

발 간 등 록 번 호

11-1541000-001613-01

<http://rri.ekr.or.kr>

농업용수원의 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 개발(최종)

Technical development for control of algal bloom
using predators in the agricultural reservoir (Final)

2012. 12



제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “농업용수원의 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 개발” 과제의 3차년도 최종보고서로 제출합니다.

2012 년 12 월 31 일

주관연구기관명 : 한국농어촌공사

연구책임자 : 남귀숙

연구원 : 이의행

김병석

황영중

김미리내

공동연구기관 : 경희대학교

연구책임자 : 장광현

연구원 : 박경진

육현아

협동연구기관 : (주) 아쌈

연구책임자 : 김민규

연구원 : 조인기

요 약 문

1. 과 제 명 : 농업용수원의 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 개발(최종)

2. 연구기간 : 2010년 1월 ~ 2012년 12월(총 3년 중 3년차)

3. 연구의 배경 및 필요성

- 농업용수원의 녹조 방제 및 제어는 식물플랑크톤 생산량을 감소시켜 수질개선에 기여할 수 있는 중요한 관리 대책임.
- 2011년 농업용수 수질측정망 보고서(농식품부, 2011)에 나타난 부양화도(Vollenweider)는 전체 시설 825개소 중 부영양화단계에 접어들고 있는 중부영양호 이상의 저수지가 76.6 %(중부영양 64.2 %, 부영양 12.4 %)로 전년도 33.2 %의 2배 이상 증가하고 있어 녹조발생에 취약한 농업용저수지와 담수호에 대한 적극적인 관리 대책이 필요함.
- 올해 기후변화로 인한 온난화와 극단화 현상은 유래없는 가뭄과 폭염으로 이어져 녹조발생이 심각하였으며, 앞으로 기후변화가 심화되면 더욱 극성스러워 질 것으로 우려하고 있지만, 효율적인 녹조관리체계는 아직 미흡한 실정임.
- 녹조방지를 위한 다양한 기술이 개발되고, 적용되어 왔으나 뚜렷한 성공사례가 없으며, 녹조가 발생할 경우 긴급대책으로 황토나 산화제 같은 화학물질을 살포하고 있어 2차 오염 피해가 더 우려되는 상황임.
- 본 연구의 기술은 호소 생태계에서 식물플랑크톤 주요 포식자로서 식물플랑크톤 군집을 억제하는 동물플랑크톤의 기능증폭에 착안한 것임.
- 본 연구에서는 부영양화로 손상된 비정상적 생태계 먹이망의 기능을 정상화시켜 식물플랑크톤을 제어하는 방법으로 지속성과 선택성이 높으며, 인위 배양한 동물플랑크톤은 상위 먹이단계인 어류에 포식되어 생태적으로 안전하고, 어족자원을 풍족하게 하는 등 생태적 기능강화를 통해 녹조발생을 자생적으로 억제하는 생태건강성 회복기술을 개발하고자 함.

4. 주요연구내용

4.1 1차년도(2010년)

- 농업용저수지 및 담수호의 녹조발생현황 및 관리실태분석
- 연구대상지 선정조사
- 수질환경 및 녹조발생 특성
- 천적생물 모니터링 및 분포특성 분석
- 천적생물 분리배양 및 종주확보
- 분리된 천적생물의 최적 배양조건 도출
- 천적생물 배양 소규모 장치 설치 및 시설 운영
- 천적생물 배양 장치 배양효과 및 녹조제거 효과분석
 - 운영조건(원수분리, 체류시간, 먹이비율, 식물섬피복비 등) 별 천적생물 배양 효과 및 최적 운영조건 도출
 - 천적생물 시험살포를 통한 녹조제어 가능성 평가
- 녹조방지를 위한 천적생물 배양장치의 유지관리방안

4.2 2차년도(2011년)

- 전대저수지 녹조발생 특성 및 수환경 모니터링
 - 연구대상지인 전대저수지의 시기별 수질변화, 녹조발생 특성, 동물플랑크톤 분포 특성 분석
- 천적생물 분리, 배양기술 개발
 - 녹조원인종 포식능이 우수한 천적생물 종주 분리
 - 천적생물 종주 농축배양(100 L) 및 현장 배양 조건 제시
- 중규모 천적생물 현장배양장치의 추가설치 및 시설운영
 - 육상형 천적생물 배양조 기준 30 m²(10 m² × 3조) 규모
 - 시설운영 및 유지관리 : 현장관리인 상시 관리 및 시설운영
 - 배양시설 보수.보강 및 운영조건 변경
- 천적생물 현장배양장치 배양성능 및 현장살포 효과분석
 - 배양성능분석 : 자연분리 천적생물 및 천적생물 종주(*Daphnia*) 대량배양 성능 분석

- 살포에 따른 녹조제어 효과분석 : 자연분리 천적생물(봄철) 및 천적생물 종주(가을철) 대량 살포 후 거리별 시간별 동물플랑크톤 및 식물플랑크톤 개체수 분석을 통한 녹조제어 효과 분석
- 천적생물 배양장치의 적용범위 및 규모 산정
- 천적생물을 이용한 녹조제어 성능 평가

4.3 3차년도(2012년)

- 포식성 천적생물 현장배양장치의 기능향상(시설보강)
 - 배양장치의 배양성능 향상을 위한 장치개선
 - 천적생물 보호용 cage의 현장 증폭 운영 및 장치개선
- 천적생물 배양장치의 기능향상에 따른 녹조제어 효과 분석
 - 배양장치의 장기 연속운영에 따른 녹조제어 효과분석
 - 천적생물 현장적용에 따른 녹조원인생물 및 천적생물 분포변화
 - 천적생물 보호용 cage의 병행적용에 따른 녹조제어 효과 분석
- 배양장치 규모산정 및 설계인자 제시
 - 저수지 규모 및 녹조발생 규모에 따른 배양장치 규모산정법 제시
 - 저수지 규모별, 녹조발생 정도에 따른 천적생물 배양장치 설계인자 제시
- 천적생물 배양장치의 최적운영 및 현장적용 방안 제시
 - 천적생물 배양장치의 최적운영방안
 - 천적생물 배양장치의 현장적용 방안 및 O/M 매뉴얼

5. 연구결과 요약

5.1 농업용저수지의 녹조발생 특성 및 전대저수지 수환경 모니터링

- 농업용저수지의 녹조발생특성을 살펴본 결과는 다음과 같음
 - 농업용저수지에서 가장 빈번하게 녹조를 유발하는 종은 남조류에 속하는 *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Aphanizomenon* 속의 종들임.
 - 녹조발생시기는 녹조발생정도에 따라 4~6월, 9~10월에 국한되기도 하고, 심할 경우 강우기를 제외한 3~12월 전 기간 동안 발생하기도 함.
 - 농업용수 수질측정망 지구의 녹조발생 특성을 분석해 본 결과, 평균수심 4m이하, 유역면적/만수면적 비 20이하, 제당높이/제당길이의 비 0.04이하일 때 녹조발생 가능성이 높아지는 것으로 나타남

- 농업용수 기준인 Chl-*a* 35 mg/m³ 초과율은 전체 측정망 지구수의 10 %, 조류대발생 기준인 Chl-*a* 100 mg/m³ 초과율은 1 % 수준을 보여주고 있음.
- 전대저수지의 녹조발생 특성과 수환경 특성을 분석하기 위하여, 2010.4.5~2012.11.21까지 3년간 COD등 수질항목과 동·식물플랑크톤, 어류 등을 대상으로 시기별 지점별 모니터링 함.
 - COD는 7.8~28.8 mg/L(평균 15.0 mg/L)의 범위로 나타나 대부분의 시기에 농업용수 수질기준(COD < 8 mg/L)을 초과하였으며, TN, TP 등 영양염류도 대부분의 시기에 농업용수 수질기준을 만족하지 못함
 - 시기별로는 봄철과 집중강우 이후에 오염물질 농도가 최고치를 보였으며, 지점별로는 유입부에서 높게 나타나, 유역에서 유입되는 오염물질이 전대저수지의 수질에 영향을 미치는 것으로 사료됨.
 - Chl-*a*는 1.2~225.9 mg/m³(평균 91.9 mg/m³)로 전체 조사시기 중 91 %가 농업용수 수질기준(Chl-*a* < 35 mg/m³)을 초과하였으며, 39 %가 100 mg/m³을 초과하는 조류대발생 수준을 보여, 녹조발생이 심각함.
 - 식물플랑크톤 현존량은 0.7~75.8 × 10⁵ cells/mL(평균 29.7 × 10⁵ cells/mL)로 대부분의 시기에 조류대발생 수준인 10⁶ cells/mL 이상의 높은 수준을 보였으며, 남조류인 *Oscillatoria* sp.가 대부분의 시기에 우점하였고 일부 *Anabaena* sp., *Microcystis* sp.가 우점종으로 나타남.
 - 전대저수지의 영양상태는 부영양화지수(Trophic State Index, TSI) 분석 결과, 전반적으로 과영양상태(TSI > 70)로 나타남
- 전대저수지에 자연 서식하는 동물플랑크톤의 분포 특성과 천적생물 활용가능 동물플랑크톤을 조사, 분석하여 녹조제어에 활용하고자 함
 - 전대저수지 동물플랑크톤 분포특성은 부영양화 호수가 가지는 전형적인 종조성을 보였는데, 박테리아 및 식물플랑크톤을 섭식하는 소형 윤충류가 연중 우점하고, 녹조를 효과적으로 제어할 수 있는 천적생물로서의 기능을 가진 대형 지각류는 거의 분포하지 않는 것으로 나타남.
 - 2011년에는 윤충류 12속 15종, 지각류 3속 3종 및 요각류 중 검물벼룩이 출현하였으며, 2012년에는 윤충류 12속 18종, 지각류 4속 4종 및 요각류 검물벼룩이 출현하여 연차별 분포 차이가 없음.
 - 천적생물로 활용이 가능한 중~대형 지각류로 유일하게 나타난 *Moina*

속의 밀도는 2.8~7 inds./L로 매우 낮게 분포하였으며, 소형 지각류로써 활용가능한 *Bosmina longirostris*는 6월~7월에만 최대 100 inds./L로 일시적 증가를 보이고, *Diaphanosoma brachyurum*는 연중 낮은 밀도를 보여 전대저수지는 자연적 녹조제어기능이 거의 없었음

- 배양장치에서 자연분리되어 배양되었던 *Simocephalus ventulus*는 살포구간과 어류 위내용물에서는 관찰되었으나 자연상태로 서식하는 개체는 확인되지 않아 저수지내 서식조건이 열악하여 자연상태에서 녹조제어 기능은 불가능한 것으로 사료됨.

- 전대저수지에 서식하는 어류의 종조성 및 분포특성을 파악하기 위해 3개 정점에서 2012년 4월~11월까지 총 3회의 조사를 실시함.

- 총 4과 9종 649개체로서, 잉어과 4종, 검정우럭과와 망둑어과 2종, 미꾸리과 1종이 출현하였으며, 우점종은 블루길(38.7 %)과 치리(27.1 %)로 수질오염 및 서식지 질적 저하에 내성이 강한 종들이 분포하였음

5.2 천적생물 종주 분리 및 종주의 최적 배양기술 개발

- 농업용저수지에서 녹조제어에 활용 가능한 천적생물 종주를 분리하고, 실내와 현장에서 대량배양을 위한 최적 배양조건을 검토함.

- 농업용저수지에서 녹조제어에 활용 가능한 천적생물 중 녹조제거 능력이 뛰어난 *Daphnia*속의 후보 천적생물로 *D. magna*, *D. pulex*, *D. similoides*를 분리하였으며, 이중 조류섭식 능력과 현장적응 능력을 비교하여 최적의 천적생물 종주로 *D. similoides*를 최종 선정하였음.

- 남조류가 우점하는 전대저수지 원수를 이용하여 천적생물에 의한 녹조 제어능을 실험한 결과, 천적생물 종주인 *Daphnia similoides*의 개체당 Chl-*a* 최대 저감 효과는 녹조발생 초기 수준인 50 mg/m³에서 0.68 mg/m³, 녹조발생 Chl-*a* 농도 200 mg/m³에서 3.17 mg/m³로 나타나, 녹조발생 상황에서 높은 제어 능력을 가지는 것으로 확인함.

- 실내에서 먹이공급에 따른 물순환 장치와 산소공급 장치를 갖춘 50~75 L의 수조에서 리터 당 150개체 이상의 고밀도 배양시스템을 확립하여 천적생물 배양장치에 천적생물 종주를 공급할 수 있도록 함.

- 천적생물 배양장치에서 자연분리된 대형 물벼룩 *Simocephalus ventulus* 역시 천적생물로써 활용성이 높은 것으로 나타남.

- 자연분리 천적생물의 경우 현장수질에 높은 적응력을 가지고 있어, 천

천적생물 증주와 함께 증식 후 살포시 환경적응력이 높아 높은 녹조제어 효과가 예상된다.

- 자연분리 천적생물 *Simocephalus ventulus*는 Chl-*a* 농도 30 mg/m³에서 개체당 저감을 0.5 mg/m³로 천적생물 증주보다는 약간 낮으나, 효과적인 녹조제어 능력을 가지고 있음.

5.3 천적생물 배양장치 개발 및 기능향상

- 농업용저수지의 녹조제어를 위해서는 천적생물 대량배양을 위한 천적생물 배양장치의 개발과 현장적용기술 완성이 매우 중요함
- 1차년도에 10톤 규모의 수상형 배양장치를, 2차년도에 30톤 규모의 육상형 배양장치를 개발함
 - 수상형 배양장치는 수면위에 부유시키는 형태로 원수분리조, 식물플랑크톤 배양조, 천적생물 배양조로 구성되어 있으며, 천적생물 배양조 기준 5 m² 규모 2조, 총 10 m² 으로 제작, 설치함.
 - 전대저수지 수변 홍만수면 부지를 활용하여 설치한 30 m² 규모의 육상형 배양장치는 10 m² 규모의 천적생물 배양조 위에 식물플랑크톤 배양조가 복층으로 올라가 있어 부지면적을 최소화하였으며, 3세트가 독립적으로 운영되도록 구성하여 문제발생시 해결이 용이하도록 함.
- 녹조수역에 천적생물 방류시 어류포식 등의 위험에서 천적생물을 보호하고 녹조제어 능력을 향상시키기 위한 방안으로 cage를 개발함.
 - 500 μm 메쉬망으로 둘러싸인 cage는 72 m³(6 m × 6 m × 1 m × 2 조)규모로 사각 철제 프레임에 천재질의 메쉬망으로 둘러싼 형태이며, 천적생물 배양장치에서 방류된 천적생물을 cage 내에서 추가 배양한 후 수역으로 다시 살포할 수 있는 구조로 제작함.
- 3차년도에는 천적생물 배양장치(수상형 배양장치, 육상형 배양장치)의 운전 성능과 배양성능을 향상시켜 최적 기술개발을 달성함.
 - 천적생물 배양성능을 개선하기 위해 배양장치 바닥의 사체와 찌꺼기를 효과적으로 배출하여 천적생물의 증식환경을 개선하는 경사판을 도입하였고, 산소 공급 장치의 큰 기포에 의한 동물플랑크톤의 충격을 완화하기 위해 Ceramic형 미세 산기관으로 개선하였으며, 천적생물 최적 살포를 위한 방류밸브 위치 개선 등의 기능향상을 수행함.

- cage 2조를 분리하여 수상형과 육상형 배양장치 방류부에 각각 36m³ 규모로 설치하여 천적생물 살포시 인공식물섬과 cage에 선택적으로 운영할 수 있도록 하였으며, cage 내에서 추가 증식된 천적생물 전량을 배출할 수 있도록 cage 바닥면을 들어올리는 구조로 개선함.

5.4 천적생물 배양장치의 대량배양 성능 및 녹조제거 특성

- 자연분리 천적생물의 천적생물 배양장치내 배양성능을 봄철과 가을철로 구분하여 평가함
 - 봄철(4~5월) 천적생물 배양장치에서 대량 배양된 동물플랑크톤은 윤충류 64.5 %, 노플리우스 27.2 %, 요각류 8 %, 일부 지각류 등이 출현하였으며, 윤충류와 지각류는 천적생물 배양조에서 50~60 % 감소하였고, 요각류와 노플리우스는 각각 186 %, 224 %로 크게 증가함.
 - 가을철(11월) 천적생물 대량배양 성능을 유입수와 비교한 결과 수상형의 10m³ 배양조에서는 동물플랑크톤 개체수가 유입수보다 평균 152 %, 육상형의 30 m³ 배양조에서는 134 % 증가하였음.
 - 천적생물 배양조에서 대량배양된 동물플랑크톤 중 천적생물로서 기능을 가진 지각류와 요각류의 증가율이 수상형의 10 m³ 배양조보다 육상형의 30 m³ 배양조에서 훨씬 높아 배양용량이 큰 30 m³ 배양조의 천적생물 대량배양성능이 우수한 것으로 판단됨.
- 천적생물 종주 *D. similoides* 의 대량배양성능을 분석하였으며, 실내 고밀도 배양한 *D. similoides*를 천적생물 배양장치에 초기접종한 후 2주 이내에 고밀도로 증식하는 것을 확인하였음.
 - 천적생물 배양조에 *D. similoides*를 1회당 약 5,000개체 이상을 2회 반복 투입하였을 경우 100 inds./L 이상으로 증가하는데 약 13일 소요됨.
 - 천적생물 배양장치에서 천적생물 개체군 증가율은 약 0.5배/일로, 안정적으로 개체군 밀도가 증가하기 시작하면, 2일마다 두 배로 증가함.
 - 천적생물 배양조에서 증식한 천적생물 *D. similoides*의 최고 밀도는 L당 800 개체 이상인 것으로 나타났으며, 살포 가능한 천적생물 개체수는 5톤 규모의 수상배양장치에서 톤당 최대 23만 개체, 10톤 규모의 육상배양장치에서는 톤당 최대 35만 개체인 것으로 조사됨.
- 천적생물 배양장치에서 배양기간 동안 수온변화와 영양염류 고갈에

따른 성장 저해현상은 관찰되지 않았고, 천적생물 군집이 안정적으로
고밀도 성장하고 있어 배양장치의 배양조건이 최적화됨을 확인함

- 천적생물 배양장치 자체가 가지는 녹조제거효율은 수상배양장치 평
균 95.5 %, 육상배양장치 97.3 %로 매우 높은 수준을 보임
- 녹조발생 구역에서 체류시간을 짧게 유지하여 식물배양조의 기능을
천적생물 1차 배양조로 전환하여 녹조제어 장치로 적용할 경우, 천적
생물 살포효과와 함께 더 효율적인 녹조제어가 가능할 것으로 판단됨.

5.5 천적생물 현장살포에 따른 녹조제어 효과분석

- 자연분리 및 천적생물 종주를 배양장치에서 각각 대량배양한 후 녹
조발생 구역으로 살포하여 시·공간별 녹조제어 효과를 분석함.
- 자연분리 천적생물 대량살포는 1차 살포(2010.10.21~11.2)와 2차 살
포(2011.5.17~6.9)로 나누어 실시한 후 효과 분석함.
- 대량배양된 자연분리 천적생물 10톤을 일시 살포 후 5, 10, 20, 30,
40, 50, 70, 100 m 간격으로 부표에서 1~12일 동안 거리별, 시기별
동.식물플랑크톤의 현존량과 Chl-*a* 값을 분석함
- 1차 살포결과 동물플랑크톤의 개체수(5 m 지점)는 살포 직후 598
inds./L에서 8일째 3,781 inds./L로 증가하였으며, 식물플랑크톤 현존량
은 1일째 1.3×10^5 cells/mL에서 12일째 0.6×10^5 cells/mL 까지 감소하
여 천적생물 살포로 인해 구역의 천적생물은 증가하고, 녹조생물인 식
물플랑크톤은 감소하는 효과를 확인함.
- Chl-*a*변화는 3일째까지 120.4 mg/m^3 의 조류대발생 수준을 보였지만 4
일부터 감소하기 시작하여 8일차에 농업용수 수질기준(35 mg/m^3)보다
낮은 32.4 mg/m^3 까지 감소하였으며, 73 %의 녹조제어 효과가 나타남
- 천적생물 대량살포 효과범위는 10 m³ 살포시 100 m까지 동물플랑크
톤이 증가하여 이 구간까지 살포효과가 있는 것으로 보임
- 자연분리 천적생물 2차 살포결과 구역에서 동물플랑크톤이 지속적으
로 증가하여 C(횡단면방향)의 경우 살포 전 956 inds./L에서 13일째
14,114 inds./L로 급증하였고, D(제방방향)의 경우 살포 전 250 inds./L
에서 13일째 12,890 inds./L로 현존량이 크게 증가함.

- Chl-*a*는 살포직전 C라인(횡단면방향) 243 mg/m³, D라인(제방방향) 217 mg/m³이었으나 살포후 시간이 경과하면서 C, D 양방향모두 지속적으로 감소하여 13일째 C라인에서는 87 % 감소한 31.2 mg/m³, D라인에서는 85.7 % 감소한 31.0 mg/m³로 농업용수 기준 35 mg/m³보다 낮은 최저수준을 보였으며, 조류대발생 기준(100 mg/m³)보다 2배이상 심각한 녹조발생 수준에서 농업용수 수질기준 만족 수준까지 녹조가 제어됨을 확인함.
- 살포 후 녹조원인 생물인 식물플랑크톤의 종조성 변화를 보면 살포 전과 살포 후 3일까지는 남조류와 갈색편모조류가 크게 우점한 반면 살포 9일 이후에는 녹조발생원인 생물인 남조류는 완전 제거되고 다양한 종류의 녹조류가 우점하여 생태건강성이 개선됨.
- 천적생물 종주인 *Daphnia* 천적생물의 대량살포 효과분석은 1차 살포(2011.10.17~11.3)와 2차 살포(여름: 2012.6.11~8.14, 가을: 2012.10.8~11.21)로 나누어 실시함.
 - 1차 살포시기에는 천적생물 종주 *Daphnia* 개체들이 현장에서 낮은 빈도로 관찰되어 녹조제어효과가 크지 않았는데, 이는 대형먹이인 천적생물 종주를 상위포식자인 어류가 대부분을 포식하여 제거된 것으로 사료되며, 향후 cage 도입 등 대응방안 수립이 필요하였음.
 - 2차 여름 살포는 2012.6.11~8.14까지 65일간 실시하였으며, 배양한 천적생물을 주 1회(월요일), 총 9회 천적생물 현장살포를 실시하였음.
 - 시기별 지점평균 Chl-*a* 농도를 보면 살포 전 72.4 mg/m³에서 14일차에 51.1 mg/m³까지 감소하여 29.2 %의 녹조제어 효과를 보였으며, 64일차에는 60.6 mg/m³를 나타내는 등 녹조발생이 억제되고 있었음.
 - 대조구(JD2) 대비 살포구간의 각 시기별 제거효율은 살포 3일차에 3.4 %에서 23~37일차에 최대 38.3~39.2 %까지 증가하였으며, 각 모니터링 지점에서 대조구 살포 0일차 대비 시간에 따른 Chl-*a* 평균 제거율은 9.8~40.5 %로 나타남.
 - 2차 가을 살포는 2012년 10/8~10/31까지 23일간 주 1회(월요일) 간격으로 총 4회 실시하였음.
 - 시기별 지점평균 Chl-*a* 농도는 0일차 219.1 mg/m³에서 31일차에 34.2 mg/m³까지 감소하여 84.4 %의 효율을 보였으며, 동물플랑크톤은 0일차 평

균 389 inds./L에서 Chl-*a*가 최소치를 보이는 31일차에 1,568 inds./L로 403 % 증가한 것으로 나타나 수체가 안정한 가을이 여름에 비해 뚜렷한 녹조제어 효과를 보임.

- 천적생물 현장살포에 따른 COD 제거효율은 8.1~46.3 %(평균 22.5 %)로 나타났으며, 지속적인 천적생물 살포에 따라 COD 제거효율이 점차 증가하는 양상을 보여 천적생물 살포에 의한 녹조제어가 저수지 내 유기물오염 감소를 유도한 것으로 판단됨.
- 천적생물 살포후 어류에 의한 포식, 희석 등에 의한 녹조제어효과 상실부분을 보호하기 위해 cage를 설치하여 cage 내에서의 녹조제어 효과를 분석함.
 - 설치초기(2011.10.20~11.7) Cage 내에서의 천적생물 개체수 변화는 초기 213 inds./L에서 16일 경과 후 861 inds./L까지 증가하였으며, 1년이 경과한 2012년에는 Chl-*a* 제거율 37.2~42.7 %, 식물플랑크톤 현존량 제거율 20.8~52.4 %의 제어효과만 확인되어 cage의 노후화로 인한 환경악화가 문제가 되는 것으로 사료됨.
- 전대저수지의 먹이망 구조와 어류에 의한 천적생물의 포식을 확인하기 위하여, 살포구간내 어류의 위내용물을 통한 섭식특성과 방사선안정동위원소 분석을 통한 섭식영향을 알아봄.
 - 전대저수지의 주요 우점종 중 블루길, 참붕어, 붕어 및 치리의 위내용물에 상당수의 천적생물이 발견되어 이들 어류가 천적생물 개체군 밀도를 감소시키는 것으로 사료됨.
 - 방사선 안정동위원소 분석을 통한 섭식영향분석 결과에서도 먹이 관계가 있음이 드러나 이들 포식어종에 대한 적절한 관리가 필요함.

5.6 천적생물 배양장치의 규모 산정 및 설계인자

- 농업용저수지의 녹조제어를 위해 적용하는 천적생물 배양장치 규모를 적정 또는 최소로 산정하는 것은 예산 절감과 운영, 유지관리의 편리성을 제공하여 녹조제어 사업의 성공확률을 높여줄 수 있음.
- 녹조발생 수역(Chl-*a* 100 mg/m³)에서 천적생물을 적용하여 농업용수 수질기준(Chl-*a* 35 mg/m³) 이하로 저감 시킬 경우 배양장치 규모는 남

조류를 대상으로 한 천적생물 개체당 녹조(Chl-a) 저감량을 토대로 산술 계산하였으며, 자연수역에서의 비증식속도를 감안하여 배양장치 규모산정식을 최종 도출함.

- 규모산정식=[저감 Chl-a에 따른 필요 천적생물 개체수 × 호수용량(유광층)] / [천적생물 살포량(비증식속도 10× 감안)]
- 규모산정식 = [(저수지 평균 Chl-a 농도 - 35) × 호수용량] ÷ 48,144
- 사전예방기능으로 천적생물 배양장치를 연속 운전할 경우 배양장치 규모는 제시한 것보다 축소 적용해도 될 것으로 사료됨.
- 천적생물 배양장치 설계는 대상저수지의 형상, 입지조건, 접근성 등을 고려하여 면밀히 검토하여야 하며, 설계인자는 다음을 전제조건으로 함
 - 배양장치 규모 : 10m³
 - 배양장치 형태 : 육상형(Package type), 배모양
 - 설치위치 : 대상 저수지의 홍·만수면 부지
 - 배양장치 구성 : 원수분리조, 식물플랑크톤배양조 및 천적생물 배양조를 일체형으로 구성
- 세부설계요소는 2장 제7절과 별책인 현장적용 매뉴얼에 자세히 제시함.

5.7 천적생물 배양장치의 최적운영 및 현장적용방안

- 천적생물 배양장치의 최적 운영을 위해서는 배양장치의 기능과 한계점, 문제점 등을 미리 숙지하여 충분한 이해를 바탕으로 하여야 함.
 - 천적생물 배양장치 운영시 한계 및 전제조건으로 수서곤충, 병원세균 등과 같은 타생물 혼입에 따른 성장장애, 천적생물 안정화단계까지의 시간 소요, 강우기(7~8월)와 동절기(12~2월)의 성장제약 등을 들 수 있으며, 이를 사전에 충분히 고려해야 함.
- 천적생물 배양장치는 해빙기인 2월 중순부터 결빙전인 12월 초순까지 2가지 운영방안을 제시하였으며, 대상수역의 녹조발생 특성을 감안하여 적용함.
 - 사전예방(초기제어) 체계는 2월부터 녹조발생 이전까지 자연분리 천적생물을 배양하여 주기적으로 살포함으로써 자연수역내에서의 포식압을 증가시켜 녹조원인 생물의 증식을 초기에 억제하고 제어하는 방안임.

- 녹조방제 체계는 녹조가 발생했을 경우 *Daphnia similoides* 등 우수한 녹조제어능력을 가진 천적생물 종주를 선택적으로 고농도 배양하여 살포함으로써 대발생한 고농도의 녹조를 신속하게 진화, 방제하는 방안임.
- 사전예방체계에서 녹조방제 체계로 전환해야 하는 시기는 Chl-*a*가 35 mg/m³이상으로 증가될 때이며, 이때 천적생물 배양조 안에서 초기제어를 위해 대량배양한 자연분리 천적생물을 일시에 살포하는 1차 대응조치를 취하고, 배양액 살포 직후 *Daphnia similoides*로 구성된 천적생물 종주를 대량 배양하여 2차 대응조치로서 *Daphnia similoides* 를 살포함
- 주 1회 Chl-*a* 측정을 통해 Chl-*a* 농도가 35 mg/m³이하로 감소하면 다시 사전예방 운영 방안으로 복귀함.
- 천적생물 배양장치의 현장적용방안으로 천적생물 배양장치 현장적용 계획수립, 규모산정 및 설계, 배양장치 운영, 유지관리 및 모니터링, 운영체계 평가 순으로 정리하여 제시함.
 - 계획수립을 위해 목표를 설정하고, 대상저수지의 환경조사를 통한 녹조 발생 특성, 녹조원인생물과 자연서식 천적생물 분포 특성을 사전에 분석하여야 하며, 천적생물 적용타당성을 평가할 수 있는 지표를 제시함
 - 적정 규모의 천적생물 배양장치를 설계하고 운영, 유지관리 방안, 모니터링을 통한 녹조제어효과분석 및 운영체계 평가항목을 제시하여 현장 실무자가 쉽게 현장에 적용할 수 있도록 자료를 제공함
 - 보다 세부적인 내용을 포함하여 실무에 적용할 수 있도록 현장적용매뉴얼을 별책 부록으로 작성함.

6. 기대효과 및 실용화 방안

6.1 기대효과

가. 기술적 측면

- 농업용수원의 녹조방제를 통해 호소의 수질개선 효과에 크게 기여하게 됨.
- 농업용수원의 수질개선사업과 연계하여 생태공학적인 기술로 적용 가능함.
- 농업용수원의 생태 건강성을 저해하지 않고 오히려 어족자원을 풍부하

게 하는 생물학적 녹조제어기법을 통해 건강한 호소관리 가능함.

- 녹조방지로 인한 농업용수원의 생태적 가치가 상승함.

나. 경제.산업적 측면

- 녹조발생으로 인한 수산양식자원에 미치는 많은 경제적 피해를 보상받을 수 있으며, 또한 용수이수목적에 따른 추가적인 정수처리 비용 절감 등 경제적 이득이 높음.
- 기존에 적용되어 오던 고가의 약품비 및 기기설치비를 비용경제적인 본 기술로 대체할 경우 비용절감 효과가 매우 크며, 유지관리비 등 절감요인 발생함.
- 녹조가 발생하지 않는 청정 수자원 관리로 쾌적한 수변공간 창출에 따른 농촌 어메니티 증진 등 농업용수원의 경관 생태적 가치가 상승함.

6.2 실용화방안

- 농업용저수지 및 담수호의 녹조방지기술 및 수질개선 기술로 현장적용 및 보급
- 기술의 보급 및 상용화(매뉴얼 보급)
- 저수지 및 담수호의 수질관리 정책에 반영

SUMMARY

1. Subject : Technical development for control of algal bloom using predators in the agricultural reservoir (Final)

2. Research Period : January, 2010~December, 2012

3. Necessity and objectives

- Exploring the characteristics of algal blooms in the agricultural reservoirs
- Developing the methods of predator on large scales in laboratory and field and introduction of the mass-cultured predators to natural environments.
- Investigating the kind of prey and the feeding mechanism of zooplankton on the algal blooms.
- The final goals of the present research is developing a method of controlling harmful algal blooms in the agricultural reservoirs using mass-cultured predators through diverse feeding and culturing experiments in the laboratory and in the natural environments.

4. Contents and Scope

4.1 Characteristics of algal bloom in agricultural reservoirs and monitoring of water quality in Jeondae Reservoir

4.2 Selective application of grazing controller and development of optimal mass culture system

4.3 Development and improvement of mass culture system for grazing controller

4.4 The efficiency of mass culture system

4.5 The analysis of removal efficiency in the introduction of grazing controller to the reservoir

4.6 Estimation of proper scale and design factor for mass culture system.

4.7 Suggestion for optimal operation of mass culture system in the field.

5. Results and Conclusions

5.1 Characteristics of algal bloom in agricultural reservoirs and monitoring of water quality in Jeondae Reservoir

- Dominant species mainly causing algal blooms in agricultural reservoirs are Genus *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Aphanizomenon*.
- Accessive rate of water quality standard for agricultural use defined as less than 35 mg/m³ chlorophyll-*a* concentration was 10 % for all local water, and 1 % of reservoirs showed higher than the chlorophyll-*a* level 100 mg/m³, indicating algal bloom.
- Results of water quality monitoring in Jeondae Reservoir indicated that COD ranged between 7.8~28.8 mg/L(average 15.0 mg/L) and serious organic pollution is proceeding in the reservoir with higher COD levels than standard for agricultural water(COD < 8 mg/L) in most seasons. Both TN and TP levels also exceeded the standard level for agricultural water.
- Chl-*a* concentration fluctuated between 1.2~225.9 mg/m³(average 91.9 mg/m³), and phytoplankton biomass showed the range of 0.7~75.8 × 10⁵ cells/ml(average 29.7 × 10⁵ cells/ml). Both Chl-*a* concentration and phytoplankton biomass exceeded the level of water bloom in most seasons.

- Zooplankton species composition in Jeondae reservoir showed typical eutrophicated water bodies with dominance of small rotifers that consume mainly bacteria and small phytoplankton. Large-bodied cladoceran species which is able to suppress algal bloom in the water body has not been observed throughout the study period.
- Fish community of Jeondae Reservoir included 4 classes and 9 species (total capture amount of 649 individuals) with 4 species of Cyprinidae, each 2 species of Centrarchidae and Gobiidae, and 1 species of Cobitidae. The dominant species was bluegill occupying 38.7 % of total fish captured, and subdominant species was sharpbelly (*Hemiculter leucisculus*) occupying 27.1 % of total fish amount. The dominant and subdominant species are resistant against water quality deterioration and degradation of habitat quality.

5.2 Selective application of grazing controller and development of optimal mass culture system

- Efficient algal grazer species of *Daphnia* (*D. magna*, *D. pulex*, *D. similoides*) were selected as applicable grazing controller for suppressing algal bloom in agricultural reservoir, and their abilities of algal feeding and adaptation in the environmental conditions in the reservoirs were compared through laboratory experiments.
- Large-bodied cladoceran *Simocephalus ventulus* which was collected from natural water of agricultural reservoir was also considered for grazing controller with *Daphnia* species selected and increased in the laboratory condition. *Simocephalus ventulus* showed competitive ability of algal control and field adaptation in the laboratory experiments.

5.3 Development and improvement of mass culture system for grazing controller

- During the first year, mass culture system (10 tons scale) on the artificial floating island was set up, 30 tons scale mass culture

system was set up at littoral area of the reservoir.

- The cage culture system was developed and set up in the reservoir. The cage culture system can protect grazers from fish predation in the reservoir and allow secondary population growth of grazers in the reservoir water.
- During the third year, the performance of the system and efficiency of mass culture of grazing controller have been improved and optimal management of mass culture system has been achieved.

5.4 The efficiency of mass culture system

- The efficiency of mass culture system was tested during spring and fall. The abundance of natural grazing controller including cladocerans and copepods was more efficiently increased in 30 tons scale culture system at the littoral area than the 10 tons scale system on artificial floating island.
- The selected grazing controller *D. similoides* was introduced to the mass culture system, and high abundance of grazing controller was achieved 2 weeks after initial introduction of grazing controllers to the system.
- Under the condition in the mass culture system, the negative impact of water temperature and nutrients depletion on the population growth of grazing controller was not observed, therefore the condition set in the mass culture system in Jeondae Reservoir seems to be optimal for the high abundance culture of grazing controller.
- The removal efficiencies of phytoplankton biomass during water bloom were 95.5 % for the mass culture system on the artificial floating island and 97.3 % for the system at the littoral area of the reservoir, respectively.

5.5 The analysis of removal efficiency in the introduction of

grazing controller to the reservoir

- Grazing controllers selected from natural zooplankton community of the reservoir and selected among applicable *Daphnia* species were cultured in the mass culture system and applied to the reservoir. The spacial and temporal removal efficiency of controllers on phytoplankton biomass was analyzed.
- After grazing controllers selected from natural zooplankton community released to the reservoir, the chlorophyll-*a* concentration in the reservoir reduced from 120.4 mg/m³ to 32.4 mg/m³, with removal efficiency of 73 %, on 8th day after grazing controller release during spring. On the other hand, the chlorophyll-*a* concentration was reduced from 243 mg/m³ to 31.2 mg/m³, with removal efficiency of 87 %, during fall release.
- For *Daphnia*, selected as applicable grazing controller from the laboratory, removal efficiencies of phytoplankton biomass in the reservoir were -4~32 % for 3rd grazing controller release, and 35~79 % for 4th release. During 4th release experiment, the removal efficiency was increased according to the time, and maximum removal rate was highest as 79 %, and decreased thereafter.
- To confirm the structure of foodweb in Jeondae Reservoir and predation effect of fish on grazing controller, stomach contents of fish caught within grazing controller release sector, and their carbon and nitrogen stable isotope ratio were analyzed. The results have suggested that bluegill, stone moroko, crucian carp and sharpbelly are main predator having negative impact on the abundance of grazing controller in the reservoir.

5.6 Estimation of proper scale and design factor for mass culture system.

- The proper scale and design of mass culture system to reduce excessive algal biomass in algal bloom area(Chl-*a* 100 mg/m³) to

standard level for agricultural water(Chl-*a* 35 mg/m³) have been estimated based on the individual-level removal efficiency of tested grazing controller species. The equation for proper culture system size was developed considering non-increasing growth speed in natural water bodies.

- The equation for proper culture system size=[necessary individual number of grazing controller for target removal Chl-*a* concentration × reservoir volume(euphotic zone)] / [release amount of grazing controller(with consideration of non-increasing growth speed ×10)]
- The equation for proper size = [(Average Chl-*a* concentration of the target reservoir - 35) × reservoir volume] ÷ 48,144
- Detail design factors are suggested in manual for field application (chapter 2, section 7).

5.7 Suggestion for optimal operation of mass culture system in the field.

- For the optimal operation of mass culture system in the field, the function of the system, limitation and possible problems should be fully understood before the field application.
- The mass culture system can be applied to the reservoir from February, thawing period to December, before ice formation. The system can be applied as algal bloom prevention(reduce algal biomass before and early period of water bloom) and algal bloom control(reduce increased algal biomass during water bloom) depending on the characteristics of target reservoirs.
- Field application manual of mass culture system including comprehensive planning of the system, estimation of optimal scale and design factors, operation of the system, maintenance and monitoring of system efficiency, and operating system was summarized and suggested.

6. Applications

- Techniques application for algae blooms prevention of agricultural reservoirs.
- Application to water quality management and algae blooms of agricultural reservoirs.
- Technical supply and commercial business realization environmental technique using biomanipulation

목 차

제1장 서론	3
제1절 연구배경 및 필요성	3
제2절 연구목적 및 추진체계	5
1. 연구목적	5
2. 추진전략 및 추진체계	6
제3절 농업용수원 녹조제어 기술 현황 및 연구동향	7
1. 녹조의 특성과 발생 원인	7
2. 농업용수원의 녹조제거 기술 및 개발 현황	11
3. 생물관리를 이용한 녹조제어 기술	15
4. 포식성 천적생물을 이용한 녹조 제어 기술 연구 현황	17
제2장 본론	25
제1절 연구내용 및 방법	25
1. 농업용저수지의 녹조발생 특성 및 전대저수지 수환경모니터링	25
2. 천적생물 종주 분리 및 종주의 최적 배양기술 개발	27
3. 천적생물 배양장치 개발 및 기능향상	29
4. 천적생물 배양장치의 대량배양 성능 및 녹조제거 특성	30
5. 천적생물 현장살포에 따른 녹조제어 효과분석	33
6. 천적생물 배양장치의 규모 산정 및 설계인자	38
제2절 농업용저수지의 녹조발생 특성 및 전대저수지 수환경모니터링	39
1. 농업용저수지의 녹조발생 특성	39
2. 전대저수지의 수환경 특성	45

제3절 천적생물 종주 분리 및 종주의 최적 배양기술 개발.....	60
1. 녹조 원인종에 대한 포식능이 우수한 천적생물 종주분리.....	60
2. 천적생물 종주 배양(100 L) 및 종주의 대량 배양 최적조건.....	69
3. 천적생물의 먹이망 내 위치와 섭식효과 및 제한요인.....	73
4. 천적생물 종주의 최적 배양조건.....	75
제4절 천적생물 배양장치 개발 및 기능향상.....	76
1. 천적생물 배양장치 개발 및 운영, 유지관리.....	76
2. 천적생물 배양장치 기능향상.....	89
제5절 천적생물 배양장치의 대량배양 성능 및 녹조제거 특성.....	93
1. 천적생물 배양장치의 최적 배양조건 분석.....	93
2. 자연분리 천적생물의 배양성능.....	97
3. 천적생물 종주의 배양성능.....	102
4. 천적생물 배양장치의 녹조제거 특성.....	109
제6절 천적생물 현장살포에 따른 녹조제어 효과분석.....	113
1. 자연분리 천적생물 대량살포 효과분석.....	113
2. 천적생물 종주 Daphnia의 대량살포 효과분석.....	121
3. 천적생물 보호용 cage의 병행적용에 따른 녹조제어 효과 분석.....	143
4. 천적생물 야외 배양에 따른 기상조건의 영향.....	145
5. 천적생물의 어류포식 영향 및 대책.....	147
제7절 천적생물 배양장치의 규모 산정 및 설계인자.....	153
1. 저수지 규모 및 녹조발생 규모에 따른 배양장치 규모산정법.....	153
2. 저수지 규모별, 녹조발생 정도에 따른 천적생물 배양장치 설계인자.....	155
제8절 천적생물 배양장치의 최적운영 및 현장적용방안.....	167
1. 천적생물 배양장치의 최적운영방안.....	167
2. 천적생물 배양장치의 현장적용방안.....	171

제3장 결론	179
제1절 농업용저수지의 녹조발생 특성 및 전대저수지 수환경 모니터링	179
제2절 천적생물 종주 분리 및 종주의 최적 배양기술 개발	179
제3절 천적생물 배양장치 개발 및 기능향상	180
제4절 천적생물 배양장치의 대량배양 성능 및 녹조제거	181
제5절 천적생물 현장살포에 따른 녹조제어 효과분석	182
제6절 천적생물 배양장치의 규모 산정 및 설계인자	183
제7절 천적생물 배양장치의 최적운영 및 현장적용방안	184
연구개발목표 달성도 및 대외 기여도	187
연구개발결과의 활용계획	189
참고문헌	193
분야별 공동연구 참여자 명단	199

표 목 차

(표 1.1) 녹조발생 원인 생물과 특징	8
(표 1.2) 농업용저수지에 적용가능한 녹조관리기술	13
(표 1.3) 최근 도입되고 있는 녹조제거기술	14
(표 1.4) 적조원인 생물에 대한 천적생물 최적 균주	20
(표 2.1) 수질분석 항목 및 방법	26
(표 2.2) 천적생물 배양장치 조건운영	31
(표 2.3) 천적생물 배양장치 운영조건	32
(표 2.4) 천적생물 살포효과 실험개요	34
(표 2.5) 저수지 축조시기에 따른 수질기준(COD) 초과시설 수	40
(표 2.6) 연도별 식물플랑크톤 우점종 특성	51
(표 2.7) 전대저수지 주요 출현 동물플랑크톤 종조성과 섭식성향 및 출현빈도	52
(표 2.8) 전대저수지의 어류 분포 특성	58
(표 2.9) 천적생물 후보종의 섭식효과 평가를 위한 섭식 대상생물과 초기 생체량	64
(표 2.10) 실내 및 현장 대량배양 최적 조건	75
(표 2.11) 천적생물 배양장치별 규모 비교	80
(표 2.12) 천적생물 배양장치 제원	81
(표 2.13) 천적생물 배양장치 소요비용	81
(표 2.14) 유지관리비 산출내역	82
(표 2.15) 배양장치 운영조건	83
(표 2.16) 운영조건에 따른 배양조 체류시간	84
(표 2.17) 천적생물 배양시설 유지관리 점검사항	85
(표 2.18) 천적생물 배양장치 현장시설 점검표	87

(표 2.19) 천적생물 배양장치 현장시설 일일 근무 일지	88
(표 2.20) 천적생물 배양장치 최적 배양조건	96
(표 2.21) 천적생물 배양장치에서 배양가능한 <i>Daphnia</i> 및 자연 천적생물 개체수.....	106
(표 2.22) 2012년 천적생물 배양장치의 천적생물 살포 개체수.....	136
(표 2.23) 단위 면적당 일정 클로로필 저감 시 필요 천적생물 개체수	153
(표 2.24) 배양장치 규모에 따른 천적생물 살포량 및 녹조제어범위.....	154
(표 2.25) 저수지 규모 및 녹조발생 정도에 따른 배양장치 규모(m ³)	154
(표 2.26) 각 부분의 명칭 및 설계요소.....	157
(표 2.27) 원수분리조 설계요소 및 사양.....	158
(표 2.28) 식물플랑크톤 배양조 설계요소 및 사양.....	161
(표 2.29) 동물플랑크톤 배양조 설계요소 및 사양.....	161
(표 2.30) cage 사양.....	163
(표 2.31) 시설설치비.....	164
(표 2.32) 유지관리비 산출내역.....	165
(표 2.33) 녹조발생 시기와 배양장치 운영방안.....	168
(표 2.34) 사전예방(초기제어) 운영조건.....	169
(표 2.35) 녹조발생시 긴급방제 운영조건	170
(표 2.36) 천적생물 배양시설 유지관리 점검사항.....	175
(표 2.37) 천적생물 배양장치 운영체계 평가.....	175

그림목차

<그림 1.1> 연차별 연구목표	5
<그림 1.2> 연차별 연구 추진 체계	6
<그림 1.3> 농업용저수지 등 호소의 녹조발생원인	9
<그림 1.4> 농업용저수지 등 호소의 녹조발생원인	10
<그림 1.5> 호수생태계의 먹이망	11
<그림 1.6> 농업용저수지에 적용가능한 녹조관리 기술의 종류와 특허기술 수	12
<그림 1.7> 수중생태계의 영양구조와 생물관리의 구분	16
<그림 1.8> 건강한 생태계와 부영양화 생태계의 플랑크톤 먹이망	18
<그림 1.9> 천적생물과 호소내 생태계 먹이망에서 천적생물의 위치, 역할	18
<그림 1.10> 선행 연구에서 개발한 천적생물 배양장치	20
<그림 1.11> 천적생물을 이용한 적조 제어효과	20
<그림 1.12> 천적생물 현장 대량 살포시험 결과	21
<그림 1.13> 천적생물 배양장치의 발전사와 관련 지적재산권	22
<그림 2.1> 모니터링 지점	25
<그림 2.2> 천적생물 후보종(<i>Daphnia</i> 속)의 형태와 크기 비교	28
<그림 2.3> <i>Daphnia pulex</i> 및 <i>Daphnia similoides</i> 1차 배양 실험	29
<그림 2.4> 천적생물 배양장치 구조 및 특성	30
<그림 2.5> 수상배양장치(10 m ³) 조사 지점도	33
<그림 2.6> 육상배양장치(30 m ³) 조사 지점도	33
<그림 2.7> 수상형 천적생물 배양장치 살포 지점	34
<그림 2.8> <i>Daphnia</i> 대량 살포 지점	35
<그림 2.9> 전대저수지 어류 모니터링 지점	36

<그림 2.10> 어류 현장조사.....	37
<그림 2.11> 농업용수 수질측정망 지구의 주요염원 구성 현황.....	39
<그림 2.12> 평균수심, 유역면적/만수면적, 제당높이/제당길이 비 등에 따른 녹조발생 특성.....	41
<그림 2.13> 부영양 농업용저수지의 시기별 식물플랑크톤 현존량.....	42
<그림 2.14> 농업용저수지의 월별 Chl- <i>a</i> 초과율.....	43
<그림 2.15> 농업용저수지의 COD 대비 Chl- <i>a</i> 분포 특성.....	44
<그림 2.16> 최근 5년간 농업용수 수질측정망 지구의 월별 수환경 특성과 Chl- <i>a</i>	44
<그림 2.17> 전대저수지의 기상조건.....	45
<그림 2.18> 전대저수지의 수온, DO, pH, EC 변화.....	46
<그림 2.19> 전대저수지의 COD, TN, TP, PO ₄ -P 및 TN:TP 비 변화.....	47
<그림 2.20> 전대저수지의 부영양화지수(TSI) 분석.....	48
<그림 2.21> 부영양화지수 편차분석.....	49
<그림 2.22> 전대저수지의 지점별·시기별 SD 및 Chl- <i>a</i> 변화.....	50
<그림 2.23> 지점별 시기별 식물플랑크톤 현존량 및 종조성.....	51
<그림 2.24> 전대저수지(JD2)의 동물플랑크톤 개체군 밀도 계절변화.....	53
<그림 2.25> 조사기간 출현한 전대저수지의 동물플랑크톤 종조성 상대풍부도... 54	54
<그림 2.26> 저수지에 출현하는 동물플랑크톤.....	55
<그림 2.27> 전대저수지 동물플랑크톤 섭식군 분포특성(2011년).....	56
<그림 2.28> 전대저수지 동물플랑크톤 섭식군 분포특성(2012년).....	57
<그림 2.29> 전대저수지 출현 어종.....	59
<그림 2.30> 천적생물 후보종의 적정먹이농도에서의 성장곡선 및 포란수 비교... 61	61
<그림 2.31> 후보 천적생물(<i>Daphnia</i>) 2종의 먹이농도에 따른 성장 비교... 61	61
<그림 2.32> 후보 천적생물(<i>Daphnia</i>) 2종의 온도에 따른 성장곡선.....	62
<그림 2.33> <i>D. pulex</i> 와 <i>D. similoides</i> 의 온도별 암컷개체 포란수.....	63
<그림 2.34> 천적생물 후보종의 섭식효과 실험에 사용된 식물플랑크톤 종... 64	64

<그림 2.35> 남조류 <i>Microcystis</i> (좌)와 <i>Oscillatoria</i> (우)에 의한 녹조대발생시 저수지 물을 이용한 <i>D. pulex</i> 와 <i>D. similoides</i> 의 녹조제어 효과...	65
<그림 2.36> <i>Oscillatoria</i> 에 대한 <i>D. pulex</i> 와 <i>D. similoides</i> 의 녹조제어 효과...	66
<그림 2.37> 남조류 <i>Oscillatoria</i> 와 와편모조류 <i>Ceratium</i> 공동 우점 현장 원수에 대한 <i>D. similoides</i> 의 녹조제어 능력 평가	67
<그림 2.38> <i>Daphnia pulex</i> 와 <i>Daphnia similoides</i> 의 남조류 저감 능력	· 67
<그림 2.39> 자연분리 천적생물 <i>Simocephalus ventulus</i> 의 <i>Oscillatoria</i> 제어 효과...	69
<그림 2.40> 실내 대량배양수조의 구조와 배양 조건	70
<그림 2.41> 실내 대량배양수조(75 L)에서의 <i>D. similoides</i> 의 개체군 밀도 변화...	71
<그림 2.42> 천적생물 배양장치에서 <i>D. similoides</i> 의 개체군 밀도 증가 경향...	72
<그림 2.43> <i>D. similoides</i> 배양조와 자연분리 천적생물 배양조의 먹이망 구조...	74
<그림 2.44> 탄소 및 질소 안정동위원소비를 이용한 <i>Daphnia</i> 의 먹이망 내 위치...	74
<그림 2.45> 배양장치 흐름도	76
<그림 2.46> 수상형 배양장치(10m ³) 측면도 및 평면도	77
<그림 2.47> 천적생물 배양장치 운영 모습(10m ³ , 2010년도 설치).....	77
<그림 2.48> 육상형 천적생물 배양장치(30 m ³) 측면도 및 평면도	78
<그림 2.49> 육상형 천적생물 배양장치 설치 모습	79
<그림 2.50> 운영조건 변화	83
<그림 2.51> 수상형 배양장치의 호내 이동 설치 모습	89
<그림 2.52> 육상형 및 수상형 배양장치 방류지점 위치 이동 전·후 모습...	89
<그림 2.53> 동물플랑크톤 배양조 바닥면 경사판 설치 전, 설치 후 모습...	90
<그림 2.54> 산기관 교체 설치	90
<그림 2.55> cage 이동설치 전·후 모습	91
<그림 2.56> 기존 천적생물 살포방법과 개선 후 살포방법	91
<그림 2.57> cage 인양모습, 청소 후 재설치 운영	92
<그림 2.58> 원수분리조 설치 형태에 따른 동·식물플랑크톤 변화	93

<그림 2.59> 체류시간에 따른 식물플랑크톤 배양조의 Chl- <i>a</i> 변화.....	94
<그림 2.60> 체류시간에 따른 천적생물 배양조의 동·식물플랑크톤 변화..	94
<그림 2.61> 인공식물섭 피복률에 따른 동·식물플랑크톤 변화.....	95
<그림 2.62> 먹이생물 공급비율에 따른 동·식물플랑크톤 변화.....	96
<그림 2.63> 봄철 자연분리 천적생물 대량배양에 따른 수상배양장치의 수질변화....	97
<그림 2.64> 가을철 자연분리 천적생물 대량배양에 따른 현장배양장치 수질변화....	99
<그림 2.65> 배양장치 내의 동물플랑크톤 현존량 변화.....	100
<그림 2.66> 자연분리형 천적생물 대량배양효과.....	101
<그림 2.67> 봄~여름철 천적생물 종주의 대량배양에 따른 현장배양장치 수질변화...	103
<그림 2.68> 가을철 천적생물 종주의 대량배양에 따른 현장배양장치 수질변화...	105
<그림 2.69> 기능개선 후 육상 및 수상배양장치에서 천적생물 종주의 밀도 변화...	106
<그림 2.70> 2012년 수상(AZ)과 육상(BZ)에 설치된 배양장치에서 주기적 살포에 따른 종주분리 천적생물 Daphnia의 개체군 밀도 증가율 변화 양상.....	107
<그림 2.71> 2012년 천적생물 살포 시험시 수상 및 육상배양장치의 천적생물 톤 당 현장 살포량	108
<그림 2.72> 2012년 수상(AZ) 및 육상(BZ)배양장치의 천적생물 종조성 변화...	109
<그림 2.73> 천적생물 배양장치의 녹조(Chl- <i>a</i>) 제거 효과.....	110
<그림 2.74> 식물플랑크톤 현존량 변화 및 제어 효과.....	111
<그림 2.75> 자연분리 천적생물 현상살포 전·후 기상특성.....	113
<그림 2.76> 자연분리 천적생물 현장살포에 따른 수질변화(1차 살포).....	114
<그림 2.77> 자연분리 천적생물 현장살포에 따른 수질변화(2차 살포).....	115
<그림 2.78> 자연분리 천적생물 현장살포에 따른 Chl- <i>a</i> 및 식물플랑크톤 변화(1차 살포).....	116
<그림 2.79> 자연분리 천적생물 현장살포에 따른 Chl- <i>a</i> 변화(2차 살포)...	117
<그림 2.80> 자연분리 천적생물 현장살포에 따른 식물플랑크톤 변화(2차 살포)...	117

<그림 2.81> 살포 후 소형윤충류(우점종, <i>Keratella cochlearis</i>)의 개체수 변화(살포지점 D0).....	118
<그림 2.82> 살포후 대형 윤충류(<i>Asplanchna</i> spp.)와 소형 지각류(<i>Bosmina longirostris</i>)의 개체수 변화(살포지점 D0).....	118
<그림 2.83> 자연분리 천적생물 살포에 의한 횡방향(C)과 제방방향(D)의 일별 동물플랑크톤 및 Chl- <i>a</i> 변화(1차 살포).....	119
<그림 2.84> 자연분리 천적생물의 대량살포에 의한 횡방향(C)의 거리별 동물플랑크톤 및 Chl- <i>a</i> 변화(1차 살포).....	120
<그림 2.85> 자연분리 천적생물 현장살포에 의한 제방방향(D)과 횡방향(C)의 일별 동물플랑크톤 및 Chl- <i>a</i> 변화(2차 살포)	121
<그림 2.86> 거리별 동물플랑크톤 및 Chl- <i>a</i> 의 살포 효과(2차 살포).....	121
<그림 2.87> 자연분리 천적생물의 살포전(0일) 대비 시간별 Chl- <i>a</i> 평균 제거율...	121
<그림 2.88> <i>Daphnia</i> 천적생물 현장살포 전·후 기상특성.....	122
<그림 2.89> <i>Daphnia</i> 천적생물 현장살포에 따른 수질변화(1차 살포).....	123
<그림 2.90> <i>Daphnia</i> 천적생물 현장살포에 따른 수질변화(2차 살포, 6~8월)...	125
<그림 2.91> <i>Daphnia</i> 천적생물 현장살포에 따른 수질변화(2차 살포, 10~11월)...	126
<그림 2.92> <i>Daphnia</i> 천적생물 현장살포에 따른 Chl- <i>a</i> 의 시·공간 분포 변화...	127
<그림 2.93> <i>Daphnia</i> 천적생물 살포 이후 식물플랑크톤 종조성 변화.....	127
<그림 2.94> <i>Daphnia</i> 천적생물 현장살포 효과분석(Chl- <i>a</i> , 6~8월).....	128
<그림 2.95> <i>Daphnia</i> 천적생물 현장살포 효과분석(식물플랑크톤, 6~8월)...	129
<그림 2.96> <i>Daphnia</i> 천적생물 살포 이후 식물플랑크톤 종조성 변화(6~8월)...	130
<그림 2.97> <i>Daphnia</i> 천적생물 현장살포 효과분석(Chl- <i>a</i> , 10~11월).....	131
<그림 2.98> <i>Daphnia</i> 천적생물 현장살포 효과분석(식물플랑크톤, 10~11월)....	132
<그림 2.99> <i>Daphnia</i> 천적생물 현장살포 효과분석(식물플랑크톤[<i>Microcystis</i> sp. 제외], 10~11월).....	132
<그림 2.100> <i>Daphnia</i> 천적생물 살포 이후 식물플랑크톤 종조성 변화(10~11월)....	133

<그림 2.101> 천적생물 살포 후 천적생물 종수와 자연분리 천적생물의 공간분포...	134
<그림 2.102> 천적생물 살포 후 소형 및 중, 대형 윤충류의 시, 공간분포...	135
<그림 2.103> 2차 여름(6월) 살포기간의 동물플랑크톤의 시,공간 분포 ...	137
<그림 2.104> 2차 여름(7월) 살포기간의 동물플랑크톤의 시,공간 분포.....	137
<그림 2.105> 2차 가을(10월) 살포기간의 동물플랑크톤의 시,공간 분포....	138
<그림 2.106> 2차 가을(10월) 살포기간의 대형 천적생물 <i>Daphnia similoides</i> , <i>Simocephalus ventulus</i> 의 시,공간 분포.....	138
<그림 2.107> 천적생물 1차 살포에 의한 동물플랑크톤 및 Chl- <i>a</i> 변화 ...	139
<그림 2.108> 10 m ³ 살포로 인한 거리별 동물플랑크톤 및 Chl- <i>a</i> 변화(1차 살포)...	140
<그림 2.109> 30 m ³ 살포로 인한 거리별 동물플랑크톤 및 Chl- <i>a</i> 변화(1차 살포)...	140
<그림 2.110> 천적생물 현장살포에 의한 계절변화에 따른 일별 동물플랑크톤 및 Chl- <i>a</i> 변화(2차 살포)	141
<그림 2.111> <i>Daphnia</i> 천적생물의 살포 전, 후 시간에 따른 Chl- <i>a</i> 변화....	142
<그림 2.112> <i>Daphnia</i> 천적생물의 살포 전, 후 시간에 따른 COD 변화(2012)....	142
<그림 2.113> 천적생물 보호 및 유지 cage 개요.....	143
<그림 2.114> 천적생물의 cage 적용효과(2011).....	144
<그림 2.115> Cage내 Chl- <i>a</i> 농도변화 및 제어 효과.....	144
<그림 2.116> Cage내 식물플랑크톤 현존량 변화 및 제어 효과.....	145
<그림 2.117> 하절기 강우 집중기간의 강우량과 천적생물 <i>Daphnia</i> 와 <i>Simocephalus</i> 를 포함한 동물플랑크톤의 배양조내 개체군 밀도 변화.....	146
<그림 2.118> 천적생물 배양장치의 개체군 밀도와 기상요인과의 상관관계...	147
<그림 2.119> 천적생물 주요 포식어종에 대한 위내용물 분석.....	150
<그림 2.120> 전대 저수지의 동물플랑크톤과 주요 출현 어종의 탄소, 질소 안정동위원소 비 분석을 이용한 먹이망 구조	151
<그림 2.121> 배양장치 예시도.....	156
<그림 2.122> 원수분리조 구조.....	158

<그림 2.123> 원수분리조 외형도.....	159
<그림 2.124> 원수분리조 구조상세도.....	160
<그림 2.125> 식물플랑크톤 구조상세도.....	162
<그림 2.126> 동물플랑크톤 배양조 구조.....	163
<그림 2.127> 방류구와 연결된 Cage와 인공식물섬.....	164
<그림 2.128> 사전 예방(초기제어) 운영방안 및 적용가능한 자연분리 천적생물....	169
<그림 2.129> 녹조방제 운영방안 및 적용가능한 천적생물 종주들.....	171
<그림 2.130> 천적생물 배양장치 배치단면도.....	171
<그림 2.131> 배양장치 예시도.....	184

제 1 장

서 론

제1절 연구배경 및 필요성

제2절 연구목적 및 추진체계

제3절 농업용수원 녹조제어 기술 현황 및 연구동향

제1장 서론

제1절 연구배경 및 필요성

우리나라에는 3만 3천여개의 크고 작은 저수지와 담수호가 전국에 걸쳐 분포하고 있으며, 농업용수, 생활용수, 공업용수를 공급하는 주요한 용수 원으로써의 역할을 하고 있다.

이중에서 중규모이상의 용수가치가 높은 825개 저수지와 담수호를 농업용수 수질측정망 지구로 선별하여 년 1회의 오염원조사와 년 4회의 수환경 조사를 실시하면서 수질관리에 노력을 기울이고 있다.

저수지 및 담수호의 주요 수질관리 항목은 화학적산소요구량(COD)이며, 이에 가장 결정적인 영향을 미치고 있는 것이 식물플랑크톤의 1차 생산성, 즉, 녹조에 기인한 유기물이므로, 녹조가 발생하게 되면 저수지 및 담수호의 COD 역시 증가하게 된다. 따라서 수질관리를 위해서라도 녹조관리는 반드시 병행되어야 하며 녹조를 방제하고 제어하게 되면 COD 저감으로 인한 수질개선에 기여하게 된다.

2011년 농업용수 수질측정망 보고서(농식품부, 2011)에 따르면, 전체 조사대상 저수지 및 담수호(825개소)의 13.8 %(114개소)가 COD에 근거한 농업용수 기준 수질환경 IV등급을 초과하고 있으며, 권역별로는 낙동강(평균COD 5.8 mg/L, 초과율 18.6 %)이 가장 높은 수준을 보여주었다.

Vollenweider의 총인과 총질소를 기준에 따라 분류한 부양화도는 전체 시설 825개소 중 부영양화단계에 접어들고 있는 중부영양호 이상의 저수지가 76.6 %(중부영양 64.2 %, 부영양 12.4 %)로 전년도(2010년) 33.2 %의 2배 이상 증가하고 있어 녹조발생에 취약한 농업용저수지와 담수호에 대한 적극적인 녹조관리 정책이 필요한 실정이다.

특히, 최근들어 세계적 이슈가 되고 있는 기후변화로 인한 온난화와 극단화 현상은 올해 유래없는 긴 가뭄과 폭염으로 이어졌으며, 그로인한 녹조발생이 식수원은 물론 안전한 농산물 생산에 위협을 주어 전국민을 녹조의 공포로 몰아넣었다. 앞으로 기후변화가 심화되면서 녹조발생 역시 더욱 심각해 질 것이라고 우려하고 있지만, 효율적인 녹조관리체계는 아직 미흡한 실정이다.

지금까지 다양한 녹조방지 기술이 개발되고, 적용되어 왔으나 뚜렷한

성공사례가 없으며, 사전 예방대책보다는 사후 녹조 제거대책으로 비용과 효율 측면에서 미봉책에 그치는 경우가 허다하다. 이런 상황에서 저수지에 녹조가 발생할 경우 일선 지사에서는 긴급 대책으로 황토나 산화제(ex, 옥시월드) 같은 화학물질을 대량 살포하고 있어 녹조제거 효과보다 2차 오염 피해가 더 우려되고 있다.

본 연구에서 개발하고자 하는 기술은 호소내 수생태계에서 식물플랑크톤의 주요 포식자로서 식물플랑크톤 군집크기를 조절하는 동물플랑크톤의 기능향상에 착안한 것으로, 생태계내 먹이망의 기능을 강화하여 식물플랑크톤을 제어하는 방법이다. 이 기술은 산화제와 같은 화학적 공법에 비해 단시간 큰 효과를 나타내지는 않지만, 장시간 지속성과 선택성이 높으며, 본 기술에서 도입한 동물플랑크톤은 상위 먹이단계의 어류에 포식되어 생태적으로 안전하고, 2차오염이 전혀 없을 뿐만 아니라 어족자원을 풍족하게 하는 장점을 가지고 있다.

본 연구진은 녹조발생이 심각한 부영양 저수지에 녹조 생물을 효과적으로 포식, 제어하는 천적생물을 도입하여 녹조발생에 취약한 손상된 생태계 먹이망을 정상화시켜 녹조발생을 스스로 제어할 수 있는 건강하고 안전한 저수지가 될 수 있도록 저수지의 자기재생 기능을 강화하는 기술을 개발하고자 하였다.

이를 위해, 녹조발생이 심각한 저수지의 녹조발생 특성을 분석하고, 녹조 원인 생물을 효과적으로 포식하는 천적생물을 분리, 확보하여 현장 대량 배양 기술을 개발하고, 녹조 발생 수역에 대량 살포함으로써 녹조제거 성능과 현장적용 방안을 연구하고 최적 방안을 제시하고자 하였다.

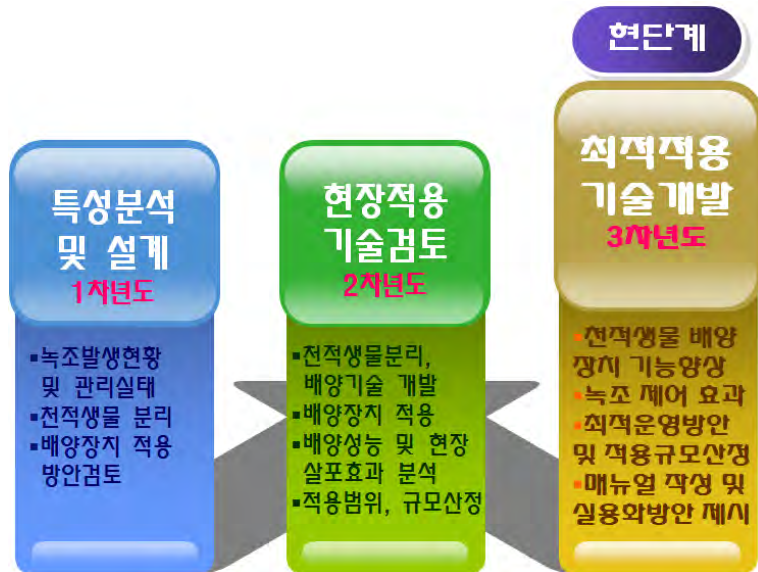
제2절 연구목적 및 추진체계

1. 연구목적

본 연구는 3년간의 계획으로 진행되었으며, 올해는 3차년도, 즉 최종년도에 해당된다. 본 연구의 목적은 녹조발생이 심각한 농업용수원에 녹조를 포식하여 제어하는 포식성 천적생물을 자연수역으로부터 분리하고, 현장배양 장치를 개발하여 대량 배양한 후 수역에 살포하여 녹조제어 효과와 적용범위, 적용 방안을 제시하는 것이다.

따라서, 연구의 최종목표는 농업용수원의 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 개발이며, 연구목표의 성격은 「기술개발/공중개발」이다.

본 연구의 연차별 세부목표는 그림 1.1과 같으며, 3차년도인 금년도에는 40톤 규모의 pilot plant에서 도출된 결과를 정리하여 실규모 적용을 위한 최적규모산정, 설계인자 및 최적운영 방안 등 실용화방안이 포함된 매뉴얼을 작성하는 것이 주요한 목표이다.



<그림 1.1> 연차별 연구목표

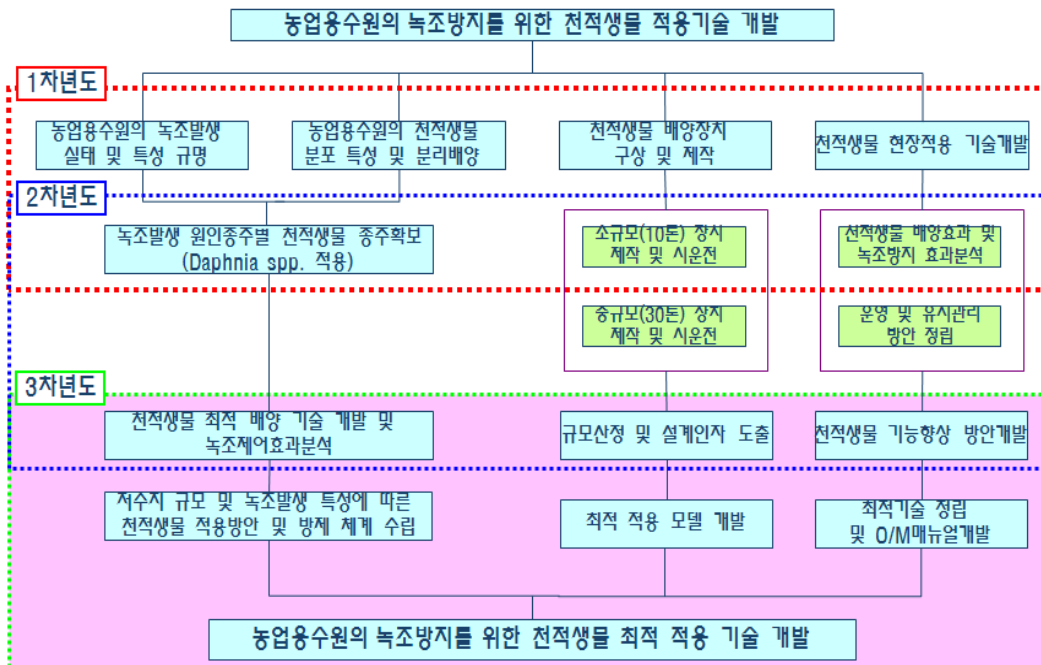
2. 추진전략 및 추진체계

연구의 추진은 기존 자료의 분석과 전문 연구기관과의 공동연구, 기술 완성을 위해 전문 기업체와의 협동연구 등 산·학·연의 공조체제를 통해 연구효율 향상을 기하였다.

기존자료의 분석은 농업용수 수질측정망 자료를 활용하여 수질 및 부영양화, 녹조발생특성을 분석하였으며, 국내 외 녹조방지 및 녹조제어 기술과 연구에 대한 문헌, 기술자료를 분석하여 활용하였다.

동물플랑크톤 분야, 특히 생물조절을 이용한 녹조제어 분야의 연구 수행 경험이 많은 경희대학교 장광현 교수팀과 공동연구를 추진하였으며, 천적생물 배양기술을 공동 개발하고 현장 장치에 대한 현물 투자를 한(주)아섬과 협동연구를 진행하여 실용기술로의 기술 발전을 촉진하고자 하였다. 또한, 관련 분야 국내외 전문 연구진 등과 네트워크를 구축하여 전문기술 교류 및 공동세미나를 추진하고, 관련 학술단체와 연계하여 활발한 학술활동과 기술 교류를 통해 연구 기술을 더욱 발전시켰다.

주요 연구 추진체계는 그림 1.2와 같다.



<그림 1.2> 연차별 연구 추진 체계

제3절 농업용수원 녹조제어 기술 현황 및 연구동향

1. 녹조의 특성과 발생 원인

가. 녹조의 특성

녹조현상이란 부영양화 된 호소나 유속이 느린 하천에서 부유성의 조류(식물플랑크톤)가 대량 증식하여 수면에 집적하고 물의 색깔을 현저하게 녹색으로 변화시키는 현상을 말한다. 최근 가장 흔하게 사용되고 있는 조류 대발생(algal-bloom), 즉 특정수역에서 조류가 대량 증식하여 물색을 변화시키는 현상과 중복되어 사용되기도 하지만 대량 증식하는 조류의 종류에 따라 물색이 달라지기 때문에 녹조현상을 넓은 의미의 조류대발생이라고 할 수 있다. 실제 녹조현상(green tide)이라는 말은 1996년 들어 우리나라에서 처음 사용된 말로 연안의 해수가 붉게 변하는 적조현상(red tide)과 비교하여 물색이 녹색으로 변한다고 하여 신문이나 방송 등을 통해 붙여진 이름이지만 실제 녹조현상을 일으키는 원인 조류들은 대부분 남조류이기 때문에 학문적으로 정확한 표현이라고는 할 수 없으나 일반시민들이 쉽게 이해할 수 있는 표현이기 때문에 점차 널리 사용되고 있다.

수많은 남조류속 중에서 유독종은 비교적 제한되어 있다. 대부분의 유독 남조류는 녹조현상을 일으키지만 모든 녹조현상의 원인 남조류가 독소를 생산하는 것은 아니며 독소를 생산하는 것으로 알려진 중, 예를 들어 *Microcystis aeruginosa* 중에서도 strain에 따라 독소를 생산하거나 하지 않는 것도 있기 때문에 녹조현상이 발생하였을 경우 그 원인조류가 표 1.1에 나타낸 유독 남조류에 속하는 지를 확인하고 유독 남조류일 가능성이 높을 경우 독성검사를 통하여 독소생산유무를 확인하여야 한다(Takamura 1988).

현재까지 국내에서 동물피해의 예가 발견되지는 않았으나 최근 연구들에서 국내의 호수나 하천에서 발생된 *Microcystis* 등의 남조류에 의한 녹조현상에서 microcystin을 검출한 결과가 보고되고 있어, 많은 호수와 하천이 상수원으로 이용되고 있는 국내의 현실에서 남조류에 의한 녹조현상의 발생에 대해 많은 경각심을 불러일으키고 있다.

부영양화된 수역에서 가장 빈번하게 녹조현상을 일으키는 남조류인 *Microcystis* 속이 생산하는 microcystin은 척추동물의 간에 독작용을 하는 간장독이며, 간출혈 및 간기능부전 등의 급성독성을 일으키는 것 외에

okadaic acid 계열의 화합물과 같이 protein phosphatase의 기능을 저해하는 것이 밝혀져 발암 promoter로서 작용할 가능성도 보고되고 있다 (Nishiwaki-Matsushima et al., 1992). *Nodularia* 속이 생산하는 nodularin도 microcystin과 마찬가지로의 펩타이드성 간장독이다.

또 다른 종류의 남조류 독성물질은 신경독으로, 역시 부영양화된 수역에서 녹조현상을 일으키는 *Anabaena* 속이 생산하는 anatoxin과 *Aphanizomenon*속이 생산하는 saxitoxin 등이 여기에 속한다.

(표 1.1) 녹조발생 원인 생물과 특징(Watanabe et al., 1995)

분류군	주요 속명	발생 시기	출현수역
남조류	<i>Microcystis</i> <i>Anabaena</i> <i>Aphanizomenon</i> <i>Oscillatoria</i>	- 여름, 표층 또는 수면을 짙은 녹색으로 변색시키며 육안으로 보이는 대형 군체를 형성. - 여름 가을에 표층, 낮은 경우에는 전층 황녹색 또는 백색이 나는 청록색	부영양호, 체류시간이 긴 하천
규조류	<i>Synedra</i> <i>Asterionella</i> <i>Cyclotella</i> <i>Melosira</i>	- 겨울부터 여름, 완전갈색 - 봄부터 여름, 완전갈색	하천유입이 많은 부영양호, 갈수기의 하천 하류부
녹조류	<i>Closterium</i> <i>Pediastrum</i> <i>Scenedesmus</i> <i>Bortyococcus</i>	- 초여름, 표층 녹색 - 여름, 선명한 녹색 " " -여름, 수면, 황녹색	비교적 깊은 부영양호, 낮은 지소, 연못
유글레나류	<i>Trachelomonas</i> <i>Euglena</i>	- 여름, 적갈색 - 겨울부터 봄	매우 얇은 호수, 방화용수 매우 얇은 연못, 하천가장자리
와편모조류	<i>Peridinium</i> <i>Gymnodinium</i>	- 봄부터 여름, 황갈색, 띠모양으로 분포	유입이 많은 호수, 댐호
황녹색조류	<i>Uroglena</i>	- 봄부터 초여름, 황색, 띠모양으로 분포	부영양화 초기 호수, 댐호

나. 녹조의 발생원인

녹조를 일으키는 원인 생물은 식물플랑크톤이라는 원시 식물체로 햇빛, 수온, 영양물질, 물의 정체 등 일정 조건만 맞으면 단시간에 급성장하는 매우 효율 좋은 생물공장이기 때문에 이들 녹조, 적조의 성장속도를 인간의 기술이 따라잡지 못하는 한계를 보이고 있는 것이 사실이다.

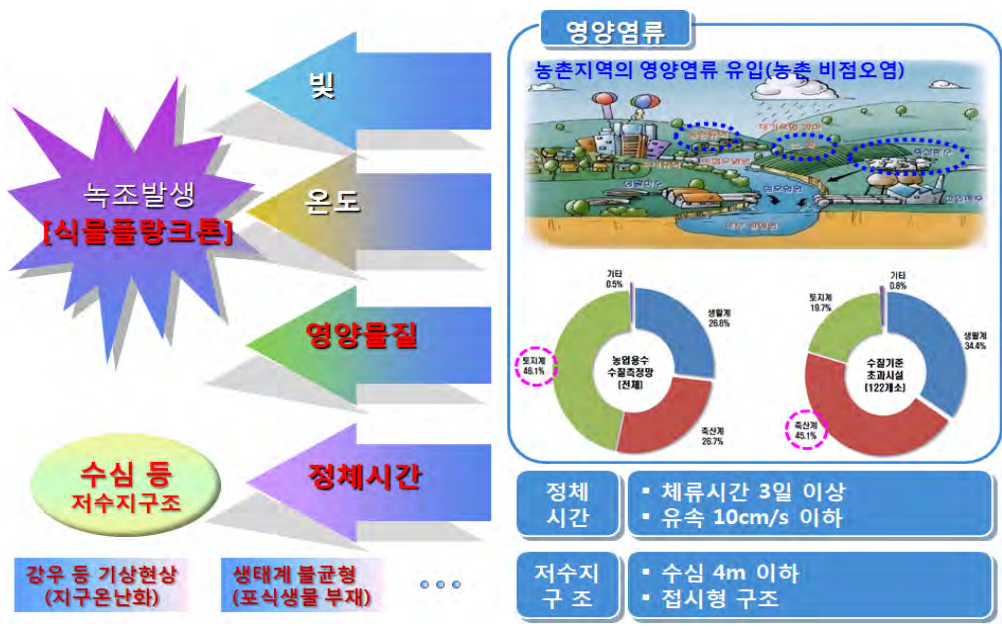
담수 중에서 대량 증식하여 녹조를 일으키고 환경적 문제를 유발하는 담수조류는 그 종류가 매우 다양하다. 우리나라에서 가장 빈번하게 녹조를 발생시키는 종은 남조류에 속하는 *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Aphanizomenon* 속(Genus)에 속하는 종들이다. 이들은 질소고정능력(*Anabaena*, *Aphanizomenon* 속 등, 이질세포(heterocyst)이용 공기 중의 질소(N₂)를 유기태 질소(NH₃)로 고정), 휴면포자 형성(내구성 강한 휴면포자(cyst) 형성), Polyphosphate body 생성(수체내 인 결핍시 체내에 Polyphosphate body 생성, 평상시 인 축적 후 결핍시 이용), Gas vacuole 형성(gas vacuole이용 환경에 따라 기포내의 gas의 양을 줄이거나 늘림으로 해서 수직 이동가능, 광저해 방지), 높은 수온 및 광범위 pH 적응성(다른 조류에 비해 최적 증식수온이 높아 여름철 고수온기 빠른 증식, 최적 증식 pH도 높아 광합성에 따라 소모된 이산화탄소에 따라 수층 내 pH가 상승할 때 더 잘 증식할 수 있는 특성 가짐), 군체 형성 능력(*Microcystis* 등은 수천, 수만 개의 세포가 점액성 물질에 싸여 군체(colony) 형성, 섭식자인 동물성플랑크톤 섭식회피) 등이 있으며, 또한, 남조류가 내는 독소도 동물성플랑크톤의 섭식을 피하기 위한 기구로서 추정되고 있다(Lampert, 1981).



<그림 1.3> 농업용저수지 등 호소의 녹조발생원인

녹조, 즉, 식물플랑크톤이 대발생하는 환경적 요인으로는 이들의 성장을 최적화 할 수 있는 충분한 일조량(태양에너지), 적정수온, 질소, 인 등의 영양물질, 그리고, 부유성의 식물플랑크톤이 안정적으로 광합성 할 수 있을 정도의 낮은 유속(체류시간) 등이 그것이다. 이 중에서 일조량과 수온은 자연적 특성으로 어찌할 수 없는 조건이며, 농업용수원의 특성상 체류시간도 변경하기가 힘든 상황이다. 따라서, 많은 농업용 저수지와 담수호들 중에서 녹조가 발생이 이루어지는 호소의 경우, 유역으로 부터 유입되는 질소, 인과 같은 영양염류의 양이 녹조를 유발하는 직접적인 요인이며, 특히, 인의 농도가 제한인자로 작용하는 이유로 인의 유입이 가장 주요한 원인이라 할 수 있다.

또한, 저수지, 담수호, 댐호 등의 호수내 생태계에서 먹이망 구조 역시 녹조발생의 한 원인이 될 수 있다. 즉, 녹조원인 식물플랑크톤을 포식하는 1차 소비자, 즉 동물플랑크톤의 군집이 클 경우 녹조가 억제되는 반면, 동물플랑크톤의 군집 규모가 상대적으로 작으면 포식자의 부재로 인해 녹조발생이 가중될 수 있다. 녹조발생 빈도가 높은 대부분 농업용저수지의 경우 식물플랑크톤을 효과적으로 포식하는 동물플랑크톤이 없거나 거의 존재하지 않는 것으로 알려져 있다.



<그림 1.4> 농업용저수지 등 호소의 녹조발생원인



<그림 1.5> 호수생태계의 먹이망

2. 농업용수원의 녹조제거 기술 및 개발 현황

농업용수원의 녹조는 크게 2가지 방법으로 관리될 수 있다. 첫번째는 사전관리 방안으로 녹조발생을 사전에 예측하여 발생을 억제하는 사전제어 기술이며, 두 번째는 사후관리 방안으로 녹조가 발생한 후 발생한 녹조를 제거하는 기술이다.

녹조를 사전관리하기 위해서는 녹조발생을 사전예측할 수 있는 녹조예측시스템이 구축되어야 하는데, 4대강 보구간의 경우 수온과 클로로필 a(Chl-a) 농도를 이용한 수질예측 시스템이 구축되어 운영되고 있으나 농업용수원의 경우 현재 연구 중에 있어 향후 2~3년이 더 소요될 예정이다. 그보다 더 큰 문제는 현재의 기술로 녹조가 예측될 때 사전에 적용할 녹조예방 기술이 없는 것이다. 단지, 본 연구에서 개발한 천적생물 적용기술은 녹조 예측시 초기 대응할 수 있는 유일한 방법으로 사전예방기술은 녹조발생 후 진화하는 사후 대책보다 그 효과가 높고 매우 경제적이기 때문에 본 기술의 중요성이 매우 높다 할 수 있다.

녹조가 발생한 후 녹조를 제거하는 사후 관리방안에는 물리적, 화학적, 생물학적 방법으로 구분된다.



<그림 1.6> 농업용저수지에 적용가능한 녹조관리 기술의 종류와 특허기술 수

2010년 현재 특허 등록이 완료된 녹조관리기술현황을 보면, 그림 1.6과 같이 총 139개의 기술이 등록 되어 있으며, 그중 화학적 기술의 특허수가 53개로 가장 많고 물리적 기술 47개, 생물학적 기술이 29개로 가장 적은 실정으로(국토해양부, 2010) 대부분이 화학적, 물리적 기술로 구성되어 있다.

지금까지는 효과가 빠르고 적용이 쉬운 화학적 기술의 개발이 상당 수 차지하고 있지만, 2차 오염의 우려와 수생태계 건강성을 저해할 가능성이 높아 친환경적이며, 생태건강성이 확보되는 생물학적 기술의 개발에 관심을 모으고 있다.

표 1.2에 농업용 저수지에 적용가능한 녹조관리기술의 종류와 적용조건, 단기 및 장기효과, 비용 분석결과를 나타내었다.

이외에도 미생물의 생리활성을 이용한 수처리제로써 다양한 미생물제재가 적용되고 있으며, 천연물질을 이용한 응집처리, 화학적 산화제로써 수산화마그네슘, 이산화염소, 차아염소산 나트륨 등이 소개되고 있다.

(표 1.2) 농업용저수지에 적용가능한 녹조관리기술(농식품부, 2009)

처리방법	단기 효과	장기 효과	비 용	조건
생물조절 (Biomani- pulation)	G-P	E	L	.단독적용보다는 다른공법과의 연계적용시 효과 상승 .생물서식처의 확보와 동시에 고려되어야함 .생태계구조와 기능에 대한 사전조사가 선행되어야함 .경제성이 높고 친환경적 .물리.화학적 방법에 비해 효과 발현에 장시간 필요
생물수확	E	F	H	.비교적 소규모의 부영양하고 외부부하가 적은 저수지 에 적용가능함 .수생식물의 경우에는 수질에 미치는 긍정적인 효과와 부정적인 효과에 대한 검토 후에 수확시기 등을 결정 하여 적용 .수확된 생물의 처리방법이 수립되어야 함
인 불활성화	E	F	L	.내부부하가 큰 부영양 저수지에 적용가능 .국내기후 여건상 적용이 어려움
유로변경	E	F	H	.외부부하가 크고, 유로거리가 짧은 저수지에 적용가능
희석	E	E	H	.희석수로 사용가능한 수원이 인근에 위치한 경우 적 용가능
폭기 (물순환)	P	F	H	.수심이 깊고 규모가 작은 저수지에 적용가능 .심층폭기는 심층무산소층이 형성되고 내부부하가 큰 저수지에 적용가능 .전층폭기는 내부부하보다는 외부부하가 크고 수심이 깊은 저수지에 적용가능
응집부상	E	P-G	H	.부영양화와 녹조현상 정도가 심한 저수지에 적용가능 .단기간내에 큰 효과를 기대하는데 유리 .효과지속성은 낮음
선택적 방류	E	E	H	.내부부하가 큰 저수지에 적용가능하며 도수관 설치가 용이한 저수지에 설치가능
준설	E	E	H	.수심이 얕고 내부부하가 큰 저수지
수위저하	G	F	L	.수량의 유지가 용이하고, 수생식물의 피복도가 높아 수질에 문제가 되는 저수지
퇴적물 피복	E	F	H	.내부부하가 큰 저수지 .비용이 많이 들고 유지보수가 어려워 적용이 어려움

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

(표 1.3) 최근 도입되고 있는 녹조제거기술

구 분	공 법 특 징
응집부상처리	○개요 : 미세기포 또는 미세기포와 응집제 등을 혼합.분사하여 녹조와 수중, 호저 부니층의 오염물질을 수면위로 부상.제거하여 수질을 개선하는 공법 ○처리범위 : 호소 전수역의 수층, 부니층 ○적용제한 : 유효수심 1.5~3m범위의 저수심 지역 ○적용시기 : 녹조 대발생 초기 또는 대발생후 ○문제점 : 응집제의 수중 잔류 및 퇴적층의 오염농도 증가
미생물처리	○개요 : 미생물 단독 또는 미생물과 보조재를 이용하여 오염물질을 분해.제거하거나 수생태계의 생물활성도를 높여 오염물질을 생물이 흡수.제거함으로써 수질을 개선하는 공법 ○처리범위 : 호소 전수역의 수중, 부니층 ○적용제한 : 없음(장마.동절기 제외) ○문제점 : 수온, pH, 용존산소 등 환경제약이 크고, 안정화에 소요되는 기간이 2개월 정도로 긴 편임
천연물질처리	○개요 : 자연식물 또는 천연광물의 성분을 이용하여 녹조발생 억제, 발생한 녹조와 수중오염물질을 제거하여 수질을 개선하는 공법 ○처리범위 : 호소 전수역의 수중, 부니층 ○적용시기 : 녹조 발생시기 또는 수질오염도 증가시기 ○문제점 : 응집 부상원리로 제거되므로 잔존물질의 침전, 재부유됨
물리적 순환처리 (물순환장치)	○개요 : 폭기 또는 임펠러를 이용해 저층까지 산소를 공급하여 수직·수평으로 물의 순환을 유도함으로써 수중 및 부니층의 오염물질의 분해제거등 작용을 통해 수질을 개선하는 공법 ○처리범위 : 유효수심 1.5~3m범위의 저수심 지역 ○적용시기 : 녹조 발생시기 또는 수질오염도 증가시기 ○문제점 : 작용범위가 예상 보다 좁고, 수심이 낮은 경우 퇴적층을 교란하여 녹조발생이 가중될 수 있음
전기적처리	○개요 : 초음파, UV, 오존 등 전기를 이용하거나, 그 형태를 변경하여 녹조의 발생을 억제하거나, 사멸시켜 수질을 개선하는 공법 ○처리범위 : 호소 전수역의 표층 ○적용시기 : 녹조 대발생 초기부터(적용제한 없음) ○문제점 : 사멸된 녹조의 영양염류 재용출로 녹조재발 가속화

표 1.3은 최근 도입되고 있는 녹조제거 기술을 정리하여 나타내었다. 녹조발생수역에서 조류를 응집 부상시켜 제거하는 응집부상처리 및 천연물질 처리는 호수외로 많은 양의 조류를 제거하여 폐기하는 방법으로 처리량에 따라 녹조제거에 효과적이라 할 수 있으나, 수거되지 못한 일부의 양이 호내 퇴적물에 침강하여 재 부유 할 수 있는 문제점이 있으며, 특히, 화학적 응집제를 처리하는 경우 생태계에 독성을 남길 수 있다. 미생물 제제의 경우 7~8월 같이 수온이 높아 미생물의 활성을 최적화 할 수 있는 조건에서는 효과를 보이지만, 녹조가 주로 발생하는 3~5월, 9~10월 수온이 높지 않은 시기

에는 효과가 크지 않은 것으로 나타나 녹조발생시기와 잘 맞지 않아 비효율적이다. 초음파, 오존, 살조세균 등의 기술은 녹조를 호내에서 사멸시키는 방법으로 사멸된 녹조로부터 영양염류가 재용출되어 재발생을 유도하므로 일시적 효과는 있으나 장기적으로는 문제가 되는 기술로 판단된다. 물순환 장치는 성층이 형성되는 6m이하의 저수지에서는 효과가 있을 수 있으나 녹조발생저수지 대부분이 평균 수심 4m이하에 분포하고 있어 퇴적물 교란에 따른 녹조발생 촉진으로 녹조 발생 저수지에의 적용은 문제가 있다.

따라서, 녹조발생의 특성과 녹조빈발 저수지의 특성을 모두 감안한 효과적인 녹조제거 공법의 적용이 필요하다.

3. 생물관리를 이용한 녹조제어 기술

수중생태계에서 대형 수생생물은 환경요인에 의해 생육이 조절되는 피동적 측면과 아울러 생물 자체의 반작용으로 환경을 변화시키는 능동적 측면을 함께 지니고 있다.

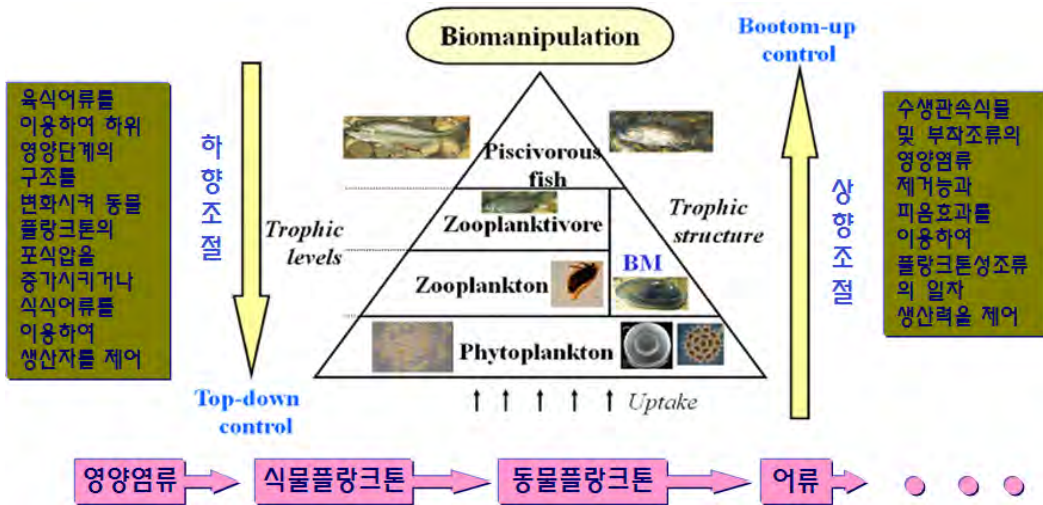
수질환경의 개선에 대한 대형생물의 능동적 측면은 일찍부터 자연정화의 하나로서 인식되어져 왔으나 이러한 기능을 인위적으로 극대화하려는 시도는 1950년 말 이후에 구체화되었다.

생물관리(Biomanipulation)는 식식어류의 투입, 플랑크톤 섭식어류의 직접제거, 고차 육식어류의 투입 등을 통해 수중 영양단계의 구조를 변화시킴으로써 일차 생산성을 제어하는 하향조절(top-down control)과 수생관속식물이나 사상성 대형 부착조류를 이용하여 영양물질을 제거함으로써 관리대상 수체의 식물플랑크톤 증식을 억제하는 상향조절(bottom-up control)로 나뉜다. 자연상태에서 생물군집의 조절에 의한 수질관리에 관한 연구는 1950년대 말을 전후하여 주로 유럽을 중심으로 시작되었는데, Shapiro et al.(1975)은 이를 Biomanipulation이라 명명하고 “Biomanipulation이란 수질개선을 위한 자연산 수생생물 군집의 관리”라고 정의한 바 있다.

최근까지 수계 부영양화의 위해성을 억제하기 위한 대부분의 노력들은 영양염류의 삭감을 통한 식물플랑크톤 증식 억제에 목표를 둔 것으로, 호수 생태계의 구조에 대한 고전적인 육수학적 접근은 영양염류→식물플랑크톤→동물플랑크톤→어류에 이르는 단일방향의 물질흐름에 기본을 둔 것이었다.

생물관리는 수생관속식물 및 부착조류의 영양염류 제거능과 피음효과

를 이용하여 플랑크톤성 식물플랑크톤의 일차생산력을 제어하는 상향조절(bottom-up control)과 육식어류를 이용하여 하위 영양단계의 구조를 변화시켜 동물플랑크톤의 초식압(grazing pressure)을 증가시키거나 식식어류를 이용하여 생산자를 제어하는 하향조절(top-down control)로 대별할 수 있다.



<그림 1.7> 수중생태계의 영양구조와 생물관리의 구분

50년대와 60년대초의 생물관리에 관한 연구는 주로 동물플랑크톤에 대한 포식 및 수질에 대한 어류의 영향에 중점이 있었다(Gophen, 1990). 고전적인 육수학적 개념에서는 호수 영양단계내 물질의 역동적 흐름이 식물플랑크톤에 의해 흡수된 영양염류가 동물플랑크톤 및 어류의 상위 영양단계를 변형시키는 단일방향의 상향조절능(bottom-up force)에 의해 이루어지는 것으로 인식되어 왔다(Straskraba, 1965). 따라서 상위 영양단계 구조의 인위적인 변형을 통하여 하위 영양단계를 변형시키는 하향조절능(top-down force)에 관한 연구는 60년대까지는 개척단계의 수준에 있었다. 70년대에는 식물플랑크톤에 대한 동물플랑크톤의 초식압(grazing pressure)에 미치는 어류의 영양단계 내림효과(trophic cascading effect)에 관한 연구가 계속되었으며, 그 외 초어(grass carp)와 같은 초식성(phytophagous) 어류의 관속식물 제거에 대한 연구가 아울러 이루어져 생물학적 수초관리의 실용적 방법의 하나로 접목되었다.

80년대 이후 생물관리의 연구는 영양염류 이동 경로와 같이 먹이망의 구성자들간에 나타나는 복합적인 상호작용을 연구하는 범위로 확대되었다.

광의의 의미에서 생물관리는 하향조절능, 영양단계 내림작용(trophic cascade interaction) 또는 먹이망조작(food-web manipulation)과 비슷한 의미를 가진다. 최근에는 생태계 반응의 복잡성 및 상향조절능이나 또는 플랑크톤 군집 구조에 대한 플랑크톤 포식어류의 영양염류 매개효과(nutrient-mediated effect)등이 생물관리 연구에 포함되고 있으며, 호수나 저수지의 수질개선에 대한 장기예측을 위해서는 상향조절능 및 하향조절능에 관한 복합적인 분석이 요구된다는 점에 최근의 관점이 집중되는 경향이 있다(Gophen, 1990).

현재까지 적용된 대부분의 생물관리는 동물플랑크톤 포식어류의 관리를 통해 식물플랑크톤에 대한 동물플랑크톤의 초식압을 증가시키는데 중점을 두어 왔으며(Shapiro and Wright, 1984), 식물플랑크톤 섭식어류(Phytoplanktivorous fish) 역시 생물관리 기술의 하나로서 연구되어 왔다(Opuszynski, 1978).

생물관리 기술은 유럽의 부영양화된 저수지 및 호수를 개선하는데 성공적으로 적용된 사례가 적지 않으며, 수질관리에 있어서 생물관리의 통합개념은 생태계내 먹이사슬 구조 및 물질흐름에 대한 보다 정확한 정보를 얻을 수 있다면 기존의 호수관리에 쓰여져 왔던 공학적 기술에 대한 생물학적 대안이 될 수 있다고 판단된다. 생물관리가 도입되어야 하는 이유로는 유역관리의 어려움과 화학적 처리의 갖가지 피해를 줄여보고자 하는 것도 있지만 실제로 영양염류를 충분히 감소시켰음에도 불구하고 과다한 녹조발생을 조절하지 못한 경우가 보고되고 있기 때문이다. 즉 수자원의 적절한 관리를 위해서는 영양염류의 관리를 통한 상향조절과 생태피라미트의 상위 영양단계 생물을 이용한 하향조절, 두가지 측면을 병행한 종합적인 관리를 해야 한다.

4. 포식성 천적생물을 이용한 녹조 제어 기술 연구 현황

가. 포식성 천적생물(동물플랑크톤)의 개념

호소생태계에서 자연적으로 이루어지는 먹이연쇄(Food web)의 구조를 보면 물속의 영양물질을 이용하여 생산자인 식물플랑크톤(phytoplankton)이 성장하게 되고, 이 식물플랑크톤은 아주 일부분이 어류의 먹이가 되고, 대부분은 동물플랑크톤(zooplankton)의 주요 먹이원이 된다. 동물플랑크톤은 크고 작은 어류의 먹이가 되어 생태계 순환이 이루어진다. 수질관리의 주요목적은 녹조제어에 있으므로 식물플랑크톤을 포식하는 동물플랑크톤의 양을 인위적으로 키워 식물플랑크톤을 줄일 수 있다면 매우 효과적이라 할 수 있다.



<그림 1.8> 건강한 생태계와 부영양화 생태계의 플랑크톤 먹이망



<그림 1.9> 천적생물과 호소내 생태계 먹이망에서 천적생물의 위치, 역할

건강한 생태계에서는 녹조생물인 식물플랑크톤과 1차 소비자인 동물플랑크톤의 포식-피식관계가 정상적으로 이루어져 식물플랑크톤 군집의 크기가 작고 일정하게 유지되고 있는 반면, 부영양화가 이루어진 녹조발생 수역에서는 지속적이고 과도한 스트레스로 인해 식물플랑크톤을 포식하는 천적생물로서의 기능을 가지는 동물플랑크톤이 매우 적게 분포하거나 존재하지 않아 식물플랑크톤 군집의 크기가 비정상적으로 커지면서 녹조가 빈발한다(그림 1.8).

일반적으로 건강한 생태계는 스스로 각 단계의 생태적 지위(ecological niche)와 군집의 크기를 조절하는 조절기능과 그로 인해 안정화되어 갈려는 동적 평형의 항상성을 유지하는 기능을 가지고 있다. 따라서, 어떠한 호수 생태계라 할지라도 생산자이면서 녹조 원인생물인 식물플랑크톤의 군집크기를 조절하려는 자연적인 포식자 또는 경쟁자(천적생물)가 항상 공존하고 있는데, 세균, 곰팡이, 바이러스 등 미생물과 동물플랑크톤 같은 원생생물, 조개류, 어류 등이 그것이다. 이 중에서 식물플랑크톤 대부분을 포식하며 그 조절기능이 가장 큰 동물플랑크톤의 기능적 이해와 활용이 무엇보다 중요할 것으로 확신하여 이를 포식성 천적생물로 명명하고 연구 대상으로 선정하였다(그림 1.9).

연구원리는 녹조발생 수역에서 상대적으로 낮은 분포를 보이는 천적생물을 분리하여 인위적 배양장치를 통해 개체수를 증가시킨 후 재방류하게 되면 녹조 원인생물을 효과적으로 포식하면서 포식-피식 평형관계를 유지하여 자연스럽게 녹조와 같은 조류대발생 문제를 사전에 예방할 수 있게 된다. 따라서, 식물플랑크톤이 과도하게 증식하는 비정상적인 생태계를 보이는 부영양화 수역에 인위적이지만, 천적생물 공급이라는 처방을 통해 식물플랑크톤의 초기 성장을 억제함으로써 녹조를 제어하는 사전 예방대책이 될 수 있다.

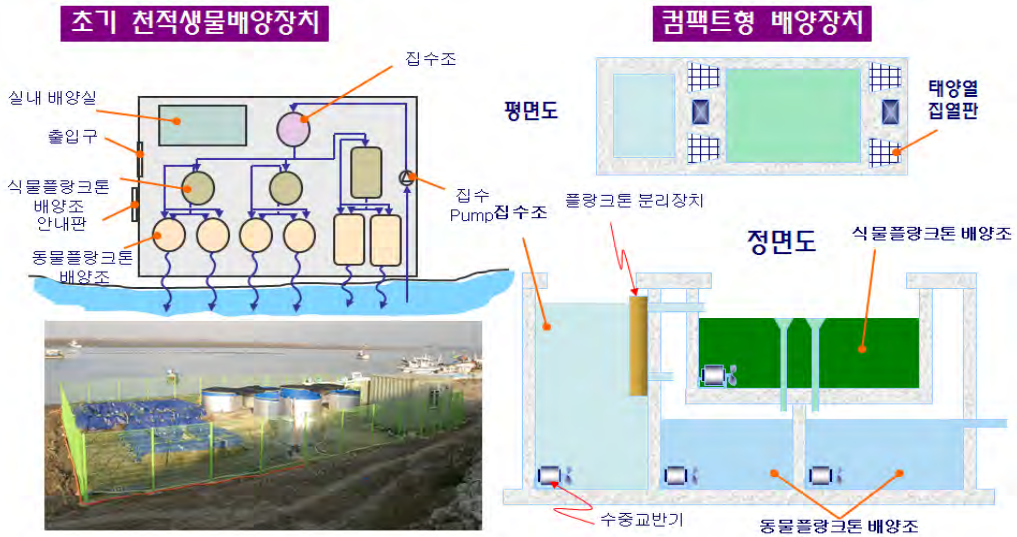
본 연구는 2007년부터 2009년까지 3년간 『새만금수역 적·녹조현장적용시험연구』의 일환으로 시작되었으며, 새만금수역의 적용가능한 다양한 방제물질의 적용시험과 함께 천적생물 도입타당성을 분석하였다. 해수호인 새만금호에서 적조원인 생물에 대한 천적생물을 탐색하였으며(표 1.4), 천적생물 현장에서 대량배양할 수 있는 장치의 초기모델을 창출하였다(그림 1.10).

연구과정을 통해 배양장치를 이용한 천적생물 분리, 배양이 성공적으로 이루어졌으며, 다양한 실험을 통해 천적생물의 적조제어 효과가 매우 높은 것을 확인함과 동시에 천적생물을 이용한 적조제어에 대한 확신을 얻었다.

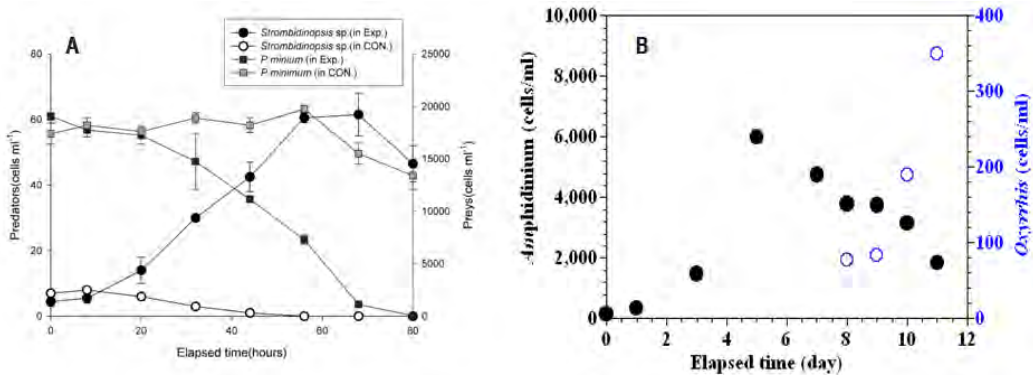
이후 새만금호의 적조제어를 위한 천적생물 배양장치의 실용화 연구를 계획하였으나, 새만금 환경업무가 환경부로 이관되면서 무산되었다.

(표 1.4) 적조원인 생물에 대한 천적생물 최적 균주

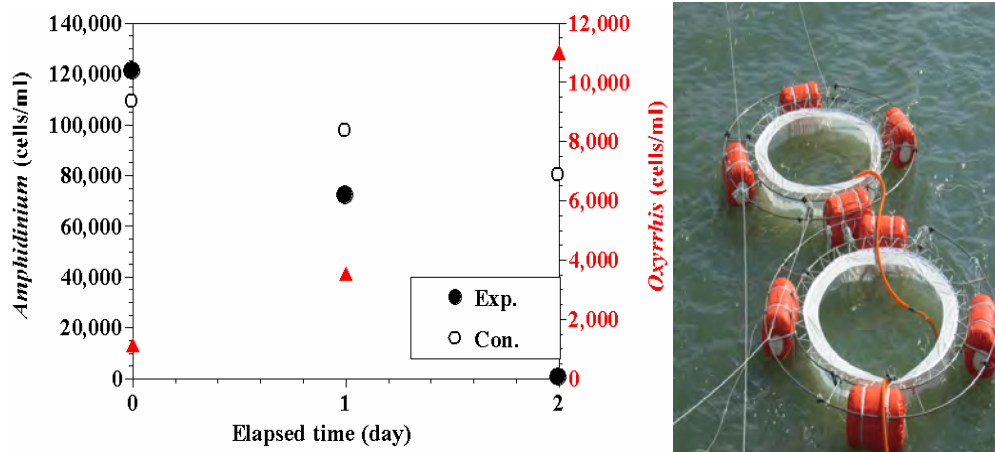
적조생물 (분류)	최적균주	비고
<i>Karlodinium veneticum</i> (약편모류)	<i>Oxyrrhis marina</i>	
<i>Skeletonema costatum</i> (규조류)	<i>Protoperdinium bipes</i>	
<i>Prorocentrum minimum</i> (약편모류)	<i>Gyrodinium dominans</i> <i>Gyrodinium spirale</i>	
<i>Heterosigma akashiwo</i> (침편모류)	<i>Oxyrrhis marina</i>	
<i>Gymnodinium aureolum</i> (약편모류)	<i>Polykrikos kofoidii</i>	
<i>Teleaulax</i> spp.	<i>Oxyrrhis marina</i> <i>Myrionecta rubra</i>	
<i>Dinophysis acuminata</i>	<i>Oxyrrhis marina</i> <i>Pfiesteria piscicida</i>	



<그림 1.10> 선행 연구에서 개발한 천적생물 배양장치



<그림 1.11> 천적생물을 이용한 적조 제어 효과(A; 200L 수조, B; 배양장치)



<그림 1.12> 천적생물 현장 대량 살포시험 결과(3 m³)

2010년부터는 해수종이 아닌 담수성 식물플랑크톤에 대한 천적생물 적용방안을 연구하였다. 2010년~2011년 2년간 새만금 수역에서 개발된 천적생물 배양기술을 이용하여 국토해양부 재원으로 정제하천에서 포식성 천적생물을 이용한 조류제어기술 개발 연구를 진행하였다. 문제는 담수성 식물플랑크톤에 대한 천적생물 탐색이었다. 적조원인 해수성 플랑크톤은 확인한 천적생물이 분포하고 있지만, 담수성 식물플랑크톤은 그 진화역사도 해수 플랑크톤보다 길어 천적생물을 탐색하기가 힘들다는 전문가 자문의견이 많았다. 1차년도에는 섬모충류 등 배양조건이 까다로운 천적생물들을 분리하여 현장배양에 고전하였으며, 2차년도에 지각류인 대형물벼룩 수종을 분리하여 성공할 수 있었다. 배양장치도 2세대로 발전하였으며, 배양조건도 최적화하였다. 또한, 하천에 설치한 배양장치의 안전성에 대한 부분도 고려하였고, 하천에서 주로 문제가 되는 규조류, 와편모 조류의 대발생에 대한 제어효과도 검증할 수 있었다.



<그림 1.13> 천적생물 배양장치의 발전사와 관련 지적재산권

하천과 동시에 농업용저수지에서 녹조제어를 위한 천적생물 적용기술연구인 본 연구가 진행되었다. 농업용저수지에서는 남조류가 녹조를 유발하므로 남조류를 효과적으로 포식하는 천적생물이 필요하였으며, 배양장치의 최적운영방안이 요구되었다.

따라서, 본 연구에서는 농업용저수지와 담수호에 적용가능한 천적생물 배양장치의 최적모델을 개발하고, 녹조원인 생물인 남조류에 효과적인 천적생물의 분리, 배양, 현장적용방안을 모색하여 효과적 제어효과를 검증하고 최적의 현장적용방안을 제시하고자 하였다.

제 2 장

본 론

제1절 연구내용 및 방법

제2절 농업용저수지 녹조발생 특성 및
전대저수지 수환경 모니터링

제3절 천적생물 종주 분리 및 종주의 최적 배양기술 개발

제4절 천적생물 배양장치 개발 및 기능향상

제5절 천적생물 배양장치의 배양성능 및 녹조제거 특성

제6절 천적생물 현장살포에 따른 녹조제어 효과분석

제7절 천적생물 배양장치의 규모산정 및 설계인자

제8절 천적생물 배양장치의 최적운영 및 현장적용방안

제2장 본론

제1절 연구내용 및 방법

1. 농업용저수지의 녹조발생 특성 및 전대저수지 수환경모니터링

가. 농업용저수지의 녹조발생 특성

농업용수원의 녹조발생 특성은 농림수산식품부와 한국농어촌공사가 관리하고 있는 주요 농업용수원(저수지와 담수호)에 대해 1999년~2011년 까지 축적된 방대한 양의 농업용수 수질측정망 조사결과를 활용하여 농업용저수지와 담수호의 녹조발생원인과 녹조발생 현황을 분석하였다.

나. 전대저수지 수환경 모니터링

(1) 모니터링 시기 및 기상조건

모니터링은 2010.3.24~2012.11.21까지 월 1회 이상 실시하였으며, 모니터링 기간중 기상조건은 기상청(<http://www.kma.go.kr/>)의 서산기상대 자료(2010.1.1~2012.11.30)를 이용하였다.

(2) 모니터링 지점

모니터링 지점은 저수지 상류 유입부인 JD1, 중류에 위치한 JD2, 저수지 중앙의 수심이 가장 깊은 JD3으로 대별하였으며, 일정 간격으로 구분하였다. 연구기간 동안 호중앙부(JD3)의 수심은 3.0~4.0 m(평균 3.5 m)의 분포를 보였으며, 저수율은 85.6~100 %의 범위(평균 95.3 %)를 보였다.



<그림 2.1> 모니터링 지점

(3) 조사항목 및 분석방법

모니터링 조사항목은 수심, SD, 수온, DO, pH, EC, COD, SS, TN, TP, Chl-*a* 및 동·식물플랑크톤으로 연구대상지인 전대저수지의 시기별 수질 변화, 식물플랑크톤 변화 및 녹조발생 특성, 동물플랑크톤 분포 특성에 대해 분석하였다.

수심(depth, m)은 현장에서 수심측정기(SPEEDTECH, SM-5)를 이용하여 측정하였으며, Secchi disk를 이용하여 투명도(SD, m)를 측정하였다. 또한, 종합수질측정장치(YSI ProPlus)를 이용하여, 수온(W.temp., °C), 용존산소량(DO, mg/L), 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC, µS/cm)를 측정하였다.

현장에서 채수한 시료는 실내에서 화학적 산소요구량(COD, mg/L), 부유물질(SS, mg/L), 총질소(TN, mg/L), 총인(TP, mg/L), 인산염인(PO₄-P, mg/L) 엽록소-*a*(Chl-*a*, mg/m³) 항목에 대한 분석을 실시하였으며, 분석방법은 수질 오염공정시험기준(환경부, 2011)에 준하였으며, 표 2.1과 같다.

(표 2.1) 수질분석 항목 및 방법

Parameter	Method	Preservation and pretreatment	Materials
depth	-	Direct measuring	SPEEDTECH, SM-5
SD			Secchi disk
W.temp.			YSI ProPlus
DO			
pH			
EC			
COD	Acid digestion by KMnO ₄	add H ₂ SO ₄ conc.(<pH 2) preserved in low temp.	-
SS	Filtering method of GF/C	-	-
TN	UV Spectrophotometric method	add H ₂ SO ₄ conc.(<pH 2) preserved in low temp.	Spectrophotometer HP 8453
TP	Spectrophotometric method (Ascorbic acid)	add H ₂ SO ₄ conc.(<pH 2) preserved in low temp.	Spectrophotometer HP 8453
PO ₄ -P	Spectrophotometric method (Molybdenic acid)	Filtered by GF/C, and preserved in low temp.	Spectrophotometer HP 8453
Chl- <i>a</i>	Spectrophotometric method (Aceton extraction)	Extraction of filtered GF/C by acidified aceton	Spectrophotometer HP 8453

(4) 부영양화 및 녹조발생현황

본 전대저수지의 부영양화지수(Trophic State Index, TSI) 분석을 위하여, 총질소(TN)는 Kratzer and Brezonik(1981)의 지수산정방식을 따랐으며, 총인(TP), 엽록소-a(CHL), 투명도(SD)는 Carlson(1977)의 지수산정 방식에 따랐다.

$$TSI(TN) = 14.43 \times \ln(TN, \text{mg/L}) + 54.45$$

$$TSI(TP) = 14.42 \times \ln(TP, \mu\text{g/L}) + 4.15$$

$$TSI(\text{CHL}) = 9.81 \times \ln(\text{CHL}, \text{mg/m}^3) + 30.6$$

$$TSI(\text{SD}) = -14.41 \times \ln(\text{SD}, \text{m}) + 60$$

전대저수지의 녹조발생 특성을 살펴보기 위해 투명도(SD)와 Chl-a, 식물플랑크톤 현존량을 분석하여 비교하였다. 식물플랑크톤은 현장에서 채수 고정해온 시료에 대하여 현존량과 출현종을 분석하였다. 균일하게 혼합시킨 고정시료를 Sedgwick-Rafter Chamber를 이용하여 광학현미경(Zeiss Axiophot) 아래에서 200배로 계수하고 400배로 동정하였으며, 정(1993), 수자원연구소(2000) 등의 문헌을 참고하였다.

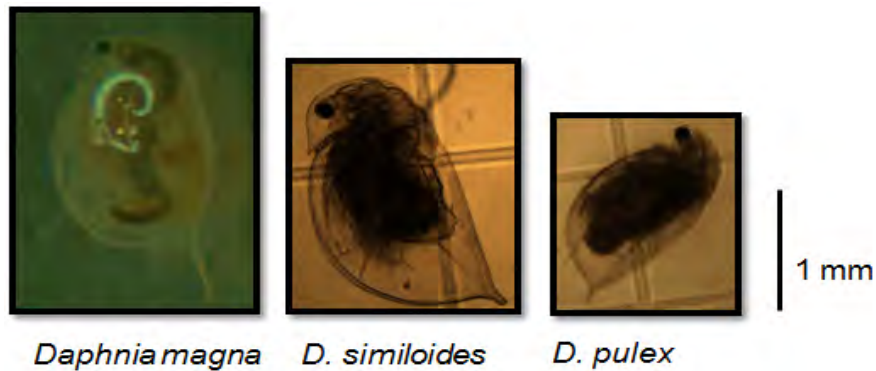
(5) 동물플랑크톤 및 천적생물 분포현황

연구대상지인 전대저수지에 자연 서식하고 있는 동물플랑크톤 분포와 그 중 천적생물로써의 기능을 하는 천적생물의 시공간분포를 파악하고 천적생물로 활용하기 위해 동물플랑크톤 군집의 종조성과 개체군 밀도 변화를 각 정점에서 정기 모니터링 하였다. 동물플랑크톤을 분석하기 위해 플랑크톤네트(망목 63 μm)로 저층 0.5 m 이상 지점부터 수직 예인하여 동물플랑크톤을 분리하고 포르말린으로 고정하였다. 고정된 시료는 광학현미경을 통해, 속 또는 중 수준으로 동정, 계수한 후 여과량을 산술 계산하여 군집조성과 개체군 밀도의 계절 변화를 분석하였다.

2. 천적생물 종주 분리 및 종주의 최적 배양기술 개발

가. 녹조원인종에 대한 포식능이 우수한 천적생물 종주분리

연구대상지인 전대저수지의 녹조제어를 위한 천적생물을 분리하고 녹조제어 효과를 분석하기 위해 수역에 자연 서식하는 천적생물의 시공간 분포의 변화를 파악하고, 먹이망 구조를 정량적으로 평가하여 대상 천적생물의 생태계 내에서의 위치와 기능을 분석하였다.



<그림 2.2> 천적생물 후보종(*Daphnia* 속)의 형태와 크기 비교

천적생물 종주 후보종으로는 대형 플랑크톤이면서 단위개체 당 식물플랑크톤 섭식능력이 뛰어난 *Daphnia magna*, *Daphnia similoides*, *Daphnia pulex* 등 *Daphnia* 3종을 대상으로 다양한 조건에서 증식경향을 분석하였으며, 현장살포에 적용이 용이하고, 포식효과가 뛰어난 종을 선별하기 위한 배양 시험을 실시하였다. *D. similoides*와 *D. pulex*는 국내에서 채집, 배양, 증식된 종을 사용하였고, *D. magna*는 외래종으로 독성시험용 스탠다드 키트에서 부화한 개체를 증식시켜 실험에 사용하였다.

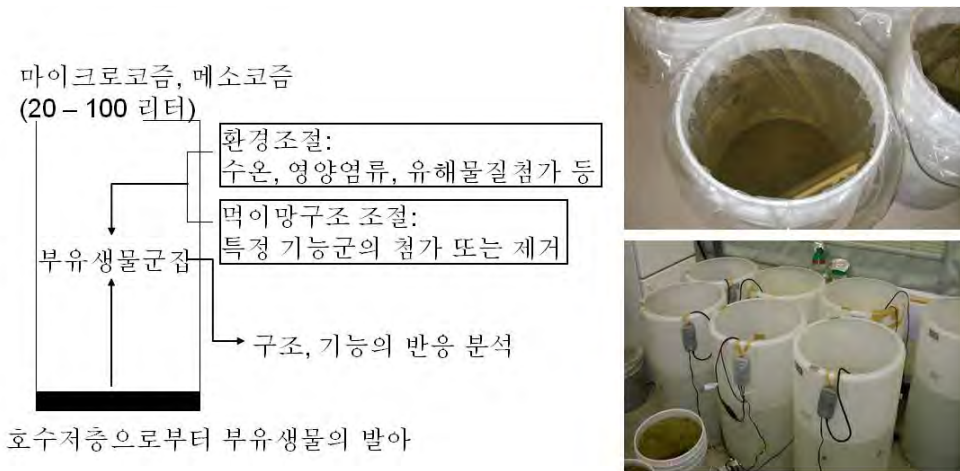
세 후보종의 기본적인 성장속도를 비교, 평가하기 위해 동일한 배양온도(25 °C), 적정 먹이양(클로렐라, 6.6×10^5 cells/ml) 조건에서 개체군 성장을 비교하였다. 또한 다양한 먹이조건과 온도에서의 성장을 비교하기 위해 먹이농도를 저농도(3.3×10^5 cells/ml), 중농도(6.6×10^5 cells/ml), 고농도(2.0×10^6 cells/ml) 조건에서, 수온 20, 25, 30 °C로 변화시킨 조건에서 실험한 후 평가하였다.

3종의 천적생물 후보 종들의 녹조제어능력을 평가하기 위해서 녹조 번성 시기의 부영양화된 저수지인 기흥저수지와 전대저수지의 원수를 이용하여 실험실 조건에서의 녹조제어 섭식실험을 실시하였다. 평가 방법은 채수된 원수를 500 ml의 실험용 용기에 투입시킨 후 후보 천적생물인 *D. pulex* 와 *D. similoides* 개체군 밀도를 저, 중, 고밀도로 조절, 투입하여 실험실 배양 조건에서 녹조제어 능력을 잔존 클로로필 농도를 측정하여 실시하였다. 실험은 배양기 내 25 °C, 암조건에서 48시간 동안 진행되었으며 식물플랑크톤의 침전을 막기 위해 2~3시간 간격으로 실험수를 상하 혼합시켜 주었다. 실험 후 투입된 *Daphnia*의 생존여부를 확인 후 포르말린 용액에 고정하여 보관하였다.

나. 천적생물 종주 농축배양(100 L) 및 현장배양 최적조건

천적생물 종주로서 녹조제어능이 우수한 *Daphnia*를 녹조 발생 시기에 맞추어 천적생물 배양장치에 원활히 공급하고, 성능평가 실험에 이용하기 위해 100L이하 규모의 증식수조를 설치하여 천적생물 종주의 최적의 배양조건과 종주배양 장치를 개발하였다. 종주배양 수조에서 증식된 *Daphnia*를 천적생물배양장치에 투입하기 전 현장조건에서 환경적응과 빠른 증식을 유도하기 위해 휴면란을 발아시켜 군집을 유지하면서 분리, 배양하였다.

녹조제어 능력이 검증된 국내 서식종 *Daphnia pulex* 및 *Daphnia similoides*를 분리하여 50~75 L 실내 배양수조에서 1차 배양을 실시하며, 최적 배양 조건을 도출하기 위한 반복 배양 실험을 실시하였다.



<그림 2.3> *Daphnia pulex* 및 *Daphnia similoides* 1차 배양 실험

3. 천적생물 배양장치 개발 및 기능향상

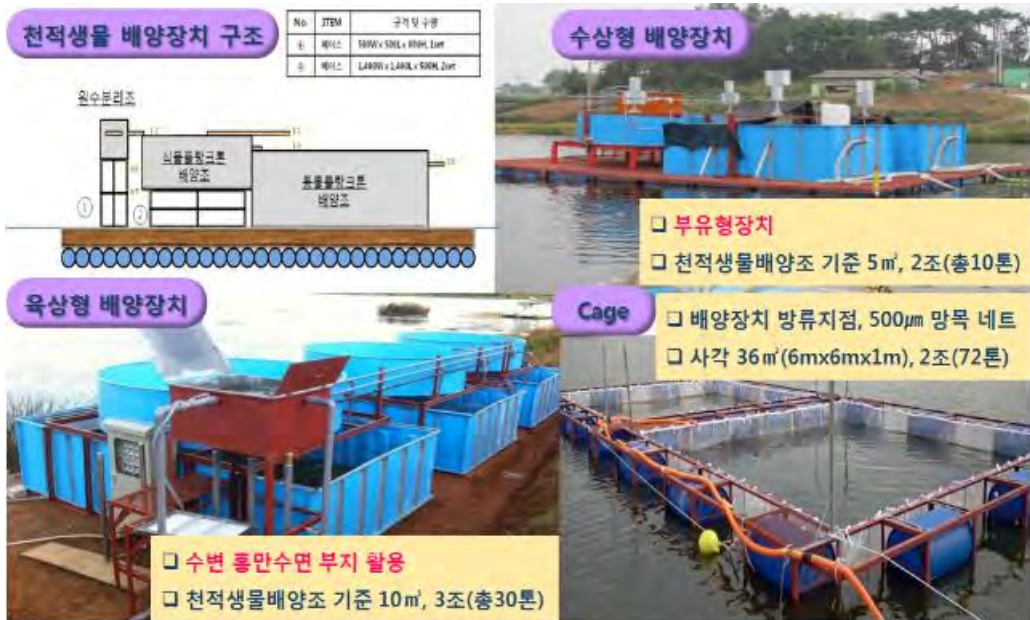
가. 천적생물 배양장치 개발

천적생물 배양장치는 저수지내 녹조발생지역의 특성과 소요부지 및 현장 살포의 적용성 등을 고려하여 2010년에 수상형 장치로 제작하였다. 배양장치는 4~7월동안 시설구상한 뒤 강우기 이후 8월초에 설치 완료하여 8월 한달간 시운전을 시행하였다. 시설규모는 동물플랑크톤 배양조를 기준하여 5 m³ × 2조, 총 10 m³으로 설치하였고, 체류시간으로 유입량을 결정하여 원수 분리조와 식물플랑크톤(먹이공급) 배양조의 규모를 결정하였다.

2011년에 시설안전성이 높은 육상형 배양장치를 저수지 우안의 홍만수면 부지에 설치하였으며, 시설규모는 동물플랑크톤 배양조를 기준하여 10 m³ × 3조, 총 30 m³으로 강우기 이후 8월말에 설치 완료하였으며, 9월 한달간 시운전을 시행한 후 10월부터 배양실험을 할 수 있었다.

나. 배양장치의 기능향상

배양장치의 기능향상을 위해 배양장치내 경사판 도입 및 내부 산소공급 장치 개선 등을 실시하였다. 배양장치내 경사판은 동물플랑크톤 사체 및 분비물 퇴적으로 인한 환경 악화를 개선하고자 배양조내 경사판을 설치하여 자연방류 할 수 있도록 하였으며, 내부 산소공급 장치는 기포 사이즈가 커서 동물플랑크톤 손상되는 점을 개선하기 위해 기포 크기와 양을 미세하게 조절하였다. 또한 천적생물 보호 방안으로 도입된 cage는 현장살포 시 일부 천적생물의 방류가 안되는 문제점을 개선하고, 배양장치와 cage를 연계한 현장 증폭 운영방안을 확보하였다,



<그림 2.4> 천적생물 배양장치 구조 및 특성

4. 천적생물 배양장치의 대량배양 성능 및 녹조제거 특성

가. 천적생물 배양장치 최적 배양조건 실험

천적생물 배양장치의 최적배양조건을 검토하기 위해 수상형 배양장치

를 대상으로 배양과정중 수환경 변화와 배양조건 별 동물플랑크톤 성장특성을 비교 분석하였다.

먼저 배양과정 중 수온, pH, DO에 의한 영향과 영양염류(TN, TP) 고갈 등 환경조건 변화를 살펴보고자 배양기간 동안 수환경 변화를 조사하였다. 조사지점은 유입(Inflow), 식물플랑크톤 배양장치(A-p, B-p), 동물플랑크톤 배양장치(A-z, B-z)로 구분하였다.

배양조건 실험은 2010.9.16~10.21에 걸쳐 실시하였으며, 체류시간(2일, 4일, 6일), 식물플랑크톤 먹이비율(50 %, 60 %) 실험을 실시하였다. 인공식물섬 적정면적은 국토해양부(2010)의 연구결과를 준용하여 40 % 면적으로 하였다.

(표 2.2) 천적생물 배양장치 조건운영

실험	기간	Set	체류시간	먹이비율	인공식물섬	차단막	비고
1차	2010.9.16 ~9.27	A	2일	60:40	적정면적 40 %	적정면적 50 %	체류시간
		B	4일				
2차	2010.9.30 ~10.8	A	4일	60:40			
		B	4일	50:50			먹이비율
3차	2010.10.13 ~10.21	A	4일	60:40			
		B	6일				체류시간

배양장치의 체류시간은 용기와 스톱위치를 이용해 유입량을 조절하여 결정하였으며, 각 배양장치를 대상으로, 현장수질측정은 종합수질측정장치(Hydrolab, Quanta-Z)를 이용하여, 수온(W.temp.), 용존산소량(DO)을 측정하였고, 현장에서 채수한 시료는 즉시 일반시료와 황산전처리 시료로 구분하여 저온상태로 보관하여 분석실로 운반하여 총질소(TN), 총인(TP), 인산염 인(SRP), 엽록소-a(Chl-a) 항목에 대해 분석을 실시하였다.

식물플랑크톤은 500 ml 채수통에 직접 담아 lugol's solution으로 2 %가 되게 고정하였다. 동물플랑크톤 채집은 2 L 비이커를 이용하여 채수한 후 플랑크톤 네트(망목 63 μm)에 거르는 작업을 5회 반복하여 총 10 L 정량채집을 하였다. 조사지점 시료는 모두 현장에서 5 % 포르말린으로 고정하였다.

이때, 수질 및 동·식물플랑크톤의 시료 채수는 조사기간 중 매일 동일 시간(15시)에 실시하였다.

나. 자연분리 천적생물 배양성능

수상형 배양장치를 대상으로 봄철 4.19~5.17과 가을철 11.4~11.11에 녹조발생 수역인 전대저수지에 서식하는 천적생물을 자연분리하여 대량배양성

능을 분석하였다. 실험기간동안 배양장치 내 수질변화 및 동·식물플랑크톤의 변화량을 표 2.3과 같은 운영조건으로 실험하고 분석하였다. 모니터링 지점은 10 m³ 배양장치는 그림 2.5와 같이 유입(Inflow1), 식물플랑크톤 배양조(A-p), 동물플랑크톤 배양조(A-z)로 구분하였고, 30 m³ 배양장치는 그림 2.6과 같이 유입(Inflow2), 식물플랑크톤 배양조(B-p), 동물플랑크톤 배양조(B-z)로 구분하였다.

(표 2.3) 천적생물 배양장치 운영조건

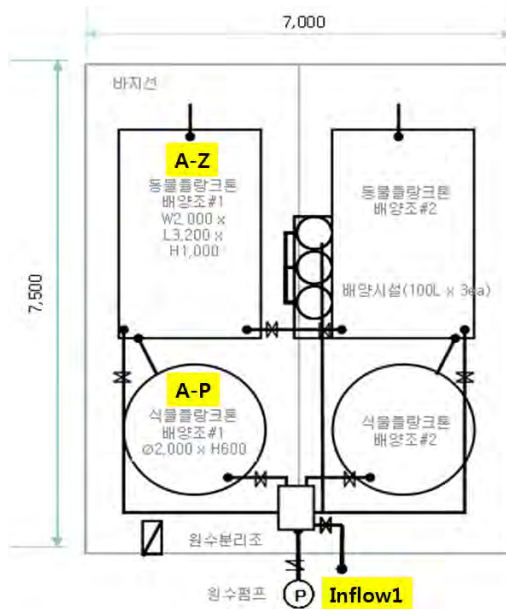
기간		천적생물	모니터링 지점	분석 내용
1차	2011.4.19~5.17	자연분리종	Inflow1, A-p, A-z	수온, DO, COD, Chl- <i>a</i> , TN(태별), TP(태별), 식물플랑크톤(500 ml), 동물플랑크톤(45 μm net, 10 L)
2차	2011.11.04~11.11	자연분리종	Inflow1, A-p, A-z, Inflow2, B-p, B-z	수온, pH, Chl- <i>a</i> , TN, TP(태별), 식물플랑크톤(500 ml), 동물플랑크톤(45 μm net, 10 L)

다. 천적생물 종주의 배양성능

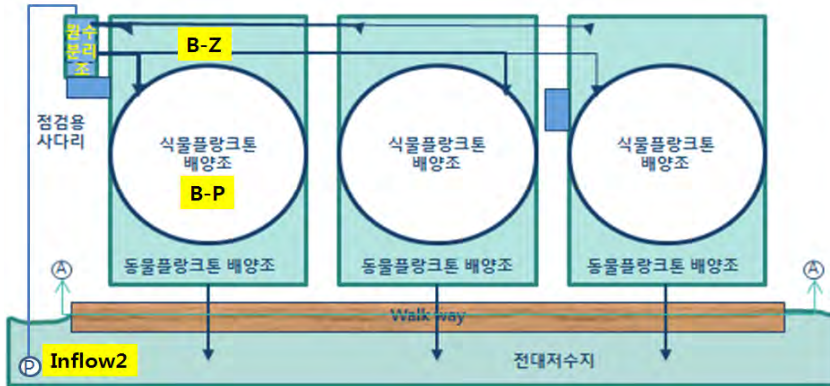
75 L 규모의 실내 배양수조에서 1차 배양된 천적생물 종주를 현장으로 이동하여 10 m³ 규모 수상형 천적생물 배양장치(5 m³, 2조)와 30 m³ 규모 육상형 천적생물 배양장치(10 m³, 3조)에 접종, 배양하여 대량배양성능을 분석하였다.

2011년에는 천적생물 배양장치에서 천적생물 종주의 배양 성능을 평가하기 위해 2개 배양조 중 한쪽은 천적생물 종주 배양, 다른 한쪽은 대조구로써 자연분리 천적생물 배양으로 구분하여 배양 특성을 비교분석 하였으며, 천적생물 배양 수조 내 수질변화와 투여된 천적생물의 개체군 밀도 변화를 표 2.3과 같은 조건으로 실험, 분석하였다. 또한, 저수지 중앙의 자연분포 천적생물과 동물플랑크톤 군집의 종조성, 개체군 밀도 변화를 분석하여 천적생물 배양장치내 천적생물의 대량 배양성능을 평가하였다.

2012년에는 원수에서 자연공급되는 자연분리종과 천적생물 배양장치에 인위적으로 도입한 천적생물이 공생하도록 하였으며, 연속배양을 통한 배양성능을 분석하였다.



<그림 2.5> 수상배양장치(10 m²) 조사 지점도



<그림 2.6> 육상배양장치(30 m²) 조사 지점도

5. 천적생물 현장살포에 따른 녹조제어 효과분석

가. 자연분리 천적생물 현장살포 효과분석

자연분리형 천적생물의 녹조제거 효과를 분석하기위해 2010년과 2011년에는 대량 배양한 천적생물을 녹조발생 수역에 일시 살포한 후 거리별, 시간별 천적생물 및 녹조원인 식물플랑크톤 개체수를 분석하였다

살포시험은 자체 제작한 관측 부표(drafter)를 활용하였다. 천적생물을 투입하기 전에 살포수역의 수평방향에 13개의 부표와 수직방향 8개의 부표를 띄우고 천적생물을 일시에 투입한 다음 각 부표에서 일정시간 단위로 동물플랑크톤과 식물플랑크톤 현존량을 분석하여 주요 이동방향과 범위에 따른 농도제거 효과를 분석하였다.

또한 표 2.4와 같이 살포 지점마다 수온, DO, COD, Chl-*a*, TN(태별), TP(태별)등을 함께 분석하였다.

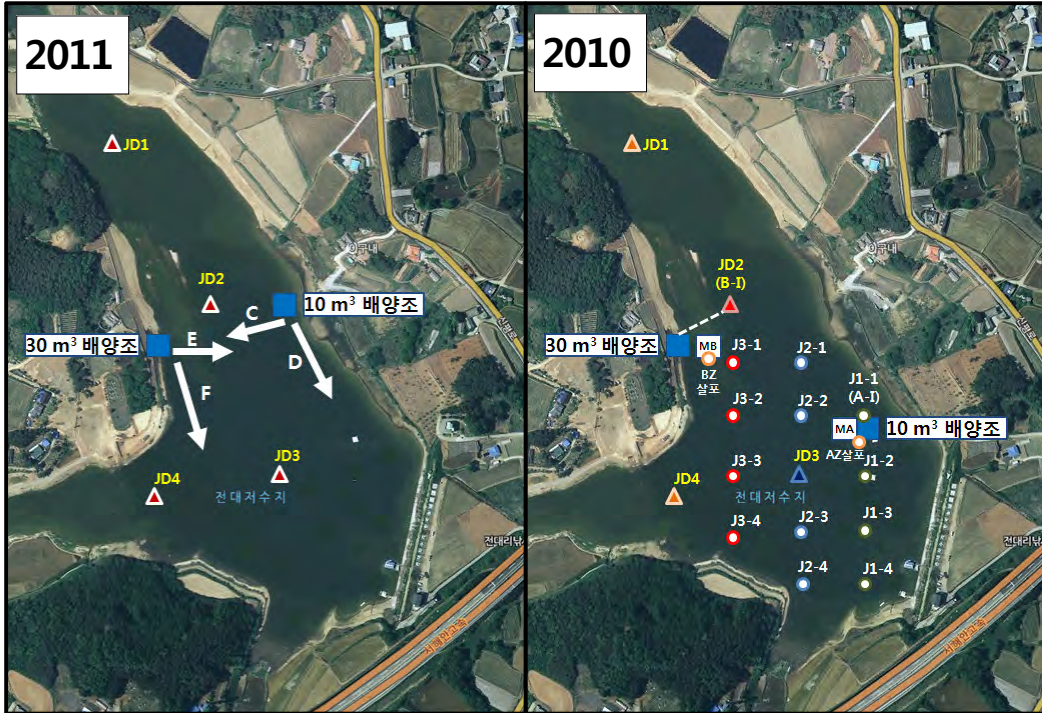
(표 2.4) 천적생물 살포효과 실험개요

기간	모니터링 시간	모니터링 지점	분석 내용	플랑크톤 분석	
1차	2010.10.21 ~11.2	t=0(투입전), 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12일	JD1, JD2, JD3 C1 ~ C8 D1 ~D13	수온, DO, COD, Chl- <i>a</i> , TN(태별), TP(태별),	식물플랑크톤(500 mℓ), 동물플랑크톤(63 μm net, 10L)
2차	2011.5.17~ 6.9	t=0(투입전), 2, 4, 6, 8, 10, 13, 16, 23일	JD1, JD2, JD3 C1 ~ C8 D1 ~D13	수온, DO, COD, Chl- <i>a</i> , TN(태별), TP(태별),	식물플랑크톤(500 mℓ), 동물플랑크톤(63 μm net, 10L)



<그림 2.7> 수상형 천적생물 배양장치 살포 지점

나. *Daphnia* 천적생물 현장살포 효과분석



<그림 2.8> *Daphnia* 대량 살포 지점(좌: 2011, 우: 2012)

Daphnia 천적생물의 녹조제거 효과 분석은 크게 2가지로 실시하였는데, 2011년에 실시한 살포 거리별 녹조제거 효과분석과 2012년에 실시한 등간격 정점에 따른 살포효과 분석이 그것이다.

2011년에는 자연분리 천적생물과 같이 살포지점을 중심으로 부표를 이용하여 살포 거리별 녹조제거 범위와 효과를 살펴보고자 10월 17일부터 11월 3일까지 천적생물 배양장치에서 대량 배양한 천적생물을 녹조발생 수역에 일시 살포한 후 거리별, 시간별 천적생물 및 녹조원인 식물플랑크톤 개체수를 분석하였다. 또한 그림 2.8과 같이 살포 지점마다 수온, DO, COD, Chl-a, TN(태별), TP(태별) 등을 함께 분석하였으며, 천적생물을 일시에 투입한 다음 각 부표마다 $t = 0$ (투입직전), 1, 3, 5, 7, 11, 14, 17일 단위로 동물플랑크톤과 식물플랑크톤 현존량을 분석하여 주요 이동방향과 범위에 따른 녹조제거 효과를 분석하였다.

2012년에는 저수지 수면을 등간격으로 구분하여 부표를 띄운 후 천적생물 살포이후 각 부표마다 $t = 0$ (투입직전), 1, 3, 5, 7, 11, 14, 17일 단위로

동물플랑크톤과 식물플랑크톤 현존량을 분석하여 주요 이동방향과 범위에 따른 녹조 제거 효과를 분석하였다.

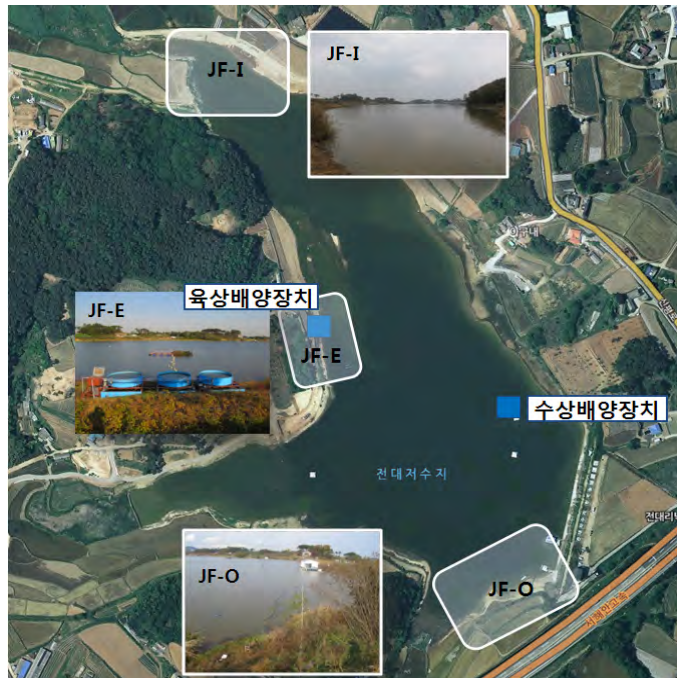
녹조 제거율 계산식은 다음과 같다

$$\{(\text{대조구 Chl-}a \text{ 농도} - \text{거리별 Chl-}a \text{ 농도}) / \text{대조구 Chl-}a \text{ 농도}\} * 100$$

다. 천적생물 살포구간에서의 어류포식 영향 및 먹이망 특성 분석

(1) 어류 분포 및 위내용물 분석을 통한 포식영향 분석

어류 모니터링은 전대저수지에 서식하는 어류의 종조성 및 섭식특성을 파악하기 위하여 실시하였으며, 조사시기는 천적생물 살포 전인 4월과, 살포 중인 10월, 살포 후인 11월로 대별하여 각 1회, 총 3회 실시하였으며, 조사도구는 투망(Casting net, 망목 7 × 7 mm)과 족대(Kick net, 망목 4 × 4 mm)를 이용하였고, 채집자가 가슴장화의 착용으로 접근이 가능한 장소에서 60분간 조사를 실시하였다. 세부조사 지점은 그림 2.9와 같다.



<그림 2.9> 전대저수지 어류 모니터링 지점

채집한 어류는 Nelson(1994)의 분류체계를 따랐으며, 김과 박(2002), 이와 노(2006)에 의거해 동정 및 계수 후 바로 풀어주는 것을 원칙으로 하되, 어류의 위내용물 분석을 위하여, 종별·크기별로 1~5개체씩 현장에서 위장

을 적출하여 10 % 포르말린 용액으로 고정하였고, 해부현미경(Olympus SZX16, × 7~115)을 이용하여 위내용물을 분석하였다. 채집된 어류의 개체수를 산정할 때 어류체장의 길이가 20 mm 이하의 동정이 불가능한 치어 또는 위적출이 불가능한 개체는 제외하였다.



<그림 2.10> 어류 현장조사(좌: 투망, 우: 족대)

어류의 위내용물은 식물플랑크톤 및 기타 유기물에 대한 정밀한 분류는 불가능하여 제외하였으며, 정량적인 개체수 파악은 연구목적에 부합하도록 천적생물로 이용할 수 있는 동물플랑크톤(지각류, 요각류, 윤충류 등)에 대한 개체수만 파악하였다.

(2) 천적생물 살포구간에서의 먹이망 특성 분석

천적생물 배양장치에서 천적생물 중주인 *Daphnia*의 섭식성향을 파악하기 위해 안정동위원소비를 이용해 *Daphnia*가 수체의 식물플랑크톤을 섭취하는지, 수조에 부착된 유기물을 섭취하는지를 분석하였으며, 천적생물이 녹조 발생 수역에 살포 후 수역에 존재하는 녹조원인 생물을 섭식하여 녹조제어에 실제로 기여하는지를 살펴보았다.

탄소와 질소의 동위원소는 자연에 존재하는 안정동위원소의 비가 광합성과 섭식활동을 통해 일정 규칙을 따라 변화하는 현상을 응용한 방법으로 생물간 상호작용을 정량적으로 계산, 먹이망의 구조를 분석할 수 있게 하여 주며(Vander Zander and Rasmussen, 2001), 동물플랑크톤과 같이 위내용물 분석이 어려운 생물종의 섭식성향을 파악하는데 유용하게 사용된다(Doi et al. 2008; 2009). 특히, 위 내용물 분석이 불가능한 *Daphnia*의 영양단계를 정량적으로 평가함으로써, 어류를 정점으로 하는 복잡한 하천 생태계의 먹이망 구조를 간단히 파악할 수 있다(Polis and Strong, 1996; Yoshioka et al., 1994).

본 연구에서는 동위원소 분석을 위해 채집된 생물시료를 냉동보관, 안

정동위원소 측정기를 이용하여 질소, 탄소 안정동위원소비율을 이용하여 정량적으로 분석하였다. 각 시료의 동위원소비는 표준시료가 함유한 탄소와 질소의 동위원소비($^{13}\text{C} : ^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N} : ^{14}\text{N}$)를 기준으로 천분율로 나타낸 동위원소비를 측정하고(Vander Zander and Rasamussen, 2001), 먹이원 평가에는 탄소의 동위원소비를, 영양단계의 평가에는 질소동위원소비를 이용하여 먹이망내 생물학적 상호작용을 평가하였다.

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{측정시료}} = ([^{13}\text{C}/^{12}\text{C}]_{\text{측정시료}}/[^{13}\text{C}/^{12}\text{C}]_{\text{표준시료}} - 1) \times 1,000 (\text{‰})$$

6. 천적생물 배양장치의 규모 산정 및 설계인자

가. 저수지 규모 및 녹조발생 규모에 따른 배양장치 규모산정법

저수지규모와 녹조발생 정도에 따른 천적생물 배양장치의 규모산정은 천적생물의 남조류 섭식실험을 통해 도출된 값을 기준으로 계상하였다.

또한, 살포 후 녹조발생 구역에서의 현장증식 속도를 감안하여 그 규모를 최적화 하였다.

나. 저수지 규모별, 녹조발생 정도에 따른 천적생물 배양장치 설계인자

저수지 규모별, 녹조발생정도에 따른 천적생물 배양장치 규모 산출 결과를 바탕으로 현장적용시 감안해야할 배양장치 설계인자를 본 연구기간동안의 시행착오를 모두 감안하여 최적화하였으며, 현장 실무직원이 이해하고, 적용할 수 있도록 세부적인 설계인자를 제시하였다.

제2절 농업용저수지의 녹조발생 특성 및 전대저수지 수환경모니터링

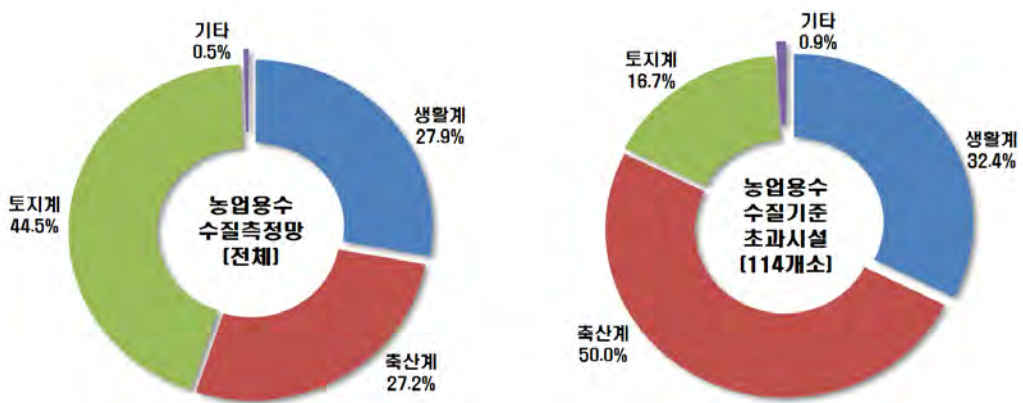
1. 농업용저수지의 녹조발생 특성

가. 농업용저수지의 녹조발생 원인

농업용저수지에서 가장 빈번하게 녹조를 유발하는 종은 남조류에 속하는 *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Aphanizomenon* 속의 종들이다.

앞서 언급한 바와 같이 녹조, 즉, 식물플랑크톤이 대발생하기 위해서는 이들이 최적으로 성장할 수 있도록 하는 여러 가지 조건이 필요하다. 식물플랑크톤의 광합성작용에 충분한 일조량(태양에너지), 식물플랑크톤의 성장에 적합한 적정수온과 질소, 인 등의 영양물질, 그리고, 부유성의 식물플랑크톤이 안정적인 자세를 유지할 수 있을 정도의 낮은 유속(체류시간) 등이 그것이다. 저수지, 담수호 등의 호수내 생태계에서 생산자인 식물플랑크톤을 포식하는 1차 소비자의 군집 크기가 식물플랑크톤의 군집크기를 조절하기 때문에 녹조발생에 중요 요인이 되고 있다.

농업용 저수지에서 인간의 활동에 의한 녹조발생 원인이 되고 있는 유역으로부터 유입되는 주 오염원 분포 특성을 보면, 농업용수 수질측정망 전체 지구에서는 토지계가 44.5 %로 생활계 27.9 %, 축산계 27.2 % 보다 높은 분포를 보였으나, 농업용수 수질환경기준(IV등급)을 초과한 114개소에 대해서는 축산계가 57개소(50.0 %)로 가장 많았고, 생활계 37개소(32.4 %), 토지계 19개소(16.7 %), 산업계 1개소(0.9 %) 등의 순으로 나타나 녹조발생 가능성이 높은 저수지에서는 축산계에 기인한 오염물질이 주요함을 알 수 있었다.



<그림 2.11> 농업용수 수질측정망 지구의 주요오염원 구성 현황(농식품부, 2011)

또한, 농업용저수지와 같은 경우 저수지 축조시기와 저수지의 평균수심, 유역면적과 제당높이의 비, 유역경사 등 물리 구조적 특성이 녹조 발생에 영향을 미칠 수 있다.

(표 2.5) 저수지 축조시기에 따른 수질기준(COD) 초과시설 수(농식품부, 2011)

구 분		계	1945년 이전	1946 ~ 1959년	1960 ~ 1969년	1970 ~ 1979년	1980 ~ 1989년	1990 ~ 1999년	2000년 이후
조사시설수(개소)		825	129	139	121	132	135	107	62
평균COD(mg/L)		5.3	7.1	6.2	5	5	4.5	4.3	4.3
Ia등급	(2이하)	10	-	2	1	-	2	2	3
Ib등급	(3이하)	101	3	6	20	11	23	23	15
II등급	(4이하)	197	12	24	22	43	43	35	18
III등급	(5이하)	163	19	25	29	32	29	20	9
IV등급	(8이하)	240	52	50	40	32	31	22	13
V 등급	(10이하)	74	27	19	8	10	6	2	2
VI등급	(10초과)	40	16	13	1	4	1	3	2
농업용수 수질기준 초과시설 수		114	43	32	9	14	7	5	4

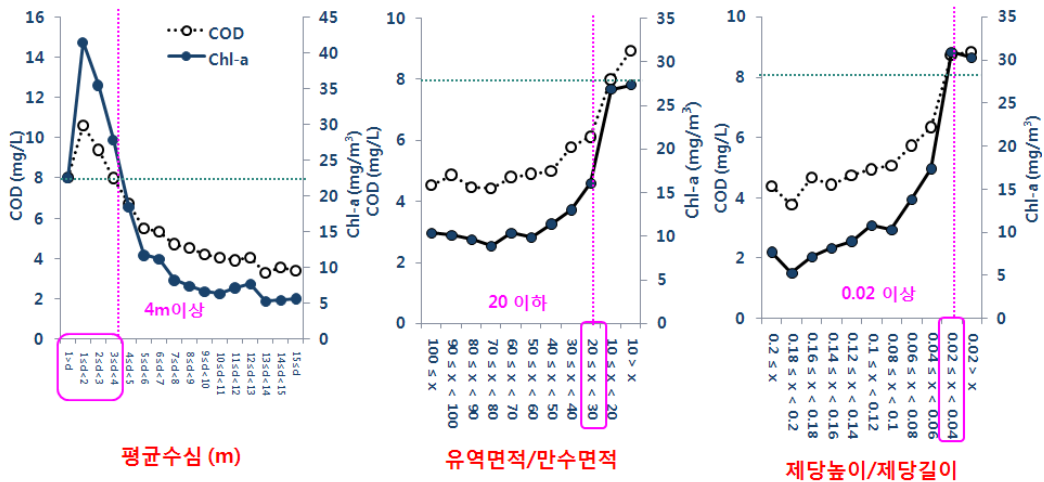
표 2.5에서와 같이 저수지 축조시기가 오래될수록 농업용수 수질 권장 기준(COD)을 초과하는 저수지의 수가 증가하였는데, 특히, 전체 825개 농업용수 수질측정망 저수지 지구중 32 %를 차지하고 있는 1959년 이전 축조된 저수지의 경우 수질 V등급 62 %, 수질 VI등급 73 %를 보이고 있는 것으로 나타났으며, 1959년 이전 축조저수지의 28 %가 수질기준을 초과하고 있었다. 축조시기가 오래될수록 오랜기간 오염물질의 퇴적과 재용출 가능성이 높고, 퇴적량 증가에 따른 저수용적 감소 등 부영양화 진행을 촉진하기 때문이다.

저수지의 평균수심은 유효저수량을 만수면적으로 나누어 나온 유효수심으로 1995년부터 2010년 까지 농업용수 수질측정망 수질자료와 비교하여 살펴본 결과, 수심 4m 이하에서 클로로필 a(Chl-a) 와 COD 농도가 급증하여 수질기준을 초과하고 있어 저수지 수심이 4m 이하일 때 녹조발생 위험이 높은 것으로 나타났다.

유역면적/만수면적 비는 강수 등에 의한 저수지 유입유출량의 의미로 저수지의 체류시간과 연계된다. 다시말해 유역면적/만수면적 비가 클수록 유

역으로부터 유출되는 수량이 증가하여 저수지의 체류시간이 그만큼 짧아지는 효과를 보이는 것이다. 따라서, 그림 2.12와 같이 유역면적/만수면적의 비가 클수록 Chl-a 농도가 안정적으로 나타나고 있는 것을 알 수 있으며, 유역면적/만수면적비가 20이하일 때 Chl-a의 급격한 증가가 나타나 20이하의 유역면적/만수면적비가 녹조발생에 유리한 조건을 제공하고 있음을 알 수 있다.

제당높이/제당길이의 비는 저수지의 형상을 나타내는 지표이다. 다시말해 저수지의 형상을 물그릇에 비유하면, 제당높이가 높을수록 물그릇은 깊은 사발형태가 되고, 제당길이가 길어지면 폭이 넓은 접시 형태가 되는 것으로, 제당높이가 낮을수록, 제당길이가 길수록, 즉 지수가 낮을수록 납작한 접시에 가까워져 녹조발생에 유리한 저수지 형상이 되는 것이다. 몇몇 복잡한 형태의 저수지가 있지만 단순화한 형태로 가정하였을 때 적용가능한 지수이다. 농업용수 수질측정망 지구의 제당높이/제당길이에 따른 수질 평균값은 도시한 결과 0.04이하에서 급격히 증가하고 있어 제당높이/제당길이의 비가 0.04이하일 때 녹조발생 가능성이 높아지는 것으로 나타났다.

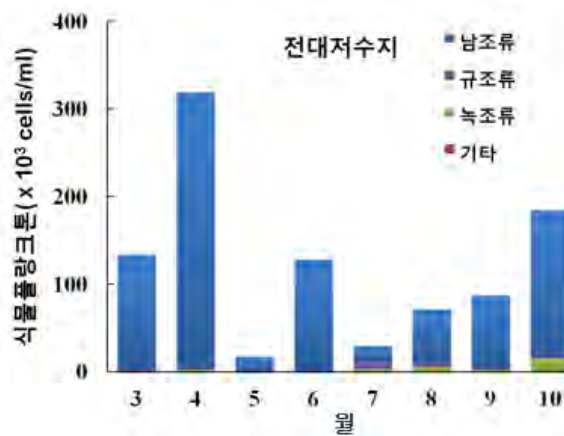


<그림 2.12> 평균수심(유효저수량/만수면적 비), 유역면적/만수면적, 제당높이/제당길이 비 등에 따른 녹조발생 특성

따라서, 농업용저수지에서는 녹조발생 원인으로써 들 수 있는 일반적인 환경 특성, 즉, 빛, 온도, 영양물질, 생태계먹이구조 외에 저수지의 수심, 형태, 물순환율 등과 같은 물리구조적 특성 역시 녹조발생의 주요인자로서 저수지 녹조관리 및 수질관리의 지표로 사용하고 있다.

나. 농업용저수지의 녹조발생 현황

농업용저수지는 대형 댐호 보다 규모가 매우 작은 편에 속하므로 녹조 발생 형태도 당연히 차이가 난다. 겨울철 결빙시기를 지난 후 2월 중하순에 해빙이 되면서 물그릇이 작고 수심이 낮아 수온 증가가 빠르게 일어나며 그에 따라 식물플랑크톤의 성장도 빠르게 일어나 4월에 일반적으로 급증한다. 이시기에 녹조가 발생하는 경우가 많다. 5월에 동물플랑크톤의 최적성장기가 되면서 때에 따라 일시적인 청수 현상도 관찰되지만, 6월에 관개용수의 사용 증가에 따른 저수율 감소와 고농도 오염물질이 포함된 농경배수의 유입으로 식물플랑크톤의 일시적 우세가 나타난다. 이후 장마, 태풍 등 강우기에 접어들면서 혼조세를 보이다가 9~10월 강우기동안 유입된 영양물질과 풍부한 일사량, 수중식물의 사멸과 분해, 성층파괴로 인한 저층 오염물질 부상 등 여러 요인들로 인해 식물플랑크톤의 성장에 최적의 환경이 제공되면서 녹조발생이 심화된다.



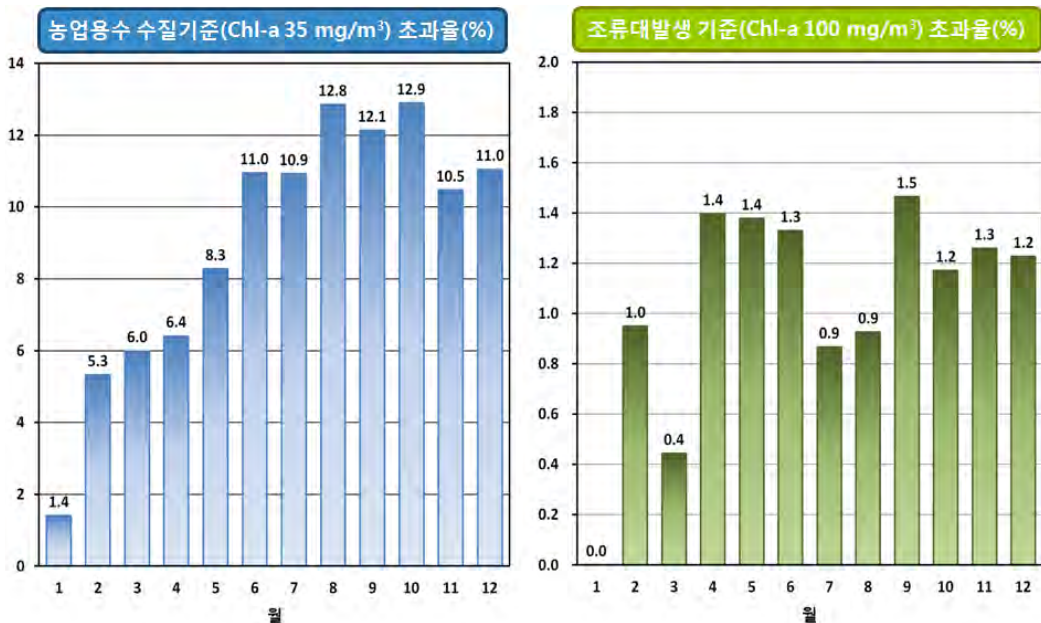
<그림 2.13> 부영양 농업용저수지의 시기별 식물플랑크톤 현존량

시기적으로 발생하는 식물플랑크톤의 종조성과 현존량은 저수지의 규모와 영양상태, 녹조발생 정도에 따라 다양하게 나타난다. 일반적으로 수온이 낮은 3월, 10월의 경우 규조류가 증가하다가 남조류로 천이되는 것으로 예상하지만 그림 2.13에서와 같이 부영양화가 심각한 농업용저수지의 경우 3~10월까지 모든 시기에 남조류가 극우점하고 있는 것을 볼 수 있으며, 규조류와 녹조류의 비율은 상대적으로 매우 낮게 나타나 부영양 저수지의 종 단순화가 심각함을 알 수 있다.

2008년~2010년 동안 농업용수 수질측정망 수질자료(Chl-a, 7,532개)를 이용하여 농업용저수지의 월별 조류발생 특성을 Chl-a 농도 변화로 살펴본 결과 농업용수 수질기준으로 사용되고 있는 환경기준 IV등급의 Chl-a 35 mg/m³ 초과율은 1월에 1.4 %로 최소값을 보인 후 점차 증가하여 6월~12월동안 10.5~12.9 %로 10 %를 초과하고 있다(그림 2.14). 특히, 8월과 9월에 최고 초과율을 보이고 있으며, 저수온기인 12월에도 11 %의 높은 초과율을 유지하여 농업용저수지의 조류성장이 결빙기 이전까지 계속 이루어지고 있음을 보여준다. 또한, 조류대발생 기준인 Chl-a 100 mg/m³ 초과율은 결빙기인 1월과 3월, 강우기인 7, 8월을 제외하면 1 % 이상의 수준을 보였으며, 9월에 최고 수준을 보여주었다. 결과적으로 농업용저수지의 녹조발생현황은 농업용수 기준 Chl-a 35 mg/m³ 적용시 약 10 %, 조류대발생 기준인 100 mg/m³ 적용시 약 1 % 수준으로 간주해도 무난할 것으로 사료된다.

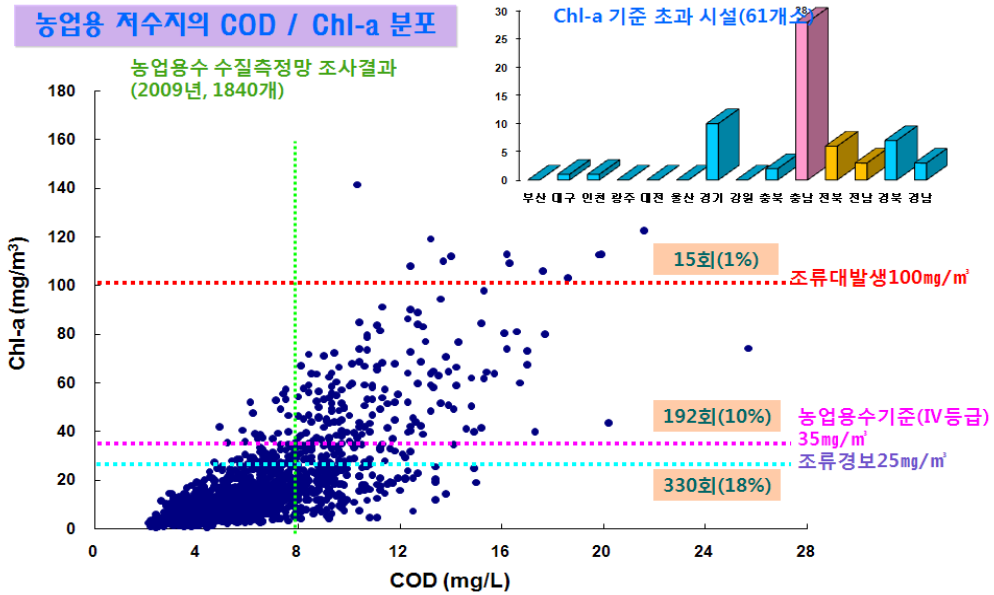
그림 2.15와 같이 농업용수 기준인 35 mg/m³ 초과율은 10 % 정도, 조류대발생인 100 mg/m³ 초과율은 1 % 수준을 보여주고 있으며, 지역별로는 충남 지역의 초과율이 높게 나타났다.

이와 같은 농업용저수지의 조류성장 특성은 저수지의 수환경 특성을 반영하고 있으므로 최근 5년간 농업용수 수질 측정망 지구 저수지의 월별 수질환경 특성과 Chl-a 변화를 평균하여 살펴보았다(그림 2.16).



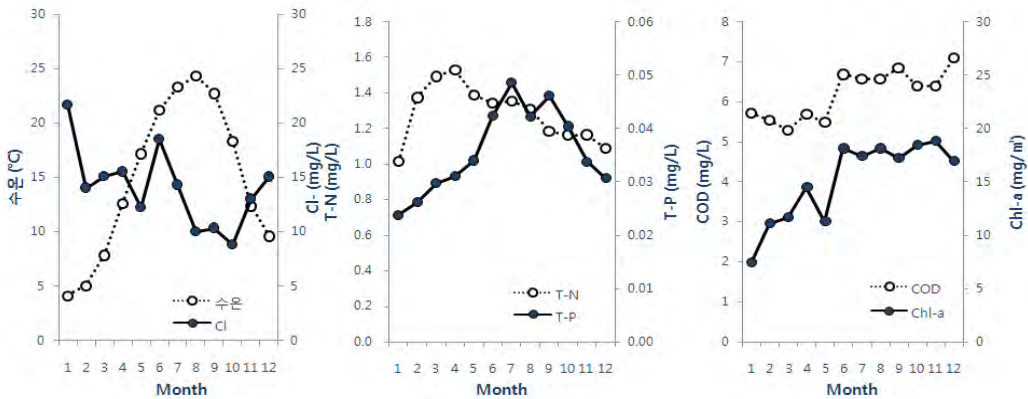
<그림 2.14> 농업용저수지의 월별 Chl-a 초과율

수온은 1월에 5°C 이하로 가장 낮게 나타났으며, 8월에 약 25°C로 가장 높았고, 12월에도 평균 10°C 수준을 유지하는 등 3월의 8°C 보다 높은 수준을 보이고 있어 12월에도 녹조발생 가능성이 있음을 보여준다.



<그림 2.15> 농업용저수지의 COD 대비 Chl-a 분포 특성

총질소(TN)는 3~4월에 가장 높은 수준을 보이고 있는 반면, 총인(TP)은 강우기 초기인 7월에 가장 높은 값을 보였다. COD와 Chl-a는 6월 이후 증가하여 12월 까지 지속적으로 높은 값을 유지하고 있는데, 이는 농업용저수지에서 조류성장이 총질소의 유입보다는 수온의 변화와 총인의 유입에 영향을 받고 있는 것으로 보였다.

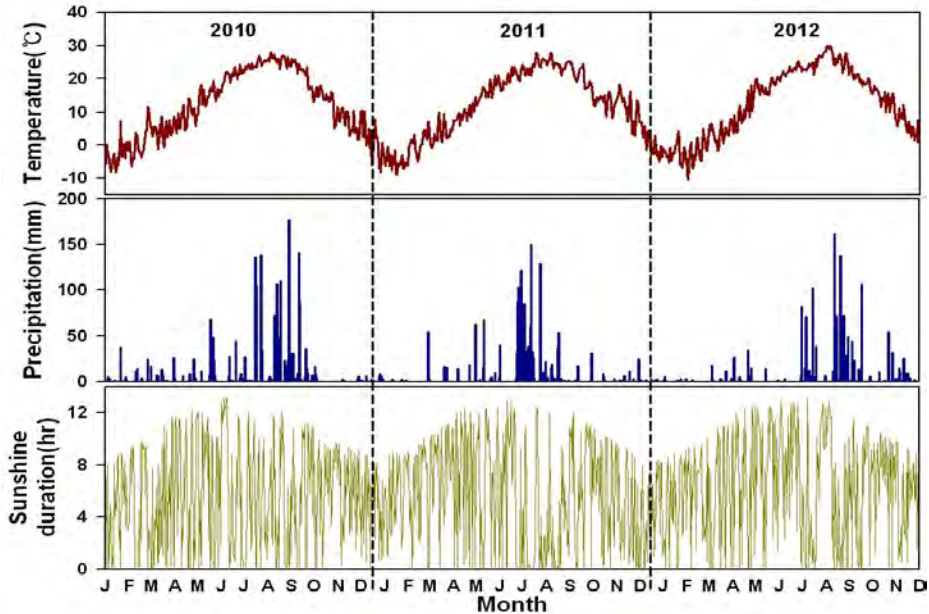


<그림 2.16> 최근 5년간 농업용수 수질측정망 지구의 월별 수환경 특성과 Chl-a

2. 전대저수지의 수환경 특성

가. 기상현황

기상자료는 기상청(<http://www.kma.go.kr>) 서산기상대의 지난 3년간(2010년 1월~2012년 11월) 자료를 이용하여 분석하였다.



<그림 2.17> 전대저수지의 기상조건

전대저수지의 기온은 $-10.0 \sim 29.9$ °C로 1~2월에 영하의 낮은 기온을 보이고, 5월~10월초까지 식물플랑크톤의 최적생장온도인 15 °C 이상의 기온을 보였는데, 이는 또한, 천적생물 적용 최적온도이기도 하다.

연간 총 강수량은 2010년 2,141.8 mm, 2011년 1,704.4 mm, 2012년(~11월) 총 1,577.2mm의 강우가 발생하였으며, 시기별로는 2010년 7~9월에 72.7%(1,556.1 mm), 2011년 6~7월에 65.7%(1,119.1 mm), 2012년 7~9월에 70.8%(1,116.2 mm)로 강우가 집중하였다. 이와 같은 하절기에 집중된 강우형태로 인해 하절기 현장실험의 어려움이 있었으며, 집중강우 이후 안정기에 대규모 녹조발생이 우려되었다.

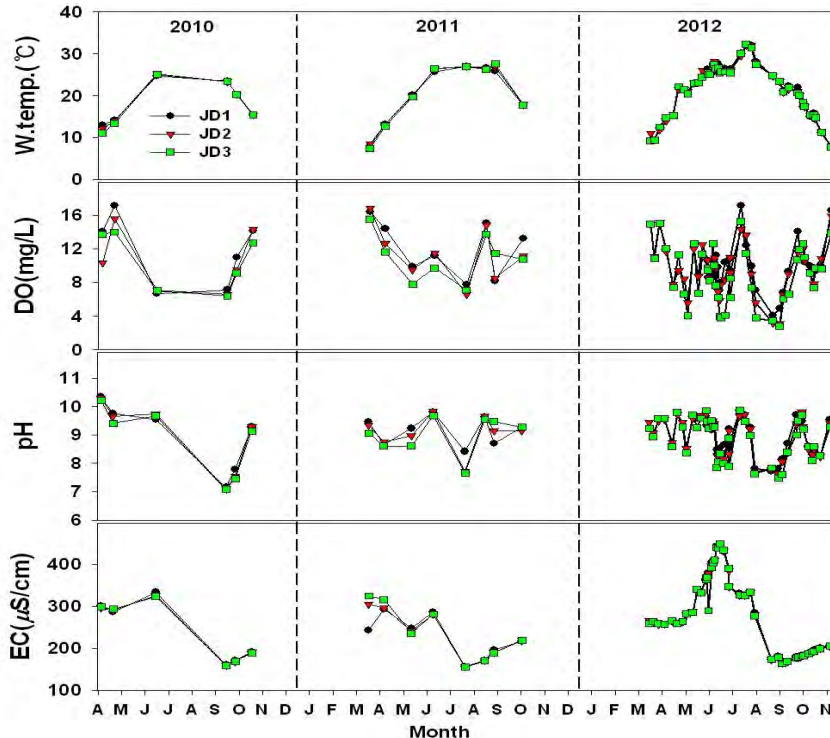
연간 평균 일조시간은 2010년과 2011년에 각각 5.4시간/일(1,984시간/년), 5.5시간/일(2,007시간/년)로 나타났고, 2012년에는 일 6.4시간(~11월 2,130시간)으로 2012년에 다소 높은 일조시간을 보여 녹조발생에 취약한 조

건을 보였다. 일조시간은 온도 및 영양염류와 함께 대규모 녹조발생의 주요 원인으로 알려져 있는데, 매년 녹조발생으로 문제가 되고 있는 대청호는 연간 2,373시간의 일조시간(일 6.5시간)을 보여(김, 2012), 전대저수지(2012년)와 큰 차이가 없는 것으로 나타나 녹조발생에 매우 유리한 조건을 제공하였다.

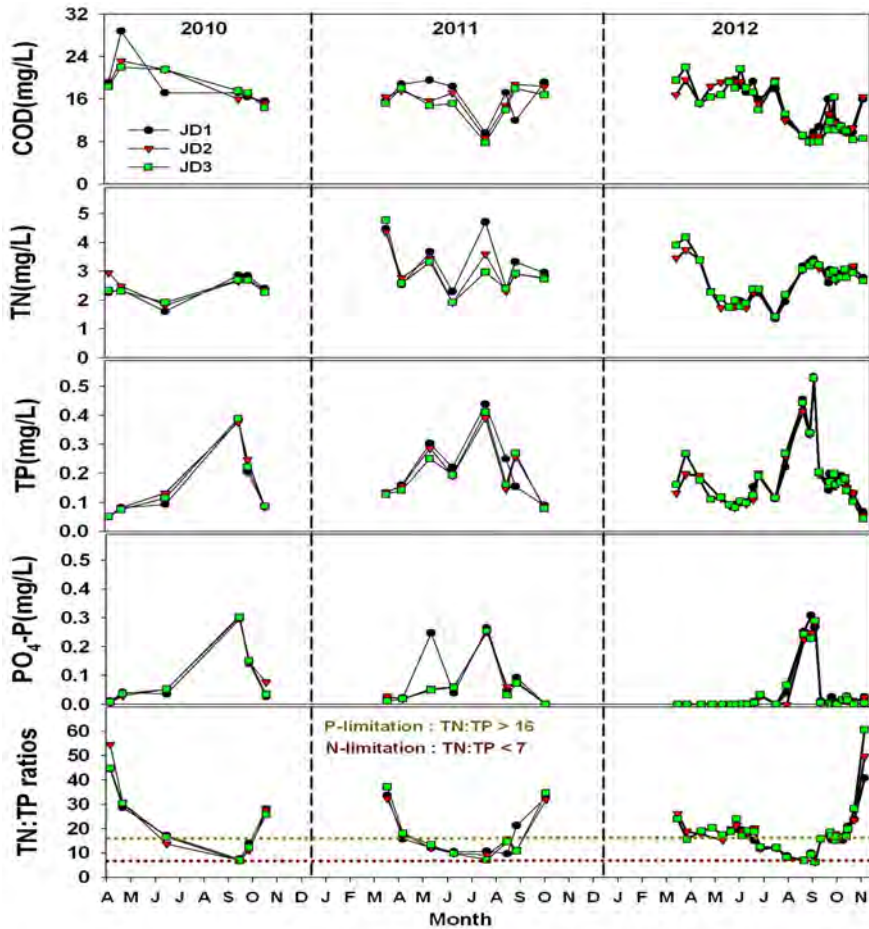
나. 수질 환경특성

전대저수지의 수질 환경특성을 분석하기 위하여, 2010.4.5~2012.11.21 동안 수온(W.temp.), 용존산소량(DO), 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 화학적산소요구량(COD), 총질소(TN), 총인(TP), 인산염인(PO_4 -P), TN:TP ratios(N/P) 등을 대상으로 수질 모니터링을 실시하였다.

수온은 7.5~32.3 °C(평균 21.4 °C)의 범위로 계절별 변이를 보였다. DO는 2.8~17.1 mg/L(평균 10.0 mg/L)의 범위로 강우기에 매우 낮은 DO를 보인 것을 제외하면 전반적으로 과포화 이상의 높은 DO를 보였다. pH는 7.1~10.3(평균 8.9)의 범위로 나타나, DO와 유사한 경향을 보였다. EC는 156~450 μ S/cm(평균 274 μ S/cm)범위로 강우기 이전까지 증가하는 경향을 보였으나, 강우동안 감소하였다.



<그림 2.18> 전대저수지의 수온, DO, pH, EC 변화



<그림 2.19> 전대저수지의 COD, TN, TP, PO₄-P 및 TN:TP 비 변화

COD는 7.8~28.8 mg/L(평균 15.0 mg/L)의 범위로 집중강우기를 제외한 대부분의 시기에 농업용수 수질기준(<8 mg/L)을 초과하는 심각한 수준을 보였다.

TN은 1.353~4.771 mg/L(평균 2.715 mg/L)의 범위로 전시기에 농업용수 수질기준(<1 mg/L)을 초과하였으며, TP는 0.044~0.534 mg/L(평균 0.186 mg/L)의 범위로 봄, 가을 일부시기를 제외한 대부분의 시기에 농업용수 수질기준(0.1 mg/L)을 초과하였다. 인산염인(PO₄-P)은 불검출~0.308 mg/L의 범위로, TP와 매우 유사한 경향을 보였으며, 인의 연중 변동이 심한 것은 강우시 영양염의 유입량이 많으며(안 등, 2008), TP의 농도가 여름철 강우 강도에 의해 결정되고(An, 2000), TP 변동이 TN보다 강우와 더 밀접(안과 신, 2005)하게 나타난다는 보고와 일치한다.

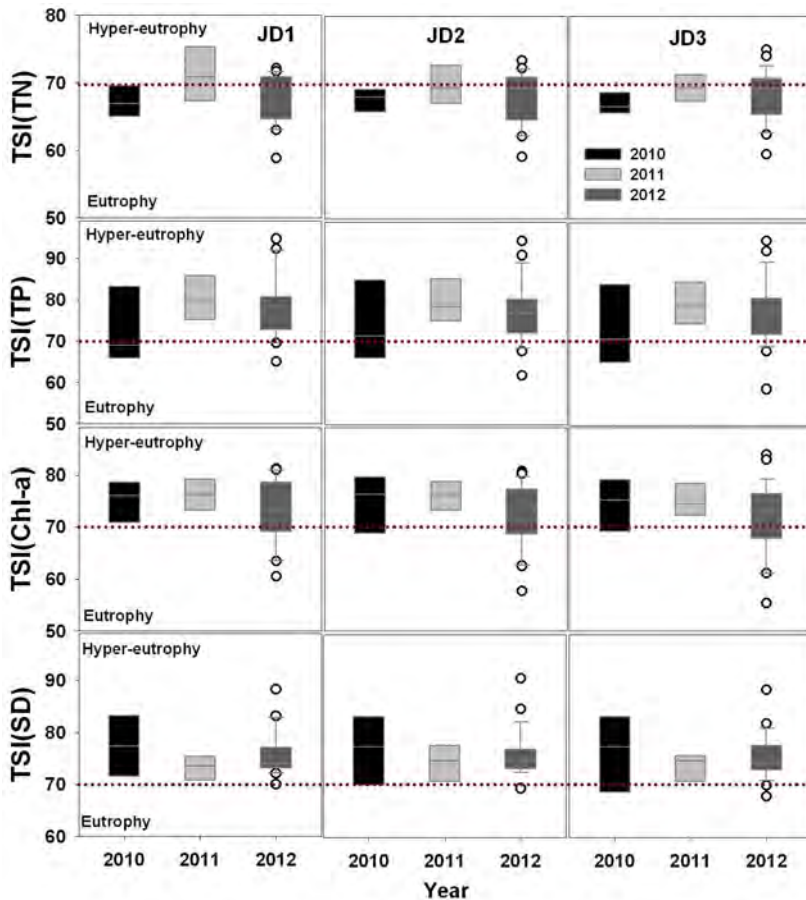
녹조발생 및 녹조원인종의 천이에 영향을 미치는 제한영양염 간접지

표.(Fugimoto and Sudo, 1997; Smith, 1983)로 활용되는 TN:TP ratios는 평균 18.6로 나타났으며, 54.9 %가 TN:TP > 16로 인이 제한요인으로, 40.7 %가 $7 < \text{TN:TP} < 16$ 로 인, 질소가 동시에 제한요인으로 작용하였다.

다. 부영양화 및 녹조발생 특성

(1) 부영양화 특성

지난 3년간(2010.4.5~11.21)의 수질자료를 바탕으로 Kratzer and Brezonik(1981) 및 Carlson(1977)에 의한 부영양화지수(Trophic State Index, TSI)를 분석하여 전대저수지의 부영양화특성을 파악하고자 하였다.



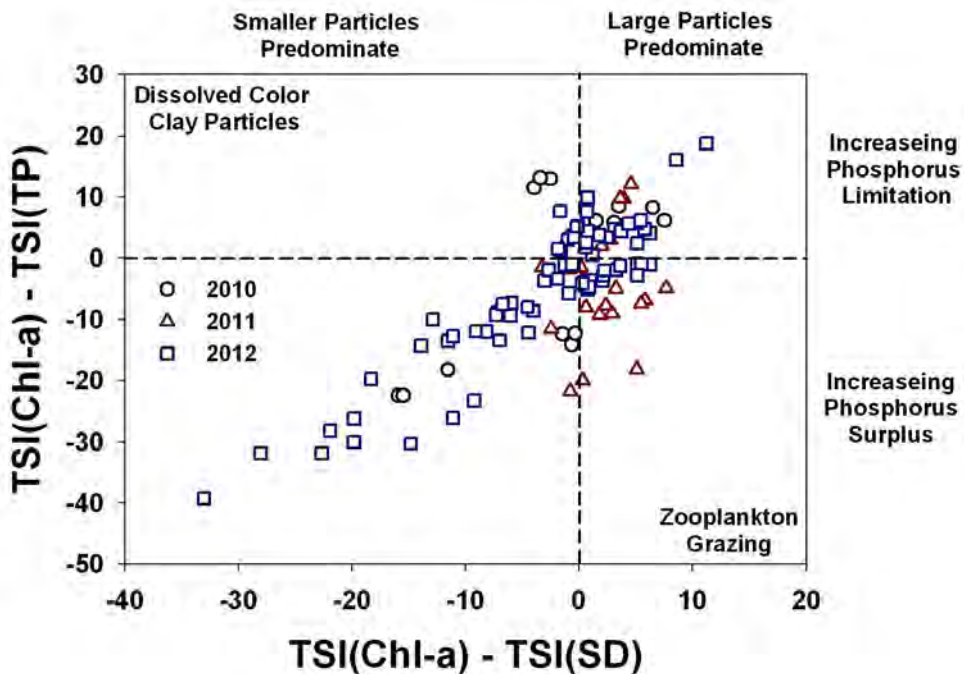
<그림 2.20> 전대저수지의 부영양화지수(TSI) 분석

TSI(TN)은 평균 68.4(58.8~77.0), TSI(TP)는 평균 77.4(58.7~94.7), TSI(Chl-a)는 평균 73.4(55.3~83.8), TSI(SD)는 평균 75.3(67.4~90.6)로 전대

저수지의 부영양화지수는 전반적으로 과영양상태(TSI > 70)로 나타났다.

특히 유입부인 JD1에서 부영양화가 가장 심각한 것으로 나타나, 전대 저수지 상류에서 유입되는 고농도의 영양염류에 의해 저수지의 부영양화가 더욱 촉진되고 있는 것으로 판단되었다.

수체 내 영양염류 변동에 의한 녹조발생 특성(Chl-a) 및 광투과도(SD) 변화의 적절한 설명을 위하여, Carlson(1991)에 의한 부영양화지수 변이성(Trophic State Index Deviation, TSID)을 분석하였다.

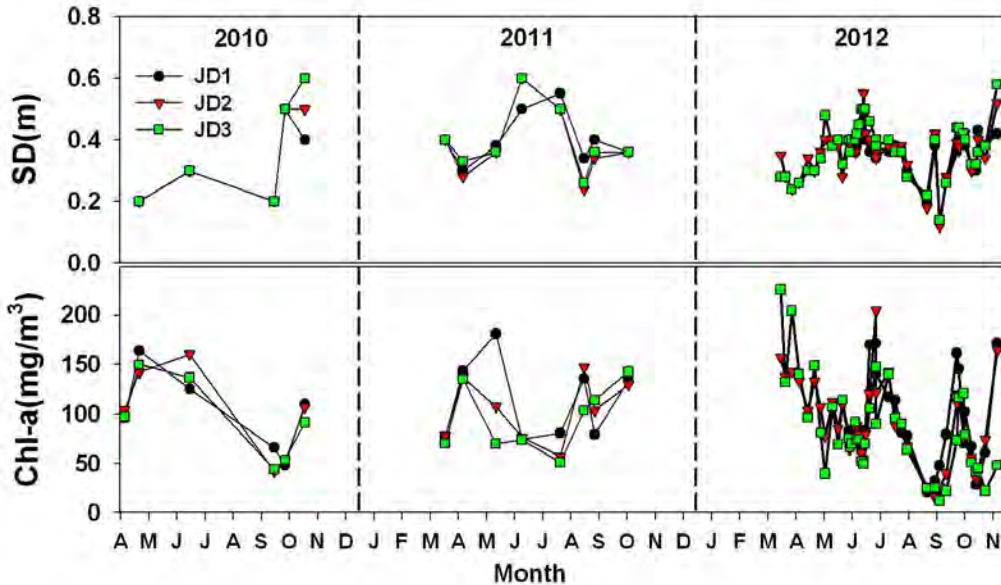


<그림 2.21> 부영양화지수 편차분석(Carlson, 1991)

대부분의 시기에 TSI(Chl-a)가 TSI(TP)와 TSI(SD)에 비해 높게 나타나, 광제한 보다는 인(TP)이 주요 제한요인으로 작용하였으며, TSI(Chl)가 TSI(SD)에 비해 높은 시기에는 군체성조류와 같은 입자가 큰 유기성부유물(VSS)이 주요 제한요인으로 작용한 것으로 판단되었다. 또한, 저수심의 저수지는 집중강우와 태풍에 의해 수층이 교란되기 쉬우며, 이 시기에는 미세한 무기성부유물(Inorganic solids, NVSS)에 의한 광제한이 녹조발생을 억제한 것으로 판단되었으며, 이후 수체 안정됨에 따라, TSI(Chl)가 TSI(SD)보다 증가하고 TSI(TP)보다 작아져, 이 시기 녹조발생은 동물플랑크톤(천적생물)의 섭식에 의해 제한받을 가능성이 있는 것으로 판단되었다(Havens, 2000).

(2) 전대저수지의 녹조발생특성

모니터링 기간(2010.4.5~11.21)에 투명도(SD), 엽록소-a(Chl-a), 식물플랑크톤 현존량을 분석하여 전대저수지의 녹조발생 특성을 검토하였다.



<그림 2.22> 전대저수지의 지점별·시기별 SD 및 Chl-a 변화

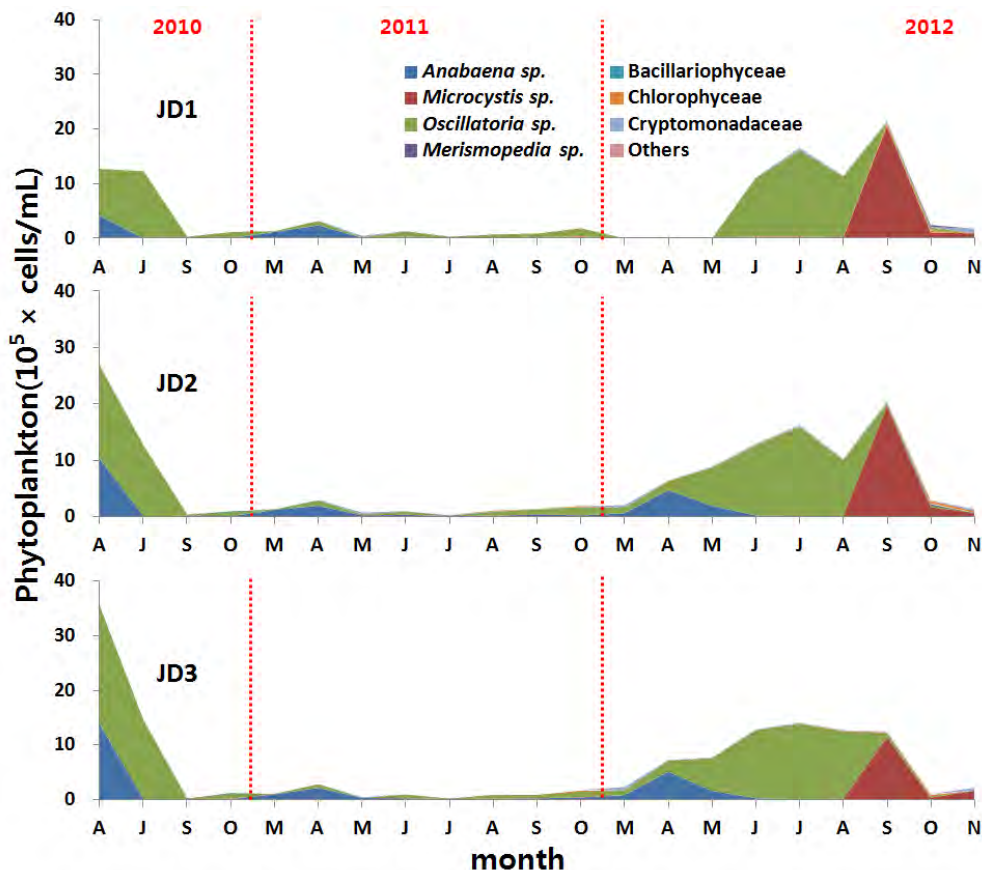
SD는 0.12~0.60 m(평균 0.37 m)의 범위로 시기별·지점별 차이 없이 전반적으로 낮은 투명도를 보였다. 낮은 SD는 부영양화로 인한 식물플랑크톤 대발생, 또는 집중강우로 인한 입자성 부유물질의 광제한으로 결정되는데(공 등, 2009), 전대저수지는 두 요인을 모두 반영하는 것으로 판단되었다.

Chl-a는 1.2~225.9 mg/m³(평균 91.9 mg/m³)의 범위로 전체의 91.4 %가 농업용수 수질기준(Chl-a < 35 mg/m³)을 초과하는 심각한 부영양화를 보였으며, 39.1 %가 100 mg/m³을 초과하는 조류대발생 수준으로 나타났다.

전대저수지의 Chl-a와 SD의 변화양상은 지점별, 시기별(특히, 강우발생) 일부 차이는 있으나, 그 변화가 역의 관계로 비교적 일치하는 경향을 보임에 따라, 녹조발생에 의한 수체 내 유기물 증가가 호내 투명도에 영향을 미치고 있는 것으로 판단되었다.

연구기간동안 전대저수지의 식물플랑크톤 현존량은 $0.7 \sim 75.8 \times 10^5$ cells/ml(평균 19.6×10^5 cells/ml)의 범위로 대부분의 시기에 남조류(Cyanophyceae)가 우점하였다. 시기별 녹조발생 원인 우점종을 보면, 대부분

의 시기에 *Oscillatoria* sp.가 우점하였으며, 3~4월 일부시기에 *Anabaena* sp., 9~10월 일부시기에 *Microcystis* sp.가 우점하기도 하였고, 2012년 11월에는 갈색편모조류(Cryptomonadaceae)인 *Cryptomonas* spp.가 우점하였다.



<그림 2.23> 지점별 시기별 식물플랑크톤 현존량 및 종조성

(표 2.6) 연도별 식물플랑크톤 우점종 특성

	2010	2011	2012
Mar.		<i>Anabaena</i> sp. (90 %)	<i>Oscillatoria</i> sp. (45 %)
Apr.	<i>Oscillatoria</i> sp. (63 %)	<i>Anabaena</i> sp. (71 %)	<i>Anabaena</i> sp. (86 %)
May		<i>Cryptomonas</i> spp. (53 %)	<i>Oscillatoria</i> sp. (98 %)
Jun.	<i>Oscillatoria</i> sp. (99 %)	<i>Oscillatoria</i> sp. (70 %)	<i>Oscillatoria</i> sp. (98 %)
Jul.		<i>Oscillatoria</i> sp. (45 %)	<i>Oscillatoria</i> sp. (98 %)
Aug.		<i>Oscillatoria</i> sp. (74 %)	<i>Oscillatoria</i> sp. (97 %)
Sep.	<i>Oscillatoria</i> sp. (44 %)	<i>Oscillatoria</i> sp. (71 %)	<i>Microcystis</i> sp. (81 %)
Oct.	<i>Oscillatoria</i> sp. (80 %)	<i>Oscillatoria</i> sp. (73 %)	<i>Microcystis</i> sp. (73 %)
Nov.			<i>Cryptomonas</i> spp. (74 %)

다. 동물플랑크톤 및 천적생물 분포 현황

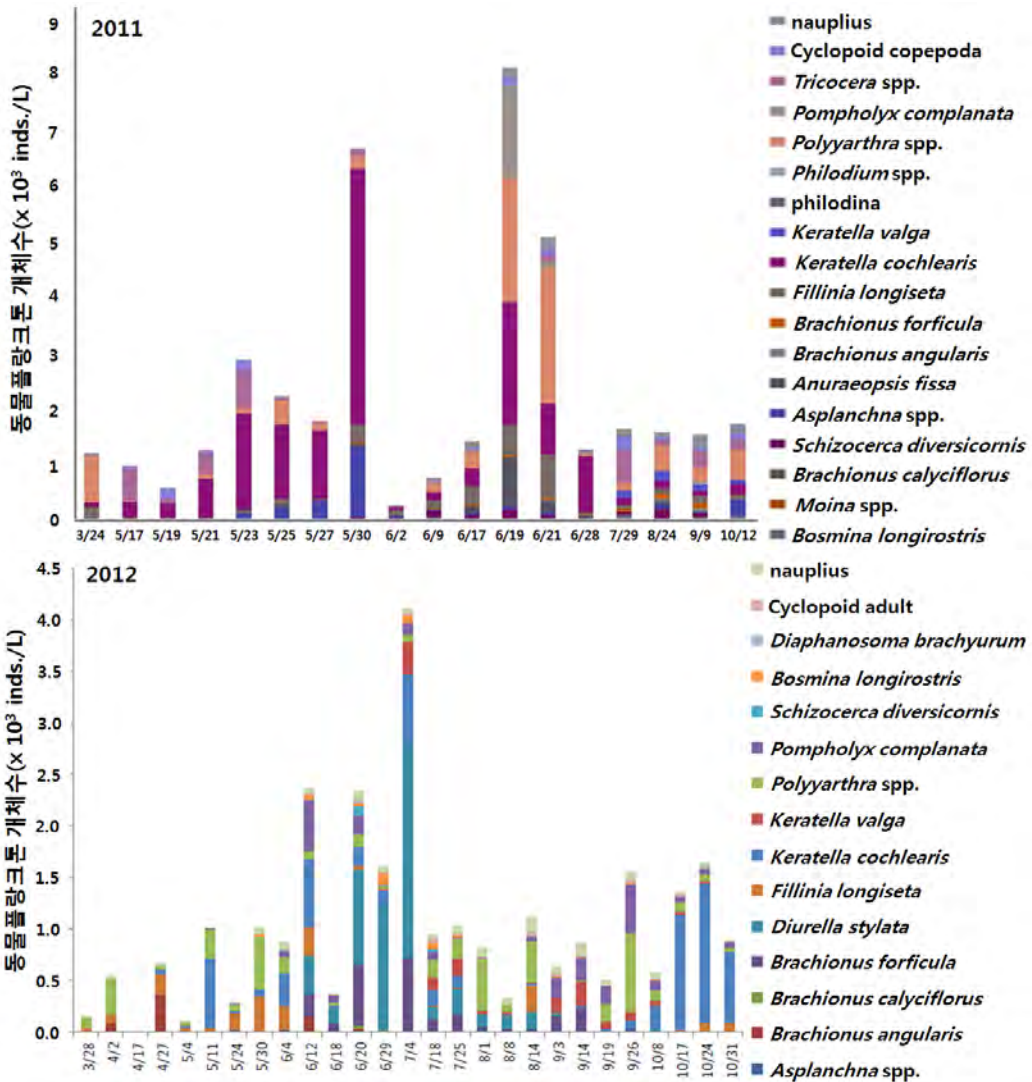
(1) 동물플랑크톤 분포 특성

전대저수지의 동물플랑크톤 분포특성을 보면, 2011년에는 윤충류 총 12속 15종, 지각류 3속 3종 및 요각류 중 검물벼룩 등이 출현하였으며, 2012년에는 윤충류 12속 18종, 지각류 4속 4종 및 요각류 검물벼룩 등이 출현하여 전년과 유사한 분포 특성을 보였다.

전대저수지의 동물플랑크톤 분포 특성 분석결과, 박테리아 및 식물플랑크톤을 섭식하는 소형 윤충류가 연중 우점하고, 녹조를 제어할 수 있는 천적생물로써의 기능을 가진 대형 지각류는 분포하지 않는 등 부영양화 호수, 즉 녹조발생 호소가 가지는 전형적인 동물플랑크톤 출현양상을 보였다.

(표 2.7) 전대저수지 주요 출현 동물플랑크톤 종조성과 섭식성향 및 출현빈도

구분	출현 종류	섭식성향	출현빈도	
윤충류	소형	<i>Polyarthra</i> spp.	박테리아 및 식물플랑크톤	고
		<i>Keratella cochlearis</i>	박테리아 및 식물플랑크톤	고
		<i>Keratella valga</i>	박테리아 및 식물플랑크톤	저
		<i>Pompholyx complanata</i>	박테리아 및 식물플랑크톤	중
		<i>Aerunopsis fissa</i>	박테리아 및 식물플랑크톤	고
		<i>Filinia longiseta</i>	박테리아 및 식물플랑크톤	중
		<i>Brachionus angularis</i>	박테리아 및 식물플랑크톤	중
		<i>Brachionus forficula</i>	박테리아 및 식물플랑크톤	저
		<i>Monostyla</i> spp.	박테리아 및 식물플랑크톤	저
		<i>Lepadella</i> sp.	박테리아 및 식물플랑크톤	저
	중형	<i>Brachionus rubens</i>	식물플랑크톤	저
		<i>Euclanis</i> sp.	식물플랑크톤	저
		<i>Philodina</i> sp.	식물플랑크톤	저
대형	<i>Schizocerca diversicornis</i>	식물플랑크톤	중	
	<i>Asplanchna</i> spp.	식물플랑크톤 및 타 윤충류	고	
	<i>Brachionus calyciflorus</i>	식물플랑크톤	저	
지각류	대형	<i>Moina</i> sp.	식물플랑크톤	저
	중형	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	박테리아	저
	소형	<i>Bosmina longirostris</i>	식물플랑크톤 및 분해된 남조류	중
		<i>Alona</i> spp.	부착 및 퇴적 유기물	저
		<i>Chydorus</i> spp.	부착 및 퇴적 유기물	고
요각류	Cyclopoida(성충)	지각류 포함 타 동물플랑크톤	고	
	Cyclopoida(유충)	소형 동물플랑크톤 및 식물플랑크톤	고	
	Cyclopoida(유생)	박테리아		



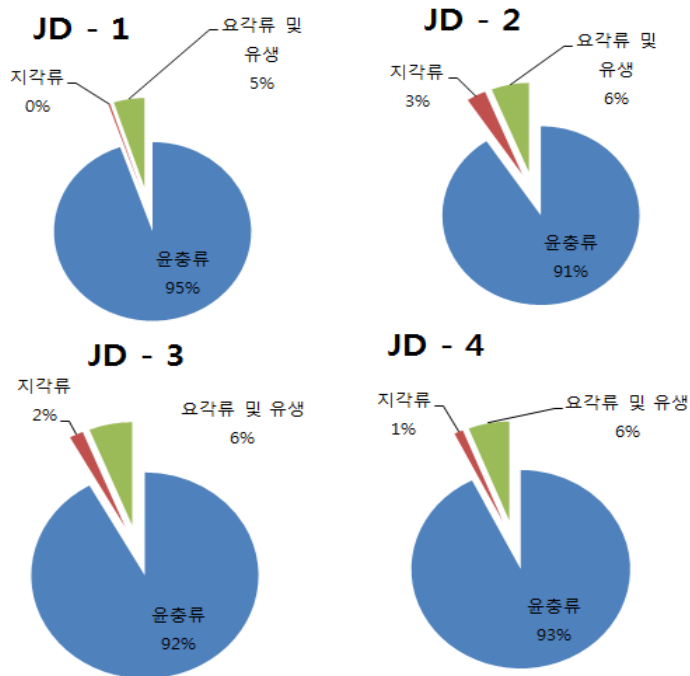
<그림 2.24> 전대저수지(JD2)의 동물플랑크톤 개체군 밀도 계절변화

전대저수지 중앙지점인 JD2에서의 동물플랑크톤 군집의 계절변화를 살펴보면, 2011년의 경우 동물플랑크톤 군집은 소형 윤충류인 *Polyarthra* spp.와 *Keratella cochlearis*가 연중 우점하였으며, 동물플랑크톤 개체수는 5월~6월에 최고치를 보인 후 7월부터 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 5월~6월에는 동물플랑크톤 개체수가 8,000 inds./L에 달하는 고밀도를 나타내어 이시기에 동물플랑크톤 서식에 최적 조건을 보임을 알 수 있었다(그림 2.24).

그러나, 최대 개체수 5,000 inds./L에 달하는 *Keratella cochlearis* 등의 소형 윤충류는 녹조발생 원인 생물인 남조류는 섭식하지 못하는 것으로 알려

져있다. 반면, 녹조제어 능력을 가진 중형 및 대형 윤충류인 *Brachionus* 속, *Asplanchna* 속 등은 3월~5월 사이 일시적으로 증가하였지만, 소형 윤충류에 비해 연중 낮은 개체군 밀도를 나타냈다(그림 2.24).

2012년의 동물플랑크톤 최고 밀도는 약 4000 inds./L로 8000 inds/L인 2011년 보다 낮게 나타났으며 고밀도 시기도 2011년은 5월~6월이었으나 2012년은 6월~7월로 다소 차이가 있었다. 결과적으로, 전대저수지의 경우 수온이 상승하는 초여름에 가장 높은 동물플랑크톤 밀도를 보이는 것으로 나타났지만 높은 동물플랑크톤 밀도에도 불구하고 천적생물로 활용 가능한 대형 지각류는 출현하지 않는 것으로 조사되었다.



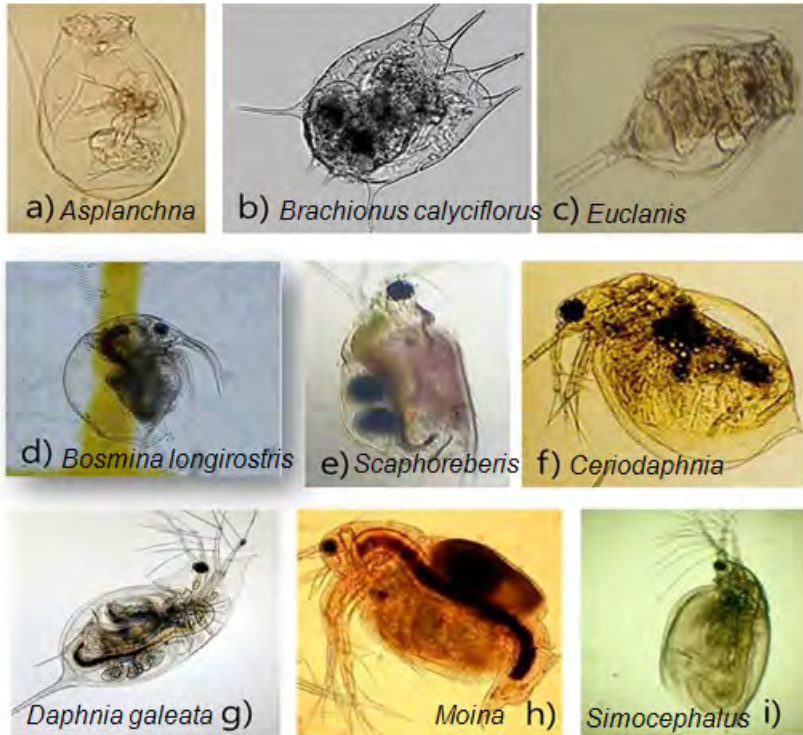
<그림 2.25> 조사기간 출현한 전대저수지의 동물플랑크톤 종조성 상대풍부도

조사 정점인 JD 1, JD 2, JD 3, JD 4의 연중 출현 동물플랑크톤의 상대 풍부도를 볼 때, 우점 동물플랑크톤 개체군의 출현패턴은 2011년과 2012년이 유사한 종조성을 보이는 것으로 나타났으며, 연중 출현량은 윤충류가 모든 지점에서 90 %을 차지하여 대부분의 동물플랑크톤 출현종이 소형종으로 천적생물 섭식 능력이 낮은 종으로 조사되었다(그림 2.25). 우점종은 윤충류인 *Keratella cochlearis*, *Polyarthra spp.*, *Diurella stylata*, *Brachionus angularis*, *Pompolyx complanata*, *Keratella valga* 등으로 전형적인 부영양

화 호수의 동물플랑크톤 종조성을 나타냈다. 지각류는 소형의 *Bosmina longirostris*와 *Diaphanosoma brachyurum*이 자주 출현하였다.

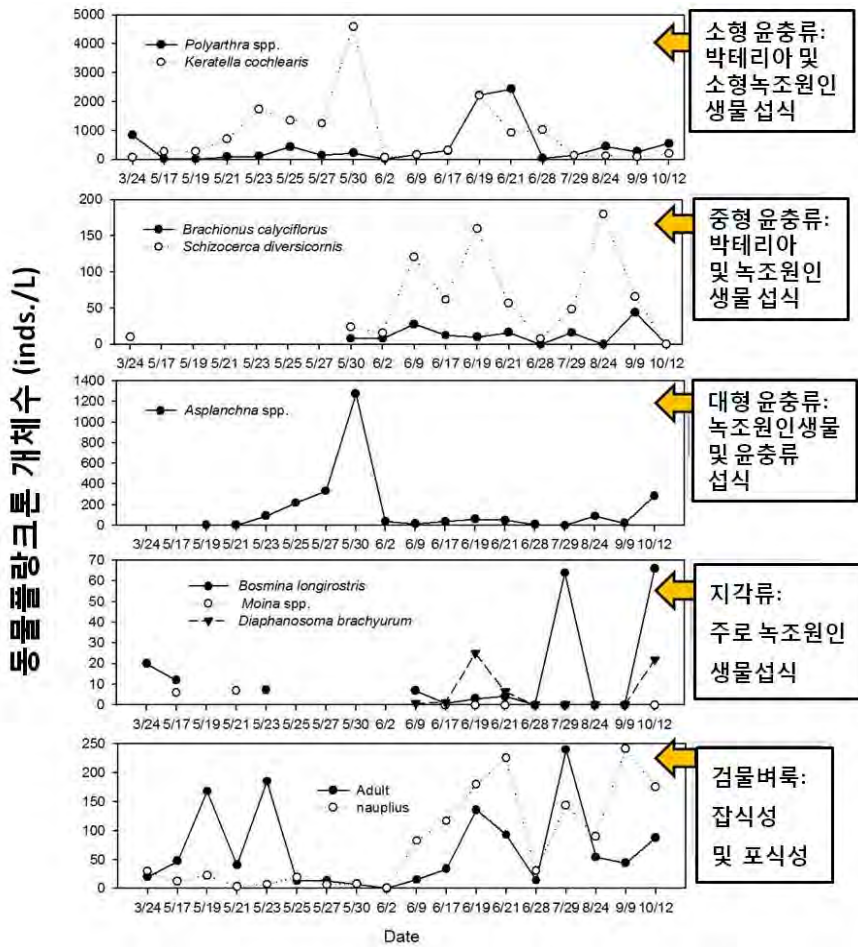
(2) 녹조제어에 효과적인 천적생물 분포 현황

전대저수지는 전형적인 부영양화 호의 동물플랑크톤 분포특성을 보여 녹조를 제어할 수 있는 천적생물인 대형 지각류는 출현하지 않거나 매우 낮은 개체군 밀도를 보이는 것으로 파악되었다. 전대저수지에서 최대 개체군 밀도를 보이는 우점종 *Keratella cochlearis* 등의 소형 윤충류는 녹조 원인종인 남조류는 섭식하지 못하는 것으로 알려져 있다. 표 2.7에 나타난 동물플랑크톤의 섭식성향과 녹조제어 능력에 따라 소형 윤충류, 중형 윤충류 및 대형 윤충류 및 지각류로 나누어 보면, 녹조제어 능력이 큰 대형 지각류 *Moina*속이 5월에 한정하여 출현하였으나 개체군 밀도가 8 inds./L 미만으로 매우 낮았다.



<그림 2.26> 저수지에 출현하는 동물플랑크톤

반면, 박테리아 및 분해된 식물플랑크톤을 섭식하는 기타 지각류 (*Bosmina longirostris* 와 *Diaphanosoma* 속)의 출현시기는 제한적이나 높은 개체군 밀도를 보이는 것으로 나타났다(그림 2.27).

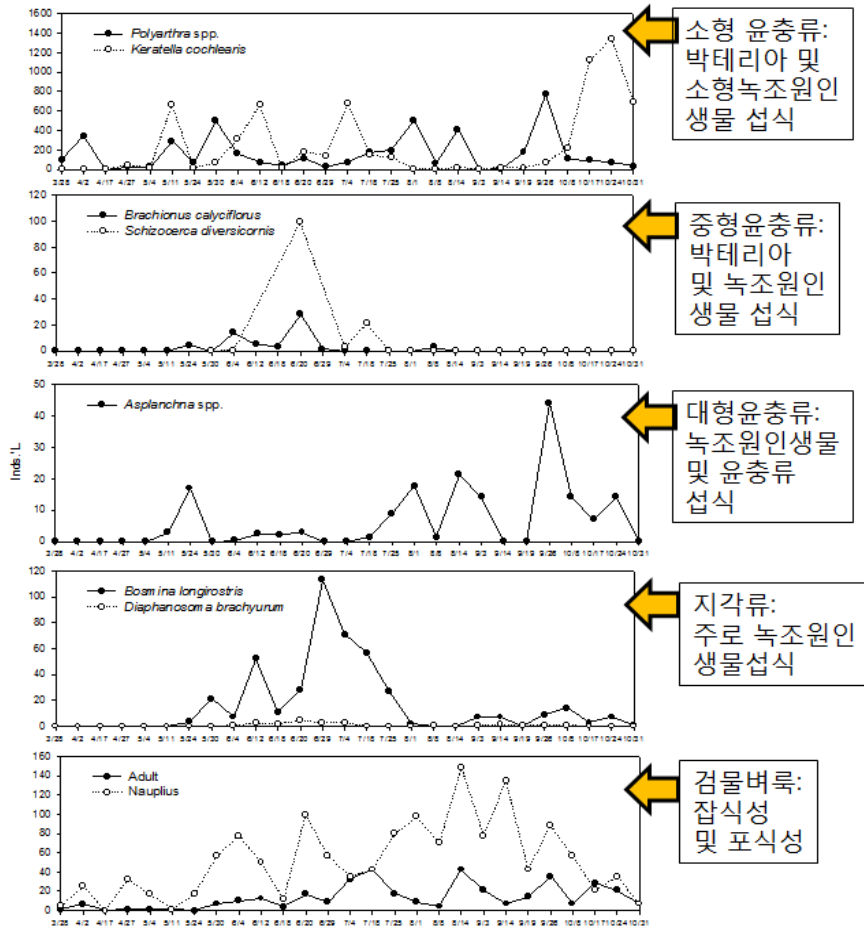


<그림 2.27> 전대저수지 동물플랑크톤 섭식군 분포특성(2011년)

시기별로 2012년은 2011년과 비교하여 동물플랑크톤의 개체군 밀도와 증가시기는 다소 상이하였으나 소형 윤충류가 연중 우점하는 현상은 동일하였다. 2011년, 2012년 연구기간동안 천적생물로 활용이 가능한 중~대형 지각류로는 *Moina* 속이 유일하였으나, 최대 개체군 밀도가 2011년 7 inds./L, 2012년 2.8 inds./L 로 매우 낮았으며, 소형 지각류는 *Bosmina longirostris*가 6월~7월에 최대 100 inds./L로 높게 나타났으나, *Diaphanosoma brachyurum*의 경우 연중 낮은 개체군 밀도를 유지하였다.

녹조를 제어할 수 있는 대형 물벼룩 *Daphnia*의 경우, 6월과 10월 천적 생물 살포기간 중 살포지점 인근의 조사지점에서 채집된 개체 이외에는 자연 상태로 서식하는 개체는 확인되지 않았으며, *Simocephalus ventulus* 또한 살

포로 인한 개체 확인과 어류 위내용물에는 포함되어 있으나 자연상태로 서식하는 개체는 확인되지 않아 전대저수지에 서식하는 동물플랑크톤의 경우 자연상태의 섭식작용으로는 녹조 제어가 불가능한 것으로 나타났다.



<그림 2.28> 전대저수지 동물플랑크톤 섭식군 분포특성(2012년)

라. 어류 종조성 및 분포특성

전대저수지에 서식하는 어류의 종조성 및 분포특성을 파악하기 위하여, 3개 지점(저수지 유입부, 천적생물 살포구간, 저수지 유출부)을 선정하여, 2012년 4월~11월까지, 총 3회 현장조사를 실시하였다.

조사결과 출현어류는 총 4과 9종 649개체로서, 잉어과(Cyprinidae) 4종, 검정우럭과(Centrarchidae)와 망둑어과(Gobiidae) 2종, 미꾸리과(Cobitidae) 1종이 채집되었다. 이들 어류 중 잉어과 어류가 상대풍부도 55.3 %로 나타났

는데, 잉어과 어류의 종수 및 비율이 높게 나타나는 것은 서·남해로 흐르는 하천의 어류 종조성 특징과 일치한다(전, 1980; Lee et al., 2008). 출현 어종의 우점종은 블루길(38.7 %)이며, 치리(27.1 %)가 아우점하였는데, 이들은 수질오염 및 서식지의 질적저하에 대한 내성이 강하며, 특히 블루길은 정체수역에서 주로 서식하는 것으로 알려져 있다. 또한 생태계교란야생생물종(환경부 야생동식물보호법)으로 지정한 블루길과 배스(4.5 %)가 전체 개체수의 43.2 %의 높은 비율로 출현하는 것으로 나타났다.

(표 2.8) 전대저수지의 어류 분포 특성

종명	환경부(2008)		Apr.		Oct.			Nov.			TNI	RA (%)
	수질 내성도	섭식 특성	JF-I	JF-O	JF-I	JF-E	JF-O	JF-I	JF-E	JF-O		
잉어과(Cyprinidae)												
잉어(<i>Cyprinus carpio</i>)	TS	O	3	0	2	0	0	3	0	0	8	1.2
붕어(<i>Carassius auratus</i>)	TS	O	7	33	4	6	13	7	0	3	73	11.2
참붕어(<i>Pseudorasbora parva</i>)	TS	O	10	7	30	5	9	18	10	13	102	15.7
치리(<i>Hemiculter eigenmanni</i>)	TS	O	67	38	21	10	9	11	6	14	176	27.1
미꾸리과(Cobitidae)												
미꾸라지(<i>Misgurnus mizolepis</i>)	TS	O	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0.2
검정우럭과(Centrarchidae)												
♣블루길(<i>Lepomis macrochirus</i>)	TS	I	3	5	39	8	24	21	84	67	251	38.7
♣배스(<i>Micropterus salmoides</i>)	TS	C	0	0	4	3	2	7	3	10	29	4.5
망둑어과(Gobiidae)												
꼭저구(<i>Chaenogobius urotaenia</i>)	IS	I	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0.5
갈문망둑(<i>Rhinogobius giurinus</i>)	TS	O	1	2	0	0	0	3	0	0	6	0.9
TNS			6	6	7	5	5	7	4	5	9	
TNI			91	88	101	32	57	70	103	107	649	

♣: 외래도입종, TNS: 총 종수, TNI: 총 개체수, RA: 상대풍부도, TS: 내성종, IS: 중간종, C: 육식종, I: 충식종, O: 잡식종

기존의 연구(환경부, 2008)에 의한 어류의 생태학적 특성 중 내성도 분석에 따르면, 수질 및 서식지의 질적 저하에도 불구하고 종수 및 분포범위가 증가하는 내성종이 99.5 %의 높은 개체수 비율을 차지한 반면, 수질 오염도에 따라 쉽게 사라지는 민감종은 전혀 출현하지 않았다.

또한 에너지 흐름을 반영하는 섭식특성 분석(환경부, 2008)에 따르면, 동·식물질을 지속적으로 섭식하는 잡식종은 56.4 %, 수서무척추동물을 섭식하는 충식종은 39.1 %, 어류 및 다른 척추동물을 섭식하는 육식종은 4.5 %로 잡식종이 우점하였으며, 외래도입종을 제외하면, 잡식종 비율이 99.2 %로 높게 나타났다. 외래도입종 제외시 잡식종의 비율이 급격히 증가하는 것은 우점

종이 블루길로 나타났기 때문이며, 블루길 같은 외래도입종은 먹이경쟁에 있어서 포식위협과 효과적인 먹이획득으로 생태계 내 에너지 흐름 교란 원인이 된다(고 등, 2008; 변과 전, 1997).

시기별로는 4월에 총 7종 179개체, 10월 7종 190개체, 11월 7종 280개체가 출현하였으며, 잉어, 붕어, 참붕어, 치리, 블루길 등 5종은 시기별로 모두 채집되었고, 시기별 블루길 변화는 4월에 8개체(4.5%), 10월 71개체(37.4%), 11월 172개체(61.4%)로 우점하여 상대풍부도가 점차 증가하였다.

지점별로는 JF-I에서는 8종 262개체로 치리(37.8%)가 우점하였으며, JF-E에서는 5종 135개체로 블루길(68.1%)이 우점하였고 JF-O에서는 7종 252개체로 블루길(38.1%)이 우점하였다.



<그림 2.29> 전대저수지 출현 어종

제3절 천적생물 종주 분리 및 종주의 최적 배양기술 개발

1. 녹조 원인종에 대한 포식능이 우수한 천적생물 종주분리

가. 천적생물 종주 후보종

천적생물 종주 후보종은 대형 동물플랑크톤이면서 단위개체 당 녹조원인종 섭식능력이 뛰어난 *Daphnia magna*, *Daphnia similoides*, *Daphnia pulex* 등 3종의 *Daphnia*를 선발하였으며, 다양한 조건에서 증식경향을 분석하고, 현장 살포가 용이하고, 포식효과가 뛰어난 종주선발을 위한 성능시험을 실시하였다.

세 후보종의 기본적인 성장속도를 비교, 평가하기 위해 25 °C, 적정 먹이양(클로렐라, 6.6×10^5 cells/ml) 조건에서 개체군 성장을 비교하였다. 25 °C에서 성숙개체의 체장은 *D. magna* > *D. similoides* > *D. pulex*의 순으로 개체 크기가 클수록 체장이 큰 것으로 나타났다. 태어난 개체가 성숙하여 산란하기까지 소요되는 시간은 짧을수록 개체 증식과 생존을 확보에 유리한데 *D. pulex*가 가장 빠른 것으로 나타났고, *D. magna*와 *D. similoides*는 서로 유사한 것으로 나타나 *D. pulex*가 수계 살포시 단시간 개체군 회복 및 대량 증식으로 녹조 제어 효과적일 것으로 판단되었다(그림 2.30).

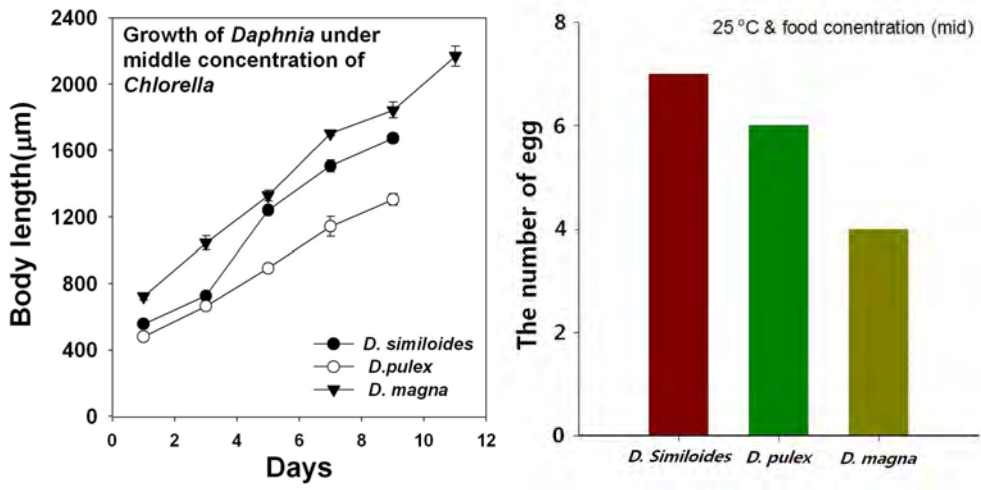
동일한 조건에서 산란 시 단위생식 알의 수(포란수)는 많을수록 개체군의 성장 속도가 빠르며, 생존율 역시 높게 평가되므로 천적생물 종주로서 중요한 요소이다. 동일한 조건에서 포란수는 *D. similoides*가 평균 약 7개로 가장 많았으며, *D. pulex* 6개, *D. magna*가 평균 4개로 가장 적은 것으로 나타나 *D. similoides*가 가장 유리한 것으로 판단되었다.

본 연구에 사용된 3 후보종의 *Daphnia*는 단위생식을 통해 빠른 시간 내 개체군 밀도를 증식시키는 특징을 가지고 있으며(김 등 2006), 본 연구 결과에서도 다소 차이는 있으나, 현장에서 유사한 속도로 개체군 밀도 증가가 이루어지는 것을 관찰하여 성장특성 측면에서는 *D. similoides* 와 *D. pulex*가 종주로서 유용할 것으로 판단되었다.

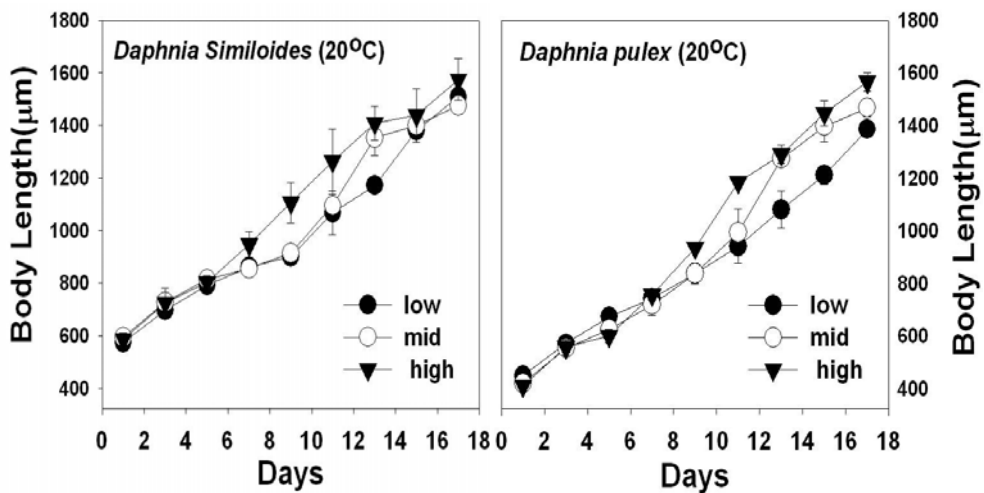
*D. magna*의 경우, 외래유입종이며 수체보다 저층에서 섭식하는 경향이 높아 국내 수생생태계의 적용시 생태계 안정성, 먹이망 교란 등의 문제점이 존재하여, 천적생물 종주 후보종에서 배제하였다.

나머지 *D. similoides*와 *D. pulex* 2개 후보종을 대상으로 먹이조건에

따른 성장경향을 클로렐라 농도를 조절하여 평가한 결과, *D. similoides*와 *D. pulex*의 개체 성장과 번식은 세가지 먹이농도인 저농도(3.3×10^5 cells/ml), 중농도(6.6×10^5 cells/ml), 고농도(2.0×10^6 cells/ml)조건에서 유사하게 나타났으며, 세가지 먹이 농도조건 모두에서 양호한 개체 성장을 보였다. 그중에서도 특히, 고농도 먹이 조건에서 개체의 크기가 가장 큰 것으로 나타났는데(그림 2.31), *Daphnia*는 높은 식물플랑크톤 생체량에서 성장저해가 나타난다는 보고(Porter et al. 1982)와 상반되는 결과를 보였다.



<그림 2.30> 천적생물 후보종의 적정먹이농도에서의 성장곡선 및 포란수 비교



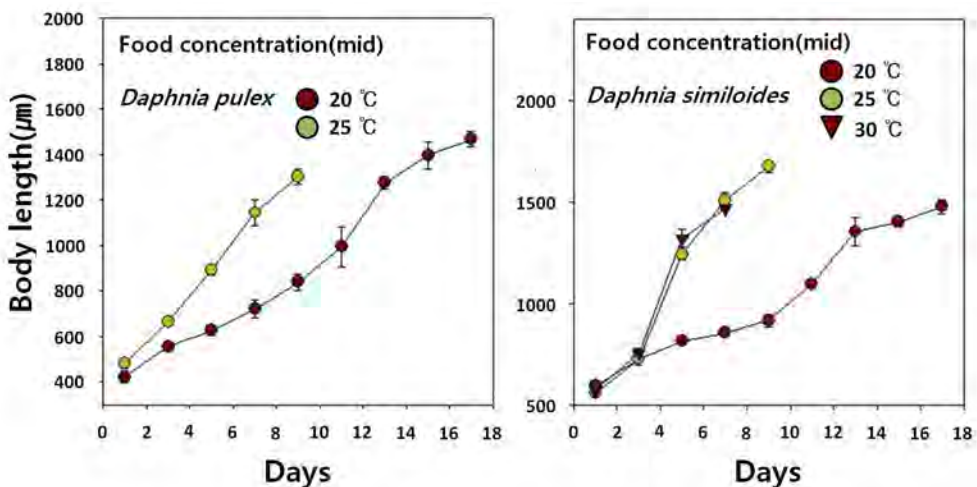
<그림 2.31> 후보 천적생물(*Daphnia*) 2종의 먹이농도(low: 3.3×10^5 cells/ml, mid: 6.6×10^5 cells/ml, high: 2.0×10^6 cells/ml)에 따른 성장 비교

이러한 성장 저해 특성 보고 때문에 부영양화된 현장에 적용시 녹조생물 농도에 따른 개체 성장은 천적생물의 현장적용 효율성에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 본 실험에서 나타난 *D. similoides*와 *D. pulex*의 고농도 먹이조건에서의 양호한 성장은 부영양 상태의 녹조발생 조건에서 이들 종을 적용할 때 고농도의 식물플랑크톤 농도에 적응하여 충분한 녹조제어 효과를 나타낼 수 있음을 시사하였다.

따라서, 국내 많은 저수지, 호수 등에서 자연 서식하는 *D. similoides*와 *D. pulex*는 실내 종주 배양, 천적생물 배양장치 대량 배양 단계를 거쳐 부영양화의 녹조발생 수역에 천적생물로써의 적용이 가능한 것으로 판단되었다.

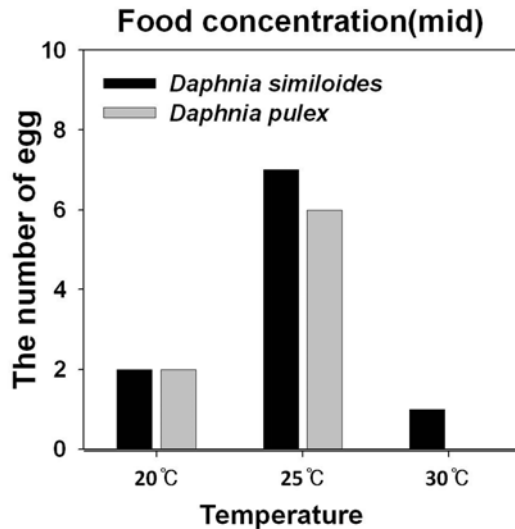
수온은 *Daphnia*의 성장에 큰 영향을 미치는 요인이며, 특히 여름철의 고온은 많은 *Daphnia* 종에게 치명적으로 작용하기도 한다(Burns, 1969). 하계 현장에 설치된 천적생물 배양장치에서 대량배양하기 위해서는 30℃의 수온에서도 성장 저해 없이 개체군이 유지되는 것이 필수조건이라 할 수 있다. 후보 천적생물의 온도에 대한 민감성을 평가하기 위해 20, 25, 28 및 30℃에서의 개체군 성장을 분석하였다.

온도별 성장실험에서 20℃와 25℃ 조건에서는 *D. pulex*와 *D. similoides* 두 종 모두 빠른 개체군 성장을 나타냈다. 또한 28℃까지는 세 종이 유사한 성장과 산란경향을 보였으나, 30℃에서는 *D. pulex*의 경우 생존율이 현저하게 떨어지는 것으로 나타났다(그림 2.32).



<그림 2.32> 후보 천적생물(*Daphnia*) 2종의 온도에 따른 성장곡선

또한, 고온에서의 생존율은 먹이조건에 크게 영향을 받아, 적정 먹이농도에서는 저온 및 고온에서의 생존율이 높은 것으로 나타났으나, 먹이농도가 높거나 낮은 경우 30 °C에서 이들 *Daphnia* 종의 생존율이 저하되는 것으로 나타났다. 암컷 개체당 포란수의 경우 25 °C에서는 *D. pulex*, *D. similoides* 모두 평균 약 6개의 포란수를 나타냈으나, 30 °C에서는 *D. pulex*는 단위생식란을 전혀 가지지 못했으며, *D. similoides*도 포란수가 크게 감소하였다(그림 2.33).



<그림 2.33> *D. pulex*와 *D. similoides*의 온도별 암컷개체 포란수

개체군의 온도 영향 실험과 별도로 온도에 따른 생존실험을 진행한 결과, *D. pulex*는 28 °C에서는 사망율이 낮으나, 30 °C에서 사망율이 급격히 증가하여 개체군 유지가 불가능하고 실험에 사용된 개체군이 모두 절멸하였다. *D. similoides*는 30 °C에서 개체군의 사망율이 *D. pulex*보다 낮은 것으로 나타났으며, 성장과 번식에 대한 온도영향이 *D. pulex*보다 크지 않아 하계와 같은 고수온기에는 *D. pulex*보다 *D. similoides*의 적용이 효과적인 것으로 판단되었다.

따라서, 녹조대발생 시기 및 30 °C이상의 수온을 보이는 하계에는 천적 생물 종주로서 우선 적용대상을 *D. similoides*로 결정하는 것이 타당하며, 환경조건이 비교적 온화한 봄, 가을에는 성장률이 높은 *D. pulex*를 천적생물 종주로 선정하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

또한 국내산 대형 지각류인 *Daphnia similoides*와 *Daphnia pulex*는 모두 배양이 용이하여 대량살포에 사용하기 용이하나 *D. pulex*의 고온 내성에

약한 점과 *D. similoides*가 *D. pulex*에 비해 증식율이 다소 낮은 점을 감안할 때 시기와 조건에 따라 두 종을 적절히 분리하여 사용하거나 혼합하여 사용하여 대량배양을 용이하게 하고, 현장 살포시 높은 생존율로 인해 녹조제어 효과도 증대될 것으로 사료된다.

나. 천적생물 종주의 녹조제어 능력 평가

Daphnia 천적생물 후보종의 녹조제어 능력을 평가하기 위해 종조성 및 식물플랑크톤 생체량이 다른 기흥저수지와 전대저수지의 물을 이용하여 24시간, 48시간 동안 녹조제어 능력을 실내 섭식실험을 통해 평가하였다. 채집된 저수지 물에 *Daphnia*를 투입한 후 실험실 배양 조건(25 °C, 암조건, 배양기 내 사육)에서 배양한 후 시간별 Chl-a 농도를 측정하여 *D. similoides*와 *D. pulex*의 밀도별 녹조제어 능력을 평가하였다.

(표 2.9) 천적생물 후보종의 섭식효과 평가를 위한 섭식 대상생물과 초기 생체량

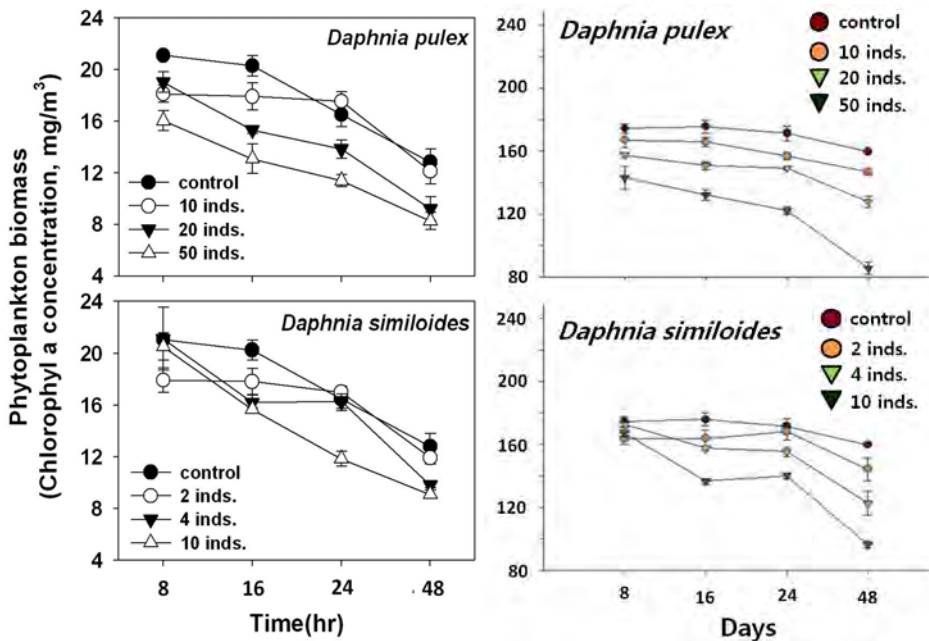
초기 Chl-a 농도	우점식물플랑크톤	원수채취지점	사용 <i>Daphnia</i> 종
~20 mg/m ³	남조류(<i>Microcystis</i>)	기흥 저수지	<i>Daphnia pulex</i> <i>Daphnia similoides</i>
~200 mg/m ³	남조류(<i>Oscillatoria</i>)	전대 저수지	<i>Daphnia pulex</i> <i>Daphnia similoides</i>
~120 mg/m ³	남조류(<i>Oscillatoria</i>) 와편모조류(<i>Ceratium</i>)	전대 저수지	<i>Daphnia similoides</i>



<그림 2.34> 천적생물 후보종의 섭식효과 실험에 사용된 식물플랑크톤 종 (왼쪽부터 *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Ceratium*)

*Microcystis*가 우점한 기흥저수지의 물을 500 ml 용기에 넣어 동일한 생체량이 되도록 두 천적생물의 저, 중, 고밀도로 조절하여 투입한 후 녹조제어 효과를 평가한 결과, *D. similoides*와 *D. pulex*는 서로 유사한 녹조제어 능

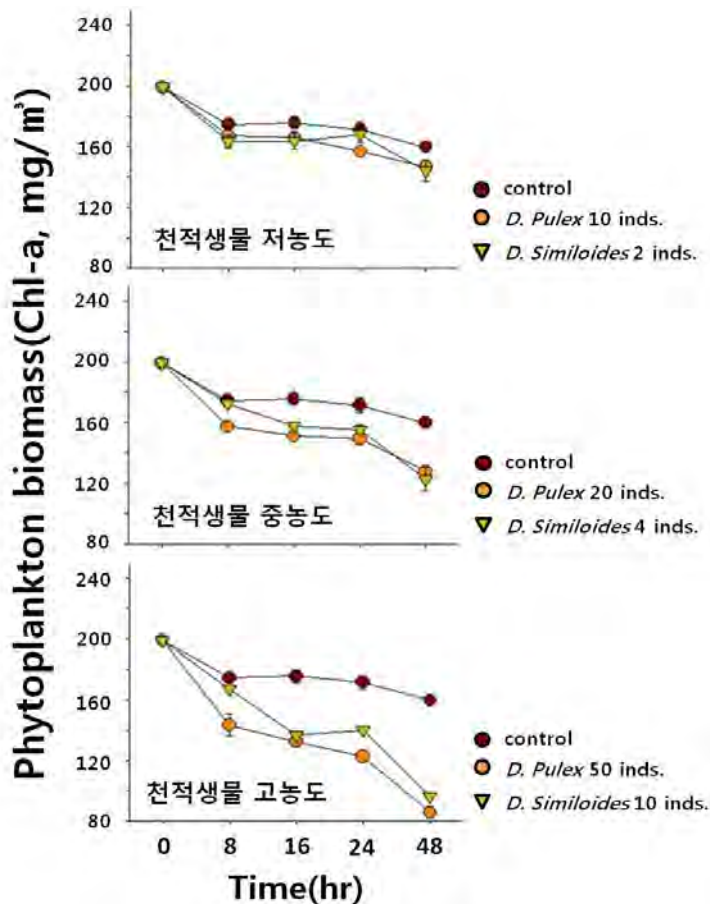
력을 가지고 있는 것으로 나타났다. 실험초기 Chl-*a* 농도가 20 mg/m³ 일 경우, *D. pulex*는 40 inds./L, *D. similoides*는 4 inds./L 이상일 때 Chl-*a* 농도를 절반이상 저감시키는 것으로 나타났으며, 48시간 경과 후 10 mg/m³ 이하로 저감되었고, 대조구와 비교한 결과 *Daphnia*에 의한 저감량은 투입한 *Daphnia*의 생체량과 비례하여 증가하였다(그림 2.34). *D. pulex*와 *D. similoides*는 체장이 서로 달라 개체 당 생체량이 다르기 때문에 본 실험에서는 동일한 생체량이 되도록 개체수를 조절하였다. 개체수 측면에서는 *D. similoides*가 보다 적은 개체수임에도 불구하고 개체 당 섭식능력이 높아 효과적으로 식물플랑크톤 생체량을 저감시키는 것으로 나타났다.



<그림 2.35> 남조류 *Microcystis*(좌)와 *Oscillatoria*(우)에 의한 녹조대발생 시 저수지 물을 이용한 *D. pulex*와 *D. similoides*의 녹조제어 효과

동일한 방법으로 *Oscillatoria* sp.가 우점하여 녹조가 발생한 전대저수지의 물을 사용하여 두 종류 *Daphnia*의 섭식능력을 동일한 방법으로 평가한 결과, 약 200 mg/m³의 Chl-*a* 농도가 *Daphnia* 투입 후 48시간 이내에 50 % 가까이 감소하는 것으로 나타났다. 대조구와 비교하여 *Daphnia* 섭식에 의하여 저감된 식물플랑크톤 생체량은 역시 투입된 *Daphnia* 개체수에 비례하여 증가하였다. 두 종의 개체크기와 생체량 차이를 고려하여 동일 생체량이 되도록 개체수를 조정하여 실험한 결과, 단위생체량에 따른 녹조제어량은 두 종에서 유사한 것으로 나타났으며(그

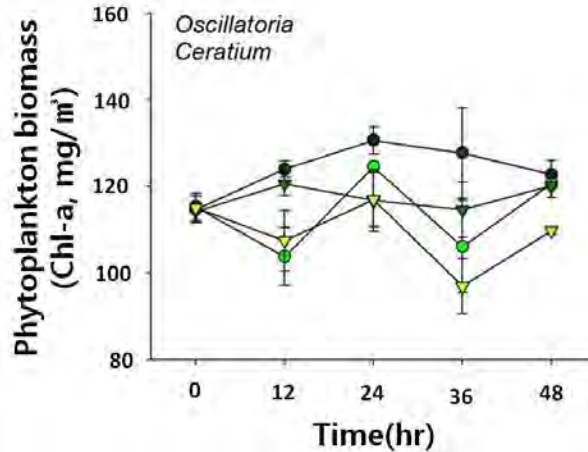
림 2.35), 두 종 모두 생체량이 증가함에 따라 녹조제어량도 증가하였다. 두 종의 천적생물 체장을 이용하여 건조중량을 감안, 동일한 생체량으로 조정하였을 경우 500 ml당 낮은 생체량(*D. pulex* 10개체, *D. similoides* 2개체)일 때는 녹조제어가 나타나지 않았고, 중간 생체량(*D. pulex* 20개체, *D. similoides* 4개체)부터 녹조제어 효과가 나타나기 시작하여 높은 생체량(*D. pulex* 50개체, *D. similoides* 10개체)에서 녹조제어 효과가 뚜렷이 나타났다. 따라서, 천적생물로 인한 녹조제어 효과를 위해서는 *D. pulex* 100 inds./L 및 *D. similoides* 10 inds./L가 요구되었다.



<그림 2.36> *Oscillatoria*에 대한 *D. pulex*와 *D. similoides*의 녹조제어 효과

한편, *D. similoides*를 이용하여 남조류인 *Oscillatoria* 와 와편모조류인 *Ceratium*이 우점하였을 때 전대저수지의 물을 채수하여 섭식실험을 수행한 결과 초기 Chl-a 농도 120 mg/m³에서 *D. similoides*로 인한 Chl-a 감소 효과가 나타나지 않았다. 투입한 *D. similoides*의 최고 개체군 밀도에서도 48시간 경

과 시 Chl-a 농도의 저감 현상이 관찰되지 않았다(그림 2.36). 이는 섭식이 쉽지 않은 *Ceratium*의 존재로 인해 *D. similoides*의 섭식행동이 크게 제약을 받아(Sommer *et al.* 2006), 섭식을 통한 녹조제어효과가 상쇄되는 것으로 나타났다. 실험 후 투입된 *D. similoides* 개체가 모두 생존하였으므로, 대상 수체의 수질에 의한 영향보다는 식물플랑크톤의 종조성에 의해 섭식을 통한 녹조제어 효과가 영향을 받은 것으로 사료된다.



<그림 2.37> 남조류 *Oscillatoria*와 와편모조류 *Ceratium* 공동 우점 현장 원수에 대한 *D. similoides*의 녹조제어 능력 평가

$$\left[\frac{\text{개체당 녹조제어능력} = \text{Chl.a [Control (no Daphnia)]} - \text{Chl.a [Daphnia]}}{\text{Daphnia 개체수}} \right] / \text{일}$$

<p>조기식물플랑크톤 농도 20 mg/m³ (남조류, <i>Microcystis</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>D. similoides</i> = 0.68 mg / m³ / day • <i>D. pulex</i> = 0.16 mg / m³ / day 	<p>조기 식물플랑크톤 농도 200 mg/m³ (남조류, <i>Oscillatoria</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>D. similoides</i> = 3.17 mg / m³ / day • <i>D. pulex</i> = 0.74 mg / m³ / day
--	---

<그림 2.38> *Daphnia pulex*와 *Daphnia similoides*의 남조류 저감 능력

남조류인 *Microcystis*와 *Oscillatoria*를 대상으로 천적생물에 의한 녹조제어 효과 분석 결과, *Daphnia* 개체당 저감율로 환산시 *D. similoides*가 24시간동안 3.17 Chl-a mg/m³를 저감시킬 수 있는 최고 효과를 보여주었다(그림 2.38). 즉, 녹조발생 수역에서 *D. similoides* 밀도를 10 inds./L로 유지하였을 경우 하루에 약 30 mg/m³의 식물플랑크톤 생체량을 저감할 수 있는 것으로 평가되었다.

천적생물 중주인 *Daphnia*의 섭식능력은 성장에 따른 개체 크기, 생체

량이나 개체수와 같은 성장관련 변수 뿐 아니라, 온도 등 환경요인에 의해서도 달라지기 때문에 평가의 어려움은 있으나, 단시간에 대형개체의 개체수를 확보하여 녹조발생 수역에 살포하여 녹조제어효과를 극대화하는 경우, *D. pulex*와 *D. similoides*는 충분한 녹조제어 효과가 있을 것으로 판단되었다.

결론적으로 다양한 천적생물 성장실험과 생존실험, 녹조제어효과 실험 결과를 토대로 녹조발생수역에 효과적으로 적용가능한 천적생물 종주는 *D. similoides*로 결정하였으며, 봄철 일부 시기에만 *D. pulex*를 종주로 활용하는 것이 효과적인 것으로 사료되었다.

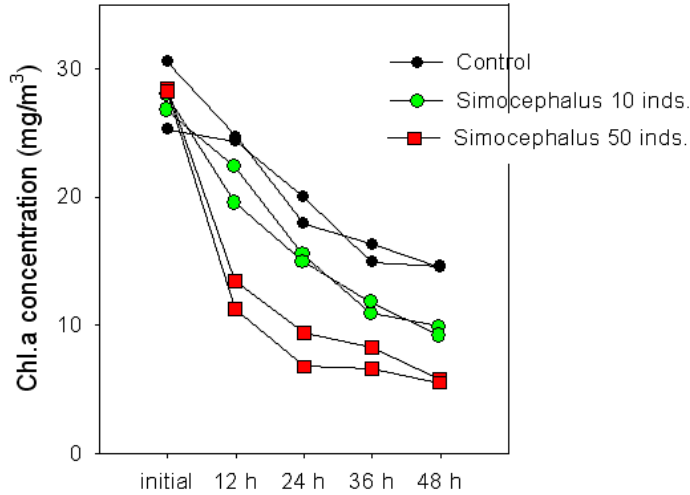
다. 자연 천적생물의 녹조제어 능력 평가

연구결과 확립한 최적의 배양조건을 이용하여 천적생물 배양시설에서 천적생물을 배양한 결과, 천적생물 종주으로써 투입된 *Daphnia* 외에 현장에서 분리된 대형 물벼룩 종인 *Simocephalus ventulus*가 배양조 내에서 우점하는 현상이 관찰되었다. 이는 전대저수지 현장에서는 어류 포식압으로 인해 개체수 증가가 이루어지지 않았던 대형 물벼룩 종이 배양조 내에서 증식한 것으로 사료된다. 이렇게 자연적으로 분리된 천적생물의 경우 별도의 실내 증식 과정 없이 현장에 적용이 가능한 장점을 가지고 있어, 본 연구에서는 자연적으로 분리된 천적생물 *Simocephalus ventulus*의 조류 저감 능력을 종주분리 천적생물 조류 저감 능력 평가와 동일한 방법으로 평가하였다. 본 평가에서는 *Oscillatoria*가 우점하는 전대저수지의 현장 원수를 이용하여 실험을 진행하였다.

그 결과, 현장에서 분리된 자연천적생물인 *Simocephalus ventulus*의 경우 개체 당 약 $0.5 \text{ mg/m}^3/\text{day}$ 의 녹조제어 능력을 가지고 있는 것으로 나타나 종주분리 대형 천적생물인 *Daphnia similoides*에는 약간 못미치지만 *Daphnia pulex*보다는 뛰어난 것으로 나타났다(그림 2.39). 따라서, 향후 현장에서 녹조제어 천적생물로 활용성이 높은 것으로 판단되었다.

실내에서 종주 분리되어 투입되는 천적생물의 경우 계절적인 적용에 제약이 따를 수 있다. 여름철 고온조건 및 현장 수질 악화에 의한 천적생물의 현장 적응성 저하 등이 발생할 가능성이 있다. 반면, 현장에서 분리된 자연 서식 천적생물의 경우 현장 수질과 고온의 조건에 높은 적응성을 가지고 있어 개체수 증가를 유도할 수 있다. 따라서, 종주분리 천적생물과 병행하여 활용할 경우, 계절에 따른 천적생물의 증감 없이 일정한 천적생물량을 확보

할 수 있을 것으로 사료되며, 현장 조건의 악화 등 환경변화에 제약 없이 농도 제어에 활용이 가능할 것으로 예상된다.



<그림 2.39> 자연분리 천적생물 *Simocephalus ventulus*의 *Oscillatoria* 제어 효과

2. 천적생물 종주 배양(100 L) 및 종주의 대량 배양 최적조건

천적생물 종주인 *Daphnia*의 실내 배양은 50 ~ 75 L의 수조를 이용하여 실시하였으며, 먹이공급과 함께 주기적인 물 교환이 이루어지도록 적절한 농도의 시판용 클로렐라를 잘 섞은 물(24시간 이상 에어레이션을 시킨 수도물) 약 2 L을 하루 두 번 투여하여 5 % 가량의 물이 매일 순환되도록 함으로서 고밀도를 유지시킬 수 있는 것으로 나타났다(그림 2.40).

종주배양을 위한 실내 배양 수조 내 *Daphnia* 수의 증감은 이론적, 산술적 증감경향보다는 다소 예측하기 힘든 경향을 보였다. 특히, 초기 투여 개체수가 많을 경우에 쉽게 증가하여 약 5일 이내 고밀도를 형성하는 것으로 나타났으나, 초기 투여 개체수가 적을 경우에는 개체수 증가에 많은 시간이 소요되었다. 초기 투여 개체수 약 100개체로 배양할 경우 약 10일 정도면 고밀도에 도달하는 것이 보였다.

배양 수조내의 *Daphnia*는 군체를 형성하여 수조 내 개체수의 정량화에 힘든 부분이 있으나, *D. similoides*의 경우 초기 100개체를 수조에 이식하고 배양을 시작하였을 때, 8일에 개체군 밀도가 68 inds./L에 도달하고, 12일에 약 160 inds./L에 도달하였다.



<그림 2.40> 실내 대량배양수조의 구조와 배양 조건

배양 수조내에서 개체군 증가율을 계산한 결과, 초기 투입 후 고밀도에 이르기까지의 평균 개체군 밀도 증가율은 약 0.5인 것으로 나타났다. 배양 초기 개체군 밀도가 낮은 조건에서는 개체군 증가율이 낮은 것으로 나타났으나, 안정적으로 개체군이 증가하여 포화상태에 이르기까지는 높은 개체군 증가율을 나타냈다. 즉, 개체군 밀도가 안정적으로 증가하는 수조에서는 개체군 밀도가 두 배로 증가하는데 2일이 소요되며, 다수의 수조에서 고밀도를 유지하면서, 이들 개체군을 새로운 수조로 유입하는 방법을 사용하면, 수조 별 증식된 개체수의 반을 수거하여 사용하더라도 이들 내에 포화 상태의 고밀도 수조를 재형성할 수 있는 것으로 나타났다.

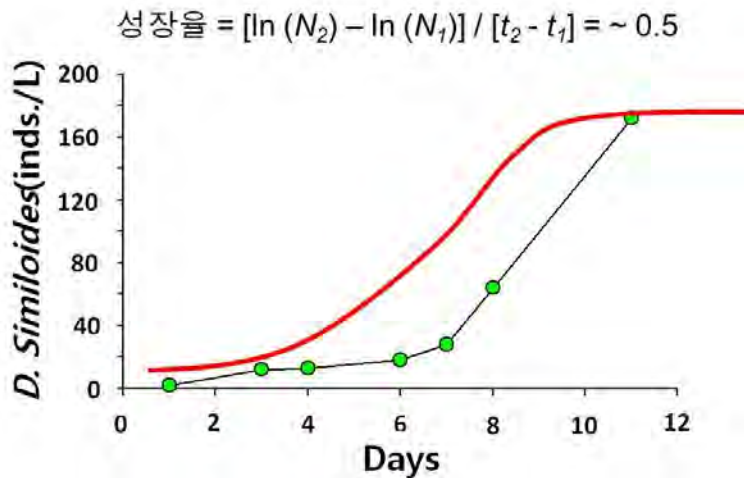
수조에서 천적생물이 고밀도로 유지되고, *Daphnia*는 표면 근처에서 무리를 형성하여 높은 개체군 밀도를 나타내는 것이 관찰되었다. 하지만, 먹이 부족으로 인한 어린개체의 감소 및 먹이 과다 공급으로 잉여의 클로렐라가 소비되기 전 대량 침전, 수질악화를 유발하여 급격한 개체수 감소 등이 빈번히 발생하였다. 다수의 배양수조를 이용하여 고밀도를 유지, 각 수조의 개체수 변화를 관찰하며 고밀도 개체수 수조에서 일정 개체수를 저밀도 개체수로

분산시키며 수조를 유지하면 다수의 배양수조에서 *Daphnia*의 대량배양이 가능한 것으로 나타났다.

종주배양 수조의 크기는 50 L 이상에서 용이하게 고밀도를 유지시켰으나, 20 L 정도의 소형 수조에서는 고밀도 형성, 유지가 용이하지 않은 것으로 나타났다. 또한, 수질유지를 위해 산소의 유입(airation)은 필요하나, 물의 흐름이 강하게 발생하면 *Daphnia*의 성장이 저해되는 것으로 나타나, 수면 가까이에서 약하게 산소를 공급해 주는 것이 가장 이상적인 것으로 나타났다.

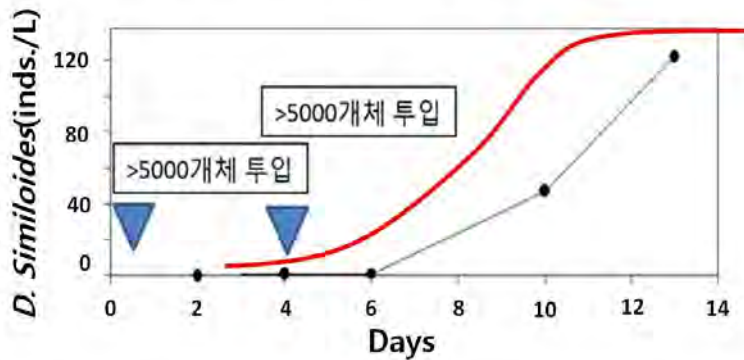
고밀도 배양을 유지할 경우 75 L 수조에서 한 번에 약 2,000 ~ 3,000 개체를 주기적으로 채취 할 수 있어 이들 개체를 녹조발생 수역의 천적생물 배양장치로 옮겨 대량배양이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 녹조발생 수역에 설치된 천적생물 배양장치에 종주배양 시스템을 함께 만들 경우, 먹이 공급과 물순환으로 인해 발생하는 overflow에 포함된 *Daphnia* 개체가 실외 천적생물 배양장치로 자동 공급되는 방법을 적용하면 종주배양과 현장 대량배양 장치가 연계되어 주기적인 *Daphnia* 자동화 공급시스템이 확보될 것으로 생각된다.

실내에서 고밀도 종주 배양된 *D. similoides*는 2 L 용기에 약 1,000 ~ 2,000 개체를 수용하여 신속하게 현장으로 이동하였으며, 현장의 천적생물 배양장치의 천적생물 배양조에 투입되었다. 천적생물 배양조에서 녹조가 발생된 전대저수지의 물속에 포함된 식물플랑크톤을 먹이로 공급하여 배양하였을 때 1회당 약 5,000개체 이상을 2회 반복 투입하였을 경우 개체수가 100 inds./L 이상으로 증가하는데 약 13일이 소요되었다.



<그림 2.41> 실내 대량배양수조(75 L)에서의 *D. similoides*의 개체군 밀도 변화

$$\text{성장율} = [\ln(N_2) - \ln(N_1)] / [t_2 - t_1] = \sim 0.5$$



<그림 2.42> 천적생물 배양장치에서 *D. similoides*의 개체군 밀도 증가 경향

실외에 설치된 천적생물 배양장치(5톤 규모)에서의 천적생물 개체군 증가율은 실내 종주배양 수조에서의 개체군 밀도 증가율과 유사한 약 0.5인 것으로 나타났으며, 안정적으로 개체군 밀도가 증가하기 시작하면, 2일마다 개체군 밀도가 두 배로 증가할 것으로 예상된다(그림 2.41, 그림 2.42).

천적생물 배양장치에서 *Daphnia*가 균일하게 분포하지 않아 정량화에 어려움이 있고, 보다 개체군 밀도를 높이기 위해서는 배양조를 물리적으로 구간별 구획을 만들어 유지할 필요가 있는 것으로 나타났다. 또한 수질유지를 위한 산소유입이 강한 경우 물의 흐름을 발생시켜 *Daphnia*의 성장을 저해하는 것으로 나타났다. 따라서, 물의 흐름을 발생시키지 않는 미세기포를 사용하거나, 시간을 조절하여 주기적으로 산소유입의 유무를 반복시켜, 천적생물 배양조 내부의 *Daphnia*가 물리적인 저해작용을 받지 않게 하는 것이 중요한 것으로 나타났다. 또한 *Daphnia*를 포식하는 수서곤충의 증가와 배양조내 대형 녹조류 증가 등으로 인해 *Daphnia*의 개체수는 초기 배양 시점부터 1개월 후에 대체적으로 감소하는 경향을 보여 살포시기에 맞추어 단기간 *Daphnia* 생체량을 증가시켜 1주일 이내에 대량 살포하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

이상과 같이 제시된 조건하에서 실내 및 실외에서 종주분리된 천적생물(*Daphnia pulex*, *Daphnia similoides*)을 대량배양할 경우, 적정 조건에서는 개체군 밀도 증가율이 약 0.5 수준으로 개체군이 유지되었으며, 실내 종주 배양 수조에서는 2일에 1회 간격으로 5,000 개체의 천적생물을 현장 대량배양에 사용할 수 있는 것으로 나타났다.

3. 천적생물의 먹이망 내 위치와 섭식효과 및 제한요인

본 연구에서 녹조원인생물을 제어하기 위한 천적생물로서 동물플랑크톤을 적용하고 있으며, 이들 천적생물의 저수지 생태계 먹이망내 위치와 섭식효과, 제한 요인 등에 대해 살펴보았다.

동물플랑크톤은 수체 내에 존재하는 식물플랑크톤 이외에 부착조류 및 기타 기질에 존재하는 미생물과 유기물 등을 먹이원으로 사용한다(Grey and Jones, 2001).

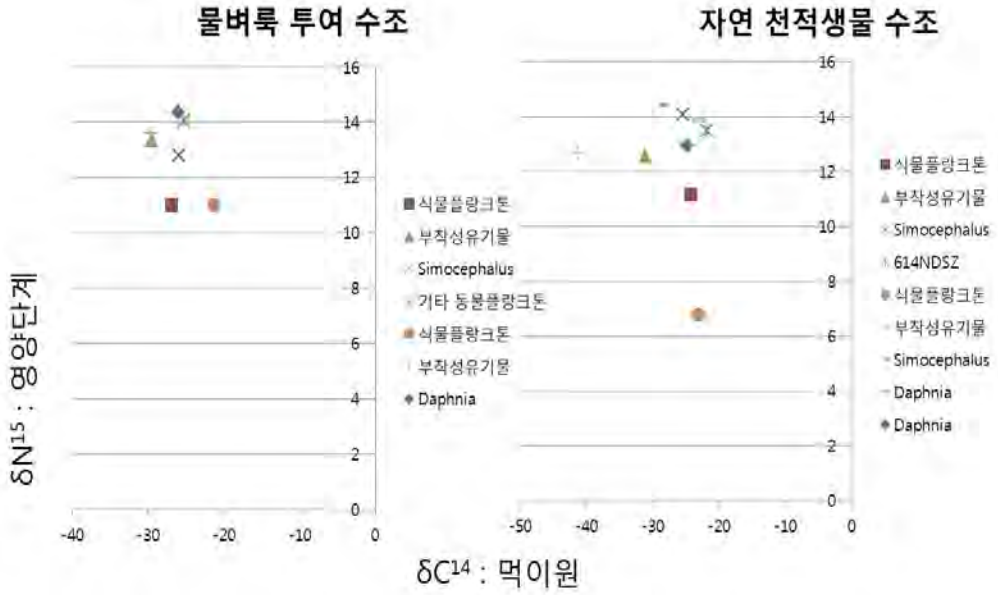
실내에서 종주 배양한 *D. similoides*를 투입한 천적생물 배양조와 자연 분리된 천적생물 배양조의 먹이망 구조를 분석한 결과, 투입된 *D. similoides*와 함께 출현한 자연분리 천적생물인 지각류도 수조의 식물플랑크톤을 주로 섭식하는 것으로 나타나, *D. similoides*와 자연분리 천적생물은 녹조발생 수역에서 식물플랑크톤 농도를 저감시키는데 효과적일 것으로 판단되었다.

전대저수지의 녹조발생수역에서 녹조제어 기능을 할 수 있는 천적생물로서 *Daphnia galeata* 및 *Simocephalus*등 대형 지각류와 소형 윤충류, 소형 지각류(*Bosmina longirostris*) 등 기타 동물플랑크톤과 동물플랑크톤의 포식자로서 어류, 그리고 저감 대상인 소형 식물플랑크톤(20 μm 필터)과 대형 식물플랑크톤(> 20 μm)에 대해 안정동위원소비를 측정하여 이들의 생물학적 상호작용을 분석하였다.

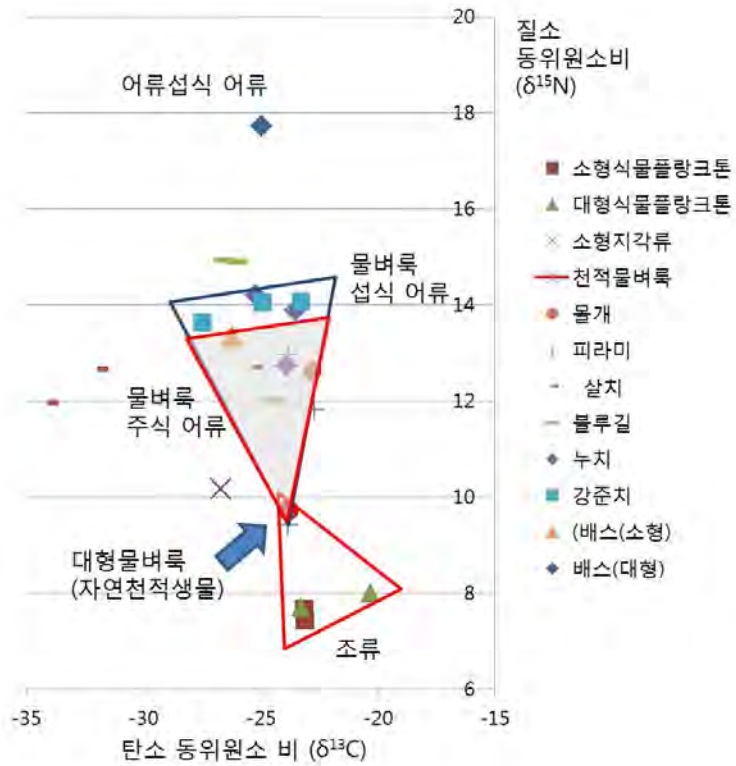
소형 및 대형 식물플랑크톤은 대형 지각류에게 주로 포식되는 것으로 나타났고, 대형 지각류는 식물플랑크톤의 주요 섭식자지만 동시에 물개, 피라미, 소형 블루길에게 주로 섭식당하고 있는 것으로 나타났다. 반면, *Bosmina longirostris*와 윤충류는 소형 식물플랑크톤을 주로 섭식하는 것으로 나타났다.

어류의 포식압은 소형 지각류보다 *Daphnia*를 포함한 대형 지각류에 집중되는 것으로 나타나 *Daphnia*를 대상으로 한 천적생물 종주의 대량 살포는 녹조발생 수역의 녹조 제어에 매우 효과적이지만 소형어류의 포식압으로 인해 개체군 분포와 밀도가 크게 제한될 것으로 판단되었다.

동일한 탄소동위원소비는 동일한 먹이원을, 질소동위원소비의 증가는 피식-포식자 관계가 성립함을 나타낸다.



<그림 2.43> *D. similoides* 배양조와 자연분리 천적생물 배양조의 먹이망 구조



<그림 2.44> 탄소 및 질소 안정동위원소비를 이용한 *Daphnia*의 먹이망 내 위치

4. 천적생물 종주의 최적 배양조건

천적생물 종주의 실내 및 현장의 대량배양 최적 조건과 배양방법을 표 2.10에 요약하여 나타내었다.

(표 2.10) 실내 및 현장 대량배양 최적 조건

배양목적	기본 배양 조건	배양 조건 및 유의사항
종주 유지 배양	<ul style="list-style-type: none"> ●적정배양크기: 1 L ●배양수 : 24시간 이상 산소공급하며 저장해 둔 수돗물 또는 식물 플랑크톤 배양용 배지 ●수온: 20~25 °C ●먹이: 클로렐라 ●산소공급: 불필요 	<ul style="list-style-type: none"> ●온도조절이 되는 배양기 또는 실험실내 배양 ●클로렐라 5×10^5 cells/ml가 되도록 매일 1회 공급 ●찌꺼기가 생기면 물교환 (월 1회, 채를 이용 <i>Daphnia</i>를 새 비이커로 이동)
실내 대량 배양	<ul style="list-style-type: none"> ●적정배양크기: 50~100 L ●배양수: 24시간 이상 산소공급하며 저장해 둔 수돗물 ●수온: 20 - 25 °C ●먹이: 클로렐라 ●산소공급: 표면에 에어레이션 	<ul style="list-style-type: none"> ●비이커에서 배양한 천적생물 <i>Daphnia</i>을 대형 배양 용기에 100개체 이상 되도록 투입하여 배양 시작 ●온도조절이 되는 실내에서 배양 ●클로렐라 1×10^5 cells/ml 가 되도록 하여 1일 2회 공급 ●50 L 수조 기준으로, 먹이는 2 L 원수에 클로렐라를 섞어 공급하여, 먹이 공급 시 수조 저층 물 교환(1일 교환율 10 % 이하가 되도록 조절) ●불필요한 미생물의 증가를 막기 위해 영양분이 들어간 배양용 배지 사용 지양 ●주기적으로 저층의 찌꺼기 펌프를 이용하여 배출 (월 1회) ●산소 공급은 수조 내 강한 물흐름이 생기지 않도록 주의
천적생물 배양장치 대량 배양	<ul style="list-style-type: none"> ●배양수조: 1 m³ 이상 ●수온: 실외에서 30 °C 넘지 않도록 주의 ●먹이: 적용대상 하천 또는 저수지의 원수 필터 후 공급 ●산소공급: 약한 에어레이션 공급 	<ul style="list-style-type: none"> ●실내 대량 배양의 천적생물 <i>Daphnia</i> 1,000개체 이상 실외 대량 배양 수조에 투입하여 배양 시작 ●수온이 30도가 넘지 않도록 필요한 경우 천막 등으로 직사광선 차단 필요 ●먹이를 포함한 원수 유입과 스크리닝한 원수 유출로 물 교환(인공섬 살포시설 수조 참고) ●산소 공급 시 수조 내의 강한 물흐름이 생기지 않도록 주의 ●유입되는 먹이원이 와편모조류 등 섭식이 곤란하거나 독성 플랑크톤일 경우 주의 ●수서곤충의 증가로 인한 개체수 감소 주의

제4절 천적생물 배양장치 개발 및 기능향상

1. 천적생물 배양장치 개발 및 운영, 유지관리

가. 배양장치 개발

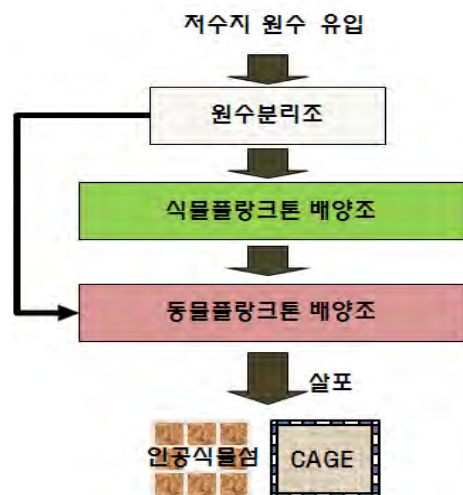
천적생물 배양장치는 녹조 원인생물의 제어 및 성장억제를 위해 대상 수역에 살포하는 동물성 플랑크톤의 원활한 증식과 성장을 유도하는 장치로서 배양장치를 개발함에 있어서 다음의 기능을 포함하도록 하였다.

- 대상 수역(농업용 저수지)으로부터 물을 직접 양수
- 공급된 물로부터 식물플랑크톤과 동물플랑크톤을 분리하는 기능
- 분리된 식물플랑크톤과 동물플랑크톤을 각 배양조로 정량 공급하고 최적의 성장조건을 위한 체류시간 확보
- 녹조발생 구역에 동물플랑크톤 살포할 수 있는 구조

녹조제어를 위한 천적생물 배양장치는 전대저수지의 녹조발생 특성과 천적생물 분포 특성, 현장 살포의 적용성 등을 고려하여 녹조발생수역의 수면에 직접 적용가능한 수상부유형(수상형) 장치를 고안하여 1차년도(2010년)에 제작, 설치하였으며 2차년도(2011년)에는 전대저수지 수변의 홍만수면 부지를 활용하여 육상형 장치를 고안하여 설치하였다.

(1) 배양장치 구성 및 흐름도

천적생물 배양장치의 구성은 최초 저수지 물을 양수하여 유입시키는 원수분리조와 먹이생물의 배양을 위한 식물플랑크톤 배양조 및 천적생물 배양과 살포를 위한 동물플랑크톤 배양조로 구성되고, 살포한 천적생물의 녹조제어효과와 생존률을 높이기 위해 방류구 말단에 인공식물섬과 cage를 설치하였으며 그 흐름은 그림 2.45와 같다.

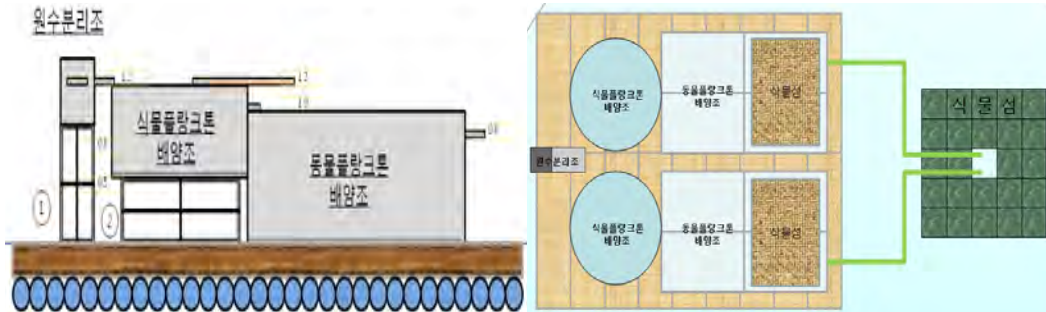


<그림 2.45> 배양장치 흐름도

(2) 수상형 배양장치

(가) 장치개요

1차년도에 제작한 수상형장치는 천적생물 배양조 기준 5 m² 규모 2계열로 구성되어 있으며, 원수분리조, 식물플랑크톤배양조를 평면으로 배열하여 부력체를 이용, 물위에 띄운 형태이다.(그림 2.46, 2.47)



<그림 2.46> 수상형 배양장치(10m²) 측면도(좌) 및 평면도(우)



<그림 2.47> 천적생물 배양장치 운영 모습(10m², 2010년도 설치)

(나) 원수분리조

원수분리조는 양수한 대상수역의 물로부터 식물플랑크톤과 동물플랑크톤을 분리하여 각 배양조로 유량을 분배하는 기능을 한다. 규격은 0.5 mW × 0.5 mL × 0.5 mH이며 1세트를 제작하여 2계열에 원수공급이 가능토록 했다.

(다) 식물플랑크톤 배양조

식물플랑크톤 배양조에는 풍력교반기를 설치하여 자연풍에 의한 교반을 피하였고 이를 위해 원형의 구조로 2세트를 제작하였다. 체류시간은 식물플랑크톤 배양조 유입량에 대해 1.5일을 유지할 수 있도록 하였으며 그 규격은 Φ2.0 m × 0.7 mH이고 유효수심은 50 cm를 유지하였다.

(라) 동물플랑크톤 배양조

동물플랑크톤 배양조는 체류시간 2.5일을 기준으로 그 규격은 3.0 mW × 3.2 mL × 1.0 mH이며 유효수심은 80 cm로 운영하였다. 동물플랑크톤 배양조에는 배양조 수면적 대비 50 %에 인공식물섬을 설치하여 직사광선 차단과 천적생물 배양환경을 조성하였다.

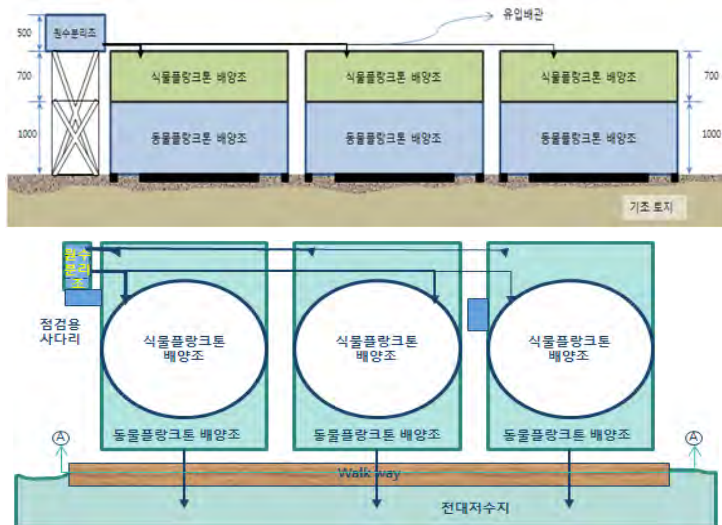
(마) 방류구

1차년도에 설치한 수상형 배양장치의 방류지점에는 천적생물의 생존을 높이고자 인공식물섬을 설치하였으며 설치면적은 25m²이고 방류관을 인공식물섬 중앙에 고정하여 천적생물을 살포하였다.

(3) 육상형 배양장치

(가) 장치개요

육상형 배양장치는 천적생물 배양조 기준 10 m³ 규모 3계열로 제작·설치하였으며, 시설 구성은 원수분리조 1 set, 식물플랑크톤 배양조 3 set, 동물플랑크톤 배양조 3 set로 구성하고, 수상형장치와 달리 식물플랑크톤 배양조를 천적생물 배양조 위에 올려 설치면적을 최소화하였다.(그림 2.48) 또한, 저수지의 물을 유입펌프를 이용하여 배양장치의 원수분리조에 유입시킨 후 자연유하흐름을 유지하도록 배치하였으며 저수지내 살포지점에는 식물섬 25 m²를 설치하고 방류관을 식물섬 중앙에 고정하여 살포된 동물플랑크톤의 은신처 역할을 할 수 있도록 구성하였다.(그림 2.48, 2.49)



<그림 2.48> 육상형 천적생물 배양장치(30 m²) 측면도(상) 및 평면도(하)



<그림 2.49> 육상형 천적생물 배양장치 설치 모습

(나) 원수분리조

원수분리조 규격은 0.5 mH × 1.0 mL × 0.5 mH로서 1 set를 제작하였으며 3계열의 배양장치에 유량을 분배할 수 있는 구조로 제작하였다. 1차년도와 달리 식물플랑크톤 이송관을 동물플랑크톤 이송관보다 30 cm 낮게 설치하여 분리망의 여과면적을 최대한 활용할 수 있게 하고 각 배양조로의 유량 배분이 쉽게 이루어 질 수 있도록 하였다.

(다) 식물플랑크톤 배양조

수상형 배양장치와 동일하게 원형의 구조로 제작하였으며 동물플랑크톤 배양조 위에 설치하여 소요부지를 최소화 하였다. 배양조 용량은 체류시간 3일 기준으로 규격은 $\Phi 3.0 \text{ m} \times 0.7 \text{ mH}$ 이고 유효수심은 50 cm이며 3세트를 제작하였다. 수상형 배양장치와는 다르게 풍력교반기 대신 수중 교반기를 설치하여 Timer에 의한 자동운전이 가능하도록 하였다.

(라) 동물플랑크톤 배양조

동물플랑크톤 배양조는 직사각형 구조로서 체류시간은 4일이고 규격은 3.0 mH × 4.5 mL × 1.0 mH이며 3세트를 제작하였다. 수상형 배양장치는 수면적 대비 50 % 면적에 인공식물섬을 설치하여 직사광선을 차단하였으나 육상형 배양장치는 동물플랑크톤 배양조 상부에 식물플랑크톤 배양조를 설치함으로써 자연적으로 직사광선이 차단되는 효과가 있다.

(마) 방류구

육상형 배양장치 방류구에는 인공식물섬과 cage를 동시에 설치하고 녹조발생 여건에 따라 선택적으로 살포하여 각각의 효과를 관찰할 수 있도록 하였다. 인공식물섬의 규격은 1차년도와 동일하게 25 m²(5 m × 5 m)를 설치하여 노랑꽃창포를 식재하였다. cage는 유효용량 36 m³으로 규격은 6.0mH × 6.0 mL × 1.5 mH이며 내부에 500 μm 메쉬망을 설치하였고 부체를 이용하여 수상에 부유할 수 있도록 하였다.

(표 2.11) 천적생물 배양장치별 규모 비교

구 분		2010 년도 (수상형)	2011 년도 (육상형)	비 고
시설규모		10 m ³	30 m ³	
1일 유입량		4 m ³ /day	10 m ³ /day	
식물 플랑크톤 배양조	유량	2 m ³ /day	5 m ³ /day	
	체류시간	1.5 day	3.0 day	
	유효용량	3 m ³	15 m ³	
동물 플랑크톤 배양조	유량	4 m ³ /day	10 m ³ /day	
	체류시간	2.5 day	4.0 day	
	유효용량	10 m ³	40 m ³	

(4) 배양장치의 제원 및 비용분석

(가) 배양장치의 제원

1차년도와 2차년도에 순차적으로 제작하여 연구에 사용한 천적생물 배양장치의 제원은 다음과 같다.

(표 2.12) 천적생물 배양장치 제원

구 분	수상형(10톤)	육상형(30톤)	비 고
원수분리조	0.5 mW × 0.5 mL × 0.5 mH 1 set	0.5 mW × 1.0 mL × 0.5 mH 1 set	
식물플랑크톤 배양조	Φ 2.0 m × 0.7 mH 2 set	Φ 3.0m × 0.7mH 3 set	
동물플랑크톤 배양조	3.0 mW × 3.2 mL × 1.0 mH 2 set	3.0mW × 4.5mL × 1.0mH 3 set	
인공식물섬	5 m × 5 m	5m × 5m	
cage	6.0 mW × 6.0 mL × 1.5 mH	6.0mW × 6.0mL × 1.5mH	

(나) 시설 설치비

2010년에 제작한 10톤 규모의 수상형 천적생물 배양장치와 2011년 제작한 30톤 규모의 육상형 천적생물 배양장치는 실험 및 연구를 위한 시설로서 시설의 내구성을 배제하고 최소의 사양으로 구성하여 설치하였으며 3년간의 연구기간동안 산소공급을 위한 산기관의 신설, 하부 경사판 설치, 유출구 메쉬망 신설 및 대량살포 방류구 설치, cage 제작설치 등 부분적으로 기능개선을 진행해 왔다. 실험시설의 주요 제원에 대한 소요비용은 다음과 같다.

(표 2.13) 천적생물 배양장치 소요비용

구 분	수상형(10톤)	육상형(30톤)	비 고
천적생물 배양장치	16,000,000 원	48,000,000 원	
바지선	24,200,000 원	-	
인공식물섬	6,400,000 원	4,800,000 원	
Cage	5,995,000 원	5,995,000 원	
배관공사 및 잡철	4,140,000 원	24,000,000 원	현장설치에 따른 중기사용료 포함
전기공사	1,400,000 원	4,400,000 원	판넬제작, 기계장치 배선
기능개선 및 보수	6,604,000 원	5,008,000 원	
합 계	64,739,000 원	92,203,000 원	

- 연구인력 인건비 및 제경비 제외

(다) 유지관리비

유지관리비는 2012년 배양장치를 10개월 운영한 기준으로, 현장관리인 1인(1일 4시간, 월 26일 근무)의 월정액과 전기료 등 제반 운영비를 포함하여 산출한 결과 연간 ₩12,784,510원이 소요되었다.

(표 2.14) 유지관리비 산출내역

연간 유지관리비	현장관리인 인건비	전기료	소모품비	예비비
12,784,510원	9,800,000원	783,610원	900,000원	2,200,000원

- 천적생물 배양장치 40톤(수상형 10톤 + 육상형 30톤) 기준
- 운영기간 : 3월 1일 ~ 11월 30일(9개월)
- 인건비 : 980,000원/월 × 10개월 = 9,800,000원
- 전기료 : 783,610원(2012. 1월 ~ 12월 연납부 총액, 1.25kW 일반용기준)
- 운영비(비품, 소모품포함) : 100,000원/월 × 9개월 = 900,000원
- 예비비(20 %이내) : 현장관리인 1인 작업불가시 보조인부 사용, 주요 부품 교환비 등
- 총 유지관리비 = (인건비+전력비+운영비+예비비) = 12,784,510원

나. 배양장치 운영

1차년도 연구결과 도출된 천적생물 배양장치의 최적배양조건에 따라 식물플랑크톤 배양조의 체류시간은 3일, 동물플랑크톤 배양조는 체류시간 4일조건으로 운영하였으며, 천적생물의 배양에 필요한 먹이생물(식물플랑크톤)의 적절한 공급을 위한 먹이 공급 비율은 먹이원 50 %에 원수 50 %를 공급하였다. 원수분리조는 25 μm 메쉬망 + 에코톤매트 미설치 조건, 인공식물섬의 피복률은 40 %로 하였다.

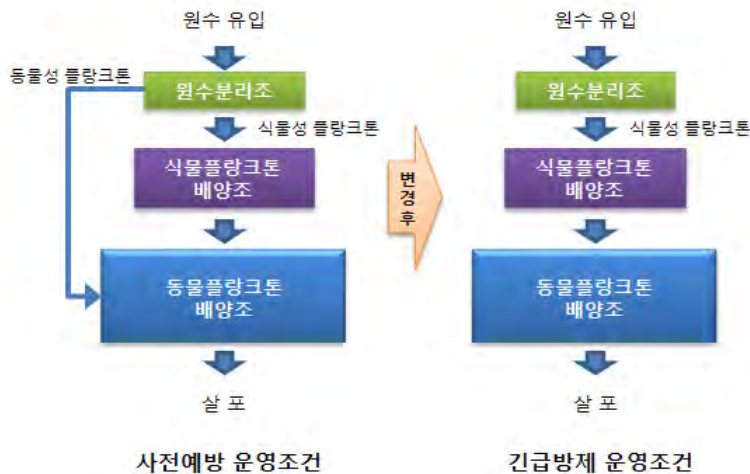
천적생물 배양장치의 최적운영조건은 표2.10 과 같으며, 천적생물 대량 배양을 실시하였다.

(표 2.15) 배양장치 운영조건

원수분리조	25 μ m 메쉬망 + 에코톤 미설치	
플랑크톤 배양조		
구 분	식물플랑크톤 배양조	동물플랑크톤 배양조
체 류 시 간	3 일	4 일
먹 이 공 급 량	-	50 %
교 반 장 치	풍력교반	풍력교반
인 공 식 물 첨	-	40 %
자 광 막	-	50 %
배 양 방 식	연속배양	연속배양 (배양역만 배출)
공 기 공 급	-	산기관으로 연속공급

(1) 유입유량 조절

기 연구된 결과를 바탕으로 평상시(사전예방) 운영조건으로는 식물플랑크톤 배양조의 체류시간을 3일로 유지하고, 동물플랑크톤 배양조는 체류시간 4일로 유지하여 운영하는 것이 안정적인 증식 조건으로 판명되었다. 이는 원수분리조에서 각 배양조로 유입되는 유량을 조절함으로써 배양조건을 만들어 줄 수 있다. 녹조 발생시 긴급방제를 위한 운영조건으로는 식물플랑크톤 배양조의 체류시간을 0.5일로 낮추고 동물플랑크톤 배양조 체류시간을 2.5일로 조정하여 배양시간을 단축시켜 운영한다. 이때에는 원수분리조에서 각 배양조로 공급되던 것을 식물플랑크톤 배양조로만 유입시켜 동물플랑크톤의 원활한 증식을 유도한다.



<그림 2.50> 운영조건 변화

(표 2.16) 운영조건에 따른 배양조 체류시간

운영조건	배양조 체류시간		비 고
	식물플랑크톤	동물플랑크톤	
사전예방 운영	3일	4일	
긴급방제 운영	0.5일	2.5일	

(2) 먹이원 공급

천적생물 배양에 필요한 먹이생물의 공급은 먹이원 50 %에 원수 50 %를 공급했을 때 비교적 안정적으로 유지되었고 먹이 공급원이 클 경우 오히려 먹이생물 공급 과잉에 따른 저해효과가 있었다.

(3) 산소공급

동물플랑크톤 배양조에 산기관을 설치하여 균질한 산소를 공급하는것이 동물플랑크톤 성장에 중요하다. 기존에는 풍력교반기를 설치하여 바람을 이용해 간헐적으로 교반해 주었으나, 동물플랑크톤의 고밀도 성장을 위해 산기관을 설치하고 용존산소 농도를 높이며 균질한 교반이 이루어지도록 하였다.

다. 배양장치의 유지관리

(1) 유지관리 기본계획

천적생물 배양장치의 최적 운영을 위해서는 안정적인 유지관리 계획의 수립이 필수적이다. 특히 자연환경에서 미소생물을 배양하는 것은 상당히 까다롭고, 많은 변수를 가지고 있기 때문에 더더욱 중요하다 하겠다. 대상 저수지의 주변 상황과 물리구조적 특성에 운영방향이 달라지기 때문에 각 저수지의 특성을 잘 반영한 유지관리방안이 적절히 수립되어야만 목적에 따른 기능을 발휘할 수 있을 것이다. 최적의 유지관리를 위해 필요한 사항은 시설운영의 기간이 장기화되면서 시행착오를 통해 수정 보완되어질 것이므로, 본 연구에서 검토한 사항 외에도 유지관리를 위해 필요한 사항이 증가할 수 있다.

천적생물 배양장치가 정상적으로 잘 운영되기 위해서는 지속적인 관리를 요하며, 다음과 같은 사항에 초점을 맞추어야 한다.

- 원수분리조에서 동물플랑크톤과 식물플랑크톤이 잘 분리될 수 있도록 해야한다. 그러기 위해서는 분리막이 찢어지거나 훼손되지 않았는지 항상 체크를 해야하며, 분리조에서 분배되는 각 유량의 양이 적합한지 관리하여야 한다.

- 동물플랑크톤 배양조의 먹이생물 공급비율, 먹이생물의 질 등을 항상 관찰하고, 관리하여야 한다.
- 먹이생물의 질적 관리를 위해 식물플랑크톤 배양조에서 배양상태 등을 꼼꼼히 체크해야 한다.
- 대량 배양된 천적생물의 살포과정에서 중요한 살포장치의 상태를 항상 점검하여 시의 적절하게 현장살포 할 수 있도록 관리해야 한다.
- 배양조내에서 비정상적인 생물의 발견 및 증식여부를 관찰하여 즉시 보고 및 조치해야 한다.

(2) 유지관리

천적생물 배양장치의 유지관리는 상시근무 현장관리인을 두어 일상적인 유지관리를 수행하고, 매월 현장 실험전 정기적 유지관리를 통해 최적의 시설가동과 적절한 실험 수행이 이루어 질수 있도록 하였다.

천적생물 배양시스템의 효과적인 유지관리를 위해 크게 정기적 관리와 비정기적 관리로 구분하여 수행하였다.

(표 2.17) 천적생물 배양시설 유지관리 점검사항

점검사항	점검내용	점검시기
양수설비	- 수중펌프의 이물질부착여부	- 수시점검
시스템작동 패널	- 배양시설 시스템의 오작동	- 전기가 들어오지 않거나 펌프가 작동하지 않을 때
누수점검	- 배관 및 반응조의 누수여부	- 적정유량이 유지되지 않을 때
누적오염물질의 제거	- 반응조내 슬러지 청소	- 2회/년
플랑크톤분리장치	- 분리막의 폐쇄여부 및 청소	- 수시점검
동절기 관리	- 배관, 반응조의 결빙현상 발생여부	- 동절기 수시점검

(가) 정기적 관리

정기적관리는 현장관리인이 현장점검일지에 작성되어 있는 항목을 중심으로 각각의 check list의 정상 여부를 확인, 점검하고, 양수장 가동, 시설 청소, 여과막 및 유입구의 청소 등 정기적 소모품 관리, 청소, 교체 등의 관리업무를 말하며, 이상발생 시에는 즉각 보고할 수 있도록 하였다.

표 2.18와 표 2.19은 천적생물 배양시설 현장점검표와 천적생물 배양시설 현장관리인 점검일지로서, 현장점검표는 현장 세부시설에 대한 정상가동 여부만을 확인하는 체크리스트표이며 크게 실내시험실, 식물플랑크톤 배양조, 동물플랑크톤 배양조, 배양지 양수 및 저장조(원수분리조), 살포장치(매조코즘 포함), 부채 및 접근교 등 주변시설로 구분하여 각 세부 점검사항을 열거하였다.

현장관리인 점검일지는 현장시설의 정상가동여부 확인이외에 별도의 작업지시 또는 별도의 유지관리업무내용을 기입하여 보고하는 서식으로 주간 보고하도록 하였다.

(나) 비정기적 관리

비정기적 관리는 미처 생각지 못한 문제의 발생시 또는 문제발생이 예상될 경우 이루어지는 관리로서 갑작스런 폭우나 강풍에 따른 시설 파손, 유실 위험 등에 대한 대책마련, 또는 부채, 부교 등 외곽 시설에 대한 손상 방지 작업 등이 그것이다. 또한 동절기 배관의 파손 또는 시설운영에 따른 시간경과로 햇빛에 노출된 FRP 파이프 또는 모래주머니 등의 부식에 따른 손상에 대비한 일련의 작업들과 교체, 보강작업 등이 비정기적 관리에 포함되어야 한다.

또한, 시설운영조건의 변경, 즉, 자연분리방법에 의해 가동하다가 종주배양방법으로 전환시 각 장치의 점검 및 수조 내부청소 등이 그것에 해당된다.

비정기적관리는 현장관리인의 정기적 업무외에 발생하는 것으로 관리자의 별도지시에 의해 이루어지고, 또한 단시간에 많은 업무량이 요구되기도 하므로 추가 발생하는 노동력 또는 장비, 재료비 등에 대한 별도의 지원예산이 마련되어 있어야 한다.

일례로 폭우 또는 태풍시 시설유실 또는 파손에 대한 실시간 상황보고 및 보강, 보수작업, 폐기물 정리, 강우에 밀려온 통나무 등 잡쓰레기 제거 작업 등이 해당될 수 있다.

(표 2.18) 천적생물 배양장치 현장시설 점검표

구 분	점 검 사 항 (기록사항은 일일근무일지에 기록)	2011년 (/) 월 점검사항 <input checked="" type="checkbox"/> 체크																														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
배양지 양수 및 저장조	○ 취수부 스크린 부착물 제거	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	○ 모터 가동시 운전상황 점검	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	○ 전기시설의 이상유무 확인	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	○ 저장조 수위확인	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	○ 저장조 온도조절장치 이상 확인	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	○ 탱크 및 배관 누수 확인	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
식물플랑크톤 배양수조	○ 유입부의 유량균등유입 확인·조치	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	○ 여과막 이상유무확인, 이물질제거	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	○ 각 수조의 수위 및 정상흐름 확인	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	○ 각 배관의 밸브 조정 및 이상확인	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	○ 배관 및 수조의 누수확인 및 조치	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	○ 수조주변장치(교반기등) 이상유무	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
천적생물 배양지	○ 유입부의 유량균등유입 확인·조치	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	○ 여과막 이상유무확인, 이물질제거	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	○ 각 수조의 수위 및 정상흐름 확인	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	○ 각 배관의 밸브 조정 및 이상확인	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	○ 배관 및 수조의 누수확인 및 조치	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	○ 수조주변장치 이상유무	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
유출부	○ 유출배관의 정상위치 확인	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	○ 유출부 주변 이물질 제거	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	○ 유출부 경광등정상작동 확인·조치	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	○ 유출배관 안전관리 및 조치	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	○ 메조코즘 이상유무 확인	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
기타시설	○ 시설부체 유실점검 및 간이보수	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	○ 시험시설의 파손확인 및 조치	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	○ 시험시설 주변 이상확인·조치	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	○ 시험시설 시건장치 및 점입자확인	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	○ 시험시설 주야간 순찰	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	○ 시설내외 환경정화	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	○ 안내판 이상확인 및 방문객 확인	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

(표 2.19) 천적생물 배양장치 현장시설 일일 근무 일지

일 자	일일보고시간		확 인		점검내용기록 및 특이사항 조치결과 (특이사항발생시 전화연락처 031-400-1829)
	출 근	퇴 근	관리인	담당자	
10 월 15일 (토요일)	13:00	17:00	이정관	남	이상없음
10 월 16일 (일요일)	13:00	17:00	이정관	남	이상없음
10 월 17일 (월요일)	13:00	18:00	이정관	남	이상없음, 시료채취
10 월 18일 (화요일)	13:00	18:00	이정관	남	이상없음, 시료채취
10 월 19일 (수요일)	13:00	17:00	이정관	남	이상없음
10 월 20일 (목요일)	13:00	18:00	이정관	남	이상없음, 시료채취
10 월 21일 (금요일)	13:00	17:00	이정관	남	이상없음.

한국농어촌공사 농어촌연구원 농어촌환경연구소 Fax)031-400-1889

2. 천적생물 배양장치 기능향상

가. 천적생물 배양장치 보강 및 기능향상

(1) 위치이동 및 방류지점 조정

(가) 수상형 배양장치 위치이동

녹조발생 수역인 전대저수지의 중·하류 구간 전체를 대상으로 천적생물 현장 살포시 녹조제어 효과를 살펴보기 위해 수상형 배양장치를 기존 설치 위치에서 제방방향으로 30 m 이동하여 설치하였다.(그림 2.51)



<그림 2.51> 수상형 배양장치의 호내 이동 설치 모습

(나) 방류지점 조정

배양장치에서 녹조발생수역으로 최대한 근접시켜 방류하기 위해, 인공식물섬과 cage를 저수지 내로 이동시키고 방류배관을 연장하여 설치하였으나, 방류배관이 길어짐에 따라 수두손실로 인해 천적생물 살포시 방류속도가 매우 느려지고 제대로 방류가 이루어 지지 않는 결과가 발생하였다. 이를 개선하고자 육상형 장치의 경우 방류배관을 최대한 직선화하고, 수상형 장치의 경우 배양장치에 식물섬과 cage를 포함한 방류배관을 바로 설치하여 천적생물 살포에 소요되는 시간을 단축하고 효과적으로 방류될수 있도록 하였다.(그림 2.52)



<그림 2.52> 육상형 및 수상형 배양장치 방류지점 위치 이동 전·후 모습

(2) 배양장치 구조 개선

(가) 경사판 설치

동물플랑크톤의 사체 및 분비물과 이물질 등의 퇴적으로 인한 천적생물 배양환경 악화를 개선하고자 동물플랑크톤 배양조 바닥면에 경사판을 설치하여 이물질의 배출이 용이하도록 구조를 개선하였다.(그림 2.53)



<그림 2.53> 동물플랑크톤 배양조 바닥면 경사판 설치 전(좌), 설치 후(우) 모습

(나) 산소공급장치

동물플랑크톤 배양조에 산소 공급을 위해 사용하였던 Rubber type의 산기관은 공기방울이 크고 미세조절이 어려워 Ceramic type의 산기관으로 교체하였으며 설치 위치도 배양장치 바닥으로부터 1/2지점으로 상향 이동하여 설치하였다. 이를 통해 천적생물에 가해지는 물리적 충격을 완화하여 동물플랑크톤 성장에 유리하도록 개선하였다.(그림 2.54)



<그림 2.54> 산기관 교체 설치

(다) 방류구 추가 설치

증식된 천적생물을 대상수역에 방류함에 있어 기존에 전량 살포하던 방식에서 2/3만 살포하고 배양조 내 용량의 1/3을 남겨두는 방법으로 운영하여 다음 배양시 빠른 증식속도를 유도하였다. 이를 위해 동물플랑크톤 배양

조 바닥으로부터 1/3지점에 방류구를 추가 설치하였다.

(3) Cage 운영 및 장치개선

(가) 위치변경

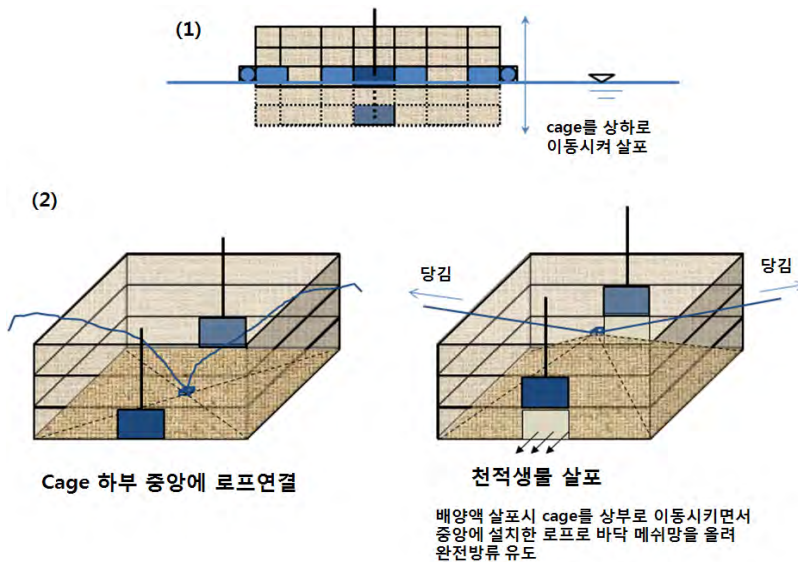
수상형장치의 살포효과를 높이기 위해 기존 육상형 배양장치의 방류지점에 설치되었던 각 36m² 규모의 cage 2조를 따로 분리하여 육상형 장치와 수상형 장치의 방류지점에 식물섬과 함께 설치하여 인공식물섬을 통한 수역 직방류와 cage를 이용한 천적생물 보호형 방류로 선택 가능하도록 하였다.



<그림 2.55> cage 이동설치 전·후 모습
(2개조를 각각 분리하여 인공식물섬과 연계 방류배관 연결)

(나) Cage 기능개선

Cage로부터 배양된 천적생물이 현상 살포시에 완전히 방류되지 않고 cage 내부에 남아있는 문제점이 있어 cage 바닥면 가운데 부분을 들어올려 완전히 방류될 수 있도록 구조를 보완하였다.(그림 2.56)



<그림 2.56> 기존 천적생물 살포방법(1)과 개선 후 살포방법(2)

(다) Cage 운영

Cage는 수중에 위치되어 있는 시간이 길어 부착성 고형물에 의해 망목이 폐쇄되는 현상이 발생하는 바, 효과적인 운영을 위해 물 위로 인양하여 고정 및 청소를 할 수 있도록 하였으며 운영기간 중 정기적인 청소를 실시하였다(그림 2.57).



<그림 2.57> cage 인양모습(좌), 청소 후 재설치 운영(우)

36m³ 규모의 cage에 천적생물을 일부 방류하여 어류 포식에 대한 천적생물의 보호와 함께 cage 내에서 안전하게 녹조를 제어할 수 있는 장치로 활용하였다.

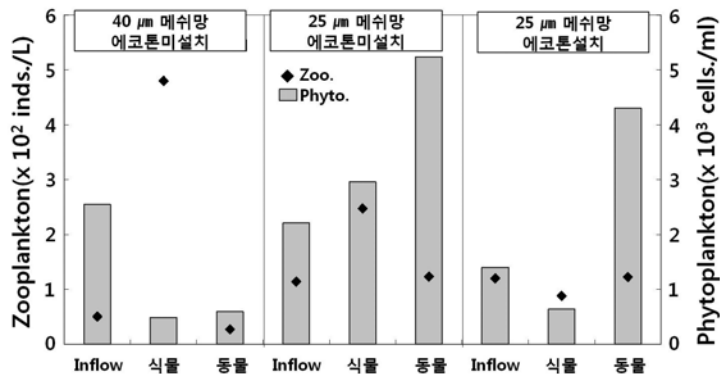
또한, 천적생물 배양장치의 살포 주기인 1주일 간격으로 cage 내에서 추가 증식한 36m³의 배양액을 천적생물 배양장치의 배양액과 함께 수역에 살포함으로써 천적생물의 현장 증폭 효과를 유도하여 저비용의 천적생물 현장 증폭장치로 효율적 운영이 가능하였다.

제5절 천적생물 배양장치의 대량배양 성능 및 녹조제거 특성

1. 천적생물 배양장치의 최적 배양조건 분석

가. 천적생물 분리

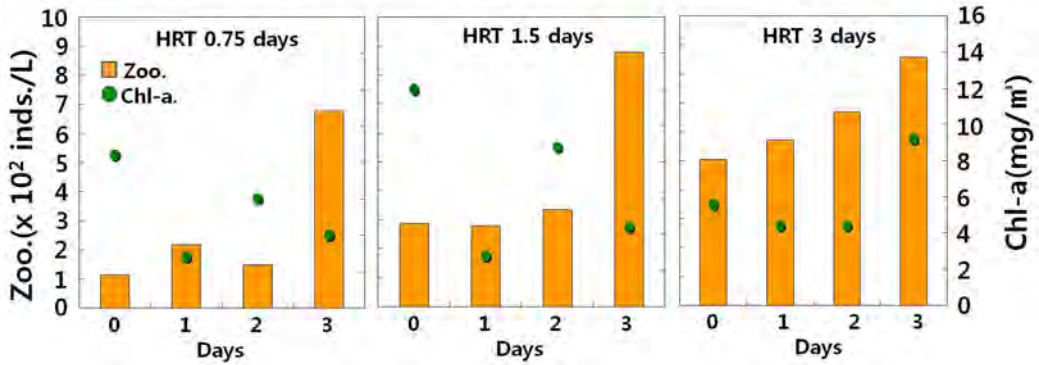
녹조발생 수역에 자연 서식하는 천적생물을 효과적으로 분리하기 위해 원수분리조를 설치한 후 최적의 천적생물 분리능을 위해 다양한 조건에서 분리 성능을 분석하였다. 원수분리조 내에 40 μm 메쉬망 + 에코톤매트 미설치 조건에서는 식물플랑크톤 952 % 증가, 동물플랑크톤 77 % 감소, 40 μm 메쉬망 + 에코톤매트 설치 조건에서는 식물플랑크톤 27 % 감소, 동물플랑크톤 307 % 증가, 25 μm 메쉬망 + 에코톤매트 미설치 조건에서는 식물플랑크톤 217 % 증가, 동물플랑크톤 237 % 증가 결과를 보여 25 μm 메쉬망 + 에코톤매트 미설치 조건에서 동·식물플랑크톤의 효과적 분리가 확인되었다.



<그림 2.58> 원수분리조 설치 형태에 따른 동·식물플랑크톤 변화

나. 먹이생물 배양조건

천적생물을 고밀도 배양하기 위해서는 먹이생물의 질과 양이 매우 중요하므로 체류시간에 따른 식물플랑크톤 배양조의 먹이생물 배양효과를 분석하여 최적의 먹이생물 배양조건을 검색하였다. 최적의 먹이생물 배양조건을 위해 식물플랑크톤 배양조의 체류시간별(0.75, 1.5, 3일) 배양효과를 분석한 결과 체류시간 0.75일과 1.5일 조건에서는 초기 Chl-a에 비해 오히려 감소한 반면, 체류시간 3일 조건에서 3일차에 급격히 증가하는 양상을 보여 체류시간이 3일 조건이 먹이생물 배양에 가장 적절한 것으로 나타났다.



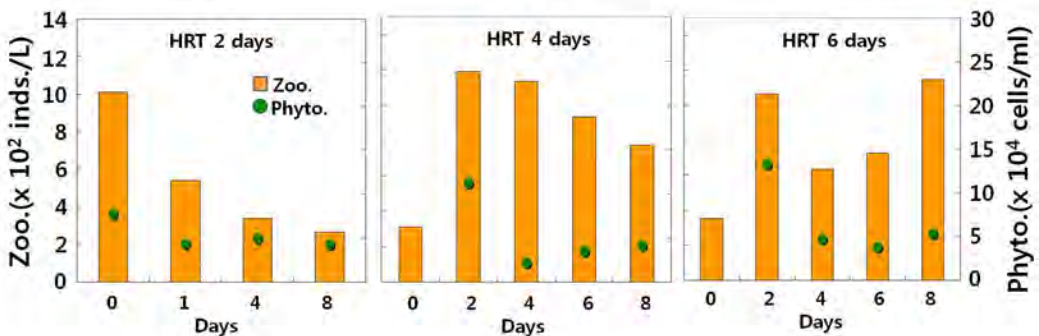
<그림 2.59> 체류시간에 따른 식물플랑크톤 배양조의 Chl-a 변화

다. 천적생물 배양조건

현장에서 천적생물의 최적배양을 위한 조건으로 체류시간, 인공식물섬의 피복도, 먹이공급비율 등을 고려하여 천적생물 배양 효과 검증 실험을 하였으며, 실험대상조건 이외 모든 조건은 동일하게 적용하였다.

(1) 체류시간

체류시간별 천적생물의 최적 배양조건을 알아보기 위해 2, 4, 6일로 구분하여 배양성능을 분석한 결과, 체류시간 2일 조건에서는 초기 개체수 2,242 inds./L에서 실험 8일차에 518 inds./L까지 현저하게 감소하였으며, 체류시간 4일 조건에서는 초기 개체수 312 inds./L에서 실험 2, 4일째 1,193~1,138 inds./L로 크게 증가하였고, 실험 8일째까지 774 inds./L로 가장 안정적인 개체수를 유지하였다. 체류시간 6일 조건에서는 초기 개체수 356 inds./L에서 8일차에 1,148 inds./L 증가하였으나, 증감의 폭이 커 안정적인 동물플랑크톤 개체수를 유지하는 데는 다소 문제가 있는 것으로 나타났다.

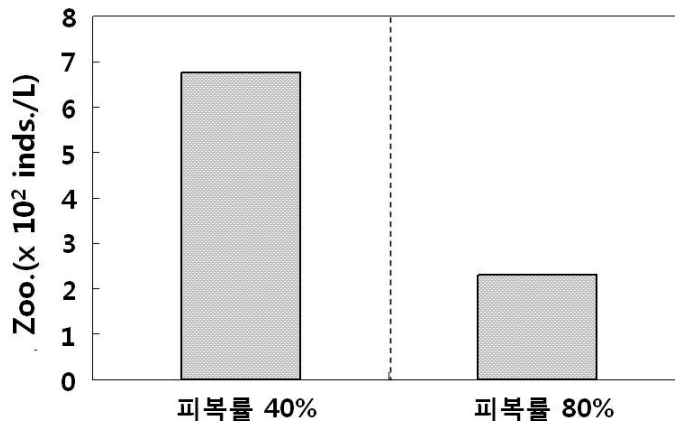


<그림 2.60> 체류시간에 따른 천적생물 배양조의 동·식물플랑크톤 변화

결과적으로, 체류시간 4일 조건에서 동물플랑크톤 개체수가 774~1,194 inds./L로 비교적 안정적으로 유지되어 체류시간 2일과 6일에 비교해 볼 때 동물플랑크톤 배양에 최적 조건인 것으로 판단되었다.

(2) 인공식물섬

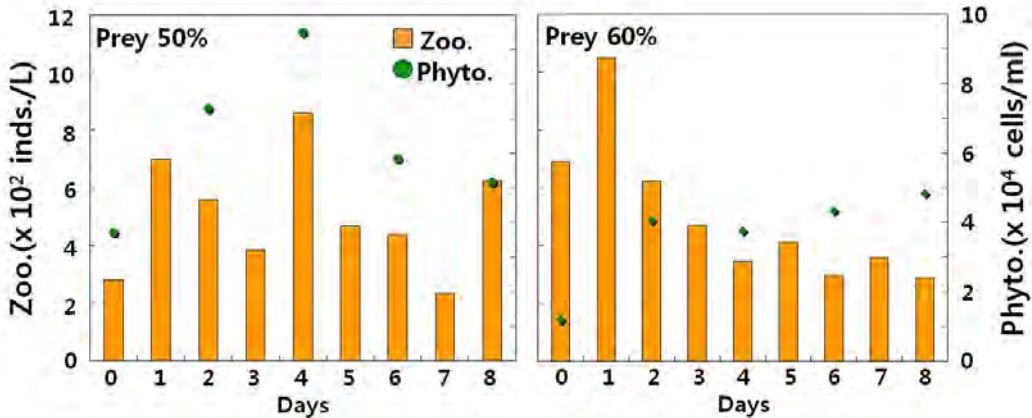
천적생물 배양 성능의 향상을 위해 인공식물섬 도입시 적정 피복률에 따른 천적생물의 배양효과를 분석하여 최적의 도입 피복율을 검토하였다. 인공식물섬이 배양조 수표면 80 % 피복조건과 40 % 피복 조건으로 나누어 최적 비율을 분석한 결과, 피복률 40 % 적용시 동물플랑크톤이 676 inds./L로 피복률 80 %의 230 inds./L 보다 높게 관찰되어 인공식물섬의 피복률은 40 % 조건이 최적의 조건으로 밝혀졌다.



<그림 2.61> 인공식물섬 피복률에 따른 동·식물플랑크톤 변화

(3) 먹이생물 비율

천적생물의 배양에 필요한 먹이생물(식물플랑크톤)의 최적 공급 비율을 파악하기 위해 먹이 공급 비율에 따른 배양효과를 분석한 결과, 먹이원 50 %에 원수 50 %를 공급했을 때 천적생물 초기농도 754 inds./L에서 최종 10일째 626 inds./L로 비교적 안정적으로 유지되었으며, 먹이원 60 %, 원수 40 % 공급시 천적생물 초기농도 691 inds./L에서 2일째 1,052 inds./L 증가 후 최종 10일째 288 inds./L로 급격히 감소한 것으로 나타나 먹이공급비율 50 %가 60 %보다 더 효과적이었다. 먹이 공급비율이 클 경우(60 %)는 실험후반으로 갈수록 먹이생물의 공급과잉에 따른 저해효과가 나타나는 것으로 판단되어 먹이공급비율은 50 %가 60 %보다 더욱 적절한 것으로 판단되었다.



<그림 2.62> 먹이생물 공급비율에 따른 동·식물플랑크톤 변화

라. 천적생물 배양장치 최적 배양조건 결정

천적생물 배양장치의 효과적인 배양을 위해, 원수분리조, 식물플랑크톤 배양조, 천적생물 배양조에서 각각 최적의 배양조건을 알아보았으며, 연구결과를 토대로 천적생물 배양장치의 최적 배양조건을 표 2.20에 제시하였다.

(표 2.20) 천적생물 배양장치 최적 배양조건

배양조	최적조건
원수분리조	분리여과막: 25 μ m 메쉬망
	에코톤매트: 미설치
식물플랑크톤 배양조	체류시간: 3일
천적생물 배양조	체류시간: 4일
	인공식물섬 피복도: 40 % 이하
	먹이생물 비율: 50 %

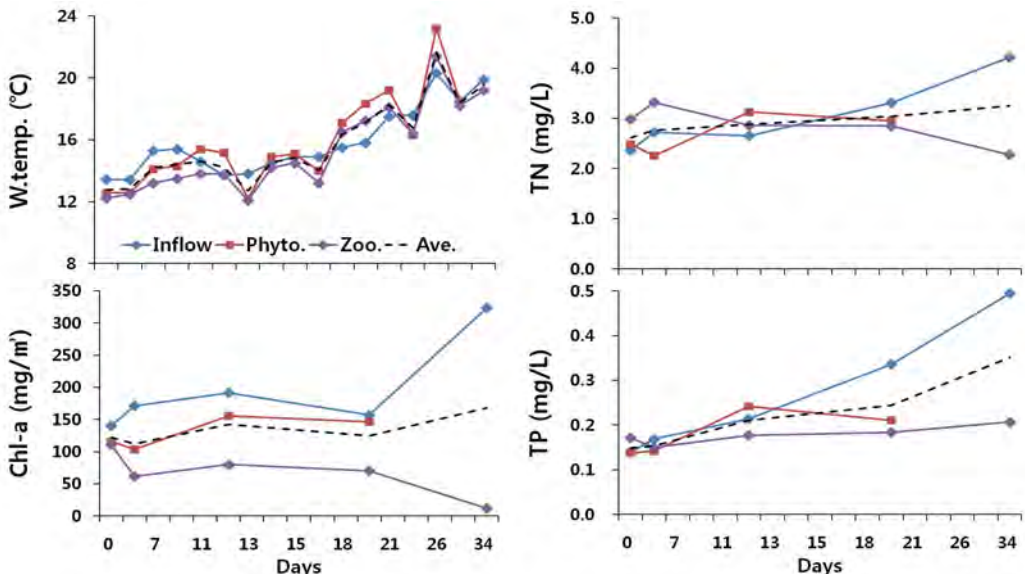
종합적으로, 현장에 설치되어진 천적생물 배양장치는 최적의 배양조건 하에서 운영되었으며, 천적생물의 배양에 뚜렷한 효과를 보였다. 이때, 체류시간의 경우는 안정적인 먹이공급과 천적생물 안정적인 배양을 위한 조건으로서, 유입수에서 안정적인 먹이공급이 될 수 있는 조건(고농도의 식물플랑크톤 유입)이 형성된다면 체류시간을 더욱 단축시키더라도 효과적인 천적생물의 배양이 기대된다. 또한, 안정된 배양시스템을 위해 단위시설의 맞는 최적의 배양조건을 응용하여 그 효율을 극대화 시키는 것이 중요하다.

2. 자연분리 천적생물의 배양성능

가. 배양장치 수환경 특성

(1) 1차 배양(4~5월, 봄철)

2011.4.13~5.17까지 수상배양장치(5 m³ × 2 set, 10 m³)에서 봄철 자연분리 천적생물의 대량배양 성능실험을 실시하였으며, 이 기간동안 수온(W.temp.), Chl-*a*, TN, TP 항목에 대한 수질변화를 검토하였다.



<그림 2.63> 봄철 자연분리 천적생물 대량배양에 따른 수상배양장치의 수질변화

W.temp.는 12.1~23.2 °C(평균 15.6 °C)의 범위로 유입수(Inflow)는 13.4~20.3 °C, 식물플랑크톤 배양조(Phyto.)는 12.2~23.2 °C, 천적생물 배양조(Zoo.)는 12.1~21.4 °C의 범위로 나타났으며, 전반적으로 수온에 의한 성장저해는 없는 것으로 나타났다.

Chl-*a*는 12.2~323.5 mg/m³(평균 131.5 mg/m³)의 범위로 녹조발생 수역의 고농도 유입수(140.5~323.5 mg/m³)가 식물플랑크톤 배양조(103.9~155.9 mg/m³), 천적생물 배양조를 거치면서 배양초기 110.8 mg/m³(0일차)에 비해 33일 차에는 12.2 mg/m³까지 감소하였는데, 이는 배양조 내 천적생물에 의한 녹조저감 효과로 판단되었다. 특히, 배양 33일 차의 경우 323.5 mg/m³의 고농도 Chl-*a*가 유입되었음에도 천적생물 배양조내에서는 12.2mg/m³로 대부분의 Chl-*a*를 제거하는 등 천적생물 배양에 따른 먹이생물 요구량이 증가하였다.

TN은 2.253~4.215 mg/L(평균 2.884 mg/L)의 범위로 고농도 유입수(2.368~4.215 mg/L)가 식물플랑크톤 배양조(2.253~3.128 mg/L), 천적생물 배양조(2.277~3.318 mg/L)를 거치면서 점차 감소하는 경향을 보였으나, 천적생물 배양에 필요한 TN 고갈은 나타나지 않았다.

TP는 0.138~0.495 mg/L(평균 0.213 mg/L)의 범위로 고농도 유입수(0.139~0.495 mg/L)가 식물플랑크톤 배양조(0.138~0.242 mg/L), 천적생물 배양조(0.150~0.207 mg/L)를 거치면서 TN과 같이 일부 감소하는 경향을 보였으나, 천적생물 배양에 필요한 TP의 고갈 현상은 관찰되지 않아 최적 배양조건을 유지할 수 있었다.

(2) 2차 배양(11월, 가을철)

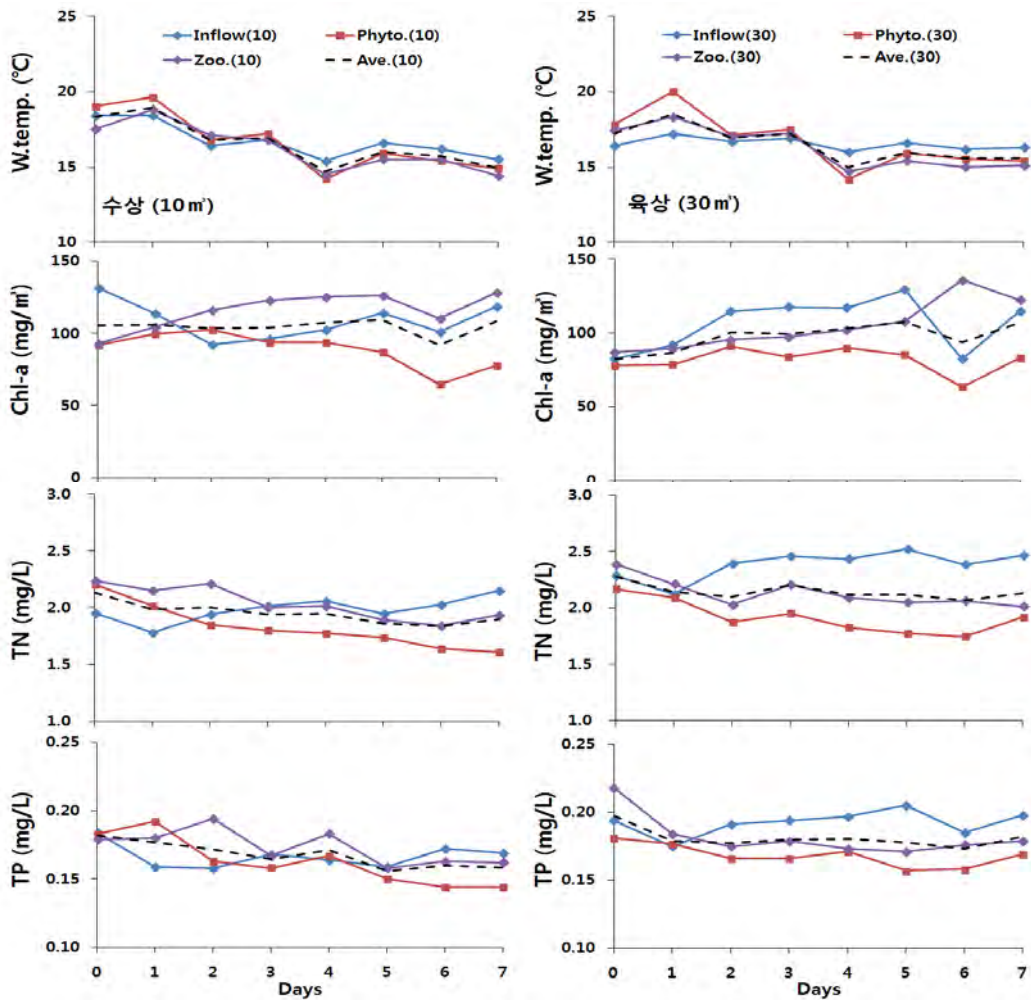
수온이 급격히 감소하는 시기인 2011.11.4~11.11까지 수상배양장치(5 m³ × 2 set, 10 m³)와 육상배양장치(10 m³ × 3 set, 30 m³)에서 가을철 자연분리 천적생물 대량배양 성능실험을 실시하였으며, 이 기간동안 W.temp., Chl-*a*, TN, TP 항목에 대한 수질변화를 검토하였다.

W.temp.는 14.2~20.0 °C(평균 16.5 °C)의 범위로 시간이 지남에 따라 감소하는 양상을 보였으며, 유입수(15.4~18.4 °C), 식물플랑크톤 배양조(14.2~20.0 °C), 천적생물 배양조(14.4~18.8 °C)로 태양광을 직접 받는 식물플랑크톤 배양조에서 다소 높고, 천적생물 배양조는 차광효과로 인해 감소하였다.

Chl-*a*는 63.3~135.7 mg/m³(평균 102.3 mg/m³)의 범위로 유입수는 수상배양장치에서 92.2~131.6 mg/m³, 육상배양장치에서 82.4~129.4 mg/m³로 유입수의 농도는 큰 차이가 없었으며, 식물플랑크톤 배양조(63.3~122.0 mg/m³), 천적생물 배양조(87.0~135.7 mg/m³)로 봄철과 달리, 유입수 및 배양조에서 모두 높은 Chl-*a* 농도를 유지하고 있었다.

TN은 1.341~2.523 mg/L(평균 2.000 mg/L)의 범위로 고농도 유입수(1.414~2.523 mg/L) 유입 후, 식물플랑크톤 배양조(1.428~2.206 mg/L), 천적생물 배양조(1.341~2.387 mg/L)에서 TN 고갈 없이 높은 농도를 유지하였다.

TP는 0.118~0.218 mg/L(평균 0.171 mg/L)의 범위로 유입수(0.130~0.205 mg/L), 식물플랑크톤 배양조(0.118~0.192 mg/L), 천적생물 배양조(0.128~0.218 mg/L)로 고농도 유입수의 유입 후 지속적으로 높은 농도를 보여 천적생물 배양에 필요한 TP의 결핍현상은 나타나지 않았다.

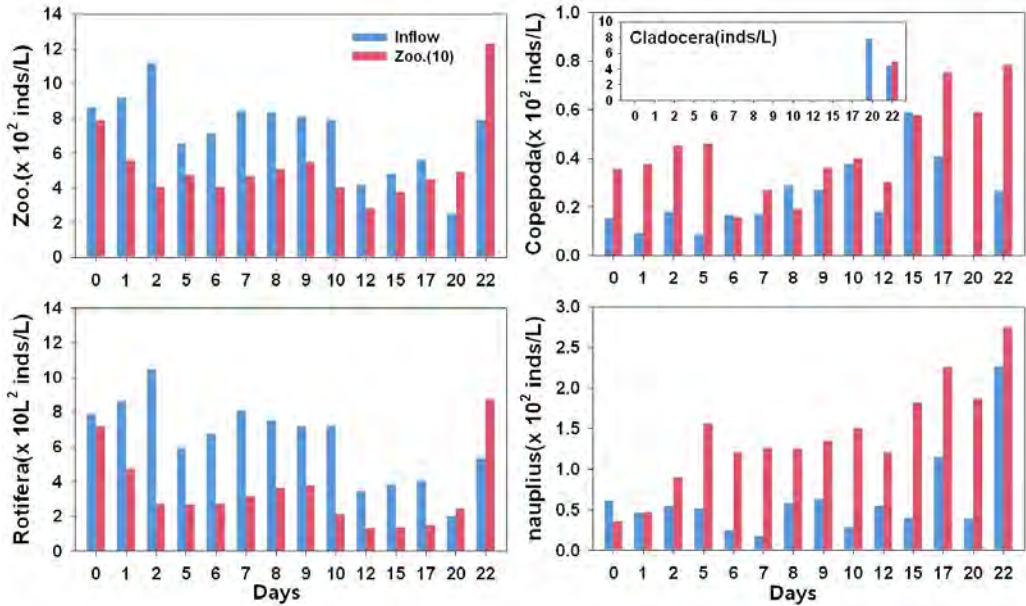


<그림 2.64> 가을철 자연분리 천적생물 대량배양에 따른 현장배양장치 수질변화 (좌: 수상배양장치 10 m³, 우: 육상배양장치 30 m³)

나. 배양장치 배양성능

(1) 1차 배양(4~5월, 봄철)

녹조발생 수역에 자연 서식하는 천적생물을 자연분리하여 2011.4.19~5.11까지 23일간 수상배양장치(5 m³ × 2 set, 10 m³)에서 대량 배양하였으며, 유입수의 동물플랑크톤 현존량과 비교하여 배양성능을 분석하였다.



<그림 2.65> 배양장치 내의 동물플랑크톤 현존량 변화

천적생물 배양조에서 배양된 자연분리 동물플랑크톤은 윤충류가 64.5 %, 노플리우스 27.2 %, 요각류 8 %, 일부 지각류 등의 비율로 출현하였다. 각 분류군별로 살펴보면, 윤충류는 유입수보다 56 %, 지각류는 60 % 감소하였고, 요각류는 186 %, 노플리우스는 224 %로 크게 증가하였다.

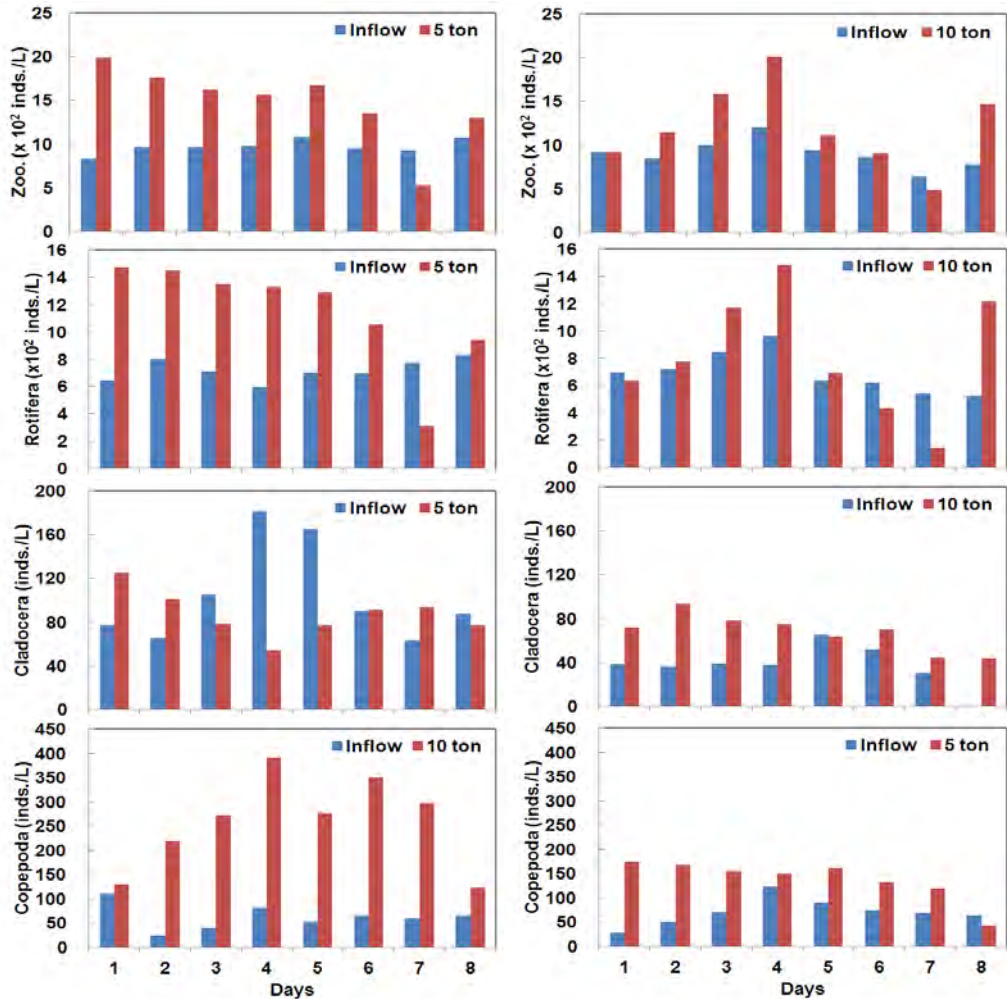
유입수에서 지각류는 20일차와 22일차에 각각 8 inds./L, 4 inds./L 출현한 것 이외에는 발견되지 않았고, 요각류는 평균 23 inds./L(0~59 inds./L), 윤충류는 평균 630 inds./L(203~1044 inds./L), 노플리우스는 평균 63 inds./L(17~227 inds./L)가 출현하였다.

천적생물 배양조에서 지각류는 유입수에서와 마찬가지로 배양 22일차에 5 inds./L가 출현한 것 이외에는 발견되지 않았고, 요각류는 평균 43 inds./L(16~78 inds./L), 윤충류는 평균 343 inds./L(130~872 inds./L), 노플리우스는 평균 141 inds./L(35~274 inds./L)가 출현하였으며, 전체 분류군이 배양 22일차에 최고치를 보인 것으로 나타났다.

(2) 2차 배양(11월, 가을철)

봄철에 이어 현장에서 서식하는 천적생물을 자연분리하여 2011.11.4~11.11까지 8일간 대량배양을 실시하였으며, 수상배양장치(5 m³ × 2 set, 10 m³)와 추가 설치된 육상배양장치(10 m³ × 3 set, 30 m³)에서 배양된 동물플랑

크톤을 유입수의 동물플랑크톤 현존량과 비교, 분석하였다.



<그림 2.66> 자연분리형 천적생물 대량배양효과

수상배양장치에서 유입수(평균 970 inds./L)는 배양 1일차(833 inds./L)에서 배양 8일차(1,072 inds./L)까지 큰 변동이 없었으며, 천적생물 배양조(평균 1,473 inds./L)는 배양 1일차(1,988 inds./L)에서 배양 8일차(1,302 inds./L)까지 유입수의 동물플랑크톤의 현존량에 비해 평균 152 %의 증가율을 보여 천적생물 배양장치의 배양성능이 뛰어난 것으로 확인되었다.

육상배양장치에서 유입수(평균 899 inds./L)는 배양 1일차(919 inds./L)에서 배양 8일차(774 inds./L)까지 큰 변동이 없었으며, 천적생물 배양조(평균 1,204 inds./L)에서는 배양 1일차(923 inds./L)에서 배양 8일차(1,465 inds./L)까지 유입수의 동물플랑크톤의 현존량에 비해 평균 134 %의 증가율을 보여,

천적생물 배양장치의 배양성능이 뛰어난 것으로 확인되었으며, 육상배양장치의 10 m³ 배양조보다 수상배양장치의 5 m³ 배양조에서 배양성능이 다소 우수한 것으로 나타났다.

각 분류군별로 살펴보면, 윤충류는 5m³ 배양조에서 유입수보다 160 %, 10 m³ 배양조에서 118 % 증가하였고, 지각류는 5 m³ 배양조에서 21 % 감소하였고, 10 m³ 배양조에서 180 % 증가하였다. 또한, 요각류는 5 m³ 배양조에서 유입수보다 193 % 증가하였고, 10 m³ 배양조에서 414 %로 크게 증가하였다. 노플리우스는 5 m³ 배양조에서 유입수보다 130 % 증가하였고, 10 m³ 배양조에서 50 % 감소하였다.

자연분리 천적생물의 전체 생물량을 배양조 규모에 따른 배양성능으로 비교해보면 5 m³ 배양조가 10 m³ 배양조보다 배양성능이 18 % 정도 높은 것으로 나타났다. 하지만, 분류군별로는 5 m³ 배양조에서는 윤충류, 노플리우스가 10 m³ 배양조보다 배양성능이 좋았고, 10 m³ 배양조에서는 지각류, 요각류가 5 m³ 배양조에서보다 월등히 배양효과가 좋았다. 천적생물로서 활용도가 높은 지각류의 배양성능을 고려할 때 5 m³ 배양조 보다는 10 m³ 배양조가 월등히 우수한 배양성능을 보이므로, 향후 천적생물 배양장치의 단위규모는 10 m³ 배양조를 기준으로 한다.

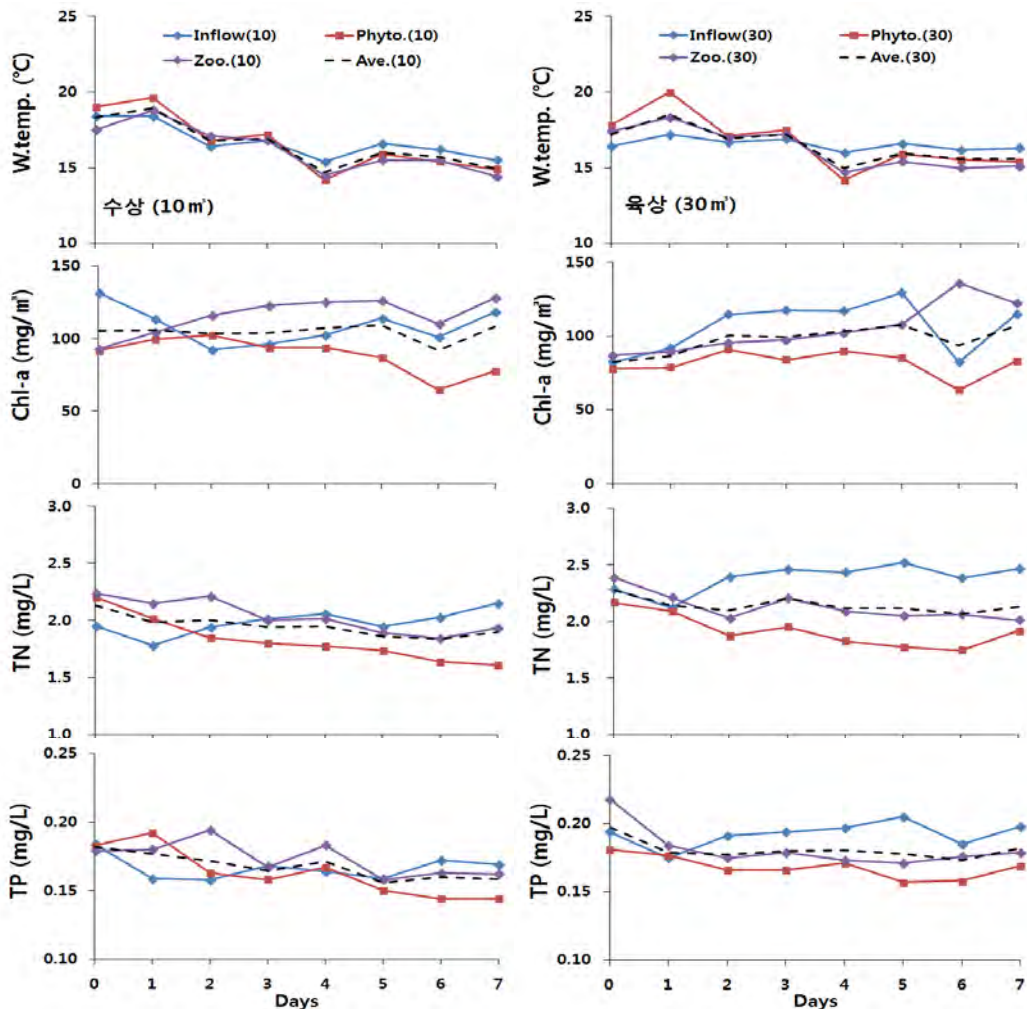
3. 천적생물 종주의 배양성능

가. 배양장치 수환경 특성

(1) 1차 배양(5 ~ 8월, 봄~여름철)

2012.5.4~8.1까지 수상배양장치와 육상배양장치에서 봄~여름 천적생물 종주의 대량배양 성능실험을 89일간 13회 실시하였으며, 이 기간동안 W.temp., Chl-a, TN, TP 항목에 대한 수질변화를 검토하였다.

W.temp.은 17.8~34.6 °C(평균 24.6 °C)의 범위로 유입수는 20.6~32.1 °C, 식물플랑크톤 배양조 17.8~34.6 °C, 천적생물 배양조 18.0~31.8 °C를 보였으며, 수온 변화폭은 식물플랑크톤 배양조의 경우 수상배양장치 16.8 °C, 육상배양장치 13.7 °C, 천적생물 배양조의 경우 수상배양장치 14.0 °C, 육상배양장치 11.8 °C의 변화폭을 보여 천적생물 배양조보다는 식물플랑크톤 배양조에서, 배양용량이 큰 육상배양장치보다 용량이 적은 수상배양장치에서 수온 변화폭이 크게 나타났다.



<그림 2.67> 봄~여름철 천적생물 종주의 대량배양에 따른 현장배양장치 수질변화(좌: 수상배양장치 10 m³, 우: 육상배양장치 30 m³)

Chl-a는 배양기간 동안 , 0.5~204.6 mg/m³(평균 51.2 mg/m³)의 범위로 나타났다. 유입수(60.6~204.6 mg/m³)가 식물플랑크톤 배양조(2.5~125.0 mg/m³), 천적생물 배양조(수상배양장치 0.7~33.4 mg/m³, 육상배양장치 0.5~98.5 mg/m³)를 통과하면서 현저한 Chl-a 감소를 확인할 수 있었다.

TN은 1.180~2.968 mg/L(평균 1.900 mg/L)의 범위로 고농도 유입수(1.314~2.705 mg/L)가 식물플랑크톤 배양조(1.180~2.479 mg/L), 천적생물 배양조(1.156~2.965 mg/L)로 이동되면서 다양한 변이를 보이고 있으며, 천적생물 배양에 필요한 TN의 결핍은 나타나지 않았다.

TP는 0.052~0.200 mg/L(평균 0.101 mg/L)의 범위로 TN과 같이 고농도의 유입수(0.086~0.200 mg/L)가 식물플랑크톤 배양조(0.058~0.147 mg/L), 천적생물 배양조(0.052~0.145 mg/L)를 거치면서 TP 결핍은 나타나지 않았다.

봄~여름철 천적생물 종주 대량배양에서는 계절적 요인으로 수온은 점차 증가하였다. Chl-a는 유입수에 비해 천적생물 배양조에서 현저히 낮은 농도를 보였으며, 영양염류 농도는 유입수 및 배양조에서 전반적으로 높은 농도를 유지하여 영양염류 결핍은 없었다.

(2) 2차 배양(9~10월, 가을철)

2012.9.26일~10.29까지 수상배양장치와 육상배양장치에서 천적생물 종주의 대량배양 성능실험을 33일간 7회 실시하였으며, 이 기간동안 W.temp., Chl-a, TN, TP 항목에 대한 수질변화를 파악하였다.

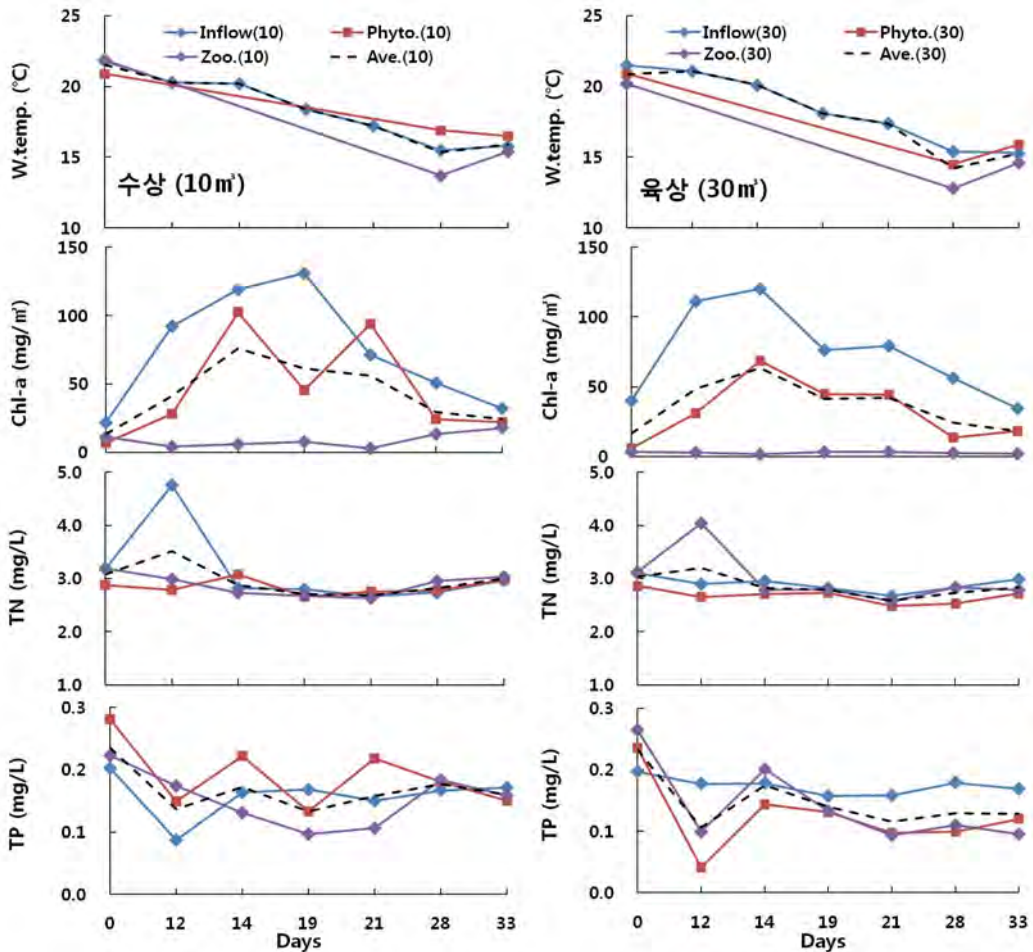
수온은 배양기간 동안 12.8~21.9 °C(평균 17.8 °C)의 범위로 유입수(15.3~22.8 °C, 평균 18.4 °C)가 식물플랑크톤 배양조(14.5~20.9 °C, 17.6 °C), 천적생물 배양조(12.8~21.9 °C, 평균 16.4 °C)로 이동하면서 점차 수온이 감소하였으며, 천적생물 성장을 저해할 낮은 수온 분포는 보이지 않았다.

Chl-a는 배양기간 동안 1.6~130.8 mg/m³(평균 39.7 mg/m³)의 범위를 보였으며, 유입수 21.7~130.8 mg/m³, 식물플랑크톤 배양조 5.7~102.5 mg/m³, 천적생물 배양조 1.6~18.0 mg/m³로 식물플랑크톤 배양조에서는 유입수와 유사한 변화 양상을 보였으나 천적생물 배양조는 평균 10 mg/m³ 미만으로 유입수에 비해 현저히 감소하였다.

TN은 배양기간 동안 2.487~4.758 mg/L(평균 2.904 mg/L)의 범위로 유입수(2.667~4.758 mg/L)는 1차 배양시 보다 더욱 높은 농도를 보였으며, 식물플랑크톤 배양조(2.487~3.080 mg/L), 천적생물 배양조(2.577~4.043 mg/L)에서 다소 감소하였으나, 천적생물 성장에 필요한 TN은 충분히 공급되고 있었다.

TP는 배양기간 동안 0.041~0.281 mg/L(평균 0.157 mg/L)의 범위로 유입수(0.087~0.203 mg/L)는 TN과 마찬가지로 높은 농도로 유입되었으며, 식물플랑크톤 배양조(0.041~0.281 mg/L), 천적생물 배양조(0.093~0.265 mg/L)에서도 천적생물 배양에 필요한 충분한 TP 농도를 보여주었다.

본 가을철 천적생물 종주 대량배양에서는 계절적 요인으로 수온은 점차 감소하였으며, Chl-a는 고농도 유입수에 비해 천적생물 배양조에서 10 mg/m³ 미만으로 현저히 감소하였고, 영양염류 농도는 1차 배양에 비해 전반적으로 높은 농도를 유지하여 영양염류 결핍은 없었다.



<그림 2.68> 가을철 천적생물 종주의 대량배양에 따른 현장배양장치 수질변화 (좌: 수상배양장치 10 m³, 우: 육상배양장치 30 m³)

나. 배양장치 배양성능

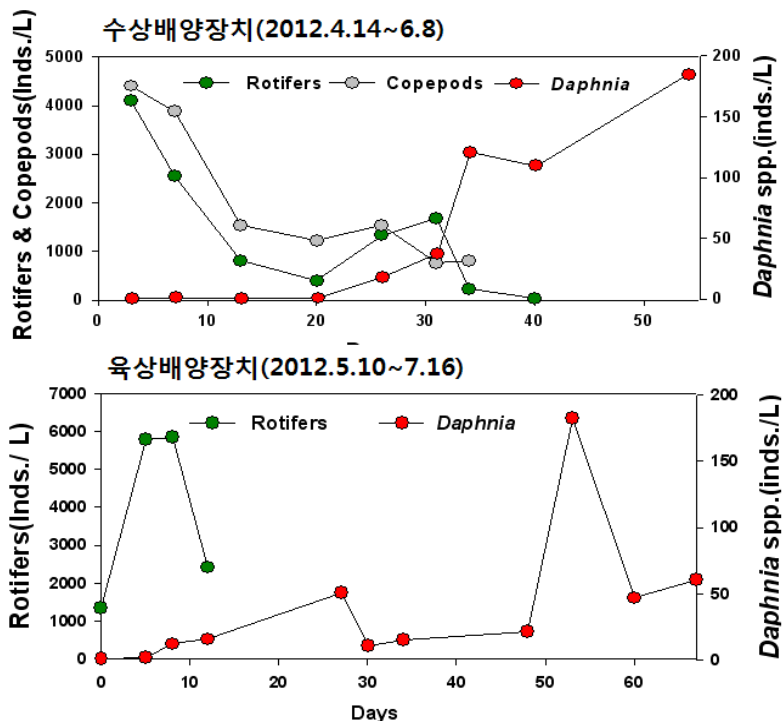
실내배양장치에서 고밀도 배양된 천적생물 종주 *Daphnia*를 천적생물 배양장치(수상배양장치, 5톤 × 2조)에 수차례 투입한 후 천적생물 배양장치 내에서 고밀도 군집을 형성하기 까지 2주 정도가 소요되어 실내배양과 같이 비교적 빠른 시간에 천적생물의 대량증식이 가능한 것으로 나타났다.

Daphnia 천적생물 종주를 천적생물 배양장치에서 대량 배양했을 때 최대 개체군 밀도는 5 m³ 배양조에서 4 × 10⁶개체 이상이었으며, 일반적으로 *Daphnia*가 배양조 내에서 저층 및 벽면에 밀집하여 존재하고 있는 것을 고려하면 천적생물 배양장치에서 대량배양하여 살포할 수 있는 천적생물 양은

m³당 약 1.6×10^6 개체인 것으로 사료되었다(표 2.25). 천적생물 배양장치에서 증식된 *Daphnia similoides*의 대량 살포 직전 배양조내 최고 개체군 밀도는 800 inds./L 이상이었다.

(표 2.21) 천적생물 배양장치에서 배양가능한 *Daphnia* 및 자연 천적생물 개체수

	천적생물 배양장치 최고 농도	최대 가능 방류량 (5 m ³ 수조)	실제 가능 방류량 (m ³ 당)
<i>Daphnia similoides</i> (투입천적생물)	835 inds./L	4,175,000 inds.	167,000 inds./m ³
<i>Moina</i> spp. (자연천적생물)	45 inds./L	225,000 inds.	9,000 inds./m ³
<i>Bosmina longirostris</i> (자연천적생물)	1285 inds./L	1,285,000 inds.	257,000 inds./m ³



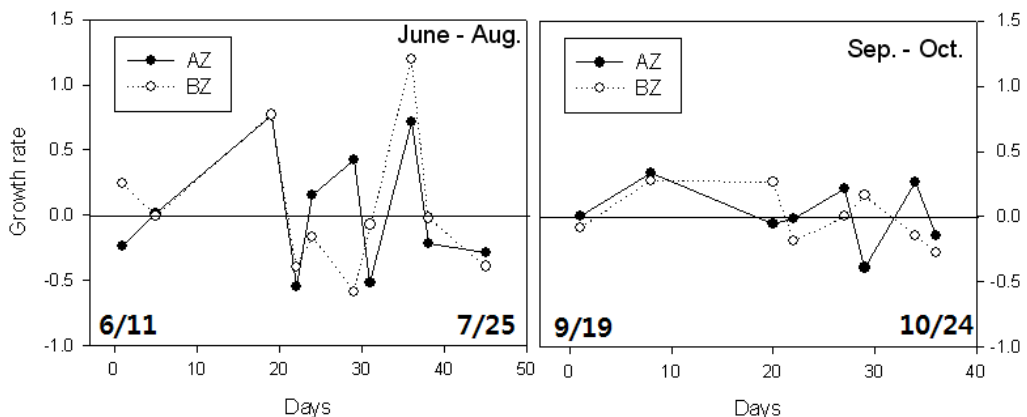
<그림 2.69> 기능개선 후 육상 및 수상배양장치에서 천적생물 종주의 밀도 변화

2012년 천적생물 배양실험 전 천적생물 배양장치의 배양성능 향상을 위해 산소공급장치 개선 및 바닥환경개선 등의 기능개선 작업을 수행하였으며, 그 결과 천적생물 종주인 *Daphnia*의 배양밀도가 초기 투입부터 마지막

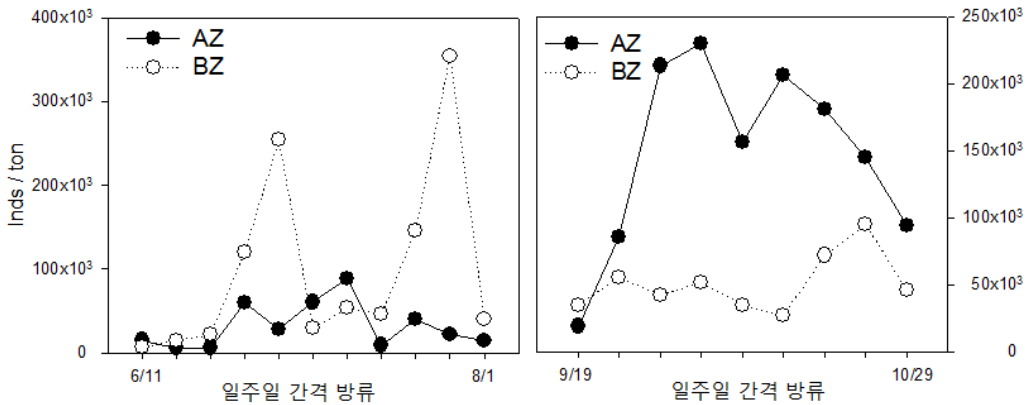
천적생물 살포가 실시된 10월 말까지 높은 상태를 유지하는 등 배양성능이 전년도에 비해 매우 향상되었다. 초기 천적생물 종주의 반복 투입 후 고밀도로 안정되기까지 약 한 달 이상이 소요되었고, 리터 당 200 개체의 고밀도로 안정된 후에는 천적생물의 개체수 증감이 반복되었다. 개체수 안정과 증감 양상은 10톤 규모의 육상배양장치와 5톤 규모의 수상배양장치에서 유사한 경향을 보였다(그림 2.69).

1주일 간격으로 천적생물 살포가 매주 진행되었던 2012년 6월~8월, 9월~10월의 육상 및 수상배양장치의 천적생물 개체군 성장률을 측정하였다. 배양조 전체 천적생물량의 2/3를 일주일 간격으로 살포하여 수역으로 배출하고 배양조내에 남은 1/3량의 천적생물에 원수를 공급하여 다음 살포시까지 재 배양하는 시스템으로 개체군 회복시 까지 천적생물량의 감소가 있었으나 전체 개체군 증가율은 -0.5에서 1.5 사이로 전체적으로 증가하거나 개체군 밀도가 현상 유지되는 것으로 나타났다. 고밀도로 안정된 후에는 살포로 인해 개체군 밀도 감소가 있더라도 일주일내 복구되는 양상을 보여, 일주일 간격의 지속적인 살포가 가능한 것으로 나타났다(그림 2.70).

6월에 실시된 1차 살포에 비해 2차 살포시기인 9월 이후 배양장치 내 천적생물 개체군 밀도가 고밀도로 안정된 이후에는 살포 실험 시 개체군 증감이 소폭으로 유지되어 보다 안정적으로 천적생물의 개체군 밀도가 유지되는 것으로 나타났다.



<그림 2.70> 2012년 수상(AZ)과 육상(BZ)에 설치된 배양장치에서 주기적 살포에 따른 종주분리 천적생물 *Daphnia*의 개체군 밀도 증가율 변화 양상

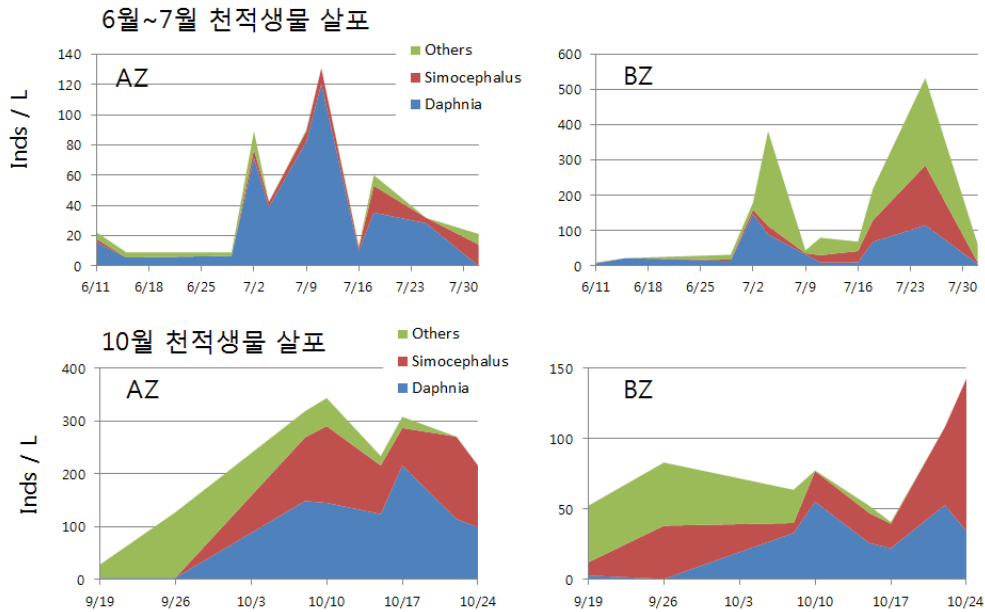


<그림 2.71> 2012년 천적생물 살포 실험시 수상 및 육상배양장치의 천적생물
톤 당 현장 살포량

천적생물 종주를 배양한 천적생물 배양장치내 천적생물 종조성을 보면, 초기에는 실내에서 종주배양하여 배양장치에 투입된 *Daphnia similoides*가 우점하여 증가하였으나, 배양장치내 배양시간이 길어짐에 따라 전대저수지 원수에서 유입된 자연분리 천적생물인 *Simocephalus*, *Moina*, *Ceriodaphnia* 등의 개체군 밀도가 증가하는 양상을 나타냈다(그림 2.72). 이들 자연 분리 천적생물은 전대저수지 수체 내에서는 어류 섭식 등의 영향으로 개체군 밀도 증가가 억제되고 있으나, 포식압이 존재하지 않는 배양장치로 유입된 후 개체군 밀도가 증가한 것으로 사료된다. 특히 일부 *Simocephalus* 같은 지각류는 조사기간 중 수체에서는 채집되지 않았으나 어류의 위내용물 속에서 검출되고 있어, 자연수역에서 크기가 큰 지각류는 어류의 포식압으로 인해 개체군 증식이 억제되고 있는 것으로 사료된다.

*Simocephalus ventulus*의 경우 *Daphnia similoides*와 유사한 대형 지각류로 조류 섭식실험에서 조류 생체량 저감 능력이 *Daphnia similoides*와 유사한 것으로 나타나, 이러한 자연분리 천적생물의 증가는 향후 현장의 조류제어 천적생물로서의 활용 가능성이 높을 것으로 기대된다.

수온이 낮고 동물플랑크톤의 밀도가 낮은 봄의 경우에는 실내에서 고밀도 배양하여 배양장치에 투입한 천적생물 종주가 증가하여 우점하고, 가을의 경우 *Simocephalus*와 같은 자연적으로 분리된 천적생물의 개체군 밀도가 증가하고 우점하는 경향을 보이기 때문에 천적생물 종주와 자연분리 천적생물의 대량배양을 병행하여 실시한다면 천적생물을 이용한 녹조제어 효과를 증진시킬 수 있을 것으로 사료된다.



<그림 2.72> 2012년 수상(AZ) 및 육상(BZ)배양장치의 천적생물 종조성 변화

4. 천적생물 배양장치의 녹조제거 특성

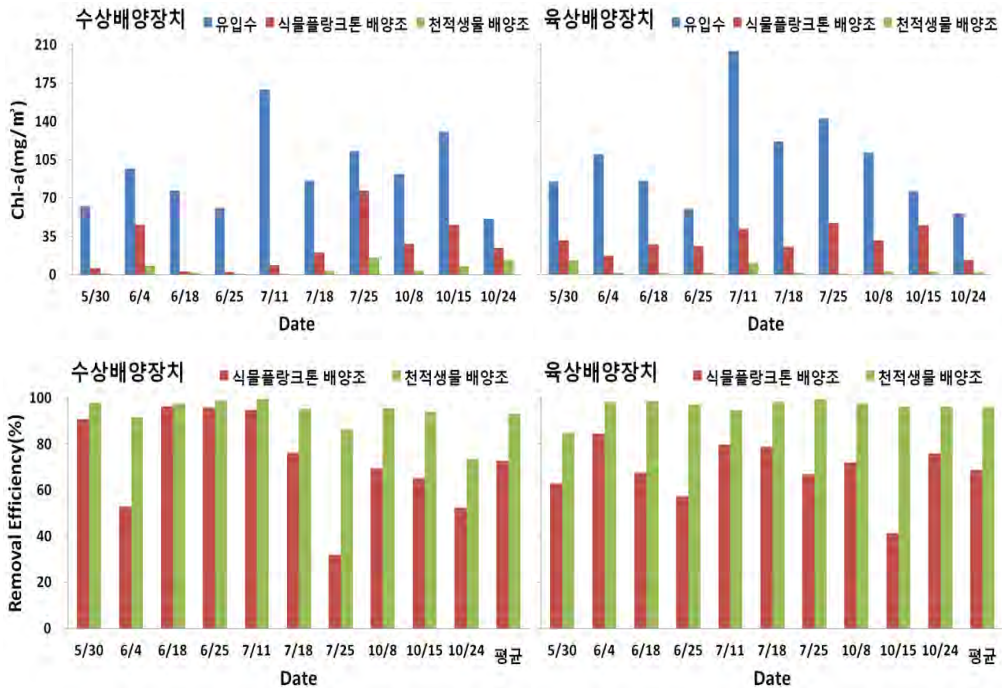
가. 녹조(Chl-a) 제거 효과

천적생물 배양장치는 천적생물이 성장하는 데 충분한 양의 식물플랑크톤(Chl-a)이 공급되어야 하며, 천적생물 배양과정 동안 천적생물의 포식으로 배양장치에 공급된 식물플랑크톤은 배양속도가 증가할수록 빠른 속도로 감소하게 된다. 다시말해, 천적생물 배양장치는 천적생물 배양기능과 유입된 식물플랑크톤을 제거하는 기능을 동시에 가지고 있다. 천적생물 배양기간인 2012.5.30~10.24까지 수상 및 육상배양장치의 각 유입수와 천적생물 배양조의 Chl-a 농도변화를 분석하여 배양장치의 Chl-a 제거성능을 검토하였다.

수상배양장치의 경우, 유입수의 Chl-a농도는 51.1~168.9 mg/m³(평균 93.8 mg/m³), 식물플랑크톤 배양조 2.5~76.5 mg/m³(평균 26.0 mg/m³), 천적생물 배양조 0.7~15.5 mg/m³(평균 5.8 mg/m³)로 나타났으며, 녹조(Chl-a) 제거 효과는 식물배양조에서 유입수 대비 평균 72.6 %, 천적생물 배양조에서 평균 93.0 %로 천적생물 배양조의 Chl-a 제거 효과가 매우 높았다(그림 2.73).

육상배양장치의 경우, 유입수의 Chl-a농도는 56.3~204.6 mg/m³(평균

105.3 mg/m³), 식물플랑크톤 배양조 13.6~47.1 mg/m³(평균 30.6 mg/m³), 천적생물 배양장치 0.5~12.8 mg/m³(평균 3.9 mg/m³)로 나타났으며, 각 배양조의 녹조(Chl-a) 제거 효과는 식물배양조에서 유입수 대비 평균 68.7 %, 천적생물 배양조에서 평균 96.1 %로 육상배양장치의 천적생물 배양조에서 수상배양장치보다도 높은 매우 뛰어난 Chl-a 제거 효과를 보였다(그림 2.73).

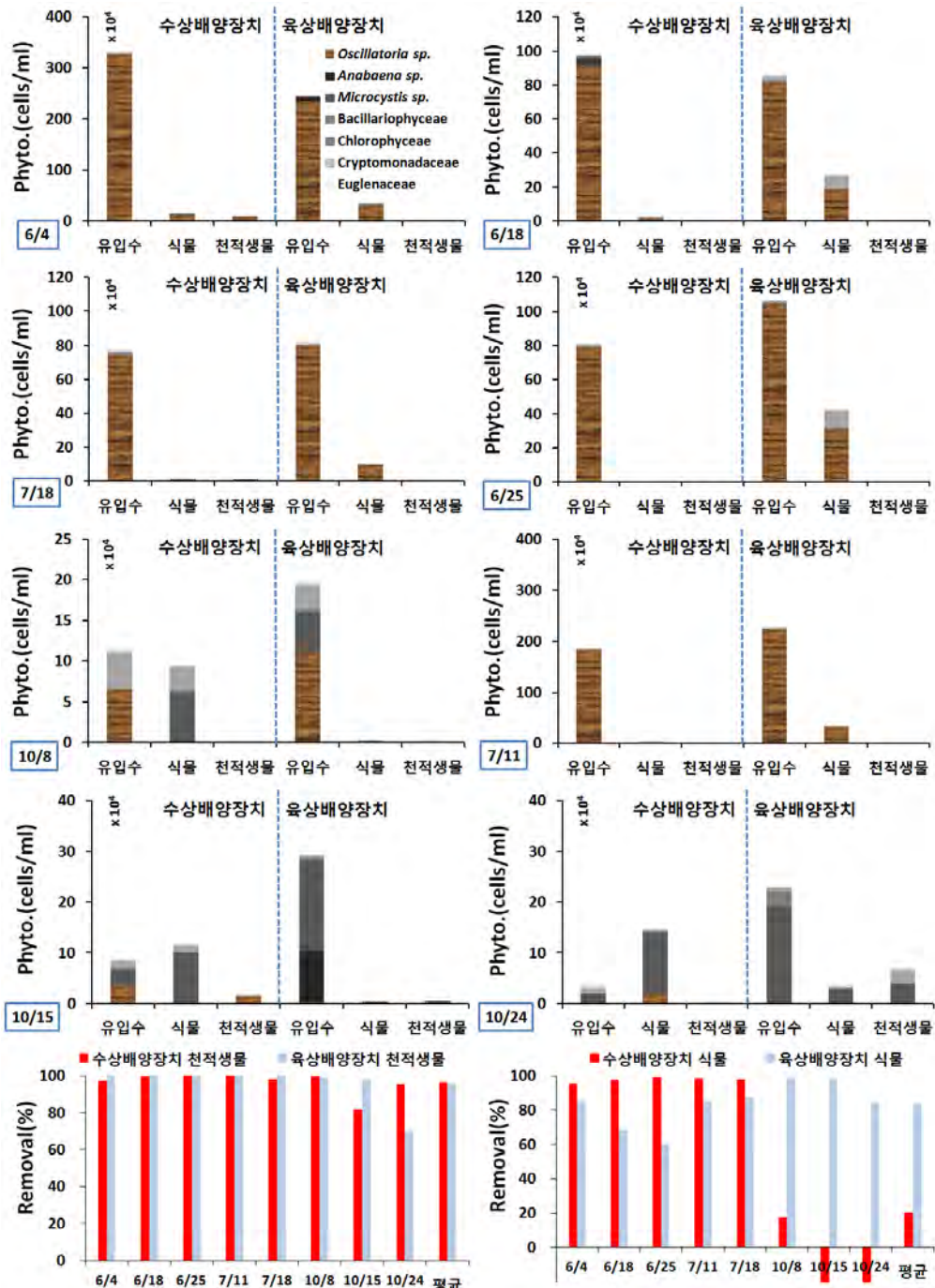


<그림 2.73> 천적생물 배양장치의 녹조(Chl-a) 제거 효과

나. 식물플랑크톤 분류군별 제어효과

천적생물 배양과정에서 제거되는 식물플랑크톤 양을 분류군별로 살펴 보기 위하여, 수상 및 육상배양장치의 각 유입수와 천적생물 배양조의 식물플랑크톤 현존량을 분석하였다.

수상배양장치의 유입수에 포함된 식물플랑크톤 현존량은 평균 99.4×10^4 cells/ml, 식물플랑크톤 배양조 평균 7.3×10^4 cells/ml, 천적생물 배양조 평균 1.5×10^4 cells/ml로 식물플랑크톤 배양조에서 유입수 대비 평균 20.3 %, 천적생물 배양조에서 평균 96.6 %의 현존량이 감소한 것으로 나타났다. 특히, 천적생물 배양조에서는 녹조 원인생물인 남조류 *Oscillatoria* sp.(6~7월)와 *Microcystis* sp.(10월)가 효과적으로 제거됨을 확인하였다(그림 2.74).



<그림 2.74> 식물플랑크톤 현존량 변화 및 제어 효과
(식물: 식물플랑크톤 배양조, 천적생물: 천적생물 배양조)

육상배양장치는 유입수 평균 102.5×10^4 cells/ml, 식물플랑크톤 배양조 평균 19.2×10^4 cells/ml, 천적생물 배양조 평균 977.5 cells/ml로 식물플랑크톤 배양조에서 평균 83.6 %, 천적생물 배양조에서 95.9 %의 녹조제거효율을 보였다. 또한 수상배양장치와 마찬가지로 남조류 *Oscillatoria* sp.(6~7월)와 *Microcystis* sp.(10월)가 효과적으로 제거되어 천적생물 배양장치가 녹조원인 생물의 제거에 매우 우수한 효과가 있음을 확인하였다(그림 2.74).

다. 천적생물 배양장치의 녹조제어 활용방안

천적생물 배양장치에서 녹조제어에 효과적인 천적생물을 배양하기 위해서는 먹이생물로서 다량의 녹조생물 공급이 필요하며, 또한, 천적생물 배양장치 내에서 천적생물이 안정적인 군집을 형성하여 대량 증식할 경우, 공급되는 녹조생물이 완전고갈 되는 경우가 빈발하였다. 이러한 경우에는, 배양장치의 체류시간을 더욱 짧게 유지하여 녹조발생 수역의 녹조생물을 먹이생물로 바로 공급하고 식물플랑크톤 배양조를 1차 천적생물 배양조로 추가 활용함에 따라 천적생물 배양장치가 천적생물 배양기능 뿐만아니라, 녹조발생 저수지 유입수에 포함된 녹조생물을 즉시 제거하는 녹조제거장치로서의 기능도 수반하게 된다.

천적생물 배양장치의 평균 녹조(Chl -a) 제거효율은 수상배양장치 평균 93.0 %, 육상배양장치 96.1 %로 매우 높은 수준을 보였으며, 식물플랑크톤 배양조에서도 시기별 차이가 있으나, 수상 및 육상배양장치에서 각각 72.6 %, 68.7 %의 제거효율을 보임에 따라, 현장의 녹조가 심각하게 발생한 수역에서는 식물플랑크톤 배양조의 기능을 천적생물 1차 배양장치로 전환하여 녹조제어 장치로 적용한다면, 천적생물 살포효과와 함께 더 효율적인 녹조제어가 가능할 것으로 판단되었다.

제6절 천적생물 현장살포에 따른 녹조제어 효과분석

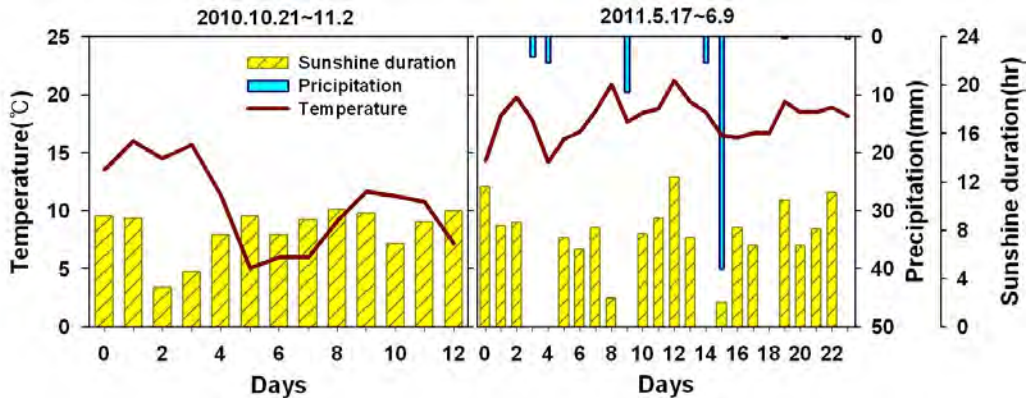
1. 자연분리 천적생물 대량살포 효과분석

가. 천적생물 현장살포 전, 후 기상 및 수환경 특성

(1) 기상 특성

자연분리 천적생물의 녹조제어 효과분석을 위한 1차 살포는 2010.10.21~11.2까지 13일간, 2차 살포는 2011.5.17~6.9까지 24일간 실시하였으며, 이 기간동안의 기상변화를 살펴보았다.

기온은 1차 살포기간에 5.1~16.0 °C(평균 10.6 °C)의 범위로 나타났으며, 2차 살포기간에는 14.2~21.2 °C(평균 17.9 °C)의 범위로 1차 살포시기의 수온이 다소 낮게 나타났다. 1차 살포 후 모니터링 기간 중에는 강우가 발생하지 않았으나, 2차 살포 후 기간에는 5차례에 걸쳐 총 62.5 mm의 강우가 발생하였고, 살포 15일차에는 40 mm의 강우가 발생하였다. 일조시간은 1차 살포기간에 평균 8.0시간(3.3~9.7시간)으로 나타났으며, 2차 살포기간에는 평균 6.0시간(0.0~12.4시간)으로 나타났는데, 2차 살포기간은 강우의 영향으로 일조시간이 감소하였다.



<그림 2.75> 자연분리 천적생물 현장살포 전·후 기상특성

(2) 수환경 특성

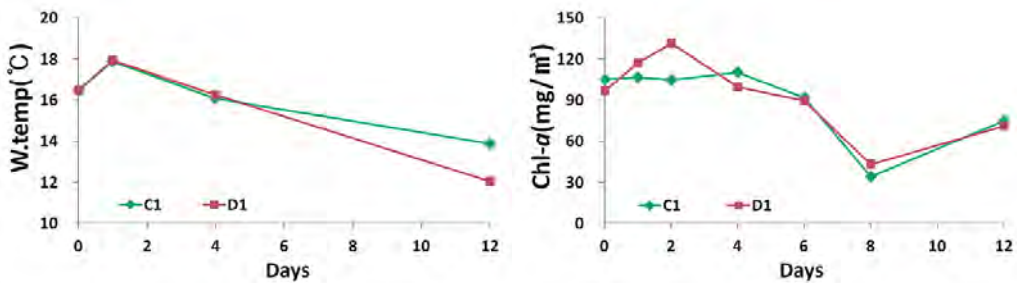
(가) 1차 살포(2010)

녹조발생 수역에 자연 서식하는 천적생물을 배양장치의 자연분리를 통해 수상배양장치(5 m³ × 2 set, 10 m³)에서 대량배양한 후, 녹조발생 수역에

일시 살포(2010.10.21)하여, 11.2일까지 13일간 살포효과 분석을 실시하였으며, 살포지점인 횡방향 살포 5m지점(C1) 및 제방방향 살포 5m지점(D1)의 수온과 Chl-a 항목의 시간별 변이를 분석하였다.

수온(W.temp.)은 12.1~17.9 °C(평균 15.9 °C)의 범위로 나타났으며, C1 13.9~17.9 °C, D1 12.1~17.9 °C으로 시간이 갈수록 감소하는 경향을 보였다.

Chl-a는 기간 중 34.0~131.6 mg/m³(평균 91.2 mg/m³)로 나타났으며, C1 34.0~110.4 mg/m³, D1 43.2~131.6 mg/m³의 범위를 보여, 살포이후 8일차까지 49.5 mg/m³로 꾸준히 감소한 후 다시 증가하는 경향을 보였다(그림 2.76).



<그림 2.76> 자연분리 천적생물 현장살포에 따른 수질변화(1차 살포)

(나) 2차 살포(2011)

자연분리 천적생물을 수상배양장치에서 대량배양한 후, 현장에 일시 살포(2011.5.17)하여, 6.9일까지 24일간 살포효과 분석을 실시하였으며, 대조구(JD2)와 살포지점(D1)의 수온, COD, TN, TP, PO₄-P, Chl-a의 변화를 검토하였다.

수온(W.temp.)은 20.1~25.4 °C(평균 22.2 °C)로 지점별로는 JD2에서 20.1~25.2 °C, D1에서 20.1~25.6 °C의 범위를 보여, 대조구와 살포지점의 수온 차는 거의 없었다.

COD는 기간 중 14.4~21.6 mg/L(평균 16.9 mg/L)로 JD2에서 13.6~18.4 mg/L, D1에서 13.2~27.2 mg/L의 범위를 보였으며, 대조구인 JD2는 0일차(16.0 mg/L)이후 ± 2.4 mg/L 범위로 증감을 반복한 반면, 살포지점인 D1은 0일차(27.2 mg/L)에 비해 2일차에 51.5 % 감소한 13.2 mg/L로 나타났는데, 이는 천적생물에 의한 녹조의 섭식에 따라 유기물 농도가 감소한 것으로 판단되었다.

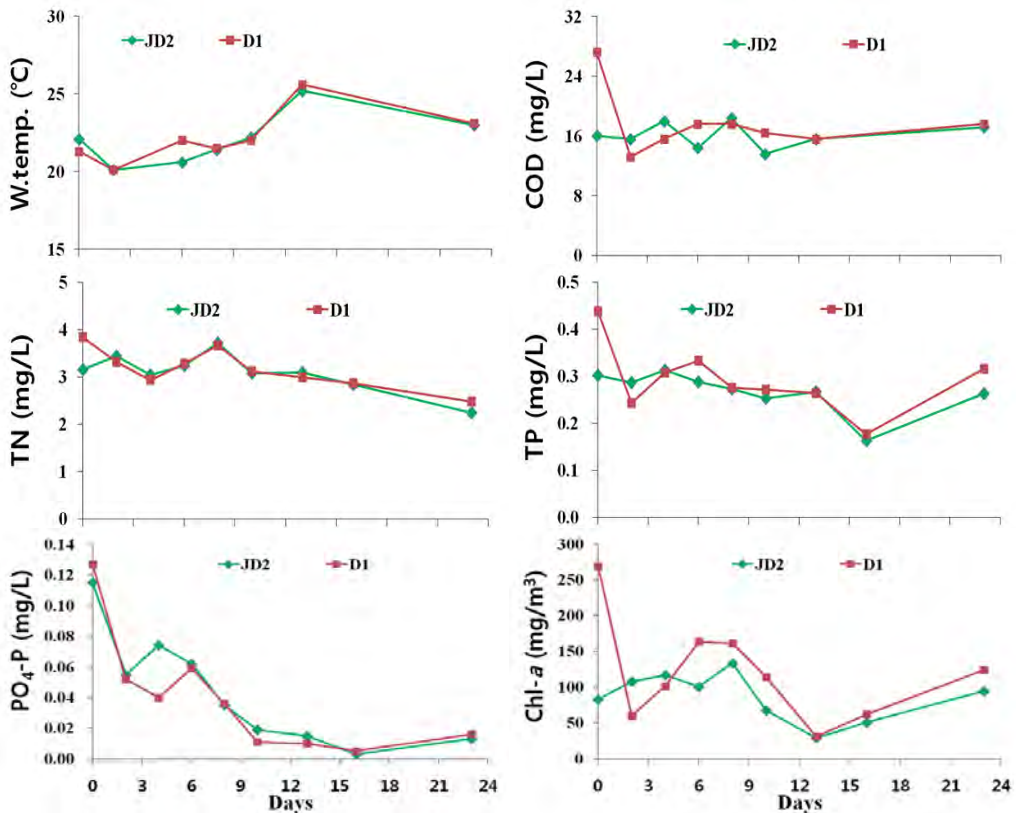
TN은 2.359~3.686 mg/L(평균 3.126 mg/L)으로 JD2에서 2.242~3.713 mg/L, D1에서 2.475~3.836 mg/L의 범위를 보여, 대조구와 살포지점에서 서로

유사하게 나타나 지점별 차이는 거의 없었고 시기별로 일부차이가 나타났다.

TP는 0.1710~0.370 mg/L(평균 0.279 mg/L)로 JD2에서 0.163~0.313 mg/L, D1에서 0.176~0.438 mg/L의 범위를 보여, 대조구와 살포지점에서 유사하였으며, 시기별로는 16일차까지 감소한 후 다시 증가하였다.

PO₄-P는 0.004~0.123 mg/L(평균 0.042 mg/L)로 JD2에서 0.003~0.115 mg/L, D1에서 0.005~0.130 mg/L로 지점별 차이가 거의 없었으며, 시기별로는 0일차에 0.123 mg/L로 최고치를 보인 후, 16일차까지 점차 감소하였다.

Chl-*a*는 30.0~175.9 mg/m³(평균 103.9 mg/m³)로 JD2 29.0~133.7mg/m³(평균 87.1 mg/m³), D1 30.9~269.1 mg/m³(평균 120.8 mg/m³)의 범위를 보였으나 대조구인 JD2는 살포당시 82.7 mg/m³에서 2일차에 107.7 mg/m³로 증가한 반면, 살포지점인 D1은 살포당시 269.1 mg/m³에서 2일차에 59.8 mg/m³까지 급격히 감소함에 따라, 천적생물 대량살포에 따른 녹조제어 효과가 나타남을 확인할 수 있었다.



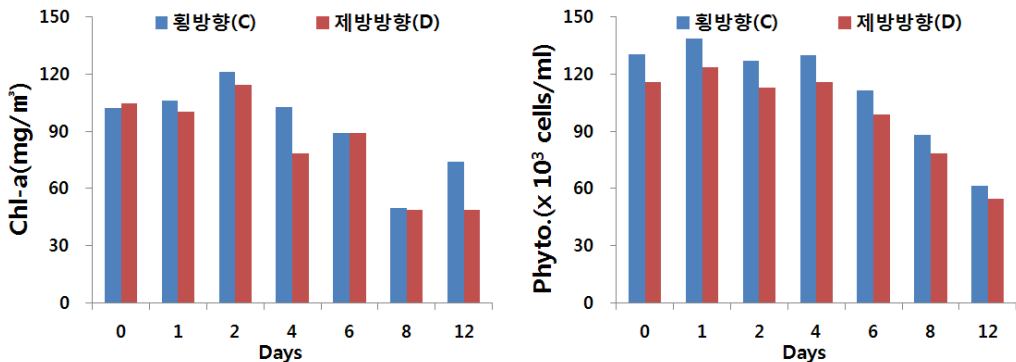
<그림 2.77> 자연분리 천적생물 현장살포에 따른 수질변화(2차 살포)

나. 천적생물 현장살포에 따른 Chl-*a* 및 식물플랑크톤 변화

(1) 1차 살포(2010)

자연분리 천적생물의 녹조제거 효과를 분석하기 위해 녹조발생 수역 살포 후 거리별, 시간별 Chl-*a* 및 식물플랑크톤 현존량 변화를 검토하였다.

1차 살포는 대량 배양된 천적생물을 일시 살포 후, 살포지점으로부터 횡방향(C)과 제방방향(D)으로 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100 m 간격으로 13일(2010.10.21~11.2) 동안 관찰하였다.



<그림 2.78> 자연분리 천적생물 현장살포에 따른 Chl-*a* 및 식물플랑크톤 변화(1차 살포)

Chl-*a*는 횡방향(C)에서 살포당시 평균 102.3 mg/m³에서 2일차 평균 121.1 mg/m³까지 소폭 상승하였으나, 8일차에 평균 49.5 mg/m³까지 감소하였으며, 제방방향(D)에서는 살포당시 평균 104.7 mg/m³에서 증감을 반복하다 48.7 mg/m³까지 감소하여 천적생물에 의한 Chl-*a* 제거가 확인되었다(그림 2.78).

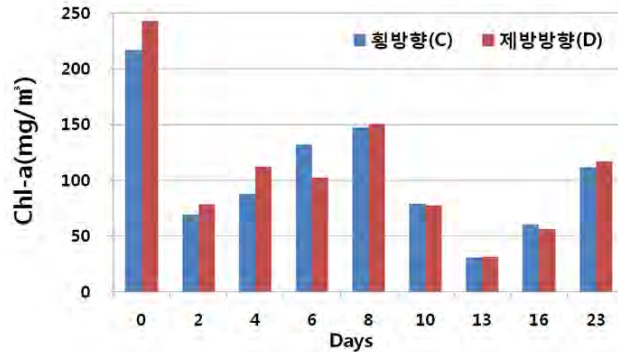
식물플랑크톤 현존량은 횡방향(C)에서 살포당시 평균 13.0×10^4 cells/ml에서 12일에 6.1×10^4 cells/ml까지 감소하였으며, 제방방향(D)에서 살포당시 평균 11.6×10^4 cells/ml에서 12일에 5.4×10^4 cells/ml까지 감소하여 자연분리 천적생물이 녹조원인생물의 제거에 효과적임을 확인하였다(그림2.80).

(2) 2차 살포(2011)

2차 살포시에는 제방방향(D)으로 기존 지점에 100, 110, 120, 130, 140, 150 m를 추가하여 24일(2011.5.17~6.9) 동안 Chl-*a*와 식물플랑크톤 현존량 변화를 살펴보았다.

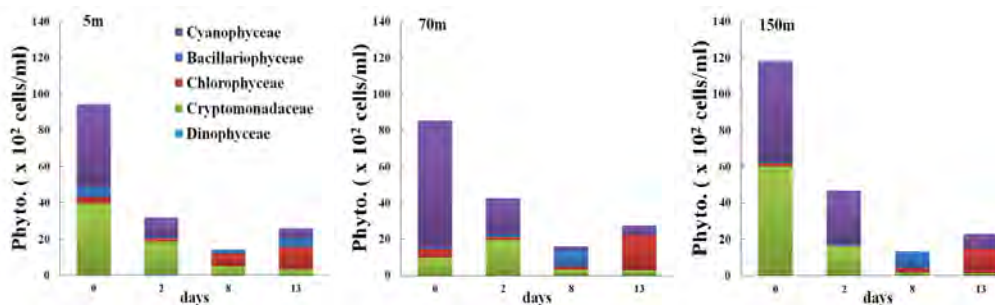
살포이후 제방방향(D)에서의 Chl-*a*변화는 살포당시 평균 243.0 mg/m³에

서 2일차에 평균 78.7 mg/m³로 급격히 감소한 후, 8일차에 150.6 mg/m³까지 증가하였으며, 13일차에 31.2 mg/m³로 최소치를 보였다. 횡방향(C)도 제방방향(D)과 마찬가지로, 살포당시 평균 217.0 mg/m³에서 2일차에 평균 69.3 mg/m³로 급격히 감소한 후, 8일차에 147.3 mg/m³까지 증가하였으며, 13일차에 31.0 mg/m³로 최소치를 보이는 등 천적생물 살포 13일차에 농업용수 수질기준(<35 mg/m³)을 만족하는 수준까지 감소하는 것을 확인할 수 있었다(그림 2.79).



<그림 2.79> 자연분리 천적생물 현장살포에 따른 Chl-a 변화(2차 살포)

천적생물 살포 이후 식물플랑크톤의 현존량 변화는 살포 전과 살포 후 3일까지는 남조류와 갈색편모조류가 크게 우점하였으나, 천적생물의 포식에 따라 현존량과 비율이 매우 낮아지는 것을 확인할 수 있었고, 이에 따라 살포 후 9일 이후에는 녹조류가 우점하여 생태계가 건강성을 회복하였다.



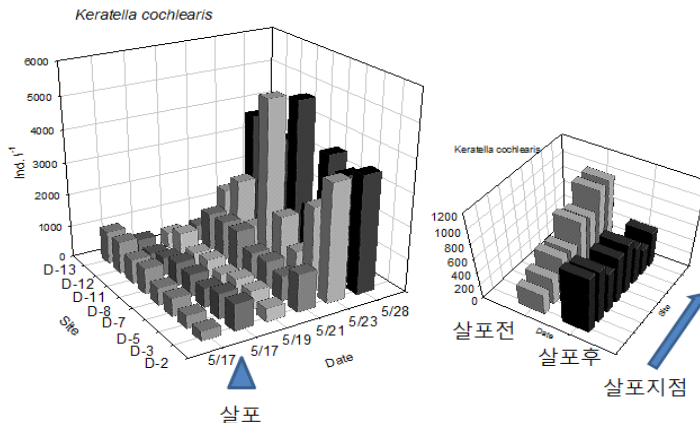
<그림 2.80> 자연분리 천적생물 현장살포에 따른 식물플랑크톤 변화(2차 살포)

천적생물 살포 후 녹조원인생물의 분류군별 저감효과를 분석해본 결과, 전대저수지에서 가장 우점하여 녹조발생에 크게 영향을 미친 남조류 *Oscilatoira*의 감소율이 살포 9일째는 98 %, 살포 14일째는 89 %에 달하였으며, 살포전 남조류와 더불어 우점하였던 갈색편모조류도 살포 9일째는 91%, 살포 14일째에는 93 %가 감소되는 것으로 나타났다.

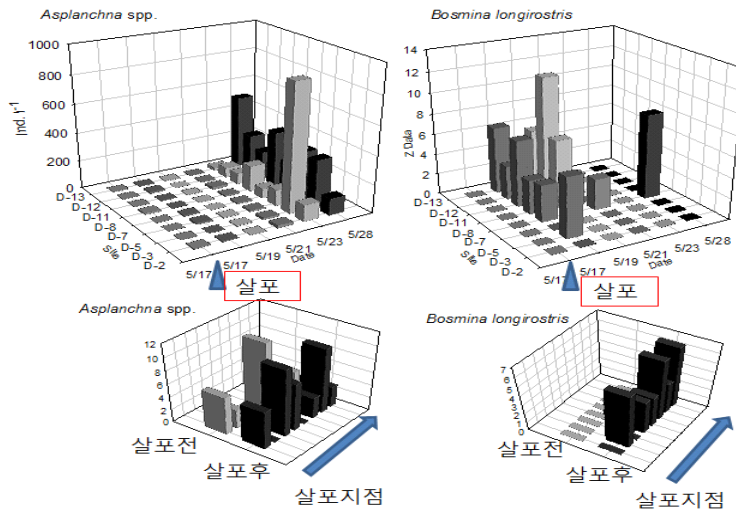
따라서, 천적생물 현장 살포에 의해 녹조원인생물, 특히 남조류의 저감에 매우 효과적임을 확인할 수 있었다

다. 천적생물 현장살포에 따른 동물플랑크톤 증가 효과

전대저수지에 자연 서식하는 동물플랑크톤을 분리 배양하여 현장에 살포한 후 총 21개 지점에서 동물플랑크톤 밀도를 모니터링한 결과, 소형윤충류, 대형윤충류 및 지각류 등 살포지점 주변의 동물플랑크톤이 증가하는 것으로 나타났다(그림 2.81).



<그림 2.81> 살포 후 소형윤충류(우점종, *Keratella cochlearis*)의 개체수 변화(살포지점 D0)



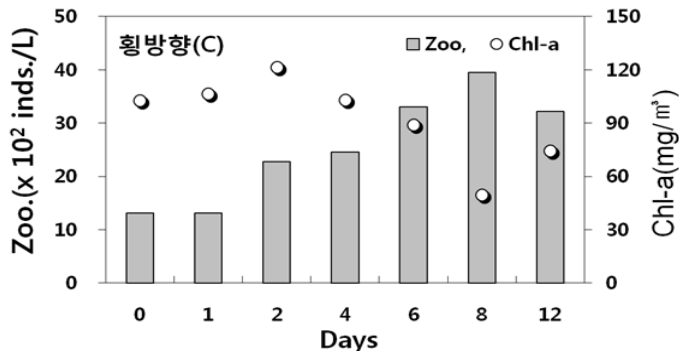
<그림 2.82> 살포 후 대형 윤충류(*Asplanchna* spp.)와 소형 지각류(*Bosmina longirostris*)의 개체수 변화(살포지점 D0)

일반적으로 녹조류 및 규조류를 섭식하는 것으로 알려진 대형 윤충류인 *Asplanchna* spp. 와 녹조류 및 분해된 남조류를 섭식하는 것으로 알려진 소형지각류인 *Bosmina longirostris*의 경우 살포 후 그 개체군 밀도가 증가하였으며, 특히, 소형지각류인 *B. longirostris*의 경우, 살포 전에는 살포지점 주변에서 개체수가 확인되지 않았으나 배양시설에서 배양, 살포 후 각 정점에서 채집되었으며 살포지점에서 높은 밀도를, 살포지점과 멀어질수록 개체수 밀도가 낮아지는 것이 확인되었다(그림 2.82).

라. 천적생물 현장살포에 따른 녹조제어 효과

(1) 1차 살포(2010)

천적생물 현장살포 효과는 살포구간 내 각 지점에서 살포전과 후 경과일수에 따른 천적생물 및 Chl-*a* 변화를 비교하여 2010.10.21~11.2까지 13일간 제거효율을 분석하였다.

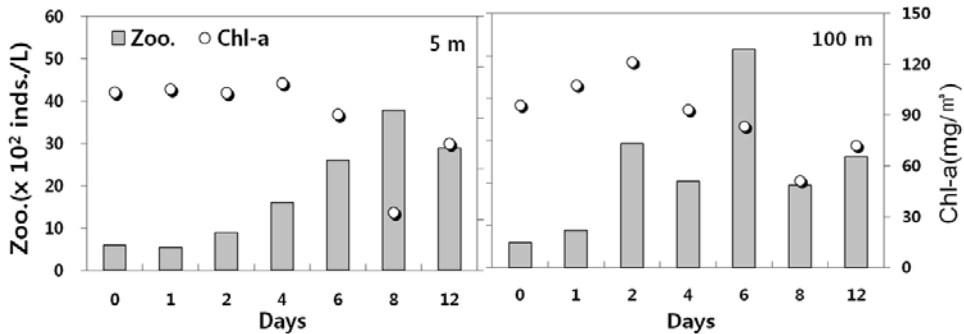


<그림 2.83> 자연분리 천적생물 살포에 의한 횡방향(C)과 제방방향(D)의 일별 동물플랑크톤 및 Chl-*a* 변화(1차 살포)

살포효과를 시간별로 분석해보면, Chl-*a*는 0일차 102.3 mg/m³에서 2일차 121.1 mg/m³까지 증가하였으며, 동물플랑크톤이 0일차(평균 1,308 inds./L) 대비 302.1 % 증가한 8일차(Zoo. 평균 3,953 inds./L)에 Chl-*a*는 51.6 % 감소하여 최소치인 평균 49.5 mg/m³로 나타나, 천적생물 현장살포에 따른 녹조제어 효과를 확인하였다(그림 2.83).

횡방향(C)을 기준으로 살포 거리별 효과를 동물플랑크톤 현존량과 Chl-*a*의 평균값을 비교 했을 때, 동물플랑크톤의 개체수는 5 m에서 8일차에 3,781 inds./L로, 100 m는 6일차에 5,149 inds./L까지 증가하여 5 m에서 100m까지 거리별로 차이는 거의 없으며, 살포 이후 점차 증가한 것으로 나

타났다. 또한, Chl-*a* 역시 초기 높은 농도에서 8일차에 5 m지점 34.0 mg/m³ (69.2 %), 100 m 지점 51.2 mg/m³(57.8 %)으로 최소치를 보이는 등 살포 후 100 m까지는 천적생물 살포 효과가 나타나고 있음을 확인하였다.



<그림 2.84> 자연분리 천적생물의 대량살포에 의한 횡방향(C)의 거리별 동물플랑크톤 및 Chl-*a* 변화(1차 살포)

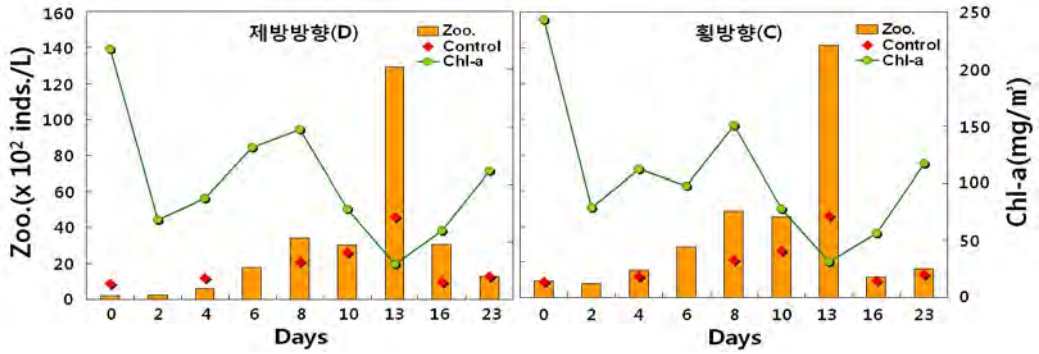
(2) 2차 살포(2011)

자연분리 천적생물 2차 살포 효과를 분석하기 위해 각 지점에서 살포 전과 후 경과일수와 거리별로 천적생물 및 Chl-*a* 변화를 비교하여 녹조제거 효과를 분석하였다.

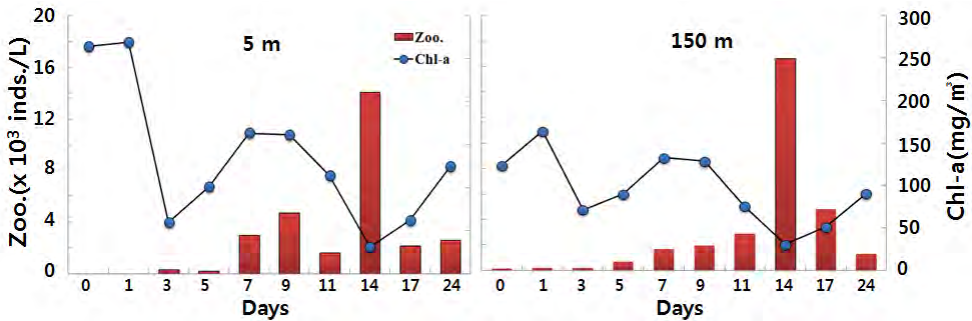
횡방향(C)은 평균 Chl-*a*의 경우 0일차 243 mg/m³에서 2일차 78.7 mg/m³, 13일차에 31.2 mg/m³까지 감소하여 87 %의 제거효율을 보였으며, 동물플랑크톤은 0일차(평균 956 inds./L)에서 13일차에 1,476 % 증가한 평균 14,114 inds./L를 보이는 등 동물플랑크톤이 최대치를 보이는 시기에 Chl-*a*가 최소 농도를 보여 동물플랑크톤의 녹조제어 효과를 확인하였다(그림 2.85).

제방방향(D)은 Chl-*a* 0일차 217 mg/m³에서 2일차 69.3 mg/m³, C방향과 같이 13일차에 31.0 mg/m³로 최소치를 보이며 85.7 %의 제거효율을 보여주었다. 동물플랑크톤은 0일차에 평균 250 inds./L였으나 Chl-*a*가 최소치를 보이는 13일차에 5,156 % 증가한 12,890 inds./L의 밀도를 보여 살포된 천적생물이 녹조발생 수역에서 효과적으로 녹조제어는 물론 개체 성장을 하는 것을 확인하였다(그림 2.85).

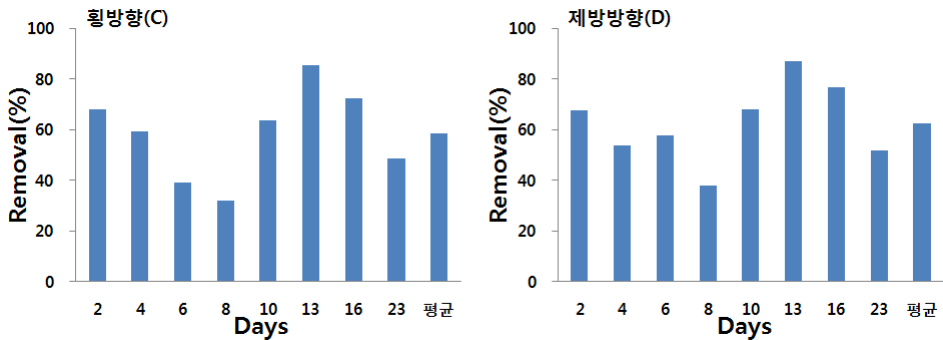
제방방향(D)에서 거리별 제어효과를 분석한 결과 5 m와 150 m에서 서로 유사한 Chl-*a* 및 동물플랑크톤의 개체수 변화를 보여 천적생물 살포 효과가 150 m까지 미치고 있음을 확인할 수 있었다(그림 2.86).



<그림 2.85> 자연분리 천적생물 현장살포에 의한 제방방향(D)과 횡방향(C)의 일별 동물플랑크톤 및 Chl-a 변화(2차 살포)



<그림 2.86> 거리별 동물플랑크톤 및 Chl-a 의 살포 효과(2차 살포)



<그림 2.87> 자연분리 천적생물의 살포전(0일) 대비 시간별 Chl-a 평균 제거율

2. 천적생물 종주 *Daphnia*의 대량살포 효과분석

(1) 기상 특성

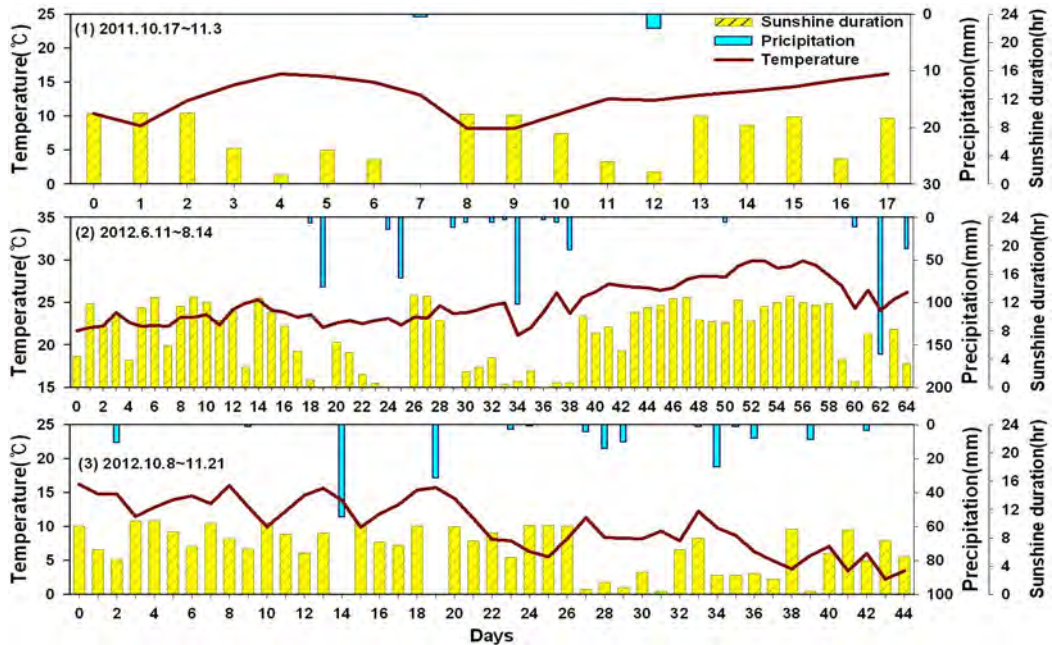
천적생물 종주인 *Daphnia*의 대량배양 및 살포에 따른 녹조제어 효과를

분석하기 위하여, 1차 살포는 2011.10.17~11.3까지 18일간, 2차 살포는 여름철인 2012.6.11~8.14(65일간)과 가을철인 2012.10.8~11.21(45일간)에 실시하였으며, 이 기간 동안의 기상특성을 알아보았다.

기온은 1차 살포기간에 8.2~16.2 °C(평균 12.8 °C)의 범위로 나타났으며, 2차 살포기간에는 여름철 21.2~29.9 °C(평균 25.0 °C), 가을철 2.3~16.2 °C(평균 10.3 °C)의 범위로 나타나, 계절특성에 따른 증감을 보였다.

강수량은 1차 살포기간에는 3차례에 걸쳐 3.1 mm가 발생하였으며, 2차 살포기간의 여름철에는 19차례에 걸쳐 총 565.3 mm의 강우가 발생하였고, 특히 34일차 102.2 mm, 62일차 161.3 mm로 집중하였다. 가을철에는 16차례에 걸쳐 총 178.9 mm의 강우가 발생하였고, 13일차에 54.4 mm의 강우가 발생하였다.

일조시간은 1차 살포기간에 평균 6.5시간(0.0~10.1시간)으로 나타났으며, 2차 살포기간에는 여름철에 평균 7.2시간(0.0~13.0시간), 가을철에 평균 6.3시간(0.0~10.4시간)으로 나타났다.



<그림 2.88> *Daphnia* 천적생물 현상살포 전·후 기상특성

(2) 수환경 특성

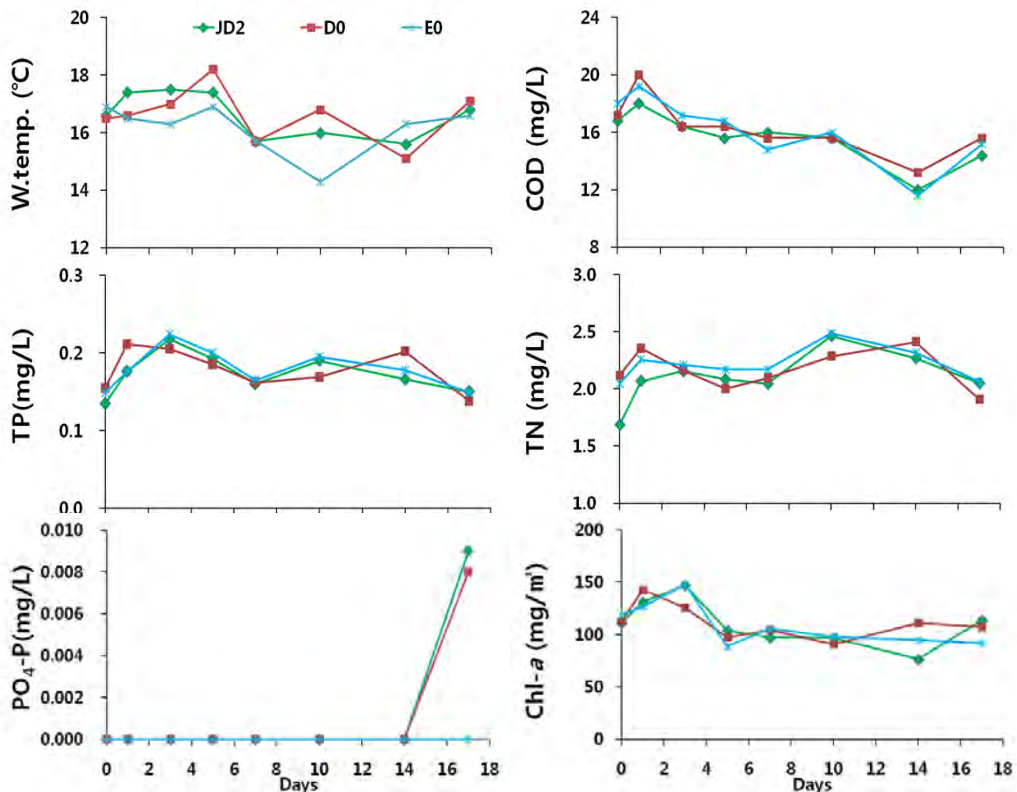
(가) 1차 살포(2011)

천적생물 종주인 *D. similoides*를 수상배양장치(10 m³)와 육상배양장치

(30 m³)에서 대량배양한 후 천적생물을 현장에 일시 살포하여, 2011.10.17~11.3 까지 18일간 살포효과 분석을 실시하였으며, 대조지점인 JD2와 수상배양장치의 살포지점인 D0, 육상배양장치의 살포지점인 E0의 수온, COD, TN, TP, PO₄-P, Chl-*a* 항목에 대한 분석을 실시하였다.

수온은 평균 16.5 °C(15.7~17.5 °C)로 JD2에서 15.6~17.5 °C, D0 15.1~18.2 °C, E0 14.3~16.9 °C의 범위를 보였다.

COD는 평균 16.0 mg/L(12.3~19.1 mg/L)로 JD2에서 12.0~18.0 mg/L, D0에서는 13.2~20.0 mg/L, E0에서는 11.6~19.2 mg/L의 범위를 보여, 대조지점에 비해 오히려 살포지점에서 높게 나타났다. TN은 평균 2.161 mg/L(1.948~2.410 mg/L)로 JD2에서 1.683~2.460 mg/L, D0에서 1.910~2.411 mg/L, E0에서 2.043~2.486 mg/L의 범위를 보여 전반적으로 높은 농도범위를 보였다. TP는 평균 0.177 mg/L(0.146~0.216 mg/L)로 JD2에서 0.135~0.218 mg/L, D0에서 0.138~0.211 mg/L, E0에서 평균 0.149~0.224 mg/L의 범위를 보여, 대조지점에 비해 살포지점에서 높게 나타났다.



<그림 2.89> *Daphnia* 천적생물 현장살포에 따른 수질변화(1차 살포)

PO₄-P는 평균 0.001 mg/L(불검출~0.006 mg/L)로 JD2에서 불검출~0.009 mg/L, D0에서 불검출~0.008 mg/L, E0에서는 검출되지 않았다. 살포 이후 14일차까지는 전 지점에서 인산염인(PO₄-P)이 검출되지 않았는데, 이는 녹조발생 수역에서 식물플랑크톤이 가용한 대부분의 인산염인을 모두 흡수한 때문으로 사료된다. Chl-*a*는 평균 110.0 mg/m³(94.0~140.1 mg/m³)로 JD2 76.6~146.9 mg/m³, D0 90.9~142.5 mg/m³, E0 88.4~147.9 mg/m³의 범위를 보였다. 살포지점(D0, E0)의 Chl-*a*는 살포 초기에는 대조구(JD2)와 같이 증가하는 경향을 보였으나, 천적생물 살포 3~5일차에 JD2에 비해 감소하였다.

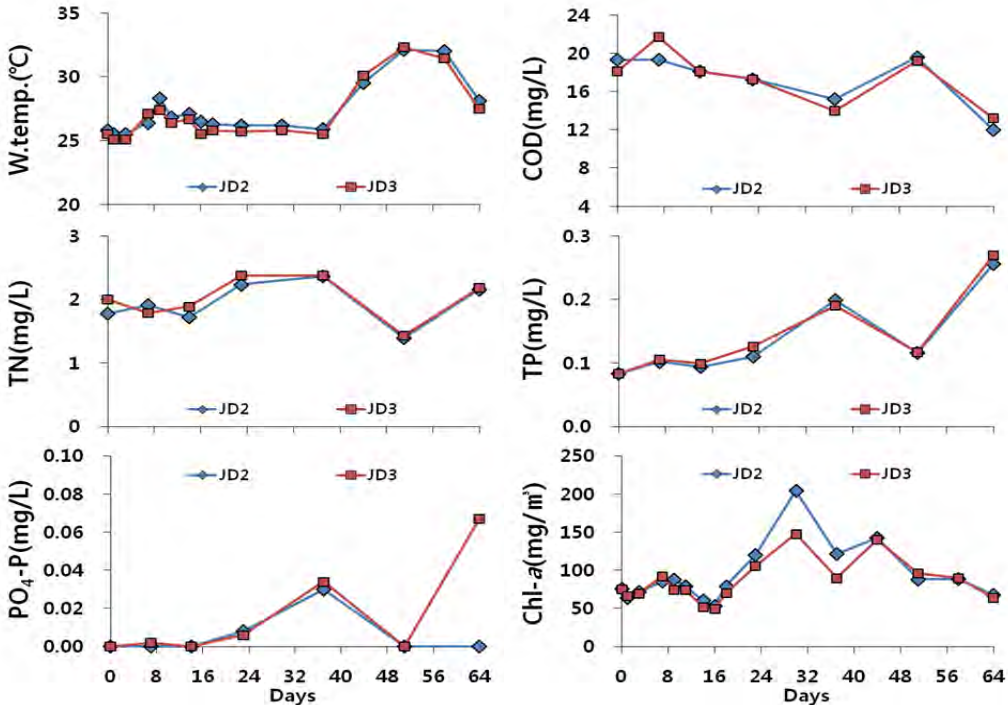
(나) 2차 살포(2012)

천적생물 종주인 *D. similoides*를 수상배양장치(10 m³)와 육상배양장치(30 m³)에서 대량배양한 후, 배양용량에 2/3의 천적생물을 주 1회(매주 월요일) 현장에 살포하여, 여름철(2012.6.11~8.14)에는 65일간, 가을철(2012.10.8~11.21)에는 45일간 살포효과분석을 실시하였으며, 대조구인 JD2와 살포구인 JD3의 수온, COD, TN, TP, PO₄-P, Chl-*a*의 변화를 분석하였다. 이때, 가을철에는 대조구인 JD2 지점이 살포영향을 받아 JD1로 대조구를 변경하였다.

○ 여름철(6~8월)

수온(W.temp.)은 평균 27.2 °C(25.1~32.3 °C)로 JD2에서 25.5~32.1 °C, JD3에서 25.1~32.3 °C의 범위를 보였으며, 하절기의 계절적 요인에 의해 8월부터는 30 °C를 초과하였다. COD는 평균 17.3 mg/L(12.0~21.7 mg/L)로 JD2에서 12.0~19.6 mg/L, JD3에서 13.2~21.7 mg/L의 범위를 보였다. TN은 평균 1.971 mg/L(1.392~2.379 mg/L)로 JD2에서 1.392~2.367 mg/L, JD3에서 1.428~2.379 mg/L의 범위를 보여, 전반적으로 높은 농도를 보였으며, 강우 이후 비교적 증가하는 경향을 보였다. TP는 평균 0.139 mg/L(0.083~0.269 mg/L)로 JD2에서 0.083~0.256 mg/L, JD3에서 0.083~0.269 mg/L의 범위를 보였으며, 62일차에 발생한 집중강우(161.3 mm)이후 급격한 증가를 보였다. PO₄-P는 평균 0.011 mg/L(불검출~0.067 mg/L)로 JD2에서 불검출~0.030 mg/L, JD3에서 불검출~0.067 mg/L의 범위를 보였는데, 64일차를 제외하고 지점별 0.004 mg/L 이내의 차이를 보였다. 시기별로 대부분의 시기에 불검출로 나타났는데, 이는 녹조발생 수역에서 식물플랑크톤이 가용한 대부분의 인산염인을 흡수되었기 때문으로 사료되었으며, TP의 변화와 일치하였다. Chl-*a*는 평균 89.0 mg/m³(49.4~204.6 mg/m³)로 JD2에서 53.7~204.6 mg/m³, JD3에서 49.4~147.6 mg/m³의 범위를 보여, 대조구에 비해 천적생물 살포의 영향을 받는 살포구에서 비

교적 낮은 Chl-a 범위를 보였다. 시기별로는 천적생물 살포이후, 16일차까지 점차 감소하여 최소치를 보인 후, 강우에 의한 영양염류 증가와 함께 30일차까지 점차 증가하여 최고치를 보인 후, 재차 감소하였다.

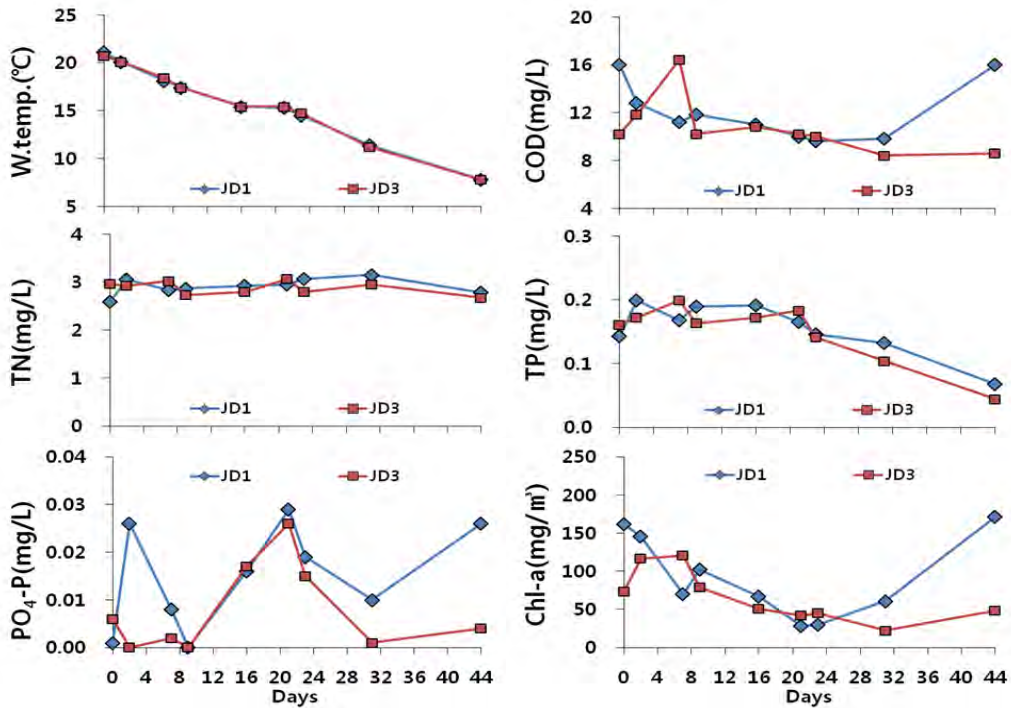


<그림 2.90> *Daphnia* 천적생물 현장살포에 따른 수질변화(2차 살포, 6~8월)

○ 가을철(10~11월)

수온(W.temp.)은 평균 15.7 °C(7.8~22.0 °C)로 JD1에서 7.9~22.0 °C, JD3에서 7.8~20.7 °C의 범위를 보였으며, 시기별로 점차 감소하였다. COD는 평균 11.4 mg/L(8.4~16.4 mg/L)로 JD1에서 9.6~16.0 mg/L, JD3에서 8.4~16.4 mg/L의 범위를 보였으며, 31일차까지 점차 감소한 후 JD1은 급격히 증가하여 최고치를 보였으나, 살포구인 JD3은 오히려 감소하여 최소치를 보였다. TN은 평균 2.895 mg/L(2.592~3.148 mg/L)로 JD1에서 2.592~3.148 mg/L, JD3에서 2.672~3.067 mg/L의 범위를 보여 전반적으로 높은 농도범위를 보였다. TP는 평균 0.152 mg/L(0.044~0.199 mg/L)로 JD1에서 0.068~0.199 mg/L, JD3에서 0.044~0.199 mg/L의 범위를 보여 시기별로 점차 감소하였다. PO₄-P는 평균 0.011 mg/L(불검출~0.029 mg/L)로 JD1에서 불검출~0.029 mg/L, JD3에서 불검출~0.026 mg/L의 범위를 보였으며, 대조구인 JD1에서 비교적 높게 나타났고, 시기별로 다양한 변화를 보였다. Chl-a는 평균 79.8 mg/m³(22.3~171.5

mg/m³)로 JD1에서 28.4~171.5 mg/m³, JD3에서 22.3~120.9 mg/m³의 범위를 보였으며, 전반적으로 대조구(평균 93.0 mg/m³)에 비해 천적생물 살포의 영향을 받는 살포구(평균 66.5 mg/m³)에서 낮은 Chl-*a* 범위를 보였다. 시기별로는 천적생물 살포이후, 대조구는 23일차에 최소치인 30.2 mg/m³, 살포구는 31일차에 최소치인 22.3 mg/m³까지 감소하였다.



<그림 2.91> *Daphnia* 천적생물 현장살포에 따른 수질변화(2차 살포, 10~11월)

나. 천적생물 현장살포에 따른 Chl-*a* 및 식물플랑크톤 변화

(1) 1차 살포(2011)

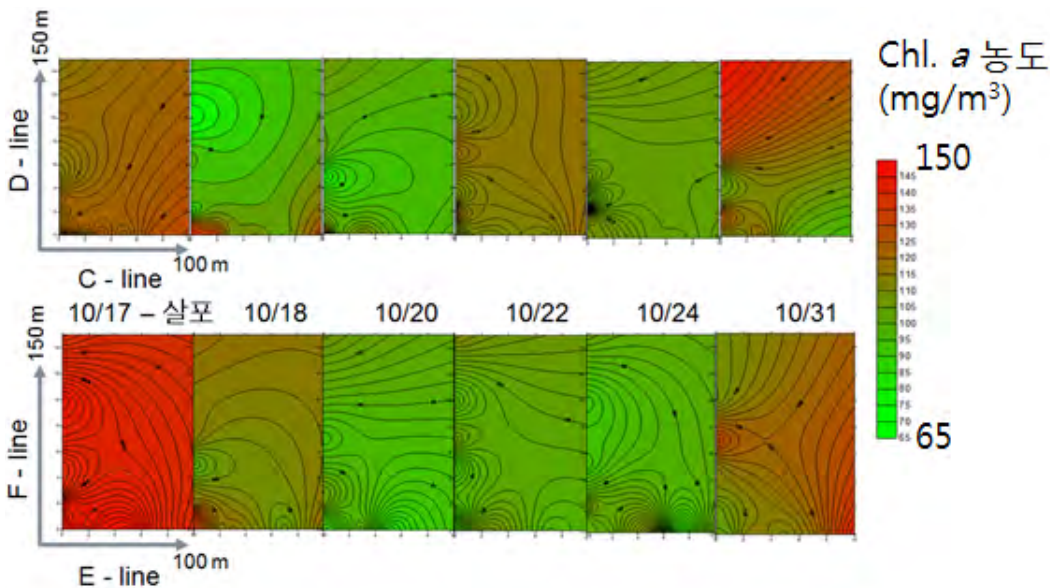
10 m³ 규모 수상배양장치의 살포효과 분석구간인 C, D-line과 30 m³ 규모의 육상배양장치의 살포효과 분석구간인 E, F-line의 살포 후 14일간 (2011.10.17~10.31) 일별 Chl-*a* 농도의 공간분포를 분석하였다.

두 살포구간 모두 살포 이후 Chl-*a* 농도가 감소하는 것이 관찰되었으며, 살포 직전 전대저수지의 살포 대상 구간에서 100 mg/m³ 이상의 높은 Chl-*a* 농도를 나타내고 있었으나, 살포 직후부터 Chl-*a* 농도가 점차 감소하기 시작하여 두 구간 모두에서 살포 3일후 가장 낮은 Chl-*a* 농도를 나타내었다. 감소된 Chl-*a* 농도는 이후 다시 점차 증가하여 살포 2주일 경과 후에

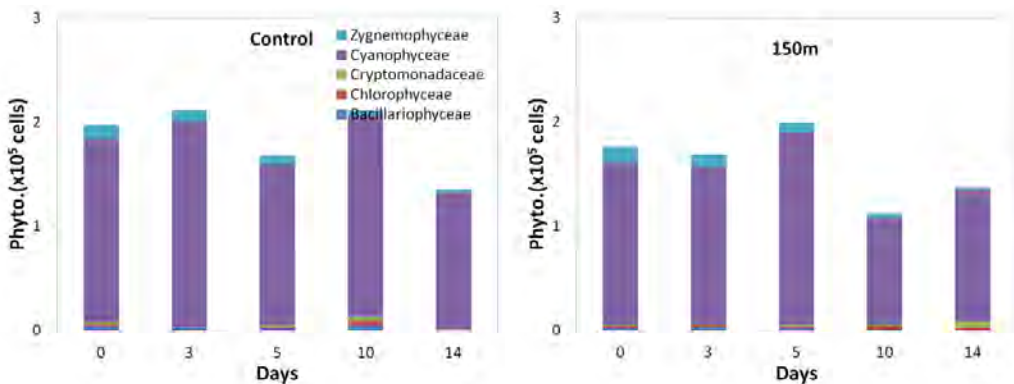
는 살포이전의 높은 Chl-*a* 농도를 보이는 것으로 나타났다(그림 2.92).

따라서, 살포구간에서 Chl-*a* 변화로 천적생물 대량 살포로 인한 녹조제어 효과가 있었음을 확인할 수 있었으며, 살포 후 3일차 이후 재증가하는 것으로 보아, 지속적인 천적생물의 현장살포가 요구되는 것으로 판단되었다.

천적생물 살포후 식물플랑크톤의 현존량 변화는 살포지점에서 150 m 이상 떨어져 있음에도 불구하고 대조구보다 낮은 현존량을 보여 이 구간까지 천적생물 살포의 영향을 받고 있는 것으로 나타났으며, 특히 살포 10일차에 대조구와 비교하여 47.0 %의 제어효과가 나타났을 뿐만 아니라 녹조원인 남조류의 효과적 감소로 천적생물 살포에 따른 녹조제어효과를 확인하였다.



<그림 2.92> *Daphnia* 천적생물 현장살포에 따른 Chl-*a*의 시·공간 분포 변화



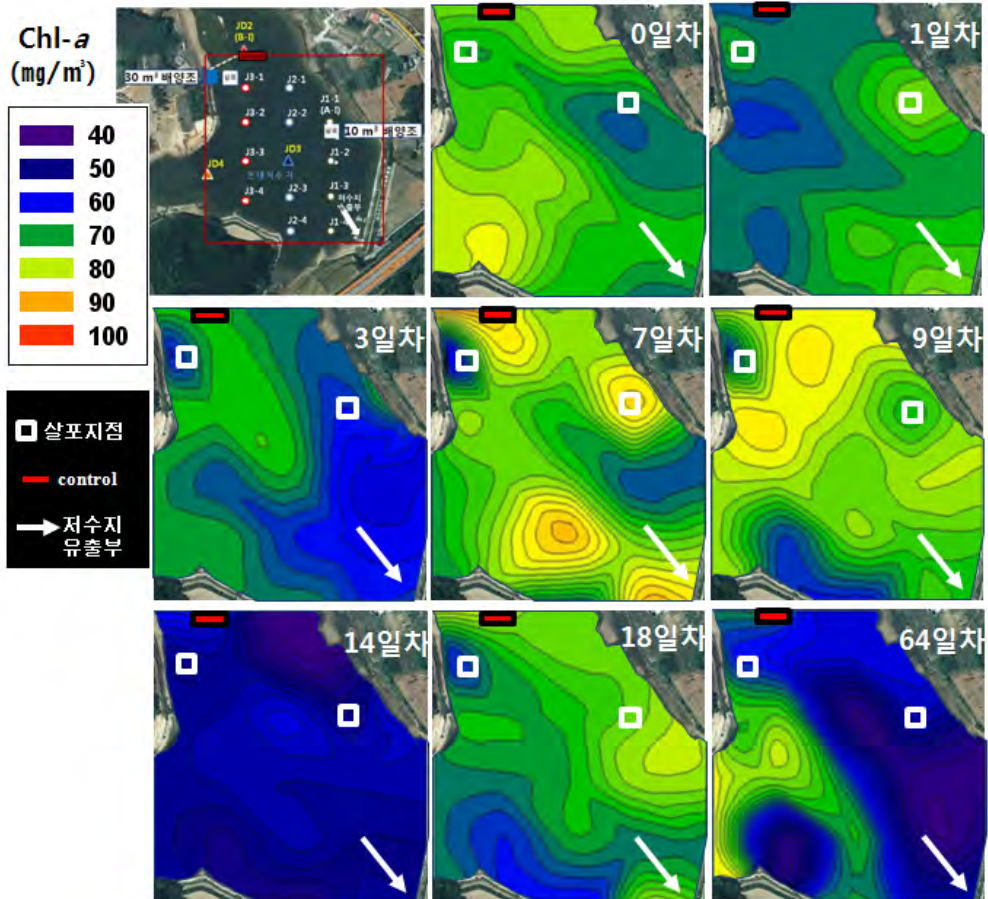
<그림 2.93> *Daphnia* 천적생물 살포 이후 식물플랑크톤 종조성 변화

(2) 2차 살포(2012)

(가) 여름철(6~8월)

천적생물 종주의 2차 살포 중 여름철 효과분석은 2012.6.11~8.14까지 65일간, 주 1회(월요일), 총 9회 천적생물 현장살포와 병행하여 효과분석을 실시하였다.

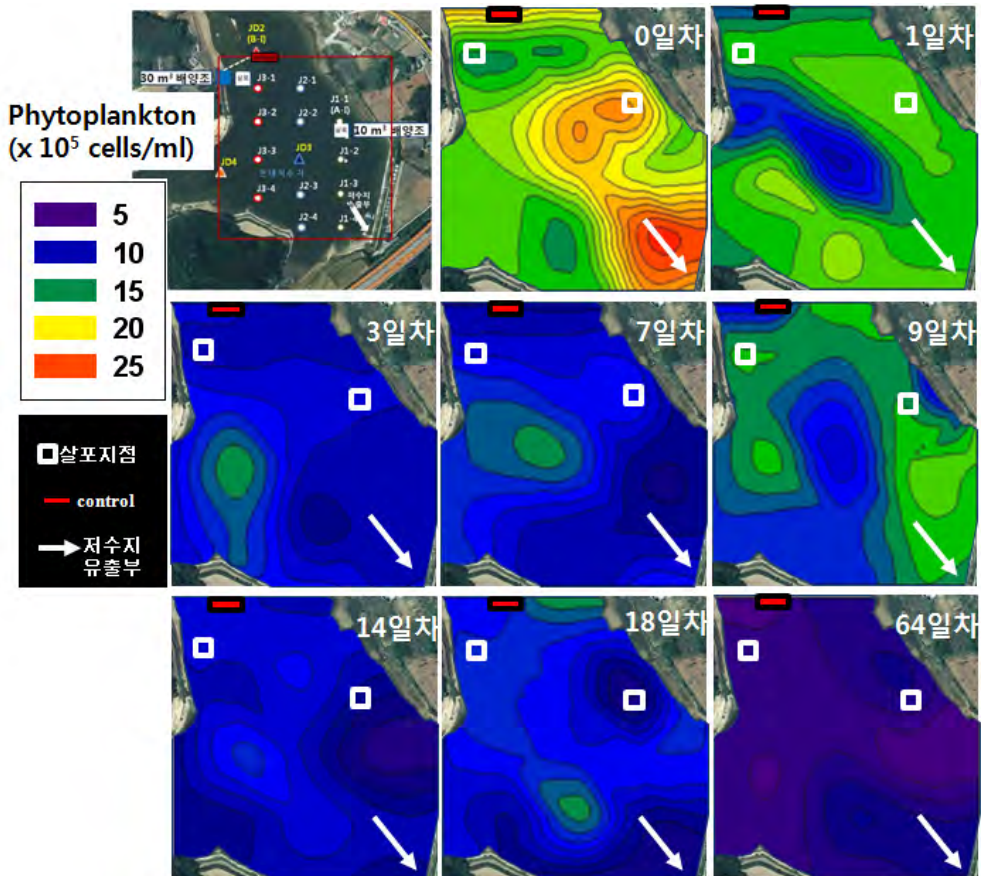
시기별로 살포지점의 평균 Chl-*a* 농도는 살포 전(0일차, 6/11) 72.4 mg/m³에서 1일차(6/12, 69.0 mg/m³)~3일차(6/14, 66.3 mg/m³)까지 감소하였으며, 7일차(6/18) 살포 전에 83.1 mg/m³로 상승하였으나, 9일차(6/20)에 75.5 mg/m³로 감소한 후, 14일차(6/25)에 51.1 mg/m³까지 감소하였다. 이후 지속적인 살포를 실시하였으며, 64일차(8/14)에는 57.8 mg/m³를 나타내 각 살포 실시 후 Chl-*a*의 감소가 관찰되었다.



<그림 2.94> *Daphnia* 천적생물 현장살포 효과분석(Chl-*a*, 6~8월)

또한, 천적생물의 영향이 없는 대조구인 JD2에서는 살포구간에 비해 높은 Chl-*a* 범위(평균 64.1~204.6 mg/m³)를 보여, 천적생물의 주기적 살포를 통한 천적생물의 녹조제어효과가 반영된 것으로 사료되었다. 여름철 천적생물에 의한 살포효과는 천적생물 살포지점 및 그 인근, 저수지 유출부 인근의 수심(평균 3.5 m 이상)이 깊은 구간, 저수지 하류 좌안의 연안부(평균 2.5 m 이하) 수초대 등 3구간에서 특히 확인할 수 있었다(그림 2.94).

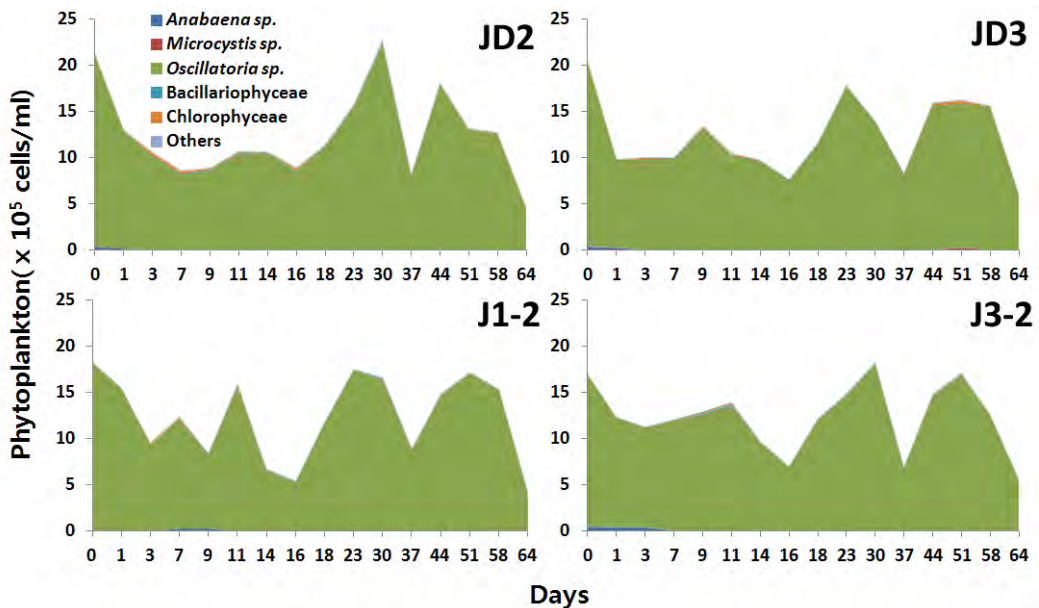
시기별로 살포지점의 평균 식물플랑크톤 현존량은 살포 전(0일차, 6/11) 17.9×10^4 cells/ml에서 1일차(6/12, 15.6×10^5 cells/ml)~3일차(6/14, 10.6×10^5 cells/ml)까지 감소하였으며, 7일차(6/18) 살포 전에 11.7×10^5 cells/ml로 일부 상승 하였으나, 9일차(6/20)에 10.2×10^5 cells/ml로 감소한 후, 64일차(8/14)에는 5.9×10^5 cells/ml까지 감소하여, 살포 실시 후 식물플랑크톤 현존량의 감소가 관찰되었다(그림 2.95).



<그림 2.95> *Daphnia* 천적생물 현장살포 효과분석(식물플랑크톤, 6~8월)

이에 따라, 천적생물의 주기적인 현장살포를 통해 Chl-*a*와 마찬가지로 식물플랑크톤 현존량 측면에서도 천적생물에 의한 녹조제어효과를 확인할 수 있었다.

녹조원인생물 및 천적생물 분포 변화는 대조구인 JD2와 실험구인 JD3, J1-2와 J3-2(살포주변하류지역) 지점을 선택하였다. 여름철에는 모든 조사지점에서 *Oscillatoria* sp.가 우점 하였고 종조성은 평균 97.3 %로 모든 시기에 극우점을 한 것으로 관찰됐다. 여름철 살포 1일차에서 JD3은 0일차보다 약 33 %의 감소율을 나타냈지만 2일차부터는 증가와 감소를 반복하며 별다른 차이를 보여주지 못한 것으로 관찰됐다. J1-2와 J3-2지점은 1일차부터 증가와 감소를 반복하며 별다른 차이를 보여주지 못하였다.



<그림 2.96> *Daphnia* 천적생물 살포 이후 식물플랑크톤 종조성 변화(6~8월)

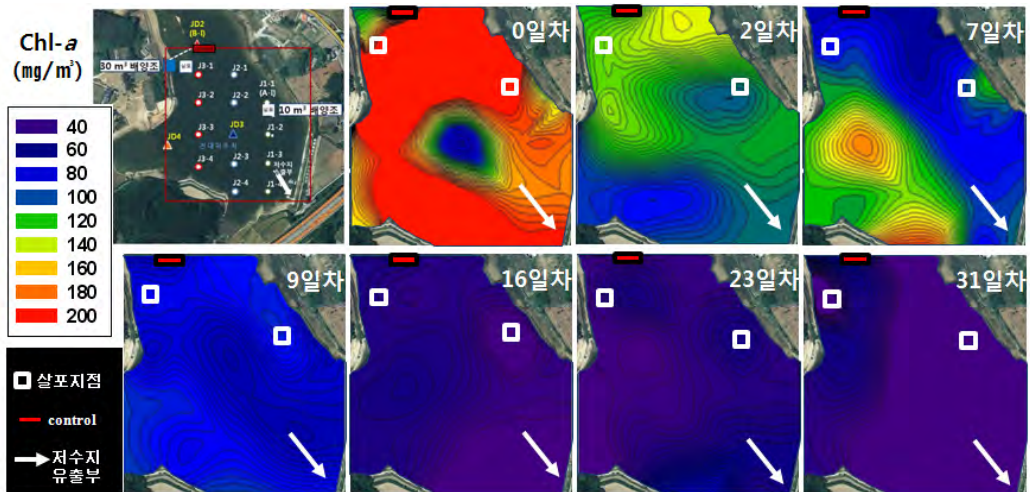
(나) 가을철(10~11월)

천적생물 종주의 2차 살포 중 가을철 효과분석은 2012.10.8~11.8까지 31일간 실시하였으며, 배양한 천적생물을 주 1회(매주 월요일), 총 4회 살포하여 효과를 분석하였다.

살포구간의 평균 Chl-*a* 농도는 살포 전(0일차, 10/8) 211.2 mg/m³에서 2일차(10/10, 116.7 mg/m³)~16일차(10/29, 46.2 mg/m³)까지 감소하였으며, 23일차(10/31)에 51.8 mg/m³로 다소 증가하였으나, 31일차(11/8)에 33.3 mg/m³로 나

타나 각 살포 실시 후 Chl-*a*의 감소가 관찰되었다. 초기 7일차까지는 Chl-*a*가 100 mg/m³을 초과하는 매우 고농도를 보였는데, 이는 초기 녹조가 매우 고농도로 번성한 상태였기 때문이며, 지속적인 천적생물 살포에 의해 Chl-*a*의 급격한 감소를 확인하였으며, 최소치를 보이는 31일차에는 살포 전(0일차)에 비해 178.0 mg/m³(제어 효과 84.3 %)의 감소를 보였다.

전대저수지 내 살포 구간별 Chl-*a* 농도변화를 보면, 여름철 살포시기와 다소 상이하지만, 대체로 살포지점에서 저수지 유출부 방향으로 이동하면서 Chl-*a* 감소효과를 보인 것으로 관찰되며, 이는 물의 흐름과 동물플랑크톤의 운동성에 기인한 것으로 사료되었다(그림 2.97).



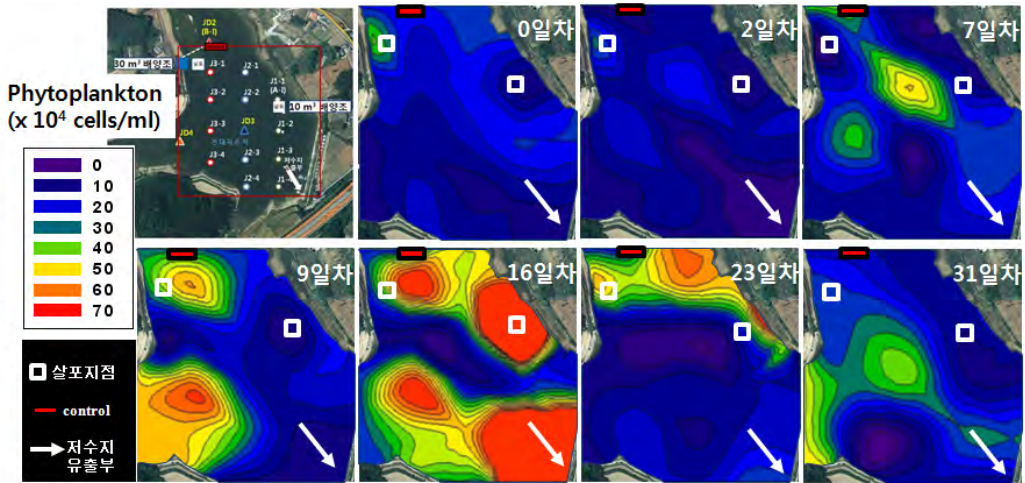
<그림 2.97> *Daphnia* 천적생물 현장살포 효과분석(Chl-*a*, 10~11월)

살포구간의 식물플랑크톤 평균 현존량은 살포 전(0일차, 10/8) 16.1×10^4 cells/ml에서 살포 후 1일차(10/10)에 11.5×10^4 cells/ml로 감소하였으나, 이후 16일차까지 55.2×10^4 cells/ml까지 증가하였으며, 31일차에는 20.9×10^4 cells/ml로 나타나, Chl-*a*와 달리 살포 1일차를 제외하면 녹조제어효과가 없는 것으로 나타났다(그림 2.98).

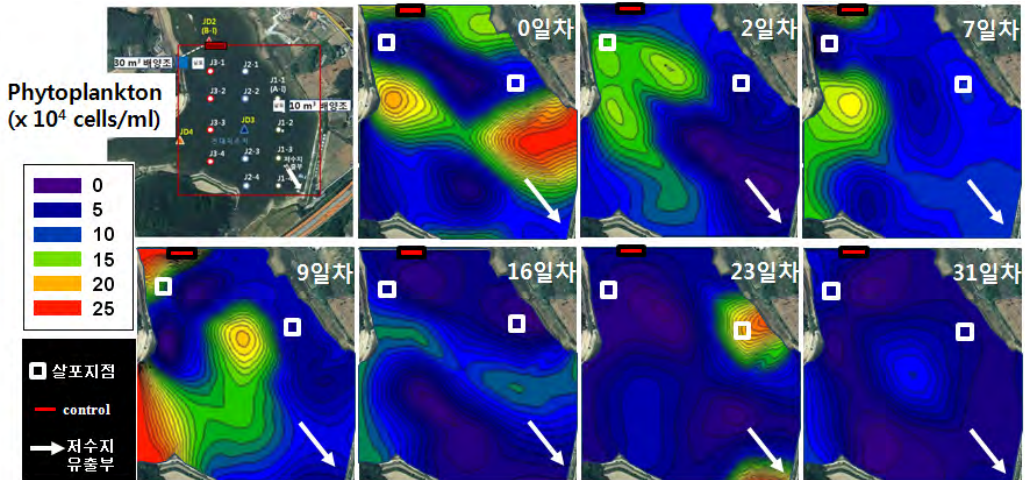
식물플랑크톤 현존량의 간접지표로서 Chl-*a*가 이용되지만, 남조류의 증가는 식물플랑크톤의 현존량과 Chl-*a*의 불일치의 원인으로 알려져 있으며(박 등, 2006), 특히, *Microcystis*속의 급증은 Chl-*a*에 비해 현존량의 과도한 증가를 유발하는 것으로 알려져 있다(Horne and Goldman, 1994).

따라서, *Microcystis* sp.를 제외한 식물플랑크톤 현존량을 분석해 본 결과, 살포전(10/8) 10.8×10^4 cells/ml에서 7일차에 8.5×10^4 cells/ml까지

감소하였으며, 9일차에 9.7×10^4 cells/ml로 재증가하였으나, 31일차에 3.1×10^4 cells/ml까지 감소하여, Chl-*a*와 유사한 양상으로 감소하는 것으로 나타났다(그림 2.99).

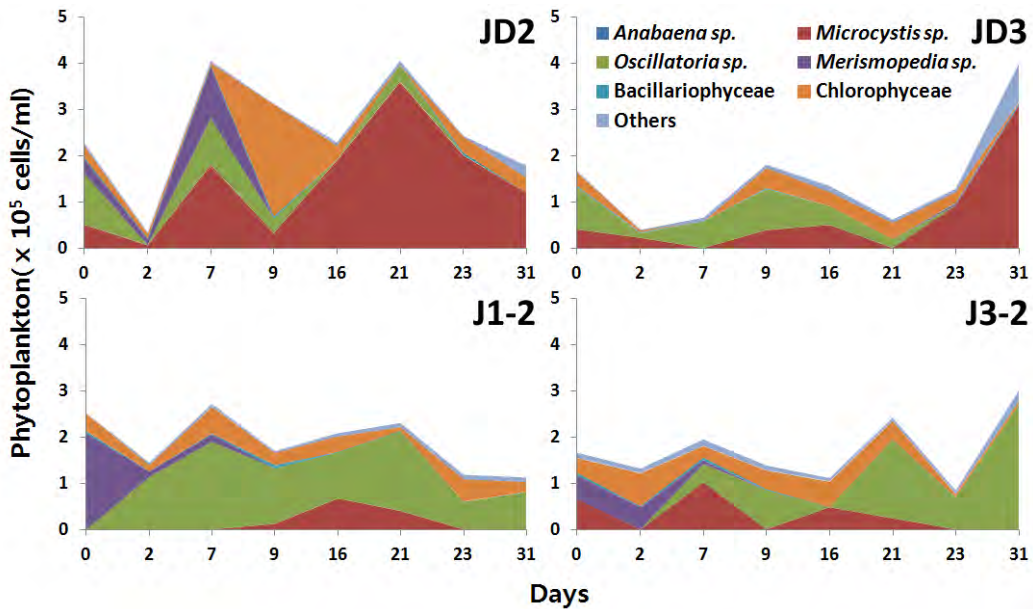


<그림 2.98> *Daphnia* 천적생물 현장살포 효과분석(식물플랑크톤, 10~11월)



<그림 2.99> *Daphnia* 천적생물 현장살포 효과분석(식물플랑크톤[*Microcystis* sp. 제외], 10~11월)

가을철 살포 후 대조구인 JD 2에 비해 살포구간인 JD 3, J1-2, J3-2 지점의 식물플랑크톤 현존량이 전반적으로 감소하였으며, 살포후 23일까지는 JD2와 같이 급증하는 경우가 나타나지 않았다. 특히, JD2에서는 *Microcystis* sp.가 우점 하였지만, 살포 인접구간인 J1-2와 J3-2의 경우 *Microcystis* sp.가 낮은 수준으로 나타나 *Microcystis* sp.의 제어효과가 높은 것을 알 수 있었다.



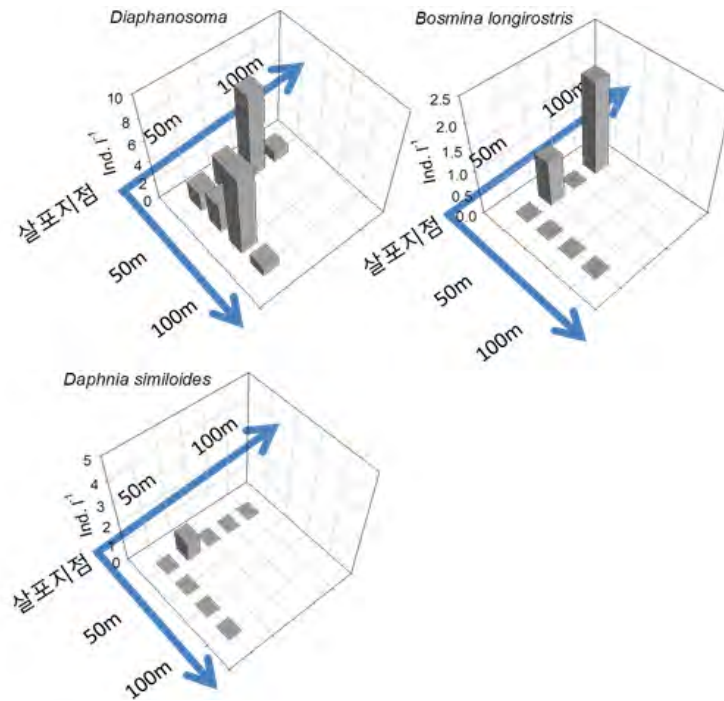
<그림 2.100> *Daphnia* 천적생물 살포 이후 식물플랑크톤 종조성 변화(10~11월)

다. 천적생물 현장살포에 따른 동물플랑크톤 변화

(1) 1차 살포(2011)

실내에서 종주배양한 고밀도 천적생물 종주 *Daphnia*를 6/7일 천적생물 배양장치에 투입하여 증식시킨 후, 6/14일 현장에 살포하였으며, 현장살포 후 천적생물의 분포와 식물플랑크톤 현존량을 분석하였다. 살포시 천적생물 배양장치에서 배양한 천적생물 종주 *Daphnia similoides*(235 inds./L) 외에 자연분리 천적생물인 *D. galeata*(225 inds./L) 및 *Moina* spp.(35 inds./L), *D. pulex*(20 inds./L) 등이 수상 배양장치에서 대량 배양되어 살포되었으며, 소형 지각류인 *Bosmina longirostris*도 1,885 inds./L의 높은 개체군 밀도로 살포되었다. 배양장치의 개체군 밀도를 고려하면, 천적생물 종주인 *Daphnia*는 약 2백만 개체 이상이 녹조발생 수역에 살포되었다.

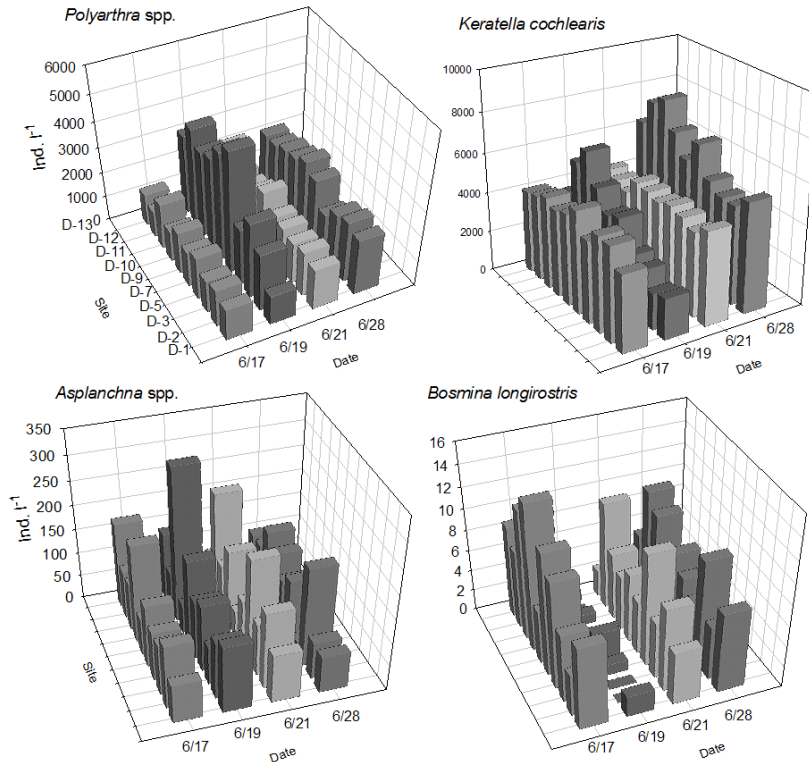
살포 후 천적생물 및 서식처 동물플랑크톤의 군집변화를 추적하기 위해 표면시료 및 플랑크톤 네트를 이용한 저층에서 표면까지의 시료 채집을 시행, 살포된 천적생물의 분포 및 동물플랑크톤 군집에 미치는 영향을 분석한 결과, 서식처에 존재하는 우점 소형윤충류 및 대형윤충류를 포함한 동물플랑크톤은 지점별 또는 시간별로 큰 개체군 밀도차를 보였으나, 살포된 천적생물의 분포는 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다(그림 2.101).



<그림 2.101> 천적생물 살포 후 천적생물 종주와 자연분리 천적생물의 공간분포

천적생물 종주인 *D. similoides*의 살포 후 효과범위를 파악하기 위해 시, 공간분포를 정기적으로 모니터링한 결과, 24시간 후 인위적으로 투입된 *D. similoides*가 살포지점 인근 지점에서 채집되었지만, 24시간 이후에는 *D. similoides*가 채집되지 않아 살포 후 비교적 짧은 기간(수일 이내) 동안만 식물플랑크톤 섭식작용을 수행하는 것으로 나타났다. 자연분리 천적생물은 중우점 분류군인 소형 윤충류 및 대형 윤충류를 포함한 동물플랑크톤은 지점별 또는 시간별로 큰 개체군 밀도차를 보였으나, 천적생물 살포에 의한 뚜렷한 영향은 없는 것으로 나타났다(그림 2.102)

1차 살포(10월) 경우 천적생물 종주인 *Daphnia*를 대량 살포하기 위해 배양하였으나, 대량배양 과정에서도 *Daphnia*의 개체수가 증가하지 않고 계속 감소하는 경향을 보였으며, 살포 후에도 살포구간에서 *Daphnia*가 관찰되지 않았다. 낮은 수온에서 먹이조건이 양호하지 않은 경우 배양장치에서 종주분리 천적생물을 일정 기간 내 증가시키는 것은 어렵다. 따라서 이 시기에는 *Daphnia* 등의 특정 대형 동물플랑크톤을 배양하여 살포하는 것보다 그 시기에 현장에 서식하는 동물플랑크톤을 자연분리한 후 대량 배양시켜 주기적으로 살포하여 생물량을 증가시켜주는 것이 더욱 효과적일 것이라 판단된다.



<그림 2.102> 천적생물 살포 후 소형 및 중, 대형 윤충류의 시, 공간분포

(2) 2차 살포(2012)

2012년 2차 연속 살포를 위해 천적생물 배양시설에서 천적생물 개체군 밀도를 증가시켜 일주일 간격으로 수체에 천적생물을 살포하였다. 살포 기간 중 천적생물의 개체군 밀도를 조사한 결과 6월에서 7월의 연속방류량은 육상 배양장치에서 최대 톤 당 354,541개체의 천적생물 살포가 가능하였고, 육상배양장치를 통해 살포될 수 있는 최대 살포량은 10,636,235개체로 매우 높게 나타났다. 10월에 실시된 연속살포 실험의 경우 살포 가능 천적생물 개체수는 육상과 수상배양장치 모두 높게 나타났다.

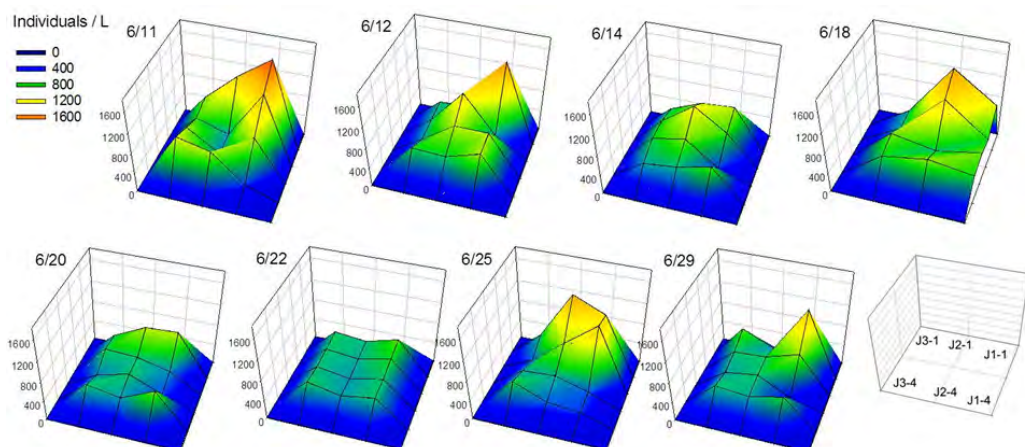
여름철 연속살포가 진행된 6월의 경우 전체 동물플랑크톤의 개체수는 J3-1 수상 살포지점에서 가장 높게 나타났다. 이후 조사지점의 동물플랑크톤 개체군 밀도는 시간 경과에 따라 크게 변화하였으나 J1-1, 2-1 및 3-1에서 높은 개체군 밀도를 나타냈다. 이 기간 중 높은 개체군 밀도를 보인 분류군은 윤충류와 요각류로 지각류의 밀도는 매우 낮은 것으로 나타났다(그림 2.103).

(표 2.22) 2012년 천적생물 배양장치의 천적생물 살포 개체수

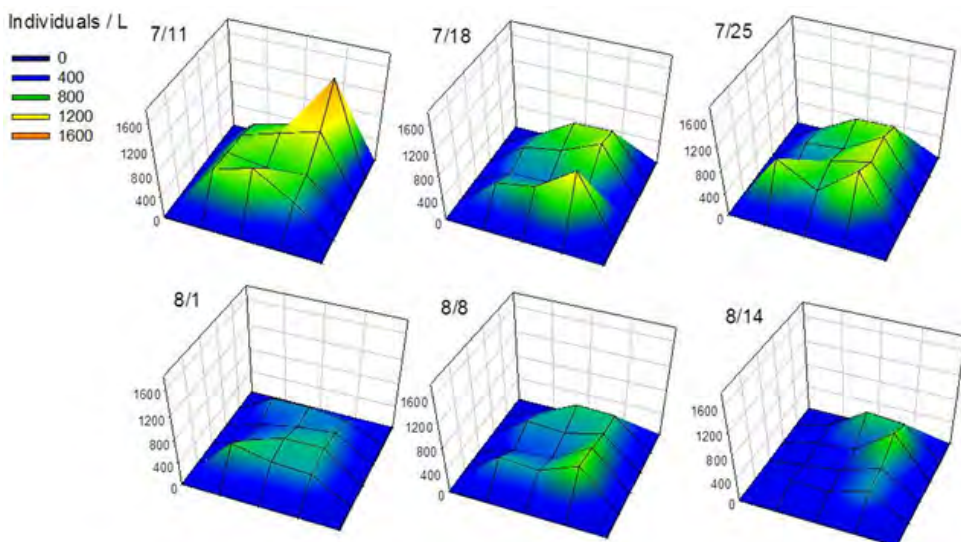
살포일자	수상배양장치		육상배양장치	
	전체방류량	톤당방류량	전체방류량	톤당방류량
6/11	149,363	14,936	192,723	6,424
6/15	59,745	5,975	444,745	14,825
6/29	59,745	5,975	637,468	21,249
7/2	597,452	59,745	3,602,436	120,081
7/4	284,501	28,450	7,624,204	254,140
7/9	604,920	60,492	889,490	29,650
7/11	877,212	87,721	1,600,142	53,338
7/16	89,618	8,962	1,378,710	45,957
7/18	403,043	40,304	4,376,858	145,895
7/25	213,376	21,338	10,636,235	354,541
8/1	142,251	14,225	1,209,519	40,317
9/19	189,667	18,967	1,044,798	34,827
9/26	853,503	85,350	1,656,617	55,221
10/8	2,133,758	213,376	1,270,701	42,357
10/10	2,299,717	229,972	1,543,666	51,456
10/15	1,564,756	156,476	1,044,798	34,827
10/17	2,062,633	206,263	814,190	27,140
10/22	1,811,323	181,132	2,155,	71,849
10/24	1,446,214	144,621	2,842,604	94,753
10/29	938,854	93,885	1,374,239	45,808

7월의 경우, 7/11 J3-1지점에서 리터당 1,500 개체 이상의 높은 개체군 밀도가 관찰된 후 본격적인 하절기로 접어들면서 8월 동물플랑크톤 개체군 밀도가 전 지점에서 감소하는 경향을 보였다. 이 시기에는 *Diurella stylata*, *Keratella cochlearis*, *Keratella valga* 및 *Polyarthra* spp.의 소형 윤충류가 우점하였고, 요각류 유생도 높은 개체군 밀도를 나타냈다(그림 2.104). 특히 8월 이후에는 강우의 영향으로 J1, J2, J3 의 모든 지점에서 동물플랑크톤 개체수가 감소하였다. 하절기에는 강우와 태풍의 영향으로 실험이 중단되었고, 이후 9월부터 육상 및 수상배양장치를 재가동하고, 연속살포 실험은 10월 재개되었다. 10월 살포실험 기간 중에는 살포가 진행된 초기 동물플랑크톤 개체군 밀도가 전 지점에서 매우 낮은 것으로 조사되었으나, 10/15 이후 J3-1 지점을 중심으로 급격히 개체군 밀도가 증가하여, 10/24에는 최대 개체군 밀도를 기록하였다(그림 2.105). 이후 11월부터는 수온의 저하로 전 지점에서 동물플랑크톤 개체군 밀도가 감소하였다.

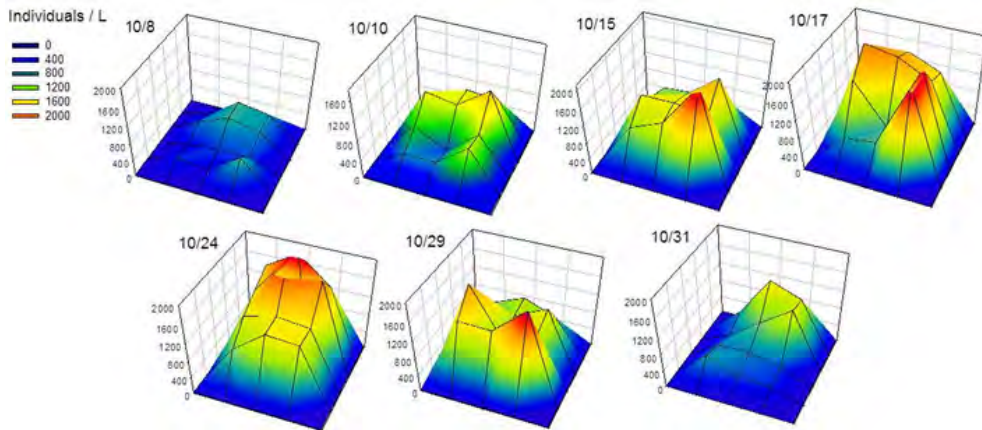
살포실험 기간동안 육상과 수상배양장치에서 현장에 살포된 천적생물 중주 *Daphnia similoides*와 자연 분리 천적생물 *Simocephalus ventulus*의 시, 공간 분포를 분석한 결과 2011년 1차 살포시에는 현장 확인된 *Daphnia similoides*는 1지점에서만 채집 네트당 한 개체로 매우 낮게 나타난 반면, 2012년도의 2차 연속 살포 실험에서는 네트당 10개체 이상의 높은 천적생물 밀도가 6월에서 7월 사이 관찰되었고, 특히 10월(10/17)의 경우 *Daphnia similoides*와 *Simocephalus ventulus*가 J1-1과 J2-1에서 네트 당 50개체 이상으로 매우 높게 나타났다.



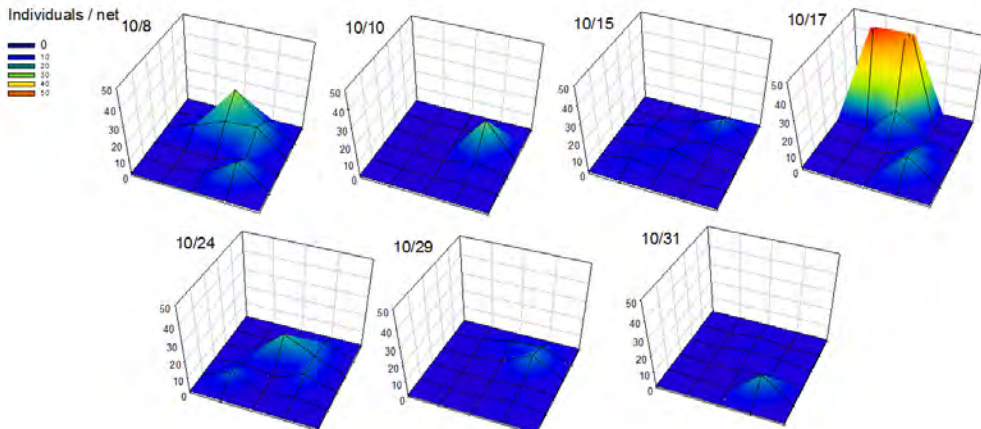
<그림 2.103> 2차 여름(6월) 살포기간의 동물플랑크톤의 시,공간 분포



<그림 2.104> 2차 여름(7월) 살포기간의 동물플랑크톤의 시,공간 분포



<그림 2.105> 2차 가을(10월) 살포기간의 동물플랑크톤의 시,공간 분포



<그림 2.106> 2차 가을(10월) 살포기간의 대형 천적생물 *Daphnia similoides*, *Simocephalus ventulus*의 시,공간 분포

2011년 1차 살포시에는 천적생물이 단1회 살포되어 녹조발생 수역에서 적응이 어려웠던 것으로 판단되며, 2012년의 2차 살포의 경우 배양장치에서 천적생물이 반복적으로 살포되어 현장에 적응한 개체수가 증가한 것으로 여겨진다. 배양시설을 확대하여 살포 천적생물 개체수를 높이고 반복으로 살포할 경우 보다 안정적으로 대상 수계에 천적생물을 살포, 공급할 수 있을 것으로 사료되며, 그로 인한 녹조제어도 충분히 달성될 것으로 판단된다.

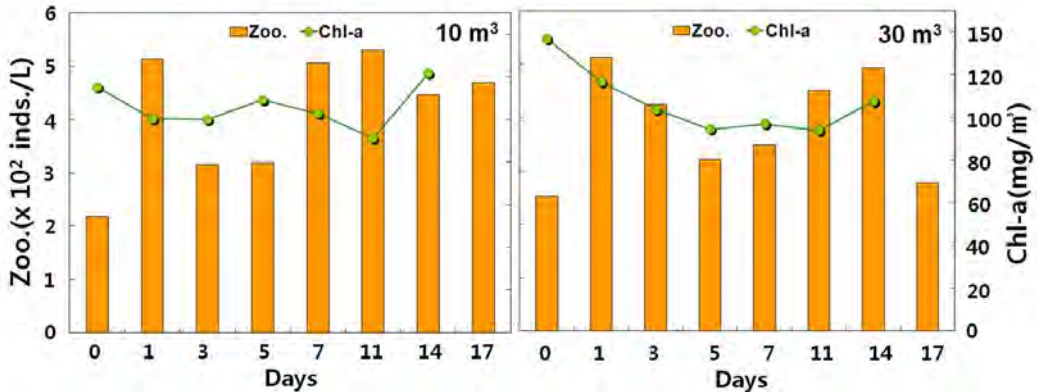
라. 천적생물 현장살포에 따른 녹조제어 효과

(1) 1차 살포(2011)

천적생물 현장살포 효과는 살포구간 내 각 지점에서 살포 경과일수에 따른 천적생물 개체수 및 Chl-*a* 변화를 비교하여 2011.10.17~11.3까지 18일간 제거효율을 분석하였다. 이때, 효과 분석지점은 제방방향으로 하였다.

수상배양장치(10 m³) 살포에서는 평균 Chl-*a*가 0일차 115.3 mg/m³에서 2일차 100.5 mg/m³까지 감소하였으며, 11일차에는 20.9 % 감소하여 최소치인 91.2 mg/m³로 나타났다. 동물플랑크톤 개체수는 0일차에 평균 217 inds./L이었으며, Chl-*a*가 최소인 11일차에 244 % 증가한 평균 530 inds./L을 보였다.

육상배양장치(30 m³) 살포에서는 Chl-*a*가 0일차 137.0 mg/m³에서 5일차 94.5 mg/m³까지 감소하였으며, 11일차에 31.5 % 감소하여 최소치인 93.8 mg/m³로 나타나 녹조제어효과가 20.9~31.5%로 비교적 낮았다. 동물플랑크톤 개체수는 0일차에 평균 225 inds./L였으며, 11일차에 202 % 증가한 평균 450 inds./L로 증가한 것으로 나타나 저수온기에 천적생물의 활동이 다소 제약받는 것으로 사료되었다(그림 2.107).

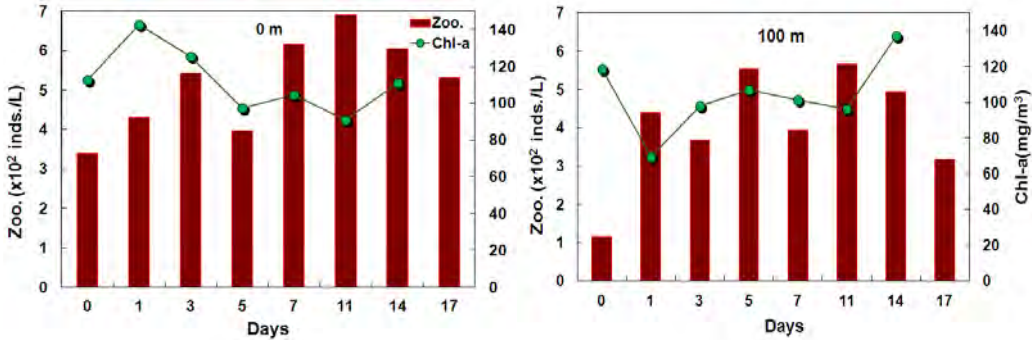


<그림 2.107> 천적생물 1차 살포에 의한 동물플랑크톤 및 Chl-*a* 변화

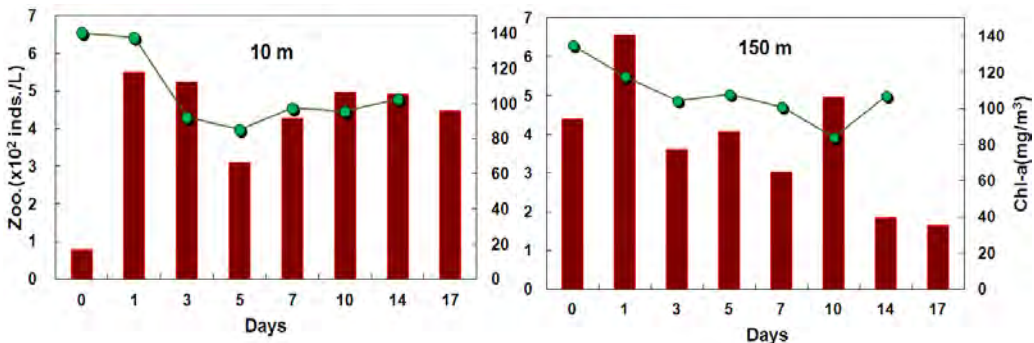
수상배양장치 살포지점과 육상배양장치 살포지점에서 각각 거리별 분석을 실시하였으며, 살포 거리별 동물플랑크톤 현존량과 Chl-*a*의 평균값을 비교해 보았다.

수상배양장치(10 m³) 살포에서는 동물플랑크톤의 개체수는 0일차에 116~338 inds./L의 범위로 나타났으며, 이후 증가하여 0 m에서는 11일차에 691 inds./L(204.3 %), 10 m에서는 1일차에 620 inds./L(151.1 %), 30 m에서는 7일차에 612 inds./L(332.1 %), 100 m에서는 11일차에 567 inds./L(488.5 %)까지 증가하였으며, 천적생물 살포 이후 거리별 동물플랑크톤의 개체수 증

가를 확인하였다. Chl-*a*는 0일차에 118.0~121.5 mg/m³의 높은 Chl-*a*를 보였으며, 0~30 m까지 구간에서는 11일차에 86.9~90.9 mg/m³로 감소하여, 살포지점 인근에서 녹조원인생물 제거효과가 나타났다(그림 2.108).



<그림 2.108> 10 m³ 살포로 인한 거리별 동물플랑크톤 및 Chl-*a* 변화(1차 살포)



<그림 2.109> 30 m³ 살포로 인한 거리별 동물플랑크톤 및 Chl-*a* 변화(1차 살포)

육상배양장치(30 m³) 살포시 동물플랑크톤의 개체수는 0일차에 78~439 inds./L의 범위로 나타났으며, 살포 이후 증가하여 1일차에 10 m 550 inds./L(707.5 %), 30 m 581 inds./L(289.0 %), 100 m 525 inds./L(210.4 %), 150 m 656 inds./L(149.3 %)로 살포지점으로 부터 150m 구간까지 천적생물이 증가하였으며, 살포지점 인근의 10 m 지점에서 매우 높은 개체수 증가를 확인하였다. Chl-*a*는 0일차에 134.8~142.5 mg/m³의 높은 Chl-*a*를 보였으며, 30 m까지 구간에서는 5일차에 85.2~94.7 mg/m³로 감소하여, 살포지점 인근에서 녹조원인생물 제거효과가 나타났다(그림 2.109.).

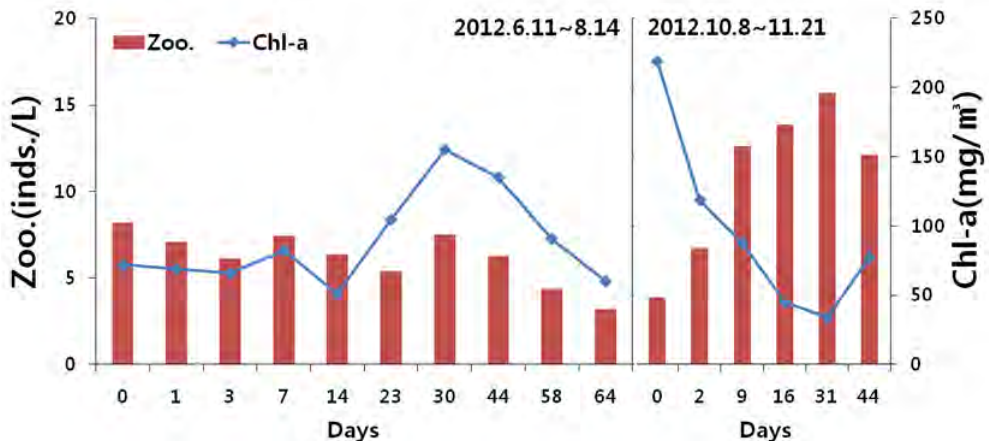
(2) 2차 살포(2012)

천적생물 현장살포 효과는 살포구간 내 각 지점에서 살포전과 후 경과 일수에 따른 천적생물 및 Chl-*a* 변화를 비교하여 여름철인 2012.6.11~

8.14(65일간)과 가을철인 2012.10.8~11.21(45일간)의 기간에 제거효율을 분석하였다.

살포효과를 시간별로 분석해보면, 여름철 살포에서는 Chl-*a*가 0일차 평균 72.1 mg/m³에서 14일차에 29.2 % 감소하여 평균 51.1 mg/m³까지 감소하였다. 살포한 천적생물은 0일차에 평균 820 inds./L로 나타났으며, 비교적 유사한 현존량을 유지하였는데, 하절기 특성상 잦은 강우에 의한 수체의 교란으로 뚜렷한 증가가 확인되지 않았다.

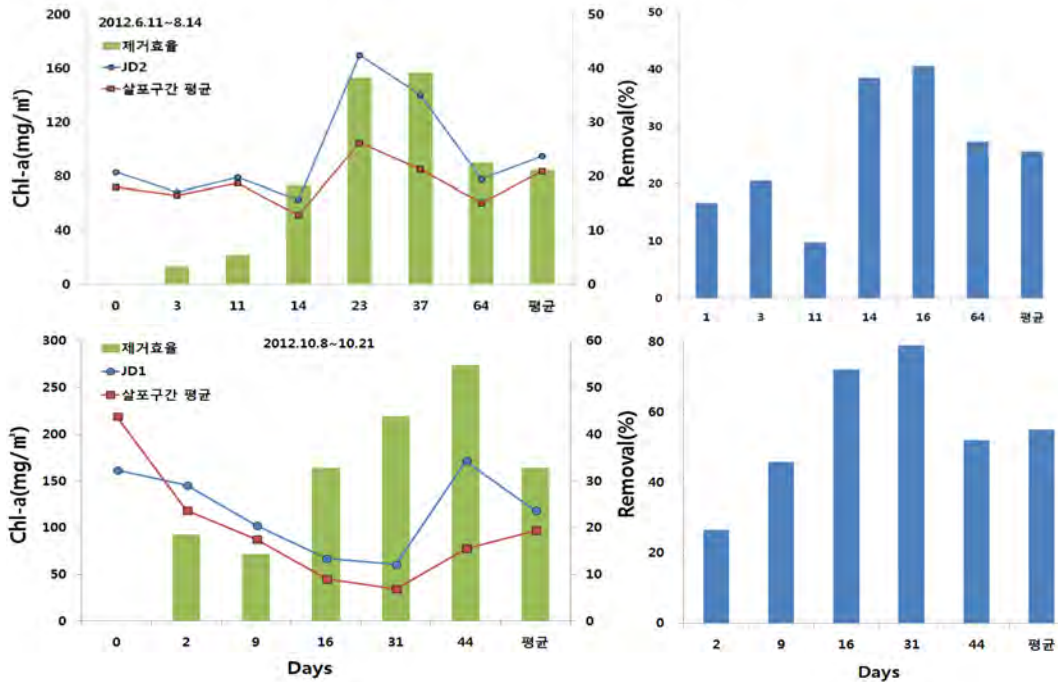
가을철 살포에서는 Chl-*a*가 0일차 평균 219.1 mg/m³에서 31일차에 84.4 % 감소하여 평균 34.2 mg/m³까지 감소하였다. 동물플랑크톤은 0일차 평균 389 inds./L에서 Chl-*a*가 최소치를 보이는 31일차에 403 % 증가하여 1,568 inds./L로 나타나, 수체가 안정한 가을철에는 여름철에 비해 뚜렷한 녹조제어 효과를 보였다(그림 2.110).



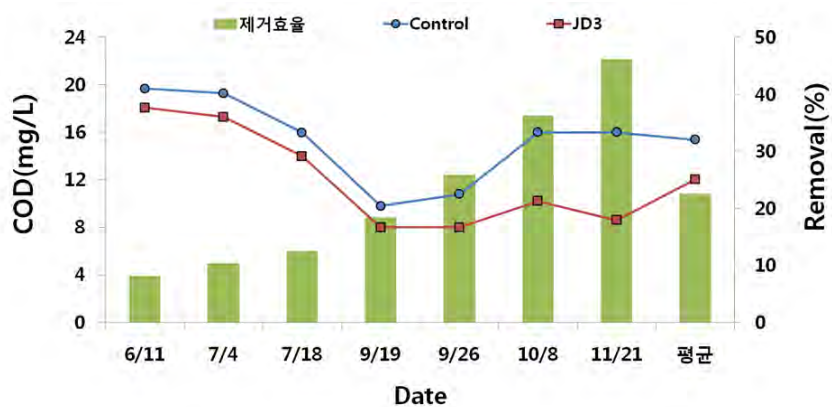
<그림 2.110> 천적생물 현장살포에 의한 계절변화에 따른 일별 동물플랑크톤 및 Chl-*a* 변화(2차 살포)

천적생물 현장살포 효과는 살포구간 내 각 지점에서 살포전과 후 경과 일수에 따른 Chl-*a* 변화를 비교하여 제거효율을 분석한 결과, 여름철 Chl-*a*는 0일차 평균 72.1 mg/m³에서 14일차에 평균 51.1 mg/m³까지 감소하였으며, 23일차에 104.8 mg/m³에서 64일차에 60.3 mg/m³까지 감소하였다. 대조구(JD2) 대비 살포구간의 각 시기별 제거효율은 살포 3일차에 3.4 %에서 Chl-*a*가 가장 높게 나타났던, 23~37일차에 최대 38.3~39.2 %까지 차이를 보였다. 또한, 각 모니터링 지점에서 대조구 살포 0일차 대비 시간에 따른 Chl-*a* 평균 제거율은 9.8~40.5 %로 나타났다. 가을철에는 Chl-*a*는 0일차 평균 219.1 mg/

m³에서 31일차에 평균 34.2 mg/m³까지 감소하였으며, 대조구(JD2) 대비 살포 구간의 각 시기별 제거효율은 살포 9일차에 14.3 %에서 21일차에 최대 54.8 %까지 지속적으로 증가하였다. 또한, 각 모니터링 지점에서 대조구 살포 0일차 대비 시간에 따른 Chl-a 평균 제거율은 26.6~78.8 %로 나타나, 지속적인 천적생물 살포에 의한 뛰어난 녹조제어 효과를 확인하였다(그림 2.111).



<그림 2.111> *Daphnia* 천적생물의 살포 전, 후 시간에 따른 Chl-a 변화

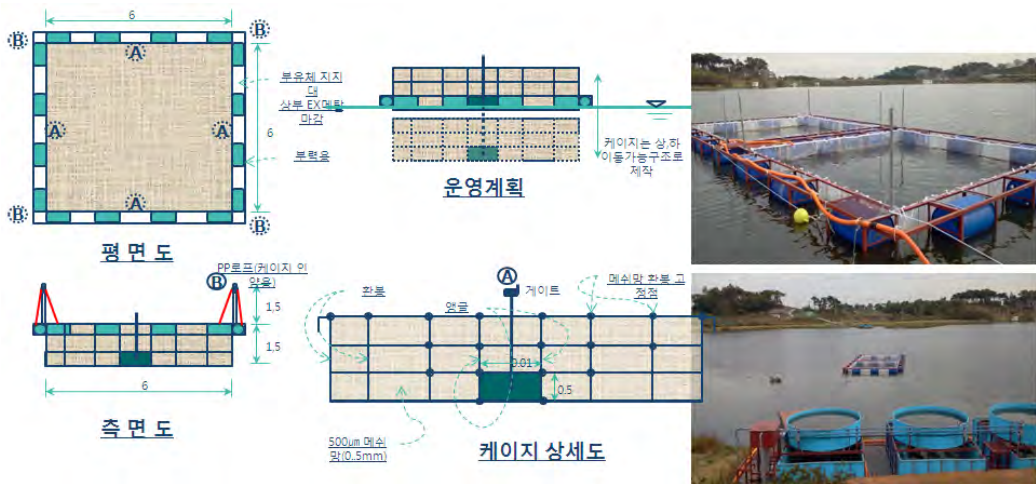


<그림 2.112> *Daphnia* 천적생물의 살포 전, 후 시간에 따른 COD 변화(2012)

또한, 천적생물 현장살포에 따른 COD 변화를 비교하여 천적생물에 의한 제거효율을 분석한 결과, 8.1~46.3 %(평균 22.5 %)의 제거효율이 나타났으며, 지속적인 천적생물 살포에 따라 COD 제거효율이 점차 증가하였다. 이에 따라, 천적생물 살포에 따른 녹조제어가 저수지 내 유기물오염 감소를 유도한 것으로 판단되었다(그림 2.112)

3. 천적생물 보호용 cage의 병행적용에 따른 녹조제어 효과 분석

천적생물 현장살포 이후 어류의 포식, 희석 등에 의한 녹조제어효과의 상실부분을 현장에 직접 살포 시와 비교분석 하기 위한 천적생물 보호용 cage를 설치하여 천적생물 추가 배양(증폭) 및 녹조제어에 활용하였다. cage는 36 m³ × 2조의 규모로 설치하여 적용하였으며, 500 μm 메쉬사이즈의 플랑크톤 네트로 이루어진 5 m × 5 m × 1 m(25 m³) 규모의 사각 cage를 제작하여 분석하였다(그림 2.113).



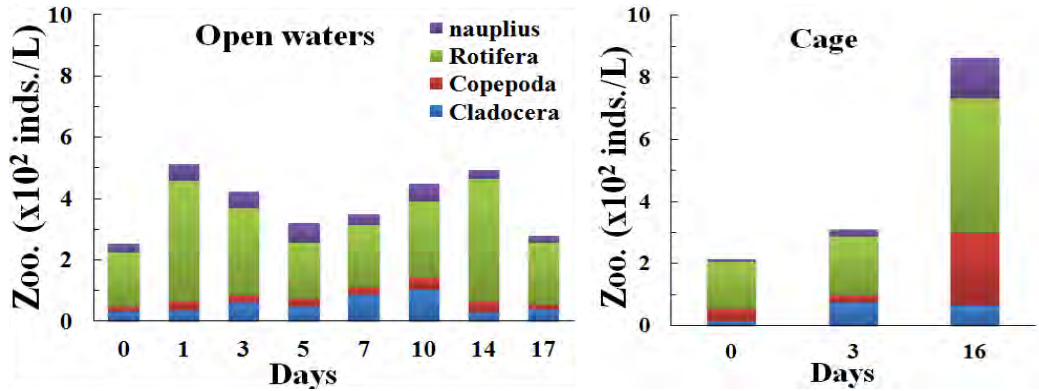
<그림 2.113> 천적생물 보호 및 유지 cage 개요

천적생물 cage 적용방법은 대량배양 된 천적생물을 방류하여 2차 증식 후 수역 살포하였으며, 이는 포식자인 물고기로부터 보호하면서 지속적인 녹조제어 실현에 도움이 될 것이라 판단되었다.

육상배양장치에서 배양한 천적생물을 cage 내 살포하여, 2011.10.20~11.7까지 17일간 천적생물 적용특성을 알아보았다. 천적생물 살포 직후 개방수역에서는 개체수가 늘어나다가 점차 감소 후 재증가하여 14일째 최대 493 inds./L까지 증가하였고, 분류군별로는 윤충류 67 %, 지각류 14 %, 노플리우

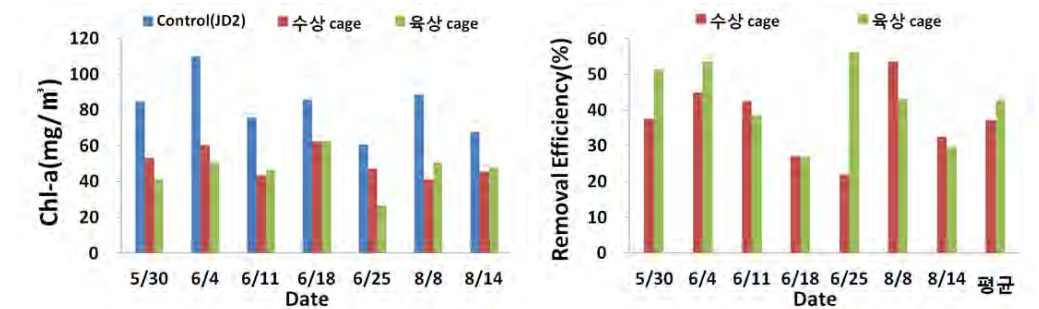
스 11 %, 요각류 7 % 순으로 우점하였다.

반면에 천적생물을 cage 안에 살포하여 천적생물의 개체수를 확인해본 결과, 살포 당시 213 inds./L에서 살포 16일째 861 inds./L까지 증가하였으며, 분류군별로는 노플리우스 2,100 % 요각류 541 %, 지각류 534 %, 윤충류 285 % 로 증가하여 개방수역 살포보다 천적생물 증가율이 높았다(그림 2.114).



<그림 2.114> 천적생물의 cage 적용효과(2011)

2012년에는 육상 및 수상배양장치와 연계하여 각각의 배양장치와 연결되어 천적생물이 유입되도록 cage를 이동·재설치하여 운용하였다. 배양장치에서 천적생물 살포 시 일부 천적생물을 cage 배양 장치로 유입되도록 하여 현장의 수중에 설치된 두 cage에서 천적생물의 증식을 유도하였다.

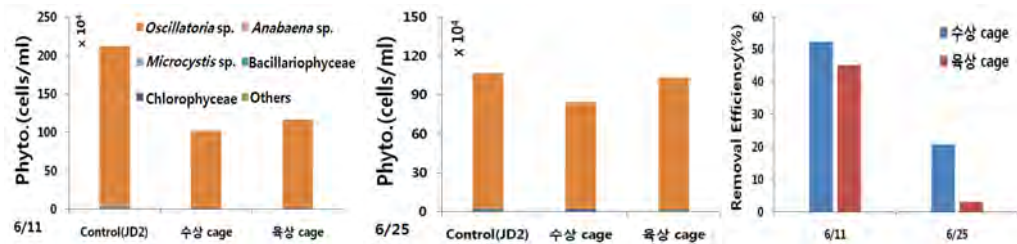


<그림 2.115> Cage내 Chl-a 농도변화 및 제어 효과

천적생물 보호용 cage내에서의 녹조제어 효과를 살펴보기 위해, 2012.5.30~8.14동안 수상배양장치 cage(이하 수상 cage)와 육상배양장치 cage(이하 육상 cage), 대조구(JD2)에 대한 Chl-a의 농도변화를 분석하였으며, cage내에서 Chl-a 제어효과를 분석하였다.

대조구인 JD2의 Chl-a농도는 60.6~109.7 mg/m³(평균 81.9 mg/m³)의 범

위를 보였으며, 수상 cage는 41.3~62.4 mg/m³(평균 50.5 mg/m³), 육상 cage는 26.6 ~62.7 mg/m³(평균 46.6 mg/m³)로 나타나, 수상 cage는 평균 37.2 %, 육상 cage는 평균 42.7 % 감소하여, cage내에서 Chl-a 제어 효과를 일부 확인하였다(그림 2.115).



<그림 2.116> Cage내 식물플랑크톤 현존량 변화 및 제어 효과

천적생물 보호용 cage의 식물플랑크톤 분류군별 녹조제어 효과를 살펴 보기 위해 6/11, 6/25 두차례에 걸쳐 수상 cage와 육상 cage, 대조구(JD2)에 대한 식물플랑크톤 현존량 변화와 식물플랑크톤 제어효과를 분석하였다.

대조구인 JD2에서 식물플랑크톤 현존량은 106.6~212.5 × 10⁴ cells/ml로 나타났으며, 수상 cage 84.4~101.3 × 10⁴ cells/ml, 육상 cage 103.4~116.6 × 10⁴ cells/ml로 나타났다. 수상 cage는 20.8~52.4 %, 육상 cage는 3.0~45.2 %의 감소효과를 보여 cage내 식물플랑크톤 제어 효과를 일부 확인하였으며, 육상 보다 수상 cage에서 높은 효과를 보였다(그림 2.116).

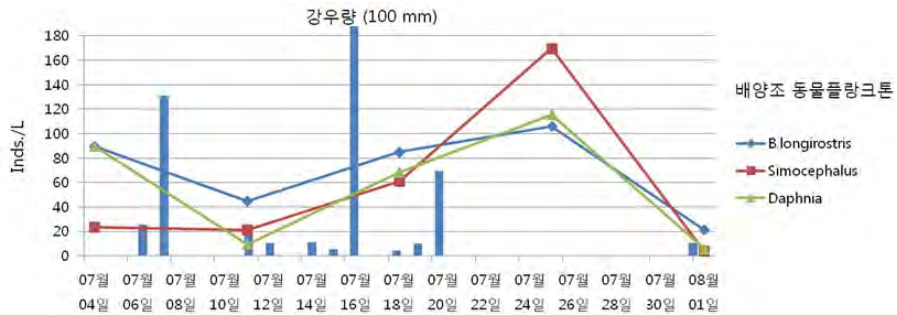
따라서, 천적생물의 대량살포에 cage 장치를 이용할 경우 개체수의 유지 측면에서 안정적일 수 있으며, 대상 생물의 생활사 등을 고려한 정기적인 방류를 실시하여 cage 내의 최적의 개체수를 항상 유지할 수 있도록 관리하는 것이 중요할 것이다.

4. 천적생물 야외 배양에 따른 기상조건의 영향

본 연구에서 천적생물 종주로 활용되는 *Daphnia*속은 온도 등의 환경변화에 반응하여 개체군 성장정도가 변화한다. 천적생물 배양장치의 경우 외부 온도변화에 따른 수온변화, 일사량 및 강우량의 변화에 노출되어 생장에 제약 받을 수도 있다.

강우는 하천에서 유량과 유속을 증가시켜 서식처에 존재하는 대형 물벼룩의 개체군 밀도를 감소시키는 것으로 알려져 있지만, 호수 및 저수지의 경우 대형 물벼룩의 개체군 밀도에 직접적인 영향을 미치는 경우는 보고되지

않고 있다(Basu and Pick, 1996). 호수와 저수지의 경우 동물플랑크톤에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 생산성 및 포식과 같은 생물학적 요인으로 알려져 있다(Pinto-Coelho et al. 2011). 2012년 살포가 진행된 조사기간 동안 전대저수지의 경우 강우로 인해 탁도가 증가 양상이 관찰되었으나, 천적생물 배양장치에서 강우의 증가로 인한 배양중인 천적생물의 감소는 관찰되지 않았다(그림 2.117).



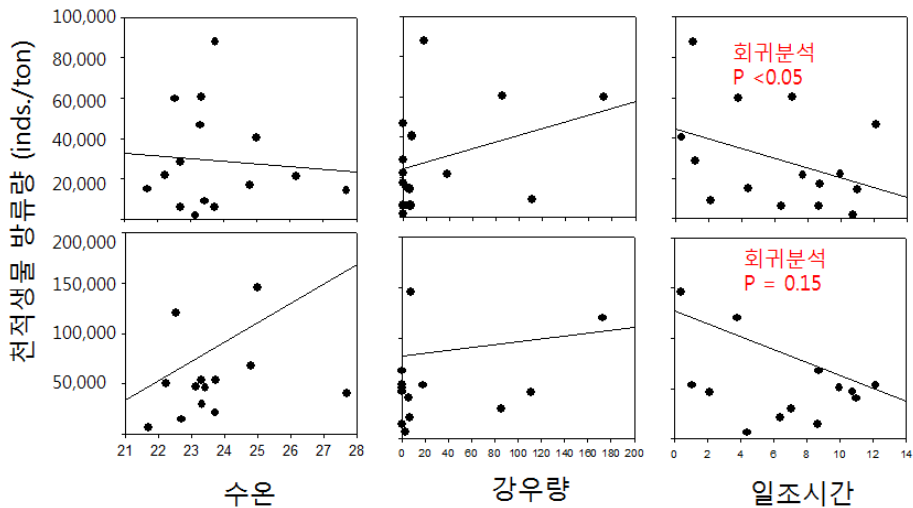
<그림 2.117> 하절기 강우 집중기간의 강우량과 천적생물 *Daphnia*와 *Simocephalus*를 포함한 동물플랑크톤의 배양조내 개체군 밀도 변화

수온의 경우 30 °C 이상의 고온과 동절기의 10 °C 이하의 수온은 동물플랑크톤의 번식과 성장을 제한하는 요인으로 작용한다(Gillooly, 2000). 특히 하절기의 30 °C 이상의 고온은 어류 섭식과 함께 대형 물벼룩의 성장을 제한하는 요인이다(Benndorf et al., 2001). 이러한 수온의 증가와 이로 인한 어류 포식의 증가는 종종 생물조작을 이용한 수질 개선 효과를 저하시키는 요인으로 작용하기도 한다.

천적생물 배양장치에 적용된 *Daphnia similoides*는 실내 실험에서 하절기의 고수온에 대한 적응력이 높은 이유로 천적생물 종주로 선정되었다. 또한 *Simocephalus ventulus*는 수심이 얇은 지역에 서식하고 있어 고수온에 내성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서, 배양기간 동안 하절기의 고수온으로 인한 천적생물 개체군 밀도의 감소는 관찰되지 않았다(그림 2.118). 배양시설의 천적생물 개체군 밀도와 수온, 강우량과의 상관관계 분석에서 이들 요인으로 인한 개체군 감소 경향은 보이지 않았다.

반면 일조시간과는 음의 상관관계를 나타냈다. 일조로 인한 UV는 수표면에 존재하는 동물플랑크톤에게 영향을 미친다. 일반적으로 강한 자외선의 영향으로 요각류와 지각류를 포함한 갑각류는 수표면을 기피하는 행동반응을 나타낸다(Alonso et al., 2004). 설치 공간 등의 제약으로 실외에 설치되는 대

량배양을 위한 배양시설은 1m 내외의 얇은 수심을 가지게 된다. 따라서, 일조시간의 연장과 일조량의 증가로 인한 자외선의 조사는 배양시설의 천적생물의 증가와 분포를 제한할 수 있다. 비록 일조량과의 상관관계에서 음의 상관관계를 나타냈으나, 강한 일조에도 불구하고 높은 천적생물 개체군 밀도를 유지하고 적절한 살포량을 유지할 수 있었던 것은 배양시설 내에 설치된 인공식물섬과 식물플랑크톤 배양조를 복층으로 설치해, 음지를 형성해 주었기 때문이라 사료된다. 천적생물 시료 채집시 네트채집은 일조에 노출된 부분에서 이루어졌기 때문에 천적생물 개체군 밀도와 일조시간과의 상관관계가 도출되었으리라 여겨진다.



<그림 2.118> 천적생물 배양장치의 개체군 밀도와 기상요인과의 상관관계

향후 천적생물 배양시설의 적용에 있어, 인공식물섬의 설치와 배양수조의 구조적 배치는 이러한 강한 일조의 영향을 고려하여 설계되면 원활한 식물플랑크톤의 공급과 일조로 인한 천적생물에의 영향을 적절히 완화시킬수 있으리라 사료된다.

5. 천적생물의 어류포식 영향 및 대책

가. 전대저수지에 서식하는 어류 위내용물 분석

전대저수지의 서식하는 주요 어종의 섭식특성을 분석하기 위하여, 천적생물 살포 전·중·후로 대별하여 위내용물 분석을 실시하였으며, 이때 대상 어종은 연구기간동안 10 % 이상의 상대풍부도를 보이는 붕어, 참붕어, 치리,

블루길의 4종으로 선정하였다.

(1) 붕어

잡식성이어서 갑각류, 패류, 실지렁이, 수서곤충, 식물의 씨나 이, 줄기 등 거의 모든 유기물을 섭식하는 것으로 알려진(최와 이, 1994) 붕어는 살포 후인 11월 조사의 JF-E를 제외하고 전지점에서 출현하였으며, 전장이 100~250 mm로 6개월(100~140 mm)에서 3년(200~230 mm) 이상의 다양한 연령군의 개체가 출현하였다.

붕어는 현장조사에서 천적생물 살포 전인 4월에 유입부(JF-I)에 출현한 개체들에서 윤충류인 *Brachionus angularis*(평균 65 inds.)와 요각류인 cyclopoida(평균 7 inds.)가 발견되었으며, 살포 중인 10월에 살포구간(JF-E)에 출현한 개체들에서 요각류(평균 243 inds.)와 지각류인 *Moina* sp., *Bosmina* sp. *Diaphanosoma* sp. 등이(평균 190 inds.)가 발견되었고(그림 2.119), 이외의 나머지 시기 및 지점에서 분석한 개체는 공복이거나 유기물 및 식물잔해가 위내용물의 대부분을 차지했다. 비록 많은 개체에서 위내용물을 확인하지는 못하였으나, 살포기간 중 JF-E에서 붕어에 의한 지각류의 다량 포식이 확인되었다.

(2) 참붕어

수서곤충, 소형갑각류, 동식물의 유기물 등을 주로 섭식하는 잡식성으로 알려진(최와 이, 1994) 참붕어는 3차례 조사 중 전지점에서 채집되었으며, 대부분 전장이 100 mm 내외의 2년생 개체군이 주를 이뤘다.

참붕어는 지각류를 주로 섭식하였는데, 천적생물 살포 전인 4월에는 JF-I와 JF-O에서 각각 평균 15 inds. 및 17 inds. 섭식하였으며, 살포 중인 10월에는 JF-O에서 10 inds., 살포 후인 11월에는 JF-I에서 16 inds. JF-E와 JF-O에서 각각 2 inds. 섭식하였다(그림 2.119).

참붕어는 많은 개체는 아니지만, 꾸준히 지각류를 섭식하였으며, 주로 *Chydorus* sp., *Alona* sp.등과 같은 수초에 붙어사는 지각류를 섭식하는 것으로 나타나, 섭식특성이 서식지 특성과 관련이 있을 것으로 판단되었다.

(3) 치리

식물의 부서진 조각이나 씨, 수서곤충 등을 주로 먹는 잡식성으로 알려진(최와 이, 1994) 치리는 대부분 전장이 100~150 mm 내외로 2~3년생 개체군이 주를 이뤘다.

치리는 참붕어와 마찬가지로 지각류를 주로 섭식하였으며, 모래와 유기물조각 등이 확인되었다. 섭식된 지각류의 개체수는 천적생물 살포 전인 4월에는 JF-I에서 평균 84 inds., 살포 중인 10월에는 JF-I, JF-E, JF-O에서 각각 평균 45 inds., 평균 112 inds., 평균 48 inds.가 섭식되었으며, 살포 후인 11월에는 JF-O에서 평균 308 inds. 포식하였다(그림 2.119).

기준에 알려진 바에 비해, 치리의 지각류 섭식비율은 매우 높은 것으로 나타났으며, JF-I에서는 *Simocephalus* sp.를, JF-O에서는 *B. longirostris*를, JF-E에서는 *Moina* sp., *Diaphanosoma* sp. 등을 주로 섭식하였다.

(4) 블루길

플랑크톤, 곤충 및 저서성대형무척추동물, 어란, 치어 등을 포식하는 것으로 알려진 블루길은 3차례 조사 중 전지점에서 채집되었으며, 전대저수지의 주요 우점종으로 나타났다.

천적생물 살포 전 4월에는 요각류인 cyclopoida를 JF-I에서 177 inds., JF-O에서 412 inds. 섭식하였으며, 10월과 11월에는 요각류뿐만 아니라, *Simocephalus* sp., *Moina* sp., *Diaphanosoma* sp., *Alona* sp., *Scaphoreberis* sp., *Chydorus* sp., *B. longirostris*와 같은 다양한 종류의 지각류를 다량 섭식하였다. 특히, 살포 후 유출부(JF-O)에서 채집된 블루길에서는 본 연구의 주요 배양살포 천적생물인 *Daphnia similoides*이 포식된 것으로 나타났다.

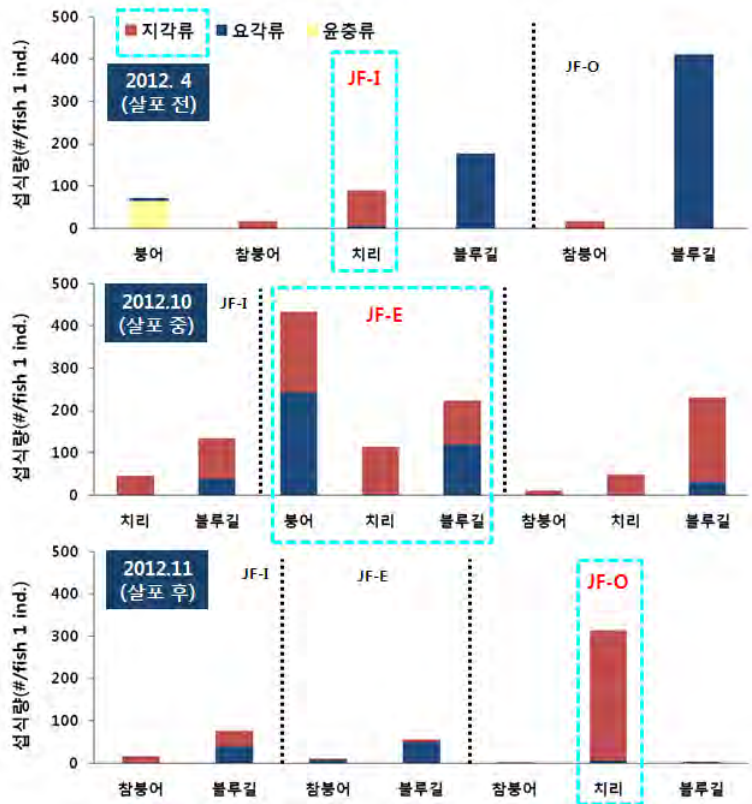
본 어종은 현장조사에서 살포 전 4월에는 4.5 %의 상대풍부도를 보였으며, 1년 미만(전장 50 mm 미만)의 개체군 연령분포를 보였으나, 살포 중인 10월에는 50~110 mm의 개체군 연령분포가 1~2.5년으로 확대되었으며, 살포 후인 11월에는 최대 210 mm의 4년생 이상의 개체가 출현하였다. 이와 같이 블루길은 본 연구대상지인 전대저수지에서 다양한 연령분포를 보였으며, 우점종의 지위를 보임에 따라, 향후 지속적으로 개체군이 증가할 가능성이 높은 것으로 판단되었다.

(5) 어류의 위내용물 분석에 따른 섭식특성

전대저수지의 시기별 위내용물 분석결과에 따르면, 천적생물 살포 전에는 지각류에 비해 윤충류와 요각류에 대한 섭식량이 높게 나타났으나, 천적생물 살포기간에는 살포지점(JF-E) 및 유출부(JF-O)의 지각류의 섭식비율이 증가하였으며, 요각류만 섭식하였던 블루길의 지각류에 대한 섭식비율이 급격히 증가한 것을 확인 할 수 있었다. 살포 종료 후 11월에는 살포구간인 JF-E의 지각류 섭식량은 현저히 줄었으며, 유출부에서 블루길이 주요 살포

천적생물인 *D. similoides*의 포식을 확인하였다(그림 2.119).

본 연구에서 녹조방지를 위해 살포한 천적생물은 전대저수지의 90 % 이상의 상대풍부도를 보이는 4종(블루길, 붕어, 참붕어, 치리)의 어류에 의해 주로 포식된 것으로 나타났다. 특히, 이전연구(국토해양부, 2011)에 의하면, 블루길은 다른 분류군에 비해 섭식하기 손쉬운 동물플랑크톤의 현존량이 증가한 상황에서는 동물플랑크톤(특히, 대형 지각류인 *Daphnia*속)을 선택적으로 우선순위를 두어 섭식하는 것으로 나타났다.

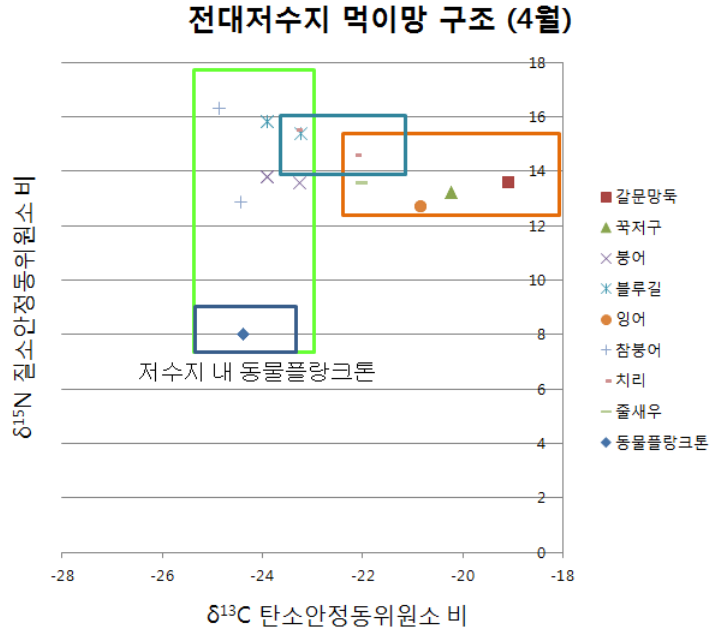


<그림 2.119> 천적생물 주요 포식어종에 대한 위내용물 분석

나. 탄소, 질소 안정동위원소를 이용한 먹이망 구조 분석에 따른 천적생물의 어류포식 영향

본 연구에서 녹조원인생물을 제어하기 위한 천적생물로서 동물플랑크톤을 적용하고 있으며, 천적생물 적용 대상 저수지인 전대저수지의 어종별 섭식성향을 파악하기 위해 천적생물과 어류에 대한 탄소와 질소 안정동위원

소비를 분석하였다.



<그림 2.120> 전대 저수지의 동물플랑크톤과 주요 출현 어종의 탄소, 질소 안정동위원소 비 분석을 이용한 먹이망 구조

채집된 어류와 수체 내의 동물플랑크톤의 안정동위원소를 비교한 결과, 먹이 이용을 나타내는 탄소 동위원소 비의 유사성이 동물플랑크톤과 블루길, 붕어 및 참붕어에서 높게 나타나 이들 어류는 동물플랑크톤을 주먹이원으로 이용하는 것으로 나타났다. 치리는 동물플랑크톤뿐만 아니라 수서무척추동물 및 새우와 같은 갑각류를 동시에 섭식하고 있는 것으로 나타났다. 갈문망둑 및 꼭저구는 탄소동위원소비가 동물플랑크톤과 현저한 차이를 보여, 저수지에 서식하는 저서성 무척추 동물을 포함한 기타 먹이원을 주로 이용하고 있는 것으로 사료되었다(그림 2.120).

다. 천적생물의 어류포식에 대한 대책

위내용물 및 안정동위원소 분석 결과, 전대저수지의 주요 우점종인 블루길, 참붕어, 붕어 및 치리는 천적생물 살포 시 살포된 천적생물을 포식하여 천적생물의 개체군 밀도를 감소시킬 가능성이 높은 어종으로 나타났다. 따라서, 조류제어를 위해 천적생물을 활용하기 위해서는 이들 어종을 중심으로 한 어류 개체군 밀도 및 포식활동을 제한할 필요성이 제시되었다.

일반적으로 초식자 동물플랑크톤을 이용하여 조류를 제어할 경우, 외국에서는 플랑크톤 섭식어류의 개체군 밀도를 줄이기 위해 배스 및 무지개송어와 같은 육식어종을 도입하여 플랑크톤 섭식 어류의 개체군 밀도를 감소시키는 방법이 사용된다. 그러나 이들 종은 국내에서는 생태계교란어종으로 분류되어 생태계 유입과 확산의 문제를 야기시킬 수 있다. 따라서, 국내 실정에 맞도록 쏘가리 및 메기와 같은 국내 토착성 육식어류를 도입하여 플랑크톤 섭식 어류를 줄이는 방법이 강구되어야 할 것으로 여겨진다.

또한 플랑크톤 섭식어류의 포식활동을 제한하기 위한 천적생물의 피난처를 제공하는 방법도 고려되어야 할 것이다. 인공식물섬과 같은 구조물은 어류의 섭식행동을 방해하여 천적생물의 생존율을 높여 주는데(Burks et al., 2001), 수생식물의 존재가 서식처 다양성을 유도하고 동물플랑크톤에게 피난처를 제공해 주기 때문이다. 특히, 본 조사에서 출현한 *Simocephalus ventulus*는 어류의 포식을 피해 주로 수생식물이 서식하는 저수지 주변부에 서식하는 경향이 있다.

깊은 수심 역시 천적생물의 피난처로 작용하여 어류의 포식압을 낮추어 주는 주요인으로 작용한다. 빛이 투과되지 않는 깊은 수심은 어류의 포식으로부터 천적생물을 보호해 줄 수 있으며, 이러한 점을 이용하여 야간에 천적생물을 살포하는 것도 천적생물의 생존율을 높일 수 있는 방법이다.

천적생물의 살포와 함께 대상 저수지의 물리적 특성을 고려하고 인공 서식처 등을 도입하면 살포된 천적생물에 대한 어류의 포식압을 저하시킬 수 있을 것이라 예상된다.

제7절 천적생물 배양장치의 규모 산정 및 설계인자

1. 저수지 규모 및 녹조발생 규모에 따른 배양장치 규모산정법

가. 배양장치 규모에 따른 천적생물 살포량 및 녹조제어 범위 산정

녹조발생 수역(Chl-a 100 mg/m³)에서 천적생물을 적용하여 농업용수 수질기준(35 mg/m³) 이하로 저감 시킬 경우 배양장치 규모에 따른 천적생물 살포량과 녹조제어범위는 남조류(Microcystis)를 대상으로 한 천적생물 개체당 조류 저감량을 토대로 산술 계산하였다.

- 제어범위(m², 수심 1m 유광층) = [(천적생물 살포량) × (배양장치 규모)] / [천적생물 필요량]
- 천적생물 필요량 (단위 면적당 저감 목표 클로로필 양) = 목표 저감치 (클로로필, 65 mg/m³) / 천적생물 개체 당 저감량(Daphnia similoides = 0.68 mg/m³/ind.)
- 산출시 사용 수치 : 천적생물 농도[육상배양장치 최고 밀도 354,000 inds./m³], 생물 개체 당 저감량 Daphnia similoides, 0.68 mg/m³

그러나, 녹조발생 수역에 살포 후 천적생물이 녹조원인 생물을 포식하면서 추가 증식하는 부분을 고려한다면 계산식의 값보다 넓은 제어범위를 보일 수 있다(배양장치 내 증식 속도는 10개체/일, 12일간 1개체→120개체 증식).

전대저수지 현장에 살포한 천적생물의 영향 범위를 보면, 10톤의 수상 배양장치와 30톤의 육상배양장치를 이용한 일시살포(2/3살포, 27톤)시 하류방향 205~330 m까지 살포한 천적생물 출현은 물론 녹조제어 효과를 보이고 있어 살포수역 81,415 m²에 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 단, 제어목표 수준의 감소는 관찰하지 못하였다.

(표 2.23) 단위 면적당 일정 클로로필 저감 시 필요 천적생물 개체수

천적생물	대상조류 (실험대상)	조류농도 (µg/ml)	개체당 조류 저감량 (µg/l/ind/day)	제거 소요 시간*	필요천적생물밀도	100톤 대상 최적살포량 (10톤배양 천적생물 밀도)
중형물벼룩 (<i>Daphnia pulex</i>)	남조류 (<i>Microcystis</i>)	30	0.16	48시간	♠당 100개체	10,000,000개체 (♠당 1000개체)
대형물벼룩 (<i>Daphnia similoides</i>)			0.68			

따라서 천적생물 개체당 조류저감량을 토대로 계산한 식의 녹조제어 범위에 비증식 속도(k) 10을 곱하여 계산하는 것이 현실적일 것으로 사료되었다.

- 최종제어범위(m², 수심 1m 유광층) = [(천적생물 살포량)×(배양장치 규모)]/[천적생물 필요량]×k(=10)

(표 2.24) 배양장치 규모에 따른 천적생물 살포량 및 녹조제어범위

배양장치 규모	20톤	30톤	50톤	100톤	200톤
천적생물 살포량 (개체수)	7 × 10 ⁶	11 × 10 ⁶	18 × 10 ⁶	35 × 10 ⁶	71 × 10 ⁶
녹조제어범위(m ²)	740	1,110	1,850	3,700	7,400

*Chl-a 100 → 35 mg/m³

나. 저수지 규모 및 녹조발생 정도에 따른 배양장치 규모산정법
저수지규모와 녹조발생 정도에 따른 천적생물 배양장치의 규모를 아래 식과 같이 산정하였다.

- 규모산정식=[저감 Chl-a에 따른 필요 천적생물 개체수 × 호수용량(유광층)] / [천적생물 살포량(비증식속도 10× 감안)]
- 규모산정식 = [(저수지 평균 Chl-a 농도 - 35) × 호수용량] ÷ 48,144

천적생물 배양장치 규모산정은 필요로 하는 Chl-a 저감에 필요한 천적생물 개체수에 호수의 유광층(부영양 호수의 경우 보통 수심의 1/5에 해당, 투명도(SD)의 2~2.5배량만을 감안하여 전수역을 대상으로 한 계산한 결과로 다소 가감이 있을 수 있다.

(표 2.25) 저수지 규모 및 녹조발생 정도에 따른 배양장치 규모(m²)

저수지 규모 녹조발생정도(Chl-a)	50만톤	70만톤	100만톤	200만톤	300만톤
50 mg/m ³	52	73	104	208	312
70 mg/m ³	156	218	312	623	935
100 mg/m ³	363	509	727	1,454	2,181
150 mg/m ³	675	945	1,350	2,700	4,050
200 mg/m ³	1,194	1,672	2,389	4,777	7,166

*제어목표 35 mg/m³

본 연구의 천적생물 배양장치를 이용한 천적생물 적용기술은 녹조 발생 초기부터 사전 제어하여 예방하는 기능을 강조하고 있으며, 살포주기 역시 주 1회로 연속운영이 가능하므로 실제 필요로 하는 배양장치의 규모는 표에서 제시한 것보다 축소 적용해도 될 것으로 사료된다.

2. 저수지 규모별, 녹조발생 정도에 따른 천적생물 배양장치 설계인자

가. 설계시 고려사항 및 주의사항

(1) 고려사항

저수지가 크고, 녹조발생 농도가 높을수록 처리해야 할 녹조량이 증가하므로 천적생물 배양장치의 규모는 증가한다. 앞서 천적생물의 배양규모가 결정되면, 총 배양용량을 단위 용량으로 나누어 배양장치 설치를 계획해야 하는데 설치 및 운영의 편의성을 높이기 위해서 배양장치 하나의 단위 용량은 동물플랑크톤 배양조 용량 기준 10m³, 20m³ 으로 결정하였다.

예를 들어, 200톤 규모의 배양장치가 필요할 경우 20톤 배양장치를 10세트로 나누어 설치하며, 50톤 규모의 배양장치가 필요할 경우는 10톤 배양장치 5세트를 설치하는 방법이다. 각각의 배양장치는 병렬배치 또는 분산배치가 가능하며 이러한 방법이 배양장치의 설치와 현장에서의 유지관리가 용이한 규모이기 때문이다.

(2) 주의사항

여러 대의 배양장치 설치를 계획하는 경우 배양장치 규모는 동일한 용량으로 선정하여 설계한다. 본 보고서에서는 10m³, 20m³ 용량의 배양장치를 제시하고 있으나 예를 들어, 30m³ 용량의 배양장치를 동일 부지에 병렬 배치할 경우 15m³ 용량의 배양장치 두 대를 설치하는 것으로 계획하여 설계하는 것이 바람직하다. 이는 배양장치 용량이 서로 다를 경우 운전조건을 세팅하고 유지·관리하는데 어려움이 있기 때문이다.

나. 설계인자 및 구성요소

(1) 전제조건 및 배양장치 설계요소

(가) 전제조건

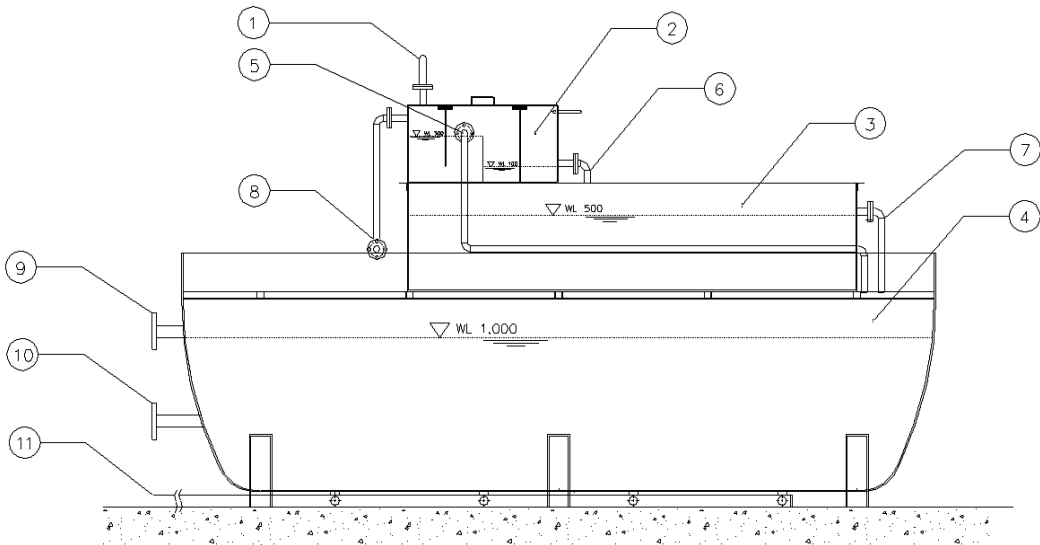
천적생물 배양장치를 설계하여 현장에 적용할 경우 적용대상 저수지의 형상, 입지조건, 접근성 등을 고려하여 면밀히 검토하여야 하며, 본 보고서에서

제시하고 있는 배양장치 설계인자는 다음 항목을 전제조건으로 하여 제시한다.

- 배양장치 규모 : 10m³
- 배양장치 형태 : 육상형(Package type)
- 설치위치 : 대상 저수지의 홍·만수면 부지

(나) 배양장치 설계요소

그림 2.121에 천적생물 배양장치 예시도를 나타내었다. 원수분리조, 식물플랑크톤 배양조 및 동물플랑크톤 배양조를 일체형으로 구성한 육상형 배양장치로 각 설계요소는 다음과 같다.



<그림 2.121> 배양장치 예시도(10톤 기준)

(표 2.26) 각 부분의 명칭 및 설계요소

No.	명 칭	설계요소	비 고
①	유입관	유입펌프	
②	원수분리조	규격, 배관구성	
③	식물플랑크톤 배양조	체류시간, 구조	
④	동물플랑크톤 배양조	체류시간, 구조, 산소공급장치	
⑤	동물배양조 이송관	-	
⑥	식물배양조 이송관	-	
⑦	이송관(식물→동물)	-	
⑧	월류관	-	
⑨	유출관	-	
⑩	대량살포 방류관	-	
⑪	DRAIN	-	

(2) 세부 설계요소 및 구성인자

(가) 설계기준

구 분	설 계 조 건	비 고
장치용량	10 m ³	동물플랑크톤 배양조 용량
설치 계열수	1	
체류시간	식물플랑크톤 배양조 : 2.5 day 동물플랑크톤 배양조 : 4.0 day	
장치형식	육상형 Package Type	

(나) 유입유량 결정

각 배양조의 적정 체류시간 확보와 원수펌프의 사양을 결정하기 위해 유입 유량을 결정한다.

구 분	설 계 조 건	비 고
총 유입유량	2.5 m ³ /day = 1.74 l/min	
계산근거	유입유량 = 장치용량 ÷ 체류시간 = 10m ³ ÷ 4 day	

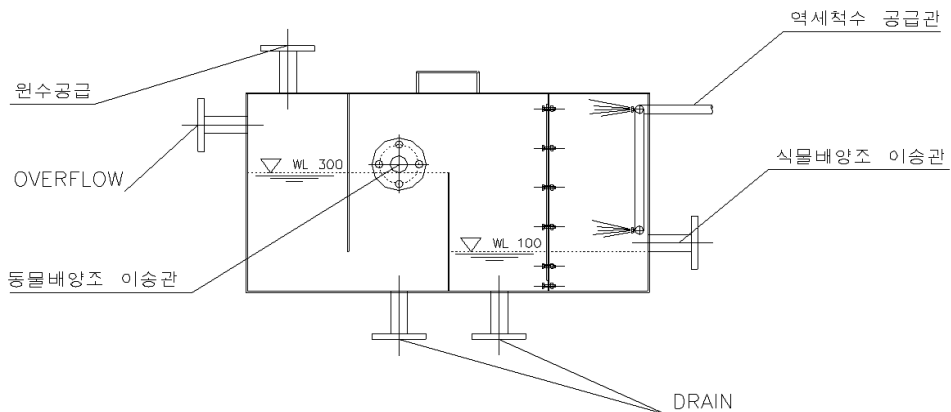
유입펌프는 결정한 유입유량 이상의 수중펌프를 선정하여 적용한다.

(다) 원수분리조

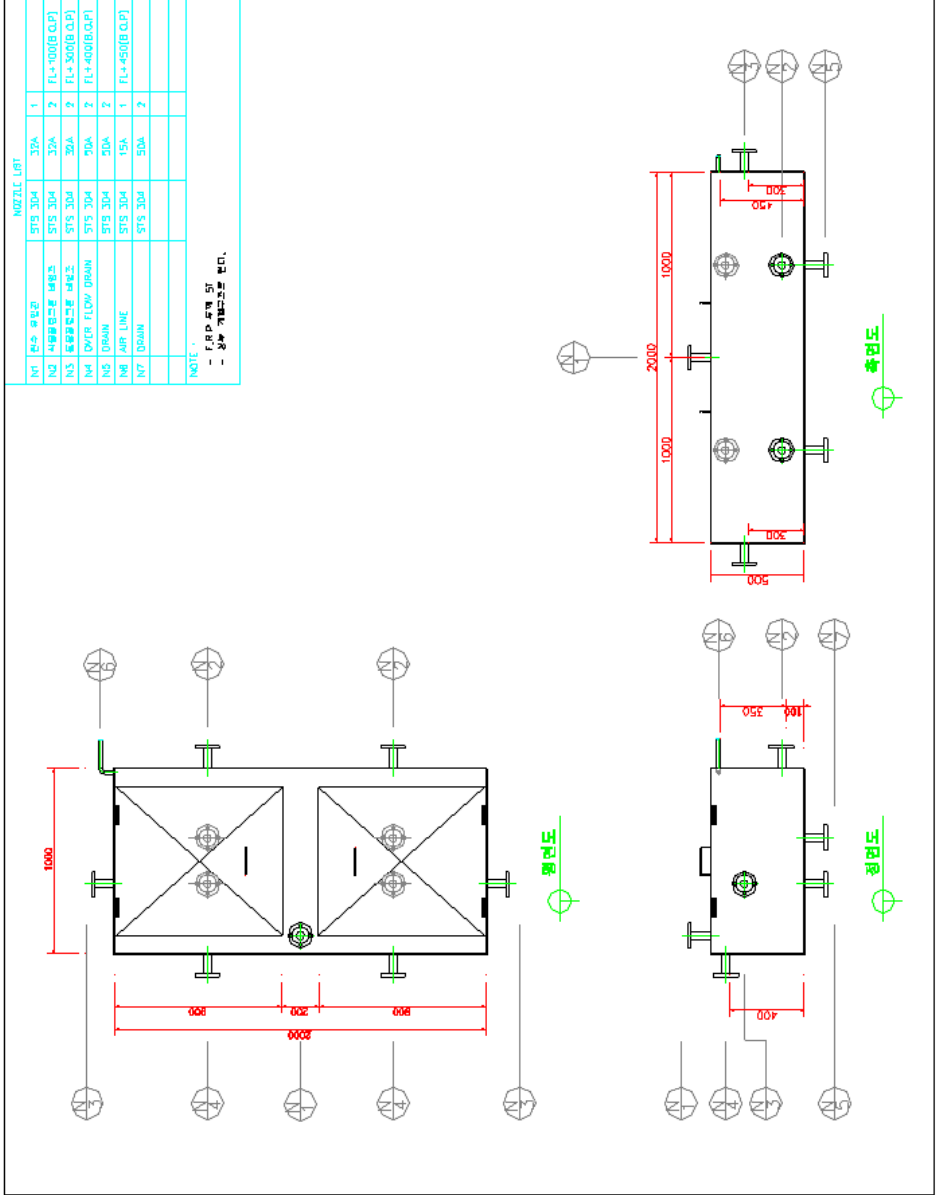
원수분리조의 체류시간은 10분 이상으로 하며 유입수 중 식물플랑크톤과 동물플랑크톤을 분리할 수 있는 구조로 한다. 동·식물 플랑크톤의 분리를 위해 25 μm 의 메쉬망을 사용하는데, 메쉬망의 청소는 자동 세척이 될 수 있도록 메쉬망 전면부에 역세척 노즐과 역세척 펌프를 설치하여 timer에 의한 자동운전으로 운영한다. 또한 동·식물플랑크톤 배양조로의 이송관에는 각각 밸브를 설치하여 정확하게 유량을 조절할 수 있어야 한다.

(표 2.27) 원수분리조 설계요소 및 사양

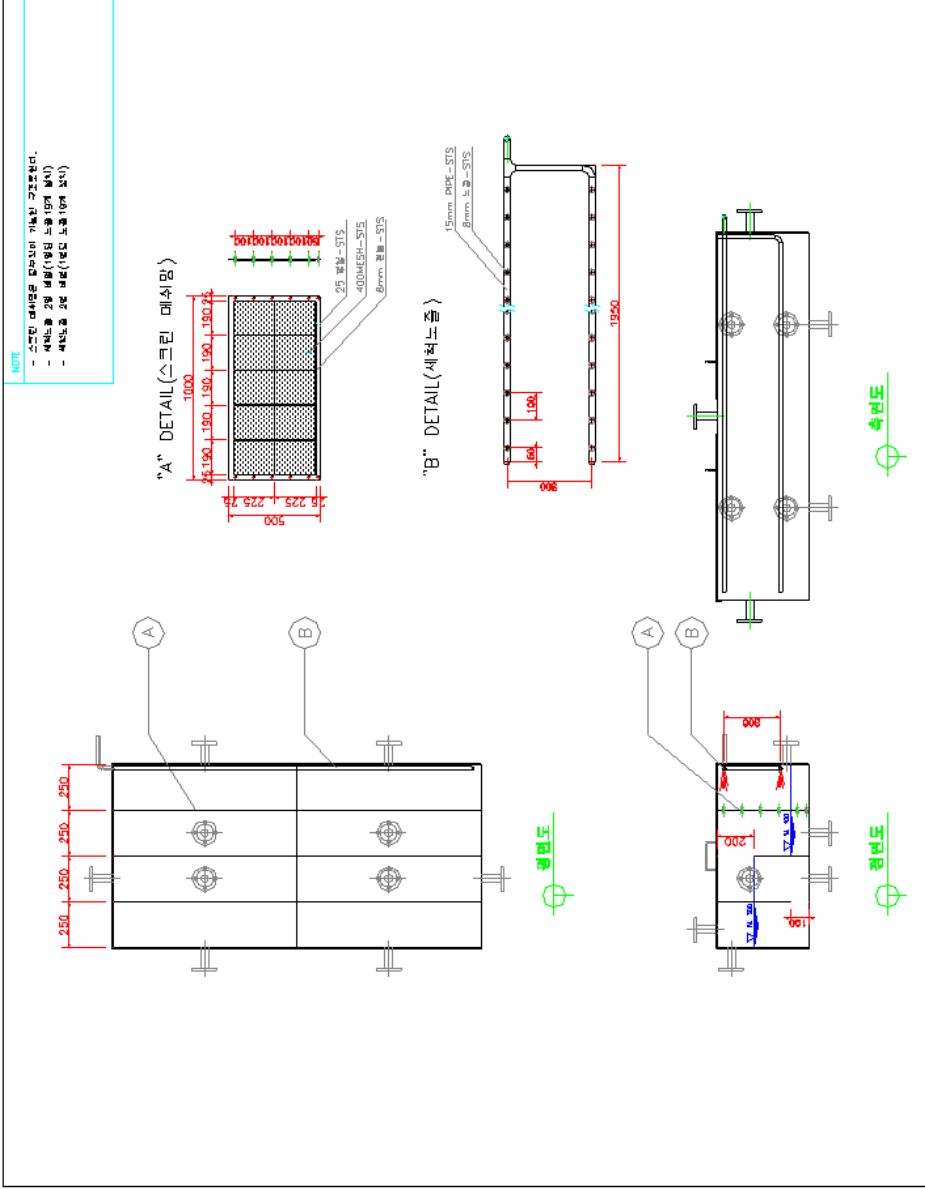
구 분	설 계 조 건	비 고
유입유량	2.5 m ³ /day = 1.74 ℓ /min	
체류시간	10 min 이상	
필요용량	0.02 m ³ 이상	
규 격	1.0 mW × 1.0 mL × 0.5 mH	
원수펌프	25A × 1.75 ℓ /min × 0.29 kw × 7 MH	
부대시설	<ul style="list-style-type: none"> - 유입 배관 32A - 동물배양조 이송관 32A - 식물배양조 이송관 32A - 역세척수 공급관 15A - DRAIN 및 OverFlow 50A - 분리망 25 μm(By-pass부 75 μm) 	



<그림 2.122> 원수분리조 구조(측단면도)



<그림 2.123> 원수분리조 외형도



<그림 2.124> 원수분리조 구조상세도

(라) 식물플랑크톤 배양조

식물플랑크톤 배양조는 설계기준 체류시간이 2.5일로서 식물플랑크톤의 성장조건을 고려하여 유효수심을 0.5m 이내로 낮게 유지하고 충분한 일조량을 확보할 수 있도록 상부 개방형 구조로 한다.

(표 2.28) 식물플랑크톤 배양조 설계요소 및 사양

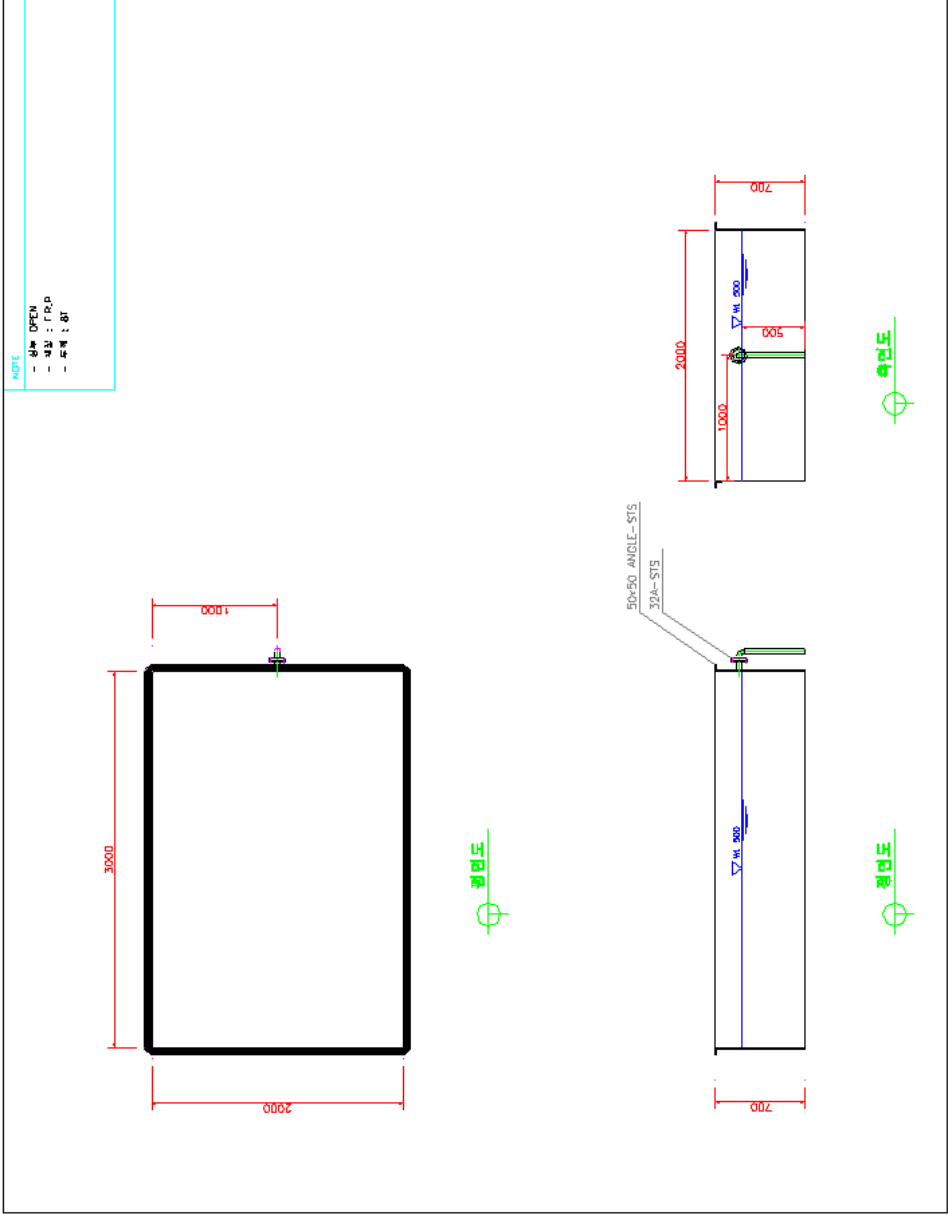
구 분	설 계 조 건	비 고
유입유량	1.25 m ³ /day = 0.87 l/min	총 유입유량의 50 %
체류시간	2.5 day	
필요용량	3.125 m ³ 이상	
규 격	2.0 mW × 3.0 mL × 0.7 mH	유효수심 0.55m
부대시설	- 유출 배관 32A - 수중 교반기(0.29kw 수중펌프 사용)	

(마) 동물플랑크톤 배양조

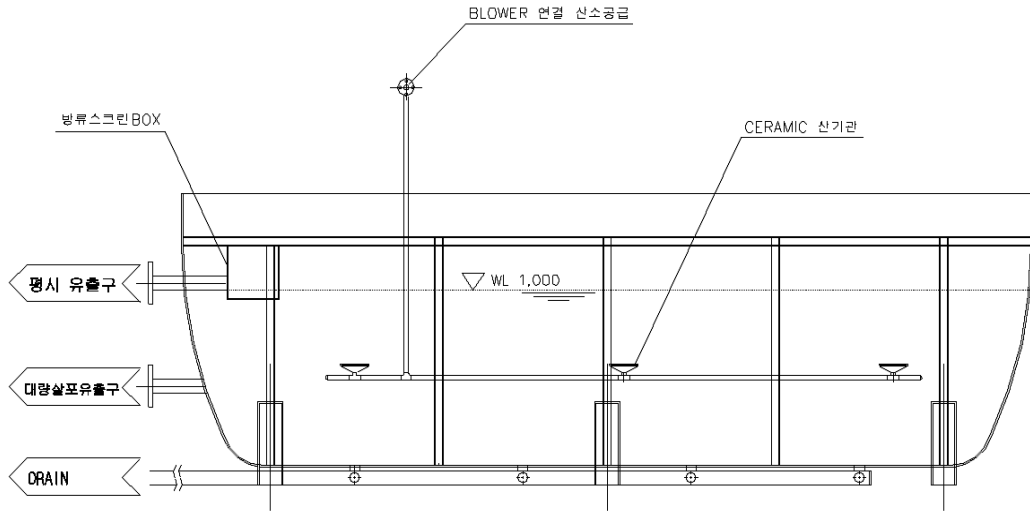
배양장치 규모를 결정하는 요소로서 동물플랑크톤 배양조 용량은 체류시간 4일로 한다. 유효수심은 1m 이상으로 하며 50 %의 수면적은 햇빛에 직접적인 노출이 되지 않도록 한다. 산소공급을 위해 수심 1/2지점에 Ceramic 산기관을 설치하고 배양조 바닥면에 경사를 주어 배양조 운영상 발생하는 이물질 등의 배출이 용이한 구조로 한다. 또한 천적생물의 대량 방류를 위해 수심의 1/3지점에 별도의 방류구를 설치하여 운영할 수 있어야 한다.

(표 2.29) 동물플랑크톤 배양조 설계요소 및 사양

구 분	설 계 조 건	비 고
유입유량	2.5 m ³ /day = 1.74 l/min	
체류시간	4.0 day	
필요용량	10.0 m ³ 이상	
규 격	2.5 mW × 5.0 mL × 1.3 mH	반 원통형
부대시설	- 평시 유출관 65A - 대량살포 유출관 65A - 산소공급용 BLOWER - CERAMIC 산기관 3개	



<그림 2.125> 식물플랑크톤 구조상세도



<그림 2.126> 동물플랑크톤 배양조 구조(측단면도)

(마) 방류구(인공식물섬)

대상수역에 살포한 천적생물의 생존율을 높이고 녹조제어효과를 지속 시키기 위해 방류구 말단은 수역에 설치한 인공식물섬 중앙부에 연결한다. 인공식물섬은 노랑꽃창포 등 수생식물이 식재되어 수면에 조성된 부도(浮島, Floating Island)로서 하부에 뿌리가 잘 발달되어 있기 때문에 물고기로부터 천적생물의 은신처 역할을 한다.

인공식물섬 설치는 방류 지점당 1개소를 설치하고 1개소 규모는 25m² (5m × 5m)로 하며, 이동 방지를 위해 수중계류를 설치하여 고정하고 방류구는 인공식물섬의 정 중앙에 천적생물 배양액이 투입될 수 있도록 연결한다.

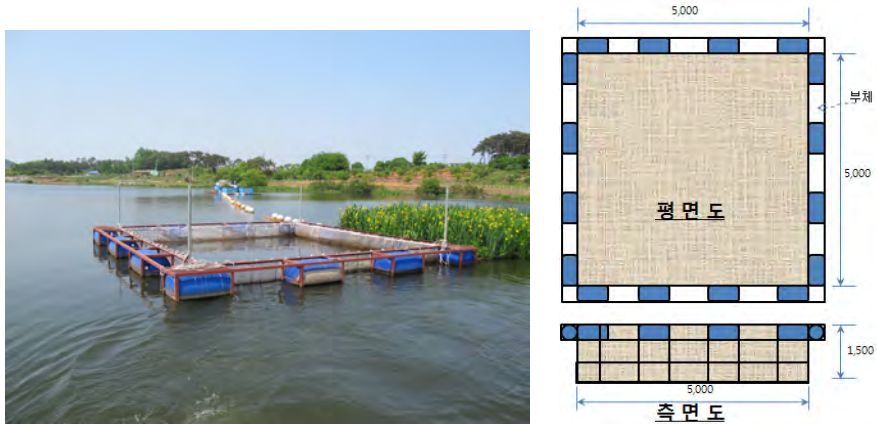
(바) Cage

(표 2.30) cage 사양

구 분	설 계 조 건	비 고
규 격	5 mW × 5 mL × 1 mH	장방형
Mesh	500 μm	
부대시설	- cage 인양장치, - 부력체	

천적생물 배양장치에서 배양한 천적생물을 수역에 살포하는 방법으로는 녹조발생 전 초기제어 목적으로 운영할 경우 인공식물섬에 직방류하는 방

법을, 녹조가 발생하거나, 물고기의 포식압이 높을 경우에는 인공식물섬 직방류와 cage 방류를 병행하는 방법을 사용한다. 이를 위해 인공식물섬 옆에 cage를 설치하며 인공식물섬과 동일하게 방류 지점당 1개소를 설치하고 그 규격은 표 2.30과 같다.



<그림 2.127> 방류구와 연결된 Cage와 인공식물섬

(3) 비용 분석

(가) 시설설치비

천적생물 배양장치의 상기 구성요소와 설계기준을 적용하여 10톤 규모의 천적생물 배양장치와 100톤 규모의 천적생물 배양장치를 설치한다고 가정할 경우 예상되는 소요비용은 다음과 같다.

(표 2.31) 시설설치비

구 분	배양장치 10톤		배양장치 100톤	
	규 격	금 액	규 격	금 액
천적생물 배양장치	배양용량 10톤 1계열	40,000,000	배양용량 20톤 5계열	400,000,000
인공식물섬	25m ²	6,000,000	25m ² × 2set	12,000,000
케이지	4m × 4m × 1.5m 1set	8,000,000	4m × 4m × 1.5m 2set	16,000,000
배관공사	지지철물, 유출입배관	5,000,000	지지철물, 유출입배관	35,000,000
자동화 및 전기공사	컨트롤 판넬 및 전기배선	5,000,000	컨트롤 판넬 및 전기배선	20,000,000
합 계		64,000,000		483,000,000

- 토지매입, 기초 토목공사, 1차 전기공사 제외이며 육상형 제작 설치기준임.
- 천적생물 배양장치는 원수분리조, 식물플랑크톤 배양조, 동물플랑크톤 배양조를 1set로 하며 기계장비(원수펌프, Blower, 수중교반기, 역세척펌프)류 포함
- 배양장치 10톤의 살포구역은 1개소로 하고 방류부에는 인공식물섬과 cage 각 1set 적용
- 배양장치 100톤의 살포구역은 2개소로 가정하고 방류부에는 인공식물섬과 cage 각 1set 적용
- 인공식물섬 : 식생기반제, 수생식물 식재 및 고정용 계류장치(각 4개소) 포함
- 케이지 : 부력제 제작설치 및 고정용 계류장치, 인양장치 포함
- 배관공사 : 유입펌프(수심 1m 유지), 유입배관, drain 배관, 방류배관 연장 및 식물섬(cage) 연결, 관리용 Walkway 제작 설치, 기타 지지철물 설치
- 자동화 및 전기공사 : 원수분리조 밸브 순차 제어, 판넬 구성 및 제작설치, 기계장비 배선공사 포함
- 설치 대수가 증가하면 천적생물 배양장치 외에 인공식물섬, 케이지, 배관공사 및 전기공사 부분은 기준 단가가 낮아질 수 있으므로 상기 사항은 개략적인 참고만 하고 세부설계시에 별도로 계상하여 적용한다.

(나) 운영, 유지관리비

운영, 유지관리비는 배양장치 100톤 운영기준으로 배양장치를 연간 10개월(2월 중순~12월 중순) 운영하고, 현장관리인 1인을 두어 1일 4시간씩 월 26일 근무하는 조건으로 산출하였다. 산출결과 연간 12,655,200원 정도 발생되며 여기에 주요 부품 교체 등 예상치 못한 운영 장애에 대비하기 위해 예비비 20 %를 포함하면 최종 연간 15,155,200원이 추정된다.

(표 2.32) 유지관리비 산출내역

연간 유지관리비	현장관리인 인건비	전기료	소모품비	예비비
15,155,200원	10,000,000원	1,655,200원	1,000,000원	2,500,000원

- 천적생물 배양장치 100톤 기준
- 운영기간 : 2월 15일(해빙 직후) ~ 12월 14일(결빙시작 전) : 10개월
- 인건비 : 1,000,000원/월 × 10개월 = 10,000,000원
- 전력비 : 3kW × 24hr/일 × 300일 × 76.63원/kWh = 1,655,200원(산업용)
- 운영비(비품, 소모품 포함) : 100,000원/월 × 10개월 = 1,000,000원
- 유지관리비 합계 =(인건비+전력비+운영비) = 12,655,200원
- 연간 유지관리비(예비비 20 % 가산) = 15,155,200원
- 예비비 : 청소작업시 현장관리인 보조인부비, 주요 부품 교체비 등 포함

제8절 천적생물 배양장치의 최적운영 및 현장적용방안

1. 천적생물 배양장치의 최적운영방안

가. 천적생물 배양장치의 한계 및 전제조건

천적생물 배양장치의 최적 운영을 위해서는 배양장치의 기능과 한계상황, 문제점 등을 미리 숙지하여 충분한 이해를 바탕으로 하여야 한다. 천적생물 배양장치 운영시 한계 및 전제조건을 다음과 같이 정리하였다.

① 천적생물 배양시 인위적으로 초기 개체수를 증가시키면 경쟁적 우위를 확보할 수 있지만, 생물을 대상으로 개방된 환경에서 배양시 타 생물에 의해 방해받을 수 있다.

- 현장배양은 내의 최적 조건에서 단일종 배양(순수배양)과 달리 목적인 천적생물 이외의 다양한 종류의 생물과 개체들이 혼재(혼합배양)될 가능성이 있다. 이럴 경우 목적인 천적생물의 안정 배양이나 고밀도 배양을 방해하는 요인으로서 작용할 수도 있다. 특히, 수서곤충의 유입이 일어나지 않도록 해야 한다.

- 일부 동물플랑크톤의 경우, 같은 종일지라도 적용지역에 따라 배양 환경이 달라지거나, 증식의 정도가 다를 수 있으므로, 각 현장마다의 환경적 특성을 충분히 고려하여 배양할 필요가 있다.

- 세균 또는 바이러스로 인한 감염으로 일부 동물플랑크톤 증식이 저해될 수 있으며, 가능하다면 배양조 바닥, 측면의 청결에 유의하여 치명적 세균성, 또는 바이러스성 질병의 확산을 미연에 방지해야 한다. 만약, 발생시 배양조의 물을 완전히 빼고 7일 정도 건조상태로 햇볕에 노출시켜 풍건될 수 있도록 한다.

② 천적생물 배양장치 운영초기 천적생물 군집의 안정화까지 많은 시간이 소요될 수 있다.

- 천적생물 초기 배양시에는 천적생물 개체군이 배양장치내에 안정화될 때 까지 약 1~2개월 정도 배양적응기간이 요구될 수 있다.

- 특히, 장치 제작 후 6개월 정도는 장치의 재질로부터 유출되는 독성에 의해 천적생물 성장이 제한될 수 있으므로 친환경 소재의 사용이나, 충분한 수세와 독성제거를 위한 주의가 필요하다.

③ 강우기(7~8월)와 동절기(12~2월)에는 성장에 제약이 있다.

- 강우기인 7월과 8월에는 탁도가 증가하여 원수분리조에 다량의 토사가 유입되

어 배양장치 정상운영이 어렵고, 또한, 폭우시 빠른 유속과 수위상승으로 시설 피해 우려가 높아 이시기에는 시설운영을 중지하는 것이 바람직하다. 또한, 이 시기에는 녹조발생 확률도 낮고, 천적생물을 살포하더라도 효과를 기대하기 어렵기 때문에 굳이 운영할 이유가 없다. 단, 강우종료 후, 최대한 단시간내 장치를 재정비하여 천적생물 배양에 돌입하여 강우 이후 발생할 수 있는 녹조에 신속하게 대비해야 한다.

- 저수온 시기이면서 결빙기인 12월부터 익년 2월까지의 수온저하와 결빙으로 인해 녹조발생 가능성이 낮고, 이 시기에는 천적생물 배양이 어렵다. 이때는 운영을 중단하고, 배양장치의 배관이 동파되지 않도록 물을 완전히 배제한 후 시설 보호에 힘쓴다.

나. 천적생물 배양장치 최적운영 방안

천적생물 배양장치는 해빙기인 2월 중순부터 결빙전인 12월 초순까지 크게 2가지 방안으로 운영할 수 있으며, 대상수역의 녹조발생 특성을 감안하여 적용한다.

(표 2.33) 녹조발생 시기와 배양장치 운영방안

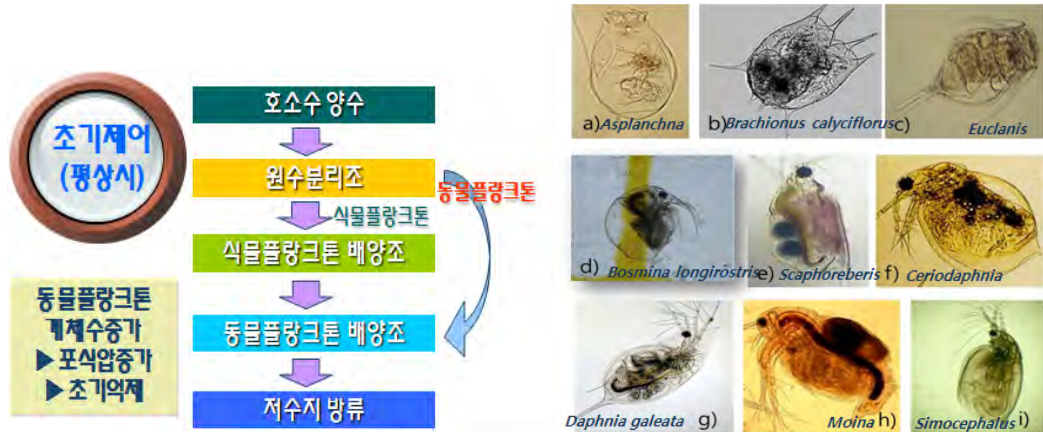
구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	
녹조발생 시기			████████████████████						████████████████████				
운영 방안	예방	████████████████████						████████████████████					
	방제			████████		████████				████████			

(1) 사전예방(초기제어)

평상시 대상 저수지에 자연 서식하는 천적생물을 배양장치의 원수분리조에서 분리한 후 대량배양하여 증식시킨 자연분리 천적생물을 활용하여 지속적으로 살포한다. 원수분리조를 통해 자연 서식 천적생물을 선택 분리한 후 대량배양하며, 적용가능한 천적생물은 그림 2.128과 같다. 사전예방 단계에서는 천적생물의 먹이원인 식물플랑크톤이 수역에 낮은 농도로 있기 때문에 천적생물 배양장치는 원래 기능인 식물플랑크톤 배양조와 동물플랑크톤배양조로 구분하여 운영해야한다. 천적생물 배양장치의 정상가동이 가능한 2월 말부터 운영을 시작하며, 초기 성장시간인 13일간은 개체수를 늘릴 수 있도록

록 집적배양(Enriched culture)을 실시하고, 이후 연속배양 형태로 운영하면서 주 1회 간격으로 배양장치의 2/3량을 지속적으로 방류한다.

사전예방 운영은 녹조생물에 대한 자연수역내에서의 포식압을 증가시켜 녹조원인 생물의 증식을 초기에 억제하고 제어한다. 저수지의 물이 녹은 후 바로 녹조발생이 가능하므로 2월 말 부터 강우기 직전인 6월 말까지 녹조가 대발생 하지 않는다면 계속 운영하는 것이 좋다.



<그림 2.128> 사전 예방(초기제어) 운영방안 및 적용가능한 자연분리 천적생물

(표 2.34) 사전예방(초기제어) 운영조건

구 분	체류시간		적용 천적생물	살포방법
	식물플랑크톤배양조	동물플랑크톤배양조		
운영조건	3일	4일	자연분리 천적	식물섬 직방류

(2) 녹조방제(종주배양)

대상저수지에 녹조가 발생했을 경우 *Daphnia similoides* 등 우수한 녹조제어능력을 가진 천적생물 종주를 선택적으로 고농도 배양하여 살포함으로써 대발생한 고농도의 녹조를 신속하게 진화, 방제하는 방법이다.

녹조방제운영은 천적생물 배양장치에서 먹이생물 배양조를 통해 들어오는 자연분리 천적생물과 녹조제어에 효과적인 천적생물 종주를 별도 투입하여 혼합된 상태로 대량 배양한다. 이때 천적생물 배양장치에서는 *Daphnia similoides*가 잘 성장할 수 있도록 충분한 먹이생물 공급이 이루어 질수 있도록 한다. 사실, 녹조발생을 전제로 적용하는 방안이므로 녹조발생 수역으로

부터 유입되는 원수에 이미 고농도의 식물플랑크톤이 존재해 충분한 먹이생물 공급이 이루어지므로 크게 신경 쓸 필요는 없다.

천적생물 종주를 배양할 때는 자연분리 천적생물에 비해 조류섭식능이 매우 높기 때문에 수역에서 고밀도로 먹이생물이 유입된다하더라도 천적생물 배양장치내에서는 먹이양 부족현상이 발생할 수 있으므로 배양장치의 체류시간을 더욱 짧게 조정하여 천적생물 배양장치의 먹이공급량을 늘려 천적생물 종주의 배양속도를 최대로 올리는 것이 좋다. 이시기 배양장치에서 천적생물 종주가 성장하면서 소비하는 녹조제거율이 평균 90 % 이상으로 높으므로 배양장치를 녹조제거장치로 활용할 수도 있다.

녹조방제 운영체제로 전환해야 하는 최적시기는 Chl-*a*를 기준으로 한 농업용수기준인 35 mg/m³ 이상으로 증가될 때이다. 이시기에 별도로 보관하고 있던 *Daphnia similoides* 종주를 이용한 천적생물 종주배양 체계로 배양방법을 전환해야 한다. 이때 천적생물 배양조 안에서 대량배양한 자연분리 천적생물을 일시에 살포하는 1차 대응조치를 취하고, 배양액 살포 직후 *Daphnia similoides*로 구성된 천적생물 종주를 대량 배양하여 2차 대응조치로서 *Daphnia similoides* 를 살포하는 제어전략이다. 실내 종주배양이 완료되면, 배양된 천적생물 종주는 새로 세팅한 천적생물 배양장치에 2일 간격으로 일정량이상 주기적으로 천적생물 배양장치로 투입해야 하며, 천적생물 종주의 개체군이 안정화 되면 더 이상 투입할 필요가 없다. 운영조건을 표 2.35과 같이 체류시간을 단축 전환하여 식물플랑크톤 배양기능을 축소하고 전체 장치를 천적생물 배양조로 운영하여 배양 효율과 녹조 제거율을 향상시킨다.

천적생물 종주배양이 안정화되어 살포수준으로 증가하면 배양액은 주 1회 배양장치의 2/3 량 씩 주기적으로 살포하고, 남은 1/3 배양액에 원수를 다시 채워 다음 살포를 위해 재배양하는 방법으로 종주를 유지한다.

(표 2.35) 녹조발생시 긴급방제 운영조건

구 분	체류시간		적용 천적생물	살포방법
	식물플랑크톤배양조 (1차 천적배양조)	동물플랑크톤배양조 (2차 천적배양조)		
운영조건	0.5일	2.5일	<i>Daphnia</i> spp.	식물섬+cage 방류

녹조방제 운영체제로 전환 후 Chl-*a* 농도가 100 mg/m³ 이상으로 초과할 경우 인공식물섬과 cage 살포를 병행하여 천적생물 양을 추가 증식하여

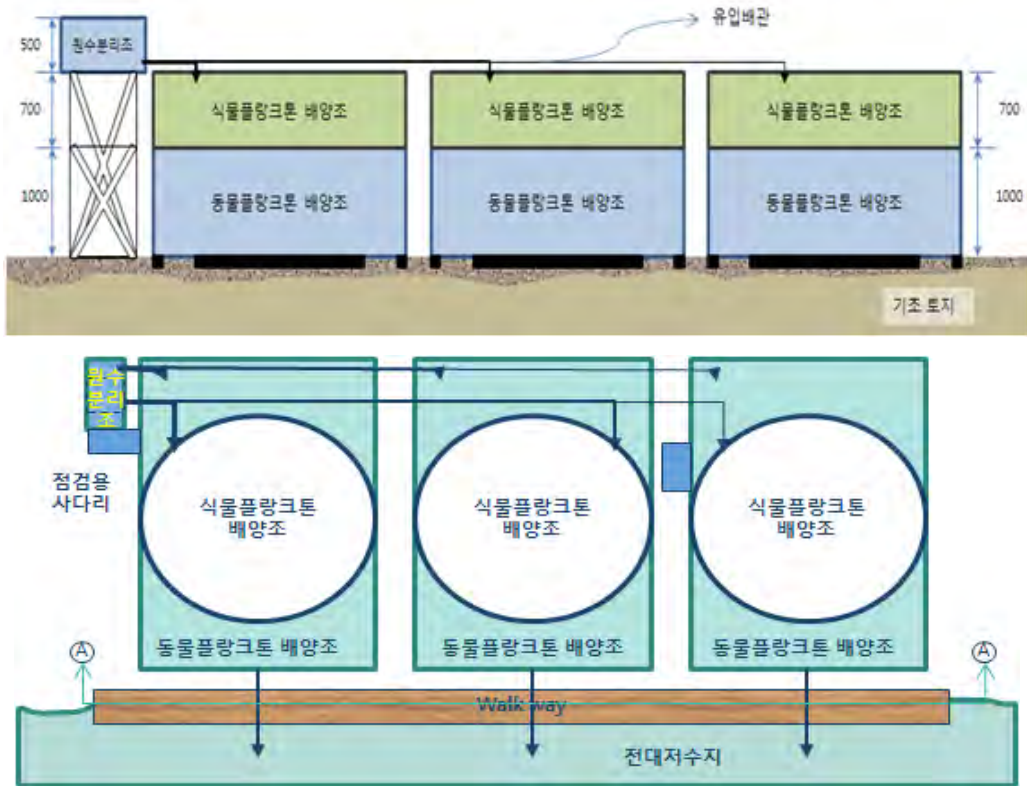
활용한다. 주 1회 Chl-a 측정을 통해 Chl-a 농도가 35 mg/m³ 이하로 감소하면 다시 사전예방 운영 방안으로 복귀한다.



<그림 2.129> 녹조방제 운영방안 및 적용가능한 천적생물 종주들

2. 천적생물 배양장치의 현장적용방안

가. 천적생물 배양장치



<그림 2.130> 천적생물 배양장치 배치단면도

천적생물배양장치는 식물플랑크톤과 동물플랑크톤을 분리하기 위한 원수분리조, 식물플랑크톤 배양조(먹이생물 공급조), 동물플랑크톤 배양조(천적생물 배양조)로 구분하였으며, 본 연구에서는 하천 수면에 직접 적용한 수면부상형으로 설치하였으나, 이를 패키지형태로 구조를 단순화하여 소요부지를 감소시켜 비용절감 효과를 유도하는 육상형 시설이 더 안전하다.

천적생물 배양장치는 원수분리조 1식, 식물플랑크톤 배양조와 동물플랑크톤배양조가 병합된 형태로 3~5식으로 구성할 수 있으며, 천적생물 배양장치 규모는 천적생물 배양조의 용량을 기준으로 하며, 각 10톤의 단위규모로 구성하는 것이 좋다.

나. 천적생물 배양장치 현장적용 계획수립

(1) 목표설정

천적생물을 이용한 녹조제어 목표 중은 남조류이며, 천적생물을 이용한 녹조제어 목표 시기는 3~6월, 9~11월 이다. 녹조발생이 빈번한 부영양 농업용저수지의 경우 결빙기 이후 해빙과 함께 녹조발생이 시작될 수 있으므로 2월 말부터 녹조발생에 대비하여야 하며, 본격적으로 3월부터 녹조 제어 체계에 돌입해야 한다. 집중강우기인 7~8월을 제외한 대부분의 시기에 녹조 발생이 예상되므로 3~6월, 9~11월 까지 천적생물 배양장치를 운영하여 녹조 제어가 이루어 질수 있도록 한다.

천적생물을 이용한 녹조제어 목표 기준은 Chl-a 35 mg/m³이하로 한다. 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률에서 제시하고 있는 호소의 생활환경기준 IV등급을 농업용수 사용가능 등급으로 규정하고 있으므로 IV등급 기준의 Chl-a 35 mg/m³ 이하를 녹조제어 목표로 한다.

(2) 대상지 환경조사

천적생물 배양장치의 적용 전, 대상 저수지의 수환경 특성과 녹조발생 시기, 녹조발생 정도, 녹조원인 생물 등에 대한 사전 조사를 통해 배양장치의 규모 및 적용방안을 수립할 수 있다. 수환경 특성은 투명도(SD), 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 용존산소량(DO), COD, 부유물질(SS), TN, TP, Chl-a를 대상으로 분석하며, 현재의 특성을 바탕으로 녹조발생원인과 대책을 수립하는데 중요한 자료를 제공한다. 주요 녹조발생시기와 녹조발생정도(Chl-a), 녹조원인생물에 대한 정보를 통해 천적생물 배양장치의 규모와 적용방안 및 운영방안을 수립할 수 있다.

(3) 녹조발생 원인 및 천적생물 분포특성 조사

(가) 녹조발생원인

녹조 원인종은 대부분 *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria* 속의 식물플랑크톤이다. 이들 남조류의 녹조 원인종은 천적생물에 의해 제어가 가능하며, 규조류와 와편모조류 역시 천적생물에 의해 제어가 가능하다.

농업용저수지의 녹조발생원인은 주로 낮은 수심과 지속적인 오염원 유입이 대부분을 차지한다. 낮은 수심의 저수지에 지속적인 오염원이 유입될 경우 저수지가 마치 미세조류 배양장의 역할을 하여 녹조발생 위험이 매우 높고, 천적생물 적용효과가 높지 않으므로 지속적인 하수, 오폐수가 유입되는 저수지의 경우 유입 오염원에 대한 대책수립이 선행되어야 한다. 또한, 천적생물인 동물플랑크톤은 포식자인 물고기를 피하기 위해 낮에는 어두운 수심 깊은 곳에 있다가 밤에 물고기를 피해 주로 식물플랑크톤을 포식한다. 따라서, 동물플랑크톤인 천적생물이 녹조발생 수역에서 녹조제어의 기능을 보이기 위해서는 3m 이상의 수심이 필요하다.

(나) 동물플랑크톤 분포 특성 및 자연분리 천적생물 유무 평가

대상 저수지의 동물플랑크톤 분포 특성을 사전에 조사하여, 적용가능한 천적생물 존재여부를 파악한다. 자연분리 천적생물로 활용가능한 종이 있다면, 천적생물 배양장치 운영시 이들 자연분리 천적생물을 최대한 배양하여 군집크기를 키움으로 인한 포식압 증가를 유도하고, 자연분리 천적생물로 활용할 수 있는 종이 없다면, 초기부터 천적생물 종주를 도입하여 종주배양 방법으로 적용하도록 계획한다.

(4) 천적생물 적용타당성 평가

천적생물 배양장치 현장적용시 사전에 최근 3년간 녹조발생 시기 및 발생 농도, 발생지점 등을 분석하고, 녹조발생 원인종에 대한 자료를 확보하여 천적생물 규모, 적용위치, 운영방안 등 적용성 평가 후 전략을 수립하여 적용한다.

- 천적생물 배양장치 적용 타당성이 높은 저수지의 조건
 - 최근 3년간 Chl-*a* 평균농도가 지속적으로 높은 저수지
 - 평균수심 3.0m 이상 저수지(=유효저수량(m³) ÷ 수표면적(m²))
 - 지속적인 외부오염원(예, 유로뉘시터, 점오염원 등)이 없는 저수지

- 광산폐수, 중금속 등 생물 독성 물질 유입이 없는 저수지
- 특히, 급경사의 산간형 저수지와 같이 수생태 건강성이 낮아 생물상이 빈약한 저수지
- 전기공급, 유지관리 용이성, 시설안전성 등 운영 및 유지관리가 용이한 곳
- 천적생물 배양장치를 도입할 적정 홍만수면 부지가 있는 곳
- 천적생물 배양장치 적용 위치
 - 저수지 유입부, 제방 등 저수지 형상과 바람의 방향에 따라 녹조생물이 집적되는 곳
 - 저수지의 홍만수면 부지 활용 : 홍만수면 부지의 경우 이른봄 저수율 100 % 일 때 물에 잠겨 접근이 불가능할 수 있으므로 시설 설치시 바닥을 1 m이상 높이는 것이 좋음.
 - 수초대가 발달한 경우 천적생물 포식자의 공격을 받을 수 있으므로 천적생물은 수초대를 벗어난 호 중앙에 살포하는 것이 좋음(살포지점에 인공식물섬 적용시 천적생물의 은신처 역할로 어류 포식으로부터 천적생물을 보호함, 야간에 적정 위치로 이동).
 - 100톤 이상 규모의 천적생물 적용시 50톤 단위로 분산 적용하는 것이 유리함.

다. 규모산정 및 설계

천적생물 배양장치의 규모산정과 설계는 제 7절을 참고한다.

라. 천적생물 배양장치의 운영

천적생물 배양장치는 녹조발생 특성에 따라 발생전 초기제어 운영과 녹조발생시 긴급 방제 운영으로 구분하여 운영한다.

천적생물 배양장치의 운영은 유지관리담당자가 운영/관리매뉴얼을 참고하여 하고, 별도의 전문가 자문단을 두어 비정상 운영에 대한 기술지원과 컨설팅을 받을 수 있도록 한다.

천적생물 배양장치운영, 유지관리는 1인의 현장관리인을 두어 상시 점검 및 이상 유무를 확인하고, 보고, 조치를 취할 수 있도록 한다. 현장관리인이 해야할 업무는 비전문가도 가능한 단순한 수준으로 비상시 항시 대기 할 수 있는 인접지역 주민으로 성실하고, 책임감이 투철한 사람이면 된다.

마. 천적생물 배양장치 유지관리 및 모니터링·운영체계 평가

천적생물 배양장치 유지관리 점검사항은 정기적, 비정기적 항목으로 구분하여 시행하며, 표 2.36에 나타난 사항은 효과적인 운영관리를 위해 반드시 실시해야 한다.

(표 2.36) 천적생물 배양시설 유지관리 점검사항

점검사항	점검내용	점검시기
양수설비	- 수중펌프의 이물질부착여부	- 수시점검
시스템작동 패널	- 배양시설 시스템의 오작동	- 전기가 차단, 펌프작동 안될 때
누수점검	- 배관 및 배양조의 누수여부	- 적정유량이 유지되지 않을 때
누적오염물질의 제거	- 배양조 내 슬러지 청소	- 1회/월
플랑크톤 분리장치	- 원수공급조와 배양장치 월류부 분리막의 찢김확인 및 폐쇄여부, 청소	- 수시점검
동절기 관리	- 배관, 배양조의 결빙현상 발생여부	- 동절기 수시점검

배양장치의 모니터링·운영체계평가는 전체적인 운전상황과 녹조제어 효과를 모니터링하여 시스템의 문제점을 분석하고 더 효과적인 운영관리 체계를 수립하기 위해 실시하며, 그 내용은 표 2.37과 같다.

(표 2.37) 천적생물 배양장치 운영체계 평가

항목	평가내용	비 고	
제어효과	Chl- <i>a</i> 감소율	운영 전 또는 대조구의 조류량(Chl- <i>a</i> 또는 식물플랑크톤 현존량)에 대한 운영 후의 조류량 비율	
	제어목표 달성율(%)(Chl- <i>a</i> 농도기준)	운영기간동안 조류제어 목표를 만족한 일수의 비율	
	천적생물개체수 증가율(%)	운영 전 또는 대조구의 동물플랑크톤 현존량(inds./L) 대비 운영 후의 동물플랑크톤 현존량 증가율	
기타	지속성	장기간의 효율유지	장기간 효율의 유지
	연속성	운영체계변경에 따른 연계성	초기제어와 선택제어의 체계변경에 따른 효율의 연속성
	안정성	효율의 안정적 유지	현장의 여건변화에 따른 변화율

제 3 장

결 론

제1절 농업용저수지의 녹조발생 특성 및
전대저수지 수환경 모니터링

제2절 천적생물 종주 분리 및 종주의 최적
배양기술 개발

제3절 천적생물 배양장치 개발 및 기능향상

제4절 천적생물 배양장치의 대량배양
성능 및 녹조제거

제5절 천적생물 현장살포에 따른 녹조제어 효과분석

제6절 천적생물 배양장치의 규모 산정 및 설계인자

제7절 천적생물 배양장치의 최적운영 및 현장적용방안

제3장 결론

제1절 농업용저수지의 녹조발생 특성 및 전대저수지 수환경 모니터링

농업용저수지의 녹조발생특성을 살펴본 결과 농업용저수지에서 가장 빈번하게 녹조를 유발하는 종은 남조류에 속하는 *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Aphanizomenon* 속의 종들이었으며, 발생시기는 녹조발생정도에 따라 4~6월, 9~10월에 국한되기도 하고, 심할 경우 강우기를 제외한 3~12월 전기간동안 발생하기도 하였다. 농업용수 수질측정망 지구의 녹조발생 특성을 분석해 본 결과, 평균수심 4m이하, 유역면적/만수면적 비 20이하, 제당높이/제당길이의 비 0.04이하일 때 녹조발생 가능성이 높아지는 것으로 나타났다으며, 녹조발생 현황은 농업용수 기준인 35 mg/m³ 초과율은 10 % 정도, 조류대발생인 100 mg/m³ 초과율은 1 % 수준을 보여주고 있었다.

전대저수지의 녹조발생 특성과 수환경 특성을 분석하기 위하여, 2010.4.5~2012.11.21까지 3년간 COD등 수질항목과 동·식물플랑크톤, 어류 등을 대상으로 시기별 지점별 모니터링 한 결과 COD는 7.8~28.8 mg/L의 범위로 나타나 대부분의 시기에 농업용수 수질기준(< 8 mg/L)을 초과하는 오염수준을 보였으며, TN 및 TP 등 영양염류도 대부분의 시기에 농업용수 수질기준을 만족하지 못하였다. Chl-*a*는 1.2~225.9 mg/m³(평균 91.9 mg/m³), 식물플랑크톤 현존량은 0.7~75.8 × 10⁵ cells/ml로 나타나 녹조발생이 심각한 수준을 보였다. 전대저수지의 동물플랑크톤 분포특성은 부영양화호수가 가지는 전형적인 종조성으로 박테리아 및 식물플랑크톤을 섭식하는 소형 윤충류가 연중 우점하고, 녹조를 효과적으로 제어할 수 있는 천적생물로써의 기능을 가진 대형 지각류는 거의 분포하지 않는 것으로 나타났다. 전대저수지에 서식하는 어류는 총 4과 9종 649개체로서, 잉어과는 4종, 검정우럭과와 망둑어과 2종, 미꾸리과 1종이 관찰되었으며, 블루길(38.7 %), 치리(27.1 %)등 수질오염 및 서식지 질적저하에 내성이 강한 종들이 주로 분포하였다.

제2절 천적생물 종주 분리 및 종주의 최적 배양기술 개발

농업용저수지에서 녹조제어에 활용 가능한 천적생물 종주를 분리하고, 실내 종주배양 및 현장 천적생물 배양장치에서 대량배양이 가능한 최적의 배

양 조건을 검토하였다.

천적생물 후보종으로 녹조원인 식물플랑크톤에 대한 능력이 뛰어난 대형 지각류인 *Daphnia magna*, *Daphnia pulex*, *Daphnia similoides*를 선정하고 이들의 녹조원인 생물 섭식능력과 현장적응 능력을 비교하여 최적의 천적생물 종주를 선정하였다. 천적생물 후보종들의 증식특성과 식물플랑크톤 섭식 효과를 비교분석한 결과, *D. similoides*가 다양한 조건에서 빠른 개체군 증가와 높은 녹조원인 생물 섭식 능력을 보였고, 특히 30°C이상의 높은 수온에서도 배양이 가능한 것으로 나타났다. 이러한 수온과 먹이조건에 대한 적응력은 *D. similoides*가 여름철 수온이 높아지는 농업용저수지에 천적생물로 살포될 경우 개체군 증가와 녹조제어 작용을 수행할 수 있는 높은 활용성을 가지고 있음을 나타내어 *D. similoides*를 천적생물 종주로 최종 선정하였다.

실내에서 분리된 천적생물종주와 함께 천적생물 배양장치에서 자연 분리된 대형 물벼룩 *Simocephalus ventulus* 역시 천적생물로서 활용가능성이 높은 것으로 나타났다. 자연분리 천적생물의 경우 녹조발생 수역에서 서식하다가 분리된 천적생물로 현장 수질에 대한 높은 적응력을 가지고 있어, 천적생물 종주와 함께 천적생물 배양장치에서 증식 후 적용시 높은 적응력과 함께 녹조제어 효과를 가져올 것으로 예상된다.

남조류가 우점하는 전대저수지의 원수를 이용하여 천적생물의 Chl-*a* 저감효과를 분석한 결과, 천적생물 종주 *Daphnia similoides*의 경우 개체당 최대 저감 효과는 녹조발생 초기 단계인 Chl-*a* 50 mg/m³에서 0.68 mg/m³, 녹조발생 수준인 Chl-*a* 200 mg/m³에서 3.17 mg/m³로 나타나, 녹조발생 상황에서 더 높은 제어능력을 보여주었다. 자연분리 천적생물 *Simocephalus ventulus*의 경우 Chl-*a* 30 mg/m³에서 개체당 저감율 0.5 mg/m³로 천적생물 종주보다 약간 낮지만, *D. similoides*와 유사한 충분한 녹조제어 능력을 가진 것으로 분석되었다.

실내에서 먹이공급 및 물순환 장치, 산소공급장치를 갖춘 50~75 L의 배양수조에서 ℓ 당 150개체 이상의 고밀도 대량배양 시스템을 확립하였으며, 천적생물 배양장치에 고밀도 천적생물 종주를 주기적으로 공급할 수 있도록 하였다.

제3절 천적생물 배양장치 개발 및 기능향상

녹조발생 농업용저수지의 녹조제어를 위해 천적생물 대량배양을 위한

천적생물 배양장치의 개발과 현장적용기술 완성을 주요 목적으로 1차년도(2010년)에 10톤 규모의 수상형 배양장치를 개발하였으며, 2차년도(2011년)에 30톤 규모의 육상형 배양장치를 개발하였다. 또한, 녹조발생수역에 천적생물을 방류했을 때 어류 포식 등의 위험에서 천적생물을 보호하고 녹조제어 능력을 향상시키기 위한 방안으로 천적생물의 2차 증폭 배양과 어류 포식으로 부터 보호받을 수 있는 cage를 개발, 적용하였다.

3차년도(2012년)에는 1, 2차년도에 걸쳐 구상하고 개발한 천적생물 배양장치(수상형 배양장치 10톤, 육상형 배양장치 30톤)의 배양성능을 향상시켰으며, 최적의 현장적용 방안을 제시하기 위해 천적생물 배양장치를 연속운영하고, 주기적 살포를 위한 살포 시스템을 최적화 하였다.

천적생물 배양장치 기능향상으로, 천적생물 배양환경 개선을 위해 배양장치 바닥의 사체와 찌꺼기를 효과적으로 배출할 수 있도록 경사판을 도입하였고, 산소 공급장치의 큰 기포에 의한 동물플랑크톤의 충격을 제거하기 위해 Ceramic형 산기관으로 개량하였으며, 천적생물 살포 방법변경에 따른 방류밸브 위치 개선 등의 작업을 수행하였다.

또한, 2011년에 도입된 cage 2조를 분리하여 수상형과 육상형 배양장치 방류부에 각각 36 m³ 규모로 설치하여 천적생물 살포시 인공식물섬과 cage에 선택적으로 살포하여 운영할 수 있도록 하였으며, cage 내에서 추가 증식된 천적생물을 전량 배출할 수 있도록 cage 바닥면을 들어 올리는 구조로 개선하였다.

제4절 천적생물 배양장치의 대량배양 성능 및 녹조제거

자연분리 천적생물의 배양장치내 배양성능을 봄철과 가을철로 구분하여 평가한 결과 천적생물 배양조에서 천적생물로서 기능을 가진 지각류와 요각류의 증가율이 수상형의 10 m³ 배양조보다 육상형의 30 m³ 배양조에서 훨씬 높아 배양용량이 큰 30 m³ 배양조의 천적생물 대량배양성능이 우수한 것으로 판단되었다.

천적생물 종주 *D. similoides*의 배양장치내 대량배양성능을 분석한 결과 실내에서 고밀도 배양한 *D. similoides*를 천적생물 배양조에 초기 접종한 후 2주 이내에 고밀도로 증식하는 것을 확인하였다.

또한, 배양기간 동안 수온과 영양염류 고갈에 따른 성장 저해현상은 관찰되지 않았고, 천적생물이 안정적으로 고밀도 성장하고 있어 배양장치의 배양

조건이 최적화되었음을 알 수 있었다. 천적생물 배양장치에서 천적생물 증가율은 약 0.5로 나타났으며, 2일마다 개체군 밀도가 두 배로 증가하는 것으로 계산되었다. 육상과 수상의 천적생물 배양장치에서 살포 가능한 천적생물 개체수는 수상배양장치에서 톤당 최대 23만 개체, 육상 배양장치에서 톤당 최대 35만 개체로 고밀도 살포가 가능한 것으로 나타났다.

또한, 천적생물 배양기간동안 배양장치의 녹조제거효율은 수상배양장치 95.5 %, 육상배양장치 97.3 %로 매우 높은 수준을 보여 녹조발생수역의 녹조 제거 장치로 활용이 가능하였다.

제5절 천적생물 현장살포에 따른 녹조제어 효과분석

자연분리 천적생물 및 천적생물 종주를 천적생물 배양장치에서 각각 대량배양하여 녹조발생 수역으로 살포한 후 시·공간별 녹조제어 효과를 분석하였다. 자연분리 천적생물을 대량배양하여 살포한 결과 1차 살포(2010.10.21~11.2)시 Chl-*a*가 120.4 mg/m³에서 8일차에 32.4 mg/m³로 감소하여 73 %의 녹조제어 효과가 나타났고, 2차 살포(2011.5.17~6.9)에서는 살포전 243 mg/m³에서 13일째 87 % 감소한 31.2 mg/m³로 농업용수 수질기준인 35mg/m³이하로 녹조가 제어되어 효과를 입증하였다.

천적생물 종주인 *Daphnia*를 대량배양, 살포한 후 살포구간 내 각 지점에서 살포전, 후 경과일수에 따른 Chl-*a* 변화를 비교하여 제거효율을 분석한 결과, 2011년 11월에 이루어진 1차 살포의 경우 낮은 수온으로 큰 제어효과가 나타나지 않았으나 2012년에 이루어진 2차 여름살포의 경우 시기별 지점 평균 Chl-*a* 농도를 보면 살포 전 72.4 mg/m³에서 14일차에 51.1 mg/m³까지 감소하여 29.2 %의 녹조제어 효과를 보였으며, 대조구(JD2) 대비 살포구간의 각 시기별 제거효율은 23~37일차에 최대 38.3~39.2 %까지 나타났고, 각 모니터링 지점에서 대조구 살포 0일차 대비 시간에 따른 Chl-*a* 제거율은 9.8~40.5 %로 나타났다. 2차 가을 살포는 Chl-*a* 농도 0일차 219.1 mg/m³에서 31일차에 34.2 mg/m³까지 감소하여 84.4 %의 제거효율을 보였으며, 동물플랑크톤은 0일차 평균 389 inds./L에서 Chl-*a* 최소치를 보이는 31일차에 403 % 증가한 1,568 inds./L로 증가하여, 수체가 안정된 가을철이 강우가 많은 여름보다 안정적인 천적생물 성장으로 뚜렷한 녹조제어 효과를 보였다.

천적생물 현장살포에 따른 COD제거효율을 분석한 결과, 8.1~46.3 % (평균 22.5 %)의 효율이 나타났으며, 지속적인 천적생물 살포에 따라 COD

제거효율이 점차 증가하여 천적생물 살포에 의한 녹조제어가 저수지 내 유기물오염 감소를 유도한 것으로 판단되었다.

전대저수지의 먹이망 구조와 어류에 의한 천적생물의 포식을 확인하기 위하여, 살포구간 내 어류의 위내용물 분석을 통한 섭식특성과 방사선안정동위원소 분석을 통한 섭식영향을 알아본 결과 블루길, 참붕어, 붕어 및 치리 등이 천적생물 개체군 밀도를 감소시키는 것으로 사료되었으며, 이에 대한 보호방안이 필요하였다.

제6절 천적생물 배양장치의 규모 산정 및 설계인자

농업용저수지의 녹조제어를 위해 천적생물 배양장치를 적용할 때 적정 규모 또는 최소규모의 산정은 예산을 절감하고, 운영, 유지관리의 편리성을 제공하여 녹조제어 사업의 성공확률을 높여줄 수 있다.

녹조발생 수역($\text{Chl-a } 100 \text{ mg/m}^3$)에서 천적생물을 적용하여 농업용수 수질기준($\text{Chl-a} < 35 \text{ mg/m}^3$) 이하로 저감시킬 경우 배양장치 규모에 따른 천적생물 살포량과 녹조제어범위는 남조류(*Microcystis*)를 대상으로 한 천적생물 개체당 녹조저감량을 토대로 산술 계산하였으며, 자연수역에서의 비증식속도를 감안하여 최종 배양장치 규모산정식을 도출하였다. 녹조발생을 사전예방하는 기능으로 천적생물 배양장치를 연속운영할 경우 실제 필요로 하는 배양장치의 규모는 제시한 것보다 축소해도 될 것으로 사료된다.

- 규모산정식=[저감 Chl-a에 따른 필요 천적생물 개체수 × 호수용량(유광층)] / [천적생물 살포량(비증식속도 10× 감안)]

- 규모산정식(간편식) = [(저수지 평균 Chl-a 농도 - 35) × 호수용량] ÷ 48,144

저수지가 클수록, 녹조발생 농도가 높을수록 처리해야할 양이 증가하므로 천적생물 배양장치의 규모는 증가하며, 각 저수지 특성에 따라 결정되는 규모는 단위규모인 10톤 배양조를 병렬 배치, 분산배치 등의 방법으로 적용할 수 있다. 천적생물 배양장치의 설계인자는 배양장치 단위 규모인 10톤 규모의 배양장치를 기준으로 하였다. 천적생물 배양장치를 설계하여 현장에 적용할 경우 적용대상 저수지의 형상, 입지조건, 접근성 등을 고려하여 면밀히 검토하여야 하며, 배양장치 설계인자는 다음을 전제조건으로 하였다.

- 배양장치 규모 : 10m³
- 배양장치 형태 : 육상형(Package type)
- 설치위치 : 대상 저수지의 홍·만수면 부지

살포를 병행하여 천적생물 양을 추가 증식하여 활용한다. 주 1회 Chl-a 측정을 통해 Chl-a 농도가 35 mg/m³ 이하로 감소하면 다시 사전예방 운영 방안으로 복귀한다.

천적생물 배양장치의 현장적용방안으로 천적생물 배양장치 현장적용 계획수립, 규모산정 및 설계, 배양장치 운영, 유지관리 및 모니터링, 운영체계 평가 순으로 정리하였다. 계획 수립을 위해 목표설정과 대상저수지의 환경조사를 통한 녹조발생 특성, 녹조원인생물과 자연서식 천적생물 분포 특성을 사전에 분석하도록 하였고, 해당저수지에서 천적생물 적용타당성을 평가할 수 있는 지표를 제안하였다. 적정 규모의 천적생물 배양장치를 설계하고 운영할 수 있는 방안과 유지관리 방안, 모니터링을 통한 녹조제어효과분석 및 운영체계 평가항목을 제시하여 현장 실무자가 쉽게 현장에 적용할 수 있도록 자료를 제공하였다.

연구개발목표 달성도 및 대외 기여도

연구개발 목표	연구개발 목표 달성 실적	달성도	대외기여도
○중규모 천적생물 현장배양장치의 개발 및 기능향상	○10 m ³ 규모의 수상형 천적생물 배양장치 장치와 30 m ³ 규모의 육상형 배양장치개발 완료하였고, 기능향상을 통해 최적 운영달성함	100 %	100 % 농업용수원인 저수지에 적용할 수 있는 현실적인 적용방안 제시
○천적생물 현장배양장치의 배양성능 및 현장살포 효과분석	○녹조발생시기인 봄철과 가을철을 대상으로 자연분리형 및 <i>Daphnia</i> 를 대상으로 배양성능 실험과 현장살포 효과분석을 완료하고, 실무 적용방안을 제시함	100 %	100 % 농업용수 수질개선 및 녹조방제사업의 주요 기술로 정책결정에 기여하고, 기술실용화로 실무부서의 효율적인 녹조방제사업에 기여
○천적생물 배양장치의 모산정설계인자출	○천적생물 배양장치의 녹조제어효과와 현장살포 실험을 바탕으로 배양장치 규모산정식을 도출하였으며, 동시에 현장 실무자가 활용할 수 있는 설계인자를 도출하였음	100 %	100 % 농업용수원의 녹조제어 사업을 실행할 수 있는 실무자료 제공
○천적생물 배양장치 최적운영 및 현장적용방안도출	○천적생물 배양장치를 녹조제어 목적에 맞게 최적 운영할 수 있는 방안을 제시하였으며, 동시에 현장실무자가 현장에 효과적으로 적용할 수 있는 방안을 제시함	100 %	100 % 농업용수원의 녹조방제 실무 활용자료 제공
○천적생물 배양장치 현장적용 매뉴얼 작성	○농업용저수지의 녹조제어를 위한 천적생물 배양장치 적용방안에 대한 현장적용 매뉴얼을 작성 완료함	100 %	100 % 농업용수원의 녹조방제 실무에 활용

연구개발결과의 활용계획

연구과제명	농업용수원의 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 개발(최종)		
연구기간	2010. 1.~2012. 12.	연구방법	공동연구, 협동연구
연구비	총연구비 : 324.5백만원(공동 : 85.7백만원) -'12년도 : 100백만원(공동 : 28.5백만원, 협동 : 현물투자)		
연구책임자	남귀숙		
활용부서 및 과제담당관	농림수산식품부(강대일 사무관)		
기대효과 활용계획	<p>■ 기대효과</p> <p>○ 기술적 측면</p> <ul style="list-style-type: none"> - 농업용수원의 녹조방제를 통해 호소의 COD 감소 등 수질개선 효과에 크게 기여하게 됨 - 농업용수원의 생태 건강성을 유지하고, 어족자원을 풍부하게 하는 생물학적 녹조제어기법을 통해 건강한 호소관리 가능 - 녹조방지로 인한 농업용수원의 생태적 가치 상승 <p>○ 경제·산업적 측면</p> <ul style="list-style-type: none"> - 녹조발생으로 인한 수산양식자원에 미치는 많은 경제적 피해를 보상받을 수 있으며, 또한 이수목적에 따른 추가적인 정수처리 비용 절감 등 경제적 이득이 높음 - 기존에 적용되어 오던 고가의 약품비 및 기기설치비를 비용경제적인 본 기술로 대체할 경우 비용절감 효과가 매우 크며, 유지관리비 등 절감요인 발생 <p>■ 활용계획</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 저수지 및 담수호의 녹조방지기술로서 현장적용 및 보급 ○ 저수지 및 담수호의 수질관리 정책에 반영 ○ 기술의 보급 및 상용화 <p>■ 활용부서(또는 기관 등)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 공사 수자원관리처 또는 환경부 및 한국수자원공사 ○ 지자체 관리 호소 및 정체수역의 수질개선사업에 활용 		
보고서 발간부수	100부		
배부계획 (배부처)	농림수산식품부 3부, 공사내 관련부서 60부, 보관본 7부, 정부 등 유관기관 10부, 공동연구기관 3부, 협동연구기관 3부, 연구기획실 : 14부(공사 도서관 등 자료실)		



참고문헌

참고문헌

- 고명훈, 박종영, 이용주. 2008. 옥정호에 도입된 배스 *Micropterus salmoides*의 식성 및 어류상에 미치는 영향. 한국어류학회지. 20(1): 36-44
- 공건화, 이재훈, 안광국. 2009. 우리나라 주요 인공호의 투명도에 대한 수질 및 수중 부유물 영향 분석. 한국하천호수학회지. 42(2): 2231-231
- 공동수, 양상용, 황동진, 류홍일, 류재근, 1994. 대형생물에 의한 수질개선 기법. 환경생물학회 춘계심포지움, 15-36.
- 공동수, 윤일병, 유재근. 1996. 팔당호의 물수지 및 수문특성. 한국육수학회지 29: 51-64.
- 공동수, 천세억, 류재근, 1996. 대형수생식물 및 부착조류를 이용한 호수질정화 및 수확물의 재이용. 한·일 지방간 생태공학적 수질개선 공법에 관한 심포지움, 강원대학교 환경연구소, pp.115-154.
- 국토해양부(2010), 포식성 천적생물을 이용한 녹조방지기술 개발 보고서(1)
- 국토해양부. 2011. 포식성 천적생물을 이용한 녹조방지 기술개발(2). 국토해양부
- 김동욱. 2012. 대청호 조류문제 해법. 워터저널. 96: 22-24
- 김병석, 박연기, 박경훈, 신진섭, 김진화, 윤성명, 안용준 2006. 실내사육조건에서 한국산 *Daphnia* 중간 life cycle 비교. 농약과학회지, 10, 196-200.
- 김익수, 박종영. 2002. 한국의 민물고기. 교학사
- 김호섭, 황순진. 2004. 육수학적 특성에 따른 국내 저수지의 부영양화 유형분석 -엽록소 a와 수심을 중심으로. 한국육수학회지. 37(2): 213-226
- 나정은, 정명화, 조인숙, 박종환, 황경섭, 송효정, 임병진, 라공환, 김현우, 이학영. 2012. 영산강·섬진강 수계 주요 호소의 식물플랑크톤 군집. 한국환경생물학회지. 30(1): 39-46
- 남귀숙, 송영희, 이의행, 배요섭, 홍대벽. 2011. 포식성 천적생물을 이용한 녹조방지 기술개발. 물과미래 44, 49-56
- 농림수산식품부. 2003. 농업환경오염 복원기술 개발
- 농림수산식품부. 2003. 부착조류시스템을 이용한 농촌유역 수질개선 기법 개발
- 농림수산식품부. 2004. 농업용수 수질개선 시험연구(최종)
- 농림수산식품부. 2004. 농업용수 수질개선을 위한 인공습지 설계·관리 요령
- 농림수산식품부. 2005. 농업용저수지의 녹조제어 기법개발
- 농림수산식품부. 2007. 2007 농업용수 수질측정망조사 보고서

- 농림수산식품부. 2008. 2008 농업용수 수질측정망조사 보고서
- 농림수산식품부. 2009. 2009 농업용수 수질측정망조사 보고서
- 농림수산식품부, 2011. 2011 농업용수 수질측정망조사 보고서
- 박정훈, 문병렬, 이옥민. 2006. 수원시 수계에 분포하는 식물플랑크톤의 종조성 및 영양단계. 한국조류학회지. 21(2): 217-228
- 변화근, 전상린. 1997. 국내에 도입된 파랑볼우럭(*Lepomis macrochirus*)의 식성. 한국환경생물학회지. 15(2): 165-174.
- 수자원 연구소. 2000. 댐 저수지의 조류사진집. 아카데미서적.
- 안광국, 김재경, 이상재. 2008. 영양염류, 투명도 및 엽록소를 이용한 인공호의 영양상태, 경험적 모델 분석 및 변수들 간의 상호관계. 한국환경생물학회지. 26(3): 252-263
- 안광국, 신인철. 2005. 산간 계류성 하천의 계절적 수질변동에 대한 몬순강우의 영향. 한국육수학회지. 38: 389-394
- 안윤주, 공동수. 1995. 생이가래를 이용한 영양물질의 제거방안 연구. 대한환경공학회지 18:593-603.
- 이완옥, 노세윤. 2006. 특징으로 보는 한반도 민물고기. 지성사.
- 전상린. 1980. 한국산 담수어의 분포에 관하여. 중앙대박사학위논문. 서울.
- 정민민, 김형신, 노섬. 1999. 기수산 물벼룩 *Diaphanosoma celebensis*의 안정배양을 위한 배양 용기의 크기 선택. 한국수산과학회지, 32, 466-469.
- 정용. 1993. 한국담수조류도감. 아카데미서적.
- 최기철, 이원규. 1994. 우리가 정말 알아야 할 우리 민물고기 백 가지. 현암사
- 최성현, 임병진. 2003. 배양조건에 따른 물벼룩의 개체생산 특성. 한국하천호수학회지, 36, 208-214.
- 환경부. 2008. 수생태계 건강성 조사 및 평가. 환경부.
- 환경부. 2011. 수질오염공정시험기준. 환경부고시 제2011-103호
- Arndt, H. and Nixdorf, B. 1991. Spring clear-water phase in a eutrophic lake: control by herbivorous zooplankton enhanced by grazing on components of the microbial web. Verhandlungen der Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie 24, 879-883.
- Benndorf, J., Kneschke, H., Kossatz, K. and Penz, E. 1984. Manipulation of the pelagic food web by stocking with predacious fishes. Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie 69, 407-428.

- Alonso, C., Rocco, V., Barriga, P. and Battini, M.A.. 2004. Surface avoidance by freshwater zooplankton: field evidence on the role of ultraviolet radiation. *Limnology and Oceanography* 49, 225-232.
- An. K.G. 2000. Regulating bluegreen dominance in a reservoir influenced by Asian monsoon. *Hydrobioal.* 432: 37-48
- Basu, B.K. and Pick, F.R. 1996 Factors regulating phytoplankton and zooplankton biomass in temperate rivers. *Limnology and Oceanography* 41, 1572-1577.
- Benndorf, J., Kranich, J., Mehner, T. and Wagner, A. 2001. Temperature impact on the midsummer decline of *Daphnia galeata*: an analysis of long-term data from the biomanipulated Bautzen Reservoir(Germany). *Freshwater Biology*, 46, 199-211.
- Burns, C.W. 1969 Relation between filtering rate, temperature, and body size in four species of *Daphnia*. *Limnol. Oceanogr* 14: 693-700.
- Burks R.L., Jeppesen E. & Lodge D.M. 2001. Pelagic prey and benthic predators: the impact of odonates on *Daphnia*. *Journal of the North American Benthological Society*, 20, 615 - 628
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* 22: 361-369.
- Carlson, R.E. 1991. Expanding the trophic state concept to identify non-nutrient limited lakes and reservoirs. *Enhancing the States's Lake Management Programs.* pp. 59-71.
- Doi, H., Chang, K.H., Obayashi, Y. Yoshihara, M., Shime, M., Yamamoto, T., Nishibe, Y. and S. Nakano. 2008. Attached microalgae contribute to planktonic food webs in bays with fish and pearl oyster farms. *Marine Ecology Progress Series.* 353; 107-113.
- Etnier, C. and B. Guterstan. 1997. *Ecological Engineering for wastewater treatment*(2nd ed.). Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Fugimoto, N. and R. Sudo. 1997. Nutrient-limited growth of *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium tenue* and competition under various N : P supply ratios and temperatures. *Limnol. Oceanogr.* 42: 250-256.
- Gillooly, J.F. 2000. Effect of body size and temperature on generation time in zooplankton. *Journal of Plankton Research* 22, 241-251.

- Gophen, M., 1990. Biomanipulation: retrospective and future development. *Hydrobiologia*, 200/201:1-11.
- Grey, J. and R. I. Jones. 2001. Seasonal changes in the importance of the source of organic matter to the diet of zooplankton in Loch Ness, as indicated by stable isotope analysis. *Limnol. Oceanogr.* 46; 505-513.
- Havens, K.E. 2000. Using Trophic Index (TSI) values to draw inferences regarding phytoplankton limiting factors and seston composition from routine water quality monitoring data. *Korean J. Limnol.* 33(3): 187-196.
- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. *Limnology*. McGraw-Hill, inc., New York.
- Horppila, J. and Kairesalo, 1990. A Fading recovery: the role of roach in maintaining high phytoplankton productivity and biomass in Lake Vesijarvi, south Finland. *Hydrobiologia*, 200/201:153-165.
- 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. *Verh. Int. Cver. Limnol.* 14: 192-195.
- Jeong HJ, JS Kim, YD Yoo, ST Kim, TH Kim, MG Park, CH Lee, KA Seong, NS Kang, JH Shim. 2003. Feeding by the heterotrophic dinoflagellate *Oxyrrhis marina* on the red-tide raphidophyte *Heterosigma akashiwo*: a potential biological method to control red tides using mass-cultured grazers. *J Eukaryot Microb* 50: 274-282.
- Kadlec, R. and R.L. Knight. 1996. *Treatment wetlands*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Kalff, J. 2002. *Limnology*. Prentice Hall. New Jersey.
- Kratzer, C.R. and P.L. Brezonik. 1981. A Carlson-Type Trophic State Index for Nitrogen in Florida Lakes. *Water Resources Bulletin* 17: 713-715.
- Lampert, W. 1981. Inhibitory and toxic effects of blue-green algae on *Daphnia*. *Int. Revue ges. Hydrobiol. Hydrogr.* 66(3):285-298
- Lee, E.H., H.M. Kim, J.K. Lee, M.S. Byeon, and K.G. An. 2008. Fish Fauna and Guild Compositions in Geum River Watershed. *Korean J. Limnol.* 41(4): 490-498.

- McQueen, D.J. and Story, V.A. 1986. Impact of hypolimnetic aeration on zooplankton and phytoplankton populations. *Environmental technology letters*. 7:31-44
- Nelson, K. 1994. Long-term retention of memory for preverbal experience: Evidence and implications. *Memory*, 2, 467-475
- Nishiwaki-Matsushima R et al. 1992. Liver tumor promotion by the cyanobacterial cyclic peptide toxin microcystin LR. *Journal of cancer research and clinical oncology*, 118:420-424.
- Opuszynski, K. 1978. The influence of the silver crap (*Hypophthalmichthys molitrix* Val.) on eutrophication of the environment of crap ponds, Part VII Recapitulation. *Roczniki Nauk Rolniczych H*, 94, 2, 127-151
- Pagano, M. 2008. Feeding of tropical cladocerans (*Moina micrura*, *Diaphanosoma excisum*) and rotifer (*Brachionus calyciflorus*) on natural phytoplankton: effect of phytoplankton size - structure *J. Plank. Res.* 30, 401-414.
- Pinto-Coelho, R., Pinel-Alloul, B., Methot, G. and Havens, K.E. 2011. Crustacean zooplankton in lakes and reservoirs of temperate and tropical regions: variation with trophic status. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 62, 348-361.
- Polis and Strong, 1996. Food web Complexity and Community Dynamics. *The American Naturalist*, Vol. 147, No.5 (May, 1996), 813-846.
- Porter, K. G., Gerritsen, J. and Orcutt, Jr., J. D. 1982. The effect of food concentration on swimming patterns, feeding behavior, ingestion, assimilation, and reparation by *Daphnia*. *Limnol. Oceanogr.* 27; 935-949.
- Rigler, F.H., 1982. The relation between fisheries management and limnology. *Trans. am. Fish. Soc.*, III:121-132.
- Sapiro, J. 1978. The need for more biology in lake restoration, *Contr. N* 183 of the *Limnological Res. Centr*, University of Minnesota, Minneapolis, Mineography: 20pp.
- Shapiro, J. 1975. Biomanipulation : the Next phase - making it stable. *Hydrobiologia*, 200/201:13-27.
- Shapiro, J. and D.I. Wright, 1984. Lake restoration by biomanipulation :Round Lake, Minnestota, the first two years. *Freshwater. Biol.*, 14:371-383.

- Smith, V.H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science* 221: 669-671.
- Sommer, U., Sommer, F., Santer, B., Zollner, E., Jurgens, K., Jamieson, C., Boersma, M. and D. Gocke. 2006. *Daphnia* versus copepod impact on summer phytoplankton: functional compensation at both trophic levels. *Oecologia*, 135; 639-647.
- Starling, F and A. Rocha, 1990. Experimental study of the impacts of planktivorous fishes on the plankton community & eutrophication of a tropical Brazilian reservoir. *Hydrobiologia* 200/201:581-591.
- Straskraba, M. 1965. The effect of fish on the number of invertebrates in ponds and streams. *Mitt. int. Ver. Limnol.*, 20:794-801.
- Takamura N. 1988. Ecology of water bloom of blue-green algae, with special reference to *Microcystis*. *Jpn. J. Phycology*, 36: pp.65~79
- Theiss, J, L. Zielinski, and H. Lang, 1990. Biomanipulation by introduction of herbivorous zooplankton. A helpful shock for eutrophic lakes, *Hydrobiologia*, 200/201:59-68.
- Vander Zander, J.M. and J.B. Rasmussen. 2001. Variation in $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ trophic fractionation: implications for aquatic food web studies. *Limnology and Oceanography* 46; 2061-2066.
- Vollenweider, R.A. 1976. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.*, 33: 53-83.
- Watanabe, M. 1995. Isolation, cultivation and classification of bloom-forming *Microcystis* in Japan. *Toxic Microcystis*. pp. 13-34.
- Yoshioka, S., Yabuki, T., Sagiya, T., Tada, T., Matsu'ura, M., 1994. Interplate coupling in the Kanto district, central Japan, deduced from geodetic data inversion and its tectonic implications. *Tectonophysics* 229, 181 - 200.

분야별 공동연구 참여자 명단

구 분	목차	성 명	직 위	전공	경 력
주관연구기관 한국농어촌공사 농어촌연구원	연구지도 및 연구방향 제시	김미옥	수석연구원 (물환경팀장)	생물학	박 사 수 료
	1장 서론 2장 4절, 7절, 8절 3장 결론	남귀숙	주임연구원 (연구총괄)	미생물학	박 사
	2장 2절, 5절, 6절	이의행	연구원	생명과학	석 사
	2장 1절	김미리내	연구원	생명과학	석 사
	2장 2절	황영종	연구원	생명과학	석 사
	참고문헌	김병석	연구원	생명과학	학 사
공동연구기관 (경희대)	2장 3절 2장 6절	장광현	조교수 (환경학 및 환경공학과)	생태학	박 사
	2장 4절	박경진	학 생 (환경학 및 환경공학과)	환경공학	학사
	2장 5절	육현아	학 생 (환경학 및 환경공학과)	환경공학	학사
협동연구기관 (주)아섬	연구 총괄	권오병	대표이사	환경과학	박 사
	2장 4절	박선구	영업이사	환경공학	석 사
	2장 7절	김민규	연구소 부장	환경공학	석 사
	2장 8절	조인기	연구소 소장	환경공학	석 사

주 의

1. 이 보고서는 농림수산식품부로부터 연구비를 지원받아 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 수행한 연구보고서입니다.
2. 이 보고서의 내용은 연구원의 공식견해와 반드시 일치하는 것은 아닙니다.

■ 발 행 처

농업용수원의 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 개발(최종)	
발 행 일	2012. 12
발 행 인	정 해 창
발 행 처	한국농어촌공사 농어촌연구원
주 소	경기도 안산시 상록구 사동 해안로 391번지 전 화 031 - 400 - 1700 FAX 031 - 409 - 6055
■ 이 책의 내용을 무단 전재하거나 복사하면 법에 저촉됩니다. 단, 이 책의 출처를 명시하면 인용이 가능합니다.	