

보완과제 (), 일반과제 (○) 과제번호: 306009-03

생물조절(먹이연쇄)을 통한 농업용저수지 수질관리 기법개발
Development of techniques for water quality management of
agricultural reservoirs using biomanipulation (food chain)

건국대학교

농림수산식품부

생물조절(먹이연쇄)을 통한 농업용저수지 수질관리 기법개발
Development of techniques for water quality management of agricultural
reservoirs using biomanipulation (food chain)

세부/협동과제명

농업용저수지 먹이연쇄 구조와 기능해석에 근거한 생물조절 유용생물 개발 및 수질개선
기법 연구

(Development of water quality improvement techniques and useful organisms
biomanipulation in agricultural reservoirs)

미소유용생물 증식과 활성증대를 위한 생물서식처의 개발 및 적용성 평가

(Development of habitat for stimulating meiofauna activity and reproduction and
evaluation of feasibility)

생물조절 수질개선 기법 개발을 위한 저수지 생태계 에너지 흐름 및 물질 순환 해석 연구
(Development of a strategy for water quality management using biomanipulation
through energy flow and organic matter cycle of ecosystem study in agricultural
reservoir)

어류의 트로픽 구조분석 및 top-down 조절기법을 이용한 농업용 저수지 수질관리 기법
개발

(Development of water quality management technique in the agricultural reservoir
based on fish trophic structure analysis and top-down biomanipulation method)

생태정보학적 기법을 이용한 저수지 수질관리 생태모델 개발

(Development of ecosystem model for water quality management using bioinformation
techniques in agricultural reservoirs)

제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “생물조절(먹이연쇄)을 통한 농업용저수지 수질관리 기법개발에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2009 년 4 월 24 일

주관연구기관명 : 건 국 대 학 교

주관연구책임자 : 황 순 진

세부연구책임자 : 황 순 진

협동연구기관명 : 한 국 농 어 촌 공 사

협동연구책임자 : 엄 한 용

협동연구기관명 : 한 양 대 학 교

협동연구책임자 : 신 경 훈

협동연구기관명 : 충 남 대 학 교

협동연구책임자 : 안 광 국

협동연구기관명 : 경 희 대 학 교

협동연구책임자 : 박 영 석

생물조절(먹이연쇄)을 통한 농업용저수지 수질관리 기법개발에 관한 연구

세부/협동과제

- 농업용저수지 먹이연쇄 구조와 기능해석에 근거한 생물조절 유용생물 개발 및 수질개선 기법 연구에 관한 연구
- 미소유용생물 증식과 활성증대를 위한 생물서식처의 개발 및 적용성 평가에 관한 연구
- 생물조절수질개선 기법 개발을 위한 저수지 생태계 에너지 흐름 및 물질 순환 해석연구에 관한 연구
- 어류의 트로픽 구조분석 및 top-down 조절기법을 이용한 농업용 저수지 수질관리 기법개발에 관한 연구
- 생태정보학 기법을 이용한 저수지 수질관리 생태모델 개발에 관한 연구

연구기관	연구원
건국대학교	김백호, 박상규, 유영훈, 박구성, 김미경, 김난영, 이연주, 김건희, 이송희, 윤성애, 박명환, 남성진, 주성배
한국농어촌공사	남귀숙, 송영희, 이동건, 이종성, 박진경
한양대학교	김민섭, 이연정, 홍성진, 갈종구
충남대학교	문운기, 심종훈, 이상재, 이의행, 김현택, 최지웅, 이민정
경희대학교	권용수, 배미정, 양미화, QuXiaodong
(주)아썸	권오병, 박선구, 조인기

요 약 문

I. 제 목

생물조절(먹이연쇄)을 통한 농업용저수지 수질관리 기법개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

최근 우리나라 농업용수 수질측정망에 대한 조사에 의하면, 조사대상 저수지(492개소)의 약 16%가 농업용수 수질기준인 IV등급(COD 기준)을 초과하고 있다. 특히 부영양화로 인하여 이미 수질이 심각하게 악화된 저수지는 약 9%에 달하며 중영양 상태의 저수지를 포함하면 전체의 약 40% 저수지가 부영양 상태이거나 근접하고 있다.

지금까지 부영양 저수지의 유기물(조류)제어를 위한 수질개선 방법은 주로 물리·화학적인 방법들로 이루어져 왔다. 이러한 방법들은 처리효과가 매우 빠르고 뚜렷하지만, 효과가 일시적이기 때문에 반복적인 기술적용이 필요하고 장기간 적용시 처리물질이나 부산물로 인한 2차 오염 등의 단점을 노출하고 있다.

최근 세계적으로 관심을 받고 있는 생물학적 기술은 생태친화적이고 장기간 사용에도 부작용이 적으며 경제성이 높은 장점을 갖고 있지만 현장 적용을 위한 기반기술의 부재 및 수요-공급의 공감대 미형성 등의 극복하여야 할 부분이 많다.

본 연구는 이와 같은 생태친화적 관점에서 저수지의 효율적인 관리를 위한 기반기술로서 생물조절기법을 개발하기 위하여 수행되었다.

III. 연구개발 내용 및 범위

1. 농업용 저수지 먹이연쇄 구조와 기능해석에 근거한 생물조절 유용생물 개발 및 수질 개선 기법 연구

가. 조사연구내용

- 농업용 저수지의 생물자원 및 서식환경평가
 - 생물자원조사: 동식물플랑크톤, 박테리아, 수생식물, 어류, 패류, 섬모충, 편모충
 - 농업용 저수지 생태계의 이화학적 환경요인 조사 - 퇴적물, TP, TN을 포함한 기본 항목

- 농업용 저수지 생물의 먹이연쇄 구조 및 기능과약
 - 수중생태계 먹이연쇄 구성 및 기능조사 - 종구성, 밀도, 생물량, C-flux
 - 농업용 저수지 수질개선을 위한 유용생물 자원의 개발
 - 유용생물의 분리선별 및 수질개선 관련 생리·생태학적 특성 평가
- 유용생물의 실험실 및 현장 수질 개선효과 평가
 - 유용생물의 수질개선 효과 평가
 - 선별 유용생물 이용에 대한 프로토콜 작성

나. 자료의 종합

- 대상 농업용 저수지 생태계의 생물자원 및 이화학적 서식환경 파악
- 유용생물의 선별 및 생리 생태적 특성 이해
- 유용생물의 수질개선 효과 파악
- 유용생물의 활용 프로토콜

다. 기대 실적물

- 농업용 저수지의 유용생물 자원
- 유용생물의 이용에 관한 기술특허, 학술 발표 및 정책자료
- 유용생물을 이용한 수질개선 기법
- 유용생물 이용 프로토콜

2. 미소유용생물 증식과 활승증대를 위한 생물 서식처의 개발 및 적용성 평가

가. 조사연구 내용

- 호내 및 수면부 인공 서식처 개발 및 적용
- 서식처내 생물활성도 및 수질개선효과 분석
- 유용생물의 도입
- 수질 및 서식환경 분석

나. 자료의 종합

- 유용생물 활성 증대 요소 파악
- 생물자원 확보 효율성 파악
- 수질개선 효과 파악

다. 기대 실적물

- 서식처 도입 기법 및 유지관리방안
- 서식처 도입기술의 실용화 방안
- 저수지특성에 따른 모델 서식처 개발기법
- 관련기술 특허, 국내외 학술발표 및 정책자료

3. 생물조절 수질개선 기법 개발을 위한 저수지 생태계 에너지흐름 및 물질 순환 해석연구

가. 조사연구 내용

- 동식물플랑크톤 생산성 평가
- 수생태계 대상 생물 탄소, 질소 안전동위원소비 분석
- 물질순환 및 에너지 흐름 평가
- 수생태계 모델의 활용성

나. 자료의 종합

- 저수지 생태계 물질순환 및 에너지 흐름 평가
- 유용생물 군집 내 물질 순환 및 에너지 흐름 평가

다. 기대 실적물

- 유용생물군집별 에너지 흐름 및 영양동태 해석
- 유용생물의 활용에 의한 수생태계 물질순환 모니터링 자료
- 농업용저수지 생태계 기능해석 및 활용자료
- 국내외 학술 발표

4. 어류의 트로픽 구조분석 및 top-down조절기법을 이용한 농업용저수지 수질관리 기법개발

가. 조사연구내용

- 신구저수지의 영양염류의 계절변동 경향 분석
- LEHA 어류모델을 이용한 신구저수지의 생태건강도 평가
- 신구저수지에서 식물 플랑크톤에 의한 제한 영양염 분석
- 생물조절 기법을 이용한 조류제어 효과 실험
- 생물 조절 기법을 이용한 현장 적용 평가

나. 자료의 종합

- 어류 생물조절에 의한 수질개선효과
- 지표종 선정
- 대상 어종 크기 고려한 적정밀도와 조류의 섭식 영향성
- 어류를 이용한 저수지 생태건강도 평가

다. 기대 실적물

- 농업용저수지 어류상 및 유용어류 지표종
- 저수지 건강성 평가기법
- 어류 생물조절 기법
- 국내외 학술발표

5. 생태정보학적 기법을 이용한 저수지 수질관리 생태모델개발

가. 조사연구 내용

- 수질 및 생물자원 생태정보화
- 저수지 수질 데이터베이스 분석
- 생태모델의 탐색

나. 자료의 종합

- 농업용저수지 자료의 생태정보화

- 생물자원을 이용한 저수지 생물구조 유형화
- 유용생물자원 파악
- 오염특성에 근거한 저수지 주요 type의 결정

다. 기대 실적물

- 농업용저수지 수질특성 유형화 및 예측 모델
- 유용생물 서식처 적합성 평가모델
- 국내외 학술발표

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구개발 결과

가. 농업용 저수지 먹이연쇄 구조와 기능해석에 근거한 생물조절 유용생물 개발 및 수질개선 기법 연구

(1) 농업용 저수지 생태계의 환경요인 조사

- 부영양 상태 농업용저수지(신구지, 충남)를 대상으로 2006년 6월부터 2008년 3월까지 매월 1회씩 정기적으로 수질환경요인 조사를 실시하였다.
- 수온(2.5~30.4°C), DO 포화도(58.8~212.8%), 전기전도도(82~202 $\mu\text{S cm}^{-2}$)는 뚜렷한 계절성을 보였으며, p(7.6~9.9), 엽록소-a(26.5~277.4 $\mu\text{g L}^{-1}$), 탁도(4.7~143.0 NTU), SS(2.8~69.5 mg L^{-1}), 투명도(0.25~1.94 m), COD(4.7~24.6 mg L^{-1}) 등은 몬순과 조류발생에 의해 크게 영향을 받았다.
- 영양염의 농도는 계절성보다 조류나 몬순에 의해 심하게 영향을 받았으며, TN(0.9~4.2 mg L^{-1})과 $\text{NO}_3\text{-N}$ (0.0~1.5 mg L^{-1})은 봄(4월)에 높은 반면 $\text{NH}_4\text{-N}$ (0.0~1.1 mg L^{-1})은 겨울(11월)에 높았다. 한편, TP(0.035~195.9 $\mu\text{g L}^{-1}$), $\text{PO}_4\text{-P}$ (0.008~35.354 $\mu\text{g L}^{-1}$), SiO_2 (0.01~6.97 $\mu\text{g L}^{-1}$)는 몬순기간(7~8월) 동안과 강우가 내린 후(9~10월)에 급증하였다.
- 지방산의 함량은 수온이 감소할수록 16:0, 14:0, 18:3 ω 3, 18:1, 16:1, 18:2 ω 6 등이 점차 감소하였고, 중속형 원생생물(20:4 ω 6)는 강우 후에 증가하였다. 그러나 박테리아(계절)를 제외한 규조류(16:1/16:0), 와편모조(22:6/20:5), *Microcystis aeruginosa*(18:3 ω 3) 등은 계절, 조

류생물량 또는 문순과 유의한 상관을 보이지 않았다.

(2) 농업용 저수지의 유용생물 자원 조사

- 박테리아($1.8 \times 10^6 \sim 4.8 \times 10^7$ cells mL⁻¹, 243.3~635.2 μ gC L⁻¹)는 계절적인 변이를 보였으며, 원생생물($5.0 \times 10^3 \sim 3.0 \times 10^4$ cells mL⁻¹, 283.4~9900.0 μ gC L⁻¹)은 2~20 μ m 크기가 높은 생물량을 나타냈다.
- 식물플랑크톤($8.3 \times 10^2 \sim 2.5 \times 10^7$ cells mL⁻¹)은 전체적으로 고수온기(8월)에 높은 밀도를 보였으며, 시기별로 녹조류(6월), 규조류(12월), 남조류(연중우점)의 출현을 보였다. 남조발생시 *Microcystis aeruginosa*는 총 생물량의 60~99% 이상을 차지하였다. 동물플랑크톤(244~8,900 ind. L⁻¹)은 고온기(6~8월)에 *Diurella stylata*, *Nauplius* 등이 높게 출현하였고, 조사기간 계속하여 *Keratella valga*가 우점하였다. 요각류는 Nauplius가 많았고, 지각류는 *Bosmina longirostris*가 높은 밀도를 각각 보였다.
- 저서성 대형무척추동물은 환경오염에 내성이 강한 과리류나 환형동물이 높게 출현하였고, 대형수생식물은 저수지 유입부에는 민하늘지기(피도율 50% 이상), 물방동사니, 흰여뀌, 들피, 방동사니, 참꽃마리, 소리쟁이, 미나리아재비 등이 우점하였고 저수지 제방 및 도로변에는 산여뀌, 개망초(귀화식물, 10% 피도), 물방동사니, 들피, 바늘여뀌, 참꽃마리, 소리쟁이 등이 서식하였다.

(3) 농업용 저수지 수중생태계 먹이연쇄의 구조 및 기능조사

- 원생동물 태양성미소편모류(HNF)와 섬모충의 박테리아 섭식: 박테리아에 대한 원생동물의 여과율은 고온기(7월)에는 HNF($0.48 \mu\text{L cell}^{-1} \text{hr}^{-1}$), 섬모충($3.66 \mu\text{L cell}^{-1} \text{hr}^{-1}$), 저온기(11월)에는 HNF($0.39 \mu\text{L cell}^{-1} \text{hr}^{-1}$), 섬모충($2.23 \mu\text{L cell}^{-1} \text{hr}^{-1}$) 등으로 각각 나타나, HNF와 섬모충 모두 수온이 높을수록 높았고, 섬모충이 HNF보다 다소 높게 나타났다.
- 동물플랑크톤(MACZ>200 μ m, MICZ<200 μ m)의 박테리아, 원생동물, 식물플랑크톤 섭식: 고온기와 저온기에 소형동물플랑크톤의 박테리아(B), 원생동물(P), 식물플랑크톤(A)의 여과율은 각각 MICZ→B($0.06, 0.02 \text{ mL } \mu\text{gdw}^{-1} \text{d}^{-1}$), MICZ→P($0.01, 0.09 \text{ mL } \mu\text{gdw}^{-1} \text{d}^{-1}$), MICZ→A($0.01, 0.04 \text{ mL } \mu\text{gdw}^{-1} \text{d}^{-1}$)로 나타났으며, 대형동물플랑크톤은 MACZ→B($0.04, 0.07 \text{ mL } \mu\text{gdw}^{-1} \text{d}^{-1}$), MACZ→P($0.02, 0.09 \text{ mL } \mu\text{gdw}^{-1} \text{d}^{-1}$), MACZ→A($0.10, 0.03 \text{ mL } \mu\text{gdw}^{-1} \text{d}^{-1}$)로 각각 나타났다. 동물플랑크톤 여과율은 저온기에 높았으며, 박테리아와 원생동물에 대해서는 큰 차이를 보이지 않은 반면, 고온기의 식물플랑크톤(조류발생)에 대해서는 MACZ가 MICZ보다 뚜렷하게 높았다.
- 박테리아(B), 원생동물(P), 식물플랑크톤(A)에서 동물플랑크톤(MACZ>200 μ m, MICZ

<200 μm)으로의 C-flux; 소형동물플랑크톤으로의 C-flux는 저온기와 고온기에 각각 B→MICZ(2.95, 0.807 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$), P→MICZ(0.222, 0.192 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$), A→MICZ(1.424, 0.876 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$)이었으며, 대형동물플랑크톤으로의 C-flux는 각각 B→MACZ(1.663, 0.379 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$), P→MACZ(1.823, 0.189 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$), A→MACZ(3.900, 0.754 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$)으로 나타났다. 동물플랑크톤으로 C-flux는 박테리아와 원생동물에서는 MICZ로 높게 전달되었으며 고온기 식물플랑크톤은 MACZ로 높게 전달되었다.

- 미생물(MFW)과 식물플랑크톤 먹이망(AFW)의 에너지전달: 조사기간 동안 식물플랑크톤은 MICZ와 MACZ 모두에 주요한 먹이원으로 나타났다. 박테리아의 주요 섭식자는 원생동물이었으며, 박테리아가 직접 동물플랑크톤에 공급되는 것보다 원생동물을 통하여 전달됨을 확인할 수 있었고, 두 먹이망은 수온, 박테리아, 식물플랑크톤 등의 변화에 따라 크게 좌우되었다.

(4) 농업용 저수지 유용생물 자원의 개발

- 연구대상저수지(신구지, 충남 서천)를 포함한 국내 다양한 저수지, 논, 연못, 하천 등에서 유기물(조류) 제어능이 뛰어난 생물을 선정하기 위하여 다양한 환경 조건(수온, DO, 수심, 퇴적물, 생물밀도, 먹이종류, 독성, 먹이밀도 등)에서 섭식실험을 수행하여 가장 효과적인 유용생물을 선정하고 이들의 현장 적용을 위하여 최적 제어조건을 확립하였다.

(가) 유용생물의 분리 및 관리

- 유해조류 분리 및 배양
- 어류 선정 및 유지관리
- 패류의 채취 및 관리
- 풍년새우 분리 및 배양
- 새뱅이 채집 및 관리
- 동물플랑크톤의 분리 및 배양
- 식물의 Allelopathic compound 추출

(나) 유용생물을 유기물(조류) 제어능 조사

① 동물플랑크톤의 *Microcystis aeruginosa* 섭식

- 대형동물플랑크톤 *Daphnia magna*의 남조 *Microcystis aeruginosa*(NIES 88, 101, 298)에 대한 섭식특성을 조사하기 위하여, 독성 및 비독성 조류, 동물플랑크톤의 크기(<1 mm, >2 mm) 및 밀도에 따른 여과율 조사를 실시하였다. 조사결과 (1) 비독성 조류에 대한 여

과율은 2.47(24 h), 1.42 mL ind⁻¹ h⁻¹(48 h)이었고, 독성조류는 0.51, 1.19(mL ind⁻¹ h⁻¹)로서 비독성조류에 대하여 보다 효과적이었으며, (2) 소형 Daphnia는 독성과 비독성 모두 제어효과가 낮았고, (3) 처리밀도에 따라 뚜렷한 섭식효과를 나타냈다.

② 물벼룩, 징거미, 풍년새우의 군체형 *Microcystis* 섭식

- 물벼룩과 징거미의 현장 남조류(군체) 섭식능을 비교하였는데, 물벼룩은 남조류 단일세포를 효과적으로 제어한 반면, 징거미(*Macrobrachium* sp.)는 유의한 효과를 보이지 않았다. 한편, 물벼룩은 직경 50 μm 이하의 군체만 섭식한 반면, 풍년새우는 50~100 μm 크기의 군체를 효과적으로 섭식하였다. 그러나 시간이 경과할수록 풍년새우의 섭식능 역시 점차 감소하였는데 이는 남조 독성에 의한 영향으로 판단되었다.

③ 식물 추출물의 남조 *Microcystis aeruginosa* 성장 억제

- 왕겨로부터 조류성장 억제물질을 추출하여 남조 *Microcystis aeruginosa*(NIEP 298, UTEX 2388)의 성장 억제효과를 조사하였는데, 저농도(1 μg L⁻¹)에서도 조류성장을 효과적으로 억제하였으며, 특히 β-sitosterol-β-D-glucoside 성분이 가장 효과적이었다.

④ 국내산 붕어의 남조류 섭식

- 국내에서 가장 흔하게 분포하는 참붕어를 대상으로 다양한 조건에서 남조류 섭식능을 파악하기 위하여, 독성 및 비독성 조류, 퇴적물 효과, 현장 mesocosm 등을 실시하였다. 참붕어는 비독성 *Microcystis aeruginosa* 처리군만 섭식하였고, 퇴적물이 있는 실내실험과 mesocosm 내에서 식물플랑크톤(20~50 μm)에 섭식효과를 보였으나 바닥층을 교란시켜 탁도 및 영양염 증가 등의 수질악화 현상이 나타났다.

⑤ 논우렁이(*Cipangopaludina chinensis*)의 조류 섭식

- 다양한 농도의 현장수(원수 엽록소; 543.7 μg L⁻¹, *Microcystis aeruginosa* >90%)에 대한 논우렁이(각고 3.0~6.1 cm)의 섭식효과를 조사하였다. 크기가 4.5 cm 이상인 개체는 비교적 안정된 섭식율(~1.35 L g⁻¹ h⁻¹)을 보인 반면, 그 이하의 크기에서는 낮은 섭식율을 보였다. 또한 크기에 상관없이 남조 *Microcystis aeruginosa*에 대하여 7 시간째 최고 섭식율을 보였으며 이후 점차 감소하였다. 엽록소가 가장 낮은 현장수(168.3 μg Chl-a L⁻¹)에서 가장 높은 섭식율(0.9 L g⁻¹ h⁻¹)을 보였고, 가장 농도(673.4 μg L⁻¹)에서 가장 낮은 섭식율(0.36 L g⁻¹ h⁻¹)을 나타냈다. 한편 동물밀도가 1.5 ind. L⁻¹ 이상에서는 조류제어 효과가 더 이상 증가하지 않았다. 한편 저온기 규조류에 대한 섭식실험에서도 비교적 높은 섭식능(0.04~1.94 L g⁻¹ hr⁻¹)을 나타냈는데 이는 재첩이나 말조개의 섭식능과 비슷한 수준이었다.

⑥ 말조개(*Unio douglasiae*)의 조류 섭식

- 수온(5°C, 15°C, 25°C, 35°C) 실험결과 5°C에서 여과율이 가장 높았으며, 수온 15°C, 25°C에서도 효과는 유지하였으나 35°C에서는 장시간 노출시 사망률이 증가하였다. 서로 다른 수심(20, 50, 75 cm)별 패류의 조류 섭식효과는 실내에서는 20 cm에서 가장 높았고, 신규저수지에 직접 적용한 결과 20 cm에서 효과는 보이지 않았으며 사망률도 가장 높았다. 한편, DO 농도(0.5, 4.5, 9.0 mg L⁻¹)중에서 가장 낮은 0.5 mg L⁻¹에서 가장 높은 여과율을 보였는데 호흡을 위한 대사결과로 판단되며, 나머지 두 농도⁻¹에서도 50% 이상의 섭식효과를 나타냈다. 패류밀도(1, 1/2, 1/4, 1/8 ind. L⁻¹)에 대하여 1/2 ind. L⁻¹와 1 ind. L⁻¹에서 가장 높은 제어능을 보였으며, 그 이하 밀도에서는 조류생물량의 증가를 보였다.
- 저온기 규조류(한강, 일감호)에 대하여 말조개의 섭식능은 두 현장수 모두 처리밀도에 따라 더 높은 섭식효과를 보였으며, 엽록소량이 적은 하천(한강)에 대해 더 높게 나타났다. 한편, 동일한 호수의 서로 다른 시기의 식물플랑크톤에 대한 말조개 섭식효과를 조사한 결과, 고온기(*Microcystis aeruginosa*, *Scenedesmus* spp.)보다 저온기(*Synedra ulna*, *Stephanodiscus hantzschii*, *Diatoma vulgare*) 식물플랑크톤 군집에 대한 섭식효과가 높았다.
- 추적자(Enriched ¹³C, ¹⁵N)를 이용하여 말조개의 남조류 섭식과정을 추적한 결과, ¹⁵N은 시간의 흐름에 따라 패류 조직속으로 흡수되는 양이 점차 증가되었으며, 흡수속도는 장-아가미-위-외투막-근육 순서인 반면, ¹³C는 상대적으로 질소보다 많은 양이 흡수되었으며 조직간 흡수되는 순서는 질소와 유사하였다. 말조개의 남조류 섭식은 계속적으로 이루어지지 않고 시간에 따라 섭취속도가 증, 감함으로서 체외로 배출하는 속도를 조절하는 것으로 나타났다으며, POM의 일부만 섭취할 뿐 대부분은 pseudofaeces 형태로 배출함을 입증하였다.

(5) 유용생물을 이용한 현장수의 수질개선 적용 및 평가

(가) 논우렁이, 말조개, 동물플랑크톤의 효과

- 남조발생 저수지(일감호, 서울)에 소형 메소코즘을 설치하고, 논우렁이, 말조개, 동물플랑크톤을 단독 또는 혼합처리한 결과, 논우렁이 단독처리시 처리밀도에 따라 도입초기에는 pH, 탁도, 엽록소 *a*량이 뚜렷하게 감소하였으나 시간이 경과할수록 오히려 엽록소 *a*가 증가하였다. 또한 말조개 단독처리군이 말조개-논우렁이 혼합처리군보다 높은 제어효과를 보였으며, 동물플랑크톤은 두 처리군보다 상대적으로 낮은 효과를 보였다.
- 연구의 대상저수지인 신규지(남조 *Microcystis aeruginosa*가 95% 이상)의 연안에 격자형 mesocosm(1.2×1.2×2.0m)을 설치하고 말조개)와 논우렁이의 단독 또는 혼합처리한 후 수질 및 생물 변화를 각각 분석하였다. 처리효과는 도입초기에 혼합군에서 가장 높았으며,

수질은 용존산소(DO)는 시간이 지날수록 모든 처리군에서 뚜렷하게 감소하였고, 투명도 (0.4→1.1 m)는 크게 증가하였다. 그러나 시간이 갈수록 논우렁이의 사망에 의한 질소(암모니아) 증가로 제어 효과 면에서 말조개 단독처리군보다 낮게 나타났다.

(나) 인공식물섬, 말조개, 새뱅이, 동자개의 효과

- 앞에서 언급한 동일한 mesocosm에 말조개, 새뱅이, 인공식물섬(API), 동자개, 새뱅이-동자개 혼합처리 후 수질 및 생물변화를 추적하였다. 생물처리 밀도는 말조개 83 ind. m⁻², 새뱅이 694 ind. m⁻², 동자개는 7 ind. m⁻²로 조절하였고, 인공식물섬은 mesocosm 내 전체 수표면적의 34.7%에 해당하는 0.5 m² coconut fiber로 제조한 인공식물섬에 노랑꽃창포 8포트를 식재하였다.
- 인공식물섬에서 가장 수질개선(DO 증가, pH 감소, 엽록소 감소) 효과가 가장 뚜렷하였고, 말조개, 새뱅이, 동자개 순이었다. 지방산 분석결과에 의하면 말조개는 4일째, 새뱅이는 6일째부터 섭취하기 시작하여 유용생물로는 말조개가 효과적임을 알 수 있었다.
- 말조개 처리군(4개 밀도)에 퇴적물을 첨가할 경우, 고밀도 처리군에서 DO, pH가 급격하게 감소하였다. 대부분의 처리군은 초기에만 약간의 엽록소 감소가 이루어졌으나 6일 이후부터는 다시 급격히 증가하였고, 수질(총인, 총질소 증가)이 뚜렷하게 악화되었으며 주된 원인은 패류의 사망이었다.

(다) 말조개의 현장 적용실험

- 본 연구의 또 다른 대상저수지인 석문시험포(5×10×1 m, 퇴적물 포함)에 말조개를 빠지지 않도록 상부 30 cm 정도에 그물을 설치하고 말조개 882개체(17 ind. L⁻¹)를 투입한 다음 수질 및 생물변화를 분석하였다. 패류 도입 초기부터 약 20%의 엽록소 감소와 급격한 영양염 증가(총인, 225 → 410 µg L⁻¹)와 높은 폐사율을 나타냈다.
- 동일한 장소에 유용생물의 혼합(인공식물섬, 말조개, 새뱅이, 동자개, 안정동위원소) 적용한 후 수질개선 효과를 조사하였다. 인공식물섬은 mesocosm(10 m×5 m)의 10%를 차지하며 노랑꽃창포 64포트를 식재하고, 말조개 41.8 ind. m⁻², 새뱅이는 30.0 ind. m⁻², 동자개는 0.24 ind. m⁻², 유기물 이동을 추적하기 위하여 동시에 안정동위원소 추적자 ¹³C, ¹⁵N를 각각 투입하였다. 약 20일간의 실험동안, 수질개선(엽록소 감소, 투명도 증가) 효과는 뚜렷하였으나 영양염 증가가 동반되었다.
- 지방산 분석결과에 의하면 주로 녹조류가 감소하였고, 말조개는 약 3일간, 새뱅이는 약 9일 이후에야 비로서 섭취하기 시작하였으며, 동자개의 효과는 유의하지 않았다. 그러나 인공

식물섬의 효과가 가장 크게 나타났으며, 결국 유용생물의 결국 유용생물의 직접적인 현장 적용은 수많은 연구에서 밝혀진 바와 같이 영양물질의 배출이라는 과제를 남겼다.

(6) 유용생물 자원의 개발 및 이용에 관한 protocol 작성

- 오염된 농업용 저수지의 수질개선을 위한 다양한 시도를 실시하였다. 아울러 유기물(조류) 제어능이 탁월한 유용생물 대부분은 수질개선(투명도 증가, 엽록소 감소)와 동시에 영양염(부영양화, 조류성장의 원인물질)의 증가를 유도한다는 사실을 재확인할 수 있었다. 결국 외부로부터 생물도입(xenobiotics introduction)을 통한 수질개선은 영양염 증가 문제를 개선하지 못한다면 궁극적으로 큰 의미가 없다고 판단하였다.
- 이에 대한 대안으로서 기존에 알려진 수처리공학 기술을 응용한 새로운 흐름형 유기물 제어(CROM, continuous removal of organic matters) 기술의 소개하였다. 생존력이 강한 한국산 토종 이매패(bivalve)를 이용한 이 기술은 아직까지 완성된 기술은 아니지만 연구자들에 의해 약 5~6회 이상 반복적으로 실시해 온 기술로서, 중심내용은 실내에 직접 도입한 현장수를 일정한 유속 및 패류밀도를 조절하여 처리한 후 다시 현장으로 환원시키고 배설물은 건조시켜 거름으로 사용하는 단순한 순환방식을 취하고 있다. 기본적으로 막여과법(membrane filtration)과 유사하나 섭식능이 높은 패류를 이용함으로써 세정주기가 막(membrane)에 비해 매우 길다는 장점이 가지고 있다.

나. 미소 유용생물 증식과 활성증대를 위한 생물서식처의 개발 및 적용성 평가

(1) 미소유용생물서식처 구성재 선별 및 인공식물섬 구성재 수질개선효과 검토

- 미소유용생물서식처 구성재 선별을 위하여 다양한 구성재(이중식생기반이용 인공식물섬(AVI), 기반재+침수식물(검정말), 모래+침수식(검정말), Media(틀모양으로 제작하여 50 cm 길이로 Media 15줄 부착)를 검토 한 결과, 수질이 투명하여지고 Chl-a의 양이 줄어드는 등 수질개선 효과가 나타났으며, 이결과 사용된 소재의 적용가능성을 보여 주었다.
- 인공식물섬의 구성요소별 장치를 구성하여 실험한 결과 각 구성재의 수질개선 효과를 확인할 수 있었으며, VAFI의 조류 총 제거효율은 97.9%(차광효과 35.1%, 미소유용생물의 복합작용에 의한 효과 61%, 식물에 의한 효과 1.8%)인 것으로 나타났다.
- 석문 수질연구단지의 연못(침강지)에서 인공식물섬에 의한 수질정화 효과를 검토한 결과 COD 4.5%, T-N 12.1%, T-P 16.9% 이상의 정화 효율을 보였다.
- 석문수질연구단지의 연못(침강지) 저서생물상 조사결과 대조구는 *Foraminifera*,

Nematoda 등이 우점하였으나, 인공식물섬 하부는 *Foraminifera*, *Nematoda* 등은 감소하고 *Ostracoda*는 증가하였다.

- 신구저수지에서 효소활성조사 결과 β -glucosidase는 인공식물섬의 하부에서를 제외하고 뚜렷한 변화를 확인하기는 어려웠으나 소규모 수역(침강지)에서는 식물섬 부근의 효소활성이 높아지는 것을 확인 할 수 있었다. 신구저수지 조사 결과 Phosphatase의 경우 식생이 밀집한 지점을 제외하고는 식물섬의 중앙보다는 식물섬 외부에서 활성이 높은 것으로 조사되었다.

(2) 메소코즘 적용시험 결과

- 이중식재기반 인공식물섬을 투입한 메소코즘 실험에서 식물플랑크톤의 총세포수, 남조류인 *Microcystis aeruginosa*를 지각류와 비교해 본 결과 반비례 관계를 나타내는 것으로 보아 상호먹이 포식-피식 관계에 있음을 확인 할 수 있었다.
- 이중식재기반 인공식물섬의 사용면적을 결정하기위한 메소코즘 실험에서 수질개선효과 및 동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 관계 등을 검토한 결과피복률 약 8% 정도가 가장 적절한 것으로 조사되었다.
- 부유형 호안수초대, 부유형 그물수초대, 침수 인공식물섬을 개발하여 실시한 메소코즘 실험에서는 부유형 호안수초대와 침수 인공식물섬이 식물플랑크톤에 대해 제어효과를 보이는 것으로 확인되었다.

(3) 신구저수지 적용시험 결과

- 신구저수지에 설치된 시설은 이중식재기반 인공식물섬, 교반장치이용 식물섬, 침수 인공식물섬(2), 호안침수 수초대(2), 부유형 그물수초대, 부유형호안수초대 등 6종류 8시설을 검토하였으며, 추가로 인공식물섬의 배열에 따른 효과도 분석하였다.
- 이중식재기반인공 식물섬, 교반장치이용 식물섬을 이용한 조사 결과 적용 식물섬이 남조류에 의한 녹조현상에 대한 저감효과를 가지고 있고 동물플랑크톤의 개체수를 증가시켜 동물플랑크톤의 서식처효과와 식물플랑크톤에 대한 효과가 인정되었다.
- 식재된 침수형 인공식물섬은 동물플랑크톤의 개체수를 유지하는데 효과를 발휘하였으며, 미디어가 부착된 침수형 인공식물섬보다 식물플랑크톤에 대한 제어효과가 효과가 높았으나 식생유지가 어려워 실제사용이 곤란한 것으로 검토되었다.

- 침수형 호안수초대는 고밀도시설이 저밀도시설에서 보다 식물플랑크톤의 증가량이 적었으며, 동물플랑크톤의 발생량 역시 많았다. 이러한 결과는 고밀도에서 보다 저밀도에서 동물플랑크톤을 포식하는 어류 등의 접근이 용이하였던 것으로 검토되었다
- 부유형 그물수초대는 식물플랑크톤에 대한 효과를 확인할 수 없었으나, 남조류를 효과적으로 제어하는 것으로 알려진 *Bosmina* sp.가 이중식생기반 인공식물섬에서와 같이 다수 출현하여 남조류에 효과적인 제어 수단이 될 수 있는 것으로 검토 되었다.
- 유입토사에 의한 매물우려 및 갈수기에의 노출로 인한 경관저해 등의 문제를 해결하기 위해 개발된 부유형 호안수초대는 식물플랑크톤의 증가에 따라 동물플랑크톤의 증가를 확인할 수 있었으며 이후 식물플랑크톤이 감소하는 것으로 조사되어 동물플랑크톤의 생물체로서의 활용가능성이 높은 것으로 검토 되었다. 특히 부유형호안수초대는 동물플랑크톤 중 남조류를 효과적으로 제어하는 것으로 알려진 *Bosmina longistris*가 출현 Cladocera의 50%를 차지하고 있는 것으로 조사되어 효과적인 미소유용생물 서식처로 선발되었다.
- 인공식물섬의 배열구조 결정을 위해 경계면 길이를 달리하여 시험한 결과 인공식물섬 경계면의 길이가 더 길은 일자형 배열이 집단형 배열보다 동물플랑크톤의 식물플랑크톤에 대한 먹이활동 영역을 보다 넓힐 수 있을 것으로 검토되었다.

(4) 인공습지의 동물플랑크톤 공급능력 검토

- 지각류, 요각류 등의 미소유용생물을 지속적으로 공급하는 시설로써 다양한 형태의 습지를 사용할 수 있을 것이며, 미소유용생물의 지속적인 공급시설을 조성할 경우에는 식생을 다양화하고 수심이 약 30~40 cm 정도의 얇은 습지형태의 미식생구간을 혼합 배치 할 경우 효과를 볼 수 있는 것으로 조사되었다

(5) 미소유용생물서식처 선발 및 평가

- 메소코즘 실험과 신규저수지에 대한 적용시험을 실시하고 평가한 결과 이중식생기반 인공식물섬, 교반장치이용 식물섬, 침수형 호안수초대(고밀도), 부유형 호안수초대가 선발되었으며, 부유형 그물수초대에 대한 추가검토가 필요한 것으로 조사되었다.

(6) 설계 및 유지관리 방안

- 미소유용생물서식처로 선발된 시설들에 대하여 설계 및 설치방안 등이 제시되었으며, 유지관리 방안도 마련하였다.

다. 생물조절 수질개선 기법 개발을 위한 저수지 생태계 에너지 흐름 및 물질 순환 해석연구

(1) 신구저수지에서의 영양단계별 에너지 전달경로 조사

(가) 1차생산력 측정

- 신구저수지에서 2006년 7월(몬순 전)과 8월(몬순 후)에 ^{13}C 추적자를 이용한 현장 배양실험을 통해 식물플랑크톤의 일차생산력을 계산하였다. 이와 더불어 식물플랑크톤의 광합성에 의해 새롭게 생성된 유기물 중 지방산의 생성속도를 입자물질과 용존물질로 나누어 측정하였다.
- 몬순전인 7월에 측정된 평균 기초생산속도는 $3.53 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 8월에 측정된 평균값은 $6.92 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 8월은 7월에 비해 약 2배 정도 높은 값을 보였다. 7월과 8월에 같은 광량의 깊이에서 식물플랑크톤이 하루 동안 단위부피당 생산해 내는 탄소의 양을 비교해 보았을 때, 7월이 더 높은 것으로 보아 8월에 기초생산성이 더 높은 값을 보이는 것은 유광층의 깊이가 3배 이상 차이이기 때문인 것으로 사료 된다(7월: 1.2 m, 8월: 3.8 m).
- Chl-*a*에 의한 탄소 고정 능력은 7월에는 $30 \text{ } \mu\text{gC } \mu\text{g}^{-1} \text{ d}^{-1}$, 8월에는 $42 \text{ } \mu\text{gC } \mu\text{g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 로 8월에 더 높았으며, 7월에 비해 8월에 식물플랑크톤의 성장이 빠름을 시사한다. 식물플랑크톤의 광합성에 의한 유기탄소의 순환속도(turnover rate) 역시 7월에 비해 8월에 더 빠르게 나타났다. 식물플랑크톤의 광합성 활동에 의해 생성된 지방산은 7월에 $640 \text{ } \mu\text{gC L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ (총 일차생산의 11%), 8월에 $722 \text{ } \mu\text{gC L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ (총 일차생산의 15%)의 속도로 생성되었으며, 7월에 포화지방산과 단일불포화 지방산, 다중 불포화 지방산은 각각 총 일차생산의 5, 3, 4%를 차지하였으며, 8월에는 각각 8, 5, 2%를 차지하였다. 이 중 먹이의 질을 판단하는 DHA와 EPA의 생성속도는 7월에 각각 10.11 (총 일차생산의 0.17%), 28.67 (총 일차생산의 0.49%) $\mu\text{gC L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 의 값을, 8월에는 각각 4.16 (총 일차생산의 0.08%), 48.22 (총 일차생산의 0.98%) $\mu\text{gC L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 의 값을 보였으며 이는 전반적으로 7월에 비해 8월에 먹이질이 높음을 의미한다. 반면 용존 지방산은 7월과 8월 모두 PUFA가 생성되지 않음으로 미루어 보아 일차생산에 의해 만들어지는 EPA와 DHA는 용존형태로의 배출보다는 상위영양단계 생물에 의한 섭식에 의해 소비되는 것으로 사료된다.

(나) 동물플랑크톤에 의한 2차 생산력 측정

- 입자 크기가 $100 \text{ } \mu\text{m}$ 이하, $63 \text{ } \mu\text{m}$ 이하, $20 \text{ } \mu\text{m}$ 이하인 입자성 유기물(POM)을 동물플랑크톤에게 섭식시켜 2차 생산력을 측정하였다. 섭식속도를 측정한 7월에는 각각 $0.12 \text{ } \mu\text{gC}$

ind.⁻¹ d⁻¹, 0.06 µgC ind.⁻¹ d⁻¹, 0.10 µgC ind.⁻¹ d⁻¹의 결과를 보였다. POM의 크기가 100 µm 이하 일 때 동물플랑크톤 중 별 섭식속도의 차이를 측정한 8월에는 Copepodid가 0.08 µgC ind.⁻¹ d⁻¹, *Diaphanosoma brachyurum*가 0.30 µgC ind.⁻¹ d⁻¹, *Asplanchna brightwelli*가 0.07 µgC ind.⁻¹ d⁻¹의 결과를 보였으며, 8월에 개체 당 식물플랑크톤 섭식속도는 *Diaphanosoma brachyurum*가 가장 높았다.

(다) 신구저수지내의 먹이사슬 연구

- 신구저수지에서 수심에 따라 망목 크기가 20 µm, 63 µm, 100 µm 메시에 통과시켜 크기 별로 구분한 입자태 유기물과 동물플랑크톤을 종별로 구분하여 유기탄소, 총질소 안정동위원소비를 측정하였다. 7월에는 수심에 따른 각 크기에 따른 입자태 유기물의 δ¹³C 값이 -25.1~-26.1‰로 1‰의 비슷한 범위를 가지며 δ¹⁵N 값은 10.5~13.7‰로 약 3‰의 차이를 보이고 있다. Copepodid 종은 δ¹³C 값이 -24.5‰, δ¹⁵N 값은 14.2‰의 범위를 나타내어 각 크기별 유기물과 δ¹³C 값이 0.5‰ 내의 변동을 보여 입자태의 크기와 상관없고 δ¹⁵N 값은 각 입자태 유기물의 값보다 3.8‰ 무거우므로 크기와 상관없이 입자태 유기물을 먹이원으로 하고 있다고 여겨진다.
- *Diaphanosoma brachyurum* 종은 δ¹³C 평균값이 -23.6‰, δ¹⁵N 값은 11.5‰의 범위를 보인다. 입자태 유기물과 δ¹³C 값이 약 1.5~2.5‰의 변동을 보이고 δ¹⁵N 값은 약 2‰의 변동을 보이므로 Copepodid와는 다른 먹이원을 갖는 것으로 여겨진다.
- 8월에는 수심에 따른 각 크기별 유기물의 δ¹³C 값이 -23.2~-27.5‰로 5‰의 큰 변동을 보이고 있으며, δ¹⁵N 값은 6.9~12.0‰로 약 5‰의 높은 차이를 보이고 있다. 또한, 7월과는 달리 수심에 따라 유기물의 δ¹³C, δ¹⁵N 값이 확연한 차이를 보이고 있다. 이는 강우 후 외부로부터의 유기물 유입에 의하여 저수지내 유기물의 유기탄소, 총질소 안정동위원소비가 큰 변동을 보이기 때문이다. 특히 저층 4.5 m의 유기물은 표층의 δ¹³C, δ¹⁵N 값은 표층과 다른 군집을 형성하며 이는 강우 후 외부로의 다른 유기물이 저수지내로 유입되어 저층에 존재한다는 것을 나타낸다.
- 그리고 탄소, 총질소 안정동위원소비를 살펴 볼 때 *Diaphanosoma brachyurum* 종은 표층의 입자태 유기물을 먹이원으로 하는 것으로 보이고 Copepodid 종은 저층의 입자태 유기물을 섭식하고 있는 것으로 여겨진다.
- 신구저수지내에서 7월에는 *Cobitis lutheri*, *Cyprinus carpio*, *Silurus asotus* 등의 질소안정동위원소비가 19.1‰~21.2‰로 상위영양단계를 이루고 있으며 그 밖의 *Daphanosoma brachyurum*, *Diacyclops thmoasi*, *Palaemon paucidens*, *Zacco platypus*, *Misgurnus anguillicaudatus*, *Misgurnus mizolepis*, *Rhynchocypris oxycephalus*, *Rhinogobius*

brunneus, *Carassius atratus*, *Pseudorasbora parva*, *Pseudobagrus fulvidraco* 등의 어류의 질소안정동위원소비는 14.7‰~16.3‰로 비슷한 수준의 영양단계를 가지고 있다. 8월에는 *Hemiculter eigenmanni*, *Carassius auratus* 등의 어류의 질소안정동위원소비가 16.9‰~17.5‰로 상위영양단계를 나타내고 있으며 *Zacco platypus*, *Pseudorasbora parva* 등의 어류의 질소안정동위원소비가 12.5‰~14.8‰로 비슷한 수준의 영양단계를 보이고 있다. 강우기 전후를 살펴보면 어류의 종의 차이가 나타나고 그 중에서 *Carassius auratus*, *Zacco platypus*, *Pseudorasbora parva* 종이 7월과 9월에 모두 발견되었다.

- 이들의 탄소 안정동위원소비를 살펴보면 *Carassius auratus* 종은 강우 전(-18.2‰)보다 강우 후(-19.2‰)에 약 1‰ 가벼워졌으며 *Zacco platypus* 종은 강우 전(-22.8‰)과 강우 후(-22.7‰)가 거의 변화가 보이지 않았고 *Pseudorasbora parva* 종은 강우 전(-21.2‰)보다 강우 후(-23.7‰)로 약 2.5‰ 가벼워졌다. 질소안정동위원소비는 *Carassius auratus* 종은 강우 전(-19.2‰)보다 강우 후(-16.5‰)에 약 2.7‰ 가벼워졌으며 *Zacco platypus* 종은 강우 전(-14.7‰)과 강우 후(-13.1‰)가 거의 변화가 보이지 않았고 *Pseudorasbora parva* 종은 강우 전(-14.7‰)보다 강우 후(-12.3‰)로 약 2.3‰ 가벼워졌다. 이러한 변화는 강우 후에 외부로부터 유입된 탄소안정동위원소비(-27.9‰)와 질소안정동위원소비(6.9‰)가 가벼운 유기물(plant detritus)에 의해 어류의 탄소안정동위원소비의 변동이 생긴 것으로 여겨진다. 즉, 신구저수지에 서식하는 어류는 강우 후에 자생기원 유기물보다는 외부기인 유기물에 의해 먹이에 의한 에너지 전달경로가 큰 영향을 받은 것으로 여겨진다.

(2) 유용생물에 의한 남조류 제어효과 연구 - 신구저수지 메소코즘 실험

- 남조류(*Microcystis aeruginosa*)가 번성하는 시기에 메소코즘을 설치하여 안정동위원소비를 이용한 질소순환, 생산성 및 유용생물의 남조류 제어효과에 관한 연구를 실시하였다. 현장실험은 2007년 9월 29일에 가로 1.3 m, 세로 1.3 m, 높이 2.0 m의 5개의 메소코즘(Mesocosm)을 설치하였으며 남조류 bloom을 일으킨 저수지의 물을 채운 후, 현장의 자연 상태를 유지하도록 하고 2일간의 안정화 시간을 가진 후 추적자인 ^{13}C , ^{13}N 을 $^{13}\text{C} - \text{HCO}_3^-$, $^{13}\text{N} - \text{NH}_4^+$ 를 이용하여 인위적으로 자연 상태보다 13% 정도 높여주었다. 그 후 각각의 메소코즘에 *Iris pseudoacorus*(M1), *Cipangopaludina*(M2), *Caridina denticulata*(M3), *Caridina denticulata*, *Pseudobagrus fulvidrao*(M4)의 유용생물을 투입하였으며, M5는 대조군(Control)으로 설치하여 3주 동안 대상생물을 채집하였다(10월 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 14, 22일).
- 모든 메소코즘 내 입자성 부유물질은 시간에 따라 감소하는 경향을 보였으며 그중에서 입자성 유기물이 차지하는 비율은 평균 87~97%로 높은 비율을 차지하였다. 메소코즘 내에서 시간에 따라 감소된 입자성 유기물의 양은 M1에서 가장 크게 감소하였으며 M4가 그 다음으로 감소하였다. M2에서는 세 차례에 걸쳐 대조군보다 입자성 유기물의 양이 높았으

며, 이는 *Cipangopaludina*가 분비하는 유기물에 의한 것으로 여겨진다. 입자성 유기탄소와 총질소의 농도는 입자성 유기물의 결과와 비슷한 경향을 보였으며 M1에서 가장 낮은 농도를 보였다. 메소코즘 실험 후반부에는 모든 메소코즘에서 유용생물에 의한 영향에 의해 POC, PN 농도가 감소하였다. *Iris pseudoacorus*는 시아노박테리아 bloom을 감소시키는 유용한 식물체이다. 또한 M1에서는 ^{13}C 가 라벨링 된 EPA농도와 16:1/16:0의 비가 시간이 지남에 따라 증가하였다. EPA와 16:1/16:0의 비가 1보다 큰 것은 규조류의 생체지표로 사용된다. 따라서 이러한 결과는 메소코즘 실험동안 식물플랑크톤 종의 변화가 있었음을 의미한다. 본 연구에서 *U. douglasiae*는 시아노박테리아의 bloom을 제대로 제어하지 못했다. 이들은 7일째와 9일째 유기물을 수층으로 배출하였으며, 이렇게 밖으로 배출된 유기물은 낮은 먹이질을 보였다. 따라서 말조개에 의해 배출된 유기물에 의해 차후 혼합메소코즘 내에서 상위 섭식자에게 낮은 먹이질의 유기물을 제공하게 될 것이다(필수지방산의 농도가 낮음). 새뱅이와 동자개를 함께 처리한 M4에서 새뱅이만 처리한 M3에 비해 ^{13}C 가 라벨링 된 POM이 크게 감소하였으며, ARA, DHA, EPA 농도는 더 높았다. 이러한 결과는 먹이연쇄를 통한 biomanipulation이 담수 내 cyanobacterial bloom을 컨트롤 할 수 있는 유용한 tool로 사용될 수 있음을 의미한다.

- 메소코즘 내 각 유용생물의 ^{13}C , ^{13}N atom(%)를 투여한 결과를 살펴보면 유용생물을 투여한 메소코즘 중에서 *C. denticulata*와 *P. fulvidrao*를 같이 투여한 M4 메소코즘에서 남조류 제거효율이 가장 뛰어났으며 *I. pseudoacorus*를 투여한 M1에서는 DIN을 섭취하는 효과가 뛰어나 영양염 섭취에 있어서 남조류와의 경쟁관계에서 우위에 있다고 여겨진다. 메소코즘 실험 1주일이 지난 시기에 크기가 작은 *Cipangopaludina*의 ^{13}C 및 ^{13}N 의 atom(%)는 줄어들고 크기가 큰 *Cipangopaludina*는 실험 종료시까지 증가하는 것으로 보아 크기가 작은 *Cipangopaludina*의 여과섭식 능력의 한계를 보여주는 것으로 여겨진다. *C. denticulata*를 투여한 메소코즘 보다는 *C. denticulata*와 *P. fulvidrao*를 같이 투여했을 때 *Microcystis aeruginosa* 제거효율에 있어 상승효과를 보여주었다.

(다) 생물조절(biomanipulation)에 의한 남조류 제어효과 평가 - 석문습지 인공연못 실험

- 생물조절에 의한 남조류 제어효과를 연구하기 위하여 석문습지에 인공연못(5 m×10 m×1 m)을 설치하고 탄소, 질소안정동위원소 추적자(^{13}C , ^{13}N)를 첨가하여 생산성, 질소순환 및 유용생물의 남조류 제어효과에 관한 연구를 실시하였다.
- 현장실험은 추적자인 ^{13}C , ^{13}N 을 $^{13}\text{C}-\text{HCO}_3^-$, $^{13}\text{N}-\text{NH}_4^+$ 를 메소코즘에 첨가하여 인위적으로 자연상태보다 10% 정도 높여준 후 *Iris pseudoacorus*(인공식물섬), *Cipangopaludina*(말조개), 필조개(*Anodonta woodiana*), 대칭이(*Anodonta arciformis*), *Caridina denticulata*(새뱅이), *Pseudobagrus fulvidrao*(동자개)등의 유용생물을 투여하였으며, 대조군(Control)과 함께 3주 동안 대상생물을 채집(2008년 10월 13, 14, 13, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 26, 29, 11월 2일)하였다.

- 모든 메소코즘 내 입자성 부유물질은 대조군보다 처리군에서 유용생물 투입 2일후부터 감소하는 경향을 보였으며 클로로필의 농도도 비슷한 경향을 보였다. POC, DOC, PON의 농도는 유용생물을 투여한 후 감소하는 경향을 보였으나 DIC의 농도는 증가하는 것으로 보아 메소코즘 내 미생물의 활동으로 인한 POC, DOC의 분해에 의한 것으로 여겨진다. 메소코즘 내 POM의 ^{13}C , ^{13}N atom(%) 결과를 살펴보면 처리군이 대조군보다 점차적으로 감소하고 있고, 생산속도도 순차적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 유용생물의 생물조절(biomanipulation) 효과로 인해 남조류가 제어되고 있음을 나타내고 있다. 유용생물에 따른 ^{13}C , ^{13}N atom(%) 결과에 따른 남조류 섭식 기여도를 평가해 보았을 때 새뱅이가 가장 높은 남조류 섭식율을 보여주었고(Carbon: 37.2%, Nitrogen: 31.0%), 그 다음은 여과 섭식자 중에서 대칭이가 높았다(Carbon: 14.9%, Nitrogen: 22.0%). 이상으로 본 연구를 통해서 수생태계 내 남조류 대발생시 생물조절에 활용될 수 있는 각 유용생물들의 제어효율을 안정동위원소 추적자를 사용하여 정량적으로 평가하였다.

라. 어류의 트로픽 구조분석 및 top-down 조절 기법을 이용한 농업용저수지 수질관리 기법개발

(1) 신구저수지의 영양염류의 계절변동 경향 분석

- 신구저수지의 영양염 변이에 따르면(농업기반공사, 2002~2005), 총인(TP)과 총질소(TN)의 값은 조사기간 동안 매우 높게 나타났다. 총인의 평균은 $79.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 였으며, 최소 $29 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 최대 $161 \mu\text{g L}^{-1}$ 까지 농도변이를 보였다. 총인은 계절에 따른 변이가 크게 나타나고 있었으며, 특히 여름철이 시작되는 6월경부터 9월 사이에 가장 높은 농도를 나타내었다. 총인은 조사기간 동안 높은 농도를 지속적으로 유지하였으며, Forsberg & Ryding (1980)의 부영양화 단계에 따르면, 부영양상태로 나타났다.
- 총질소는 1.5 mg L^{-1} 이상의 고농도를 지속적으로 유지하였으며, 총인과 마찬가지로 부영양상태로 나타나고 있었다. 총질소의 평균농도는 2.4 mg L^{-1} 이었고, 계절별 변이차는 총인보다 크게 나타났으며, 조사기간 중 변이폭은 최소 1.3 mg L^{-1} 에서 최대 3.6 mg L^{-1} 로 나타났다. 총질소의 경우 총인과는 달리 봄에 가장 높은 농도를 유지하고 있었으며, 여름에는 농도값이 감소하는 것으로 나타났다.
- 식물성플랑크톤의 농도변이는 계절별로 매우 변이차를 나타내고 있었고, 주로 여름철에 급격한 증가를 보이고 있었으며, 평균농도는 $43 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다. 조사기간 동안 식물성플랑크톤의 계절별 변이는 총인의 계절별 변이와는 다른 양상으로 나타났으며, 오히려 총질소와 비슷한 양상을 보이고 있었다.

- TN:TP비는 모두 17이상(평균 37)으로 나타났으며, 이에 따라 1차생산력 증가에는 인이 제한영양염으로 작용할 것으로 판명되었다. 조사 기간 중 2004년 11월에는 급격한 증가를 나타내었는데, 이 기간 동안 식물성플랑크톤 농도는 전 기간 중 가장 낮은 농도를 나타내었다. 이는 질소의 양의 급격한 유입에도 불구하고 인이 현저히 낮은 농도를 유지하여 1차 생산력의 감소로 나타난 결과로 볼 수 있다.

(2) LEHA 어류모델을 이용한 신구저수지의 생태건강도 평가

- 신구저수지에서는 13종의 어류가 출현하였으며, 붕어(*Carassius auratus*), 밀어(*Rhinogobius brunneus*), 참붕어(*Pseudorasbora parva*)가 가장 우점하는 종으로 나타났다. 우점종인 붕어, 참붕어는 모두 내성종이었으며, 전체 내성종은 13종 381개체 중, 8종 242개체를 차지하고 있었다.
- LEHA 모델에 의거한 신구저수지의 생태건강도는 “보통에서 악화상태(Fair-Poor)”로 나타났다. S1과 S4는 각각 평균 28점과 30점으로 “보통(Fair)상태”로 나타났으며, S2와 S3은 각각 평균 21점과 23점으로 “보통에서 악화상태(Fair-Poor)”로 나타났다. S1은 평균 지수와 계절별 지수에 따른 변이는 크지 않은 것으로 나타났으나, S2~S4 계절별 약간의 값의 변이를 보였다. 이는 농업용 저수지의 특성상 장마전기 인근 농경지의 관개용수로의 이용으로 인하여 S2~S4의 저수량이 급격히 감소하였으며, 이로 인해 생태건강도 지수에 큰 영향을 미친 것으로 판단되었다.
- 실제 어류 조사 기간 중 장마전기에 S2~S4의 저수량이 급격한 감소하였으며 이에 따라 대상 지점에서의 어류채집이 전혀 이루어지지 않음으로써 생태건강도 지수는 매우 낮은 점수로 평가되었다.

(3) 신구저수지에서 식물 플랑크톤에 의한 제한 영양염 분석

- 대조군(control)의 농도변화에 따른 각 처리군(Treatment) 농도 변화비는 전반적으로 시간의 흐름에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. T1과 T2에서 각각의 Chl-*a* 농도는 초기농도 42.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ 과 38.6 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 실험종료 시에 34.6 $\mu\text{g L}^{-1}$ 과 26.3 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 감소하였다. T1과 T2의 식물성플랑크톤의 농도는 일자가 지남에 따라 점차 감소양상을 나타내었으며, 실험기간동안의 농도변이는 대조군(control)에 비하여서도 낮은 값을 지속적으로 나타내고 있었다. 이는 실험기간동안 충분한 일조량을 확보해 주었음에도 불구하고, 식물성플랑크톤의 성장원으로서 인이 이용되지 않았음을 나타내는 결과였다.
- 질소가 첨가된 T3과 T4는 Chl-*a* 농도의 뚜렷한 증가를 나타냈으며, 각각의 농도는 40 $\mu\text{g L}^{-1}$ 과 39.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 98.4 $\mu\text{g L}^{-1}$ 과 112.8 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 약 2~3배 증가한 것으로 나타났다.

최초 질소가 첨가된 날에는 $149.2 \mu\text{g L}^{-1}$ 과 $180.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 까지 증가하였으며, 이후 첨가된 질소가 1차생산력으로 환원됨으로써 점차적으로 Chl-*a*의 농도는 감소하였다. 본 실험기간 동안에는 질소에 의한 제한효과가 뚜렷하게 나옴으로써 기존 저수지에서의 1차생산력에 대한 인 제한효과와는 상반된 결과로 나타났다.

- 이전 연구결과에서 대조군에 비하여 질소가 처리된 곳에서 성장률이 높게 나와 인과 질소 모두 제한요소로 작용하는 실험결과가 도출되기도 하였으나, 본 연구결과처럼 인이 처리된 곳에서 대조군에 비해 성장률이 낮고, 질소가 처리된 곳에서 가장 높은 성장률은 보인 경우는 나타나지 않았다. 이전 연구에서 가장 높은 성장률을 보인 것은 인 혹은 인과 질소가 동시에 처리된 곳에서만 나타났으며, 질소가 단독으로 처리된 곳에서의 높은 성장률은 나타나지 않았다.

(4) 생물조절 기법을 이용한 조류제어 효과 실험

(가) 어류를 이용한 생물조절 효과

- 어류의 top-down 조절실험에 의한 녹조 및 남조류의 제어 효과는 일부종에서 나타났지만 전반적으로 극히 미미한 것으로 나타나 현장에서 상기 종에 의한 제어는 어려울 것으로 나타났다. 국내에서 수행된 이전의 어류를 이용한 실험결과와는 달리 외국의 경우는 top-down 조절에 의한 cascading 가설을 실험한 바가 있는데 몇몇 연구에서는 탁월한 효과를 보인바 있다.
- 어류투여군(fish treatment)은 대조군(control)에 비해 용존산소(DO), 수소이온농도(pH)는 감소하였으며 전기전도도 및 탁도의 수치는 증가하는 것으로 나타났다. 즉 처리군에서의 이러한 변화는 어류의 분변 및 분비물에 의한 인(P)과 질소(N)의 증가 및 부유물의 증가로 인한 결과로 사료되었다.

(나) 대형무척추동물을 이용한 생물조절 효과

- 줄새우를 투여한 수조에서는 시간이 경과함에 따라 Chl-*a*의 농도가 점차적으로 감소하였다. 줄새우는 처리군의 밀도에 있어서 25개체 및 50개체로 서로 달리 하였을 때 실험 최종일인 D7에 Chl-*a* 농도는 두개의 처리군에서 각각 $64 \mu\text{g L}^{-1}$, $77 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타나 초기의 평균 Chl-*a* 농도 $97 \mu\text{g L}^{-1}$ 보다 $32 \mu\text{g L}^{-1}$, $20 \mu\text{g L}^{-1}$ 만큼 감소한 수치를 보여 여과 섭식성 대형무척추동물에 의한 Chl-*a* 제거 효과가 탁월한 것으로 분석되었다. 이는 대조군(control)에서 Chl-*a*의 최종 농도 $149 \mu\text{g L}^{-1}$ 과 비교하였을 때, 줄새우의 제거효율(removal rate)는 57% ($85 \mu\text{g L}^{-1}$) 및 47% ($72 \mu\text{g L}^{-1}$)로 높게 나타났다.

- 줄새우의 개체수를 25마리, 50마리로 서로 달리 하였을 때 실험 마지막날 T4, T5의 최종 남조류 단위면적당 세포수가 $9.3 \times 10^2 \text{ cells mL}^{-1}$, $1.1 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 나타나 초기의 평균 남조류 단위면적당 세포수 $6.6 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 보다 $5.7 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$, $5.5 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 만큼 감소한 수치를 보여 여과 섭식성 대형무척추동물에 의한 남조류 제거 효과가 탁월함을 관찰 할 수 있었다.

(다) 상위 포식자에 의한 생물조절 효과

- 줄새우 처리군(Treatment)의 개체수 변이에 따른 T1, T2 및 T3에서 Chl-*a* 제거효과는 각각 42%, 66%, 80%로 나타났으며, 동자개를 투여한 T4, T5, T6 에서는 55%, 34%, 25%로 나타났다. 남조류의 최종 제거효과는 T1, T2 및 T3에서 51%, 70%, 71%로 나타났으며, 동자개를 투여한 T4, T5, T6 에서는 50%, 13%, 11%로 나타났다. Top-carnivore에 섭식에 의해 조류 제거의 효과가 낮게 나타났으며, 특히 Chl-*a*보다 남조류 제거에 보다 더 탁월한 효과를 보였다.

(5) 생물 조절 기법을 이용한 현장 적용 평가

(가) 신구저수지 현장 메소코즘 적용

- 대조군(control)과 처리군에서 각각 채취한 샘플을 Chl-*a* 크기별로 분리하여 분석한 결과, 2~20 μm , 20~50 μm 두 크기에서 평균 92%로 높은 제거 효율을 보였다. 그리고 50 μm 이상의 크기와 총 엽록소에서는 각각 77%, 88%로 제거 효율을 보였다. 한편 상위 포식자의 섭식엔 의한 영향은 실제 저수지에서는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
- 남조류의 제거율은 5~8%로 낮은 효율을 보여 실험 기간 동안 새뱅이는 남조류보다 엽록소 제거에 탁월한 효과가 나타났다 이는 새뱅이 밀도별 조류 섭식에 영향을 받은 것으로 사료 되어 향후 단위 면적당 체적 생물량을 투여하여 실험이 이루어져야 할 것으로 나타났다.

(나) 석문단지에서의 복합적 생물처리를 통한 현장 적용

- 용존산소의 경우 말조개, 새뱅이, 동자개의 호흡에 의한 영향으로 점차 감소되는 경향을 보였다. 탁도는 반면 초기에 약 60 NTU에서 실험 종료일인 16일 후에는 약 25 NTU로 나타나 수질향상에 기여한 것으로 나타났다. 또한 Chl-*a*는 초기 농도 약 $40 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 최종일에는 $13 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났으며, 남조류 역시 초기 농도 약 $38,000 \text{ cells L}^{-1}$ 에서 최대 5,000 cells L^{-1} 로 감소하는 경향을 보였다. 이는 복합적으로 투여한 인공식품섭과 새뱅이, 말조개 등의 섭식 및 영양염 흡수로 인한 것으로 사료되었으며, 이들을 개별적으로 사용하여 조류 제거능을 평가할 때보다 복합적으로 적용하였을 때 보다 더 탁월한 효과를 보였다.

마. 생태정보학적 기법을 이용한 저수지 수질관리 생태모델의 개발

(1) 수질 및 생물자료

- 본 연구과제는 농업용저수지 생태계의 다양한 생물들 간의 상호작용을 이용하여 저수지의 수질을 개선하고자 하는 것이다. 이를 위해 다양한 문헌, 연구보고서, 농림부 및 환경부에서 운용하는 전국호소수질측정망 자료 등을 통하여 농업용 저수지의 수질을 나타내는 물리, 화학, 수문학적 수질 자료와 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 등 생물 자료를 수집하였다. 또한 시험저수지 및 메소코즘에 데이터로그를 설치하여 온도 및 광량을 측정하였다.

(2) 저수지 수질특성 유형화 및 예측 모델 개발

(가) 수질특성 유형화

- 농업용저수지의 수질자료 중 2006년 자료를 이용하여 Carlson의 TSI 지수에 따라 전국 165개 농업용 저수지의 영양상태를 평가한 결과 TSI_{CHL} 에서는 전체 저수지의 약 60%가 부영양화된 것으로 나타났으며, TSI_{TP} 결과 48%가 부영양화된 것으로 나타났다.
- 저수지 수질 자료 중 결측 비율이 낮은 2002년도 8월 전후의 6개 수질인자 DO, COD, SS, TN, TP, Chl-*a*를 이용하여 SOM을 통해 수질특성에 따른 저수지 유형을 분류하였다. 그 결과, 우리나라 저수지는 4개의 그룹(I-IV)으로 나뉘어졌다. 이를 크게 보면 2개의 그룹(그룹 I, II 및 III, IV)으로 나눌 수 있으며, 좀 더 세분화 한다면 6개의 그룹(Ia, Ib, II, III, IVa, IVb)으로 나눌 수 있다. 그룹 III은 SS가 매우 높은 특징을 가지는 저수지들이며, 그룹 IVb는 COD, TN, TP, Chl-*a*의 값이 매우 높은 저수지 들이다. 그리고 그룹 IVa는 DO가 높은 지역들이라는 것을 알 수 있다. 이에 비해 그룹 I은 수질 지수들이 모두 가장 낮은 값을 보이는 맑은 저수지들이며, 그룹 II는 다소 중간의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 따라서 그룹 III, IV로 분류된 저수지들은 매우 오염된 저수지라는 것을 알 수 있으며, 이에 비해 그룹 I의 저수지들은 가장 청정한 곳이며 또한 그룹 II의 저수지도 비교적 양호한 수질을 나타낸다는 것을 알 수 있다.
- 또한 SOM 상에서 분류된 각 저수지의 그룹별 제방높이, 제방길이, 고도, $TSI(CHL)$, $TSI(TP)$, TN:TP 등의 차이를 비교하였다. 그 결과 각 그룹 간에 제방 높이와 길이는 음의 상관관계를 가지는 것을 볼 수 있다. 그리고 고도와 제방높이는 양의 상관관계가 있음을 보여준다. 따라서 Chl-*a*는 고도, 제방높이, 제방길이 등과도 밀접한 관계를 가지는 것을 보여준다. 고도가 높은 곳에 위치하는 제방의 높이가 높은 즉, 수심이 깊은 저수지에서는 녹조발생이 적으며 상대적으로 수질이 양호한 것을 제시해 준다. 한편 그룹 Ia로 분류된 저수지들은 고도 및 제방 높이가 가장 높고, TSI는 가장 낮은 것을 보여주고 있다. 반면

제방 길이는 상대적으로 낮으며, TN:TP는 가장 높다는 것을 보여준다. 그룹 IVb가 가장 높은 TSI를 보였으며, 반면 TN:TP는 가장 낮았다. 이러한 SOM 분석을 이용하여 저수지 수질의 연도별 변동을 예측할 수 있다.

(나) 수질특성 유형화 방법 비교

- 한편 SOM 방법 외에 ordination 방법 중 좌표 및 축을 제공하는 PCA(principal component analysis), DCA(detrended correspondence analysis), NMS(nonmetric multidimensional scaling), Isomap 등 4 방법을 이용하여 저수지를 유형화하였다. 그 결과 모두 유사한 ordination 유형을 보였지만 ordination 결과를 뒷받침 해주는 설명력에서 차이를 보였다. PCA의 경우 축 1과 2가 각각 2.89와 0.87의 고유치로 전체 분산의 64.4%를 설명한 것에 반해, DCA의 경우 축 1과 2가 각각 0.061과 0.029의 고유치를 나타냄으로써 DCA 결과를 뒷받침하기에는 낮은 값을 나타냈다. NMS의 경우 13.4의 stress값을 보여 NMS 결과를 설명하기에 유효하다고 판단 할 수 있다. Isomap의 경우 원 데이터를 설명하기 위한 차원 축소의 에러를 평가하는 축 1과 2의 residual variance값이 0.18과 0.08로 낮지만 다른 ordination 방법들과 달리 variable scores와 같은 변수들의 좌표값들을 얻을 수 없기 때문에 이용에 제한이 있다. 따라서 4개의 ordination 방법을 통하여 유사한 결과가 도출되었지만 4가지 ordination의 설명력을 근거로 하였을 때 PCA와 NMS가 저수지를 유형화 하는데 있어서 가장 효율적인 방법임을 보였다.

(다) 수질 특성 시간변동 유형화

- 하나의 저수지 내에서 시간적으로 어떠한 수질 변이 특성을 보이는 가를 밝히기 위해 본 연구과제의 시험 저수지인 신구저수지에서 2002년 11월부터 2004년 2월까지 매월 2회씩 조사된 수질자료를 이용하여 신구저수지 수질의 시간적 변동을 SOM을 이용하여 유형화하였다. 저수지 수질은 크게 4개의 그룹(유형)을 나타내 주었는데 이는 계절성을 잘 반영해 주고 있다. 그룹 1과 3, 그룹 2와 4가 큰 차이가 있음을 보여준다. 그룹 1은 봄, 그룹 4는 여름, 그룹 2는 가을, 그리고 그룹 3은 겨울을 나타낸다. SD(Sechi depth)는 SOM 맵의 위쪽 영역, 즉 그룹 1, 3(봄, 겨울)에서 높은 값을 나타내어 봄과 겨울철에는 저수지가 매우 투명하지만, 가을철에는 물이 매우 탁해진다는 것을 보여준다. DO 또한 봄과 겨울에 높은 값을 보였다. pH는 여름에 높은 값을 보여주어 알카리성으로 되는 것을 보여주고 있으며, BOD 또한 여름에 높은 값을 보였다. 그러나 SS, COD는 가을에 가장 높은 값을 보여 차이가 있었다. POP, TP는 봄과 겨울에는 낮지만 여름과 가을에 매우 높게 나타남을 보여준다.

(라) 저수지 수질 예측

- 판별분석을 이용하여 농업용저수지의 영양상태를 예측한 결과 전체 판별적중률은 약 60%

를 보였다. 판별분석의 결과를 이용하여 정준분석을 수행한 결과, 첫 번째 축과 두 번째 축은 총 변이에 대해 전체 96%의 설명력을 보여 부영양 상태가 명확히 구분될 수 있다는 것을 보였다. 그룹의 판별분석에 영향을 주는 환경요인의 상대적 중요도를 정준 분석의 표준화 계수를 통해 나타내면, 첫 번째 축의 고유치는 1.176으로 총 변이에 대해 91%의 설명력을 가지며, 표준화 계수에 의해 첫 번째 축에서의 변수들 간의 상대적 중요도는 COD, DO, TP의 순으로 나타났다. 두 번째 축은 0.059의 고유치를 가지며, 수면적과 저수지 길이, 제방높이에 따라 구분되는 것을 보였다.

- 저수지 수질 유형화 모델에서 사용된 수질 인자(유역면적, 고도, 둘레길이, 저수지길이, 저수량, 수면적, 제방높이, 제방길이, 온도, DO, BOD, COD, SS, TN, TP)를 이용하여 저수지 수질을 나타내 주는 Chl-*a*의 농도를 예측하기 위한 방법으로 MLR(multiple linear regression)과 인공신경회로망인 MLP(multilayer perceptron)를 이용하였다. 그 결과 MLR에서는 상관관계수가 0.81($r^2=0.64$)로 비교적 높게 나타났다. Chl-*a* 농도 예측에서도 환경인자들의 상대적 중요도는 COD가 가장 높은 연관성을 보였으며, 다음은 TP가 중요한 인자로 나타났다. MLP에 의한 Chl-*a* 농도를 예측한 결과 상관관계수가 0.74로 비교적 높게 나타났다. MLR에서와 같이 COD가 가장 높은 연관성을 보였다. 그러나 일반적으로 알려져 있는 MLP 모델이 MLR 모델보다 예측력이 높다는 결과와 다소 차이가 있어 MLP 모델 개선을 개선하기 위하여 particle swarm optimization(PSO) 알고리즘을 도입하여 모델을 개발하였다. PSO 알고리즘을 적용한 MLP-PSO 모델에서 입력층의 조건을 달리하여 각 조건에 따른 예측 결과를 비교하였다. 각각의 조건은 입력층에 사용되는 환경인자 수를 변화 시킨 것으로, 전체 13개 환경인자를 모두 사용한 경우, Chl-*a*와 유의한 상관관계를 보인 12개 환경인자만을 사용한 경우, 이화학적 수질 인자 6개만을 사용한 경우로 구성하였다. 이중 Chl-*a* 농도와 유의한 상관관계를 보인 12개의 환경인자를 사용하는 경우와 6개의 환경인자만을 사용하는 경우 모두 13개 환경인자를 사용한 경우에 비해 낮은 Gbest 값을 보여 상대적으로 높은 정확성을 보였다. 특히 12개의 환경인자를 사용한 경우의 3개 뉴런으로 구성된 단일 은닉층에서 Gbest의 값이 0.018로 가장 낮았으며, 모델을 통한 예측력 또한 다른 조건들에 비해 높게 나타났다(학습 $r=0.755$, 검증 $r=0.831$, $p<0.05$). 이는 입력층에 12개의 뉴런을 사용하고, 단일 은닉층의 3개 뉴런으로 구성된 12-3-1 구조 모델이 가장 높은 효율성을 보였다.

(3) 생물구조 유형화

(가) 식물플랑크톤 군집 유형화

- 본 연구의 시험저수지인 신구저수지에서 2002년 11월에서 2004년 2월까지 격주 간격으로 조사된 식물성플랑크톤 군집 자료를 이용하여 생물구조를 유형화하였다. 조사는 저수지의 깊이에 따라 상층, 중층, 하층(2 m 간격)으로 나누고 각 수층에서 식물플랑크톤 및 동물플

랑크톤 군집 조사가 이루어졌다.

- NMS 분석 결과, 상층부에서는 축 1과 축 2가 전체 분산의 69%(축 1; $r^2=0.34$, 축 2; $r^2=0.35$)를 설명하였으며, 뚜렷한 계절성을 보였다. 또한 계절성을 보이는 각 그룹별로 IndVal 분석에 의한 지표종은 그룹 I는 *Selenastrum minutum*, *Aphanocapsa* sp. 등을 포함하는 3종이었으며, 그룹 II는 *Crucigenia rectangularis*, *Staurastrum astroideum* 2종이 지표종으로 나타났다. 한편 그룹 III은 *Ankistrodesmus bibraianus*, *Nitzschia palea*을 포함하는 7종이 지표종이었으며, 그룹 IV는 *Chlamydomonas* sp. 등을 포함하는 3종이 지표종이었다.
- 이에 반해 중층부와 하층부에서의 식물플랑크톤 군집은 상층부에 비해 비교적 약한 계절성을 보였다. 중층부의 NMS ordination에서 축 1과 축 2는 전체 분산의 65%(축 1 $r^2=0.27$, 축 2 $r^2=0.48$)를 설명하였으며, 그룹 3의 표본은 다른 것들보다 많이 분산되어 있으며, 시간적 경과가 상층에 비해 상대적으로 혼재되어 있다. 중층부에서 IndVal 분석에 의한 지표종 분석결과, 그룹 1은 *Dictyosphaerium pulchellum*, *Tetraedron incus*를 포함하는 5종으로 대표되었으며, 그룹 3은 *Coelastrum longissima*, *Nitzschia palea*를 포함하는 7종으로 대표되었고, 그룹 4는 *Chlamydomonas* sp.를 포함하는 3종으로 대표되었다. 그러나 그룹 2는 지표종을 보이지 않았다.
- 한편 하층부의 경우 NMS ordination에서 축 1과 축 2는 전체 분산의 70%(축 1 $r^2=0.44$, 축 2 $r^2=0.26$)을 설명하였으며, IndVal 분석결과 그룹 III과 IV에서만 지표종이 선택되었다. 그룹 III은 *Nitzschia palea*, *Navicula* sp. 등을 포함한 8종으로 대표되었으며, 그룹 IV는 *Chlamydomonas* sp.을 포함한 2종으로 대표되었다.

(나) 동물플랑크톤 군집 유형화

- 식물플랑크톤 군집 특성과 함께 동일한 시기에 신구저수지에서 조사된 동물플랑크톤은 분류군에 따라 발생특성이 매우 다르게 나타났다. 동물플랑크톤은 청수기인 5~6월 기간이 다른 기간에 비해 높은 밀도를 나타냈고, 6월 조사에서 가장 높은 밀도를 나타냈다. 이 중 윤충류는 2002년 겨울과, 2003년 4월~12월 초 기간 동안은 60% 이상으로 가장 높은 비율을 나타냈다. 종 다양도와 풍부도는 청수기인 5~6월과 2004년 겨울철 기간 동안에 가장 낮은 것으로 나타났고, 9월에 가장 높은 값을 나타내었다. 종 별 출현 횟수는 윤충류 중에 *Keratella cochlearis* 종이 22회 조사 횟수 중 19회 출현하여, 가장 높은 출현 빈도를 나타냈고, *Asplanchna herricki*, *Polyathra euryptera* 종이 14회 출현하여 높은 출현 빈도를 나타냈다. 요각류는 *Diacyclops thomasi* 종이 18회 출현하여 *Keratella cochlearis* 종 다음으로 높은 출현빈도를 나타냈고, 지각류는 *Bosmina longirostris* 종이 13회로 겨울철 시기를 제외한 대부분의 시기에 출현하는 것으로 나타났다.

- 동물플랑크톤 군집의 NMS ordination 결과 계절적 특징을 나타내며, 5개의 군집으로 나누었다. 그룹 I는 겨울철인 2003년 12월에서 2004년 2월, 그룹 II는 봄철인 2003년 5~6월, 2002년 11월~12월, 그룹 III은 여름철인 7~9월초, 그룹 IV는 가을철인 2003년 10월~11월로 구분되어지며, 청수기는 2003년 5월~6월로 구분되어진다. NMS ordination은 전체 변이중 65%의 설명력으로 동물플랑크톤 군집의 변화를 나타내었으며(축 1: $r^2=0.49$, 축 2: $r^2=0.16$), Monte Carlo test 결과 두 축 모두 유의성을 보였다($p<0.05$). 남조류가 우점한 시기를 나타내는 그룹 III~V는 수온과 식물플랑크톤 밀도, 특히 남조류 밀도와 양의 상관성을 나타낸 반면, 겨울철을 대표하는 그룹 I는 수온과 음의 상관성을 나타내며, 식물플랑크톤 군집 중에는 겨울철에 우점으로 나타나는 규조류와 양의 상관성을 나타내었다. 그룹 II는 용존산소 농도와 양의 상관성을 나타냈다.
- 신구저수지에서 2002년 11월에서 2004년 2월까지 조사된 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 그리고 영양염류의 변동과 그들의 특성을 바탕으로 이들 인자들 사이의 관계를 나타낼 수 있다. 그 결과 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 및 TP 변동을 나타내는 것으로 식물플랑크톤의 밀도변동은 TP의 변동과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 동물플랑크톤은 식물플랑크톤 밀도 변동과 밀접한 관계를 가지고 있다.

(4) 생물서식지 적합성평가 모델 개발

(가) 식물플랑크톤 밀도 조절

- 신구저수지에서 2002년~2004년에 조사된 식물플랑크톤 중 가장 많은 종수를 차지하는 것은 녹조류였으며 남조류, 규조류, 편모조류 순 이었다. 이 중 여름철 저수지의 녹조현상을 야기하는 남조류는 여름철에 가장 높은 빈도를 보였다. 한편 신구저수지에 다양한 조건의 인공식물섬을 설치하여 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 군집변동을 조사한 결과, 풍력장치가 있는 인공식물섬, 고밀도침수형식물 처리 조건에서 식물플랑크톤 밀도가 감소하며, 동물플랑크톤 밀도는 증가하는 것을 보였다. 이는 이들 조건이 수질개선을 위한 유용동물플랑크톤의 좋은 서식지 조건을 만들어 줄뿐 아니라 식물섬 자체적으로도 영양염류 제거 등의 효과가 있기 때문으로 보인다. 따라서 앞으로 인공식물섬을 설치하는 경우 이러한 조건을 고려하여 인공식물섬을 제작하고 설치하는 것이 요구된다.

(나) 인공식물섬 처리 효과 분석

- 인공식물섬 설치 후 시간 경과에 따른 인공식물섬의 효과를 평가함으로써 효과적인 수질 관리에 기여하고자 하였다. 인공식물섬이 설치된 후 식물생육현황을 설치 년차에 따라 정리하여 인공식물섬 식물의 생육을 평가한 결과 생체량 및 건조중량, 지상 및 수중부분 중량 모두 설치 후 점차 증가 하여 2년 후에 가장 높은 값을 보인 후, 3년째부터 감소하였

다. 따라서 식물섬의 효율을 높이기 위해서는 2~3년에 한번씩은 주기적으로 인공식물섬의 식물들이 성장을 잘 할 수 있도록 관리해 주는 것이 필요하다는 것을 제시해 준다.

(다) 시스템다이내믹스 모델

- 인자들간의 다양한 상호작용을 고려한 연구방법으로서 시스템다이내믹스 모델(structural dynamic model) 접근법이 많이 사용된다. 본 연구에서는 Stella 프로그램을 이용하여 연구대상 저수지인 신구저수지의 시간 변화에 따른 서식지 적합성을 평가하였다. 본 모델에서는 식물플랑크톤의 성장에 중요한 영향을 미치는 외부 환경인자인 TP의 유입 변화에 따른 식물플랑크톤의 밀도 변동을 식물플랑크톤 섭식자인 동물플랑크톤과의 관계를 고려하여 나타내었다. 또한 식물플랑크톤과 동물플랑크톤 성장에 영향을 주는 요인으로 온도를 고려하였다. 한편 연구대상 저수지 내에서 유용생물의 영향을 고려하기 위해 말조개와 인공식물섬을 고려하였으며, 연구대상 저수지의 수질 개선을 위해 이들 유용생물의 적정 조건을 모델을 통해 나타내었다. 그 결과 인공식물섬의 저수지 전체 피복율이 10% 이상에서 식물플랑크톤의 밀도를 크게 억제하는 것으로 나타났으며, 말조개를 투입하는 경우 신구저수지의 경우 신구저수지 전체에 10만 마리 이상을 투입하였을 때 식물플랑크톤의 억제 효과가 뚜렷하게 나타남을 보였다. 이는 약 3 m³ 당 1개체가 해당되는 양이다.

(5) 농업용저수지 관리전략

- 본 연구에서는 우리나라 농업용 저수지의 수질특성을 SOM을 통하여 유형화하고 수문학적, 지형학적 특성 등과 연계하여 분석하였다. 그리고 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 및 이화학적 수질인자간의 상호작용에 대하여 분석하였다. 그 결과 앞서 살펴본 바와 같이 우리나라 농업용 저수지의 수질은 이들이 위치하는 지리적 위치와 제방의 높이, 저수지 형태 등에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 이를 통해 저수지가 위치하는 고도가 높은 곳에서는 비교적 양호한 수질을 유지하지만 고도가 낮은 곳에 위치하는 저수지는 부영양화가 심하다는 것을 제시하여 주었다.
- 이는 저수지 유역 특성과 관련되는 것으로서 고도가 높은 곳의 저수지들의 유역은 대부분 산림 등으로 구성된데 비하여 저지대 저수지들의 유역은 농경지, 가축사육장 등으로 사용되어 많은 양의 영양염류가 저수지로 유입되게 되어 부영양화를 초래한다. 또한 고도에 따른 수온의 차이도 있어 고지대 저수지들은 낮은 온도로 인하여 조류발생이 제한될 수 있는데 비하여 저지대 저수지들은 수온이 상대적으로 높기 때문에 영양염류가 풍부한 경우 쉽게 조류가 대발생할 가능성이 높다. 일조량 등도 크게 영향을 미칠 수 있다.
- 생물 먹이망을 통한 저수지 수질 개선은 용존 영양염류 농도를 낮게 하여 조류 발생을 억제하는 것과 밀도가 높아지는 조류를 섭식하여 제거하는 방법으로 나누어 고려할 수 있다.

먼저 전자의 경우는 P, N 등의 농도를 저하시켜 조류가 이용할 수 있는 기회를 줄이는 것으로서 수생식물을 이용하는 방법이다. 이는 저수지 수변부에 있는 침수식물 식생대를 발달시키는 방법과 침수식물을 식재한 인공식물섬을 개발하는 것이다. 이러한 침수식물의 발달은 영양염류를 제거해 줄뿐만 아니라 조류를 섭식하는 동물플랑크톤, 저서 및 부유성 무척추동물에게 유용한 서식지 제공 등을 통하여 수질 개선에 기여할 수 있을 것이다. 또한 인공식물섬의 설치는 빛을 부분적으로 차단하여 조류 발생 억제에도 기여할 수 있으며, 심미적 관점 등 다양한 간접적인 효과가 있다. 따라서 유용생물의 서식지를 개발 설치하는 것은 수질개선에 매우 필요한 것으로 사료된다. 생물먹이망을 통한 수질 개선의 두 번째 경우는 조류의 섭식률이 높은 생물들(본 연구과제에서 연구된 말조개, 새뱅이 등)을 이용하여 조류의 섭식량을 늘려줌으로서 조류발생을 억제하는 것이다. 이는 앞서 설명된 유용생물서식지 개발 및 설치와 연계하면 보다 높은 효과를 얻을 수 있을 것이다.

2. 연구개발결과 활용을 위한 건의

- 농업용 저수지의 수질개선이 요구되는지 여부를 판단할 수 있는 저수지의 생태계 조사(수질 및 생물자원), 특히 문제가 되는 탁수, 조류현존량 및 수질에 대한 지속적인 조사가 필요하다. 우리나라의 농업용 저수지는 규모가 작은 50만 m² 이하의 저수지는 환경부 수질측정망이나 정기조사 대상에서 제외되어 있으며 수질 및 생물조사는 전혀 이루어지지 않고 있다. 따라서 정부나 지자체에서 규모가 작은 농업용 저수지에 대해서도 수질 및 생태계의 정기적인 조사가 필요하며, 저수지의 규모보다 이용현황에 대한 자세한 검토가 요구된다.
- 본 대상저수지에 현재 서식하고 있는 생물 중에서 조류제어능을 갖는 유용생물을 선정하고자 시도하였으나 실현되지 않았다. 아울러 다양한 국내 토종을 선정하였으나 분포 지역이나 밀도가 큰 차이가 있어 원활한 생물자원 공급 및 대량화 연구가 반드시 필요하며 아울러 해당 생물의 서식처개발 등의 연구가 동반되어야 할 것이다.
- 생물을 이용한 수질개선, 이른바 생물조절(biomanipulation) 효과에 대한 논쟁은 여전히 계속되어 오고 있다. 특히, 패류와 같은 생물들은 섭식특성상 지속적인 유기물 배출로 인하여 수중의 영양물질 증가에 기여할 잠재성이 있기 때문에 오염수를 외부로 취수하여 생물학적 처리 후 다시 환원하려는 흐름형 유기물 제어(CROM, continuous removal of organic matters) 기술이 효과적일 수 있다. 이 기술의 성공여부를 가늠하는 가장 중요한 요소는 유용생물의 대량화, 관리 및 배출된 영양염의 제거 등이다. 따라서 효율적인 CROM 운영 및 영양염 제거를 위한 추가적인 연구가 필요하다.
- 저수지의 수질개선은 유입부하량의 감소, 호소내부의 부하량 감소, 호소생태계의 다양성회

복 등 다양한 방안이 검토되어야 하며 본 연구에서 제시된 기법들은 유효한 수생태계 다양성회복 방안 및 수질개선안 으로 제시될 수 있다. 그러나 수질개선사업 계획 수립시 이러한 기법은 수질개선효과의 정량화가 어려워 친환경 생태시설 등의 보조기법으로 사용되는 경향이 많으므로 생태계 다양성 회복기법의 효과 발현에 대한 장기성, 저수지 특성 등을 고려하여 보다 장기적인 안목에서 적극적인 적용이 요구되어진다.

- 농업용저수지에 남조류의 과다 번성을 저감시키기 위하여 생물조절(biomanipulation) 방법을 도입하였다. 유용생물 군집(새우류, 이매패류, 어류, 인공식물)에 따른 남조류 제거속도 및 효율성을 평가하기 위하여 ^{13}C , ^{15}N 추적자를 활용하였으며 더 나아가 수생태계 에너지 흐름 및 물질순환 속도를 파악하여 유용생물에 의한 남조류 제거기술에 대한 정량적인 정보를 제시하였다.
- 저수지내 부영양화와 남조류 증식의 원인은 외부로부터 유입된 영양염류에 의해서이다. 그러므로 부영양화 저감과 녹조제어는 해당 저수지의 영양염을 비롯한 유기물질의 동태에 대한 이해와 조사 분석이 선행되어야 하며 이를 기초로 하여 효과적인 저감기술의 개발과 적용이 뒤따라야 할 것이다.
- 생태공학적인 수질관리법은 호소 생태계에서 상위 섭식자들에 의한 조류제어를 통해 부영양화 및 조류 대번성을 해결을 위한 방법으로 시도 되어져왔다. 본 연구에서는 새우류와 이매패류 및 어류를 조합하여 투여함으로써 남조류 대량번식을 제어하는 방법론(top-down control)과 각 유용생물의 제거 효율을 파악하였고 나아가 실제 중형 소형 인공연못에서 현장에 적용될 수 있음을 밝혀내었다. 또한 인공식물들을 이용하여 영양물질을 제거하여 조류증식을 억제하는 bottom-up control에 의한 제거기작의 효율도 밝혀내었다. 본 연구 결과는 향후 농업용저수지의 남조류 대량 발생 제어를 위한 친환경적 생태공학 기법을 적용하는데 필요한 핵심 자료들을 제공함으로써 실제 해당 수역 생태계의 특성을 고려한 각 유용생물 선정 및 개체 수 결정에 크게 기여할 수 있다고 사료된다.
- 향후 본 연구 성과를 바탕으로 실제 현장에서 생태공학적인 기법에 의한 수질개선 효과를 평가하기 위해서는 유용생물 투여 후 보다 장기간의 모니터링을 통한 종합적 생태공학기법에 의한 수질개선 시스템을 개발하고 검증할 필요가 있다.
- 어류를 이용한 생물학적 조류제어기법은 가장 경제적이며 친환경적인 기술이나, 제한된 먹이로 인한 영양 결핍, 스트레스에 의한 섭식능력 저해, 먹이 연쇄와 같은 단계적인 에너지 전달현상을 기대하기 어려워 효과가 나타나지 못함으로 인해 연구가 활발히 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서도 마찬가지로 어류를 이용한 조류제어 방법이 수중 생태계의 급격한 혼란을 막고 현장에서 서식하는 소비자를 이용한다는 점에서 가장 이상적인 방법으로 논의되었으나, 녹조현상이 만연하는 부영양상태의 저수지에서는 어류조

절이라는 한 가지 방법으로는 효과를 기대하기 힘들다고 판단하였다. 따라서 어류 이외의 무척추동물, 식물, 패류 등의 다양한 생물을 이용한 복합적 생물 처리와 수중폭기·전자선 초음파에 의한 물리적 방법과 살조제를 이용하는 화학적인방법 등 다른 기술과 연계적인 적용을 통하여 효과를 기대하도록 하는 것이 가장 현실적인 방안이라고 판단된다.

- 어류의 top-down 조절실험에 의한 녹조(Chl-a) 및 남조류(blue green algae)의 제어 효과는 일부종에서 나타났지만 전반적으로 극히 미미한 것으로 나타났다. 그러나 filter feeder로 알려진 대형 무척추동물 줄새우(*Palaemon paucidens*)와 새뱅이(*Caridina denticulata*)는 실험실 내(Lab test) 뿐만 아니라 현장 적용 microcosm, mesocosm 실험을 통해서 탁월한 수질개선 효과를 보였다. 한편 동자개(*Pseudobagrus fulvidraco*)가 줄새우 및 새뱅이의 조류 제거 효과가 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- 신경회로망인 SOM을 이용하여 농업용저수지를 수질특성에 따라 유형을 크게 4개의 유형으로 구분하였다. NMS 등을 통한 생물군집 유형화에서는 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤은 명확한 계절성을 보였으며, 환경인자의 변이를 잘 반영해 주었다. Stella를 이용한 시스템다이내믹스 모델에 따르면 저수지 수면적 대한 인공식물섬의 피복율이 10% 이상일 때 수질개선 효과가 명확히 나타났다.
- 저수지 수질유형 분류는 저수지의 효율적인 관리에 활용될 수 있다. 특히, 농어촌공사 등에서 농업용 저수지 수질관리 프로그램 및 환경부에서 실시하는 호소수질관리 정책수립 등에 활용될 수 있다. 연구 결과에 따르면 농업용 저수지의 지리적 위치가 수질을 결정하는데 매우 중요하게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 저수지의 위치와 관련된 사항들, 즉 저수지 유역의 토지이용, 토지피복도 등과 관련된 추가 연구가 요구되며, 이에 대한 연구를 진행할 계획이다. 또한 방법론적으로는 SOM, MLP 등을 활용한 이러한 방법은 복잡하고 비선형적인 자료에 잘 적용될 수 있는 것으로, 비선형성을 많이 내포하고 있는 다양한 종류의 환경, 생태학적 자료를 분석 등에 매우 효율적으로 사용될 수 있다.

SUMMARY

I. Topic

Development of techniques for water quality management of agricultural reservoirs using biomanipulation (food chain)

II. Purpose and Background of the Study

According to the recent survey on the water quality network of agricultural water use, about 16% of study reservoirs exceed the agricultural water quality standard (Grade IV, COD). Particularly, deeply deteriorated reservoirs due to eutrophication reach about 9%, and with adding mesotrophic reservoirs, approximately 40% of the reservoirs are belonging to bad condition.

Water quality improvement techniques to control algal bloom problem in eutrophic reservoirs have mainly depended on physical and chemical approaches. Although, the effects of these methods are rapid and clear, they needs repetitive application due to the short term effect and expose some weakness such as secondary pollution form the by-products produced during application.

Biological techniques calling high attention recently are eco-friendly, exert little adverse effects, and are advantageous economically. However, there remains some limits to be solved, such as a lack of base techniques for field application. Related with this eco-friendly perspective, this study was performed to develop biomanipulation techniques for effective reservoir management.

III. Contents and Scope of the study

1. Development of water quality improvement techniques and useful organisms for biomanipulation in agricultural reservoirs

A. Objectives

- Evaluation of biological resources and habitat

- Survey on biological resource: Phytoplankton, zooplankton, bacteria, protists, macrophytes, fishes, macroinvertebrates
- Physico–chemical parameters in study reservoir
- Analyses of food chain structure and function
 - Investigation of food web components and energy flow
 - Development of useful organisms to apply water quality improvement
 - Selection of useful organisms and evaluation of their physio–ecological characteristics related to water quality improvement
- Evaluation of water quality improvement effects in laboratory and field condition
 - Evaluation of water quality improvement effects of useful organisms
 - Preparation of a protocol for selected useful organisms application

B. Synthesis of the results

- Understanding biological resources and habitat environment of the study reservoir
- Selection of useful organisms and understanding the physico–ecological characteristics
- Understanding water quality improvement effects of useful organisms
- Protocol for the application of useful organisms

C. Expected products

- Useful bioresources in agricultural reservoirs
- Patents, academic papers, and data for policy
- Techniques for water quality improvement
- Application protocol

2. Development of habitat for stimulating meiofauna activity and reproduction and evaluation of feasibility

A. Objectives

- Development and application of artificial habitat in lake and littoral zone
- Analyses of bioactivity within the habitats and water quality improvement effects
- Introduction of useful organisms

- Analyses of water quality and habitat environment

B. Synthesis

- Understanding components for increasing bioactivity
- Understanding effectiveness of bioresources
- Measuring effects of water quality improvement

C. Expected products

- Plan for habitat introduction and management
- Plan for making practicable of technique of habitat introduction
- Technique of model habitat development
- Patents, academic papers, and data for policy

3. Development of a strategy for water quality management using biomanipulation through energy flow and organic matter cycle of ecosystem study in agricultural reservoir

A. Objectives

- Evaluation of productivity of phyto- and zooplankton
- Analyses of C, N stable isotope ration for applied organisms
- Analysis of matter cycling and energy flow

B. Synthesis

- Understanding matter cycling and energy flow in reservoir ecosystem
- Understanding matter cycling and energy flow among applied organisms

C. Expected products

- Interpretation of energy flow and nutrients dynamics among applied organisms
- Monitoring data for matter cycling in reservoir ecosystem by application of useful organisms
- Data for ecosystem function and application in agricultural reservoir

- Academic papers and presentations

4. Development of water quality management technique in agricultural reservoir based on fish trophic structure analysis and top-down biomanipulation method

A. Objectives

- Analysis of seasonal changes of nutrients in Shin-hu Reservoir
- Evaluation of ecosystem health in Shin-gu Reservoir using LEHA fish model
- Analysis of limiting nutrients
- Experiments of algal control using biomanipulation method
- Evaluation of field application of biomanipulation method

B. Synthesis

- Water quality improvement effect using fish biomanipulation method
- Selection of fish bioindicator species
- Suitable fish density and its impact on algae
- Evaluation of reservoir ecosystem health using fish community

C. Expected products

- Fish fauna and indicator species in agricultural reservoir
- Evaluation technique for reservoir health
- Fish biomanipulation technique
- Academic papers and presentations

5. Development of ecosystem model for water quality management using bioinformation techniques in agricultural reservoir

A. Objectives

- Acquisition of water quality and bioresources
- Analysis of water quality data base

- Development of ecological model

B. Synthesis

- Establishing ecological data base of agricultural reservoirs
- Patterning organism structure in reservoirs using bioresources
- Understanding useful bioresources
- Deciding main reservoir types based on pollution characteristics

C. Expected products

- Prediction model and water quality pattern in agricultural reservoirs
- Model to evaluating habitat suitability
- academic papers and presentations

IV. Results and suggestions

1. Results of the study

A. Development of water quality improvement techniques and useful organisms for biomanipulation in agricultural reservoirs

(1) Environmental condition of reservoir ecosystem

- We investigated water quality parameters in Shin-gu reservoirs at monthly intervals from June 2006 to March 2008.
- Water temperature (2.5~30.4°C), DO saturation (58.8~212.8%), and EC (82~202 $\mu\text{S cm}^{-2}$) showed clear seasonality. And pH (7.6~9.9), Chl-*a* (26.5~277.4 $\mu\text{g L}^{-1}$), turbidity (4.7~143.0 NTU), SS (2.8~69.5 mg L^{-1}), Secchi depth (0.25~1.94 m), and COD (4.7~24.6 mg L^{-1}) were largely affected by monsoon climate and algal bloom.
- Nutrients concentration was affected by monsoon climate and algal bloom, and did not show clear seasonality. TN (0.9~4.2 mg L^{-1}) and $\text{NO}_3\text{-N}$ (0.0~1.5 mg L^{-1}) were high during Spring (April), while $\text{NH}_4\text{-N}$ (0.0~1.1 mg L^{-1}) was high during winter

(November). TP ($0.035\sim 195.9\ \mu\text{g L}^{-1}$), $\text{PO}_4\text{-P}$ ($0.008\sim 35.354\ \mu\text{g L}^{-1}$), and SiO_2 ($0.01\sim 6.97\ \mu\text{g L}^{-1}$) rapidly increased during heavy rainfall period (July~August) and also after monsoon (September~October).

- Fatty acid contents (16:0, 14:0, 18:3 ω 3, 18:1, 16:1, 18:2 ω 6) decreased with temperature decrease, but fraction of heterotrophic protozoa (20:4 ω 6) increased after rainfall. Fraction of diatom (16:1/16:0), dinoflagellates (22:6/20:5), *Microcystis aeruginosa* (18:3 ω 3) did not show significant relations with season and algal biomass.

(2) Investigation of useful organisms in agricultural reservoir

- Bacterial biomass ($1.8\times 10^6\sim 4.8\times 10^7\ \text{cells mL}^{-1}$, $243.3\sim 635.2\ \mu\text{gC L}^{-1}$) varied with season and among protozoa biomass ($5.0\times 10^3\sim 3.0\times 10^4\ \text{cells mL}^{-1}$, $283.4\sim 9,900.0\ \mu\text{gC L}^{-1}$), the size fraction of 2~20 μm showed the highest biomass.
- Phytoplankton density ($8.3\times 10^2\sim 2.5\times 10^7\ \text{cells mL}^{-1}$) was high in August, and dominant communities appeared in different times: chlorophytes in June, diatoms in December, cyanobacteria during the most of the year. During cyanobacterial bloom, *Microcystis aeruginosa* attributed to more than 60~99% of total biomass. Zooplankton density ($4\sim 8,900\ \text{ind. L}^{-1}$) was high during summer (June~August), and *Diurella stylata* and Nauplius were among dominant groups. *Keratella valga* dominated throughout study period.

(3) Food web structure and function in agricultural reservoir

- Heterotrophic nanoflagellates (HNF) and ciliate grazing on bacteria : Protozoan FR on bacteria was high during the summer, and ciliate community FR was higher than that of HNF. Both HNF and ciliate FR were high in July at the average of $0.48\ \mu\text{L cell}^{-1}\ \text{hr}^{-1}$ and $3.66\ \mu\text{L cell}^{-1}\ \text{hr}^{-1}$, respectively.
- Zooplankton (MACZ>200 μm , MICZ<200 μm) grazing on bacteria (B), phytoplankton (A) and protozoa (P): MICZ FR on B, A, and P during summer and winter period was MICZ \rightarrow B ($0.06, 0.02\ \text{mL}\ \mu\text{gdw}^{-1}\ \text{d}^{-1}$), MICZ \rightarrow P ($0.01, 0.09\ \text{mL}\ \mu\text{gdw}^{-1}\ \text{d}^{-1}$), and MICZ \rightarrow A ($0.01, 0.04\ \text{mL}\ \mu\text{gdw}^{-1}\ \text{d}^{-1}$), respectively. MACZ FR on B, A, and P during summer and winter period was MACZ \rightarrow B ($0.04, 0.07\ \text{mL}\ \mu\text{gdw}^{-1}\ \text{d}^{-1}$), MACZ \rightarrow P ($0.02, 0.09\ \text{mL}\ \mu\text{gdw}^{-1}\ \text{d}^{-1}$), and MACZ \rightarrow A ($0.10, 0.03\ \text{mL}\ \mu\text{gdw}^{-1}\ \text{d}^{-1}$), respectively. Zooplankton FR was high during winter period. MACZ was more important grazer on

phytoplankton than MICZ during the summer.

- C-flux from bacteria (B), protozoa (P), phytoplankton (A) to zooplankton: C-flux to MICZ during summer and winter was B→MICZ (2.95, 0.807 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$), P→MICZ (0.222, 0.192 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$), and A→MICZ (1.424, 0.876 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$), while C-flux to MACZ was B→MACZ (1.663, 0.379 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$), P→MACZ (1.823, 0.189 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$), and A→MACZ (3.900, 0.754 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$), respectively. Bacteria and protozoa C-flux to MICZ was greater than those to MACZ, however, Phytoplankton C-flux to MACZ during the summer was greater than that MICZ.
- C flow through MFW (Microbial Food Web) and AFW (Algal Food Web): Phytoplankton was most important C source to zooplankton. Main grazer of bacteria appeared to be protozoa. Relative importance of two food web varied with temperature, bacteria and phytoplankton density.

(4) Development of useful bioresources in agricultural reservoir

(a) Separation and maintenance of useful organisms

- Separation and cultivation of harmful algae
- Selection of fish and maintenance
- Collection of bivalves and maintenance
- Separation and cultivation of *Branchinella kugenumaensis*
- Collection and maintenance of *Caridina denticulata*
- Separation of cultivation of zooplankton
- Extraction of plant allelopathic compound

(b) Controlling effect of useful organisms on algae

① Zooplankton grazing on *Microcystis aeruginosa*

- *Daphnia magna* grazing characteristics on *Microcystis aeruginosa* were measured with applying toxic and non-toxic form, and zooplankton size (<1 mm, >2 mm) and density. During 24 hr experiment, *Daphnia* FR on non-toxic form showed 2.47 mL ind.⁻¹ h⁻¹ and FR on toxic form was 0.51 mL ind.⁻¹ h⁻¹. Grazing rate was more effective on non-toxic form, small-sized *Daphnia* was not effective both on toxic and non-toxic forms, and high *Daphnia* density application resulted in more evident effect.

② Grazing of *Daphnia*, *Macrobachium*, *Branchinella kugenumaensis* on single-celled and colonial *Microcystis*

- *Daphnia* effectively grazed single-celled *Microcystis*, while *Macrobachium* did not show significant grazing effect. *Daphnia* effectively grazed smaller than 50 μm colonies, while *Branchinella* effectively grazed larger colonies of 50~100 μm size.

③ Growth inhibition of plant extract on *Microcystis aeruginosa*

- Crude extract produced from rice hulls effectively inhibited the growth of *Microcystis aeruginosa* (NIER 298, UTEX 2388) even in low concentration (1 $\mu\text{g L}^{-1}$).

④ *Pseudorasbora* grazing on *Microcystis aeruginosa*

- *Pseudorasbora parva* grazing effect on *Microcystis aeruginosa* was measured in the different conditions under toxic and non-toxic algae, sediment addition and field mesocosm application. *Pseudorasbora* showed some grazing effect on non-toxic algae, and on the phytoplankton size of *Pseudorasbora* in the sediment addition treatment. However, during the experiment they disturbed sediment and resulted in the increase of turbidity and nutrients concentration.

⑤ *Cipangopaludina chinensis* grazing on *Microcystis aeruginosa*

- We measured the effects of *Cipangopaludina chinensis* grazing on *Microcystis aeruginosa* considering different *Microcystis* density and predator size. Individuals larger than 4.5 cm showed stable FR (about 1.35 $\text{L g}^{-1} \text{h}^{-1}$), while smaller individuals showed low FR. Regardless of the size, they showed the maximum FR after 7 hours, and thereby FR gradually decreased. *Cipangopaludina chinensis* grazing was the highest (0.897 $\text{L g}^{-1} \text{h}^{-1}$) in the low density of food (168.3 $\mu\text{g Chl-}a \text{ L}^{-1}$). Grazing effect did not increase in the density greater than 1.5 ind. L^{-1} .

⑥ *Unio douglasiae* grazing on algae in various conditions

- In the temperature treatment (5°C, 13°C, 25°C, 35°C), FR was the highest in 5°C. The grazing effect was considerable in 13°C and 25°C, but *Unio* died at the long-term exposure on 35°C.

- Depth (20, 50, 75 cm) effects of *Unio* was measured in the laboratory. Effect of algal grazing was highest at the depth of 20 cm. However, when applied to same dept in the field mesocosm, the grazing effect did not exert.
- Effect of DO concentrations (0.5, 4.5, 9.0 mg L⁻¹) on *Unio* grazing on algae was measured. Among applied DO concentrations, FR was the highest in 0.5 mg L⁻¹.
- Effect of predator density (1, 1/2, 1/4, 1/8 ind. L⁻¹) was measured. Among applied density, the highest FR appeared in the density of 1/2 ind. L⁻¹ and 1 ind. L⁻¹.
- *Unio* grazing effect also measured on diatoms during low temperature period, and higher FR appeared in lower diatom density. When applied to different phytoplankton composition in the same reservoir, *Unio* FR was higher during low temperature period when dominant phytoplankton were diatoms (*Synedra ulna*, *Stephanodiscus hantzschii*, *Diatoma vulgare*), compared to high temperature period when cyanobacteria (*Microcystis aeruginosa*, *Scenedesmus* spp.) dominated the phytolankton community, indicating food selectivity.
- When detecting the grazing process using stable isotopes (¹³C and ¹⁵N), ¹⁵N accumulation on the mussel tissue increased with time. Uptake rate appeared in the order of gut, gil, stomach, mantle, muscle. ¹³C absorption was higher than ¹⁵N, and accumulation rate in different organs was similar to that of ¹⁵N. Based on the absorption pattern alternating the increase and decrease of absorption rate, *Unio* seemed not to continuously feed on algae, but they seem to control feeding by excreting POM as faeces or pseudofaeces.

(5) Application of useful organisms to the field and evaluation of water quality improvement

(a) Effects of *Cipangopaludina chinensis*, *Unio douglasiae*, and *Daphnia magna*

- Analyzed were the effects of both single and mixed treatment of different predators in the field mesocosm prepared in a eutrophic lake causing frequent cyanobacterial bloom. In the case of single treatment of *Cipangopaludina chinensis*, pH, turbidity and Chl-*a* concentration clearly decreased in the early period, but Chl-*a* concentration increased toward the end of experiment. Single treatment of *Unio* showed higher grazing effect than the mixed treatment of *Unio*-*Cipangopaludina*. *Daphnia* treatment effect was relatively low compared to two treatments.

- Field application was tried in the large scale mesocosm (1.2×1.2×2.0 m) prepared in the eutrophic study reservoir (*Microcystis aeruginosa* greater than 95%) and the effects of single and mixed treatment of *Unio* and *Cipangopaludina* on water quality and algal composition. Grazing effect was highest in the early of experiment with mixed treatment, and DO concentration was markedly decreased with time and transparency (Secchi depth) also largely increased, from 0.4 m to 1.1 m. However, mortality of *Cipangopaludina* increased which subsequently increased ammonium ion concentration.

(b) Effects of AFI, *Unio douglasial*, *Caridina denticulata*, and *Pseudobagrus fulvidraco* on water quality improvement

- The effects of AFI (0.5 m² coconut fiber: 35% of surface water area), *Unio* (83 ind. m⁻²), *Caridina denticulata* (694 ind. m⁻²), *Pseudobagrus fulvidraco* (7 ind. m⁻²), *Caridina denticulata*–*Pseudobagrus fulvidraco* treatment on the water quality and biotic components were measured in the same mesocosm prepared in the study reservoir.
- The effect of water quality improvement (DO increase, pH decrease, Chl-*a* decrease) was shown in the treatment of AFI, followed by *Unio*, *Caridina denticulata*, and *Pseudobagrus fulvidraco*.
- The high density treatment of *Unio* (4 ind. m⁻²) with sediment addition showed marked decrease of both DO and pH. A little decrease of Chl-*a* was shown in most treatments in the early of the experiment, however, Chl-*a* rapidly increased after 6 days, resulting in the increase of TN and TP due to the death of predators.

(c) Field application of *Unio*

- The effects of water quality improvement using mixed application of useful bioresources, including AFI (10% of the pond surface area), *Unio* (42 ind. m⁻²), *Caridina denticulata* (30 ind. m⁻²), *Pseudobagrus fulvidraco* (0.24 inds. m⁻²), was conducted in the artificial pond (5x10x1 m, with sediment) in Seokmoon area. At the same time, stable isotopes (¹³C, ¹⁵N) were added to trace the passage and uptake rate of isotopes. During 20 day experiment, evident water quality improvement was detected (Chl-*a* decrease and transparency increase), however, nutrients increase was accompanied.
- Based on the fatty acid analysis, mostly chlorophytes decreased, and grazing activity

varied with time. *Unio* grazing was evident for 3 days, and digestion of algae by *Caridina denticulata* appeared after 9 days after experiment started. AFI effect was highest among applied candidates.

(d) Protocol for development and use of useful biological candidates

- In this study, we tried various biological methods for the water quality improvement in a eutrophic agricultural reservoir. Most of excellent biological candidates (bivalves) exerted water quality improvement, but at the same time they increased nutrients concentration through POM excretion.
- As an alternative to this problem, we introduced a CROM (Continuous Removal of Organic Matters) technique using bivalves selected in this study. This technique is not completed in this study. The essence of this technique is to circulate lake water through a CROM facility in which flow velocity and bivalve density are controlled, and finally filtered water is reintroduced to the lake. The facility equips a part to collect faeces and pseudofaeces produced by bivalved during the filtration, and those excreted material can be used as fertilizer. Basically, this technique is similar to membrane filtration method, but it uses living biofilters with high activity, and thus cleaning and maintenance duration is relatively longer.

B. Development of habitat for stimulating meiofauna activity and reproduction and evaluation of feasibility

- (1) Selection of materials for meiofauna habitat and investigation of water quality improvement effect of materials of Vegetated Artificial Floating Islands (VAFI)
- For selecting materials of meiofauna's habitat we tested several kinds of materials – VAFI with two mats for plant, VAFI's mat for plant and sand base matched with submerged macrophyte, sand, media line (50 cm long and 15 lines). We found out water quality improvement effect with decreasing Chl-*a*, increasing, transparency, etc.
- We investigated water quality improvement effect and algal growth inhibition by VAFI and the result was effective. VAFI's algae removal rate was 97.9% (shading effect 35.1%, complex reaction of meiofauna 61%, plant 1.8%).

- In the field test in pond with VAFI at Seokmoon water quality research center, water quality improvement effect of VAFI appeared to be COD 4.5%, T-N 12.1%, T-P 16.9%.
- We checked benthos in the pond's sediment with or without VAFI at Seokmoon water quality research center. In pond without VAFI, dominant benthos were foraminifera and nematoda but in pond with VAFI foraminifera, nematoda decreased while ostracoda was dominant
- B-glucosidase activity at Shingu reservoir was high in VAFI's lower part compared to adjacent area, but we found out high activity in adjacent area in pond with VAFI. Except for havy planted area, phosphatase's activity was high in outside part compared to the center of VAFI.

(2) Mesocosm test

- From the experiment whit the Vegetated Artificial Floating Islands including two plant mets (VAFI-DM) in the mesocosm, Cladocera showed an inverse relationship with phytoplankton.
- In order to decide the suitable size of VAFI-DM, we investigated the relationship between zooplankton and phytoplankton as well as water quality improvement effect in the mesocosm. The coverage factor about 8% was most appropriate.
- In mesocosm experiment with Floating littoral Artificial Waterweed (FAW), Floating Net Waterweed (FNW) and Submerged Vegetated Artificial Islands (SVAI), FAW and SVAI showed some control effect on phytoplankton.

(3) Field test (Shingu reservoir)

- In Shingu reservoir, we investigated the effect of VAFI-DM, VAFI with circulator (VAFI-C), SVAI (2 types), Littoral Settled Artificial Waterweed (LSAW, 2 types), FNW and FAW. We also analyzed the effect of arrangement method of VAFI-DM.
- After the 2 years test with VAFI-DM and VAFI-C, these facilities showed reduction effect on the eutrophication caused by blue-green algae and phytoplankton, and on the role of habitat for zooplankton

- The SVAI displayed the effect which maintaining zooplankton and was more effective for phytoplankton reduction compared to SVAI with media. But it is difficult to maintain plant alive.
- Among LSAWs, phytoplankton density was lower at the high density facility than low density facility and zooplankton density was reverse pattern.
- It was not able to confirm the effect of FNW about phytoplankton, but there were many *Bosmina* sp. which was known to controls the *Microcystis* sp. effectively
- At the FAW to solve the problem of burying by sediment and exosing bad view during water shortage periods due to the increase of phytoplankton we found the increase of zooplankton and decrease of phytoplankton. So FAW appeared to be a good habitat for zooplankton, especially *Bosmina longistris*.
- For the arrangement structural pattern of VAFI-DM we prepared two types of arrangements 1×4 and 2×2, and 1×4 had longer boundary surface length than 2×2 Longer boundary surface lengthy would offer more feeding area for zooplankton on phytoplankton.

(4) Investigation of zooplankton supplying ability by artificial wetland

- Several types artificial wetlands can be used as continuous suppling facilities for Cladocera and Copepoda. in continuous meiofauna suppling facilities it is effective to use mixed type of the various macrophyte vegetated wetland and non-vegetated wetland about 30~40 cm depth.

(5) Evaluation and selection of meiofauna habitat

- According to mesocosm test and field investigation, VAFI-DM, VAFI-C, LSAW (high density), FAW was selected as effective meiofauna habitat.

(6) Design and management

- Establishment and management plans were presented, for the facilities which were selected as effective meiofauna habitats, and also the maintenance plan was provided.

C. Development of a strategy for water quality management using biomanipulation through energy flow and organic matter cycle of ecosystem study in agricultural reservoir

(1) Energy pathway of aquatic food web in Shin-gu reservoir.

(a) primary production

- Primary productivity was determined through in situ incubation experiments using ^{13}C tracer method in Shingu reservoir in July (before the rainy season) and August (after the rainy season). In addition, production rates of particulate and dissolved fatty acids were determined with the same method. The average primary productivity was 3.5 in July and 6.9 $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ in August. The euphotic layer depth is three times deeper in August than July. Chl-*a* specific production rate was 30 in July and 42 $\mu\text{gC } \mu\text{g}^{-1} \text{d}^{-1}$ in August, implying that phytoplankton growth rate is higher in August. These results can account for higher primary productivity in August. As a result, turnover rate of organic carbon through photosynthesis was also faster in August.
- In addition, the relative contributions of saturated fatty acid (SAFA), monounsaturated fatty acid (MUFA) and polyunsaturated fatty acid (PUFA) to the production rate of total fatty acid was 43, 24, 33% in July and 54, 35, 11% in August, respectively. As the essential fatty acids, DHA and EPA production rates were 10.1, 28.7 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ in July, and 4.2, 48.2 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ in August, respectively. These results suggest that organic matter produced through phytoplankton photosynthesis should be higher food quality in August than in July. On the other hand, PUFA including EPA and DHA was not found in dissolved fatty acid pool, demonstrating complete depletion of essential fatty acids.

(2) The study of Secondary production by zooplankton

- In July, grazing rate of Copepodid varied with different size POM pools indicating 0.12 (<100), 0.06 (<63), 0.10 (<20 μm) $\mu\text{gC ind.}^{-1} \text{d}^{-1}$ respectively. Furthermore, it was various among three different zooplanktons, showing that Copepodid, Diaphanosomabrachyurum, Asplanchnabrightwelli was 0.08, 0.30, 0.07 $\mu\text{gC ind.}^{-1} \text{d}^{-1}$ with the POM pool (<100 μm), respectively. Production rate of particulate fatty acid through photosynthesis was 640 in July (11% of PP) and 722 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ (15% of PP) in August.

(3) Food web study

- Carbon and nitrogen stable isotope ratios of suspended particulate organic matter (POM), zooplankton (Copepodid, *Diaphanosoma brachyurum*), secondary consumer species (shrimp and fishes) were measured in Sin-gu reservoir during July and August 2006. POM were divided to the size of the 100 μm , 63 μm , 10 μm according to the depth. Zooplankton were sorted to species using microscope. The various fish species such as carp, mudfish, crucian carp, catfish, minnow, shrimp were collected by using net. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of the POM showed the average difference of 1‰ and 3‰, ranging from -25.1‰ to -26.1‰ and from 10.5‰ to 13.7‰ , respectively in July. Also, it has the average 5‰, showing from -23.2‰ to -27.5‰ and 6.9‰ to 12.0‰ , respectively in August. This is because $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of POM were largely influenced by allochthonous inflow from outside into reservoir after heavy rainfall. At 4.5 m water depth, other origin of POM existed substantially compared with POM in the upper waters of reservoir, considering $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values. *Diaphanosoma brachyurum* species mainly consumed the POM in the upper water column, but Copepodid species were mainly fed with POM in bottom water. *Cobitis lutheri*, *Cyprinus carpio* and *Silurus asotus* were the higher trophic levels in July in Shin-gu reservoir. It showed a small range of nitrogen isotope ratios from 19.1‰ to 21.2‰ . *Palaemon paucidens*, *Zacco platypus*, *Misgurnus anguillicaudatus*, *Misgurnus mizolepis*, *Rhynchocypris oxycephalus*, *Rhinogobius brunneus*, *Carassius atratus*, *Pseudorasbora parva* and *Pseudobagrus fulvidraco* were the similar and lower trophic levels in July. It showed a small range of nitrogen isotope ratios from 14.7‰ to 16.3‰ . *Hemiculter eigenmanni* and *Carassius auratus* were the higher trophic levels in August in Shin-gu reservoir. It showed a range of nitrogen isotope ratio from 16.9‰ to 17.5‰ . *Zacco platypus* and *Pseudorasbora parva* were the similar and lower trophic level in August. It showed similar nitrogen isotope ratios, ranging from 12.5‰ to 14.8‰ .
- Fish species composition was changed before and after rainy season but *Carassius auratus*, *Zacco platypus* and *Pseudorasbora parva* were found in July and in August. Carbon and nitrogen stable isotope values of *Carassius auratus* and *Pseudorasbora parva* showed lighter value in August rather than in July, but *Zacco platypus* showed almost same values according to seasonal change. Plant detritus significantly contributed to the POM pool in reservoir after rainy season, and it affected the food web of aquatic ecosystem. As a result, carbon and nitrogen stable isotope values in *Carassius auratus* and *Pseudorasbora parva* showed the lighter values after rainy season because plant detritus has relatively lighter isotope values as their diet. Also it

means that allochthonous rather than autochthonous origin after rainy season was more main food source.

(4) A study on controlling algal bloom using aquatic organisms – mesocosm experiment in Shin-gu reservoir

- Algal bloom is a serious problem to control water quality throughout the world lakes and reservoirs. To control massive algal bloom, many researches have been carried out. Biomanipulation is an example, and it has been increasingly used as a lake restoration technique.
- The changes of carbon–nitrogen pools and fatty acid composition were determined during mesocosm study in agricultural lake. *Microcystis* bloom occurred during the experiment and we added ^{13}C and ^{15}N tracer to understand a cycling of photosynthetic products. We examined the removal rates of *Microcystis aeruginosa* by aquatic organisms (plants: *Iris pseudoacorus*, bivalve: *Unio douglasiae*, shrimp: *Caridina denticulate* and fish: *Pseudobagrus fulvidrao*) in mesocosm experiments using stable isotope tracers (^{13}C , ^{15}N) for 9 times during 3 weeks (1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 14, 22 day) in October 2007. Chl-*a* concentrations in all mesocosms were reduced during the experiment periods. *Iris pseudoacorus* showed the maximum Chl-*a* decrease, and the second largest reduction of Chl-*a* concentration was occurred in the combination of *Caridina denticulate* and *Pseudobagrus fulvidrao*. Organic carbon and nitrogen contents in particle organic matter showed a similar trend to the Chl-*a* concentrations.
- Largest decrease of particulate organic matter (POM) concentration was observed in mesocosm 1 (M1), and relative concentration of EPA (essential fatty acid) was largely increased compared with control. The POM concentration was higher than control in M2, on account of *U. douglasiae*'s excretion. Fatty acid composition of POM, which was influenced by its excretion, was similar to control. It means that *U. douglasiae* didn't assimilate POM effectively after 6 days, and they had released POM, has a similar fatty acid composition to control. In M4 (*C. denticulate*+*P. fulvidrao*), the decrement of POM was larger than M3 (only *C. denticulate*), it was due to the effect of algal bloom control through food web.
- In M1, the largest decrease of particulate organic matter (POM) was observed and percentage of C16:1 and C20:5 ω 3 was largely increased with times. In M2, concentration and ^{13}C content of POM were higher than control during the study

period and particulate fatty acid composition was similar to control. It can be thought that *U. douglasiae* can't assimilate POM in their tissue and spitted from their stomach to water at the latter term. In M4, POM concentration was largely reduced and percentage of C20:5 ω 3 is higher compared to M3, it suggests that *P. fulvidraco* should affect the feeding rate of *C. denticulate* and particulate fatty acid composition during the experiment.

- Largest decrease of particulate organic matter (POM) concentration was observed in mesocosm 1 (M1), and relative concentration of EPA (essential fatty acid) was largely increased compared with control. Twice, POM concentration was higher than control in M2. It is considered effect of *U. douglasiae*'s excretion. Fatty acid composition of POM, include excretion, was similar to control. It means *U. douglasiae* didn't assimilate POM effectively after 6 days, and they had released POM, has a similar fatty acid composition to control, to aquatic system. In M4 (*C. denticulate*+*P. fulvidraco*), the decrement of POM was larger than M3(only *C. denticulate*), it shows the effect of algal bloom control through biomanipulation. Also, POC and PN concentrations in all mesocosms were influenced by decrease of water temperature at the end of experiment. as well as biomanipulation. *Iris pseudoacorus* was a useful plant to reduce cyanobacteria bloom. In M1, ¹³C labelled EPA concentration and 16:1/16:0 ratio were increased with time, suggesting that phytoplankton species was changed during the experiment. *U. douglasiae* was less effective organism in controlling massive cyanobacteria bloom. They released (or spitted) organic matter at 7 & 9 days, and the quality of these released organic matter was relatively poor to higher trophic level organisms. In M4 (treated with *C. denticulate* and *P. fulvidraco*), ¹³C labelled POM concentration was largely reduced and ARA, DHA and EPA concentrations were higher compared with only *C. denticulate* addition experiment. The present result shows the potential that food web biomanipulation using these organisms can be an effective tool to control large cyanobacteria bloom in freshwater ecosystem.
- ¹³C atom(%) in *Caridina denticulate* which was added by *Pseudobagrus fulvidrao* exhibit the maximum value, indicating active assimilation of *Microcystis aeruginosa*. ¹⁵N atom(%) in *Iris pseudoacorus* showed the maximum value, and it suggests that aquatic plants rapidly takes up the DIN, compared to *Microcystis aeruginosa*. *Caridina denticulate* and *Pseudobagrus fulvidrao* addition in mesocosm demonstrated higher removal efficiency rather than only *Unio douglasiae*. The large size of *Unio douglasiae* (longer than 15cm) have assimilated effectively, without any apparent releasing into the water.

- (5) Evaluation of removal rates of *Microcystis aeruginosa* through the biomanipulation – ^{13}C , ^{15}N tracers mesocosm experiments in Sukmoon wet land
- We examined the removal rates of *Microcystis aeruginosa* by aquatic organisms (plants: *Iris pseudoacorus*, bivalve: *Unio douglasiae*, *Anodonta woodiana*, *Anodonta arcaiformis* shrimp: *Caridina denticulate* and fish: *Pseudobagrus fulvidrao*) in mesocosm experiments using stable isotope tracers (^{13}C , ^{15}N) for 11 times during 3 weeks (1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 13, 16, 21 day) in October 2008. Chl-*a* concentrations in all mesocosms were reduced during the experiment periods, and also SPM and POM concentration showed a similar trend to Chl-*a* concentrations.
 - *Iris pseudoacorus* showed the maximum decrease of Chl-*a*, and the second largest reduction of Chl-*a* concentration was occurred through the combination of *Caridina denticulate* and *Pseudobagrus fulvidrao*. Organic carbon and nitrogen contents in particle organic matter showed a similar trend to Chl-*a* concentrations. POC, DOC, PON concentrations decreased after addition of aquatic organisms, but DIC concentration increased through the effect of microbial activity on decomposition of organic matter including POC and DOC. ^{13}C , ^{15}N atom(%) and production rate of POM were decreased during the experiment period. This result suggests that the growth of *Microcystis aeruginosa* should be restricted by biomanipulation.
 - ^{13}C and ^{15}N atom(%) in *Caridina denticulate* exhibit the maximum value, indicating active assimilation of *Microcystis aeruginosa*. *Anodonta arcaiformis* showed a second maximum value of ^{13}C and ^{15}N atom(%). ^{15}N atom(%) in *Iris pseudoacorus* showed the second maximum value, it suggests that aquatic plants rapidly takes up the DIN, compared to *Microcystis aeruginosa*.
 - In the present study, the removal efficiencies of useful aquatic organisms during the massive bloom of cyanobacteria were evaluated quantitatively using stable isotope tracers.

D. Development of water quality management technique in the agricultural reservoir based on fish trophic structure analysis and top-down biomanipulation method

(1) Seasonal Variation Trend Analysis of Nutrients in Shingu Reservoir

- In Shingu Reservoir, trophic state by total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP), based on long-term data, ranged between eutrophic and hypertrophic conditions,

according to Forsberg and Ryding (1980) and varied depending on seasons and years sampled.

- According to nutrient analysis, TN values were $> 1.0 \text{ mg L}^{-1}$, regardless of season and year and TP values varied in the range of $40\sim 120 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$. Concentrations of Chl-*a* were above $20 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ in all observations, except for one data. Mass ratios of TN:TP averaged 37 (range: 14~104), and the ratios were much greater than the mass ratio (7.2N:1P) of Redfield (1934) and the mass ratio of 17N:1P proposed by Forsberg and Ryding (1980)
- indicating a potential of P-limitation in the ambient waters. Previous studies of this Reservoir showed also P-limitation, but the limiting nutrients varied with seasons. Overall, trophic parameters indicated an eutrophic – hypereutrophic state.

(2) Ecological Health Assessment in Shingu Reservoir based on the LEHA Model

- Total 13 fishes species and 381 individuals were sampled during study period. The number of individuals and species during the study were showed mean 15~52 and 3~6 at each site. *Hemiculter eigenmanni* and *Carassius auratus* were each sampled 195 and 100 individuals during sampling period, and these was appeared to dominant species through the whole collected fishes
- Mean LEHA values ranged from 21 to 30, the overall ecosystem health in this Reservoir was judged as a “Fair–Poor” condition according to the criteria (Karr, 1981; An and Han, 2007). LEHA value of S2–S4 in the premonsoon season were lower than other season, these were underestimated cause by dry of water according to irrigation of the farmland at that time.
- LEHA value of S2–S4 at that time were all scored “10”. On the other hands, LEHA values of S1–S3 effected by the Reservoir character was lower than S4 effected by the valley stream flow, we thought that it was attributed to the eutrophication by the farmland near the locations..

(3) Nutrient Enrichment Bioassays(NEBs) for Determination of the Nutrient Limitation in Shingu Reservoir

- Nutrient enrichment experiments were conducted in July 2006 to identify which nutrient

regulates phytoplankton growth in the Reservoir. The cubitainers which spiked the P (T1) and 2P (T2) were decreased Chl-*a* concentrations from 42.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ and 38.6 $\mu\text{g L}^{-1}$ to 34.6 $\mu\text{g L}^{-1}$ and 26.3 $\mu\text{g L}^{-1}$ during experiment and the final concentrations was lowed than initial concentrations.

- The cubitainers which spiked the NO_3 (T3) and P+ NO_3 (T4) were increased considerably from 40 $\mu\text{g L}^{-1}$ and 39.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ to 98.4 $\mu\text{g L}^{-1}$ and 112.83 $\mu\text{g L}^{-1}$ and the final concentrations was maintained high level than initial concentrations. In the short-term experiment, nitrogen seemed to be a primary limiting nutrient during the periods of NEBs conducted.
- Ambient nutrient data of TP and TN showed a potential phosphorus limitation on phytoplankton growth, and previous nutrient stimulation tests showed variations of limiting nutrients by nitrogen or phosphorus depending on seasons and years. Our outcomes on primary limiting nutrient in the NEBs seems to be an seasonal effect rather than consistent results.

(4) Algal Removal Efficiency Experiment Based on Biomanipulation

(ㄱ) Biomanipulation Effects Using Fish

- We tested phytoplankton feeding efficiency of fishes during 6 days. At the result, all fishes used this test were not showed impressive feeding effect. Only *A. chinensis* and *R. ocellatus* were showed increase of Chl-*a* removal rate 13.1%, 4.2% during test period, but rests were not showed efficiency, at all. Also, removal rate of *A. chinensis* and *R. ocellatus* was not enough high to control algal bloom, particularly
- All treatments were looked like having a removal efficiency for the bluegreens. However, this result was not significant, because removal rate of control was increase to 31.6% during test period, also. Therefore, we judged that all fishes used in this test were not useful organism for the “Top-down biomanipulation” of Reservoir

(ㄴ) Biomanipulation Effects Using Macroinvertebrates

- Experiment (Exp-II) were showed a high feeding efficiency of the *P. paucidens* during experimental period. The tanks input 25 and 50 individuals were decreased from 96 and 99.5 $\mu\text{g L}^{-1}$ to 72.2 and 71.1 $\mu\text{g L}^{-1}$. And the removal rates were appeared to each 25 and 28% during this times

- High feeding efficiency was observed in the bluegreens. The bluegreens was greatly lowered from 6,048 and 6,539cells mL⁻¹ to 1,421 and 1,284cells mL⁻¹, and the removal rates were appeared to 76.5 and 80%. While the control was decreased removal rate both of Chl-*a* (-19.9%) and bluegreens (-1.6%) during test. Accordingly, feeding ability of *P. paucidens* was appeared more useful compared with all fishes used

(다) Biomanipulation Effects Using Top Predators

- The water tanks input the predator fish (*P. fulvidraco*) were showed lower feeding efficiency than the tanks that only input the macroinvertebrates (*P. paucidens*). Especially, the feeding effect for the Chl-*a* and bluegreens were considerably decreased in water tank input the predator fish. It seems that not only the effect by the direct predation but also a stress due to the predating by the fish make decrease of feeding efficiency by the macroinvertebrates.

(라) Field Application Evaluation Based on Biomanipulation

① Mesocosm Application in Shingu Reservoir

- According to the analysis result sorting by the size of Chl-*a* sampled in control and treatment respectively, it showed high removal rate over average 92% in two size groups as 2~20 μm and 20~50 μm. It also showed 77% and 88% removal rate in > 50 μm group and total Chlorophyll. While, feeding effects of top predator might not affect significantly in actual Reservoir.
- Removal rate of blue-green algae showed the low efficiency with only 5~8% so that *Caridina denticulata* could show more effective removal rate than blue-green algae during the experiment. So, algae feeding along with *Caridina denticulata* density may affect to this result. Consequently, optimal biomass per unit area was necessary to conduct further experiment.

② Field Application Based on Multiple Biomanipulation in Seokmun Complex.

- In case of dissolved oxygen, it was decreasing in association with the respiratory effects of *Unio douglasiae*, *Caridina denticulata*, and *Pseudobagrus fulvidraco*. Turbidity, whereas, was about 60 NTU at the start point but decreased about 25 NTU after 16 days at the endpoint so that it contributes to the improvement of water

quality. In addition, Chl-*a* was decreased from 40 $\mu\text{g L}^{-1}$ to 15 $\mu\text{g L}^{-1}$ and blue-green algae also decreased from 38,000 cell mgL^{-1} to max. 5000 cell mgL^{-1} . Multiple treatment such as the feeding effects and nutrition absorption of *Caridina denticulata* and *Unio douglasiae* along with artificial Floating Vegetated Island was affected to this result so that multiple application was more effective to evaluate algal removal efficiency than individual application.

E. Development of ecological models for agricultural reservoir water quality management using ecological informatics techniques

(1) Database of water quality and biological data

- This study aimed to develop a method to improve the water quality of agricultural reservoirs by controlling interactions among organisms as well as between organisms and their environmental factors. As the first step, we developed a database composed of water quality variables as well as community data of phytoplankton and zooplankton. Water quality data were obtained from the national reservoir water quality monitoring programme operated by the Ministry of Environment, Korea.

(2) Development of water quality patterns and prediction models

(a) Patterning water quality

- The trophic states of the reservoirs were classified into 5 groups based on Carlson's TSI (Chl-*a*). More than 60% of the studied reservoirs were eutrophic and hypereutrophic states, presenting that majority of the reservoirs in Korea are polluted based on the concentration of Chl-*a*. However, it consider only one variable, although water quality are influenced with many different factors. Therefore, we classified the reservoirs with six different water quality variables such as DO, COD, SS, TN, TP, Chl-*a* measured in August 2008 through the learning process of a self-organizing map(SOM), which is an unsupervised artificial neural network.
- The SOM results were accordingly visualized on the map. The SOM units were classified into four main clusters (I-IV). And main clusters were further divided to six subclusters at different levels. Cluster I (Ia and Ib) and cluster IV (IVa and IVb) divided two subclusters, respectively. Cluster IV was characterized by the most highly proportion of environmental variables with exception of SS. Especially, proportion of

DO were higher at cluster IVa, and IVb showing the highest proportion of Chl-*a* among 6 clusters. Meanwhile cluster I was identified by the lowest proportion of all environmental variables. Cluster Ib was more higher in Chl-*a* than cluster Ia. Meanwhile, cluster II and cluster III were presented by the intermediate contribution of environmental variables except SS in cluster III. SS showing the highest value in cluster III.

- Hydro-morphological factors and environmental indices of reservoirs were significantly different among cluster defined in the SOM map. TSI_{TP} and TSI_{CHL} were significantly higher in cluster IVb, while cluster Ia showed the lowest one. TN:TP ratio was significantly higher in cluster Ia. Meanwhile, Cluster Ia and Ib were significantly higher than other clusters exception with cluster IIIa in altitude. B_height was most significantly higher in cluster Ia, whereas B_length was most significantly lower in cluster Ia.

(b) Comparison of ordination methods

- Four different ordination techniques (PCA(principal component analysis), DCA(detrended correspondence analysis), NMS(nonmetric multidimensional scaling), and Isomap) were conducted to find water quality patterns of the Korean agricultural reservoirs concerning physical and chemical factors. Even though four ordination methods displayed similar ordination patterns, different methods showed different explanation power. Axes 1 and 2 of PCA explained 64.4% of the total variation. The first two axes of DCA were 0.061 and 0.029 of the eigen values, respectively. This value is too low to explain the characteristics of the raw data. In NMS, the stress of the first two axes was 13.4. Based on Kruskal's rules of thumb, the value is fair. The NMS result in this study was appropriate to be used. Significant level of Monte Carlo test was less than 0.01, representing that NMS result extracted stronger axes than expected by chance. Isomap defines residual variance to evaluate the error of dimensionality reduction. The residual variance decreases to be small enough, which indicates preferable reservation of the structure of original space. As the residual variances in the first two axes were 0.18 and 0.08, the ordination result reflected well the characteristics of raw data. In contrast to other ordination methods, the coordinates of variables such as variables scores in PCA could not be obtained. The variable scores are very efficient to evaluate their contribution in the ordination map. Therefore, this is a weakness of Isomap for the ordination of samples. Consequently, even though similar ordination results were displayed in the results of the four different ordination

methods, PCA and NMS was the most efficient to pattern reservoirs based on the explanation power. However, because different analyses have their own merits and demerits, various multivariate analyses can be used according to the objectives of the research to be solved.

(c) Patterning temporal changes of water quality

- In the previous section, we characterized the water quality of agricultural reservoirs in national scale, and related the patterns with geological, morphological factors, showing spatial distribution patterns. Here, we tried to characterize temporal changes of water quality in a agricultural reservoir. The water quality variables such as pH, COD, etc. were measured two times a month at Shingu reservoir in Boryung, Chungnam, from November 2002 to February 2004. The changes of water quality were patterned through the learning process of SOM based on the similarities of water quality variables, and four typical patterns were identified, reflecting the strong seasonality of water quality changes. Water quality in summer was more similar with that in autumn than other seasons. Concentrations of SS and COD were the lowest in winter, and those of POP and TP were low in spring and winter, and high in summer and autumn.

(d) Prediction of water quality

- Concentration of Chl-*a* was also predicted with multiple linear regression (MLR) and multilayer perceptron (MLP) of artificial neural networks. We used data obtained from water quality monitoring networks of reservoirs operated by the Ministry of Agriculture and Forestry and the Ministry of Environment of Korea. We used variables such as catchment area, altitude, circumference, storage, surface area, bank height, bank length, temperature, DO, BOD, COD, SS, TN, and TP. MLR model showed 0.81 ($r^2=0.64$) of correlation coefficient between predicted and observed values, and TP showed high contribution to the determination of Chl-*a* concentration. Meanwhile, MLP model showed relatively low predictability with 0.74 of correlation coefficient between predicted and observed values. Generally, however, it is known that MLP model is superior to MLR in the water quality prediction in general. Therefore, we tried to improve the predictability of MLP model by implementing particle swarm optimization (PSO). MLP-PSO (MLP with PSO for the optimization) was applied for the prediction of Chl-*a* with environment factors, and showed high predictability ($r=0.83$, $p<0.001$). Additionally, the sensitivity analysis of the MLP-PSO

model showed that COD had the strongest positive relations with the concentration of Chl-*a*, and TP had strong influence on the determination of Chl-*a* concentration, followed by TP, TN, DO, whereas altitude and bank height had negative effects on the concentration of Chl-*a*.

(3) Patterning community structures

(a) Patterning phytoplankton community structure

- We assessed succession in the phytoplankton community in different water depths of a hypertrophic reservoir. The study site was the Shingu Reservoir, a shallow hypertrophic agricultural reservoir located in Chungnam. Phytoplankton samples were collected biweekly from the bank near the deepest point in the reservoir from November 2002 to February 2004; samples were not collected between January and February 2003 due to thick ice cover on the reservoir. Samples were collected from three water depths (surface, middle and bottom layers) at 2 m intervals.
- The phytoplankton community in community composition in the surface layer was classified into four clusters (I~IV) based on similarity, and displayed clear seasonality. The MRPP showed significant differences among clusters ($A=0.137$, $p<0.001$). Samples in November 2002 were classified into cluster III, samples in spring 2003 were in cluster I, samples from June to October 2003 were in cluster II, and samples in winter (from 2003 to 2004) were in cluster IV. Some environmental variables, including temperature and TP, showed significant differences among clusters (K-W test, $p<0.05$), but others including SD, DO, COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and SRP did not. Temperature was significantly higher in cluster II than in other clusters, TP was significantly higher in cluster II than in clusters I and IV, TDP differed significantly between clusters I and III, and the TN:TP ratio differed significantly between clusters I and II (Dunn's test, $p<0.05$).
- A two-dimensional ordination of NMDS, obtained using the classification dataset, explained 69% of the variance (0.34 and 0.35 of the determination coefficients, r^2 , for axes 1 and 2, respectively) in the phytoplankton distance matrix of the surface layer. Overall, the ordination showed clear seasonal changes in the phytoplankton community. Using the NMDS analysis, species could be ordinated on the biplot based on their contribution to the community ordination, reflecting their occurrence at different times. The results were consistent with the IndVal analysis conducted to

evaluate indicative species for each cluster. Cluster I was represented by three species including *Selenastrum minutum* and *Aphanocapsa* sp., cluster II with two species (*Crucigenia rectangularis* and *Staurastrum astroideum*), cluster III with seven species including *Ankistrodesmus bibraianus* and *Nitzschia palea*, and cluster IV was with three species including *Chlamydomonas* sp.

- The phytoplankton community in the middle layer was classified into four clusters (1–4), and mostly showed seasonal variation. Although the classification was similar to that of the surface layer, the seasonality in the middle layer was weaker than in the surface layer, showing that samples in different seasons were grouped together in different clusters, particularly in cluster 3.
- A two-dimensional NMDS ordination explained around 65% of the variance in phytoplankton community structure in the middle layer (axis 1, $r^2=0.27$; axis 2, $r^2=0.48$). Samples in cluster 3 were more highly scattered than others, and the ordination of samples in time order was slightly mixed compared with that of the surface layer, although they showed seasonality.
- Based on the IndVal analysis, cluster 1 was characterized by 5 species including *Dictyosphaerium pulchellum* and *Tetraedron incus*, cluster 3 was characterized by 7 species including *Coelastrum longissima* and *Nitzschia palea*, and cluster 4 was characterized by 3 species including *Chlamydomonas* sp.
- Cluster analysis classified the phytoplankton communities in the bottom layer into four clusters (I–IV). The classification showed weak seasonality compared with those of the surface and middle layers. Temperature was highest in cluster II and lowest in cluster IV (Dunn's test, $p<0.05$), and TDP was significantly different between clusters II (highest value) and IV (lowest value) (Dunn's test, $p<0.05$).

(b) Zooplankton community

- Zooplankton community sampled at the same study site of the phytoplankton was analyzed through a multivariate analysis including a cluster analysis and nonmetric multidimensional scaling. Zooplankton showed higher cell density during the clean water period (May and June), especially the highest density in June. Among zooplankton groups, rotifer showed over the 60% among total cell density from April to November and during the winter in 2002. A total of 30 zooplankton species were

recorded during the study period. Number of species was the highest (16 species) in September, 2003, the lowest (4 species) in January and February, 2004. Meanwhile, species diversity and richness were the lowest from May to June and winter in 2004, but September was the highest one.

- Zooplankton community was classified into five clusters (I–V) by a cluster analysis, and they were also similarly ordinated in the NMS ordination, displaying seasonality by Monsoon climate. Samples in winter (from 2003 to 2004) were classified to cluster I, samples in spring (April and May) in 2003 were in cluster II, samples from July to September in 2003 were in cluster III, samples in fall (from November to December in 2003 and from October to November in 2004) were in cluster IV, and samples in late spring (May and June in 2003) were in cluster V. A two-dimensional NMS ordination explained around 65% of the variance in zooplankton community structure (axis 1; $r^2=0.49$, axis 2; $r^2=0.16$). Through the correlation coefficient analysis between environmental variables and NMS axes scores, NMS axes was significantly correlated with some environment variables (Pearson correlation, $p<0.05$). Temperature, phytoplankton density and cyanophyceae density were positively correlated to cluster III~V, whereas temperature was negatively correlated to cluster I. cluster II was positively correlated with DO.
- Changes of phytoplankton communities were strongly influenced with TP, and resulted in changes of zooplankton community.

(4) Habitat suitability assessment model

(a) Vegetated artificial floating island

- Phytoplankton community and zooplankton community sampled at different habitat types such as vegetated artificial floating island (VAFI), VAFI with aeration apparatus, VAFI with different density of vegetation, etc. Phytoplankton density decreased at VAFI with high density of vegetation, while zooplankton density increased. This indicated that VAFI has direct and indirect effects to control algal bloom. High density of vegetation was preferred in the installation of VAFI.
- We evaluated the effects of vegetated artificial floating islands at different years after installation of the islands. Data were collected at six reservoirs such as the Olympic park, Saeachim park, Solchan park, Haedoji park, Daechung, and Shingu reservoir. Dry weights of vegetation were the highest at two years after the installation of the

island.

(b) Structural dynamic models

- Structural dynamic models using Stella were developed to assess habitat suitability and management of water quality of agricultural reservoirs. In the models, we considered phytoplankton dynamics related with TP and temperature which are important environmental factors affecting growth of phytoplankton.
- To evaluate the capability of freshwater Bivalve and vegetated artificial floating island were considered. In the results, the control effect of VAFI on phytoplankton density was observed when at least 10% of the water surface of the reservoir was covered with VAFI. Considering grazing effects of freshwater Bivalve through the Stella model, the reduction of phytoplankton density was observed when at least 100,000 individuals were provided in the experimental Shingu reservoir. This is equivalent value with one individual per 3 m³.

(5) Management strategy of agricultural reservoir water quality

- We patterned the water quality of the agricultural reservoirs in national scale through the learning process of SOM, and related them with geological, morphological factors. The results showed that location (altitude) and bank height of reservoirs were the most important factors influencing on the water quality of reservoirs. Generally reservoirs at high altitude were good water quality, while reservoirs at low altitude were eutrophic. This reflected the differences of land cover at the catchment of the reservoirs. Reservoirs at high altitude had more forest area in their catchment, while reservoirs at low altitude were surrounded by various types of agricultural area providing amount of nutrients to reservoirs. In addition, altitude affects on the temperature of reservoirs, and, in turn, influence on the growth of phytoplankton. Therefore, reservoirs at low altitude area have more possibility to be eutrophic status than those at high altitude. Thus, different management strategies should be applied to the reservoirs based on their geological location.
- By considering biomanipulation of water quality in agricultural reservoirs, two approaches could be considered: control of algal bloom through the reduction of nutrients concentration, and the reduction of phytoplankton through the grazing. In the first case, nutrients such as P and N could be reduced with macrophytes in the

riparian area, suggesting development of riparian area and VAFI for macrophytes. These macrophytes have direct and indirect effects on the improvement of water quality, by absorbing nutrients and providing habitats for phytoplankton consumers. In the second case, phytoplankton consumers such as freshwater Bivalve could be provided in the reservoirs to reduce phytoplankton density algae.

2. Suggestions

- It is necessary to conduct regular monitoring on the ecological parameters for agricultural reservoirs, included in the “Water quality monitoring network” in addition to water quality parameters. Also the ecosystem monitoring should be expanded to national scale including small eutrophic reservoirs.
- This study tried to select biological candidates which dwell in the study reservoir, but it did not realize, due to resource limitation. Thus, we selected various native species from the broad range of aquatic ecosystems. However, due to large variation of their distribution and density, it is necessary to support additional research on the mass culture of useful species and development of their habitats.
- Reservoir water quality improvement should call various approaches, including reduction of pollutant loading from the watershed, reduction of internal loading, and restoration of ecosystem health. Techniques considered and developed in this study can provide alternative methods of restoration of biological diversity and improvement of water quality. However, these techniques causes some difficulties in quantifying the effects, and the significance of the biological approaches and techniques often are underestimated. Thus, the strengths of biological approaches such as long-term effect, eco-friendliness, and economic advantages should be emphasized and more positively considered in the policy perspective.
- Eutrophication and subsequent harmful algal blooms in agricultural reservoirs are mainly caused by excessive amount of nutrients loading. Thus, monitoring and analysis of nutrient and organic matter dynamics are prerequisites for the development of effective techniques and sound control and management of eutrophic reservoirs.
- Biological control on harmful algae using fishes is one of most economic and eco-friendly techniques, however, related researches are not active because of nutrients

deficit from limited food sources and disturbance of grazing ability caused by stresses. Our study expected fish biomanipulation as an ideal approaches in terms that it prevent rapid disturbance of ecosystem and it uses native species dwell within interested ecosystem. However, we confirmed that only one technique of fish manipulation in very eutrophic reservoirs with high degree of algal bloom would not bring about effective result. Therefore, it is necessary to consider multiple application of biomanipulation and physico-chemical techniques, and develop combining techniques based on the characteristics of reservoir and pollution.

- Despite some effects of the fish biomanipulation on the harmful algal bloom, neither is it effective nor promising for application. Instead, other candidate species, *Palaemon paucidens* and *Caridina denticulata* were very effective both in the laboratory and field application, suggesting further researches on them.

- In this study, we identified agricultural reservoirs into four patterns based on the water quality characteristics. Classification of biological communities using NMS and other related methods showed clear seasonality of phyto- and zooplankton, and it was reflected by environmental parameters. According to system dynamic model using Stella, coverage rate of at least 10% to reservoir surface area showed clear effect of water quality improvement.

- This kind of pattern classification is useful to effective management of agricultural reservoirs. Our results showed that geographical location of the reservoir was important in deciding water quality. Thus, location-related variables, such as land use pattern and land coverage, calls additional studies. In addition, techniques such as SOM and MLP appeared to be appropriate for complex and non-linear data.

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
Section 1 Purpose and background	4
1. Technical aspects	4
2. Economic and industrial aspects	6
3. Socio-cultural aspects	10
Chapter 2 Current status of technical development	11
Section 1 Current status and limits of related techniques	13
1. International status	13
2. Domestic status	14
3. Current status of related researches	16
4. Limits and improving aspects	18
Section 2 Future perspectives	19
1. Implementation strategies of research results	19
2. Expected products	20
Section 3 Justification of technique introduction	21
Chapter 3 Results of the study	23
Section 1 Development of water quality improvement techniques and useful organisms for biomanipulation in agricultural reservoirs	25
1. Investigation of useful bioresources in agricultural reservoir	27
2. Development of useful bioresources in agricultural reservoir	26
3. Application of useful organisms to the field and evaluation of water quality improvement	128
4. Protocol for development and use of useful biological candidates	6
Section 2 Development of habitat for increasing meiofauna and activity and evaluation of usability	181

1. Disturbance of ecosystem health and water quality	8
2. Case studies of habitat construction	16
3. Habitat development for meiofauna	10
4. Results of habitats application	16
5. Development and evaluation of habitats	33
6. Habitats construction and management	34
Section 3 Development of a strategy for water quality management using biomanipulation through energy flow and organic matter cycle of ecosystem study in agricultural reservoir	335
1. Energy pathway of aquatic foodweb in Shin-gu reservoir	3
2. A study on controlling algal bloom using aquatic organisms – mesocosm experiment in Shin-gu reservoir	6
3. Evaluation of removal rates of <i>Microcystis aeruginosa</i> through the biomanipulation – mesocosm experiments in Sukmoon wet land	3
Section 4 Development of water quality management technique in the agricultural reservoir based on fish trophic structure analysis and top-down biomanipulation method	417
1. Ecosystem status of study reservoir	4
2. Algal removal efficiency experiment based on biomanipulation	4
3. Field application of top-carnvores	6
Section 5 Development of ecological models for agricultural reservoir water quality management using ecological informatics techniques	477
1. Database of water quality and biological data	49
2. Development of water quality patterns and prediction models	9
3. Patterning community structures	37
4. Habitat suitability assessment model	51
5. Management strategy of agricultural reservoir water quality	51
Chapter 4 Level of purpose accomplishment and contribution to the related area	577
Section 1 Development of water quality improvement techniques and useful organisms for biomanipulation in agricultural reservoirs	579
1. Investigation of useful bioresources in agricultural reservoir	9

2. Development of useful bioresources in agricultural reservoir	579
3. Application of useful organisms to the field and evaluation of water quality improvement	579
4. Protocol for development and use of useful biological candidates	579
Section 2 Development of habitat for increasing meiofauna and activity and evaluation of usability	580
1. Development and evaluation of habitat using mesocosm	580
2. Field application and evaluation of meiofauna habitats	580
Section 3 Development of a strategy for water quality management using biomanipulation through energy flow and organic matter cycle of ecosystem study in agricultural reservoir	582
1. Energy pathway of aquatic foodweb in Shin-gu reservoir	582
2. Energy flow and matter cycling through mesocosms and field application	582
3. Analysis of application model by useful organisms and habitats	582
Section 4 Development of water quality management technique in the agricultural reservoir based on fish trophic structure analysis and top-down biomanipulation method	584
1. Study on the study reservoir ecosystem and fish feeding characteristics	584
2. Fish biomanipulation effects	584
3. Development and application of fish biomanipulation method	584
Section 5 Development of ecological models for agricultural reservoir water quality management using ecological informatics techniques	586
Chapter 5 Plan for substantiation of research results	587
Section 1 The necessity of further research	589
1. Master plan of reservoir water quality management	589
2. The necessity of further research	589
Section 2 Practical use of the results	591
1. Technical patents	591
2. Academic contribution	591

Section 3 Plan for substantiation in commercial business	598
1. Application area	598
2. Strategy of field application	600
3. Expectations	601
 Chapter 6 Scientific and technical information collected	 603
 Chapter 7 References	 611
 Appendices	 621

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	1
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성	4
1. 기술적 측면	4
2. 경제·산업적 측면	6
가. 경제적 중요성	6
나. 산업적 중요성	8
3. 사회, 문화적 측면	0
제 2 장 국내의 기술개발 현황	11
제 1 절 국내의 관련기술의 현황과 문제점	13
1. 관련기술의 세계적 수준	B
2. 국내수준	4
3. 국내외 연구 현황	6
4. 문제점 및 개선점	8
제 2 절 앞으로의 전망	19
1. 연구개발결과의 활용방안	9
2. 기대성과	20
가. 기술적 측면	20
나. 경제적·산업적 측면	20
제 3 절 기술도입의 타당성	21
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과	23
제 1 절 농업용 저수지 먹이연쇄 구조와 기능해석에 근거한 생물조절 유용생물 개발 및 수질개선 기법 연구	25
1. 농업용 저수지의 수질개선을 위한 유용생물 자원의 현황 조사	7
가. 농업용 저수지 생태계의 환경요인 조사	7
나. 농업용 저수지의 유용생물 자원 조사	44
다. 농업용 저수지 수중생태계 먹이연쇄의 구조 및 기능조사	54
2. 농업용 저수지의 유용생물의 자원의 개발	62
가. 유용생물의 분리 및 관리	62
나. 유용생물을 이용한 수질개선 효과 및 평가	70

3. 유용생물을 이용한 수질개선 기술의 현장 적용 및 평가	128
가. 유용생물에 의한 현장 mesocosm 수질 개선 효과 실험	128
나. 유용생물의 현장 mesocosm 적용 실험	133
다. 유용생물 현장(석문시험포) 적용 실험	147
4. 유용생물 자원의 개발 및 이용에 관한 protocol 작성	161
가. 연구배경 및 필요성	161
나. 연구범위와 내용	162
다. 유용생물을 이용한 농업용 저수지 수질개선 방법(안)	168
제 2 절 미소유용생물 증식과 활성증대를 위한 생물 서식처 개발 및 적용성 평가.....	181
1. 농업용 저수지의 생태다양성 훼손과 수질변화	183
가. 농업용 저수지의 생태다양성 훼손과 수질변화	183
나. 연구목적	184
2. 미소유용생물과 서식처조성 사례	186
가. 수질과 미소유용생물	186
나. 미소유용생물	186
다. 미소유용생물의 수질정화 기작 및 서식처	187
라. 생물서식처 조성사례	188
3. 미소유용생물 서식처 개발	190
가. 인공서식처 개발 모티브	190
나. 인공식물섬	191
다. 수변식생대 대체 수변 인공 수초대	195
4. 미소유용생물 서식처 적용시험 결과	196
가. 미소유용생물 서식처 구성재 선발 및 인공식물섬 구성재 수질개선효과 검토	196
나. 메소코즘 적용시험 결과	217
다. 신규저수지 적용시험 결과	251
라. 인공습지의 동물플랑크톤 공급 능력 검토	298
마. 인공식물섬의 경계면 길이 유효성 검토	306
5. 미소유용생물 서식처 평가 및 선발	313
가. 미소유용생물 서식처의 개발 필요성	313
나. 미소유용생물 서식처 개발 및 평가요소 도출	314
다. 미소유용생물 서식처 평가 결과	317
6. 미소유용생물 서식처 조성 및 유지관리	324
가. 이중식재기반 인공식물섬	324
나. 교반장치이용식물섬	327
다. 침수형 호안수초대	329
라. 부유형 호안수초대	330

마. 부유형 그물수초대	332
제 3 절 생물조절 수질개선 기법 개발을 위한 저수지 생태계 에너지 흐름 및 물질 순환 해석 연구	335
1. 신구저수지에서의 영양단계별 에너지 전달경로 조사	338
가. 현장조사 및 시료채취	338
나. 실험방법	339
2. 유용생물에 의한 남조류 제어효과 연구(신구저수지 메소코즘 실험)	366
가. 현장 실험	366
나. 결과 및 결론	374
다. 결과 및 결론	345
3. 생물조절(biomanipulation)에 의한 남조류 제어효과 평가(석문 인공연못 실험)	398
가. 현장 실험	398
나. 결과 및 결론	402
제 4 절 어류의 트로픽 구조분석 및 top-down 조절 기법을 이용한 농업용 저수지 수질관리 기법 개발	417
1. 대상 저수지 모델 시스템 생태계 현황	419
가. 신구저수지의 이화학적 수질 특성	419
나. LEHA 어류모델을 이용한 신구저수지의 생태건강도 평가	422
다. 생물조절 대상 후보 생물 지표종 선정	430
라. 신구저수지에서 식물플랑크톤에 의한 제한 영양염 분석	431
2. 생물을 이용한 실험적 조류제거 기법 평가	437
가. Chl-a 및 남조류 제거 효과를 위한 어류 조작 실험	437
나. 생물 조절 기법을 이용한 Chl-a 및 남조류 제거 효과	447
3. Top carnivore 투여에 의한 현장 적용 실험	440
가. 신구저수지 메소코즘에서 1차 현장 적용 실험	440
나. 신구저수지 메소코즘에서 2차 현장 적용 실험	463
다. 현장 적용 예비 실험	466
라. 석문단지 현장 적용 실험	474
제 5 절 생태정보학적 기법을 이용한 저수지 수질관리 생태모델 개발	477
1. 수질 및 생물자료의 생태정보화	479
가. 저수지 수질자료	479
나. 저수지 생물자료	481
다. 환경변화 모니터링	486

2. 저수지 수질특성 유형화 및 예측 모델 개발	489
가. 수질특성 유형화 연구 국내외 사례	489
나. 저수지 수질 자료 특성	491
다. 저수지 수질 특성 유형화 모델 방법	496
라. 전국 저수지 수질 특성 유형화 결과	505
마. 수질 특성 시간변동 유형화 결과	515
바. 저수지 수질 예측 모델 결과	517
3. 생물구조 유형화	527
가. 식물플랑크톤 군집 유형화	527
나. 식물플랑크톤 군집 자료 특성	527
다. 식물플랑크톤 군집 유형화	531
라. 동물성플랑크톤 군집 유형화	536
마. 식물 및 동물플랑크톤 상호작용	540
4. 생물서식지 적합성평가 모델 개발	541
가. 생물조절에 의한 저수지 수질관리	541
나. 식물플랑크톤 밀도 조절	542
다. 인공식물섬 처리효과	544
라. 인공식물섬 효율평가	553
마. 신규저수지 메소코즘 실험	554
바. 유용생물 발생예측 및 서식지 평가	557
사. 시스템다이나믹스 모델	562
아. 메소코즘 실험결과에 따른 식물플랑크톤 밀도조절 시뮬레이션	568
5. 농업용 저수지 관리전략	574

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 577

제 1 절 농업용 저수지 먹이연쇄 구조와 기능해석에 근거한 생물조절 유용생물

개발 및 수질개선 기법 연구 579

1. 농업용 저수지의 수질개선을 위한 유용생물 자원 현황 조사	579
2. 농업용 저수지의 유용생물의 자원의 개발	579
3. 유용생물을 이용한 수질개선 기술의 현장 적용 및 평가	579
4. 유용생물 자원의 개발 및 이용에 관한 protocol 작성	579

제 2 절 미소유용생물 증식과 활성증대를 위한 생물 서식처 개발 및 적용성 평가 580

1. 메소코즘을 이용한 서식처의 개발 및 평가	580
2. 미소유용생물 서식처 현장적용 평가	580

제 3 절 생물조절 수질개선 기법 개발을 위한 저수지 생태계 에너지 흐름 및 물질 순환 해석 연구	582
1. 대상 저수지 생태계의 에너지 흐름 및 물질 순환 규명	582
2. 현장 메소코즘 및 서식처에서의 유용생물에 의한 에너지 흐름 및 물질 순환 파악	582
3. 유용생물과 서식처 적용에 따른 생태계 에너지 흐름 및 적용 모델의 활용성 검토	582
제 4 절 어류의 트로픽 구조분석 및 top-down 조절 기법을 이용한 농업용 저수지 수질관리 기법 개발	584
1. 농업용 저수지의 현황 파악 및 어류의 섭식특성 파악	584
2. 어류의 생물조절 효과 파악	584
3. 생물조절 기법의 현장 적용 및 개발	585
제 5 절 생태정보학적 기법을 이용한 저수지 수질관리 생태모델 개발	586
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획	587
제 1 절 추가연구의 필요성	589
1. 저수지 수질관리를 위한 마스터플랜의 수립 필요	589
2. 추가연구의 필요성	589
제 2 절 연구결과의 활용	591
1. 기술 특허	591
2. 학술적 기여	591
가. 국제 논문	591
나. 국내 논문 발표	592
다. 국내 학술 발표	594
라. 국제 학술 발표	596
제 3 절 기업화 추진방안	598
1. 적용 분야	598
가. 수질개선사업	598
나. 생태복원사업	598
다. 관광 및 생태학습장	599
라. 농업용 저수지 수질개선	599
마. 오폐수 처리장 활용	599
바. 골프장, 공원 등 인공호수 적용	599
2. 현장적용방안	600
가. 이중식생기반 인공식물섬을 이용한 저수지 수질개선	600

나. 부유형 호안수초대 기술을 이용한 저수지 수질 개선	600
3. 기대효과	601
가. 기술적인 효과	601
나. 경제적인 효과	601
다. 사회적인 효과	601
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	603
제 1 절 어류 이용기법	605
제 2 절 동물플랑크톤 이용기법	608
제 3 절 패류 이용기법	609
제 4 절 인공서식처 조성기술	610
제 7 장 참고문헌	611
부 록	621
부록 1: 연구관련 특허출원	623
부록 2: 연구관련 논문게재 실적	633
부록 3: 연구진 회의 회의록	653
부록 4: 조사대상 저수지 생물자료	691
부록 5: 전국 농업용저수지 유형화를 위한 전국 농업용 저수지 목록	749
부록 6: 신규저수지 정기조사 결과	761

제 1 장 연구개발과제의 개요

- 제1절 연구개발의 목적 및 필요성
-
-
-
-

제 1 장 연구개발과제의 개요

우리나라의 농업용저수지(약 18,700개)는 숫(數)적인 측면에서는 정수시스템의 압도적인 부분(99% 이상)을 차지하나, 현실적인 여건상 대부분 제대로 관리를 받지 못하여 상당수가 부영양화 되고 있으며, 수질개선 노력이 절실히 요구되는 상황이다.

2004년 농업용수 수질측정망 조사결과에 따르면(농림부, 2004), 전체 조사대상 저수지(492개소)의 16.3%가 COD 기준 농업용수 수질기준인 IV등급을 초과하고 있다. 이미 부영양화로 인해 수질환경이 심각하게 악화된 저수지는 전체의 8.5%에 달하고 있으며 또한 중부영양화 상태의 저수지를 포함하면 전체의 40.4%가 부영양화단계에 접어들고 있다.

농업용 저수지의 부영양화는 생활하수를 포함한 점오염원과 농지 및 산림으로부터 유출되는 불특정 비점오염원의 유입에 따라 수계 내 영양물질 축적에 의해 조류가 대발생되는 현상이다. 이는 21세기 지구촌의 가장 큰 수환경 문제 중의 하나로서 산업혁명이후 급격한 인구집중과 도시화에 따른 용수의 수요급증이 주요 원인으로(Hargrave, 1991), 우리나라와 같이 중위도권에 위치한 대부분의 국가에서 공통적으로 발생하며, 여름철(성층기) 호소에서 높은 수온과 광량으로 인해 조류의 최고성장을 보이는 이른바 녹조현상(algal bloom)을 동반한다(Martin and Gonzalez, 1978; Carmichael, 1994).

녹조현상은 대개 남조류(cyanobacteria)와 규조류(diatom)가 주요 종이지만 지역에 따라 와편모조나 소형 cryptomonas 등 다양한 조류에 의해 발생하기도 한다(Brock, 1985; Hermansky *et al.*, 1990). 남조발생(cyanobacterial bloom)은 주로 *Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Oscillatoria* 등에 의해 주도되며 독성물질을 분비하여 수중 내 다른 수생생물, 동식물플랑크톤, 원생동물(DeMott *et al.*, 1991 Reinikainen, 1994), 어류(Penalzoza *et al.*, 1990; Wolk, 1973), 심지어 야생동물이나 가축에 치명적인 해를 주는 사례도 발생한다(Kiviranta *et al.*, 1991; Shirai, 1991).

지금까지 저수지의 녹조제어를 포함하는 수질관리 기술로서 여러 가지 방법들이 소개되었는데 (1) 물리적인 방법으로는 준설, 폭기, 차광막, 수초 및 부착조류 제거, 심층수 방류 (2) 화학적 방법으로는 응집부상분리, 제초제, 황산동 등이 개발되었다(Jeffries and Mills, 1990; Cooke and Welch, 1993). 이러한 방법들은 직접적이고 대체로 효과가 뚜렷하지만, 비용이 많이 들고 일시적이며(Reyssac and Pletikisic, 1990), 다른 생물에 대한 독성(Lee, 1980) 또는 화학물질에 의한 2차적인 환경오염과 같은 부정적 요소를 가지고 있다.

이러한 점에서 최근 세계적으로 부각되고 있는 생태친화적 방법의 도입은 매우 시기적절하다. 이미 미국, 유럽 및 일본을 포함하는 선진국에서는 물환경관리 정책의 핵심적인 부분이 “생태계의 건전성”의 확보, 그리고 “인간과 자연의 상생을 통한 지속가능한 순환형 사회의 구축”이라는 측면으로 자리 잡고 있으며, 우리나라에서도 국내 4대강 전역에 걸쳐 생태계의 건전성 확보와 복원을 앞으로의 물관리정책의 핵심이슈로 채택하였다(환경부, 2006). 또한 정부는 4대강 수계를 중심으로 비점오염관리 정책(3단계 계획: 2020년까지)을 수립 진행하고 있으며, 농업용수원으로 사용되고 있는 농업용저수지 및 담수호 역시 수질오염 총량관리제의 규제대상이 되어

유역의 비점오염물질 저감을 위한 노력을 해야 하는 시기이다. 이러한 국내외적인 물환경관리의 정책과 인식의 변화는 앞으로 우리나라의 농업용저수지도 생태계 본연의 위치를 회복하도록 유도할 것이며, 따라서 저수지 관리도 생태계의 총체적 기능(integrity: 온전성)의 회복을 요구하게 될 것으로 전망된다.

이제 농업용수의 수질개선은 용수이용 목적의 적합 여부는 물론이며, 4대강 물관리 대책 등 정부의 유역관리제도에도 부합해야 한다. 또한 농촌의 쾌적한 환경용수로 인식이 전환되고 있는 시점에서 이러한 요구에 적절히 그리고 적극적으로 대처할 때 농업용수원의 새로운 다원적 기능이 형성되고, 그 가치 역시 상승할 것이다. 그러므로 농업용저수지는 더 이상 농업용수원으로서의 기능만을 담당하지 않으며, 농촌과 도시민의 친수 휴식공간으로 삶의 질을 향상시킬 수 있는 웰빙의 공간이 되고 있으며, 건전한 생태환경과 수질환경 구현이 농촌정책의 중요 부분이 되어야 한다.

실제로 그 수와 국토 전역에 걸친 분포를 감안한다면 우리나라의 농업용저수지가 지닌 다원적 기능과 역할은 지대하지만, 그간 농업용저수지의 관리정책은 수요적 물관리 측면만을 강조한 나머지 그들이 가지는 생태계로서의 본연의 위치와 생물서식지로서의 기능을 간과해 온 것이 사실이다. 그러는 동안 저수지 생태계의 수질과 생태계 서비스 기능은 크게 악화되어 왔다.

호소생태계 내의 거동은 유역과 호소내부의 문제 뿐 만 아니라 다양한 오염원과 수계 내 생물들의 역학적인 관계까지를 포함하여 매우 복잡한 문제다. 따라서 어느 한 가지의 방법으로 당면문제를 해결하기는 불가능 하며(Cooke *et al.*, 1993), 이는 우리나라 농업용저수지의 관리에도 동일하게 적용된다.

저수지의 관리와 환경보전은 생태적인 관점에서 방향을 설정해야 한다. 즉, 수질오염은 인간에 의하여 생태계가 환경에 이상적(異常的)으로 반응하는 생태계 대사(metabolism)의 병리적인 문제로서 해석하고 생태계라는 '체제(system)'의 관점에서 해결책을 유도하도록 해야 한다. 이를 위해서는 생태계를 해석하고 자료를 활용하는 방법에 있어서도 보다 종합적, 다변량적인 방법이 요구된다.

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 기술적 측면

외국의 호수관리 사례나 국내에서 상수원으로 이용되는 대형 댐들에 대한 수질개선 및 관리기술의 개발은 상당히 진전되었으며(US EPA, 1990; NALMS, 2001), 또한 국내 농업용저수지 관리기법에 대해서도 그간 산발적이기는 하지만 연구와 기술개발(예, 농림부, 2005) 노력이 진행되어 왔다. 그러나 우리나라의 기후특성, 유역 및 오염원 특성, 현실적인 관리여건, 저수지의 특성 및 규모, 관리 재정적 여건 등 국내의 농업용저수지들이 가지고 있는 특성과 여건을 충분히 고려하여 실용화 할 수 있는 기법이나 기술들이 개발되지는 못한 실정이다.

여기에는 여러 가지 이유들이 있겠으나 농업용 저수지를 종합적인 생태계로 인식하는데 미흡하였고 또한 유역의 관리와 동시에 고려하지 못한 측면도 있었다. 또한 농업용 저수지의 유역특성과 저수지 내부의 특성을 충분히 이해하지 못한 상태에서 이미 개발된 기법이나 기술들을 그대로 접목하고자 한 데에도 문제가 있었다. 특히, 현실적인 관리재원의 문제로 인해 가능성 있는 기법이나 기술들이 충분히 지원되지 못하였다. 따라서 개발된 기법이나 기술의 경제성과 효율성의 문제는 앞으로 농업용 저수지 관리에서는 피할 수 없는 부분이며, 이러한 측면에서 생태공학 및 생물학적 기법을 이용한 기술의 개발이 크게 요구될 것이다.

기술적인 측면에서 농업용 저수지의 관리를 위해서는 많은 방법들을 활용할 수 있지만 저수지 오염이 가지는 현안문제를 우선적으로 해결하는 것이 올바른 방법일 것이다. 예를 들면, 우리나라 농업용 저수지는 외부로부터 영양염의 유입이 크고, 대부분 비점오염원에 의하며, 상당수가 축조된지 오래되어 바닥에 유기물 층이 축적되어 수심이 얕고 이로 인해 내부적인 오염부하가 큰 특성을 가지고 있다. 이러한 특성을 가진 저수지 관리를 위해서는 우선적으로 퇴적물을 처리하는 것이 일차적인 방안이다. 선행연구에서 진공흡입식 준설기법이 기존의 토목준설의 대안으로 연구 개발된 바 있다(농림부, 2005).

또한 어패류의 이용과 같은 생물학적 수질개선 기법개발이 시도된 바 있으나(농림부, 2003, 2005), 경제적인 측면에서 가장 현실성이 높은 기술은 관리 대상 저수지에 서식하고 있는 생물들 혹은 서식 가능한 생물들을 활용하는 것이며, 이것이 가장 친환경적일 것이다. 그러나 농업용 저수지의 생물자원을 이용하는 생물조절 기법이나 유용생물들을 위한 서식처를 개발하는 측면의 종합적 연구개발은 아직 수행된 바 없으며, 국내에서 생물학적 수질개선 기법개발 연구도 아직 초보적인 수준에 있다. 특히, 국내의 거의 모든 호소는 자연호가 아니고 댐이나 제방을 축조하여 만든 인공저수지이므로 이러한 저수지 특성을 이해하고 그에 맞는 효과적 처리 및 관리기술 개발이 필요하다.

그동안 적용되었던 기계적, 화학적인 수질개선 공법들은 고비용, 저효율, 한시적 효과 등의 문제점을 가지고 있으므로 이와 차별화된 저비용, 고효율, 효과지속성 기법의 개발이 필요하다 [표 1.1.1]. 오염된 수환경의 파괴된 생태고리를 연결함으로써 수질오염요인을 효과적으로 제어하는 생물조절기법은 선진국에서는 어느 정도 개발과 도입의 단계에 와 있으나 우리나라의 기후적 조건과 농업용저수지 여건에 맞지 않아 적정기법의 개발이 절실하다.

농업용저수지 수질관리와 조류발생 제어를 위한 생태친화적 방법의 기본적인 골격은 크게, (1) 유역에서의 생태적 복원과 관리 (2) 대상저수지의 이화학적 수질오염의 원인 및 Target 조류의 생태특성 및 거동 이해 (3) 대상조류를 직접 또는 간접적으로 제어하는 조류제어물질, 기능미생물 천적생물 및 유용생물의 분리 및 대량배양 기술개발 및 적용, 그리고 (4) 생물조절 기능이 탁월한 미소 혹은 유용생물들의 안정적인 서식처의 개발 및 적용 등을 포함할 수 있다.

본 연구는 이와 같은 생태친화적 관점에서 저수지의 효율적인 관리를 위한 생물조절의 기법개발을 목적으로 하며, 이를 달성하기 위해 저수지 생태계 생물자원의 파악과 먹이연쇄의 구조와 기능의 이해를 바탕으로 생물조절작용의 가능성이 높은, 유용생물들을 개발하고 이들의 안정적 성장과 증식을 위한 서식처를 개발·적용하는 연구를 수행하였다.

[표 1.1.1] 농업용 저수지에 적용가능한 수질관리 기법의 사례와 조건

처리방법	단기간 효과	장기간 효과	비용	조 건
준설	E	E	H	· 수심이 얇고 내부부하가 큰 저수지 · 준설토에 대한 후처리 방안이 수립되어야 함
수위 저하	G	F	L	· 수량이 유지가 용이하고, 수생식물의 피복도가 높아 수질에 문제가 되는 저수지
퇴적물 피복	E	F	H	· 내부부하가 큰 저수지 · 비용이 많이 들고 유지보수가 어려워 적용이 어려움
생물조절 (Biomani- pulation)	G-P	E	L	· 단독 적용보다는 다른 공법과의 연계적용시 효과 상승 · 생물서식처의 확보와 동시에 고려되어야 함 · 생태계 구조와 기능에 대한 사전조사가 선행되어야함 · 경제성이 높고 친환경적 · 물리·화학적 방법에 비해 효과 발현에 장시간 필요
생물 수확	E	F	H	· 비교적 소규모의 부영양하고 외부부하가 적은 저수지에 적용 가능함 · 수생생물의 경우에는 수질에 미치는 긍정적인 효과와 부정적인 효과에 대한 검토 후에 수확시기 등을 결정하여 적용 · 수확된 생물의 처리방법이 수립되어야 함
인 불활성화	E	F	L	· 내부부하가 큰 부영양 저수지에 적용가능 · 국내기후 여건상 적용이 어려움
유로 변경	E	F	H	· 외부부하가 크고, 유로거리가 짧은 저수지에 적용가능
희석	E	E	H	· 희석수로 사용가능한 수원이 인근에 위치한 경우에 적용가능
폭기	P	F	H	· 수심이 깊고 규모가 작은 저수지에 적용가능 · 심층폭기는 심층무산소층이 형성되고 내부부하가 큰 저수지에 적용가능 · 전층 폭기는 내부부하보다는 외부부하가 크고 수심이 깊은 저수지에 적용가능
응집 부상	E	P-G	H	· 부영양화와 녹조현상 정도가 심한 저수지에 적용가능 · 단기간에 큰 효과를 기대하는데 유리 · 효과지속성은 낮음
선택적 방류	E	E	H	· 내부부하가 큰 저수지에 적용 가능하며 도수관 설치가 용이한 저수지에 적용가능

(주) E=Excellent, F=Fair, G=Good, P=Poor, H=High, L=Low
(자료) 농림부(2005), 수정보완

2. 경제·산업적 측면

가. 경제적 중요성

생활수준의 향상과 함께 지금까지 방치되어 왔던 농업용 저수지의 수질문제는 수질악화로 인한 농업 피해, 저수지 하류의 수질 악화, 수질오염과 관련된 국민 보건의 문제, 국민 여가공간으로서의 저수지의 경제적 가치 등의 관점에서 매우 중대한 문제로 부상할 것으로 전망된다.

농업용 저수지에서의 부영양화와 녹조발생은 다량의 유기물의 재발생을 유도하여 궁극적으로 저수지내 심각한 수질오염을 야기한다. 이로 인해 농업용수로서의 가치를 크게 감소시킴으로써 농촌 경제에 막대한 영향을 끼치고 있다. 이러한 농업용 저수지의 녹조제어 및 부영양화 저감을 위해 다양한 기술들이 적용될 수 있지만 생물조절과 서식처의 도입은 저비용 고효율을 창출하며, 유지관리비의 효율성을 고려할 때 생물이용 조류 제어기법의 개발이 시급하다.

저수지의 수질개선과 관리기법은 매우 다양하며 외국의 다양한 사례를 보더라도 어느 한 가지의 기술만으로는 이를 해결하기는 불가능하므로 해당 저수지가 가지는 유역과 저수지의 특성을 충분히 감안하여 현안 문제에 대해 우선적으로 접근하되 최종적으로는 종합적(다원적) 측면으로 다루어야 한다(NALMS & US EPA, 2001). 이와 함께 해당 저수지환경에 대한 경제성과 효율성도 고려하여야 한다.

국내외적으로 지금까지 개발되어 적용하고 있는 저수지 수질관리 기법들은 대부분 물리·화학적 처리위주로 나타나고 있으며, 친환경적 측면과 경제성을 추구하는 생물학적 혹은 생물을 이용하는 기법들에 대한 연구개발은 이화학적 기법들에 비해 신속한 효과를 도모하기 어렵고 생물이라는 살아있는 유기체를 대상으로 하여 그 과정이 복잡하고 장기간을 소요하기 때문에 상대적으로 어려움과 제약이 따라왔다.

이러한 문제는 복잡한 생물·무생물적 요소들로 구성된 생태계로서의 저수지 환경을 전반적으로 다루기가 어렵다는 것이 가장 큰 원인이라고 볼 수 있다. 따라서 생물학적 기법을 이용하는 부분은 육수생태계로서 저수지 환경에 대한 전반적인 이해를 기반으로 하여야 한다.

특히, 생물조절기법에서 적용의 실패에 대한 가장 큰 원인은 대상 생물의 서식처는 간과하고 대상 생물만을 다루어 연구된 생물들이 현장에서 적응하는데 실패한 경우다. 실제로 서식처는 생물들의 생존과 발달에 가장 기본적인 요소이므로 안정적인 서식처가 확보되지 않는 한 유용 생물의 적용에는 한계가 있을 수 밖에 없다.

저수지의 관리기법 중에서 생물과 그들의 서식처를 이용하는 기법의 가장 큰 장점은 기존의 많은 물리·화학적 기법들에 비해 높은 경제성을 담보로 하고 있으며, 일단 정착되면 관리비용이 적을 뿐 만 아니라 친환경적으로 관리할 수 있다.

농업용 저수지의 다양한 이용성 증대에 따른 환경적 요구와 자연자원 중에서 생물다양성 확보의 대상으로서 중요성은 앞으로 농업용 저수지의 관리에 대한 정책적 인식을 변화시킬 것으로 전망된다. 따라서 농업이라는 산업적 현실을 감안할 때 경제적인 방법에 의한 기술적 요구도가 증가하게 될 것이다. 이러한 변화는 생물학적 기법을 이용한 농업용 저수지의 관리에 대한 당위성을 부여하여 생태적 기능을 극대화하도록 유도할 것으로 예상된다. 또 다른 중요한 일면은 농업용 저수지의 수질오염원은 주로 비점오염원이므로 지금까지 도시하수의 처리에 적용하였던 기법이나 기존의 호소관리 방안으로는 현실성을 찾기 어렵다.

생물조절을 이용한 기법의 중요성은 상기한 방안들의 대안으로서 또한 경제성과 친환경성을 동시에 도모할 수 있는데 찾을 수 있다. 기계적, 물리·화학적인 방법을 통해 저수지의 오염을 저감시키는 방법에 비해 생물을 이용하는 자연적 기법은 수질개선과 함께 생태계 복원을 통해 종의 다양성이 증가하고, 수려한 경관, 생태공원 등의 제공이 가능하여 다원적 목표를 달성하며 이를 포함하는 무형적 경제성이 매우 우수하다.

현재 국내 주요 호수나 하천생태계에 친환경적 녹조제어기술의 도입은 아주 미흡하고, 적용 사례가 거의 없기 때문에 본 기술이 안정화 단계에 이르면, 첨단 환경기술의 확보는 물론 고부가 가치의 산업기술로서 활용도가 매우 높다.

나. 산업적 중요성

농업용 저수지의 수질악화는 이를 사용하는 산업(즉, 농업)활동에 피해를 주게 된다. 기존의 저수지 가운데에는 수질이 악화되어 농업용수의 수질기준을 초과하는 곳이 많으며, 새로운 저수지를 건설하여 수자원을 확보하고자 할 때에도 수질의 악화가 우려되어 건설하지 못하는 예가 많다. 따라서 저수지의 수질을 개선하는 것은 새로운 수자원의 확보와 비슷한 경제적 가치를 가진다.

부영양 저수지의 녹조제어와 부영양화 저감을 위해 다양한 기술들이 적용될 수 있지만 농업 관련 산업의 특성상 저비용 고효율 방안이 모색될 필요성이 매우 크다. 농업지역의 수질문제는 저농도 고유량의 특성으로 나타나며, 이를 유발하는 오염원(비점오염원)의 저감은 비용이 많이 소요되어 산업적 실용화되는데 어려움이 겪고 있는 실정이다.

앞으로 저수지 물환경 관리에 대한 종합적인 여건과 정책의 변화가 대두될 것이 확실하므로 친환경적이고 경제적인 저수지 수질관리기법에 대한 요구도는 크게 증대할 것으로 전망된다. 농업용 저수지를 포함하는 농업지역의 수질관리 대상은 매우 광범위하고 많아 이에 대한 시장성은 큰 잠재성을 가지고 있다. 따라서 경제성과 친환경적인 기술의 개발은 산업적 측면에서 전망이 매우 높다.

○ 시장성

2005년부터 물부족 국가로서 이에 대응하기 위한 일환으로 담수량 확보를 위한 정책수립 발표된 바가 있다. 특히 각종 저수지 등의 담수호 2급수 유지정책 시행(2001. 1.)과 국내 물환경관리에 있어 생태계복원과 건강성의 확보정책의 시행에 따른 수질개선사업의 확대가 더욱 가속화할 것으로 전망되고 있다.

서비스산업의 성장률은 연평균 약 30%의 성장을 예측하고 있으며, 산업화가 가속됨으로써 그에 따른 수질환경은 더욱 악화될 것이며, 이에 대비한 관련기술의 개발이 시급한 것으로 판단된다. 한편 국내수요에 따라 장비도입에 대응한 외화절감 효과도 클 것으로 예상된다.

국내의 환경 산업 시장규모는 2003년 12조 5,000억 원에서 2004년도 13조 6,100억 원, 2010년에는 31조 7,550억 원에 달할 전망이다(삼성경제연구소, 2001). 2003년에서 2010년까지 시장성장률은 15.2%로 비교적 높을 것으로 추정되며 특히, 환경자원이용업의 시장성장률이 높고, 국내 환경기초시설의 투자가 어느 정도 마무리되어 감에 따라 환경복원 및 창조를 포함하는 환경서비스업의 증가율이 상대적으로 높아질 것으로 전망된다.

[표 1.1.2] 환경산업에 대한 기대치를 반영한 시장규모

구분	2000년	2001년	2002년	2003년
세계시장(억 \$)	404	482	561	654
국내시장(억 원)	1,313	1,565	1,822	2,124

(자료) 세계시장: 통계청 국제통계연감(1997) 참조. 국내시장: 환경부자료(1994) 참조

구분	2003년	2004년	2010년	연평균증가율
세계시장(억 \$)				
환경서비스업	3,050	3,180	4,180	4.6
환경자원이용업	1,700	1,810	2,600	6.3
환경설비업	1,510	1,590	2,070	4.6
합계	6,260	6,580	8,850	5.1
국내시장(억 원)				
환경서비스업	53,440	57,890	136,390	14.6
환경자원이용업	40,650	44,670	118,540	16.5
환경설비업	30,910	33,540	62,620	10.2
합계	125,000	136,100	317,550	14.2

(자료) 삼성경제연구소(2001), 무한한 가능성 환경산업

○ 적용성

각 수계별로 정확히 예측하기는 어려우나 국내의 하천은 약 3,600여 개소(건교부 통계), 댐, 저수지 등은 약 18,000여개소로 추산된다. 농업분야와 관련할 때 부영양 저수지가 전체 22%(농림부 2001), 이중 관리를 시급히 요하는 저수지가 20% 정도 된다고 가정 할 때 약 800여개 (18,000 × 22% × 20% = 792)의 저수지에 대해 우선 적용이 가능하며, 다른 수계들과 합하면 그 적용성은 더욱 클 것으로 예상된다.

국가 경제의 발달과 생활수준의 향상으로 농업 이외 부문과의 물수요 경쟁이 심화될 것으로 예상된다. 향후 새로운 대규모 댐 건설이 거의 불가능한 실정에서 새로운 용수수요를 전적으로 신규개발을 통해 대처하는 방안 대신, 농업용수의 보전 등의 다른 방법을 통하여 충족시킬 수 있는 방법이 대두될 것이다.

2001년 농업개방정책이 실시된 이후 장래의 수도생산은 위축될 수밖에 없고, 한편으로 외국산 쌀에 대한 경쟁력을 확보하기 위해서는 양질의 쌀을 생산해야 할 것이다. 따라서 농업용수의 수질개선은 장기적으로 우리나라 쌀 생산의 경쟁력을 확보하고 안정적인 국산미의 공급을 위해 매우 중요한 사안이기도 하다.

세계경제가 무한경쟁 체제인 WTO 체제로 돌입하게 됨에 따라 우리나라에서는 농촌지역의 생활여건을 개선하여 농업의 경쟁력을 높이는 정책을 추진하고 있고, 이를 위해서는 생활용수나 산업용수 등을 포함하는 농업용수의 수요가 필연적으로 증가할 것으로 전망된다.

농업용저수지는 농업활동에 따른 직접적인 부가가치 창출 외에도 양식이나 사람들의 친수공간으로 활용됨으로써 매우 큰 간접적 경제산업의 가치를 가진다. 그러나 이러한 간접적인 부

가가치는 충분한 수량과 깨끗한 수질이 유지될 때 극대화 될 수 있으므로, 수질의 악화는 결과적으로 농촌지역 주민의 소득 감소와 더불어 삶의 질을 저하시키게 된다.

3. 사회, 문화적 측면

최근 들어 생활수준의 향상과 더불어 국민들의 환경의식 강화는 환경을 이용하는 문제와 함께 보전에 대한 요구가 증대하여 친환경적인 정서가 비등하고 있다. 그러나 식량문제의 해결에 필요한 농업생산을 유지 관리하기 위해서는 현실적으로 농지에서 비료와 농약의 사용을 완전히 중단할 수 없는 만큼 농업용 배수의 수질개선은 주요한 사안이다. 오염원의 분포가 광대한 농촌유역의 용배수에 대한 처리와 관리가 매우 미흡한 현실을 감안할 때, 농업생산의 지속성과 환경보전의 양면성을 동시에 해결해야하는 농업문제는 앞으로 발전과 전망에 대한 상당한 부담을 가지고 있으므로 농촌유역 용배수의 수질개선에 대한 방안과 처리 대책이 시급히 마련되어야 한다.

지금까지의 기계적인 고도처리는 오염물질을 다른 형태로 이전하는 것에 불과한 반면, 생태계의 생물적 구성원에 의한 수질정화 방법은 2차적인 오염을 별로 유발하지 않으며 생태계의 물질순환 고리의 안전성을 유지시킨다는 점에서 크게 유리한 친환경적인 수질개선 방법이다. 혐오시설로 여겨지는 기계적 처리시설에 비해 자연정화시스템은 오히려 자연계의 생물상을 풍부하게 하고 심미적인 경관을 제공함으로써 사회적 측면에서도 유익하다. 또한 물질을 쓰고 버린 것을 모아서 버리는 일방향 개념인 기계적 환경문화로부터 버린 것을 자원으로 이용하여 생물상을 발달시키고 수거된 생물을 다시 자원으로 환원시키는 재순환의 환경문화로 전환하는 기반을 마련할 수 있다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 제1절 국내외 관련기술의 현황과 문제점
- 제2절 앞으로의 전망
- 제3절 기술도입의 타당성
-

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내외 관련기술의 현황과 문제점

1. 관련기술의 세계적 수준

저수지를 포함하는 호소생태계의 전반적인 수처리나 관리기술(특히, 공학적 처리부분)에 대한 세계적 수준은 이미 기업화단계와 기술의 안정화 단계로 들어섰다고 평가된다. 북미와 유럽 그리고 일본을 포함하는 선진국에서는 호소관리를 위해 다양한 기술들이 이미 기업화 혹은 상품화되어 보편적으로 적용되고 있다. 미국의 경우 환경청(EPA)과 관련 학회나 기관(North American Lake Management Society: NALMS; International Lakes Environment Committee: ILEC)에서 호소관리에 관한 가이드라인을 제시하고 있으며, 일반인들에게도 교육과 홍보가 상당히 일반화 되어있다(US EPA, 1990; ILEC, 1995; NALMS & US EPA, 2001).

자연정화방법을 기본적으로 이용하는 생태공학적 수질개선 기법은 아직도 다양한 방법들이 연구개발되는 과정에 있으나, 그 중에서 인공습지의 개발과 적용부분에서는 큰 성과를 거두어 왔다(예: Kadlec and Knight, 1996; Etnier and Guterstam, 1997). 국내에서도 인공습지 적용기술의 발전은 괄목할 만하여(농림부, 2004), 농업용수 수질개선을 위한 인공습지의 설계·관리의 가이드라인(농림부, 2004)을 제시하는 수준에 이르렀다.

그러나, 공학적 베이스의 처리기술에 비해 호소생태계를 대상으로 하는 생물학적 혹은 생물 조절의 기술들의 적용은 상대적으로 미흡하며, 또한 단편적인 측면으로 치우쳐 왔다. 생물조절 방법 중에서 상품화된 기술은 미생물이 포함된 액체 혹은 분말을 이용하여 유기물을 분해, 제거하는 방안이며, 그 외에 부착매질을 활용하는 기술 등에 불과하다.

어류 biomanipulation 이론은 1960년대 초 유럽에서 호소의 먹이연쇄에 있어 top-down 조절이라는 개념이 태동된 이후(Hrbacek *et al.*, 1961), 미국을 중심으로 1970년대 이후에 활발한 연구가 진행되었다(Sapiro, 1978). 먹이연쇄나 생물조절을 이용하는 방법은 어류의 경우 어류를 조절하여 top-down 효과를 창출하여 동물플랑크톤으로 하여금 조류를 제어하거나 또는 직접 조류를 섭식하는 어류를 도입하는 방법 등이 있다.

생태계와 먹이연쇄의 복잡성으로 인해 어류 생물조절의 방법은 일단 정착되면 장기적인 효과를 발휘하나 정착되기 까지 여러 가지 어려움이 있어 다른 기법들과의 연계 적용적 측면에서 활용되어 왔다. 그러나 생물조절은 광의의 측면에서 볼 때, 어류만을 포함하는 것이 아니라 생태계 먹이망 구성요소 전체를 대상으로 하므로 패류, 동물플랑크톤 및 미소생물들을 모두 포함한다. 따라서 어떠한 생물들의 특성을 파악하여 어떻게 활용하고 적용하는 것이 관건이다. 세계적 수준에서 생물조절을 호소 수질관리에 이용하는 사례는 주로 어류에 국한되어 왔을 뿐 다른 유용생물에 대한 기술적 접근은 공학적 기술에 비해 매우 미흡하다.

2. 국내수준

국내에서 연구 개발된 농업용저수지의 수질개선기법들은 오염물질 침강지, 준설 등을 이용한 물리적 기법, 화학적 응집제와 초미세기포를 이용한 가압부상방법, 폭기 등 기계적방법, 또는 응집처리, 인불활성화처리, 살조제처리 등 화학적 처리기법들이 개발되었거나 적용되는 수준에 있고 또한 생태공학 혹은 생물학적 처리기법으로는 인공습지, 인공식물섬, 미생물접촉제, 초어도입, 동물플랑크톤 배양지, 미생물배양제제(조절제) 등을 활용하는 수준에 있다.

국내의 생물조절 기법을 활용한 저수지 수질관리 분야의 경우는 외국에 비해 훨씬 열악하며, 그간 단편적으로 연구가 진행되어 온 수준이다. 다만 비점오염원의 제어를 위해 인공습지 등을 활용하는 기법은 국내에서도 상당한 수준에 이르러 외국에 비견할 만한 단계에 이르렀다고 평가된다(농림부, 2005).

농업용저수지의 수질개선을 위한 생물학적 처리기법으로 인공습지, 미생물접촉제의 개발 등이 대표적이며, 이와 관련된 연구는 많이 진행된 상태이나 생물 섭식 및 분해, 성장저해 등과 같은 생물간의 조절작용을 활용한 생물학적 처리기법의 연구는 상당히 부진한 상태이다. 특히, 초어, 동물플랑크톤, 미생물조절제 등의 처리기법은 현장적용시 안정적인 처리 효과의 입증되지 않고 있으며, 아직까지는 외부에서 다량 길러진 상태로 대규모 살포하여 처리하는 고비용의 비효율적 방법을 적용하고 있는 초보적 단계에 있다.

기존의 생물조절 미소생물을 이용한 생물학적 처리기법은 저수지환경에서 적용생물의 생존율이 낮아 반복 도입하는 단점을 가지고 있으므로 저수지 환경에 장기간 생존할 수 있도록 환경적응된 생물조절 미소생물의 개발을 위한 서식처도입 연구가 절대 필요하지만 현재까지 이와 관련된 연구는 전혀 없는 실정이다.

현재 생물조절 기법을 이용한 호소 수질개선에 대한 연구는 다소 진행되고 있으나 대부분이 호소 밖에서 다량 배양하여 고가의 비용으로 투여하는 방법이 위주이고, 생물조절기능을 가진 미소 생물의 서식지를 조성함으로써 저수지의 환경용량을 강화시키기 위한 연구는 아직 수행된 사례가 없다. 국내에서 생물조절을 이용한 연구사례가 전혀 없는 것은 아니나[표 2.1.1] 그 분야가 단편적이고 개별적으로 수행되어 왔기 때문에 종합적 측면에서 생물조절을 연구개발한 사례는 거의 없다.

지금까지 농업용저수지의 수질문제를 제대로 관리하지 못한 측면이 상수원을 위주로 관리하는 국내의 물환경정책과도 무관하지는 않으며 또한 농업용저수지를 관개용수의 공급원이라는 수요자 중심의 관리를 해온데도 문제가 있다. 그러나 국토 전역에 걸쳐 산재하는 농업용저수지의 역할은 지대하며 그 역할은 앞으로 이용자가 산업적(농업)분야를 넘어 다양하게 확대될 수밖에 없으며 또한 생태계적 측면을 필연적으로 포함하게 될 것이므로 매우 중요한 대상으로 다루어져야한다. 한편으로 저수지의 생태계는 매우 복잡하고 특히 비점오염원의 영향은 지속적이기 때문에 근본적이고 종합적인 이해가 선행되지 않고서는 관리가 어려울 수밖에 없다.

농업용저수지를 생태학적 측면을 이해하고 이를 수질개선에 활용하고자 하는 노력이 시도되고 있으나(농림부, 2005), 생물학적 측면을 종합적으로 이해하는 부분은 전례가 없었다. 또한,

생물 자체를 대상으로 할 뿐 만 아니라 생물들이 서식하는 안정된 서식처를 확보하는 측면의 연구는 더욱 큰 의미를 가지고 있다. 즉, 생물은 안정된 서식공간이 확보되어야만 이를 통해 성장과 활성을 발휘하게 되는 기본 생태학적 법칙을 고려해야만 한다.

최근에 수행되었거나 현재 수행되고 있는 (농업용)저수지의 수질관리에 대한 정부차원의 연구들을 [표 2.1.1]에 제시하였다. 여기에서 제시된 대부분의 선행 연구들이 생물조절을 이용하는 본 연구와 어느 정도 연관이 있는 것은 사실이나, 본 연구에서 추구하는 생물자체를 이용하거나 생물을 조절하는 방법과 더불어 유용한 생물들이 서식하는 공간(서식처)의 구조적 기능적 부분을 부여하는 종합적인 생물조절의 연구로는 차별성이 크다.

[표 2.1.1] 국내 관련 선행연구의 사례

연구수행 기관 및 지원기관	연구개발의 내용	연구개발성과의 활용현황
건국대 (농림부, 2005)	농업용 저수지의 녹조제어 기법개발 -어류의 남조류 섭식 및 농업용 저수지 적용에서의 가능성 -가압부상기술의 개선 및 농업용 저수지 적용 -농업용저수지에서의 인의 불활성화 기술 -농업용저수지 퇴적물의 환경친화적 흡입식준설기법의 개발 및 개선 -농업용 저수지의 유형분류에 따른 관리방안	-농업용 저수지 관리정책에 활용 -진공 흡입식 준설기술의 농업용 저수지 시범사업 및 사업화 -농업용저수지 외 타 수역에 응용 -교육 및 언론 홍보 -타 연구사업에 활용 -국내외 학회 및 학술지 발표 -특허 및 실용신안
농업기반 공사 (농림부, 2003)	농업용 저수지의 수질개선 시험연구 -자연정화 처리시스템(바이오파크) 연구 -농촌유역 비점오염원 관리모델 연구 -인공습지의 효율성 및 적용성	-자연친화적 비점오염 정화기술의 모델로 활용 -수생식물의 정화효과 -타 연구 및 사업에 활용 -인공습지 설계, 관리 지침 작성
건국대 (농림부, 2003)	부착조류시스템을 이용한 농촌유역 수질개선 기법개발 -부착조류의 성장특성 및 인제거 효과 -부착조류 수질개선 시스템 개발 -타기술과의 접목 및 연계방안	-부착조류 수질개선 시스템 특허 -인공습지와 부착조류 시그템 연계방안 개발 -타 연구사업 활용
고려대 (농림부, 2003)	농업환경오염복원기술개발 -토양오염 복원기술 -지표수 및 지하수오염 복원기술	-토양 및 지표수오염 복원기술 특허 및 국내외 연구발표 -토양오염 복원정책에 활용 -패류를 이용한 수질개선 기법개발 -타 연구사업에 활용 -교육 및 홍보
강원지역 환경기술 개발센터 (환경기술진흥원, 2004)	호소 및 저수지 연안대의 생태계 복원 -미생물 부착여재 및 자연친화적 소재를 이용한 홍만 수위 부분 토양복원 -인공식물섬, 인공어초, 토양미생물제 개발	-호소 및 저수지 연안대 절터면 복원기술 활용 -호소경사면복화장치 특허 -식물생장복원 미생물균제 특허
한국건설 기술연구원 (국토 해양부)	자연공생 호소실험사업 -호소설계인자 및 최적관리방안제시 -오염호소수질회복방안 및 관리방안 -퇴적토 적정처리방안	연구수행중 (2003. 03 ~ 2011. 12)

3. 국내의 연구 현황

생물을 이용하여 오염된 물을 정화하는 방법은 생태공학적(ecological engineering) 수질개선 기법의 범주에 속하며 여기에는 수생관속식물, 미생물, 조류(algae), 대형 동물플랑크톤, 어패류 등이 대상이 된다. 생물을 이용하여 수질을 개선하는 기술은 생물의 관점에서 본다면 오염된 물로부터 생물들이 영양물질을 흡수하여 성장하는 것이지만, 이용자의 관점에서 본다면 이들 생물의 최적 성장조건을 조절하고 관리함으로써 오염물질을 제거할 수 있으므로, 공학적 기술에 비하여 보다 경제적이고 장기적이며 친환경적 효과를 기대할 수 있다.

생물을 이용하는 수질개선 분야에서 부레옥잠, 갈대, 생이가래, 줄, 꽃창포, 부들, 미나리 등과 같은 다양한 수생관속식물들이 외국에서 뿐 만 아니라 최근 국내에서도 다양하게 연구되어 왔으며(변 등, 1985; 공 등 1996; 김 등 1991; 안과 공 1995; 농림부, 1999), 처리 환경과 식물의 종류에 따라 어느 정도의 수질개선 능력이 있음이 보고되었다.

연구 개발된 식물들은 인공습지나 인공식물섬에 도입되는 식물들로 활용되거나 기타 하천이나 저수지 수변부에서의 복원에 주로 활용되어 왔으나, 실제 다른 수생생물의 서식지와 다른 생물의 활성증대를 위한 역할을 현장에서 연구된 사례는 없다. 또한 식물의 타감작용(allelopathy)를 활용하는 조류제어 방법들이 국내에서 연구된 바 있으나(국립환경연구원, 1998) 실용화 수준까지는 이르지 못하고 있다.

인공습지는 국내외적으로 생물과 공학이 접목된 생태공학적 기법으로 가장 널리 연구개발된 부분으로서(예: Kadlec and Knight, 1996; Etnier and Guteratan, 1997), 그간 상당한 발전과 성과가 있었다. 특히 비점오염원을 다루는 기법으로 국내의 경우 농촌유역에서 활용하는 시범연구사업(농림부, 2003)과 연구(윤 등, 1997 1998)들이 진행 되었다. 특히 농림부(2004)에서는 농촌유역을 대상으로 하는 인공습지 설계관리에 대한 가이드라인을 제시하여 이 분야는 국내에서도 어느 정도 정착단계에 이르렀다고 평가할 수 있다.

부착매질과 생물군집의 수질정화에 관한 주요 연구로서는 부영양 하천에서의 생물막내 조류의 비율과 성장량 측정(Aizaki, 1978, 1979, 1980), 부착매질을 설치한 순환수로에서의 하천수 유기물 제거(Tachibana *et al.*, 1988; Okada *et al.*, 1984)가 수행된 바 있으며, 국내에서는 부착조류를 이용한 인제거 기법(농림부, 2003)에 대해 연구가 수행된 바 있다.

생물을 이용한 조류제어와 관련한 생물조절적 연구는 조류를 직접 섭식하거나 조류의 성장을 저해 혹은 조류를 치사시키는(천적생물) 등 수계 환경에서 각 생물군들이 가지는 특성을 이용하게 된다. 또한 먹이연쇄를 통한 Top-down 작용을 이용하여 간접적으로 다른 생물의 작용을 유도하는 방법을 이용할 수 있다.

조류제어를 위한 미생물학적 연구는 주로 미생물 먹이연쇄를 구성하는 생물들을 활용하는 연구들이 수행되어 왔다. 예를 들면, 녹조발생 원인 종인 *Stephanodiscus hantzschii*의 생물학적 제어와 관한 연구(김 등, 2004), 섬모충 및 박테리아를 이용한 *Microcystis aeruginosa* 제어와 관련한 연구(김 등, 2003), 세균에 의한 남조류 분해와 관련한 연구(김 등, 2003) 등이 있으나 이들의 실용성에 대해서는 아직 검증이 되지 않은 상태이다.

Virus나 bacteria 등을 조류의 천적생물로서 활용한 연구들이 수행되었다. 조류제어를 위한 생물(virus, bacteria, protozoa, fish 등)의 실험실 또는 mesocosm의 연구는 비교적 많은 편이지만 (Manage *et al.*, 2000; Imai *et al.*, 1993; 1995, Fukami *et al.*, 1991; Nagasaki, 1998; Fukushima *et al.*, 1999; Nielsen *et al.*, 2000; Xie *et al.*, 2000; Carpenter *et al.*, 2001; Takamura *et al.*, 1999; Takamatsu *et al.*, 1996; Noda *et al.*, 1993; Nygaard and Tobiesen, 1993), 현장에 적용한 사례는 극히 드물며, 그 원인은 생물체제의 적용으로 인한 생태계의 혼란이나 적절한 적용범위나 적용밀도 등의 기술적인 문제에서 찾을 수 있다. 지금까지 알려진 남조 분해세균으로 *Myxococcus* sp.(Wu and Kaiser, 1995, 1996, 1997), *Cellvibrio fulvus*(Granhall and Berg, 1972), *Streptomyces* sp.와 *Alcaligenes* sp. 등이 있으나, 국내 남조제어 세균에 대한 연구는 매우 빈약하다.

동물플랑크톤은 조류의 직접적인 섭식자이므로 먹이연쇄에서 포식자로서 직접적인 효과를 발휘함. 여과섭식의 특성을 가진 대형동물플랑크톤(특히, 물벼룩)의 섭식능력 및 효율, 섭식에 관여하는 환경 및 먹이 조건 등에 대한 연구는 먹이사슬 동태학적 연구에서 에너지 흐름적 측면에서 많은 외국 연구사례들이 있으나(예: Carpenter *et al.*, 2001; Hwang, 1995), 국내에서는 이 분야의 연구가 아직 미비한 상태이다.

어류의 생물조절을 이용한 조류제어 연구는 수생태계에서 먹이연쇄 영양단계간의 생물학적 작용의 중요성을 이론적으로 인식한 이후부터 수질개선에 응용하고자하는 시도들이 유럽과 미국을 중심으로 진행되어 그 역사가 상당히 오래되었다. 포식자 의존적인 조절기작 (Predator-dependent control) 즉, top-down 조절방법도 경우에 따라 중요한 조류생물량 조절인자로 작용할 수 있음이 보고되었다(Carpenter *et al.*, 1995).

특히, 유럽의 경우 1980년대 이후로 어류를 이용한 수질개선 및 녹조제어는 많은 연구들이 시도되었고 Enclosure 및 전 호소를 대상으로 하는 적용에서 상당한 수질개선 효과도 발표되어 왔다. 한편 다른 일부 연구들은 대상호소의 영양상태, 지리지형적 특성, 유역특성에 따라 그 효율성에 상당한 변이가 있음을 보고하였다. 어류의 top-down 조절기법 적용기술은 대상 호소의 육수학적인 특성을 고려할 때 수질개선어(유럽 붕어) 제거를 통한 *Microcystis*의 남조류 감소효과에 의해 수체의 투명도가 증가하여 수질개선효과를 보고한 바 있다(Rothhaupt, 1996). 유럽의 (네덜란드, 스페인, 핀란드, 스웨덴, 영국) 연구에서는 낮은 영양염 단계에서 식물성플랑크톤 생체량이 planktivorous fish에 의해 저감효과를 나타내는 연구가 보고된 바 있다.

어류조절 연구로 국내에서는 농업용저수지의 조류 제어를 위한 연구(농림부, 2005)가 시도된 바 있으나, 종합적 측면에서의 연구는 아직도 크게 미흡하다. 따라서 대상 저수지의 특성을 이해하고 그에 맞는 어종과 적절한 밀도를 조절하여야 하며 또한 다른 수질개선 기술도 병행되어 복합적인 시너지효과를 도모하는 것이 고려될 필요가 있다. 여과섭식성 이매패류는 여과능력이 탁월하므로(Gosling 2003; Hwang *et al.*, 2004) 이들을 수질개선에 응용하고자 하는 노력들이 유럽을 중심으로 연구되어 왔으며, 지역적으로 특이하고 다양한 이매패류의 응용은 상당한 잠재성을 가지고 있다. 유럽과 북미(특히, 오대호)에서는 담수산 이매패류인 얼룩말조개(zebra mussel)의 생리생태학적 연구(Nalepa and Schloesser, 1993)가 상당히 진행되었으며, 그 결과를 이용한 수질개선에의 응용적 측면도 시도되었다(Neumann and Jenner, 1992). 국내에서

는 재첩과 말조개 등에 대한 여과율의 연구(황 등, 2002)와 이를 수질개선에 활용하고자 하는 연구(농림부, 2003)들이 실내와 mesocosm 수준에서 수행된 바 있다. 국내에 서식하는 여러 가지 담수산 이매패류에 대한 기초 생태학적 연구는 어느 정도 결과를 축적하고 있으나 현장적용의 수준에는 이르지 못하고 있다. 앞으로 패류의 서식지 확보와 대상 패류의 효율극대화 등을 통한 현장적용에 대한 연구가 필요한 실정이다.

4. 문제점 및 개선점

농업용 저수지를 포함하는 정수시스템의 수질관리와 관련한 지금까지의 연구개발의 결과들은 [표 2.1.2]에서 정리한 바와 같이 몇 가지의 문제점을 안고 있다.

가장 큰 문제는 공학적 기술개발이 위주가 되어 생물을 이용하는 방법들이 종합적으로 시도되지 못한 점이고, 이와 관련하여 대상 수계의 생물자원과 생태계의 이해가 충분하지 못하여 적용성에 어려움을 도출하였고, 해당 기술 혹은 생물만을 대상으로 하여 생물서식공간에 대한 의미의 부여가 미흡하였다. 또한 단일과제 내에서 세부 분야들의 연계가 미흡하여 전체적인 연구성과의 효율적 활용이 저하되는 것도 문제점으로 대두되었다. 앞으로의 연구에서는 이러한 문제점들을 개선하고 보완하는데 역점을 두어야 한다.

[표 2.1.2] 국내 관련 선행연구의 현황과 문제점 및 앞으로 개선방향

관련 연구개발의 현황 및 문제점	연구개발의 개선방향
<ul style="list-style-type: none"> - 공학적 측면에 치우친 연구 - 저수지 생물자원을 충분히 고려하지 못함 - 대상 생물에 국한하여 단편적인 결과도출 - 현장적용성에 대한 연구의 미흡 - 생물서식지 연구와 연계의 미흡 - 저수지 생태계의 기능해석 미흡 - 종합적 연구와 고려의 미흡 	<ul style="list-style-type: none"> - 저수지의 생태적 기능의 강조 및 이해 - 저수지의 생물자원의 파악에 따른 현장 생물종의 활용 - 생물과 서식지의 관계를 동시에 고려 - 세부 분야들의 연계성 확보 및 종합화 - 농업용 저수지의 특성 이해

제 2 절 앞으로의 전망

1. 연구개발결과의 활용방안

본 연구에서 생물조절을 이용하는 농업용저수지의 수질기법의 개발을 통해 앞으로 농업용저수지 수질관리를 위한 정책적 자료로 활용가능할 뿐 만 아니라, 개발된 기법들을 활용한다면 상당한 경제적·산업적 기대효과를 도모할 수 있다.

앞으로 농업용저수지의 관리에 대한 정책은 농업용저수지가 보유하는 다원적 기능(농업용수 공급, 생태계서비스, 위락 및 경관의 이용성)을 추구하여야 하기 때문에, 본 연구의 종합적 결과는 이러한 다양한 측면에서 활용될 수 있는 기초자료와 정책적 방향을 제시하는데도 기여할 것이다.

한편, 본 연구에서 도출되는 결과는 농업용저수지의 생물자원과 저수지생태계 먹이연쇄의 구조와 기능을 파악케 하여 농업용저수지의 오염특성과 생태계를 보다 심도 있게 이해할 수 있도록 할 것으로 기대한다. 이를 통해 농업용저수지의 수질개선과 관리에 필요한 제반 기술들의 효과와 결과를 객관적으로 파악하는데 기여할 수 있을 것이다.

비선형적인 생태자료를 효율적으로 유형화하여 농업용저수지 수질 개선과 관리에 기여할 수 있으며, 현재까지 수질평가는 주로 단편적인 이화학적 지수에 의존하는데, 이를 수환경에 관여하는 생물-무생물의 제반 중요요인을 내재시켜 종합적으로 나타낼 수 있다. 또한 다면적이고 입체적으로 저수지 생태계를 표현함으로써 저수지 수질개선에 효율적으로 이용가능하다.

개발되는 기초적 결과와 방법론은 각 생물 분류군간의 유연관계를 효과적으로 유형화하고 예측하여, 이를 통해 먹이연쇄-생물조절을 통한 저수지 수질개선에 효과적으로 활용될 수 있다.

본 연구의 결과는 다음과 같은 측면에서 활용성을 도모할 수 있을 것으로 기대된다.

- 비점오염문제 등에 취약한 농촌의 수질관리 정책방향제시 및 자료 활용
- 농업용수 수질관리 및 녹조방지대책 등 수질개선 정책자료로 활용
- 농업용저수지의 생물조절기능의 강화로 저수지의 오염저항성 강화
- 국내 농업용저수지 특성에 맞는 선진 수질개선 기술개발로 사업활성화
- 수질개선분야 관련 연구와 산업에의 파급효과
- 생물조절을 이용한 수질개선 및 유지관리를 위한 지침서개발
- 농업용저수지의 수질 및 생태관리에 필요한 생태모델의 개발 및 활용
- 유용생물을 이용한 다양한 생물조절의 기법을 통한 농업용저수지의 수질관리에 활용
- 농업용저수지의 수질과 생태계를 심도 있게 이해하여 타 연구 및 사업에 활용
- 미래의 농업용저수지 관리 및 다원적 기능 활용을 위한 모델 제시
- 국내외 저명 학술지의 발표 및 교육 홍보자료로 활용(저수지 생물자원의 지표종화)

- 농업용 저수지 및 유입하천 생태계 건강성 평가기법의 개발
- 천적생물에 의거한 친환경적(생태공학적) 복원기술에 활용
- 농업용저수지 생태계의 지표생물 복원에 활용
- 농업용저수지의 생물자원자료를 생태정보학적으로 이용하여 생태계 관리전략 연구에 기여
- 소규모의 수계 및 대형인공호의 생태계 복원 및 보존관리기술에 응용
- 환경 산업체의 재료 및 환경기술제공

2. 기대성과

가. 기술적 측면

본 연구에서 기대되는 기술적 성과는, (1) 생물조절에 유용한 생물자원을 개발하고 이를 현장에 적용하는 측면, (2) 생물조절을 위한 유용생물들이 증식하고 활성을 도모할 수 있는 서식처의 개발 측면, (3) 농업용 저수지 생태계의 건강성 평가 및 수질관리 생태모델개발 측면을 포함하며, 세부적으로는 다음과 같은 성과를 포함한다.

- 농업용저수지의 생물조절 유용생물 확보기술 개발
- 농업용저수지의 생물조절 미소생물 서식처 조성방안 및 적용기술 개발
- 생물조절을 이용한 수질개선공법의 실용화 기술개발
- 생물조절을 이용한 수질개선 및 유지관리를 위한 지침서 개발
- 오염저항성을 가진 농업용저수지 수질관리 기법 개발
- 농업용 저수지 및 유입하천 생태계의 건강성 평가기법 기반기술 개발
- 농업용저수지 수질관리를 위한 생태모델 개발
- 기술의 검증을 통한 실용신안 및 특허 개발

나. 경제적·산업적 측면

농업용 저수지의 환경에 적합한 생물조절 유용생물의 개발과 적용기술의 수립은 경제적이며, 효과지속적인 신개념의 수질개선 방안으로써 연구개발을 통해서 도출된 지침서와 적용 기술들은 그 수요가 증대될 것으로 판단된다.

국내 수환경 특성에 대한 현장조사를 토대로 개발된 기술은 적용시에 필요한 가이드라인을 동시에 제시됨으로써 실용화가 가능하다. 농업용 저수지 수질개선에 대한 국가적 차원에서의 인식의 전환과 지원이 증가될 것으로 예측되는 바, 기술이전에 대한 요구가 증가해 산업화 또한 가능할 것이다.

환경시장 규모는 전세계적으로 1990년대에 비해 10배 이상 향상되고 있으며, 국내에서도 향후 15년 내에 수질개선을 위한 정부의 환경 투자 및 민간투자가 활발히 이루어질 전망 하에 있기 때문에 수환경 분야의 기술개발의 효과는 미래에 기하급수적으로 증가될 것으로 기대되며, 본 연구개발 결과를 통해 도출되는 생물조절 기술은 앞으로 시설의 설치와 관리비용적 측면에서 저수지를 관리하는데 경제적·산업적으로 매우 유리할 것으로 기대된다.

본 연구에서 도출되는 서식처의 확보기술은 상대적으로 설치비용이 저렴하며, 별도의 동력비 및 약품비가 들지 않아 유지관리비가 현저히 낮은 자연공법으로 수명이 길고 매우 경제적이다. 또한 수질개선과 함께 생태계 복원을 통해 종의 다양성이 증가하고 수려한 경관, 생태공원 등의 제공이 가능하여 경제적인 기대효과가 있다. 그밖에 국내 환경기술의 수출, 고부가가치의 로열티 확보할 수 있으며, 유용생물을 이용한 환경 산업기술 첨단화 유도 및 자체기술 개발로 국가 경제 경쟁력강화에 이바지 할 것이다.

향후 농업용저수지의 조사 및 관리를 위한 비용절감의 측면에서도 본 연구의 성과를 기대할 수 있다. 저수지 특성을 유형화 및 예측하는 모델을 개발함으로써 다양한 저수지에서 연속적, 지속적으로 모니터링하는 비용 절감하고, 서식처 적합성을 평가 모델을 활용하여 생태계 복원 시 서식처 설정을 위한 경제성 제고 가능하다. 또한 생태정보학, 생태공학적 기법은 생태복원 등에서 효율적으로 응용됨으로서 관련분야의 활성화를 유도할 수 있다.

제 3 절 기술도입의 타당성

농업용저수지와 같은 정체성 수역에서 생물조절을 통한 수질개선 기술은 현재 선진국의 기술을 상당히 못 미치는 것이 사실이다. 그러나 우리나라 수역에서 부영양화와 녹조문제의 심각성 그리고 앞으로의 발전성을 고려할 때 선진기술을 그대로 도입하여 이용하는 것은 경제적·산업적으로 여러 가지 불이익을 감수해야 할 것이다.

외국의 호수수질 개선연구는 거의 자연호를 대상으로 하고 있다. 자연호는 체류시간이 길기 때문에 외부로부터 유입되는 인부하량에 비해 호수 내 저질에서 재용출되는 내부부하량의 비중이 커지는 특성을 가진다. 그러나 우리나라의 농업용저수지는 체류시간이 짧고 외부유입 부하량이 큰 특성을 가진다. 그러므로 미국과 유럽의 자연호에서 사용하는 기술을 그대로 사용하면 육수학적환경의 차이로 인하여 효과가 크지 않을 것으로 예상된다.

그러므로 우리나라 저수지 생태계의 육수학적 특성에 적합한 기술을 개발하여야 한다.

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

- 제1절 농업용 저수지 먹이연쇄 구조와 기능해석에
● 근거한 생물조절 유용생물 개발 및 수질
● 개선 기법 연구
- 제2절 미소유용생물 증식과 활성증대를 위한 생물
● 서식처 개발 및 적용성 평가
- 제3절 생물조절 수질개선 기법 개발을 위한
● 저수지 생태계 에너지 흐름 및 물질 순환
● 해석 연구
- 제4절 어류의 트로픽 구조분석 및 top-down 조절
● 기법을 이용한 농업용 저수지 수질관리
● 기법 개발
- 제5절 생태정보학적 기법을 이용한 저수지 수질
● 관리 생태모델 개발

제 1 절

-
-
- 농업용 저수지 떡이연쇄 구조와 기능해석에
- 근거한 생물조절 유용생물 개발 및 수질개선
- 기법 연구
-

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

제 1 절 농업용 저수지 먹이연쇄 구조와 기능해석에 근거한 생물조절 유용생물 개발 및 수질개선 기법 연구

1. 농업용 저수지의 수질개선을 위한 유용생물 자원의 현황 조사

가. 농업용 저수지 생태계의 환경요인 조사

(1) 연구내용

현장 조사는 1차년도 13회 정기 조사에 이어 2차년도 2주 간격으로 정기조사(25회)를 실시하였고, 2008년 2월까지(6회) 총 44회 조사하였다.

현장 조사는 Multi-parameter water quality monitor(YSI 6600 Sonde)를 이용하여 수온, pH, 탁도, 전기전도도, 용존산소 및 포화도, 염분도를 측정하였고, 투명도판(secchi disk)을 이용하여 투명도를 측정하였다. 현장에서 Van Dorn 채수기를 이용하여 수심 1 m까지의 원수를 채수 하여, 3 L의 무균 채수병에 담아 실험실로 이동 후 Chl-*a* 농도와 수질분석에 이용하였다. Chl-*a* 농도는 원수를 2 µm 이하, 2~20 µm, 20~50 µm, 50 µm 이상으로 각각 size fraction하여 측정하였다. 수질 분석은 원수를 GF/F 필터에 200 mL 필터하여 SS를 측정하였고, 필터하지 않은 원수와 필터한 원수를 각각 200 mL bottle에 담아 COD, TN, NO₂-N, NO₃-N, NH₄-N, TP, PO₄-P, SiO₂의 수질 분석에 각각 사용하였다.

유용생물에 의한 남조류 섭식 여부는 안정동위원소(¹³C, ¹⁵N)를 이용한 추적자 실험과 함께 지방산 biomarker의 추적을 통해서 연구하였다. 이를 위해 2006년 3월부터 12월까지 9회의 소양호 양구대교 지점과 2006년 8월부터 2007년 2월까지 14회의 신규저수지 메소코즘 주변 지점의 원수를 샘플링하여 부유물 시료로부터 지방산을 분석하였다. 또한 한국생명공학연구원에 설치된 MIDI system을 이용하여 세균 기원의 지방산 분석도 병행하여 실시하였다. 이러한 결과를 식물플랑크톤 모니터링 자료와 함께 분석하여 문헌에 이미 알려진 지방산 biomarker를 검증하였다.

(가) 대상저수지 선정

본 연구의 연구대상 저수지는 농업용수를 공급하는 저수지로, 낚시를 포함하는 외부로부터 교란이 적은 곳을 선정하였다. 또한 조사지점 선정은 저수지 내 하천 및 오염원 영향, 수문학적

및 지형적 특성을 고려하여 선정하였다.

충남 홍성에 소재하는 “신구저수지”는 “농림부의 녹조제어 연구(2002~2005)”가 수행된 바 있어 적절한 후보지로 고려되었으며, 또한 충남 당진에 소재하는 “석문시협포”는 “담수호수질개선사업조사사업(2001~2010)”이 수행되며 주변 농지로부터 유입되는 농업용수 침강지로서 규모는 작지만 농업용저수지의 특징을 가지고 있었다. 대상 저수지의 최종적인 선정은 한국농어촌 연구원과 협의 하에 후보지를 물색한 후 현장 답사를 통하여 결정하였다.



[그림 3.1.1] 대상저수지 전경 및 현장 조사(A: 신구저수지, B: 플랑크톤조사)

(나) 조사항목

- 환경요인: 수문자료(강우, 체류시간, 유량), 수온, 투명도, DO, COD, 전기전도도, SS, pH, PO₄-P, TP, NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N, TN, SiO₂, Chl-*a*
- 생물요인: 박테리아, 식물플랑크톤, 원생동물, 동물플랑크톤, 어류, 저서성 대형무척추동물, 수생식물

(다) 조사방법

① 환경요인 조사

현장에서 측정하는 수질항목은 수온, pH, 전기전도도(EC), 투명도이며 각 항목들은 현장 수질측정기(YSI)로 측정 하였다. 수질요인분석에 필요한 시료는 각 지점의 표층에서 채수하여 7 L 폴리에틸렌 용기에 담아 냉장보관 후 실험실로 운반하였다.

DO, SS와 COD는 수질오염공정시험법(환경부, 1998)에 따라 측정하였고, 용존무기인(SRP)은 ascrobic acid법, 총인(TP)과 용존총인(TDP)는 persulfate 분해 후 용존무기인 측정방법으로 수행 하였다.

암모니아성질소(NH₃-N)와 아질산성질소(NO₂-N)는 각각 Phenate, Colorimetric을 이용하여 측정하였고, 질산성질소(NO₃-N)는 cadmium reduction법, 총인(TN)은 cadmium reduction법으로 측정하였다.

SiO₂는 Strickland and Parsons(1972)에 따라 측정하며, Chl-*a*는 시료를 GF/F 여과지로 여과하여 100% 메탄올을 이용하여 24시간 동안 냉암소에 보관하여 Chl-*a*를 추출한 후 흡광광도계를 이용하여 측정 하였다(Marker, 1972).

분석법은 기본적으로 수질오염 공정시험법(환경부, 1998)를 따랐으며, 필요시 미국 표준시험법(Standard Methods)(APHA, 1995)을 참고로 하였다. 강우량, 유량 및 체류시간은 선행연구물이나 각종 기관의 자료를 이용하였다(기상청, 2007).

② 생물요인 조사

㉠ 박테리아

Bacteria의 계수를 위해 5 L Van Dorn 채수기로 현장의 표층수(0.5 m 수심)를 채수한 후, 멸균된 250 mL 폴리에틸렌 채집병에 시료를 넣고, Glutaraldehyde 용액으로(최종농도 1%) 고정하여 실험실로 운반 하였다. 시료 일정량을 취해 DAPI(4',6-diamidino-2-phenylindole, Porter & Feig, 1980) 염색을 한 후, 형광현미경으로 계수 하였다. 계수와 생물량 환산은 Hwang and Heath(1997a)의 방법을 따랐다.

㉡ 미세편모류

Van Dorn 채수기로 현장의 표층수를 채수한 후, 박테리아와 같은 방법으로 고정 및 운반하였다. 시료를 일정량을 취해 Primulin(Caron, 1983) 염색방법을 통해, 형광현미경 하에서 검경하고, 생물량(탄소량) 환산을 위해 각 세포의 크기를 구하여 평균 체적을 구한 후, conversion factor(183 fgC m⁻³, Caron *et al.*, 1995)를 이용하여 계산하였다.

㉢ 식물플랑크톤

Van Dorn 채수기로 현장의 표층수를 채수한 후, Lugol 용액으로 고정 및 운반. 실험실에서 72시간 이상 침강시킨 후 시료의 조류 농도에 따라 2~5배 농축하였다. 농축한 시료는 잘 혼합한 후, Sedgwick-Rafter Counting Chamber에 시료 1 mL을 옮긴 후 10분 이상 침전시킨 다음 광학현미경 하에서 군체 또는 세포수를 계수하였다. 출현종의 동정은 규조류는 Cox(1996), 남조류는 Akiyama *et al.*(1981), 와편모조류는 Abé(1981) 등의 문헌을 참고하였다.

㉣ 섬모충

Van Dorn 채수기를 이용하여 채수하여 300 mL 폴리에틸렌 병에 담은 후, Bouin's solution으로 최종농도 2%로 고정하였다. 섬모충은 24시간 농축 후 QPS(quantitative protargol stain) 방법(Montagnes and Lynn, 1987)을 이용하여 영구 Preparat를 만들어 계수 및 동정하였다.

㉞ 동물플랑크톤

플랑크톤 네트(망목의 크기 64 μm)로 수직 예인한 시료를 포르말린(최종농도 4%)으로 고정 한 후 해부현미경 하에서 윤충류, 요각류, 지각류로 구분하여 동정 및 계수하였다. 출현종에 대한 가로, 세로 길이를 측정하여 평균값을 생물량 계산에 이용. 생물량 계산은 Hwang(1995)에 따랐다.

㉞ 어류

어류 채집은 미환경부의 정수생태계 평가 기법(Lake and Reservoir Bioassessment and Biocriteria) (U.S. EPA, 1998)에 기초를 두었으며, 국내 호소환경에 맞게 수정·적용한 방법(안과한, 2007)에 따랐다. 어류채집은 수심이 3~4 m 미만인 얇은 호소의 연안부(Littoral Zone)에서 실시하였으며, 수심이 얇은 수초 근처에서는 족대(Mesh size : 4 \times 4 mm), 호소 연안대의 개방된 구간에서는 투망(Mesh size : 5 \times 5 mm)을 이용하였다. 어류채집은 지점별로 50분간 실시하였으며, 채집구간은 저수지 규모를 감안하여 조사지점별로 50 m 구간 내에서 실시하였다. 각 지점에서 채집된 어류는 김과 박(2002), 김(1997)에 의거하여 동정하였다.

㉞ 패류

저수지의 연안대에서 직접 손이나, 패류채집용 Dredge를 이용하여 긁어서 채취하였다. 패류의 동정 및 밀도측정은 권 등(1993)을 따라 수행하였다.

㉞ 수생식물

수변부 수생식물은 전통적인 방형구 측정법(Krebs, 1999)을 따랐으며, 건중량은 전체 시료를 일정량으로 나누어 Oven(65 $^{\circ}\text{C}$, overnight)에서 건조한 후 무게를 측정하였다(APHA, 1995). 수생식물 조직내 탄소와 질소함량은 CHN analyzer를 이용하며 측정하였고, 인은 건조된 식물체를 일정량 마쇄한 후 persulfate로 분해한 후 TP의 측정법에 의거하여 분석하였다.

㉞ 지방산 분석

동물시료의 경우 지방산 함량의 정량을 위해 액체 질소나 드라이아이스 등을 이용하여 야외에서 시료를 실험실로 운반하고 식물 플랑크톤을 비롯한 seston의 경우, GF/C filter를 이용하여 여과한 후 여과지를 추출이 시작될 때까지 영하 80 $^{\circ}\text{C}$ 정도의 초저온 냉장고에서 보관하였다. 동결된 시료를 분석 전 동결 건조기를 이용하여 건조시킨 후 지방산 성분을 추출하였다.

37개의 혼합 지방산 표준물질과 해양성 지방산 표준물질(fatty acid methyl ester : FAME) (Supelco)을 n-hexane에 녹인 뒤 보유시간을 측정하여 지방산 동정에 사용하였다. 또한 시료에

따라 적정한 양의 21:0 지방산(1 mg mL^{-1})을 동결 건조된 여과지에 첨가하여 각 추출과정의 내부 표준물질로 이용하였다.

추출과 메틸화 과정은 Kattner and Fricke(1986)의 방법을 따랐고 PTV(Programmed Temperature Vaporizer) inlet이 장착된 Gas Chromatograph(HP 6890)에 의해 분석하였다. 내부 표준물질인 21:0의 peak 면적을 환산하여 각 지방산의 상대적인 양을 비교하여 정량화하였다. 분석되어진 각 시료의 지방산 양을 정리한 후, 주성분 분석(PCA, Principal components analysis) 등을 S-Plus 통계 패키지를 이용하여 해석하였다.



[그림 3.1.2] 지방산 분석과정

(2) 연구결과

(가) 환경 요인

수온은 여름철 최대 30.4°C 를 나타냈고, 겨울철로 가면서 점차 감소하여 1월에는 2.5°C 까지 낮아져 계절적인 특성을 나타냈다[그림 3.1.3].

전기전도도(EC)는 $82 \sim 202 \mu\text{S cm}^{-2}$ 의 변화를 나타냈으며, 1차년(2006년 6월~12월)도의 조사 결과($105 \sim 186 \mu\text{S cm}^{-2}$)에 비하여 2차년도(2007년) 변화의 폭이 크게 나타났다. 여름철에 높은 값을 나타낸 반면에, 겨울철에 낮은 값을 나타냈다.

염분도(Salinity)는 0.04~0.08%의 범위를 나타냈고, 정기 조사 시기에 따라 큰 차이를 나타내지 않았고, 2007, 2008년도의 조사 결과가 비슷한 경향을 나타냈다.

용존산소농도(DO)는 $4.7 \sim 19.0 \text{ mg L}^{-1}$ 의 농도를 나타냈고, 조류 bloom이 발생한 8~9월과 수온이 가장 낮은 겨울철(1~2월)에 높게 나타난 반면, 6~7월 조사에서 가장 낮은 농도를 나타냈다. 8~9월은 조류 bloom에 의한 높은 식물플랑크톤 밀도에 의한 것으로 판단된다.



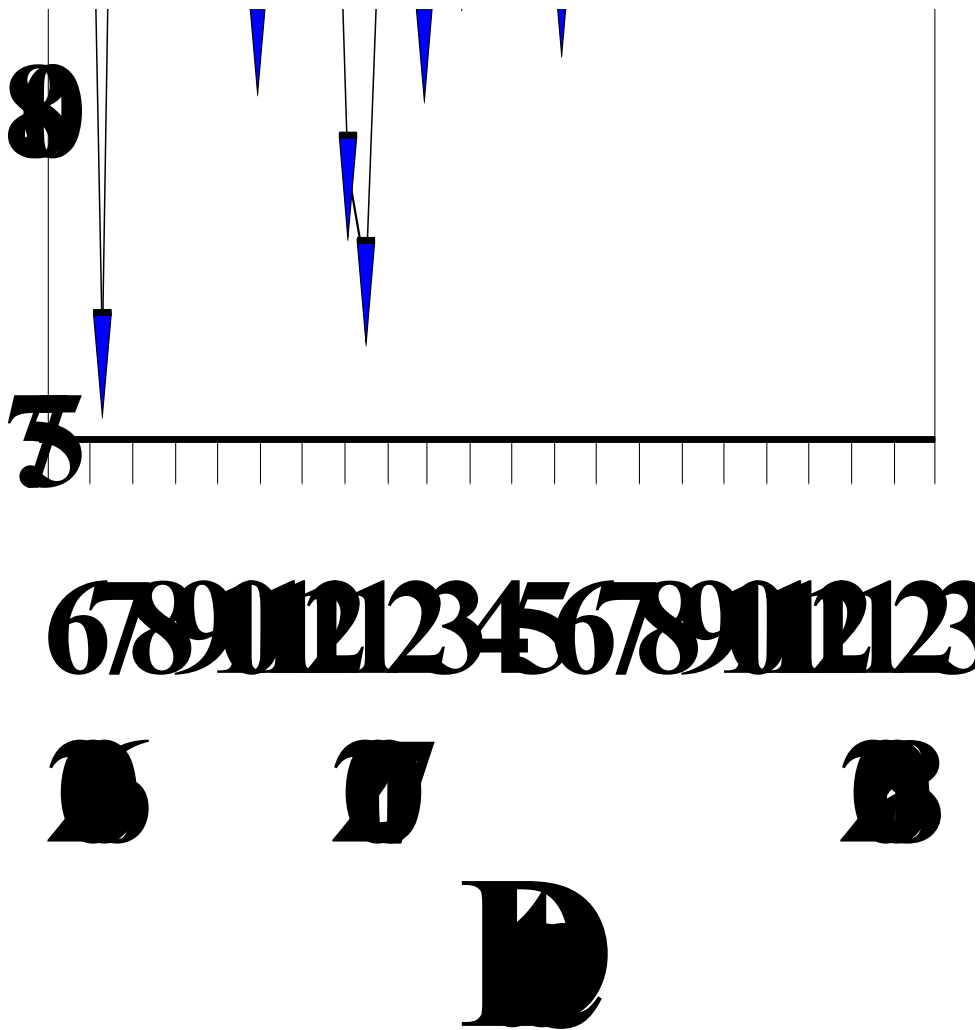
[그림 3.1.3] 신구저수지의 수온, 염분도, DO 농도의 연중 변화

투명도는 0.25~1.94 m의 범위를 나타냈으며, 수온이 가장 낮은 2007년 1월 조사에서 1.94 m로 가장 높게 나타났으며, 갈수기로 수심이 얇고, 조류의 bloom이 발생하기 시작한 2007년 7월에 0.25 m로 가장 낮은 수치를 나타냈다. 저수지의 투명도는 겨울철(1월~2월)을 외에는 낮았으

며(0.25~0.7 m), 2007년 1월(1.9 m), 2008년 1월(0.9 m)에는 가장 높았다[그림 3.1.4]. 이는 1차년도 1월의 평균 Chl-*a* 농도 $4.9 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 낮았던 반면에 2차년도 1월은 $27.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 5배 이상 높았기 때문으로 판단되며, Chl-*a* 농도와 음의 상관성을 나타냈다($r=-0.433$, $p<0.01$, $n=42$).

탁도(NTU)는 4.7~143.0의 범위를 나타냈으며, 7월에 높고 1월에 낮게 가장 낮게 나타났고, 투명도의 변화와 음의 상관성을 나타냈다($r=-0.386$, $p<0.05$, $n=42$).

pH는 연중 8.3~9.6의 범위를 나타냈고, 식물플랑크톤 농도가 높았던 여름철에 높게 나타났고, 식물플랑크톤 농도가 감소함에 따라 같이 감소하는 경향을 나타냈다($r=0.432$, $p<0.01$, $n=42$).

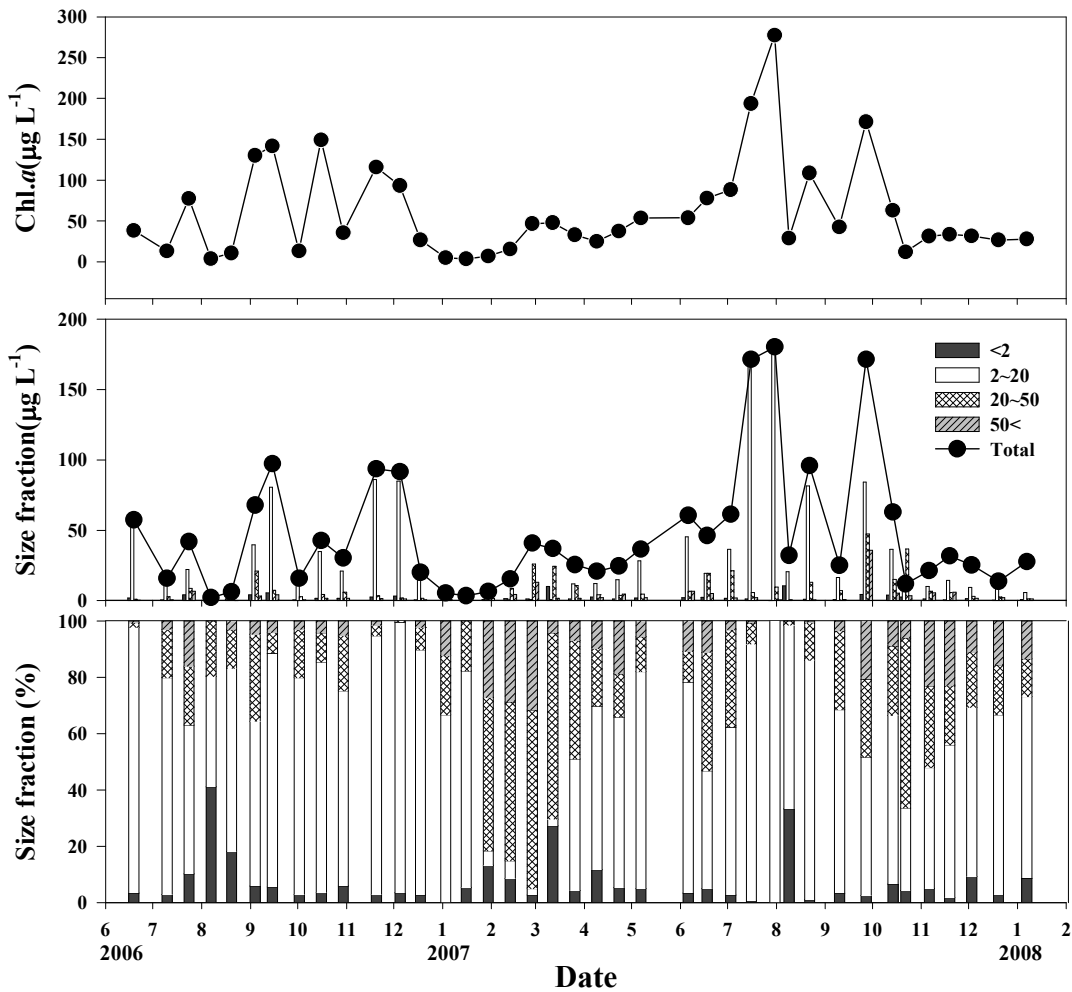


[그림 3.1.4] 신구저수지의 투명도, 탁도, pH의 연중 변화

(나) Chl-*a*

Chl-*a* 농도는 조사 기간 동안 26.5~277.4 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 나타냈고, 2007년 7월 조사에서 가장 높은 농도를 나타냈다. 2006년도의 조류 bloom이 발생했던 8~9월의 Chl-*a* 농도보다 1.5 배 이상 높게 나타났다[그림 3.1.5]. 이는 1차 년도에 비해 저수지의 저수량이 상대적으로 적고, 유입 인 농도가 상대적으로 높아 조류 bloom의 발생이 1차년도(2006)에 비해 크게 발생했기 때문으로 판단된다.

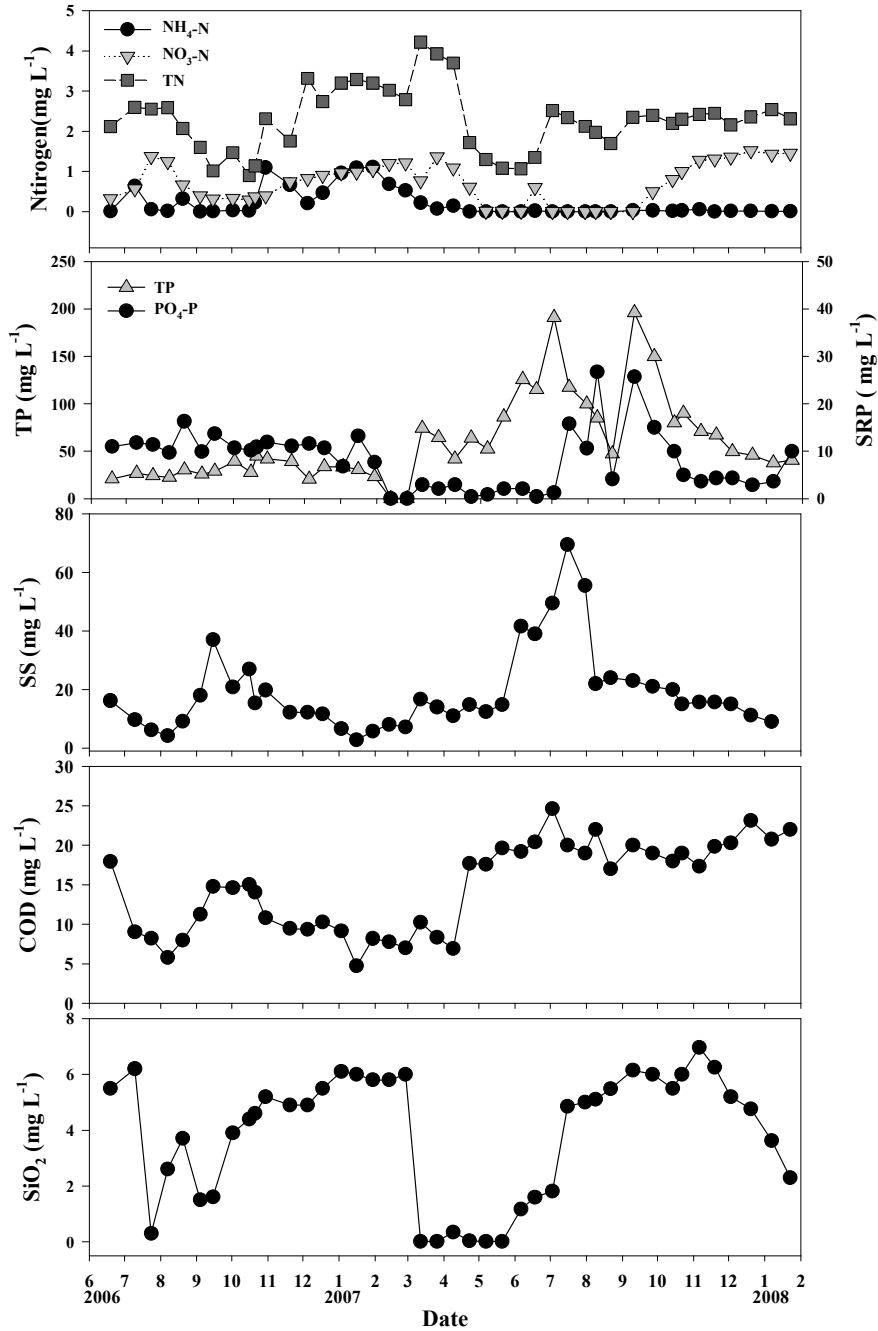
Size fraction으로 평가할 때 2~20 μm 의 size의 비율이 2차년도 전 조사기간 동안 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 2 μm 이하의 Chl-*a* 농도는 8월 7일 조사에서 40% 정도로 가장 높은 비율을 나타냈고, 전체적으로 평균 5% 정도의 아주 낮은 비율을 나타냈다. 1차년도 조사에서는 11~12월에 2 μm 이상의 크기가 90% 이상을 나타낸 반면, 2차 년도는 40~50% 정도로 상대적으로 낮은 비율을 나타냈다. 대부분의 시기에 우점종으로 출현하였던, *Microcystis aeruginosa*(7월~12월), *Oscillatoria* sp.(4~5월)의 크기가 3~4 μm 이상이었기 때문으로 판단된다.



[그림 3.1.5] 신구저수지의 연중 Chl-*a* 농도 변화

(다) 수질

총 질소(TN) 농도는 조사 기간 동안 1.0~4.5 mg L⁻¹의 범위를 나타냈다. 4~5월에 1.0~1.3 mg L⁻¹로 가장 낮은 농도를 나타냈다. 그 외 조사 기간 동안은 비교적 일정한 농도를 나타냈다 [그림 3.1.6].



[그림 3.1.6] 신구저수지의 연중 수질 변화

암모니움 이온($\text{NH}_4\text{-N}$) 농도는 $0.0\sim 5.9\ \mu\text{g L}^{-1}$ 로 2차년도 조사 기간 동안 낮은 농도를 나타냈고, 1차년도에 비해 낮은 농도를 나타냈다.

총 인(TP) 농도는 $37.7\sim 195.9\ \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 1차년도의 연중 변화보다 크게 나타났고, 가장 높은 농도는 3배 이상 높게 나타났다. 2차년도의 7월에 조사된 Chl-*a* 농도는 1차년도에 비해 1.5배 이상 높게 나타났는데, 이 시기에 높은 농도의 인의 유입에 의한 것으로 판단된다.

SRP 농도는 $0.4\sim 35.4\ \mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도 범위를 나타냈고, 총인의 농도가 높게 나타난 7~8월에 가장 높은 값을 나타냈다.

부유물질 농도는 2차년도의 조사 기간 동안 $4.0\sim 69.5\ \text{mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타냈다. 최대 농도를 나타낸 조사 시기는 7월로 조류의 bloom과 수심이 1~2 m로 얕은 시기로 수층의 교란이 쉽게 발생하기 때문에 부유하는 퇴적물에 의한 것으로 판단된다. 부유물질은 Chl-*a* 농도와 아주 높은 상관성($r=0.711$, $p<0.001$, $n=42$)을 나타내는 것으로 보아, 부유물질의 농도에 식물성 플랑크톤의 밀도가 크게 영향을 주는 것으로 판단된다.

COD의 농도는 $17.0\sim 23.1\ \text{mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타냈고, 2007년도 조사결과는 2006년도 조사에 비해 상대적으로 높은 농도를 나타냈다. 부유물질 농도와 비슷한 경향을 보였다.

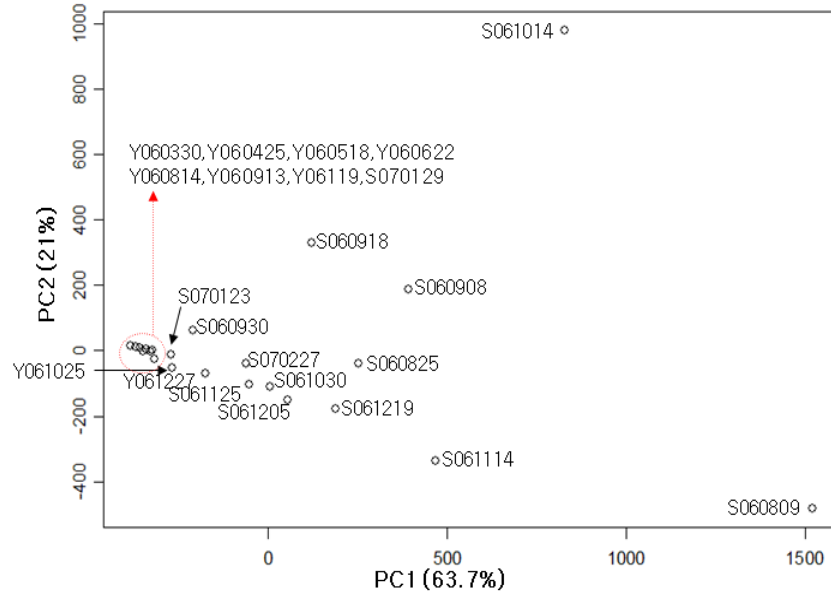
규소(SiO_2) 농도는 조사 기간 동안 $0.01\sim 6.96\ \text{mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타냈고, 2007년 4~5월에 가장 낮은 농도를 나타냈다. 9~10월에 높은 농도를 나타냈는데, 이는 8~10월 강우에 의해 유역으로부터 다른 영양물질과 함께 유입이 증가하기 때문으로 판단된다.

(라) 지방산 biomarker 연구

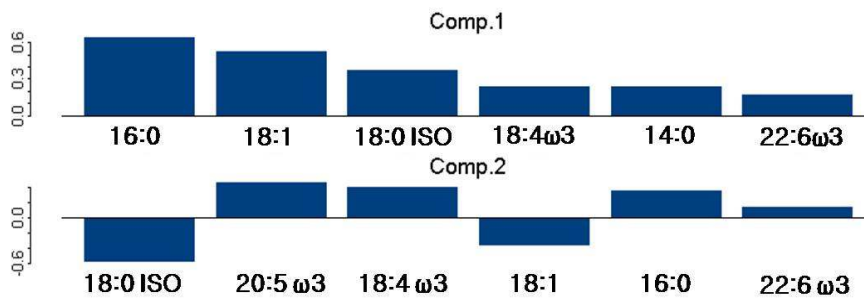
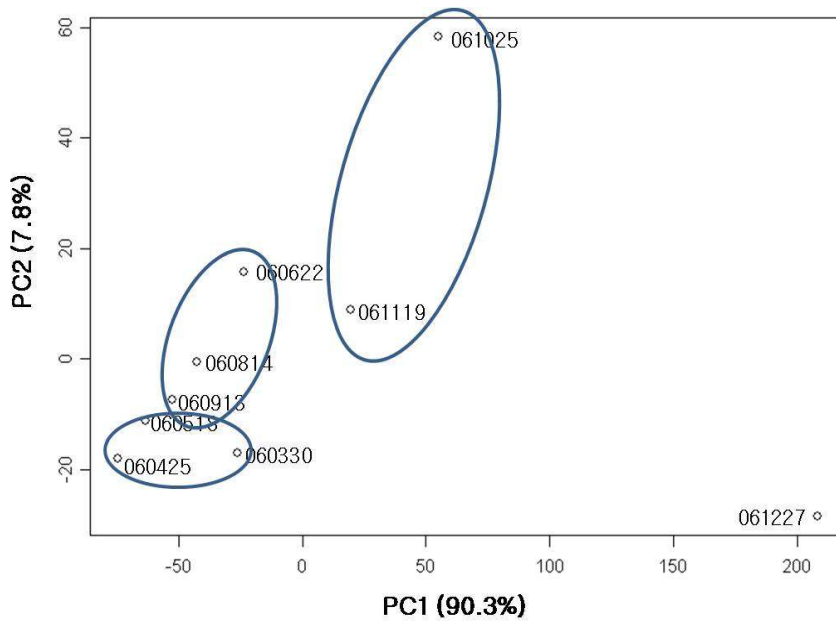
신구저수지와 양구대교에서 분석한 25개의 지방산 profile을 모두 주성분 분석(PCA)한 결과를 [그림 3.1.7]에 나타내었다. 주성분 score를 분석해 보면 양구대교의 지방산 profile은 아주 가까이 모여 있는 반면 신구저수지의 주성분 score는 계절에 따라 널리 퍼져 있으며 겨울철 시료는 두 수체의 지방산이 비슷해짐을 알 수 있다. 각 수체의 지방산 profile에 대해 각각 주성분 분석을 실시한 결과는 아래[그림 3.1.8, 9]와 같다.

양구대교의 지방산 profile은 봄철, 여름철 가을철이 뚜렷이 구별되고 2006년 12월 27일 시료는 이와 상당히 떨어져 있는 것을 볼 수가 있었다. 주성분 1축이 전체 변이의 90%를 설명하였는데 겨울이 될수록 주성분 1축 왼쪽에서 오른쪽으로 score가 이동하는 것을 볼 수 있다. 따라서 겨울이 될수록 1축에 양의 loading값을 갖는 16:0, 18:1, 18:0 ISO, 18:4 ω 3, 14:0, 22:6 ω 3 등이 커지는 경향을 볼 수 있다. 이 자료에서 특별히 다른 profile과 떨어져 있는 자료는 2006년 10월 25일과 12월 27일의 profile이다.

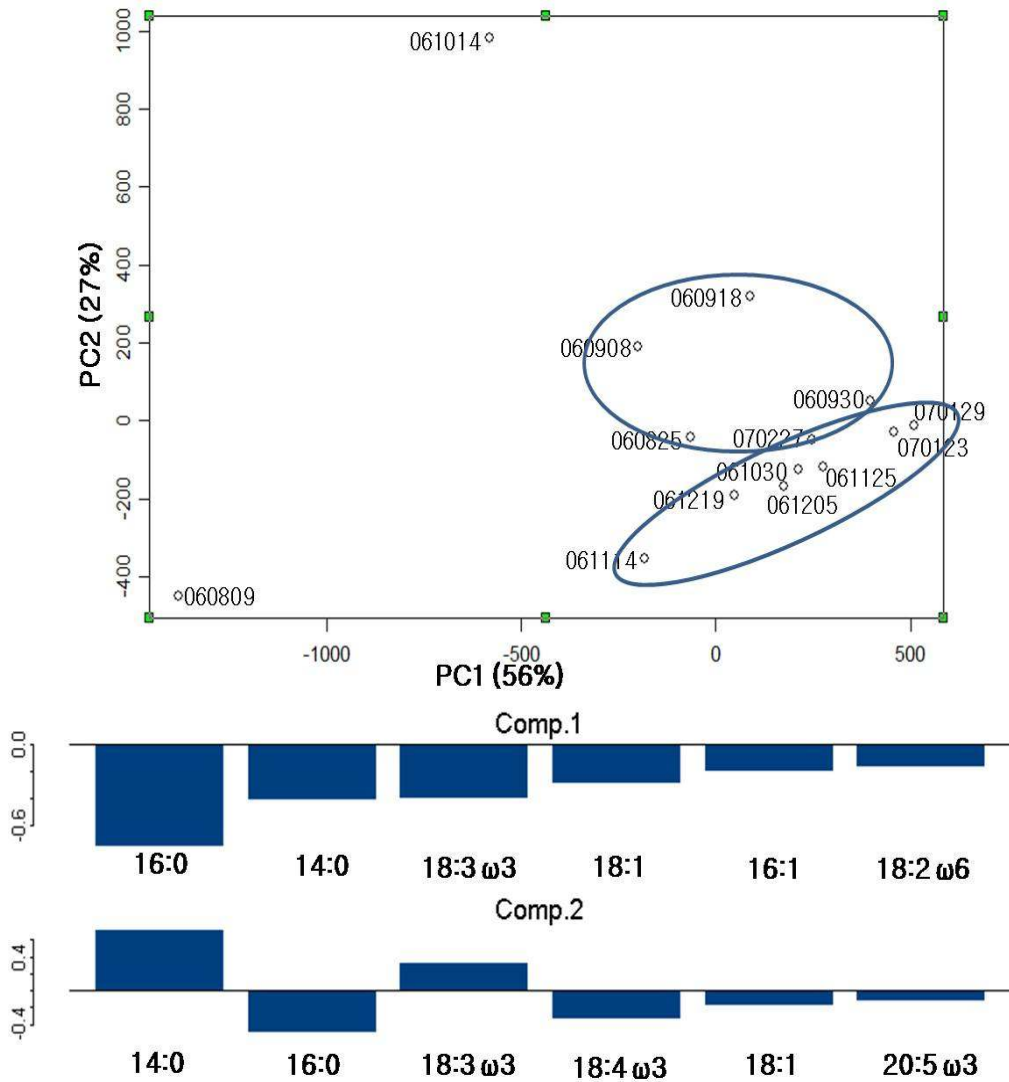
신구저수지의 지방산 profile score를 보면 봄철과 여름철의 자료가 없거나 적지만 가을철과 겨울철이 뚜렷이 구별되고 있다. 주성분 1축이 전체 변이의 56%, 2축이 27%를 설명해 1축과 2축을 합하면 전체 변이의 83%를 설명하였다. 양구대교와 마찬가지로 전체적으로 주성분 공간 왼쪽 하단에서 중앙으로 다시 오른쪽 하단으로 score가 이동하는 것을 볼 수 있다. 겨울이 될수록 1축에 음의 loading값을 갖는 16:0, 14:0, 18:3 ω 3, 18:1, 16:1, 18:2 ω 6 등이 작아지는 경향을 볼 수 있다. 이 자료에서 특별히 다른 profile과 떨어져 있는 자료는 2006년 8월 9일과 10월 14일의 profile이다.



[그림 3.1.7] 신규저수지(S)와 양구대교(Y) 지방산 profile의 주성분 score



[그림 3.1.8] 양구대교 시료의 지방산 profile에 대한 주성분 score와 loading값

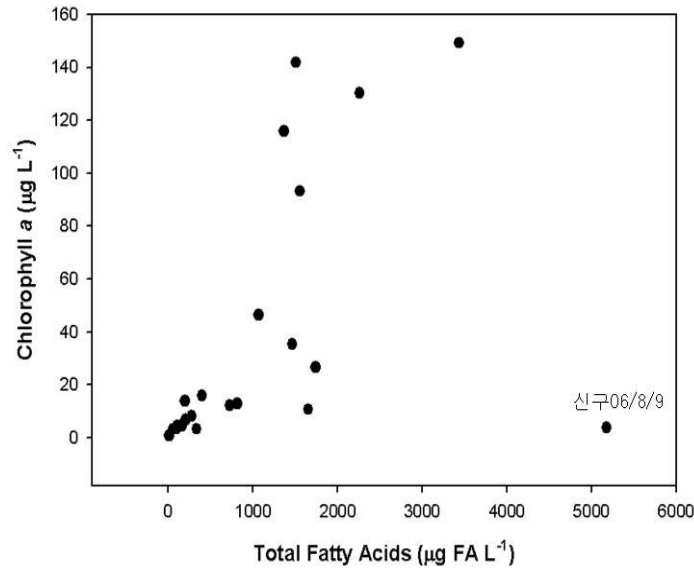


[그림 3.1.9] 신규저수지 시료의 지방산 profile에 대한 주성분 score와 loading값

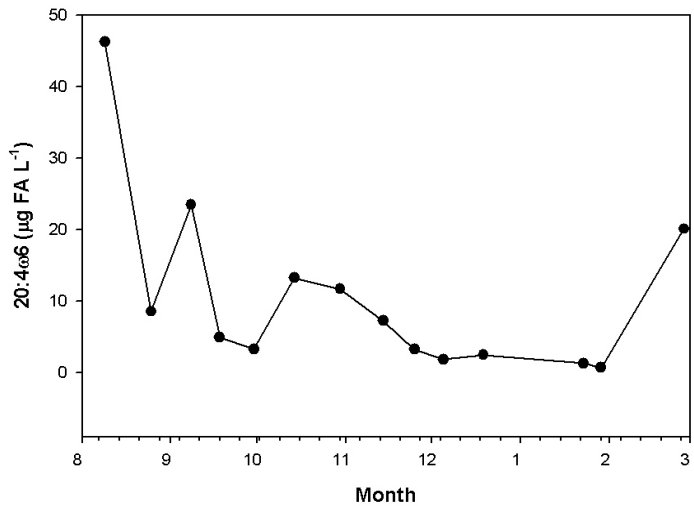
① 총지방산 농도와 Chl-a 농도 관계

총지방산이 많을수록 Chl-a 농도가 비례해서 많아지나 신규저수지 2006년 8월 9일 시료는 총지방산이 가장 많음에도 Chl-a 농도는 상당히 낮다. 따라서 이때의 총지방산의 대부분은 광합성을 하지 않는 종속영양 원생생물에 의한 구성으로 해석된다[그림 3.1.10].

식물성플랑크톤이 만들어내지 않는 것으로 알려진 20:4ω6에 대해 신규저수지 시료 내 농도의 계절변화를 알아보았다[그림 3.1.11]. 2006년 8월9일에 20:4ω6 농도가 가장 높아 20:4ω6가 종속 영양 원생생물에 대한 좋은 biomarker임을 시사하였다.



[그림 3.1.10] 총 지방산 농도와 Chl-*a* 농도



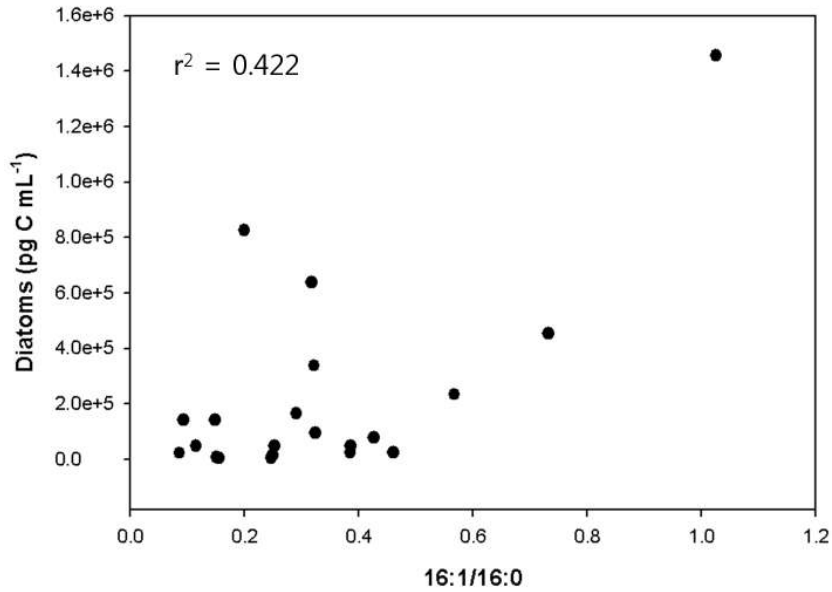
[그림 3.1.11] 20:4 ω 6 농도의 계절변화

② 각 식물성플랑크톤에 대한 지방산 biomarker

문헌상에 알려진 각 식물성플랑크톤에 대한 지방산 biomarker를 같은 시기에 동시에 분석된 식물성플랑크톤 자료와 비교해 보았다. 우선 규조류의 탄소량으로 추정된 생물량과 16:1/16:0 index는 전체 변이의 42%를 설명하여 상당히 유용한 biomarker임을 시사하였다[그림 3.1.12].

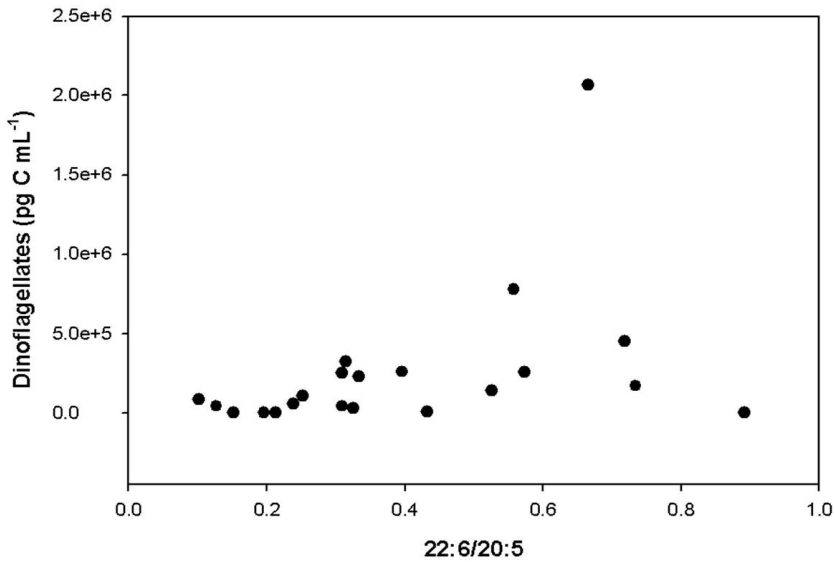
한편 와편모조류의 생물량과 와편모조류 biomarker로 알려진 22:6/20:5 index는 유의한 관계를 나타내지는 못했고 특히 22:6/20:5가 높은 값일 때 계수로 추정된 와편모조류 생물량과 잘 맞지 않았다[그림 3.1.13].

16:1/16:0



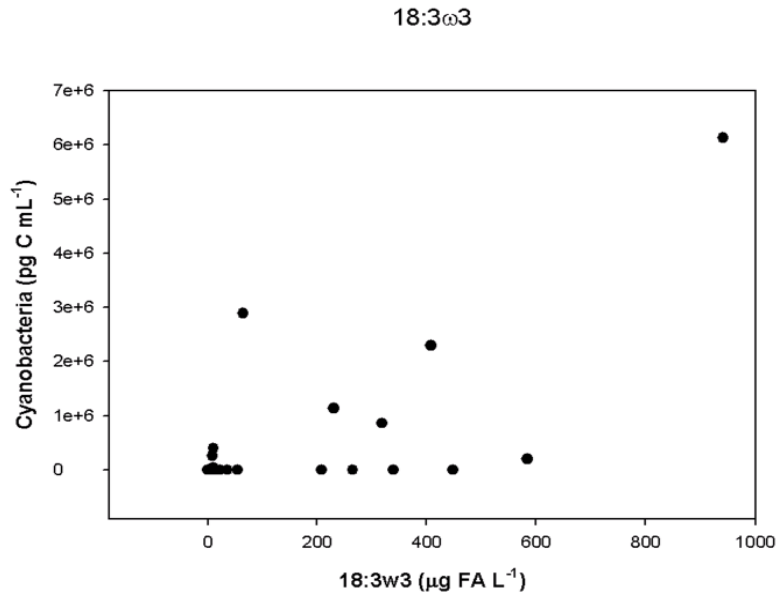
[그림 3.1.12] 16:1/16:0 index와 규조류 생물량의 관계

22:6/20:5



[그림 3.1.13] 22:6/20:5 index와 와편모조류 생물량의 관계

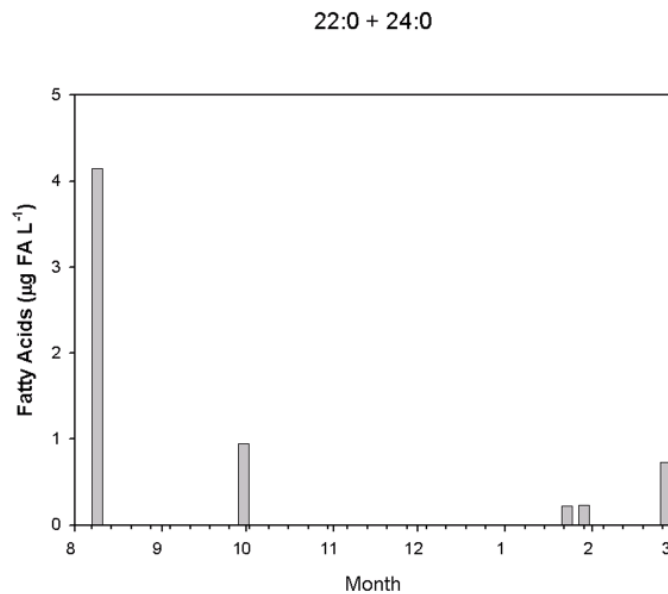
남조류 특히 *Microcystis aeruginosa*가 많이 함유하고 있다고 알려진 18:3 ω 3 농도와 남조류 생물량 관계도 큰 상관관계를 보여주지 않았다[그림 3.1.14]. 하지만 가장 18:3 ω 3 농도가 높을 때 남조류의 생물량도 가장 많은 것으로 보아 18:3 ω 3가 어느 정도 남조류 biomarker로 유용할 수 있음을 보였다.



[그림 3.1.14] 남조류 생물량과 18:3 ω 3 농도와의 관계

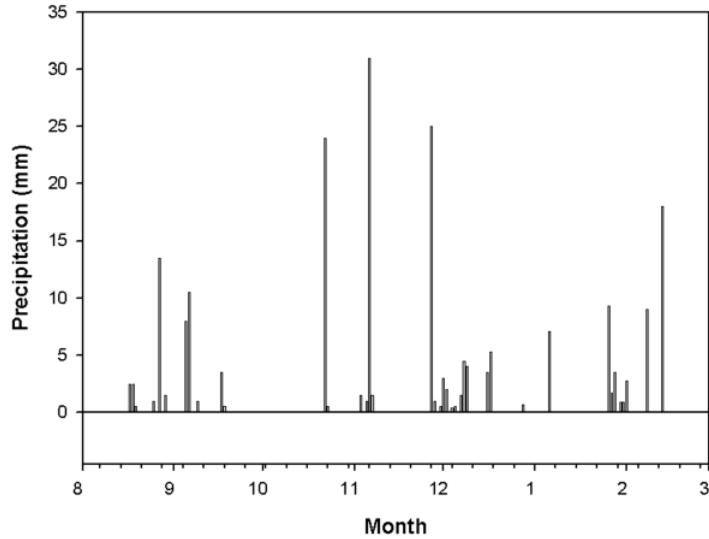
③ 육상기원의 지방산 biomarker

‘육상기원 지방산’에 대한 biomarker로 알려진 22:0+24:0 index를 신규저수지 시료에서 구해 보았다[그림 3.1.15]. 22:0+24:0 index는 어떤 시료에서는 전혀 검출되지 않았는데 오직 5시료에 서만 검출되었다. 이러한 22:0+24:0 index가 강우량과 관계가 있는지 알아 보기위해 보령 기상 관측소에서 측정된 강우량 자료를 이 시기에 대해 그려 보았다[그림 3.1.16].



[그림 3.1.15] 22:0+24:0 index의 계절변화

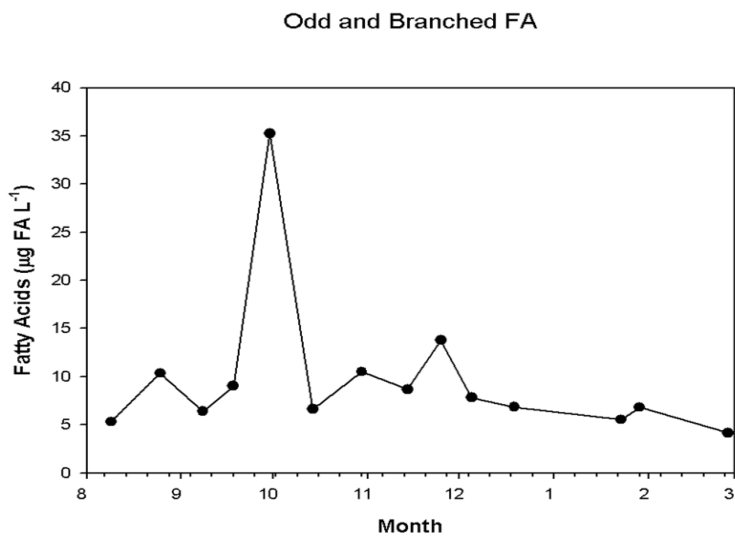
강우량 자료와 22:0+24:0 index와 큰 연관성을 찾기는 힘들지만 2006년 8월 말과 9월 달의 계속된 비 이후에 9월 30일 시료에서 22:0+24:0 index가 상승함을 볼 수 있다.



[그림 3.1.16] 보령 기상관측소의 일일 강우량자료

④ bacterial biomarker

한편 탄소 개수가 홀수인 지방산과 분기한 지방산은 bacteria에서만 만들어지는 것으로 알려져 왔는데 신구저수지에서의 이러한 bacterial biomarker 계절변화를 [그림 3.1.17]에 나타내었다. 2006년 9월 30일 시료에서 bacterial biomarker가 가장 높아지는 것을 볼 수 있다.



[그림 3.1.17] 신구저수지에서 bacterial 지방산 biomarker의 계절변화

⑤ 종합적인 지방산 biomarker의 적용

지금까지 개별적으로 알아본 지방산 biomarker를 종합적으로 양구대교 시료와 신구저수지 시료에 적용해 [그림 3.1.18, 19]에 나타내었다.

우선 양구대교 시료의 주성분 분석상 특이점이었던 2006년 10월 26일과 12월 27일 시료에 대해서 지방산 biomarker를 살펴보면 10월 26일에는 Chl-a 함량이 많은데 규조류 biomarker가 높고 남조류, 와편모조류 등은 별로 높지 않은 것을 볼 수 있다. 한편 12월 27일 시료는 이와는 대조적으로 와편모조류 biomarker가 가장 높고 또한 bacterial biomarker index도 높아짐을 볼 수 있다.

신구저수지에서 주성분 분석상 특이점은 2006년 8월 9일과 10월 14일 시료였다. 앞에서 본 바와 같이 8월 9일에는 20:4 ω 6의 농도가 아주 높고 Chl-a는 아주 낮아 종속영양생물이 상당한 생물량을 차지하는 것으로 보인다. 10월 14일에는 Chl-a의 양이 가장 높는데 이때 와편모조류 biomarker가 높음을 볼 수 있다. 한편 8월 9일과 9월 30일 시료에서 특이하게 terrestrial biomarker가 높는데 8월 9일과는 달리 9월 30일에는 bacterial biomarker가 가장 높은 값을 보여 9월 30일 시료는 강우 뒤 쓸려온 terrestrial source의 부유물에 대한 분해가 많이 일어나는 것으로 해석하였다. 이러한 여러 가지 biomarker를 이용하면 일상적인 현미경 계수에서는 얻을 수 없는 많은 정보를 얻을 수 있다.



[그림 3.1.18] 양구대교의 지방산 biomarker 계절변화



[그림 3.1.19] 신구저수지의 지방산 biomarker 계절변화

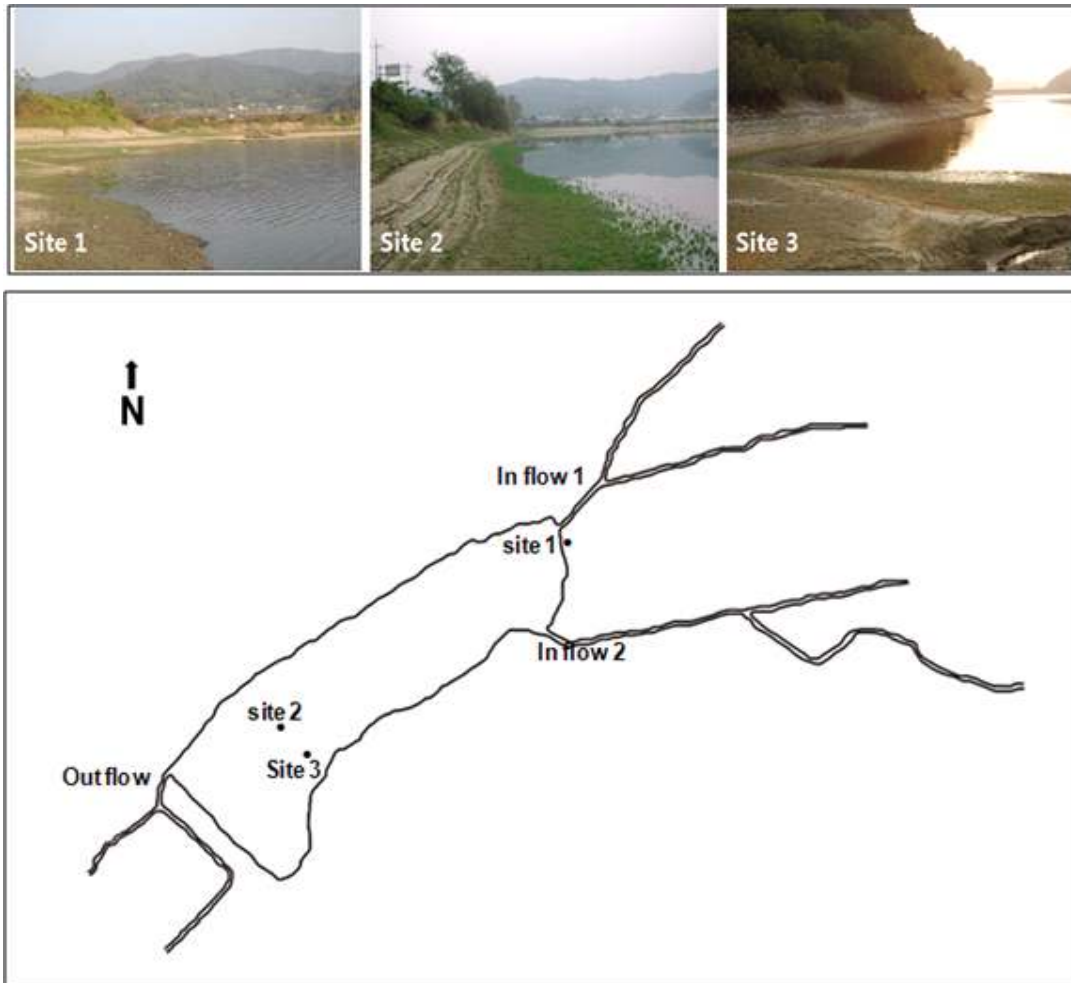
나. 농업용 저수지의 유용생물 자원 조사

호소와 같은 정수생태계에는 다양한 생물군이 분포하고 있다. 소형 박테리아, 동, 식물플랑크톤, 섬모충과 편모충 같은 원생동물, 수생식물, 어류, 저서생물 등 다양하고 풍부한 생물의 분포는 호소생태계의 현재 상태를 알려주는 좋은 지표이다. 따라서 이화학적 수질과 함께 저수지의 생물군에 대한 조사는 추후 생물먹이망을 이용한 조류제어 실험에 매우 귀중한 기초자료를 제공해 준다. 본 연구는 신구저수지와 같은 농업용 저수지내에 분포하는 생물군의 특성을 파악하여 이들 중 유해조류(식물플랑크톤)와 이를 제어하기 위해 필요한 포식자(원생동물, 동물플랑크톤, 패류, 어류 등)를 조사하였다.

(1) 연구내용

식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 원생동물, 박테리아는 Mesocosm이 설치되어 있는 site 2 지점을 선택하여 2주 간격으로 정기조사를 실시하였다.

저서성 대형무척추동물 조사는 2007년 6월과 9월에 걸쳐 두 번 실시되었으며, 저수지내 site 3지점을 선택하여 실시하였다[그림 3.1.20].



[그림 3.1.20] 신구저수지 저서성 무척추동물 조사지점

저서성 대형무척추동물의 채집은 저수지 수변부(site 1)에서는 D-net을 사용하였으며, 저수지 내부(site 2, site 3)에서는 Grab sampler를 사용하여 채집하여, 정량 분석하였다. 군집구조 분석을 위해서 종다양도지수와 균등도지수를 산출하였으며, 이때 사용한 식은 다음과 같다.

$$\text{다양도지수}(H') = - \sum_{i=1}^s p_i \log_2 p_i, \quad p_i = \frac{N_i}{N}$$

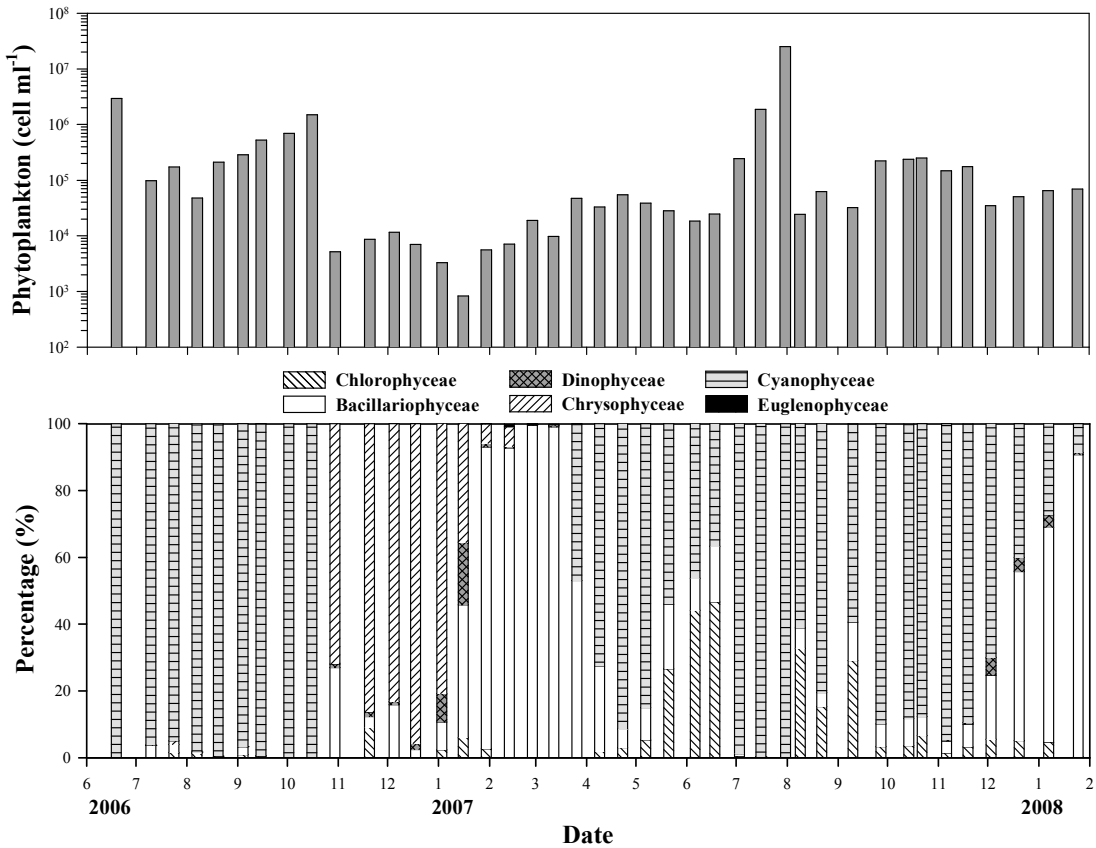
$$\text{균등도지수}(J') = \frac{H'}{\log S}$$

수생식물의 생물상 조사는 갈수기인 2007년 10월 22일에 실시하였으며, 조사지점의 선정은 1차년도와 동일하게 저수지 유입부와 저수지 제방 및 도로변을 선정하여 실시하였다.

(2) 연구결과

(가) 식물플랑크톤

식물플랑크톤의 밀도는 2007년 8월 초 조사에서 가장 높게 나타났고, 다른 기간은 비슷한 경향을 나타냈다[그림 3.1.21]. 2007년 9월에 식물플랑크톤이 급격히 감소하는 경향을 나타냈는데, 갈수기에 적은 저수량(평균 수심: 1.2 m)에서 조류 bloom이 발생하여 높아진 식물플랑크톤 밀도가 2007년 9월에 많은 강우와 저수지 외부로의 유입수로 저수지 저수량의 급격한 증가(평균 수심: 5 m)로 인한 것으로 판단된다. 2차년도 겨울철(2007년 11월~2008년 1월)의 식물플랑크톤 밀도는 1차년도(2006년) 겨울철에 비해 상대적으로 높은 경향을 나타냈다. 저수지 부영양화의 주원인인 인 영양염의 농도가 9~10월 강우로 인하여 저수지 수체의 총인(TP) 농도가 1차년도에 비해 3배 이상 높아졌기 때문으로 판단된다.



[그림 3.1.21] 식물플랑크톤 밀도와 비율의 연중 변화

식물플랑크톤은 녹조류가 우점한 2007년 6월과 규조류가 우점한 2~4월 시기를 제외하고, 연중 남조류(Cyanophyceae)가 우점하는 경향을 나타냈다. 조사 기간 대부분 남조류가 우점하는 경향은 1차년도와 비슷하나, 1차년도 겨울철(11~1월)에 황색편모조류(Bacillariophyceae), 6월

남조류가 우점했던 것과 달리, 2차년도에는 각각 남조류, 녹조류가 우점하는 다른 경향을 나타냈다.

남조류가 우점하는 기간 중 2006년 7월부터 11월 초까지 *Microcystis aeruginosa*가 60~99% 이상으로 우점 하였고, 2007년 4월과 5월은 *Oscillatoria* sp. 가 우점하는 것으로 나타났다. 2006년 1월 중순 이후는 규조류 중 *Aulacoseira islandica*가 60~90% 이상으로 우점하는 것으로 나타났다. 2006년 11월부터 2007년 1월 중순까지 녹조류가 우점했던 기간에는 *Scenedesmus acutus*, *Coelastrum sphaericum* 등이 우점종으로 나타났다.

(나) 동물플랑크톤

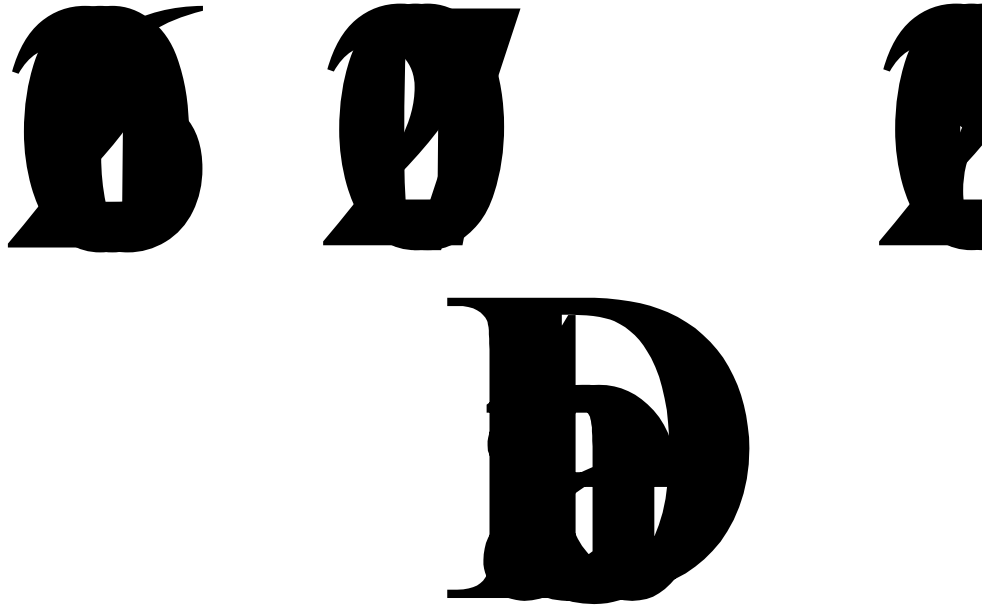
조사 기간 동안 출현한 동물플랑크톤은 총 22 분류군으로 나타났으며, 9월에 12분류군으로 종 풍부도가 높게 나타났다. 정기조사 기간 동안 윤충류가 지각류와 요각류에 비해 높은 종 다양성과 개체밀도를 나타냈다. 동물플랑크톤의 밀도는 2007년도 6월에 4,226 ind. L⁻¹로 가장 높게 나타났지만, 2006년도 6~9월에 출현한 동물플랑크톤 밀도에 비해서 50% 이상 낮은 것으로 나타났다. 2차년도에 조사된 지각류와 요각류의 밀도 변화는 1차년도 변화 경향과 비슷한 것으로 나타났다.

동물밀도가 가장 높게 나타난 2006년 6월과 7월 중순 이후의 조사 기간에는 윤충류의 *Keratella valga*가 우점하는 것으로 나타났고, 7월 중순은 *Diurella stylata*, Nauplius가 우점하는 것으로 나타났다. 요각류는 Nauplius의 비율이 다른 종에 비해 높았고, 지각류는 *Bosmina longirostris* 종이 높은 비율의 생물량을 나타냈다. 탄소량으로 본 생물량은 개체밀도가 가장 높았던 2007년 6월 초와 8월 말 조사에서 높게 나타났다[그림 3.1.22].

(다) 박테리아 및 원생동물

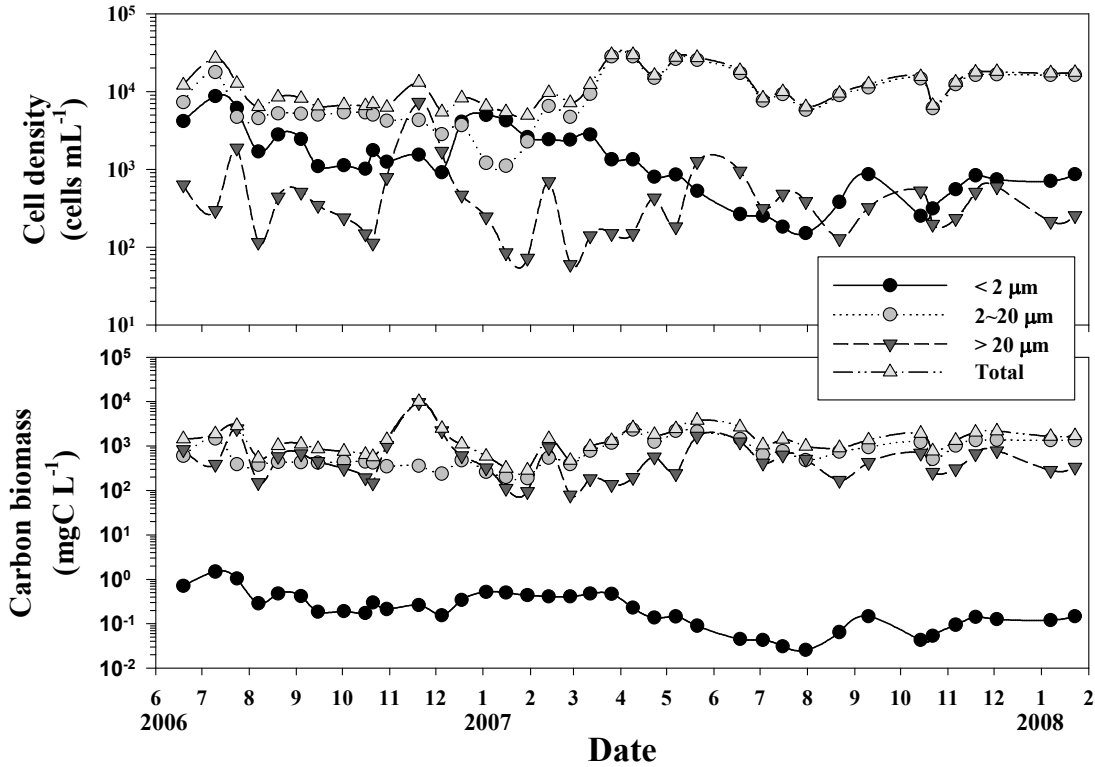
박테리아의 생물량은 243.2~641.6 $\mu\text{gC L}^{-1}$ 로 2007년 7~10월 기간에 높게 나타났고, 이후 점차 감소하여 겨울철(2007년 12월~2008년 1월)에 가장 낮은 생물량을 나타냈다[그림 3.1.23].

원생동물은 2차년도 정기조사 기간 동안 6,327~27,331 cells mL⁻¹로 나타났다. Size에 따른 생물량은 조사 기간 동안 2~20 μm size의 원생동물이 높게 나타내었고, 20 μm 이상 크기의 생물량이 가장 낮게 나타났다. 2 μm 이하의 원생동물은 11월초 증가하여 겨울 기간 동안 2~20 μm size의 원생동물과 비슷한 경향을 나타냈다. 탄소량에 의한 원생동물의 생물량은 2007년 5월말 조사에서 3,763.8 $\mu\text{gC mL}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났고, 평균 1737.8 $\mu\text{gC mL}^{-1}$ 로 2006년도 1,571.5 $\mu\text{gC mL}^{-1}$ 에 비해 약간 높게 나타났다[그림 3.1.24].



[그림 3.1.22] 동물플랑크톤의 밀도와 생물량의 연중 변화

[그림 3.1.23] 박테리아의 밀도와 생물량의 연중 변화



[그림 3.1.24] 원생동물의 밀도와 생물량의 연중 변화

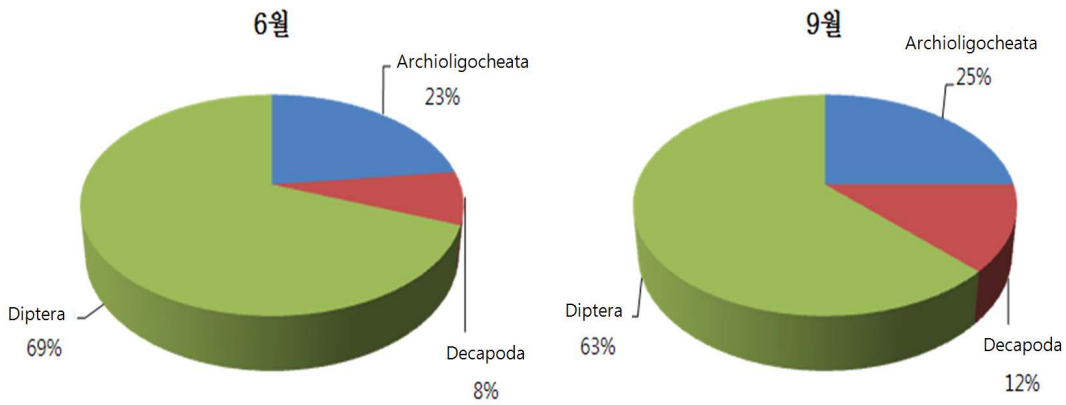
(라) 저서생물

① 저서성 대형무척추동물상 및 출현종수

저서성 대형무척추동물 조사는 2007년 6월과 9월에 걸쳐 두 번 실시되었으며, 저수지내 3지점에서 실시하였다[그림 3.1.20]. 신구저수지 내 대형무척추동물의 조사결과 총 3강, 3목, 10종으로 확인되었다. 각 조사지점별 출현종수를 비교해보면 2007년 6월에는 7종이 출현한 것에 비해 9월에는 5종만 출현해 상대적으로 6월의 종 구성이 풍부함을 보이고 있다[표 3.1.1]. 이러한 신구저수지내에서 출현한 저서성 대형무척추동물의 구성비를 살펴보면 6월과 9월 모두 Diptera(파리목)의 비율이 가장 높게 나타났다[그림 3.1.25]. 이 중 Decapoda(십각목)의 경우 발생한 종의 수는 6월과 9월 모두 동일하나 9월의 Diptera 출현종수가 줄어 상대적으로 Decapoda의 종 구성 비율이 증가하였다.

[표 3.1.1] 조사지점별 출현종수

출현종		2007년 6월			2007년 9월		
		St.1	St.2	St.3	St.1	St.2	St.3
Oligochaeta (빈모강)	Archioligocheata (물지렁이목)	1	1	1	1	1	
Crustacea (갑각강)	Decapoda (십각목)	1			1		
Insecta (곤충강)	Diptera (파리목)	5	2	2	3		2
Total		7	3	3	5	1	2



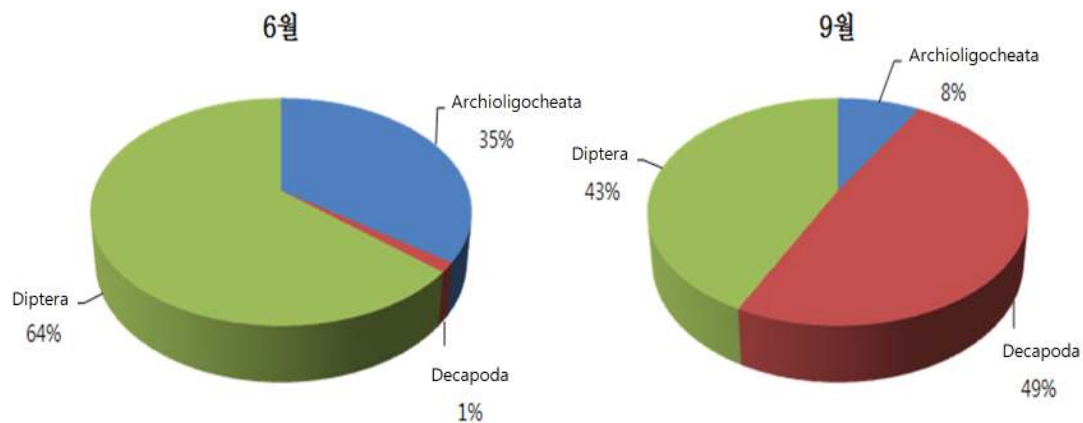
[그림 3.1.25] 조사시기에 따른 저서성무척추동물 종 구성비

② 개체수 현존량

신구저수지에서 채집된 저서성 대형무척추동물은 종 구성에서는 큰 차이를 보이지 않았으나 개체수에서는 조사시기에 따라 차이를 보였다[그림 3.1.26]. 2007년 6월 조사의 경우 Decapoda의 개체수 비율이 전체의 1%에 해당했으나, 9월 조사에서는 전체의 49%로 증가하였다. 이는 6월에 비해 9월에 Decapoda가 많이 출현한 이유도 있으나, 상대적으로 6월에 출현한 깔다구와 실지렁이의 개체수에 비해 9월 조사에서 이들 두 종의 출현비율이 감소되었기 때문이다 또한 신구저수지의 각 조사지점에 따른 개체수를 살펴보면 저수지 유입부인 site 1에서 단위면적당 가장 풍부한 개체수현존량을 보였다[표 3.1.2]. 이는 저수지 유입부의 특성상 저수지 유입부에 위치한 하천의 영향을 받은 것으로 사료된다. 이는 site 1이 다른 두 조사지점에 비해 상대적으로 하천 생물 환경에 가까운 것을 의미한다[그림 3.1.20].

[표 3.1.2] 각 조사지점별 개체현존량(ind. m⁻²)

출현종		2007년 6월			2007년 9월		
		St.1	St.2	St.3	St.1	St.2	St.3
Oligochaeta (빈모강)	Archiloligocheata (물지렁이목)	556	170	89	26	4	-
Crustacea (갑각강)	Decapoda (십각목)	33	-	-	174	-	-
Insecta (곤충강)	Diptera (파리목)	1133	163	193	137	-	15
Total		1722	333	281	337	4	15



[그림 3.1.26] 조사시기에 따른 개체현존량 구성비

③ 우점종 및 우점율 변화

9월에 채집된 site 1을 제외한 나머지 조사지점에서는 깔따구와 실지렁이가 우점종으로 나타났다. 이들 두 종이 차지하는 점유율 또한 매우 높게 나타났다[표 3.1.3]. 9월의 site1에서 다른 종이 우점으로 발생한 것은 site 1의 경우 저수지 유입부로, 조사시기인 9월에는 수위가 높아 청소새우과에 해당하는 종들이 상대적으로 저수지 유입부 쪽으로 몰려 우점을 차지한 것으로 판단된다. 이러한 분포는 신규저수지내의 저서생물의 군집구조가 비교적 단순함을 의미한다. 우점종으로 나타난 이들 두 종의 습성은 하상의 부식물질 또는 유기퇴적물을 긁어 먹는 섭식 특성을 가지는데 이러한 특성을 통해 간접적인 저수지내 환경특성을 유추할 수 있다.

[표 3.1.3] 각 조사지점에서의 우점종 및 점유율

조사시기	우점종				
	제1우점종	점유율(%)	제2우점종	점유율(%)	
07.6	St.1	Chironomidae spp. (깔다구류)	54.4	<i>Limnodrilus gotoi</i> (실지렁이)	32.3
	St.2	<i>Limnodrilus gotoi</i> (실지렁이)	51.1	Chironomidae spp. (깔다구류)	47.8
	St.3	Chironomidae spp. (깔다구류)	67.1	<i>Limnodrilus gotoi</i> (실지렁이)	31.6
07.9	St.1	Palaemonidae (징거미류)	51.6	Chironomidae spp. (깔다구류)	38.5
	St.2	<i>Limnodrilus gotoi</i> (실지렁이)	100	-	-
	St.3	<i>Diptera</i> sp. (파리류)	75	Chironomidae spp. (깔다구류)	25

④ 군집지수의 변동

신구저수지의 조사시기별 조사지점에서의 군집지수는 [표 3.1.4]에 나타내었다. 9월의 site 2의 경우에는 실지렁이 한 종만 출현하였기 때문에 다양도 지수 및 균등도지수가 0으로 나타났다. 반면 유입부인 site 1에서 두 조사 시기 모두에서 다른 조사지점들에 비해 다양도지수가 높게 나타났다.

[표 3.1.4] 조사시기별 조사지점에 따른 군집지수

	2007년 6월			2007년 9월		
	St.1	St.2	St.3	St.1	St.2	St.3
다양도(H')	1.132	0.746	0.689	1.005	0	0.562
균등도(J)	0.582	0.679	0.627	0.625	0	0.811
종수	7	3	3	5	1	2

(마) 수생식물

① 저수지 유입부

저수지 유입부의 식물군락은 2006년과 2007년 조사간에 큰 차이를 보이지 않았다. 대표적인 출현종으로는 민하늘지기, 물방동사니, 흰여뀌, 돌피, 방동사니, 참꽃마리, 소리쟁이, 미나리아재비 등이 조사되었는데 1차년도 조사와 마찬가지로 민하늘지기가 피도율 50%를 점유하는 우점종으로 나타났다[그림 3.1.27].



[그림 3.1.27] 민하늘지기 군락

[표 3.1.5] 저수지 유입부의 식생군락 식별표

I : 산여뀌-개망초 군락 (우점종)

군락구분	I	Scientific name
자료(stand)수	3	
식물명		Scientific name
민하늘지기	IV(+ -3)	<i>Fimbristylis squarrosa</i>
물방동사니	III(+ -2)	<i>Cyperus glomeratus</i>
흰여뀌	II(+ -1)	<i>Persicaria lapathifolia</i>
돌피	I(+)	<i>Echinochloa crus-galli</i>
소리쟁이	I(+ -1)	<i>Rumex crispus</i>
참꽃마리	-	<i>Trigonotis nakaii</i>
미나리아재비		<i>Ranunculus japonicus</i>

② 저수지 제방 및 도로변

저수지 제방과 도로변에는 주로 산여뀌, 개망초, 물방동사니가 군락을 유지하였으며, 돌피, 바늘여뀌, 참꽃마리, 소리쟁이 등이 주된 구성원으로 나타났다. 조사구에는 귀화식물인 개망초의 높은 피도(10% 이상)가 나타난 2차년도(2007년) 결과는 1차년도(2006년) 결과와 유사하였다[그림 3.1.28]. 그러나 결과를 종합하여 보면, 2차 년도는 1차 년도에 비해 농번기가 지난 후에도 저수율이 높아 수생식물의 종수나 개체수가 비교적 낮게 나타났다.



[그림 3.1.28] 산여뀌-개망초 군락

[표 3.1.6] 저수지 제밭과 도로변 지대 식생군락 식별표

I : 산여뀌-개망초 군락 (우점종)

군락구분	I	Scientific name
자료(stand)수	3	
식물명		Scientific name
산여뀌	IV(+ -3)	<i>Fimbristylis squarrosa</i>
개망초	III(+ -2)	<i>Erigeron annuus</i>
물방동사니	II(+ -1)	<i>Cyperus glomeratus</i>
돌피	I(+)	<i>Echinochloa crus-galli</i>
바늘여뀌	I(+ -1)	<i>Persicaria bungeana</i>
참꽃마리	-	<i>Trigonotis nakaii</i>
소리쟁이	-	<i>Rumex crispus</i>

다. 농업용 저수지 수중생태계 먹이연쇄의 구조 및 기능조사

수생태계 생물들의 상호작용으로 표현되는 기능적인 측면(예를 들면, 물질의 순환과 에너지의 흐름)에 대한 이해는 생태계 전반을 이해하고 이를 물 관리에 이용하는데 매우 중요한 부분이다. 본 연구에서는 수중의 부유생물간 섭식관계를 정량화하여 신규저수지 플랑크톤 먹이망의 에너지 흐름을 파악하기 위하여 수행하였다.

(1) 연구내용

(가) 박테리아-원생생물 섭식관계

박테리아와 원생생물(편모류 및 섬모충류) 간 섭식관계는 Hwang and Heath(1997b)의 방법에 따라 측정했다. 각 종에 대하여 박테리아에 대한 섭식률(SGR: specific ingestion rate)은 시간과 섭식 박테리아 수간의 직선회귀관계를 통해 계산했으며, SGR에 대해 현장 박테리아 밀도를 나누어 여과율(FR: filtering rate)을 계산했다. 탄소량에 의거한 섭식률은 여과된 물의 용량에 포함된 박테리아 밀도와 탄소량 전환계수를 이용하여 계산하였다. 각 종의 섭식률(BCF)을 모두 합하여 원생동물 군집의 섭식률과 에너지 전달률을 평가하였다.

(나) 박테리아, 원생동물, 식물플랑크톤-동물플랑크톤 섭식관계

여러 먹이 생물과 동물플랑크톤 간의 섭식관계 및 탄소 전달을 측정은 Lehman and Sandgren(1985)의 방법에 따라 실험하였다. 박테리아는 Porter and Feig(1980)의 방법에 따라 DAPI로 염색하여 형광현미경($\times 1000$) 하에서 계수하였다. 원생동물은 Caron(1983)에 따라 Primulin으로 염색하여 형광현미경($\times 1000$) 하에서 원생동물을 계수하였다.

식물플랑크톤은 각각 규조류(Bacillariophyceae), 남조류(Cyanophyceae), 녹조류(Chlorophyceae)로 구분하여 동정하고 계수하였으며, 와편모조류(Dinophyceae)와 은편모조류(Cryptophyceae)는 출현종과 밀도가 작아 두 분류군 모두를 편모조류(flagellate algae)로 취급하였다. 동물플랑크톤의 생물량은 윤충류, 지각류, 요각류로 분류하여 동정 계수하였다. 각각의 동물플랑크톤 밀도 조절구에서 24시간 동안 감소된 밀도를 측정하여 감소율(death rate: 단위 = day^{-1})을 계산하였다.

여과율(Clearance rate)은 조절구 내의 동물플랑크톤 생물량과 지수 성장율 간의 직선회귀 관계를 통해 기울기로 평가하였고, 이를 통해 C-flux를 평가하였다.



[그림 3.1.29] 플랑크톤 군집구조 분석실험

(2) 연구결과

(가) 박테리아-원생생물 섭식관계

신구저수지 생태계에서 조사기간 동안 박테리아를 섭식하는 원생생물 중 자양성 미세편모류 (Autotrophic nanoflagellate, PNAN)는 관찰되지 않았으며, 타양성 미세편모류(heterotrophic nanoflagellate, HNF) 6종, 섬모충류 2종으로 총 8종이 관찰되었다.

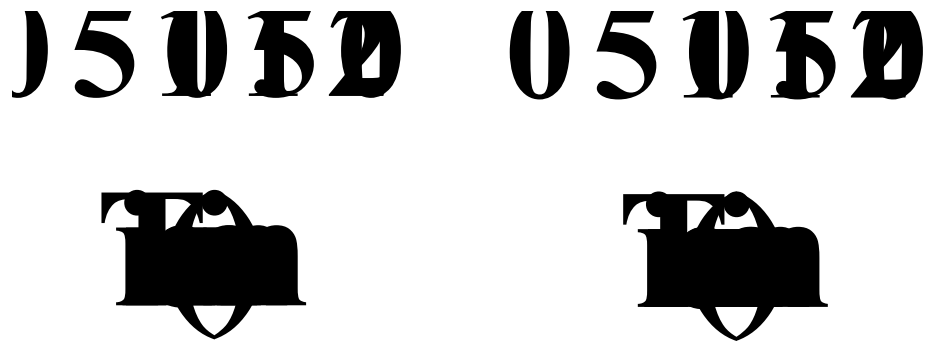
각 원생생물 군집별 박테리아 섭식율은 7월 조사에서 HNF 12.48 bac cells⁻¹ hr⁻¹, 섬모충류 96.14 bac cell⁻¹ hr⁻¹, 11월 조사에서 HNF 11.99 bac cell⁻¹ hr⁻¹ 섬모충류 69.03 bac cells⁻¹ hr⁻¹로 두 시기 모두 HNF의 박테리아 섭식율보다 섬모충류의 섭식율이 크게 높은 것으로 나타났다.

박테리아에 대한 원생생물의 여과율은 7월에 HNF는 0.48 $\mu\text{L cell}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 섬모충류는 3.66 $\mu\text{L cell}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 이었으며 11월에 HNF는 0.39 $\mu\text{L cell}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 섬모충류는 2.23 $\mu\text{L cell}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 섭식율과 마찬가지로 섬모충류에서 높은 여과율을 나타냈다[표 3.1.7].

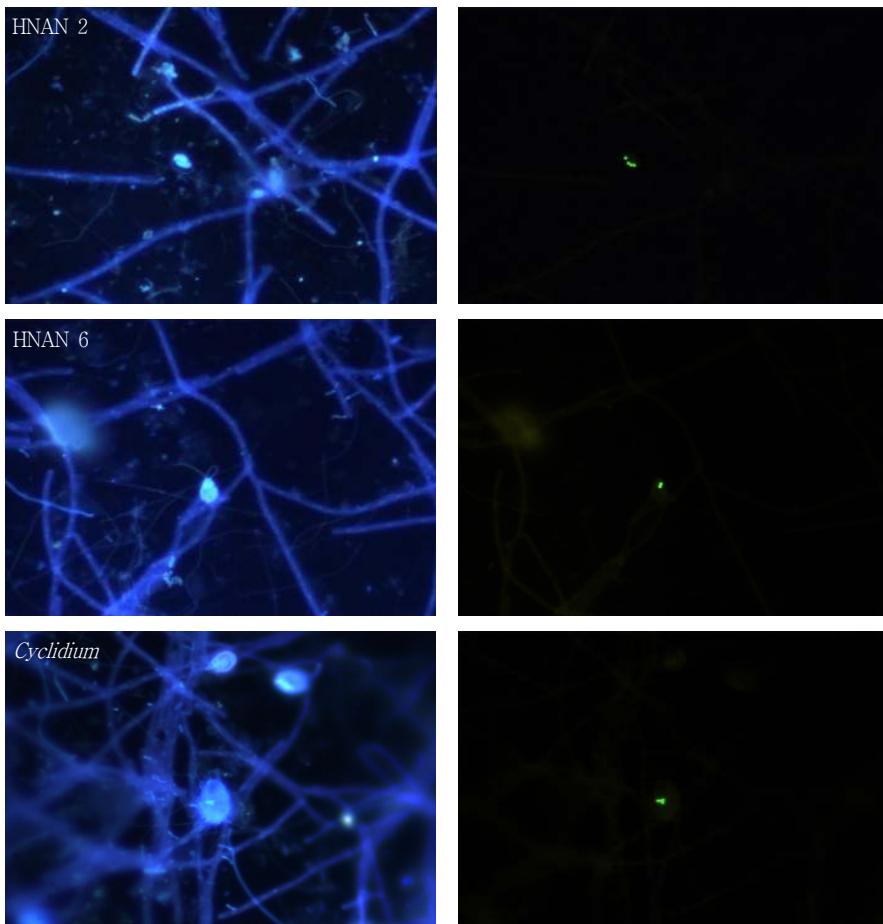
[표 3.1.7] 박테리아-원생생물간의 섭식율 및 여과율

	Group	Specific grazing rate (bac cell ⁻¹ hr ⁻¹)			Filtering rate (bac cell ⁻¹ hr ⁻¹)		
2006.10.	HNF	11.13	±	1.2	0.35	±	0.0
	Ciliate	86.74	±	3.5	2.76	±	0.1
2007.07.	HNF	12.48	±	1.6	0.48	±	0.1
	Ciliate	96.14	±	1.3	3.66	±	0.1
2007.11.	HNF	11.99	±	0.9	0.39	±	0.0
	Ciliate	69.03	±	14.5	2.23	±	0.0

각 원생생물 군집으로의 C-flux는 7월에 HNF로 1.76 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 섬모충류로 0.40 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 을 나타내었으며, 11월에 HNF로 1.37 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 섬모충류로 0.19 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 을 나타내었다. 박테리아로부터 각 군집으로의 C-flux는 두 시기 모두 HNF으로의 C-flux가 80% 이상을 차지하여 상대적으로 중요도가 높은 것으로 나타났다(7월: 81.5%; 11월: 87.8%).



[그림 3.1.30] 박테리아에 대한 원생생물의 섭식을

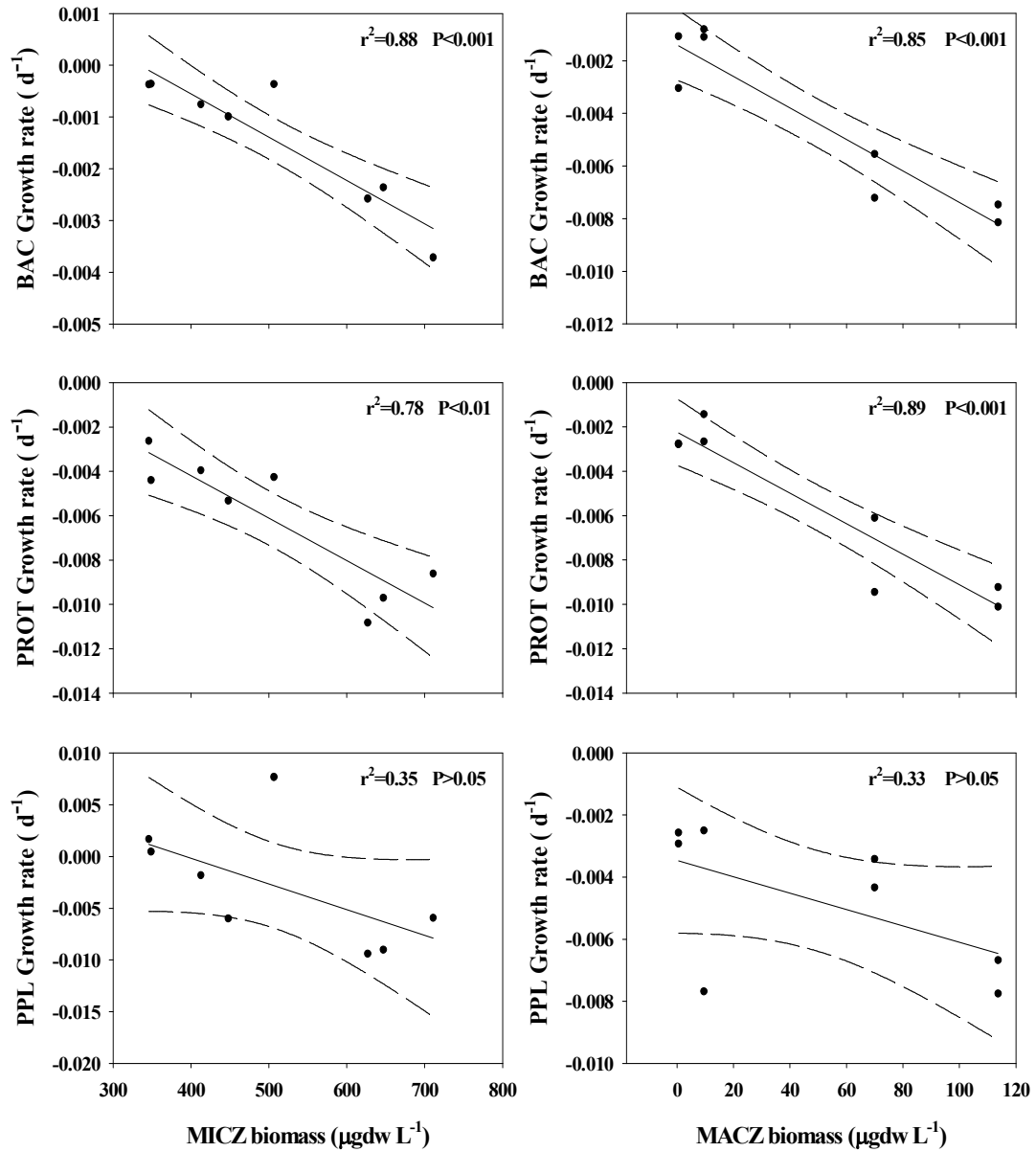


[그림 3.1.31] 형광 bead를 섭식한 원생생물(좌, 우의 사진은 동일한 field를 청색파장(왼쪽)과 녹색파장(오른쪽)으로 촬영)

(나) 박테리아, 원생동물, 식물플랑크톤-동물플랑크톤 간 섭식관계 및 에너지 전달을 평가

① 박테리아, 원생동물, 식물플랑크톤에 대한 동물플랑크톤의 여과율

각 먹이생물에 대한 동물플랑크톤의 여과율은 먹이생물의 지수성장과 동물플랑크톤생물량의 직선회귀 관계를 통한 기울기로 평가하였으며[그림 3.1.32], >200 μm 인 대형동물플랑크톤(MACZ), 60~200 μm 인 소형동물플랑크톤(MICZ)으로 구분하여 크기별로 나타내었다.



[그림 3.1.32] 먹이생물 감소율과 동물플랑크톤 생물량과의 관계

조사 기간 동안 박테리아에 대한 소형동물플랑크톤의 여과율은 0.06(7월), 0.02(11월) mL $\mu\text{gdw}^{-1} \text{d}^{-1}$, 대형동물플랑크톤의 여과율은 0.04(7월), 0.07(11월) mL $\mu\text{gdw}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 각각 나타났으며, 원생동물에 대한 소형동물플랑크톤의 여과율은 0.01(7월), 0.09(11월) mL $\text{gdw}^{-1} \text{d}^{-1}$, 대형동물플랑크톤의 여과율은 0.02(7월), 0.09(11월) mL $\mu\text{gdw}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 각각 나타났다. 식물플랑크톤으로부터 동물플랑크톤으로의 여과율은 소형 0.01(7월), 0.04(11월) mL $\mu\text{gdw}^{-1} \text{d}^{-1}$ 대형 0.10(7월), 0.03(11월) mL $\mu\text{gdw}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 나타났다[표 3.1.8].

[표 3.1.8] 박테리아, 원생생물, 식물플랑크톤에 대한 동물플랑크톤 여과율(CR: mL $\mu\text{gdw}^{-1} \text{hr}^{-1}$)

		박테리아			원생동물			식물플랑크톤		
		CR	n	r^2	CR	n	r^2	CR	n	r^2
MICZ	2006.10	0.01	8	0.88***	0.02	8	0.78*	0.03	8	0.35
	2007.07	0.06	8	0.67*	0.01	8	0.47	0.01	8	0.84***
	2007.11	0.02	8	0.77*	0.09	8	0.75*	0.04	8	0.38
MACZ	2006.10	0.06	8	0.85***	0.07	8	0.89***	0.03	8	0.33
	2007.07	0.04	8	0.89***	0.02	8	0.48	0.10	8	0.36
	2007.11	0.07	8	0.35	0.09	8	0.53	0.03	8	0.37

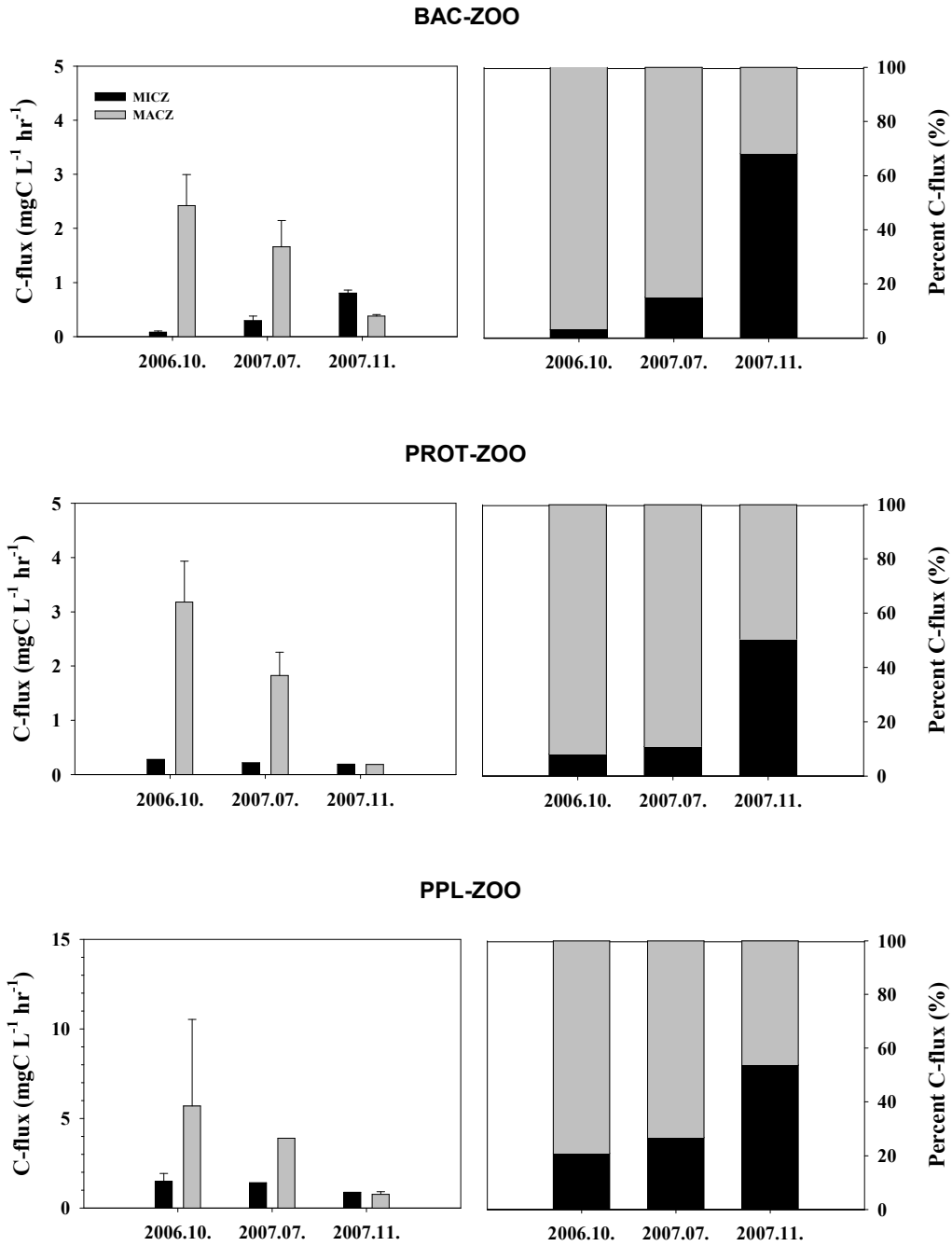
② 박테리아, 원생생물, 식물플랑크톤으로부터 동물플랑크톤으로의 C-flux

박테리아로부터의 C-flux는 7월에 소형동물플랑크톤으로 0.295 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 대형동물플랑크톤으로 1.663 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 나타났으며, 11월 조사에서 박테리아로부터의 C-flux는 소형동물플랑크톤으로 0.807 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 대형동물플랑크톤으로 0.379 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 나타났다.

원생생물로부터 동물플랑크톤으로의 C-flux는 7월에 소형동물플랑크톤으로 0.222 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 대형동물플랑크톤으로 1.823 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 나타났으며, 11월에 소형동물플랑크톤으로 0.192 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 대형동물플랑크톤으로 0.189 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 나타났다.

7월 조사에서 식물플랑크톤으로부터 소형과 대형동물플랑크톤으로의 C-flux는 1.424 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 3.900 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 각각 나타났으며, 11월 조사에서는 소형으로 0.876 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 대형으로 0.754 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 나타났다[그림 3.1.33]. 대부분 동물플랑크톤으로의 C-flux는 7월에 비해 먹이생물량 및 동물플랑크톤의 생물량이 적었던 11월에 낮게 나타났다.

2006년 10월의 조사와 마찬가지로 7월 조사에서 각 먹이 생물로부터 동물플랑크톤으로의 C-flux는 모두 대형동물플랑크톤에서 높은 값을 나타내었다. 그러나 11월 조사에서는 소형동물플랑크톤이 대형동물플랑크톤의 약 25배에 해당되는 밀도로 출현하여 두 섭식자의 C-flux가 비슷하거나 높은 값을 나타내었다[그림 3.1.33].



[그림 3.1.33] 각 먹이생물에서 동물플랑크톤으로의 탄소전달율

비록 11월 조사에서 두 동물플랑크톤으로의 C-flux가 비슷한 값을 나타냈다고 하더라도 밀도의 차이를 고려했을 때, 대형동물플랑크톤은 소형동물플랑크톤에 비해 높은 섭식율을 가지고 있는 것으로 판단되며, 이는 대형동물플랑크톤이 소형동물플랑크톤에 비해 높은 섭식율을 가짐으로써 더욱 효과적으로 먹이생물의 생물량을 조절하며, 먹이 경쟁을 통한 간접적인 방해나 상처를 입히는 직접적인 방해로 MICZ의 섭식을 억제할 수 있기 때문으로 판단된다.

③ 미생물 먹이망과 식물플랑크톤 먹이망의 에너지전달 비교 평가

조사기간에 신구저수지에서 식물플랑크톤(PPL), 박테리아(BAC), 원생동물(PRO)에서 동물플랑크톤으로의 에너지 전달율은 [표 3.1.9]과 같이 나타났다. 전 조사기간에 걸쳐 PPL은 소형동물플랑크톤과 대형동물플랑크톤 모두에게 주요 먹이원으로 나타났으며 박테리아는 7월에 비해 11월에 중요도가 큰 것으로 나타났다. 2006년의 결과와 비교하여 MACZ의 먹이원으로서 각 생물의 중요도는 큰 차이를 나타내지 않았으나, 동물플랑크톤과 원생생물의 먹이원인 박테리아가 섭식자에게 공급하는 에너지의 기여도는 50% 이상이 원생생물로 전달되는 것으로 나타나 원생생물이 박테리아의 주요섭식자로 나타났다(7월: 52.5%; 11월: 56.7%).

[표 3.1.9] 각 먹이생물로부터 동물플랑크톤으로의 상대적 에너지 전달율(%)

	MICZ				MACZ			
	BAC	PROT	PPL	Total	BAC	PROT	PPL	Total
2006.10	4.3	15.0	80.7	100	21.4	28.2	50.4	100
2007.07	15.2	11.4	73.4	100	22.5	24.7	52.8	100
2007.11	43.0	10.2	46.7	100	28.6	14.3	57.1	100

식물성플랑크톤을 기저로 하는 Algal food web(AFW)와 bacteria를 기저로 하는 Microbial food web(MFW)의 상대적 중요도를 각 base 먹이원으로부터 섭식에 의해 전달되는 C-flux 양으로 비교하였다[표 3.1.10]. 신구저수지에서는 대체로 AFW의 중요도가 약간 높은 것으로 나타났으나 큰 차이를 보이지 않았다. 박테리아에서 동물플랑크톤으로 직접 전달되는 에너지양은 적었으나 원생동물을 통해 동물플랑크톤으로 전달되는 양을 포함하였을 경우 근소한 차이를 나타냈다. 또한 박테리아로부터 동물플랑크톤으로 직접 전달되는 에너지의 양보다 원생동물로 전달되는 에너지의 양이 많은 것으로 나타났다.

2006년 10월 조사와 비교하여 박테리아로부터 동물플랑크톤으로 직접 전달되는 에너지의 양이 증가하였는데 이는 식물플랑크톤이나 원생생물의 생물량의 변화에 비해 박테리아 생물량의 변화가 적었기 때문으로 판단된다.

[표 3.1.10] 식물플랑크톤과 박테리아를 통한 C-flux의 상대적 중요도(비율)

	$\frac{(BAC-ZOO)+(PROT-ZOO)}{(PPL-ZOO)}$	$\frac{BAC-ZOO}{PPL-ZOO}$	$\frac{PROT-ZOO}{PPL-ZOO}$	$\frac{BAC-PROT}{BAC-ZOO}$
	2006.10	0.8	0.3	0.5
2007.07	0.8	0.4	0.4	1.1
2007.11	1.0	0.7	0.2	1.3

2. 농업용 저수지의 유용생물의 자원의 개발

가. 유용생물의 분리 및 관리

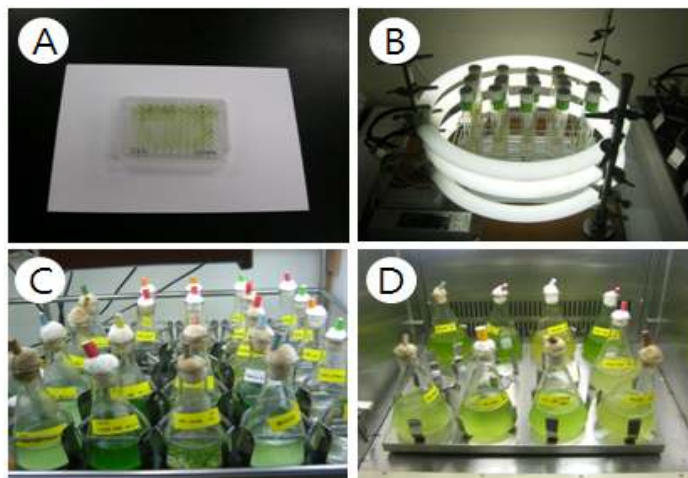
(1) 녹조발생 원인조류 분리 및 배양

(가) 녹조발생원인종의 분리

녹조발생원인종의 분리를 위하여 남조 대발생 수역인 건국대 일감호의 시료를 5 L Van Dorn 채수기(General Oceanics, USA)를 이용하여 20 L 플라스틱통에 채수하여, 시료를 실험실로 운반 후 즉시 capillary method를 이용하여 유해조류 *Microcystis aeruginosa*를 단일 세포 또는 군체로 분리하였다. 독립현미경(Axiovert 100, Zeiss) 100배 또는 200배 배율 하에서 Pasteur-pipette로 분리한 세포를 배양 배지로 4~5회 세척 후, 활성이 가장 좋은 세포를 96 well plate(Falcon, USA)에 한 개체씩 접종하여 배양을 하였다. 접종 후 세포의 성장은 해부현미경에서 관찰하였다.

(나) 녹조원인 유해종의 배양

96 well plate에서 1차 배양된 세포는 배지 2 mL을 넣은 24 well plate(Falcon, USA)에서 2차 배양을 하였다. 2차 배양이 성공하였을 때 50 mL test tube에 배지 15 mL, 배양주 1 mL을 넣어 배양을 하였다. 이후 세포가 잘 성장한 시료는 최종적으로 250 mL 삼각플라스크에 넣어 strain을 유지하였다. 이때 이용한 배지는 CB와 Allen's media 등의 배양액을 사용하였다. 온도는 현장수온을 고려하여 20~25°C로 조절하고, 광조건은 $100 \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (14h:10h LD cycle)로 하여 배양하였다[그림 3.1.34].



[그림 3.1.34] 조류배양 모습(A: Microplate B: Test tube C: 조류배양기(250 mL) D: 조류배양기(500 mL)

유해 남조류의 분리 후 배양을 통해 현재 16개 strain[표 3.1.11]의 *Microcystis* sp.(KUES 003, 004, 006, 008, 011)를 삼각플라스크에서 배양 중에 있으며, 또한 그 외 11개의 남조 녹조류를 분양받아(일본국립환경연구소, 한국국립환경연구소, 한국생명과학연구원) 유지하고 있다. 배양한 조류는 녹조 원인 생물의 조류제어를 위한 재료로 사용하였다.

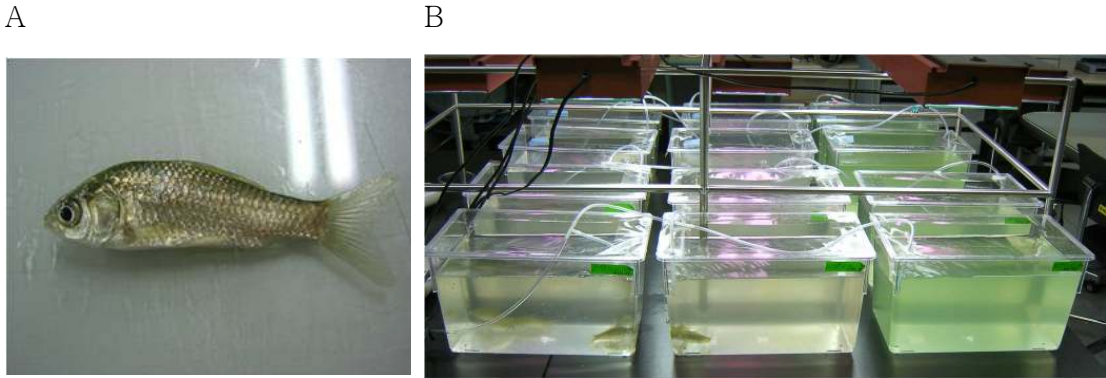
[표 3.1.11] 유해조류 분리 및 배양 후 보유종 목록

Strain No.	Species	State	Medium	Locality	Date
NIES 296	<i>Microcystis aeruginosa</i>	Unicell	Allen, A+CB	일본국립환경연구소	2006. 05
NIER 10010	<i>Microcystis aeruginosa</i>	Unicell	Allen	한국국립환경과학원	2006. 05
KUES 003	<i>Microcystis</i> sp.	Colony	Allen	Lake Ilgam	2006. 08. 24
KUES 004	<i>Microcystis</i> sp.	Colony	Allen	Lake Ilgam	2006. 08. 24
KUES 006	<i>Microcystis</i> sp.	Unicell	Allen	Lake Ilgam	2006. 08. 24
KUES 008	<i>Microcystis</i> sp.	Colony	Allen	Lake Ilgam	2006. 08. 24
KUES 011	<i>Microcystis</i> sp.	Colony	Allen	Lake Ilgam	2006. 08. 24
AG 10001	<i>Ankistrodesmus convolutus</i>	Unicell	Allen	한국생명공학연구원	2007. 01
AG 10003	<i>Scenedesmus quadricaua</i>	Unicell	Allen	한국생명공학연구원	2007. 01
AG 10019	<i>Oscillatoria subbrevis</i>	Unicell	Allen	한국생명공학연구원	2007. 01
AG 30010	<i>Anabaena flos-aquae</i>	Unicell	Allen	한국생명공학연구원	2007. 01
AG 10300	<i>Lyngbya</i> sp.	Unicell	Allen	한국생명공학연구원	2008. 05
AG 10009	<i>Selenasturm gracile</i>	Unicell	Allen	한국생명공학연구원	2008. 05
UTEX 265	<i>Chlorella vulgaris</i>	Unicell	Allen	한국화학연구원	2008. 05
AG 10038	<i>Phormidium</i> sp.	Unicell	Allen	한국생명공학연구원	2008. 05
AG 30088	<i>Spirulina platensis</i>	Unicell	Allen	한국생명공학연구원	2008. 05

(2) 어류의 선정 및 유지관리

국내 자생어류 중 유해조류 제어능이 탁월한 어종은 지금까지 알려진 바 없으며, 외국사례에 의하면 백년어(초식성 어류)의 효과가 알려지고 있으나, 대상저수지의 영양조건이나 수중생물의 구성에 따라 효율성의 차이가 크다. 본 연구에서는 국내 자생어류(붕어)에 대한 유해조류 가능성을 평가하기 위하여 청평내수면 연구소에서 참붕어를 직접 분양받아 실내 및 실외 조류제어에 이용 하였다.

어류의 유지 및 관리는 시중에서 판매하는 시판용 사료, 액상 클로렐라, 동물플랑크톤을 먹이로 유리수조에 2~3일간 폭기시킨 tap water를 넣고 유지하였다. 실험전 2~3일 동안 먹이를 주지 않고 유지하면서 실험당일 실험조에 직접 투입하였으며, 조류제어능과 어류성장(체중, 길이)를 측정하였다[그림 3.1.35].



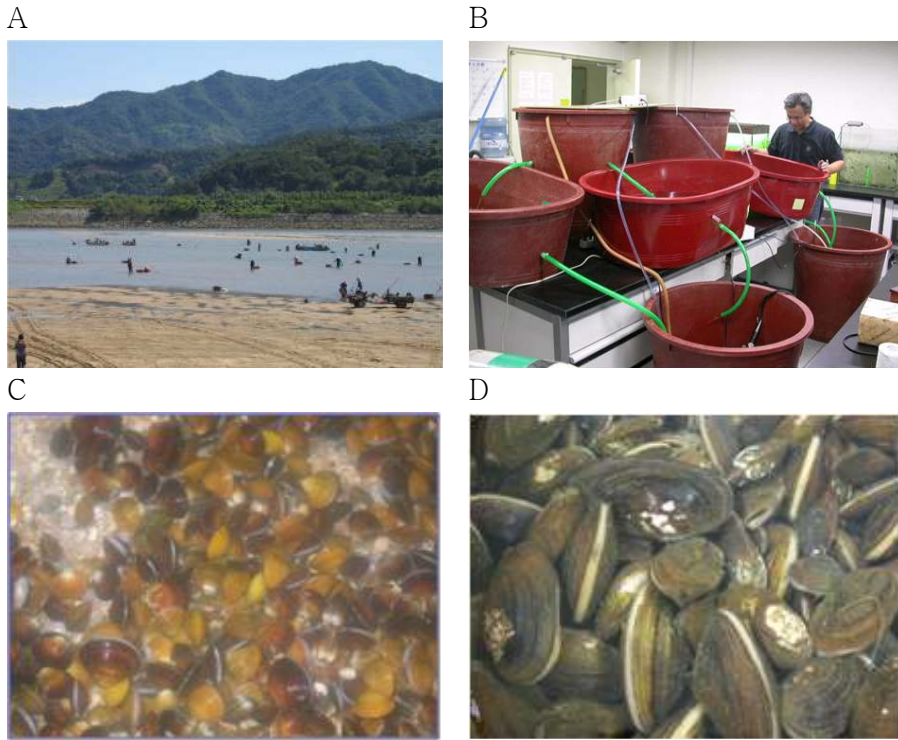
[그림 3.1.35] 실험에 사용한 참붕어(A)와 조류제어실험(B)

농업용 저수지에 분포하는 어류의 분포와 함께 어류 생물조절에 이용한 동자개의 유지관리는 제 3장 제4절 생물조절 대상 후보생물 선정 분야에서 정리하였다.

(3) 조개의 채취 및 관리

본 연구팀에서 선행연구 경험이 있는 국내산 조개(재첩)의 조류제어능을 토대로 다양한 국내산 조개류(재첩, 말조개, 칼조개 등)를 선정하여 이들의 섭식능을 비교한 결과, 생존력이 가장 강하고 섭식능이 탁월한 말조개를 현장에서 북한강(남이섬 부근)에서 직접 채집하여 실내에서 장기간 유지하면서[그림 3.1.36], 유해조류 제어실험에 이용하였다.

현재 신구저수지에서는 어떠한 종류의 조개류도 출현된 바 없으며(benthos 분포조사 자료 참조), 연구실에서 유지되고 있는 말조개 및 재첩류는 약 3,000마리 정도이며, 채집하여 실내로 도입한 후 8개월 유지하였다. 먹이는 액상클로렐라, 수온 $18.5^{\circ}\text{C} \pm 1.0$, 바닥은 현장에서 채취한 모래와 중자갈을 설치하였다.

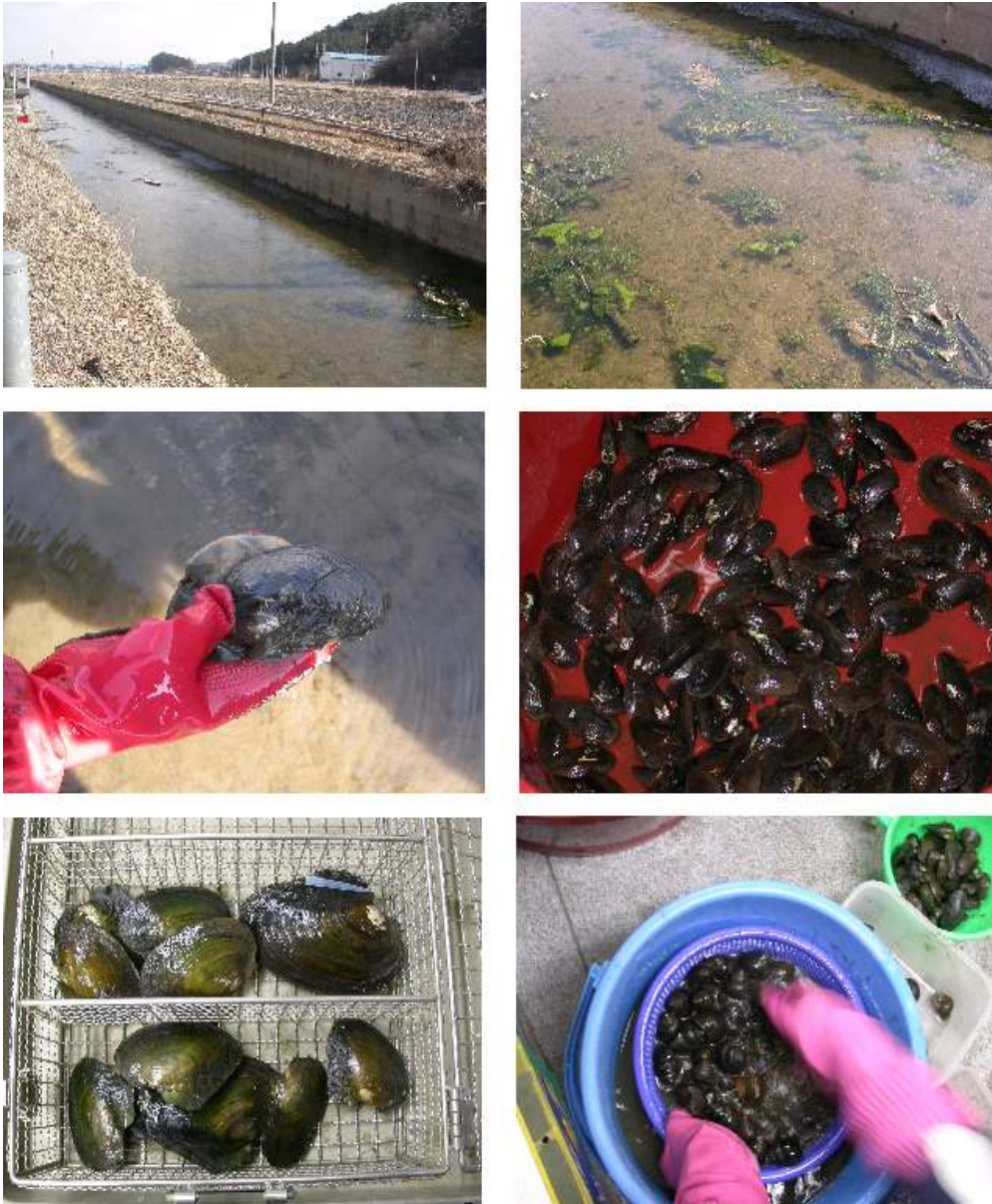


[그림 3.1.36] 패류 채집 및 관리(A: 패류채집 전경, B: 패류 배양을 위한 연속 순환조, C: 배양중인 재첩, D: 배양중인 말조개)

연구 결과 1차년도 연구에서 효과가 입증된 국내산 말조개 및 논우렁이는 채집 및 관리 하고[그림 3.1.37, 38] [표 3.1.12], 실험에 이용하였다.



[그림 3.1.37] 유용생물의 관리시스템 구성



[그림 3.1.38] 유용생물의 채집(말조개, 논우렁이, 귀이빨 대칭이)

[표 3.1.12] 패류유용생물(말조개, 논우렁이, 귀이빨대칭이) 채집 및 활용

채집날짜	채집지점	비고
2007-05-02	입포천 (양화면)	실험
2007-08-15	길산천 (군산)	실험 및 유지
2007-11-05	옥산천 (옥구-군산)	실험 및 유지
2008-01-15	대천천 하류 (대천)	실험 및 유지
2008-02-16	대천천 하류 (대천)	실험 및 유지
2008-02-17	옥산천 (군산)	실험 및 유지

유용생물의 인공생태계 적응실험을 위해 소형 연못과 하천에 논우렁이 및 말조개의 번식능 실험진행 하였으며, [그림 3.1.39]는 유용생물의 생태계 적응실험을 위해 조성한 연못과 하천수로의 모습을 보여준다.



[그림 3.1.39] 충주시 가남 소재 인공연못 조성(좌), 하천 수로(우)

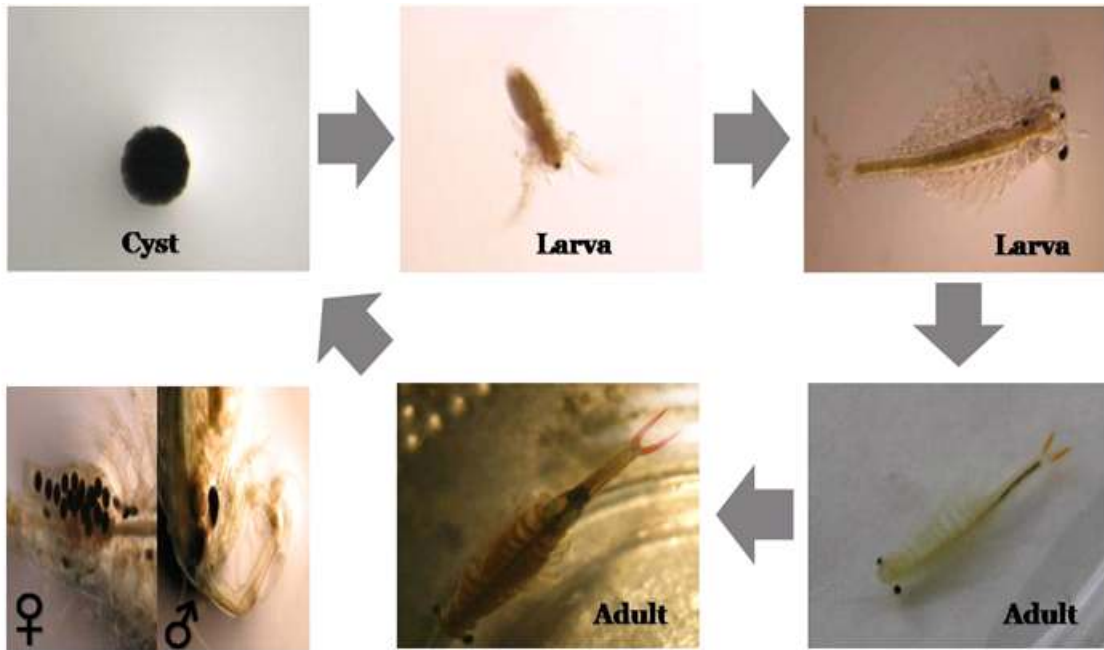
(4) 풍년새우 분리 및 배양

풍년새우의 배양을 위해서 2008년 6월 전라남도 장성군에 위치한 논에서 풍년새우 300여 개체를 채집하여 분리 배양하였다. L16 배지에 *Selenastrum capricornutum*, *Scenedesmus acutus*, *Cryptomonas ovata*를 단일 또는 혼합하여 먹이를 주었으며 3일~7일 사이에 새로운 배지를 공급해 주었다.

배양은 실험실 내와 성장상 안에서 이루어졌으며 성장상 안의 온도는 낮, 밤 25°C를 유지하며 낮과 밤의 주기를 16h:8h로 설정해 주었다. 유성생식을 위해 암수개체를 같은 장소에 배양하였으며 2주 정도 지나 성숙한 개체를 분리하여 배양하였다. cyst를 생성한 암컷을 수컷과 같이 배양하여 수정 및 산란을 유도하였으며 바닥에 산란된 cyst는 64 μm mesh를 이용하여 재선별하였다.

재선별된 cyst는 배양병에 나누어 증류수, L16배지, L16($\times 12$ NaNO₃) 배지 등을 단일 및 혼합하여 15°C~25°C 조건으로 부화시킨 후, 부화한 유생은 하루이내에 다른 배양병에 옮겨주어 먹이를 공급하였다.

풍년새우는 실내 배양을 위해 cyst에서의 부화는 알맞은 조건하에서 1~2일 경과 후 부화하였으며 개체간의 차이가 존재하나 10~14일 정도 지나면 성숙하여 성체의 모습을 갖추었다. 성숙하면서 수컷의 경우 머리 부분에 더듬이와 같은 부속지가 구분되어 크게 자라며 암컷의 배 밑부분에 cyst를 저장하는 저장낭을 가지는 것을 관찰하였다. 부화 후, 2주~3주가 지나면 암컷은 cyst를 생성하고 수컷과의 짝짓기가 진행되었다. 3주 이후에 각 개체별로 순차적으로 산란하게 되며 산란된 cyst는 조건이 갖추어지면 부화하게 된다[그림 3.1.40].



[그림 3.1.40] 풍년새우(*Branchinella kugenumaensis*) 생활환 모식도

암컷의 경우 개체당 300개 정도의 많은 양의 cyst를 생성, 산란하기 때문에 성체로의 성장배양과 짝짓기를 위한 적정한 수의 수컷의 배양은 대량 생산의 가능성을 보여준다. 또한 산란된 cyst는 건조 및 stock 형태로 보관하여 필요시 부화시킬 수 있어 배양시기의 조절이 가능하다. 실제로 이번 연구에 사용한 풍년새우 개체들은 부화시기를 조절함으로써 각 실험에서 cohort를 사용할 수 있었다. 이를 위해서는 온도, 빛, DO, pH, 먹이, 배지의 신선도 등의 유지관리가 필요하다[그림 3.1.41].

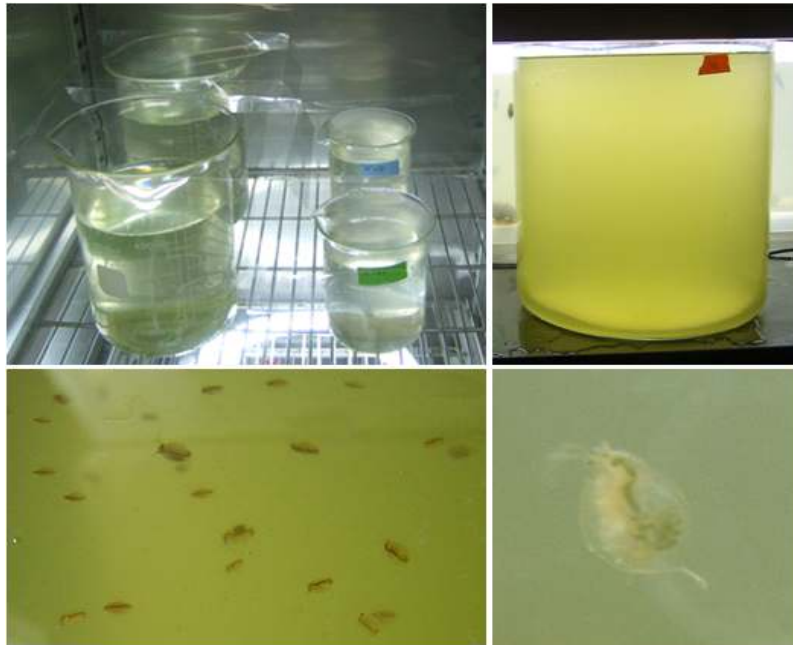


[그림 3.1.41] 풍년새우(*Branchinella kugenumaensis*) 배양 모습

(5) 동물플랑크톤의 분리 및 배양

대형 동물플랑크톤(*Daphnia*)의 분리를 위하여 남조 대발생 수역인 건국대학교 내 일감호의 시료를 플랑크톤 네트(망목의 크기 64 μm)로 예인한 후, 실험실로 운반하여 즉시 해부현미경하에서 분리 후 well plate에 넣어 동물플랑크톤의 성장을 계속 관찰하였다. 분리된 종은 포르말린(최종농도 4%)으로 고정된 후 해부현미경 하에서 동정 하였다.

Well plate에서 배양된 동물플랑크톤은 배양이 성공하였을 때 플라스크 및 비이커 수준으로 점차 배양용기의 용량을 늘려나갔다. 사용한 배지는 현장수를 10 μm 의 망목으로 걸러서 사용하였다. 온도는 현장수온을 고려하여 15~25 $^{\circ}\text{C}$ 로 조절하고, 광과 광주기를 각각 50 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 14h:10h LD cycle로 하여 배양하였다.



[그림 3.1.42] 동물플랑크톤(*Daphnia*) 배양모습

(6) 식물의 추출물

유해조류 제어에 효과적인 물질탐색을 목적으로 왕겨 추출물을 이용한 조류제어 효과를 조사하였다. 왕겨는 건국대학교 실습농장에서 재배된 일품벼(*Oryza sativa*)를 수확하여 얻었으며, 이를 다시 실험실에서 실온(25 $^{\circ}\text{C}$) 상태로 7일 동안 건조하여 분쇄기를 이용해 분말화하였다. 왕겨 분말 10 kg은 methanol 용매 60 L에 침지시켜, 7일 동안 실온에서 용매 추출하였다. 7일 경과 후에는 여과지(Whatman No.1)를 사용하여 여과하였고, 여과액은 vacuum evaporator(N-1000, EYELA, Japan)를 사용하여 감압 농축시켜 최종적으로 150 g의 methanol 추출물(crude extract)을 얻었다. 왕겨 추출물은 실험에 사용할 때까지 영하 10 $^{\circ}\text{C}$ 상태에서 냉동 보관하였다.

(7) 새뱅이 채집 및 관리

수체내 Chl-*a*를 조절 유용생물을 탐색 중 조류를 섭식하는 대형무척추동물의 가능성을 확인하였다. 새뱅이의 분리를 위하여 건국대학교내 일감호에 어항을 던져 청소새우과의 새뱅이를 채집하였으며 분리한 종은 유리수조(30 × 40 × 30 cm)에 24시간 동안 폭기하여 탈염한 수돗물에서 유지하였다.

배양은 실험실 내에서 이루어졌으며 온도는 15~20℃를 유지하며 낮과 밤의 주기를 16h:8h로 설정해 주었다. 먹이는 3일에 1회씩 수조부피의 20%를 현장수로 교환하였다.

나. 유용생물을 이용한 수질개선 효과 및 평가

본 연구는 다양한 서식환경에서 선정한 유용생물 및 유용물질(어류, 동물플랑크톤, 말조개, 논우렁이, 풍년새우, 새뱅이, 왕겨추출물 등)을 대상으로 조류제어 효과를 평가하였으며, 이와 함께 각 유용생물들의 생리 생태적 특성을 분석함으로써 유용생물의 적용에 필요한 주요 변수들을 파악하였다.

(1) 대형 동물플랑크톤(*Daphnia magna*)의 남조섭식 실험

식물플랑크톤 섭식하는 대형 동물플랑크톤을 통한 조류 대발생의 억제는 저비용의 생물친화적 조류제어 방법으로 국내외에서 여러 차례 시도가 이루어져 왔다. 그러나 국내에서는 녹조류가 아닌 유해조류인 남조류를 대상으로 섭식에 의한 생물조절 효과를 검증한 사례가 거의 없었다. 본 연구는 유해 남조류를 대상으로 대형 동물플랑크톤의 섭식효과 실험을 수행하였다.

(가) 연구내용

본 연구에서 이용된 대형 동물플랑크톤 종은 *Daphnia magna*를 사용하였으며, 조류종은 남조 *Microcystis aeruginosa*(NIES 88, 101, 298) 및 녹조 *Chlorella*를 사용하였다. 독소 유무에 따른 여과효과, 대형 동물플랑크톤의 크기에 따른 여과효과, 대형 동물플랑크톤의 밀도에 따른 여과효과 등을 조사하였다.

독소 유무 및 대형 동물플랑크톤의 크기에 따른 여과효과는 독성종으로 NIES 298을 사용하였고, 비독성종으로 NIES 101을 사용하였다. 이때 *Daphnia magna*는 1 mm 이하의 작은 크기, 2 mm 이상의 큰 크기로 나누어 각각 1 L 당 100개체로 실험하였다. 또한 대형 동물플랑크톤의 밀도에 따른 여과효과는 독성종인 NIES 88을 대상으로 2 mm 이상의 큰 크기인 *Daphnia magna*를 사용, 대조군(0 ind.), 처리군(50, 100 ind. L⁻¹)으로 나누어 그 효과를 비교하였다. 그 이후에는 *Chlorella*를 사용하여 대형 동물플랑크톤의 밀도에 따른 여과효과를 30 L 규모의 용량에서 대조군(0 ind. L⁻¹), 처리군(3, 5, 10, 20, 40 ind. L⁻¹)으로 나누어 그 효과를 비교하였다.

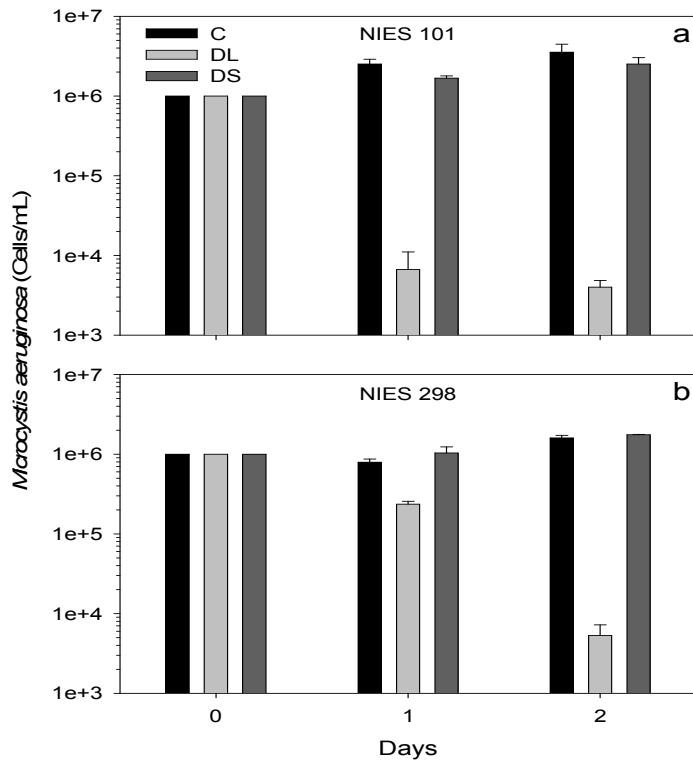
동물플랑크톤의 여과율은 다음과 같이 Gauld의 식(Gauld, 1951)을 변형하여 산정하였다.

$$F = V \times (\ln(C1) - \ln(C2)) / (n \times t)$$

F = 섭식율(cells ind.⁻¹ h⁻¹)
 C1 = 대조구 조류농도
 C2 = 처리구 조류농도
 V = 배지의 용량(mL)
 n = zooplankton의 개체수
 t = 섭식시간(h)

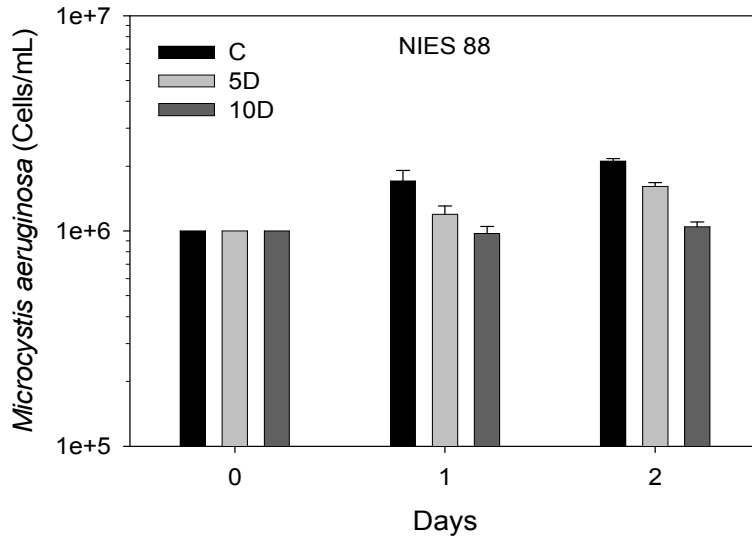
(나) 연구결과

독소 유무의 차이에 따른 제어효과에서 2 mm 이상 크기(DL)의 *D. magna*는 NIES 101의 경우 24, 48시간 후 여과율이 각각 2.47, 1.42(mL ind.⁻¹ h⁻¹), NIES 298의 경우 각각 0.51, 1.19(mL ind.⁻¹ h⁻¹)을 나타내어, 비독성 조류가 실험 하루만에 빠른 제어 효과를 보인 반면에, 독성 조류는 2일 후 제어효과를 보여 조류의 독성유무에 따라 그 차이를 나타냈다. 그러나 1 mm 이하 크기(DS)의 *D. magna*는 독성과 비독성 모두 제어효과가 거의 없었다[그림 3.1.43].



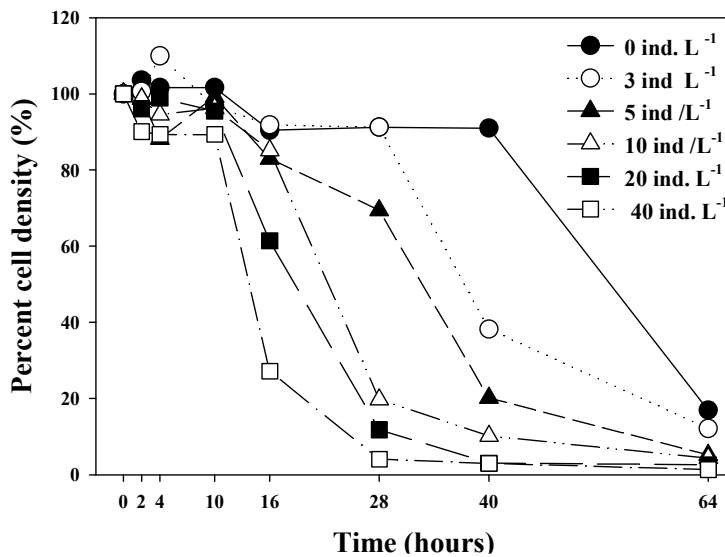
[그림 3.1.43] 조류의 독소 유무와 물벼룩(*Daphnia magna*)의 크기에 따른 섭식효과(a: 비독성종, b: 독성종)

독성종인 NIES 88을 대상으로 실시한 *D. magna*의 밀도에 따른 여과효과는 2 mm 이상의 큰 크기인 *D. magna*를 사용했을 때, 50 ind. L⁻¹의 경우 24, 48시간 후 여과율이 각각 0.15, 0.06(mL ind.⁻¹ h⁻¹), 100 ind. L⁻¹의 경우 24, 48시간 후 여과율이 각각 0.23, 0.15(mL ind.⁻¹ h⁻¹)을 나타내어 *Daphnia*를 두 배 첨가한 경우에 여과율이 훨씬 높게 나타났다[그림 3.1.44].



[그림 3.1.44] *Daphnia magna*의 밀도에 따른 독성조류 섭식효과

*Chlorella*에 대한 *D. magna*의 밀도에 따른 섭식효과는 각각의 처리군 3, 5, 10, 20, 40 ind. L⁻¹에서 모두 제어효과가 나타났으며, 특히 16시간 후에는 20 ind. L⁻¹ 이상의 처리구에서 그 효과가 매우 두드러지게 나타났고, 28시간 후에는 10 ind. L⁻¹ 이상의 처리구에서, 30시간 이후에는 모든 처리구에서 효과가 나타났다[그림 3.1.45].



[그림 3.1.45] *Daphnia magna*의 밀도에 따른 *Chlorella*의 섭식효과

이후에는 대조구의 급격한 세포농도 감소와 더불어 각 실험구간의 차이가 크지 않았다. 처리 64시간 후 각 처리군의 섭식율은 다음의 [표 3.1.13]과 같다. 또한 *D. magna*의 성장은 활발하여 98시간 이후에는 모든 처리군에서 10배 이상의 밀도증가를 나타내었다[그림 3.1.46].

[그림 3.1.46] 실험 98시간 후 *Daphnia* 밀도변화(A: >1000 μm , B: 200~1000 μm , C: total)

[표 3.1.13] 처리 64시간 후 *Daphnia magna*의 밀도에 따른 *Chlorella*의 여과율 비교

처리밀도	3 ind. L ⁻¹	5 ind. L ⁻¹	10 ind. L ⁻¹	20 ind. L ⁻¹	40 ind. L ⁻¹
여과율 (mL ind. ⁻¹ h ⁻¹)	1.74	3.71	2.15	1.47	0.99

(2) 물벼룩(*Daphnia magna*)과 민물새우의 *Microcystis* 섭식 실험

(가) 연구내용

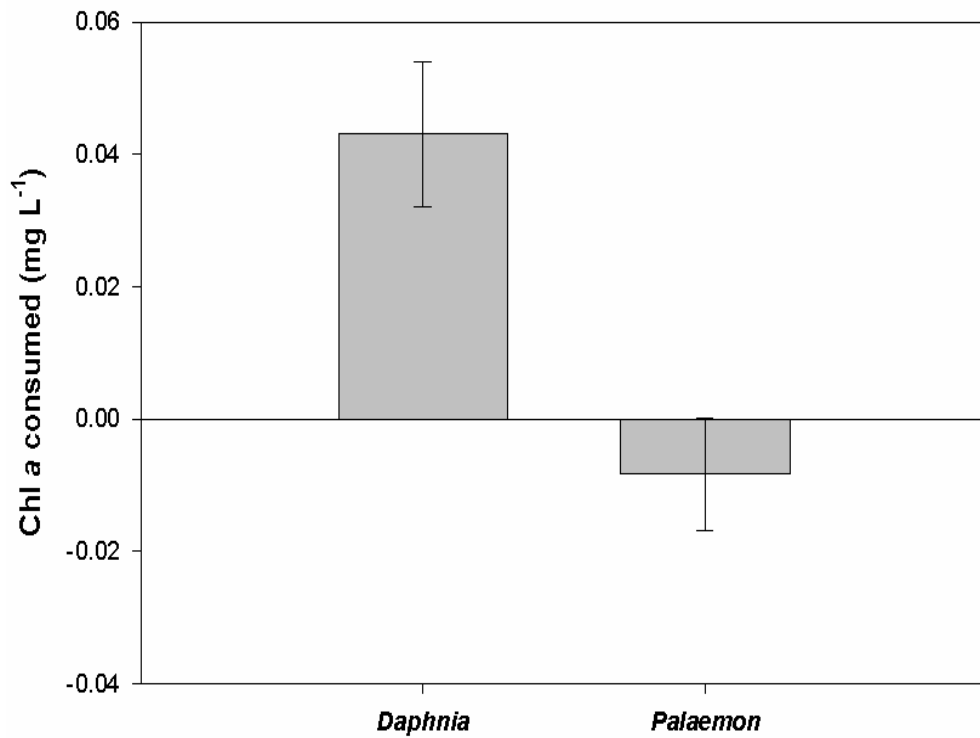
농업용 저수지 수체내 조류를 섭식하는 생물로서 물벼룩과 민물새우(줄새우, 징거미)의 남조류에 대한 조류 섭식능을 비교 실험하였다.

민물새우의 남조류 *M. aeruginosa* 단일세포 섭식 실험은 변형 L16 배지 200 mL에 남조류 *M. aeruginosa*(UTEX 2386) 200 mL를 혼합하여 민물새우 1개체씩 500 mL 비이커에 넣고 (n=3) 24 h 동안 암조건에서 진행하였다. 대조구는 민물새우를 넣지 않고 같은 조건에서 배양하였다. 24 h 후 흡광도를 측정하여 Chl-a 농도를 측정하였으며, 민물새우의 *M. aeruginosa* 군체 섭식실험의 경우 변형 L16 배지 200 mL에 경기도 수원시 서둔동에 위치한 서호에서 채집한 *M. aeruginosa* 군체를 포함한 호수물 200 mL를 이용하여 물벼룩과 민물새우를 1마리씩 5반복으로 48 h 배양하고 Chl-a 농도의 변화와 *M. aeruginosa* 군체의 크기 변화를 측정하였다. 군체의 크기변화는 섭식 전후의 *M. aeruginosa* 군체를 무작위로 각 처리구마다 10개씩 선정하여 가장 긴 축을 기준으로 해부 현미경으로 40배에서 측정하였다.

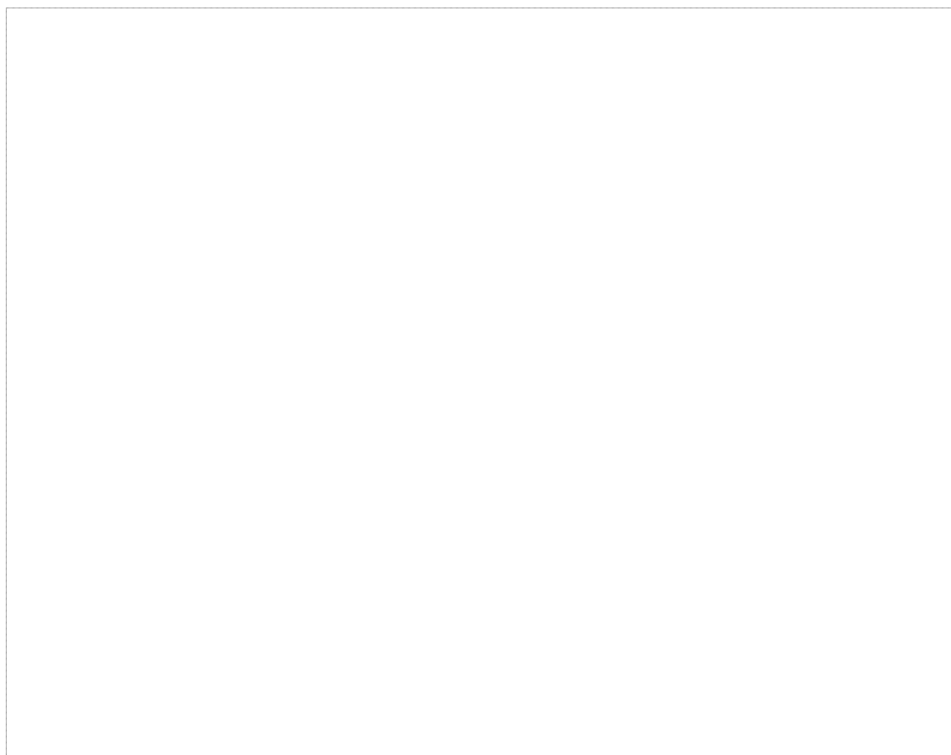
(나) 연구결과

물벼룩과 민물새우의 남조류 섭식능을 알아보기 위하여 *Daphnia magna*와 줄새우를 이용하여 *M. aeruginosa* 단일세포 섭식 실험을 실시하였다[그림 3.1.47]. filter feeder인 물벼룩은 남조류 단일세포 제거능력을 보였으나 남조류 단일세포를 제거하지 못하였다.

한편 남조류 군체에 대한 제거능을 알아보기 위해 물벼룩과 징거미(*Macrobrachium* sp.)를 이용한 군체섭식 실험을 실시하였으나 물벼룩과 징거미 모두 군체에 대한 제거능은 보여 주지 못하였다[그림 3.1.48]. 또한 남조류 군체에 대한 물리적인 영향을 통하여 군체 섭식 전과 섭식 후에 군체 크기 분포에 영향을 주는지 알아보았다[그림 3.1.49]. 물벼룩과 징거미 모두 남조류 군체 크기에 별다른 영향을 주지 않는 것을 확인하였다



[그림 3.1.47] *Daphnia magna*와 줄새우(*Palaemon* sp.)의 1일 *M. aeruginosa* 제거율



[그림 3.1.48] *Daphnia magna*와 징거미(*Macrobrachium* sp.)의 1일 *M. aeruginosa* 군체 제거율



[그림 3.1.49] *Daphnia magna*와 징거미(*Macrobachium* sp.)의 섭식 전후의 *M. aeruginosa* 군체 크기변화

(3) 물벼룩과 풍년새우의 남조류 섭식 능력 평가

물벼룩은 저수지 수체내 다양한 조류를 섭식하는 생물로서 대형담의 청수기에 영향을 미친다고 알려져 있다 또한 풍년새우는 눈에 물이 채워지는 시기에 발생을 하며 개체가 동물 플랑크톤보다 큰 동물로 식물 플랑크톤을 섭식한다고 알려져 있다. 본 연구에서는 두 생물간 남조류의 섭식능력을 평가하였다.

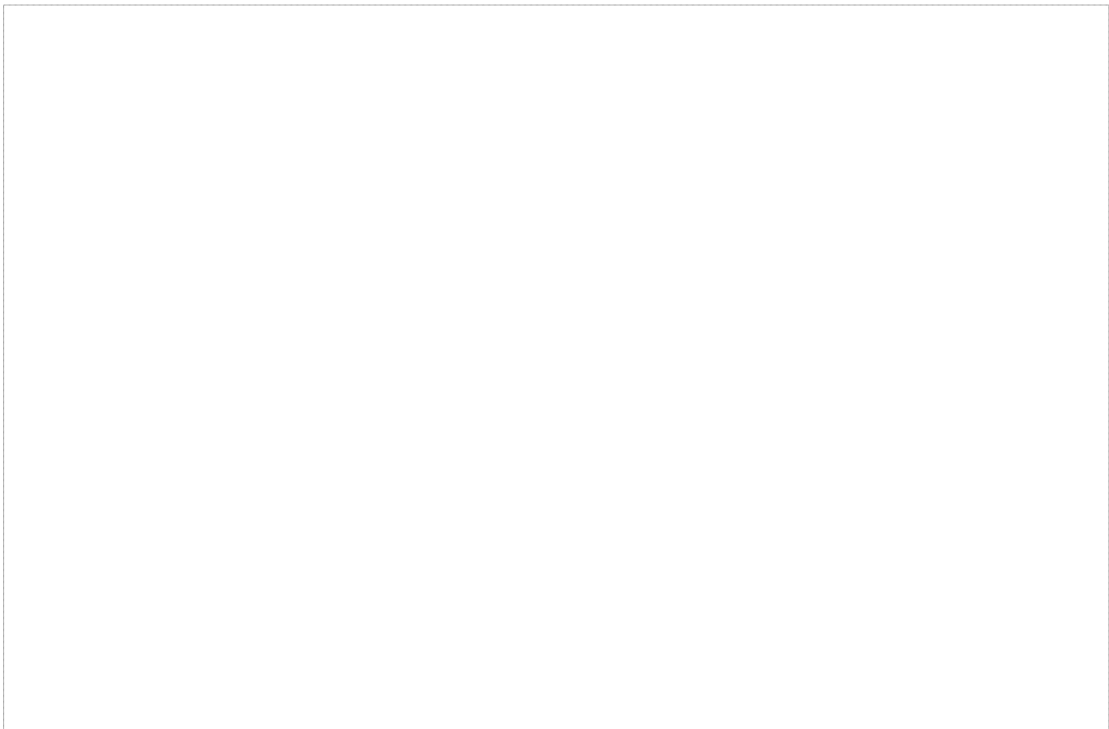
(가) 연구내용

물벼룩(*Daphnia magna*)과 풍년새우(*B. kugenumaensis*)를 대상으로 남조류 *Microcystis aeruginosa*를 이용한 섭식실험을 시행하였다. *M. aeruginosa*는 각각 군체, 비독성, 독성을 가지는 종을 이용하여 실험하였다. 비독성 및 독성 strain은 UTEX를 통해 분양받은 Uni-cell형태(독성 strain: UTEX2385, 비독성 strain: UTEX2386)를 이용하였다. 남조류 배양은 변형 L16 배지(NaNO₃ 12배 강화)를 이용하여 batch culture로 25°C에서 명주기 16 h, 암주기 8 h 환경에서 이루어졌다. 군체 섭식 실험의 경우, *Microcystis* bloom이 일어난 경기도 수원시 서둔동에 위치한 서호에서 채집하여 386 µm 체로 거른 후 사용하였다. *M. aeruginosa*의 초기 농도는 spectrometer를 이용하여 664, 647, 630 nm 파장에서의 흡광도를 측정된 후 계산식으로 계산하여 맞추어 주었다. L16 배지와 *M. aeruginosa*를 혼합한 용액 100 mL을 250 mL 비커에 넣고

동물플랑크톤을 각 1개체씩 넣은 후 암조건, 25°C에서 12시간 동안 섭식실험을 진행하였다. 섭식 전, 후의 혼합용액을 GF/C membrane filter로 여과한 후 아세톤을 이용하여 추출, fluorometer를 이용하여 Chl-*a*를 측정하였다. 섭식 전, 후의 Chl-*a* 양을 이용하여 정화율 (clearance rate)을 계산하였다.

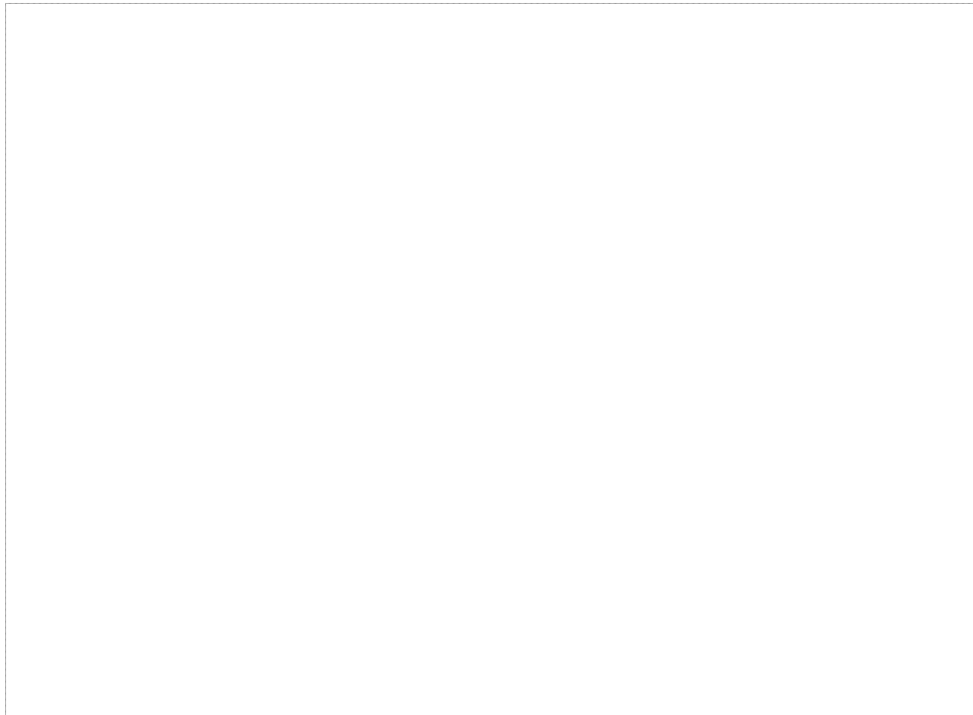
(나) 연구결과

물벼룩(*Daphnia magna*)과 풍년새우(*B. kugenumaensis*)를 대상으로 *Microcystis aeruginosa*에 대한 섭식실험을 시행하였다. 배지와 *M. aeruginosa*를 혼합하여 100 mL을 250 mL 비커에 각 1개체씩 넣은 후 암조건에서 12시간동안 섭식 실험을 진행하였다. *M. aeruginosa*는 각각 군체, 비독성, 독성을 가지는 종을 이용하여 실험하였다. 독성과 비독성 strain은 UTEX에서 분양을 받았고, 군체는 경기도 수원시 서둔동에 위치한 서호에서 채집하여 386 µm 체로 거른 후 사용하였다. 실험결과 물벼룩 보다 풍년새우가 모든 실험에서 높은 개체당 여과율을 보였다[그림 3.1.50].



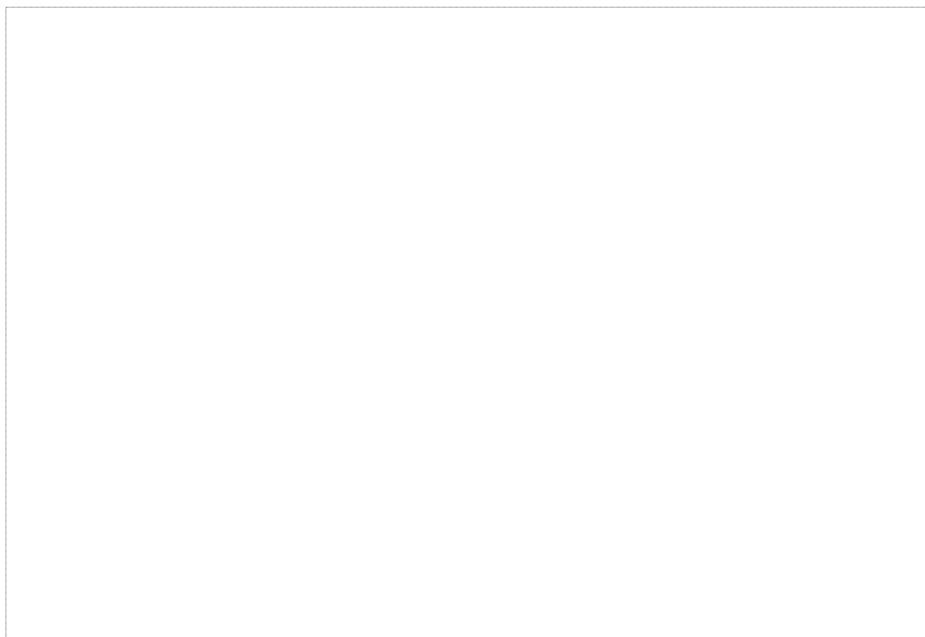
[그림 3.1.50] *B. kugenumaensis*와 *D. magna*의 *M. aeruginosa* 특성별 섭식실험(C: 군체, N: 비독성, T: 독성)

군체 섭식실험 전후의 *M. aeruginosa* 군체 크기 분포를 비교하여 보며 대조군에서는 실험 전후 크게 차이가 없었으나 물벼룩과 풍년새우의 섭식 전후는 군체 크기 분포가 차이가 남을 알 수 있다. 물벼룩의 경우 직경 50 µm 군체의 경우 섭식을 하는 것으로 보이나 그 보다 큰 군체의 경우 거의 섭식을 하지 못하였다[그림 3.1.51].



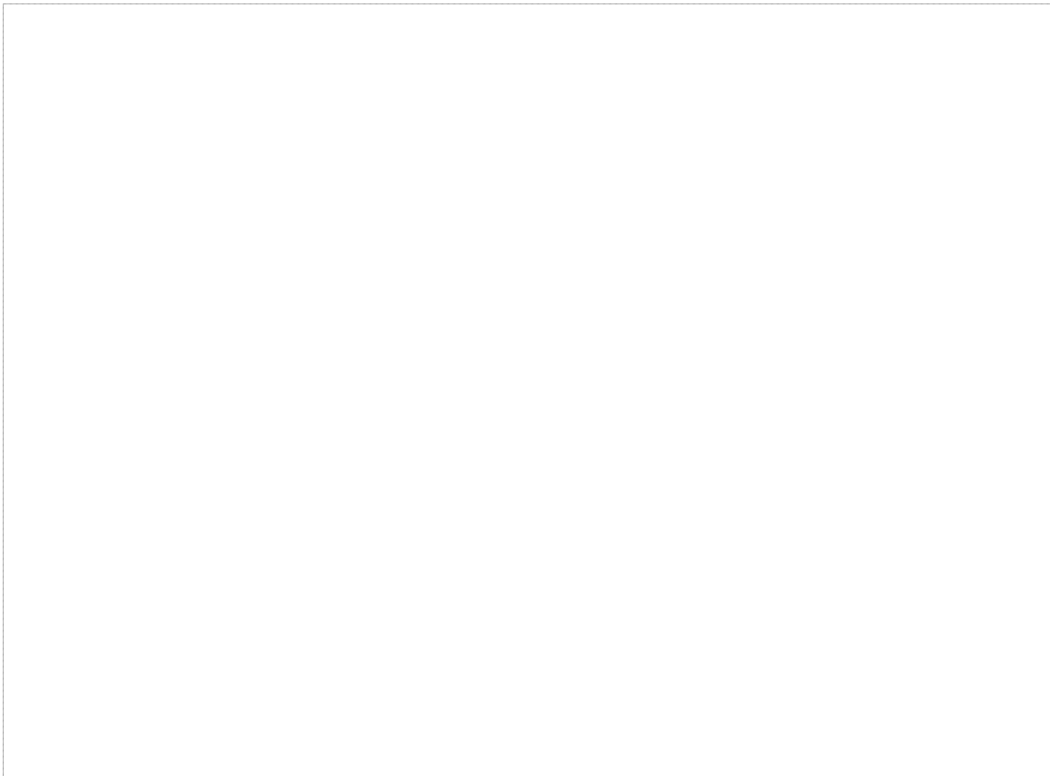
[그림 3.1.51] *M. aeruginosa* 군체 섭식실험에 대한 실험 전후 군체크기 분포도

풍년새우의 경우 50~100 μm 크기 범위의 남조류 군체에 대한 섭식 효과를 보여 물벼룩 보다 군체 섭식능력이 우수한 것으로 판단되었다[그림 3.1.52].



[그림 3.1.52] *M. aeruginosa* 군체 섭식실험에 대한 실험 전후 군체크기 분포도

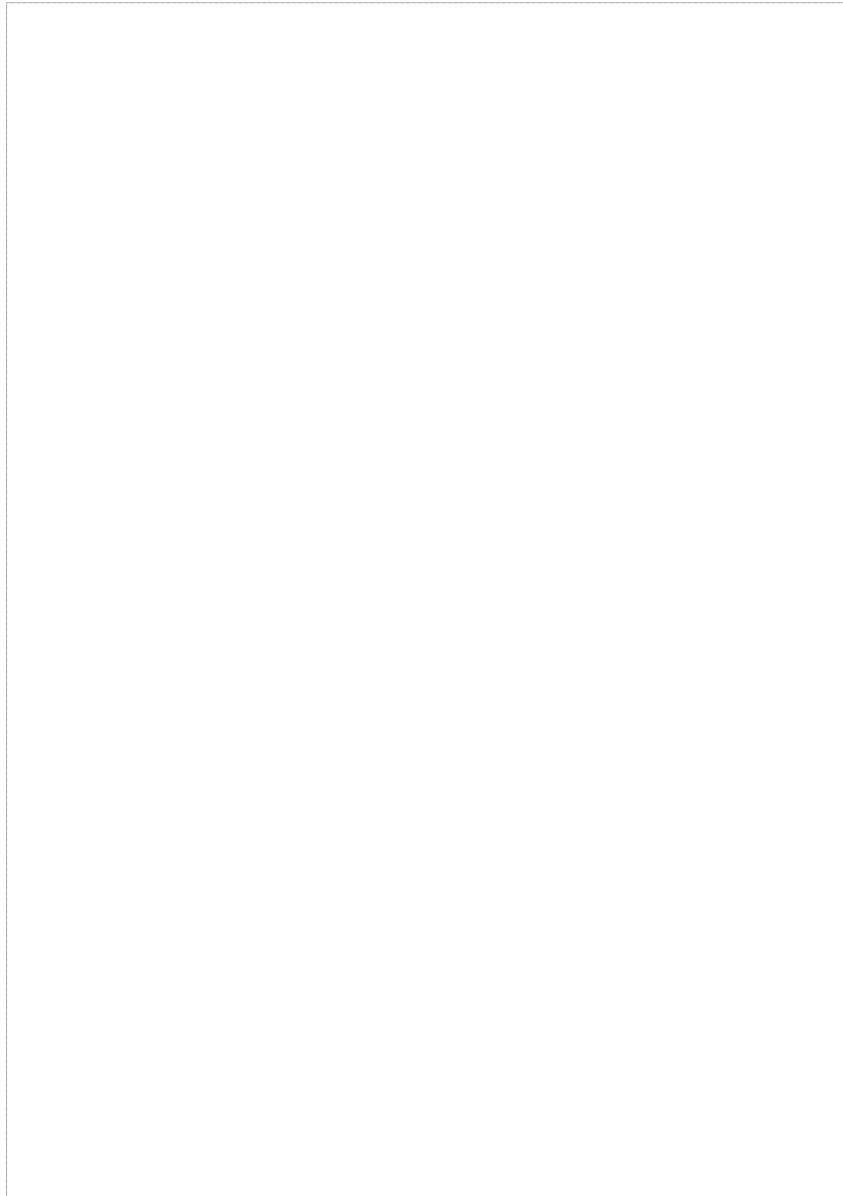
이러한 실험 결과에서 풍년새우는 남조류 *M. aeruginosa* 단일 세포 및 군체에 대해 상당한 섭식능력이 있음을 알 수 있었다. 이러한 섭식 능력을 가진 풍년새우를 실제 남조류 제어에 응용하려면 Microcystin 등 독성물질을 분비하는 *M. aeruginosa* 우점 환경에서 상당한 기간 생존 능력이 있어야 할 것이다. 이러한 생존 능력을 검증하기 위해 독성 *M. aeruginosa* 섭식조건하에 부화한 유생부터 순차적으로 생존 실험을 시행하였다. 실험 결과 중간 정도 크기(6 mm 정도) 이상의 풍년새우는 독성 *M. aeruginosa* 만 섭식하면서 11일 정도 생존하여 독성 남조류 환경에서도 상당한 기간 동안 생존할 수 있는 능력을 보였다[그림 3.1.53].



[그림 3.1.53] *M. aeruginosa*(독성)와 *S. capricornutum* 섭식 조건에서의 풍년새우 길이 성장

독성 남조류 *M. aeruginosa*에 장기간 순응시킨 풍년새우는 더 높은 내성을 보일 것으로 예상되며 실제 생물조절에 쓰일 생물은 이러한 독성 남조류 *M. aeruginosa*에 장기간 순응시켜 적응된 strain을 적용해야 할 것이다.

남조류 제어 효과가 가장 좋은 크기 조건과 환경 조건의 영향을 알아보기 위해 풍년새우의 크기별 섭식률을 빛이 있는 조건과 없는 조건에서 측정하였는데, 중간 크기의 풍년새우가 다른 크기에 비해 높은 섭식률을 보였다[그림 3.1.54]. 하지만 *M. aeruginosa*에 대한 여과율이 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 경향을 보이고 단시간의 섭식 실험에서 보였던 높은 여과율을 보여주지는 못하여 독성 *M. aeruginosa*에 대한 풍년새우 섭식에 영향을 볼 수 있었으며 이를 극복하기 위해서는 역시 독성 *M. aeruginosa*에 장기간 순응시킨 풍년새우를 이용하는 것이 필요할 것으로 판단되었다.



[그림 3.1.54] *M. aeruginosa*(독성)와 *S. capricornutum* 섭식 조건에서의 풍년새우 길이 성장 및 크기에 따른 여과율

(4) 식물(왕겨) 추출물을 이용한 조류성장 억제 실험

녹조제어에 효과적인 물질탐색을 목적으로 왕겨 추출물을 이용한 조류제어 효과를 조사하였다. 한 식물체에서 어떤 물질이 방출되어 다른 식물체의 성장을 억제시키는 작용을 타감작용(allelopathy)이라고 하는데, 식물체내의 allelochemical들은 지금까지 주로 phenolic compounds와 tannin 종류로 보고되었다. 이러한 allelochemicals의 작용은 호르몬성 식물생장조절물질과 달리 식물체내에 비교적 고농도로 존재하고, 식물자체에는 특정한 생리적 역할을 갖고 있지 않

으나, 분비되어 타식물의 발아 및 생장억제, 호흡, 광합성, 영양분의 흡수, 호르몬의 합성 등을 방해한다. 최근에는 참나무류, 벗짚 및 보릿짚 추출물내의 phenolic compounds가 *Microcystis* sp.와 *Scenedesmus* sp. 등의 생장을 억제한다고 알려졌다. 본 연구에서는 유독성 남조류인 *Microcystis aeruginosa*를 시험종으로 하여 왕겨 추출물의 조류생장 억제 효과에 관해 조사하였다

(가) 연구내용

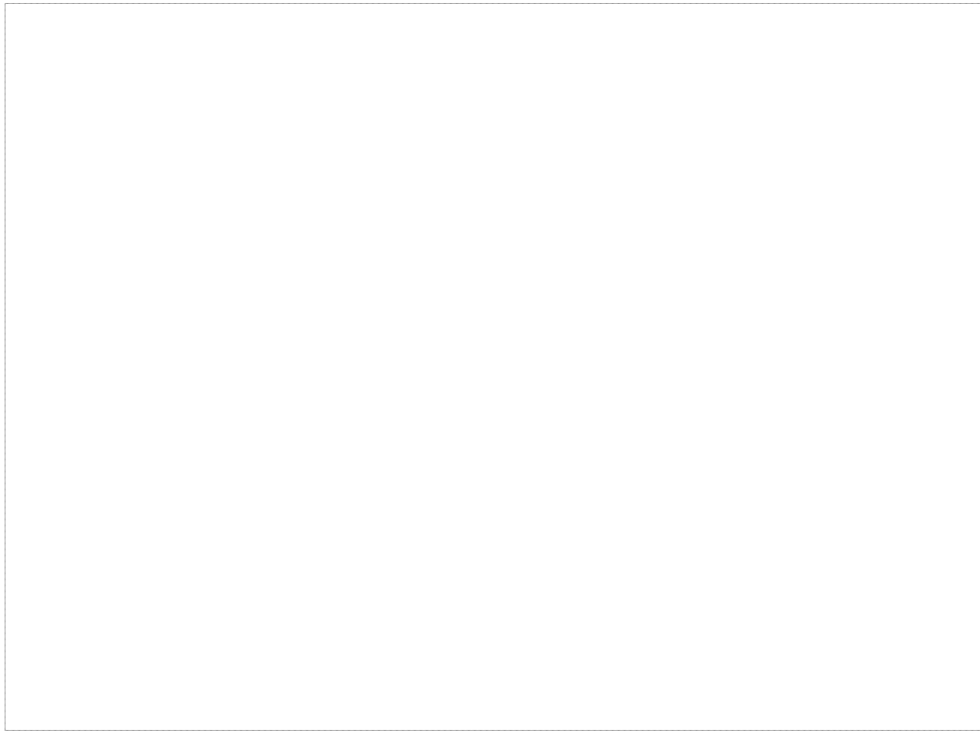
왕겨 메탄올 추출물을 이용하여 남조 *Microcystis aeruginosa*(NIER 298, UTEX 2388)의 생장 억제 효과를 조사하였다. 조사수역인 충남 보령시 신구저수지에서 채수한 시료를 GF/C 유리섬유 여과지로 여과하여 250 mL 삼각플라스크에 넣어 현장수를 배지로 하고, 각각의 처리구에는 왕겨 메탄올 추출물을 1000, 100, 10, 1, 0.1, 0.01 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도로 첨가하였다. 초기에는 1000, 100, 10, 1 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도의 왕겨 메탄올 추출물을 첨가하여 실험하였으며, 이후 농도를 감소시켜 10, 1, 0.1, 0.01 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도로 조사하였다.

배양시료는 25°C의 온도조건, 100 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (14h:10h LD cycle)의 광조건에서 100 rpm의 교반속도로 7일간 실험하였다. 배양 기간 동안 남조류 세포 농도의 변화는 haemocytometer(Laboroptik, Fuchs-Rosenthal)를 이용하여 현미경 하에서 계수하였다.

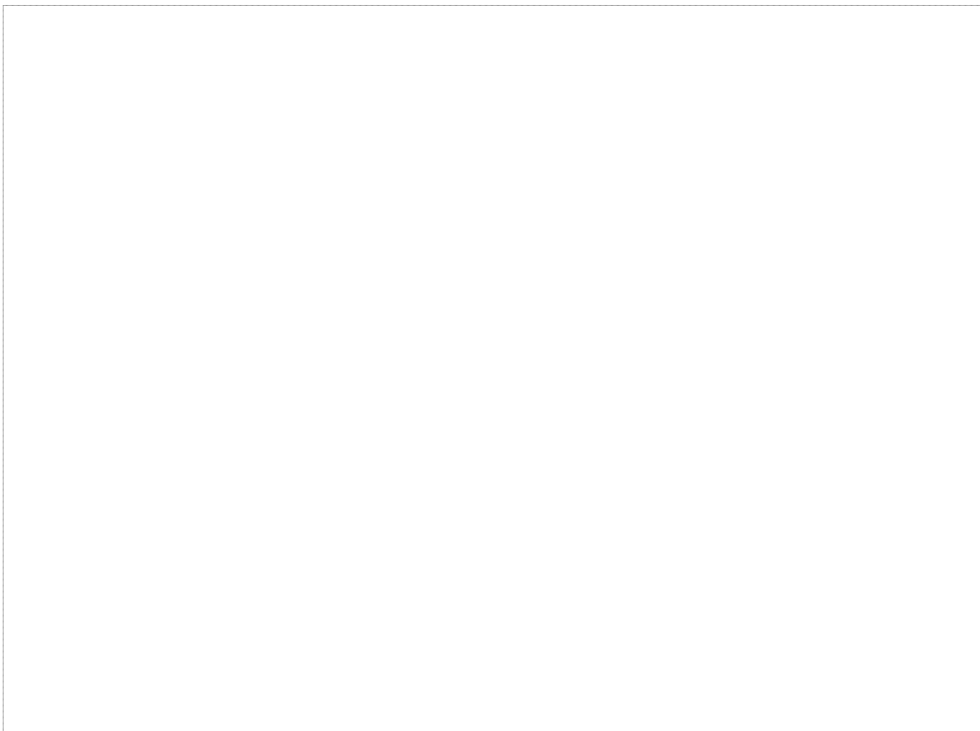
(나) 연구결과

1000, 100, 10, 1 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 왕겨 메탄올 추출물을 *M. aeruginosa*(NIER 298) 배양시료에 각각 첨가하여 실험한 결과, 왕겨를 처리한 모든 시료가 98% 이상의 높은 생장 억제 효과를 나타냈다. 처리구는 초기(2일 후)부터 64% 이상의 높은 생장 억제 효과를 나타내었고, 7일 후에는 각각 99, 99, 98, 98%의 효과를 나타내었다[그림 3.1.55]. 이때 가장 높은 농도인 1000 $\mu\text{g L}^{-1}$ 는 100, 10, 1 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도에서의 억제효과를 비교하여 유의한 차이를 보였으나($P < 0.05$), 100, 10, 1 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 추출물 첨가농도 간에는 서로 유의한 차이를 보이지 않았다($P > 0.05$).

왕겨 메탄올 추출물을 *M. aeruginosa*(UTEX 2388) 배양시료에 각각 10, 1, 0.1, 0.01 $\mu\text{g L}^{-1}$ 첨가한 시료 역시 초기(2일 후)에 60% 이상의 효과적인 생장 억제를 나타내었고, 7일 후에는 각각 98, 98, 98, 97%의 높은 생장 억제 효과를 나타내었다[그림 3.1.56]. 이 실험에서 가장 낮은 농도인 0.01 $\mu\text{g L}^{-1}$ 은 10, 1, 0.1 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도와 세포농도를 비교하여 유의한 차이($P < 0.05$)를 보였으나, 10, 1, 0.1 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도간에는 서로 유의한 차이를 보이지 않았다($P > 0.05$). 본 연구 결과에 의하여 왕겨 메탄올 추출물은 저농도인 0.01 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서도 매우 효과적인 조류생장 억제를 하는 것으로 나타나, 왕겨추출물이 유해남조류 억제를 위한 좋은 후보물질이 될 수 있음을 시사하였다.



[그림 3.1.55] 왕겨 추출물의 *Microcystis aeruginosa*(NIER 298) 성장 억제 효과



[그림 3.1.56] 왕겨 추출물의 *Microcystis aeruginosa*(UTEX 2388) 성장 억제 효과

(5) 독성 조류에 대한 국내산 어류(붕어)의 효과

수중생태계의 상위영양단계에 속하는 어류의 도입 또는 제거는 하위영양단계에 대한 섭식압력으로 전달되어 최종적으로 식물플랑크톤의 감소를 유도하거나, 어류 및 동물플랑크톤의 섭식 과정을 통해 생성된 다양한 크기의 유·무기물이 다시 박테리아 또는 미소플랑크톤을 거쳐 상위그룹에 먹이를 재공급하는, trophic cascade 특성을 나타낸다(Carpenter and Kitchell, 1984; McQueen *et al.*, 1989). 또한 어류도입은 박테리아와 미소플랑크톤과 같은 하위 그룹의 생물량, 투명도, 인, 질소 등의 농도변화를 유도하게 한다(Horn, 1991; Sarnelle, 1992). 어류를 이용한 수질관리방법은 중위도 지역을 경계로 하는 세계 여러 나라에서 시도한 바 있다(Carpenter *et al.*, 1985, 1987; McQueen, 1990; Shapiro, 1990; Findlay *et al.*, 1994). 최근 어류도입에 따른 뚜렷한 효과가 없다는 보고(DeMelo *et al.*, 1992)는 물론, 외래종 도입에 따른 고유 어종의 소멸, 새와 포유류 감소 및 부영양화 유도 등의 생태계 교란이 발생한다는 보고도 있다(Spancer *et al.*, 1991; Goldschmidt *et al.*, 1993). 대표적인 어종으로 백연어(*Hypophthalmichthys molitrix*)는 실내·외 실험을 통하여 조류제어능이 확인되어 왔으나(Laws and Weisburd, 1990; Starling, 1993; Lieberman, 1996), 호수에 직접 적용된 사례는 매우 드물다(김 등, 2001; Zhao, 2001). 특히 외래어종이 아닌 국내산 토종 어류를 이용한 수질개선 노력은 매우 빈약한 실정이며(농림부, 2005; 이 등, 2007), 특히 부영양호수의 수질개선(유기물 및 조류제어)을 위한 국내산 토종 참붕어를 이용한 섭식 연구는 거의 전무하다.

국내산 참붕어(*Pseudorasbora parva* Temminck *et* Schlegel)는 잉어목 잉어과에 속하고, 전국적으로 분포하며 국내 담수 생태계에서 흔히 관찰된다(최 등, 1990). 오염에 대한 강한 내성으로 수질오염이 심한 하천 및 저수지 등에서 잘 성장하며 저서성 부착조류, 저서곤충 및 기타 미소플랑크톤을 섭식할 수 있는 잡식성이다(최 등, 1990). 그러나 참붕어와 비슷하게 저서성 유기물을 섭식하는 어류(예, 백연어) (김 등, 2000; Kim *et al.*, 2000; 김 등, 2001)는 도입시 퇴적물의 교란을 발생시켜 수체 내 탁도 증가를 유발하며 영양염 용출로 인한 수질악화의 원인으로 작용할 수 있기 때문에(이 등, 2007; Matsuzaki *et al.*, 2007; Eugenia *et al.*, 2009), 어류를 이용한 수질개선이나 유기물 제어에 있어서 현장 적용에 많은 어려움을 가지고 있다.

여름철 부영양 호수나 하천에서 대발생을 일으키는 남조류는 종에 따라서 독소를 나타내며, 남조류의 독소는 어류와 플랑크톤을 비롯한 담수생물은 물론 식수로 이용하는 상수원에도 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(김 등, 1995). 국내에서 독소를 나타내는 대표적인 남조류는 *Microcystis aeruginosa* 로서 간 독성을 보이는 Microcystin을 생성하며, 수계에서 고농도로 분포할 시 생물농축으로 인한 부정적 영향을 미칠 가능성이 높다(김 등, 1995; Yasuno *et al.*, 1998; 김 등, 2005). 최근에는 수계에서 독성 남조류를 제어하고자 생태친화적인 방법의 일환으로 다양한 유용생물의 적용 노력이 활발하게 이루어지고 있으나(김 등, 2002; 김 등, 2004; 농림부, 2005; 이 등, 2008; 김 등, 2008) 생물 종에 따라서 독성 남조류에 대한 반응이 다르다는 연구가 보고된 바 있다(DeMott *et al.*, 1991; Haney *et al.*, 1994).

따라서 본 연구팀은 백연어와 같이 저서성 유기물의 섭식습성을 보이고 국내 토종이며 많은 지역에서 분포하는 참붕어를 대상으로 이들의 남조류 제어능에 대한 평가가 필요하다고 판단하

였으며, 국내산 토종 참붕어의 섭식특성 파악을 위해 (1) 참붕어 도입이 퇴적물 교란으로 인한 수질악화를 유도하는지, (2) 독성 또는 비독성 조류에 대한 선택적 섭식이 존재하는지, 그리고 (3) 현장 조건에서 남조류 제어능을 나타내는지 등에 대한 실내·외 실험을 수행하였다.

(가) 연구내용 및 방법

본 연구에 사용된 어류는 국내산 참붕어(*Pseudorasbora parva* Temmincket Schlegel)로서 국립수산과학원 청평 내수면연구소로부터 직접 분양 받았다. 분양 받은 붕어는 실험실로 운반하여 2일 동안 폭기 한 사육수에 넣고 시중에서 판매중인 어류용 사료(금비단 1호-우성사료)를 먹이로 유지시켰다. 수온은 분양 당시 수온($26^{\circ}\text{C} \pm 1$)으로 유지하였으며, 실험에 사용된 어류는 성어로서 각각 체장은 평균 8.7 ± 0.1 cm, 무게는 평균 7.2 ± 0.5 g 이다.

섭식실험은 크게 실내 소형수조(7 L) 실험과 야외 Enclosure(120 L) 실험으로 나누며 자세한 내용은 [표 3.1.14]과 같다.

[표 3.1.14] 어류의 조류섭식 실험을 위한 각 실험 디자인

	EXP I	EXP II	EXP III
Exp. repl.	3 × 3	2 × 2	3 × 3
Exp. vol. (L)	7 L	7 L	120 L
Exp. time (d)	9 / 13	5	12
Exp. water	Ilkam Lake	NIES 101*(Non-toxic) NIES 298(Toxic)	Ilkam Lake
Sediments	No / Yes	No	Yes
Initial Chl- <i>a</i> ($\mu\text{g L}^{-1}$)	138.0 / 39.7	50.3	170.9
Fish density (ind. L^{-1})	0.1, 0.4, 1 / 0.1, 0.3, 0.6	0.3, 0.7	0.04, 0.2
Sampling interval(hr)	24	24	24

NIES 101*: Non-toxic *Microcystis aeruginosa*, NIES 298: Toxic *Microcystis aeruginosa*(Yasuno *et al.*, 1998)

① 실험 1. 퇴적물 영향

퇴적물 비첨가 실험: 실험은 소형수조($20 \times 33 \times 20$ cm)에서 남조류 *Microcystis aeruginosa*가 대발생한 부영양 소형 인공호수의 현장수를 각 수조당 7 L 용량으로 넣어주었으며, 형광등을 이용하여 98 μmol , 광주기 12L:12D를 유지하였다. 4일에 한번 CB media 10%를 첨가하였으며, 실험 종료시까지 기포기를 이용하여 산소를 공급해 주었다. 실험은 어류를 도입하지 않은 대조군(C)과 어류를 0.1 ind. L^{-1} 밀도로 도입한 처리군(F1), 0.4 ind. L^{-1} 밀도로 도입한 처리군(F2), 1 ind. L^{-1} 밀도로 도입한 처리군(F3)으로 나누어 12개 수조에서 3반복으로 동시에 실험하였다.

퇴적물 첨가 실험: 실험은 남조류 *Microcystis aeruginosa*의 대발생하는 부영양 소형 인공호

수에서 현장수와 저층 퇴적물을 채집하여, 인공적으로 조류대발생을 유지하도록 설계한 대형 유리수조(50 × 65 × 120 cm)에서 실시하였다. 수조는 Heater(Amazon Heater 100 W)와 형광등을 이용하여 평균수온 26 ± 1.0°C 80 μmol, 광주기 12L:12D를 유지하였다. 실험 아크릴 수조는 상하가 노출된 투명 아크릴 원통(Φ 19 cm, height 40 cm)을 실험 수조 내에 총 12개를 설치하였고, 7 L의 현장수를 넣어주었으며, 원통의 하단은 톱니처럼 홈을 파내 퇴적물을 통하여 바깥 쪽과 안쪽 사이에 영양염류의 이동이 가능하도록 제작하였다(김 등, 2008). 실험은 어류를 도입하지 않은 대조군(C)과 어류를 0.1 ind. L⁻¹밀도로 도입한 처리군(F1), 0.3 ind. L⁻¹밀도로 도입한 처리군(F2), 0.6 ind. L⁻¹밀도로 도입한 처리군(F3)으로 나누어 12개 원통에서 3반복으로 동시에 실시하였다.

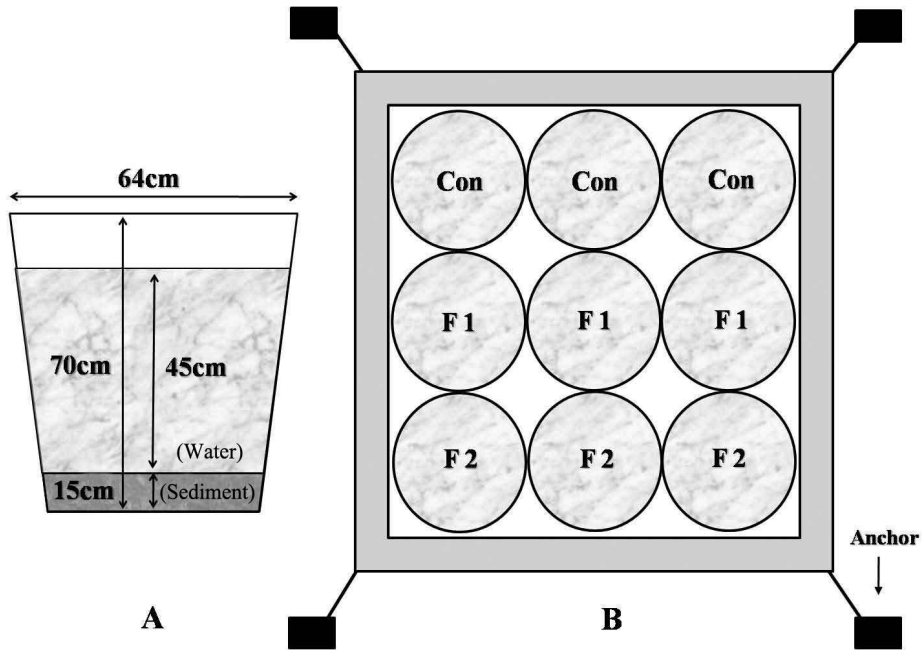
② 실험 2. 독성 및 비독성 조류

섭식실험은 실험실의 소형수조(20 × 33 × 20 cm)에서 NIES 101(Nontoxic)과 NIES 298 (Toxic)을 각 수조당 7 L용량으로 넣어주었으며, 퇴적물을 첨가하지 않았다. 형광등을 이용하여 98 μmol, 광주기 24L:0D를 유지하였고, 산소는 기포기를 이용하여 실험 종료시까지 공급해 주었다. 실험은 각각 NIES 101와 NIES 298을 대상으로 어류를 도입하지 않은 대조군(C)과 어류를 0.3 ind. L⁻¹밀도로 도입한 처리군(F1), 0.7 ind. L⁻¹밀도로 도입한 처리군(F2)으로 나누어 2반복으로 동시에 실험하였다.

실험에 사용된 남조류는 NIES 101(Non-toxic)과 NIES 298(Toxic)로 국립환경과학원에서 직접 분양 받았다. 분양 받은 균주는 NIES 101과 NIES 298 모두 Unicell의 형태를 보이며, 실험실에서 CB Media를 영양분으로 온도 27 ± 2.0°C, 광도 75 μmol, 광주기 24L:0D의 조건에서 배양하였다. 실험실에서 NIES 101은 Toxin 농도가 0 μg mg⁻¹ dry cells로 비독성의 형태를 보였고, NIES 298은 Toxin 농도가 0.168 μg mg⁻¹ dry cells로 독성 형태를 보였다(Yasuno *et al.*, 1998).

③ 실험 3. In situ mesocosm 실험

실험은 남조류가 대발생하는 부영양 호수(일감호)에서 대형 고무수조(Φ 64 cm, height 70 cm)를 이용하여 실시하였다[그림 3.1.57, A]. 각각의 수조는 서로 고정하여 총 9개를 설치하였으며, 각각의 수조에는 현장의 저층 퇴적물을 15 cm 높이로 넣어주었고, 부영양 호수 현장수를 120 L 넣어주었다[그림 3.1.57, B]. 실험은 어류를 도입하지 않은 대조군(C)과 어류를 0.04 ind. L⁻¹밀도로 도입한 처리군(F1), 0.2 ind. L⁻¹밀도로 도입한 처리군(F2)으로 9개 원통에서 3반복으로 실시하였다. 실험이 수행된 일감호는 부영양 인공호수로 수표면적은 55,661 m²이고, 최대수심은 2.0 m이다. 평균보유수량은 54,288 m³로써 유량은 강우와 지하수에만 의존하고, 호수가 만수위가 될 때만 배출되는 특성을 가지고 있다. 주로 6월~8월에 걸쳐 호수 전체에 *Microcystis aeruginosa*의 Bloom이 발생하며, 9월까지 지속된다(김 등, 2003).



[그림 3.1.57] 실외 mesocosm 전경(각 mesocosm의 측면도(A), 정면도(B), 대조군(Con), 어류 처리군(F1, 5마리), 어류 처리군(F2, 25마리))

④ 생물 및 환경요인 분석

어류의 밀도차이에 따른 식물플랑크톤의 섭식을 분석하기 위해 24시간 간격으로 대조군과 처리군의 Chl-*a*와 조류밀도를 측정하였다. 야외에서 진행된 120 L Mesocosm 실험은 2 μm 이하(Nanoplankton), 2 μm~20 μm(Picoplankton), 20 μm~50 μm(Microplankton), 50 μm 이상(Macroplankton)의 크기로 나누어 Chl-*a*의 농도를 측정하였으며, Enclosure를 제외한 모든 실험에서 Chl-*a*는 실험수 10 mL을 채수하여 측정하였다.

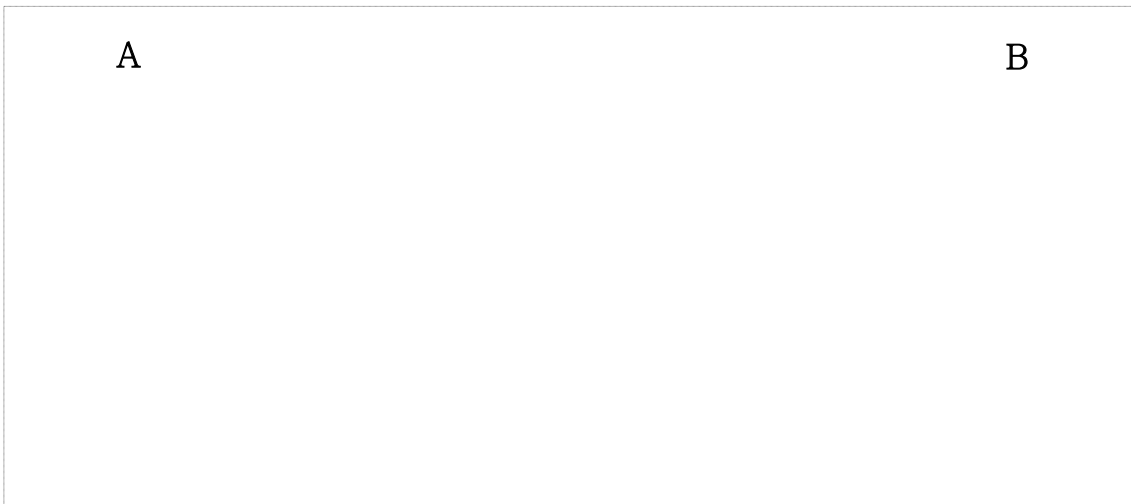
모든 실험에서 Chl-*a* 농도는 GF/F filter를 이용하여 여과한 시료에 90% 아세트산을 첨가하고 냉암소에서 24시간 추출한 후 흡광도를 측정하였으며, Lorenzen법(1967)에 따라 계산하였다. 실험수 1 mL을 채수하여 Lugol 용액으로 고정하였고(최종 농도 2%), 고정한 식물플랑크톤은 Sedgwick-Rafter 계수판을 이용하여 광학현미경 하에서(×200 Zeiss, Germany) 계수하였다.

야외 Mesocosm 실험에서 어류의 식물플랑크톤 섭식에 따른 수질변화를 확인하기 위해, 총 질소(TN), 암모니아(NH₄-N), 아질산성질소(NO₃-N), 총인(TP), 용존무기인(PO₄-P), 화학적산소 요구량(COD), 총부유물질(SS) 등을 측정하였다. 수질항목은 24시간 간격으로 표층에서 20 cm 아래 물을 채수하여 GF/F filter로 여과한 후 Standard methods(APHA, 1995)에 따라 분석하였다.

(나) 연구결과

① 어류섭식에 대한 퇴적물 영향

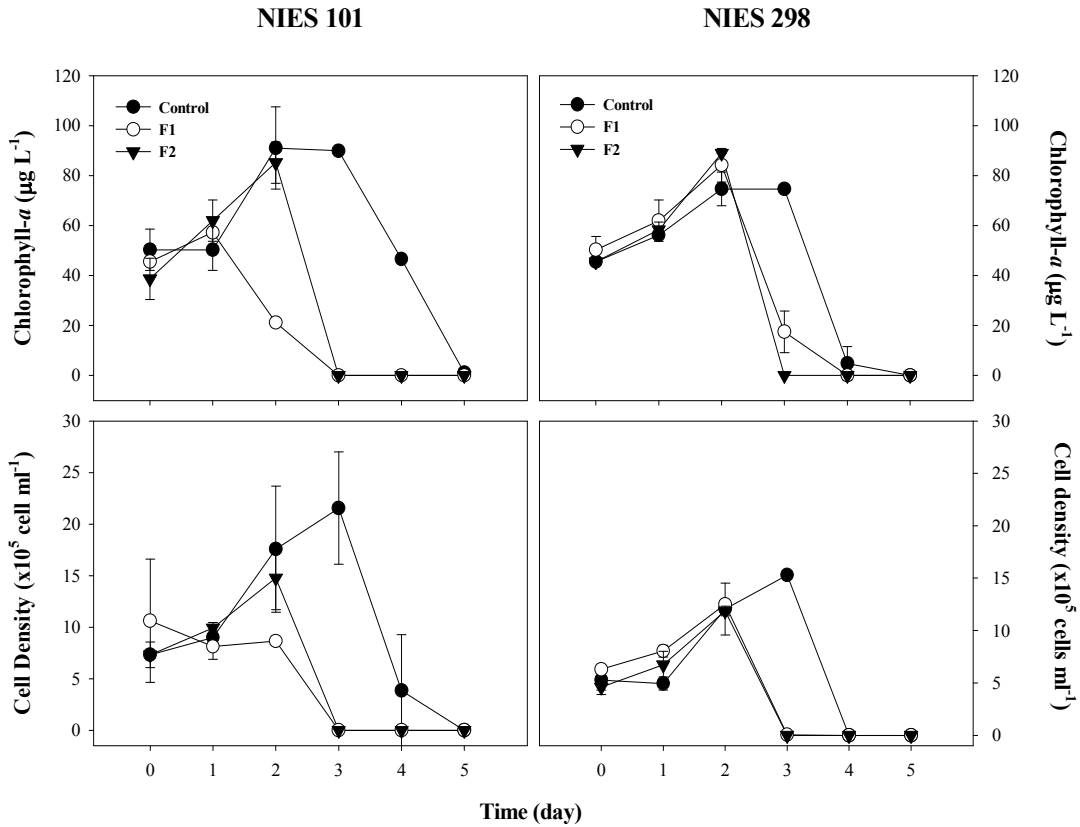
비퇴적물 실험에서, 모든 처리군과 대조군은 Chl-*a* 농도가 감소하였으며 실험종료 시 모든 처리군에서 대조군보다 높은 농도를 나타냈다[그림 3.1.58, A]. 하지만 초기 3일 동안 대조군의 Chl-*a*는 최고 191.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ 까지 증가했으며, 처리군의 Chl-*a*는 120.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ 까지 감소하였다[그림 3.1.58, A]. 퇴적물을 첨가할 경우, 어류를 도입한 모든 처리군과 대조군 모두에서 실험기간 동안 대조군의 Chl-*a*보다 상대적으로 높은 값을 보였다[그림 3.1.58, B]. 특히 F2 처리군에서 초기값 보다 907.2 $\mu\text{g L}^{-1}$ 증가하여 가장 높은 값을 보였다. 하지만, 대조군은 실험 초기값보다 100.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ 증가하였다[그림 3.1.58, B]. 실험결과 비퇴적물 조건에는 단기간의 식물플랑크톤 섭식을 보였으며, 퇴적물이 존재할 시에는 참붕어에 의한 식물플랑크톤 섭식은 나타나지 않았다.



[그림 3.1.58] 수체내 Chl-*a*의 변화 [sediment 비처리군(A), sediment 처리군(B) {그림 A, 대조군(Con), 어류 처리군(F1, 1마리), 어류 처리군(F2, 3마리) 어류처리군(F3, 7마리). 그림 B, 대조군(Con), 어류처리군(F1, 1마리), 어류처리군(F2, 2마리) 어류 처리군(F3, 4마리)}]

② 어류섭식에 대한 조류독성 영향

독성 *Microcystis aeruginosa*(NIES 298)와 비독성 *Microcystis aeruginosa*(NIES 101)를 대상으로 한 어류 섭식 실험에서 독성조류 처리군의 Chl-*a*는 실험초기 2일까지 증가하고 2~3일 사이에는 Chl-*a*가 감소하여 0.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ 를 보였으며, 비독성조류 처리군의 Chl-*a*는 실험초기 1일부터 감소하여 실험종료 시 0.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ 를 보였다[그림 3.1.59, A, B]. 조류밀도의 변화는 Chl-*a*의 변화와 유사한 경향(NIES 298: $r=0.950$, $p<0.01$, $n=18$; NIES101: $r=0.860$, $p<0.01$, $n=18$)을 나타냈으며, 실험결과 비독성 *Microcystis aeruginosa* 처리군에서만 참붕어에 의한 식물플랑크톤의 섭식이 나타났다[그림 3.1.59].



[그림 3.1.59] 비독성 남조류 *Microcystis aeruginosa*(NIES101)에서 Chl-*a* 농도 변화(A), 조류 밀도 변화(C), 독성 남조류 *Microcystis aeruginosa*(NIES298)에서 Chl-*a* 농도 변화(B), 조류 밀도 변화(D)

③ 현장 Mesocosm에서 어류섭식

Chl-*a*의 변화 - 야외 Mesocosm 실험에서 대조군과 F5 처리군의 모든 크기에서 실험종료시 Chl-*a*가 감소하였고, F25 처리군의 Chl-*a*는 Microplankton(20 µm~50 µm)을 제외하고 모든 크기에서 Chl-*a*가 감소하였다[그림 3.1.60]. 또한 Nanoplankton(2 µm~20 µm), Macroplankton(50 µm이상)의 Chl-*a*는 전체 Chl-*a* 변화와 유의한 상관성(2 µm~20 µm: $r=0.996$, $p<0.01$, 50 µm이상: $r=0.821$, $p<0.01$)을 나타냈다[그림 3.1.60]. Picoplankton(2 µm 이하)과 Microplankton(20 µm~50 µm)의 Chl-*a*는 실험 3일 이후 처리군에서 증가하는 경향을 보였으며 처리된 어류의 수가 높을수록 Chl-*a*의 값이 높게 나타났다[그림 3.1.60].

실험결과 참붕어를 이용한 식물플랑크톤 섭식은 단기간 동안 오직 Microplankton에 대해서만 나타났으며, 또한 낮은 어류밀도에서만 식물플랑크톤 섭식을 보였다[그림 3.1.60].



[그림 3.1.60] Sediment를 포함한 mesocosm 실험에서 조류 크기에 따른 Chl-*a*의 변화(F1: 5마리 처리군, F2: 25마리 처리군)

수질변화 - 화학적산소요구량(COD)은 모든 처리군과 대조군에서 초기 2일 동안 17.0~18.0 mg L⁻¹의 범위를 보였으며, F25 처리군과 대조군은 2일 이후 감소하는 경향을 보였다[그림 3.1.61]. 실험종료 시 F25 처리군은 11.1 mg L⁻¹로 가장 낮은 값을 보였고, F5 처리군은 16.5 ~ 18.5 μg L⁻¹의 범위를 보이며 실험기간 동안 큰 변화를 보이지 않았다. 부유물질(SS)은 모든 처리군에서 3일까지 감소하였으며, 3일 이후에는 F5 처리군에서 증가하였고, 실험종료 시 46.7 mg L⁻¹로 가장 높은 값을 나타냈다. 하지만 F25 처리군은 3일 이후에도 감소하여 실험 종료 시 7.4 mg L⁻¹로 가장 낮은 값을 나타냈다[그림 3.1.61].

총인(TP)은 모든 처리군과 대조군에서 증가하는 경향을 나타냈고, F5 처리군에서 21.0 μg L⁻¹로 가장 높은 값을 나타냈다[그림 3.1.61]. 용존무기인(PO₄-P)은 F25 처리군과 대조군에서 실험 기간 동안 감소하는 경향을 나타냈으며, F5처리군은 9.5~10.0 μg L⁻¹의 범위를 보이며 실험 초기 값과 실험종료 값이 큰 차이를 보이지 않았다[그림 3.1.61]. 총질소(TN)는 실험종료 시 대조군과 처리군 모두 실험초기 값보다 감소하였으며, F5 처리군에서 3일에 1.6 mg L⁻¹로 가장 높은 값을 나타냈고, 실험종료 시 1.15 mg L⁻¹로 가장 낮은 값을 나타냈다. 암모니아(NH₄-N)는 실험초기 2일 동안은 모든 처리군과 대조군에서 10.0~35.2 μg L⁻¹의 범위를 보였으나, 2~8일 사이에 F5 처리군에서 225.7 μg L⁻¹증가하여 가장 높은 값을 보였다. 아질산성질소(NO₃-N)는 대조군과 모든 처리군이 실험 종료 시까지 큰 변화를 보이지 않으며, 0.19 mg L⁻¹~0.24 mg L⁻¹의 범위를 나타냈다.

실험결과 참붕어의 도입은 수체 내 질소, COD와 SS의 증가를 유발하여 수질에 부정적인 영향을 미치며, 높은 어류밀도 보다 낮은 어류밀도에서 상대적으로 수질이 더 악화되었다.



[그림 3.1.61] Sediment를 포함한 mesocosm 실험에서 물리화학적 요인의 변화(F1: 5마리 처리군, F2: 25마리 처리군)

본 연구 결과, 한국산 토종 참붕어의 섭식활동은 퇴적물이 존재하는 수계에서 퇴적물 교란을 유발시키고, 이로 인한 영양염 용출로 말미암아 수질악화 및 조류대발생을 유발하여 부영양화 요인으로 작용할 가능성이 높은 것으로 사료된다. 이는 잉어과 어류를 이용한 Matsuzaki *et al.*(2007)의 연구결과와 유사한 것으로서, 참붕어(*Pseudorasbora parva*)의 도입은 비 퇴적물 조건에서 도입초기에 단기간의 섭식을 나타냈으나, 퇴적물 첨가 시 참붕어의 퇴적물 교란으로 인해 영양염 용출이 발생하여 수질악화의 원인을 제공한 것으로 판단된다. 또한 Zhao *et al.*(2001), 이 등(2007), Eugenia *et al.*(2008) 등의 연구결과와 유사하게 참붕어의 분변 및 분비물은 수계에서 질소 농도를 증가시켰으며, 특히 총질소(TN)와 암모니아(NH₄)에서 가장 높은 증가를 나타내었다. 이러한 변화는 어류밀도가 증가함에 따라서 낮은 값을 보였으며, 이는 상대적으로 좁은 참붕어의 행동반경이 영양염 용출에 영향을 미친 것으로 판단된다.

또한 어류의 먹이섭식은 먹이의 특성과 소화 정도에 의존되며(Fukushima *et al.*,1999), 백연어는 먹이대상의 운동성에 관계없이 Picoplankton 크기(2 μm 이하)의 식물플랑크톤을 섭취한다(김 등, 2000; 김 등, 2001). 하지만 참붕어는 수중 Microplankton 크기(20 μm ~50 μm)의 식물플랑크톤에 대하여 높은 섭식을 보였으며, 소형과 대형플랑크톤에 대해서는 유의한 영향을 주지 않았다. 결국 참붕어는 특정크기의 식물플랑크톤에 대한 선택성이 강한 것으로 확인되었다.

부영양호수에서 대발생하는 *Microcystis*는 어류에게 있어 좋은 먹이가 되지 못하는 것으로 알려져 있다(Carbis *et al.*, 1997; Bagnaz *et al.*, 1998). DeMott *et al.*(1991)은 독성에 대한 동물 플랑크톤의 반응이 종에 따라 다르다고 보고하였고, Kamjunke *et al.*(2002)은 유럽산 잉어과 어류인 *Rutilus rutilus* Linnaeus를 이용한 섭식실험을 통해서 독성·비독성 모두 섭식을 확인하였으며, 또한 *Oreoc hromis niloticus* Linnaeus, *Aristichthys nobilis* Richardson등의 어류가 독성·비독성 모두에서 섭식을 보였다고 보고된 바 있다(Datta and Jana, 1998; Lu *et al.*, 2006). 그러나 본 연구에서 한국산 토종 참붕어는 독성 *Microcystis aeruginosa*에 대해서는 섭식을 보이지 않은 반면, 비독성 *Microcystis aeruginosa*에 대해서만 섭식을 보였다. 이는 참붕어가 독소에 대해 내성이 매우 약한 것으로서 국내 다양한 저수지에 서식하는 참붕어의 분포에 따른 독성조류의 분포를 판단할 수 있는 지표로 활용이 가능하리라 판단된다.

결론적으로 담수생태계에서 참붕어의 도입은 어류의 퇴적물교란으로 인한 영양염 용출을 발생시키고, 이는 호소의 부영양화 발생 및 조류대발생의 원인으로 작용할 것으로 판단되며, 참붕어의 현장 적용 시 참붕어는 *Microcystis aeruginosa*와 같이 Nanoplankton(2 μm ~20 μm) 크기의 식물플랑크톤 섭식을 보이지 않아 남조류에 대한 제어능을 기대하기는 어려울 것으로 판단된다. 하지만, 정수장의 실내 반응조와 같이 비 퇴적물 조건에서 참붕어의 도입은 Nanoplankton(2 μm ~20 μm)과 Microplankton(20 μm ~50 μm) 크기의 식물플랑크톤을 대상으로 섭식효과를 보일 것으로 판단되며, *Microcystis*와 같은 유해조류가 생성하는 독소의 변화를 검토한 후 현장도입이 이루어져야 한다고 사료되었다.

(6) 논우렁이의 식물플랑크톤 섭식 및 유기물 생산량 측정

지금까지 연구한 유용생물 중 패류는 온도(저온)에 대한 내성이 강하고, 월동하는 패류 중 수명이 길며, 특히 논우렁이(*Cipangopaludina chinensis malleata*)는 주로 부착조류와 debris 등을 섭취하기 때문에 수심이 낮고 오염된 연못이나 하천의 정화에 응용되기도 한다. 본 연구는 국내산 유용생물이 부유성 조류인 남조 *Microcystis aeruginosa*에 대한 섭식능을 파악하기 위하여, 매년 남조가 대발생하는 소형저수지 현장수를 대상으로 다양한 크기, 개체밀도, 먹이밀도, 그리고 시간에 따른 섭식율(grazing rate) 및 유기물생산(pseudofaeces production)에 대하여 연구하였다.

(가) 연구내용

금강(충남 보령)유역에서 채집된 약 3,000개체의 논우렁이 중 실험에 사용된 총 108개체의 크기(각고)는 2.0~6.1 cm 범위였으며, 약 4.5 cm를 중심으로 하는 bimodal patterns를 보였다 [그림 3.1.62, A]. 또한 유기물 함량은 각 개체의 크기에 높은 상관성을 나타냈다 [그림 3.1.62, B, $r=0.886$, $p<0.001$]

논우렁이 여과율(Filtering Rate, FR, L gAFDW⁻¹ h⁻¹)은 일정시간 동안 우렁이에 의해 소모되는 수중 내 Chl-*a*의 변화량으로 산정하였다. 계산식은 다음과 같다.

$$FR = V \times \ln (C/M) / t / W$$

V : 실험에 사용된 물의 총량(L)

C : 대조군의 Chl-*a*의 농도(mg L⁻¹)

M : 실험군의 Chl-*a*의 농도(mg L⁻¹)

W : 사용된 우렁이의 유기물함량(gAFDW)

유기물 생산량(pseudofaeces production)은 일정시간이 경과한 후 대조군과 실험군에 생성된 조류괴(algal mass, green pellet)를 다른 실험수와 최대한 섞이지 않도록 진공펌프로 꺼내 75 mm Nylon net로 걸러 여과된 다음 남은 pellet만을 spoid로 꺼내 건조시켜, 두 무게의 차이를 우렁이의 유기물 생산량으로 사용하였다 [그림 3.1.62].

[그림 3.1.62] 논우렁이(*Cipangopaludina chinensis malleata*)의 크기별 분포(A) 및 각고와 유기물함량(AFDW)의 상관관계

논우렁이의 섭식실험은 크게 개체의 크기와 밀도, 먹이밀도, 그리고 시간별로 실시하였으며, 섭식실험에 사용한 실험수는 매년 6월부터 11월초까지 남조 *Microcystis aeruginosa* 대발생이 일어나는 소형 인공호의 현장수(일감호, 서울)를 이용하였다. 현장수의 Chl-*a* 농도는 $526.7 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 90% 이상이 *Microcystis aeruginosa*가 우점 하였다. 각 섭식실험에서는 이를 적절한 농도로 희석하여 사용하였다. 섭식실험은 투명한 아크릴수조(3 L)를 사용하였으며, 실험수 2 L,

수는 $25^{\circ}\text{C}\pm 1.0$, 광도 $70\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 광주기 14D:10L 조건하에서 실시하였다. 시료채취는 정해진 시간에 교란이 일어나지 않도록 표층 15 cm에 미리 설치해 놓은 tube를 통해 연결된 부분에 주사기를 꽂아 실험종류에 따라 10~50 mL 씩 채취하였다.

우렁이 크기에 따른 섭식실험은 크기가 다른 우렁이 28개체(각고 3.0~6.1 cm)를 실험($543.7\ \mu\text{g L}^{-1}$)이 들어있는 수조에 $1\ \text{ind. L}^{-1}$ 밀도로 투입한 다음 1, 4, 7, 13, 24 hr 간격으로 Chl-*a* 변화를 조사하였다.

먹이밀도 섭식실험은 plankton net(20 μm)를 이용하여 현장수를 농축($673.4\ \mu\text{g Chl.}a\ \text{L}^{-1}$)하여 실험시에 탈염수돗물로 25%씩 4단계(168.3, 336.7, 505.0, $673.4\ \mu\text{g L}^{-1}$)로 희석하고, 각 실험군에 동일한 밀도의 우렁이($1\ \text{ind. L}^{-1}$)를 각각 투입하여 시간별 Chl-*a* 농도 변화를 조사하였다.

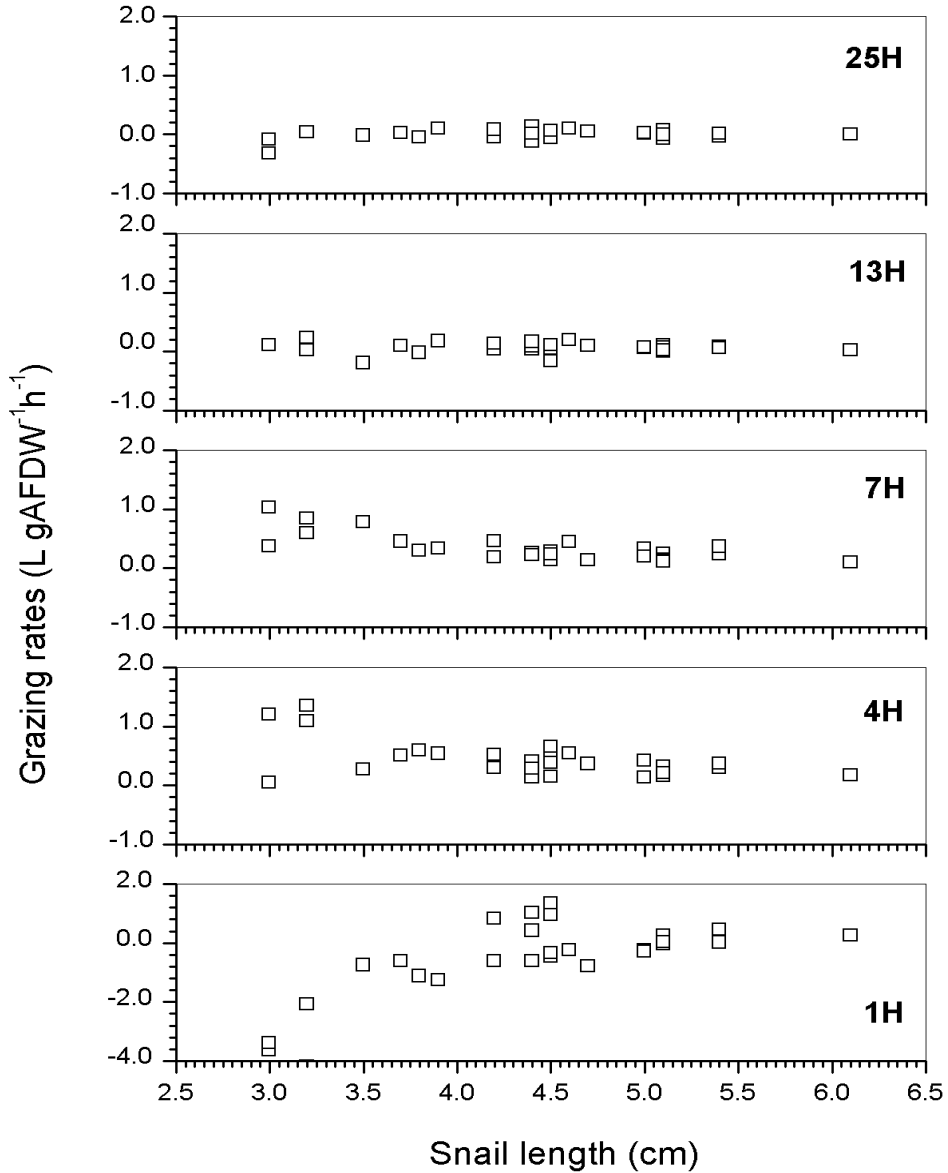
시간별 섭식실험은 각 측정시간별로 실험군을 회수하여 Chl-*a* 변화와 유기물 생산량을 동시에 측정하였다. 실험은 현장 농축수($825.4\ \mu\text{g L}^{-1}$)를 각각 동일하게 넣고, 각고가 유사한 크기(4.6~5.4 cm)의 우렁이를 $1\ \text{ind. L}^{-1}$ 로 각각 투입한 후 시간별로(1, 3, 5, 7, 9, 11 hr) 회수하여 Chl-*a* 농도와 유기물량을 각각 측정하였다.

우렁이 개체밀도 섭식실험은 각고가 유사한(각고 4.5~5.0 cm) 우렁이를 선별하여, 실험수($247.8\ \mu\text{g L}^{-1}$)에 우렁이 밀도를 각각 0.5, 1, 1.5, 2 ind. L^{-1} 로 투입하여 실험하였고, 모든 실험은 우렁이를 투입하지 않은 대조군 및 실험군은 모두 3회씩 반복실험을 실시하였다.

(나) 연구결과

① 우렁이 크기에 따른 먹이 섭식율

논우렁이 크기에 따른 섭식능은 실험초기(1 hr)에는 전체적으로 불안정한 반면, 시간이 경과함에 따라 점차 증가하다가 25시간째에는 다시 감소하는 경향을 나타냈다[그림 3.1.63]. 또한 크기가 4.5 cm 이상 큰 우렁이일수록 실험시간에 상관없이 높고 안정된 섭식율을 보인 반면($-0.79\sim 1.35\ \text{L gAFDW}^{-1}\ \text{h}^{-1}$), 4.5cm이하의 크기에서는 실험초기에 낮은 섭식율을 보였으나, 시간이 경과함에 따라 증가하였다($-4.17\sim 1.35\ \text{L gAFDW}^{-1}\ \text{h}^{-1}$). 전체적으로 논우렁이는 크기에 상관없이 남조류 *Microcystis aeruginosa*가 우점 하였던 현장수에서 7 시간째 최고의 섭식율을 나타냈고, 이후 점차 감소하는 특징을 나타냈다.



[그림 3.1.63] 논우렁이의 크기에 따른 여과율의 변화

② 먹이농도(Chl-a)에 따른 먹이 섭식율 및 유기물(배설물) 생산

먹이농도를 다르게 하여 실험한 결과, 가장 낮은 먹이농도($168.3 \mu\text{g L}^{-1}$)에서 가장 높은 섭식율($0.897 \text{ L gAFDW}^{-1} \text{ h}^{-1}$)을 나타냈으며, 가장 높은 먹이농도($673.4 \mu\text{g L}^{-1}$)에서 가장 낮은 섭식율($0.357 \text{ L gAFDW}^{-1} \text{ h}^{-1}$)을 나타냈다[그림 3.1.64]. 한편, 유기물생산은 예상했던 대로 먹이농도에 비례하여 증가하였는데, 가장 높은 먹이농도 (673.4 mg L^{-1})에서 가장 많은 유기물을 생산하였으며($51.2 \text{ mg gAFDW}^{-1}$), 가장 낮은 먹이농도(168.3 mg L^{-1})에서 가장 적은 유기물($21.3 \text{ mg gAFDW}^{-1}$)을 각각 생산하였다[그림 3.1.64].

[그림 3.1.64] 먹이 밀도(Chl-*a* 농도)에 따른 논우렁이의 여과율 및 유기물 생산량

③ 시간에 따른 먹이 섭식율 및 유기물 생산

비교적 크기가 큰 우렁이(> 4.5 cm)를 대상으로 시간별 먹이섭식율과 유기물 생산을 측정한 결과, 1시간째 최고 섭식율($0.538 \text{ L gAFDW}^{-1} \text{ h}^{-1}$)을 보였으며 점차적으로 감소하여 11시간째 가장 낮은 섭식율($0.175 \text{ L gAFDW}^{-1} \text{ h}^{-1}$)을 나타냈다. 유기물 생산은 7시간째 최고치 $99.5 \text{ mg gAFDW}^{-1}$ 을 보였으며, 평균 $50.3 \text{ mg gAFDW}^{-1}$ 의 수준을 보였다. 결과적으로 논우렁이는 투입 초반에 높은 섭식능을 보이며, 투입 후 7 hr에서 가장 많은 유기물을 생산하였다[그림 3.1.65].

[그림 3.1.65] 배양 시간에 따른 논우렁이의 여과율 및 유기물 생산량의 변화

④ 우렁이 밀도에 따른 조류제어 및 유기물 생산

논우렁이를 4단계 밀도로 투입한 후 조류제어효과와 유기물 생산량을 각각 조사하였다. 투입된 우렁이의 밀도가 증가할수록 Chl-*a*는 뚜렷하게 감소하였고, 유기물 생산량은 증가하였다[그림 3.1.66]. 그러나 우렁이밀도가 1.5 ind. L⁻¹ 이상에서는 조류제어 효과가 더 이상 큰 차이를 보이지 않은 반면, 유기물 생산량은 계속적으로 증가하였다.

[그림 3.1.66] 논우렁이의 개체 밀도에 따른 여과율 및 유기물 생산량 간의 관계

논우렁이의 남조류 섭식능은 0.023~1.348 L gAFDW⁻¹ h⁻¹로서 부영양 저수지 식물플랑크톤을 대상으로 한 여과성 이매패 *Corbicula leana*(Kim *et al.*, 2004), *Unio douglasiae*(Lee, 2007) 등과 거의 비슷한 섭식능을 나타냈다. 특히 이들은 개체의 크기, 먹이농도 및 시간에 따라 섭식능의 차이가 뚜렷하였으며, 유기물 생산 역시 유사한 패턴을 보였다. 이러한 결과는 지금까지 오염된 연못이나 하천바닥의 유기물 또는 부착조류만을 섭취하는 것으로 알려진 논우렁이의 새로운 섭식유형이며, 다른 패류와 연구에서 논우렁이가 생산한 pseudofaeces가 동일한 조건에서 다른 패류가 생산한 것보다 더 오랫동안 형태를 유지하며 보다 효과적인 투명도 감소를 가져오는 것으로 나타났다. 부유성 남조 *M. aeruginosa*의 대발생 수역에 논우렁이의 적용이 새로운 생태공학적 수질개선 기술로서 충분한 가치가 있다고 판단되었다.

(7) 말조개의 수온에 따른 조류 섭식능

본 연구는 온도에 따른 패류(말조개)의 섭식능 변화를 관찰하고, 패류(말조개)생존에 적절한 수온 범위를 조사하는데 목적이 있다. 이는 수온이 담수패류를 이용한 현장 환경에 대한 유해

조류 제어의 최적조건에 가장 크게 영향을 주는 요인으로서 뿐만 아니라, 추후 실제 현장 저수지에 일정 규모 또는 대량의 패류를 직접 적용함으로써 저수지 실제 환경에 적응이 가능한 지 여부에 대한 중요한 정보를 제공하기 때문이다. 따라서 본 연구는 실내, 외에서 동시에 담수패류의 현장 적응 실험은 물론 이들의 다양한 수온 조건에서 조류제어 및 성장 특성을 조사하고자 실시하였다.

(가) 연구내용

수온에 따른 패류(말조개)의 섭식 및 생존능을 조사하기 위하여 하상에는 사질토(경안천에서 수거)를 채우고, 24시간 이상 폭기하여 탈염한 수돗물을 7 L까지 넣은 플라스틱 수조를 준비하였다. 수온을 5°C(T5), 15°C(T15), 25°C(T25), 35°C이상(T35)으로 맞추기 위해 5°C는 냉장고 안에, 15°C는 실외에 설치하고, 25°C와 35°C는 열 발생기를 이용하여 온도를 조절 하였다. 각각의 온도를 맞춘 수조는 2개씩 준비하여 2반복 실험을 했다. 7 L 수조에 길이와, 폭, 무게가 비슷한 패류(말조개)를 5마리씩 넣고, 먹이는 액상 클로렐라를 사용하며 각각의 수조에 동일한 양을 주었다[그림 3.1.67]. 1, 3, 7, 12시간 간격으로 sampling하여 Chl-a를 통해 섭식 전, 후의 밀도 변화를 관찰하여 이를 바탕으로 말조개의 섭식능을 예측하였다. 또한 수온이 다른 각각의 수조에서 말조개의 사망률을 조사하여 생존능도 파악하였다.



[그림 3.1.67] 온도에 따른 패류(말조개)의 섭식 및 생존능 실험

(나) 연구결과

*Chlorella*를 넣고 24시간이 지난 후에는 모든 수조 속에서 *Chlorella*의 밀도가 낮아지는 것으로 보아 말조개가 여과했다는 것을 알 수 있었다. 12시간에 모든 수조에서 *Chlorella*의 밀도가 감소했지만, 25, 35°C 수조의 Chl-a 농도는 계속 증가하다가 3시간 이후 조금씩 감소하는 것으로 보아 고온에서도 패류의 여과섭식이 가능하다고 판단된다.

5°C에서 패류의 여과율이 가장 높았으며, 15, 25, 35°C는 클로렐라가 생육 가능한 수온으로 3시간까지 오히려 증가하는 경향을 보였다. 3시간 이후 약한 여과율의 증가를 보였다. 35°C에서

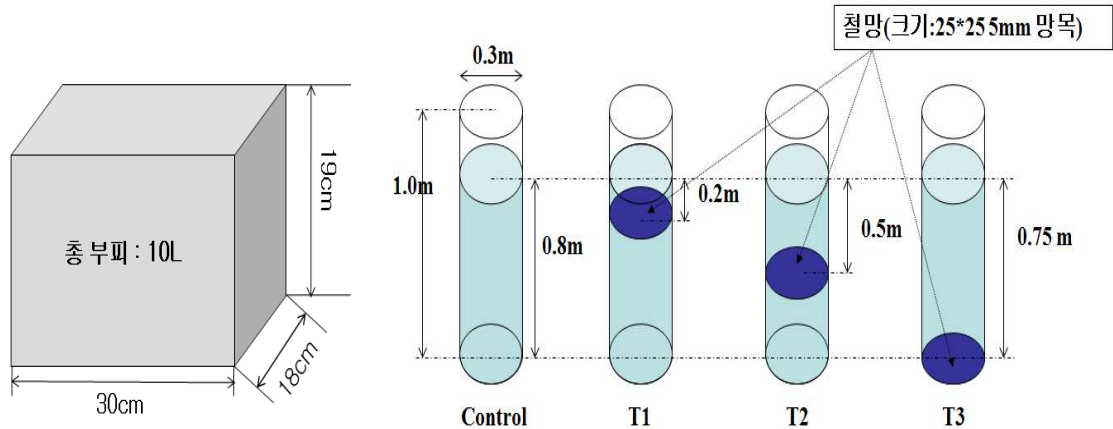
는 말조개가 장시간 높은 온도에 노출되어 사망하기 시작하였으며 *Chlorella* 밀도가 점차 증가하였다. 말조개는 35°C 이하에서는 생존 및 여과섭식이 가능하지만, 사망의 위험이 있고, 수온이 낮으면 여과율이 증가하는 것으로 보인다.

[그림 3.1.68] 수온에 따른 패류의 섭식능

(8) 말조개의 밀도 및 수심에 따른 여과율

(가) 연구내용

실험은 크게 밀도실험과 수심별 제어실험을 실시하였다. 사육 수조는 투명 플라스틱 수조를 사용하였으며 이 수조에 배양중인 조류를 배양수와 함께 밀도실험은 9 L, 수심실험은 56.5 L를 각각 투입하였다[그림 3.1.69]. 사육 중 온도는 상온 23°C(±2°C) 이었고, 명암주기는 12h:12h, 광도는 50 $\mu\text{m photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 조건으로 전체 수조에 동일한 환경을 조성하였다.



[그림 3.1.69] 담수패류(말조개)의 조류제어 실험 장치(왼쪽: 밀도실험, 오른쪽: 수심별 효과실험)

밀도별 실험은 각 실험군마다 조류배양수의 부피에 비례하여 조개를 투입하였으며 각 처리구마다 동일조건인 3반복 실험군을 구성하였다. 실험군은 4개로 나누어 각각 1, 2, 4, 8마리를 투입하여 실험하였다. 채수를 위해 silicone tube를 사용하였으며 관의 끝을 U자 형태로 고정하여 채수과정에 있어 상층과 하층에 영양을 끼치지 않도록 조정하였다. 채수관의 끝은 수조 밑 바닥으로부터 8 cm 이격시켜 설치하였으며, 모든 sample의 채수는 이 채수관을 통해 채수하였다. 또한 정량 채수 전 10 mL 가량의 sample은 그냥 흘러버림으로 채수관내에 잔여하고 있지 모르는 사육수를 제거한 후 정량 채수하였다. 측정시간은 각 최초 30분 단위로 6시간 동안 채취하였으며 그 이후 12시간 간격, 24시간 간격으로 총 17회에 걸쳐 측정하였다[표 3.1.15].

[표 3.1.15] 밀도에 따른 담수패류(말조개)의 조류제어 실험 Time table

(단위 : 분)

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17
0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	1,080	1,800	3,240	4,050

수심별 실험은 사육 수조를 높이 1 m, 폭 0.3 m의 원통형 투명 아크릴 수조를 사용하였다. 이 수조의 0.8 m까지 모두 동일한 조류배양수를 넣고 각각의 수조마다 수표면으로 부터 20, 50, 75 cm의 수심에 조개를 고정시킬 수 있는 망목을 설치한 후 각각 동일한 크기와 질량의 조개 12마리를 각각 위치시킨다. 채수는 밀도실험과 동일한 U자형태의 채수관을 수조 밑바닥으로부터 40 cm 이격시켜 설치하였다. 채수 전 10 mL 가량의 sample은 그냥 흘러버림으로 채수관내에 잔여하고 있지 모르는 사육수를 제거한 후 200 mL을 정량 채수하였다. 측정시간은 각 최초 1시간단위로 4시간 동안 채취하였으며 그 이후 2시간, 4시간, 12시간 간격으로 총 14회에 걸쳐 측정하였다[표 3.1.16].

[표 3.1.16] 수심에 따른 담수패류(말조개)의 조류제어 실험 Time table

(단위 : 시간)

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
0	1	2	3	4	6	10	14	18	22	26	38	50	62

패류의 조류섭식능 측정을 위하여 3가지(SS, Chl-a, 생물량)의 방법을 동시에 병행하여 측정하였다.

① SS

SS는 미리 세척하여 최초중량을 파악한 GF-C필터로 일정량의 Sample을 필터링하여 20시간 동안 80°C 고온건조기에서 건조시킨 후 최후중량을 측정하여 그 차를 이용, Sample중 조류의

중량을 측정하였다. SS는 중층과 상/하층 총 3영역에 걸쳐 측정하며 각각의 측정 방법과 측정 시간은 다음과 같다

- 상층은 실험이 종료된 이후 진공펌프를 이용하여 상층부를 모두 흡입하여 채취하였다. 채취된 상층부 사육수를 잘 혼합한 후 20 mL의 Sample을 채취하였다.
- 중층은 채수관을 통해 측정시마다 채수관을 통해 각 실험마다 정량의 샘플을 채취하여 측정하였다.
- 하층은 실험이 종료된 이후 채수관을 통해 중층부의 물을 바닥면에서부터 3 cm까지 모두 제거한 후 바닥 침전층을 모두 부유시켜 채취하였다. 채취된 하층부의 사육수를 잘 혼합한 후 20 mL의 Sample을 채취하였다.

$$SS(mg/L) = \frac{\text{필터링 후 건조된 무게}(mg) - \text{세척/건조 필터최초무게}(mg)}{\text{채취 Sample부피}(L)}$$

② Chl-a

Chl-a는 GF-C필터로 각 실험의 정량 채수 Sample을 필터링하여 24시간 동안 90% 아세톤 10 mL으로 4°C 암상태 하에서 Chl-a를 추출한다. 추출한 시료는 500G의 원심력으로 20분간 원심분리하여 상층액을 분광광도계를 이용하여 측정하였다.

$$\text{Chl-a}(mgm^{-3}) = \frac{Y \times \text{상등액량}(mL)}{\text{여과한 시료의 양}(L)}$$

$$Y = 11.64X^1 - 2.16X^2 + 0.10X^3$$

$$X^1 = \text{흡광도}(663 \text{ nm}) - \text{흡광도}(750 \text{ nm})$$

$$X^2 = \text{흡광도}(645 \text{ nm}) - \text{흡광도}(750 \text{ nm})$$

$$X^3 = \text{흡광도}(630 \text{ nm}) - \text{흡광도}(750 \text{ nm})$$

③ Direct counting

Direct counting은 Sample 1 mL을 Lugol 300 μL로 고정하여 도립현미경 50배율 하에서 Sample 50 μL상의 모든 *Microcystis*-colony를 전체 계수하였다. colony는 5 cell 이상의 군집을 이루고 있는 것을 colony로 규정하고 이러한 군체를 계수하였다. 두 개 이상의 군체가 겹쳐있을 경우 두 군체 사이의 접점이 2 cell 이상일 경우 근접한 두 군체는 하나의 군체로 규정하며 1 cell 이하의 cell이 접촉되었거나 gell-coat만이 접촉되어 있을 경우 독립군체로 규정하여 각각 계수하였다.

④ 식물플랑크톤에 대한 패류의 여과율(Filtering Rate)

식물플랑크톤에 대한 패류의 여과율은 투입한 조개의 무게값을 토대로 매 측정시마다 여과율(FR)을 산출하였다.

식물플랑크톤에 대한 패류의 여과율은 다음의 식을 따랐다.

$$FR(mL\ g^{-1}hr^{-1}) = \frac{V \times \ln \frac{C}{M}}{W \times t}$$

V : 실험에 사용된 호소수의 양(L)

C : 유용생물이 없는 대조구 t시간 이후의 식물플랑크톤 밀도

M : 유용생물이 존재하는 실험군 t시간 이후의 식물플랑크톤 밀도

W : 실험군 투입 전에 측정된 패류의 무게(g)

t : 배양시간

(나) 연구결과

밀도실험에 있어 말조개를 투입한 수조에서 그렇지 않은 수조보다 모두 낮은 농도의 *Microcystis*를 확인할 수 있었다[그림 3.1.70, B]. 하지만 군체를 형성하는 *Microcystis* 특성상 colony의 크기의 차이가 있어도 모두 동일한 하나의 colony로 계수하는 Direct-Counting과는 달리 단일 cell 모두를 측정하는 Chl-a 경우 Direct counting과 차이를 보였다[그림 3.1.70, A, B].

전체적인 성향을 살펴볼 경우 모두 말조개를 투입한 경우가 투입하지 않은 대조구보다 확연한 *Microcystis*의 제어능을 보였으며[그림 3.1.70, A, B], 1/2 ind. L⁻¹와 1 ind. L⁻¹에서 가장 높은 제어능을 보이는 것으로 확인되었다[그림 3.1.70, D]. 이와는 반대로 1/8 ind. L⁻¹와 1/4 ind. L⁻¹의 경우 조개의 적응기간 탓에 초반에는 오히려 조류의 증가를 보였다. 하지만 2시간 정도 경과 후 조개가 안정기에 들어서게 되면 모든 실험군에서 조류 제어능을 보였다[그림 3.1.70, D]. 최종 실험 종료시에는 중층부의 물은 실험군과 대조군사이에 큰 차이는 없으나 상층과 하층에 잔존한 조류의 양을 살펴볼 때 1/2 ind. L⁻¹와 1 ind. L⁻¹에서는 중층부의 조류제어능도 높았을 뿐 아니라 전체적인 조류의 감소에까지 영향을 미쳤다[그림 3.1.70, C].

A

B

C

D

[그림 3.1.70] 담수패류(말조개)의 밀도에 따른 조류제어(A: Chl-*a* 변화, B: 조류 밀도의 변화, C: 부유물질의 변화, D: 여과율의 변화)

이와 같은 결과는 낮은 밀도에서는 말조개의 호흡과 연관되어 이산화탄소의 배출과 배설물로 인한 영양염의 유입으로 인해 결과적으로 더 높은 조류가 발생한 것으로 보인다. 또한 1 ind. L⁻¹와 같은 경우 너무 빠른 조류의 제어속도 때문에 결과적으로 조개가 소화시킨 조류의 양이 적었던 것으로 보인다.

수심실험에 있어서도 밀도실험과 동일하게 모든 실험군에서 대조군과 비교하여 낮은 조류의 밀도를 확인할 수 있었으며 그중 조개들의 위치가 가장 높은 실험군이 가장 높은 조류의 제어능을 보였다[그림 3.1.71, A, B, D]. 또한 상부 부유층에 있어서도 가장 높은 곳에 조개가 위치한 실험군이 가장 적은 부유층을 형성한 것을 확인할 수 있었다[그림 3.1.71, C]. 이는 부유와 하강을 주기적으로 반복하는 *Microcystis*의 특성에 견주어 생각해 볼 때 상층에 조개가 위치할수록 조류와 접촉할 수 있는 기간이 길며 또한 조개에 의해 침전된 SS는 조개의 호흡이나 이동 등의 교란을 받지 않으므로 침전된 상태 그대로 있을 수 있어 높은 곳에 위치할수록 더욱 높은 조류 제어능을 보이는 것으로 확인되었다. 조류 제어능에 있어 Bottom에 위치한 실험군에 있어서조차 밀도실험과 다른 경향을 보이는 것은 조개를 위치시킨 망목에 영향을 받은 것으로

보인다. 망목은 조개가 조류를 고정시킨 SS를 조개의 호흡이나 움직임에 영향을 받지 않는 바닥면으로 분리시켜 줌으로써 일단 SS의 해체로 인한 고정된 조류의 재부유를 격리한 결과로 확인된다.

A

B

C

D

[그림 3.1.71] 담수패류(말조개)의 밀도에 따른 조류제어(A: SS, B: Chl-a, C: SS, D: 여과율)

실험 종료 시점에서 50, 80 cm 수심에서 높은 여과율은 감소하는 식물플랑크톤의 밀도에 의해서 먹이 섭식을 위하여 증가하는 것으로 판단된다. 다른 담수산 이매패의 먹이(식물플랑크톤) 밀도에 따른 실험에서도 먹이 밀도가 낮아질수록 여과율이 증가하는 것으로 보고되었다(Hwang, 1996; Bontes *et al*, 2007). 다른 수심에 비해 20 cm 수심에서의 낮은 여과율은 수체 내의 순환이 상대적으로 약한 표층에 위치하였고, 환경요인의 변화가 가장 민감하여 말조개의 생리적인 부분에 영향을 미침으로 인하여 낮게 평가된 것으로 판단된다. 말조개의 개체당 여과율은 수심에 실험에서 3.61~12.14 L ind.⁻¹ d⁻¹로 나타났다.

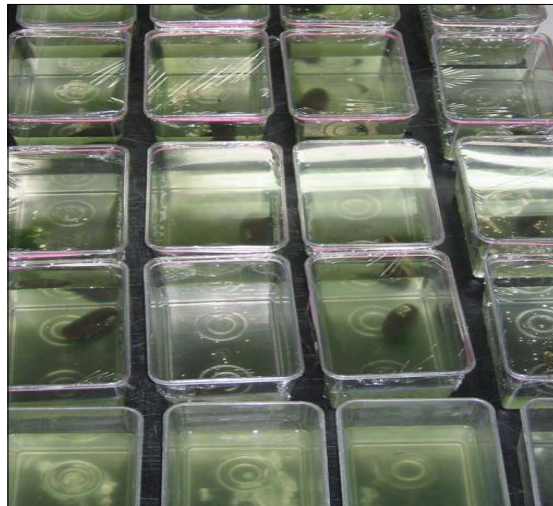
이와 같은 결과를 종합하여 볼 때 수서환경에 고정적으로 설치하여 조류의 제어를 목적으로 한다면 최적의 조류 제어능과 감소율을 얻기 위해 2 L당 1마리의 밀도로 말조개를 투입하는 것이 가장 효과적인 조류 제어 효과를 얻을 수 있을 것으로 보인다. 하지만 단시간동안 설치하여

순간적인 조류제어를 목적으로 한다면 더욱 높은 밀도의 조개를 투입하면 초반 단시간동안 매우 높은 효율의 조류 제어능을 기대할 수 있을 것으로 보인다. 또한 조개는 최대한 수표면과 근접한 위치에 위치시킴으로써 수표면에 부유층을 형성하는 *Microcystis*를 보다 효과적으로 제어할 수 있는 것으로 판단된다. 또한 패류를 망목과 같은 망을 이용하여 수중에 위치시켜 패류가 고정한 SS를 따로 수집하여, 고정된 SS가 흩어져 다시 부유하는 것을 막아야 가장 효율적인 조류의 제어능을 얻을 수 있을 것으로 확인되었다.

(9) 말조개의 DO 농도 변화에 따른 여과율

(가) 연구내용

DO 농도에 따른 말조개의 여과율 변화를 측정하기 위하여, 남조류 Bloom이 발생한 수조의 원수를 Chl-*a* 농도 $200 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 희석한 실험수에 DO 농도를 각각 0.5, 4.5, 9.0 mg L^{-1} 로 조정하여 실험하였다. 농도가 낮은 0.5와 4.5 mg L^{-1} 의 농도를 맞추기 위하여 질소가스로 폭기·환원하여 조정하였고, 9.0 mg L^{-1} 의 농도는 기포기를 이용하여 조정하였다. 실험은 2 L 용량의 투명한 아크릴 사각 수조에 각각의 원수를 1.5 L씩 채운 후, 패각 길이가 6.5~7.1 cm(평균 6.7 ± 0.3 cm)인 말조개를 각 수조에 1개체씩 투입하였다. 실험 기간 동안 수조 내의 DO농도 변화를 최소화하기 위하여 개방된 수조의 상위 부분을 비닐랩으로 밀봉하여, 공기의 유입을 막았다[그림 3.1.72].



[그림 3.1.72] DO 농도에 따른 패류의 여과율 실험

채수는 각각 0, 4, 8, 12, 24 hr에 실험에 이용한 시료 1.5 L 전체를 취하였으며, 그 중 1.4 L 은 수중의 Chl-*a* 농도 측정을 위해 사용하였고, 바닥부의 나머지 0.1 L는 Pseudofeces production(PFP)을 측정하기 위하여 사용하였다. 1.4 L은 표면부터 상층부를 채수하였고, 채수 시 수조 내의 교란을 최소화하기 위하여 직경 5 mm 실리콘튜브를 이용하여 수위 차에 의해

천천히 채수하였다. 채수한 1.4 L의 원수는 잘 혼합한 후 400 mL를 뽑아 GF/F 여과지로 여과하여 Chl-*a* 농도를 측정하였다. 말조개의 PFP를 측정하기 위하여 수조에 남아 있는 0.1 L의 원수와 수조의 바닥층을 증류수로 세척하여 GF/F 여과지로 여과하여 SS를 측정하였다.

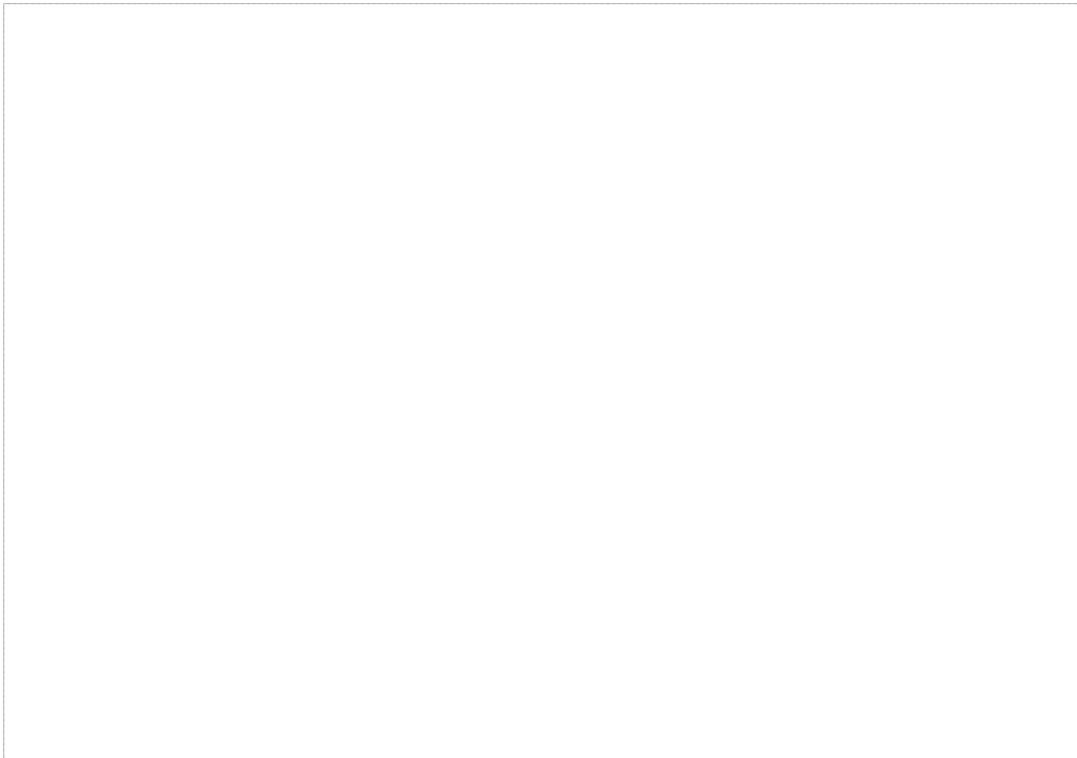
실험기간 동안 말조개의 PFP는 다음과 같은 식에 의하여 계산하였다.

$$\text{PFP (mgDW gAFDW}^{-1} \text{ hr}^{-1}) = (S_t - S_c) / B / \Delta t$$

여기서, S_t 와 S_c 는 처리구와 대조구에서 처리시간동안 발생한 SS 농도(mg L^{-1}), B는 말조개 무게(gAFDW), Δt 는 처리 시간(hr)이다.

(나) 연구결과

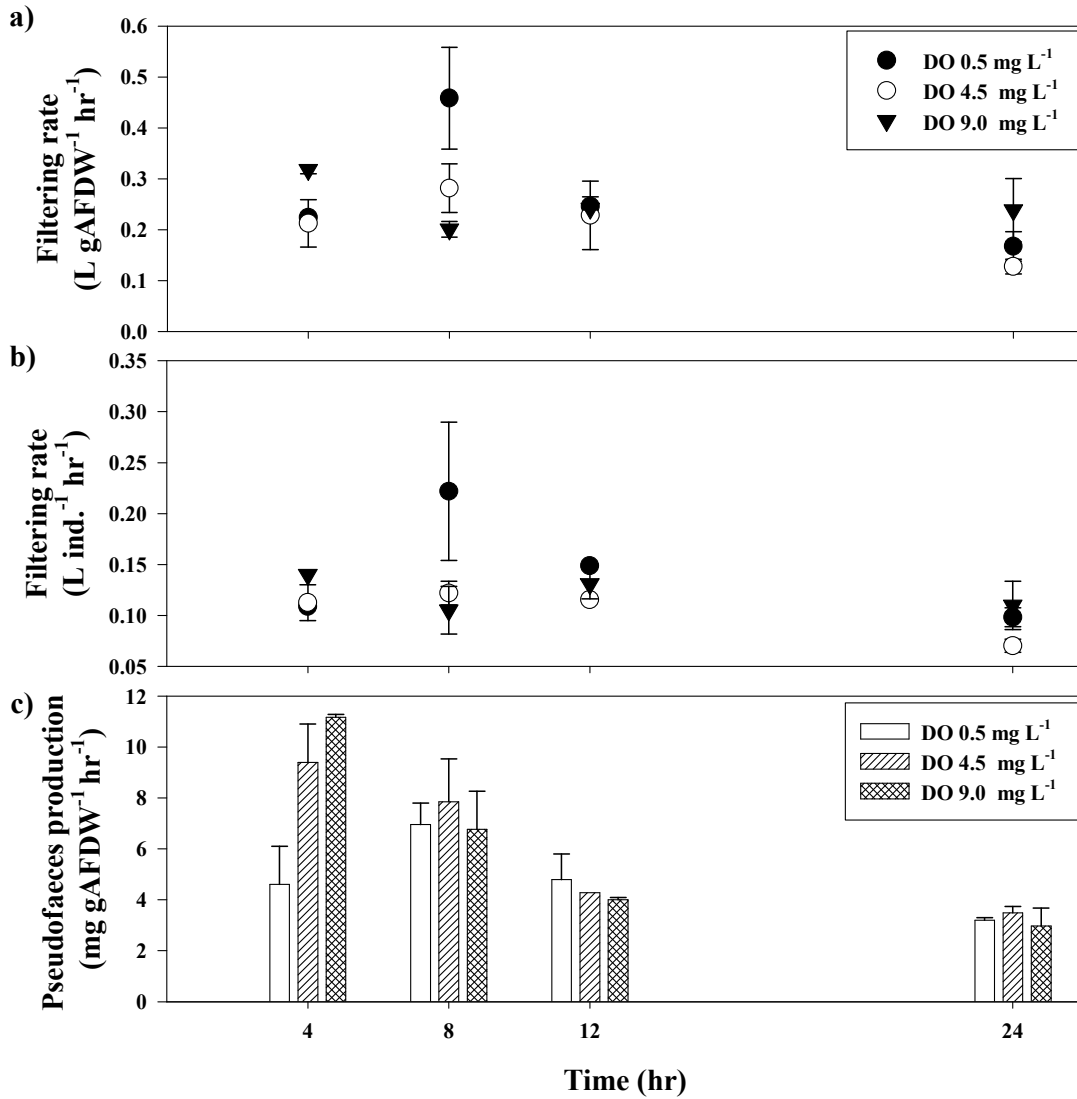
말조개를 투입하지 않은 대조구에서 실험 기간 동안 Chl-*a* 농도는 $190.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 $282.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 까지 지속적으로 증가하였지만, 말조개를 투입한 모든 처리구는 지속적인 Chl-*a* 농도의 감소를 나타냈다[그림 3.1.73]. 처리구의 Chl-*a* 농도의 감소경향은 처리구별로 큰 차이를 나타내지는 않았다.



[그림 3.1.73] DO 농도에 따른 Chl-*a* 변화(Control: without mussel, 8.8 mg L^{-1} , Treatment: With mussel, 0.5, 4.5, 9.0 mg L^{-1})

DO 농도를 가장 낮게 조절한 0.5 mg L⁻¹에서의 여과율 변동이 0.17~0.46(Ave: 0.27±0.04) L gAFDW⁻¹ hr⁻¹로 가장 크게 나타났고, 4.5와 9.0 mg L⁻¹은 각각 0.13~0.21(Ave:0.21±0.02) L gAFDW⁻¹ hr⁻¹, 0.20~0.32(Ave: 0.25±0.03) L gAFDW⁻¹ hr⁻¹로 상대적으로 변화가 적게 나타났다[그림 3.1.74, a]. 개체당 여과율은 0.5 mg L⁻¹에서 0.22 L ind.⁻¹ hr⁻¹로 가장 높았고, 평균 0.14±0.06 L ind.⁻¹ hr⁻¹로, 9.0 mg L⁻¹에서 0.12±0.02 L ind.⁻¹ hr⁻¹, 4.5 mg L⁻¹에서 0.11±0.02 L ind.⁻¹ hr⁻¹ 보다 높게 나타났다[그림 3.1.74, b].

말조개의 PFP는 실험 초기에 DO 농도가 높을수록 높게 나타났다. 실험 8 hr 이후 DO 농도에 따른 PFP는 비슷한 경향을 보였으며, 시간이 경과함에 따라 점차 감소하였다. 9.0 mg L⁻¹에서는 실험 초기(4 hr)에 각각 11.2 mg gAFDW⁻¹ hr⁻¹로 가장 높은 생산량을 보였고, 0.5 mg L⁻¹에서는 8 hr 시점에서 7.0 mg gAFDW⁻¹ hr⁻¹로 가장 높게 나타냈다[그림 3.1.74, c].



[그림 3.1.74] DO 농도에 따른 여과율(a, b), pseudofeces 생산(c)

실험 기간 동안 DO 농도는 $9.9 \sim 12.9 \text{ mg L}^{-1}$ 로 높게 유지되었다. 광합성이 이루어지지 않는 밤 동안 식물플랑크톤의 호흡으로 인한 DO의 감소가 발생하더라도 패류는 DO 농도가 낮아질수록 산소소비량을 감소시키며(Chen *et al.*, 2001), 산소가 없는 상태에서 7일 동안 90%의 생존율을 가질 수 있는 생리적인 특성(Horne and McIntosh, 1979)을 감안할 때, DO 농도가 상대적으로 높게 유지된 본 연구의 현장에서 말조개의 폐사에 대한 직접적 영향은 크지 않았을 것으로 판단된다. 높은 암모니아 농도도 패류의 폐사 원인이 될 수 있으나, 실험 초기를 제외한 나머지 기간에는 0.03 mg L^{-1} 이하로 낮은 농도를 유지하였기 때문에 말조개의 폐사에 직접적인 영향은 거의 없었을 것으로 추정된다. 또한 말조개 자체의 암모니아 배출의 영향도 개방된 공간에 설치하였기 때문에 크지 않았을 것으로 판단된다.

담수 이매패의 여과율은 먹이원인 식물플랑크톤의 종 조성(Hwang, 1996; Pires *et al.*, 2005, Bontes *et al.*, 2007)과 밀도(Dorgelo and Smeenk, 1998), 패류의 밀도(Welker and Walz, 1998), 수온(Fanslow *et al.*, 1995) 등 여러 환경요인에 의해 복합적으로 영향을 받는다. 본 연구에서 측정된 말조개의 여과율은 말조개의 수중 위치(수심)와 DO 농도에 따라 다르게 나타났다. 말조개의 최대 여과율은 DO 0.5 mg L^{-1} 에서 실험 초기(8 hr)에 $0.46 \text{ L gAFDW}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ 로 나타났지만, PFP 생성율은 다른 시간에 비해 큰 차이를 나타냈다. DO 농도가 혐기성에 가까울 정도로 낮은 경우에 말조개는 섭식을 위한 여과보다는 호흡을 위해 여과율을 증가시키는 것으로 판단된다. DO 농도에 따라서 $1.12 \sim 4.71 \text{ L ind.}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 로 나타났다.

(10) 말조개와 논우렁이를 이용한 저온기 규조류 제어 실험

온대성 호수 및 하천에서 저온기 동안 규조류의 높은 성장은 일반적이며(Wetzel, 1983; Kilham *et al.*, 1986; Leitao, 1995), 국내에서도 부영양 하천 및 호수에서 규조류 대발생이 일어나고 있다. 이들은 여름철 남조류 대발생과 달리 조류독소를 발생하거나 독소에 의한 인간에게 피해를 입힌 사례는 보고된바 없으나, 정수과정에 문제를 일으키고 물 냄새를 유발하는 등 원활한 수자원 공급에 어려움을 주고 있다(Oksiyuk, 1965; 임 등, 2000).

(가) 말조개를 이용한 규조류 제어 실험

① 연구내용

실험수는 2008년 1월에 규조류가 우점하는 한강과 일감호의 물을 이용하였고, 초기 식물플랑크톤 밀도가 각각 $20,600 \text{ cells mL}^{-1}$, $22,000 \text{ cells mL}^{-1}$ 이었고, Chl-*a* 농도는 각각 47.13, 25.43 $\mu\text{g L}^{-1}$ 을 나타내었다. 식물플랑크톤 우점종은 한강에서는 *Asterionella formosa*, *Stephanodiscus hantzschii*, *Aulacoseira granulata* 등이 우점하였고, 일감호에서는 *Synedra ulna*, *Scenedesmus* sp., *Diatoma vulgare* 등 이었다.

3 L의 용량의 투명 플라스틱 수조에 원수를 2 L 채우고, 말조개의 밀도를 1 L당 0, 0.3, 1, 2 개체의 밀도로 실험하였으며 전체 실험은 동일 조건의 3반복 실험군을 구성하였다($n=3$). 온도는

상은 18°C(±2°C)로 실험하였으며, 광도는 63 μmol의 조건으로 전체 수조에 동일한 환경을 조성하였다[그림 3.1.75]. 측정시간은 실험시작 시간을 기준으로 1, 4, 7 hr 후의 변화를 측정하였다. 패류의 조류섭식능 측정을 위하여 Chl-*a* 농도, PFP(Pseudofaeces Production), 식물플랑크톤 밀도 변화를 조사하였다.

② 연구결과

밀도실험에 있어서 한강과 일감호 현장수 모두 패류의 밀도가 높을수록, 시간이 지날수록 Chl-*a* 농도가 감소하는 경향을 보였다[그림 3.1.76]. 그러나 한강에서는 한 시간 이후에 변화의 폭이 크게 나타났으며, 일감호에서는 한 시간 이내에 변화가 크게 나타났다. 실험에 사용한 두 현장수의 초기 Chl-*a* 농도는 한강은 47.13 μg L⁻¹, 일감호는 25.43 μg L⁻¹로 한강의 먹이농도가 더 높았는데, 일감호의 농도 감소가 더 컸다. 이것은 먹이밀도가 낮을수록 더 활발한 섭식활동을 하는 결과로 추정된다.



[그림 3.1.75] 말조개의 규조류 섭식실험

[그림 3.1.76] 말조개 밀도에 따른 규조류의 생물량 변화(A: 한강, B: 일감호)

두 실험군 모두 0.3 ind. L^{-1} 밀도에서 여과율이 가장 높게 나타났고, $1, 2 \text{ ind. L}^{-1}$ 밀도에서는 상대적으로 낮은 여과율을 나타냈다[그림 3.1.77]. 규조류에 대한 여과율은 조개의 단위 밀도가 낮을수록 높게 나타나는 것으로 판단된다. 시간에 따른 말조개의 여과율은 실험 시작 1 hr 이후 일정 수준의 여과율을 나타냈는데, 이는 초기 말조개의 환경 적응에 의한 것으로 판단되며, 두 현장수에서 여과율의 차이는 먹이밀도 차이에 의한 것으로 판단된다.

[그림 3.1.77] 서로 다른 먹이원에 대한 말조개의 여과율(A: 한강, B: 일감호)

두 처리군에서 식물플랑크톤 밀도의 변화를 살펴보면, 일감호에 비해 한강의 조류의 밀도가 크게 감소한 것으로 나타났다[그림 3.1.78]. 말조개는 먹이(식물플랑크톤)의 크기가 작을수록 말조개가 상대적으로 여과하기 쉽기 때문인 것으로 판단된다.

[그림 3.1.78] 말조개 투입에 따른 주요 식물플랑크톤 변화

(나) 논우렁이를 이용한 규조류 제어 실험

① 연구내용

본 실험은 서로 다른 두 수계인 일감호의 현장수와 한강의 현장수의 차이와 동물밀도, 시간별 차이를 두고 논우렁이의 저온기 규조류 여과율을 측정하였다.

논우렁이 여과율(Filtering Rate, FR, L gAFDW⁻¹ h⁻¹)은 일정시간 동안 우렁이에 의해 소모되는 수중 내 Chl-*a*의 변화량으로 산정하였다. 계산식은 다음과 같다.

$$FR = V \times \ln (C/M) / t / W$$

V : 실험에 사용된 물의 총량(L)

C : 대조군의 Chl-*a*의 농도(mg L⁻¹)

M : 실험군의 Chl-*a*의 농도(mg L⁻¹)

W : 사용된 우렁이의 유기물함량(gAFDW)

실험에 사용한 실험수는 2008년 1월 15일에 채수한 일감호(서울)와 한강(뚝섬부근)의 현장수를 사용하였으며, 수질특성을 측정하기 위해 일감호와 한강 현장에서 사용직전 보정한 다중 수질항목 측정기(YSI 6920, YSI Inc., USA)를 사용하였다. 대상항목으로는 실험수의 수온, 용존산소, 전기전도도, pH, 탁도 등을 측정하였다.

논우렁이 섭식 실험의 실험조건으로는 수온 15±1.0°C, 광도 55 μmol m⁻²sec⁻¹를 유지하였으며, 실험에서는 일감호와 한강의 현장수를 채수 후 500 μm Mesh로 거른 다음 두 실험수의 온도가 안정화 되었을 때 실험을 시작하였다. 수조는 3 L부피(23 × 12 × 13 cm)의 아크릴로 이루어져 있으며, 여기에 각각 현장수를 2 L씩 담고, 논우렁이 밀도는 0, 0.5, 1, 2, 4 ind. L⁻¹로 실험을 실시하였다. 시료채취는 모든 실험에서 동일하게 실시하였는데, 실험시작 후 0, 1, 4, 7시간에 표층으로부터 10 cm 아래층에서 피펫으로 최대한 교란이 일어나지 않도록 실험수를 채수하였다. 시료는 각각 시간마다 110 mL씩 채취하여 밀도분석과 Chl-*a* 분석에 사용하였으며, 대조구 및 실험구는 모두 3 회씩 반복하여 실험하였다.

② 연구결과

우렁이의 밀도가 증가할수록, 시간이 경과할수록 규조류의 밀도 감소폭과 Chl-*a*의 감소폭도 컸다. 일감호 현장수의 경우 모든 밀도(0.5, 1.0, 2.0, 4.0 ind. L⁻¹)에서 실험 종료시간까지 Chl-*a*의 감소가 확인되었으며, 그 중 동물 밀도 1.0 ind. L⁻¹에서는 실험 시작 후 4시간 까지 감소폭이 가장 컸다. 4시간 이후부터 실험 종료 7시간까지는 동물 밀도가 높아질수록 Chl-*a*의 감소폭이 뚜렷이 나타났다. 한강의 현장수에서는 모든 밀도에서 실험 4시간까지 Chl-*a*의 감소가 확인되었다. 또한 실험 4시간째 동물밀도 1.0 ind. L⁻¹에서 Chl-*a*의 감소가 뚜렷이 나타났다. 4시간

이후부터 실험 종료 7시간까지는 동물 밀도가 높은(2.0, 4.0 ind. L⁻¹) 실험군에서만 Chl-*a*가 감소하였고, 저밀도(0.5, 1.0 ind. L⁻¹)에서는 Chl-*a*가 감소하지 않았다.

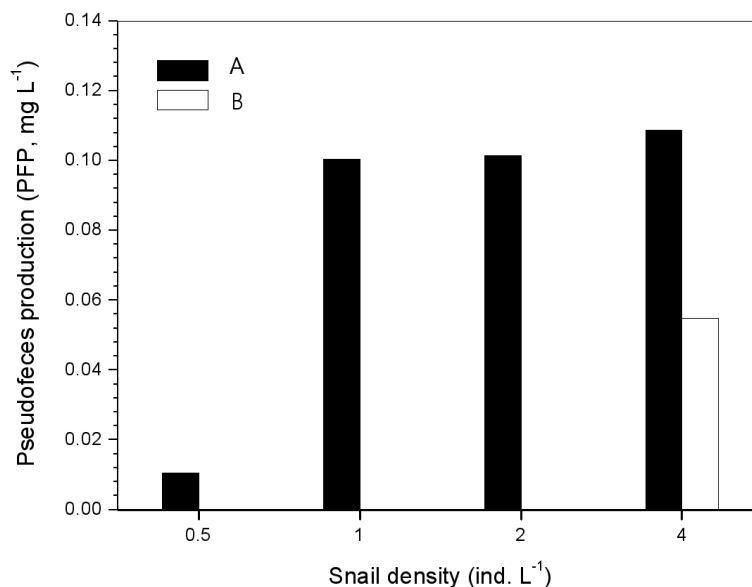
일감호 한강의 두 현장수 모두 모든 동물 밀도에서 시간의 흐름에 따라 지속적인 조류 밀도의 감소가 보였으나 실험종료인 7시간의 저밀도(0.5, 1.0 ind. L⁻¹)에서는 조류섭식이 뚜렷하지 않는 반면 고밀도(2.0, 4.0 ind. L⁻¹)에서는 조류섭식이 확인 되었다[그림 3.1.79].

[그림 3.1.79] 논우렁이 밀도에 따른 조류 현존량 변화(A: 일감호, B: 한강)

일감호와 한강 현장수 모두 0.5, 1.0 ind. L⁻¹ 밀도에서 시간이 지남에 따라 여과율이 감소하는 경향이 나타났다. 반면 2.0, 4.0 ind. L⁻¹ 밀도에서는 시간에 따른 여과율의 변화를 확인할 수 없었다. 여과율이 초기 1시간 0.5 ind. L⁻¹에서 일감호 현장수에 가장 높은 1.94 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹로 나타났으며 7시간 4.0 ind. L⁻¹에서 0.081 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹로 가장 낮았다. 한강의 현장수에서 가장 높은 여과율은 초기 1시간 동안 동물밀도 0.5 ind. L⁻¹에서 0.55 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹로 가장 높았고, 7시간 경과 후 동물밀도 1.0 ind. L⁻¹에서 0.043 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹로 가장 낮았다. [그림 3.1.80].

[그림 3.1.80] 시간의 흐름에 따른 논우렁이 여과율 변화(A: 일감호, B: 한강)

논우렁이는 일감호 현장수의 0.5 ind. L⁻¹를 제외한 모든 동물밀도에서 개체당 비슷한 유기물 (pseudofeces)이 생산되었으며 한강의 현장수에서는 동물 밀도 4.0 ind. L⁻¹에서만 유기물 생산이 관찰 되었다[그림 3.1.81]. 일감호 현장수에 대한 논우렁이의 pseudofeces production은 동물 밀도 4.0 ind. L⁻¹에서 0.11 mg L⁻¹로 가장 높게 나타났으며, 1.0, 2.0, 4.0 ind. L⁻¹에서는 각 개체당 비슷한 양의 유기물을 생산하였다. 그에 비해 0.5 ind. L⁻¹에서 유기물 생산량은 다른 동물 밀도의 유기물 생산성에 비해 10% 수준에 머물렀다. 한강 현장수에서는 4.0 ind. L⁻¹에서 0.05 mg L⁻¹의 생산량을 보였으며 일감호의 같은 동물 밀도에서의 45% 생산량을 보였다. 또한 4.0 ind. L⁻¹이외의 밀도에서는 pseudofeces가 생산되지 않았다.



[그림 3.1.81] 생물 밀도별 유기물 생산(A: 일감호, B: 한강)

이매패류와 논우렁이를 사용하여 오염된 하천이나 저수지 등의 수질정화에 사용한 사례는 이미 여러 차례 보고된바 있다(Kehde, 1972; Osenberg, 1989; Weber and Lodge, 1990). 본 연구에서는 저온기 규조류에 대한 논우렁이의 섭식능을 확인하였고, 또한 고온기 남조류에 대한 여과능 실험(황 등, 2008)과 비교해 보았다.

논우렁이는 고온기 남조류 제어보다 저온기 규조류 제어에 더 높은 여과율을 보였으며, 이는 남조류 제어보다 규조류 제어에 더 효과적이며 또한 한강(0.04~0.56 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹) 현장수보다 일감호(0.06~1.94 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹) 현장수에서 더 높게 나타났다. 논우렁이는 마리당 0.04~1.94 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹범위의 여과율을 나타냈으며 이는 부영양 저수지 식물플랑크톤을 대상으로 한 여과성 이매패 *Corbicula leana*(김 등, 2004), *Unio douglasiae*(이 등, 2008)등과 유사한 수준이었다[표 3.1.17]. 특히 일감호 저온기 규조류 현장수에서 고온기 남조류에 대한 여과율(0.02~1.35 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹)보다 높게 나타났다.

[표 3.1.17] 선행연구에서의 담수 이매패의 여과율

Bivalves	mL mgAFDW ⁻¹ h ⁻¹	Food source	References
<i>Corbicula leana</i>	0.74~3.05	Mesotrophic lake phytoplankton	Hwang <i>et al.</i> , 2004
	0.24~0.87	Hypertrophic lake phytoplankton	Hwang <i>et al.</i> , 2004
<i>Unio douglasiae</i>	0.07~0.80	<i>Microcystis</i> blooming water	Lee <i>et al.</i> , 2008
	0.12~1.43	Diatom blooming water	Lee <i>et al.</i> , 2008
<i>Cipangopaludina chinensis malleata</i>	0.02~1.35	<i>Microcystis</i> blooming water	Hwang <i>et al.</i> , 2008
	0.04~1.94	Diatom blooming water	This study

일감호의 현장수에서 실험 1시간째 동물밀도 1.0 ind. L⁻¹에서 1.94 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹로 가장 높은 여과율을 나타냈으며, 한강에서 가장 높게 나타난 1시간째 동물밀도 1.0 ind. L⁻¹에서 0.55 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹보다 높았다. 이로써 논우렁이는 한강의 실험수보다 조류밀도가 상대적으로 더 낮은 일감호의 실험수의 조류를 더 효율적으로 제어한다는 사실을 알 수 있다. 섭식율은 대체적으로 시간에 흐름에 따라 감소하는 경향이 나타났는데 이는 시간의 흐름에 따라 실험 수조의 조류의 밀도가 급격히 줄어든 만큼 효율이 떨어졌을 것으로 사료된다.

논우렁이는 밀도가 높을수록 그리고 시간이 흐를수록 높은 효율을 보였고, 이매패인 말조개(*Unio douglasiae*)의 조류 섭식율 보다 높은 효과를 보였다(이 등, 2008). 또한 논우렁이는 이매패와 달리 높은 운동성과 섭식기관인 치설을 사용하여 조류를 섭식하며, 현장 적용 가능성이 높다. 또한 국내의 다른 담수 패류보다 번식이 쉽고 빠른 장점이 있다.

논우렁이는 먹이를 섭취하여 체내 또는 체외 축적한 다음 이를 서서히 소화 시키는 과정을 거치며(Dawen *et al.*, 2006), 이때 생기는 조류 응집물은 이매패가 생산한 유기물보다 더 단단

하고 끈끈한 점액질로 쌓여있어 오랫동안 유지된다. 이는 다른 박테리아나 수서 곤충에게 손쉬운 먹잇감을 제공하며 보다 많은 생물과의 연계를 가능하게 한다. 이는 다른 이때때가 가지지 못하는 논우렁이만의 고유 특성이며 생물학적 조류제어 및 생물공학적인 기법개발에 가능성이 있음을 시사한다.

본 실험은 낮은 초기 Chl-*a* 농도로 인해 높은 우렁이 밀도에서 조류의 변동을 확실히 알 수는 없지만, 논우렁이에 의한 규조류 섭식능은 선행 실험과 비슷한 결과를 나타냈다. 논우렁이는 부영양 저수지와 하천에 발생한 저온기 규조류에 높은 여과율로 수질을 개선하는데 효과적인 것으로 사료되나, 현장적용에 필요한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

(11) 저온기와 고온기 식물플랑크톤에 대한 말조개 섭식능 비교

일반적으로 여름에 비해 상대적으로 일조시간이 짧고 수온이 낮은 봄, 가을 그리고 겨울 등의 저온기 호수에서는 규조류가, 늦은 봄, 여름 그리고 초가을 등의 고온기에는 남조류가 우점한다(Sommer *et al.*, 1986). 본 연구의 대상호수인 일감호(서울)는 수표면적 약 55,661 m², 최대 수심 약 2.0 m, 평균 보유수량은 수위가 해발고도 14.88 m일 때 약 54,288 m³이다. 저수량은 강우와 지하수에 의존하고 있으며, 자연유하식의 구조로 호수가 만수위가 되는 경우에만 배출되고 있다. 주요 오염원은 우수와 호수 주변의 낙엽과 서식생물들의 배설물 등이며, 호수 부영양화 진행에 대해서는 과거에 조사된 자료가 미흡하여 정확히 추정할 수 없으나, 1975년 한강에서 유입되었던 유지용수가 차단되면서 부영양화가 시작된 것으로 판단된다. 현재에는 외부유입 오염물에 대한 관리가 부분적으로 이루어지고 있으나, 체류시간이 긴 수리·수문학적 특성과 생성초기부터 유입된 많은 유입물질과 저층에 축적된 유기물, 유입수 수질자체의 악화 등과 같은 요인들로 인해 과영양상태에 놓여 있다(김 등, 2003).

본 연구는 국내 하천이나 호수 유역에 풍부하게 서식하는 한국산 말조개(*Unio douglasiae*)를 대상으로 저온기에는 규조발생을, 고온기에는 남조발생을 유도하는 과영양호수(일감호, 서울)의 표층수에 대한 섭식특성을 이해하고자, 말조개 서식밀도와 유사한 조건에서 여과율 및 식물플랑크톤 변화를 조사하였다.

(가) 연구내용

섭식실험은 저온기(2008년 3월 31일)와 고온기(2008년 6월 19일)의 일감호 표층수를 채수하여 1 mm Nylon mesh로 여과한 후 실험에 사용하였다. 여과된 실험수는 100 L PVC 수조에 잘 저어 섞은 다음 60 L씩 채우고, 광도 65.0 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{sec}^{-1}$, 수온 13~15°C로 각각 유지하였다. 각 실험에 사용된 실험수의 식물플랑크톤 특성은 [표 3.1.18]과 같다.

[표 3.1.18] 섭식실험에 사용한 고온기, 저온기 일감호 수체내 우점 조류

Period	Major phytoplankton	Density(cells mL ⁻¹)	
Cold period (March 2008)	<i>Synedra ulna</i>	16,500	(37.88%)
	<i>Scenedesmus ecornis</i>	12,300	(28.31%)
	<i>Chroococcus turgidus</i>	2,900	(6.82%)
	<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	1,800	(4.19%)
Warm period (June 2008)	<i>Microcystis aeruginosa</i>	56,100	(61.77%)
	<i>Scenedesmus ecornis</i>	25,300	(27.86%)
	<i>Tetraedron regulare</i>	2,100	(2.30%)
	<i>Pediastrum simplex</i>	2,100	(2.33%)

섭식실험은 크게 대조군과 처리군으로 구성하였으며, 대조군은 CON(0 ind. m⁻²)으로 구성하였으며, 처리군은 M100(100 ind. m⁻²), M200(200 ind. m⁻²)로 하여 각각 구성하였다. 실험에 사용된 모래는 경안천에서 채취해 왔으며 바닥에 5 cm 정도의 두께로 깔았다. 모든 실험은 3회 반복하여 실시하였으며, 실험도중 패류가 사망할 경우, 다른 패류에 대해 영향을 미치지 않게 하기 위해 교란을 최소화하면서 제거하였다.

시료는 패류 처리 후 2시간 간격으로 24시간 동안 교란을 최소화하면서 표층 10 cm 하부를 채취하여, Chl-*a* 및 조류밀도, 수질 등을 각각 분석하였다. Chl-*a*는 각 시간별로 채취한 시료를 GF/C 필터로 여과하고, 90% 아세톤을 10 mL 첨가하여 24시간 동안 4°C 암소에서 추출한 다음 20분간 500 g 속도로 원심분리하여 상층액을 꺼내 분광광도계로 흡광도를 측정하였다(APHA, 1995). 조류밀도는 각 시간별로 1 mL씩 채취하여 Lugol 용액으로 고정하고 균일하게 혼합시킨 다음 12시간 이상 정치시킨 후 Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 광학현미경(Axiostarplus, ZEISS, Germany) 100~200배율 하에서 계수하였다. 출현종의 동정은 종 수준까지 하였고, 미동정 종에 대해서는 sp.로 처리하였다. 각 시간별 수온과 pH, EC, 용존산소 측정은 현장 수질측정기를 이용하여 직접 측정하였다(YSI 600QS-O-M, USA). 영양염 분석을 위해 시료를 각 시간별로 채수한 후 수질오염공정시험방법(환경부, 2004)에 의해 분석하였다.

(나) 연구결과

저온기의 경우, Chl-*a* 농도는 M100에서 평균 75.0%, M200에서 평균 91.6% 각각 감소하였으며[그림 3.1.82, A], 고온기에서는 M100에서 평균 62.7%, M200에서 평균 77.9% 각각 감소하여[그림 3.1.82, B], 시기에 상관없이 고밀도 처리군에서 뚜렷한 조류 제어능을 나타냈다. 한편 동일 밀도를 처리할 경우, 저온기에서 보다 뚜렷한 제어효과가 나타났다.

말조개의 식물플랑크톤 제어능은 적용 시간과, 적용 밀도에 따라 차이를 나타내었다[그림 3.1.83]. 저온기 현장수에서는 패류 밀도에 따른 식물플랑크톤 감소 경향이 뚜렷한 차이를 보였는데, M100에서는 실험 6시간째 70%, 12시간째 80%, 18시간째 97%, 24시간째 98% 감소하여

서서히 감소하는 경향을 보인 반면, M200에서는 실험 6시간째 94% 감소하여 실험 초기에 거의 대부분이 제어되었다[그림 3.1.83, A].

고온기 현장수에서는 저온기 현장수와는 달리 패류 밀도에 따른 식물플랑크톤 감소 경향이 뚜렷하지 않았는데, M100에서는 실험 6시간째 75%, 12시간째 84%, 18시간째 85%, 24시간째 86% 감소하여 서서히 감소하는 경향을 보였다[그림 3.1.83, B]. 그러나 M200에서는 실험 6시간째 82% 감소하여 M100보다 감소폭이 컸지만 실험 12시간째 69%로 증가하였으며 18시간째에는 85%로 다시 감소하였고 실험 종료 시인 24시간째에는 64%로 증가하는 경향을 보였다. 결과적으로 한국산 말조개는 저온기 현장수에서는 패류밀도가 클수록 뚜렷한 섭식효과를 보였으나, 고온기 현장수에서는 패류밀도에 따른 뚜렷한 효과를 보이지 않았으며, 고온기보다 저온기 식물플랑크톤 군집에 뚜렷한 섭식효과를 나타냄을 알 수 있었다.

[그림 3.1.82] 말조개 밀도 따른 Chl-*a*의 변화(A: *Synedra ulna*, *Stephano discus hantzchii*, *diatoma vulgare*가 식물조류의 52%를 차지하는 저온기 수체, B: *Microcystis aeruginosa* 전체 식물조류의 63%를 차지하는 고온기 수체. 대조군 0 ind. m⁻², 처리군 M100: 100 ind. m⁻², 처리군 M200: 200 ind. m⁻²)

[그림 3.1.83] 패류 밀도 따른 조류 밀도의 감소(A: 저온기 수체, B: 고온기 수체, 대조군 0 ind. m⁻², 처리군 M100: 100 ind. m⁻², 처리군 M200: 200 ind. m⁻²)

저온기 현장수에서 우점한 식물플랑크톤에 대한 말조개의 제어능은 패류적용 시간이 지남에 따라 뚜렷하였으며 패류 밀도가 높을수록 뚜렷하였지만 식물플랑크톤의 종류에 따라 차이를 나타내었다[그림 3.1.84]. *Synedr aulna*는 저온기 현장수에서 가장 우점하였으며, M100에서는 실험초기에 73% 감소하였으며, M200에서는 실험초기에 97% 감소하여 실험 초기에 대부분이 감소하는 경향을 보였다. *Stephanodiscus hantzschii*는 M100에서는 실험 초기에 64% 감소하였으며, M200에서는 실험 초기에 97% 감소하여 실험초기에 대부분이 감소하는 경향을 보였다. *Scenedesmus ecornis*는 M100에서는 실험 초기에 45%, 12시간째 50%, 18시간째 60%, 24시간째 88% 감소하였으며, M200에서는 실험 초기에 71%, 12시간째 85%, 18시간째 87%, 24시간째 100% 감소하여 서서히 감소하는 경향을 보였다. *Chroococcus turgidus*는 M100에서는 실험 초기에 67%, 12시간째 63%, 18시간째 87%, 4시간째 100% 감소하였으며, M200에서는 실험 초기에 81%, 12시간째 80%, 18시간째 100%, 24시간째 100% 감소하여 서서히 감소하는 경향을 보였다.

[그림 3.1.84] 저온기 수체내 패류 밀도 따른 우점조류의 밀도 변화
대조군 0 ind. m⁻², 처리군 M100: 100 ind. m⁻², 처리군 M200: 200 ind. m⁻²

고온기 현장수에서 우점한 식물플랑크톤에 대한 말조개의 제어능은 패류적용 시간과 패류적용 밀도에 따라 뚜렷한 감소경향을 보이지 않았으며, 식물플랑크톤의 종류에 따라 차이를 나타내었다[그림 3.1.85]. *Microcystis aeruginosa*는 고온기 현장수에서 가장 우점하였으며, M100에서는 실험초기에 47%, 12시간째 53%, 18시간째 59%, 24시간째 49% 감소하였으며, M200에서는 실험초기에 59%, 12시간째 36%, 18시간째 51%, 24시간째 11%로 증가와 감소를 반복하였으며, 다른 우점조류에 비해 제어효과가 가장 좋지 않았다. *Scenedesmus ecornis*는 M100에서는 실험초기에 85% 감소하였으며, M200에서는 실험초기에 95% 감소하여 실험 초기에 대부분이 감소하는 경향을 보였다. *Tetraedron regulare*는 M100에서는 실험초기에 92% 감소하였으며, M200

에서는 실험초기에 97% 감소하여 실험 초기에 대부분이 감소하는 경향을 보였다. *Pediastrum simplex*는 M100에서는 실험초기에 77% 감소하였으며, M200에서는 실험초기에 100% 감소하여 실험 초기에 대부분이 섭식되는 경향을 보였다.

[그림 3.1.85] 고온기 수체내 패류 밀도 따른 우점조류의 변화
(대조군 0 ind. m⁻², 처리군 M100: 100 ind. m⁻², 처리군 M200: 200 ind. m⁻²)

두 시기의 현장수에 대한 말조개의 여과능은 패류적용의 시간과 밀도에 따라 뚜렷한 차이를 나타내었다[그림 3.1.86]. 저온기 현장수에서는 M100에서 실험 초기부터 높은 여과율(0.315 Lg⁻¹h⁻¹)을 보였으며, 4시간째에는 가장 높은 여과율(0.470 Lg⁻¹h⁻¹)을 보였다[그림 3.1.86, A]. 이후 6시간째부터 실험 종료시까지 비슷한 수준을 유지하면서 급격히 감소하는 경향을 보였다(평균 0.367 Lg⁻¹h⁻¹, 범위 0.264~0.420 Lg⁻¹h⁻¹). M200에서는 실험 초기(2시간째)에 가장 높은 여과율(1.226 Lg⁻¹h⁻¹)을 보였으며, 실험 종료시까지 서서히 감소하는 경향을 보여 실험 종료시에는

M100과 비슷한 수준까지 감소하였다(Avg: $0.808 \text{ Lg}^{-1}\text{h}^{-1}$, $0.297 \sim 1.226 \text{ Lg}^{-1}\text{h}^{-1}$). 고온기 현장수에서는 M100에서 실험 초기(2시간째)에 높은 여과율($0.670 \text{ Lg}^{-1}\text{h}^{-1}$)을 보였으며, 실험 4시간째에 가장 높은 여과율($0.736 \text{ Lg}^{-1}\text{h}^{-1}$)을 보였다[그림 3.1.86, B]. M200에서는 실험 초기(2시간째)에 가장 높은 여과율($0.780 \text{ Lg}^{-1}\text{h}^{-1}$)을 보였으며, 실험 4시간째에도 역시 높은 여과율($0.737 \text{ Lg}^{-1}\text{h}^{-1}$)을 보였다. 두 실험군 모두에서 실험 종료 시까지 약간의 변동을 보이면서 전체적으로 감소하였으며 두 실험군이 큰 차이 없이 비슷한 경향을 보였다. 결과적으로 저온기 현장수에서는 고밀도 처리군에서 여과율이 높았으며, 고온기 현장수에서는 고밀도 처리군과 저밀도 처리군의 여과율이 비슷한 수준과 감소경향을 보였다.

[그림 3.1.86] 담수 이매패인 말조개의 밀도에 따른 여과율의 변화. A: 저온기 수체, B: 고온기 수체. 대조군 0 ind. m^{-2} , 처리군 M100: 100 ind. m^{-2} , 처리군 M200: 200 ind. m^{-2}

본 연구는 저온기 동안 규조류 대발생을 일으키는 현장수와 고온기 동안 남조류 대발생을 일으키는 현장수를 대상으로 시기별 수질 및 식물플랑크톤 종 조성이 서로 다른 현장수에 대한 말조개의 밀도별 섭식특성을 비교 조사하였다. 말조개는 시기별 - 저온기(*Synedra ulna*, *Stephanodiscus hantzschii*, *Diatoma vulgare*, 우점율 52.4%), 고온기(*Microcystis aeruginosa*,

Scenedesmus ecornis, 우점율 90.13%)에 대하여 패류 적용 시간에 따라 Chl-*a*의 뚜렷한 감소를 보였으나, 패류 밀도에 있어서 시료간에 차이를 나타내었다.

저온기 현장수와 고온기 현장수 모두에서 고밀도의 패류처리구(M200)에서 보다 뚜렷한 Chl-*a* 감소를 보였으며, 동일한 패류 밀도 조건에서는 저온기 현장수에서 고온기 현장수보다 Chl-*a* 제어효과가 뚜렷하였다. 그러나 고온기 현장수에서는 시간에 따른 감소경향이 뚜렷하지 않고 증가와 감소를 반복했다. 이런 특성은 외부로부터 영양염 공급이 없는 제한된 공간에 독성남조 *M. aeruginosa*의 높은 현존량이 고온기 현장수에 대한 말조개의 섭식능에 영향을 주었을 것으로 사료된다. 말조개의 섭식율은 저온기 현장수와 고온기 현장수에서 모두 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 경향을 나타냈는데, 이것은 말조개의 경쟁적 섭식에 의한 결과라고 판단되며 안정동위원소를 이용한 *M. aeruginosa* 섭식실험 결과와 일치된다(이 등, 2009). 그러나 저온기 현장수에서는 말조개 밀도에 따른 여과율의 차이가 뚜렷하게 나타난 반면, 고온기 현장수에서는 말조개 밀도에 따른 여과율의 차이가 뚜렷하지 않았다. 말조개 밀도에 따른 섭식특성의 차이는 우점종 감소경향에서도 나타났는데, 말조개 밀도에 따른 우점종 감소 현상이 뚜렷하였던 저온기와는 달리, 고온기 현장수에서는 두 말조개 밀도에서 감소 현상이 비슷한 경향을 보였다. 이것은 퇴적물에 의한 영양염과 계절적인 특성으로 인한 수온 등이 말조개의 경쟁적 섭식특성에 영향을 주었을 것이라고 사료되었다.

패류적용에 따른 조류현존량의 감소는 Chl-*a*의 감소와 유사하였으나, 현장수와 식물플랑크톤 종에 따라 차이를 보였다. 저온기 현장수에서 조류 현존량은 거의 100%에 가깝게 제거된 반면, 고온기 현장수에서 조류 현존량은 약간의 증가를 보이기도 하였으며 제어율이 낮았다. 이런 특징은 규조류가 대발생 하였던 현장수를 이용한 말조개 섭식실험(이 등, 2008a)과 유사하였으며, 섭식능의 차이는 종 조성의 차이로 인한 조류의 크기 및 형태가 주된 원인으로 판단된다(Shumway and Cucci, 1987; Shumway, 1990; Ward *et al.*, 1998).

저온기 현장수에서 우점하였던 *Synedra ulna*와 *Stephanodiscus hantzschii*는 빠른 시간내에 감소한 반면, *Scenedesmus ecornis*와 *Chroococcus turgidus*는 서서히 감소하는 경향을 보였으며, 고온기 현장수에서 우점하였던 *Scenedesmus ecornis*, *Tetraedron regulare*, *Pediastrum simplex*은 빠른 시간내에 감소하는 경향을 보였다. 이러한 현상은 규조에 대한 말조개의 섭식특성이 뛰어난을 증명해 주며, Zebra mussel(*Dreissena polymorpha*)은 두꺼운 silicate frustule를 갖고 있는 규조류를 일반적으로 선호하지 않는다는 보고가 있으나(Naddafi *et al.*, 2007), 말조개의 규조 섭식에 대한 효과는 국내 여러 연구에 의해 입증된 바 있어(이 등, 2008a; 이 등, 2008b) 말조개의 규조 섭식능이 다른 담수산 이매패류보다 효과적임을 알 수 있다. 또한 저온기 현장수의 *Scenedesmus ecornis*와는 달리 고온기 현장수의 *Scenedesmus ecornis*의 높은 섭식능은 제어 효과가 가장 적었던 *M. aeruginosa*의 독성으로 인한 상대적인 결과라고 판단되며(Vanderpoeg, 2001), *Microcystis* 군체를 먹이로 하였을 때 낮은 섭식능을 보인다는 *Dreissena polymorpha*의 연구와도 일치한다(Bastviken *et al.*, 1998; Vanderploeg *et al.*, 2001).

결과를 종합하면, 수온이 서로 다른 시기에 부영양호수의 식물플랑크톤에 대한 국내산 말조개의 섭식능은 남조류가 우점하였던 고온기보다 규조나 녹조가 우점하였던 저온기에 보다 효과적임을 알 수 있었다. 결국 말조개는 여름철 부영양호수에서 수질문제를 야기하는 남조류보다

저온기 하천이나 호수에서 높은 밀도를 보이는 규조나 녹조류의 제어에는 효과적이며, 남조발생 제어를 위한 유용생물의 발굴 및 새로운 기법 개발이 요구된다 하겠다.

(12) 추적자(^{13}C , ^{15}N)를 이용한 말조개의 남조류 에너지 동화 실험

추적자로서 알려져 있는 농도의 탄소(^{13}C), 질소(^{15}N) 안정동위원소를 메소코즘에 첨가하면 식물 플랑크톤인 남조류(*Microcystis aeruginosa*)는 이를 광합성을 통해 체내에 흡수하고, 말조개는 섭식을 통하여 생체내에 이를 흡수하거나 pellet 형태로 배설하여 요소나 암모니아 형태로 체외로 배출된다.

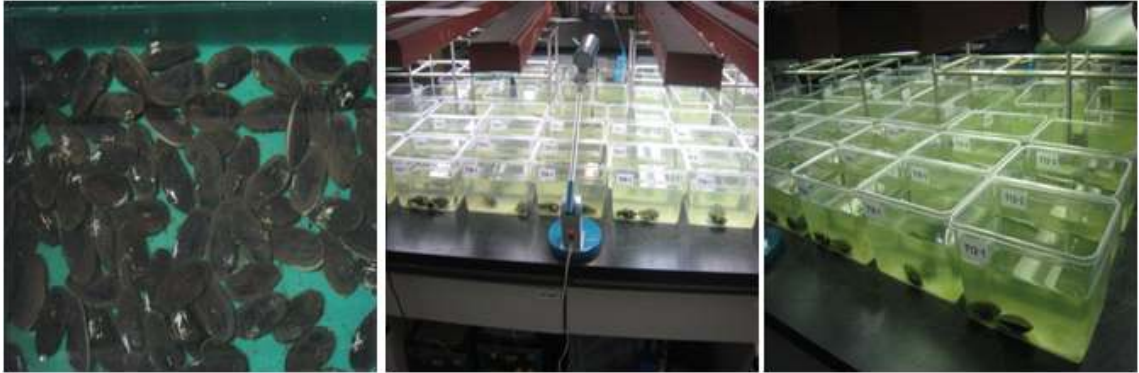
본 연구는 추적자가 새겨진 남조류(*Microcystis aeruginosa*)를 말조개(*Unio douglasiae*)가 섭식한 후 배설한 pellet의 안정동위원소비와 말조개의 체내에 흡수된 안정동위원소비를 비교하여 시간에 따른(0시간~240시간) 말조개의 남조류 제거율을 유추하였으며 또한 추적자를 이용하여 말조개가 남조류를 섭취하였을 때 부위별(근육, 아가미, 피부, 내장, 위)에 따른 에너지 동화율을 연구하였다.

(가) 연구내용

실내에서 배양한 실험수(남조류 *Microcystis aeruginosa* 90% 이상 우점)에 추적자(Enriched ^{13}C , ^{15}N)를 첨가하였으며 남조류(*M. aeruginosa*)세포내 흡수를 유도하였다. 추적자(Enriched ^{13}C , ^{15}N)를 함유하고 있는 남조류는 10일간의 섭식실험을 통하여 말조개가 생체내에 흡수하거나 pellet의 형태 혹은 영양염 형태로 용출 및 체외로 배출될 거라 판단을 하고, 말조개 각 조직(근육, 아가미, 피부, 내장, 위)내 탄소, 질소 안정동위원소 값을 측정하여 남조류 제거 속도 및 탄소, 질소의 turnover rate를 계산하여 에너지 순환속도를 분석하였다.

실험수는 2008년 1월에 매년 6월부터 11월 초까지 남조류 *Microcystis aeruginosa* 대발생이 일어나는 소형 인공호(일감호, 서울)의 현장수와 저니층을 대형 유리수조($50 \times 65 \times 120$ cm)에 넣고, 수온 $25^\circ\text{C} \pm 1.0$, 광도 $78 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 조건하에 CB배지를 넣어 인공적으로 조류 발생을 일으킨 실험수를 사용하였다. 실험수의 90% 이상이 *M. aeruginosa*가 우점하였다.

3 L의 용량의 투명 플라스틱 수조에 원수를 2 L 채우고, 말조개의 밀도를 1 L당 1개체의 밀도로 실험하였으며 전체 실험은 동일 조건의 실험군 3반복, 대조군 2반복으로 구성하였다(n=75). 온도는 상온 $22^\circ\text{C} (\pm 2^\circ\text{C})$ 로 실험하였으며, 광도는 $63 \mu\text{mol}$ 의 조건으로 전체 수조에 동일한 환경을 조성하였다[그림 3.1.87].



[그림 3.1.87] 말조개의 남조류 에너지 동화 실험

측정시간은 실험시작 시간을 기준으로 0시간~144시간 간의 변화를 측정하였다. 패류의 조류 섭식능 측정을 위하여 Chl-*a* 농도, SPM, POM, Pellet, 실험수, 말조개 부위로 잘라 준비한 조직에 대해 안정동위원소비를 각각 조사하였으며, 또한 수질분석도 실시하였다.

시료는 정해진 시간에 교란이 일어나지 않도록 표층으로부터 5 cm 아래에서 각각 100 mL씩 채취하여 Chl-*a* 농도의 경시적 변화로 측정하였다. Chl-*a*는 채취한 시료를 잘 혼합하여 GF/F 여과지로 여과한 후, 90% 아세톤을 넣고 24시간 냉암소에서 추출한 뒤 원심분리기로 20분간 분리하여 흡광도를 측정하였다.

입자성 부유물질(SPM)과 입자성 유기물(POM)은 2 mL 스포이드를 사용하여 교란이 일어나지 않도록 주의하여 말조개가 배출한 Pellet을 채취하고, 미리 무게를 측정된 여과지(GF/F)에 여과한 후 70°C의 oven에서 건조시킨 후 무게를 측정하여 다음의 식에 따라 계산하였다.

$$\text{SPM}(\text{mg L}^{-1}) = (a-b)/V$$

a: 여과한 후 여과지 (GF/F)의 무게(mg)

b: 여과하기 전 여과지 (GF/F)의 무게(mg)

V: 여과 한 시료의 양(L)

POM은 SPM을 측정한 여과지를 450°C에서 1시간 동안 태워 유기물을 제거한 후 무게를 측정하여 다음의 식에 따라 계산하였다.

$$\text{POM}(\text{mg L}^{-1}) = \text{SPM}(\text{mg L}^{-1}) - \text{태운 후의 여과지 무게}(\text{mg})$$

(나) 연구결과

대조군에서는 Chl-*a* 농도가 증가하다가 12시간 이후 급격히 감소하였다. 24시간이후 농도가 유지되었다. 그러나 처리군에서는 실험 시작부터 Chl-*a* 농도가 급격히 감소하였으며 24시간 이후에는 배설작용에 의해 약간 증가하는 경향을 보였다[그림 3.1.88]. 대조군에서의 12시간 이후

의 Chl-*a* 농도 감소는 남조류들이 표층으로 대부분 부상하여 시료를 채취한 층에서 상대적으로 감소한 것으로 나타났으나, 실제로 전체 농도가 감소한 것은 아니었다. 이는 시료 채취상의 문제이다.

[그림 3.1.88] 시간의 흐름에 따른 Chl-*a*의 변화

말조개 처리군의 총 질소(TN)의 농도는 대조군과 비슷한 경향을 보였으며, 큰 차이를 확인할 수 없었다. 총 인(TP)의 농도는 대조군과 처리군 모두 실험 초기부터 점차 증가하다가 36시간 이후 말조개 처리군이 크게 증가하였다. 그 이후에는 증가와 감소를 반복하는 경향을 나타내었다[그림 3.1.89].

[그림 3.1.89] 시간의 흐름에 따른 TN, TP의 변화

패류의 유기물 생산은 실험 초기 6시간 전까지 매우 높은 생산력을 보이다 6시간 이후에는 감소하였다. 이는 수체내 Chl-*a*의 농도가 $60 \mu\text{m L}^{-1}$ 일 때 까지며 패류의 유기물 생산은 수체내 유기물이 일정량 이상일 때 유기물 생산력이 높다는 사실을 확인하였다[그림 3.1.90].

[그림 3.1.90] 시간의 흐름에 따른 유기물 생산(상: ^{15}N , 하: ^{13}C)

추적자를 이용하여 패류 조직에 존재하는 추적자의 양을 평가한 결과[그림 3.1.91], ^{15}N 은 시간이 흐름에 따라 패류 조직속으로 흡수되는 양이 확인 되었다. 장-아가미-위-외투막-근육 순서로 많이 흡수되었다. ^{13}C 는 상대적으로 ^{15}N 보다 많은 양이 흡수 되었으며 조직간 흡수되는 순서는 ^{15}N 과 유사하였다. 상대적으로 소화기관에 많은 양이 흡수되었으며 12시간 이후 흡수량이 증가하였다. 패류의 배설물이 대량 생산되는 시간과 차이를 확인 할 수 있으며 패류는 조류 섭취 후 약 12시간이 지나야 조류세포를 소화흡수 한다는 사실을 확인하였다. 또한 ^{15}N 보다 ^{13}C 에서 많은 양의 추적자가 합성되었다.

말조개의 Production rate는 시간에 따라서 +, - 값의 변화가 관찰되었는데, 이는 말조개가 남조류를 계속적으로 섭취하는 것이 아니며 또한, 시간에 따라 섭취하는 속도가 빠르기도 하고, 흡수보다는 체외로 배출하는 속도가 빠를 수도 있다는 것을 나타낸다.

N과 P의 흡수에 의한 Net production(순생산력)의 결과로 미루어 볼 때, 말조개는 POM(남조류)을 섭취하여 극히 일부만 체내에 흡수하고 대부분을 pellet형태로 체외로 배출한다는 것을 유추할 수 있다[그림 3.1.92].

[그림 3.1.91] 시간의 흐름에 따른 조직별 추적자 흡수량

[그림 3.1.92] 시간의 흐름에 따른 추적자의 분포

3. 유용생물을 이용한 수질개선 기술의 현장 적용 및 평가

가. 유용생물에 의한 현장 mesocosm 수질 개선 효과 실험

본 실험은 유용 생물의 현장 적용에 대비한 실험의 일환으로 실시하였다. 매년 유해 남조류 (*Microcystis aeruginosa*)가 대발생하는 부영양호수(일감호, 서울)에 소규모 mesocosm을 설치하여 유용생물의 수질 개선 효과를 조사하였다. 유해조류 *Microcystis* spp.를 채수한 호수는 최대수심은 2.0 m이며, 평균보유수량은 54,288 m³의 호수로써 유량은 강우와 지하수에만 의존하고, 호수가 만수위가 될 때만 배출되는 특성을 가지고 있다. 그 중에 *Microcystis* spp.가 bloom을 일으킨 곳에서 mesocosm을 설치하여 실험하였다.



[그림 3.1.93] A: 일감호 전경, B: 남조류 대발생한 일감호, C: 일감호내 mesocosm D: 시료채취모습

(1) 유용생물(논우렁이, 말조개, 동물플랑크톤) 수질 개선 효과

(가) 연구내용

1차 실험은 유용생물인 논우렁이를 단독 처리하여 조류 제어 효과를 조사하였다. 연구는 2007년 9월 26일~9월 30일까지 4일간 실시하였고, 120 L의 원형수조 9개에 직접 퇴적물을 넣고, 우렁이를 0~120개체까지 20개체씩 단계별로 투입하여 조류제어 실험을 시도하였다.

2차 실험은 실내 실험을 통하여 조류 제어 효과를 나타낸, 유용생물(말조개, 동물플랑크톤, 논우렁이)을 적용하여 조류 제어 효과를 조사하였다. 실험 환경은 1차 실험과 동일하며, 유용생물의 개체 밀도를 말조개와 우렁이는 1 ind. L^{-1} , 동물플랑크톤은 30 ind. L^{-1} 로 투입한 후, 수질과 조류의 변화를 조사하였다.

(나) 연구결과

① 1차 실험

논우렁이를 투입함에 따라 pH 및 탁도는 뚜렷한 감소경향을 나타냈다. 특히 탁도는 1일 후에 급격한 감소를 나타내 Chl-a 농도의 변화와 비슷한 경향을 나타냈다[그림 3.1.94]. 실험 초기

에는 우렁이의 밀도가 증가할수록 Chl-*a* 농도가 크게 감소하였다. 그러나 2일 이후 감소율이 낮아지고 높은 밀도의 실험군에서는 오히려 Chl-*a* 농도가 증가하는 경향이 나타났다[그림 3.1.95]. 우렁이를 이용한 조류제어는 높은 밀도일수록 빠른 효과를 보였으나 일정량의 제어 후 다시 Chl-*a* 농도가 증가하여 제어 후 추가적인 처리가 필요할 것으로 판단된다.

20

[그림 3.1.94] 논우렁이 밀도에 따른 이화학적 환경요인 변화

[그림 3.1.95] 논우렁이 투입에 따른 조류제어효과

② 2차 실험

가장 높은 제어율은 말조개 단독 실험군에서 나타났으며($93\pm 3.5\%$, 13 hr) 낮은 제어율은 *Daphnia* 단독 실험군에서 나타나($15\pm 2.3\%$, 13 hr), 동물 플랑크톤은 혼합 적용 시 다른 생물들과의 상호 작용을 통해 더 높은 섭식능을 발휘 할 것으로 예상된다. 두 종간의 혼합 실험 결과, 논우렁이와 말조개 혼합 실험군에서 상대적으로 높은 제어율($83.8\pm 3.9\%$, 13 hr)이 관찰되었다. 전체 혼합군에서는 두 종간의 혼합 실험 결과와 비교해 추가적인 상승효과는 나타나지 않아, 동물플랑크톤의 투입 효과가 미미한 것으로 판단된다[그림 3.1.96]. 따라서 말조개가 남조류 bloom의 제어에 중요한 역할을 하는 것으로 여겨지며, 동물플랑크톤과 패류의 혼합 적용 보다는 패류간의 혼합적용이 더 높은 제어효과를 가져올 것으로 사료되었다.

[그림 3.1.96] 유용생물(말조개, 동물플랑크톤, 논우렁이)의 제어율 비교

본 실험결과로써 (1) 말조개와 논우렁이는 개별적이거나 혼합하여 투입한 경우에 상관없이 효과적인 섭식능을 가지고 있다. (2) 논우렁이는 활발한 운동성을 바탕으로 전체 조류제어 효과를 나타내며, 특히 상층 투명도 향상에 탁월함을 나타낸 반면, 말조개는 하층에 정착한 상태에서 섭식을 하므로 하층 조류제어에 뛰어나다. (3) *M. aeruginosa*의 대발생 실험수에서 두 동물은 시너지 효과를 창출해내었으며, 이러한 이유는 논우렁이가 *M. aeruginosa*와 같은 식물플랑크톤을 섭식하는 반면, 말조개는 하층 조류나 논우렁이가 생산해낸 유기물을 제거하는 기능을 가지고 있으므로 기대할 수 있다[그림 3.1.97].

[그림 3.1.97] 말조개와 논우렁이의 혼합 적용시 상층 조류와 유기물 생산 (유기물생산 (상), 조류제어 효과(하))

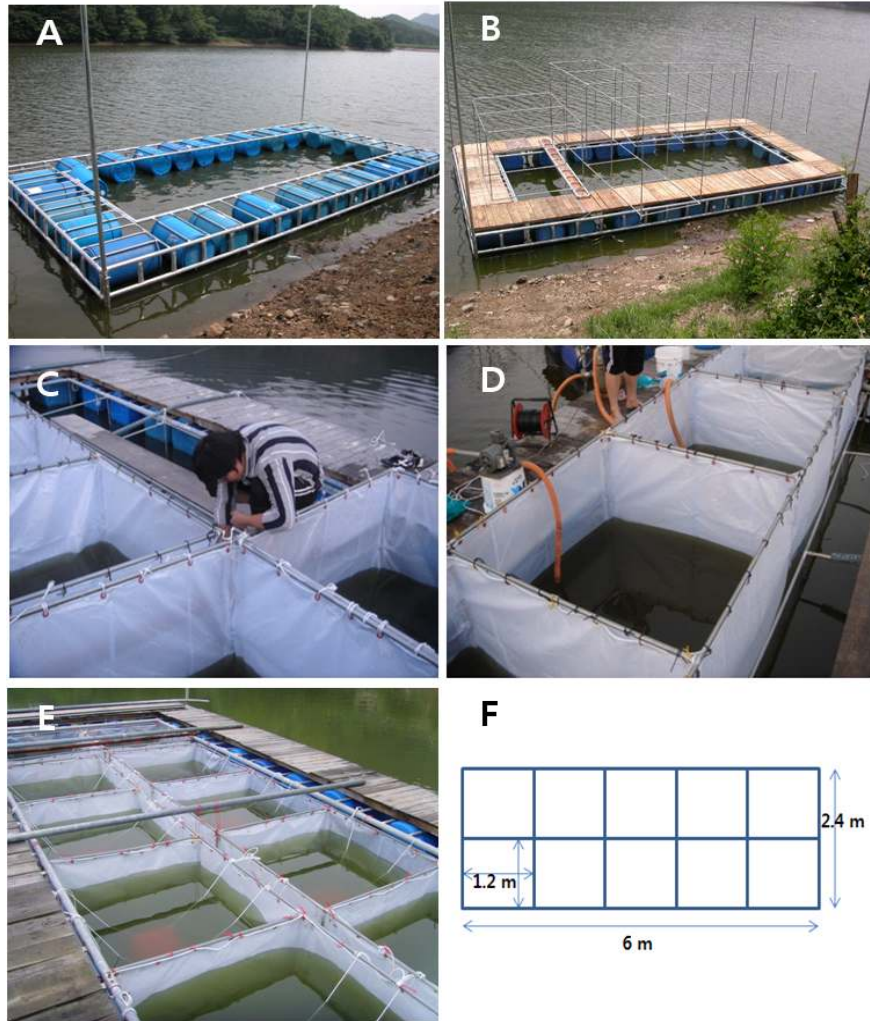
나. 유용 생물의 현장 mesocosm 적용 실험

(1) 말조개와 논우렁이 혼합실험

부영양화가 크게 진행된 농업용저수지의 조류를 제어하기 위하여 2007년도 여름철에 충남 보령군에 위치한 신구지 연안대에 격자형 mesocosm(1.2 × 1.2 × 2.0 m)을 설치하고, 1차 실험은 말조개의 밀도효과(15, 30, 45, 60개체)에 대하여, 2차 실험은 말조개(88개체)와 우렁이(70개체)의 혼합효과에 대하여 각각 분석하였다. 유기물 제어효과는 생물처리 이후의 Chl-*a* 농도 변화를 근거로 하였다. 두 차례 실험기간동안 현장수의 식물플랑크톤은 남조 *Microcystis aeruginosa*가 95% 이상을 차지하였다.

(가) 연구내용

유용생물의 저수지 현장 적용 예비 실험의 목적으로, [그림 3.1.98]과 같이 Mesocosm(가로 × 세로 × 높이 : 1.2 m × 1.2 m × 2.5 m, 10개)을 신규 저수지에 설치하여, 총 2회에 걸쳐 유용생물의 현장 적용성과 수질 개선 효과에 대하여 실험하였다.



[그림 3.1.98] 신규저수지의 Mesocosm 설치 및 구조

신규저수지 1차 mesocosm 실험은 대조구(C), 말조개 처리구(U), 우렁이 처리구(S), 말조개와 우렁이를 혼합한 처리구(U+S), 총 4개의 실험군으로, 각 처리구를 2 개씩을 만들어 2 반복 실험하였다. 또한, 실험기간동안 저수지 수체(Out)의 변화를 알아보기 위하여 동시에 조사를 하였다. 실험시간은 2007년 7월 31일~8월 9일까지 10일 동안 7회에 걸쳐 조사하였다. 실험에 이용한 말조개는 체장이 5.0~12.8 cm(AFDW: 63.8~472.0 mg)인 것을 사용하였고, 우렁이는 3.3~5.0 cm의 크기를 이용하였다. 말조개는 각 처리구에 86개체, 우렁이는 70개체씩을 투입하여 실험하였다. 말조개와 우렁이를 수중에 위치시키고, 물의 유입이 용이하도록 [그림 3.1.99]와 같이

1.5 cm 망목(ϕ 1 mm, 스테인레스)의 케이스(가로 \times 세로 \times 높이: 100 cm \times 40 cm \times 15 cm)를 제작하여 이용하였다. 유용생물을 담은 케이스는 Mesocosm 수면으로부터 50~80 cm 위치에 설치하였다.

분석 항목은 현장에서 수온, 전기전도도, 탁도(NTU), pH, 투명도(SD), 용존산소(DO)를 측정하였고, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, Chl-*a* 농도, 영양염(TP, PO₄-P, TN, NH₄-N) 분석하였다.



[그림 3.1.99] Mesocosm 실험에 이용한 말조개와 실험용 케이스

(나) 연구결과

수온은 실험기간 동안 흐린 날씨와 강우 때문으로 29℃에서 26℃로 낮아졌다. 실험 처리군 간의 수온 차이는 미비하였다[그림 3.1.100].

전기전도도는 실험 초기 215 $\mu\text{S cm}^{-2}$ 에서 시간이 경과함에 따라 지속적으로 낮아지는 경향을 나타냈고, 처리군에 비해서 대조군이 상대적으로 높은 경향을 나타냈다.

pH는 실험초기 10.2로 가장 높게 나타났으며, 시간이 지날수록 낮아지는 경향을 나타냈다. 대조군의 pH 감소가 10.2에서 9.8로 가장 낮았던 반면, 말조개와 우렁이를 혼합 처리한 처리구가 10.2에서 9.0까지 큰 변화를 나타냈다. 유용생물의 섭식 작용에 의한 식물플랑크톤의 감소와 흐린 날씨로 인한 낮은 광량으로 식물플랑크톤의 활성이 낮아졌기 때문으로 판단된다.

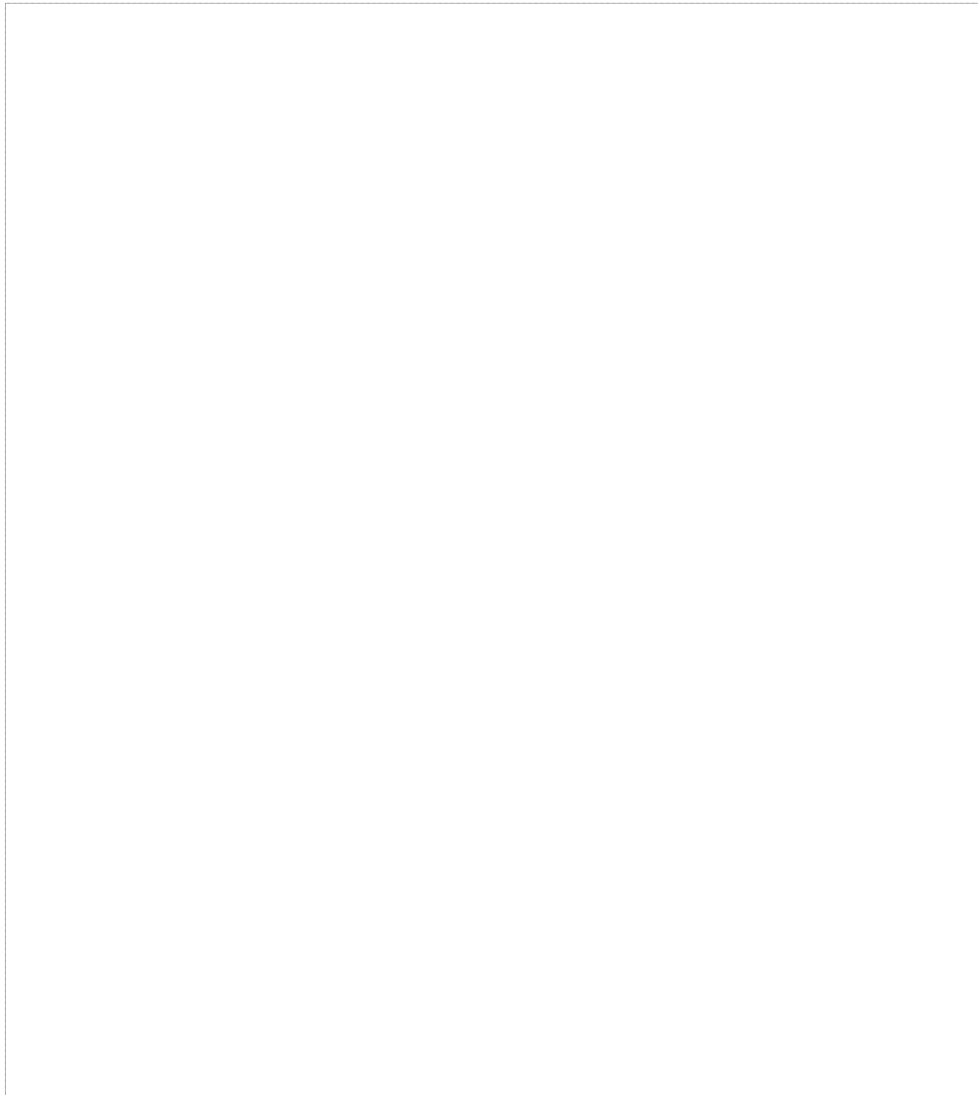
용존산소(DO) 농도의 변화는 실험초기 16.0 mg L^{-1} 로 가장 높았던 반면, 시간이 지날수록 모든 처리구에서 감소하는 경향을 나타냈다. 실험군별 감소경향은 pH의 감소경향과 비슷하게, 대조군에서 가장 낮은 감소경향을 보였던 반면 혼합 처리구에서 가장 크게 감소하는 경향을 나타냈다.

탁도(NTU)는 말조개를 처리한 처리구에서만 실험 중반까지 감소하여 지속적으로 낮은 값을 나타낸 반면, 나머지 처리구와 대조군은 실험 초기 42.7~48.8로 가장 높게 나타났고, 실험 중반(8월 3일)까지 11.7~18.3까지 점차 감소하다가 이후 25~31.7까지 다시 증가하는 경향을 나타냈다.

투명도(SD)는 말조개 처리구에서 실험초기 0.4 m에서 1.1 m까지 가장 크게 증가하였고, 우렁이와 혼합처리구는 실험중반까지 약간의 감소를 보였으나, 이후 약간의 증가를 나타냈다.

탁도와 투명도는 수중의 부유물질과 식물플랑크톤의 농도에 많은 영향을 받기 때문이며, 본 실험에서 측정된 Chl-*a* 농도, 식물플랑크톤 밀도 변화와 비슷한 경향을 나타냈다[그림 3.1.100].

말조개 단독 처리군의 총 질소(TN)와 총 인(TP) 농도는 실험 초기 감소하여 낮은 농도를 유지하다가 실험 6일 이후 점차 증가하는 경향을 나타냈고, 우렁이를 투입한 처리군과 말조개와 우렁이를 혼합 투입한 처리군에서는 실험 중반(2007년 8월 3일) 이후 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 유용생물을 투입하지 않은 대조군은 감소와 증가를 반복하였다. 암모니아의 농도는 대조군에서는 실험기간동안 검출되지 않았지만, 유용생물을 처리한 처리군은 실험 4일째부터 증가하는 경향을 보였다. PO_4-P 농도는 실험 7일째까지 지속적으로 감소하다가 실험 종료시점에서 증가하는 경향을 나타냈다[그림 3.1.101].



[그림 3.1.100] Mesocosm 실험 기간 동안 시간에 따른 수질 변화(Out: 저수지, C: 대조군, U: 말조개 처리군, S: 논우렁이 처리군, U+S: 말조개 논우렁이 혼합처리군)



[그림 3.1.101] 유용생물 처리군과 대조군의 영양염 농도 변화(Out: 저수지, C: 대조군, U: 말조개 처리군, S: 논우렁이 처리군, U+S: 말조개 논우렁이 혼합처리군)

말조개 처리군에서 5일째 낮은 총 질소 농도는 나타낸 것은 말조개의 여과작용에 의한 수중의 식물플랑크톤이 감소하였기 때문으로 판단되며, 5일 이후 총 질소 농도의 증가는 투입한 말조개 중 사망한 것으로부터 영양염이 용출되었기 때문으로 판단된다. 대조군에서의 총질소의 감소는 실험 기간 동안 흐린 날씨의 지속과 강우의 원인으로 인하여 식물플랑크톤의 사멸 또는 침강과 부유 등의 원인에 의한 것으로 판단된다. 유용생물을 처리한 처리군의 변화는 실험기간 동안 Mesocosm에 투입한 말조개와 우렁이 중 사망한 개체로부터 영양염의 유출이 발생하였기 때문으로 판단된다. 특히, 우렁이의 경우는 말조개보다 사망률이 높았기 때문에 총 질소의 경우 우렁이를 처리한 실험군에서 크게 증가하는 것을 볼 수 있었다. 암모니아의 증가는 유용생물의 사망과 더불어 생리작용(유기물 용출)에 의해 증가하는 것으로 판단된다.

수질 개선 효과를 위해 유용생물을 수중에 장기간 위치시켜 이용하는 경우 우렁이보다는 말조개를 이용하는 것이 더 효율적일 것으로 판단된다. 실험기간 동안 말조개의 사망률이 높게 나타난 이유는, 본 실험기간동안의 상대적으로 높은 수온으로 인한 것으로 판단된다. 조개의 현장 적용시 풍력 인공식물섬 등을 이용하여 차광과 수체 교류를 통하여 수온의 저감시키는 방법 등을 이용하는 것도 좋을 것으로 판단된다.

대조군의 식물플랑크톤 밀도는 실험시간동안 일정한 밀도가 유지되었던 반면, 말조개의 처리구는 지속적인 감소경향을 나타냈다. 우렁이와 혼합 처리구는 실험 중반까지 약간의 감소를 나타냈지만 이후 대조군과 비슷한 밀도를 나타냈다. Chl-*a* 농도도 식물플랑크톤 밀도의 경향과 비슷한 경향을 나타냈고, 우렁이와 혼합처리구의 경우는 대조군보다 높은 농도를 나타냈다[그림 3.1.102].



[그림 3.1.102] 식물플랑크톤 밀도(cells mL⁻¹)와 Chl-*a* 농도(µg L⁻¹) 변화(Out: 저수지, C: 대조군, U: 말조개 처리군, S: 논우렁이 처리군, U+S: 말조개 논우렁이 혼합처리군)

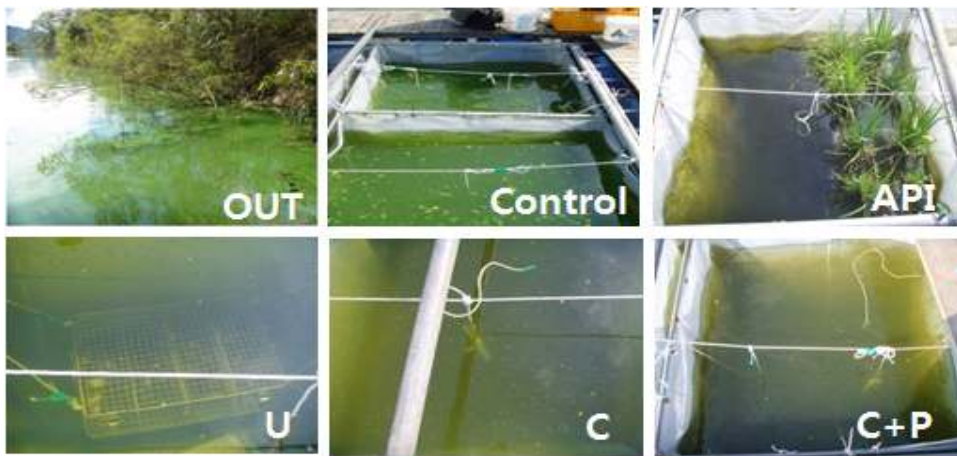
말조개의 처리군은 지속적으로 식물플랑크톤의 감소를 나타낸 반면, 우렁이 처리구와 혼합 처리구는 시험 초기에 약간의 감소를 나타냈지만 실험 중반 이후 증가하는 경향을 나타냈다. 말조개의 처리구의 식물플랑크톤 감소는 말조개의 여과능에 의해 식물플랑크톤의 농도가 지속적으로 감소하는 것으로 판단된다. 다른 두 처리구의 식물플랑크톤 농도의 증가는 실험 중반 이후 우렁이의 대부분이 사멸하였기 때문에, 영양염의 증가로 인하여 식물플랑크톤 밀도의 증가가 생존한 말조개나 우렁이의 여과능을 초과하기 때문으로 판단된다. 실험 종료 시점에 모든 실험군에서 식물플랑크톤의 감소가 나타났는데, 이는 3일간(2007년 8월 6~9일)의 지속적인 강우의 영향으로 판단된다.

(2) 유용생물(식물섬, 말조개, 새뱅이, 동자개) 수질개선 효과 비교

부영양 저수지의 수질개선을 목적으로 2종류의 여과섭식성 생물(filter-feeders: 말조개 *Unio douglasiae*, 새뱅이 *Caridina denticulata*)과 노랑꽃창포를 식재한 인공식물섬을 도입하고, 수질 개선(탁도 및 조류현존량)의 효과를 각각 분석하였다. 연구대상 저수지는 충남 보령군에 위치한 전형적인 농업용 저수지(신구저수지)로서 주변 농경지와 축산지역으로부터 많은 영양염이 유입되고 있으며, 매년 고온기에 독성 남조 *Microcystis aeruginosa*가 높은 밀도로 발생하고 있다.

(가) 연구내용

Mesocosm 실험은 본 연구팀의 각 기관에 실험하여 조류의 제어 효과를 보인 유용생물과 인공식물섬을 이용하여 현장 Mesocosm에서 수질 개선 효과를 비교 평가하기 위하여 실시하였다. 실험에 이용한 유용생물은 말조개(U), 새뱅이(C)이며, 인공식물섬(API)과 새뱅이의 섭식자인 동자개를 새뱅이와 함께 처리(C+P)하여 각각의 수질 개선 효과를 비교 평가하였다. 유용생물의 밀도는 말조개 83 ind. m⁻², 새뱅이 694 ind. m⁻², 동자개는 7 ind. m⁻²로 투입하였다. 인공식물섬은 Mesocosm 내 전체 수표면적의 34.7%에 해당하는 0.5 m²의 인공식물섬에 노랑꽃창포 8포트를 식재하였으며, 그림자에 영향을 최소화하기 위해서 북쪽 면에 고정하였다[그림 3.1.103].



[그림 3.1.103] 현장 mesocosm의 설치 전경(control: 대조군, API: 인공식물섬 처리군, U: 말조개 처리군, C: 새뱅이 처리군, C+P: 새뱅이+동자개 혼합 처리군)

각 유용생물을 2개의 Mesocosm에 동일하게 투입하여 2반복 실험을 하였고, 한쪽은 안정동위원소를 넣어 생물의 먹이 섭식과 에너지의 흐름을 분석하였다. 또한 안정동위원소를 투입하지 않은 Mesocosm에서 대조군, 새뱅이 처리군, 말조개 처리군에서 조절생물 내의 지방산 조성 profile과 부유물의 지방산 profile을 시간에 따라 비교하여 말조개와 새뱅이가 *Microcystis aeruginosa*를 섭식하였는지 여부를 조사하였다. 실험시작 후 0, 2, 4, 6, 8 일째에 부유물 지방산은 대조군과 처리군에서 각각 반복 없이 시료를 얻었고, 말조개의 경우 2 반복씩 새뱅이의 경우 3반복씩 시료를 분석하였다.

(나) 연구결과

실험 기간 동안 수온은 19.4~22.8°C의 범위를 나타냈고, 실험기간 종료 시점에 강우의 영향으로 수온이 낮아지는 경향을 나타냈다. 대조군과 처리군 간의 수온 차이는 미비하였다[그림 3.1.104].

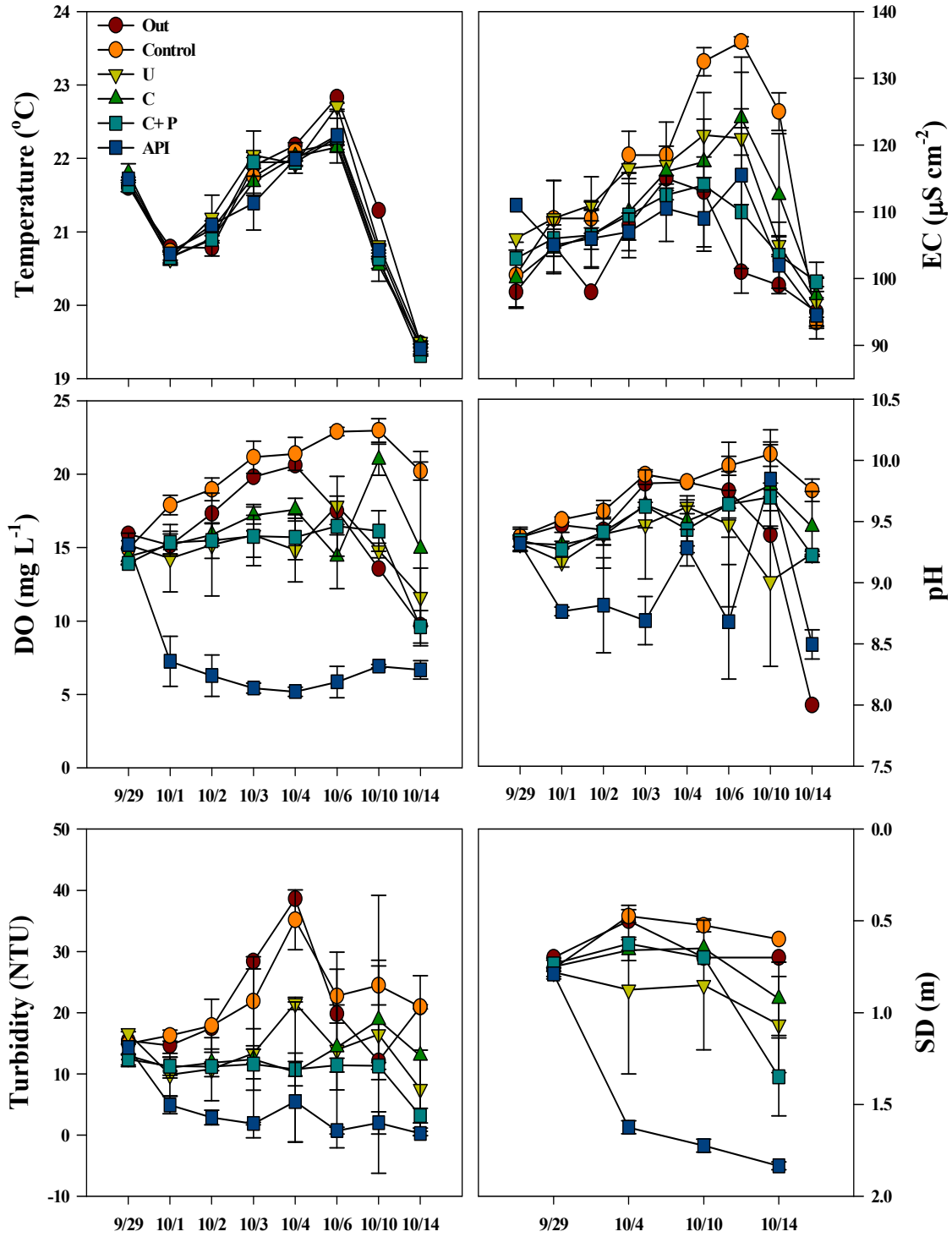
전기전도도는 실험 중반까지 지속적으로 증가하다가 실험 종료시점에 낮아지는 경향을 나타냈고, 대조군이 98.0 $\mu\text{S cm}^{-2}$ 에서 115.0 $\mu\text{S cm}^{-2}$ 까지 가장 큰 증가를 나타냈고, 인공식물섬을 설치한 처리군에서 105.0 $\mu\text{S cm}^{-2}$ 에서 115.5 $\mu\text{S cm}^{-2}$ 로 가장 낮은 증가를 나타냈다.

용존산소(DO) 농도는 대조군에서는 뚜렷하게 증가하는 경향을 나타냈고, 인공식물섬을 설치한 처리군에서는 뚜렷한 감소를 나타낸 반면 다른 처리구에서는 그 변화가 상대적으로 작게 나타났다. 인공식물섬 처리군에서의 DO 농도 감소는 식물플랑크톤의 밀도 감소로 인한 것으로 판단된다.

pH는 변화는 DO 농도의 변화는 유사한 경향을 나타냈다. 인공식물섬 처리군은 실험 초기 9.3에서 실험 종료 시점에 8.5까지 낮아진 반면, 새뱅이와 새뱅이+동자개 처리군은 실험 후반까지 증가하는 경향을 보였고, 말조개 처리군은 실험 중반 이후 감소하는 경향을 나타냈다.

탁도(NTU)도 인공식물섬 처리군에서 가장 낮은 값을 나타냈고, 대조군이 가장 높은 값을 나타냈다. 투명도(SD)도 인공식물섬 처리군에서 0.6 m에서 1.8 m까지 크게 증가하였고, 새뱅이+동자개 혼합처리, 말조개, 새뱅이 처리군 순으로 나타났다.

식물플랑크톤의 밀도는 인공식물섬에서 가장 크게 감소하였고, 유용생물 처리군에서는 말조개 처리군이 가장 크게 감소한 것으로 나타났다[그림 3.1.105]. 인공식물섬 처리군에서 식물플랑크톤의 가장 큰 감소는 인공식물섬이 Mesocosm 표면적의 34.7%를 덮기 때문에 차광의 영향이 컸던 것으로 판단된다. 대조군의 식물플랑크톤의 밀도는 증가한 반면 유용생물을 처리한 모든 처리군에서는 식물플랑크톤 밀도가 감소의 나타나 식물플랑크톤의 저감 효과가 있는 것으로 판단되고, 새뱅이보다는 말조개가 식물플랑크톤 밀도 저감에 더 좋은 효과가 있는 것으로 판단된다. 말조개 처리군에서 초기 증가하는 경향은 말조개의 배설물이 부유함으로 인하여 식물플랑크톤 밀도가 다소 높게 평가된 것으로 판단된다.



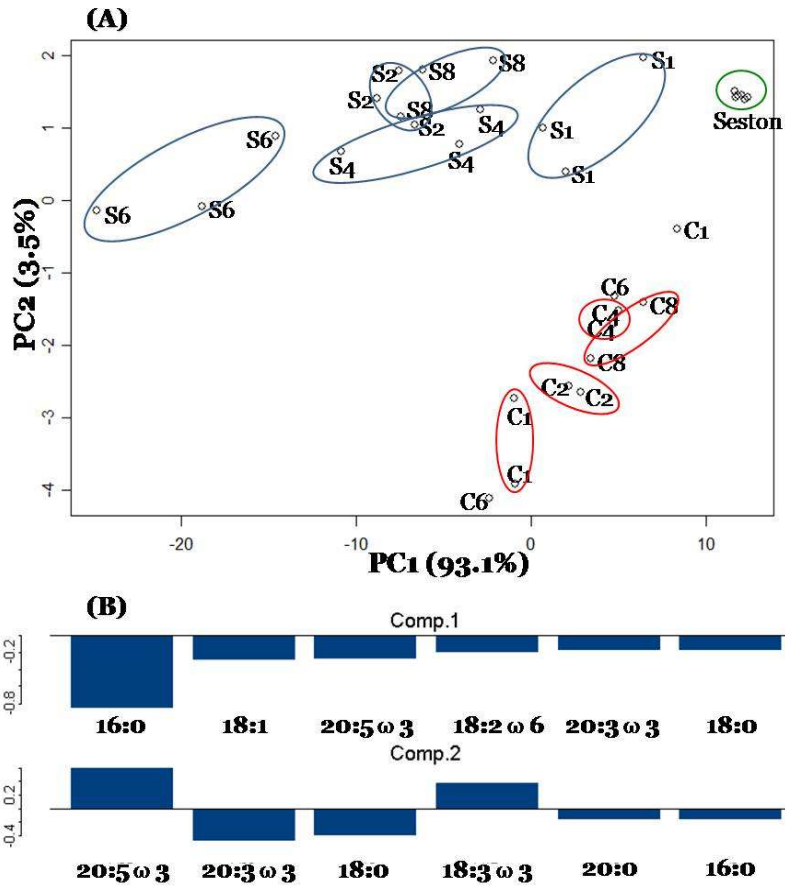
[그림 3.1.104] 유용생물처리에 따른 수질 환경 변화(Out: 저수지, Control: 대조군, U: 말조개처리군, C: 새뱅이처리군, C+I: 새뱅이 동자개 혼합처리군, API: 식물섬)



[그림 3.1.105] 유용생물 처리 후 식물플랑크톤 밀도 변화. Control: 대조군, U: 말조개처리군, C: 새뱅이처리군, C+P: 새뱅이 동자개 혼합처리군, API: 식물섬

메소코즘 실험 결과 새뱅이 새우와 말조개 지방산 조성의 시간에 따른 변화를 [그림 3.1.106]에 나타내었다. 주성분분석결과 제 1축이 전체변이의 약 93%를 설명하여 지방산변화의 대부분은 1축으로 설명이 되었다.

부유물(seston)의 지방산 조성은 실험 전후로 크게 변하지 않았다. 새뱅이 새우의 경우 메소코즘 실험이 시작한 뒤 약 6일째까지 계속 부유물의 지방산조성으로부터 멀어졌다가 8일째에 다시 가까워지는 경향을 보였다. 반면 말조개의 경우 1일째에서 4일째까지는 부유물의 지방산조성과 가까워지다가 4일 이후 8일까지는 정체되는 양상을 보였다. 이러한 지방산 조성으로 보면 새뱅이 새우는 실험 기간 동안 부유물을 별로 섭식하지 않다가 다른 생물들을 통해서 간접적으로 부유물의 탄소를 동화하는 것으로 보이고 말조개의 경우는 처음 4일간은 부유물을 섭식하였으나 그 이후로는 부유물의 섭식속도가 크게 감소한 것으로 추정되었다. 좀 더 정밀한 해석을 위해서는 이러한 부유물 지방산이 조절생물의 체내에 유입되는데 걸리는 시간을 알아야 할 것이다 이러한 지방산의 체내 유입속도는 안정동위원소 추적 실험결과에 판단할 수 있다.



[그림 3.1.106] A: 시간 경과에 따른 지방산 profile 변화 주성분 분석(S: 새뱅이(*Caridina denticulata*), C: 말조개(*Unio douglasiae*)), B: 주성분 분석에 대한 적재값(loadings score)

말조개를 이용한 현장 Mesocosm 결과를 바탕으로, 농업용 저수지에 말조개를 이용하여 수질 개선을 할 때, 말조개의 여과능에 의한 식물플랑크톤 밀도의 저감을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 더불어, 높은 수온에서 우려되는 말조개의 사망은 유용생물 서식처 개발 시에 고려하여 적용하면 충분히 해소할 수 있을 것으로 판단된다.

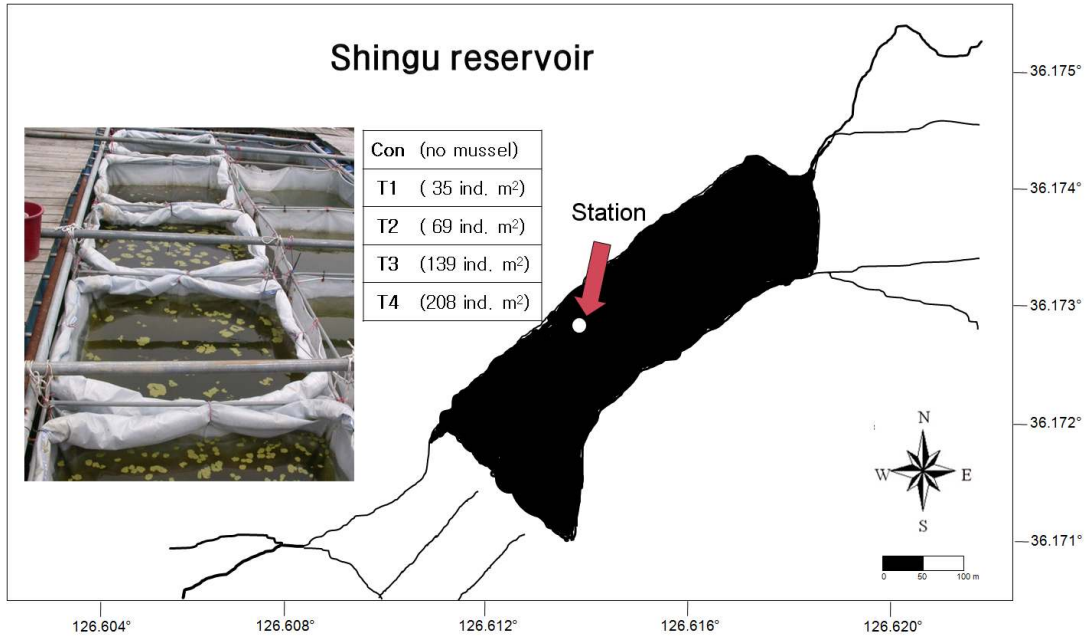
(3) 말조개 밀도실험(Sediment 첨가)

(가) 연구내용

말조개가 mesocosm 수체내 어떠한 영향을 미치는지를 알기 위해 2008년 4월 24일 5개의 실험용 구조물을 설치하여 현장적용 시켰으며, 조류 bloom을 위해 4회에 걸쳐 남조류를 20 L씩 접종하였다. 또한 영양염 고갈을 막기 위하여 실험 2주 전(2008년 6월 24일) mesocosm의 부피 7.5%(162 L)에 해당하는 현장 sediment를 첨가하였다.

각 mesocosm 구조물의 제질은 PE Tarpaulin으로 폴리에틸렌이 주성분이며, 크기는 1.2 × 1.2 × 1.5(가로 세로 높이) m이다[그림 3.1.107]. 실험은 1개의 대조군(Control), 4개의 처리군

(T1, T2, T3, T4)으로 구별하였으며, T1은 말조개 밀도 35 ind. L⁻¹, T2는 말조개 밀도 69 ind. L⁻¹, T3은 말조개 밀도 139 ind. L⁻¹, T4는 말조개 밀도 208 ind. L⁻¹를 투여하였다. 시간의 흐름에 따른 말조개 밀도별 조류 섭식실험을 하였다.



[그림 3.1.107] 신구저수지 mesocosm 설치

실험기간은 2008년 7월 2일부터 10일 까지 9일간 이며, sampling은 7월 2일 오후 4시에 시작하였고 3, 4일은 오전 10시, 오후 4시 1일 2회의 sampling을 하였다. 그 후 5, 6, 8, 10일에는 1일 1회 오후 4시에 sampling을 하였다. 유기물 제어효과는 생물처리 이후의 Chl-a 농도와 SS 변화를 근거로 하였다.

현장에서 수온, 전기전도도, 탁도(NTU), pH, 투명도(SD), 용존산소(DO)를 측정하였고, 채수 후 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, Chl-a 농도, 영양염(TP, PO₄-P, TN, NH₄-N)을 분석하였다.

(나) 연구결과

7월 2일 실험 첫날 수온은 25°C이였으며, 현장은 인근지역의 강우로 인해 구름이 많았으며 바람 또한 강했다. 실험 시작 4일 이후에는 광량이 증가하여, 수온이 점차 상승하였다. EC는 시간이 지날수록 증가하였으며, 증가폭이 크지 않은 T1과 달리 T4는 4일 이후 크게 증가하였다. 대조군과 처리군의 차이는 DO 농도와 pH에서 두드러졌으며, 알려진 것과 같이 생물이 높은 밀도로 처리된 순으로 DO 농도와 pH가 감소하는 경향을 보였다[그림 3.1.108].

[그림 3.1.108] Mesocosm의 수온, 전기전도도, DO농도, pH의 변화

신구저수지 현장과 대조군의 Chl-*a*는 48시간 동안 초기 농도 보다 점차 증가하다 조금씩 감소하는 경향이 나타났다. 그에 비해 T1은 48시간 이후 Chl-*a*의 밀도가 급격히 증가하였으며, T4는 72시간 이전까지 대조군에 비해 최고 Chl-*a* 39% 감소하였으며, 6일 이후 급격히 증가하는 경향이 나타났다. T4는 실험 시작 72시간 동안에는 패류의 섭식으로 Chl-*a*가 감소가 되었으나 그 후에는 증가하였다. 이는 패류에서 발생하는 영양염과 폐사한 패류의 영향으로 조류 증식이 패류의 제어능을 초과하여 나타난 것으로 판단되었다[그림 3.1.109].

[그림 3.1.109] Mesocosm의 Chl-*a* 변동

패류의 여과섭식 작용으로 인한 수체내 투명도 증가는 패류의 밀도에 따라 높은 효율을 보이지만[그림 3.1.110], 3일 이후 생물로부터 발생된 유기물 및 폐사된 패류의 영향으로 수체 내 부유물질의 양은 오히려 증가하는 현상이 나타났으며 패류의 밀도가 높을수록 과도한 부유물질이 발생되었다.

[그림 3.1.110] Mesocosm의 SS 변화

실험기간 초기에는 신규저수지 현장과 대조군의 TP, TN는 큰 변화가 보이지 않았다. 하지만 처리군인 T1, T4의 TN와 TP가 시간이 지날수록 점차 증가하였으며, 실험 시작 후 144시간(6일) 이후에는 TP, TN이 크게 증가 하였다. 실험 144시간 까지는 T4보다 T1에서 TN, TP가 더 용출 되었으나 144시간 이후에는 T4에서 T1보다 많은 영양염이 용출되었다. TN:TP ratio는 T4에서 24시간이 지났을 때 60:1로 수체의 TP를 효과적으로 제어한 것으로 확인되었다. 실험 시작 후 48시간 후 또한 높은 효율을 보였으나 24시간 이였을 때 보다 적어 패류의 영양염 제어의 가장 큰 효과는 패류를 처리한 후 24시간 후임을 알 수 있다. 실험 시작 후 72시간(3일) 이후는 패류의 폐사 등으로 인한 영양염의 용출로 인해 더 이상 조류제어 효과가 나타나지 않았다[그림 3.1.111].

[그림 3.1.111] Mesocosm의 TP, TN, TP:TN ratio의 변동

다. 유용생물 현장(석문시험포) 적용 실험

(1) 말조개 적용실험

본 연구에서의 대상지인 석문 제2시험포(N36° 57 ' 4"; E126° 37 ' 5")는 충남 당진군 고대면 석문 간척 지구에 위치하고 있으며, 이곳은 2001년부터 2010년까지 “담수호 수질개선을 위한

자연정화 시설의 최적설계 및 효율적 조성방안 연구”를 목표로 실험이 진행되는 연구단지이다. 제 2 시험포는 주변 농경지의 농경용수가 장기간 체류하는 침강지로서 오염물질 침강효율 개선 연구를 하는 장소이며 많은 유기물이 침전되어 있다. 시설규모는 가로 5 m 세로 42 m 높이 1 m로 최대 수량 210 m³을 수용할 수 있으며 시설면적은 213 m²이다. Mesocosm은 2008년 8월 21일에 4각 기둥형태의(가로 10 m 세로 5 m의 높이 1 m) 염화비닐수지(PVC) 천막을 이용하여 2쌍을 제작하였다. 비닐천막의 위 모서리를 고정시키고 아래 부분을 쇠사슬로 고정하여 수체를 통한 직접적인 물질의 이동을 차단 시켰으며 sediment를 통해 물의 이동을 가능하게 하였다[그림 3.1.112]. 현장은 부영양 상태의 신규저수지 보다 TN, TP가 월등히 높은 상태로 높은 영양염 조건에서 패류가 수질에 미치는 영향에 대해 조사하였다.



[그림 3.1.112] 석문시험포 mesocosm 설치 모습(A, B, C, D, E, F) 및 구조(G)

(가) 연구내용

본 연구에서는 다량의 유기물이 함유된 sediment가 패류에 나쁜 영향을 줄 것이라 판단하고 조개폐사의 영향을 줄이고 말조개의 여과율이 가장 높은 수심인 20~50 cm(박 등, 2008)을 유지하기 위해 인공적인 그물 구조물을 설치하였으며 구조물은 망목 2×2 cm의 그물로 수층으로부터 50 cm 위의 수심에 설치하였다. 실험 개시전 각 처리군에 882(17 ind. L^{-1})개체의 말조개를 투입하였다. 또한 시간의 흐름에 따른 패류의 사망률을 조사하였다. 그물 구조물(가로 1.5 m, 세로 6 m)은 대조군과 처리군 모두 각각 2개씩 설치하였다[그림 3.1.113].

실험에서 사용된 금강수계의 충청북도 보령과 옥구의 농수로 또는 소형 하천의 진흙바닥에서 직접 채집하였다. 채집한 말조개는 각 개체의 길이를 측정 후 현장 적용 실험을 하였다. 또한 실험 기간 중 폐사한 패류는 즉시 제거하였다.



[그림 3.1.113] 석문 mesocosm 실험에 이용한 말조개(좌)와 그물 구조물(우)

(나) 연구결과

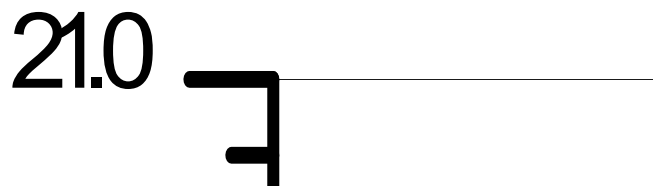
실험 기간 동안 수온은 18.5~20.5°C의 범위를 나타냈고, 실험기간인 7일 동안 맑은 날씨로 높은 광도를 보였다. 대조군과 처리군 간의 수온 차이는 미비하였다[그림 3.1.114].

전기전도도는 처리군에서 실험 중반까지 증가하다가 실험 종료시점까지 유지되었고, 반명 대조군은 낮아지는 경향을 나타냈다. 전기전도도는 496.0 $\mu S cm^{-2}$ 에서 545.0 $\mu S cm^{-2}$ 까지 범위를 나타냈고, 생물 처리군에서 실험 종료시 530.0 $\mu S cm^{-2}$ 로 나타났다.

용존산소(DO) 농도는 대조군과 처리군에서 큰차이는 보이지 않았으나 대체적으로 대조군에 비해 처리군에서 15% 낮은 용존산소가 확인 되었다. 하지만 높은 농도의 조류에 의한 광합성으로 큰 차이는 없었다.

pH는 변화는 대조군과 처리군에서 큰 차이를 보이지 않았다. pH는 대조군과 처리군 모두 8.2~9.2까지의 범위를 나타냈다.

21.0



[그림 3.1.114] 유용생물 처리 후 이화학적 수질 요인 변화. C: 대조군, T: 말조개 처리군

석문시협포의 영양염 농도는 매우 높았으며 시간에 따른 총 질소의 농도변화는 확인 할 수 없었다. 그에 비해 처리군에서의 총 인은 실험 종료시 급격히 증가하였다[그림 3.1.115].

[그림 3.1.115] 유용생물 처리 후 TN, TP, TN:TP 변화. C: 대조군, T: 말조개 처리군

말조개는 부영양 수계 적용 즉시 바로 섭식효과를 보이며, 지속적인 섭식을 통한 수체내 부유 유기 무기물을 제어한다. 석문 시험포에서의 SS는 실험 종료인 7일까지 대조군에 비해 20~40%의 조류 제어율을 보였으며 투명도를 증가 시켰다[그림 3.1.116]. 부유물질은 3일과 9일에서 가장 큰 감소를 보였으며 이는 Chl-*a*의 감소와 유사하였다. Chl-*a*는 패류처리군에서 20% 제어 효율을 보였다[그림 3.1.117].

[그림 3.1.116] 유용생물 처리 후 SS 밀도 변화. C: 대조군, T: 말조개 처리군

[그림 3.1.117] 유용생물 처리 후 Chl-*a* 농도변화. C: 대조군, T: 말조개 처리군

실험 초기 석문저수지 현장의 우점조류는 남조류 중 *Anabaena spiroides*로 전체 조류의 80% 이상 차지하였으며 실험 종료시까지 수체내 조류 조성의 큰 변화는 보이지 않았다. 하지만 전체적인 조류 밀도는 감소하였고 패류는 선택적인 여과에 대해 확인할 수는 없었다[그림 3.1.118].

패류가 배설하는 faeces, pseudofaeces 형태의 배설물은 수체내 sediment로 축적되며 sediment는 영양염의 싱크로서의 역할을 한다. 본 연구에서는 패류와 sediment와의 관계를 차단하였으며 sediment의 효과를 배제하고 패류의 효과만을 판단하였다.

[그림 3.1.118] 조류군집 변화(C: 대조군, T: 말조개 처리군)

본 연구에 적용한 말조개는 실험 초기에 상당한 폐사율을 보였다. 특히 4~6일 사이에 높게 나타났고 그 이후에는 안정되는 경향을 보여주었다[그림 3.1.119]. 이러한 말조개의 폐사로 인해 본 실험에서의 조류제어 결과가 다른 실험들에 비해 상대적으로 낮게 나타났다고 보인다. 이러한 결과로 판단할 때 조개를 수질개선에 적용할 때, 해당 환경에 대한 순응(Acclimation) 과정이 매우 중요한 선결조건으로 도출되었다.

[그림 3.1.119] 패류 사망율(T1: 말조개 처리군1, T2: 말조개 처리군2)

(2) 다양한 유용생물의 혼합적용 실험

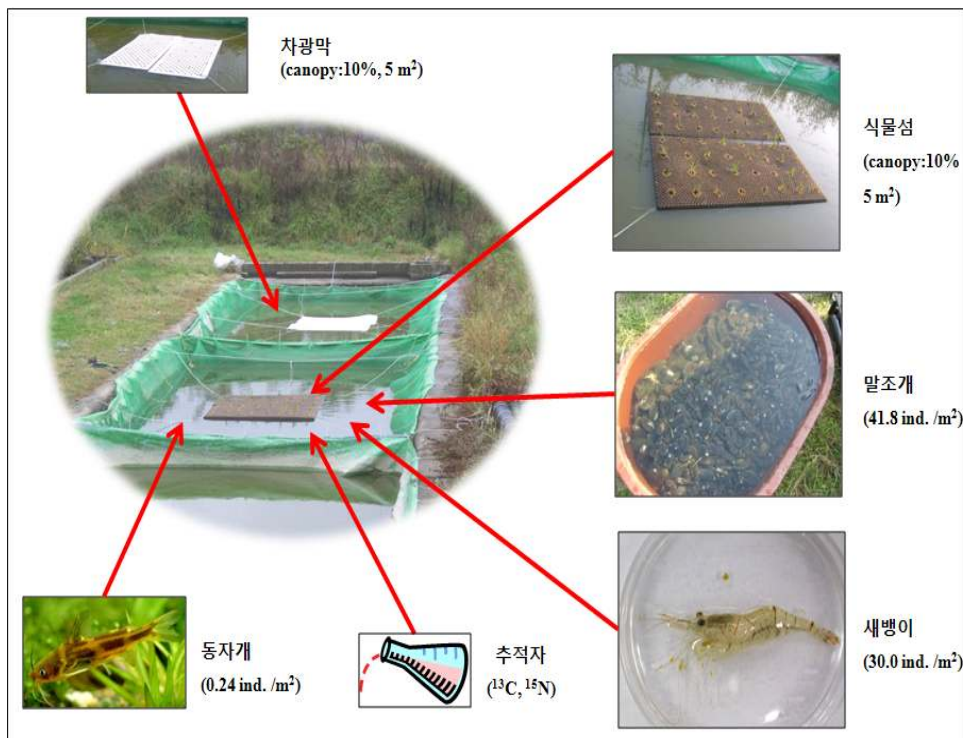
본 연구 과제를 통해 선별된 수질개선 효과를 가진 다양한 생물들의 혼합적용 효과를 평가하였다. 지금까지의 연구는 단순히 각 생물군마다 현장적용의 가능성만을 확인하였을 뿐 실질적으로 부영양 호수에서 얼마큼의 수질개선 효과가 있는지 또한 다양한 생물의 혼합적용의 시너지 효과에 대한 연구가 미흡하였다. 때문에 본 연구는 유용생물과 서식처를 저수지 환경에 적용하는 전단계조사로서 다양한 유용생물과 서식처를 부영양 시험포 조건에 적용하고 그 효과를 분석하였다.

(가) 연구내용

본 연구과제를 통해 다양한 유용생물들에 대해 연구하였다. 그 결과 각 유용생물별 장단점을 확인하였으며, 생물의 혼합적용을 통한 농업용 저수지 수질개선에 대한 가능성을 확인하였다. 식물섬(5 m × 5 m)은 5 m²로 mesocosm(10 m × 5 m)면적 50 m²의 10%를 차지하며 또한 노랑꽃창포 64포트를 식재하였다. 말조개는 41.8 ind. m⁻² 밀도로 처리 하였고 sediment에 직접 투여하였다. 새뱅이는 30.0 ind. m⁻²이며 동자개는 0.24 ind. m⁻² 밀도로 처리하였다. 또한 생물의 에너지 흐름을 규명하기 위한 안정동위원소 추적자 ¹³C, ¹⁵N를 투여하였다[그림 3.1.120].

실험기간은 2008년 10월 15일부터 11월 3일까지 20일간이며, Sampling은 10월 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 26, 29, 11월 3일에 1일 1회의 sampling을 하였다. 시간은 광합성량이 높은 오후 1시에 하였다. 유기물 제어효과는 생물처리 이후의 Chl-a 농도와 SS 변화를 근거로 하였다.

현장에서 수온, EC, 탁도(NTU), pH, 투명도(SD), 용존산소(DO)를 측정하였고, 또한 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, Chl-a 농도, 영양염(TP, PO₄-P, TN, NH₄-N) 분석하였다.



[그림 3.1.120] 석문 mesocosm에서 다양한 유용생물을 통한 수질개선 실험 디자인

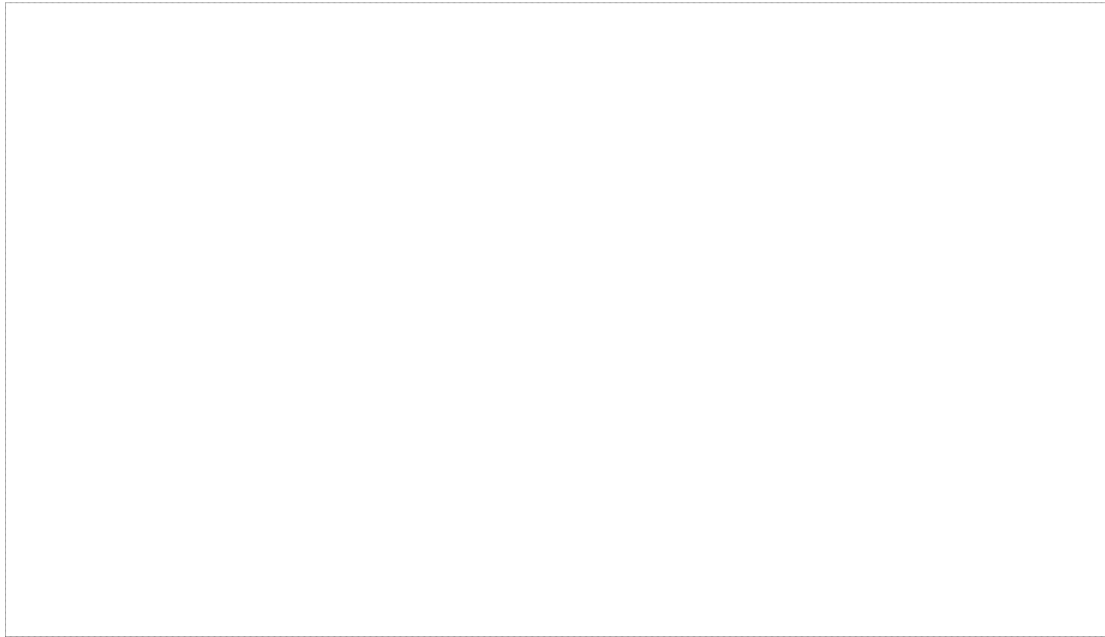
(나) 연구결과

석문 시험포의 박테리아 밀도는 $3\sim 9 \times 10^6 \text{ cell mL}^{-1}$ 범위이며 대조군과 처리군의 밀도차이는 확인되지 않았다. 4일 이후 대조군 처리군 모두 박테리아의 밀도가 가장 높았으며, 박테리아의 밀도가 급격히 증가 이후 패류의 사망률이 증가하였다. 원생동물은 4일 이후 대조군에 비해 처리군에서 밀도가 44% 감소하였다[그림 3.1.121].

[그림 3.1.121] 박테리아(좌)와 원생동물(우) 밀도변화(Control: 대조군(canopy 10%, 5 m²) Treatment: 식물 섬(canopy 10%, 5 m²), 말조개(41.8 ind. m²), 새뱅이(30.0 ind. m²), 동자개(0.24 ind. m²), 추척자(¹³C, ¹⁵N))

현장에서는 Chl-*a* 농도가 22~188 mg L⁻¹ 범위를 보였으며 실험이 진행되는 11일 동안 유용 생물 처리군에서 극명한 Chl-*a* 제어 효과를 나타냈으며 특히 20~50 μm 크기의 조류에 대한 억제 효과가 가장 분명하였다[그림 3.1.122]. 처리군에서 유용생물을 통한 Chl-*a* 감소를 확인하였으며 조류 밀도가 높은 부영양 호수 수체의 수질개선에 대한 가능성을 시사하였다.

수체내 식물플랑크톤은 남조류(*Anabaena spiroides*)가 80~90% 이상 차지하는 전형적인 조류 대발생 지역의 특징을 보였다. 실험 3일 이후 처리군에서 다양한 유용생물들이 남조류의 밀도를 50%, 실험 종료시 30% 정도 감소시켰다[그림 3.1.123].



[그림 3.1.122] 식물플랑크톤 크기별 Chl-*a* 농도(Control(좌): 대조군(canopy 10%, 5 m²), Treatment(우): 식물섬(canopy 10%, 5 m²), 말조개(41.8 ind. m²), 새뱅이(30.0 ind. m²), 동자개(0.24 ind. m²), 추적자(¹³C, ¹⁵N))

[그림 3.1.123] 식물플랑크톤 군집 변화(Control(좌): 대조군(canopy 10%, 5 m²), Treatment(우): 식물섬(canopy 10%, 5 m²), 말조개(41.8 ind. m²), 새뱅이(30.0 ind. m²), 동자개(0.24 ind. m²), 추적자(¹³C, ¹⁵N))

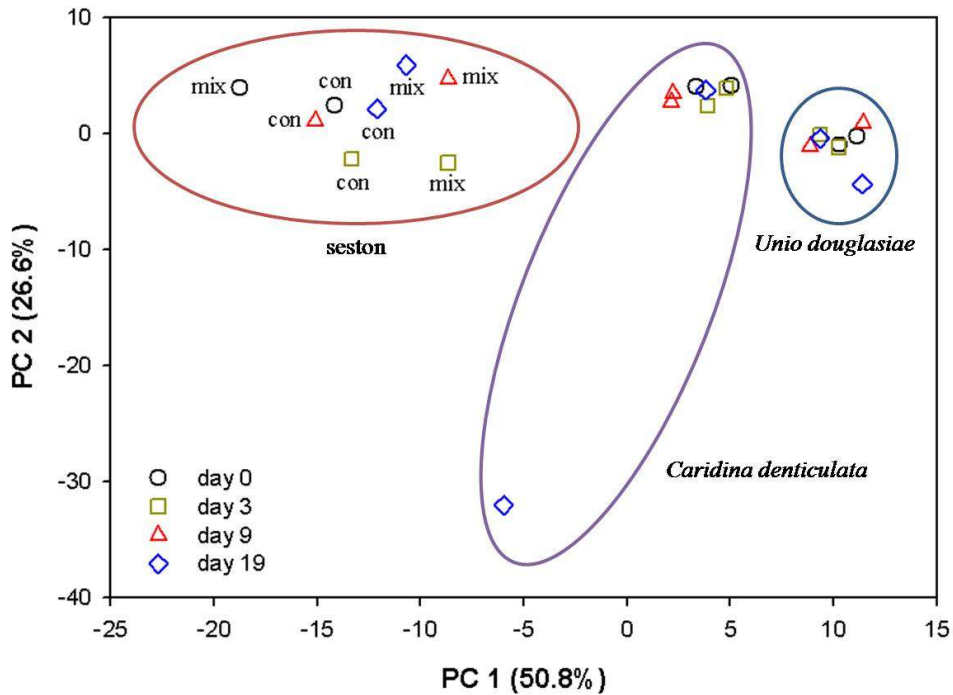
석문시험포의 동물플랑크톤의 군집은 윤충류가 대부분을 차지하였으며 실험 종료시까지 동물군집의 변화는 보이지 않았다. 다양한 유용생물이 처리된 처리군에서는 시간이 지남에 따라 동물 밀도가 급격히 감소하였으며 4일 이후에는 대부분의 플랑크톤이 낮은 밀도를 유지하였다 [그림 3.1.124]. 이는 다양한 유용생물의 섭식작용에 의한 결과로 사료된다.

[그림 3.1.124] 동물플랑크톤 밀도 변화(Control: 대조군(canopy 10%, 5 m²), Treatment: 식물섬(canopy 10%, 5 m²), 말조개(41.8 ind. m²), 새뱅이(30.0 ind. m²), 동자개(0.24 ind. m²), 추적자(¹³C, ¹⁵N))

대조군의 TN과 NH₃-N는 지속적인 증가를 보였으며 처리군에서는 초기 밀도를 유지하거나 TN은 약간 감소하였다[그림 3.1.125]. 선행연구에서 여과섭식을 하는 이때말조개와 새뱅이를 이용한 수질개선 활용은 수체내 투명도 증가 대한 탁월할 효과를 가지고 있었다. 하지만 단기적인 효과이며 생물에 의한 장기적인 영양염의 용출은 결국 수체내 조류를 발생 시키는 요인이 될 수 있다. 여과섭식을 하는 생물은 수체내 유입시 부유하는 유기물 무기물을 섭식하지만 섭식과정 혹은 섭식 후 생산되는 feces나 pseudofeces로부터 PO₄-P, NH₃-N 등의 영양염이 용출되므로 이에 대한 고려가 있어야 한다. 그러나 수질개선 대상 저수지가 이미 상당히 부영양상태이고 또한 무기영양염 농도가 높으므로 실제 현장에서 용출로 인한 농도 증가가 현장 농도를 유의하게 상승시킬 확률은 매우 희박하다. 따라서 부분적인 폐류 적용에 의한 영양염 용출이 현장 저수지의 조류 발생에 크게 기여하리라고 판단하지 않는다. 또한 본 연구에서 사용된 식물섬은 영양염 제어를 통한 조류감소에 큰 효과가 있다고 확인된 바 있다.

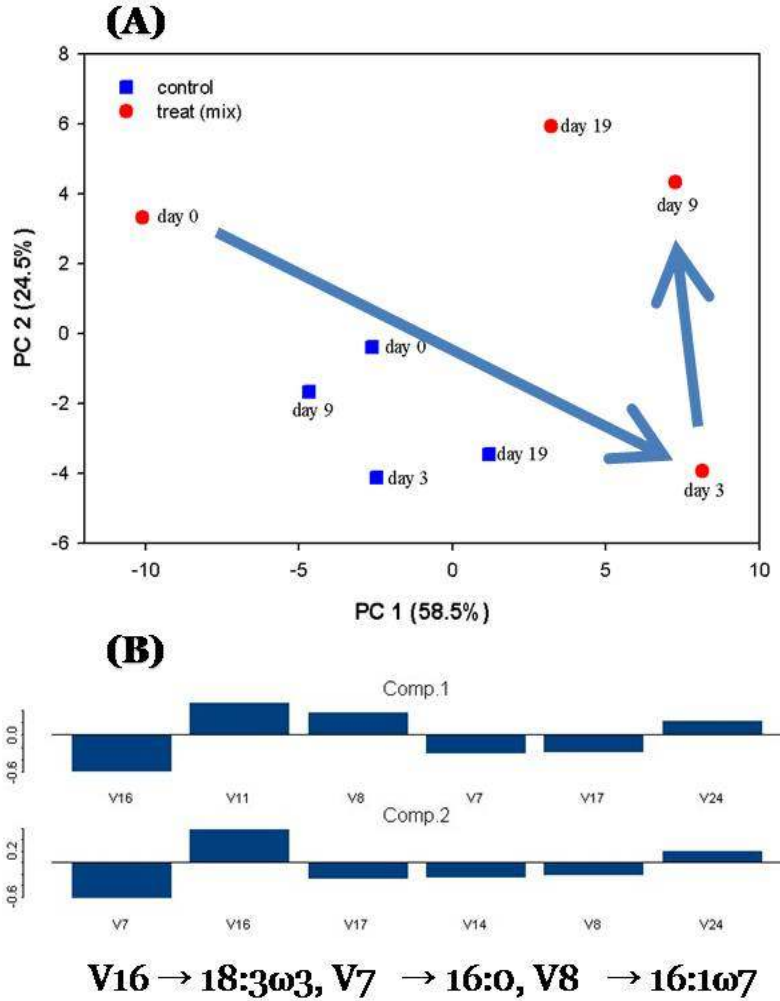
[그림 3.1.125] 시간에 따른 영양염 농도 변화

석문시험포에서 이루어진 복합 생물조절 실험에서 새뱅이 새우와 말조개의 섭식을 지방산으로 분석한 결과 부유물의 지방산 조성은 상당한 변이가 있는 데 반해 새뱅이 새우와 말조개의 지방산 조성은 시간에 따라 큰 변화가 없는 것을 볼 수 있었다[그림 3.1.126].



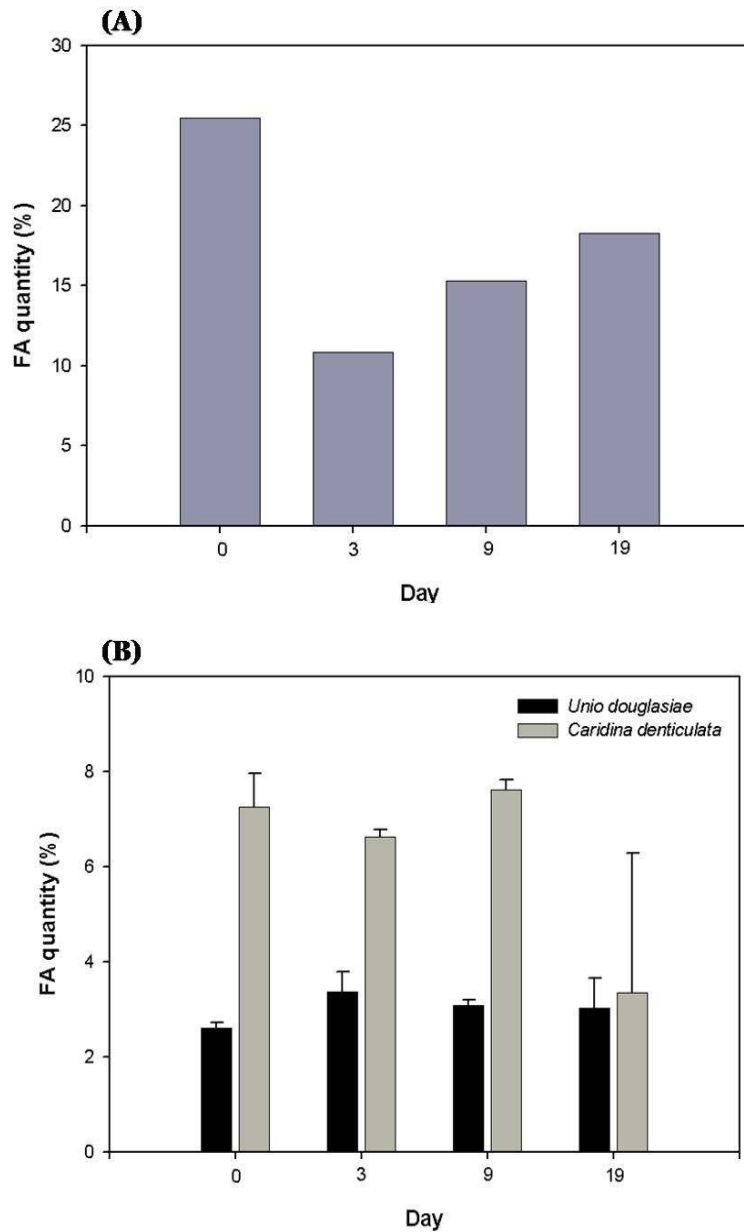
[그림 3.1.126] 시간 경과에 따른 지방산 profile 주성분 분석, con: seston 대조군, mix: seston 실험군)

석문 실험 기간 동안 부유물의 지방산 조성은 어떻게 변화하였는지 분석하여 보았는데 대조구의 경우 큰 변화가 없었으나 처리구의 경우 초기 3일 동안 주성분 1축의 양의 방향 주성분 2축의 음의 방향으로 변화가 있었고 3일에서 9일 사이에서는 주성분 2축에 대해 양의 방향으로의 변화를 볼 수 있었다[그림 3.1.127]. 9일 이후 19일까지는 큰 변화를 볼 수 없었다.



[그림 3.1.127] A: 석문 메소코즘 실험, 시간 경과에 따른 실험군(처리군), 대조군 seston 내 지방산 profile 주성분 분석, B: 주성분 분석에 대한 적재값(loadings score)

이러한 변화를 좀 더 분석하기 위해 적재값을 분석한 결과 3일까지 18:3 ω 3가 줄어들었다가 다시 9일까지 늘어났다는 것을 알 수 있었다. 18:3 ω 3 지방산은 남조류와 녹조류에 많은 지방산으로 이 시기의 식물플랑크톤 생물량 조성비 자료를 보면 대부분 녹조류의 감소에 따른 것으로 판단된다. 이러한 18:3 ω 3의 함량이 부유물에서 어떻게 변화하였는지 보면 주성분분석 결과대로 3일까지 줄어들다가 다시 점차 늘어나는 경향을 볼 수 있고[그림 3.1.128, A], 말조개에서도 3일까지는 약간 늘어나다가 더 이상 늘어나지 않는 경향을 볼 수 있다[그림 3.1.128, B]. 새뱅이 새우의 경우 초기에는 큰 변화가 없다가 9일 이후에 오히려 18:3 ω 3 지방산이 감소하는 경향을 볼 수 있다.



[그림 3.1.128] A: seston의 시간 경과에 따른 18:3 ω 3의 상대적인 조성비, B: 말조개(*Unio douglasiae*), 새뱅이(*Caridina denticulata*) 체내의 시간에 따른 18:3 ω 3의 상대적인 조성비

본 연구를 통해 실질적인 농업용 저수지의 수질개선에 대한 확실한 가능성을 확인하였다. 유용생물은 새뱅이와 동물플랑크톤 등과 달리 다른 포식자의 섭식압으로 부터 유리한 국내산 이매패인 말조개와 식물섬이 적합할 것으로 판단하였으며, 또한 한국의 토종어류(납자루 등)와 공생을 하는 고유한 생태 습성을 가진 말조개는 담수생태계의 토종 어족자원을 유지하는데 도움이 될 것으로 판단하였다.

4. 유용생물 자원의 개발 및 이용에 관한 protocol 작성

가. 연구배경 및 필요성

산업화 및 도시화는 공공수역의 부영양화를 유도하였고, 이에 따른 조류대발생은 단기적으로는 수중 생물군집에 심각한 교란을 주며 이,미취를 유발함으로써 수자원 공급에도 부정적인 영향을 준다. 또한 하천의 직강화, 하상의 골재 채취 활동은 생물서식지 파괴는 물론 부영양화를 억제할 수 있는 유용생물들의 종수 및 다양성을 현저히 감소시켰다.

오늘날 많은 국가들은 수처리 기술로서 주로 물리-화학적 처리방법에 의존하고 있다. 이런 기술들은 빠르고 높은 처리효과를 기대할 수 있다는 장점은 있으나 효과지속시간이 짧기 때문에 반복적인 기술적용이 불가피하여 비경제적이고 처리이후 발생하는 부산물이 수계 내 새로운 오염원으로 작용한다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 최근에는 환경친화적이고 생태계에 부작용을 적은 생물학적 처리기술 개발이 활발하다. 그러나 이러한 생물학적 기술들은 주로 용존된 유기물 제거를 위하여 관련되는 기능성 박테리아를 이용하는 것으로서 아직까지는 방류수의 고도처리에만 이용되고 있을 뿐 처리규모가 크고 용수 공급을 목적으로 하는 자연수의 정수과정에는 적용 사례가 극히 드물다.

세계적으로 부영양화에 의한 유기오염이 심한 저수지나 하천의 수질개선을 위하여 다양한 유용생물을 이용하는 생물조절(biomanipulation) 연구가 시도되어 왔다. 지금까지 자연수의 오염 저감을 위한 다양한 생물들은 박테리아를 비롯하여 바이러스, 동물플랑크톤, 섬모충, 패류, 어류 등을 이용한 직접적인 방법과 수변식물(예, 물참포, 부레옥잠 등)들을 이용하여 수중 용존염을 제거하는 간접적인 방법 등이 알려져 왔다. 그러나 많은 실험실적 연구들은 효과적인 수질개선 가능성을 시사하고 있으나, 현장에서의 재현성에 대해서는 의문과 유용생물의 직접적인 사용에 대한 많은 논란이 지속되고 있다. 특히 바이러스나 박테리아의 경우, 실험적 연구에서는 매우 높은 효과를 보였으나 현장에 직접 살포하거나 살포 이후 생태계 변화 및 건강위협 등의 우려에 대한 의문이 제기되었고, 동물플랑크톤이나 어류의 경우, 매우 제한된 수계(유용생물 적용 이후 포식자나 조류독성 등에 의한 사망률 증가)에만 적용가능하다.

최근에는 유기오염이 심한 수계에서도 장기간 생존이 가능하며 여과능이 뛰어난 패류에 대한 연구가 진행중이다. 이들은 수체내 입자성 유기물을 여과 섭식하고 소화되지 않은 것들은 덩어리(mass)형태의 가분(假糞; pseudofaeces)을 만들어 배출함으로써 바닥에 침강하여 저서생물들에게 풍부한 먹이를 제공하는 이른바 물과 퇴적물의 연결작용(pelagic-benthic coupling)의 중요한 매개자 역할을 한다. 그러나 국내에서는 화학물질 사용의 급증으로 인한 하천오염이나 외래종과의 먹이경쟁 등으로 인하여 종수나 개체수가 점차 감소하고 있는 실정이다.

본 연구는 오염된 수계의 수질정화에 있어 많은 인력과 비용을 요구하는 물리화학적 처리기법을 대신할 수 있는 생물학적 처리기술의 개발 및 현장 적용을 목적으로, 소형규모의 다양한 예비실험을 거쳐 저수지 유기물(조류)의 제어기능을 탁월하고 재현성이 뛰어난 다양한 국내산 유용생물을 대상으로 1) 오염된 농업용 저수지의 수질개선을 위한 유용생물의 선정, 분리, 배양

및 대량화 가능성, 2) 유용생물을 이용한 수질개선 기술의 최적화, 3) 최적 유용생물의 현장적용을 위한 기술적 지침과 요령에 관한 프로토콜을 농업용 저수지의 수질개선에 이바지 하고자 한다.

나. 연구범위와 내용

(1) 유용생물의 선정 및 선정기준

앞에서 언급한 연구목표를 달성하기 위하여 본 연구에서는 농업용 저수지의 수질개선을 위한 유용생물의 선정을 위한 기본적인 기준을 두고 다른 생물과의 차별화를 시도하였다.

- ① 국내 대부분의 하천에서 흔히 발견되는 국내산 토종으로 박테리아나 바이러스처럼 폭발적인 증식이나 병원성이 낮아야 한다.
- ② 유기물이 풍부한 부영양 하천이나 호수에서도 적용 이후 사망률이 낮고 서식 가능하여야 하며, 현장 수중생물에 대한 생태학적 교란도가 낮아야 한다.
- ③ 유용생물의 생물량이 풍부하고 가능하면 자연계로부터 공급이 가능하거나 인공배양을 할 수 있어야 한다.
- ④ 유용생물을 적용할 현장의 규모나 접근 가능하여 적용 이후 주기적인 유용생물의 재수확이나 생물량 변화를 추적 가능하여야 한다.
- ⑤ 유용생물을 직접 현장적용을 하지 않고 오염지역의 현장수를 간헐 또는 연속적으로 이동시켜 처리한 다음 다시 현장에 환송하는 동안 유용생물 사망률은 낮고 처리효과가 상당기간 지속되어야 한다.
- ⑥ 유용생물의 효과가 감소하여 처음 유용생물을 채집한 장소로 다시 환원시킬 경우, 사망률이 비교적 낮아야 한다.

(2) 유용생물의 종류 및 특성조사

지금까지 알려진 유용생물의 종류는 [표 3.1.19]과 같다. 본 연구에서는 유기물(조류)을 직접 제어하는 생물 분류군을 대상으로 하였으며, 각 분류군에 속하는 종은 구분하지 않았으며, 수중의 용존성 영양염(질소, 인)의 흡수와 서식처 제공을 목적으로 이용되는 기술(예, 인공식물섬)은 제외하였다. 각 생물군의 해당점수는 본 연구의 자료와 2009년 4월 현재까지 알려진 국내외 논문, 특허 등의 자료를 참고하였다.

[표 3.1.19] 유용생물의 종류 및 특성

종 류	제어효과	연구 완성도	실험 난이도	활용성	분리 및 대량화	경제성	국산화	합계
바이러스	1	3	5	3	1	2	1	16
박테리아	1	1	5	3	1	2	1	14
새뱅이	-	5	3	3	1	3	2	17
말조개	1	3	1	2	4	3	1	15
재첩	2	1	1	3	4	3	1	15
펼조개	1	2	1	2	4	3	1	14
동물플랑크톤 (섬모-편모충)	3	2	4	3	2	3	2	19
논우렁이	-	4	3	5	3	4	1	20
풍년새우	-	5	3	4	4	4	1	21
어류	3	1	2	3	3	3	3	18

1. Excellent 2. Good 3. Very fair 4. Fair 5. Bad - . 연구사례 또는 완성도가 정의되어 있지 않음.

[자체평가] 유기물(조류) 제어효과는 대부분 ‘보통’ 이상으로서 이들이 유용생물로서 높은 잠재성을 가지고 있는 것으로 밝혀졌으며, 특히 바이러스, 박테리아, 말조개, 펼조개 등이 높은 제어능을 나타냈다. 현재까지 기술의 완성도는 박테리아, 재첩, 어류에서 높았으나 손쉽게 활용 가능한 생물은 말조개, 재첩, 펼조개로서 이들은 국산화에 적합한 것으로 나타났다. 다만 유용생물의 개발 및 적용을 통한 경제성(기술이전 및 기술경쟁력)에서는 처리효과에서 가장 우수하였던 생물은 박테리아와 바이러스로 나타났다.

(3) 유용생물 적용의 최적조건 확립

유용생물의 적용조건은 각 생물군의 섭식활동이나 처리대상에 따라 차이를 나타낼 수 있다. 지금까지 1, 2차년도 연구(실내조건 실험)에서 밝혀진 유용생물의 최적조건 실험결과와 기존 문헌 등에 알려진 자료를 근거로 유용생물의 처리조건을 정리하면 [표 3.1.20]과 같다.

여기서 처리시간은 단위체적당 적용된 적정 유용생물 밀도가 유기물(조류)를 제어하는 제어율을 근거로 하였으며, 처리생물의 밀도가 낮을수록, 온도범위가 넓을수록 점수가 낮으며, 적용수심 범위가 깊을수록, 먹이종류나 밀도에 의존율이 낮을수록, 퇴적물 적용에 상관이 없고, 다른 생물과 혼합적용시 효과가 증가될수록 높은 점수를 부여하였다. 다만 유용생물의 생물량이 차이가 심하여 처리밀도의 경우, 자연계에 분포하는 생물군의 평균적 밀도를 고려하여 제조하기 쉬울수록 높은 점수를 부여하였다.

[표 3.1.20] 유용생물의 적용을 위한 최적조건

종 류	처리시간	밀도	온도	수심	먹이	퇴적물	혼합적용	합계
바이러스	1	1	4	3	5	1	5	20
박테리아	2	4	4	3	5	1	5	24
새뱅이	4	4	4	1	3	2	4	22
말조개	2	4	1	2	2	2	1	14
재첩	2	3	1	2	2	3	1	14
펼조개	2	3	1	2	2	2	1	13
동물플랑크톤 (섬모-편모층)	4	4	4	1	4	1	4	22
논우렁이	5	4	1	1	3	1	1	16
풍년새우	4	4	4	1	3	1	2	19
어류	3	3	3	1	3	1	3	17

1. Excellent 2. Good 3. Very fair 4. Fair 5. Bad -. 연구사례 또는 완성도가 정의되어 있지 않음.

[자체평가] 유용생물의 적용시 고려하여야 할 환경조건으로는 수온, 수심, 퇴적물에 의하여 생물간에 점수 차이가 크게 나타났다. 비교적 넓은 수온에서 제어능을 보이는 패류(말조개, 재첩, 펼조개, 우렁이)는 수심과 먹이(종류 및 밀도), 퇴적물 등에 대해서도 크게 영향을 받지 않았으며, 다른 생물과의 혼합적용시 상승효과를 나타낼 가능성이 높다고 판단되었다. 이에 반해 적용이후 빠른 효과를 보이는 박테리아와 바이러스는 수온, 먹이(유기물, 조류), 혼합적용 등에 대하여 적용조건이 매우 제한적임을 알 수 있었다. 전체적으로 펼조개를 비롯한 말조개, 재첩 등이 비교적 손쉽게 적용할 수 있는 유용생물로 나타났다.

(4) 유용생물의 관리기술(분리, 배양 및 대량화)

유기물(조류)제어를 위한 유용생물의 적용에 있어 가장 중요한 핵심기술은 자연계로부터 생물의 분리 및 배양이다. 대개 생물의 크기가 비교적 크고 쉽게 채집이 가능한 패류나 어류 등은 이러한 점에 매우 유리하지만 대량화 과정에서는 절대적인 공간이나 관리에 상대적으로 많은 시간과 노력이 필요하다. 유용생물의 적용을 위한 관리기술 [표 3.1.21]은 크게 현장수 이외에 다른 인공배지의 사용여부, 무균화, 생물유지와 대량화에 필요한 공간 등에 따라 점수를 부여하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 해당분야 학자나 전문가들의 견해는 차이가 있을 수 있다고 판단되어 계속하여 수정, 보완하기로 하였다. 또한 현장 적용시 상태(액체, 고체, 숙주) 또는 BOX나 CAGE 요구성 등에 따라 해당점수를 각각 부여하였다.

[표 3.1.21] 유용생물의 관리기술(분리, 배양, 대량화)

종 류	배지	무균	유지공간	현장증식	고밀도	상태	box/cage	기타
바이러스	5	5	1	-	1	4	-	16
박테리아	5	5	3	-	5	3	-	21
새뱅이	2	1	2	2	4	1	1	13
말조개	1	1	3	3	3	1	2	14
재첩	1	1	3	3	4	1	2	15
펼조개	1	1	3	3	3	1	2	14
동물플랑크톤 (섬모-편모충)	2	2	2	2	3	1	2	14
논우렁이	1	1	3	2	3	1	2	13
풍년새우	2	1	3	2	4	1	1	14
어류	2	1	4	-	4	1	-	12

1. Excellent 2. Good 3. Very fair 4. Fair 5. Bad -. 연구사례 또는 완성도가 정의되어 있지 않음.

[자체평가] 유용생물의 분리 및 배양, 그리고 대량화 뿐만 아니라 이동 등 대부분의 과정동안, 바이러스나 박테리아는 반드시 배지나 숙주가 동반되어야 한다. 아직까지 두 생물의 현장 적용에 대한 논란이 있다. 특히 이들이 적용이후 제어효과보다 우선적으로 실내에서 분리 배양한 생물이 현장에서 생존가능할지, 이들이 다른 생물군에 미치는 영향이 명확하게 규명되어 있지 않기 때문에 대부분의 국가에서 이들의 적용에 대한 적합한 메뉴얼이 없다. 특히 이들은 항상 무균상태를 유지하여야 하며 오염될 경우(혼합적용 부적절) 그 기능이 상실되거나 저감되는 경우가 많다. 아울러 박테리아의 경우 고밀도 집적배양이 이루어지더라도 지금까지 연구결과들에 의하면 매우 높은 밀도를 수계에 넣어야 가능하고 이들의 적용은 엄청난 양의 유기물 유입으로 인하여 오히려 심각한 수질악화가 우려되었다. 따라서 전체적으로 배지나 무균화가 필요 없고 특별한 장치가 요구되지 않은 새뱅이와 동물플랑크톤 등이 관리하기에 용이하였다.

(5) 유용생물의 적용대상 및 범위 선택

유용생물 적용의 효과는 대상 수계의 수리-수문학적 성질에 크게 의존되며 적용이후 유용생물의 생존율도 크게 영향을 받는다. 따라서 유기오염이 심한 농업용 저수지의 기존에 서식하고 있는 생물상에 대한 정확한 사전정보 및 유용생물의 적용이후 생존율 및 생태계 교란도 등에 대한 예비조사를 실시하여야 한다. 특히 유용생물이 초기에 분리되었던 현장의 조건과 부합되지 않을 경우, 발생가능한 부작용이나 유기물(조류)제어효과에 미치는 영향 등은 사전에 폭 넓은 예비실험은 유용생물의 효과를 최대화 하는 결정적인 단서가 될 수 있다. [표 3.1.22]는 유용생물의 적용이 가능하다고 판단되거나 지금까지의 기존자료들에서 적용대상으로 하거나 목표로 삼았던 수계를 대상으로 유용생물의 적합성을 임의적으로 판단한 결과이다.

[표 3.1.22] 유용생물의 적용 대상 및 범위

종 류	상수원수	농업 저수지	공원연못	하천/보	골프장 연못	축산폐수	합계
바이러스	5	4	3	2	1	2	17
박테리아	5	4	3	2	1	2	17
새뱅이	1	1	1	1	4	3	11
말조개	1	1	1	1	3	2	9
재첩	1	1	1	1	3	3	10
펼조개	1	1	1	1	3	2	9
동물플랑크톤 (섬모-편모충)	1	1	1	3	2	2	10
논우렁이	1	1	1	1	3	2	9
풍년새우	1	1	1	1	4	3	11
어류	4	1	1	1	3	3	13

1. Excellent 2. Good 3. Very fair 4. Fair 5. Bad -. 연구사례 또는 완성도가 정의되어 있지 않음.

[자체평가] 대부분의 유용생물의 분리 및 채집 장소는 하천이나 저수지(연못)과 같은 자연수와 논과 같은 경작지이다. 따라서 특정한 유해물질에 내성이 강한 생물이 아니라면 독성물질에 약하기 때문에 적용대상 수역 역시 수질오염(유해화학물질)이 심한 장소는 적합하지 않다고 판단된다. 따라서 오염원이 주로 유기물질로만 이루어진 자연수를 대상으로 함이 적당하다. 가장 낮은 점수를 보인 말조개, 펼조개, 논우렁이는 비교적 오염이 심한 수계(특히 축산폐수가 유입되는 하천)에서 높게 분포하는 특징을 갖는 생물군으로서 다양한 수계에 사용이 가능할 것으로 판단되지만 바이러스와 박테리아는 상수원이나 농업용 저수지에는 적합하지 않다. 수심이 비교적 낮고 저니층이 잘 발달된 저수지는 다양한 소형하천으로부터 유입되는 유기물(비점오염원)로 인하여 쉽게 부영양화가 발생되며 연달아 조류발생이 일반적이다. 따라서 수심이 깊은 곳이나 유속이 빠른 지점을 제외한다면 예서는 비교적 효과가 낮고 유역 패류를 비롯하여 다양한 생물군의 이용이 가능할 것으로 판단되었다.

(6) 유용생물의 적용시기 및 규모

유용생물의 채집시기와 적용시기는 바이러스와 박테리아를 제외하고는 일치하기 어렵다. 그러나 [표 3.1.23]에 나타난 바와 같이 유용생물의 대부분은 실내 배양이나 유지가 가능하다. 다만 실내에서 대량으로 배양하거나 유지하기 위한 기술적 어려움이나 이런 과정에 요구되는 절대적인 공간, 먹이공급, 세척 등과 같은 일련의 과정을 관리하고 유지하는 노력이외에 채집시기가 적용시기와 일치하지 않을 경우 유용생물의 적용은 제한되기 쉽다. 한편 적용시기 또한 유기물(조류) 농도가 높게 유지되거나 여름철이나 규조류가 대발생하는 겨울철과 같이 폭 넓은 온도범위에 적용가능한 생물은 그다지 많지 않다. 따라서 실내에서 생물의 유지관리가 가능하더라도 계절에 따른 수온변화에 적합한 생물을 선정하는 기술의 다른 어떤 기술보다 앞선다.

지금까지 알려진 많은 유용생물들의 유기물(조류)제어 연구는 현장수를 대상으로 한 직접 시

도된 사례는 매우 빈약하다. 뿐만 아니라 좁은 실험실이나 저수지나 하천의 유역에 소형 메소코즘을 설치하여 성공리에 유기물을 제어한 경우라 할지라도 open system에 적용시 과연 어떠한 결과를 나타낼 지 사실상 미지수다. 특히 이는 기술적인 문제보다 적용이후 예상되는 제현상을 예측하기 어렵고 실제적으로 생물학적 처리기법의 한계이기도 하다. 따라서 본 연구의 궁극적인 목표이자 유용생물의 현장 적용을 위한 범국가적인 차원에서 정책적이고 행정적인 협조가 절실히 요구된다 하겠다. 우리나라에서는 아직 현장수(특히 상수원수나 농업용 저수지) 대상으로 한 생물학적처리 기술을 적용한 사례는 보고된 바 없으며, 행정적 규제로 말미암아 예비 실험은 물론 재현하기도 어려운 실정이다.

[표 3.1.23] 유용생물의 적용시기 및 규모

종 류	채집시기	적용시기	< 100 L	> 1 t (메소코즘)	open system (현장)	CROM 시스템	합계
바이러스	1	1	1	3	-	-	6
박테리아	1	1	1	3	-	1	7
새뱅이	3	3	1	2	-	-	9
말조개	1	1	1	1	-	2	6
재첩	1	1	1	3	-	3	9
펼조개	1	1	1	1	-	1	5
동물플랑크톤 (섬모-편모충)	3	3	1	3	-	-	10
논우렁이	1	1	1	3	-	5	11
풍년새우	3	3	1	2	-	-	9
어류	2	2	2	2	-	-	8

1. Excellent 2. Good 3. Very fair 4. Fair 5. Bad -. 연구사례 또는 완성도가 정의되어 있지 않음.

[자체평가] 대부분의 유용생물은 수온이나 계절에 상관없이 채집이 가능하지만 적용시기는 매우 한정되거나 경우에 따라서는 유기물(조류발생)의 농도가 도달하는 시점까지 관리가 요구된다. 따라서 박테리아나 바이러스처럼 짧은 시간에 높은 농도를 제작하기 쉬운 생물의 적용이 바람직하다. 그러나 채집밀도가 낮거나 적용시기에 대량밀도를 유지하기 힘든 생물군(패류, 어류) 등에서는 기술의 완성도를 위하여 배양기술의 확보가 절대적으로 필요하다. 아울러 하절기에만 출현하는 새우류나 동물플랑크톤 역시 수온 못지 않게 포식자의 존재를 먼저 확인하여 적용이후 개체수 감소가 발생되지 않도록 하여야 한다. 또한 10종류의 유용생물 중 1톤 이상의 규모에서 적용이 가능한 생물(패류)이라 할지라도 저수지나 하천 전체의 open system 경우 적용이후 유용생물의 관리가 현실적으로 불가능하다.

따라서 cage나 패류망을 이용한 다음 적절한 시기에 회수하는 간접적인 방법을 시도하거나 오염된 현장수를 pump나 기타 유입시설을 이용하여 간헐적 또는 흐름형으로 제작한 장치에 유용생물의 밀도, 유입수의 유량과 유속, 생물의 사망률 등을 조절함으로써 효과를 극대화하고 처리수는 다시 환원하도록 하는, 예를 들면 CROM(continuous removal of organic matters)형 방법을 시도함이 타당하다고 판단된다.

다. 유용생물을 이용한 농업용 저수지 수질개선 방법(안)

농업용 저수지의 수질개선을 위한 적절한 유용생물의 선정을 위하여, 연구자들의 1) 다양한 실내실험 및 현장 메소코즘, 2) 연속적 유기물 제어(CROM) 연구의 결과를 토대로 유기오염이 심한 국내 농업용저수지에 적합한 유용생물의 선정 및 수질개선 방법(안)을 제안하였다.

(1) 유용생물의 선정

다양한 유용생물군에서 앞에서 언급한 바와 같이 1) 유용생물의 종류 및 특성, 2) 유용생물의 적용을 위한 최적조건, 3) 유용생물의 적용 대상 및 범위, 4) 유용생물의 관리기술(분리, 배양, 대량화), 5) 유용생물의 적용시기 및 규모 등의 적합성 조사결과를 토대로, 국내 농업용 저수지의 수질개선에 가장 적합한 유용생물을 선정하였다. 각 생물군의 장단점은 [표 3.1.23]과 같다.

[표 3.1.24] 농업용저수지를 대상으로 한 유용생물의 장, 단점 비교

생물군	장 점	단 점	순위*
하등생물 바이러스 박테리아	빠른 성장속도를 가지며 대상수역에 상관없이 적용가능하고 보관이 용이함	수주나 대상조류에 대한 특이성이 있으며, 병원성이 있어 관리나 적용이 후 예측불가능	7
절지동물 새뱅이 풍년새우	비교적 빠른 성장을 보이며 대부분의 저수지에 분포함	수온이나 계절에 영향을 받으며 실내 유지가 다소 어렵고 현장수에 포식자가 존재할 경우 부적절	3
패류 말조개 펼조개 재첩 논우렁이	가장 효과적인 여과율을 보이고 관리나 채집이 용이하며 오염내성이 강하며 포식자 영향이 낮음	수심이 깊은 저수지의 효과가 낮고, 자연 개체밀도가 낮을 경우 배양이 필요함	2
동물플랑크톤 (섬모-편모충)	빠른 성장과 식물플랑크톤에 대한 높은 섭식율을 가지며 배양이 용이함	수온이나 계절에 영향을 받으며 실내 유지가 다소 어렵고 현장수에 포식자가 존재할 경우 부적절	4
어류 백년어	단위시간당 섭식율이 높고 제한된 공간에선 효율이 높음	먹이습성에 따라 오히려 오염원으로 작용하고 대상저수지의 어류구성에 따라 조건적임	6
인공식물섬	canopy와 더불어 유기물생성 억제 효과가 가장 높음	식물성장후 수확 및 기상여건에 따라 관리문제 발생	1
식물추출물	allelopathy효과를 갖는 천연유기물 제제로서 소규모에서는 효과적임	용매를 사용하여야 하며 다른 생물군에 미치는 영향을 불확실	5

*) 순위는 본 연구의 결과 및 선행연구 결과를 근거로 선정

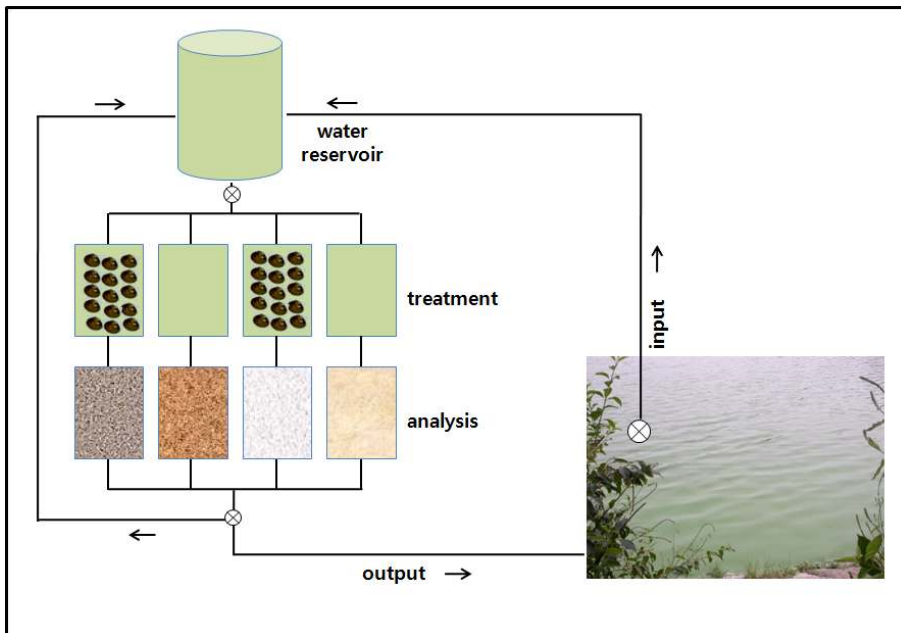
(2) 연속적 유기물 제어(CROM)의 선정

본 연구에서 유용생물의 장, 단점을 종합하여 보면, 생물적용의 난이도, 관리, 효과, 생태계 교란 및 인간 위험도 등 다양한 면에서 가장 적합한 유용생물은 패류(말조개, 펼조개)로 나타났다. 연구에 사용된 말조개와 펼조개는 국내산 토종 이매패류로서 높은 여과율은 물론 비교적 폭넓은 환경조건에서 생존이 가능하며 오염수계에 내성이 강하여 가장 유력한 유용생물로 판단

되었다. 다만 이들이 배출하는 용존유기물의 처리가 기술의 완성도 확보의 중요한 과제였으며, 특히 자신이 배출한 암모니아 농도에 의해 사망률이 증가하므로 불연속형 제어보다 연속형 제어(CROM)방식이 권장된다. 부가적으로 서식환경으로서 퇴적물의 유입효과는 그다지 크지 않으며 여과율에도 큰 영향을 미치지 않고 생존력이 강하여 매우 적합하다고 판단된다.

CROM 기술[그림 3.1.129]은 이매패를 현장에 직접 적용하지 않고 적절한 패류밀도를 갖는 처리조에 유기물이 많은 오염저수지의 현장수를 펌핑 도입하고 일정시간 통과시킨 후 처리수는 다시 현장으로 환원시키고 여과된 유기물은 분리하여 처리할 수 있는 방식으로 현장에 직접 적용함을 목적으로 한다. 이 방법은 기존에 알려진 막여과법(membrane filtration)과 유사한 것으로서 섭식능이 높은 패류를 막 대신 이용한다는 점에서 차이를 가지며 세정기간이나 주기가 막에 비해 길다는 장점을 갖는다.

CROM은 전형적인 수질정화 시스템으로 패류의 서식에 적합한 환경을 제공하고 이들의 여과능을 이용하여 효율적으로 수질을 정화시키도록 하는 장치이다. 장치는 직접적으로 부영양 호소에서 부유 유기물이 다량 함유한 수체를 현장 실험실로 끌어들이는 다음 패류 여과장치안에 패류로 인해 유기물이 바닥으로 침전을 유도하며 수확된 Sludge는 건조되어 폐기된다.

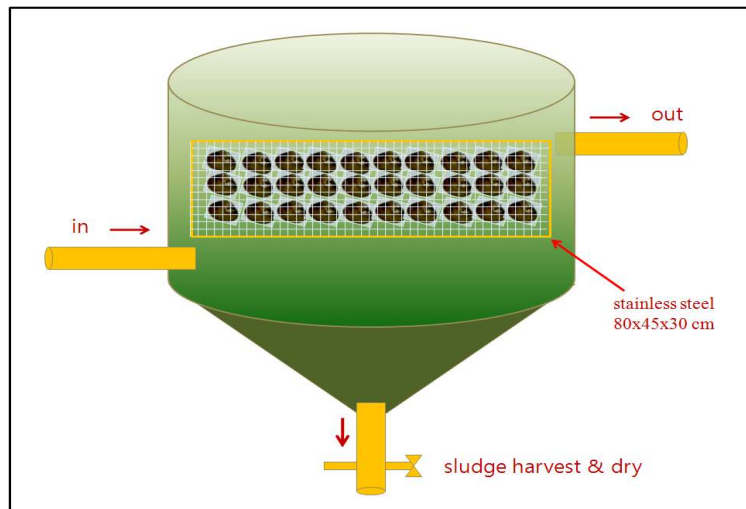


[그림 3.1.129] 패류를 사용한 부영양 저수지 수질개선 모식도

(3) 유용생물을 이용한 생물학적 수질개선 방법(안)

부영양화에 의한 조류발생 등으로 수층에 많은 유기물을 포함한 오염된 농업용 저수지의 수질개선(투명도, Chl-a 감소)을 위하여 다음과 같이 연속형 유기물 제어(CROM: continuous removal of organic matters)의 운영을 실시한다.

- 운영목적: 유기오염이 심하고 탁도가 높은 농업용 저수지의 수질개선을 목적으로 한다.
- 유용생물: CROM 운영에 사용되는 생물은 한국산 토종 패류(재첩, 콩조개, 말조개, 칼조개, 필조개, 대칭이 등)을 대상으로 한다.
 - 패류의 종류에 따라 대상저수지, 유속 및 유량 등을 조정할 필요가 있다.
 - 패류의 종류에 따라 처리밀도, 수온, 수심 등을 조정하여야 한다.
- 대상저수지: 수질, 생물상, 탁도, 수온약층, 결빙, 용도, CROM 설치 용이도 등을 고려하여야 한다.
- CROM의 구성: 저류조, 조정조, 처리조, 방류 및 유기물 처리조, 환원조 등 5개로 구성한다. 사망한 패류의 교체를 위하여 교체 가능한 여분의 패류를 유지하여야 한다.
- CROM의 핵심부분



[그림 3.1.130] 패류 처리조의 sludge 처리과정 모식도

- 운영:
 - 대상저수지 인접 지역으로 외부 기온과 차단할 수 있고, 생물서식이 적당한 수온을 유지하여야 한다.
 - 매일 시간별로 운영일지를 작성하고 유기물 제어효과(상, 중, 하)에 따라 ‘중’ 미만(제어율 50% 미만)일 경우, 패류의 교체 또는 세척 등의 적절한 조치를 하여야 한다.
 - 측정항목:
 - 매일 YSI(온도, 탁도, pH, 용존산소, 전도도, 산소포화도), 패류사망율
 - 1주일 간격: 수질, 생물, 배설물 생성량
 - 세척주기: 1주일
 - CROM 운영의 총괄은 대상저수지의 관리 담당자 또는 전문가.

[사례연구]

○ 대상저수지: 일감호(Lake Ilgam, Seoul)

본 연구대상 수역인 인공 소형저수지[그림 3.1.131]의 총 수표면적은 약 55,661 m²이며 최대 수심이 2.0 m 정도이고 평균 보유량은 54,288 m³이다. 대상 저수지의 주 오염원은 하수관거가 완비된 1975년 이전에는 생활하수, 실험실폐수 및 공장폐수 등이었으나, 하수관거가 완비된 이후에는 오, 폐수의 유입이 중단되었고 1975년 이후에는 오염부하량이 적을 것으로 추정되는 우수와 지하수만이 주 유입오염원이다. 1982년 이전부터 이미 상당히 부영양화 되었던 것으로 판단되며, 1975년 이후 외부유입 오염물의 감소에도 불구하고 지금까지 일감호의 수질은 부영양 상태로 유지되고 있다. 본 연구는 공학적 산출방식이 용이하고, 외부 유입과 유출이 제한된 곳으로 선정하였다. 또한 수심이 낮고, 높은 영양염 농도로 농업용저수지와 유사하며 조류의 대발생 빈도가 빈번한 지점으로 선정하였다.



[그림 3.1.131] CROM 대상저수지

○ 유용생물: 필조개(*Anodonta woodiana*)

- 채집: 2009. 1. 21
- 서식: 군산-옥구지역
- 크기: 4~15 cm
- 처리밀도: 200 indi 500 L⁻¹
- 유속(유량): 320 mL min.⁻¹

○ 운영방법

- 운영일시: 2009. 2.1 ~ 현재
- 운영조: 현장수(CON), 현장수+모래(S), 현장수+패류(M), 현장수+모래+패류(S+M), 등 4가지로 구성.

- 측정항목: 조정조와 분석조의 Chl-*a* 또는 부유물질(SS)의 농도
수질: TN, TP, NO₂-N, NO₃-N, NH₃-N, PO₄-P 등
- 측정주기: 운영초기 매일 1회씩, 1개월 이후 매주 1회씩

○ 운영결과

- 퇴적물 첨가에 상관없이 패류처리에 따라 평균적으로 Chl-*a*(약 60%)와 SS(55%)의 제거효과를 나타냄
- 패류처리군(S, S+M): 영양염 증가, 9일째 최고치(세정주기: 약 1주일)
- 패류사망률: 256마리 중 3마리가 사망.

○ 운영후기

- 유용생물(말조개, 펼조개)의 수질개선 효과, 즉 SS와 Chl-*a*의 뚜렷한 저감을 확인하였으며 비교적 장기간 동안 패류가 생존하였다
- 저수온기에 제한된 실험이라 고수온기의 결과가 주목된다.
- 회수된 배설물의 활용대책이 필요하다.

Protocol Reference

- Alden, R. W., R. C. Dahiga & R. J. Young, 1982. A method for the enumeration of zooplankton subsamples. *J. Exp. March Biol. Ecol.* 59: 185–206.
- Al-Tai, A. M. S., 1982. Characteristics and microbial interactions of certain actinomycetes from Iraq. Ph.D. Thesis, University of Dundee.
- Annadotter, H., G. Cronberg, R. Aagren, B. Lundstedt, P. A. Nilsson & S. Strobeck., 1999. Multiple techniques for lake restoration. *Hydrobiologia* 396: 77–85.
- APHA, 1980. Standard Methods for the Examination Water and Wastewater. 16th edn.
- Barnet, Y. M., M. J. Daft & W. D. Stewart, 1981. Cyanobacteria-cyanophage interactions in continuous culture. *J. appl. Bact.* 51: 541–552.
- Bartzokas, A. & D. A. Metaxas. 1995. Factor analysis of some climatological elements in Athens, 1931–1992: covariability and climatic change. *Theoret. Appl. Climatol.* 52: 195–205.
- Bengtsson, L., 1975. Phosphorus release from a highly eutrophic lake sediment. *Verh. Int. Ver. Limnol.* 19: 1107–1116.
- Bershova, O. I., Z. P. Kopteva & E. V. Tantsyurenko, 1968. The interrelations between the blue-green algae – the causative agents of “water bloom” – and bacteria. In A.V Topachevsky (ed.) *Tsvetnie Vody*: 159–171.
- Ganf, G. G. & R. L. Oliver, 1982. Vertical separation of light and available nutrients as a factor causing replacement of green algae. *Journal of Ecology* 70: 829–844.
- Brabrand, A., B. A. Faafeng, T. Kallquist & J. P. Nilssen, 1983. Biological control of undesirable cyanobacteria in culturally eutrophic lakes. *Oecologia* 60: 1–5.
- Burnham, J. C., S. A. Collart & M. J. Daft, 1984. Myxococcal predation of the cyanobacterium *Phormidium luridum* in aqueous environments. *Arch. Microbiol.* 137: 220–225.
- Burnham, J. C., S. A. Collart & B. A. Highison, 1981. Entrapment and lysis of the cyanobacterium *Phormidium luridum* by aqueous colonies of *Myxococcus xanthus* PCO2. *Archives of Microbiology* 129: 285–294.
- Vertical separation of light and available nutrients as a factor causing replacement of green algae by blue-green algae in the plankton of a stratified lake. *J. Ecol.* 70: 829–844.
- Canter, H. M. & J. W. Lund, 1951. Fungal parasites of the phytoplankton. II. (Studies on British Chytrids XII). *Ann. Bot.* 15: 129–156.
- Canter, H. M., S. I. Heaney & J. W. Lund, 1990. The ecological significance of grazing on planktonic populations of cyanobacteria by the ciliate *Nassula*. *New Phytol.* 114: 247–263.

- Carrick, H. J., F. J. Aldridge & C. L. Schelske, 1993. Wind influences phytoplankton biomass and composition in a shallow, productive lake. *Limnol. Oceanogr.* 38: 1179-1192.
- Claesson, A. & S. O. Ryding, 1977. Nitrogen - a growth limiting nutrient in eutrophic lakes. *Prog. Wat. Tech.* 8: 291-299.
- Cole, G. T. & M. J. Wynne, 1974. Endocytosis of *Microcystis aeruginosa* by *Ochromonas danica*. *Journal of Phycology* 10: 397-410.
- Cook, W. L., D. G. Ahearn, D. J. Reinhardt & R. J. Reiber, 1974. Blooms of an algophorous amoeba associated with *Anabaena* in a freshwater lake. *Wat. Air Soil Pollut.* 3: 71-80.
- Daft, M. J. & W. D. Stewart, 1971. Bacterial pathogens of freshwater blue-green algae. *New Phytol.* 70: 819-829.
- Daft, M. J., J. Begg & W. D. Stewart, 1970. A virus of bluegreen algae from fresh-water habitats in Scotland. *New Phytol.* 69: 1029-1038.
- Daft, M. J., J. C. Burnham & Y. Yamamoto, 1985. Algal blooms: consequences and potential cures. *J. appl. Bact.* 75S-186S.
- Daft, M. J., S. B. McCord & W. D. Stewart, 1975. Ecological studies on algal lysing bacteria in fresh waters. *Freshwat. Biol.* 5: 577-596.
- Dillon, P. J. & R. H. Rigler, 1974. A test of a simple nutrient budget model predicting the phosphorus concentration in lake water. *J. Fish. Res. Bd Can.* 31: 1771-1778.
- Dryden, R. C. & J. C. Wright, 1987. Predation of cyanobacteria by protozoa. *Can. J. Microbiol.* 33: 471-482.
- Edler, L., 1979. Recommendations for marine biological studies in the Baltic sea. Rep. Of Unesco Working group 11, Marine.
- Edmondson, W. T., 1970. Phosphorus, nitrogen, and algae in Lake Washing after diversion of sewage. *Science* 169: 690-691.
- Ekholm, P., O. Malve & T. Kirkkala, 1997. Internal and external loading as regulators of nutrient concentrations in the agriculturally loaded Lake Pyhajarvi (southwest Finland). *Hydrobiologia* 345: 3-14.
- Ensign, J. C. & R. S. Wolfe, 1965. Lysis of bacterial cell walls by an enzyme isolated from a *Myxobacter*. *J. Bact.* 90: 395-402.
- Everall, N. C. & D. R. Lees, 1996. The use of barley straw to control general and blue-green algal growth in a Derbyshire reservoir. *Wat. Res.* 30: 269-276.
- Fallon, R. D. & T. D. Brock, 1979. Lytic organisms and photooxidative effects: Influence on blue-green algae (cyanobacteria) in lake Mendota, Wisconsin. *Appl. environ. Microbiol.* 38: 499-505.
- Fraleigh, P. C. & J. C. Burnham, 1988. Myxococcal predation on cyanobacterial populations:

- nutrient effects. *Limnol. & Oceanogr.* 33: 476-483.
- Gaudette, H. E., W. R. Flight, L. Toner & D. W. Folger, 1974. An inexpensive titration method for determination of organic carbon in recent sediments. *J. Sedim. Petrol.* 44: 249-253.
- Gerloff, G. C. & F. Skoog, 1957. Nitrogen as a limiting factor for the growth of *Microcystis aeruginosa* in southern Wisconsin lakes. *Ecology* 38: 556-561.
- Ghadouani A., B. Alloul, Y. Zhanc. & E. Prepas, 1998. Relationships between zooplankton community structure and phytoplankton in two lime-treated eutrophic hardwater lakes. *Freshwat. Biol.* 39: 775-790.
- Goldman, C. R. & R. G. Wetzel, 1963. A study of the primary productivity of Clear Lake, California. *Ecology* 44: 283-294.
- Hamilton, D. P. & S. F. Mitchell, 1996. An empirical model for sediment resuspension in shallow lakes. *Hydrobiologica* 317: 209-220.
- Hamilton, D. P. & S. F. Mitchell, 1997. Wave-induced shear stresses, plant nutrients and chlorophyll in seven shallow lakes. *Fresh. Biol.* 38: 159-168.
- Hanson, M. A. & M. G. Butler, 1994. Responses to food web manipulation in a shallow waterfowl lake. *Hydrobiologia* 279/280: 457-466.
- Holdren, G. C. & D. E. Armstrong, 1980. Factors affecting phosphorus release from intact lake sediment cores. *Environ. Sci. Technol.* 14: 79-87.
- Horppila, J., H. Peltonen, T. Malinen, E. Luokkanen & T. Kairesalo, 1998. Top-down or bottom-up effects by fish - issues of concern in biomanipulation of lakes. *Restor. Ecol.* 6: 20-28.
- Hosper, S. H. & E. Jagtman, 1990. Biomanipulation additional to nutrient control for restoration of shallow lakes in The Netherlands. *Hydrobiologia* 200/201: 523-534.
- Jackson, D. F. & V. Sladeck, 1970. Algal viruses - eutrophication and control potential. *Yale Sci. Mag.* 44: 16-22.
- Jellison, R., L. G. Miller, J. M. Melack & G. L. Dana, 1993. Meromixis in hypersaline Mono Lake, California. 2. Nitrogen fluxes. *Limnol. Oceanogr.* 38: 1020-1039.
- Jeppesen, E. M., J. P. Jensen, M. Søndergaard, T. Lauridsen, L. J. Pedersen & L. Jensen, 1997. Top-down control in freshwater lakes, the role of nutrient state, submerged macrophytes, and water depth. *Hydrobiologia* 342/343: 151-164.
- Jeppesen, E. M., J. P. Jensen, P. Kristensen, M. Søndergaard, E. Mortensen. O. Sortkjær & K. Olrik, 1990. Fish manipulation as a lake restoration tool in shallow, eutrophic, temperate lakes 2: threshold levels, long-term stability and conclusions. *Hydrobiologia* 200/201: 219-227.
- Jeppesen, E. M., M. Søndergaard, B. Kronvang, J. P. Jensen, L. M. Svendsen & T. Lauridsen, 1998b. Lake and catchment management in Denmark. In: Harper, D., A.

- Ferguson, B. Brierley, & G. Phillips (eds), *Ecological Basis for Lake and Reservoir Management*.
- Jeppesen, E. M., M. Søndergaard, J. P. Jensen, E. Mortensen, A. M. Hansen & T. Jørgensen, 1998a. Cascading trophic interactions from fish to bacteria and nutrients after reduced sewage loading - an 18-year study of a shallow hypertrophic lake. *Ecosystems* 1: 250-267.
- Jeppesen, E. M., P. Kristensen, J. P. Jensen, M. Søndergaard, E. Mortensen & T. Lauridsen, 1991. Recovery resilience following a reduction in external phosphorus loading of shallow, eutrophic Danish lakes: duration, regulating factors and methods for overcoming resiliences. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 48: 127-148.
- Kelly, L. A. & S. Smith, 1996. The nutrient budget of a small eutrophic loch and the effectiveness of straw bales in controlling algal blooms. *Freshwat. Biol.* 36: 411-418.
- Kleeberg, A. & H. P. Kozerski, 1997. Phosphorus release in Lake Grosser Müggelsee and its implications for lake restoration. *Hydrobiologia* 342: 9-26.
- Kozerski, H. P. & A. Kleeberg, 1998. The sediments and benthic-pelagic exchange in the shallow Lake Müggelsee (Berlin, Germany). *Int. Rev. Hydrobiol.* 83: 77-112.
- Kotti, M. E., A. G. Vlessidis & N. P. Evmiridis, 2000. Determination of phosphorus and nitrogen in the sediment of Lake "Pamvotis" (Greece). *Int. J. environ. anal. Chem.* 78: 455-467.
- Laybourn-Parry, J., K. Jones & J. P. Holdich, 1987. Grazing by *Mayorella* sp. (protozoa: Sarcodina) on cyanobacteria. *Funct. Ecol.* 1: 99-104.
- Martin, E. L., 1976. Biological control of blue-green algae. National Technical Information Service Report PB-288 311. Nebraska.
- Mason, C. F., 1996. *Biology of Freshwater Pollution*, 3rd edn. Longman, Essex.
- Michaloudi E., M. Zarftzian & P. S. Economides, 1997. The zooplankton of lake Mikri Prespa. *Hydrobiologia*, 351: 77-94.
- Möller-Andersen, J., 1974. Nitrogen and phosphorus budgets and the role of sediments in six shallow Danish lakes. *Arch. Hydrobiol.* 74: 528-550.
- Newman, J. R. & P. R. F. Barrett, 1993. Control of *Microcystis aeruginosa* by decomposing Barley straw. *J. of aquatic Plant Manage.* 31: 203-206.
- Ohki, K. & Y. Fujita, 1996. Occurrence of a temperate cyanophage lysogenising the marine cyanophyte *Phormidium persicum*. *J. Phycol.* 32: 365-370.
- Osborne, P. L., 1980. Prediction of phosphorus and nitrogen concentrations in lakes from both internal and external loading rates. *Hydrobiologia* 69: 229-233.
- Pace, M. L. & J. D. Orcutt, 1981. The relative importance of protozoans, rotifers and crustaceans in a freshwater zooplankton community. *Limnol. Oceanogr.* 26: 822-830.

- Padan, E. & M. Shilo, 1973. Cyanophages—viruses attacking bluegreen algae. *Bacteriol. Rev.* 37: 343-370.
- Padan, E., M. Shilo & N. Kislev, 1967. Isolation of “Cyanophages” from freshwater ponds and their interaction with *Plectonema boryanum*. *Virology* 32: 234-246.
- Pashos, J., I. Kagalou & L. Natsis, 1995. Lake Pamvotis Restoration and Management Study. Municipal Enterprise for the Lake of Ioannina. Ioannina, Greece.
- Perrow, M. R., B. Moss & J. Stansfield, 1994. Trophic interactions in a shallow lake following a reduction in nutrient loading - a long-term study. *Hydrobiologia* 276: 43-52.
- Putz, K. & J. Benndorf, 1998. The importance of pre-reservoirs for the control of eutrophication of reservoirs. *Wat. Sci. Tech.* 37: 317-324.
- Ramm, K. & V. Scheps, 1997. Phosphorus balance of a polytrophic shallow lake with the consideration of phosphorus release. *Hydrobiologia* 342: 43-53.
- Ratsep, R., B. Nihlgård, V. N. Bashkin, P. Blazka, B. Emmet, J. Harris & M. Kruk, 1994. Agricultural impacts in the northern temperate zone. In Moldan, B. & J. Cerný (eds.), *Biogeochemistry of small catchments: A Tool for Environmental Research*. John Wiley & Sons, New York: 361-382.
- Reckhow, K. H., 1980. Empirical lake models for phosphorus: development, applications, limitations and uncertainty. In Scavia, D. & A. Robertson (eds), *Perspectives in Lake Ecosystem Modeling*. Ann Arbor Science. Ann Arbor, USA.
- Redhead, K. & S. J. Wright, 1978. Isolation and properties of fungi that lyse blue-green algae. *Appl. Environ. Microbiol.* 35: 962-969.
- Redhead, K. & S. J. Wright, 1980. Lysis of the cyanobacterium *Anabaena flos-aquae* by antibiotic producing fungi. *J. Microbiol.* 119: 95-101.
- Reim, R. L., M. S. Shane & R. E. Cannon, 1974. The characterisation of a *Bacillus* capable of blue-green bactericidal activity. *Can. J. Microbiol.* 20: 981-986. 172.
- Ridge, I. & P. R. Barrett, 1992. Algal control with barley straw. *Aspects appl. Biol.* 29: 457-462.
- Ridge, I., J. Walters & M. Street, 1999. Algal growth by terrestrial leaf litter: a realistic tool? *Hydrobiologia* 395/396 (Dev. Hydrobiol. 136): 173-180.
- Robarts R. D., M. J. Waiser, O. Hadas, T. Zohary & S. Macintyre, 1998. Relaxation of phosphorus limitation due to typhooninduced mixing in two morphologically distinct basins of Lake Biwa, Japan. *Limnol. Oceanogr.* 43: 1023-1036.
- Romero, J. R., J. Imberger & A. Bartzokas, Diel spatial patterns of water quality in a eutrophic shallow lake during low winds. Submitted to *Aquatic Sciences*.
- Romero, J. R., R. Jellison & J. M. Melack, 1998. Stratification, vertical mixing, and upward ammonium flux in hypersaline Mono Lake, California. *Arch. Hydrobiol.* 142: 283-315.

- Rubenchik, L. I., O. I. Bershova & Z. P. Knizhnik, 1965. On the interrelationship of *Anabaena* with bacteria and actinomycetes. In: *Ecologia i physiologia sinezelenych vodorosleiy*. Nauka Moscow: 223-226.
- Rump, H. H. & H. Krist, 1992. *Laboratory Manual for the Examination of Water, Wastewater and Soil*. 2nd edn., 190 pp.
- Safferman, R. S. & M. Morris, 1962. Evaluation of natural products for algicidal properties. *Appl. Microbiol.* 10: 289-292.
- Safferman, R. S. & Morris, M. 1963. The antagonistic effects of actinomycetes on algae found in waste stabilisation ponds. *Bacteriol. Proc.* 14: A56.
- Sallal, A. K., 1994. Lysis of cyanobacteria with *Flexibacter* spp isolated from domestic sewage. *Microbios* 77: 57-67.
- Salton, M. R. J., 1955. Isolation of *Streptomyces* spp. capable of decomposing preparations of cell walls from various microorganisms and a comparison of their lytic activities with those of certain actinomycetes and myxobacteria. *J. Gen. Microbiol.* 12: 25-30.
- Scheffer, M., 1990. Multiplicity of stable states in freshwater systems. *Hydrobiologia* 200/201: 475-486.
- Scheffer, M., S. H. Hosper, M. L. Meijer, B. Moss & E. Jeppesen, 1993. Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends Ecol. Evol.* 8: 275-279.
- Schindler, D. W., 1975. Whole-lake eutrophication experiments with phosphorus, nitrogen, and carbon. *Int. ver. Theor. Angew. Limnol. Verh.* 19: 3221-3231.
- Schindler, D. W., 1977. The evolution of phosphorus limitation in lakes. *Science* 195: 260-262.
- Sheng, Y. P. & W. Lick, 1979. The transport and resuspension of sediments in a shallow lake. *J. Geophys. Res.* 84: 1809-1826.
- Shilo, M., 1970. Lysis of blue-green algae by *Myxobacter*. *J. Bacteriol.* 104: 453-461.
- Sigee, D. C., 1993. *Bacterial Plant Pathology: Cell and Molecular Aspects*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Silvey, J. K. & A. W. Roach, 1975. The taste and odour producing aquatic actinomycetes. *CRC Crit. Rev. environ. Control* March 1975: 233-273.
- Silvey, J. K., 1973. Determination of nuisance organisms. *Proceedings AWWA Water Quality Technology Conference*, December 1973.
- Somlyódy, L., 1982. Water-quality modelling: a comparison of transport oriented and ecology oriented approaches. *Ecol. Model.* 17: 183-207.
- Søndergaard, M., P. Kristensen & E. Jeppesen, 1992. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind exposed Lake Arresø, Denmark. *Hydrobiologia* 228: 91-99.

- Søndergaard, M., P. Kristensen & E. Jeppesen, 1993. Eight years of internal phosphorus loading and changes in the sediment phosphorus profile of Lake Søbygård, Denmark. *Hydrobiologia* 342/343: 319-325.
- Stewart, W. D. & M. J. Daft, 1977. Microbial pathogens of cyanophycean blooms. *Adv. aquatic Microbiology* 1: 177-219.
- Threlkeld, S. T., 1994. Benthic-pelagic interactions in shallow water columns: an experimentalist's perspective. *Hydrobiologia* 275/276: 293-300.
- Utermohl, H., 1958. Zur Vervollkommnung der quantitativen phytoplankton -methodik. *Mitt. int. ver. theor. angew. Limnol.* 9: 1-8.
- Vollenweider, R. A., 1968. Water management research. OECD Paris. DAS/CSI/68.27.
- Vollenweider, R. A., 1975. Input-output models, with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweiz. Z. Hydrol.* 37: 53-64.
- Vollenweider, R. A., 1976. Advances in defining critical load levels for phosphorus in lake eutrophication. *Mem. Inst. Ital. Idrobiol.* 33: 53-63.
- Wallace, B. B. & D. P. Hamilton, 1999. The effect of variations in irradiance on buoyancy regulation of *Microcystis aeruginosa*. *Limnol. Oceanogr.* 44: 273-281.
- Welch, E. B. & G. D. Sc hrieve, 1994. Alum treatment effectiveness and longevity in shallow lakes. *Hydrobiologia* 275/276: 423-431.
- Whyte, L. G., A. Maule, & D. R. Cullimore, 1985. Method for isolating cyanobacteria-lysing Streptomycetes from soil. *J. appl. Bact.* 58: 195-197.
- Wright, S. J. & R. J. Thompson, 1985. *Bacillus volatiles* antagonise cyanobacteria. *FEMS Microbiol. Lett.* 30: 263-267.
- Wright, S. J., C. J. Linton, R. A. Edwards & E. Drury, 1991. Isoamyl alcohol (3-methyl-1-butanol), a volatile anticyanobacterial and phytotoxic product of some *Bacillus* spp. *Lett. appl. Microbiol.* 13: 130-132.
- Wright, S. J., K. Redhead & H. Maudsley, 1981. *Acanthamoeba castellanii*, a predator of cyanobacteria. *J. Gen. Microbiol.* 125: 293-300.
- Yamamoto, Y. & K. Suzuki, 1990. Distribution and algal-lysing activity of fruiting myxobacteria in lake Suwa. *J. Phycol.* 26: 457-462.
- Yamamoto, Y., 1981. Observations on the occurrence of microbial agents which cause lysis of blue-green algae in Lake Kasumigaura. *Jpn. J. Limnol.* 42: 20-27.

제 2 절

-
- 미소유용생물 증식과 활성증대를 위한 생물
- 서식처 개발 및 적용성 평가
-

제 2 절 미소유용생물 증식과 활성증대를 위한 생물 서식처 개발 및 적용성 평가

1. 농업용 저수지의 생태다양성 훼손과 수질변화

가. 농업용 저수지의 생태다양성 훼손과 수질변화

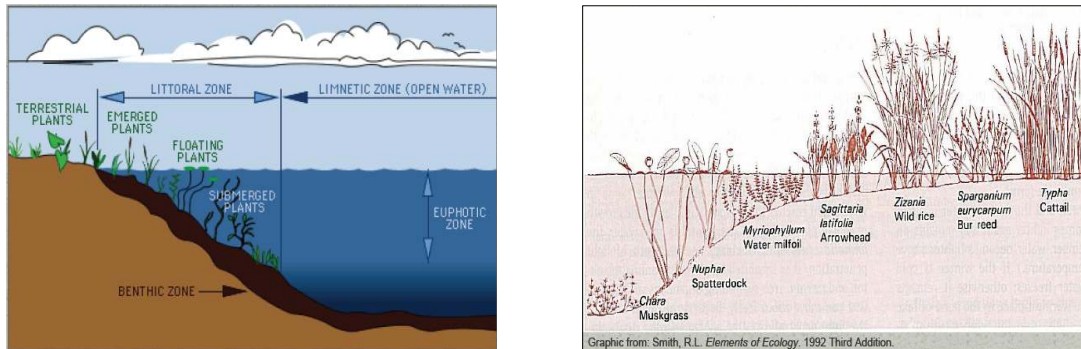
(1) 농업용저수지의 생태다양성 훼손

저수지(호소)는 수변전이대(land-water interface)와 개방수역(open water)으로 수역을 구분할 수 있으며, 수변전이대는 대략 바닥까지 빛이 도달할 수 있는 수심 2 m 내외의 지역으로 수중생태계의 가장 중요한 생물서식지로 수초대(littoral zone)가 형성되고 저서 동물과 어류의 중요 서식지가 되고 있다. 따라서 육상부와 경계를 이루는 지역으로 곤충, 양서류, 새 등의 육상생태계와 연결지역이며 수변식생이 유지될 수 있는 구간으로 볼 수 있다[그림3.2.1].

그러나 농업용저수지는 이러한 수변구역이 훼손되어서 호소생태계의 유지가 매우 어려운 문제점을 안고 있다. 농업용저수지는 대부분 산지를 가로막아 축조되어 수변구역의 경우 경사가 심한 지형적 특성과 관개기에 용수이용량이 많아 시기에 따른 수위 변화가 심하다. 따라서 갈수기에 농업용저수지의 수변이 건조 상태로 노출되어 수생식생이 파괴되고 육상초본식물이 자라게 되나 만수시에는 급격히 수위가 높아져 노출되었던 수변이 물에 잠겨 육상초본식물은 사멸하게 된다. 농업용저수지는 이러한 극심한 수위변화가 잦아 안정된 수변호생태계가 유지되지 못하고 황폐화하게 된다. 이러한 경우는 농업용저수지는 물론 국내 대담의 경우에서도 수위변동이 큰 소양호, 파로호 등에서 수변 수초대가 형성되지 못하여 수변 호소생태계가 파괴되고 있는 것으로 알려져 있다[그림 3.2.2].

(2) 생태다양성과 수질

수변생태계의 중요성은 호소의 수질관리와 연관하여 파악할 수 있다. 호소생태계에 유입된 오염물질은 일차적으로 식물플랑크톤이나 미생물 등에 의하여 일차이용이 되고, 순차적으로 증식된 식물플랑크톤은 동물플랑크톤, 작은 어류, 대형어류 등의 먹이 연쇄를 거쳐 먹이로 이용된다. 이러한 과정에서 수변식생대는 수생생물의 중요 서식처 역할을 담당하게 된다. 얕은 호소에서는 다양한 식물이 생육하는데 이러한 식물들은 대형수생식물(macrophytes)로 통칭되고 있다. 대형수생식물은 습지, 얕은 호소, 하천 등에서 많이 관찰되고 있으며 수생생태계에 있어서 지화학적, 생태학적으로 중요한 역할을 담당하고 있다. 수변의 식생대는 어류의 산란처 및 피난처, 먹이 공간 등으로 이용되고 있으며, 특히 동물성플랑크톤의 경우 어류 포식에 대한 피난처로 수생식물대를 이용하고 있어 중요성이 강조되고 있다.



[그림 3.2.1] 수변생태계 모식도

출처 : 인터넷자료, ecology of lake littoral zones, Joe Bischoff, Wenck Associates, Inc.



[그림 3.2.2] 농업용저수지의 저수위 수변 노출 모습

(3) 생태다양성 훼손에 따른 농업용저수지의 수질악화

수변식생대는 생물학적 중요성 이외에도 수질개선에 있어서 역할이 강조되고 있는데 Schreiter(1998)는 양어장연못에서 대형수생식물이 풍부 할수록 식물성플랑크톤의 밀도가 감소 되어 탁도가 개선됨을 보고하고 있으며, 이후 많은 보고에서도 대형수생식물의 분포가 호소 탁도 개선에 효과 있음을 보고하고 있다(Jieppesen *et al.*, 1990, Canfield *et al.*, 1984). 실제 농업용저수지의 경우 수변식생대가 조성되지 못한 경우가 많아 생태다양성이 훼손되고, 강우기 이후 녹조현상이 빈발하며 용존산소고갈에 따라 어류가 폐사하는 등의 많은 문제점을 안고 있다.

나. 연구목적

(1) 농업용저수지의 생태다양성 회복 필요성

농업용저수지의 수질문제에 있어서 주요문제는 중금속 등의 오염물질에 의한 것이 아니라 질소, 인 등의 영양염류문제라는 것을 인식할 때에는 보다 합리적인 수질관리수단 마련이 필요

하다. 이제까지의 농업용저수지에 있어서 수질보전은 질소, 인 등의 수질항목 관리를 통한 수질 개선 및 보전활동이 이루어져 왔으며 실제 한국농어촌공사에서 매년 실시하는 농업용저수지 측정망 조사에서 중금속 등의 오염사례는 없는 것으로 조사되고 있다.

수질개선을 위해서는 근본적인 오염물질저감수단이 강구되어야 하나 농업용저수지의 경우 오염물질이 농업요소인 유효성분이라는 관점에서 접근할 경우 생태적으로 건강한 수질이라면 문제가 없지 않을까하는 생각을 하게 된다. 실제로 농업용저수지의 수질관리는 수질기준을 고려한 관리가 이루어지고 있으나 실제 현장에서는 부영양화로 인한 녹조현상이 주요판단 기준이 되고 있는 실정이다. 부영양화를 수생생태계 관점에서 고찰할 경우 수생생태계 다양성의 훼손이 문제가 되는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 수생생태계의 다양성을 회복할 수 있다면 다소 영양염류의 농도가 높더라도 호소수질의 투명도를 개선하여 호소건강성을 회복할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 농업용저수지의 생태다양성 회복을 위한 방안 모색

정부에서는 농업용수수질개선사업의 필요성을 인식하고 농업용저수지의 수질개선대상지구로 수질오염이 심각한 저수지를 선정하고 연차별계획을 수립하여 사업을 진행하고 있다. 사업내용 중 수질개선 방안으로는 유역오염물질 유입대책과 호내대책으로 구분하여 유역관리는 환경기초 시설을 이용토록하고 있으며, 호내대책으로는 주로 오염물질의 유입저감을 목표로 하는 방법으로 인공습지, 침강지, 준설 등의 방법을 주로 채택하고 있다. 이러한 방법들은 많은 예산을 수반하며 실제 농림수산식품부의 사업예산 역시 지구당 30억 원 정도 소요되는 것으로 나타나고 있다.

본 연구에서는 농업용저수지의 수질개선기법으로 본과제의 최종목표인 생물조절(먹이연쇄)을 이용한 수질개선기법의 개발 목표중 먹이연쇄의 일차소비자와 분해자 등의 미소유용생물을 위한 서식처를 조성하여 호소생태계의 다양성을 회복할 경우 호소투명도개선 등 수질개선이 가능할 것으로 판단되어 수생식물대를 포함하는 인공서식처를 조성하고자 하였다. 미소유용생물 서식처는 미생물의 부착매질로 이용될 수 있으며, 동물플랑크톤의 어류 먹이활동에 대한 피난처와 서식지로도 이용될 수 있어 호소생태계의 생물다양성회복 및 식물플랑크톤에 대한 섭식활동으로 조류발생을 막아 호소투명도를 개선하는 등의 수질보전 방안으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

이러한 생물먹이연쇄를 고려한 수질보전 기법은 초기여건의 조성만으로도 많은 효과를 거둘 수 있을 것으로 기대된다.

(3) 인공서식지 개발

본 연구에서는 호소에 서식하는 미소유용생물의 서식처개발을 목표로 인공식물섬을 이용한 서식처 개발 및 수변 수초대의 식생유지가 어려움에 따라 다양한 형태의 인공 수변수초대, 그물을 이용한 인공서식지 등을 조성하여 미생물 활성 및 동식물플랑크톤, 수질조사 등을 실시

하여 효과를 검토하였다. 또한 본 실험에 앞서 메소코즘을 이용하여 현장적용에 앞서 효과를 검토하였다.

2. 미소유용생물과 서식처조성 사례

가. 수질과 미소유용생물

우리나라 농업용저수지의 수질문제는 부영양화에 따른 녹조발생과 서식처 훼손으로 인한 생물자원 및 다양성의 감소가 가장 큰 현안사항이다.

수중생태계에는 먹이피라미드의 하부를 구성하는 많은 미소생물이 서식하고 있다. 특히 동물플랑크톤의 섭식활동은 부유미소생물간의 에너지 흐름의 주요한 역할을 담당하고 있으며 (Keckeis *et al.*, 2003), 식물플랑크톤과 박테리아 및 원생동물들을 섭식함으로써 먹이사슬 상위 단계인 어류로 에너지를 전달하는 역할을 한다(Hwang *et al.*, 1999). 높은 여과 효율을 가진 *Daphnia*와 같은 대형동물플랑크톤의 밀도증가는 식물플랑크톤의 총 생물량 감소 및 종구성을 변화시켜 투명도를 증가시키며(Brook, 1985; Gawler *et al.*, 1988), 봄 기간 동안에 일시적인 청수현상을 발생시킨다(Lampert *et al.*, 1986; Sommer *et al.*, 1986; Vanni and Temte, 1990; Kim *et al.*, 2003). 동물플랑크톤의 선택적 섭식에 의한 식물플랑크톤 종구성변화 (Thys *et al.*, 2003), 수체의 수리학적 특성(Keckeis *et al.*, 2003), 영양상태 (Heath *et al.*, 2003), 먹이망을 구성하는 요소들(Reynolds, 1994)에 따라 동물플랑크톤의 역할 정도의 차이가 나타나기 때문에 먹이망 관련하여 다양한 연구는 수질과 생태계 보전을 위해 활용될 수 있는 양질의 자료를 제공할 수 있다.

나. 미소유용생물

호소에는 여러 종류의 부유생물이 존재한다. 부유생물은 플랑크톤이라고 부르기도 하는데, 이는 그리스어로 떠돌아다니는 생물이란 뜻이다. 부유생물에는 운동성이 전혀 없이 전적으로 떠다니는 생물과 어느 정도 유연능력을 조금 가지고 있는 생물로 구분된다. 그러나 헤엄쳐 다니는 생물이더라도 어류처럼 물의 흐름에 역류하며 헤엄을 칠 능력이 없는 생물을 플랑크톤으로 간주한다. 부유생물은 대부분 크기는 수 μm ~수 mm 정도이다. 부유생물은 다시 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 및 세균 등으로 구분할 수 있다.

식물플랑크톤은 호소생태계의 1차 생산자로 빛과 호소수 중의 이산화탄소를 이용하여 광합성을 하고 호소생태계의 에너지순환에 이용된다. 식물플랑크톤에는 녹조류, 남조류, 규조류 등이 있다.

동물플랑크톤은 200~2,000 μm 의 크기로 요각류와 지각류 등의 갑각류가 가장 흔한 생물이다. 이들은 주로 식물플랑크톤을 먹고 살며 낮에는 빛이 없는 깊은 곳으로 이동하고 밤에 먹이

를 찾아 표면으로 이동하는 행동을 통하여 어류에 의한 포식을 피한다. 또한 수평이동을 통하여 어류의 포식을 피하기도 하는데 수변의 수생식물대를 서식지로 개방수역과 식생지역을 오가는 수평이동을 실시한다.

이러한 여러 부유생물 중 식물플랑크톤은 호소 부영양화에 따라 번성하는 종으로 본 연구에서의 유용생물로 정의하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 식물플랑크톤을 섭식할 수 있는 동물플랑크톤과 호소생태계내의 최종분해자인 미생물이 호소 투명도를 개선할 수 있는 종으로 판단하고 인공서식처의 효과를 검토하기 위하여 이들 종을 미소유용생물 규정하고 효과를 검토하였다.

다. 미소유용생물의 수질정화 기작 및 서식처

호소생태계의 주요개념중 하나는 호소생태계 내에서의 먹이연쇄이다. 호소내의 먹이연쇄는 주로 수초나 식물플랑크톤 등의 생산자와 이를 먹는 1차 소비자인 동물플랑크톤, 동물플랑크톤을 먹는 2차 소비자인 소형어류, 소형어류를 먹는 육식어류의 3차 소비자, 최종적으로 분해자인 미생물 등으로 이루어진다. 이것은 호소생태계를 매우 단순화한 것으로 실제 여기에 수질, 빛, 온도 등이 더해져 매우 복잡하다.

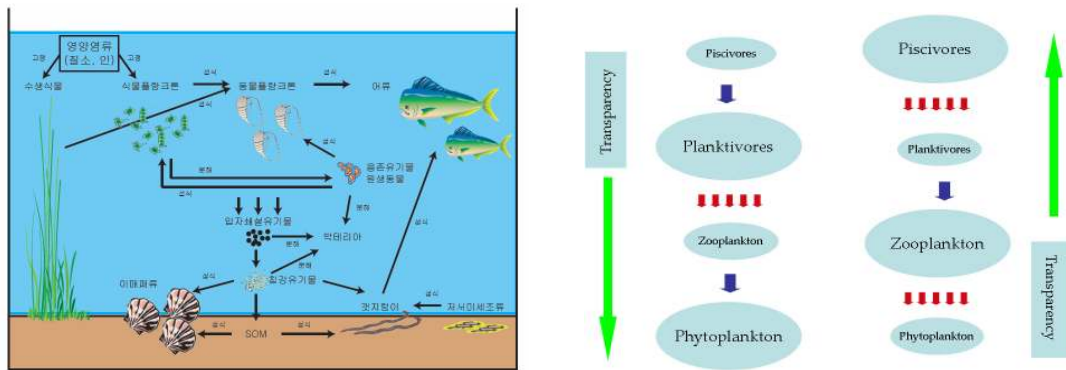
청정한 호소는 항상 수질을 정상으로 유지하려고 하나 지속적으로 유입되는 영양염류의 양이 증가함에 따라 부영양화가 진행되고 식물플랑크톤의 양이 증가하여 점차 호소수의 투명도를 감소시키게 된다. 이러한 조건하에서는 식물플랑크톤의 양이 지속적으로 증가하여 다른 생물에 대한 호소서식환경을 악화시키고 생물다양성이 낮은 호소생태계가 형성된다. 일단 부영양화 된 호소는 외부에서 유입되는 영양염류의 양을 감소시키더라도 회복속도가 매우 느리며 생물 다양성의 회복이 어려우며 처음의 청정한 상태로 돌아가지 못하고 호소의 부영양화 역시 개선되지 못한다.

이러한 상태의 호소는 생태계의 다양성을 인위적으로 조성하여 생물다양성을 높임으로서 식물플랑크톤의 양을 조절할 수 있다. 동물플랑크톤은 식물플랑크톤을 섭식하는 1차 소비자로서 동물플랑크톤의 양을 증가시킬 경우 식물플랑크톤의 양을 감소시켜 호소의 혼탁도를 개선할 수 있다. 동물플랑크톤을 증가시키는 방법으로는 전통적으로 동물플랑크톤에 대한 어류의 포식압을 줄일 경우 동물플랑크톤 특히 *Daphnia* 등의 생체량을 증가시킬 수 있으며, 차례로 동물플랑크톤에 의한 식물플랑크톤에 대한 포식압을 높여 투명도를 개선할 수 있다(LArs-Anders *et al.*, 1998) [그림3.2.3]. 어류를 조절하여 동물플랑크톤의 포식압을 감소시키는 방법은 어류에 의한 저니 교란 감소, 식물플랑크톤 감소 등으로 투명도 개선 등에 따라 수초의 생육조건 개선으로 이어지게 된다. 수초는 영양염류의 흡수를 통한 영양염류를 저감시키는 효과 외에 식물플랑크톤에 대한 타감 작용이나 저니를 피복하여 저니의 재현탁을 방지하고 투명도를 증가시키게 된다. 또한 동물플랑크톤이나 저서생물의 서식피난장소를 제공하고 어류의 포식에 의한 감소를 줄일 수 있기 때문에 식물플랑크톤의 증가를 억제하게 된다.

그러나 이러한 수질정화기법은 일반적으로 인식되고 있는 부영양화를 일으키는 질소나 인의 삭감에는 그다지 관계가 높지 않다. 네덜란드에서는 호소생태계관리 기법을 실시한 후에 오히려

려 인의 농도가 약간 증가한 예가 있는데, 이 경우에서도 식물플랑크톤의 양이 증가하지 않고 투명도는 유지되었다.

따라서 생물조절을 이용하여 호소수질을 관리하고자 하는 기법은 동물플랑크톤에 대한 포식 어류의 개체수 감소와 수초대의 증가가 필수적으로 고려되어야 한다.



[그림 3.2.3] 호소에서의 물질순환 및 먹이연쇄 및 생물조절 개념도

라. 생물서식처 조성사례

호소수질관리 및 개선을 위하여 동물플랑크톤의 서식지 중요성이 대두됨에 따라 인공서식지 개발에 대한 다양한 연구가 진행되어 영국에서는 Italian comb라는 나일론재질의 brush 모양의 인공침수식물 제품을 이용하여 부착생물 및 동물플랑크톤의 변화를 검토하였으며 일본과 유럽에서는 인공식물섬을 이용한 다양한 연구가 진행되었다.

(1) 인공침수식물

영국 Norfolk Broads 호소는 농업배수 및 각종 오수의 유입으로 심각하게 오염되어 퇴적층은 과영양 상태의 black-mud였으며, 때때로 녹조 bloom이 발생하는 등 오염이 심한 호소이다. 이러한 오염을 해결하고자 호소위원회는 각종 수질개선대책을 시도하였으며, 준설을 포함하는 다양한 혁신적인 기법이 시도되었다.

그중 인공식물을 이용하여 동물플랑크톤과 저서생물에게 서식처를 제공하고 먹이사슬을 이용하는 수질개선기법이 시도되었다.

실험은 호소내 3개의 메소코즘을 설치하여 실시되었다. 메소코즘은 각각 물고기를 제거하고 인공식물체 투여구, 물고기만 투여구, 물고기와 인공식물섬이 없는 대조구로 진행되었다. 인공식물은 직경 20 cm 정도로 약 10 cm 길이의 나일론 털로 브러쉬 모양으로 제작되었다.

진행결과 인공식물체 투여구는 1차년도에 인공식물체에 부착생물이 급속히 성장하였으며, 생물다양성이 증가하고 수중의 영양염류농도가 저하하는 효과를 보였으나, 2차년 이후 인공식물체는 스폰지 형태로 변하였으며 서식지로서의 기능이 저하되어 생물다양성 및 수질정화효과는

감소하였다. 물고기 단독투여구는 동물플랑크톤의 섭식으로 인하여 조류가 번성하였으며, 물고기와 인공식물체가 없는 구에서는 남조류가 번성하고 동물플랑크톤의 계수는 어려웠다.

결론적으로 인공식물체를 투여하여 초기에는 생물 다양성의 증가와 부착생물로 인하여 급속한 수질정화 효과를 거둘 수 있었으며, 시간이 경과함에 따라 그 효과는 감소하더라도 서식처의 역할을 지속할 수 있었다.

(2) 인공식물섬

(가) 가스미가우라

일본의 가스미가우라 호소의 츠찌우라 항 근처에 경관개선 및 서식처제공, 수질정화 및 해안보호 등을 목적으로 길이 92 m, 폭 9 m의 인공식물섬을 설치하고 효과를 검토하였다. 검토결과 인공식물섬은 어류 및 새우류 등이 서식처로 활용성이 높았으며, 전체생물량은 대조구에 비하여 2.6배 높은 것으로 조사되었다. 또한 인공식물섬 하부는 생물다양성이 높아 수질의 관점에서 좋은 조건을 제공하는 것으로 조사되었다.

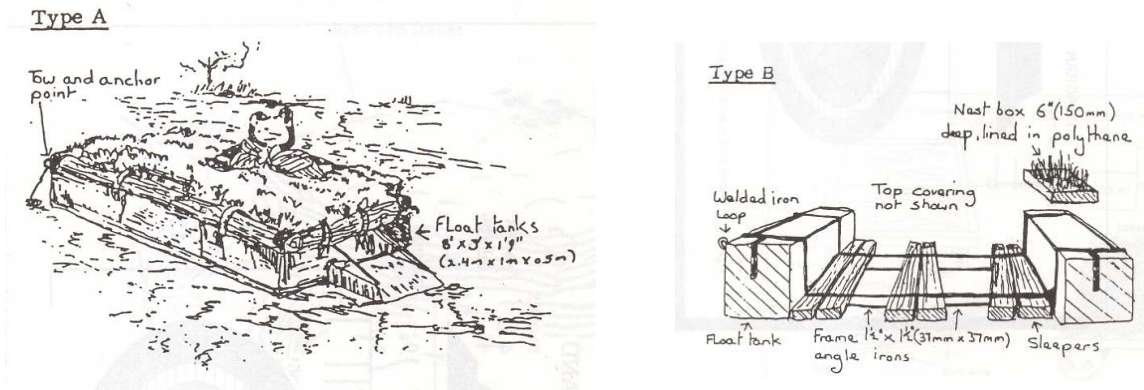
(나) 국내사례

국내에서는 서식처의 개발보다는 직접적인 수질정화의 목적으로 인공식물섬이 연구되었다. 농림부와 한국농어촌공사는 저수지수질개선의 목적으로 인공식물섬을 연구하였으며(2004), 권(1999)은 소규모 수조에 인공식물섬을 설치하여 수질변화, 생태학적 변화 등에 관한 연구를 수행한 바 있다. 인공식물섬은 부채와 매질을 이용하여 식물을 식재하고 물에 뜨도록 하여 식물 흡수에 의한 수질정화효과를 기대하고 이용하였으나 현재는 경관성과 조류의 쉼터, 어류의 산란 시설 등으로 각광을 받고 있다.

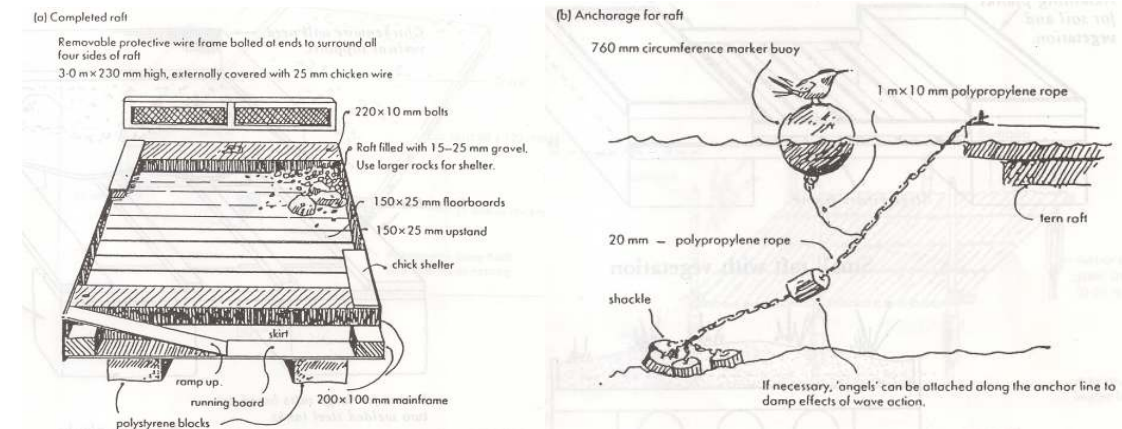
(다) 유럽사례

유럽의 경우 독일을 중심으로 수환경개선 등의 목적보다는 야생조류의 산란장소를 제공하는 것을 주목적으로 인공식물섬을 설치했다. 따라서 일본이나 한국에서의 경우와 같이 다양한 식물섬 보다는 단순하고 투박한 형태의 식물섬이 많은 것이 특징이다.

[그림 3.2.4]의 Type A는 드럼통과 같은 부채를 조합해서, 위에 토양과 식생을 엮은 모습이며, Type B는 침목 같은 모양의 둥글고 두꺼운 것을 부채로 해서 조합하고, 식물을 식재한 통은 엮은 부도의 모습이다. [그림 3.2.5]에서는 새끼와 보호새의 승강용 계단이 붙은 부도와 앵커의 구조를 볼 수 있다.



[그림 3.2.4] 유럽의 인공식물섬(Waterways and Wetlands. The British Trust for Conservation Volunteers Ltd.: 106~127, 1976. A type)



[그림 3.2.5] 새 보금자리 조성용 인공섬

3. 미소유용생물 서식처 개발

가. 인공서식처 개발 모티브

우리나라 수자원의 가장 큰 특징 중의 하나는 강우기와 비강우기가 뚜렷하여 수자원을 확보하기 위하여 많은 댐과 저수지를 축조하여 9개의 다목적 댐과 10개의 발전용 댐, 15개의 생활/공업용수 댐 그리고 18,000여개의 농업용저수지가 있다. 이밖에도 5개의 하구둑이 조성되어 있다. 이중 대부분의 농업용저수지는 중산간지에 위치하고 있고 편중된 강우로 인하여 만수위와 저수위의 차이가 크며 이러한 현상은 갈수기에 호소수변구역을 나대지로 그대로 드러나게 하여 호소수변 생태계를 크게 훼손하고 있다. 이는 자연호소가 수위변동이 크지 않아 식물이나 동물들이 살아갈 수 있는 수변생태계가 잘 발달한 반면 인공적으로 조성된 호소의 경우 그 조성목

적에 따른 이용으로 수위차가 커서 육상생태계는 물론 수상 생태계도 취약할 수밖에 없다.

호수내의 수생식물 서식지(수초대)는 수중생태계와 육상생태계를 연결하는 추이대의 역할을 하며 생물상이 다양하고 생산성이 높은 곳(Wetzel, 2001)이므로 호소 내에 이러한 추이대나 유사 수생식물대를 조성하여 주면 생태다양성을 높이고 수질개선에도 도움을 줄 수 있다. 식물플랑크톤 생물량과 이로 인한 호소의 혼탁도는 침수식물이 없는 호소보다는 침수수생식물이 있는 호소에서 더 낮아지는 것으로 알려져 있으며, 침수식물이 성장하는 저수지에 대한 조사에서 침수식물의 생물량이 늘어감에 Chl-a, T-P의 비율이 낮아진다는(Joo, sangbae *et al.*, 2007) 보고도 있다.

따라서 본 연구에서는 식물플랑크톤을 제어할 수 있도록 동물플랑크톤의 생물량을 높일 수 있는 서식지를 개발하고자 하였다.

나. 인공식물섬

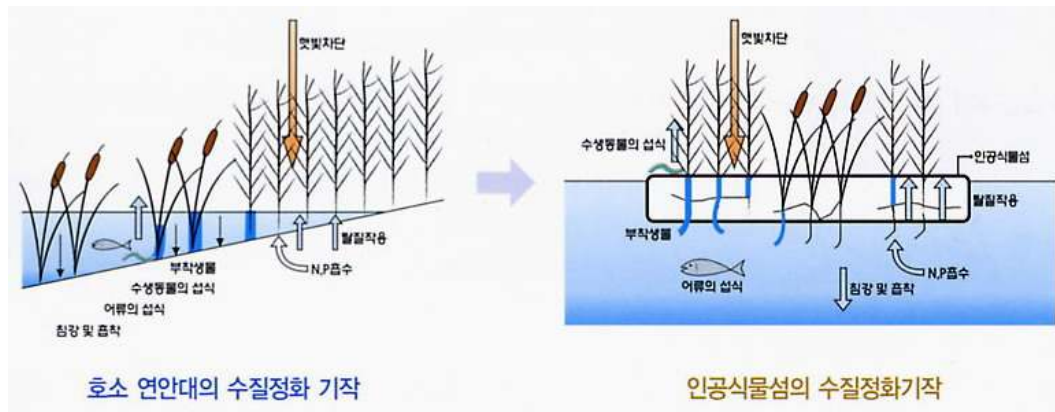
(1) 인공식물섬 개요

(가) 인공식물섬이란

수생식물을 이용한 인공습지는 물리, 화학적으로 수질을 향상시키는 한편 고급어류와 생물들에게 많은 서식처를 제공하고 있어 호소 수질정화공법으로 많은 이점을 가지고 있으나, 호소연안의 새로운 습지형성은 부지확보 및 경제적으로 많은 어려움이 있으며, 특히 조경과 인공적인 관개시스템이 필요할 경우 더 많은 비용이 소요된다. 따라서 미국, 일본 등의 생물학자와 기술자들은 부체(浮體, Floating platforms)를 건조하여 수생식물을 식재, 수표면에서 습지의 역할을 하는 방안을 고안하였다. 이 구조물을 미국에서는 Floating islands, 독일은 Schwimmkampen, 그리고 일본에서는 Ukishima라 부른다(Sartoris *et al.*, 1996). 이 공법은 수질개선효과 이외에 새와 어류의 서식처, 호수의 경관개선, 호안의 침식방지 등의 부가적인 효과가 있다.

인공식물섬은 소형호수나 대형인공호수에 적용시킬 수 있으며, 다년생 수생식물을 토양에 식재하지 않고 식생기반체가 충전된 부력을 가진 재질로 만들어진 부체 위에 식물을 착생시키는 생태공학기술이다. 인공식물섬은 수질개선은 물론 호반침식의 방지 및 보호기능을 할 수 있으며, 각종 수생생물의 서식공간을 창출함으로써 수표면 위에 위치한 최소 규모의 Bio-tope의 기능을 할 수 있다.

오염된 호소나 하천의 수질개선을 위한 자연정화시설로서 호소내 직접 적용이 가능한 인공식물섬은 식물성장에 따른 호소내 질소, 인 등의 영양염류의 직접 흡수와 더불어 유기물 분해 세균의 분해 매질 및 산소제공, 수서곤충 및 치어들의 은신처, 조류 등의 휴식처 역할을 하는 등 많은 순기능을 가지고 있다고 알려져 있으나, 인공식물섬의 호소내 수질정화효과를 정량적으로 계산하는 것이 어려운 실정이다[그림 3.2.6].



[그림 3.2.6] 호소연안대와 인공식물섬 수질정화기작

인공식물섬은 부유물, 부채, 식생기반재, 수생식물, 계류장치, 수상방책, 부교 등으로 이루어진다. 특히, 식생기반재는 식물뿌리와 같이 미생물의 매질로 이용되고 주변의 많은 영양염류를 농축하여 식물에게 영양분을 제공할 뿐만 아니라, 식물의 뿌리는 통기조직을 통해 산소를 식물뿌리로 전달시켜 미생물의 유기물 분해를 촉진시킨다. 또한 식생기반재에 부착한 많은 세균은 수체 내 유기물 분해와 빠른 물질순환을 일으키며 또한 동물플랑크톤의 먹이로 이용될 수 있다.

(나) 인공식물섬 연구사례

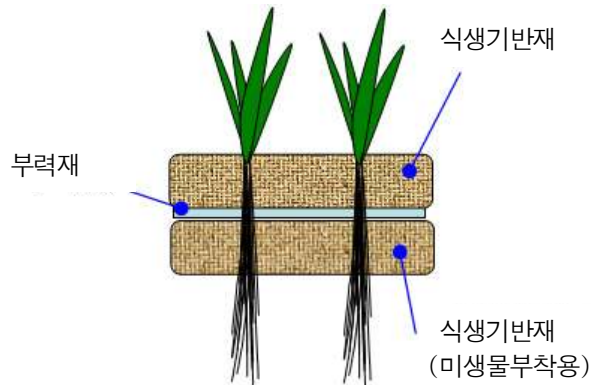
국내에서는 농업기반공사(1998)가 인공부도에 의한 수질정화공법을 “인공식물섬”이라 용어를 정의하고 관개용 저수지의 수질개선 시험사업의 목적으로 설치하여 운영하고 있으며, 권(1999)은 소규모 수조에 인공식물섬을 설치하여 수질변화, 생태학적 변화 등에 관한 연구를 수행한 바 있다. 인공적으로 조성된 식물섬은 식물이 물에 잠기지 않고 뜨게 하는 부채와 식물의 뿌리와 지하경을 고정하는 기질로서 구성되며 자연상의 floating mat와 동일한 기능을 수행할 수 있다. 현재 인공식물섬은 물새와 어족의 생식환경 창출과 제공, 수변경관향상에 기여, 수질정화 효과 기대 등과 파랑에 의한 호안침식의 방지, 수인성전염병 예방 등의 효용성을 지닌다는 점에서 많은 각광을 받고 있다(김 등, 2001).

수중 생태계에서 세균은 유기물의 분해 및 재합성 기능을 수행하여 물질순환에 기여하며, 용존 영양물질을 생체 내로 흡수하여 영양단계가 더 높은 생물에게 에너지를 공급하는 중요한 역할을 담당하고 있다(Rheineimer, 1985; Ahn *et al.*, 1995). 따라서 환경의 변화가 미생물의 생태계에 미치는 영향은 생태학적으로 매우 중요하고, 그러한 주위 환경의 상태를 나타내는 간접적인 지표로 환경의 변화에 대해 민감하게 반응하는 세균의 분포와 활성도가 이용되고 있다(Atlas and Bartha, 1986). 이러한 미생물의 체외활성도에 대한 연구는 소양호에서의 유기인산염 분해율에 관한 연구(최, 1992), 소양호의 세균 개체수와 활성도 변화에 관한 연구(최, 1996), 소양호에서 섬유소 기질에 부착한 미생물의 유기물 분해 활성도 연구(최 등, 1995) 등이 있다.

(2) 이중 식생기반 인공식물섬

대부분의 인공식물섬은 식물, 식생기반재, HDPE망, 부력재, 계류장치, 부표, 인공어초 등으로 구성 된다. 구성재중 식생기반재와 부력재가 인공식물섬의 주요부분으로 식생을 유지하고 부력을 담당하게 된다. 기존 인공식물섬은 식생기반재의 경우 직접적인 물과의 접촉이 적었으며 대부분 식물뿌리의 역할과 그에 부착한 미생물의 효과에 의존하였다.

따라서 본 연구에서 사용한 이중 식생기반 인공식물섬은 비표면적이 넓은 식생기반재를 수중에 설치할 경우 미생물의 부착량 및 동물성플랑크톤의 서식지를 증가시킬 수 있을 것으로 보고 식생기반재를 상하로 설치하고 중간에 부력재를 설치하는 샌드위치 형태로 제작하였다. 식생기반재의 경우 하부에 세로로 부착시킬 수 있으나 수류의 영향을 크게 받아 안정성 문제가 발생되므로 평면 샌드위치형으로 부착하였다.

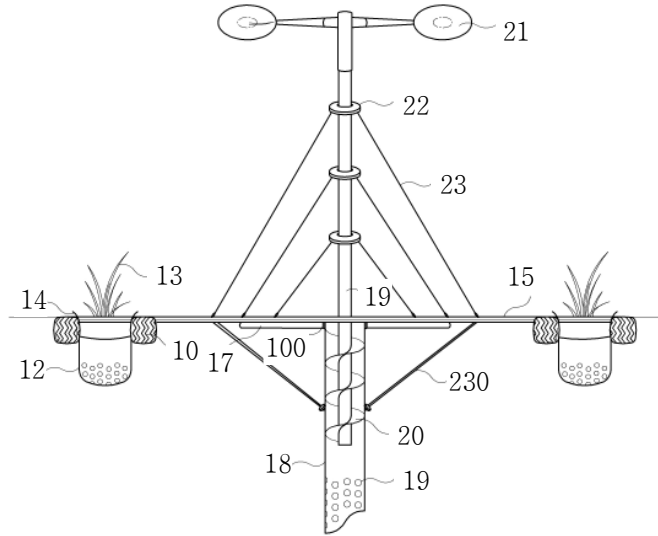


[그림 3.2.7] 이중 식생기반 인공식물섬 개념도

(3) 교반장치이용 인공식물섬

물순환장치는 물을 강제로 순환시켜 저층의 물을 상부표층으로 확산 시켜 대기와 접촉하여 용존산소 농도를 높이고 다시 하층으로 이동함으로써 수중의 산소조건을 개선하는 등의 효과를 거둘 수 있다. 또한 물순환은 파동 형성 및 수중 pH 개선 등으로 남조의 성장을 억제하는 효과를 보일 수 있다.

이러한 물순환장치의 장점을 인공식물섬과 결합하여 그 효과를 검토하고자 하였다. 제품은 기존에 개발된 제품을 사용 하였다. 장치는 풍력교반기와 식생기반 및 부력재의 원형부력제로 이루어져 있으며, 별도의 식생기반은 없이 원통형의 부력재에 자갈을 넣고 2년생 정도의 꽃창포를 넣어 조성하였다.

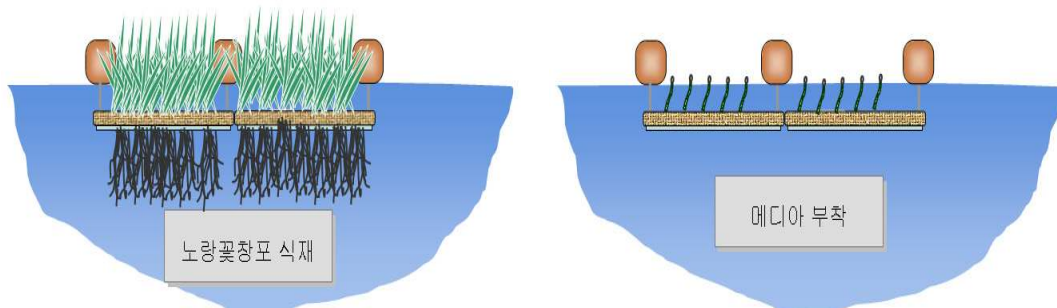


[그림 3.2.8] 교반장치이용 인공식물섬 개념도

(4) 침수 인공식물섬

보통의 인공식물섬은 식물중 뿌리만이 수중에 있고 햇빛이 가리어 있어 생물 다양성을 높이는 데는 다소 부족한 면이 있다. 일반적으로 수변의 수생식물 수초대에서의 생물 다양성이 높은 점에 착안하여 인공식물섬을 수중에 설치하고 식재식물의 줄기 등이 일부 수중에 놓이도록 하여 동물플랑크톤 및 어류를 위한 서식처와 산란장을 제공하며 생물의 다양성을 증진시키기 위해 수면하에 부유하는 습지형태의 침수형 식물섬을 설치하였다. 식생이 수중에 설치되어있는 인공식물섬의 상부에 동물성플랑크톤의 서식처 조성 및 어류의 산란지를 제공하고, 어류의 산란 및 부화시 어란과 치어의 침강에 의한 손실을 막을 수도 있을 것으로 기대되었다.

침수 인공식물섬은 노랑꽃창포를 식재한 구와 식물체의 역할을 대신 할 수 있도록 부력재를 연결한 미디어를 설치한 2가지 형태로 제작되어 수심 0.2~0.3 m 위치에 설치되었다.



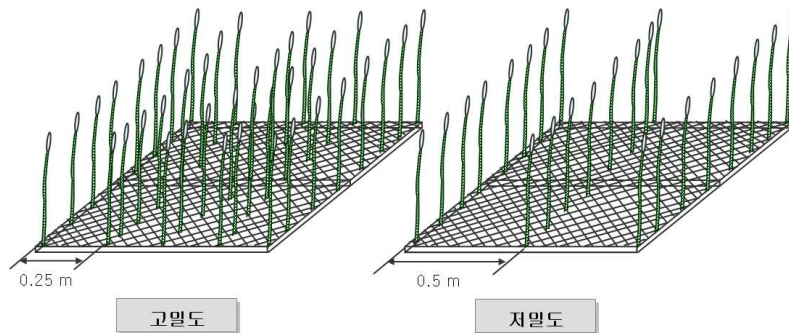
[그림 3.2.9] 침수 인공식물섬 개념도

다. 수변식생대 대체 수변 인공 수초대

(1) 침수형 호안수초대

농업용저수지의 경우 홍수기와 갈수기의 수위차가 크므로 수변식생대가 정착되지 못하고 식생이 없는 상태로 유지되게 되며 빈약한 식생으로 호소생태계 역시 단순화하게 된다. 따라서 갈수기에도 인공 수초대의 효과를 얻고자 갈수기 최저 수위부근에 침수형 호안수초대를 설치하였다. 이러한 침수형 호안수초대는 저수지 수위와 관계없이 동물플랑크톤 등의 서식처 제공이 가능할 것으로 호안에 안정적인 인공 수초대를 조성하여 동물성플랑크톤의 서식처 제공 및 어류의 산란처로 이용 될 수 있다.

침수형 호안수초대는 자연수초의 형태를 유사하게 연출하기 위해 상부에서 추를 이용해 아래로 늘어뜨리는 형태가 아닌 하부 고정 후 상부에 부력재를 이용한 방식으로 제작하였으며, 인공수초를 고밀도(부착 미디어수: 81개 m^{-2})와 저밀도(부착 미디어수: 27개 m^{-2})로 조성하여 설치하였다[그림 3.2.10].

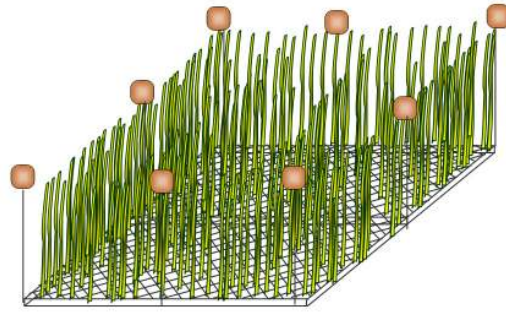


[그림 3.2.10] 침수형 호안수초대 개념도

(2) 부유형 호안수초대

농업용저수지의 경우 홍수기와 갈수기의 수위차가 크므로 수변식생대가 정착 되지 못하고 식생이 없는 상태로 유지되게 되며 빈약한 식생으로 호소생태계 역시 단순화 하게 된다. 따라서 갈수기에도 수변 수초대와 같은 인공 수초대를 수심의 변화에 문제가 없도록 설치하여 자연 수초대의 효과를 얻고자 하였다. 이러한 부유형 호안수초대는 저수지 수위와 관계없이 호안에 안정적인 인공 수초대를 조성하여 동물플랑크톤 등의 서식처 제공 및 어류의 산란처로 조성 이용 될 수 있다.

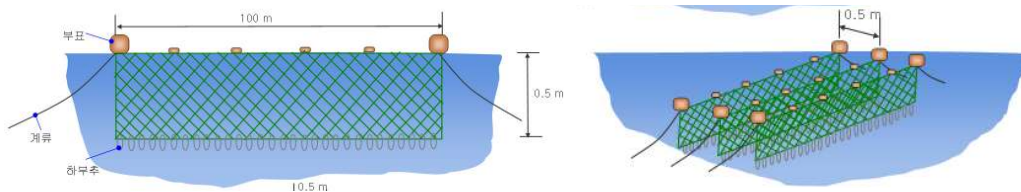
부유형 호안수초대는 1 m의 깊이로 수중에 설치하여 저수지의 수위변동에 관계없이 안정하게 부유해 있으며 동물플랑크톤 서식처 제공 및 어류의 산란처 조성에 이용 될 수 있도록 자체 부력이 있는 재질을 이용하여 자연 수초처럼 유동할 수 있도록 제작하였다[그림 3.2.11].



[그림 3.2.11] 부유형 호안수초대 개념도

(3) 부유형 그물수초대

인공식물섬 구성재를 이용한 수초대는 제작에 다소 많은 비용이 필요하므로 비교적 규모가 큰 저수지의 경우 설치에 많은 비용이 필요하게 된다. 따라서 저렴한 비용으로 대규모 미생물 및 동물플랑크톤서식처 조성을 위하여 그물을 이용한 부유형 그물수초대를 제작하였다. 형태는 비교적 망목이 적은 그물을 3중으로 병렬배치하여 동물플랑크톤의 서식처로 이용토록하며 작은 망목으로 인하여 어류가 접근 및 서식할 수 없도록 하여 동물플랑크톤의 개체량 증가를 유도하고자 하였고, 수초대의 양쪽 끝에는 인공식물섬을 연결하였다. 차후 소규모로 인공식물섬을 중간 배치할 수 있도록 하였다[그림 3.2.12].



[그림 3.2.12] 부유형 그물수초대 개념도

4. 미소유용생물 서식처 적용시험 결과

가. 미소유용생물 서식처 구성재 선별 및 인공식물섬 구성재 수질개선효과 검토

(1) 미소유용생물 인공서식처 소재개발을 위한 실험

미소유용생물이 인공서식처로 이용할 수 있는 소재를 개발하기 위하여 인공식물섬, 침수식물, 미생물접촉재(메디아) 등에 대하여 사용가능성을 검토하였다. 실험구는 (1) 비교를 위한 blank test와 (2) 이중식재기반이용 인공식물섬(AVI), (3) 기반재+침수식물(검정말), (4) 모래+침

수식물(검정말), (5) Media(틀모양으로 제작하여 50 cm 길이로 media 15줄 부착)로 구성하였다 [그림 3.2.13]. 실험 장소는 농어촌연구원에서 운영하는 석문담수호 수질개선연구단지내에 설치하여 조사 하였으며, 용수는 단지 내에 공급되는 당진천 인입수를 사용하였다. 실험은 원형 수조(용량 300 L, 200 L 원수 투입 시 수면지름 0.8 m, 수면적 0.5 m^2 , 수심 0.4 m) 5개에 시수를 200 L씩 주입하고 실험조의 유량변동을 최소화하기 위해 자연증발량과 시료 채수 시 채수한 만큼 원수를 보충해주는 방법으로 유입과 유출의 상태를 조정하였다. 효과검토를 위해 2개월간 운영하였으며 설치 1주일 후와 1개월마다 수질오염공정시험법에 따라 수질분석을 실시하였다. 동물플랑크톤은 플랑크톤 넷트(망목 63 μm)를 이용하여 총 20 L 정량채집 후 고정하여 종별로 계수하였다. 동물플랑크톤의 분류 및 동정은 한국동식물도감과 일본 해수/담수동물플랑크톤검색도설 등을 참조하여 실시하였다.



[그림 3.2.13] 미소유용생물 인공서식처 소재개발을 위한 실험구성 및 실험전경

(가) 수질분석 결과

COD 조사 결과 대조구는 실험초기와 비교하여 종료시점에서 0.7 mg L^{-1} 증가하였으며, 이 중식재기반 인공식물섬은 2.3 mg L^{-1} , 기반재+침수식물(검정말) 구는 0.4 mg L^{-1} , 모래+침수식물(검정말) 구는 0.5 mg L^{-1} 증가하였으나 미디어투입구는 2.1 mg L^{-1} 감소하여 이중식재기반 인공식물섬에서의 증가율이 가장 높았다. 이러한 이중식재기반 인공식물섬의 결과는 후술되어진 인공식물섬의 구성재에 따른 수질정화 효과가 약 80% 정도의 BOD 제거효과가 있었으나 같은 유기물지표인 COD가 대부분 증가하는 것으로 조사 되어 상이한 결과를 보인다. 이러한 결과는 BOD와 COD의 측정방법이 상이하하여 나타난 결과일 수도 있으나 BOD와 COD는 동일유기물 지표라는 점에서도 인공식물섬 등이 장기간 폐쇄 수역에서 적용 될 경우 다소 유기물지표를 상승 시킬 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 실험은 2개월에 걸쳐 장기간 운영되어 인공식물섬 등의 투입물에 다량의 미생물이 부착하고 생육되어 시간에 따른 탈락 등으로 유기물 농도를 높였을 것이며, 또한 인공식물섬이나 검정말 등의 생산작용과 일부 식물체 등의 분해도 발생 하였을 것이다.

총질소의 경우 처리구간에 따라 다소 차이는 있으나 대부분 시간이 경과함에 따라 감소하였으며 끈상미디어 투입구에서 66% 감소한 것으로 조사되어 가장 많이 감소한 것으로 조사되었다. 이는 인공식물섬이나 검정말 투입구의 경우 광합성에 의한 생산 활동이 이루어지는 반면 미디어 투입구는 부착미생물에 의한 분해작용이 증가 됨에 따라 유기질소가 분해되어 부착미생

물에 이용된 결과로 판단된다. 이는 COD의 경우에서도 타처리구들에서 농도가 증가한 반면 메디아 처리구에서만 감소가 일어나 활발한 분해작용이 일어난 것으로 짐작 된다.

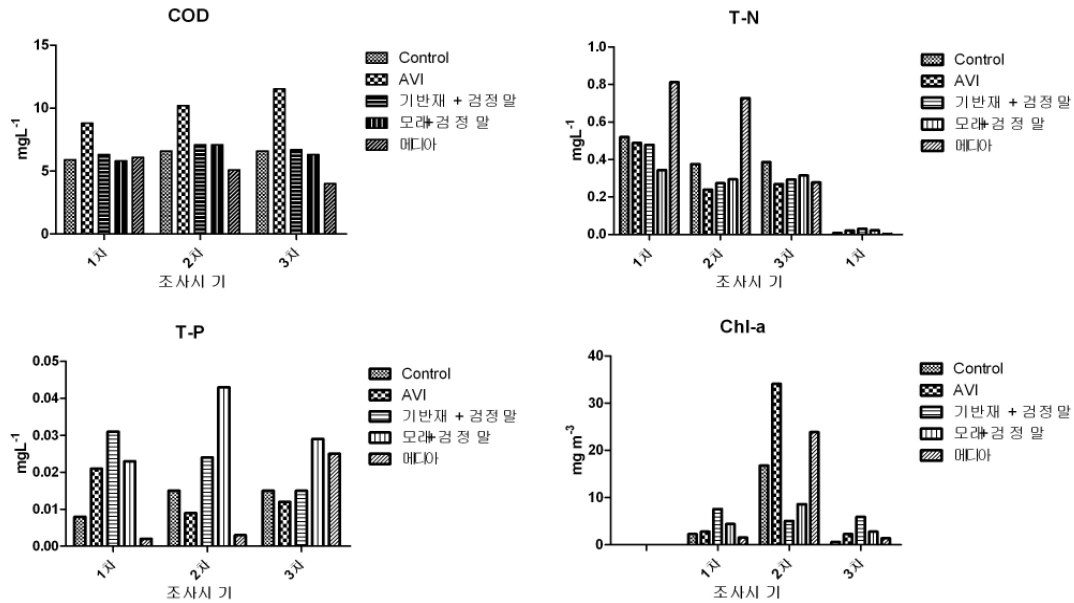
총인의 경우 이중식재기반 인공식물섬과 기반재+침수식물(검정말) 처리구에서 감소한 반면 대조구와 모래+침수식물(검정말), 메디아 투입구에서는 증가 하였다. 총인의 감소가 식물체를 이용한 처리구에서 발생 한 것으로 보아 식물체에 의한 인의 흡수로 수중 인이 감소한 것으로 보이며 검정말을 식재한 인공식물섬과 모래 처리구에서의 차이는 실험기간 중 모래처리구의 검정말의 성장상태가 기반재+침수식물(검정말)에 비하여 안 좋았던데 원인이 있는 것으로 판단된다. 따라서 수생식물을 이용할 경우 인의 흡수에 의한 제거를 기대 할 수 있으나 주기적인 수거 대책이 필요할 것이다. 특히 침수식물인 검정말 등의 경우 기온이 하강하여 고사하면 바로 분해되어 수중의 COD를 높이는 등의 문제를 발생시키므로 검정말 등의 침수식물을 이용할 경우 주기적인 수거가 필요하다.

Chl-*a*의 경우 조사기간 중 2차 조사에서 검정말을 이용한 처리구외의 처리구에서는 7.3~15.9배 증가하였으나 검정말을 처리한구에서는 -0.7~1.9배 증가하였다. 이러한 결과는 침수식물이 조류의 성장을 저해한 결과로 침수수생식물이 호소의 투명도를 개선한 결과이며(Marten, 1998), 침수식물은 호소로 투과되는 빛의 양을 제한하고 또한 식물플랑크톤의 성장을 억제하는 물질을 분비하는 allelopathy 효과(Hutchinson, 1975)를 나타내는 것으로 보고되고 있다.

3차 조사결과 2차 조사에서 Chl-*a*의 함량이 증가했던 대조구, 이중식재기반 인공식물섬, 메디아 투입구와 증가율이 낮았던 침수식물투입구에서 모두 실험초기의 농도로 감소하였다. 이는 투입된 소재들의 장기운영에 따라 영양분 흡수 및 분해 등의 효과발현에 의한 영향으로 판단된다. 대조구 역시 감소하여 처리구별 절대적인 비교검토가 이루어지지 못하였으며, 이는 실험기간이 장기화되어 실험용기의 벽면에 사상성조류 및 이끼류 등이 부착생육하여 실험 용기를 생물서식을 위한 부착매질로 이용하고 있는 부착생물에 의한 양분 흡수 등에 의한 영향이 있었던 것으로 판단된다.

[표 3.2.1] 수질분석결과

	조사 차수	Control	AVI	기반재 + 검정말	모래+검정말	메디아
COD	1차	5.9	8.8	6.3	5.8	6.1
	2차	6.6	10.2	7.1	7.1	5.1
	3차	6.6	11.5	6.7	6.3	4.0
T-N	1차	0.520	0.489	0.478	0.344	0.812
	2차	0.376	0.240	0.274	0.294	0.727
	3차	0.386	0.269	0.293	0.315	0.277
T-P	1차	0.008	0.021	0.031	0.023	0.002
	2차	0.015	0.009	0.024	0.043	0.003
	3차	0.015	0.012	0.015	0.029	0.025
Chl- <i>a</i>	1차	2.3	2.8	7.6	4.4	1.5
	2차	16.8	34.1	5.1	8.6	23.9
	3차	0.6	2.3	5.9	2.8	1.4



[그림 3.2.14] 수질분석 결과

(나) 동물플랑크톤

1차 조사에서 동물플랑크톤은 대조구에서 총 386개체, 이중식재기반 인공식물섬에서 43개체, 기반재+검정말 20개체, 모래+검정말 748개체, 미디어 502개체로 조사되어 처리에 따른 초기 개체수의 변화가 심하였다. 이는 실험초기에 처리구를 설치 후 안정 기간으로 1주일 경과 후 조사된 결과로 안정화 기간 중 상당한 변화가 발생되었던 것으로 짐작 된다. 안정화기간 중변화로는 모래와 검정말, 미디어를 설치한 처리구는 대조와 비교하여 각각 1.9배, 1.3배 높은 개체수를 보였다. 이는 동물플랑크톤의 섭식활동이 계속 진행중에 있었던 것으로 판단되며, 이중식재기반 인공식물섬과 기반재+검정말 처리구는 비교적 단시간내에 동물플랑크톤에 의한 섭식활동이 거의 종료 된 것으로 판단된다.

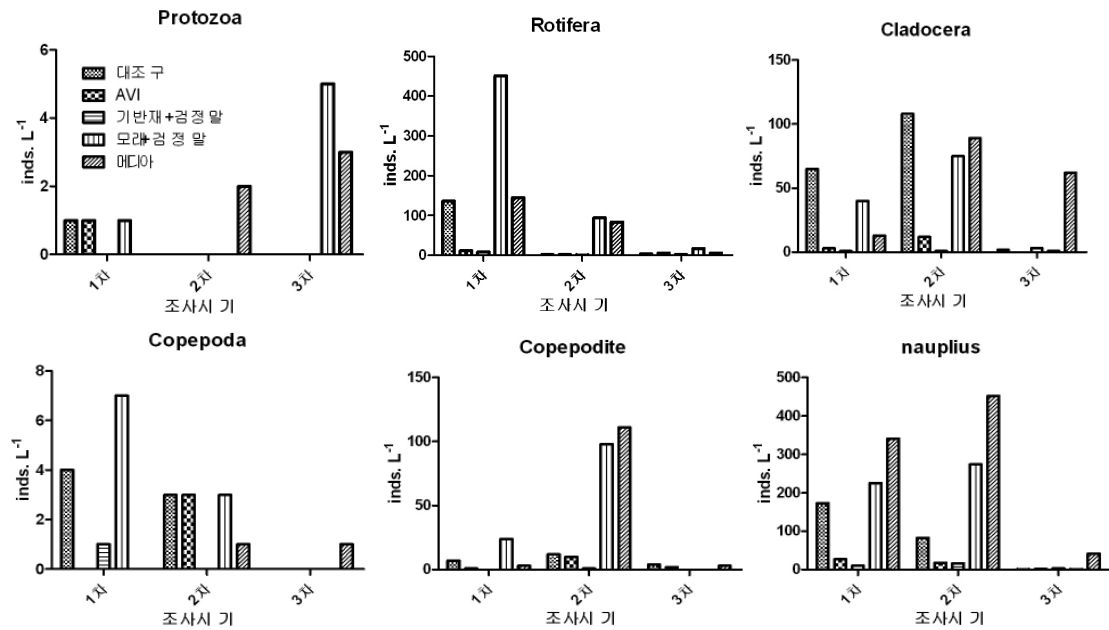
2차 조사에서는 미디어구에서 지속적인 증가가 관찰된 반면 대조구와 타처리구에서는 감소하였다. 내용적으로는 지각류는 다소 증가하는 것으로 조사되었고 지각류를 제외한 다른 종은 감소하는 것으로 조사되었다.

3차 조사결과 모든 처리구에서 급격한 감소가 발생하였으며 이러한 결과는 Chl-a의 결과에서 보듯이 식물플랑크톤의 급격한 감소로 동물플랑크톤의 먹이가 부족해짐에 따라 발생한 현상으로 볼 수 있다. 대조구의 감소 역시 실험기간의 장기화로 용기의 벽면에 사상성조류 및 이끼류 등이 부착생육하여 동물플랑크톤의 먹이로 이용될 수 있는 부유물이 감소하였으며 또한 부착생물에 의한 양분 흡수 등에 의한 영향이 있었던 것으로 판단된다.

이상의 결과에서 뚜렷한 분석결과를 얻을 수는 없었으나 실험종료 후 모든 처리구가 수질이 투명하여지고 Chl-a의 양이 줄어드는 등 수질개선효과가 인정되는 것으로 보아 사용된 소재의 사용가능성을 높여 주었다.

[표 3.2.2] 동물플랑크톤 변화

Texa	처리구 조사시기	대조구	이중식재기반 인공식물섬	기반재+검정말	모래+검정말	메디아
1차 (8.29)	Protozoa	1	1	-	1	-
	Rotifera	136	11	8	451	145
	Cladocera	65	3	1	40	13
	Copepoda	4	-	1	7	-
	Copepodite	7	1	-	24	3
	nauplius	173	27	10	225	341
	계	386	43	20	748	502
2차 (9.11)	Protozoa	-	-	-	-	2
	Rotifera	2	2	1	94	83
	Cladocera	108	12	1	75	89
	Copepoda	3	3	-	3	1
	Copepodite	12	10	1	98	111
	nauplius	83	18	17	274	452
	계	208	45	20	544	738
3차 (10.5)	Protozoa	-	-	-	5	3
	Rotifera	3	6	2	17	6
	Cladocera	2	-	3	1	62
	Copepoda	-	-	-	-	1
	Copepodite	4	2	-	-	3
	nauplius	1	2	3	1	42
	계	10	10	8	24	117



[그림 3.2.15] 동물플랑크톤 변화

(2) 인공식물섬 적용을 위한 특성 검토

(가) 인공식물섬의 구성요소별 능력검토

본 연구에서 사용되고 있는 이중식재기반 인공식물섬의 구성요소별 BOD, SS, T-N, T-P 제거효과와 조류의 성장억제 능력을 분석하고, 조류제어효과에 있어서 차광효과, 미생물 활성화, 식물의 영양염류 흡수에 대한 각각의 효과를 판단하기 위해 인공식물섬의 구성 요소 별 장치를 구분하여 실험하였다.

본 연구는 실험실 규모(Lab-scale)의 동일한 환경조건에서 5가지의 실험대상을 투입하여 진행하였다. 5가지 실험대상은 (1) 비교를 위한 blank test, (2) 차광, 미생물, 식물성장에 의해 오염물질을 제거하는 복합적 효과를 분석하기 위해 인공식물섬(VAFI) 0.25 m⁻²를 투입, (3) 차광 및 미생물에 의한 효과를 분석하기 위해 식물을 식재하지 않은 인공식물섬(AFI) 0.25 m⁻²를 투입, (4) 차광에 대한 효과를 분석하기 위해 인공식물섬을 수면위로 부유시키는 역할을 하고 있는 부력재 0.25 m⁻²를 투입, (5) 인공식물섬 식생기반재의 미생물활성효과와 비교분석하기 위한 media(부력재 0.25 m⁻²에 50 cm 길이로 media를 4줄 부착)를 투입하였다.

실험에서 사용된 인공식물섬은 코코넛 섬유(coconut fiber)로 구성된 기반재에 발포성 부력재(Poly Ethylene Form)를 부착하고 HDPE(High Density Poly Ethylene) 망체로 감싸서 제작하였으며 식물은 1년생 노랑꽃창포(Iris pseudoacorus) 2~3분얼 4 pot를 식재하였다(권, 2007). 실험은 원형 수조(용량 300 L, 200 L 원수 투입 시 수면지름 0.8 m, 수면적 0.5 m², 수심 0.4 m) 5개에 시수를 200 L씩 주입하고 실험조의 유량변동을 최소화하기 위해 고농도 인공원수(조성: BOD 약 106 mg L⁻¹, T-N 약 5×10³ mg L⁻¹, T-P 약 103 mg L⁻¹)를 1 mL 주입한 후 균

질하게 교반하였다. 수조 5개에 각각 blank, 인공식물섬(VAFI) 0.25 m², 식물 미식재 인공식물섬(AFI) 0.25 m², 부력재 0.25 m², media의 조건으로 반응조를 구성하고 시료 채수시 채수한 만큼 원수 및 시수를 보충해주는 방법으로 유입과 유출의 상태를 유지하였다. 조류를 인위적으로 발생시키기 위해 충남 보령에 위치한 신구저수지에서 조류 대발생되었다고 판단되는 시점에 (2007년 7월 1일) 조류가 밀집해있는 호안의 수표면에서 채수하여 각각의 반응조에 10 mL씩 주입하였다. 인공식물섬의 효과를 검증하기 위하여 1주당 2회 채수를 실시하여 측정하였다(환경부, 2006). 모든 실험항목의 제거율은 월별 분석값 중 최종달(9월)에 산출된 값들의 평균을 blank와 비교하여 계산하였다.

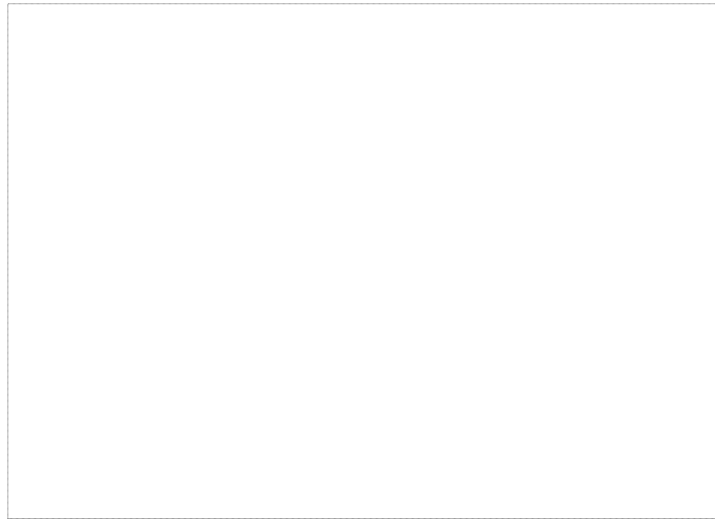
① 수질항목의 변화

㉠ BOD변화

실험초기에는 각 반응조별로 거의 차이가 없었으나 인공원수를 이용하여 실험한 결과 9월 평균 blank에서 10.4 mg L⁻¹까지 농도가 증가하였다. 이에 비해 VAFI의 경우 BOD농도가 1.8 mg L⁻¹로 감소하였으며 제거효율은 82.7%로 나타났다. AFI의 경우에도 2.0 mg L⁻¹까지 감소하였으며 제거효율은 80.8%로 나타났다[표 3.2.3, 그림 3.2.16]. 이는 기반재의 구성이 코코넛 섬유(coconut fiber)로써 다량의 미생물이 부착하여 BOD 유발물질을 제거한 것으로 판단된다. 미생물 부착을 목적으로 하는 media도 그 효과는 양호하였으나 AFI에 비해 약간 낮은 59.6%의 제거효율을 나타냈으며, 9월평균 BOD가 4.2 mg L⁻¹로 인공식물섬보다 높은 수치를 나타내었다. 결과적으로 미생물부착기반에 미생물의 보유량에 따라 BOD 제거효율에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 부력재의 경우도 5.7 mg L⁻¹이며 제거효율은 45.2%로 blank보다 양호하였으며 이는 다공성 재질로 구성된 부력재에 미생물이 다량 부착되었기 때문인 것으로 판단된다. 권(2007)의 연구에 의하면 식물뿌리 등에 부착한 세균은 주위의 유기물, N, P를 흡수하여 증식하고 세균의 밀도가 높아지면 그만큼 이들 물질의 농도가 높아져 물질분해율, 미생물활성도가 증가한다. 이 과정에서 인공식물섬 내에서 생산성도 함께 높아져 동물성플랑크톤의 수적증가, 어류의 증가도 함께 나타나는 것으로 확인되었다. Rheinheimer(1980)의 연구에 의하면 수중생태계에서 세균은 유기물분해 및 재합성 기능을 행하여 물질순환에 기여하며, 용존영양물질을 생체 내로 흡수하여 영양단계가 더 높은 생물에게 에너지를 공급하는 중요한 역할을 담당하고 있다. 안(2007)의 연구에 의하면 파로호에 설치된 인공식물섬에서 식생기반재의 공극수를 채수하고 인공식물섬이 설치되지 않은 호수물을 채수하여 총 세균수를 비교한 결과 5.4~18.1배 높았고, 활성세균수를 비교한 결과 5.7~42.9배 높았으며, β -glucosidase 활성도는 10.3~76.7배 높은 결과를 보였다.

[표 3.2.3] BOD 변화(Unit: mg L⁻¹)

Month		Blank	VAFI	AFI	Buoyant plate	Media
Jul	Max.	7.2	7.4	7.8	6.9	7.2
	Average	5.7	5.3	5.8	5.6	5.4
	Min.	4.6	4.1	4.7	4.3	3.4
Aug	Max.	5.4	4.4	3.7	4.8	3.4
	Average	4.4	2.3	2.1	4.3	2.4
	Min.	3.4	1.6	1.8	3.4	1.9
Sep	Max.	13.0	2.1	2.4	5.9	4.7
	Average	10.4	1.8	2.0	5.7	4.2
	Min.	6.8	1.4	1.4	5.0	3.8



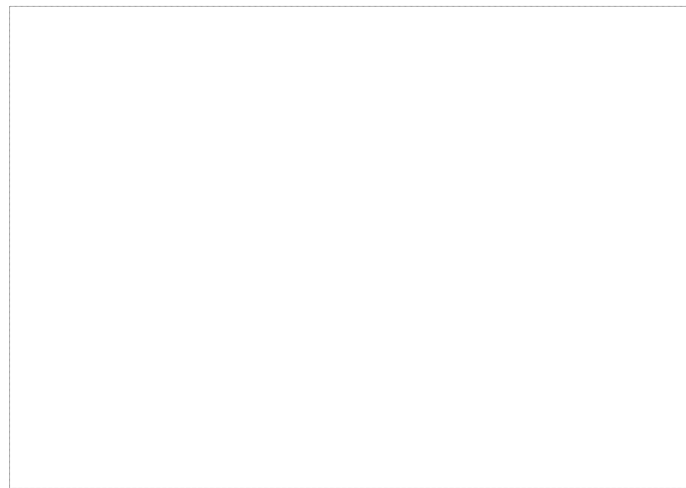
[그림 3.2.16] BOD 변화

⊕ SS변화

유입원수에 SS가 포함되어 있지 않으므로 SS 원인물질은 대기강하분진이거나 조류이다. 9월 평균 blank의 SS농도가 37.1 mg L⁻¹로 단시간 내에 상승한 것으로 볼 때 조류의 과다번식에 의해 농도가 증가한 것으로 판단된다. 반면에 VAFI의 경우는 3.0 mg L⁻¹이며 제거효율은 91.9%였고 AFI의 경우에도 5.0 mg L⁻¹이며 제거효율은 86.5%로 양호하게 유지되었다[표 3.2.4, 그림 3.2.17]. 부력재의 경우 햇빛을 차단한 효과로 blank보다 낮은 수치인 24.8 mg L⁻¹과 제거효율은 33.2%로 나타났으나 조류발생에 의한 농도상승이 관찰되었으며 media의 경우 7.7 mg L⁻¹와 제거효율은 79.2%로 blank보다 양호하나 VAFI 보다 좋지 않은 수치를 나타내었다.

[표 3.2.4] SS 변화 (Unit: mg L⁻¹)

Month		Blank	VAFI	AFI	Buoyant plate	Media
Jul	Max.	3.8	3.5	3.7	5.8	3.8
	Average	2.0	2.7	2.6	4.0	2.4
	Min.	1.1	2.1	1.8	0.8	1.2
Aug	Max.	5.9	4.2	5.2	16.4	8.7
	Average	4.5	3.0	3.6	8.0	5.4
	Min.	2.1	1.6	2.2	4.4	2.9
Sep	Max.	48.2	5.2	6.7	29.3	9.2
	Average	37.1	3.0	5.0	24.8	7.7
	Min.	25.3	1.9	3.1	19.7	6.1



[그림 3.2.17] SS변화

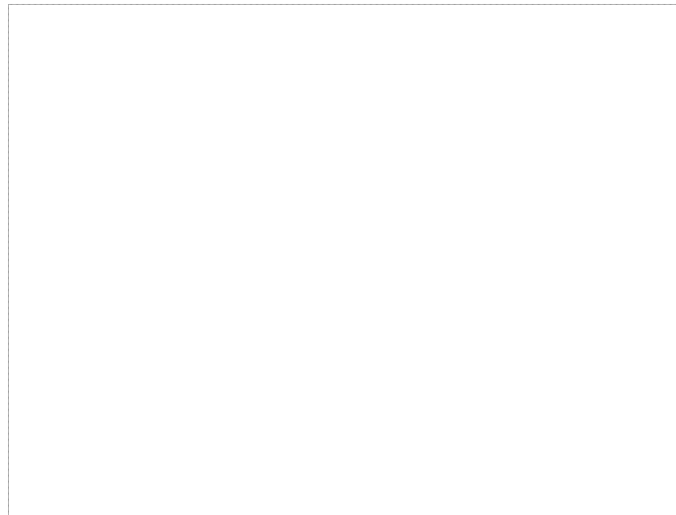
㉔ T-N변화

T-N은 Test 기간동안 큰 변화가 없었으나 9월평균 blank농도는 4.5 mg L⁻¹였으며 VAFI에서 2.2 mg L⁻¹까지 농도가 저감되었고 제거효율은 51.1%를 나타냈다[표 3.2.5, 그림 3.2.18]. 이는 소형인공호수에서 인공식물섬의 수질개선효과를 test하여 10월에 T-N 제거효율 57%를 얻은(권 등, 2002)의 결과와 유사하다. 또한 AFI의 경우에도 3.1 mg L⁻¹까지 농도가 감소하였고 제거효율은 31.1%를 나타냈다. 이와 유사하게 media에서 3.4 mg L⁻¹까지 농도가 감소하였고 제거효율은 24.4%의 결과를 보였으나 두 경우 모두 VAFI보다 농도가 높았다. 미생물에 의해 주요한 정화작용이 발생하는 AFI와 media보다 VAFI의 T-N제거효율이 양호한 것은 비표면적인 넓은 식물뿌리부에 추가적으로 부착한 미생물작용과 식물자체흡수에 의한 효과인 것으로 판단된다. 양(2006)의 연구에 의하면 인공식물섬의 질소제거는 식물뿌리와 식생기반재에 부착된 미생물에 의해 질소가 흡수되어 제거되기도 하나, 식물에 의한 흡수로 대부분 이루어진다. 인공식물섬 아래의 T-N농도는 주변과 비교하여 비성장기에 2.4% 낮았으며, 성장기에는 11.0% 낮게 나

타났다(양, 2006).

[표 3.2.5] T-N 변화 (Unit: mg L⁻¹)

Month		Blank	VAFI	AFI	Buoyant plate	Media
July	Max.	3.5	2.8	2.9	3.2	2.9
	Average	2.8	2.4	2.7	2.7	2.6
	Min.	2.3	2.1	2.5	2.3	2.3
August	Max.	3.9	2.6	3.2	3.6	3.6
	Average	3.8	2.3	2.9	3.5	3.3
	Min.	3.7	2.0	2.5	3.1	3.0
September	Max.	4.9	2.5	3.2	4.7	3.5
	Average	4.5	2.2	3.1	4.4	3.4
	Min.	4.0	1.9	3.0	3.9	3.2



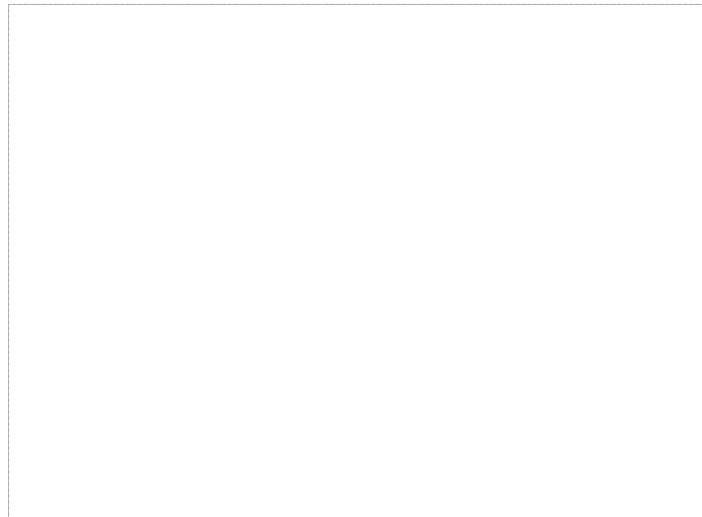
[그림 3.2.18] T-N변화

㉠ T-P변화

T-P는 9월평균 blank에서 0.3 mg L⁻¹였으며 VAFI에서 0.23 mg L⁻¹로 23.3%, AFI는 0.25 mg L⁻¹로 16.7%, 부력재는 0.27 mg L⁻¹로 10.0%, media는 0.26 mg L⁻¹로 13.3%의 제거효율을 나타냈다[표 3.2.6, 그림 3.2.19]. VAFI에서 제거효율이 가장 양호하였으나 다른 실험항목들과 달리 제거효율의 차이가 크지 않았다. 단기간에 실험이 진행되어서 식물의 활성도가 아직 낮아 T-P 흡수, 제거속도가 낮았기 때문인 것으로 판단된다. 양(2006)의 연구에 의하면 인공식물섬의 인 제거는 식물뿌리와 식재기반재에 부착된 미생물에 의해 흡수되어 제거되며 인공식물섬을 설치한 곳과 설치하지 않은 곳의 T-P 농도차는 비성장기와 성장기의 경우 각각 2.1%와 9.1%였다.

[표 3.2.6] T-P 변화 (Unit: mg L⁻¹)

Month		Blank	VAFI	AFI	Buoyant plate	Media
July	Max.	0.23	0.20	0.20	0.20	0.21
	Average	0.20	0.19	0.17	0.18	0.18
	Min.	0.17	0.16	0.16	0.16	0.16
August	Max.	0.31	0.24	0.27	0.26	0.28
	Average	0.28	0.21	0.24	0.24	0.25
	Min.	0.23	0.19	0.21	0.21	0.21
September	Max.	0.33	0.26	0.29	0.29	0.29
	Average	0.30	0.23	0.25	0.27	0.26
	Min.	0.27	0.21	0.21	0.23	0.22



[그림 3.2.19] T-P 변화

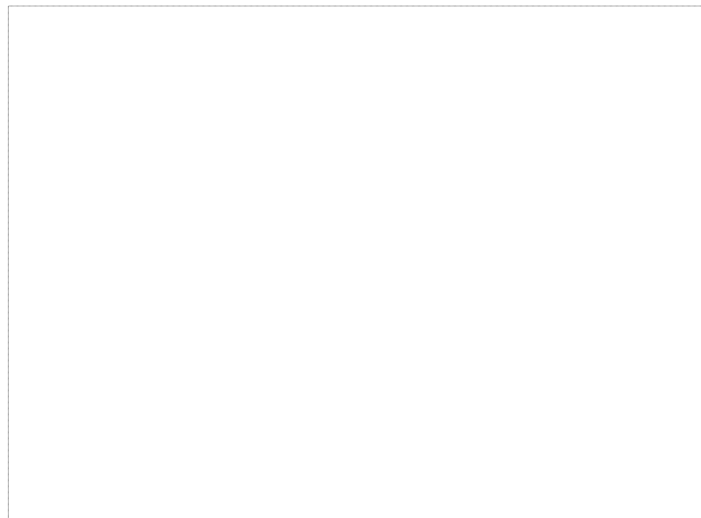
㉞ Chlorophyll-*a* 변화

초기 조류 seeding 및 지속적인 오염물질 강제주입을 실시하였으며 8월 이 후 수온이 상승하자 9월평균 blank의 조류농도가 92.4 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 심각한 녹조현상이 발생되었으나 VAFI 및 AFI의 경우 조류농도가 1.9 $\mu\text{g L}^{-1}$, 3.6 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 조류성장이 억제되었다[표 3.2.7, 그림 3.2.20]. 녹조제거효과는 VAFI, AFI, media, 부력재, blank 순서인 것으로 볼 때 단순한 햇빛차단효과보다 미생물과 식물에 의한 상호작용의 영향이 주된 효과인 것으로 판단된다. 인공식물섬의 수질 정화 기작으로 식물의 영양염류 흡수, 식물뿌리와 식생기반재 표면에 부착하는 미생물 및 부착 조류에 의한 제거, 부유물의 침강, 햇빛의 차폐효과, 어류에 의한 섭취 등이 제시되고 있다(양, 2006). 단기간에 실험이 진행되었으며 반복적인 결과는 얻지 못하였으나 본 실험에 있어서 VAFI의 조류 총 제거효율은 97.9%를 나타냈다. VAFI의 구성요소별 제거효율로 분석해보면 총

97.9% 중 차광효과 35.1%, 식생기반재에 부착한 미생물의 복합작용에 의한 효과 61.0%, 식물과 뿌리에 의한 효과 1.8%인 것으로 나타났다. 식물과 뿌리에 의한 효과가 매우 낮게 나타났는데 이는 식물이 완전하게 성장하지 못했기 때문이라고 판단된다. 지속적으로 오염이 되고 이를 이용해 식물이 성장하여 영양염류의 흡수량이 증가하고 뿌리부가 발달하여 미생물의 보유량이 증가하면 인공식물섬의 한 부분으로써 조류제거에 차지하는 부분이 더욱 높아질 것이라 판단된다.

[표 3.2.7] Chl-*a* 변화 (Unit: $\mu\text{g L}^{-1}$)

Month		Blank	VAFI	AFI	Buoyant plate	Media
July	Max.	1.4	0.7	1.2	1.8	1.4
	Average	0.5	0.1	0.2	0.9	0.6
	Min.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
August	Max.	45.2	4.9	4.2	40.3	7.3
	Average	11.2	2.7	3.3	9.4	3.5
	Min.	2.2	1.9	1.8	0.9	1.3
September	Max.	110.2	2.4	4.0	73.2	20.4
	Average	92.4	1.9	3.6	60.0	17.7
	Min.	65.8	1.4	3.0	52.4	12.3

[그림 3.2.20] Chl-*a* 변화

이상의 결과에서 인공식물섬의 BOD, SS, T-N, T-P 제거효율과 조류의 성장억제 능력을 분석하였으며 조류제거효과에 있어서 미생물보유활성화, 식물의 흡수효과에 대한 각각의 효과성을 판단하기 위해 구성요소별 장치를 구성하여 실험한 결과는 다음과 같다.

구성요소별 장치는 (1) blank test, (2) 인공식물섬 (VAFI) 0.25 m^{-2} , (3) 식물을 식재 하지 않은 인공식물섬 (AFI) 0.25 m^{-2} , (4) 인공식물섬을 수면위로 부유시키기 위한 부력재 0.25 m^{-2} , (5) media (부력재 0.25 m^{-2} 에 50 cm 길이로 media를 4줄 부착)이다. BOD 제거는 VAFI, AFI,

부력재, media에서 각각 82.7%, 80.8%, 45.2%, 59.6%로 나타났다. T-N 제거는 VAFI, AFI, media에서 각각 51.2%, 31.7%, 25.1%로 나타났다. T-P 제거는 VAFI, AFI, 부력재, media에서 각각 23.3%, 16.7%, 10.0%, 13.3%로 나타났다. Chl-*a*는 VAFI에서 97.9%가 제거되었다. VAFI의 구성 요소 별 제거율은 차광효과 35.1%, 미생물의 복합작용에 의한 효과 61%, 식물과 뿌리에 의한 효과 1.8%인 것으로 나타났다.

(나) 인공식물섬 구성재 특성

① 식생기반재

식생기반재는 식재된 식물이 완전히 활착할 때까지 토양으로서의 기능을 하며, 부형고형물(Suspended Solids)의 흡착여과 기능, 식물체 뿌리와 더불어 미생물집적여과의 역할 그리고 미생물, 동물플랑크톤, 무척추동물, 어류 등의 산란 및 서식처 역할을 한다. 식생기반재로 사용되는 코코넛 섬유는 야자나무 열매를 가공 처리한 것으로 우수한 보습력(식물성장애 유리), 강한 인장력, 높은 유연성 및 시공의 용이성, 내염성(수산 양식용 rope로 사용), 강한 통풍성 및 투수성을 가지며, 수중 분해시간은 10~20년 소요되며, 섬유 자체가 cellulose와 lignin으로 구성되어 난분해성 물질로써 수질오염을 촉진하지 않는다.

코코넛 섬유에 대한 화학적 안정성 시험 결과와 자외선에 의한 폭로 시험결과는 [표 3.2.8]과 같고 비표면적 검토는 BET 분석을 실시결과는 [표 3.2.9]에 수록하였다.

식생기반재로 사용된 코코넛 섬유로 비표면적이 큰 것으로 알려져 있으며 Guillermo 등(2005)이 암모니아제거를 위한 biofilter 연구에 사용한 코코넛 섬유는 비표면적이 $0.75 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 이었다. 그러나 본 연구에 사용된 코코넛 섬유는 가공처리하여 비표면적을 평균 $8.17 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 까지 증가시켜 미생물 등의 부착효율을 높일 수 있을 것으로 기대된다[표 3.2.10].

[표 3.2.8] 코코넛 섬유의 화학적 안정성 시험 결과

시험액\시험시간	0시간	250시간	500시간	750시간	1,000시간
증류수	100%	78.2%	84.5%	89.5%	73.8%
염화나트륨 3%용액	100%	90.5%	75.0%	103.3%	75.5%
수산화칼슘 0.1% 용액	100%	97.0%	102.9%	105.5%	97.9%
수산화나트륨 0.1% 용액	100%	91.0%	86.4%	85.5%	84.4%
황산 0.1% 용액	100%	90.3%	92.0%	98.4%	81.7%
염산 0.1% 용액	100%	89.5%	92.1%	104.4%	100.6%

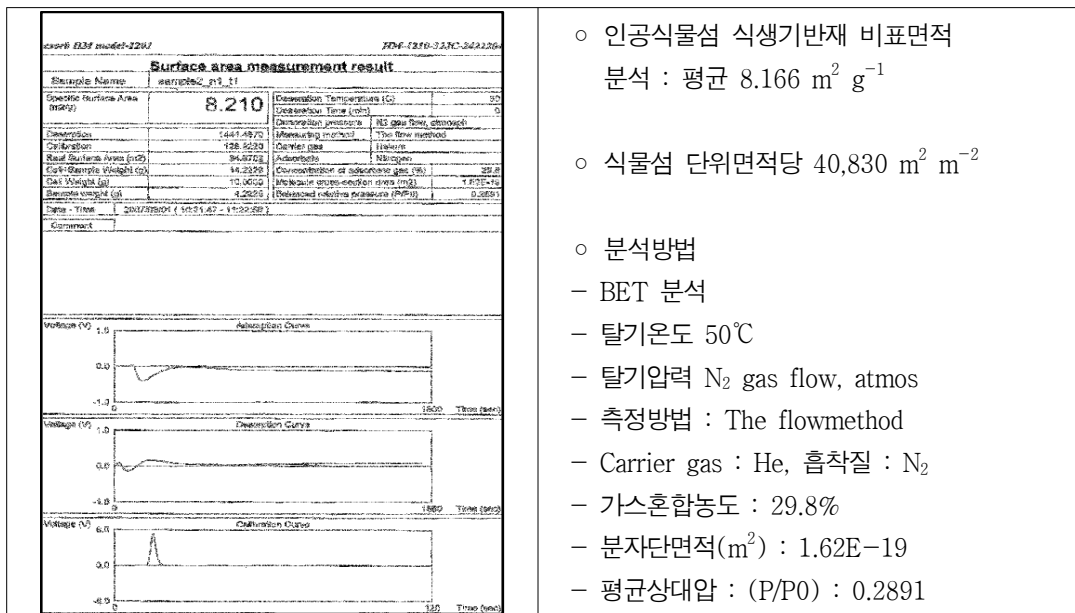
※ 시험개시전의 시험체 최고강도에 대한 각 시간마다의 최고강력의 비율
한국원사직물시험연구원 시험성적서

[표 3.2.9] 코코넛 섬유의 내후성(자외선에 의한 폭로시험) 시험 결과

폭로시간 (h)	인장력에 의한 파단시 신장율
0	19.2%
100	10.3%
200	10.6%
300	8.1%
400	10.0%

※ 시험개시전과 후 100시간의 사이에 변화가 있으나, 그 후 시간에 의한 큰 폭의 저하는 보이지 않았음.
한국원사직물시험연구원 시험성적서

[표 3.2.10] 비표면적 시험 결과



② 부력재

부력재는 식생기반재와 수생식물을 띄우고 고정시키는 역할을 하며, 재질로는 부력성이 탁월하고 내부식성을 가진 평판형 가교결합 폴리에틸렌폼(Cross linking Polyethylene Foam)이다. 유연성을 갖는 평판형 가교결합 폴리에틸렌폼 부체는 파랑 및 유속 등의 지속적인 외부 충격에 대해 파손 및 유실의 우려가 적고, 일광 등에 의한 변형이 적은 특징을 갖고 있다[표 3.2.11].

③ HDPE망

평판형 가교결합 폴리에틸렌폼(Cross linking Polyethylene Foam)을 부체로 사용하는 인공식물섬은 식생기반재로 코코넛 섬유 재질의 매트를 부체위에 얹고 전체를 HDPE(High Density PolyEthylene) 망체로 감싸 일체형으로 제작한다. HDPE의 물성 자료는 [표 3.2.12]와 같다.

④ 식물

인공식물섬에 식재되는 수생식물은 수질정화능력이 탁월한 수종, 질소인 등의 오염원별 수질 개선 목표에 따라 특정 오염원의 제거효율이 뛰어난 수종, 구입 및 유지관리가 용이한 수종, 환경조건에 잘 적응하며 월동이 가능한 수종 그리고 설치목적에 적합하고 전체적인 분위기에 조화되는 수종을 선택해야 하며, 수생식물별 특징을 정리하였다. 본 Test에서 사용하는 정수식물(emergent plant)은 노랑꽃창포로써 국내 기후와 환경에 가장 잘 적응된 다년생 초본식물이며, 영양염 흡수능과 환경적응성이 매우 우수하다[표 3.2.13].

㉞ 계류장치

인공식물섬을 호소나 하천의 일정부위에 고정시키는 역할을 하며 수위변동, 유속, 유량의 변동에 견딜 수 있어야 한다. 식물섬은 wire 또는 합성수지로 제작된 rope에 의해 콘크리트, 철근 등 중량체로 만들어진 앵커와 연결되어 수체에 고정된다.

[표 3.2.11] 가교결합 폴리에틸렌폼(Cross linking Polyethylene Foam) 물성자료

검사항목	단위	측정값
밀도	g cm^{-3}	0.045
인장강도	kg cm^{-2}	4.0
신장율	%	220
인열강도	kg cm^{-1}	2.1
가열치수변화(80°C, 1hr)	%	-2.3
압축경도(25% deflection)	g cm^{-3}	0.80

*Testmethod: KSm 3014-96

*제품검사성적서 [제품명: Cross linking Polyethylene Foam, 영보화학주식회사]

[표 3.2.12] HDPE(High Density PolyEthylene)망체 물성자료

검사항목	기준치	측정치			부분 판정	비고
		X1	X2	X3		
용융지수	0.4 g 10 min^{-1} 이하	0.33	0.32	0.33	합격	ASTM D 1238
밀도	0.950 g cm^{-2}	0.954	0.953	0.956	합격	ASTM D 1505
저온취하온도	-40°C 이하	이상무	이상무	이상무	합격	ASTM D 746
충격강도	30 kg cm^{-1} 이상	33.3	33.5	33.4	합격	ASTM D 256
카본블랙함량	2~3%	2.3	2.2	2.2	합격	ASTM D 1603
발포재	불포함	None	None	None	합격	육안관찰
종합판정	합격	특기사항				

*제품검사성적서 [제품명: 네트론, 규격: CE121, CE131]
대림산업주식회사 품질관리팀

[표 3.2.13] 수생식물 선정기준표 단위 : $g\ m^{-2}\ day^{-1}$

수종명	정화가 가능한 오염물질		영양 염류 제거 능력	수집 능력	운 반성	재활 용성	내한성	내공 해성	맹아력	구입 난이도
	N	P								
꽃 창 포			○	○	△	△	○	○	○	○
애기부들	1.413	0.0248	○	○	△	○	○	○	○	○
갈 대	2.796	0.0425	○	○	△	△	△	○	○	○
줄	1.9011	0.0384	○	○	△	△	△	○	○	○
달뿌리풀			○	△	△	△	△	○	○	△
물 억 새			○	○	△	△	△	○	○	△
부레옥잠화	1.3557	0.286	△	○	○	×	○	×	○	△
좁개구리밥	0.243	0.0627	△	○	○	×	○	△	○	○
마 름 류	0.150	-	△	△	×	×	△	△	○	○
미 나 리	0.734	0.0925	○	○	○	△	△	○	○	○
연 꽃			△	△	×	△	△	×	○	△
검 정 말			△	△	×	×	△	△	○	△

주) 팔당호 수질관리 특별대책 수립을 위한 오염 저감기술, 국립환경연구원 수생식물에 의한 수질개선기법 연구(Ⅱ), 농어촌진흥공사(7)

(다) 소규모 연못(침강지)을 이용한 인공식물섬의 수질정화효과 검토

인공식물섬의 직접적인 수질정화효과를 검토하고자 석문수질연구단지내에 설치된 인공식물섬의 수질정화 효과를 검토하였다.

석문수질연구센터에 있는 인공식물섬을 설치한 침강지와 설치되지 않은 침강지 2개에 대하여 수질조사를 실시하고 양침강지의 정화효율차이를 비교하였다.

조사에 사용되어진 인공식물섬은 4 m × 4 m로 조성되어 있으며 지상부 생물량은 평균 742 g DM m⁻²로 최대값은 1,310 g DM m⁻²이었고, 식물체 높이는 평균 102 cm로 최대값은 117 cm로 조사되었다.

2006년 인공식물섬에 의한 수질정화 효과를 검토한 결과 COD 4.5%, T-N 12.1%, T-P 16.9% 이상의 정화 효율을 보인 것으로 조사되어 인공식물섬의 수질정화 효과를 확인할 수 있었다.

[표 3.2.14] 석문수질개선연구단지 인공식물섬 수질정화 효과

항목	효율	
	Pond(%)	Pond+AVI(%)
COD	11.5	16.0
T-N	25.6	37.7
T-P	22.6	39.5

(라) 소규모 연못(침강지)의 인공식물섬 하부 저서생물상변화

장기간 인공식물섬(AVI)을 이용할 경우 인공식물섬의 하부 식물뿌리 등의 탈락 및 부착생물 및 인공식물섬을 이용하는 생물의 사체 등이 인공식물섬의 하부 저서상에 변화를 줄 것이다. 따라서 본 연구에서 사용하고자하는 인공식물섬을 장기간 운영 할 경우 저서생물상의 변화를 파악하기위하여 석문수질연구단지내 침강지에 '00년 설치되어 운영되어온 인공식물섬에 대하여 조사를 실시하였다.

중형저서생물을 채집할 하기 위해 특수 제작한 주사기 형태의 corer를 사용하여 저질을 채집하여 조사하였으며 중형저서생물의 분류 및 동정은 Introduction to the study of meiofauna (Higgins, 1988)으로 실시하였다.

장기간 운영한 인공식물섬의 하부와 인공식물섬이 설치되지 않은 퇴적층의 퇴적물에 대한 조사한 결과 인공식물섬 하부 퇴적층의 pH가 일반퇴적층보다 다소 낮았으며, 유기물 함량은 약 3배 이상, 총인, 총질소, 강열감량 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 인공식물섬이 장기간 운영됨에 따라 인공식물섬 식물체의 사멸된 뿌리가 퇴적층 중에 쌓여 나타난 결과이다. 그러나 유효인의 양이적어 이로부터 용출 되는 인의 양이 많지 않을 것으로 판단된다.

저서생물상을 조사 한 결과 대조구의 경우 Foraminifera, Nematoda 등이 우점하였으나 인공식물섬 하부의 경우 Foraminifera, Nematoda 등은 감소하고 Ostracoda 은 증가하는 것으로 조사 되었다.

[표 3.2.15] 인공식물섬 하부 퇴적물 특성

구 분	pH (1:5)	유기물 (%)	Ava.P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	T-N mg kg ⁻¹	T-P mg kg ⁻¹	EC dSm ⁻¹ (1:5)	LOI (%)
Pond	5.7	1.07	38.7	482	515	0.34	2.8
Pond+AVI	5.5	3.98	28.4	3084	883	1.09	8.1

[표 3.2.16] 인공식물섬 하부 퇴적물 저서동물상

Taxa	Station	Control (개체수 10 ⁻² cm ⁻³)	AVI (개체수 10 ⁻² cm ⁻³)
Foraminifera		181	68
Nematoda		110	19
Ostracoda		15	71
Tardigrada		8	0
Copepoda		3	0
Total		136	108

(마) 인공식물섬에 의한 체외효소활성도

인공식물섬은 부유플, 부채, 식생기반재, 식재용 수생식물, 계류장치, 수상방책, 부교 등으로 이루어지며 특히, 식생기반재는 식물뿌리와 같이 미생물의 매질로 이용되고 주변의 많은 영양염류를 농축하여 식물에게 영양분을 제공할 뿐만 아니라, 식물의 뿌리는 통기조직을 통해 산소를 식물 뿌리로 전달시켜 미생물의 유기물 분해를 촉진시킨다. 또한 식생기반재에 부착한 많은 세균은 수체 내 유기물 분해와 빠른 물질순환을 야기시켜 동물플랑크톤의 먹이로 작용할 수 있다.

수중 생태계에서 세균은 유기물의 분해 및 재합성 기능을 수행하여 물질순환에 기여하며, 용존 영양물질을 생체 내로 흡수하여 영양단계가 더 높은 생물에게 에너지를 공급하는 중요한 역할을 담당하고 있다(Rheineimer, 1985; Ahn *et al.*, 1995). 따라서 환경의 변화가 미생물의 생태계에 미치는 영향은 생태학적으로 매우 중요하고, 그러한 주위 환경의 상태를 나타내는 간접적인 지표로 환경의 변화에 대해 민감하게 반응하는 세균의 분포와 활성도가 이용되고 있다(Atlas and Bartha, 1986). 이러한 미생물의 체외활성도에 대한 연구는 소양호에서의 유기인산염 분해율에 관한 연구(최, 1992), 소양호의 세균 개체수와 활성도 변화에 관한 연구(최, 1996), 소양호에서 섬요소 기질에 부착한 미생물의 유기물 분해 활성도 연구(최 등, 1995) 등이 있다.

본래 저수지에서는 가시적인 인공식물섬에 의한 수질개선 효과를 증명하기가 어렵다. 실제 인공식물섬 주변의 수질과 호수 내 수질을 측정하여 비교해보면 식물뿌리 주변으로 유기물질이 부착하여 오염도가 더 높은 것으로 나타나는 사례도 있다. 따라서 인공식물섬에 의한 생태복원 효과를 알아보기 위해 수질뿐만 아니라 미생물 활성도 측정이 동시에 이뤄져야 한다.

본 연구에서는 신구저수지에 설치된 이중식재기반 인공식물섬 5지점, 교반장치를 이용한 인공식물섬 3지점 및 대조지점으로 댐앞에서도 조사를 실시하였다. 또한 보다 제한된 범위에서의 식물섬의 체외효소 활성도를 측정하기 위하여 석문연구단지에 설치한 인공식물섬과 동일조건인 침강지에서 조사를 실시하였다.

체외효소 활성도는 미생물에 의한 물질순환 정도를 알아보기 위하여 이당류를 단당류로 분해시키는 β -glucosidase와 유기인에서 무기인으로 용탈시키는 효소인 phosphatase 활성도를 조사하였다. 기질로 methylumbelliferyl-substrate(MUF- β -glucoside; 10 mm), mUF-phosphate(10 mm)를 시료 4.5 mL에 최종농도가 25, 50, 100, 200, 400 μ M되게 첨가하여 현상온도에서 1시간 배양 후 glycine-NaOH(pH 10.5, 0.2M) 0.5 ml을 첨가하여 반응을 정지시킨 후 생성된 mUF의 양을 형광분광광도계(Spectrofluorophotometer RF-1501, Shimadzu, Ex: 380, Em: 445 nm)로 정량분석 하였다.

Lineweaver-Burk 식을 이용하여 최대분해속도인 V_{max} , 자연상태의 기질농도와 친화력의 합인 $K_t + S_n$ (Chrst, 1989)을 구하였으며, 모든 분석은 3회 실시하여 평균값을 사용하였다.

① B-glucosidase 활성

신구저수지 댐앞(대조지점)은 효소활성도조사결과 B-glucosidase의 최대분해속도는 $40.2 \text{ nmol L}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ 였다. 이중식재기반 인공식물섬의 경우 식물섬 중앙의 최대분해속도는 $40.0 \text{ nmol L}^{-1} \text{ hr}^{-1}$

로 대조지점과 차이가 없었으며 좌우측의 식물섬 주변도 42.5, 43.8 $\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 을 보여 차이를 발견 할 수 없었다. 그러나 식물섬의 하부는 81.1 $\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 분해속도가 중앙보다 2배정도 높았다. 식물섬과 1 m 떨어진 곳 역시 35.6 $\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 차이가 없었다. 전달상수 및 기질의 자연농도는 다소 다른 결과를 보였는데 대조지점이 57.0 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 이었으나 이중식재기반 인공식물섬의 중앙은 99.6 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 식물섬 주변부는 73.1 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 66.2 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 식물섬하부는 75.6 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 을 보여 대조지점보다는 높은 것으로 조사되었으나, 식물섬과 1 m 이격된 지점의 경우 45.2 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 대조지점보다 약간 낮은 것으로 조사되었다.

교반장치를 이용한 인공식물섬의 최대분해속도조사 결과 역시 중앙이 32.4 $\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 외부가 46.6 $\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 대조지점과 비교하여 약간의 차이는 있었으나 그 차이는 매우 작았다. 그러나 꽃창포를 식재한 pot내는 214.7 $\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 대단히 높은 활성을 나타내었는데 pot내 많은 식물뿌리가 있고 물이 내부에 정체되어 분비 효소의 농축 등으로 나타난 결과로 추정된다. 전달상수 및 기질의 자연농도는 이중식재기반 인공식물섬의 경우와 마찬가지로 대조지점보다는 높은 것으로 조사되어 중앙이 72.7 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 외부가 70.6 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, pot내가 86.5 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 pot내가 다소 높았으나 최대분해속도의 경우와 같은 큰 폭의 증가는 없었다.

대형수체에서 소규모로 설치된 인공식물섬의 수질정화효과를 정확히 파악하는 것은 매우 어렵기 때문에 인공식물섬의 효소활성도를 비교하고자 석문수질연구단지의 침강지에 설치된 인공식물섬에 대하여 조사를 실시하였다. 침강지에 설치된 인공식물섬과 유출입수의 β -glucosidase 활성을 조사한 결과 식물섬이 없는 침강지의 유입·유출수의 최대분해속도는 11.0 $\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 10.8 $\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 변화가 없는 것으로 조사되었으나 전달상수 및 기질의 자연농도는 유입수가 7.4 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 유출수가 30.1 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 증가한 것으로 조사 되었다. 식물섬을 설치한 침강지의 경우 최대분해속도는 유입수가 10.4 $\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 식물섬이 168.9 $\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 유출수가 10.4 $\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 유입수와 유출수의 경우 변화가 없었으나 식물섬에서는 16.2배 증가하는 것으로 조사되었다. 전달상수 및 기질의 자연농도는 식물섬은 41.6 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 유입수와 유출수의 8.2 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 6.4 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 보다 높은 것으로 조사되었다.

② Phosphatase 활성

유기인산염을 무기인산염으로 분해하는 phosphatase는 용존무기인이 제한될 때 식물플랑크톤이나 세균들이 분비하는 세포외 효소이다. 신구저수지에서 조사한 phosphatase 활성조사결과는 B-glucosidase와는 다소 상이한 결과를 보였다. 신구저수지에서 조사결과 대조지점의 phosphatase 최대효소활성도는 797.8 $\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 이었으며 이중식재기반 인공식물섬의 경우 인공식물섬 중앙부는 624.0 $\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 이고, 식물섬 주변부는 1,031.0 $\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 832.3 $\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 인공식물섬 하부는 896.5 $\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 식물섬으로부터 1 m 이격지점은 968.5 $\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 식물섬의 중앙부가 가장 낮은 것으로 조사 되었다. 이러한 결과는 식물섬 중앙의 경우 식물섬 외부와는 달리 식물플랑크톤의 성장이 제한되었던 데에 기인하는 것으로 보이며, 인공식물섬 하부의 경우 세균개체수가 높아 활성이 높았던 것으로 판단된다. 이중기반 식생 인공식물섬의 전달상수 및 기질의 자연농도는 식물섬 중앙이 67.8 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 식물섬주

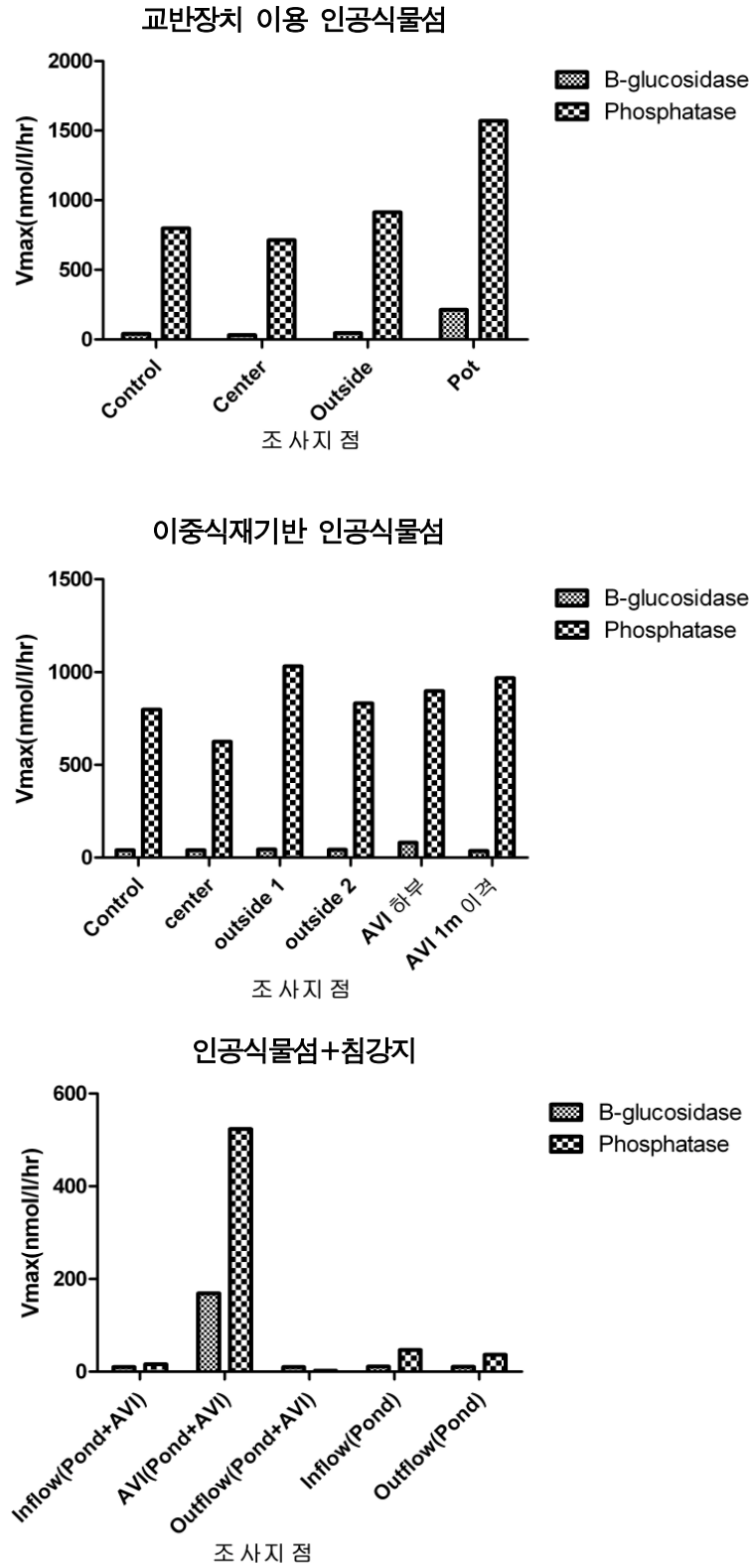
변이 $5.3 \mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, $41.6 \mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 식물섬 하부가 $9.6 \mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 식물섬과 1 m 이격지점은 $2.4 \mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 식물섬 중앙이 가장 높은 것으로 조사 되었으며 식물섬 주변부는 대조지점의 $8.4 \mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 과 유사한 것으로 조사되었다.

교반장치를 이용한 인공식물섬은 최대분해속도가 중앙이 $714.7 \text{ nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 외부가 $913.0 \text{ nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, pot가 $1,570.5 \text{ nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 중앙이 낮고 외부가 높은 것으로 조사되어 외부와 pot에서 인산의 무기화가 활발하게 진행되는 것으로 보이며 이는 식물플랑크톤이나 식물체의 성장과 관련이 있음을 보여주는 것으로 볼 수 있다. 전달상수 및 기질의 자연농도는 중앙이 $8.4 \mu\text{mol L}^{-1}$, 외부가 $38.0 \mu\text{mol L}^{-1}$, pot가 $4.4 \mu\text{mol L}^{-1}$ 로 식물섬 외부가 가장 높았던 것으로 조사되었다.

석문수질연구단지의 침강지에서 실시한 효소활성측정결과 식물섬이 없는 침강지는 유입수와 유출수의 최대분해속도는 $46.9 \text{ nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, $36.1 \text{ nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 유입과 유출의 차이가 거의 없는 것으로 조사되었다. 그러나 인공식물섬을 설치한 침강지의 경우 유입과 유출수의 최대분해속도는 각각 $15.6 \text{ nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, $1.6 \text{ nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 이었으며 식물섬은 $523.6 \text{ nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 식물섬에서 급격히 증가하는 것으로 조사되었다. 전달상수 및 기질의 자연농도는 식물섬이 없는 침강지의 유입·유출수중 $80.7 \mu\text{mol L}^{-1}$, $64.3 \mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 유출수에서 소폭 감소하였으며, 식물섬이 설치된 침강지의 유입·유출수는 $49.9 \mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, $15.6 \mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 역시 약간 감소하였으며 식물섬에서는 $244.0 \mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 유입유출수보다 상당히 증가되었다.

[표 3.2.17] 체외효소활성조사결과

SITE	SITE	B-glucosidase		Phosphatase		
		V_{\max} ($\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$)	K_t+S_n ($\mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$)	V_{\max} ($\text{nmol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$)	K_t+S_n ($\mu\text{mol L}^{-1} \text{hr}^{-1}$)	
신구 저수지	Control	40.2	57.0	797.8	8.4	
	교반 장치 식물섬	Center	32.4	72.7	714.7	38.0
		Outside	46.6	70.6	913.0	4.4
		Pot	214.7	86.5	1,570.5	83.8
	이중 식생 기반 식물섬	center	40.0	99.6	624.0	67.8
		outside 1	43.8	73.1	1,031.0	5.3
		outside 2	42.5	66.2	832.3	41.6
		AVI 하부	81.1	75.6	896.5	9.6
		AVI 1 m 이격	35.6	45.2	968.5	2.4
석문수질 연구단지	침강지 + 식물섬	Inflow	10.4	8.2	15.6	49.9
		AVI	168.9	41.6	523.6	244.0
		Outflow	10.4	6.4	1.6	15.6
	침강지	Inflow	11.0	7.4	46.9	80.7
		Outflow	10.8	30.1	36.1	64.3



[그림 3.2.21] 체외효소활성조사결과

신구저수지에서 실시한 효소활성조사 결과 β -glucosidase의 경우 인공식물섬의 하부에서를 제외하고는 뚜렷한 변화를 확인하기는 어려웠으나 소규모수역(침강지)에서의 효소활성 측정결과 식물섬 부근의 활성이 높아지는 것을 확인할 수 있었다. Phosphatase의 경우 신구저수지조사 결과 식생이 밀집한 지점을 제외하고는 식물섬의 중앙보다는 식물섬 외부에서 활성이 높은 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 phosphatase가 유기인산염을 무기인산염으로 분해하는 하는 효소로 용존무기인이 제한될 때 식물플랑크톤이나 세균들이 분비하는 세포의 효소인 점에 미루어 식물섬 외부의 식물플랑크톤 생장이 더 많았음을 알 수 있다.

이상의 효소활성도의 결과에서 인공식물섬의 수질개선 효과는 생태계의 기능이 강화되어 나타나는 것으로 판단된다. 즉, 식물뿌리 등에 부착한 세균은 주위의 낮은 농도의 유기물, N, P를 흡수하여 증식하고 이 세균의 밀도가 높아지면 그만큼 이들 물질의 농도가 높아져 물질분해율, 미생물활성도가 빨라지는 것이다. 더욱이 본 연구에서 채용한 이중식재기반체는 미생물 부착을 위한 많은 공간의 제공이 가능하여 추가적인 효과를 기대할 수 있다.

나. 메소코즘 적용시험 결과

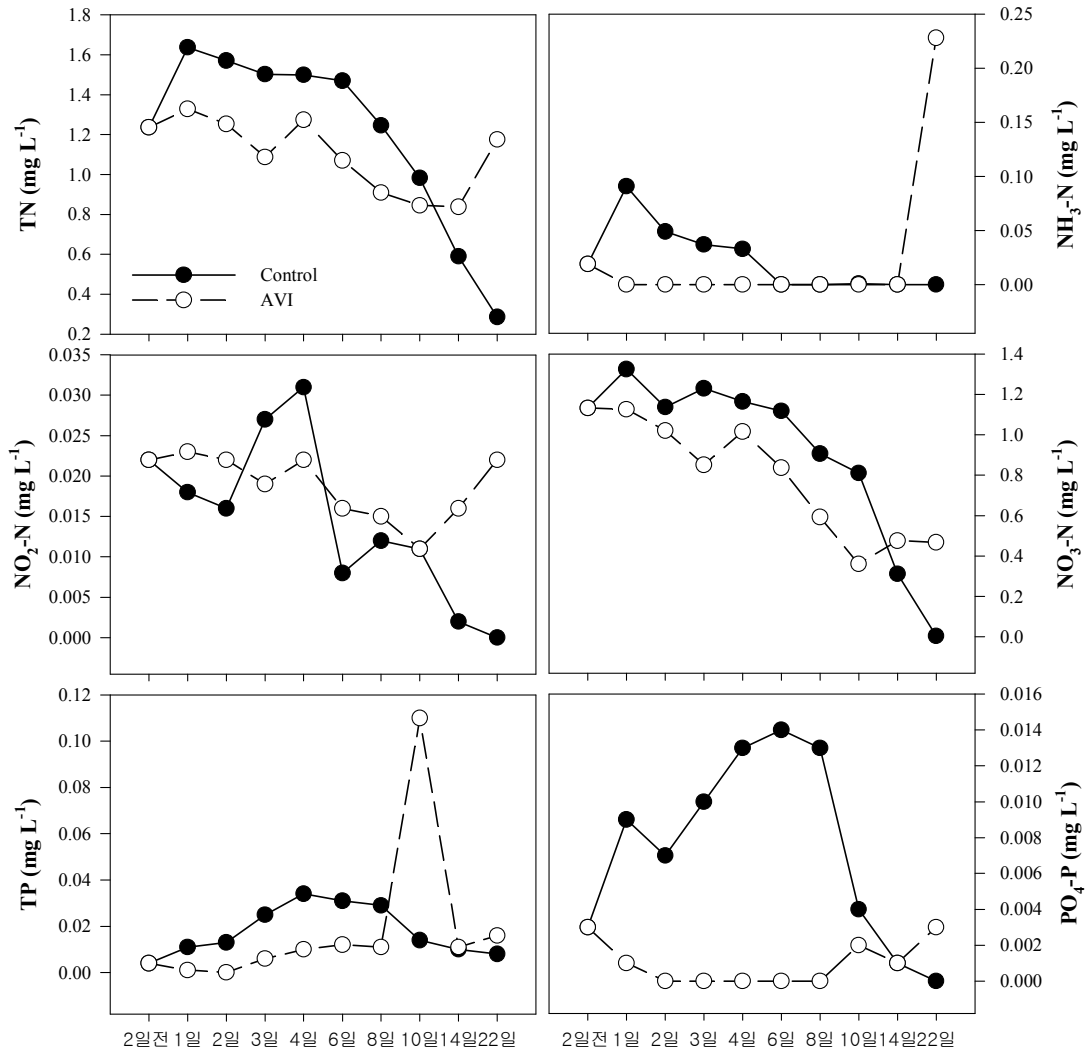
(1) 이중식재기반 인공식물섬과 기타유용생물의 혼합적용 메소코즘

2007년 9월 29일에서 10월 22일까지 신구저수지에 격자형의 8개의 메소코즘($1.2 \times 1.2 \times 2.5$ m)을 제작하고 대조군(control), 수표면적의 22%에 해당하는 0.5 m^2 의 이중식재기반 인공식물섬에 노랑꽃창포 8포트를 식재한 처리군(AVI), 말조개(38.2 ind. m^{-2})처리군, 새뱅이(440 ind. m^{-2})처리군로 나누어 총 23일 동안 2반복으로 실시하였다.

수질분석은 현장에서 시료를 채취하여 수질오염공정시험법에 준하여 전처리를 실시하고 농어촌연구원 실험실로 옮겨 분석을 실시하였다. 동물플랑크톤 넷트(망목 $63 \mu\text{m}$)를 이용하여 채집을 하고, 식물플랑크톤은 채집 후 실험실에서 시료를 24 hr 이상 안정된 장소에 보관하여 식물플랑크톤을 침전시킨 조사하였다. 한국담수조류도감(정, 1993), 댐저수지의 조류사진집(수자원연구소), 팔당호 식물플랑크톤 사진집(국립환경연구원)플랑크톤의 분류 및 동정은 한국동식물도감과 일본 해수/담수동물플랑크톤검색도설 등을 참조하여 실시하였다.

(가) 수질조사 결과

신구저수지에 설치한 메소코즘을 이용한 이중식재기반 인공식물섬 수질정화효과를 검토한 결과 질소성분의 변화는 실험기간 중 무처리구에서는 6일 이후 감소세를 보였으나 그 변화폭은 적고 총질소와 질산성 질소의 경우 최종적으로 재상승하였다. 그러나 이중식재기반 인공식물섬을 설치한 시험구에서는 4일 이후 질소의 뚜렷한 감소를 보여 실험이 종료되는 22일까지 지속되었다. 이러한 결과는 이중식재기반 인공식물섬의 식물체에 의한 질소 흡수가 발생한 것으로 판단할 수 있다.



[그림 3.2.22] 메소코즘(이중식재기반 인공식물섬)내의 수질변화

총인과 인산염인의 경우 실험초기 증가세를 보이다가 8일 이후 지속적으로 감소하였으나 무처리구의 경우 농도변화를 관찰하기 어려웠다. 이는 당초 메소코즘 내 농도가 낮았던데 원인이 있는 것으로 판단된다. 그러나 동일조건에서 실험이 이루어졌다는 가정하에서 고찰해볼 때 이중식재기반 인공식물섬의 초기농도증가가 설명되어야 한다. 이중식재기반 인공식물섬 처리구의 초기농도상승은 당초 실험구 설치 후 2-3일의 안정화 기간을 두었던데 원인이 있는 것으로 초기 입자성 물질이 저층부에 퇴적 된 후 실험이 개시시점에서 이중식재기반 인공식물섬의 정착에 따라 미생물활성이 높아지고 퇴적물 중의 초기 인함유 퇴적물 분해에 따른 무기화용존인 증가 등으로 농도가 증가하고 점진적으로 이중식재기반 인공식물섬의 식물에 의한 흡수 증가로 농도가 감소한 것으로 추정된다.

결과적으로 이중식재기반 인공식물섬 도입직후 조류 제어를 통한 높은 투명도 증가를 보였으며, 10일 이후 NO₂-N, NO₃-N, NH₃-N, PO₄-P 등 영양염에 대한 높은 저감 능력을 보였다. 하

지만, 투명도와 영양염 조절 등 수질개선 효과가 있는 반면, 2일 이후 DO 농도가 50% 이상 감소하였다.

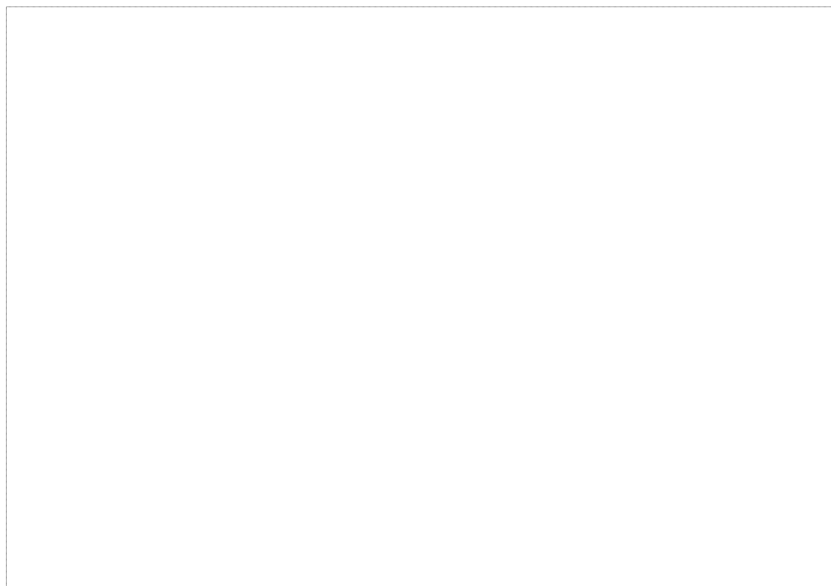
(나) 동물플랑크톤 효과 분석

메소코즘 조사에서 이중식재기반 인공식물섬을 설치한 실험구에서 경과일수별로 동물플랑크톤의 종류와 개체수를 파악하여 수질변화에 효과적인 분류군을 예측해 보았다.

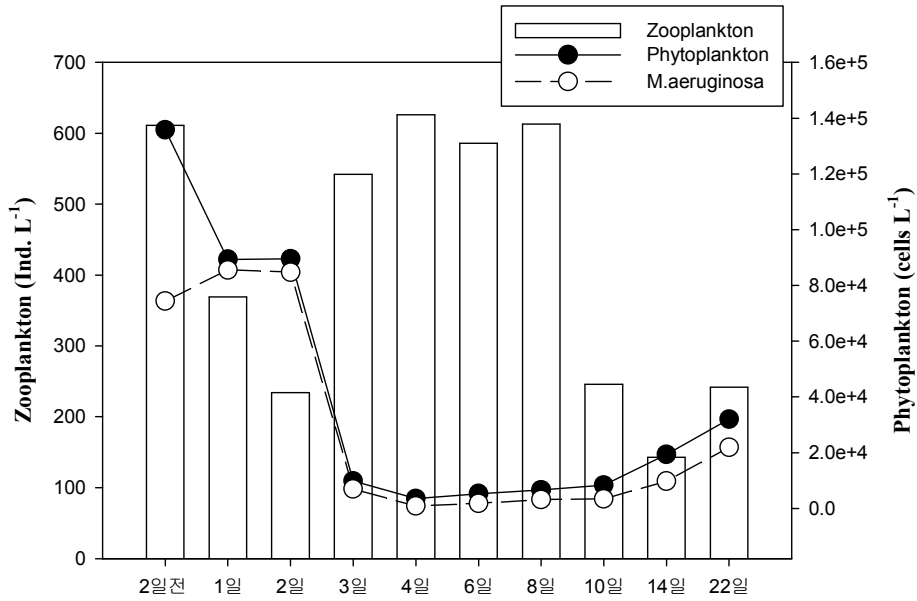
메소코즘 중 이중식재기반 인공식물섬을 넣은 실험구를 중점 조사 한 결과, 원생동물 2종, 운형류 15종, 지각류 4종, 요각류 2종이 포함되어 총 23종이 출현하였다. 조사 초반 원생류인 *Pontigulasia* sp., 운충류인 *Trichocera marina*, *Trichocera longispina*, *Keratella valga*가 최우점하다가 조사일수가 지날수록 지각류가 우점하게 된다. 출현하는 지각류에는 남조류를 섭식할 것이라 추정되고 있는 *B. longistris*의 개체수가 3일째부터 크게 증가하여 6일 전후로 최고치를 기록하는 양상을 보였다. 이런 결과는 수질개선 상태를 알 수 있는 다른 수치와 비교해 봤을 때 동물플랑크톤 중 지각류의 개체수 변화가 수질 개선 변화에 영향을 미쳤음을 알 수 있다.

그러나, 8일째 이후로 지각류의 개체수가 급격히 줄어들었는데, 이것은 메소코즘의 공간적 한계에 의한 부족한 먹이 섭식과 이동 능력 저하 등의 원인들에 의한 것으로 해석된다. 또한, 식물플랑크톤의 총세포수, 남조류인 *Microcystis aeruginosa*를 지각류와 비교해 본 결과 반비례관계를 나타내는 것으로 보아 상호먹이 연쇄 관계에 있어 알려진 대로 일부 섭식이 이루어진 것으로 보여진다.

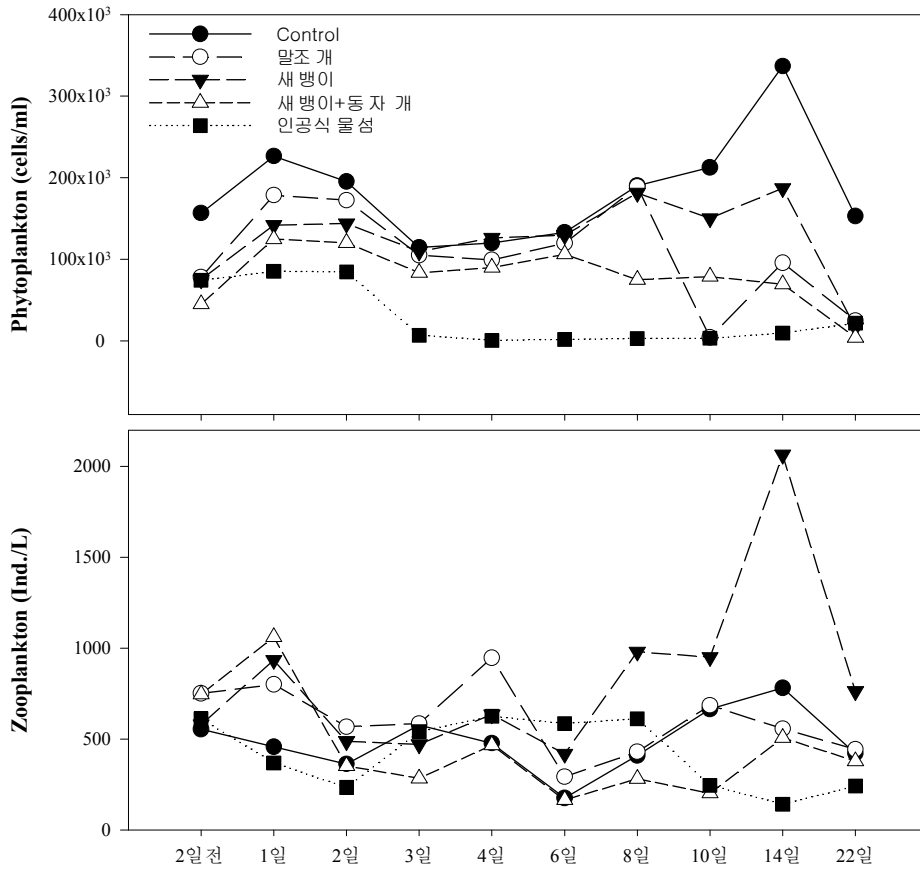
메소코즘의 다른 실험구에서는 이런 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는 것으로 보아 이중식재기반 인공식물섬이 수질 개선에 도움은 물론 식물 플랑크톤의 먹이 연쇄에 있는 동물플랑크톤의 안정적인 서식처 역할을 제공하는 것으로 보인다.



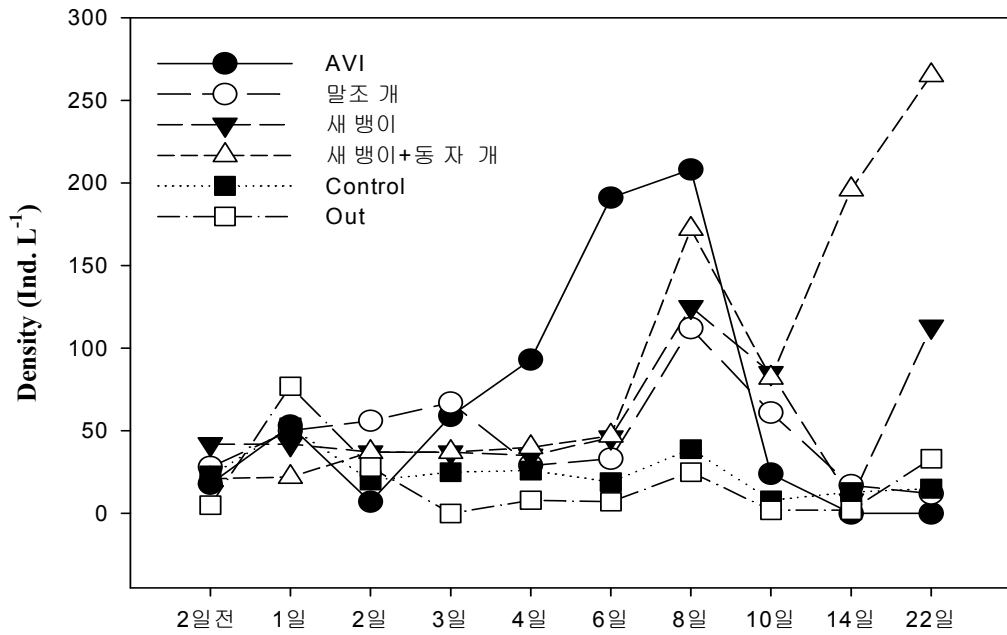
[그림 3.2.23] 메소코즘(이중식재기반 인공식물섬)의 동물플랑크톤 분류군별 현존량



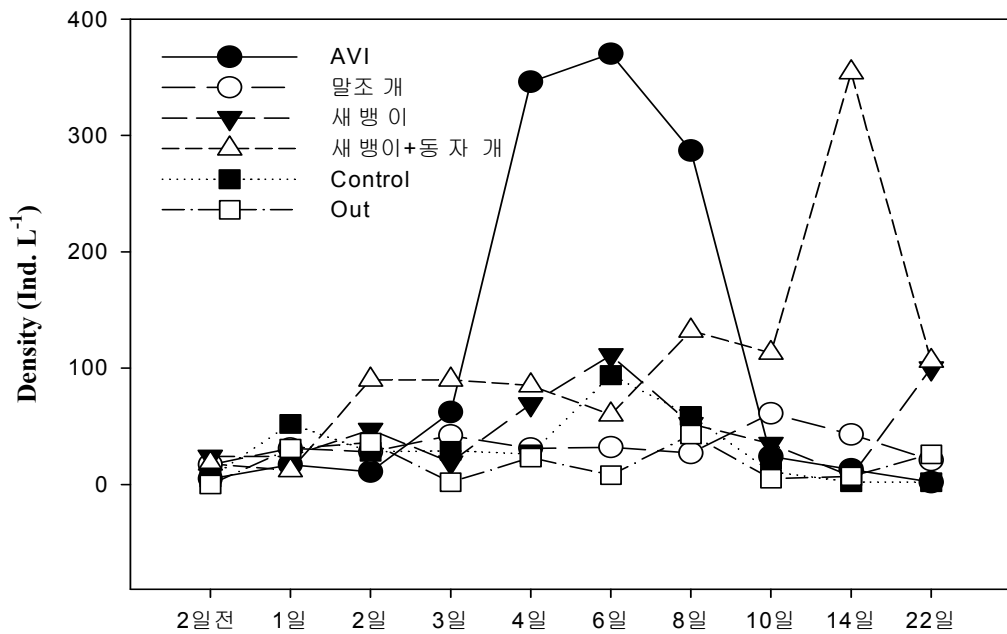
[그림 3.2.24] 메소코즘(이중식재기반 인공식물섬)의 동물플랑크톤 분류군별 현존량



[그림 3.2.25] 메소코즘(이중식재기반 인공식물섬)내 동·식물플랑크톤 조건별 현존량 비교



[그림 3.2.26] 메소코즘(이중식재기반 인공식물섬)내 *Bosmina coregoni* 조건별 현존량 비교



[그림 3.2.27] 메소코즘(이중식재기반 인공식물섬)내 *Bosmina longirostris* 조건별 현존량 비교

[표 3.2.18] 메소코즘(이중식재기반 인공식물섬)내 수질 분석결과

Station	Date	T-N	T-P	NO ₂ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P
대조군	2일전	1.236	0.004	0.022	1.133	0.019	0.003
	1일	1.637	0.011	0.018	1.325	0.091	0.009
	2일	1.571	0.013	0.016	1.137	0.049	0.007
	3일	1.502	0.025	0.027	1.230	0.037	0.010
	4일	1.499	0.034	0.031	1.165	0.033	0.013
	6일	1.470	0.031	0.008	1.118	-	0.014
	8일	1.246	0.029	0.012	0.907	-	0.013
	10일	0.983	0.014	0.011	0.811	-	0.004
	14일	0.590	0.010	0.002	0.312	-	0.001
	22일	0.286	0.008	-	0.004	-	-
	이중식재기반 인공식물섬	2일전	1.236	0.004	0.022	1.133	0.019
1일		1.328	0.001	0.023	1.126	-	0.001
2일		1.253	-	0.022	1.021	-	-
3일		1.087	0.006	0.019	0.851	-	-
4일		1.274	0.010	0.022	1.016	-	-
6일		1.070	0.012	0.016	0.837	-	-
8일		0.909	0.011	0.015	0.593	-	-
10일		0.845	0.110	0.011	0.361	-	0.002
14일		0.838	0.011	0.016	0.476	-	0.001
22일		1.175	0.016	0.022	0.468	0.228	0.003

[표 3.2.19] 메소코즘(이중식재기반 인공식물섬)의 동물플랑크톤 종조성

Species \ Date	2일전	1일	2일	3일	4일	6일	8일	10일	14일	22일
Protozoa										
<i>Diffugia elegans</i>	4	2	1	2	1	0	0	0	0	0
<i>Pontigulasia</i> sp.	110	38	25	14	2	0	0	13	0	0
Rotifera										
<i>Asplanchna</i> sp.	10	27	2	3	0	0	0	0	0	0
<i>Brachionus calyciflorus</i>	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Brachionus forficula</i>	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>Euclanis dilatata</i>	0	0	0	0	0	0	2	0	6	0
<i>Filinia longiseta</i>	1	0	1	1	0	0	2	0	2	1
<i>Keratella valga</i>	91	23	14	41	16	2	5	5	1	0
<i>Keratella quadrata cruvicornis</i>	0	0	0	0	0	1	0	1	1	2
<i>Lecane ludwigii</i>	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Monostyla bulla</i>	1	1	3	5	1	1	8	19	5	2
<i>Polyarthra remata</i>	31	26	31	43	14	1	18	47	50	165
<i>Schizocerca diversicornis</i>	13	6	4	5	1	0	0	0	0	0
<i>Trichoceramarina</i>	116	29	12	49	9	1	3	4	0	13
<i>Trichocera longispina</i>	98	46	43	133	72	9	5	3	2	0
Cladocera										
<i>Alona rectangula</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Bosmina coregoni</i>	23	53	7	59	93	191	208	24	0	0
<i>Bosmina longispina</i>	0	17	11	62	346	370	287	24	13	2
<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	6	4	5	29	9	0	12	2	0	0
Copepoda										
<i>Thermocyclops taihokuensis</i>	5	0	2	0	0	1	3	1	1	0
<i>Mesocyclops dissimilis</i>	0	1	1	0	4	0	1	0	0	0
<i>Copepodites</i>	7	16	6	14	27	6	10	21	28	34
<i>Nauplius</i>	84	79	65	82	31	3	49	82	34	23
Total	611	369	234	542	626	586	613	246	143	242

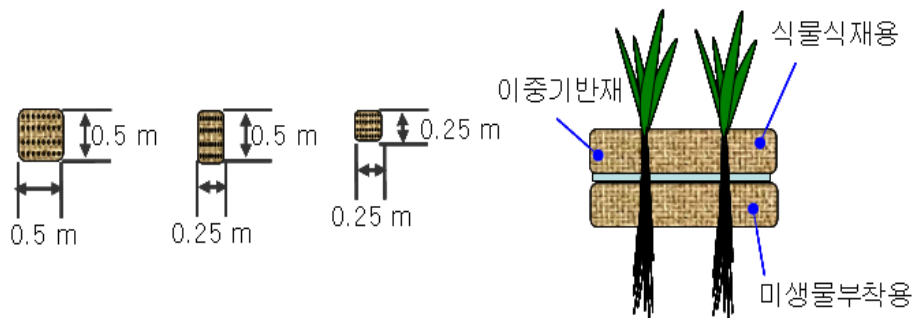
[표 3.2.20] 메소코즘(이중식재기반 인공식물섬)의 식물플랑크톤 종조성

Species	Date	9.31	10.1	10.2	10.3	10.4	10.6	10.8	10.1	10.14	10.22
	Chlorophyceae										
<i>Polyedriopsis spinulosa</i>		40	0	0	40	0	0	0	80	40	120
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>		0	100	80	0	0	80	0	0	800	1,880
<i>Closterium aciculare</i>		0	0	0	0	0	0	80	40	40	760
<i>Pediastrum duplex</i>		0	0	0	120	0	0	0	0	960	1,280
<i>Pediastrum simplex</i>		200	0	0	160	0	0	0	0	0	0
<i>Tetradron</i>		0	0	0	0	0	0	80	0	0	0
<i>Scenedesmus</i> spp.		1,040	720	640	240	480	280	440	320	1,200	1,520
<i>Staurastrum</i> sp.		240	60	120	120	80	80	120	0	40	160
<i>Actinastrum hantzschii</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	280	0
<i>spirulina</i>		0	360	720	0	0	0	0	0	0	0
<i>Aulacoseira</i> sp.		880	1,220	1,560	600	520	480	700	280	720	0
<i>Crucigenia</i> sp.		0	0	0	0	0	0	140	0	800	1440
<i>Cyclotella</i> sp.		640	400	520	80	0	120	120	480	1,080	840
<i>Fragillaria crotonensis</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	120	0
<i>Navicular</i> sp.		120	20	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Synedra</i> sp.		0	0	0	0	200	120	40	0	80	360
<i>Kirchneriella obesa</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	80	200
Cryptophyceae											
<i>Cryptomonas ovata</i>		60	100	360	160	760	120	420	760	600	280
<i>Gloeocystitis gigas</i>		0	100	0	0	0	320	0	0	0	320
Chrysophyceae											
<i>Tetraedron regulare</i>		0	0	0	0	0	160	0	0	0	0
Cyanophyceae											
<i>Microcystis aeruginosa</i>		74,380	85,500	84,720	6,960	880	1,800	3,160	3,360	9,760	21,920
<i>Teubaria</i> sp.		0	0	0	0	0	0	40	80	0	0
Euglenophyceae											
<i>Trachelomonas</i> spp.		60	260	320	440	160	320	180	480	240	200
<i>Nitzschia</i>		920	300	440	800	440	760	860	1,520	2,360	720
<i>Coronastrum lunatum</i>		0	0	0	160	0	640	240	960	160	0

(2) 이중식재기반 인공식물섬 설치면적 검토

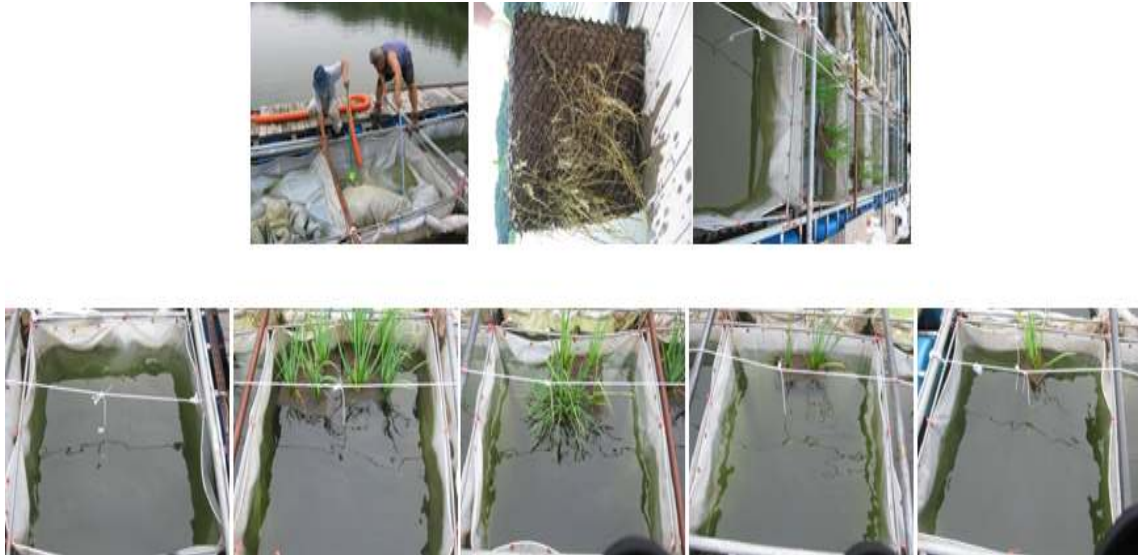
2008년 8월 12일에서 22일까지 7회에 걸쳐 신구저수지에 메소코즘을 만들어 조사 하였다. 메조코즘의 규격은 격자형의 5개의 메소코즘(1.2 × 1.2 × 2.5 m)을 제작하고 대조군(control), 수표면적의 35%에 해당하는 0.5 m² 크기의 노랑꽃창포를 식재한 이중식재기반 인공식물섬(M1), 수표면적의 17.4%에 해당하는 0.25 m² 크기의 이중식재기반 인공식물섬(M2), 수표면적의 8.7%에 해당하는 0.125 m² 크기의 이중식재기반 인공식물섬(M3), 수표면적의 4.3%에 해당하는 0.0625 m² 이중식재기반 인공식물섬(M4)으로 나누어 실시하였다.

수질분석은 현장에서 시료를 채취하여 수질오염공정시험법에 준하여 전처리를 실시하고 농어촌연구원 실험실로 옮겨 분석을 실시하였다. 동물플랑크톤 넷트(망목 63 μm)를 이용하여 채집을 하고, 식물플랑크톤은 채집 후 실험실에서 시료를 24 hr 이상 안정된 장소에 보관하여 식물플랑크톤을 침전시킨 후 조사하였다. 한국담수조류도감(정준, 1993), 댐저수지의 조류사진집(수자원연구소), 팔당호 식물플랑크톤 사진집(국립환경연구원) 플랑크톤의 분류 및 동정은 한국동식물도감과 일본 해수/담수동물플랑크톤검색도설 등을 참조하여 실시하였다.



Blank				
	피복율 : 35%	피복율 : 17.4%	피복율 : 8.7%	피복율 : 4.3%
	식물섬 면적 : 0.5 m ²	식물섬 면적 : 0.25 m ²	식물섬 면적 : 0.125 m ²	식물섬 면적 : 0.0625 m ²

[그림 3.2.28] 이중식재기반 인공식물섬 규격 및 형태



[그림 3.2.29] 이중식재기반 인공식물섬 설치 모습

(가) 수질분석

수온은 조사기간 동안 25.5~30.54℃ 범위의 분포를 나타냈고 조사가 진행될수록 수온이 떨어지는 양상을 보였다. 수온 차이는 조사일내에서는 각 정점별로 0.1℃ 내외로 거의 차이가 나지 않았다.

용존산소농도(DO)는 조사기간 동안 2.06~12.41 mg L⁻¹ 범위의 분포를 나타냈고, 각 조사 시기 동안 처리간의 용존산소농도 차이는 두드러진 차이를 보였다. 대조군(control)을 제외한 다른 처리에서는 실험 6일째까지 최대 7 mg L⁻¹까지 용존산소량이 떨어지다가 8, 10일째 소폭 증가하는 양상을 보였다. 특히, 용존산소농도는 식물플랑크톤과 관련이 있다고 알려져 있는데, 피복률이 높을수록 용존산소량은 급속히 줄어들고 식물플랑크톤의 양도 줄어든 것을 볼 수 있었다.

전기전도도(EC)는 조사기간 동안 0.142~0.161 mS cm⁻¹ 범위의 분포를 보였는데, 같은 조사일내에서는 거의 차이가 없었다.

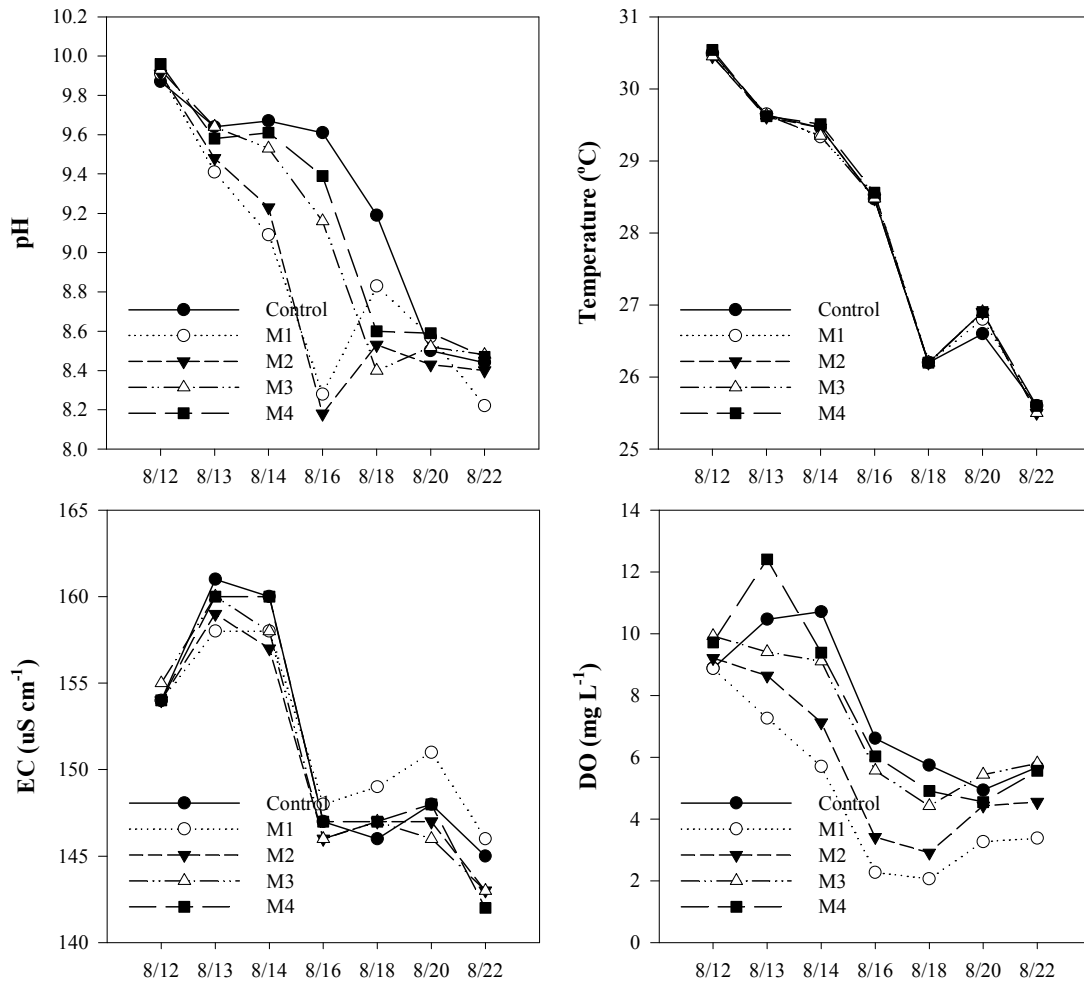
화학적산소요구량(COD)은 7.2~15.2 mg L⁻¹의 범위의 분포를 나타내었고, 조사기간이 경과함에 따라 낮아지는 양상을 보였다. 또한, 조사시기내에서 대조군(control)이 항상 0.2~2 mg L⁻¹ 정도로 높은 수치를 보여서 이중식재기반 인공식물섬을 투입한 다른 처리구에 비해 비교적 정화효율이 떨어진다는 것을 알 수 있었다. 다른 처리구에서는 조사기간이 경과할수록 피복률이 높은 처리구에서 낮은 수치를 보였다.

Chl-*a* 농도는 4.4~44.4 mg L⁻¹의 범위의 분포를 나타냈다. 조사 1일째와 조사 10일째를 비교해보니 8.4~37.6 mg L⁻¹의 감소 효과를 보였다.

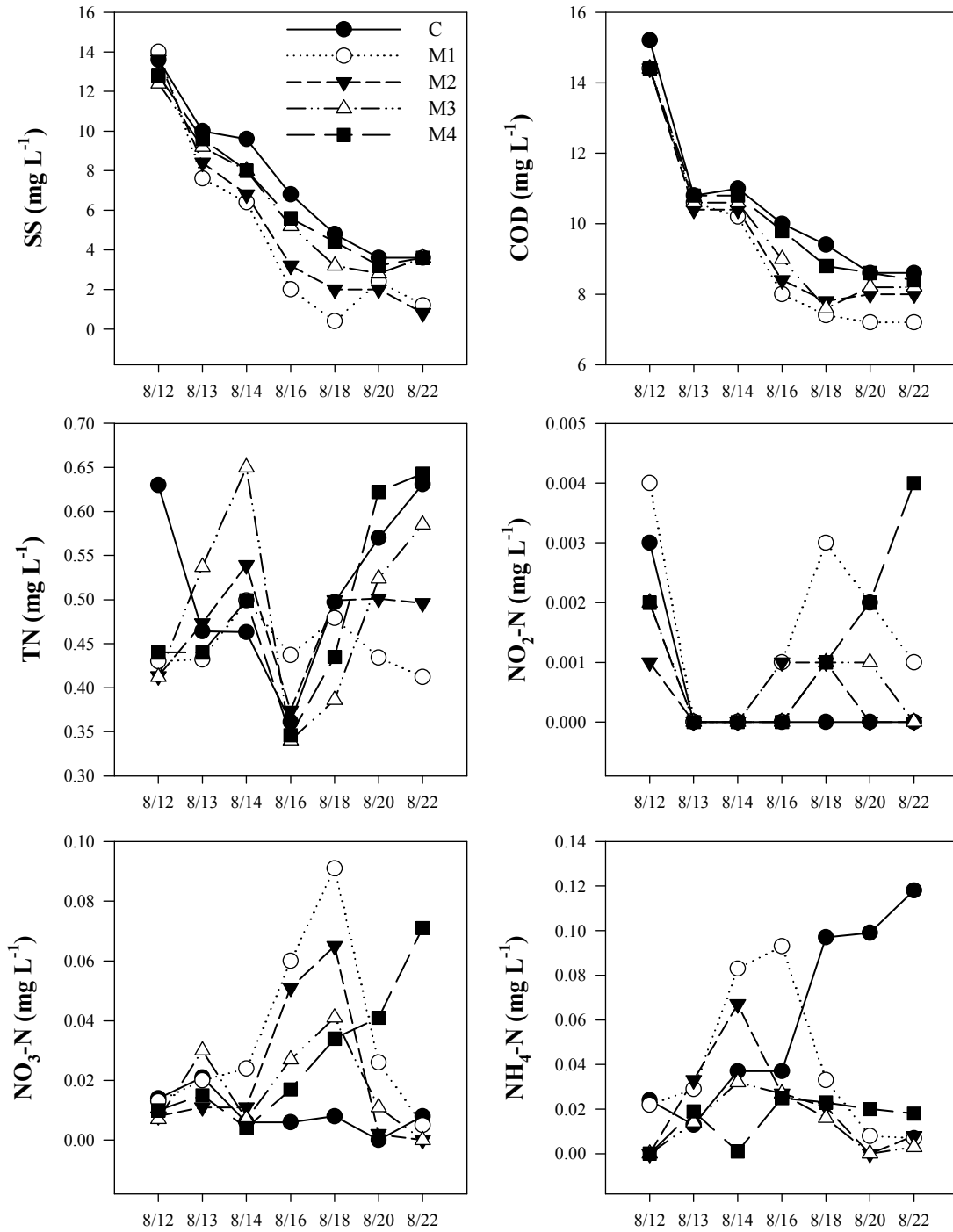
부유물질 농도(SS)는 0.8~14.0 mg L⁻¹ 범위의 분포를 나타냈다. 피복률이 가장 높은 정점에서 6일 만에 14 mg L⁻¹에서 0.4 mg L⁻¹로 낮아지는 양상을 보였고, 다른 정점에서는 비교적 유사하게 나타났다.

총질소 농도는 $0.34 \sim 0.63 \text{ mg L}^{-1}$ 범위의 분포를 나타냈다. 비교적 실험 4일째까지는 총질소가 낮아지다가 그 이후로 거의 모든 정점에서 높아지는 양상을 보였다.

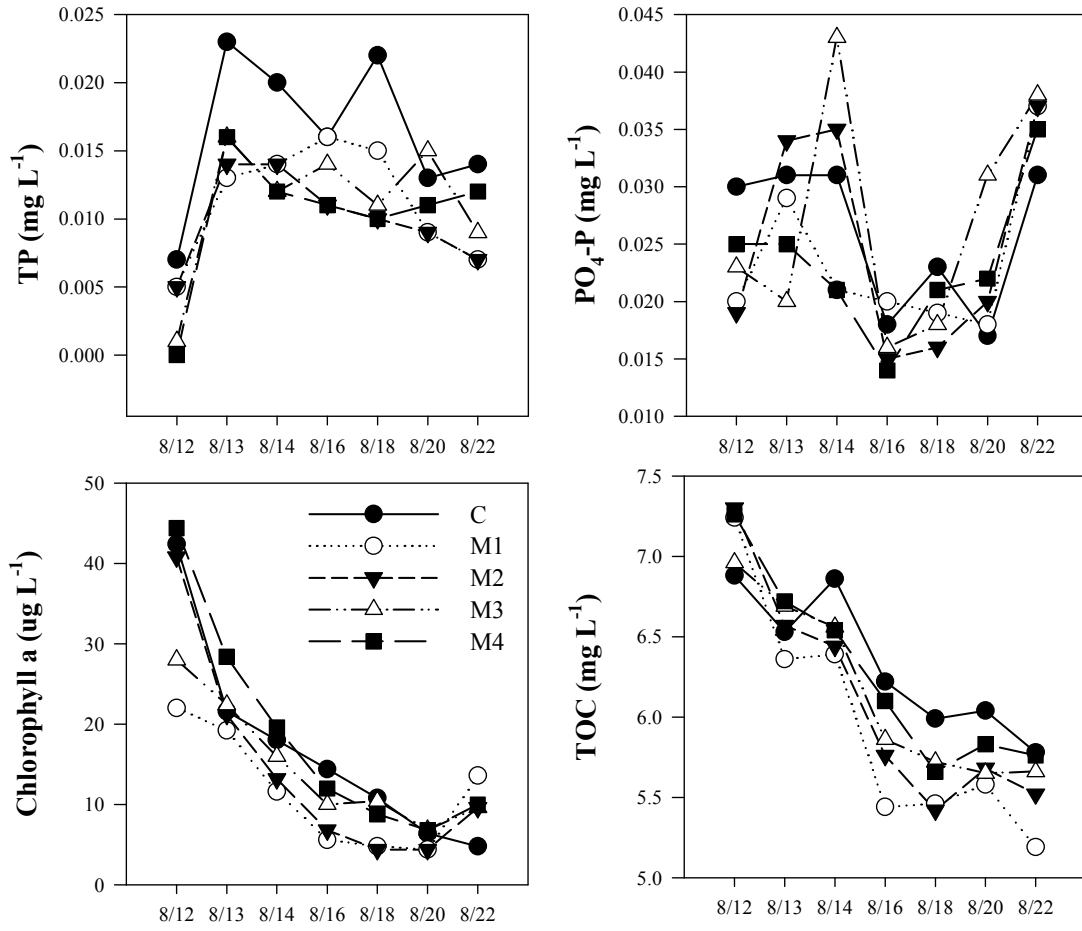
총인 농도는 $0.015 \sim 0.043 \text{ mg L}^{-1}$ 범위의 분포를 나타냈다. 총인의 농도 총질소와 유사하게 실험 4일째까지는 낮아지다가 그 이후부터는 높아졌다.



[그림 3.2.30] 메소코즘내 수질변화



[그림 3.2.31] 메소코즘내 수질 변화



[그림 3.2.32] 메소코즘내 수질 변화

[그림 3.2.33] 각 처리면적별 투명도 변화

[표 3.2.21] 현장 수질 분석 결과

		Control	M1	M2	M3	M4
8월 12일	pH	9.87	9.91	9.91	9.93	9.96
	EC	154	154	154	155	154
	DO	8.88	8.87	9.21	9.93	9.72
	DO%	118.8	117	123.1	135.3	129.7
	Temp.	30.5	30.48	30.45	30.45	30.54
	SD	60	-	-	-	-
8월 13일	pH	9.64	9.41	9.48	9.64	9.58
	EC	161	158	159	160	160
	DO	10.47	7.26	8.64	9.41	12.41
	DO%	137.8	95.5	113.7	123.6	29.62
	Temp.	29.64	29.65	29.61	29.63	29.62
8월 14일	pH	9.67	9.09	9.23	9.53	9.61
	EC	160	158	157	158	160
	DO	10.71	5.7	7.13	9.11	9.39
	DO%	140.4	74.7	29.46	119.2	123.2
	Temp.	29.46	29.33	29.46	29.35	29.51
8월 16일	pH	9.61	8.28	8.18	9.16	9.39
	EC	147	148	146	146	147
	DO	6.61	2.27	3.41	5.57	6.03
	DO%	84.7	29.2	44.1	72.1	51.8
	Temp.	28.47	28.53	28.48	28.48	28.56
8월 18일	pH	9.19	8.83	8.53	8.4	8.6
	EC	146	149	147	147	147
	DO	5.74	2.06	2.91	4.42	4.91
	DO%	70.8	25.5	35.9	54.7	60.8
	Temp.	26.2	26.2	26.2	26.2	26.2
8월 20일	pH	8.5	8.57	8.43	8.52	8.59
	EC	148	151	147	146	148
	DO	4.94	3.27	4.43	5.44	4.55
	DO%	61.8	40.6	55.3	68.3	57
	Temp.	26.6	26.8	26.9	26.9	26.9
	SD	150	220	210	170	170
8월 22일	pH	8.44	8.22	8.4	8.48	8.47
	EC	145	146	143	143	142
	DO	5.68	3.38	4.55	5.8	5.56
	DO%	69.5	41.3	55.6	71	67.9
	Temp.	25.6	25.6	25.5	25.5	25.6
	SD	190	230	220	180	180

[표 3.2.22] 수질 분석 결과

		COD	SS	T-N	NO ₃ -N	NO ₂ -N	NH ₃ -N	T-P	PO ₄ -P	Chl- <i>a</i>	TOC
8/12	C	15.2	13.6	0.630	0.014	0.003	0.024	0.030	0.007	42.4	6.88
	M1	14.4	14.0	0.430	0.013	0.004	0.022	0.020	0.005	22.0	7.24
	M2	14.4	13.6	0.413	0.008	0.001	0.000	0.019	0.005	40.8	7.30
	M3	14.4	12.4	0.412	0.007	0.002	0.000	0.023	0.001	28.0	6.96
	M4	14.4	12.8	0.440	0.010	0.002	0.000	0.025	0.000	44.4	7.26
8/13	C	10.8	10.0	0.464	0.021	0.000	0.013	0.031	0.023	21.6	6.53
	M1	10.6	7.6	0.432	0.020	0.000	0.029	0.029	0.013	19.2	6.36
	M2	10.4	8.4	0.473	0.011	0.000	0.033	0.034	0.014	21.2	6.57
	M3	10.6	9.2	0.537	0.030	0.000	0.014	0.020	0.016	22.4	6.69
	M4	10.8	9.6	0.440	0.015	0.000	0.019	0.025	0.016	28.4	6.72
8/14	C	11.0	9.6	0.463	0.006	0.000	0.037	0.031	0.020	18.0	6.86
	M1	10.2	6.4	0.499	0.024	0.000	0.083	0.021	0.014	11.6	6.39
	M2	10.4	6.8	0.539	0.011	0.000	0.067	0.035	0.014	13.2	6.44
	M3	10.6	8.0	0.650	0.007	0.000	0.032	0.043	0.012	16.0	6.56
	M4	10.8	8.0	0.499	0.004	0.000	0.001	0.021	0.012	19.6	6.54
8/16	C	10.0	6.8	0.361	0.006	0.000	0.037	0.018	0.016	14.4	6.22
	M1	8.0	2.0	0.437	0.060	0.001	0.093	0.020	0.016	5.6	5.44
	M2	8.4	3.2	0.374	0.051	0.001	0.027	0.015	0.011	6.8	5.76
	M3	9.0	5.2	0.340	0.027	0.000	0.027	0.016	0.014	10.0	5.86
	M4	9.8	5.6	0.346	0.017	0.000	0.025	0.014	0.011	12.0	6.10
8/18	C	9.4	4.8	0.497	0.008	0.000	0.097	0.023	0.022	10.8	5.99
	M1	7.4	0.4	0.479	0.091	0.003	0.033	0.019	0.015	4.8	5.46
	M2	7.8	2.0	0.499	0.065	0.001	0.021	0.016	0.010	4.4	5.42
	M3	7.6	3.2	0.386	0.041	0.001	0.016	0.018	0.011	10.4	5.72
	M4	8.8	4.4	0.435	0.034	0.001	0.023	0.021	0.010	8.8	5.66
8/20	C	8.6	3.6	0.570	0.000	0.000	0.099	0.017	0.013	6.4	6.04
	M1	7.2	2.4	0.434	0.026	0.002	0.008	0.018	0.009	4.4	5.58
	M2	8.0	2.0	0.501	0.002	0.000	0.000	0.020	0.009	4.4	5.68
	M3	8.2	2.8	0.524	0.011	0.001	0.000	0.031	0.015	6.8	5.65
	M4	8.6	3.2	0.622	0.041	0.002	0.020	0.022	0.011	6.8	5.83
8/22	C	8.6	3.6	0.631	0.008	0.000	0.118	0.031	0.014	4.8	5.78
	M1	7.2	1.2	0.412	0.005	0.001	0.007	0.037	0.007	13.6	5.19
	M2	8.0	0.8	0.496	0.000	0.000	0.008	0.037	0.007	9.6	5.52
	M3	8.2	3.6	0.585	0.000	0.000	0.003	0.038	0.009	9.6	5.66
	M4	8.4	3.6	0.643	0.071	0.004	0.018	0.035	0.012	10.0	5.76

(나) 플랑크톤 분석

이중식재기반 인공식물섬의 적정한 면적을 구하기 위하여 메소코즘 실험을 실시하였고, 그 경과 일수 별로 동물 플랑크톤의 종류와 개체수를 파악하여 효과를 검토해 보았다.

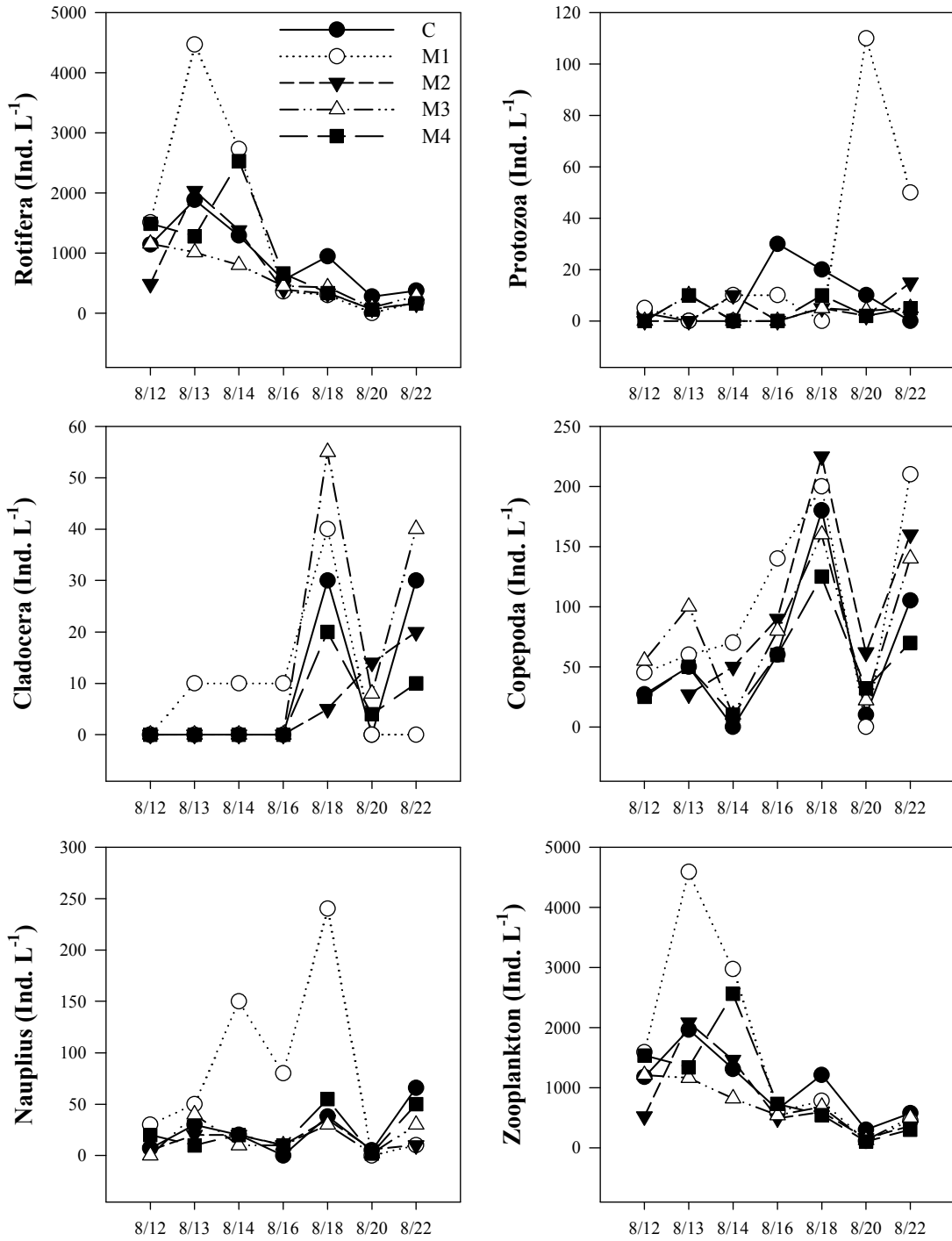
메소코즘 중 대조구에서는 원생동물 1종, 윤충류 15종, 지각류 3종, 요각류 3종이 포함되어 총 22종이 출현하였다. 조사기간 동안 윤충류인 *Trichocera marina*, *Polyarthra remata*, *Keratella valga*가 우점하다가 조사 일수가 경과 할수록 개체수가 줄어들게 된다. 우점하는 동물플랑크톤 중 *Trichocera marina*를 제외하고는 여타 종의 개체수가 6일째 이후부터 크게 줄어드는 양상을 보였다.

메소코즘 중 피복률 35%에 해당하는 실험구에서는 원생동물 2종, 윤충류 16종, 지각류 2종, 요각류 2종이 포함되어 총 22종이 출현하였다. 조사기간 동안 윤충류인 *Brachionus calyciflorus*, *Trichocera marina*, *Polyarthra remata*가 우점하다가 조사 일수가 지날수록 전반적으로 개체수가 줄어들게 된다. 특히, 실험 8일째 원생동물인 *Pontigulasia*를 제외한 다른 동물플랑크톤이 전혀 관찰되지 않았고, 10일째 이후 일부가 다시 보였다.

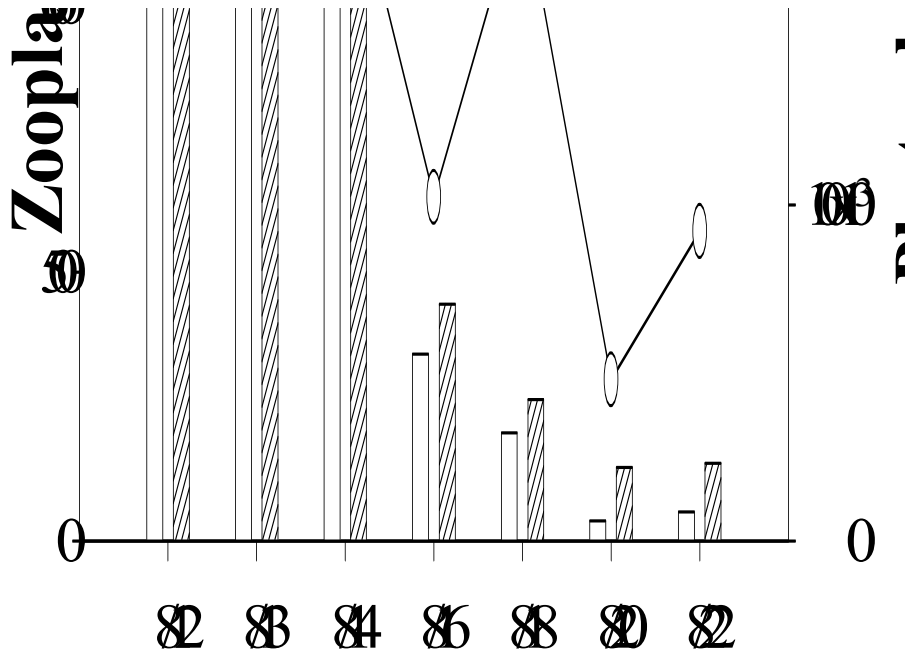
메소코즘 중 피복률 17.4%에 해당하는 실험구에서는 원생동물 1종, 윤충류 13종, 지각류 3종, 요각류 2종을 포함되어 총 19종이 출현하였다. 조사기간동안 윤충류인 *Trichocera marina*, *Polyarthra remata*가 우점하다가 조사 일수가 지날수록 전반적으로 개체수가 줄어들게 된다.

메소코즘 중 피복률 8.7%에 해당하는 실험구에서는 원생동물 1종, 윤충류 13종, 지각류 4종, 요각류 1종이 포함되어 총 19종이 출현하였다. 조사기간 동안 윤충류인 *Brachionus calyciflorus*은 실험 3~5일째까지 개체수가 증가하다가 감소하는 경향을 보였고, *Polyarthra remata*는 실험 1일째날 이후로 지속적으로 감소하는 양상을 보였다. *Trichocera marina*는 실험이후 유사하게 개체수를 유지하다가 5일째 급속히 감소하다가 7일째 급속히 증가하였다.

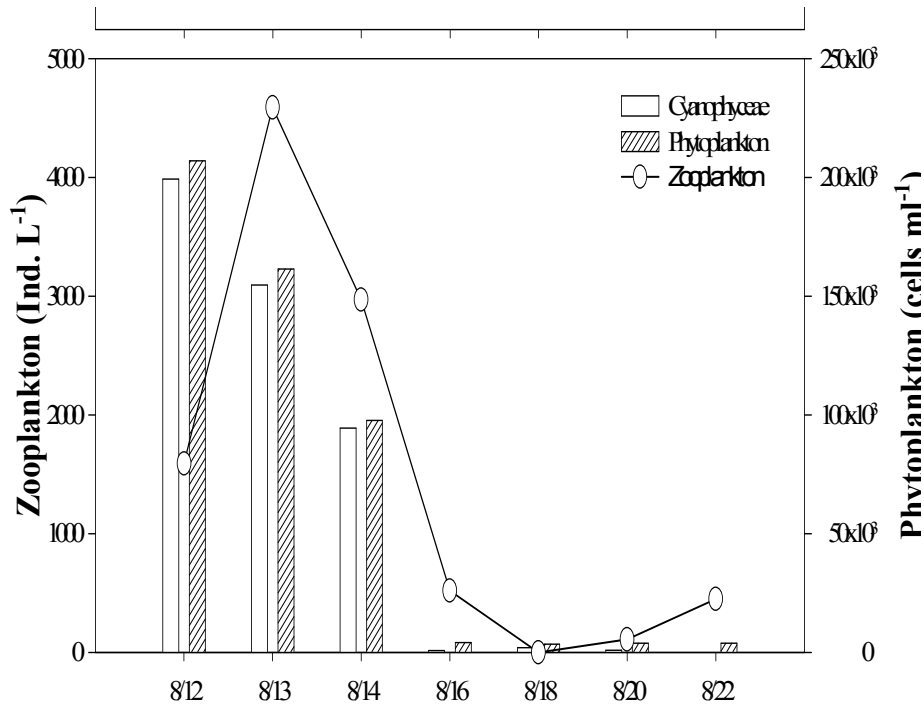
메소코즘 중 피복률 4.3%에 해당하는 실험구에서는 원생동물 2종, 윤충류 16종, 지각류 2종, 요각류 2종이 포함되어 총 22종이 출현하였다. 조사기간 동안 윤충류인 *Brachionus calyciflorus*, *Trichocera marina*, *Keratella valga*가 실험 3일째까지 늘어나다가 조사일수가 지날수록 줄어드는 양상을 보였다. 특히, 실험 8일째 원생동물인 *Pontigulasia*를 제외한 다른 동물플랑크톤이 전혀 관찰되지 않았고, 10일째 이후 일부가 다시 보였다.



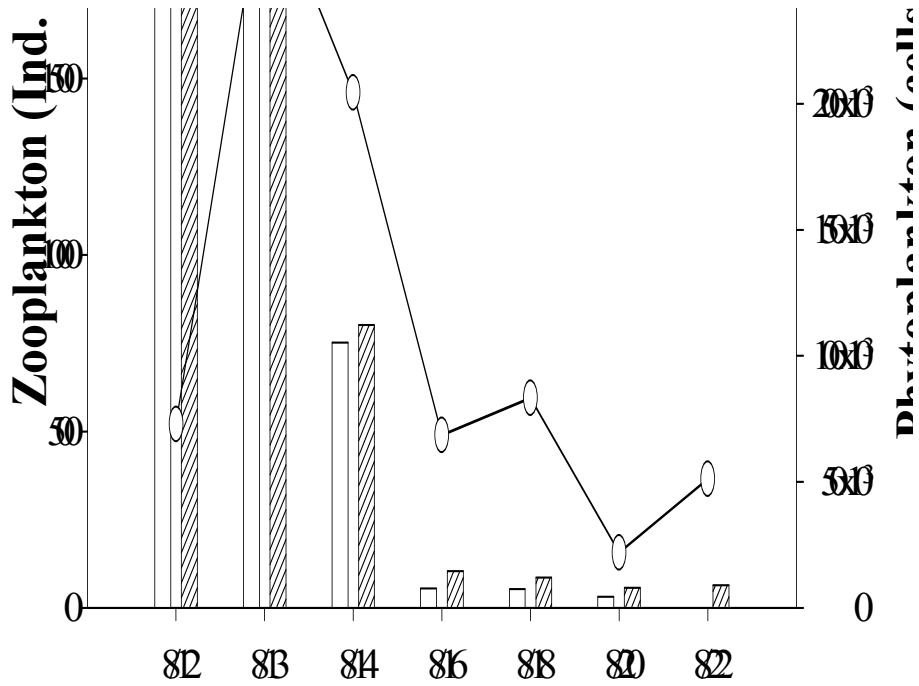
[그림 3.2.34] 이중식재기반 인공식물섬 사용면적 검토 메소코즘 실험에서 나타나는 동물플랑크톤의 분류군별 변화



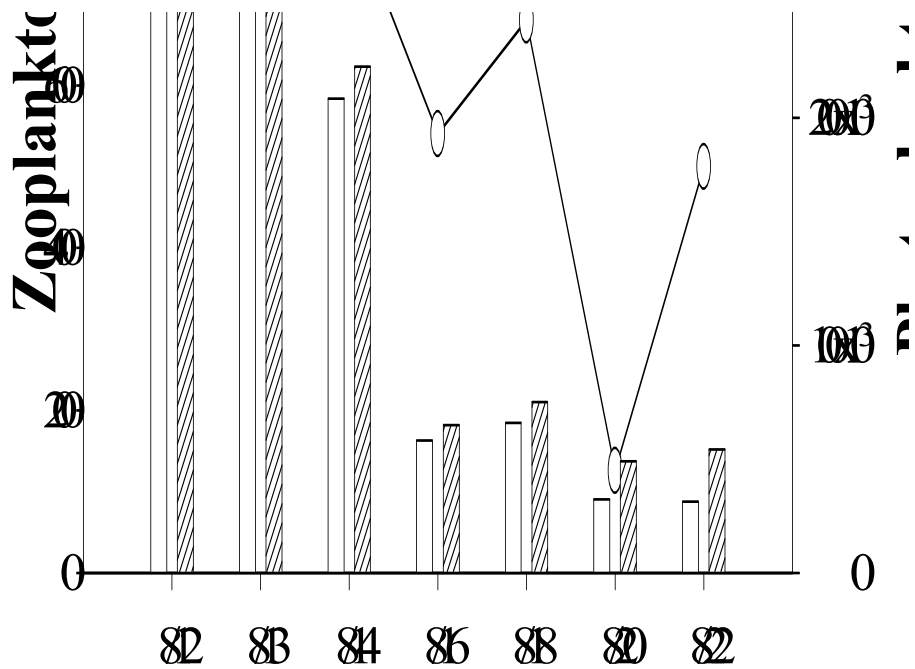
[그림 3.2.35] 이중식재기반 인공식물섬 사용면적 검토 메소코즘 실험에서 나타나는 동물플랑크톤의 분류군별 변화-control



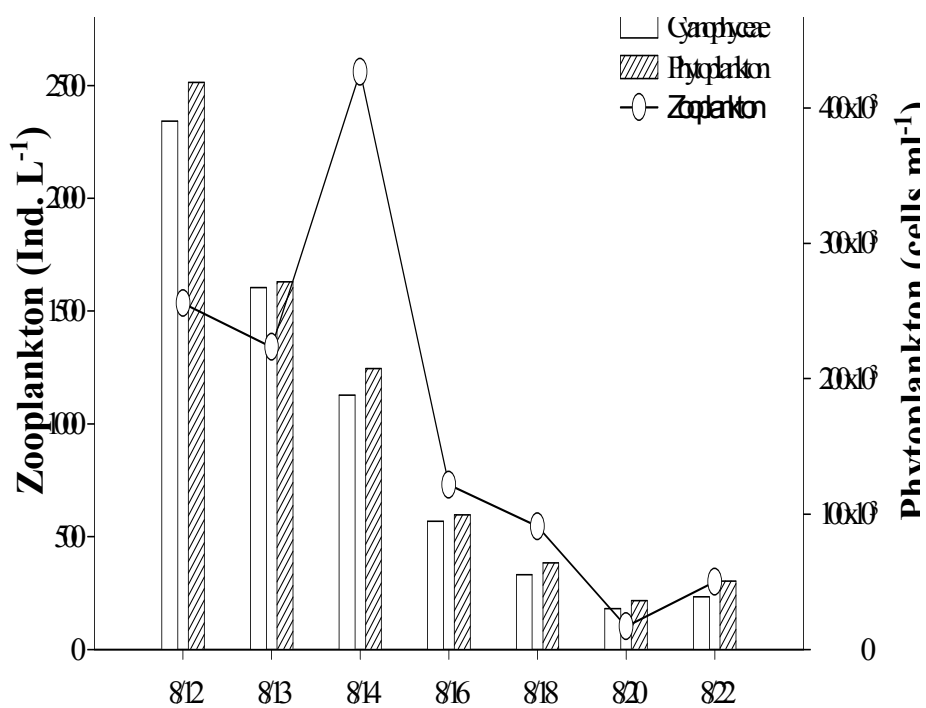
[그림 3.2.36] 이중식재기반 인공식물섬 사용면적 검토 메소코즘 실험에서 나타나는 동물플랑크톤의 분류군별 변화-피복률: 35%



[그림 3.2.37] 이중식재기반 인공식물섬 사용면적 검토 메소코즘 실험에서 나타나는 동물플랑크톤의 분류군별 변화-피복률: 17.4%



[그림 3.2.38] 이중식재기반 인공식물섬 사용면적 검토 메소코즘 실험에서 나타나는 동물플랑크톤의 분류군별 변화-피복률: 8.7%



[그림 3.2.39] 이중식재기반 인공식물섬 사용면적 검토 메소코즘 실험에서 나타나는 동물플랑크톤의 분류군별 변화—피복률: 4.3%

[표 3.2.23] 이중식재기반 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험 동물플랑크톤의 개체수 (inds. L⁻¹)

	Site	8/12	8/13	8/14	8/16	8/18	8/20	8/22
Protozoa	C	3	0	0	30	20	10	0
	M1	5	0	10	10	0	110	50
	M2	0	0	10	0	5	2	15
	M3	0	10	0	0	5	4	5
	M4	0	10	0	0	10	2	5
Rotifera	C	1,140	1,885	1,290	550	945	275	375
	M1	1,510	4,470	2,730	360	300	0	180
	M2	485	2,034	1,380	390	325	72	160
	M3	1,155	1,010	800	450	430	90	285
	M4	1,490	1,280	2,530	660	335	62	165
Cladocera	C	0	0	0	0	30	0	30
	M1	0	10	10	10	40	0	0
	M2	0	0	0	0	5	14	20
	M3	0	0	0	0	55	8	40
	M4	0	0	0	0	20	4	10
Copepoda	C	7	30	20	0	38	5	66
	M1	30	50	150	80	240	0	10
	M2	5	20	20	10	35	6	10
	M3	0	40	10	10	30	2	30
	M4	20	10	20	10	55	2	50
Nauplius	C	27	50		60	180	10	105
	M1	45	60	70	140	200	0	210
	M2	30	27	50	90	225	62	160
	M3	55	100	10	80	160	22	140
	M4	25	50	10	60	125	32	70
Total	C	1,177	1,965	1,310	640	1,213	300	576
	M1	1,590	4,590	2,970	600	780	110	450
	M2	520	2,081	1,460	490	595	156	365
	M3	1,210	1,160	820	540	680	126	500
	M4	1,535	1,340	2,560	730	545	102	300

[표 3.2.24] 이중식재기반 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험 식물플랑크톤 세포수 (cells mL⁻¹)

	8/12	8/13	8/14	8/16	8/18	8/20	8/22
C	규조류	3,154	1,963	1,109	651	2,989	1,308
	녹조류	14,933	4,492	4,861	14,262	6,982	11,088
	남조류	328,936	354,176	184,947	55,587	32,106	6,092
	기타	1,140	429	1,089	11	35	959
	총출현종수	36	23	32	23	23	20
	총개체수	348,163	361,060	192,006	70,511	42,112	21,813
M1	규조류	1,950	2,320	439	617	496	934
	녹조류	4,690	3,022	2,452	2,674	950	2,420
	남조류	199,351	154,672	94,477	775	2,028	919
	기타	1,026	1,349	292	74	7	49
	총출현종수	30	29	21	23	24	24
	총개체수	207,017	161,363	97,660	4,140	3,481	3,862
M2	규조류	12,442	636	1,687	2,178	357	398
	녹조류	9,276	4,382	5,262	4,712	4,001	3,092
	남조류	274,181	240,204	105,205	7,605	7,404	4,342
	기타	1,546	155	53	19	297	78
	총출현종수	20	19	11	16	13	19
	총개체수	297,445	245,377	112,207	14,514	12,059	7,910
M3	규조류	1,479	2,535	2,046	1,882	2,154	3,181
	녹조류	8,124	7,575	11,738	4,635	6,941	13,278
	남조류	372,066	255,989	208,435	58,216	65,976	32,313
	기타	272	259	292	253	3	186
	총출현종수	16	20	19	19	19	20
	총개체수	381,941	266,358	222,511	64,986	75,074	48,958
M4	규조류	5,810	1,252	4,060	4,680	2,424	1,676
	녹조류	20,190	2,383	14,197	47	6,058	4,086
	남조류	390,139	267,217	187,842	94,655	55,183	30,117
	기타	2,905	658	1,374	93	240	132
	총출현종수	20	20	29	6	17	14
	총개체수	419,044	271,510	207,473	99,475	63,905	36,011

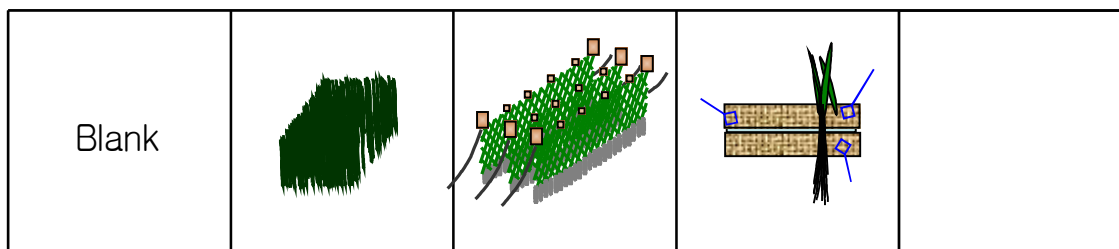
(다) 고찰

피복률 35%에서는 식물플랑크톤이 실험 4일째에서 급격히 세포수가 감소하였고, 그와 더불어 동물플랑크톤의 개체수도 동반 감소하는 양상을 보였다. 피복률 8.7%에서는 조사구에서 식물플랑크톤이 적정수를 유지하면서 식물플랑크톤의 먹이원으로 하는 동물플랑크톤의 수도 급격히 떨어지지 않았다. 이와 더불어 DO(용존산소)용도도 다른 시험구에 비해 40% 정도 감소하는 것에 그쳤다. 피복률 35%는 투명도는 크게 높아졌으나, DO가 60% 이상 감소하여 장기적으로 보았을 때 자정능력을 감소시킬 수도 있을 것이다. 전반적인 경향들을 종합해 보면 피복률 약 8% 정도가 가장 적절한 것으로 보인다.

(3) 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘

2008년 9월 2일에서 17일까지 신구저수지에 메소코즘을 만들어 조사 하였다. 메소코즘의 규격은 격자형의 개의 메소코즘(1.2 × 1.2 × 2.5 m)를 제작하고 대조군(control), 부유형 호안수초대(M1), 부유형 그물수초대(M2), 침수 인공식물섬(M3) 등으로 나누어 다양한 서식처 적용을 위한 실험을 실시하였다.

수질분석은 현장에서 시료를 채취하여 수질오염공정시험법에 준하여 전처리를 실시하고 농어촌연구원 실험실로 옮겨 분석을 실시하였다. 동물플랑크톤 플랑크톤 넷트(망목 63 μm)를 이용하여 채집을 하고, 식물플랑크톤은 채집 후 실험실에서 시료를 24 hr 이상 안정된 장소에 보관하여 식물플랑크톤을 침전시킨 후 조사하였다. 한국담수조류도감(정준, 1993), 댐저수지의 조류사진집(수자원연구소), 팔당호 식물플랑크톤 사진집(국립환경연구원) 플랑크톤의 분류 및 동정은 한국동식물도감과 일본 해수/담수동물플랑크톤검색도설 등을 참조하여 실시하였다.



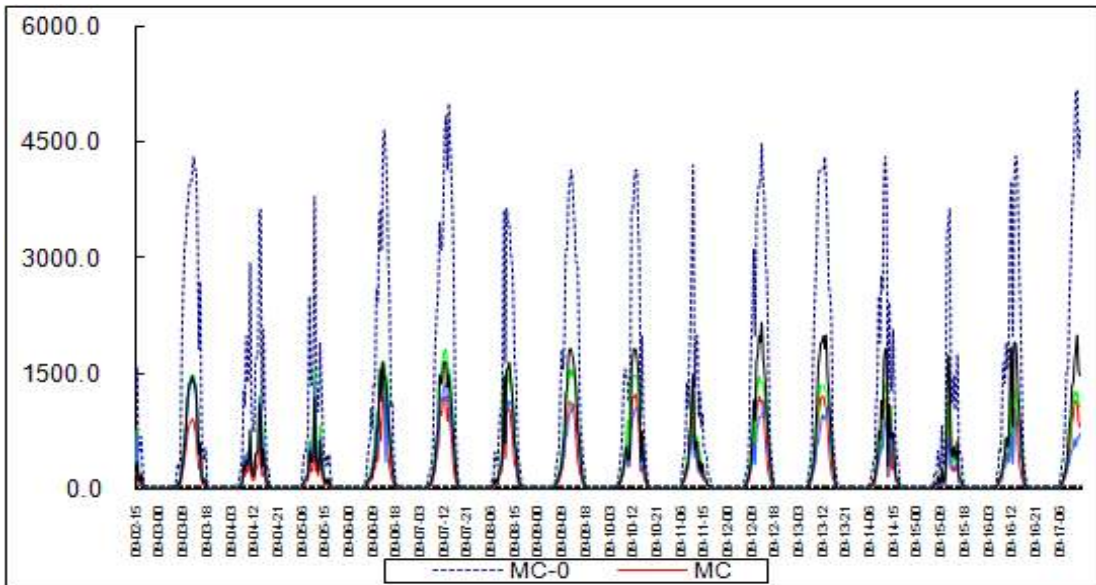
[그림 3.2.40] 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 설치 그림



[그림 3.2.41] 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 설치 사진



[그림 3.2.42] 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험 마지막날 모습



[그림 3.2.43] 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘내 시기별 광량변화

(가) 수질분석

수온은 조사기간 동안 25.91~27.7°C 범위의 분포를 나타냈고 조사가 진행될수록 수온이 조금 떨어지는 양상을 보이다가 5일째 이후로 다시 상승하였다. 수온 차이는 조사일내에서는 각 정점별로 거의 차이가 나지 않았다.

용존산소농도(DO)는 조사기간 동안 4.45~19.17 mg L⁻¹ 범위의 분포를 나타냈고, 각 조사 시기 동안 정점간의 용존산소농도 차이는 두드러진 차이를 보였다. 대조군(control)과 수변그물섬에서는 5일째까지 5~6 mg L⁻¹ 정도로 높아지는 양상을 보이다가 다시 증가하였다. 부유형 호안수초대와 침수 인공식물섬은 실험이 진행될수록 용존산소농도가 떨어졌고, 특히 침수식물섬은 확연히 낮아지는 양상을 보였다. 이는 용존산소농도를 식물플랑크톤의 양과 비교해 볼 때 이들 처리구에서 식물플랑크톤의 감소로 인한 1차 생산자의 생산량이 줄어든 것으로 볼 수 있다.

전기전도도(EC)는 조사기간 동안 0.153~0.166 mS cm⁻¹ 범위의 분포를 보였는데, 같은 조사일내에서는 처리구별 차이가 거의 나지 않았다.

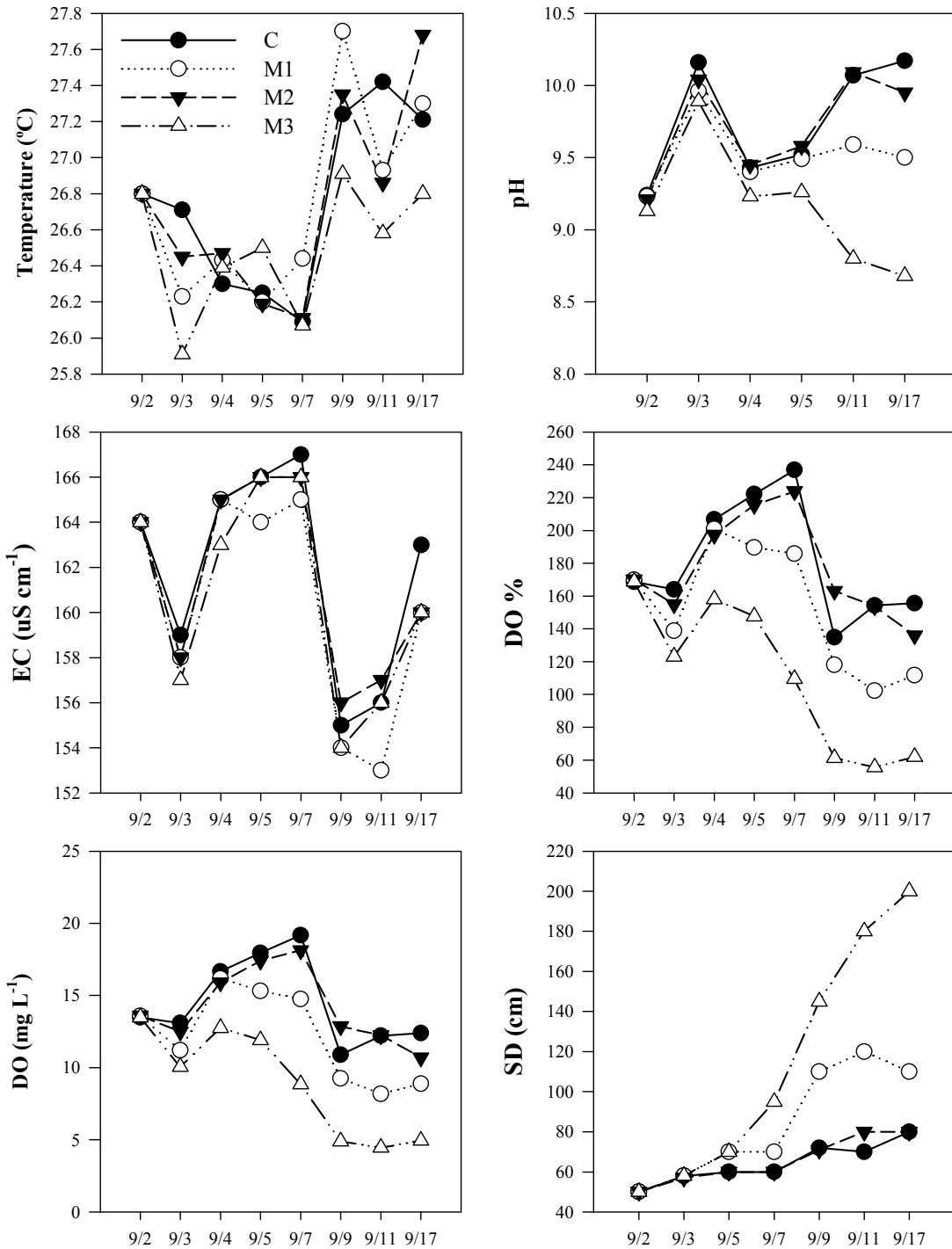
화학적산소요구량(COD)은 9.4~16.0 mg L⁻¹의 범위의 분포를 나타내었고, 조사시기가 지날수록 그 값이 전반적으로 낮아지는 양상을 보였다. 하지만, 조사시기내에서 대조군(control)과 부유형 그물수초대에서는 4일째 1 mg L⁻¹ 정도 수치가 높아지는 것을 볼 수 있었다. 침수 인공식물섬에서는 8일째 까지 수치가 낮아지다가 10일째 잠깐 높아지다가 다시 낮아지는 양상을 보여서 침수 인공식물섬 투입처리가 비교적 정화효율이 좋았다는 것을 알 수 있었다.

Chl-*a* 농도는 1.6~47.2 mg L⁻¹의 범위의 분포를 나타냈다. 침수 인공식물섬에서 조사 1일째와 조사 15일째를 비교해보니 40.0 mg L⁻¹였던 농도가 1.6 mg L⁻¹까지 낮아지는 양상을 보여 식물플랑크톤의 제어 효과가 확연하다는 것을 알 수 있었다. 그 다음으로는 부유형 호안수초대에서 15일째를 제외하고는 Chl-*a* 농도가 점점 낮아지는 것을 볼 수 있었다.

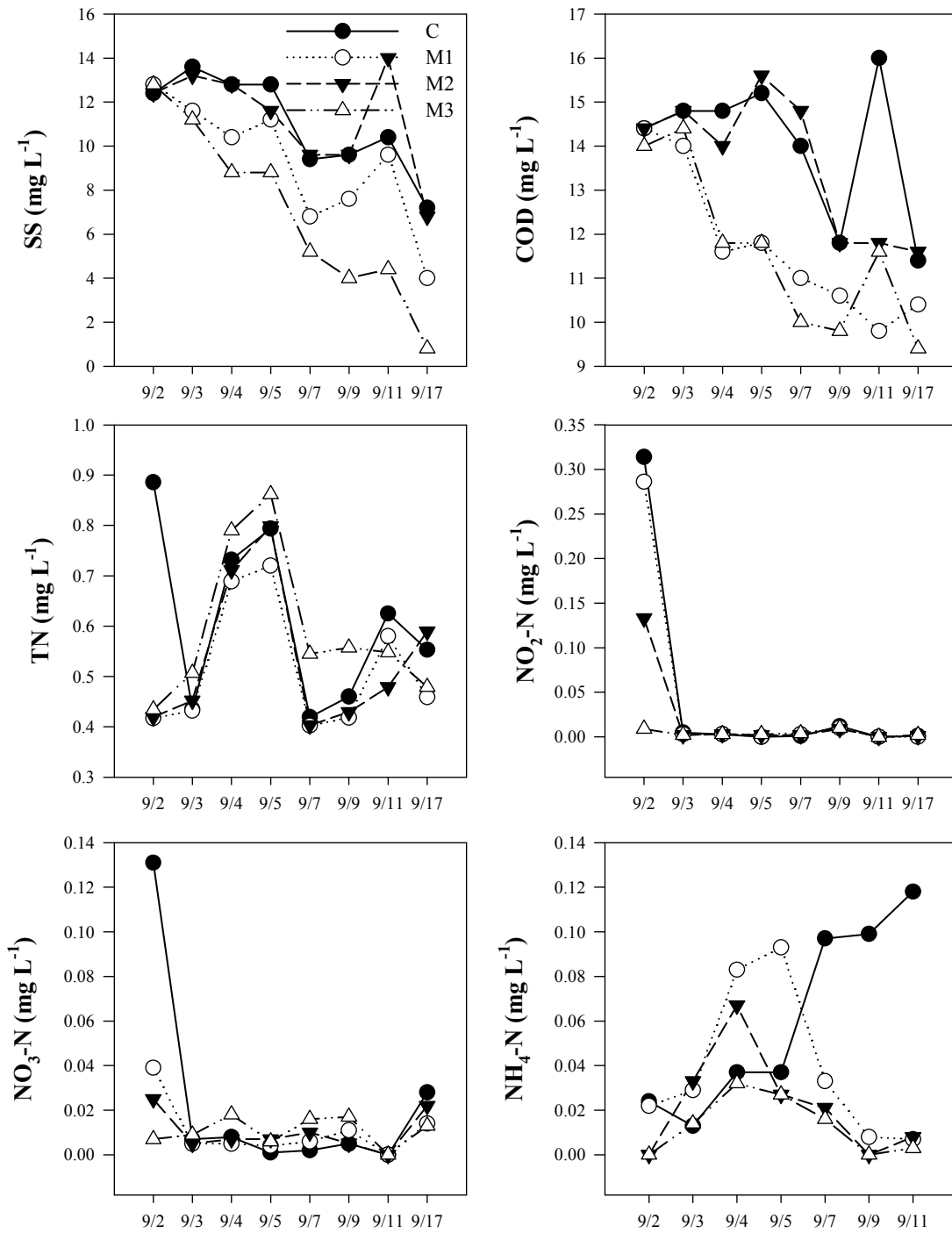
부유물질 농도(SS)는 0.8~13.6 mg L⁻¹ 범위의 분포를 나타냈다. 전반적으로 조사시기에 지날수록 농도가 낮아지는 양상을 보였는데, 침수 인공식물섬을 제외한 대조군을 포함한 다른 정점에서는 10일째 일시 높아지다가 다시 낮아졌다. 침수 인공식물섬에서는 초기 농도가 12.8 mg L⁻¹였던 것이 점점 낮아져서 15일 만에 0.8 mg L⁻¹의 농도를 보였다.

총질소 농도는 0.403~0.886 mg L⁻¹ 범위의 분포를 나타냈다. 비교적 실험 4일째까지는 총질소가 높아지다가 그 이후로 거의 모든 정점에서 낮아지는 양상을 보였다.

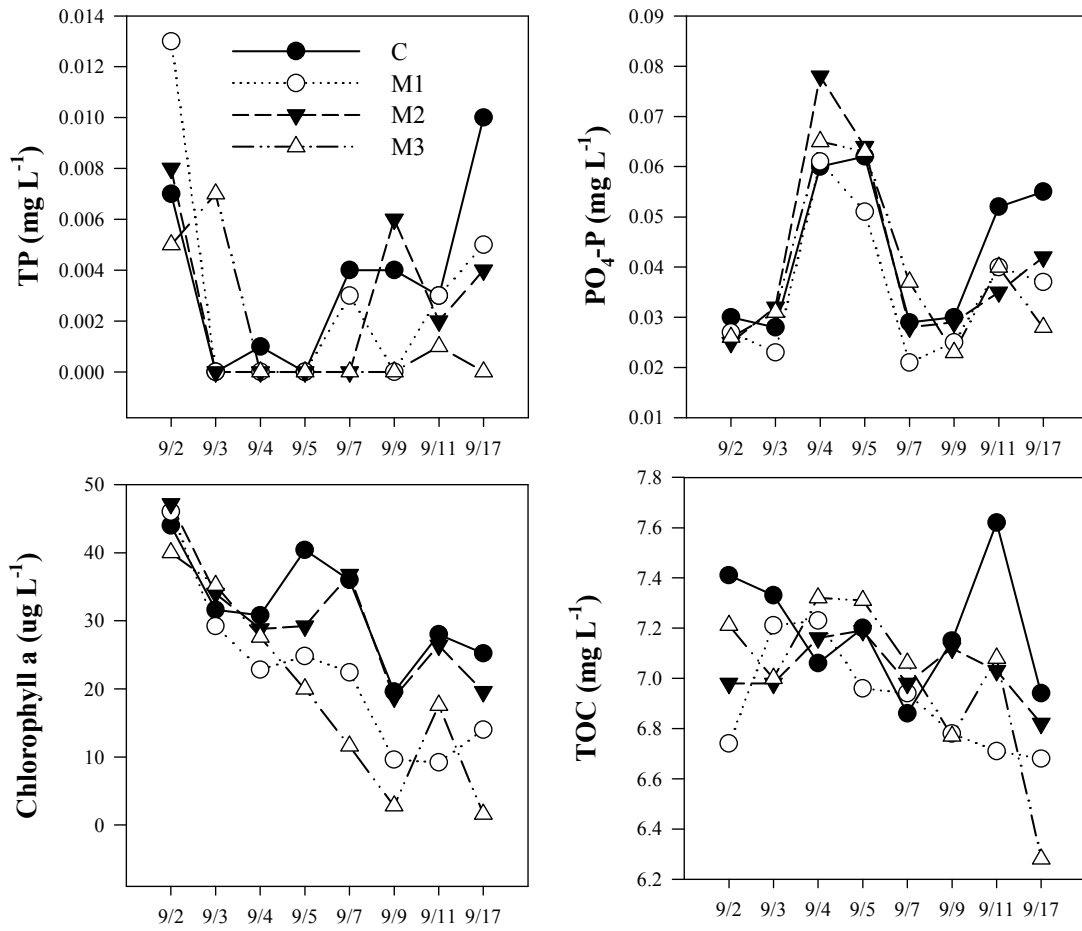
총인 농도는 0~0.008 mg L⁻¹ 범위의 분포를 나타냈다. 거의 모든 정점에서 실험 초기에 미량으로 나타나다가 거의 없어지다가 실험 5일째 이후에 다시 일부 발생되었다. 하지만, 침수 인공식물섬에서는 실험 2일째 이후로 거의 나타나지 않았다.



[그림 3.2.44] 메소코즘내 이화학적 수질변화



[그림 3.2.45] 메소코즘내 이화학적 수질변화



[그림 3.2.46] 메소코즘내 이화학적 수질변화

[표 3.2.25] 메소코즘내 이화학적 수질변화

Date	구분	C	M1	M2	M3
9/2	pH	9.24	9.23	9.21	9.13
	EC	164	164	164	164
	DO	13.49	13.57	13.6	13.49
	DO%	168.7	169.8	170.1	168.9
	Temp.	26.8	26.8	26.8	26.8
	SD	50	50	50	50
9/3	pH	10.16	9.96	10.04	9.89
	EC	159	158	158	157
	DO	13.09	11.2	12.5	10.06
	DO%	164	138.9	155	123.1
	Temp.	26.71	26.23	26.45	25.91
	SD	58	58	57	58
9/4	pH	9.43	9.4	9.45	9.23
	EC	165	165	165	163
	DO	16.66	16.18	15.9	12.75
	DO%	206.8	200.9	197.4	158
	Temp.	26.3	26.43	26.47	26.39
	SD	-	-	-	-
9/5	pH	9.52	9.49	9.58	9.26
	EC	166	164	166	166
	DO	17.96	15.32	17.4	11.9
	DO%	222.1	189.6	215.4	147.6
	Temp.	26.25	26.2	26.19	26.5
	SD	60	70	60	70
9/7	pH	-	-	-	-
	EC	167	165	166	166
	DO	19.17	14.75	18.13	8.85
	DO%	236.9	185.8	223.8	109.4
	Temp.	26.09	26.44	26.11	26.07
	SD	60	70	60	95
9/9	pH	-	-	-	-
	EC	155	154	156	154
	DO	10.9	9.25	12.85	4.9
	DO%	135	118.1	163.1	61.3
	Temp.	27.24	27.7	27.35	26.91
	SD	72	110	71	145
9/11	pH	10.07	9.59	10.09	8.8
	EC	156	153	157	156
	DO	12.21	8.19	12.24	4.45
	DO%	154.2	102.4	153.7	55.6
	Temp.	27.42	26.93	26.86	26.58
	SD	70	120	80	180
9/17	pH	10.17	9.5	9.95	8.68
	EC	163	160	160	160
	DO	12.39	8.89	10.7	4.95
	DO%	155.6	111.7	136	61.9
	Temp.	27.21	27.3	27.68	26.8
	SD	80	110	80	200

[표 3.2.26] 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험 이화학적 수질변화

구분	조사 시기	COD	SS	T-N	NO ₃ -N	NO ₂ -N	NH ₃ -N	T-P	PO ₄ -P	chl- <i>a</i>	TOC
C	9/2	14.4	12.4	0.886	0.131	0.314	0.000	0.030	0.007	44.0	7.41
	9/3	14.8	13.6	0.435	0.007	0.005	0.268	0.028	0.000	31.6	7.33
	9/4	14.8	12.8	0.732	0.008	0.003	0.017	0.060	0.001	30.8	7.06
	9/5	15.2	12.8	0.794	0.001	0.000	0.002	0.062	0.000	40.4	7.20
	9/7	14.0	9.4	0.419	0.002	0.001	0.001	0.029	0.004	36.0	6.86
	9/9	11.8	9.6	0.460	0.005	0.012	0.004	0.030	0.004	19.6	7.15
	9/11	16.0	10.4	0.625	0.000	0.000	0.000	0.052	0.003	28.0	7.62
	9/17	11.4	7.2	0.553	0.028	0.001	0.012	0.055	0.010	25.2	6.94
M1	9/2	14.4	12.8	0.417	0.039	0.286	0.063	0.027	0.013	46.0	6.74
	9/3	14.0	11.6	0.432	0.005	0.003	0.288	0.023	0.000	29.2	7.21
	9/4	11.6	10.4	0.689	0.005	0.003	0.011	0.061	0.000	22.8	7.23
	9/5	11.8	11.2	0.720	0.004	0.000	0.000	0.051	0.000	24.8	6.96
	9/7	11.0	6.8	0.402	0.006	0.003	0.024	0.021	0.003	22.4	6.94
	9/9	10.6	7.6	0.418	0.011	0.010	0.040	0.025	0.000	9.6	6.78
	9/11	9.8	9.6	0.580	0.000	0.000	0.037	0.040	0.003	9.2	6.71
	9/17	10.4	4.0	0.459	0.014	0.000	0.000	0.037	0.005	14.0	6.68
M2	9/2	14.4	12.4	0.419	0.025	0.133	0.123	0.025	0.008	47.2	6.98
	9/3	14.8	13.2	0.452	0.005	0.002	0.305	0.032	0.000	34.0	6.98
	9/4	14.0	12.8	0.711	0.007	0.003	0.000	0.078	0.000	28.8	7.16
	9/5	15.6	11.6	0.798	0.007	0.002	0.000	0.064	0.000	29.2	7.19
	9/7	14.8	9.6	0.403	0.010	0.002	0.000	0.028	0.000	36.8	6.98
	9/9	11.8	9.6	0.429	0.005	0.009	0.000	0.029	0.006	18.8	7.12
	9/11	11.8	14.0	0.479	0.000	0.000	0.090	0.035	0.002	26.4	7.03
	9/17	11.6	6.8	0.589	0.022	0.001	0.000	0.042	0.004	19.6	6.82
M3	9/2	14.0	12.8	0.434	0.007	0.009	0.128	0.026	0.005	40.0	7.21
	9/3	14.4	11.2	0.507	0.009	0.002	0.392	0.031	0.007	35.2	7.00
	9/4	11.8	8.8	0.790	0.018	0.003	0.133	0.065	0.000	27.6	7.32
	9/5	11.8	8.8	0.862	0.006	0.003	0.152	0.063	0.000	20.0	7.31
	9/7	10.0	5.2	0.545	0.016	0.004	0.161	0.037	0.000	11.6	7.06
	9/9	9.8	4.0	0.557	0.017	0.010	0.113	0.023	0.000	2.8	6.77
	9/11	11.6	4.4	0.548	0.000	0.000	0.097	0.040	0.001	17.6	7.08
	9/17	9.4	0.8	0.479	0.013	0.002	0.015	0.028	0.000	1.6	6.28

(나) 플랑크톤 분석

다양한 서식처 적용 평가를 위하여 부유형 호안수초대, 부유형 그물수초대, 침수 인공식물섬을 이용한 메소코즘 실험을 실시하였고, 그 경과일수별로 동물 플랑크톤의 종류와 개체수를 파악하여 효과를 검증해 보았다.

메소코즘 중 대조군에 해당하는 실험구에서는 유행류 11종, 지각류 3종, 요각류 1종이 포함되어 총 15종이 출현하였다. 조사기간 동안 유행류인 *Trichocera marina*, *Pompholix complanata*, *Keratella valga*가 우점하다가 조사 일수가 경과 할수록 개체수가 줄어들게 된다. 반면 지각류와 요각류는 실험 10일째 이후 수가 증가하였다.

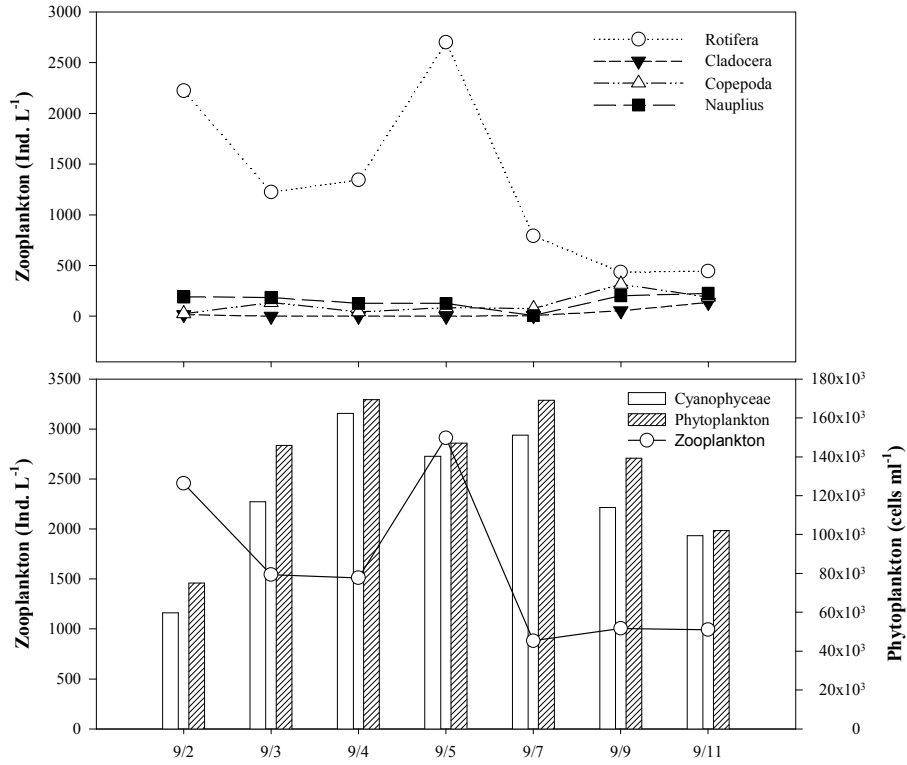
메소코즘 중 부유형 호안수초대가 설치된 실험구에서는 원생동물 1종, 유행류 11종, 지각류 3종, 요각류 1종이 포함되어 총 15종이 출현하였다. 조사기간 동안 유행류인 *Keratella cruciformis*, *Trichocera marina*, *Pompholix complanata*가 우점하다가 조사 일수가 지날수록 전반적으로 개체수가 줄어들게 된다. 특히, 실험 10일째 이후 유행류의 개체수가 줄어든 이후 지각류의 개체수가 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 요각류는 유생단계인 코페포다이트와 노플리우스들이 꾸준히 유지되었다.

메소코즘 중 부유형 그물수초대에 해당하는 실험구에서는 원생동물 1종, 유행류 11종, 지각류 3종, 요각류 1종을 포함되어 총 15종이 출현하였다. 조사기간 동안 유행류인 *Keratella valga*, *Trichocera marina*, *Polyarthra remata*, *Pompholix complanata*가 우점하다가 조사 일수가 지날수록 전반적으로 개체수가 줄어들게 된다. *Pompholix complanata*는 실험 15일째 수가 급격히 늘어나는 것을 볼 수 있었다. 지각류는 전체적으로 출현빈도가 낮았으며, 실험 10일째 일부 관찰되었다. 요각류는 유생단계인 코페포다이트와 노플리우스들이 꾸준히 출현하였다.

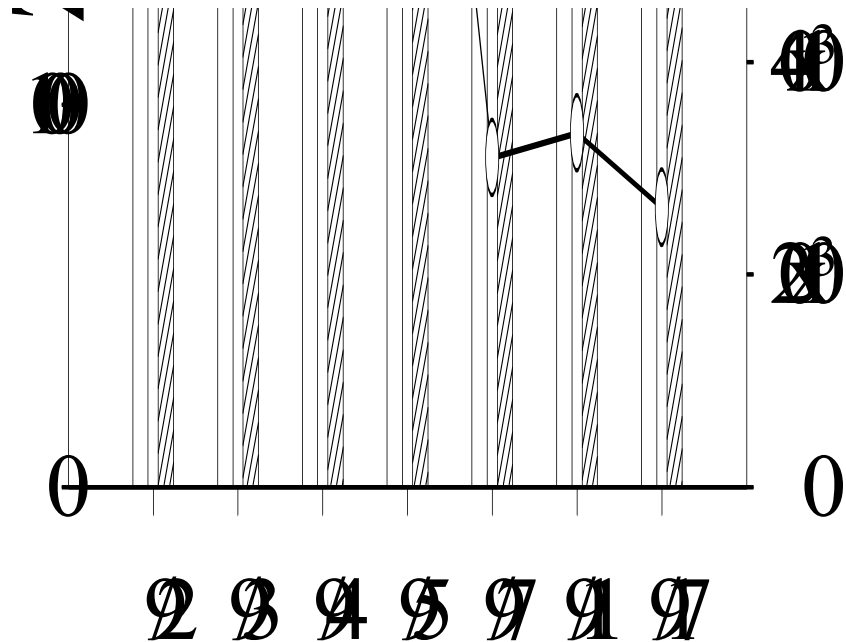
메소코즘 중 침수 인공식물섬에 해당하는 실험구에서는 원생동물 1종, 유행류 11종, 지각류 3종, 요각류 1종이 포함되어 총 15종이 출현하였다. 조사기간 동안 유행류인 *Keratella valga*, *Polyarthra remata*, *Trichocera marina*가 우점하다가 조사일수가 경과할수록 개체수가 줄어들게 된다. 지각류는 실험기간동안 거의 발생하지 않다가 실험 10일째부터 *Bosmina coregoni*와 *Bosmina longispina*가 출현하였다.

동물플랑크톤의 서식면에 있어서 부유형 호안수초대와 침수 인공식물섬이 비교적 안정적인 환경을 제공하는 것으로 보인다.

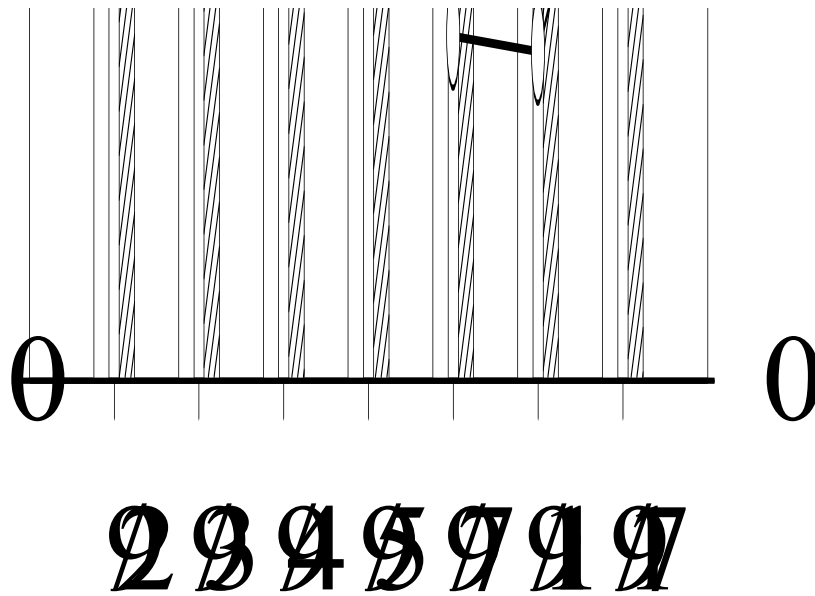
식물플랑크톤은 초기 출현종의 80~93.7%가 남조류 해당하는 것으로 나타났다. 이들 남조류이 비중은 실험 종료시 대조군은 97%, 부유형 호안수초대는 63.8%, 부유형 그물수초대는 98.1%, 침수 인공식물섬은 56.2%로 나타났다. 특히나 침수 인공식물섬은 총 개체수가 185,794 cells mL⁻¹에서 6,764 cells mL⁻¹로 90% 이상 급감하였고 종수에 있어서도 7종으로 현저히 감소하였다. 이는 다른 실험구에서 16~18종이 출현하는 것과는 현저히 다른 양상을 보인 것이다. 그 다음으로 부유형 호안수초대에서 일부 식물플랑크톤의 제어효과를 보인 것으로 확인되었다. 결과적으로 수초대 등에 서식하는 동물플랑크톤의 먹이섭식의 영향이 기대된다.



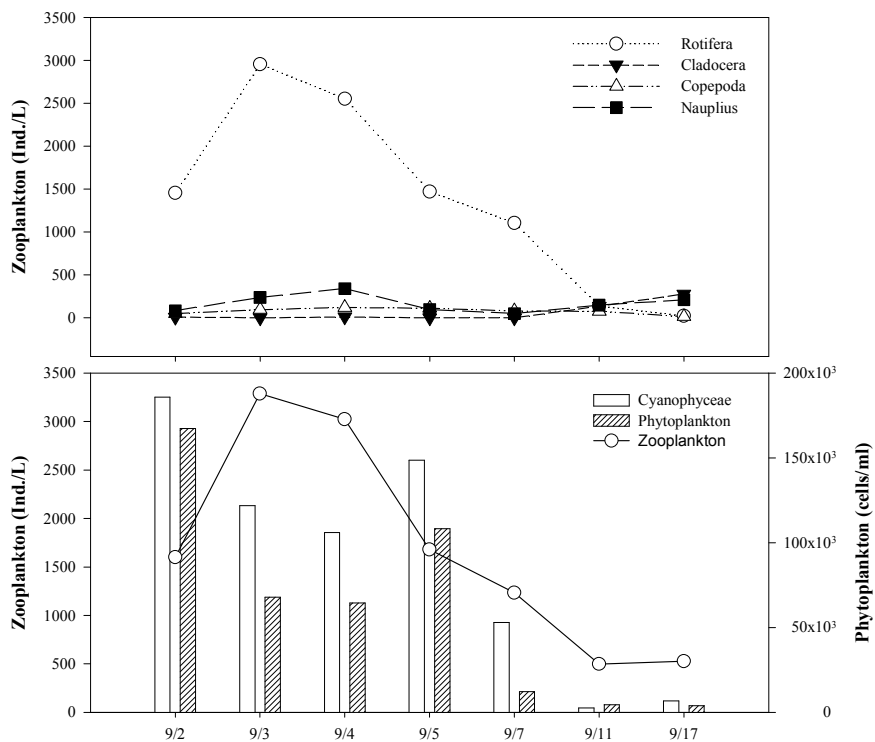
[그림 3.2.47] 대조군내 동식물플랑크톤 밀도 변화



[그림 3.2.48] 부유형 호안수초대내 동식물플랑크톤 밀도 변화



[그림 3.2.49] 부유형 그물수초대내 동식물플랑크톤 밀도 변화



[그림 3.2.50] 침수 인공식물섬 메소코즘내 동식물플랑크톤 밀도변화

[표 3.2.27] 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험에서 나타나는 동물플랑크톤 밀도 (inds. L⁻¹)

		9/2	9/3	9/4	9/5	9/7	9/11	9/17
Control	Rotifera	2,224	1,224	1,344	2,702	793	435	444
	Cladocera	16	0	0	0	6	53	136
	Copepoda	24	136	42	84	76	315	188
	Nauplius	192	184	126	126	6	202	225
	Total	2,456	1,544	1,512	2,912	881	1,005	993
M1	Rotifera	1,234	2,220	3,444	2,660	589	234	324
	Cladocera	20	10	14	14	0	391	293
	Copepoda	267	70	168	112	119	225	15
	Nauplius	60	100	280	168	153	75	98
	Total	1,581	2,400	3,906	2,954	861	925	730
M2	Rotifera	918	3,710	3,640	2,223	558	181	849
	Cladocera	45	0	14	0	0	90	0
	Copepoda	9	70	168	169	39	135	256
	Nauplius	72	150	182	117	55	218	173
	Total	1,044	3,930	4,004	2,509	652	624	1,278
M3	Rotifera	1,455	2,955	2,551	1,470	1,103	136	23
	Cladocera	9	0	11	0	0	136	278
	Copepoda	51	96	121	112	80	76	15
	Nauplius	85	238	341	98	51	150	210
	Total	1,600	3,289	3,024	1,680	1,234	498	526

[표 3.2.28] 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험에서 나타나는 식물플랑크톤 (cells mL⁻¹)

	9/2	9-3	9/4	9/5	9/7	9/9	9/11	9/17	
C	규조류	4,650	1,042	2,346	914	2,476	1,903	2,282	771
	녹조류	8,149	21,251	115	2,234	13,704	1,043	19,147	0
	남조류	59,712	116,822	162,370	140,266	151,074	97,408	113,867	99,422
	기타	2,524	6,803	4,576	3,593	1,882	1,655	3,901	1,815
	총출현종수	29	21	13	17	25	17	21	16
	총개체수	75,035	145,918	169,407	147,007	169,136	102,009	139,197	102,008
M1	규조류	7,386	6,768	9,678	3,066	8,732	5,822	-	23,692
	녹조류	1,397	2,928	2,742	7,225	2,911	24	-	4,290
	남조류	148,397	119,760	157,016	154,931	115,919	65,515	-	52,084
	기타	1,165	1,920	1,125	3,613	5,818	581	-	1,530
	총출현종수	21	14	17	16	20	14	-	18
	총개체수	158,345	131,376	170,561	168,835	133,380	71,942	-	81,596
M2	규조류	8,451	3,550	732	5,277	2,998	1,528	5,561	508
	녹조류	14,499	9,500	1,668	1,016	239	642	34,84	635
	남조류	147,553	222,198	172,252	214,589	183,678	110,626	130,769	79,713
	기타	4,045	4,179	4,796	2,817	5,103	3,055	2,680	407
	총출현종수	20	27	17	18	16	13	17	17
	총개체수	174,548	239,427	179,448	223,699	192,018	115,851	142,494	81,263
M3	규조류	11,389	29,795	15,183	7,495	14,514	1,482	181	0
	녹조류	6,619	12,837	5,323	13,002	86	2,083	769	2,957
	남조류	167,461	67,958	64,513	108,296	12,227	4,337	0	3,807
	기타	325	11,350	20,941	19,833	26,183	2,057	1,608	0
	총출현종수	23	22	19	21	14	15	14	7
	총개체수	185,794	121,940	105,960	148,626	53,010	9,959	2,558	6,764

다. 신규저수지 적용시험 결과

(1) 2006~2007년 이중기반재 및 교반장착 인공식물섬 신규저수지 적용 결과

인공식물섬은 녹조현상이 발생한 호소나 연못의 수질을 개선시키고 경관을 아름답게 하는 방법으로 많이 이용되고 있다(권, 2007). 호소에 설치한 식물섬은 빛의 차광효과로 인해서 식물

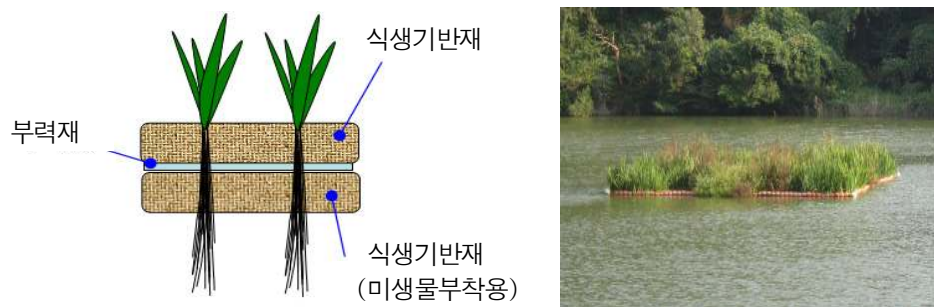
플랑크톤의 양을 줄이고, 그곳에 식재한 식물의 뿌리 부분의 박테리아 등을 이용하여 동물플랑크톤이 증가하고 이것을 먹기 위해서 물고기들이 이곳에 모여들고 또한 뿌리사이에 알을 낳고 치어들이 포식자로부터 피할 수 있어서 이곳은 또다른 수중 생태계를 만들어 내고 있다는 보고가 있다(이 등, 2002).

본연구의 참여업체인 (주)아썸에서는 인공식물섬의 식생기반재로 코코넛야자섬유를 가공처리하여 이용하고 있으며, 가공된 코코넛야자섬유는 일반 야자섬유에 비하여 월등한 비표면적을 갖고 있는 것으로 조사되었다. 따라서 본 연구에서는 사용된 야자섬유의 비표면적이 많은 특성을 이용하여 이중식재기반의 인공식물섬을 구상하였으며 메소코즘 등을 통하여 수질개선효과 및 동물플랑크톤의 서식지 효과가 좋은 것으로 나타나 현장실험을 실시하였다.

또한 물순환장치는 물을 강제로 순환시켜 저층의 물을 상부표층으로 확산 시켜 대기와 접촉하여 용존산소 농도를 높이고 다시 하층으로 이동함으로써 수중의 산소조건을 개선하는 등의 효과를 거둘 수 있다. 따라서 한 이러한 물순환을 채용한 교반장치를 장착한 인공식물섬의 영향을 파악하였다.

○ 이중식재기반을 이용한 인공식물섬

- 시설명: 이중식재기반 인공식물섬
- 설치시기: 2006년 8월 25일
- 설치장소: 충청남도 보령 신구저수지
- 설치규모: 인공식물섬 11 m × 10 m
- 설치방법: 인공식물섬을 바둑판모양으로 설치
- 구성자재(기본구성자재에 대한 상세내용은 부록 참조)
식물, 식생기반재, HDPE망, 부력재, 계류장치, 부표, 인공어초
- 인공식물섬의 주요구조
 - 비표면적이 넓은 식생기반재를 미생물 접촉여재 및 동물플랑크톤 활성화 재료로 사용
 - 식생기반재 부분을 하단부에 겹쳐서 두겹으로 사용하여 인공식물섬 하부에 추가 부착한 샌드위치 형태로 제작
 - 하부에 세로로 부착시킬 수 있으나 수류의 영향을 크게 받아 안정성 문제가 발생되므로 평면 샌드위치형으로 부착



[그림 3.2.51] 이중 식생기반 인공식물섬 개념도



[그림 3.2.52] 이중 식생기반을 이용한 인공식물섬 개념도 및 현장설치 전경

○ 교반장치를 장착한 인공식물섬

- 시설명: 교반장치를 장착한 인공식물섬
- 설치시기: 2006년 8월 10일
- 설치장소: 충청남도 보령 신구저수지
- 구성자재
 - 교반장치, 부력재, 식물(꽃창포)
- 주요구조
 - 물교반장치를 하부에 장착하고 교반장치 주변으로 식물이 식재된 원통형 부력재를 8개 설치

조사는 충남 보령시에 위치한 신구저수지에서 대조지점으로 댐앞(st. 1), 이중식재기반 인공식물섬(st. 2), 그리고 교반장치를 이용한 식물섬(st. 3)에서 2006년 9월~11월, 2007년 2월~5월 까지 수심별 동식물의 정량조사를 실시하였으며, 2006년 8월 24일에는 식물섬을 설치하기 전이었기 때문에 사전조사를 실시하였다



[그림 3.2.53] 교반장치를 이용한 인공식물섬 현장설치 작업 및 설치전경

조사방법으로는 식물플랑크톤은 신구저수지 표층에서 채수하여 500 ml 폴리에틸렌 시료병에 담아 Lugol 용액으로 현장고정 후 약 2주일 이상 침강 시켰다(APHA·AWWA·WPCF, 1989). 이 시료를 siphon으로 상등액을 뽑아 농축시켰다(Sukhanova, 1978). 세포의 계수는 Plamer-Maloney counting chamber를 사용하였으며, 광학현미경을 이용하여 400~1,000배에서 검경하였다. 종 동정은 mizuno(1964), 그리고 Hirose와 Yamagishi(1977)에 따랐다.

동물플랑크톤의 채수시기와 채수지점은 식물플랑크톤과 같았고, 시료채취방법은 플랑크톤 정량넷트(mesh size 80~100 μm)를 이용하였다. 채수한 물은 250 ml 폴리에틸렌 시료병에 담아 현장에서 포르말린으로 고정한 후 실험실로 옮겨서 광학현미경 400~1000배에서 계산한다. 종 동정은 水野(1964), Hirose와 Yamogishi(1977), 水野·高橋(1991)에 의했다.

그밖에 종다양성(H), 우점도(C), 균등도(J) 조사를 실시하였는데 종다양도는 종의 이질성(species heterogeneity)이라고도 말하며, 한 군집 내에 다수의 종들이 비슷한 개체수로 출현하면 종다양도가 높고, 이와 반대로, 소수의 종이 출현하거나 소수의 종이 상대적으로 많은 개체수를 차지하는 군집은 낮다고 말한다. 예를들면, 10종이 100개체로 구성된 군집의 경우, 10종이 각각 10개체로 구성된 군집은 최대가능다양도(maximum possible diversity)이고, 1종이 91개체

로, 나머지 9종이 1개체씩으로 구성된 군집은 최소가능다양도(minimum possible diversity)이다. 종다양도가 높은 군집은 에너지유동, 먹이망, 포식, 경쟁, 지위분배에 있어서 상호작용이 복잡하고 다양함을 나타낸다. 이번 연구에서는 Shannon-Wiener diversity index(H')를 이용하였다.

$$H' = -\sum(n_i/N)(\ln n_i/N)$$

우점도(C)는 Simpson(1949) 식으로 그리고 균등도(J')는 Pielou(1969) 식에 따랐다.

$$C = \sum(n_i/N)^2$$

$$J' = H'/H'_{\max}$$

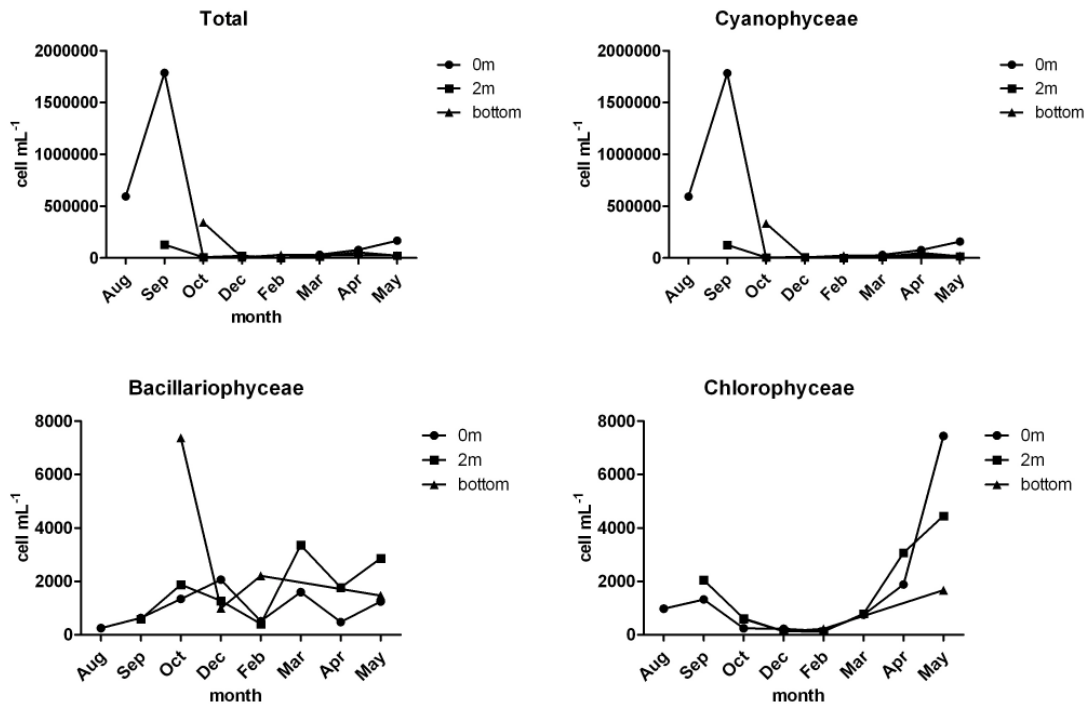
신구저수지에서 조사기간(2006년 8월~12월, 2007년 2월~5월) 동안 각 조사지역에서 출현하는 식물플랑크톤의 종 구성 및 세포수는 부록에 수록하였다.

신구저수지에서 조사기간 동안 출현하는 총 종수는 48속 107종이 출현하였다. 대조지점 댐 앞(st. 1)에 출현하는 총 종수는 32속 93종, (주)아썸에서 설치한 이중식재기반식물섬(st. 2)에 출현하는 식물플랑크톤 총 종수는 36속 64종, 교반장치를 이용한 식물섬(st. 3)에서 출현하는 식물플랑크톤 총 종수는 39속 60종으로 조사되었다. 대조지점 st. 1에 비하여 식물섬을 설치한 st. 2와 3에서 출현하는 식물플랑크톤은 약 20종 정도 적게 출현하였으며 이것은 식물섬의 영향일 수도 있고 대조지점 st. 1의 수심이 가장 깊었기 때문에 수심에 따른 영향일 수도 있다고 사료된다.

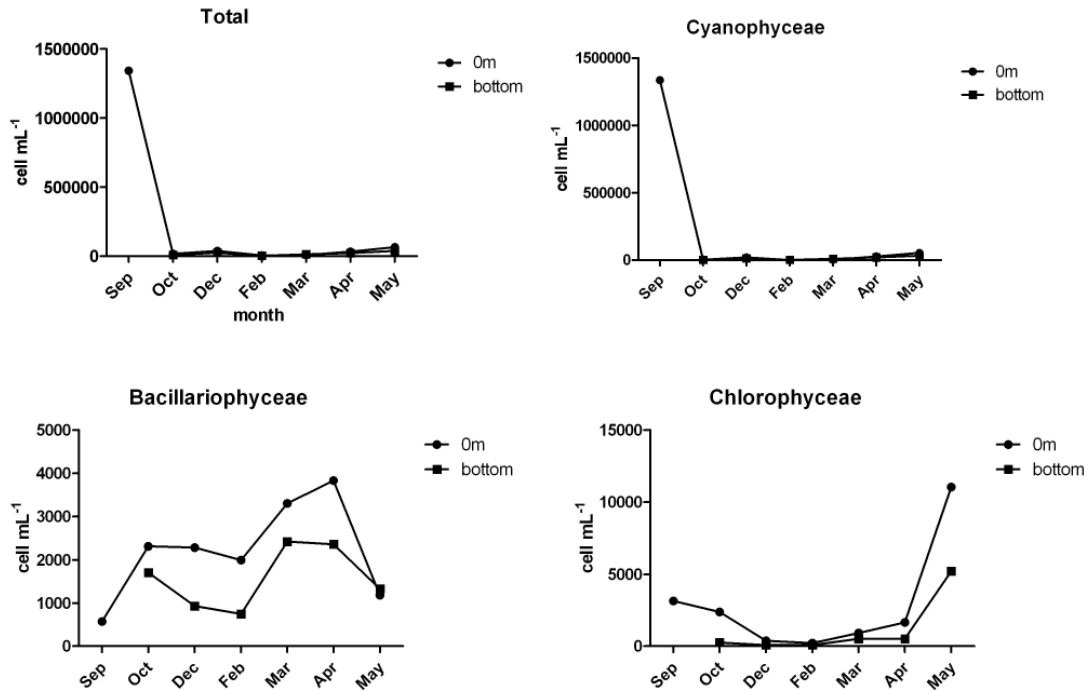
대조지점 지점(st. 1)에서 수심별 출현하는 각 분류군별 식물플랑크톤의 세포수가 가장 많았던 시기와 세포수는 2006년 9월 표층(0 m)로 약 1.8×10^6 cells mL⁻¹였고, 가장 적게 출현한 시기와 세포수는 2007년 2월 2 m로 약 9.0×10^2 cells mL⁻¹였다. 식물플랑크톤 총 세포수의 출현 pattern과 남조류 출현 형태가 비슷한 것으로 보아서 신구저수지에 출현하는 식물플랑크톤에 가장 많은 영향을 미치는 것이 남조류임을 알 수 있었다. 분류군별 출현세포수의 변화는 남조류는 9월 이후 급격한 감소를 보였고 규조류는 가을에 증가하였다가 겨울에 감소하였고 다시 봄에 증가하는 형태였다. 녹조류는 2007년 5월에 급격한 증가를 보였다.

[표 3.2.29] 신구저수지 대조지점(st. 1) 표층에 출현하는 식물플랑크톤 중 우점종

우점종명	2006년				2007년			
	8월	9월	10월	11월	2월	3월	4월	5월
<i>Cryptomonas</i> sp.				●				
<i>Lyngbya</i> sp.	●	●						
<i>Oscillatoria</i> sp.			●	●		●	●	●
<i>Phormidium</i> sp.	●							
<i>Melosira granulata</i>					●			



[그림 3.2.54] 신구저수지 대조지점(st. 1)에서 수심별 출현하는 식물플랑크톤 분류군 별 세포수

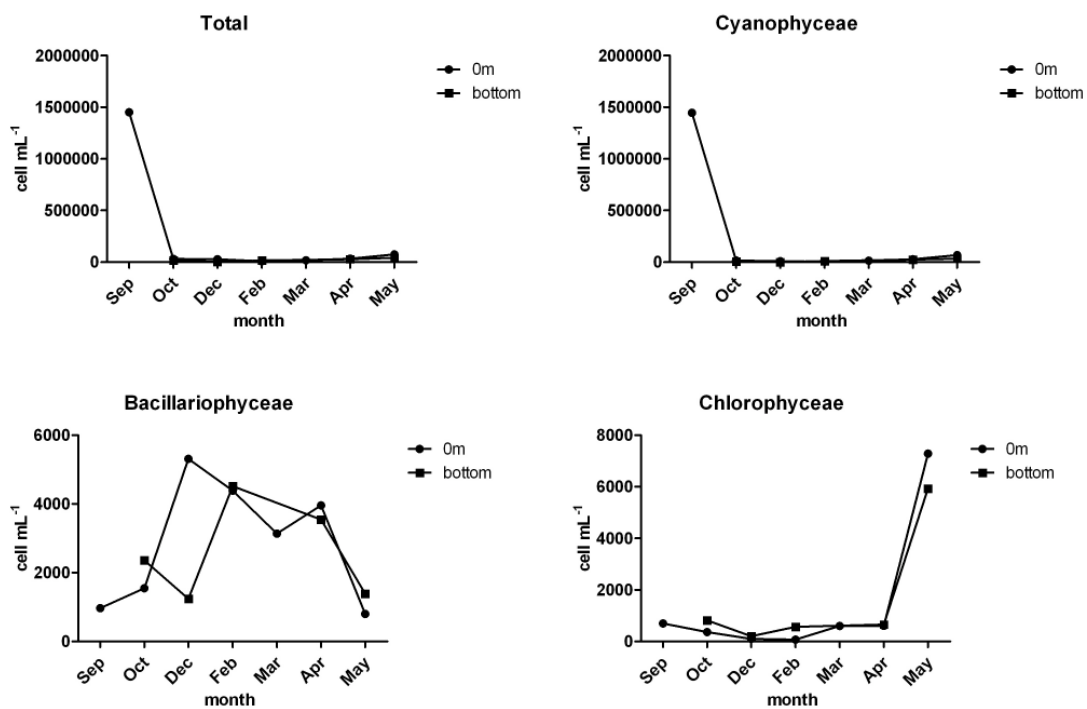


[그림 3.2.55] 신구저수지에 이종식재기반 인공식물섬이 있는 지점(st. 2)에서 수심별 출현하는 식물플랑크톤 분류군 별 세포수

st. 2에서 가장 많은 세포수를 차지한 시기와 세포수는 2006년 9월 표층(0 m)에서 1.3×10^6 cells mL⁻¹였고 가장 적게 출현한 세포수와 시기는 2007년 2월 2 m로 2.6×10^3 cells mL⁻¹였다. 9월에 이렇게 세포수가 증가한 것은 대부분 남조류인 *Lyngbya* sp. 때문이다. 분류군별 계절 변화형태는 남조류는 9월 이후 급격한 감소를 보이고 규조류는 2006년 가을과 2007년 봄에 세포수가 증가하는 모습을 보였는데 가을보다는 봄에 더 크게 세포수가 증가한 것을 볼 수 있었다.

[표 3.2.30] 신구저수지 st. 2 표층에 출현하는 우점종

우점종명	2006년			2007년			
	9월	10월	11월	2월	3월	4월	5월
<i>Cryptomonas</i> sp.		●	●	●			
<i>Lyngbya</i> sp.	●						
<i>Oscillatoria</i> sp.			●		●	●	●
<i>Melosira granulata</i>				●			
<i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>					●		

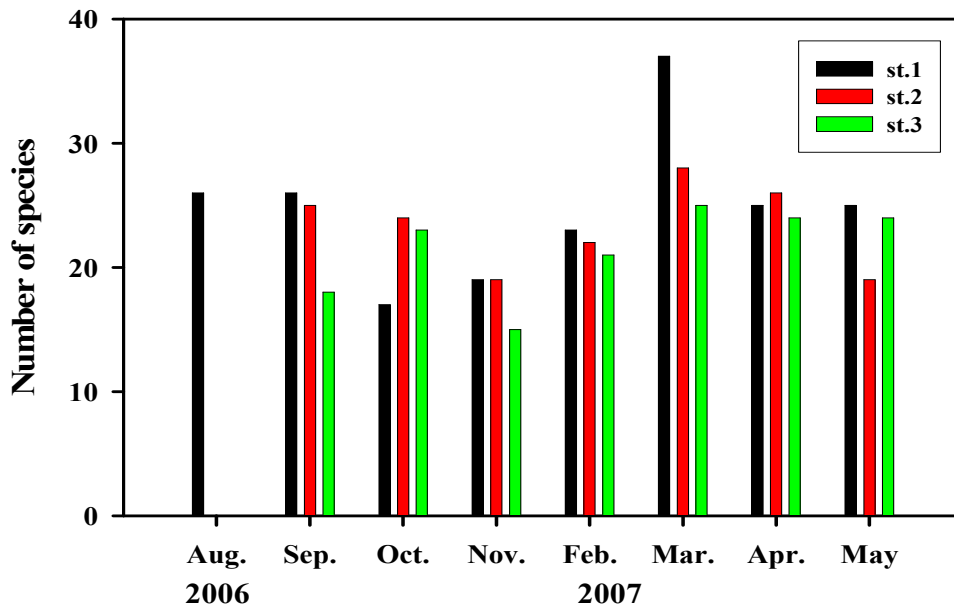


[그림 3.2.56] 신구저수지 교반장치를 이용한 식물섬을 설치한 지점(st. 3)에서 수심별 출현하는 식물플랑크톤 분류군 별 세포수

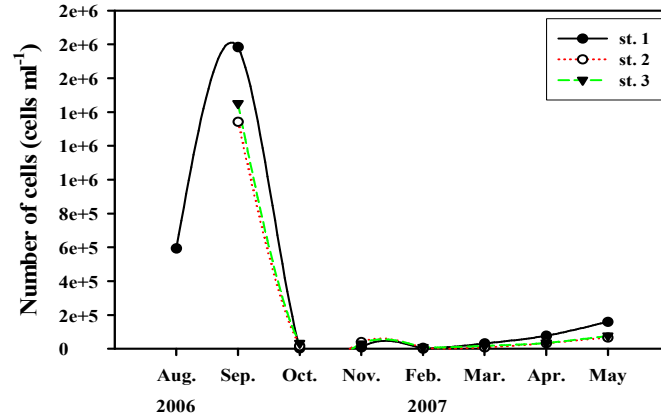
st. 3에서도 st. 1, 2와 마찬가지로 총 세포수의 형태와 남조류의 출현형태가 같았다. 즉 이 지점에서 총 세포수의 많은 부분을 남조류가 차지한다는 것을 알 수 있었다. 이 지점에서 세포수가 가장 많이 출현한 시기와 수층은 9월의 표층(0 m)로 약 1.4×10^6 cells mL⁻¹였다. 가장 적게 출현한 시기와 수층은 2007년 2월 2 m로 약 2.2×10^3 cells mL⁻¹였다. st. 3에서 수층별 출현하는 식물플랑크톤 형태는 남조류는 2006년 9월에 가장 많이 출현하였고 그 이후 감소하다가 2007년 5월에 다시 증가하는 형태를 보였고 규조류는 가을과 봄에 두 차례 증가형태를 보였다. st. 3 표층에 출현하는 식물플랑크톤 우점종은 다음과 같다.

[표 3.2.31] 신구저수지 st. 3 표층에 출현하는 우점종

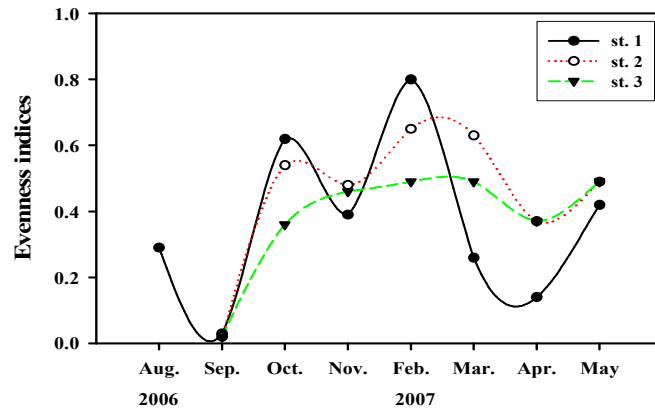
우점종	2006년			2007년			
	9월	10월	11월	2월	3월	4월	5월
<i>Cryptomonas</i> sp.		●	●				
<i>Lyngbya</i> sp.	●						
<i>Oscillatoria</i> sp.		●	●	●	●	●	●



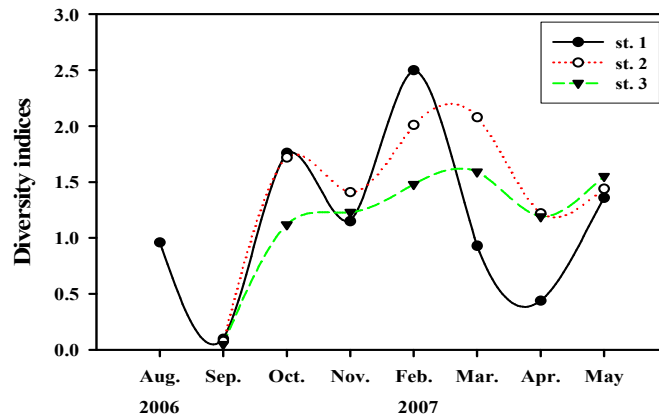
[그림 3.2.57] 신구저수지 각 지점 표층에 출현하는 식물플랑크톤 종 수



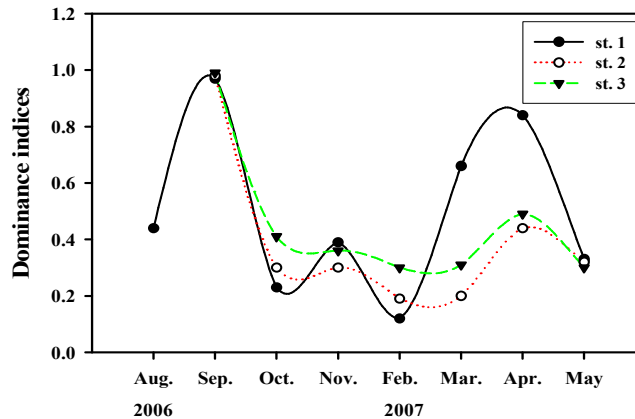
[그림 3.2.58] 신구저수지 각 지점 표층에 출현하는 남조류(Cyanophyceae) 세포수(cells mL⁻¹)



[그림 3.2.59] 신구저수지 각 조사지점 표층에 출현하는 식물플랑크톤을 이용한 평균도지수



[그림 3.2.60] 신구저수지 각 조사지점 표층에 출현하는 식물플랑크톤을 이용한 종다양성지수



[그림 3.2.61] 신구저수지 각 조사지점 표층에 출현하는 식물플랑크톤을 이용한 우점도지수

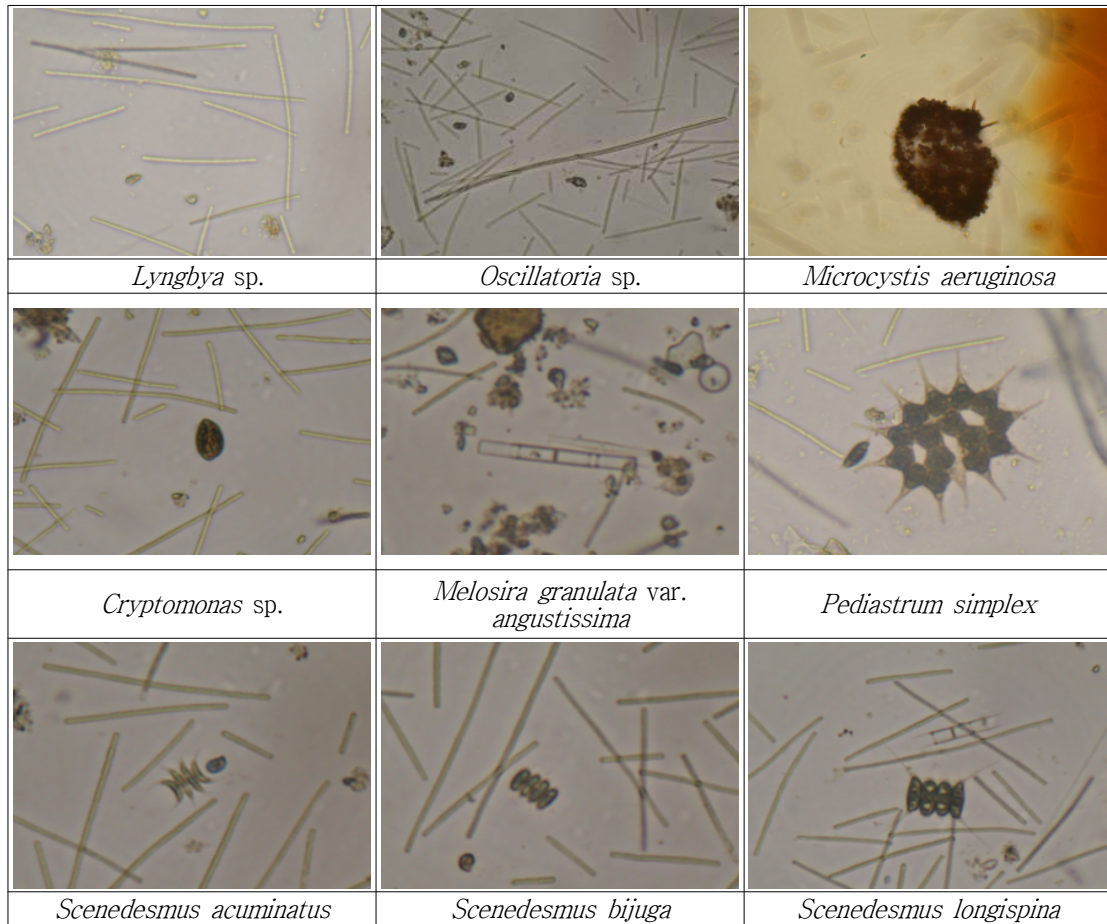
남조류는 부영양호수에서 녹조(綠潮)현상을 일으키며 수질을 떨어뜨리는 분류군이다. 신구저수지에서 녹조현상을 일으키는 남조류는 *Lyngbya* sp.와 *Phormidium* sp. 그리고 *Oscillatoria* sp.가 우점하였다. 조사기간 중 남조류가 가장 많이 출현한 시기는 2006년 9월로 대조지점 st. 1에서는 약 1.8×10^6 cells mL⁻¹였으나 식물섬을 설치한 st. 2에서는 약 1.3×10^6 cells mL⁻¹로 약 1.5×10^5 cells mL⁻¹만큼 세포수가 저감되었다. 즉 이 지점에서는 약 1.3배 저감되었다는 것이다. st. 3의 남조류는 9월 표층에서 약 1.4×10^6 cells mL⁻¹로 대조지점 지점보다 약 3.4×10^5 cells mL⁻¹ 만큼 적게 출현하여 st. 1보다 약 1.2배 정도 적게 나왔다. 그리고 우점종도 대조지점 곳에서는 *Lyngbya* sp., *Phormidium* sp., 그리고 *Oscillatoria* sp.가 우점하였으나 st. 2와 3에서는 *Oscillatoria* sp.가 주로 우점하였다. st. 2와 3의 약간의 차이는 있으나 식물섬이 녹조저감에 기여한다는 것이 증명되었다.

종다양성지수가 가장 높았던 시기와 지점은 st. 1 2007년 2월에 2.5였고 가장 낮았던 시기는 st. 3의 9월로 0.05였다. 종 다양성지수는 출현하는 종수와 세포수와의 관계로 지수가 낮다는 것은 우점하는 한두종이 많은 세포수를 보여준다는 것이다. 세 지점 모두 2006년 9월 남조류가 많이 출현했던 시기에 종 다양성 지수가 가장 낮았고 규조류가 많이 출현했던 2월에 종다양성 지수가 높은 형태를 보였다.

평균도지수는 종다양성지수와 비슷한 의미로 변화양상이 비슷한 것을 볼 수 있었다. 평균도지수의 의미는 출현하는 세포수가 어느 정도로 비슷하게 출현하느냐의 양상을 보여주는데 이것은 종다양성지수와 비슷한 의미이다.

신구저수지의 우점도지수는 각 조사지점에서 출현하는 식물플랑크톤 한두 종이 많이 출현할 때 높다. 우점도 지수가 가장 높았던 시기와 조사장소는 st. 3의 9월로 0.99였고 가장 낮았던 시기는 2007년 2월로 0.12였다. st. 3에서 9월에 우점도지수가 가장 높은 이유는 남조류 중 한 종인 *Lyngbya* sp.가 우점하였다는 뜻이다. 규조류가 많이 다양하게 출현한 2007년 2월에 우점도 지수가 가장 낮은 이유였다.

다음은 출현한 식물플랑크톤 중 우점종과 아우점종을 차지하는 종들의 사진이다.

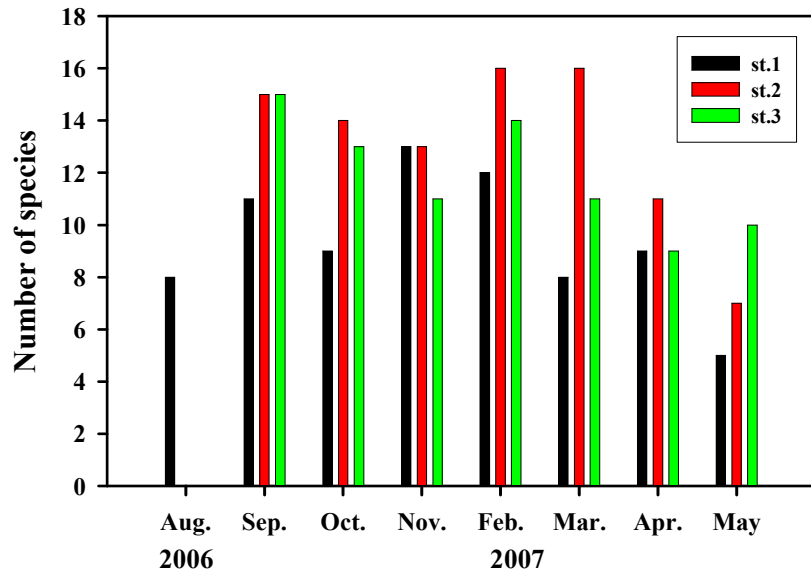


[그림 3.2.62] 식물플랑크톤 우점종 및 아우점종

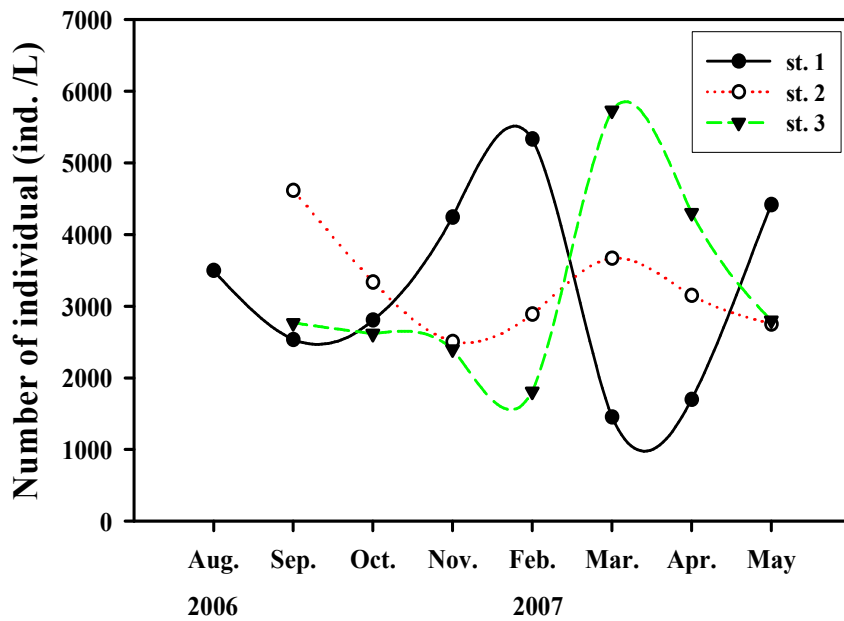
신구저수지 각 조사지점 수층별 출현하는 동물플랑크톤의 종명과 개체수는 부록에 수록하였다. 신구저수지 각 조사지점 0~2 m에 출현하는 동물플랑크톤의 총 종수는 27속 40종이었다. 대조지점 지점(st. 1)에 출현하는 총 종수는 21속 29종, 이중식재기반 인공식물섬 조사지점(st. 2)에 출현하는 동물플랑크톤 총 종수는 21속 31종, 교반장치를 이용한 인공식물섬을 설치한 지점(st. 3)에 출현하는 총 종수는 21속 30종이었다. 식물플랑크톤과는 달리 동물플랑크톤은 식물섬을 설치한 지점에서 한, 두 종이 더 많이 출현하였다.

동물플랑크톤 종수는 식물섬을 설치한 지점에서 다양하게 많이 출현함을 볼 수 있었다. 가장 많이 출현했던 시기의 지점은 st. 2에서 2월과 3월로 16종이 출현하였다.

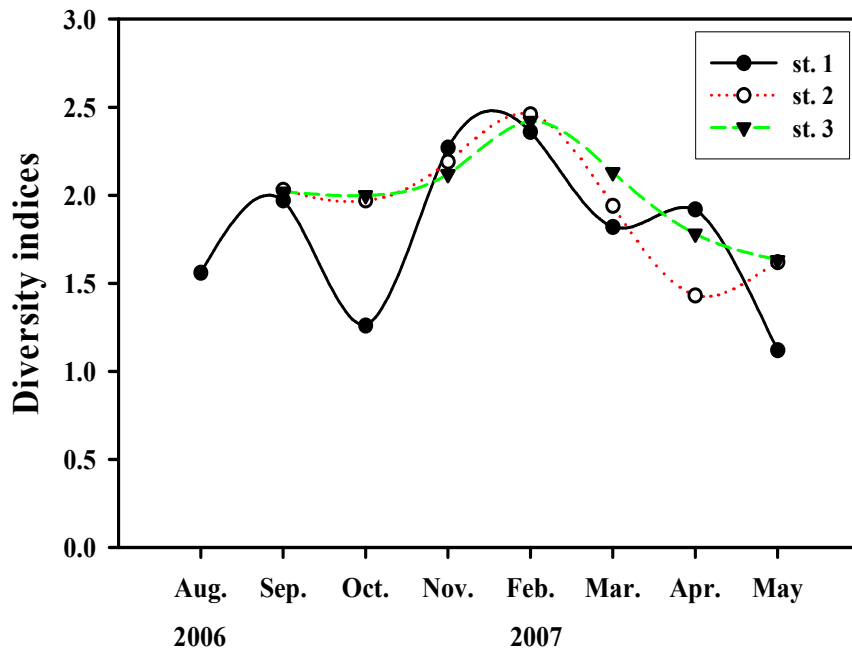
각 조사지점 0~2 m에 출현하는 동물플랑크톤 개체수 변화는 다음 그림과 같다



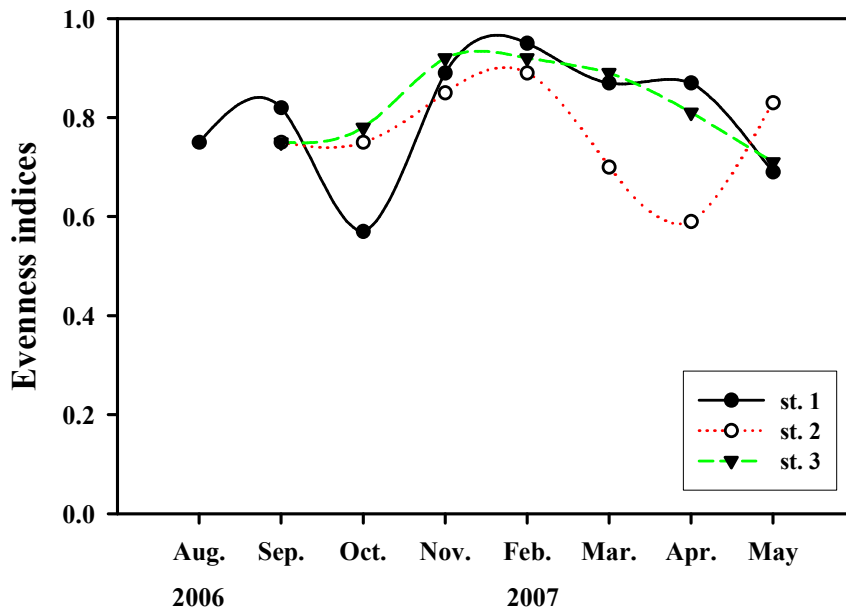
[그림 3.2.63] 신구저수지 각 조사지점에 출현하는 동물플랑크톤의 총 종수



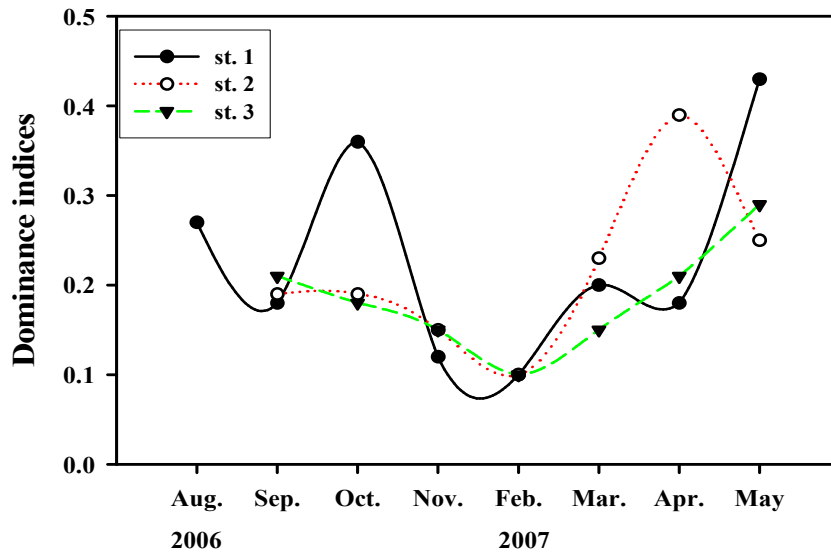
[그림 3.2.64] 신구저수지 각 조사지점 0~2 m에 출현하는 동물플랑크톤의 개체수



[그림 3.2.65] 신구저수지 각 조사지점 0~2 m에 출현한 동물플랑크톤의 종다양성지수



[그림 3.2.66] 신구저수지 각 조사지점 0~2 m에 출현한 동물플랑크톤 평균도지수

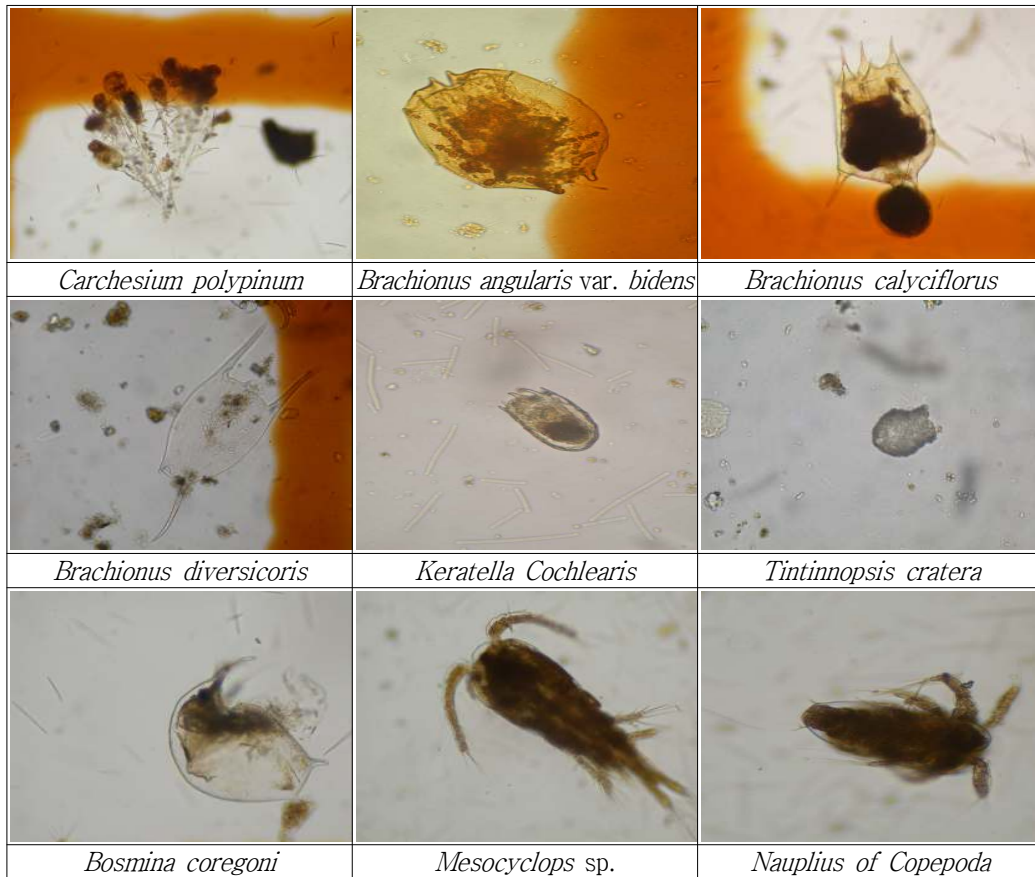


[그림 3.2.67] 신구저수지 각 조사지점 0~2 m에 출현한 동물플랑크톤의 우점도지수

개체수가 가장 많이 출현하는 시기와 장소는 교반장치를 이용한 식물섬을 설치한 장소 (st. 3)에서 3월로 약 5.7×10^3 ind. L^{-1} 였고 가장 적게 출현했던 지점과 시기는 2007년 3월, st. 1에서 약 1.5×10^3 ind. L^{-1} 였다. st. 1에서 동물플랑크톤 개체수가 가장 많이 출현한 시기는 2007년 2월로 5.3×10^3 ind. L^{-1} 였다. 이 시기에는 식물섬을 설치한 지점에서는 동물플랑크톤이 별로 출현하지 않았다. 이 시기에 st. 1에 주로 출현하는 동물플랑크톤 개체군은 윤충류로 *Keratella* 종이였다. 이후 개체수는 감소하다가 2007년 5월에 다시 증가하였는데 이 시기의 우점종은 지각류인 *Bosmina* 종이 우점하였다. st. 2에서는 2006년 9월에 4.6×10^3 ind. L^{-1} 가장 많은 개체수를 보였으며 가장 낮은 시기는 2006년 11월로 2.5×10^3 ind. L^{-1} 였다. 그 이후 3월까지 증가하다가 5월에 다시 약간 낮아졌다. st. 3에서는 2007년 3월에 약 5.7×10^3 ind. L^{-1} 로 가장 많이 출현했고 2월에 약 1.8×10^3 ind. L^{-1} 가장 적게 출현하였다. 겨울철을 제외하고는 조사지점에서 대부분 식물섬을 설치한 곳에서 동물플랑크톤이 많이 출현하였다. 이것은 식물섬을 설치한 곳에 동물플랑크톤이 많이 모여 물고기의 좋은 서식처가 된다는 것을 증명해 주는 것이다.

각 조사지점에서 종 다양성지수는 st. 1에서 2006년 10월과 2007년 5월을 제외하는 거의 1.5 이상으로 다양한 종들이 비슷하게 출현하고 있다는 것을 알 수 있었다. 세 지점 모두 겨울철에 종 다양성 지수가 높았고 2007년 봄으로 올수록 종 다양성지수가 점차 감소하였다. 이는 겨울철에 원생동물이나 윤충류의 많은 종들이 겨울철에 증가하다가 봄철로 올수록 지각류나 요각류 같은 몇몇의 대형 종들이 많은 개체수로 출현하기 때문이다.

우점도 지수는 세 지점 모두 2006년 11월과 2월에 낮은 값을 보였고 2007년 5월로 올수록 점차 증가하는 형태를 보여주고 있었다. 이는 평균도지수와는 역상관 관계를 보여주는 것이다. 즉 겨울에서 봄철로 올수록 윤충류보다는 지각류나 요각류의 한두종이 크게 우점 한다는 것을 지수로도 알 수 있었다.



[그림 3.2.68] 동물플랑크톤 우점종 및 아우점종

신구저수지에서 조사기간동안 출현하는 총 종수는 48속 107종으로 황색편모조류(Chrysophyceae) 1속 1종, 갈색편모조류(Cryptophyceae) 1속 1종, 외편모조류(Dinophyceae) 1속 1종, 남조류(Cyanophyceae) 9속 12종, 규조류(Bacillariophyceae) 18속 48종 그리고 녹조류(Chlorophyceae) 18속 44종이었다. 대조지점 댐 앞(st. 1)에 출현하는 총 종수는 32속 93종, 이중 식재기반 인공식물섬이 있는 조사지점(st. 2)에 출현하는 식물플랑크톤 총 종수는 36속 64종 그리고 교반장치를 이용한 식물섬을 설치한 조사지점(st. 3)에서 출현하는 식물플랑크톤 총 종수는 39속 60종으로 대조지점 st. 1에 비하여 식물섬을 설치한 st. 2와 3에서 출현하는 식물플랑크톤은 약 30종 정도 적게 출현하고 있었다. 식물섬에 의한 남조류의 녹조현상 억제 효과는 st. 2에서 약 1.3배, st. 3에서 약 1.2배 효과가 있었다. 우점종도 st. 1에서는 남조류 중 *Lyngbya* sp., *Oscillatoria* sp., *Phormidium* sp. 등 다양한 종이 출현하였으나 식물섬을 설치한 st. 2, 3에서는 *Oscillatoria* sp. 한 종만이 우점하였다.

이번 조사로 다양한 형태의 식물섬이 남조류에 의한 녹조현상에 대한 저감효과를 가지고 있고 동물플랑크톤의 개체수도 더 많이 출현하여 좋은 서식처가 될 수 있음을 알 수 있었다.

(2) 2007~2008년 이중기반재 및 교반장치 인공식물섬 신규저수지 적용 결과

2007~2008년 이중식재기반 및 교반장치이용 인공식물섬의 신규저수지 적용시험은 '06~'07 조사와 동일한 방법으로 조사를 수행하였다.

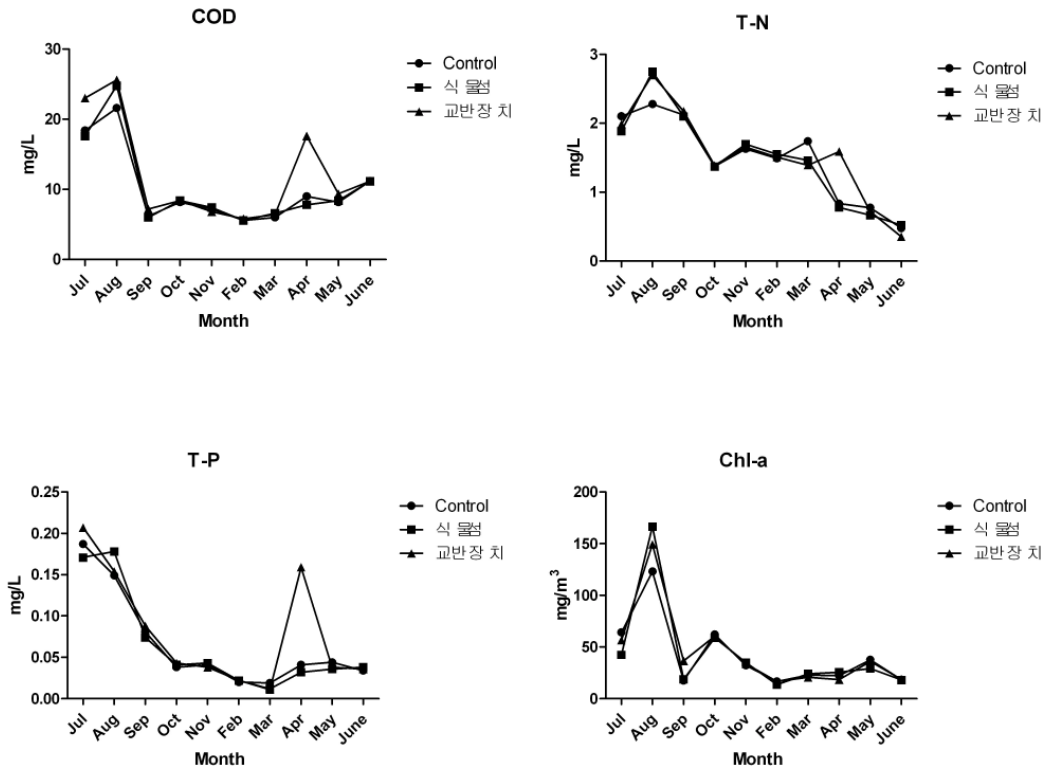
신규저수지에 설치 이중식재기반식물섬과 교반장치이용인공식물섬 주변의 수질과 대조지점의 수질을 비교한 결과 수체의 크기에 비하여 식물섬의 규모가 작아 지속적인 수체의 교란과 혼합으로 수질정화효과는 계량 할 수 없었으나 일부시기에는 식물섬 주변의 수질농도가 높은 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 식물섬에서 지속적인 생산활동이 이루어짐에 따라 식물섬 주변으로 생산된 유기물 등이 배출되어 수질농도를 높였던 결과로 판단된다. 그러나 신규 저수지에서의 식물섬 주변과 대조지점과의 차이는 크지 않았던 것으로 조사되었다.

신규저수지에 설치한 이중식재기반 인공식물섬과 교반장치를 이용한 식물섬에 대한 2차년식물플랑크톤의 상세 조사결과는 부록에 수록하였다.

총세포수에 있어서 대조지점(st. 1)에서 07년 7월부터 9월까지의 경우 $2.5 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^5$ cells mL^{-1} 로 가장 높은 수를 보였으며 '08년 2월에 가장 적은 2.0×10^4 cell mL^{-1} 이 조사되었으며 이후 6×10^4 cells mL^{-1} 수준을 유지 하였다(월평균 9.8×10^4 cells mL^{-1}). 반면 인공식물섬이 설치된 지역(st. 1, 2)의 경우 '07년 8월에 2.5×10^5 cells mL^{-1} 을 정점으로 $8.5 \times 10^4 \sim 6.9 \times 10^3$ cells mL^{-1} 범위로 조사되어 전반적으로 대조지점보다는 식물플랑크톤의 수가 적은 것으로 조사되었다(평균 st. 2 5.7×10^4 cells mL^{-1} , st. 3 6.2×10^4 cells mL^{-1}). 실험중 설치된 인공식물섬 형태에 따른 식물플랑크톤총세포수간의 차이는 시기별로 다소 차이가 있으나 전체적으로 뚜렷한 차이는 구별할 수 없었다.

총 출현종수는 대조지점이 평균 16.1종(최소 8종, 최대 26종)이 출현하였다. 인공식물섬 설치 지역은 이중식재기반식물섬이 평균 16.6종(최소 6종, 최대 23종)이 출현하였으며, 교반장치를 이용한 식물섬은 평균 16.9종(최소 7종, 최대 29종)이 출현하여 식물섬을 설치한 지역에서 보다 다양한 종이 출현하였던 것으로 조사되었다.

종다양성지수의 경우 대조지점(st. 1)은 0.018~1.691로 평균 0.98을 보여 비교적 종다양성이 낮은 것으로 조사되었으며 '07년 7월에 가장 낮았고 '08년 6월에 가장 높았다. 식물섬설치지역의 경우 이중식재기반식물섬은 평균 1.14, 교반장치를 이용한 인공식물섬은 1.47로 종다양성이 대조지점에 비하여 높았던 것으로 조사되었다.



[그림 3.2.69] 이중식재기반식물섬과 교반장치식물섬의 수질정화효과

총풍부도 또한 대조지점은 1.35, 이중식재기반식물섬은 1.50, 교반장치를 이용한 식물섬은 1.52로 식물섬을 설치한 지역에서 총풍부도가 높았다.

균등도 역시 타지수와 비슷한 양상을 보여 대조지점은 0.34, 이중식재기반식물섬은 0.42, 교반장치를 이용한 식물섬은 0.52로 식물섬을 설치한 지역에서 높은 것으로 조사 되었다.

이상의 결과에 따르면 인공식물섬주변지역의 경우 식물플랑크톤의 출현개체수는 작은 반면 출현종수가 다양하고 종당양성지수, 총풍부도지수, 균등도지수 등이 높아 인공식물섬이 생태다양성 효과를 나타내고 있는 것으로 판단된다.

신구저수지에 설치한 이중식재기반 인공식물섬과 교반장치를 이용한 식물섬에 대한 2차년도 동물플랑크톤의 상세 조사결과는 부록에 수록하였다.

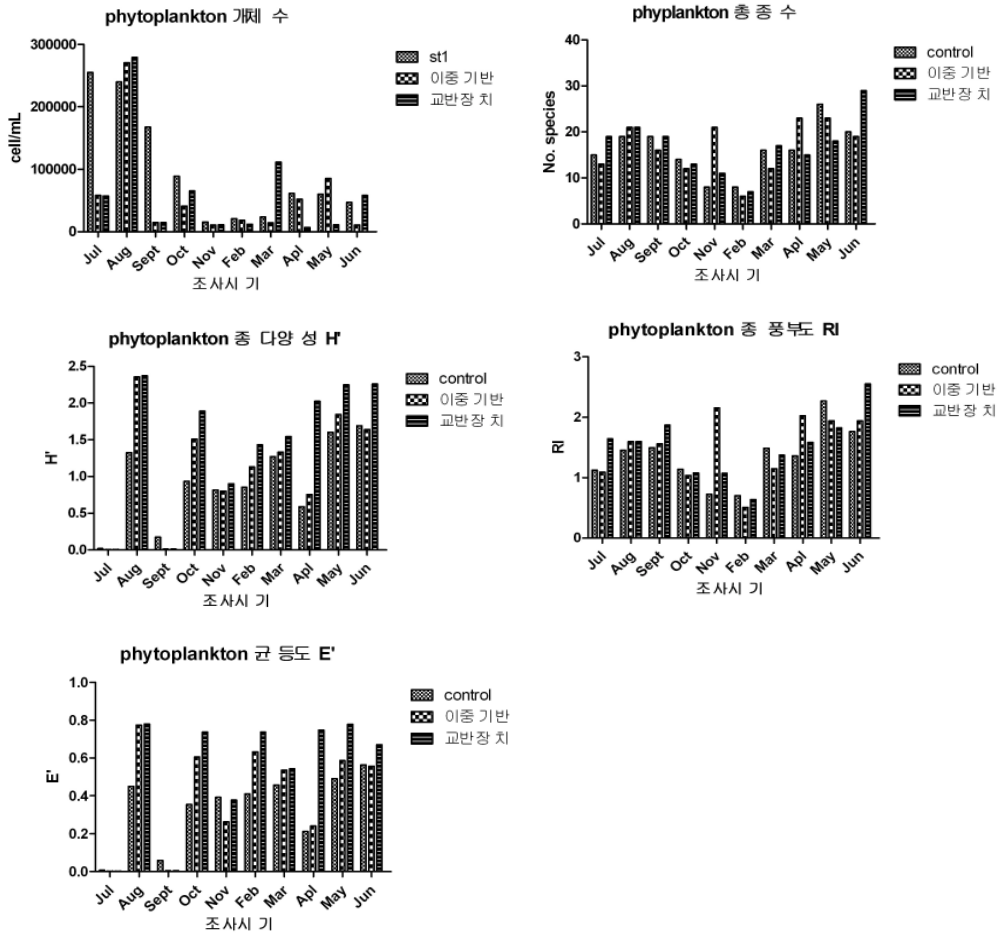
동물플랑크톤의 총개체수는 대조지점이 시기에 따라 31~2,450 inds. mL⁻¹로 평균 340 inds. mL⁻¹이 출현한 것으로 조사 되었다 '07년의 경우 식물플랑크톤이 번성하였던 7, 8월에 출현개체가 적었으며, 동절기 역시 적은 개체수만이 조사되었다. 그러나 '08년의 경우 6월에 2,450 inds. mL⁻¹이 조사되었으며 이시기에 식물플랑크톤의 개체수가 감소한 것을 확인 할 수 있었다. 반면 식물섬이 설치된 지역의 총개체수는 식물플랑크톤과는 반대로 대조지점보다 많은 개체가 출현한 것으로 조사되었다. 서식처에 따른 동물플랑크톤의 종별 변화는 다음과 같다.

종별변화에 있어서도 대부분의 종들이 대조지점보다는 많은 개체수가 조사되었으며, Rotifera가 가장 많은 개체가 조사되었으며 가을과 봄철에 식물섬 등을 설치한곳에서 높은 개체

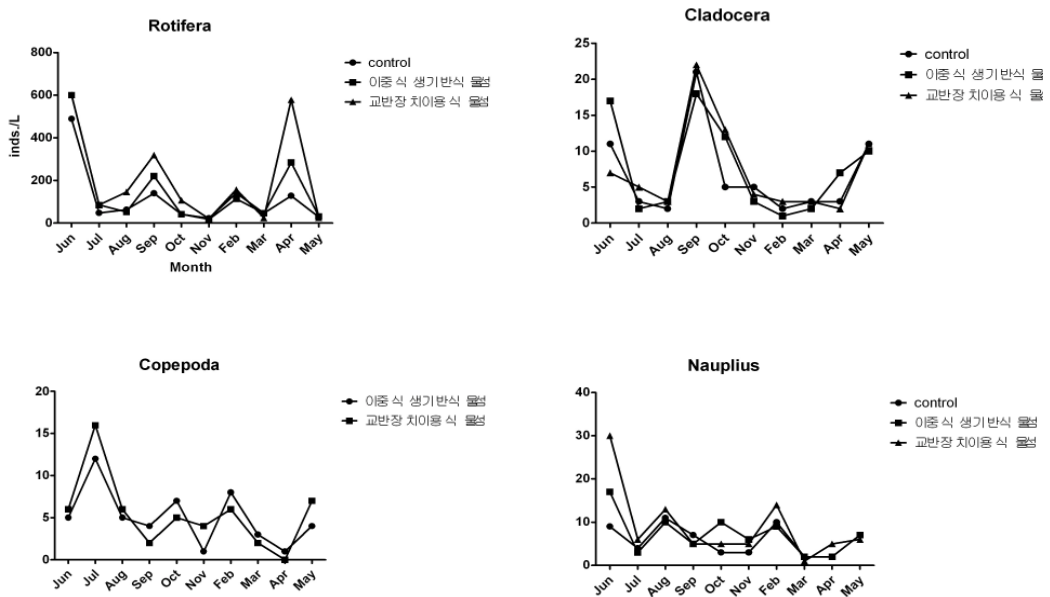
수를 보이는 것으로 조사되었다. 식물섬이 설치된 지역의 경우 식물플랑크톤과는 다른 생물지수를 보이는데 총 출현종수는 대조지점이 11.91종, 이중식재기반식물섬이 11.45종, 교반장치식물섬이 10.91종으로 대체적으로 식물섬을 설치한 지역이 대조지점보다 낮은 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 근소한 차이이나 종다양성, 종풍부도, 균등도 등에서도 동일한 양상을 보였다.

[표 3.2.32] 식물플랑크톤 총개체수 및 생물지수

조사시기 구분		2007년					2008년					평균
		07~20	08~16	09~19	10~23	11~22	03~27	03~27	04~30	05~20	06~17	
총 개체수	Control	255,449	240,173	167,383	88,952	15,679	20,801	23,856	61,253	60,011	47,110	98,066
	식물섬	58,126	270,532	14,820	40,781	10,781	18,480	14,420	52,216	85,006	10,814	57,597
	교반 장치	57,071	279,295	14,806	65,598	11,013	11,952	111,664	6,911	11,165	58,417	62,789
총종수	Control	15	19	19	14	8	8	16	16	26	20	16.10
	식물섬	13	21	16	12	21	6	12	23	23	19	16.60
	교반 장치	19	21	19	13	11	7	17	15	18	29	16.90
종 다양성 (H')	Control	0.018	1.327	0.173	0.937	0.817	0.856	1.270	0.588	1.602	1.691	0.93
	식물섬	0.005	2.358	0.014	1.509	0.801	1.134	1.335	0.756	1.844	1.641	1.14
	교반 장치	0.005	2.374	0.014	1.893	0.904	1.435	1.542	2.025	2.251	2.260	1.47
종 풍부도 (RI)	Control	1.124	1.453	1.497	1.141	0.725	0.704	1.488	1.361	2.272	1.766	1.35
	식물섬	1.094	1.599	1.562	1.036	2.154	0.509	1.149	2.025	1.938	1.938	1.50
	교반 장치	1.644	1.595	1.874	1.082	1.074	0.639	1.377	1.584	1.824	2.551	1.52
균등도 (E')	Control	0.007	0.451	0.059	0.355	0.393	0.411	0.458	0.212	0.492	0.565	0.34
	식물섬	0.002	0.775	0.005	0.607	0.263	0.633	0.537	0.241	0.588	0.557	0.42
	교반 장치	0.002	0.780	0.005	0.738	0.377	0.738	0.544	0.748	0.779	0.671	0.54



[그림 3.2.70] 식물플랑크톤 총개체수 및 생물지수



[그림 3.2.71] 동물플랑크톤 종도성 변화

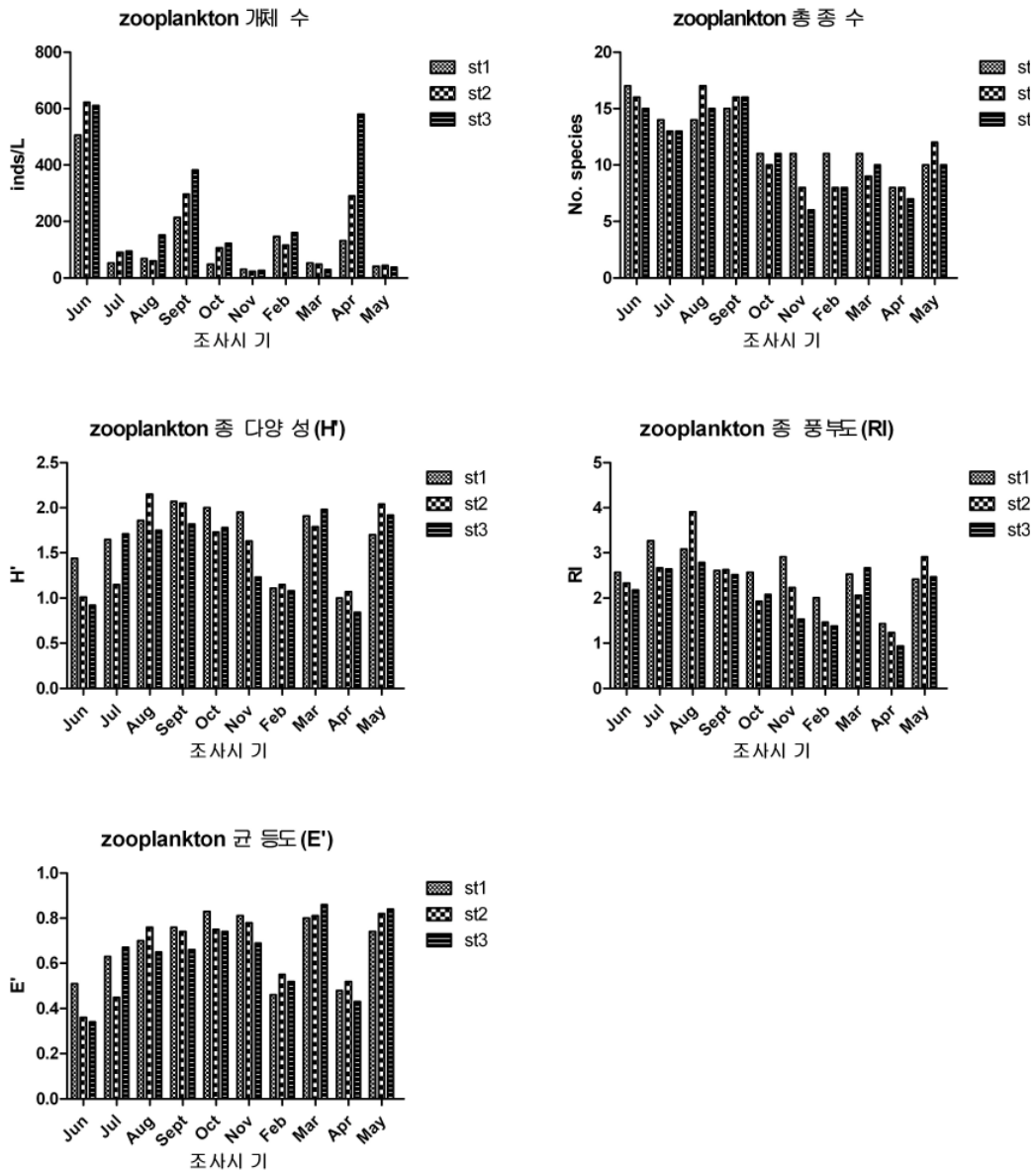
[표 3.2.33] 동물플랑크톤 총개체수 및 생물지수

구분	조사시기	2007년						2008년						평균
		6월	7월	8월	9월	10월	11월	2월	3월	4월	5월	6월		
총 개체수	Control	506	53	68	214	49	31	146	52	132	41	2,450	340	
	식물섬	622	90	0	297	107	23	116	49	291	44	3,030	429	
	교반장치	611	95	152	382	122	26	160	29	580	38	1,730	356	
총 종수	Control	17	14	14	15	11	11	11	11	8	10	9	11.91	
	식물섬	16	13	17	16	10	8	8	9	8	12	9	11.45	
	교반장치	15	13	15	16	11	6	8	10	7	10	9	10.91	
종다양성 (H')	Control	1.44	1.65	1.86	2.07	2.00	1.95	1.11	1.91	1.00	1.70	1.81	1.68	
	식물섬	1.01	1.15	2.15	2.05	1.73	1.63	1.15	1.79	1.07	2.04	1.81	1.60	
	교반장치	0.92	1.71	1.75	1.82	1.78	1.23	1.08	1.98	0.84	1.92	1.57	1.51	
종풍부도 (RI)	Control	2.57	3.27	3.08	2.61	2.57	2.91	2.01	2.53	1.43	2.42	1.03	2.40	
	식물섬	2.33	2.67	3.91	2.63	1.93	2.23	1.47	2.06	1.23	2.91	1.00	2.22	
	교반장치	2.18	2.64	2.79	2.52	2.08	1.53	1.38	2.67	0.94	2.47	1.07	2.02	
균등도 (E')	Control	0.51	0.63	0.70	0.76	0.83	0.81	0.46	0.80	0.48	0.74	0.83	0.69	
	식물섬	0.36	0.45	0.76	0.74	0.75	0.78	0.55	0.81	0.52	0.82	0.82	0.67	
	교반장치	0.34	0.67	0.65	0.66	0.74	0.69	0.52	0.86	0.43	0.84	0.72	0.65	

신구저수지의 대조지점은 동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 개체수 변화에서 상호 연관성을 찾기 어려웠으나 가을과 봄철의 경우 식물플랑크톤의 증식에 따라 동물플랑크톤 개체수도 상승하는 경향을 보였다.

이중식재기반 인공식물섬의 경우 '07년 8월 식물플랑크톤의 급속한 증가가 관찰되었으나 이후 9월에 동물플랑크톤의 급격한 증식에 따라 감소였으며 이후 봄에는 동물플랑크톤이 급격히 증가하고 식물플랑크톤은 도증가 경향을 보였으나 대조지점과는 달리 개체수가 적었고 증가속도 역시 낮았다.

교반장치를 이용한 인공식물섬 역시 이중식재기반 인공식물섬과 같이 '07년 8월 식물플랑크톤의 급속한 증가가 관찰되었으나 이후 9월에 동물플랑크톤의 급격한 증식에 따라 감소였으며 이후 봄에는 동물플랑크톤이 급격히 증가하고 식물플랑크톤은 증식이 활발하지 못했던 것으로 조사되었다.



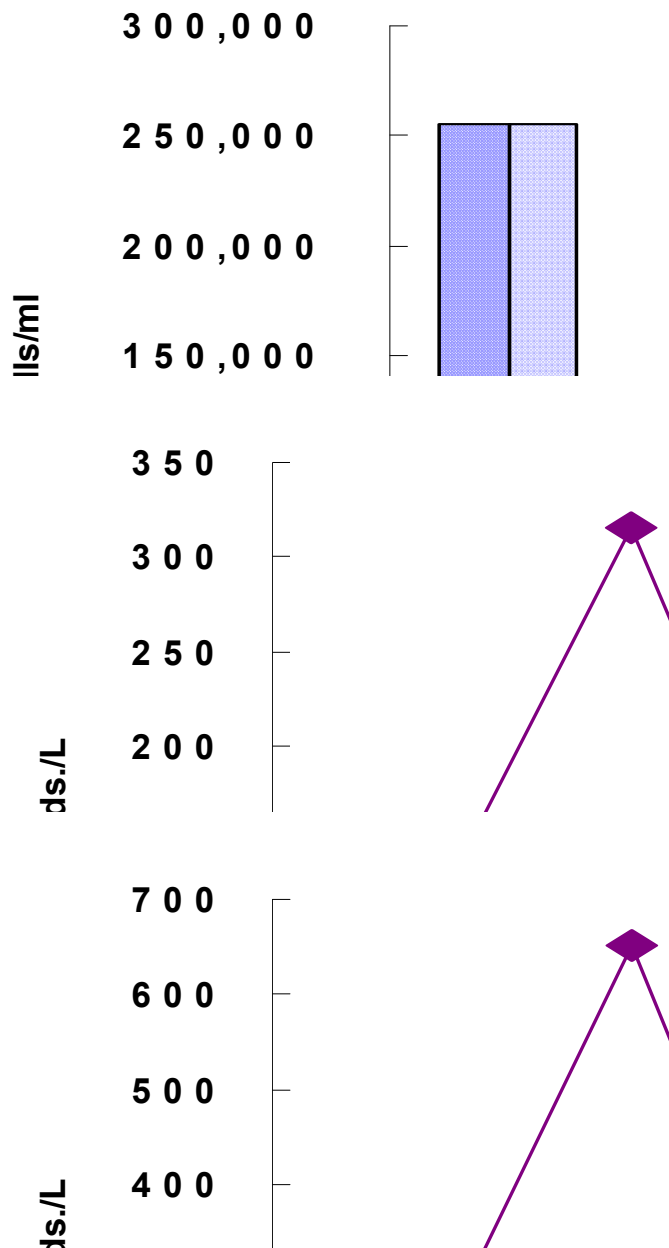
[그림 3.2.72] 동물플랑크톤 총개체수 및 생물지수

식물섬의 설치목적은 호소내에 수생식물군락을 조성하여 미생물의 부착재 역할과 동물플랑크톤, 어류 등의 서식지를 조성하여 호소생태계의 다양성을 피하고 이로부터 얻어진 생물다양성이 호소수질관리에 유리한 역할을 담당하도록 하고자 하는 것이다.

2차년도 조사에 따르면 인공식물섬을 설치한 지역의 경우 동·식물플랑크톤 개체수에 있어서 식물플랑크톤의 개체수는 감소하고 동물플랑크톤의 개체수는 증가하는 것으로 조사되어 식물플랑크톤의 제어에 효과가 있는 것으로 조사되었다. 이는 기존에 알려져 왔던 바와 같이 인공식물섬 주변의 많은 동물플랑크톤이 식물플랑크톤을 먹이 등으로 이용함에 따른 결과로 판단된다. 그러나 총 개체수와는 달리 각종 생물지수에 있어서는 동물플랑크톤의 생물지수는 낮아지는 반면 식물플랑크톤의 경우 식물섬 주변에서 높아지는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는

식물섬 주변에서 동물플랑크톤의 섭식작용에 의하여 특정종이 우점하지 못한 결과로 판단되며, 이밖에 식물섬 주변의 광-shading 및 식물체의 각종 타감물질분비 등으로 소수의 종이 우점할 수 없었던 결과인 것 같다.

동물플랑크톤은 식물플랑크톤과는 반대로 각종 생물지수가 낮은 것으로 조사되었는데 이는 서식처이 구성에 따라 서식처의 환경에 우점하여 정착할 수 있는 동물플랑크톤의 양이 증가한 결과로 판단된다.



[그림 3.2.73] 시기별 동·식물 플랑크톤의 현존량

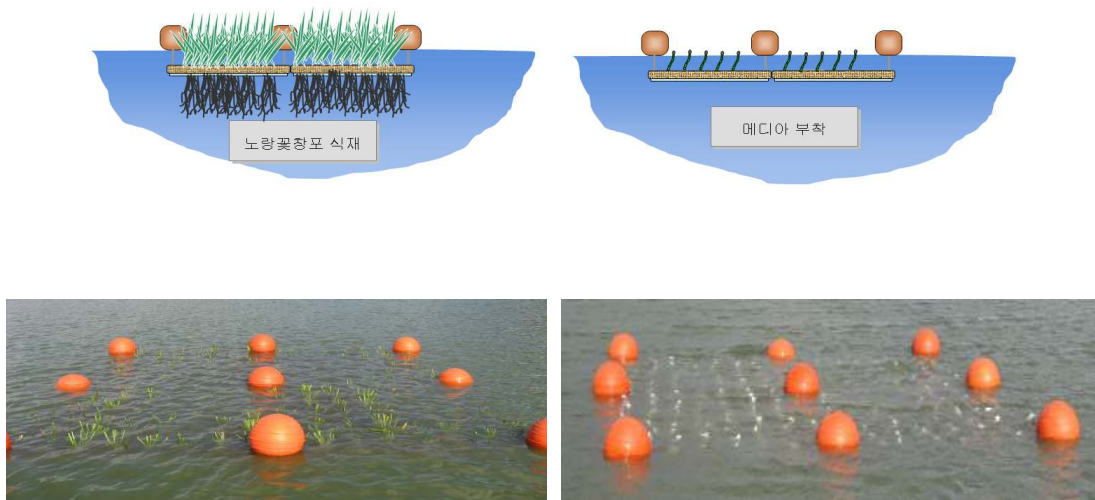
(3) 침수형 인공식물섬

수생식물식생지역은 동물플랑크톤의 서식지로 사용되고 있으며 특히 침수식물이 번성하는 곳은 침수식물의 타감물질 배출과 빛투과 방해 등의 물리화학적 작용 외에 동물플랑크톤의 서식지로 이용되어 식물플랑크톤의 수를 감소시키는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 조사에서는 식생기반재에 꽃창포를 식재한 식물섬과 매디아를 부착한 침수형인공식물섬을 제작하여 수중에 설치하고 효과를 검토 하였다.

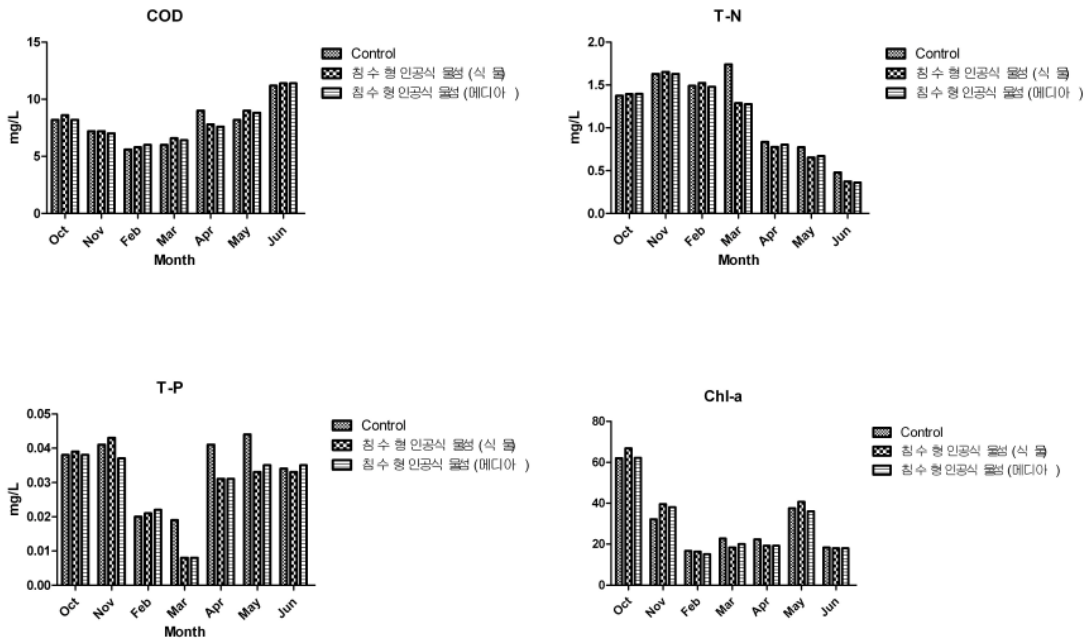
침수형인공식물섬은 수면에 부유하는 형태로 수심은 0.2 m 깊이로 수중에 설치하였으며, 인공식물섬의 상부에 동물성플랑크톤의 서식처 조성 및 어류의 산란지 제공을 목적으로 어류의 산란 및 부화시 어란과 치어의 침강에 의한 손실을 막기 위해 침수형으로 제작하고 꽃창포와 매디아를 식재·설치하였다.

- 설치시기: 2007년 10월 16일
- 설치장소: 충청남도 보령 신구저수지
- 설치규모: 인공식물섬 4×4 m
- 특이사항: 식물 식재형, 매디아 부착형 2가지형태로 제작
- 구성자재: 식물, 식생기반재, HDPE망, 부력재, 계류장치, 부표, SUS앵글, 매디아

침수형인공식물섬을 신구저수지내에 조성하여 수질분석한 결과 조사시기에 따라 다소 차이는 있었으나 대조지점시료와 침수형인공식물섬의 식재, 매디아 설치여부에 관계없이 해당시기의 조사결과에서는 유의한 차이를 발견할 수 없었다. 이는 침수형인공식물섬이 수중에 설치됨에 따라 표층수가 바람에 의하여 흐름을 형성하고 이에 대한 차단 장치가 없어 지속적인 호소수의 혼합이 발생하였기 때문으로 보인다.



[그림 3.2.74] 침수형인공식물섬 모식도 및 설치전경



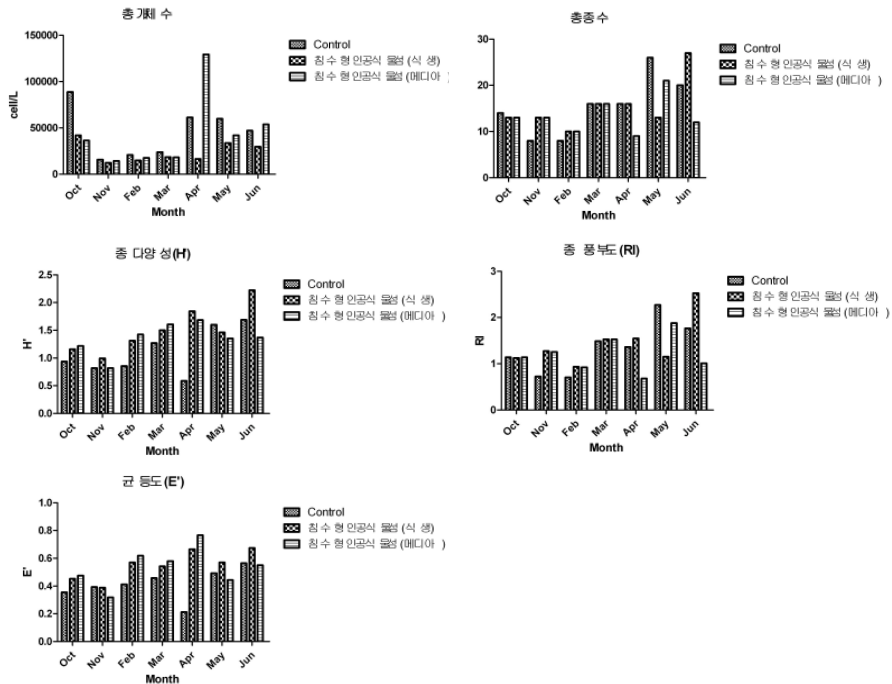
[그림 3.2.75] 침수형인공식물섬 수질정화 효과

침수형인공식물섬의 식물플랑크톤 변화를 조사한 결과 총개체수는 대조구, 침수형인공식물섬 (미디어), 침수형인공식물섬(식재) 순으로 출현하였으나 미디어를 부착한 침수형인공식물섬에서 4월에 비약적으로 증가한 결과를 제외한다면 대부분의 시기에 있어 침수형인공식물섬에서의 식물플랑크톤의 감소를 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 침수형인공식물섬에서의 채취지점이 식물섬 상부에서 실시되어 식물섬에 의한 빛차단 효과가 배제된 상태로 조사된 결과이므로 식물섬자체의 식물플랑크톤제어효과를 짐작할 수 있다.

식물플랑크톤에 대한 생물지수를 검토한 결과 대조지점은 조사기간 평균 15.43종이 출현하여 종다양성이 1.11, 종풍부도가 1.35, 균등도는 0.41이었다. 침수형인공식물섬 중 식재가 된 식물섬은 조사기간 평균 15.43종이 출현하여 대조구와 같았으나 내용적인 면에 있어서 식재된 식물섬은 조사기간 중 고른 출현종수를 보인 반면 대조구는 조사시기마다 차이가 있고 봄에 많은 종이 출현하였다. 식물이 식재된 침수형인공식물섬의 종다양성은 1.15, 종풍부도는 1.44, 균등도는 0.55로 조사되었다. 미디어를 부착한 침수형인공식물섬은 출현종이 13.43종으로 대조구에 비하여 적은 종이 출현하였으나 조사기간 중 출현빈도는 비교적 고른 것으로 조사되었다. 종다양성 및 종풍부도는 각각 1.35, 1.20으로 낮게 조사되었으나 균등도는 0.54로 식재한 식물섬과 유사하였다.

[표 3.2.34] 침수형인공식물섬 식물플랑크톤 생물지수 변화

구분	조사시기	Oct	Nov	Feb	Mar	Apr	May	Jun	평균
	Control	총 개체수	88,952	15,679	20,801	23,856	61,253	60,011	47,110
총 종수		14	8	8	16	16	26	20	15.43
종다양성(H')		0.937	0.817	0.856	1.270	0.588	1.602	1.691	1.11
종풍부도(RI)		1.141	0.725	0.704	1.488	1.361	2.272	1.766	1.35
균등도(E')		0.355	0.393	0.411	0.458	0.212	0.492	0.565	0.41
식재 식물섬	총 개체수	41,964	12,439	14,884	18,404	16,409	33,706	29,873	23,954
	총 종수	13	13	10	16	16	13	27	15.43
	종다양성(H')	1.159	0.995	1.313	1.501	1.844	1.462	2.223	1.50
	종풍부도(RI)	1.127	1.273	0.937	1.527	1.546	1.151	2.523	1.44
	균등도(E')	0.452	0.388	0.570	0.542	0.665	0.570	0.674	0.55
미디어 부착 식물섬	총 개체수	36,488	14,287	17,744	18,364	129,405	42,111	53,965	44,623
	총 종수	13	13	10	16	9	21	12	13.43
	종다양성(H')	1.218	0.818	1.425	1.608	1.686	1.352	1.367	1.35
	종풍부도(RI)	1.142	1.254	0.920	1.528	0.680	1.878	1.010	1.20
	균등도(E')	0.475	0.319	0.619	0.580	0.767	0.444	0.550	0.54

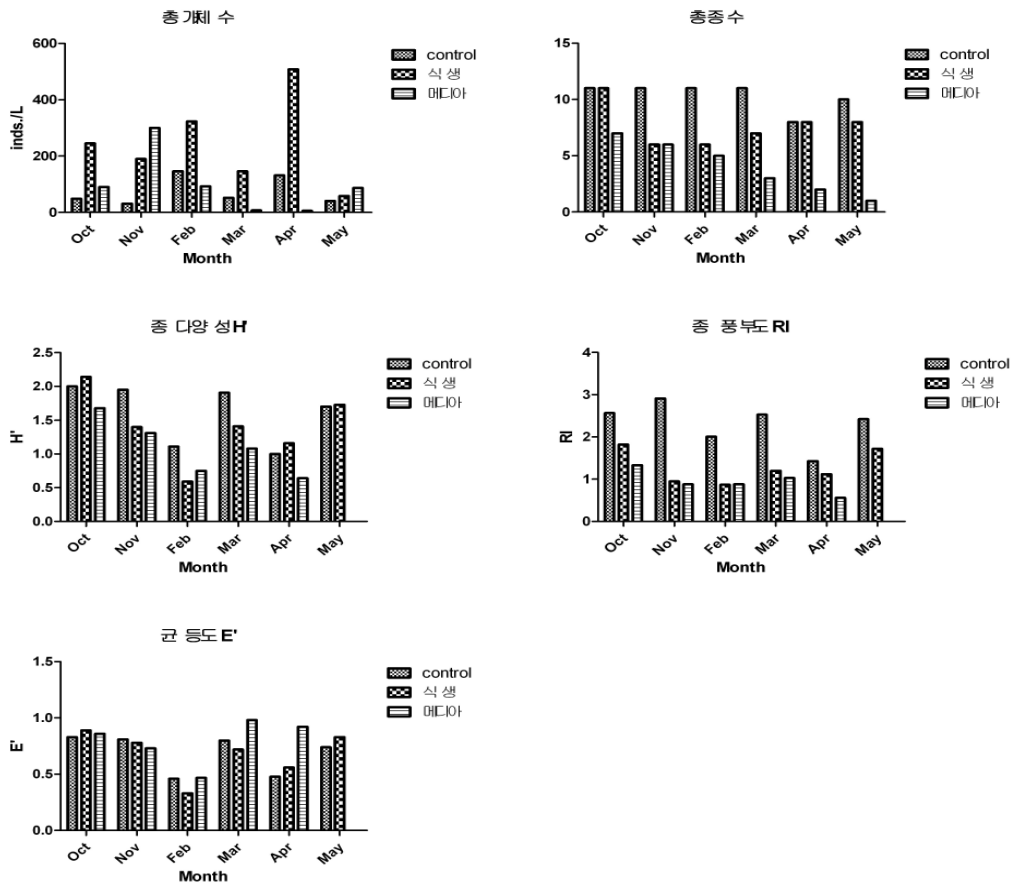


[그림 3.2.76] 식물플랑크톤 총세포수 및 생물지수 변화

침수형인공식물섬구간에 대한 동물플랑크톤 조사결과 대조구는 조사기간 중 31~132 inds. L⁻¹로 평균 75 inds. L⁻¹에 평균 10.3종의 동물플랑크톤이 출현하였다. 종다양성은 0.997~2.000으로 평균 1.61로 나타났으며 2월과 4월이 낮게 조사되었다. 식재된 침수형인공식물섬은 58~508 inds. L⁻¹로 평균 245 inds. L⁻¹, 7.6종이 출현하여 종다양성은 0.595~2.143으로 평균 1.41로 조사되었다. 미디어가 부착된 침수형인공식물섬은 6~300 inds. L⁻¹로 평균 97 inds. L⁻¹에 평균 4종이 출현하였다. 종다양성은 0~1.677로 평균 0.91로 가장 낮았던 것으로 조사되었다. 이상의 결과에서 동물플랑크톤의 경우 식재된 침수형인공식물섬에서는 개체수가 많이 출현하였으나 종다양성은 대조구에 비하여 낮았으며, 미디어가 부착된 침수형인공식물섬은 출현개체수는 대조구와 비슷하고 종다양성은 낮았다.

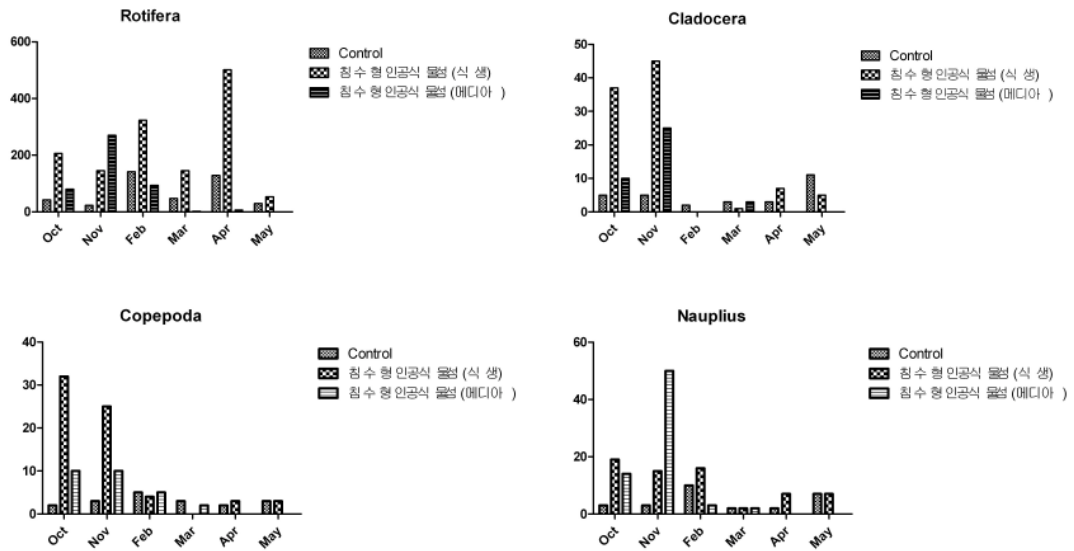
[표 3.2.35] 침수형인공식물섬 동물플랑크톤 생물지수 변화

구분		조사시기	Oct	Nov	Feb	Mar	Apr	May	평균	평균
control	총 개체수	49	31	146	52	132	41	75	75.14	
	총 종수	11	11	11	11	8	10	10.33	10.33	
	종다양성(H')	2.000	1.948	1.113	1.914	0.997	1.698	1.61	1.61	
	종풍부도(RI)	2.569	2.912	2.007	2.531	1.434	2.424	2.31	2.31	
	균등도(E')	0.834	0.812	0.464	0.798	0.479	0.738	0.69	0.69	
식재 식물섬	총 개체수	245	190	323	146	508	58	245	245.00	
	총 종수	11	6	6	7	8	8	7.67	7.67	
	종다양성(H')	2.143	1.401	0.595	1.408	1.159	1.731	1.41	1.41	
	종풍부도(RI)	1.818	0.953	0.865	1.204	1.124	1.724	1.28	1.28	
	균등도(E')	0.894	0.782	0.332	0.723	0.557	0.832	0.69	0.69	
미디어부 착식물섬	총 개체수	90	300	93	7	6	87	97	97.14	
	총 종수	7	6	5	3	2	1	4.00	4.00	
	종다양성(H')	1.677	1.306	0.750	1.079	0.637	0.000	0.91	0.91	
	종풍부도(RI)	1.333	0.877	0.882	1.028	0.558	0.000	0.78	0.78	
	균등도(E')	0.862	0.729	0.466	0.982	0.918	0.000	0.66	0.66	



[그림 3.2.77] 침수형인공식물섬 동물플랑크톤 생물지수 변화

동물플랑크톤의 종변화를 조사한 결과 Rotifera의 경우 조사기간 중 최소 42 inds. L⁻¹, 최대 141 inds. L⁻¹로 평균 68 inds. L⁻¹로 조사되었으나 식재된 식물섬은 최소 53 inds. L⁻¹, 최대 501 inds. L⁻¹로 평균 229 inds. L⁻¹가, 메디아가 부착된 식물섬은 최소 0 inds. L⁻¹, 최대 270 inds. L⁻¹로 평균 75 inds. L⁻¹로 조사되어 식재된 침수형 식물섬에서 평균 2.2배 높게 출현하였다. 메디아가 부착된 침수형인공식물섬의 경우 11월 최대 270 inds. L⁻¹가 출현하였으나 봄철에는 거의 조사되지 않았다. 조사기간 중 Cladocera는 대조구 2~11 inds. L⁻¹, 식재된 식물섬 0~45 inds. L⁻¹, 메디아부착 식물섬은 0~25개체가 출현하여 '07년 가을에는 침수형인공식물섬에서 많이 출현한 반면 '08년 봄에는 대조구에서 소량출현하고 식물섬 구간에서는 조사되지 않았다. Copepoda는 Cladocera와 마찬가지로 침수형인공식물섬에서 '07년 가을 주로 출현하고 대조구의 경우 조사기간중 2~5 inds. L⁻¹만이 조사되었다. Nauplius도 위의 두 종과 유사한 경향을 보여 대조구는 2~10 inds. L⁻¹, 식재식물섬이 2~19 inds. L⁻¹, 메디아부착식물섬이 0~50 inds. L⁻¹로 주로 가을에 다수가 출현하였다.



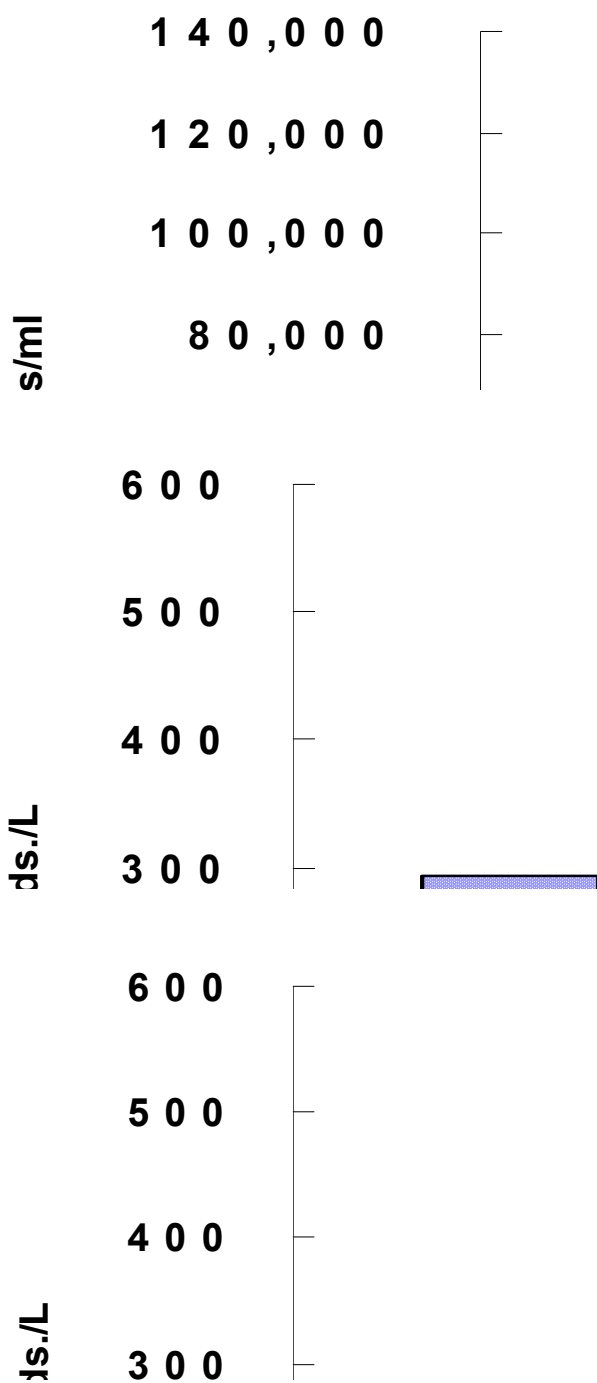
[그림 3.2.78] 침수형인공식물섬 동물플랑크톤 종조성변화

조사기간 중 대조구에서 식물플랑크톤의 증감과 동물플랑크톤의 증감이 거의 유사하게 진행되었으며, 식재된 침수형인공식물섬에서는 상대적으로 많은 동물플랑크톤이 유지되고 식물플랑크톤의 증감이 비교적 적었으나 '08년 5월 동물플랑크톤이 감소하며 식물 플랑크톤의 수가 증가하는 경향을 보였다. 미디어가 부착된 침수형인공식물섬의 경우 동물플랑크톤이 200여 개체 정도만으로도 식물플랑크톤의 양을 식재된 침수형인공식물섬과 비슷한 식물플랑크톤의 수를 유지하였으나 3~4월에 급격히 감소함에 따라 급격히 식물플랑크톤이 증식하였고 다시 5월에 동물플랑크톤 개체가 증가 됨에 따라 식물플랑크톤이 급격히 감소하였다.

호소생태계에 있어서 수생식물이 생태적 중요성뿐 아니라 수질개선에도 효과가 있음이 알려져 있다. 그러나 우리나라의 중산간지에 위치한 호소의 경우 수위변동이 심하여 수변의 수생식물대가 형성되지 못하여 수생생태계의 건강성이 악화되고 있다. 따라서 호소의 생태적 건강성을 높이고 수질보전에 도움을 줄 수 있는 복원기법이 필요하다.

본 조사에서 사용한 침수형인공식물섬은 동물플랑크톤의 개체수를 유지하는 데 효과를 발휘하고 있으며, 미디어가 부착된 침수형인공식물섬은 수생태계내에서의 동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 먹이연쇄 관계 외에 미생물부착재질을 이용함으로써 식물플랑크톤의 증식을 억제하는 기능을 갖는 기법으로의 가능성을 기대 할 수 있다.

그러나 조사 결과 식물플랑크톤에 대한 효과는 식물을 식재한 침수형식물섬이 미디어를 부착한 침수형식물섬보다 제어효과가 효과가 있는 것으로 조사되었으나 식생유지가 곤란한 것으로 조사되어 실제사용이 곤란한 것으로 조사되었다.



[그림 3.2.79] 침수형인공식물섬 식물플랑크톤-동물플랑크톤



설치 후



설치 1년 후

[그림 3.2.80] 침수형인공식물섬 설치 전과 후의 식생

(4) 침수형 호안수초대

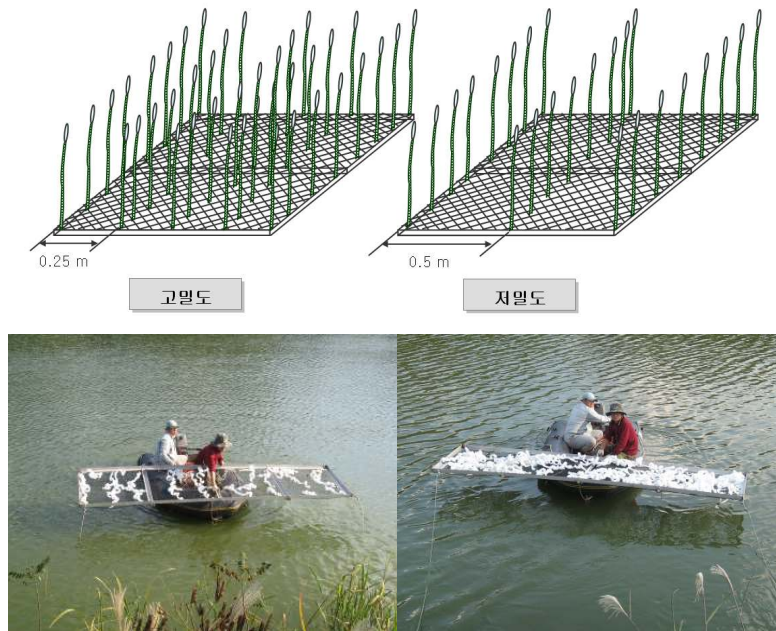
농업용저수지의 경우 홍수기와 갈수기의 수위차로 인하여 수변식생대가 정착 되지 못하는 문제점을 해결하기위하여 인위적으로 갈수기의 최저수심아래에 인공구조물의 침수 수초대를 조성하여 저수지 수위와 관계없이 동물성 플랑크톤 등의 서식지 제공을 하고자 하였다. 침수형 호안수초대는 갈수기에도 호안에 안정적인 인공 수초대를 유지하여 동물플랑크톤의 서식처 제공 및 어류의 산란처로 이용 될 수 있을 것으로 기대된다.

침수형 호안수초대는 자연수초의 형태를 유사하게 연출하기 위해 상부에서 추를 이용해 아래로 늘어뜨리는 형태가 아닌 하부 고정 후 상부에 부력재를 이용한 방식으로 제작하였으며, 인공수초를 고밀도와 저밀도로 조성하여 설치하였다. 설치위치는 신구저수지 좌측 수변부의 갈수기수심으로 예상되는 지점에서도 1 m의 수심을 유지할 수 있는 지점에 호소바닥에 설치되었다.

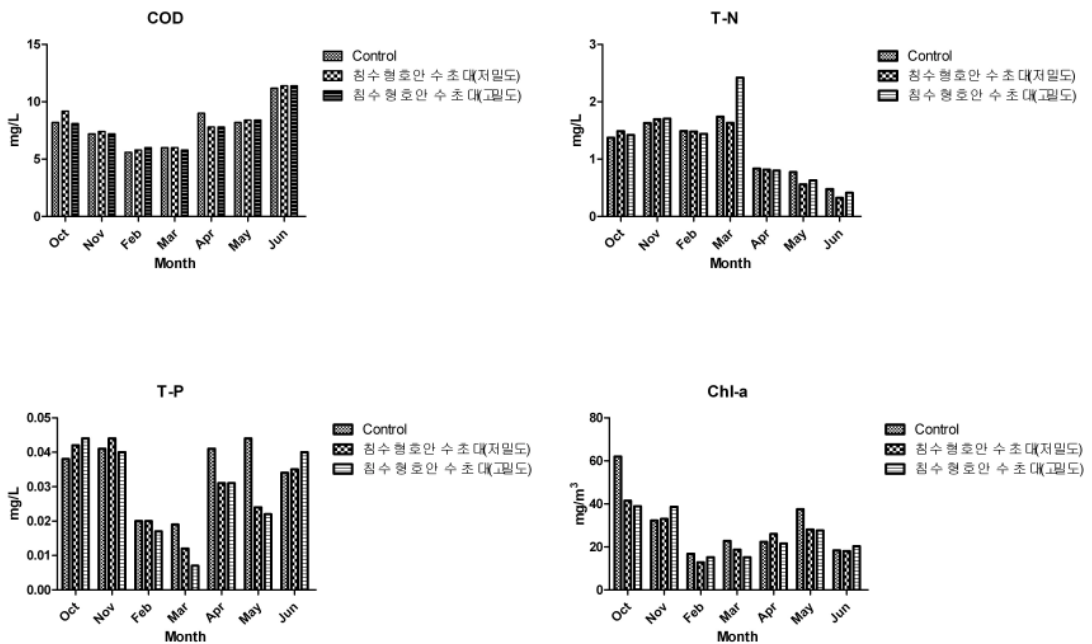
- 설치시기: 2007년 10월 16일
- 설치장소: 충청남도 보령 신구저수지
- 설치규모: 1×4 m, 2 set
- 구성자재: SUS앵글, HDPE망, 미디어, 부표
- 특이사항: 인공수초를 고밀도(부착 미디어수: 81개)와 저밀도(부착 미디어수: 27개)로 조성

조사기간 중 침수형 호안수초대는 노출 되지 않고 수중에 계속 유지 할 수 있었다. 수질조사 결과 수질항목별 수질농도에서 큰 차이는 발견할 수 없었으나 T-P항목의 경우 '08년 봄 조사에서 대조지점보다 낮은 농도를 유지 했던 것으로 조사되었다. 수질농도가 낮게 유지되었던 것은 봄철의 식물플랑크톤이 낮은 농도로 유지되어 부유물 등의 양이 적었고 설치된 침수형 호안수초대의 인공수초가 미생물 등의 부착이 쉬운 미디어로 제작되어 부착 미생물에 의한 분해 작용

과 생체 이용 등에 의한 것으로 판단된다. 그러나 6월 조사에서는 대조구보다 약간 상승된 것으로 조사 되었는데 이는 침수형 호안수초대가 수면에 설치되었고 설치지점이 바람 등에 의한 부유물질 및 발생조류가 밀집하는 곳으로 지형적 영향 등으로 부유물질의 농도가 증가하였던 것으로 보인다.



[그림 3.2.81] 침수형 호안수초대 모식도 및 설치전경



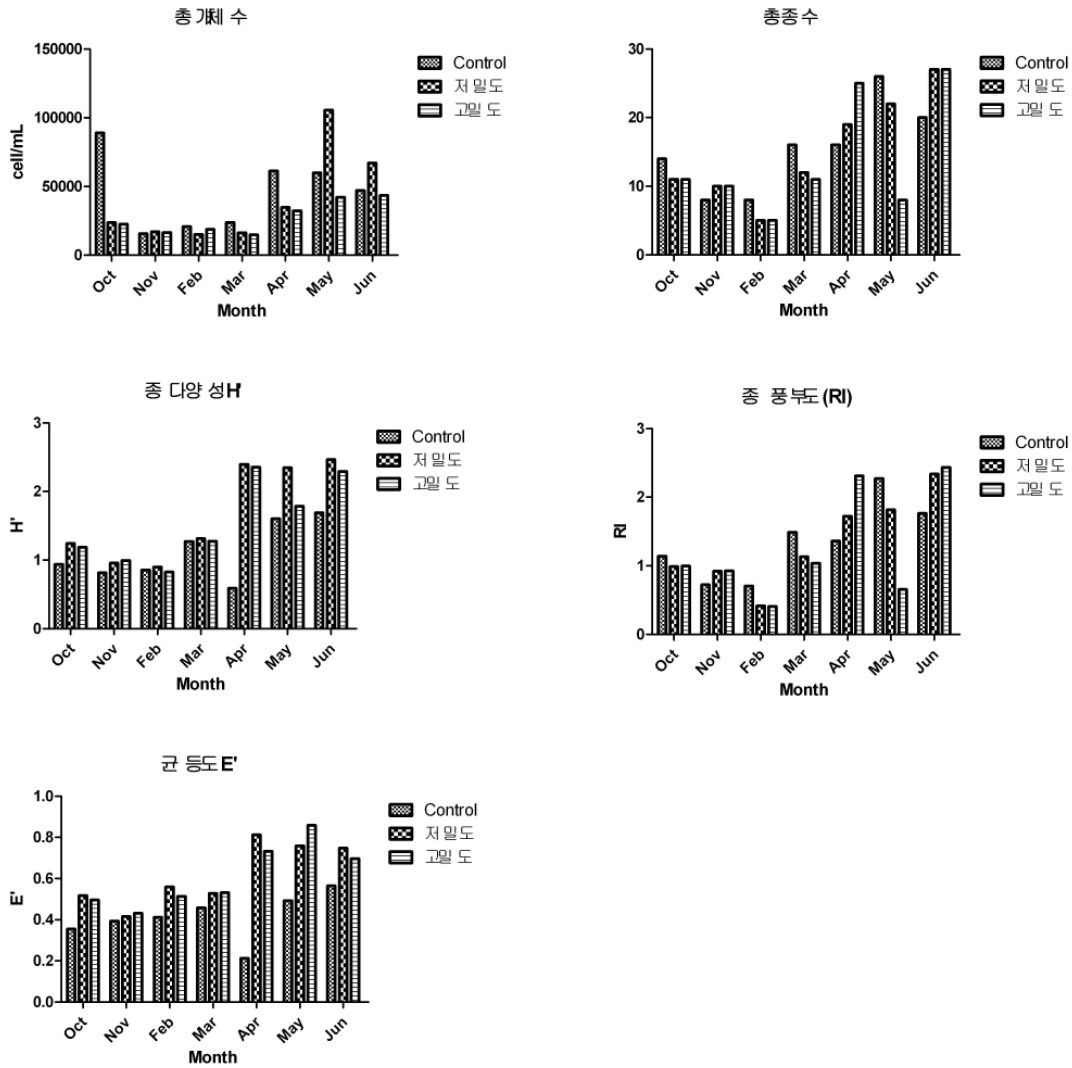
[그림 3.2.82] 침수형 호안수초대 수질 분석 결과

침수형 호안수초대를 설치한 지점에 대하여 실시한 식물플랑크톤조사결과 대조지점은 조사기간중 평균 4.5×10^4 cells mL⁻¹이 계수되었으며 평균 15.43 종이 출현하였으며 종다양성은 1.35였다. 침수형 호안수초대중 저밀도로 조성된 구간은 평균 4.0×10^4 cells mL⁻¹이 계수되었으며 총 출현종수는 평균 15.14종, 종다양성은 1.66으로 조사되었다. 고밀도 지점에서는 평균 2.7×10^4 cells mL⁻¹이 계수되었으며 총 출현종수는 평균 13.86종이 출현하여 종다양성은 1.53이었다.

조사기간 중 시기별 조사결과는 총개체수에 있어서 실험 초기에는 침수형 호안수초대 설치 지점의 식물플랑크톤의 출현양은 비교적 차이가 적거나 대조지점이 약간 많은 경향을 보였으나 실험 후기 봄철에는 저밀도구간에서 대조지점이나 고밀도 지점보다 출현수가 월등히 많은 것으로 조사되었다. 출현종수의 변화는 뚜렷한 차이를 발견할 수 없었으며 조사지점간의 출현종수 차이역시 크지 않았으나 고밀도지점의 5월 조사에서 대조지점이 26종, 저밀도지점이 22종이 조사된 반면 고밀도지점에서는 단지 8종만을 확인 할 수 있었다. 그러나 종다양성은 조사기간 중 대체적으로 고밀도>저밀도>대조지점의 순으로 종다양성이 감소하는 것으로 조사 되어 침수형 호안수초대의 설치로 식물플랑크톤의 감소와 종다양성이 증가되는 것으로 조사되었다.

[표 3.2.36] 침수형 호안수초대 식물플랑크톤 생물지수 변화

구분	조사시기	Oct	Nov	Feb	Mar	Apr	May	Jun	평균
		Control	총 개체수	88,952	15,679	20,801	23,856	61,253	60,011
	총 종수	14	8	8	16	16	26	20	15.43
	종다양성(H')	0.937	0.817	0.856	1.270	0.588	1.602	1.691	1.11
	종풍부도(RI)	1.141	0.725	0.704	1.488	1.361	2.272	1.766	1.35
	균등도(E')	0.355	0.393	0.411	0.458	0.212	0.492	0.565	0.41
침수형 호안수초대 (저밀도)	총 개체수	23,848	17,089	15,000	16,316	34,813	105,725	67,118	39,987
	총 종수	11	10	5	12	19	22	27	15.14
	종다양성(H')	1.240	0.957	0.899	1.313	2.393	2.347	2.467	1.66
	종풍부도(RI)	0.992	0.923	0.416	1.134	1.721	1.815	2.339	1.33
	균등도(E')	0.517	0.416	0.559	0.528	0.813	0.759	0.748	0.62
침수형 호안수초대 (고밀도)	총 개체수	22,632	16,449	18,840	14,972	32,310	42,155	43,615	27,281
	총 종수	11	10	5	11	25	8	27	13.86
	종다양성(H')	1.189	0.994	0.827	1.275	2.357	1.786	2.292	1.53
	종풍부도(RI)	0.997	0.927	0.406	1.040	2.311	0.657	2.434	1.25
	균등도(E')	0.496	0.432	0.514	0.532	0.732	0.859	0.696	0.61



[그림 3.2.83] 침수형 호안수초대 식물플랑크톤 총세포수 및 생물지수 변화

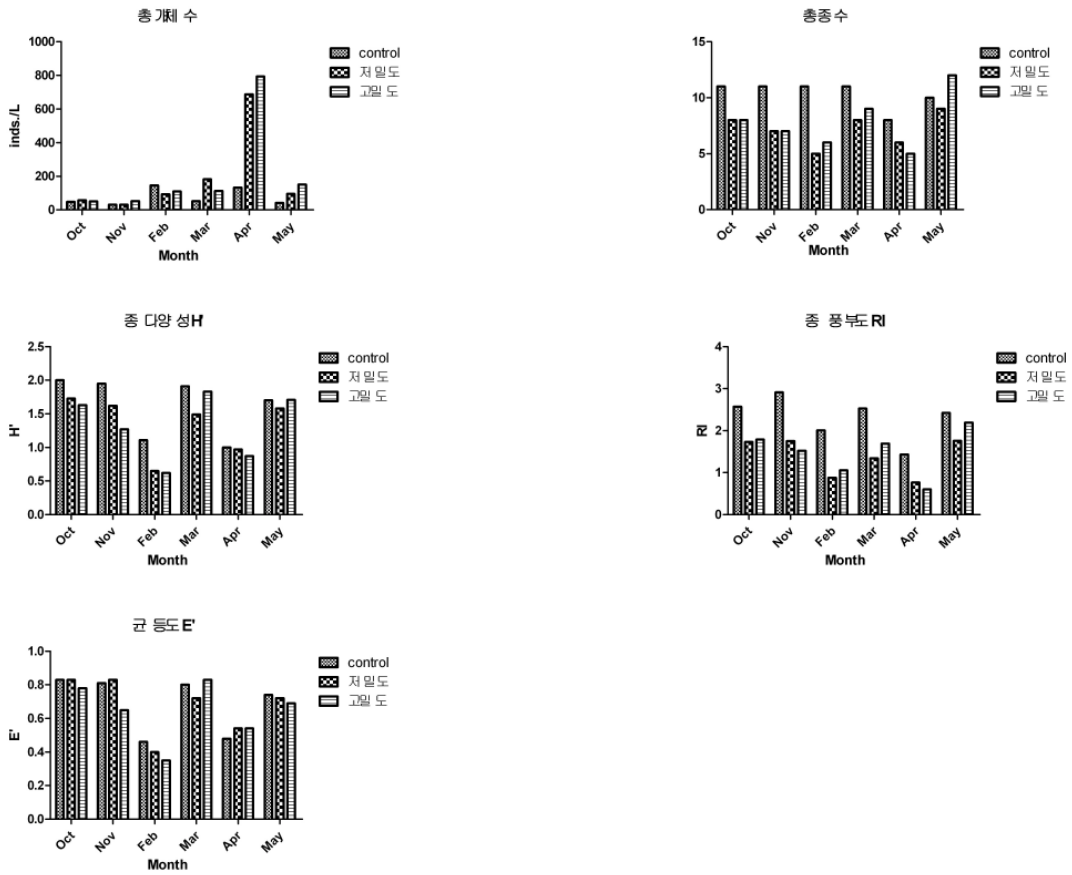
동물플랑크톤의 변화를 조사한 결과 조사기간중 출현개체수는 대조지점이 평균 75 inds. L⁻¹ 이 조사되었으며 저밀도지역은 평균 191 inds. L⁻¹, 고밀도지점은 211 inds. L⁻¹이 조사되어 출현 개체수는 고밀도>저밀도>대조지점의 순으로 조사되었다. 개체수의 변화를 종변화와 검토할 때 출현개체의 대부분은 Rotifera였으며 그 외 Cladocera, Copepoda, Nauplius 등이 적은개체가 출현한 것으로 조사되었다. Rotifera의 경우 조사기간 중 변동 폭이 크지 않았으나 4월 조사에서는 대조지점은 128 inds. L⁻¹로 조사되어 소폭 증가한 반면 고밀도와 저밀도로 설치된 침수형인 공식물섬 구간에서는 각각 794 inds. L⁻¹, 685 inds. L⁻¹로 조사되어 급격한 증가를 보인 것으로 조사되었다. Cladocera, Copepoda, Nauplius 등은 11월과 익년 5월에 침수형 호안수초대를 조성한 곳에서 대조지점보다 출현개체수가 많았던 것으로 조사되었다.

출현 동물플랑크톤 출현종의 총 종수와 종다양성은 대조지점이 평균 10.33종이 출현하였으며, 종다양성 1.62로 가장 많은 종과 높은 종다양성을 보였다. 침수형 호안수초대의 경우 저밀

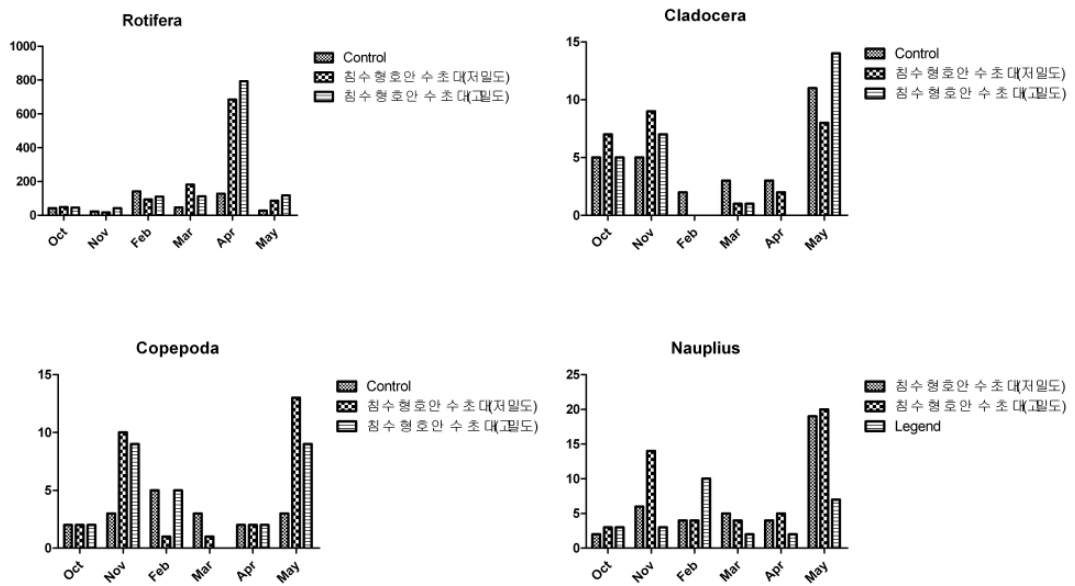
도지점이 평균 7.17종이 출현하고 종다양성은 1.34였으며, 고밀도지점은 평균 7.83종이 출현하고 종다양성은 평균 1.32로 저밀도지점과 고밀도지점에서의 출현종수 및 종다양성은 유사하였던 것으로 조사되었다.

[표 3.2.37] 침수형 호안수초대 동물플랑크톤 생물지수 변화

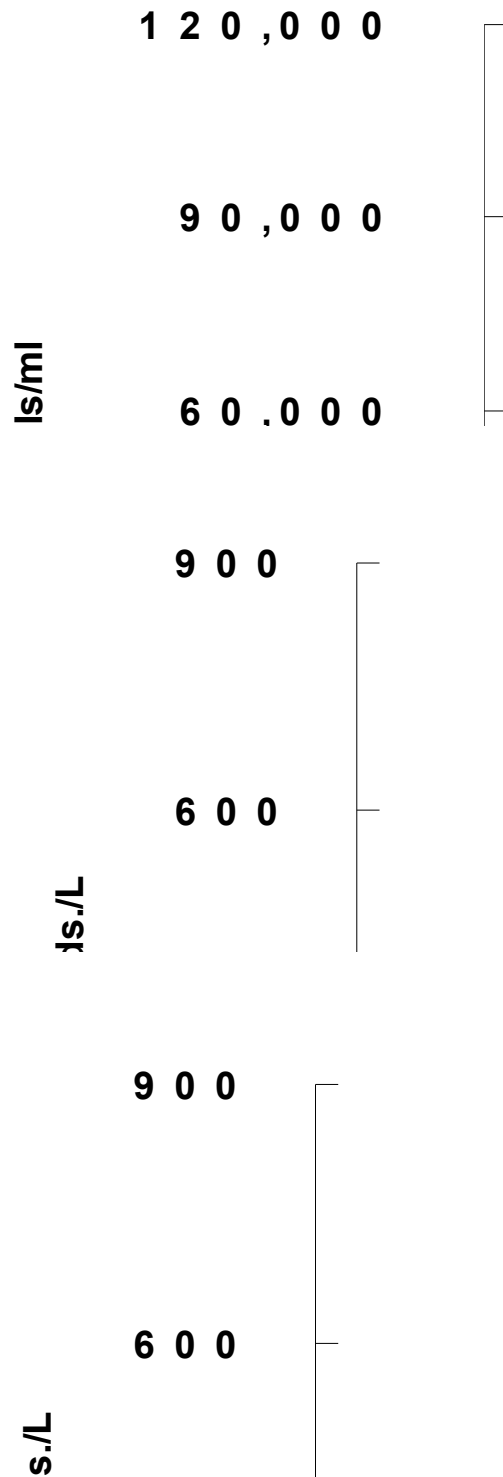
구분	조사시기	Oct	Nov	Feb	Mar	Apr	May	평균
		Control	총 개체수	49	31	146	52	132
	총 종수	11	11	11	11	8	10	10.33
	종다양성(H')	2.00	1.95	1.11	1.91	1.00	1.70	1.61
	종풍부도(RI)	2.57	2.91	2.01	2.53	1.43	2.42	2.31
	균등도(E')	0.83	0.81	0.46	0.80	0.48	0.74	0.69
침수형 호안 수초대 (저밀도)	총 개체수	57	31	94	183	687	95	191
	총 종수	8	7	5	8	6	9	7.17
	종다양성(H')	1.73	1.62	0.65	1.49	0.97	1.58	1.34
	종풍부도(RI)	1.73	1.75	0.88	1.34	0.77	1.76	1.37
	균등도(E')	0.83	0.83	0.40	0.72	0.54	0.72	0.67
침수형 호안 수초대 (고밀도)	총 개체수	50	52	110	113	794	151	211
	총 종수	8	7	6	9	5	12	7.83
	종다양성(H')	1.63	1.27	0.62	1.83	0.87	1.71	1.32
	종풍부도(RI)	1.79	1.52	1.06	1.69	0.60	2.19	1.48
	균등도(E')	0.78	0.65	0.35	0.83	0.54	0.69	0.64



[그림 3.2.84] 침수형 호안수초대 동물플랑크톤 총세포수 및 생물지수 변화



[그림 3.2.85] 침수형 호안수초대 동물플랑크톤 종조성 변화



[그림 3.2.86] 침수형 호안수초대 식물플랑크톤-동물플랑크톤

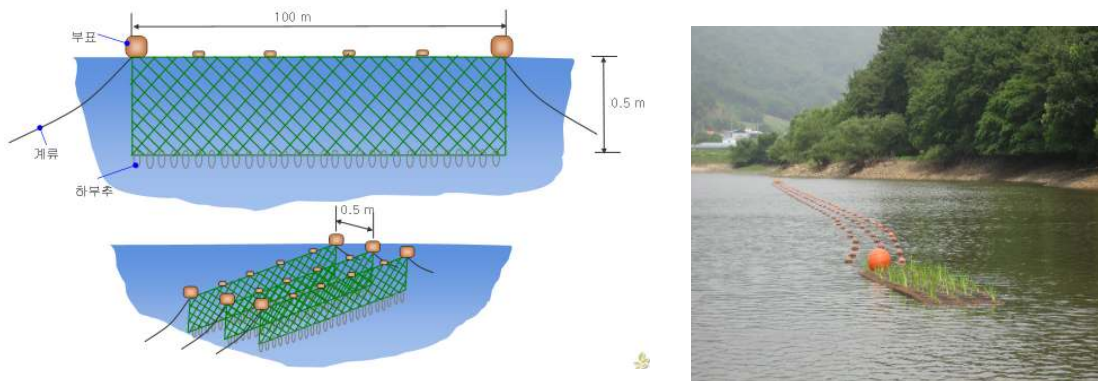
(5) 부유형 그물수초대

인공식물섬 등의 수초대는 제작에 다소 많은 비용이 소모되어 규모가 큰 저수지의 경우 설치에 많은 비용이 필요하게 된다. 따라서 비교적 저렴한 비용으로 경제적인 대규모 미생물 및 동물플랑크톤서식처 제공을 위하여 그물을 이용하여 부유형 그물수초대를 제작하였다.

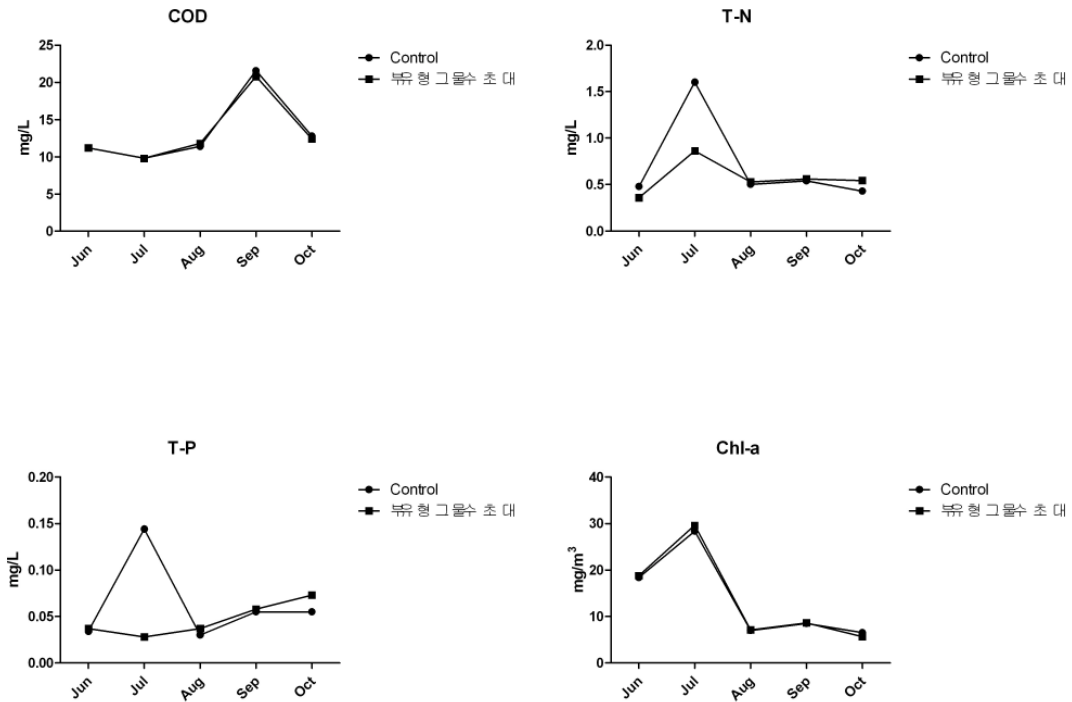
부유형 그물수초대 형태는 비교적 망목이 적은 그물을 3중으로 병렬 배치하여 동물플랑크톤의 서식처로 이용토록하며 작은 망목으로 인하여 어류가 서식할 수 없도록 하여 동물플랑크톤의 개체량 증가를 유도하고자 하였다. 수초대의 양쪽 끝에는 인공식물섬을 연결하였고, 차후 소규모로 인공식물섬을 중간 배치할 수 있도록 하였다. 부유형 그물수초대의 설치 가능한 호변의 갈수기에도 최소 수심이 유지될 수 있는 공간에 설치하여 효과를 검토하였다.

- 설치시기: 2008년 6월 12일
- 설치장소: 충청남도 보령 신구저수지
- 설치규모: 망크기(5 cm × 5 cm)의 그물 100 m × 0.5 m, 3 set를 0.5 m간격으로 병렬연결
- 구성자재: SUS Wire, 그물, 부표, 계류장치, 인공식물섬

부유형 그물수초대 설치 후 조사된 수질 분석결과 조사시기에 따라 대조지점과 설치지점의 수질항목 중 COD와 Chl-*a*의 차이는 거의 없는 것으로 조사되었다. 그러나 총질소와 총인은 부유형 그물수초대에서 7월 조사 결과 대조지점에 비하여 총질소는 대조지점의 50%, 총인은 약 70% 정도 감소된 것으로 조사되었다. 그러나 이러한 효과는 지속되지 못하고 이후 대조지점과 유사한 수질농도를 보이는 것으로 분석되었다.



[그림 3.2.87] 부유형 그물수초대 개념도 및 설치 전경



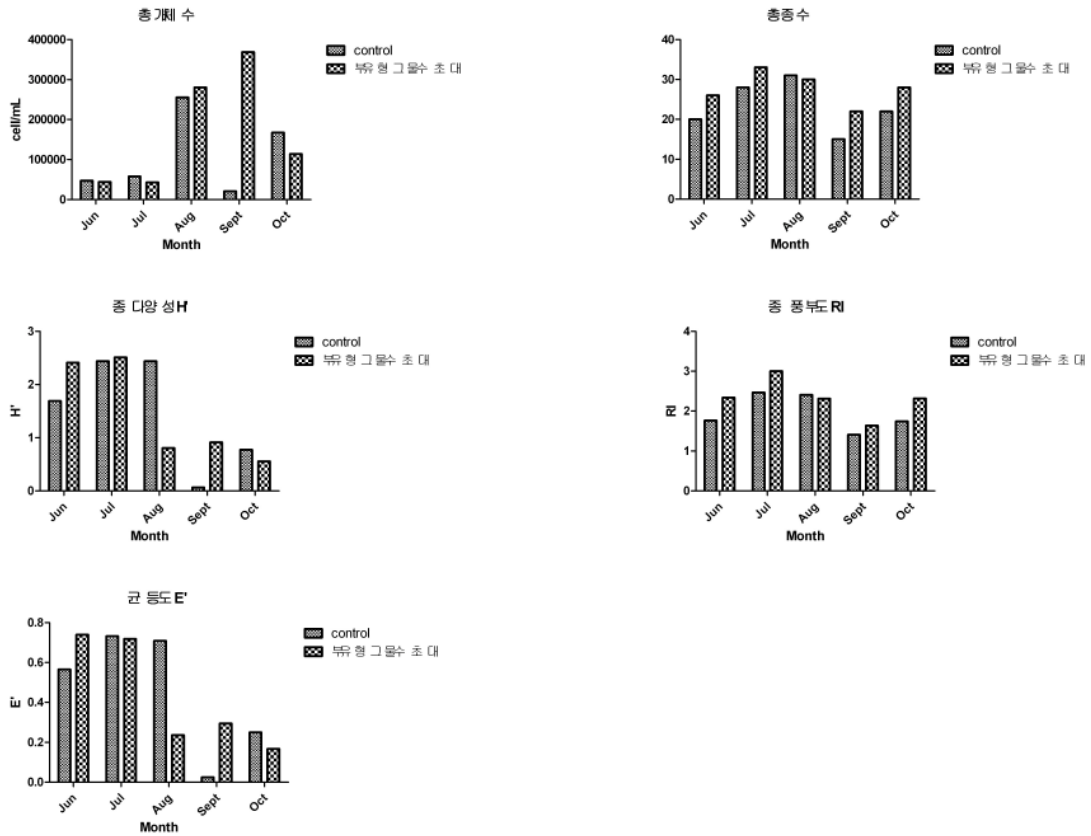
[그림 3.2.88] 부유형 그물수초대 수질 분석 결과

부유형 그물수초대를 설치한 후 식물플랑크톤의 거동을 분석한 결과 대조지점의 조사기간 평균 출현개체수는 $109,568 \text{ cell mL}^{-1}$ 였으며 부유형 그물수초대는 $169,877 \text{ cell mL}^{-1}$ 로 대조구에 비하여 55% 이상 더 많은 것으로 조사 되었다 이러한 결과는 부유형 그물수초대에서 9월조사 시 $368,878 \text{ cell mL}^{-1}$ 이 분석되어 대조지점의 $20,644 \text{ cell mL}^{-1}$ 보다 약 17.8배 이상의 증식을 보인 결과로 보인다. 9월 조사를 제외하고는 대부분의 시기에 유사한 세포수를 보인 것으로 조사 되었다. 식물플랑크톤의 생물지수는 대부분의 시기에서 총종수 및 종다양성, 종풍부도 등은 부유형 그물수초대를 조성한 지점이 다소 높은 것으로 조사 되었으나 균등도에서는 대조지점이 약간 높은 것으로 조사 되었다.

부유형 그물수초대의 설치에 따른 동물플랑크톤의 변화는 대조지점의 경우 조사기간 평균 944 cell mL^{-1} 이 조사되었으며 6월에 $2,450 \text{ cell mL}^{-1}$ 로 가장 많은 개체수가 조사된 반면 부유형 그물수초대에서는 평균 633 cell mL^{-1} 이 조사되고 6월에는 930 cell mL^{-1} 만이 조사 되어 대조지점보다 출현개체수가 적었던 것으로 조사되었다. 그러나 이후 두지점간의 출현개체수는 큰 차이를 발견할 수 없었다. 총 출현종수는 시기에 따라 두 지점간에 1~2종 정도의 차이가 있을 뿐 대조지점이 평균 12종, 부유형 그물수초대가 11.6종으로 거의 비슷한 종수를 보였다. 종풍부도도 대조지점(1.69), 부유형 그물수초대(1.71)간의 차이가 거의 없는 것으로 조사되어 본 조사기간 중 단지 동물플랑크톤의 생물학적 평가만으로는 서식처로서의 활용성은 입증되지 못하였다.

[표 3.2.38] 부유형 그물수초대 식물플랑크톤 생물지수 변화

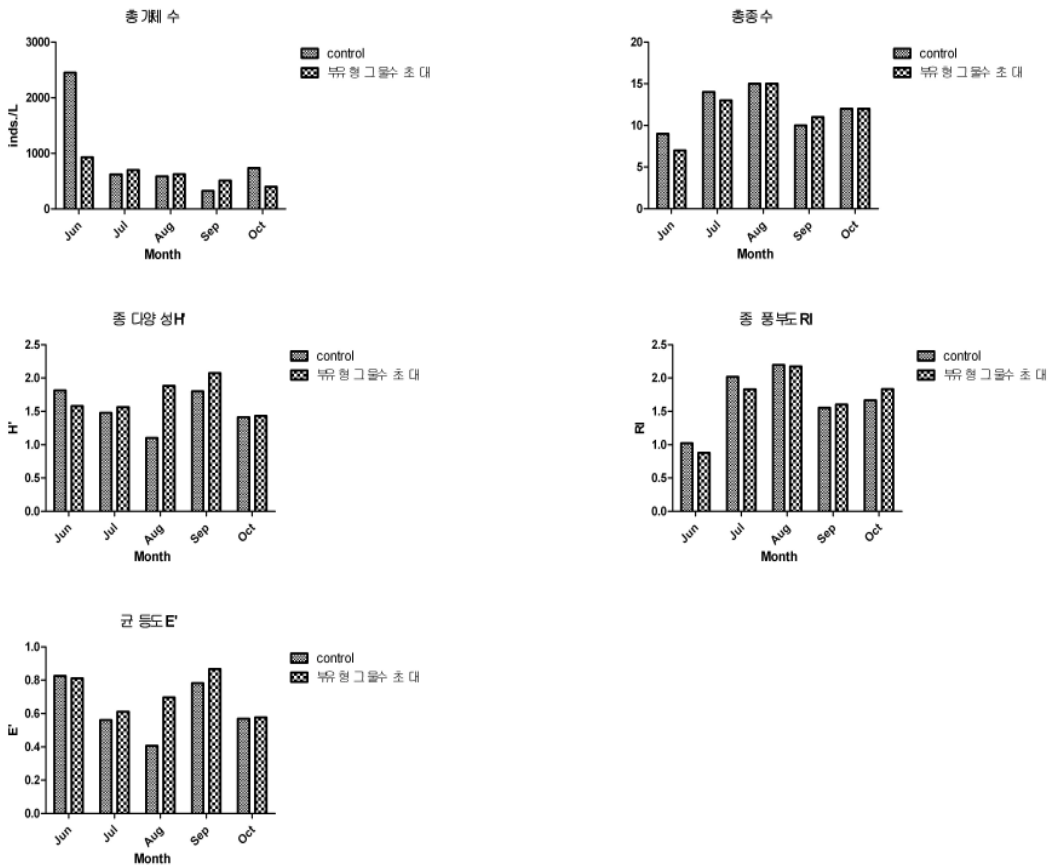
구분	조사시기	Jun	Jul	Aug	Sept	Oct	평균
	Control	총 개체수	47,110	57,514	255,561	20,644	167,015
총 종수		20	28	31	15	22	23.20
종다양성(H')		1.691	2.439	2.435	0.066	0.774	1.48
종풍부도(RI)		1.766	2.463	2.409	1.409	1.746	1.96
균등도(E')		0.565	0.732	0.709	0.024	0.250	0.46
부유형 그물수초 대	총 개체수	43,903	42,760	280,050	368,878	113,796	169,877
	총 종수	26	33	30	22	28	27.80
	종다양성(H')	2.410	2.509	0.803	0.911	0.556	1.44
	종풍부도(RI)	2.339	3.001	2.312	1.638	2.319	2.32
	균등도(E')	0.740	0.718	0.236	0.295	0.167	0.43



[그림 3.2.89] 부유형 그물수초대 식물플랑크톤 총세포수 및 생물지수 변화

[표 3.2.39] 부유형 그물수초대 동물플랑크톤 생물지수 변화

구분	조사시기	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	평균
	Control	총 개체수	2,450	624	585	325	737
총 종수		9	14	15	10	12	12.00
종다양성(H')		1.814	1.478	1.103	1.801	1.414	1.52
종풍부도(RI)		1.025	2.020	2.197	1.556	1.666	1.69
균등도(E')		0.826	0.560	0.407	0.782	0.569	0.63
부유형 수변 그물 수초대	총 개체수	930	700	625	510	402	633
	총 종수	7	13	15	11	12	11.60
	종다양성(H')	1.580	1.563	1.884	2.077	1.432	1.71
	종풍부도(RI)	0.878	1.832	2.175	1.604	1.834	1.66
	균등도(E')	0.812	0.610	0.696	0.866	0.576	0.71

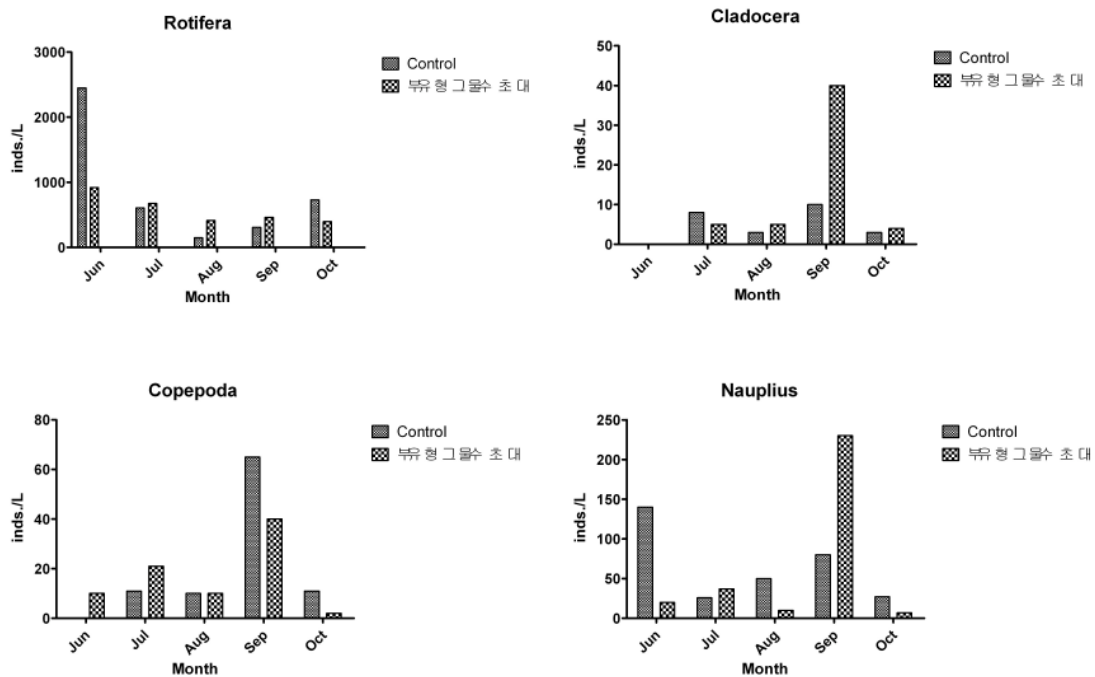


[그림 3.2.90] 부유형 그물수초대 동·식물플랑크톤 총세포수 및 생물지수 변화

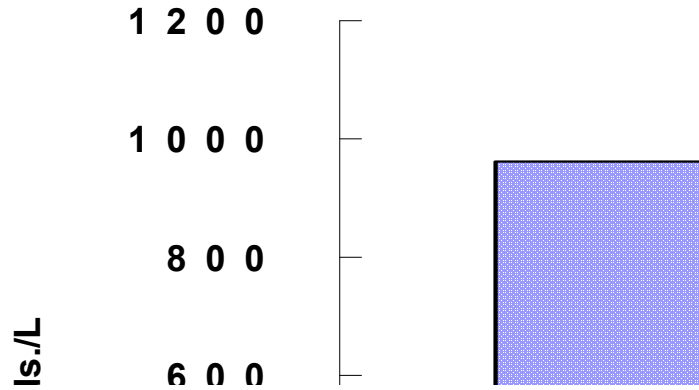
동물플랑크톤의 종조성변화에 있어서는 조사초기 대조지점에서 가장 많은 개체가 출현하여 2000여 inds L⁻¹ 이상 조사되었으나 이후 Rotifera의 경우 부유형 그물수초대에서의 조사개체수가 대조구보다 더 많은 것으로 조사되었다. Cladocera는 9월에 부유형 그물수초대에서 가장 많이 출현하였는데 주요종은 *Bosmina* sp.로 조사되었다. Copepoda 역시 9월에 증가하였으나 대조지점보다는 출현개체수가 적었으며 Nauplius 역시 9월에 급격히 증가하였으나 여타종과 마찬가지로 10월까지 지속하지 못하였다.

부유형그물수초섬의 동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 관계는 6, 7월에는 동물플랑크톤이 700여 inds. L⁻¹ 이상일 때 식물플랑크톤은 40,000 cells mL⁻¹ 수준으로 유지 되었으나, 700여 inds. L⁻¹ 이하에서 식물플랑크톤이 급격히 증가하였으나 이후 동물플랑크톤이 증가하여 780여 inds. L⁻¹ 이상으로 증식하며 식물플랑크톤의 발생이 감소한 것으로 조사되었다.

부유형그물인공 수초대는 생물조절을 이용한 저수지 수질보전 기법의 개발에 필요한 미소유용생물 서식처를 저렴한 비용으로 설치하고자 개발하여 제작 설치하였다. 부유형 그물수초대는 인공식물섬 등으로 서식처를 조성하는 것보다 그물을 이용하여 길게 설치할 경우 비용면에서 유리 할 것이고 더욱이 어류의 소통을 제한할 수 있어 동물플랑크톤의 개체수가 증가 할 수 있을 것으로 기대되었다. 부유형 그물수초대를 설치 후 동식물 플랑크톤의 조사를 통하여 효과를 검토결과 개개의 생물학적 변화를 파악한 결과만으로는 효과를 기대하기 어려운 것으로 조사되었다. 그러나 동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 증감은 연동하여 변화하였으며, 특히 동물플랑크톤 중 남조류를 효과적으로 제어하는 것으로 알려진 *Bosmina* sp.가 이증식제기반 인공식물섬에서와 같이 다수 출현하여 남조류에 효과적인 제어 수단이 될 수 있는 가능성을 보였다.



[그림 3.2.91] 부유형 그물수초대 동·식물플랑크톤 종조성 변화



[그림 3.2.92] 부유형그물 수초대 식물플랑크톤-동물플랑크톤

(6) 부유형 호안수초대

농업용저수지의 경우 홍수기와 갈수기의 수위차가 크므로 수변식생대가 정착 되지 못하고 식생이 없는 상태로 유지되게 되며 빈약한 식생으로 호소생태계 역시 단순화 하게 된다. 따라서 갈수기에도 수변 수초대와 같은 인공 수초대를 수심의 변화에 문제가 없는 형태로 설치하여 상시 수초대의 효과를 재현하여 미소유용생물서식처로 활용할 수 있을 것이다

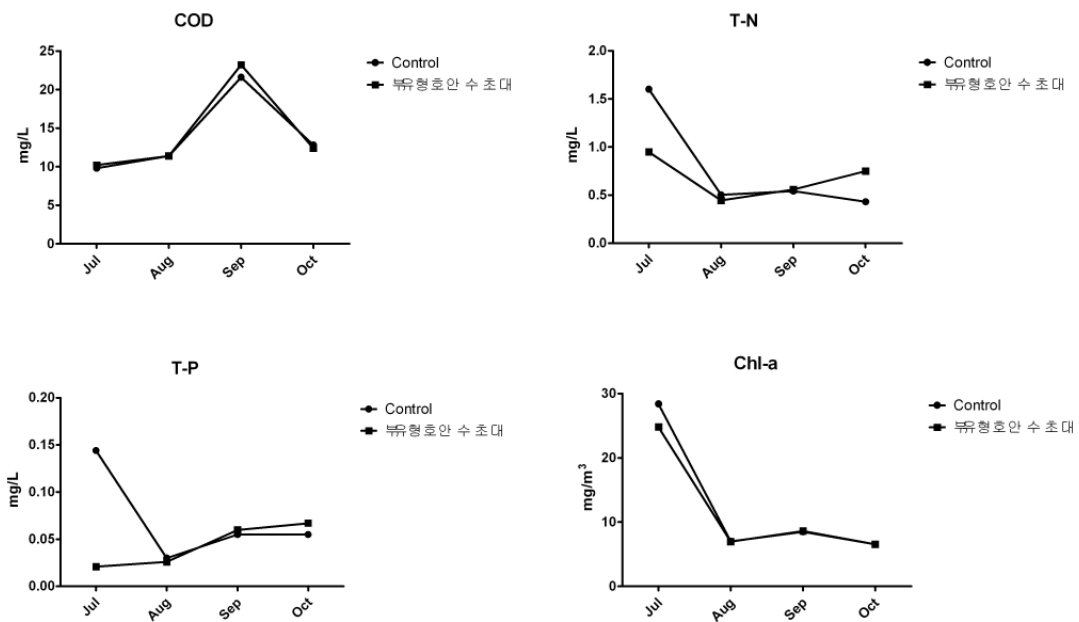
따라서 본 시설에서는 호소바닥에 설치하는 침수형수초대 형태의 경우 유입퇴적물 등에 의하여 매몰될 우려와 갈수기에의 노출로 인한 경관저해 등의 문제를 해결하고 보다 효율적인 미소유용생물의 서식처를 개발하고자 부유형으로 고안하고 모형수초를 밀식하여 조성하였다. 부유형 호안수초대는 자체부력이 있는 재질을 이용하여 자연 수초처럼 유동할 수 있도록 모형수초를 제작하고 앵글에 부착하고 부표를 달아 1 m의 깊이로 수중에 설치하였으며 저수지의 수위변동에 관계없이 안정하게 부유해 있도록 하였다. 이러한 형태의 부유형 호안수초대는 동물플랑크톤 서식처 제공, 어류의 산란처 조성 및 미생물 접촉여재 및 유용생물 서식처 등으로 다양한 이용이 가능 할 것으로 예상되었다.

- 설치시기: 2008년 6월 12일
- 설치장소: 충청남도 보령 신구저수지
- 설치규모: 인공 수초대 1 m × 16 m
- 특이사항: 고무줄(중심이 비어있는 형태)을 인공수초로 이용함
- 구성자재: SUS앵글, HDPE망, 고무줄, 부표



[그림 3.2.93] 부유형 호안수초대 개념도 및 설치전경

신구저수지에 부유형 호안수초대 설치 후 COD, T-N, T-P, Chl-a 등에 대한 월별수질조사를 실시하였다. 수질 분석결과 조사시기에 따라 대조지점과 설치지점의 조사된 수질항목에서 유의한 차이를 발견 할 수 없었다. 이는 침수형인공식물섬에서와 부유형 호안수초대가 수심 1 m 지점의 수중에 설치됨에 따라 표층수가 바람에 의하여 흐름을 형성하고 이에 대한 차단 장치가 없어 지속적인 호소수의 혼합이 발생하였기 때문으로 보인다.



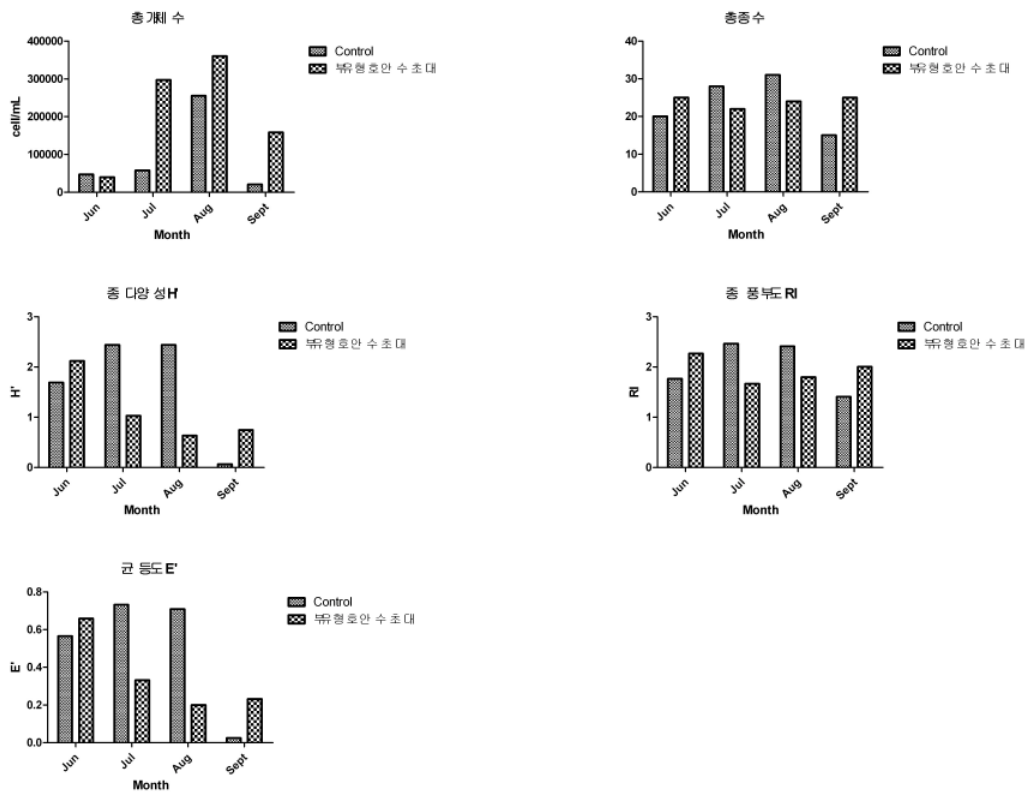
[그림 3.2.94] 부유형 호안수초대 수질 분석 결과

부유형 호안수초대를 설치한 지점의 식물플랑크톤분석결과 대조지점은 조사기간 평균 95,207 cells mL⁻¹이 조사된 반면 부유형 호안수초대의 경우 평균 214,181 cells mL⁻¹로 조사되어 약 2.2배정도 출현개체수가 많았던 것으로 조사되었으며 조사기간 중의 변화 역시 지속적으로 식물플랑크톤이 대조지점보다 많은 개체가 출현하였다. 총 종수는 대조지점(평균 23.5종), 부유형 호안수초대(24.0종)로 비슷한 수의 종이 출현하였으나 종다양성 및 종풍부도 등은 대조지점이 높은 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 부유형 호안수초대의 구조에 기인한 것으로 판단된다.

부유형호안수초대는 기반재위에 수초모형을 1 m 길이로 밀식형태로 부착하여 제작한 것으로 호소내 바람의 영향으로 식물플랑크톤이 부유하다 수초모형의 밀식으로 물 흐름이 저해되고 부유물의 집적되는 현상이 발생 한 것으로 판단된다. 따라서 식물플랑크톤의 집적은 발생하나 큰 군체를 이루지 않는 식물플랑크톤 발생초기에는 동물플랑크톤의 활발한 증식과 먹이활동을 유발 할 수 있는 것으로 판단된다.

[표 3.2.40] 부유형 호안수초대 식물플랑크톤 생물지수 변화

구분	조사시기	Jun	Jul	Aug	Sept	평균
		Control	47,110	57,514	255,561	20,644
부유형 호안 수초대	총 개체수	39,983	297,640	360,472	158,632	214,181
	총 종수	25	22	24	25	24.00
	종다양성(H')	2.121	1.028	0.637	0.745	1.13
	종풍부도(RI)	2.265	1.666	1.798	2.004	1.93
	균등도(E')	0.659	0.332	0.200	0.232	0.36



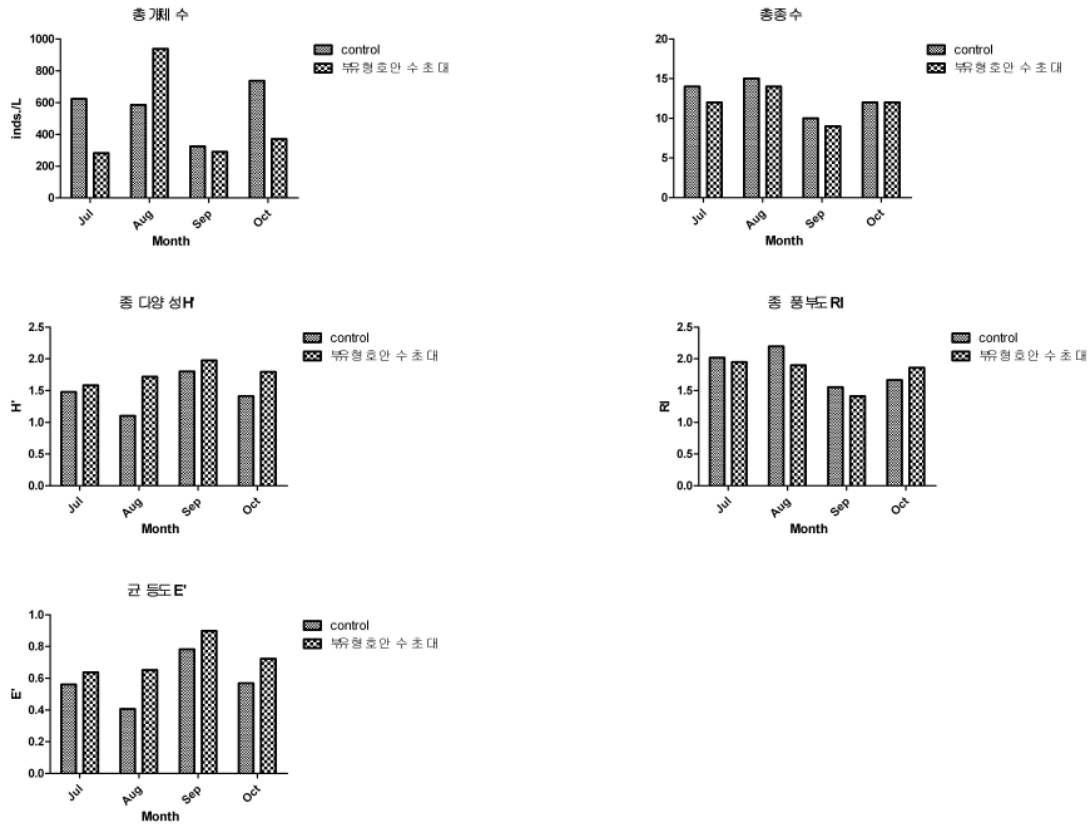
[그림 3.2.95] 부유형 호안수초대 식물플랑크톤 생물지수 변화

부유형 호안수초대를 설치한 지점의 동물플랑크톤분석결과 조사기간 중 대조지점의 총개체수는 평균 567 inds. L⁻¹였으며, 부유형 호안수초대는 8월 조사에서만 Rotifera의 출현개체수가 많았던 시기만을 제외하고는 평균 470 inds. L⁻¹로 대조구에 비하여 출현개체수가 적었다. 출현종종수는 대조지점이 12.75종, 부유형 호안수초대에서는 11.75종으로 대조지점에서 더 많은 종이 출현한 것으로 조사되었다. 그러나 종다양성은 대조구 1.45, 부유형 호안수초대는 1.77로 부유형 호안수초대의 종다양성이 더 높았던 것으로 조사되었다.

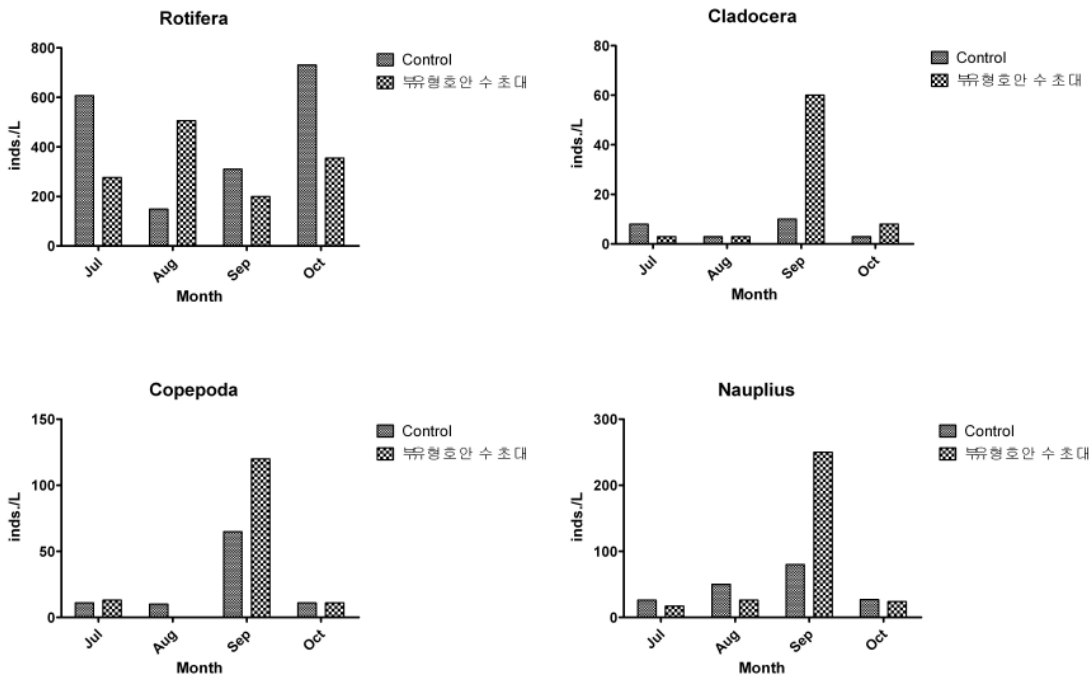
부유형 호안수초대의 동물플랑크톤 종조성 변화를 조사한 결과 Rotifera는 8월을 제외하고는 조사시간 대부분의 시기에 대조지점에서 발생이 많았다 Cladocera, Copepoda, Nauplius 등은 조사기간 중 대조지점과 유사한 출현개체를 보였으며 특히 9월 조사에서는 월등히 많은 개체가 조사되었다. 부유형 호안수초대의 출현 동물 플랑크톤 중 Cladocera의 *Bosmina* sp.의 출현이 두드러지는데 남조류에 대한 먹이효과가 인정되는 *Bosmina longistris*가 출현 Cladocera의 50%를 차지하고 있는 것으로 조사되었다.

[표 3.2.41] 부유형 호안수초대 동물플랑크톤 생물지수 변화

구분		조사시기	Jul	Aug	Sep	Oct	평균
Control	총 개체수		624	585	325	737	567
	총 종수		14	15	10	12	12.75
	종다양성(H')		1.478	1.103	1.801	1.414	1.45
	종풍부도(RI)		2.020	2.197	1.556	1.666	1.86
	균등도(E')		0.560	0.407	0.782	0.569	0.58
부유형 수변 그물 수초대	총 개체수		283	939	290	371	470
	총 종수		12	14	9	12	11.75
	종다양성(H')		1.583	1.718	1.975	1.795	1.77
	종풍부도(RI)		1.948	1.899	1.411	1.859	1.78
	균등도(E')		0.637	0.651	0.899	0.723	0.73



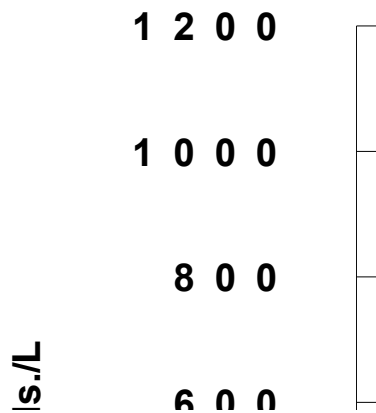
[그림 3.2.96] 부유형 호안수초대 동물플랑크톤 생물지수 변화



[그림 3.2.97] 부유형 호안수초대 동물플랑크톤 종조성 변화

부유형 호안수초대의 동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 관계는 7월에 동물플랑크톤이 300여 inds. L⁻¹ 이상일 때 식물플랑크톤은 8월에 300,000 cells mL⁻¹ 수준으로 급격히 증가하였으며 동반하여 동물 플랑크톤 역시 965 inds. L⁻¹로 급격히 증가하였다. 이후 9월에는 식물플랑크톤의 증가세가 둔화되고 이후 감소되었으며, 동물 플랑크톤역시 유사한 경향으로 감소하였다.

부유형 호안수초대는 호소수변의 약화된 수변 수초대 식생을 대신 할 수 있는 소재를 활용하여 미소유용생물의 서식처를 개발하고자 부유형으로 고안하고 모형수초를 밀식하여 조성하였다. 또한 부유형 호안수초대는 침수형 호안수초대가 바닥에 설치됨으로써 유입토사에 의한 매몰우려 및 갈수기에의 노출로 인한 경관저해 등의 문제를 해결하고자 부유형으로 고안하고 모형수초를 밀식하여 조성하였다. 결론적으로 부유형 호안수초대는 설치 후 동식물 플랑크톤의 조사를 통하여 개개의 생물학적 변화의 파악만으로는 효과를 기대하기 어려우나 동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 증감을 검토한 결과 식물플랑크톤의 증가에 따라 동물 플랑크톤의 증가를 확인 할 수 있었으며 이후 식물플랑크톤의 감소를 보여 동물플랑크톤의 생물처로서의 활용가능성이 높은 것으로 판단된다. 특히 부유형 호안수초대는 동물플랑크톤 중 남조류를 효과적으로 제어하는 것으로 알려진 *Bosmina longistris*가 출현 Cladocera의 50%를 차지하고 있는 것으로 조사되어 효과적인 미소유용생물서식처로 선발하였다.



[그림 3.2.98] 부유형 호안수초대 식물플랑크톤-동물플랑크톤

라. 인공습지의 동물플랑크톤 공급 능력 검토

일반적으로 농업용저수지에 비점오염물질 유입차단 방법으로 인공습지가 많이 이용되고 있으며, 비교적 저농도·다유량의 유입수중에 포함된 오염물질을 제거하기위하여 사용되어진다. 그러나 인공습지는 오염물질제거라는 수질정화기능 외에 생태다양성제공이라는 부수적인 기능을 담당하게 된다. 인공습지 중에는 많은 저서생물과 어류, 동물플랑크톤이 서식하고 있어 유출수중에는 다양한 미소유용생물이 포함되어 있을 수 있다. 따라서 인공습지를 동물플랑크톤 공급시설로 이용하고자 다양한 형태의 인공습지유출수중의 동물플랑크톤 종조성 및 개체수를 파악하였다.

조사는 농어촌연구원에서 사용 중인 석문수질개선연구단지의 5개 형태의 습지 [표 3.2.42, 43]에서 원생동물, 윤충류, 지각류, 요각류 등에 대하여 7월과 10월 2차례 조사를 실시하였다.

[표 3.2.42] 조사시험포 제원 및 특성

연구 시험포	면적 (m ²)	수심 (m)	체류시간 (days)	식생	비고	
단일 식생	무식재구	910	0.4	1 ~ 8	사상성조류	
	갈 대 구	910	0.4	1 ~ 8	갈대 monoculture	
	애기부들구	910	0.4	1 ~ 8	애기부들 monoculture	
연못	침 강 지	200	1.4	1 ~ 4	-	
	침 강 지	200	1.4	1 ~ 3	인공식물섬 (노랑꽃창포)	
복합 식생	갈대-애기부들구	910	0.4	3 ~ 4	갈대, 애기부들 monoculture	
	무식재-갈대구	910	0.4	3 ~ 4	사상성조류, 갈대 monoculture	
	갈대-무식재구	910	0.4	3 ~ 4	갈대, 사상성조류 monoculture	
자연 식생	혼합식재구	2,800	0.3 ~ 1.5	3 ~ 15	정수, 부엽, 침수식물 polyculture	습지 내부 개방수역
연못-식생	Pond-식생구 반복배열	5,00	50 ~ 1.5	65 ~ 190	"	개방-식생-개방-식생-개방-식생-개방

[표 3.2.43] 각 시험포별 채수, 채집 지점

구분	지점명	조사지점 위치	비고
단일식생	Input	유입부	유입수
	No-plant	미식재구 유출부	유출수
	Reed	갈대구 유출부	유출수
	Cattail	애기부들구 유출부	유출수
연못	Input	유입부	유입수
	Output	침강지 유출부	유출수
복합식생	Input	유입부	유입수
	Reed-Cattail	애기부들-갈대구 유출부	최종 유출수
	No plant-Reed	무식재-갈대구 유출부	최종 유출수
	Reed-No plant	갈대-미식재구 유출부	최종 유출수
자연식생	Input	유입부	유입수
	Output	기부들구 유출부	유출수
연못-식생	Input	유입부	유입수
	Open 1	개방구간 유출부	중간 유출수
	plant 1	개방구간 유출부	중간 유출수
	Open 2	개방구간 유출부	중간 유출수
	Plant 2	개방구간 유입부	최종 유출수

(1) 7월 조사 결과

(가) 단일식생습지

단일식생습지는 애기부들구, 갈대구, 미식재구간의 3개 시험포로 현저한 개체수 차이를 보였는데, 그 중에서 미식재구가 다른 구간에 비해 적게는 5배에서 많게는 15배 이상 많은 개체가 출현하였다. 미식재구에서 가장 많이 나타난 분류군은 윤충류로 1,275 inds. L⁻¹이 출현하여 최대를 기록하였고, 그 다음으로는 지각류로 990 inds. L⁻¹이 출현하였으며, 요각류와 그 유생인 *Nauplius*들도 모두 550 inds. L⁻¹이 출현하여 많은 생물량을 나타내었다. 갈대구에서는 윤충류가 135 inds. L⁻¹, *Nauplius*가 41 inds. L⁻¹ 순으로 출현하였으며, 나머지 분류군의 출현 개체수는 극히 적었다. 애기부들구에서는 윤충류가 380 inds. L⁻¹, *Nauplius* 152 inds. L⁻¹이 출현하여 갈대구에 비해 2배 이상의 개체수가 출현하였다.

(나) 연못

연못은 수심 1~1.5 m로 식생은 전혀 없는 형태로 유입수와 유출수 조사결과 유입수에서는 유공충류, 윤충류, 그리고 *Nauplius*가 4, 50 inds. L⁻¹로 유사한 출현 개체수를 나타내었고, 유출수에서는 대체로 유입수에 비해 출현 개체수가 증가하였는데 윤충류가 101 inds. L⁻¹, *Nauplius* 75 inds. L⁻¹, 지각류 71 inds. L⁻¹ 순으로 나타났다.

(다) 복합식생습지

복합형 식생습지에서는 다른 형태의 습지와 현저하게 다른 양상을 관찰되었다. 우선, 애기부들구와 갈대구 혼합습지에서는 윤충류가 가장 많은 195 inds. L⁻¹이 출현하였고, 다음은 지각류 65 inds. L⁻¹, 유공충류 50 inds. L⁻¹ 순으로 발견되었다. 미식재구와 갈대구 혼합습지에서는 모든 시험포의 습지와는 다르게 섬모충류가 195 inds. L⁻¹가 출현하여 최다 개체수를 보였으며, 다음으로 윤충류가 103 inds. L⁻¹로 그 뒤를 따랐다. 또한, 이 습지에서는 유글레나 71 inds. L⁻¹, 많은 양의 모기알이 발견되었다. 갈대구와 미식재구 혼합습지에서는 윤충류가 528 inds. L⁻¹로 극우점하였고, 다른 분류군은 출현수가 적었다.

(라) 자연식생

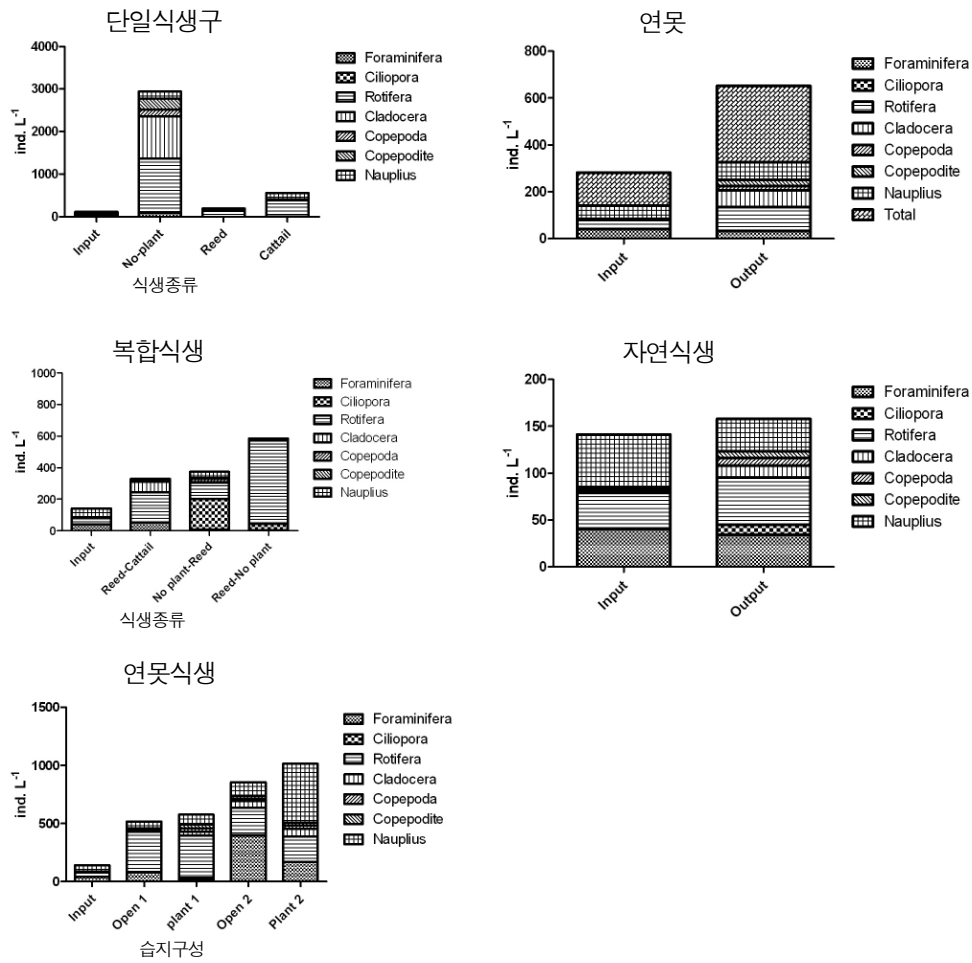
자연식생구는 습지 가운데 개방구간이 있는 개방구간과 습지와 혼합된 습지로서 유입수와 유출수 조사 결과 두 조사지점에서 발견된 분류군의 출현양상이 유사한 성향을 보였으나, 특히 하계 유출구에서 패충류 35 inds. L⁻¹이 발견되어 일부 다른 습지에서 출현하던 패충류 중 최고치를 나타냈다.

(마) 연못-식생 습지

연못-식생 습지는 식생습지와 개방구역을 번갈아 배치한 형태로 구간마다 중간 유출수를 관찰하였다. 먼저, 첫 번째 개방구역만을 걸친 유출수에서는 유입수와 전반적으로 분류군의 개체가 조금씩 증가하였는데, 그 중 윤충류는 39 inds. L⁻¹에서 345 inds. L⁻¹로 10배 정도의 증가율을 보였다. 두 번째 식재구간과 개방구역의 중간 유출수에서는 유공충류만이 5배 정도 출현수가 줄어들었고, 나머지 분류군은 2~3배의 증가율을 보였다. 세 번째 식재구간과 개방구역의 중간 유출수에서는 유공충류가 396 inds. L⁻¹로 모든 습지에서 가장 많은 수가 출현하였으며, 다음은 윤충류 236 inds. L⁻¹, *Nauplius* 122 inds. L⁻¹ 순으로 발견되었다. 마지막 최종 유출수에서는 노플리우스가 극우점하여 507 inds. L⁻¹이 나타났고 윤충류 217 inds. L⁻¹, 유공충류 167 inds. L⁻¹ 순으로 출현하였다.

[표 3.2.44] 각 시험포에서 7월에 관찰된 동물 플랑크톤의 출현 개체수 (inds. L⁻¹)

Stations	Taxa	Forami- nifera	Ciliopora	Rotifera	Cladocera	Copepo- dite	Nauplius	Total	
단일 식생	Input	8	0	37	8	1	3	58	115
	No-plant	92	0	1,275	990	155	260	165	2,937
	Reed	2	0	135	2	2	8	41	190
	Cattail	4	4	380	8	8	6	152	562
연못	Input	40	0	39	3	2	0	57	141
	Output	33	0	101	71	19	27	75	326
복합 식생	Input	40	0	39	3	2	0	57	141
	Reed-Cattail	50	0	195	65	13	2	3	328
	No plant-Reed	8	195	103	2	20	6	40	374
	Reed-No plant	5	38	528	9	2	0	3	585
자연 식생	Input	40	0	39	3	2	0	57	141
	Output	34	11	50	13	8	7	35	158
연못-식생	Input	40	0	39	3	2	0	57	141
	Open 1	79	3	345	8	13	10	59	517
	plant 1	16	17	361	33	32	32	85	576
	Open 2	396	3	236	58	18	23	122	856
	Plant 2	167	2	217	67	28	26	507	1,014



[그림 3.2.99] 인공습지별 출현분류군 및 개체수(7월)

(2) 10월 조사 결과

(가) 단일식생습지

미식재구에서는 윤충류 134 inds. L⁻¹, 유공충류 79 inds. L⁻¹, *Nauplius* 40 inds. L⁻¹ 순으로 출현하였고 갈대구에서는 윤충류 87 inds. L⁻¹, 유공충류 43 inds. L⁻¹이 발견되었다. 애기부들구에서는 윤충류가 36 inds. L⁻¹, 나머지 분류군은 1-7 inds. L⁻¹이 출현하였다.

(나) 연못

유입수에서는 윤충류 36 inds. L⁻¹, 유공충류 22 inds. L⁻¹가 출현하였으며, 유출수에서는 대체로 유입수에 비해 출현 개체수가 현저하게 감소하였는데, 총 출현개체수가 14 inds. L⁻¹로 모든 습지와 비교했을 때 가장 낮은 출현수를 기록하였다.

(다) 복합식생습지

애기부들구와 갈대구 혼합습지에서는 윤충류가 가장 많은 599 inds. L⁻¹이 출현하였고, 다음은 지각류 40 inds. L⁻¹, 유공충류 27 inds. L⁻¹ 순으로 발견되었다. 미식재구와 갈대구 혼합습지에서는 애기부들구와 갈대구 혼합습지와 대체로 유사한 출현 양상을 보였는데, 요각류와 요각류 유생은 250여 inds. L⁻¹이 출현하여 7배 이상의 차이를 보였다. 갈대구와 미식재구 혼합습지에서는 윤충류 126 inds. L⁻¹, 유공충류 68 inds. L⁻¹, 지각류 41 inds. L⁻¹ 순으로 출현하였다.

(라) 자연식생

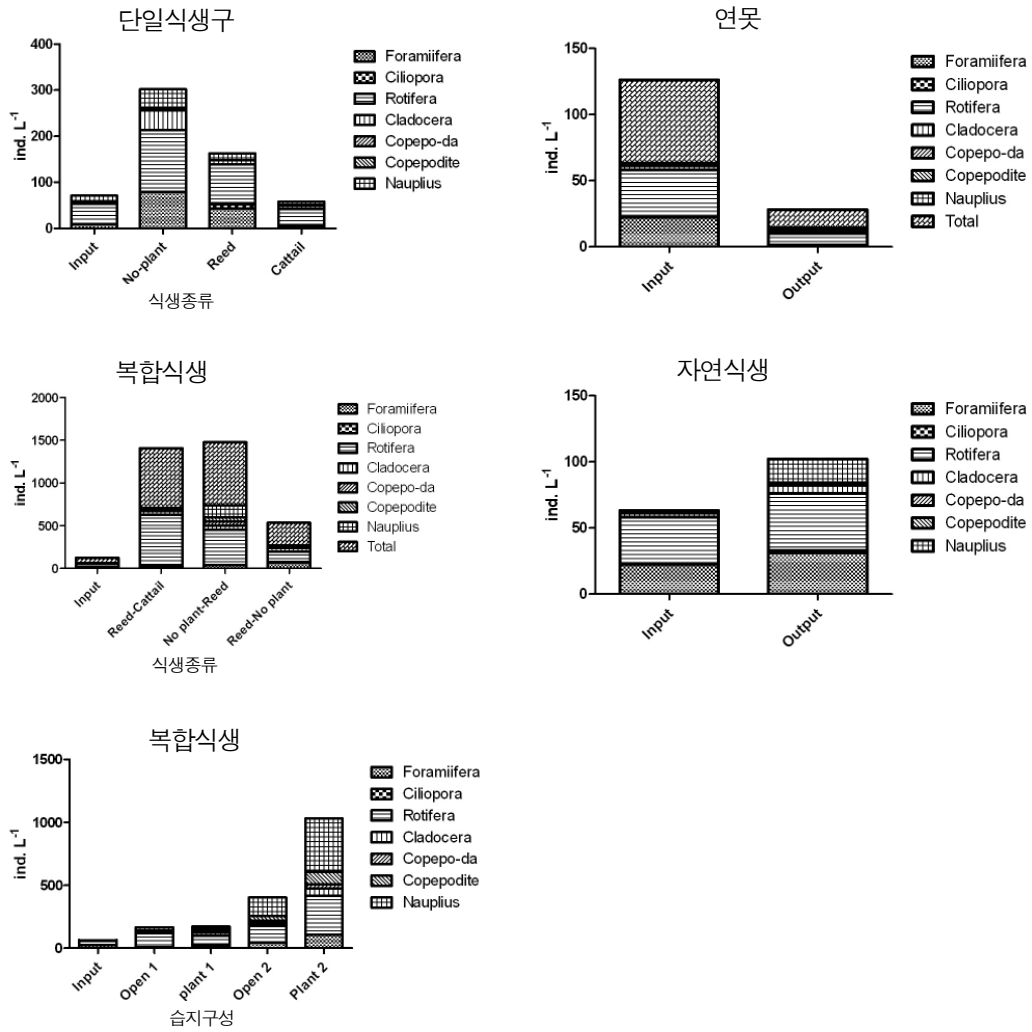
유입수와 유출수에서 유사한 출현양상을 보였는데, 유입수에서는 윤충류 35 inds. L⁻¹, 유공충류 22 inds. L⁻¹이 출현하였고, 유출수에서는 윤충류 43 inds. L⁻¹, 유공충류 31 inds. L⁻¹을 나타내어 총 출현개체수의 1.5배 정도의 증가율을 보였다.

(마) 연못-식생 습지

첫 번째 개방수역의 유출수에서는 윤충류는 112 inds. L⁻¹로 우점하였고, 다른 분류군들은 그 출현 빈도가 현저히 낮았다. 두 번째 식재구간과 개방수역의 중간 유출수에서는 윤충류가 76 inds. L⁻¹로 1.5배 정도 출현수가 줄어들었고, 나머지 분류군은 증가하였다. 세 번째 식재구간과 개방수역의 중간 유출수에서는 요각류가 148 inds. L⁻¹로 크게 증가하였으며, 윤충류가 130 inds. L⁻¹로 그 뒤를 따랐다. 마지막 최종 유출수에서는 *Nauplius* 427 inds. L⁻¹, 윤충류 311 inds. L⁻¹, 유공충류 107 inds. L⁻¹ 순으로 출현하여 이번 시험포에서 최고 출현 개체수를 보였다.

[표 3.2.45] 각 시험포에서 10월에 관찰된 동물 플랑크톤의 출현 개체수(inds. L⁻¹)

Stations	Taxa	Forami- nifera	Ciliopora	Rotifera	Cladocera	Copepoda	Copepo- dite	Nauplius	Total
단일 식생	Input	9	0	44	2	4	0	12	71
	No-plant	79	0	134	43	1	5	40	302
	Reed	43	9	87	9	0	0	15	163
	Cattail	5	1	36	7	1	1	7	58
연못	Input	22	0	36	3	0	0	2	63
	Output	1	0	9	2	0	0	2	14
복합 식생	Input	22	0	36	3	0	0	2	63
	Reed-Cattail	27	5	599	40	11	17	5	704
	No plant-Reed	37	0	413	48	53	46	142	739
	Reed-No plant	68	5	126	41	4	6	18	268
자연 식생	Input	22	0	36	3	0	0	2	63
	Output	31	2	43	6	2	0	18	102
연못- 식생	Input	22	0	36	3	0	0	2	63
	Open 1	8	0	112	8	7	5	26	166
	plant 1	20	1	76	25	18	13	17	170
	Open 2	46	0	130	22	21	35	148	402
	Plant 2	107	0	311	56	34	98	427	1,033



[그림 3.2.100] 인공습지별 출현분류군 및 개체수(10월)

(3) 동물플랑크톤의 출현 양상

(가) 다양성지수, 균등도지수, 풍부도지수

7월의 종다양성지수는 0.422~1.709의 범위이고, 균등도지수는 0.2166~0.8781, 풍부도지수는 0.7514~1.2645의 범위로 나타났다. 10월의 종다양성지수는 0.6155~1.5884의 범위이고, 균등도지수는 0.4839~0.8163, 풍부도지수는 0.8645~1.4777의 범위로 나타났다. 종 다양성 지수는 7월에 높게 나타났고, 균등도지수와 풍부도 지수는 10월에 더 높은 수치를 보였다.

[표 3.2.46] 각 시험포에서 발견된 동물플랑크톤의 종다양성, 균등도, 풍부도 지수

	조사 지점	7월 조사			10월 조사		
		다양성 지수(H')	총풍부도 (Da)	균등도 (E')	다양성 지수(H')	총풍부도 (Da)	균등도 (E')
단일 식생	Input	1.217	1.265	0.626	1.121	1.408	0.576
	No-plant	1.369	0.751	0.703	1.343	1.051	0.690
	Reed	0.851	1.144	0.437	1.066	1.178	0.548
	Cattail	0.858	0.948	0.441	1.228	1.478	0.631
연못	Input	1.221	1.212	0.628	0.942	1.448	0.484
	Output	1.637	1.037	0.841	1.029	2.274	0.529
복합 식생	Input	1.221	1.212	0.628	0.942	1.448	0.484
	Reed-Cattail	1.119	1.036	0.575	0.615	0.915	0.316
	No plant-Reed	1.267	1.013	0.651	1.331	0.908	0.684
	Reed-No plant	0.422	0.942	0.217	1.308	1.073	0.672
자연 식생	Input	1.221	1.212	0.628	0.942	1.448	0.484
	Output	1.709	1.185	0.878	1.353	1.297	0.695
연못- 식생	Input	1.221	1.212	0.628	0.942	1.448	0.484
	Open 1	1.068	0.960	0.549	1.087	1.174	0.559
	plant 1	1.264	0.944	0.649	1.588	1.168	0.816
	Open 2	1.370	0.889	0.704	1.507	1.001	0.774
	Plant 2	1.358	0.867	0.698	1.455	0.865	0.748

(나) 군집별 변동 비교

대부분의 온대 저수지에서 봄에 동물플랑크톤의 천이양상은 짧은 세대교번의 소형 윤충류가 수일 내에 기하급수적으로 증가한 후 섬모충류나 편모충류와 같은 원생동물이 동물플랑크톤의 먹이원으로 증가할 때 크기가 크고 성장률이 느린 지각류와 요각류 종이 증가한다(Sommer *et al.*, 1986). 장마와 집중강우 시기였던 여름에는 수리학적 영향으로 동물플랑크톤 군집 밀도의 변화가 다변적이다. 이시기에는 봄에 윤충류가 대변성하는 것과 같이 집중강우에 따른 washing out 현상 이후 세대교번이 빠른 윤충류가 가장 먼저 증가한다. 이러한 일시적인 윤충류 우점 이후에는 요각류와 지각류가 증가하며 각각의 분류군이 혼재하는 양상을 나타낸다. 가을에는 요각류의 우점비율이 높았다가 점차 지각류의 밀도가 증가한다. 11월에 기온이 낮아짐에 따라 동물플랑크톤 밀도가 감소한다. 먹이가 부족하고 수온이 낮은 겨울에는 성장률이 느린 요각류 유생과 몇몇의 성체만이 존재하면, 지각류는 퇴적층에서 휴지기를 보내기 때문에 거의 출현하지 않는다(Agbeti *et al.*, 1995).

다양한 형태의 습지에 대한 조사를 통해 여름과 가을의 동물플랑크톤 출현조사에 따르면 여

름철의 경우 대부분의 조사유형 습지에서 윤충류가 우점하였으며, 단일 식생의 미식채구, 연못, 복합식생의 갈대-부들구에서 지각류가 다음으로 많이 출현하였다. 지각류의 출현개체수는 미식채구에서 990 inds. L⁻¹로 지각류의 출현이 가장 많았고 연못, 복합식생의 갈대-부들구, 연못-식생구에서는 대략 30~70 inds. L⁻¹로 출현개체수가 유사하였다. 여타 조사습지에서의 지각류 출현개체수는 10 inds. L⁻¹ 미만인 것으로 조사 되었다. 가을철 조사 전체적인 동물 플랑크톤의 수는 감소하였지만 대부분의 습지에서 윤충류가 우점 하였으며, 유공충류와 지각류가 다음으로 많이 출현하였다. 이중 미소유용생물로 주목받을 수 있는 지각류는 단일 식생의 미식채구, 복합식생의 갈대-부들구, 미식채-갈대, 갈대-미식채구, 연못식생구등에서의 출현개체수가 많은 것으로 조사 되었다. 이밖에 양조사시기 모두 요각류의 출현량은 지각류보다는 다소 적거나 비슷한 개체수가 출현하였다.

습지는 수초뿌리를 중심으로 풍부한 미소생물상이 형성되고 대체 먹이원의 공급을 원활하게 하여 동물플랑크톤의 종 풍부도와 다양성을 증가시킬 수 있다. 또한 일반 식생이 없는 깊은 연못보다는 강우와 유량에 따른 수체 변동의 영향이 적어 동물플랑크톤 특히, 몸체가 큰 요각류와 지각류의 증식에 좋은 서식처를 제공할 수 있다.

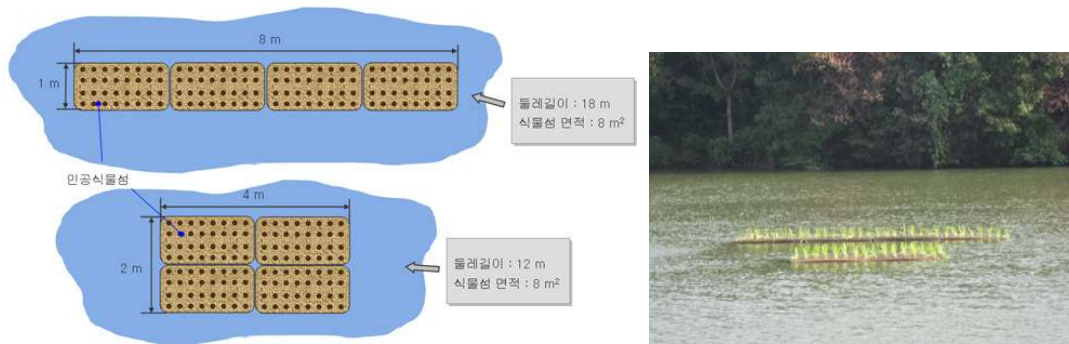
본조사결과에 따르면 습지는 수심이 30~40 cm 정도로 수심이 얇고 식생이 없는 얇은 습지에서 윤충류를 제외하고는 지각류와 요각류의 출현이 가장 많았던 것으로 조사 되었다. 이밖에 갈대와 부들을 식재한 습지, 미식채 구간 앞과 뒤에 미식채 구간을 배치한 형태의 습지 등에서도 많은 개체수가 출현하였다. 이러한 결과는 일반 연못 형태의 호소에서는 식물플랑크톤이 동물플랑크톤의 주요 먹이원인 반면 습지에서는 대체 먹이원인 세균이나 원생동물이 풍부하여 동물플랑크톤의 증식이 더 활발했을 것이다. 따라서 지각류, 요각류 등의 미소유용생물을 지속적으로 공급하는 시설로써 다양한 형태의 습지를 사용 할 수 있을 것이며, 호소의 수질개선을 위해 호소주변에 미소유용생물의 지속적인 공급시설을 조성 할 경우에는 식생을 다양화하고 수심이 약 30~40 cm 정도의 얇은 습지형태의 미식생구간을 혼합 배치 할 경우 효과를 볼 수 있을 것이다.

마. 인공식물섬의 경계면 길이 유효성 검토

본 연구에서는 주요 미소유용생물 서식로의 활용이 기대되는 이중식재기반 인공식물섬의 배열기법을 검토하고자 일자형과 사각형의 집단구조로 배열하여 이중식재기반 인공식물섬의 수체와의 경계면 길이에 변화를 주어 수질정화 효과 및 동식물플랑크톤의 변화량을 검토하였다.

동물성플랑크톤의 경우 호소내에서 주야간의 수직이동 외에 주변의 수초대로 수평이동을 하는 것으로 알려져 있다(Burks *et al.*, 2002). 이러한 수평이동은 물벼룩 등의 지각류에 대한 어류의 포식압을 낮추고 결과적으로 증가된 동물플랑크톤의 섭식으로 식물플랑크톤의 양을 감소시키는 것으로 알려져 있다. 따라서 가까운 거리에 서식처를 조성하여 주고 동물플랑크톤이 인공식물섬으로의 이동이 발생할 경우 식물섬의 배열구조와 관련하여 일자형으로 길게 배열하여 수체와의 경계면을 길게 하는 것과 집단으로 배열하여 식물섬을 넓게 배치하는 것 중 유리한 방안을 모색하고자 실시하였다.

- 설치시기: 2007년 10월 16일
- 설치장소: 충청남도 보령 신구저수지
- 설치규모: 인공식물섬 둘레길이 일자형 18 m, 집단형 12 m
- 구성자재: 식물, 식생기반재, HDPE망, 부력재, 계류장치

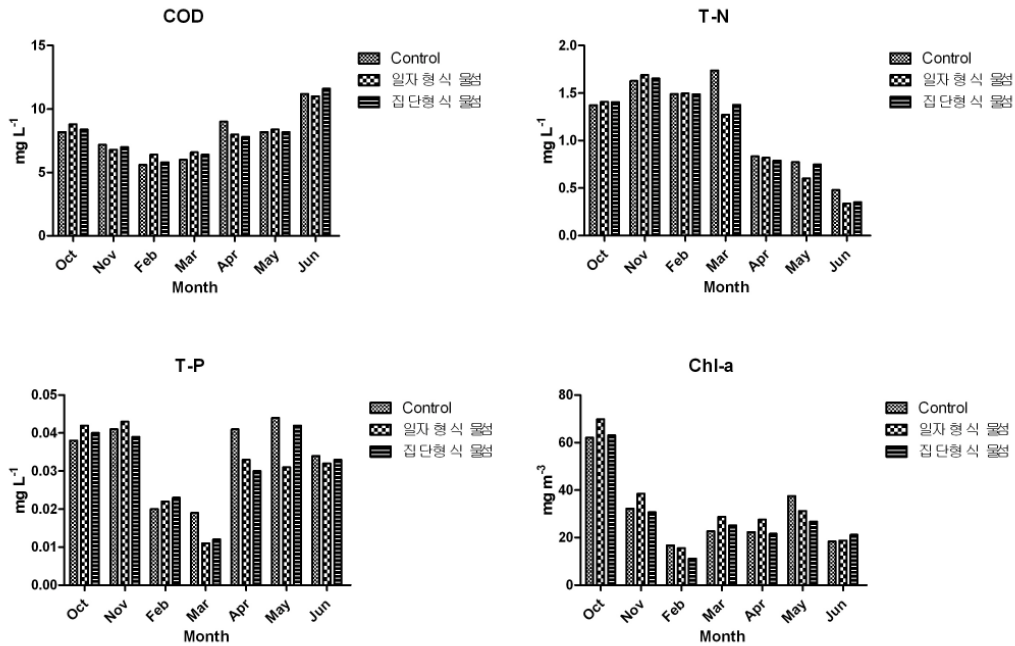


[그림 3.2.101] 경계면 유효성 검토를 위한 인공식물섬 배열 모식도 및 설치전경

이중식재기반 인공식물섬의 경계면의 길이 변화에 대한 유효성 검토를 위하여 신구저수지에 설치한 일자형과 집단형 이중식재기반 인공식물섬에 대한 수질조사 결과 시기별 수질농도의 차이는 있으나 조사지점간의 뚜렷한 차이는 구별 할 수 없었다, 일반적으로 가을철의 경우 식물섬을 설치한 구간의 수질농도가 대조와 유사하거나 일자형 배열구에서 약간 높은 것으로 조사되었다. 반면 봄철에는 식물섬 배열구간이 대조구에 비하여 약간 낮은 농도를 보이고 있는 것으로 조사되었다.

인공식물섬의 배열구조에 따른 식물플랑크톤 변화를 조사한 결과 총개체수는 대조구, 집단형 배열구, 일자형배열구의 순으로 감소하여 시기적 차이는 있으나 일자형배열이 식물플랑크톤 제어에 보다 효과가 있었던 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 실제 인공식물섬이나 수생식물 수초대를 서식처로 이용하는 동물플랑크톤의 서식지내 이동거리가 그리 길지 않은 것으로 보인다. 일반적으로 동물플랑크톤이 호소의 수변 수초대를 서식처로 이용하기 위해서는 수초대의 밀도, 퇴적쇄설물의 상태 및 다양한 물리화학적 특성 등에 의하여 결정될 것이며, 인공식물섬을 서식처로 이용하는데 있어서 역시 인공식물섬 하부 뿌리층의 밀도, 간격 및 기반재의 공극 등이 동물플랑크톤의 피난처 및 서식공간의 주요한 결정 인자가 된다. 만일 이러한 모든 인자가 설치 식물섬의 전체설치면적에 있어서 동일하다면 동물플랑크톤이 식물섬 하부 중앙으로 원거리를 이동 할 필요는 없을 것이며, 같은 관점에서 동물 플랑크톤이 서식처로 이동하고 다시 먹이활동을 위하여 외부로 이동하기 위하여 너무 원거리 이동은 불필요할 것이다. 따라서 수체와의 경계면을 보다 길게 조성하는 것이 동량의 수체내 동물플랑크톤의 수가 동수이더라도 집단형 보다는 보다 동물플랑크톤을 부양하기 위한 공간을 많이 제공할 수 있을 것으로 보인다. 대조 지점에서는 식물플랑크톤이 15.43종이 출현하고 종다양성은 1.11, 일자형배열구가 12.43종이 출

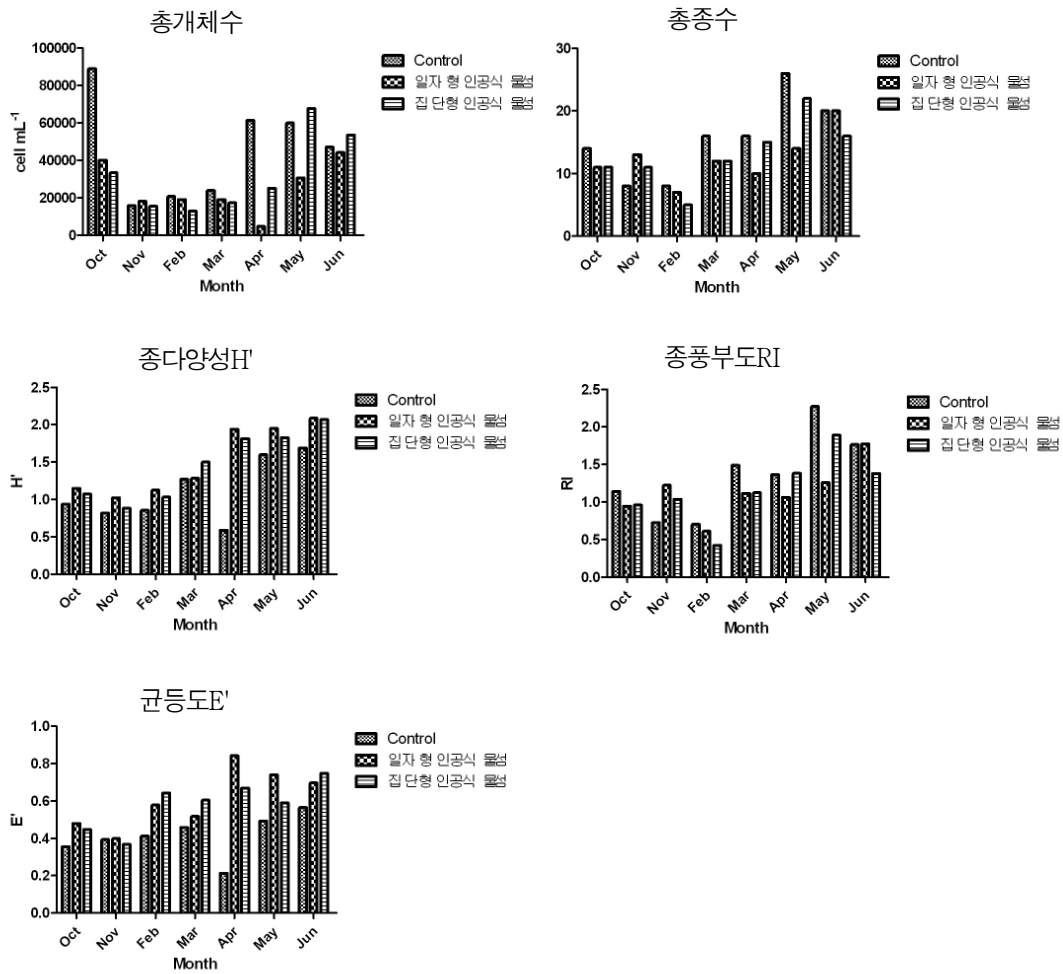
현하고 종다양성이 1.54, 집단배열형에서는 13.414종이 출현하고 종다양성은 1.46을 보여 식물섬 구간에서 적은종수가 출현하였음에도 대조지점과 비교하여 상대적으로 높은 종다양성을 보이는 것으로 조사되었다.



[그림 3.2.102] 인공식물섬 배열구조별 수질 분석 결과

[표 3.2.47] 인공식물섬 배열구조별 식물플랑크톤 개체수 및 생물지수 변화

구분		조사시기	Oct	Nov	Feb	Mar	Apr	May	Jun	평균
Control	총 개체수		88952	15679	20801	23856	61253	60011	47110	45,380
	총 종수		14	8	8	16	16	26	20	15.43
	종다양성(H')		0.937	0.817	0.856	1.270	0.588	1.602	1.691	1.11
	종풍부도(RI)		1.141	0.725	0.704	1.488	1.361	2.272	1.766	1.35
	균등도(E')		0.355	0.393	0.411	0.458	0.212	0.492	0.565	0.41
일자배열	총 개체수		40,144	18,093	19,060	19,060	4,709	30,645	44,231	25,134
	총 종수		11	13	7	12	10	14	20	12.43
	종다양성(H')		1.149	1.024	1.124	1.284	1.938	1.950	2.089	1.51
	종풍부도(RI)		0.943	1.224	0.609	1.116	1.064	1.258	1.776	1.14
	균등도(E')		0.479	0.399	0.578	0.517	0.842	0.739	0.697	
집단배열	총 개체수		33,388	15,533	12,840	17,281	25,108	67,618	53,549	32,188
	총 종수		11	11	5	12	15	22	16	13.14
	종다양성(H')		1.074	0.881	1.034	1.500	1.813	1.825	2.068	1.46
	종풍부도(RI)		0.960	1.036	0.423	1.127	1.382	1.888	1.378	1.17
	균등도(E')		0.448	0.367	0.642	0.604	0.669	0.590	0.746	0.58

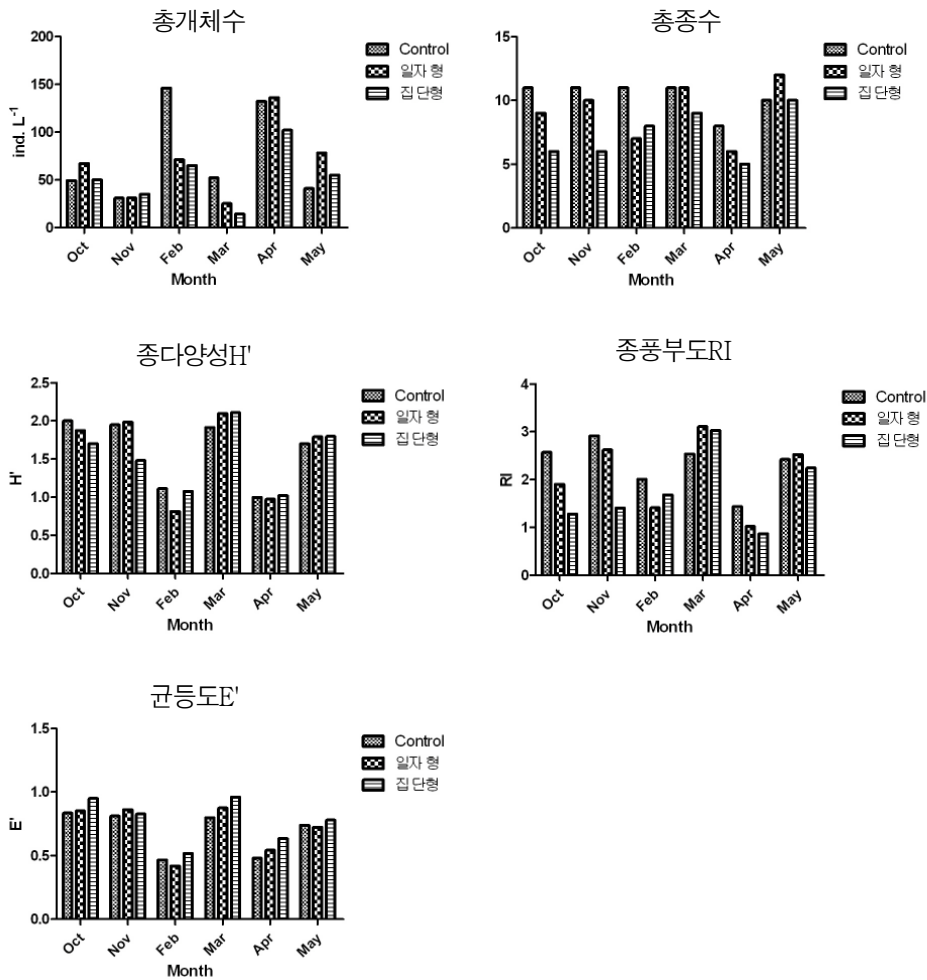


[그림 3.2.103] 인공식물섬 배열형태에 따른 식물플랑크톤의 생물지수 변화

인공식물섬 배열형태 결정을 위하여 설치된 인공식물섬에 대한 동물플랑크톤 조사결과 대조구는 조사기간 중 31~132 inds. L⁻¹로 평균 75 inds. L⁻¹에 평균 10.3종의 동물플랑크톤이 출현하였다. 종다양성은 0.997~2.000으로 평균 1.61로 조사되어 개체수는 2월과 3월에 상대적으로 인공식물섬지역보다 높게 조사되었고 종다양성은 10월과 익년의 2월을 제외하고는 인공식물섬 지역보다 낮은 것으로 조사되었다. 일자배열형인공식물섬에서는 조사기간 중 25~136 inds. L⁻¹, 평균 68 inds. L⁻¹ 출현하였고 종다양성은 0.811~2.099로 평균 1.59로 조사되었다. 집단배열형인공식물섬에서는 조사기간 중 14~102 inds. L⁻¹, 평균 53 inds. L⁻¹이 조사되었고 종다양성은 1.075~2.107로 평균 1.53이었다.

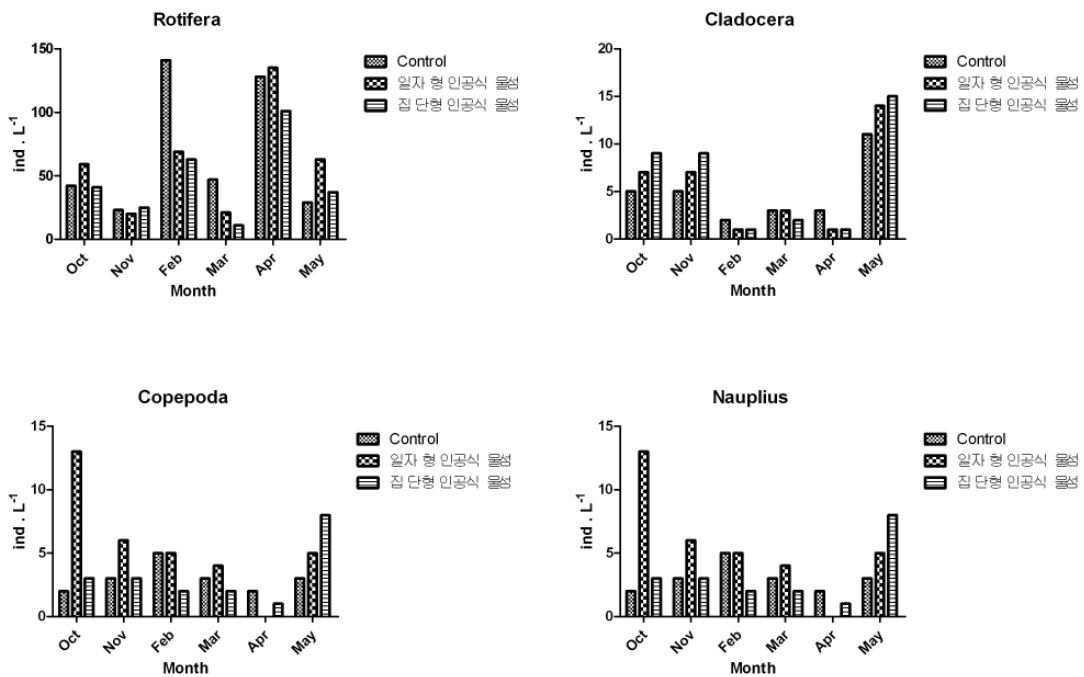
[표 3.2.48] 인공식물섬 배열구조별 동물플랑크톤 개체수 및 생물지수 변화

구분	조사시기	Oct	Nov	Feb	Mar	Apr	May	평균
	Control	총 개체수	49	31	146	52	132	41
총 종수		11	11	11	11	8	10	10.33
종다양성(H')		2.000	1.948	1.113	1.914	0.997	1.698	1.61
종풍부도(RI)		2.569	2.912	2.007	2.531	1.434	2.424	2.31
균등도(E')		0.834	0.812	0.464	0.798	0.479	0.738	0.69
일자형 배열	총 개체수	67	31	71	25	136	78	68
	총 종수	9	10	7	11	6	12	9.17
	종다양성(H')	1.873	1.982	0.811	2.099	0.971	1.793	1.59
	종풍부도(RI)	1.903	2.621	1.408	3.107	1.018	2.525	2.10
	균등도(E')	0.852	0.861	0.417	0.875	0.542	0.722	0.71
집단형 배열	총 개체수	50	35	65	14	102	55	53
	총 종수	6	6	8	9	5	10	7.33
	종다양성(H')	1.701	1.483	1.075	2.107	1.019	1.798	1.53
	종풍부도(RI)	1.278	1.406	1.677	3.031	0.865	2.246	1.75
	균등도(E')	0.949	0.827	0.517	0.959	0.633	0.781	0.78



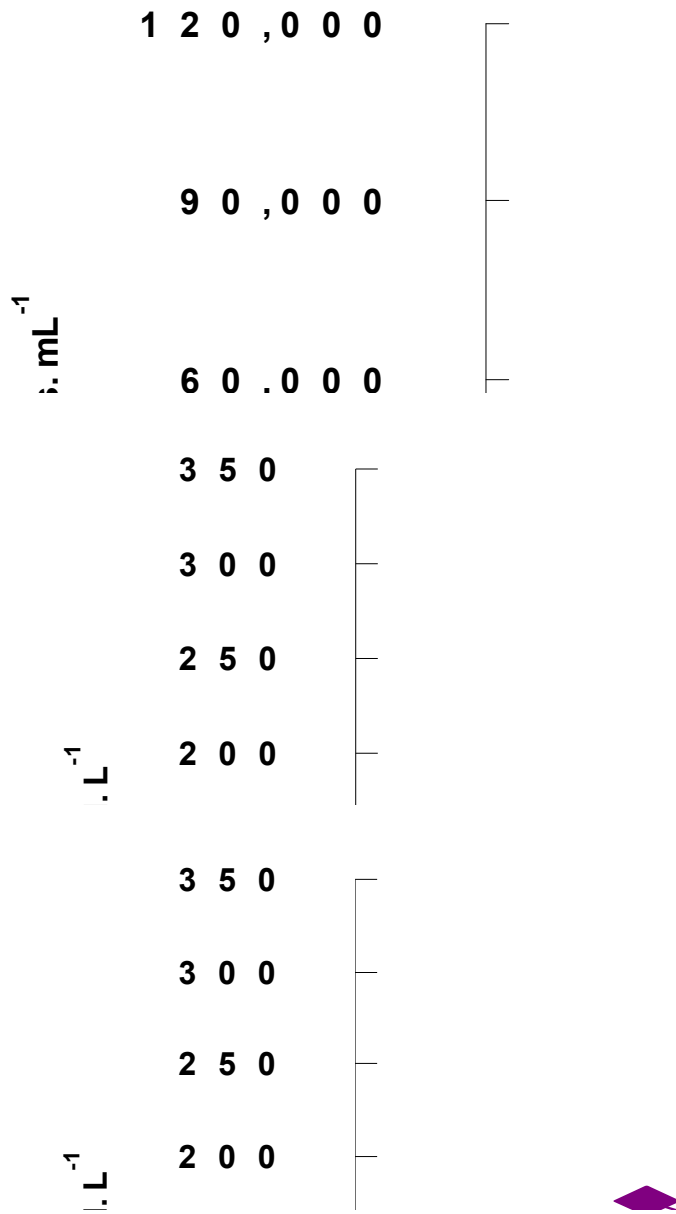
[그림 3.2.104] 인공식물섬 배열형태에 따른 동물플랑크톤의 생물지수 변화

동물플랑크톤의 종조성 변화는 전반적으로 Rotifera가 개체수에서 가장 많이 출현하였으며 조사기간 중 2월과 4월에 가장 많은 수가 출현하였으며, 특히 대조구에서 가장 많이 출현하였다. 그러나 Cladocera, Copepoda, Nauplius 등은 총개체수에 차지하는 비율은 작으나 식물섬 설치지역에서 많이 출현하여 실질적인 식물플랑크톤의 제어가 있었을 것으로 보인다. Cladocera는 집단형, 일자형, 대조구의 순으로 감소하였으며, Copepoda, Nauplius개체수는 '08년 3월과 4월을 제외하고 일자형, 집단형, 대조구의 순으로 감소하였다



[그림 3.2.105] 인공식물섬 배열형태에 따른 동물플랑크톤의 종조성변화

인공식물섬 배열형태에 따라 식물플랑크톤과 동물플랑크톤을 비교시 일자형인공식물섬에서는 비교적 조사기간 중 식물플랑크톤의 개체수변화가 적었으나 집단배열형구조에서는 조사기간 종료시 급격한 식물플랑크톤의 증가가 발생하였다. 이러한 결과는 동물플랑크톤의 종조성 및 출현수에 있어서도 일자형과 집단형간의 경향이 비슷하여 해석이 불분명하나 인공식물섬의 배열구조에 따른 현상을 유추 할 수 있다. 실제 단위 용량 당 개체수는 비슷하나 인공식물섬의 경계면이 일자형이 집단형보다 더 크므로 동물플랑크톤이 인공식물섬 주변으로 식물플랑크톤에 대한 먹이활동 영역을 보다 넓힐 수 있을 것으로 기대된다.



[그림 3.2.106] 인공식물섭배열형태별 식물플랑크톤-동물플랑크톤

호소생태계내에서 생태공학적인 기법을 이용한 수질개선기법은 먹이연쇄에 의한 top-down 형태의 기법이 많이 거론되고 있다. 이중 실제적으로 식물플랑크톤의 제어에는 영양염류의 제한이라는 기법과 더불어 동물플랑크톤의 이용이 가장 유력한 방법이 될 것이다. 이러한 동물플랑크톤은 대부분 호소 중 수직과 수평이동을 실행하고 있다. 동물플랑크톤의 이러한 이동은 대부분 어류의 포식에 대항하는 방법으로 주간에는 저층으로 이동하고 야간에는 표층으로 이동하여 식물플랑크톤 등 부유물질, 생물 등에 대한 섭식활동을 하는 것으로 알려져 있다. 이러한 이동은 수직이동 외에 수평이동을 통하여도 이루어지는데 수평이동을 위해서는 어류의 포식에 피할 수 있는 피난처 및 서식처를 필요로 하게 된다. 이러한 서식처는 대부분의 호소에서 수생식물

수초대가 이용되고 있다. 그러나 수초대의 조성이 어려운 지역에서는 인공적으로 조성하여 줄 필요가 있는데 그중 국내에서 사용되고 있는 기법으로는 인공식물섬이 가장 유력한 대안으로 대두되고 있다. 그러나 본연구중 수행된 이중식재기반 인공식물섬의 적정사용면적을 판단하기 위한 메소코즘 실험결과 수표면적의 8~15% 정도 설치되어야 수질보전능력을 발휘할 수 있을 것으로 판단되었으며 Martin(1999)은 30~40%, Per(1995)는 15~20%를 적정 동물플랑크톤의 어류 피난처로서의 호소 수생식물대 면적으로 제시하고 있어 실제 호소의 수질보전 목적으로는 적용하기에 많은 투자가 필요하다. 따라서 본실험에서 검토 한 바와 같이 식물섬과 수체와의 경계면을 크게 하여 동물플랑크톤이 단거리이동으로 서식 할 수 있는 공간을 많이 조성하여 줄 경우 투자소요를 줄일 수 있을 것이다.

이는 위에서 살펴본바와 같이 설치 식물섬의 전체설치면적에 있어서 하부서식처의 서식처 적합성이 모두 동일하다면 동물플랑크톤이 식물섬 하부 중앙으로 원거리를 이동 할 필요는 없을 이므로 수체와의 경계면을 보다 길게 조성하는 것이 동물플랑크톤을 부양하기 위한 공간을 보다 많이 제공 할 수 있을 것이기 때문이다.

5. 미소유용생물 서식처 평가 및 선발

가. 미소유용생물 서식처의 개발 필요성

우리나라에는 약 18,000여개의 농업용저수지가 운영되고 있으며 일반적으로 농업용수수질기준항목에 따라 환경책기본법상의 IV등급 수질을 목표로 관리되고 있다. 이러한 관리기법은 이미 오래전부터 실시되어오던 방안이나 수질관리효과를 거두기 위해서는 비용이 많이 들고 사후유지관리도 어려운 실정이다. 따라서 근자에는 수질정화 기법으로 유지관리비용이 적게 소요되는 방안을 다각도로 모색하고 있다.

이러한 방안으로 가장 많이 이용되고 있는 방법으로는 습지의 수질정화기능을 활용한 인공습지를 이용한 수질정화 기술이 많이 연구되고 있다. 그러나 이러한 인공습지를 이용한 수질관리방안은 주로 유역에서 유입되는 오염물질을 제거하는 기술로 효과적인 방법임에도 불구하고 많은 부지를 필요로 하고 모기 등의 위생해충, 습지의 식물관리 등의 다양한 문제점을 내포하고 있다. 그리고 저수지의 수질관리를 위한 철저한 유입부하 저감대책을 수립하더라도 일단 오염된 저수지는 내부생산으로 인하여 호소의 부영양화현상은 지속적으로 발생되게 되어 준설 등의 호내 대책을 필요로 하게 된다.

이러한 저수지의 수질관리를 위하여 근래에는 생태공학적 기법을 이용하여 수질을 관리하고자 하는 기법 들이 모색되고 있다. 그러나 이러한 기법들은 위에서 기술한 습지나 식물 등에 의한 오염물질의 제거, 미생물부착여재 등을 활용한 기법 등이 주를 이루고 있으며 호내 대책으로는 준설 이외의 방법은 검토되지 못하고 있는 실정이다.

본 과제에서는 최종목표를 생물조절기법을 이용한 농업용저수지 수질개선기법개발을 목표로 하고 있으며, 그중 미소유용생물의 활용성을 높여 호소내 식물플랑크톤제어를 위해 동물플랑크

톤이나 미생물을 적절히 배양 할 수 있는 서식처를 개발하여 동물플랑크톤의 식물플랑크톤에 대한 먹이연쇄와 미생물의 분해 작용으로 호소 부영화에 따른 식물플랑크톤의 증식을 제한하고 호소투명도를 개선 할 수 있는 기법을 개발하고자 하였다.

일반적인 일반저수지(호소)는 수변전이대(land-water interface)와 개방수역(open water)으로 수역을 구분할 수 있으며, 수변전이대는 대략 바닥까지 빛이 도달할 수 있는 대략 수심 2 m 내외의 지역으로 수중생태계의 가장 중요한 생물서식지로 수초대(littoral zone)가 형성되고 저서 동물과 어류의 중요 서식지가 되고 있다.

그러나 농업용저수지는 이러한 호소생태계의 유지가 매우 어려운 문제점을 안고 있다. 농업용저수지는 대부분 산지를 가로막아 축조되어 수변지역의 경우 경사가 심한 지형적 특성과 관개기에 용수이용량이 많아 시기에 따른 수위의 변화가 심하다. 따라서 갈수기에 농업용저수지의 수변이 건조 상태로 노출되어 수생식생이 파괴되고 육상초본식물이 자라게 되나 만수시에는 급격히 수위가 높아져 노출되었던 수변이 물에 잠겨 육상 초본식물은 사멸하게 된다. 농업용저수지는 이러한 극심한 수위변화가 잦아 안정된 수변생태계가 이루어지지 못하고 황폐화하게 된다. 이는 국내 대댐의 경우에서도 수위변동이 큰 소양호, 파로호 등에서도 수변 수초대가 형성되지 못하여 수변 생태계가 파괴 되고 있는 것으로 알려져 있다.

수변생태계의 중요성은 호소의 수질관리와 연관하여 파악 할 수 있다. 호소 생태계에 유입된 오염물질은 일차적으로 식물성플랑크톤이나 미생물 등에 의하여 일차이용이 되고, 순차적으로 증식된 식물성플랑크톤은 동물플랑크톤, 작은 어류, 대형어류 등의 먹이 연쇄를 거쳐 먹이로 이용 된다. 이러한 과정에서 수변식생대는 수생생물의 중요 서식처 역할을 담당하게 되며 어류의 산란처 및 피난처, 먹이 공간 등으로 이용되고 특히 동물성플랑크톤의 경우 어류 포식에 대한 피난처로 수생식물대를 이용하고 있어 중요성이 강조 되고 있다.

이러한 수변식생대는 알단 파괴되면 수변식생대에서의 생태순환 고리가 끊어져 생태다양성이 훼손되고, 강우기 이후 오염물질이 유입되어 녹조현상이 빈발하게 된다.

따라서 본 연구에서는 수생생태계의 다양성을 회복 할 수 있도록 훼손된 수변식생대를 대체 할 수 있는 기법으로 다양한 종류의 인공서식지를 조성하고 수생생물상을 조사하여 적합한 미소유용생물 서식처를 개발하고자 하였다.

나. 미소유용생물 서식처 개발 및 평가요소 도출

본 연구에서는 주로 사용된 기법은 기존의 인공식물섬을 개량한 이중식재기반 인공식물섬, 교반장치를 이용한 인공식물섬, 침수형인공식물섬을 사용한 것과 인공식물섬을 사용하지 않고 호변에 인공 수초대를 조성하는 기법으로 나누어진다.

(1) 서식처 개발

(가) 인공식물섬 개량형

인공식물섬을 활용하여 시험한 방법으로는 식생기반재를 부력재 상하에 부착한 1) 이중식재 기반 인공식물섬의 효과를 검토하였다. 이 이중식재기반 인공식물섬 기법은 참여업체인 (주)아썸에서 인공식물섬에 식생기반재로 사용하고 있는 가공된 코코넛 섬유를 사용하였는데 기존의 상단에 식생기반재를 사용하고 하부에 부력재를 사용하는 방식을 개량하여 코코넛 섬유 식생기반재를 하부에 추가로 부착하였다. 코코넛 섬유를 하부에 부착한 사유는 (주)아썸에서 개발하여 사용하는 코코넛 섬유는 비표면적이 대단히 커서(평균 $8.166 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) 미생물부착면적이 넓고 공극이 넓어 상부의 식생기반재로만 사용하는 것 보다는 미소유용생물의 서식처로서 효과가 기대되었다. 또한 식생기반재의 효과는 없지만 단순히 식물을 pot에 식재하고 물교반장치를 부착하여 식물섬 주변에 물순환을 발생시킨 2) 교반장치를 이용한 식물섬을 검토하였다. 이러한 장치는 pot에 식재된 식물의 뿌리에 의한 서식처공급, 영양염류 흡수효과 외에 교반장치에 의한 물순환으로 수중산소 공급 및 남조류 등의 제어를 기대하였다. 수변식생대에는 다양한 수생식물이 서식하여 뿌리와 줄기 등이 미생물의 부착재로 사용되거나 동물플랑크톤의 서식지로 이용되고 있는 것과 같이 식생기반재를 물속에 침수시키고 식물을 식재하는 방법으로 침수형인공식물섬으로 꽃창포를 식재한 3) 침수형인공식물섬(식재)과 식생의 과량과 동절기 고사 후 이후 봄에 새싹이 오리나 물고기 등에 섭식되어 유지되지 못할 경우를 예상하여 식물과 유사한 효과를 내고자 나일론 재질의 미디어를 부착한 4) 침수형인공식물섬(미디어)의 효과를 검토하였다. 이러한 침수형인공식물섬은 식생의 유지를 위하여 수심 20 cm에 설치하였다.

또한 서식처의 개발은 아니지만 부가적으로 인공식물섬의 동물플랑크톤 등이 미소유용생물에 대한 서식처의 효과가 인정됨에 따라 인공식물섬의 효율적이고 경제적인 사용방안을 검토하고자 인공식물섬의 배열방법에 대한 검토를 실시하였다. 인공식물섬의 배열방법으로는 일자형으로 길게 배열하는 5) 일자형배열과 6) 집단형배열로 설치하여 효과를 검토하였다.

(나) 인공 수초대

호소의 수변식생대가 미소유용생물의 효율적인 서식처로서의 효과를 발휘하기 위하여는 대략 호소내 식생대가 15~30% 정도가 유효한 것으로 알려져 있다. 따라서 호소수변생태계가 거의 없는 국내 농업용저수지에 이 정도의 서식처를 인공식물섬 등으로 개발하는 것은 비용적으로 비효율적일 수 있다. 따라서 수변의 수초대와 유사한 기능을 할 수 있는 인공 수초대를 개발하여 미생물, 동물플랑크톤, 저서생물, 어류 등 수중 생물의 번식과 먹이 섭취 등이 이루어지는 근거지를 조성하고 효과를 검토하고자 하였다.

사용시설로는 호소바닥에 설치하는 침수형 호안수초대와 수층에 부유할 수 있는 부유형호안수초를 제작하여 설치하였다. 침수형호안수초는 SUS 앵글로 틀을 제작하고 나일론재질의 끈상 미디어에 부력재를 달아 50 cm 간격으로 설치한 저밀도의 7) 침수형호안수초(저밀도)와 25 cm

간격으로 미디어를 설치한 고밀도의 8) 침수형호안수초(고밀도)를 제작하여 갈수심이하의 수심에 설치하였다.

침수형수초대의 퇴적토사에 의한 매몰우려를 해결하기 위하여 부유형으로 인공 수초대를 조성하여 설치하였다. 부유형 호안수초대는 그물형과 인공수초의 두가지 형태로 제작하여 설치되었다. 9) 부유형 그물수초대는 5 cm 정도의 망목을 갖는 나일론 망을 3열로 병렬배치하고 길이 약 50 m로 제작하여 양 끝에 인공식물섬을 설치하고 중간에 부력재를 사용하여 설치하였다. 10) 부유형 호안수초대는 자체부력을 갖는 고무재질의 끈상소재를 밀집하여 앵글에 설치하고 부력재를 달아 수심 1 m에 설치하여 침수식물의 효과를 얻고자 하였다.

(2) 미소유용생물서식처의 평가요소 개발

서식처 조성후 평가의 목적은 조성된 서식처가 얼마만큼 효과를 나타내는지 살펴보는 것과 같다고 할 수 있다. 아직까지 우리나라에서는 이렇다 할 서식지의 평가에 대한 방법론이 제시되지 않고 있으며 주로 외국자료에 의존하고 있는 실정이다. 외국의 경우에는 복원과 유사한 개념인 회복(rehabilitation)과 같은 계획을 수행한 후에 평가하기 위한 기준을 설정하고 있으며 Ewel(1987)은 생태복원계획에서 회복계획의 생태적 측면에서 성공이나 실패를 측정할 수 있는 5가지 기준을 제시하고 있다[표 3.2.49].

그러나 이러한 인자들은 구체적인 수치나 정도를 표현하기에 어려운 점들을 가지고 있다. 즉, 생물서식공간의 지속성이나 취약성, 안정성이나 효율성 등에 대한 정도를 제시해 주는 데에는 한계점이 있어 다소 간소화된 방법을 제시하여야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 Ewel의 제안을 변형하여 서식처평가에 필요한 사항을 도출하고 생태평가에 있어서 기준에 흔히 사용하고 있는 생물·생태학적인 평가방법을 첨가하여 평가하였다.

(3) 본 연구에서의 평가요소 도출

본 연구에서는 위에서 살펴본 바와 같이 Ewel의 제안을 변형하여 다음의 서식처 평가요소를 개발하였다[표 3.2.50]. 본연구의 최종목적인 농업용저수지의 수질보전이라는 결과물을 얻기 위해서는 너무 많은 방법과 시간과 투자를 필요로 한다. 따라서 여기에서는 농업용저수지의 수질개선방안으로 생태공학적인 기법인 먹이연쇄에 의한 수질개선기법 중 식물플랑크톤을 제어할 수 있는 미소유용생물이 서식할 수 있는 공간을 조성하고 그 활용성을 판단하는데 평가의 의의를 두었다. 여기서 가장 중요한 것은 조성된 기법으로 인해서 생물종이 증가한 것인지, 아니면 그러한 공간이 새롭게 창출되어서 종이 증가하게 된 것인지에 대한 관계성을 파악해야 한다. 이 표에서 나타내고자 하는 것은 미소유용생물의 생물서식처 평가에 있어서는 서식처 조성 전·후의 비교평가 보다는 서식처와 무서식처의 비교를 통하여 서식처를 조성한곳과 조성하지 않은 곳으로 생물종의 여러 구성 차이를 조사함으로써 조성 기법에 대한 효과를 파악해 보고자 한 것이며, 서식처의 조성 및 관리에 관한 사항역시 포함하였다.

[표3.2.49] 회복계획의 평가요소

기준	평가요소
시스템은 지속할 수 있는가?	새롭게 조성된 시스템은 스스로 자기조절을 할 수 있거나 자신의 체계를 유지하는데 도움을 줄 수 있는가?
침입으로부터의 취약성	새로운 군락구조는 다른 종의 침입에 저항할 수 있는가(견딜 수 있는가)?
생산성	원래의 시스템처럼 새롭게 조성된 것도 같은 생산성을 가질 수 있는가?
영양물질의 보유	영양물질의 순환에 얼마나 효과적인가?
생물학적 상호작용	중요한 동·식물종(key animal & plant)이 출현하는가?

[표 3.2.50] 본 연구에서의 미소유용생물 서식처 평가요소

기준	평가요소	평가 항목
○시스템 지속 가능성	○유지관리의 편리성 및 안정성 ○호소생태계에의 저해요소 유무	○유지관리의 난이도 및 주기, 서식처의 기능유지 등 ○서식처의 호소생태계저해 예상 항목(뿌리잔사 등)
○침입 및 제거로부터의 취약성	○인공식물섬 식재종유지 - 외부종 유입, 조류(鳥類)에 의한 제거 등	○동식물의 외부종유입에 의한 영향
○생산성	○동식물플랑크톤 종조성 및 생물지수 ○주요종의 서식여부	○총개체수, 총종수, 종다양성, 종풍부도, 균등도, 주요 출현동식물플랑크톤
○영양물질의 순환	○수질개선효과 및 식재식물의 생육정도	○수질개선효과, 식생의 건전성
○생물학적 상호작용	○동식물플랑크톤의 상호작용 ○호소생태계내에서의 조류(鳥類) 이용	○식물플랑크톤제어, 조류 등의 외부생물이용정도

다. 미소유용생물 서식처 평가 결과

본연구에서 사용된 미소유용생물서식처에 대한 평가 결과는 [표3.2.51]과 같다.

이중식재기반 인공식물섬을 신규저수지에 적용한 결과 동물플랑크톤의 출현개체수는 평균 429 inds. L⁻¹로 대조지점의 340 inds. L⁻¹보다 약 28% 정도 개체수가 많았으며 특히 식물플랑크톤에 대한 섭식기능 있다고 알려진 *B. longgistris*가 조사기간 중 지속적으로 관찰되었다. 식물섬주위의 식물플랑크톤양은 대조지점 보다 약 42% 정도 감소된 것으로 조사되어 식물섬에 의한 동물플랑크톤의 증가와 식물플랑크톤의 감소를 확인 할 수 있었다. 또한 동물플랑크톤의 총종수 및 종다양성, 종풍부도, 균등도 등은 다소 낮아진 것으로 조사되었으며, 역으로 식물플랑크톤의 생물지수는 높아지는 것으로 나타나 이중식재기반 인공식물섬이 동물플랑크톤에 선택적으로 이용되고 있으며 식물플랑크톤에 대한 비선택적 작용으로 식물플랑크톤의 양은 줄이나 다양성은 높일 수 있는 것으로 판단된다. 이중식재기반 인공식물섬의 수질개선 효과는 메소코즘을 통하여 뚜렷한 수질개선효과를 보였으며 영양염류의 저감은 물론 투명도개선에 효과가 있음

을 보여주었다. 현장에 적용된 이중식재기반 인공식물섬은 설치 2년 이후 식생이 완전히 정착하여 우수한 경관을 보여주었고 3년차에는 미국자리공과 여귀풀이 침입하여 경관을 다소 침해하였으나 식생이 교체되거나 경관이 많이 악화되거나 하지는 않았다. 식물섬은 겨울철에는 철새들의 이용이 많아 식물섬이 생태친화적 시설인 것을 확인할 수 있었다. 인공식물섬은 식물을 유지하는 기반으로 장기간 식생이 유지 될 경우 뿌리 등의 사체가 하부에 퇴적되어 호소 바닥 생태계에 영향을 줄 것으로 예상 되었다. 따라서 장기간 식물섬을 운영하고 있는 석문수질개선 단지에 설치된 식물섬의 하부 퇴적층을 조사한 결과 유기쇄설물이 상당히 집적된 것을 확인할 수 있었으며, 저서생물로는 식물섬이 없는 구간은 *Foraminifera*, *Nematoda* 등이 우점하였으나 인공식물섬 하부의 경우 *Foraminifera*, *Nematoda* 등은 감소하고 *Ostracoda*은 증가하는 것으로 조사 되었다. 인공식물섬의 농업용저수지 적용에 문제점으로는 농업용저수지는 일반적으로 수위변화가 심하여 갈수기에는 저수지의 바닥이 드러나기 쉬우며 이곳에 설치된 인공식물섬은 바닥과 접촉하여 식물뿌리가 바닥에 뻗게 되어 재부상에 어려움을 줄 수 있으므로 설치시 위치선정에 주의 할 경우 많은 효과를 얻을 수 있다. 이상의 평가에서 이중식재기반식물섬은 호소내 미소유용생물의 서식지로서 기능과 활용면에서 유리한 것으로 판단된다.

교반장치를 이용한 인공식물섬을 신규저수지에 적용한 결과 동물플랑크톤의 출현개체수는 평균 429 inds. L⁻¹로 대조지점의 340 inds. L⁻¹보다 약 28% 정도 개체수가 많았으며, 식물섬주위의 식물플랑크톤양은 대조지점 보다 약 36% 정도 감소된 것으로 조사되어 식물섬에 의한 동물플랑크톤의 증가와 식물플랑크톤의 감소를 확인 할 수 있었다. 또한 동물플랑크톤의 총 종수 및 종다양성, 종풍부도, 균등도 등은 이중식재기반식물섬에서와 마찬가지로 다소 낮아진 것으로 조사되었으며, 역으로 식물플랑크톤은 생물지수는 높아지는 것으로 나타나 교반장치를 이용한 인공식물섬 역시 동물플랑크톤에 선택적으로 이용되고 있으며 식물플랑크톤에 대한 비선택적 작용으로 식물플랑크톤의 양은 줄이나 다양성은 높일 수 있는 것으로 판단된다. 교반장치를 이용한 식물섬은 미생물 부착재로 이용 될 수 식물 뿌리에 부착한 미생물에 의한 분해 작용보다는 식물체에 의한 흡수가 주 영양염류 제거방법이 될 수 있고 물순환을 통하여 수중 산소상태를 개선하고 그에 따른 유기물분해 등의 효과가 기대된다. 현장에 적용된 교반장치를 이용한 식물섬 역시 설치 2년 이후 식생이 완전히 정착하여 우수한 경관을 보여주었으나 중심축에서 거리가 멀어질수록 식생이 감소되는 것을 확인 할 수 있었다. 식물섬에는 미국자리공과 여귀풀이 침입하여 경관을 다소 침해하였으나 식생이 교체되거나 경관이 많이 악화되거나 하지는 않았다. 이중기반인공식물섬과는 달리 교반장치의 회전 등으로 철새들이 식물섬을 이용하는 것은 확인하지 못했다. 교반장치를 이용한 인공식물섬의 농업용저수지 적용에 문제점으로는 농업용저수지는 일반적으로 수위변화가 심하여 갈수기에는 저수지의 바닥이 드러나기 쉬우며 이곳에 설치된 인공식물섬은 바닥과 접촉하여 식물뿌리가 바닥에 뻗게 되어 재부상에 어려움을 줄 수 있으므로 설치시 위치선정에 주의 하여야 한다. 이상의 평가에서 교반장치를 이용한 인공식물섬 역시 호소내 미소유용생물의 서식지로서 기능과 활용면에서 유리한 것으로 판단된다.

꽃창포를 식재한 침수형인공식물섬과 메디아를 부착한 침수형인공식물섬을 신규저수지에 적용한 결과 꽃창포를 식재한 식물섬에서는 동물플랑크톤의 출현개체수는 평균 245 inds. L⁻¹로 대조지점의 75 inds. L⁻¹보다 약 227% 정도 개체수가 많았으며, 메디아를 부착한 식물섬에서는

출현 개체수가 93 inds. L⁻¹로 24% 증가하였다. 식물플랑크톤양은 대조지점에 비하여 꽃창포 식재식물섬에서 48%의 감소를 보였고, 미디어식물섬은 2% 정도 감소하는데 그쳐 침수형인공식물섬에서 꽃창포를 식재한 침수형식물섬이 미디어를 이용한 것보다 동물플랑크톤의 증가와 식물플랑크톤의 감소에 보다 효과적이었다. 침수형인공식물섬의 경우 동물플랑크톤의 총 종수 및 종다양성, 종풍부도, 균등도 등이 대조구와 비교하여 많이 낮아졌으며 특히 미디어를 이용한 시설에서는 종다양성은 44%, 종풍부도는 67% 정도 감소한 것으로 조사되었다. 식물성플랑크톤의 경우에는 미디어를 이용한 시설의 종풍부도가 대조지점과 비교하여 약간 낮아진 것을 제외하고 다른 지수는 높아진 것으로 조사되었다. 따라서 침수형인공식물섬 역시 동물플랑크톤에 선택적으로 이용되고 있으며 식물플랑크톤에 대한 비선택적 작용으로 식물플랑크톤의 양은 줄이나 다양성은 높일 수 있는 것으로 판단된다. 이러한 효과는 식재한 시설에서 효과가 높을 것으로 기대된다. 수질개선 측면에서 침수형인공식물섬의 경우 기반재로 인공식물섬의 코코넛 섬유를 사용하고 있어 미생물의 부착에 의한 유기물의 분해 등은 기대되나 식재된 식물의 정착이 어렵고 식생의 생육이 불량하여 식물에 의한 영양염류의 흡수는 기대하기 어려울 것으로 보인다. 미디어를 채용한 시설역시 미생물 부착체로서 유기물의 분해 등에서의 이용은 기대되나 직접적인 영양염류의 제거기능은 없을 것으로 판단된다. 기능면에서의 효과 외에 외형적인 면에서 식생을 이용한 침수형인공식물섬은 식생이 유지되지 못했으며 이듬해 식생을 발견하기 어려웠다. 따라서 식생을 이용한 침수형인공식물섬은 기반재 만을 이용하는 시설이 되어 식생을 배제한 인공식물섬으로 설치효과가 지속되지 못할 것으로 판단된다. 미디어를 이용한 부착미생물의 탈리 등으로 대규모 사용시 사용경과에 따라 수질오염을 발생 시킬 수도 있다.

미디어를 저밀도와 고밀도로 부착하여 호소 밑바닥에 설치한 침수형 호안수초대에 대한 조사결과 저밀도로 미디어를 설치한 수초대에서는 동물플랑크톤이 18%의 증가를 보인 반면 고밀도 처리시설에서는 181%로 큰 폭으로 증가하였으며 식물플랑크톤에 효과가 있다고 알려진 *B. longgistris*가 조사되었다. 식물플랑크톤의 경우에는 저밀도 12%, 고밀도 40% 감소하는 것으로 나타나 고밀도의 침수호안수초대의 효과가 더 높은 것으로 조사 되었다. 동물플랑크톤의 출현 종은 저밀도와 고밀도 설치지점에서는 각각 7.17종, 7.83종이 출현한 반면 대조지점은 10.33종으로 더 많았다. 이러한 결과는 신규저수지에 설치한 시설에서 전반적으로 나타나는 현상으로 서식처가 동물플랑크톤에 대한 특이성을 나타내는 것으로 보인다. 종다양성 등의 생물지수 역시 대조구에 비하여 낮아진 것으로 조사 되었다. 식물플랑크톤은 총종수는 대조구가 15.43종, 저밀도가 15.14종, 고밀도가 13.86종이 나타나 고밀도지역의 출현식물플랑크톤종수가 가장 적었으며 종다양성 등의 생물지수도 같은 경향을 보였다. 침수형 호안수초대의 수질개선 기능은 미디어에 부착된 미생물에 의한 유기물의 분해가 주작용이 될 것이며 영양염류의 직접적인 제거 기능은 없을 것으로 판단된다. 침수형 호안수초대는 농업용저수지의 호변바닥에 설치하여 수변 수초대의 침수식물대와 유사한 효과를 얻고자 한 것으로 유입토사가 많을 경우 토사 매몰의 우려가 높은 것으로 조사되었다. 실제 설치 1년 만에 미디어를 부착한 앵글이 일부 매몰된 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 장기간 설치하여 운영할 경우 점진적인 효과 저하가 우려된다. 경관적으로는 갈수심 이하로 설치되었더라도 노출시에는 미디어 부착물 등으로 인하여 경관을 다소 해치는 것으로 조사 되었다. 이상의 결과에서 침수형 호안수초대는 고밀도로 제작할 필요가 있

으며, 매몰에 대한 대책수립이 가능 할 경우 유효한 서식처로서의 기능이 기대된다.

부유형 그물수초대를 설치하여 조사한 결과 동물플랑크톤은 대조지점에서 944 inds. L^{-1} 이 출현하고 부유형 그물수초대에서는 633 inds. L^{-1} 로 33% 정도 적게 출현하였으며, 식물플랑크톤 역시 대조지점이 $109,568 \text{ cells mL}^{-1}$, 서식처가 $169,887 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 조성된 서식처에서 55% 정도 증가하였고 생물지수가 거의 유사한 것으로 조사되어 미소유용생물의 서식처로서의 기능을 확인 하지 못하였다. 그러나 대조지점에서 관찰되지 않은 *B. longistris*가 조사되어 추후 추가적인 검토가 필요 할 것으로 판단된다. 길게 드리워진 그물망상부의 연결줄은 새들이 중간 중간 등에서 헛터로 이용하고 있는 것이 관찰되었다. 유지관리측면에서 본 시설은 그물망을 이용한 외에 특별한 추가설치물이 없어 유지보수는 간단하나 그물망 등을 이용하고 있으므로 물고기가 포획 되는 경우와 그에 따른 어류사체 발생 등의 문제가 발생 할 수 있는 것으로 보이나 실험 기간 중에는 관찰할 수 없었다. 결론적으로 본 시설은 식물플랑크톤에 대한 유효성과 동물플랑크톤개체수의 증가 측면에서는 유효성이 인정되지 않았지만 실험기간의 단기성 및 유효 미소유용생물로 인정 될 수 있는 *B. longistris*의 관찰 등으로 비추어 추가적인 검토 후 유효성을 검토 할 필요가 있다.

부유형 호안수초대를 설치하여 조사한 결과 동물플랑크톤은 대조지점이 567 inds. L^{-1} , 조성 서식처가 470 inds. L^{-1} 로 조성서식처에서 18% 적게 계수되었으며 식물플랑크톤도 대조지점이 $95,207 \text{ cells mL}^{-1}$, 조성서식처가 $214,181 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 조성된 서식처에서 더 많이 계수되었다. 채수지점이 동일호소에서 동일시기에 관찰된 점을 고려시 서식처의 식물플랑크톤의 양은 정상적으로 볼 수 없으며 조성서식처의 기능을 검토 할 필요가 있다. 부유형 호안수초대는 기반재 위에 수초모형을 1 m길이로 밀식형태로 부착하여 제작한 것으로 호소내 바람의 영향으로 식물플랑크톤이 부유하다 수초모형의 밀식으로 물흐름이 저해되고 부유물의 집적되는 현상이 발생한 것으로 판단된다. 따라서 식물플랑크톤의 집적은 발생하나 큰 군체를 이루지 않는 식물플랑크톤 발생초기에 동물플랑크톤의 활발한 증식과 먹이활동을 유발 할 수 있는 것으로 판단된다. 실제 조사전체기간에 걸쳐 식물플랑크톤에 유효한 *B. longirostris* 등의 지각류가 다수 관찰되었으며 전체 시설에서 가장 많은 개체수를 보였다. 부유형 호안수초대는 인공수초를 이용하므로 영양염류의 흡수와 같은 기작보다는 부착 미생물에 의한 유기물 분해 등의 효과가 기대되며 유지관리 역시 부유형으로 매몰 등의 우려가 없는 미소유용생물의 서식처로서 유효한 것으로 판단된다.

이중식재기반 인공식물섬의 배열 기법을 검토한 결과는 식물플랑크톤의 제어가 많았던 일자형 배열(경계면을 크게 함)이 권장된다. 동물 플랑크톤의 경우 실제 수평이동시 식물섬 하부 깊숙이 이동하는 것보다는 짧은 거리에 피난처 및 서식처를 갖는 것이 유리 할 것으로 보이며 따라서 식물섬의 경계면을 길게 조성하는 것이 유효할 것이다.

[표 3.2.51] 미소유용 생물서식처 평가 결과

구분	조사대상	이중식재기반 인공식물섬		교반장치 이용식물섬		침수형 인공식물섬			
		대조지점	시설지점	대조지점	시설지점	대조지점	식재	미디어	
나미에코리프 기반	총개체수 inds. L ⁻¹	340	429	340	429	75	245	93	
	총종수	11.91	11.45	11.91	10.91	10.33	7.67	4.00	
	종다양성	1.68	1.60	1.68	1.51	1.61	1.41	0.91	
	종풍부도	2.40	2.22	2.40	2.02	2.31	1.28	0.78	
	균등도	0.69	0.67	0.69	0.65	0.69	0.69	0.66	
생물지수	주요종	<i>Keratella</i> sp.	<i>Keratella</i> sp. <i>B. longistris</i>	<i>Keratella</i> sp.	<i>Keratella</i> sp.	<i>Keratella</i> sp.	<i>Keratella</i> sp. <i>Polyatthra</i> sp.	<i>Keratella</i> sp. <i>Polyatthra</i> sp.	
	총개체수 cell mL ⁻¹	98,066	57,597	98,066	62,789	45,380	23,954	44,623	
	총종수	16.1	16.60	16.1	16.90	15.43	15.43	13.43	
	종다양성	0.93	1.14	0.93	1.47	1.11	1.50	1.35	
	종풍부도	1.35	1.50	1.35	1.52	1.35	1.44	1.20	
식물플랑크톤 기반	주요 출현종	<i>Phormidium</i> sp.1 <i>Aulacoseira</i> sp.1 <i>Synechocystis</i> sp.	<i>Phormidium</i> sp.1 <i>Aulacoseira</i> sp.1 <i>Aulacoseira</i> sp.	<i>Phormidium</i> sp.1 <i>Aulacoseira</i> sp.1 <i>Synechocystis</i> sp.	<i>Aulacoseira</i> sp.1 <i>Scenedesmus</i> sp. <i>quadricauda</i>	<i>Phormidium</i> sp.1 <i>Aulacoseira</i> sp.1 <i>Synechocystis</i> sp.	<i>Aulacoseira</i> sp.1 <i>Asterionella</i> sp.1 <i>formosa</i>	<i>Aulacoseira</i> sp.1 <i>Scenedesmus</i> sp.1 <i>quadricauda</i> <i>Synechocystis</i> sp.	
	수질개선 (양분흡수)	-	우수	-	우수	-	미약~ 없음	미약~ 없음	
	식생 건전성	-	우수	-	우수	-	빈약 후 사멸	없음	
	생물학적 상호작용	식물플랑크톤 제어	-	우수	-	우수	-	우수	우수
	외부종 유입	외부생물 이용건전성	-	철새서식지 쉼터이용	-	없음	-	확인안됨	미생물 부착
지속 가능성	식물	-	미국자리공 여귀	-	미국자리공 여귀	-	거의 없음	없음	
	동물	-	조류이용	-	이용곤란	-	이용곤란	이용곤란	
	유지 관리	-	간단한 보수	-	주기적 교반장치 확인	-	식생유지곤 란	간단한 보수	
	호소생태계 저해	-	뿌리사체 퇴적	-	뿌리사체 퇴적	-	확인안됨	확인안됨	
특기사항	-	저수위시 뿌리활착 무게증가	-	저수위시 뿌리활착 무게증가	-	식생이 유지되지 못함	부착미생물 탈리		
판 단	-	채택	-	채택	-	제외	제외		

3장 2절 미소유용생물 증식과 활성증대를 위한 생물 서식처 개발 및 적용성 평가

구분	조사대상	침수형 호안수초대			부유형 그물수초대		부유형 호안수초대	
		대조지점	저밀도	고밀도	대조지점	그물수초대	대조지점	호안수초대
대면적배양	총개체수 inds. L ⁻¹	75	191	211	944	633	567	470
	총종수	10.33	7.17	7.83	12.00	11.60	12.75	11.75
	종다양성	1.61	1.34	1.32	1.52	1.71	1.45	1.77
	종풍부도	2.31	1.37	1.48	1.69	1.66	1.86	1.78
	균등도	0.69	0.67	0.64	0.63	0.71	0.58	0.73
	주요종	<i>Keratella</i> sp. <i>Polyatthra</i> sp.	<i>Keratella</i> sp. <i>Polyatthra</i> sp. <i>B. longgistris</i>	<i>Keratella</i> sp. <i>Polyatthra</i> sp. <i>B. longgistris</i>	<i>Keratella</i> sp. <i>Polyatthra</i> sp.	<i>Keratella</i> sp. <i>Polyatthra</i> sp. <i>Bosmina</i> sp.	<i>Keratella</i> sp. <i>Polyatthra</i> sp.	<i>Keratella</i> sp. <i>Polyatthra</i> sp. <i>Bosmina</i> sp.
생물지수	총개체수 cell mL ⁻¹	45,390	39,987	27,281	109,568	169,877	95,207	214,181
	총종수	15.43	15.14	13.86	23.20	27.80	23.50	24.00
	종다양성	1.11	1.66	1.53	1.48	1.44	1.66	11.13
	종풍부도	1.35	1.33	1.25	1.96	2.32	2.01	1.93
	균등도	0.41	0.62	0.61	0.46	0.43	0.51	0.36
	주요 출현종	<i>Aulacoseira</i> <i>ambigua</i> <i>Phormidium</i> sp.1	<i>Aulacoseira</i> <i>ambigua</i> <i>Closteriopsts</i> <i>longissima</i> <i>Synechocystis</i> sp.	<i>Aulacoseira</i> <i>ambigua</i>	<i>Aulacoseira</i> <i>ambigua</i> <i>Aulacoseira</i> <i>granulata</i> var. <i>angustissima</i> <i>Synedra</i> <i>ulna</i> <i>Phormidium</i> sp.1	<i>Aulacoseira</i> <i>granulata</i> var. <i>angustissima</i> <i>Scenedesmus</i> <i>granulata</i> var. <i>quadricauda</i> <i>Phormidium</i> sp.3 <i>Synechocystis</i> sp.	<i>Aulacoseira</i> <i>ambigua</i> <i>Aulacoseira</i> <i>granulata</i> var. <i>angustissima</i> <i>Synedra</i> <i>ulna</i> <i>Phormidium</i> sp.1	<i>Aulacoseira</i> <i>ambigua</i> <i>Scenedesmus</i> <i>quadricauda</i> <i>Phormidium</i> <i>valderianum</i> var. <i>tenuis</i> <i>Synechocystis</i> sp.
수질 개선	수질개선 (양분흡수)	-	미약~ 없음	미약~ 없음	-	미약~ 없음	-	미약~ 없음
	식생 건전성	-	없음	없음	-	없음	-	없음
생물학적 상호작용	식물플랑크톤 제어	-	양호	우수	-	확인안됨	-	확인안됨
	외부생물 이용건전성	-	없음	없음	-	철새 쉼터 이용	-	없음
외부종 유입	식물	-	없음	없음	-	없음	-	없음
	동물	-	없음	없음	-	없음	-	없음
지속 가능성	유지 관리	-	퇴적물 매몰우려	퇴적물 매몰우려	-	간단한 보수	-	간단한 보수
	호소생태계저해	-	없음	없음	-	어류포획	-	없음
특기사항	-	노출시 경관저해	노출시 경관저해	-	어류사체잔존	-	<i>B. longgistris</i> 다수출현 인공수초 밀집으로 식물플랑크톤 농축	
판 단	-	제외	채택	-	추가검토후 채택	-	채택	

3장 2절 미소유용생물 증식과 활성증대를 위한 생물 서식처 개발 및 적용성 평가

구분	조사대상	인공식물섬 배열검토		
		대조지점	일자형 배열	집단형 배열
동물플랑크톤	총개체수 inds. L ⁻¹	75	68	53
	종다양성	10.33	9.17	7.33
	종풍부도	1.61	1.59	1.53
	균등도	2.31	2.10	1.75
	주요종	0.69	0.71	0.78
총중수	식물 플랑크톤	총개체수 cell mL ⁻¹	<i>Keratella</i> sp. <i>Bosmina</i> sp.	<i>Keratella</i> sp. <i>Bosmina</i> sp.
	총개체수 cell mL ⁻¹	45,380	25,134	32,188
	종다양성	15.43	12.43	13.14
	종풍부도	1.11	1.51	1.46
	균등도	1.35	1.14	1.17
총중수	주요 출현종	0.41	-	0.58
	수질개선	수질개선 (양분흡수)	<i>Aulacoseira ambigua</i> <i>Scenedesmus</i> <i>quadricauda</i> <i>Synechocystis</i> sp.	<i>Aulacoseira ambigua</i> <i>Synechocystis</i> sp.
식생 건전성	수질 개선	-	우수	우수
	생물학적 상호작용	식물플랑크톤제어	우수	우수
외부생물 이용건전성	식물플랑크톤 제어	-	우수	우수
	외부종 유입	식물	철새서식지 شط터이용	철새서식지 شط터이용
동물	식물	-	미국자리공 여귀	미국자리공 여귀
	지속 가능성	유지 관리	조류이용	조류이용
호소생태계 저해	유지 관리	-	간단한 보수	간단한 보수
	특기사항	-	뿌리사체 퇴적	뿌리사체 퇴적
판 단		-	저수위시 뿌리활착 무게증가	저수위시 뿌리활착 무게증가
판 단		-	권장	무방

6. 미소유용생물 서식처 조성 및 유지관리

메소코즘 실험과 신규저수지에 대한 적용시험을 실시하고 평가한 결과 1) 이중식재기반 인공식물섬 2) 교반장치이용식물섬 3) 침수형호안수초대(고밀도) 4) 부유형 호안수초대와 추후검토 시설로 5) 부유형 그물수초대가 미소유용생물서식처로서의 유용성이 인정되었다. 또한 인공식물섬 등을 설치 시에는 수체와의 경계면을 크게하여 배열하는 것이 유리한 것으로 나타났다.

가. 이중식재기반 인공식물섬

(1) 기본개념

이중식재기반 인공식물섬은 기존의 인공식물섬 개념을 기반으로 수중에서의 미소유용생물서식처 및 미생물부착공간의 확대를 위하여 식생기반재인 코코넛 섬유기반재를 식물섬하부에 부착한 시설이다. 따라서 기존의 인공식물섬이 갖는 수생태계의 다양한 기능을 확대한 시설로 볼 수 있다.

(2) 적용형태

이중식재기반 인공식물섬은 기존의 인공식물섬과 같이 사용이 자유로워 기본규격의 식물섬을 조합하여 다양한 형태로 연출이 가능하며, 수체와의 경계면을 크게 조성 할 경우 효과를 더욱 강화 할 수 있다. 기본단위 규격으로는 생산자 및 주문자의 요구사항에 따라 1×1, 2×1, 2×2, 2×4 등으로 다양한 크기가 가능하다

(3) 적합성 및 사용적합시설

이중식재기반 인공식물섬은 농업용저수지 및 호수에 직접 적용하여 미소유용생물의 서식처조성이 가능 할 뿐 아니라 수질개선의 기능을 얻을 수 있다. 이밖에 기존의 저류지, 인공습지 등의 비점오염시설의 효과 극대화에 적용 할 수 있다.

(4) 이중식재기반 인공식물섬 설계

(가) 재료 및 시공방법

이중식재기반재의 재료는 기본적으로 기존의 인공식물섬에 사용되는 재료를 사용하게 되며 식물섬의 하부층에 기존의 코코넛 섬유 식생기반재를 식물섬 하부에 부착하게 된다.

① 식생기반재

식생기반재는 식재된 식물이 완전히 활착할 때까지 토양으로서의 기능을 하며, 이외에 부유 고형물(Suspended Solids)의 흡착·여과 기능, 식물체 뿌리와 더불어 미생물접촉여재의 역할 그리고 미생물, 동물플랑크톤, 무척추 동물, 어류 등의 산란 및 서식처 역할을 한다.

식생기반재로는 코코넛 섬유를 가공 처리한 것을 사용하며, 코코넛 섬유는 섬유 자체가 cellulose와 lignin으로 구성되어 난분해성 물질로써 수질오염을 촉진하지 않는다. 식생기반재는 부력재의 상하에 부착하며 기존의 하부층에의 부착물에 의한 무게증가로 침수우려가 있을 시 두께를 줄여 사용할 수 있다.

② 부력재

부력재는 식생기반재와 수생식물을 띄우고 고정시키는 역할을 하며, 재질로는 부력성이 탁월하고 내부식성을 가진 평판형 가교결합 폴리에틸렌폼(Cross linking Polyethylene Foam)을 사용하는 것이 식물섬의 형태 유지 및 다양한 형태의 제작 등이 자유롭다. 또한 유연성을 갖는 평판형 가교결합 폴리에틸렌폼 부체는 파랑 및 유속 등의 지속적인 외부 충격에 대해 파손 및 유실의 우려가 적고, 일광 등에 의한 변형이 적은 특징을 갖고 있다.

③ HDPE망

평판형 가교결합 폴리에틸렌폼(Cross linking Polyethylene Foam)을 부체로 사용하는 인공식물섬은 식생기반재로 코코넛 섬유 재질의 매트를 부체위에 얹고 전체를 HDPE(High Density Polyethylene) 망체로 감싸 일체형으로 제작한다.

④ 식물

인공식물섬에 식재되는 수생식물은 수질정화능력이 탁월한 수종, 구입 및 유지관리가 용이한 수종, 환경조건에 잘 적응하며 월동이 가능한 수종 등 설치목적에 적합하고 전체적인 분위기에 조화되는 수종을 선택한다.

⑤ 계류장치

식물섬을 호소나 하천의 일정부위에 고정시키는 역할을 하며 수위변동, 유속, 유량의 변동에 견딜 수 있어야 한다. 식물섬은 wire 또는 합성수지로 제작된 rope에 의해 콘크리트, 철근 등의 중량체로 만들어진 앵커와 연결되어 수체의 일정 부위에 고정된다.

(나) 이중식재기반 인공식물섬 설치 및 유지관리

이중식재기반 인공식물섬은 농업용저수지 및 호수에 직접 적용하여 미소유용생물의 서식처조성이 가능 할 뿐 아니라 수질개선의 기능을 얻을 수 있다. 이밖에 기존의 저류지, 인공습지 등의 비점오염시설의 효과 극대화에 적용 할 수 있다.

① 설치면적 결정

식물섬 단독시설로 수질개선목적으로 설치하고자 할 경우 최적의 효과는 15% 이상 설치하여야 수질개선이 가능하나 비용문제 등을 고려 할 경우 비경제적일 수 있으며 과도하게 수표면적을 덮을 경우 수중산소공급을 저해할 수 있다. 따라서 수질개선시설로 사용 할 경우 다양한 수질개선 공법과 병행하여 시행하는 것이 유리하며 수표면적의 약 8%~10% 정도를 사용하는 것이 좋다.

② 설치위치 설정

농업용저수지 등에 설치시 농업용저수지의 수리특성 등을 충분히 고려하여 설치하도록 한다. 농업용저수지는 수리시설의 설치목적상 관개기에는 다량의 물을 유출시키므로 수위가 낮아지고 일부 저수지구간의 경우 바닥이 노출되는 경우가 있다. 이러한 지점에 식물섬을 설치할 경우 저수지수위가 낮아짐에 따라 식물섬 하부의 뿌리가 바닥층에 뺏어 향후 수위 상승시 식물섬이 수위에 따라 부유하지 못하는 경우가 발생 할 수 있다. 따라서 식물섬은 설치시 뿌리가 바닥에 닿지 않도록 최소 수위가 1 m 이상 유지될 수 있는 곳에 설치하도록 하며 불가능할 경우에는 바닥에 보호시설을 설치한 후 시공하도록 한다.

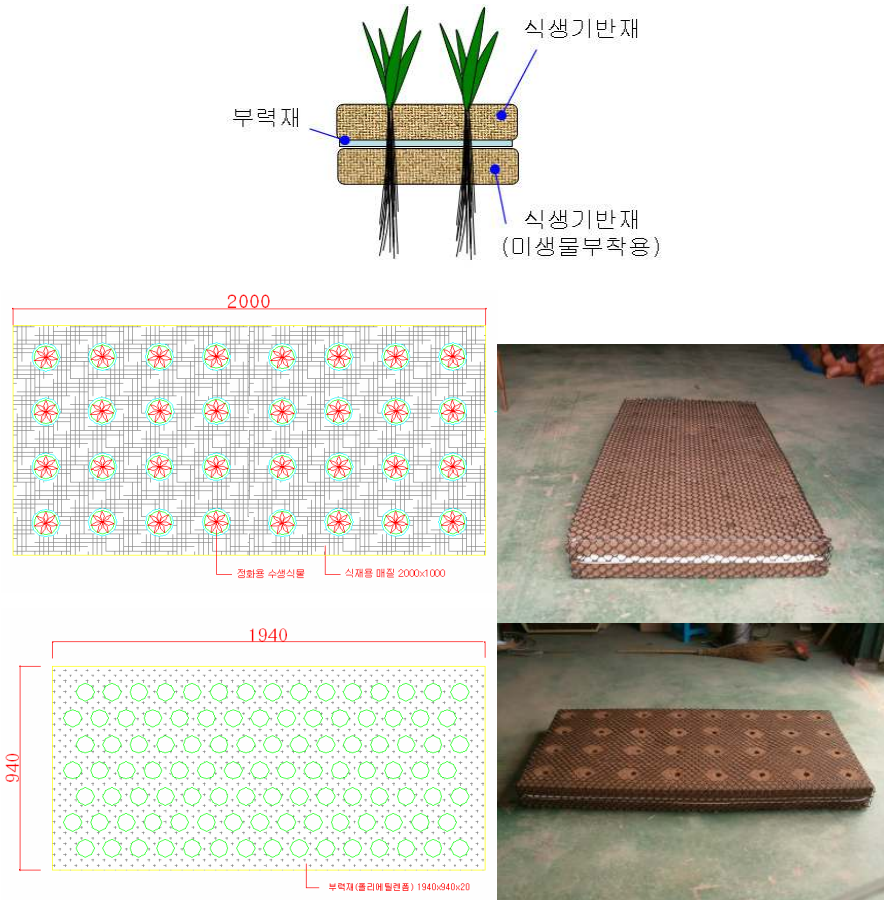
또한 농업용저수지는 대부분 중산간지 이상에 위치하여 강우시 일시에 다량의 물이 유입되어 빠른 물흐름에 의하여 식물섬이 부유할 경우 여수토를 막아 물흐름을 저해 할 수 있으므로 가능한 여수토와는 떨어진 지점의 바닥에 계류장치를 단단히 고정하여 설치하여야 한다.

③ 유지관리계획

이중식재기반식물섬의 유지관리항목 및 점검항목은 [표3.2.52]와 같다.

[표3.2.52] 이중식재기반 인공식물섬의 유지관리 활동 및 계획

점검활동	계획
○시설완공 후 몇차례의 강우사상이 지나간 후 식생기반 및 고정장치의 파손여부	필요할 때 마다
○과도한 쓰레기 등의 누적	"
○식생의 생육상태	년 1회, 5월경
○수서생물 및 조류 등의 생태학적 지표 및 수질모니터링	년 2회 이상
○유지관리 활동	계 획
○식물섬 상부의 쓰레기 청소	년 1회
○식물의 보식	년 1회(필요시)
○수위변동, 폭우, 강풍 등에 의한 위치 변동 유무	필요할 때 마다



[그림 3.2.108] 이중식재기반 인공식물섬 모식도 및 재원

나. 교반장치이용식물섬

(1) 기본개념

교반장치를 이용한 인공식물섬은 물순환을 발생시켜 식물섬에 식재된 식물에 양분의 공급을 원활히 하여 영양염류를 제거하고 물순환류에 따라 저층의 물을 표층으로 순환시켜 수층의 용존산소 농도를 높일 수 있는 시설이다.

(2) 적용형태

본 연구에서는 식생기반이 없이 단순히 식물을 포트형태의 부력재에 넣고 교반장치를 중심으로 방사형으로 배치하여 실험을 실시하였으나 본 시설은 실제 교반장치 스크류가 저층의 물을 순환하기에는 다소 어려운 것으로 보이며 순환류의 영향반경 역시 교반장치 주변에 설치된 식재된 부력재(pot 겸용)로 막혀 멀리가지 못하는 것으로 판단되며 이는 식생의 생육정도가 교

반장치에서 떨어질수록 낮아지는 것으로 확인 할 수 있다.

따라서 본 시설은 적용 가능한 수심 및 물순환 반경을 넓힐 수 있도록 할 필요가 있다. 중앙에 물순환 장치를 배치하고 충분한 부력을 준 이중식재기반 인공식물섬을 역삼각형모양으로 4개배치하여 중앙에 꼭지점을 연결하여주도록 하고 식물섬 간격은 충분히 띄워주어 교반장치에서 발생된 수류를 멀리 퍼질 수 있도록 할 경우 멀리까지 물을 보낼 수 있어 보다 높은 효과가 기대되며 식물섬 하부에도 물순환에 의한 영양염류가 충분히 공급될 수 있을 것이다. 또한 저층수의 표층으로 이동을 위하여 높낮이를 조절할 수 있도록 관을 교반장치의 중앙에 스크류를 넣어 설치 할 경우 약한 교반만으로도 저층수의 상승이 가능하다

본 시설은 형태의 변형은 어려울 것으로 보이나 여러개를 연결하여 사용하는 것은 가능 할 것이다.

(3) 적합성 및 사용적합시설

교반장치를 이용한 식물섬은 농업용저수지 및 호수에 직접 적용하여 미소유용생물의 서식처 조성이 가능할 뿐 아니라 수질개선의 기능을 얻을 수 있다.

(4) 교반장치를 이용한 식물섬 설계

(가) 재료 및 시공방법

개발된 교반장치를 이용한 재료는 기본적으로 기본의 인공식물섬에 사용되는 재료와 별도의 교반장치를 필요로 한다. 교반장치는 물에 부식이 되지 않는 내부식성의 재료를 사용한다.

(나) 교반장치를 이용한 식물섬 설치 및 유지관리

① 설치면적 결정

이중식재기반 인공식물섬의 경우와 같이 식물섬 단독시설로 수질개선목적으로 설치하고자 할 경우 약 15% 이상 설치하여야 수질개선이 가능하나 비용문제 등을 고려할 경우 비경제적일 수 있다. 따라서 수질개선시설로 사용 할 경우 다양한 수질개선공법과 병행하여 시행하는 것이 유리하며 수표면적의 약 8%~10% 정도를 사용하는 것이 좋다.

② 설치위치설정

기본적으로 이중식재기반 인공식물섬의 고려사항을 참조한다.

③ 유지관리계획

기본적으로 이중식재기반 인공식물섬의 고려사항을 참조한다.

다. 침수형 호안수초대

(1) 기본개념

농업용저수지의 경우 홍수기와 갈수기의 수위차로 인하여 수변식생대가 정착 되지 못하는 문제점을 해결하기위하여 인위적으로 갈수기의 최저수심아래에 인공구조물의 침수 수초대를 조성하여 저수지 수위와 관계없이 동물성플랑크톤 등의 서식처 제공을 하고자 하였다. 이러한 인공 수초대는 갈수기에도 호안에 안정적인 인공 수초대를 조성하여 동물성플랑크톤의 서식처 제공 및 어류의 산란처로 조성 이용 될 수 있다.

(2) 적용형태

침수형 호안수초대는 사용이 자유로워 기본규격의 침수형 호안수초대를 결합하여 설치규모의 결정이 용이하다. 수초대의 수초는 미디어나 본 연구에서 특허출원(10-2008-0086902)된 인공 수초의 사용이 가능하다

(3) 적합성 및 사용적합시설

침수형 호안수초대 농업용저수지 및 호수에 직접 적용하여 미소유용생물의 서식처 조성이 가능할 뿐 아니라 수질개선의 기능을 얻을 수 있다.

(4) 침수형 호안수초대 설계

(가) 재료 및 시공방법

침수형 호안수초대는 물에 부식이 잘되지 않고 자체 무게로 바닥에 고정설치가 가능한 재질의 기반틀을 제작하고 HDPE(High Density PolyEthylene) 망체로 감싸 일체형으로 제작한다. 망체에는 자체부력을 갖도록 만들어 특허출원(10-2008-0086902)된 인공수초나 미디어 등을 약 1 m 길이로 사용하며 설치간격은 25 cm 이내로 촘촘히 설치한다.

(나) 침수형 호안수초대 설치 및 유지관리

① 설치면적 결정

침수형 호안수초대는 농업용저수지내 동물플랑크톤 등의 미소유용생물의 서식처를 조성하고자 하는 시설로 직접적인 수질개선 효과를 기대하기는 어렵다. 그러나 미소유용생물서식처로서의 효과를 얻고자 할 경우 8% 이상 설치하도록 한다. 또한 다른 수질개선시설과 혼합하여 사용할 수 있다.

② 설치위치결정

제작된 침수형호안수초대는 농업용저수지의 평균최저수심보다 가능하면 약 1 m 이하의 수심 유지가 가능한 곳에 설치하도록 한다. 설치위치는 홍수시 유입토사의 퇴적이 쉬운 저수지 유입부보다는 중하류의 유입토사에 의한 매몰우려가 적은 곳에 설치하도록 한다.

③ 유지관리계획

침수형호안수초대는 수중에 설치되어 일반적으로 유지관리가 어렵다. 그러므로 수위가 낮아졌을 때 매몰여부 등을 확인하는 것으로 충분하다.

라. 부유형 호안수초대

(1) 기본개념

농업용저수지의 경우 홍수기와 갈수기의 수위차가 크므로 수변식생대가 정착되지 못하고 식생이 없는 상태로 유지되게 되며 빈약한 식생으로 호소생태계 역시 단순화하게 된다. 따라서 갈수기에도 수변 수초대와 같은 인공 수초대를 수심의 변화에 문제가 없는 형태로 설치하여 상시 수초대의 효과를 얻고자 하였다. 또한 호소바닥에 설치하는 형태의 경우 유입퇴적물 등에 의하여 매몰될 우려가 있어 부유형 인공수초대를 조성하여 해결하고자 하였다

(2) 적용형태

부유형 호안수초대는 사용이 자유로워 기본규격의 부유형 호안수초대를 결합하여 설치규모의 결정이 용이하다. 수초대의 수초는 본 연구에서 특허출원(10-2008-0086902)된 인공수초의 사용이 가능하다

(3) 적합성 및 사용적합시설

부유형 호안수초대 농업용저수지 및 호수에 직접 적용하여 미소유용생물의 서식처 조성이 가능할 뿐 아니라 수질개선의 기능을 얻을 수 있다.

(4) 부유형 호안수초대 설계

(가) 재료 및 시공방법

부유형 호안수초대는 물에 부식이 잘되지 않고 자체 무게로 물에 가라앉을 수 있는 재질의 기반틀을 제작하고 HDPE(High Density PolyEthylene) 망체로 감싸 일체형으로 제작한다. 수심 1 m 정도를 지체부력으로 유지할 수 있는 형태도 가능하다. 망체에는 자체부력을 갖도록 만들어 특허출원(10-2008-0086902)된 인공수초를 약 1 m 길이로 사용하며 설치간격은 25 cm 이내로 가능한 촘촘히 설치한다. 기반틀에는 부력장치를 달아 수심 1 m 이내에서 유지될 수 있도록 하며 인공식물섬에서 사용되는 계류장치를 이용할 수 있다.

(나) 부유형 호안수초대 설치 및 유지관리

① 설치면적 결정

부유형 호안수초대는 농업용저수지내 동물플랑크톤 등의 미소유용생물의 서식처를 조성하고자 하는 시설로 직접적인 수질개선 효과를 기대하기는 어려우나 미소유용생물의 서식처로 이용되어 식물플랑크톤의 제어에 이용된다. 따라서 미소유용생물서식처로서의 효과를 얻고자 할 경우 8% 이상 설치하도록 한다. 또한 다른 수질개선시설과 혼합하여 사용할 수 있다.

② 설치위치결정

제작된 부유형호안수초대는 식생이 없어 바닥에 놓여 지더라도 바닥에 부착우려가 없으므로 설치 위치에 제한이 없다. 그러나 상류 유입부의 경우 바닥이 드러난 후 갑작스런 홍수 등으로 토사가 유입되면 부분적으로 매몰 우려가 있으므로 가능한 유입부는 피하도록 한다. 또한 농업용저수지는 대부분 중산간지 이상에 위치하여 강우시 일시에 다량의 물이 유입되어 빠른 물흐름에 의하여 식물섬이 부유할 경우 여수도를 막아 물흐름을 저해할 수 있으므로 가능한 여수도와는 떨어진 지점의 바닥에 계류장치를 단단히 고정하여 설치하여야 한다.

③ 유지관리계획

부유형호안수초대는 수중에 설치되어 일반적으로 유지 관리가 어려우나 이중식재기반 인공식물섬의 경우에서 식생관리를 제외한 일반적인 사항에 대하여 점검을 실시한다.

마. 부유형 그물수초대

(1) 기본개념

부유형 그물수초대의 형태는 비교적 망목이 적은 그물을 3중으로 병렬배치하여 동물플랑크톤의 서식처로 이용토록하며, 작은 망목으로 인하여 어류가 서식할 수 없도록 하여 동물플랑크톤의 개체량 증가를 유도하도록 하였다. 또한 인공식물섬 등은 비용이 다소 많이 들어 비교적 저렴한 비용으로 미소유용생물 서식처를 조성하는 기법을 개발하고자 하였다.

(2) 적용형태

부유형 그물수초대는 사용이 자유로워 망목 5 cm 이하의 그물을 3중으로 배열하고 길이는 약 100 m 정도로 물흐름의 방향으로 설치하여 부유쓰레기 등이 걸리지 않아야 하며, 보통 어류의 이동이 물흐름 방향임을 감안하여 어류가 가능한 그물에 포획되지 않도록 한다. 그물상부에는 양쪽 끝에 인공식물섬을 두어 경관과 부력문제를 해결할 수 있으며, 중간에 추가로 인공식물섬의 설치가 가능하여 서식처의 효과를 높일 수 있다.

(3) 적합성 및 사용적합시설

추가검토가 필요하지만 부유형 그물수초대 농업용저수지 및 호수에 직접 적용하여 미소유용생물의 서식처조성이 가능할 뿐 아니라 간접적인 수질개선의 기능을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

(4) 부유형 그물수초대 설계

(가) 재료 및 시공방법

길이 100 m × 폭 0.5 m의 망목 5 cm × 5 cm의 그물 3 set를 0.5 m 간격으로 병렬연결하고 중간에 부력재를 달아 부유토록 하고, 양쪽 끝에 인공식물섬을 두어 경관과 부력문제를 해결하며, 중간에 추가로 인공식물섬의 설치가 가능하여 서식처의 효과를 높일 수 있다. 호소 내 고정은 인공식물섬에서 사용되는 계류장치를 이용 할 수 있다.

(나) 부유형 호안수초대 설치 및 유지관리

① 설치규모 결정

부유형 그물수초대는 농업용저수지내 동물플랑크톤 등의 미소유용생물의 서식처를 조성하고자 하는 시설로 시설의 직접적인 수질개선 효과를 기대하기는 어려우나 미소유용생물의 서식처로 이용되어 식물플랑크톤의 제어에 이용된다. 부유형 그물수초대의 경우 설치규모의 산정이 어려우나 저수지 수변의 적당한 장소에 설치될 수 있으며 다른 수질개선시설과 혼합하여 사용할 수 있다.

② 설치위치결정

제작된 부유형 그물수초대는 식생이 없어 바닥에 놓여 지더라도 바닥에 부착우려가 없으므로 설치 위치에 제한이 없다. 그러나 상류 유입부의 경우 바닥이 드러난 후 갑작스런 홍수 등으로 토사가 유입되면 부분적으로 매몰 우려가 있으므로 가능한 유입부는 피하도록 한다. 인공식물섬과 결합하여 사용시에는 갈수기에 인공식물섬의 바치피하여 강우시 일시에 다량의 물이 유입되어 빠른 물흐름에 의하여 식물섬이 부유할 경우 여수토를 막아 물흐름을 저해할 수 있으므로 가능한 여수토와는 떨어진 지점에 바닥에 계류장치를 단단히 고정하여 설치하여야 한다.

③ 유지관리계획

부유형 그물수초대는 수중에 설치되어 일반적으로 유지관리가 어려우나 이중식재기반 인공식물섬의 경우에서 식생관리를 제외한 일반적인 사항에 대하여 점검을 실시한다.

제 3 절

- 생물조절 수질개선 기법 개발을 위한 저수지
- 생태계 에너지 흐름 및 물질 순환 해석 연구
-
-
-
-
-

제 3 절 생물조절 수질개선 기법 개발을 위한 저수지 생태계 에너지 흐름 및 물질 순환 해석 연구

우리나라의 농업용 저수지는 수적으로 매우 많이 있지만, 상당수가 부영양화 되어있다. 실제 2004년 농업용수 수질측정망 조사결과에 따르면(농림부, 2004), 전체 조사대상 저수지(492개소)의 16.3%가 COD 기준 농업용수 수질기준인 IV등급을 초과하고 있으며, 중 부영양화 상태의 저수지를 포함하면 전체의 40.4%가 부영양화단계에 접어들고 있다. 부영양화는 조류의 대발생을 유발하며, 특히 여름철 호소에서 높은 수온과 광량으로 인해 조류의 최고성장을 보이는 녹조현상을 동반하고 있다(Martin and Gonzalez, 1978; Carmichael, 1994). 녹조현상을 일으키는 주요 종은 지역마다 다르지만 주로 남조류(cyanobacteria)와 규조류(diatom)에 의해 일어난다. 이 중 남조류는 수돗물의 냄새를 유발시키고, 정수과정의 침전을 방해하며, 간을 손상시키고, 구토, 복통을 일으키는 독소를 분비하기도 한다(이 등, 2003). 이러한 저수지의 부영양화는 물의 효율적 이용과 생태계의 건전한 기능수행을 저해하는 조류의 비정상적인 대발생을 초래하며, 국내 대부분의 상수원으로 이용하는 호소 및 저수지에서 그 부작용(예를 들면, 저층에서의 산소고갈, 저서생물의 고사, 독성물질 용출로 인한 생물들의 피해 등)이 나타나고 있다.

따라서 농업용 저수지의 부영양화 및 녹조 발생 방지를 위하여 외부오염원의 저감 노력이 필요하며(김, 2004; Schindler, 1974), 나아가 저수지 수생태계의 기능 및 특성을 파악하기 위한 수층 내 유기물의 총량 및 에너지 순환과정에 대한 정확한 해석이 요구된다. 담수 생태계의 부영양화 현상은 다양한 요소에 의해 결정되며(Wetzel, 1983), 특히 영양염류의 유입으로 인한 남조류의 과다 번성은 생태학적인 관점 뿐 만 아니라 사회적으로도 많은 문제점을 야기하고 있다. 수화(algal bloom) 또는 녹조현상으로 표현되는 조류의 대발생은 수중 유기물(클로로필, COD) 증가를 유발할 뿐만 아니라 사멸시 저수지 바닥층(sediment)에 퇴적되어 분해됨으로써 심층산소의 고갈을 유발하여 오염의 악순환을 야기한다. 국내 4대강 유역의 주요상수원인 팔당호(한강), 대청호(금강), 물금(낙동강), 주암호(영산강)에서는 이미 조류의 번성으로 인해 여러 가지 경제적인 문제들이 발생하고 있다. 이들 녹조 현상을 유발하는 주요 조류는 계절적으로 봄에는 규조류(*Stephanodiscus*, *Synedra*, *Asterionella*, *Melosira*), 여름과 가을에는 남조류(*Microcystis*, *Oscillatoria*)로 나타나고 있다.

외국의 경우 수계의 부영양화 원인과 조류발생에 대해서 많은 연구가 수행되었고 실제 부영양화 개선과 조류제어에 관해 진행된 사업들의 사례가 많다(Cooke *et al.*, 1993). Carpenter(1988)는 포식자 의존적인 조절기작(predator dependent control) 즉, top-down control도 경우에 따라 중요한 조류생물량 조절인자로 작용할 수 있음을 보고하였고, Radke(2002)는 어류(백련어)가 지각류의 번식속도를 증가시켜 부가적인 식물플랑크톤 억제에 효과를 보인다고 보고하였으며, Peterson(2002)은 물벼룩(*Daphnia*)에 의해 사상성 남조류의 억제효과를 가져온다고 하였다.

최근에 생물적 요소를 이용한 남조류의 점감법이 제시되어 이러한 문제점에 대한 대안이 되고 있다. 조류저감을 위한 생물조절(biomanipulation)은 어류를 이용한 섭식효과를 통하여 진행

되기 시작하였다. 어류는 수중 먹이망에 영향을 주는 중요한 요소의 하나이다. 외국, 특히 유럽의 경우 1980년대 이후로 어류를 이용한 수질 개선 및 녹조제어에 많은 연구들이 시도되었고 enclosure 및 전 호소를 대상으로 하는 적용에서 상당한 수질개선 효과도 발표되어 왔다. 생물을 이용한 방법으로는 어류조절을 통한 조류제어(독일, 캐나다, 미국, 네덜란드)와 수생식물의 제거를 통한 유기물 오염원 제어(미국, 스웨덴, 네덜란드)는 시행된 사례가 많으며, 우리나라에서는 식물(예, 미나리, 개구리밥, 부레옥잠, 줄, 부들, 갈대 등)을 이용하여 수질을 개선하는 연구가 상당히 많이 진척되었으며 이를 적용한 중소규모의 사례도 여러 곳이 있다(예, 팔당호). 또한 조류펜스의 이용(예, 서낙동강), 황토살포(예, 팔당호, 대청호) 등이 있으나 대부분 복합적인 시스템 기술의 적용보다는 개별기술이 이용적 수준에 머무르고 있다.

그러므로 저수지의 수질을 보다 효과적으로 관리하기 위해서는 수 생태계의 기능 및 특성을 파악하여야 한다. 그러기 위해서는 수층 내 유기물의 총량 및 에너지 순환과정에 대해 조사하는 것이 필수적이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 저수지 내 서식하는 생물의 체내 탄소($^{13}\text{C}:$ ^{12}C) 및 질소($^{15}\text{N}:$ ^{14}N)의 안정동위원소비를 이용하여 호수생태계 내의 각 영양단계별 에너지 전달 경로를 규명하고자 한다. 뿐만 아니라, ^{13}C 추적자를 첨가하는 현장 배양실험을 통해 식물 플랑크톤의 기초생산속도를 결정하고 100 μm 보다 큰 동물플랑크톤을 분류하여 종에 따른 식물 플랑크톤 섭식 속도를 비교해 보고자 한다. 더 나아가서 유용생물 군집에 의한 수질개선 효율을 추정하고자 한다. 현장에 메소코즘을 설치하여 ^{13}C , ^{15}N 추적자를 첨가한 후 일정기간 동안 유용생물 군집(인공식물섬, 패류, 어류, 줄새우)들에 의한 남조류(*Microcystis*) 제어 능력을 유기탄소, 총질소 안정동위원소비 및 지방산 비를 이용하여 평가하고자 한다. 이와 같은 방법에 의해 수생태계 내의 에너지 흐름 경로 및 물질순환 속도를 파악한다면 유용생물에 의한 남조류 제어기술에 대한 기초 정보를 제공할 수 있으며, 장기적인 수질 개선의 효과를 예측하는데 도움을 줄 것이다.

1. 신구저수지에서의 영양단계별 에너지 전달경로 조사

가. 현장조사 및 시료채취

신구저수지에서 한 차례의 예비조사(2006년 6월 21일)와 두 차례(2006년 7월 4일, 8월 7일)에 걸친 현장조사 및 현장 배양 실험, 한 차례(2006년 9월 14일)의 현장조사가 있었다. 이에 대한 내용은 [표 3.3.1]에 나타내었다.

현장 배양실험은 녹조 발생시기인 우기 전후(7월 4일, 8월 7일)에 실시하였으며, 9월 14일에도 배양실험을 실시하려 했으나 농업용으로 사용하기 위해 저수지 내 물이 많이 빠져있고, 메소코즘의 상태가 불안정하여 실시하지 못하였다.

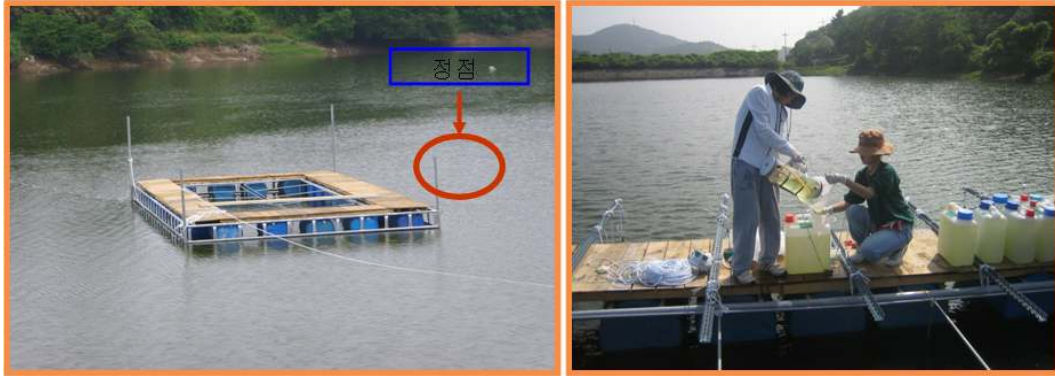
[표 3.3.1] 신구저수지 현장 조사 일정

날짜	목적	실험 내용	채취한 시료
2006년 6월 21일	예비 조사	- 배양실험을 위한 정점 확인 및 주변 지형 및 유입원수 파악 - 기초 환경조사	- SPM/POM, POC/PN, DOC 농도 측정을 위한 시료 - Chl-a 농도, 식물플랑크톤 종 동정용 시료
2006년 7월 4일	1차 조사	- 기초 환경조사 - 현장배양실험 - 먹이연쇄구조 파악을 위한 생물 채집	- Chl-a 농도 측정용 시료 - 일차생산 및 이차생산 측정을 위한 시료 - POC/PN, SPM/POM 농도 측정을 위한 시료 - DOC 농도 측정을 위한 시료 - 체내 안정동위원소 측정을 위한 생물
2006년 8월 7일	2차 조사	- 기초 환경조사 - 현장배양실험 - 먹이연쇄구조 파악을 위한 생물 채집	- Chl-a 농도 측정용 시료 - 질소와 인의 농도 측정을 위한 시료 - 일차생산 및 이차생산 측정을 위한 시료 - POC/PN, SPM/POM 농도 측정을 위한 시료 - DOC 농도 측정을 위한 시료 - 체내 안정동위원소 측정을 위한 생물
2006년 9월 14일	3차 조사	- 기초 환경조사	- SPM/POM, POC/PN, DOC 농도 측정을 위한 시료 - Chl-a 농도 측정용 시료 - 질소와 인의 농도 측정을 위한 시료
2006년 11월 20일	시료 확보	- 줄새우 채집	- 줄새우 시료 - 어류 시료

나. 실험방법

(1) 수질환경 측정

[그림 3.3.1]은 신구저수지 내 시료를 채취한 정점과 시료를 채취하고 있는 모습이다. 우기 전 후 인 7월, 8월에는 수질환경 측정 및 배양실험이 실시되었다. 시료는 Van Dorm 채수기를 이용하여 채수하였으며, 기초적인 환경 데이터(수온, 탁도, pH, 전기전도도)는 수질측정기(Horiba U-10)를 이용하여 수심에 따라서(50 cm 간격) 오전, 오후로 나누어 2회 측정하였다.



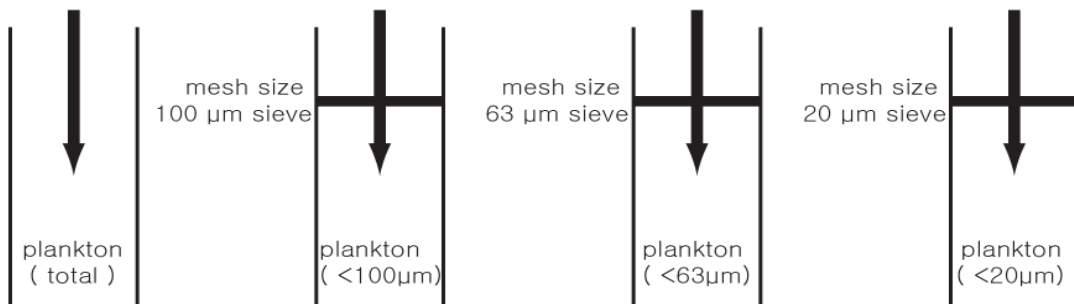
[그림 3.3.1] 신구저수지 내 메소코즘 및 시료 채취

(2) 크기에 따른 입자성 부유물질의 농도

신구 저수지 내 크기에 따른 입자성 부유물질과 유기물질의 농도, Chl-*a*의 농도, 입자성 유기탄소의 농도 차이를 알아보하고자 메시(망목 크기: 100, 63, 20 μm)를 이용하여 크기를 나누어 분석을 실시하였다.

(가) 일차생산력 측정을 위한 플랑크톤 크기분류

식물플랑크톤의 일차생산력 역시 플랑크톤의 크기를 분류하여 측정하였으며, 사용한 메시의 망목 크기는 위에서 언급한 바와 같다. 시료는 현장 배양이 끝난 후에 25 mm GF/F 여과지에 여과시킨 후 보관하였다. 일차생산력 측정을 위한 플랑크톤 크기 분류에 대한 모식도는 [그림 3.3.2]와 같다.



[그림 3.3.2] 플랑크톤 크기 분류에 관한 모식도

(나) 동물플랑크톤

먹이연쇄 구조를 파악하기 위한 동물플랑크톤 시료는 저수지 내 담수를 망목 크기가 100

µm인 메시에 통과시켜 메시 위에 걸러진 동물플랑크톤을 역 세척 하여 100 mL 유리병에 채집 하였다. 그 후 현미경하에서 종에 따라 분류한 후 25 mm GF/F 여과지에 여과한 후 보관하였다. 식물플랑크톤 섭식 속도를 측정하기 위한 동물플랑크톤 샘플은 현장 배양 실험 후 위와 같은 방법에 의해 채집한 후 보관하였다.

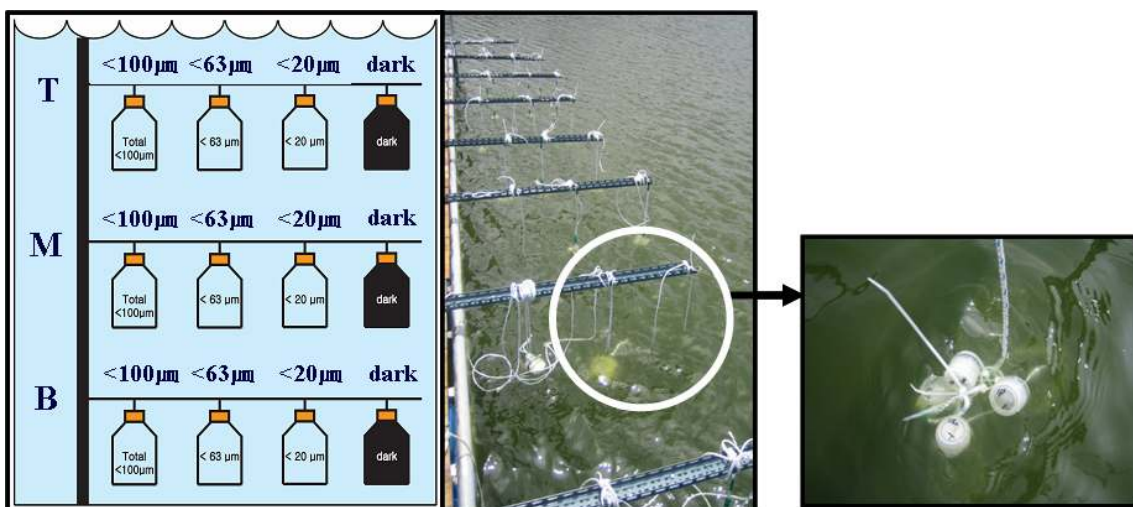
(3) 현장 배양실험

(가) 식물플랑크톤의 일차생산력 측정

크기별로 분류한 식물플랑크톤의 일차생산력을 측정하고자 현장 배양실험을 실시하였으며, Polycarbonate 재질의 배양용기를 사용하였다. 현장의 광량을 측정하여 배양 깊이를 결정한 후 [표 3.3.2], ¹³C 추적자 (NaH¹³CO₃, 98%)를 첨가시켜 ¹³C의 존재비를 인위적으로 높여준 후 배양을 실시하였으며, 배양실험의 모식도는 [그림 3.3.3]과 같다.

[표 3.3.2] 현장배양실험 유광층 깊이 및 배양 수심

일 시	유광층 깊이(m)	배양수심(m)	표층 상대 광량(%)
2006년 7월 4일	1.2	0	100
		0.73	10
2006년 8월 7일	3.8	0	100
		1	50
		2.3	10



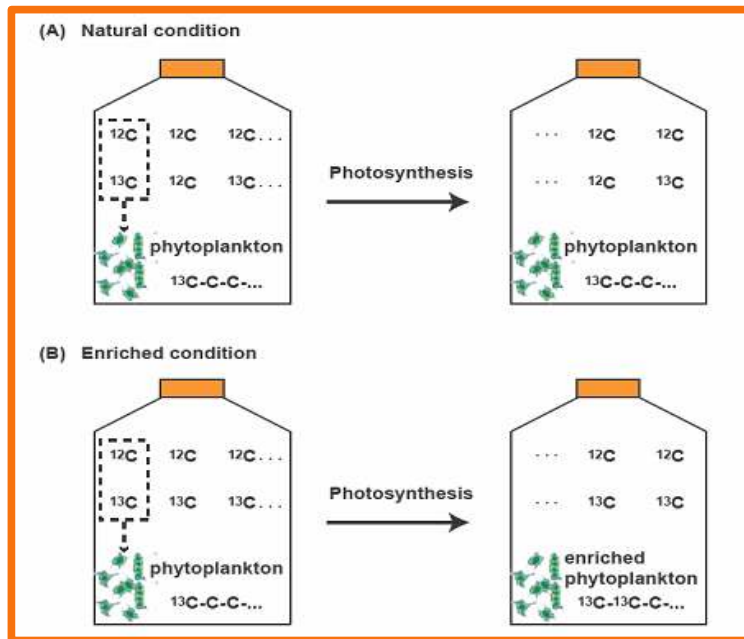
[그림 3.3.3] 현장 배양실험 모식도 및 사진

^{13}C 추적자($\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$, 98%)를 첨가시킨 배양용기 내에는 자연상태에 비해 ^{13}C -DIC의 함량이 높으며, 이렇게 증가된 ^{13}C -DIC는 광합성 속도를 결정짓는 추적자로써 사용된다. ^{13}C 추적자를 활용한 배양실험의 원리는 [그림 3.3.4]와 같다.

배양이 끝난 시료는 실험실에서 25 mm GF/F 여과지로 여과한 후 염산증기를 사용하여 무기탄소를 제거한 후 알래스카대학 물환경연구소(WERC: Water Environmental Research Center)에서 원소-질량분석기(Elemental Analyzer-Mass Spectrometer)를 사용하여 분석하였다. 그 후 Hama *et al.*(1983)의 방법에 따라 일차 생산속도를 계산하였다.

$$\text{Production rate (pc(t))} = \frac{\Delta \text{POC}(t)}{t} = \frac{a_i \cdot \text{C} - a_{ns} \cdot \text{C}}{a_i \cdot \text{C} - a_{ns} \cdot \text{C}} \times \frac{\text{POC}(t)}{t}$$

- a_{is} : ^{13}C atomic percent of particulate matter at the end of the incubation
- a_{ns} : ^{13}C atomic percent in natural (non-incubation) sample
- a_{ic} : ^{13}C atomic percent in dissolved inorganic carbon in the incubation bottle
- t : Incubation time
- $\Delta\text{POC}(t)$: Increase in POC(Particle Organic Carbon) concentration during the incubation
- $\text{POC}(t)$: Concentration of POC(Particle Organic Carbon) at the end of the incubation

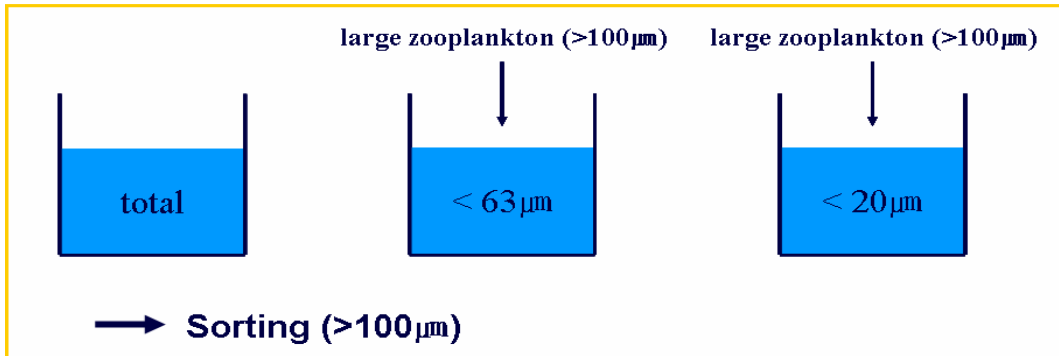


[그림 3.3.4] ^{13}C 추적자를 활용한 광합성속도 결정을 위한 배양실험의 원리

(나) 동물플랑크톤에 의한 식물플랑크톤 섭식속도 측정

7월에는 동물플랑크톤의 섭식 능력에 있어 식물플랑크톤의 크기분포가 주는 영향을 알아보 고자 배양실험을 실시하였으며, 모식도는 [그림 3.3.5]와 같다. 배양실험은 일차생산력 측정과 동

일하게 ^{13}C 추적자를 첨가시킨 후 실시하였다.



[그림 3.3.5] 동물플랑크톤에 의한 식물플랑크톤 섭식속도 측정을 위한 배양실험 모식도

8월에는 플랑크톤의 크기를 구분하지 않고 총 시료를 이용하여 현장배양 실험을 실시하였다. 배양 실험이 끝난 후 동물플랑크톤 샘플은 100 μm 이상의 크기를 모아서 현미경 하에서 종에 따라 분류하였다. 그 후 증류수로 여러 번 행군 후 25 mm GF/F 여과지에 여과한 후 보관하였으며, 일차생산력 측정을 위한 샘플과 동일하게 전처리를 실시하였다. 그 후 Hama *et al.* (1983) 등의 방법에 따라 섭식 속도를 측정하였다.

$$\text{Grazing rate} = \frac{a_{pp} - a_{ns}}{a_{ic} - a_{ns}} X POC(t)_{pp}$$

a_{pp} : ^{13}C atomic percent of phytoplankton carbon in the incubated sample

a_{ns} : ^{13}C atomic percent in natural(non-incubation) sample

a_{ic} : ^{13}C atomic percent in dissolved inorganic carbon in the incubation bottle

t : Incubation time

$POC(t)_{pp}$: Particulate organic carbon of phytoplankton at the end of incubation

(4) 입자성 부유물질 / 입자성 유기물질(SPM/POM)

SPM과 POM은 각 수심별로 채수한 후 각 크기별로 미리 무게를 측정한 47 mm GF/F 여과지에 여과한 후 70°C의 oven에서 건조시켜 데시케이터에 넣어서 방냉한 후 전자저울로 무게를 측정한다. 그 후 아래 식에 따라 계산한다.

$$\text{SPM}(\text{mg L}^{-1}) = (b - a) / V$$

a : 여과하기 전 GF/F filter paper의 무게(mg)

b : 여과 한 후 GF/F filter paper의 무게(mg)

v : 여과 한 물의 양(L)

POM은 SPM을 측정한 여과지를 전기로(Furnace)를 사용하여 450°C에서 1시간 동안 태워 유기물을 제거한 후 전자저울로 무게를 측정한다.

$$PCM(\text{mg L}^{-1}) = \text{SPM}(\text{mg L}^{-1}) - \text{태운 후의 여과지의 무게}(\text{mg})$$

(5) Chlorophyll-a(Chl-a)

Chl-a의 농도를 측정하기 위한 시료는 각 수심별로 채수한 후 크기를 나누어 47 mm GF/F 여과지에 여과한 후 90% 아세톤으로 추출한 뒤 UV-Spectrophotometer(Carry 50)를 사용하여 분석하였다.

(6) 저수지내 대상생물 체내의 탄소와 질소의 안정동위원소비 측정

대상생물(어류, 새우류 등)을 동결 건조기를 사용하여 완전 건조시킨 후 막자사발을 이용하여 분말 상태로 갈아주었다. 그 후 탄소 안정동위원소비 측정을 위한 시료는 1 N 염산을 이용하여 무기탄소를 제거한 뒤 증류수를 이용하여 염산을 제거하고, 동결 건조기에서 재건조시켰다. 총 질소 안정동위원소비 측정을 위한 시료는 측정 자료에 영향을 미치지 않기 때문에 염산 처리를 해주지 않는다. 시료는 틴(Tin)캡에 넣어 미국알래스카주립대학 물환경연구소 WERC (Water Environmental Research Center)에 있는 원소-질량분석기(Elemental Analyzer-Mass Spectrometer)를 이용하여 분석하였다.

$$\delta^{13}\text{C}, \delta^{15}\text{N} = \{R(\text{sample})/R(\text{standard}) - 1\} \times 1000(\%)$$

$$R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}, {}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$$

${}^{13}\text{C}$: ${}^{12}\text{C}$ 는 PDB(PeeDee Belemnite), ${}^{15}\text{N}$: ${}^{14}\text{N}$ 는 N_2 (Air)를 표준물질로 사용하였다.

(7) 입자성 물질의 지방산 생성속도 측정

입자성물질의 지방산 생성속도를 측정하기 위하여 표층수 9 L를 채수하여 100 μm sieve로 거른 후 시료에 $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ (98%)을 첨가하여 ${}^{13}\text{C}$ 의 존재 비를 약 16%까지 올려준 후 6시간 동안 배양하였다. 그 후 미리 태운(450°C, 4시간) GF/F 여과지로 여과한 후 동결 건조하여 내부표준물질(C^{19} : 0 사용) 첨가 후 dichloromethane:methanol(2:1 v/v) 용액으로 추출하고, dichloromethane 증을 취해 sodium-methanol 용액으로 비누화 반응을 시켜준 후 BF_3 -methanol 용액을 첨가시켜 80°C에서 30분간 반응시켜 fatty acid를 fatty acid methyl ester형태로 전환시켰다. 지방산 농도 분석을 위한 시료는 capillary column(DB-5, 30 m \times 0.25 mm i.d., 0.25 μm film thickness, Agilent, USA)을 이용하여 분리시킨 후, 불꽃 이온화 검출기가 장착된 gas chromatography(GC-2010, Shimadzu, Japan)를 이용하여 농도분석을 하였다. 시료 도입부와 검출부의 온도는 300°C로 설정하였으며, oven의 승온 조건은 40°C에서 1분간 유지시킨 후, 200°C까지 1분당 10°C씩, 250°C까지는 1분당 2°C씩, 300°C까지 1분당 10°C 상승시킨 후 10분간 유지시켰다. Carrier gas는 헬륨을 사용하였으며, 피크 동정은 GC/MS(GCMSQP2010 plus,

Shimadzu, Japan)를 이용하였다.

지방산의 생성속도 측정을 위한 시료 분석은 GC/MS를 이용하였으며, isobutane을 사용하여 chemical ionization시켰다. Ion source의 온도는 200°C로 설정하였으며 모든 분석조건은 위에서 언급한 GC 분석조건과 동일하다. 각 지방산의 ^{13}C 원자 백분율은 GC/MS를 통해 얻어진 결과를 Kouchi(1982)식을 이용하여 계산하였으며, 지방산의 생성속도는 Hama *et al.*(1987)의 식을 통해 계산하였다.

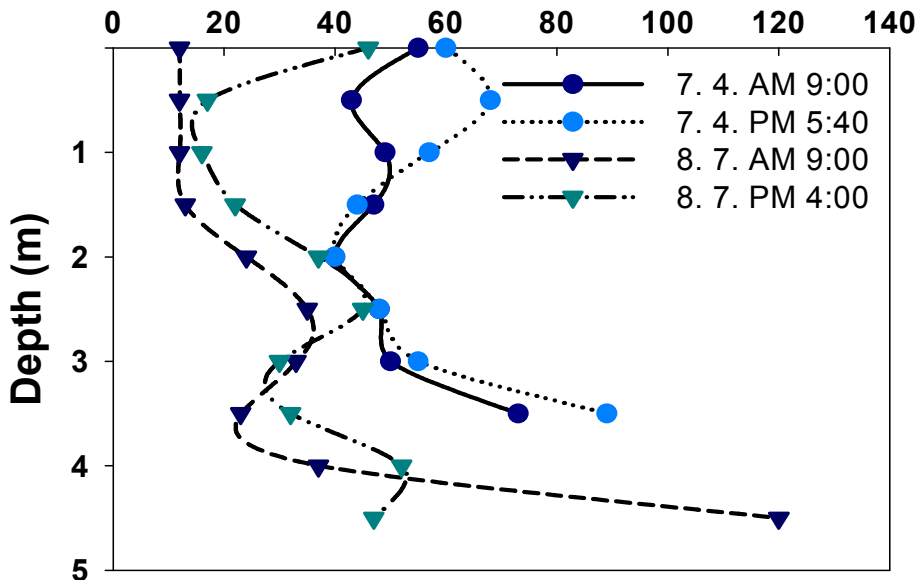
다. 결과 및 결론

(1) 저수지 내 기초 환경조사

수질 측정은 50 cm 간격으로 측정하였으며, 오전과 오후 2번에 걸쳐 측정하였다. 7월과 8월 조사시 수질 자료는 [그림 3.3.6]과 [그림 3.3.7]에서 나타내고 있다.

(가) 광도

수층에 빛이 투과하는 정도를 측정하기 위하여 광도계(LI-1000)를 사용하여 표층광도에 대한 상대광도가 100%(표층), 50%, 10%, 1%인 깊이를 측정하였다. 7월에는 광량 1% 지점이 전체수심 3.8 m보다 훨씬 얇은 1.2 m에 불과하였으나 8월에는 전체수심 5 m에 가까운 3.8 m로 조사되었다[그림 3.3.6]. 이는 7월에는 표층 탁도(Turbidity)가 68 NTU의 값을, 8월에는 표층 탁도 12 NTU의 값을 보이기 때문인 것으로 사료 된다[그림 3.3.6].

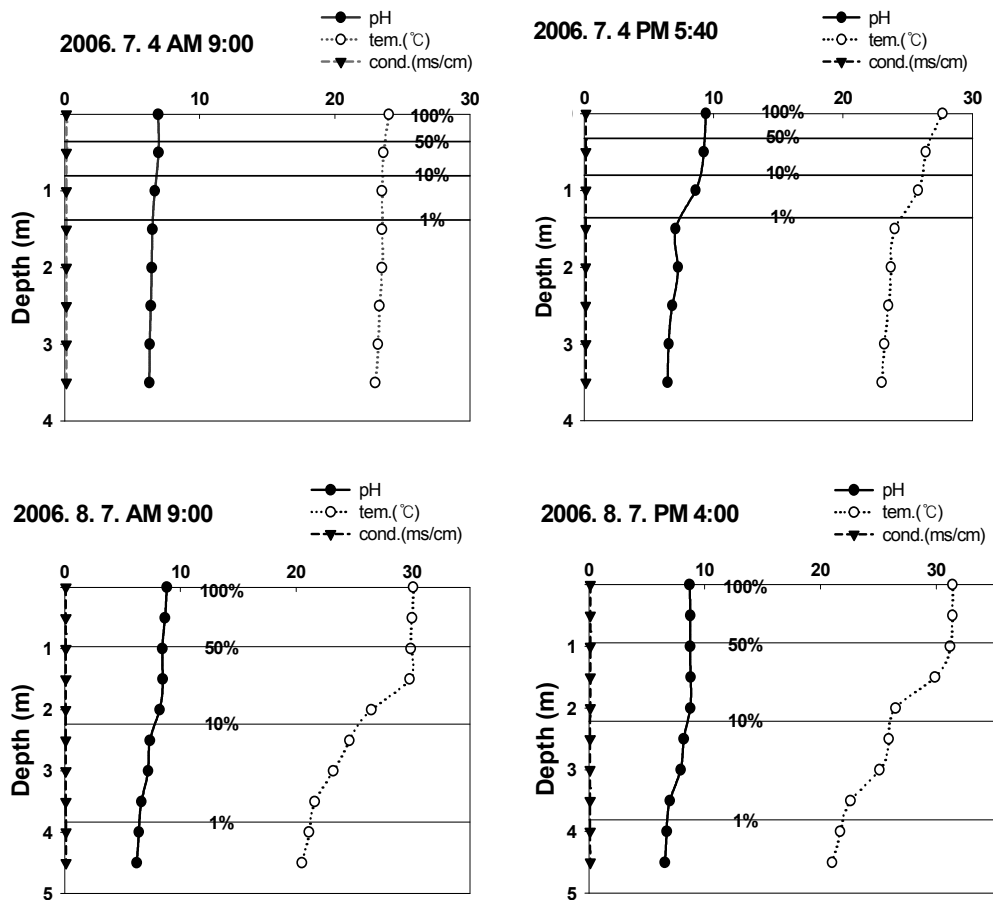


[그림 3.3.6] 신구저수지내 7월, 8월 조사시 탁도(Turbidity) 자료

(나) 전기전도도(Conductivity), pH, 수온(Temperature)

pH, 수온은 오전과 오후에 측정하였을 때 표층은 물론 수심에 따라서 수치가 변하고 있다. 수온은 시간에 따라 광량의 변화로 인해 수심에 따라서도 변동을 보이는 것으로 사료된다[그림 3.3.6].

전기전도도는 시간과 수심에 따라서 거의 변동이 없었다. pH는 7월 조사 중 오전에는 표층에서 6.92, 수심 3.5 m에서 6.27로 약간 감소하고 있으나 오후에는 9.41에서 6.45로 크게 감소하고 있다. 수온은 오전에 표층에서 24℃, 수심 3.5 m 지점에서 23℃로 약간 감소하고 있으나 오후에는 27.7℃에서 23℃로 크게 감소하고 있다. 이는 오전보다 오후에 광량 투과정도가 크기 때문에 표층에서의 수온이 상승하여 저층과 수온 차이에 의한 성층이 형성되기 때문이다. 8월에는 7월보다 표층에서 오전에는 수온이 30.1℃로 훨씬 높기 때문에 오후의 수치와 큰 차이를 보이고 있다. pH는 8월 조사시 오전에 표층에서 8.82, 수심 4 m에서 6.41, 오후에는 8.7에서 6.72로 크게 감소하고 있다. 수온은 오전에 표층에서 30.1℃, 수심 4 m 지점에서 21.1℃, 오후에는 31.4℃에서 21.7℃로 크게 감소하고 있다.



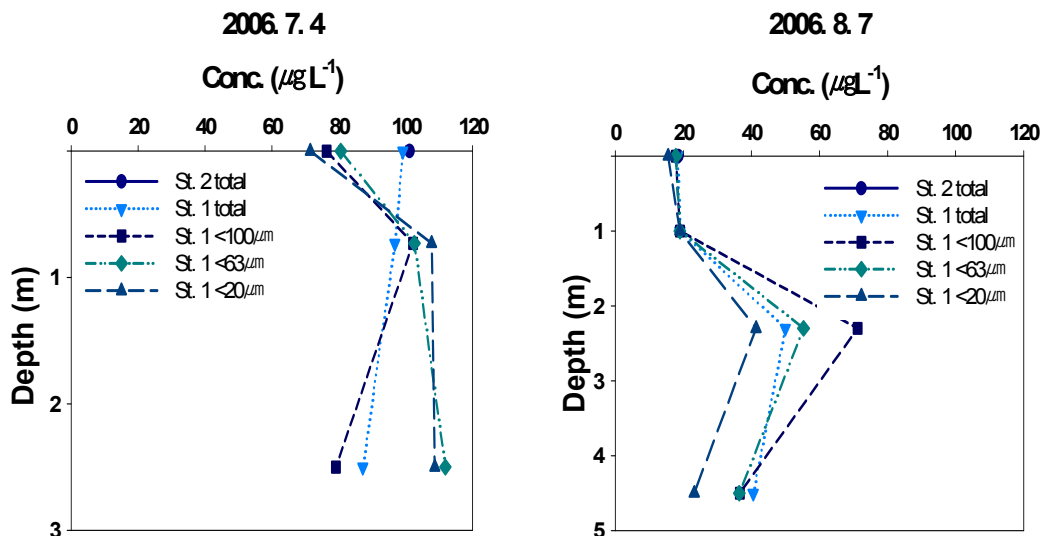
[그림 3.3.7] 신구 저수지 내 7월, 8월 조사에 따른 수질자료(수온, pH, 전기전도도)

(다) 탁도(Turbidity)

탁도는 7월 조사 중 오전에는 표층에서 55 NTU, 수심 3.5 m에서 73 NTU, 오후에는 60 NTU에서 89 NTU로 증가하고 있다[그림 3.3.6]. 그러나 8월 조사 중 오전에는 표층에서 12 NTU, 수심 3.5 m에서 37 NTU, 오후에는 46 NTU에서 52 NTU로 증가하고 있다. 오전에 표층에서는 7월(55 NTU)이 8월(12 NTU)보다 높지만 저층에서는 7월(73 NTU)에 비해 8월(120 NTU)에 더 높다. 8월에 탁도가 표층보다 저층에서 크게 증가하고 있는 것으로 보아 호우로 인해 외부로부터 유입된 유입물질이 저수지의 저층에 존재하는 것으로 여겨진다.

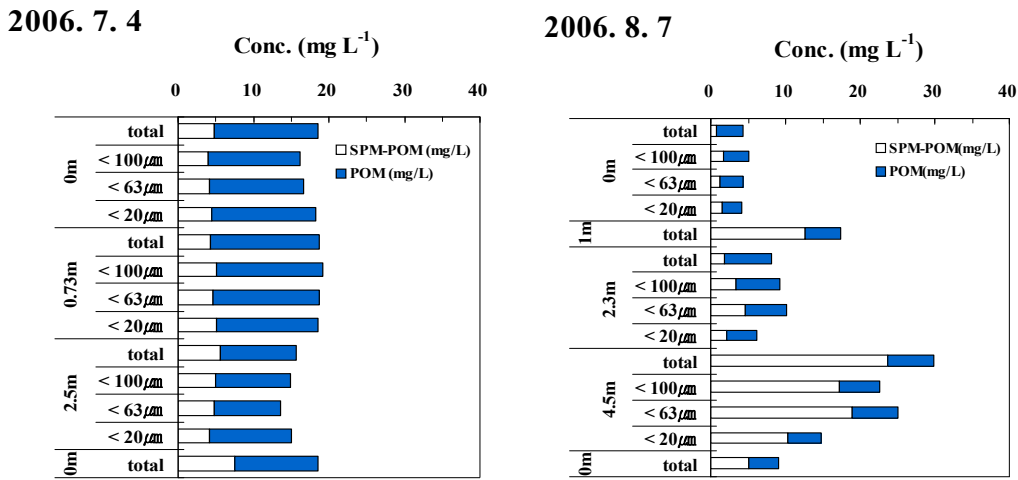
(라) Chlorophyll-*a* 농도(Chl-*a*)

[그림 3.3.8]은 Chl-*a*의 농도를 도식화한 그림이다. 수심에 따라서 플랑크톤의 크기를 구분하지 않은 시료(total)와 Mesh를 사용하여 플랑크톤을 20 μm , 63 μm , 100 μm 의 크기로 구분한 시료의 Chl-*a* 농도를 측정하였다. 7월 조사 때는 표층에서 총 Chl-*a*의 농도가 99.1 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 높은 수치를 보이지만 8월에는 18.3 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 낮은 농도를 보였고 저층에서도 108.6 $\mu\text{g L}^{-1}$ (7월)에서 23.19 $\mu\text{g L}^{-1}$ (8월) 낮은 농도를 보였다. 이러한 현상은 강우기 이후에 실시된 8월 조사 때 많은 양의 물이 유입되어 희석된 효과라 여겨진다. 수심 역시 8월에는 5 m, 7월에는 3.8 m로 차이를 보이는 것 역시 이를 뒷받침 해 주는 자료라 생각된다. 식물플랑크톤 발생 정도의 차이 때문일 수도 있는데, 이를 판단하기 위해서는 식물플랑크톤의 정량자료와의 비교가 필요하다고 생각된다. 수심에 따라서는 7, 8월 모두 표층보다는 중층에서 높은 농도를 보였으며 저층에서 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 총 시료 뿐 만 아니라 플랑크톤을 크기별로 구분한 시료의 Chl-*a* 농도 또한 비슷한 경향을 보이고 있다.

[그림 3.3.8] 신구저수지 내 Chl-*a*의 농도

(마) SPM/POM 농도

7월에는 전 수심에서 SPM 중에 POM이 차지하는 비율이 높게 나타나고 있으며, 8월에 비해서도 더 높은 농도를 보이고 있다. 이는 7월에 8월보다 높은 탁도를 보이는 결과와 일치한다. 8월에 4.5 m 지점에서 SPM의 농도가 높게 나타나고 있는데[그림 3.3.9], 이는 강우 후에 외부로부터 저수지내로 유입된 물질에 의한 영향으로 사료 된다. 이는 8월에 저층에서 탁도가 급격히 증가하는 것과 비슷한 경향을 보인다.



[그림 3.3.9] 신구저수지 내 SPM/POM 농도

(바) 저수지내 질소, 인 농도

[표 3.3.3] 신구저수지 내 총질소(TN), 총인(TP) 농도

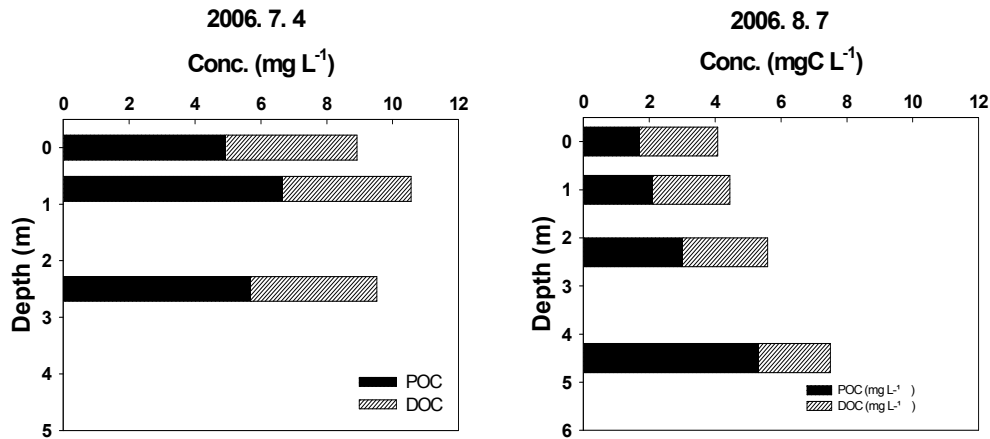
수심	8월 조사			9월 조사		
	총질소(TN) ($\mu\text{g L}^{-1}$)	총인(TP) ($\mu\text{g L}^{-1}$)	TN/TP	총질소(TN) ($\mu\text{g L}^{-1}$)	총인(TP) ($\mu\text{g L}^{-1}$)	TN/TP
0 m	920	31.3	29.3	1875	48.1	38.9
2 m	1152	51.8	22.3	1971	46.8	42.1
4 m	1543	59.2	26.0	-	-	-

(사) 저수지내 입자성 유기탄소(POC)와 용존성 유기탄소(DOC)의 농도

신구저수지에서 2번의 조사를 통해 총질소와 총인의 농도를 측정하였다. 8월 조사 시에는 TN/TP의 비가 22.3~29.3의 범위를 보이지만 9월 조사 때는 38.9~42.1로 높은 수치를 보이고 있다[표 3.3.3]. Smith(1983)는 표층의 TN/TP 비가 29보다 작을 때, 남조류가 우점한다고 보고

한 바 있으며, Tilman & Kiesling(1984)은 TN/TP 비가 9보다 작고 온도가 20°C 이상일 때, 남조류가 출현한다고 보고한 바 있다. 이러한 관점에서 본다면 8월, 9월에 남조류가 출현하지 않은 이유가 TN/TP 값이 충분히 낮지 않아서라고 볼 수 있다. 그러나 항상 이러한 결과가 나타나는 것은 아니며, 주변 환경 여건과의 관계를 복합적으로 고려해야 할 것이다.

[그림 3.3.10]은 입자성 유기탄소(POC)와 용존성 유기탄소(DOC)의 농도를 도식화 한 그림이다. 7월 조사에서는 수심에 따라서 POC의 농도가 4.96~6.68 mg L⁻¹의 범위를 보이고 있고 DOC의 농도가 3.82~3.96 mg L⁻¹의 범위를 보이고 있다. 하지만 8월 조사에서는 POC의 농도가 1.73~5.32 mg L⁻¹의 범위를 보이고 있고 DOC의 농도가 2.18~2.57 mg L⁻¹의 범위를 보이고 있어 전체적으로 8월에 7월보다 POC의 농도와 DOC의 농도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 전체 유기탄소 중 POC와 DOC가 차지하는 평균 비율은 7월에는 각각 60, 40%이며, 8월에는 각각 54, 64%였다.



[그림 3.3.10] 신구저수지 내 POC와 DOC의 농도

(아) 입자성 유기탄소(POC)와 Chl-*a*의 비

[표 3.3.4]는 배양 후 입자성 유기탄소가 식물플랑크톤 광합성과 외부기원 물질 중 어떠한 영향을 더 크게 받았는지를 판단하기 위해 입자성 유기탄소와 Chl-*a*의 농도비를 조사하여 나타낸 것이다. 여기서 POC(t)는 배양이 끝난 후 측정된 입자성 유기탄소의 농도이다. 대체적으로 7월보다 8월에 높은 범위의 값을 보이고 있다. 1994년 Montangnes 등은 살아있는 식물플랑크톤의 입자성 유기탄소와 엽록소의 비가 40에 가깝다고 발표하였고 1977년 Eppley 등은 입자성 유기탄소와 엽록소의 비가 100 이상이면 육지기원임을 제시하였다. 이에 근거하여 7월보다 8월에 신구저수지는 POC(t)/Chl-*a* 비가 100 이상이므로 육지기원 물질의 영향을 많이 받는 것으로 사료된다. 이는 8월 조사는 장우기 이후에 실시되었기 때문에 외부에서 많은 유기물이 유입되어 나타난 결과라 사료된다.

[표 3.3.4] 신구저수지 내 크기에 따른 입자성 유기탄소와 Chl-*a*의 비

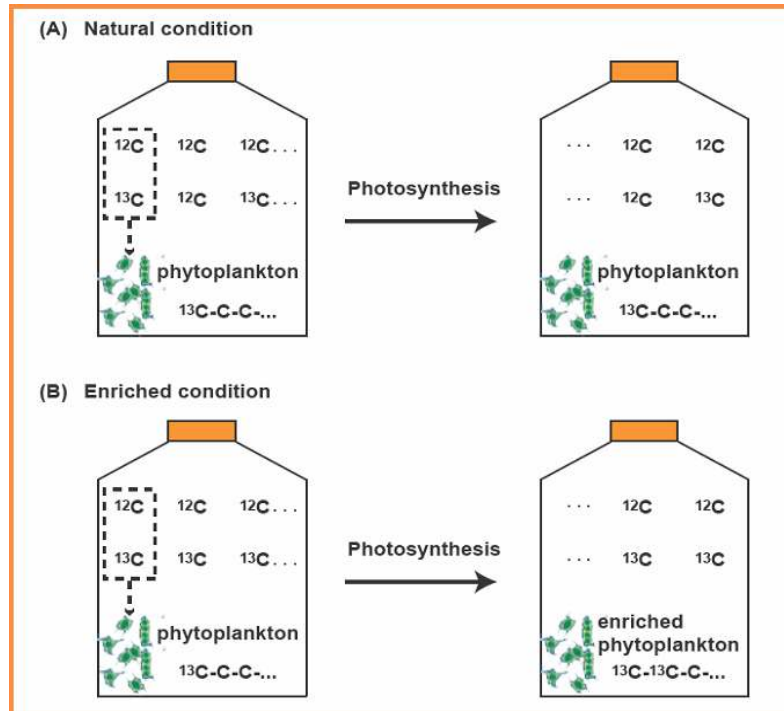
날 짜	수심 (m)	광량 (%)	Size	POC(t)/Chl- <i>a</i> ($\mu\text{gC Chl-}a^{-1}$)
7월 4일	0	100	< 100 μm	71.9
			< 63 μm	79.5
			< 20 μm	87.4
	0.73	10	< 100 μm	63.2
			< 63 μm	57.3
			< 20 μm	53.4
8월 7일	0	100	< 100 μm	104
			< 63 μm	105
			< 20 μm	118
	1	50	< 100 μm	137
			< 63 μm	136
			< 20 μm	132
2.3	10	< 100 μm	53.2	
		< 63 μm	64.6	
		< 20 μm	68.7	

(2) 식물플랑크톤의 일차생산속도 측정

식물플랑크톤에 의한 광합성은 수생태계의 생물들에게 유기물과 에너지를 제공하는 매우 중요한 활동이다. 뿐만 아니라, 식물플랑크톤에 의해 생성되는 유용한 물질들은 상위단계의 섭식자들의 성장을 향상시킴으로써 수생태계의 질을 향상시킨다. 그러므로 식물플랑크톤의 일차생산력을 측정하는 것은 수생태계의 물질순환 및 에너지 흐름을 파악하는데 중요한 자료가 된다.

1952년 Steemann Nielsen은 방사성 동위원소인 ^{14}C 를 이용하여 일차생산력을 측정하는 방법을 발표하였다. 이 방법은 이전에 사용되던 Oxygen method에 비해 감도가 뛰어났기 때문에 많은 사람들로 하여금 일차생산력을 측정하는 일반적인 방법으로 받아들여졌다. 그러나 일부 국가에서는 방사성 동위원소의 사용을 엄격히 규제하고 있다. 이에 일차생산을 측정하는데 있어 방사성 동위원소인 ^{14}C 보다 친환경적이고 안정적인 동위원소인 ^{13}C 를 사용하는데 있어서의 정당성을 얻고자 여러 연구자들은 각각의 방법을 통해 얻어진 일차생산력 결과의 차이를 비교해 보았으며 두 방법에 의해 얻어진 결과는 큰 차이를 보이지 않고 있다(Slawyk *et al.* 1984; Satoh *et al.* 1985; T. Hama *et al.* 1983). 그러므로 현재 일반적으로 사용되는 ^{14}C 방법 대신에 ^{13}C 를 이용한 측정 방법 역시 사용되어질 수 있으며, 후에 GC-MS 방법과 함께 사용함으로써 생성유기물의 조성 및 생성속도 역시 파악할 수 있을 것이다.

^{13}C 추적자를 이용하여 일차생산력을 측정하는 방법은 현장배양 실험을 통해 실시되며, 이 실험에 의한 모식도는 [그림 3.3.11]과 같다.



[그림 3.3.11] ^{13}C 추적자를 이용한 현장 배양실험의 원리

식물플랑크톤의 광합성에 의해 새로 생성된 유기물에는 자연 상태 보다 많은 양의 ^{13}C 가 존재하게 되고, 이와 같이 증가된 ^{13}C 원자의 백분율을 측정함으로써 식물플랑크톤이 단위 시간당 단위 면적 내에서 만들어내는 유기탄소의 양을 알 수 있다.

7월, 8월 조사에서도 이러한 원리를 이용한 ^{13}C 추적자 실험을 이용하여 식물플랑크톤의 생산속도를 측정하였으며, 생산속도는 [표 3.3.5]와 같다. 7월 조사 시 표층 100 μm 이하 크기의 식물플랑크톤 생산속도는 $5.85 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 의 값을, 8월 조사 시에는 $4.90 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 의 값을 보이고 있다. 같은 10%의 광량을 가진 깊이에서의 100 μm 이하 크기의 식물플랑크톤 생산속도를 비교하면 7월에는 $2.32 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 의 값을, 8월에는 $0.91 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 의 값을 보이고 있다. 그러므로 하루 동안 일정 부피당 만들어내는 탄소의 양은 7월에 더 높았다고 볼 수 있다. 그러나 유광층 깊이가 7월에 비해 8월에 훨씬 깊었기 때문에 하루 동안 단위 면적 당 만들어내는 탄소의 양은 [그림 3.3.12]에서 보는 바와 같이 8월 조사시 더 높게 나타났다.

[표 3.3.6]은 단위 식물플랑크톤 생체량(biomass)이 생산해 내는 탄소의 양을 알아보하고자 식물플랑크톤의 생체량을 나타내는 지표인 Chl-*a*에 의한 탄소 고정 능력과 식물플랑크톤의 일차 생산속도를 계산하여 나타낸 것이다.

[표 3.3.5] 신구저수지 내 크기에 따른 생산속도($\text{mgC L}^{-1} \text{d}^{-1}$)

날 짜	수심(m)	광량(%)	Size	Production rate ($\text{mgC L}^{-1} \text{d}^{-1}$)
7월 4일	0	100	< 100 μm	5.85
			< 63 μm	6.83
			< 20 μm	7.23
	0.73	10	< 100 μm	2.32
			< 63 μm	1.43
			< 20 μm	1.94
8월 7일	0m	100	< 100 μm	4.90
			< 63 μm	5.15
			< 20 μm	3.75
	1m	50	< 100 μm	2.77
			< 63 μm	2.62
			< 20 μm	2.72
2.3m	10	< 100 μm	0.91	
		< 63 μm	0.62	
			< 20 μm	0.60

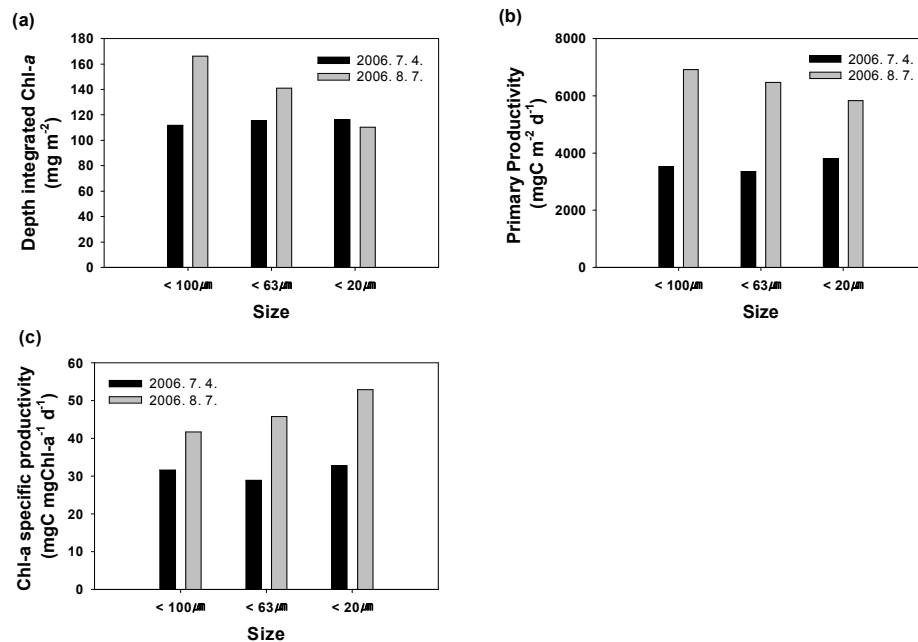
[표 3.3.6] 유광층 깊이 내 식물플랑크톤의 크기별 Chl-*a*의 합(Depth integrated Chl-*a*), 일차생산력(Primary productivity), Chl-*a*에 의한 탄소 고정 능력(Chl-*a* specific productivity)

	Size	Depth integrated Chl- <i>a</i> ($\text{mgChl-}a \text{ m}^{-2}$)	Primary productivity ($\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	Chl- <i>a</i> specific productivity ($\text{mgC mgChl-}a^{-1} \text{d}^{-1}$)
7월 4일	< 100 μm	112	3,530	31.6
	< 63 μm	116	3,347	28.9
	< 20 μm	116	3,800	32.7
8월 7일	< 100 μm	166	6,919	41.7
	< 63 μm	141	6,467	45.8
	< 20 μm	110	5,837	52.9

식물플랑크톤의 크기별 수심에 따른 유광층 깊이 내 Chl-*a*의 합(Depth integrated Chl-*a*)은 7월에 112~116 mg m^{-2} 의 범위를 보이며 8월에는 110~166 mg m^{-2} 의 범위를 보이고 있다. 7월에는 100 μm 이하와 63 μm 이하, 20 μm 이하의 식물플랑크톤의 Chl-*a*의 농도 차이가 거의 없다. 이는 이 시기에 20 μm 보다 작은 식물플랑크톤이 대부분을 차지하기 때문이라고 볼 수 있다. 8월에는 100 μm 이하와 20 μm 이하의 식물플랑크톤 간의 차이가 존재한다. 식물플랑크톤의 크기별 일차생산력(Primary productivity)은 7월에 3,347~3,800 $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 의 범위를 보이며 8월에는 5,837~6,919 $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 의 범위를 보이고 있다. 유광층 깊이 내 Chl-*a*의 합 결과와 마찬가지로 7월에는 20 μm 이하의 식물플랑크톤과 100 μm 이하의 식물플랑크톤 간의 일차생산

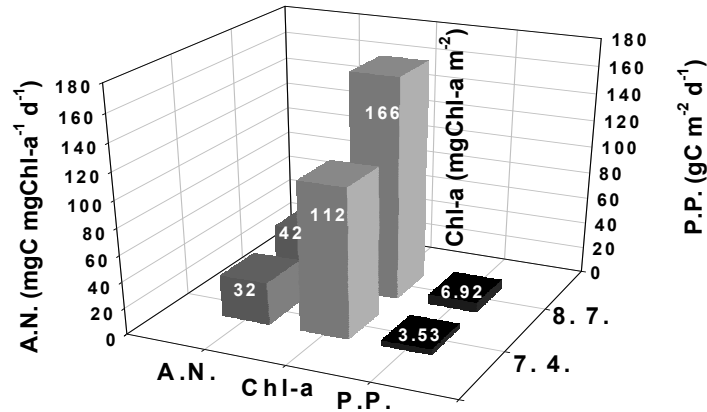
력 차이가 거의 없다. 이 역시 20 μm 보다 작은 식물플랑크톤이 총 일차생산력의 대부분을 차지하고 있다고 판단할 수 있다. 8월 조사에서는 20 μm 이하의 식물플랑크톤이 총 일차생산에 기여하는 정도가 7월에 비해 낮다고 판단된다. [표 3.3.6]에서 보는 바와 같이 7월에 유광층 내 Chl-*a*의 농도나 일차생산력, Chl-*a*에 의한 탄소 고정 능력은 8월에 더 높은 값을 보이고 있다. 이는 약 3배 이상 차이가 나는 유광층의 깊이에 의한 결과로 사료된다(7월: 1.2 m, 8월: 3.8 m).

Chl-*a*에 의한 탄소 고정 능력(Chl-*a* specific productivity)은 7월에 28.9~32.7 $\text{mgChl-}a^{-1}$ 의 범위를 보이며 8월에는 41.7~52.9 $\text{mg mg}^{-1} \text{d}^{-1}$ 의 범위를 보이고 있다. 이 값은 대청호(13.1 $\text{mgC mgChl-}a^{-1}$ 한국수자원공사, 1993)나 경기만(1.24~24.8 $\text{mgC mgChl-}a^{-1} \text{d}^{-1}$ 강등, 1992)보다 높은 값이다. [그림 3.3.12]는 이 결과를 그래프로 표시하고 있다.



[그림 3.3.12] 유광층 깊이 내 식물플랑크톤의 크기별 (a) Chl-*a*의 합(Depth integrated Chl-*a*); (b) 일차생산력 (Primary productivity), (c) Chl-*a*에 의한 탄소 고정 능력(Chl-*a* specific productivity)

Malone (1980)은 미소부유생물(nanoplankton)의 동화계수가 소형부유생물(microplankton)보다 크면 미소부유생물이 더 빨리 자라고, 작으면 소형부유생물이 더 빨리 자란다는 사실을 밝혔다. Cole (1986)은 그 값이 서로 비슷하면 둘의 성장 속도는 비슷함을 밝혔다. 이러한 관점에서 본다면 8월에 식물플랑크톤의 활성도가 더욱 큰 것으로 사료되며, 7월과 8월 모두 20 μm 이하의 식물플랑크톤의 동화계수가 가장 높은 것으로 보아 성장속도(활성도)가 가장 빠르다고 볼 수 있다.



[그림 3.3.13] 유광층 깊이 내 100 μm 보다 작은 식물플랑크톤의 크기별 일차생산력(P.P.), Chl-a의 농도(Chl-a), Chl-a에 의한 탄소 고정 능력(A.N.)

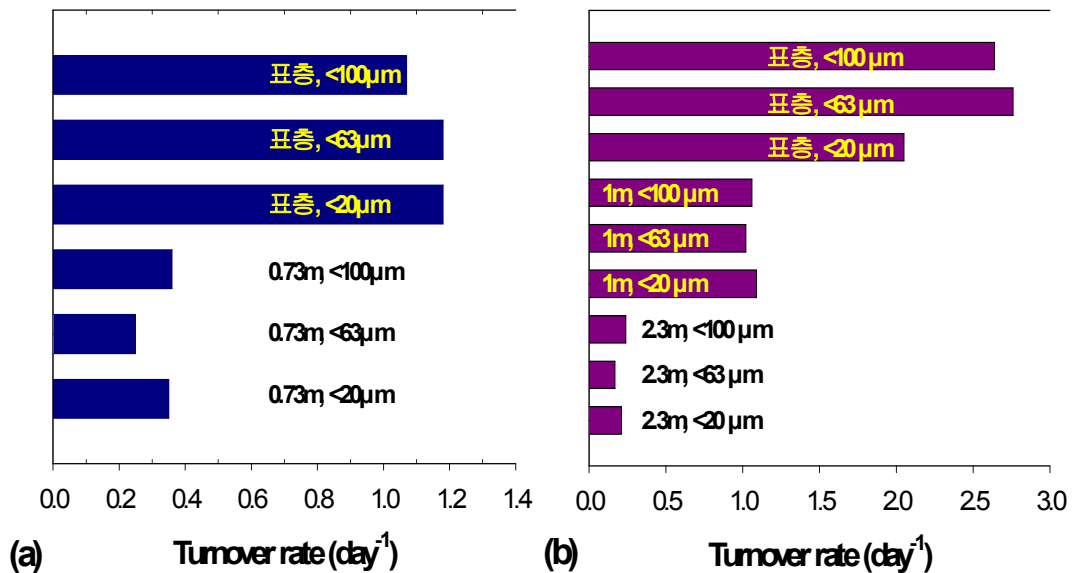
[그림 3.3.13]은 유광층 깊이 내 100 μm 보다 작은 식물플랑크톤의 크기별 일차생산력, Chl-a의 농도, Chl-a에 의한 탄소 고정 능력을 나타내고 있다. 유광층 깊이 내 100 μm 이하의 식물플랑크톤의 일차생산력이 7월보다 8월에 높고(각 3.53 $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 6.92 $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$), Chl-a의 농도(각 118 mgChl-a m^{-2} , 165 mgChl-a m^{-2}), Chl-a에 의한 탄소 고정 능력 또한 높다(각 30 $\text{mgC mgChl-a}^{-1} \text{d}^{-1}$, 42 $\text{mgC mgChl-a}^{-1} \text{d}^{-1}$). 이는 약 3배 이상 차이 나는 유광층의 깊이에 의한 결과이다(7월: 1.2 m, 8월: 3.8 m). 즉, 저수지 내 수심에 따른 빛 투과도의 변화가 식물플랑크톤의 생활사에 중요한 영향을 미친다고 할 수 있다. 유광층 깊이가 깊을수록 단위 면적 당 식물플랑크톤의 일차생산성은 높아지며 Chl-a 당 탄소 고정 능력 또한 증가하여 성장속도(활성도)가 증가하는 것으로 여겨진다.

순환속도(Turnover rate)는 식물플랑크톤이 하루 당 어느 정도의 유기탄소를 순환시키는지 를 판단하기 위한 것으로 그 결과는 [표 3.3.7]과 같다. 7월에 유광층 수심 내에서 식물플랑크톤의 크기별 순환속도는 표층에서 높고 저층에서 감소하는 경향을 보이며 8월에도 유사한 경향을 보이고 있다. 전체적으로 보았을 때 7월보다 8월에 순환속도가 높은 것으로 나타나고 있다. 이를 식물플랑크톤의 크기별 동화계수와 비슷한 경향을 보이고 있다. 이는 앞에서의 결과와 마찬가지로 7월보다 8월에 유광층 깊이가 더 깊기 때문이다. 즉, 8월에 7월보다 탁도가 낮기 때문에 식물플랑크톤의 일차생산력과 동화계수가 높게 나타나며 순환속도 또한 증가하는 경향을 보이고 있다.

[표 3.3.7] 유광층 깊이 내 식물플랑크톤의 크기별 유기탄소의 순환속도(Turnover rate) 및 Chl-a 당 탄소 고정 능력(Chl-a specific productivity)의 차이

	Depth(광량 %)	Size	Turnover rate(d ⁻¹)	Chl-a specific productivity (mgC mgChl-a ⁻¹ d ⁻¹)
7월 4일	0 m(100)	< 100 μm	1.07	76.7
		< 63 μm	1.18	84.7
		< 20 μm	1.18	101
	0.73 m(10)	< 100 μm	0.36	22.7
		< 63 μm	0.25	13.9
		< 20 μm	0.35	18.0
8월 7일	0 m(100)	< 100 μm	2.64	276
		< 63 μm	2.76	290
		< 20 μm	2.05	241
	1 m(50)	< 100 μm	1.06	146
		< 63 μm	1.02	131
		< 20 μm	1.09	136
	2.3 m(10)	< 100 μm	0.24	12.8
		< 63 μm	0.17	11.3
		< 20 μm	0.21	14.5

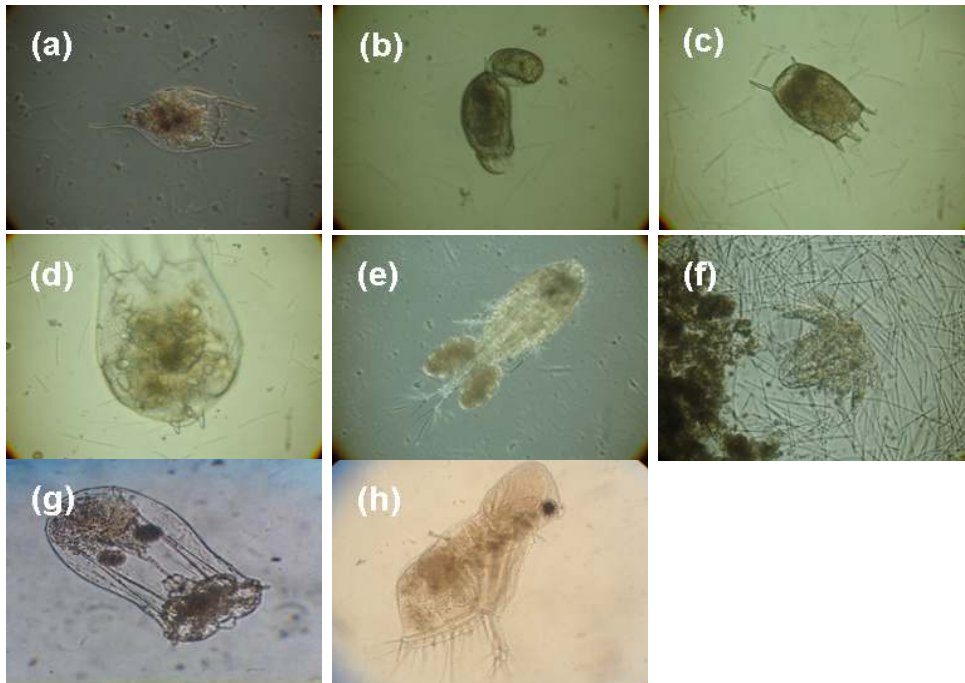
7월, 8월 조사시기에 표층에서 식물플랑크톤의 크기별 순환속도는 저층보다 높게 나타나며 저층에서는 감소하는 경향을 보이고 있다[그림 3.3.14]. 이는 표층에서의 광량이 저층보다 높기 때문에 식물플랑크톤의 광합성 활동이 활발해져 순환속도가 빠른 것으로 여겨진다. 이는 식물플랑크톤의 크기별 Chl-a 당 탄소 고정 능력, 일차 생산력의 결과와 비슷한 경향을 보이고 있다.



[그림 3.3.14] 신구저수지내 수심에 따른 식물플랑크톤의 크기별 유기탄소의 순환속도 (a) 7월 조사(7월 4일); (b) 8월 조사(8월 7일)

(3) 동물플랑크톤에 의한 식물플랑크톤의 섭식속도 측정

먹이연쇄를 통한 저수지의 수질 관리에 사용되는 유용생물은 저수지 내 존재하는 생물이 가장 적합하다. 그리하여 저수지 내 100 μm 보다 큰 동물플랑크톤들의 식물플랑크톤 섭식 속도를 측정하기 위하여 현장에서 ^{13}C 추적자를 사용하여 배양실험을 하였다. 배양 실험이 끝난 후에는 빛을 가린 후 실험실로 가져와 현미경을 사용하여 동물플랑크톤을 종 분류 하였다. 현미경을 사용하여 동정한 결과 신구저수지 내 존재하는 동물플랑크톤은 *Brachionus diversicornis*, *Keratella cochlearis*, *Keratella valga*, *Brachionus calyciflorus*, Copepodid 및 Nauplius, *Asplanchna brightwelli*, *Diaphanosoma brachyurum* 등이었다. [그림 3.3.15]는 위에 나열한 신구 저수지 내 존재하는 동물플랑크톤을 현미경 하에서 관찰한 것이다.



[그림 3.3.15] 신구저수지 내 존재하는 동물플랑크톤. (a) *Brachionus diversicornis*; (b) *Keratella cochlearis*; (c) *Keratella valga*; (d) *Brachionus calyciflorus*; (e) Copepodid; (f) Nauplius; (g) *Asplanchna brightwelli*; (h) *Diaphanosoma brachyurum*

이들 동물플랑크톤 중에서 7월에는 Copepodid 종을, 8월에는 Copepodid, *Asplanchna brightwelli*, *Diaphanosoma brachyurum* 종을 분류하였다.

신구저수지내의 플랑크톤을 크기별로 구분 한 후 ^{13}C 추적자와 100 μm 이상의 동물플랑크톤을 넣어준 후 식물플랑크톤 섭식속도를 측정하였다. 7월에 Copepodid의 섭식속도는 크기가 63 μm 보다 작은 유기물을 넣어준 배양용기에서 0.81 $\mu\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 의 가장 낮은 값을 나타내었고, 모든 크기의 유기물이 첨가된 배양용기에서 Copepodid의 섭식속도는 2.34 $\mu\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 가장 높게 측정되었다[표 3.3.8]. 다른 동물플랑크톤 역시 모든 크기의 유기물이 첨가된 배양용기에서 89.4

$\mu\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 가장 높은 섭식속도를 나타내고 있고, 크기가 $63 \mu\text{m}$ 보다 작은 유기물을 넣어준 배양용기에서 $34.2 \mu\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 가장 낮은 값을 보이고 있다. 7월에 분류된 총 동물플랑크톤의 유기물 섭식속도는 모든 크기의 유기물이 첨가된 배양용기에서 $91.7 \mu\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 다른 배양용기보다 가장 높은 값을 보이고 있다. 그러나 배양실험 후 동물플랑크톤 분류 당시에 대상생물 외에도 $100 \mu\text{m}$ 보다 큰 응집물이 많았던 것으로 미루어 보아 실제 동물플랑크톤의 섭식속도보다 매우 높게 측정된 값이라 사료된다.

[표 3.3.8] 7월에 측정된 담수 내 식물플랑크톤을 포함한 유기물 크기를 구분하여 넣어준 후 배양시킨 Copepodid의 식물플랑크톤 섭식 속도 및 총 동물플랑크톤의 섭식속도

Species	Size fractionated POM		
	Total bottle	< $63 \mu\text{m}$ bottle	< $20 \mu\text{m}$ bottle
Copepodid grazing rate	$0.12 \mu\text{gC ind.}^{-1} \text{d}^{-1}$ ($2.34 \mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$)	$0.06 \mu\text{gC ind.}^{-1} \text{d}^{-1}$ ($0.81 \mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$)	$0.10 \mu\text{gC ind.}^{-1} \text{d}^{-1}$ ($1.15 \mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$)
Zooplanktons grazing rate (> $100 \mu\text{m}$)	$89.4 \mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$	$34.2 \mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$	$54.1 \mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$
Total zooplankton grazing rate (> $100 \mu\text{m}$)	$91.7 \mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$	$35.0 \mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$	$55.2 \mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$

[표 3.3.9]는 신구저수지에서 8월 조사 시 동물플랑크톤의 유기물 섭식속도를 나타낸 것이다. 7월에 유기물의 크기를 분류해서 넣어준 배양용기 내에서 동물플랑크톤의 섭식속도가 큰 차이가 없었기 때문에 보다 많은 동물플랑크톤의 종을 분류하기 위하여 유기물의 크기를 분류하지 않고 배양을 실시하였다. 개체수 당 측정된 동물플랑크톤의 섭식속도는 *Diaphanosoma brachyurum* 종이 $0.30 \mu\text{g ind.}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 가장 높게 측정되었고, *Asplanchna brightwelli* 종이 $0.08 \mu\text{g ind.}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 가장 낮게 측정되었다. 하지만 실제 현장에는 세 종 중 Copepodid의 개체 수가 가장 많았기 때문에 부피당 동물플랑크톤의 섭식속도는 Copepodid가 $0.70 \mu\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 가장 높고 *Asplanchna brightwelli* 종이 $0.09 \mu\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 가장 낮기 때문에 실제 현장에서도 Copepodid의 섭식효과가 더 높게 나타날 것이다. 후에 2차년도 메소코즘 실험에서는 신구 저수지 내 동물플랑크톤이 아닌 *Daphnia* 종이 사용된다면 실내 실험을 통해서 위의 종들과 *Daphnia* 종간의 식물플랑크톤 섭식속도의 비교가 필요하다고 여겨진다.

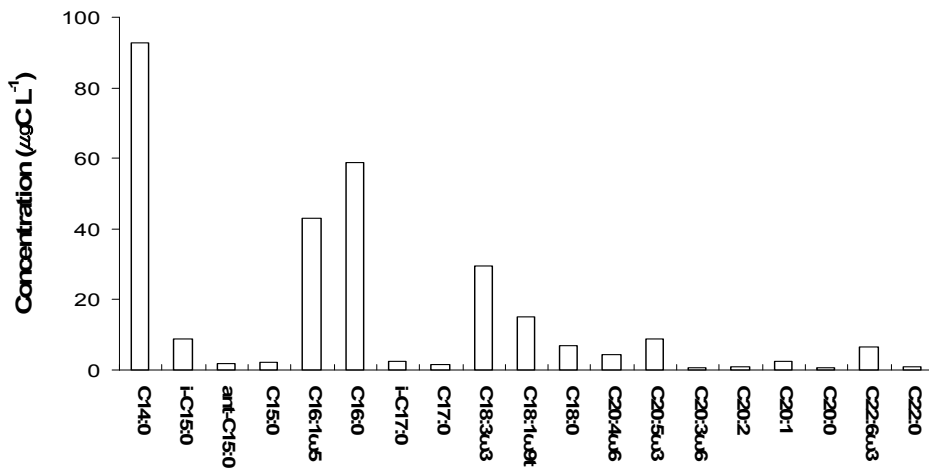
[표 3.3.9] 8월에 측정된 담수내 식물플랑크톤을 포함한 유기물을 넣어준 후 배양시킨 동물플랑크톤의 섭식속도

Species	individual grazing rate ($\mu\text{gC ind.}^{-1} \text{d}^{-1}$)	Zooplankton grazing rate ($\mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$)
Copepodid	0.08	0.70
<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	0.30	0.12
<i>Asplanchna brightwelli</i>	0.07	0.09
Zooplanktons(> $100 \mu\text{m}$)	—	2.97
Total zooplankton grazing rate (> $100 \mu\text{m}$)	—	3.88

(4) 입자성 지방산 농도 및 생성속도 변화

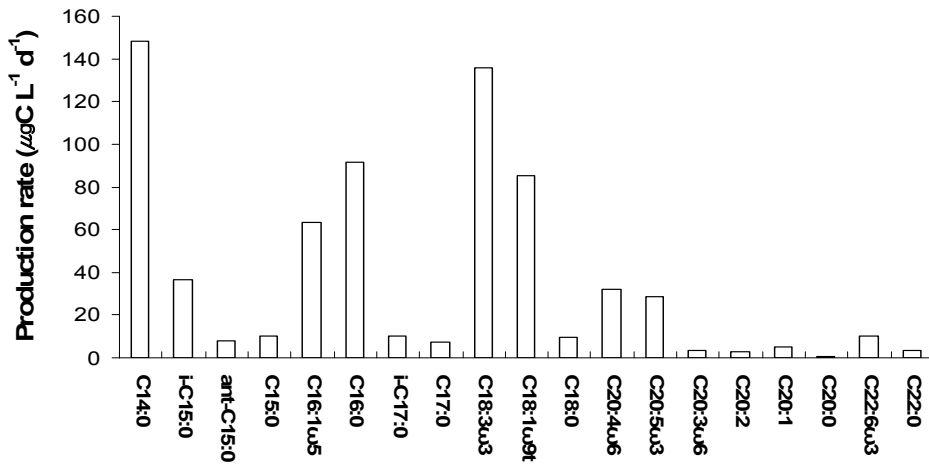
[그림 3.3.16]은 신구저수지 내 7월 조사시 입자성지방산의 농도를 나타낸다. C14:0이 $93 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높은 농도를 보였으며, C16:0은 59, C16:1 ω 5는 43, 18:3 ω 3은 29, C18:1 ω 9trans는 $15 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도를 보였다. C14:0이나 C16:0은 대부분의 생물들이 만들어 낼 수 있는 지방산으로 비교적 높은 농도를 나타내었다.

Matsunaga *et al.*(1995)은 *Phormidium* sp.내에서 cis-palmitoleic acid(C16:1c)의 농도가 높게 나타났음을 보고한 바 있다. 이번 연구에서 C16:1 ω 5가 cis형태인지는 확인하지 못하였으나, 본 연구기간 동안 우점한 *Phormidium* sp.가 이 지방산에 큰 기여를 한 것으로 추측 된다. C18:3 ω 3은 Chlorophytes나 Cryptomonads, 일부 Cyanobacteria 내에서 높은 농도로 존재하는 것으로 보고되고 있다(Volkman, 2006; Vargas *et al.* 1998). 따라서 일부 녹조류와 시아노박테리아가 이 지방산의 농도 분포에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 18:3 ω 3은 필수지방산의 하나로 상위 섭식자에게 질 좋은 먹이로써 사용될 수 있다. 일반적으로 먹이질의 지표로 쓰이는 EPA(C20:5 ω 3)나 DHA(C22:6 ω 3)는 비교적 낮은 농도를 보였다.



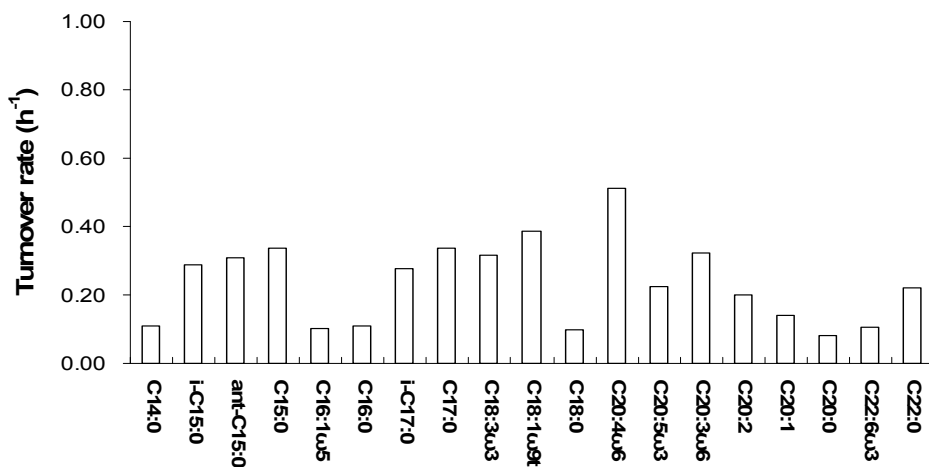
[그림 3.3.16] 7월 신구저수지 입자성지방산 농도

[그림 3.3.17]은 입자성 지방산의 생성속도를 보여주고 있다. 농도가 가장 높았던 C14:0의 생성속도는 $148 \mu\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 가장 빠르게 나타났으며, 18:3 ω 3은 136, C16:0은 92, C18:1 ω 9t는 85, C16:1 ω 5는 $63 \mu\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 나타났다. 지방산의 농도조성과 식물플랑크톤 광합성 활동에 의해 만들어진 입자성 지방산의 생성속도는 거의 비슷하며, 이는 본 연구기간 동안 신구저수지 내 수층 입자성 유기물은 대부분 식물플랑크톤에 의해 유래된 것이라 사료된다.



[그림 3.3.17] 7월 신구저수지 입자성지방산 생성속도

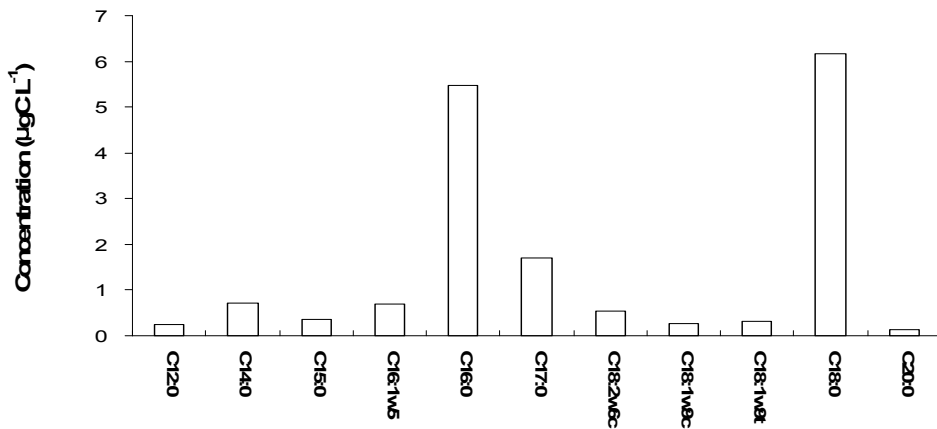
[그림 3.3.18]은 7월 신구저수지에서 생성된 입자성지방산의 순환속도를 보여주고 있다. 여기서 순환속도 (turnover rate)는 입자성 지방산의 생성속도를 농도로 나누어 계산하였다. 포화지방산 (C14:0, C16:0, C18:0, C20:0)은 불포화지방산에 비해 순환속도가 낮게 나타났다. 필수지방산 중에서는 C18:3ω3과 C20:4ω6이 C20:5ω3 (EPA)나 C22:6ω3(DHA)에 비해 빠른 순환속도를 보였다. 박테리아성 지방산인 iso-C15:0, ant-C15:0, C15:0, iso-C17:0, C17:0 역시 ¹³C 백분율(%)이 증가하였는데, 이는 광합성을 통해 만들어진 유기물이 세포외배출(extracellular release) 등을 통해 용존유기물 pool로 이동된 후 박테리아에게까지 빠르게 전달되었음을 의미한다(Nalewajko *et al.* 1980). 또한 이들의 높은 생성속도는 7월 신구저수지 내 박테리아에 의한 유기물 소비가 활발하게 일어나고 있음을 의미한다.



[그림 3.3.18] 7월 신구저수지 입자성지방산 순환속도

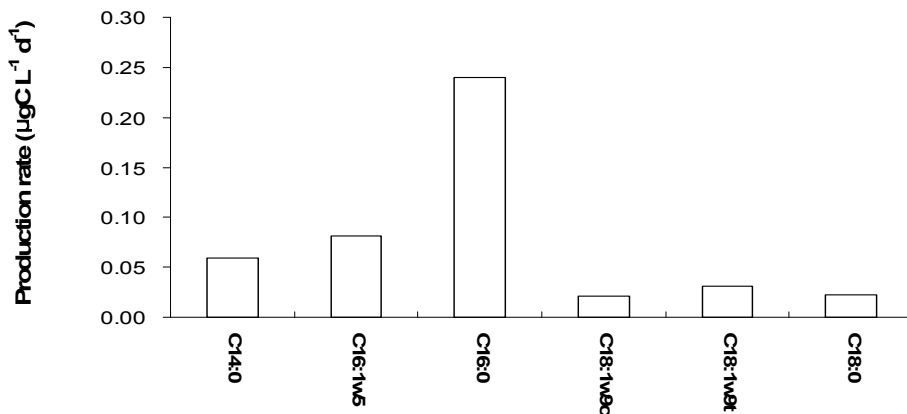
(5) 용존성 지방산 농도 및 생성속도 변화

[그림 3.3.19]는 7월 신구저수지 용존성지방산의 조성을 나타내고 있다. 용존성지방산은 입자성지방산에 비해 농도가 낮게 나타났으며, 검출되는 지방산의 수 역시 적었다. 가장 높은 농도를 보인 지방산은 C16:0과 C18:0이었으며, 다중불포화지방산은 cis-18:2 ω 6을 제외하고 검출되지 않았다. 박테리아성 지방산인 C15:0과 C17:0의 농도는 각각 0.4, 1.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었다. 대부분 포화 지방산은 용존유기물 pool로 이동되는 반면, 대부분의 불포화지방산은 생물에게 빠르게 사용되는 것으로 사료된다.



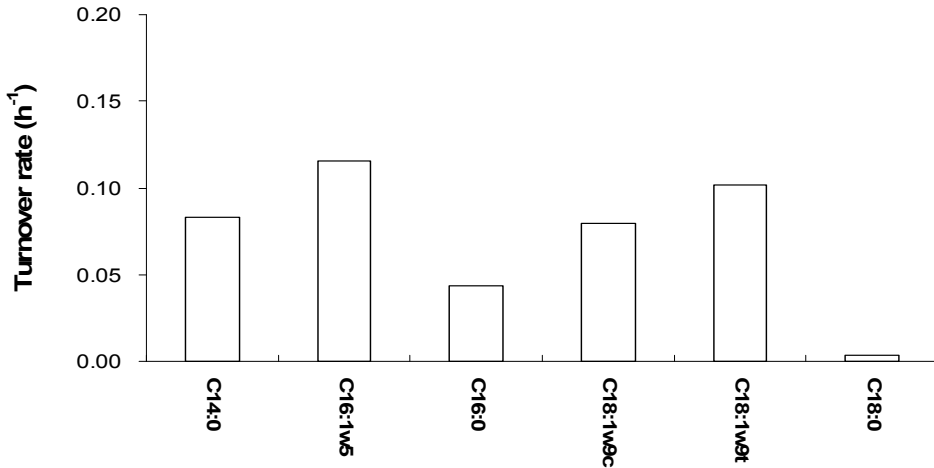
[그림 3.3.19] 7월 신구저수지 용존성지방산 조성

[그림 3.3.20]은 7월 신구저수지 용존성지방산의 생성속도를 보여주고 있다. 용존성지방산 중 ¹³C가 검출된 지방산은 C14:0, C16:1 ω 5, C16:0, C18:1 ω 9, C18:1 ω 9, C18:0으로 가장 높은 생성속도를 보인 지방산은 C16:0이었다. C16:0의 생성속도는 약 0.25 $\mu\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 이었으며, 다른 지방산은 0.1 $\mu\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 미만의 낮은 생성속도를 보였다.



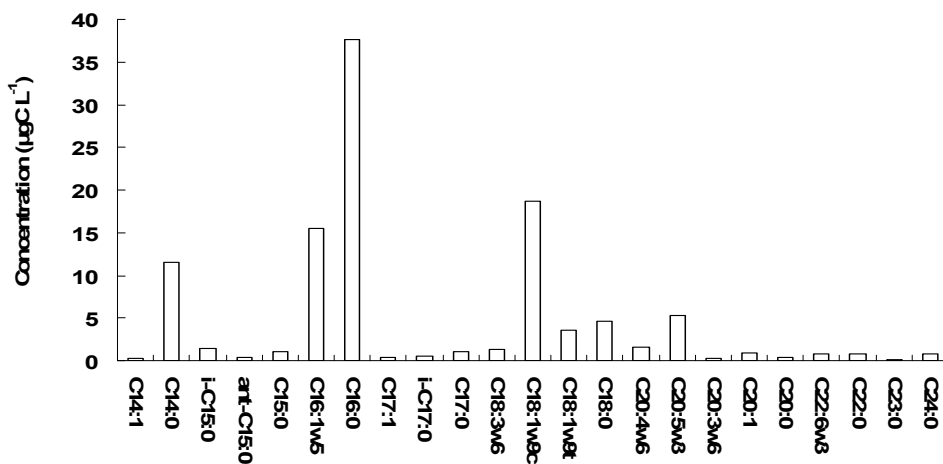
[그림 3.3.20] 7월 신구저수지 용존성지방산 생성속도

[그림 3.3.21]은 7월 용존성지방산의 생성속도를 보여주고 있다. 순환속도는 C18:0이 0.004 h⁻¹로 가장 낮은 속도를 보였으며, 그 다음은 C16:0으로 0.04 h⁻¹의 순환속도를 보였다.



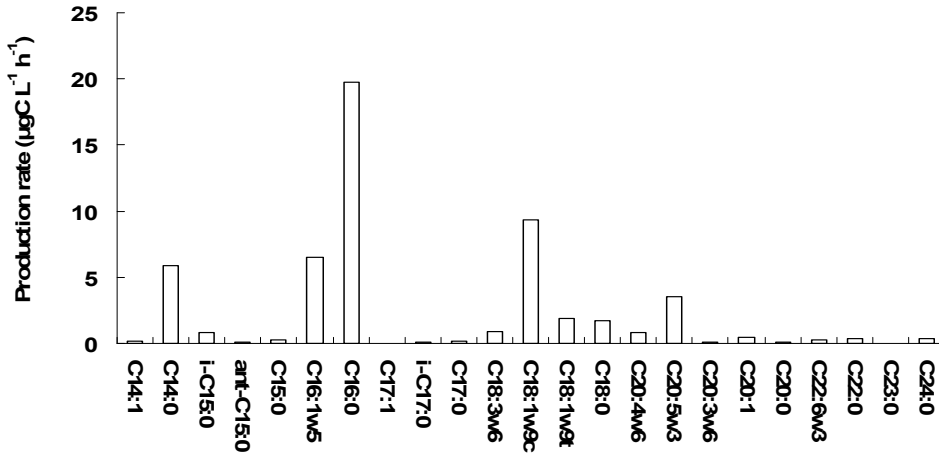
[그림 3.3.21] 7월 신구저수지 용존성지방산 순환속도

[그림 3.3.22]는 신구저수지 내 8월 조사 시 입자성지방산의 농도를 나타낸다. 가장 높은 농도를 보인 지방산은 C16:0으로 38 μgC L⁻¹의 농도를 보였으며, C18:1ω9c는 19, C16:1ω5는 16, C14:0은 13 μg L⁻¹의 농도를 보였다. 전체적으로 강우기 전인 7월에 비해 낮은 농도를 보였으며, 박테리아성 지방산 역시 낮은 농도를 보였다.



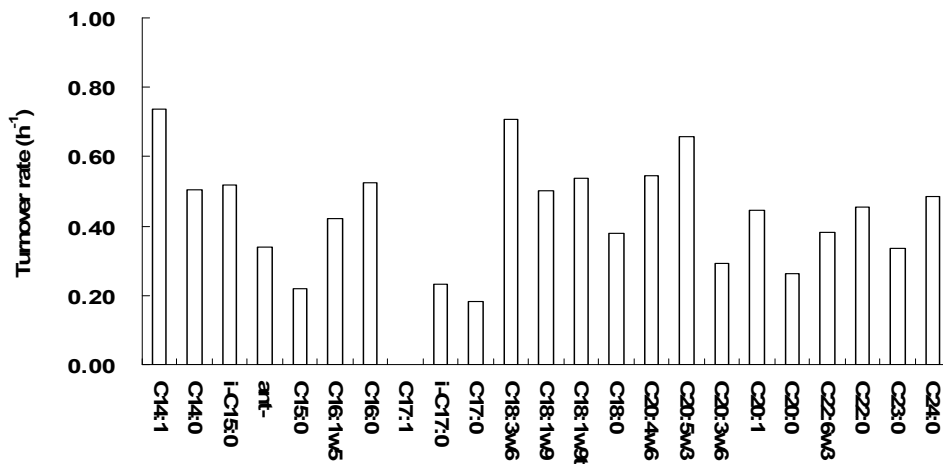
[그림 3.3.22] 8월 신구저수지 입자성지방산 농도

[그림 3.3.23]은 입자성 지방산의 생성속도를 보여주고 있다. 농도가 가장 높았던 C16:0의 생성속도는 $20 \mu\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 가장 빠르게 나타났으며, 18:1 ω 9는 9, C16:1 ω 5는 0.7, C14:0은 $0.6 \mu\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 나타났다. 8월 역시 지방산 농도 조성과 식물플랑크톤 광합성 활동에 의해 만들어진 입자성 지방산의 생성속도는 거의 비슷하며, 이는 본 연구기간 동안 신구저수지 내 수층 입자성 유기물은 대부분 식물플랑크톤에 의해 유래된 것이라 사료된다.



[그림 3.3.23] 8월 신구저수지 입자성지방산 생성속도

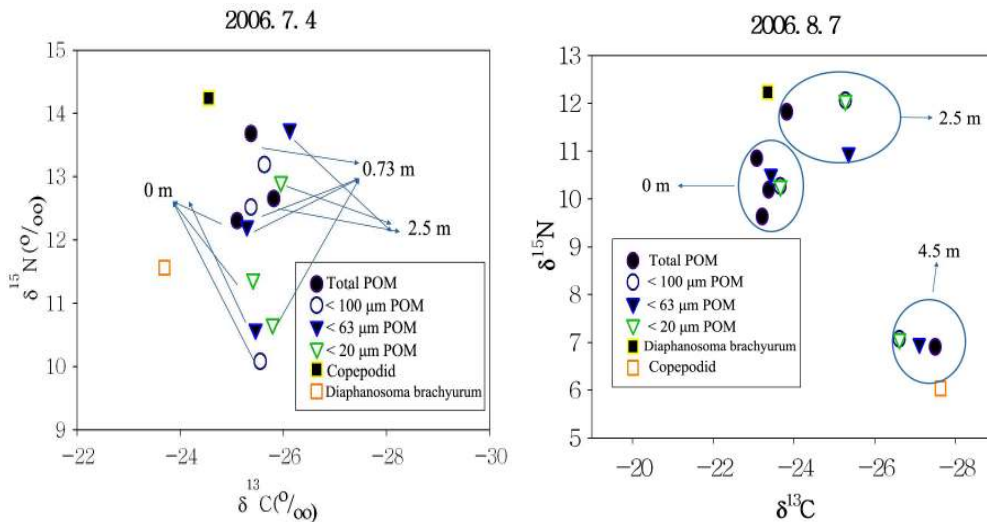
[그림 3.3.24]는 8월 신구저수지에서 생성된 입자성지방산의 순환속도를 보여주고 있다. 모든 지방산이 1 이하로 나타났으며, 박테리아성 지방산의 순환속도가 비교적 낮게 나타났으며, 다른 지방산들은 평균 0.4h^{-1} 로 유사하게 나타났다.



[그림 3.3.24] 8월 신구저수지 입자성지방산 순환속도

(6) 저수지내 입자성 유기물의 기원 변화

유기탄소와 총 질소 안정동위원소비는 기존의 먹이원 규명 방식인 배양 실험법이나 소화기 관 해부실험법의 단점을 충분히 보완하여 자연환경 생태계 내에서 일어나는 에너지의 흐름을 이해하는데 유용하게 사용될 수 있다. 일반적으로 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 1‰ 미만의 변동으로 유기물의 기원을 나타내고 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 약 3~5‰의 분별작용으로 영양단계를 반영하게 된다. 이러한 현상은 ^{15}N 이 결핍된 질소의 선호적인 체외 배출로 인해 야기된다. 또한, 체내기관에서 보이는 각 조직간의 상이한 순환속도(turnover rate)의 차이는 안정동위원소비의 차이를 통해 반영되기 때문에 생물체 내 유기물의 흐름 또한 추측이 가능하다.



[그림 3.3.25] 신구저수지 내 크기별 유기물과 동물플랑크톤의 먹이관계

신구저수지에서 담수를 수심에 따라 망목 크기가 20 μm , 63 μm , 100 μm 메시에 통과시켜 크기별로 구분한 유기물과 동물플랑크톤을 종별로 구분하여 유기탄소, 총질소 안정동위원소비를 측정하였으며, 결과는 [그림 3.3.25]와 같다. 7월에는 수심에 따른 모든 유기물의 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 $-25.1 \sim -26.1\text{‰}$ 로 1‰의 비슷한 범위를 가지며 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 10.5~13.7‰로 약 3‰의 차이를 보이고 있다. Copepodid 종은 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 -24.5‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 값은 14.2‰의 범위를 가진다. 모든 유기물과 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 0.5‰ 내의 변동을 보이고 있으므로 수심에 따른 모든 유기물을 먹이원의 기원으로 하고 있으며 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 모든 유기물보다 약 3.8‰ 무거우므로 영양단계상 바로 상위단계라 할 수 있다. *Diaphanosoma brachyurum* 종은 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 -23.6‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 값은 11.5‰의 범위를 보인다. 모든 유기물과 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 약 1.5~2.5‰의 변동을 보이므로 먹이 기원으로 유기물 외에 다른 먹이원의 영향을 복합적으로 받는 것으로 여겨진다. $\delta^{15}\text{N}$ 값은 약 2‰의 변동을 보이므로 상위 섭식자라 할 수 있다.

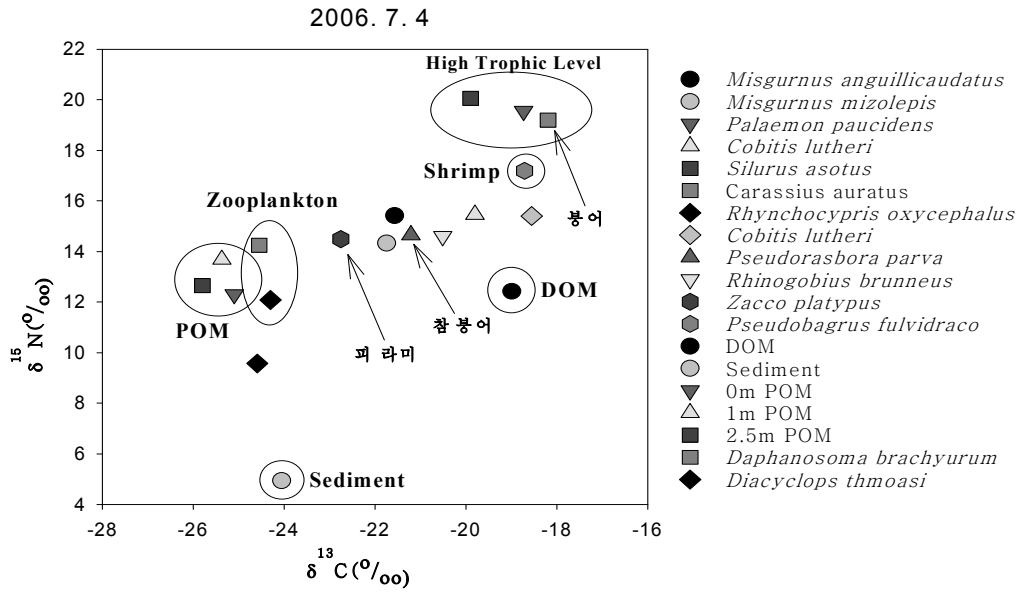
8월에는 수심에 따른 모든 유기물의 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 $-23.2 \sim -27.5\text{‰}$ 로 5‰의 큰 변동을 보이고 있

으며, $\delta^{15}\text{N}$ 값은 6.9~12.0‰로 약 5‰의 높은 차이를 보이고 있다. 또한, 7월과는 달리 수심에 따른 유기물의 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 값이 확연한 차이를 보이고 있어 서로간의 뚜렷한 특징을 보이고 있다. 이는 강우 후 외부로부터의 유기물 유입에 의하여 저수지내 유기물의 유기탄소, 총질소 안정동위원소비가 큰 변동을 보이는 것으로 여겨진다. 특히 저층 4.5 m의 유기물은 표층의 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 값은 표층과 다른 군집을 형성하며 이는 강우 후 외부로의 다른 유기물이 저수지내로 유입되어 저층에 존재한다는 것을 나타낸다. *Diaphanosoma brachyurum* 종은 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 -23.3‰, $\delta^{15}\text{N}$ 값은 12.2‰의 범위를 보이는 것으로 보아 주로 표층에서의 유기물을 먹이원으로 하고 있다. 모든 유기물과 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 약 1.5~2.5‰의 변동을 보이므로 먹이 기원으로 유기물 외에 다른 먹이원의 영향을 복합적으로 받는 것으로 여겨진다. 하지만 표층 유기물과 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 비슷한 변화를 보이고 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 약 2.8‰의 변동을 보이므로 상위 섭식자로서 표층 유기물을 먹이원으로 하는 것으로 여겨진다. 하지만 Copepodid 종은 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 -27.6‰, $\delta^{15}\text{N}$ 값은 6.0‰의 범위를 보이고 있고 저층 유기물의 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 값을 반영하고 있다.

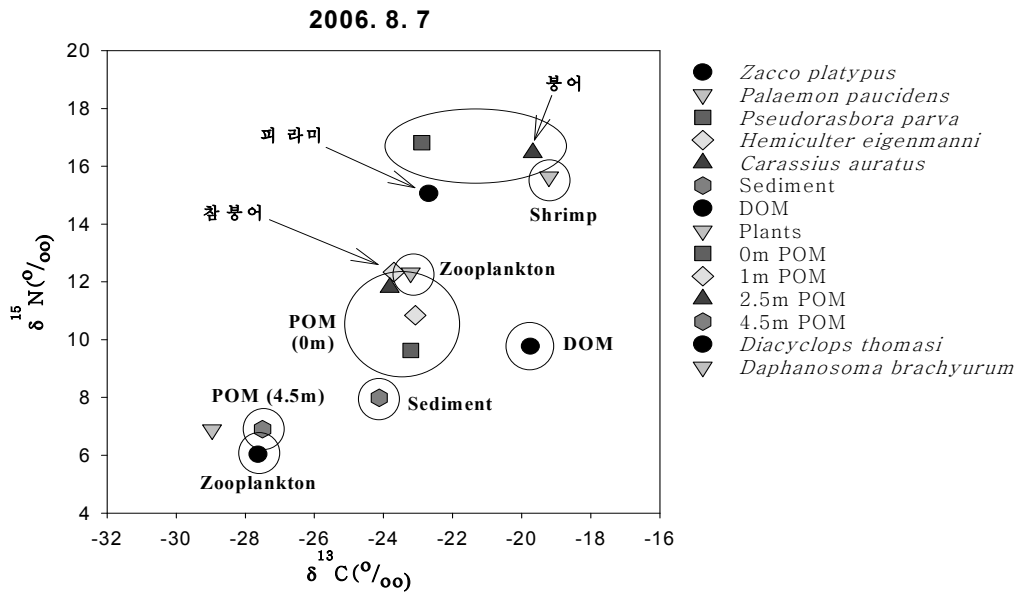
(7) 저수지내 먹이사슬 변화 연구

신구저수지에서의 각 영양단계별 food web을 연구하기 위하여 망목 크기가 20 μm , 63 μm , 100 μm 메시에 통과시켜 크기별로 입자성 유기물을 구분하였으며 동물플랑크톤은 net로 채집하여 종별로 구분하였다. 그 외에 식물 detritus, DOM을 채집하고 저수지내에 서식하는 어류 및 새우류를 채집하였다. 7월에는 *Daphanosoma brachyurum*, *Diacyclops thmoasi*, *Palaemon paucidens*, *Zacco platypus*, *Misgurnus anguillicaudatus*, *Misgurnus mizolepis*, *Rhynchocypris oxycephalus*, *Rhinogobius brunneus*, *Carassius atratus*, *Pseudorasbora parva*, *Pseudobagrus fulvidraco*, *Cobitis lutheri*, *Cyprinus carpio*, *Silurus asotus* 등이 발견되었으며 9월에는 7월보다 종수가 적은 *Daphanosoma brachyurum*, *Diacyclops thmoasi*, *Palaemon paucidens*, *Zacco platypus*, *Carassius auratus*, *Hemiculter eigenmanni*, *Pseudoras boraparva* 등이 발견되었다.

탄소 안정동위원소는 먹이원에 따라 0.8~1‰ 이내의 분별작용을 받아 그 먹이기원을 알아내는데 매우 유용하게 쓰이고 있으며(DeNiro & Epstein, 1978) 질소 안정동위원소는 기초 생산자와 소비자 사이에 약 3~4‰의 분별작용을 거치므로 소비자의 영양단계를 판별하는데 중요하게 쓰이고 있다(DeNiro & Epstein, 1981).



[그림 3.3.26] 신구저수지 내 영양단계별 foodweb 모식도(7월)



[그림 3.3.27] 신구저수지 내 영양단계별 foodweb 모식도(9월)

신구저수지내에서 7월에는 *Cobitis lutheri*, *Cyprinus carpio*, *Silurus asotus* 등의 질소안정동위원소비가 19.1‰~21.2‰로 상위영양단계를 이루고 있으며 그 밖의 *Daphanosoma brachyurum*, *Diacyclops thmoasi*, *Palaemon paucidens*, *Zacco platypus*, *Misgurnus anguillicaudatus*, *Misgurnus mizolepis*, *Rhynchocypris oxycephalus*, *Rhinogobius brunneus*, *Carassius atratus*, *Pseudorasbora parva*, *Pseudobagrus fulvidraco* 등의 어류의 질소안정동위

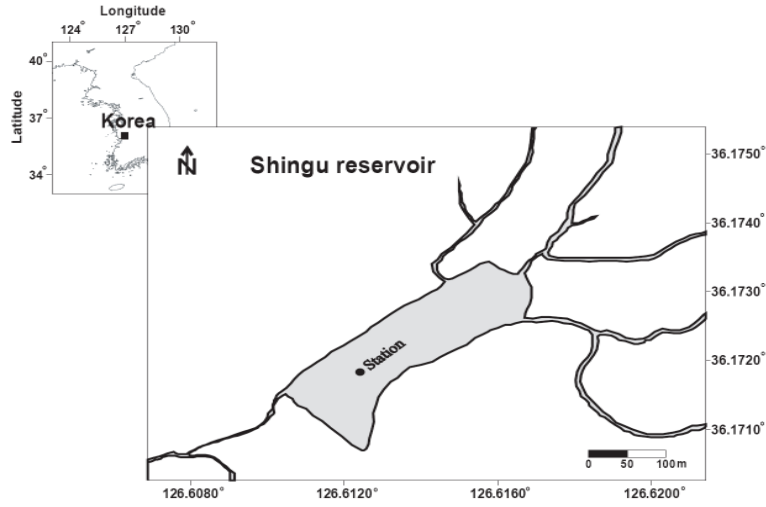
원소비는 14.7‰~16.3‰로 비슷한 수준의 영양단계를 가지고 있다. 8월에는 *Hemiculter eigenmanni*, *Carassius auratus* 등의 어류의 질소안정동위원소비가 16.9‰~17.5‰로 상위영양 단계를 나타내고 있으며 *Zacco platypus*, *Pseudorasbora parva* 등의 어류의 질소안정동위원소비가 12.5‰~14.8‰로 비슷한 수준의 영양단계를 보이고 있다[그림 3.3.26, 3.3.27]. 강우기 전후를 살펴보면 어류의 종의 차이가 나타나고 그 중에서 *Carassius auratus*, *Zacco platypus*, *Pseudorasbora parva* 종이 7월과 9월에 모두 발견되었다. *Carassius auratus* 종은 7월과 9월 모두 상위영양단계에 속해 있었으며 *Zacco platypus*, *Pseudorasbora parva* 종은 *Carassius auratus* 종보다 낮은 영양단계에 속해있다. 이들의 탄소 안정동위원소비를 살펴보면 *Carassius auratus* 종은 강우전(-18.19‰)보다 강우후(-19.21‰)에 약 1‰ 가벼워졌으며 *Zacco platypus* 종은 강우전(-22.75‰)과 강우후(-22.69‰)가 거의 변화가 보이지 않았고 *Pseudorasbora parva* 종은 강우전(-21.21‰)보다 강우후(-23.7‰)로 약 2.5‰ 가벼워졌다. 질소안정동위원소비는 *Carassius auratus* 종은 강우전(-19.19‰)보다 강우후(-16.47‰)에 약 2.7‰ 가벼워졌으며 *Zacco platypus* 종은 강우전(-14.69‰)과 강우후(-15.06‰)가 거의 변화가 보이지 않았고 *Pseudorasbora parva* 종은 강우전(-14.65‰)보다 강우후(-12.34‰)로 약 2.3‰ 가벼워졌다. 이러한 변화는 강우후에 외부로부터 유입된 탄소안정동위원소비(-27.9‰)와 질소안정동위원소비(6.9‰)가 가벼운 유기물(plant detritus)에 의해 어류의 탄소안정동위원소비의 변동이 생긴 것으로 여겨진다. 실제적으로 7월에 수심에 따른 모든 유기물의 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 -25.1~-26.1‰로 1‰의 범위를 가지며 8월에는 -23.2~-27.5‰의 유의한 변화를 보이고 있다. $\delta^{15}\text{N}$ 값은 7월에 10.5~13.7‰, 8월에 6.9~12.0‰로 무거운 값을 보이고 있다. 하지만 강우후에 외부로부터 유입된 유기물의 영향을 받은 저층에서의 입자성 유기물의 탄소, 질소 동위원소비는 표층의 유기물보다 상당히 가벼운 값을 보이고 있다. 즉, 신구저수지에 서식하는 어류는 강우후에 자생기원 유기물보다는 외부기원 유기물에 의해 먹이에 의한 에너지 전달경로가 큰 영향을 받은 것으로 여겨진다.

2. 유용생물에 의한 남조류 제어효과 연구(신구저수지 메소코즘 실험)

가. 현장 실험

(1) 현장 실험의 개요

신구저수지는 충청남도 보령시 주안면에 위치한 농업용 저수지로서(면적 0.1 km², 최대수심 7.0 m), 유역면적은 2.55 km²이며 유로연장이 각각 1.3 km, 3.4 km인 2개의 유입수로를 가지고 있다[그림 3.3.28]. 평균수심이 3.9 m이고 유효 저수량은 38.8만톤이며 연평균 Chl-*a* 농도가 25 $\mu\text{g L}^{-1}$ 이상인 부영양 저수지이다(농림부, 2000).



[그림 3.3.28] 신구저수지에서의 메소코즘 설치

현장 실험은 신구저수지에서 남조류(*Microcystis* sp.)가 번성하는 시기에 메소코즘을 설치하여 실시하였다[그림3.3.29]. 현장에 가로 1.3 m, 세로 1.3 m, 높이 2.0 m의 메소코즘(Mesocosm, 중형생태계)을 설치하여 현장의 자연 상태를 유지하도록 하였다. 메소코즘은 테플론 재질을 이용하여 제작하였으며 수체내의 거동이 원활하도록 사각형 모형을 사용하였다. 메소코즘(Mesocosm)은 총 10개를 설치하여 [그림 3.3.30]과 같이 고정하였으며 남조류의 안정화를 위하여 설치 후 2일간의 안정화 시간을 가진 후 실시하였다.



[그림 3.3.29] 메소코즘 설치 당시 신구저수지내 남조류 번성 모습



[그림 3.3.30] 신구저수지내 메소코즘 모형

(2) 현장 실험의 내용

동위원소란 같은 원자번호를 가지면서 질량수가 다른 원자를 말한다. 이들의 상대적인 농도 비를 이용하면 생물학적, 지질학적, 물리적, 화학적 과정을 연구하는 추적자로 이용할 수 있다. 본 연구에서 사용한 추적자 원소인 탄소, 질소의 경우 자연 상태에서는 ^{12}C 가 98.9% ^{13}C 가 1.1%, ^{14}N 이 99.6%, ^{15}N 이 0.4%를 차지하고 있다. 매우 적은 부분을 차지하고 있는 ^{13}C , ^{15}N 을 $^{13}\text{C}-\text{HCO}_3^-$, $^{15}\text{N}-\text{NH}_4^+$ 를 이용하여 인위적으로 자연상태보다 15% enrichment 시켜 메소코즘 내에서의 질소 순환 및 생산성에 관하여 연구하였다.



[그림 3.3.31] 메소코즘내 추적자(^{13}C , ^{15}N) 첨가 모습

메소코즘은 총 10개로 구분하였으며 탄소의 추적자인 $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ 과 질소의 추적자인 $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, K^{15}NO_3 을 사용하였다. 각각의 추적자가 들어간 메소코즘의 모습은 아래와 같다.

M1 ^{19}C , ^{15}N 인공식물섬	M2 ^{13}C , ^{15}N 말조개	M3 ^{13}C , ^{15}N 새뱅이	M4 ^{13}C , ^{15}N 새뱅이+동자개	M5 ^{13}C , ^{15}N CONTROL
M6 ^{12}C , ^{14}N 인공식물섬	M7 ^{12}C , ^{14}N 말조개	M8 ^{12}C , ^{14}N 새뱅이	M9 ^{12}C , ^{14}N 새뱅이+동자개	M10 ^{12}C , ^{14}N CONTROL

[그림 3.3.32] 신구저수지내 메소코즘별 유형생물 도식도

신구저수지내 메소코즘(Mesocosm) 실험은 2007년 9월 29일부터 22일까지 총 10회에 걸쳐 실시하였다. 9월 29일에 메소코즘을 설치하여 안정화 기간을 거친 후 추적자를 첨가하여 10월 1일부터 유용생물을 투입하여 10월 22일까지 3주 동안 대상생물을 채집하였다(10월 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 14, 22일). 대상생물중에서 동물플랑크톤은 size 60 μm 인 동물플랑크톤 Net를 이용하여 채집하였으며 새뱅이 및 동자개는 어항을 이용하여 채집하였다[그림 3.3.33]. 이에 대한 내용은 [표 3.3.10]에 나타내었다.



[그림 3.3.33] 메소코즘내 대상생물 채집 모습

[표 3.3.10] 신구저수지 현장 조사 일정

날 짜	목적	실험 내용	채취한 시료
2007년 9월 29일	예비 조사	- 메소코즘 설치 - 추적자 투입 - 초기 환경 조사	- SPM/POM, POC/PN, DIC/DIN, DOC/DON 농도 측정을 위한 시료 - 체내 안정동위원소 측정을 위한 유용생물(말조개, 줄새우, 동자개, 인공식물) 채집
2007년 10월 1일 ~ 2007년 10월 22일	1차 조사	- 유용생물 투입 - 현장배양실험 - 유용생물 군집의 남조류(<i>Microcystis</i>) 제어 능력 파악	- SPM/POM, POC/PN, DIC/DIN, DOC/DON 농도 측정을 위한 시료 - 체내 안정동위원소 측정을 위한 유용생물(말조개, 줄새우, 동자개, 인공식물) 채집

(3) 실험방법

(가) 입자성 부유물질 / 입자성 유기물질 (SPM/POM)

SPM과 POM은 각 수심별로 채수한 후 각 크기별로 미리 무게를 측정된 47 mm GF/F 여과지에 여과한 후 70°C의 oven에서 건조시켜 데시케이터에 넣어서 방냉한 후 전자저울로 무게를 측정한다. 그 후 아래 식에 따라 계산한다.

$$\text{SPM}(\text{mg L}^{-1}) = (b - a) / V$$

a : 여과하기 전 GF/F filter paper의 무게(mg)

b : 여과 한 후 GF/F filter paper의 무게(mg)

v : 여과 한 물의 양(L)

POM은 SPM을 측정한 여과지를 전기로(Furnace)를 사용하여 450°C에서 1시간 동안 태워 유기물을 제거한 후 전자저울로 무게를 측정한다.

$$\text{POM}(\text{mg L}^{-1}) = \text{SPM}(\text{mg L}^{-1}) - \text{태운 후의 여과지의 무게}(\text{mg})$$

(나) 총알칼리도

총 알칼리도는 Gran titration(Gran, 1952) 방법을 통해 측정하였다. 현장에서 채취한 샘플의 초기 pH값을 측정한 후, HCl을 첨가하면서 감소된 pH와 첨가된 염산량의 자료를 얻은 후, 이들의 상관관계를 얻는다. 이 때, 필요한 자료는 적어도 4 set 이상이며, pH의 범위는 3.5~4.0으로 한다. 얻어진 자료를 통해 총 알칼리도를 계산하며, 그 식은 아래와 같다(Lahav *et al.* 2001).

$$\text{Total alkalinity} (\text{moles L}^{-1}) = (V_e \times C_a) / V_s$$

여기서 V_s 는 시료의 부피, Ca 는 넣어준 염산의 농도를 의미하며, V_e 는 H_2CO_3 의 당량점에 도달하는데 까지 첨가된 염산의 양으로 다음과 같은 식을 통해 구할 수 있다.

$$F_{IX} = 10^{-pH_x}(V_s + V_x) = Ca(V_e - V_x)$$

염산을 첨가하여 시료의 pH가 3.5에서 4.0 사이에 도달하게 한 후, 그때의 pH값과 시료의 부피, 넣어준 염산의 양(V_x)을 통해 F_{IX} 의 값을 구한다. 그 후, F_{IX} 와 V_x 의 상관식을 계산하며, 이 때 얻어진 식의 y절편의 값이 V_e 가 된다.

(다) 용존성 무기탄소(Dissolved inorganic carbon) 농도 계산

DIC의 농도는 총 알칼리도(Total alkalinity)의 값을 측정하여 아래의 식을 참고하여 계산하였다(Pilson, M.E.Q., 1998).

$$[TCO_2] = ([TA] - \frac{K_B^* [TB]}{\{H^+\} + K_B^*}) \left(\frac{\{H^+\}^2 + \{H^+\}K_1^* + K_1^*K_2^*}{K_1^* (\{H^+\} + 2K_2^*)} \right)$$

$[TCO_2]$: 용존성 무기탄소의 농도(전탄산 농도)

$[TA]$: 총 알칼리도

K_B^* : 붕산의 겔보기 분리상수 (Edmond and Gieskes(1970)의 식을 통해 계산)

$[TB]$: 전체 붕소의 농도($[TB] = 11.88 \times 10^{-6} \times \text{Salinity}$ (Pilson, M.E.Q., 1998))

$\{H^+\}$: 수소이온 농도

K_1^*, K_2^* : 탄산의 첫 번째, 두 번째 겔보기 분리 상수(Plath *et al.*(1980)의 식을 통해 계산)

(라) 저수지내 유용생물 체내의 탄소와 질소의 안정동위원소비 측정

대상생물(어류, 새우류 등)을 기관별로 나눈 후[그림 3.3.34, 3.3.35, 3.3.36] 동결 건조기를 사용하여 완전 건조시켜 시료분쇄기(pulverisette 6, Fritsch)를 이용하여 분말 상태로 갈아준다. 그 후 탄소 안정동위원소비 측정을 위한 시료는 1 N 염산을 이용하여 무기탄소를 제거한 뒤 증류수를 이용하여 염산을 제거하고, 동결 건조기에서 재건조 시킨다. 총 질소 안정동위원소비 측정을 위한 시료는 측정 자료에 영향을 미치지 않기 때문에 염산 처리를 해주지 않는다. 시료는 틴(Tin) 캡에 넣어 미국알래스카 주립대학 물환경연구소 WERC(Water Environmental Research Center)에 있는 원소-질량분석기(Elemental Analyzer - Mass Spectrometer)를 이용하여 분석하였다.

$$\delta^{13}\text{C}, \delta^{15}\text{N} = \{R(\text{sample})/R(\text{standard}) - 1\} \times 1000(\%)$$

$$R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}, {}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$$

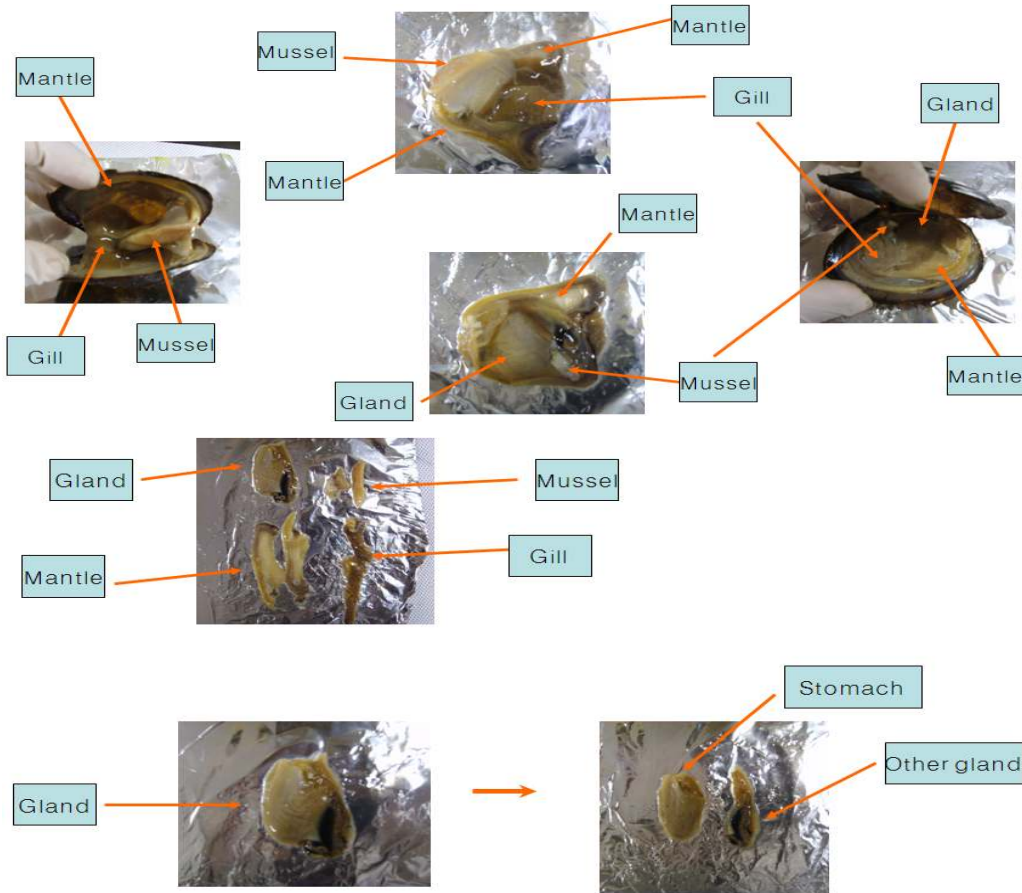
${}^{13}\text{C}$: ${}^{12}\text{C}$ 는 PDB(PeeDee Belemnite), ${}^{15}\text{N}$: ${}^{14}\text{N}$ 는 N_2 (Air)를 표준물질로 사용하였다.



[그림 3.3.34] 기관별 새뱅이 분해 모식도



[그림 3.3.35] 기관별 동자개 분해 모식도



[그림 3.3.36] 기관별 말조개 분해 모식도

(마) 저수지내 유용생물 체내의 지방산비 측정

입자성 물질의 지방산 생성속도를 측정하기 위하여 표층수 9 L를 채수하여 100 µm sieve로 거른 후 시료에 $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ (98%)를 첨가하여 ^{13}C 의 존재비를 약 16%까지 올려준 후 6시간 동안 배양하였다. 그 후 미리 태운 (450°C, 4시간) GF/F 여과지로 여과한 후 동결건조하여 내부표준물질(C^{19} : 0 사용) 첨가 후 Dicoloromethane-methanol(2:1 v/v) 용액으로 추출하고, Dicoloromethane층을 취해 sodium-methanol 용액으로 비누화 반응을 시켜준 후 BF_3 -methanol 용액을 첨가시켜 80°C에서 30분간 반응시켜 fatty acid를 fatty acid methyl ester형태로 전환시켰다. 지방산 농도 분석을 위한 시료는 capillary column(DB-5, 30 m × 0.25 mm i.d., 0.25 µm film thickness, Agilent, USA)을 이용하여 분리시킨 후, 불꽃 이온화 검출기가 장착된 gas chromatography(GC-2010, Shimadzu, Japan)를 이용하여 농도분석을 하였다. 시료 도입부와 검출부의 온도는 300°C로 설정하였으며, oven의 승온 조건은 40°C에서 1분간 유지시킨 후, 200°C까지 1분당 10°C씩, 250°C까지는 1분당 2°C씩, 300°C까지 1분당 10°C 상승시킨 후 10분간 유지시켰다. Carrier gas는 헬륨을 사용하였으며, 피크 동정은 GC/MS(GCMS-QP2010 plus, Shimadzu, Japan)를 이용하였다. 지방산의 생성속도 측정을 위한 시료 분석은 GC/MS를 이용

하였으며, isobutane을 사용하여 chemical ionization시켰다. Ion source의 온도는 200°C로 설정하였으며 모든 분석조건은 위에서 언급한 GC 분석조건과 동일하다. 각 지방산의 ^{13}C 원자 백분율은 GC/MS를 통해 얻어진 결과를 Kouchi 식(1982)을 이용하여 계산하였으며, 지방산의 생성 속도는 Hama *et al.* (1987)의 식을 통해 계산하였다.

$$\Delta FAC = FAC \times \frac{a_{is} - a_{ns}}{a_{ic} - a_{ns}}$$

ΔFAC : The amount of each fatty acid carbon photosynthetically produced during the incubation

a_{is} : ^{13}C atom % in each fatty acid of incubated sample

a_{ns} : ^{13}C atom % in each fatty acid of natural sample

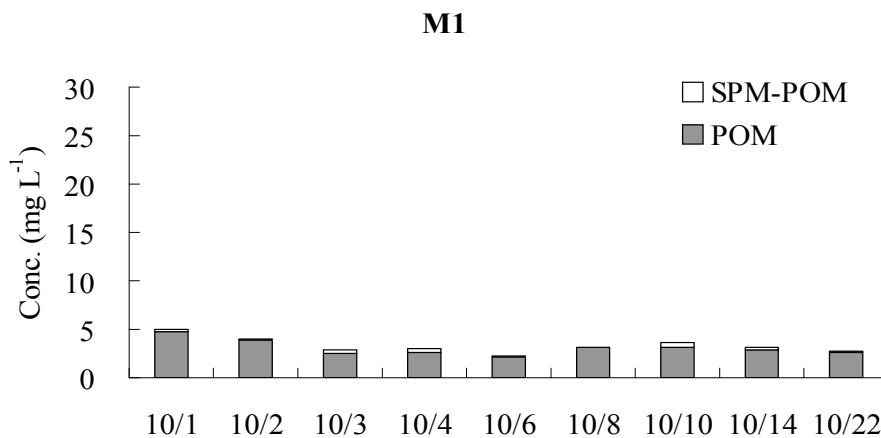
a_{ic} : ^{13}C atom % in ^{13}C enriched inorganic carbon

FAC : Concentration of each fatty acid carbon at the end of incubation

나. 결과 및 결론

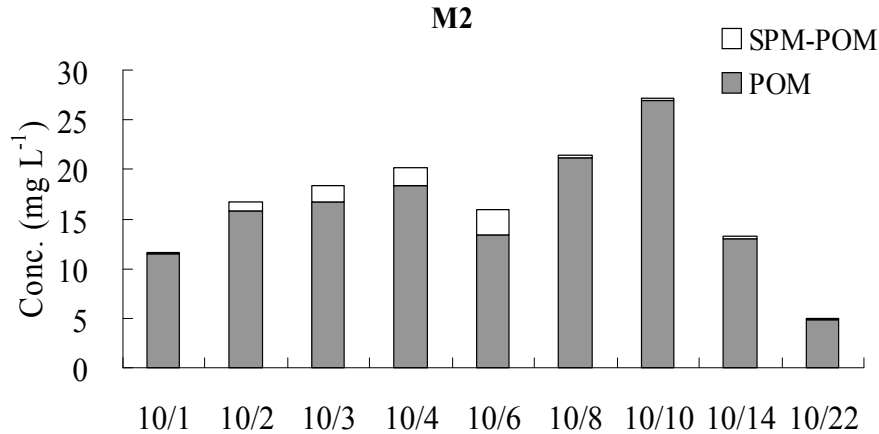
(1) 입자성 부유물질 및 입자성유기물의 농도변화

[그림 3.3.37]은 메소코즘 1(M1, 인공식물섬 투여) 내에서의 입자성 부유물질(SPM) 및 입자성유기물(POM)의 시간에 따른 농도변화를 보여주고 있다. SPM의 농도는 $2.27 \sim 5.05 \text{ mg L}^{-1}$ 의 분포를 보였으며, 시간에 따라 감소하는 경향을 보였다. 입자성유기물(POM)은 $2.18 \sim 4.73 \text{ mg L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였으며, SPM과 마찬가지로 10월 1일에 최고값을 보인 후 시간에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. M1의 SPM, POM 농도는 다른 메소코즘에 비해 현저히 낮은 값을 보였으며, SPM 중 POM이 차지하는 비율은 평균 93%로 입자성 부유물질의 대부분이 유기물로 이루어졌다는 것을 알 수 있다.



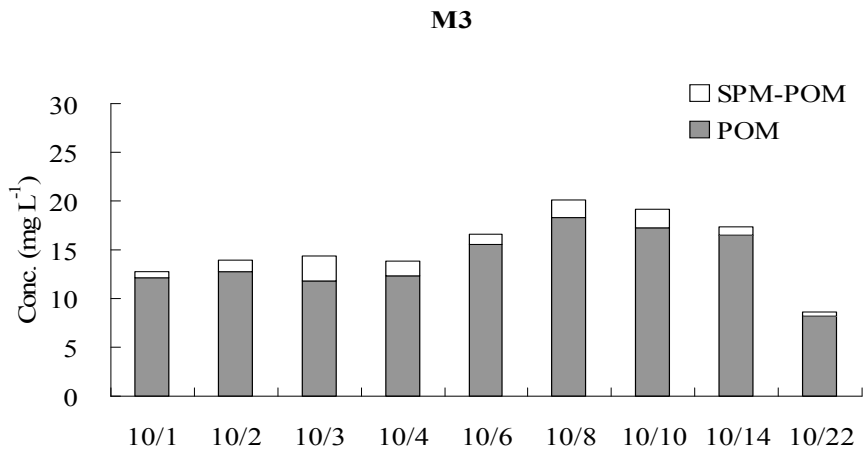
[그림 3.3.37] 메소코즘 1 내에서의 입자성 부유물질 및 입자성 유기물의 농도변화

[그림 3.3.38]은 메소코즘 2(M2, 말조개 투여) 내에서의 입자성 부유물질(SPM) 및 입자성 유기물(POM)의 시간에 따른 농도변화를 보여주고 있다. SPM의 농도는 5.04~27.17 mg L⁻¹의 분포를 보였으며, 시간에 따라 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 입자성 유기물(POM)은 4.82~26.97 mg L⁻¹의 농도분포를 보였으며, SPM과 마찬가지로 10월 10일에 최고값을 보인 후, 시간에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. SPM 중 POM이 차지하는 비율은 평균 95%였다.



[그림 3.3.38] 메소코즘 2 내에서의 입자성 부유물질 및 입자성유기물의 농도변화

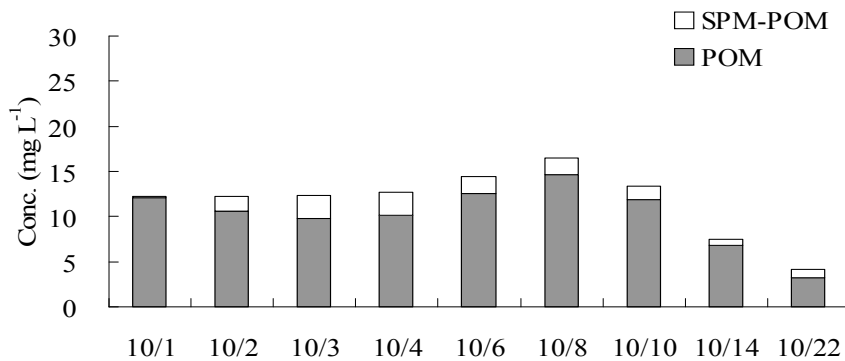
[그림 3.3.39]는 메소코즘 3(M3, 새뱅이 투여) 내에서의 입자성 부유물질(SPM) 및 입자성 유기물(POM)의 시간에 따른 농도변화를 보여주고 있다. SPM의 농도는 8.58~20.13 mg L⁻¹의 분포를 보였으며, M2와 마찬가지로 시간에 따라 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 입자성 유기물(POM)은 8.18~18.33 mg L⁻¹의 농도분포를 보였으며, SPM과 마찬가지로 10월 8일에 최고값을 보인 후, 시간에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. SPM 중 POM이 차지하는 비율은 평균 92%였다.



[그림 3.3.39] 메소코즘 3 내에서의 입자성 부유물질 및 입자성유기물의 농도변화

[그림 3.3.40]은 메소코즘 4(M4, 새뱅이와 동자개 투여) 내에서의 입자성 부유물질(SPM) 및 입자성유기물(POM)의 시간에 따른 농도변화를 보여주고 있다. SPM의 농도는 $4.11 \sim 16.48 \text{ mg L}^{-1}$ 의 분포를 보였으며, M1을 제외한 다른 메소코즘들과 마찬가지로 시간에 따라 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 입자성유기물(POM)은 $3.26 \sim 14.60 \text{ mg L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였으며, SPM과 POM 모두 M3과 같이 10월 8일에 최고값을 보인 후, 시간에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. SPM 중 POM이 차지하는 비율은 평균 87%로 다른 메소코즘에 비해 부유물질 중 무기물이 차지하는 비율이 비교적 높았다.

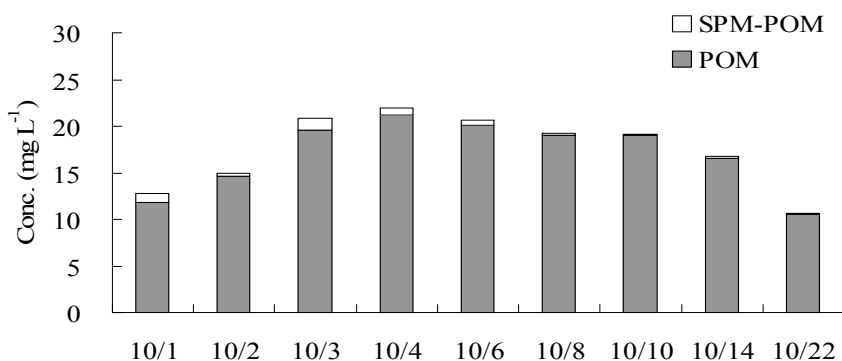
M4



[그림 3.3.40] 메소코즘 4 내에서의 입자성 부유물질 및 입자성유기물의 농도변화

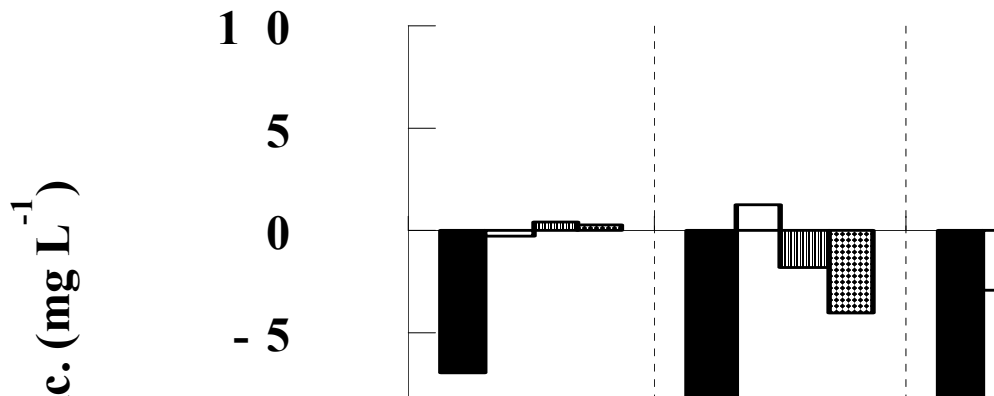
[그림 3.3.41]은 메소코즘 5(M5, 대조군) 내에서의 입자성 부유물질(SPM) 및 입자성유기물(POM)의 시간에 따른 농도변화를 보여주고 있다. SPM의 농도는 $10.68 \sim 21.92 \text{ mg L}^{-1}$ 의 분포를 보였으며, M1을 제외한 다른 메소코즘들과 마찬가지로 시간에 따라 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 입자성유기물(POM)은 $10.50 \sim 21.18 \text{ mg L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였으며, SPM과 POM 모두 10월 4일에 최고값을 보인 후, 시간에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. SPM 중 POM이 차지하는 비율은 평균 97%로 다른 메소코즘에 비해 가장 높은 값을 보였다.

M5

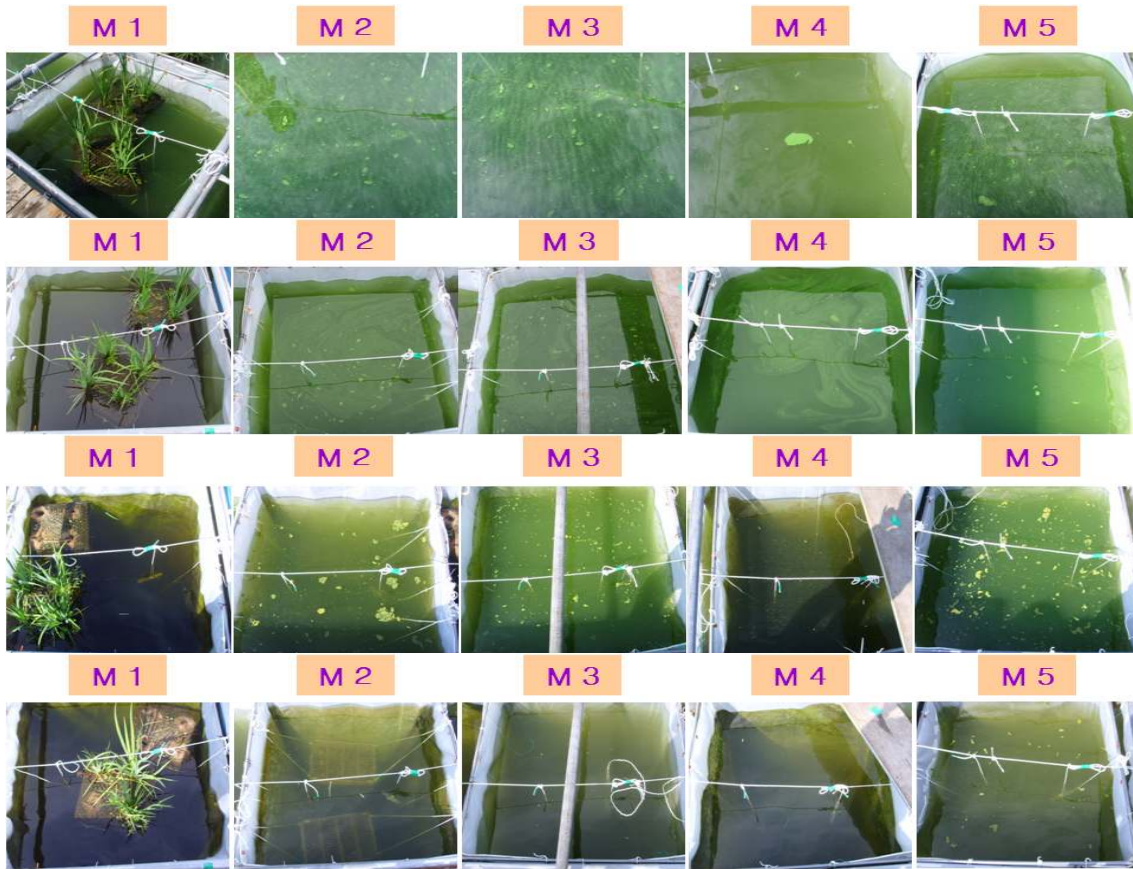


[그림 3.3.41] 메소코즘 5 내에서의 입자성 부유물질 및 입자성유기물의 농도변화

[그림 3.3.42]는 각 메소코즘 내에서 시간에 따라 감소된 입자성유기물의 양을 보여주고 있다. 여기서 감소된 양은 날짜별로 해당 메소코즘과 대조군(M5)과의 입자성유기물 농도차이로 구하였다. 그림에서 보는바와 같이 일부를 제외하고(M2, 10월 2일, 10월 8일, 10월 10일) 모든 메소코즘에서 대조군에 비해 입자성유기물의 양은 감소하였다. 가장 많은 양이 감소한 곳은 인공식물섬을 투여한 M1이었으며, 감소한 양의 범위는 $7.08 \sim 18.62 \text{ mg L}^{-1}$ 이었다. 메소코즘 실험이 시작된 후 차츰 감소되는 양이 증가하다가 10월 4일과 6일에 가장 높은 감소를 보인 후, 차츰 그 양이 줄어들고 있다. 다음으로 감소한 양이 많은 메소코즘은 새뱅이와 동자개를 함께 투여한 M4였으며, 그 범위는 $4.03 \sim 11.06 \text{ mg L}^{-1}$ 이었다. M4에서는 M1과 달리 감소되는 양이 시간에 따라 증가하다가 10월 8일에 현저하게 줄어든 후, 다시 증가하였다. 새뱅이를 투여한 M3는 감소한 양의 범위가 $0.11 \sim 8.86 \text{ mg L}^{-1}$ 였으며, M4와 달리 감소되는 양이 증가하다가 10월 6일부터 차츰 줄어든 후, 계속 낮은 값을 보였다. 다른 메소코즘과 달리 말조개를 투여한 M2에서는 10월 2일, 10월 8일, 10월 10일 세 차례에 걸쳐 대조군 보다 입자성유기물의 양이 높았으며, 이는 말조개가 분비하는 입자성유기물에 의한 것, 혹은 원생동물이나 동물플랑크톤의 bloom 등으로 생각해 볼 수 있으나 추후 다른 결과와의 비교를 통해 확인해 보아야 할 것이다.



[그림 3.3.42] 시간에 따라 감소된 입자성유기물의 양



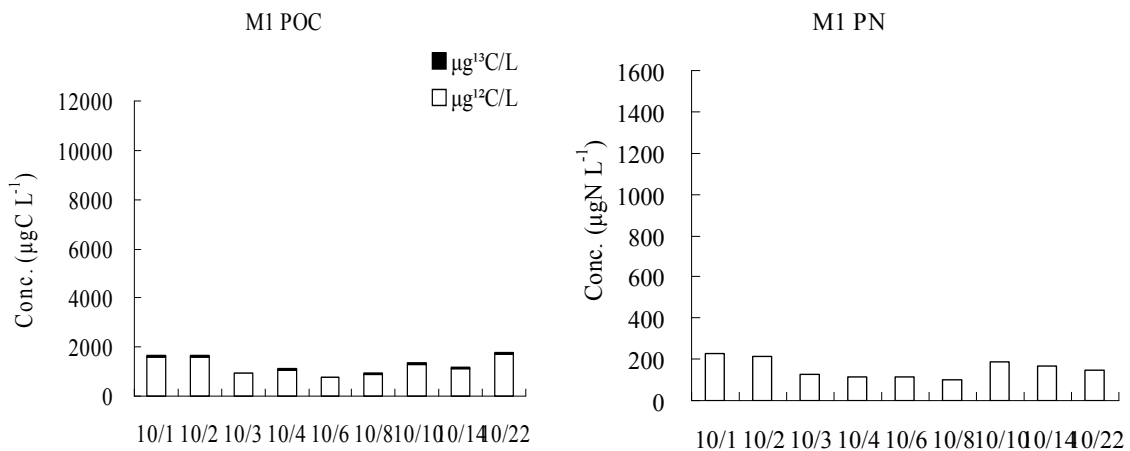
[그림 3.3.43] 메소코즘 현장실험 모습(위에서부터 10월 1일, 4일, 10일 22일)

	10/1	10/2	10/3	10/4	10/6	10/8	10/10	10/14	10/22
M1									
M2									
M3									
M4									
M5									

[그림 3.3.44] 시간에 따른 메소코즘내 POM 여과지의 농도 변화

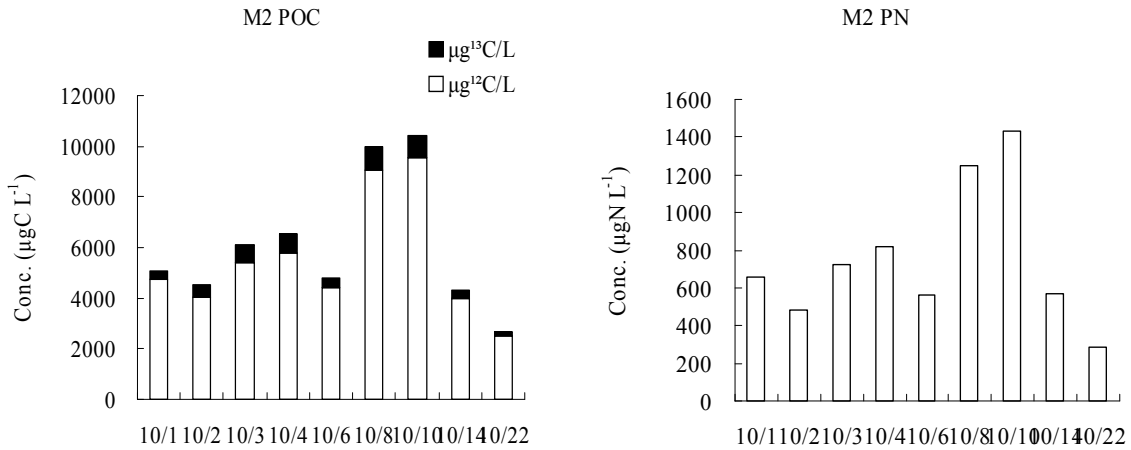
(2) 입자성 유기탄소 및 입자성 질소의 농도변화

[그림 3.3.45]는 M1 내에서 입자성 유기탄소(POC)와 입자성 질소(PN)의 농도변화를 보여주고 있다. POC는 $797 \sim 1,647 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였으며, PN는 $111 \sim 230 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였다. 이 두 값은 메소코즘 실험이 실시된 후 감소하는 경향을 보이다가 10월 10일부터 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. POC 내에서 검정색 bar로 표시된 부분은 POC 내에서 ^{13}C 원자가 차지하는 양을 나타내는 것으로 그 값은 $31 \sim 62 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, POC 내에서 차지하는 비율은 실험기간 동안 큰 변화 없이 약 4%를 유지하였다. POC와 PN의 농도 역시 SPM/POM의 결과와 마찬가지로 M1에서 다른 메소코즘에 비해 가장 낮은 값을 보였다.



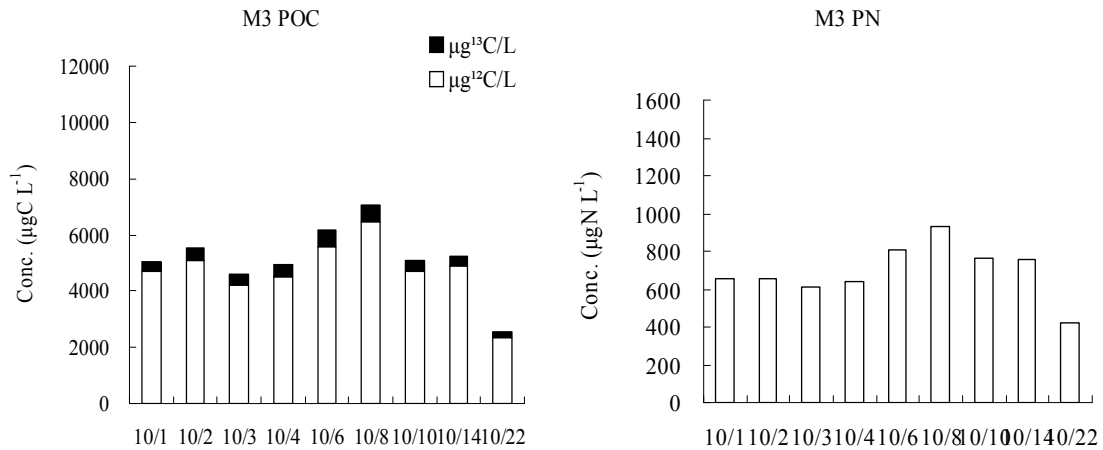
[그림 3.3.45] M1 내에서의 시간에 따른 입자성 유기탄소와 입자성 질소의 농도변화

[그림 3.3.46]은 M2 내에서 POC와 PN의 농도변화를 보여주고 있다. POC는 $2,681 \sim 10,410 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였으며, PN는 $288 \sim 1,246 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였다. POC와 PN의 농도분포는 M1과는 다른 경향을 보였는데, 비교적 10월 6일까지는 비슷한 값을 보이다가 10월 8일과 10일에 크게 증가한 후 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 위의 SPM/POM의 결과와 일치한다. 그림 8에서 검정색 bar로 표시된 부분은 POC 내에서 ^{13}C 원자가 차지하는 양으로, 이는 실험기간 동안 광합성을 통해 새롭게 생성된 유기물이라 할 수 있다. 그러나 엽록소-*a*의 농도와 ^{13}C 가 라벨링 된 POC 간의 상관관계를 계산해 보았을 때, 다른 메소코즘은 모두 양의 상관관계를 보인 반면, M2에서는 음의 상관관계를 보였다. 이는 10월 8일과 10일에 높게 나타난 POC와 PN, POM의 값은 식물플랑크톤이 광합성을 하여 새롭게 만들어 낸 유기물에 비해 다른 경로를 통해 공급된 유기물의 양이 많은 것이라 짐작할 수 있다. 또한 이들 내에 ^{13}C 가 존재한다는 것은 다른 경로를 통해 공급된 유기물 역시 실험기간 동안 광합성을 통해 만들어진 유기물이 포함되어 있음을 의미한다. 이들을 구성하는 유기물은 말조개가 식물플랑크톤을 섭식한 후 배설한 유기물 혹은 식물플랑크톤을 섭식하는 동물플랑크톤이나 원생동물 등으로 짐작해 볼 수 있으나, 이는 차후 다른 분석 결과와 함께 판단해 보아야 할 것이다. POC 내에서 ^{13}C 원자가 차지하는 비율은 평균 9%이다.



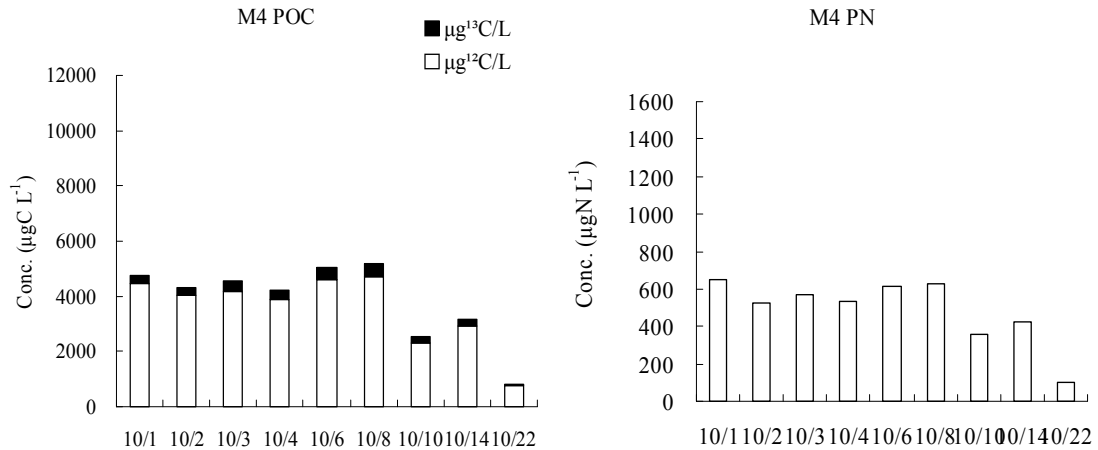
[그림 3.3.46] M2 내에서의 시간에 따른 입자성 유기탄소와 입자성 질소의 농도변화

[그림 3.3.47]은 M3 내에서의 농도변화를 보여주고 있으며, POC는 2,529~7,055 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였으며, PN는 420~931 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였다. 이 두 값은 시간이 지날수록 약간 증가하긴 하지만, 전반적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. POC 내에서 ^{13}C 원자가 차지하는 양은 158~558 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, POC 내에서 평균 8%를 차지하였다.



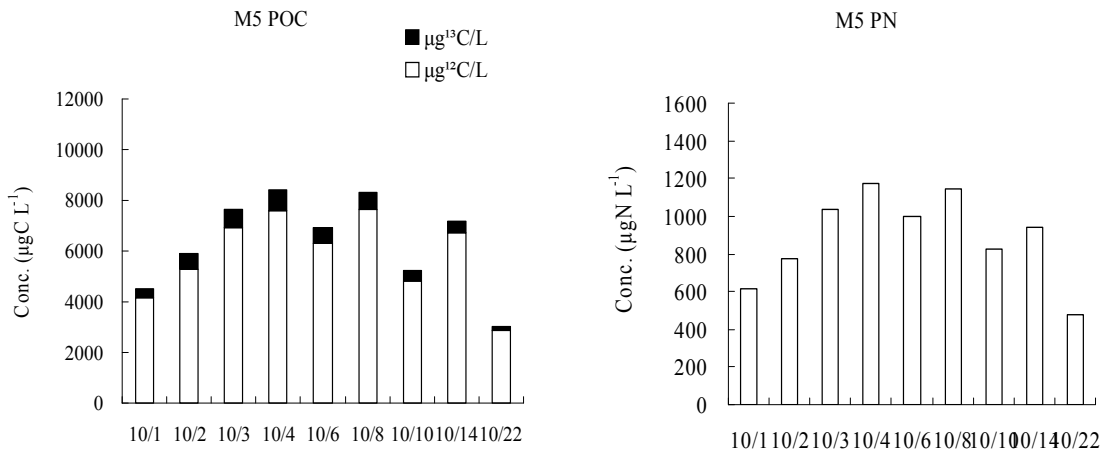
[그림 3.3.47] M3 내에서의 시간에 따른 입자성 유기탄소와 입자성 질소의 농도변화

[그림 3.3.48]은 M4 내에서의 농도변화를 보여주고 있으며, POC는 808~5,164 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였으며, PN는 103~611 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였다. 이 두 값은 시간이 지남에 따라 감소하는 경향을 보이고 있으며, 실험 마지막 날인 10월 22일 POC와 PN의 농도는 다른 메소코즘에 비해 가장 낮은 값을 보이고 있다. POC 내에서 ^{13}C 원자가 차지하는 양은 42~468 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, POC 내에서 평균 7%를 차지하였다.



[그림 3.3.48] M4 내에서의 시간에 따른 입자성 유기탄소와 입자성 질소의 농도변화

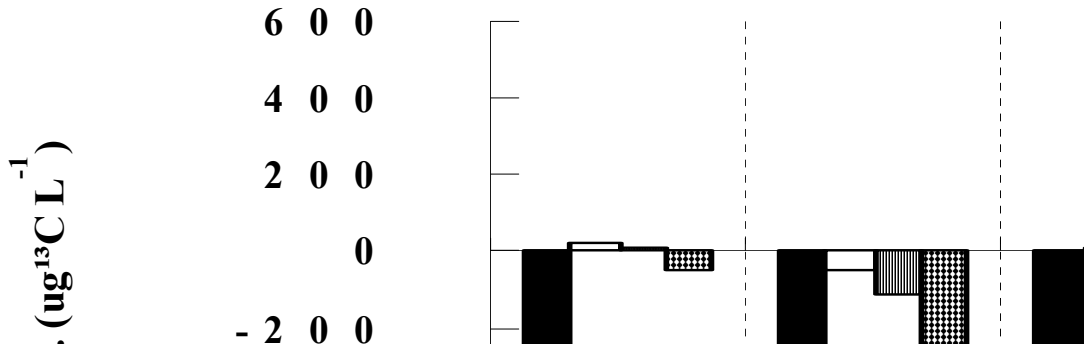
[그림 3.3.49]는 대조군인 M5 내에서의 농도변화를 보여주고 있으며, POC는 3,039~8,389 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였으며, PN는 477~1,174 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였다. 이 두 값은 시간이 지남에 따라 증가하다가 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이는 POM이나 엽록소-a, POC, PN, ^{13}C 가 라벨링 된 POC의 모든 결과에서 나타나는 경향으로, 다른 유용생물이 없는 환경에서도 시간이 지남에 따라 조류의 양이 감소하고 있음을 의미한다. POC 내에서 ^{13}C 원자가 차지하는 양은 179~774 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, POC 내에서 평균 8%를 차지하였다.



[그림 3.3.49] M5 내에서의 시간에 따른 입자성 유기탄소와 입자성 질소의 농도변화

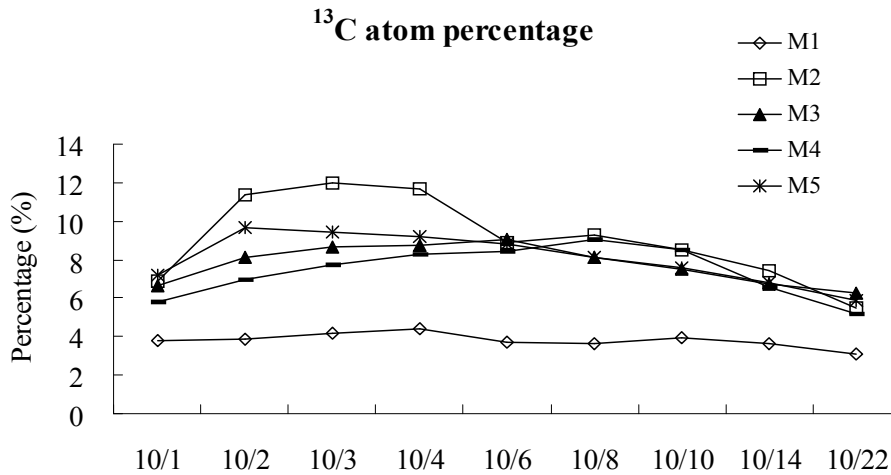
[그림 3.3.50]은 각 메소코즘 내에서 시간에 따라 감소된 ^{13}C POC(^{13}C 가 라벨링 된 POC)의 양을 보여주고 있으며, [그림 3.3.42]에서 본 POM 결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

가장 많은 양이 감소한 M1에서는 그 범위가 123~725 $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었으며, 그 다음인 M4에서는 51~424 $\mu\text{g L}^{-1}$, M3에서는 15~342 $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었다. M2에서는 POM과 같이 10월 8일과 10일에 대조군 보다 ^{13}C POC 양이 높았다.



[그림 3.3.50] 시간에 따라 감소된 13C가 라벨링 된 입자성 유기탄소의 양

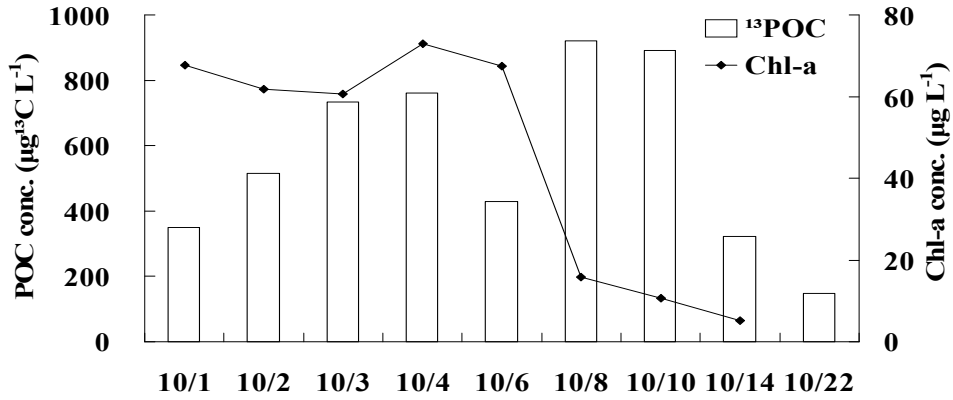
[그림 3.3.51]은 POC 내에 ^{13}C 원자가 차지하는 비율을 나타낸 것으로, M1에서는 3.1~4.4, M2에서는 5.5~11.9, M3에서는 6.2~9.1, M4에서는 5.2~9.1, M5에서는 5.9~9.4의 범위를 보였다. M2의 값은 10월 2일부터 10월 6일까지 대조군 보다 높으며, 그 후에는 M2뿐 아니라 M4까지 대조군보다 높은 값을 보이고 있다. 이는 위에서 언급한 바와 같이 유용생물의 배설 등을 통해 ^{13}C 가 라벨링 된 유기물이 공급되었을 가능성, 혹은 식물플랑크톤을 섭식하는 동물플랑크톤이나 원생동물이 이 두 메소코즘 내에서 대량 번식을 일으켰을 가능성을 생각해 볼 수 있다.



[그림 3.3.51] 시간에 따른 입자성 유기물 내 ^{13}C 원자의 백분율

[그림 3.3.52]는 메소코즘 2에서 실험기간 동안 ^{13}C -POC와 Chl-*a*의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 유용생물 투입 후 7일과 9일 쯤(10/8, 10/10)에 ^{13}C -POC와 Chl-*a*의 변화양상이 일치하지 않는 것을 볼 수 있다. 따라서 이때 크게 증가한 입자성 유기물은 메소코

즘 내에서 광합성을 통해 생성된 유기물이지만, 살아있는 식물플랑크톤 세포는 아닌 것으로 판단되며, 이들의 유입경로는 위에서 언급한 바와 같다.



[그림 3.3.52] 메소코즘 기간 동안 ¹³C-POC와 Chl-*a*의 변화(M2)

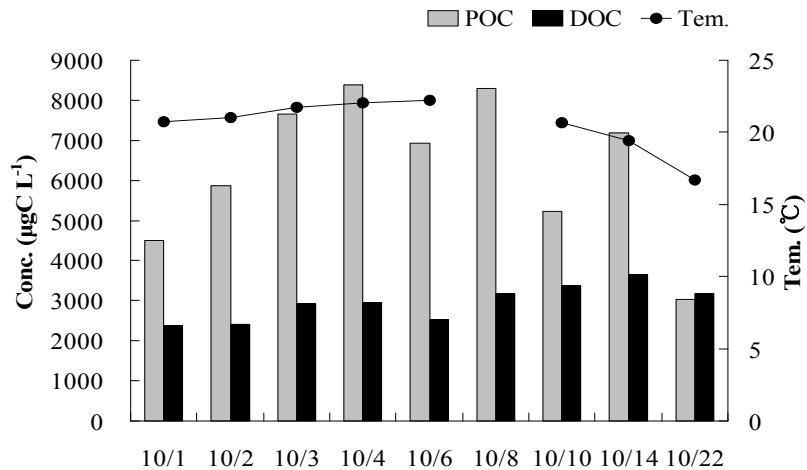
(3) 대조구 (M5)에서의 입자성 유기탄소 및 입자성 질소의 감소

위에서 언급한 바와 같이 유용생물을 처리하지 않은 메소코즘 내에서 입자성 유기탄소 및 입자성 질소가 시간에 따라 감소하였다. 이는 수온의 감소, 영양염류의 감소 등 여러 환경적 요소에 의한 결과일 가능성이 높다.

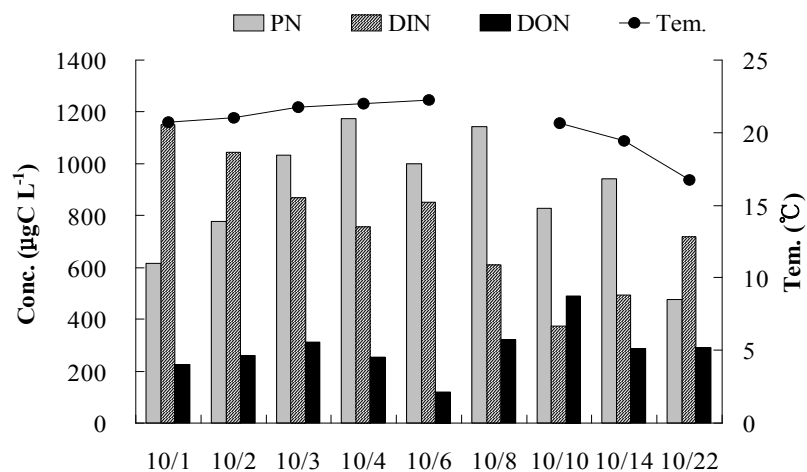
[표 3.3.11] 대조구 내 각 요소들 간의 상관관계(r)

	Chl- <i>a</i>	¹³ C-POC	Temp	DIN	DO	NTU	pH	POC	PN
chl- <i>a</i>	1.0								
¹³ C-POC	0.4	1.0							
Temp	0.9	0.8	1.0						
DIN	0.2	0.0	0.3	1.0					
DO	0.6	0.8	0.9	-0.2	1.0				
NTU	0.6	0.9	0.8	-0.2	0.9	1.0			
pH	0.3	0.6	0.7	-0.4	0.9	0.9	1.0		
POC	0.1	0.9	0.7	-0.2	0.8	0.9	0.7	1.0	
PN	0.3	0.9	0.8	-0.3	0.8	0.9	0.8	1.0	1.0

[표 3.3.11]은 대조구 내 각 요소들 간의 상관관계(r)를 나타내고 있으며, 0~0.5는 상관도 낮음(진한회색), 0.6~0.7은 상관도 있음(흰색), 0.8~1은 상관도 좋음(회색)으로 정의한다. 표에서 보는바와 같이 용존무기질소(DIN)는 모든 항목과 낮은 상관도를 보였는데, 이는 DIN은 광합성 하는데 사용되어 농도가 감소하기도 하고, 유기물 분해에 의해 농도가 증가하기도 하기 때문에 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는 것으로 사료된다. Chl- a 는 수온과는 높은 상관관계를 보인 반면, 용존산소와 탁도와는 상관도가 있고, 다른 항목들과는 상관도가 낮은 것으로 나타났다. ^{13}C -POC는 메소코즘 실험이 시작된 후 광합성을 통해 생성된 유기물을 의미하며, POC, PN, 탁도와 높은 상관관계를 보인다. 따라서 대조구 내에서 POC 및 PN은 식물플랑크톤 광합성을 통해 생성된 유기물이 대부분이라고 판단할 수 있다. 이들의 농도 증가 및 감소는 곧바로 탁도와 연결되기 때문에 탁도(NTU)와 높은 상관도를 보이고 있다. 수온은 DIN을 제외하고 모든 항목들과 비교적 높은 상관관계를 보이고 있다. 따라서 대조구 내에서 시간에 따른 POC, PN 감소는 영양염류의 부족보다 수온 감소에 의한 결과로 사료된다.



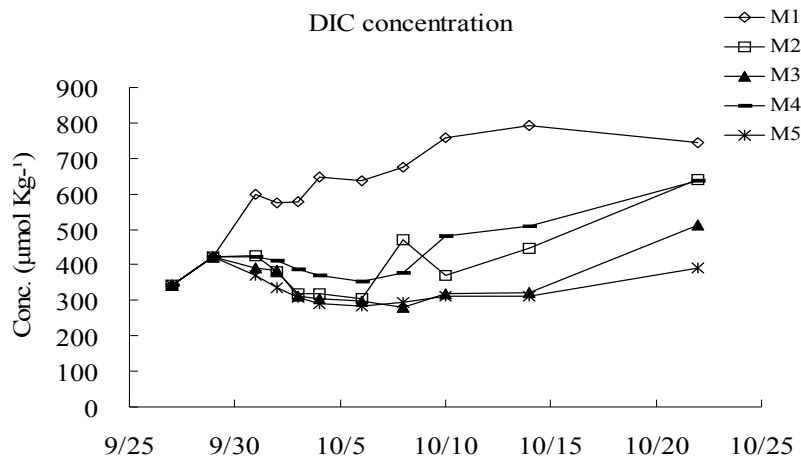
[그림 3.3.53] 시간에 따른 탄소 pool과 온도의 변화



[그림 3.3.54] 시간에 따른 질소 pool과 온도의 변화

[그림 3.3.53]은 대조구 내에서 시간에 따른 탄소 pool(POC, DOC)과 온도의 변화를, [그림 3.3.54]는 대조구 내에서 시간에 따른 질소 pool(PN, DIN, DON)과 온도의 변화를 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서 대조구를 비롯한 모든 메소코즘은 유용생물의 영향뿐만 아니라 시간이 지날수록 감소하는 수온에 의한 영향 역시 나타났을 것으로 사료된다.

(4) 용존 무기탄소의 농도변화

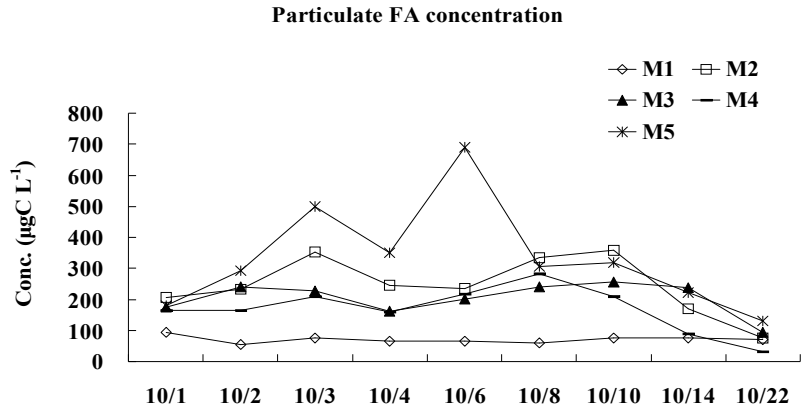


[그림 3.3.55] 시간에 따른 용존성 무기탄소의 농도변화

수계 내 탄소의 pool은 크게 용존성 무기탄소(DIC), 용존성 유기탄소(DOC), 입자성 유기탄소(POC)로 나누어 생각할 수 있다. [그림 3.3.55]는 이들 중 하나인 DIC의 농도변화를 보여주고 있다. 메소코즘 별로 차이는 있지만, 전반적으로 시간이 지날수록 이들 농도는 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이는 대기에서의 이산화탄소 유입 혹은 수계 내에서의 유기물 분해에 의한 결과로 생각할 수 있다. M1에서 이들 농도분포는 $638 \sim 793 \mu\text{mol Kg}^{-1}$, M2에서는 $303 \sim 640 \mu\text{mol Kg}^{-1}$, M3에서는 $280 \sim 512 \mu\text{mol Kg}^{-1}$, M4에서는 $352 \sim 636 \mu\text{mol Kg}^{-1}$, M5에서는 $285 \sim 391 \mu\text{mol Kg}^{-1}$ 이었다.

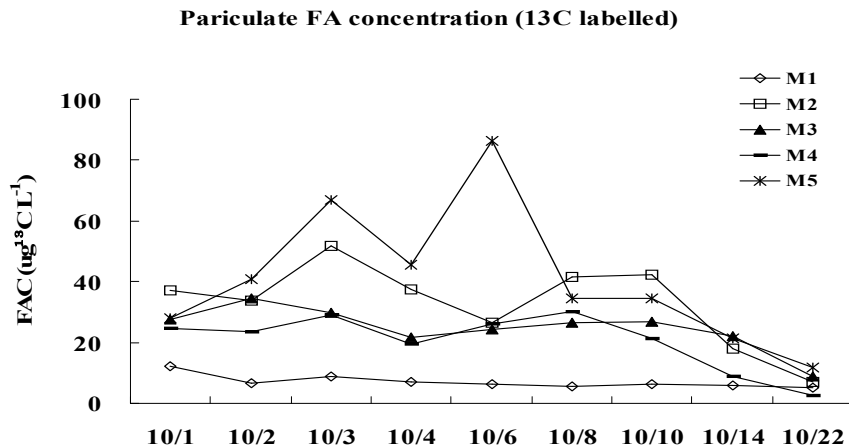
(5) 시간에 따른 입자성 지방산의 농도변화

[그림 3.3.56]은 메소코즘 별 시간에 따른 입자성 지방산의 농도변화를 보여주고 있으며, 이는 전체 입자성 지방산의 농도를 나타내고 있다. 농도변화 경향은 POM이나 POC, PN 등 bulk 단위의 유기물 변화양상과 비슷하였다. M2의 10월 1일과 8일, 10일 결과를 제외하면 모든 값은 대조군인 M5에서 가장 높게 나타났다. M1의 지방산 농도는 $54 \sim 94 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 앞의 결과와 마찬가지로 입자성 지방산의 농도 역시 가장 낮게 나타났다. M2에서는 $75 \sim 359 \mu\text{g L}^{-1}$, M3에서는 $95 \sim 257 \mu\text{g L}^{-1}$, M4에서는 $30 \sim 289 \mu\text{g L}^{-1}$, M5에서는 $130 \sim 689 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 값을 보였다.



[그림 3.3.56] 시간에 따른 총입자성 지방산의 농도변화

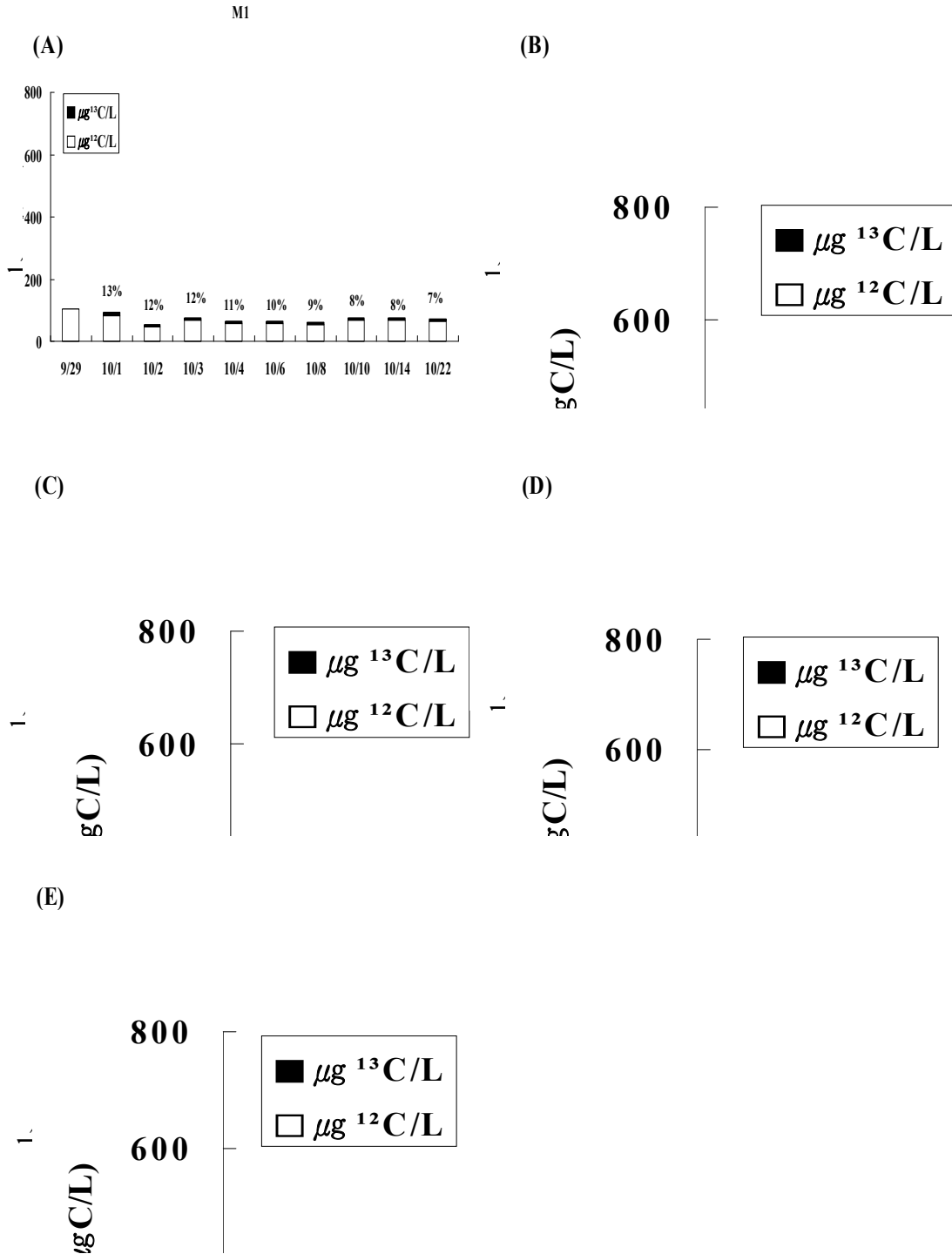
[그림 3.3.57]은 입자성 지방산 중 ^{13}C 가 라벨링 된 지방산, 즉 메소코즘 실험기간 동안 식물 플랑크톤 광합성에 의해 새롭게 만들어진 지방산의 농도변화를 보여주고 있다. 농도변화 경향은 모두 [그림 3.3.56]과 일치한다. ^{13}C 가 라벨링 된 지방산의 농도는 M1에서 $5.2\sim 11.9\ \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, M2에서는 $6.8\sim 51.9\ \mu\text{g L}^{-1}$, M3에서는 $8.7\sim 34.5\ \mu\text{g L}^{-1}$, M4에서는 $2.7\sim 30.2\ \mu\text{g L}^{-1}$, M5에서는 $11.9\sim 86.3\ \mu\text{g L}^{-1}$ 의 값을 보였다. M2의 지방산은 10월 1일과 8일, 10일에 ^{13}C 가 라벨링 된 것과 전체 지방산 모두 대조구보다 높은 값을 보였으며, 이는 위의 POC 결과와 일치한다. M2가 M5의 지방산 보다 높은 농도를 보이는 것은 어느 생물이나 가지고 있으며, 메소코즘 기간 동안 가장 우점하여 나타났던 지방산인 C16:0의 차이에 의한 것이었다.



[그림 3.3.57] 시간에 따른 입자성 지방산의 농도변화

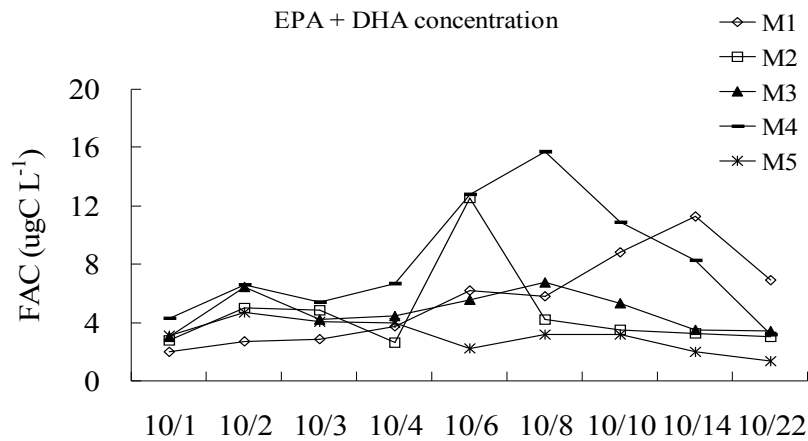
[그림 3.3.58]은 각 메소코즘의 지방산 중 ^{13}C 가 라벨링 된 지방산이 차지하는 양 및 비율을 시간에 따라 보여주고 있다. M1에서 ^{13}C 가 라벨링 된 지방산의 양은 $5.2\sim 11.9\ \mu\text{g L}^{-1}$ 이며, 평균 지방산 농도의 9%를 차지하고 있었다. M2에서는 $6.8\sim 51.9\ \mu\text{g L}^{-1}$ 로 평균 13%를 차지하고 있

였으며, M3에서는 8.7~34.5 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 평균 12%, M4에서는 2.7~30.2 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 평균 12%, M5에서는 11.9~86.2 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 평균 12%를 차지하고 있었다.

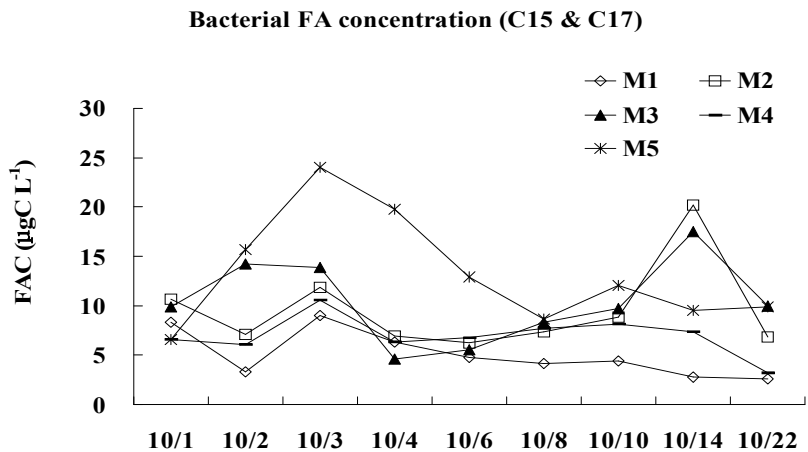


[그림 3.3.58] 총 지방산 중 ^{13}C 가 라벨링 된 지방산이 차지하는 비율 및 양의 변화((A)-M1; (B)-M2; (C)-M3; (D)-M4; (E)-M5)

EPA나 DHA는 수계의 먹이질을 판단하는 지표로 사용되는 지방산이며, [그림 3.3.59]는 이들 농도합의 시간에 따른 변화를 메소코즘 별로 나타내고 있다. M1은 1.9~11.3 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도 변화를 보이며, 마지막 날을 제외하고 시간에 따라 값이 증가하는 경향을 보이고 있다. M2에서는 2.6~12.5 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 보이며, 10월 6일을 제외하고 비슷한 값을 보였다. M3에서는 3.0~6.7 $\mu\text{g L}^{-1}$, M5는 1.4~4.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 보였다. 10월 14일과 22일을 제외하고 M4에서 이들의 농도가 가장 높게 나타났다. 따라서 다른 메소코즘에 비해 먹이질이 좋다고 판단된다.



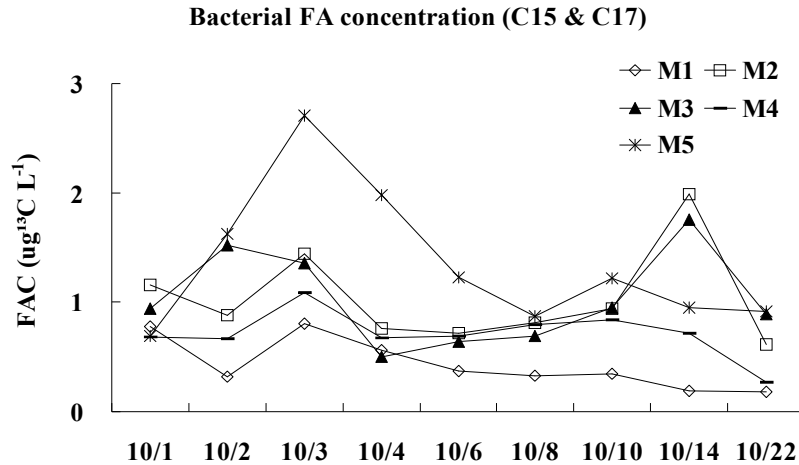
[그림 3.3.59] 시간에 따른 EPA와 DHA 합이 농도변화



[그림 3.3.60] 시간에 따른 박테리아성 총지방산의 농도변화

[그림 3.3.60]은 박테리아성 지방산인 C15:0, i-C15:0, a-C15:0, C17:0의 농도 합이 시간에 따라 어떻게 변하는지를 메소코즘 별로 보여주고 있으며, [그림 3.3.61]은 ^{13}C 가 라벨링 된 C15:0, i-C15:0, a-C15:0, C17:0의 농도 합을 보여주는 것으로, 이는 메소코즘 기간 동안 식물플랑크톤 광합성에 의해 만들어진 유기물이 박테리아에게 전달된 양을 나타내는 것이다. [그림 3.3.61]은 [그림 3.3.60]과 농도차이는 있지만, 그 변화양상은 똑같다. 10월 14일을 제외하고는 M5에서 이

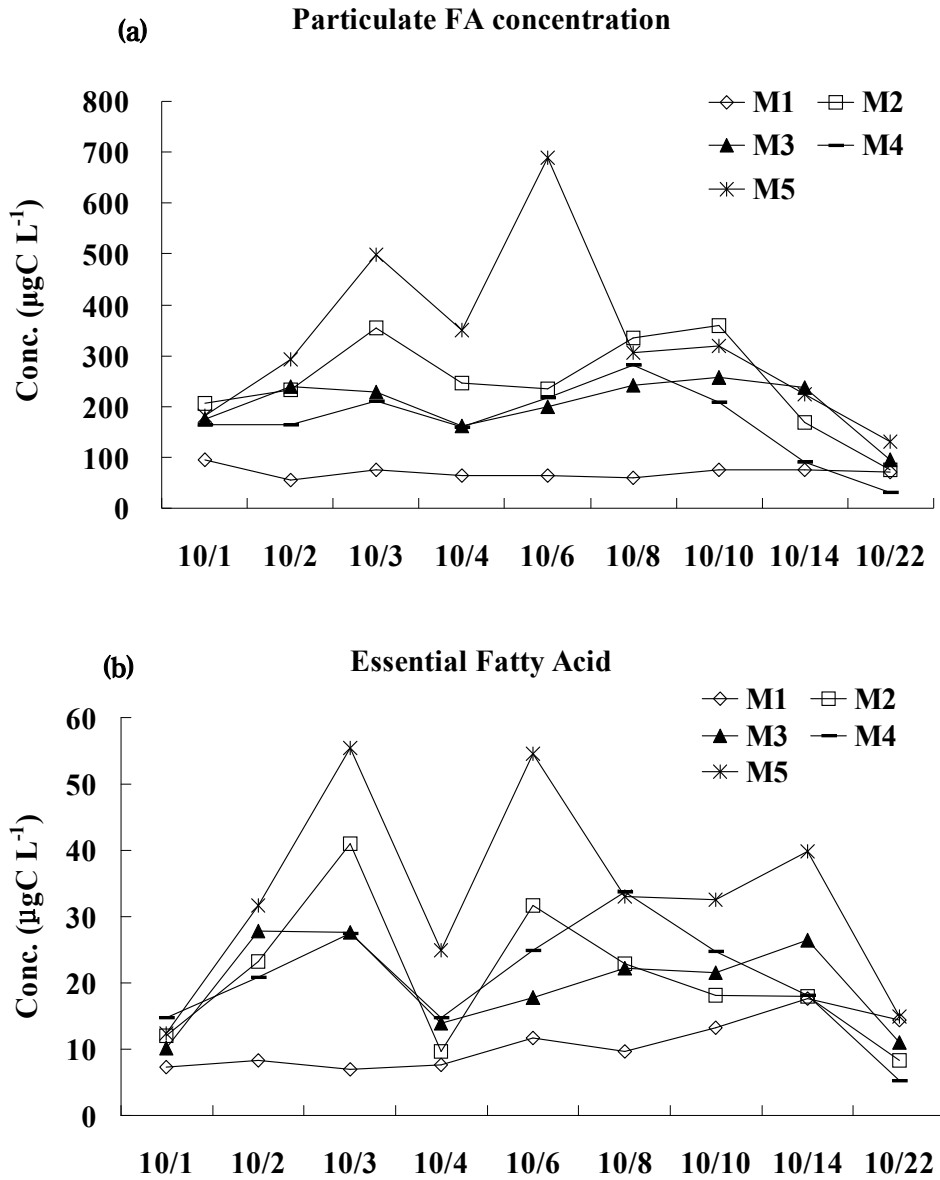
들의 농도가 가장 높게 나왔으며, 이를 통해 미생물의 활동이 대조군에서 가장 활발하다고 간접적으로 판단할 수 있다.



[그림 3.3.61] 시간에 따른 박테리아성 지방산의 농도변화(^{13}C 라벨링 된 것)

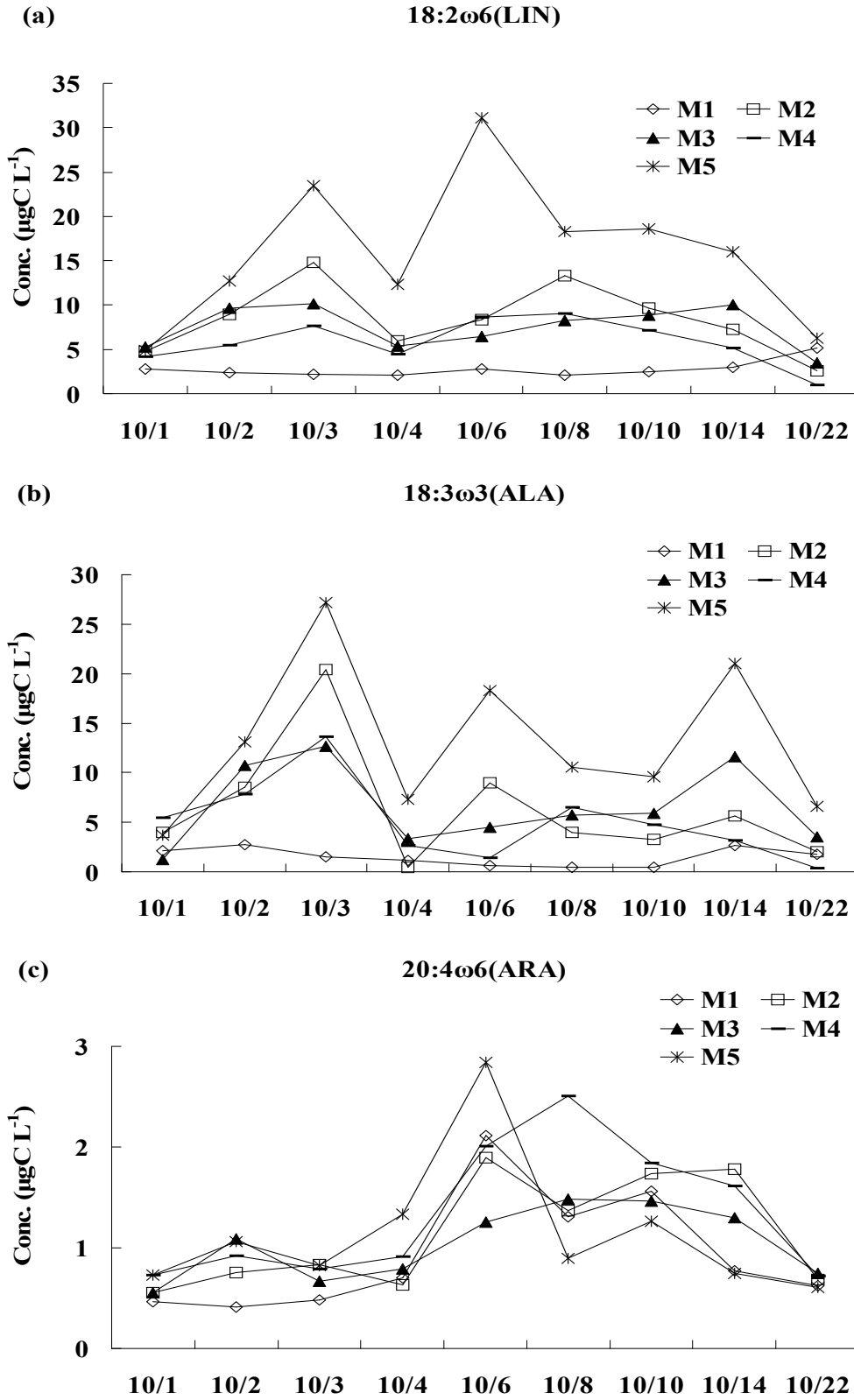
(6) 시간에 따른 각 메소코즘 내 필수지방산의 농도변화

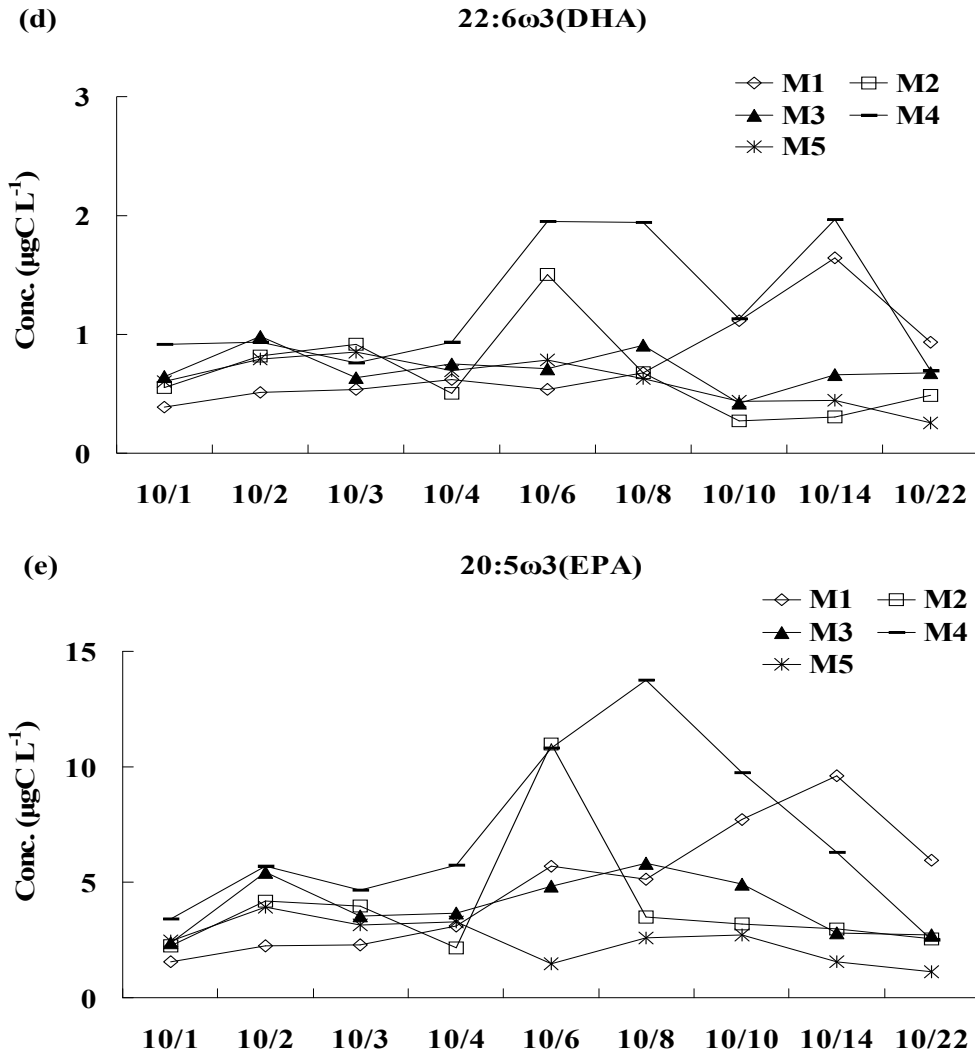
[그림 3.3.62]는 각 메소코즘 내 입자성 지방산의 농도 변화 및 필수지방산의 농도변화를 보여주고 있다. 수층의 초식동물에게 먹이로 사용되는 입자성 유기물 내 필수지방산 함량은 소비자들의 reproduction이나 성장을 좌우하는 주요한 요소가 되기 때문에 수층 유기물 내 필수지방산은 수생태계 내에게 매우 중요하다. 따라서 필수지방산은 먹이질을 판단하는 지표로써 사용될 수 있다. 본 연구에서 필수지방산은 18:2 ω 6(LIN), 18:3 ω 3(ALA), 20:4 ω 6(ARA), 20:5 ω 3(EPA), 22:6 ω 3(DHA)의 합으로 구하였다.



[그림 3.3.62] 시간에 따른 각 메소코즘 내 (a) 입자성 지방산 및 (b)필수지방산의 농도변화

[그림 3.3.62]의 (a)에서 보는 바와 같이 메소코즘 기간 중 유용생물 투입 후 7일째와 9일째 (10/8, 10/10) M2에서의 입자성 지방산 농도는 대조구에 비해 높은 농도를 보이고 있으나, 이 때 (b)에서 보는 바와 같이 입자성 유기물 내 필수지방산 농도는 대조구보다 낮게 나타났다. 따라서 이 때 대조구에 비해 입자성 유기물의 양은 증가 했지만 먹이질은 대조구보다 낮다고 판단된다. 입자성 유기물 내 필수지방산 농도는 대조구인 M5에서 가장 높게 나타났으며, 가장 큰 POC 감소를 보인 M1에서 가장 낮게 나타났다.

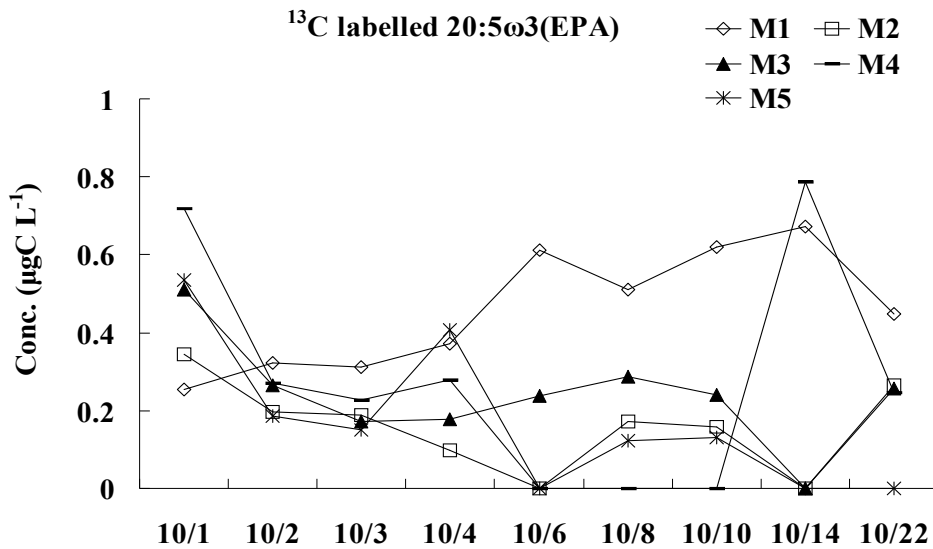




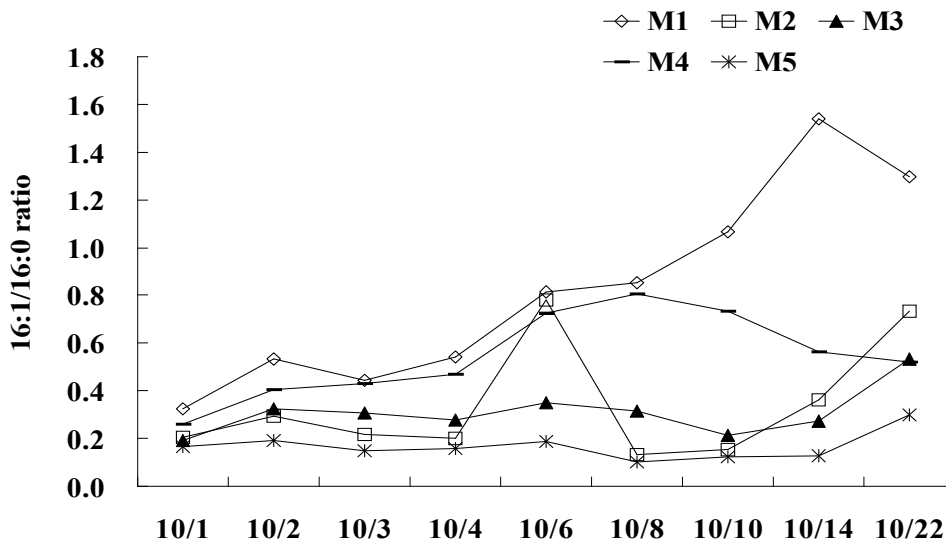
[그림 3.3.63] 시간에 따른 메소코즘 별 각 필수지방산의 농도 변화 (a) 18:2 ω 6(LIN); (b) 18:3 ω 3 (ALA); (c) 20:4 ω 6 (ARA); (d) 22:6 ω 3(DHA); (e) 20:5 ω 3(EPA)

Vargas *et al.*(1998)은 시아노박테리아 내 상당량의 LIN과 ALA가 검출됨을 보고한 바 있으며, 본 연구에서 모든 메소코즘 내 필수지방산 중 가장 많은 비율을 차지하는 것은 LIN과 ALA였다. 따라서 체내 상당량의 LIN과 ALA를 가지고 있는 시아노박테리아의 대발생에 의해 대조구에서 필수지방산의 농도가 가장 높게 나타난 것으로 사료된다[그림 3.3.63]. POC와 PN의 감소율이 가장 컸던 M1에서는 LIN과 ALA의 농도가 낮게 나타났다. LIN과 ALA는 각각 EPA와 ARA의 전구물질로 알려져 있다. ARA는 실험 초기에는 대조구에서 높은 반면 후기로 갈수록 대조구에서 가장 낮은 농도를 보였고, 새뱅이와 동자개를 함께 처리한 M4에서 높은 농도를 보였다. DHA 역시 메소코즘 실험동안 M4에서 가장 높게 나타났으며, EPA는 M4에서 높은 농도를 보이다가 10월 14일과 10월 22일에는 노란꽃창포를 처리한 M1에서 가장 높은 농도를 보였다.

[그림 3.3.64]는 ^{13}C labelled EPA의 농도변화를 나타내고 있으며, 실험기간 동안 식물플랑크톤 광합성을 통해 만들어진 EPA의 농도를 의미한다. EPA의 농도가 높게 나타났던 M4에 비해 광합성을 통해 새로 생성된 EPA는 M1에서 더 높게 나타났다. 10월 14일, 10월 22일에는 대조구에서 ^{13}C labelled EPA가 검출되지 않았다. 초기 M4에서 나타난 높은 농도의 EPA는 메소코즘 기간 전에 만들어진 EPA로써 줄새우나 동자개의 배출이나 다른 메소코즘 내 생물들의 분해 등에 의해 나타난 결과로 사료된다. 그러나 메소코즘 후기에는 M4에서도 높은 ^{13}C labelled EPA가 높은 농도를 보였다.



[그림 3.3.64] 시간에 따른 각 메소코즘 별 ^{13}C labelled EPA의 농도변화

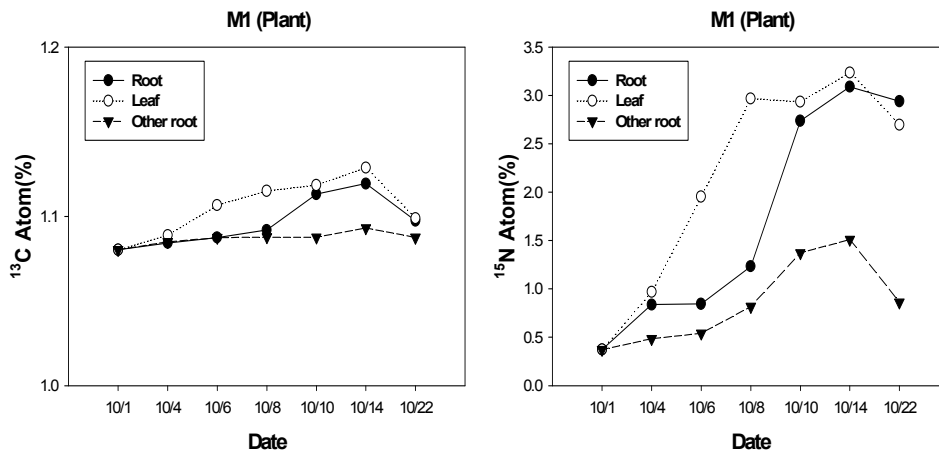


[그림 3.3.65] 시간에 따른 각 메소코즘 내 C16:1과 C16:0의 비의 변화

Virtue *et al.*(2004)은 C16:1/C16:0이 1보다 크면 규조류의 생체지표로 사용될 수 있다고 보고하였다. 본 연구에서는 노란꽃창포를 처리한 M1에서 10월 10일부터 이 비가 1 이상으로 나타났으며, 따라서 M1에서는 수생식물에 의해 메소코즘 내에서 규조류가 식물플랑크톤 내에서 차지하는 비율이 점차 증가했다고 해석할 수 있다. 또한 규조류 체내에는 EPA가 높은 농도로 존재한다고 보고된 바 있는데, C16:1/C16:0의 비를 통해 해석된 결과는 ^{13}C labelled EPA나 총 EPA의 농도가 시간이 지날수록 증가하는 결과와 일치한다.

(7) 각 유용생물별 남조류 제거효과

^{13}C , ^{15}N 추적자 첨가 실험을 한 신구저수지 메소코즘 실험에서의 총 유기탄소 및 총질소 안정동위원소비를 ^{13}C , ^{15}N atom%로 환산하여 도식화하였다[그림 3.3.66]. 여기서 유용생물의 atom%가 의미하는 것은 다음과 같다. 본 메소코즘에 투여한 추적자($^{13}\text{HCO}_3^-$, $^{15}\text{NH}_4^+$)는 무기태 형태로 식물플랑크톤이 광합성을 하는데 이용한다. 식물플랑크톤은 중탄산염과 질산염을 이용하여 광합성을 하며 체내에 흡수하여 새로운 유기물을 합성한다. 이때 새로이 생성된 유기물에는 첨가한 추적자가 labelling되며 유용생물이 섭식을 통해 이를 흡수하면 유용생물 체내에 유기물을 동화시켜 다시 labelling되는 것이다. 즉, 유용생물의 atom%가 의미하는 것은 얼마나 많은 남조류를 섭식을 통해 체내에 새로운 유기물로서 동화시켰는지를 알아낼 수 있는 지표로서 atom%가 높을수록 보다 많은 남조류를 섭식한 것이라고 할 수 있다.



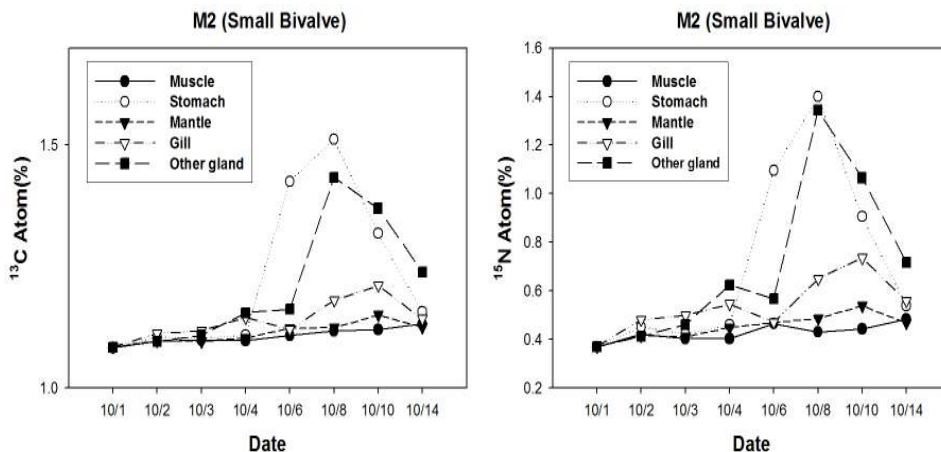
[그림 3.3.66] 시간에 따른 M1 메소코즘에서의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

실험기간동안 유용생물로서 인공식물을 투여한 M1 메소코즘에서 ^{13}C atom%는 1.08~1.11%이다. 이는 자연상태에서 존재하는 ^{13}C 의 존재비와 거의 비슷한 값으로 인공식물이 수층에 존재하는 중탄산염(HCO_3^-)을 이용하여 광합성을 하지 않고 대기중의 이산화탄소(CO_2)를 이용하여 광합성을 하기 때문에 우리가 넣어준 추적자의 영향을 받지 않은 것으로 여겨진다. 그러나 인공식물은 수층의 질산염을 이용하여 광합성에 필요한 에너지원으로 사용하기 때문에 ^{15}N atom%가 0.3~3.0%까지 지속적으로 증가하고 있다. 인공식물은 섭식을 통해 남조류를 섭식할

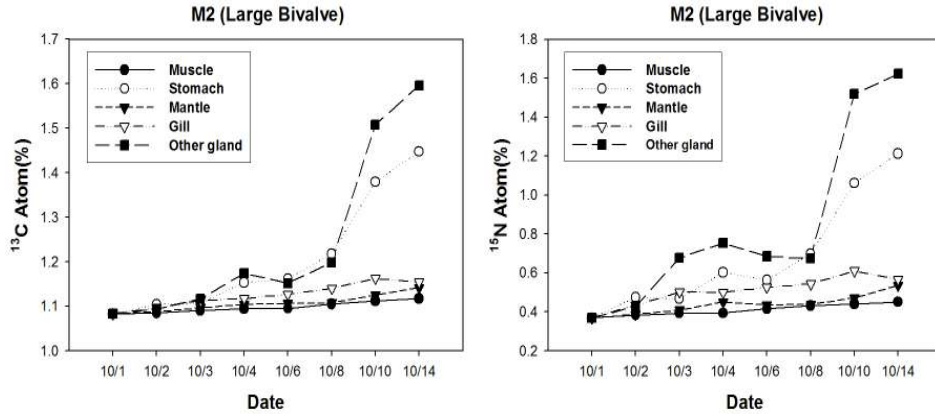
수 없으므로 atom%가 증가한 것은 수층에 있는 DIN 형태의 질산염을 흡수한 것으로 여겨진다. 인공식물을 투여한 M1 메소코즘에서 POC 함량과 식물플랑크톤 정량 수치가 다른 메소코즘보다 빠르게 감소한 것은 인공식물섬이 남조류와의 질산염 섭취 경쟁에서 우위에 있기 때문에 보다 빨리 수층의 질산염을 제거하여 남조류의 증식을 억제한 것으로 여겨진다. 부위에 따른 atom%의 변화는 뿌리보다 잎이 보다 높은 함량을 보이고 있으며 이는 인공식물 자체의 영양염 이동기작에 의한 것으로 뿌리에서 수층의 질산염을 흡수한 후 성장을 위해 잎으로 에너지를 이동시켰기 때문이다.

실험기간동안 M2 메소코즘에 말조개를 투입하여 남조류 제어효과를 관찰하였다. 말조개는 크게 지름이 10 cm 이하의 작은 말조개와 지름이 15 cm 이상의 큰 말조개로 구분하여 조사하였다. 작은 말조개는 실험시작 8일까지 각 기관별로 ^{13}C atom%는 1.0~1.8%의 증가를 보이고 있고, ^{15}N atom%는 0.3~1.5%의 증가를 보이지만 10일째부터 급격한 감소를 보이고 있다 [그림 3.3.67]. 그러나 큰 말조개는 실험이 끝나는 시점까지 ^{13}C atom%는 1.0~1.6%의 증가를 보이고 있고, ^{15}N atom%는 0.3~1.7%의 증가를 보이고 있다 [그림 3.3.68]. 이는 개체의 크기가 작은 말조개와 크기가 큰 말조개간의 여과섭식의 차이점을 보여주고 있는 것으로 크기가 작은 말조개는 남조류 섭식의 한계를 보이고 있지만 크기가 큰 말조개는 지속적으로 남조류를 섭식함으로써 보다 높은 섭식율을 보이고 있는 것으로 여겨진다.

말조개의 기관별 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화를 살펴보면 muscle, mantle, gill 기관보다 stomach, gland 기관에 보다 많은 ^{13}C , ^{15}N atom%가 함유되어 있다. 또한 stomach, gland 기관은 시간이 경과함에 따라 급격한 증감을 보이지만 muscle, mantle, gill 기관은 앞서의 기관보다는 느리고 작은 증감을 보인다. 이는 말조개 체내의 기관별 에너지 이동과정의 차이로써 말조개가 여과섭식을 통해 남조류를 섭식하면 체내에 에너지를 동화하는 과정에서 stomach, gland 기관쪽에 먼저 유기물을 동화하고 남은 에너지를 muscle, mantle, gill 기관쪽으로 동화시키기 때문이다. 그러므로 stomach, gland 기관쪽은 동화율이 빠르고 높은 atom%를 보이는 것이며, 다른 기관은 상대적으로 느리고 낮은 atom%를 보이는 것으로 여겨진다.

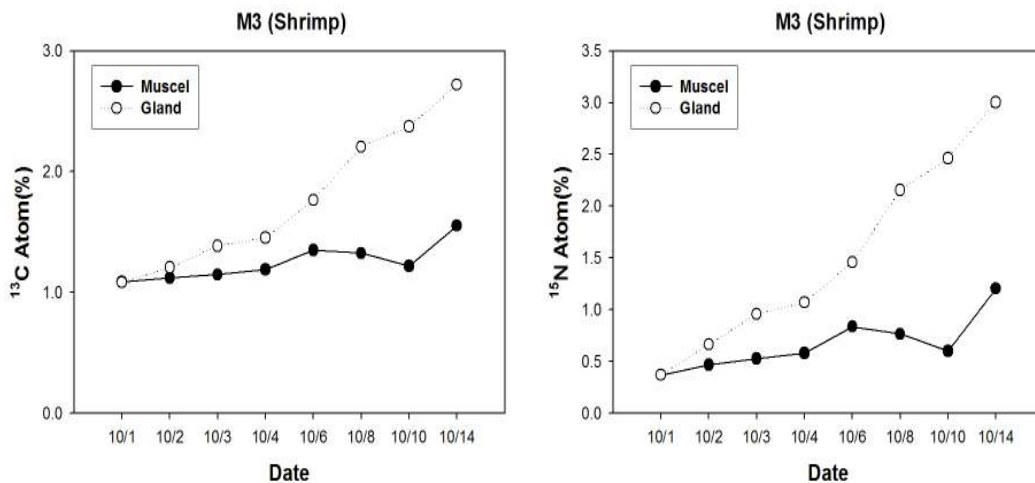


[그림 3.3.67] 시간에 따른 M2 메소코즘에서의 small bivalve ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

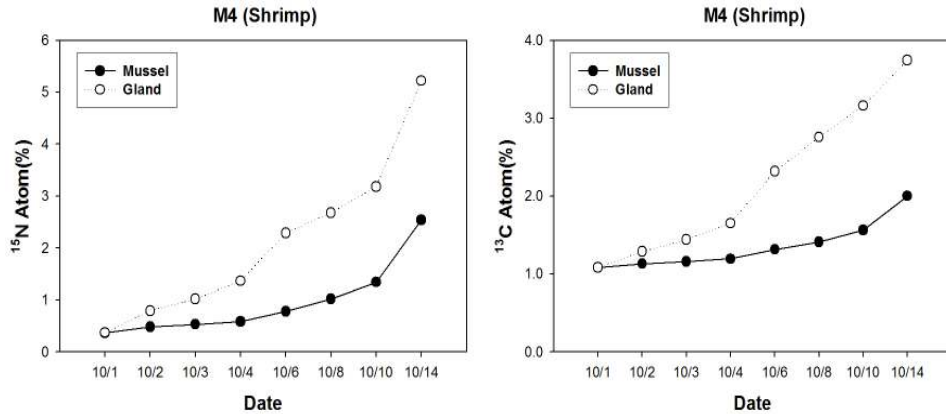


[그림 3.3.68] 시간에 따른 M2 메소코즘에서의 large bivalve ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

실험기간동안 M3 메소코즘에 새뱅이를 투입하여 남조류 제어효과를 관찰하였다. 새뱅이는 근육과 내장으로 기관을 분리하여 각각의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화를 관찰하였다. 새뱅이는 각 기관별로 ^{13}C atom%는 1.0~2.8%의 증가를 보이고 있고, ^{15}N atom%는 0.4~3.2%의 증가를 보이고 있다[그림 3.3.69]. 하지만 동자개와 새뱅이를 같이 투여한 M4 메소코즘에서 새뱅이의 ^{13}C atom%는 1.0~3.8%의 증가를 보이고 있고, ^{15}N atom%는 0.4~5.4%의 증가를 보이고 있어 M3 메소코즘의 새뱅이보다 높은 atom%를 나타내고 있다[그림 3.3.70]. 이는 M3 메소코즘에서의 새뱅이의 남조류 제어효과보다 M4 메소코즘에서 동자개를 새뱅이와 같이 투여했을 때 남조류 제어효과의 상승을 가져온 것으로 여겨진다. 기관별 atom%를 살펴보면 mussel 기관보다 gland 기관에서 보다 높은 atom%를 보이고 있다. 이는 앞의 말조개 기관에서의 에너지 전달 및 동화 과정과 마찬가지로 체내에 에너지를 동화하는 과정에서 gland 기관 쪽에 먼저 유기물을 동화하고 남은 에너지를 muscle 기관 쪽으로 동화시키기 때문이다. 그러므로 gland 기관 쪽은 동화율이 빠르고 높은 atom%를 보이는 것이며, mussel 기관은 상대적으로 느리고 낮은 atom%를 보이는 것으로 여겨진다.

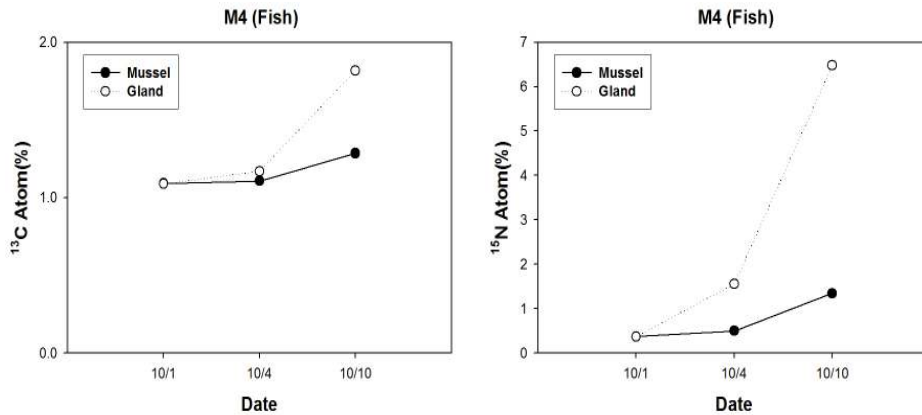


[그림 3.3.69] 시간에 따른 M3 메소코즘에서의 새뱅이의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화



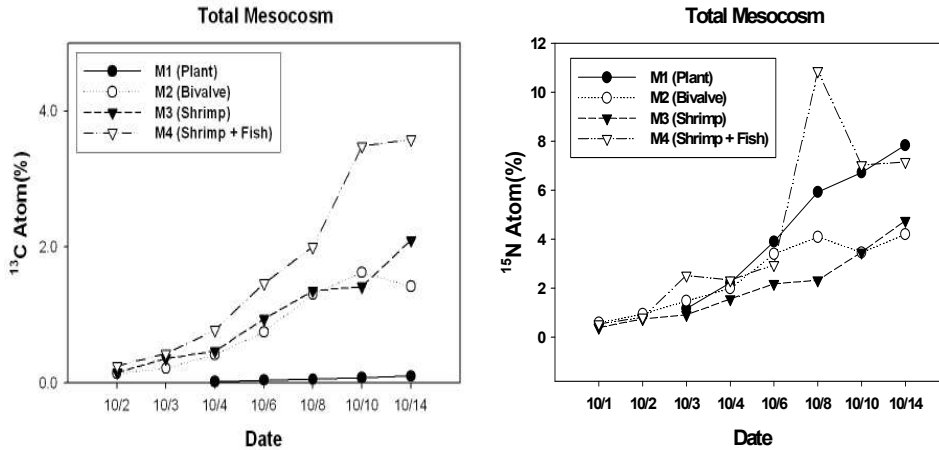
[그림 3.3.70] 시간에 따른 M4 메소코즘에서의 새뱅이의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

실험기간동안 M4 메소코즘에 동자개와 새뱅이를 동시에 투입하여 남조류 제어효과를 관찰하였다. 동자개는 근육과 내장으로 기관을 분리하여 각각의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화를 관찰하였다. 동자개는 각 기관별로 ^{13}C atom%는 1.1~1.8%의 증가를 보이고 있고, ^{15}N atom%는 0.4~6.7%의 증가를 보이고 있다[그림 3.3.71]. 또한 새뱅이와 말조개 유용생물과 마찬가지로 mussel 기관보다 gland 기관에서 보다 높은 atom%가 관찰되고 있다.



[그림 3.3.71] 시간에 따른 M4 메소코즘에서의 동자개의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

실험기간동안 모든 메소코즘에 각 유용생물의 남조류 제어효과를 살펴보면 새뱅이와 동자개를 투입한 M4 메소코즘에서 가장 높은 atom%를 보이고 있다[그림 3.3.72]. 또한, 메소코즘 실험이 종료되는 시점에서 M2 메소코즘의 말조개, M3 메소코즘의 ^{13}C %가 각각 1.7%, 2.0%인데 반해, M3 메소코즘에서의 동자개와 새뱅이의 ^{13}C 는 3.8%로 약 2배 높은 결과를 보이고 있다. 이는 유용생물 중에서 새뱅이와 동자개를 같이 투입하였을 때 남조류를 섭식하고 남조류의 제어하는 능력이 크다는 것을 의미한다. 특히 인공식물섬은 수층의 질산염을 남조류보다 빠르게 흡수함으로써 남조류의 번식을 제어하는 효과를 가지고 있으며 이는 남조류와의 영양염 경쟁에서 우위에 있기 때문이다.



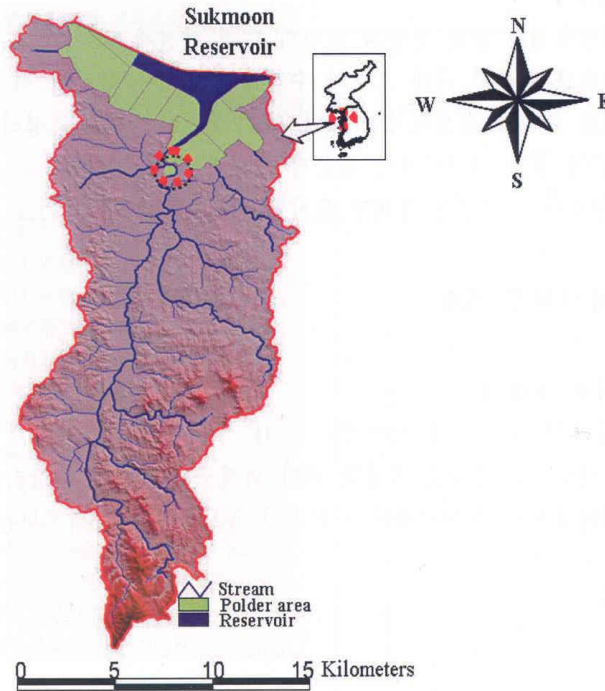
[그림 3.3.72] 시간에 따른 모든 메소코즘에서의 동자개의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

3. 생물조절(biomanipulation)에 의한 남조류 제어효과 평가(석문 인공연못 실험)

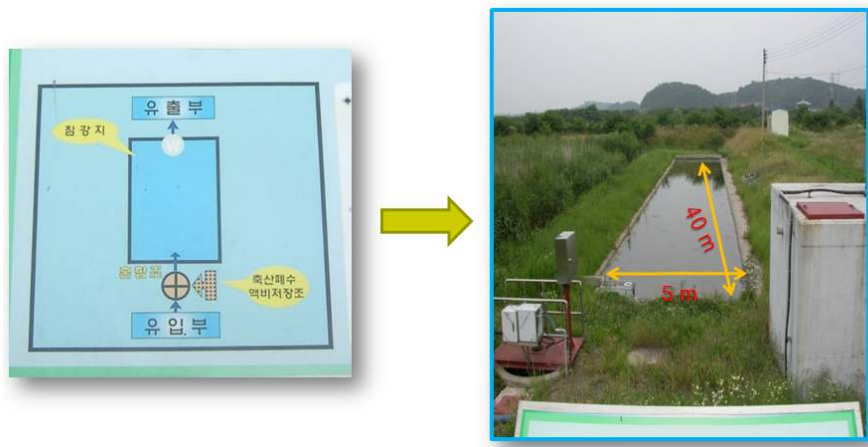
가. 현장 실험

(1) 현장 실험의 개요

현장 실험의 위치는 동경 126°34′, 북위 36°56′의 충남 당진군 고대면 석문간척지구에 위치한 석문지구 석문습지이며, 실험시설의 위치는 [그림 3.3.73]과 같다. 본 실험지역인 석문습지는 담수호 수질개선 시험조사사업의 일환으로 설치된 인공습지로서 자연정화시설 최적 설계 및 효율적 조성방안 시험연구와 환경적, 생태적, 문화적 기능의 다원적 인공습지이다. 석문습지는 총 8개의 시험포로 구성되어 있으며 각각 그 기능과 설치 목적이 다른 시험포이다. 본 연구에서는 8개의 시험포 중에서 2시험포인 침강지를 선택하였으며 이곳에 인공연못을 설치하였다[그림 3.3.74]. 가로 5 m, 세로 10 m, 높이 1 m의 2개의 인공연못을 설치하여 대조군과 실험군으로 나누어 제작하였으며 인위적으로 남조류를 번성시켰다.



[그림 3.3.73] 석문지구 석문습지내 실험지역의 위치



[그림 3.3.74] 석문습지내 인공연못 설치 모식도

(2) 현장 실험내용

동위원소란 같은 원자번호를 가지면서 질량수가 다른 원자를 말한다. 이들의 상대적인 농도 비를 이용하면 생물학적, 지질학적, 물리적, 화학적 과정을 연구하는 추적자로 이용할 수 있다. 본 연구에서 사용한 추적자 원소인 탄소, 질소의 경우 자연 상태에서는 ^{12}C 이 98.9% ^{13}C 이 1.1%, ^{14}N 이 99.6%, ^{15}N 이 0.4%를 차지하고 있다. 매우 적은 부분을 차지하고 있는 ^{13}C , ^{15}N 을 $^{13}\text{C}-\text{HCO}_3^-$, $^{15}\text{N}-\text{NH}_4^+$ 를 이용하여 인위적으로 자연 상태보다 5% enriched 시켜 메소코즘 내에

서의 유용생물에 의한 남조류 제어효과에 관하여 연구하였다. 메소코즘은 총 2개(대조군, 실험군)로 구분하였으며 탄소의 추적자인 $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ 과 질소의 추적자인 $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 를 사용하였다.

신구저수지내 메소코즘(Mesocosm) 실험은 2009년 10월 14일부터 11월 3일까지 총 10회에 걸쳐 실시하였다. 10월 13일에 추적자를 첨가하여 안정화 기간을 거친 후 10월 14일부터 유용생물을 투입하여 11월 3일까지 3주 동안 대상생물을 채집하였다(10월 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 26, 29, 11월 3일). 유용 생물중에서 동물플랑크톤은 size 60 μm 인 동물플랑크톤 Net를 이용하여 채집하였으며 새뱅이 및 동자개는 어항을 이용하여 채집하였다[그림 3.3.75]. 이에 대한 내용은 [표 3.3.12]에 나타내었다.

[표 3.3.12] 석문습지 메소코즘 조사 일정

날짜	목적	실험 내용	채취한 시료
2009년 10월 13일	1차조사	- 추적자 투입 - 초기 환경 조사	- SPM/POM, POC/PN, DIC/DIN, DOC/DON 농도 측정을 위한 시료
2009년 10월 14일	2차조사	- 유용생물 투입 - 기초환경조사	- SPM/POM, POC/PN, DIC/DIN, DOC/DON 농도 측정을 위한 시료 - 유용생물체내 안정동위원소 측정을 위한 시료(말조개, 펄조개, 대칭이, 새뱅이, 동자개, 동사리, 참붕어, 미꾸리, 인공식물) 채집
2009년 10월 14일 ~2009년 11월 2일	2차조사	- 유용생물 군집의 남조류 (Microcystis) 제어 능력 파악	- SPM/POM, POC/PN, DIC/DIN, DOC/DON 농도 측정을 위한 시료 - 유용생물체내 안정동위원소 측정을 위한 시료(말조개, 펄조개, 대칭이, 새뱅이, 동자개, 동사리, 참붕어, 미꾸리, 인공식물) 채집



[그림 3.3.75] 석문습지내 인공연못 유용생물 투입 모습

(3) 실험방법

(가) 입자성 부유물질 / 입자성 유기물질 (SPM/POM)

SPM과 POM은 각 수심별로 채수한 후 각 크기별로 미리 무게를 측정한 47 mm GF/F 여과지에 여과한 후 70°C의 oven에서 건조시켜 데시케이터에 넣어서 방냉한 후 전자저울로 무게를 측정한다. 그 후 아래 식에 따라 계산한다.

$$SPM(mg L^{-1}) = (b - a) / V$$

a : 여과하기 전 GF/F filter paper의 무게(mg)

b : 여과 한 후 GF/F filter paper의 무게(mg)

v : 여과 한 물의 양(L)

POM은 SPM을 측정한 여과지를 전기로(Furnace)를 사용하여 450°C에서 1시간 동안 태워 유기물을 제거한 후 전자저울로 무게를 측정한다.

$$POM(mg L^{-1}) = SPM(mg L^{-1}) - \text{태운 후의 여과지의 무게(mg)}$$

(나) 용존성 무기탄소, 용존성 무기질소 측정

현장수를 채수하여 직경 47 mm GF/F filter paper를 이용하여 여과한 후 1 N 염산을 첨가하여 미생물에 의한 활동을 방지한다. 그 후 연구소에서 TOC analyzer(TOC-Vcph, SIMAZU)를 이용하여 분석하였다.

(다) 입자성 유기물질의 탄소와 질소의 안정동위원소비 측정

현장에서 채수하여 직경 25 mm GF/F filter paper를 이용하여 여과한 후 현장에서 냉장 보관하여 가져온다. 이 시료를 1 N 염산증기를 이용하여 24시간동안 acidification 한 후 데시케이터에 넣어서 24시간 동안 방냉한다. 추후 시료는 틴캡(Tincap)에 넣어 한양대학교 공동기기연구실에서 EA-GC-irms(GV Instrument, Germany)를 이용하여 분석하였다.

(라) 퇴적물의 탄소와 질소의 안정동위원소비 측정

현장에서 퇴적물을 채취하여 동결건조기를 이용하여 건조한 후 시료분쇄기를 이용하여 균질화 시킨 후 1 N 염산으로 24시간 동안 acidification 한다. 원심분리 후 상층액을 버리고 증류수

를 넣어 4~5번 반복하면서 4시간 동안 산을 제거한다. 추후 시료는 틴캡(Tincap)에 넣어 한양대학교 공동기기연구실에서 EA-GC-irms(GV Instrument, Germany)를 이용하여 분석하였다.

(마) 저수지내 유용생물 체내의 탄소와 질소의 안정동위원소비 측정

대상생물(어류, 새우류 등)을 기관별로 나눈 후[그림 3.3.26, 3.3.27, 3.3.28] 동결 건조기를 사용하여 완전 건조시켜 시료분쇄기(pulverisette 6, Fritsch)를 이용하여 분말 상태로 알아준다. 그 후 탄소 안정동위원소비 측정을 위한 시료는 1 N 염산을 이용하여 무기탄소를 제거한 뒤 증류수를 이용하여 염산을 제거하고, 동결 건조기에서 재건조 시킨다. 총 질소 안정동위원소비 측정을 위한 시료는 측정 자료에 영향을 미치지 때문에 염산 처리를 해주지 않는다. 추후 시료는 틴캡(Tincap)에 넣어 한양대학교 공동기기연구실에서 EA-GC-irms(GV Instrument, Germany)를 이용하여 분석하였다.

$$\delta^{13}\text{C}, \delta^{15}\text{N} = \{R(\text{sample})/R(\text{standard}) - 1\} \times 1000(\text{‰})$$

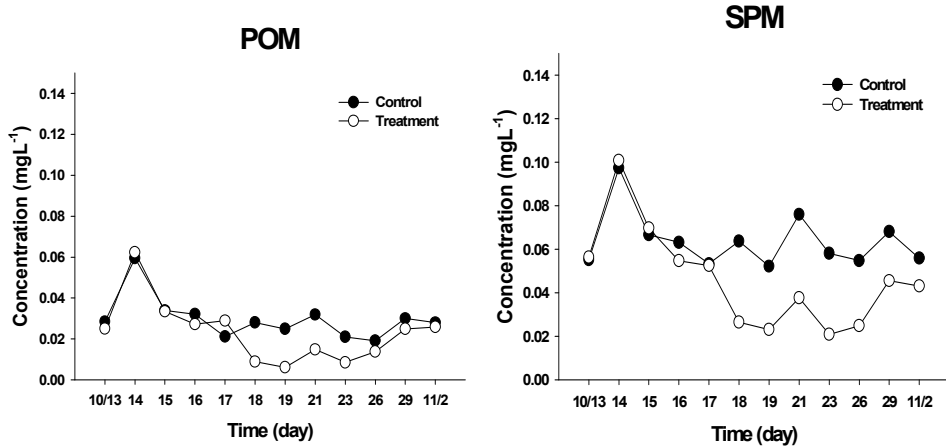
$$R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}, {}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$$

${}^{13}\text{C} : {}^{12}\text{C}$ 는 PDB(PeeDee Belemnite), ${}^{15}\text{N} : {}^{14}\text{N}$ 는 $\text{N}_2(\text{Air})$ 를 표준물질로 사용하였다.

나. 결과 및 결론

(1) 입자성 부유물질 및 입자성유기물의 농도변화

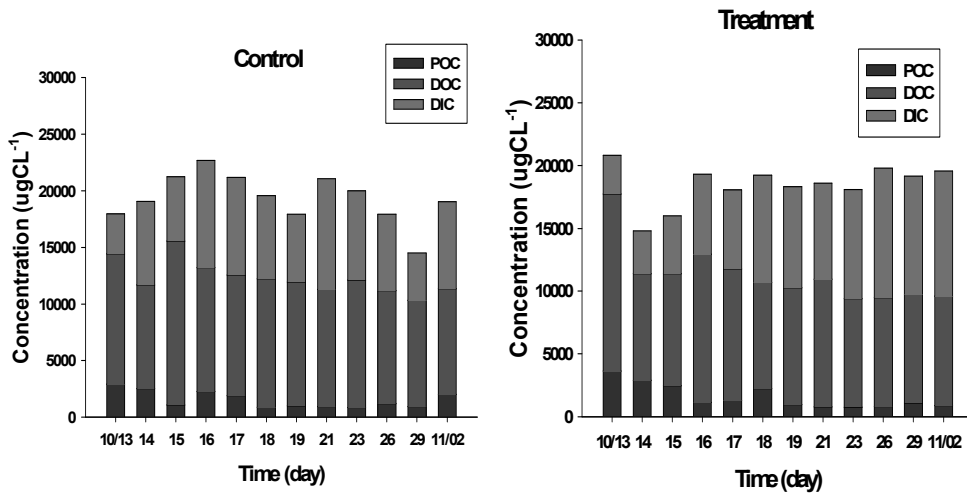
[그림 3.3.76]은 인공연못 내에서의 입자성 부유물질(SPM) 및 입자성유기물(POM)의 시간에 따른 농도변화를 보여주고 있다. 유용생물을 투여하지 않은 control에서 SPM의 농도는 $0.05 \sim 0.10 \text{ mg L}^{-1}$ 의 분포를 보였으며, 시간에 따라 감소하는 경향을 보였다. 입자성유기물(POM)은 $0.02 \sim 0.05 \text{ mg L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였으며, SPM과 마찬가지로 10월 14일에 최고값을 보인 후 시간에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 유용생물을 투여한 treatment에서 SPM의 농도는 $0.02 \sim 0.10 \text{ mg L}^{-1}$ 의 분포를 보였으며, 시간에 따라 감소하는 경향을 보였다. 입자성유기물(POM)은 $0.005 \sim 0.060 \text{ mg L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였으며, SPM과 마찬가지로 10월 14일에 최고값을 보인 후 시간에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. control 인공연못보다 유용생물을 투여한 treatment에서 보다 높은 SPM, POM 농도 감소를 보였으며 이는 남조류의 성장이 treatment 인공연못에서 억제되고 있음을 보여주고 있다.



[그림 3.3.76] 인공연못 내에서의 입자성 부유물질 및 입자성 유기물의 농도변화

(2) 입자성 유기탄소 및 입자성 질소의 농도변화

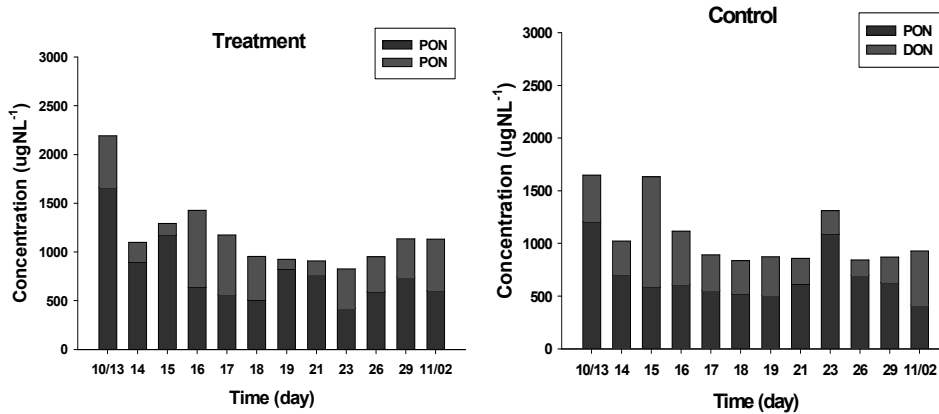
[그림 3.3.77]은 인공연못 내에서 입자성 유기탄소(POC), 용존성 유기탄소(DOC), 용존성 무기탄소(DIC)의 농도변화를 보여주고 있다. Control에서 POC는 848~2,905 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였으며, DOC는 9,152~11,536 $\mu\text{g L}^{-1}$, DIC는 3,509~9,790 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였다.



[그림 3.3.77] 인공연못 내에서의 입자성 유기탄소의 농도변화

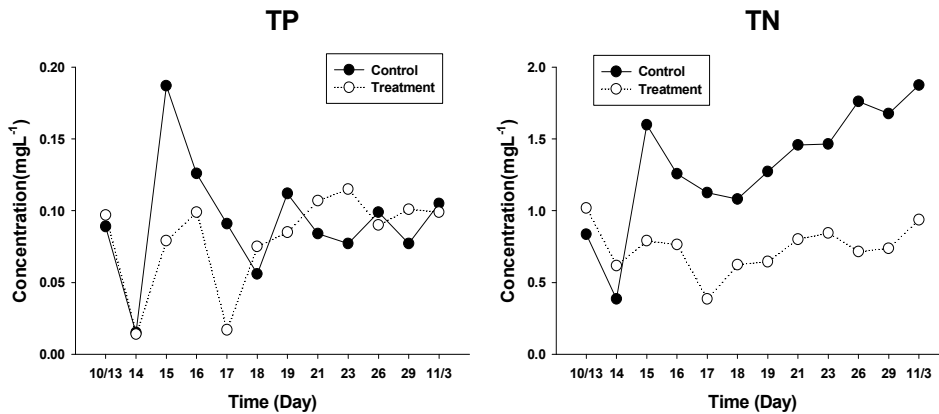
Treatment에서 POC는 740~3,636 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였으며, DOC는 8,455~14,105 $\mu\text{g L}^{-1}$, DIC는 3,086~10,323 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였다. control 인공연못에서 POC, DOC, DIC의 뚜렷한 변화는 보이지 않지만 treatment에서는 DIC의 농도가 실험종료시까지 증가하고 있다. 이는 treatment 인공연못내에서 미생물의 활발한 활동으로 인해 유기물이 분해되어 DIC의 농도가 높아지는 것으로 여겨진다.

[그림 3.3.78]은 인공연못 내에서 입자성 유기질소(PON), 용존성 유기질소(DON)의 농도변화를 보여주고 있다. Control에서 PON는 414~1,087 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였으며, DON은 146~1,042 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였다. Treatment에서 PON는 422~1,660 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였으며, DON은 104~611 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였다. control과 treatment 인공연못에서 PON, DON의 뚜렷한 변화는 보이지 않았다.



[그림 3.3.78] 공연못 내에서의 질소의 농도변화

(3) 수층내 총질소 및 총인의 농도변화



[그림 3.3.79] 인공연못 내에서의 총질소 및 총인의 농도변화

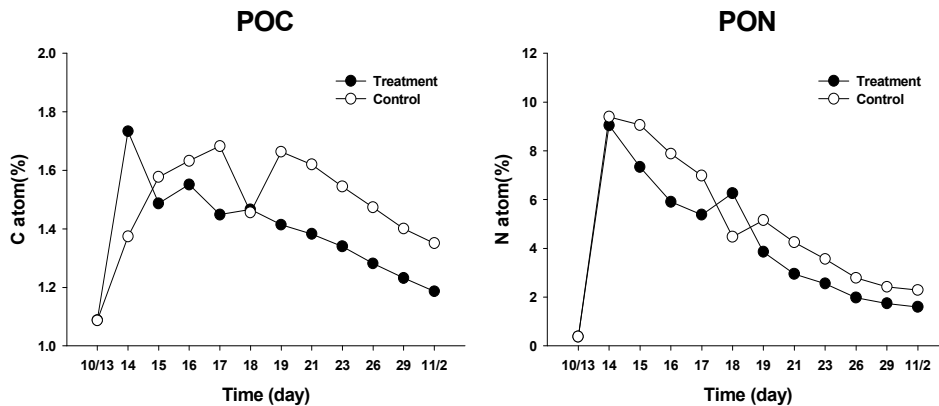
[그림 3.3.79]는 인공연못 내에서 수층에서의 총질소 및 총인의 농도변화를 보여주고 있다. Control에서 TN는 0.38~1.87 mg L^{-1} 의 농도분포를 보였으며, treatment에서는 0.38~1.01 mg L^{-1} 의 농도분포를 보였다. Control에서는 영양염의 농도가 실험 종료 시까지 큰 폭으로 증가하고 있지만 treatment에서는 증가와 감소를 반복하며 실험종료시에는 실험 시작시의 농도와 큰 차이를 보이고 있지 않다. 이는 treatment에서는 유기물 분해, 유용생물의 배설물 등에 의한 질산염 공급이 이루어지지만 유용생물인 인공식물에 의한 지속적인 질산염 섭취로 인해 전체적으

로 큰 변화가 없는 것으로 여겨진다. Control에서 TP는 $0.01 \sim 0.18 \text{ mg L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였으며, treatment에서는 $0.01 \sim 0.11 \text{ mg L}^{-1}$ 의 농도분포를 보였다. control, treatment 모두 큰 변화를 보이지 않았으며 이는 유용생물이 수층내 질산염 제어에는 효과적이지만 인산염 제어에는 효과적이지 못한 것으로 여겨진다.

(4) 유용생물의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

석문습지 인공연못에서 입자성 유기물질의 총 유기탄소 및 총 질소 안정동위원소비를 ^{13}C , ^{15}N atom%로 환산하여 도식화하였다[그림 3.3.80]. 여기서 입자성 유기물질의 atom%가 의미하는 것은 다음과 같다. 본 메소코즘에 투여한 추적자($^{13}\text{HCO}_3^-$, $^{15}\text{NH}_4^+$)는 무기태 형태로 식물플랑크톤이 광합성을 하는데 이용한다. 즉, 식물플랑크톤은 중탄산염과 질산염을 이용하여 광합성을 하며 체내에 흡수하여 새로운 유기물을 합성한다. 여기서 입자성 유기물질의 atom%는 새로이 합성된 유기물을 반영한다.

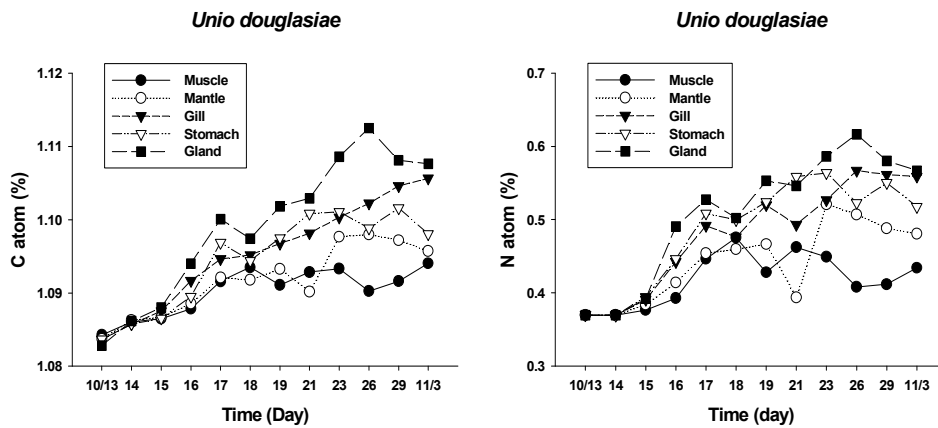
실험기간동안 control 인공연못에서 입자성 유기물질의 ^{13}C atom%는 1.1~1.7%이고, treatment에서는 1.1~1.2%의 변화를 보이고 있다. control 인공연못에서 입자성 유기물질의 ^{15}N atom%는 0.4~9.4%이고, treatment에서는 0.4~9.6%의 변화를 보이고 있다. 실험기간 동안 control, treatment에서 입자성 유기물질의 ^{13}C , ^{15}N atom%가 모두 감소하고 있지만 treatment에서 더 큰 폭으로 감소하고 있으며 이는 유용생물을 투여한 인공연못에서 남조류의 성장이 제한을 받고 있음을 나타내고 있다.



[그림 3.3.80] 석문 인공연못에서 입자성 유기물질의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

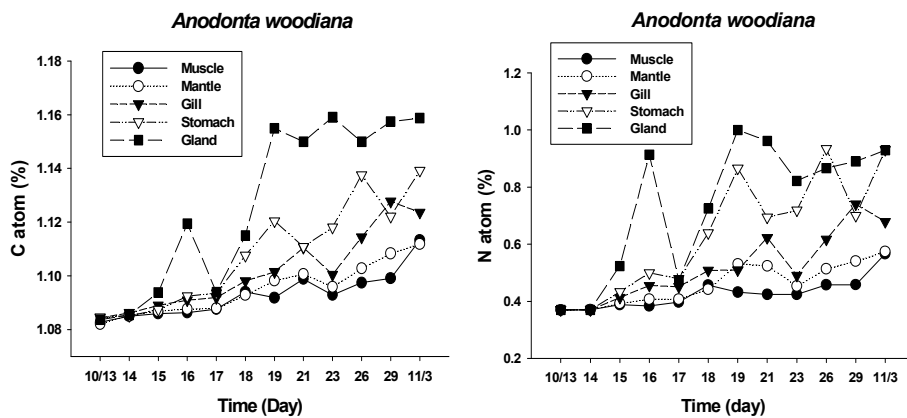
실험기간동안 석문 인공연못에 투여한 유용생물 중에서 말조개의 남조류 제어효과를 관찰하였다. 여기서 유용생물의 atom%가 의미하는 것은 다음과 같다. 본 메소코즘에 투여한 추적자($^{13}\text{HCO}_3^-$, $^{15}\text{NH}_4^+$)는 무기태 형태로 식물플랑크톤이 광합성을 하는데 이용한다. 식물플랑크톤은 중탄산염과 질산염을 이용하여 광합성을 하며 체내에 흡수하여 새로운 유기물을 합성한다. 이때 새로이 생성된 유기물에는 첨가한 추적자가 labelling되며 유용생물이 섭식을 통해 이를 흡수하면 유용생물 체내에 유기물을 동화시켜 다시 labelling되는 것이다. 즉, 유용생물의 atom%

가 의미하는 것은 얼마나 많은 남조류를 섭식을 통해 체내에 새로운 유기물로서 동화시켰는지 를 알아낼 수 있는 지표로서 atom%가 높을수록 보다 많은 남조류를 섭식한 것이라고 할 수 있다. 말조개는 각 기관별로 ^{13}C atom%는 1.08~1.11%의 증가를 보이고 있고, ^{15}N atom%는 0.3~0.6%의 증가를 보이지만 실험시작 15일째부터 기관별에 따라서 감소를 보이고 있다[그림 3.3.81]. 이를 기관별 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화로 살펴보면 muscle, mantle 기관보다 stomach, gland, gill 기관에 보다 많은 ^{13}C , ^{15}N atom%이 함유되어 있다. 이는 말조개 체내의 기관별 에너지 이동과정의 차이로써 말조개가 여과섭식을 통해 남조류를 섭식하면 체내에 에너지를 동화하는 과정에서 stomach, gland, gill 기관쪽에 먼저 유기물을 동화하고 남은 에너지를 muscle, mantle, 기관쪽으로 동화시키기 때문이다. 그러므로 stomach, gland, gill 기관쪽은 동화율이 빠르고 높은 atom%를 보이는 것이며, 다른 기관은 상대적으로 느리고 낮은 atom%를 보이는 것으로 여겨진다.



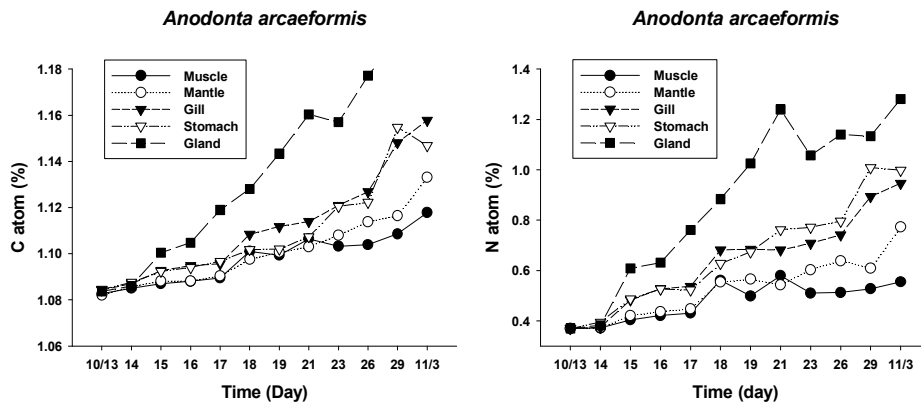
[그림 3.3.81] 석문 인공연못에서 말조개의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

펼조개는 각 기관별로 ^{13}C atom% 는 1.08~1.16%의 증가를 보이고 있고, ^{15}N atom%는 0.3~1.0%의 증가를 보이고 있다. 이는 앞서의 말조개와 비교했을 때 높은 atom%를 보이지만 실험시작 10일째부터 기관별에 따라서 감소를 보이고 있다[그림 3.3.82]. 이를 기관별 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화로 살펴보면 말조개와 마찬가지로 muscle, mantle 기관보다 stomach, gland, gill 기관에 보다 많은 ^{13}C , ^{15}N atom%가 함유되어 있다.



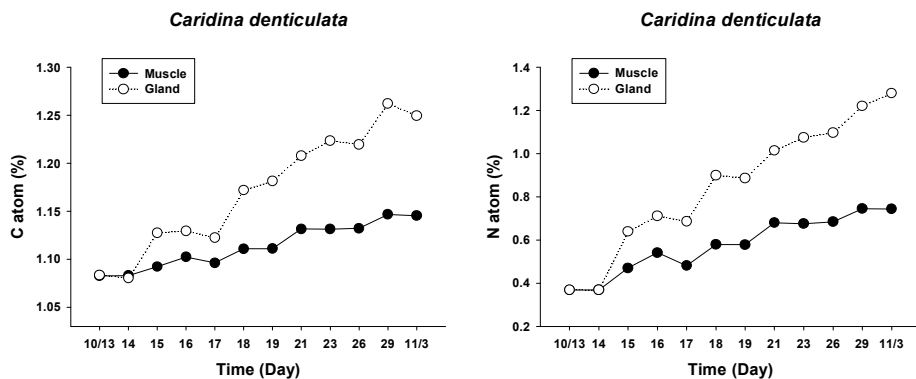
[그림 3.3.82] 석문 인공연못에서 펼조개의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

대칭이는 각 기관별로 ^{13}C atom%는 1.08~1.18%의 증가를 보이고 있고, ^{15}N atom%는 0.3~1.3%의 증가를 보이고 있다[그림 3.3.83]. 앞에서의 말조개, 필조개 atom%보다 훨씬 높은 함유량으로 실험시작부터 실험종료 시까지 꾸준한 증가율을 보이고 있다. 즉, 여과섭식자들, 말조개, 필조개, 대칭이 중에서 대칭이가 남조류를 제어하는 가장 높은 효율을 나타내는 종이라는 것을 의미하며 실험 기간에 상관없이 꾸준한 여과섭식을 통해서 남조류를 섭식한다는 것을 나타낸다. 또한, 기관별 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화로 살펴보면 muscle, mantle 기관보다 stomach, gland, gill 기관에 보다 많은 ^{13}C , ^{15}N atom%를 함유하고 있어 다른 여과섭식자와 비슷한 특징을 보이고 있었다.



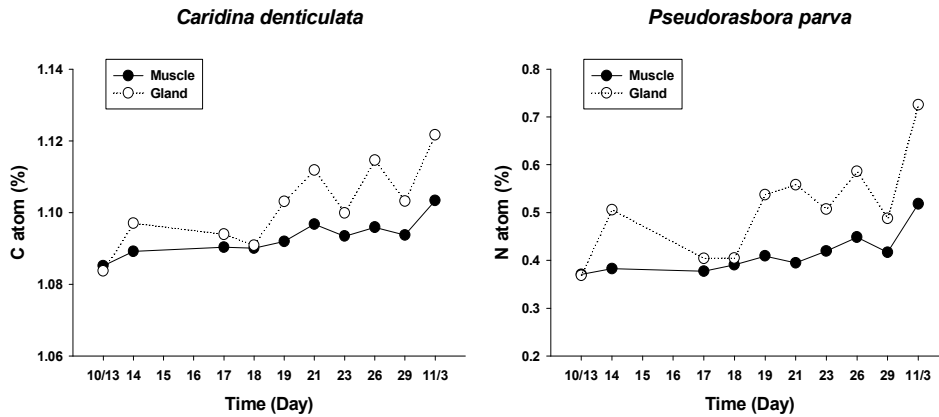
[그림 3.3.83] 석문 인공연못에서 대칭이의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

상위섭식자인 새뱅이는 각 기관별로 ^{13}C atom%는 1.08~1.27%의 증가를 보이고 있고, ^{15}N atom%는 0.3~1.3%의 증가를 보이고 있다[그림 3.3.84]. 실험기간 동안 약간의 증감은 있지만 꾸준하게 남조류를 섭식하고 있는 것으로 나타나고 있다. 기관별 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화를 살펴 보면 muscle 기관보다 gland 기관에 보다 많은 ^{13}C , ^{15}N atom%를 함유하고 있어 gland 기관에 먼저 유기물을 동화하고 남은 에너지를 muscle 기관에 동화시키는 것으로 관찰되었다. 그러므로 gland 기관에 동화율이 빠르고 높은 atom%를 보이는 것이며, 다른 기관은 상대적으로 느리고 낮은 atom%를 보이는 것으로 여겨진다.



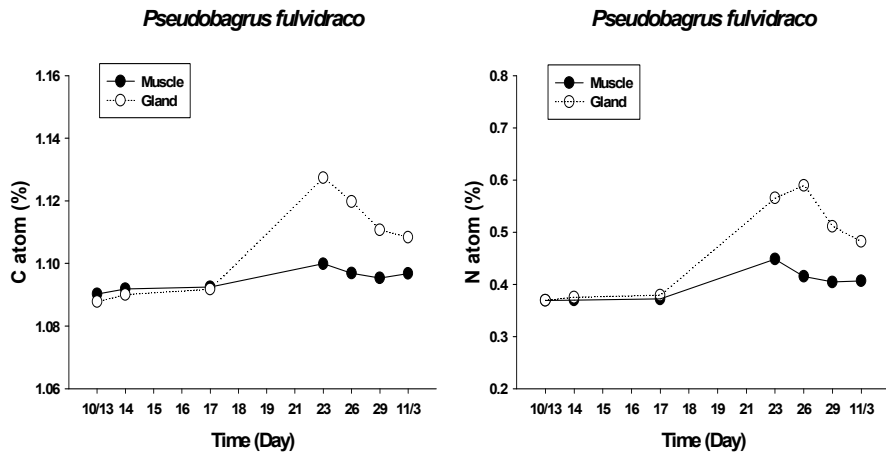
[그림 3.3.84] 석문 인공연못에서 새뱅이의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

상위섭식자인 참붕어는 각 기관별로 ^{13}C atom%는 1.08~1.12%의 증가를 보이고 있고, ^{15}N atom%는 0.3~0.7%의 증가를 보이고 있다[그림 3.3.85]. 실험기간 동안 약간의 증감은 있지만 꾸준히 남조류를 섭식하고 있는 것으로 나타나고 있다. 기관별 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화를 살펴보면 muscle 기관보다 gland 기관에 보다 많은 ^{13}C , ^{15}N atom%를 함유하고 있다.



[그림3.3.85] 석문 인공연못에서 참붕어의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

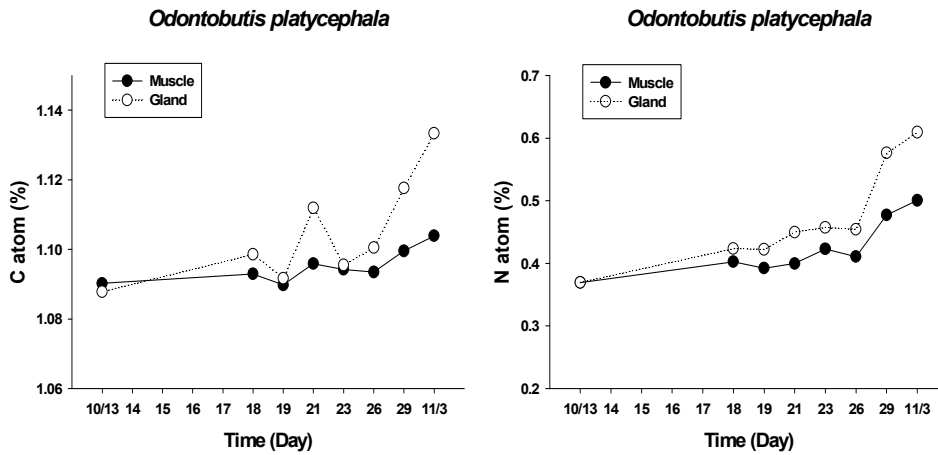
상위섭식자인 동자개는 각 기관별로 ^{13}C atom%는 1.08~1.13%의 증가를 보이고 있고, ^{15}N atom%는 0.3~0.6%의 증가를 보이고 있다[그림 3.3.86]. 실험시작 14일 후부터 atom%가 감소하고 있으며 앞서의 새뱅이와는 달리 남조류 섭식의 제한을 받고 있음을 나타내고 있다. 기관별 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화를 살펴보면 muscle 기관보다 gland 기관에 보다 많은 ^{13}C , ^{15}N atom%를 함유하고 있다.



[그림 3.3.86] 석문 인공연못에서 동자개의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

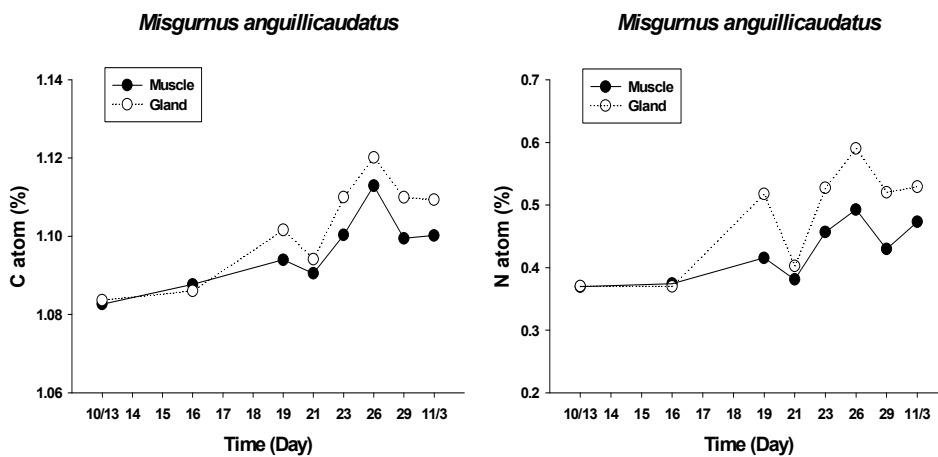
상위섭식자인 동사리는 각 기관별로 ^{13}C atom%는 1.08~1.13%의 증가를 보이고 있고, ^{15}N atom%는 0.3~0.6%의 증가를 보이고 있다[그림 3.3.87]. 앞서의 동자개와는 달리 약간의 증감은 있지만 실험 종료시까지 atom%가 증가하고 있으며 꾸준히 남조류를 섭식하고 있는 것으로

나타나고 있다. 기관별 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화를 살펴보면 muscle 기관보다 gland 기관에 보다 많은 ^{13}C , ^{15}N atom%를 함유하고 있다.



[그림 3.3.87] 석문 인공연못에서 동사리의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

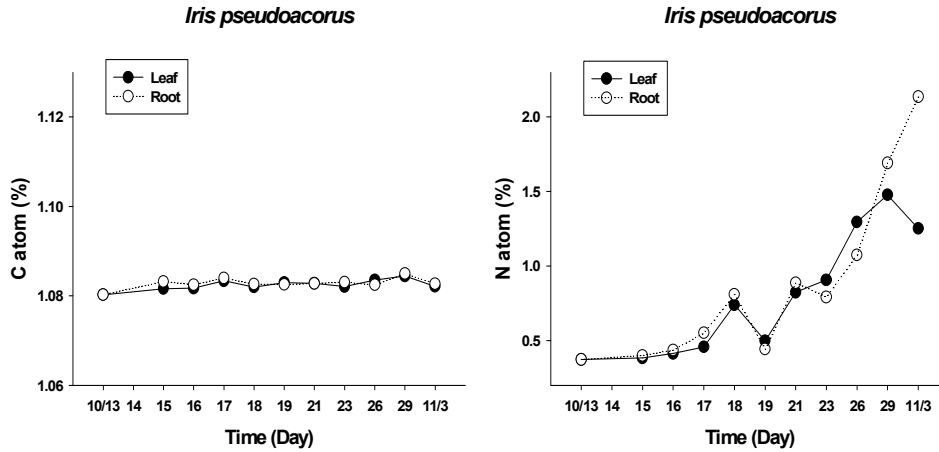
상위섭식자인 미꾸리는 각 기관별로 ^{13}C atom%는 1.08~1.12%의 증가를 보이고 있고, ^{15}N atom%는 0.3~0.6%의 증가를 보이고 있다[그림 3.3.88]. 하지만 실험시작 14일 후부터 atom%가 감소하고 있으며 앞에서의 새뱅이, 동사리와는 달리 남조류 섭식의 제한을 받고 있음을 나타내고 있다. 기관별 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화를 살펴보면 muscle 기관보다 gland 기관에 보다 많은 ^{13}C , ^{15}N atom%를 함유하고 있다.



[그림 3.3.88] 석문 인공연못에서 미꾸리의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

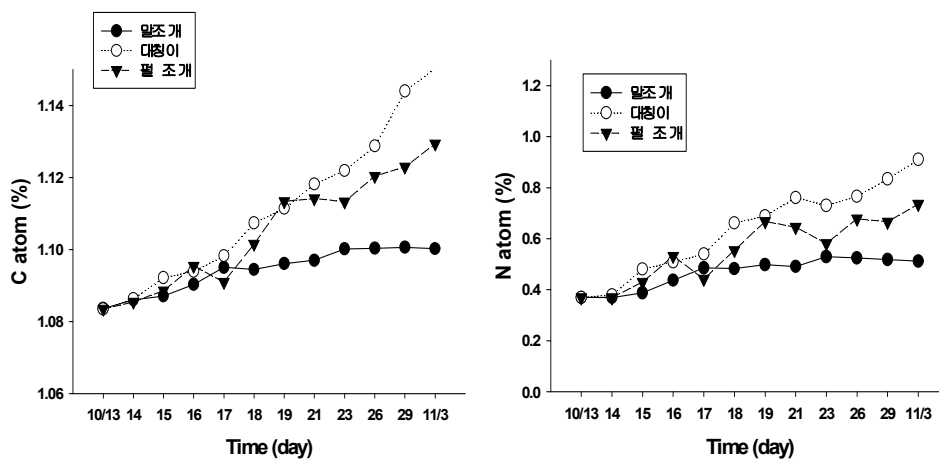
실험기간동안 유용생물로서 인공식물을 ^{13}C atom%는 1.081~1.084%로 거의 변화가 없다 [그림 3.3.89]. 이는 자연 상태에서 존재하는 ^{13}C 의 존재비와 거의 비슷한 값으로 인공식물이 수층에 존재하는 중탄산염(HCO_3^-)을 이용하여 광합성을 하지 않고 대기중의 이산화탄소(CO_2)를 이용하여 광합성을 하기 때문에 우리가 넣어준 추적자의 영향을 받지 않은 것으로 여겨진다. 그

러나 인공식물은 수층의 질산염을 이용하여 광합성에 필요한 에너지원으로 사용하기 때문에 ^{15}N atom%가 0.3~2.3%까지 지속적으로 증가하고 있다. 인공식물은 섭식을 통해 남조류를 섭식할 수 없으므로 atom%가 증가한 것은 수층에 있는 DIN 형태의 질산염을 흡수한 것으로 여겨진다. 즉, 인공식물섭이 남조류와의 질산염 섭취 경쟁에서 우위에 있기 때문에 보다 빨리 수층의 질산염을 제거하여 남조류의 증식을 억제한 것으로 여겨진다.



[그림 3.3.89] 석문 인공연못에서 인공식물의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

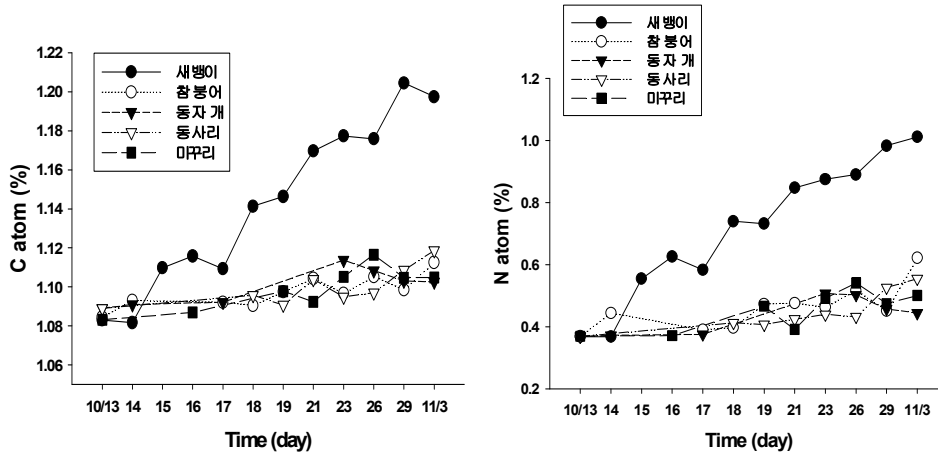
[그림 3.3.90]은 석문 인공연못에서 여과섭식자(말조개, 대칭이, 펄조개)들의 atom%를 도식화한 것이다. 말조개, 대칭이, 펄조개의 3종은 모두 여과섭식을 통해서 남조류를 체내에 동화시키지만 종에 따라서 그 흡수율이 다르게 나타나고 있다. 대칭이가 가장 높은 흡수율을 보이며 그 다음으로 펄조개, 말조개 순이다.



[그림 3.3.90] 석문 인공연못에서 여과섭식자의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

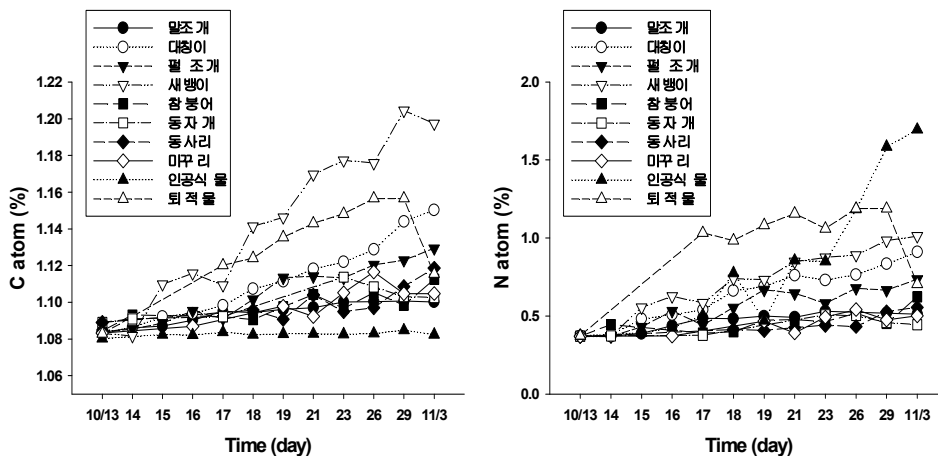
[그림 3.3.91]은 석문 인공연못에서 상위섭식자(새뱅이, 참붕어, 동자개, 동사리, 미꾸리)들의 atom%를 도식화한 것이다. 새뱅이, 참붕어, 동자개, 동사리, 미꾸리는 섭식을 통해서 남조류를

체내에 동화시키지만 종에 따라서 그 흡수율이 다르게 나타나고 있다. 새뱅이가 가장 높은 흡수율을 보이며 그 외의 종은 비슷한 흡수율을 나타내고 있다.



[그림 3.3.91] 석문 인공연못에서 상위섭식자의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

[그림 3.3.92]는 석문 인공연못에서 남조류를 제어하기 위하여 투입한 모든 유용생물의 atom%를 도식화한 것이다. 종에 따라서 새뱅이가 가장 높은 C atom%를 보이고 있었으며 인공식물섬은 수층내 DIN을 제거하는 효율이 뛰어나 높은 N atom%를 보이고 있었다.



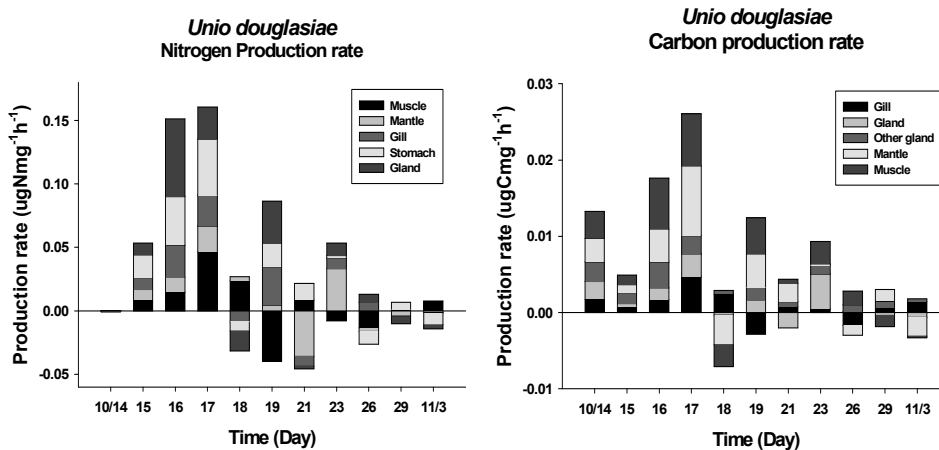
[그림 3.3.92] 석문 인공연못에서 유용생물의 ^{13}C , ^{15}N atom% 변화

(5) 유용생물의 production rate 변화

유용생물이 남조류를 섭식하여 체내에 동화시키는 효율을 알아보하고자 production rate를 측정하였다. production rate는 시간당 말조개 체내에 새로이 생성된 유기물 중에서 얼마만큼의 탄소와 질소계열의 유기물을 얼마나 체내에 동화시켰는지를 알아보는 지표이다. production rate

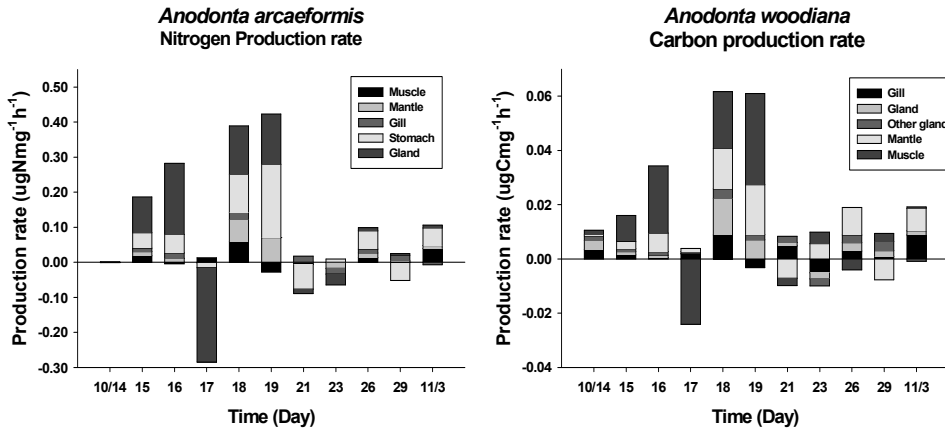
의 값이 +, -를 나타내는 것은 하루 동안의 새로이 생성된 유기물이 기존보다 높으면 +값을 나타내며 기존보다 낮으면 -를 나타낸다.

[그림 3.3.93]은 석문 인공연못에서 남조류를 제어하기 위하여 투입한 유용 생물중에서 말조개의 production rate 변화를 도식화한 것이다. 실험시작 4일째인 17일까지 지속적으로 남조류를 섭식하고 있지만 5일째인 18일부터 production rate 값이 $-0.008 \mu\text{g mg}^{-1} \text{h}^{-1}$ 값을 나타내고 있다. 이는 실험시작 4일째까지는 말조개가 남조류를 섭식하여 체내에 유기물을 동화시키고 있지만 5일째는 4일째보다 남조류의 섭식율이 떨어져 체내에 유기물을 동화시키는 비율이 적음을 나타낸다. 즉, 말조개가 섭식은 하지만 체내에 동화시키기 보다는 fecal pellet 형태로 체외로 방출하거나 뱉어버리는 경향이 있는 것으로 여겨진다. 이는 말조개의 생리적인 특성으로 말조개가 실험기간 동안 지속적으로 남조류를 섭식하지 않고, 배설을 더 많이 하는 시기도 있음을 나타내고 있다.



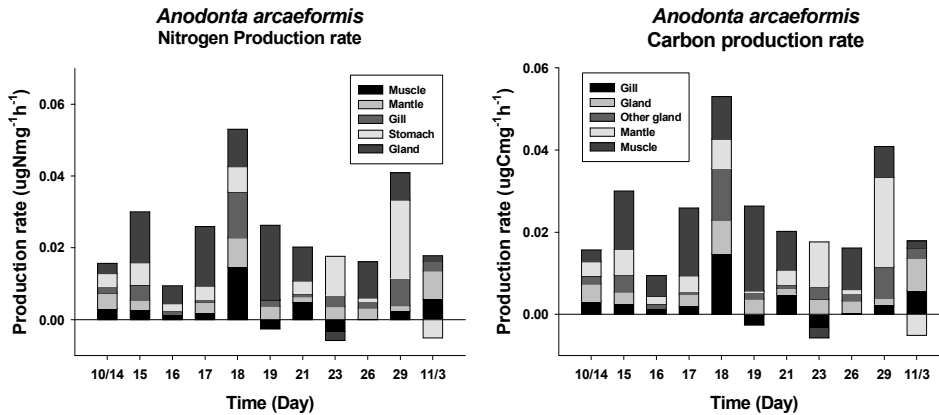
[그림 3.3.93] 석문 인공연못에서 말조개의 production rate 변화

[그림 3.3.94]는 석문 인공연못에서 남조류를 제어하기 위하여 투입한 유용 생물중에서 필조개의 production rate 변화를 도식화한 것이다. 실험시작 3일째인 16일까지 지속적으로 남조류를 섭식하고 있지만 4일째인 17일부터 production rate 값이 $-0.025 \mu\text{g mg}^{-1} \text{h}^{-1}$ 값을 나타내고 있다. 이는 실험시작 3일째까지는 말조개가 남조류를 섭식하여 체내에 유기물을 동화시키고 있지만 4일째는 3일째보다 남조류의 섭식율이 떨어져 체내에 유기물을 동화시키는 비율이 적음을 나타낸다. 이는 실험기간 종료시까지 나타나고 있으며 앞서의 말조개와 비슷한 경향을 보이고 있다.



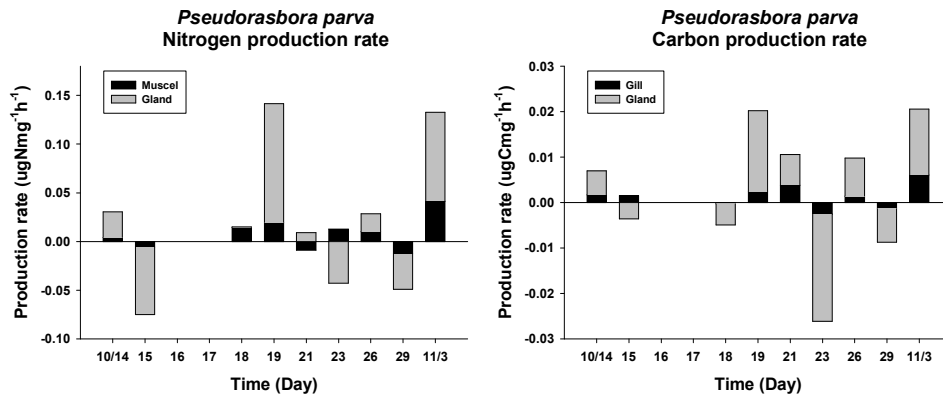
[그림 3.3.94] 석문 인공연못에서 펄조개의 production rate 변화

[그림 3.3.95]는 석문 인공연못에서 남조류를 제어하기 위하여 투입한 유용생물중에서 대칭이의 production rate 변화를 도식화한 것이다. 실험시작부터 실험종료시까지 높은 $+0.018 \sim +0.054 \mu\text{g mg}^{-1} \text{h}^{-1}$ 값을 보여주고 있으며 10월 19일, 23일, 11월 3일에는 $-0.002 \sim 0.006 \mu\text{g mg}^{-1} \text{h}^{-1}$ 값을 보이고 있지만 +값보다 낮은 값을 보이고 있다. 이는 앞에서의 말조개와 펄조개의 production rate와는 다른 경향을 보여주고 있는 것으로 대칭이는 남조류를 섭식하여 체내에 유기물을 동화시키는 과정에서 어떤 형태의 배설보다 우위에 있음을 나타내고 있다. 또한 실험시작부터 종료시까지 남조류 섭식율과 production rate가 지속적으로 증가 혹은 +값을 나타내고 있어 말조개와 펄조개와는 달리 남조류를 제어하는 효과가 훨씬 뛰어난을 나타내고 있다.



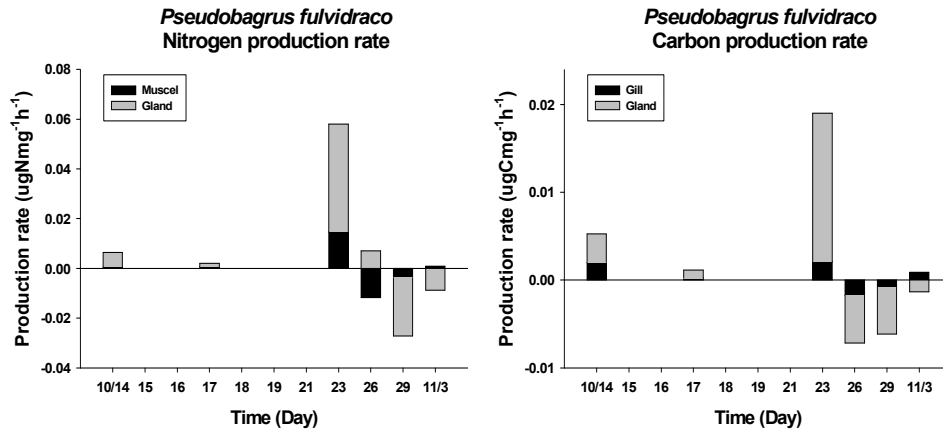
[그림 3.3.95] 석문 인공연못에서 대칭이의 production rate 변화

[그림 3.3.96]은 석문 인공연못에서 남조류를 제어하기 위하여 투입한 유용생물중에서 참붕어의 production rate 변화를 도식화한 것이다. 실험종료시까지 production rate 변화가 심하게 나타나고 있으며 체내에 유기물을 동화시키기 보다는 fecal pellet 형태로 체외로 방출하거나 뱉어 버리는 경향이 많은 것으로 여겨진다. 이는 참붕어의 생리적인 특성으로 참붕어가 실험기간 동안 지속적으로 남조류를 섭식하지 않고, 배설을 더 많이 하는 시기도 있음을 나타내고 있다.



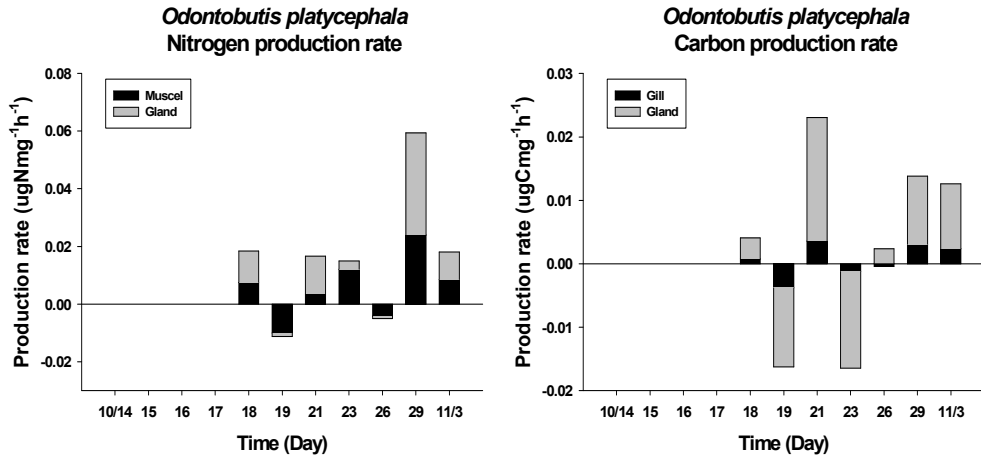
[그림 3.3.96] 석문 인공연못에서 참붕어의 production rate 변화

[그림 3.3.97]은 석문 인공연못에서 남조류를 제어하기 위하여 투입한 유용생물중에서 동자개의 production rate 변화를 도식화한 것이다. 10월 23일 까지는 production rate가 $+0.005 \mu\text{g mg}^{-1} \text{h}^{-1}$ 로 체내에 유기물을 동화시키는 비율이 높지만 10월 26일부터는 production rate가 $-0.002 \sim -0.007 \mu\text{g mg}^{-1} \text{h}^{-1}$ 로 fecal pellet 형태로 체외로 방출하거나 뱉어버리는 경향이 많은 것으로 여겨진다. 이는 동자개의 생리적인 특성으로 동자개가 실험기간 동안 지속적으로 남조류를 섭식하지 않고, 배설을 더 많이 하는 시기도 있음을 나타내고 있다.



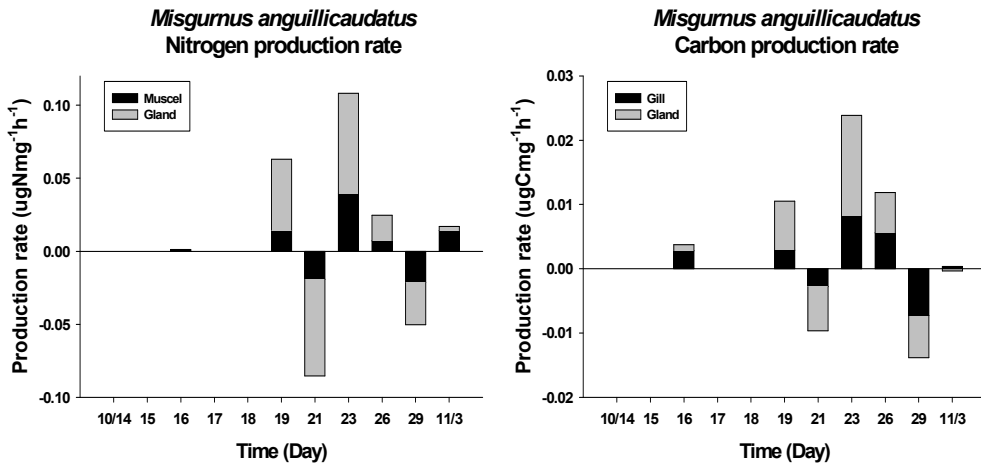
[그림 3.3.97] 석문 인공연못에서 동자개의 production rate 변화

[그림 3.3.98]은 석문 인공연못에서 남조류를 제어하기 위하여 투입한 유용생물중에서 동사리의 production rate 변화를 도식화한 것이다. 실험 종료시까지 production rate 변화가 심하게 나타나고 있으며 체내에 유기물을 동화시키거나 fecal pellet 형태로 체외로 방출하는 경향이 많은 것으로 여겨진다. 10월 23일에 동사리 체내에서 탄소의 production rate는 $-0.018 \mu\text{g mg}^{-1} \text{h}^{-1}$ 의 값을 가지지만 질소의 production rate는 $+0.018 \mu\text{g mg}^{-1} \text{h}^{-1}$ 의 값을 가진다. 이는 체내의 유기물을 동화시키는 과정에서 탄소와 질소의 동화율이 다를 수 있음을 나타내고 있다.



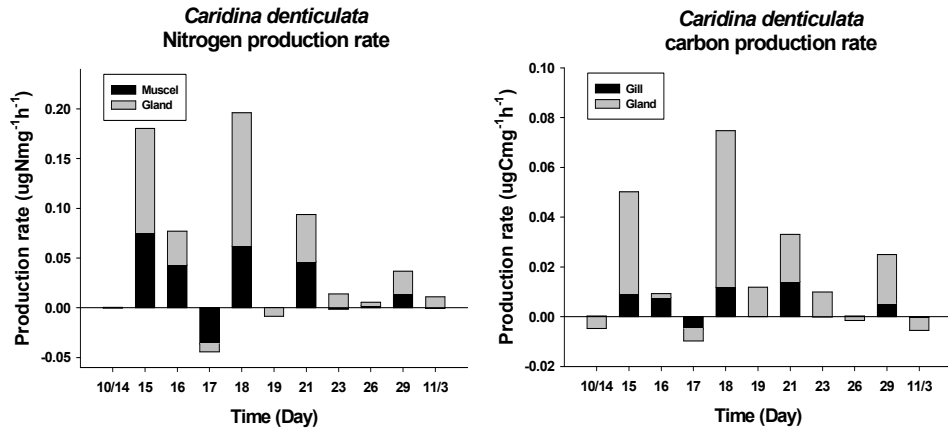
[그림 3.3.98] 석문 인공연못에서 동사리의 production rate 변화

[그림 3.3.99]는 석문 인공연못에서 남조류를 제어하기 위하여 투입한 유용생물중에서 미꾸리의 production rate 변화를 도식화한 것이다. 실험종료시까지 production rate 변화가 심하게 나타나고 있으며 체내에 유기물을 동화시키거나 fecal pellet 형태로 체외로 방출하는 경향이 많은 것으로 여겨진다.



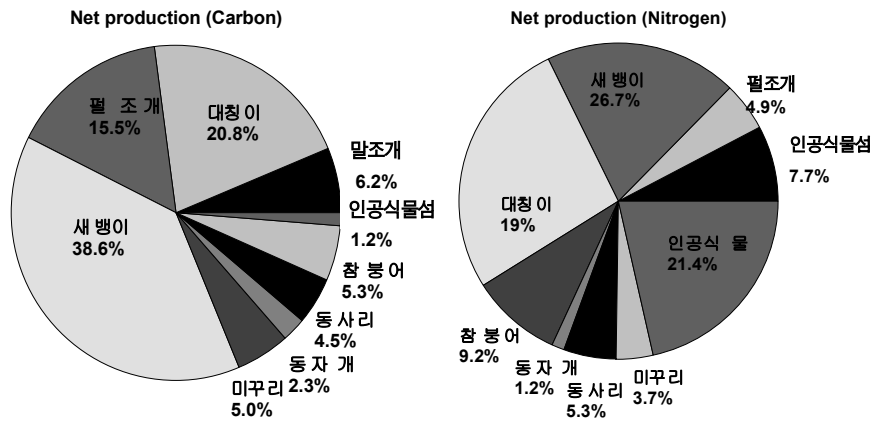
[그림 3.3.99] 석문 인공연못에서 미꾸리의 production rate 변화

[그림 3.3.100]은 석문 인공연못에서 남조류를 제어하기 위하여 투입한 유용생물중에서 새뱅이 production rate 변화를 도식화한 것이다. 실험시작부터 실험종료시까지 높은 $+0.01 \sim +0.078 \mu\text{g mg}^{-1} \text{h}^{-1}$ 값을 보여주고 있으며 10월 17일에는 $-0.015 \sim 0.040 \mu\text{g mg}^{-1} \text{h}^{-1}$ 값을 보이고 있다. 이는 앞서 상위섭식자 중에서 참붕어, 동사리, 동자개, 미꾸리의 production rate와는 다른 경향을 보여주고 있는 것으로 새뱅이는 남조류를 섭식하여 체내에 유기물을 동화시키는 과정에서 어떤 형태의 배설보다 우위에 있음을 나타내고 있다. 또한 실험시작부터 종료시까지 남조류 섭식율과 production rate가 지속적으로 증가 혹은 +값을 나타내고 있어 다른 종과는 달리 남조류를 제어하는 효과가 훨씬 뛰어난 것을 나타내고 있다.



[그림 3.3.100] 석문 인공연못에서 새뱅이의 production rate 변화

석문습지 인공연못에서 유용생물을 이용한 남조류 제어효과를 평가하기 위하여 각 유용생물이 남조류를 섭식하고 제어하는 효율을 평가하고자 총생산 변화율을 계산하였다[그림 3.3.101]. 유용 생물중에서 새뱅이가 남조류를 섭식함에 있어서 탄소 38.6%, 질소 26.7%로 가장 높은 효율을 보였으며 그 다음으로 대칭이가 탄소 20.8%, 질소 19.0%로 높았다.



[그림 3.3.101] 석문 인공연못에서 유용생물의 총생산 변화율

제 4 절

-
-
- 어류의 트로픽 구조분석 및 top-down 조절
- 기법을 이용한 농업용 저수지 수질관리 기법
- 개발
-

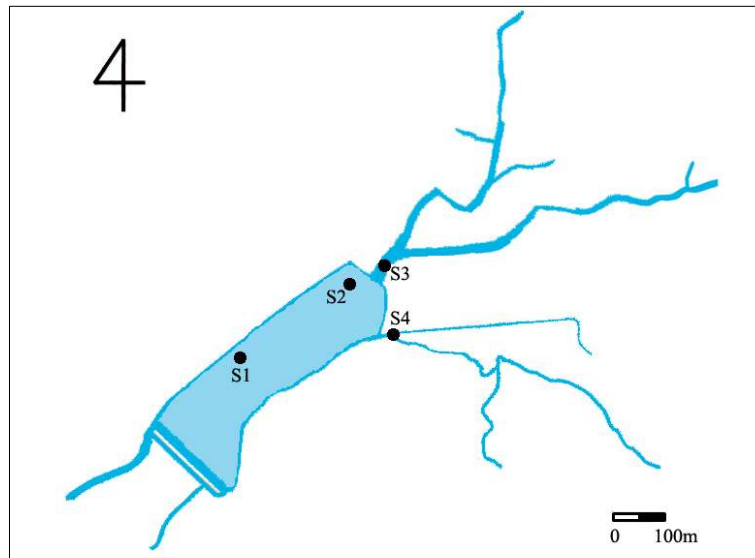
제 4 절 어류의 트로픽 구조분석 및 top-down 조절 기법을 이용한 농업용 저수지 수질관리 기법개발

1. 대상 저수지 모델 시스템 생태계 현황

가. 신구저수지의 이화학적 수질 특성

(1) 조사지 개황 및 지점

신구저수지는 충청남도 서천군에 위치하고 있는 소규모 농업용 저수지로서, 수표면적은 0.1Km^2 , 저수량은 3.88×10^5 톤으로 보고되고 있다. 신구저수지의 평균 수심은 4 m로 비교적 얇은 저수지로 분류되고 있으며, 여름철 수화현상(Algal bloom)이 빈번하게 일어나고 있다(김 등, 2005; Hwang *et al.*, 2003). 얇은 수심을 가지는 수체는 일반적으로 영양염(N, P) 부하 및 1차생산력이 크게 나타나는 것으로 보고되고 있다(Vollenweider, 1968; 환경부, 2001). 저수지의 경계에는 농경지가 존재하며, 이곳으로부터 지속적인 영양염이 직접적으로 유입되고 있어 수체의 영양염 농도 증가에 큰 영향을 끼치고 있는 것으로 나타나고 있다.



[그림 3.4.1] 신구저수지의 수질 조사 및 어류 현장조사 지점

본 연구는 2006년 6월부터 2007년 9월까지 총 4회의 어류조사를 실시하였다. 본 연구를 위해 저수지 내 호소특성을 보이는 2개 지점(S1, S2)과 저수지내로 유입되는 유입천 2개 지점(S3, S4)을 선정하였다[그림 3.4.1]. S1과 S2는 저수지 내부에 위치하여 호소특성을 그대로

반영하는 지점이었고, S3은 저수지로 유입되는 유입천 지점이나 저수지 유량상승에 의해 저수지의 특성을 잘 반영하는 지점이었다. S4는 저수지내로 유입되는 또 다른 유입천에 위치한 지점이었으나 S3과는 달리 저수지 유량상승에 의한 영향이 크게 미치지 않는 지점으로 선정하였다.

(2) 이화학적 수질 특성

(가) 신구저수지의 수질 특성 평가

전기전도도(Conductivity)는 다항목 수질측정기(YSI Sonde 6600)를 이용하여 측정하였으며, 25°C로 보정된 값을 측정결과로 사용하였다. Chl-*a*(Chlorophyll-*a*) 농도 측정에 에탄올 추출법(Sartory and Grobbelaar, 1984)을 이용하였으며, 분광광도계(Spectrophotometer, Beckman DU-530 Model)를 이용하여 흡광도를 측정하여 아래 식을 통하여 Chl-*a*의 농도를 계산하였다.

$$\text{Chl-}a(\mu\text{g L}^{-1}) = \frac{[13.7(OD_{649} - OD_{750}) - 5.76(OD_{649} - OD_{750})] V}{V * 10}$$

또한 신구저수지의 장기간 수질특성 분석은 2002년부터 2005년까지 한국농촌공사에서 측정한 수질자료(농업기반공사, 2001~2005)를 이용하였다. 사용된 수질항목은 전기전도도(Conductivity, EC), 용존산소(Dissolved oxygen, DO), 영양염(Total nitrogen, TN; Total phosphorus, TP), 화학적 산소요구량(Chemical oxygen demand, COD), 부유물(Suspended solid, SS), Chl-*a*(Chlorophyll-*a*)의 총 7개 항목이었으며, 본 수질자료의 시간별 변이 추이를 토대로 신구저수지의 수질경향성을 분석하였다.

(나) 신구저수지의 수질 특성 결과

2002년부터 2005년까지 수질분석결과 신구저수지는 부영양화 현상과 수질오염이 심각한 것으로 나타나고 있었다[그림. 3.4.2]. 전기전도도(EC)는 측정기간 동안 평균 219.3 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 수질오염이 상당히 진행된 대표적인 인공호인 대청호에서 보여진 평균 108~120 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (안과 한, 2007) 보다도 2배 정도 높은 값을 나타내고 있었다. 용존산소(DO)는 기간 동안 4.2~12 mg L^{-1} 변이를 보이고 있었으며 계절에 따른 변이 폭이 크게 나타나고 있었다. 생물화학적 산소요구량(COD)은 평균 9.5 mg L^{-1} 으로 환경부에서 공시하고 있는 호소수질환경 기준에 따르면, 6등급에 해당하는 수치를 보였으며, 겨울을 제외한 나머지 전 계절에서 8 mg L^{-1} 이상의 값을 지속적으로 나타내고 있었다. 부유물(SS)은 평균 11.5 mg L^{-1} 로서 호소수질환경기준에서는 양호한 상태로 나타나고 있었다. 그러나 계절별로 큰 변이폭을 보이고 있었으며, 여름철 강우에 의한 상승

효과가 크게 나타나고 있었다. 또한 2002년에서 2005년으로 갈수록 하락추세를 나타내고 있었다. 영양염(TN, TP) 값은 매우 높게 나타나고 있었으며, 총질소(TN), 총인(TP) 모두 호소수질 환경기준에서 매우 악화된 상태로 판명되었다. TN:TP비는 조사기간 동안 모두 17 이상으로 나타나 본 연구대상 저수지에서는 인 제한효과가 매우 크게 나타나고 있는 것으로 판명되었다. Chl-*a* 값은 높은 인 수치에 의해 매우 높은 값을 형성하고 있었으며, 연중 수화현상(Algal bloom)이 지속적으로 일어나고 있는 것으로 나타났다.



[그림 3.4.2] 신구저수지의 연별 이화학적 수질변화 특성

나. LEHA 어류모델을 이용한 신규저수지의 생태건강도 평가

(1) 어류 채집 및 어류 분포

(가) 어류 채집 방법 및 지점

어류 채집은 미환경부의 정수생태계 평가 기법(Lake and Reservoir Bioassessment and Biocriteria) (U.S. EPA, 1998)에 기초를 두었으며, 국내 호소환경에 맞게 수정·적용한 안과 한(2007)의 방법에 따라 실시하였다. 어류채집은 수심이 3~4 m 미만인 얇은 호소의 연안부(Littoral Zone)에서 실시하였으며, 수심이 얇은 수초 근처에서는 족대(Mesh size: 4×4 mm), 호소 연안대의 개방된 구간에서는 투망(Mesh size: 5×5 mm)을 이용하였다. 어류채집은 지점별로 50분간 실시하였으며, 채집구간은 저수지 규모를 감안하여 조사지점별로 50 m 구간 내에서 실시하였다. 각 지점에서 채집된 어류는 김과 박(2002), 김(1997)에 의거하여 동정하였다. 어류 채집 지점은 이화학적 수질 측정 지점과 동일하며, 지점 전경은 아래와 같다[그림 3.4.3].



지점 1



지점 2



지점 3



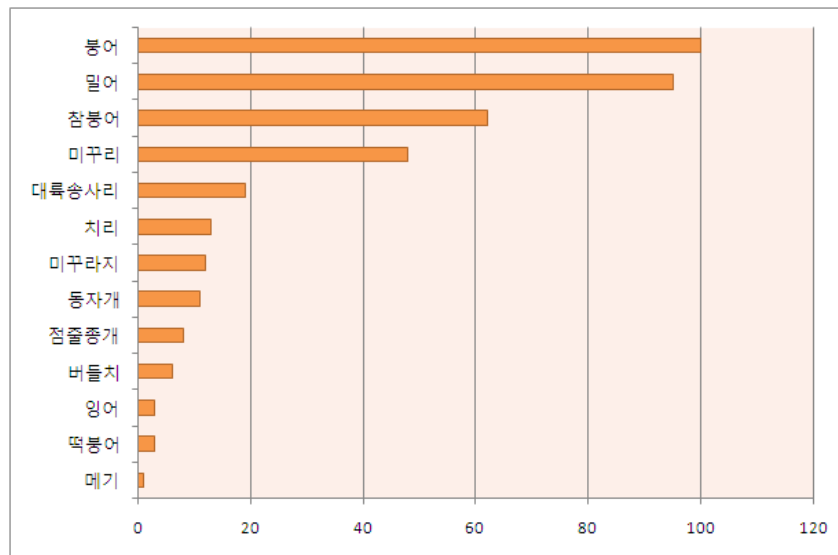
지점 4

[그림 3.4.3] 신규저수지의 어류 현장 조사 지점

(나) 신규 저수지의 어류상

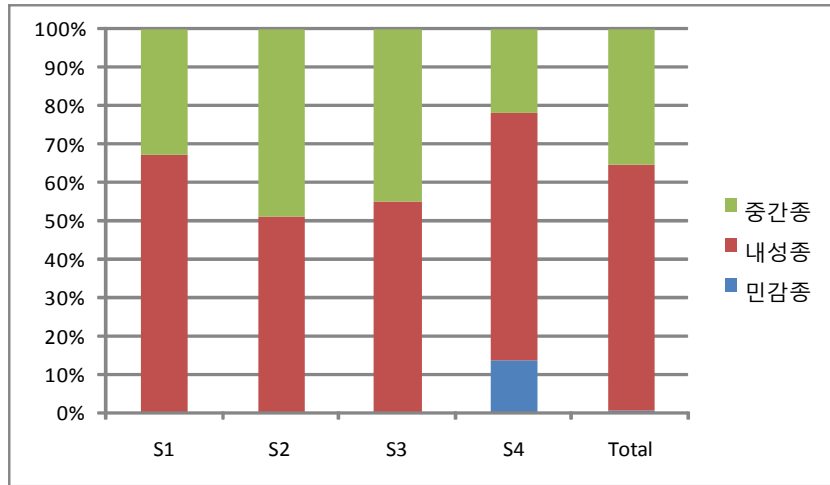
총 4차례의 조사결과, 신규저수지에서는 13종 381개체가 출현하였으며, 붕어(*Carassius auratus*), 밀어(*Rhinogobius brunneus*), 참붕어(*Pseudorasbora parva*)가 가장 우점하는 종으로 나타났다[그림 3.4.4]. 우점종인 붕어, 참붕어는 모두 내성종이었으며, 전체 내성종은 13종 381개체 중, 8종 242개체를 차지하고 있었다. 이는 전체의 78%에 해당하는 것으로 나타나 현재 저수지의 부영양화와 수질오염 정도가 매우 심각한 상태임을 간접적으로 시사하였다.

지점별로는 저수지 내에 위치한 지점(S1)에서 주요 분포를 보이고 있었으며, 반면 유입천에 위치한 지점(S3, S4)에서는 비교적 내성종 출현빈도가 낮게 나타나고 있었다[그림 3.4.5]. 그러나 각 지점별 출현 내성종 출현비율은 전 지점에서 평균 60% 이상으로 저수지의 전체적인 내성종 우점현상이 큰 것으로 나타났다.

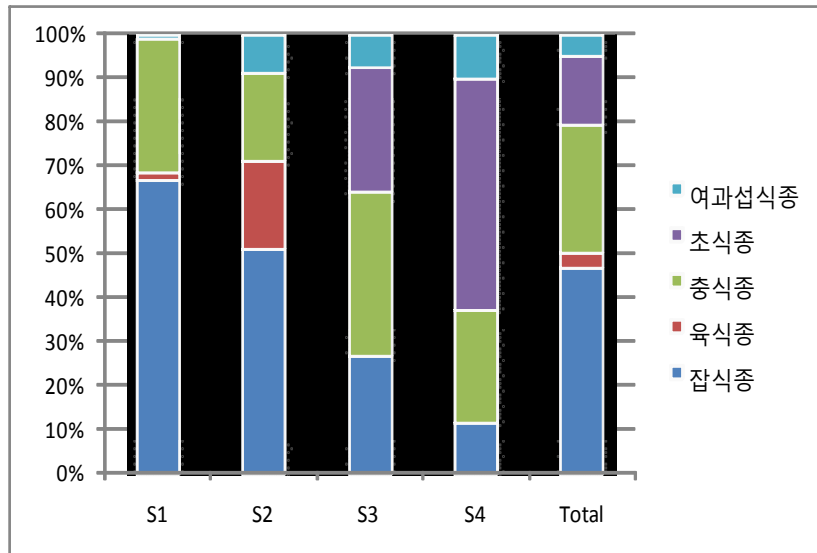


[그림 3.4.4] 신규저수지에서 어류의 상대빈도

전 조사지점에서 민감종은 산간계류천의 영향을 받고 있는 S4에서만 출현하고 있었으며, 나머지 지점에서는 총 4차례의 조사동안 민감종은 전혀 출현하지 않았다. 이전 연구결과(윤 등, 2006)에서도 일반적으로 농업용 저수지에서 잡식성종이 크게 우점하는 현상을 보인다는 보고한 바 있듯, 신규저수지에서도 잡식성종이 평균 약 50%로 가장 많은 우점현상을 보이고 있었으며, 충식성, 초식성 순의 우점 비율을 나타내고 있었다[그림 3.4.6]. 지점별로 잡식성종은 S1에서 S4로 갈수록 비율이 줄어들고 있었다. 저수지내 지점인 S1과 S2에서는 50% 이상을 보였으나 유입천 지점인 S3과 S4에서는 30%의 출현비율을 나타냈다. 이는 저수지내 다량의 유기물과 영양염의 집중으로 인하여 잡식성종의 비율이 크게 증가하고 있는 것으로 판단되었다. 그러나 하천특성이 가장 크게 작용하고 있는 S4에서는 10% 미만으로 나타나 저수지내 지점과 큰 대조를 이루었다.



[그림 3.4.5] 신구저수지에서 지점별 내성도 분석



[그림 3.4.6] 신구저수지에서 지점별 섭식도 분석

일반 하천과는 달리 신구저수지에서는 충식성종의 비율이 비교적 높게 나타나고 있었는데, 이는 저수지내 갑각류(새우류)를 포함한 대형무척추동물의 서식 비율이 크게 작용한 것으로 판단되었다. 한편 S3과 S4에서만 초식종이 출현하였는데, 이는 미꾸라지(*Misgurnus mizolepis*)와 미꾸리(*Misgurnus anguillicaudatus*)의 다량 출현에 의한 비율 증가로 인한 것이었으며, 유입천 부근에 위치한 지리적인 특성으로 인하여 두 어종의 서식이 용이하였기 때문으로 사료되었다 [표. 3.4.1~4][그림 3.4.7].

[표 3.4.1] 신구저수지에서 1차 조사 어류 종조성 및 길드 특성분석

종명(학명)	길드특성		조사지점			
	내성길드	트로픽길드	S1	S2	S3	S4
붕어(<i>Carassius auratus</i>)	TS	O	40	3		
떡붕어(<i>Carassius cuvieri</i>)	TS	O	2	1		
점줄종개(<i>Cobitis lutheri</i>)	IS	I	4			
잉어(<i>Cyprinus carpio</i>)	TS	O	1			
치리(<i>Hemiculter eigenmanni</i>)	TS	O				
미꾸리(<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>)	TS	H			19	27
미꾸라지(<i>Misgurnus mizolepis</i>)	TS	H				5
대륙송사리(<i>Oryzias sinensis</i>)	IS	O	2	4	3	6
동자개(<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>)	IS	C	1	8		
참붕어(<i>Pseudorasbora parva</i>)	TS	O	15		3	1
밀어(<i>Rhinogobius brunneus</i>)	IS	I	35	8	22	8
버들치(<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>)	SS	I				6
메기(<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>)	TS	C	1			
총 개체수			101	26	50	57
총 종수			9	5	4	6

(TS: 내성종, IS: 중간종, SS: 민감종, O: 잡식종, C: 육식종, I: 총식종, H: 초식종)

[표 3.4.2] 신구저수지에서 2차 조사 어류 종조성 및 길드 특성분석

종명(학명)	길드특성		조사지점			
	내성길드	트로픽길드	S1	S2	S3	S4
붕어(<i>Carassius auratus</i>)	TS	O	5			
떡붕어(<i>Carassius cuvieri</i>)	TS	O				
점줄종개(<i>Cobitis lutheri</i>)	IS	I				
잉어(<i>Cyprinus carpio</i>)	TS	O				
치리(<i>Hemiculter eigenmanni</i>)	TS	O	11			
미꾸리(<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>)	TS	H				
미꾸라지(<i>Misgurnus mizolepis</i>)	TS	H				
대륙송사리(<i>Oryzias sinensis</i>)	IS	O				
동자개(<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>)	IS	C	1			
참붕어(<i>Pseudorasbora parva</i>)	TS	O	5			
밀어(<i>Rhinogobius brunneus</i>)	IS	I	1			
버들치(<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>)	SS	I				5
메기(<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>)	TS	C				
총 개체수			24	0	0	5
총 종수			5	0	0	1

(TS: 내성종, IS: 중간종, SS: 민감종, O: 잡식종, C: 육식종, I: 총식종, H: 초식종)

[표 3.4.3] 신구저수지에서 3차 조사 어류 종조성 및 길드 특성분석

종명(학명)	길드특성		조사지점			
	내성길드	트로픽길드	S1	S2	S3	S4
붕어(<i>Carassius auratus</i>)	TS	O	11			
떡붕어(<i>Carassius cuvieri</i>)	TS	O				
점줄종개(<i>Cobitis lutheri</i>)	IS	I	3			
잉어(<i>Cyprinus carpio</i>)	TS	O	1			
치리(<i>Hemiculter eigenmanni</i>)	TS	O	2			
미꾸리(<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>)	TS	H				
미꾸라지(<i>Misgurnus mizolepis</i>)	TS	H				
대륙송사리(<i>Oryzias sinensis</i>)	IS	O				
동자개(<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>)	IS	C				
참붕어(<i>Pseudorasbora parva</i>)	TS	O	9			
밀어(<i>Rhinogobius brunneus</i>)	IS	I	12			
버들치(<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>)	SS	I				
메기(<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>)	TS	C				
총 개체수			39	0	0	0
총 종수			6	0	0	0

(TS: 내성종, IS: 중간종, SS: 민감종, O: 잡식종, C: 육식종, I: 충식종, H: 초식종)

[표 3.4.4] 신구저수지에서 4차 조사 어류 종조성 및 길드 특성분석

종명(학명)	길드특성		조사지점			
	내성길드	트로픽길드	S1	S2	S3	S4
붕어(<i>Carassius auratus</i>)	TS	O	18	10	13	
떡붕어(<i>Carassius cuvieri</i>)	TS	O				
점줄종개(<i>Cobitis lutheri</i>)	IS	I		1		
잉어(<i>Cyprinus carpio</i>)	TS	O			1	
치리(<i>Hemiculter eigenmanni</i>)	TS	O				
미꾸리(<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>)	TS	H				2
미꾸라지(<i>Misgurnus mizolepis</i>)	TS	H				7
대륙송사리(<i>Oryzias sinensis</i>)	IS	O			2	2
동자개(<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>)	IS	C		1		
참붕어(<i>Pseudorasbora parva</i>)	TS	O	11	9	1	8
밀어(<i>Rhinogobius brunneus</i>)	IS	I	5		3	1
버들치(<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>)	SS	I				
메기(<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>)	TS	C				
총 개체수			34	23	23	24
총 종수			3	4	5	5

(TS: 내성종, IS: 중간종, SS: 민감종, O: 잡식종, C: 육식종, I: 충식종, H: 초식종)



[그림 3.4.7] 조사 지점별 어종의 개체수, 종수, 잡식종 비율 및 총식성의 상대빈도

(2) 신구저수지 생태 건강도 평가

(가) 정수생태계 평가모델(LEHA model) 적용 및 생태 건강도 평가

신구저수지에서의 생태건강도 평가는 안과 한(2007)의 LEHA 어류에 의거하였고, 기본적인 모델은 생물통합지수(Index of Biological Integrity)에 기반을 두었다. LHEA 어류모델의 메트릭은 총 11개였으나, 본 연구에서는 신구저수지의 규모와 식생분포율을 감안하여 최초 LEHA 모델의 수변 식피율 메트릭을 제외하고 10개 메트릭을 적용하였다 .

신구저수지의 생태건강도는 LEHA(Lentic Ecosystem Health Assessment) 모델에 근거하여 평가되었으며, 본 연구에 사용된 모델 메트릭은 다음과 같다. M₁은 총 본토종수, M₂는 민감성 어종의 개체수, M₃는 내성 지표종의 개체수빈도로 이들 M₁~M₃의 메트릭들은 종 다양도 및 생태 지표특성을 반영하는 메트릭으로 선정되었다. M₄는 잡식성종의 상대빈도, M₅는 본토 충식성종의 상대빈도로서 이들 2개의 메트릭은 수체 내 에너지 흐름인 영양단계를 반영하는 변수들로 선정되었다. M₆는 총개체수, M₇는 외래종 빈도, M₈는 개체의 비정상도 빈도로서 개체 풍부도 및 건강성을 반영한 메트릭을 이용하였다, M₉는 전기전도도 지수, M₁₀는 부영양화도 지수는 화학적 수질 상태를 반영한 메트릭이었다. M₁~M₈은 기존 하천건강성 평가모델인 IBI(Index of Biological Integrity) 모델에 기본을 둔 메트릭이며, M₉-M₁₀은 정수생태계 특성을 반영하고자 안과 한(2007)에 의해 새롭게 개발된 메트릭이다[표 3.4.5].

[표 3.4.5] 정수생태계의 건강도 평가모델(LEHA) 메트릭 및 등급기준

범 주	어류평가모델 메트릭	등급 기준		
		5	3	1
생태지표특성	M ₁ . 총 본토종 수	>67%	33~67%	<33%
	M ₂ . 민감종 수	>67%	33~67%	<33%
	M ₃ . 내성종 개체 빈도(%)	<5%	5~20%	>20%
영양단계구조	M ₄ . 잡식성 개체 빈도(%)	<20%	20~45%	>45%
	M ₅ . 충식성 개체 빈도(%)	<20%	20~45%	>45%
어류풍부도 및 건강도	M ₆ . 총 개체수	>67%	33~67%	<33%
	M ₇ . 외래종 수	0%	0~1%	>1%
	M ₈ . 비정상 개체 빈도(%)	0%	0~1%	>1%
화학적 수질 상태	M ₉ . 전기전도도($\mu\text{s cm}^{-1}$)	<81	81~229	>229
	M ₁₀ . TSI지수(Chlorophyll-a)	<40	40~50	>50

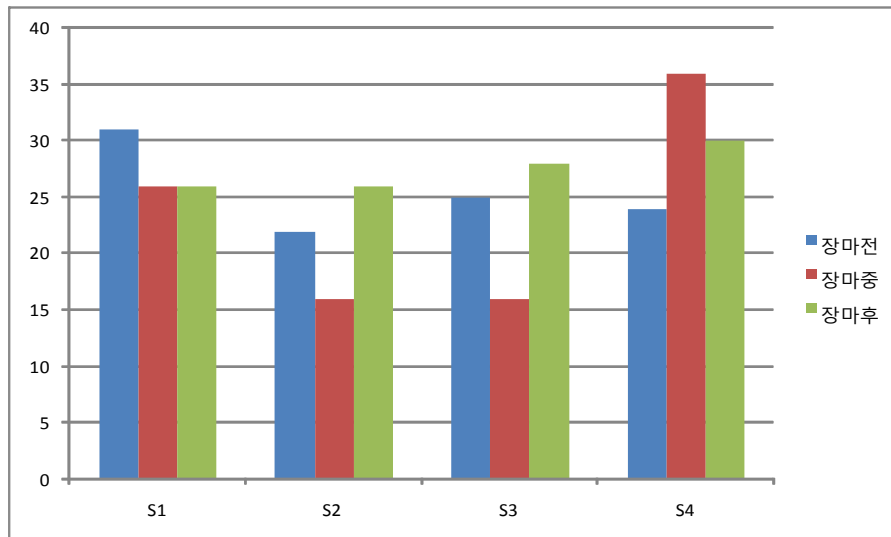
[표 3.4.6] 정수생태계 건강도 평가모델 등급 및 모델 값

생태 건강도 등급	LEHA 모델 값	건강도 상태	등급별 특성
I	46~50	최적상태 (Excellent, E)	어류의 종적 구성이 예외적으로 풍부하고, 청정지역의 생태 지표 어종(민감종)의 우점
II	36~40	양호상태 (Good, G)	어종 풍부도가 일부 감소하고, 민감종이 존재하며, 내성 어종이 일부 출현
III	26~30	보통상태 (Fair, F)	민감성 생태지표 어종이 희박하고, 잡식어종의 상대풍부도가 증가하고 오염지표 생산자 및 소비자의 생체량 증가
IV	16~20	악화상태 (Poor, P)	민감성 생태지표 어종이 거의 부재하고, 일부 외래종이 출현하고, 잡식어종 및 내성종의 우점
V	≤ 10	극히 악화상태 (Very Poor, VP)	어류 거의 존재하지 않음, 기형 개체의 증가

본 연구에 이용된 LEHA 모델 등급은 총 5개 범주로 구분하였으며, 등급별 적용기준 값은 11개 메트릭으로 환산된 기존 LEHA 모델의 기준에서 10개 메트릭 모델에 맞게 수정하여 적용하였다. 등급산정은 각 메트릭별로 1, 3, 5의 모델값을 부여하여 총 10개 메트릭 점수를 합산하여 산정하였고, 46~50은 최적 상태(Excellent), 36~40은 양호상태(Good), 26~30은 보통 상태(Fair), 16~20은 악화상태(Poor), 10 이하는 극히 악화된 상태(Very poor)로 구분하였다[표 3.4.6].

(나) LEHA 모델에 의한 신규저수지의 생태건강도 평가 결과

LEHA 모델에 의거한 신규저수지의 생태건강도는 “보통에서 악화상태(Fair~Poor)”로 나타났다. S1과 S4는 각각 평균 28점과 30점으로 “보통(Fair)상태”로 나타났으며, S2와 S3은 각각 평균 21점과 23점으로 “보통에서 악화상태(Fair~Poor)”로 나타났다[그림 3.4.8]. S1은 평균 점수와 계절별 점수에 따른 변이는 크지 않은 것으로 나타났으나, S2~S4 계절별 약간의 값의 변이를 보였다. 이는 농업용 저수지의 특성상 장마전기 인근 농경지의 관개용수로의 이용으로 인하여 S2~S4의 저수량이 급격히 감소하였으며, 이로 인해 생태건강도 점수에 큰 영향을 미친 것으로 판단되었다. 실제 조사 기간 중 장마전기에 S2~S4의 저수량이 급격한 감소하였으며 이에 따라 대상 지점에서의 어류채집이 전혀 이루어지지 않음으로써 생태건강도 점수는 매우 낮은 점수로 평가되었다.



[그림 3.4.8] 강우특성(장마전, 장마중, 장마후)에 따른 신규저수지 생태건강도 모델값(LEHA) 변화

한편 이전의 농업용 저수지의 생태건강도 평가에 대한 연구는 전무한 실정으로 현재 신규저수지의 타 저수지에 대한 상대적인 생태건강도는 비교 불가능한 상태였으며, LHEA 모델을 이용한 인공호 평가사례(안과 한, 2007)와 비교하였을 때 생태건강도는 유의한 상태로 나타나고 있었다. 향후 농업용 저수지를 대상으로 한 생태건강도 평가의 지속적인 실시로 우리나라 농업용 저수지의 생태건강도에 대한 평균적인 자료 제시가 필요할 것으로 판단되었다.

다. 생물조절 대상 후보 생물 지표종 선정

Top down 조절을 위한 생물 지표선정을 위해 현장에서 채집된 어류는 실험실로 옮겨져 해부를 통해 위 내용물을 적출하였으며[그림 3.4.9], 내용물은 광학현미경 하에서 관찰을 통해 먹이원을 분석하였다. 위 내용물 분석결과 실제 저수지 내에서 Chl-*a*를 직접적으로 섭식할 것으로 판단되는 참붕어(*Pseudorasbora parva*)와, 줄새우(*Palaemon paucidens*)가 후보 생물종으로 분류 되었으며, 또한 이 중 줄새우를 주 먹이원으로 섭식하는 것으로 나타난 동자개(*Pseudobagrus fulvidraco*)가 Top carnivore 후보 생물종으로 분류되었다

한편 실제 대상 저수지에서는 채집이 이루어지지 않았거나, 위 내용물 분석결과 녹조를 실질적으로 섭식하지는 않으나, 녹조제어 능에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되는 예비 후보 생물종으로 치리(*H. eigenmanni*), 왜물개(*A. chinensis*), 칼납자루(*A. korensis*), 줄물개(*G. strigatus*), 돌고기(*P. herzi*), 흰줄납줄개(*R. o. ocellatus*)를 분류하였다.



[그림 3.4.9] 신구저수지에서 채집된 어류의 위내용물 분석(붕어, 참붕어, 치리, 피라미)

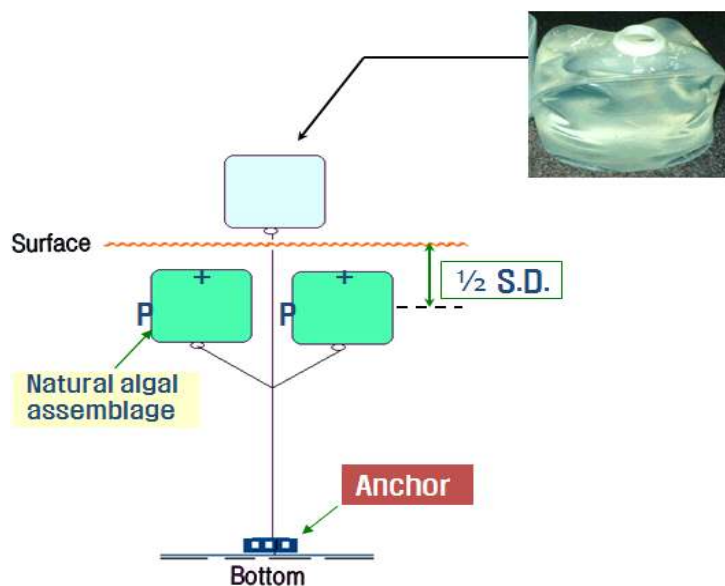
라. 신구저수지에서 식물플랑크톤에 의한 제한 영양염 분석

(1) 영양염 첨가 실험(Nutrient Enrichment Bioassay)

제한영양염 평가실험은 2006년 6월 22일부터 28일까지 총 7일간 실시하였다. 평가를 위한 물은 저수지 중앙부에서 총 10 L를 채수하였으며, 실험실로 이동한 후 1개의 대조군(Control)과 4개의 처리군(Treatment)에 같은 영양염(Nutrient) 농도가 되도록 잘 섞은 뒤 cubitainer에 각각 2.5 L씩 나누어 담았다. 대조군은 원수를 그대로 사용하였으며, T1에는 KH_2PO_4 $100 \mu\text{g L}^{-1}$ 을 첨가하였고, T2에는 KH_2PO_4 $200 \mu\text{g L}^{-1}$ 을 첨가하여 각각 P, 2P가 되도록 하였다. 또한 T3에는 KNO_3 2.59 mg L^{-1} 를 첨가하여 $\text{NO}_3\text{-N}$ 가 되도록 하였으며, T4에는 KH_2PO_4 $100 \mu\text{g L}^{-1}$ 과 KNO_3 2.59 mg L^{-1} 을 첨가하여 P+ $\text{NO}_3\text{-N}$ 가 되도록 하였다[표 3.4.7].

[표 3.4.7] 영양염 제한 분석 실험 디자인

실험조건	실험 용량	영양염류의 종류	영양염 투여 농도	온도조건
대조군(C)	2.5 L	-	-	$20 \pm 1^\circ\text{C}$
처리군 1(T1)	2.5 L	P	$100 \mu\text{g L}^{-1}$ as KH_2PO_4	$20 \pm 1^\circ\text{C}$
처리군 2(T2)	2.5 L	2P	$200 \mu\text{g L}^{-1}$ as KH_2PO_4	$20 \pm 1^\circ\text{C}$
처리군 3(T3)	2.5 L	NO_3	2.59 mg L^{-1} as KNO_3	$20 \pm 1^\circ\text{C}$
처리군 4(T4)	2.5 L	P+ NO_3	$100 \mu\text{g L}^{-1}$ as KH_2PO_4 , 2.59 mg L^{-1} as KNO_3	$20 \pm 1^\circ\text{C}$



[그림 3.4.10] 영양염 제한 분석 실험 모식도

각 cubitainer는 대형수조에 자연수를 첨가하여 그 안에 앵커리지를 달아 수표면에 위치하게 하여, 실외에서 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 유지시켰다. 광조건은 인위적인 조작 없이 실제 저수지에서의 조건과 동일하도록 인공광은 배제하고 자연광만을 유지하도록 하였다[그림 3.4.10]. 제한영양염 분석을 위해 각각의 cubitainer에서 100 mL씩 세 개의 샘플을 격일로 1차생산력 증가량이 비교적 미미한 오전 10시에 채수하였으며, 1차생산력 증가의 원인이 되는 영양염을 분석하기 위하여 각 샘플의 식물성플랑크톤(Chl-*a*)의 양을 측정하여 농도변화를 관찰하였다[그림 3.4.11].



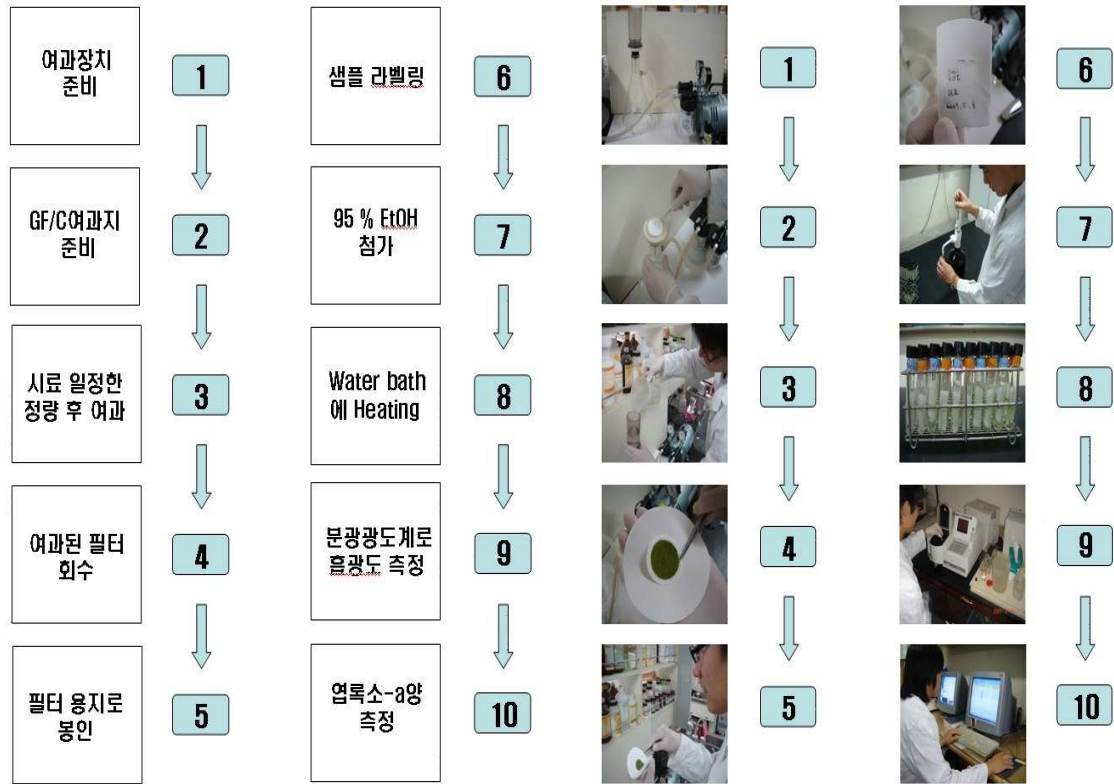
[그림 3.4.11] 조류 증식도 실험(A: 실험중, B: 실험후)

(2) Chl-*a* 농도 측정

각 cubitainer에서 채수된 샘플은 Glass Filter(Whatman GF/C glass microfiber filter)를 이용하여 여과하여 바로 Chl-*a* 농도를 분석하였으며, 분석법은 에탄올 추출법(Sartory & Grobbelaar, 1984)을 이용하였다[그림 3.4.12]. 흡광광도계(Spectrophotometer, Beckman DU 530)에 측정된 Chl-*a*의 데이터는 회귀식을 이용하여 실제 Chl-*a* 농도를 계산하였으며, 추정 회귀식은 다음과 같다.

$$\text{Chl-}a(\mu\text{g L}^{-1}) = \frac{[13.7(OD_{649} - OD_{750}) - 5.76(OD_{649} - OD_{750})]V}{V*10}$$

(OD=Optical density; V=Sample Volume).



[그림 3.4.12] 실험실 내에서의 Chl-a 분석

(3) 화학분석

본 연구에서는 2002~2005년까지 한국농촌공사에서 측정한 총질소(Total nitrogen, TN), 총인(Total phosphorus, TP), Chl-a(Chlorophyll-a)의 총 3개 수질항목을 이용하였다. 각 수질항목 분석은 수질오염공정시험법에 의하여 분석된 자료로서, TN은 흡광광도법, TP는 아스코르빈산 환원법, Chl-a는 흡광광도법을 이용하여 분석되어졌다. 한편, TN:TP비는 측정된 총질소와 총인을 동단위의 값으로 환산하여 두 영양염 간의 비율로 계산하였다.

(4) 영양염류의 계절변동 경향성 분석

2002년부터 2005년까지 측정된 신규저수지의 영양염 변이에 따르면(농업기반공사, 2002~2005), 총인(TP)과 총질소(TN)의 값은 조사기간 동안 매우 높게 나타나고 있었다. 총인의 평균은 $79.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 였으며, 최소 $29 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 최대 $161 \mu\text{g L}^{-1}$ 까지 농도변이를 보였다. 총인은 계절에 따른 변이가 크게 나타나고 있었으며, 2004년의 경우 다른 해에 비해 각 계절에 따른 변이차가 매우 크게 나타나고 있었다. 2004년 6월은 전 기간동안 가장 높은 $161 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타난 반면, 11월은 가장 낮은 $29 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타나 약 5배 이상의 차이를 보였다. 총인은 계절에 따른 농도차이를 보였으며, 특히 여름철이 시작되는 6월경부터 9월 사이에 가장 높은 농도를 나타내

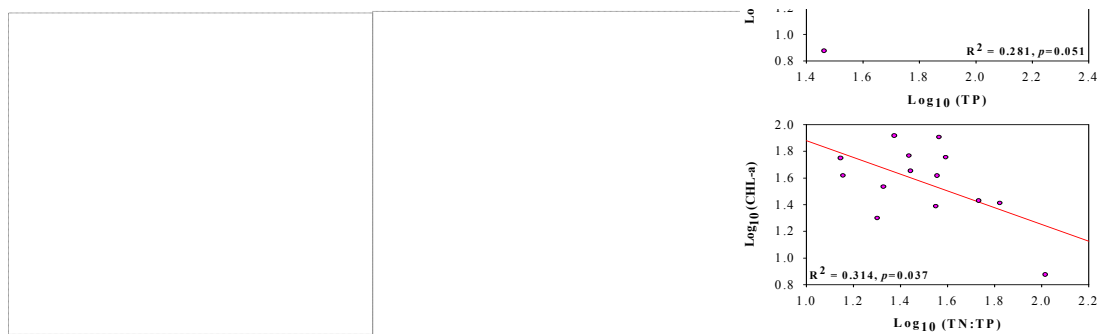
었다. 총인은 조사기간 동안 높은 농도를 지속적으로 유지하였으며, Forsberg & Ryding(1980)의 부영양화 단계에 따르면, 부영양상태로 나타나고 있었다.

총질소는 2004년 10월을 제외하고 나머지 기간 동안 1.5 mg L^{-1} 이상의 고농도를 지속적으로 유지하였으며, 총인과 마찬가지로 부영양상태로 나타나고 있었다. 총질소의 평균농도는 2.4 mg L^{-1} 이었고, 계절별 변이치는 총인보다 크게 나타났으며, 조사기간 중 변이폭은 최소 1.3 mg L^{-1} 에서 최대 3.6 mg L^{-1} 로 나타났다. 총질소의 경우 총인과는 달리 봄에 가장 높은 농도를 유지하고 있었으며, 여름에는 농도값이 감소하는 것으로 나타났다.

식물성플랑크톤의 농도변이는 계절별로 매우 변이차를 나타내고 있었고, 주로 여름철에 급격한 증가를 보이고 있었으며, 평균농도는 $43 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다. 2003년과 2004년에는 여름철에 가장 높은 농도를 유지하였으나, 2005년 9월에는 총인의 높은 농도에도 불구하고 2005년 중 가장 낮은 농도를 나타내었다. 조사기간 동안 식물성플랑크톤의 계절별 변이는 총인의 계절별 변이와는 다른 양상으로 나타났으며, 오히려 총질소와 비슷한 양상을 보이고 있었다.

2002년에서 2005년 사이 신규저수지내 TN:TP비는 모두 17이상(평균 37)으로 나타났으며, 이에 따라 1차생산력 증가에는 인이 제한영양염으로 작용할 것으로 판명되었다. 조사 기간 중 2004년 11월에는 급격한 증가를 나타내었는데, 이 기간동안 식물성플랑크톤 농도는 전 기간 중 가장 낮은 농도를 나타내었다. 이는 질소의 양의 급격한 유입에도 불구하고 인이 현저히 낮은 농도를 유지하여 1차생산력의 감소로 나타난 결과로 볼 수 있다. 이전에 수행된 제한영양염 평가연구에 따르면, 신규저수지의 식물성플랑크톤은 인에 의한 제한이 되는 것으로 나타났으며, 인 첨가시 식물성플랑크톤의 성장률이 계절적인 변이를 나타내고, 또한 질소의 양과 인의 양을 동시에 증가시켜 첨가하였을 때, 질소에 의한 제한효과는 나타나지 않는 것으로 보고된 바 있다(김과 황, 2004).

한편 식물성플랑크톤 농도와 총질소, 총인, TN:TP비의 회귀분석을 실시한 결과, 총질소와 식물성플랑크톤 사이의 r^2 은 현저히 낮은 0.042로 나타났으며, 유의값은 0.48로 나타나 두 변수 사이에 상관성은 거의 없는 것으로 나타나, 총질소는 1차생산력 증가에 제한요소로 크게 작용하지 않는 것으로 나타났다. 총인과 식물성플랑크톤은 r^2 이 0.281로 총질소에 비해 높게 나타났으며, 유의값은 0.05로 높은 상관도를 나타내었다. 또한 TN:TP비와의 비교적 높은 역상관관계를 보임으로써, 신규저수지에서 1차생산력은 인에 의하여 크게 제한되고 있는 것으로 나타났다(그림 3.1.13).

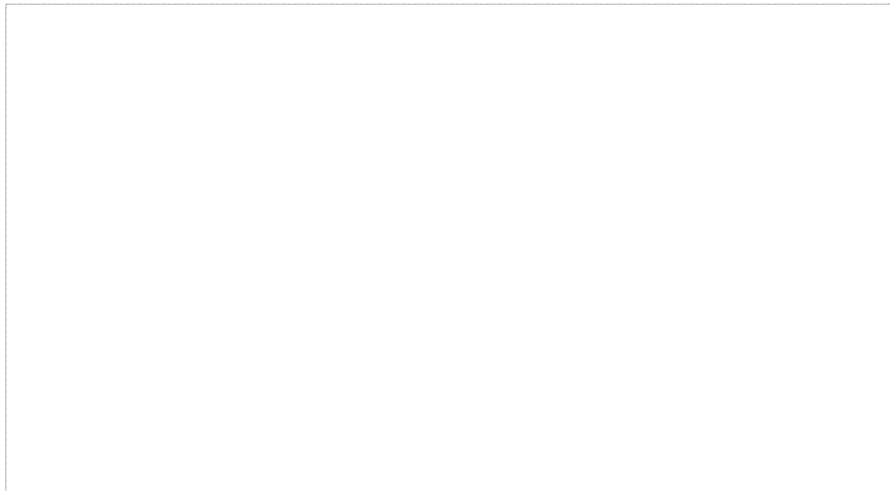


[그림 3.4.13] 수질변수간 경험적 모델에 의한 상관성

(5) 제한 영양염류(Limiting Nutrient) 평가

각 일자별 대조군(Control)의 농도변화에 따른 각 처리군(Treatment) 농도변화비는 전반적으로 시간의 흐름에 따라 감소하는 경향을 나타내었다[그림 3.4.14]. 특히 T3와 T4의 경우 실험초기에는 대조군과의 비율은 거의 1로 나타나고 있었으나, 2일째부터 급격한 비율감소를 나타내었으며 실험 마지막 날에는 약 0.25의 비율로 나타났다. 그러나 T1과 T2는 초기비율과 마지막 날의 비율에 큰 차이를 보이지 않았으며, 오히려 실험 중간 시기에는 대조군에 비해 높은 비율을 나타내기도 하였다.

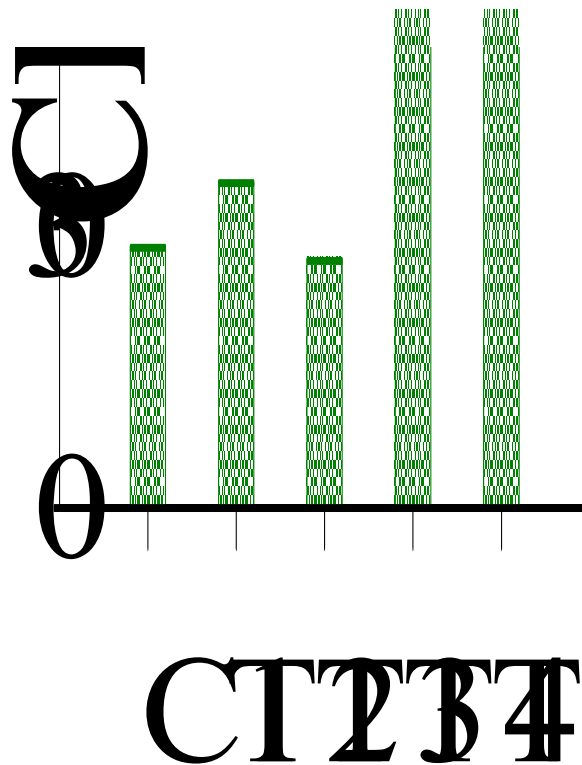
이는 질소가 첨가된 처리군에서 식물성플랑크톤의 농도, 즉 1차생산력의 급격한 증가가 이루어졌으나 인이 첨가된 처리군에서는 1차생산력에 영향을 미치지 않았음을 나타내는 것이었으며, 일반적으로 인 제한효과가 나타나는 것과는 달리 질소에 의한 제한효과가 크게 작용하는 것으로 사료되는 결과였다.



[그림 3.4.14] 영양염 첨가에 따른 대조군(Control) 및 처리군(T1~T4)의 Chl-*a* 농도 변화

한편, T1과 T2에서 각각의 Chl-*a* 농도는 초기농도 $42.7 \mu\text{g L}^{-1}$ 와 $38.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 실험종료 시에 $34.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 와 $26.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 감소하였다[그림 3.4.15]. T1과 T2의 식물성플랑크톤의 농도는 일자가 지남에 따라 점차 감소양상을 나타내었으며, 실험기간동안의 농도변이는 대조군(Control)에 비하여서도 낮은 값을 지속적으로 나타내고 있었다. 이는 실험기간동안 충분한 일조량을 확보해 주었음에도 불구하고, 식물성플랑크톤의 성장원으로서 인이 이용되지 않았음을 나타내는 결과였다. 이에 반하여, 질소가 첨가된 T3와 T4는 Chl-*a* 농도의 뚜렷한 증가를 나타냈으며, 각각의 농도는 $40 \mu\text{g L}^{-1}$ 와 $39.7 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 $98.4 \mu\text{g L}^{-1}$ 와 $112.8 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 약 2~3 배 증가한 것으로 나타났다. 최초 질소가 첨가된 날에는 $149.2 \mu\text{g L}^{-1}$ 와 $180.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 까지 증가하였으며, 이후 첨가된 질소가 1차생산력으로 환원됨으로써 점차적으로 Chl-*a*의 농도는 감소하였다. 본 실험기간 동안에는 질소에 의한 제한효과가 뚜렷하게 나옴으로써 기존 저수지에서의 1차생산력에 대한 인 제한효과와는 상반된 결과로 나타났다. 이전 연구결과에서 대조군에 비하여 질소가 처리된 곳에서 성장률이 높게 나와 인과 질소 모두 제한요소로 작용하는 실험결과가 도출

되기도 하였으나(김과 황, 2004), 본 연구결과처럼 인이 처리된 곳에서 대조군에 비해 성장률이 낮고, 질소가 처리된 곳에서 가장 높은 성장률은 보인 경우는 나타나지 않았다. 이전 연구에서 가장 높은 성장률을 보인 것은 인 혹은 인과 질소가 동시에 처리된 곳에서만 나타났으며, 질소가 단독으로 처리된 곳에서의 높은 성장률은 나타나지 않았다. 신규저수지는 계절에 따른 TN:TP비의 변이가 크게 나타나고 있는데, 2004년의 6월의 경우 TN:TP비는 17 이하로 나타났으며, 인의 농도는 2002년에서 2005년 중 가장 높게 나타나고 있었으나, 질소의 농도는 상대적으로 낮은 농도로 나타나고 있었다. 이 시기의 1차생산력의 변화에 대한 평가가 실시되지 않아, 무엇이 제한영양염으로 작용하였는지 알 수 없으나, 17이하의 TN:TP비를 감안하였을 때, 이 당시에 질소에 의한 제한이 일어났으리라 유추해 볼 수 있다.



[그림 3.4.15] 영양염 첨가에 따른 처리군 Chl-a 농도 변화

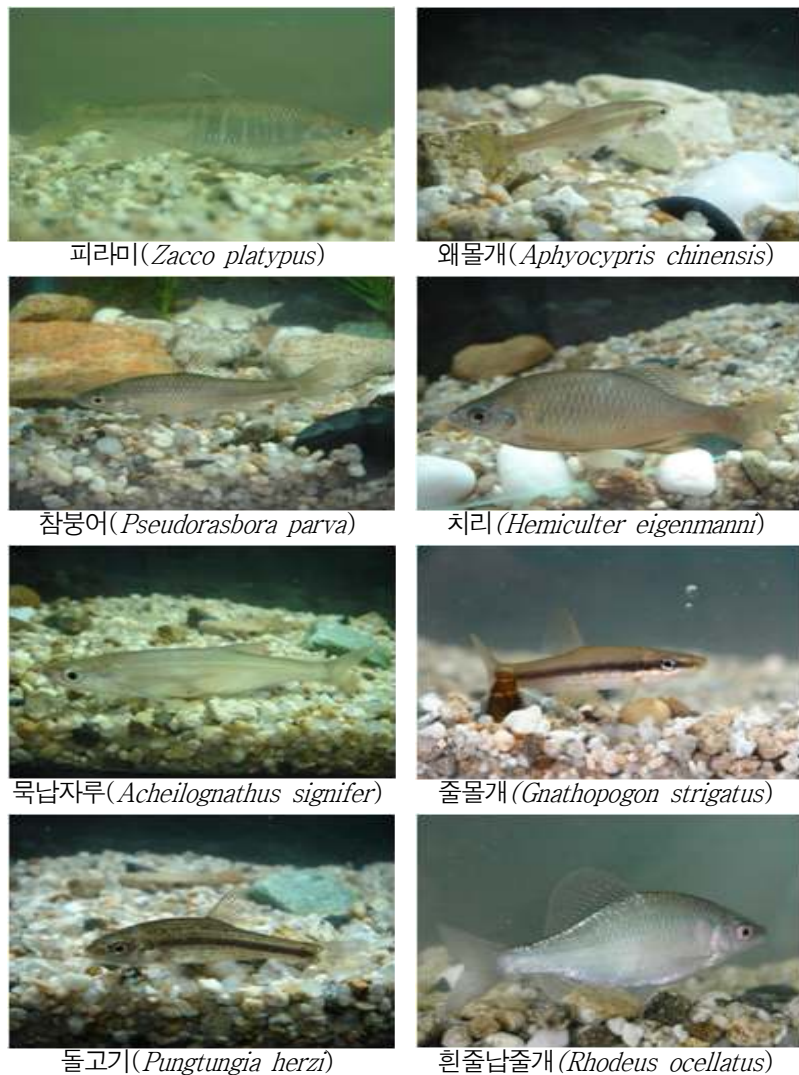
따라서 본 실험을 위한 채수가 실시된 시기인 2006년 6월에도 2004년 6월과 같은 TN:TP비를 형성하여 제한영양염 평가실험 시 질소제한의 결과를 나타내는데 영향을 미쳤을 것으로 사료되었다. 그러나 이 부분에 대해서는 향후 계절에 따른 제한영양염 평가실험을 지속적으로 실시하여 실제 신규저수지에서 질소에 의한 제한효과가 계절주기에 따라 나타나는지 확인할 필요가 있을 것으로 판단되었다.

2. 생물을 이용한 실험적 조류제거 기법 평가

가. Chl-a 및 남조류 제거 효과를 위한 어류 조작 실험

(1) 실험어종 선정

본 연구에서는 국내 농업용 저수지에서 비교적 우점하는 종을 고려하여 선별하였으며(윤 등, 2006), 최종적으로 8개 어종인 참붕어(*Pseudorasbora parva*), 치리(*Hemiculter eigenmanni*), 왜몰개(*Aphyocypris chinensis*), 갈납자루(*Acheilognathus korennsis*), 줄몰개(*Gnathopogon strigatus*), 돌고기(*Pungtungia herzi*), 흰줄납줄개(*Rhodeus ocellatus ocellatus*), 피라미(*Zacco platypus*)를 실험 대상 어종으로 선정하였다[그림 3.4.16].



[그림 3.4.16] 어류를 이용한 조류제거능 검증 실험

(2) 어류에 의한 생물조절 실험

본 연구에서는 9개의 실험용 수조(20×40×25 cm)에 초기의 Chl-*a* 농도를 맞추기 위해 인근 호수 및 연못에서 식물성 플랑크톤 네트를(Mesh size: 20 μm) 이용하여 자연 개체군의 조류를 채집하여 실험실에서 1~2일 순화시켰다. 9개의 각각의 10 L 수조에 약 100~120 μg L⁻¹로 초기 농도를 고정하였다. 수조는 1개의 대조군(Control)과 8개의 실험군(Fish treatments)로 대별하였으며, 실험군 수조에는 선정된 8개 어종을 각각 참붕어(*Pseudorasbora parva*) 3개체, 치리(*Hemiculter eigenmanni*) 2개체, 왜물개(*Aphyocypris chinensis*) 3개체, 칼납자루(*Acheilognathus korensis*) 3개체, 줄물개(*Gnathopogon strigatus*) 2개체, 돌고기(*Pungtungia herzi*) 3개체, 흰줄납줄개(*Rhodeus ocellatus ocellatus*) 6개체, 피라미(*Zacco platypus*) 4개체씩 투입하였다. 실험용 수조는 실험실내에서 광조건은 16 hr:8 hr(Light:Dark)으로 유지되었고 영양염류의 순환 및 정체에 의한 식물성플랑크톤의 침강을 막기 위해 7일의 실험기간동안 지속적으로 산소를 공급하였다[그림 3.4.17]



[그림 3.4.17] 좌: 어류조작 실험 디자인, 우: 플랑크톤네트를 이용한 조류 채집

(3) 수조 내 이화학적 수질 평가

대조군(control)과 처리군(treatment)의 수조에서 온도(Temperature), 용존 산소량(DO), 수소이온농도(pH), 전기전도도(Conductivity) 및 탁도(Turbidity)는 다항목수질 측정기(YSI-6600 Sonde)를 이용하여 측정하였다. 한편, 남조류 측정은 MS-5 남조류 측정기(Hach company)를 이용하여 각 수조별 남조류의 단위면적당 남조류 세포수(cells mL⁻¹)를 측정하였다. 본 실험이 시행되는 7일간 일주일 동안 매일 1회 같은 시간에 측정하여 시간대별 남조류 농도를 측정하였다[그림 3.4.18]



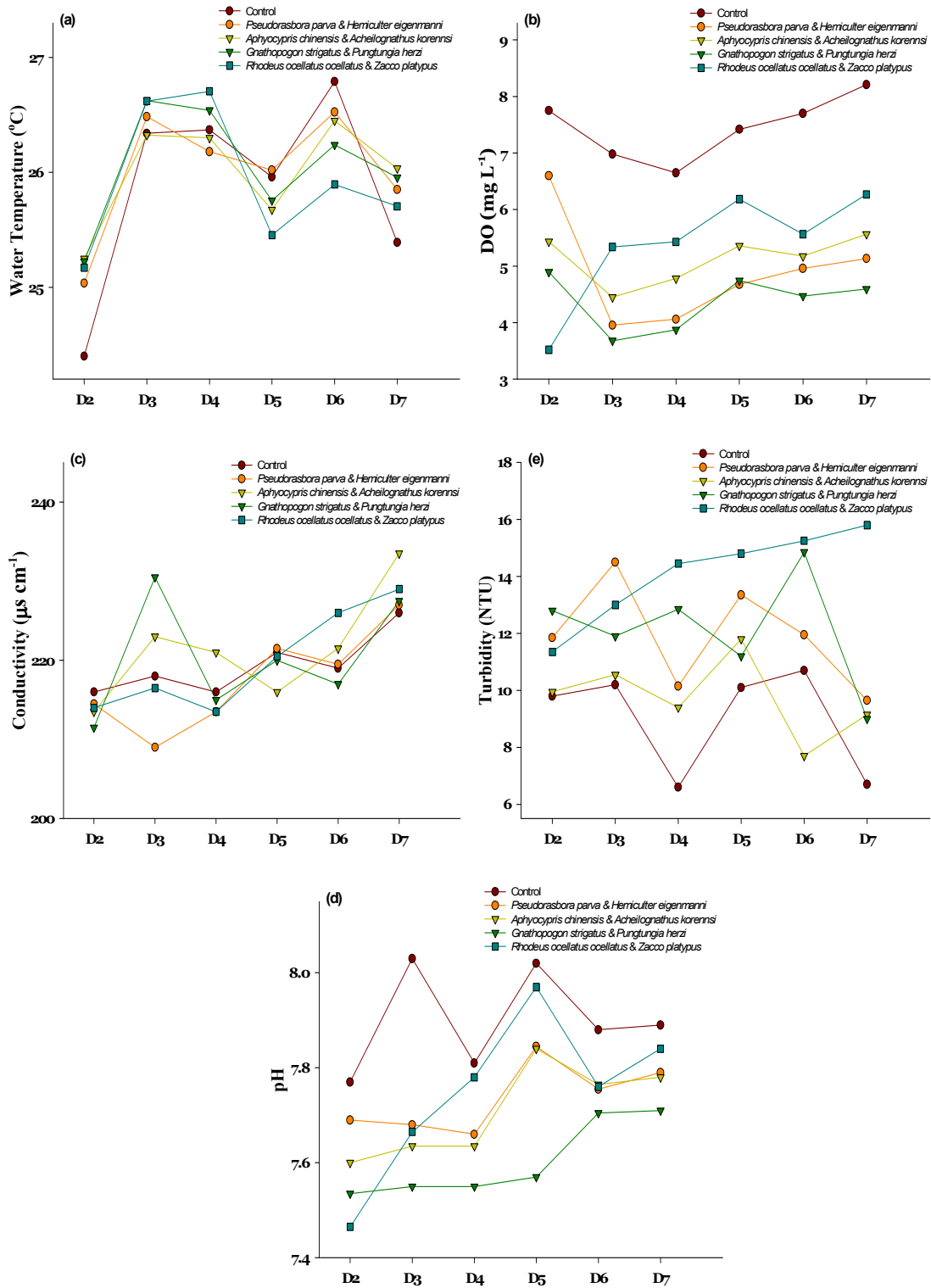
[그림 3.4.18] 다항목 수질 측정기(YSI 6600, MS-5)

수온은 대조군(Control)에서 평균 25.9°C로 처리군(treatment)의 평균 온도 26.0°C와 비교하여 차이를 보이지 않았다. 용존산소(DO)는 대조군에서 평균 7.5 mg L⁻¹, 처리군의 평균 DO는 4.9 mg L⁻¹으로 나타나 실험 7일 동안 약 2.5 mg L⁻¹ 감소한 수치를 보였으며, 이는 어류에 의한 산소소비 및 배설물에 의한 유기물 증가에 의한 호기성 생물의 이용 때문인 것으로 판단되었다. 대조군의 평균 pH 7.9, 실험군의 평균 pH 7.7로 나타나 차이가 없는 것으로 나타났다. 탁도는 대조군에서 평균 9.0 NTU, 실험군에서 평균 12.0 NTU로 나타났으며, 이는 어류 분뇨 증가에 따른 수치 증가로 판단되었다. 대조군의 평균 전기전도도(conductivity 25°C)는 219.3 μs cm⁻¹, 처리군에서는 평균 216.4 μs cm⁻¹을 나타내었으며 각 수조별로 변동 폭이 약 10 μs cm⁻¹ 전후로 나타나 큰 차이는 없는 것으로 나타났다[그림 3.4.19].

(4) 수조 내 녹조 및 남조제거율 측정

각 수조별 녹조 제거율 평가를 위하여 7일 동안 같은 시간(PM: 06:00)에 각 수조별로 100 mL을 채수하여 흡광광도법(APPA, 1985)을 이용하여 Chl-*a*를 측정하였다. 흡광광도계(Spectrophotometer, Beckman DU 530)에 측정된 Chl-*a*는 데이터는 아래의 회귀식을 이용하여 실제 Chl-*a* 농도를 추정하였다(OD=Optical density; V=Sample Volume).

$$\text{Chl-}a(\mu\text{g L}^{-1}) = \frac{[13.7(OD_{665} - OD_{750}) - 5.76(OD_{649} - OD_{750})] V}{V * 10}$$



[그림 3.4.19] 어류에 의한 Top-down 조절 실험기간동안의 이화학적 수질 변화 특성

(5) 어종별 녹조 및 남조제거 특성분석

(가) 대조군(control)

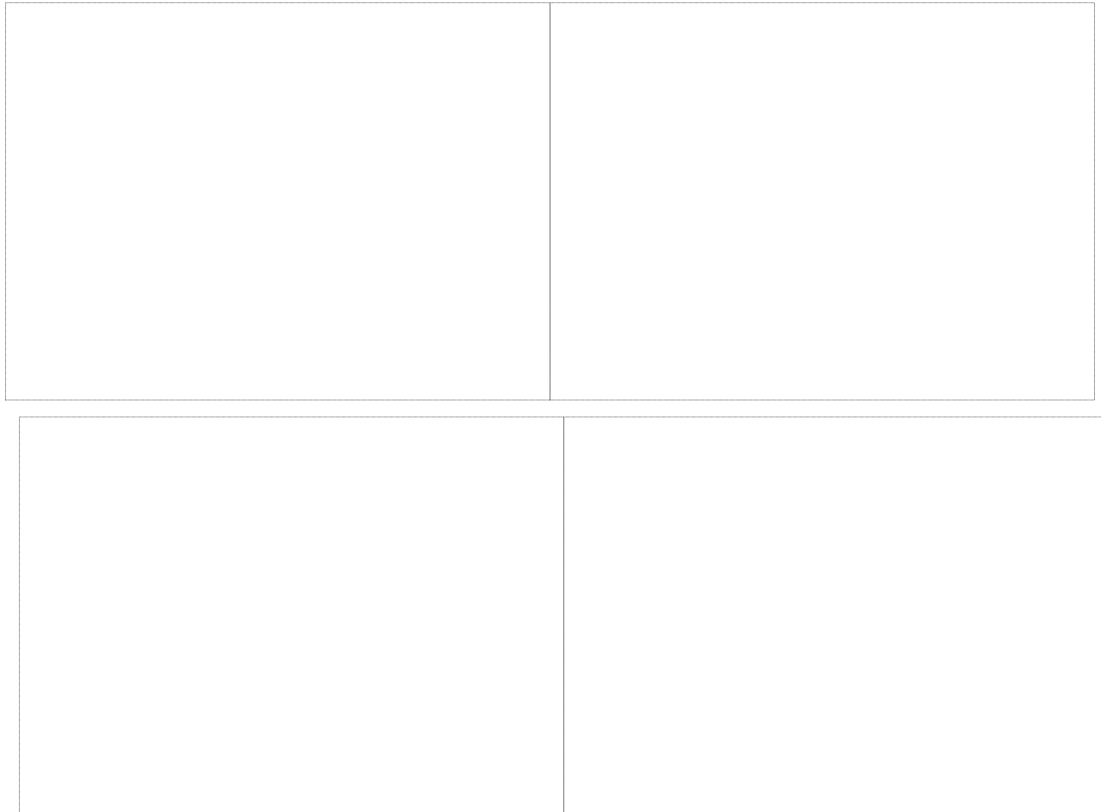
대조군(control)의 Chl-*a*는 초기값 $112 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 점차 증가하여 실험 3일째 $147 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 최대치를 보였으며 이후 점차 감소하는 경향을 나타냈으며 실험 마지막날 $127 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다. 한편 남조류(Bluegreen algae) 농도는 초기값 $6.6 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 에서 실험 2일째 $7.3 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 최대치를 보였으며, 이후 점차 감소하는 경향을 나타내 마지막날 $4.5 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 나타났다.

(나) 참붕어(*Pseudorasbora parva*)에 의한 조류 제거율 분석

참붕어가 투입되었을 때 Chl-*a*는 $118 \sim 163 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 변화하는 것으로 나타났다. Chl-*a*는 초기값 $118 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 점차 증가하여 실험 3일째 $163 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 최대치를 보였으며, 실험 4일째 한 차례 감소한 이후 서서히 증가하는 경향을 나타내 마지막날 $146 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다. 참붕어의 Chl-*a* 제거율은 전반적으로 감소하는 경향을 보였으며 초기 제거율 -16.9% 에서 최종 제거율이 -23.1% 로 나타나 여전히 조류생장이 이루어지는 것으로 사료되었다. 한편 남조류는 초기값 $6.6 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 에서 실험 2일째 $6.7 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 최대치를 보였으며, 이후 점차 감소하는 경향성을 보이면서 마지막날 $5.7 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 나타났다. 참붕어의 남조류 제거율은 전반적으로 점차 증가하는 경향성을 띄어 초기 제거율 -1.6% 에서 최종 제거율이 13.9% 를 보였으나 대조군에서의 남조류의 농도가 함께 감소하는 것으로 보아 실질적으로 참붕어에 의한 남조류 제거 효과는 없는 것으로 사료 된다[그림 3.4.20].

(다) 치리(*Hemiculter eigenmanni*)에 의한 조류 제거율 분석

치리의 Chl-*a*는 초기값 $123 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 점차 증가하여 실험 3일째 $143 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 최대치를 보였으며, 이후 점차 감소하는 경향성을 나타내다 마지막날 $125 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다. 치리의 Chl-*a* 최종제거율은 -1.5% 로 나타났으나 대조군의 제거율과 비교한 순제거율에서 11.9% 의 제거효과가 있는 것으로 나타났다. 한편 남조류는 초기값 $6.7 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 에서 실험 2일째 $7.3 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 최대치를 보였으며, 이후 점차 감소하는 경향성을 보이면서 마지막날 $5.1 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 나타났다. 치리의 남조류 제거율은 전반적으로 점차 증가하는 경향성을 보였으며 최종 제거율이 24.3% 로 나타났으나 대조군에서의 남조류의 농도가 함께 감소하는 것으로 보아 실질적으로 치리에 의한 남조류 제거 효과는 없는 것으로 사료 된다[그림 3.4.20].



[그림 3.4.20] 어류처리군(참붕어, 치리)에서의 Chl-*a*와 남조류 제거량

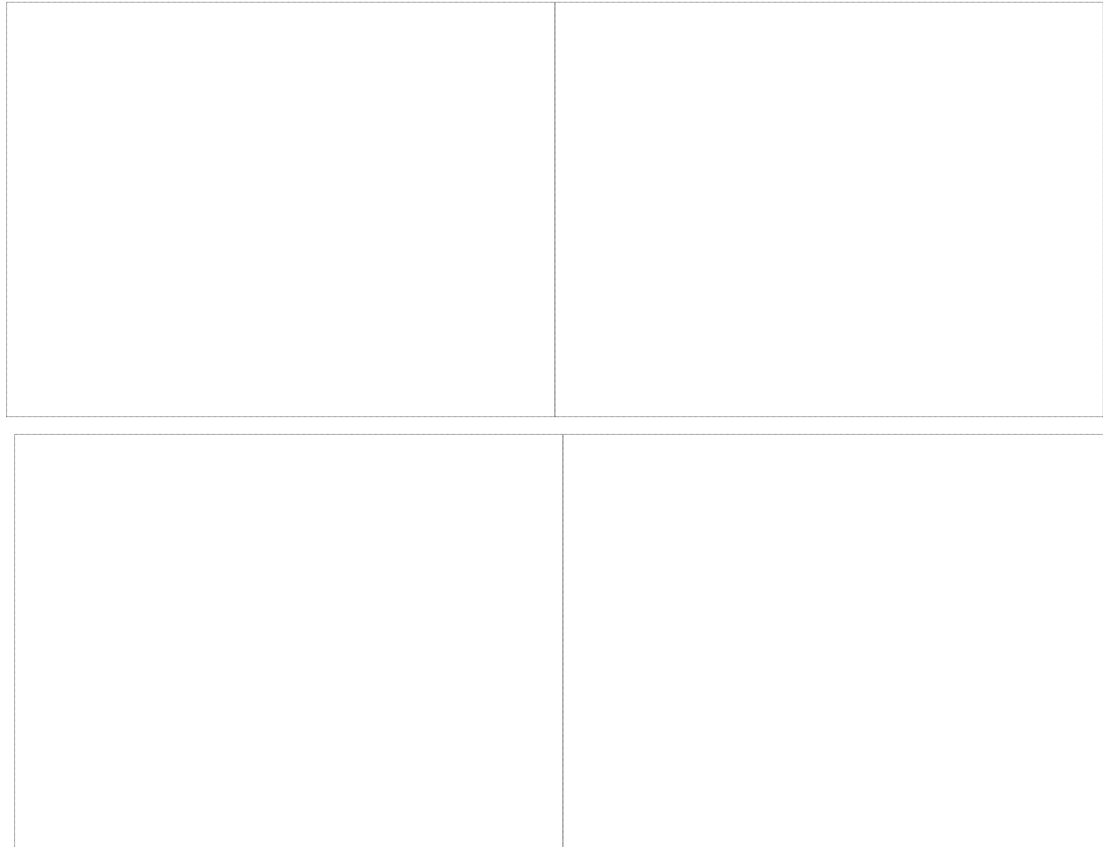
(라) 왜물개(*Aphyocypris chinensis*)에 의한 조류 제거율 분석

왜물개의 Chl-*a*는 초기값 $125 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 실험 2일째 $137 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 최대치를 보였으며, 이후 꾸준히 감소하는 경향을 보이다가 6일째 소폭 증가하였으나 마지막날에는 $108 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다. 왜물개는 초기 제거율 -9.9%로 오히려 Chl-*a*가 증가하는 모습을 보였으나 이후 차츰 감소하는 경향으로 바뀌어 최종 제거율은 13.2%로 8종의 어류처리군 수조에서 가장 높은 제거 효율을 보였다. 한편 남조류는 초기값 $6.6 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 에서 실험 3일째 $7.5 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 최대치로 나타났고, 이후 점차 감소하는 경향성을 보이면서 마지막날 $4.9 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 나타났다. 왜물개의 남조류 제거율은 전반적으로 점차 증가하는 경향성을 초기 제거율 -7.8%에서 최종 제거율이 25.8%로 나타났으나 대조군에서의 남조류의 농도가 함께 감소하는 것으로 보아 실질적으로 왜물개에 의한 남조류 제거 효과는 없는 것으로 사료되었다[그림 3.4.21].

(마) 갈납자루(*Acheilognathus koreensis*)에 의한 조류 제거율 분석

갈납자루의 Chl-*a*는 초기값 $120 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 실험 3일째 $139 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 최대치를 보였으며, 실험 5일째 $122 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 감소하였다가 이후 다시 증가하여 마지막날 $132 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다. 갈납자루는 초기 제거율 -9.6%과 최종 제거율이 -10.2%로 나타나 녹조 제거 효과가 거의 없는

것으로 사료 된다. 한편 남조류는 초기값 7.2×10^3 cells mL⁻¹에서 마지막날 4.6×10^3 cells mL⁻¹로 실험기간 내 꾸준한 감소 추이를 나타내었다. 칼납자루의 남조류 제거율은 전반적으로 점차 증가하는 경향성을 나타내었으며 초기제거율 6.8%에서 최종 제거율이 36.5%로 나타났으나 대조군에서의 남조류의 농도가 함께 감소하는 것으로 보아 실질적으로 칼납자루에 의한 남조류 제거 효과는 거의 없는 것으로 사료되었다[그림 3.4.21].



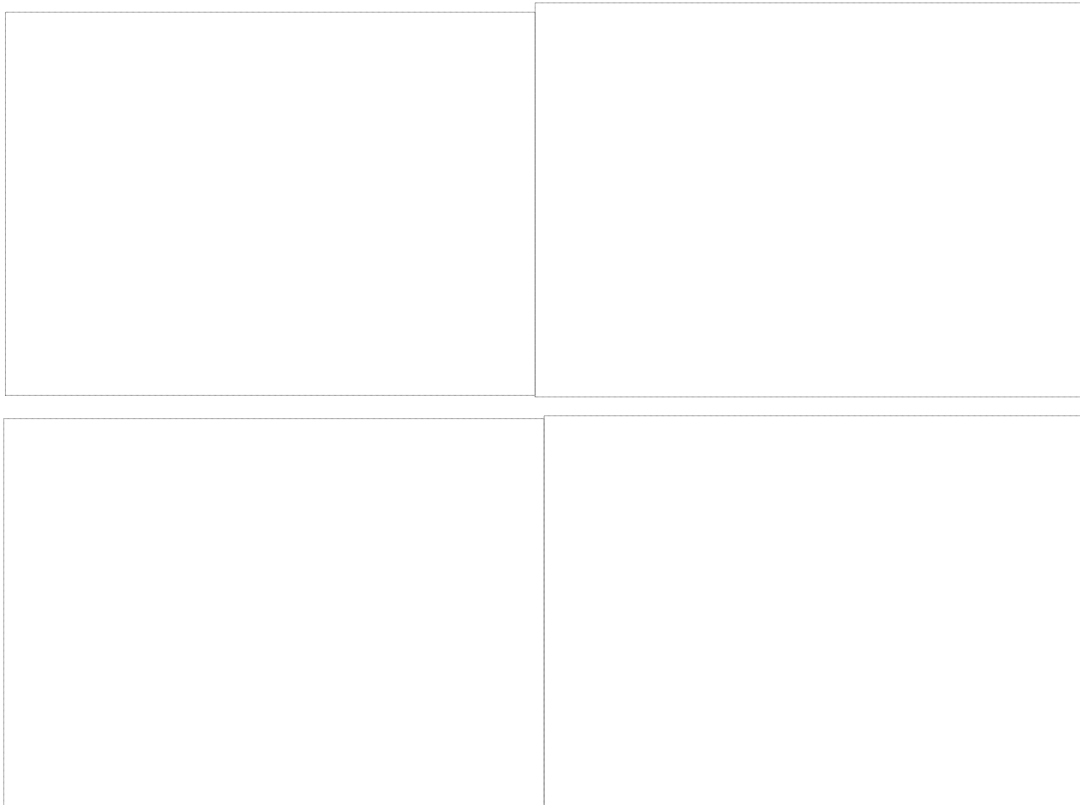
[그림 3.4.21] 어류처리군(왜물개, 칼납자루)에서의 Chl-*a*와 남조류 제거효율

(바) 줄물개(*Gnathopogon strigatus*)에 의한 조류 제거율 분석

줄물개의 Chl-*a*는 초기값 $122 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 둘째날 $140 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 최대치를 보였으며, 이후 실험 5일째까지 점차 감소하다 다시 증가하여 마지막날 $138 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다. 줄물개의 Chl-*a*의 제거율은 초기 -14.9%에서 최종적으로 -13.6%을 보여 녹조제거 효과가 없는 것으로 나타났다. 한편 남조류는 초기값 7.9×10^3 cells mL⁻¹에서 이후 꾸준히 감소하다 실험 5일째 4.5×10^3 cells mL⁻¹로 가장 낮은 값을 보였으나, 이후 다시 증가하여 마지막날 6.0×10^3 cells mL⁻¹로 나타났다. 줄물개의 남조류 제거율은 전반적으로 점차 증가하는 경향을 보였으며 초기 제거율 4.7%에서 최종 제거율이 24.8%로 나타났으나 대조군에서의 남조류의 농도가 함께 감소하는 것으로 보아 실질적으로 줄물개에 의한 남조류 제거 효과는 없는 것으로 사료되었다[그림 3.4.22].

(사) 돌고기(*Pungtungia herzi*)에 의한 조류 제거율 분석

돌고기의 Chl-*a*는 초기값 $115 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 실험 2일째 $147 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 최대치를 보였으며, 이후 점차 감소하여 실험 5일째 $108 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 최저치를 보였으나 다시 증가하여 마지막날 $120 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다. 돌고기의 Chl-*a*의 제거율은 초기 -27.3%에서 최종적으로 -4.0%로 나타나 녹조제거 효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 한편 남조류는 초기값 $7.5 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 에서 점차적으로 감소하다 5일째 되던 날 $5.6 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 가장 낮은 값을 나타냈으며, 이후 다시 증가하여 마지막날 $5.9 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 나타났다. 돌고기의 남조류 제거율은 전반적으로 점차 증가하는 경향을 보였으며 초기 제거율 13.7%에서 최종 제거율이 21.4%로 나타났으나 대조군에서의 남조류의 농도가 함께 감소하는 것으로 보아 실질적으로 돌고기에 의한 남조류 제거 효과는 없는 것으로 사료되었다[그림 3.4.22].

[그림 3.4.22] 어류처리군(줄물개, 돌고기)에서의 Chl-*a*와 남조류 제거량(아) 흰줄납줄개(*Rhodeus ocellatus*)에 의한 조류 제거율 분석

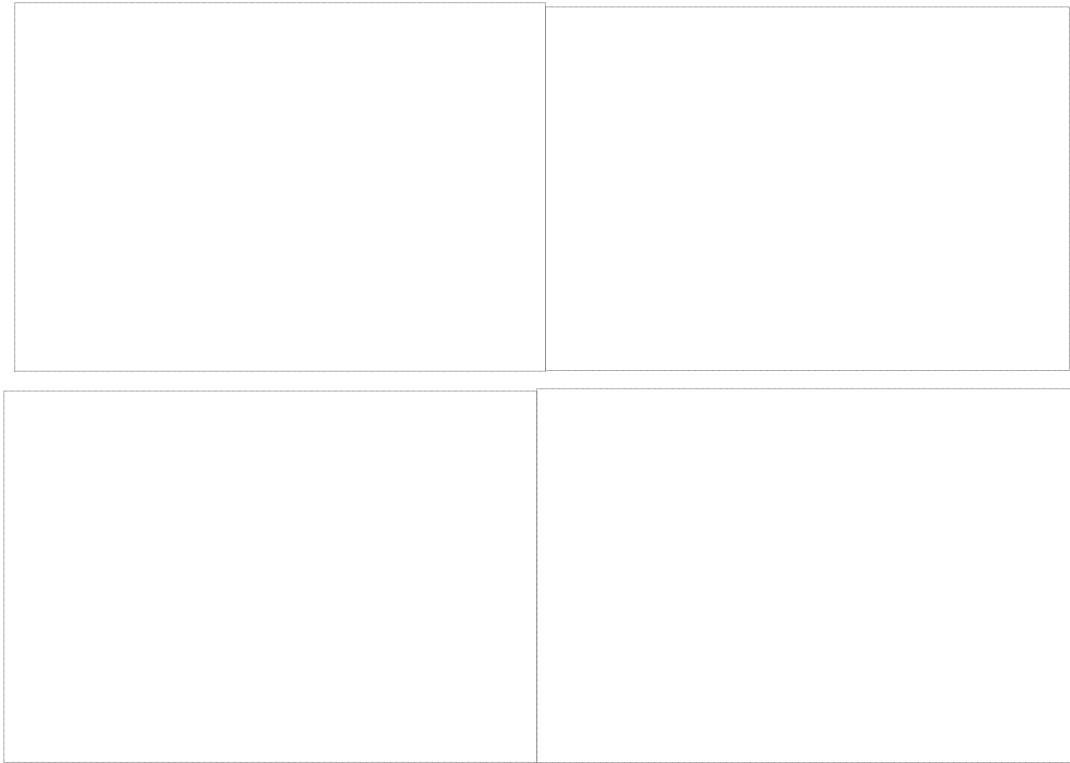
흰줄납줄개의 Chl-*a*는 초기값 $120 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 실험 2일째 $141 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 최대치를 보였으며, 이후 점차 감소하는 경향을 나타내다 마지막날 $115 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다. 흰줄납줄개의 Chl-*a* 최종 제거율은 4.2%로 나타났다. 한편 남조류는 초기값 $7.0 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 에서 점차적으로 감

소하는 경향을 보였으며 실험 5일째 5.5×10^3 cells mL⁻¹로 낮은 값을 나타냈고, 이후 더욱 감소하여 마지막날 5.2×10^3 cells mL⁻¹로 나타났다. 흰줄납줄개의 남조류 제거율은 전반적으로 점차 증가하는 경향을 보였으며 최종 제거율이 24.8%로 나타났으나 대조군에서의 남조류의 농도가 함께 감소하는 것으로 보아 실질적으로 흰줄납줄개에 의한 남조류 제거 효과는 없는 것으로 사료되었다[그림 3.4.23].

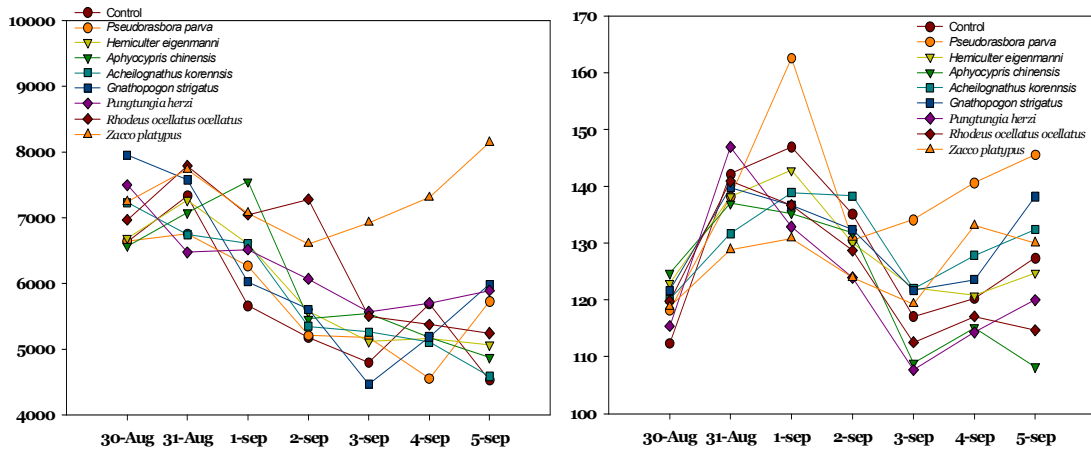
(자) 피라미(*Zacco platypus*)에 의한 조류 제거율 분석

피라미의 Chl-*a*는 초기값 $119 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 실험 5일째까지 소폭으로 증가 감소를 반복 하였다가 실험 6일째 $133 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 최고치를 보였으며 마지막날 $130 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다. 피라미의 Chl-*a*의 제거율은 초기 -8.4%에서 최종적으로 -9.4%로 나타났다. 한편 남조류는 초기값 7.2×10^3 cells mL⁻¹에서 점차적으로 감소하는 경향을 나타내다 실험 4일째 6.6×10^3 cells mL⁻¹로 최고치를 보였으며, 이후 점차적으로 증가하여 마지막날 8.1×10^3 cells mL⁻¹로 나타났다. 피라미의 남조류 제거율은 뚜렷한 경향성 없이 초기 제거율 -6.7%에서 최종 제거율이 -12.4%로 나타났으며 남조류 제거효과가 거의 없는 것으로 나타났다[그림 3.4.23].

본 연구에서 어류의 top-down 조절실험에 의한 녹조 및 남조류의 제어 효과는 일부종에서 나타났지만 전반적으로 극히 미미한 것으로 나타나 현장에서 상기종에 의한 제어는 어려울 것으로 사료되었다[그림 3.4.23]. 국내에서 수행된 이전의 어류를 이용한 실험결과(김 등, 2001; 농림부, 2005)와는 달리 외국의 경우는 top-down 조절에 의한 cascading 가설을 실험한 바가 있는데 몇몇 연구에서는 탁월한 효과를 보인바 있다(Richters 1986; Starling, 1993; Prokopkin *et al.*, 2006). 어류투여 실험군(fish treatment)은 대조군(control)에 비해 용존산소(DO), 수소이온농도(pH)는 감소하였으며 전기전도도 및 탁도의 수치는 증가하는 것으로 나타났다. 즉 처리군에서의 이러한 변화는 어류의 분변 및 분비물에 의한 인(P)과 질소(N)의 증가 및 부유물의 증가로 인한 결과로 사료되었다.



[그림 3.4.23] 어류처리군(흰줄납줄개, 피라미)에서의 Chl-*a*와 남조류 제거



[그림 3.4.24] 어류처리군에서의 Chl-*a*와 남조류 제거

나. 생물 조절 기법을 이용한 Chl-a 및 남조류 제거 효과

(1) 대형무척추동물과 어류에 의한 생물조작 효율성 평가

(가) 실험종 선정 및 후보종 채집

본 연구에서는 국내 농업용 저수지에서 비교적 우점하며 녹조제어에 탁월한 효과를 가져올 것으로 예상되는 어류(fish)와 대형무척추동물(macroinvertebrate)을 각각 선별하였다. 선정된 후보 어류는 정체된 저수지 및 농수로에서 주로 서식하며 조류 및 부착조류 등을 섭식하는 것으로 알려진(김 등, 2002) 참붕어(*Pseudorasbora parva*)를 대상으로 하였다. 참붕어는 농업용 저수지처럼 수질이 악화된 곳에서 잘 서식할 수 있기 때문에 생물조절기법을 위한 유용후보로서 적합할 것으로 판단되었다. 또한, 대형무척추동물로는 여과 섭식성(filter-feeding) 생물인 줄새우(*Palaemon paucidens*)를 선정하였다. 이런 여과 섭식성 생물은 수체내 조류와 같은 입자성 유기물의 제거를 통하여 수생태계의 물질순환에 중요한 역할을 하는 것으로 사료되는데 실험종으로 중요하게 인식되고 있다(김 등, 2004). 본 연구에서 사용된 생물 채집은 저수지에서 통발 그물 어항을 30분간 설치하여 참붕어를 채집하였으며, 족대(망목: 4×4 mm)를 이용하여 수변지역의 줄새우를 채집하였다. 또한 식물성 플랑크톤 네트(mesh size: 20 μm)를 이용하여 자연 개체군의 식물성플랑크톤(phytoplankton)을 농축하여 실험에 이용하였다[그림 3.1.27].



[그림 3.4.25] 생물조절 후보종 현장 채집

(나) 생물조절 실험 디자인

생물조절 시험을 위해 본 연구에서는 6개의 실험용 수조(20×40×25 cm)에 초기 Chl-a의 농도를 95~100 μg L⁻¹로 고정한 자연수를 10 L씩 투여하였다. 수조는 1개의 대조군(Control), 3개의 어류 실험군(fish treatment) 및 2개의 대형무척추동물 실험군(macroinvertebrate treatment)으로 대별 하였으며, 각각의 어류 처리군에는 참붕어 25개체(T1), 50개체(T2), 100개체(T3)를 투여하

였고, 무척추동물 처리군에는 줄새우를 25개체(T4), 50개체(T5)를 투입하여 생물 개체수 밀도 변화에 따른 조류제거 효율을 평가하였다[표 3.4.8]. 실험용 수조는 실험실내에서 광조건(light condition)이 16 hr:8 hr(Light:Dark)으로 유지하였고, 영양염류의 순환 및 정체에 의한 식물성플랑크톤의 침강을 막기 위해 7일의 실험기간 동안 지속적으로 기포발생기를 넣어주었다.

[표 3.4.8] 생물조절 및 실험에 사용된 생물(어류, 대형무척추동물)의 실험조건 및 Tank내의 초기 Chl-a 농도

실험조건	실험생물	학명	개체수	초기 Chl-a 농도($\mu\text{g L}^{-1}$)
C	무처리	-	-	98
T1	어류	<i>Pseudorasbora parva</i>	25	97
T2	어류	<i>Pseudorasbora parva</i>	50	96
T3	어류	<i>Pseudorasbora parva</i>	100	97
T4	대형무척추동물	<i>Palaemon paucidens</i>	25	96
T5	대형무척추동물	<i>Palaemon paucidens</i>	50	99

[C=대조군(Control), T=처리군(Treatment)]

(다) 수조 내 이화학적 수질 평가

대조군(control)과 처리군(treatment)의 수조에서는 수온, 용존 산소량(DO), 수소이온농도(pH), 전기전도도(conductivity) 및 탁도(turbidity)를 분석하였고, 이를 위해 다항목수질 측정기(모델:YSI-6600 Sonde)를 이용하여 측정하였다. 수온은 대조군(control), 어류 처리군(fish treatment), 대형무척추동물 처리군(macroinvertebrate treatment) 모두 평균 25°C 내외로 유지되어 생물들의 섭식에 적정 온도를 유지하였다. 용존산소(DO)는 T3에서 단위 면적당 높은 생물량으로 인하여 평균 8.6 mg L⁻¹로 나타났으며 전체 수조의 평균 9.2 mg L⁻¹보다 낮게 나타났다. 이는 T3의 생물의 호흡으로 인한 산소 이용을 증가 때문으로 판단되었다. pH는 모든 처리군에서 시간이 경과함에 따라 점진적으로 증가하였다. 초기 평균 7.3에서 마지막날 8.2로 약 0.9만큼 증가하였다. 전기전도도(conductivity, 25°C) 역시 초기의 D1시기에 평균 210 $\mu\text{s cm}^{-1}$ 에서 D7에는 288 $\mu\text{s cm}^{-1}$ 로 약 78 $\mu\text{s cm}^{-1}$ 만큼 증가하였다. 탁도(turbidity)는 어류 처리군과 대형무척추 동물 처리군이 확실히 대조를 이루었다. 특히 T3는 육안으로도 현격한 차이를 보일만큼 탁도가 증가 하였다. 대형 무척추동물 처리군은 평균 11.3 NTU 내외로 유지 되었지만 어류 처리군은 평균 15.4 NTU, 최대 28.3 NTU까지 나타나 어류의 배설물에 의한 탁도의 증가 양상을 보였다 [표 3.4.9].

[표 3.4.9] 생물조절에 따른 실험기간(D1-D7) 동안의 수질 변화 특성

(a) Temp.(°C)

실험조건	Data Sampled						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
C	22.7	25.7	25.3	26.3	26.2	25.6	25.1
T1	22.5	25.3	24.7	25.8	25.8	25.4	25.1
T2	22.5	25.1	25.0	25.8	25.6	25.4	24.7
T3	22.6	25.7	25.0	26.3	25.0	25.9	24.8
T4	22.5	25.3	25.1	25.9	25.7	25.4	24.8
T5	22.5	25.1	24.8	25.7	25.5	25.3	24.9

(b) DO(mg L⁻¹)

실험조건	Data Sampled						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
C	9.20	9.17	9.44	9.43	9.51	9.66	9.69
T1	9.11	8.75	9.16	8.96	9.11	9.22	9.22
T2	9.20	8.91	9.27	9.29	9.43	9.26	9.66
T3	9.15	8.37	8.53	8.68	8.83	8.79	8.17
T4	9.19	9.20	9.36	9.43	9.61	9.66	9.65
T5	9.17	9.01	9.32	9.18	9.26	9.22	9.21

(c) pH

실험조건	Data Sampled						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
C	7.48	7.86	7.98	8.47	8.51	8.52	8.22
T1	7.19	7.80	7.91	8.31	8.34	8.36	8.15
T2	7.19	7.78	7.62	8.45	8.49	8.54	8.25
T3	7.18	7.79	7.95	8.45	8.50	8.82	8.34
T4	7.28	7.84	7.96	8.49	8.52	8.54	8.17
T5	7.22	7.84	7.95	8.46	8.49	8.48	8.18

(d) Cond.(μS cm⁻¹)

실험조건	Data Sampled						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
C	209	210	216	215	230	222	223
T1	209	213	221	228	232	236	248
T2	209	215	229	247	236	274	289
T3	212	229	267	331	378	226	465
T4	210	213	214	216	270	234	241
T5	209	213	222	227	238	234	261

(e) Turbidity(NTU)

실험조건	Data Sampled						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
C	10.7	4.9	17.8	8.8	7.8	10.5	3.8
T1	8.7	13.4	13.2	10.2	11.8	14.3	9.4
T2	8.3	13.8	9.2	13.7	16.2	14.8	15.1
T3	8.7	17.6	24.4	23.1	24.1	25.8	28.3
T4	9.1	10.8	14.0	13.5	12.5	9.6	6.7
T5	7.7	10.6	13.7	14.8	12.9	12.3	9.6

[C=대조군(Control), T=처리군(Treatment)]

(라) 수조 내 이화학적 수질 평가

각 수조별 녹조 제거율 평가를 위하여 7일 동안 동일한 시각(PM: 06:00)에 각 수조별로 100 mL을 채수하여 Glass Filter(Whatman GF/C)를 이용하여 여과 후 Chl-*a*의 측정은 에탄올 추출법(Sartory & Grobbelaar, 1984)을 이용하여 측정하였다. 흡광광도계(Spectrophotometer, Beckman DU 530)에 측정된 Chl-*a*의 데이터는 아래의 회귀식을 이용하여 실제 Chl-*a* 농도를 추정하였다(OD=Optical density; V=Sample Volume).

$$\text{Chl-}a(\mu\text{g L}^{-1}) = \frac{[13.7(OD_{649} - OD_{750}) - 5.76(OD_{649} - OD_{750})] V}{V * 10}$$

남조류(bluegreen algae)의 측정은 MS-5 남조류 측정기(Hach company)를 이용하여 각 수조별 남조류의 단위 체적당 남조류 세포수(cells mL⁻¹)를 측정하였다. 본 실험이 시행되는 7일 동안 매일 1회 같은 시간에 측정하여 시간(PM 06:00)에 따른 남조류의 세포수변화를 측정하였다.

(마) 수조 내 녹조 및 남조 제거율 평가

① Chl-*a* 제거 특성

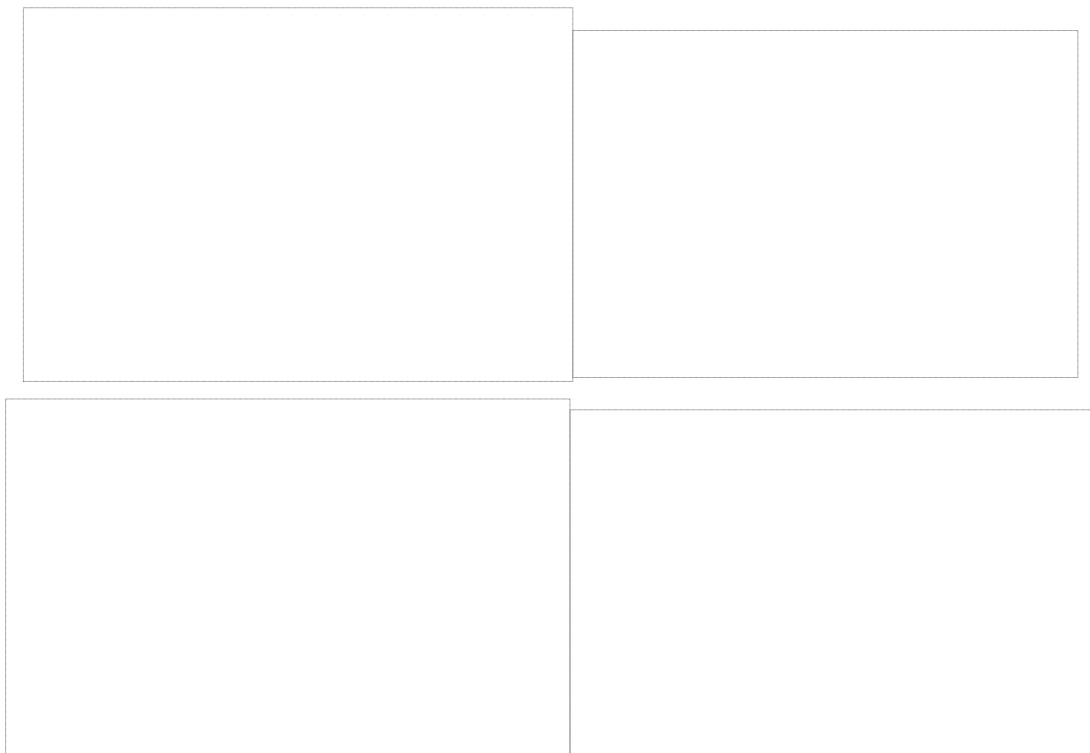
Chl-*a*의 제거효율은 이용된 어류인 참붕어보다 여과 섭식성 대형무척추동물에서 확연한 높게 나타나 줄새우는 녹조제어에 큰 역할을 하는 것으로 나타났다. [그림 3.1.26]에서 제시하는 바와같이, 참붕어를 투여한 수조에서는 D1~D7까지 시간 경과에 따라 Chl-*a* 농도가 감소하지 않고 오히려 점진적으로 증가하는 양상을 보였다. 참붕어의 처리군은 25, 50, 100개체로 각각 달리 처리 하였을 때, 실험 마지막날 최종 Chl-*a* 농도는 3개의 처리군에서 각각 153 $\mu\text{g L}^{-1}$, 149 $\mu\text{g L}^{-1}$, 157 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타나 초기의 평균 Chl-*a* 농도 97 $\mu\text{g L}^{-1}$ 보다 오히려 56 $\mu\text{g L}^{-1}$, 52 $\mu\text{g L}^{-1}$, 60 $\mu\text{g L}^{-1}$ 만큼 증가한 수치를 보여 어류에 의한 Chl-*a* 제거 효과는 없는 것으로 나타났다. 또한 어류의 개체수 변화에 따라 Chl-*a* 농도에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이전에 치리를 이용한 녹조제어의 실험결과에 따르면, Chl-*a*의 감소는 관찰되지 않았으며 실험종료 후 적출된 장에서도 어떠한 식물플랑크톤도 관찰되지 않았다(농림부, 2005).

한편 줄새우를 투여한 수조에서는 시간이 경과함에 따라 Chl-*a*의 농도가 점차적으로 감소하였다. 줄새우는 처리군의 밀도에 있어서 25개체 및 50개체로 서로 달리 하였을 때 실험 최종일인 D7에 Chl-*a* 농도는 두개의 처리군에서 각각 64 $\mu\text{g L}^{-1}$, 77 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타나 초기의 평균 Chl-*a* 농도 97 $\mu\text{g L}^{-1}$ 보다 32 $\mu\text{g L}^{-1}$, 20 $\mu\text{g L}^{-1}$ 만큼 감소한 수치를 보여 여과 섭식성 대형무척추동물에 의한 Chl-*a* 제거 효과가 탁월한 것으로 분석되었다. 이는 대조군(control)에서 Chl-*a*의 최종 농도 149 $\mu\text{g L}^{-1}$ 와 비교 하였을 때, 줄새우의 제거효율(removal rate)은 57%(85 $\mu\text{g L}^{-1}$) 및 47%(72 $\mu\text{g L}^{-1}$)로 높게 나타났다. 한편, 줄새우 역시 개체수 변이에 Chl-*a* 영향은 크지 않은 것으로 나타나 이미 두개의 처리군에서 1 L당 3개체수는 조류제거에 있어서 충분한

것으로 나타났다[그림 3.4.26]. 즉 어류의 최종 Chl-*a* 제거율은 참붕어의 25, 50, 100개체 처리군에서 각각 -58%, -56%, -61%로서 조류의 증가가 분명했는데 이는 참붕어의 배설물에서 생성된 인 및 질소의 성분이 조류의 성장을 촉진한 것으로 사료되었다. 한편 줄새우 처리군에서는 25개체에서 50개체로 밀도를 증가시키기에 따라 D3~D6 기간에는 고밀도처리군에서 제거효율이 높은 것으로 나타났다. 특히 줄새우 처리군과 대조군의 상대적인 Chl-*a* 제거율이 85%, 74%로 나타나 줄새우의 섭식에 의한 Chl-*a* 제거가 매우 효과적인 것으로 나타났다.

실험 기간동안 처리군의 생물 한 개체당 섭식한 Chl-*a*는 참붕어에 의한 섭식 효과는 전혀 나타나지 않았으므로 T1, T2, T3에서 각각 $-2.2 \mu\text{g L}^{-1}$, $-1.1 \mu\text{g L}^{-1}$, $-0.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 음의 값들로 나타났다. 반면 T4, T5에 각각 $1.3 \mu\text{g L}^{-1}$, $0.4 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다. T5는 T4에 비해 개체수를 두 배로 많이 하였으나 T5에서 한 개체당 섭식한 Chl-*a*의 양이 더 낮게 나타났다. 이는 단위 면적당 개체의 밀도가 높아 상호간 섭식경쟁의 영향으로 T4의 수치가 더 높게 나타난 것으로 사료된다[그림 3.1.26].

참붕어 처리군 T1, T2, T3에서 단위L당, 개체의 일일 Chl-*a* 섭취량은 뚜렷한 경향 없이 평균값이 $-0.04 \mu\text{g L}^{-1}$, $-0.02 \mu\text{g L}^{-1}$, $-0.01 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 음의 값을 보였다. 즉 참붕어에 의한 Chl-*a* 섭식이 없는 것으로 나타났다. 하지만 줄새우 처리군 T4, T5의 Chl-*a*는 실험 초기에 많은 양의 Chl-*a* 섭식이 이루어지다 점차 감소하는 경향을 보여 일일 평균 $0.02 \mu\text{g L}^{-1}$, $0.01 \mu\text{g L}^{-1}$ 만큼 섭식하는 것으로 나타났다[그림 3.4.26].



[그림 3.4.26] 줄새우(*Palaemon paucidens*)와 참붕어(*Pseudorasbora parva*)의 Chl-*a* 제거 효율 비교

② 남조류 제거 효율

어류 및 여과 섭식성 대형무척추동물에서 남조류(bluegreen algae)의 제어효과는 Chl-*a*의 제거효율과 뚜렷한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 참붕어를 투여한 수조에서는 시간이 경과함에 따라 남조류의 단위면적당 세포수는 점진적으로 증가하였다. 참붕어의 남조류 제거 처리군은 개체수를 25, 50, 100으로 서로 달리 하였을 때 실험 최종일에 남조류의 단위 면적당 세포수는 T1, T2, T3에서 7.4×10^3 cells mL⁻¹, 7.7×10^3 cells mL⁻¹, 9.6×10^3 cells mL⁻¹로 나타나 초기의 평균 남조류의 단위면적당 세포수 6.6×10^3 cells mL⁻¹보다 오히려 8.4×10^2 cells mL⁻¹, 1.1×10^3 cells mL⁻¹, 3.1×10^3 cells mL⁻¹ 만큼 증가한 수치를 보여 어류에 의한 남조류 제거 효과를 관찰할 수 없었다. 또한 어류의 단위면적당 개체수가 증가함에 따라 남조류도 함께 증가하는 경향을 나타내었다. 한편 줄새우를 투여한 수조에서는 시간이 경과함에 따라 남조류의 세포수가 점진적으로 감소하여 나타났다. 줄새우의 개체수를 25마리, 50마리로 서로 달리 하였을 때 실험 마지막날 T4, T5의 최종 남조류 단위면적당 세포수가 9.3×10^2 cells mL⁻¹, 1.1×10^3 cells mL⁻¹로 나타나 초기의 평균 남조류 단위면적당 세포수 6.6×10^3 cells mL⁻¹보다 5.7×10^3 cells mL⁻¹, 5.5×10^3 cells mL⁻¹ 만큼 감소한 수치를 보여 여과 섭식성 대형무척추동물에 의한 남조류 제거 효과가 탁월함을 관찰할 수 있었다. 하지만 실험 마지막날 대조군의 남조류의 집단 사멸로 인하여 대조군과 대비한 직접적 효과를 나타내지 못했다[그림 3.4.27]. 어류와 여과 섭식성 대형무척추동물에서 남조류 최종 제거율은 참붕어 개체수가 25마리, 50마리, 100마리로 증가함에 따라 -0.5%, -12%, -48%의 제거율을 보여 남조류가 오히려 증가함을 보였다. 한편 줄새우의 개체수가 25마리, 50마리 증가함에 따라 85%, 84%의 제거율을 보여 줄새우에 의한 남조류 제거 효율이 매우 높은 것으로 나타났다.

실험 기간동안 처리군(treatment)의 생물 한 개체당 섭식한 남조류는 참붕어에 의한 섭식 효과가 전혀 나타나지 않았으므로 T1, T2, T3에서 각각 $-1.6 \mu\text{g L}^{-1}$, $-15.9 \mu\text{g L}^{-1}$, $-31.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 음의 값들로 나타났다. 반면 T4, T5에 각각 $204.8 \mu\text{g L}^{-1}$, $109.7 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 Chl-*a*보다 더 뚜렷한 차이를 보였다, 하지만 T5는 T4에 비해 개체수를 두 배로 많이 하였으나 T5에서 한 개체당 섭식한 Chl-*a*의 양이 더 낮게 나타났다. 이 역시 단위 면적당 개체의 밀도가 높아 개체당 섭식 능력에 영향을 미쳐 T4의 수치가 더 높게 나타난 것으로 사료되었다.

참붕어 처리군의 단위 L당, 개체의 일일 남조류 섭취량은 뚜렷한 경향 없이 평균값이 $-0.03 \mu\text{g L}^{-1}$, $-0.26 \mu\text{g L}^{-1}$, $-0.52 \mu\text{g L}^{-1}$ 음의 값을 보였다. 즉 참붕어에 의한 남조류 섭식효과는 거의 없는 것으로 나타났다. 하지만 줄새우 처리군의 남조류는 실험 초기에 많은 양의 남조류 섭식이 이루어지다가 점차 감소하는 경향을 보여 일일 평균 $3.41 \mu\text{g L}^{-1}$, $1.83 \mu\text{g L}^{-1}$ 만큼 섭식하는 것으로 나타나 참붕어 처리군과 대조되었다[그림 3.4.27].

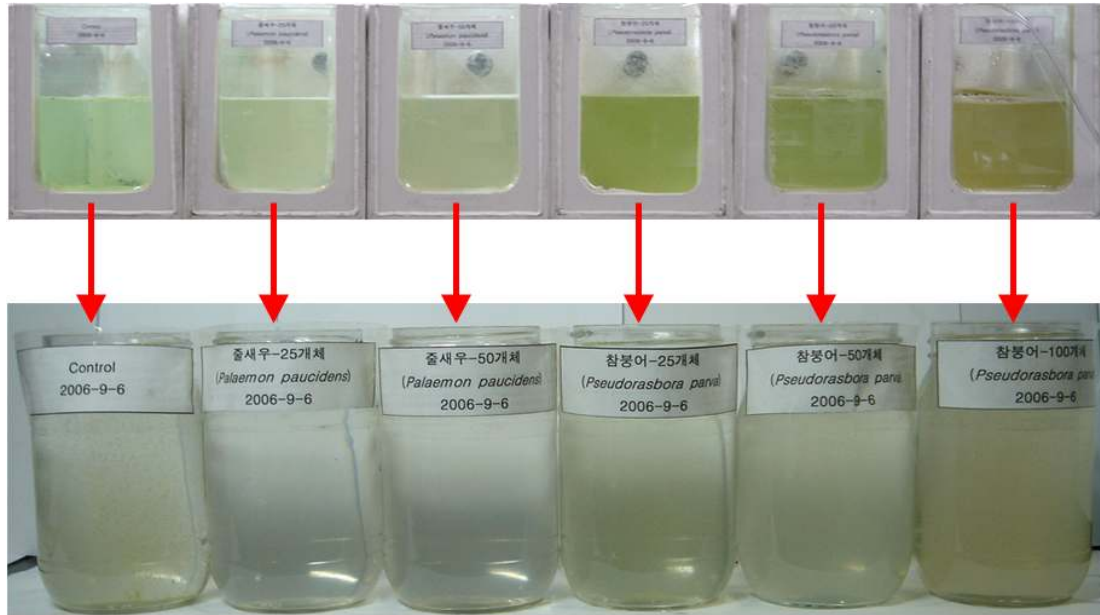
상기 연구를 종합해 볼 때, 어류 처리군의 조류 제어능은 이전에 다른 어종을 이용한 실험결과(이 등, 2007)와 동일하게 제어 효과가 전혀 없는 것으로 나타났다. 오히려 어류의 분뇨, 분비물에서 발생한 영양염류(질소 및 인)에 의해 식물성 플랑크톤이 급증한 것으로 사료된다. 반면, 여과 섭식성 생물인 줄새우에 의한 조류 제어 효과가 높게 나타났다.



[그림 3.4.27] 줄새우와 참붕어의 남조류 제거 효율 비교

특히 수체내 존재하는 일반 조류농도의 척도인 Chl-*a*보다는 남조류(bluegreen algae)의 제거 효율이 보다 탁월하게 나타났다. 또한 생물투입 초기에 다량의 조류를 섭식하다가 시간 경과함에 따라 섭식량이 점차 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 생물 섭식에 의한 조류의 감소 효과로 사료되었다. 그러나 단위면적당 대상 생물의 개체수가 과다하면 오히려 생물들 간의 섭식능력에 영향을 미쳐 조류제어 효과가 낮아지는 것으로 보아 적정량의 생물이 투여해야 최대의 효과를 보일 것으로 사료되었다. 대형무척추동물 처리군의 탁도(turbidity), 전기전도도(conductivity)는 육안으로 관찰하여도 낮아졌음을 쉽게 알 수 있었다. 초기의 녹색빛을 띤 물이 시간의 경과함에 따라 점진적으로 연한 갈색 빛으로 나타났으며, 수소이온농도(pH) 역시 소폭 증가하여 약 알카리성을 보였다.

본 연구에서는 실험실내에서 줄새우의 섭식에 의한 높은 조류 제거효과를 검증할 수 있었다 [그림 3.4.28]. 다음단계의 향후 실험은 다양한 먹이원이 존재하며, 자연계의 물질순환 및 에너지 흐름에 대한 실체를 시험해 볼 수 있는 메소코즘(mesocosm) 현장 실험을 통해 조류 제거 효과에 대한 실험이 필요할 것으로 사료되었다.



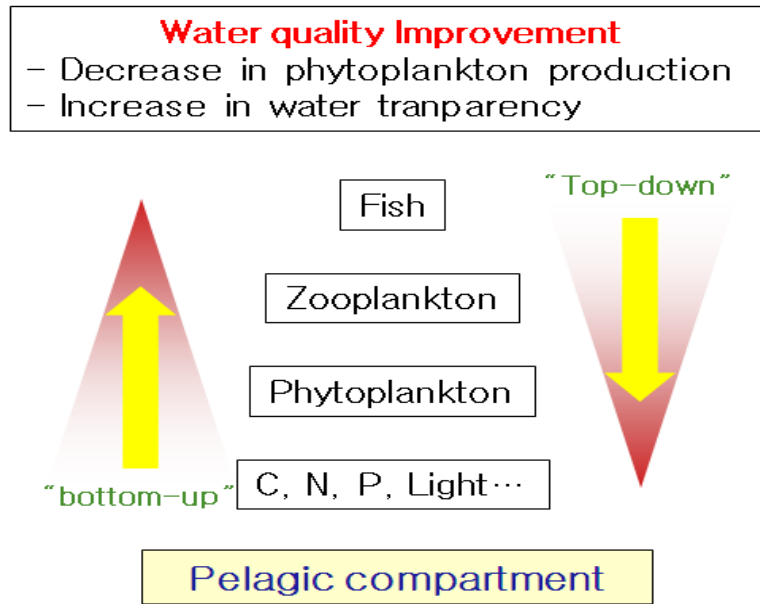
[그림 3.4.28] 생물 처리 후 탁도 변화

(2) Top-Down 조절 하 줄새우를 이용한 생물 조작

7개의 실험용 수조(20×40×25 cm)에 초기의 Chl-*a* 농도를 맞추기 위해 인근호수 및 연못에서 식물성 플랑크톤 네트(mesh size: 20 μm)를 이용하여 자연 개체군의 조류를 채집하여 실험실에서 1~2일 순화시켰다. 7개의 각각의 10L 수조에 약 100~120 μg L⁻¹로 초기 농도를 고정하였다. 수조는 1개의 대조군(control)과 6개의 처리군(treatments)로 대별하였으며, 처리군 수조에는 각각 줄새우(*Palaemon paucidens*) #20, #40, #80개체, 줄새우 #80개체와 동자개(*Pseudobagrus fulvidraco*) #2개체, 줄새우 #80개체와 동자개 #4개체, 줄새우 #80개체와 동자개 #8개체 투여하였다[그림 3.4.32]. 실험용 수조는 실험실내에서 광조건은 16 hr:8 hr(light:dark)으로 유지되었고 영양염류의 순환 및 정체에 의한 식물성플랑크톤의 침강을 막기 위해 실험기간동안 지속적으로 산소를 공급하였다.

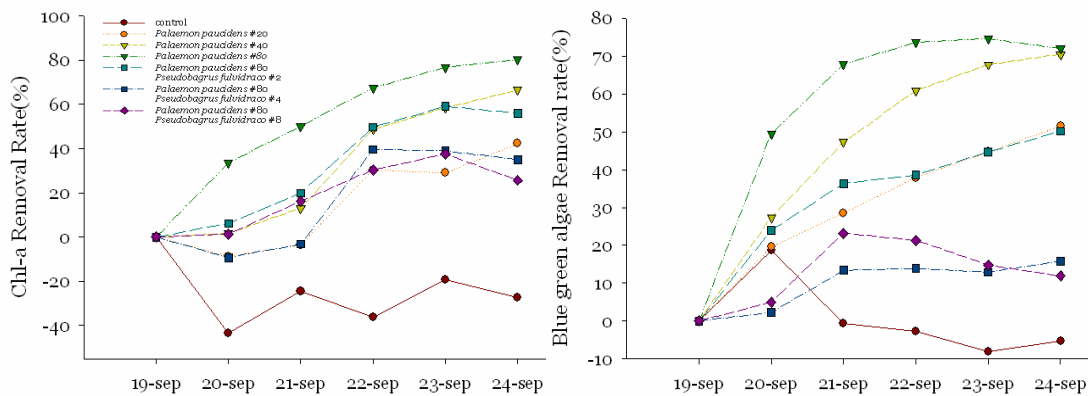


[그림 3.4.29] 생물조작 실험 후보종(줄새우, 참붕어, 동자개)

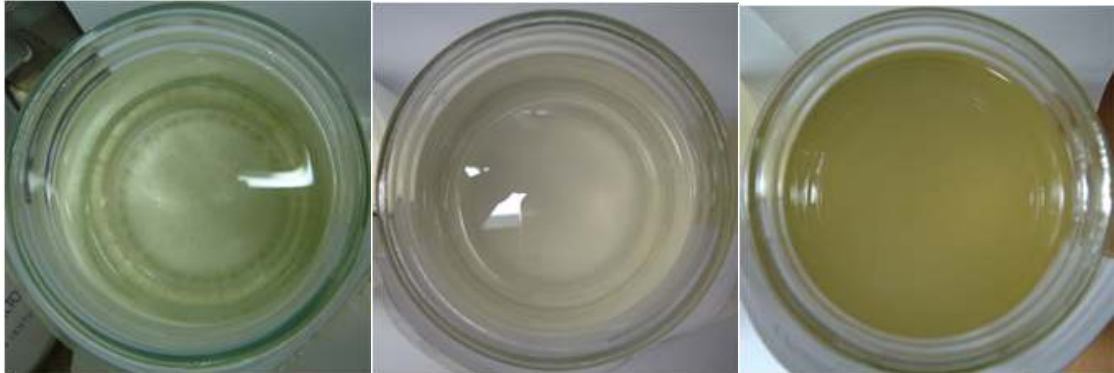


[그림 3.4.30] 생물조절 기법 가설 모식도

줄새우 처리군(treatment)의 개체수 변이에 따른 T1, T2 및 T3에서 Chl-a 제거효과는 각각 42%, 66%, 80%로 나타났으며, 동자개를 투여한 T4, T5, T6 에서는 55%, 34%, 25%로 나타났다. 남조류의 최종 제거효과는 T1, T2 및 T3에서 51%, 70%, 71%로 나타났으며, 동자개를 투여한 T4, T5, T6 에서는 50%, 15%, 11%로 나타났다[그림 3.4.31]. Top-carivore에 섭식에 의해 조류 제거의 효과가 낮게 나타났으며, 특히 Chl-a보다 남조류 제거에 보다 더 탁월한 효과를 보였다[그림 3.4.32].



[그림 3.4.31] Chl-a 제거효율(줄새우: *P. paucidens*, 동자개: *P. fulvidraco*)

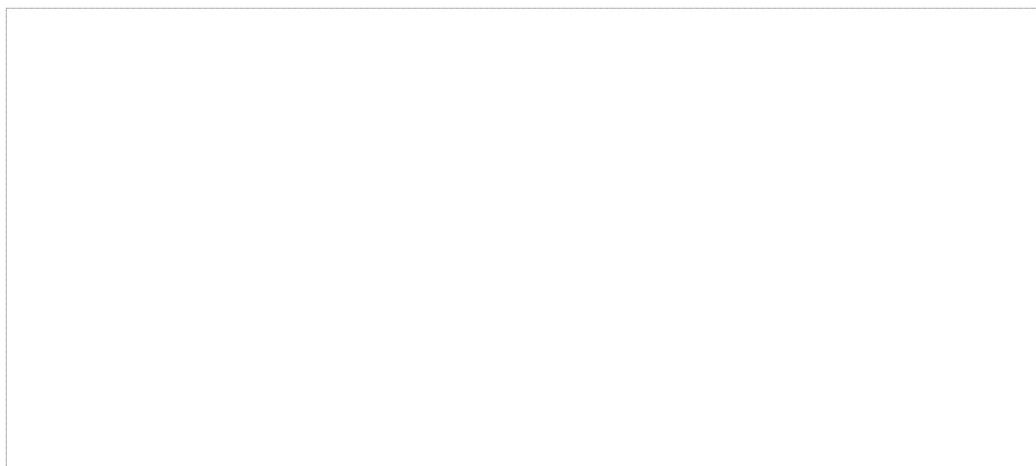


[그림 3.4.32] 생물처리 후 탁도 변화(좌: 대조군, 중: 줄새우 처리군, 우: 줄새우+동자개 처리군)

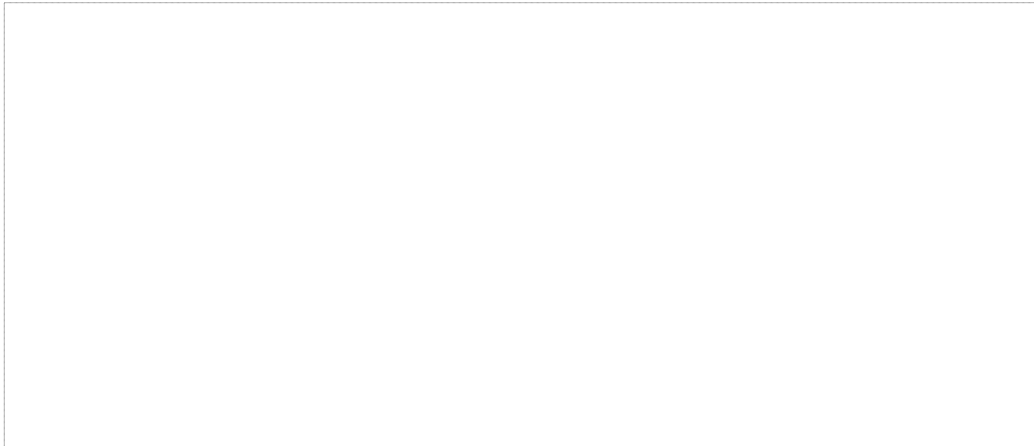
(3) 줄새우의 Chl-*a* 및 남조류 제거 효과 재검증

4개의 실험용 수조(20×40×25 cm)에 초기의 Chl-*a* 농도를 맞추기 위해 인근호수 및 연못에서 식물성 플랑크톤 네트(mesh size: 20 μm)를 이용하여 자연 개체군의 조류를 채집하여 실험실에서 1~2일 순화시켰다. 4개의 각각의 10 L 수조에 약 25~70 μg L⁻¹로 초기 농도를 고정하였다. 수조는 1개의 대조군(control)과 3개의 처리군(treatments)로 대별하였으며, 처리군 수조에는 각각 줄새우(*P. paucidens*) #10, #20, #40개체 투입하였다. 실험용 수조는 실험실내에서 광조건은 16 hr:8 hr(light:dark)으로 유지되었고 영양염류의 순환 및 정체에 의한 식물성플랑크톤의 침강을 막기 위해 실험기간동안 지속적으로 산소를 공급하였다.

대조군(control)에서 Chl-*a* 제거율이 -76%, 남조류는 8%로 나타난 것에 비해 줄새우 처리군(treatment)의 개체수 변이에 따른 T1, T2 및 T3에서 Chl-*a* 제거효과는 각각 -5%, 1%, 52%로 나타났으며[그림 3.4.33], 남조류의 최종 제거효과는 14%, 40%, 50%로 나타나 대조군 대비 상대적인 Chl-*a* 제거율은 71%, 77%, 128%로 나타났으며, 상대적인 남조류 제거율은 6%, 32%, 42%로 나타났다[그림 3.4.34]. 이전 실험 결과와 마찬가지로 조류 제거에 탁월한 효과를 나타냈다.



[그림 3.4.33] 줄새우(*Palaemon paucidens*)의 Chl-*a* 제거율



[그림 3.4.34] 줄새우(*Palaemon paucidens*)의 남조류(BL: *Bluegreen algae*) 제거율

(4) 기타 다른 어종 및 무척추동물을 Chl-*a* 및 남조류 제거 효과

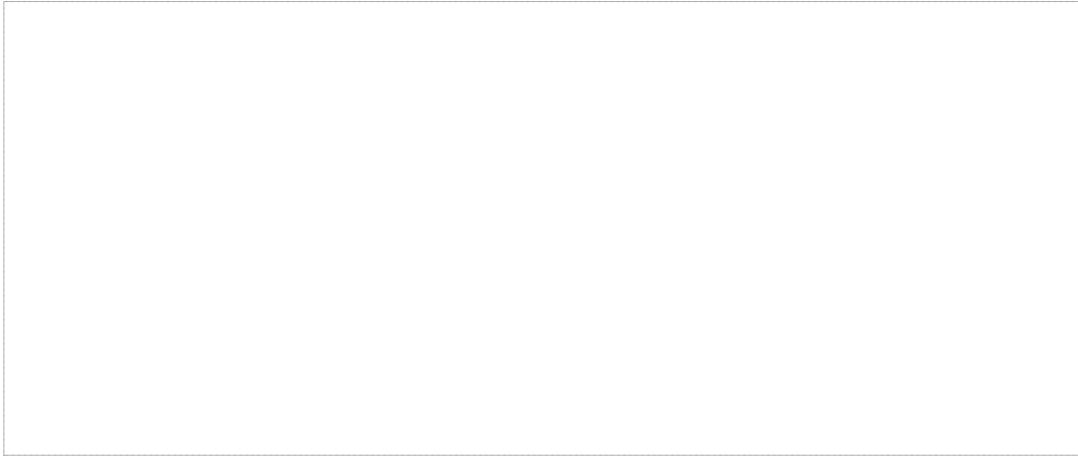
5개의 실험용 수조(20×40×25 cm)에 초기의 Chl-*a* 농도를 맞추기 위해 인근호수 및 연못에서 식물성 플랑크톤 네트(mesh size: 20 μm)를 이용하여 자연 개체군의 조류를 채집하여 실험실에서 1~2일 순화시켰다. 5개의 각각의 10L 수조에 약 100~120 μg L⁻¹로 초기 농도를 고정하였다. 수조는 1개의 대조군(control)과 4개의 처리군(treatments)로 대별하였으며, 처리군 수조에는 각각 새뱅이(*C.denticulata*) #30, #60개체, 송사리(*Oryziaslatipes*) #10, #30개체 투입하였다[그림 3.4.35]. 실험용 수조는 실험실내에서 광조건은 16 hr:8 hr(Light:Dark)으로 유지되었고 영양염류의 순환 및 정체에 의한 식물성플랑크톤의 침강을 막기 위해 실험기간동안 지속적으로 산소를 공급하였다.



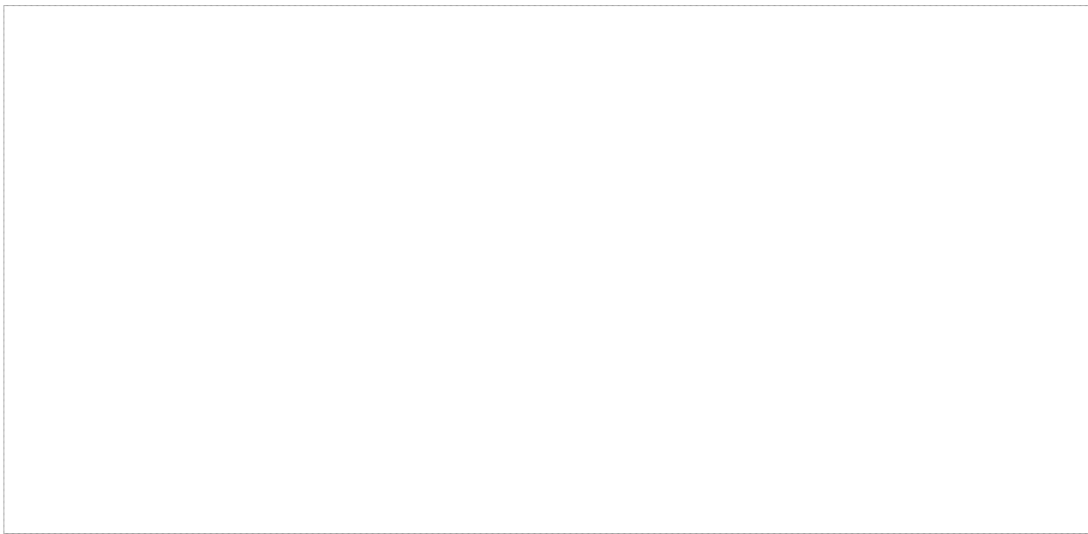
[그림 3.4.35] 생물 조작 실험 후보종(송사리, 새뱅이)

대조군(Control)에서 Chl-*a* 제거율이 -149%, 남조류 제거율은 -51%로 나타나는 것에 비해 송사리 처리군(Treatment)의 개체수 변이(#10, #30)에 따른 T1, T2에서 Chl-*a* 제거효과는 각각 -58%, -14%[그림 3.4.36], 남조류 제거 효과는 각각 4%, 15%로 나타났으며[그림 3.4.37], 새뱅이 처리군의 개체수 변이(#30, #60)에 따른 T4, T5에서 Chl-*a* 제거효과는 각각 62%, 81%, 남조류 제거 효과는 71%, 68%로 나타났다. 대조군과 대비 하여 실질 적인 제거 효율은 T1, T2, T3 및

T4에서 Chl-*a*는 각각 91%, 135%, 211%, 230%로 나타났으며, 남조류는 55%, 66%, 122%, 119%로 송사리에 의한 제거 효율이 나타나지만 새뱅이에 의한 효율이 월등한 것으로 나타났다.



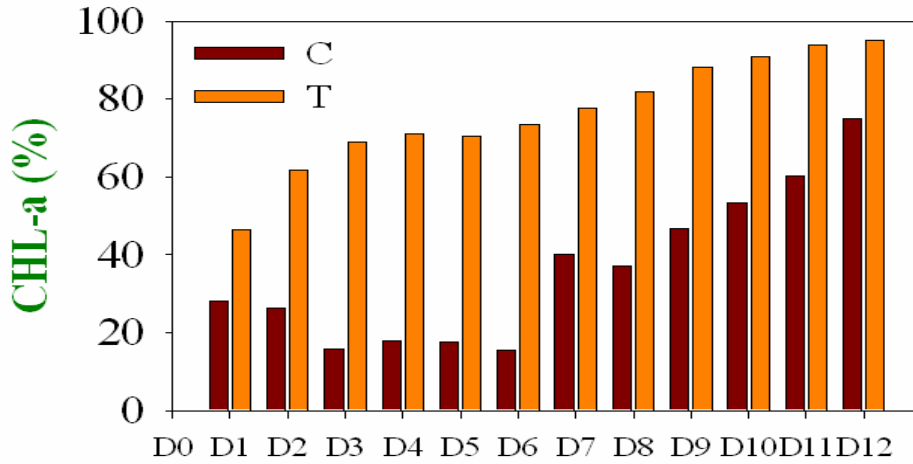
[그림 3.4.36] 새뱅이(*C. denticulata*), 송사리(*O. latipes*)의 Chl-*a* 제거율



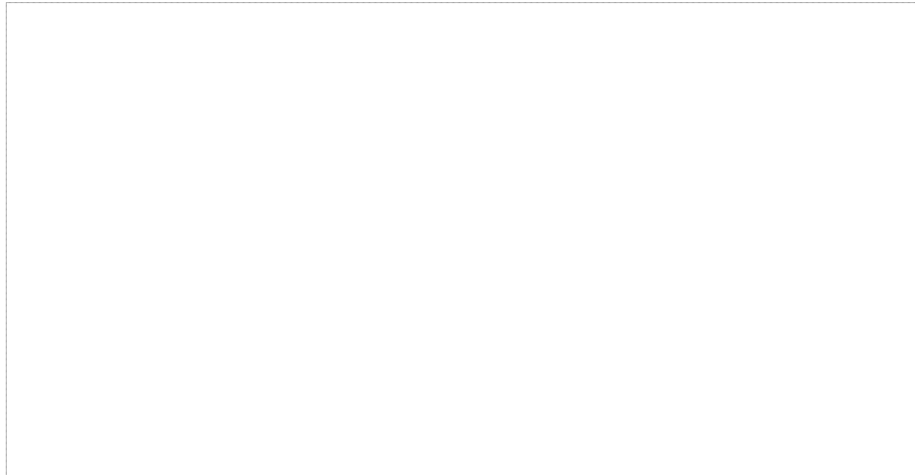
[그림 3.4.37] 새뱅이(*C. denticulata*), 송사리(*O. latipes*)의 남조류(BL: Bluegreen algae) 제거율

(5) 고농축수에서의 새뱅이를 이용한 Chl-*a* 및 남조류 제거 효과

2개의 실험용 수조(20×40×25 cm)에 고농축 조류를 실험실에서 1~2일 순화시켰다. 2개의 각각의 10 L 수조에 약 260 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 초기 농도를 고정하였다. 수조는 1개의 대조군(control)과 1개의 처리군(treatments)로 대별하였으며, 처리군 수조에는 각각 새뱅이(*C.denticulata*) #50개체 투입하였다. 실험용 수조는 실험실내에서 광조건은 16 hr:8 hr(Light:Dark)으로 유지되었고 영양 염류의 순환 및 정체에 의한 식물성플랑크톤의 침강을 막기 위해 실험기간동안 지속적으로 산소를 공급하였다.

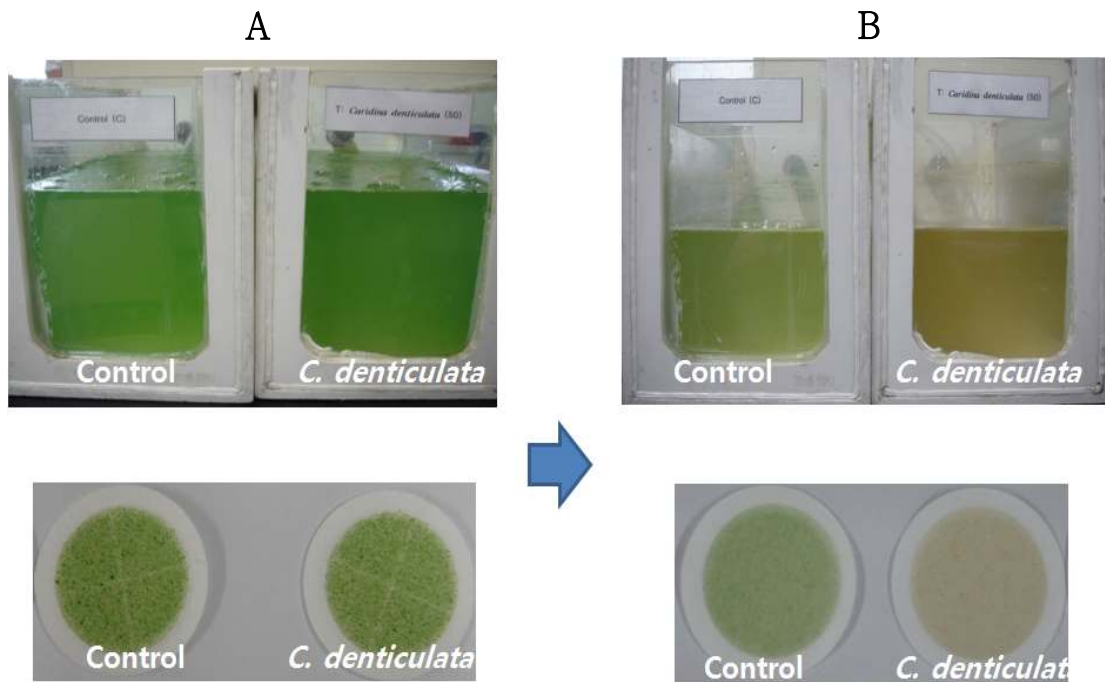


[그림 3.4.38] 새뱅이(*C. denticulata*)의 Chl-*a* 제어율 평가 실험 [C=대조군(Control), T=처리군(Treatment)]



[그림 3.4.39] 새뱅이(*C. denticulata*)의 남조류 제어율 평가 실험 [C=대조군(Control), T=처리군(Treatment)]

대조군(control)에서 Chl-*a* 제거율이 60%, 남조류 제거율은 74%로 나타나 것에 비해 새뱅이 처리군(개체수 #50)에 따른 Chl-*a* 제거효과는 89%[그림 3.4.38], 남조류 제거 효과는 94%로 나타났다[그림 3.4.39]. 실험 초기 7일간은 대조군에서의 제거 효율이 거의 나타나지 않았으나 이후 시간이 지남에 따라 높아져 실질적인 상대 제거율이 점차 감소하여 나타났다. 이는 시간이 지남에 따라 조류의 사멸에 의한 영향으로 사료된다. 또한 실험 종료 후 GF/C filter를 통해 관찰 할 수 있을 뿐만 아니라[그림 3.4.40], 육안으로도 수질이 개선되었다는 것을 쉽게 관찰 할 수 있었다.



[그림 3.4.40] 새뱅이의 조류 제어 실험(GF/C여과지)

3. Top carnivore 투입에 의한 현장 적용 실험

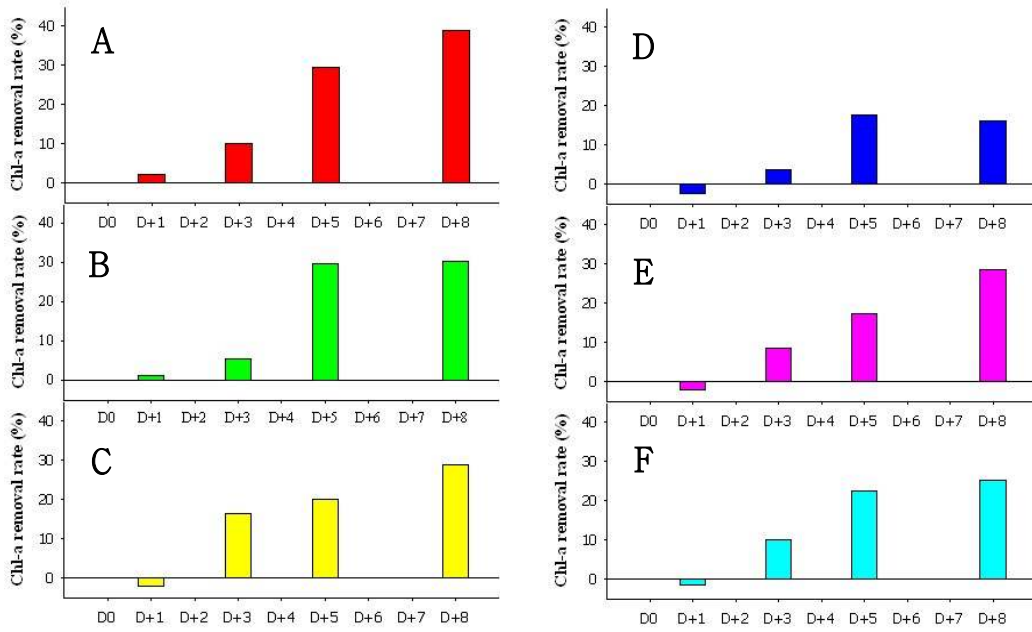
가. 신규저수지 메소코즘에서 1차 현장 적용 실험

2006년 10월 21일부터 10월 29일까지 1주에 걸쳐 충남 보령시에 위치한 신규 저수지의 수변 지역에서 약 50 m 떨어진 지점에 메소코즘(120×120×250 cm, 3,600 L) 을 설치하였다[그림 3.4.41]. 메소코즘은 스텐리스 재질의 골격과 폴리프로필렌 재질의 내부 격막으로 구성되었으며 저수지의 자연수 2,880L를 투여 후 하나의 대조군(Control) 과 여섯개의 처리군으로 대별하였다. 첫 번째 처리군(T1)은 줄새우(*Palaemon paucidens*) 150개체, 처리군(T2)은 줄새우 300개체, 처리군(T3)은 줄새우 150개체와 Top carnivore인 동자개(*Pseudobagrus fulvidraco*) 2개체, 처리군(T4)은 줄새우 300개체와 동자개 2개체, 처리군(T5)는 줄새우 150개체와 동자개 4개체, 처리군(T6)은 줄새우 300개체와 동자개 4개체를 각각 투여한 후 Chl-*a* 및 남조류 제거량 및 제거율을 산출하였다.



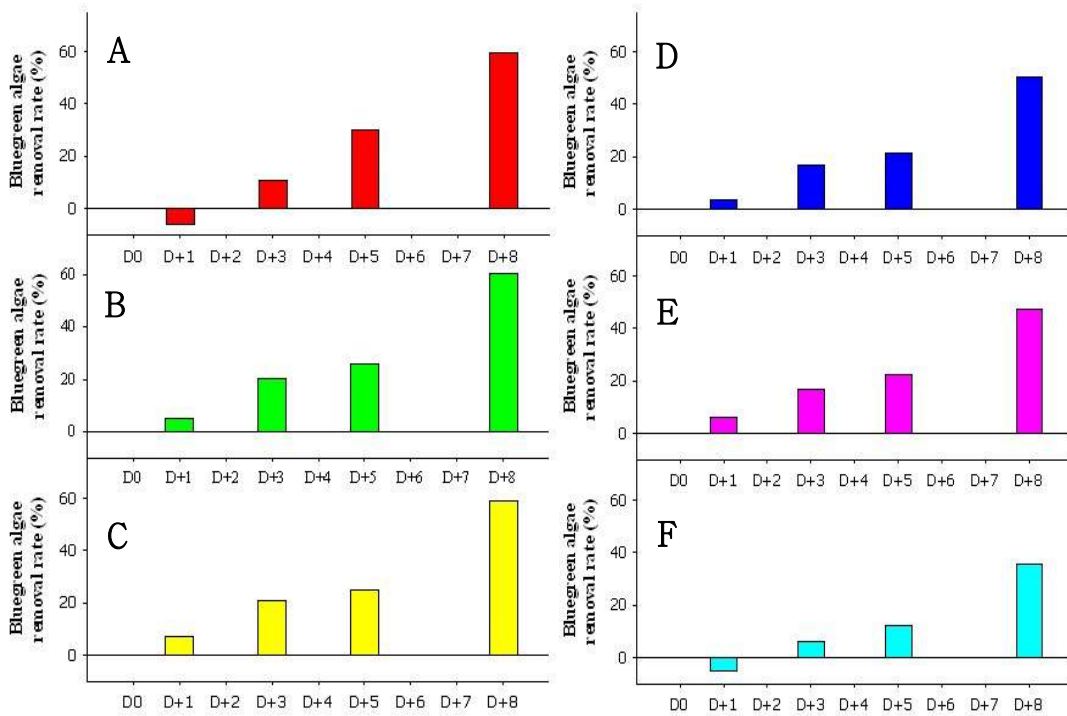
[그림 3.4.41] 신구저수지 현장 메소코즘 설치

대조군(control)과 처리군에서 각각 채취한 샘플의 Chl-*a*의 제거율을 평가한 결과 실험 마지막 날 최종 제거율이 줄새우 150개체를 투입한 처리군에서 최적의 효율을 보였다. 한편 최종 포식자인 동자개의 개체수가 증가할수록 Chl-*a*의 제거 효율이 낮아짐을 알 수 있었다. 이는 동자개의 포식 활동은 물론이며, 동자개가 줄새우의 섭식에 영향을 미칠 뿐 아니라 동자개에 의한 배설물, 분비물을 통해 조류 제어능이 감소함을 알 수 있었다[그림 3.4.42]. 또한 남조류 제거는 보다 더 효율적인 제거능을 확인 할 수 있었다. Chl-*a*와 마찬가지로 시간이 지남에 따라 제거율이 점차 증가하였으며, 최대 61%의 고효율의 제거능을 나타나기도 하였다. 하지만 최상위 포식자를 투입하였을 경우 줄새우의 섭식에 영향을 미쳐 남조의 제거 효율이 감소하는 것을 알 수 있었다[그림 3.4.43].



[그림 3.4.42] 신구저수지 메소코즘 실험에서 Chl-a 제거율 변화

(A: $P.p(150)$, B: $P.p(300)$, C: $P.p(150) + P.f(2)$, D: $P.p(300) + P.f(2)$, E: $P.p(150) + P.f(4)$, F: $P.p(300) + P.f(4)$)

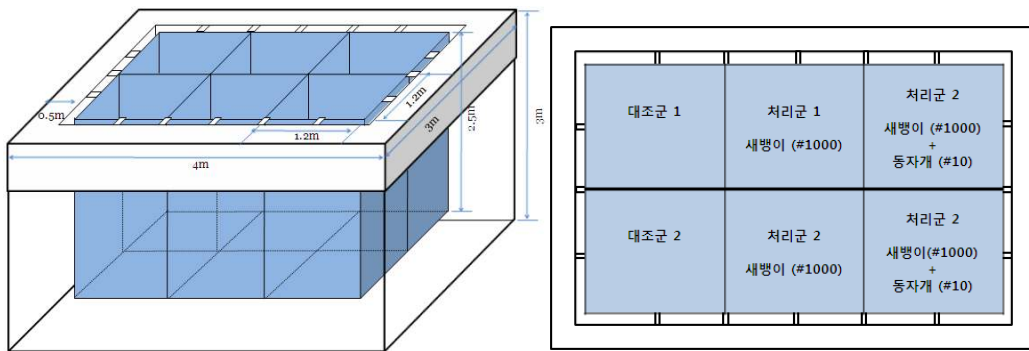


[그림 3.4.43] 신구저수지 메소코즘 실험에서 남조류 제거율 변화

(A: $P.p(150)$, B: $P.p(300)$, C: $P.p(150) + P.f(2)$, D: $P.p(300) + P.f(2)$, E: $P.p(150) + P.f(4)$, F: $P.p(300) + P.f(4)$)

나. 신구저수지 메소코즘에서 2차 현장 적용 실험

2007년 10월 1일부터 14까지 2주에 걸쳐 충남 보령시에 위치한 신구 저수지의 수변 지역에서 약 50 m 떨어진 지점에 메소코즘(120×120×250 cm, 3,600 L)을 설치하였다. 메소코즘은 스텐리스 재질의 골격과 폴리프로필렌 재질의 내부 격막으로 구성되었으며 저수지의 자연수 2,880 L를 투여 후 하나의 대조군(Control)과 두 개의 처리군으로 대별하였다[그림 3.4.44]. 첫 번째 처리군(T1)은 새뱅이 1,000개체를 투여 하였고, 또 다른 처리군(T2)은 새뱅이 1,000개체와 Top carnivore인 동자개(*Pseudobagrus fulvidraco*)를 각각 투여하였다.



[그림 3.4.44] 메소코즘 설치 모식도

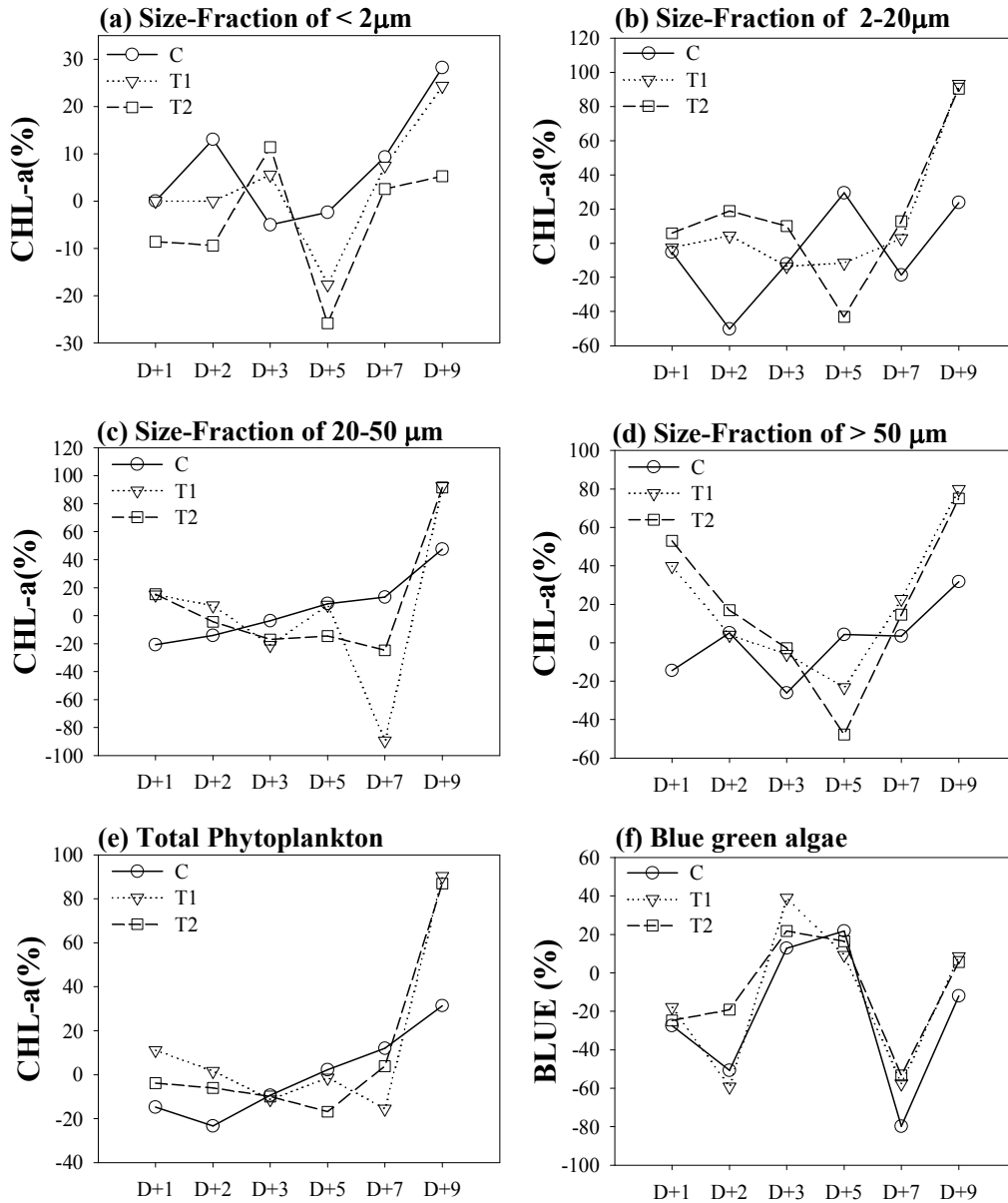


[그림 3.4.45] 메소코즘에서의 샘플 채수

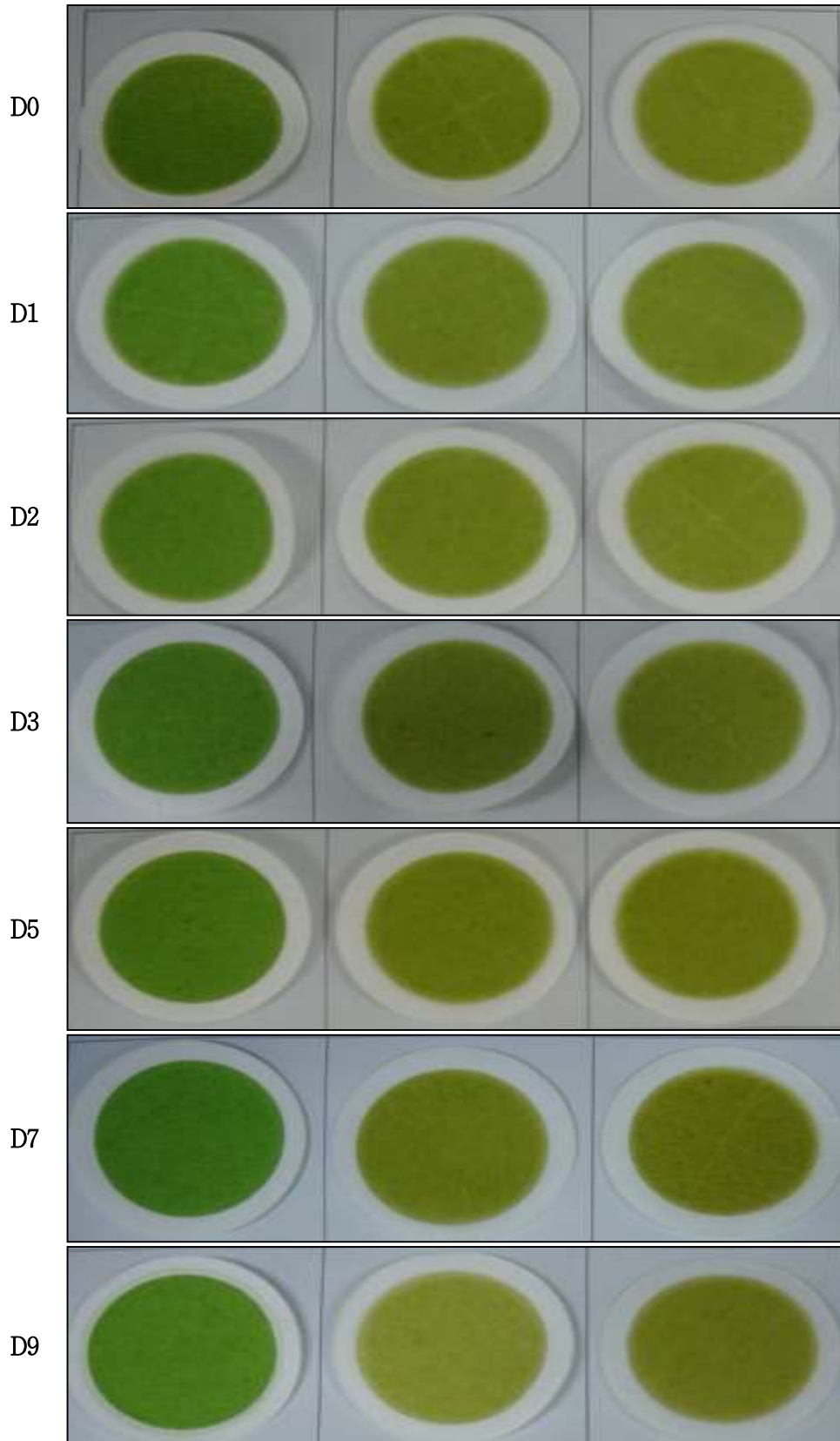
실험기간 동안 대조군(control)과 처리군(treatment)에서 각각 500 mL씩 두 개의 샘플을 채수하여 필터링 하였다[그림 3.4.45]. GF/F(pore size: 1 μm), GF/D(pore size: 2~20 μm) 필터 페이퍼와 20, 50 μm mesh screen(나이론 플랑크톤 네트)을 이용하여 샘플을 크기별(<2 μm, 2~20 μm, 20~50 μm, >50 μm, total size)로 총 5개 범주로 분리하여 분석하였다. Chl-a 분석과 남조류는 실험실(in vivo)에 분석한 것과 동일한 방법으로 분석하였다.

대조군(control)과 처리군에서 각각 채취한 샘플을 Chl-a 크기별로 분리하여 분석한 결과, 2~20 μm, 20~50 μm 두 크기에서 평균 92%로 높은 제거 효율을 보였다. 그리고 50 μm 이상의 크

기와 총 Chl-a에서는 각각 77%, 88%로 나타났다[그림 3.4.46]. 상위 포식자의 섭식에 의한 영향은 실제 저수지에서는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 반면 남조류의 제거율은 5~8%로 낮은 효율을 보였다. 실험기간 동안 새뱅이는 Chl-a 제거에 탁월한 효과가 나타났다[그림 3.4.47].



[그림 3.4.46] 신구저수지 메소코즘 실험에 따른 Chl-a 크기별 제거 효율 및 남조류 제거효율 분석



[그림 3.4.47] 현장 메소코즘(Mesocosm)에서의 Chl-*a*의 일별 변화량(D0~D9)

다. 현장적용 예비 실험

(1) 생물조절기법을 위한 현장적용 지점 조사

생물 조절기법 현장 적용을 위하여 대전광역시, 충청남도, 충청북도에 위치한 저수지의 지점 조사를 실시하였다[그림 3.4.48]. 대상 저수지의 접근성과 위치, 저수지의 용도, 수질 상태를 고려하여 1:50,000 지도를 이용하여 현장 답사를 실시하였다. 대전광역시 유성구 안산동에 위치한 안산소류지의 경우 평균 수심이 1.5 m 이상으로 깊고 가파른 계곡 상류에 위치하여 접근성이 용이하지 못하였다. 농업용수로 사용되고 있다는 장점이 있긴 하나 인근에 군부대가 위치하여 생물 조절기법 현장 적용하기에는 부적절 한 것으로 사료되었다. 충남 연기군에 위치한 감성 저수지의 경우 농업용수의 목적으로 만들어진 저수지로서 저수지 내 수중 식물 및 수변 생물들이 상당히 발달해 있었다. 한편 도로변에 위치하여 접근이 매우 용이 하였으나, 접근이 용이한 만큼 인근 마을에서 어로 행위가 빈번히 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 또한 현장 저수지의 규모가 굉장히 방대하여 생물조절기법 실험의 현장 적용하기에 부적절 한 것으로 사료되었다. 충청북도 옥천군 군북면에 위치한 증약소류지의 경우 평균 수심이 약 2 m로 깊고, 인근에 마을이 위치하여 전형적인 농업용 저수지의 성격을 띄고 있었다. 하지만 도로가 발달 하지 않아 접근성이 매우 나쁜 단점이 있어 현장 적용 실험 대상지로 부적절 한 것으로 사료 되었다. 대전시 서구 도안동에 위치한 도덕골 저수지의 경우 목원대학교내에 위치한 소규모 저수지로서 인근야산으로 둘러싸인 형태를 보이고 있었다. 수온이 약 19.1℃로 낮았으며, 불빛이 육안으로도 확연하게 녹색을 띄고 있음을 확인 할 수 있었다. 하지만 대학교내에 위치하여 생물조절 실험하기에는 부적절 한 곳으로 사료되었다. 대전광역시 대덕구 법동에 위치한 산중골 방죽은 계곡 산에서 흘러 내려오는 물을 가둬 만든 소규모 저수지로서 인근농경지의 농업용수 공급을 목적으로 설립되었다. 저수지내에는 참붕어, 동자개, 새뱅이, 줄새우 등 생물조절기법 후보 대상종이 서식하고 있으며, 규모 또한 그리 크지 않아 실험하기에 최적의 조건을 갖춘 곳으로 사료되었다. 한편 충남 연기군 금천리에 위치한 소재 소류지와 대전광역시 동구 추동에 위치한 용대말 방죽의 경우 지도상에서는 존재하였으나 실제 현장에서는 찾지 못하여 확인하지 못하였다.



안산소류지



감성저수지



도덕골 저수지



산중골방죽

[그림 3.4.48] 생물조절 현장적용을 위한 다양한 모델 시스템 현장 답사

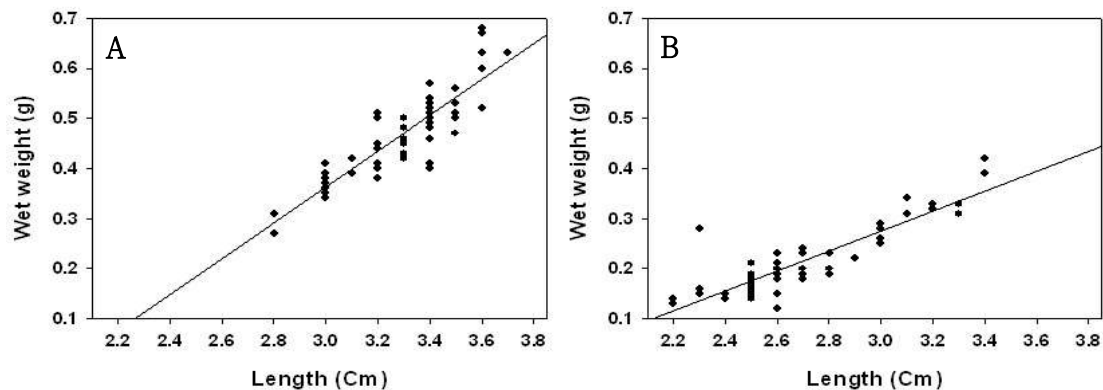
(2) 현장 실험적용을 위한 생물 증식 기술개발

(가) 생물채집 및 체장 체중 관계분석

생물조절기법 현장 적용 실험을 위하여 후보종인 새뱅이를 2008년 5월 13일, 5월 22일, 6월 24일 3회에 걸쳐 채집하여 확보하였다. 1차 조사시에 채집된 총 생체량이 284.39 g으로 약 1,095개체를 채집 하였다. 이 중 알을 가지고 있는 종의 비율이 전체의 31.7%, 알을 가지고 있지 않은 종의 비율이 68.3%로 채집되었다. 알을 가진 개체의 평균 생체량이 약 0.47 g으로 나타났으며 알을 가지고 있지 않은 개체의 경우 생체량이 0.22 g로 나타났다[표 3.4.10]. 새뱅이의 산란과 체장 체중과의 관계를 분석한 결과 체장은 약 2.8 cm, 체중은 약 0.3 g 이상인 개체에서 주로 산란을 하는 특징을 보였다[그림 3.4.49].

[표 3.4.10] 1차 현장 조사 후 채집된 새뱅이(*Caridina denticulata*) 생체량 분석

	알 가진 개체	알이 없는 개체	합계
총 생체량(g)	90.18	194.21	284.39
비율(%)	31.7	68.3	100.0
평균 생체량(g)	0.47	0.22	0.69
추정 개체수	193.8	901.6	1095.4

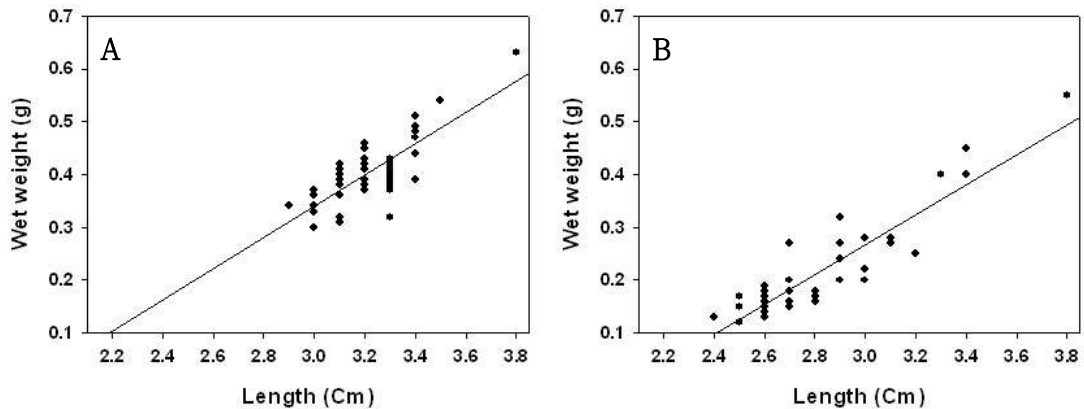


[그림 3.4.49] 1차 현장 채집된 새뱅이 체장 체중 관계분석(A: 알 가진 개체, B: 알 없는 개체)

2차 조사시에 채집된 총 생체량이 276.21 g으로 약 1,153개체를 채집 하였다. 이 중 알을 가지고 있는 종의 비율이 전체의 25.5%, 알을 가지고 있지 않은 종의 비율이 74.5%로 채집되었다. 알을 가진 개체의 평균 생체량이 약 0.40 g으로 나타났으며 알을 가지고 있지 않은 개체의 경우 생체량이 0.21 g로 나타났다[표 3.4.11]. 새뱅이의 산란과 체장 체중과의 관계를 분석한 결과 체장은 약 2.9 cm, 체중은 약 0.29 g 이상인 개체에서 주로 산란을 하는 특징을 보였다[그림 3.4.50]

[표 3.4.11] 2차 현장 조사 후 채집된 새뱅이(*Caridina denticulata*) 생체량 분석

	알 가진 개체	알이 없는 개체	합계
총 생체량(g)	70.32	205.89	276.21
비율(%)	25.5	74.5	100.0
평균 생체량(g)	0.40	0.21	0.61
추정 개체수	175.2	977.6	1,152.8



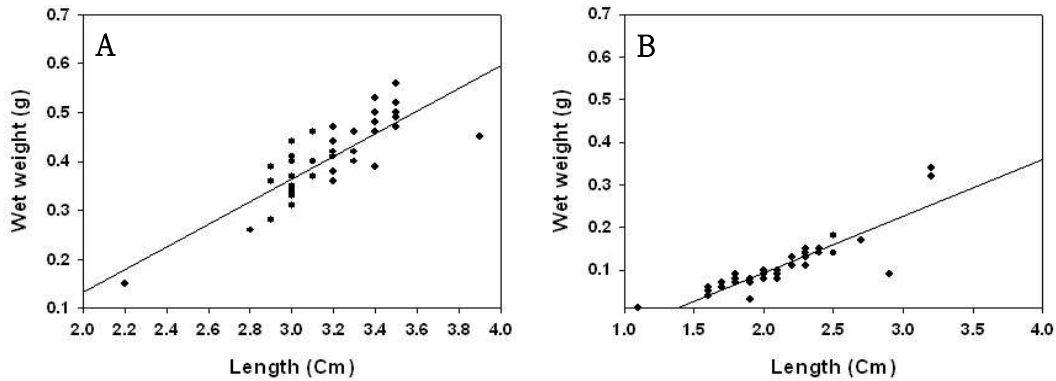
[그림 3.4.50] 2차 현장 채집된 새뱅이 체장 체중 관계분석(A: 알 가진 개체, B: 알 없는 개체)

3차 조사시에 채집된 총 생체량이 132.06 g으로 약 1,156개체를 채집하였다. 이 중 알을 가지고 있는 종의 비율이 전체의 17.1%, 알을 가지고 있지 않은 종의 비율이 82.9%로 채집되었다. 이는 앞선 1, 2차 현장 채집에 비하여 알을 가진 개체의 비율이 현저히 줄었는데, 이를 통해 새뱅이의 산란 시기는 5월 하순부터 6월 초 중순쯤으로 나타났다. 알을 가진 개체의 평균 생체량이 약 0.41 g으로 나타났으며 알을 가지고 있지 않은 개체의 경우 생체량이 0.10 g으로 갓 부화된 유생들이 대량 채집되어 알의 가지지 않은 새뱅이의 생체량이 이전 1, 2차 조사에 비하여 낮게 나타났다[표 3.4.12]. 새뱅이의 산란과 체장 체중과의 관계를 분석한 결과 체장은 약 2.9 cm, 체중은 약 0.29 g 이상인 개체에서 주로 산란을 하는 특징을 보였다[그림 3.4.51].

새뱅이 채집시 평균 수온은 약 21.8°C이며 전기전도도의 범위는 119~138 $\mu\text{s cm}^{-1}$ 로 나타났다. Chl-*a*는 평균 3.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 물의 흐름이 정체되어 있는 수역에서 비교적 얇은 지역에 특히 수변 식물들이 다수 분포하는 곳에 집단으로 서식하는 것을 알 수 있었다. 먹이원은 수초나 기타 유기물, 어류 사체 등 다양한 먹이원을 주로 섭식하는 것으로 사료되었다.

[표 3.4.12] 2차 현장 조사 후 채집된 새뱅이(*Caridina denticulata*) 생체량 분석

	알 가진 개체	알이 없는 개체	합계
총 생체량(g)	20.23	112.83	132.06
비율(%)	17.1	82.9	100.0
평균 생체량(g)	0.41	0.10	0.51
추정 개체수	56.7	1,099.7	1,156.4



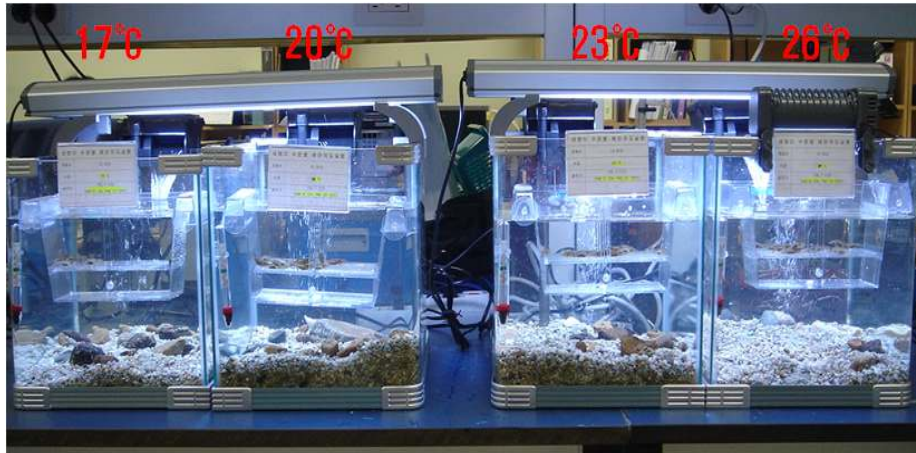
[그림 3.4.51] 3차 현장 채집된 새뱅이 체장 체중 관계분석(A: 알 가진 개체, B: 알 없는 개체)

(나) 온도변화에 따른 배란 유도 실험 및 행동 및 습성 분석

실험에 사용된 새뱅이는 대전광역시 대덕구 범동에서 채집된 새뱅이(*Caridina denticulata*)의 알을 사용하였다. 채집은 2008년 5~6월에 걸쳐 채집한 새뱅이 성체 중에서 알을 가진 개체를 이용하였다. 인공사육을 위해 포획한 개체들은 20 L의 수조에 원래서식지의 물을 담아 실험실로 옮긴 후, 수조 내 온도를 17°C, 20°C, 23°C, 26°C로 각각 대별하여 5월 14일부터 21일까지 일주일간 실험을 실시하였다[그림 3.4.52]. 17°C, 20°C는 워터쿨러와 얼음팩을 이용하여 수온을 조절하였으며, 23°C, 26°C의 수조는 히터를 이용하여 수온을 조절 하였다. 각각의 실험군에는 알을 가진 성체를 15개체씩 투입하였으며, 매일 동일한 시간에 부화한 유생을 확인하였다. 수조의 광주기는 13 hr:11 hr(Light:Dark)로 조절하였으며 산소공급기(air pump)를 통해 용존산소를 유지시켰다.

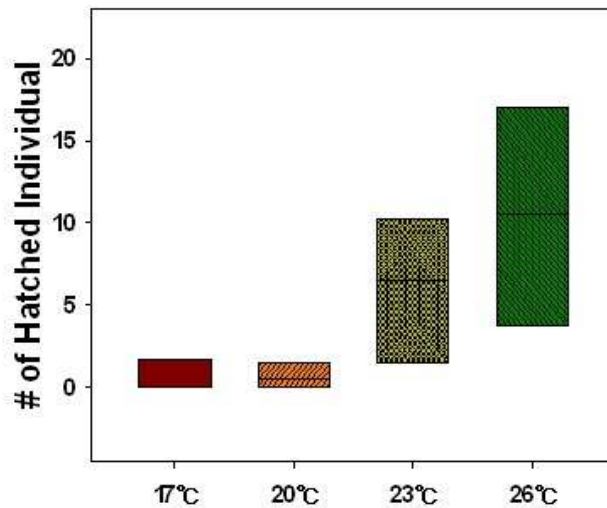
[표 3.4.13] 현장시 이화학적 수질 상태

	수온(°C)	전기전도도($\mu\text{s cm}^{-1}$)	용존산소량(mg L^{-1})	수소이온농도	탁도(NTU)	Chl-a($\mu\text{g L}^{-1}$)
1차 조사	18.6	138	12	8.34	52.9	15.8
2차 조사	24.2	135	9.63	8.6	99.4	61.7
3차 조사	22.7	119	10.4	9.4	54.2	20.5



[그림 3.4.52] 수온별 배란 유도 실험

각각의 항온조건에서 알의 부화실험을 한 결과 23°C, 26°C에서 부화기간이 가장 짧고 집중적으로 부화되었다[그림 3.4.53]. 특히 26°C에서는 가장 높은 부화 성공률을 보였다. 반면 17°C, 20°C에서는 얼음팩에 의해 수온이 낮아져, 새끼의 움직임이 현저히 둔화됨을 보였으며, 이로 인해 매우 낮은 부화율을 보였다. 새끼의 난의 형태는 불투명한 난원형난이었으며, 유생이 부화에 성공하는데 약 2~3일의 시간이 소요되는 것으로 나타났으며 이는 완전한 성체의 형태를 보였다[그림 3.4.54]. 부화 성공률은 평균 60% 전후로 나타났다. 부화가 일어난 후 성체는 탈피하여 표면이 더욱 매끄럽게 나타난다.



[그림 3.4.53] 수온별 부화율



[그림 3.4.54] 갓부화한 새뱅이의 모습

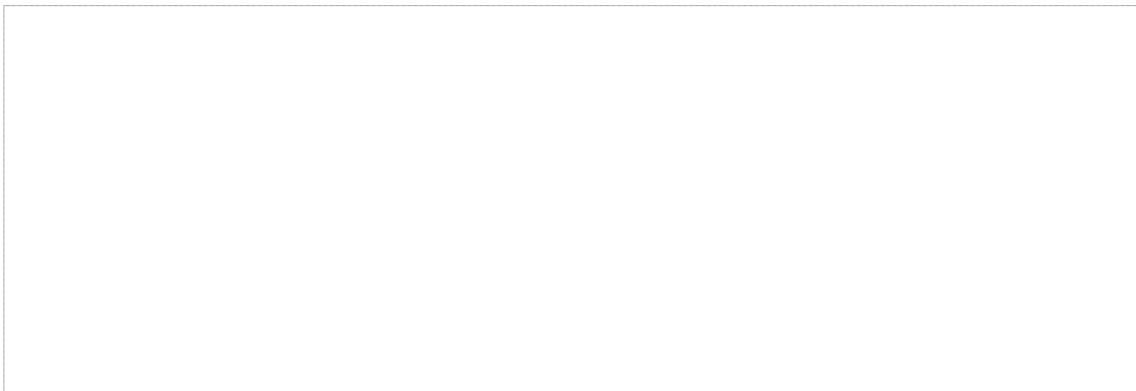
(3) 미소서식지 적용 실험

2008년 10월 2일부터 10월 25일까지 24일에 걸쳐 대전 대덕구 범동에 위치한 산중골 방죽 저수지에 미소서식지 적용 실험을 실시하였다. 미소서식지의 규모를 $0.35\text{ m} \times 0.50\text{ m} \times 0.40\text{ m}$ 의 직육면체 형태의 플라스틱 소재를 이용하였으며(부피 약 40 L), 현장과 조건을 동일하게 하기 위하여 저수지내에 흙과 모래를 약 5 cm 정도 깔고 자연광이 잘 드는 수변에 메소코즘을 설치하여 실험하였다[그림 3.4.55]. 아무런 처리하지 않은 대조군과 첫번째 실험군(T1)에는 새뱅이(*Caridina denticulata*) 200개체, 두번째 실험군(T2)에는 새뱅이 200개체와 동자개(*Pseudobagrus fulvidraco*) 1개체, 세번째 실험군(T3)에는 새뱅이 200개체와 동자개(*Pseudobagrus fulvidraco*) 2개체를 각각 투입하였다. 생물 조절 후보종이 새뱅이의 밀도는 단위 리터당 5개체를 투입하여 최적의 효과를 나타내고자 하였다.

수질은 다항목 수질측정기(YSI 6600 SONDE)를 이용하여 이화학적 수질을 측정하였으며, 남조류 측정기(HACH-MS5)를 이용하여 단위면적당 남조류 변화 양상을 분석하였다. 대조군과 대비하여 각각의 처리군을 비교하여보았을 때 새뱅이만 투입한 처리군 1에서 가장 낮은 조류 증가율을 보였다. 남조류 역시 처리군 1에서 가장 낮게 나타나, 새뱅이에 의한 조류 제어능이 나타남을 알 수 있었다. 반면 동자개를 처리한 처리군 2와 처리군의 3의 경우 동자개의 새뱅이 섭식에 의한 영향과 어류의 분비물과 배설물에 의한 조류 저감효과가 낮아지는 것으로 나타났다[그림 3.4.56].



[그림 3.4.55] 법동 저수지에서의 소규모 미소서식지 실험(Vol.: 40L)



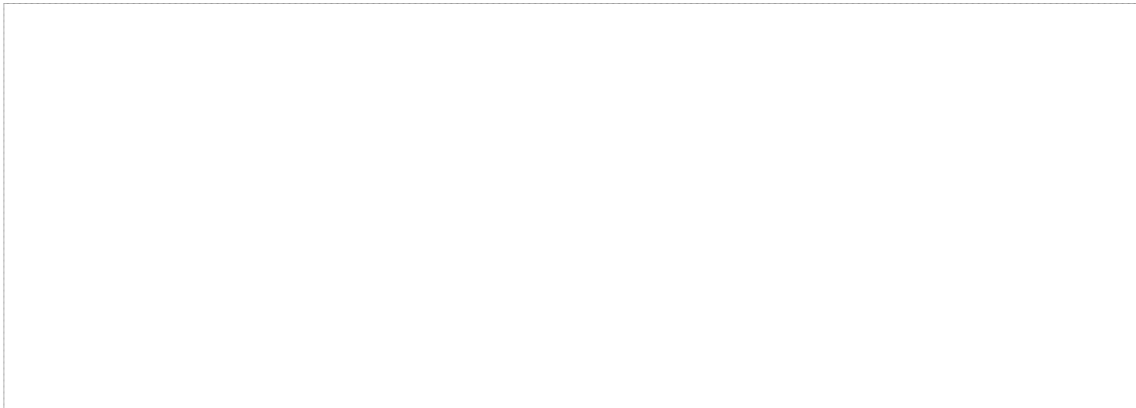
[그림 3.4.56] Chl-*a* 및 남조류 변화 양상

2008년 10월 2일부터 10월 25일까지 24일에 걸쳐 대전 대덕구 법동에 위치한 산중골 방죽 저수지에 중규모 미소서식지 적용 실험을 실시하였다. 미소서식지의 규모를 위 지름 53 m, 아래 42 m 높이 62 m의 원뿔형태의 플라스틱 소재를 이용하였으며(부피 약 100 L), 현장과 조건을 동일하게 하기 위하여 저수지내에 흙과 모래를 약 10 cm 정도 깔고 자연광이 잘드는 수면에 메소코즘을 설치하여 실험하였다[그림 3.4.57]. 아무런 처리하지 않은 대조군(Control) 과 첫번째 실험군(T1)에는 새뱅이(*Caridina denticulata*) 500개체, 두번째 실험군(T2)에는 새뱅이 500개체와 동자개(*Pseudobagrus fulvidraco*) 3개체, 세번째 실험군(T3)에는 새뱅이 500개체와 동자개(*Pseudobagrus fulvidraco*) 5개체를 각각 투입하였다. 생물 조절 후보종이 새뱅이의 밀도는 단위 리터당 5개체를 투입하여 최적의 효과를 나타내고자 하였다.



[그림 3.4.57] 법동 저수지에서의 소규모 미소서식지 실험(Vol.: 100L)

수질은 다항목 수질측정기(YSI 6600 SONDE)를 이용하여 이화학적 수질을 측정하였으며, 남조류 측정기(HACH-MS5)를 이용하여 단위면적당 남조류 변화 양상을 분석하였다. 대조군과 대비하여 각각의 처리군을 비교하여보았을 때 모든 처리군에서 Chl-*a*가 증가하는 양상을 보였으나, 새뱅이만 투여한 처리군 1에서 가장 낮은 Chl-*a* 수치를 보였다. 이는 남조류 변화에서도 동일한 결과를 보였는데, 소규모 메소코즘과 마찬가지로 동자개의 새뱅이 섭식에 의한 영향과 어류의 분비물과 배설물에 의한 조류 저감효과가 낮아지는 것으로 나타났다[그림 3.4.60].

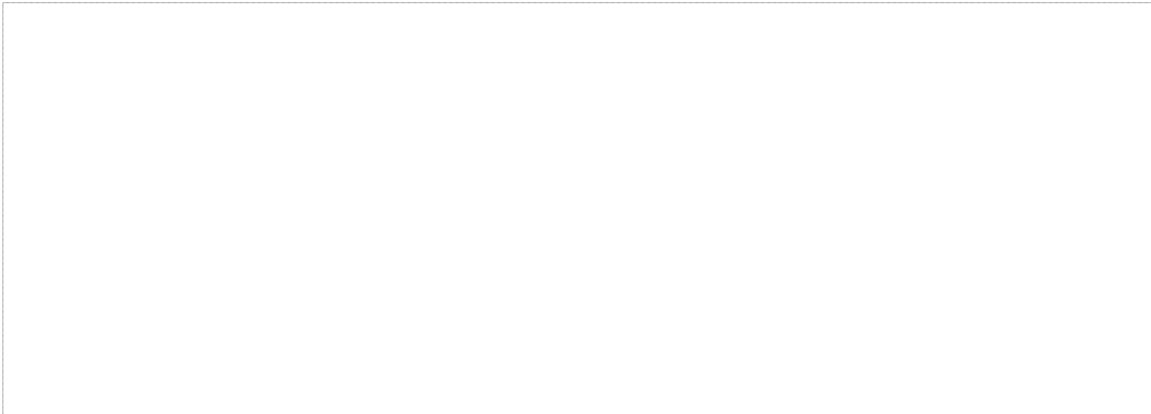


[그림 3.4.58] Chl-*a* 및 남조류 변화 양상

라. 석문단지 현장 적용 실험

(1) 석문단지 예비 실험

2008년 10월 7일부터 10월 13일까지 6일동안 석문단지 현장 적용 실험에 앞서 석문단지 원수에서 생물 조절 후보종의 생존 여부 및 조류 제어능 효과를 확인하였다. 아무런 처리하지 않은 대조군과 새뱅이 72개체를 투여한 처리군 1(T1), 새뱅이 72개체와 현장 sediment를 함께 투여한 처리군(T2), 새뱅이 72개체와 동자개 2개체 그리고 현장 sediment를 함께 투여한 처리군(T3)에 전체 물의 부피를 약 12L로 맞추어 매일 동일한 시간에 이화학적 수질 데이터를 측정하였다. 이 때 새뱅이는 단위 리터당 6개체씩 투여하여 실험을 실시하였다. 그 결과 새뱅이와 동자개의 사망은 전혀 나타나지 않았으며, 실험기간동안 여전히 조류제거 효과가 나타나고 있음을 보였다[그림 3.4.59].



[그림 3.4.59] 석문단지 Chl-*a* 및 남조류 변화 예비실험 결과

(2) 복합적 생물 처리를 통한 현장 적용 실험

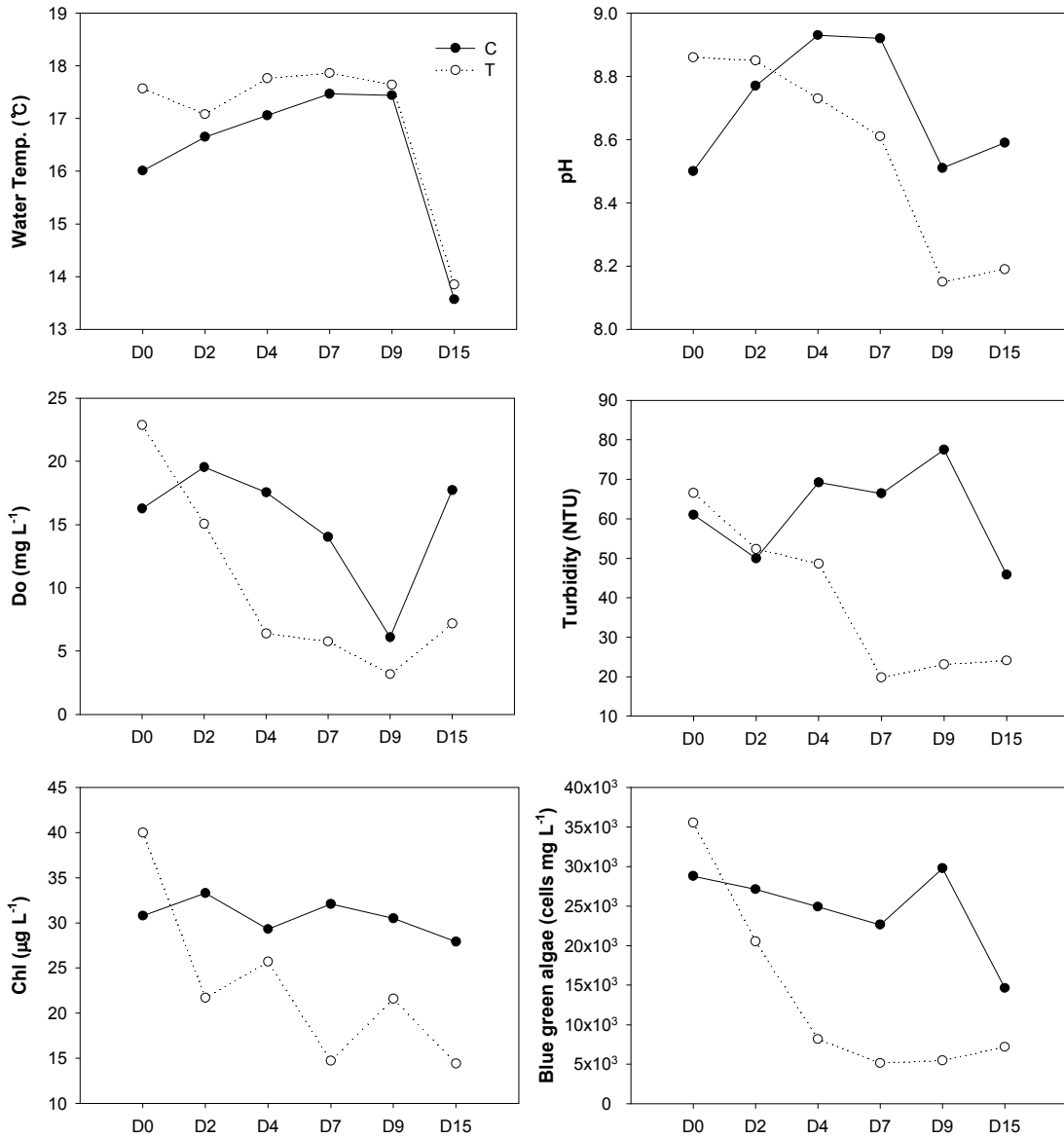
2008년 10월 14일부터 10월 29일간 충남 당진군에 위치한 석문단지 제2시험포(침강지)에서 현장 적용 실험을 실시하였다. 생물조절 후보종인 새뱅이와 이를 섭식하는 Top-carnivore인 동자개 그리고 기타 다른 후보종인 말조개, 그리고 영양염을 직접적으로 uptake하는 인공식물섬을 이용하여 복합적인 생물 적용 및 추적자를 실험을 현장에서 실시하였다. 또한 본 실험은 아무처리 하지 않은 대조군과 대별하여 실험을 실시하였다. 연구기간 중 10월 14일, 16일, 18일 21일, 23일, 29일 6회에 걸쳐 매 동일한 시간(AM 11:00)에 다항목 수질 측정기(YSI 6600 Sonde)와 남조류 측정기(HACH-MS5)를 이용하여 이화학적수질을 분석하였다[그림 3.4.60].



[그림 3.4.60] 석문단지 실험 현장

용존산소의 경우 말조개, 새뱅이, 동자개의 호흡에 의한 영향으로 점차 감소되는 경향을 보였다. 탁도는 반면 초기에 약 60 NTU에서 실험 종료일인 16일 후에는 약 25 NTU로 나타나 수질향상에 기여한 것으로 나타났다. 또한 Chl-*a*는 초기 농도 약 $40 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 최종 일에는 $15 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났으며, 남조류 역시 초기 농도 약 $38,000 \text{ cell mg L}^{-1}$ 에서 최대

5,000 cells mg L⁻¹로 감소하는 경향을 보였다[그림 3.4.61]. 이는 복합적으로 투여한 인공식 물섬과 새뱅이, 말조개 등의 섭식 및 영양염 흡수로 인한 것으로 사료되었으며, 이들을 개별적으로 사용하여 조류 제거능을 평가 할 때보다 복합적으로 적용하였을 때 보다 더 탁월한 효과를 보였다.



[그림 3.4.61] 석문단지에서 메소코즘 현장 실험기간동안 이화학적수질 변화 특성

제 5 절

-
-
- 생태정보학적 기법을 이용한 저수지 수질관리
- 생태모델 개발
-
-
-

제 5 절 생태정보학적 기법을 이용한 저수지 수질관리 생태모델 개발

1. 수질 및 생물자료의 생태정보화

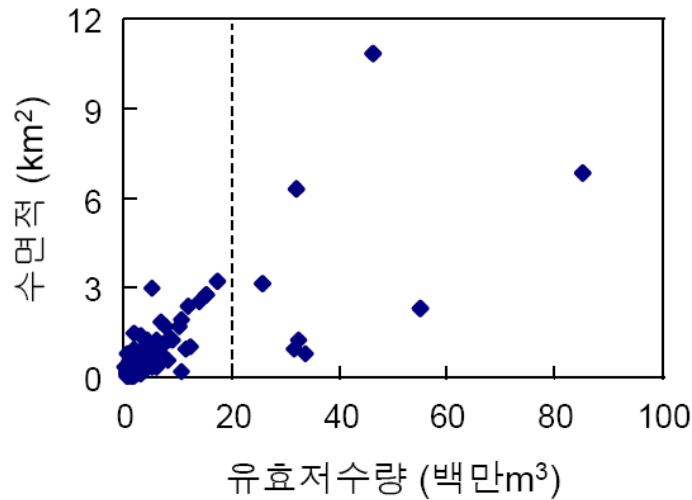
가. 저수지 수질자료

농업용 저수지의 수질을 나타내 물리, 화학, 수문학적 자료는 문헌, 연구보고서, 농림부 및 환경부에서 운용하는 전국호소수질측정망 자료 등을 통하여 많은 자료를 수집하였다. 농림부 및 환경부 전국호소수질측정망 자료는 전국 670여개 조사지점에서 1989년부터 2008년까지 19년간 조사된 자료이다. 각 시설물의 유역면적은 1 km² 이하인 비교적 작은 경우부터 23,800 km² 이상인 매우 큰 것까지 다양하였다. 또한 수면적은 2~335 km²의 분포를 보였다. 각 조사저수지에서는 전국수질측정망 자료의 생물, 물리, 화학적 특성뿐만 아니라 수문학적 특성 등도 기록되었다. [표 3.5.1]은 수질 측정망 자료의 자료 개수와 각 인자별 유효한 자료비율을 나타낸다. 수질 측정망 자료 중 수면적 0.1 km² 이상으로 시설물이 저수지라고 불리어지는 시설물만을 선정하여 농업용저수지로 선택하였다. 특히 시설물의 규모가 매우 큰 댐 등은 제외하였다. [그림 3.5.1]은 농업용저수지의 유효저수량 및 수면적 간의 관계를 나타내 주는 것으로, 그림에서 볼 수 있듯이 유효저수량이 20,000,000 m³ 이상 되는 곳에서는 수면적과의 관계가 낮아지며 다른 일반적인 저수지와 성질이 많이 달라진다는 것을 보여주고 있다. 따라서 유효면적 20,000,000 m³ 이하의 저수지를 선정하여 농업용저수지 수질유형화 모델 개발에 이용가능하게 하였다.

한편 수집된 각 농업용저수지의 위치는 행정구역별로 구분이 되어 있어 이를 행정적으로 관리하는 데는 매우 유용하다. 그러나 저수지의 지리정보가 수치화되어 있지 않았다. 이는 각 저수지들이 위치한 고도 등을 포함하는 지리적 특성, 저수지 형태적 특성 등과 연계된 수질관리에는 어려움을 초래할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 앞서 선정된 농업용저수지 시설물의 위치를 위도, 경도(GPS 좌표)로 나타낼 수 있도록 측정하였다. 좌표 측정은 1:50,000 지도, GPS 프로그램(알맵 Max 2.5, 구글어스) 등을 이용하였다. 일부의 경우 문헌(기록)상의 시설물 명이 지도상에 표기되지 않는 경우는 관련 문헌자료, 행정구역의 관할 관청 문의 및 현지답사 등을 통하여 확인하였다. 또한 GPS를 통하여 확인된 저수지는 시설물의 제방이 있는 위치의 고도, 저수지 둘레, 그리고 저수지의 길이 등을 GPS 프로그램을 이용하여 측정하였다. 고도는 지도상에서 저수지제방의 중앙점을 찍어서 측정하였으며, 저수지 둘레 길이는 GPS 상에 나타나는 저수지의 형태를 추적하여 측정하였으며, 저수지 길이는 제방으로부터 가장 멀리 떨어져 있는 지점까지를 측정하였다. 이들 자료는 농업용저수지 수질 특성 유형화에 이용될 수 있게 하였다.

[표 3.5.1] 전국수질측정망 자료 중 각 인자의 유효 자료 비

인자	자료개수	비율(%)
출처	23,000	
시설명		
자료년도		
측정원		
위치		
유역면적	19,564	85.1
유효저수량	20,979	91.2
수면적	21,532	93.6
총저수량	11,458	49.8
제당높이	20,899	90.9
제당길이	20,898	90.9
수온(°C)	22,754	98.9
pH	21,961	95.5
전기전도도	18,305	79.6
투명도	15,991	69.5
DO(mg L ⁻¹)	22,854	99.4
BOD(mg L ⁻¹)	18,731	81.4
COD(mg L ⁻¹)	22,873	99.4
SS(mg L ⁻¹)	22,625	98.4
T-N(mg L ⁻¹)	22,725	98.8
T-P(mg L ⁻¹)	22,363	97.2
Chl-a	20,020	87.0
NH ₃ -N	11,968	52.0
NO ₃ -N	12,639	55.0
PO ₄ -P	3,557	15.5
총대장균군수	19,429	84.5
분원성대장균군수	10,140	44.1



[그림 3.5.1] 농업용저수지의 유효저수량 및 수면적 간의 관계

한편 전국수질 측정망 자료 외에 저수지를 포함하는 전국 내륙습지 자연환경조사(환경부 국립환경연구원 2001~2004)를 통하여 자료를 수집하였다. 그리고 본 연구의 시험저수지인 신구저수지에서 수행된 이전 연구결과보고서 및 연구 자료를 통하여 2002년 11월부터 2004년 2월까지 조사된 자료를 수집하였다(김과 황, 2004; 김 등, 2005; Kim *et al.*, 2007). 본 자료는 신구저수지에서 월 1~2회 조사가 이루어졌으며, 수심에 따라 상, 중, 하로 나누어 수심, 온도, BOD, COD, TN, TP 등 21개 물리, 화학적 수질인자가 기록되었다. 수집된 자료는 MS Excel로 정리하여 분석에 이용될 수 있도록 하였다.

나. 저수지 생물자료

본 연구과제는 농업용저수지 생태계의 다양한 생물들 간의 상호작용을 이용하여 저수지의 수질을 개선하고자 하는 것이며, 저수지의 물리, 화학적 수질인자 뿐만 아니라 저수지 내의 생물 군집구성을 탐구하는 것 또한 매우 중요한 부분이다. 따라서 본 연구에서는 저수지내의 생물먹이망 및 생물자원의 구조파악을 위하여 국내외 농업용저수지에서 조사된 생물자료를 연구보고서 및 연구논문 등을 토대로 종합하여 정보화하였다.

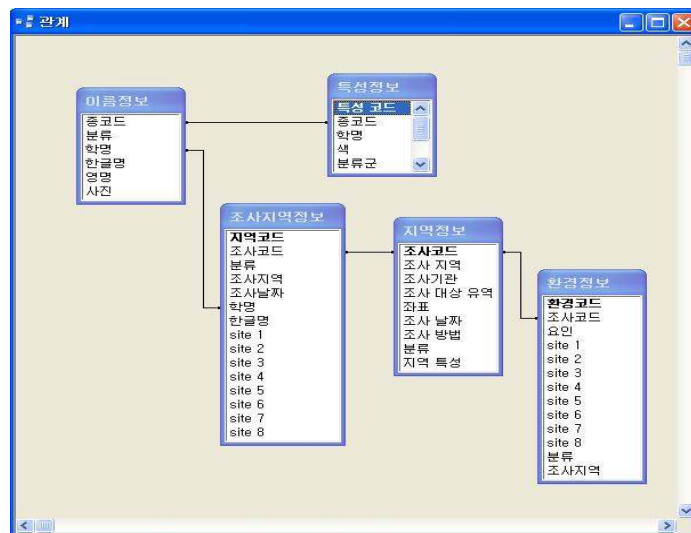
우리나라 주요 저수지에서 서식하는 식물플랑크톤은 전국 내륙습지 자연환경조사(환경부 국립환경연구원, 2001~2004) 등을 활용하여 수집되었으며, 조사지역 및 지점, 조사일시, 출현 생물종 등을 기록하였다. 그리고 본 연구과제의 시험 저수지인 신구저수지에서 수행된 이전 연구결과보고서(농림부, 2005) 및 연구자료(김과 황, 2004; 김 등, 2005; Kim *et al.*, 2007)를 통하여 2002년 11월부터 2004년 2월까지 조사된 자료를 수집하였다. 식물플랑크톤은 월 1~2회 야외조사가 수행되었으며, 저수지의 수심에 따라 상, 중, 하로 나누어 각각 조사가 이루어져졌다. 분류군 별로 녹조류, 규조류, 편모조류, 남조류 등에 대하여 밀도뿐만 아니라 탄소생체량으로도 자료가 환산되어 있다. [그림 3.5.2]는 신구저수지에서 2002년 11월부터 2004년 2월까지 식물플랑크톤의 탄소생체량 변동을 나타내 주고 있다. 전체적으로 편모조류가 높은 밀도를 보이며 2003년 여름에는 남조류가 가장 높게 나타났다는 것을 보여주고 있다. 출현 종은 녹조류가 36종으로 가장 많았으며, 규조류는 12종, 편모조류는 3종, 그리고 남조류는 15종이 출현하였다. 한편 물리, 화학적 수질 자료, 식물플랑크톤 군집자료 뿐만 아니라 신구저수지에서는 동물플랑크톤에 대하여도 식물플랑크톤 조사 때 같이 수행되어 생물먹이망 및 수질인자 간의 특성을 이해하는데 효과적으로 이용될 수 있을 것이다.

수집된 자료는 MS Excel로 정리하였으며, 저수지에 따른 식물플랑크톤 밀도는 database 응용프로그램인 MS Access를 이용하여 조사지역의 환경특성, 출현종 및 각 종의 학명 등 분류학적 특성, 형태적 특징, 생태적 특징, 영상 등을 정리하여 자료화 하였다. 생물종 정보는 수자원연구소(2000), 정준(1993)을 참고하였다.



[그림 3.5.2] 신구저수지에서 식물플랑크톤의 탄소생체량 변동(2002년 11월~2004년 2월)

[그림 3.5.3]은 MS Access database에 입력된 입력 항목 및 각 특성들 간의 관계를 나타내 주고 있다. 이름(종)정보, 종의 특성정보, 조사 지역(지점) 및 일자에 대한 정보, 조사지역의 지리정보, 그리고 각 조사에 대한 물리, 화학적 수질 정보 등으로 구성되어 있다. 기본적으로 이름정보에서는 특성정보를 하위 폼으로 가지기 때문에 동일한 종코드를 사용해 연결하였으며, 지역정보를 통해 보여지는 조사지역정보와 환경정보는 조사코드를 이용하여 관계를 형성하였다. 또한 조사지역정보에서 조사된 개체의 학명을 선택시 종정보에서 검색이 됨을 나타내기 위해 학명을 이용하여 관계를 형성하였다. [그림 3.5.4]는 분류군별 출현종과 코드 등에 대한 입력특성을 보여준다.



[그림 3.5.3] Access database에서 관계도

종코드	분류	학명	한글명	영명	그림
40	algae	Fragilaria rumpens			비트맵 이미지
41	algae	Fragilaria construens			비트맵 이미지
42	algae	Tabellaria fenestrata			비트맵 이미지
43	algae	Tabellaria flocculosa			비트맵 이미지
44	algae	Asterionella formosa			비트맵 이미지
45	algae	Actinastrum hantzschii			비트맵 이미지
46	algae	Actinastrum hantzschii var. fluviatile			비트맵 이미지
47	algae	Trachelomonas robusta			비트맵 이미지
48	algae	Trachelomonas sp.			비트맵 이미지
49	algae	Cyclotella asterocostata			비트맵 이미지
50	algae	Cyclotella stelligera			비트맵 이미지
51	algae	Stephanodiscus hantzschii			비트맵 이미지
52	algae	Golenkinia radiata			비트맵 이미지
53	algae	Micractinium bomhemienae			비트맵 이미지
54	algae	Micractinium pusillum			비트맵 이미지
55	algae	Westella botryoides			비트맵 이미지
56	algae	Coelastrum cambicum			비트맵 이미지
57	algae	Coelastrum polychordum			비트맵 이미지
58	algae	Coelastrum sphaericum			비트맵 이미지
59	algae	Eudotina elegans			비트맵 이미지
60	algae	Eudotina unioocca			비트맵 이미지
61	algae	Pandorina monum			비트맵 이미지
62	algae	Volvox prolificus			비트맵 이미지
63	algae	Volvox testis			비트맵 이미지
64	algae	Dictyosphaerium pulchellum			비트맵 이미지
65	algae	Dictyosphaerium ehrenbergianum			비트맵 이미지
66	algae	Chlorococcum humicola			비트맵 이미지
67	algae	Botryococcus braunii			비트맵 이미지
68	algae	Woronichinia naegeliana			비트맵 이미지
69	algae	Microcystis smithii			비트맵 이미지
70	algae	Microcystis aeruginosa			비트맵 이미지
71	algae	Microcystis wesenbergii			비트맵 이미지
72	algae	Microcystis ichthyoblabe			비트맵 이미지
73	algae	Anabaena spiroides var. crassa			비트맵 이미지
74	algae	Anabaena planctonica			비트맵 이미지
75	algae	Acanthoceras magdeburgens			비트맵 이미지
76	algae	Diploleis sp.			비트맵 이미지
77	algae	Cymbella tumida			비트맵 이미지
78	algae	Cymbella sp.			비트맵 이미지
79	algae	Gomphonema gracile			비트맵 이미지
80	algae	Gomphonema pseudoaugur			비트맵 이미지
81	algae	Gomphonema truncatum			비트맵 이미지
82	algae	Gomphonema sp.			비트맵 이미지
83	algae	Suriella linearis			비트맵 이미지
84	algae	Suriella sp.			비트맵 이미지
85	algae	Cosmarium obtusatum			비트맵 이미지
86	algae	Cosmarium undulatum			비트맵 이미지

[그림 3.5.4] MS Access에서 분류군별 출현종 코드 예

[그림 3.5.5]는 종 정보의 입력 형태 및 구성 예를 보여주는 것으로서 두 테이블을 상하위 폼으로 연결시켜 만든 종정보 폼이다. 이러한 형태는 보고서형식에서 제공되는 틀이 되며 검색 프로그램의 메인을 형성시 실질적으로 나타나는 주요한 형태이다.

The screenshot shows a Microsoft Access form titled '종정보' (Species Information). The form is divided into several sections:

- 분류 (Classification):** Includes fields for '학명' (Scientific Name: *Aulosira ambigua*), '한글명' (Korean Name: *Aulosira ambigua*), and '영명' (English Name).
- 종상세정보 (Detailed Species Information):** A large text area for detailed description.
- 색 (Color):** A dropdown menu set to '황갈색' (Olive-brown).
- 분류군 (Taxonomy):** A tree view showing the classification: Class: Bacillariophyceae, Order: Centrales, Family: Thalassiosiraaceae.
- 형태적 특징 (Morphological Characteristics):** A list of characteristics such as '크기: 4-17μm, 길이: 5-13μm' and '세포벽: 두꺼운 두꺼운 세포벽이 구획적으로 확립되어 있음'.
- 생태적 특징 (Ecological Characteristics):** A list of ecological traits such as '수중에서 발견되는 편모조류' and '수중에서 발견되는 편모조류'.
- 참고 문헌 (References):** A list of scientific references including 'Coc, 1986' and 'Round et al., 1990'.

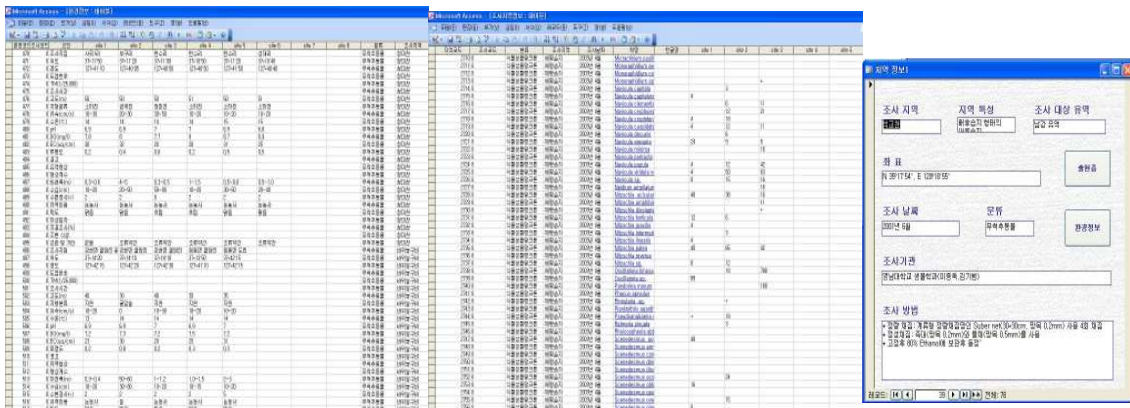
[그림 3.5.5] MS Access에서 종 정보의 입력형태 및 구성 예

3장 5절 생태정보학적 기법을 이용한 저수지 수질관리 생태모델 개발

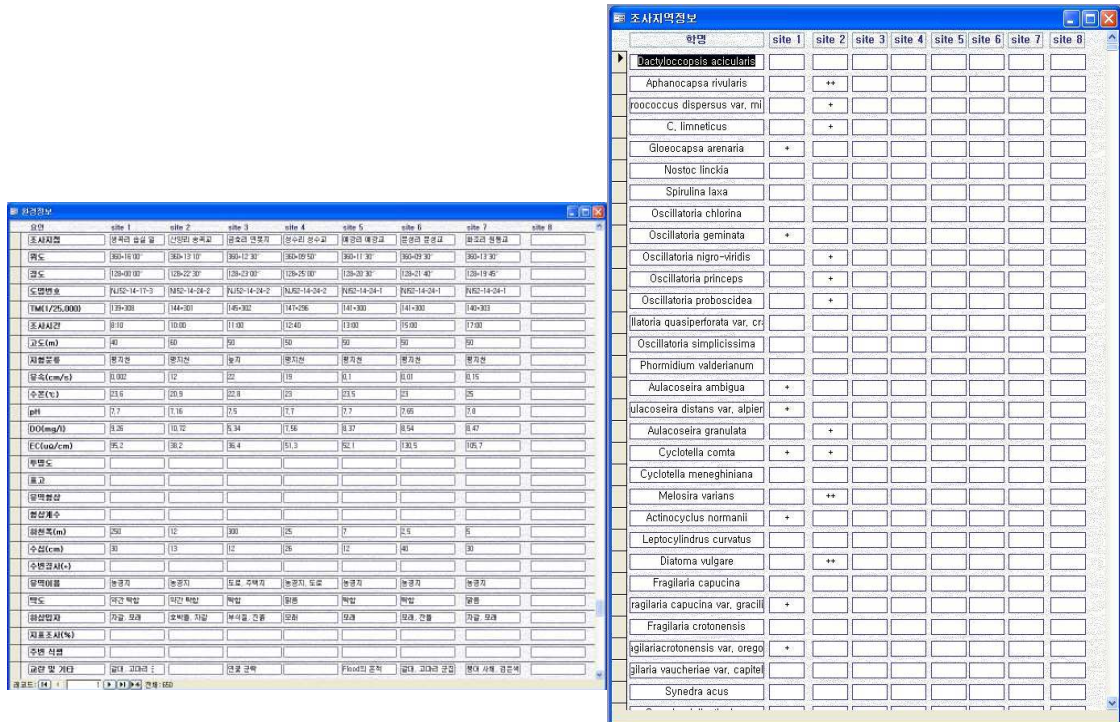
조사기관	조사 지역	조사기관	조사 대상 구역	좌표	조사 날짜	조사 방법	분류	지역 특성
1	진촌늪	경북대학교(간한 수.이경락)	낙동강 유역		2003년 5월	<ul style="list-style-type: none"> • 정성분석 : 용량크로믹(Rhigosa N00025)로 포획수 채집 • 정량분석 : 1용 플러에틸렌 병 이용(수심 30cm에서 채수) • 단위 : 개체수/㎡ 	식물성플랑크톤	자연늪
2	진촌늪	경북대학교(간한 수.이경락)	낙동강 유역		2003년 8월	<ul style="list-style-type: none"> • 정성분석 : 용량크로믹(Rhigosa N00025)로 포획수 채집 • 정량분석 : 1용 플러에틸렌 병 이용(수심 30cm에서 채수) • 단위 : 개체수/㎡ 	식물성플랑크톤	자연늪
3	진촌늪	경북대학교(간한 수.이경락)	낙동강 유역		2003년 10월	<ul style="list-style-type: none"> • 정성분석 : 용량크로믹(Rhigosa N00025)로 포획수 채집 • 정량분석 : 1용 플러에틸렌 병 이용(수심 30cm에서 채수) • 단위 : 개체수/㎡ 	식물성플랑크톤	자연늪
4	황정습지	경북대학교(간한 수.이경락)	낙동강 유역		2003년 5월	<ul style="list-style-type: none"> • 정성분석 : 용량크로믹(Rhigosa N00025)로 포획수 채집 • 정량분석 : 1용 플러에틸렌 병 이용(수심 30cm에서 채수) • 단위 : 개체수/㎡ 	식물성플랑크톤	자연늪
5	황정습지	경북대학교(간한 수.이경락)	낙동강 유역		2003년 8월	<ul style="list-style-type: none"> • 정성분석 : 용량크로믹(Rhigosa N00025)로 포획수 채집 • 정량분석 : 1용 플러에틸렌 병 이용(수심 30cm에서 채수) • 단위 : 개체수/㎡ 	식물성플랑크톤	자연늪
6	황정습지	경북대학교(간한 수.이경락)	낙동강 유역		2003년 10월	<ul style="list-style-type: none"> • 정성분석 : 용량크로믹(Rhigosa N00025)로 포획수 채집 • 정량분석 : 1용 플러에틸렌 병 이용(수심 30cm에서 채수) • 단위 : 개체수/㎡ 	식물성플랑크톤	자연늪
7	해평습지	대구대학교(이정호.공성현)	감연 유역		2003년 4월	<ul style="list-style-type: none"> • 정량조사 : 1L용 플라스틱 채수병으로 채집(수심 10~20cm) • 정성 조사 : 용량크로믹(N00025)로 채수한 시료 + 정성시료 • 분석도구(분석기구) : 울, spind, 핀셋을 이용하여 채집 • 단위 : 개체수/㎡ 	식물성플랑크톤	하천습지
8	해평습지	대구대학교(이정호.공성현)	감연 유역		2003년 6월	<ul style="list-style-type: none"> • 정량조사 : 1L용 플라스틱 채수병으로 채집(수심 10~20cm) • 정성 조사 : 용량크로믹(N00025)로 채수한 시료 + 정성시료 • 분석도구(분석기구) : 울, spind, 핀셋을 이용하여 채집 • 단위 : 개체수/㎡ 	식물성플랑크톤	하천습지

[그림 3.5.6] MS Access에서 지역정보를 나타내 주는 테이블 예

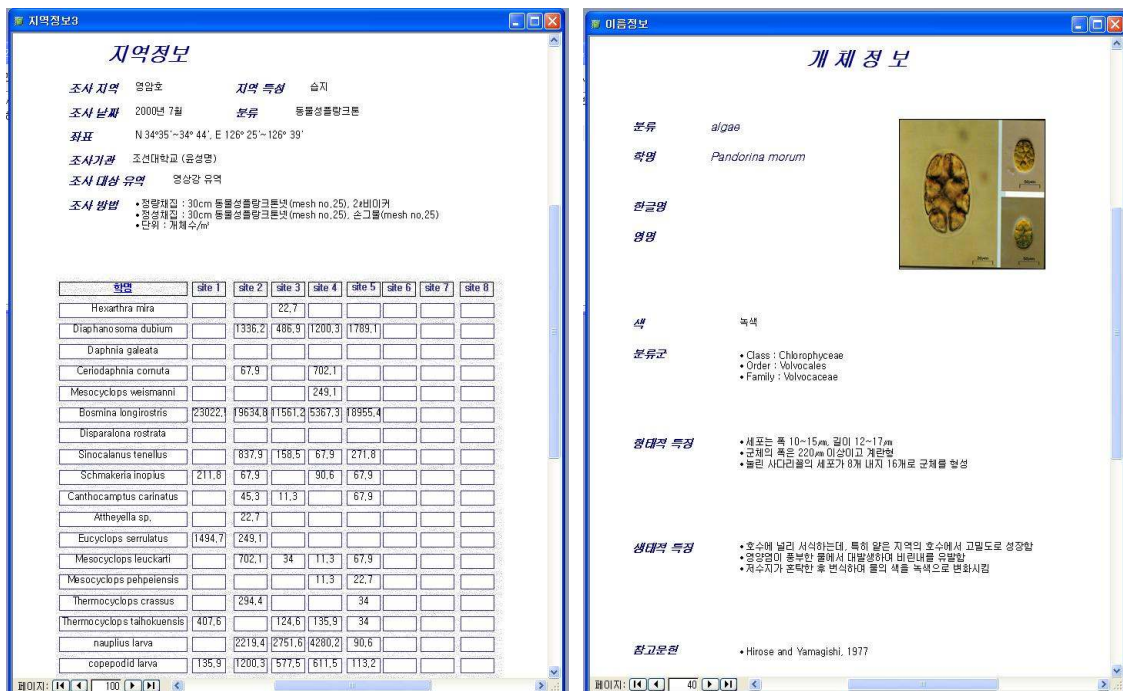
[그림 3.5.6]은 Access에서 지역정보를 나타내 주는 테이블 예를 보여주는 것으로, 조사지역, 조사기관, 조사일시, 지역, 좌표, 방법, 분류군, 특성 등에 대한 정보를 제공한다. 그리고 환경정보와 조사지역정보(출현 종)를 연결시켜 폼을 형성하게 된다. [그림 3.5.7]은 지역정보와 연결되는 환경, 수질정보와 조사지역정보, 그리고 지역정보 입력 폼의 예를 보여주고 있다. 지역정보 폼은 지역정보 테이블을 기초로 하고 있다. 출현종과 환경정보를 클릭할 경우 각각의 지역에서 조사된 출현종과 그 지역의 환경정보 폼을 열게 된다. [그림 3.5.8]은 환경정보와 출현종에 관한 정보를 담고 있는 조사지역정보 폼의 예이며, [그림 3.5.9]는 지역정보 및 종 정보를 예를 보여 준다. 앞의 지역정보 폼의 명령단추를 선택할 경우 이러한 형태의 지역정보 폼이 열리게 되며, 출현종을 선택할 경우 특정종에 대한 정보가 출력될 수 있도록 연결되어 있다.



[그림 3.5.7] Access의 환경정보 및 조사지역정보, 그리고 지역정보 입력 form 예



[그림 3.5.8] Access 환경정보와 출현종에 관한 조사지역정보 form 예



[그림 3.5.9] Access 지역정보 및 개체 정보 예

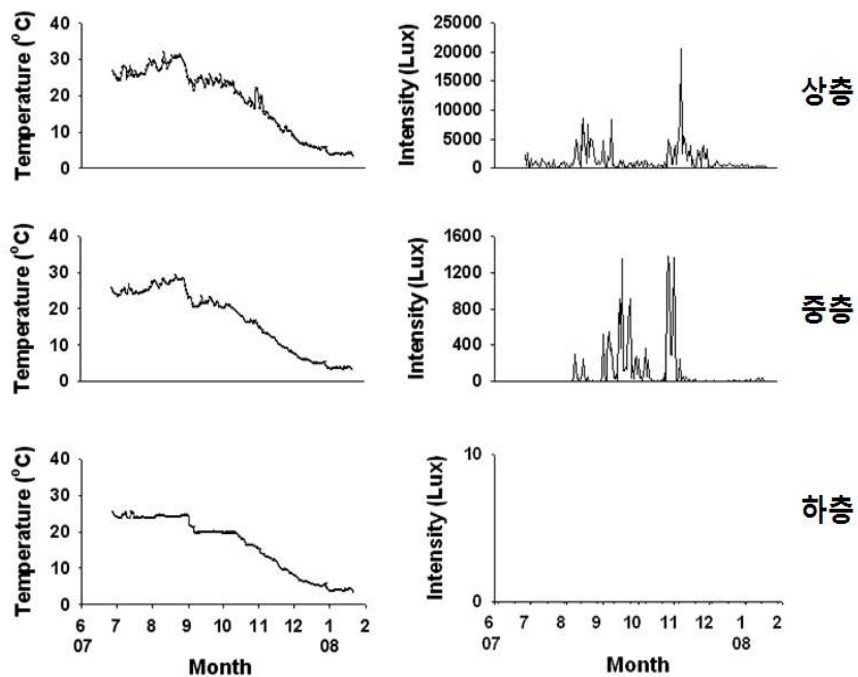
다. 환경변화 모니터링

(1) 시험저수지 data logger 설치

충남 보령시에 위치한 본 연구과제 시험저수지인 신구저수지 환경변화 모니터링을 위해 수면에서 2 m 간격으로 수층을 나누고 각 층별로 온도와 광량의 변화를 연속적으로 측정하였다. 이를 위하여 Onset Computer Corporation의 HOBO Pendant Temperature/Light data logger [그림 3.5.10]을 설치하였다. 장비는 2007년 6월 18일에 설치하였으며, 측정은 매 30분마다 실시되게 하여 연속적으로 환경변화를 측정하였다. Data logger는 온도: $-20^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ (정확도: 25°C 에서 $\pm 0.47^{\circ}\text{C}$), 광량: $0 \sim 320,000 \text{ lux}$ (정확도: 900 nm의 빛의 파장에 가장 높은 반응)의 측정범위를 가지며, 30 m에서 $-20^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 의 범위로 측정이 가능하다.



[그림 3.5.10] HOBO pendant Temperature/Light Data logger



[그림 3.5.11] 신구저수지의 깊이에 따른 온도 및 광량 변화

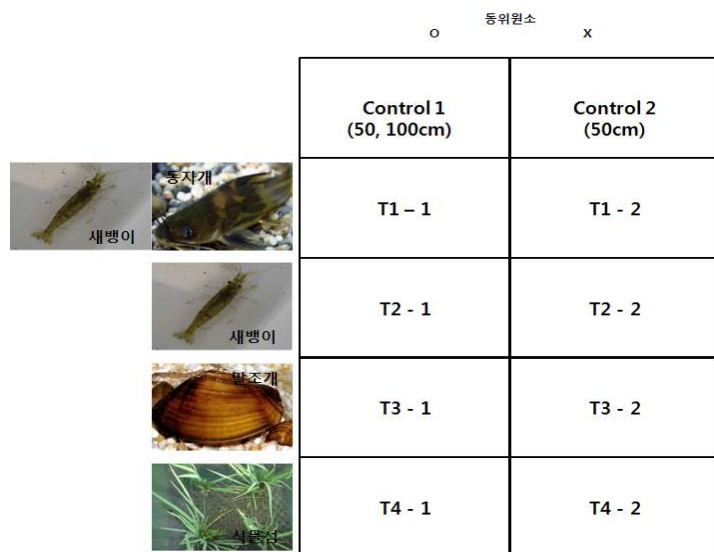
[그림 3.5.11]은 시험저수지인 신구저수지에서 깊이에 따른 온도 및 광량의 변화를 Hobo data logger를 이용하여 측정한 결과이다. 전체적으로 상층에서 하층보다 온도가 다소 높은 것을 보여주고 있다. 여름철 이후 9월에 온도가 크게 감소하였으며 10월 이후에는 온도가 급격히 감소하여 1월에는 5°C 이하로 유지되고 있는 것을 볼 수 있다. 한편 광량은 상층에서는 8월, 9월에 다소 높은 값을 보이기도 하지만 11월에 가장 높은 값을 보였는데 이는 녹조발생 등이 일어나지 않아 물이 맑아짐에 따라 광투과량이 증가하였기 때문으로 보인다. 중층에서는 광량이 크게 감소하였으며, 하층에서는 빛이 거의 투과되지 않는 것으로 나타났다.

(2) 메소코즘 data logger 설치

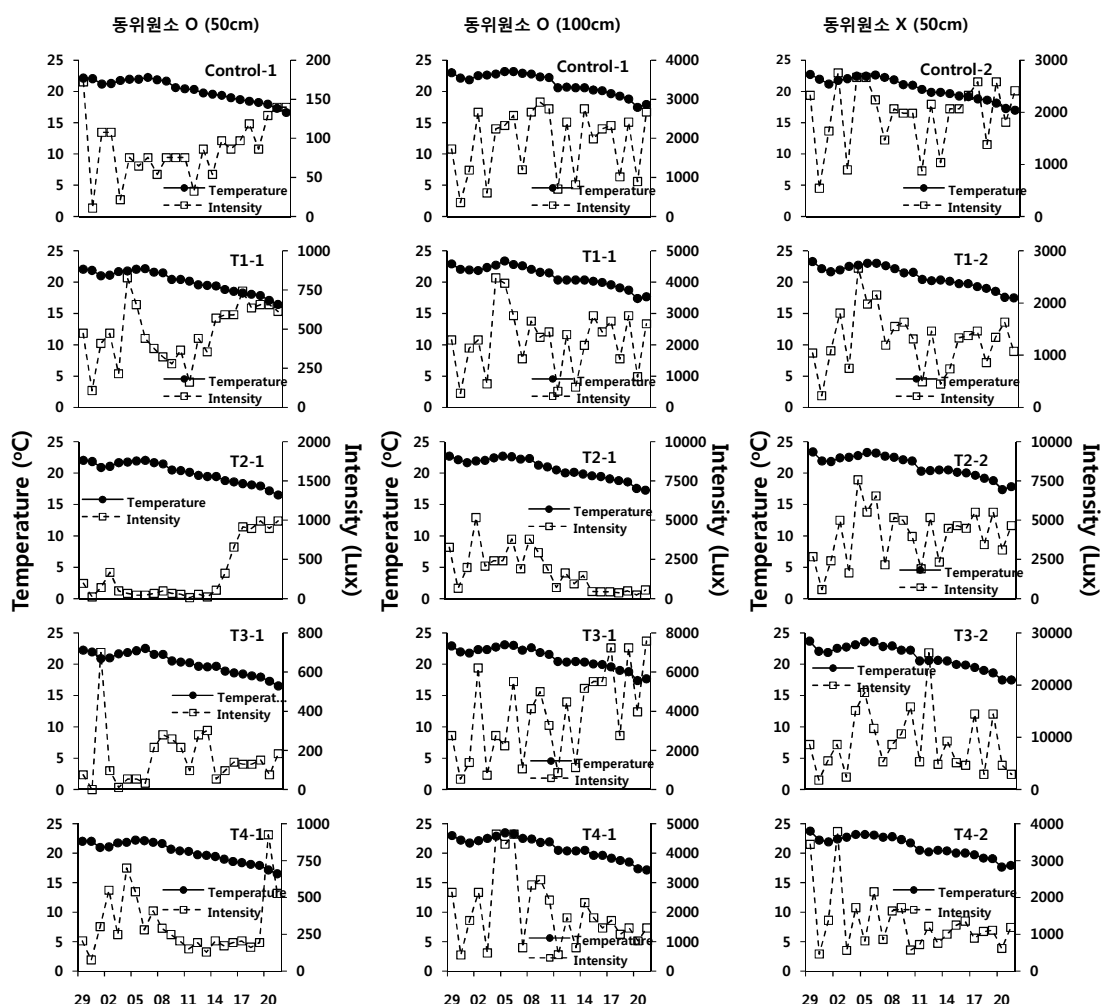
메소코즘이 설치된 신구저수지에서 2007년 9월 29일부터 2007년 10월 22일까지 5분 간격으로 메소코즘 내 각 실험 조건별로 광량과 온도 변화를 data logger를 이용하여 측정하였다. data logger는 앞서 설명된 [그림 3.5.10]과 같은 것이다. data logger는 동위원소를 처리한 실험군에서는 수표면으로부터 50 cm와 100 cm 깊이에 각각 data logger를 설치하였으며, 동위원소를 처리하지 않은 곳에는 수표면으로부터 50 cm에 data logger를 설치하였다.

[그림 3.5.12]는 메소코즘의 각 조합별 실험 구성을 나타내고 있다. 각 조합에서 data logger의 결과 온도의 변화는 5가지 메소코즘 조건에서 모두 비슷한 경향성을 보였으나, 광량의 변화에서는 차이를 보였다[그림 3.5.13]. 특히 동위원소를 비처리한 곳의 말조개 실험군(T3-2)에서 가장 높은 광량의 경향성을 보였으며, 다음으로 동위원소 비처리한 새뱅이 실험군(T2-2)에서 높은 광량의 경향성을 보였다. 그러나 나머지 세곳의 동위원소를 처리하지 않은 실험군에서는 비슷한 광량이 기록되었으나 식물섬 실험군(T4-2)은 메소코즘 실험의 후반으로 갈수록 광량이 줄어든 것에 비해 대조군과 동자개+새뱅이 실험군(T1-2)에서는 실험 후반에 광량이 증가하는 경향성을 보였다. 그러나 동위원소를 처리한 실험군 중 새뱅이 실험군(T2-1, 100 cm)과 식물섬 실험군(T4-1)에서는 메소코즘 실험기간 동안 뚜렷하게 광량이 감소하였다. 이러한 광량의 변화는 메소코즘의 각 실험 조건에 따른 녹조제거 효율의 정도를 대략적으로 가늠할 수 있으나, 각 실험군의 초기 상태 및 외부 요인(채수 및 환경요인 측정 등)들에 의해 영향을 받을 수도 있다. 따라서 각 메소코즘 실험군의 다른 환경요인 측정 결과와 비교 분석하여야 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

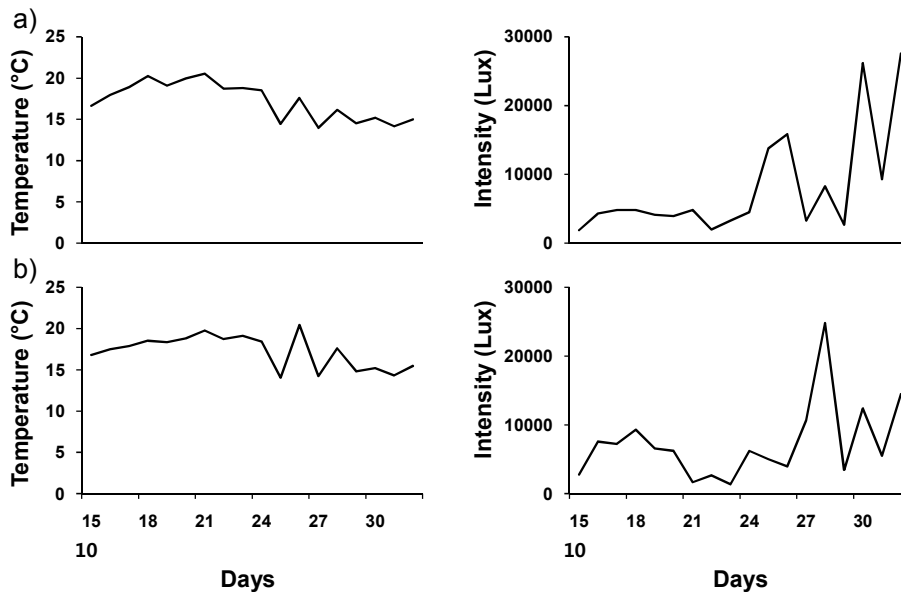
한편 2008년 10월 13일부터 11월 3일까지는 충남 당진군에 위치한 석문시험지에 메소코즘을 설치하여 실험을 실시하였다. 실험 조건 별로 data logger를 설치하여 광량과 온도 변화를 매 10분 간격으로 측정하였다. data logger는 앞서 설명된 [그림 3.5.10]과 같은 것이다. data logger는 대조군(a)과 유용생물 처리군(b) 모두 수표면으로부터 30 cm 깊이에 data logger를 설치하였다. [그림 3.5.14]는 석문시험지 메소코즘에서의 조사기간 동안 온도 및 광량의 변화를 나타내고 있다. 온도는 메소코즘 실험기간동안 일정하게 유지되는 것에 비해 광량은 시간이 지날수록 증가하는 것으로 나타났다. 이때 유용생물 처리군(b) 광량이 대조군(a)에 비해 낮게 나타났으며, 이는 유용생물의 식물플랑크톤 제거로 인한 광량이 증대한 것으로 판단할 수 있다. 그러나 실험기간동안 시험저수지의 수위가 감소함에 따라 data logger가 수표면에 노출되는 등의 노이즈가 발생하였다.



[그림 3.5.12] 2007년 신규저수지 설치 메소코즘 구성



[그림 3.5.13] 2007년 신규저수지 메소코즘 실험 조건에 따른 온도 및 광량 변화



[그림 3.5.14] 메소코즘(석문시험지) 실험 조건에 따른 온도 및 광량 변화(a: 대조군, b: 유용생물처리군)

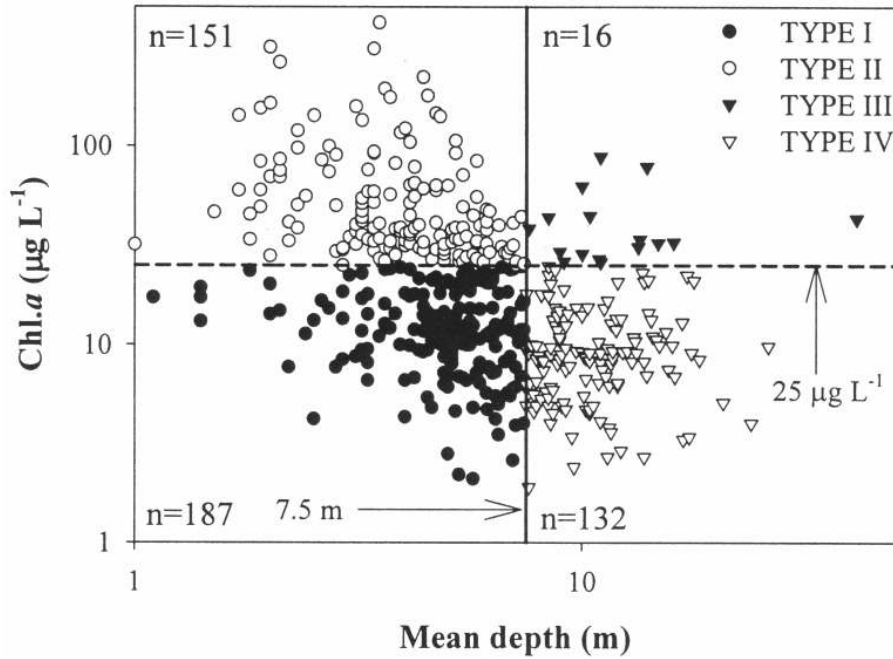
2. 저수지 수질특성 유형화 및 예측 모델 개발

가. 수질특성 유형화 연구 국내외 사례

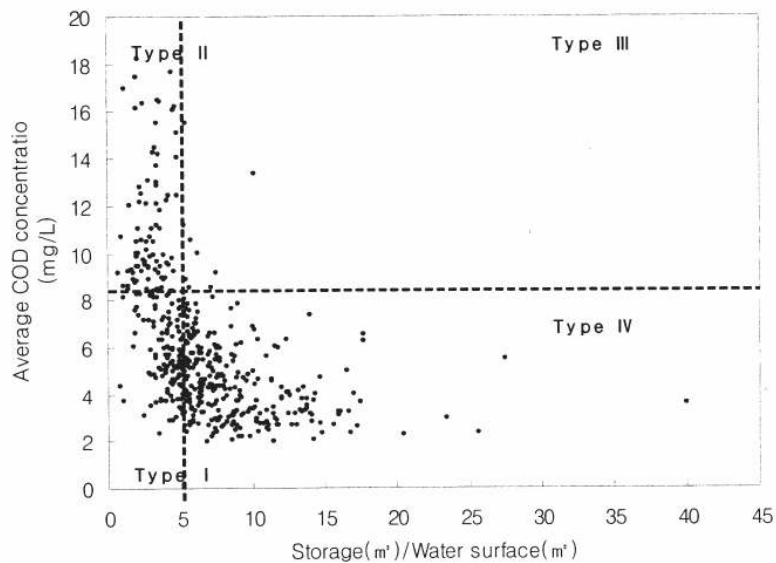
농업용저수지의 수질을 효율적으로 관리하기 위해서는 각각의 저수지들이 가지는 특성을 잘 이해하는 것이 필수적이다. 또한 우리나라 전국의 농업용저수지를 관리하기 위해서는 우리나라 농업용저수지의 시공간적 변이 특성을 정확히 이해하고, 그 특성에 따라 저수지를 유형화하여 관리하는 것이 필요하다. 또한 저수지의 수질과 환경인자, 그리고 생물인자간의 상호작용 등에 대한 이해가 요구된다. 이러한 필요성에 따라 저수지를 포함하는 호수의 유형을 분류하기 위한 다양한 시도가 있었으며, 그 중 호수의 영양상태에 따라 크게 빈영양, 중영양, 부영양호로 구분하는 것이 일반적이다. 이러한 영양상태의 차이는 호수의 영양물질의 차이에 따른 것으로 수질의 차이를 반영해 준다. Carlson(1977)은 Chl-*a* 농도, 총인 농도에 따라 호수의 영양상태를 구분하기 위한 부영양화도지수(Trophic state index: TSI)를 개발하였으며, OECD(1982)에서는 이러한 Carlson의 TSI를 기반으로 부영양의 기준을 제시하였다.

한편 우리나라에서도 Carlson의 TSI 및 OECD 기준에 따라 호수를 분류하는 많은 연구가 있었다(Kim *et al.*, 2001; 김 등, 2003; 김 등, 2007; 김 등, 2007). 또한 농업용저수지의 수질특성을 유형화하기 위한 방법론적 연구가 있었다. 또한 농업용저수지 수질특성을 수심에 따른 Chl-*a*의 농도 특성을 비교하여 우리나라 농업용저수지를 4개의 유형으로 나누었다(김과 황, 2004; 김 등, 2007) [그림 3.5.15]. 그리고 농림부 기획연구과제인 “농업용저수지의 조류 제어기법 개발 연구”에서는 유효저수량/수면적 비와 COD를 이용하여 저수지를 4개의 유형으로 분류

하였다[그림 3.5.16] (농림부, 2005). 이들 두 방법은 모두 두 변수간의 상관관계에 따라 저수지 유형을 분류하는 것으로서 비교적 쉽게 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 실제 자연현상들을 1~2개의 변수만으로 설명하기에는 어려움이 많이 있다. 즉 저수지의 수질은 여러 다양한 인자들이 서로 복합적으로 작용하여 나타나는 것이므로 이러한 특성이 고려된다면 보다 유용한 저수지 유형 분류가 될 수 있을 것이다.



[그림 3.5.15] 수심과 Chl-a의 농도에 근거한 저수지 유형화(김과 황, 2004)



[그림 3.5.16] 저수량/수면적 비와 COD를 이용한 저수지 유형 분류(농림부, 2005)

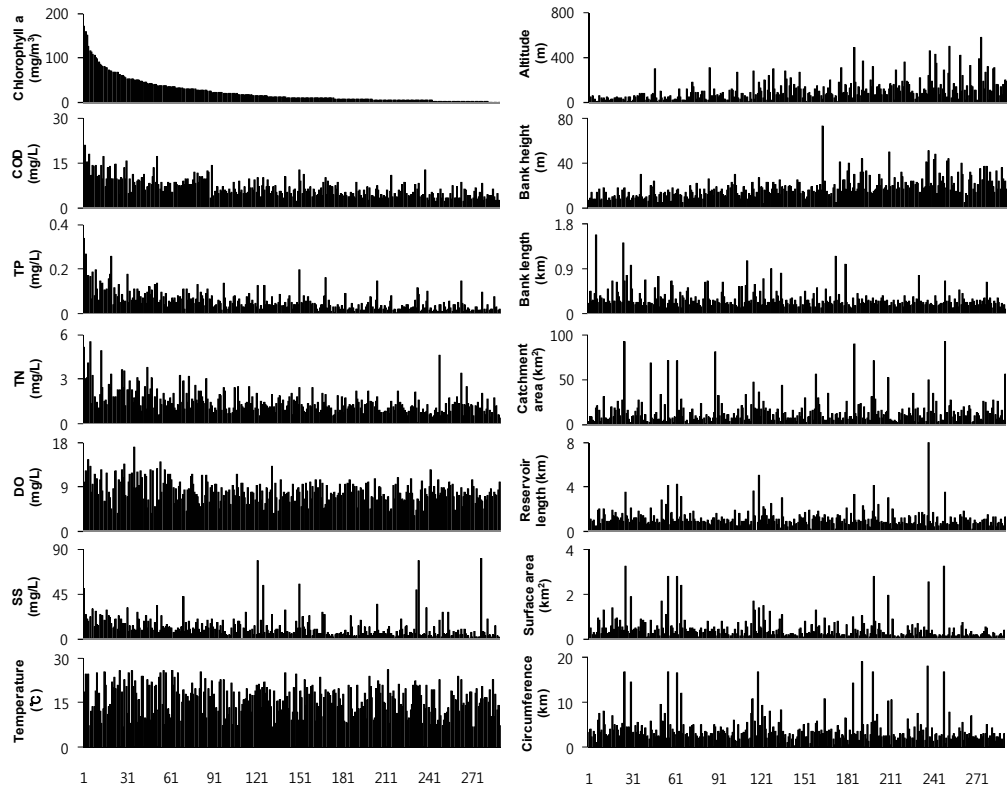
따라서 본 연구에서는 다양한 수질인자를 이용하여 저수지 수질 특성을 유형화하고 수질 인자 외에 수문학적, 지형학적 특성등과 연관하여 분석하고자 하였다. 효과적인 모델을 선정하기 위하여 신경회로망(SOM 및 MLP)(Zurada, 1992)과 다변량통계분석법인 주요인분석(PCA), 집계 분석 등 다양한 모델링 방법을 시도하고 이를 통해 주어진 결과를 비교 분석하여 가장 효율적인 방법을 선정하였다. 이에 대한 방법 및 결과는 다음 절에서 설명된다.

나. 저수지 수질 자료 특성

저수지의 수질 특성을 유형화하기 위하여 본 연구에서는 앞서 언급된 농업용저수지 수질 생태정보자료 중 전국수질측정망 자료를 이용하였다. 본 자료에는 댐 등은 제외하였으며, 유효저수량 20백만 m^3 이하인 저수지만을 고려하여 301개의 저수지를 선정하였다. 그리고 301개 저수지에서 대부분의 조사가 되어 결구(missing data)의 비율이 낮은 TN, TP, DO, COD, SS, 온도, Chl-*a* 농도 등의 물리·화학적 환경인자와 생물학적 환경인자들을 이용하였으며, 저수지의 수리수문학적 특성을 반영하기 위해 고도, 유역면적, 저수지 둘레길이, 표면적, 저수량, 제방 높이, 제방 길이 등의 환경인자들은 전자지도를 이용하여 측정하였다. 각 요인들의 변이는 [표 3.5.2]에 제시하였으며 [그림 3.5.17]은 저수지별 수질인자의 변이를 나타낸다.

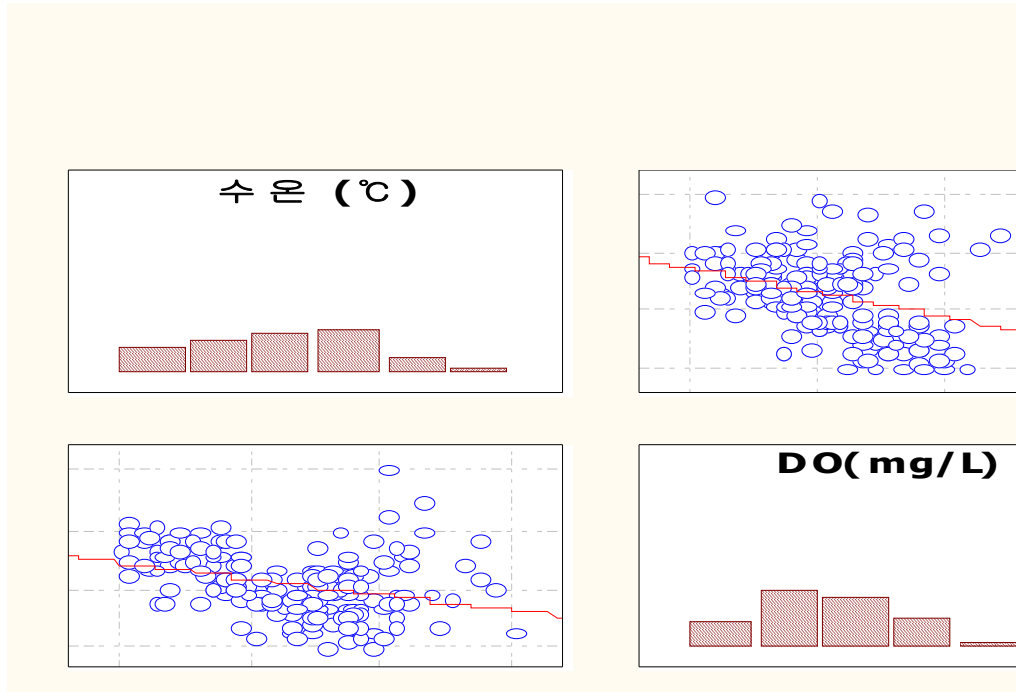
[표 3.5.2] 수질 및 수문학적 인자 특성

변수	평균(S.D.)	범위
고도(m)	105.88(98.55)	4~574
유역면적(km^2)	14.14(14.52)	0.8~93
둘레(km)	3.98(3.07)	0.3~19.2
길이(km)	1.18(0.83)	0.1~8
수면적(km^2)	0.47(0.51)	0.1~3.3
저수량(백만 m^3)	2.41(2.73)	0.2~17.2
제방높이(m)	18.49(12.35)	4~160
제방길이(m)	317.15(322.22)	16.7~3,746
TN($mg L^{-1}$)	1.54(0.91)	0.08~6.3
TP($mg L^{-1}$)	0.07(0.12)	0.005~1.8
DO($mg L^{-1}$)	8.2(2.23)	3.2~17
BOD($mg L^{-1}$)	3.75(2.63)	0.4~15.8
COD($mg L^{-1}$)	6.96(3.69)	2.2~29.8
SS($mg L^{-1}$)	12.44(14.64)	0.5~121.6
온도($^{\circ}C$)	16.37(5.16)	4.2~28
Chl- <i>a</i> ($mg m^{-3}$)	25.88(44.11)	0.1~574.7



[그림 3.5.17] 환경인자의 변이(Chl-a 농도 구배에 따라 정렬)

[표 3.5.3]은 저수지의 수질 인자들 간의 상관관계를 나타내 주고 있다. 지형, 수문학적 인자와의 관계를 보면 유역면적은 저수지의 크기와 높은 상관관계를 가지고 있음을 보여준다. 즉, 유역면적은 둘레, 길이, 저수량, 수면적 등과 높은 양의 상관관계를 나타냄으로서 유역면적이 넓은 곳의 저수지는 저수지의 크기가 크다는 것을 보여준다. 이는 일반적으로 받아들여지는 자연스러운 특성이라 볼 수 있다. 한편 고도는 제방 높이와 큰 양의 상관관계를 보여 줌으로서 고도가 높은 곳에 위치하는 저수지들이 제방 높이가 높은 것을 보여주고 있다. 이는 산골지역에서 계곡을 막아 저수지를 만듦으로서 제방의 높이가 높아지는 것으로 해석될 수 있다. 또한 흥미로운 것은 고도는 화학적 수질인자(COD, BOD 등)와 통계적으로 유의한 음의 상관관계를 보여주고 있으며, Chl-a의 농도와도 음의 상관관계를 보임으로서 비교적 고도가 높은 곳에 위치한 저수지들은 그 수질이 상대적으로 양호하다는 것을 제시해 준다. Chl-a 농도는 COD, BOD, TN, TP, SS, 온도 등 물리화학적 인자와 높은 양의 상관관계를 보인다[표 3.5.3, 그림 3.5.18]. [그림 3.5.19]는 Chl-a 농도에 따른 이화학적 인자의 상관관계를 보여준다. 이러한 특성은 저수지의 수질관리를 하는데 중요한 정보가 될 수 있을 것으로 판단된다.



[그림 3.5.18] 수질측정망자료의 이화학적인자와 Chl-*a*의 상호관계

Chl-*a* 농도는 $0.1 \sim 173.4 \text{ mg m}^{-3}$ 의 분포 범위를 보였으며, 이러한 Chl-*a* 변이에 따라 COD, TP, TN, SS 등이 유사한 분포 양상을 보였다. 그러나 고도 및 제방높이는 Chl-*a* 농도 분포와 반대되는 농도구배를 보였다. 또한 저수지 둘레길이, 수면적, 저수지 길이 간에는 유사한 분포 양상을 보였다 [그림 3.5.17]. 조사 자료에서 Chl-*a* 농도는 이화학적 수질인자인 COD 및 TP와 높은 양의 상관관계를 보였으나(각각 $r=0.66$, $r=0.67$, $p<0.05$), 제방 높이 및 고도와는 음의 상관관계를 보였다(각각 $r=-0.60$, $r=-0.56$, $p<0.05$) [표 3.5.3].

[표 3.5.3] 수질 및 수문학적 인자 간의 상관계수

	고도	유역면적	저수지 둘레	저수지 강고	수면적	저수량	제방높이	제방길이	TN	TP	DO	BOD	COD	SS	온도	Chl-a
고도	1.00															
유역면적		1.00														
저수지둘레			1.00													
저수지장고				1.00												
수면적					1.00											
저수량						1.00										
제방높이							1.00									
제방길이								1.00								
TN									1.00							
TP										1.00						
DO											1.00					
BOD												1.00				
COD													1.00			
SS														1.00		
온도															1.00	
Chl-a																1.00

* p<0.05, ** p<0.01

한편 2006년도 전국호소수질측정망 자료 중 녹조 발생률이 높은 9월 전후의 전국수질측정망 자료에서 수면적을 비롯한 다른 환경인자들과의 관계를 고려하여 유효저수량이 2천만 m³ 이하인 저수지들의 Chl-*a*와 TP를 이용하여 Carlson 부영양화 지수(TSI)에 따라 영양 상태를 분류하였다. 이때 사용한 Carlson 부영양화 지수는 다음 식과 같다.

$$TSI_{CHL} = 9.81 \times \ln(Chl - a) + 30.6$$

$$TSI_{TP} = 14.42 \times \ln(TP) + 4.15$$

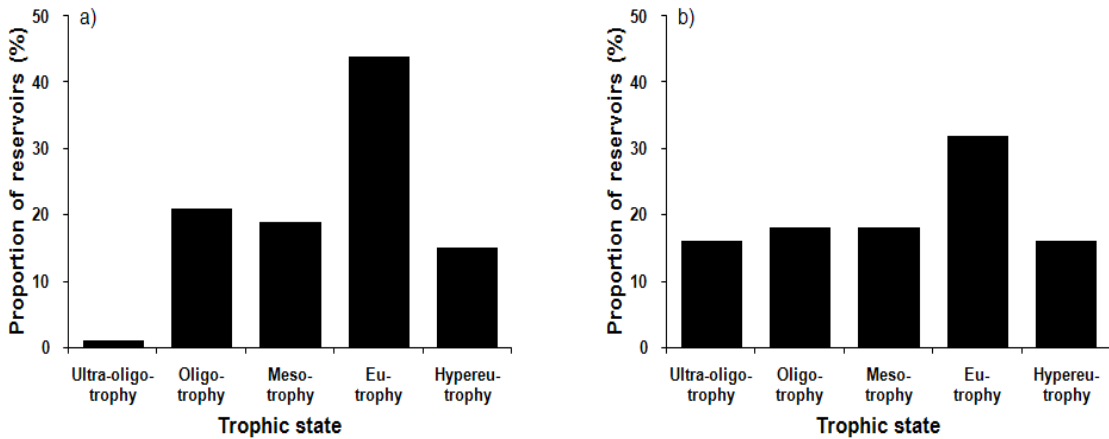
이때 Carlson 부영양화 지수(TSI)는 저수지 영양 상태를 평가하는 가장 일반적인 방법으로, Chl-*a* 농도 및 TP의 농도 단위는 mg L⁻¹을 사용하였다.

[표 3.5.4] 영양지수(TSI)에 따른 호수 분류(Kratzer와 Brenzarick 1981)

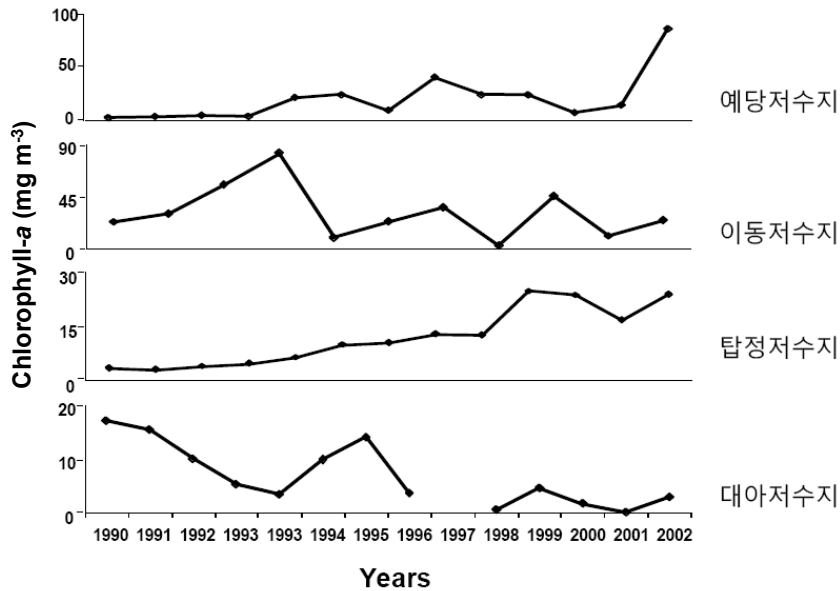
그룹	TSI	영양상태
1	<20	극빈영양
2	30~40	빈영양
3	45~50	중영양
4	53~60	부영양
5	>70	극부영양

계산된 TSI를 이용하여 Kratzer와 Brenzarick(1981)의 영양상태 판정표[표 3.5.4]에 근거하여 분석대상 저수지의 영양 상태를 등급에 따라 5개 그룹으로 구분하였다. 이때 각 영양단계에 속하지 않는 TSI값은 근사값으로 가장 근접한 영양단계로 반영하였다. 저수지의 영양 상태를 나타내는 지표 TSI_{CHL}를 이용하여 2006년 전국 165개 농업용 저수지의 영양 상태를 평가한 결과, 중영양 이하의 영양 상태를 나타낸 저수지는 전체 165개 저수지 중 41%(69개)로 나타났다. 반면 부영양 상태를 나타낸 저수지는 44%(72개), 과영양 상태는 15%(24개)를 나타내 전체 저수지의 약 60%가 부영양화 된 것으로 나타났다[그림 3.5.19]. 또한 TSI_{TP}를 통한 농업용 저수지의 영양 상태를 평가한 결과에서는 중영양 상태 이하의 저수지는 전체 165개 저수지의 52%(86개)를 나타내었으며, 부영양 상태 이상의 저수지는 48%(79개)로 TSI_{CHL} 결과에 비해 빈영양 상태 저수지의 수가 상대적으로 높게 나타났다[그림 3.5.19]. 이는 TSI_{CHL} < TSI_{TP}인 경우에는 인이 아닌 다른 요인이 조류의 성장을 제한한다는 부영양화 지수를 통해 식물플랑크톤 제한요인을 유추한 Havens(2000)의 연구와 일치한다. 이러한 결과는 농업용 저수지 내 식물성 플랑크톤에 축적된 인의 양이 포화상태를 이루어 공급된 인의 양보다 식물플랑크톤의 1차 생산력에 의한 환원율이 감소한 것으로 판단된다.

저수지 수질은 지역에 따라 연도별로 다양한 특성을 보였다. [그림 3.5.20]은 분석 저수지별 Chl-*a* 농도가 연도별로 변동하는 것을 나타낸 예로서, 저수지별로 다양한 변동특성을 보인 예이다.



[그림 3.5.20] Carlson 지수에 따른 농업용저수지의 영양상태 분류(a: TSI_{CHL}, b: TSI_{TP}) (2006년 자료)



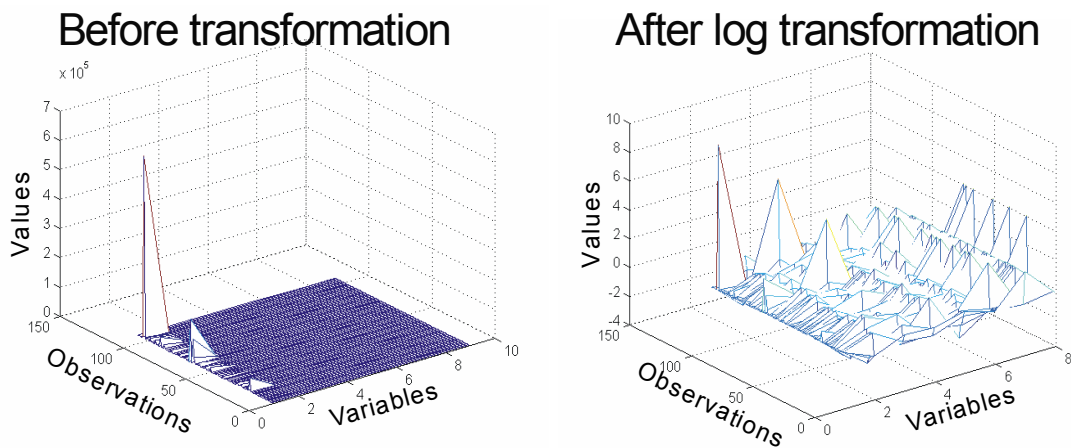
[그림 3.5.21] 저수지별 연도별 Chl-a 변동

다. 저수지 수질 특성 유형화 모델 방법

(1) 전처리과정

환경자료 및 생물자료로 구성되는 생태자료는 많은 인자들 간의 복잡한 상호작용의 결과로서 자료는 비선형성과 복잡성을 내포하고 있다. 또한 많은 잡음(noise; 유용한 정보가 아닌 것)을 내포하고 있어 이들 자료를 분석하는데 많은 어려움이 있다. 따라서 정량적인 자료 분석에 있어서 먼저 수행되어야 할 것은 이러한 잡음을 제거해 주고, 자료를 표준화하는 것이다. 이때

사용될 수 있는 것은 자료를 적절한 방법에 따라 변환하는 것이다. 이러한 변환방법에는 가장 일반적으로 사용되는 것이 로그변환이다. [그림 3.5.21]은 로그 변환 전과 후의 값의 변이를 나타내 준다. 어느 특정 인자의 값이 매우 크고 변이가 심할 경우 정량분석에서는 작은 값을 가지는 변수들은 상대적으로 그 중요성이 줄어들게 된다. 그러나 군집분석 등에서는 출현하는 종의 개체수가 중요한 의미를 가지지만 어느 수준이상이 되면 그 중요성의 차이는 적어진다. 또한 작은 값 또한 중요한 의미를 가지므로 이들의 중요성을 상대적으로 고려해 주어야 한다. 이러한 경우 로그 변환 등을 하게 되면 큰 값과 작은 값 사이의 차이를 줄여줌으로서 작은 값을 보이는 변수의 중요성을 증가시켜 줄 수 있다. 또한 대부분의 통계분석에서는 자료의 균질성 등을 필요로 하는데 이러한 조건을 충족시켜 줄 수 있다. 그 외 percentage, root square, 최대-최소값 변환, 분산비율 변환 등이 사용될 수 있다.



[그림 3.5.22] 로그변환으로 나타나는 값의 변화

분석자료 중 Chl-a, TP, TN, SS, 고도, 제방 길이, 저수지 길이, 저수지 수면적, 저수지 둘레 길이는 변이 폭이 커 상대적인 자료의 중요성에 줄어들게 된다. 어느 특정 인자의 값이 매우 크고 변이가 심할 경우 정량분석에서는 작은 값을 가지는 변수들은 상대적으로 그 중요성이 줄어들게 된다. 그러나 군집분석 등에서는 출현하는 종의 개체수가 중요한 의미를 가지지만 어느 수준이상이 되면 그 중요성의 차이는 적어진다. 또한 작은 값 또한 중요한 의미를 가지므로 이들의 중요성을 상대적으로 고려해 주어야 한다.

실제 농업용저수지 자료 중 Chl-a, TP, TN, SS, 고도, 제방 길이, 저수지 길이, 저수지 수면적, 저수지 둘레길이는 변이 폭이 매우 크게 나타났다. 이러한 경우 로그 변환 등을 하게 되면 큰 값과 작은 값 사이의 차이를 줄여줌으로서 작은 값을 보이는 변수의 중요성을 증가시켜 줄 수 있다. 이때 log 값이 0이 되는 것을 방지하기 위하여 각 변수의 값에 1을 더해 계산하였다.

또한 각 변수들의 중요도를 균등하게 고려하기 위하여 모든 변수는 최소-최대 변환식(식 3)을 사용하여 각 변수의 범위를 0과 1사이의 값으로 변환시켰다.

$$b_i(x) = \frac{(x_i - \min(x))}{\max(x) - \min(x)}$$

여기서 $b_i(x)$ 는 표본 i 의 변수 x 의 변환된 값, $\min(x)$ 및 $\max(x)$ 는 각각 변수 x 의 최소값 및 최대값을 나타낸다.

(2) 상관분석 및 회기분석

두 변수가 있을 때 이 두 변수가 단지 서로 관련이 있는지를 파악하고자 할 때는 상관분석을 하게 된다. 상관분석의 초점은 변수사이에 얼마나 밀접한 관계가 있는지를 측정하는데 있다. 변수 x 값이 커짐에 따라 변수 y 값도 커지는 경우 이들 두 변수 사이에는 양(+)의 관련성이 있는 것이며, 반대로 y 값이 작아지는 경우는 이들 두 변수 사이에는 음(-)의 관련성이 있다. 상관계수(r)의 범위는 $-1 \leq r \leq 1$ 이다. 상관계수는 자료의 성격에 따라 모수 및 비모수 방법으로 구할 수 있다.

상관계수와 유사하면서 구분되어 사용되어야 할 것은 단순선형회귀(simple linear regression)이다. 선형회귀는 두 개의 변수가 선형관계를 가지고 있는 것을 의미한다. 즉, 두 변수 x , y 사이의 관계를 선형적으로 표현한 통계적 모델로서 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$y = b + ax + e$$

여기 x 는 독립변수, y 는 종속변수를 나타낸다.

따라서 상관분석과 선형회귀 분석의 차이는 두 변수 x , y 가 서로 종속관계에 있는지 유무에 따라 선택되어야 한다. 즉, 두 변수가 서로 독립적인 경우는 회기분석을 실시하는 것은 잘못된 분석이라는 것이다.

(3) 유형화 모델

측정대상으로부터 여러 개의 변수들을 측정하여 구하는 자료를 “다변량자료”라고 한다. 다변량분석은 크게 다음과 같이 두 가지로 구분하여 생각할 수 있다. 첫째는 일변량분석에 대한 다변량분석인데 이는 원인을 측정하는 설명변수와 결과를 관측하는 반응변수가 있는 모형에서 반응변수의 수에 의한 구분이다. 즉 반응변수가 하나이면 일변량분석이라고 하고 반응변수가 두 개 이상인 경우에는 다변량분석이라 한다(<http://www.pvalue.co.kr/>). 두 번째 형태의 다변량분석은 각 개체로부터 여러 개의 변수들을 측정하였을 때 여러 변수들 사이의 관계를 이용하는 통계분석들로 대표적인 것으로는 주성분분석(PCA) 등이 있다.

생물군집자료 전체를 이용한 군집의 유사성 또는 유형을 파악하고자 하는 경우 위에서 설명

된 두 번째 경우에 해당되는 다변량분석법을 이용한다. 여기에는 Principal component analysis (PCA, 주요인분석), cluster analysis(CA), correspondence analysis(COA) 등이 있으며, 최근에는 Local Linear Embedding(LLE) (Roweis and Saul, 2000), Isomap (Tenenbaum *et al.*, 2000) 등이 소개되었다. 또한 신경회로망의 하나인 self-organizing map(SOM) 등이 사용된다. 다변량 분석은 생물변수와 환경변수간의 관계를 분석하는데 유용하게 사용될 수 있다.

(가) PCA(주요인분석)

PCA(주요인분석)은 대표적인 indirect gradient 분석법의 하나로서 eigen value(고유값)를 계산하여 군집의 유사성을 ordination하는 것이다. PCA는 서로 연관이 있는 변수들($X_1, X_2, X_3, \dots, X_p$)이 관측되었을 때, 이 변수들이 가지고 있는 정보들을 최대한 확보하는 적은 수의 새로운 변수들을 생성하는 방법이다. 즉, 서로 연관이 있는 p 개의 변수($X_1, X_2, X_3, \dots, X_p$)들에 대하여 주요한 관심사 중의 하나는 이 변수들이 가지고 있는 변이를 측정하는 것이다. 변이란 이 변수들이 가지고 있는 정보의 양이라고 할 수 있는데, 주성분분석에서는 원래의 변수들이 가지고 있는 변이의 양을 가장 많이 확보하는 순서대로 변수들의 선형결합을 이용하여 새로운 변수를 구하는 과정이다(<http://www.pvalue.co.kr/>).

(나) NMS(다차원척도법)

NMS는 군집분석과 같이 여러 개체들을 대상으로 몇 개의 특성변수를 측정한 후에 이 변수들을 이용하여 개체들 사이의 거리 또는 비유사성을 측정하고, 이를 이용하여 개체들을 2차원 또는 3차원 공간상의 점으로 표현하는 통계적 분석방법이다. 군집분석은 개체들 간의 비유사성을 이용하여 동일한 그룹들로 분류하고자 한다. 반면 NMS는 개체들의 비유사성을 이용하여 공간상에 표시함으로써 개체들간의 상대적인 위치를 표시하고, 이를 이용하여 유사한 개체들을 파악하며, 이들 개체들을 2차원 공간상에 점으로 표현하여 개체들 사이의 집단화를 시각적으로 표현하는 분석방법이다(<http://www.pvalue.co.kr/>). 이러한 NMS는 유사성이 작은(비유사성이 큰) 대상끼리는 멀리, 유사성이 큰(비유사성이 작은) 대상끼리는 가깝게 위치를 정한다.

(다) Isomap

Isomap 알고리즘은 고차원 데이터들 사이의 거리가 주어지면 거리들의 분포를 보전하면서 2차원이나 3차원 등의 저차원 공간에 투영시킨 좌표들의 집합을 구하는 방법 중의 하나이다. 즉, Isomap은 ordination을 위한 새로운 알고리즘으로, 다양한 비선형의 분류를 위해 NMS와 PCA의 고전적 기법을 결합한 것이다. Isomap 알고리즘은 nonlinear geodesic inter-point distance matrix를 기반으로 한다. 각 지점의 이웃한 지점을 계산하고, 두 지점 사이의 geodesic distance는 두 지점의 짧은 path linking에 따라 arc length의 합에 의해 수렴한다. 그리고 metric MDS

는 수립된 geodesic distance matrix에 적용된다.

(라) CA(집계분석)

CA(집계분석)는 다음의 경우에 사용된다. 실험의 결과나 표본 등에서 얻어진 케이스들을 어떤 성질에 따라 분류하여 동질적인 몇 개의 그룹(cluster)으로 나누어 분류하고자 할 경우가 있다. 예를 들어 생물종들이 나타나는 유사성을 따라 군집을 몇 개의 그룹으로 분류하거나, 수질의 물리화학적 환경 인자를 이용하여 조사지점을 몇 개의 그룹으로 나트는 것 등을 말한다. CA는 n 개의 개체를 대상으로 p 개의 변수들을 측정하였을 때, 이 변수들을 이용하여 n 개의 개체들 사이의 유사성 또는 비유사성의 정도를 측정하여 개체들을 가까운 순서대로 연결해 나가는 분석방법이다.

CA는 방법에 따라 계층구조적 방법(hierarchical cluster)과 상호배반적 방법(disjoint cluster)으로 나눈다. 계층적 군집방법은 병합적(agglomerative)방법과 분할적(division)방법이 있다(Jongman *et al.*, 1995). 병합적 방법은 가까운 개체들끼리 묶어감으로써 군집을 만들어 가는 방법이며, 분할적 방법은 반대로 먼 개체들을 나누어 가는 방법이다. 병합적인 방법은 우선 가장 가까운 2개의 개체를 묶어서 하나의 군집을 만들고, 나머지 ($N-2$)개의 개체는 각각 하나의 군집을 이루도록 한다. 다음은 ($N-1$)개의 군집 중에서 가장 가까운 2개의 군집을 묶어 ($N-2$)개의 군집을 만든다. 이와 같은 방법으로 ($N-1$)단계를 반복하면 결국 N 개의 개체가 모두 묶여서 하나의 군집을 만들게 된다(<http://www.pvalue.co.kr/>).

이와는 반대로 분할적인 방법은 먼저 개의 개체를 2개의 군집으로 나누는 것으로부터 시작되어 병합적인 방법의 역순으로 진행된다. 군집들이 병합 또는 분리되는 과정은 나무모양그림(dendrogram)을 이용하여 간단히 표현될 수 있다. 일반적으로 분할적 방법보다는 병합적 방법이 많이 사용된다. 병합적인 방법은 군집간의 거리를 정의하는 방법에 따라서 최단연결법(single linkage method), 최장연결법(complete linkage method), 중심연결법(centroid linkage method), 중앙값연결법(median linkage method), 평균연결법(average linkage method), WARD 방법 등이 있다.

(마) SOM(self-organizing map)

SOM(self-organizing map)은 비지도학습 신경회로망의 하나로서 군집분석, ordination, 시각화, 유형화 등에 효과적으로 사용된다(Kohonen, 2001; Park *et al.*, 2003). SOM은 자료를 입력받는 입력층과 계산 결과를 출력해 주는 출력층으로 구성된다[그림 3.5.22a]. 각 층은 계산단위체인 노드(또는 뉴우런)로 구성된다. 원리는 입력된 자료를 받아 반복된 계산과정을 거쳐 입력 자료를 최적화하여 분류하는 것이다. 이러한 반복된 계산과정을 학습(훈련)이라 한다. 즉, 학습은 사전에 조사된 자료를 대상 인공신경망에 반복 입력하여 입력층과 출력층 사이의 연결계수(connectivity weight)가 입력 자료의 정보 특성을 반영하도록 하는 과정이다. 일차적으로 출력

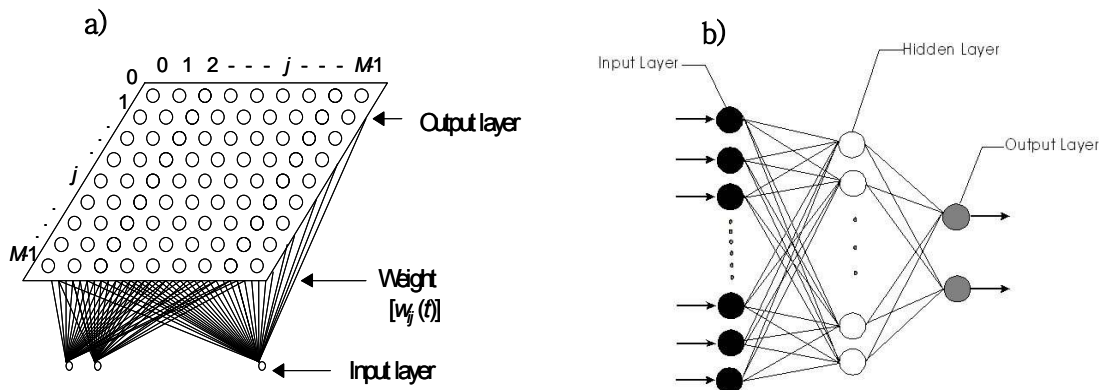
노드 j 와 입력노드 i 사이의 연결계수인 w_{ji} 와 입력 벡터 x_i (즉, 변수 i 의 값)와의 차이의 합 ($d_j(t)$)이 제일 작은 j 노드를 아래 식에 따라 선정한다(Kohonen, 2001).

$$d_j(t) = \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} \{w_{ji}(t) - x_i\}^2}$$

여기서 n 은 입력노드의 수이고 w_{ji} 는 초기에 작은 임의의 수로 주어진다. 계산되어진 거리 $d_j(t)$ 값 중에서 가장 작은 값을 가진 노드 j 가 승자 노드(winning node) j^* 로 선택된다. 이후 승자 및 그에 인접한 뉴우런의 연결계수가 아래와 같이 반복되어 조절된다.

$$w_{ij^*}(t+1) = w_{ij^*}(t) + \eta(t)(x_i - w_{ij^*}(t))Z_{ij^*}$$

여기서 $Z(j^*)$ 는 승자와 그에 인접한 이웃 뉴우런은 1이 되고, 나머지 뉴우런은 0으로 할당되어, 승자 및 인접 뉴우런의 연결계수 조절을 가능하게 한다. $\eta(t)$ 는 학습률로써 반복계산 과정에서 학습효율을 조절한다.



[그림 3.5.23] (a) Self-organizing map(SOM), (b) Multilayer perceptron(MLP)

(4) 예측 모델 인공신경회로망 모식도.

주어진 인자를 이용하여 원하는 값을 예측하고자 하는 경우는 다변량인 경우 여러 종류의 다중회기 모델을 만들 수 있으며, 또한 신경회로망을 이용하는 경우는 지도학습법의 하나인 multilayer perceptron(MLP)을 이용하는 방법이 많이 이용된다.

(가) MLR 모델

다중회귀분석(MLR)은 2개 이상의 독립변수와 종속변수간의 관계를 분석하는 것으로, 두 변수 이상의 독립변수(원인변수)들이 종속변수(결과변수)에 어떠한 영향을 미치는가를 알기 위한 분석기법이다. 이러한 다중회귀분석은 오차분산을 줄이고 종속변수에 대한 보다 충실한 설명이나 예견이 가능하다. 또한 다른 독립변수의 값을 통제된 상태에서 특정 독립변수가 종속변수에 독립적으로 행사하는 영향력을 측정할 수 있다. 따라서 각 독립변수가 종속변수에 미치는 효과의 상대적인 비교와 보다 정밀한 인과관계의 분석이 가능하다는 장점을 가진다 (<http://www.pvalue.co.kr/>). 다중회귀분석(MLR)의 모형식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k$$

여기서 X_k 는 예측에 사용된 변수이고, Y 는 예측하고자 하는 값이 된다.

(나) MLP(multilayer perceptron)

MLP는 인공신경회로망 기법 중에서 가장 많이 응용되는 방법으로서 MLP의 모식도는 [그림 3.5.22b]와 같다. MLP는 입력층, 은닉층, 출력층 등 3개의 층으로 구성된다. 각 층은 계산단 위체인 뉴우런(노드)으로 구성되며, 층과 층은 연결강도(가중치)로 연결된다. 먼저 입력층의 각 뉴우런에 입력자료가 주어진다. 여기서 입력자료는 일반적으로 환경자료가 주어지며, 여기에 대응하여 요구되는 기댓값이 출력층에 주어지게 된다. 출력층에는 일반적으로 예측하고자 하는 생물특성 값을 주는데 본 연구에서는 저서성무척추동물 영양구조군의 액서지 값 또는 중요종의 출현밀도 등을 사용하고자 한다. 이렇게 주어진 값들은 반복적인 계산과정을 거쳐 모델에 의해 계산된 출력값과 기대값 사이의 오차를 최소화 할 수 있도록 진행되는데 이를 학습과정이라 한다. 이러한 과정을 통해 입력층과 은닉층, 은닉층과 출력층 사이의 연결강도가 조절된다. MLP의 기본알고리즘은 다음과 같다(Zurada, 1992).

$$\text{단계 1) } Net_{p,j} = \sum_0 W_{op,j} IN_{o,i} \quad , \quad IN_{o,i} : \text{입력값}$$

$$Out_{p,j} = F(Net_{p,j}) = \frac{1}{1 + e^{-Net_{p,j}}} \quad , \quad Net_{q,k} = \sum_0 W_{pq,k} Out_{p,j}$$

$$\text{단계 2) } Out_{q,k} = F(Net_{q,k}) = \frac{1}{1 + e^{-Net_{q,k}}}$$

$$\delta_{q,k} = Out_{q,k}(1 - Out_{q,k})(Target - Out_{q,k}),$$

$$\Delta W_{pq,k}(n+1) = \eta \delta_{q,k} Out_{p,j} + m \Delta W_{pq,k}(n)$$

$$\text{단계 3) } W_{pq,k}(n+1) = W_{pq,k}(n) + \Delta W_{pq,k}(n) \quad ; \text{ for } k \text{ layer}$$

$$\Delta W_{p,j}(n+1) = \eta \delta_{p,j} IN_{o,i} + m \Delta W_{p,j}(n)$$

$$\text{단계 4) } W_{op,j}(n+1) = W_{op,j}(n) + \Delta W_{op,j}(n) \quad ; \text{ for } j \text{ layer}$$

여기서 i, j, k 는 각각 입력층, 은닉층, 출력층을 나타내고, $OUT_{q,k}, OUT_{p,j}$ 는 각각 출력층의 q 계산소자, 은닉층의 p 뉴우런의 출력치를 표시하고 $IN_{o,i}$ 는 입력층의 o 뉴우런의 입력값이며 $W_{pq,k}, W_{op,j}$ 는 각각 출력층에서 p, q 계산자 간의 연결강도 및 은닉층에서 o, p 간의 연결강도를 뜻한다.

이러한 MLP의 학습과정을 통해 환경인자 특성에 따라 생물인자 등의 변수값을 예측할 수 있으며, 각 환경변수들이 생물군집의 각 변수값에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 이를 위해서는 MLP를 이용한 예측모델의 민감도분석(sensitivity analysis) 등을 이용한다. 민감도분석은 모델의 출력값을 결정하는데 어떤 인자가 가장 중요한 값인지를 평가해주고, 어떻게 기여를 하는지에 대한 정보를 제공해 준다. MLP 모델 민감도분석에는 여러 방법들이 제시되었다. 그 중 본 연구에서는 계산 알고리즘 관점에서 보다 일관성이 있는 편미분계수(partial derivatives; PaD) 방법(Dimopoulos 등, 1995)을 사용하고자 한다. PaD는 입력값(환경인자) 변화에 따른 출력값의 반응을 나타내며 이를 통해 입력변수의 작은 값이 모델의 출력값에 나타나는 변이형태를 보여준다. 편미분계수(d_{ji})는 다음과 같이 계산된다.

$$d_{ji} = S_j \sum_{h=1}^{nh} w_{ho} I_{hj} (1 - I_{hj}) w_{ih}$$

여기서 S_j 는 입력값에 대한 출력 뉴우런의 미분계수, I_{hj} 는 h 번째 은닉뉴우런의 반응, w_{ho} 와 w_{ih} 는 각각 출력 뉴우런과 h 번째 은닉 뉴우런 사이의 연결강도 및 i 번째 입력 뉴우런과 h 번째 은닉 뉴우런 사이의 연결강도이다. 입력변수들의 상대적인 기여도는 각 입력변수의 편미분계수 합(SSD)을 산출하여 상대적인 크기를 비교함으로써 가능하다. 가장 높은 SSD를 가지는 입력변수는 출력변수에 가장 큰 영향을 미친다.

(다) MLP-PSO 알고리즘

PSO(particle swarm optimization)는 컴퓨터 지능 분야에서 각광받고 있는 최신 기법으로, 새나 물고기의 사회적 학습 행동을 나타내기 위해 Kennedy와 Eberhart(1995)가 고안한 확률적 최적화 기법에 바탕을 두고 있다. PSO 알고리즘의 원리는 각 입자는 최적의 해를 얻기 위해 다차원 탐색공간을 날아다니며, 그들 자신과 그들 이웃의 경험에 대한 정보를 이용하여 최적의 위치로 이동해 간다. 즉, 무리가 최적의 방향을 찾아가는 과정에서 무리 내부의 입자 방향이 지금까지의 자신의 경험과 무리 전체에 공유되어 있는 정보를 기초로 하여 행동한다는 개념을 최

적화 과정에 도입한 것이다.

PSO 알고리즘의 연산과정은 다음의 순서로 진행된다. 먼저 입자들의 초기 위치와 속도를 최적화하기 위해 d 차원의 해 공간상에서 입자들의 위치와 속도를 임의로 설정한다. 이후 현재 단계의 위치, 속도 정보와 목적 함수값을 이용하여 $k+1$ 번째의 속도 벡터를 아래 식에 따라 조정한다.

$$v_{k+1}^i = w * v_k^i + c_1 * r_1 (pbest_k - x_k^i) + c_2 * r_2 (gbest_k - x_k^i)$$

이때 r_1 과 r_2 는 난수로 0과 1사이의 값을 가지며, w 는 관성 가중치, c_1 과 c_2 는 가속상수로 2이다. 그리고 v_k^i 는 i 번째 입자의 k 번째 속도, x_k^i 는 i 번째 입자의 k 번째 위치이다. $pbest_k$ 는 i 번째 입자의 현재까지의 최적 위치, $gbest_k$ 는 군집의 최적위치이다. 다음으로 i 번째 입자의 $k+1$ 번째 위치는 앞서 구한 속도 벡터를 이용하여 새로운 값으로 갱신되며 이때 다음 식을 사용한다.

$$x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i$$

PSO 알고리즘을 앞서 설명된 지도학습 인공신경회로망의 일종인 다층신경회로망(MLP)의 최적화에 적용하였다. [그림 3.5.23]은 PSO 알고리즘을 나타낸 것이다.

The pseudo code of the PSO procedure

```

For each particle
  initialize particle
END

Do
  For each particle
    Calculate fitness value
    If the fitness value is better than the best fitness value (pbest) in history
      set current value as the new pbest
    End
  End

  Choose the particle with the best fitness value of all the particles as the gbest
  For each particle
    Calculate particle velocity according equation
     $v_{k+1}^i = w * v_k^i + c_1 * r_1 (pbest_k - x_k^i) + c_2 * r_2 (gbest_k - x_k^i)$ 
    Update particle position according equation
     $x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i$ 
  End

  pbestk: the best position of the kth individual
  gbestk: the best position among the individual (group best)
  vki: the particle velocity           xki: the current particle (solution)
  r(): a random number between (0,1)   c1, c2: learning factors usually c1 = c2 = 2

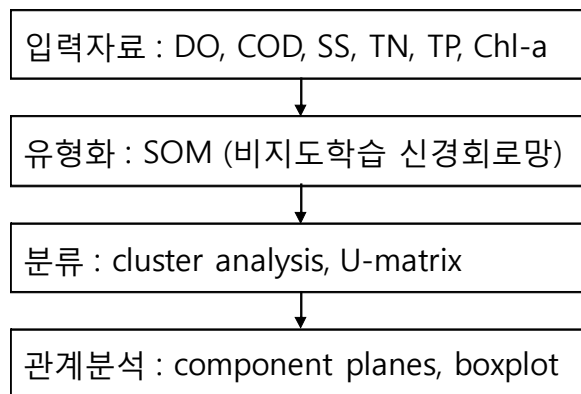
```

[그림 3.5.24] PSO 알고리즘

라. 전국 저수지 수질 특성 유형화 결과

(1) SOM 결과

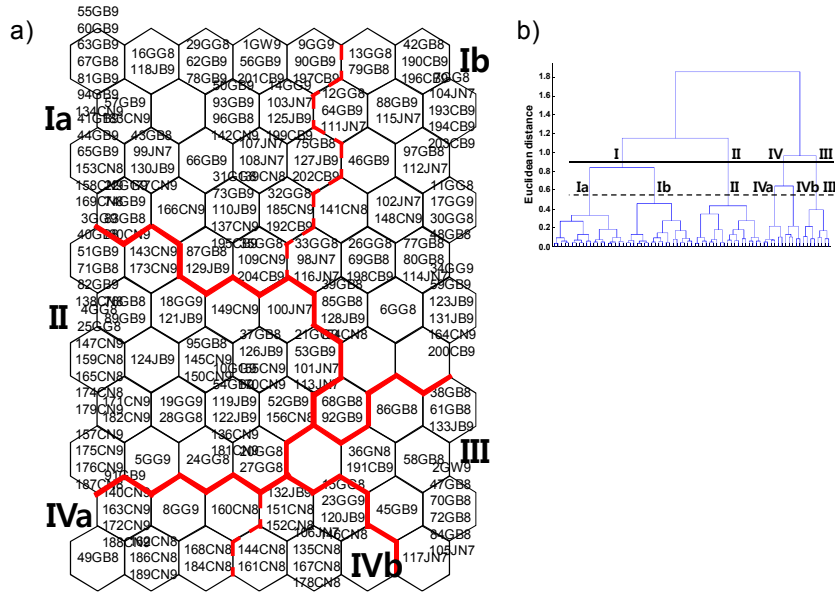
6개 수질인자 DO, COD, SS, TN, TP, Chl-*a*를 이용하여 수질특성에 따른 저수지 유형을 구분하였다. [그림 3.5.24]는 자료 유형화에 효과적으로 사용되는 비지도학습법 신경회로망인 SOM을 이용한 유형화 과정을 모식도로 나타낸 것이며, 그 결과는 [그림 3.5.25]와 같다. [그림 3.5.25a]는 저수지의 SOM 유형화 결과, [그림 3.5.25b]는 SOM 맵을 Ward's linkage 방법을 이용하여 분류한 것이다. SOM 내에는 유형화된 저수지의 일련번호 및 지역, 조사 시기를 나타낸다. 즉 앞쪽의 1~3 숫자는 일련번호, 다음 두 영문 알파벳은 지역(GG: 경기, GW: 강원, CB: 충북, CN: 충남, JN: 전남, JB: 전북, GB: 경북, GN: 경남 등), 그리고 마지막 1~2 숫자는 조사월을 나타낸다. SOM의 결과에 따르면 우리나라 저수지는 4개의 그룹(I~IV)으로 나뉘어졌으며, 이를 크게 보면 2개의 그룹(그룹 I, II 및 III, IV)으로 나눌 수 있으며, 좀 더 세분화 한다면 6개의 그룹(Ia, Ib, II, III, IVa, IVb)으로 나눌 수 있다는 것을 보여준다. 각 그룹은 하나의 저수지 수질 유형으로 볼 수 있다. SOM 맵의 아래쪽에 위치한 그룹 III과 IVa, IVb는 서로 유사하며 이들은 다른 그룹과는 많은 차이가 있다는 것을 보여준다. 그리고 그룹 Ia과 Ib가 서로 유사하며 그룹 II는 다소 중간에 해당된다는 것을 보여준다. 이들은 큰 2개의 그룹에서는 같은 무리에 속한다는 것을 보여주고 있다. 각 그룹별 저수지는 [부록 5]에 나타내었다.



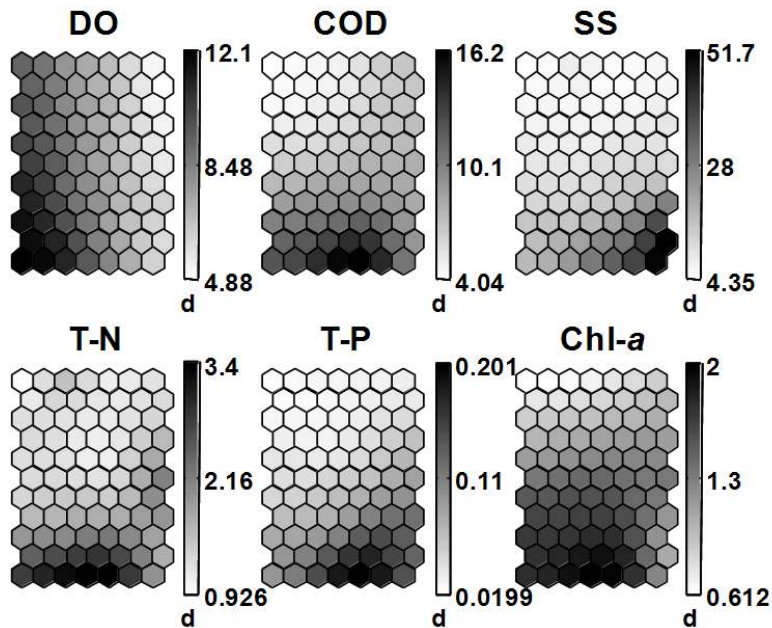
[그림 3.5.25] SOM을 이용한 유형화 분석과정

[그림 3.5.26]은 SOM 학습에 이용된 수질인자들의 학습된 값을 나타내는 것으로 진한 색은 높은 값을, 밝은 색은 낮은 값을 나타낸다. 그림을 통해 각 인자는 특정영역에서 높거나 낮은 값을 가진다는 것을 볼 수 있다. 즉 COD, TN, TP, Chl-*a* 등은 아래쪽 중앙영역에서 높은 값을 나타내지만 다른 곳에서는 매우 낮으며, SS(부유물질)는 아래 오른쪽 영역에서 높은 값을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 앞서 살펴본 [그림 3.5.25a]와 비교하면 보다 명확하게 저수지 수질 특성을 이해할 수 있다. 즉 그룹 III은 SS가 매우 높은 특징을 가지는 저수지들이며, 그룹 IVb는 COD, TN, TP, Chl-*a*의 값이 매우 높은 저수지 들이다. 그리고 그룹 IVa는 DO가

높은 지역들이라는 것을 알 수 있다. 이에 비해 그룹 I은 수질 지표들이 모두 가장 낮은 값을 보이는 맑은 저수지들이며, 그룹 II는 다소 중간의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 따라서 그룹 III, IV으로 분류된 저수지들은 매우 오염된 저수지라는 것을 알 수 있으며, 이에 비해 그룹 I의 저수지들은 가장 청정한 곳이며 또한 그룹 II의 저수지도 비교적 양호한 수질을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

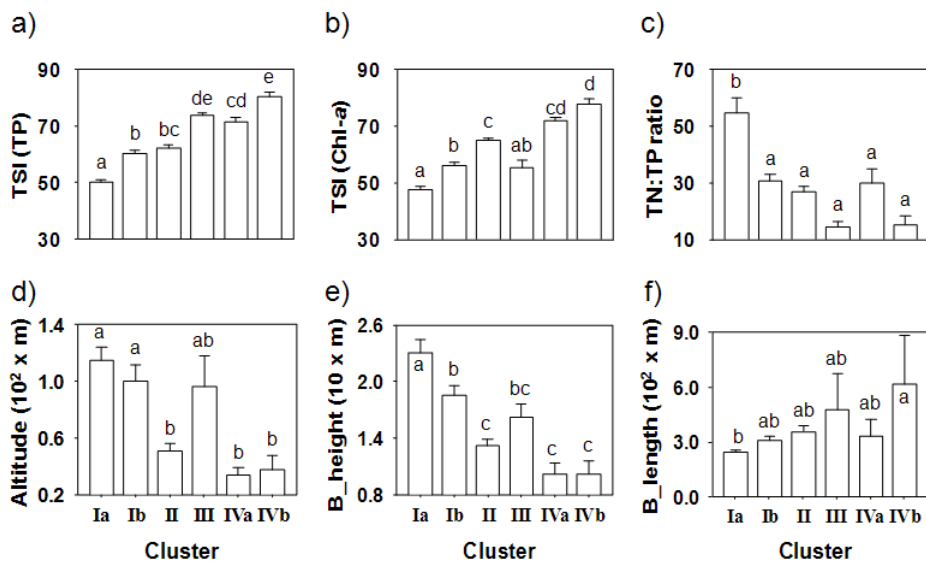


[그림 3.5.26] (a) SOM에 의한 저수지 유형, (b) SOM unit의 세부적인 분류, (b)는 Ward linkage 방법에 따라 분석



[그림 3.5.27] SOM 학습 결과 얻어진 각 수질인자의 분포 특성

[그림 3.5.27]은 6개의 수질 지수들로 학습된 SOM 상에서 분류된 각 저수지의 그룹별 제방 높이, 제방길이, 고도, TSI(Chl-a), TSI(TP), TN:TP 등의 차이를 나타낸 것이다. 먼저 각 그룹 간에 제방 높이와 길이는 음의 상관관계를 가지는 것을 볼 수 있다. 그리고 고도와 제방높이는 양의 상관관계가 있음을 보여준다. 따라서 앞서 살펴본 수질인자 등과 비교 한다면 Chl-a는 고도, 제방높이, 제방길이 등과도 밀접한 관계를 가지는 것을 보여준다. 고도가 높은 곳에 위치하는 제방의 높이가 높은 즉, 수심이 깊은 저수지에서는 녹조발생이 적으며 상대적으로 수질이 양호한 것을 제시해 준다. 한편 그룹 Ia로 분류된 저수지들은 고도 및 제방 높이가 가장 높고, TSI는 가장 낮은 것을 보여주고 있다. 반면 제방 길이는 상대적으로 낮으며, TN:TP는 가장 높다는 것을 보여준다. 그룹 IVb가 가장 높은 TSI를 보였으며, 반면 TN:TP는 가장 낮았다.

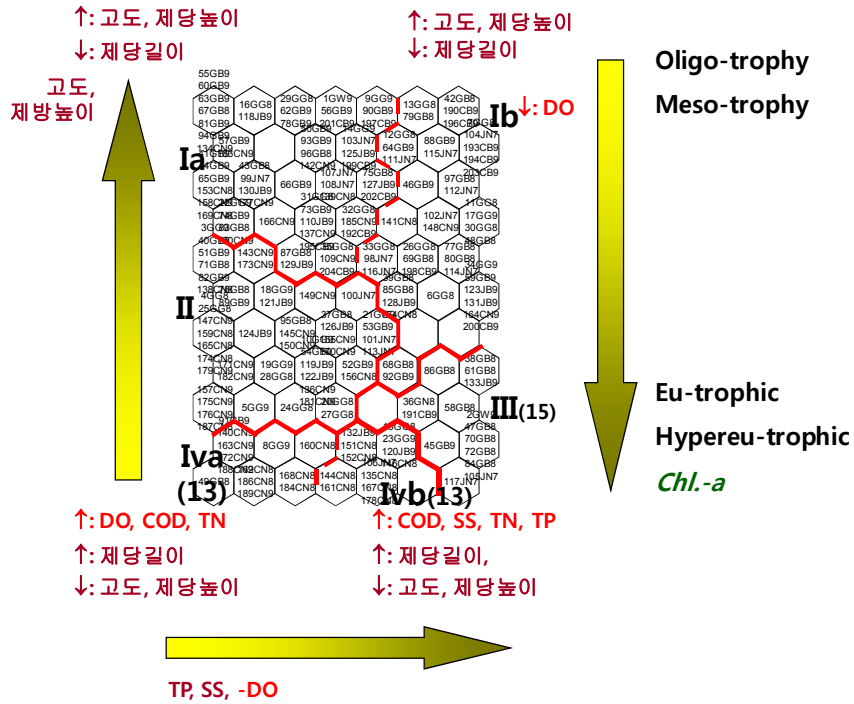


[그림 3.5.28] SOM에서 정의된 각 그룹별 TSI(TP), TSI(Chl-a), TN:TP 비, 고도, 제방높이(B_height), 제방길이(B_length) 차이

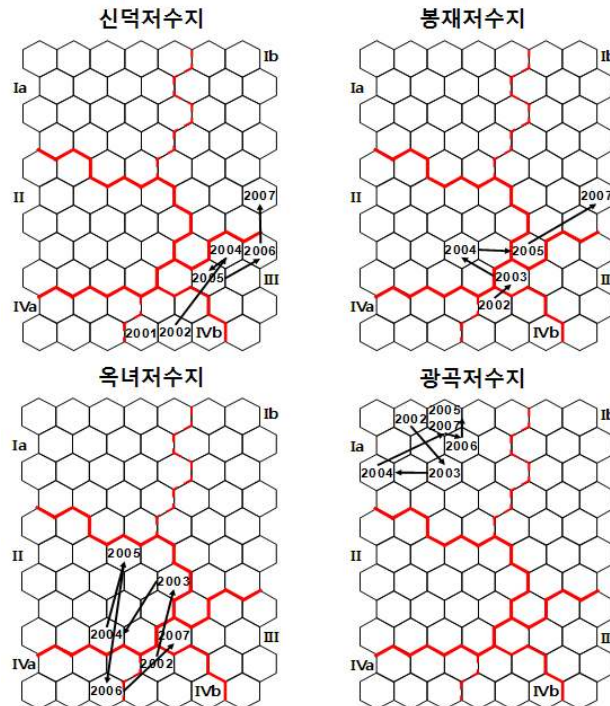
[그림 3.5.28]은 앞서 설명된 SOM의 결과를 종합한 것으로 저수지(그룹), 수질 인자, 수문학적 특성, Chl-a 농도 등의 관계를 볼 수 있다. 그룹 III, IVa, IVb는 고도가 낮은 곳에서 제방의 높이가 낮고, TN, TP, COD, SS 등이 높으며, 따라서 식물플랑크톤이 많이 발생하여 Chl-a의 농도가 높은 부영양화, 강부영양화 상태를 나타내는 저수지들이다. 반면, 그룹 Ia, Ib는 이와는 반대되는 특성을 가지는 빈영양 상태의 저수지임을 보여준다. 이러한 유형 특성은 농업용저수지의 수질을 효율적으로 관리하는데 매우 중요한 정보가 될 수 있을 것이다.

[그림 3.5.29]는 앞서 정의된 SOM에 의해 정의된 저수지 유형과 비교하여 연도별로 수질변동이 어떻게 되는가를 추적한 예이다. 사용된 수질인자는 유형을 정의하기 위하여 학습에 사용된 변수이며 값은 각 연도별 값으로서 학습에는 사용되지 않은 새로운 값이다. 옥너저수지는 다소 변동은 있으나 수질이 매우 악화된 상태로 크게 개선되지 않고 있으며, 신덕 및 봉덕 저수지는 2000년 초반보다는 수질이 미약하지만 다소 개선되고 있는 것으로 보이며, 광곡 저수지는 매우 맑은 수질을 계속유지하고 있다는 것을 보여준다. [그림 3.5.30]은 연도에 따라 예의 각

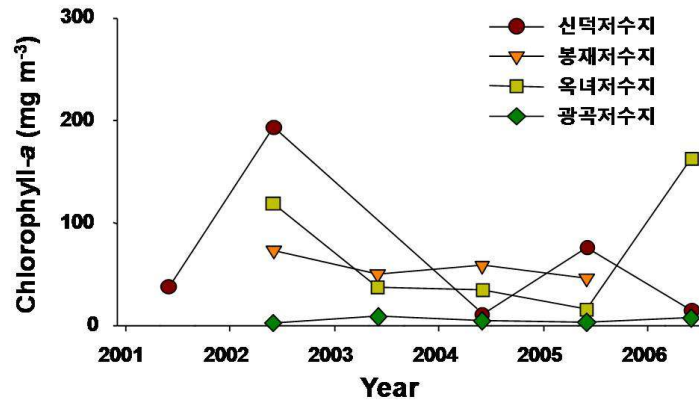
저수지별 수질을 나타내는 Chl-a 농도 변이를 보여준다. 이러한 방법은 실제 저수지 수질을 관리하는데 있어서 매우 유용하게 사용될 수 있다.



[그림 3.5.29] SOM에 의한 저수지 수질 유형 및 그 특성



[그림 3.5.30] SOM 유형에 새로운 수질 자료를 입력한 후 연도별 수질의 변동 추이 탐색 예



[그림 3.5.31] 저수지별 연도별 Chl-a 농도 변화 예

(2) CA 결과

SOM에 의한 저수지 수질 유형분류 결과를 일반적으로 많이 사용되는 다변량 통계법과 비교하기 위하여 CA, PCA, DCA, NMS, ISOMAP 등과 비교하였다. [그림 3.5.31]은 CA분석 결과를 보여 주는 것으로 저수지를 수질에 따라 크게 3개의 그룹으로 나눌 수 있을 것으로 제시해 주고 있으나 서로간의 상관관계를 밝히는데 어려움이 있으며 각 수질인자의 값이 어떠한 특성을 가지는 가는 설명하기 어렵다.

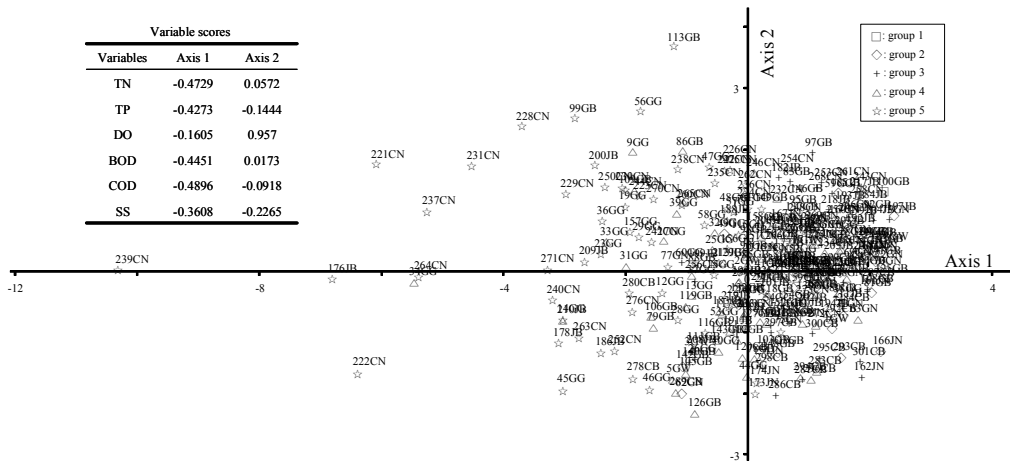


[그림 3.5.32] CA 분석. 가로축은 각각의 저수지 이름을 나타내며 세로축은 유사도를 나타냄

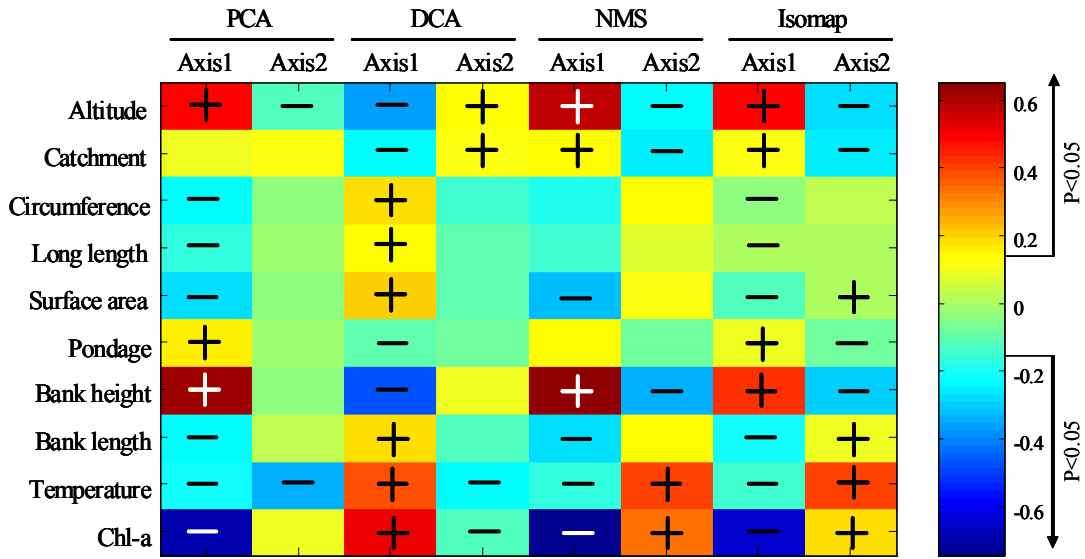
(3) PCA 결과

PCA를 통하여 2개의 주성분을 추출하였으며, PCA ordination 결과 전반적으로 영양염의 농도에 따라서 저수지들이 분리되는 것을 확인할 수 있다. 2개의 주성분은 자료의 전체 분산 중 64.4%를 설명할 수 있었으며 축 1의 고유치는 2.89, 축 2의 고유치는 0.97을 나타냈다[그림 3.5.32]. Kratzer와 Brezonik(1981)가 제시한 기준에 따라 5개의 그룹[표 3.5.4]로 영양상태를 나누는 뒤 PCA ordination에 적용한 결과 주로 충남과 경기지역(예, 239CN, 221CN, 237CN, 264CN)에 위치한 저수지들이 부영양화 또는 과영양 상태를 보였으며 PCA ordination의 왼쪽부분에 위치하였다. 반면 빈영양이나 중영양 상태인 저수지들(그룹 2와 3)의 경우 PCA ordination 오른쪽부분에 위치되어 있지만 그룹들 간의 데이터들이 얽혀있어 뚜렷한 구분이 어려웠다. 축 1의 왼쪽에 위치한 저수지들은 COD, TN, BOD, TP, SS 등의 높은 상관관계를 보였으며, 축 2의 경우 DO와 높은 상관관계를 나타냈다.

PCA ordination에 사용되지 않은 생물학적, 수리·수문학적 요인들 간의 스피어만 비모수 상관관계 분석 결과 축 1과 2의 경우 제방높이($r=0.62, p<0.01$), 고도($r=0.48, p<0.01$)와 높은 양의 상관관계를 보였으며 축 1과 Chl-*a* 농도($r=-0.70, p<0.01$)는 음의 상관관계를 보였다[표 3.5.5]. 이는 PCA ordination 왼쪽에 위치한 저수지들(예; 239CN, 176JB, 34GG, 264CN)이 높은 Chl-*a* 농도와 낮은 고도, 제방높이 값을 나타낸다. 각 축에 대한 상관관계는 [그림 3.5.33]로 나타내었다.



[그림 3.5.33] 6개 물리, 화학적 환경 인자를 이용한 농업용 저수지의 PCA 결과(축 1 고유치: 2.89, 축 2 고유치: 0.97). 저수지를 Carlson의 영양상태 지표에 따라 5개 그룹으로 나누어 표현



[그림 3.5.34] 수문학적 인자와 각 ordination 방법의 축 1과 2와의 상관관계. <표 3.5.5>를 도식화 하였음

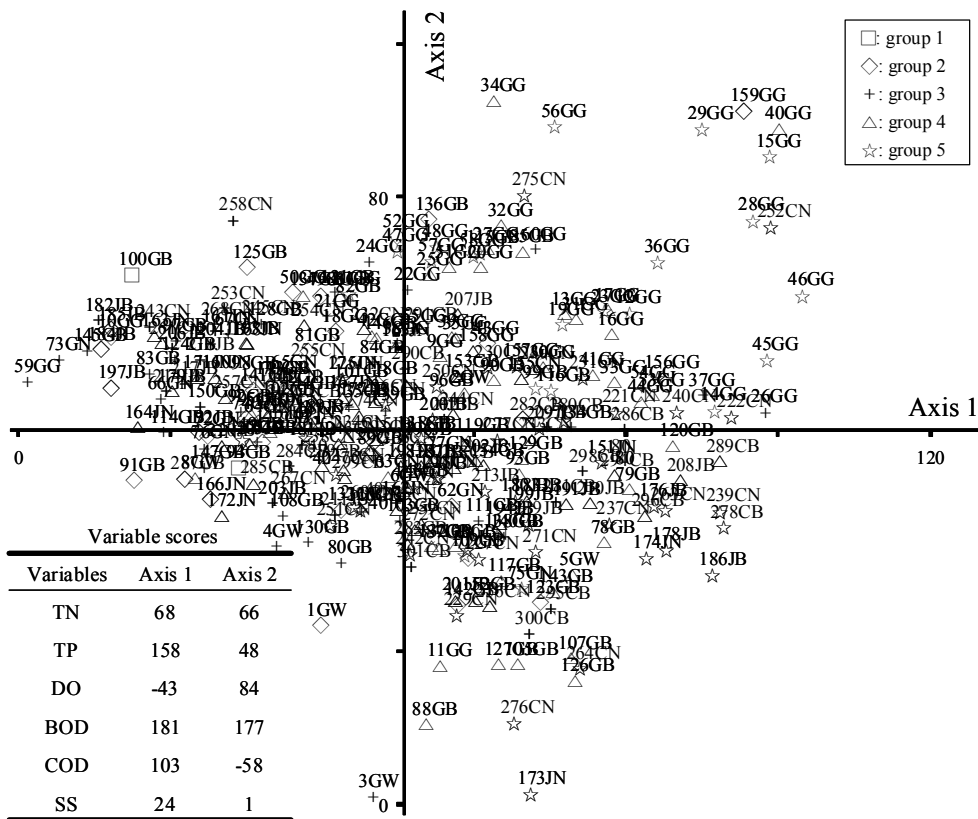
[표 3.5.4] 수리수문학적 인자와 각 ordination 방법의 축 1과 2와의 Spearman 상관관계계수.

Variables	PCA		DCA		NMS		Isomap	
	Axis 1	Axis 2	Axis 1	Axis 2	Axis 1	Axis 2	Axis 1	Axis 2
Altitude	0.48**	-0.12*	-0.36**	0.14*	0.58**	-0.23**	0.58**	-0.23**
Catchment	0.10	0.11	-0.23**	0.11*	0.14*	-0.27**	0.14*	-0.27**
Circumference	-0.22**	-0.04	0.19**	-0.14*	-0.20**	0.14*	-0.20**	0.14*
Long length	-0.16**	-0.02	0.13**	-0.11	-0.15*	0.07	-0.15*	0.07
Surface area	-0.28**	-0.04	0.21**	-0.11	-0.31**	0.13*	-0.31**	0.13*
Storage	0.17**	-0.02	-0.11	-0.08	0.14*	-0.08	0.14*	-0.08
Bank height	0.62**	-0.03	-0.48**	0.09	0.65**	-0.33**	0.65**	-0.33**
Bank length	-0.23*	0.02	0.19**	-0.13*	-0.28**	0.15*	-0.28**	0.15*
Temperature	-0.20**	-0.33**	0.37**	-0.24*	-0.17**	0.33**	-0.17**	0.40**
Chl-a	-0.70**	0.09	0.51**	-0.13*	-0.75**	0.40**	-0.75**	0.33**

* p<0.05, ** p<0.01

(4) DCA 결과

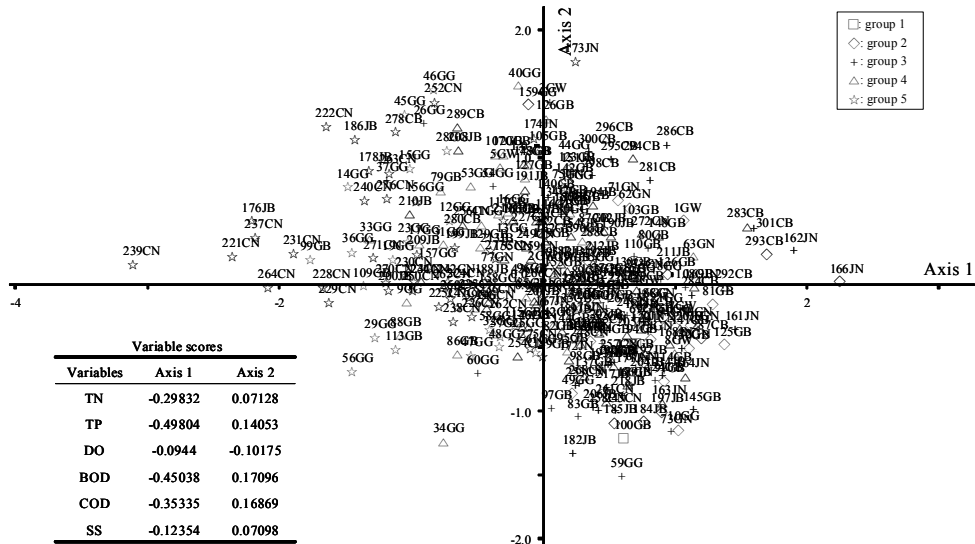
DCA(Detrended Correspondence Analysis) ordination 결과 영양염의 농도에 따라서 저수지들이 위치하였으며, 축 1과 2는 각각 0.061, 0.029의 고유치를 보였다[그림 3.5.34]. 부영양화(그룹 4)와 과영양화(그룹 5) 상태인 저수지들은 DCA ordination 오른쪽 부분에 위치하였으며 주로 경기지역에 위치한 저수지들(예, 159GG, 40GG, 29GG, 15GG)이 속하였다. 반면 다른 그룹에 속하는 저수지들은 DCA ordination상에서 뚜렷하게 나뉘지 않았다. DCA ordination의 첫 번째 축의 경우 TN, TP, COD, BOD, SS와 양의 상관관계를 보였으며 이는 축 1의 오른쪽에 위치한 저수지들이 높은 농도의 영양염을 가짐을 시사한다. 반면 축 1은 고도($r=-0.36, p<0.01$), 제방높이($r=-0.48, p<0.01$)와 음의 상관관계를 나타냈으며, Chl-*a* 농도와는 양의 상관관계를 나타냈다[표 3.5.5, 그림 3.5.33]. 이는 DCA ordination 오른쪽에 위치한 저수지들이 높은 농도의 영양염과 Chl-*a* 농도, 낮은 고도와 제방높이를 가짐을 의미한다.



[그림 3.5.35] 6개 물리, 화학적 환경인자를 이용한 농업용 저수지의 DCA ordination 결과(축 1 고유치: 0.061, 축 2 고유치: 0.029). 저수지를 Carlson의 영양상태 지표에 따라 5개 그룹으로 나누어 표현

(5) NMS 결과

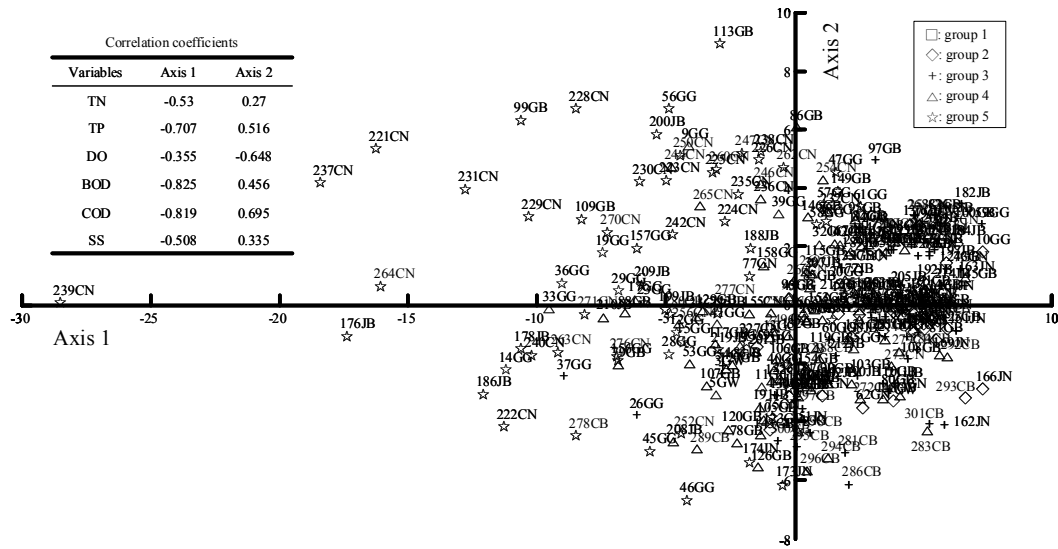
NMS ordination 결과 저수지들이 영양염의 농도에 따라서 분포하였으며, 이때 stress 값은 13.4로 나타났다. 전반적으로 부영양화와 과영양 상태를 보이는 저수지들은 NMS ordination 왼쪽부분의 위치한 반면 다른 그룹의 저수지들은 NMS ordination상에서 뚜렷하게 나뉘지 않았다 [그림 3.5.35]. NMS ordination의 첫 번째 축의 경우 TN, TP, BOD, COD, SS와 음의 상관관계를 나타내었으며, 이는 NMS ordination 결과 왼쪽에 위치한 저수지들이 높은 영양염을 가짐을 시사하였다. 또한 축 1은 고도($r=0.58, p<0.01$), 제방 높이($r=0.65, p<0.01$)와 양의 상관관계를 갖는 반면 Chl-*a* 농도와는 음의 상관관계를 보였다. 이는 NMS ordination 왼쪽에 위치한 저수지들이 영양염과 Chl-*a* 농도가 높게 나타나는데 반해, 낮은 고도, 제방 높이를 가짐을 나타낸다 [표 3.5.5, 그림 3.5.35].



[그림 3.5.36] 6개 물리, 화학적 환경인자를 이용한 농업용 저수지의 NMS ordination 결과(축 1과 2의 stress 값: 13.4, Monte Carlo test: $p<0.05$). 저수지를 Carlson의 영양상태 지표에 따라 5개 그룹으로 나누어 표현

(6) Isomap 결과

Isomap ordination 결과 저수지들이 영양염의 농도에 따라서 분포하였으며 축 1과 2는 각각 0.18, 0.08의 residual variances를 가졌다. 전반적으로 부영양화와 과영양 상태의 저수지들(예, 239CN, 237CN, 221CN, 264CN)은 Isomap ordination의 왼쪽에 위치하였다[그림 3.5.36]. 첫 번째 축은 BOD($r=-0.83, p<0.01$)와 가장 높은 음의 상관관계를 나타냈으며, 다음으로 COD, Chl-*a* 농도, TN, SS($p<0.01$)순으로 음의 상관관계를 나타냈다. 반면 제방 높이($r=0.65, p<0.01$), 고도($r=0.58, p<0.01$)와 양의 상관관계를 보였다. 이는 축 1의 왼쪽에 위치한 저수지들(예, 239CN, 237CN, 221CN, 231CN)이 높은 영양염과 Chl-*a* 농도를 가지며 고도와 제방 높이는 낮음을 의미한다[표 3.5.5, 그림 3.5.36].



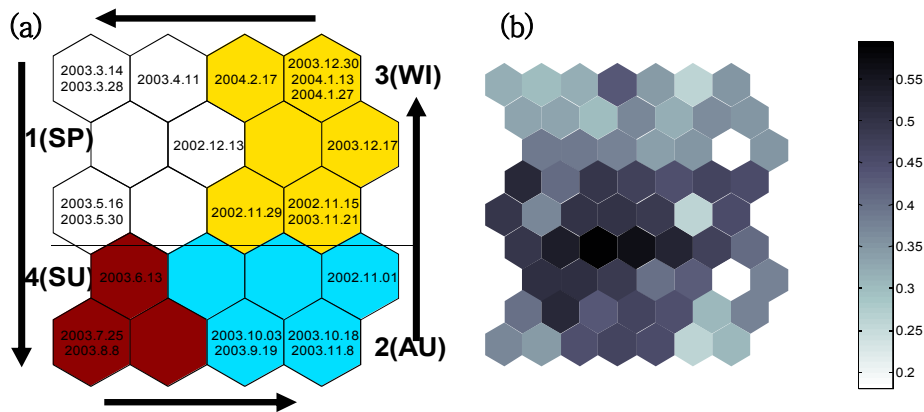
[그림 3.5.37] 6개 물리, 화학적 환경인자를 이용한 Isomap ordination 결과(residual variances: 축 1: 0.18, 축 2: 0.08). 301개 농업용 저수지를 Carlson의 영양상태 지표에 따라 5개 그룹으로 나누어 표현

Ordination 방법 중 좌표가 있는 PCA, DCA, NMS, Isomap 4가지 방법들을 비교하였다. 비교에서 SOM은 좌표 및 축을 제공하지 않기 때문에 비교에서 제외하였다. 그 결과 모두 유사한 ordination 유형을 보였지만 ordination 결과를 뒷받침 해주는 설명력에서 차이를 보였다. PCA의 경우 축 1과 2가 각각 2.89와 0.87의 고유치로 전체 분산의 64.4%를 설명한 것에 반해, DCA의 경우 축 1과 2가 각각 0.061과 0.029의 고유치를 나타냄으로써 DCA 결과를 뒷받침하기에는 낮은 값을 나타냈다. NMS의 경우 13.4의 stress값을 보였으며 Kruskal's rules of thumb에 의하면 이 값은 NMS결과를 설명하기에 유효하다고 판단 할 수 있다. McCune과 Grace(2002)는 대부분의 군집데이터는 10에서 20사이의 stress값을 가질 것이며 stress의 값이 낮을수록 NMS가 원 데이터를 잘 반영한다고 하였으며 stress값이 20을 초과할 경우 NMS의 해석에 문제가 있을수 있음을 지적하였다. 또한 Monte Carlo test의 유의 값이 0.01보다 낮음으로 NMS결과의 설명력을 또한 뒷받침 해준다. Isomap의 경우 원 데이터를 설명하기 위한 차원 축소의 에러를 평가하는 축 1과 2의 residual variance값이 0.18과 0.08로 낮지만 다른 ordination 방법들과 달리 variable scores와 같은 변수들의 좌표값들을 얻을 수 없기 때문에 이용에 제한이 있다. 따라서 4개의 ordination방법을 통하여 유사한 결과가 도출되었지만 4가지 ordination의 설명력을 근거로 하였을 때 PCA와 NMS가 저수지를 유형화 하는데 있어서 가장 효율적인 방법임을 보였다. 하지만 다양한 분석방법들 각각의 장점과 단점들로 인해 분석하고자 하는 데이터의 특성과 해결하고자 하는 연구 목적에 맞는 분석방법을 선택해야 할 것이다. SOM 및 CA, PCA, DCA, NMS, Isomap에 의한 저수지 유형 및 각 저수지의 TSI 값은 [부록 5]에 제시되었다.

마. 수질 특성 시간변동 유형화 결과

앞서 살펴본 전국 저수지 수질 유형화는 다양한 저수지들이 보여주는 저수지 수질 특성은 나타낸 것으로서 지리적, 공간적 분포 유형을 설명해 줄 수 있다. 따라서 다음으로 필요한 것은 하나의 저수지 내에서 시간적으로 어떠한 변이 특성을 보이는 가를 밝히는 것이다.

[그림 3.5.37]은 본 연구과제의 시험 저수지인 신구저수지에서 2002년 11월부터 2004년 2월까지 매월 2회씩 조사된 수질자료를 이용하여 신구저수지 수질의 시간적 변동을 유형화 한 것이다. 방법은 앞서 설명된 유형화에 가장 적합한 것으로 나타난 SOM을 이용하였다. [그림 3.5.37b]는 SOM unit들 간의 유사성을 구분하기 위한 U-matrix(Ultsch 1993) 결과를 나타내는 것으로 진한 색일수록 unit들 간에 차이가 많다는 것을 의미한다. 저수지 수질은 크게 4개의 그룹(유형)을 나타내 주었는데 이는 계절성을 잘 반영해 주고 있다. 그룹 1과 3, 그룹 2와 4가 큰 차이가 있음을 보여준다. 그룹 1은 봄, 그룹 4는 여름, 그룹 2는 가을, 그리고 그룹 3은 겨울을 나타낸다. 그리고 이러한 계절성은 봄과 겨울, 여름과 가을의 수질이 서로 유사하며 크게 2개의 그룹으로 나뉘질 수 있다.

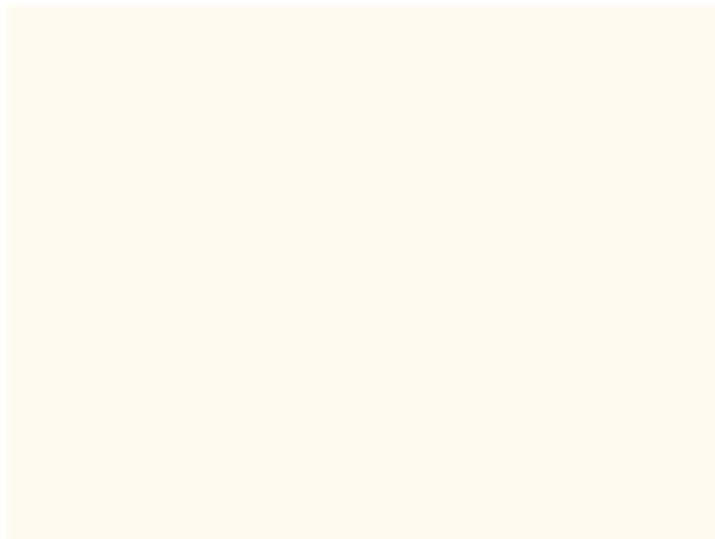


[그림 3.5.38] (a) SOM을 이용한 신구저수지 수질 시간적 변동 유형화, (b) SOM unit들 간의 유사성을 구분하기 위한 U-matrix. 진한 색일수록 unit들 간에 차이가 많다는 것을 의미함. 그룹 1과 3, 그룹 2와 4가 큰 차이가 있음을 보여줌. SP: 봄, SU: 여름, AU: 가을, WI: 겨울

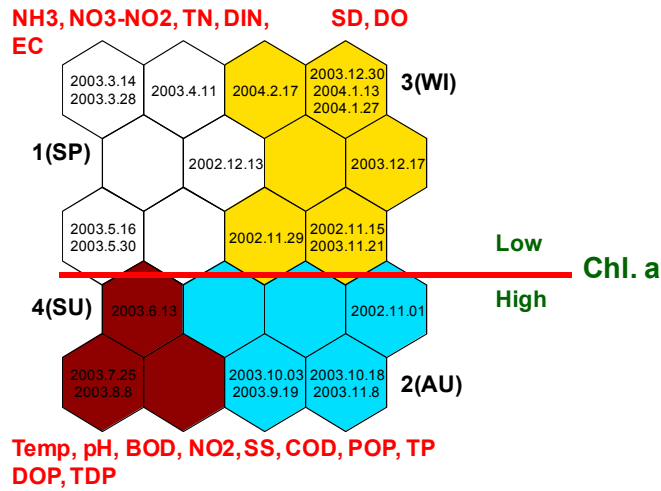
그림 3.5.38]은 SOM에 사용된 수질 인자와 SOM에서 학습된 결과 값을 보여준다. 진한 색은 높은 값, 밝은 색은 낮은 값을 나타낸다. SD(Sechi depth)는 SOM 맵의 위쪽 영역, 즉 그룹 1, 3(봄, 겨울)에서 높은 값을 나타내어 봄과 겨울철에는 저수지가 매우 투명하지만, 가을철에는 물이 매우 탁해진다는 것을 보여준다. DO 또한 봄과 겨울에 높은 값을 보였다. pH는 여름에 높은 값을 보여주어 알카리성으로 되는 것을 보여주고 있으며, BOD 또한 여름에 높은 값을 보였다. 그러나 SS, COD는 가을에 가장 높은 값을 보여 차이가 있었다. POP, TP는 봄과 겨울에는 낮지만 여름과 가을에 매우 높게 나타남을 보여준다.

[그림 3.5.39] SOM에 사용된 수질 인자의 학습된 값 분포도. 그룹 간에 수질인자의 뚜렷한 구배가 있음을 보여줌.

[그림 3.5.39]는 SOM에서 정의된 저수지 그룹(유형)별 Chl-*a* 농도를 나타내는 것으로 그룹 2(가을)에 가장 높으며, 그룹 4(여름)에도 상대적으로 높음을 보여준다. 그러나 그룹 1(봄), 그룹 3(겨울)에는 매우 낮다. [그림 3.5.40]은 SOM을 이용하여 신규저수지의 월별 수질 변동을 유형화 한 결과를 요약한 것으로 수질 인자가 계절에 따라 뚜렷한 차이가 있다는 것을 보여 주고 있으며, 이는 Chl-*a*의 농도 변화, 즉 식물플랑크톤의 대량증식과 밀접한 관계를 가지고 있음을 제시해 준다.



[그림 3.5.40] SOM에서 정의된 각 그룹(유형)별 Chl-*a* 농도 차이



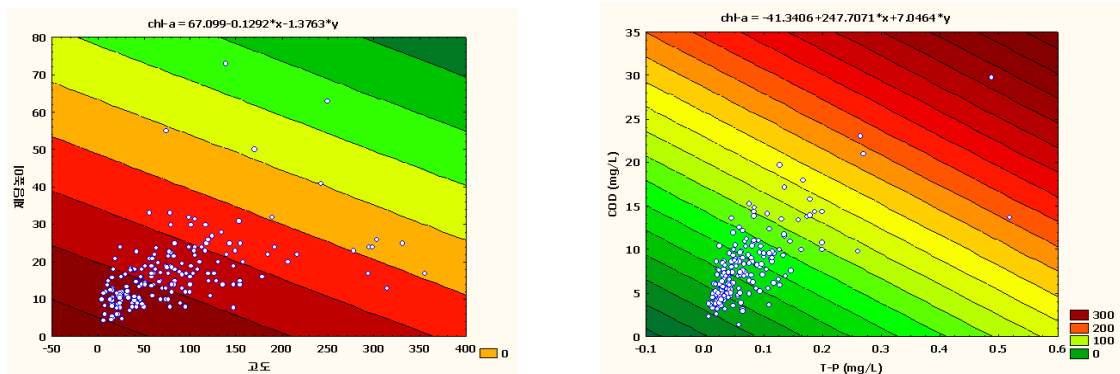
[그림 3.5.41] 신구저수지의 월별 수질 변동 특성 유형화 종합

바. 저수지 수질 예측 모델 결과

효율적으로 저수지 수질을 관리하기 위해서는 수질에 따른 유형을 정의하고 그에 따른 적절한 관리대책을 수립하는 것뿐만 아니라 환경특성에 따른 수질을 적절히 예측하는 것 또한 매우 필요한 부분이다. 따라서 본 연구에서는 지형학적, 수리수문학적 특성에 따른 수질인자 예측, 이화학적 인자에 따른 녹조발생 등을 다양한 예측모델을 이용하여 분석하였다.

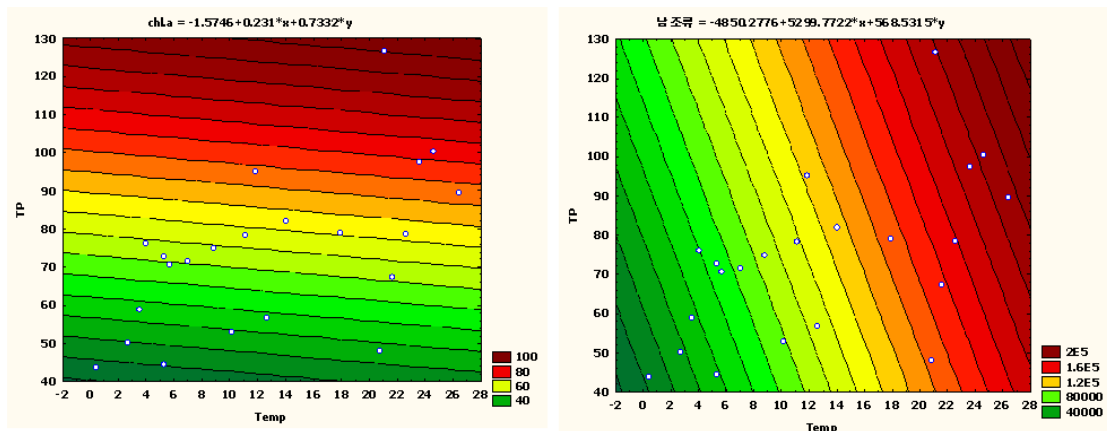
(1) 다중회기식에 의한 수질예측

[그림 3.5.41]은 앞서 살펴본 전국수질측정망자료를 이용하여 고도 및 제당높이, TP 및 COD 변화에 따른 Chl-a 농도 변동을 나타내는 것으로 $chl-a = 67.0999 - 0.1292 \times \text{고도} - 1.3763 \times \text{제당높이}$ 로 표현된다. 이는 Chl-a는 고도와 제당높이와는 음의 상관성을 가진다는 것과 일치하는 것이다. 한편 TP 및 COD 변화에 대해서는 $chl-a = -413.3406 + 247.7071 \times TP + 7.046 \times COD$ 로 표현되어 TP농도에 따라 Chl-a가 크게 증가하는 것을 보여준다.



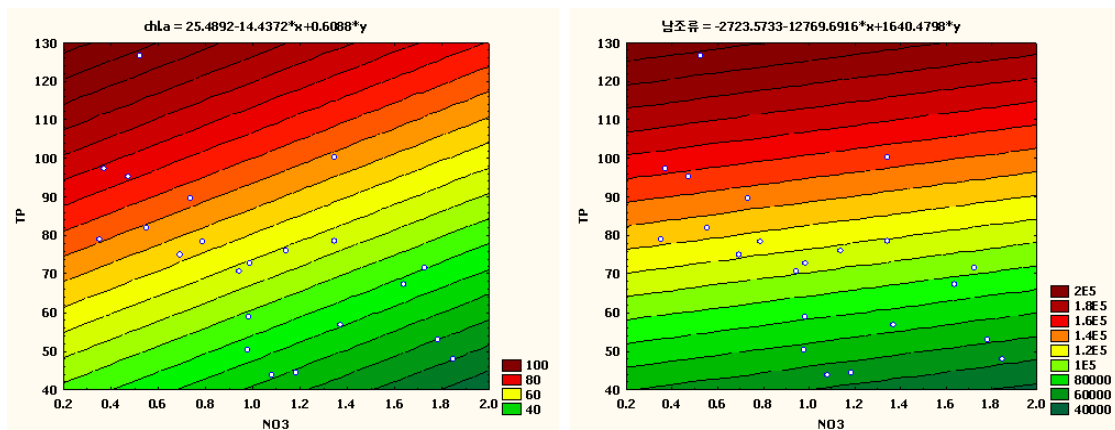
[그림 3.5.42] 고도 및 제당높이, TP 및 COD 변화에 따른 Chl-a 변동 모델

[그림 3.5.42]는 앞서 살펴본 신구저수지 자료를 이용하여 TP 및 온도에 따른 Chl-*a* 및 남조류 농도를 예측한 것으로 Chl-*a* 및 남조류는 모두 온도와 TP가 증가함에 따라 크게 증가하며, 특히 Chl-*a*는 온도보다는 TP에 크게 좌우되며, 남조류 농도는 온도에 증가에 따라 크게 증가한다. Chl-*a*는 $Chl-a = -1.5746 + 0.231 \times \text{온도} + 0.7332 \times TP$ 의 관계식을 통해 표현되며, Chl-*a*의 농도는 TP와 온도에 양의 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 또한 남조류는 $\text{남조류} = -4850.2776 + 5299.7722 \times \text{온도} + 568.5315 \times TP$ 의 관계식을 통해 표현되었으며, 이때 온도와 TP 모두 남조류와 양의 상관성을 보였다.



[그림 3.5.43] TP 및 온도에 따른 Chl-*a* 및 남조류 농도 예측

[그림 3.5.43]은 NO_3 및 TP에 따른 Chl-*a* 및 남조류 농도변화를 예측한 것으로 Chl-*a* 및 남조류는 모두 NO_3 보다는 TP에 증가에 따라 크게 증가한다. NO_3 및 TP에 따라 $Chl-a = 25.4892 - 14.4372 \times NO_3 - 0.6088 \times TP$ 로 표현되며, 남조류는 $\text{남조류} = -2723.5733 - 12769.6916 \times NO_3 + 1640.4798 \times TP$ 로 표현되었다.



[그림 3.5.44] NO_3 및 TP에 따른 Chl-*a* 및 남조류 농도 예측. Chl-*a* 및 남조류는 모두 NO_3 보다는 TP에 증가에 따라 크게 증가

(2) 판별분석을 이용한 농업용 저수지 영양상태 예측

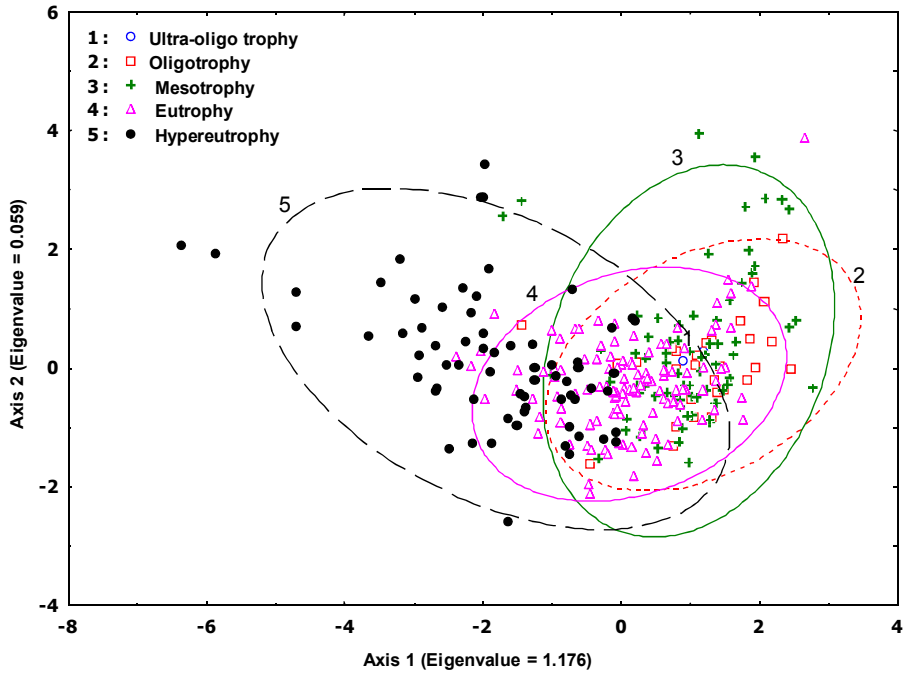
판별분석(discriminant function analysis)은 하나 이상의 판별 변수의 조합으로 이루어진 판별 함수에 의해 그룹 내 분산에 대해 그룹 간 분산을 최대화하고자 하는데 목적을 둔다. 이는 측정 변수들의 선형 결합 형태의 판별식을 구하고 이를 이용하여 새로운 개체를 분류하는 방법이다. 즉, 판별분석은 자료 수집시 이미 그룹이 나누어져 있으므로, 개체가 어느 그룹에 속하는지 판별하는 식을 구하고 이를 이용하여 새로운 개체를 분류하고자 하는 것이다.

농업용 저수지의 영양상태를 판별하기 위한 방법으로 농업용 저수지의 부영양화 정도를 TSI 값에 따라 5개 그룹으로 나누고, 이를 환경인자 특성을 기준으로 판별분석 하였다. 그 결과 전체 290개 저수지 중 148개가 올바르게 판별되어 전체 판별적중률은 약 60%를 보였다[표 3.5.6]. 각 그룹별 판별적중률은 부영양 및 과부영양 상태가 각각 80.7%와 65.7%로 높은 예측력을 보였다. 그러나 중영양 및 빈영양 상태에서는 각각 42.5% 및 6.9%로 낮게 나타났는데 이는 이들 그룹에서 많은 저수지들이 상위영양 상태로 예측되었기 때문이다. 이와 같이 보다 높은 영양상태로 판정하는 것은 해당 저수지에서 Chl-a의 농도가 보다 더 높아질 가능성이 있다는 것을 반영해 준다. 판별분석의 결과를 이용하여 정준분석을 수행한 결과, 첫 번째 축과 두 번째 축은 총변이에 대해 전체 96%의 설명력을 보여 부영양 상태가 명확히 구분될 수 있다는 것을 보였다[그림 3.5.44]

정준분석(canonical analysis)에 따른 5개 그룹의 분포는 가장 오른쪽에 빈영양상태를 나타내는 그룹이 분포하며, 왼쪽으로 갈수록 부영양화가 진행되어 가장 오른쪽에 과부영양상태를 나타내는 그룹이 분포한다. 그러나 극빈영양상태를 나타내는 그룹에 포함된 저수지의 수는 2개뿐이어서 명확한 경향성을 설명하기는 어렵다. 그룹의 판별분석에 영향을 주는 환경요인의 상대적 중요도를 정준 분석의 표준화 계수를 통해 나타내면, 첫 번째 축의 고유치는 1.176으로 총변이에 대해 91%의 설명력을 가지며, 표준화 계수에 의해 첫 번째 축에서의 변수들 간의 상대적 중요도는 COD, DO, TP의 순으로 나타났다[표 3.5.7]. 두 번째 축은 0.059의 고유치를 가지며, 수면적과 저수지 길이, 제방높이에 따라 구분되는 것을 보였다. 이러한 두 번째 축에서 인자들의 상대적 중요도는 호수의 형태적 특성이 수질특성에 크게 영향을 미친다는 것을 제시해 준다.

[표 3.5.5] 판별분석을 이용한 저수지의 5단계 영양상태에 따른 판별

	Predicted					Correct prediction(%)
	Ultra-oligotrophy	Oligotrophy	Mesotrophy	Eutrophy	Hyper-eutrophy	
Ultra-oligotrophy	0	0	1	1	0	0.0
Oligotrophy	0	2	13	13	1	6.9
Mesotrophy	0	0	31	40	2	42.5
Eutrophy	0	2	12	96	9	80.7
Hyper-eutrophy	0	0	0	23	44	65.7
Total	0	4	57	173	56	59.8



[그림 3.5.45] 농업용 저수지의 영양 상태에 따른 판별을 위한 판별분석의 정준분석

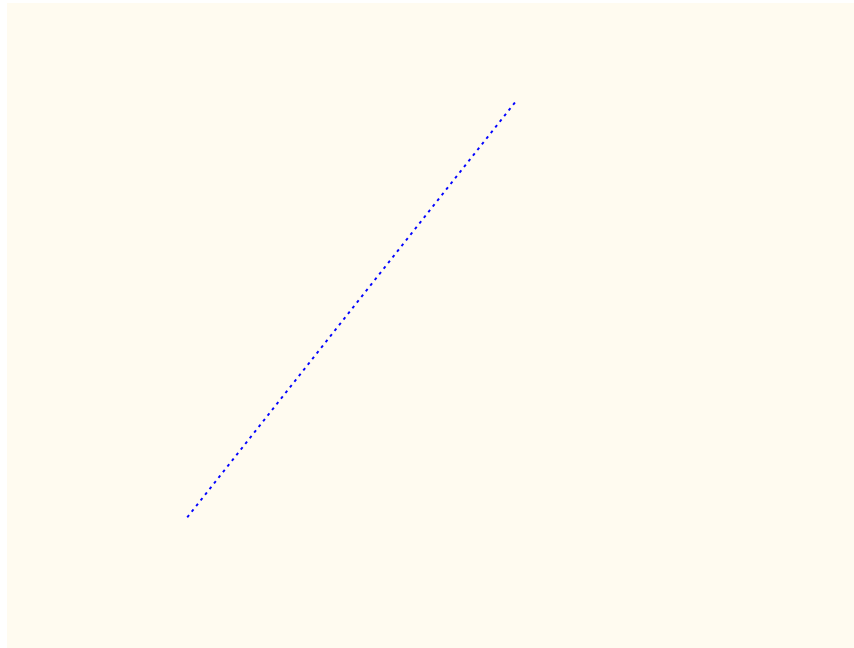
[표 3.5.6] 농업용 저수지의 영양 상태의 판별분석을 통한 표준화 판별계수

Variables	Axis 1	Axis 2
Altitude	0.119	0.188
Circumference	0.241	0.436
Reservoir length	-0.154	-0.676
Surface area	-0.351	0.668
Bank height	0.211	0.656
Bank length	-0.025	-0.214
Temperature	-0.124	-0.065
DO	-0.446	0.446
COD	-0.516	-0.100
SS	0.285	-0.125
TN	-0.117	-0.062
TP	-0.395	0.556
Eigen value	1.176	0.059
Cum. Proportion(%)	91.1	95.7

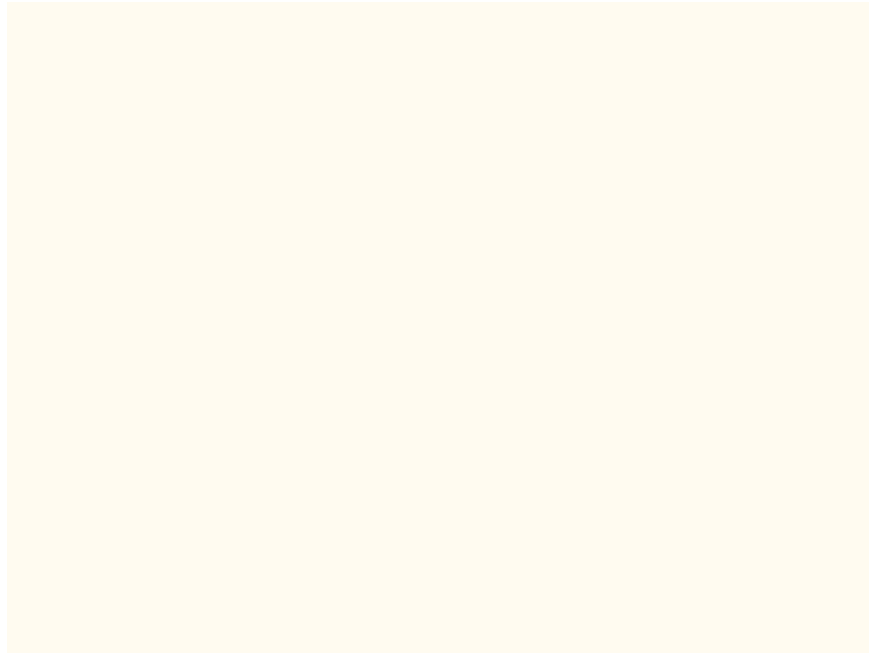
(3) MLR 모델 결과

전국 수질 자료를 이용하여 유형화 모델에서 사용된 수질 인자를 이용하여 저수지 수질을 나타내 주는 Chl-*a*의 농도를 예측하였다. 이를 위해 MLR과 인공신경회로망인 MLP를 이용하였으며 각각의 결과를 비교하였다.

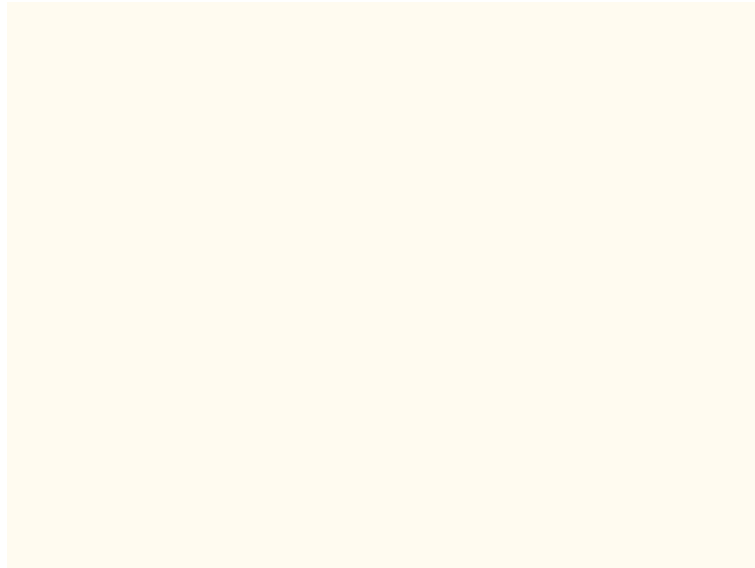
[그림 3.5.45]는 전국수질측정망 자료 중 환경인자로서 유역면적, 고도, 들레길이, 저수지길이, 저수량, 수면적, 제방높이, 제방길이, 온도, DO, BOD, COD, SS, TN, TP에 따라 Chl-*a* 농도 변화를 MLR에 따라 예측한 것이다. 야외 조사값과 MLR에 의해 예측된 값의 관계는 산포도로 나타내었으며, 이들 간의 상관관계계수가 0.81($r^2=0.64$)로 비교적 높게 나타났다. 그리고 각 인자의 정규화된 계수는 [그림 3.5.46]에 나타난 것과 같다. 이를 비교해 보면 COD가 Chl-*a*를 결정하는데 가장 중요한 요인이며, 다음은 TP가 중요한 인자이다. 그러나 예측 결과의 잔차(예측값-관찰값)의 분포를 보면 낮은 값에서는 모두 값이 실측치보다 높게 예측되어 있다[그림 3.5.47]. 이러한 특성은 잔차의 정규성(normality)을 보이지 않는 것으로 나타났다[그림 3.5.48].



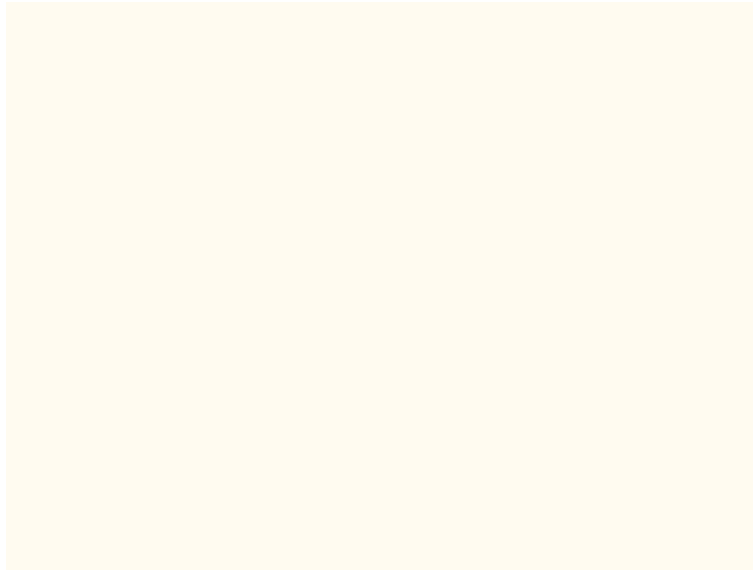
[그림 3.5.46] MLR에 의한 Chl-*a* 예측값과 실측값 비교. 점선은 1:1의 비로 예측되었을 때의 경향성을 나타내며, 실선은 실측값과 예측값 관계의 경향성을 나타냄



[그림 3.5.47] MLR에 의한 Chl-*a* 예측을 위한 수질지수의 계수. 정규화된 계수는 크기에 따라 중요성을 의미함. 1: 유역면적, 2: 고도, 3: 둘레길이, 4: 저수지길이, 5: 저수량, 6: 수면적, 7: 제방높이, 8: 제방길이, 9: 온도, 10: DO, 11: BOD, 12: COD, 13: SS, 14: TN, 15: TP



[그림 3.5.48] MLR에 의한 Chl-*a* 예측값의 잔차 분포

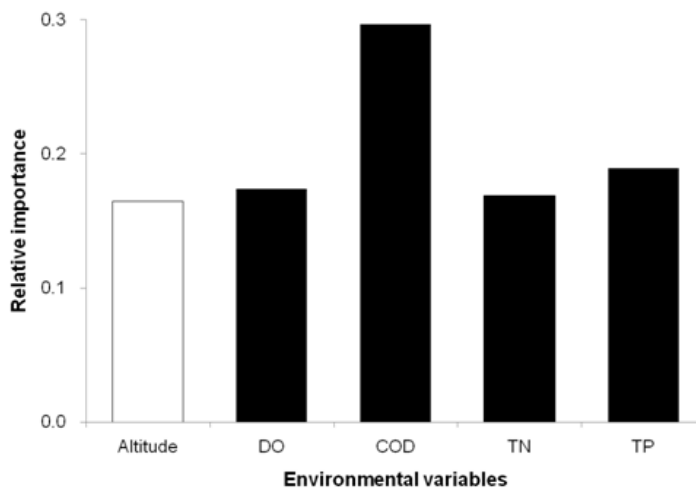


[그림 3.5.49] MLR에 의한 Chl-*a* 예측 모델의 정규성 검정

MLR model을 통해 최종적으로 얻어진 변수는 고도, DO, COD, TN, TP이었으며, 이들은 아래 식과 같이 표현된다.

$$y=0.083753-0.170118\times\text{고도}+0.240218\times\text{DO}+0.368904\times\text{COD}+0.267849\times\text{TN}+0.220307\times\text{TP}$$

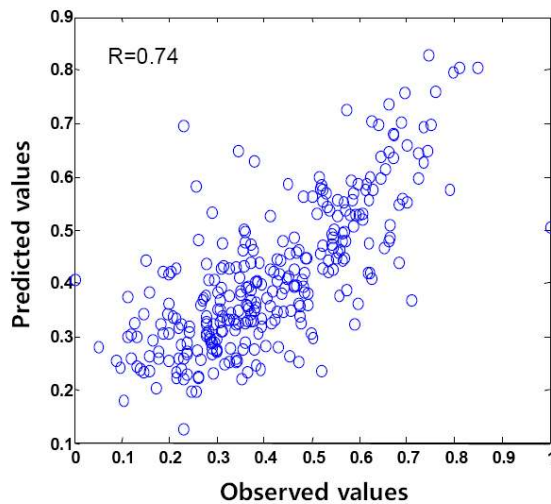
최종 얻어진 MLR 모델을 통한 농업용 저수지의 Chl-*a* 농도 예측에서도 환경인자들의 상대적 중요도는 COD가 0.2970으로 가장 높게 나타났다. 또한 MLR 모델에서 환경인자의 상대적 중요도는 TP(0.1896), DO(0.1741), TN(0.1691), 고도(0.1644)의 순서로 Chl-*a* 농도를 예측하는데 유의한 영향($p<0.05$)을 미쳤다[그림 3.5.49].



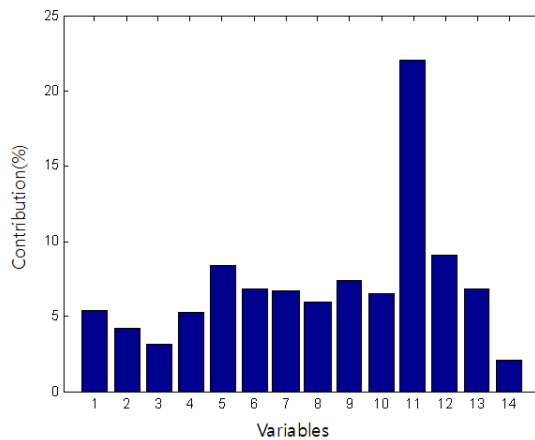
[그림 3.5.50] MLR 모델을 통한 Chl-*a* 농도 예측에서 환경인자들의 상대적 중요성($p<0.05$, 검은 막대: 양의 상관관계, 흰색 막대: 음의 상관관계)

(4) MLP에 의한 예측

[그림 3.5.50]은 인공신경회로망인 MLP를 이용하여 수질인자 변화에 따른 Chl-*a* 농도를 예측한 것으로 예측 값과 실측값의 분포가 다소 흩어져 나타나는 것으로 보이나 상관계수가 0.74로 비교적 높게 나타난다. 그리고 [그림 3.5.51]은 MLP에 의한 수질인자의 상대적 중요도를 나타낸 것으로 MLP 모델의 sensitivity analysis를 통하여 얻어진다. 그 결과 COD가 가장 중요한 인자인 것으로 나타났으며, 다른 이자들은 매우 낮은 기여도를 보였다. 이는 MLR 모델 결과와 일치하는 것이다. 그러나 일반적으로 알려져 있는 MLP 모델이 MLR 모델보다 예측력이 높다는 결과와 다소 차이가 있어 MLP 모델 개선을 개선하기 위하여 particle swarm optimization (PSO) 알고리즘을 도입하여 모델을 개발하였다.



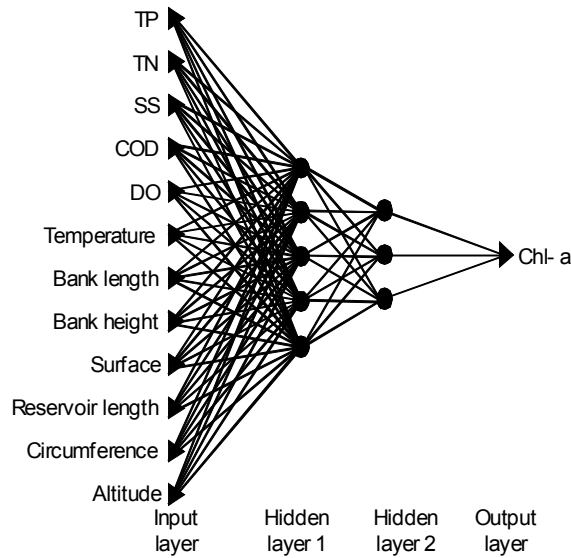
[그림 3.5.51] MLP에 의한 Chl-*a*의 예측. 값은 최대-최소값에 따라 0~1사이에서 정규화 되었음



[그림 3.5.52] MLP에 의한 Chl-*a* 농도 예측에서 수질인자의 중요도 평가. 세로축은 기여도(%), 가로축은 수질인자: 1: 고도, 2: 둘레, 3: 길이, 4: 저수량, 5: 수면적, 6: 제방높이, 7: 제방길이, 8: 온도, 9: DO, 10: BOD, 11: COD, 12: SS, 13: TN, 14: TP

(5) MLP-PSO 예측 결과

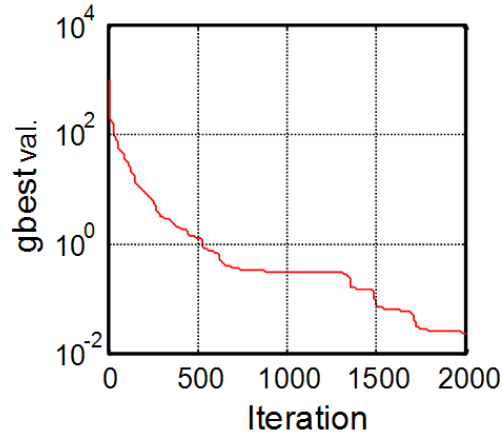
PSO 최적화 기법에 의한 MLP-PSO 모델의 입력층에는 13개 환경인자 값을, 출력층에는 입력층의 환경인자에 대응되는 저수지 수질을 나타내는 Chl-*a* 농도 값을 제공하여 예측하였다 [그림 3.5.52]. 즉, 3개의 층(입력층, 은닉층, 출력층)으로 구성된 MLP-PSO는 입력층에 환경인자들의 값을 할당하고 은닉층을 통해 최적해를 찾는다. 최적해는 출력층에 할당되는 Chl-*a*의 값과 비교해 최량해를 도출하게 되는 것이다.



[그림 3.5.53] PSO를 적용한 MLP-PSO 모델 모식도. 입력층(input layer)에서는 환경인자 값을, 출력층(output layer)에서는 예측하고자 하는 값(Chl-*a* 농도)을 제공. 일반적인 MLP에서는 은닉층(hidden layer)은 단수 또는 둘 이상의 복수의 층이 가능

PSO 알고리즘을 적용한 MLP-PSO 모델에서 입력층의 조건을 달리하여 각 조건에 따른 예측 결과를 비교하였다. 각 각의 조건은 입력층에 사용되는 환경인자 수를 변화 시킨 것으로, 전체 13개 환경인자를 모두 사용한 경우, Chl-*a*와 유의한 상관관계를 보인 12개 환경인자만을 사용한 경우, 이화학적 수질 인자 6개만을 사용한 경우로 구성하였다. [그림 3.5.53]은 학습과정에 따라 Gbest 값이 점차 감소하는 것을 보여준다.

위의 각 모델 조건에 따른 예측 결과는 Gbest(global best value)와 MLP-PSO 모델을 통해 얻은 예측값과 관찰값의 상관계수를 통해 비교 평가하였다. 세 모델 조건의 결과 Chl-*a* 농도와 유의한 상관관계를 보인 12개의 환경인자를 사용하는 경우와 6개의 환경인자만을 사용하는 경우 모두 13개 환경인자를 사용한 경우에 비해 낮은 Gbest값을 보여 상대적으로 높은 정확성을 보였다[표 3.5.8]. 특히 12개의 환경인자를 사용한 경우의 3개 뉴우런으로 구성된 단일 은닉층에서 Gbest의 값이 0.018207로 가장 낮았으며, 모델을 통한 예측력 또한 다른 조건들에 비해 높게 나타났다(학습 $r=0.755$, 검증 $r=0.831$, $p<0.05$). 이는 입력층에 12개의 뉴우런을 사용하고, 단일 은닉층의 3개 뉴우런으로 구성된 12-3-1 구조 모델이 가장 높은 효율성을 보였다.



[그림 3.5.54] 학습과정에 따라 Gbest 값의 점차 적인 감소 예

앞선 MRL 모델의 결과에서는 $r=0.81$ 의 예측력을 보였으나, MLP-PSO 모델의 최적 조건인 12-3-1로 구성된 구조에서 $r=0.83$ 의 예측력으로 MLR 모델의 결과보다 다소 높은 예측력을 보였다.

[표 3.5.7] 조건에 따른 MLP-PSO 모델의 예측 결과 비교

Variables*	No. hidden layer(s) and neurons	Gbest	Correlation coefficient	
			Train	Validation
6	Single	3	0.73005	0.83446
		5	0.73282	0.83778
	Double	3,5	0.72972	0.84161
		5,3	0.73534	0.83836
12	Single	3	0.75476	0.83071
		5	0.65264	0.76512
	Double	3,5	0.48154	0.51231
		5,3	0.74159	0.80683
13	Single	3	0.75206	0.83042
		5	0.67247	0.75979
	Double	3,5	0.62292	0.67221
		5,3	1.098	0.74888

* 6 variables: Temperature, DO, COD, SS, TN, TP

12 variables: Altitude, Circumference, L-length, Surface area, Height, Length, Temperature, DO, COD, SS, TN, TP

13 variables: Catchment area, Altitude, Circumference, L-length, Surface area, Height, Length, Temperature, DO, COD, SS, TN, TP

3. 생물구조 유형화

가. 식물플랑크톤 군집 유형화

생물구조 유형화를 위하여 본 연구의 시험저수지인 신구저수지에서 2002년 11월에서 2004년 2월까지 격주 단위로 건국대학교 물환경생태연구실에서 조사한 식물플랑크톤 군집을 자료를 이용하였다. 조사대상 농업용 저수지인 신구저수지는 수면적 0.1 km², 최대 수심 7 m, 유역면적 0.255 km²의 비교적 좁고 부영양화가 발생하는 저수지이다. 저수지의 깊이에 따라 상층, 중층, 하층(2 m 간격)으로 나누고 각 수층에서 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤 군집을 조사를 하였다. 또한 총 14개 이화학적 환경인자(SD(Secchi depth; 투명도), 온도, pH, 전기전도도, SS, BOD, DO, COD, TP, TN, NH₃-N, NO₂-N, SRP(soluble reactive phosphorus, NO₃))를 함께 측정하였으며, 이들 환경인자의 특성은 [표 3.5.9]에 요약된다.

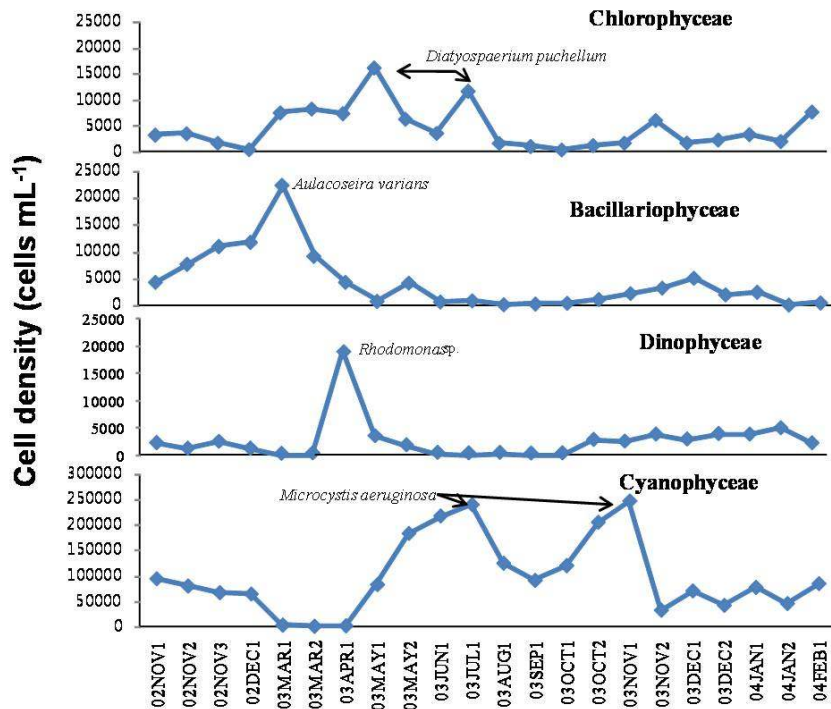
나. 식물플랑크톤 군집 자료 특성

조사 기간 중 신구저수지에서 식물플랑크톤은 총 66종이 동정되었으며, 이중 녹조류(Chlorophyceae)가 36종으로 가장 많았으며 남조류, 규조류, 편모조류 순으로 나타났다. 상층에서는 52종, 중층에서는 50종, 하층에서는 56이 채집되었다. 그러나 이 중 여름철 저수지의 녹조 현상을 야기하는 남조류의 경우 관찰된 종의 수는 녹조류에 비해 상대적으로 적었으나, 전체 cells density는 4종의 식물플랑크톤 중 가장 많이 관찰되었다. [그림 3.5.54]는 상층에서의 각 분류군별 cells density의 조사기간 동안의 변화 양상을 나타낸 것이다. 남조류는 여름철에 가장 높은 밀도를 보였으며, 이 기간 중 *Microcystis aeruginosa*가 우점종으로 나타났다. 이에 비해 녹조류, 규조류, 편모조류는 봄철에 상대적으로 높은 cells density를 보였다.

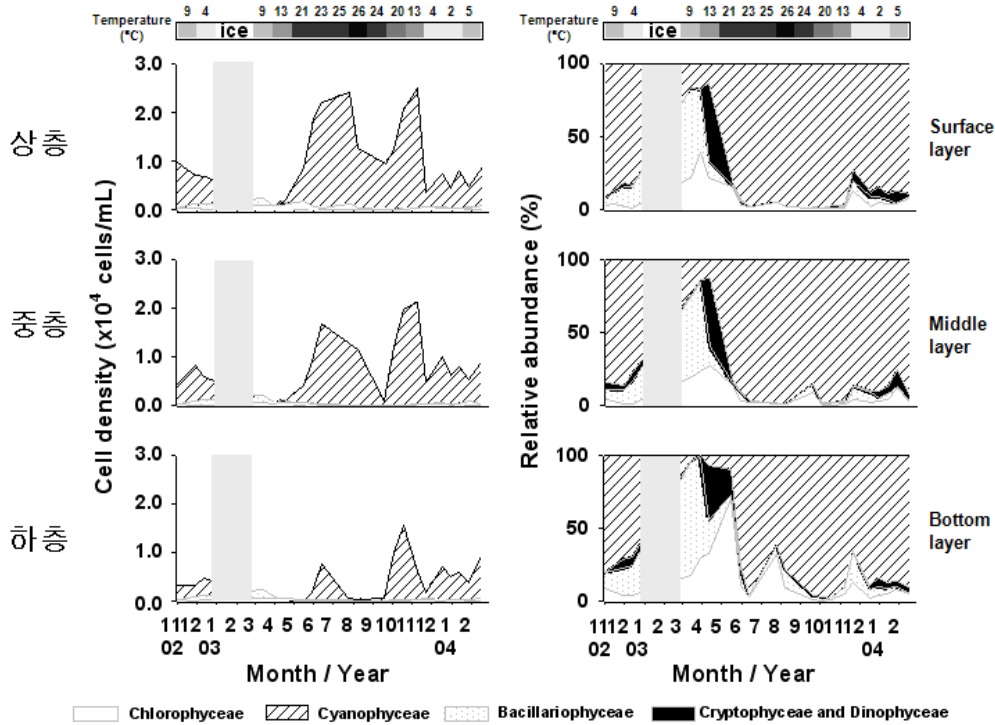
전체적으로 남조류가 가장 높은 밀도를 보이고 있으며, 특히 여름과 가을에 매우 높지만 봄에는 매우 낮은 값을 보여주고 있다. 반면 3월, 4월, 5월 등 봄에는 Bacillariophyceae, Chlorophyceae, Dinophyceae가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 봄철에 온도, 영양염류 등의 변화에 따라 식물플랑크톤 군집이 변화하고 있다는 것을 보여주고 있다. 이러한 군집변이는 수심에 따라 나타나는 특성이 다소 차이가 있으며, 특히 수심에 따라 봄철에 Bacillariophyceae, Chlorophyceae, Dinophyceae 등이 정점을 보이는 시기가 표층에서보다는 다소 늦어지는 것으로 보인다.

[표 3.5.8] 신구저수지 각 층의 환경인자 특성(2002년 11월에서 2004년 2월까지)

Variables	Surface layer		Mid layer		Bottom layer	
	Mean(SD)	Range	Mean(SD)	Range	Mean(SD)	Range
SD(m)	0.75(0.19)	0.5~1.2	-	-	-	-
Temperature(°C)	12.77(8.22)	0.4~26.4	12.07(7.54)	1.8~23.6	11.68(7.00)	1.8~21.5
pH	8.43(0.92)	6.7~9.87	8.03(0.93)	6.19~9.34	7.69(0.86)	6.11~9.55
Conductivity (µS cm ⁻¹)	178.91(38.62)	107~228.8	181.15(39.88)	96~229.1	182.67(43.34)	102~251.4
DO(mg L ⁻¹)	11.58(1.48)	8.9~15	10.52(2.6)	5~13.5	7.31(5.03)	0~13.7
SS(mg L ⁻¹)	13.19(5.56)	5~28	11.99(4.13)	4.5~22	16.47(9.36)	7.7~45
BOD(mg L ⁻¹)	4.49(1.00)	2~6.6	4.06(0.73)	2.2~5.3	3.67(1.03)	2.1~5.5
COD(mg L ⁻¹)	10.07(2.22)	5.7~13.4	10.17(1.89)	6.1~12.8	8.68(2.63)	1.3~13.5
NH ₃ -N(mg L ⁻¹)	0.29(0.27)	0.00~0.92	0.34(0.25)	0~0.96	0.64(0.61)	0.15~2.53
NO ₂ -N(mg L ⁻¹)	0.03(0.02)	0.01~0.08	0.04(0.05)	0.01~0.24	0.06(0.07)	0.01~0.24
NO ₃ (mg L ⁻¹)	1.04(0.46)	0.35~1.85	1.09(0.47)	0.35~1.84	1(0.43)	0.29~1.74
TN(mg L ⁻¹)	2.41(0.47)	1.6~3.2	2.45(0.64)	1.5~3.5	2.49(0.84)	1.1~4.5
SRP(µg L ⁻¹)	4.19(2.06)	0.6~8.8	3.38(1.67)	0.1~8.6	7.23(12.26)	0.1~56.7
TP(µg L ⁻¹)	73.5(20.55)	43.9~126.6	68.88(11.96)	46.9~94.5	79.26(19.57)	46.9~117



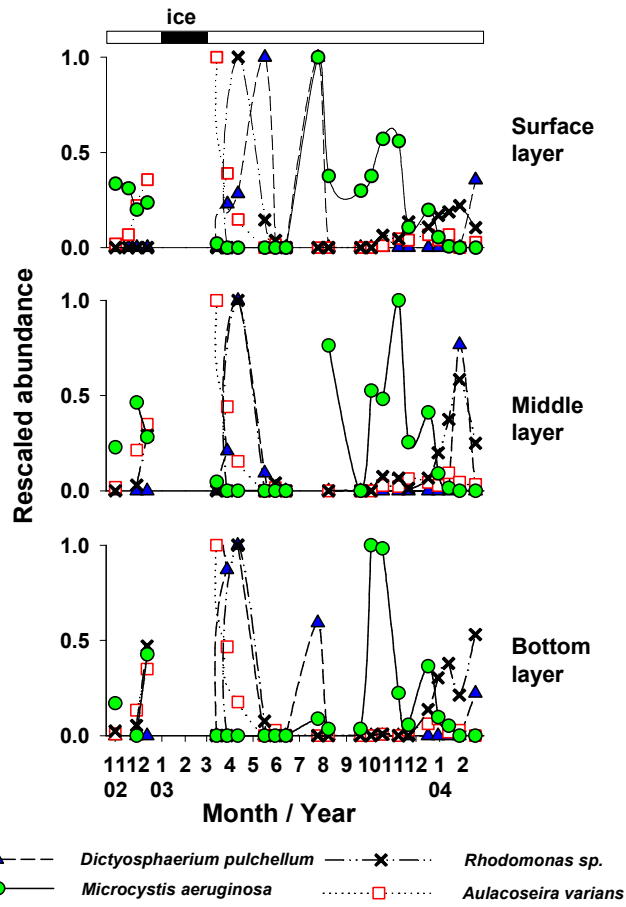
[그림 3.5.55] 식물플랑크톤의 계절적 변동



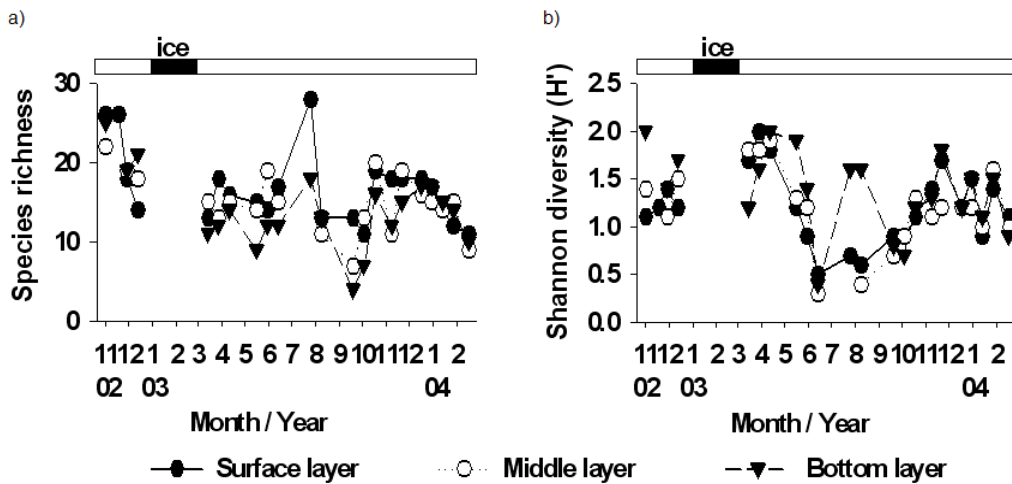
[그림 3.5.56] 수심에 따른 식물플랑크톤 분류군 밀도 변동 및 상대밀도

[그림 3.5.56]은 시기에 따른 각 분류군별 우점종의 밀도를 최고값을 기준으로 비례하여 나타낸 것으로 앞서 언급된 식물플랑크톤 군집의 천이를 잘 반영해 준다. 상층에서는 3월에 *Auacoseira varians*가 높은 밀도를 보이고, 다음으로 4월, 5월에 *Rhodomonas* sp., *Dictyosphaerium phulchellum*이 높은 밀도를 보이며 마지막으로 8월에 *Microcystis aeruginosa*가 높은 밀도를 보이는 순으로 나타나고 있다. *Microcystis*는 가을에 다시 한 번 높은 밀도를 보인다.

[그림 3.5.57]은 깊이에 따른 식물플랑크톤의 월별 종풍부도 및 Shannon 다양도 변동을 나타낸 것으로 여름철에 상층부에서 종풍부도가 가장 높게 나타났으며 하층에서 상대적으로 낮게 나타났다. 종풍부도는 대체적으로 11월에 높은 값을 보였으며 9월에 중층과 하층에서 크게 감소하였다. 이에 비해 Shannon 종다양도지수는 봄철에 가장 높은 값을 보였으며 여름철에 가장 낮은 값을 보였다. 그러나 여름철에 하층부에서 다양도지수가 가장 높게 나타나 종풍부도와는 차이를 보였다. 이는 하층에서 여름철에 출현하는 종수가 적지만 각 종의 개체수가 상대적으로 비슷하게 나타났기 때문이다.



[그림 3.5.57] 주요 우점종의 시기에 따른 상대밀도 변동



[그림 3.5.58] 깊이에 따른 식물플랑크톤의 월별 종풍부도 및 종다양도 변동
(a: 종풍부도, b: Shannon 다양도지수)

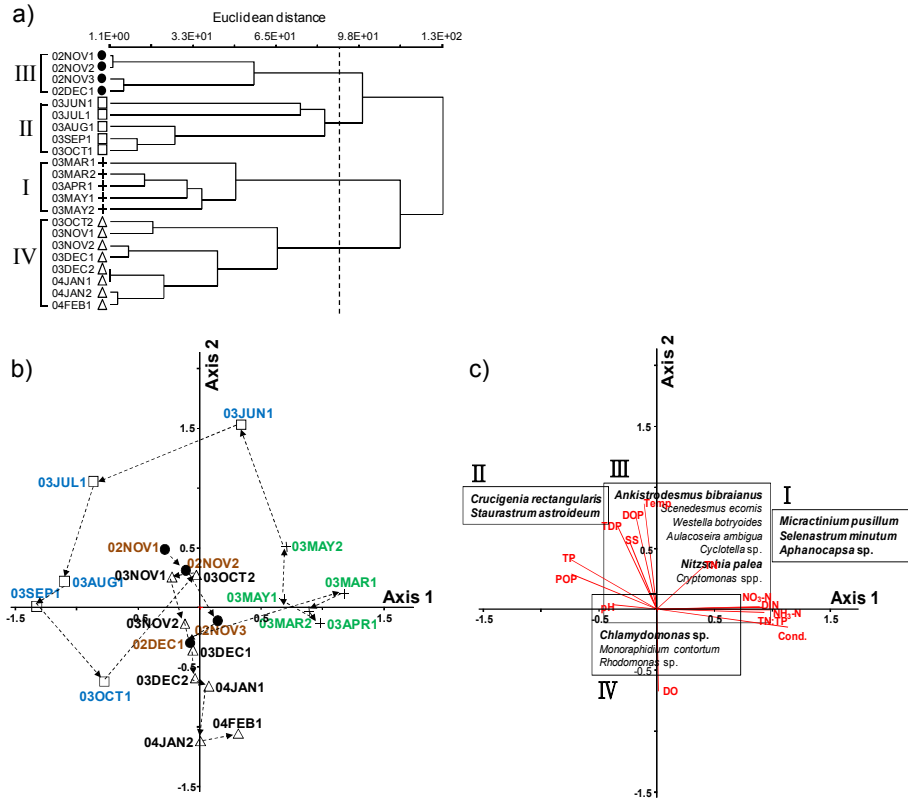
다. 식물플랑크톤 군집 유형화

앞서 수질 유형화 방법론에서 설명된 바와 같이 비모수 다차원척도법(NMS)은 군집분석과 같이 여러 개체들을 대상으로 몇 개의 특성변수를 측정한 후에 이 변수들을 이용하여 개체들 사이의 거리 또는 비유사성을 측정하고, 이를 이용하여 개체들을 2차원 또는 3차원 공간상의 점으로 표현하는 통계적 분석방법이다. 군집분석은 개체들 간의 비유사성을 이용하여 동일한 그룹들로 분류하고자 한다. 반면 NMS는 개체들의 비유사성을 이용하여 공간상에 표시함으로써 개체들 간의 상대적인 위치를 표시하고, 이를 이용하여 유사한 개체들을 파악하며, 이들 개체들을 2차원 공간상에 점으로 표현하여 개체들 사이의 집단화를 시각적으로 표현하는 분석방법이다(<http://www.pvalue.co.kr/>). 이러한 NMS는 유사성이 작은(비유사성이 큰) 대상끼리는 멀리, 유사성이 큰(비유사성이 작은) 대상끼리는 가깝게 위치를 정한다.

[그림 3.5.58]은 신구저수지 상층부 식물플랑크톤 군집 분석결과를 보여주는 것으로 Cluster 분석 결과 크게 4개의 그룹으로 나뉘어졌다. 각 그룹은 MRPP 분석 결과 유의한 차이를 보였으며($p < 0.05$), 각 그룹은 식물플랑크톤의 시기별 별동을 잘 반영해 주었다. 그룹 I은 평균온도 14.42°C로 3월, 4월, 5월의 봄 자료를 나타내 주었으며, 그룹 II는 평균 온도 23.66°C 6월~10월의 자료로 여름 및 가을 자료를 반영해 주었다. 그리고 그룹 III은 평균 7.58°C 11월 가을 자료, 그룹 IV는 평균 7.53°C로 12월~2월이 겨울 자료를 나타내 주었다. 한편 각 그룹들에서의 TP 값은 그룹 II에서 98.54 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 그룹 I에서 59.42 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 낮은 값을 보였다.

이러한 시기별 그룹은 NMS ordination에서도 명확하게 반영되었다. NMS ordination에서 축 1과 축 2는 전체 분산의 69%(축 1 $r^2=0.34$, 축 2 $r^2=0.35$)를 설명하였다[그림 3.5.58b]. 각 축은 Monte Carlo permutation tests 결과 유의함을 보였다($p=0.01$). 봄 자료인 그룹 I은 오른쪽, 그룹 II는 왼쪽 위, 그룹 III은 중앙, 그룹 IV는 중앙 아래쪽에 주로 위치하였다. indVal(Dufrene & Legendre 1997) 분석에 의한 각 그룹별로 지표종은 그룹 I은 *Selenastrum minutum*, *Aphanocapsa* sp. 등을 포함하는 3종이었으며, 그룹 II는 *Crucigenia rectangularis*, *Staurastrum astroideum* 2종이 지표종으로 나타났다. 한편 그룹 III은 *Ankistrodesmus bibraianus*, *Nitzschia palea*을 포함하는 7종이 지표종이었으며, 그룹 IV는 *Chlamydomonas* sp. 등을 포함하는 3종이 지표종이었다.

한편 환경인자의 영향을 평가하기 위하여 NMS 각 축에 대하여 환경인자의 상관관계계수를 계산한 결과가 유의성(Pearson correlation coefficient, $p < 0.05$)을 보이는 변수들을 [그림 3.5.58c]에 화살표로 표기하였다. 축 1은 전기전도도($r=0.80$, $p < 0.05$)와 가장 관계가 높았으며, 다음으로 $\text{NH}_3\text{-N}$ ($r=0.75$, $p < 0.05$), $\text{NO}_3\text{-N}$ ($r=0.72$, $p < 0.05$), TP($r=0.68$, $p < 0.05$), TN($r=0.48$, $p < 0.05$), pH($r=0.46$, $p < 0.05$) 순이었다[표 3.5.10]. 한편 축 2는 온도($r=0.70$, $p < 0.05$)와 높은 양의 상관성을 보였으며, 다음으로 SS($r=0.56$, $p < 0.05$), TN($r=0.45$, $p < 0.05$)이 높은 상관성을 보였다. 그러나 DO($r=-0.62$, $p < 0.05$) 음의 관계를 보였다. 질소와 인은 식물플랑크톤 군집에 대하여 서로 다른 관계를 보였다. 봄(그룹 I)에는 전기전도도와 질소 관련 인자들이 높은 값을 보였으나, 인 관련 인자들은 여름(그룹 II)에 높은 값을 보였다. 이는 인이 조류 대발생 등에 크게 영향을 미치는 것을 반영해 준다.

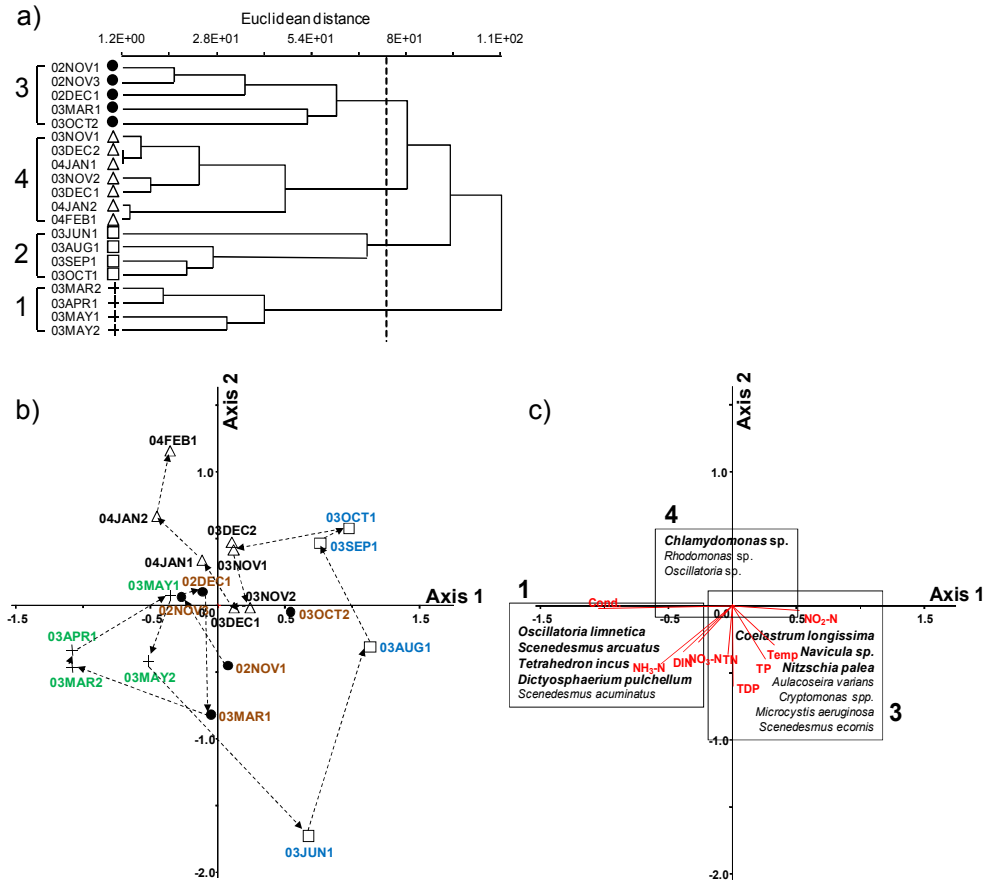


[그림 3.5.59] 상층부 식물플랑크톤 군집 분석. (a) Cluster 분석, (b) NMS ordination, (c) 각 그룹별 환경인자 및 지표종

[표 3.5.9] 신구저수지 각 층에서의 NMS 축과 환경인자들간의 상관계수

Variables	Surface layer		Mid layer		Bottom layer	
	Axis 1	Axis 2	Axis 1	Axis 2	Axis 1	Axis 2
Secchi depth(m)	0.39	-0.41	-0.24	-0.61 *	-0.31	0.60 *
Temperature(°C)	-0.25	0.70 *	0.44 *	-0.08	0.12	-0.24
pH	-0.46 *	0.13	-0.24	0.07	-0.29	-0.03
Conductivity($\mu\text{S cm}^{-1}$)	0.80 *	-0.29	-0.06	-0.37	-0.01	0.74 *
DO(mg L^{-1})	0.08	-0.62 *	-0.31	-0.03	-0.07	0.15
SS(mg L^{-1})	-0.36	0.56 *	0.09	0.33	-0.01	-0.19
BOD(mg L^{-1})	-0.14	0.13	0.15	-0.40	0.19	0.18
COD(mg L^{-1})	-0.15	0.20	0.10	0.18	-0.20	0.33
NH ₃ -N(mg L^{-1})	0.75 *	-0.07	0.32	-0.53 *	0.21	0.71 *
NO ₂ -N(mg L^{-1})	-0.28	0.40	0.32	-0.09	0.30	-0.23
NO ₃ (mg L^{-1})	0.72 *	0.07	0.37	-0.66 *	0.42	0.16
TN(mg L^{-1})	0.48 *	0.45 *	0.49	-0.37	0.45 *	0.47 *
SRP($\mu\text{g L}^{-1}$)	-0.35	0.02	0.09	0.14	0.42	-0.49 *
TP($\mu\text{g /L}^{-1}$)	-0.68 *	0.40	0.43	0.54 *	0.49 *	-0.27

Note: *: p<0.05



[그림 3.5.60] 중층부 식물플랑크톤 군집 분석. (a) Cluster 분석, (b) NMS ordination, (c) 각 그룹별 환경인자 및 지표종

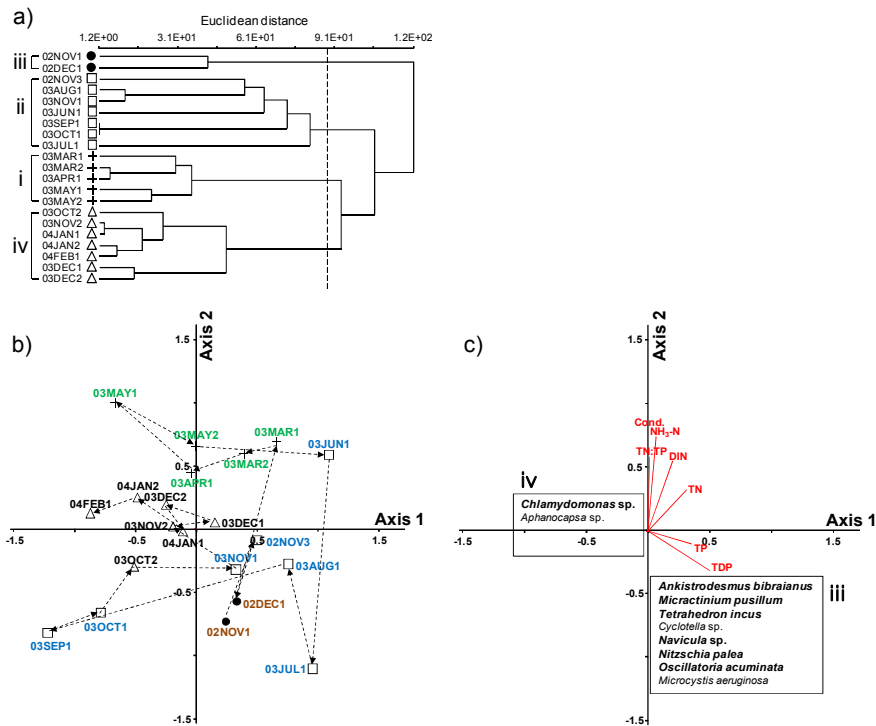
[그림 3.5.59]는 신규저수지 중층부 식물플랑크톤 군집 분석결과를 보여주는 것으로 Cluster 분석 결과 상층부에서와 같이 크게 4개의 그룹(1~4)으로 나뉘어졌다. 각 그룹은 MRPP 분석결과 유의한 차이를 보였다($A=0.123$, $p<0.0001$), 각 그룹은 식물플랑크톤의 시기별 별동을 잘 반영해 주었다. 그룹핑이 상층부와 유사하기는 하지만 중층부에서 계절성은 상대적으로 약하게 나타났다. 이는 다른 계절들의 군집자료가 각기 다른 그룹, 특히 그룹 3에 속하였다는 것을 보여준다. 그룹 1의 표본은 3월~5월까지 분포하였으며, 그룹 2는 6월~10월의 표본으로 구성되었다. 그룹 3은 2002년 11월, 12월, 2004년 11월~2월의 자료가 혼재하였으며, 그룹 4는 가을과 겨울(2003년 11월~2004년 2월)의 자료로 구성되었다. 온도, NO_2-N , TDP, POP 등의 환경인자는 각 그룹간에 유의한 차이를 보였으며(K-W test, $p<0.05$) [표 3.5.10], 특히 온도는 그룹 2에서 가장 높고, 그룹 4에서 가장 낮은 값을 보였다(Dunn's test, $p<0.05$). TDP는 그룹 3에서 가장 높았으며 그룹 4와는 유의한 차이를 보였다(Dunn's test, $p<0.05$).

이러한 시기별 그룹은 NMS ordination에서도 명확하게 반영되었다. NMS ordination에서 축 1과 축 2는 전체 분산의 65%(축 1 $r^2=0.27$, 축 2 $r^2=0.48$)을 설명하였다[그림 3.5.59b]. 각 축은 Monte Carlo permutation tests 결과 유의함을 보였다($p=0.01$). 그림에서 점선 화살표는 2002년

11월부터 2004년 2월까지 표본의 시간적 변이를 나타낸 것이다. 그룹 3의 표본은 다른 것들보다 많이 분산되어 있으며, 시간적 경과가 상층에 비해 상대적으로 혼재되어 있다.

indVal 분석에 의한 지표종 분석결과, 그룹 1은 *Dictyosphaerium pulchellum*, *Tetrahedron incus*을 포함하는 5종으로 대표되었으며, 그룹 3은 *Coelastrum longissima*, *Nitzschia palea*를 포함하는 7종으로 대표되었고, 그룹 4는 *Chlamydomonas* sp.를 포함하는 3종으로 대표되었다 (Monte Carlo test, $p < 0.05$) [그림 3.5.59c]. 그러나 그룹 2는 지표종을 보이지 않았다.

환경인자와 NMS ordination 축간의 상관분석을 한 결과, 몇몇 환경인자와 유의한 상관성을 보였으며(Pearson correlation, $p < 0.05$), 이들은 NMS ordination에 화살표로 표기되었다[그림 3.5.59c]. 축 1과 전기전도도($r = 0.77$, $p < 0.05$), $\text{NH}_3\text{-N}$ ($r = 0.56$, $p < 0.05$), DIN($r = 0.47$, $p < 0.05$)은 음의 상관성을 보였으나, $\text{NO}_2\text{-N}$ ($r = 0.54$, $p < 0.05$)과 온도($r = 0.45$, $p < 0.05$)는 양의 상관성을 보였다 [표 3.5.10]. 축 2는 TDP($r = 0.60$, $p < 0.05$)와 높은 상관성을 보였으며, 다음으로 TP, $\text{NH}_3\text{-N}$, TN (각각 $r = 0.49$, $r = 0.49$ and $r = 0.46$, $p < 0.05$)와 높은 상관성을 보였다.



[그림 3.5.61] 하층부 식물플랑크톤 군집 분석. (a) Cluster 분석, (b) NMS ordination, (c) 각 그룹별 환경인자 및 지표종

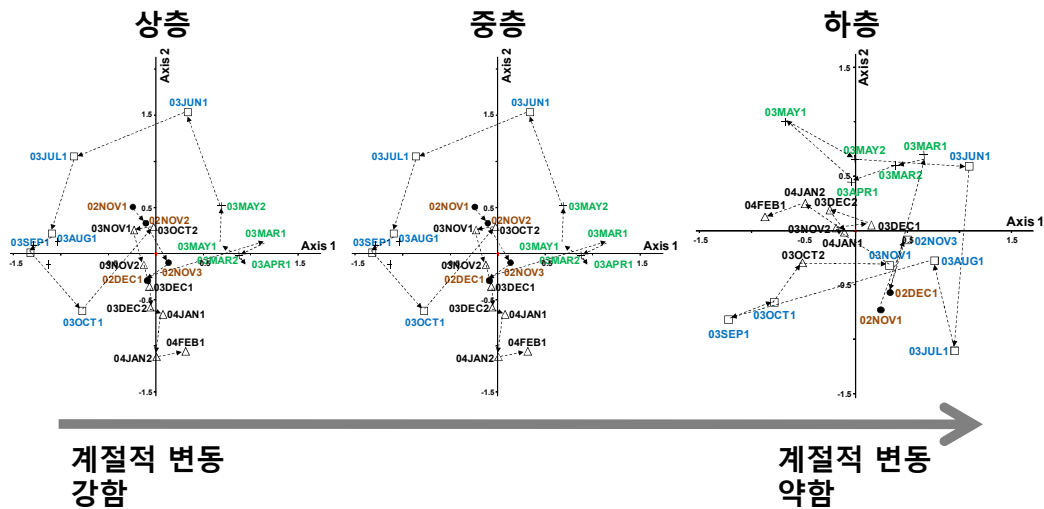
하층의 식물플랑크톤 군집에 대한 Cluster 분석결과 상층, 중층에서와 같이 4 그룹(i-iv)으로 구분되었다[그림 3.5.60a]. 각 그룹은 MRPP 분석결과 유의한 차이를 보였다($A = 0.109$, $p < 0.0001$), 각 그룹은 식물플랑크톤의 시기별 별동을 반영해 주었다. 그룹핑이 상층부, 중층부와 유사하기는 하지만 하층부에서 계절성은 상대적으로 약하게 나타났다. 온도, 전기전도도, DO, $\text{NH}_3\text{-N}$, DIN, DOP, TDP 등 환경인자는 그룹간에 유의한 차이를 보였다(K-W test, $p < 0.05$). 온도는 그

룹 ii에서 가장 높고, 그룹 iv에서 가장 낮았으며(Dunn's test, $p < 0.05$), TDP는 그룹 ii(가장 높은 값)와 그룹 iv(가장 낮은 값) 사이에 유의한 차이를 보였다(Dunn's test, $p < 0.05$).

NMS ordination은 식물플랑크톤 군집의 시기별 변동을 반영해 주었다. NMS ordination에서 축 1과 축 2는 전체 분산의 70%(축 1 $r^2=0.44$, 축 2 $r^2=0.26$)을 설명하였다[그림 3.5.60b]. 각 축은 Monte Carlo permutation tests 결과 유의함을 보였다($p=0.01$). 그림에서 점선 화살표는 2002년 11월부터 2004년 2월까지 표본의 시간적 변이를 나타낸 것이다. Cluster 분석의 결과에서 보았듯이 식물플랑크톤 군집의 계절성은 상층, 중층에 비해 매우 약화되었다. 또한 indVal 분석결과 단지 그룹 iii과 iv에서만 지표종이 선택되었다(Monte Carlo test, $p < 0.05$). 그룹 iii은 *Nitzschia palea*, *Navicula* sp. 등을 포함한 8종으로 대표되었으며, 그룹 iv는 *Chlamydomonas* sp.을 포함한 2종으로 대표되었다[그림 3.5.60c].

NMS ordination에 대한 환경인자의 관계를 분석하기 위하여 NMS ordination 축과 환경인자 간의 상관관계를 분석한 결과 몇몇 변수는 유의한 관계를 보였다(Pearson correlation, $p < 0.05$). 축 1은 TDP 및 TP (각각 $r=0.57$, $r=0.48$, $p < 0.05$)와 높은 상관성을 보였으며, 이에 비해 축 2는 전기전도도($r=0.74$, $p < 0.05$)와 가장 높은 상관성을 보였고, 다음으로 $\text{NH}_3\text{-N}$ ($r=0.71$, $p < 0.05$), TN:TP ratio($r=0.63$, $p < 0.05$)가 높은 값을 보였다. 축 2는 TDP($r=-0.47$, $p < 0.05$)와 음의 상관성을 보였다.

[그림 3.5.61]은 앞서 살펴본 수심에 따른 식물플랑크톤 군집 변이를 NMS로 분석한 것을 정리한 것이다. 상층(표층)은 하층보다 계절변동이 명확하며, 밀도는 상층이 높고 하층이 낮다.



[그림 3.5.62] 수심에 따른 식물플랑크톤 군집 변이

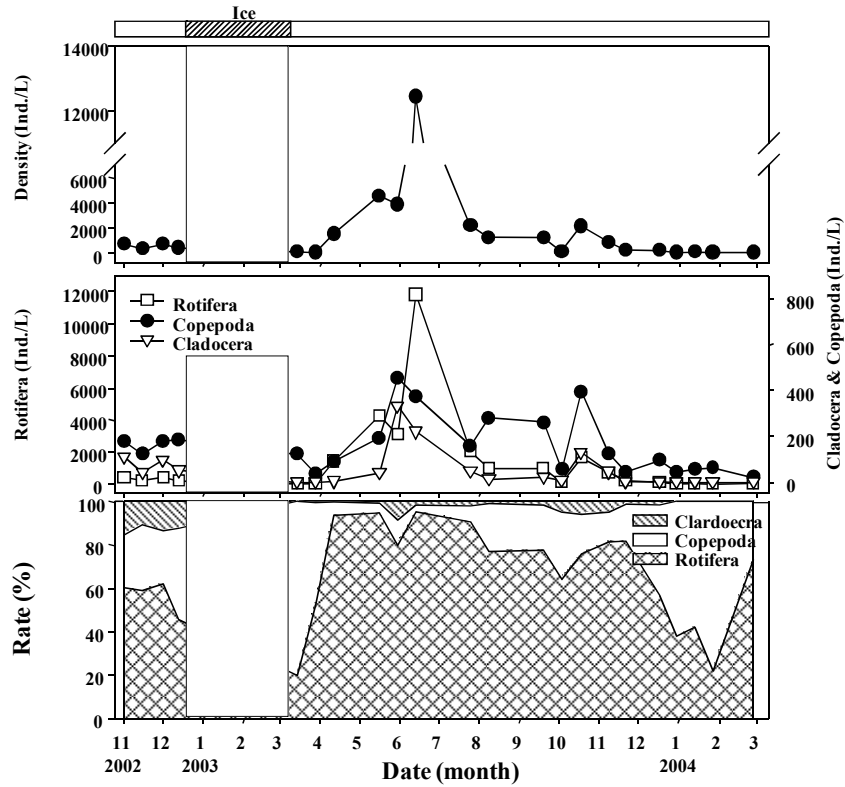
라. 동물성플랑크톤 군집 유형화

본 연구의 시험저수지인 신구저수지에서 2002년 11월에서 2004년 2월까지 식물플랑크톤과 동일한 시기에 조사된 동물성플랑크톤은 분류군에 따라 발생특성이 매우 다르게 나타났다. [그림 3.5.62]는 동물성플랑크톤의 총밀도, 분류군별 밀도 및 상대밀도를 나타낸다. 동물성플랑크톤은 청수기인 5~6월 기간이 다른 기간에 비해 높은 밀도를 나타냈고, 6월 조사에서는 12,433 ind. L⁻¹로 가장 높은 밀도를 나타냈다. 이 외의 기간 동안은 2,000 ind. L⁻¹ 이하의 밀도를 나타냈고, 겨울철 기간에 100 ind. L⁻¹ 낮은 밀도를 나타냈다.

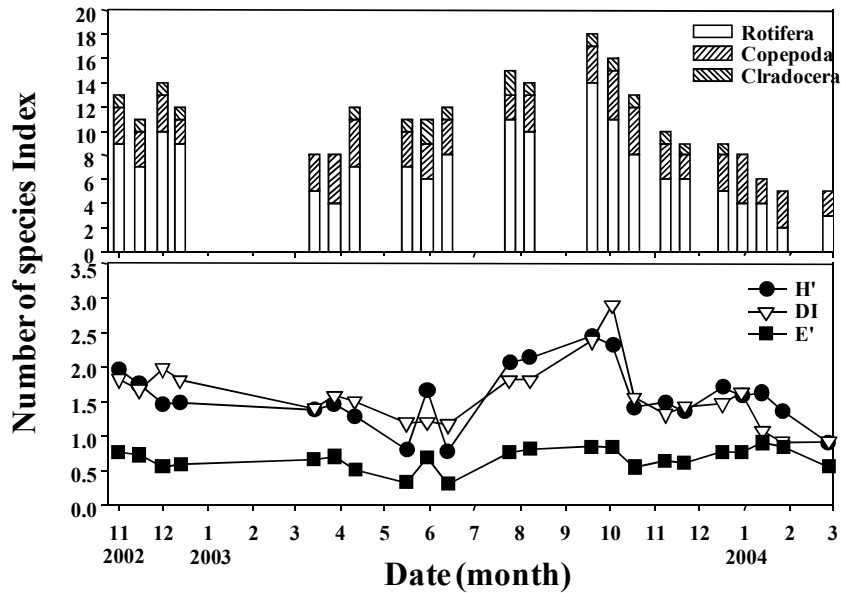
윤충류는 2002년 겨울과, 2003년 4월~12월 초 기간 동안은 60% 이상으로 높은 비율을 나타냈다. 2004년 1월, 2월 동안은 요각류의 비율이 60% 이상으로 높은 비율을 나타냈다. 지각류는 겨울철 기간 동안은 조사되지 않았으며, 이외의 기간 동안은 대부분 10% 이하의 낮은 비율을 나타냈다. 조사 시기별 동물성플랑크톤 우점종은 11월부터 5월까지의 *Keratella cochlearis*, *Polyarthra* spp.와 같은 소형 윤충류가 우점하였고, 5월 16일에는 비교적 크기가 큰 *Conochilus unicornis*가 일시적으로 증가하여 우점하는 것으로 나타났다. 5월 말에는 *Brachionus diversicornis*, 6월에는 *Pompholyx complanata* 종이 우점하였다. 강우기 이후인 7~8월에는 *Keratella cochlearis*와 *Keratella valga*가 우점하였고, 9~10월까지 *Pompholyx complanata*가 다시 우점하였다.

[그림 3.5.63]은 시기별 분류군별 종수 및 Shannon 다양도지수(H'), 종풍부도지수(RI), 균등도지수(E')를 나타낸다. 전체적으로 동물성플랑크톤은 연구기간 동안 16속 30종이 출현하였다. 출현 종수는 2003년 9월 조사에서 16종으로 가장 많은 종수가 출현하였고, 2004년 1~2월에 4종이 출현하여 가장 낮은 출현종수를 나타냈다. 종 다양도와 풍부도는 청수기인 5~6월과 2004년 겨울철 기간 동안에 가장 낮은 것으로 나타났고, 9월에 가장 높은 값을 나타내었다. 종 별 출현 횟수는 윤충류 중에 *Keratella cochlearis* 종이 22회 조사 횟수 중 19회 출현하여, 가장 높은 출현 빈도를 나타냈고, *Asplanchna herricki*, *Polyarthra euryptera* 종이 14회 출현하여 높은 출현 빈도를 나타냈다. 요각류는 *Diacyclops thomasi* 종이 18회 출현하여 *Keratella cochlearis* 종 다음으로 높은 출현빈도를 나타냈고, 지각류는 *Bosmina longirostris* 종이 15회로 겨울철 시기를 제외한 대부분의 시기에 출현하는 것으로 나타났다.

Shannon 종다양성지수(H')는 9월에 2.34로 가장 높게 나타났고, 2004년 2월에 0.48로 가장 낮게 나타났다. 종풍부도(RI)는 2003년 10월에 2.67로 가장 높게 나타났고, 2004년 2월 조사에서 0.73으로 가장 낮게 나타났다. 균등도(E')는 동물성플랑크톤 밀도가 가장 높게 나타난 6월에 0.28로 가장 낮게 나타났고, 1월 조사에서 0.94로 가장 높게 나타났다. 균등도는 동물성플랑크톤 출현 종수가 4~5로 낮고 밀도가 낮은 겨울철 기간과 동물성플랑크톤 대발생 기간 이후 출현 종(최대 16종)의 증가와 종간의 밀도차가 감소한 여름철 기간(7월 말~9월)의 균등도가 다른 기간에 비해 높게 나타났다.



[그림 3.5.63] 동물플랑크톤의 총밀도, 분류군별 밀도 및 상대밀도



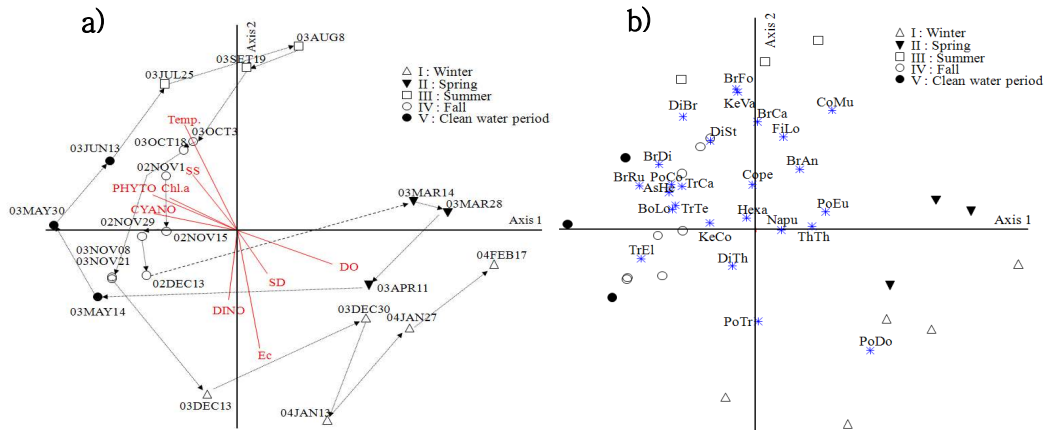
[그림 3.5.64] 시기별 동물플랑크톤 Shannon 다양도지수(H'), 종풍부도지수(RI), 균등도지수(E') 및 분류군별 종수

[그림 3.5.64]는 동물플랑크톤 군집의 NMS ordination 결과를 나타낸 것이다. 동물플랑크톤 군집은 문순 기후에 의한 계절적 특징을 나타내며, 5개의 군집으로 나누었다. 4계절(그룹 I~IV)과 가을철그룹과 유사한 경향을 나타내지만 동물플랑크톤 대발생 시기인 청수기(그룹 V)이다. I 그룹은 겨울철인 2003년 12월에서 2004년 2월, 그룹 II는 봄철인 2003년 5~6월, 2002년 11월~12월, 그룹 III은 여름철인 7~9월초, 그룹 IV는 가을철인 2003년 10월~11월로 구분되어지며, 청수기는 2003년 5월~6월로 구분되어진다. NMS ordination은 전체 변이중 65%의 설명력으로 동물플랑크톤 군집의 변화를 나타내었으며(축 1: $r^2=0.49$, 축 2: $r^2=0.16$), Monte Carlo test 결과 두 축 모두 유의성을 보였다($p<0.05$) [그림 3.5.64a].

환경인자들 및 식물플랑크톤 분류군은 축 1과 축 2와의 상관관계를 계산하여 유의성을 보이는 변수들만 표기하였다. 선의 길이는 상관성의 크기를 나타내며, 선의 방향은 각 축과의 상관성을 의미한다. 축 1과 DO($r=0.653$, $p<0.01$)가 가장 밀접한 상관성을 나타냈고, 수온($r=-0.491$, $p<0.05$), 부유물질 농도($r=-0.452$, $p<0.05$), Chl-*a* 농도($r=-0.555$, $p<0.01$), 전체 식물플랑크톤 밀도($r=-0.620$, $p<0.01$), 남조류($r=-0.615$, $p<0.01$)가 음의 상관성을 나타내었다. 축 2와는 전기전도도(Ec)($r=-0.760$, $p<0.01$)가 가장 높은 음의 상관성을 나타냈고, 규조류($r=-0.584$, $p<0.01$), 투명도($r=-0.461$, $p<0.05$)가 음의 상관성을 나타냈고, 수온($r=0.720$, $p<0.01$)과 부유물질 농도($r=0.523$, $p<0.05$)는 양의 상관성을 나타냈다[그림 3.5.64a].

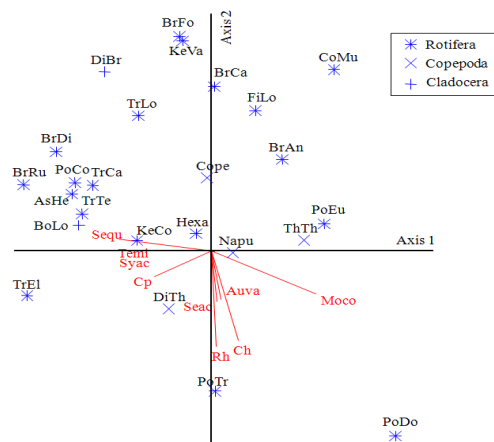
남조류가 우점한 시기를 나타내는 그룹 III~V는 수온과 식물플랑크톤 밀도, 특히 남조류 밀도와 양의 상관성을 나타낸 반면, 겨울철을 대표하는 그룹 I은 수온과 음의 상관성을 나타내며, 식물플랑크톤 군집 중에는 겨울철에 우점으로 나타나는 규조류와 양의 상관성을 나타내었다. 그룹 II는 용존산소 농도와 양의 상관성을 나타냈다[그림 3.5.64a].

동물플랑크톤군집의 시기별 변동에 대하여 대표적인 종의 특성을 분석하고자 indVal 분석(Dufrene & Legendre, 1997)을 실시하였다. 그 결과 그룹 III은 *Keratella valga*(KeVa), *Diurella stylata*(DiSt), *Brachionus forficula*(BrFo), *Brachionus calyciflorus*(BrCa), *Filinia longiseta*(FiLo) 종이 지표종으로 나타났다. *Keratella valga*, *Brachionus forficula*, *Brachionus calyciflorus*의 지표종 수치가 다른 그룹에 비해 10 이상 높게 나타나 동물플랑크톤의 군집구조의 변화를 나타내는 좋은 지표종으로 나타났다. IV 그룹은 *Bosmina longirostris*(BoLo), 그룹 V는 *Brachionus diversicornis*(BrDi) 종에 의해 특징화되었다(Monte Carlo test, $p<0.05$). 그룹 I, II에 대한 지표종은 나타나지 않았다. 출현빈도가 14회 이상으로 연구기간 동안 대부분 출현한 *Keratella cochlearis*(KeCo), *Brachionus angularis*(BrAn), *Polythra euryptera*(PoEu), *Diacyclops thomasi*(DiTh), *Thermocyclops thomasi*(ThTh)와 출현빈도가 아주 낮은 *Hexathra* sp.는 그룹의 지표적 특성을 나타내지 않았다.



[그림 3.5.65] 동물플랑크톤 군집의 NMS ordination biplot. (a) 군집의 월별 변동, (b) 동물플랑크톤 종의 분포. 화살표는 시간적 흐름을 나타내며, 환경인자들 및 식물플랑크톤 분류군은 축 1과 축 2와의 상관관계를 계산하여 유의성을 보이는 변수들만 표기. Ec: 전기전도도, SD: 투명도, temp.: 온도, DO: 용존산소, SS: 부유물질, Chl-a: Chllrophyll-a, PHYTO: Phytophyceae, CYANO: Cyanophyceae, DINO: Dinophyceae

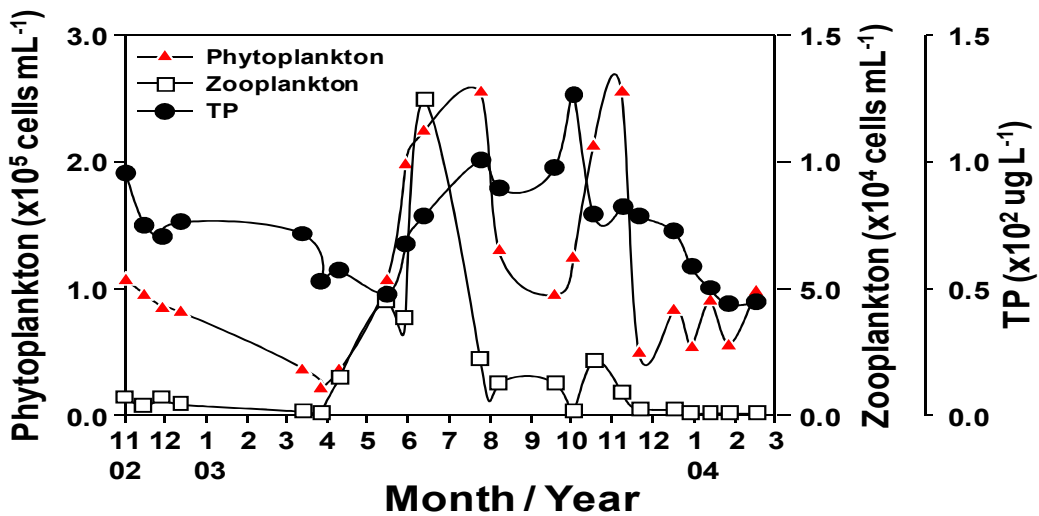
[그림 3.5.65]는 앞서 얻어진 동물플랑크톤 NMS ordination에서 동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 관계를 나타내는 것으로 NMS ordination 축과 식물플랑크톤 밀도의 상관관계를 구하여 유의($p < 0.05$)한 종들만 표기하였다. 축 1은 *Monoraphidium contortum*와 가장 높은 상관성을 나타냈고(Moco, $r = 0.678$, $p < 0.01$), *Scenedesmus quadricauda*(Sequ, $r = -0.637$, $p < 0.01$), *Tetraedron minimum*(Temi, $r = -0.625$, $p < 0.01$), *Synedra acus*(Syac, $r = -0.621$, $p < 0.01$), *Cyptomonas* spp.(Cp, $r = -0.500$, $p < 0.01$) 순으로 나타났으며, 축 2는 *Rhodomonas* sp.와 가장 높은 상관성을 나타냈고(Rh, $r = -0.691$, $p < 0.01$), *Scenedesmus acuminatus*(Seac, $r = -0.503$, $p < 0.05$), *Aulacoseira varians*(Auva, $r = -0.490$, $p < 0.05$), *Monoraphidium contortum*(Moco, $r = -0.462$, $p < 0.05$) 순으로 상관성을 나타냈다.



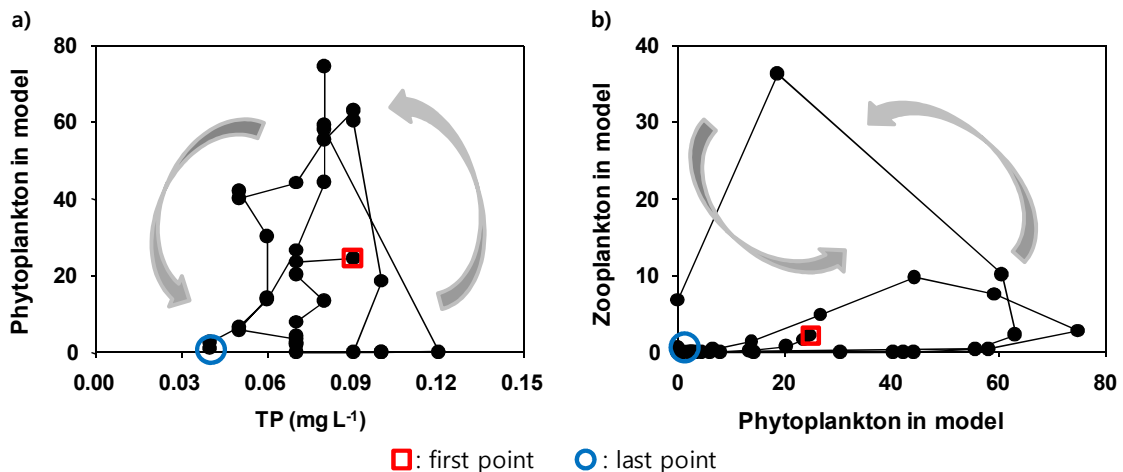
[그림 3.5.66] 동물플랑크톤 NMS ordination에서 동물플랑크톤 및 식물플랑크톤 주요 종의 관계. NMS ordination 축과 식물플랑크톤 밀도의 상관관계를 구하여 유의한 종들만 표기

마. 식물 및 동물플랑크톤 상호작용

앞서 신구저수지에서 2002년 11월에서 2004년 2월까지 조사된 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 그리고 영양염류의 변동과 그들의 특성에 대해서 살펴보았다. 다음은 이들을 종합하여 인자들 사이에 서로 어떠한 연관성을 가지고 있는가를 분석하였다. [그림 3.5.66]은 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 및 TP 변동을 나타내는 것으로 식물플랑크톤의 밀도변동은 TP의 변동과 밀접한 관계를 가지고 있으며 또한 동물플랑크톤은 식물플랑크톤 밀도 변동과 밀접한 관계를 가지고 있다. 이는 [그림 3.5.67]과 같이 나타내어 보면 그 의존성이 보다 명확하게 나타난다.



[그림 3.5.67] 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 및 TP 변동



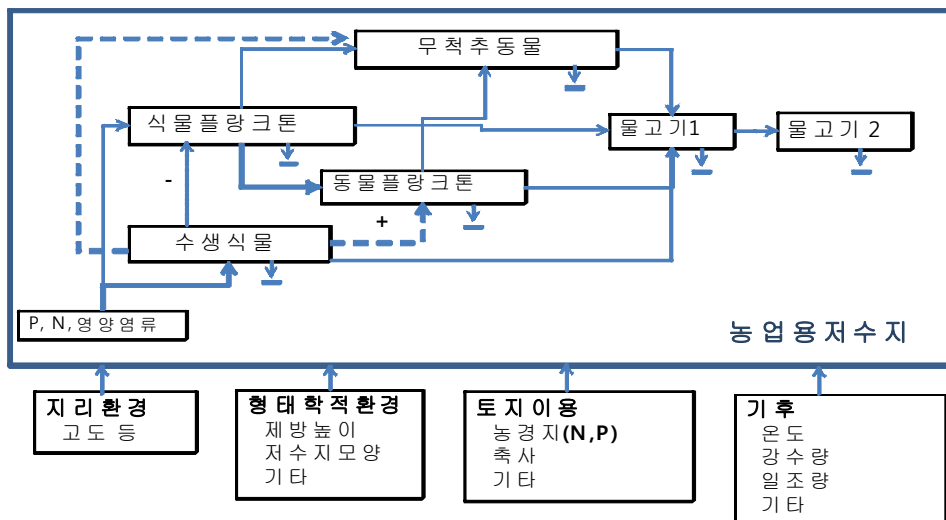
[그림 3.5.68] 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 및 TP 변동의 상호 의존성

4. 생물서식지 적합성평가 모델 개발

가. 생물조절에 의한 저수지 수질관리

호수생태계에는 P, N 등 영양염류를 섭취하는 식물플랑크톤과 이들을 먹이로 하는 동물플랑크톤, 무척추동물, 어류 등 다양한 생물들이 먹이망을 통해 복잡한 생물구조를 형성하고 있으며, 이들은 다양한 환경인자로부터 영향을 받는다. [그림 3.5.68]는 앞서 살펴 본 연구결과를 정리한 것이다. 우리나라 농업용 저수지의 수질은 이들이 위치하는 지리적 위치와 제방의 높이, 저수지 형태 등에 따라 크게 영향을 받는다. 이는 고도의 차이에 따른 것으로 나타났으며, 또한 토지이용(농경지, 가축사육장 등) 등과 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 이는 농경지 등으로부터 P, N 등이 많이 유입되기 때문으로 판단된다. 또한 문헌조사 등을 통해 보면 기후 조건으로서는 온도, 강수량, 일조량 등이 중요한 요인으로 작용한다. 따라서 저수지 수질을 관리하기 위해서는 이러한 환경적인 조건을 충분히 고려한다면 보다 효율적으로 관리할 수 있다는 것을 제시해 준다.

한편 수생식물은 식물플랑크톤과 함께 조류발생을 유발하는 P, N을 흡수하는 주요 생물이다. 따라서 수생식물을 적절히 서식할 수 있게 한다면 효과적으로 영양염류를 제거하여 부영양화를 제거 또는 감소시킬 수 있다. 또한 동물플랑크톤 외에 달팽이류 등 식물플랑크톤을 섭식하는 동물의 수를 증가시켜 식물플랑크톤 밀도를 감소시킬 수 있을 것이다. 이러한 개념에 근거하여 본 연구과제에서는 저수지 수질개선을 위한 생물조절에 대한 연구를 수행하였으며, 그 결과로 인공식물섬을 만들어 수생식물을 식재하여 영양염류를 제거하고, 동물플랑크톤에게는 서식지를 제공하여 밀도를 증가시킴으로서 식물플랑크톤 밀도를 감소시키는 연구를 하였다. 또한 말조개, 새뱅이 등의 무척추동물에 의한 식물플랑크톤 제거실험이 있었다. 이들에 대한 자세한 연구방법 및 결과는 건국대학교, 충남대학교, 한양대학교 연구팀에서 자세히 보고하였다.



[그림 3.5.69] 호수생태계의 먹이연쇄 모식도 및 관련인자. 화살표는 에너지 흐름을 나타내며, 각 구성인자에는 작은 화살표로 sediment 등으로 축적이 있음

한편 저수지내 생물적인 특성은 P, N 등의 농도 증가는 식물플랑크톤의 증가를 초래하며 이로 인해 녹조현상이 발생하고 탁도가 증가하게 된다. 이러한 식물플랑크톤 증가는 이들을 먹이로 하는 동물성플랑크톤의 증가를 동반하며 그 이후 어류의 증가를 촉진시킨다. [그림 3.5.68]에 서는 이러한 에너지의 흐름을 화살표로 나타내 주고 있다. 특히 주요한 에너지 흐름은 굵은 선으로 나타내 주고 있다. 굵은 선 중에서 물고기 1을 줄여줌으로서 물벼룩 등 동물플랑크톤을 증가시켜 녹조발생을 제어하는 생물조절은 잘 알려진 방법이다. 이와 같이 동물성플랑크톤과 식물플랑크톤간의 관계는 피식자-포식자 모델로 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\frac{dA}{dt} = rA\left(1 - \frac{dA}{dt}\right) - g_z Z \frac{A}{A + h_a}$$

$$\frac{dZ}{dt} = e_z e_g Z \frac{A}{A + h_a} - m_g Z$$

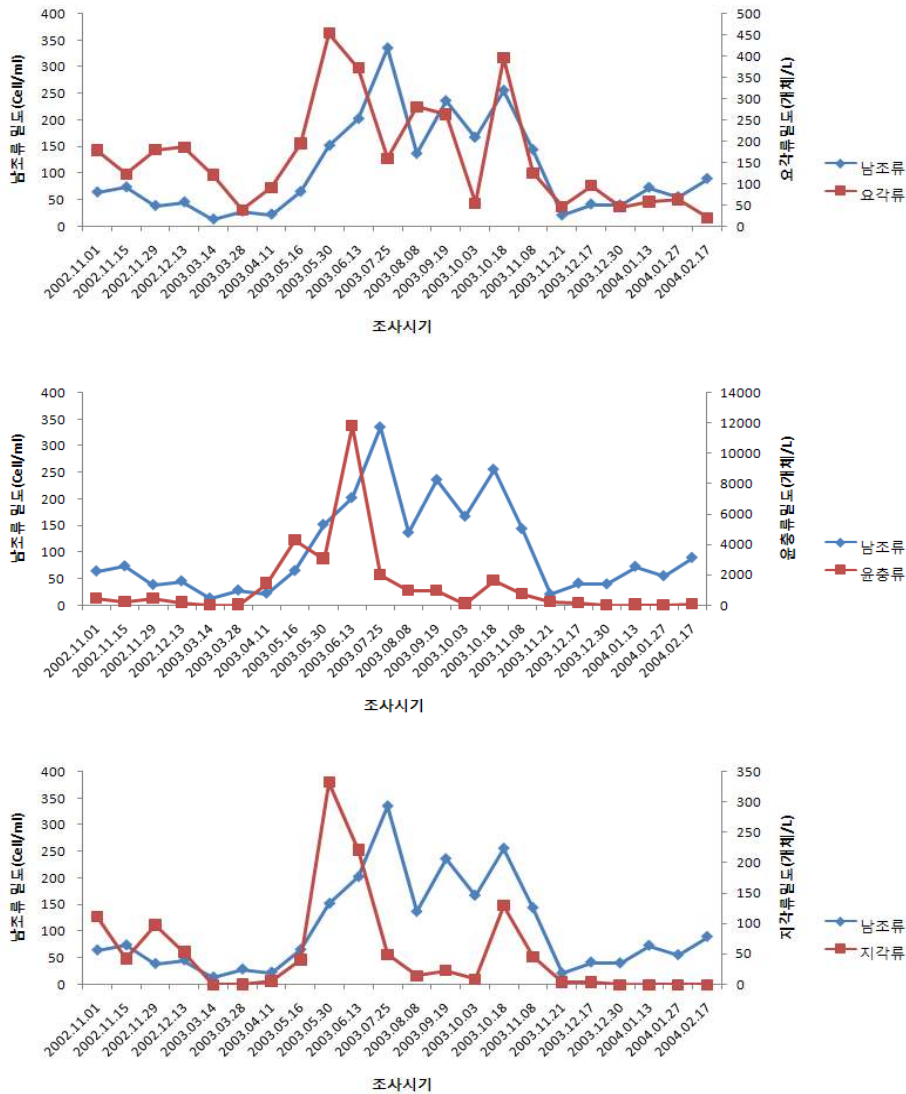
여기서 A : 식물플랑크톤 밀도, r : 최대 성장률, K : 최대수용능, Z : 동물성플랑크톤, g_z : 최대 소비율, h_a : 기능적 반응의 최대값의 반, e_z : 먹이 전환율 등으로 나타낼 수 있다.

나. 식물플랑크톤 밀도 조절

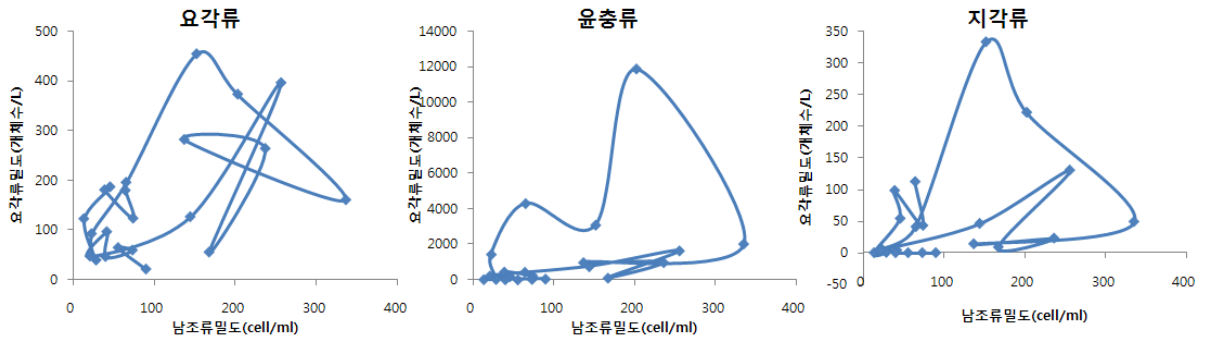
앞서 언급 한 바와 같이 2002년~2004년에 조사된 신구저수지의 식물플랑크톤 중 가장 많은 종수를 차지하는 것은 녹조류였으며 남조류, 규조류, 편모조류 순 이었다 이 중 여름철 저수지의 녹조현상을 야기하는 남조류는 여름철에 가장 높은 빈도를 보였다. 이러한 남조류를 섭식하는 것은 동물플랑크톤을 비롯하여 수서곤충, 어류 등 초식동물들이 포함된다. 이러한 초식동물들을 이용하여 조류발생을 억제/조절에 대한 연구도 본 연구과제의 한 부분이다. 잘 알려져 있는 바와 같이 생물조절을 통한 조류 발생 억제 또는 저수지 수질개선은 식물플랑크톤을 섭식하는 *Daphnia* 등 동물성플랑크톤의 밀도를 증가시킴으로서 조류를 효과적으로 제거하고 수질을 개선한다는 많은 연구결과가 있다. 그러나 이러한 상황은 각 저수지의 생태적 특성에 따라 달라질 수 있기 때문에 각 저수지의 생태적 특성을 먼저 명확히 이해를 하여야한다. 앞서 언급된 생물조절에서 효과적으로 사용되는 *Daphnia*는 본 시험조사지인 신구저수지에서 채집이 되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 신구저수지의 남조류의 밀도 변동과 함께 이를 섭식하는 동물성플랑크톤의 밀도변동을 상호 연관하여 분석함으로써 동물성플랑크톤의 녹조제어 가능성에 대해 평가 하였다. [그림 3.5.69]는 남조류의 밀도 변동에 따른 동물성플랑크톤 변동을 보여 주고 있는 것으로 요각류의 밀도변동은 남조류 밀도가 증가 후 약 2~4주 후에 크게 증가하며, 특히 남조류 밀도가 높은 8~10월에는 윤충류 및 지각류의 밀도는 크게 감소한데 비해 요각류는 상대적으로 높은 밀도를 유지하였다. 요각류 중 가장 높은 밀도를 보인 것은 Nauplius였다.

생물조절은 피식자와 포식자의 관계 개념을 이용한 접근방법이다. 이는 피식자의 밀도변동이 포식자의 밀도변동에 의존적이며 이러한 의존적 반응은 일정기간의 시간 지연을 두고 나타나게 된다. 따라서 본 연구에서는 남조류의 밀도변동이 이를 섭취하는 동물성플랑크톤들과 어떠한 연관성이 있는지를 밝히고자 앞서 살펴본 남조류와 동물플랑크톤 밀도변동 자료를 [그림 3.5.70]과 같이 나타내었다. 요각류, 지각류, 윤충류 모두 남조류의 밀도변동에 따라 변동하고 있는 것을 보여주고 있다. 이러한 관계를 통해 동물성플랑크톤을 통한 남조류의 발생 제어를 할 수 있다는 가능성을 제시해 주고 있다.



[그림 3.5.70] 남조류의 밀도 변동에 따른 요각류, 윤충류, 지각류의 밀도변동. 신구저수지에서 2002년 11월부터 2004년 2월 조사

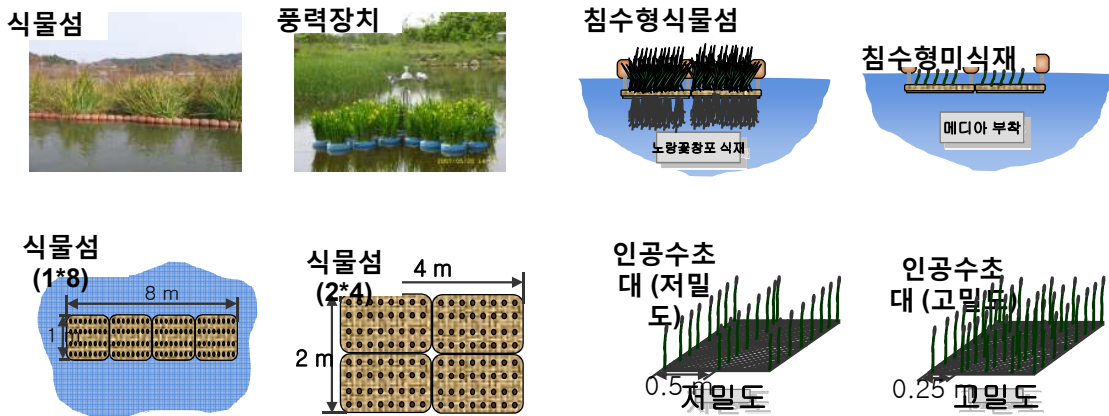


[그림 3.5.71] 남조류 및 윤충류, 요각류, 지각류 간의 상호 관계

다. 인공식물섬 처리효과

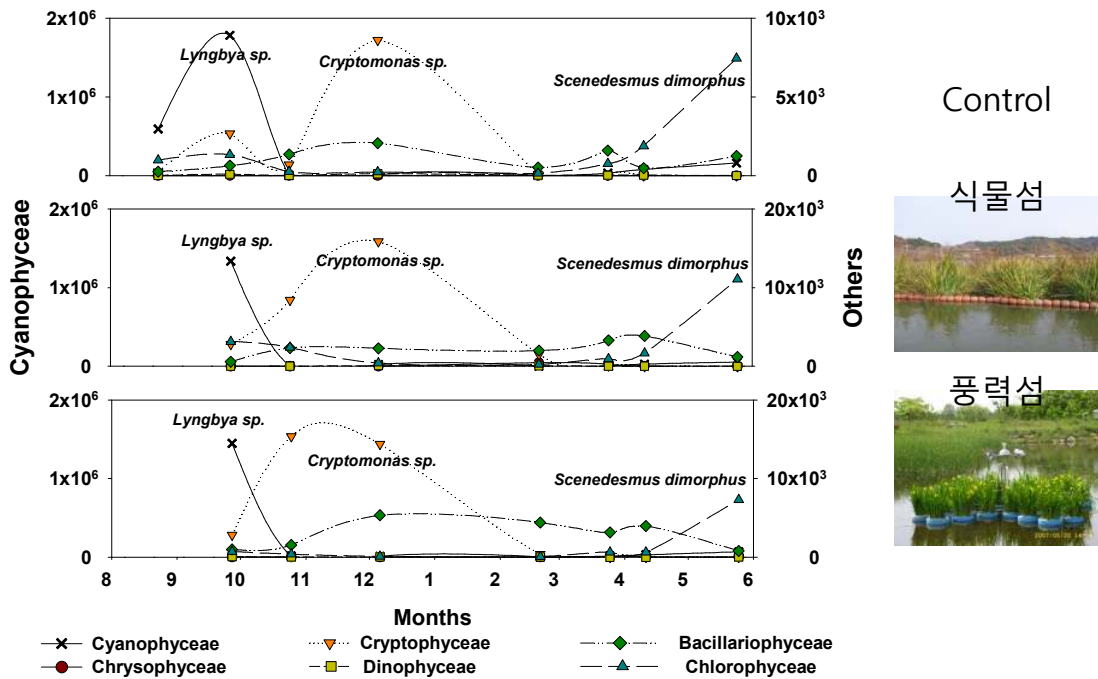
(1) 식물플랑크톤 밀도변동

본 연구과제 참여기업인 (주)아썸에서는 시험저수지인 신구저수지에 2006년 8월부터 2007년 5월까지 식물을 식재한 인공식물섬을 설치하여 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 밀도를 매일 측정하였으며 또한 관련 수질환경인자를 측정하였다. 따라서 본 연구에서는 이들 자료를 활용하여 유용생물서식지의 적합성을 평가하고 수질 개선효과를 평가하였다. 이러한 인공식물섬의 처리 조건은 [그림 3.5.71]와 같이 4가지의 패턴으로 처리되었다. 또한 각 패턴은 2가지 형태로 상호 비교하며 처리 조건의 효과를 비교하였다. 각각의 인공식물섬 처리 조건은 먼저 인공식물섬에 식물을 식재 처리한 조건과 이러한 식물 식재에 풍력장치를 설치한 풍력섬 조건이 있다. 다음으로는 침수형식물섬과 식물을 식재하지 않고 매디아만 부착한 상태의 침수형미식재의 조건이 있다. 세 번째 패턴은 인공식물섬의 면적을 1×8 m와 2×4 m로 크기를 달리한 조건이다. 마지막 패턴은 인공수초대의 밀도를 고밀도와 저밀도로 식재했을 때의 조건으로 나타내었다.



[그림 3.5.72] 인공식물섬 처리 조건

인공식물섬의 설치에 따른 수질 개선 효과를 평가하기 위해 인공식물섬을 처리하지 않은 조건과 실험조건 중 인공식물섬 및 풍력섬에서 조사된 식물플랑크톤 밀도 변동을 비교하였다. [그림 3.5.72]는 이러한 인공식물섬의 설치 조건에 따른 식물플랑크톤의 차이를 나타내었다. 그 결과 인공식물섬과 풍력섬을 설치했을 경우 식물플랑크톤 밀도 감소 효과가 발생했다. 특히 인공식물섬의 처리 조건 중 대조구의 2007년 5월 남조류의 밀도가 $159,310 \text{ ind. L}^{-1}$ 인 것에 비해 인공식물섬과 풍력섬은 각각 $53,506 \text{ ind. L}^{-1}$ 과 $67,845 \text{ ind. L}^{-1}$ 로 남조류의 밀도가 감소하였다.



[그림 3.5.73] 인공식물섬 설치지역에서 식물플랑크톤 밀도 변동(2006년 8월~2007년 6월. 아섬 조사)

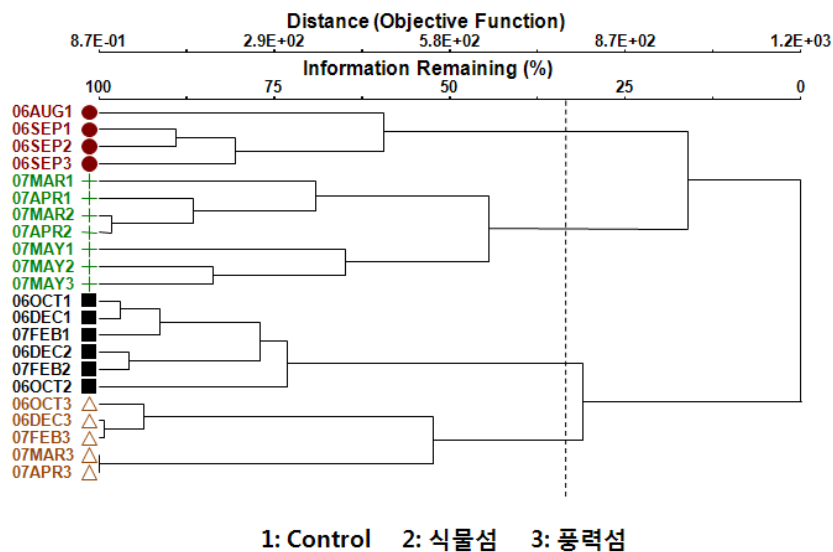
각 처리 조건별 식물플랑크톤 밀도, 종수 및 우점종은 [표 3.5.11]과 같이 정리되었다. 인공식물섬을 조건에서 식물플랑크톤의 밀도 및 종수에서 대조구와 뚜렷한 차이를 보였다. 대조구에서는 밀도가 평균 $112,828.2 \text{ ind. L}^{-1}$, 종수가 59종이었는데 비하여, 인공식물섬 조건에서는 $66,728.8 \text{ ind. L}^{-1}$, 52종으로 식물플랑크톤의 밀도가 감소하였다. 특히 인공식물섬 면적을 달리한 조건에서는 평균 종수가 35종으로 나타났다. 한편 전체적으로 우점종은 *Phormidium* sp.와 *Synechocystis* sp.이었다.

[표 3.5.10] 인공식물섬 처리 조건별 식물플랑크톤 밀도, 종수 및 우점종

처리	밀도 (mean, ind.L ⁻¹)	종수	우점종	
			제1	제2
대조구*	112,828.2	59	<i>Phormidium angutissima</i>	<i>Phormidium</i> sp.1
식물섬	66,728.8	52	<i>Phormidium</i> sp.1	<i>Synechocystis</i> sp.
풍력섬	76,398.0	40	<i>Synechocystis</i> sp.	<i>Asterionella formosa</i>
침수형식물섬	55,091.1	46	<i>Synechocystis</i> sp.	<i>Cyclotella</i> spp.
침수형미식재	127,170.7	51	<i>Phormidium</i> sp.1	<i>Synechocystis</i> sp.
식물섬(1*8)	56,719.8	35	<i>Synechocystis</i> sp.	<i>Dictyosphaerium</i> sp.
식물섬(2*4)	64,950.1	35	<i>Synechocystis</i> sp.	<i>Anabaena spiroides</i>
수초(저밀도)	145,182.9	52	<i>Phormidium valderianum</i>	<i>Phormidium</i> sp.2
수초(고밀도)	91,316.6	57	<i>Aphanocapsa</i> sp.	<i>Asterionella formosa</i>

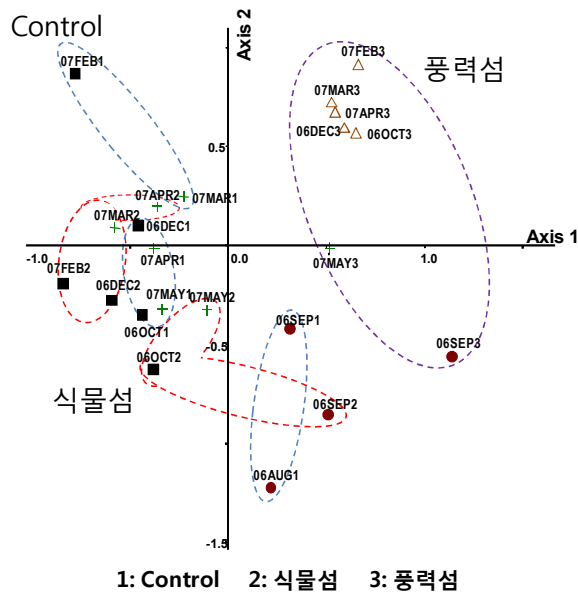
* 인공식물섬이 설치되지 않은 저수지

한편 인공식물섬 처리시의 조건에 따른 식물플랑크톤 군집의 차이를 비교하기 위하여 군집 분석을 실시하였다[그림 3.5.73]. 군집분석은 앞선 2006년 8월부터 2007년 5월까지의 인공식물섬의 수질개선 효과를 알아보기 위한 인공식물섬 처리 조건에 따른 식물플랑크톤 변동 자료 중 대조구, 식물섬, 풍력섬의 자료만을 이용하였다. 먼저 cluster 분석결과 자료는 크게 4개의 그룹으로 구분이 되었으며 군집변동의 계절성뿐만 아니라 서식지 조건에 따라서도 차이가 있다는 것을 보여준다. MRPP 분석결과 각 그룹간에는 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 4개의 그룹은 각각 2006년 여름철(8, 9월)에서의 대조구, 식물섬, 풍력섬의 자료의 그룹1과 대조구와 식물섬의 2007년 봄(3, 4, 5월)의 자료와 풍력섬의 5월 자료로 구성된 그룹2로 나타났다. 또한 그룹3은 대조구와 식물섬의 2006년 10월부터 2007년 2월까지의 겨울철 자료로 이루어졌으며, 그룹4는 풍력섬의 자료 중 2006년 9월과 2007년 5월을 제외한 나머지 자료들로 이루어졌다.



[그림 3.5.74] 식물플랑크톤 군집의 cluster 분석

다음으로 NMS ordination 기법을 활용하여 식물플랑크톤 군집의 차이를 비교하였다 [그림 3.5.74]. 그 결과 NMS ordination에서 두 축에 의해 형성된 stress 값은 60.95였다. 이때 앞서 시행한 군집분석의 결과 그룹1은 좌표의 오른쪽 아래에 위치하였으며 그룹4는 오른쪽 위에 위치하였다. 그룹2는 좌표의 왼쪽 가운데에 주로 위치한 반면 그룹3은 좌표의 왼쪽 부분에 넓게 분포하였다. 또한 이들 자료를 인공식물섬의 처리조건에 따라 구분 지었을 때 풍력섬은 좌표의 오른쪽부분에 분포하면 나머지 두 조건과 구별된 것에 비해, 대조군과 인공식물섬의 조건은 일부 자료들이 혼재되어 나타났다.

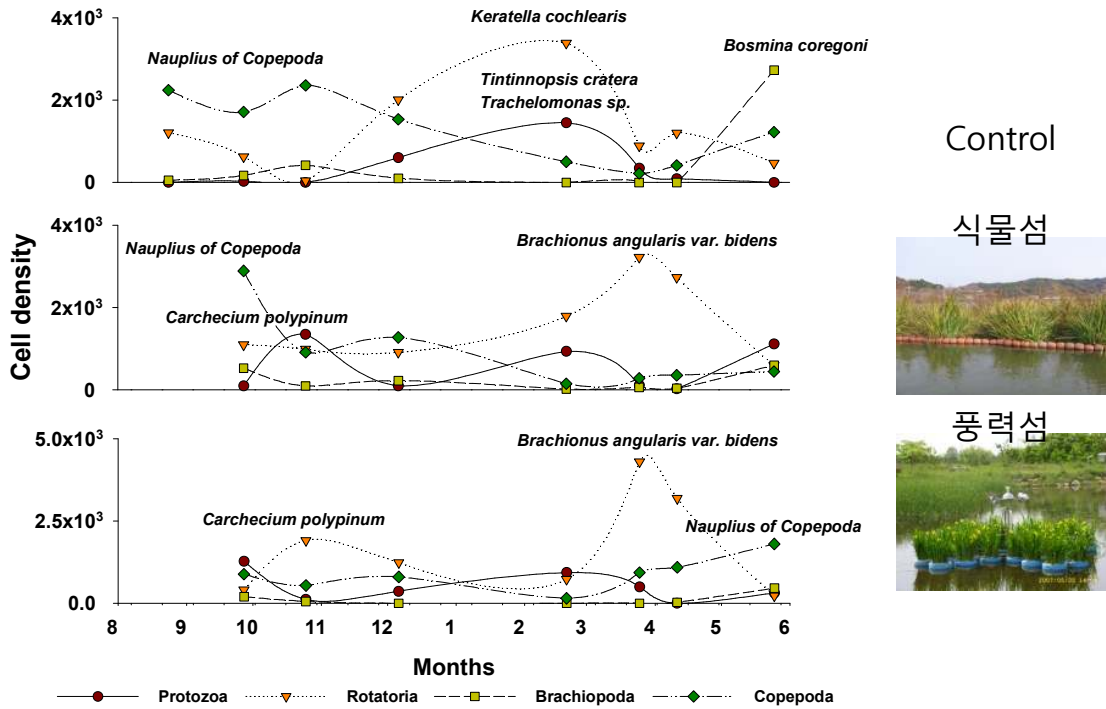


[그림 3.5.75] 인공식물섬 설치에 따른 식물플랑크톤 군집 비교를 위한 NMS ordination(2축 Stress: 60.95)

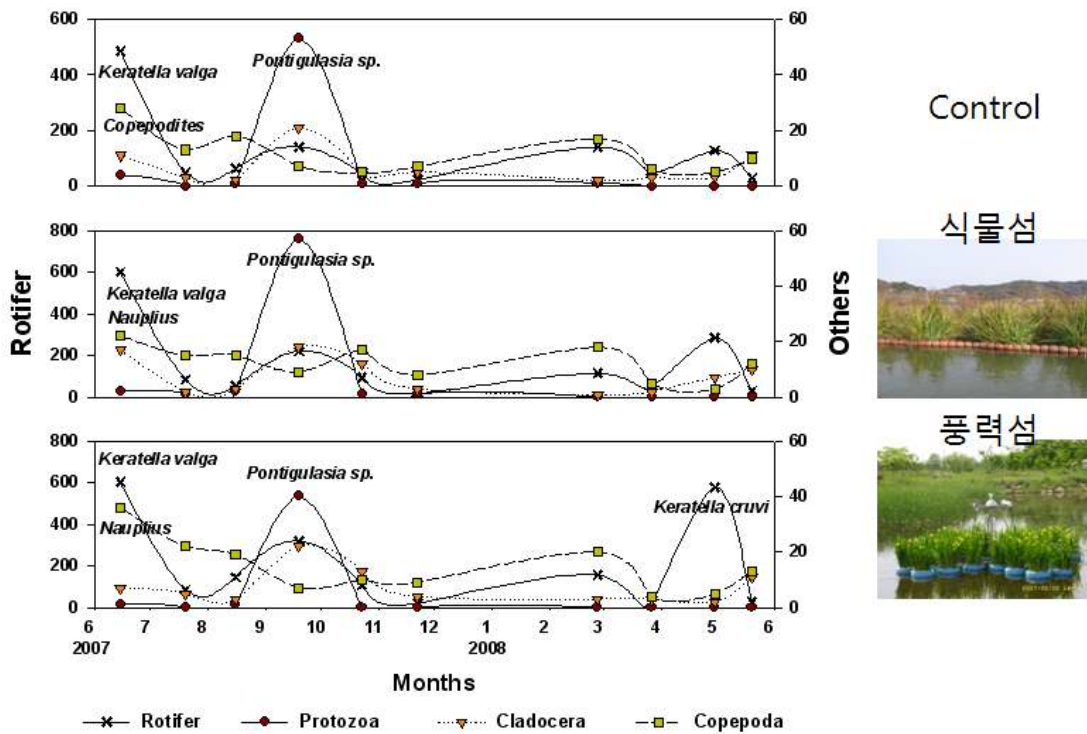
(2) 동물플랑크톤 밀도변동

앞선 인공식물섬의 처리 조건에 따른 실험 대상 저수지인 신구저수지에서의 수질개선 효과를 위한 식물플랑크톤 변동 조사와 함께 동물플랑크톤의 변동을 조사하였다. [그림 3.5.75]는 2006년 8월에서 2007년 6월까지의 조사결과로, 특히 인공식물섬의 처리 조건 중 풍력섬에서의 2007년 3월의 윤충류 밀도가 $4,300 \text{ ind. L}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났다. 또한 식물섬의 조건에서도 $3,221 \text{ ind. L}^{-1}$ 로 같은 시기 대조구의 889 ind. L^{-1} 에 비해 높게 나타났다. 한편 대조구에서의 동물플랑크톤 밀도는 윤충류의 밀도가 가장 높게 나타난 2007년 2월 $5,330 \text{ ind. L}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났다.

[그림 3.5.76]은 인공식물섬 설치지역에서 농어촌연구원에서 조사한 2007년 7월부터 2008년 5월까지의 동물플랑크톤 밀도 변동을 나타낸 것이다. 2007년 6월 대조구에서의 윤충류의 밀도가 486 ind. L^{-1} 인 것에 비해 식물섬과 풍력섬 처리 조건에서는 각각 601 ind. L^{-1} 과 602 ind. L^{-1} 로 나타났다. 또한 풍력섬의 2008년 4월 윤충류의 밀도가 578 ind. L^{-1} 로 다른 두 조건에 비해 높게 나타났다.



[그림 3.5.76] 인공식물섬 설치지역에서 동물플랑크톤 밀도 변동(2006년 8월~2007년 6월, 아섬 조사)



[그림 3.5.77] 인공식물섬 설치지역에서 동물플랑크톤 밀도 변동(2007년 7월~2008년 5월, 농어촌연구원 조사)

[표 3.5.12]는 2007년 7월부터 2008년 5월까지 신구저수지에서 조사된 처리 조건별 동물플랑크톤 밀도, 종수 및 우점종을 나타낸 것으로 인공식물섬을 식재한 조건에서 대조구와 뚜렷한 차이를 보였다. 대조구에서는 밀도가 평균 83 ind. L⁻¹, 종수가 16종인 것에 비해, 인공식물섬 조건에서는 115 ind. L⁻¹, 15종으로 동물플랑크톤의 밀도 및 종수가 증가하였다. 특히 침수형식물섬에서는 268 ind. L⁻¹, 16종으로 가장 높은 밀도와 종수 증가를 보였다. 한편 전체적으로 우점종은 *Keratella cruvi*와 *Keratella cochlearis* 이었다.

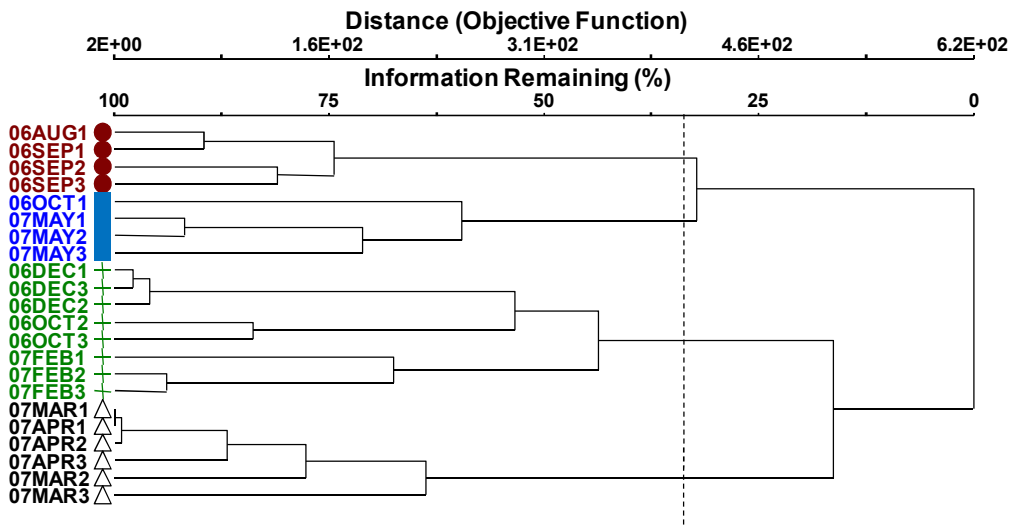
따라서 앞서 살펴본 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 밀도 및 종수 변화를 보면 풍력장치가 있는 식물섬, 고밀도침수형식물 처리 조건에서 식물플랑크톤 밀도가 감소하며, 동물플랑크톤 밀도는 증가하는 것을 보여준다. 이는 이들 조건이 수질개선을 위한 유용동물플랑크톤의 좋은 서식지 조건을 만들어 줄뿐 아니라 식물섬 자체적으로도 영양염류제거 등의 효과가 있기 때문으로 보인다. 따라서 앞으로 인공식물섬을 설치하는 경우 이러한 조건을 고려하여 인공식물섬을 제작하고 설치하는 것이 요구된다.

[표 3.5.11] 인공식물섬 처리 조건별 동물플랑크톤 밀도, 종수 및 우점종

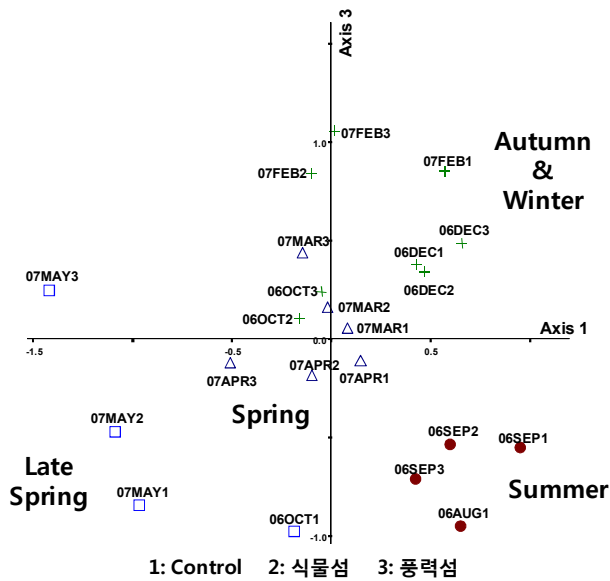
Treatment	Density (mean, ind.L ⁻¹)	No. species	Dominant species	
			1st	2nd
Control	83	16	<i>Keratella cruvi</i>	<i>Polyarthra longiremis</i>
식물섬	115	15	<i>Keratella cruvi</i>	<i>Keratella cochlearis</i>
풍력섬	169	15	<i>Keratella cruvi</i>	<i>Keratella cochlearis</i>
침수형식물섬	268	16	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Polyarthra longiremis</i>
침수형미식재	114	11	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cruvi</i>
식물섬(1*8)	79	14	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cruvi</i>
식물섬(2*4)	61	14	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cruvi</i>
수초(저밀도)	203	13	<i>Keratella cruvi</i>	<i>Keratella cochlearis</i>
수초(고밀도)	225	15	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cruvi</i>

[그림 3.5.77]은 인공식물섬 처리 조건에 따른 동물플랑크톤 군집의 차이를 비교하기 위하여 군집분석을 실시한 것으로, 2006년 8월부터 2007년 6월의 조사기간 동안의 대조구인 인공식물섬을 처리하지 않은 조건과 인공식물섬과 풍력섬을 설치한 조건의 자료를 이용하였다. Cluster 분석결과 동물플랑크톤 군집은 크게 4개의 그룹으로 구분이 되었으며, 군집변동의 계절성에 따라서 차이가 있다는 것을 보여준다. MRPP 분석결과 각 그룹간에는 유의한 차이를 보였다 ($p < 0.05$). 4개의 그룹은 각각 2006년 여름철(8, 9월)에서의 대조구, 식물섬, 풍력섬의 자료를 나타내는 그룹 1, 2007년 봄(3, 4월)의 자료로 구성된 그룹 4를 보였으며, 그룹 3은 겨울철(12, 2월)과 대조구의 10월을 제외한 식물섬과 풍력섬의 10월 자료로 구성되었으며, 그룹 2는 2007년 5월과 2006년 10월의 대조구 자료로 이루어졌다.

또한 2006년 8월부터 2007년 6월까지의 동물플랑크톤 자료를 이용한 군집분석 후 NMS ordination 기법을 활용하여 동물플랑크톤 군집의 차이를 비교하였다[그림 3.5.78]. 그 결과 NMS ordination에서 두 축에 의해 형성된 stress 값은 55로 나타났다. 이때 앞서 시행한 군집 분석의 결과 그룹 1은 좌표의 오른쪽 아래에 위치하였으며, 그룹 2는 좌표의 왼쪽 아래에 나타났다. 또한 그룹 3은 좌표의 오른쪽 윗부분에 주로 분포하였으며, 그룹 4는 좌표의 가운데 부분에 주로 분포하였다. 이들 그룹의 분포는 계절적 차이에 따라 구분되었으나, 앞서 살펴 본 식물 플랑크톤 밀도변동과는 달리 서식지 조건에 따른 차이는 뚜렷하게 나타나지 않았다.



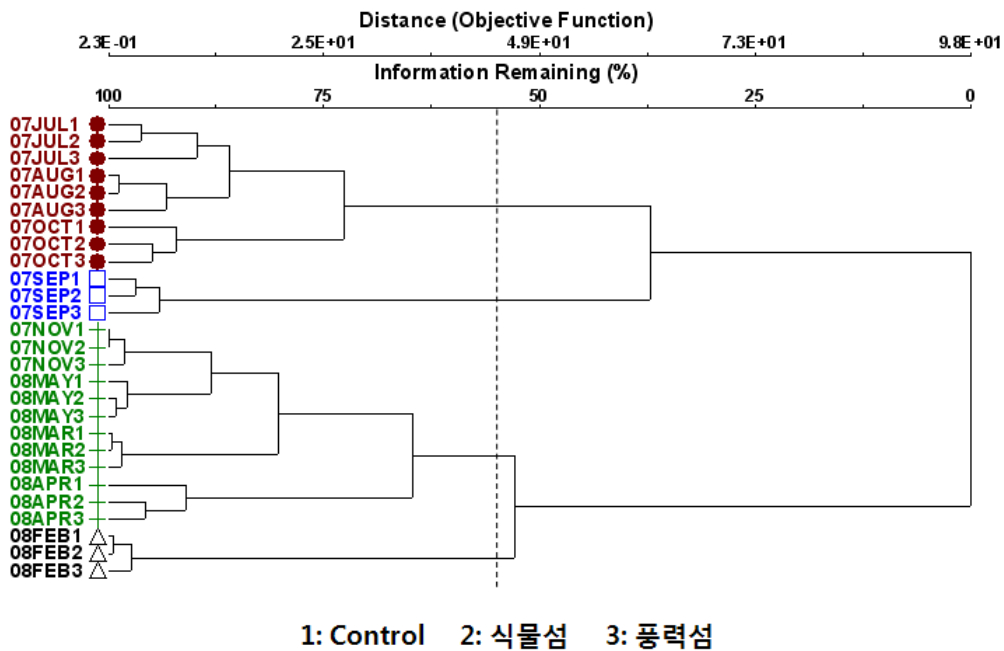
[그림 3.5.78] 인공식물섬 처리에 따른 동물플랑크톤 군집 변동 분석(1: 대조고, 2: 식물섬, 3: 풍력섬) (2006년 8월~2007년 6월)



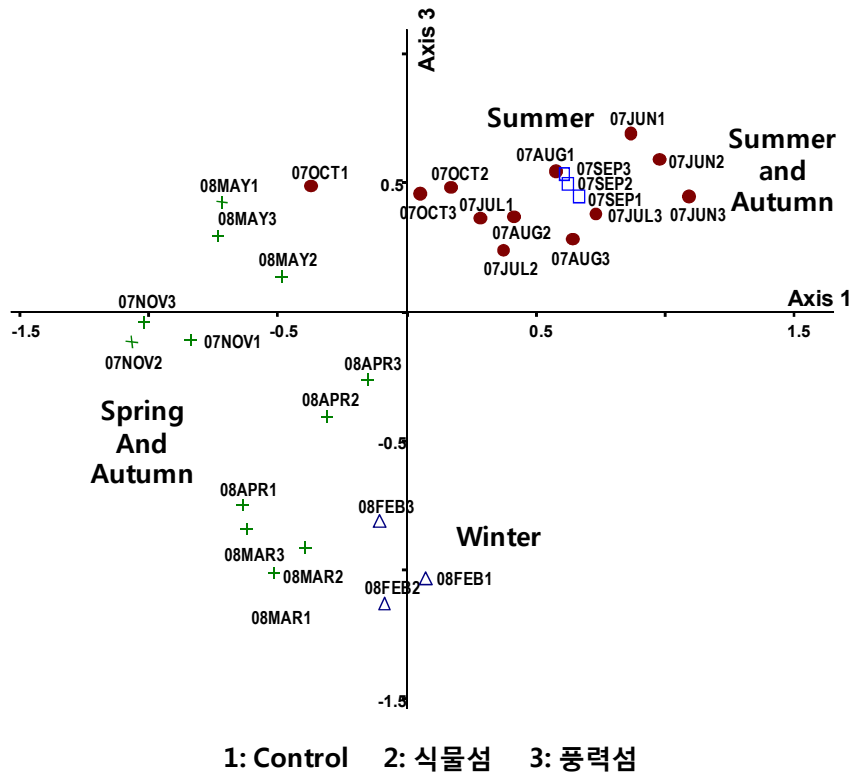
[그림 3.5.79] 인공식물섬 처리에 따른 동물플랑크톤 군집 NMS ordination(2축 stress: 55) (2006년 8월~2007년 6월)

[그림 3.5.79]는 2007년 7월부터 2008년 5월의 조사기간 동안 신구저수지에서 인공식물섬 처리 조건에 따른 동물플랑크톤 군집의 차이를 비교하기 위하여 군집분석 한 결과이다. 군집분석은 대조구, 식물섬, 풍력섬의 자료만 이용하였다. Cluster 분석결과 앞서 자료 분석에서와 같이 크게 4개의 그룹으로 구분이 되었으며 군집변동의 계절성에 따라서 차이가 있다는 것을 보여준다. MRPP 분석결과 각 그룹간에는 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 그룹 2는 각 처리 조건에서의 2007년 9월의 자료들로 구성되었으며, 이에 반해 그룹 4는 2008년 2월의 자료들로 이루어졌다. 그룹 1은 2007년 9월을 제외한 7월부터 10월까지의 자료로 구성되었으며, 그룹 3은 2007년 11월과 2008년 3월에서 5월까지의 자료들로 이루어졌다.

또한 2007년 7월부터 2008년 5월까지의 동물플랑크톤 자료를 이용한 군집분석 후 NMS 분석을 하였다[그림 3.5.80]. 그 결과 NMS ordination에서 두 축에 의해 78%의 설명력을 보였다. 이때 앞서 시행한 군집분석의 결과 그룹 4는 좌표의 아래쪽에 분포하였으며, 그룹 3은 좌표의 왼쪽에 위치하였다. 또한 그룹 1은 좌표의 오른쪽 위에 분포하였으며, 그룹 2는 그룹 1과 혼재되어 나타났다. 이들 그룹의 분포는 계절적 차이에 따라 구분되었으나 앞서 살펴본 바와 같이 식물플랑크톤 밀도변동과는 달리 서식지 조건에 따른 차이는 뚜렷하게 나타나지 않았다.

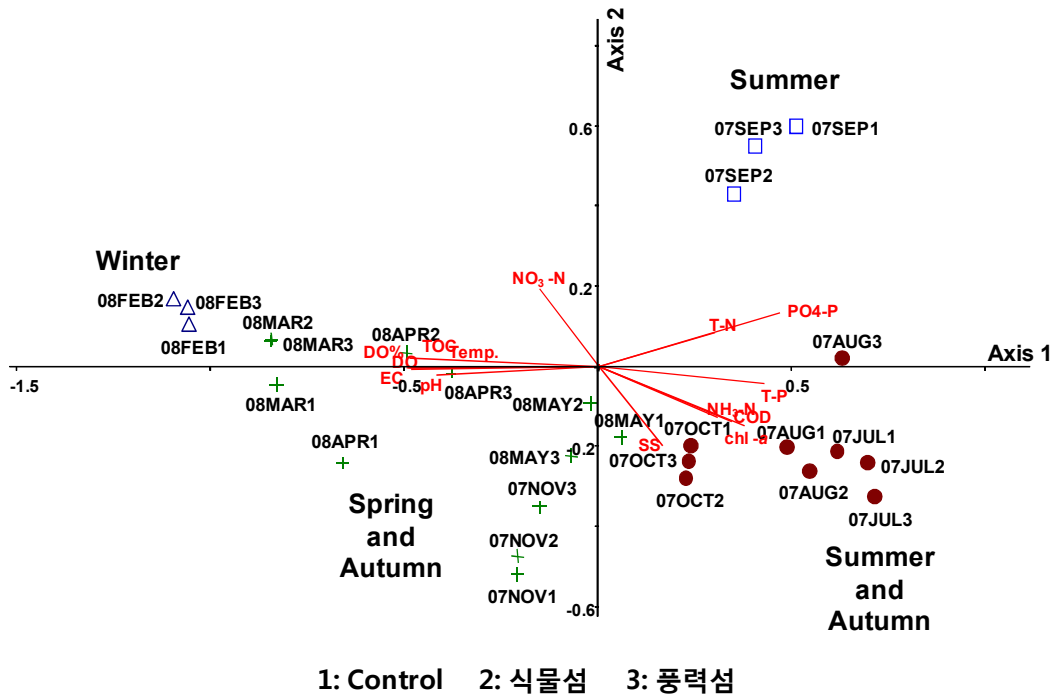


[그림 3.5.80] 인공식물섬 처리에 따른 동물플랑크톤 군집 변동 분석(1: 대조구, 2: 식물섬, 3: 풍력섬) (2007년 7월~2008년 5월)



[그림 3.5.81] 인공식물섬 처리에 따른 동물플랑크톤 군집 NMS ordination
(축 1: $r^2=0.42$, 축 2: $r^2=0.36$) (2007년 7월~2008년 5월)

한편 [그림 3.5.81]은 환경인자의 조사가 함께 이루어진 2007년 7월부터 2008년 5월까지의 동물플랑크톤 자료와 환경인자를 이용한 군집분석 후 CCA(canonical correspondence analysis) ordination 결과를 나타낸다. CCA는 PCA와는 달리 direct gradient analysis 방법으로서 표본, 생물 및 환경인자간의 상호 연관성을 잘 표출해 줄 수 있는 ordination 방법이다. CCA ordination에서 1축과 2축에 각각 $r^2=0.619$, $r^2=0.040$ 의 설명력을 보였다. 이때 앞서 시행한 NMS 분석에서의 ordination과는 달리 그룹 1과 그룹 2가 혼재되지 않고 분리되어 나타나는 차이를 보였다. 이때 선은 환경인자들과 축들과의 상관성을 나타낸 것으로 선의 길이는 상관값의 정도를 나타내고, 선의 방향은 각 축과의 상관성의 경향을 나타낸다. Chl-*a*와 COD의 경우 그룹 1과 양의 상관성을 보인 반면, DO와 전기전도도(EC)는 그룹 3과 그룹 4와 높은 양의 상관관계를 보였다.



[그림 3.5.82] 인공식물섬 처리에 따른 동물플랑크톤 군집 CCA ordination(축 1: $r^2=0.619$, 축 2: $r^2=0.039$) (2007년 7월~2008년 5월)

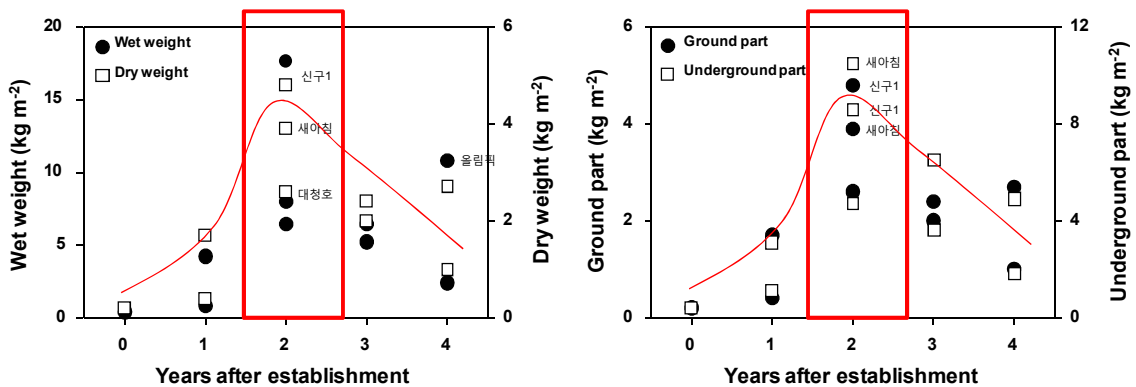
라. 인공식물섬 효율평가

인공식물섬을 설치하는 것은 식재된 식물에 의해 P, N 등 영양염류를 직접 제거하는 효과와 미생물, 동물플랑크톤, 무척추동물, 및 어류 등 중속영양 생물에게 서식지를 제공하는 효과, 그리고 인공식물섬 자체로서 조류발생에 중요한 요인인 빛을 차단하는 효과 등 다양한 측면에서 저수지의 수질개선에 영향을 미친다. 그러나 인공식물섬은 설치 후 안정화되는 기간이 필요하며 또한 식물이 계속 성장을 함으로서 인공식물섬의 식물서식지로서 조건이 달라진다. 따라서 본 연구에서는 인공식물섬 설치 후 시간 경과에 따른 인공식물섬의 효과를 평가함으로써 효과적인 수질관리에 기여하고자 하였다. 분석을 위한 자료는 아섬 및 농어촌연구원에서 10개 조사 지점(올림픽공원, 새아침공원, 솔찬공원, 해돋이공원, 대청호1~3, 신구저수지1~3)에서 조사한 자료를 활용하였다. [표 3.5.13]은 조사 지역 및 조사시기별 특성을 보여준다.

이에 근거하여 인공식물섬이 설치된 후 식물생육현황을 설치년차에 정리하여 인공식물섬 식물의 생육을 평가하였다[그림 3.5.82]. 그 결과 생체량 및 건조중량, 지상 및 수중부분 중량 모두 설치 후 점차 증가 하여 2년 후에 가장 높은 값을 보인다. 그러나 3년째부터는 다소 감소하는 것을 보여준다. 설치 후 2년째 까지는 식물이 성장을 위한 충분한 공간이 있어 많이 성장할 수 있지만 그 이후에는 종내 자체 경쟁 때문에 다소 감소하는 것으로 판단된다. 따라서 식물섬의 효율을 높이기 위해서는 2~3년에 한번씩은 주기적으로 인공식물섬의 식물들이 성장을 잘 할 수 있도록 관리해 주는 것이 필요하다는 것을 제시해 준다.

[표 3.5.12] 인공식물섬의 설치 년도별 식물생육현황조사 지역 및 특성

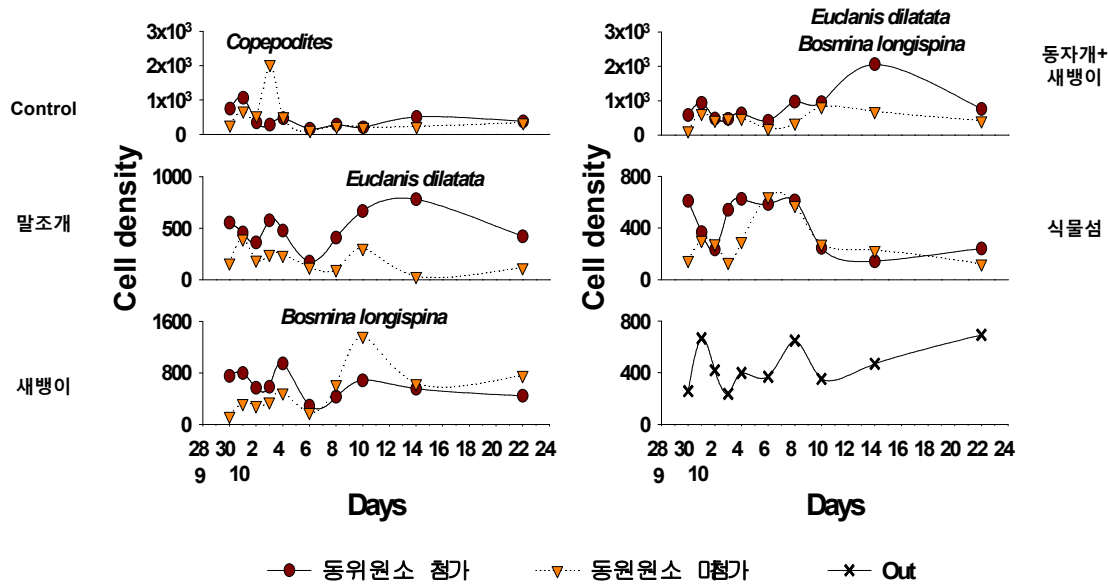
장소명	설치년도	조사년도	식재수종	생장길이(cm)	생체중량(kg m ⁻²)	
					습중량	건중량
올림픽공원	2004	2008	노랑꽃창포	평균	10.8	2.7
				최장		
솔찬공원	2005	2008	갈대	평균	6.4	2.4
				최장		
새아침공원	2006	2008	갈대	평균	8.0	3.9
				최장		
해돋이공원	2007	2008	갈대	평균	0.8	0.4
				최장		
대청호1	2004	2008	노랑꽃창포	평균	8.0	3.9
				최장		
대청호2	2005	2008	노랑꽃창포	평균	160	
				최장		
대청호3	2006	2008	노랑꽃창포	평균	120	
				최장		
신구저수지1	2006	2008	노랑꽃창포	평균	110	
				최장		
신구저수지2	2007	2008	노랑꽃창포	평균	2.4	1.0
				최장		
신구저수지3	2008	2008	노랑꽃창포	평균	70	
				최장		



[그림 3.5.83] 인공식물섬 설치 후 식재된 식물의 중량 및 건조중량(a), 수중 및 지상부의 생체량(b) 변동

마. 신구저수지 메소코즘 실험

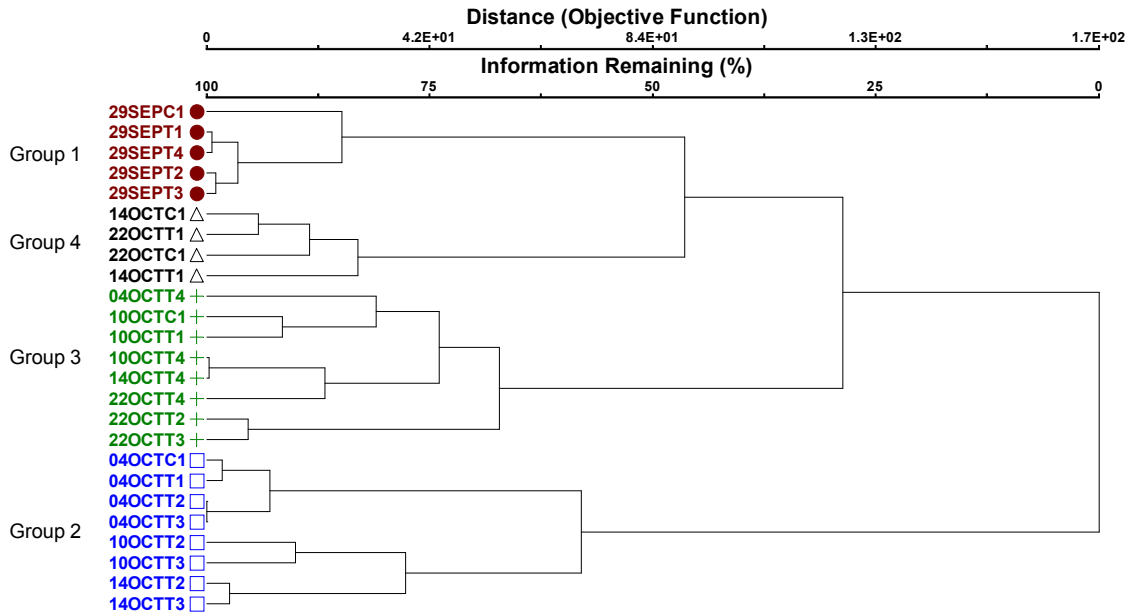
신구저수지에서 2007년 9월 29일부터 10월 22일까지 실시된 메소코즘 실험결과를 토대로 식물플랑크톤과 동물플랑크톤 군집의 변동, 그리고 환경인자와의 관계에 대해 분석하였다. [그림 3.5.83]은 메소코즘 내 처리 조건에 따른 동물플랑크톤 밀도 변동특성을 보여주는 것이다.



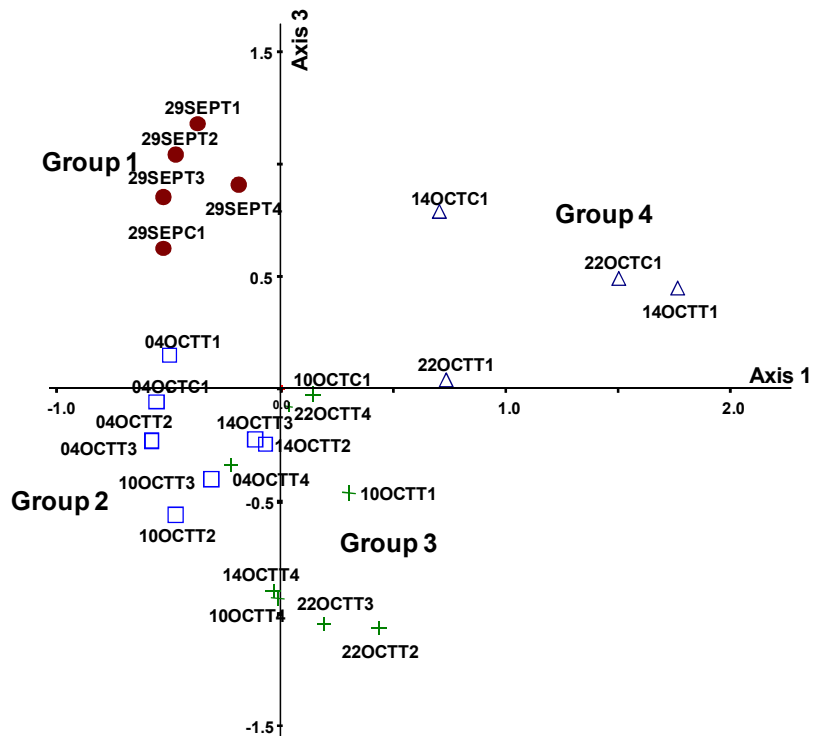
[그림 3.5.84] 메소코즘에서 조사기간동안 동물플랑크톤 밀도변동. Out은 메소코즘이 아닌 외부 저수지를 나타냄(농어촌연구원 조사)

[그림 3.5.84]는 2007년 9월 29일부터 10월 22일까지 실시된 메소코즘 실험결과에 따른 동물 플랑크톤 군집의 차이를 비교하기 위하여 군집분석한 결과이다. 군집분석에서 사용된 메소코즘의 처리조건은 말조개, 새뱅이, 새뱅이+동자개, 식물섬의 4가지 조건과 대조군을 이용하였다. Cluster 분석결과 자료는 크게 4개의 그룹으로 구분이 되었으며, 처리 조건과 실험 후 경과 시간에 따른 차이가 나타났다. MRPP 분석결과 각 그룹 간에는 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 그룹 1은 실험 초기인 9월 29일의 자료들로 이루어졌으며, 그룹4는 대조군과 말조개를 처리한 조건의 실험 후반부인 10월 14일과 22일의 자료로 이루어졌다. 그룹2는 10월 4일의 대조군과 말조개 처리군을 비롯한 실험 중반부인 10월 4일과 10일, 14일의 새뱅이, 새뱅이+동자개의 조건으로 이루어졌다. 나머지 그룹 3은 식물섬 처리군과 10월 10일의 대조군, 말조개 처리군, 22일의 새뱅이 처리군, 새뱅이+동자개 처리군으로 구성되었다.

앞서 선행된 군집분석의 결과를 토대로 2007년 9월 29일부터 10월 22일까지 실시된 메소코즘 실험결과 중 동물플랑크톤 자료를 이용한 NMS 분석을 실시하였다[그림 3.5.85]. 그 결과 NMS ordination에서 두 축에 의해 형성된 설명력은 각 축 1은 $r^2=0.419$, 축 2는 $r^2=0.394$ 를 보였다. 이때 앞서 시행한 군집분석의 결과 그룹 4는 좌표의 오른쪽 윗부분에 분포하였으며, 그룹 1은 좌표의 왼쪽 윗부분에 위치하였다. 또한 그룹 2와 그룹 3은 좌표의 아랫부분에 위치하였으며, 각각 두 번째 축을 기준으로 좌우로 나뉘었다. 이들 그룹의 분포는 메소코즘 처리조건에 따른 차이보다 실험 시간의 경과에 따른 차이가 훨씬 더 뚜렷하게 나타났다.



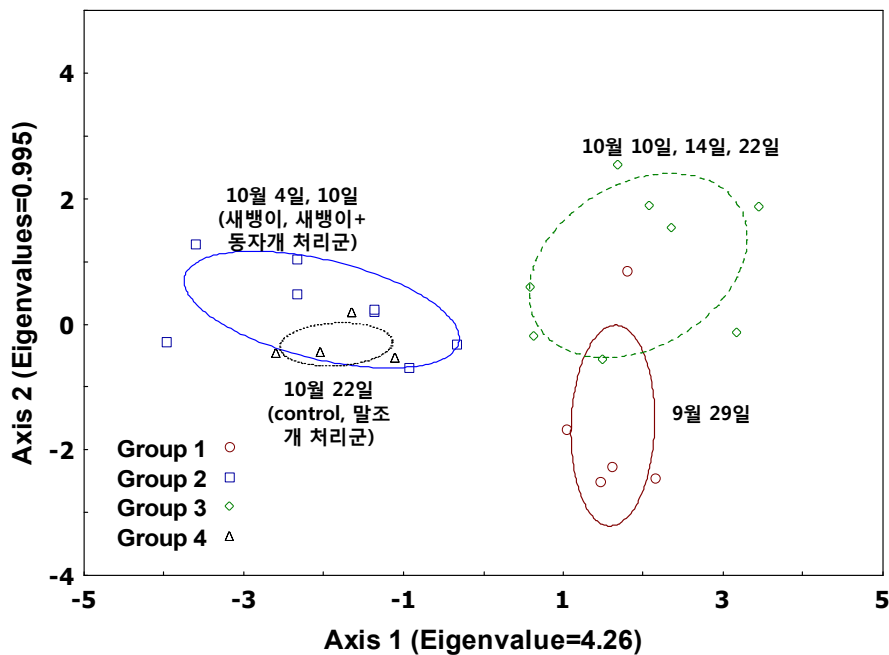
[그림 3.5.85] 메소코즘의 각 처리 조건에서 동물플랑크톤 군집변동 분류. 표본이름의 마지막 숫자는 처리조건을 나타냄(1: 말조개, 2: 새뱅이, 3: 새뱅이+동자개, 4: 식물섬). (자료: 농어촌연구원 조사)



[그림 3.5.86] 메소코즘의 각 처리 조건에서 동물플랑크톤 군집변동 NMS ordination. (축 1: $r^2=0.419$, 축 2: $r^2=0.394$). 그룹은 cluster 분석에서 얻어진 것임

바. 유용생물 발생예측 및 서식지 평가

앞서 메소코즘 분석에서 정의된 동물플랑크톤 군집 그룹이 그들의 환경인자에 의해 판별될 수 있는가를 평가하고 이에 미치는 중요 환경인자를 평가하기 위하여 판별분석(discriminant function analysis)을 실시하였다[그림 3.5.86]. 그 결과 선행된 군집분석에서 나누어진 4개의 그룹들이 두 축에 의해 서로 구분되어졌다. 이때 각 축에 대한 고유치(eigen value)는 첫 번째 축이 4.26, 두 번째 축이 0.995로 첫 번째 축의 설명력이 가장 높게 나타났다. 그룹 1과 그룹 3은 첫 번째 축을 기준으로 오른쪽에 위치한 반면, 그룹 2와 그룹 4는 첫 번째 축의 왼쪽에 위치하였다. 또한 2축에 의해 그룹 1과 그룹 3이 구분되어졌다. 한편 이들 축에 의한 그룹의 판별에서는 환경인자의 상대적 중요성이 다르게 작용하게 된다. 첫 번째 축의 경우 전기전도도의 상대적 중요성이 가장 높았으며, 다음으로 TP와 PO₄-P의 순으로 상대적 중요성이 나타났다. 또한 두 번째 축은 TP의 중요성이 가장 높게 나타났으며, PO₄-P와 TN이 중요한 환경인자로 그룹의 판별에 영향을 미쳤다[표 3.5.14].



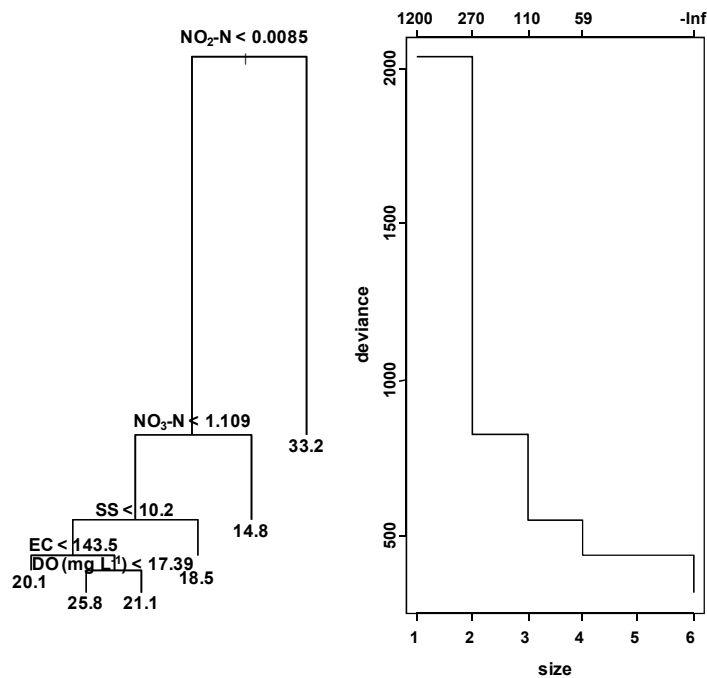
[그림 3.5.87] 메소코즘의 각 처리 조건에서 동물플랑크톤 군집변동 판별분석

또한 2007년 7월부터 2008년 5월까지 농어촌공사에서 조사된 신규저수지의 환경자료를 토대로 Chl-*a* 농도를 예측하기 위하여 분류회기분석나무 모형(Classification and Regression Tree: CART)(Breiman *et al.*, 1984) 방법을 이용하였다. CART는 각 독립변수를 이분화하는 과정을 반복하여 트리(나무) 형태를 형성함으로써 분류와 회귀분석을 수행하는 것이다. 이를 통해 Chl-*a* 농도 변화에 중요하게 영향을 미치는 요인을 분석하고, 수질개선을 위한 중요한 인자를

평가할 수 있다. 그 결과 [그림 3.5.87]에서 보는 바와 같이 0.0085 mg L⁻¹의 NO₂-N 농도를 기준으로 기준 농도 이상에서는 Chl-*a*값이 33.2 mg m⁻³이 되며, 이하에서는 다시 NO₃-N, SS, 전기전도도, DO가 순서대로 Chl-*a*의 농도를 예측에 중요하게 작용한다는 것을 보여준다.

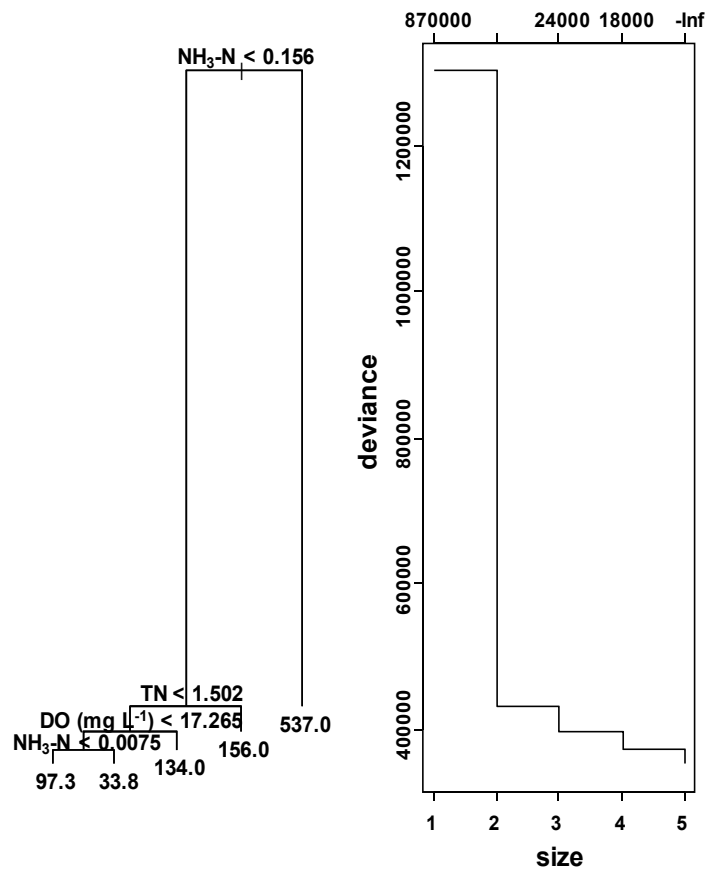
[표 3.5.13] 메소코즘의 각 처리 조건에서 동물플랑크톤 군집변동 판별분석 결과 환경인자 중요도 평가

Variables	Axis 1	Axis 2
Temperature	-0.93	-0.13
Conductivity	-3.96	-0.01
Salinity	1.74	-0.25
Do(%)	0.44	0.02
DO(mg L ⁻¹)	1.97	-0.59
pH	1.46	0.46
ORP	0.91	0.17
Turbidity	1.09	0.78
TN	-1.57	2.00
TP	-2.76	-3.43
NO ₂ -N	2.39	0.78
NO ₃ -N	-0.20	-1.28
NH ₄ -N	0.89	-0.46
PO ₄ -P	2.66	2.43
Eigen value	4.26	0.99
Cum.prop.(%)	0.74	0.91



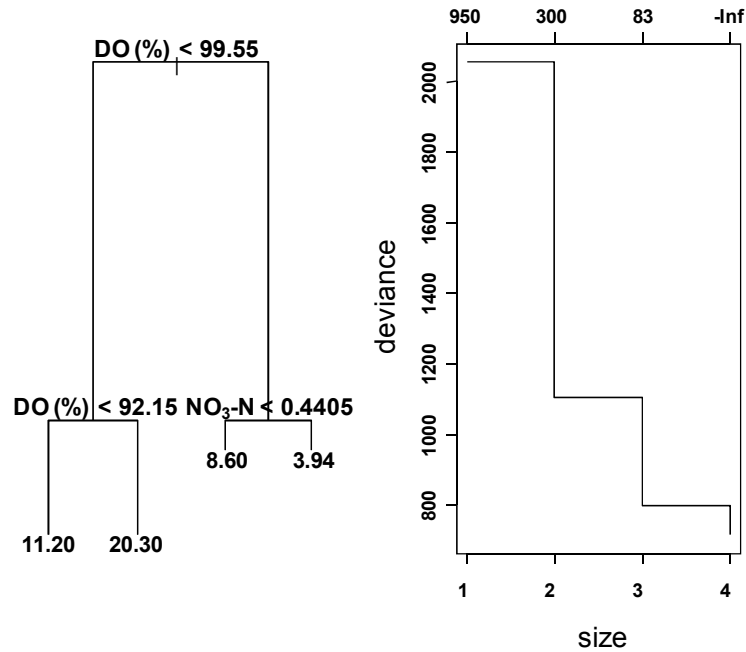
[그림 3.5.88] Chl-*a* 농도 예측을 위한 CART 분석 결과(자료: 농어촌연구원 2007~2008 조사)

또한 CART를 이용하여 식물플랑크톤의 주요 섭식자이고 시험저수지에서 높은 밀도를 보인 동물플랑크톤 중 윤충류의 밀도를 환경인자의 변화에 따라 예측하고, 그 서식지 환경인자의 상대적 중요도를 평가하였다. [그림 3.5.88]은 이러한 환경인자에 따른 윤충류 밀도 예측의 결과이며, 그 결과 0.156 mg L⁻¹ 이상의 NH₃-N 농도에서 537 cells L⁻¹의 윤충류 밀도를 보이는 것으로 예측되었다. 한편 NH₃-N의 농도가 0.156 mg L⁻¹ 이하일 경우에는 TN과 DO의 농도 기준에 의해 윤충류의 밀도가 예측되었으며, 마지막으로 NH₃-N의 농도에 따라 윤충류의 밀도가 세분화 되어 예측되었다. 이는 윤충류의 서식조건을 결정하는데 있어서 NH₃ 농도가 가장 중요하며 TN, DO 농도 또한 중요하게 작용한다는 것을 제시해 준다.



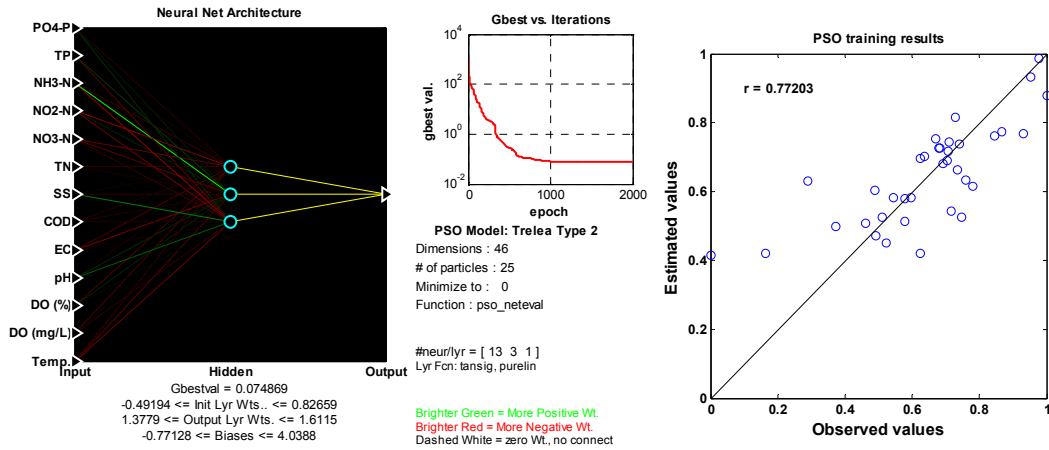
[그림 3.5.89] 윤충류 밀도 예측을 위한 CART 분석 결과(자료: 농어촌연구원 2007~2008 조사)

한편 동물플랑크톤 중 요각류의 밀도를 환경인자를 이용하여 CART를 통해 예측한 결과, DO의 %농도가 99.55% 이상에서는 NO₃-N의 농도 기준에 따라 요각류의 밀도가 나뉘어 예측된 것에 비해 99.55% 이하의 DO농도에서는 다시 DO의 99.15%의 농도를 기준으로 요각류의 밀도가 예측되었다[그림 3.5.89]. 이는 요각류의 서식조건을 결정하는데 있어서 DO 및 NO₃ 농도가 중요하게 작용한다는 것을 제시해 준다.

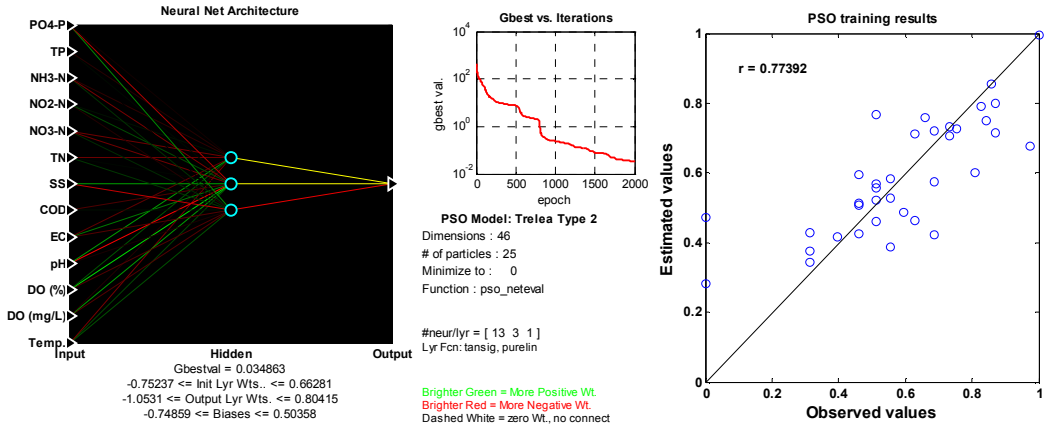


[그림 3.5.90] 요각류 밀도 예측을 위한 CART 분석 결과(자료: 농어촌연구원 2007~2008 조사)

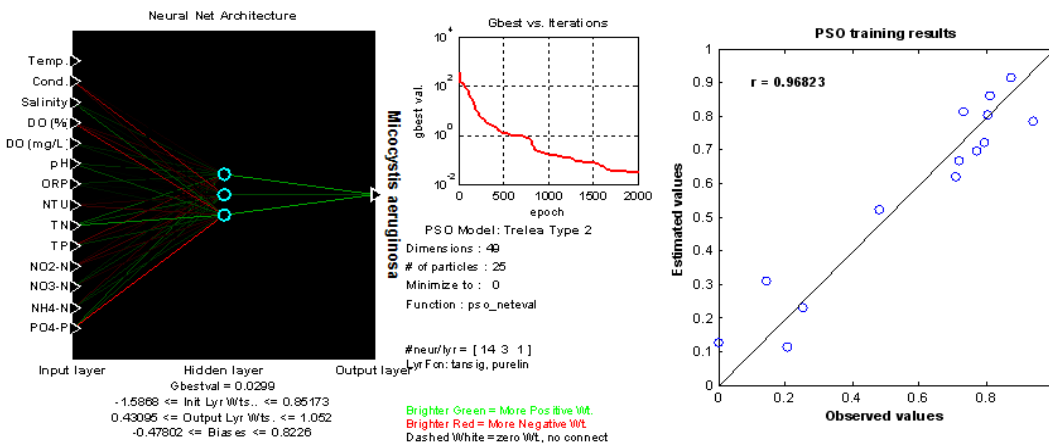
한편 CART와 더불어 앞 절에서 사용한 MLP-PSO 모델을 이용하여 신구저수지에서의 동물플랑크톤 및 *Microcystis aeruginosa*의 밀도를 예측하였다. MLP-PSO 모델에서의 입력층에는 13의 환경인자를 사용하였으며, 은닉층과 출력층은 각각 3개와 1개로 구성된 13-3-1 구조로 나타내었다. [그림 3.5.90]은 2007~2008년 동안 농어촌연구원에서 조사한 자료를 바탕으로 동물플랑크톤 중 윤충류의 밀도를 예측한 결과로 0.074869의 Gbest 값을 나타내었다. MLP-PSO 모델을 통한 윤충류 밀도의 예측 결과 $r=0.77(p<0.05)$ 의 예측치를 보였다. 한편 앞의 MLP-PSO 모델을 통한 윤충류의 밀도 예측과 동일한 자료를 이용하여 MLP-PSO 모델을 통한 요각류의 밀도 예측에서는 0.034863의 Gbest 값과 $r=0.77(p<0.05)$ 의 예측력으로 윤충류의 밀도 예측력과 비슷한 경향을 나타내었다[그림 3.5.91]. 그러나 2007년 9월 29일~10월 22일 동안 신구저수지에서 실시된 메소코즘의 결과(건국대학교 및 농어촌연구원 자료 이용)를 이용한 MLP-PSO 모델을 통한 *Microcystis aeruginosa*의 밀도 예측의 결과에서는 0.0299의 Gbest 값과 $r=0.97(p<0.05)$ 의 매우 높은 예측력을 보였다[그림 3.5.92]. 이는 환경인자를 이용한 이들 동물 및 식물플랑크톤의 밀도 예측을 고려하였을 때 식물플랑크톤인 *Microcystis aeruginosa*가 동물플랑크톤인 윤충류와 요각류보다 환경인자에 더욱 민감하게 반응하기 때문으로 사료된다.



[그림 3.5.91] 율충류 밀도 예측을 위한 MLP-PSO 분석 결과 (자료: 농어촌연구원 2007~2008 조사) (Gbest=0.074869)



[그림 3.5.92] 요약류 밀도 예측을 위한 MLP-PSO 분석 결과 (자료: 농어촌연구원 2007~2008 조사) (Gbest=0.034863)



[그림 3.5.93] Microcystis aeruginosa 밀도 예측을 위한 MLP-PSO 분석 결과 (자료: 신구저수지 메소코즘, 건국대학교 및 농어촌연구원 2007.9.29~10.22 조사) (Gbest=0.0299)

사. 시스템다이나믹스 모델

호수 생태계는 주변 환경과 영양염류, 조류 등 생산자, 동물플랑크톤을 포함하는 1차 소비자, 어류 등을 포함하는 2차 소비자, 그리고 미생물 등을 포함하는 분해자 등으로 구성되며, 저수지 수질은 P, N등의 영양염류와 조류발생 등으로 나타내어진다. 수질을 개선하기 위한 생물적 방법으로 앞서 살펴본 바와 같이 영양염류, 동물플랑크톤, 무척추동물, 어류, 수생식물 등 다양한 방법으로 활용하기 위한 연구가 있었다. 그러나 이들은 서로 독립적으로 서로 작용하는 것이 아니라 하나의 시스템 내에서 서로 상호작용이 이루어지기 때문에 매우 복잡한 관계를 형성한다. 인자들 간의 다양한 상호작용을 고려한 연구방법으로서 시스템다이나믹스 모델(structural dynamic model) 접근법이 많이 사용된다.

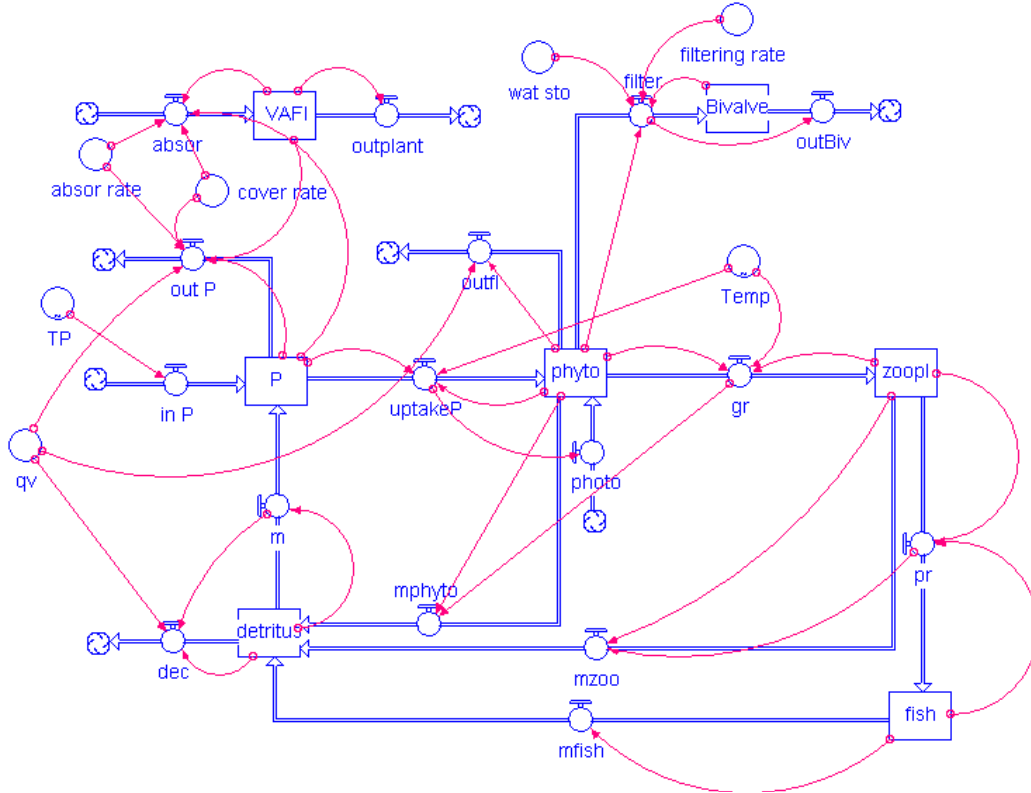
시스템다이나믹스 모델은 Forrester(Forrester, 1961)가 산업동태론(industrial Dynamics)을 발표한 이후 도시동태론(Urban Dynamics), 세계동태론(World Dynamics) 등으로 확장되어 나갔으며(Forrester, 1969; 1971), 이후로 계속해서 그 응용범위가 확대되어 다양한 학문 및 실무분야에서 사용되어왔다. 초기 산업동태론으로 거론되던 시스템다이나믹스는 현상에 내재된 순환적 인과관계를 규명하여 하나의 시스템으로 정립시키고, 이를 컴퓨터상에서 구현하여 현상의 시간에 따른 변화과정을 시뮬레이션을 통하여 구현하고 관찰하며, 원하는 시스템의 상태를 얻기 위하여 취할 수 있는 정책적 대안을 결정하고자 하는 일련의 과정을 포함하는 과학적 방법론으로 설명될 수 있다(박 등 2006). 시스템다이나믹스 모델은 시스템의 개별 구성에 대한 모델링보다는 시스템 전체의 형태 변화의 모의에 중점을 둔 것으로 시스템 내에 존재하는 정보 혹은 물질의 피드백을 직접적으로 모델링한다. 이러한 시스템다이나믹스 모델링 방법을 이용함으로써 시스템의 개별 구성요소를 작동시키는 기체들을 정보 또는 물질의 피드백 체계에 따른 연결을 통하여, 개별 인자의 변화가 시스템 내의 다른 구성에 미치는 영향의 정도를 파악할 수 있게 되는 것이다. 즉, 시스템다이나믹스는 시스템 내에 존재하는 특정 현상에 대한 시간에 따른 변화 양상을 보고자 하는 것으로, 현상을 발견시키는 변수들 간의 실제적이며 직접적인 인과관계의 정립에 중점을 두는 것이다.

시스템다이나믹스 모델은 다양한 학문분야에서 사용되고 있으며, 물환경 분야에서도 적용 예가 많으나 주로 수량의 분석과 그에 관련된 정책결정에 주로 사용되어 왔다. 주요사례로는 홍수조절을 위한 저수지 운영문제(Ahmad, 2000), 지구 수자원 모델(Simonovic, 2002), Las Vegas의 물 문제 해결을 위한 정책 결정(Stave, 2003)등이 있다. 또한 Ahmad 등(2001)의 홍수예방정책의 영향 평가를 위한 의사결정도구로서의 시스템다이나믹스 연구와 같이 정책 결정을 위한 의사결정도구로서 빈번히 사용되기도 한다. 한편 생태계내 먹이연쇄를 고려한 먹이망에 대한 연구에도 활용되고 있다. 이러한 사례로는 Jørgensen과 Bernardi(1997)는 물고기 사망률의 변화에 따른 동물플랑크톤 변화를 통한 호수 생태계의 변화 관찰 및 Jørgensen과 Bernardi(1998)은 호수에서 영양염의 변화에 따른 상위 영양단계에서 변화를 통해 호수의 구조적 관계 변화를 나타내고자 하였다. 또한 Zhang 등(2003)은 시스템다이나믹스 모델을 터키의 호수에 적용하였다.

일반적으로 시스템다이나믹스 모델은 Stella(ISEE Systems ver. 9.0.2) 프로그램이 많이 이용된다. 모델은 저장변수(stock variable), 변환자(converter), 유량변수(flow variable), 연결자

(connector)가 시간의 변화에 따라 구성되어 있으며, 이들 구성요소들의 관계에 의해 모델 내 시스템이 결정되게 된다. 특히, 이들 구성요소들간의 관계는 차분방정식을 통해 나타내며, 각 단위 시간에서의 변수들의 해를 연속적으로 구해 나간다. 이때 구해진 변수들의 해는 시간에 따른 시스템 내 구성 요소들의 변화로 시스템에서 발생하는 현상의 모식적 변화를 의미하게 된다. 이러한 Stella에서의 시스템다이내믹스의 초기 상태, 변수값, 외부 유추, 민감도 분석의 시행 등에 대한 사용 방법에 대한 자세한 내용은 여러 논문들에서 설명하고 있다(Costanza, 1987; Hannon and Ruth, 1994; Peterson and Richmond, 1996).

Jørgensen과 Bernardi(1998)은 호수 내 영양염의 변화에 따른 상위 영양단계인 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤, 물고기에서 나타나는 변화를 통한 호수 생태계의 구조적 변화에 대한 연구를 하였다. 본 연구에서는 Jørgensen과 Bernardi(1998)의 모델을 기반으로 Stella 프로그램을 이용하여 연구대상 저수지인 신구저수지의 시간 변화에 따른 서식지 적합성을 평가하였다[그림 3.5.93]. [그림 3.5.93]의 diagram에서는 식물플랑크톤의 성장에 중요한 영향을 미치는 외부 환경인자인 TP의 유입 변화에 따른 식물플랑크톤의 밀도 변동을 식물플랑크톤 섭식자인 동물플랑크톤과의 관계를 고려하여 나타내었다. 그러나 동물플랑크톤의 상위 섭식자인 물고기의 영향은 연구 대상저수지에서 연구의 어려움으로 인해 모식도에서 나타내기만 했을 뿐 실제 모델에서는 고려되지 않았다. 또한 식물플랑크톤과 동물플랑크톤 성장에 영향을 주는 요인으로 온도를 고려하였다.



[그림 3.5.94] 신구저수지 Stella 모델 모식도

한편 연구대상 저수지 내에서 유용생물의 영향을 고려하기 위해 말조개(Bivalve)와 인공식물섬(Vegetated Artificial Floating Island, VAFI) 투입 및 식재하였으며, 연구대상 저수지의 수질 개선을 위해 이들 유용생물의 적정 조건을 모델을 통해 나타내었다. 이때 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤 밀도 자료와 환경인자(TP, 온도) 자료는 건국대학교에서 2002년 11월부터 2004년 2월까지 조사된 자료를 이용하였다. 이때 모델을 구성하는 식은 [그림 3.5.94]에 나타내었다.

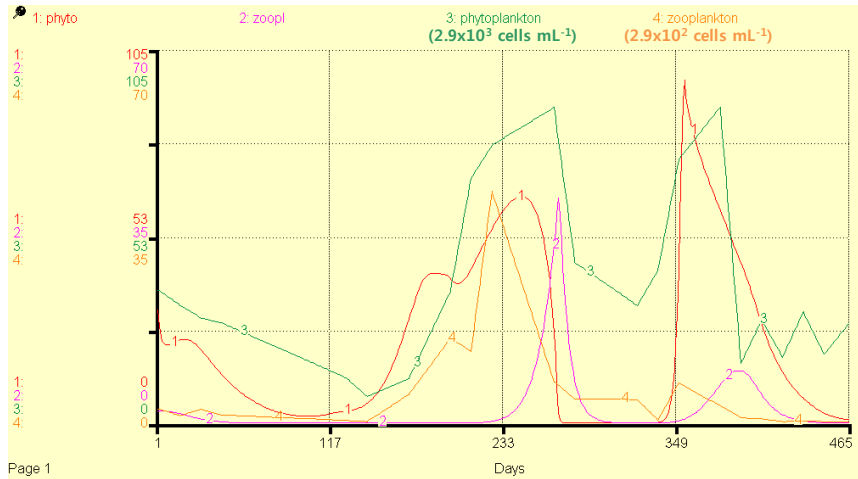
```

Bivalve(t) = Bivalve(t - dt) + (filter - outBiv) * dt
INIT Bivalve = 0
INFLOWS:
filter = Bivalve*filtering_rate/wat_sto*phyto
OUTFLOWS:
outBiv = filter*1.05
detritus(t) = detritus(t - dt) + (mphyto + mzoo + mfish - m - dec) * dt
INIT detritus = 4
INFLOWS:
mphyto = 0.055*phyto+0.35*gr
mzoo = 0.15*zoopl+0.35*pr
mfish = 0.05*fish
OUTFLOWS:
m = 0.004*detritus
dec = 100*m+qv*detritus
fish(t) = fish(t - dt) + (pr - mfish) * dt
INIT fish = 0
INFLOWS:
pr = 0.125*fish*(zoopl-0.1)/(zoopl+0.16)
OUTFLOWS:
mfish = 0.05*fish
P(t) = P(t - dt) + (in_P + m - uptakeP - out_P) * dt
INIT P = 0.095
INFLOWS:
in_P = TP
m = 0.004*detritus
OUTFLOWS:
uptakeP = 0.01*phyto*EXP(-2.3*ABS((Temp-20)/20))*(P-0.15)/(P+0.25)
out_P = qv*P+absor_rate*plant*P*cover_rate
phyto(t) = phyto(t - dt) + (photo + uptakeP - gr - outfl - mphyto - filter) * dt
INIT phyto = 31.8
INFLOWS:
photo = uptakeP*90
uptakeP = 0.01*phyto*EXP(-2.3*ABS((Temp-20)/20))*(P-0.15)/(P+0.25)
OUTFLOWS:
gr = zoopl*0.4*(phyto*100-0.4)/(phyto*100+0.6)*EXP(-2.3*ABS((Temp-20)/20))
outfl = phyto*qv
mphyto = 0.055*phyto+0.35*gr
filter = Bivalve*filtering_rate/wat_sto*phyto
plant(t) = plant(t - dt) + (absor - outplant) * dt
INIT plant = 0
INFLOWS:
absor = absor_rate*cover_rate*P*plant/(plant+0.27)
OUTFLOWS:
outplant = plant*0.0008
zoopl(t) = zoopl(t - dt) + (gr - pr - mzoo) * dtINIT zoopl = 2.22
INFLOWS:
gr = zoopl*0.4*(phyto*100-0.4)/(phyto*100+0.6)*EXP(-2.3*ABS((Temp-20)/20))
OUTFLOWS:
pr = 0.125*fish*(zoopl-0.1)/(zoopl+0.16)
mzoo = 0.15*zoopl+0.35*pr
absor_rate = 0.233
cover_rate = 0.01
ex = phyto*3.4+35*zoopl+300*fish+detritus
filtering_rate = 8.06
qv = 0.07
wat_sto = 388000/0.045*1/2
phytoplankton = GRAPH(TIME)
(1.00, 37.3), (15.0, 33.2), (29.0, 29.6), (43.0, 28.2), (57.0, 25.6), (71.0, 23.0), (85.0, 20.5), (99.0, 17.9), (113, 15.3), (127, 12.7), (141, 7.50), (155, 10.0), (169, 12.5), (183, 24.7), (197, 37.0), (211, 69.0), (225, 78.2), (239, 81.8), (253, 85.3), (267, 88.9), (281, 45.2), (295, 41.2), (309, 37.2), (323, 33.1), (337, 43.1), (351, 74.2), (365, 81.6), (379, 89.1), (393, 16.9), (407, 29.0), (421, 18.6), (435, 31.3), (449, 19.4), (463, 26.7), (477, 34.1)
Temp = GRAPH(TIME)
(1.00, 11.8), (15.0, 8.80), (29.0, 5.70), (43.0, 4.00), (57.0, 3.10), (71.0, 2.50), (85.0, 3.30), (99.0, 5.50), (113, 8.40), (127, 7.00), (141, 10.1), (155, 11.4), (169, 12.6), (183, 16.7), (197, 20.8), (211, 21.6), (225, 22.6), (239, 23.3), (253, 23.9), (267, 24.6), (281, 26.4), (295, 25.5), (309, 24.5), (323, 23.6), (337, 21.1), (351, 17.9), (365, 16.0), (379, 14.0), (393, 11.1), (407, 5.30), (421, 3.50), (435, 2.70), (449, 0.4), (463, 2.90), (477, 5.30)
TP = GRAPH(TIME)
(1.00, 0.0953), (15.0, 0.0751), (29.0, 0.0707), (43.0, 0.0761), (57.0, 0.075), (71.0, 0.0748), (85.0, 0.0738), (99.0, 0.073), (113, 0.0723), (127, 0.0716), (141, 0.0531), (155, 0.055), (169, 0.0569), (183, 0.052), (197, 0.048), (211, 0.0675), (225, 0.0786), (239, 0.0858), (253, 0.093), (267, 0.1), (281, 0.0897), (295, 0.066), (309, 0.095), (323, 0.0974), (337, 0.127), (351, 0.079), (365, 0.0805), (379, 0.082), (393, 0.0784), (407, 0.0728), (421, 0.0589), (435, 0.0503), (449, 0.0439), (463, 0.044), (477, 0.0446)
zooplankton = GRAPH(TIME)
(1.00, 2.60), (15.0, 1.40), (29.0, 2.60), (43.0, 1.50), (57.0, 1.40), (71.0, 1.20), (85.0, 1.00), (99.0, 0.9), (113, 0.7), (127, 0.5), (141, 0.3), (155, 2.80), (169, 5.40), (183, 10.6), (197, 15.9), (211, 13.5), (225, 43.5), (239, 31.6), (253, 19.7), (267, 7.80), (281, 4.50), (295, 4.50), (309, 4.50), (323, 4.40), (337, 0.6), (351, 7.60), (365, 5.40), (379, 3.20), (393, 1.00), (407, 0.8), (421, 0.3), (435, 0.4), (449, 0.3), (463, 0.3), (477, 0.3)

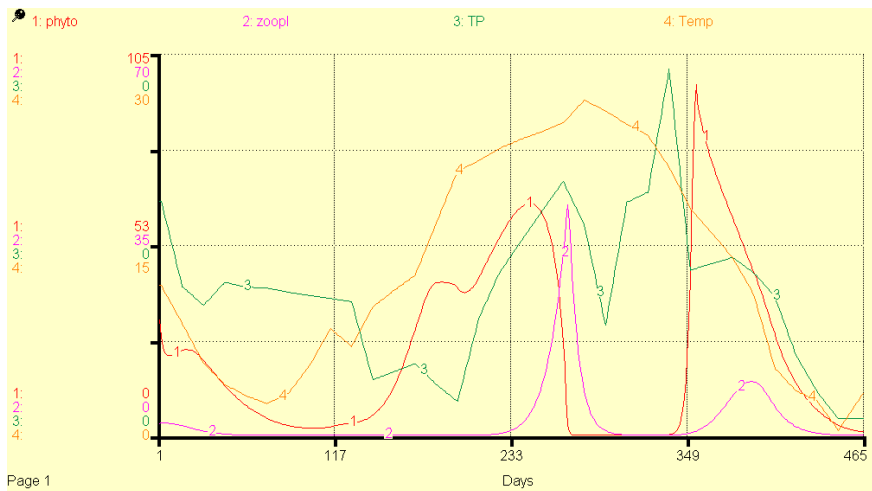
```

[그림 3.5.95] 신구저수지 Stella 모델 식

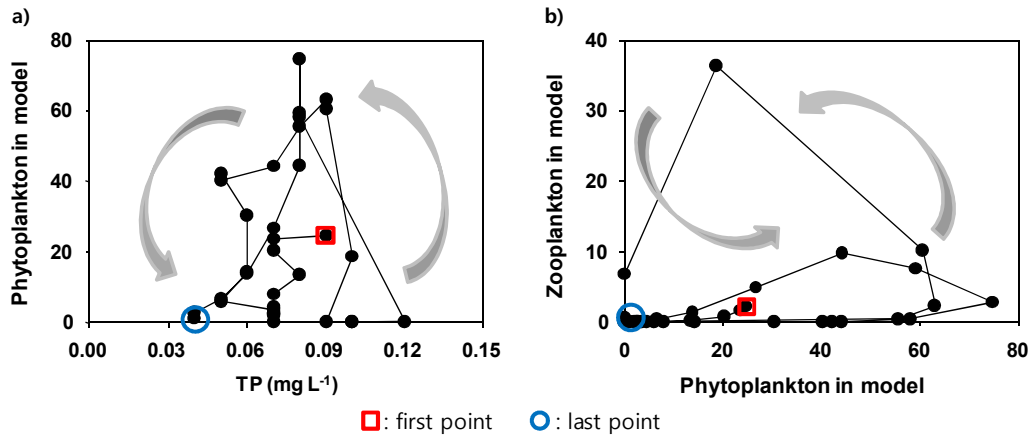
그 결과 모델을 통해 얻어진 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 밀도 변동은 신구저수지에서 조사된 값과 유사한 패턴을 보였다[그림 3.5.95]. 그러나 모델에서는 동물플랑크톤의 활성이 실제 조사보다 다소 늦게 발생하는 차이를 보였다. 이는 모델에서 식물 및 동물플랑크톤이 특정 종이 아닌 전체 종의 밀도를 고려하여 그 관계를 나타내었으며, 모델에서 동물플랑크톤의 변화는 식물플랑크톤의 변화에 종속 되는 특징을 가지기 때문이다. 그러나 모델에서 구해진 식물 및 동물플랑크톤의 전체적인 변화의 양상은 실제 조사된 신구저수지의 식물 및 동물 플랑크톤 변화 패턴과 유사하였다. 또한 식물플랑크톤의 변화는 TP와 온도 변화에 유의하게 나타났다 [그림 3.5.96]. 특히 식물플랑크톤의 변동은 TP 농도의 증감에 따른 변화를 보였다[그림 3.5.97a]. 또한 동물플랑크톤의 밀도 변동은 식물플랑크톤의 밀도변동에 따른 변화를 보였다[그림 3.5.97b]. 이러한 변화는 앞서 살펴본 룯카-볼테라 포식 모델과 일치하는 것으로 저수지 내 먹이망에 따른 에너지 변화를 뚜렷하게 보여준다.



[그림 3.5.96] 모델 결과 값(1, 2) 및 실측값(3,4) 결과 비교



[그림 3.5.97] TP, 온도에 따른 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤 모델 값



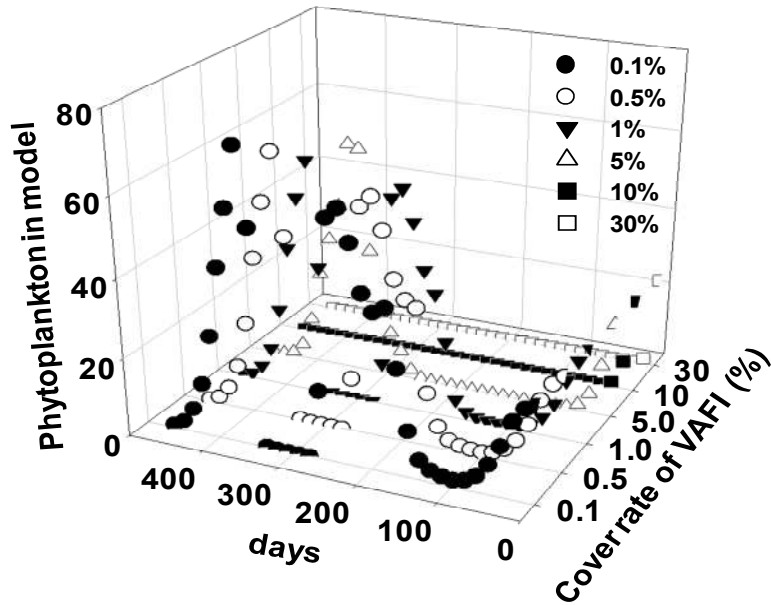
[그림 3.5.98] TP, 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤 모델값의 상호 연관성

한편 연구대상저수지의 서식지 적합성평가를 위한 유용생물에 따른 저수지 상태 변화를 나타내기 위한 방법으로 유용생물(인공식물섬, 말조개)의 적용에 조건 따른 식물플랑크톤의 밀도 변화를 모델링하였다. 그 결과 유용생물 적용 조건의 변화는 식물플랑크톤의 밀도 변화에 뚜렷한 영향을 주는 것으로 나타났다. 이때 식물플랑크톤의 제거 효율을 나타내기 위한 기준으로 조류예보제의 조류경보 수준을 기준으로 하였다. 조류경보는 남조류의 수가 $5,000 \text{ cells mL}^{-1}$ 일 때 발령하는 것으로, 실제 신구저수지의 식물플랑크톤 조사 결과 남조류의 일종인 *Mycrocystis aeruginosa*의 밀도가 봄을 제외한 대부분의 조사기간 동안 우점하였기에 이러한 조류예보제 기준을 적용하였다.

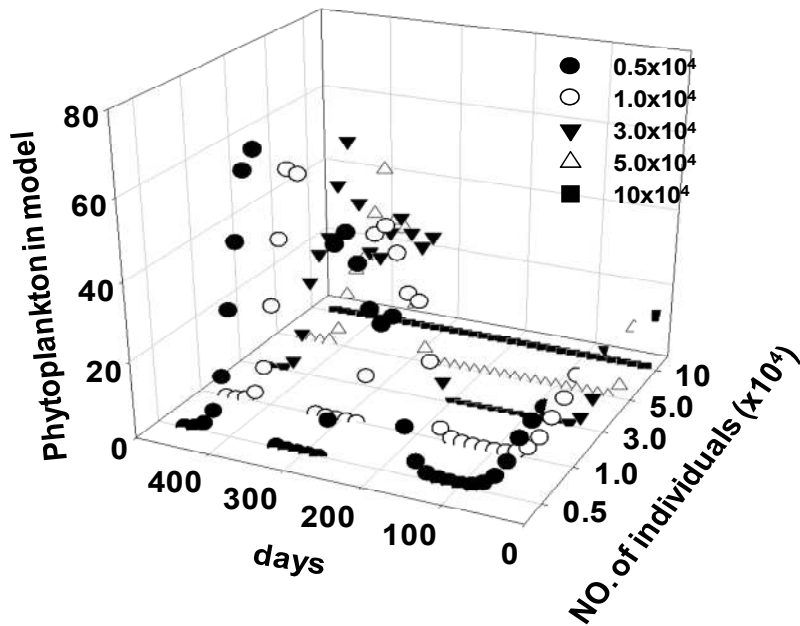
[그림 3.5.98]은 인공식물섬 피복율에 따른 식물플랑크톤 억제 변동 모델을 나타낸 것으로, 대상 저수지인 신구저수지에서 유용생물로 인공식물섬이 단독으로 사용되었을 경우 식물플랑크톤 억제 효과를 나타내고 있다. 이때 인공식물섬은 식물플랑크톤의 직접적인 제거가 아닌 식물플랑크톤의 에너지 원인 영양염(TP)의 제거를 통한 식물플랑크톤의 성장을 억제하게 된다. 인공식물섬에 의한 TP의 제거효율은 23.3%(박 등², 2008)을 사용하였다. 한편 모델 내에서 인공식물섬의 성장을 고려하였으나, 인공식물섬의 성장율은 식물플랑크톤의 밀도 변화에 영향을 주는 것이 아닌 인공식물섬의 유지에 초점을 두기 위한 것으로 일정하게 유지하였다. 유용생물로서 인공식물섬의 영향을 고려하기 위한 조건으로 연구대상 저수지인 신구저수지에서 인공식물섬의 피복율을 0.1%, 0.5%, 1%, 5%, 10%, 30%로 변화시키며 식물플랑크톤의 제거 효율을 비교하였다. 그 결과 인공식물섬의 피복율이 10% 이상에서 식물플랑크톤의 밀도가 조류 경보 수준이하로 내려가는 것으로 나타났으며, 인공식물섬의 식물플랑크톤 억제 효과가 뚜렷하게 나타나는 것으로 판단할 수 있었다.

한편 유용생물인 말조개의 투입을 고려한 저수지 내 식물플랑크톤 억제 변동 모델에서 말조개의 식물플랑크톤 여과율은 박 등¹(2008)의 실내실험 결과를 이용한 것으로 $3.98 \sim 12.14$ (평균 8.09) $\text{L ind.}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 의 조건을 사용하였다. 그러나 모델에서 말조개의 투입량에 따른 식물플랑크톤의 제거 효율을 보기 위해 저수지 내 말조개 투입 후 말조개 개체수의 변화는 없도록 에너지의 유입과 유출량이 같도록 유지하였다. 그 결과 말조개의 투입량은 신구저수지의 저수량

($388 \times 10^3 \text{ m}^3$)을 고려했을 때 신규저수지 전체에 10만 마리 이상을 투입하였을 때 식물플랑크톤의 억제 효과가 뚜렷하게 나타남을 보였다[그림 3.5.99]. 이는 약 3 m^3 당 1개체가 해당되는 양이다.

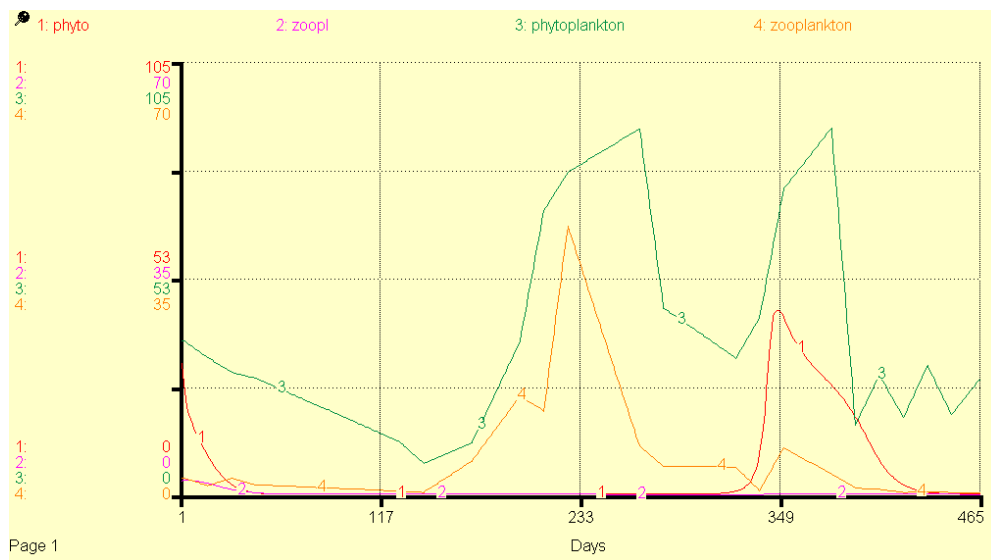


[그림 3.5.99] 인공식물섬 피복율에 따른 식물플랑크톤 밀도 변동 시뮬레이션 결과



[그림 3.5.100] 말조개 개체수 조절에 따른 식물플랑크톤 밀도 변동 시뮬레이션 결과

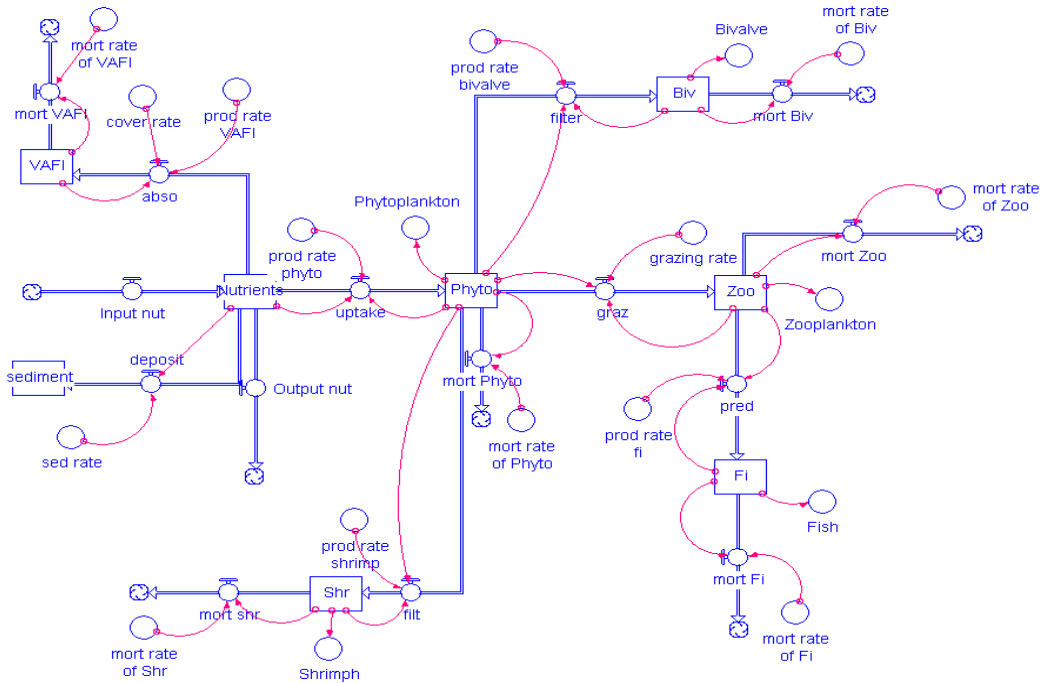
그러나 이들 유용생물을 단독으로 처리할 경우 상대적으로 많은 비용이 소비되며, 투입량 대비 식물플랑크톤의 억제 효율이 상대적으로 낮은 특성을 보이고 있다. 따라서 비용의 문제와 효율의 극대화를 위한 방법으로 이들 유용생물의 혼합 처리를 통한 비용의 절감과 효율을 극대화시킬 수 있다. 이를 위해 본 모델을 통해 신구저수지에서 인공식물섬과 말조개의 혼합 처리 조건을 달리하며 가장 좋은 효율의 조건을 찾고자 하였다. 그 결과 본 모델인 Stella 프로그램을 이용한 시스템다이나믹스 모델의 결과에서는 이러한 말조개와 인공식물섬의 혼합 처리에서는 5%의 인공식물섬 식재와 5만 마리의 말조개 투입 조건에서 조류제거 효과가 나타나는 것을 보였다[그림 3.5.100].



[그림 3.5.101] 말조개 및 인공식물섬이 동시에 처리 되었을 때 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤 밀도변동 시뮬레이션

아. 메소코즘 실험결과에 따른 식물플랑크톤 밀도조절 시뮬레이션

2008년 10월 13일에서 11월 3일까지 실시된 석문포 시험지의 메소코즘에서 다양한 유용생물의 처리 조건에 따른 식물플랑크톤의 억제실험을 실시하였다. 그 결과를 바탕으로 조류밀도변동 및 관련 환경인자들 사이의 모델을 [그림 3.5.101]과 같이 나타내었다. 또한 [그림 3.5.102]에서는 석문포 시험저수지의 Stella 모델식을 나타내었다. 이때 생물들 간의 에너지의 흐름을 나타내기 위한 방법으로 한양대학교 연구팀에서 조사한 각 생물들의 production rate를 이용하였으며, 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤의 변화 값은 건국대학교의 조사 자료를 바탕으로 모델링하였다. 또한 각 유용생물의 초기 투입 값은 실제 실험에서 사용된 개체수를 바탕으로 하였다. 그러나 본 모델에서는 메소코즘의 짧은 실험기간의 특성상 외부환경 요인(온도 및 일조량 등)의 영향을 배제하고 유용생물들 간의 에너지 흐름에 초점을 두어 모델을 성립시켰다.



[그림 3.5.102] 메조크즘 시뮬레이션위한 Stella 모식도

따라서 식물 및 동물플랑크톤의 밀도 변화가 실제 실험에서는 초기에 급격한 감소를 보이는 반면 모델에서는 일정하게 변화하는 차이를 보이고 있다. 그러나 모델의 후반부에서는 이들 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤의 밀도 변화가 실제 실험에서 비슷한 양상을 보여 전체적으로 유사한 패턴을 보였다[그림 3.5.103]. 이러한 석문포 시험지 상태에서의 실험기간 경과 후 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤의 밀도 변화를 모델을 통하여 나타내었으며, 그 결과 식물플랑크톤의 섭식자인 유용생물(말조개, 새뱅이)의 감소로 인해 실험 시작 60일 전후로 식물플랑크톤의 밀도가 증가하였다[그림 3.5.104]. 또한 식물플랑크톤의 증가와 함께 동자개의 감소로 인해 동물플랑크톤의 밀도증가가 일어나는 것을 알 수 있다[그림 3.5.104].

석문포 시험지에서의 유용생물의 혼합 투입에 따른 식물플랑크톤 억제 효율은 유용생물의 종류와 밀도에 따라 다른 양상을 보였다. 식물플랑크톤을 직접적으로 제거하는 말조개와 새뱅이에서 그 효율이 가장 높게 나타났으며, 이들 유용생물의 밀도의 변화가 식물플랑크톤 밀도에 큰 영향을 미쳤다. 말조개의 경우 말조개 투입으로 인해 식물플랑크톤 감소의 효과는 나타났으나, 2,090마리 이하의 말조개 밀도에서는 식물플랑크톤의 억제 효과가 낮게 나타났다[그림 3.5.105]. 그러나 2,090마리 이상의 말조개를 석문포 시험지에 투입했을 경우 식물플랑크톤의 밀도 변화가 빠르고 급격하게 감소하여 실험 시작 20일 전에 식물플랑크톤의 밀도가 최하값을 보였다. 한편 새뱅이의 경우에서도 말조개와 유사한 양상이 나타났으며, 실제 실험에서 투입한 1,500마리의 새뱅이 밀도를 기준으로 그 이상의 새뱅이 밀도에서 식물플랑크톤 밀도의 뚜렷한 변화가 나타났다[그림 3.5.106].

한편 동물플랑크톤의 섭식자인 동자개의 개체수 조절에 따른 식물플랑크톤의 밀도 억제 효과는 다른 유용생물에 비해 상대적으로 낮았다[그림 3.5.107]. 비록 동자개의 감소가 동물플랑크

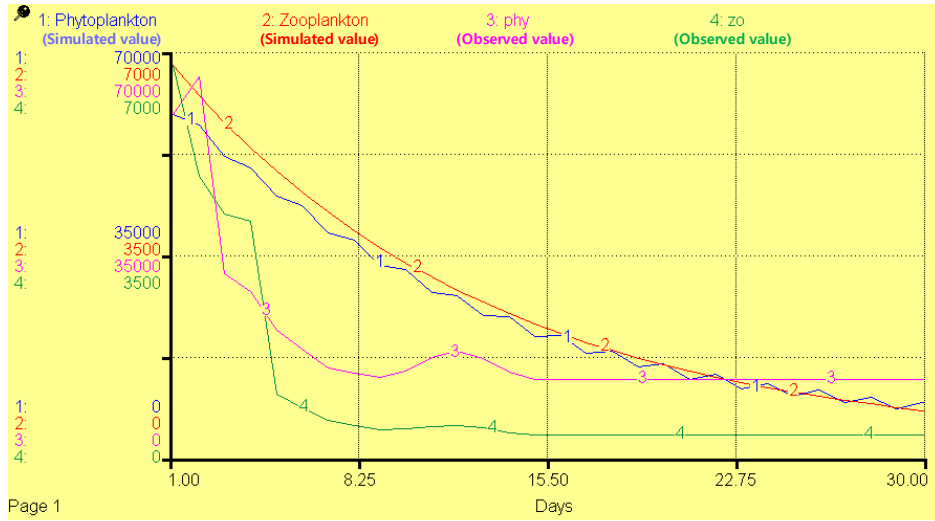
톤을 증가시키는 원인으로 작용하나, 모델에서 동물플랑크톤의 식물플랑크톤 섭식율이 다른 유용생물의 효율에 비해 낮기 때문에 동자개의 개체수 변화를 통한 식물플랑크톤 밀도 억제 효과가 상대적으로 낮게 나타나는 것이다. 또한 인공식물섬의 피복율에 따른 효과에서도 뚜렷한 식물플랑크톤 밀도 억제 효과가 발생하지 않았다[그림 3.5.108]. 이는 모델에서의 에너지 흐름은 인공식물섬에서 식물에 의한 영양염의 흡수율만을 고려한 것으로 인공식물섬에 의한 차광효과 및 인공식물섬 기반재에 의한 효과는 고려하지 않았기 때문이다. 만약 이러한 인공식물섬의 복합적인 효과에 대한 조사가 이루어진다면 인공식물섬 자체의 식물플랑크톤 억제 효율은 더욱 증가할 것으로 사료된다.

```

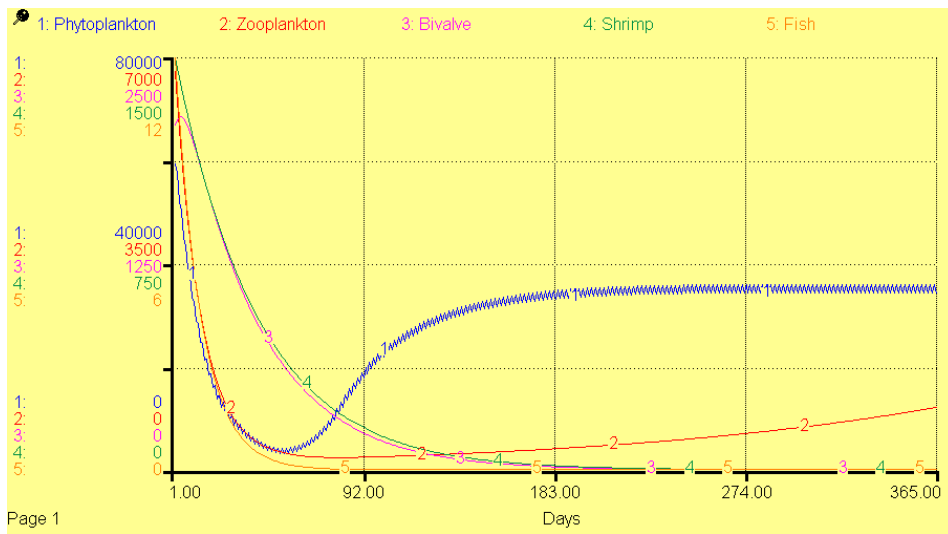
Biv(t) = Biv(t - dt) + (filter - mort_Biv) * dt
INIT Biv = 418*9.257
INFLOWS:
filter = Biv*prod_rate_bivalve*(Phyto-0.2)*(Phyto+0.5)
OUTFLOWS:
mort_Biv = Biv*DELAY1(mort_rate_of_Biv,5,0.001)
Fi(t) = Fi(t - dt) + (pred - mort_Fi) * dt
INIT Fi = 3.745*2.4*140
INFLOWS:
pred = Fi*prod_rate_fi*(Zoo-0.3)*(Zoo+0.5)
OUTFLOWS:
mort_Fi = Fi*mort_rate_of_Fi
Nutrients(t) = Nutrients(t - dt) + (Input_nut - uptake - abso - deposit - Output_nut) * dt
INIT Nutrients = 1.09*10^2
INFLOWS:
Input_nut = 1*10^2
OUTFLOWS:
uptake = Phyto*prod_rate_phyto*(Nutrients-0.1)(Nutrients+0.6)+Nutrients
abso = VAFI*prod_rate_VAFI*cover_rate
deposit = Nutrients*sed_rate
Output_nut = 0.2*10^2
Phyto(t) = Phyto(t - dt) + (uptake - graz - filter - fil - mort_Phyto) * dt
INIT Phyto = 3286.778
INFLOWS:
uptake = Phyto*prod_rate_phyto*(Nutrients-0.1)(Nutrients+0.6)+Nutrients
OUTFLOWS:
graz = grazing_rate*Zoo*(Phyto-25)(Phyto+15)
filter = Biv*prod_rate_bivalve*(Phyto-0.2)(Phyto+0.5)
fil = Shr*prod_rate_shrimp*(Phyto-0.3)(Phyto+0.6)
mort_Phyto = Phyto*mort_rate_of_Phyto
sediment(t) = sediment(t - dt) + (deposit) * dt
INIT sediment = 50
INFLOWS:
deposit = Nutrients*sed_rate
Shr(t) = Shr(t - dt) + (fil - mort_shr) * dt
INIT Shr = 300*2.764
INFLOWS:
fil = Shr*prod_rate_shrimp*(Phyto-0.3)(Phyto+0.6)
OUTFLOWS:
mort_shr = Shr*mort_rate_of_Shr
VAFI(t) = VAFI(t - dt) + (abso - mort_VAFI) * dt
INIT VAFI = 30*5.866*10
INFLOWS:
abso = VAFI*prod_rate_VAFI*cover_rate
OUTFLOWS:
mort_VAFI = VAFI*mort_rate_of_VAFI
Zoo(t) = Zoo(t - dt) + (graz - pred - mort_Zoo) * dt
INIT Zoo = 119
INFLOWS:
graz = grazing_rate*Zoo*(Phyto-25)(Phyto+15)
OUTFLOWS:
pred = Fi*prod_rate_fi*(Zoo-0.3)(Zoo+0.5)
mort_Zoo = Zoo*mort_rate_of_Zoo
Bivalve = Biv*9.257*5
cover_rate = 0.1
Fish = Fi(140*3.745)*5
grazing_rate = 0.05
mort_rate_of_Biv = 0.044
mort_rate_of_Fi = 0.085
mort_rate_of_Phyto = 0.045
mort_rate_of_Shr = 0.13
mort_rate_of_VAFI = 0.0002
mort_rate_of_Zoo = 0.043
Phytoplankton = Phyto*59320/3286.778
prod_rate_bivalve = 0.000711*24
prod_rate_fi = 0.000325*24
prod_rate_phyto = 0.006948*24
prod_rate_shrimp = 0.004382*24
prod_rate_VAFI = 0.000608*24
sed_rate = 0.037853*24
Shrimp = Shr*2.764*5
Zooplankton = 6776/119*Zoo
phy = GRAPH(TIME)
(1.00, 59320), (2.00, 65780), (3.00, 31700), (4.00, 28740), (5.00, 22040), (6.00, 18720), (7.00, 15400), (8.00, 14650), (9.00, 13900), (10.0, 15005), (11.0, 17215), (12.0, 18320), (13.0, 17135), (14.0, 14765), (15.0, 13580)
zo = GRAPH(TIME)
(1.00, 6776), (2.00, 4871), (3.00, 4208), (4.00, 4088), (5.00, 1092), (6.00, 866), (7.00, 640), (8.00, 561), (9.00, 483), (10.0, 498), (11.0, 529), (12.0, 545), (13.0, 508), (14.0, 434), (15.0, 398)

```

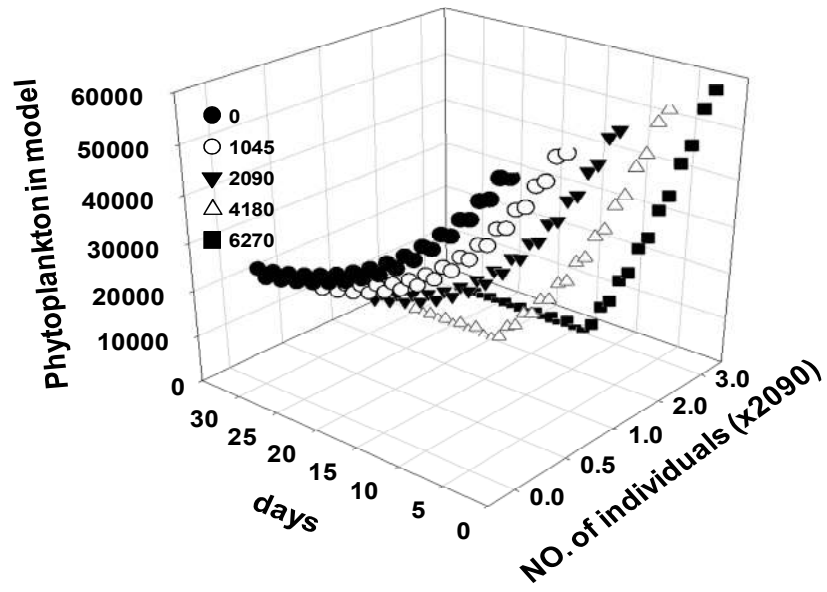
[그림 3.5.103] 메소코즘 Stella 모델 식



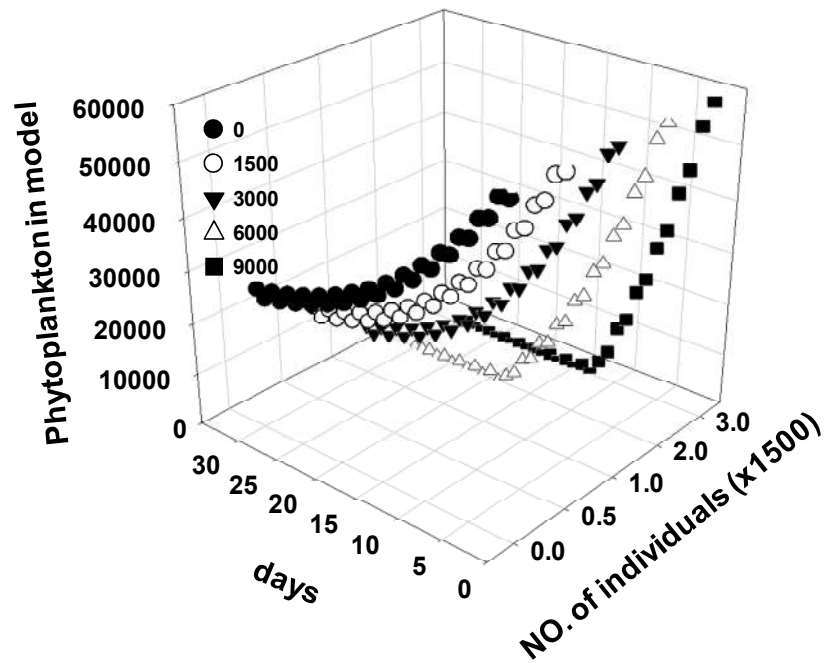
[그림 3.5.104] 메소코즘 시뮬레이션 결과 및 야외조사값(30일 동안 시뮬레이션)



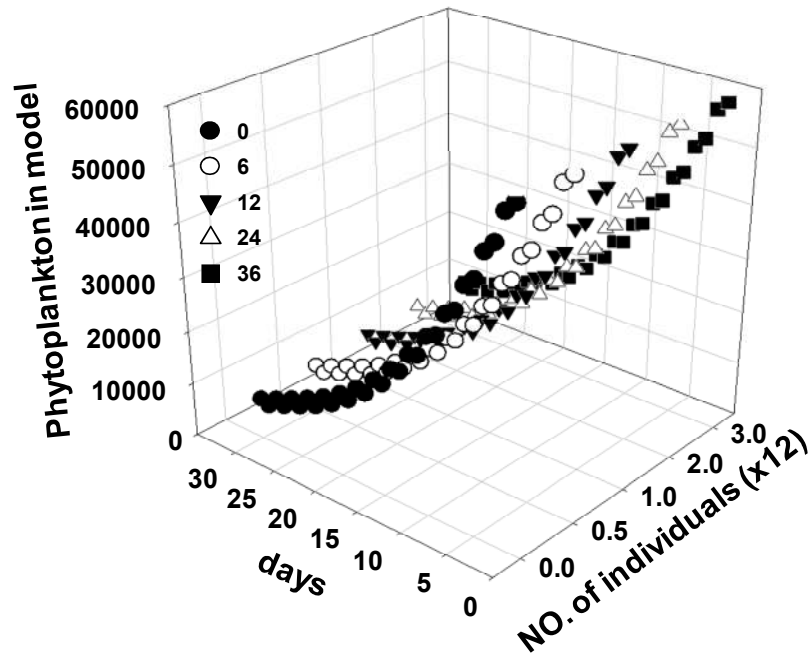
[그림 3.5.105] 메소코즘 시뮬레이션 결과 및 야외조사값



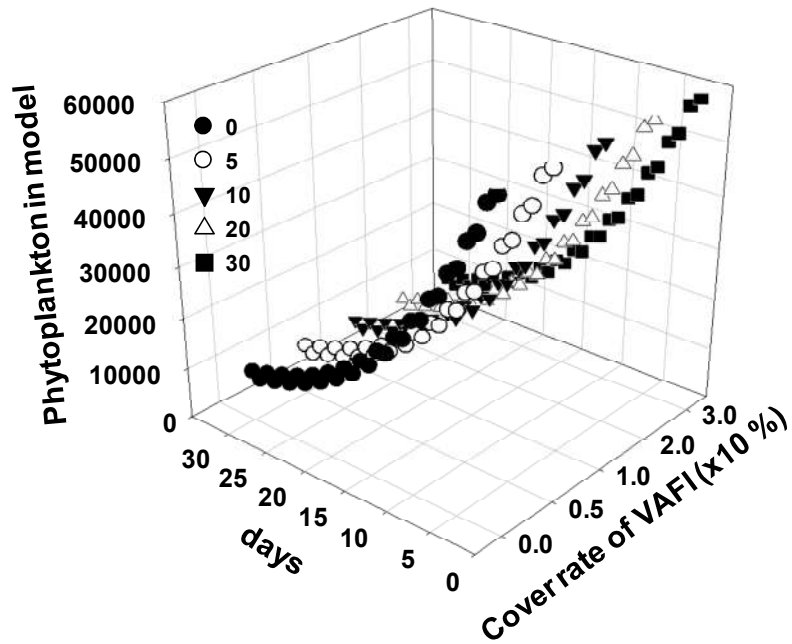
[그림 3.5.106] 메소코즘에서 말조개 개체수 조절에 따른 식물플랑크톤 밀도변동 시뮬레이션



[그림 3.5.107] 메소코즘에서 새뱅이 개체수 조절에 따른 식물플랑크톤 밀도변동 시뮬레이션



[그림 3.5.108] 메소코즘에서 동자개 개체수 조절에 따른 식물플랑크톤 밀도변동 시뮬레이션



[그림 3.5.109] 메소코즘에서 인공식물섬 회복을 조절에 따른 식물플랑크톤 밀도변동 시뮬레이션

5. 농업용 저수지 관리전략

우리나라 많은 농업용 저수지는 여름철 부영양화로 인해 녹조현상이 빈번하게 일어나고 있다(농림부, 2000). Rawson(1995)에 따르면 호소의 깊이가 얇을수록 부영양화가 쉽게 발생하는데, 우리나라 저수지의 대부분이 수심이 얇고 노후화 되어있기 때문에(Hwang *et al.*, 2003) 부영양화가 쉽게 되며, 저수지의 노후화로 인해 침전물로부터 영양염류의 용출 가능성이 증가하게 되어 부영양화의 가능성이 높아지는 것을 의미한다(권 등, 2008).

Harper(1992)에 따르면 저수지 내 제한 영양염인 인의 유입 증가는 저수지 부영양화를 발생시킨다. 저수지의 부영양화는 저수지 내 식물플랑크톤을 증가시켜 저수지 투명도를 감소시키고, 저층의 식물플랑크톤 부패로 용존산소가 감소하는 등의 수질 변화를 초래한다(신 등, 2002). 또한 저수지의 부영양화는 저수지 내 투명도, 총인 농도, Chl-*a* 농도와 밀접한 관계를 가지고 있으며, 이들 환경 인자는 저수지의 영양상태를 분류하는 기준으로 사용된다(Carlson, 1977). 특히 Chl-*a* 농도가 저수지 영양 상태를 나타내는 데 있어 가장 중요한 역할을 한다(Lu, 1999). 그러나 우리나라 농업용 저수지 수질 기준에는 Chl-*a* 농도에 대한 규제가 없어 부영양화 정도를 판단하고, 이를 근거로 수질개선 사업을 시행할 법적 근거가 없다(이 등, 2003).

농업용저수지의 수질을 관리하기 위해서는 먼저 지속적인 수질의 모니터링이 필요하다. 그러나 우리나라에 있는 모든 저수지를 효율적으로 모니터링하고 관리하기란 현실적으로 매우 어려운 일이다(권 등, 2008). 따라서 이들 저수지들의 이화학적, 수문학적 특성을 분석하고, 그 특성에 따른 농업용저수지의 수질 예측관리가 필요하다. 이 등(2007)은 농업용 저수지 내에서 수질변이의 특성을 파악하기 위해 영양염류와 조류 생산력의 관계를 분석하였으며, 전 등(2002)은 우리나라 농업용 저수지에서 물리학적 인자의 영향에 대한 연구를 하였다. 그러나 기존의 수질 예측 모델들에서는 저수지의 이화학적 특성들에 초점이 맞춰져 상대적으로 수문학적 특성들은 그 중요도가 낮았다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 농업용 저수지의 수질특성을 SOM을 통하여 유형화하고 수문학적, 지형학적 특성 등과 연계하여 분석하였다. 그리고 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 및 이화학적 수질인자간의 상호작용에 대하여 분석하였다. 그 결과 앞서 살펴본 바와 같이 우리나라 농업용 저수지의 수질은 이들이 위치하는 지리적 위치와 제방의 높이, 저수지 형태 등에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 이를 통해 저수지가 위치하는 고도가 높은 곳에서는 비교적 양호한 수질을 유지하지만 고도가 낮은 곳에 위치하는 저수지는 부영양화가 심하다는 것을 제시하여 주었다.

이는 저수지 유역 특성과 관련되는 것으로서 고도가 높은 곳의 저수지들의 유역은 대부분 산림 등으로 구성되는데 비하여 저지대 저수지들의 유역은 농경지, 가축사육장 등으로 사용되어 많은 양의 영양염류가 저수지로 유입되게 되어 부영양화를 초래한다. 또한 고도에 따른 수온의 차이도 있어 고지대 저수지들은 낮은 온도로 인하여 조류발생이 제한될 수 있는데 비하여 저지대 저수지들은 수온이 상대적으로 높기 때문에 영양염류가 풍부한 경우 쉽게 조류가 대발생 할 가능성이 높다. 일조량 등도 크게 영향을 미칠 수 있다.

생물 먹이망을 통한 저수지 수질 개선은 용존 영양염류 농도를 낮게 하여 조류 발생을 억제하는 것과 밀도가 높아지는 조류를 섭식하여 제거하는 방법으로 나누어 고려할 수 있다. 먼저 전자의 경우는 P, N 등의 농도를 저하시켜 조류가 이용할 수 있는 기회를 줄이는 것으로서 수생식물을 이용하는 방법이다. 이는 저수지 수변부에 있는 침수식물 식생대를 발달시키는 방법과 침수식물을 식재한 인공식물섬을 개발하는 것이다. 이러한 침수식물의 발달은 영양염류를 제거해 줄뿐만 아니라 조류를 섭식하는 동물플랑크톤, 저서 및 부유성 무척추동물에게 유용한 서식지 제공 등을 통하여 수질 개선에 기여할 수 있을 것이다. 또한 인공식물섬의 설치는 빛을 부분적으로 차단하여 조류 발생 억제에도 기여할 수 있으며, 심미적 관점 등 다양한 간접적인 효과가 있다. 따라서 유용생물의 서식지를 개발 설치하는 것은 수질개선에 매우 필요한 것으로 사료된다. 생물먹이망을 통한 수질 개선의 두 번째 경우는 조류의 섭식률이 높은 생물들(본 연구과제에서 연구된 말조개, 새뱅이 등)을 이용하여 조류의 섭식량을 늘려줌으로서 조류발생을 억제하는 것이다. 이는 앞서 설명된 유용생물서식지 개발 및 설치와 연계하면 보다 높은 효과를 얻을 수 있을 것이다. 본 연구에서 얻어진 결과를 바탕으로 저수지 수질관리의 고려사항 및 각 분야에 대한 관리적인 측면은 [표 3.5.15]에 정리하였다.

[표 3.5.14] 저수지 수질 관리 고려 사항

인자	관리 고려 사항
지형적 요인	
- 저수지 고도	- 고도에 따른 다른 관리 전략 수립 필요
- 유역 토지이용	- 산림/농경/축산 지역에 따른 차별화된 관리 전략 - 오염원의 저수지 유입 사전 저감 대책 수립
기후요인	
- 온도	- 지형적 요인과 연계하여 관리
- 일조량	- 일조량을 감소시킬 수 있는 전략
생물서식지	
	- 유용생물서식지를 충분히 공급(영양염류제거, 유용생물 서식지 제공)
	- 수변부 침수식물 식생대 개발
	- 저수지 안쪽 면에 침수식물 인공섬 설치
	- 주기적인 침수식물 관리(제거, 영양염류제거)
생물먹이망 조절	
	- 조류 제거능이 높은 말조개 등 식물플랑크톤 섭식자를 침수식물 인공섬과 같이 설치

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

- 제1절 농업용 저수지 먹이연쇄 구조와 기능해석에
● 근거한 생물조절 유용생물 개발 및 수질
● 개선 기법 연구
- 제2절 미소유용생물 증식과 활성증대를 위한 생물
● 서식처 개발 및 적용성 평가
- 제3절 생물조절 수질개선 기법 개발을 위한
● 저수지 생태계 에너지 흐름 및 물질 순환
● 해석 연구
- 제4절 어류의 트로픽 구조분석 및 top-down 조절
● 기법을 이용한 농업용저수지 수질관리 기법
● 개발
- 제5절 생태정보학적 기법을 이용한 저수지 수질
● 관리 생태모델 개발

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 농업용 저수지 먹이연쇄 구조와 기능해석에 근거한 생물 조질 유용생물 개발 및 수질개선 기법 연구

1. 농업용저수지의 수질개선을 위한 유용생물 자원 현황 조사

현재 우리나라는 소규모 농업용 저수지(만수위 50만 m²)에 대한 수질 및 생물상에 대한 자료가 절대적으로 부족한 실정이며, 본 연구결과는 비록 3년간이지만 대표성이 뚜렷한 부영양 농업용저수지(신구지)의 수질 및 생물에 대한 기초적인 자료를 제공할 수 있다. 아울러 이번 조사에서처럼 매월 정기적인 조사는 어렵지만 추후 소형 저수지에 대한 생태계 조사가 철저히 요구되며 저수지 관리자나 유사연구에 있어서 조사항목이나 조사방법에 대한 기초적인 정보를 제공할 것으로 판단된다.

2. 농업용 저수지의 유용생물의 자원의 개발

비록 연구대상 저수지내에 서식하고 있는 생물 중 유기물(조류) 제어능을 갖는 유용생물은 분리할 수 없었으나, 저수지 현장수에서도 장시간 생존이 가능한 새뱅이, 동자개, 말조개, 풍년 새우 등의 국내 토종을 선별할 수 있었다. 특히 대상저수지보다 조류발생이 심한 현장수(일감호, 서울)에서 3개월 이상 생존이 가능하였던 국내산 말조개, 펄조개의 경우 CROM 운영시 대량화와 영양염 제거 연구가 완성된다면 효과적인 유용생물로 이용하게 될 것이다.

3. 유용생물은 이용한 수질개선 기술의 현장 적용 및 평가

본 연구에 사용되었던 유용생물은 대부분 유기물 제어능을 나타냈으며, 실내실험을 통하여 그들의 최적조건이 확립되었다. 특히 국내산 이매패(말조개, 펄조개)는 수심이 낮은 저수지 현장에서도 장시간 생존이 가능하였고, CROM 운영시 1주일 이상 90% 이상의 투명도 개선효과를 유지하여 추가적인 연구로 발전시킬 가치가 큰 것으로 나타났다.

4. 유용생물 자원의 개발 및 이용에 관한 protocol 작성

부영양 저수지에 외부로부터 생물(xenobiotics)을 도입하려는 기술은 1차적으로 적용 후 생물 관리가 어려워 기술적용의 가장 난점으로 알려져 왔다. 본 연구에서는 흐름형 유기물 제어(CROM, continuous removal of organic matters) 기술을 고안하여 배설물과 처리수를 분리하고

처리수는 다시 환원하도록 시도하였다. 처리 후 배출된 영양물질의 제거에 대한 연구가 완성된다면 명실 공히 지금까지 알려진 생태 공학적 수질개선 연구의 선도자가 될 것으로 판단된다.

제 2 절 미소유용생물 증식과 활성증대를 위한 생물 서식처 개발 및 적용성 평가

본 연구에서는 농업용 저수지내 먹이연쇄의 중요지위를 차지하고 있는 동물플랑크톤 등의 미소유용생물 증식과 활성 증대를 위한 서식처를 개발하고 적용성을 평가 하였다.

농업용저수지는 일반적으로 농업용수의 공급을 일차목적으로 조성된 시설로 용수수요에 따라 수위차가 심하여 저수지수변은 식생대가 발달하지 못하고 나지로 나타나곤 한다. 이러한 호소생태계의 불균형은 중국에는 호소내 먹이연쇄의 파괴로 이어지고 식물플랑크톤의 증가로 수질오염에 취약한 형태로 변하게 된다. 관련 자료에 따르면 호소에서 수변 수초대는 각종 수생생물에 이용되며 특히 수변수초대의 면적은 동물플랑크톤에 절대적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 농업용 저수지내 정착하기 어려운 수초대를 인공적으로 조성하고 효과를 검토 평가하여 적용이 가능한 4종의 미소유용생물서식처를 제안하였으며, 이용가능성이 높은 서식처 1종을 개발하였다.

개발된 기법의 평가는 수질개선효과와 동물플랑크톤의 증가량, 식물플랑크톤의 감소량 등에 대하여 메소코즘 실험을 실시하였고 신규저수지에서 현장 적용성 검토를 위한 현장조사를 실시하였다.

1. 메소코즘을 이용한 서식처의 개발 및 평가

메소코즘 실험은 이중식재기반 인공 식물섬의 수질정화 효과와 서식처의 타당성 검토와 식물섬의 적정 소요면적 판단, 개발된 미소유용생물의 서식처 검토 등을 위하여 3회에 걸쳐 실시되었다. 평가결과 이중식생기반 인공 식물섬의 효과를 검토한 1차 메소코즘 실험에서 설치 초기부터 수질개선 효과를 보였으며 미소유용생물로서 주목받을 수 있는 지각류 중 *Bosmina longispina* 의 증식과 상대적으로 *Microcystis aeruginosa*의 감소를 확인할 수 있어서 이중식생기반 인공식물섬이 미소유용생물의 서식처로 효과적으로 이용 될 수 있음을 확인 할 수 있었다. 2차 메소코즘 실험으로 이중식생기반 인공식물섬의 유효한 사용면적을 검토한 결과 8%이상 설치가 필요한 것으로 설치기준을 설정할 수 있었다. 3차 메소코즘 실험에서는 신규저수지에 적용되는 시설들 중 침수형 인공식물섬, 부유형 그물수초대, 부류형호안수초대 등의 효과를 검토하였으며 긍정적인 결과를 얻을 수 있었다

2. 미소유용생물 서식처 현장적용 평가

메소코즘 실험을 통하여 검토된 시설들에 대하여 충남 보령 신구저수지에서 현장적용시험을 실시하고 결과를 검토하였다. 신구저수지에 설치된 시설은 이중식재기반 인공식물섬, 교반장치 이용 식물섬, 침수 인공식물섬(2), 호안침수 수초대(2), 부유형 그물수초대, 부유형 호안수초대 등 6종류 8시설을 검토하였으며, 추가로 인공식물섬의 배열에 따른 효과도 분석하였다. 평가분석에는 동물플랑크톤의 증가, 식물플랑크톤의 감소 등을 포함한 각종 생물지수 등의 실험결과 외에 시스템 지속 가능성, 침입 및 제거로 부터의 취약성, 생산성, 영양물질의 순환, 생물학적 상호작용 등을 고려하여 평가 하였다. 또한 시설의 유지관리 정도, 수질개선효과 등이 고려되었으며, 시설 중 *Bosmina* sp. 등의 지각류 출현여부도 고려하였다.

평가분석 결과 이중식재기반 인공식물섬, 교반장치 이용식물섬, 부유형호안수초대와 인공수초를 고밀도로 배열한 호안침수수초대 등의 4가지 시설에서 동물플랑크톤의 증가와 식물플랑크톤의 감소를 확인 할 수 있었다. 동물플랑크톤의 출현개체 수는 증가하였으나 출현종수, 종다양성, 종풍부도 및 균등도 등의 생물지수는 감소하여 적용 시설들이 동물플랑크톤에 대하여 선택성이 있는 것으로 추정되었다. 반면에 식물플랑크톤은 출현 세포수는 감소하였으나 생물지수에서는 증가하는 것으로 나타나 우점도가 감소하는 것으로 조사 되었다. 또한 인공식물섬을 기본으로 하는 시설은 직접적인 수질정화효과가 인정되었다.

설치시설 중 침수형 인공식물섬(식재형)의 경우에는 동물플랑크톤의 증가, 식물플랑크톤의 감소가 뚜렷하였으나 식생 유지가 어려운 등 유지관리 문제로 제외하였다. 부유형 그물수초대는 추가분석이 필요하나 *B. longirostris*가 다수 관찰되는 등 활용가능성이 높은 것으로 조사되었다. 따라서 평가분석 결과를 활용하여 이중식재기반 인공식물섬, 교반장치 이용식물섬, 인공수초를 밀식한 침수호안 수초대, 부유형호안수초대 등이 선발되었으며 부유형 그물초대는 추가 검토 후 채택하도록 하였다.

이밖에 인공습지에서 동물플랑크톤 공급 능력 등을 검토한 결과 식생지역의 후속시설로 개방수역을 조성하는 기법으로 인공습지를 구성할 경우 동물플랑크톤의 공급량을 늘릴 수 있는 것으로 조사 되었다. 본 연구에서 실험된 일부시설은 기존의 시설을 개량하기도 하였으며, 인공수초 등은 새로이 시도된 기법들이다. 특히 인공수초는 특히 출원 중에 있다. 이러한 수질개선 기법들은 이제까지의 농업용저수지 수질개선대책에 이용될 수 있으며 일부공정은 대체될 수 있을 것이다. 유역 환경기초시설 및 유입부예의 인공습지, 침강지 등을 이용한 유입오염부하 감소, 준설을 통한 호내 오염물질의 직접적인 제거 등의 직접적인 수질개선방안은 많은 비용이 드는 수질개선방안이다. 그러나 농업용저수지의 경우 오염물질로 판단되는 질소, 인 등은 실제 농작물에는 영양염류로 이용되고 있어 수질개선의 방향에 일부 전환이 필요하다. 저수지의 생물다양성을 회복하면 일부 저수지내 영양염류의 농도가 높더라도 저수지의 투명도가 개선되는 효과를 거둘 수 있을 것으로 판단되며 미소유용생물서식처 및 습지를 이용한 동물플랑크톤 등 미소유용생물의 지속공급방안 등은 대안으로 활용 될 수 있다.

제 3 절 생물조절 수질개선 기법 개발을 위한 저수지 생태계 에너지 흐름 및 물질 순환 해석 연구

1. 대상 저수지 생태계의 에너지 흐름 및 물질 순환 규명

본 연구에서는 유기탄소, 총질소 안정동위원소비 및 지방산비를 활용하여 계절별 수질환경 조사를 통한 생태계 내 에너지 흐름에 대하여 조사하였다. 안정동위원소 추적자를 활용하여 저수지에서 기초생산을 담당하는 식물플랑크톤의 1차 생산성을 조사하고 동물플랑크톤의 2차 생산성을 조사하였으며 나아가 수생태계 대상생물(새우류, 어류 등)을 포함한 물질순환을 규명하였다. 강우기 전후에 저수지 생태계 내 에너지 흐름 및 영양동태를 모니터링 함으로써 수생태계 대상생물(동물플랑크톤, 새우류, 어류 등)에 대한 먹이원을 규명하고 남조류 증식을 억제할 수 있는 유용생물 선정에 활용하였다. 어류를 이용한 생물학적 조류제어기법은 가장 친환경적인 기술이나, 녹조현상이 빈번하게 나타나는 대상 저수지에서는 어류를 이용한 한 가지 조절기법으로는 큰 효과를 기대하기 어렵다. 그러므로 다른 기술이나 다른 대상생물과 연계하는 방법을 통하여 큰 효과를 기대하도록 하는 것이 보다 현실적인 방법일 것이다.

2. 현장 메소코즘 및 서식처에서의 유용생물에 의한 에너지 흐름 및 물질 순환 파악

본 연구에서는 현장 메소코즘 실험을 통하여 생물조절을 통한 유용생물의 수질개선 효율을 평가하였다. 메소코즘내에 ^{13}C , ^{15}N 추적자를 첨가하여 친생물 원소의 순환속도를 추정하고 남조류의 일차 생산성의 시간적 변화를 측정하였다. 이후 선정된 유용생물(인공식물, 새우류, 이매패류, 어류) 각각의 남조류 제어효과를 평가하였으며 에너지 흐름 및 영양동태학적 해석을 통해 수생태 모델에 적용하여 물질순환 해석 자료로 활용하였다. 유용생물 개개의 남조류 제어효과는 새우류가 가장 높았으나 top-down 효과를 평가하는 메소코즘에서 더 높은 효율을 보였다. 이러한 결과는 현장 조건에서 유용생물을 이용한 top-down 조절도 경우에 따라서 중요한 남조류 생물량 조절인자로 작용할 수 있음을 시사하고 있다.

이러한 결과를 바탕으로 유용생물 배양에 따른 인공서식처 내 미소생물 물질순환을 해석하고 유용생물에 의한 수질개선 효율을 분석함으로써 최적 수질개선 효과도출 모델에 적용할 수 있는 자료로 사용될 수 있을 것이다.

3. 유용생물과 서식처 적용에 따른 생태계 에너지 흐름 및 적용 모델의 활용성 검토

본 연구에서는 1, 2차년도 연구를 통해 얻어진 자료를 통하여 소규모 연못에 남조류를 번식

시킨 후 선정된 모든 유용생물을 투여하여 수질개선 효과를 평가하였다. ^{13}C , ^{15}N 추적자를 첨가하여 남조류의 일차생산성을 측정하고 유용생물 군집별(인공식물, 새우류, 이매패류, 어류) 에너지 흐름 및 영양동태를 해석하고 물질순환을 모니터링 하였다. 그 결과 새뱅이가 가장 높은 남조류 제어효과를 보였으며 이매패류 중에서 대칭이가 높은 효율을 보였다. 인공식물은 수층의 영양염을 빠르게 제거함으로써 남조류의 증식을 억제하였다. 이러한 결과를 이용하여 유용생물 군집 내 남조류 제어 속도 자료를 수생태 모델에 적용하였으며 미소서식처 내 수질개선 효과를 평가하였다. 더 나아가 타 분야의 연구결과와 비교 종합적으로 해석하여 최적의 수질개선 효과도출 시스템을 도출하는데 중요한 자료로 사용되었다.

제 4 절 어류의 트로픽 구조분석 및 top-down 조절 기법을 이용한 농업용 저수지 수질관리 기법 개발

1. 농업용 저수지의 현황 파악 및 어류의 섭식특성 파악

본 연구에서는 문헌조사에 의거하여 국내 농업용 저수지 현황과 저수지 내 어류분포 양상을 분석하였다. 환경부 수질 측정망과 현장 조사를 통하여 모델생태계의 탐색이 이루어졌다. 국내 농업용 저수지의 대부분이 준설이 이루어지지 않고 있기 때문에 다량의 퇴적물이 하부에 지속적으로 축적되고 있고, 이러한 퇴적물은 인근에 위치한 농경지 및 축사 등의 점오염원으로부터 유입된 유기물 및 영양염류로부터 기인하는 것으로 보고되고 있어 화학적 오염이 심각한 것으로 나타났다. 이와 같은 이유로 정부 및 환경단체에서는 농업용 저수지 내에서 수질변이의 특성을 파악하기 위해 다양한 수질 모델을 개발 적용하고 있으며 이러한 모델을 이용하여 영양염류와 조류 생산력의 관계를 수치적으로 해석하여 저수지의 향후 수질변화를 예측하고 있다. 그러나 이러한 모델은 우리나라의 국지적 하절기 몬순강우의 영향 및 인공저수지의 수리수문학적 특성에 의해 수리수문학적 특성 및 계절적 강우의 영향을 고려한 경험적 모델(Empirical Model)의 개발이 시급하다.

또한 농업용 저수지내 서식하는 어류의 섭식 특성을 파악하기 위하여 문헌조사 및 현장 채집을 실시하였으며, 농업용 저수지에 우점하는 어종을 선별하여 해부를 실시하였다. 그리하여 이들의 섭식특성, 내성도, 분포범위 생활사 등을 조사하였다. 본 연구는 향후 농업용저수지의 수질관리를 위한 유용한 기초자료로 이용 할 수 있다.

2. 어류의 생물조절 효과 파악

조류 제거효과를 위한 방법으로 생물을 이용하는 방법은 수중 생태계의 급격한 혼란을 막고 현장에서 서식하는 소비자를 이용한다는 점에서 이상적인 방법이며, 경제적인 방안으로 논의되고 있으나 아직까지도 실험적 연구 수준을 크게 벗어나지 못하고 있다. 특히 어류를 이용한 생물조절 방법에서는 제한된 먹이로 인한 영향 결핍, 스트레스에 의한 섭식능력저해, 먹이 연쇄와 같은 단계적 에너지 전달현상을 기대하기 어려워 자연호수에서와 같은 효과가 나타나지 못함으로 인해 현장적용에 관한 연구가 활발히 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서 어류의 생물조절실험에 의한 녹조 및 남조의 제어효과는 일부 종에서 나타났지만 전반적으로 어류에 의한 효과를 기대하기에는 극히 미미한 것으로 나타나 현장에서의 적용의 더욱이 어려울 것으로 사료되었다. 또한 본 연구는 단일 종에 의한 직접적인 효과를 실험하는 연구였으나, 향후 국외에서처럼 트로픽 단계(trophic level)를 달리한 실험을 시행할 경우 효과가 나타날지에 대한 연구가 필요할 것이며, 본 연구를 통한 결과가 명백한 기초자료로 이용될 수 있다.

3. 생물조절 기법의 현장 적용 및 개발

현장 메소크즘을 통한 현장적용 실험은 저밀도의 top carnivore 처리 시 중간단계의 종의 증가로 인해 동물성플랑크톤의 감소를 가져와 식물성플랑크톤(조류)이 증가하여 수체의 투명도 감소와 수질오염도 증가를 예상 할 수 있는 top-down 가설을 전제로 하고 있다. 또한 생물조절 후보 종으로 줄새우, 새뱅이, 동자개를 이용하였으며, Chl-*a*와 남조류 변동의 양상을 분석한 결과 새뱅이에 의한 조류제거 효과가 가장 탁월한 것으로 보였으며, 이를 섭식하는 동자개에 의해 새뱅이가 조류 섭식의 영향을 받는 것으로 나타났다.

제 5 절 생태정보학적 기법을 이용한 저수지 수질관리 생태모델 개발

본 연구에서는 문헌 및 DB 검색 등을 통하여 농업용저수지의 수질자료 및 생물자료를 수집하였다. 전국수질측정망 자료의 수질자료는 수질인자만의 값을 제시해 주고 지리, 지형, 수문학적 인자의 값이 부족하여 GIS, 지도 및 기타 문헌 검색을 통하여 부가적인 자료를 수집하였다. 또한 농업용 저수지에서 주기적, 연속적으로 조사된 수질 및 생물자료를 수집하여 저수지 수질 및 생태적 특성을 잘 나타내줄 수 있는 자료를 획득하였다. 이를 바탕으로 다양한 방법이 생태모델을 탐구하여 적절한 모델을 선택하였다.

수집된 수질 및 생물 생태정보를 활용하여 저수지 수질 및 생물구조를 적절히 유형화하였으며 또한 수질 및 생물 인자를 예측하였다. 모델의 구성은 적절히 선정이 되었으며 방법론적으로도 적합한 것으로 판단된다. 또한 예측모델을 통하여 주요인의 중요도 평가하고 이를 통해 유용생물 서식지 적합성 평가를 실시하였다. 계획되었던 목표는 충분히 달성된 것으로 판단되며, 수질 및 생물구조 유형화 및 예측 모델 결과, 그리고 유용생물 서식지 적합성 평가모델은 농업용저수지 수질 관리에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

- 제1절 추가연구의 필요성
- 제2절 연구결과의 활용
- 제3절 기업화 추진방안
-
-

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

제 1 절 추가연구의 필요성

1. 저수지 수질관리를 위한 마스터플랜의 수립 필요

농업용수 제공의 목적으로 건설된 전국 18,000여개의 저수지들은 간척 담수호와 같은 대형 인공호를 제외하고는 대부분 중소규모이며 관리주체도 대부분 지자체로서 수질관리에 대한 예산과 관심이 매우 적은 현실이다. 이로 인해 최근 부영양화 된 농업용 저수지가 증가되고 있으며, 환경에 대한 국민적 인식이 고조와 함께 깨끗하고 친자연적인 환경조성에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 실정에서 안정적인 유량확보와 더불어 국가차원에서 깨끗한 수질관리를 위한 장기적인 정책이 마련될 필요성이 크다.

저수지 환경의 특성과 관련된 여러 가지 현상을 이해하기 위해서는 기본적으로 문제를 정확히 동정하는 작업이 필요하다. 저수지 내에서 발생하는 일반적인 문제들, 예를 들면, 영양염문제, 조류문제, 수초문제, 수심문제, 저질문제 등을 정확히 파악하기 위한 예비조사 및 분석 그리고 이들을 기초로 호수의 영양 상태를 정확히 판정하는 것이 중요하다. 또한 저수지 수질에 영향을 미치는 요인들 그리고 이들 요인들에 대한 저수지의 반응에 대한 이해는 호수수질 관리와 예측에 필수적이다.

우리나라의 저수지 수질관리 정책은 세부적인 측면에서 종합적인 부분으로 그 원칙이 진행되는 경향이 있다. 즉, 국가차원의 종합적인 마스터플랜 하에서 필요한 정책을 수행하는 것 보다는 사안별로 주요한 현안 사항위주로 정책을 추진하다보니 전반적인 정책추진의 일관성과 지속성이 저하되는 문제가 있다. 추진상의 원칙이 바뀜으로 인해 노력과 경비가 중복적으로 투자되기 쉬우며 문제의 핵심을 전체계획에서 반영하지 못하는 사례가 발생할 우려가 크다. 그러므로 저수지의 조사와 관리정책의 수립을 위해서는 기본적으로 다양한 저수지의 특성을 이해하고 유형화하는 것이 중요하며, 그 다음으로 저수지에 영향을 미치는 유역의 여러 가지 인자(예를 들면, 토지이용변화, 환경악화 등)들을 종합적으로 연결하는 총체적 계획을 통해야 하며, 이 과정에서 세부적인 부분들이 구체화되어야 한다. 또한 근래에 들어 가시화되고 있는 기후변화의 영향(수문체계변화, 홍수, 가뭄 등) 까지도 향후 저수지 수질관리의 중요한 변수로 포함되어야 한다.

2. 추가연구의 필요성

본 연구를 통해 저수지 수질관리를 위한 생물조절기법을 개발하였다. 세부적으로는 유용생물의 특성 및 수질개선 효과를 분석하여 활용에 대한 방향을 제시하였다. 또한 유용생물의 산란, 피난, 서식을 위한 서식처(예: 수면 및 수중 수초섬)를 개발하여 유용생물들이 저수지 내에서 수질개선 기능을 수행할 수 있는 공간 마련 기법을 제시하였다.

저수지의 수질관리는 다양한 기술로 접근할 수 있으나 본 연구의 중요성은 보다 친환경적이고 장기적 효과를 발휘할 수 있는 생물학적(생태 공학적) 기반을 마련한데 있다. 그러나 생물조절 기법에는 본 연구과제에서 개발된 기법 이외에도 미생물 제재, 식생 등의 기법들이 있다. 이미 일부 연구들이 수행되어 관련기술들이 개발된 사례가 있으나, 종합적인 수준에서 연구된 사례는 없다.

본 연구에서 다루어진 생물조절기술들의 효과는 충분히 검증되었으며, 또한 다양한 유용생물과 서식처를 동시에 투입하여 종합적 효과도 검증하였다. 그러나 연구기간이 충분치 못하여 이러한 종합기술들의 현장 적용성을 확보하기에는 미흡하였다. 따라서 유용생물과 서식처의 시스템화 및 현장적용에 대한 추가연구의 필요성이 제기되었다.

○ 패류적용 기법에 대한 사용화 연구

- 현재의 기술은 현장을 모사한 소규모의 현장 pilot 수준까지 적용하였으므로, 이를 시스템화 하고 scale up하여 현장에 직접 적용하며 기술화하는 추가 연구가 필요하다.

○ 유용생물의 시스템화 및 조합

- 본 연구를 통해 실용화 가능한 개별기술들로 패류이용 기술과 인공서식처 도입기술을 도출하였다. 실제로 기술적 측면에서 볼 때 유용생물들의 도입, 적용, 관리를 위한 시스템화가 관건이며, 유용생물들이 서식처 내에서 적응하고 활성을 발휘하도록 해야 한다.
- 따라서 패류이용기술과 서식처적용 기술이 연계시스템으로 발전될 수 있도록 하는 추가 연구가 필요하다.
- 한편으로 이러한 시스템은 저수지 외부에서 물을 도입하여 처리한 후 다시 유입시키도록 적용하는 기법개발도 필요하다. 패류가 여과한 물은 입자성 물질(조류, SS 등)만 제거하고, 용존성 영양염은 대상으로 하지 않기 때문에 이를 제거하는 기법과 연계하는 방안도 큰 의미를 가진다.
- 패류는 자연조건에서 확보하기가 어려우므로, 패류 적용기술의 안정화를 위해서는 장기적으로 패류를 배양하는 시스템을 개발할 필요성이 크다.

○ 저수지 수질관리기법의 다원적 적용

- 저수지 수질은 물리/화학/생물학적 요인들에 의해 종합적으로 나타나는 현상이므로, 관리 목표와 현안 문제에 따라 다양한 기술들이 적용될 수 있다.
- 저수지 수질 문제의 복잡성은 어느 하나의 기술로 전반적인 문제를 해결하기 어렵게 만드는 요인이므로 생물조절 기술과 함께 다른 기술들이 조합된 다원적 기법 마련에 대한 연구가 필요하다.
- 특히 우리나라 농업용 저수지에 적합한 실용적 기술이용에 관한 가이드라인 작성이 필요하다.

제 2 절 연구결과의 활용

본 연구에서 도출된 연구 결과를 기술 특허, 전문학술지 게재 및 국내외 학술 발표를 통해 활용하였다.

1. 기술 특허

- 1) 말조개를 이용한 부유성 조류 제어 방법. 2008. 01. 03. 한국. 2008-0007085
- 2) 논우렁이를 이용한 부유성 조류 제어 방법. 2008. 11. 04. 한국. 2007-0116026
- 3) 패류서식장치 및 이를 포함하는 수질정화 시스템. 2008. 01. 05. 한국. 2008-0007986
- 4) 어류 서식처 및 생물 다양성을 제공할 수 있는 인공 수초. 2008. 09. 03. 한국. 10-2008-0086902

2. 학술적 기여

가. 국제 논문

- (1) Kwang-Guk An, Jae-Yon Lee, Hema K. Kumar, Sang-Jae Lee, Soon-Jin Hwang, Young-Seuk Park, Kyung-Hoon Shin, Sangkyu Park, Han-Young Um. 2009. Control of Algal Scum Using Top-Down biomanipulation Approaches and Ecosystem Health Assessments for Efficient Reservoir Management. Water Air Soil Pollut. DOI 10.1007/s11270-009-0053-5
- (2) Yong-Su Kwon, Soon-Jin Hwang, Ku-Sung Park, Ho-Seob Kim, Kyung-Shin, Sangkyu Park, Kwan-Guk An, Baik-Ho Kim, Young-Hee Song, Young-Seuk Park. 2009. Temporal changes of phytoplankton community at different water depths of a shallow hypertrophic reservoir in relation to environmental variables. Int'l J. Limnology(인쇄중)
- (3) Patterning water quality of reservoirs using an artificial neural network. (In preparation)
- (4) Changes of zooplankton community responding to their food resources and environmental condition. (In preparation)
- (5) Evaluation of removal rates of *Microcystis aeruginosa* through the biomanipulation :

experiment using ^{13}C , ^{15}N tracers in mesocosm study (In preparation)

- (6) Food web dynamics of aquatic organisms in Shingu reservoir : application of stable carbon and nitrogen isotope ratios (In preparation)
- (7) The effects of biomanipulation on carbon and nitrogen cycles – a mesocosm study (In preparation)
- (8) Potential of *Branchinella kugenumaensis* for controlling bloom-causing *Cyanobacteria* *Microcystis aeruginosa*. (In preparation)
- (9) Application of fatty acid biomarker to monitor trophic relationship in biomanipulation experiments. (In preparation)
- (10) Filtration and mortality of the freshwater bivalve *Unio douglasiae* (Unionidae) in Korea: responses of animal density and size, prey density and kinds, temperature, dissolve oxygen, water depth and sediments. (In preparation)

나. 국내 논문발표

- (1) 이재연, 이재훈, 신경훈, 황순진, 안광국. 2007. 우리나라 농업용 저수지의 영양상태 및 수질 특성. 한국하천호수학회지 40(2):223-233
- (2) 홍성진, 최진영, 양동범, 신경훈. 2007. 신구저수지의 유기인계 농약 분포와 특성. 한국하천호수학회지 40(2):318-326
- (3) 이상재, 이재연, 안광국. 2007. 조류제거 효과에 대한 Top-down 어류 조작실험. 한국하천호수학회지 40(3):431-438
- (4) 박구성, 김백호, 엄한용, 황순진. 2008. 남조류 대발생 환경에서 수심과 용존산소 변화에 따른 담수산 이매패(말조개)의 생존율, 여과율 및 배설물 생산. 한국하천호수학회지 41(1):50-60
- (5) 이연주, 김백호, 감난영, 엄한용, 황순진. 2008. 수온, 먹이농도, 패각 크기가 *Microcystis aeruginosa*에 대한 말조개의 여과율 및 배설물 생산에 미치는 영향. 한국하천호수학회지 41(1):61-67

- (6) 황순진, 전미진, 김난영, 김백호. 2008. 한국산 논우렁이의 유해조류 섭식율 및 배설물 생산. 한국하천호수학회지 41(1):77-85
- (7) 박선구, 조인기, 권오병, 문정수, 엄한용, 황순진. 2008. 인공식물섬에 의한 조류(Algae) 및 영양염류의 제거. 한국하천호수학회지 41(1):93-98
- (8) 이연정, 김민섭, 신경훈, 황순진. 2008. 신구저수지의 1차 생산 및 지방산 생성속도 결정을 위한 ^{13}C 추적자 활용 연구. 한국하천호수학회지 41(1):21-26
- (9) 김민섭, 이연정, 신경훈, 황순진. 2008. 하계 강우기 전·후 신구저수지 내 입자성유기물의 수직분포 및 기원 연구. 한국하천호수학회지 41(1):27-34
- (10) 이상재, 이재연, 이재훈, 배대열, 이의행, 한정호, 황순진, 안광국. 2008. 실험적 생물조절 기법을 이용한 엽록소 및 남조류 제거 효과. 한국하천호수학회지 41(1):86-92
- (11) 이재연, 이상재, 한정호, 이의행, 최지웅, 황순진, 안광국. 2008. 신구저수지의 수질특성 및 LEHA 어류모델을 이용한 생태건강도 평가. 한국하천호수학회지 41(1):42-49
- (12) 이재연, 이상재, 이재훈, 배대열, 최지웅, 황순진, 안광국. 2008. 신구저수지 식물플랑크톤 성장에 대한 제한 영양염 분석. 한국하천호수학회지 41(1):35-41
- (13) Bae, Mi-Jung, Young-Su Kwon, Soon-Jin Hwang and Young-Seuk Park. 2008. Comparison of Four Different Ordination Methods for Patterning Water Quality of Agricultural Reservoirs. Korean Journal of Limnology. 41(1):1-10
- (14) 권용수, 배미정, 황순진, 박영석. 2008. 농업용 저수지의 수질 예측 모델을 위한 PSO(Particle Swarm Optimization) 알고리즘의 적용. 한국하천호수학회지 41(1):11-20
- (15) 윤성애, 김난영, 김백호, 황순진. 2008. 저온기 부영양 수계 규조군집의 유입능. 한국하천호수학회지 41(3):311-319
- (16) 유영훈, 김백호, 황순진. 2008. 저온기 부영양 수계의 규조발생에 대한 한국산 논우렁이의 섭식특성. 한국하천호수학회지 41(3):338-347
- (17) 이연주, 김백호, 황순진. 2008. 북한강 수계에 분포하는 말조개의 남조류 섭식특성. 한국하천호수학회지 41(3):367-374

다. 국내 학술 발표

- (1) 생물조절기법(Biomanipulation)을 이용한 농업용 저수지의 녹조제어에 대한 실험적 평가. 2006.11. 한국환경생물학회
- (2) Filtering rates and pseudofaeces production of freshwater bivalve *Unio douglasiae* on natural cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. 2007.3. 한국육수학회
- (3) 국내산 자생어 붕어를 이용한 유해조류 *Microcystis aeruginosa* 제어 및 생태계 변화. 2007.3. 한국육수학회
- (4) 신규 저수지 내 식물플랑크톤 크기에 따른 일차생산성 측정 및 동물플랑크톤의 섭식속도 평가-¹³C 추적자 활용. 2007.3. 한국육수학회
- (5) 신규저수지의 유기인계 영양분포와 특성. 2007.3. 한국육수학회
- (6) 안정동위원소비를 이용한 저수지내 먹이사슬 연구. 2007.3. 한국육수학회
- (7) 생물조절기법(Biomanipulation)을 이용한 녹조제거의 Lab test. 2007.3. 한국육수학회
- (8) 농업용수로 이용되는 저수지의 영양염류 분포 및 경험적 모델. 2007.3. 한국육수학회
- (9) 신규저수지의 수 환경 특성 분석. 2007.3. 한국육수학회
- (10) 농업용저수지 수질 유형 예측 및 환경인자의 상대적 중요도 평가. 2007.3. 한국육수학회
- (11) 농업용저수지 수질 특성 유형화를 위한 Self-organizing map의 응용. 2007.3. 한국육수학회
- (12) Comparison of several ordination methods for patterning water quality of agricultural reservoirs. 2007.3. 한국육수학회
- (13) 농업용 저수지의 수질관리를 위한 예비조사. 2007.6. 한국환경생물학회
- (14) 줄새우(*Palaemon paucidens*)를 이용한 microcosom 내 녹조 제어 실험. 2007.6. 한국환경생물학회

- (15) 유해조류 제어를 위한 유용생물의 혼합 적용 연구. 2007.8. 한국생물과학협회
- (16) 수심과 용존산소에 따른 말조개의 먹이 여과율 및 유기물 생산. 2007.8. 한국생물과학협회
- (17) 참붕어의 독성 남조 내성 및 식물플랑크톤 군집의 변화. 2007.8. 한국생물과학협회
- (18) 말조개의 먹이 여과율 및 유기물생산에 미치는 최적 환경 연구. 2007.8. 한국생물과학협회
- (19) 벼 메탄을 추출물의 독성 남조 *Microcystis aeruginosa* 성장 억제효과. 2007.8. 한국생물과학협회
- (20) 국내산 담수패류와 침수식물을 이용한 유해 남조류 성장억제 연구. 2007.8. 한국생물과학협회
- (21) 농업용저수지 내 식물성플랑크톤 군집의 시공간적 변동 유형 분석. 2007.11. 한국수리생물학회
- (22) 새뱅이(*Caridina denticulate*)와 송사리(*Orizias latipes*)의 조류제어 효율에 대한 Lab test. 2007.11. 한국환경생물학회
- (23) 조류제거효과에 대한 Top-down 어류 조작실험. 2007.11. 한국환경생물학회
- (24) 부영양 하천(한강)과 호수(일감호)의 저온기 규조 현상수에 대한 한국산 논우렁이의 규조 섭식능 비교. 2008.4. 한국하천호수학회
- (25) 부영양 저수지의 유해 남조 *Microcystis aeruginosa* 에 대한 한국산 말조개의 섭식능. 2008.4. 한국하천호수학회
- (26) 유해조류제어를 위한 유용생물의 혼합적용 - 남조류와 규조류에 대한 섭식실험. 2008.4. 한국하천호수학회
- (27) 부영양호 신구저수지의 수질 및 플랑크톤 군집변화. 2008.4. 한국하천호수학회
- (28) 농업용저수지 남조류 대량번식 제어를위한 유용생물 적용 메조코즘 실험 기간 중 탄소와 질소 pool의 시간적 변화. 2008.4. 한국하천호수학회
- (29) 신구저수지내 탄소 및 질소 안정동위원소 첨가 메조코즘 실험을 위한 유용생물의 남조

류 제어효과 연구. 2008.4. 한국하천호수학회

- (30) 신구저수지에서 엽록소 크기에 따른 녹조 제어능 평가. 2008.4. 한국하천호수학회
- (31) 신구저수지의 생태 건강도 평가. 2008.4. 한국하천호수학회
- (32) Zooplankton community structure and dynamics pattern in Shingu reservoir, Korea. 2008.4. 한국하천호수학회
- (33) 생물조절기법을 이용한 Mesocosm 내 조류 제어율 분석. 2008.8. 한국생물과학협회
- (34) LEHA 모델을 이용한 농업용 저수지 생태 건강도 평가. 2008.8. 한국생물과학협회
- (35) Relations between phytoplankton and zooplankton communities in relation to environmental factors in the Shingu reservoir, Korea. 2008.8. 한국생물과학협회
- (36) 부영양 저수지의 유기물 제어를 위한 유용생물의 단독 및 혼합적용 실험. 2009.3 한국하천호수학회
- (37) 유용생물의 혼합적용에 의한 부영양 저수지의 수질개선: 현장 메조코즘 사례 연구. 2009.3 한국하천호수학회
- (38) Effects of sediment and a toxic alga on the feeding behavior of a Korean carnivorous fish *Pseudorasbora parva*. 2009.3. 한국하천호수학회
- (39) 부영양 저수지의 유기물 제어를 위한 유용생물의 단독 및 혼합적용 실험. 2009.3. 한국하천호수학회

라. 국제 학술 발표

- (1) Prediction of Chlorophyll-*a* in agricultural reservoirs of Korea using particle swarm optimization (PSO). 2007.5. Ecosummit
- (2) Filtration rate and pseudofaeces production of freshwater bivalve *Unio douglasiae* on cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* in eutrophic lake. 2007.10. International Symposium on River and Lake Environment (ISRLE)

- (3) Combined effects of filter-feeding bivalve (*Unio douglasiae*) and zooplankton (*Daphnia magna*) on the growth inhibition of freshwater harmful algae (*Microcystis aeruginosa*) in a eutrophic lake. 2007.10. International Symposium on River and Lake Environment (ISRLE)
- (4) Filtration and pseudofaeces production of a freshwater snail, *Cipangopaludina chinensis malleata* on cyanobacterium bloom (*Microcystis aeruginosa*) in a eutrophic lake. 2007.10. International Symposium on River and Lake Environment (ISRLE)
- (5) Survival and filtration rate of the freshwater bivalve (*U. douglasiae*) on the cyanobacterial bloom with environment changes. 2007.10. International Symposium on River and Lake Environment (ISRLE)
- (6) Combined effects of freshwater filter-feeders on a nuisance cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. 2007.10. International Symposium on River and Lake Environment (ISRLE)
- (7) Filtration rate of a freshwater bivalve *Unio douglasiae* on the phytoplankton assemblage in a shallow hypereutrophic lake. 2007.10. International Symposium on River and Lake Environment (ISRLE)
- (8) Foodweb dynamics of aquatic organisms in Shingu reservoir: Application of stable carbon and nitrogen isotope ratio. 2007.10. International Symposium on River and Lake Environment (ISRLE)
- (9) Organic carbon cycling through phytoplankton photosyntheses in Shingu reservoir. 2007.10. International Symposium on River and Lake Environment (ISRLE)
- (10) Laboratory Tests of Top-down effect on phytoplankton removal. 2007.10. International Symposium on River and Lake Environment (ISRLE)
- (11) Patterning phytoplankton community changes using non-metric multidimensional scaling(NMS) in Shingu reservoir, Korea. 2007.10. International Symposium on River and Lake Environment (ISRLE)
- (12) Pattern zooplankton community pattern in an agricultural reservoir using computational methods. 2008.12. ISEI

제 3 절 기업화 추진방안

본 연구는 연구기간 동안 총 4개의 특허를 출원하였다. 특히 패류서식장치 및 이를 포함하는 수질정화 시스템(출원번호: 2008-0007986)과 어류 서식처 및 생물 다양성을 제공할 수 있는 인공수초(출원번호: 10-2008-0086902) 기술은 향후 실용화가 가능한 기술이다. 앞으로 본 연구결과와 출원된 특허자료를 보완하여 참여기업 기술 이전을 통한 기업화를 추진하고자 한다.

본 연구에서 개발된 기술을 현장에 적용하면 수면뿐만 아닌 호안이나 수중에도 생태복원 및 수질정화를 폭넓게 이룩할 수 있으며 호소의 다양한 특성에 부합할 수 있는 가장 적합한 기술의 조합이 가능하다. 본 연구를 공동 수행한 (주)아썸은 본 연구결과물의 기초기술인 인공식물섬을 이용한 다양한 사업화 실적을 보유하고 있으며 모든 기술개발 결과물의 직접 제작이 가능하다.

1. 적용 분야

가. 수질개선사업

본 연구에서 신구저수지의 메소코즘에 이중기반 인공식물섬을 적용해 본 결과 기반재에 다량의 미생물이 부착하여 수중의 영양염류를 흡수하였으며 특히 질소의 제거효과가 우수하였다. 수질환경오염의 주요원인인 조류(algae)는 더 이상 성장하지 못하고 사멸하였으며 이로 인해 수질은 지속적으로 청정함을 유지하였다. 대형수체의 경우 경제적인 이유로 규모의 제한이 따를 수 있지만 중소규모의 호소나 대형수체에서 오염이 집중되는 만곡부, 오폐수 처리시설의 방류조나 그 후단에 설치하여 수질정화를 이룩할 수 있다. 인공식물섬의 생물학적인 수질정화 효과가 물리·화학적 처리방법에 비해 느리고 오염물질 제거총량이 낮으나 동일한 양의 오염물질을 제거할 경우 소요되는 비용은 비교할 수 없을 만큼 경제적이며 부가적으로 생태복원까지 이룩할 수 있는 매우 유용한 공법이므로 수질정화사업에 대한 비전은 매우 높다.

나. 생태복원사업

건강한 생태계의 복원은 세계적 추세이다. 특히 우리나라는 강수량이 여름에 편중되어 있고, 지하수원도 크게 부족하여 대규모의 저수지들이 용수공급의 중요한 역할을 하는데 이러한 대형저수지의 연안대가 고수위와 저수위의 반복으로 심하게 훼손되어있으며 오염물질이 수체내로 유입되어 생태계가 지속적으로 파괴되고 있다. 이러한 수변생태계의 복원 및 습지생태계 복원은 인간의 생명과 매우 밀접한 관계이기 때문에 시급히 개발되어야하는 분야이다. 그리고 그 공법은 대상수역의 주변 환경 및 생태를 고려하면서 경제성도 우수해야 한다.

본 연구에서 개발된 이중식생기반 인공식물섬 및 부유형 호안수초대는 수체의 수면과 호안에 수위변동에 관계없이 유지할 수 있는 생물서식공간을 창출하여 식물이 성장하고, 유용생물의 서식처를 제공하여, 수질개선 및 수생태복원이 이루어진다. 이로 인해 파충류, 어류 및 새들

이 서식하게 되며 생태계가 안정하게 유지될 수 있도록 한다. 다양한 호소의 특성에 부합할 수 있도록 다양한 형태의 인공식물섬이 개발되었다. 미생물의 확보량을 증가시키기 위한 이중기반 인공식물섬, 동물플랑크톤의 서식특성을 고려하여 수체와 동물플랑크톤의 도피면적을 최대화한 경계면 인공식물섬, 어류의 안전한 산란을 유도하며 치어를 천적으로부터 보호하기 위한 침수형 인공식물섬, 호안에서 동물성 플랑크톤의 서식처를 제공하기 위한 침수형 호안수초대, 수심에 관계없이 서식처를 제공하기 위한 부유형 호안수초대, 부유형 그물수초대 등의 기술은 개별적인 효과도 있지만 조합해서 설치한다면 더욱 우수한 생태복원 효과가 나타날 것으로 판단된다.

이러한 기술들은 수면 및 수중에 수위변동과 상관없이 유지될 수 있는 습생 비오톱 조성으로 수생태복원에 이바지할 것이며, 나아가 어류, 조류, 곤충, 수달 등의 목표 종을 위한 서식처 개발로 발전될 수 있다.

다. 관광 및 생태학습장

본 연구를 통하여 개발된 다양한 부유습지 기술인 이중식생기반 인공식물섬 및 부유형호안수초대 조성공법은 고효율 정화연못의 연속적인 구성이 가능하며, 인공습지 조성하에 하천, 오폐수의 고도처리 시설로 설치가능하며, 이러한 습지는 습생 비오톱 조성과 생태학습장으로 활용가능하다. 또한 생태공원으로 조성되어 새로운 경관창출 및 생태관광코스도 활용할 수 있다.

라. 농업용 저수지 수질개선

과거 농업용저수지는 위락용으로 사용되었고 지속적으로 오염물질이 유입되었다. 이로 인해 녹조현상이 발생되었으며 본래의 가치가 훼손되었다. 이를 환경 친화적으로 개선하여 수질개선, 생태복원, 어족자원보호, 경관창출을 실시하며 나아가 지역사회를 특성화 할 수 있는 관광자원이 될 수 있도록 한다.

마. 오폐수 처리장 활용

오폐수처리장 후단에 있는 방류조에 직접 적용하거나 인공습지를 조성하여 고도의 수질개선을 도모할 수 있다.

바. 골프장, 공원 등 인공호수 적용

골프장이나 공원 등의 인공호수는 비교적 소규모이며 비점오염물질이 지속적으로 유입되어 농업용 저수지 보다 오염이 심각하다. 이러한 현장들은 경관가치가 매우 중요하기 때문에 지속적인 수질관리가 반드시 필요하다.

2. 현장적용방안

가. 이중식생기반 인공식물섬을 이용한 저수지 수질개선

(1) 국산화 및 개발추진계획

(가) 1단계

- 이중식생기반 인공식물섬의 조류(algae)제어효과에 대한 적용성 개발
- 신규Test를 실시하여 입증

(나) 2단계

- 규격화 및 추가개발
- 기존 연구결과 및 현장적용 사례로 볼 때 이중기반재의 기술적 문제없음
- 조립형 시설로 scale up 문제없음
- 기초기술에 대한 사례 다양함
- 침수형은 대형화를 하기위한 기술보완이 필요함

(다) 3단계 생산 및 보급

- 참여기업 기초기술 보유

나. 부유형 호안수초대 기술을 이용한 저수지 수질 개선

- (1) 부유형호안수초대는 미생물 보유량이 높으며 동물플랑크톤이 활성화되어 녹조현상이 제어되고 어류의 서식처 및 산란처 역할을 한다.
- (2) 부유형호안수초대의 가장 중요한 장점은 매우 경제적이란 점이다. 기존에 고가의 시설을 예산 문제로 소규모로 설치한 경우 목적인 만큼의 효과를 나타내지 못하였으나 이러한 문제를 해결하고 대규모로 설치함으로써 실제적 효과를 나타낼 수 있다.
- (3) 특히 유입부 인근에 조성하여 수위변동에 관계없이 수초대를 형성하고 수중에 생태계서식처 조성 및 유입오염물제거에 적극 활용할 수 있다.

3. 기대효과

가. 기술적인 효과

- 생태복원기법 확립
- 새롭게 개발된 공법 및 이의 조합으로 독창성 확보

나. 경제적인 효과

- 생물학적인 자정작용의 효과증가로 수질정화비용 절감
- 약품을 사용하지 않으며 2차 오염 감소

다. 사회적인 효과

- 생태계의 건강성을 직접 체험하며 환경에 대한 인식을 전환할 수 있는 계기마련
- 경관창출로 지역 특성화 기여

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1 절 어류 이용기법

1. Persson, *et al.* 1991.

- 어류는 호수 내에서 미생물 먹이환에 영향을 미치는 중요한 인자.
- 어류상은 호소의 영양단계를 추정하는 지표로 잉어과(Cyprinids) 어류들이 우점하는 지역은 식물플랑크톤의 생체량(Chlorophyll *a*)이 높게 나타나 생산성이 높은 지역으로 평가되고 있음

2. Hrbacek, *et al.* 1961.

- 어류를 이용한 Top-down 조절 개념 도입
- 동·식물 플랑크톤 및 어류의 종조성 및 Biomanipulation 이론과 먹이 연쇄 과정을 설명하고 있음

3. Sapiro, J. 1978

- 미국 미네소타 대학 중심으로 Biomanipulation 이론의 활발한 연구 진행
- 먹이연쇄나 생물조절을 이용하는 방법은 어류의 경우 어류를 조절하여 top-down 효과를 창출하여 동물플랑크톤으로 하여금 조류를 제어하거나 또는 직접 조류를 섭식하는 어류를 도입하는 방법이 있음.

4. Opuszinski, 1993

- 대두어는 부영양화 된 저수지에서 수화현상을 일으키는 식물플랑크톤을 주로 섭식하며 동물플랑크톤 또한 주된 먹이원이거나 전체 식이물에서는 낮은 비율을 차지함

5. Beveridge, 1993

- 백련어와 나일틸라피아는 남조(*Microcystis*) 섭식 시 독성이 없는 스트레인의 콜로니를 선택적으로 섭식하는 특성을 보임.
- 섭식의 선택성은 남조독(microcystin) 뿐만 아니라 독성/비독성 스트레인이 가지는 세포

표면의 구성성분을 이용하여 선택적 섭식을 하는 것으로 판단됨

6. Fukushima. 1999

- 남조(*Anabaena*)가 발생하는 부영양 호수에 여과섭식을 하는 백련어는 동식물플랑크톤 군집의 변화를 초래함.
- 백련어가 없는 대조구에서만 남조 및 율충류의 종 증가가 관찰되며 수온이 낮아져 어류의 섭식이 둔화될 경우 대형동물플랑크톤에 의한 식물플랑크톤 감소가 큰 비중을 차지하는 것으로 연구됨.

7. Starling, 1983, 1999

- silver carp을 이용한 현장 메소코즘 적용(직경: 2 m, 높이 3 m) 실험
- 3~4일 주기로 샘플 채수 후 플랑크톤 양 측정 결과 전반적으로 남조류 및 식물성플랑크톤 감소 효과 보임
- 나일틸라피아에 의한 수체내의 질소/인 재순환이 큰 비중을 차지하므로 어류의 제거에 의한 조류의 감소효과가 나타날 수 있음.

8. Richter 1986

- 부영양 호수에 sediment를 섭식하는 어종인 Bream을 투여하여 어류의 sediment 섭식에 의한 녹조제어 효과 검증
- Sediment 내 영양염의 감소 및 조류증식감소 효과를 나타 냄

9. Prokopkin 2006

- 인위적인 Zooplanktivore fish(Crucian carp, 유럽산 붕어) 제거를 통한 녹조제어효과 검증
- 낮은 영양염 단계에서 식물성플랑크톤 생체량이 Planktivorous fish에 의해 저감효과를 나타낸다고 보고함, microcystis의 감소를 보임

10. Jeppesen *et al.* 1990.

- Piscivorous fish (Pike, Perch) 투여와 동시에 Zooplanktivore fish(Bream, Roach, Rudd) 제거하여 식물성 플랑크톤의 양을 감소하며 투명도를 향상시킴

11. Donk *et al.* 1990

- Piscivorous fish 투입에 의한 녹조제어 사례
- Piscivorous fish(Pike, 4 cm, 1,500개체)와 Food source로 Rudd(140개체) 투입 후 Zooplanktivore fish(Bream) 제거 하여 식물성 플랑크톤 및 Chl-*a* 제거 효과를 밝힘

12. Lazzaro, 2003

- 적은 수의 어류식성의 포식성 어류가 존재할 경우 동물플랑크톤을 섭식하는 소형의 잡식성 어류에 의해 식물플랑크톤의 수화가 영향을 받으나 고밀도의 포식성 어류가 존재할 경우 이들에 의해 top-down 효과가 나타남

13. Dawidowicz, 2002

- 포식성 어류(창고기, 메기류, 송어) 등을 이용해 잉어과에 속하는 소형 플랑크톤식성 어류를 제거할 경우 물벼룩의 섭식에 의해 식물플랑크톤군집의 종조성이 변화함

14. Carpenter S.R 1995

- 포식자 의존적인 조절기작(Predator-dependent control) 즉, top-down 조절 방법도 경우에 따라 중요한 조류생물량 조절인자로 작용할 수 있음이 보고되었음

제 2 절 동물플랑크톤 이용기법

가. Ghadouani, 2003

- 현장에 설치된 메소코즘에 일정량의 질소와 인을 첨가하여 남조(*Micocystis*, *Aphanizomenon*, *Anabaena*) 수화를 유도하여도 수심이 얇은 메소코즘에서만 수화가 발생하므로 남조의 영양염 흡수에 수심이 영향을 미치는 것으로 평가
- 남조독은 낮은 농도에서 동물플랑크톤 군집에 억제효과가 없지만 특정농도에서는 대형 지각류에 독성효과를 보이므로 동물플랑크톤에 의한 남조 제어에는 한계가 있음

나. Paterson, 2002

- 물벼룩(*Daphnia*)에 의해 발생하는 사상성 남조류(*Aphanizomenon*)의 억제효과는 물벼룩에 의한 인의 침전으로 인한 재순환의 억제로부터 발생하는 것이 아님

제 3 절 패류 이용기법

1. Mcivor, 2004

- 석패과 패류의 여과능력 파악과 생리생태 연구
- 실질적인 소하천과 저수지에 패류를 통한 수질개선 연구 시스템 연구결과 수체 내 부유 물질 저감효과

2. Gosling, 2003

- 이매패류의 여과능력 탁월. 지역적으로 특이하고 다양한 이매패류의 응용은 상당한 잠재성을 가지고 있음

3. Nalepa and Schloesser, 1993

- 유럽과 북미(오대호)에서는 담수산 이매패류인 얼룩말조개(Zebra mussel)의 수질개선의 응용적 측면의 가능성 제시

제 4 절 인공서식처 조성기술

1. DeCarlo, Matt, 2007

- 수변침식방지 및 CO₂ 방출저감, 어류군집 증가 기법으로 틀을 제작하고 제작된 틀 내에 Sea phanergam을 심어 설치함으로써 어류의 증식과 수변침식방지 등의 효과를 거둘 수 있음

2. Hoare D., Jackson M.J. & Perrow M. 2006

- 영국 Norfolk Broads 호소가 농업배수 및 각종 오수의 유입으로 심각하게 오염되어 해결을 위하여 인공식물을 이용하여 동물플랑크톤과 저서생물에게 서식처를 제공하고 먹이 사슬을 이용한 수질개선 기법이 시도
- 인공식물은 직경 20 cm 정도로 약 10 cm 길이의 나일론 털로 브러쉬 모양으로 제작
- 진행결과 인공식물체를 투여하여 초기에는 생물 다양성의 증가와 부착생물로 인하여 급속한 수질정화 효과를 거둘 수 있으나 시간이 경과함에 따라 그 효과는 감소하더라도 서식처의 역할을 지속할 수 있었음

3. Martin R. Perrow *et al.* 1999, Boegestrand J. 1995

- 호소 생태계에서 수변식생대는 수생생물의 중요 서식처 역할을 담당하게 되는데 수변의 식생대는 어류의 산란처 및 피난처, 먹이 공간 등으로 이용
- 특히 동물성플랑크톤의 경우 어류 포식에 대한 피난처로 수생식물대를 이용하고 있어 중요성이 강조
- 호소생태계에서 수변식생대의 규모결정

제 7 장 참고문헌

제 7 장 참고문헌

- 공동수, 윤일병, 유재근. 1996. 팔당호의 물수지 및 수문특성. 한국육수학회지 29: 51-64.
- 국립환경연구원, 1998. 호소내 조류 대발생에 대한 수면제어기술에 관한연구(I)-팔당호 수역을 중심으로 한 제어기술의 개발-. pp. 74-84.
- 권오길, 박만갑, 이준상. 1993. 한국 원색패류도감. 아카데미서적. 445p.
- 기상청. 2007. 기상통계자료(www.kma.go.kr).
- 김건희, 김백호, 박명환, 황순진. 2008. 담수패류(*Unio douglasiae*)와 침수식물(*Potamogeton crispus*)의 유해 남조 *Oscillatoria* sp. 성장억제 효과. 한국하천호수학회지 41: 68-76.
- 김범철, 김은경, 표동진, 박호동, 허우명. 1995. 국내 호수에서의 남조류 독소발생. 한국물환경학회지 11: 231-237.
- 김복영, 이상규, 권장식, 소규호, 윤근호. 1991. 부레옥잠에 의한 생활오수의 정화효과. 한국환경농학회지 7: 111-116.
- 김백호, 최민규, 황수옥, 高村典子. 2000. 부영양호의 enclosure내에서 어류의 밀도조절이 수질 및 플랑크톤 군집에 미치는 영향. 한국하천호수학회 33: 358-365.
- 김백호, 최민규, 高村典子, 2001, 어린 백련어의 성장에 대한 동, 식물플랑크톤의 먹이기여도, 한국하천호수학회지 34: 98-105.
- 김백호, 최희진, 가순규, 한명수, 2003. 남조 *Microcystis aeruginosa* 제어를 위한 생물제제의 단일 또는 혼합적용. 환경과학연구지 12: 23-29.
- 김백호, 강운호, 한명수, 2004. 겨울철 녹조발생 원인 중 *Stephanodiscus hantzschii*의 생물학적 제어를 위한 미소생물제제의 적용실험. 한국육수학회지 27(2): 236-240.
- 김백호, 김보라, 한명수. 2005. 박테리아와 어류가 유해조류 *Microcystis aeruginosa*의 성장 및 형태변화에 미치는 변화. 한국하천호수학회지 38: 420-428.
- 김상훈, 전선옥, 임병진. 2002. 식물체를 이용한 조류제어 현장 적용성 실험. 한국하천호수학회지 35: 123-132.
- 김철호, 권오섭, 이진애, 2003. 세균에 의한 남조 *Anabaena cylindrica*의 분해에 대한 연구. 한국조류학회지 18(4): 355-360.
- 김호섭, 황순진, 고재만. 2003. 도심의 얇은 인공호인 일감호의 수질변화특성과 퇴적환경의 평가. 한국하천호수학회지 36: 161-171.

- 농림부. 2001. 농업용수 수질측정망 조사보고서.
- 농림부. 2003. 농업환경오염 복원기술 개발.
- 농림부. 2004. 농업용수 수질개선 시험연구(최종).
- 농림부. 2005. 농업용저수지의 녹조제어 기법개발.
- 변중영, 김문규, 이종식. 1985. 수생식물을 이용한 수질오염원 제거에 관한 연구. 제 1보, 부레옥잠의 유기물제거 효과 및 생장에 미치는 제요인. 한국잡초학회지 5: 143-148.
- 삼성경제연구소. 2001. 무한한 가능성 환경산업.
- 안윤주, 공동수. 1995. 생이가래를 이용한 영양물질의 제거방안 연구. 대한환경공학회지 18: 593-603.
- 윤춘경, 김형중, 류재현. 1997. 물옥잠을 이용한 水中처리방법에 의한 농공단지 폐수처리에 관한 연구, 한국농공학회지 39(3): 64-71.
- 윤춘경. 1998. 인공습지의 농촌지역 오수정화시설에 적용 가능성 연구, 제1회 식물을 이용한 환경복원기술 워크숍 - Phytoremediation - 논문집, 한국과학기술연구원, pp. 59-76.
- 이상재, 이재연, 안광국. 2007. 조류제거 효과에 대한 Top-down 어류 조작 실험. 한국하천호수학회 40: 431-438.
- 이상재, 이재연, 이재훈, 배대열, 이의행, 한정호, 황순진, 안광국. 2008. 실험적 생물조절 기법을 이용한 엽록소 및 남조류 제거 효과. 한국하천호수학회 41: 86-92.
- 최기철, 전상인, 김익수, 손영목. 1990. 원색한국담수어도감. 낙문사.
- 통계청. 1997. 국제통계연감.
- 환경부. 1998. 수질오염공정시험법. 동화기술. p. 134.
- 환경부. 2005. 물환경관리기본계획(안).
- 황순진, 김호섭, 최광현, 박정환, 신재기. 2002. 국내 담수산 조개의 섭식활동이 호수수질에 미치는 영향. 한국육수학회지 35(2): 92-102.
- Abé, T.H. 1981. Studies on the order Peridiniidae an unfinished monograph of the armoured dinoflagellata. The Nippon Printing and Publishing Co., Tokyo.
- Aizaki, M. 1978. Seasonal changes in standing crop and production of periphyton in the Tamagawa River. Jap. J. Ecol. 28: 123-134.
- Aizaki, M. 1979. Growth rate of microorganisms in a periphyton community. Jap. J. Limnol. 40: 10-19.

- Aizaki, M. 1980. Changes in standing crop and photosynthetic rate attendant on the film development of periphyton in a shallow eutrophic river. *Jap. J. Limnol.* 41: 225–234.
- Akiyama, M. T., Loiya, K., Lmahori, H., Kasaki, S., Kumano, H., Kobayashi, E., Yakahashi, K., Tsumura, M., Hirano, H., Hirose, T. and Yamagishi. 1981. Illustration of the Japanese Freshwater Algae. Uchidarockakuho Publishing Co., Tokyo.
- APHA. 1995. Standards methods for the examination of water and wastewater (19thEd.). American Public Health Association, Washington, D.C.
- APHA. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th edn. American Public Health Association, Washington.
- Brock, T. D. 1985. A eutrophic lake: Lake Mendota, Wisconsin. (Ecol. Stud. Vol.55) Springer-Verlag, New York.
- Carmichael W. W. 1994. The toxins of cyanobacteria. *Scientific Am Jan*; 270: 78–86.
- Caron, D. A. 1983. Technique for enumeration of heterotrophic and phototrophic nanoplankton, using epifluorescent microscopy, and comparison with other procedures. *Appl. Environ. Microbiol.* 46: 491–498.
- Caron, H., Peter, M., van Sluis, P., Speleman, F., de Kraker, J., Laureys, G., Michon, J., Brugieres, L., Voute, P. A., Westerveld, A. 1995. Evidence for two tumour suppressor loci on chromosomal bands involved in neuroblastoma: one probably imprinted, another associated with N-myc amplification. *Hum. Mol. Genet.* 4: 535–539.
- Carpenter, S. R. and J. F. Kitchell. 1984. Plankton community structure and limnetic primary production. *American Naturalist* 124: 159–172
- Carpenter, S. R., J. F. Kitchell and J. R. Hodgson. 1985. Cascading trophic interactions and lake productivity. *Bio-Science* 35: 634–639.
- Carpenter, S. R., J. F. Kitchell, J. R. Hodgson, P. A. Cochran, J. J. Elser, M. M. Elser, D. M. Lodge, D. Kretchmer, X. He and C. N. von Ende. 1987. Regulation of lake primary productivity by food web structure. *Ecology* 68: 1863–1876.
- Carpenter, S. R., Christensen D. L., Cole J. J., Cottingham K. L., He X., Hodgson J. R., Kitchell J. F., Knight S. E., Pace M. L., Post D. M., Schindler D. E., Voichick N. 1995. Biological control of eutrophication in lakes. *Environmental Science and Technology* 29: 784–786.
- Carpenter, S. R., J. J. Cole, J. R. Hodgson, J. F. Kitchell, M. L. Pace, D. Bade, K. L. Cottingham, T. E. Essington, J. N. Houser and D. E. Schindler. 2001. Trophic cascades, nutrients and lake productivity: hole lake experiments. *Ecological Monographs* 71: 163–186.

-
- Cooke, G. D., E. G. Welch, S. P. Peterson, and P. R. Newroth. 1993. Restoration and management of lakes and reservoirs(2nd ed.). 548pp. Lewis. Boca Raton.
- Cox, E. J. 1996. Identification of freshwater diatom from live material. Chapman & Hall. London
- DeMott, W. R, Zhang Q. X., Carmichael W. W. 1991. Effects of toxic cyanobacteria and purified toxins on the survival and feeding of a copepod and three species of Daphnia. *Limnol Oceanogr* 36: 1346-1357.
- Eugenia, T. Apostolaki, Nu'ria Marba`, Marianne Holmer, Ioannis Karakassis. 2009. Fish farming enhances biomass and nutrient loss in *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 81: 390-400.
- Etnier, C. and B. Guterstan. 1997. Ecological Engineering for wastewater treatment (2nd ed.). Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Findlay, D. L., S. E. M. Kasian, L. L. Hendzel, G. W. Regehr, E. U. Schindler and J. A. Shearer. 1994. Biomanipulation of Lake 221 in the experimental lakes area (ELA): Effects on phytoplankton and nutrients. *Canadian Journal of Fish Aquatic Science* 51: 2794-2807.
- Fukami, K., T. Nishijima, H. Murata, S. Doi, and Y. Hata. 1991. Distribution of bacteria influential on the development and the decay of *Gymnodinium nagasakiense* red tide and their effects on algal growth. *Nippon Suisan Gakkaishi-Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish.* 57: 2321-2326.
- Fukushima, M., N. Takamura, L. Sun, M. Nakagawa, K. Matsushige and P. Xies. 1999. Changes in the plankton community following introduction of filter-feeding planktivorous fish. *Freshwat. Biol.* 42: 719-735.
- Goldschmidt, T., F. Witte and J. Wanink. 1993. Cascading effects of the introduced Nile perch on the detritivorous /phytoplanktivorous species in the sublittoral areas of Lake Victoria. *Conservation Biology* 7: 686-700.
- Gosling, E. 2003. Bivalve molluscs: biology, ecology and culture. Oxford ; Fishing News Books.
- Granhall, U. and Berg, B. 1972. Antimicrobial effects of *Cellvibrio* on Blue-green Algae. *Arch. Mikrobiol.* 84: 234.
- Haney, J. F., D. J. Forsyth and M. R. James. 1994. Inhibition of zooplankton filtering rate by dissolved inhibitors produced by naturally occurring cyanobacteria. *Archiv fur Hydrobiologie* 132: 1-13.
- Hargrave, W. J. 1991. Water Fit to Drink. BCWWA Seminar, Burnaby, B.C., 1991, February 25-26.

- Hermansky, S. J., Stohs S. J., Eldeen Z. M., Roche V. F., Mereish K. A. 1991. Evaluation of potential chemoprotectants against microcystin-LR hepatotoxicity in mice. *J. Appl. Toxicol.* 11: 65-74.
- Horn, W. 1991. The influence of biomass and structure of crustacean plankton on the water transparency in the Saldenbach storage reservoir. *Hydrobiologia* 224: 115-120.
- Hrbacek, J., M. Dvorakova, V. Korinek and L. Prochazkova.. 1961. Demonstration of the effect of the fish-stock on the species composition of zooplankton and the intensity of metabolism of whole plankton association. *Veř. Int. ČVer. Limnol.* 14: 192-195.
- Hwang, S. J. 1995. Carbon dynamics of plankton communities in nearshore and offshore Lake Erie: The significance of the microbial loop for higher trophic levels. PhD Dissertation, Kent State University, Kent, OH.
- Hwang, S-J. and Heath, R.T. 1997. Bacterial productivity and protistan bacterivory in costal and offshore communities of Lake Erie. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 54: 788-799.
- Hwang, Soon-Jin, Ho-Sub Kim., Jae-Ki Shin, Jong-Min Oh. 2004. Grazing effects of a freshwater bivalve (*Corbicula leana* Prime) and large zooplankton on phytoplankton communities in two Korean lakes. *Hydrobiologia* 515: 161-179.
- ILEC. 1995. Guidelines of lake management- Biomanipulation in lakes and reservoirs management. ILEC & UNEP.
- Imai, I., Y. Ishida, and Y. Hata. 1993. Killing of marine phytoplankton by a gliding bacterium *Cytophaga* sp., isolated from the coastal sea of Japan. *Mar. Biol.* 116: 527-532.
- Imai, I., Y. Ishida, K. Sakaguchi, and Y. Hata. 1995. Algicidal marine bacteria isolated from northern Hiroshima Bay, Japan. *Fish. Sci.* 61: 628-636.
- Jeffries, M., Mills D. 1990. *Freshwater Ecology : Principals and Applications*. Belhaven Press: London; 283.
- Kadlec, R. and R. L. Knight. 1996. *Treatment wetlands*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Kalff, J. 2002. *Limnology, Inland Water Ecosystem*. Prentice-Hall, Inc.
- Kattner, G. and H. S. G. Fricke. 1986. Simple gas-liquid chromatographic method for the simultaneous determination of fatty acids and alcohols in wax esters of marine organisms. *Journal of Chromatography* 361: 263-268.
- Kiviranta, J., Sivonen K., Niemelä SI, Huovinen K. 1991. Detection of toxicity of

- cyanobacteria by *Artemia salina* bioassay. *Environ Tox Water Qual* 6: 423-436.
- Krebs, C. 1999. *Ecological Methodology* (2nd ed.). Addison Wesley Longman, Menlo Park, California. 620pp.
- Laws, E. A. and R. S. J. Weisburd. 1990. Use of silver carp to control algal biomass in aquaculture ponds. *Progressive Fish-Culturist* 52: 1-8.
- Lee, R. E. 1980. *Phycology*. Cambridge University Press, Cambridge. 478pp.
- Lieberman, D. M. 1996. Use of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and bighead carp (*Aristichthys nobilis*) for algae control in a small pond: changes in water quality. *Journal of Freshwater Ecology* 11: 391-397.
- Martin, D. F., & Gonzalez M. H. 1978. Effects of salinity on synthesis of DNA, acidic polysaccharide, and growth in the blue-green alga *Gomphosphaeria aponina*. *Water Research*, 12: 951-955.
- Manage, P. M., Z. Kawabata, and S. Nakano. 2000. Algicidal effect of the bacterium *Alcaligenes denitrificans* on *Microcystis* spp. *Aquat. Microb. Ecol.* 22: 111-117.
- Matsuzaki S-i.S., Usio N., Takamura N., Washitani I. 2007. Effects of common carp on nutrient dynamics and littoral community composition: roles of excretion and bioturbation. *Arch. fur Hydrobiologie* 168: 27-38.
- McQueen, D. J., Mark R. S. Johannes and J. R. Post. 1989. Bottom-Up and Top-Down impacts on freshwater pelagic community structure. *Ecological Monograph* 59: 189-309.
- McQueen, D. J. 1990. Manipulating lake community structure: Where do we go from here? *Freshwater Biology* 23: 613-620.
- Montagenes, D. J. S., and D. H. Lynn. 1987. A quantitative protargol staining (QPS) for ciliates; method description and test of its quantitative nature. *Mar Microb Food Webs* 2: 83-93.
- Nagasaki, K. 1998. Possible use of algicidal viruses as microbiological agents against harmful algal blooms. *Microb. Environ.* 13:109-113. (In Japanese with English abstract.)
- Nalepa, T. F. and D. W. Schloesser. 1993. *Zebra mussels: Biology, impacts and control*. Lewis, Boca Raton, Florida.
- NALMS and US EPA. 2001. *Managing lakes and reservoirs*.
- Neumann, D. and H. A. Jenner. 1992. *The zebra mussel- Ecology, Biological Monitoring and First Applications in the Water Quality Management*. Gustav Fischer, New York.

- Nielsen, D. L., T. J. Hillman, F. J. Smith and R. J. Schiel. 2000. The influence of a planktivorous fish on zooplankton assemblages in experimental billabongs. *Hydrobiologia* 434: 1–9.
- Noda, N., N. Kaneko, M. Mikami, Y. Kimochi, S. Tsuneda, A. Hirata, M. Mizuochi and Y. Inamori. 1993. Effects of SRT and DO on N_2O reductase activity in an anoxic–oxic activated sludge system. *Water Science & Technology* 48(11): 363–370.
- Nygaard, K., and A. Tobiesen. 1993. Bacterivory in algae: a survival strategy during nutrient limitation. *Limnol. Oceanogr.* 38:273–279.
- Okada, M. and R. Sudo. 1984. Submerged filter streams as applied to gray water treatment. *Res. Rep. Nat'l. Environ. Stud.* 55.
- Reinikainen, M, Ketola M, Walls M. 1994. Effects of the concentrations of toxic *Microcystis aeruginosa* and an alternative food on the survival of *Daphnia pulex*. *Limnol Oceanogr* 39:424–432.
- Penalzoa, R., M. Rojas, I. Vila and F. Zambrano. 1990. Toxicity of a soluble peptide from *Microcystis* sp. to zooplankton and fish. *Freshwater Biology* 24: 233.
- Rothhaupt, K. O. 1996. Laboratory experiments with a mixotrophic chrysophyte and obligately phagotrophic and phototrophic competitors. *Ecology* 77: 716–724.
- Sarnelle, O. 1992. Nutrient enrichment and grazing effects on phytoplankton in lakes. *Ecology* 73: 551–560.
- Sevrin–Reyssac, J., Pletikosic M. (1990). Cyanobacteria in fish ponds. *Aquacult* 88: 1–20.
- Shapiro, J. 1990. Biomanipulation : the next phase–making it stable. In Gulati RD, Lammens E, Meijer ML, Van Donk E (eds). *Biomanipulation–tool for water management*, Kluwer Academic Publishers, Belgium, pp. 13–27.
- Shirai, M., A. Ohtake, T. Sano, S. Matsumoto, T. Sakamoto, A. Sato, T. Aida, K.–I. Harada, T. Shimada and M. Suzuki. 1991. Toxicity and Toxins of Natural Blooms and Isolated Strains of *Microcystis* sp. (Cyanobacteria) and Improved Procedure for Purification of Cultures, *Appl. Environ. Microbial.*, 54, 1241–1245.
- Spencer, C. N., B. R. McClelland and J. A. Stanford. 1991. Shrimp stocking, salmon collapse, and eagle displacement. *BioScienc.* 41: 14–21.
- Starling, F. L. R. M. 1993. Control of eutrophication by silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) in the tropical Paranoa Reservoir (Brasilia, Brazil): a 메소코즘 experiment. *Hydrobiologia* 257: 143–152.
- Strickland, J. D. H. and T. R., Parson. 1972. *A practical handbook of seawater analysis*. The Alger Press, Ltd, Canada. 310pp.

- Tachibana, H., A. Moriguchi, T. Inoue, N. Kimura, and S. Omura. 1988. Composition and its water purification ability of biofilm on river bed – Examining urban rivers for instance. *Proc. Environ. & Sani. Eng. Res.* 24.
- Takamatsu, Y., O. Nishimura, Y. Inamori, R. Sudo and M. Matsumura. 1996 Effect of temperature on biodegradability of surfactants in aquatic microcosm system. *Water Science and Technology*. Vol 34 No 7–8 pp 61–68.
- Takamura, N., H. Mikami, h. Mizutani and K. Nagasaki. 1999. Did a drastic change in fish species from kokanee to pond smelt decrease the secchi disc transparency in the oligotrophic Lake Towada, Japan? *Arch. Hydrobiol.* 144: 283–304.
- U.S. EPA. 1990. The lake and reservoir restoration guidance manual. EPA-440/4-90-006.
- Welch, E. B. and G. D. Cooke. 1999. Effectiveness and longevity of phosphorus inactivation with alum. *Lake and Reserv. Manage.* 15(1): 5–27.
- Wetzel, R. G. 1983. *Limnology* 2nd ed. Saunders College Publishing, Philadelphia. 860pp.
- Wetzel, R. G. 2001 *Limnology* 2nd ed. Academic Press. San Diego, San Francisco, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo.
- Wolk, P. 1973. Physiology and Cytological chemistry of Blue–Green Algae. *Bacterial reviews*: 37, 32–101.
- Wu, S. S., Kaiser D. 1995. Genetic and functional evidence that type IV pili are required for social motility in *Myxococcus xanthus*. *Mol Microbiol.* 18: 547–558.
- Wu, S. S., Kaiser D. 1996. Markerless deletion of pil genes in *Myxococcus xanthus* generated by counterselection with the *Bacillus subtilis* sacB gene. *J Bacteriol.* 178: 5817–5821
- Wu, S. S., Kaiser D. 1997. Regulation of expression of the pilA gene of *Myxococcus xanthus*. *J Bacteriol.* 179: 7748–7758.
- Xie, P. X. Huang and N. Takamura. 2000. Changes of *Leptodora kindti* abundance (1957–1996) in a planktivorous fishes–dominated subtropical Chinese lake (Lake Donghu). *Arch. Hydrobiol.* 147: 351–372.
- Yasuno, M., S. Yoshio, K. Kunimitsu and Makoto M. Watanabe. 1998. Variations in the toxicity of *Microcystis* species to *Moina macrocopa*. *Phycological Research* 46: 31–36.
- Zhao, W., S. Dong, Z. Zhang, D. Li. 2001. Effect of silver carp stocking and fertilization on plankton community in enclosures in saline–alkaline ponds. *Chinese journal of applied ecology* 12: 299–303.

부 록

- 부록 1: 연구관련 특허출원
- 부록 2: 연구관련 논문 게재
- 부록 3: 연구진 회의 회의록
- 부록 4: 조사대상 저수지 생물자료
- 부록 5: 전국 농업용저수지 유형화를 위한 전국
농업용저수지 목록
- 부록 6: 신규저수지 정기조사 결과
-
-
-

부록 1: 연구관련 특허출원

○ 2007-0116026 ‘논우렁이를 이용한 부유성 조류 제어 방법’

特 許 出 願 書

출원인	건국대학교산학협력단		
발명의 명칭	국문	논우렁이를 이용한 부유성 조류 제어 방법	
사무소 관리번호	P07P0555	귀사전담자 관리번호	
사무소 담당자	구 현 서	명세서 /도면	19 / 6
출원번호 (출원일)	10-2007-0116026 (2007. 11. 14)	심사청구 유 / 무	유
청구항수 (독/종)	1	6	출원종류 신규출원
발명자	황순진/김백호/전미진		
등급			

特 許 法 人 信 誠

TEL : 2009-6100 FAX : 2009-6114

관인생략 출원번호통지서

출원일자 2007.11.14
 특기사항 심사청구(유) 공개신청(무)
 출원번호 10-2007-0116026 (접수번호 1-1-2007-0816448-46)
 출원인명칭 건국대학교 산학협력단(2-2004-015764-8)
 대리인성명 특허법인 신성(9-2000-100004-8)
 발명자성명 황순진 김백호 전미진

특 허 청 장

- 출원번호통지서 출원 이후 심사진행 상황 등을 확인하실 때에는 출원번호가 필요하오니 출원번호통지서는 출원절차가 종료될 때까지 보관하시기 바랍니다.
- 2-가. 특허 및 실용신안 출원은 심사청구 후 평균 10개월에 1차 심사처리가 이루어지고, 상표 및 디자인은 출원 후 평균 6개월에 1차 심사처리가 이루어집니다.
 2-나. 특허 및 실용신안은 특허청 홈페이지(<http://www.kipo.go.kr> 이하 "홈페이지"라 함)내 "특허로(온라인전자출원)" 사이트 "나의출원등록조회"에서 1차 심사처리 1개월 전에 1차 심사결과통지 예정시기를 확인할 수 있으며, 동 사이트 코너인 "통지서비스신청"에서 1차 심사결과통지 예정시기 알림 서비스를 신청하시면 1차 심사처리 약 1개월 전에 해당 출원 건의 1차 심사결과통지 예정시기를 SMS 또는 E-mail 서비스로 제공 받을 수 있습니다.(단 홈페이지 회원에 한하여 통지서비스 신청 가능)
 2-다. 상표 및 디자인은 특허청 홈페이지(공지사항)에 유별 1차 심사결과통지 예정시기를 매월 게시하고 있으며, 특허정보검색서비스 시스템(<http://www.kipris.or.kr>)을 통해 개별 출원건에 대한 1차 심사결과통지 예정시기를 알려드립니다. 또한, 출원시 1차 심사결과통지 예정시기 알림 서비스를 신청하시면, SMS 또는 E-mail 서비스로 제공해 드립니다.
 ※ 상기 1차 심사결과통지 예정시기는 사정에 의해 다소 늦거나 빨라 질 수 있습니다.
 2-라. 1차 심사결과통지시(심사관이 특허결정의 등본을 송달하기 전 또는 심사관이 최초로 거절이유를 통지한 후 출원인이 그 거절이유를 받기 전 중 빠른 때)까지 귀하께서는 특허출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 명세서 또는 도면을 보정할 수 있습니다.
- 심사청구 특허출원은 출원일로부터 5년 이내에 특허법시행규칙 별지 제24호서식에 의거 심사청구를 하지 않으면 그 출원은 출원취하된 것으로 간주하여 처리됨을 알려드립니다.
- 우선심사 특허출원 또는 디자인등록출원에 대해 조기에 심사받기를 원하시면 우선심사제도를 이용하실 수 있습니다.
- 주소 등 변경신고 출원인의 주소 등을 변경하고자 하는 경우에는 특허법 시행규칙 별지 제4호의 2서식에 의한 출원인 정보변경(경정) 신고서를 제출하여야 합니다.
- 산업재산권 표시, 광고요령 특허 등 산업재산권을 출원 중에 있는 경우에는 해당 산업재산이 출원상태임을 다음과 같이 표시하여야 하며, 이를 위반할 경우 특허법 제224조 및 제227조에 의거 처벌 받게 됩니다.
 예) 특허출원 10-2001-0000001, 실용신안등록출원 20-2001-0000001, 디자인등록출원 30-2001-0000001, 상표등록출원 40-2001-0000001
- 미성년자 미성년자인 출원인이 만20세에 도달하는 경우 출원인의 부모 등 법정대리인의 대리권은 소멸하게 되므로, 출원인은 직접 또는 대리인을 새로이 선임하여 특허에 관한 절차를 밟을 수 있습니다.
- 문의처 기타 문의사항이 있으시면 특허고객 콜센터(1544-8080)에 문의하시거나 특허청 홈페이지(www.kipo.go.kr)를 참고하시기 바랍니다.
- 특허청 주소 302-701 대전광역시 서구 둔산동 920 정부대전청사 4동
 특허청 서울사무소 주소 135-911 서울특별시 강남구 역삼동 647-9 한국지식센터
 FAX) 대전 : 042-472-7140, 서울 : 02-566-8454

○ 2008-0007085 ‘말조개를 이용한 부유성 조류 제어 방법’

特 許 出 願 書

출원인	건국대학교 산학협력단		
발명의 명칭	국문	말조개를 이용한 부유성 조류 제어 방법	
사무소 관리번호	P07P0636	귀사전담자 관리번호	
사무소 담당자	구 현 서	명세서 /도면	19 / 7
출원번호 (출원일)	10-2008-0007085 (2008. 1. 23)	심사청구 유 / 무	유
청구항수 (독/종)	1	10	출원종류 신규출원
발명자	황순진/김백호/이연주/박구성/김난영		
등급			

特 許 法 人 信 誠

TEL : 2009-6100 FAX : 2009-6114


관인생략
출원번호통지서

출원일자 2008.01.23
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무)
출원번호 10-2008-0007085 (접수번호 1-1-2008-0056674-77)
출원인명칭 건국대학교 산학협력단(2-2004-015764-8)
대리인성명 특허법인 신성(9-2000-100004-8)
발명자성명 황순진 김백호 이연주 박구성 김난영

특 허 청 장

- 출원번호통지서 출원 이후 심사진행 상황 등을 확인하실 때에는 출원번호가 필요하오니 출원번호통지서는 출원절차가 종료될 때까지 보관하시기 바랍니다.
- 2-가. 특허 및 실용신안 출원은 심사청구 후 평균 10개월에 1차 심사처리가 이루어지고, 상표 및 디자인은 출원 후 평균 6개월에 1차 심사처리가 이루어집니다.
2-나. 특허 및 실용신안은 특허청 홈페이지(<http://www.kipo.go.kr> 이하 "홈페이지"라 함)내 "특허로(온라인전자출원)" 사이트 "나의출원등록조회"에서 1차 심사처리 1개월 전에 1차 심사결과통지 예정시기를 확인할 수 있으며, 동 사이트 코너인 "통지서비스신청"에서 1차 심사결과통지 예정시기 알림 서비스를 신청하시면 1차 심사처리 약 1개월 전에 해당 출원 건의 1차 심사결과통지 예정시기를 SMS 또는 E-mail 서비스로 제공 받을 수 있습니다.(단 홈페이지 회원에 한하여 통지서비스 신청 가능)
2-다. 상표 및 디자인은 특허청 홈페이지(공지사항)에 유별 1차 심사결과통지 예정시기를 매월 게시하고 있으며, 특허정보검색서비스 시스템(<http://www.kipris.or.kr>)을 통해 개별 출원건에 대한 1차 심사결과통지 예정시기를 알려드립니다. 또한, 출원시 1차 심사결과통지 예정시기 알림 서비스를 신청하시면, SMS 또는 E-mail 서비스로 제공해 드립니다.
* 상기 1차 심사결과통지 예정시기는 사정에 의해 다소 늦거나 빨라 질 수 있습니다.
2-라. 1차 심사결과통지시(심사관이 특허결정의 등본을 송달하기 전 또는 심사관이 최초로 거절이유를 통지한 후 출원인이 그 거절이유를 받기 전 중 빠른 때)까지 귀하께서는 특허출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 명세서 또는 도면을 보정할 수 있습니다.
- 심사청구 특허출원은 출원일로부터 5년 이내에 특허법시행규칙 별지 제24호서식에 의거 심사청구를 하지 않으면 그 출원은 출원취하된 것으로 간주하여 처리됨을 알려드립니다.
- 우선심사 특허출원 또는 디자인등록출원에 대해 조기에 심사받기를 원하시면 우선심사제도를 이용하실 수 있습니다.
- 주소 등 변경신고 출원인의 주소 등을 변경하고자 하는 경우에는 특허법 시행규칙 별지 제4호의 2서식에 의한 출원인 정보변경(경정) 신고서를 제출하여야 합니다.
- 산업재산권 표시, 광고요령 특허 등 산업재산권을 출원 중에 있는 경우에는 해당 산업재산이 출원상태임을 다음과 같이 표시하여야 하며, 이를 위반할 경우 특허법 제224조 및 제227조에 의거 처벌 받게 됩니다.
예) 특허출원 10-2001-0000001, 실용신안등록출원 20-2001-0000001, 디자인등록출원 30-2001-0000001, 상표등록출원 40-2001-0000001
- 미성년자 미성년자인 출원인이 만20세에 도달하는 경우 출원인의 부모 등 법정대리인의 대리권은 소멸하게 되므로, 출원인은 직접 또는 대리인을 새로이 선임하여 특허에 관한 절차를 밟을 수 있습니다.
- 문의처 기타 문의사항이 있으시면 특허고객 콜센터(1544-8080)에 문의하시거나 특허청 홈페이지(www.kipo.go.kr)를 참고하시기 바랍니다.
- 특허청 주소 302-701 대전광역시 서구 둔산동 920 정부대전청사 4동
특허청 서울사무소 주소 135-911 서울특별시 강남구 역삼동 647-9 한국지식센터
FAX) 대전 : 042-472-7140, 서울 : 02-566-8454

- 2008-0007986 ‘폐류서식장치 및 이를 포함하는 수질정화 시스템’

경기도 평택시 평택동 65-23 부광빌딩 5층	 Patent & Law Firm 더원국제특허법률사무소	Tel. 031 656 7300 Fax. 031 656 7345 E-mail. mail@onepat.com
<h2>특허출원서</h2>		
발 명 의 명 칭	폐류서식장치 및 이를 포함하는 수질정화 시스템	
출 원 일	2008년 01월 25일	
출 원 번 호	10-2008-0007986	
출 원 인	주식회사 아쌈 / 황 순 진	


관인생략 출원번호통지서

출원일자 2008.01.25
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무)
출원번호 10-2008-0007986 (접수번호 1-1-2008-0064086-73)
출원인명칭 주식회사 아썸(1-2000-045995-4) 외 1명
대리인성명 오용주(9-2003-000369-8)
발명자성명 황순진 김백호 권오병 박선구 문정수 조인기

특 허 청 장

1. **출원번호통지서** 출원 이후 심사진행 상황 등을 확인하실 때에는 출원번호가 필요하오니 출원번호통지서는 출원절차가 종료될 때까지 보관하시기 바랍니다.
2. 2-가. 특허 및 실용신안 출원은 **심사청구 후 평균 10개월**에 1차 심사처리가 이루어지고, 상표 및 디자인은 **출원 후 평균 6개월**에 1차 심사처리가 이루어집니다.
2-나. 특허 및 실용신안은 **특허청 홈페이지**(<http://www.kipo.go.kr> 이하 "홈페이지"라 함)내 "**특허로(온라인전자출원)**" 사이트 "나의출원등록조회"에서 1차 심사처리 1개월 전에 1차 심사결과통지 예정시기를 확인할 수 있으며, 동 사이트 코너인 "통지서비스신청"에서 1차 심사결과통지 예정시기 알림 서비스를 신청하시면 1차 심사처리 약 1개월 전에 해당 출원 건의 1차 심사결과통지 예정시기를 SMS 또는 E-mail 서비스로 제공 받을 수 있습니다.(단 홈페이지 회원에 한하여 통지서비스 신청 가능)
2-다. 상표 및 디자인은 **특허청 홈페이지(공지사항)**에 **유별 1차 심사결과통지 예정시기**를 매일 게시하고 있으며, **특허정보검색서비스 시스템**(<http://www.kipris.or.kr>)을 통해 개별 출원건에 대한 1차 심사결과통지 예정시기를 알려드립니다. 또한, 출원시 1차 심사결과통지 예정시기 알림 서비스를 신청하시면, **SMS 또는 E-mail 서비스**로 제공해 드립니다.
※ 상기 1차 심사결과통지 예정시기는 사정에 의해 다소 늦거나 빨라질 수 있습니다.
2-라. 1차 심사결과통지시(심사관이 특허결정의 등본을 송달하기 전 또는 심사관이 최초로 거절이유를 통지한 후 출원인이 그 거절이유를 받기 전 중 빠른 때)까지 귀하께서는 특허출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 명세서 또는 도면을 보정할 수 있습니다.
3. **심사청구** 특허출원은 출원일로부터 5년 이내에 특허법시행규칙 별지 제24호서식에 의거 심사청구를 하지 않으면 그 출원은 출원취하된 것으로 간주하여 처리됨을 알려드립니다.
4. **우선심사** 특허출원 또는 디자인등록출원에 대해 조기에 심사받기를 원하시면 우선심사제도를 이용하실 수 있습니다.
5. **주소 등 변경신고** 출원인의 주소 등을 변경하고자 하는 경우에는 특허법 시행규칙 별지 제4호의 2서식에 의한 출원인 정보변경(경정) 신고서를 제출하여야 합니다.
6. **산업재산권 표시, 광고요령** 특허 등 산업재산권을 출원 중에 있는 경우에는 해당 산업재산이 출원상태임을 다음과 같이 표시하여야 하며, 이를 위반할 경우 특허법 제224조 및 제227조에 의거 처벌받게 됩니다.
예) 특허출원 10-2001-0000001, 실용신안등록출원 20-2001-0000001, 디자인등록출원 30-2001-0000001, 상표등록출원 40-2001-0000001
7. **미성년자** 미성년자인 출원인이 만20세에 도달하는 경우 출원인의 부모 등 법정대리인의 대리권은 소멸하게 되므로, 출원인은 직접 또는 대리인을 새로이 선임하여 특허에 관한 절차를 밟을 수 있습니다.
8. **문의처** 기타 문의사항이 있으시면 특허고객 콜센터(1544-8080)에 문의하시거나 특허청 홈페이지(www.kipo.go.kr)를 참고하시기 바랍니다.
9. **특허청 주소** 302-701 대전광역시 서구 둔산동 920 정부대전청사 4동
특허청 서울사무소 주소 135-911 서울특별시 강남구 역삼동 647-9 한국지식센터
FAX) 대전 : 042-472-7140, 서울 : 02-566-8454

- 2008-0086902 ‘어류 서식처 및 생물 다양성을 제공할 수 있는 인공 수초’

경기도 평택시 평택동 65-23 부광빌딩 5층	 <p>특허법인 태동 (구)더원국제특허법률사무소</p>	Tel. 031 656 7300 Fax. 031 656 7345 E-mail. mail@tdpat.com
<h2>특허출원서</h2>		
발 명 의 명 칭	어류 서식처 및 생물 다양성을 제공할 수 있는 인공 수초	
출 원 일	2008년 09월 03일	
출 원 번 호	10-2008-0086902	
출 원 인	한국농촌공사 / (주)아쌈	

관인생략 출원번호통지서

출원일자 2008.09.03
 특기사항 심사청구(유) 공개신청(무)
 출원번호 10-2008-0086902 (접수번호 1-1-2008-0627899-70)
 출원인명칭 한국농촌공사(3-2000-003153-9) 외 1명
 대리인성명 특허법인 태동(9-2008-100001-5)
 발명자성명 엄한용 박구성 송영희 권오병 박선구 조인기 문정수

특 허 청 장

- 출원번호통지서 출원 이후 심사진행 상황 등을 확인하실 때에는 출원번호가 필요하시니 출원번호통지서는 출원절차가 종료될 때까지 보관하시기 바랍니다.
- 2-가. 특허 및 실용신안 출원은 **심사청구 후 평균 10개월**에 1차 심사처리가 이루어지고, 상표 및 디자인은 **출원 후 평균 6개월**에 1차 심사처리가 이루어집니다.
 2-나. 특허 및 실용신안은 **특허청 홈페이지**(<http://www.kipo.go.kr> 이하 "홈페이지"라 함)내 "**특허로(온라인전자출원)**" 사이트 "나의출원등록조회"에서 1차 심사처리 1개월 전에 1차 심사결과통지 예정시기를 확인할 수 있으며, 동 사이트 코너인 "통지서비스신청"에서 1차 심사결과통지 예정시기 알림 서비스를 신청하시면 1차 심사처리 약 1개월 전에 해당 출원 건의 1차 심사결과통지 예정시기를 SMS 또는 E-mail 서비스로 제공 받을 수 있습니다.(단 홈페이지 회원에 한하여 통지서비스 신청 가능)
 2-다. 상표 및 디자인은 **특허청 홈페이지(공지사항)**에 **류별 1차 심사결과통지 예정시기**를 매월 게시하고 있으며, **특허정보검색서비스 시스템**(<http://www.kipris.or.kr>)을 통해 개별 출원건에 대한 1차 심사결과통지 예정시기를 알려드립니다. 또한, 출원시 1차 심사결과통지 예정시기 알림 서비스를 신청하시면, **SMS 또는 E-mail 서비스**로 제공해 드립니다.
 ※ 상기 1차 심사결과통지 예정시기는 사정에 의해 다소 늦거나 빨라 질 수 있습니다.
 2-라. 1차 심사결과통지서(심사관이 특허결정의 등본을 송달하기 전 또는 심사관이 최초로 거절이유를 통지한 후 출원인이 그 거절이유를 받기 전 중 빠른 때)까지 귀하께서는 특허출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 명세서 또는 도면을 보정할 수 있습니다.
- 심사청구** 특허출원은 출원일로부터 5년 이내에 특허법시행규칙 별지 제24호서식에 의거 심사청구를 하지 않으면 그 출원은 출원취하된 것으로 간주하여 처리됨을 알려드립니다.
- 우선심사** 특허출원 또는 디자인등록출원에 대해 조기에 심사받기를 원하시면 우선심사제도를 이용하실 수 있습니다.
- 주소 등 변경신고** 출원인의 주소 등을 변경하고자 하는 경우에는 특허법 시행규칙 별지 제4호의 2서식에 의한 출원인 정보변경(경정) 신고서를 제출하여야 합니다.
- 산업재산권 표시, 광고요령** 특허 등 산업재산권을 출원 중에 있는 경우에는 해당 산업재산이 출원상태임을 다음과 같이 표시하여야 하며, 이를 위반할 경우 특허법 제224조 및 제227조에 의거 처벌받게 됩니다.
 예) 특허출원 10-2001-0000001, 실용신안등록출원 20-2001-0000001, 디자인등록출원 30-2001-0000001, 상표등록출원 40-2001-0000001
- 미성년자** 미성년자인 출원인이 만20세에 도달하는 경우 출원인의 부모 등 법정대리인의 대리권은 소멸하게 되므로, 출원인은 직접 또는 대리인을 새로이 선임하여 특허에 관한 절차를 밟을 수 있습니다.
- 문의처** 기타 문의사항이 있으시면 특허고객 콜센터(1544-8080)에 문의하시거나 특허청 홈페이지(www.kipo.go.kr)를 참고하시기 바랍니다.
- 특허청 주소** 302-701 대전광역시 서구 선사로 139 정부대전청사 4동
특허청 서울사무소 주소 135-911 서울특별시 강남구 역삼동 647-9 한국지식센터
 FAX) 대전 : 042-472-7140, 서울 : 02-566-8454

부 록 2



연구관련 논문게재 실적

부록 2: 연구관련 논문게재 실적

순서

- 1) '우리나라 농업용 저수지의 영양상태 및 수질특성' - 한국하천호수학회지 40(2)
- 2) '신구저수지의 유기인계 농약 분포와 특성' - 한국하천호수학회지 40(2)
- 3) '조류제거 효과에 대한 Top-down 어류 조작실험' - 한국하천호수학회지 40(3)
- 4) '남조류 대발생 환경에서 수심과 용존산소 변화에 따른 담수산 이매패(말조개)의 생존율 및 유기 생산물' - 한국하천호수학회지 41(1)
- 5) '수온, 먹이농도, 패각 크기가 *Microcystis aeruginosa*에 대한 말조개의 여과율 및 배설물 생산에 미치는 영향' - 한국하천호수학회지 41(1)
- 6) '한국산 논우렁이의 유해조류 섭식을 및 배설물 생산' 한국하천호수학회지 41(1)
- 7) '인공식물섬에 의한 조류(Algae) 및 영양염류의 제거' - 한국하천호수학회지 41(1)
- 8) '신구저수지의 1차 생산 및 지방산 생산속도 결정을 위한 ^{13}C 추적자 활용 연구' - 한국하천호수학회지 41(1)
- 9) '하계 강우기 전, 후 신구저수지 내 입자성유기물의 수직분포 및 기원연구' - 한국하천호수학회지 41(1)
- 10) '실험적 생물조절 기법을 이용한 엽록소 및 남조류 제거 효과' - 한국하천호수학회지 41(1)
- 11) '신구저수지의 수질특성 및 LEHA 어류모델을 이용한 생태건강도 평가' - 한국하천호수학회지 41(1)
- 12) '신구저수지에서 조류성장에 대한 제한 영양염 분석' - 한국하천호수학회지 41(1)
- 13) 'Comparison of Four Different Ordination Methods for Patterning Water Quality of Agricultural Reservoirs' - 한국하천호수학회지 41(1)
- 14) '농업용 저수지의 수질 예측 모델을 위한 PSO(particle swarm optimization) 알고리즘 적용' - 한국하천호수학회지 41(1)
- 15) '저온기 부영양 수계의 규조군집의 유입능' - 한국하천호수학회지 41(3)
- 16) '저온기 부영양 수계의 규조발생에 대한 한국산 논우렁이의 섭식특성' - 한국하천호수학회지 41(3)
- 17) '북한강 수계에 분포하는 말조개의 남조류 섭식특성' - 한국하천호수학회지 41(3)

우리나라 농업용 저수지의 영양상태 및 수질특성

이재연 · 이재훈 · 신경훈¹ · 황순진² · 안광국*

(충남대학교 생명과학부, ¹한양대학교 해양환경과학과, ²건국대학교 환경과학과)

Trophic State and Water Quality Characteristics of Korean Agricultural Reservoirs. Lee, Jae-Yon, Jae-Hoon Lee, Kyung-Hoon Shin¹, Soon-Jin Hwang² and Kwang-Guk An* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764; ¹Department of Environmental Marine Science, Hanyang University, Ansan 426-791; ²Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701)

For this study, we analyzed spatial and temporal patterns of trophic state and water quality over the period of 2002~2005, using the water chemistry dataset obtained from the Korea Rural community & Agriculture corporation. Most reservoirs, based on TN, showed eutrophic (about 88% of the total). About 26% of agricultural reservoirs, based on TP, showed eutrophic after the criteria of OECD (1982), while 71% and 3% were mesotrophic and oligotrophic, respectively. Seasonal variations were evident due to the intense monsoon rain during July~August; conductivity, COD, SS, nutrients, and chlorophyll-*a* (CHL) increased in the postmonsoon compared to the premonsoon. TP values had positive functional relations with conductivity, COD, and CHL values. COD and SS peaked during the intense monsoon. Mean values of TP and CHL values were two times greater in the intense monsoon than the weak monsoon. The increased TP was probably due to inorganic suspended solids from point and non-point sources during the monsoon. Ratios of TN:TP had strong inverse relations ($R^2=0.843$, $p<0.001$, $n=34$) with TP, but not with TN ($p>0.05$, $n=34$). Log₁₀-transformed CHL increased with TP in most P-limited reservoirs ($\text{Log}_{10}\text{TP}=0.5\cdot\text{Log}_{10}\text{CHL}+0.086$). Similarity analysis, based TN, TP, and CHL showed that three groups were separated at 90% similarity level; One group was reservoirs with high salinity nearby the seawater, and the other two groups were reservoirs with a low salinity of the inland, and intermediate salinity, respectively.

Key words : Trophic state, agricultural reservoir, empirical model, chlorophyll-*a*, nutrient

서 론

최근 농림부에서는 농업용 저수지의 저수량 감소 및 부영양화 현상의 가속화로 인해 농업용수의 안정적인 양적공급 및 질적관리에 대한 관심이 고조되고 있다 (남 등, 2003; 농업기반공사 농어촌연구원, 2005). 1990년대

이후 대다수의 농업용 저수지는 인근 농지로부터 유입된 인(P)과 질소(N)는 수체 내 식물성플랑크톤에 의한 1차 생산력의 증가 뿐 아니라 하절기 상시적 남조류의 수화 현상(algal bloom)을 야기시켜(농업기반공사, 2001, 최와 김, 2002) 저수지 생태계 교란, 시각적인 불쾌감 증대를 통해 막대한 경제적 손실을 초래하고 있다(국립환경연구원, 1999). 현재 18,000여 개의 농업용 저수지의 대부분

* Corresponding author: Tel: 042) 821-6408, Fax: 042) 822-9690, E-mail: kgan@enu.ac.kr

신구저수지의 유기인계 농약 분포와 특성

홍성진 · 최진영¹ · 양동범¹ · 신경훈*

(한양대학교 해양환경과학과, ¹한국해양연구원)

Distribution and Characteristics of Organophosphorous pesticides in Shingu Reservoir, Korea. Hong, Seong Jin, Jin Young Choi¹, Dong Beom Yang¹ and Kyung Hoon Shin* (Department of Environmental Marine Sciences, Hanyang University, Ansan 425-791, Korea; ¹Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan 425-600, Korea)

Characteristics of organophosphorus pesticides (OPs) distribution were investigated in Shingu Reservoir, as a shallow eutrophic agriculture reservoir in Korea. In August 2006, IBP, DDVP and dyfonate were detected in the water column of Singu Reservoir, ranging from 1340.7 to 16030.1 ng L⁻¹, 58.7 to 127.6 ng L⁻¹ and N.D. to 20.3 ng L⁻¹, respectively. However, in September 2006, mevinfos, ethoprofos, phorate, chlorfenvinfos, and methidathion were also found in addition to IBP (202.5~213.2 ng L⁻¹), DDVP (100.7~340.5 ng L⁻¹) and dyfonate (N.D.~25.0 ng L⁻¹). Maximum concentrations of OPs were observed at the middle depth in August, which might be related with photo-oxidation. On the other hand, IBP and DDVP among the OPs were detected in suspended particles, suggesting the relatively active adsorption reactivity. The composition of OPs varied temporally on account of the influence of inflow water from its surrounding areas. In the present study, the observed OPs concentrations seem to be not acute toxic levels to aquatic organisms in Shingu Reservoir, considering the standard monitoring levels of U.S. Environmental Protection Agency and Japan Ministry of Environment.

Key words : organophosphorous pesticides, IBP, DDVP, Shingu Reservoir

서 론

농약은 농작물, 산림 등에 살균이나 살충의 목적으로 사용되고 그 중 일부는 바람과 강물에 의해 저수지, 강, 호수, 바다로 유출되어진다 (Ferrando *et al.*, 1992). 농약은 크게 유기인계 농약 (organophosphorus pesticides, OPs)과 유기염소계 농약 (organochlorine pesticides, OCs)으로 나누어지는데, 유기염소계 농약은 심각한 잔류성과 생체축적의 특성 때문에 우리나라를 포함한 여러 나라에서 사용을 금하고 있다. 반면에 유기인계 농약은

낮은 안정성으로 인해 빛이나 미생물에 의한 분해가 빨라 환경 내에 잔류시간이 짧고, 생물축적을 또한 낮다 (Manhan, 1979; Drapper and Crosby, 1984). 때문에 유기 염소계 농약의 대안으로 간주되어 국내 뿐 아니라, 여러 나라에서 점차 사용량이 증가하는 추세이다 (Tse *et al.*, 2004).

하지만 과도한 유기인계 농약의 사용으로 인한 수 생태계의 유입은 서식 생물에 아세틸콜린 (acetylcholine)을 분해하는 콜린에스테라아제 (cholinesterase, ChE)와 결합하여 그 작용을 저해하므로 아세틸콜린 (AChE)의 축적을 가져와 신경장애를 가져오는 등의 급성독성을 나타

* Corresponding author: Tel: 031) 400-5536, Fax: 031) 416-6173, E-mail: shinkh@hanyang.ac.kr

조류제거 효과에 대한 Top-down 어류 조작실험

이 상 재 · 이 재 연 · 안 광 국*

(충남대학교 생명과학부)

Top-down Fish Biomanipulation Experiments on Algal Removal Effects. Lee, Sang-Jae, Jae-Yon Lee and Kwang-Guk An* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764)

This study was to test algal removal efficiency by top-down fish biomanipulation experiments in the laboratory during August~September 2006. We selected eight candidate fishes for the biomanipulation. We set up the experiments of eight fish-treatment tanks (3~6 fishes) with initial chlorophyll-*a* concentrations (CHL-*a*) of 100~120 $\mu\text{g L}^{-1}$ and one control tank including no fish with the same initial CHL-*a*. All tanks were maintained water quality of dissolved oxygen (5.3~8.2 mg L^{-1}) and pH (7.4~8.1) in the tests. During the biomanipulation, DO and pH in the treatments were lower than those of the control, while conductivity increased gradually in the treatments. Biomanipulation experiments showed that CHL-*a* increased 13% and 6% (mean values of 8 fishes) in the controls and treatments, respectively. These results indicate that algal growth was maintained in the control and fish treatments, but the rate of CHL-*a* in the treatments was lower than that of the control. The removal rates of bluegreens algae decreased 32% in the control, and 20% in treatments (mean values of 8 fishes) respectively. In other words, bluegreen algae showed greater growth rate in the fish treatments than the control and this was due to higher nutrients supplied from fish excretions. Overall, simple fish biomanipulation on algal control was not effective at all in these laboratory tests.

Key words : biomanipulation, fish, chlorophyll, bluegreen algae

서 론

최근 우리나라의 농업용 저수지는 농경지에서 유입되는 영양염류(N, P) 및 농촌지역의 생활하수·오수 등의 유입으로 빈번한 수화현상(algal bloom)과 이에 따른 어류 폐사가 보고되고 있다(이 등, 2006). 특히 여름철 남조류의 대발생은 대형담 인공호의 식수에 다양한 독성 영향(예: Microcystin)뿐만 아니라 농업용 저수지의 부영양화에 의한 이·취미를 발생시켜 농업용수에도 많은 문제

를 야기시키고 있다(이 등, 2002). 이들은 대개의 분해활동에서 각종 유기물과 질소(N), 인(P) 등의 무기염류가 용출되어 수계의 부영양화를 반복, 심화시킬 뿐만 아니라, 용존산소 감소, 투명도 감소 및 심한 악취를 발생하며(Kolmakov *et al.*, 2002), 심지어 독특한 독소를 발생하여 어류는 물론 가축이나 인체 건강에 영향을 주는 것으로 나타났다(이 등, 2002).

이러한 다양한 문제들은 궁극적으로 조류의 대발생에 의해 야기되며 이를 해결하기 위한 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 조류제거 방안이 전 세계적으로 검토되고

* Corresponding author: Tel: 042) 821-6408, Fax: 042) 822-9690, E-mail: kgan@cnu.ac.kr

Korean J. Limnol. 41 (Special issue) : 50~60 (2008)

남조류 대발생 환경에서 수심과 용존산소 변화에 따른 담수산 이매패 (말조개)의 생존율, 여과율 및 배설물 생산

박구성 · 김백호 · 엄한용¹ · 황순진*

(건국대학교 환경과학과, ¹한국농촌공사 농어촌연구원)

Effects of Dissolved Oxygen and Depth on the Survival and Filtering Rate and Pseudofeces Production of a Filter-feeding Bivalve (*Unio douglasiae*) in the Cyanobacterial Bloom. Park, Ku-Sung, Baik-Ho Kim, Han-Yong Um¹ and Soon-Jin Hwang* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; ¹Rural Research Institute, Gyeonggi 426-908, Korea)

We performed the experiment to evaluate the effect of different DO concentrations (0.5, 4.5 and 9.0 mgO₂ L⁻¹) and water depths (20, 50 and 80 cm) on the filtering rate, mortality, and pseudofeces production of *Unio douglasiae* against the cyanobacterial bloom (mainly *Microcystis aeruginosa*). A solitary-living bivalve *U. douglasiae* was collected in the upstream region of the North Han River (Korea). The harvested mussels were carefully transferred to the laboratory artificial management system, which was controlled temperature (18±2°C), flow rate (10 L h⁻¹), food (*Chlorella*TM), sediment (pebble and clay), light intensity (ca. 20 μmol photons), and photoperiod (12 L : 12 D). In the field observation, the mussel mortality was significantly correlated with water temperature, pH and DO concentration (P<0.05). The mortality was decreased with water depth; 65, 90, 80% of mortality at 20, 50, 80 cm water-depth, respectively. Filtering rate (FR) showed the highest value at 50 cm water depth, and thereby the concentration of chlorophyll-*a* decreased continuously by 94% of the control at the end of the experiment. In contrast, FR decreased by 34% of the initial concentration at 20 cm water depth. Over the given water-depth range, the mussel FR ranged from 0.15~0.20 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹ during the 18 hrs of experiment, and thereafter, they appeared to be approximately 0.11, 0.26 and 0.30 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹ at 20, 50 and 80 cm water depth, respectively. FR was highest with the value of 0.46 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹ at 0.5 mgO₂ L⁻¹ at the early stage of the experiment, while it increased with DO concentration. Maximum pseudofeces production was 11.2 mg gAFDW⁻¹ hr⁻¹ at 9.0 mgO₂ L⁻¹. Our results conclude that *U. douglasiae* has a potential to enhance water quality in eutrophic lake by removing dominant cyanobacteria, but their effects vary with environmental parameters and the water depth at which they are located.

Key words : dissolved oxygen, depth, filtering rate, survival rate, *Unio douglasiae*, cyanobacterial bloom

* Corresponding author; Tel: 02) 450-3748, Fax: 02) 456-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

Korean J. Limnol. 41 (Special issue) : 61-67 (2008)

수온, 먹이농도, 패각 크기가 *Microcystis aeruginosa*에 대한 말조개의 여과율 및 배설물 생산에 미치는 영향

이연주 · 김백호 · 김난영 · 엄한용¹ · 황순진*

(건국대학교 환경과학과, ¹한국농촌공사 농어촌연구원)

Effects of Temperature, Food Concentration, and Shell Size on Filtering Rate and Pseudofeces Production of *Unio douglasiae* on *Microcystis aeruginosa*. Lee, Yeon-Ju, Baik-Ho Kim, Nan-Young Kim, Han-Yong Um¹ and Soon-Jin Hwang* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul, Korea; ¹Rural Research Institute, Gyeonggi 426-908, Korea)

This study was conducted to evaluate filtering rate (FR) and pseudofeces production (PFP) of a freshwater filter-feeding bivalve, *Unio douglasiae*, on a toxic cyanobacterium (*Microcystis aeruginosa*). The experiments were conducted under the various conditions of water temperature (5~35°C), mussel size (5.6~13.3 cm) and food concentrations (49~491 µg Chl-*a* L⁻¹). Among the applied temperature, the maximum FR (0.41 L · gAFDW⁻¹ · hr⁻¹) and PFP (0.47 mg · gAFDW⁻¹ · hr⁻¹) were observed at 15 and 25°C, respectively. Both weight-based FR and PFP were not correlated with the mussel size, and the values lied in a limited range with some degree of variation. Likewise, no significant relations between FR and PFP was observed in the mussel size. The FR values were negatively correlated with food concentration, while PFP showed positive correlation. Among the applied food concentrations, the maximum FR (0.34 L · gAFDW⁻¹ · hr⁻¹) and PFP (0.06 mg · gAFDW⁻¹ · hr⁻¹) appeared in 113 µg Chl-*a* · L⁻¹ and 491 µg Chl-*a* · L⁻¹, respectively. These results indicate that the grazing of *Unio douglasiae* are affected by various parameters, and it may be applied as an effective biofilter to inhibit *Microcystis* bloom under appropriate application. However, further studies on the fate of excreted pseudofeces are needed to understand their possibility of stimulating nuisance algal growth.

Key words : freshwater bivalve, *Unio douglasiae*, *Microcystis aeruginosa*, filtering rate, pseudofeces production

서 론

담수생태계에서 여과섭식 특성을 가진 이매패류(bivalve)는 미세 박테리아로부터 동물플랑크톤에 이르기까지 다양한 크기의 생물 혹은 무생물 입자들을 섭식한다 (Dame *et al.*, 1985; Vaughn and Hakenkamp, 2001). 또한 이들에 의한 무기형태의 영양염 혹은 faeces와 pseu-

dofaeces와 같은 물질의 배출은 패류의 섭식과 관련되어 나타나는 주요한 결과들이다 (Kryger and Riisgard, 1988; Welker and Walz, 1998; Strayer, 1999). 패류 섭식과정의 부산물은 식물플랑크톤 (James, 1987; Lauritsen and Mozley, 1989)과 저서성 조류 군집의 성장에 이용될 수 있는 것으로 알려져 있다 (Dame, 1996; Christian and Berg, 2000; Davis *et al.*, 2000).

최근 들어 이매패류가 가진 여과능력을 조류제어와 관

* Corresponding author: Tel: 02) 450-3748, Fax: 02) 456-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

한국산 논우렁이의 유해조류 섭식을 및 배설물 생산

황순진 · 전미진 · 김난영 · 김백호*

(건국대학교 환경과학과)

Grazing Rate and Pseudofaeces Production of Native Snail *Cipangopaludina chinensis malleata* Reeve on Toxic Cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. Hwang, Soon-Jin, Mi-Jin Jeon, Nan-Young Kim and Baik-Ho Kim* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

Grazing rates (GR) and pseudofaeces production (PFP) of native snail, Chinese mystery snail (*Cipangopaludina chinensis malleata* Reeve) on natural colonial morphs of *Microcystis aeruginosa* was measured. *C. chinensis* was collected from the upstream of the Geum River (Boryeong, Korea), where they co-habituated with *Unio douglasiae* and *Lanceolaria aerorhyncha*. The experiments were performed to evaluate the GR and PFP at different conditions such as; incubation time (1, 3, 5, 7, 9 and 11 hr), body size (3 to 6.1 cm, n=28), snail density (0.5, 1, 1.5 and 2.0 ind. L⁻¹) and prey concentration (168.3, 336.7, 505.0 and 673.0 µg Chl-a L⁻¹). All experiments were triplicated, and conducted in transparent acrylic vessel (3 L in volume). Regarding feeding time, a highest GR (0.538 L gAFDW⁻¹ h⁻¹) and PFP (7.18 mgAFDW⁻¹) appeared at 1 hr and 7 hr after snail stocking, respectively. Interestingly, the snail, smaller than 4.5 cm in body size, showed a wide range of GR (-4.173 ~ 1.087 L gAFDW⁻¹ h⁻¹) for the initial period (1 and 4 hrs of stocking), compared to those greater than 4.5 cm, which showed a stable FR, higher than 0.5 L gAFDW⁻¹ h⁻¹. Upon density effect, the density of 1.5 ind. L⁻¹ induced the most effective inhibition on *Microcystis* biomass with highest PFP. On the prey concentration, highest GR (0.897 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹) and PFP (3.67 mg gAFDW⁻¹) were induced at the level of 168.3 µg Chl-a L⁻¹ and 673 µg Chl-a L⁻¹, respectively. GR and PFP of this freshwater snail on the cyanobacterial bloom (*M. aeruginosa*) varied with the feeding conditions, and they were comparatively high for a short period of time less than 7 hrs regardless of the stocking condition. Our results suggest that this freshwater snail has a potential to control cyanobacterial bloom when provided with suitable condition.

Key words : Chinese mystery snail, *Cipangopaludina chinensis malleata*, grazing rate, pseudofaeces production, *Microcystis aeruginosa*

서 론

부영양화로 인한 조류 대발생 및 수질악화에 대한 관심도가 날로 증가하고 있으며, 지금까지 계속적으로 논란

이 되어 왔던 물리-화학적 조류제어 방법의 대안으로 다양한 기능성 생물을 적용하는 생태공학적 연구가 활발하게 진행되고 있다. 생물조절(biomanipulation)을 통한 수질개선에 이용된 생물로는 어류(Carpenters *et al.*, 1985; Fukushima *et al.*, 2000), 동물플랑크톤(Lampert *et al.*,

* Corresponding author: Tel: 02) 452-3749, Fax: 02) 452-3749, E-mail: white-t@hanmail.net

인공식물섬에 의한 조류(Algae) 및 영양염류의 제거

박선구* · 조인기 · 권오병 · 문정수¹ · 엄한용² · 황순진³

((주)아셈 호소생태연구소, ¹서울대학교 건설환경공학부,
²농촌공사 농어촌연구원, ³건국대학교 환경과학과)

Algae and Nutrient Removal by Vegetated Artificial Floating Island. Park, Sun-Koo*, In-Ki Cho, Oh-Byung Kwon, Jung-Soo Mun¹, Han-Yong Um² and Soon-Jin Hwang³ (Reserch of Limnology, ASSUM, Gyeonggi 427-070, Korea; ¹Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea; ²Rural Research Institute, Gyeonggi 426-908, Korea; ³Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

We investigated the effect on the removal of BOD, SS, TN and TP and algal growth inhibition of Vegetated Artificial Floating Island (VAFI), by examining microorganism activity and nutrient uptake in the batch test of various conditions: (1) Blank (Control group), (2) VAFI of 0.25 m², (3) AFI of 0.25 m² which has no vegetation, (4) buoyant plate of 0.25 m², (5) buoyant plate of 0.25 m² with linear media. The proportion of BOD removal in the VAFI, AFI, buoyant plate and buoyant plate with media were 82.7, 80.8, 45.2% and 59.6% respectively. TN removal in the VAFI, AFI and buoyant plate with media were 51.2, 31.7% and 25.1% respectively. TP removal in the VAFI, AFI, buoyant plate and buoyant plate with media were 23.3, 16.7, 10.0% and 13.3% respectively. Chlorophyll-*a* removal in the VAFI was 97.9%. The factors of chlorophyll-*a* removal in the VAFI accounted for the shading effect of 35.1%, microorganisms activity of 61%, and plant root of 1.8%.

Key words : artificial floating island, algae, nutrient, lake, water quality

서 론

조류(Algae)대발생은 수체에 영양염류가 유입되어 식물성플랑크톤이 비정상적 대량 증식함으로써 나타나며, 독성방출, 어폐류폐사 등 수생태계에 심각한 문제를 야기시킨다(경기개발연구원, 1998). 이러한 조류대발생과 영양염류 제거를 위한 공법으로 물리·화학적 방법이 사용되고 있지만 초기 투자비 및 운영비용이 많이 소요되고, 이들은 2차오염을 발생시키는 등의 문제점을 안고 있다(정 등, 1998; Tanner, 2001).

이에 따른 대안으로 운영비가 적고, 2차오염 없이 생태

계를 복원하는 생물학적인 방법이 다양하게 적용되고 있다(송 등, 2006). 최근, 이러한 생물학적 방법들 중 수생식물을 식재하여 호소수면에 부유시키는 인공식물섬이 적용되고 있는데, 인공식물섬은 수생식물이 수체에 부유하여 영양염류를 흡수 제거하고, 뿌리 및 식생기반재는 미생물 접촉여재로서의 기능을 수행하여 부착미생물에 의해 수중오염물이 흡착, 분해, 제거된다. 또한 햇빛을 차단하여 조류의 광합성을 억제하는 수질정화기작이 발생한다(권, 2007). 인공식물섬에 의한 수질관리방법은 수중의 생물상에 매우 긍정적인 영향을 주는 것으로 파악되었다(변, 2007).

인공식물섬은 주로 정수생태제인 호소를 대상으로 생

* Corresponding author: Tel: 02) 502-0724, Fax: 02) 502-0725, E-mail: sqfpp@hanmail.net

Korean J. Limnol. 41 (Special issue) : 21-26 (2008)

신구저수지의 1차 생산 및 지방산 생성속도 결정을 위한 ^{13}C 추적자 활용 연구

이연정 · 김민섭 · 신경훈* · 황순진¹

(한양대학교 해양환경과학과, ¹건국대학교 환경과학과)

An Application of ^{13}C Tracer for the Determination of Primary Productivity and Fatty Acid Production Rate in Shingu Reservoir. Lee, Yeonjung, Min-Seob Kim, Kyung-Hoon Shin* and Soon-Jin Hwang¹ (Department of Environmental Marine Sciences, Hanyang University, Ansan 425-791, Korea; ¹Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

The *in situ* incubation experiment was carried out using ^{13}C tracer to determine primary productivity and fatty acid production rate in the shallow, eutrophic Shingu reservoir on 4th July. Particulate organic matter (POM) accounted for 76% in suspended particulate matter (SPM), and average concentration of chlorophyll-*a* was 89 $\mu\text{g L}^{-1}$ in the euphotic layer. Total amount of chlorophyll-*a* (Chl-*a*), primary productivity and Chl-*a* specific productivity in euphotic layer were 112 $\text{mg Chl-}a \text{ m}^{-2}$, 3.53 $\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 32 $\text{mg C mg Chl-}a^{-1} \text{ d}^{-1}$, respectively. The fatty acid composition in newly produced organic matter and suspended organic matter didn't show any significant difference, demonstrating that autochthonous organic matter should be a major source of POM pool. In addition, the fatty acids of bacterial origin were increased through extracellular release of newly photosynthesized DOC, and closely coupled with bacterial assimilation. This result suggests that organic carbon should be actively cycled through the microbial loop in Shingu reservoir in summer.

Key words : ^{13}C tracer method, primary productivity, fatty acid, Shingu reservoir

서 론

우리나라의 농업용 저수지는 농업용수 공급을 위해 1990년도부터 약 492개소가 수질측정망으로 운영되고 있으며, 이 중 약 40%가 부영양화 상태이다(농어촌연구원, 2005). 부영양화 현상은 조류 대발생과 같은 환경적인 문제를 야기시키므로 효과적이고 체계적인 관리를 통한 농업용 저수지의 수질개선이 필요하며, 수질악화의 원인이 되는 주요한 대상의 하나로서 저수지 내 자생기원 유기물 생산 등 수생태계 물질순환에 대한 이해가 절실

히 필요하다.

안정동위원소란 방사붕괴를 하지 않는 동위원소로써 현장에서 사용이 가능하여 수생태계 내 물질순환에 관한 연구를 수행하는데 있어 유용하게 사용된다. 특히 안정동위원소 추적자 실험과 가스크로마토그래피-질량분석기(Gas Chromatography-Mass Spectrometry) 방법을 함께 사용하면 식물플랑크톤의 광합성을 통해 새롭게 생성된 유기물의 종류 및 이들의 생성속도를 파악할 수 있다(Hama *et al.*, 1983). 이에 대한 예로는 지방산과 같은 특정 유기물의 생성속도 측정에 관한 연구(Shin *et al.*, 2000)와 특정 유기물의 생성속도 결정을 통한 식물플랑

* Corresponding author: Tel: 031) 400-5536, Fax: 031) 416-6173, E-mail: shinokh@hanyang.ac.kr

Korean J. Limnol. 41 (Special issue) : 27~34 (2008)

하계 강우기 전·후 신구저수지 내 입자성유기물의 수직분포 및 기원 연구 - 탄소 및 질소 안정동위원소비의 활용 -

김민섭 · 이연정 · 신경훈* · 황순진¹

(한양대학교 해양환경과학과, ¹진국대학교 환경과학과)

A Study on Vertical Distribution and Origin of Particulate Organic Matter in Shingu Reservoir in Pre-monsoon and Post-monsoon Period - Application of Carbon and Nitrogen Stable Isotope Ratio-. Kim, Min-Seob, Yeonjung Lee, Kyung-Hoon Shin* and Soon-Jin Hwang¹ (Department of Environmental Marine Science, Hanyang University, Ansan 425-791, Korea; ¹Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

The vertical distribution and origin of particulate organic matter (POM) were investigated in Shingu reservoir on 4th July (pre-monsoon) and 7th August (post-monsoon) 2006. High turbid water (120 NTU) were found at 4.5 m water depth in post-monsoon period. The average C/N ratio of POM was about 5.70 and 6.96 in surface water and bottom water, respectively in pre-monsoon period, exhibiting the close values to its ratio in phytoplankton cell. However, the average C/N ratio was 7.10 in surface water and 12.81 in bottom water in post-monsoon period. In addition, the $\delta^{13}\text{C}$ values of POM in pre-monsoon period ranged from -25.1‰ to -26.1‰ in whole water column, but the $\delta^{13}\text{C}$ values of POM in post-monsoon period showed relatively wide range between -23.2‰ and -27.5‰ . The apparently lighter values (average- 27.5‰) in near bottom water (4.5 m water depth) demonstrate that POM in high turbid water in post-monsoon period may be derived from the outside terrestrial plants through heavy rainfall during the summer monsoon period. The present study suggests that carbon and nitrogen stable isotope ratios as well as C/N ratios should be useful indexes to clarify the origin of POM.

Key words : carbon and nitrogen isotope, POM, Shingu reservoir

서 론

저수지의 부영양화는 물의 효율적 이용과 생태계의 건전한 기능수행을 저해하는 조류의 비정상적인 대발생을 초래하며, 저층에서의 산소고갈, 저서생물의 고사, 독성물질 용출로 인한 생물들의 피해 등이 나타나 용수로서의 기능을 상실하게 한다(이, 2003). 우리나라의 농업용 저

수지는 생활하수, 축산폐수와 같은 비점오염원의 수계유입으로 부영양화와 조류 발생이 빈번하여(Hwang, 2003), 수질관리에 가장 큰 문제점으로 지적되고 있다(농림부, 2003). 따라서 농업용 저수지의 부영양화 및 녹조 발생 방지를 위하여 외부오염원의 저감 노력이 필요하며(Schinder, 1974; 김, 2004), 나아가 저수지 수생태계의 기능 및 특성을 파악하기 위한 수층 내 유기물의 총량 및 에너지 순환과정에 대한 정확한 해석이 요구된다.

* Corresponding author: Tel: 031) 400-5530, Fax: 031) 416-6173, E-mail: shinkh@hanyang.ac.kr

실험적 생물조절 기법을 이용한 엽록소 및 남조류 제거 효과

이상재 · 이재연 · 이재훈 · 배대열 · 이의행 · 한정호 · 황순진¹ · 안광국*

(충남대학교 생명과학부, ¹전국대학교 환경과학과)

Removal Effects of Chlorophyll-*a* and Cyanobacteria Using Laboratory-scale Biomanipulation Tests. Lee, Sang-Jae, Jae-Yon Lee, Jae-Hoon Lee, Dae-Yeul Bae, Eui-Hang Lee, Jung-Ho Han, Soon-Jin Hwang¹ and Kwang-Guk An* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea; ¹Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

This study was conducted to determine removal effect on phytoplankton (chlorophyll-*a* as whole algae) and cyanobacteria by a fish *Pseudorasbora parva* and macroinvertebrate *Palaemon paucidens* in September 2006. Three treatments with 25 (T1), 50 (T2) and 100 (T3) individuals along with control (C1, no input fish), and two treatments with 25 (T4) and 50 (T5) individuals along with control (C1) were made for fish and macroinvertebrate, respectively. The initial concentrations of chlorophyll-*a* (Chl_a) in each 10 L test tank were set up for the levels of 95~100 µg L⁻¹ and the daily values were monitored in the test tank during 7 days. In the lab tests, *P. parva* did not show Chl-*a* removal effect; the removal rate of Chl-*a* for *P. parva* was -58% in T1, -56% in T2, and 61% in T3 during the test period. In contrast, *P. paucidens*, in the treatments of T4 and T5 removed the phytoplankton effectively and the removal effect were appeared to be 33% and 22%, respectively. Also, *P. paucidens* showed high feeding efficiency in the removal of cyanobacteria. The levels of cyanobacteria were greatly lowered from 6,048 to 927 cells mL⁻¹ in T4 and from 6,539 to 1,053 cells mL⁻¹ in T5, resulting in 85% and 84% in the removal effect, respectively. Our results for biomanipulation tests suggest that *P. paucidens* may be used as a potential candidate organism for algae control in spite of the preliminary results by laboratory tests.

Key words : biomanipulation, removal effect, cyanobacteria, chlorophyll-*a*, agricultural reservoir

서론

농업용 저수지는 과거로부터 농업활동에 가장 중요한 수자원으로 이용되어 왔으나 최근에는 단위 면적당 수확량 증가를 위한 각종 합성비료 사용 증가 및 산업화로

수질이 빠르게 악화되고 있다(김 등, 1995; 윤, 1998; 이 등, 2003; 김 등, 2004; 안 등, 2007). 특히, 농업용 저수지는 이·치수 기능을 고려하여 전국 18,000여개 이상이 축조되어 농업용수의 공급을 목적으로 관리하여 왔으나 본래의 기능을 상실함을 물론 수질 악화가 심각하여 대다수의 저수지가 부영양화 단계를 보이고 있으며 상습적

* Corresponding author; Tel: 042) 821-6408, Fax: 042) 822-9690, E-mail: kgan@cnu.ac.kr

신구저수지의 수질특성 및 LEHA 어류모델을 이용한 생태건강도 평가

이재연 · 이상재 · 한정호 · 이의행 · 최지웅 · 황순진¹ · 안광국*

(충남대학교 생명과학부, ¹건국대학교 환경과학과)

Waterquality Characteristics and Ecosystem Health Assessments Using a LEHA Fish Model in Shingu Reservoir. Lee, Jae-Yon, Sang-Jae Lee, Jung-Ho Han, Eul-Hang Lee, Ji-Woong Choi, Soon-Jin Hwang¹ and Kwang-Guk An* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea; ¹Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

For this study, we collected fishes of four times at the four site during June 2006~September 2007. In the result, the tolerance and omnivore species like a *Carassius auratus* and *Pseudorasbora parva* were largely dominated over all, and the sensitive species was not appeared at all except S4 in Shingu reservoir. This reservoir was appeared the simplified of trophic guild was shown in Shingu reservoir. Demonstrating that the omnivore species was occupied 78% of whole. According to the water chemistry dataset obtained from the Korea Rural community & Agriculture corporation during 2002~2005, the Shingu reservoir showed severe eutrophication and water pollution, therefore the increase of primary production and frequent algal blooms had been occurred. On the other hand, ecosystem health of reservoir was appeared "Fair~Poor", and we judged that eutrophication and water pollution were due to this. Consequently, we thought that interception of nutrients and organic matters from the farmland and village and management of reservoir would be need, after this.

Key words : ecosystem health, fish, agricultural reservoir, eutrophication

서 론

일반적으로 수심이 얇은 호수는 깊은 호수보다 영양염류(N, P) 부하 및 조류에 의한 1차 생산력이 더 큰 것으로 보고된 바 있다(Vollenweider, 1968; 환경부, 2007). 현재 우리나라에서 농업용 저수지는 전국적으로 18,000여개가 분포하고 있으며, 대부분은 생성연도가 오래되고 평균수심이 10 m 이하로서 최근 부영양화 현상이 더욱 가속화되는 것으로 알려져 있다(이 등, 2003; Hwang et al., 2003). 수심이 얇은 농업용 저수지의 수질악화는 인

근에 형성되어 있는 마을과 농경지로부터 유입되는 생활하수 및 영양염류(N, P)가 주요 원인으로 작용하고 있으며, 이로 인하여 저수지내 1차 생산력이 급격히 증가하고 수층내 용존산소 고갈 및 빈번한 수화현상(algal bloom)이 나타나고 있다(최와 김, 2002; 농업기반공사, 2005). 특히 여름철 발생하는 수화현상의 대부분은 남조류에 의한 것으로 이들 남조류의 수화현상은 저수지 내 생태계 먹이사슬의 교란, 시·후각적 불쾌감의 증대, 관개용수로서의 질적 저하를 유발하고 있다(국립환경연구원, 1999).

최근까지의 농업용 저수지와 같은 정수생태계의 연구들에 따르면, 수체의 수질특성 및 건강성 평가지표로서

* Corresponding author: Tel: 042) 821-6408, Fax: 042) 822-9690, E-mail: kgan@cnu.ac.kr

신구저수지 식물플랑크톤성장에 대한 제한 영양염 분석

이재연 · 이상재 · 이재훈 · 배대열 · 최지웅 · 황순진¹ · 안광국*

(충남대학교 생명과학부, ¹진국대학교 환경과학과)

Analysis of Algal Response Effects Using Nutrient Enrichment Bioassays in Shingu Reservoir. Lee, Jae-Yon, Sang-Jae Lee, Jae-Hoon Lee, Dae-Yeul Bae, Ji-Woong Choi, Soon-Jin Hwang¹ and Kwang-Guk An* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea; ¹Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

Nutrient Enrichment Bioassays (NEBs) were conducted in the laboratory during June 22~28, 2006 in order to determine primary limiting factor on the phytoplankton growth. For the NEBs, the water was sampled using a 10 L polyethylene-lined container and dispensed into 2.5 L container in the laboratory. The algal growths response in the control (C) and three treatments of phosphorus (P), 2-fold phosphorus (2P), and nitrate nitrogen (NO₃-N) were monitored during 7 days. In the cubitainers which were spiked as P (T1) and 2P (T2) Chl-*a* concentrations were decreased during the test period and the final concentrations was low than initial values. However, Chl-*a* in the cubitainers which were spiked as NO₃ (T3) and P+NO₃ (T4) showed significant increases compared to the initial values, indicating that in the short-term experiments, nitrogen seemed to be a primary limiting nutrient during the periods of NEBs experiment. Long-term ambient nutrient data of TP and TN, and TN:TP mass ratios, however, showed a potential phosphorus limitation on phytoplankton growth and previous other researchers showed a variations of limiting nutrients by nitrogen or phosphorus depending on the seasons sampled and locations. In this study nitrogen as primary limiting nutrient in the NEBs seem to be an seasonal effect rather than the consistent nitrogen limitation.

Key words : nutrient limitation, algal response, bioassay, water quality

서 론

현재 우리나라의 대부분의 저수지는 부영양 상태를 보이고 있으며, 이들 저수지는 부영양화에 따른 1차 생산력의 증가로 인하여 매년 수화현상(algal bloom)이 반복적으로 나타나고 있다(이 등, 2003; 이 등, 2007). 특히 농업용 저수지는 일반적인 담수호와는 달리 구조적인 폐쇄성을 보이고 있어 정체현상이 뚜렷하며, 수체 내 포함되어

있는 영양염이 저수지 외부로의 방출에 있어 자유롭지 못한 현상을 나타내고 있다(환경부, 2006; 김 등, 2007). 따라서 외부기원 영양염과 내부기원 영양염이 저수지내 지속적으로 축적되는 현상을 보이고 있으며, 이들에 의한 식물성플랑크톤과 남조류의 급격한 성장으로 여름철 상시적인 수화현상이 나타나고 있다(최와 김, 2002; 농업기반공사, 2005). 특히 남조류는 독성물질들을 포함하고 있어 이들이 일으키는 수화현상으로 수생태계 내에 존재하는 생물뿐 아니라, 저수지의 수변구역에 접촉이 가능한 육상

* Corresponding author; Tel: 042) 821-6408, Fax: 042) 822-9690, E-mail: kgan@cnu.ac.kr

Comparison of Four Different Ordination Methods for Patterning Water Quality of Agricultural Reservoirs

Bae, Mi-Jung, Yong-Su Kwon, Soon-Jin Hwang¹ and Young-Seuk Park*

(Department of Biology, Kyunghee University, Seoul 130-701, Korea,

¹Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

We patterned water quality of agricultural reservoirs according to the differences of six physico-chemical environmental factors (TN, TP, DO, BOD, COD, and SS) using four different ordination methods: Principal Components Analysis (PCA), Detrended Correspondence Analysis (DCA), Nonmetric Multidimensional Scaling (NMS), and Isometric Feature Mapping (Isomap). The dataset was obtained from the water quality monitoring networks operated by the Ministry of Agriculture and Forestry and the Ministry of Environments. Chlorophyll- α displayed the highest correlation with COD, followed by TP, BOD, SS, and TN ($p < 0.01$), while negatively correlated with altitude and bank height of the reservoirs ($p < 0.01$). Although four different ordination methods similarly patterned the reservoirs according to the gradient of nutrient concentration, PCA and NMS appeared to be the most efficient methods to pattern water quality of reservoirs based on the explanation power. Considering variable scores in the ordination map, the concentration of nutrients was positively correlated with Chl- α , while negatively correlated with altitude and bank height. These ordination methods may help to pattern agricultural reservoirs according to their water quality characteristics.

Key words : agricultural reservoir, classification, ordination, multivariate analysis, water quality, reservoir management

INTRODUCTION

Water management in agriculture has been focused mostly on the quantitative supply for irrigation without much attention to the quality of the supplied water in Korea. Recently, however, quantitative water supply as well as water quality management of agricultural reservoirs is becoming an important issue to improve quality of agricultural products as well as healthy ecosystems (Nam *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2007). Eutrophication has been one of the major water quality problems in lentic systems including agricultural reservoirs, as it causes turbid water with high amount of algal biomass and poor conditions

to the ecosystem (Portielje and Van der Molen, 1999). Eutrophication results in the irregularity of the nutrient cycles in aquatic ecosystem, the flourishing of microorganisms including phytoplankton, and the increase of organic matter made by the microorganisms as the high amount of nutrition is inflow (OECD, 1982). So figuring out the relationships between related environmental variables and phytoplankton biomass variability is important to provide informative ways for determining water quality criteria and making pollution prevention plans for eutrophic reservoirs (George and Arhonditsis, 2004).

Water quality of reservoirs is influenced by various factors including physico-chemical, hydrological and geological factors. For effective

* Corresponding author: Tel: 02) 961-0946, Fax: 02) 961-0244, E-mail: parkys@khu.ac.kr

농업용 저수지의 수질 예측 모델을 위한 PSO (Particle Swarm Optimization) 알고리즘의 적용

권용수 · 배미정 · 황순진¹ · 박영석*

(경희대학교 생물학과, ¹전국대학교 환경과학과)

Application of Particle Swarm Optimization (PSO) for Prediction of Water Quality in Agricultural Reservoirs of Korea. Kwon, Yong-Su, Mi-Jung Bae, Soon-Jin Hwang¹ and Young-Seuk Park* (Department of Biology, Kyunghee University, Seoul 130-701, Korea; ¹Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

In this study, we applied a Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to predict the changes of chlorophyll-*a* related to environmental factors in agricultural reservoirs in Korean national scale. Data were obtained from water quality monitoring networks of reservoirs operated by the Ministry of Agriculture and Forestry and the Ministry of Environment of Korea. From the database of the monitoring networks, 290 reservoirs were chosen with variables such as chlorophyll-*a* and 13 environmental factors (COD, TN, TP, Altitude, Bank height, etc.) measured in 2002. Based on Carlson's trophic status index, reservoirs were divided into five groups, and most agricultural reservoirs (TSI_{CHL} 64.1%, TSI_{TP} 75.5%) were in the eutrophic states. The groups were discriminated with environmental variables, showing that COD, DO, and TP were important factors to determine the trophic states. MLP-PSO (Multilayer perceptron (MLP) with PSO for the optimization) was applied for the prediction of chlorophyll-*a* with environment factors, and showed high predictability ($r=0.83$, $p<0.001$). Additionally, the sensitivity analysis of the MLP-PSO model showed that COD had the strongest positive effects on the concentration of chlorophyll-*a*, and followed by TP, TN, DO, whereas altitude and bank height had negative effects on the concentration of chlorophyll-*a*.

Key words : agricultural reservoir, water quality, trophic status index, particle swarm optimization, discriminant analysis

서 론

우리나라 대부분의 저수지는 여름철 부영양화로 인해 녹조현상이 빈번하게 일어나고 있다 (농림부, 2000). Rawson (1995)에 따르면 호소의 깊이가 얕을수록 부영양화가 쉽게 발생하는데, 우리나라 저수지의 대부분이 수심이 얕고 노후화되어 있기 때문에 (Hwang *et al.*, 2003)

부영양화가 쉽게 되며, 저수지의 노후화로 인해 침전물로부터 영양염류의 용출 가능성이 증가하게 되어 부영양화의 가능성이 높아지는 것을 의미한다.

Harper (1992)에 따르면 저수지 내 제한 영양염인 인의 유입 증가는 저수지 부영양화를 발생시킨다. 저수지의 부영양화는 저수지 내 식물플랑크톤을 증가시켜 저수지 투명도를 감소시키고, 저층의 식물플랑크톤 부패로 용존 산소가 감소하는 등의 수질 변화를 초래한다 (신 등,

* Corresponding author: Tel: 02) 961-0946, Fax: 02) 961-0244, E-mail: parkys@khu.ac.kr

Korean J. Limnol. 41 (3) : 311~319 (2008)

저온기 부영양 수계 규조군집의 유입능

윤성애 · 김난영 · 김백호 · 황순진*

(건국대학교 생명환경과학대학 환경과학과)

Relative Immigration Activity of the Hibernial Diatom Community in Eutrophic Waters. Yoon, Sung-Ae, Nan-Young Kim, Baik-Ho Kim and Soon-Jin Hwang* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

To understand the relative immigration activities (RIA) of hibernial diatom community in Lake Ilgam (at the station with and without macrophyte) and River Han (at the station with different current and nutrient), a natural and artificial bed substrate was deposited from 15 to 29 January 2008. For the study period, both waters comprised huge biomass of diatom, over 75% of total abundance. Nutrients in water column, ash-free dry matter (AFDM) and chlorophyll-*a* (Chl-*a*) concentration in substrates were decreased with increasing of current in rivers, while in lakes the macrophyte largely affected the diatom community and water quality. Algal RIA in rivers was high at stations with high concentration of nutrient, AFDM and Chl-*a*, and in high nutrients and no macrophytes in lakes, respectively. The species showing a higher RIA was *Nitzschia amphibia* in rivers and *Aulacoseira italica* in lakes, while the dominant species were *Navicula* sp. in rivers and *Syndera acus* in lakes, suggesting no relationship between water algal biomass and its RIA. These results suggest that the RIA of stream diatom community depends exclusively on the current, while the planktonic diatom in lake was of the macrophyte.

Key words : immigration, hibernial diatom community, artificial substrates, stream, lake, macrophyte

서 론

규조류는 수생태계 1차 생산자로서 생물학적 요인과 이화학적 요인에 의해서 독특한 군집을 형성한다(Wetzel, 1996; Marcus, 1980). 수중 내 규조류의 군체화는 박테리아와 함께 초기 microfouling process에 관여하는데(심 등, 1998), 매우 짧은 시간 내에 기질에 부착하여 군체를 이루고(Sieburth, 1975; Cuba and Blake, 1983; 강 등, 1998), 이들은 기질의 1차 생물막(biofilm)으로서 대형 고착생물의 먹이원 또는 새로운 미소서식지의 형성을 유도한다(Caron and Sieburth, 1981; Meenakumari and

Nair, 1994). 대개 군체화 초기에는 박테리아와 규조류가 주로 우점하는데(Callow, 1993), 유속이나 다른 환경요인에 의하여 규조군집 특성이 결정되며, 이들의 유입능에 따라 군집의 천이과정이 결정된다(최 등, 1999).

조류의 유입능은 수중에 분포하는 식물플랑크톤이 기질로 부착되는 상대적인 양 또는 정도를 의미하며, 주로 수중 내 현존량과 밀접한 관계를 갖기 때문에, 조류의 현존량에 영향을 주는 요인들, 1) 유속 및 영양염 등의 환경적 요인, 2) 조류를 포식하거나 분해하는 생물적 요인, 그리고 3) 조류 종간의 먹이에 대한 경쟁 및 세포형태 등에 의하여 크게 좌우된다(Stevenson and Peterson, 1989).

또한 하천에서 조류유입능은 유속, 영양염 또는 빛에

* Corresponding author: Tel: 02) 450-3748, Fax: 02) 456-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

Korean J. Limnol. 41 (3) : 338-347 (2008)

저온기 부영양 수계의 구조발생에 대한 한국산 논우렁이의 섭식특성

유 영 훈 · 김 백 호 · 황 순 진*

(건국대학교 생명환경과학대학 환경과학과)

Grazing Characteristics of Native Snail *Cipangopaludina chinensis malleata* on the Hibernial Diatom Bloom in Eutrophic Lake and Stream. Yoo, Young-Hun, Baik-Ho Kim and Soon-Jin Hwang* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

Grazing rate (GR) and feces production (FP) of freshwater snail *Cipangopaludina chinensis malleata* on two hibernial diatom communities were examined in a laboratory. Snail with the similar size (4.2~5.8 cm) were collected from the Gunsan and Okgu district (Jeonbuk), transferred to the artificial management system in laboratory, and starved for 3 day before the experiment. The feeding experiments were conducted at various conditions such as passage of time (0, 1, 4 and 7 hr), snail density (0.0, 0.5, 1.0, 2.0 and 4.0 ind. L⁻¹) and kinds of prey (cold lake and stream water). One prey used in this study is the water of Lake Ilgam, the other is that of Han river. Lake Ilgam water was dominated by *Synedra ulna* (69.1%) and *Scenedesmus* sp. (6.6%), while Han river was by *Asterionella formosa* (69.4%) and *Diatoma vulgare* (27.7%). With the increment of snail density and time, the Chl-*a* concentration of two experimental waters were clearly decreased. Chl-*a* of Han river rapidly was decreased after 1 hour of snail treatment, while that of Ilgam lake was decreased after 4 hour. On the passage of time, a highest GR (1.94 L g⁻¹ h⁻¹) showed at 1 hr, and then, decreased gradually to 0.04 L g⁻¹ h⁻¹ by 7 hr. The highest FP (0.11 mg L⁻¹) showed at 7 hr. These results indicate that native snail *Cipangopaludina chinensis malleata* may be applied as a potential bio-filter to control diatom blooms in the cold lake and stream.

Key words : freshwater snail, *Cipangopaludina chinensis malleata*, hibernial diatom blooms, grazing characteristics, feces production

서 론

수계의 부영양화는 물의 효율적 이용과 생태계의 건강성을 저해하는 조류의 비정상적인 대발생을 초래한다. 또한 조류의 대발생은 저층의 산소고갈과 저서생물을 고사시키며 독성물질을 용출시켜 용수로서의 기능을 상실하게 한다(이 등, 2003). 소형 저수지인 일감호는 1975년

이후부터 유입되는 영양염에 대하여 관리가 이루어지고 있으나, 유기물과 영양염을 다량 함유한 퇴적층으로 인해 고온기마다 남조류(*Microcystis aeruginosa*)가 우점하는 등의 부영양화의 특징을 가지고 있다(황 등, 2008). 한강의 중·하류 또한 생활하수 및 비점오염원으로 부영양화된 팔당호의 영향을 크게 받고 있다. 또한, 하천수로 내수중보, 교각 등 시설물의 증가로 정체수역이 많아지고 있으며 바닥에 쌓인 유기물로 인한 악취와 미관상 좋지

* Corresponding author: Tel: 02) 450-3748, Fax: 02) 456-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

북한강 수계에 분포하는 말조개의 남조류 섭식특성

이 연 주 · 김 백 호 · 황 순 진*

(건국대학교 생명환경과학대학 환경과학과)

Grazing Effects of Freshwater Bivalve *Unio douglasiae* of the North Han River on the Cyanobacterial Bloom Waters. Lee, Yeon-Ju, Baik-Ho Kim and Soon-Jin Hwang* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

A freshwater bivalve (*Unio douglasiae*) was examined to assess the filtering rate (FR) on the cyanobacterial assemblage in a hypertrophic lake. Animal *U. douglasiae* used in the present study was collected using a hand-operated dredge from the North Han River (Gapyeong, Korea). The FR was measured at different feeding conditions such as feeding interval (1, 4, 7, and 24 h), mussel size (4.2~8.1 cm, n=23), prey concentration (506.7, 409.8, 327.5, 199.7 and 88.6 $\mu\text{g L}^{-1}$), and mussel density (0.5, 1.0 and 1.5 indiv. L^{-1}). On the applied feeding interval, the maximum FR ($0.21 \text{ L g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) and minimum feces production (FP, $0.12 \text{ mg g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) were observed at 1 and 24 hr, respectively. Both weight-based FR and FP were not correlated with the mussel size, and the values lied in a limited range with some degree of variation. Likewise, no significant relations between FR and FP were observed in the mussel size. The FR values were negatively correlated with food concentration, but positively with FP. For the food concentrations, the maximum FR ($0.41 \text{ L g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) and FP ($0.16 \text{ mg g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) were $88.6 \mu\text{g L}^{-1}$ and $327.5 \mu\text{g L}^{-1}$, respectively. These results indicate that *U. douglasiae* collected from the North Han River, although the filtering rate were slightly less than Keum River mussel, may be applied as a strategic bio-filter to mitigate cyanobacterial bloom in eutrophic lake.

Key words : freshwater bivalve, *Unio douglasiae*, cyanobacterial bloom, grazing rate, feces production

서 론

고온기 부영양 호수에서 남조류 대발생은 21세기 환경 문제의 새로운 화두이며, 사회-경제 분야에 미치는 영향을 정확히 추정하는 것조차 불가능할 정도이다. 특히 상수원으로 이용되는 호수에서의 조류발생은 1차적으로 경관적 불쾌감은 물론 각종 이, 취미 발생으로 인한 소비자의 불만을 유발하고, 처리과정에 사용되는 약품의 반복적 사용으로 인하여 2차 오염, 생태계 파괴 및 비경제적 정수과정 등 악순환이 매년 계속되고 있다(한강수계관리

위원회, 2004). 최근 호수내 조류를 포함한 다량의 유기물을 제거할 수 있는 다양한 물리-화학적 방법들이 개발되고 있으나, 이들의 단점을 보완할 수 있는 생태친화적이고 지속 가능한 기술개발에 대한 요구가 증가하고 있다(박 등, 2008).

일반적으로 패류는 식물플랑크톤에 대해 높은 섭식능(Heath *et al.*, 1995; Hwang, 1996; Soto and Mena, 1999)과 수환경의 다양한 질적 변화·부영도 증가, 엽록소 감소, 플랑크톤 감소(Leach, 1993; Nicholls and Hopkins, 1993)를 유도하기 때문에 종종 오염된 수계의 수질개선을 위한 유용생물로 이용되고 있다(Reeders *et al.*, 1989,

* Corresponding author: Tel: 02) 450-3748, Fax: 02) 456-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

부 록 3



연구진 회의 회의록

부록 3: 연구진 회의 회의록

1. 1차년도 1차 연구협의회

제목	1차년도 1차 연구과제 협의회
일시	2006년 8월 23일
장소	건국대학교 생명환경과학대학
참석인원	<p>건국대 : 황순진, 김백호, 박명환, 박구성, 손주연, 엄성화, 김난영 아주대 : 박상규, 주성배 한국농촌공사 농어촌연구원 : 엄한용 한양대 : 신경훈, 홍성진, 이연정, 김민섭 충남대 : 안광국, 이재연 경희대 : 박영식, 권용수, 남형규, 배미정 (주)아셈 : 박선구, 남미아 대진대학교: 김보열 농림부 시설관리과 : 박종훈 농림부기술관리센터 : 서형석</p>
회의내용	<p>황순진 교수 - 농업분야에 활용 가능한 기술적 과제수행과 학술적인 분야로써의 연구가 되어야 할 것 박종훈 사무관 - 기존의 농업용 저수지 수질개선 방향은 수동적 진행, 농림부, 환경부, 지자체등과 연관성 없이 관리 수질조사 횟수와 지점이 적음. 또한 기존에 개발된 수질개선 특히 공법 적용이 힘들어 - 농림부와 환경부 공동조사, 저수지 수질문제 파악이 년 말 시작될 것이고, 년4회 조사와 지점확대(150개정도), 특허공법에 대한 매뉴얼 작성, 예산액 증액이 될 것 - 생물이용이 가장 효율이 낮으므로 자연정화 기법으로 적용해야 할 것이고, 외국 연구사례를 국내에 적용하는 방향으로, 외국 적용 중에 있는 것과 없는 것으로 구분하여 1년 동안 조사 정리해서 2년간 적용기간을 갖는 게 좋을 것 - 어류와 같은 경우는 전국적으로 적용이 가능하도록 하는 방법을 연구, 현장성 적용이 가능하도록 하는 것이 중요할 것 서형석 간사 - 연구는 실용화에 목적을 뒤야 할 것. 농업 수질관리 방법론의 선행연구를 통해 기여부분이 있을 것으로 기대. 연구기여 목표점이 어느 정도인지 설정하고 목표를 향해서 연구기간동안 노력바람 - 연구평가방법에 맞추어 연차실적보고서를 엄두에 두고 연구 진행. 특히 참여기업인 아셈은 연구를 통해서 가져갈 수 있는 부가가치가 무엇인지 고려 해보고, 이 후 기술에 대한 기술료가 아깝지 않을 정도로 산업화 과정에 고민 연구 방향설정에도 기여 바람 황순진 교수 - 연구 초기 단계이고 하고자 하는 의욕이 커서 여러 가지가 병행해서 진행 된 것 같음. 연구의 틀을 목적 달성에 맞도록 협의 하도록 할 것. 문제점에 대한 검토로 요망 - 조사 중 안전사고에 유의 해주기 바람 - 10월 말 워크샵이 있을 예정이며 오늘 나온 문제 핵심을 심도 있게 토의 예정 - 연구과제 용 웹하드를 개설하여 필요한 정보를 서로 공유 - 신구저수지에 현재 남조류가 발생이 되지 않아서 site의 이용 여부 결정</p>

제목	1차년도 1차 연구과제 협의회
	<p>- 아썸에서 설치하기로 한 인공섬은 일정대로 설치하도록 함.</p> <p>안광국 교수</p> <p>- 메소코즘은 close계이기 때문에 옮기지 말고 식물 net를 이용하여 농도구배를 맞춰서 하는 것이 어떨지? 지금은 장마로 인한 희석 효과로 인한 것이니 11월까지 조금은 기다려 보는 것도 괜찮을 것 같음.</p> <p>신경훈 교수</p> <p>- 영양염을 넣어서 남조류가 발생하게 하는 것도 한 방법임.</p> <p>황순진 교수</p> <p>- 연구진 내에서 한 번 더 논의 후에 결정. 유사시 옮기는 것이 가능하니까 논의 후 행동. 특히나 논문 등 신경 써 정량적인 평가에 대비하고, 특히에 관련된 비용은 지원이 되므로 각 연구진에서는 신경을 써주셨으면 함. 2차 협의회에서는 각 연구진 별로 논문 방향을 발표 해주셨으면 또한 내년 ISRL에서 발표할 수 있도록 준비 부탁</p>

2. 1차년도 2차 연구협의회

제목	1차년도 2차 연구과제 협의회(워크샵)
일시	2006년 10월 27~28일
장소	충주 수안보 한화콘도
참석인원	<p>건국대 : 황순진, 김백호, 박명환, 박구성, 손주연, 엄성화, 김난영 한국농촌공사 농어촌연구원 : 엄한용, 이복자 한양대 : 신경훈, 이연정, 김민섭 충남대 : 안광국, 이재연, 이상재 경희대 : 박영석, 남형규 (주)아쌈 : 박선구, 남미아, 조인기 농림부 : 서형석, 강동현 자문위원 : 김경만, 엄동혁</p>
회의내용	<p>황순진 교수 - 신구저수지에서 과거에 발생했던 Microcystis bloom이 올해는 발생하지 않았고, 내년에도 이와 같은 상황이 발생 할 수 있으므로 신구에 설치한 메소코즘을 올해 bloom이 발생한 인근 저수지로 이동하는 문제에 대해서 생각해봐야 함 - 줄새우를 연구대상으로 포함하여 유용생물로 연구해야 할 것인가? 어류 실험은 지속해야 할 것인지 검토바람 - 유용생물에 대한 인공식물섬의 적합성에 대한 data조사가 필요함.</p> <p>안광국 교수 - 메소코즘은 그대로 유지하면서 정기조사 하는 것을 계속 유지하는 것이 좋을 것. 녹조제어 관련 실험은 메소코즘의 형태로 각 연구기관별로 실험을 하여, 이후에 bloom이 발생 했을 때 적용하면 좋을 것.</p> <p>김백호 박사 -메소코즘 내에 bloom이 발생하는 곳의 퇴적토를 넣어서 bloom을 발생시켜서 실험 하는 것도 한 방법.</p> <p>김경만 (자문위원) - 농업용수 수질은 TP, COD 중점이지만 시각과 심미적인 문제를 고려해야 할 것. 더불어 농업용수 수질관리는 목표는 녹조의 저감에 있음.</p> <p>신재기 (자문위원) - 농업용저수지는 탁도 측정이 필요. clay 등의 콜로이드 상태는 연중 부유하므로 입자분석이 필요.</p> <p>안광국 교수 - 생물을 이용한 녹조제어이므로 줄새우를 연구하는 것은 큰 문제가 되지 않을 것으로 사료. 어류는 top-down을 이용한 생물조절에 이용하는 쪽으로 생각해보는 것이 좋을 것.</p> <p>엄한용 과장 - 인공섬의 적합성 연구는 한 팀에서 하는 것보다는 연구진행에 맞추어 전체연구팀이 함께 진행하여 해당 항목을 조사하는 것이 좋을 것.</p> <p>신경훈 교수 - 조사지점을 전부 동일하게 하는 것은 생물마다 특성이 다르고, 특히 이동생물과 동위원소 같은 경우 특성이 다르기 때문에 전부 같은 사이트를 하는 것은 어려움. 연구의 전체적인 측면에서 볼 때 중복되는 사이트를 2~3개 하는 것은 좋을 것.</p> <p>황순진 교수 - 연구진 의견과 자문 의견을 종합한 결과 연구목적이 녹조가 아닌 수질개선에 있으므로, 신구저수지를 그대로 유지하도록 결정 - 유용생물 후보로 줄새우를 포함하여 연구 - 건국대에서의 어류연구는 지양하고, 충남대에서 모두 수용 - 인공식물섬의 정량적 효과 평가를 위한 분석도 실시</p>

3. 1차년도 3차 연구협의회

제목	1차년도 3차 연구과제 협의회
일시	2007년 1월 8일
장소	건국대학교 생명환경과학대학
참석인원	<p>건국대 : 황순진, 김백호, 박명환, 박구성, 손주연, 엄성화, 김난영, 김건희 아주대 : 박상규, 남기정 한국농촌공사 농어촌연구원 : 엄한용, 이복자 한양대 : 신경훈, 이연정, 김민섭 충남대 : 안광국, 이재연 경희대 : 박영석 (주)아셈 : 박선구 농림부 : 서형석</p>
회의내용	<p>황순진 교수 - 각 연구진의 발표는 현재 진행사항과 미진행상을 중심으로 발표, 연구에 대한 논문 게재 예정에 대해서도 발표바람. - 3월 중순까지 각 기관별로 15~20페이지정도로 연차보고서를 작성요망. - 1차년 연구가 막바지이므로 연구 미 진행 사항에 해결에 노력 - 마지막 워크샵에서는 자문위원 초청할 계획임 .</p> <p>박상규 교수 - 동물이나 식물플랑크톤 자료를 받는 것이 가능한가요?</p> <p>황순진 교수 - 논문 작성 시 동물이나 식물플랑크톤 자료가 필요하시면 요청 시 제공해 드리겠음.</p> <p>엄한용 과장 - 조류 중은 어떤 것을 사용하셨는지?</p> <p>김백호 박사 - 현장 퇴적물을 떠다가 실험실에서 Bloom을 일으켜서 실험에 사용하였음.</p> <p>신경훈 교수 - 패류가 오래 살 수 있는가? 남조류를 넣었을 경우 오래 사는가?</p> <p>김백호 박사 - 먹이를 주지 않은 상태의 실험실 조건에서 3개월 이상 살아 있음. 높은 농도의 남조류가 있는 물에서는 오래 살지 못하였으나, 자연조건에서는 실험실보다 오래 살 수 있을 것으로 판단.</p> <p>안광국 교수 - 재첩은 하천의 모래에서 주로 서식하고, 말조개는 유수가 적은 곳에서 서식하므로 말조개를 이용하는 것은 괜찮은 것으로 생각됨.</p> <p>황순진 교수 - 필터링하는 생물 중에 패류가 필터링 rate가 가장 좋기 때문에 패류를 선정하였음.</p> <p>엄한용 과장 - 패류의 서식 공간 차이가 있지 않은가?</p> <p>김백호 박사 - 접촉공간이 중요하고, 수심에 따라 생존율이 다르게 나타난다. 현재 수심별로 조류 섭식을 실험을 하고 있음.</p> <p>이복자 연구원 - 패류가 환경에 의해 죽었을 경우 제거하는 것이 중요한데, 사망에 대한 요인과 대책이 필요할 것 같음.</p> <p>김백호 박사 - 일단은 패류를 이용하고 빼낼 것이나, 적응을 잘하면 두고 이용할 계획임. 현재 pallet의 처리 방법을 고려중임.</p>

제목	1차년도 3차 연구과제 협의회
	<p>황순진 교수 - 자연계에서는 새우등 육식성 종들에 의해 섭식됨으로 100%오염원이 되기는 어려울 것을 생각함. 여주 농장에 pond를 조성해서 실험을 하는 것도 고려중에 있음.</p> <p>박상규 교수 - 2차 년도에 다른 Zooplankton ¹³C와 비교해 봤으면 좋을 것 같음.</p> <p>안광국 교수 - 국내 육수학회 논문 Data는 충분히 축적하였고, 외국논문 게재 시 타 연구진들의 자료를 받으면 도움이 많이 될 것임.</p> <p>황순진 교수 - 본 과제 연구결과는 논문 자료로 요청 시 전체가 공유 할 수 있도록 하는 것이 좋을 것임.</p> <p>박영석 교수 - 메소코즘의 Data logger설치하여 수온의 지속적인 변화를 살펴보려고 함.</p> <p>신경훈 교수 - 수온과 광량까지 측정가능 한 기계가 있고, 지속적인 Data가 있으며 좋을 것 같음.</p> <p>이복자 연구원 - 인공식물서식처 시설 등을 조사하여 미생물 증식의 환경인자 조사와 기본 수질 조사항목을 24시간 동안 조사하고 있음. 오염물질과 미생물활성과의 상호관계가 미비하기 때문에 중점을 주지는 않고 고려하고는 있으나, 유용생물이 조사되면 유용생물로 실험하는 것이 좋을 것 같음. 수질개선의 기준은 무엇으로 할 것인가?</p> <p>황순진 교수 - 투명도와 Chl-a로 하기로 전체적으로 결정.</p> <p>이복자 연구원 - 식물섬, 인공서식처의 다양화에 대한 검토 중이며 인공식물섬의 조성하는 이유는 수위의 변동이 심한 저수지는 저수지 주변에 식물군락의 형성이 어렵기 때문이며, 탁도가 상대적으로 높아 침수식물이 발달이 되지 않기 때문임.</p> <p>신경훈 교수 - 탁도보다는 수심이 1m 이하인 경우는 침수식물이 많음. Chl-a 함량이 높은 곳에는 잘 자라지 않을 것임.</p> <p>박선구 소장 - 식물을 수중으로 내려서 실험 계획 중이며 서식처에 대한 평가를 고려중이다. 서식처와 관련하여 자연서식처에 대한 인공서식처와의 비교를 검토하고 있다.</p> <p>황순진 교수 - 유역평가는 따로 이 과제에서 할 필요가 없을 것 같고, 저수지내에서 정리하는 것이 좋겠음. 서식처 조성과 다른 생물과의 관계에 중점을 두고 효과를 정량화 하는 부분이 필요.</p> <p>황순진 교수 - 먹이질과 에너지 흐름에 대하여 현장이나 메소코즘에서 일정을 전체 연구진이 맞춰서 진행 할 수 있도록 하는 것이 좋을 것 같음.</p> <p>안광국 교수 - 연초는 각자 실험에 임하고, 후반기는 전체연계해서 할 필요가 있다.</p> <p>황순진 교수 : 연구책임자 - 3월 중순쯤 마지막 4차 연구 협의회가 있을 예정 1차 연차보고서와 2년차 계획서를 같이 첨부바람. - 또한 마지막 협의회이전에 논문과 관련된 부분에서 필요한 Data는 미리 요청, 논문 투고 준비와 특히 부분에도 신경을 써 주시기 바람</p>

4. 1차년도 4차 연구협의회

제목	1차년도 4차 연구과제 협의회 (워크샵)
일시	2007년 3월 29~30일
장소	대천 한화콘도
참석인원	<p>건국대 : 황순진, 김백호, 박구성, 김난영, 김건희, 이연주 아주대 : 박상규, 남성진 한국농촌공사 농어촌연구원 : 엄한용, 이복자 한양대 : 신경훈, 이연정, 김민섭, 홍성진 충남대 : 안광국, 이재연, 이재연 경희대 : 박영석, 배미정 (주)아셈 : 권오병, 박선구 자문위원 : 최광순</p>
회의내용	<p>신경훈 교수 - 메소코즘 실험 시 영양염을 넣어서 인공 bloom을 일으키는 건 어떤지? 자연 상태 보다 높게 만들어서 좀 더 강한 것을 볼 수 있을 것 같은데?</p> <p>김백호 박사 - 실험 기간 동안 Control이 유지되는 것을 살펴보면서 경우에 따라서 넣어 실험 하면 될 것 같습니다.</p> <p>최광순 박사 - 실험에 봉어를 쓴 이유가 따로 있는가?</p> <p>김백호 박사 - 외래종이 아닌 국내종이고, 많이 분포하고 쉽게 구할 수 있기 때문에 사용하였다. 저서성 어류를 사용하면 암모니아 증가로 N/P의 변화를 일으켜 식물플랑크톤의 종천이 현상을 일으킨다.</p> <p>최광순 박사 - 벚지이나 보릿지도 효과가 있는가? 자연계에 그냥 노출된 경우도 제거 기능을 하는가?</p> <p>김백호 박사 - 효과가 있는 것으로 알려져 있지만, 큰 효과를 보기 위해서는 추축을 해야 할 것 같습니다.</p> <p>신경훈 교수 - 실험기간은 각 팀들이 기간을 서로 상의하여 조정할 필요가 있을 것 같습니다.</p> <p>최광순 박사 - 말조개가 사는 수심은 어느 정도 인가? 경제성은? 그물망을 띄워서 설치 할 경우 성장이 잘 되는가요?</p> <p>김백호 박사 - 2~4 m정도까지 가능하며, 경제성은 아직 없는 것으로 생각된다. 수중에 띄우는 경우 장기간은 어려울 것 같습니다.</p> <p>박영석 교수 - 패류(말조개)의 생활사 등이 알려져 있는가?</p> <p>김백호 박사 - 학문적으로 대략적인 것은 알려져 있으나, 말조개에 대한 생활사는 확인할 필요가 있다.</p> <p>박영석 교수 - 전체적으로 공유할 수 있는 자료는 공유하면 좋을 것 같다.</p> <p>황순진 교수 - 박교수팀에서 양식을 만들어서 공유하고 필드 자료에 관련해서 모으면 좋을 것 같다. 2차년도 실험과 샘플링은 거의 같이 이루어질 것으로 생각되며, 가장 좋은 날</p>

제목	1차년도 4차 연구과제 협의회 (워크샵)
	<p>짜로 서로 맞추어서 하는 것이 좋겠습니다.</p> <p>박상규 교수 - 2차 년도에 다른 Zooplankton ¹³C의 비교와 한양대와 공유해서 자료를 분석하면 좋을 것 같습니다.</p> <p>신경훈 교수 - 샘플을 주시면 분석 가능한 범위 내에서 도와 드리겠습니다.</p> <p>최광순 박사 - 서식처 개발에 대한 연구인데, 풍력장치를 사용한 이유가 부적합한 것 같은데, 서식처의 유영생물에 영향을 명확히 해야 할 것 같습니다.</p> <p>황순진 교수 - 수질개선보다 서식처에 대한 연구가 더 필요할 것 같고 미생물과 동물플랑크톤 조사가 좀 더 이루어져야 할 것 같습니다.</p> <p>박선구 소장 - 패류 등 유영생물이 정해지면 그것에 맞게 서식처의 조정과 연구를 할 예정입니다.</p> <p>엄한용 차장 - 인공 식물섬 부채 아래에 상당량 붙어 침수가 발생하였는데 부착생물에 대한 정밀 분석도 할 예정입니다.</p> <p>박영석 교수 - 계절별로 부표아래의 변화를 관찰해보면 정말 좋을 것 같다. 그리고 아래부표 조사 자료를 이용하며 서식지 적합성을 평가하는데도 이용할 수 있을 같으나, 지금의 자료는 이용하는데 조금 미약한 부분이 없지 않다.</p> <p>황순진 교수 - 2차 년도에는 수질보다는 유영생물에 도움이 되는 서식처 개념에 좀 더 초점을 맞출 필요가 있을 것 같습니다.</p> <p>신경훈 교수 - 먹이망 전체에 걸쳐 확인 하려면, 전체적으로 실험 일정을 맞추어 줄 필요가 있고, 특히 각 영양단계의 생물군에 대한 정보가 많이 필요하기 때문에 도움이 많이 필요하다.</p> <p>신경훈 교수 - 퇴적물의 유기물 흡수는 효율이 10%정도이고, 섭식된 종 조성을 확인하기 위해서는 위 소화물을 확인해야 하는데 어려움이 있기 때문에 동위원소를 사용한다.</p> <p>최광순 박사 - 가능한 한 중복되는 것이 없도록 하고 서로 공유하는 것이 필요할 것 같고, control의 N, P농도가 빠진 것 같습니다.</p> <p>안광국 교수 - 농도는 신규저수지 원수 농도의 2배 A정도를 넣어 주었다.</p> <p>박영석 교수 - 지수가 저수지에 대해서 만들어진 것인지? 하천지수를 저수지 지수로 사용하는데 무리는 없는지?</p> <p>안광국 교수 - 동일한 지수를 사용하였는데 신규저수지는 낮은 수심이고 외각부분은 1m정도이고 사이트가 작기 때문에 큰 의미가 없기 때문에, lotic ecosystem을 사용하였다. lentic은 수심이 15m이상인 경우에 사용한다.</p> <p>김백호 박사 - 줄새우가 남조의 어느 종을 가장 잘 먹는지 종에 대한 자세히 볼 필요가 있다.</p> <p>황순진 교수 - 충남대는 어류에 관련한 연구인데, 줄새우에 중점이 있는 것이 아닌지?</p>

제목	1차년도 4차 연구과제 협의회 (워크샵)
	<p>안광국 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 생물조절의 한 방편으로 어류를 조절함으로 하위 단계인 줄새우의 생물량을 조절하는 방법을 이용하는 것이다. 신규 동자개는 줄새우를 대량 섭식하기 때문에 동자개와 줄새우를 동시에 넣어서 실험을 하고 있다. <p>김백호 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 줄새우의 자연상태 밀도 확인 및 남조류 섭식 효능에 대하여 재확인 필요하다. <p>최광순 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 외부 행정은 성과가 눈에 보여야할 필요가 있으므로, 목표를 구체적으로 세우고 실험을 할 필요성이 있다. <p>황순진 교수 : 연구책임자</p> <ul style="list-style-type: none"> - 연구 결과 자료 중 전체가 공유해야 할 자료는 박영석 교수님께서 데이터베이스를 구축하셔서 공유하도록 해주시기 바람 - 2차년도 연구목표를 연구초점과 명확하게 조명하여 재조정 - 논문, 특허(실적관리)에 지속적으로 관심 - 2차년도 현장 메소코즘 실험과 관련하여 실험일정과 계획 등을 2차년도 1차 협의회가 4월 말이나 5월 초에 있을 예정.

5. 2차년도 1차 연구협의회

제목	2차년도 1차 연구과제 협의회
일시	2007년 5월 28일
장소	건국대학교 생명환경과학대학
참석인원	<p>건국대 : 황순진, 김백호, 박명환, 박구성, 김난영, 김건희, 이연주 아주대 : 박상규 한국농촌공사 농어촌연구원 : 엄한용, 이복자, 송영희 한양대 : 신경훈 충남대 : 안광국 경희대 : 박영석 (주)아셈 : 박선구</p>
회의내용	<p>황순진 교수 - 건국대에서 2주마다 정기조사를 하고 있는데 표층에 한정된 조사로 자료가 좀 부족한데 수심별로 하면 좀 더 좋을 것 같아서 고려중에 있다.</p> <p>박영석 교수 - 신규저수지 평균 수심 변동을 알 수 있는지?</p> <p>엄한용 차장 - 대부분 조건표를 가지고 있기 때문에, 저수지 조건표가 있는지 알아보겠다. 물 사용시기에는 계속해서 조사가 이루어지기 때문에 자료가 있을 것으로 생각되며, 퇴적량은 20년 기준 준설을 계산한다.</p> <p>황순진 교수 - 신규저수지 상류에 측사가 있지만 처리 시설이 확실하게 만들어져 있다. 그래서 남조가 안 뜨는 이유가 될 수 있는 것 같다. 신규저수지 조사는 한양대와 건국대가 날짜를 맞췄으면 좋겠다.</p> <p>박영석 교수 - 근래에 측정기를 설치하여 수온과 수심 등을 지속적으로 모니터링을 할 예정이다.</p> <p>안광국 교수 - 수온변화로 무엇을 보려고 하는지?</p> <p>박영석 교수 - 2주 간격의 저수지 조사는 저수지내 연속적인 변화를 보기에는 다소 어렵기 때문이다.</p> <p>박상규 교수 - 지방산 분석과 관련한 것은 메소코즘을 한양대와 맞춰서 진행하면 좋을 것 같고, 풍년새우를 확보하여 키우고 있고, 남세균을 먹여서 얼마나 먹는지 실내 실험을 진행할 예정이다</p> <p>황순진 교수 - 후보 중으로 생각하는 것이므로 다음 2차 워크샵에서 결과를 보여주시면 좋을 것 같다. 한양대에서 수중, 퇴적 탄소 측정을 격주로 할 수 있는지?</p> <p>신경훈 교수 - 시간과 금액이 많이 들기 때문에 격주 샘플링은 힘든 점이 있다. 퇴적물을 샘플링 해주시면 분석은 어느 정도 가능한 합니다.</p> <p>황순진 교수 - 식물섬의 효과에 대한 정량화를 굳이 다른데서 하지 말고 메소코즘 실험 할 때, 메소코즘 한 부분에 넣어서 하는 것도 가능하고, 실험을 같이 하면 다른 유용생물과의 비교 자료를 얻을 수 있으므로 같이 실험을 수행하기 바란다.</p> <p>엄한용 차장 - 식물 실험에는 오래 시간이 필요하므로 단기간에 하는 메소코즘과 병행하는 것은 약간의 문제가 있을 것 같은데, (주)아셈 측과 논의를 해보겠다. 미생물 총량 측</p>

제목	2차년도 1차 연구과제 협의회
	<p>정을 하려고 하고 있으며, 수중 침수 식물을 위한 서식처를 만드는 것도 고려중에 있다.</p> <p>황순진 교수 - 이론과 실재는 좀 다르므로 서식처에 대한 기술이나 정보 획득은 3년 동안 어려움이 있을 수도 있으므로, 인공 식물섬의 효과를 잡는 것과 서식처와 관련하여 유용생물을 연결 하는 방안을 고려하자.</p> <p>김백호 박사 - 식물에 따른 서식환경 자료를 모으는 것이 필요할 것 같다.</p> <p>박영석 교수 - 서식처 적합성 조사에 식물의 자료는 필요한데, 아쌈, 농촌공사에 자료가 있는지?</p> <p>박선구 소장 - 인공 식물섬에 이용한 식물들에 대한 기본적인 사항(생물량, TP 등)은 가지고 있다.</p> <p>황순진 교수 - 자료의 종합에 대해서는 여러 생각이 필요하고, 아쌈, 경희대, 농촌공사팀 간에 상의를 하기 바라고, 각 식물에서 서식하는 미소생물과 이들의 기능의 특이성을 찾기 바란다.</p> <p>황순진 교수 - 충남대는 새뱅이와 송사리를 가지고 실험을 새로 실험하여, 효과가 상당히 좋게 나왔는데 다른 팀에서 검증하는 것에 대하여 어떻게 생각들 하시는지?</p> <p>김백호 박사 - 후보종은 많을수록 좋고, 다른 팀에서 검증하는 것도 좋을 것 같고, 충남대에서도 다시 한 번 해주시면 좋을 것 같다. 어류와 패류를 동시에 넣어서 효과를 보기에 는 힘든 점이 있다.</p> <p>안광국 교수 - 송사리는 표층에 주로 머무르면서 필터하는 어류이기 때문에 퇴적층 바닥을 건들지 않으므로 기존 어류보다는 괜찮을 것 같다.</p> <p>황순진 교수 - 충남대 연구팀은 어떠한 어류 한 종에 대해 초점을 맞추고 다른 것과 연계하여 진행하면 좋을 것 같고, 2차 년도는 각 팀별로 연구 성과를 가시화 해주기 바란다.</p> <p>김백호 박사 - 저희 실험실에서 사용하는 원수를 사용하여 검증을 하시면 어떠실지? 송사리가 저수지에서 잘 사는가?</p> <p>안광국 교수 - 원수를 보내주시면 검증실험을 해보겠다. 20L 정도 보내주시면 될 것 같다. 저수지에서 송사리가 잘 산다.</p> <p>박영석 교수 - 신구저수지의 저서 생물에 대해서는 유역 조사와 더불어 저의 팀이 조사를 하도록 하겠다.</p> <p>황순진 교수 - 앞으로 저서생물에 대해서는 경희대 팀에서 정리해주시 바랍니다.</p> <p>황순진 교수 - 올해 메소코즘 실험일정에 대해서 각 팀 간의 논의가 필요할 것 같다.</p> <p>안광국 교수 - 혼합된 부분은 올해 들어가지 않는가?</p> <p>김백호 박사 - 재현성은 다른데서 할 필요는 없고, 시료를 테스트 할 필요할 것 같고, 메소코즘 1, 2차는 실내 실험 검증과증이다. 실내실험 경험에 따르면, 어류는 퇴적층을 건</p>

제목	2차년도 1차 연구과제 협의회
	<p>드리므로 같이 실험하는 것은 좋지 않을 것 같다. 혼합실험은 단계를 결정 한 후 1~2개월 후 썸 가능할 것 같고, 실험에 있어서 기후가 가장 문제가 될 듯하다.</p> <p>신경훈 교수 - 같은 시기에 메소코즘을 진행하면, 데이터 비교에도 좋을 것 같으니 같은 시기를 잡아서 하도록 하자.</p> <p>황순진 교수 - 건대는 밀도 검증 실험을 하고 난 이후의 실험에서 생물을 넣어서 실험할 팀은 건국대와 충남대인 것 같다.</p> <p>신경훈 교수 - 두 팀이 같이 할 때, 동위원소를 이용한 실험을 같이 병행하여 전체에 대해서 보고 싶다. 추적자 실험을 하면, 인공 식물섬의 차이를 확실히 볼 수 있을 것이다.</p> <p>황순진 교수 - 건국대 밀도 실험 확정 후 각 팀이 들어올 부분은 조합해서 보도록 하자.</p> <p>안광국 교수 - 10월 ISRLE에 지금 연구과제와 관련한 세션을 하나 만들고 각 팀당 2개정도로 정리하여 발표하면 좋을 것 같다.</p> <p>황순진 교수 - 각 협동기관 연구팀에서 여름이 끝나기 전까지 책임급 1편 이상 정리하고, 논문투고와 발표내용은 총괄연구자에게 알려주시기 바란다.</p>

6. 2차년도 2차 연구협의회

제목	2차년도 2차 연구과제 협의회 (워크샵)
일시	2007년 11월 3~4일
장소	양평 한화콘도
참석인원	<p>건국대 : 황순진, 김백호, 박명환, 박구성, 김난영, 김건희, 이연주 아주대 : 박상규, 남성진 한국농촌공사 농어촌연구원 : 엄한용, 송영희 한양대 : 신경훈 충남대 : 안광국, 이재연, 이상재 경희대 : 박영석, 배미정, 권용수 (주)아셈 : 박선구, 조인기 농림부 : 박재수, 서형석 자문위원 : 배경석, 서미연, 김경만, 원두희</p>
회의내용	<p>김경만 박사 - 선행과제에서는 물리적 방법을 주로 이용한 반면에 본 과제는 생물을 이용한 방법이 주를 이루는 것 같습니다. 필드 연구는 시간적 제약이 심하기 때문에 시간이 상당히 촉박합니다. 가능하다면 새로운 것을 개발 하는 것보다는 기존 연구의 보완 및 마무리를 하는 것이 좋을 것 같습니다. 생물을 이용 시 다량 처리는 불가능한 측면이 강하기 때문에, 각 생물들의 섭식정도를 정량적으로 정리하여 일반인이 이해할 수 있도록 하는 것이 좋다. 생물을 이용한 제어 기능에 대한 요인 및 원인을 밝히고, 처리면적 및 처리량, 처리기작, 등을 정리하여 일반인이 보고 이해할 수 있도록 알려주면, 후일을 연구과제나 기술 개발을 위해 좋을 것 같다.</p> <p>황순진 교수 - 각 기술마다 특성이 있고, 생태계 안에서 기술은 다양한 요인이 존재한다. 정확히 어떤 시스템으로 정해서 이야기하기는 어려운 측면이 없지 않다. 원리와 기작 및 요인과 같은 자료에 대한 정리의 필요성을 느끼고 있고, 기본적인 자료는 정리하고 있다.</p> <p>배경석 박사 - 생물의 효율이나 기작을 밝히는 것은 매우 난해하다. 단계별 효율이나 기작을 분명히 하여 전체적으로 봤을 때 일반인 또는 비전문인이 봤을 때 효율이나 기작을 이해 할 수 있도록 정리하는 것이 중요하다. 건국대와 충남대는 조류제어가 가능한 생물에 초점을 맞추고 있다. 그러나 그것 외에 호수 생태계에서 가장 우점종은 깔따구일 것이고, 이러한 우점종의 기여 정도를 무시 못 할 것이기 때문에 이런 측면의 연구도 고려하면 좋을 것 같다.</p> <p>황순진 교수 - 깔따구 등을 이용하여 유기물 제어를 통한 조류제어는 아직까지 계획에 없으나, 깔따구를 통한 수질 정화는 문헌조사를 통해 가능성을 고려해보겠다.</p> <p>서미연 박사 - 말조개 처리 후 사멸에 따른 사후 문제 및 공급에 따른 문제에 대한 자세한 정리가 필요 할 것 같고, 인공 식물섬을 이용한 제어에서 조류의 제어가 식물에 의한 것인지, 광차단에 의한 것인지 확실한 평가가 이루어져야 할 것이다. 어류를 이용한 top Down의 효과로 조류를 제어에서 Chl-a 값으로 조류의 제어 정도를 판단하였는데, 조류와 Chl-a와의 상관성은 매우 작기 때문에, 조류와 Chl-a의 상관성을 %로 제시한다면 좋을 것으로 생각된다.</p> <p>황순진 교수 - 처리 생물의 지속적인 공급을 현재 연구 중이지만, turn over가 일어나기 위해서는 2~3년이 소요된다. 일단은 과제가 끝나기 전에 정리하는 것을 목표로 하고 있다. 식물섬 자체를 통한 직접적인 효과가 아니라 식물섬에 의한 영양염 흡수, 햇빛의 차단, 조류제어 타생물의 서식처 제공 등 본 연구는 식물섬을 통한 다른 기능을 개발 중에 있다.</p> <p>안광국 교수</p>

제목	2차년도 2차 연구과제 협의회 (워크샵)
	<p>- Chl-a 측정뿐만 아니라, 남조류 측정기계를 통한 남조류 개체수를 측정하고 있다. 실제로 Chl-a와 남조류 개체수 사이에 차이점이 존재 하고 있다.</p> <p>원두희 박사</p> <p>- 저수지 내 생물들의 섭식과 같은 상호작용에 대하여 파악하면 다른 연구에도 많은 도움이 될 것 같다.</p> <p>황순진 교수</p> <p>- 기계 측정과 현미경 카운팅을 비교해 봐야 할 것 같다.</p> <p>박재수 사무관</p> <p>- 십여 년 전부터 농업용 저수지 수질 측정망, 친환경 하천 정비, 저수지 상류부에 침강지 조성 등이 수질개선이 전부였지만, 현재 생물을 통한 수질개선에 관심을 보이고 있다. 외국에서는 생물(어류)를 통한 수질개선은 왜 있는데 우리나라는 없는 가라는 질문이 나오고 있기 때문에, 기술로 적용할 수 있는 자료와 실용화가 가능한 기술을 개발에 이용할 수 있는지 궁금하다. 기존의 자라, 송어, 은어 등을 방사하여 수질개선 효과를 도입하지 못하는지? 기존에 있는 논문 및 외국 사례를 적용할 수 있는지? 실용화 할 수 있는 기술을 만들 수 있도록 연구가 진행되었으면 좋겠다.</p> <p>황순진 교수</p> <p>- 외국에서는 어류와 식물을 통한 효과는 존재하지만 부영화가 높을수록 효과가 낮다. 위에서 누르는 힘이 아래에서 쳐 올리는 힘보다 약해서 그것을 깰 수 없기 때문에, 효과는 어느 정도 덜 부영양화 되어야 나타난다. 외국과 우리나라의 호수 상태는 형태적으로 서로 다르기 때문에 서로 다른 생태계에 있는 생물을 처리하는 것은 매우 어려운 문제이다. 붉은 귀거북은 현재 환경부에서 제거대상으로 지정되었다. 실험실에서는 생물조절의 효율이 확인 가능하지만 필드에서는 조절의 어려움이 존재한다. 학문적 연구를 실용화 기술로의 이동에 중점을 맞춰서 연구하고 있으며, 현재 아섬에서 식물섬을 통한 기술개발을 현실화와 농촌공사에서 생물 서식처에 관한 기술을 현실화하고 있다.</p> <p>서형석 간사</p> <p>- 연구의 초심은 물리적 화학적 수질개선을 뛰어넘어 생물학적 수질개선의 기대인 것 같다. 연구결과를 다양화 된 것을 일반화하여 향후 농림부 정책결정에 영향을 미칠 수 있도록 했으면 좋겠고, 생물학적 수질개선이 하나의 방법으로 자리매김 할 수 있도록 연구의 마무리가 중요하다. 사업적 측면에서 실용화되지 않으면 향후 생물분야 연구자의 자금 지원이 어려울 수도 있다. 새로운 연구와 연구기회가 생겨나기 위해서는 본 연구 결과의 정리와 구체화에 힘써주시기 바랍니다.</p> <p>황순진 교수</p> <p>- 생물학적 조절에 따른 메카니즘을 통해서 향후 처리 후 문제 예측할 수 있도록 하겠다.</p> <p><기타></p> <p>김백호 박사</p> <p>- 메소코즘을 철거 할 계획인데 더 사용하실 팀은 연락주시면 미물 예정이며, 사용할 팀은 보수 후 사용해주세요. 조그마한 연못을 만들어 3차년도 실험할 예정이며, 현재 여주와 아섬 진천 공장의 연못을 이용할 계획에 있으며, 장소를 같이 쓰실 팀은 미리 연락 주시기 바랍니다.</p> <p>신경훈 교수</p> <p>- 이번 메소코즘 분석 로드가 많아서 수질은 다른 팀에서 도와줬으면 좋을 것 같다.</p> <p>엄한용 차장</p> <p>- 저희 팀에서 수질은 분석을 맡도록 하겠다. 또한 50만톤 이하의 작은 저수지를 알아보겠다.</p> <p>황순진 교수</p> <p>- 자료 공유 체계를 확실히 해야 할 것이고, 분석이 끝날 때 연구 협의회를 개최할 예정입니다. 그리고 현재 각 팀의 연구 결과를 육수학회 특별호로해서 논문을 발간할 계획이다.</p>

7. 2차년도 3차 연구협의회

제목	2차년도 3차 연구과제 협의회
일시	2008년 1월 15일
장소	건국대학교 생명환경과학대학
참석인원	<p>건국대 : 황순진, 김백호, 박명환, 박구성, 김난영, 김건희, 이연주, 유영훈, 윤성애, 이송희</p> <p>아주대 : 박상규</p> <p>한국농촌공사 농어촌연구원 : 엄한용, 송영희</p> <p>한양대 : 신경훈, 김민섭</p> <p>충남대 : 안광국</p> <p>경희대 : 박영석</p> <p>(주)아셈 : 박선구, 조인기</p> <p>농림부 : 한민우</p>
회의내용	<p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 3차 년도에는 메소코즘 실험을 하는 것보다 현장으로 직접 실험하는 것이 좋을 것 같다. 3차년도 방향과 목표는 수질개선 관련 쪽으로 가야할 것 같고, 각 연구팀 결과를 수질개선에 활용할 수 있도록 일반화 하는 쪽으로 정리되어야 할 것 같다. 조개배설물의 fate 연구에 대한 디자인을 건국대, 한양대, 아주대, 공통으로 해서 실험을 하면 괜찮을 것 같다. <p>신경훈 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 연구협의회가 끝난 직후 모여서 논의하도록 합시다. <p>김백호 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 3차 메소코즘 실험 데이터를 총괄해서 논문 쓰는 부분이 토의가 되어야 할 것 같다. <p>박영석 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 각 팀 분석항목 등을 메타베이스에 리스트업해서 엑셀시트로 보내주시면 핵심내용을 정리, 공유하면 좋을 것 같다. <p>안광국 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 각자 데이터에서 다른 데이터를 어떻게 이용할지는 모르고 있기 때문에 그런 것 같고, 각 팀별로 엑셀로 데이터를 정리하여 대략적인 목적이나 핵심 내용 등을 표그림으로 작성하여 공유하면 좋을 것 같다. <p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 종합해서 해야 할 부분은 각 팀별로 고민한 후에 3월에 있는 워크샵에서 논의하도록 하고, 필요한 자료는 발표자료(ppt)를 이용해 주길 바라며, 필요한 자료는 직접 요구하는 것이 좋다고 본다. <p>한민우 간사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 유기농법으로 인하여 수질이 많이 악화 되고 있는 현황에서 본 연구는 정책적으로 활용가치가 있을 것으로 생각된다. 한농공 연구진은 산업화 쪽으로 발전할 수 있도록 신경을 써주셔야 할 것 같고, 특히, (주)아셈은 연구가 끝난 후에 어떻게 연구결과를 산업화 쪽에 활용할 수 있는가에 대해서 고민을 하셔야 할 것 같습니다. <p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 본 연구과제의 연구결과로 육수학회 특별호에 14편을 발행할 예정입니다. <p>김백호 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 신규저수지에 설치되어 있는 메소코즘을 이용하실 팀에서는 수리보수를 해서 안전사고가 없도록 사용해주시기 바랍니다. 3차년도 현장 적용 실험에 참여하실 팀에서는 시설설치부터 관리까지 같이 참여하는 것이 좋을 것 같다. <p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 다음달 24일까지 연차 실적 및 3차년도 계획서를 제출해야 하기 때문에 이에 신경을 써주시고, 2차년도 마지막 연구협의회 및 워크샵은 3월 중에 있을 예정이니, 그 사이에 미비한 분석들은 마무리해서 결과를 도출하시기 바랍니다.

8. 2차년도 4차 연구협의회

제목	2차년도 4차 연구과제 협의회
일시	2008년 3월 21~22일
장소	산정호수 한화콘도
참석인원	<p>건국대 : 황순진, 박명환, 김백호, 박구성, 김난영, 김건희, 이연주, 유영훈, 윤성애, 이송희</p> <p>아주대 : 박상규</p> <p>한국농촌공사 농어촌연구원 : 엄한용</p> <p>한양대 : 신경훈, 김민섭, 양진용</p> <p>충남대 : 안광국, 이상재</p> <p>경희대 : 박영석, 권용수, 양미화, 배미정</p> <p>(주)아셈 : 박선구, 조인기</p> <p>자문위원 : 김경만, 김용재</p>
회의내용	<p>김경만 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 유용생물을 5~6개 중 선택했고, 실·내외 실험을 통해 말조개를 선택했다. 처음에 어떻게 5~6가지를 선택하게 됐는지에 대한 설명과 말조개는 신구에서만 유용한 것인지 또 다른 저수지에서도 유용한 것인지에 대한 설명을 부탁드린다. 그리고 말조개가 다른 생물과 비교해서 얼마만큼 효과적인지 가능하면 정량적인 제시가 필요하다. <p>김백호 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 생물재제로 쓸 만한 생물은 굉장히 많지만, 그 중 몇 가지로 축약한 이유는 다양한 생물재제들이 발표되어 있는 것이 많지만 현장에 적용된 예는 많지 않기 때문이다. 현장에 적용할 수 있는 재제를 찾아보다 얼룩말조개 등에서 힌트를 얻었고, 경험 문헌 등을 통해 선택하게 됐다. 말조개는 전국에 고루 분포하고, 생존력도 강해서 말조개를 적용하게 되었다. 숫자적인 것은 특별호에 원단위에 대한 내용이 실려 있다. 전국하천에 가장 흔한 것에 말조개가 있었으며, 대량화는 힘들지라도 전국적으로 적용하기에 어려움이 없다고 생각된다. 현장조사를 통해 많은 지역에서 패류가 서식함을 확인하였고, 그 중에서 전라도의 한 농업용수로에서는 말조개 등이 밀생물을 하고 있으며, 도시하천에도 분포하고 있기 때문에 찾기도 쉽다. 대량화하는 방법은 아직 알려진 바가 없다. 하지만 유지하기가 어렵지 않고, 저산소 층에서도 잘 견디기 때문에 생물재제로 무리가 없다고 생각한다. <p>김경만 박사 : 과제의 연구에 관련해서 인공 식물섬과 기존의 인공 식물섬의 차이점에 대한 설명과 플랑크톤의 군집에 대해서 조사를 하는데, 분석과 수질개선과의 관련성에 대한 설명이 필요하다.</p> <p>엄한용 과장</p> <ul style="list-style-type: none"> - 인공 식물섬을 형태나 밀도 등을 변형해서 기존의 인공 식물섬과 차이점에 대해 분석중이지만 아직 결과가 나오지 않아 제시를 하지 못하였다. 미디어 등을 이용할 경우 수초들의 효과를 볼 수 있다고 예상되어 분석중이다. 수질개선효과에 대해서는 파격적인 수질개선 효과를 나타내지는 않지만 Bosmina 등의 동물플랑크톤이 증가할 경우 수질개선 효과가 나타난다고 할 때, 그 종이 충분히 자랄 수 있는 환경을 만들어줄 수 있는 하나의 자료가 될 것이라고 생각된다. <p>김경만 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 인공 식물섬이 어떤 것이 다르냐고 문의가 왔을 때 어떻게 설명을 해야 하나? <p>박선구 소장</p> <ul style="list-style-type: none"> - 기반체가 위아래로 들어가 있는 구조로 타 식물섬과 차이를 보인다. 이것은 생물량을 높이기 위한 샌드위치 구조이고, 비슷한 양의 부피를 차지하면서 유속 등의 영향을 적게 받는 형태이다. 하지만 이런 식으로 구조가 변함으로서 생기는 변화를 조사하는 것이 필요하다.

제목	2차년도 4차 연구과제 협의회
	<p>김경만 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 줄새우가 Chl-a를 많이 감소시키고, 실내실험에서 또한 Chl-a의 감소가 많다고 나와 있는데 말조개처럼 저수지에 많이 넣을 것인가 아니면 어떤 방식으로 조절할 수 있는지 알고 싶다. <p>안광국 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 줄새우와 새뱅이가 많이 있는 저수지가 있는데, 그 곳에서 실험을 하게 된다면 연못을 막고 한쪽은 새뱅이를 제거해서 실험을 하는 방법이 있다. 또한 실험지에서 새우를 잡아먹는 동자개의 양을 줄이는 방법도 있다. 현장 적용실험과 조류 제어 방법을 찾아봐야한다. 현장적용 실험 시 pond에서 조류가 발생이 일어나지 않는다면 다른 방법을 연구진과 협의해 봐야한다. <p>신경훈 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 동자개만 조류에 넣어서 실험해본 것은 없는지, 동자개가 새우를 통해서 조류를 섭식하는 것인지, 직접 섭식하는 것인지 실험이 필요하다. <p>안광국 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 동자개는 육식성이기 때문에 그런 일은 없을 것으로 생각 된다. <p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 그래도 실험을 해서 정확한 데이터를 찾아야 한다. 3차 년도에는 많은 실험을 통해 결과를 도출해야 할 것이다. <p>김용재 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 식물플랑크톤 현존량을 일정하게 유지시키면서 배설량 조절을 했는지? <p>김백호 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 메소코즘이기 때문에 장기간 할 수 없었고 장기간 할 것 이었으면 영양염을 첨가 했어야 했다. 퇴적층이 없기 때문에 영양염 순환에 대한 영향을 배제 한 실험이다. 이에 대해 고려를 해야 할 것이다 <p>김용재 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 현장 적용 시 유용생물의 적용 위치는? <p>김백호 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 실내 실험에 의한 결과에 의하면 sediment 없이 1~4시간 사이에 최대 여과율을 보였으며, 메소코즘은 3톤에 80마리 정도로 효과를 극대화시킨 실험이 아니며, 위치도 여러 번의 실험을 거쳐 적용 수심을 고정 시켰다. 물 양을 고려한 효과를 극대화시킬 말조개의 절대량을 채울 수 없었다. 이 방법론을 일반화 시키면 안된다. <p>김용재 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 인공섬을 설치했을 때 좋은 효과를 나타내는데 실험하는데 식물섬의 면적의 크기는 전체 저수지의 몇%인가? 또한 어떤 식물을 가지고 인공섬으로 설치를 했을 때 효과가 극대화 되는가? <p>박선구 소장</p> <ul style="list-style-type: none"> - 먼저 부들이나 갈대, 창포에 대한 효율은 나와 있다. 하지만 식물섬의 면적은 정확한 데이터는 없고, 앞으로 데이터화를 해 나가야할 부분이다. <p>김용재 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 말조개, 새우, 어류 같이 넣어서 제어하는 방법은 시도 했는지? <p>김백호 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 3차 년도에는 현장실험으로 이뤄져야 할 것 같다. 말조개, 새뱅이, 동자개 이 생물들이 자연 상태로 들판에서 효과를 나타낼 수 있을 지에 대하여 실험이 필요하다. <p>김용재 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 5일 정도 되면 N:P가 떨어지는데 15일 정도 배양하면 Chl-a는 바닥으로 갈 것이다. 그에 대한 것은 어떻게 생각하는지? <p>안광국 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 대조군은 별로 안 떨어졌다. 메소코즘은 뉴트리언트가 떨어지는 효과는 상대적으로

제목	2차년도 4차 연구과제 협의회
	<p>적은 것 같다. 대조군과의 상대적인 비교를 통해 그 부분은 설명 가능할 것이다. 적절한 생물을 넣으면 잘 떨어지지 않는다.</p> <p>김경만 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 실내실험과 메소코즘 실험을 통한 실험에서 나온 효과를 일반화 시키는 우려를 범하면 안된다. <p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 얼마나 많은 자료와 factor를 가지고 검증과 test를 한다면 일반성을 가질 수 있다는 생각이 든다. 다른 저수지의 변이의 예측이 가능하도록 한다면 문제가 없다고 생각한다. 또한 우리도 그쪽으로 조심하도록 하겠다. <p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 여러 팀들이 열심히 해주셔서 연구책임자로서 고맙게 생각한다. 3년 길지 않는 시간이다. 유종의 미를 거두도록 하자. 물론 모든 데이터는 다 완성할 수는 없다. 하지만 팀 마다 계획했던 내용들은 모두 해결해야 할 것이다. 남은 기간 최선을 다해주시길 부탁드립니다.

9. 3차년도 1차 연구협의회

제목	3차년도 1차 연구과제 협의회
일시	2008년 9월 19일
장소	건국대학교 생명환경과학대학
참석인원	<p>건국대 : 황순진, 박명환, 김백호, 박구성, 김난영, 김건희, 이연주, 유영훈, 윤성애, 이송희</p> <p>아주대 : 박상규</p> <p>한국농촌공사 농어촌연구원 : 엄한용</p> <p>한양대 : 신경훈</p> <p>충남대 : 안광국</p> <p>경희대 : 권용수</p> <p>(주)아쌈 : 박선구</p>
회의내용	<p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 바쁜 시기지만 3차년도 연구를 위해 모이게 되었다. 이제 여러 가지 실험을 하기에는 시간적으로 급박하다. 오늘 이 자리는 3차년도 실험 계획에 필요한 부분을 조정하고 보충하기 위해서이다. - 지난여름 석문 제2 시험포에 현장조사 실험을 하기 위해 건국대학교, 아쌈, 농어촌연구원에서 작지 않은 규모의 메소코즘을 준비하였다. - 석문 제2 시험포는 완전히 염분이 빠지지 않은 간석지로 현재 습지형태이다. 그 안에 4부분으로 나눈 천막을 설치하였으며 그동안 조류를 발생시키기 위해 신규 저수지와 건국대학교의 일감호에서 Bloom을 일으킨 남조류를 여러 차례 접종하였다. 현재 예비실험을 한 차례 하였으며, 석문 Sediment와 현장수를 그대로 사용하였다. Sediment는 입자는 곱지만 과도한 유기물로 상태가 좋지 않다. 먼저 팀별로 발표를 하고 각 팀들은 실험 계획 및 실험 내용을 보고 들어갈지 여부를 확인해달라. <p>김백호 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 말조개 수급에 따른 문제 및 현장 조류의 상태에 따라 약간의 실험 계획 수정이 필요하다. Sediment에 의한 말조개의 폐사를 고려해야하면, 본 실험시 공중에 띄어 실행한다. Isotopo에 따른 Sedinent monitoring의 제한 걱정된다. 올해 메소코즘 실험은 내년에 논문 투고 예정이며 다른 연구자의 참여에 따른 Combination 문제 및 참여 일정 문제를 조정해야 한다. <p>엄한용 팀장</p> <ul style="list-style-type: none"> - 식물섬은 전체 수표면의 15%에서 가장 효과가 좋은 것으로 나타났으며 식물섬의 mat는 침수 하였을 때 수질개선 효과가 증가한다. <p>신경훈 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 보기에는 식물의 효과도 있겠지만 Mat의 작용도 무시하지 못할 것이다. 혹시 그에 대한 실험 결과가 있는가? <p>엄한용 팀장</p> <ul style="list-style-type: none"> - 물론 Mat 만으로도 수질개선 효과가 나타난다. 하지만 식재를 포함한 메트가 효과가 더 낫다. <p>박선구 소장</p> <ul style="list-style-type: none"> - 한국하천호수학회지에 식물이 식재된 mat와 그냥 mat와의 비교실험 논문이 소개된 적이 있다. 물론 mat 만으로도 효과가 있지만 식물과 함께 있는 것이 더 좋다고 확인되었다. <p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - mat 만의 효과를 무시할 수 없을 것 같다. 말조개를 부유시키는데 그물 말고 식물 mat에 올리는 것이 어떠한가. <p>엄한용 팀장</p> <ul style="list-style-type: none"> - 말조개가 폐사하는 이유를 오염된 Sediment 때문이라고 볼 수도 있겠다. 하지만

제목	3차년도 1차 연구과제 협의회
	<p>오염된 Sediment는 일반적인 농업용 저수지에서 그리 많은 부분을 차지하지 않는다. 또한 오염된 Sediment라도 충분한 산소가 공급된다면 다시 양호한 상태가 될 수 있다. 현장 적용 시 오염된 Sediment 보다 그러한 매질 위에 패류를 넣어 두는 것도 고려해볼만하다.</p> <p>신경훈 교수 - 그동안 분석이 이제 막 끝났다. 그 결과를 아직 준비하지 못했으나 다음 workshop 에서는 발표할 수 있을 것이다. 현장이 매우 넓어 4곳에 모두 Isotopo를 처리하는 것은 무리가 있어 4부분 중 2부분을 사용할 예정이다. 하지만 Sediment 층을 통해 Isotopo 이동이 걱정된다. 추적자 첨가 실험 후 DIC의 안정동위원소비가 자연 상태로 돌아가는데 오랜 시간이 소요 최적 상태에서 실험을 시작해야한다. 본 메소크롬에서 현장적용에 대한 Background를 제시할 수 있어야 할 것이다.</p> <p>권용수 연구원 - 생물 구조 파악 등 3차년도 과제 남아있다. 농촌공사 아섬의 Data를 이용한 분석인 필요하며 분석이 가능한 자료를 보내주면 감사하겠다. 광량과 온도 측정 가능한 Data logger 12개가 현재 이용가능하다.</p> <p>황순진 교수 - 발표 시간이 많이 걸렸다. 그래도 토론을 하고 끝내자. 지금까지 팀별로 충실히 연구수행을 하느라 수고하였다. 최종적으로 연구진별 각각의 생물을 가지고 평가 할 수 있지만 마지막에는 전체적으로 생물을 종합 적용해 보아야 할 것이다. 단지 종합적인 적용을 연구 기간내 끝낼 수 있을 것인가 아니면 보고서가 끝나고 나서 실험을 할 것인가의 문제다. 석문 모습 자체가 우리가 생각한 농업용저수지와 정확히 맞지는 않지만 실험결과로서 완성도를 높여야 한다.</p> <p>김백호 박사 - 건국대학교는 말조개를 주문한 상태이며 조개가 수급완료 된다면 바로 실험이 가능하다.</p> <p>황순진 교수 - 3차년도에서 아주대의 풍년새우는 적은 개체수로 적용을 못할 것이다. 하지만 충남대학교의 새뱅이와 동자개를 적용을 할 수 있을 것이다.</p> <p>안광국 교수 : 동자개는 충분한 개체수를 확보할 수 있지만 새뱅이는 개체수를 확보하기 위해서는 3주정도 시간이 필요하다. 동자개는 0.5~1 ind, 100L⁻¹ 밀도이고 새뱅이는 8 ind. L⁻¹ 밀도를 적정농도로 보고 있다.</p> <p>김백호 박사 - 생물을 현장 적용하기 전에 먼저 예비실험이 필요하다. 실험에 들어가기 전에 먼저 석문 시험포에서 Sediment와 물을 준비하여 생물 적용 실험이 필요할 것이라 생각한다.</p> <p>황순진 교수 - 건국대학교에서는 3 차례의 실험을 생각하고 있지만 전부 할 수 없을 것이라고 생각한다. 건국대학교에서는 1차 실험을 먼저 실시하여, 필요한 현장 적용 가능성을 확인하고 2차 실험에서는 각 연구팀이 모두 참여하는 방향으로 하는 것이 좋겠다. 건국대학교에서 1차 실험을 하는 동안 각 팀들은 실험에 필요한 준비를 하기 바란다. 10월 10일 정도에는 모든 연구팀이 참여하는 2차 실험을 해야 한다. 경희대학교에서는 Data logger 설치를 준비하고, 한국 농촌 공사에서는 먼저 석문 Sediment의 화학적 조성을 분석이 가능하면 조사를 부탁한다. 아섬에서는 식물섬의 투입여부를 다른 팀의 실험방법을 참고하여 결정해 달라. 충남대학교에서는 새뱅이와 동자개의 예비 실험을 하고, 현장적용 실험을 위한 준비를 부탁한다. 건국대학교에서는 패류 투입 시 mat를 사용할 것인지 그물을 사용할 것인지 정리할 필요가 있다. 각 팀들의 과제 과업에서 누락되는 점이 없는지 확인 부탁하며 팀별 외국논문 1~3개가 목표였으므로 논문 발표 준비를 부탁한다.</p>

제목	3차년도 1차 연구과제 협의회
	<p>신경훈 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 실험 디자인은 현실적용을 위해 준비가 필요할 것 같다. 모든 생물과 식물섬을 가장 효율이 좋은 밀도를 알고 있지만 커다란 현장에 그에 맞는 생물 밀도와 식물섬은 막대한 금액이 들어간다. - 이런 현실 가능성 없는 실험보다 실험 효율이 낮더라도 작은 밀도로 현장에 적용 가능한 범위의 비를 알 수 있게 하는 실험이 필요하다고 생각한다. 그렇게 해야 신규저수지 등에 큰저수지에 적용을 할 때, 얼마만큼의 식물섬이 혹은 유용생물이 필요한지 그런 기준을 제시할 수 있는 결과를 도출해야할 것이다. <p>박상규 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 현장에 자연생태의 영양염 농도와 DIC 농도에 따른 영양염의 차이는 없을 것인가를 고려해보았는가. <p>신경훈 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 선행연구에서 보통 DIC 투입 시 자연 농도에 비해 영양염이 약 5%증가한다고 한다. 5%수준이지만 이것인 실험에서 크게 문제될 사항은 아니다.

10. 3차년도 2차 연구협의회

제목	3차년도 2차 연구과제 협의회 (워크샵)
일시	2008년 11월 7일
장소	농어촌연구원 주택전시관
참석인원	<p>건국대 : 황순진, 박명환, 김백호, 김난영, 김건희, 이연주, 유영훈, 윤성애, 이송희 아주대 : 박상규 한국농촌공사 농어촌연구원 : 엄한용, 박구성, 송영희 한양대 : 신경훈, 김민섭 충남대 : 안광국, 이상재 경희대 : 박영석, 권용수 (주)아셈 : 박선구, 조인기 자문위원: 배요섭, 남귀숙, 김배옥, 김용재</p>
회의내용	<p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 자체평가 결과 연구의 최종목표 및 내용은 잘 수행되어가고 있습니다. 팀 자체적으로 행정적 문제나 연구내용에 대한 문제가 있는지 점검해 주시고, 연구내용 중 누락된 부분이 있다면 연구기간 내 정리하여 주시기 바랍니다. - 이번 메소코즘 실험의 팀별 결과내용으로 12월에 3차 과제협의회를 계획하고 있습니다. 또한 2009년 2월 정도에 총 과제연구기간(3년) 동안 수행한 연구과제에 대해 발표하는 workshop(4차 협의회)을 개최할 예정이며, 그 사이 최종보고서 형식을 만들어 배포하도록 하겠습니다. - 특허는 많은 연구진이 도움을 주어 건국대 2개, 건국대와 (주)아셈에서 공동으로 1개를 출원하였고 (주)아셈에서 2개 특허가 진행 중에 있습니다. 과제 마무리 전에 총 5개의 특허가 출원될 것으로 예상됩니다. 학술 논문은 특별호를 포함하여 16편이 출간되었으며, 진행 중인 논문까지 포함하면 과제 종료 전까지 20편 정도 출간될 것으로 예상됩니다. 외국논문은 총 8편이 준비 중에 있습니다. - 연구성과 활용방안은 총 과제연구기간(3년) 동안 발표한 내용과 기술부분을 중점으로 기술이전을 할 수 있도록 하는 것이 중요합니다. (주)아셈은 함께 연구한 부분에서 기술이전 고려하여 사업화할 수 있도록 고민을 부탁드립니다. - 3년 동안 연구한 내용들을 정리하여 2009년 상반기 말이나 하반기에 특별 symposium 개최를 고려중입니다. 농어촌연구원에 도움을 받아 종합 메소코즘을 설치하였고, 여러 분야의 연구팀이 참여하였습니다. 또한 실제로 여러 분야에서 참여한 공동 실험은 매우 실현이 어려운 것입니다. 5개의 연구기관에서 사이트를 만들고 실험을 기획하고 실행했다는 것으로도 획기적이며, 이번 실험의 연구 결과는 국내외 학회 등에 유용한 자료로 이용될 것입니다. 실험에 사용했던 사진들로 홍보물을 기획하여 2차 워크샵(4차 과제협의회) 때 보여드릴 예정이므로 각 팀별로 정리하여 주시기 바랍니다. - (주)아셈에서 기술개발에 노력을 부탁드립니다. 참고로 인공 식물섬을 수표면 밑으로 조금 내리고 패류나 생물 적용을 위한 공간을 만드는 것 또한 특허 출원 가능성을 가지고 있을 것으로 사료 됩니다. 자료가 너무 많아 결과를 다시 검토해야 하며, 결론을 이끌어 낼 논리를 고민해야 합니다. 3차 협의회는 내용이 많아 질 경우 1박 2일로 하는 것을 검토해 보도록 하겠습니다. 동위원소를 사용한 실험은 동위원소가 생물의 어디로 많이 이동하였는지 좋은 아이디어를 고안한다면 2~3개 논문을 만들 수 있을 것이며, 조금 더 고민한다면 연구 자료로서의 활용에 도움이 될 것입니다. <p>김용재 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 유용생물이 들어오게 되면 종마다 증감이 다르나 대체적으로 암모니아나 아질산이 증가합니다. 영양염은 생물에 간접적으로 영향을 주며 반대로 생물로 인해 N, P 또한 용출되므로, 무엇이 먼저 영향을 미치는지 고려해 보아야 합니다. 영

제목	3차년도 2차 연구과제 협의회 (워크샵)
	<p>양염은 실제로 다양한 생물이 이용하기 때문에 다양한 변수를 가지고 있으며, 이를 식물 및 동물 플랑크톤에 관련하여 초점을 맞춘다면 Data가 좋아지지 않을까 사료됩니다.</p> <p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 인공식물섬에 유용생물의 피난처 또는 산란처 등 어떤 의미를 부여하든지 인공식물섬의 효과를 정량화 한다면, 수질 관리 측면에 큰 의미가 될 것 입니다. 과제가 4~5개월 남았으며 많은 자료를 요약 정리하는 것에 통계적 기술이 필요할 것입니다. <p>김용재 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 건국대학교는 말조개를 현장 적용할 때 기간별 효율은 어떻게 되는지, 또한 생물을 지속적으로 처리하는 것이 좋은지 아니면 짧은 기간이 좋을지 고려해 주시기 바랍니다. 또한 경희대학교의 인공섬에 대한 해석 부분이 동물 및 식물플랑크톤이 꼭 중요한 인자인지, 영양염에 대한 식물플랑크톤 감소와 동물플랑크톤 증가하는 것에 대한 상관관계를 고려해 주시기 바랍니다. 한양대학교는 N, C 동위원소를 통한 흐름을 확인했는데, P은 사용하지 않았습니다. N나 C의 요구량이 생물마다 다르며, P 또한 중요한 인자입니다. 방사선 동위원소를 사용해서 P의 이동량을 확인해 보는 것도 좋을 것으로 사료됩니다. <p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 구체적인 유용생물 적용에 대한 조건과 기간은 최종 워크샵에서 발표하도록 하겠습니다. 동위원소 N, C에 대한 식물 및 동물플랑크톤에 대한 생물학적 이동량은 지금 연구과제의 초점으로 다루기 어렵습니다. <p>신경훈 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 실험에 사용한 동위원소는 방사선 동위원소가 아니라 안정 동위원소로서, 방사선 동위원소는 규제가 심하며 허가를 받아야 합니다. P는 방사선 동위원소로 허가가 필수적이며 규제도 엄격하여 쉽지 않습니다. C, N 순환 중심으로 연구하였으나, P 또한 주요 영양염으로 생물마다 요구량이 다르며 중요한 부분입니다. 만약 다른 연구과제가 생긴다면 그때 인의 순환에 대해 연구해 보도록 하겠습니다. <p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 건국대학교와 한양대학교에서 공동으로 실행한 실험에서 동위원소 P32, P33의 이동을 볼 수 있었다면 도움이 되었겠지만, 함께 진행할 수 없었으며, 기회가 있다면 실험할 수 있도록 하겠습니다. <p>남귀숙 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 연구목표는 농업용 저수지의 수질관리이며 연구의 결과를 통해서 수질관리의 매뉴얼을 작성해야 합니다. 또한 가시적인 효과를 보이기 위한 최종목표를 남은 기간 동안 정리하고 결론은 추출하는데 많은 고민이 필요할 것으로 사료됩니다. 현장 적용 관리 방법을 효율적으로 하기 위하여 생물 처리부터 회수방법 까지 매뉴얼과 가이드라인을 제시해야 합니다. (주)아썸의 인공식물섬을 이용한 실험은 규모가 작고, 시간이 짧아 그 data를 가지고 장기적인 효과를 확인하는 것은 무리가 있다고 생각합니다. <p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 우리의 최종목표는 학술 논문생산이 아니라 기술개발 및 현장적용입니다. 짧은 실험기간으로 현장 실험에서 발생하는 시행착오는 수정하기 힘들지만 각 생물을 종합 적용하여 현장적용에 구체화해야만 합니다. 수질개선에 대한 실험목표를 확고히 하고 주안점을 정리하여 효율적인 가이드라인을 만들고, 보고서를 통해 따로 정리할 필요가 있습니다. <p>배요섭 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 여러 가지 생물에 대하여 생물의 생리적 특성에 대한 실험 등 많은 실험을 하

제목	3차년도 2차 연구과제 협의회 (워크샵)
	<p>였는데, 이런 생태학적 특성이 규명되지 않은 생물의 기본적인 정보를 아는 것은 매우 중요합니다. 하지만 너무 많은 data로 인해 뚜렷한 경향 찾을 수 없을 수도 있으므로, data screening작업이 병행되어야 한다고 생각합니다. 동물 및 식물플랑크톤에 집중된 인공식물섬 메리트 혹은 식물섬의 기반제에서 식물을 분리하고, 기반제에서 부착하는 부착조류의 성격을 아는 것도 필요합니다. 모델 발표를 통하여 유용생물의 최적 조합과 최적 패턴이 나오게 되는 것인지, 제안 인자 범위가 나올 수 있는 것인지 궁금하며, 농업용수는 여러 곳에서 발생하는 요인으로 인하여 영양염의 변화를 통한 전체적인 반영에 는 어려움이 있다고 생각합니다.</p> <p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 생물의 기본적 생리 생태 특성을 조사하지 못한다면, 문헌 조사를 통해서라도 정리하도록 하겠습니다. 또한 인공식물은 여러 가지 생물에 큰 의미를 가지고 있지만, 그 중 부착조류에 대한 내용은 과제와 독립성이 있어 따로 정리하는 것은 무리라 사료됩니다. - 여러 실험을 통해 많은 data가 생산되었으며, 이러한 자료에 대한 정리가 필요합니다. - 여러 생물자료를 정리하여, 수질관리의 의미를 부여한 모델까지 정리하도록 하겠습니다. (주)아셈 인공식물섬의 재료와 유용생물과 상호관계를 명확히 정립하는 것은 필요한 부분입니다. 또한 제품공정 과정과 기술화 기법의 매뉴얼 정립 또한 필요합니다.

11. 3차년도 3차 연구협의회

제목	3차년도 3차 연구과제 협의회
일시	2009년 1월 17일
장소	건국대학교 생명환경과학대학
참석인원	<p>건국대 : 황순진, 박명환, 김백호, 김난영, 김건희, 유영훈, 윤성애, 이송희, 이주환, 김미경</p> <p>아주대 : 박상규</p> <p>한국농촌공사 농어촌연구원 : 엄한용, 박구성, 송영희</p> <p>한양대 : 신경훈, 김민섭</p> <p>충남대 : 안광국, 이상재</p> <p>경희대 : 박영석, 권용수</p> <p>(주)아셈 : 박선구, 조인기</p>
회의내용	<p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 3년 과제의 정리가 잘 되어가고 있습니다. 또한 각 팀별 진행이 순차적으로 잘 되고 있으며, 많은 성과를 만들고 있습니다. 그러나 많은 자료를 종합하는 것이 쉬운 일이 아닙니다. 또한 석문에서의 종합실험은 방향성을 가지고 결과를 만들어야 할 것입니다. 이것은 가능한 신경훈 교수님팀에서 빠른 시일내 분석이 완료되어야 전체적인 이야기를 할 수 있을 것입니다. <p>신경훈 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 현재 탄소와 질소를 따로 분석하여 시간이 지연되고 있었습니다. 이번에 빠른 분석을 위해 장비를 구입하였으며, 분석 시간이 단축될 것으로 예상 됩니다. 분석은 2월 중 종료할 것 같습니다. <p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2월 20~21일 양일간 최종 워크샵을 개최하도록 하겠습니다. 장소는 아직 미정이며 추후 공지 하겠습니다. 최종 워크샵은 많은 시간이 소요될 것으로 사료됩니다. 3년 과제를 정리하는 회의이므로, 결과를 요약하여 발표자료를 준비하여 주시기 바랍니다. 3차년도 연구를 중점으로 준비하시고, 1, 2차년도의 자료도 정리하시기 바랍니다. <p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 경희대에서는 전체적인 자료를 종합적인 측면에서 제시해야 합니다. 1월 안으로 연구팀들은 가지고 있는 1, 2, 3차년도의 raw data를 정리하여 총괄 연구팀으로 보내 주시기 바랍니다. 총괄에서 자료를 취합하여 연구책임자 협의에 따라 필요한 연구팀에게 제공하도록 하겠습니다. 박영석 교수님은 각 팀의 자료를 정리하여 연구의 종합적인 해석을 부탁드립니다, 연구 계획서와 누락되는 부분이 없도록 신경 써 주시기 바랍니다. <p>신경훈 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - data를 공유함에 있어 자료를 논문화 할 때 중복문제가 발생할 가능성이 있다고 생각합니다. 또한 자료 사용함에 있어 어떤 부분을 어떻게 사용한다는 연락이 필요할 것으로 사료됩니다. <p>황순진 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 총괄에서 모든 자료를 취합함에 있어 자료 사용에 대한 요청이 있을 시 해당 연구팀에 연락을 드리고 자료를 공유하도록 하겠습니다. 또한 자료를 사용하면 해당 팀과 authorship을 공유해야 할 것입니다. - 팀별 내용 중 기술적 성과를 내는 부분이 필요하며, 이는 (주)아셈, 농어촌연구원, 건국대학교에서 기술적인 부분에 대하여 추가적인 논의가 필요합니다. - 각 연구팀별 논문과 학술 대회를 정리하고 있습니다. 국제 발표가 다가오고 있으며 연구팀별 많은 성과를 낼 수 있도록 신경 써 주시기 바랍니다. ISRLE는 8월 중순에 일본 신슈 대학에서 예정되어 있습니다. Select된 논문은 일본 학술

제목	3차년도 3차 연구과제 협의회
	<p>지인 Limnology에 투고된다고 합니다. 예상으로는 적어도 2~3편 정도 투고해야 할 것으로 생각합니다. 또한 농림부 연구 과제로 special issue가 제작된다면 5편 정도 생각해 볼 수 있겠지만 조금 더 상의가 필요한 부분입니다. 또한 난징에서 SIL 국제육수학회가 올해 8월 중에 있으므로 많은 참석을 바랍니다.</p> <p>- 최종 보고서의 목차 중 1장은 연구 개발과제의 개요, 2장은 국내외 기술개발 현황입니다. 3장은 연구개발 수행내용 및 결과로 각 팀별 진행해 온 연구결과를 포함한 내용 작성해 주시기 바랍니다. 4장 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도 5장 연구개발결과의 활용계획, 6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술 정보, 7장 참고문헌 부분은 각 팀 모든 연구팀에서 작성해 주시고 총괄 연구팀으로 보내주시면 저희가 취합하도록 하겠습니다. 보고서는 100부 제본해야 하며, 각 기관으로 보내지게 될 것입니다. 보고서의 마지막 부분에는 농림부 과제로 만들어진 모든 논문 학술대회 자료 모두 첨부가 될 것이니, 각 해당하는 자료를 총괄로 보내 주시기 바랍니다.</p>

12. 3차년도 4차 연구협의회

제목	3차년도 4차 연구과제 협의회 (워크샵)
일시	2009년 2월 20~21일
장소	현대 성우리조트
참석인원	건국대 : 황순진, 김백호, 김난영, 김진희, 유영훈, 윤성애, 이송희, 이주환, 김미경 아주대: 박상규 한국농촌공사 농어촌연구원 : 엄한용, 박구성, 송영희 한양대 : 신경훈, 김민섭 충남대 : 안광국, 이상재 경희대 : 박영식, 권용수, 배미정 (주)아셈 : 권오병, 박선구, 조인기 자문위원 : 김경만, 김용재
회의내용	김경만 박사 - 지금까지의 패류실험을 살펴보면 실험 시작 후 7시간이 지났을 때 가장 큰 효과를 보였습니다, 하지만 24시간 이후의 효과 또한 어떻게 변화되는지 보여주어야 하며 건국대에서 작성한 protocol과 어떠한 관련성이 있는지 또한 확인시켜 주어야 합니다. 김백호 박사 - 패류의 효과는 물론 7시간에 가장 큰 효율을 보이며, 이후에는 점차 효율이 감소하는 웨이브를 보입니다. 반응조 실험에서는 지속적인 조류 및 영양염류의 유입이 있기 때문에 결코 높은 여과율을 확인하기 힘들 것입니다. 하지만 여과율은 분명 웨이브 모양을 이루며 그 효과의 지속기간과 최고의 효율을 찾는 것이 실험의 한 부분입니다. 박선구 소장 - 반응조의 부피가 커 보이는데, 반응기 체류시간이 얼마인지 궁금합니다. 김백호 박사 - 체류시간은 3시간입니다. 김용재 교수 - 논우렁이는 정수역에서, 말조개는 유수역에서 서식하는 것으로 알려져 있는데, 말조개를 저수지에 적용시켰을 때 생존율은 어떻게 되는지 궁금합니다. 김백호 박사 - 패류의 저온기 실내실험에서의 생존율은 매우 높으며 수심 50 cm에서 생존율이 가장 높습니다. 박선구 소장 - 장치가 매우 좋아 보입니다. 저수지의 경우 순환량, size 등을 고려해야 합니다. 저수지 크기에 따라 말조개가 얼마만큼 정화해야 전체 저수지를 정화할 수 있는지, 또한 배설물을 어떻게 처리해야 하는지 명확히 할 필요가 있습니다. 김백호 박사 - 배설물은 패류의 효과를 감소시키는 문제 중 하나입니다. 패류의 배설물은 어떠한 독성을 유발하지는 않지만 영양염의 저장소로 작용하므로 이를 적절히 처리하는 것이 숙제입니다. 신경훈 교수 - 말조개의 남조류의 섭식효과는 유용하게 나오지 않았는데 다른 조류의 섭식율은 얼마나 되는지 궁금합니다. 김백호 박사 - 말조개의 활성은 실내실험실의 제한된 공간내에서 실험하였으며 정확한 활성에 대한 설명은 하기 어렵습니다. 실험 디자인에 따라 효과가 뛰어난 실험도 있습니다. 김용재 교수

제목	3차년도 4차 연구과제 협의회 (워크샵)
	<p>- 배설된 배설물이 다시 분해되는 시간이 어떻게 되는지 궁금합니다.</p> <p>황순진 교수</p> <p>- 배설물의 영양염은 분명히 다시 회복됩니다. 자연계에서 활성이 100이고 50이 배설물 형태로 가라앉는다면 다시 분해되는 시간이 지연될 것이고, 패류의 효과로 인한 수체내 상황이 달라질 것이다.</p> <p>신경훈 교수</p> <p>- 섭식 후 발생하는 배설물의 Chl-a는 수체의 것과 구조가 다릅니다. 하지만 배설물이 영양염의 소스로서는 작용 가능할 것입니다.</p> <p>김백호 교수</p> <p>- 배설물 처리에 대해서는 다양한 시도를 생각 중에 있습니다.</p> <p>황순진 교수</p> <p>- 석문지방산 분석 시 필요한 플랑크톤 자료를 건국대학교에 요청을 하시면 그에 맞는 자료를 제공할 것입니다.</p> <p>김경만 박사</p> <p>- 건국대에서는 말조개를 이용해서 PILOT 실험과 다양한 섭식실험을 통해 유용생물의 결론을 내린 반면 풍년새우는 지방산과 실험실 내 실험을 통해 유용생물로 결론을 내리기에는 문제가 제기되지 않을까 생각합니다.</p> <p>박상규 교수</p> <p>- 지방산은 다른 실험으로 유용생물로 결정하지 않았습니다. 그리고 우리는 PILOT 실험은 안했지만, 단기간과 장기간 실험실 내 섭식실험을 통해 Chl-a의 감소를 확인했으므로, 유용생물의 가능성을 제시하는데 문제는 없는 것으로 판단합니다.</p> <p>김경만 박사</p> <p>- 다른 곳에서도 인공 식물섬 대한 연구가 많이 있습니다. 다른 곳과 차이점과 특징을 내세우지 않으면 안 됩니다. 또한 인공 식물섬의 특징과 이번 연구과제의 결과와 종합적인 특색이 필요하다고 생각합니다.</p> <p>권오병 사장</p> <p>- (주)아썸의 인공 식물섬은 고유의 공법으로 다른 식물섬과 분명한 차이가 있으며, 또한 여러 가지 특허와 신기술을 가지고 있습니다. 기반재는 RCN 자연섬유를 압착한 것이며, 디자인에서는 유사성이 있을지 몰라도 다른 식물섬은 화학적인 그물망이나 화학섬을 사용한 것으로 우리의 것과 분명한 차이가 있습니다.</p> <p>박선구 소장</p> <p>- 이번 특허의 식물섬은 수면에서 20~30cm 가라앉는 식물섬으로 기존의 것과 차이가 있습니다.</p> <p>김경만 박사</p> <p>- 업체는 식물섬의 구조적 기능이 실제로 연구결과에 어떠한 영향을 미치게 했는지에 대한 설명이 필요합니다.</p> <p>김용재 교수</p> <p>- AVI의 적용이 모든 AVI에서 나타나는 공통적인 효과인지 궁금하며, 제목으로 봐서는 모든 AVI가 수체의 영양염 감소 및 식물플랑크톤 감소, 동물플랑크톤 개체수 증가의 효과를 가지고 있다고 느낄 수 있습니다.</p> <p>박선구 소장</p> <p>- 본 연구에서는 유용생물의 인공서식처를 목표로 잡고 연구를 진행하였습니다. 물벼룩 류는 Keystone species이며, 이것들의 개체수를 증가시키고 서식처 제공을 통해 식물플랑크톤의 감소를 유발하는 것을 효과로 보고 있습니다.</p> <p>안광국 교수</p> <p>- 초기 TP 농도가 일부 실험에서 특히 높은 것이 이상합니다.</p> <p>박구성 연구원</p> <p>- 본 실험은 기간이 달라서 그런 것이며, 건국대 정기조사에서 보시면 8~9월에 특</p>

제목	3차년도 4차 연구과제 협의회 (워크샵)
	<p>히 TP값이 높은 것을 볼 수 있습니다. 이로 인해 실험 초기 값이 높은 것으로 판단됩니다.</p> <p>김백호 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 신규 메소코즘에서 대조군의 그림자 효과를 보는 것은 동일한 소재를 사용하지 않았으며, 그리고 본 연구발표에서 그림자 효과에 대한 것이 빠져 있습니다. 또한 그림자 효과를 빼면 결과 정리에서 매우 모호할 가능성이 존재합니다. <p>엄한용 팀장</p> <ul style="list-style-type: none"> - AVI를 유용생물체의 인공서식처의 관점에서 볼 것인가 아니면 식물체의 서식으로 볼 것인가를 따져야 합니다. 본 연구에서 사용한 식물섬은 차광의 효과뿐만 아니라 다른 동물플랑크톤의 서식처 및 기반재의 흡착효과 식물의 영양염 흡수의 효과를 가지고 있습니다. 각각의 특성에 대한 효과는 추가적인 정리가 필요하며, 식물섬의 복합적인 효과를 제외하고 식물의 효과만을 보려면 줄에 식물을 달아 식물의 순수한 효과를 보는 것과 차이가 없다고 생각합니다. <p>신경훈 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 식물체가 흡수한 양분의 자료는 한양대에서 측정한 동위원소를 확인할 수 있습니다. 식물체의 효과를 확인할 수 있을 것입니다. <p>김백호 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 실외 부화실에서 생육이 가능한 것인지, 실외는 박테리아와 어류 포식 등의 문제가 있을 것으로 사료됩니다. <p>안광국 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 실험실에서 어느 정도 생육을 마친 후 실외에서 배양하는 쪽으로 진행해야 하는 것으로 판단하고 있습니다. <p>권오병 사장</p> <ul style="list-style-type: none"> - 역설적으로 자연상태 생태계에서, 조류가 많은 호수에 유용생물 중 새뱅이에 적용하거나 서식환경이 적절하다면 개체수가 증가하게 될 것입니다. 하지만 열린 공간에서 유용생물을 대량으로 투입하면 개체 수 유지 또는 제어하는 것이 어려울 것으로 사료됩니다. 본 연구 부분은 사업화가 어려울 것으로 판단됩니다. 이것을 유지하기 위한 구조물 및 서식환경 제공에 대한 연구가 필요할 것으로 판단됩니다. <p>안광국 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 새뱅이는 인공적인 구조물의 설치까지 필요 없을 것으로 사료됩니다. 실험실에서 온도조건을 적절하게 유지할 경우 번식률이 떨어졌으며, 경제적인 효과도 가져올 수 있습니다. 내수면 연구소에서 여러 가지 어류를 번식시키듯 새뱅이도 적절한 시설이 마련된다면 대량번식이 가능할 것으로 생각합니다. 새뱅이는 어류의 먹이 대상이 되며, 이를 피할 수 있는 서식지 조건이 적절하다면 잘 자랄 수 있을 것이고 어느 정도 수체내 조류제어의 효과도 있을 것으로 사료됩니다. <p>권오병 사장</p> <ul style="list-style-type: none"> - 유용생물을 자연에 투입할 경우, 우점종이 될 수 없습니다. 결국 우점종은 유용생물을 섭식하는 섭식자일 것입니다. <p>김경만 박사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 모델을 통해서 저수지의 건강성을 수치로 나타내는 것이 가능한지 궁금합니다. <p>박영석 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 좋음, 나쁨 등의 기준으로는 평가 가능할 것으로 판단합니다. <p>안광국 교수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 변수에서 TP를 사용하기 보다는 다른 변수를 제시하는 것이 좋지 않을까 생각합니다. 또한 SS가 종속변수이지 독립변수가 될 수 없습니다. 모델을 바꿨으면 하는 생각입니다. <p>박상규 교수</p>

제목	3차년도 4차 연구과제 협의회 (워크샵)
	<p>- 모델 자체가 매우 복잡해질 가능성이 있으며, 예측의 어려움이 존재합니다.</p> <p>김경만 박사</p> <p>- 농림부 과제들이 학술적외보다는 실용화에 중점이 맞춰져 있습니다. 실용화로 가기 위해서는 아썸에서 활용할 수 있는 데이터의 형태가 필요할 것으로 생각됩니다. 자료의 보안이 필요하며, 학술적 형태의 자료 또한 좋을지 모르지만 과제의 특성상 효과의 유무와 제어의 효율, 기업 및 공무원의 활용 가능한 형태의 자료가 중요할 것으로 판단됩니다.</p> <p>김용재 교수</p> <p>- 농업용 저수지의 수질개선 즉 부영양화를 개선하기 위해 인위적인 제어가 필요합니다. 수질개선의 목표가 있으며, 본 연구에서도 개선목표가 있을 것으로 판단합니다. 생태계에서는 여러 생물체가 상호관계를 맺고 상호작용을 통한 자연조절이 발생합니다. 본 연구에서는 인위적이지만 최대한 생태계의 상호작용(섭식관계)을 통한 제어를 실현시킬 수 있는 자료를 정리하는 것이 좋을 것으로 판단됩니다.</p> <p>황순진 교수</p> <p>- 각 팀별로 각 보고서 작성에는 연구의 목표 배경 등이 확실해야 합니다. 또한 각 연구팀별로 중요한 키포인트를 확인하시고, 내용을 취합하시기 바랍니다. 생물의 활성증대를 위한 요소 또한 연구팀별로 정리하시기 바랍니다. 연구과제 보고서 양식은 각 팀별로 작성을 우선시 하도록 하겠습니다. 내용의 전체적인 종합은 총괄팀에서 하고, 각 연구팀이 작성하도록 하겠습니다. 3월말에는 연구팀이 모여서 연구진 회의(종합적인 결론부분 도출)를 하도록 하겠습니다. 3월 말을 목표로 보고서를 작성하며, (주)아썸은 필요한 자료의 list를 작성하여 요청하시면 정리하여 보내드리겠습니다. 기업체에서 활용할 수 있는 형식으로서의 변환은 (주)아썸에서 정리하시기 바랍니다.</p> <p>권오병 사장</p> <p>- 현실의 사업화를 위해서는 범용을 위한 단순화 작업이 필요할 것으로 판단됩니다. 예를 들어, 타겟종을 선택해서 그 종에 대한 서식처의 특화 및 서식처 제공을 설계하는 등의 사업화를 할 수 있을 것입니다. 적절한 자료를 활용할 수 있다면, 이것을 특화시켜 지방자치단체에서 이를 활용하여 사업화를 활용할 수 있을 것으로 사료됩니다.</p>



[회의모습 1] 1차년도 1차 (2006년 8월 23일, 건국대학교)



[회의모습 2] 1차년도 2차 (2006년 10월 27일, 한화콘도)



[회의모습 3] 1차년도 3차 (2007년 1월 8일, 건국대학교)



[회의모습 4] 1차년도 4차 (2007 3월 29일, 한화콘도)



[회의모습 5] 2차년도 1차 (2007년 5월 28일, 건국대학교)



[회의모습 6] 2차년도 2차 (2007년 11월 3일, 한화콘도)



[회의모습 7] 2차년도 3차 (2008년 1월 15일, 건국대학교)



[회의모습 8] 2차년도 4차 (2008년 3월 21일, 한화콘도)



[회의모습 9] 3차년도 1차 (2008년 9월 19일, 건국대학교)



[회의모습 10] 3차년도 2차 (2008년 11월 7일, 농어촌연구원)



[회의모습 11] 3차년도 3차 (2009년 1월 17일, 건국대학교)



[회의모습 12] 3차년도 4차 (2009년 2월 20일, 한화콘도)

부 록 4



조사대상 저수지 생물자료

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

<부록 4: 차례>

- 부록 4.1 06년 신구저수지 st. 1 (담양: 0 m)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (06년8월24일~06년12월6일)
- 부록 4.2 07년 신구저수지 st. 1 (담양: 0 m)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (07년2월20일~07년5월25일)
- 부록 4.3 06년 신구저수지 st. 1 (담양: 2 m)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (06년9월27일~06년12월6일)
- 부록 4.4 07년 신구저수지 st. 1 (담양: 2 m)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (07년2월20일~07년5월25일)
- 부록 4.5 06년 신구저수지 st. 1 (담양: Bottom)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (06년9월27일~07년4월11일)
- 부록 4.6 06년 신구저수지 st. 2 (식물섬: 0 m)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (06년9월27일~06년12월6일)
- 부록 4.7 07년 신구저수지 st. 2 (식물섬: 0 m)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (07년2월20일~07년5월25일)
- 부록 4.8 06년 신구저수지 st. 2 (식물섬: bottom)의 식물플랑크톤 밀도(cells mL⁻¹) (06년10월25일~06년12월6일)
- 부록 4.9 07년 신구저수지 st. 2 (식물섬: bottom)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (07년2월20일~07년5월25일)
- 부록 4.10 06년 신구저수지 st. 3 (폐타이어 식물섬: 0 m)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (06년9월27일~06년12월6일)
- 부록 4.11 07년 신구저수지 st. 3 (폐타이어 식물섬: 0 m)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (07년2월20일~07년5월25일)
- 부록 4.12 06년 신구저수지 st. 3 (폐타이어 식물섬: bottom)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (06년12월6일~07년5월25일)
- 부록 4.13 06년 신구저수지 st. 1 (담양)의 동물플랑크톤 밀도 (ind. L⁻¹) (06년8월24일~06년12월5일)
- 부록 4.14 07년 신구저수지 st. 1 (담양)의 동물플랑크톤 밀도 (ind. L⁻¹) (07년2월20일~07년5월25일)
- 부록 4.15 06년 신구저수지 st. 2 (식물섬)의 동물플랑크톤 밀도 (ind. L⁻¹) (06년9월17일~06년12월6일)
- 부록 4.16 07년 신구저수지 st. 2 (식물섬)의 동물플랑크톤 밀도 (ind. L⁻¹) (07년2월20일~07년5월25일)
- 부록 4.17 06년 신구저수지 st. 3 (폐타이어 식물섬)의 동물플랑크톤 밀도 (ind. L⁻¹) (06년9월27

일~12월6일)

부록 4.18 07년 신구저수지 st. 3 (페타이어 식물섬)의 동물플랑크톤 밀도 (ind. L⁻¹) (07년2월20일~07년5월25일)

- 부록 4.19 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- Control (zooplankton-ind. L⁻¹)
- 부록 4.20 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- 피복률35% (zooplankton-ind. L⁻¹)
- 부록 4.21 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- 피복률17.4% (zooplankton-ind. L⁻¹)
- 부록 4.22 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- 피복률8.7% (zooplankton-ind. L⁻¹)
- 부록 4.23 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- 피복률4.3% (zooplankton-ind. L⁻¹)
- 부록 4.24 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험- Control (zooplankton-ind. L⁻¹)
- 부록 4.25 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험- 인공수초대 (zooplankton-ind. L⁻¹)
- 부록 4.26 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험- 수변그물섬 (zooplankton-ind. L⁻¹)
- 부록 4.27 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험- 침수식물섬 (zooplankton-ind. L⁻¹)
- 부록 4.28 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- Control (phytoplankton-cells mL⁻¹)
- 부록 4.29 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- 피복률35% (phytoplankton-cells mL⁻¹)
- 부록 4.30 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- 피복률17.4% (phytoplankton-cells mL⁻¹)
- 부록 4.31 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- 피복률8.7% (phytoplankton-cells mL⁻¹)
- 부록 4.32 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- 피복률4.3% (phytoplankton-cells mL⁻¹)
- 부록 4.33 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험- Control (phytoplankton-cells mL⁻¹)
- 부록 4.34 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험- 인공수초대(phytoplankton-cells mL⁻¹)
- 부록 4.35 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험- 수변그물섬 (phytoplankton-cells mL⁻¹)
- 부록 4.36 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험- 침수식물섬 (phytoplankton-cells mL⁻¹)
- 부록 4.37 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사- Control (cells mL⁻¹)
- 부록 4.38 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사- 식물섬 (cells mL⁻¹)
- 부록 4.39 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사- 풍력섬 (cells mL⁻¹)
- 부록 4.40 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사- 침수형식물섬 (cells mL⁻¹)
- 부록 4.41 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사- 침수형미식재 (cells mL⁻¹)
- 부록 4.42 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사- 식물섬(1*8) (cells mL⁻¹)
- 부록 4.43 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사- 식물섬(2*4) (cells mL⁻¹)
- 부록 4.44 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사- 인공수초대(저밀도) (cells mL⁻¹)
- 부록 4.45 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사- 인공수초대(고밀도) (cells mL⁻¹)
- 부록 4.46 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사- 침수 수변그물섬, 침수 인공수초대 (cells mL⁻¹)

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.1 06년 신규저수지 st. 1 (담양: 0 m)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (06년8월24일~06년12월6일)

종 명	2006년 (0 m)			
	8월 24일	9월 27일	10월 25일	12월 6일
Cryptophyceae				
<i>Cryptomonas</i> sp.	246	2,658	701	8,605
Dinophyceae				
<i>Peridinium</i> sp.	10	83	3	111
Cyanophyceae				
<i>Anabaena spiroides</i>	2457			
<i>Anabaena</i> sp.	71	66		
<i>Aphanocapsa</i> sp.		332		
<i>Lyngbya</i> sp.	245,700	1,760,707		
<i>Microcystis aeruginosa</i>	8,217	15,458		
<i>Oscillatoria</i> sp.	29,484	7,072	1,376	7,400
<i>Phormidium tenue</i>	307,125			
Bacillariophyceae				
<i>Achnanthes hungarica</i>				37
<i>Achnanthes minutissima</i>				3
<i>Asterionella gracillima</i>				74
<i>Cyclotella comta</i>			6	9
<i>Cymbella graciles</i>		211		
<i>Cymbella tumida</i>		21		
<i>Cymbella turgida</i>		21		
<i>Diatoma vulgare</i>	31	21		
<i>Diatoma</i> sp.				3
<i>Melosira granulata</i>	28	83	60	1,739
<i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	123	50	751	74
<i>Melosira varians</i>		13	66	12
<i>Navicula cryptocephala</i>		83	3	
<i>Navicula exigua</i>			9	
<i>Nitzschia frustulum</i>		66		
<i>Synedra acus</i>	61	21	375	74
<i>Synedra ulna</i>	5	42	75	37
Chlorophyceae				
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>				37
<i>Ankistrodesmus longissima</i>	5			3
<i>Ankistrodesmus spiralis</i>	61	21	9	
<i>Asterococcus limneticus</i>		21	18	3
<i>Asterococcus superbus</i>		249		
<i>Chlorella</i> sp.	39			
<i>Coelastrum sphaericum</i>	40			
<i>Cosmarium impressulum</i>	2			
<i>Cosmarium pachydermum</i>		7		
<i>Euastrum binale</i>	61			
<i>Pediastrum duplex</i>	76			
<i>Pediastrum simplex</i>	19	106	24	
<i>Quadrigula chodatii</i>	37			21
<i>Scenedesmus acuminatus</i>		250	38	
<i>Scenedesmus armatus</i> var. <i>bicaudatus</i>				12
<i>Scenedesmus bijuga</i>		250		
<i>Scenedesmus ellipsoideus</i>	491	416	150	148
<i>Selenastrum minutum</i>			6	
<i>Staurastrum dickiei</i>	92			
<i>Staurastrum gracile</i>	5			
<i>Tetraedron</i> sp.	49			

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.2 07년 신규저수지 st. 1 (담양: 0 m)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (07년2월20일~07년5월25일)

종 명	2007년 (0 m)			
	2월 20일	3월 25일	4월 11일	5월 25일
Cryptophyceae				
<i>Cryptomonas</i> sp.	73	32		
Dinophyceae				
<i>Peridinium</i> sp.	19	20	30	
Cyanophyceae				
<i>Anabaena</i> sp.		80	1343	59,500
<i>Aphanocapsa</i> sp.	120	658	240	22,460
<i>Lyngbya</i> sp.		340	2,488	5,100
<i>Microcystis aeruginosa</i>		340		
<i>Oscillatoria</i> sp.	100	26,800	72,637	72,250
<i>Phormidium tenue</i>		2,594		
Bacillariophyceae				
<i>Achnanthes hungarica</i>	40	58		
<i>Achnanthes minutissima</i>	5	34		
<i>Asterionella gracillima</i>	75	45		
<i>Cyclotella comta</i>		20	14	
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	5	30	14	
<i>Cymbella graciles</i>		95		
<i>Cymbella turgida</i>	8	34		
<i>Cymbella ventricosa</i>		25	3	
<i>Diatoma vulgare</i>	3			
<i>Diatima</i> sp.		8		
<i>Melosira granulata</i>	250	35	98	425
<i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>		980	299	51
<i>Melosira varians</i>		50	24	68
<i>Navicula cryptocephala</i>	30	83	9	17
<i>Navicula exigua</i>		33		
<i>Navicula rhyncocephala</i>			3	
<i>Synedra acus</i>	85	54	12	680
<i>Synedra ulna</i>	12	12		
Chlorophyceae				
<i>Actinastrum hantzschii</i>	50	32	56	136
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	18	45		34
<i>Ankistrodesmus longissima</i>	24		14	17
<i>Ankistrodesmus spiralis</i>			12	
<i>Asterococcus limneticus</i>		25	3	
<i>Asterococcus superbus</i>	12	34		
<i>Coelastrum reticulatum</i>		40		170
<i>Coelastrum sphaericum</i>		20		136
<i>Cosmarium impressulum</i>	5			
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	3	32	48	136
<i>Micractinium pusillum</i>			112	
<i>Pediastrum boryanum</i>				544
<i>Pediastrum duplex</i>				816
<i>Quadrigula chodatii</i>			24	68
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	8	52	168	68
<i>Scenedesmus bijuga</i>	9	15		68
<i>Scenedesmus bijuga</i> var. <i>alternans</i>				68
<i>Scenedesmus dimorphus</i>				4,420
<i>Scenedesmus ellipsoideus</i>		258	1,194	68
<i>Scenedesmus longispina</i>		154	199	680
<i>Schroederia setigera</i>				17
<i>Staurastrum gracile</i>		32		
<i>Tetraedron elegans</i>	16	12	56	

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.3 06년 신규저수지 st. 1 (담양: 2 m)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (06년9월27일~06년12월6일)

종 명	2006년 (2 m)		
	9월 27일	10월 25일	12월 6일
Cryptophyceae			
<i>Cryptomonas</i> sp.	608	78	10,480
Dinophyceae			
<i>Peridinium</i> sp.			72
Cyanophyceae			
<i>Anabaena</i> sp.	247		
<i>Aphanocapsa</i> sp.	209		
<i>Chroococcus</i> sp.	18		
<i>Lyngbya</i> sp.	118,421	910	
<i>Merismopedia elegans</i>	912	336	
<i>Microcystis aeruginosa</i>	289		
<i>Oscillatoria</i> sp.	6,080	4,160	9,360
Bacillariophyceae			
<i>Achnanthes exigua</i>		52	
<i>Achnanthes linearis</i>		7	
<i>Cocconeis placentula</i>		3	
<i>Cyclotella comta</i>	38	28	
<i>Cyclotella meneghiniana</i>		7	
<i>Diatoma vulare</i>			4
<i>Gomphonema olivaceum</i>		26	
<i>Melosira granulata</i>		126	1,008
<i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	475	1,406	144
<i>Melosira varians</i>		91	35
<i>Navicula cryptocephala</i>	57		
<i>Synedra acus</i>	19	104	4
<i>Synedra ulna</i>		26	72
Chlorophyceae			
<i>Ankistrodesmus longissima</i>			4
<i>Ankistrodesmus spiralis</i>	3	26	4
<i>Asterococcus limneticus</i>	38	3	
<i>Asterococcus superbis</i>			12
<i>Cosmarium pachydermum</i>	38		
<i>Euastrum binale</i>			4
<i>Pediastrum duplex</i>			64
<i>Pediastrum simplex</i>	1,520	208	
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	228	104	
<i>Scenedesmus bijuga</i>	12	208	16
<i>Scenedesmus bijuga</i> var. <i>alternans</i>	49		
<i>Scenedesmus ellipsoideus</i>	152	56	32
<i>Scenedesmus obliquus</i>	12		
<i>Selenastrum minutum</i>		3	

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.4 07년 신규저수지 st. 1 (담양: 2 m)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (07년2월20일~07년5월25일)

종 명	2007년 (2 m)			
	2월 20일	3월 25일	4월 11일	5월 25일 (1.5 m bottom)
Cryptophyceae				
<i>Cryptomonas</i> sp.	50	15		
Dinophyceae				
<i>Peridinium</i> sp.	15	29	69	
Cyanophyceae				
<i>Anabaena</i> sp.		3,580	12,300	4,440
<i>Aphanocapsa</i> sp.	120	2,420		
<i>Chroococcus</i> sp.	35	24		
<i>Lyngbya</i> sp.			14,377	300
<i>Oscillatoria</i> sp.	150	2,588	22,364	10,360
Bacillariophyceae				
<i>Achnanthes linearis</i>	25			
<i>Cyclotella comta</i>		34		15
<i>Cyclotella meneghiniana</i>		168	160	
<i>Diatoma vulgare</i>	18			
<i>Fragilaria construens</i>				45
<i>Gomphonema constrictum</i>				30
<i>Melosira granulata</i>	150	885		1,332
<i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	150	1,920	1,278	962
<i>Melosira varians</i>	34	102	92	120
<i>Navicula cryptocephala</i>		83	6	15
<i>Naviculea exigua</i>				15
<i>Navicula placentula</i>		50		30
<i>Nitzschia frustulum</i>		38	160	
<i>Synedra acus</i>	5	70	69	296
<i>Synedra ulna</i>	30	8	6	
Chlorophyceae				
<i>Actinastrum hantzschii</i>		80	92	90
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>		35	24	45
<i>Ankistrodesmus longissima</i>	8	20		222
<i>Ankistrodesmus spiralis</i>	9	11	23	
<i>Asterococcus limneticus</i>				15
<i>Asterococcus superbus</i>	15			15
<i>Coelastrum reticulatum</i>				150
<i>Coelastrum</i> sp.		84	20	
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>		150	1,920	
<i>Euastrum binale</i>	9			
<i>Micractinium pusillum</i>		88	96	
<i>Pediastrum duplex</i>	13			476
<i>Pediastrum simplex</i>				180
<i>Scenedesmus acuminatus</i>		20	24	
<i>Scenedesmus bijuga</i>	29			180
<i>Scenedesmus bijuga</i> var. <i>alternans</i>				
<i>Scenedesmus dimorphus</i>		150	184	2,960
<i>Scenedesmus ellipsoideus</i>	39	38	24	60
<i>Scenedesmus longispina</i>		54	639	60
<i>Selenastrum minutum</i>		9		
<i>Staurastrum dorsidentiferum</i>		54	23	

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.5 06년 신규저수지 st. 1 (댐앞: Bottom)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (06년9월27일~07년4월11일)

종 명	2006년 (bottom)			2007년
	9월 27일	10월 25일	12월 6일	4월 11일
Cryptophyceae				
<i>Cryptomonas</i> sp.	35		5,962	
Dinophyceae				
<i>Peridinium</i> sp.		2	90	
Cyanophyceae				
<i>Anabaena</i> sp.	208			4,500
<i>Lyngbya</i> sp.	332,061	670		897
<i>Oscillatoria</i> sp.	1,908	4,685	22,050	15,000
Bacillariophyceae				
<i>Achnanthes brevipes</i>	4			
<i>Cyclotella comta</i>	35	3	90	75
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	35	3		75
<i>Cymbella graciles</i>	4			
<i>Cymbella tumida</i>			14	
<i>Diatoma vulare</i>			45	
<i>Diatoma</i> sp.		2	7	
<i>Gomphonema augur</i>	4			
<i>Gomphonema olivaceum</i>	4			
<i>Melosira granulata</i>	69	502	990	90
<i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	5,630	234	855	1050
<i>Melosira varians</i>	277	36	36	
<i>Navicula cryptocephala</i>	29	3		9
<i>Navicula cryptocephala</i> var. <i>veneta</i>				9
<i>navicula exigua</i>	4		7	
<i>Navicula hasta</i>				9
<i>Navicula placentula</i>			7	
<i>Navicula pupula</i>		3		
<i>Neidium dubium</i>		2		
<i>Nitzschia frustulum</i>	115			
<i>Nitzschia obtusa</i>	4			
<i>Pinnularia gibba</i>		2		
<i>Surirella tenera</i>	4			
<i>Synedra acus</i>	382	134	135	150
<i>Synedra pulchella</i>	12			
<i>Synedra ulna</i>	763	67	21	
Chlorophyceae				
<i>Actinastrum hantzschii</i>				72
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>			14	18
<i>Ankistrodesmus longissima</i>				9
<i>Ankistrodesmus spiralis</i>		3	7	
<i>Asterococcus limneticus</i>		3		
<i>Asterococcus superbus</i>	31	3		
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>				1,050
<i>Gloeocystis gigas</i>		12		
<i>Pediastrum simplex</i>	138	14		144
<i>Quadrigula chodatii</i>			111	
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	69	12	56	300
<i>Scenedesmus bijuga</i>		12	36	
<i>Scenedesmus ellipsoideus</i>	346	72		
<i>Scenedesmus longispina</i>				80
<i>Scenedesmus gracile</i>	4			

부록 4.6 06년 신규저수지 st. 2 (아섬 식물섬: 0 m)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (06년9월27일~ 06년12월6일)

종 명	2006년 (0 m)		
	9월 27일	10월 25일	12월6일
Cryptophyceae			
<i>Cryptomonas</i> sp.	2,802	8,397	15,868
Dinophyceae			
<i>Peridinium</i> sp.		8	60
Cyanophyceae			
<i>Anabaena spiroides</i>	118		
<i>Anabaena</i> sp.			348
<i>Aphanocapsa delicatissima</i>			8,880
<i>Aphanocapsa</i> sp.	1475		
<i>Lyngbya</i> sp.	1,327,434	763	
<i>Microcystis aeruginosa</i>	3,897		
<i>Oscillatoria</i> sp.	2,360	2,560	10,329
Bacillariophyceae			
<i>Cyclotella comta</i>	3	4	48
<i>Cymbella tumida</i>	3		
<i>Melosira granulata</i>		382	1,500
<i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	472	1,527	400
<i>Melosira varians</i>		256	60
<i>Navicula cryptocephala</i>	29		
<i>Navicula placentula</i>		9	12
<i>Navicula radiosa</i>			12
<i>Neidium affine</i>		4	
<i>Synedra acus</i>	6	127	200
<i>Synedra ulna</i>	59		50
Chlorophyceae			
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	3	64	
<i>Ankistrodesmus longissima</i>			24
<i>Ankistrodesmus spiralis</i>		64	12
<i>Asterococcus limneticus</i>	88		12
<i>Asterococcus superbus</i>	88	9	
<i>Coelastrum reticulatum</i>		31	
<i>Coelastrum sphaericum</i>	147		
<i>Cosmarium pachydermum</i>	59		
<i>Micractinium pusillum</i>		92	192
<i>Pediastrum duplex</i>	47	1,024	
<i>Pediastrum simplex</i>	1,770	72	
<i>Quadrigula chodatii</i>		640	
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	118	36	96
<i>Scenedesmus bijuga</i>	354	51	
<i>Scenedesmus dimorphus</i>		36	
<i>Scenedesmus ellipsoideus</i>	354	256	48
<i>Selenastrum westii</i>		9	
<i>Staurastrum dorsidentiferum</i>	59		
<i>Staurastrum elegantissimum</i>	3		
<i>Staurastrum megacanthum</i>	59		

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.7 07년 신구저수지 st. 2 (아섬 식물상: 0 m)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (07년2월20일~07년5월25일)

종 명	2007년 (0 m)			
	2월 20일	3월 25일	4월 11일	5월 25일
Chrysophyceae				
<i>Dinobryon divergens</i>	450	250	20	
Cryptophyceae				
<i>Cryptomonas</i> sp.	1,485	45		
Dinophyceae				
<i>Peridinium</i> sp.	50	3	5	
Cyanophyceae				
<i>Anabaena</i> sp.	30	580	5,751	13,398
<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	871			
<i>Aphanocapsa</i> sp.		200	150	650
<i>Aphanothece</i> sp.				120
<i>Coelosphaerium</i> sp.				1,058
<i>Lyngbya</i> sp.		400	568	5,280
<i>Microcystis aeruginosa</i>				
<i>Oscillatoria</i> sp.	105	2,015	20,590	33,000
Bacillariophyceae				
<i>Asterionella gracillima</i>		20	5	
<i>Cyclotella comta</i>	50	50	5	
<i>Cymbella ventricosa</i>		45	5	
<i>Melosira granulata</i>	1,350	450		12
<i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	300	2,581	3,479	307
<i>Melosira spiroides</i>			40	
<i>Melosira varians</i>	50	30		
<i>Navicula cryptocephala</i>				3
<i>Navicula exigua</i>	3	8	5	
<i>Navicula placentula</i>	10			
<i>Navicula radiosa</i>	10			
<i>Pinnularia gibba</i>		10	5	
<i>Pleurosigmasp.</i>		10	5	
<i>Synedra acus</i>	180	100	284	858
<i>Synedra ulna</i>	40			
Chlorophyceae				
<i>Actinastrum hantzchii</i>	62	30	40	104
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>		60	71	
<i>Ankistrodesmus longissima</i>				13
<i>Ankistrodesmus spiralis</i>	10	8	5	
<i>Asterococcus limneticus</i>	10	8	5	3
<i>Asterococcus superbus</i>	9			
<i>Chodatella</i> sp.		15	20	
<i>Coelastrum cambricum</i>				36
<i>Micractinium pusillum</i>	19	30	40	
<i>Pediastrum duplex</i>				832
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	80	500	852	12
<i>Scenedesmus bijuga</i>		150	284	
<i>Scenedesmus dimorphus</i>		10	40	10,032
<i>Scenedesmus ellipsoideus</i>	32	10	20	
<i>Scenedesmus longispina</i>		100	284	12
<i>Schroederia setigera</i>				3

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.8 06년 신구저수지 st. 2 (아썸 식물상: bottom)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (06년10월25일~06년12월6일)

종 명	2006년 (bottom)	
	10월 25일 (1m)	12월 6일 (1.5 m)
Cryptophyceae		
<i>Cryptomonas</i> sp.	5,806	11,765
Dinophyceae		
<i>Peridinium</i> sp.		47
Cyanophyceae		
<i>Lyngbya</i> sp.	538	
<i>Oscillatoria</i> sp.	1,344	12,220
Bacillariophyceae		
<i>Cyclotella comta</i>	4	
<i>Diatoma</i> sp.		3
<i>Melosira granulata</i>	296	658
<i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	1,290	140
<i>Melosira varians</i>		34
<i>Navicula placentula</i>	4	3
<i>Navicula pupula</i>	4	
<i>Synedra acus</i>	54	94
<i>Synedra ulna</i>	54	
Chlorophyceae		
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	4	12
<i>Asterococcus limneticus</i>	8	3
<i>Pediastrum duplex</i>	64	
<i>Quadrigula chodatii</i>	8	
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	48	48
<i>Scenedesmus bijuga</i>	16	12
<i>Scenedesmus ellipsoideus</i>	108	11

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.9 07년 신규저수지 st. 2 (아뾀 식물삼: bottom)의 식물플랑크톤 밀도 (cells mL⁻¹) (07년2월20일~07년5월25일)

종 명	2007년 (bottom)			
	2월 20일	3월 25일	4월 11일	5월 25일
	2 m	1.5 m	2 m	2 m
Chrysophyceae				
<i>Dinobryon divergens</i>	12	120	720	
Cryptophyceae				
<i>Cryptomonas</i> sp.	150	18		
Dinophyceae				
<i>Peridinium</i> sp.	58	55	80	
Cyanophyceae				
<i>Anabaena flos-aquae</i>				1,276
<i>Anabaena</i> sp.		3,000	4,560	14,800
<i>Aphanocapsa</i> sp.				450
<i>Lyngbya</i> sp.		1,200	6,400	580
<i>Oscillatoria</i> sp.	1,500	5,580	8,000	14,800
Bacillariophyceae				
<i>Cyclotella comta</i>	3	30	80	3
<i>Diatoma</i> sp.	2	15		
<i>Fragilaria construens</i>		19	18	
<i>Hantzschia amphioxys</i>		8	9	
<i>Melosira granulata</i>	500	35		348
<i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	110	1,854	1,840	592
<i>Melosira varians</i>	38	200	160	
<i>Navicula cryptocephala</i>				6
<i>Navicula dicephala</i>				3
<i>Navicula laterostrata</i>		8	9	
<i>Navicula placentula</i>	3			
<i>Pinnularia gibba</i>				3
<i>Synedra acus</i>	80	200	160	370
<i>Synedra ulna</i>	13	50	80	
Chlorophyceae				
<i>Actinastrum hantzschii</i>		35	36	47
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	10			87
<i>Ankistrodesmus longissima</i>		78	80	74
<i>Asterococcus limneticus</i>	2	12	9	
<i>Coelastrum reticulatum</i>	15			232
<i>Cosmarium</i> sp.				29
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>		70	72	
<i>Micractinium pusillum</i>		70	72	
<i>Pediastrum duplex</i>				236
<i>Pediastrum simplex</i>				15
<i>Quadrigula chodatii</i>		30	27	
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	35	130	144	
<i>Scenedesmus armatus</i>		25	36	
<i>Scenedesmus bijuga</i>	10			
<i>Scenedesmus dimorphus</i>				4,144
<i>Scenedesmus ellipsoideus</i>	10			116
<i>Scenedesmus longispina</i>				232
<i>Scenedesmus maximus</i>		55	36	
<i>Schroederia setigera</i>		18	9	

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.10 06년 신구저수지 st. 3 (페타이어 식물섬: 0 m)의 식물플랑크톤 밀도(cells mL⁻¹) (06년9월27일~ 06년12월6일)

종 명	2006년 (0 m)		
	9월 27일	10월 25일	12월 6일
Cryptophyceae			
<i>Cryptomonas</i> sp.	2821	15,359	14,379
Dinophyceae			
<i>Peridinium</i> sp.	67	3	26
Cyanophyceae			
<i>Anabaena spiroides</i>	141		
<i>Aphanocapsa</i> sp.	1,003		
<i>Lyngbya</i> sp.	1,442,006	1,089	
<i>Merismopedia elegans</i>	50		
<i>Microcystis aeruginosa</i>	1,791		
<i>Oscillatoria</i> sp.	1,003	14,161	9,804
Bacillariophyceae			
<i>Achnanthes brevipes</i>		54	
<i>Cocconeis placentula</i>		3	
<i>Cyclotella comta</i>			3
<i>Cyclotella meneghiniana</i>		54	
<i>Melosira granulata</i>		327	3,350
<i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	940	654	1,389
<i>Melosira varians</i>		70	327
<i>Navicula cryptocephala</i>		54	
<i>Nitzschia frustulum</i>	22		
<i>Nitzschia gracile</i>	3		
<i>Pinnularia gibba</i>		3	
<i>Synedra acus</i>		294	109
<i>Synedra ulna</i>		33	109
<i>Tabellaria flocculosa</i>			26
Chlorophyceae			
<i>Actinastrum hantzschii</i>			
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>		14	
<i>Ankistrodesmus longissima</i>			7
<i>Ankistrodesmus spiralis</i>		33	
<i>Asterococcus limneticus</i>		33	
<i>Asterococcus superbus</i>	9	7	
<i>Coelastrum</i> sp.	50		
<i>Cosmarium quadriatum</i>	3		
<i>Micractinium pusillum</i>		28	
<i>Pediastrum simplex</i>	358		
<i>Quadrigula chodatii</i>			13
<i>Scenedesmus acuminatus</i>		56	13
<i>Scenedesmus bijuga</i>	90	56	39
<i>Scenedesmus ellipsoideus</i>	179	132	26
<i>Selenastrum minutum</i>		7	
<i>Staurastrum gracile</i>	6		

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.11 07년 신규저수지 st. 3 (페타이어 식물섬: 0 m)의 식물플랑크톤 밀도(cells mL⁻¹) (07년2월20일~07년5월25일)

종 명	2007년 (0 m)			
	2월 20일	3월 25일	4월 11일	5월 25일
Chrysophyceae				
<i>Dinobryon divergens</i>	15	50	40	
Cryptophyceae				
<i>Cryptomonas</i> sp.	358			
Dinophyceae				
<i>Peridinium</i> sp.	25			14
Cyanophyceae				
<i>Anabaena</i> sp.		3,000	2,380	20,746
<i>Aphanocapsa</i> sp.		1,580	2,000	4,600
<i>Aphanothece</i> sp.				140
<i>Coelosphaerium</i> sp.				1,359
<i>Lyngbya</i> sp.		254	1,700	6,560
<i>Oscillatoria</i> sp.	3,500	8,500	23,290	34,440
Bacillariophyceae				
<i>Achnanthes brevipes</i>	8			
<i>Cocconeis placentula</i>	3	3		
<i>Cyclotella comta</i>	5			
<i>Cymbella ventricosa</i>		16	8	
<i>Gomphonema constrictum</i>		8	8	
<i>Melosira granulata</i>	2,500	250	104	
<i>Melosira granulata</i> var . <i>angustissima</i>	1,500	2,500	3,485	328
<i>Melosira varians</i>	32	80	72	28
<i>Navicula cryptocephala</i>	54	5	8	7
<i>Nitzschia frustulum</i>	80			
<i>Nitzschia gracile</i>	24			
<i>Pinnularia gibba</i>		9	8	
<i>Pleurosigmasp.</i>				23
<i>Synedra acus</i>	100	250	255	410
<i>Synedra ulna</i>	50	16	8	
<i>Tabellaria flocculosa</i>	30			
Chlorophyceae				
<i>Actinastrum hantzschii</i>				184
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	4			69
<i>Ankistrodesmus longissima</i>	8	10	8	23
<i>Ankistrodesmus spiralis</i>				
<i>Asterococcus limneticus</i>		10	8	
<i>Asterococcus superbis</i>		10	8	
<i>Coelastrum cambricum</i>				184
<i>Micractinium pusillum</i>		130	128	
<i>Palmella mucosa</i>		160	152	
<i>Pediastrum duplex</i>				368
<i>Pediastrum simplex</i>				161
<i>Quadrigula chodatii</i>	20			
<i>Scenedesmus abundanca</i>				92
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	18	80	96	
<i>Scenedesmus bijuga</i>	20	45	32	92
<i>Scenedesmus dimorphus</i>		88	64	5904
<i>Scenedesmus ellipsoideus</i>				92
<i>Scenedesmus longispina</i>		60	96	92
<i>Schroederia setigera</i>		6	8	
<i>Staurastrum longiradiatum</i>				21

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.12 06년 신구저수지 st. 3 (페타이어 식물섬: bottom)의 식물플랑크톤 밀도(cells mL⁻¹) (06년12월6일~07년5월25일)

종 명	2006년 (bottom)	2007년 (bottom)			
	12월 6일	2월 20일	3월 25일	4월 11일	5월 25일
	1.5 m	1.5 m	1.5 m	2 m	1.5 m
Cryptophyceae					
<i>Cryptomonas</i> sp.	8,772	300			
Dinophyceae					
<i>Peridinium</i> sp.	73	50	30	27	20
Cyanophyceae					
<i>Anabaena</i> sp.			3,450	5,520	12,000
<i>Aphanothece</i> sp.			150		120
<i>Lyngbya</i> sp.			128	1,380	3,600
<i>Oscillatoria</i> sp.	5,840	450	7,250	17,250	19,200
Bacillariophyceae					
<i>Cyclotella comta</i>	13	12			2
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	4	3			6
<i>Cymbella ventricosa</i>			8	9	
<i>Fragilaria construens</i>			25	18	
<i>Gomphonema sphaerophorum</i>	4	5			
<i>Melosira granulata</i>	1,316	120	200	54	180
<i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	803	850	4,000	3,174	660
<i>Melosira varians</i>			50	36	160
<i>Navicula angulica</i>					6
<i>Navicula cryptocephala</i>			15	27	12
<i>Neidium dubium</i>			3		6
<i>Synedra acus</i>	73	45	200	207	360
<i>Synedra rumpens</i>			8	9	
<i>Synedra ulna</i>	146	200	8	9	
Chlorophyceae					
<i>Actinastrum hantzschii</i>			20	36	19
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	4	45	20	36	
<i>Ankistrodesmus longissima</i>					180
<i>Asterococcus limneticus</i>	73	18	3		
<i>Asterococcus superbus</i>	73	18	8	9	
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>			150	144	
<i>Pediastrum duplex</i>			130	144	960
<i>Pediastrum simplex</i>					14
<i>Quadrigula chodatii</i>	9	6	25	27	
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	18	8	50	72	10
<i>Scenedesmus bijuga</i>	18	8	40	72	24
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	584	30			4320
<i>Scenedesmus ellipsoideus</i>	35	45	20	36	80
<i>Scenedesmus longispina</i>		25	50	36	321
<i>Scenedesmus maximus</i>			38	36	
<i>Schroederia setigera</i>			8	9	

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.13 06년 신구저수지 st. 1 (댐앞)의 동물플랑크톤 밀도 (ind. L⁻¹) (06년8월24일~06년12월5일)

종 명	2006년 (0~2 m)			
	8월 24일	9월 27일	10월 25일	12월 5일
Protozoa				
<i>Difflugia corona</i>				301
<i>Trachelomonas</i> sp.		26		
<i>Vampyrella campanula</i>				301
Rotatoria				
<i>Brachionus angularia</i> var. <i>.bidens</i>				100
<i>Brachionus calyciflorus</i>	517	171		100
<i>Brachionus falcatus</i>	603	26	18	
<i>Keratella cochlearis</i>		171		903
<i>Keratella valga</i>		86	18	
<i>Notholca acuminata</i>		86		
<i>Polyarthra euryptera</i>				502
<i>Polyarthra trigla</i>				301
<i>Pompholyx complanata</i>		86		100
<i>Trichocerca</i> sp.	86			
Brachiopoda				
<i>Bosmina coregoni</i>			180	100
<i>Bosmina longirostris</i>			18	
<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	26	171		
<i>Holopedium</i> sp.			180	
<i>Leptodora kindtii</i>			36	
<i>Sida crystallina</i>	26			
Copepoda				
<i>Cyclops</i> sp.	431	513		30
<i>Mesocyclops</i> sp.	258	770	990	502
Nauplius of <i>Copepoda</i>	1,551	428	1,350	702
<i>Thermocyclops</i> sp.			18	301

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.14 07년 신구저수지 st. 1 (댐앞)의 동물플랑크톤 밀도 (ind. L⁻¹) (07년2월20일~07년5월25일)

종 명	2007년 (0~2 m)			
	2월 20일	3월 25일	4월 11일	5월 25일
Protozoa				
<i>Diffugia corona</i>	250			
<i>Tintinnopsis cratera</i>	500	345	86	
<i>Trachelomonas</i> sp.	500			
<i>Vampyrella campanula</i>	200			
Rotatoria				
<i>Brachionus angularis</i> var. <i>bidens</i>	200	480	541	
<i>Brachionus calyciflorus</i>	380	100	257	
<i>Brachionus forficula</i>	450			
<i>Keratella cochlearis</i>	940			
<i>Keratella cochlearis</i> var. <i>tecta</i>		75	86	376
<i>Keratella cochlearis</i> var. <i>tecta</i> f. <i>macracantha</i>				94
<i>Polyarthra euryptera</i>	805			
<i>Polyarthra trigla</i>	408	180	283	
<i>Pompholyx complanata</i>	200			
<i>Trichocerca</i> sp.		54	34	
Brachiopoda				
<i>Bosmina coregoni</i>				2,725
Copepoda				
<i>Macrocylops</i> sp.		100	172	376
<i>Mesocyclops</i> sp.			69	
Nauplius of <i>Copepoda</i>	500	120	172	846
Rotatoria				
<i>Brachionus angularis</i> var. <i>bidens</i>		5,360		
<i>Brachionus calyciflorus</i>		315		
<i>Filinia longiseta</i>		32		
<i>Polyarthra trigla</i>		105		
Copepoda				
<i>Macrocylops</i> sp.		105		
<i>Mesocyclops</i> sp.		32		
Nauplius of <i>Copepoda</i>		315		

부록 4.15 06년 신규저수지 st. 2 (아섬 식물섬)의 동물플랑크톤 밀도(ind. L⁻¹) (06년9월17일~06년12월6일)

종 명	2006년 (0~1 m)		
	9월 27일	10월 25일	12월6일
Protozoa			
<i>Carchesium polypinum</i>		1,116	
<i>Diffugia corona</i>		46	
<i>Tintinnopsis cratera</i>		186	
<i>Trachelomonas</i> sp.	100		
<i>Vampyrella campanula</i>			98
Rotatoria			
<i>Asplanchna</i> sp.			98
<i>Brachionus calyciflorus</i>	598	651	294
<i>Brachionus diversicornis</i>		186	
<i>Brachionus forficula</i>	100		
<i>Filinia longiseta</i>	30	28	29
<i>Keratella cochlearis</i>	70	28	196
<i>Keratella valga</i>	70		
<i>Polyarthra euryptera</i>	30		98
<i>Polyarthra trigla</i>		46	98
<i>Pompholyx complanata</i>			98
<i>Trichocerca porcellus</i>		46	
<i>Trichocerca tenuior</i>	199		
Brachiopoda			
<i>Bosmina coregoni</i>	199	93	196
<i>Bosmina longirostris</i>			29
<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	30		
<i>Leptodera kindtii</i>	100		
<i>Polyphemus pediculus</i>	199		
Copepoda			
<i>Cyclops</i> sp.	299	28	
<i>Mesocyclops</i> sp.	1,096	279	489
Nauplius of <i>Copepoda</i>	1,495	558	685
<i>Thermocyclops</i> sp.		46	98

부록 4.16 07년 신규저수지 st. 2 (아섬 식물섬)의 동물플랑크톤 밀도(ind. L⁻¹) (07년2월20일~07년5월25일)

종 명	2007년			
	2월 20일	3월 25일	4월 11일	5월 25일
	0~2 m	0~1.5 m	0~2 m	0~1.5 m
Protozoa				
<i>Carchesium polypinum</i>	34	50		1115
<i>Diffugia corona</i>	450			
<i>Tintinnopsis cratera</i>	200	30	24	
<i>Trachelomonas</i> sp.	200	30		
<i>Vampyrella campanula</i>	50			
Rotatoria				
<i>Asplanchna</i> sp.	120			
<i>Brachionus angularis</i> var . <i>bidens</i>	120	1580	1884	
<i>Brachionus calyciflorus</i>	300	468	236	
<i>Brachionus diversicornis</i>				149
<i>Brachionus forficula</i>	15			
<i>Filinia longiseta</i>	15	35		
<i>Keratella cochlearis</i>	250			
<i>Keratella cochlearis</i> var . <i>tecta</i>	380	40	39	372
<i>Keratella cochlearis</i> var. <i>tecta</i> f. <i>micracantha</i>	240	58	24	74
<i>Polyarthra euryptera</i>	350	300		
<i>Polyarthra trigla</i>		500	471	
<i>Pompholyx complanata</i>		120		
<i>Trichocerca</i> sp.		120	79	
Brachiopoda				
<i>Bosmina coregoni</i>	15	50	39	594
<i>Bosmina longirostris</i>		10		
Copepoda				
<i>Eucyclops</i> sp.		80	79	
<i>Mesocyclops</i> sp.			118	149
Nauplius of <i>Copepoda</i>	150	200	157	297

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.17 06년 신규저수지 st. 3 (페타이어 식물섬)의 동물플랑크톤 밀도(ind. L⁻¹) (06년9월27일~12월6일)

종 명	2006년		
	9월 27일	10월 25일	12월 6일
	0~0.5 m	0~1 m	0~1.5 m
Protozoa			
<i>Carchesium polypinum</i>	1,079		
<i>Diffugia corona</i>		90	73
<i>Tintinnopsis cratera</i>		27	
<i>Trachelomonas</i> sp.	98		
<i>Vampyrella campanula</i>			290
<i>Vorticella</i> sp.	98		
Rotatoria			
<i>Anuraeopsis fissa</i>		27	
<i>Asplanchna</i> sp.	29		73
<i>Brachionus calyciflorus</i>	98	718	218
<i>Brachionus diversicornis</i>		718	
<i>Brachionus forficula</i>	98		
<i>Filinia longiseta</i>	29		
<i>Keratella cochlearis</i>	29	27	654
<i>Keratella valga</i>	98	180	
<i>Polyarthra euryptera</i>		54	73
<i>Polyarthra trigla</i>			218
<i>Trichocerca capucina</i>		180	
<i>Trichocerca</i> sp.	29		
Brachiopoda			
<i>Bosmina coregoni</i>	98	54	
<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	98		
Copepoda			
<i>Cyclops</i> sp.	98		73
<i>Mesocyclops</i> sp.	196	90	363
Nauplius of <i>Copepoda</i>	589	359	290
<i>Thermocyclops</i> sp.		90	73

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.18 07년 신규저수지 st. 3 (페타이어 식물섬)의 동물플랑크톤 밀도(ind. L⁻¹) (07년2월20일~07년5월25일)

종 명	2007년			
	2월 20일	3월 25일	4월 11일	5월 25일
	0~1.5 m	0~1.5 m	0~2 m	0~1.5 m
Protozoa				
<i>Carchesium polypinum</i>	250			80
<i>Diffugia corona</i>	180			230
<i>Tintinnopsis cratera</i>	200	250		
<i>Trachelomonas</i> sp.	200	250		
<i>Vampyrella campanula</i>	100			
Rotatoria				
<i>Anuraeopsis fissa</i>	10			80
<i>Asplanchna</i> sp.	80			
<i>Brachionus angularis</i>	50	1,200		57
<i>Brachionus angularis</i> var. <i>bidens</i>		1,500	1,544	
<i>Brachionus calyciflorus</i>	100	600	772	
<i>Brachionus diversicornis</i>				57
<i>Keratella cochlearis</i>	300			
<i>Keratella cochlearis</i> var. <i>tecta</i>	100	250	193	34
<i>Keratella cochlearis</i> var. <i>f.micracantha</i>		180	96	
<i>Polyarthra euryptera</i>	38	180		
<i>Polyarthra trigla</i>	50	390	579	
Brachiopoda				
<i>Bosmina coregoni</i>			29	459
Copepoda				
<i>Eucyclops</i> sp.				80
<i>Macrocyclus</i> sp.		350	125	
<i>Mesocyclops</i> sp.			289	345
Nauplius of <i>Copepoda</i>	150	580	675	1,378

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.19 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- Control (zooplankton-ind. L⁻¹)

종 명	8월 12일	8월 13일	8월 14일	8월 16일	8월 18일	8월 20일	8월 22일
Protozoa							
<i>Pontigulasia</i> sp.	3	0	0	30	20	10	0
Rotifera							
<i>Asplanchna</i> sp.	0	30	30	0	5	0	0
<i>Brachionus calyciflorus</i>	50	180	430	150	75	0	0
<i>Brachionus forficula</i>	153	225	120	10	35	15	5
<i>Euclanis dilatata</i>	0	0	0	10	0	30	0
<i>Filinia longiseta</i>	17	105	30	10	5	0	0
<i>Keratella valga</i>	210	150	110	50	130	75	45
<i>Keratella cochlearis</i>	57	0	0	0	0	0	0
<i>Keratella cruciformis</i>	60	25	20	20	60	60	80
<i>Lepadalla</i> sp.	0	0	0	0	0	10	0
<i>Monostyla bulla</i>	0	0	0	0	0	5	0
<i>Polyarthra remata</i>	330	375	140	130	15	5	10
<i>Pompholix complanata</i>	17	125	100	20	210	5	65
<i>Schizocerca diversicornis</i>	33	60	0	0	0	0	0
<i>Trichocera marina</i>	203	600	310	150	410	70	170
<i>Trichocera longispina</i>	10	10	0	0	0	0	0
Cladocera							
<i>Bosmina longispina</i>	0	0	0	0	10	0	0
<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	0	0	0	0	15	0	30
<i>Simocephalus vetulus</i>	0	0	0	0	5	0	0
Copepoda							
<i>Thermocyclops taihokuensis</i>	0	0	0	0	20	0	40
<i>Mesocyclops dissilis</i>	0	0	0	0	0	0	5
<i>Cyclopoids</i>	0	0	0	0	3	0	1
<i>Copepodites</i>	7	30	20	0	15	5	20
Nauplius	27	50	0	60	180	10	105

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.20 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- 피복률35% (zooplankton-ind .L⁻¹)

종 명	8월 12일	8월 13일	8월 14일	8월 16일	8월 18일	8월 20일	8월 22일
Protozoa							
<i>Diffugia elegans</i>	0	0	0	10	0	0	0
<i>Pontigulasia sp.</i>	5	0	10	0	0	110	50
Rotifera							
<i>Asplanchna sp.</i>	0	30	30	0	0	0	0
<i>Brachionus calyciflorus</i>	130	650	560	130	0	0	0
<i>Brachionus forficula</i>	230	180	140	10	20	0	0
<i>Conochilus sp.</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Euclanis dilatata</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Filinia longiseta</i>	70	330	240	10	0	0	0
<i>Keratella valga</i>	240	260	280	50	100	0	20
<i>Keratella cochlearis</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Keratella cruciformis</i>	145	50	10	0	0	0	20
<i>Monostyla bulla</i>	0	10	0	10	0	0	10
<i>Polyarthra remata</i>	270	950	960	30	0	0	10
<i>Pompholix complanata</i>	0	310	80	40	50	0	10
<i>Schizocerca diversicornis</i>	90	130	0	0	0	0	0
<i>Trichocera marina</i>	325	1540	420	80	130	0	100
<i>Trichocera longispina</i>	10	20	10	0	0	0	10
<i>Trichotria tetractis</i>	0	10	0	0	0	0	0
Cladocera							
<i>Bosmina coregoni</i>	0	0	0	0	20	0	0
<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	0	10	10	10	20	0	0
Copepoda							
<i>Thermocyclops taihokuensis</i>	0	0	0	20	70	0	0
<i>Cyclopoids</i>	0	0	0	0	30	0	0
<i>Copepodites</i>	30	50	150	60	140	0	10
Nauplius	45	60	70	140	200	0	210

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.21 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- 피복률17.4% (zooplankton-ind. L⁻¹)

종 명	8월 12일	8월 13일	8월 14일	8월 16일	8월 18일	8월 20일	8월 22일
Protozoa							
<i>Pontigulasia</i> sp.	0	0	10	0	5	2	15
Rotifera							
<i>Asplanchna</i> sp.	0	0	10	10	0	2	0
<i>Brachionus calyciflorus</i>	10	180	520	100	25	2	10
<i>Brachionus forficula</i>	85	80	20	0	0	2	0
<i>Euclanis dilatata</i>	0	0	0	0	5	0	0
<i>Filinia longiseta</i>	15	180	80	0	0	0	0
<i>Keratella valga</i>	40	73	90	70	40	12	20
<i>Keratella cruciformis</i>	25	27	30	10	10	10	15
<i>Monostyla bulla</i>	0		0	0	5	6	0
<i>Polyarthra remata</i>	145	533	250	130	5	4	15
<i>Pompholix complanata</i>	50	207	200	20	55	14	10
<i>Schizocerca diversicornis</i>	25	47	20	0	0	0	0
<i>Trichocera marina</i>	75	700	150	40	175	18	90
<i>Trichocera longispina</i>	15	7	10	10	5	2	0
Cladocera							
<i>Bosmina coregoni</i>	0	0	0	0	0	0	5
<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	0	0	0	0	5	8	0
<i>Scapholebris mucronata</i>	0	0	0	0	0	6	15
Copepoda							
<i>Thermocyclops taihokuensis</i>	0	0	0	0	5	2	5
<i>Cyclopoids</i>	0	0	0	0	10	2	0
<i>Copepodites</i>	5	20	20	10	20	2	5
Nauplius	30	27	50	90	225	62	160

부록 4.22 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- 피복률8.7% (zooplankton-ind. L⁻¹)

종 명	8월 12일	8월 13일	8월 14일	8월 16일	8월 18일	8월 20일
Protozoa						
<i>Pontigulasia</i> sp.	0	10	0	0	5	4
Rotifera						
<i>Asplanchna</i> sp.	0	50	10	0	5	2
<i>Brachionus calyciflorus</i>	55	90	300	210	45	20
<i>Brachionus forficula</i>	220	70	0	10	5	6
<i>Filinia longiseta</i>	50	60	70	10	0	0
<i>Keratella valga</i>	125	100	110	80	45	8
<i>Keratella cochlearis</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Keratella cruciformis</i>	35	50	10	30	15	8
<i>Monostyla bulla</i>	0	10	0	0	0	0
<i>Polyarthra remata</i>	305	220	100	70	0	4
<i>Pompholix complanata</i>	55	80	10	0	95	14
<i>Schizocerca diversicornis</i>	35	50	0	0	0	0
<i>Trichocera marina</i>	255	220	180	40	210	26
<i>Trichocera longispina</i>	20	10	10	0	10	2
Cladocera						
<i>Bosmina coregoni</i>	0	0	0	0	5	0
<i>Bosmina longispina</i>	0	0	0	0	15	0
<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	0	0	0	0	30	6
<i>Scapholebris mucronata</i>	0	0	0	0	5	2
Copepoda						
<i>Thermocyclops taihokuensis</i>	0	0	0	0	5	2
<i>Copepodites</i>	0	40	10	10	25	0
Nauplius	55	100	10	80	160	22

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.23 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- 피복률4.3% (zooplankton-ind. L⁻¹)

종 명	8월 12일	8월 13일	8월 14일	8월 16일	8월 18일	8월 20일	8월 22일
Protozoa							
<i>Pontigulasia</i> sp.	0	0	10	10	10	2	5
Rotifera							
<i>Asplanchna</i> sp.	5	20	120	20	0	0	0
<i>Brachionus calyciflorus</i>	75	90	920	360	35	6	5
<i>Brachionus forficula</i>	185	160	190	10	0	2	10
<i>Euclanis dilatata</i>	0	0	10	0	5	18	0
<i>Filinia longiseta</i>	75	20	150	0	0	0	0
<i>Keratella valga</i>	105	150	190	30	30	6	15
<i>Keratella cruciformis</i>	55	20	30	10	10	0	20
<i>Lepadalla</i> sp.	0	0	0	0	0	2	0
<i>Monostyla bulla</i>	0	0	0	0	0	2	0
<i>Polyarthra remata</i>	485	250	140	120	10	4	0
<i>Pompholix complanata</i>	145	50	260	0	100	4	35
<i>Schizocerca diversicornis</i>	35	60	10	0	0	0	0
<i>Trichocera marina</i>	300	440	510	110	140	16	80
<i>Trichocera longispina</i>	25	20	0	0	5	2	0
Cladocera							
<i>Alona rectangula</i>	0	0	0	0	0	2	0
<i>Bosmina coregoni</i>	0	0	0	0	0	0	5
<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	0	0	0	0	20	2	5
Copepoda							
<i>Thermocyclops taihokuensis</i>	0	0	0	0	5	0	15
<i>Mesocyclops dissiilis</i>	0	0	0	0	0	0	15
<i>Cyclopoids</i>	0	0	0	0	15	0	0
<i>Copepodites</i>	20	10	20	10	35	2	20
<i>Nauplius</i>	25	50	10	60	125	32	70

부록 4.24 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험- Control (zooplankton-ind. L⁻¹)

종 명	9월 2일	9월 3일	9월 4일	9월 5일	9월 7일	9월 11일	9월 17일
Rotifera							
<i>Asplanchna</i> sp.	8	0	0	14	51	0	0
<i>Brachionus calyciflorus</i>	0	16	28	28	19	15	38
<i>Brachionus forficula</i>	48	80	56	14	0	0	0
<i>Filinia longiseta</i>	8	24	84	28	38	30	
<i>Keratella valga</i>	432	176	168	952	488	120	120
<i>Keratella cruciformis</i>	696	128	126	112	51	0	0
<i>Monostyla bulla</i>	40	0	28	0	0	0	23
<i>Polyarthra remata</i>	336	112	126	84	32	0	23
<i>Pompholix complanata</i>	32	16	420	1176	38	135	210
<i>Trichocera marina</i>	496	656	308	294	76	135	30
<i>Trichocera longispina</i>	128	16	0	0	0	0	0
Cladocera							
<i>Bosmina coregoni</i>	8	0	0	0	6	45	53
<i>Bosmina longispina</i>	0	0	0	0	0	8	83
<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	8	0	0	0	0	0	0
Copepoda							
<i>Thermocyclops taihokuensis</i>	0	24	14	0	19	60	60
<i>Copepodites</i>	24	112	28	84	57	255	128
<i>Nauplius</i>	192	184	126	126	6	202	225

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.25 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험- 인공수초대 (zooplankton-ind. L⁻¹)

종 명	9월 2일	9월 3일	9월 4일	9월 5일	9월 7일	9월 11일	9월 17일
Protozoa							
<i>Diffugia elegans</i>	0	0	0	0	0	0	38
Rotifera							
<i>Asplanchna</i> sp.	0	0	0	28	77	0	0
<i>Brachionus calyciflorus</i>	0	80	84	70	128	135	30
<i>Brachionus forficula</i>	67	200	98	28	0	0	0
<i>Filinia longiseta</i>	7	250	28	14	34	15	0
<i>Keratella valga</i>	293	180	532	1,120	264	38	15
<i>Keratella cruciformis</i>	400	290	84	126	26	8	60
<i>Monostyla bulla</i>	20	0	0	0	0	0	8
<i>Polyarthra remata</i>	87	230	42	84	43	0	8
<i>Pompholix complanata</i>	40	200	1,988	1,050	0	23	188
<i>Trichocera marina</i>	273	770	560	154	94	15	15
<i>Trichocera longispina</i>	47	20	28	14	0	0	0
Cladocera							
<i>Bosmina coregoni</i>	13	0	14	14	0	143	173
<i>Bosmina longispina</i>	0	0	0	0	0	248	120
<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	7	10	0	0	0	0	0
Copepoda							
<i>Thermocyclops taihokuensis</i>	0	20	28	0	17	60	0
<i>Copepodites</i>	267	50	140	112	102	165	15
<i>Nauplius</i>	60	100	280	168	153	75	98

부록 4.26 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험- 수변그물섬 (zooplankton-ind. L⁻¹)

종 명	9월 2일	9월 3일	9월 4일	9월 5일	9월 7일	9월 11일	9월 17일
Rotifera							
<i>Asplanchna</i> sp.	18	0	14	0	28	0	0
<i>Brachionus calyciflorus</i>	0	30	56	13	44	0	0
<i>Brachionus forficula</i>	18	220	70	13	0	0	0
<i>Filinia longiseta</i>	0	220	140	13	6	30	38
<i>Keratella valga</i>	225	300	1092	1144	380	53	83
<i>Keratella cruciformis</i>	333	250	140	65	11	0	30
<i>Monostyla bulla</i>	0	80	14	0	0	0	0
<i>Polyarthra remata</i>	81	330	70	91	17	23	0
<i>Pompholix complanata</i>	18	810	1330	598	11	45	653
<i>Trichocera marina</i>	171	1420	700	273	61	30	45
<i>Trichocera longispina</i>	54	50	14	13	0	0	0
Cladocera							
<i>Bosmina coregoni</i>	18	0	14	0	0	60	0
<i>Bosmina longispina</i>	18	0	0	0	0	30	0
<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	9	0	0	0	0	0	0
Copepoda							
<i>Thermocyclops taihokuensis</i>	0	0	42	13	0	30	38
<i>Copepodites</i>	9	70	126	156	39	105	218
<i>Nauplius</i>	72	150	182	117	55	218	173

부록 4.27 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험- 침수식물섬 (zooplankton-ind. L⁻¹)

종 명	9월 2일	9월 3일	9월 4일	9월 5일	9월 7일	9월 11일	9월 17일
Rotifera							
<i>Asplanchna</i> sp.	17	0	0	14	61	0	0
<i>Brachionus calyciflorus</i>	0	19	66	14	5	0	0
<i>Brachionus forficula</i>	34	171	11	0	0	0	0
<i>Filinia longiseta</i>	26	218	132	28	0	0	0
<i>Keratella valga</i>	323	171	462	504	868	68	0
<i>Keratella cruciformis</i>	510	342	66	140	56	0	0
<i>Monostyla bulla</i>	9	200	11	0	0	0	8
<i>Polyarthra remata</i>	153	665	1143	84	47	30	15
<i>Pompholix complanata</i>	34	599	0	336	5	23	0
<i>Trichocera marina</i>	289	570	649	350	61	15	0
<i>Trichocera longispina</i>	60	0	11	0	0	0	0
Cladocera							
<i>Alona rectangula</i>	0	0	0	0	0	8	0
<i>Bosmina coregoni</i>	0	0	11	0	0	105	158
<i>Bosmina longispina</i>	9	0	0	0	0	23	120
Copepoda							
<i>Thermocyclops aihokuensis</i>	0	10	44	0	19	38	0
<i>Copepodites</i>	51	86	77	112	61	38	15
<i>Nauplius</i>	85	238	341	98	51	150	210

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.28 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- Control (phytoplankton-cells mL⁻¹)

종 명	8월 12일	8월 13일	8월 14일	8월 16일	8월 18일	8월 20일	8월 22일
<i>Achnanthes catenata</i>	143				35	23	15
<i>Achnanthes</i> sp.				11			
<i>Aulacoseira ambigua</i>					174		
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	143						
<i>Cyclotella</i> spp.	428	971	198	412	1,736	3,193	862
<i>Fragilaria capucina</i>	285	20					
<i>Navicula cryptocephala</i>			10				
<i>Navicula cryptotenella</i>	15						
<i>Nitzschia acicularis</i>	2			11	348		
<i>Nitzschia gracilis</i>	428	389	396	103	348		
<i>Nitzschia palea</i>	143		99				
<i>Nitzschia</i> sp.	285		99			229	
<i>Nitzschia filiformis</i>				11			
<i>Synedra acus</i>	1,282	583	297	103	348	229	431
<i>Ankistrodesmus nannoselene</i>	143						
<i>Chlamydomonas</i> sp.		195	99			229	
<i>Chlorella</i> sp.	29		99	103			
<i>Closterium gracile</i>	15		10	11	35		
<i>Coelastrum reticulatum</i>							2
<i>Coelastrum sphericum</i>		1,166	20			46	
<i>Cosmarium abbreviatum</i> f. <i>pygmaea</i>			99	618	35	23	144
<i>Cosmarium</i> sp.	143	195	198		35	23	
<i>Crucigenia mucronata</i>							2
<i>Crucigenia neglecta</i>			396	11	35	23	
<i>Golenkinia radiata</i>	15	195					288
<i>Kirchneriella contorta</i>		389			35	23	
<i>Kirchneriella danubiana</i>			198	11			
<i>Koliella elongata</i>	11,392		2,969	11,323		6,841	
<i>Monoraphidium contortum</i>			10				
<i>Mougeotia</i> sp.			10				
<i>Pediastrum simplex</i>	570				174		
<i>Scenedesmus acuminatus</i>			20				
<i>Scenedesmus denticulatus</i>	570						
<i>Scenedesmus ecornis</i>	855	1,360	594	1,236	1,389	1,369	6,319
<i>Scenedesmus opoliensis</i>	570			11	1,389		
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	15	777	99	412	1,389	457	1,724
<i>Schroederia indica</i>	15						
<i>Selenastrum minutum</i>			10				
<i>Staurastrum cingulum</i>				11			
<i>Staurastrum iotanium</i> var. <i>longatum</i>	15						
<i>Staurastrum</i> sp.	143				348		
<i>Tetraedron minimum</i>	428	195	20	412	2,083	1,141	4,452
<i>Tetraedron triangulare</i>				103	35	913	288
<i>Treubaria</i> sp.		20					
<i>Treubaria tricappendiculata</i>	15		10				
<i>Anabaena macrospora</i>		2,136					
<i>Anabaena</i> sp.1	3,560		7,422	7,206	174		
<i>Anabaenopsis</i> sp.	2,136	971					
<i>Aphanocapsa</i> sp.	11,392	8,738	3,365	7,206	12,148		
<i>Chroococcus minutus</i>	143	389					
<i>Phormidium</i> sp.1						1,141	
<i>Phormidium</i> sp.2	14,952	2,913	18,307	1,030	2,430		
<i>Phormidium</i> sp.3	291,902	333,981	154,368	40,145	17,354		8,616
<i>Raphidiopsis indica</i>	1,709		1,485				
<i>Synechocystis</i> sp.	3,142	5,048				4,951	
<i>Peridinium bipes</i>		389				23	
<i>Peridinium</i> sp.1	997	20	891	11	35	913	
<i>Peridinium</i> sp.2			99				
<i>Trachelomonas volvocina</i>	143	20	99			23	15

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.29 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- 피복률35% (phytoplankton-cells mL⁻¹)

조사일	8월 12일	8월 13일	8월 14일	8월 16일	8월 18일	8월 20일	8월 22일
<i>Achnanthes catenata</i>		14		8	66	1	1
<i>Achnanthes minutissima</i>				74			
<i>Achnanthes</i> sp.	113					43	
<i>Aulacoseira ambigua</i>	23	14		8			6
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>							289
<i>Aulacoseira</i> sp.				74			0
<i>Cyclotella</i> spp.	788	539	219	148	66	214	116
<i>Fragilaria capucina</i>				8			
<i>Navicula cryptocephala</i>				1	66		1
<i>Navicula cryptotenella</i>					7		58
<i>Nitzschia acicularis</i>	12	135	1	74	66	86	289
<i>Nitzschia fruticosa</i>		270					
<i>Nitzschia gracilis</i>		270		74	7	43	116
<i>Nitzschia palea</i>	113				7	1	
<i>Nitzschia</i> sp.				74	66		
<i>Synedra acus</i>	563	1,078	219	74	131	86	58
<i>Synedra acus</i> var. <i>rumpens</i>	338				7		
<i>Chlorella</i> sp.			8	74			
<i>Closteriopsis longissima</i> var. <i>tropica</i>				74			6
<i>Closterium gracile</i>	12						
<i>Coelastrum cambricum</i>	1,013						
<i>Coelastrum sphericum</i>		809					
<i>Cosmarium</i> sp.		135	73			43	
<i>Cosmarium undulatum</i>							58
<i>Crucigenia mucronata</i>		14				171	
<i>Crucigenia neglecta</i>					7	171	
<i>Golenkinia radiata</i>	113	135	8		7	43	
<i>Kirchneriella contorta</i>			15	8	131		116
<i>Koliella elongata</i>			1,457	1,476		22	1,156
<i>Monoraphidium contortum</i>							116
<i>Monoraphidium litorale</i>	12					43	
<i>Monoraphidium pusillum</i>	12						
<i>Pediastrum simplex</i>	12						
<i>Scenedesmus denticulatus</i>						171	
<i>Scenedesmus ecornis</i>	1,126	1,078	292	443	7	897	347
<i>Scenedesmus opoliensis</i>	23	14			14		12
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	1,689	539	437	443	587	811	578
<i>Staurastrum biexcavatum</i> var. <i>binodulum</i>	226	135					
<i>Staurastrum iotanum</i> var. <i>longatum</i>		135					
<i>Staurastrum</i> sp.	113			74	0	5	6
<i>Tetraedron minimum</i>	226	14	73	74	196	43	6
<i>Tetraedron triangulare</i>	113	14	8	8	1		
<i>Tetrastrum</i> sp.							232
<i>Treubaria</i> sp.			73				
<i>Anabaena macrospora</i>		2,021					
<i>Anabaena</i> sp.1	4,503	14					
<i>Anabaenopsis</i> sp.	1,126	1,752					
<i>Aphanocapsa</i> sp.	6,754	5,389	4,005	738	33	22	
<i>Chroococcus minutus</i>	451						
<i>Phormidium</i> sp.1				37			
<i>Phormidium</i> sp.2	6,416	9,431	5,680		33	427	
<i>Phormidium</i> sp.3	180,089	132,023	55,341		1,955		
<i>Raphidiopsis indica</i>	12				7	470	
<i>Spirulina</i> sp.		4,042					
<i>Synechocystis</i> sp.		0	29,451				
<i>Cryptomonas</i> sp.		135			7	43	232
<i>Gymnodinium</i> sp.						1	
<i>Peridinium bipes</i>		405	73				
<i>Peridinium</i> sp.1	788	674	146				
<i>Peridinium</i> sp.2	226						
<i>Synura</i> sp.							58
<i>Trachelomonas volvocina</i>	12	135	73	74		5	

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.30 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- 피복률17.4% (phytoplankton-cells mL⁻¹)

조사일	8월 12일	8월 13일	8월 14일	8월 16일	8월 18일	8월 20일	8월 22일
<i>Achnanthes catenata</i>		155		182			
<i>Achnanthes lanceolata</i>	78						
<i>Achnanthes minutissima</i>		16					
<i>Aulacoseira ambigua</i>	6,181			906		233	17
<i>Aulacoseira granulata</i>				363			
<i>Cyclotella</i> spp.	2,318	155	527	182		78	418
<i>Cyclotella stelligera</i>			527				
<i>Fragilaria capucina</i>					30		
<i>Fragilaria crotonensis</i>		155	527	363		78	835
<i>Fragilaria</i> sp.							
<i>Nitzschia acicularis</i>	1,546		53			1	
<i>Nitzschia palea</i>	1,546				297		42
<i>Synedra acus</i>	773	155	53	182	30	8	5
<i>Cosmarium geminatum</i>	78	309					
<i>Cosmarium gracile</i>						8	
<i>Cosmarium humile</i>				363		16	
<i>Cosmarium</i> sp.	155						
<i>Cosmarium subalatum</i>		31					
<i>Crucigenia rectangularis</i>						310	
<i>Didymocystis sinermis</i> var. <i>danubialis</i>		309	3,157	725	2,369	774	
<i>Gloenkinia brevispina</i>					593		
<i>Monoraphidium arcuatum</i>						8	
<i>Monoraphidium contortum</i>						78	
<i>Monoraphidium griffithii</i>	1,546				30		42
<i>Oocystis pyniformis</i>						39	
<i>Pediastrum duplex</i> var. <i>gracillimum</i>						1,161	
<i>Pediastrum simplex</i> var. <i>echinulatum</i>							293
<i>Scenedesmus abundans</i>		617					1,669
<i>Scenedesmus armatus</i>		31					
<i>Scenedesmus denticulatus</i>							1,669
<i>Scenedesmus ecornis</i>		617	2,105	2,173	119	310	
<i>Scenedesmus incrassatulus</i>	4,636						
<i>Scenedesmus intermedius</i>							3,338
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	78	1,542	0	363	593	310	
<i>Scenedesmus quadricauda</i> var. <i>parvus</i>	310						167
<i>Sphaeroszoma vertebratum</i>				725			
<i>Staurastrum</i> sp.	155	309					
<i>Tetraedron minimum</i>	2,318	617		363	297	78	42
<i>Anabaena flos-aquae</i>		124					
<i>Aphanocapsa rivularis</i>			10,521				
<i>Chroococcus minutus</i>					593		
<i>Merismopedia tenuissima</i>					297		
<i>Microcystis aeruginosa</i>						86	
<i>Nostoc coeruleum</i>	13,907						
<i>Oscillatoria angustissima</i>	177,697	178,304	74,169	2,535		4,256	
<i>Oscillatoria subtilissima</i>				3,621			
<i>Phormidium luridum</i>					6,514		
<i>Phormidium</i> sp.2				1,449			
<i>Phormidium valderianum</i> var. <i>tenuis</i>	18,543	6,011	20,515				
<i>Synechocystis</i> sp.	64,034	55,765					
<i>Peridinium bipes</i>		155		19			
<i>Peridinium polonicum</i>						78	
<i>Peridinium</i> sp.2	773		53				
<i>Peridinium tabulatum</i>	773						
<i>Trachelomonas oblonga</i>					297		418

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.31 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- 피복률8.7% (phytoplankton-cells mL⁻¹)

조사일	8월 12일	8월 13일	8월 14일	8월 16일	8월 18일	8월 20일	8월 22일
<i>Achnanthes catenata</i>		259					
<i>Aulacoseira ambigua</i>	247		583		1,156	2,046	
<i>Aulacoseira granulata</i>		207	292				619
<i>Cyclotella</i> spp.	493	1,034	292	23	463	372	1,238
<i>Cymbella</i> sp.						186	
<i>Fragilaria capucina</i>					232		
<i>Fragilaria crotonensis</i>			292	918	232	186	619
<i>Fragilaria</i> sp.			292				
<i>Nitzschia acicularis</i>		517	3	459	24	19	619
<i>Nitzschia palea</i>		259		23			310
<i>Synedra acus</i>	739	259	292	459	47	186	1,547
<i>Synedra acus</i> var. <i>radians</i>						186	
<i>Closteriopsts longissima</i>		1,810		2,982			
<i>Closterium gracile</i>			292	23	24	372	310
<i>Coelastrum astroideum</i>						1,674	
<i>Coelastrum cambricum</i>							3,713
<i>Cosmarium angulosum</i> var. <i>concinnum</i>							619
<i>Cosmarium</i> sp.				459			
<i>Cosmarium wittrockii</i>		52					
<i>Crucigenia rectangularis</i>						2,231	
<i>Didymocystisinerms</i> var. <i>danubialis</i>		2,068	583	230	2,774	744	2,475
<i>Monoraphidium contortum</i>			292	3	24		
<i>Monoraphidium griffithii</i>					47		
<i>Pediastrumsimplex</i> var. <i>echinulatum</i>			9,318				2,166
<i>Scenedesmus carinatus</i>		1,034			93		
<i>Scenedesmus ecornis</i>	1,969	1,034	1,165	918	1,850	5,950	4,950
<i>Scenedesmus ellipsoideus</i>							186
<i>scenedesmus maximus</i>						75	
<i>Scenedesmus opoliensis</i>				10		744	2,475
<i>Scenedesmus protuberans</i>	2,954						619
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	1,969	1,034	88	10	1,850	744	
<i>Scenedesmus quadricauda</i> var. <i>biornatus</i>	985						
<i>Staurastrum natator</i>							62
<i>Staurastrum pingue</i>		517					
<i>Staurastrum</i> sp.		26			47		62
<i>Tetraedronminimum</i>	247				232	744	31
<i>Anabaena oumiana</i>						149	
<i>Anabaena</i> sp.2			641	276			
<i>Cylindrospermopsis curvisrora</i>	2,707	6,204					
<i>Microcystis wesenbergii</i>	27,070		1,398				
<i>Myxosarcina burmensis</i>	5,907						
<i>Nostoc coeruleum</i>		6,979					
<i>Phormidium</i> sp.1							27,843
<i>Phormidiumsubterraneum</i> var. <i>crassum</i>	248,548	189,710	142,969	23,855	37,674	30,676	
<i>Phormidium valderianum</i> var. <i>tenuis</i>	21,902	22,745	18,927	26,607			3,403
<i>Phormidium tenue</i>					6,241	1,488	
<i>Synechocystis</i> sp.	65,932	30,351	44,500	7,478	22,061		
<i>Pediastrum</i> sp.			292				
<i>Peridinium bipes</i>							310
<i>Peridinium polonicum</i>				23		186	
<i>Peridinium</i> sp.2	247	259			3		31
<i>Peridinium</i> sp.3	25						
<i>Peridinium tabulatum</i>				230			

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.32 인공식물섬 적정 면적 메소코즘 실험- 피복률4.3% (phytoplankton-cells mL⁻¹)

조사일	8월 12일	8월 13일	8월 14일	8월 16일	8월 18일	8월 20일	8월 22일
<i>Achnanthes catenata</i>							265
<i>Aulacoseira ambigua</i>			580				529
<i>Aulacoseira granulata</i>						93	
<i>Cyclotella</i> spp.	1,417	313	773		960	921	1,322
<i>Fragilaria crotonensis</i>	1,417		194		720	264	529
<i>Nitzschia acicularis</i>	71	313	194	47		2	
<i>Nitzschia palea</i>	71	313	194	4,633		132	
<i>Synedra acus</i>	2,834	313	1,931		720	264	529
<i>Synedra acus</i> var. <i>radians</i>					24		
<i>Synedra acus</i> var. <i>rumpens</i>			194				
<i>Closteriopsts longissima</i>					168		
<i>Closterium gracile</i>		32	20		480		
<i>Cosmarium angulosum</i> var. <i>concinnum</i>			773				
<i>Didymocystis inermi</i> var. <i>danubialis</i>	5,667	126	1,159		2,880	1,579	2,644
<i>Golenkinia paucispina</i>					24		
<i>Scenedesmus arcuatus</i>					10		
<i>Scenedesmus armatus</i>	2,834						
<i>Scenedesmus ecornis</i>	2,834		6,951		1,920	2,105	4,231
<i>Scenedesmus longispina</i>		126					
<i>Scenedesmus opoliensis</i>	284	1,252	2,317				
<i>Scenedesmus protuberans</i>			773				
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	8,500		1,545			6	529
<i>Scenedesmus quadricauda</i> var. <i>parvus</i>		126			96		1,058
<i>Staurastrum cinctum</i>			387				
<i>Staurastrum planctonicum</i> var. <i>ornatum</i>		626					
<i>Staurastrum polymorphum</i> var. <i>cinctum</i>			39				
<i>Staurastrum</i> sp.	71	63	39	47			
<i>Staurastrum trifidum</i> var. <i>inflesum</i>						132	
<i>Tetraedron minimum</i>		32	194		480	264	
<i>Anabaena cylindrica</i>			21,237				
<i>Anabaena</i> sp.1	425						
<i>Cylindrospermopsis curvisrora</i>	780	251	4,827				
<i>Microcystis</i> sp.			27,029		7,198		
<i>Nostoc coeruleum</i>	1,134	282			1,680		2,380
<i>Nostoc sphaericum</i>			11,391				
<i>Oscillatoria subtilissima</i>		188					
<i>Phormidium subterraneum</i> var. <i>crassum</i>	219,563	260,553	38,613	83,383	44,385	29,327	27,762
<i>Phormidium valderianum</i> var. <i>tenuis</i>	60,203	5,943	58,691		1,920	790	8,726
<i>Synechocystis</i> sp.	108,034		26,054	11,272			
<i>Peridinium bipes</i>		32	580				
<i>Peridinium polonicum</i>		313					
<i>Peridinium</i> sp.2	1,417	313	774	93	240	132	
<i>Peridinium tabulatum</i>	1,417						
<i>Trachelomonas oblonga</i>	71						
<i>Trachelomonas robusta</i>			20				

부록 4.33 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험- Control (phytoplankton-cells mL⁻¹)

조사일	9월 2일	9월 3일	9월 4일	9월 5일	9월 7일	9월 9일	9월 11일	9월 17일
<i>Achnanthes catenata</i>	5				145	21	616	6
<i>Achnanthes minutissima</i>								19
<i>Achnanthes minutissima</i> var. <i>Jackii</i>						21		
<i>Achnanthes</i> sp.	988							
<i>Aulacoseira ambigua</i>	99	25		83				
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	50	49						
<i>Cyclotella</i> spp.	494						206	
<i>Fragilaria capucina</i>	494							
<i>Fragilaria crotonensis</i>			1,144	3		1,033		545
<i>Fragilaria</i> sp.					290			
<i>Navicula cryptocephala</i>	494							
<i>Navicula</i> sp.	494							
<i>Nitzschia acicularis</i>					434	414	206	
<i>Nitzschia dissipata</i>								19
<i>Nitzschia gracilis</i>	494	242			1,447		206	
<i>Nitzschia palea</i>	50		58	552		414	616	182
<i>Nitzschia</i> sp.		242					411	
<i>Synedra acus</i>	988	242	1,144	276	145		21	
<i>Synedraacus</i> var. <i>radians</i>		242						
<i>Chlamydomonas</i> sp.	50							
<i>Closterium gracile</i>	494	242		28			21	
<i>Cosmarium abbreviatum</i> f. <i>pygmaea</i>	494				145			
<i>Cosmarium</i> sp.					2		206	
<i>Cosmarum sexangulare</i>			115					
<i>Elakatothrix gelatinosa</i>	988							
<i>Golenkinia radiata</i>					145		411	
<i>Kirchneriella danubiana</i>	988							
<i>Koliella elongata</i>	4,936	19,294			13,019		18,467	
<i>Monoraphidium contortum</i>					15		21	
<i>Pediastrum simplex</i>					73			
<i>scenedesmus maximus</i>						9		
<i>Scenedesmus opoliensis</i>	50	25						
<i>Scenedesmus protuberans</i>				1,103		827		
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	99	1,448		1,103	15			
<i>Schroederia judayi</i>							21	
<i>Tetraedron minimum</i>					145	207		
<i>Treubaria</i> sp.	50				145			
<i>Treubaria tricappendiculata</i>		242						
<i>Anabaena macrospora</i>					4,629		5,130	
<i>Anabaena oumiana</i>								
<i>Anabaena</i> sp.1	247	121			579			
<i>Anabaena</i> sp.2			46	1,655		31		146
<i>Anabaena spiroides</i>								6,171
<i>Anabaena verrucosa</i>								4,175
<i>Anabaenopsis</i> sp.					73			
<i>Aphanocapsa elachista</i> var. <i>conferta</i>								3,812
<i>Aphanocapsa</i> sp.	247	27,012			3,617		103	
<i>Chroococcus minutus</i>					868		1,232	
<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>						310		
<i>Cylindrospermopsis curvispora</i>			5,146	194				
<i>Nostoc coeruleum</i>			515	8,272		16,522		11,797
<i>Nostoc</i> sp.			2,288					
<i>Oscillatoria</i> sp.	1,481					620		
<i>Phormidium</i> sp.2	34,552	79,347			130,183		99,718	
<i>Phormidium</i> sp.3		2,412						
<i>Phormidium valderianum</i> var. <i>tenuis</i>			154,375	130,145		79,925		71,869

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

조사일	9월 2일	9월 3일	9월 4일	9월 5일	9월 7일	9월 9일	9월 11일	9월 17일
<i>Spirulina</i> sp.		25						
<i>Synechocystis</i> sp.	23,185	7,905			11,125		7,684	
<i>Cryptomonas</i> sp.	5	25						
<i>Glenodinium gymnodinium</i>								363
<i>Gymnodinium</i> sp.							206	
<i>Peridinium aciculiferum</i>								
<i>Peridinium bipes</i>	1,975	4,100	572	1,931	1,013	414	3,489	
<i>Peridinium</i> sp.1					290			
<i>Peridinium</i> sp.2			1,716	552				363
<i>Peridinium</i> sp.3			1,716	552				363
<i>Peridinium</i> sp.5						414		
<i>Peridinium</i> sp.6						207		
<i>Trachelomonas hispida</i>	50	25						
<i>Trachelomonas intermedia</i>				3				
<i>Trachelomonas oblonga</i>			572	552		620		726
<i>Trachelomonas robusta</i>				3				
<i>Trachelomonas volvocina</i>	494	2,653			579		206	

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.34 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험- 인공수초대 (phytoplankton-cells mL⁻¹)

조사일	9월 2일	9월 3일	9월 4일	9월 5일	9월 7일	9월 9일	9월 11일
<i>Achnanthes catenata</i>					15		13,195
<i>Achnanthes minutissima</i>	130					1,741	
<i>Aulacoseira ambigua</i>	4,395		1,119				
<i>Aulacoseira distans</i>	776		112				
<i>Aulacoseira granulata</i>	388				4,842	2,321	1,200
<i>Cyclotella</i> spp.	130		1,119				3,299
<i>Cymbella minuta</i>	13						
<i>Fragilaria capucina</i>							900
<i>Fragilaria crotonensis</i>			3,356	601	1,453	1,161	5,098
<i>Gyrosigma</i> sp.	130						
<i>Nitzschia acicularis</i>	130	1,440	560			581	
<i>Nitzschia palea</i>	1,164	4,800	3,356	1,202	1,453	6	
<i>Synedra acus</i>	130	480	56	1,202	969	12	
<i>Synedra acus</i> var. <i>radians</i>		48		61			
<i>Actinastrum hantzschii</i>	52	960	280				
<i>Cosmarium depressum</i>	259						
<i>Monoraphidium contortum</i>					5		30
<i>Pediastrum simplex</i> var. <i>echinulatum</i>							2,100
<i>Scenedesmus bicaudatus</i>	52						
<i>Scenedesmus ecornis</i>					1937		
<i>scenedesmus maximus</i>				13		24	
<i>Scenedesmus opoliensis</i>			224	2,404			120
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	1,034	1,920	2,238	2,404			120
<i>Scenedesmus quadricauda</i> var. <i>biornatus</i>				2,404			
<i>Scenedesmus quadricauda</i> var. <i>parvus</i>							120
<i>Scenedesmus serattus</i>					969		
<i>Staurastrum</i> sp.		48					1,800
<i>Aphanocapsa elachista</i>			2,349				
<i>Chroococcus cohaerens</i>		37,433	35,793		18,400	2,3788	9,596
<i>Coelosphaerium dubium</i>	41,228			13,819	30,989	8,123	
<i>Nostoc coeruleum</i>				37,251		4,642	3,899
<i>Nostoc kihlmani</i> var. <i>doliiforme</i>				1,382	727	15,085	
<i>Nostoc microscopicum</i>	905						
<i>Phormidium tenue</i> .f.non-constrictum	44,330						
<i>Phormidium valderianum</i> var. <i>tenuis</i>		26,875					
<i>Phormidium lapidem</i> var. <i>amorphum</i>			16,778				
<i>Phormidium tenue</i>		5,279	44,741	38,453	30,989	4,642	2,999
<i>Spirulina major</i>					4,842		
<i>Synechocystis</i> sp.	61,934	50,173	57355	64,026	29,972	9,235	35,590
<i>Peridinium aciculiferum</i>	259						
<i>Peridinium bipes</i>							900
<i>Peridinium inconspicuum</i>					1453		
<i>Peridinium minusculm</i>						581	
<i>Peridinium pygmacum</i>		480					
<i>Peridinium</i> sp.2	130	480	6	1,202	1,453		
<i>Peridinium</i> sp.3					969		
<i>Peridinium</i> sp.4					485		
<i>Peridinium tabulatum</i>				7			
<i>Trachelomonas oblonga</i>	776	960	1,119	2,404	1,453		600
<i>Trachelomonas robusta</i>					5		
<i>Trachelomonas</i> sp.							30

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.35 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험- 수번그물섬 (phytoplankton-cells mL⁻¹)

조사일	9월 2일	9월 3일	9월 4일	9월 5일	9월 7일	9월 9일	9월 11일	9월 17일
<i>Achnanthes catenata</i>				252	297		3,350	127
<i>Achnanthes lanceolata</i>		220						
<i>Achnanthes minutissima</i>								127
<i>Aulacoseira ambigua</i>	2,401	880	42					
<i>Aulacoseira granulata</i>	2,401	440		1,758		916	1,340	
<i>Cyclotella</i> spp.	401	220						
<i>Cymbella minuta</i>		220						
<i>Fragilaria capucina</i>	41			252		306		
<i>Fragilaria capucina</i> var. <i>gracillia</i>					1,484		67	
<i>Fragilaria crotonensis</i>	2,401	1,539	209	1,256				127
<i>Nitzschia acicularis</i>		22						
<i>Nitzschia palea</i>	5	3	63	1,507	1,187	306	67	127
<i>Synedra acus</i>	801	3	209	252	30		670	
<i>Synedra acus</i> var. <i>radians</i>		3	209				67	
<i>Actinastrum hantzschii</i>	13	1,539						
<i>Chlorococcum humicola</i>	401							
<i>Closterium gracile</i>	81							
<i>Cosmarium punctulatum</i> var. <i>subpunctulatum</i>		22						
<i>Cosmarium subtriordinatum</i> var. <i>acervatum</i>		22						
<i>Crucigenia rectangularis</i>		1,320			119			
<i>Dictyosporium pulchellum</i>	9,202							
<i>Didymocystis inermis</i> var. <i>danubialis</i>		2,639						
<i>Gloenkinia</i> sp.							670	
<i>Golenkinia radiata</i>			209					
<i>Monoraphidium arcuatum</i>		440						
<i>Monoraphidium contortum</i>						31		
<i>Pediastrum duplex</i> var. <i>gracillimum</i>		3,518						
<i>Scenedesmus eornis</i>				1,005				
<i>Scenedesmus longispina</i>	1,601						2,680	
<i>Scenedesmus protuberans</i>					60			
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	3,201		1,459	11	60	611	134	
<i>Scenedesmus quadricauda</i> var. <i>parvus</i>								508
<i>Schroederia setigera</i>								127
<i>Anabaena solitaria</i> f. <i>planctonica</i>								6,858
<i>Anabaenopsis circularis</i>								8,000
<i>Chroococcus dispersus</i>		264						
<i>Chroococcus thridus</i> var. <i>thermalis</i>			834					
<i>Cylindrospermopsis curvispora</i>							9,379	
<i>Myxosarcina burmensis</i>								7,365
<i>Nostoc coeruleum</i>		9,673	1,251	5,526	3,560	16,483	21,437	23,492
<i>Nostockihlmanivardoliiforme</i>		2,199						
<i>Nostoc microscopicum</i>			251					
<i>Oscillatoria tortosa</i>							804	
<i>Phormidium valderianum</i> var. <i>tenuis</i>	92,019	130,145	116,478	137,123	120,721	79,362		31,238
<i>Phormidium tenue</i>							67659	
<i>Spirulina major</i>				252	386	2137		
<i>Synechocystis</i> sp.	55,534	79,917	53,438	71,688	59,011	12,644	31,490	2,760
<i>Peridinium bipes</i>	801	1,320	626	503	2,373	1,527		13
<i>Peridinium polonicum</i>		440	626	26				
<i>Peridinium</i> sp.2	801	220	1,251	754	890	611		
<i>Peridinium</i> sp.3		220	1,251	1,005	890	611	670	
<i>Peridinium</i> sp.4								127
<i>Peridinium</i> sp.5								127
<i>Trachelomonas amphora</i>				26				
<i>Trachelomonas intermedia</i>								
<i>Trachelomonas oblonga</i>	1,201	1,979	1,042	503	890	306	670	13
<i>Trachelomonas robusta</i>	41				60		1,340	127
<i>Trachelomonas</i> sp.	1,201							

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

부록 4.36 다양한 서식처 적용 평가를 위한 메소코즘 실험- 침수식물섬 (phytoplankton-cells mL⁻¹)

조사일	9월 2일	9월 3일	9월 4일	9월 5일	9월 7일	9월 9일	9월 11일	9월 17일
<i>Achnanthes catenata</i>	7	710		1,102	2,846			
<i>Achnanthes minutissima</i>						3		
<i>Aulacoseira ambigua</i>	3,565	710	349	4,407				
<i>Aulacoseira granulata</i>	973		3,490	441				
<i>Aulacoseira muzzanensis</i>	1,297							
<i>Cyclotella</i> spp.	325					579		
<i>Fragilaria capucina</i>						29		
<i>Fragilaria capucina</i> var. <i>gracillis</i>			2,618					
<i>Fragilaria crotonensis</i>	649	23,401	7,853	221	8,537	868	177	
<i>Nitzschia acicularis</i>	325	2,837		111				
<i>Nitzschia amphibia</i>		8						
<i>Nitzschia dissipata</i>				111				
<i>Nitzschia palea</i>	1,621	710						
<i>Synedra acus</i>	1,621	1,419	873	1,102	2,846		4	
<i>Synedra acus</i> var. <i>radians</i>	973				285	3		
<i>Synedra</i> sp.	33							
<i>Actinastrum hantzschii</i>				2,204				
<i>Closterium gracile</i>	4		88					
<i>Coelastrum astroideum</i>				7,712				493
<i>Cosmarium angulosum</i> var. <i>concinnum</i>						58		
<i>Didymocystis inermis</i> var. <i>danubialis</i>							36	
<i>Eudorina</i> sp.								739
<i>Monoraphidium contortum</i>		71					18	
<i>Pandorina morum</i>								739
<i>Pteromonas angulosa</i>						290		
<i>Scenedesmus abundans</i>	1,297							
<i>Scenedesmus ecornis</i>		2,837						
<i>Scenedesmus ellipsoideus</i>	130							
<i>Scenedesmus incrassatulus</i>								493
<i>Scenedesmus longispina</i>				441				
<i>Scenedesmus opoliensis</i>		5,673		441		1,735		
<i>Scenedesmus perforatus</i>	973							
<i>Scenedesmus protuberans</i>	1,297		1,745					
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	2,593	2,837	3,490	2,204	86			
<i>Scenedesmus quadricauda</i> var. <i>parvus</i>							8	
<i>Spondylosium</i> sp.							705	
<i>Tetraedron minimum</i>	325	1,419					2	
<i>Tetraedron</i> sp.								493
<i>Anabaena affinis</i>		1,135						
<i>Anabaena</i> sp.2			611	7,712				
<i>Aphanocapsa elachista</i>	130							
<i>Cylindrospermopsis curvispora</i>	260	568	698					
<i>Nostoc coeruleum</i>		2,837	2,007	17,628	1,423			
<i>Phormidium subterraneum</i> var. <i>crassum</i>	118,291	30,492	28,792	25,339		4,337		1,847
<i>Phormidium valderianum</i> var. <i>tenuis</i>			17,450					
<i>Synechocystis</i> sp.	48,780	32,926	14,955	57,617	10,804			1,960
<i>Peridinium bipes</i>		1,419	9,598		2,846		177	
<i>Peridinium minusculm</i>						290	353	
<i>Peridinium polonicum</i>				1,102				
<i>Peridinium pygmaeum</i>							353	
<i>Peridinium</i> sp.2		1,419	1,745		8,537	579	177	
<i>Peridinium</i> sp.3		710	5,235	4,407		290		
<i>Peridinium</i> sp.4		710	3,490	4,407			353	
<i>Peridinium</i> sp.5				3,306				
<i>Peridinium tabulatum</i>				6,611	2,846	290		
<i>Peridinium volzii</i>					570			
<i>Trachelomonas intermedia</i>					2,846	29	18	
<i>Trachelomonas oblonga</i>		7,092	873			579	177	
<i>Trachelomonas robusta</i>	325							
<i>Trachelomonas</i> sp.					2,846			
<i>Trachelomonas superba</i> var. <i>inevoluta</i>					5,692			

부록 4.37 신규저수지 식물플랑크톤 월별조사- Control(cells mL⁻¹)

Species	7월20일	8월16일	9월19일	10월23일	11월22일	2월27일	3월27일	4월30일	5월20일	6월17일	7월28일	8월20일	9월11일	10월7일
<i>Achnanthes catarata</i>														82,149
<i>Achnanthes minutissima</i>												842		
<i>Asterionella formosa</i>						13,763	12,746	4,658	1,264					
<i>Aulacoseira ambigua</i>	14		8	350	4,368	5,713	7,547		2,211	8,632	4,894	67,317	17	446
<i>Aulacoseira distans</i>	1	1		1		78	336	2,795	316	785			5	31
<i>Aulacoseira granulata</i>				150		130		5						123
<i>Aulacoseira granulatavar.angustissima</i>		1,830	25	150	1			1		1	2,753	39,549	13	
<i>Aulacoseira japonica</i>											3,059			
<i>Cyclotella</i> spp.	4						168		2,527	3,139	1	11,781		
<i>Cymbella</i> sp.										1	1,500			
<i>Cymbella tumida</i>					243									
<i>Fragilariacapitatavar.gracilllis</i>		1		1										
<i>Gomphonema gracile</i>														1
<i>Gomphonema parvulum</i>						26	168							
<i>Gomphonema truncatum</i>						26								
<i>Navicula cryptocephala</i>							2							
<i>Navicula cryptotenella</i>	4						17							
<i>Navicula</i> sp.												842		
<i>Nitzschia acicularis</i>										1	2	9	1	1
<i>Nitzschia fruticosa</i>											1			1
<i>Nitzschia palea</i>	57	1,830	41	1,000			2		632	363	2,447	9,257	9	93
<i>Synedra acus</i>			1			26			632		1			
<i>Synedra ulna</i>		1,830	14	1,000					316	383	14,986	23,561	17	262
<i>Actinastrum haritzschii</i>				1,390							8,564	1,683		
<i>Actinastrumharitzschii</i> var. <i>fluviale</i>		1												
<i>Ankistrodesmus namoselene</i>								1						
<i>Chodatella</i> sp.									316					
<i>Cladocapsa longissima</i>									632		306			
<i>Closterium gracile</i>								1	316					
<i>Closterium</i> sp.							168							
<i>Coelastrum sphericum</i>									2,527			1		
<i>Coronastrium lunatum</i>			1											
<i>Crucigenia mucronata</i>					1									

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

Species	7월20일	8월16일	9월19일	10월23일	11월22일	2월27일	3월27일	4월30일	5월20일	6월17일	7월28일	8월20일	9월11일	10월7일
<i>Crucigena</i> sp.									316					
<i>Dietyosphanium pulchellum</i>											1			
<i>Dietyosphanium</i> sp.												3,366		
<i>Galenkinia radiata</i>		915							316	785	306	1		
<i>Micracanthum guacrisetum</i>						1,039								
<i>Micracanthum pusillum</i>		1,463							316		2,447	3,366		
<i>Monoraphidium arcuatum</i>							671	1						
<i>Monoraphidium caribaeum</i>								1						
<i>Monoraphidium contortum</i>	7		20				168		316	393	612	842		47
<i>Monoraphidium griffithii</i>							17							
<i>Monoraphidium</i> sp.	31								1,264	1,177				
<i>Pediastrum duplex</i>		1,830		1,000	243				316	393				
<i>Pediastrumduplex</i> var. <i>gracillimum</i>														1
<i>Pediastrum simplex</i>		915	5									842	5	
<i>Scenedesmus acuminatus</i>			22							1	1			62
<i>Scenedesmus acutus</i>		3,660	31						1,264	3,139	1,224			
<i>Scenedesmus arcuatus</i>		3,660												
<i>Scenedesmus denticulatus</i>	1	3,660												
<i>Scenedesmus ecomis</i>									1,895	1,570	612	3,366		
<i>Scenedesmus protuberans</i>											2,447	3,366	9	62
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	14	7,315	35					1	1,895		1,224	13,464	50	
<i>Scenedesmusquadricauda</i> var. <i>parvus</i>							1,342							
<i>Scenedesmus quadrispinia</i>	14													
<i>Schroederia setigera</i>				5					316	1,177	1			
<i>Selenastrium bibracium</i>														
<i>Selenastrium minutum</i>								1						
<i>Staurastrum chaetoceras</i>									316	393				
<i>Staurastrumichianum</i> var. <i>longatum</i>					1						1			
<i>Staurastrum</i> sp.			2						316		306	842	1	16
<i>Tetraedonminimum</i>								1			1	842		1
<i>Tetraedonigonum</i> var. <i>gradle</i>								1						
<i>Anabaena</i> sp.1	228											2,525		
<i>Anabaena spiroides</i>	114	40,230	6,159	6,500							5,505		17	446
<i>Anabaenopsis</i> sp.												5		
<i>Aphanocapsa</i> sp.		1						466		20				
<i>Cylindrocapsa</i> sp.												2,525		62

Species	7월20일	8월16일	9월19일	10월23일	11월22일	2월27일	3월27일	4월30일	5월20일	6월17일	7월28일	8월20일	9월11일	10월7일
<i>Metanopeda tenuissima</i>			9									3,366		
<i>Oscillatoria</i> sp.			25					52,168						
<i>Phormidium angulissima</i>														
<i>Phormidium</i> sp.1	24	21,030		11,400					39,474	24,324	3,670	37,866	13	82,917
<i>Phormidium</i> sp.2												3,366		
<i>Phormidium tenue</i>							101							
<i>Raphidiopsis mediterranea var. grandis</i>							369							
<i>Synechocystis</i> sp.	254,935	150,000	160,962	66,000	10,579			1,151				13,195	20,473	
<i>Ceratium hirundinella</i>								1	1					16
<i>Cryptomonas</i> sp.														16
<i>Euglena</i> sp.														
<i>Peridinium</i> sp.1			21									1,683	9	
<i>Peridinium tabulatum</i>							34							
<i>Trachelomonas hispida</i>									1					
<i>Trachelomonas</i> sp.												1,683		47
<i>Trachelomonas volvocina</i>	1	1		5	243					333	612	842	5	215

부록 4.38 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사식물섬(cells mL⁻¹)

Species	7월20일	8월16일	9월19일	10월23일	11월22일	2월27일	3월27일	4월30일	5월20일	6월17일	10월7일
<i>Achnanthes catenata</i>											32,917
<i>Asterionella formosa</i>						5,560	8,760	3,464			
<i>Aulacoseira ambigua</i>	1	6,000		7,200	2,000	10,320	2,120	3,464	1,696	2,400	1,074
<i>Aulacoseira distans</i>						1,160	40				
<i>Aulacoseira granulata</i>		9,000			1,000					1	
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	1	15,201	1	3,000				7	1,696	1	2
<i>Cyclotella</i> spp.			1					4	2	1	
<i>Cyclotella stelligera</i>					10						
<i>Cymbella</i> sp.		12,411		2,880							
<i>Navicula exigua</i>	1	1	1								
<i>Nitzschia acicularis</i>	1		1		10		1				1
<i>Nitzschia fruticosa</i>											1
<i>Nitzschia gracilis</i>									2		
<i>Nitzschia palea</i>	1		1	1	1		20		1,696	71	716
<i>Nitzschia</i> sp.								4			
<i>Stauranodiscus</i> sp.			1						2		
<i>Synedra acus</i>		2,540		400	1	440		4			
<i>Synedra ulna</i>	11	6,220	1	1,000	1	200	280		10,176	283	716
<i>Achnanthes haritzschii</i>		8,100			1				1,696	142	716
<i>Ankistrodesmus falcatulus</i>			1								
<i>Ankistrodesmus falcatulus</i> var. <i>mirabilis</i>									3,392		
<i>Ankistrodesmus namoselene</i>								4			
<i>Chodatella chodatii</i>								4			
<i>Chodatella subsalsa</i>										71	
<i>Clamydomonas</i> sp.								4			
<i>Clusterocestis longissima</i>					1		1,200	3,464	5,088	142	
<i>Coelastrum sphaericum</i>								4			1
<i>Cosmarium</i> sp.					1			4	4		
<i>Crucigenia neglecta</i>								4			
<i>Dichotomococcus curvatus</i>											1
<i>Ditycospharium pulchellum</i>										142	
<i>Ditycospharium</i> sp.		4,800									
<i>Euastrum</i> sp.											1,432
<i>Golenkinia radiata</i>									1,696		

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

Species	7월20일	8월16일	9월19일	10월23일	11월22일	2월27일	3월27일	4월30일	5월20일	6월17일	10월7일
<i>Microcinium quadrisetum</i>						800					
<i>Microcinium pusillum</i>		17,860							6,784		
<i>Monoraphidium arcuatum</i>							120				
<i>Monoraphidium contortum</i>	1	1	1	320	1		800	4	6,784		716
<i>Monoraphidium griffithii</i>							40				
<i>Mougeotia</i> sp.											1
<i>Pediastrum duplex</i>					1				3,392	283	
<i>Pediastrum simplex</i>	1	2,644	1		1						358
<i>Scenedesmus acuminatus</i>					1			4	2		1,432
<i>Scenedesmus acutus</i>									4		
<i>Scenedesmus bicaudatus</i>								4			
<i>Scenedesmus denticulatus</i>		27,811								283	
<i>Scenedesmus ecomis</i>					1			4		283	1
<i>Scenedesmus squedicauda</i>	1	25,140	1	800	1		840	4	2	71	358
<i>Staurastrum tataricum var. longatum</i>					2				2		1
<i>Staurastrum</i> sp.	1	1,500	1								716
<i>Tetraedron caudatum</i>					1						
<i>Traubaria</i> sp.		1									
<i>Anabaena</i> sp.1								18	85	424	
<i>Anabaena spiroides</i>	5	22,100	6	2,720							
<i>Aphanocapsa</i> sp.		1						174	85	4	
<i>Phormidium</i> sp.1		66,000	1		5		200	41,561	40,703	5,646	114,493
<i>Synechocystis</i> sp.	58,100	43,200	14,800	22,000	7,740						
<i>Cryptomonas</i> sp.		1						4			
<i>Peridinium</i> sp.1											1
<i>Trachelomonas hispida</i>											1
<i>Trachelomonas</i> sp.				180						142	
<i>Trachelomonas valcourina</i>	1		1	280	1			4	17	424	358

부록 4.39 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사-풍력섬(cells mL⁻¹)

Species	7월20일	8월16일	9월19일	10월23일	11월22일	2월27일	3월27일	4월20일	5월20일	6월17일
<i>Achnanthes</i> sp.							2			
<i>Asterionella formosa</i>						3,258	65,079	2,454	1,577	740
<i>Aulacoseira arctica</i>	1	5,928		9,707	2,600	3,801	7,855	182	498	17,002
<i>Aulacoseira distans</i>					40	1,086	8,977	182		
<i>Aulacoseira granulata</i>		8,891			1,120		2,245			
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	2	17,782	1	3,883	20	3	2	182	498	5,914
<i>Cyclotella</i> spp.			1	3,398			3,367	273	1,079	1,479
<i>Cymbella</i> sp.		11,855						1		
<i>Fragilaria capucina</i>										
<i>Navicula cryptocephala</i>										370
<i>Navicula cryptotenella</i>	1									
<i>Navicula exigua</i>	1		1							
<i>Naviculastavaera gracilis</i>	1									
<i>Navicula</i> sp.										370
<i>Nitzschia acicularis</i>	1		1		12		2		1	1
<i>Nitzschia palea</i>	1		1		1		1,123	182	166	740
<i>Synedra acus</i>		2,964	1	486			2	91		740
<i>Synedra acus</i> var. <i>rumpens</i>										
<i>Synedra ulna</i>	1	5,928	1	1,456			2,245	182	249	740
<i>Actinastrum hantzschii</i>	1	8,891		13,589	1					1,479
<i>Actinastrum hantzschii</i> var. <i>fluviale</i>										
<i>Arkilrodosmus falcatus</i>			1							
<i>Arkilrodosmus subtilis</i>										
<i>Chodatella subsalsa</i>									249	
<i>Closteriopsis longissima</i>							6,733	273	747	740
<i>Dityrospharium</i> sp.		5,928								
<i>Golenkinia radialis</i>	2									
<i>Microcodium pusillum</i>		17,782								
<i>Monoraphidium contortum</i>	1	2	1	486	1	543	4,489	182	166	740
<i>Pediastrum duplex</i>					1				332	1
<i>Pediastrum simplex</i>	1	2,964	1							
<i>Scenedesmus acuminatus</i>			1		1				332	1,479
<i>Scenedesmus bicaudatus</i>										740
<i>Scenedesmus denticulatus</i>		29,637								

Species	7월20일	8월16일	9월19일	10월23일	11월22일	2월27일	3월27일	4월20일	5월20일	6월17일
<i>Scenedesmus ecoris</i>								182	332	
<i>Scenedesmus protuberans</i>										1,849
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	1	23,710	1	1,942	1		8,977	727	166	2,218
<i>Schroederia setigera</i>			1							1
<i>Staurastium micranthum</i> var. <i>longatum</i>					1					
<i>Staurastium</i> sp.	1	2,964	1	466	1				166	370
<i>Tetraodon mirum</i>										370
<i>Treubaria</i> sp.		2								
<i>Anabaena</i> sp. 1							2			
<i>Anabaena spiroides</i>	4	20,746	2	6,310						
<i>Aphanocapsa</i> sp.		2							42	185
<i>Chroococcus minutus</i>						3				
<i>Phormidium</i> sp. 1		68,165	2		1	3,258	562	1,636	3,901	15,894
<i>Phormidium</i> sp. 2										185
<i>Synechocystis</i> sp.	57,048	45,150	14,786	22,883	7,200					
<i>Cryptomonas</i> sp.		2					2			1
<i>Gymnodinium</i> sp.	1									
<i>Pantidium</i> sp. 1										1
<i>Trachelomonas robusta</i>			1							
<i>Trachelomonas</i> sp.	1			466						740
<i>Trachelomonas volvocina</i>	2		1	466	16			182	664	2,588

부록 4.40 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사- 침수형식물섬(cells mL⁻¹)

Species	10월23일	11월22일	2월27일	3월27일	4월30일	5월20일	6월17일	10월7일
<i>Achnanthes catenata</i>								12,491
<i>Asterionella formosa</i>			4,240	11,080	7,587	1,222		
<i>Aulacoseira ambigua</i>	160	3,440	7,600	2,400	893		9,939	264
<i>Aulacoseira distans</i>		40	800	800	224			
<i>Aulacoseira granulata</i>		1,440	1,400	560				
<i>Aulacoseiragranulata</i> var. <i>angustissima</i>	360				447	733		176
<i>Cyclotella</i> spp.		20			781	21,490	5,754	176
<i>Cymbella gracilis</i>							262	9
<i>Cymbella</i> sp.	400							
<i>Fragilaria crotonensis</i>							1	
<i>Gomphonema gracile</i>			20	20				
<i>Gomphonema parvulum</i>			20	20				
<i>Navicula pupula</i>							1	
<i>Nitzschia acicularis</i>		8		0				176
<i>Nitzschia palea</i>	160	1	40	40	112		524	88
<i>Synedra acus</i>	80	10	240		112	733	262	176
<i>Synedra ulna</i>	40	7	160	240	112	733	262	88
<i>Actinastrium hantzschii</i>	13,360	1					1,047	
<i>Ankistrodesmus</i> taicaius var. <i>mirabilis</i>							524	88
<i>Chodatella</i> sp.							27	
<i>Closteropsis longissima</i>				1,000	781	1,710	1,047	
<i>Coelastrum microporum</i>								528
<i>Cosmarium</i> sp.								88
<i>Crucigenia</i> sp.								352
<i>Dityosporium</i> sp.					112	977	1,047	88
<i>Ditymposisthemis</i> var. <i>denubialis</i>								
<i>Echinospaeridium hexacantha</i>						245		
<i>Golenkinia radiata</i>							262	
<i>Micractinium guadrisetum</i>			400					
<i>Monoraphidium arcuatum</i>				400				
<i>Monoraphidium caribaeum</i>								
<i>Monoraphidium contortum</i>	80			520	1,005	733	524	88
<i>Monoraphidium griffithii</i>				240				
<i>Pediastrum duplex</i>					112			88

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

Species	10월23일	11월22일	2월27일	3월27일	4월30일	5월20일	6월17일	10월7일
<i>Pediastrum simplex</i>								88
<i>Scenedesmus acuminatus</i>		12			1			
<i>Scenedesmus ecoris</i>					670	977	262	88
<i>scenedesmus maximus</i>								1
<i>Scenedesmus apollensis</i>							262	88
<i>Scenedesmus protuberans</i>					447	489	1,047	352
<i>Scenedesmusquadricauda</i>	960	40	4	760				
<i>Scenedesmus</i> sp.				4				
<i>Schroederia setigera</i>							262	
<i>Staurastrum</i> sp.							262	88
<i>Tetraodontrichium</i>							262	
<i>Anabaena spirorbis</i>	3,200							352
<i>Merismopedia tenuissima</i>							1,047	352
<i>Nostoc coeruleum</i>							14	
<i>Phormidium</i> sp.1				320	3,013	3,419	4,446	52,776
<i>Synechocystis</i> sp.	23,000	7,400						829
<i>Ceratium hirundinella</i>								88
<i>Gymnodinium</i> sp.								88
<i>Peridinium</i> sp.1							1	
<i>Trachelomonas hispida</i>						245		88
<i>Trachelomonas oblonga</i>							1	
<i>Trachelomonas</i> sp.	48							
<i>Trachelomonas valvulina</i>	116	20					524	88

부록 4.41 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사- 침수형미식체(cells mL⁻¹)

Species	10월23일	11월22일	2월27일	3월27일	4월30일	5월20일	6월17일
<i>Asterionella formosa</i>			5,600		17,357	349	
<i>Aulacoseira arctica</i>	320	3,000	7,200		15,779	523	6,681
<i>Aulacoseira distans</i>		40	1,560				
<i>Aulacoseira granulata</i>		560	680			349	1,028
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	560					9	1,542
<i>Cyclotella</i> spp.		20				1,918	
<i>Cymbella</i> sp.	720						
<i>Fragilaria crotonensis</i>				9,920			
<i>Fragilaria</i> sp.				1,720			
<i>Gomphonema acuminatum</i>				640			
<i>Gomphonema gracile</i>				680			
<i>Nitzschia acicularis</i>		10					1
<i>Nitzschia palea</i>	160					175	
<i>Synedra acus</i>	40	20	200			349	
<i>Synedra ulna</i>	200	16	80			523	
<i>Actinestrum hantzschii</i>	5,440	40					1,028
<i>Ankyra lanceolata</i>				60			
<i>Chodatella</i> sp.				0			
<i>Closteropsis longissima</i>				120	14,201	698	
<i>Coelastrum microoortum</i>						1,046	
<i>Coscinotium subthornatum</i> var. <i>acervatum</i>				1,600			
<i>Dityosphaerium</i> sp.						3,312	8,223
<i>Golenkinia radiata</i>						349	
<i>Microcylindrium quadrisetum</i>			2,400				514
<i>Monoraphidium contortum</i>	160				6,312		
<i>Pediastrum duplex</i>		1				523	
<i>Pediastrum simplex</i>				360			
<i>Pediastrum tetras</i>				2,200			
<i>Pteromonas angulosa</i>				40			
<i>Scenedesmus acuminatus</i>		20					175
<i>Scenedesmus acutus</i>					7		
<i>Scenedesmus ecoris</i>					15,779	698	
<i>Scenedesmus protuberans</i>							2,066
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	2,040	80			6,312	698	

Species	10월23일	11월22일	2월27일	3월27일	4월30일	5월20일	6월17일
<i>Scenedesmus</i> sp.			4				
<i>Staurastrum tataricum</i> var. <i>longatum</i>				600			
<i>Staurastrum</i> sp.			10	4		349	514
<i>Anabaena macrospora</i>	2,880			10			
<i>Anabaena spirroides</i>						88	
<i>Aphanocapsa</i> sp.					10		
<i>Nostoc coeruleum</i>					53,648	29,630	31,863
<i>Phormidium</i> sp.1							
<i>Synechocystis</i> sp.	23,800	10,400					
<i>Euglena</i> sp.			10				
<i>Glencodium gymnodinium</i>				400			
<i>Peridinium</i> sp.6				10			
<i>Peridinium tabulatum</i>							1
<i>Trachelomonas hispida</i>						175	
<i>Trachelomonas</i> sp.	36						
<i>Trachelomonas volvocina</i>	132	80				175	514

부록 4.42 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사식물섬(1+8) (cells mL⁻¹)

Species	10월23일	11월22일	2월27일	3월27일	4월30일	5월20일	6월17일
<i>Asterionella formosa</i>			5,680	12,160	509	1,572	
<i>Aulacoseira ambigua</i>	560	5,600	10,200	2,880		1,572	9,241
<i>Aulacoseira distans</i>		160	2,400	400			
<i>Aulacoseira granulata</i>		1,040					
<i>Aulacoseira granulata var. angustissima</i>	880				509		2,189
<i>Cyclotella</i> spp.		20				3,536	
<i>Cymbella</i> sp.							973
<i>Nitzschia palea</i>	80	1		40		393	
<i>Synedra acus</i>	280	40	240			393	487
<i>Synedra ulna</i>	120	40	40	160	763	786	973
<i>Actinastrium hantzschii</i>	8,440	20					487
<i>Closteropopsis longissima</i>				1,120	255	786	487
<i>Diatyosphenium</i> sp.						11,391	1,946
<i>Micracidium guadrisetum</i>			480				
<i>Monoraphidium arcuatum</i>				80			
<i>Monoraphidium contortum</i>				480	509		
<i>Monoraphidium griffithii</i>				40			
<i>Pediastrum duplex</i>						786	487
<i>Pediastrum duplex var. gracillimum</i>							4
<i>Pediastrum simplex</i>		12					
<i>Scenedesmus acuminatus</i>		80					973
<i>Scenedesmus ecomis</i>					1,017	1,572	
<i>Scenedesmus protuberans</i>							973
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	1,560	160		880	1,017	786	973
<i>Staurastrum</i> sp.						393	244
<i>Anabaena spiroides</i>	2,800						
<i>Phormidium</i> sp.1				800	128	6,678	12,889
<i>Synechocystis</i> sp.	25,360	10,800					9,199
<i>Euglena</i> sp.			20				
<i>Peridinium</i> sp.1						1	1
<i>Peridinium tabulatum</i>					1		
<i>Trachelomonas hispida</i>							244
<i>Trachelomonas oblonga</i>					1		1
<i>Trachelomonas</i> sp.	8						
<i>Trachelomonas volvocina</i>	56	120					1,460

부록 4.43 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사- 식물섬(2*4) (cells mL⁻¹)

Species	10월23일	11월22일	2월27일	3월27일	4월30일	5월20일	6월17일
<i>Asterionella formosa</i>			7,920	8,600	6,803	472	
<i>Aulacoseira ambigua</i>	200	4,000	3,280	3,960	1,408	1,571	15,143
<i>Aulacoseira distans</i>			800	520			
<i>Aulacoseira granulata</i>		680				1	
<i>Aulacoseiragranelata</i> var. <i>angustissima</i>	160				939		1,893
<i>Cyclotella</i> spp.		12				2,670	947
<i>Navicula cryptocephala</i>							474
<i>Nitzschia acicularis</i>		20		1			
<i>Nitzschia palea</i>	160			40			1
<i>Synedra acus</i>	40		200	1	235	315	474
<i>Synedraacus</i> var. <i>tumpersi</i>							
<i>Synedra ulna</i>	80				470	4,240	1,893
<i>Actinastrium hantzschii</i>	3,240	40					
<i>Ankistrodesmus</i> <i>taiwanicus</i> var. <i>mirabilis</i>						315	
<i>Chodatella</i> sp.						158	
<i>Closteropsis longissima</i>				1,280	1,408	472	1,893
<i>Ditycosphanium</i> sp.					939	8,795	13,250
<i>Golenkinia radiata</i>					235		
<i>Micractinium quadrisetum</i>			640				
<i>Monoraphidium arcuatum</i>				80			
<i>Monoraphidium contortum</i>				640	704	315	947
<i>Monoraphidium griffithii</i>				40			
<i>Pediastrum duplex</i>		4				629	947
<i>Scenedesmus acuminatus</i>		16			1	158	
<i>Scenedesmus denticulatus</i>						158	
<i>Scenedesmus ecomis</i>					704	629	
<i>Scenedesmus quadricauda</i>		1		1,200	470	629	1,893
<i>Staurastrum</i> sp.	880				235	158	
<i>Anabaena</i> sp.2						629	
<i>Anabaena</i> sp.3						1,257	
<i>Anabaena spiroides</i>	8,040						
<i>Phormidium</i> sp.1		40		920	10,322	16,175	8,518
<i>Synechocystis</i> sp.	20,560	10,440				27,714	3,855
<i>Trachelomonas hispida</i>							947
<i>Trachelomonas volvocina</i>	8	280			235	158	474

부록 4.44 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사- 인공수초대(저밀도) (cells mL⁻¹)

Species	10월23일	11월22일	2월27일	3월27일	4월30일	5월20일	6월17일
<i>Asterionella formosa</i>			4,520	10,080	7,031	203	
<i>Aulacoseira ambigua</i>	280	5,000	9,280	1,360	3,164	3,536	10,331
<i>Aulacoseira distans</i>			80	560	1,055		
<i>Aulacoseira granulata</i>		1,000					
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	200				704		6,396
<i>Cyclotella</i> spp.		12				2,526	1,968
<i>Cymbella tumida</i>		60					
<i>Fragilaria crotonensis</i>						2,021	
<i>Gyrodinium acuminata</i>							984
<i>Navicula cryptocephala</i>							492
<i>Nitzschia acicularis</i>		20		1		6	492
<i>Nitzschia fruticosa</i>							5
<i>Nitzschia gracilis</i>				16	1		492
<i>Nitzschia palea</i>	40				352		492
<i>Nitzschia</i> sp.							1,476
<i>Synedra acus</i>	20		80	40	352	51	492
<i>Synedra ulna</i>	40				704		
<i>Actinastrium hantzschii</i>	3,600	1					
<i>Closteropsis longissima</i>				1,440	2,813	7,071	
<i>Closterium gracile</i>						51	
<i>Dictyosphaerium</i> sp.					1,407		
<i>Diadymocystis nemisii</i> var. <i>denubialis</i>						2,021	
<i>Golenkinia radiata</i>					352		492
<i>Microactinium guadisetum</i>			1,040				
<i>Monoraphidium arcuatum</i>				60		1,516	
<i>Monoraphidium contortum</i>				1,040	352		50
<i>Monoraphidium griffithii</i>				40		1,011	984
<i>Pediastrum duplex</i>		40			352		50
<i>Pediastrum duplex</i> var. <i>gracillimum</i>						4,041	
<i>Scenedesmus abundans</i>							2,952
<i>Scenedesmus acuminatus</i>						4,041	984
<i>Scenedesmus exomis</i>					1,407	2,021	984
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	1,000			40	1,407		984
<i>Schroederia setigera</i>							984

부록 4: 조사대상 저수지 생물자료

Species	10월23일	11월22일	2월27일	3월27일	4월30일	5월20일	6월17일
<i>Selenastrum bibratianum</i>							50
<i>Staurastrum</i> sp.						102	
<i>Treubaria</i> sp.							492
<i>Anabaena</i> sp.1					1,758		
<i>Anabaena spiruloides</i>	6,000						
<i>Aphanocapsa</i> sp.					3,516		9,839
<i>Oscillatoria limnetica</i>						7,577	
<i>Oscillatoria limosa</i>							246
<i>Oscillatoria</i> sp.						506	
<i>Phormidium subterranum</i>						4,041	
<i>Phormidium valbenianum</i>						22,729	
<i>Phormidium</i> sp.1							
<i>Phormidium</i> sp.2		36		1,640	7,734		15,743
<i>Phormidiumvalbenianum</i> var. <i>tenuis</i>						11,112	
<i>Synedra</i> sp.	12,600	10,600				26,511	5,712
<i>Trachelomonas volvocita</i>	56	320			362		2,962

부록 4.45 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사- 인공수초대(고밀도) (cells mL⁻¹)

Species	10월23일	11월22일	2월27일	3월27일	4월30일	5월20일	6월17일
<i>Achnanthes catenata</i>					113		
<i>Achnanthes</i> sp.					1,129		518
<i>Asterionella formosa</i>			5,520	9,200	10,158		
<i>Aulacoseira ambigua</i>	320	4,520	12,400	2,200	226	15,885	9,321
<i>Aulacoseira distans</i>			240	400			
<i>Aulacoseira granulata</i>		1,200					
<i>Aulacoseira granuleta</i> var. <i>angustissima</i>	240				2,258		104
<i>Cyclotella</i> spp.		8			1,129	7,060	2,072
<i>Gyrodinium aureolum</i>		80					
<i>Fragilaria crotonensis</i>						5,295	
<i>Gomphonema acuminatum</i>							52
<i>Navicula cryptocapsala</i>							52
<i>Navicula</i> sp.							518
<i>Nitzschia aculeans</i>		16		1	1,129		1,036
<i>Nitzschia fruticosa</i>							
<i>Nitzschia gracilis</i>					1,129		1,036
<i>Nitzschia palea</i>	40			12			
<i>Synechtra acus</i>	60		120				
<i>Synechtraacus</i> var. <i>rumpans</i>							
<i>Synechtra ulna</i>	40			40			52
<i>Actinostrium hantzschii</i>	3,400	1					
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>							6
<i>Chlorella</i> sp.						3,386	
<i>Closteriopsis longissima</i>				1,240			
<i>Coelastrum sphaericum</i>							104
<i>Didymocystis nemisus</i> var. <i>danubialis</i>						3,530	
<i>Golenkinia radiata</i>							518
<i>Microcylindrium guadalupense</i>			560				
<i>Monoraphidium arcuatum</i>				40			518
<i>Monoraphidium caribaeum</i>					113		
<i>Monoraphidium contortum</i>				560	12		
<i>Monoraphidium littorale</i>					1,129		52
<i>Monoraphidium pusillum</i>					1,129		
<i>Pediastrum duplex</i>		80			12		104

Species	10월23일	11월22일	2월27일	3월27일	4월30일	5월20일	6월17일
<i>Scenedesmus abundans</i>					113		
<i>Scenedesmus acuminatus</i>							52
<i>Scenedesmus ecomis</i>					113		
<i>Scenedesmus opolensis</i>							2,072
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	768			80	4,515		
<i>Selenastrium bibrachium</i>							2,072
<i>Selenastrium minutum</i>					2,258		
<i>Staurastrium dimazum</i>						3,530	
<i>Staurastrium tictanum var. longatum</i>					113		
<i>Staurastrium</i> sp.					113		
<i>Tetraedromminum</i>							52
<i>Anabaena</i> sp. 1					565		
<i>Anabaena spirioides</i>	4,400						
<i>Aphanocapsa</i> sp.							10,357
<i>Chroococcus endophyticus</i>						4,236	
<i>Phormidium</i> sp. 1		44		1,200			
<i>Raphidiopsis indica</i>							104
<i>Synechocystis</i> sp.	13,320	10,200				854	4,505
<i>Cryptomonas</i> sp.					1,129		52
<i>Trachelomonas hispida</i>							518
<i>Trachelomonas oblonga</i>							
<i>Trachelomonas volvocina</i>	40	300			113	1,765	1,554

부록 4.46 신구저수지 식물플랑크톤 월별조사- 침수 수변그물섬, 침수 인공수초대(cells mL⁻¹)

Species	침수 수변그물섬						침수 인공수초대			
	6월17일	7월28일	8월20일	9월11일	10월7일	7월28일	8월20일	9월11일	10월7일	
<i>Achnanthes catenata</i>		171		16	5,483				679	
<i>Achnanthes lanceolata</i>	45									
<i>Achnanthes minutissima</i>							281		453	
<i>Asterionella formosa</i>	896					318			1,132	
<i>Aulacoseira ambigua</i>	2,666	35	6,085		314	1,270	16,509	3,087	4,526	
<i>Aulacoseira granulata</i>					16	159	4,064	169	1,358	
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	4,028	1,874	1,889	1,204						
<i>Aulacoseira muzzanensis</i>								842		
<i>Cyclotella</i> spp.	1,791	341	1,049			318	2,286	281		
<i>Cyclotella stelligera</i>								281		
<i>Cymbella</i> sp.	5									
<i>Fragilaria crotonensis</i>										
<i>Navicula cryptocephala</i>						4,126	508	562	453	
<i>Navicula cryptotenella</i>								29	3	
<i>Navicula lanceolata</i>	448									
<i>Navicula pseudolenocolata</i>	45									
<i>Navicula pupula</i>	45							281		
<i>Nitzschia acicularis</i>	896	11,413	1,049	452	314	1,587	762	281	227	
<i>Nitzschia fruticosa</i>		3,067	2,308		470					
<i>Nitzschia gracilis</i>	448	852	840	753	16					
<i>Nitzschia palea</i>		682			16	318	508	1,684	227	
<i>Nitzschia</i> sp.	448		210							
<i>Synedra acus</i>	896	682	420	16	16	962	254	29	227	
<i>Synedra ulna</i>										
<i>Actinastrum hantzschii</i>						952	508			
<i>Chlamydomonas</i> sp.			21							
<i>Chodatella citiformis</i>					16					
<i>Glosterionopsis longissima</i> var. <i>tropica</i>		18								
<i>Glosterium gracile</i>						318				
<i>Cocleastrum sphaericum</i>	90	2,726			32					
<i>Coscinium abbreviatum</i> var. <i>pygmaea</i>		18	420		157					
<i>Cosmarium</i> sp.			420		16					
<i>Crucigenia mucronata</i>		682								

Species	침수 수변그물섬						침수 인공수초대			
	6월 17일	7월 28일	8월 20일	9월 11일	10월 7일	7월 28일	8월 20일	9월 11일	10월 7일	
<i>Crucigenia neglecta</i>			1,973							
<i>Crucigenia rectangularis</i>							1,016			
<i>Crucigenia tetrapedia</i>					16					
<i>Dichotomococcus capitatus</i>					2					
<i>Diclyosporium ehrenbergianum</i>				16						
<i>Diclyosporium pulchellum</i>					1,097					
<i>Didymocystisnemismisvar.danubialis</i>							1,016			
<i>Golenkinia radiata</i>		2,896	420	16	157					
<i>Kirchneriellacontorta</i>		18								
<i>Monoraphidium arcuatum</i>		341			470			29	679	
<i>Monoraphidium caribeum</i>	448									
<i>Monoraphidium contortum</i>		171		151	16			29	679	
<i>Monoraphidium griffithii</i>			210							
<i>Monoraphidium littorale</i>	448									
<i>Mougeotia</i> sp.			21		16					
<i>Pediastrum dublex</i>	5,371									
<i>Pediastrumduplexvar.gracillimum</i>		2				58				
<i>Pediastrum simplex</i>		682								
<i>Pediastrumsimplexvar.echinulatum</i>							407		91	
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	5	18				2,539			1,811	
<i>Scenedesmus acutiformis</i>						127				
<i>Scenedesmus acutus</i>						127				
<i>Scenedesmus denticulatus</i>			3				2,032			
<i>Scenedesmus ecomis</i>		682	1,259		16		3,048			
<i>Scenedesmus maximus</i>							1,016	1,123	10	
<i>Scenedesmus opoliensis</i>			840		627		1,016		906	
<i>Scenedesmus perforatus</i>								1,123		
<i>Scenedesmusquadrifida</i>	5,818	4,089	2,728	602	314	2,539	2,794	1,123	1,358	
<i>Scenedesmusquadrifida</i> var. <i>parvus</i>						1,270				
<i>Schroederia indica</i>	448									
<i>Schroederia setigera</i>		171	210	151	16	32				
<i>Selenastrum bibraianum</i>					314					
<i>Spondylium</i> sp.										
<i>Staurastrumrotanum</i> var. <i>longatum</i>		171					102			

Species	침수 수변그물섬						침수 인공수초대				
	6월 17일	7월 28일	8월 20일	9월 11일	10월 7일	7월 28일	8월 20일	9월 11일	8월 20일	9월 11일	10월 7일
<i>Staurastrum pitigale</i>						64					
<i>Staurastrum</i> sp.			21				51				
<i>Tetraodonminimum</i>	5	341	210	151							
<i>Treubaria</i> sp.		852									
<i>Arabaena macrospora</i>				12,791							
<i>Arabaena</i> sp.1		86						365			
<i>Arabaena</i> sp.2						381					
<i>Arabaenopsis</i> sp.		35			1,254						
<i>Aphanocapsa</i> sp.	9,846	86	4,196	76							
<i>Chroococcus minutus</i>			420								
<i>Chroococcus</i> sp.				16							159
<i>Cylindrocapsa ovata</i>						254					
<i>Merismopedia tenuissima</i>	90								10,160		
<i>Microcystis pulvere</i>											408
<i>Nostoc coeruleum</i>										814	
<i>Oscillatoria</i> sp.						18,087					
<i>Phormidium</i> sp.2		5,962	1,679	260,326	101,659						
<i>Phormidium</i> sp.3			237,069	4,515					233,411		
<i>Phormidium subterranum</i> var. <i>crassum</i>									8,636	303,894	137,586
<i>Phormidium valdeianum</i> var. <i>tenue</i>											
<i>Raphidopsis indica</i>			21								
<i>Spirulina</i> sp.		86		7,524							
<i>Synechocystis</i> sp.	3,689	3,339	13,639	78,865		2,472	7,536	40,459			2,037
<i>Cryptomonas</i> sp.				16							
<i>Euglena proxima</i>					16						
<i>Gymnodinium</i> sp.			210	452							
<i>Pendinium bipes</i>											
<i>Pendinium polonicum</i>								29			453
<i>Pendinium</i> sp.1								29			
<i>Trachelomonas oblonga</i>								3,648			2,490
<i>Trachelomonas robusta</i>						318					453
<i>Trachelomonas volvocina</i>	4,923	171	210	753	940						

부 록 5

-
-
-
-
-

전국 농업용저수지 유형화를 위한 전국 농업용
저수지 목록

부록 5: 전국 농업용저수지 유형화를 위한 전국 농업용저수지 목록

부록 5.1 전국 농업용저수지 유형화를 위한 전국 농업용저수지 목록

저수지명	행정구역				수계명	Code		설치년도	TSI(TP)	TSI(Chl- <i>a</i>)	Group		
	시도	시군구	읍면동	리		SOM	기타				TSI(TP)	TSI(Chl- <i>a</i>)	SOM
가곡	충청남도	홍성군	갈산면	가곡리	금강서해	134CN9	243CN9	1984	40.0	43.7	2	3	4
가북	경상남도	거창군	가북면	박암리	낙동강		76GN10	1982	71.0	45.1	5	3	
가산	경상남도	밀양시	부북면	가산리	낙동강		75GN10	1945	65.2	65.3	5	5	
가음	경상북도	의성군	가음면	양지리	낙동강	37GB8	129GB8	1959	63.2	64.4	4	4	3
가혜	충청남도	아산시	염치읍	석두리	삽교천	135CN8	264CN8	1950	84.6	83.7	5	5	2
감동	경상남도	창녕군	고암면	감리	낙동강		68GN10	1957	55.0	48.3	4	3	
감물	경상남도	밀양시	단장면	감물리	낙동남해		63GN10	1949	62.2	60.0	4	4	
개운	경상북도	상주군	개운동		낙동강	38GB8	105GB8	1948	77.6	52.5	5	4	5
개천	경상북도	의성군	안계면	위양리	낙동강	39GB8	107GB8	1952	64.1	62.4	4	4	1
경천	충청남도	공주시	계룡면	양화리	금강	136CN9	256CN9	1973	59.7	63.7	4	4	3
계룡	충청남도	공주시	계룡면	하대리	금강	137CN9	267CN9	1964	53.2	53.4	4	4	4
고경	경상북도	영천시	고경면	청정리	낙동강	40GB8	112GB8	1956	62.5	53.3	4	4	4
고구	인천광역시	강화군	교동면	고구리	한강서해	3GG9	158GG9	1977	59.4	56.1	4	4	4
고남	충청남도	서산시	성연면	고남리	금강서해	138CN8	232CN8	1968	55.4	54.8	4	4	4
고모	경기도	포천군	소흘읍	고모리	한강		38GG10	1984	49.4	48.0	3	3	
고삼지1	경기도	안성시	고삼면	봉산리		4GG8	57GG9	1963	65.8	65.6	5	5	3
고삼지2	경기도	안성시	고삼면	봉산리			58GG9	1963	66.2	66.2	5	5	
고삼지3	경기도	안성시	고삼면	봉산리			59GG9	1963	61.4	49.1	4	3	
고풍	충청남도	서산시	운산면	고풍리	금강서해	139CN8	274CN8	1974	56.2	51.6	4	4	4
고현	경상북도	청송군	진보면	고현리	낙동강		98GB10	1959	58.0	52.6	4	4	
공능	경기도	파주시	조리면	장곡리	한강	5GG9	19GG9	1966	63.4	70.9	4	5	3
공리	충청남도	홍성군	구항면	공리	금강서해	140CN9	244CN9	1985	69.4	62.9	5	4	6
광곡	전라북도	완주군	구이면	광곡리	만경강	118JB9	192JB9	1984	51.7	39.6	4	2	4
광교지1	경기도	수원시				6GG8	9GG9		62.9	60.7	4	4	3
광교지2	경기도	수원시					10GG9		60.6	34.6	4	2	
광혜	경기도	안성시	죽산면	두교리	금강		11GG10	1988	58.0	56.5	4	4	
구림	전라북도	순창군	구림면	월정리	섬진강		185JB10	1960	42.2	38.8	3	2	
구만	전라남도	구례군	광의면	구만리	섬진강		171JN10	1973	56.6	62.0	4	4	
구산	전라남도	해남군	험산면	구산리		98JN7		1995	40.0	63.6	2	4	1
구성	전라남도	곡성면	오곡면	구성리	섬진강	99JN7	172JN10	1945	62.7	53.4	4	4	4

저수지명	행정구역				수계명	Code		설치년도	TSI(TP)	TSI(Chl-a)	Group		
	시도	시군구	읍면동	리		SOM	기타				TSI(TP)	TSI(Chl-a)	SOM
구시	전라남도	해남군	현산면	구시리		100JN7		1963	63.2	66.2	4	5	3
구천	경상북도	청송군	부남면	화장리	낙동강	41GB9	83GB9	1987	48.7	47.5	3	3	4
군곡	전라남도	해남군	송지면	군곡리		101JN7		1961	68.0	65.0	5	5	3
공산	전라북도	고창군	심원면	공산리	영산서해		210JB10	1945	80.4	53.7	5	4	
궁평	충청남도	아산시	송악면	궁평리	삽교천	141CN8	273CN8	1961	58.4	55.6	4	4	1
금광	경기도	안성시	금광면	금광리		7GG8		1961	55.0	50.9	4	3	1
금마	전라북도	익산시	금마면	동고도리	만경강		180JB10	1945	61.4	66.4	4	5	
금봉	경상북도	의성군	옥산면	금봉리	낙동강	42GB8	123GB8	1985	59.0	40.7	4	2	1
금석	충청북도	음성군	금왕읍	금석리	한강	190CB9	295CB9	1982	49.4	46.2	3	3	1
금오	경상북도	구미시	남동동		낙동강	43GB8	135GB8	1946	48.1	48.5	3	3	4
금전	전라남도	화순군	한천면	금전리	영산강	191CB9	170JN10	1962	53.7	61.7	4	4	5
금정	충청북도	음성군	생곡면	관성리	한강		278CB9	1945	74.3	67.0	5	5	
금주	경기도	포천군	영중면	금주리	한강		21GG10	1981	45.0	42.6	3	3	
금평	전라북도	김제시	금산면	쌍용리	동진강	119JB9	213JB9	1961	57.7	72.0	4	5	3
금풍	전라북도	남원시	주생면	내동리	섬진강		206JB10	1971	62.7	42.3	4	3	
금화	경상북도	칠곡군	가산면	금화리		44GB9		1984			1	1	4
기동	경상북도	포항시 북구	기계면	화봉리	형산강		86GB10	1955	66.4	56.1	5	4	
기산	경기도	양주군	백석면	기산리	한강		27GG10	1975	45.0	51.4	3	4	
기산	경기도	포천군	일동면	기산리	한강		34GG10	1979	112.3	51.6	5	4	
기지	전라북도	전주시	덕진구	장동	만경강	120JB9	178JB9	1934	79.0	69.8	5	5	5
길상2	인천광역시	강화군	길상면	장흥리	한강서해	8GG9	157GG9	1962	74.7	71.5	5	5	6
길용	전라남도	영광군	백수읍	길용리	영산서해		165JN10	1979	47.3	60.1	3	4	
길정	인천광역시	강화군	양도면	길정리	한강서해	9GG9	159GG9	1989	45.0	36.4	3	2	4
남매	경상북도	경산시	계양동		낙동강	45GB9	106GB9	1928	72.2	64.5	5	4	5
내장	전라북도	정읍시	내장동		동진강	121JB9	216JB9	1964	57.0	61.1	4	4	4
노동	전라북도	고창군	고창읍	노동리	영산서해		187JB10	1952	56.6	56.3	4	4	
노홍	대구광역시	달성군	논공읍	노이리	낙동강	46GB9	152GB9	1977	62.9	52.4	4	4	1
능	전라북도	김제시	만경읍	만경리	영산서해		219JB10	1945	61.9	70.0	4	5	
달창	대구광역시	달성군	유가면	한정리	낙동강		154GB10	1972	57.3	53.3	4	4	
대곡	전라남도	보성군	조성면	대곡리		102JN7		1979	60.6	57.6	4	4	1
대룡	강원도	홍천군	북방면	성동리	한강	103JN7	4GW10	1957	45.8	47.3	3	3	4
대사	충청남도	홍성군	갈산면	대사리	금강서해	142CN9	241CN9	1978	46.6	47.0	3	3	4
대산	인천광역시	강화군	송해면	송취리	한강서해	10GG9	156GG9	1980	64.8	77.1	4	5	3

저수지명	행정구역				수계명	Code		설치년도	TSI(TP)	TSI(Chl-a)	Group		
	시도	시군구	읍면동	리		SOM	기타				TSI(TP)	TSI(Chl-a)	SOM
대성	경상북도	구미시	수점동		낙동강	47GB8	140GB8	1962	68.4	45.8	5	3	5
대송	경상북도	영천시	금호읍	오계리	낙동강	48GB8	120GB8	1939	67.3	52.6	5	4	1
대안	강원도	원주시	홍업면	대안리	한강		1GW10	1998	52.7	37.9	4	2	
대위	전라북도	군산시	회현면	고사리	영산서해		186JB10	1962	71.4	73.7	5	5	
대정	전라북도	고창군	공음면	두암리	영산서해		207JB10	1929	45.0	60.7	3	4	
대지	전라남도	구례군	마산면	갑산리	섬진강		160JN10	1945	48.1	51.6	3	4	
대평	경기도	양평군	지제면	대평리	한강		22GG10	1962	58.7	49.8	4	3	
대화	전라북도	김제시	금구면	대화리	동진강	122JB9	199JB9	1962	65.4	69.4	5	5	3
덕가	경상북도	상주시	사벌면	덕가리	낙동강	49GB8	99GB8	1969	59.0	70.7	4	5	6
덕곡	경상북도	고령군	덕곡면	노리	낙동강		125GB10	1996	40.0	40.7	2	2	
덕동	경상북도	경주시	덕동		형산강	50GB9	150GB9	1977	48.7	48.3	3	3	4
덕림	전라북도	고창군	무장면	덕림리	영산서해		176JB10	1944	88.1	81.2	5	5	
덕산	전라북도	무주군	안성면	덕산리	금강		197JB10	1981	41.1	38.3	2	2	
덕산	경기도	안성시	삼죽면	덕산리	한강	11GG8	44GG8	1991	66.4	53.3	5	4	1
덕웅	충청남도	부여군	충화면	가화리	금강	143CN9	269CN9	1955	47.3	57.2	3	4	4
덕우	경기도	화성군	봉담읍	덕우리	한강서해		56GG10	1949	63.4	66.4	4	5	
도고	충청남도	아산시	도고면	시전리	삼교천	144CN8	271CN8	1945	79.6	76.5	5	5	5
도척	경기도	광주시	도척면	유정리	한강		24GG10	1975	48.7	47.3	3	3	
도천	경상북도	영덕군	남정면	도천리	낙동동해	51GB9	95GB9	1942	58.0	52.9	4	4	4
도천	전라북도	고창군	심원면	도천리	영산서해	123JB9	191JB9	1940	61.4	63.2	4	4	5
도촌	전라남도	보성군	득량면	도촌리		104JN7		1984	48.7	55.2	3	4	1
동명	경상북도	철곡군	동명면	구덕리	낙동강	52GB9	113GB9	1961	72.3	69.3	5	5	3
동방	경기도	화성시	팔탄면	노하리	한강서해		29GG10	1939	68.9	66.0	5	5	
동부	충청남도	서천군	시초면	봉선리	금강	145CN9	277CN9	1945	60.6	65.1	4	5	3
동상	전라북도	완주군	동상면	수만리			220JB10	1965	47.3	51.4	3	4	
두창	경기도	용인시	원삼면	두창리	한강	12GG8	37GG8	1992	62.7	45.1	4	3	4
마둔	경기도	안성시	금광면	장죽리	안성천	13GG8	54GG8	1975	53.2	47.0	4	3	1
마산	충청남도	아산시	방축동		삼교천	146CN8	263CN8	1945	78.9	72.5	5	5	5
마지	경기도	파주시	법원읍	직천리	한강	14GG9	55GG9	1980	53.7	48.8	4	3	4
만년	충청북도	괴산군	불정면	추산리	한강	192CB9	279CB9	1958	55.8	54.8	4	4	4
만수	경기도	안성시	공도면	만정리	안성천	15GG8	14GG8	1945	80.4	75.8	5	5	5
만수	전라북도	정읍시	고부면	만수리	동진강	124JB9	188JB9	1947	62.7	65.8	4	5	3
만운	경상북도	안동시	풍산읍	만운리	낙동강	53GB9	132GB9	1959	64.6	63.3	4	4	3
매원	경상북도	철곡군	왜관읍	봉계리	낙동강	54GB9	88GB9	1952	67.9	61.7	5	4	3

저수지명	행정구역				수계명	Code		설치년도	TSI(TP)	TSI(Chl-a)	Group		
	시도	시군구	읍면동	리		SOM	기타				TSI(TP)	TSI(Chl-a)	SOM
매화	경상북도	울진군	원남면	기양리	낙동동해	55GB9	100GB9	1976	46.6	8.0	3	1	4
맹동	충청북도	음성군	맹동면	통동리	금강	193CB9	300CB9	1983	46.6	50.2	3	3	1
역우	경기도	화성시	우정면	역우리	한강서해		28GG10	1945	67.2	65.1	5	5	
명계	경상북도	경주시	내남면	명계리	형산강	56GB9	121GB9	1983	55.0	43.7	4	3	4
명관	경상남도	함안군	군북면	명관리	낙동강		65GN10	1974	51.7	42.0	4	3	
묘곡	경상북도	영덕군	영해면	묘곡리	낙동동해	57GB9	147GB9	1963	56.6	47.0	4	3	4
무곡	충청북도	음성군	음성읍	사정리	한강	194CB9	294CB9	1982	56.6	54.1	4	4	1
무수	충청북도	진천군	광혜원면	구암리	금강		290CB10	1959	59.7	51.0	4	3	
무을	경상북도	구미시	무을면	상송리	낙동강	58GB8	111GB8	1970	76.0	48.5	5	3	5
문광	충청북도	괴산군	문광면	양곡리	한강	195CB9	285CB9	1978	54.1	54.5	4	4	4
문산	충청남도	서천시	문산면	은곡리	금강	147CN9	236CN9	1957	64.1	64.0	4	4	3
문천	경상북도	경산시	진량면	문천리		59GB9	143GB9	1959	69.4	58.5	5	4	5
미륵	전라북도	익산시	낭산면	낭산리	금강		190JB10	1947	59.7	60.8	4	4	
미산	경기도	안성시	양성면	미산리	안성천	16GG8	43GG8	1985	54.1	36.9	4	2	4
미제	전라북도	군산시	마룡동		영산서해	125JB9	212JB9	1959	45.0	48.0	3	3	4
미호	충청북도	진천군	초평면	화산리	금강	196CB9	301CB9	1984	57.0	45.6	4	3	1
박달	경상북도	경주시	내남면	박달리	형산강	60GB9	124GB9	1989	46.6	42.3	3	3	4
반곡	경상북도	포항시 북구	신광면	반곡리	낙동동해		97GB10	1945	51.7	44.2	4	3	
반산	충청남도	부여군	규암면	반산리	금강	148CN9	272CN9	1956	58.4	57.0	4	4	1
반월	경기도	군포시	둔대동		한강서해	17GG9	40GG9	1957	62.2	60.9	4	4	1
발랑	경기도	파주시	광탄면	발랑리	한강	18GG9	25GG9	1976	62.2	59.4	4	4	4
방교	경기도	화성시	동탄면	산척리	안성천	19GG9	17GG9	1945	66.0	63.8	5	4	3
방동	대전광역시	유성구	방동		금강	149CN9	155CN9	1977	48.7	64.5	3	4	4
백마	충청북도	괴산군	사리면	소매리	한강	197CB9	282CB9	1964	57.0	42.0	4	3	4
백마	충청북도	제천시	백운면	방학리	금강	198CB9	292CB9	1959	64.1	63.1	4	4	1
백산	전라북도	김제시	백산면	하정리	영산서해		211JB10	1969	52.2	46.8	4	3	
백석	전라북도	전주시	덕진구	전미동	만경강	126JB9	195JB9	1964	63.4	61.0	4	4	3
백용	전라남도	나주시	다시면	운봉리	영산강		173JN10	1932	66.2	72.0	5	5	
백학	경기도	연천군	백학면	백학리	한강		42GG10	1697	58.7	59.9	4	4	
벽계	경상남도	의령군	공유면	벽계리	낙동강		72GN10	1983	44.1	30.6	3	2	
벽남	전라북도	장수군	계남면	공양리	금강		182JB10	1974	56.6	43.2	4	3	
보통	경기도	화성군	정남면	보통리	안성천		36GG10	1955	71.9	75.8	5	5	
복심	충청남도	부여군	충화면	복심리	금강	150CN9	266CN9	1945	62.9	65.0	4	5	3

저수지명	행정구역				수계명	Code		설치년도	TSI(TP)	TSI(Chl-a)	Group		
	시도	시군구	읍면동	리		SOM	기타				TSI(TP)	TSI(Chl-a)	SOM
봉림	충청남도	예산시	봉산면	봉림리	삽교천	151CN8	276CN8	1944	66.4	79.9	5	5	5
봉산	경상남도	창녕군	계성면	봉산리	낙동강		71GN10	1926	60.8	41.0	4	2	
봉성	경상남도	함안군	여항면	외암리	낙동강		67GN10	1942	49.4	48.3	3	3	
봉암	경기도	양주군	남면	봉암리	한강		30GG10	1979	65.4	60.4	5	4	
봉재	충청남도	아산시	둔포면	봉재리	삽교천	152CN8	240CN8	1945	77.2	72.7	5	5	5
봉학	경상북도	성주군	벽진면	봉학리	낙동강		133GB10	1990	56.6	40.3	4	2	
부전	전라북도	정읍시	부전동		동진강	127JB9	198JB9	1986	57.0	51.9	4	4	4
불갑	전라남도	영광군	불갑면	녹산리	영산서해		175JN10	1926	53.2	58.7	4	4	
사산	전라북도	부안군	주산면	사산리	영산서해		200JB10	1962	68.7	70.9	5	5	
산수	충청남도	서산시	해미면	산수리	금강서해	153CN8	268CN8	1962	50.0	47.0	3	3	4
산정	경기도	포천군	영북면	산정리	한강		50GG10	1945	52.2	29.6	4	2	
삼가	경상북도	영주시	풍기읍	옥금리	낙동강		141GB10	1986	44.1	36.9	3	2	
삼기	충청북도	괴산군	증평면	울리	금강	199CB9	291CB9	1963	51.7	49.0	4	3	4
상성	충청남도	아산시	영인면	상성리	인성천	154CN8	233CN8	1958	65.0	64.6	4	4	3
상판	경상북도	상주시	모동면	상판리	금강	61GB8	148GB8	1979	66.2	58.7	5	4	5
생곡	강원도	홍천군	서석면	생곡리	한강		7GW10	1983	40.0	38.8	2	2	
서부	충청남도	서천군	판교면	홍림리	금강서해	155CN9	275CN9	1945	63.4	75.0	4	5	3
서성	전라남도	화순군	동면	서성리	영산강		169JN10	1972	55.4	57.2	4	4	
서암	경상남도	의령군	가례면	과진리	낙동강		66GN10	1959	45.0	47.7	3	3	
석남	전라북도	고창군	상하면	석남리	영산서해		194JB10	1954	56.2	52.4	4	4	
석문	충청남도	당진군	석문면	삼봉리	금강서해	156CN8	227CN8	1968	72.9	72.0	5	5	3
석우	전라북도	정읍시	고부면	장문리	동진강	128JB9	183JB9	1945	64.1	59.4	4	4	1
석포	전라북도	부안군	진서면	석포리	영산서해		181JB10	1998	34.1	44.2	2	3	
설성	경기도	이천시	설성면	금당리	한강	20GG8	31GG8	1958	69.5	64.1	5	4	3
성남	전라북도	임실군	성수면	성수리	섬진강		179JB10	1967	47.3	54.1	3	4	
성암	충청남도	서산시	음암면	탑곡리	금강서해	157CN9	260CN9	1966	72.3	73.3	5	5	3
성연	충청남도	보령시	청소면	성연리	금강서해	158CN9	253CN9	1977	45.8	48.8	3	3	4
소수	충청북도	괴산군	소수면	길선리	한강	200CB9	289CB9	1962	71.9	64.5	5	4	5
소월	경상북도	경산시	와촌면	소월리	낙동강	62GB9	131GB9	1959	45.0	39.6	3	2	4
송단	전라남도	화순군	북면	방리	섬진강	105JN7	162JN10	1983	52.2	47.8	4	3	5
송면	충청북도	괴산군	청천면	삼송리	한강	201CB9	287CB9	1985	30.0	35.2	2	2	4
송선	경상북도	경주시	건천면	송선리	형산강	63GB9	128GB9	1943	50.0	45.4	3	3	4
송악	충청남도	당진군	송악면	가교리	삽교천	159CN8	224CN8	1958	60.0	68.4	4	5	3
수룡	충청남도	태안군	근흥면	수룡리	금강서해	160CN8	242CN8	1960	75.9	74.4	5	5	6

저수지명	행정구역				수계명	Code		설치년도	TSI(TP)	TSI(Chl-a)	Group		
	시도	시군구	읍면동	리		SOM	기타				TSI(TP)	TSI(Chl-a)	SOM
수송	전라북도	남원시	수지면	고평리	섬진강		177JB10	1978	57.7	53.8	4	4	
수야	경상북도	청도군	이서면	수야리	낙동강	64GB9	80GB9	1958	45.0	49.3	3	3	1
수양	전라남도	장성군	삼서면	수양리	영산강		174JN10	1959	61.7	66.9	4	5	
수청	전라북도	정읍시	칠보면	수청리	동진강	129JB9	215JB9	1986	52.2	60.1	4	4	4
순성	충청남도	당진군	면천면	원동리	삽교천	161CN8	237CN8	1959	84.8	80.3	5	5	6
순흥	경상북도	영주시	순흥면	내죽리	낙동강		136GB10	1997	45.0	36.9	3	2	
승언2	충청남도	태안군	안면읍	승언리	금강서해	162CN8	229CN8	1959	74.9	66.5	5	5	6
신구	충청남도	보령시	주산면	신구리	금강서해	163CN9	223CN9	1956	69.2	67.9	5	5	6
신대	충청남도	청양군	운곡면	신대리	삽교천	164CN9	252CN9	1977	70.1	67.6	5	5	5
신덕	전라남도	해남군	화원면	신덕리		106JN7		1986	88.1	82.3	5	5	2
신송	충청남도	서산시	고북면	신송리	금강서해	165CN8	262CN8	1985	54.1	65.8	4	5	3
신창	충청남도	서산시	운산면	신창리	금강서해	166CN9	255CN9	1977	40.0	52.8	2	4	4
신춘	전라남도	장흥군	안양면	신춘리		107JN7		1984	42.2	51.9	3	4	4
신풍	경상북도	청송군	현동면	거성리	낙동강	65GB9	82GB9	1971	53.7	49.3	4	3	4
신항	충청북도	괴산군	괴산읍	신항리	한강	202CB9	288CB9	1985	57.7	52.7	4	4	1
신휴	충청남도	아산시	음봉면	신휴리	안성천	167CN8	239CN8	1954	93.4	92.9	5	5	2
심곡	경상북도	경주시	서면	심곡리	형산강	66GB9	139GB9	1931	58.0	50.1	4	3	4
안룡	경상북도	상주시	이안면	안룡리	낙동강	67GB8	92GB8	1990	44.1	43.7	3	3	4
안심	경상북도	포항시 북구	청하면	명안리	낙동동해		102GB10	1971	58.7	53.6	4	4	
안심	전라남도	화순군	이서면	안심리	섬진강		161JN10	1987	45.0	43.7	3	3	
애당	전라북도	정읍시	소성면	주천리	동진강		196JB10	1971	59.0	58.3	4	4	
양악	전라북도	장수군	개북면	양악리	금강		204JB10	1996	40.0	43.2	2	3	
양천	충청남도	천안시	직산면	양당리	안성천	168CN8	221CN8	1949	77.9	77.2	5	5	6
양지	경상북도	상주시	모서면	화현리	금강	68GB8	116GB8	1998	73.7	67.5	5	5	5
양춘	전라남도	해남군	삼산면	구립리		108JN7		1961	34.1	52.7	2	4	4
어천	경기도	화성시	매송면	어천리	한강서해	21GG9	15GG9	1956	65.4	68.0	5	5	3
연제	충청북도	청원군	강외면	연제리	금강		280CB10	1923	75.3	73.8	5	5	
연풍	경기도	파주시	법원읍	삼방리	한강	22GG9	32GG9	1960	69.5	51.4	5	4	4
영천	충청남도	공주시	우성면	한천리	금강	109CN9	234CN9	1961	52.7	60.3	4	4	4
오남	경기도	남양주시	오남면	오남리	한강		52GG10	1985	43.2	41.4	3	2	
오동	전라남도	영광군	염사면	오동리	영산서해		167JN10	1930	54.1	59.3	4	4	
오동	전라북도	장수군	장계면	오동리	금강		217JB10	2000	45.0	45.6	3	3	
오로	경상북도	구미시	장천면	오로리	낙동강	69GB8	127GB8	1978	67.7	53.4	5	4	1

저수지명	행정구역				수계명	Code		설치년도	TSI(TP)	TSI(Chl-a)	Group		
	시도	시군구	읍면동	리		SOM	기타				TSI(TP)	TSI(Chl-a)	SOM
오봉	전라북도	임실군	성수면	오봉리	섬진강	1GW9	214JB10	1991	43.2	49.5	3	3	4
오봉	경상북도	김천시	남면	오봉리	낙동강	70GB8	142GB8	1989	70.0	35.8	5	2	5
오성	전라북도	정읍시	용동면	상산리	동진강	130JB9	203JB9	1997	43.2	50.1	3	3	4
오어	경상북도	포항시	오천면	문총리	낙동동해		145GB10	1964	52.7	42.9	4	3	
오태	경상북도	상주시	공검면	오태리	낙동강	71GB8	146GB8	1959	50.6	52.7	3	4	4
옥계	경상남도	함양군	병곡면	옥계리	낙동강		73GN10	1995	45.0	44.4	3	3	
옥계	충청남도	예산군	덕산면	옥계리	삼교천	169CN8	261CN8	1957	51.7	51.1	4	4	4
옥곡	전라북도	군산시	성산면	대명리	금강	131JB9	208JB9	1975	69.7	63.2	5	4	5
옥녀	전라북도	군산시	미성동		영산서해	132JB9	209JB9	1976	80.4	77.5	5	5	5
옥산	충청남도	부여군	옥산면	봉산리	금강	170CN9	259CN9	1945	66.4	59.9	5	4	3
옥서	충청남도	보령시	남포면	옥서리	금강서해	171CN9	235CN9	1961	61.4	65.8	4	5	3
옥성	경상북도	구미시	옥성면	대원리	낙동강	72GB8	126GB8	1946	73.8	57.0	5	4	5
옥연	대구광역시	달성군	옥포면	기세리	낙동강	73GB9	153GB9	1964	59.7	53.0	4	4	4
옥천	경상남도	창녕군	창녕읍	옥천리	낙동강		70GN10	1962	48.1	32.4	3	2	
왕궁	전라북도	익산시	왕궁면	동용리	만경강		202JB10	1945	57.7	53.9	4	4	
왕송	경기도	의왕시	월암동		안성천	23GG9	45GG9	1948	84.3	72.4	5	5	2
왕신	경상북도	경주시	강동면	왕신리	형산강	74GB9	122GB9	1975	51.1	50.5	4	3	4
용계	충청북도	음성군	금왕읍	백야리	한강	203CB9	296CB9	1982	55.4	56.1	4	4	1
용곡	경상북도	포항시 북구	송라면	방석리	낙동동해		104GB10	1964	61.4	42.9	4	3	
용곡	충청북도	청원군	미원면	용곡리	금강		283CB10	1984	60.3	55.5	4	4	
용담	경기도	용인시	원삼면	사암리	한강	24GG8	33GG8	1978	71.8	62.7	5	4	3
용당	충청북도	충주시	신니면	송암리	한강		298CB10	1949	66.8	49.1	5	3	
용덕	경기도	용인시	이동면	목리		25GG8		1959			1	1	3
용산	전라북도	정읍시	용산동		동진강	110JB9	205JB9	1966	51.1	56.2	4	4	4
용설	경기도	안성시	죽산면	용설리	한강	26GG8	53GG8	1985	59.7	57.8	4	4	1
용암	경상북도	의성군	단밀면	위중리	낙동강	172CN9	87GB8	1959	54.1	51.9	4	4	6
용암	충청남도	연기군	서면	고복리	금강	75GB8	270CN9	1989	67.7	76.5	5	5	1
용연	경상북도	포항시 북구	신광면	호리	낙동동해	76GB8	149GB10	1961	59.7	67.9	4	5	4
용연	충청남도	천안시	목천면	교촌리	금강		254CN8	1966	52.7	59.7	4	4	
용천	경상북도	포항시 북구	신광면	냉수리	형산강		89GB10	1959	66.4	32.4	5	2	
용풍	경기도	이천시	장호원읍	송산리	한강	27GG8	23GG8	1946	70.6	68.9	5	5	3
용화	강원도	철원군	갈말읍	신철원리	한강		6GW10	1961	45.8	57.0	3	4	

저수지명	행정구역				수계명	Code		설치년도	TSI(TP)	TSI(Chl-a)	Group		
	시도	시군구	읍면동	리		SOM	기타				TSI(TP)	TSI(Chl-a)	SOM
우금	경기도	포천군	가산면	우금지	한강		18GG10	1958	50.6	40.7	3	2	
우목	충청남도	공주시	우상면	옹봉리	금강	173CN9	248CN9	1988	52.7	57.6	4	4	4
운암	경상북도	예천군	용문면	내지리	낙동강	77GB8	90GB8	1954	68.4	54.8	5	4	1
웅양	경상남도	거창군	웅양면	산포리	낙동강		62GN10	1987	79.0	31.5	5	2	
원남	충청북도	진천군	초평면	신통리	금강	204CB9	299CB9	1988	57.3	57.9	4	4	4
원당	경기도	양주군	남면	황방리	한강		35GG10	1979	60.3	54.1	4	4	
원창	강원도	춘천시	동산면	원창리	한강		8GW10	1998	30.0	52.0	2	4	
원천지1	경기도	수원시	팔달구	하동	안성천	28GG8	47GG9	1929	63.2	69.4	4	5	3
원천지2	경기도	수원시	팔달구	하동	안성천		48GG9	1929	60.6	69.8	4	5	
원천지3	경기도	수원시	팔달구	하동	안성천		49GG9	1929	76.1	40.7	5	2	
월산	전라남도	담양군	월산면	옹흥리	영산강		164JN10	1988	48.1	54.6	3	4	
유천	전라남도	화순군	동북면	유천리	섬진강	111JN7	168JN10	1984	40.0	52.3	2	4	1
이동지1	경기도	용인시	이동면	어버리		29GG8	60GG9	1972	57.3	43.2	4	3	5
이동지2	경기도	용인시	이동면	어버리			61GG9	1972	60.6	71.4	4	5	
인교	전라북도	전주시	덕진구	우아동	만경강		189JB10	1964	55.0	61.2	4	4	
임고	경상북도	영천시	임고면	사리	낙동강	78GB9	118GB9	1962	58.0	33.9	4	2	4
입곡	경상남도	합안군	산인면	입곡리	낙동강		64GN10	1926	48.7	39.2	3	2	
입장	충청남도	천안시	입장면	기로리	안성천	174CN8	226CN8	1952	57.0	66.1	4	5	3
잠홍	충청남도	서산시	음암면	상황리	금강서해	175CN9	247CN9	1958	67.0	68.5	5	5	3
장계	경기도	안성시	죽산면	장계리	한강	30GG8	26GG8	1986	67.9	47.7	5	3	1
장곡	충청남도	홍성군	장곡면	죽전리	금강서해	176CN9	238CN9	1978	68.7	67.4	5	5	6
장남	전라북도	장수군	번암면	국포리	섬진강		218JB10	1984	46.6	50.2	3	3	
장치	전라남도	화순군	이양면	장치리	영산강	112JN7	163JN10	1978	60.3	53.9	4	4	1
장흥	경기도	여주군	금사면	장흥리	한강	31GG8	51GG8	1989	47.3	52.8	3	4	4
적누	충청남도	청양군	청양읍	송방리	금강	177CN9	245CN9	1998	34.1	50.4	2	3	4
전대	충청남도	당진군	송악면	전대리	금강서해	178CN8	222CN8	1959	94.3	71.9	5	5	2
정안	충청남도	공주시	정안면	고성리	금강	179CN9	246CN9	1976	58.7	64.0	4	4	3
조성	경상북도	의성군	구천면	조성리	낙동강	79GB8	138GB8	1959	53.7	47.1	4	3	1
중천	충청남도	서천군	판교면	상차리	금강서해	180CN9	257CN9	1963	49.4	52.5	3	4	4
주남	경상남도	창원시	동읍	월령리	낙동강	36GN8	77GN9	1945	74.6	74.4	5	5	5
주촌	전라북도	남원시	운봉읍	주촌리	낙동강		193JB10	1961	45.0	51.4	3	4	
죽안	경상북도	예천군	유천면	죽안리	낙동강	80GB8	93GB8	1967	67.2	54.2	5	4	1
죽암	전라남도	고흥군	동강면	오월리		113JN7		1990	62.7	66.8	4	5	3
중산	충청북도	충주시	상모면	중산리	한강		293CB10	1982	57.0	42.0	4	3	

저수지명	행정구역				수계명	Code		설치년도	TSI(TP)	TSI(Chl-a)	Group		
	시도	시군구	읍면동	리		SOM	기타				TSI(TP)	TSI(Chl-a)	SOM
중화	경상북도	고령군	고령읍	중화리	낙동강		85GB10	1962	65.0	54.3	4	4	
중흥	충청남도	공주시	의당면	중흥리	금강	181CN9	251CN9	1998	63.2	69.3	4	5	3
중광	전라남도	보성군	별교읍	중광리		114JN7		1978	63.9	57.1	4	4	1
지슬	경상북도	침도군	각북면	지슬리	낙동강	81GB9	114GB9	1993	37.4	45.6	2	3	4
지정	광주광역시	광신구	지정동		영산강		151JN10	1926	65.2	73.4	5	5	
지천	경상북도	칠곡군	지천면	창평리		82GB9		1965			1	1	4
지평	경상북도	상주시	공검면	지평리	낙동강	83GB8	137GB8	1949	59.7	53.0	4	4	4
직지	경상북도	김천시	대항면	북전리	낙동강	84GB8	103GB8	1957	72.7	45.8	5	3	5
진죽	충청남도	보령시	청소면	진죽리	금강서해	182CN9	225CN9	1945	65.2	67.2	5	5	3
창림	경상북도	구미시	해평면	창림리	낙동강	85GB8	117GB8	1953	61.1	54.6	4	4	5
창평	경상북도	봉화군	봉성면	창평리	낙동강		81GB10	1957	48.1	34.6	3	2	
천락	경상남도	의령군	봉수면	천락리	낙동강		69GN10	1998	48.1	51.5	3	4	
천장	충청남도	청양군	정산면	천장리	금강	183CN9	258CN9	1978	27.4	47.7	2	3	4
천천	전라북도	장수군	천천면	남양리	금강		184JB10	1996	38.7	42.0	2	3	
청계	경상북도	포항시 북구	청하면	청계리	형산강		91GB10	1965	46.6	33.2	3	2	
청상	경상북도	상주시	청리면	청상리	낙동강	86GB8	119GB8	1964	75.1	60.6	5	4	5
청용	경기도	안성시	서운면	청용리	안성천	32GG8	41GG8	1974	53.7	51.8	4	4	4
초대	충청남도	당진군	신평면	초대리	금강서해	184CN8	228CN8	1975	78.5	78.0	5	5	6
초전	경상북도	성주시	초전면	소성리	낙동강		110GB10	1975	56.2	47.1	4	3	
추동	전라남도	보성군	별교읍	추동리		115JN7		1985	43.2	53.7	3	4	1
추평	충청북도	충주시	엄정면	추평리	한강		297CB10	1981	63.9	48.8	4	3	
축동	충청남도	서천군	한산면	축동리	금강	185CN9	249CN9	1955	53.2	52.2	4	4	4
칠곡	경기도	안성시	원곡면	칠곡리	안성천	33GG8	16GG8	1958	58.4	58.8	4	4	1
칠동	전라남도	보성군	별교읍	천치리		116JN7		1990	43.2	64.3	3	4	1
관곡	경상북도	상주시	화동면	관곡리	금강	87GB8	96GB8	1998	62.2	56.8	4	4	4
평암	경상남도	마산시	진전면	평암리	낙동남해		74GN10	1998	43.2	33.2	3	2	
풍년	충청남도	천안시	입장면	시장리	안성천	186CN8	231CN8	1957	71.4	74.1	5	5	6
풍락	경상북도	영천시	청통면	대평리	낙동강	88GB9	134GB9	1932	57.0	49.3	4	3	1
풍전	충청남도	서산시	인지면	풍전리	금강서해	187CN8	265CN8	1945	67.3	63.1	5	4	3
하곡	경상북도	경주시	안강읍	하곡리	형산강	89GB9	144GB9	1932	58.4	59.3	4	4	4
하도	경상북도	경시	남천면	하도리	낙동강	90GB9	108GB9	1993	46.6	47.7	3	3	4
하빈	경상북도	칠곡군	지천면	금호리	낙동강	91GB9	109GB9	1945	68.0	72.0	5	5	6
학	강원도	철원군	동송읍	오덕리	한강		5GW10	1945	73.8	57.5	5	4	

저수지명	행정구역				수계명	Code		설치년도	TSI(TP)	TSI(Chl- <i>a</i>)	Group		
	시도	시군구	읍면동	리		SOM	기타				TSI(TP)	TSI(Chl- <i>a</i>)	SOM
한계	충청북도	청원군	가덕면	한계리	금강		284CB10	1978	55.0	48.3	4	3	
해원	전라남도	해남군	송지면	해원리		117JN7		1945	76.8	69.5	5	5	5
향리	경기도	양평군	개군면	향리	한강		12GG10	1945	70.1	66.3	5	5	
향호	강원도	강릉시				2GW9	3GW9	1987	74.9	49.4	5	3	5
호민	경상북도	안동시	풍천면	갈전리	낙동강	92GB9	79GB9	1945	74.8	63.2	5	4	5
호암	충청북도	충주시	호암동		한강		286CB10	1924	63.7	46.4	4	3	
홍동	충청남도	홍성군	장곡면	지정리	삼교천	188CN9	230CN9	1955	70.6	69.4	5	5	6
홍양	충청남도	홍성군	금마면	장성리	삼교천	189CN9	250CN9	1945	72.3	69.1	5	5	6
홍중	경기도	광주군	광주읍	중대리	한강		13GG10	1957	67.2	59.7	5	4	
화곡	충청북도	충주시	주덕읍	화곡리	한강	94GB9	281CB10	1982	62.2	47.8	4	3	4
화곡	경상북도	경주시	내남면	화곡리	형산강	93GB9	101GB9	1963	56.6	47.0	4	3	4
화매	경상북도	영양군	석보면	삼의리	낙동강		130GB10	1997	57.7	43.2	4	3	
화산	경상북도	영천시	신령면	연정리	낙동강		94GB9	1982	41.1	23.8	2	1	
화정	전라북도	완주군	고산면	양지리	만경강		201JB10	1978	54.6	63.0	4	4	
회룡	경상북도	문경시	산북면	회룡리	낙동강	95GB8	115GB8	1963	63.2	65.4	4	5	4
횡계	경상북도	영천시	화북면	횡계리	낙동강	96GB8	84GB8	1975	51.7	46.8	4	3	4
효곡	전라남도	구례군	간전면	금산리	섬진강		166JN10	1988	47.3	35.8	3	2	
효천	경상북도	의성군	다인면	평림리		97GB8	78GB8	1964	60.8	53.6	4	4	1
흥덕	전라북도	고창군	흥덕면	석우리		133JB9		1954	74.0	45.1	5	3	4
효촌	경기도	양주군	남면	두곡리	한강		39GG10	1982	66.8	64.6	5	4	
흥부	경기도	시흥시	물왕동		한강서해	34GG9	46GG9	1944	71.1	67.3	5	5	5
흥아소	경기도	여주군	점동면	관한리	한강	35GG8	20GG8	1944	52.2	58.9	4	4	4
흥업	강원도	원주시	흥업면	매지리	한강		2GW10	1962	63.2	58.1	4	4	

부 록 6



신구저수지 정기조사 결과

부록 6: 신구저수지 정기조사 결과

<부록6: 차례>

- 부록 6.1 신구저수지 정기조사 - 식물플랑크톤 밀도 변화 (cells mL⁻¹) (06년6월19일~06년10월2일)
- 부록 6.2 신구저수지 정기조사 - 식물플랑크톤 밀도 변화 (cells mL⁻¹) (06년10월16일~07년1월15일)
- 부록 6.3 신구저수지 정기조사 - 식물플랑크톤 밀도 변화 (cells mL⁻¹) (07년1월30일~07년6월18일)
- 부록 6.4 신구저수지 정기조사 - 식물플랑크톤 밀도 변화 (cells mL⁻¹) (07년7월3일~08년1월22일)
- 부록 6.5 신구저수지 정기조사 - 동물플랑크톤 밀도 변화 (ind. L⁻¹) (06년6월19일~06년10월2일)
- 부록 6.6 신구저수지 정기조사 - 동물플랑크톤 밀도 변화 (ind. L⁻¹) (06년10월16일~07년1월15일)
- 부록 6.7 신구저수지 정기조사 - 동물플랑크톤 밀도 변화 (ind. L⁻¹) (07년1월3일~07년6월18일)
- 부록 6.8 신구저수지 정기조사 - 동물플랑크톤 밀도 변화 (ind. L⁻¹) (07년7월3일~08년1월22일)
- 부록 6.9 신구저수지 정기조사 - 동물플랑크톤 탄소량 변화 (µgC L⁻¹) (06년6월19일~06년10월2일)
- 부록 6.10 신구저수지 정기조사 - 동물플랑크톤 탄소량 변화 (µgC L⁻¹) (06년10월16일~07년1월15일)
- 부록 6.11 신구저수지 정기조사 - 동물플랑크톤 탄소량 변화 (µgC L⁻¹) (07년1월30일~07년6월18일)
- 부록 6.12 신구저수지 정기조사 - 동물플랑크톤 탄소량 변화 (µgC L⁻¹) (07년7월3일~08년1월22일)
- 부록 6.13 신구저수지 정기조사 - 원생동물과 박테리아의 밀도 및 탄소량 변화
- 부록 6.14 신구저수지 정기조사 - 환경요인 변화
- 부록 6.15 신구저수지 정기조사 - 수질 변화

부록 6: 신구저수지 정기조사 결과

부록 6.1 신구저수지 정기조사 - 식물플랑크톤 밀도 변화 (cells mL⁻¹) (06년6월19일~06년10월2일)

Species	2006년							
	6월19일	7월10일	7월24일	8월7일	8월21일	9월4일	9월15일	10월2일
Chlorophyceae								
<i>Actinastrum hantzschii</i>								
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>			360					
<i>Chlorogonium elongatum</i>								
<i>Closterium setaceum</i>								
<i>Coelastrum sphaericum</i>								
<i>Crucigenia crucifera</i>								
<i>Chlamydomonas</i> sp.								
<i>Cosmarium</i> sp.								
<i>Eudorina umicocca</i>								
<i>Gonium pectorale</i>								
<i>Kirchneriella obesa</i>								
<i>Micractinium pusillum</i>			1240			440		
<i>Oocystis</i> sp.								
<i>Pediastrum duplex</i>			920			640		
<i>Pediastrum simplex</i>				80	140	320	600	120
<i>Scenedesmus acuminatus</i>								
<i>Scenedesmus acutus</i>					80	160		160
<i>Scenedesmus armatus</i>	320	160	240	540	640	1280	480	520
<i>Scenedesmus intermedius</i>								
<i>Scenedesmus quadricanda</i>								
<i>Scenedesmus</i> sp.								
<i>Staurastrum</i> sp.								
Bacillariophyceae								
<i>Amphora ovalis</i>								
<i>Aulacoseira ambigua</i>								
<i>Aulacoseira islandica</i>								
<i>Aulacoseira italica</i>								
<i>Asterionella formosa</i>		840					640	
<i>Asterionella granulata</i>								
<i>Cyclotella kutzingiana</i>								
<i>Cyclotella meneghiniana</i>								
<i>Cyclotella</i> sp.	120	2640	3920		80	3000	560	320
<i>Cymbella minuta</i>								
<i>Doatoma vulgare</i>								
<i>Fragillaria crotonensis</i>								
<i>Melosira varians</i>								
<i>Synedra ulna</i>								
<i>Nitzschia palea</i>	400		240	200	40	3600	560	80
<i>Nitzschia</i> sp.								
<i>Navicula viridula</i>								
<i>Navicula</i> sp.								
Dinophyceae								
<i>Cryptomonas ovata</i>	680	20	1840	10	80	240	680	320
<i>Ceratium hirundinella</i>								
<i>Mallomonas raginae</i>								
<i>Peridinium</i> sp.	120	40		20	14	40		
Cyanophyceae								
<i>Anabaena smithii</i>								
<i>Anabaena</i> sp.								
<i>Aphanizomenon</i> sp.								
<i>Merismopedium glaucum</i>								
<i>Microcystis aeruginosa</i>	120			800		4400	55200	20800
<i>Microcystis</i> sp.								
<i>Oscillatoria</i> sp.								
<i>Phormidium</i> sp.	2937600	93600	162800	46000	211200	272000	466400	673200
<i>Synechocystis aquatilis</i>								

부록 6: 신구저수지 정기조사 결과

부록 6.2 신구저수지 정기조사 - 식물플랑크톤 밀도 변화 (cells mL⁻¹) (06년10월16일~07년1월15일)

Species	2006년						2007년	
	10월16일	10월21일	10월30일	11월20일	12월5일	12월18일	1월3일	1월15일
Chlorophyceae								
<i>Actinastrum hantzschii</i>								
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>								
<i>Chlorogonium elongatum</i>								
<i>Closterium setaceum</i>								
<i>Coelastrum sphaericum</i>								
<i>Crucigenia crucifera</i>								
<i>Chlamydomonas</i> sp.								
<i>Cosmarium</i> sp.								
<i>Eudorina umicocca</i>								
<i>Golenkinia radiata</i>								
<i>Gonium pectorale</i>								
<i>Kirchneriella obesa</i>								
<i>Micractinium pusillum</i>								
<i>Oocystis</i> sp.								
<i>Pediastrum duplex</i>					8			
<i>Pediastrum simplex</i>		280		300			16	
<i>Scenedesmus acuminatus</i>								
<i>Scenedesmus acutus</i>	80			480		4		
<i>Scenedesmus armatus</i>	440	320						
<i>Scenedesmus intermedius</i>								
<i>Scenedesmus quadricanda</i>								
<i>Scenedesmus</i> sp.							2	3
<i>Staurastrum</i> sp.								
Bacillariophyceae								
<i>Amphora ovalis</i>								
<i>Aulacoseira ambigua</i>	1600	520	640	240	1830			
<i>Aulacoseira islandica</i>						33	123	102
<i>Aulacoseira italica</i>						114	46	43
<i>Asterionella formosa</i>								
<i>Asterionella granulata</i>	720	1120	760					
<i>Cyclotella kutzingiana</i>								
<i>Cyclotella</i> sp.								
<i>Cymbella minuta</i>								
<i>Doatoma vulgare</i>								
<i>Fragillaria crotonensis</i>								31
<i>Melosira varians</i>								
<i>Synedra acus</i>				40	10	24	107	129
<i>Synedra ulna</i>								
<i>Nitzschia palea</i>								
<i>Navicula viridula</i>								
<i>Navicula</i> sp.							1	25
Dinophyceae								
<i>Cryptomonas ovata</i>	160	320	3720	7440	9660	6700	2660	296
<i>Ceratium hirundinella</i>								
<i>Mallomonas raginae</i>								
<i>Peridinium</i> sp.	20	10	40	120	110	125	280	156
Cyanophyceae								
<i>Anabaena</i> sp.								
<i>Aphanizomenon</i> sp.								
<i>Merismopedium glaucum</i>								
<i>Microcystis aeruginosa</i>	10240	2400						
<i>Microcystis</i> sp.								
<i>Oscillatoria</i> sp.								
<i>Phormidium</i> sp.								
<i>Synechocystis aquatilis</i>								

부록 6.3 신구저수지 정기조사 - 식물플랑크톤 밀도 변화 (cells mL⁻¹) (07년1월30일~07년6월18일)

Species	2007년							
	1월30일	2월13일	2월27일	3월12일	3월26일	4월23일	5월21일	6월18일
Chlorophyceae								
<i>Actinastrum hantzschii</i>								
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>			2	1		100	150	
<i>Chlorogonium elongatum</i>								
<i>Chlorogonium aciculare</i>	148			1				
<i>Closterium setaceum</i>								
<i>Closterium</i> sp.						400		
<i>Coelastrum sphaericum</i>								7,500
<i>Crucigenia crucifera</i>								
<i>Chlamydomonas</i> sp.								
<i>Cosmarium</i> sp.								1,000
<i>Eudorina umicocca</i>								
<i>Golenkinia radiata</i>								
<i>Kirchneriella obesa</i>								
<i>Micractinium pusillum</i>								
<i>Oocystis</i> sp.								
<i>Pediastrum duplex</i>			12	5				400
<i>Pediastrum simplex</i>						400		300
<i>Scenedesmus acuminatus</i>						700		
<i>Scenedesmus acutus</i>							6,250	
<i>Scenedesmus quadricanda</i>								700
<i>Scenedesmus</i> sp.	1	3	12	9			700	1,450
<i>Schroederia robusta</i>								
<i>Staurastrum</i> sp.	1					50		150
Bacillariophyceae								
<i>Amphora ovalis</i>								
<i>Aulacoseira ambigua</i>								1,950
<i>Aulacoseira islandica</i>	203	103	344	240	4,600	2,150	5,450	
<i>Aulacoseira italica</i>	86	22	100	96	450			
<i>Asterionella formosa</i>				2				
<i>Cyclotella</i> sp.	3250	490	50	78		50		1,950
<i>Cymbella minuta</i>								
<i>Doatoma vulgare</i>								
<i>Fragillaria crotonensis</i>	1250	3460	6920	186				
<i>Melosira varians</i>								
<i>Synedra acus</i>	303	2540	11520	9050	19,450	900		100
<i>Nitzschia palea</i>								
<i>Nitzschia</i> sp.								
<i>Navicula viridula</i>								
<i>Navicula</i> sp.	6	2	1	5	350			100
Dinophyceae								
<i>Cryptomonas ovata</i>	327	415	10	16				
<i>Ceratium hirundinella</i>								
<i>Mallomonas raginae</i>								
<i>Peridinium</i> sp.	67	35	26	44				
Cyanophyceae								
<i>Anabaena smithii</i>								
<i>Anabaena</i> sp.						13,400	1,100	4,250
<i>Aphanizomenon</i> sp.								
<i>Merismopedium glaucum</i>								
<i>Microcystis aeruginosa</i>					22,000	7,400		2,300
<i>Microcystis portea</i>								
<i>Microcystis</i> sp.								
<i>Oscillatoria limnetica</i>								2,500
<i>Oscillatoria limosa</i>								
<i>Oscillatoria</i> sp.						29,250	14,100	
<i>Phormidium</i> sp.								
<i>Synechocystis aquatilis</i>								

부록 6: 신구저수지 정기조사 결과

부록 6.4 신구저수지 정기조사 - 식물플랑크톤 밀도 변화 (cells mL⁻¹) (07년7월3일~08년1월22일)

Species	2007년						2008년	
	7월3일	9월9일	10월22일	11월5일	11월19일	12월3일	1월2일	1월22일
Chlorophyceae								
<i>Actinastrum hantzschii</i>								
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	50			550	250	500	450	
<i>Chlorogonium elongatum</i>			100					
<i>Chlorogonium aciculare</i>								
<i>Closterium setaceum</i>				100	200	150	750	150
<i>Closterium</i> sp.			400					
<i>Coelastrum sphaericum</i>		3,400	100	200				
<i>Crucigenia crucifera</i>	150	150						
<i>Crucigenia lauterbornii</i>								
<i>Chlamydomonas</i> sp.								
<i>Cosmarium</i> sp.					3,300			
<i>Eudorina umicocca</i>				50	50			
<i>Golenkinia radiata</i>								
<i>Gonium pectorale</i>			50	300	50			
<i>Kirchneriella obesa</i>		1,000						
<i>Micractinium pusillum</i>							600	28
<i>Oocystis</i> sp.								
<i>Pediastrum duplex</i>					600			
<i>Pediastrum simplex</i>				200				
<i>Scenedesmus acuminatus</i>								
<i>Scenedesmus acutus</i>								
<i>Scenedesmus intermedius</i>								
<i>Scenedesmus quadricanda</i>				700	1,250	1,300		
<i>Scenedesmus</i> sp.	900	4,750	1,400				1,200	
<i>Schroederia robusta</i>								
<i>Staurastrum chaetoceras</i>								
<i>Staurastrum cingulum</i>				100				
<i>Staurastrum</i> sp.		100		2,200	5,700	1,950		
Bacillariophyceae								
<i>Amphora ovalis</i>								
<i>Aulacoseira islandica</i>	1,300		1,500	3,850	11,600	6,300	40,950	61,650
<i>Aulacoseira italica</i>		1,600						
<i>Asterionella formosa</i>								
<i>Cyclotella meneghiniana</i>				750		300		650
<i>Cyclotella</i> sp.								
<i>Cymbella minuta</i>								
<i>Doatoma vulgare</i>								
<i>Fragillaria crotonensis</i>				350	100			
<i>Melosira varians</i>						50	150	
<i>Synedra acus</i>	550		200					
<i>Nitzschia acicularis</i>				50			300	
<i>Nitzschia</i> sp.								
<i>Navicula capitata</i>								
<i>Navicula veneta</i>				200	200	50		150
<i>Navicula viridula</i>				5,200	11,900	6,700	41,400	62,450
<i>Navicula</i> sp.	150	2,100						
Dinophyceae								
<i>Cryptomonas ovata</i>				700	950	1,850	2,400	500
<i>Ceratium hirundinella</i>								
<i>Mallomonas raginae</i>								
<i>Peridinium</i> sp.	200							
Cyanophyceae								
<i>Anabaena</i> sp.	850							
<i>Aphanizomenon</i> sp.								
<i>Merismopedium glaucum</i>								
<i>Microcystis aeruginosa</i>	240,150	19,150	26,700	139,300	156,000	23,800	15,500	5,950
<i>Microcystis portea</i>								
<i>Oscillatoria</i> sp.						600	2,100	
<i>Phormidium</i> sp.								
<i>Synechocystis aquatilis</i>								

부록 6: 신구저수지 정기조사 결과

부록 6.5 신구저수지 정기조사 - 동물플랑크톤 밀도 변화 (ind. L⁻¹) (06년6월19일~06년10월2일)

Species	2006년							
	6월19일	7월10일	7월24일	8월7일	8월21일	9월4일	9월15일	10월2일
Rotifer								
<i>Ascomorpha ecaudis</i>								
<i>A. ovalis</i>								
<i>Asplanchna herricki</i>		104				8		
<i>A. priodonta</i>								
<i>A. sp</i>								
<i>Brachionus angularis</i>	355	609		212	17	25	18	
<i>B. calyciflorus</i>		9	33	16		8	18	58
<i>B. capsuliflorus</i>								
<i>B. diversicornis</i>	21						45	
<i>B. forficula</i>	1,406	1,270		897	799	217	36	
<i>B. rubens</i>								
<i>Dipleuchlanis propatula</i>								
<i>Filinia longiseta</i>				8		8		131
<i>F.terminalis</i>	10	113						
<i>Kellicottia bostoniensis</i>								
<i>K. longispina</i>								
<i>Keratella cochlearis</i>	5	9	640	3,040	374	50	81	29
<i>K. valga</i>					51	1,328	810	599
<i>Lophocharis salpina</i>								
<i>Polyathra dolichoptera</i>								
<i>P. euryptera</i>	10	1,470		122	51	242	45	15
<i>P. trigla</i>								
<i>Pompholyx complanata</i>		70			51	1,420		
<i>Synchaeta Kitina</i>								
<i>S. oblonga</i>								
<i>Testudinella patina</i>								
<i>Trichocerca branchyura</i>								
<i>T. capucina</i>	21							
<i>T. birostris</i>	324	574	377	41		701	279	628
<i>T. cylindrica</i>						67	72	
<i>T. dixon-nuttalli</i>								
<i>T. elongata</i>								
<i>T. sp.</i>				16				
<i>Trichotria tetractis</i>	2,153							
Copepod								
<i>Ceriodaphnia</i>								
<i>Cyclops strenus</i>								
<i>C. vicinus</i>								
<i>Daphnia retrocurva</i>								
<i>Thermocyclops hyalinus</i>								
<i>Macrocyclops albidus</i>								
<i>Microcyclops sp.</i>								
copepodid		26						
Nauplius	72	104	148	82	68	84	27	88
Cladocera								
<i>Alona guttata</i>								
<i>Bosmina longirostris</i>								
<i>Chydorus spaericus</i>								
<i>Diaphanosoma birgei</i>		17		16	17			
<i>D. brachyurum</i>								

부록 6: 신구저수지 정기조사 결과

부록 6.6 신구저수지 정기조사 - 동물플랑크톤 밀도 변화 (ind. L⁻¹) (06년10월16일~07년1월15일)

Species	2006년						2007년	
	10월16일	10월21일	10월30일	11월20일	12월5일	12월18일	1월3일	1월15일
Rotifer								
<i>Ascomorpha ecaudis</i>					33			
<i>A. ovalis</i>								
<i>Asplanchna herricki</i>			7					
<i>A. priodonta</i>								
<i>A. sp</i>								
<i>Brachionus angularis</i>				15	79	172	51	102
<i>B. calyciflorus</i>		3						
<i>B. capsuliflorus</i>								
<i>B. diversicornis</i>		7	104	7				
<i>B. forficula</i>	13	7						
<i>B. rubens</i>								
<i>Dipleuchlanis propatula</i>								
<i>Diurella stylata</i>								
<i>Filinia longiseta</i>			37			21	13	
<i>F.terminalis</i>								23
<i>Kellicottia bostoniensis</i>								
<i>K. longispina</i>	7							
<i>Keratella cochlearis</i>		3		226	205	33	24	9
<i>K. valga</i>	194	373	155					
<i>Lophocharis salpina</i>								
<i>Polyathra dolichoptera</i>								
<i>P. euryptera</i>		20	81		14	14	173	326
<i>P. remata</i>								
<i>P. trigla</i>						118	72	
<i>P. vulgaris</i>								
<i>P. sp</i>								364
<i>Pompholyx complanata</i>		3	7	22	14			
<i>Synchaeta Kitina</i>					27	39		
<i>S. oblonga</i>								
<i>Testudinella patina</i>								
<i>Trichocerca branchyura</i>								
<i>T. capucina</i>								
<i>T. birostris</i>	20			7				
<i>T. cylindrica</i>			15					
<i>T. dixon-nuttalli</i>								
<i>T. elongata</i>								
<i>T. sp.</i>								
<i>Trichotria tetractis</i>								
Copepod								
<i>Ceriodaphnia</i>								
<i>Cyclops strenus</i>		13						
<i>C. vicinus</i>							4	11
<i>Daphnia retrocurva</i>						13		
<i>Macrocyclus albidus</i>								
<i>Microcyclus sp.</i>								
<i>Thermocyclops hyalinus</i>		3						
copepodid					17	6		
Nauplius	168	76	44	29	52	85	44	29
Cladocera								
<i>Alona guttata</i>								
<i>Bosmina longirostris</i>	7	10	22	15	38	26		5
<i>Chydorus spaericus</i>								
<i>Diaphanosoma birgei</i>		10						
<i>D. brachyurum</i>								

부록 6: 신구저수지 정기조사 결과

부록 6.7 신구저수지 정기조사 - 동물플랑크톤 밀도 변화 (ind. L⁻¹) (07년1월3일~07년6월18일)

Species	2007년							
	1월30일	2월13일	2월27일	3월12일	3월26일	4월23일	5월21일	6월18일
Rotifer								
<i>Ascomorpha ecaudis</i>								
<i>A. ovalis</i>								
<i>Asplanchna herricki</i>							157	46
<i>A. brightwelli</i>							48	
<i>A. priodonta</i>								
<i>A. sp</i>								
<i>Brachionus angularis</i>	146	424	248	379	34	25		
<i>B. budapestinensis</i>								
<i>B. calyciflorus</i>					3	31		
<i>B. capsuliflorus</i>							4	
<i>B. diversicornis</i>						3	256	24
<i>B. forficula</i>							8	112
<i>B. rubens</i>								
<i>B. urceolaris</i>								
<i>Colurella colurus</i>								
<i>Diurella stylata</i>							48	
<i>D. sp</i>								
<i>Filinia longiseta</i>								163
<i>F. terminalis</i>	3	38	24	51	2			
<i>Kellicottia bostoniensis</i>								
<i>K. longispina</i>								
<i>Keratella cochlearis</i>	6	25		16	26	19	296	3
<i>K. valga</i>							20	3,154
<i>Lophocharis salpina</i>								
<i>Philodium reseola</i>								
<i>Polyathra dolichoptera</i>								
<i>P. euryptera</i>	283	49	59	161	175	229	375	22
<i>P. remata</i>								
<i>P. trigla</i>								
<i>P. vulgaris</i>								
<i>P. sp</i>	234	681	419	158	16	127	16	157
<i>Pompholyx complanata</i>								
<i>Synchaeta Kitina</i>								
<i>S. oblonga</i>								
<i>Testudinella patina</i>								
<i>Trichocerca branchyura</i>								
<i>T. capucina</i>								27
<i>T. birostris</i>								
<i>T. cylindrica</i>							82	
<i>T. dixon-nuttalli</i>								
<i>T. elongata</i>							375	17
<i>T. sp.</i>								
<i>Trichotria tetractis</i>						3		
Copepod								
<i>Ceriodaphnia</i>								
<i>Cyclops strenus</i>								
<i>C. vicinus</i>	15	6	14	39	6			
<i>Daphnia retrocurva</i>								
<i>Macrocyclus albidus</i>								
<i>Microcyclus sp.</i>								
<i>Thermocyclus hyalinus</i>								
copepodid					8	6		31
Nauplius	36	84	43	34	32	16	69	
Cladocera								
<i>Alona guttata</i>								
<i>Bosmina longirostris</i>							23	92
<i>Chydorus spaericus</i>								
<i>Diaphanosoma birgei</i>								
<i>D. brachyurum</i>								

부록 6: 신구저수지 정기조사 결과

부록 6.8 신구저수지 정기조사 - 동물플랑크톤 밀도 변화 (ind. L⁻¹) (07년7월3일~08년1월22일)

Species	2007년							2008년	
	7월3일	8월22일	9월9일	10월22일	11월5일	11월19일	12월3일	1월20일	1월22일
Rotifer									
<i>Ascomorpha ecaudis</i>									
<i>A. ovalis</i>		12							
<i>Asplanchna herricki</i>			56		28		47		
<i>A. brightwelli</i>									
<i>A. priodonta</i>									
<i>A. sp</i>				4					
<i>Anuraeopsis fissa</i>									
<i>Brachionus angularis</i>						38	114		94
<i>B. calyciflorus</i>	56	18							
<i>B. capsuliflorus</i>			8						
<i>B. diversicornis</i>	1	12							
<i>B. forficula</i>		146		3	26	17			
<i>B. rubens</i>			195						
<i>B. urceolaris</i>									
<i>Colurella colurus</i>									
<i>Dipleuchlanis propatula</i>									
<i>Diurella stylata</i>		165	11						
<i>D. sp</i>									
<i>Filinia longiseta</i>	5			1	71				
<i>F. terminalis</i>		67							
<i>Kellicottia bostoniensis</i>									
<i>K. longispina</i>									
<i>Keratella cochlearis</i>		24	19	1		361	234	8	
<i>K. valga</i>	96	299	158	213	291				
<i>Lophocharis salpina</i>									
<i>Philodinium reseola</i>									
<i>Polyathra dolichoptera</i>									
<i>P. euryptera</i>	1	12	38		142		67	57	276
<i>P. remata</i>				11					
<i>P. trigla</i>								27	169
<i>P. vulgaris</i>									
<i>P. sp</i>								8	
<i>Pompholyx complanata</i>	51	98		7	35	62	4		
<i>Synchaeta Kitina</i>									
<i>S. oblonga</i>									
<i>Testudinella patina</i>									
<i>Trichocerca branchyura</i>									
<i>T. capucina</i>									
<i>T. birostris</i>									
<i>T. cylindrica</i>	5		8						
<i>T. dixon-nuttalli</i>									
<i>T. elongata</i>									
<i>T. sp.</i>		18		17					
<i>Trichotria tetractis</i>									
Copepod									
<i>Ceriodaphnia</i>									
<i>Cyclops strenus</i>								3	
<i>C. vicinus</i>			8						
<i>Daphnia retrocurva</i>									
<i>Macrocyclus albidus</i>									
<i>Microcyclus sp.</i>									
<i>Thermocyclus hyalinus</i>									
copepodid		24		6	64		33		6
Nauplius	157	238	11	158	16	55	87	11	41
Cladocera									
<i>Alona guttata</i>									
<i>Bosmina longirostris</i>	1			26	36	24	53		
<i>Chydorus spaericus</i>									47
<i>Diaphanosoma birgei</i>	25	43							
<i>D. brachyurum</i>									

부록 6: 신구저수지 정기조사 결과

부록 6.9 신구저수지 정기조사 - 동물플랑크톤 탄소량 변화($\mu\text{gC L}^{-1}$) (06년 6월 19일~06년 10월 2일)

Species	2006년							
	6월19일	7월10일	7월24일	8월7일	8월21일	9월4일	9월15일	10월2일
Rotifer								
<i>Ascomorpha ecaudis</i>								
<i>A. ovalis</i>								
<i>Asplanchna herricki</i>		17						
<i>A. priodonta</i>								
<i>A. sp</i>								
<i>Brachionus angularis</i>	1	1.7		0.8		0.1		
<i>B. calyciflorus</i>		1.1	1.3	1.7		0.7	0.6	2.7
<i>B. capsuliflorus</i>								
<i>B. diversicornis</i>	0.9						2.4	
<i>B. forficula</i>	6.4	5.3		4.5	5.6	1.1	0.2	
<i>B. rubens</i>								
<i>Dipleuchlanis propatula</i>								
<i>Filinia longiseta</i>				0.1		0.1		2
<i>F. terminalis</i>	0.2	2.9						
<i>Kellicottia bostoniensis</i>								
<i>K. longispina</i>								
<i>Keratella cochlearis</i>			1.2	5.9	0.7	0.1	0.2	0.1
<i>K. valga</i>					0.2	4	2.4	2.7
<i>Lophocharis salpina</i>								
<i>Polyathra dolichoptera</i>								
<i>P. euryptera</i>	0.3	30.5		2.2	0.5	5.9	0.4	0.1
<i>P. trigla</i>								
<i>Pompholyx complanata</i>		0.7			0.5	13.5		
<i>Synchaeta Kitina</i>								
<i>S. oblonga</i>								
<i>Testudinella patina</i>								
<i>Trichocerca branchyura</i>								
<i>T. capucina</i>	0.2							
<i>T. birostris</i>	3.2	5.2	3.1	0.3		7.9	2.6	5.6
<i>T. cylindrica</i>						1.1	0.7	
<i>T. dixon-nuttalli</i>								
<i>T. elongata</i>								
<i>T. sp.</i>								
<i>Trichotria tetractis</i>								
Copepod								
<i>Ceriodaphnia</i>								
<i>Cyclops strenus</i>								
<i>Daphnia retrocurva</i>								
<i>Thermocyclops hyalinus</i>								
copepodid		32.6						
Nauplius	4.2	8.3	7.4	6.7	6.2	5.2	0.8	8.1
Cladocera								
<i>Alona guttata</i>								
<i>Bosmina longirostris</i>								
<i>Chydorus spaericus</i>								
<i>Diaphanosoma birgei</i>		20.5		19.2	22.1			
<i>D. brachyurum</i>								

부록 6: 신구저수지 정기조사 결과

부록 6.10 신구저수지 정기조사 - 동물플랑크톤 탄소량 변화($\mu\text{gC L}^{-1}$) (06년 10월 16일~07년 1월 15일)

Species	2006년						2007년	
	10월16일	10월21일	10월30일	11월20일	12월5일	12월18일	1월3일	1월15일
Rotifer								
<i>Ascomorpha ecaudis</i>					1			
<i>A. ovalis</i>								
<i>Asplanchna herricki</i>								
<i>A. priodonta</i>								
<i>A. sp</i>								
<i>Brachionus angularis</i>				0.4	1.5	3.1	0.9	2.3
<i>B. calyciflorus</i>		0.1						
<i>B. capsuliflorus</i>								
<i>B. diversicornis</i>		0.4	6.7	0.2				
<i>B. forficula</i>	0.1							
<i>B. rubens</i>								
<i>Dipleuchlanis propatula</i>								
<i>Diurella stylata</i>								
<i>Filinia longiseta</i>			0.5			0.4	0.3	
<i>F.terminalis</i>								0.4
<i>Kellicottia bostoniensis</i>								
<i>K. longispina</i>								
<i>Keratella cochlearis</i>				0.4	0.4	0.1		
<i>K. valga</i>	0.6	0.9	0.5					
<i>Lophocharis salpina</i>								
<i>Polyathra dolichoptera</i>								
<i>P. euryptera</i>		0.6	2.2		0.4	0.4	4.8	11.7
<i>P. remata</i>								
<i>P. trigla</i>							2.3	
<i>P. vulgaris</i>								
<i>P. sp</i>						4.8		8.6
<i>Pompholyx complanata</i>			0.1	0.2	0.1			
<i>Synchaeta Kitina</i>					0.8	0.4		
<i>S. oblonga</i>								
<i>Testudinella patina</i>								
<i>Trichocerca branchyura</i>								
<i>T. capucina</i>								
<i>T. birostris</i>	0.2			0.1				
<i>T. cylindrica</i>			0.1					
<i>T. dixon-nuttalli</i>								
<i>T. elongata</i>								
<i>T. sp.</i>								
<i>Trichotria tetractis</i>								
Copepod								
<i>Ceriodaphnia</i>								
<i>Cyclops strenus</i>		8.6						
<i>C. vicinus</i>							8.6	46.7
<i>Daphnia retrocurva</i>								
<i>Macrocyclus albidus</i>						86.5		
<i>Microcyclus sp.</i>								
<i>Thermocyclops hyalinus</i>		2.4						
<i>copepodid</i>					24.9	8.4		
Nauplius	10.9	4.1	4.6	3.8	6.1	14	4.2	5.2
Cladocera								
<i>Alona guttata</i>								
<i>Bosmina longirostris</i>	2.8	4.2	9.4	6.2	25.1	11.1		1.9
<i>Chydorus spaericus</i>								
<i>Diaphanosoma birgei</i>		8.1						
<i>D. brachyurum</i>								

부록 6: 신구저수지 정기조사 결과

부록 6.11 신구저수지 정기조사 - 동물플랑크톤 탄소량 변화($\mu\text{gC L}^{-1}$) (07년 1월 30일~07년 6월1 8일)

Species	2007년							
	1월30일	2월13일	2월27일	3월12일	3월26일	4월23일	5월21일	6월18일
Rotifer								
<i>Ascomorpha ecaudis</i>								
<i>A. ovalis</i>								
<i>Asplanchna herricki</i>							89.5	92.2
<i>A. brightwelli</i>							25.5	
<i>A. priodonta</i>								
<i>A. sp</i>								
<i>Brachionus angularis</i>	1.9	8.8	4.2	8.9	4.7	0.3		
<i>B. budapestinensis</i>					0.4	3.7		
<i>B. calyciflorus</i>								
<i>B. capsuliflorus</i>						0.2	0.9	0.7
<i>B. diversicornis</i>							23.2	1.1
<i>B. forficula</i>							0.1	
<i>B. rubens</i>								
<i>B. urceolaris</i>								
<i>Colurella colurus</i>								
<i>Diurella stylata</i>							0.7	
<i>D. sp</i>								
<i>Filinia longiseta</i>								1.4
<i>F. terminalis</i>	0.1	1	0.7	1.3	0.6			
<i>Kellicottia bostoniensis</i>								
<i>K. longispina</i>								
<i>Keratella cochlearis</i>					0.1		0.6	0.1
<i>K. valga</i>							0.1	9.4
<i>Lophocharis salpina</i>								
<i>Philodium reseola</i>								
<i>Polyathra dolichoptera</i>						4.9		4.1
<i>P. euryptera</i>	11.6	17.4	14.8	5.7	4.5		9.1	
<i>P. remata</i>								
<i>P. trigla</i>								
<i>P. vulgaris</i>						3.2		3.9
<i>P. sp</i>	6.2	17.1	8.4	3.4	3.1		0.4	
<i>Pompholyx complanata</i>								
<i>Synchaeta Kitina</i>								
<i>S. oblonga</i>								
<i>Testudinella patina</i>								
<i>Trichocerca branchyura</i>								
<i>T. capucina</i>								0.8
<i>T. birostris</i>								
<i>T. cylindrica</i>							3	
<i>T. dixon-nuttalli</i>								0.6
<i>T. elongata</i>							10.9	
<i>T. sp.</i>								
<i>Trichotria tetractis</i>								
Copepod								
<i>Ceriodaphnia</i>								
<i>Cyclops strenus</i>								
<i>C. vicinus</i>	61.3	58.4	50.5	184.6	25.4			
<i>Daphnia retrocurva</i>								
<i>Macrocyclus albidus</i>								
<i>Microcyclus sp.</i>								
<i>Thermocyclops hyalinus</i>								
<i>copepodid</i>					10.4	5.3		19.7
<i>Nauplius</i>	3.4	9.3	7.6	4.7	2.9	1.7	4.6	
Cladocera								
<i>Alona guttata</i>								
<i>Bosmina longirostris</i>							9.1	24.1
<i>Chydorus spaericus</i>								
<i>Diaphanosoma birgei</i>								
<i>D. brachyurum</i>								

부록 6: 신구저수지 정기조사 결과

부록 6.12 신구저수지 정기조사 - 동물플랑크톤 탄소량 변화 ($\mu\text{gC L}^{-1}$) (07년7월3일~08년1월22일)

Species	2007년							2008년	
	7월3일	8월22일	9월9일	10월22일	11월5일	11월19일	12월3일	1월20일	1월22일
Rotifer									
<i>Ascomorpha ecaudis</i>									
<i>A. ovalis</i>									
<i>Asplanchna herricki</i>		23.7	28.3		14.9		24.2		
<i>A. brightwelli</i>									
<i>A. priodonta</i>									
<i>A. sp</i>				2.8					
<i>Anuraeopsis fissa</i>									
<i>Brachionus angularis</i>						0.9	0.8		1.6
<i>B. calyciflorus</i>	4.9								
<i>B. capsuliflorus</i>		2.3	1						
<i>B. diversicornis</i>	0.5								
<i>B. forficula</i>		0.2		0.1	7.3	0.3			
<i>B. rubens</i>		1.5	2						
<i>B. urceolaris</i>									
<i>Colurella colurus</i>									
<i>Dipleuchlanis propatula</i>									
<i>Diurella stylata</i>		1.3	0.1						
<i>D. sp</i>									
<i>Filinia longiseta</i>	0.1				0.5				
<i>F. terminalis</i>		0.8							
<i>Kellicottia bostoniensis</i>									
<i>K. longispina</i>									
<i>Keratella cochlearis</i>						0.5	0.4		
<i>K. valga</i>	0.2	1.3	0.7	0.4	0.6				
<i>Lophocharis salpina</i>									
<i>Philodinium reseola</i>									
<i>Polyathra dolichoptera</i>	0.2								
<i>P. euryptera</i>		0.3	1		3		1.8	1.6	8
<i>P. remata</i>				0.2					
<i>P. trigla</i>								0.5	2
<i>P. vulgaris</i>									
<i>P. sp</i>	0.5							0.1	
<i>Pompholyx complanata</i>		0.7		0.1	0.3	0.6	0.4		
<i>Synchaeta Kitina</i>									
<i>S. oblonga</i>									
<i>Testudinella patina</i>									
<i>Trichocerca branchyura</i>									
<i>T. capucina</i>									
<i>T. birostris</i>	0.2								
<i>T. cylindrica</i>			0.1						
<i>T. dixon-nuttalli</i>									
<i>T. elongata</i>									
<i>T. sp.</i>		0.1							
<i>Trichotria tetractis</i>									
Copepod									
<i>Ceriodaphnia</i>									
<i>Cyclops strenus</i>								3.8	
<i>C. vicinus</i>			10.2						
<i>Daphnia retrocurva</i>									
<i>Macrocyclus albidus</i>									
<i>Microcyclus sp.</i>									
<i>Thermocyclops hyalinus</i>									
<i>copepodid</i>		36.8		3	27.6		14.8		3.4
<i>Nauplius</i>	5.7	9	0.7	15	10.2	6.6	4.8	1.9	3.1
Cladocera									
<i>Alona guttata</i>									
<i>Bosmina longirostris</i>	4.1			13	18.3	11.4	27.4		
<i>Chydorus spaericus</i>									5
<i>Diaphanosoma birgei</i>	29.8	59.4							
<i>D. brachyurum</i>									

부록 6: 신구저수지 정기조사 결과

부록6.13 신구저수지 정기조사 - 원생동물과 박테리아 밀도 및 탄소량 변화

	원생동물						박테리아	
	< 2 μm size		2~20 μm size		> 20 μm size		밀도 ($\times 10^4$ cells mL^{-1})	탄소량 ($\mu\text{gC L}^{-1}$)
	밀도 (cells mL^{-1})	탄소량 ($\mu\text{gC L}^{-1}$)	밀도 (cells mL^{-1})	탄소량 ($\mu\text{gC L}^{-1}$)	밀도 (cells mL^{-1})	탄소량 ($\mu\text{gC L}^{-1}$)		
2006.06.19	4,166.15	0.71	7,253.56	601.43	632.36	832.60	2,887.64	381.17
2006.07.10	8,708.41	1.49	17,713.02	1,468.67	296.20	390.00	4,811.84	635.16
2006.07.24	6,091.73	1.04	4,696.41	389.40	1,871.76	2,464.47	3,380.28	446.20
2006.08.07	1,685.70	0.29	4,539.91	376.43	114.93	151.33	2,676.50	353.30
2006.08.20	2,785.34	0.48	5,239.75	434.45	441.24	580.96	2,281.96	301.22
2006.09.04	2,437.34	0.42	5,153.96	427.34	507.78	668.57	2,455.77	324.16
2006.09.15	1,086.46	0.19	5,029.89	417.05	342.03	450.34	2,996.40	395.53
2006.10.02	1,125.58	0.19	5,351.43	443.71	236.96	312.00	2,595.46	342.60
2006.10.16	1,010.21	0.17	5,387.80	446.73	147.32	193.97	3,788.16	500.04
2006.10.21	1,757.20	0.30	5,046.32	418.41	112.64	148.31	2,996.40	395.53
2006.10.30	1,251.01	0.21	4,199.81	348.23	786.35	1,035.35	3,015.60	398.06
2006.11.20	1,538.76	0.26	4,292.34	355.90	7,248.38	9,543.63	3,169.15	418.33
2006.12.05	912.47	0.15	2,822.50	238.44	1,701.73	2,218.02	3,233.13	446.20
2006.12.18	4,078.98	0.34	3,693.63	477.37	464.47	611.55	3,380.28	446.20
2007.01.03	4,987.54	0.52	1,202.50	261.21	244.83	322.36	3,193.68	421.57
2007.01.16	4,253.71	0.50	1,108.83	200.99	84.48	111.23	2,730.89	360.48
2007.01.30	2,573.25	0.44	2,270.40	188.25	71.92	94.70	2,325.68	306.99
2007.02.13	2,415.12	0.41	6,487.51	537.91	695.02	915.11	2,629.00	347.03
2007.02.27	2,401.43	0.41	4,684.42	388.41	59.76	78.69	2,597.34	342.85
2007.03.12	2,799.13	0.48	9,354.73	775.65	139.86	184.15	2,125.92	280.62
2007.03.26	1,342.07	0.47	28,063.90	1,176.76	148.85	135.39	2,756.48	363.86
2007.04.09	1,342.07	0.23	28,063.90	2,326.91	148.85	195.98	2,199.32	290.31
2007.04.23	798.19	0.14	14,869.46	1,232.90	427.16	562.42	2,933.76	387.26
2007.05.07	851.21	0.15	26,298.62	2,180.55	181.74	239.29	2,485.63	328.10
2007.05.21	526.82	0.09	25,433.37	2,108.80	1,256.75	1,654.71	2,703.16	356.82
2007.06.18	265.10	0.05	17,270.60	1,431.99	945.08	1,244.35	2,455.68	324.15
2007.07.03	251.99	0.04	7,629.88	632.63	314.06	413.51	2,633.47	347.62
2007.07.16	182.25	0.03	9,235.44	765.75	479.85	631.80	2,891.10	381.63
2007.07.31	150.21	0.03	5,792.22	480.26	384.61	506.40	2,837.98	374.61
2007.08.22	379.33	0.06	8,924.35	739.96	128.04	168.58	2,671.17	352.59
2007.09.10	862.03	0.15	11,238.30	931.82	322.03	424.00	2,801.42	369.79
2007.10.14	251.77	0.04	14,638.42	1,213.74	527.24	694.20	2,778.57	366.77
2007.10.22	313.08	0.05	6,083.86	504.44	196.39	258.58	2,306.84	304.50
2007.11.06	552.97	0.09	12,333.57	1,022.64	233.35	307.24	2,036.35	268.80
2007.11.19	835.30	0.14	16,326.78	1,353.73	509.47	670.80	1,898.76	250.64
2007.12.03	742.48	0.13	16,616.59	1,377.76	596.10	784.86	2,338.39	308.67
2008.01.07	706.34	0.12	16,325.97	1,353.67	213.50	281.11	1,924.64	254.05
2008.01.23	861.02	0.15	16,349.76	1,355.64	253.15	333.31	1,843.79	243.38

부록 6: 신구저수지 정기조사 결과

부록 6.14 신구저수지 정기조사 - 환경요인 변화

	Temperature	Electric Conductivity	Dissolved Oxygen	Turbidity	Secchi depth	pH
	(°C)	($\mu\text{s cm}^{-1}$)	(mg L^{-1})	(NTU)	(m)	pH
2006.06.19	24.6	151	14.02	17	0.28	9.95
2006.07.10	24.11	142	7.03	27.6	0.3	7.64
2006.07.24	23.65	117	13.88	5.8	0.95	9.48
2006.08.07	30.35	135	11.7	28	1.1	9.84
2006.08.20	28.5	139	10.9	137	0.6	9.89
2006.09.04	26.7	144	13.11	11.2	0.5	9.83
2006.09.15	22.13	139	11.67	34.5	0.25	9.88
2006.10.02	21.29	141	7.17	24.2	0.4	9.09
2006.10.16	19.65	131	9.89	28	0.35	9.16
2006.10.21	21.59	149	10.38	29.6	0.45	9.59
2006.10.30	16.34	133	10.24	19.4	0.49	8.13
2006.11.20	10.31	160	8.61	13.5	0.5	8.97
2006.12.05	6.5	170	9	10.7	0.6	9.3
2006.12.18	4.95	107	9.5	7.6	0.9	9
2007.01.03	3.06	105	10.31	6.3	0.9	7.91
2006.01.16	2.45	188	11.05	3.8	1.85	7.75
2007.01.30	3.29	186	12.96	5.9	1	8.53
2007.02.13	5.48	180	12.31	7	0.6	8.72
2007.02.27	8.4	118	12.85	11.2	0.6	8.12
2007.03.12	7.1	176	12.22	13.2	0.6	8.75
2007.03.26	11.38	173	11.78	12	0.6	8.26
2007.04.09	12.76	133	12.65	8.1	0.7	8.81
2007.04.23	15.33	144	11.95	12.4	0.5	8.61
2007.05.07	19.3	161	12.9	7.1	0.65	9.5
2007.05.21	20.01	166	9.93	14.7	0.6	9.17
2007.06.06	24.13	187	5.45	40.1	0.4	8.19
2007.06.18	25.8	202	4.72	42.2	0.4	8.92
2007.07.03	25.1	171	6.2	72.4	0.25	9.24
2007.07.16	25.16	149	8.82	93	0.35	9.32
2007.07.31	29.29	202	15.47	82.6	0.3	9.58
2007.08.09	26.9	136	15.78	23.9	0.49	8.76
2007.08.22	30.8	176	15.81	37.4	0.4	9.85
2007.09.10	23.2	115	17.1	33.6	0.8	9.38
2007.09.27	21.6	98	15.92	15.4	0.7	9.37
2007.10.14	19.48	99	9.97	20.9	0.6	8.6
2007.10.22	16.77	95	11.55	21.2	0.5	9.31
2007.11.06	14.26	119	9.99	20.5	0.53	9.2
2007.11.19	11.26	90	10.81	21.3	0.58	9
2007.12.03	7.82	85	11.9	13	0.68	8.91
2007.12.20	5.2	82	12.02	7.9	0.9	8.45
2008.01.07	3.78	82	14	9.03	0.94	8.84
2008.01.23	3.25	82	15.87	5.8	0.91	8.34
2008.02.04	3.74	85	19.02	4.7	-	9.18
2008.02.18	4.54	89	18	5.9	-	8.6

부록 6: 신구저수지 정기조사 결과

부록 6.15 신구저수지 정기조사 - 수질 변화

	Chl- <i>a</i>	SS	SiO ₂	COD	NH ₄ -N	NO ₃ -N	TN	PO ₄ -P	TP
	($\mu\text{s L}^{-1}$)	(mg L^{-1})	($\mu\text{g L}^{-1}$)	(mg L^{-1})	($\mu\text{g L}^{-1}$)	(mg L^{-1})	(mg L^{-1})	($\mu\text{g L}^{-1}$)	($\mu\text{g L}^{-1}$)
2006.06.19	38.17	16.20	5.50	17.94	0.01	0.32	2.12	11.00	20.80
2006.07.10	12.99	9.68	6.20	9.04	0.64	0.57	2.59	11.80	26.80
2006.07.24	77.41	6.20	0.30	8.22	0.06	1.37	2.55	11.40	24.20
2006.08.07	3.79	4.20	2.60	5.79	0.02	1.25	2.59	9.70	22.40
2006.08.20	10.69	9.20	3.70	7.98	0.32	0.66	2.07	16.30	30.50
2006.09.04	130.19	18.00	1.50	11.26	0.00	0.39	1.60	9.90	26.00
2006.09.15	141.79	37.00	1.60	14.77	0.01	0.32	1.02	13.70	29.00
2006.10.02	12.99	20.80	3.90	14.63	0.03	0.33	1.47	10.70	39.30
2006.10.16	149.23	27.00	4.40	15.03	0.02	0.29	0.90	10.20	27.80
2006.10.21	86.83	15.33	4.60	14.03	0.22	0.37	1.14	10.90	44.80
2006.10.30	35.44	19.80	5.20	10.80	1.10	0.39	2.31	11.90	41.90
2006.11.20	115.88	12.20	4.90	9.46	0.67	0.75	1.76	11.10	39.20
2006.12.05	93.22	12.20	4.90	9.35	0.21	0.82	3.32	11.60	20.40
2006.12.18	26.48	11.60	5.50	10.30	0.47	0.91	2.74	10.70	33.70
2007.01.03	4.68	6.60	6.10	9.14	0.96	0.97	3.20	6.80	33.60
2006.01.16	3.33	2.80	6.00	4.72	1.09	0.98	3.29	13.20	30.80
2007.01.30	6.86	5.80	5.80	8.20	1.11	1.05	3.20	7.70	23.20
2007.02.13	15.49	8.00	5.80	7.78	0.69	1.20	3.02	0.01	0.04
2007.02.27	46.43	7.20	6.00	7.01	0.53	1.21	2.79	0.02	0.04
2007.03.12	47.71	16.70	0.01	10.26	0.22	0.77	4.22	2.91	74.20
2007.03.26	32.87	14.00	0.01	8.33	0.08	1.36	3.93	2.07	64.30
2007.04.09	24.72	11.00	0.35	6.92	0.15	1.08	3.70	2.91	41.80
2007.04.23	37.40	14.80	0.04	17.71	0.01	0.61	1.72	0.42	63.90
2007.05.07	53.33	12.40	0.01	17.59	0.00	0.01	1.30	0.83	52.40
2007.05.21	53.70	14.80	0.01	19.64	0.00	0.01	1.08	2.08	86.20
2007.06.06	77.80	41.60	1.17	19.18	0.00	0.01	1.07	2.08	125.70
2007.06.18	88.08	39.00	1.60	20.43	0.02	0.60	1.35	0.42	114.90
2007.07.03	193.67	49.50	1.82	24.62	0.00	0.00	2.52	1.25	191.00
2007.07.16	277.35	69.50	4.86	20.00	0.00	0.00	2.34	15.78	117.50
2007.07.31	28.80	55.50	5.00	19.00	0.00	0.00	2.12	10.61	99.80
2007.08.09	108.53	22.00	5.10	22.00	0.00	0.00	1.98	26.70	85.20
2007.08.22	42.52	24.00	5.49	17.00	0.00	0.00	1.70	4.15	47.20
2007.09.10	171.40	23.00	6.15	20.00	0.03	0.00	2.35	25.70	195.90
2007.09.27	62.90	21.00	6.00	19.00	0.03	0.50	2.40	15.00	150.00
2007.10.14	11.90	20.00	5.50	18.00	0.02	0.80	2.20	10.00	80.00
2007.10.22	31.34	15.00	6.00	19.00	0.03	1.00	2.30	5.00	90.00
2007.11.06	33.46	18.00	6.97	17.33	0.06	1.27	2.42	3.61	70.86
2007.11.19	31.53	13.00	6.26	19.83	0.00	1.31	2.45	4.33	67.17
2007.12.03	26.52	10.00	5.20	20.31	0.02	1.36	2.16	4.33	49.46
2007.12.20	27.64	8.00	4.76	23.14	0.02	1.51	2.35	2.89	45.77
2008.01.07	-	4.00	3.63	20.75	0.01	1.43	2.54	3.61	37.65
2008.01.23	-	5.00	2.29	21.98	0.01	1.46	2.31	35.35	40.61