

발간등록번호

11-1541000-001319-01

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

# 농업용수원의 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 개발(Ⅱ)

Technical development for prevention of algal bloom  
using predators in the agricultural reservoir(Ⅱ)

2011. 12

농림수산식품자료실



0006185



**농림수산식품부**

Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries



**한국농어촌공사**

ISO 9001 / ISO 14001 인증

# 제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “농업용수원의 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 개발” 과제의 2차년도 보고서로 제출합니다.

2011 년 12 월 31 일

주관연구기관명 : 한국농어촌공사  
연구책임자 : 남귀숙 (총괄)  
연구원 : 송영희 (2장 5, 6절)  
          이의행 (2장 2, 7절)  
          김미리내 (1장)  
          김동환 (2장 1절)  
          유선아 (참고문헌)

공동연구기관 : 경희대학교  
연구책임자 : 장광현 (2장 3, 6절 총괄)  
연구원 : 손용익 (2장 1, 3절)  
          표세희 (2장 1, 6절)

협동연구기관 : (주) 아쌈  
연구책임자 : 권오병 (2장 4절 총괄)  
연구원 : 김민규 (2장 4절)  
          조인기 (2장 4절)



## 요 약 문

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

2. 연구기간 : 2011년 1월 ~ 2011년 12월(총 3년 중 2년차)

3. 연구의 배경 및 필요성

- 농업용저수지 및 담수호의 영양상태 증가에 따라 녹조발생이 빈발하고 있음에도 효율적인 녹조관리체계는 미흡한 상황임.
- 2010년 농업용수 수질측정망 보고서(농림수산식품부, 2010)에 나타난 농업용저수지 또는 담수호의 부영양화 상황을 보면 전체 연구대상 저수지 및 담수호(826개소)의 13.8%가 화학적산소요구량(COD) 기준 농업용수 수질기준인 IV등급을 초과하고 있으며, 초과 시설의 주요 오염원은 45.1%가 축산, 34.4%가 생활계로서 전체 오염원의 80%를 차지하고 있음.
- 시설수를 기준으로 농업용수 수질기준(IV등급, COD 8 mg/L이하)을 가장 많이 초과한 지역은 대구·경북(43개소)이며, 인천·경기, 대전·충남지역에서 각각 15개소가 수질기준을 초과하였음.
- 권역별 농업용수 수질기준(IV등급, COD 8 mg/L이하) 초과율은 낙동강권역(18.6%)에서 가장 높았고, 금강권역(16.1%), 한강권역(15.9%), 영산강권역(11.4%), 섬진강권역(5.5%) 등의 순으로 조사되어 낙동강권역의 대구, 경북지역에서 적극적인 녹조관리가 필요한 것으로 사료됨.
- Vollenweider(1976)의 총인과 총질소를 기준에 따라 분류한 부양화도는 2010년 현재 전체 시설 825 개소 중 부영양화단계에 접어들고 있는 중부영양호 이상의 저수지가 33.2%로 녹조발생에 취약한 이들 저수지에 대한 적극적인 녹조관리 기술 적용이 필요한 실정임.
- 기존에 녹조방지에 관한 유사연구가 많이 진행되었으나 뚜렷한 성공사례가 없으며, 지금도 중소기업체에서 개발한 각종 녹조방지 화학물질을 적용하고 있는 사례가 빈번하여 2차 오염 피해가 상당히 우려되는 상황임.

- 따라서 기연구된 녹조제어기술을 종합 분석하여 저수지 및 담수호의 녹조발생을 효과적으로 제어할 수 있으며, 생태적으로 안전한 생물학적 제어기술을 개발하고 범용화할 필요가 있음.
- 본 연구에서는 1차년도에 설치하여 운영한 천적생물 배양장치를 이용하여 녹조제어 효과와 적용범위를 분석하고, 추가시설 설치로 인한 규모 확대와 기능 향상을 통해 저수지 및 담수호에 직접 적용 가능한 생물학적 녹조 제어기술을 개발하고자 함.

#### 4. 주요연구내용

##### 4.1 전년도(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 동물플랑크톤 배양 효과 및 최적 운영조건 도출
  - 천적생물 시험살포를 통한 녹조제어 가능성 평가
- 녹조방지를 위한 천적생물 배양장치의 유지관리방안

##### 4.2 금년도(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 m<sup>3</sup> (10 m<sup>3</sup> × 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

## 5. 연구결과 요약

### 5.1 전년도(1차년도, 2010년) 결과

#### (1) 농업용저수지 및 담수호의 녹조발생현황 및 관리실태

- 2007년 ~ 2009년 3개년 동안의 농업용저수지 및 담수호 826개소의 수질 연구결과(총 1,840회), 10.4%에 달하는 192회의 연구에서 농업용수 수질기준인 35 mg/m<sup>3</sup>를 초과하고 있었으며, 조류대발생 기준인 100 mg/m<sup>3</sup>이상을 나타내는 경우도 15회(0.8%)로 농업용수원의 녹조발생 수준이 심각한 것으로 판단되었음.
- 농업용수원의 녹조관리는 녹조발생 시 이루어지는 적극적인 대응방안과 녹조를 사전에 방지하는 사전 대책방안으로 구분하였음.
- 농업용수원 유지관리부서에서 시행하는 녹조방제훈련은 전문지식 없이 무분별하게 이루어지고 있었으며, 녹조발생에 대한 정확한 이해와 전문가의 자문을 통한 방제훈련이 이루어질 수 있도록 녹조방제에 대한 지침 또는 안내서 마련이 시급한 상황으로 판단됨.
- 현재 수질오염이 심각한 저수지에 대해 수질개선 시범사업을 실시하고 있는 것은 결국 호소의 내부생산성을 억제하는 녹조관리의 한 방편이므로, 수질개선사업과 녹조관리는 분리해서 생각할 필요가 없다고 사료됨.

- 농업용수 수질개선사업은 그동안 인공습지와 같이 질소, 인 등의 영양염류를 직접 제거(상향조절)하는 방법과 녹조의 생장을 저해하는 수중 폭기장치, 물순환장치, 가압부상공법, 수초제거선 등과 같은 생산된 녹조를 회수하는 물리화학적 방법 등이 주로 적용되어 왔음.
- 그러나, 효과 지속성, 관리 용이성, 집중강우기를 가지는 계절적 특이성 등의 특성상 위 공법들의 적용한계가 크므로 호소의 생태적 특성과 실시간 연동하여 반응하는 생태공학적 기법으로서의 본 연구 기술이 녹조 및 수질관리를 위한 기술로 적용 가능함.

## (2) 연구대상지 선정

- 연구대상 후보지는 유동인구가 많고 오염이 심각한 경기, 충남지역의 농업용 저수지 중, 유기오염 및 부영양화가 심각하여 수체 내 식물플랑크톤의 농도가 높으며, 도로접근성 및 선박유무 등 편리성이 높은 대상지 위주로 선정하였음.
- 2007 ~ 2009년 농업용수 수질추정망 자료를 바탕으로 COD 및 엽록소-*a*(Chl-*a*)가 높은 경기도 및 충청남도에 위치한 유효저수량  $1,000 \times 10^3 \text{ m}^3$  내외의 10개 지구를 선정한 후 최근 1년간 Chl-*a* 변화특성과 현장 모니터링을 통해 최종적으로 충남 당진에 위치한 전대저수지를 연구대상지로 선정하였음.
- 유역면적 234 ha, 만수면적 15.58 ha, 수혜면적 105 ha, 제당높이 7.8 m(15.6 EL.m), 평균수심 3.77 m, 총저수량  $619 \times 10^3 \text{ m}^3$ (유효저수량:  $587 \times 10^3 \text{ m}^3$ )의 소규모 농업용저수지인 전대저수지는 2009년 Chl-*a*가  $138.4 \text{ mg/m}^3$ 로 충분히 높고, 저수지 내 낚시터가 존재하여 도로접근성 및 선박이용이 용이하고, 수심 및 형상 등 물리 구조적 측면에서도 최적의 대상지로 판단되었음.

## (3) 수질 모니터링 및 녹조발생 특성

- 연구대상지 선정 후, 강우기인 7 ~ 8월을 제외한 시기에 4개 지점을 대상으로 총 6회의 수질 모니터링을 실시한 결과, COD의 경우 JD1(유입부) ~ JD4(제방앞)의 평균이 18.1 ~ 19.1 mg/L로 지점별 차이는 거의 없었으나 오염물질이 유입되는 상류지역(JD1)이 제방앞 하류지

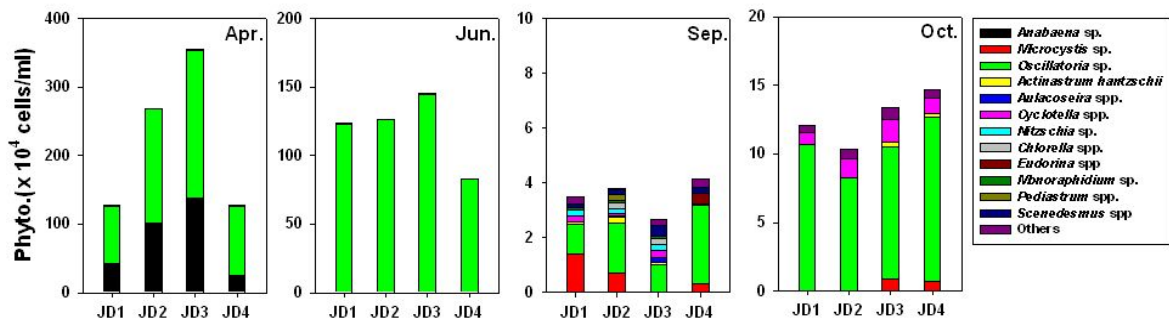
역(JD3)보다 다소 높게 나타났으며, 영양염류인 TN과 TP는 2.372 ~ 4.990 mg/L, 0.150 ~ 0.163 mg/L로 상류지역(JD1)이 높고 하류지역인 JD3지점에서 가장 낮게 나타나 상류유역이 오염원인으로 확인되었음.

- 녹조발생지표인 Chl-*a*는 95.5 ~ 107.6 mg/m<sup>3</sup>으로 영양염류농도가 가장 낮은 제방앞(JD3)지점에서 가장 낮게 나타났고, 유역으로부터 유입되는 축산오염원의 영향을 받아 영양염류의 농도가 높은 JD4 지점에서 가장 높게 나타났으나, 전 지점이 조류대발생 기준(100 mg/m<sup>3</sup>)을 초과하는 높은 수치를 보여주어 녹조방지 기술적용이 필요한 저수지로 사료되었음.
- 시기별 수질변화를 보면, COD는 4월에 18.4 ~ 28.8 mg/L로 가장 높게 나타나 봄철 내부생산 활동이 활발함을 알 수 있었으며, 총질소(TN)와 총인(TP)은 4월에 2.260 ~ 2.950, 0.051 ~ 0.086 mg/L로 다소 낮고, 강우기 이후인 9월에는 TN 2.661 ~ 3.172, TP 0.199 ~ 0.389 mg/L로 매우 높게 나타나 영양염류 유입원이 강우에 의한 비점오염원으로 추정되었음.
- 전대저수지의 부영양화 특성을 살펴보기 위해 분석한 부영양화지수(Carlson's Trophic State Index, TSI)는 TSI(TP), TSI(SD), TSI(Chl-*a*) 각각의 평균이 73.6, 76.8, 75.0으로 과영양상태로 확인되었으며, 부영양화지수 변이성(Trophic State index Deviation, TSID) 분석결과 전대저수지는 강우로 인한 광(光) 제한효과와 녹조발생시 인의 제한효과가 관찰된 과영양호소로 판단되었음.

(표 1) 전대저수지 표층의 식물플랑크톤 우점종

Site	April	June	October
JD1	<i>Oscillatoria</i> sp.(66.55%)	<i>Oscillatoria</i> sp.(99.21%)	<i>Oscillatoria</i> sp.(88.79%)
JD2	<i>Oscillatoria</i> sp.(61.67%)	<i>Oscillatoria</i> sp.(99.86%)	<i>Oscillatoria</i> sp.(79.89%)
JD3	<i>Oscillatoria</i> sp.(60.89%)	<i>Oscillatoria</i> sp.(99.67%)	<i>Oscillatoria</i> sp.(71.97%)
JD4	<i>Oscillatoria</i> sp.(79.58%)	<i>Oscillatoria</i> sp.(99.81%)	<i>Oscillatoria</i> sp.(81.43%)





<그림 1> 전대저수지 표층의 식물플랑크톤 분포

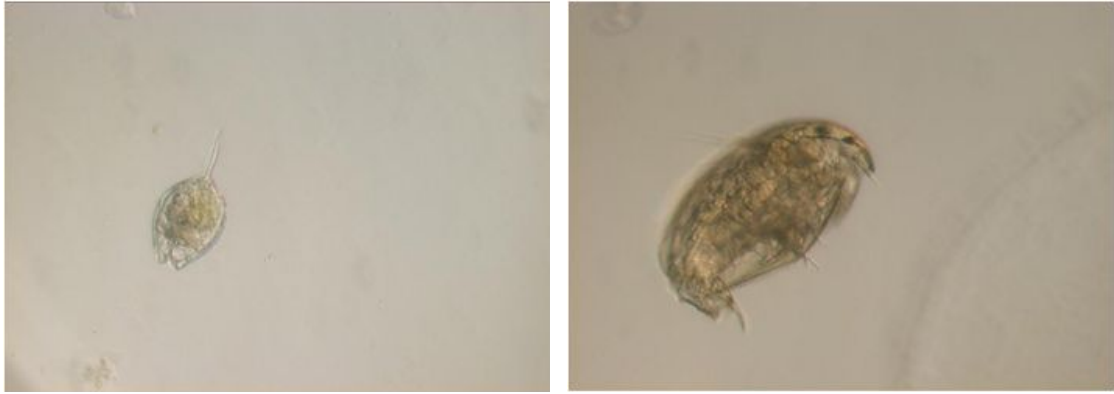
- Chl-*a*의 농도는 4월에 95.6 ~ 164.0 mg/m<sup>3</sup>, 6월에 125.6 ~ 160.4 mg/m<sup>3</sup>으로 조류대발생 수준을 능가하는 높은 수치를 보여주었으며, 강우기 직후인 9월에는 수층의 교란과 탁수의 발생으로 낮게 나타났으나 수체의 안정화가 이루어진 10월에 다시 91.2 ~ 155.2 mg/m<sup>3</sup>로 높게 나타나 강우현상이 없는 대부분의 시기에 녹조발생이 예상되는 심각한 부영양 수준을 보여주고 있었음.
- 전대저수지의 시기별 식물플랑크톤의 현존량과 종조성을 분석한 결과, Chl-*a*와 COD 농도가 높게 나타난 4월에 가장 높은 식물플랑크톤 현존량을 보였으며, 특히, JD 3지점에서  $3.5 \times 10^6$  cells/ml 로 가장 높은 분포특성을 보여주었음.
- 6월, 10월에도  $0.1 \sim 1.4 \times 10^6$  cells/ml로 조류대발생 기준인  $1.0 \times 10^6$  cells/ml에 근접하고 있어 녹조방제의 필요성을 보여주고 있음.
- 녹조원인 식물플랑크톤은 전시기, 전지점에서 사상성 남조류인 *Oscillatoria* sp.가 단일 우점종으로 나타나 본 연구 녹조방제 대상종으로 선정함.
- 또한, 녹조방제 목표는 농업용수 기준인 Chl-*a* 35 mg/m<sup>3</sup>으로 결정함.

#### (4) 천적생물 분포특성 및 분리배양, 종주확보

- 2010년 6월 ~ 10월까지 전대저수지에 분포하는 천적생물 주요 후보종으로 섬모충플랑크톤과 동물플랑크톤으로 구분하여 분석하였으며, 강우기인 7월, 8월을 제외한 6, 9, 10월에 모니터링을 시행하였음.
- 섬모충플랑크톤 현존량은 정점별로는 6월, 9월, 10월 각각 정점 1, 4, 2에서 각각 최대량을, 시기별로는 6월에 최대, 9월에 최소로 나타나

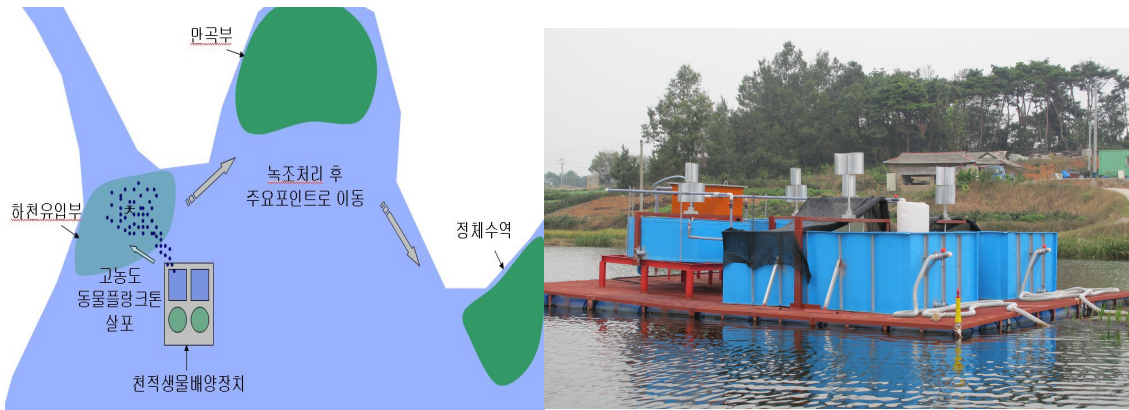
정점별보다 시기별 영향이 큰 것을 확인함.

- 섬모충플랑크톤의 군집구조는 Scuticociliate, Oligotrichida, Peritrichia, Choreotrichida가 전체 현존량의 85%를 차지하고 있었으며, 우점하는 섬모충플랑크톤은 *Halteria* spp., *Pelagostrombidium fallax*, *Urotricha* spp., *Epistylis procumbenz*, *Hastella radian*, Scuticociliate 으로, *P. fallax*는 10월에 급증하여 우점하는 특성을 보였음.
- 동물플랑크톤 현존량은 6월에 평균 최저량, 9월에 최대량을 보였으며, 동물플랑크톤 출현 종조성은 윤충류(Rotifera) 8속, 지각류(Cladocera) 2속, 요각류(Copepoda) 3속으로 전 정점에서 윤충류가 지각류와 요각류에 비해 높은 종 다양성과 개체밀도로 관찰되었고, 우점종은 *K. cochlearis*와 *Polyarthra* spp., *Trichocerca* spp. 등으로, 요각류 출현종수 및 개체수가 다른 개체군에 비해 현저히 낮았고 어린 유생(Nauplius)의 비율이 높게 관찰됨.
- 저수지에 분포하는 천적생물 중 최적의 포식효과를 보이는 천적생물을 분리한 결과, 천적생물 후보종으로 윤충류 *Euchlanis* sp.와 지각류 *Bosmina* sp. 2종을 확보하였으며, 이들은 저수지의 주요 녹조원인 식물플랑크톤인 *Microcystis aeruginosa*를  $1.0 \times 10^6$  cells/ml의 농도로 접종하였을 때 각각 98.9%, 98.4%의 높은 제거율을 보여주어 녹조방지를 위한 천적생물로서의 가능성을 보여주었음.
- 본 연구에서 분리된 천적생물 후보종 *Euchlanis* sp.는 남조류 대발생기에 다른 동물플랑크톤보다 높은 수준으로 개체군이 유지되고(이 등, 2005), *Chlorella* 등 소형 녹조류와 *Aphanizomenon* 등 사상형 남조류를 섭식할 수 있으며(Gulati et al., 1987), 본 연구에서는 *M. aeruginosa*에 섭식능이 높게 나타나 천적생물로서 유용할 것으로 판단됨.
- *Bosmina* sp.는 *Aulacoseira granulata*, *Stephanodiscus hantzschii*, *Cyclotella meneghiniana* *Asterionella formosa* 등 규조류를 선호하는 것으로 알려져 있으나(김 등, 2006) 본 연구에서 *M. aeruginosa*에 대해서도 섭식능이 높게 관찰되어 녹조제어에 매우 유용할 것으로 판단됨.

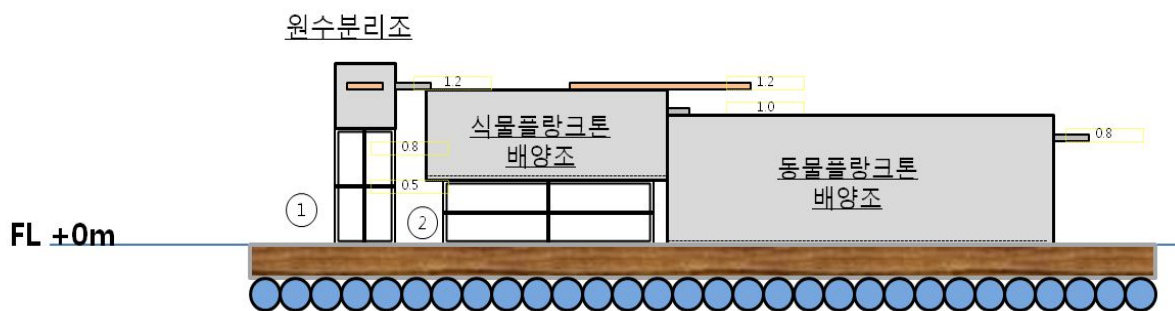


<그림 2> 분리된 천적생물 후보종(좌; *Euchlanis* sp., 우; *Bosmina* sp.)

(5) 천적생물 배양 소규모 장치 설치 및 배양효과 분석



<그림 3> 천적생물 배양장치 녹조처리 개요 및 배양시설 설치모습

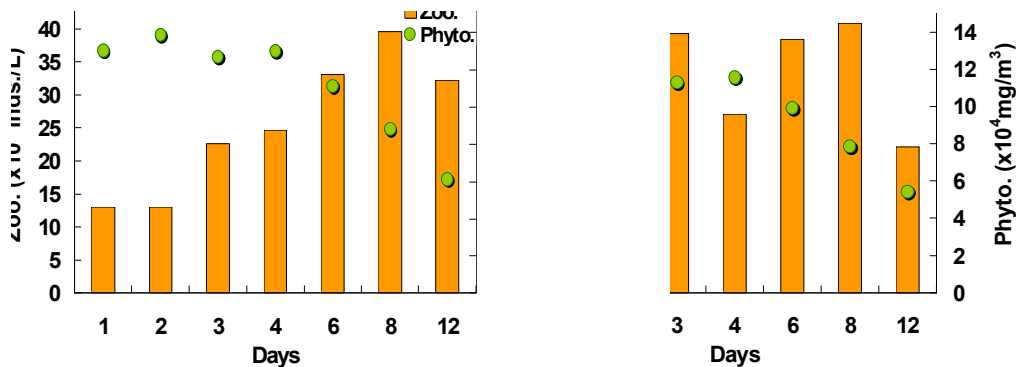


<그림 4> 천적생물 배양장치의 세부 구조

- 천적생물을 현장에서 대량 배양하기 위한 배양장치는 저수지내 녹조발생지역의 특성과 부지확보문제 및 현장살포 용이성 등을 고려하여 수면 부상형으로 제작하였음.

- 시설규모는 동물플랑크톤 배양조를 기준하여 5 m<sup>3</sup> × 2조, 총 10 m<sup>3</sup>으로 설치하였고, 체류시간으로 유입량을 결정하여 원수분리조와 식물플랑크톤(먹이공급) 배양조의 규모를 결정하였음.
- 기본 설계조건으로 동물플랑크톤 배양조 체류시간을 2.5일로 하였음.
- 원수분리조는 1차 25 μm 메쉬망과 두께 10 cm의 에코톤 식생매트를 적용하였고, 월류부에 75 μm의 메쉬망을 추가 설치하여 유입된 후 바로 월류 유출되는 잉여수 속의 동물플랑크톤 유실을 최소화하였음.
- 식물플랑크톤 배양조(먹이원)와 천적생물 배양조는 인공식물섬과 풍력교반장치를 도입하여 배양성능을 향상시켰음.
- 배양조건 실험(9 ~ 10월) 동안 평균기온은 13.8 ~ 22.8 °C, 수온 15.5 ~ 26 °C로 동물플랑크톤의 성장에 큰 영향이 없었음.
- 9월 강우이후 전대저수지의 Chl-*a*는 조류 대발생 수준인 100 mg/m<sup>3</sup>를 훨씬 초과하는 147 mg/m<sup>3</sup>를 보이기도 하여 녹조제거 효과를 분석하기에 적절한 조건을 제시해 주었고, 배양장치 내 TP와 TN의 농도변화는 유입수의 농도에 의존하였으나, 천적생물 배양동안 영양염류 결핍 현상이 없어 영양공급은 적절한 것으로 나타났음.
- 먹이생물(식물플랑크톤) 배양조의 체류시간별 배양효과는 식물플랑크톤의 특성상 체류시간이 3일이 가장 적절한 것으로 관찰되었으며, 동물플랑크톤 배양조는 체류시간 4일에서 천적생물 개체수가 774 ~ 1,194 inds./L로 비교적 안정적으로 유지되어 최적조건으로 판명됨.
- 천적생물의 배양에 필요한 먹이생물(식물플랑크톤)의 적절한 공급을 위해 먹이 공급 비율에 따른 배양효과 분석 결과, 먹이원 50%에 원수 50 %를 공급했을 때 비교적 안정적으로 유지되는 것으로 나타났으며, 먹이 공급이 클 경우(60%) 오히려 먹이생물 과잉공급에 따른 저해효과가 있는 것으로 관찰되었음.
- 원수분리조는 동·식물플랑크톤 모두에서 분리 및 배양이 유리한 것으로 나타난 25 μm 메쉬망 + 에코톤매트 미설치 조건이 플랑크톤 분리 시스템으로 적합하였으며, 인공식물섬의 적정 피복률은 80% 보다 40% 피복율에서 배양효과가 더욱 우수하였음.

- 대량 배양된 천적생물 10 m<sup>3</sup>을 일시 살포 후 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100 m 간격으로 12일 동안 거리별 동물플랑크톤의 현존량과 Chl-*a*의 평균값을 비교 했을 때 동물플랑크톤의 개체수는 살포일 이후 점차 증가하여 8일차에 최고치를 보여주었고, Chl-*a*는 살포 8일차까지 점차 감소한 것으로 나타나 대량 살포한 천적생물이 녹조원인생물의 제어에 효과적임을 확인하였음.
- 지점별로는 살포지점 5 m 지점에서 동물플랑크톤의 현존량은 살포 직후 598 inds./L에서 8일째 3,781 inds./L로 증가하였으며, 10 m 지점에서는 살포 직후 1,395 inds./L에서 8일째 3,496 inds./L로 증가하였으며, 이때 식물플랑크톤 현존량은 1일째  $1.3 \times 10^5$  cells/ml에서 4일째까지 거의 유지되다가 그 후 급속히 감소하여 실험 12일째  $0.6 \times 10^5$  cells/ml 까지 감소하였음.



<그림 5> 천적생물 대량 살포 후 시간에 따른 방향별(좌: 횡방향, 우: 종방향) 동·식물플랑크톤 현존량 변화 비교

- 천적생물 대량살포 후 Chl-*a*변화는 3일째까지 조금 증가하여 120.4 mg/m<sup>3</sup>의 조류대발생 수준을 보였지만 4일부터 8일까지 크게 감소하여 농업용수 수질기준(35 mg/m<sup>3</sup>)보다 낮은 32.4 mg/m<sup>3</sup>로 나타나 천적생물을 이용한 녹조방제에 효과적임을 보여주었음.
- 천적생물 대량살포 효과는 5 ~ 100 m 까지도 동물플랑크톤의 증가추세를 보여 10 m<sup>3</sup> 용량(10 m<sup>3</sup> 규모시설)의 대량배양액이 100 m 구간까지 효과적인 것으로 나타났음.
- 천적생물 배양장치의 유지관리 기본방향은 저수지에 따라 시기별로

운영방향이 달라지기 때문에 각 저수지의 특성을 잘 반영하여 수립하여야 하며 특히, 원수분리조 상태관리, 유량관리, 풍력교반장치와 먹이생물 공급비율 조정, 먹이생물질 관리, 식물 및 동물 플랑크톤 배양상태 관리, 살포장치 관리 등에 중점을 맞추어야 함.

- 천적생물 배양장치는 정기적, 비정기적 주요 체크사항과 제시되어 있는 관리항목을 항상 확인하여야 하며, 현장관리의 용이함과 신속대응을 위해 현장에 상주할 수 있는 현장관리인을 고용하여 실시간 연락관계를 유지하였음.

## 5.2 금년도(2차년도, 2011년) 결과

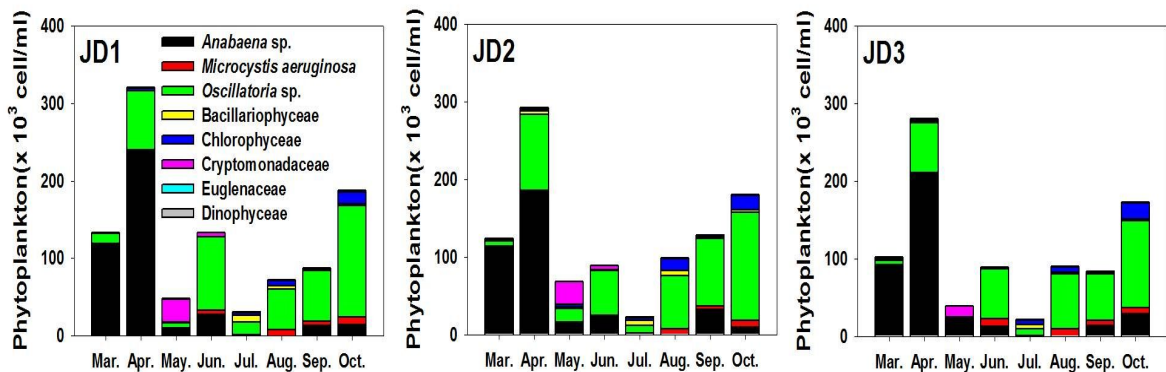
### (1) 전대저수지 녹조발생 특성 및 수환경 모니터링

- 연구대상지인 전대저수지의 녹조발생특성과 수환경 특성을 분석하기 위해 2011년 3월 24일 ~ 10월 12일까지 총 9회(월 1회)에 걸쳐 모니터링을 실시하였으며, 주요 항목은 수온, SD, 수심, DO, pH, EC, COD, SS, TN, TP, PO<sub>4</sub>-P, Chl-*a* 및 동·식물플랑크톤으로 시기별, 지점별로 분석하였음.
  - 연구기간중 기온 분포는 -9.0 ~ 27.9 °C(평균: 16.4 °C)로 3월에 영하의 낮은 기온을, 11월에는 평년 동일시기보다 높은 기온분포를 보였으며, 5월 ~ 9월 그리고 11월의 일부기간에 15 °C이상의 기온을 보이고 있어 녹조발생에 유리한 조건을 보였음.
  - 총 강수량은 1587.8 mm로 특히 6월(462.6 mm)과 7월(656.5 mm)에 집중하여 나타났으며, 7월 중순에 150.5 mm가 집중하였음
  - 수온변화는 7.5 ~ 27.6 °C(평균 20.7 °C)로 나타났으며, 지점별 차이보다는 계절적 변이가 크게 나타남.
  - COD는 연구기간 동안 7.8 ~ 19.6 mg/L(평균 15.7 mg/L)의 범위로 선행강우 149.5 mm를 보였던 7월에 7.8 ~ 9.6 mg/L(평균 8.7 mg/L)로 급감한 것을 제외하면 농업용수 수질기준(8 mg/L)을 초과하는 12 mg/L이상으로 높게 나타났으며, 지점별로는 유입부인 JD1(평균 16.3mg/L)에서 가장 높았고, 하류지점인 JD3(평균 15.0)으로 갈수록 감소하였음.
  - 전대저수지의 전반적 수질은 대부분 항목에서 농업용수 기준을 만족하

지 못하였으며, 특히, 영농활동이 활발한 5월과 강우가 집중된 7월에 영양염류가 증가하였고, 유입부의 농도가 높게 나타남에 따라 유역에서 유입되는 오염물질이 수질에 영향을 미치는 것으로 사료되었음.

- TSI(Chl-*a*)는 74.7 ~ 76.4(평균 75.6)로 과영양(Hyper- eutrophy, TSI > 70)상태를 나타내었고, 2010년보다도 다소 높게 나타났음.
- TSI(TP)는 79.3 ~ 80.2(평균 79.7)로 TP가 감소한 10월을 제외한 전시기에 과영양(Hyper- eutrophy)상태로 나타났으며, 2010년(평균 73.6)에 비해서도 높게 나타났고, TSI(Chl-*a*), TSI(SD) 보다 높게 나타나 부영양화지수가 더욱 증가할 잠재성을 보여주고 있음.
- Chl-*a*는 51.1 ~ 181.1 mg/m<sup>3</sup>(평균 104.2 mg/m<sup>3</sup>)로 전시기에 농업용수 수질기준(Chl-*a* < 35 mg/m<sup>3</sup>)을 초과하였으며, 3월과 7월을 제외한 대부분의 시기에 평균 100 mg/m<sup>3</sup>을 초과하는 조류대발생 수준을 보여주고 있음. 지점별로는 JD1 74.3 ~ 181.1 mg/m<sup>3</sup>(평균 113.1 mg/m<sup>3</sup>), JD2 57.0 ~ 146.9 mg/m<sup>3</sup>(평균 104.6 mg/m<sup>3</sup>), JD3 51.1 ~ 142.7 mg/m<sup>3</sup>(평균 95.1 mg/m<sup>3</sup>)로 유입부인 JD1에서 녹조발생이 심각하였음.

○ 연구기간동안 식물플랑크톤 현존량은 지점평균 109.7 ~ 126.6 × 10<sup>3</sup> cells/ml(전평균 120.6 × 10<sup>3</sup> cells/ml)로 유입부인 JD1에서 높게 나타났으며, 시기별로는 4월(유입부(JD1): 320.6 × 10<sup>3</sup> cells/ml, 중류(JD2): 292.2 × 10<sup>3</sup> cells/ml, 제방앞(JD3): 280.0 × 10<sup>3</sup> cells/ml)에 가장 높은 현존량을 보였고 집중강우가 발생한 7월에 가장 낮은 현존량을 보였음.



<그림 6> 지점별 시기별 식물플랑크톤 현존량 및 종조성

- 봄철(3 ~ 4월)에는 남조류인 *Anabaena* sp.가 우점하였으며, 5월에는 갈색편모조류인 *Cryptomonas* spp.가 유입부(JD1)와 중류(JD2)에서 우점하

였고, 6월부터 10월까지 *Oscillatoria* sp.가 우점하여 남조류인 *Anabaena* sp.와 *Oscillatoria* sp.에 의한 녹조발생에 대해 적절한 제어방안의 수립이 필요함.

- 전대저수지에 서식하고 있는 동물플랑크톤 종조성 분석결과, 연중 풍부하게 출현하는 동물플랑크톤 대부분이 식물플랑크톤 및 박테리아를 섭식하는 윤충류로 나타나 녹조제어에는 그 효과가 미미하였으며, 연구기간 동안 녹조제어 능력을 가진 대형 지각류의 경우 *Moina* 속이 확인되었으나 출현시기가 봄철(5월)로 한정되었고, 출현밀도도 10 inds./L로 매우 낮아 동물플랑크톤에 의한 자연적인 녹조제어는 불가능한 것으로 판단됨.

## (2) 천적생물 분리, 배양기술 개발

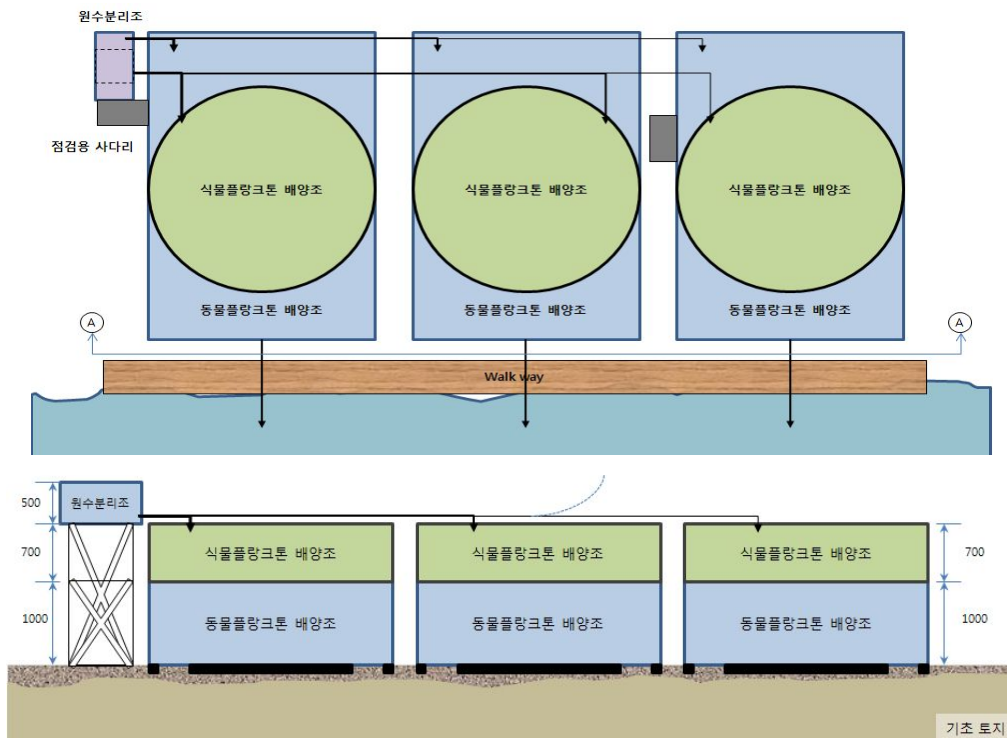
- 농업용저수지에서 녹조제어를 위해 포식성 천적생물로서 유용한 동물플랑크톤 종주를 분리하고, 실내 및 현장에서 대량 배양 가능한 최적 배양조건을 검토하였음.
- 전대저수지에는 녹조제어에 효과적인 천적생물이 자연서식하지 않는 것으로 확인되었으며, 일반적으로 호수 및 저수지에서 생태계에 미치는 영향이 적고 식물플랑크톤 섭식효과가 뛰어난 천적생물로서 *Daphnia* spp.를 종주로 분리하였음.
- 천적생물 종주의 증식특성과 식물플랑크톤 섭식효과를 비교분석한 결과, *D. pulex*와 *D. similoides*가 다양한 조건에서 빠른 개체군 증가를 보이고, 식물플랑크톤 섭식 능력이 뛰어난 것으로 나타났으며, 특히, *D. similoides*는 여름철 고수온 조건에서도 높은 적응능력을 보여 천적생물로 적합한 것으로 판단됨.
- 전대저수지 물을 이용하여 천적생물에 의한 녹조제어 실내 실험 결과, 천적생물 *Daphnia*를 이용할 경우 개체당 Chl-*a*의 최대 저감 효과는 조류 대발생 초기 단계인 50 mg/m<sup>3</sup>에서 *D. pulex*가 0.16 mg/m<sup>3</sup>, *D. similoides*가 0.68 mg/m<sup>3</sup>에 이르고, 조류대발생 시 Chl-*a*(200 mg/m<sup>3</sup>)에서 *D. pulex*가 0.74 mg/m<sup>3</sup>, *D. similoides*가 3.17 mg/m<sup>3</sup>로 나타나, 녹조 발생 상황에서 높은 제어 능력을 가지고 있는 것으로 확인됨.



- 저수지의 녹조발생시 천적생물 배양장치에 천적생물 초기 접종액을 공급하기 위한 *Daphnia* 고밀도배양은 50 ~ 75 L의 수조에서 적정량의 먹이공급과 함께 주기적인 물 교환을 병행하여 실시하였으며, 실내 고밀도 대량배양 시스템을 확립하였음.

### (3) 천적생물 현장배양장치의 추가설치 및 시설운영

- 녹조제어를 위한 천적생물 배양장치는 전대저수지의 녹조발생 특성과 천적생물 분포특성, 현장살포 적용성 등을 고려하여 1차년도에 천적생물 배양조 기준 10 m<sup>3</sup> 규모의 수상형 장치를 제작, 설치하였으며, 전년도 운영결과를 바탕으로 일부장치의 기능개선을 수행하였음.
  - 천적생물 배양조 유출부 보강 : 연속배양으로 일정량씩 배출되는 배양조 유출부에 75 μm의 플랑크톤네트를 설치하여 대형 동물플랑크톤의 유출을 방지함으로써 유용한 천적생물 집적효과 상승
  - 원수분리조 보강 : 스테인레스 재질의 플랑크톤 분리막을 P.E 로 교체하여 내구성 증가시킴
  - 산소공급장치 개선 : 천적생물 배양조 하부에 송풍기와 산기장치를 설치하여 산소공급과 동시에 균질한 교반효과 유도
- 전년도 수상형 배양장치의 운영결과를 바탕으로 결정한 천적생물 배양장치의 최적 운영조건인 먹이생물(식물플랑크톤) 배양조 체류시간 3일, 천적생물(동물플랑크톤) 배양조 체류시간 4일, 먹이생물 공급비율 50% 의 조건에서 2011년 4월부터 11월까지 배양장치를 운영하였음.
- 또한, 전대저수지 수변 홍만수면 부지를 활용하여 천적생물 배양조 기준 30 m<sup>3</sup> 규모의 육상형 장치를 8 ~ 9월 중 설치하여 10 ~ 11월 동안 운영하였음.
- 추가 설치한 육상형 배양장치는 10 m<sup>3</sup> 규모(동물플랑크톤 배양조 기준)의 배양조를 3계열 설치하고 각각 독립적으로 운영되도록 구성함.
  - 원수분리조는 유입 원수에 포함된 식물플랑크톤과 동물플랑크톤을 분리하여 각 배양조로 공급할 수 있는 구조로 제작 설치함.
  - 식물플랑크톤 배양조는 태양광이 잘 조사되도록 상부를 오픈하고 낮은 수심을 유지하여 식물플랑크톤이 잘 성장할 수 있도록 제작 설치함.



<그림 7> 설치 평면도 및 정면도



<그림 8> 육상형 배양장치(30m³) 시설 전경

- 동물플랑크톤 배양조는 식물플랑크톤 배양조로부터 먹이원을 공급받아 동물플랑크톤 개체수를 증식시키고 살포대상지역으로 일시 또는 연속적으로 살포할 수 있는 구조로 제작 설치함.
  - 상부는 식물플랑크톤 배양조, 하부는 동물플랑크톤 배양조로 복층 구조 형태로 제작하여 소요 부지를 최소화하였음.
  - 밸브류는 모두 게이트 밸브를 사용하여 유입 유량의 미량 조절이 용이하도록 하고, 원수분리조와 동물플랑크톤 배양조의 메쉬망은 P.E 재질을 적용하여 찢어지는 현상 방지함.
  - 동물플랑크톤 배양조 유출부에 75  $\mu\text{m}$  메쉬망을 설치하였으며 쉽게 탈부착이 가능하도록 하였음
  - 원수는 24hr 연속적으로 유입되며 각각 배양조의 교반기는 콘트롤 패널에 설치된 타이머로 작동할 수 있도록 하였음.
- 녹조발생수역에 천적생물을 방류했을 때 어류 포식 등의 위험에서 천적생물을 보호하고 녹조제어 능력을 향상시키기 위한 방안으로 저수지 내에서 천적생물의 2차 증폭 배양이 가능하고, 어류 포식으로부터 보호받을 수 있는 cage를 적용하였음.
- 배양장치에서 배양된 천적생물을 cage로 방류하게 되면 수역의 녹조생물을 포식하면서 2차 증식을 하게 되고, cage 내부에는 천적생물의 포식자인 어류가 들어올 수 없어 어류로부터 안전한 공간확보가 가능함.



<그림 9> 천적생물 cage 설치 운영모습

- cage 규모는 500  $\mu\text{m}$  메쉬망으로 둘러싸인 72m<sup>3</sup> (6 m × 6 m × 1m × 2조)이며, 사각 철제 프레임에 천재질의 메쉬망으로 둘러 싼 형태임.
- Cage 구조는 천적생물 배양장치에서 방류된 천적생물을 수역 내에서 추가 배양한 후 수역으로 다시 살포할 수 있도록 일부구간이 개폐 가능하도록 제작하였음.

#### (4) 천적생물 현장배양장치 배양성능 및 현장살포 효과분석

- 전년도에 설치한 수상형(10 m<sup>3</sup>) 배양장치에서 전대저수지의 현장수에 포함된 천적생물을 자연분리하여 봄철(4월 13일 ~ 5월 17일)과 가을철(11월 4일 ~ 11월 11일) 두 차례에 걸쳐 대량배양 성능 실험을 실시하였음.
- 봄철(4 ~ 5월)에 이루어진 자연분리 천적생물 대량배양에 필요한 수질환경조건을 분석한 결과는 다음과 같음
  - 수온(W.temp.)은 12.1 ~ 23.2 °C(평균 15.6 °C)로 계절변화에 따라 점차 증가하였으며, 각 단계의 평균 TN은 유입수 3.054 mg/L, 식물플랑크톤 배양조 2.705 mg/L, 동물플랑크톤 배양조 2.858 mg/L로 비교적 높은 수준을 유지하였고, TP 역시 유입수 0.271 mg/L, 식물플랑크톤 배양조 0.183 mg/L, 동물플랑크톤 배양조 0.178 mg/L로 높은 농도를 보여 동물 및 식물플랑크톤배양에 필요한 충분한 영양염이 포함되어 있어 온도장애 또는 영양염 고갈에 의한 성장 제한현상은 나타나지 않았음.
  - 봄철(4 ~ 5월) 천적생물 배양장치에서 대량 배양된 동물플랑크톤은 윤충류 64.5%, 노플리우스 27.2%, 요각류 8%, 일부 지각류 등의 비율로 출현하였으며, 윤충류와 지각류는 천적생물 배양조에서 오히려 50 ~ 60% 감소하였고, 요각류와 노플리우스는 천적생물 배양조에서 각각 186%, 224%로 크게 증가하였음.
- 가을철(11월), 자연분리 천적생물 대량배양성능 실험은 기설치된 수상형(10 m<sup>3</sup>)과 신규설치한 육상형(30 m<sup>3</sup>) 장치에서 동시에 이루어졌음.
  - 배양기간 동안 수온은 수상형 배양장치의 경우 16.3 ~ 16.7 °C의 범위로 유입수(Infow)에서 식물플랑크톤 배양조, 동물플랑크톤 배양조로 이동하면서 점차 감소하였으며, 육상형 배양장치의 경우 역시 16.3 ~ 16.7 °C의 범위로 식물플랑크톤 배양조 > 유입수 > 동물플랑크톤 배양

- 조 순으로 나타났고, 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 양상을 보였으나 전반적으로 15 °C 이상의 수온을 보여 동물 및 식물플랑크톤 배양에 저수온으로 인한 생육저해는 나타나지 않았음.
- 대량배양이 이루어지는 동안 수상형 장치의 각 단계 평균 TN은 유입수 1.940 mg/L, 식물플랑크톤 배양조 1.823 mg/L, 동물플랑크톤 배양조 2.011 mg/L로 나타났으며, 육상형 장치에서는 유입수 2.276 mg/L, 식물플랑크톤 배양조 1.863 mg/L, 동물플랑크톤 배양조 2.044 mg/L로 영양염 고갈 현상이 관찰되지 않았음.
  - 대량배양이 이루어지는 동안 수상형 장치의 각 단계 평균 TP는 유입수 0.163 mg/L, 식물플랑크톤 배양조 0.158 mg/L, 동물플랑크톤 배양조 0.168 mg/L로 나타났으며, 육상형 장치에서는 유입수 0.189 mg/L, 식물플랑크톤 배양조 0.169 mg/L, 동물플랑크톤 배양조 0.180 mg/L로 TN과 마찬가지로 영양염 고갈이 관찰되지 않았음.
  - 가을철(11월) 동물플랑크톤 배양조에서의 천적생물 대량배양 성능을 유입수 비교한 결과 수상형의 10m<sup>3</sup> 배양조에서는 동물플랑크톤 개체수가 유입수보다 평균 152%, 육상형의 30 m<sup>3</sup> 배양조에서는 134% 증가하였음.
  - 동물플랑크톤 분류군별로는 윤충류는 수상형의 10 m<sup>3</sup> 배양조에서는 160%, 육상형의 30 m<sup>3</sup> 배양조에서 118% 증가하였고, 지각류는 10 m<sup>3</sup> 배양조 83%, 30 m<sup>3</sup> 배양조 180%로 증가하였으며 요각류는 10 m<sup>3</sup> 배양조 193%, 30 m<sup>3</sup> 배양조에서 414%로 크게 증가하였음.
  - 동물플랑크톤 배양조에서 대량배양된 동물플랑크톤 중 천적생물로서 기능을 가진 지각류와 요각류의 증가율이 수상형의 10 m<sup>3</sup> 배양조보다 육상형의 30 m<sup>3</sup> 배양조에서 훨씬 높아 배양용량이 큰 30 m<sup>3</sup> 배양조의 천적생물 대량배양성능이 우수한 것으로 판단됨.
- 실내 고밀도 배양에 성공한 천적생물 종주 *D. similoides* 의 천적생물 배양장치에서의 대량배양성능을 분석한 결과 실내에서 고밀도 배양한 *D. similoides*를 천적생물 배양장치의 천적생물 배양조에 초기접종한 후 2주 이내에 고밀도로 증식하는 것을 확인하였음.
- 천적생물 배양조내의 *Daphnia* 개체군 밀도를 분석한 결과, 배양조에서 증식한 천적생물 *D. similoides*의 최고 밀도는 L당 800 개체 이상인 것

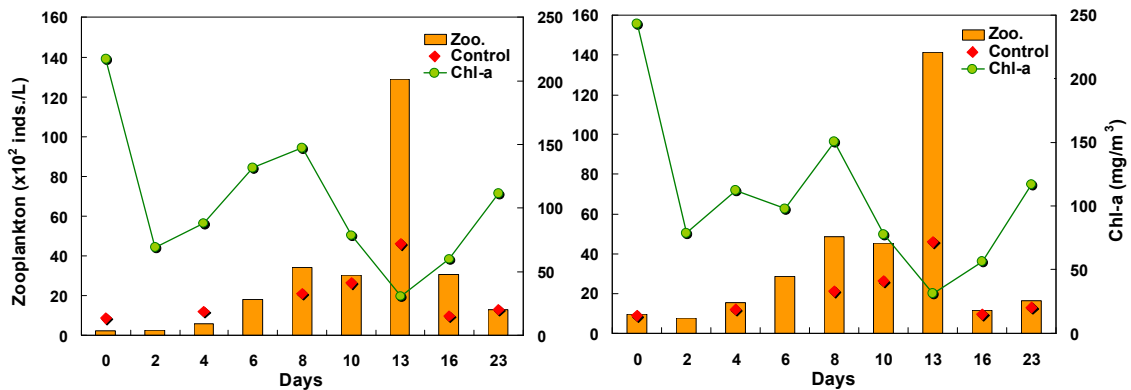
으로 나타났으며, 대량 배양하여 방류 가능한 *D. similoides*의 양은 m<sup>3</sup>당 약 16만 개체정도로 추정됨.

#### (5) 천적생물 현장살포 효과분석

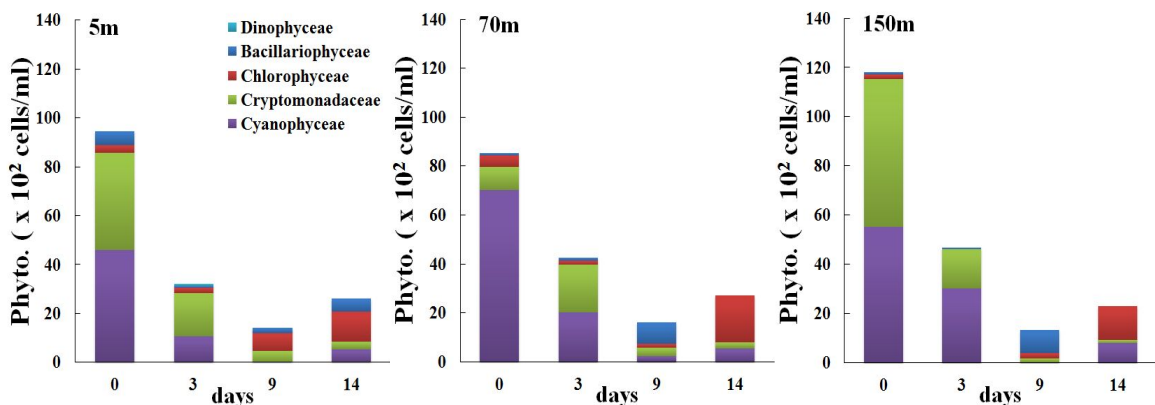
- 자연분리 및 천적생물 종주를 천적생물 배양장치에서 각각 대량배양한 후 일시에 녹조발생 수역으로 살포하여 시간별 공간별 녹조제어 효과를 분석하여 녹조제어범위와 제어성능을 제시하고자 하였음.
- 봄철(5월) 수역에 분포하는 천적생물을 자연분리 및 대량 배양하여 천적생물을 현장에 일시 살포(5월 17일)하여 이후 23일간 거리별 살포효과를 추적조사 하였음.
  - 살포효과분석기간 동안 COD는 평균 16.9 mg/L로 살포지점(D1)은 살포당시 27.2 mg/L의 높은 값에서 이후 18 mg/L 미만으로 감소하였으며, 대조구인 저수지중앙(JD2)은 평균 16.1 mg/L로 살포효과분석기간 동안 큰 변화가 없었음.
  - 살포효과분석기간 동안 TN은 D1 평균 3.161 mg/L, JD2 평균 3.091 mg/L로 살포 초기 JD2가 증가하는 시기에 D1에서 감소한 것을 제외하면 유사한 경향을 보였고, TP는 D1 평균 0.291 mg/L, JD2 평균 0.267 mg/L로 살포초기 TN과 같이 D1에서 감소 경향을 보여 살포초기 천적생물 살포의 영향이 반영되었음을 추정할 수 있음.
  - 자연분리 천적생물의 일시살포 후 거리별, 시간별 분포 특성을 보면, 살포 이후 양방향에서 지속적으로 개체수가 증가하여 C(횡단면방향)에서 살포 전 956 inds./L가 13일째 14,114 inds./L로 급증하였고, D(제방방향)에서는 살포 전 250 inds./L에서 13일째 12,890 inds./L로 천적생물 살포에 따라 녹조발생 수역의 동물플랑크톤 현존량이 크게 증가하였음.
  - Chl-*a*는 살포직전 C라인(횡단면방향) 243 mg/m<sup>3</sup>, D라인(제방방향) 217 mg/m<sup>3</sup>이었으나 살포후 시간이 경과하면서 C, D 양방향모두 지속적으로 감소하여 13일째 C라인에서는 87% 감소한 31.2 mg/m<sup>3</sup>으로, D라인에서는 85.7% 감소한 31.0 mg/m<sup>3</sup>로 농업용수 기준 35 mg/m<sup>3</sup>보다 낮은 최저수준을 보여 조류대발생 기준(100 mg/m<sup>3</sup>)보다 2배이상의 심각한 녹조발생 수준에서 농업용수 수환경기준 만족 수준까지 녹조가 제어되었음.
  - 천적생물 살포에 따라 거리별 식물플랑크톤의 현존량 변화는 살포지점

으로부터의 멀어질수록 증가하여 거리에 따라 녹조제어효과 감소를 관찰하였으며, 또한 시간이 경과함에 따라서도 제어효과가 감소하여 적정 규모에서 주기적 살포가 필요한 것으로 사료됨.

- 살포 후 녹조원인 생물인 식물플랑크톤의 종조성 변화를 보면 살포 전과 살포 후 3일까지는 남조류와 갈색편모조류가 크게 우점한 반면 천적생물의 제어효과에 의해 남조류와 편모조류의 현존량과 비율이 급감하는 것을 관찰할 수 있었으며, 살포 9일 이후에는 녹조발생원인 생물인 유해 남조류는 제거되고 녹조류가 우점하였음.
- 결론적으로 천적생물을 이용하여 저수지의 주요 녹조발생원인 생물인 남조류가 효과적으로 제어되는 것으로 사료됨.



<그림 10> 자연분리 천적생물 대량 살포로 인한 D라인과 C라인의 동물플랑크톤 개체수 및 Chl-a 농도의 일변화



<그림 11> 자연분리 천적생물 살포 이후 식물플랑크톤 종조성 변화

- 천적생물 종주 *D. similoides*를 천적생물 배양장치에서 대량배양한 후 봄철(6월), 가을철(10월) 2차례에 걸쳐 녹조발생 수역에 대량살포하여 자연

- 분리 천적생물과의 효과 비교는 물론 녹조제어 성능을 제시하고자 하였음.
- 봄철(6월) *D. similoides*를 대상으로 대량살포를 실시한 후 11일간 시간별 공간별 녹조제어효과를 분석한 결과는 다음과 같음.
    - 살포기간 동안 수온은 평균 26.4 °C로 실험에 용이하였으나, 강수량은 살포 후 4일차부터 총 263 mm가 집중하여 효과분석 저해 요소로 작용함.
    - COD는 살포전 살포지점(D0)에서 20.0 mg/L, 대조구인 저수지중류(JD2)에서 17.2 mg/L로 D0에서 높게 나타났으며 이후 다소 감소하는 경향을 보였음.
    - 살포기간동안 평균 TN은 D0 2.413 mg/L, JD2 2.236 mg/L로 살포 이후 강우의 영향으로 점차 증가하였으며, TP는 D0 0.251 mg/L, JD2 0.220 mg/L로 TN과 같이 강우의 영향으로 다소 증가하였음.
    - 대량배양되어 살포된 천적생물 중 *Daphnia*는 약 2백만 개체 이상으로 추정되지만 24시간 후에는 살포구간에 관찰되었으나 그 이후에는 관찰되지 않아 비교적 짧은 기간(수 일 이내) 녹조제어 작용을 수행하거나 강우의 영향을 크게 받은 것으로 사료되었음.
    - 천적생물 살포 후 거리별 경과일수에 따른 식물플랑크톤 현존량을 Chl-*a*로 살펴본 결과 시간이 경과함에 따라 Chl-*a* 농도는 점차 감소하였으며, D line의 경우 2일차에는 30 m, 4일차에는 70 m, 11일차에는 100 m에서 최소 값을 보이는 등 강우가 시작되기 전 다소의 녹조제어 효과가 관찰되었음.
  - 가을철(10월) 천적생물 종주인 *D. similoides*에 대한 2차 대량살포는 수상형의 10 m<sup>3</sup> 배양장치와 육상형의 30 m<sup>3</sup> 배양장치에서 동시에 시행한 후 14일 동안 수상형 배양장치 살포지점 D0, 육상형 배양장치 살포지점 E0, 그리고 대조구로써 저수지 중앙의 JD2지점에서 살포효과를 분석하였으며 그 결과는 다음과 같음.
    - 살포효과 분석기간 동안 강수량은 총 3.1 mm로 효과분석에 영향을 미치지 않았으며, 수온은 평균 16.4 °C로서, 지점별 차이는 1 °C 내외, 시기별로는 3 °C 내외의 차이를 보여 수온에 의한 영향도 없었음.
    - 살포효과 분석기간 동안 COD는 대조구인 호중양(JD2) 평균 16.7 mg/L, 10m<sup>3</sup> 살포구간(D0) 평균 17.5 mg/L, 30 m<sup>3</sup> 살포구간(E0) 평균 17.8 mg/L로서, 살포 후 1일차에 전 지점에서 증가한 후 14일차까지 감소하는 경향



- 을 보였으며, 지점별 차이는 크지 않아 저수지 전반적 양상으로 판단됨.
- 살포효과 분석기간 동안 평균 TN은 JD2 2.109 mg/L, D0 2.236 mg/L, E0 2.204 mg/L로 살포 전 JD2 1.683 mg/L, D0 2.118 mg/L E0 2.043 mg/L보다 전 지점 증가하였음.
  - TP는 살포효과 분석기간 동안 JD2 평균 0.177 mg/L, D0 및 E0 평균 0.184 mg/L로서, 살포당시 JD2 0.135 mg/L, D0 0.155 mg/L, E0 0.149 mg/L)보다 증가하여 나타남
  - 천적생물살포 후 거리별로 경과일수에 따른 식물플랑크톤 현존량을 Chl-*a* 로 살펴본 결과 시간 경과에 따라 Chl-*a* 농도는 점차 감소하였음
  - 대량 살포된 천적생물의 생체량은  $167 \times 10^3$  inds./m<sup>3</sup>에서 최고  $835 \times 10^3$  inds./m<sup>3</sup>인 것으로 나타났으며, 배양수조 개선과 배양조건 개선을 통해 살포 생체량을 높일 수 있을 것으로 예상됨.
  - 10m<sup>3</sup> 살포구간인 D line(제방방향)의 경우 대조구와 일 평균 Chl-*a* 값을 비교한 결과 2일차에는 30 m, 4일차에는 70 m 11일차에는 100m에서 최소 값을 보였으며, 살포구역(D)보다 초기값이 낮았던 대조구였음에도 불구하고 4일차 이후에는 살포구역에서 더 낮은 Chl-*a* 값을 유지하여 천적생물 살포에 따른 녹조제어 효과를 보여줌.
  - 수직채집하여 분석한 *Daphnia* 개체들은 현장에서 개체수가 낮은 것으로 나타났고, 기타 대형 지각류도 그 개체수가 매우 낮았음. 서식처에 존재하는 우점 소형윤충류 및 대형윤충류를 포함한 동물플랑크톤은 지점별 또는 시간별로 큰 개체군 밀도차를 보였으나, 천적생물 살포에 의한 뚜렷한 영향은 나타나지 않았음.
- 천적생물 배양장치에서 대량 배양된 자연분리 및 종주분리 천적생물 살포시, 자연분리된 천적생물의 살포는 살포 주변지역의 천적생물의 밀도를 높이며 식물플랑크톤 생체량을 저감시키는 것으로 나타났으며, 대량배양을 통해 살포된 종주분리 천적생물(*Daphnia*)은 살포 후 수체의 체류시간은 24시간으로 비교적 짧은 것으로 나타남.
- 천적생물 *Daphnia*의 체류시간을 연장시키고, 수체 내 녹조제어를 효과적으로 유도하기 위해서는 살포량 증가(고밀도 배양), 살포시기 및 방법(반복 살포), *Daphnia* 섭식 어류 시,공간 분포 조절 등이 병행되어

야 할 것으로 분석됨.

(6) 천적생물 배양장치의 적용범위 및 규모 산정, 녹조제어 성능 평가

- 자연분리 천적생물의 현장 적용범위와 규모산정을 위해서는 배양장치 내 최적 살포조건을 확립하는 것이 우선 필요하며, 대량배양실험에서 도출된 값을 기준으로 정리해보면 자연분리 천적생물의 경우 배양기간은 5일, 10 m<sup>3</sup> 배양조 기준에서 개체수는 2 × 10<sup>3</sup> inds./L, 최적배양 개체수는 10<sup>7</sup>이 적절하다고 사료됨.

(표 2) 자연분리 천적생물의 최적 살포조건

투입종	배양기간	L 당 개체수 (10 m <sup>3</sup> 배양조 기준)	최적배양개체수 (10 m <sup>3</sup> 배양조 기준)
자연분리 천적생물	5일 배양	2 × 10 <sup>3</sup>	1 × 10 <sup>7</sup>

- 녹조발생 농도에 따라 천적생물 살포량은 각각 달라지는데, 녹조발생 시 Chl-*a* 수치가 100 mg/m<sup>3</sup> 일 때 24.8 × 10<sup>6</sup>을 투입해야만 제어목표인 25 mg/m<sup>3</sup> 에 도달 할 수 있으며, 이 수치는 최적 배양 개체수 기준으로 25 m<sup>3</sup>의 배양규모가 필요함.
- 종주분리 천적생물인 *Daphnia*의 식물플랑크톤 생체량 제거 속도와 필요 천적생물량을 산출해보니 중형 *Daphnia*인 *Daphnia pulex*는 100 m<sup>3</sup> 대상 최적살포량이 1.0 × 10<sup>7</sup>이었으며, 대형 *Daphnia*인 *D. similoides*는 100 m<sup>3</sup> 대상 최적살포량이 2.0 × 10<sup>6</sup>을 투입하면 48시간 내에 제거되었음.
- 천적생물 배양장치에서 최적배양 농도인 5 × 10<sup>6</sup>을 녹조발생구역에 투입했을 시 살포 1일차 100 m까지 평균 녹조 제거율이 61.3%였고, 살포 3일차에는 평균 제거율이 61.8%였으며, 5일차에는 18.7%로 제거율이 급격히 감소하였으며, 이 결과를 바탕으로 녹조 발생시 3일 주기로 천적생물의 최적 생물량을 투입하는 것이 녹조를 제어를 하는데 적절하다고 사료됨.

## 6. 기대효과 및 실용화 방안

### 6.1 기대효과

#### 가. 기술적 측면

- 농업용수원의 녹조방제를 통해 호소의 COD 감소 등 수질개선 효과에 크게 기여하게 됨.
- 농업용수원의 수질개선사업과 연계하여 생태공학적 기술로 적용 가능함.
- 농업용수원의 생태 건강성을 저해하지 않고 오히려 어족자원을 풍부하게 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 작성 및 보급)
- 저수지 및 담수호의 수질관리 정책에 반영

# SUMMARY

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

2. Research Period : January, 2011 ~ December, 2011

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

- Monitoring of JD1(upper region) ~ JD3(downstream) were executed for total 9 times from March until October, water temperature differs greatly from seasonal variation than regional variation compare to JD ~ JD3(range: 7.5 ~ 27.6 °C).
- Chemical Oxygen Demand(COD) appears to high concentration in JD1(average: 16.3 mg/L) compare to JD ~ JD3(range: 7.8 ~ 20.4 mg /L, average: 8.8 mg/L).

- For observes the eutrophication quality of the Jundae reservoir, in result which analyzes eutrophication quotient(Carlson's Trophic State Index and TSI(Chl-*a*), TSI(SD), TSI(TP) average were 75.6, 73.8 and 79.7. The result which analyzes eutrophication quotient variability(Trophic State index Deviation and TSI(SD), confirmed Hyper-eutrophy reservoir.
- Chl-*a* appears to high concentration in JD1(average: 95.1 mg/m<sup>3</sup>, compare to JD1 ~ JD3(range: 51.1 ~ 181.1 mg/m<sup>3</sup>). All the region, Chl-*a* over algae bloom standard(100 mg/m<sup>3</sup>).
- In the survey area, the range of phytoplankton standing crops were 109.7 ~ 126.6 × 10<sup>3</sup> cells/ml(average 120.6 × 10<sup>3</sup> cells/ml). Dominant species were *Oscillatoria* sp. in Spring, *Cryptomonas* spp. in May, and *Oscillatoria* sp. from Summer until Autumn.
- The most dominant zooplankton was rotifer during study period at the all stations. Rotifers fed on bacteria and some microalgae, so have little effect on algae blooms removal. In Jundae reservoirs found *Moina* in May which cladoceran have an effect algae blooms removal, but under 10 individuals .
- Three *Daphnia* species were cultured as grazing controller for algal biomass, and *D. pulex* and *D. similoides* were selected as main predators due to their high resistance for various environmental conditions in the fields and superior grazing abilities.
- In the laboratory experiments, *D. pulex* and *D. similoides* were able to reduce algal biomass mainly including cyanobacteria with maximum algal biomass removal efficiencies of 0.74 mg/m<sup>3</sup> for *D. pulex* and 3.17 mg/m<sup>3</sup> for *D. similoides* under high initial algal biomass(200 mg/m<sup>3</sup>).
- The efficient culture methods for *Daphnia* species in the laboratory was established for sustainable supply of high *Daphnia* biomass for outdoor culture system in the reservoir.

- Mass cultured system establishes on the ground with 30 m<sup>3</sup>(10 m<sup>3</sup> × 3 sets), and composed of organism filtering aquatank, phytoplankton cultured aquatank and zooplankton cultured aquatank.
- Respects the stable operation and a conditional experiment of algae predators cultured system executed a test run under basic establishment condition. The test run condition was HRT 4 days, advanced in continuous cultivation format. The outflow net size of zooplankton aquatank was 75 μm.
- Mass culture of natural predators was executed in 10 m<sup>3</sup> floating cultivation from 13 April until 17 May. The water temperature of aquatank was about 15.6 °C(range: 12.1 ~ 23.2 °C). The water temperature distribution of cultured aquatank was not greatly different.
- Total nitrogen(TN) appears average 16.3mg/L in inflow, average 2.705 mg/L in phytoplankton aquatank and average 2.858 mg/L in zooplankton aquatank. Total phosphorus(TP) appears average 0.271 mg/L in inflow, average 0.183 mg/L in phytoplankton aquatank and average 0.178 mg/L in zooplankton aquatank.
- The 64.5% of rotifers, 24.2% of nauplius, 8% of copepods and some cladocerans were founded during study period in the aquatank. Abundances of aquatank's rotifers(56%) and cladoceran(60%) decrease than inflow', and abundances of aquatank's copepods(189%) and nauplius(224%) increase than inflow'.
- Mass culture of natural predators was executed in 10 m<sup>3</sup> floating cultivation and 30 m<sup>3</sup> land cultivation from 4 November until 11 November. The water temperature of 10 m<sup>3</sup> floating cultivation was average 16.7 °C in inflow, average 16.6 °C in phytoplankton aquatank and average 16.3 °C in zooplankton aquatank. The water

temperature of 30 m<sup>3</sup> tank cultivation was average 16.5 °C in inflow, average 16.7 °C in phytoplankton aquatank and average 16.3 °C in zooplankton aquatank. The water temperature distribution of each cultured aquatank was not greatly different.

- Abundances of zooplankton increase 152% than inflow in 10 m<sup>3</sup> floating cultivation and abundances of zooplankton increase 134% than inflow in 30 m<sup>3</sup> land cultivation. Abundances of aquatank's rotifers(160%), cladoceran(83%) and copepods(193%) increase than inflow' in 10 m<sup>3</sup> floating cultivation. Abundances of aquatank's rotifers(118%), cladoceran(180%) and copepods(414%) increase than inflow' in 30 m<sup>3</sup> land cultivation.
- After massive scattering for 23 days, observed the natural separation predators in 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 110, 120, 130, 140, and 150 m intervals. Comparing to average zooplankton abundance and Chl-*a* each distance. Zooplankton abundance of after scattering to increase gradually, highest level to seem in eighth day. After scattering, Chl-*a* was on the decrease gradually. Therefore, scattering predators was effective in removal of algae blooms.
- After massive scattering for 14 days, observed *Daphnia* in same intervals. Comparing to average zooplankton abundance and Chl-*a* each distance. Scattering *Daphnia* was ineffective in removal of algae blooms. Because abundances of *Daphnia* was insufficient, which mass culture wasn't accomplished in autumn.
- In the outdoor culture system that was designed for algal biomass control in the reservoir, the system supported high biomass of *Daphnia* and possible release amount to the reservoir through mass culture was estimated as 167,000 individuals per m<sup>3</sup> as minimum to 835,000 individuals per m<sup>3</sup> as maximum.

- After release of naturally collected predators and laboratory-cultured predator to the reservoir, it was found that predator release induced high density of predators near the releasing point and lowered the algal biomass temporarily.
- The duration of predators presence in the reservoir was within 48 hours for laboratory-cultured predator, *Daphnia* and developments of culture system and releasing method are necessary for enhance the algal removal by released predators in the reservoir.
- It is more appropriate HRT 5 days in predators cultured system. The optimum standard appears 1,000 individuals per liter and  $5 \times 10^6$  individuals in 5 m<sup>3</sup> aquatank. It's different predators scattering according as algae bloom level. When Chl-*a* exceeds 100 mg/m<sup>3</sup>, scattering  $24.8 \times 10^6$  individuals which reach to 25 mg/m<sup>3</sup>. For mass culture optimum individuals, it need to 25 m<sup>3</sup> culture system
- Scattering  $1.0 \times 10^7$  individuals of *Daphnia pulex* and  $2.0 \times 10^6$  of *D. similoides*, removed within 24 hour in algae blooms area(100 m<sup>3</sup>)
- Scattering  $5 \times 10^6$  individuals, removal rate of algae blooms is 61.3% at first day, 61.8% at second day and 18.7% at third day. Because removal rate was decreased dramatically after third day, it is appropriate to scattering optimal biomass of predators at third period..

## 5. 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

<b>제1장 서론</b> .....	<b>1</b>
제1절 연구배경 및 필요성 .....	3
제2절 연구목적 및 추진체계 .....	4
1. 연구목적 .....	4
2. 추진전략 및 추진체계 .....	5
제3절 연구사 .....	6
1. 동물플랑크톤 및 기타 후생동물에 의한 녹조 제어 .....	11
2. 관련기술의 국내외 연구동향 .....	12
3. 국내 농업용저수지를 대상으로 한 연구 동향 .....	13
4. 천적을 이용한 제어 기술 연구 현황 .....	17
제4절 녹조 원인생물과 천적생물 .....	19
1. 녹조현상과 녹조 원인생물 .....	19
2. 녹조 방지(부영양화) 대책 .....	21
3. 천적생물(동물플랑크톤)의 개념 .....	25
<b>제2장 본론</b> .....	<b>29</b>
제1절 연구내용 및 방법 .....	31
1. 전대저수지 녹조발생 특성 및 수환경 모니터링 .....	31
2. 천적생물 종주 분리 및 종주의 최적 배양기술 개발 .....	35
3. 천적생물 배양장치의 대량배양 성능 .....	37
4. 천적생물 현장살포 효과분석 .....	39
5. 천적생물 배양장치의 적용범위 및 규모 산정, 녹조제어 성능 평가 .....	41
제2절 전대저수지 녹조발생 특성 및 수환경 모니터링 .....	42
1. 기상현황 .....	42
2. 수질현황 .....	43

3. 부영양화 및 녹조발생현황 .....	46
4. 천적생물 분포현황 .....	49
제3절 천적생물 종주 분리 및 종주의 최적 배양기술 개발 .....	54
1. 녹조 원인종에 대한 포식능이 우수한 천적생물 종주분리 .....	54
2. 천적생물 종주 배양(100 L) 및 종주의 대량 배양 최적조건 .....	62
3. 천적생물의 먹이망 내 위치와 섭식효과 및 제한요인 .....	66
4. 천적생물 종주의 최적 배양조건 .....	69
제4절 천적생물 배양장치 설치 및 시설운영, 유지관리 .....	70
1. 천적생물 배양장치 설치 및 시설운영 .....	70
2. 유지관리방안 .....	81
제5절 천적생물 배양장치 배양성능 .....	86
1. 자연분리 천적생물 배양성능 .....	86
2. <i>Daphnia</i> 천적생물 배양성능 .....	94
제6절 천적생물 대량 살포 효과분석 .....	99
1. 자연분리 천적생물 대량살포 효과분석 .....	99
2. <i>Daphnia</i> 천적생물 대량살포 효과분석 .....	108
제7절 천적생물 배양장치의 적용범위 및 규모 산정, 녹조제어 성능 평가 .....	125
1. 천적생물 배양장치의 적용범위 및 규모 산정 .....	125
2. 천적생물 배양장치의 녹조제어 성능 평가 .....	127
<b>제3장 결론 .....</b>	<b>129</b>
제1절 전대저수지 녹조발생 특성 및 수환경 모니터링 .....	131
제2절 천적생물 종주 분리 및 최적 배양기술 개발 .....	132
제3절 천적생물 배양장치 설치 및 시설 운영, 유지관리 .....	133
제4절 천적생물 배양장치 대량배양 성능 .....	134
제5절 천적생물 현장살포 효과분석 .....	135
제6절 천적생물 배양장치의 적용범위 및 규모 산정, 녹조제어 성능 평가 .....	138

연구개발목표 달성도 및 대외 기여도 .....	139
연구개발결과의 활용계획 .....	141
참고문헌 .....	143
분야별 공동연구 참여자 명단 .....	149
부록 .....	151



# 표 목 차

(표 1.1) 국내 관련 선행연구의 사례 .....	16
(표 1.2) 녹조발생 원인 생물과 특징 .....	20
(표 1.3) 유독 남조류와 그 독소 .....	21
(표 2.1) 모니터링 시기 및 환경조건 .....	31
(표 2.2) 수질분석 항목 및 방법 .....	33
(표 2.3) 천적생물 배양장치 운영조건 .....	37
(표 2.4) 천적생물 살포효과 실험개요 .....	39
(표 2.5) 지점별 식물플랑크톤 우점종 특성 .....	49
(표 2.6) 전대저수지 주요 출현 동물플랑크톤 종조성과 섭식성향 및 출현빈도 .....	50
(표 2.7) 천적생물 후보종의 섭식효과 평가를 위한 섭식 대상생물과 초기 생체량 .....	58
(표 2.8) 실내 및 현장 대량배양 최적 조건 .....	69
(표 2.9) 천적생물 배양장치 규모 .....	70
(표 2.10) 배양장치 운영조건 .....	74
(표 2.11) 수상형 배양장치 운영 .....	75
(표 2.12) 원수분리조의 제원 .....	78
(표 2.13) 식물플랑크톤 배양조의 제원 .....	78
(표 2.14) 동물플랑크톤 배양조의 제원 .....	78
(표 2.15) 육상형 배양장치 운영 .....	80
(표 2.16) 천적생물 배양시설 유지관리 점검사항 .....	82
(표 2.17) 천적생물 배양장치 현장시설 점검표 .....	84
(표 2.18) 천적생물 배양장치 현장시설 일일 근무 일지 .....	85

(표 2.19) 천적생물 배양장치에서 배양가능한 <i>Daphnia</i> 및 자연 천적 생물 개체수 .....	95
(표 2.20) 자연분리 천적생물 최적 살포조건 .....	125
(표 2.21) 식물플랑크톤 농도(Chl- <i>a</i> )별 천적생물 투입량 및 배양규모 .....	126
(표 2.22) 천적생물에 의한 식물플랑크톤 생체량 제거(반감) 속도와 필요 천적생물 량 .....	126
(표 2.23) 살포효과에 따른 녹조(Chl- <i>a</i> ) 제거율 .....	127

# 그림목차

<그림 1.1> 연차별 연구목표 .....	4
<그림 1.2> 연차별 연구 추진 체계 .....	5
<그림 1.3> 수중생태계의 영양구조와 생물관리의 구분 .....	7
<그림 1.4> 천적생물 현장 대량 살포시험 결과 .....	17
<그림 1.5> 선행 연구에서 개발한 천적생물 배양장치 .....	17
<그림 1.6> 건강한 생태계와 부영양화 생태계의 플랑크톤 먹이망 ...	26
<그림 1.7> 천적생물과 호소내 생태계 먹이망에서 천적생물의 위치, 역할 ...	26
<그림 2.1> 모니터링 지점 .....	32
<그림 2.2> 전대저수지의 수심 및 저수율 변화 .....	32
<그림 2.3> 천적생물 후보종( <i>Daphnia</i> 속)의 형태와 크기 비교 .....	35
<그림 2.4> <i>Daphnia pulex</i> 및 <i>Daphnia similoides</i> 1차 배양 실험 .....	36
<그림 2.5> 수상형 배양장치(10 m <sup>3</sup> ) 조사 지점도 .....	38
<그림 2.6> 육상형 천적생물 배양장치(30 m <sup>3</sup> ) 조사 지점도 .....	38
<그림 2.7> 부수형 천적생물 배양장치 살포 지점 .....	40
<그림 2.8> <i>Daphnia</i> 대량 살포 지점 .....	40
<그림 2.9> 전대저수지의 기상조건 .....	42
<그림 2.10> 전대저수지의 지점별·시기별 수질변화 .....	45
<그림 2.11> 전대저수지의 부영양화지수(TSI) 분석 .....	46
<그림 2.12> 지점별 SD 및 Chl- <i>a</i> 변화 .....	48
<그림 2.13> 지점별 시기별 식물플랑크톤 현존량 및 종조성 .....	48
<그림 2.14> 전대 저수지의 동물플랑크톤 군집의 개체군 밀도 계절변화 ...	50
<그림 2.15> 저수지에 출현하는 동물플랑크톤 .....	51
<그림 2.16> 전대저수지 동물플랑크톤 분포특성 .....	52



<그림 2.17> JD1, JD2, JD3에서의 동물플랑크톤 개체군의 연 변화 ...	53
<그림 2.18> 천적생물 후보종의 적정먹이농도에서의 성장곡선 및 포란수 비교 .....	55
<그림 2.19> 후보 천적생물( <i>Daphnia</i> ) 2종의 먹이농도에 따른 성장 비교 ..	55
<그림 2.20> 후보 천적생물( <i>Daphnia</i> ) 2종의 온도에 따른 성장곡선 ....	56
<그림 2.21> <i>D. pulex</i> 와 <i>D. similoides</i> 의 온도별 암컷개체 포란수 .....	57
<그림 2.22> 천적생물 후보종의 섭식효과 실험에 사용된 식물플랑크톤 종 ...	58
<그림 2.23> 남조류 <i>Microcystis</i> 와 <i>Oscillatoria</i> 에 의한 녹조대발생 시 저수지 물을 이용한 <i>D. pulex</i> 와 <i>D. similoides</i> 의 녹조제어 효과 .....	59
<그림 2.24> <i>Oscillatoria</i> 에 대한 <i>D. pulex</i> 와 <i>D. similoides</i> 의 녹조제어효과 ...	60
<그림 2.25> 남조류 <i>Oscillatoria</i> 와 와편모조류 <i>Certium</i> 공동 우점 현장 원수에 대한 <i>D. similoides</i> 의 녹조제어 능력 평가 .....	61
<그림 2.26> <i>Daphnia pulex</i> 와 <i>Daphnia similoides</i> 의 남조류 저감 능력 ....	61
<그림 2.27> 실내 대량배양수조의 구조와 배양 조건 .....	62
<그림 2.28> 실내 대량배양수조에서의 <i>D. similoides</i> 의 개체군 밀도 변화 ...	64
<그림 2.29> 천적생물 배양장치에서 <i>D. similoides</i> 의 개체군 밀도 증가 경향 .....	65
<그림 2.30> <i>D. similoides</i> 배양조와 자연분리 천적생물 배양조의 먹이망 구조 .....	68
<그림 2.31> 탄소 및 질소 안정동위원소비를 이용한 <i>Daphnia</i> 의 먹이망 내 위치 .....	68
<그림 2.32> 수상형 배양장치(10m <sup>3</sup> ) 평면도 .....	70
<그림 2.33> 육상형 천적생물 배양장치(30 m <sup>3</sup> ) 평면도 .....	71
<그림 2.34> 실용신안 등록된 콤팩트형 구상도 .....	71
<그림 2.35> 천적생물 배양조 유출부 개선 .....	72
<그림 2.36> 원수분리조 스크린 개선 .....	73
<그림 2.37> 산소 공급 개선 .....	73

<그림 2.38> 천적생물 배양장치 운영 모습 .....	74
<그림 2.39> 육상형 장치 설치 후보지 .....	76
<그림 2.40> 육상형 배양장치 측면도, 평면도, 정면도 .....	77
<그림 2.41> 육상형 천적생물 배양장치 설치 모습 .....	79
<그림 2.42> 천적생물 cage 설치 운영모습 .....	79
<그림 2.43> 봄철 자연분리 천적생물 대량배양에 따른 수상형 배양장 치의 수질변화 .....	86
<그림 2.44> 천적생물 배양장치 내의 동물플랑크톤 현존량 변화 .....	88
<그림 2.45> 가을철 자연분리 천적생물 대량배양에 따른 현장배양장치 수질변화 .....	91
<그림 2.46> 자연분리형 천적생물 대량배양효과 .....	93
<그림 2.47> 전대저수지 호중앙, 배양장치 유입수, <i>Daphnia</i> 배양수조 및 자연분리 천적생물 배양수조에서 기초 수질 비교 ..	95
<그림 2.48> 천적생물 배양장치의 천적생물 배양조, 유입수와 호 중앙의 동물플랑크톤 종조성과 개체군 밀도 비교 .....	96
<그림 2.49> 부유형 대량배양 수조(좌, 우) 에서의 투입 <i>Daphnia</i> 및 자연 천적생물과 기타 우점 동물플랑크톤 개체군 밀도의 계절 변화 .....	97
<그림 2.50> 자연분리형 천적생물 현장살포에 따른 수질변화 .....	99
<그림 2.51> 살포로 인한 소형윤충류의 지점별 개체수밀도 변화 .....	102
<그림 2.52> 살포로 인한 대형 윤충류와 소형 지각류의 지점별 개체수 밀도 변화 .....	102
<그림 2.53> 대량 살포로 인한 제방방향(D라인)과 횡단면방향(C라인) 의 일별 동물플랑크톤 개체수 변화 .....	104
<그림 2.54> 대량 살포로 인한 제방방향(D라인)의 거리별 동물플랑크톤 개체수 변화 .....	106
<그림 2.55> 살포 이후 식물플랑크톤 종조성 변화 .....	107

<그림 2.56> <i>Daphnia</i> 천적생물 현장살포에 따른 수질변화(1차 살포) ...	110
<그림 2.57> 천적생물 종주 살포 후 자생 지각류와 살포된 천적생물의 공간분포 .....	111
<그림 2.58> 천적생물 종주 살포 후 서식처에 서식하는 소형 및 중, 대형 윤충류의 시, 공간분포 .....	112
<그림 2.59> 살포 후 식물플랑크톤 현존량 변화 .....	113
<그림 2.60> <i>Daphnia</i> 천적생물 현장살포에 따른 수질변화(2차 살포) ...	115
<그림 2.61> 천적생물 10 m <sup>3</sup> 살포(D라인)와 30 m <sup>3</sup> 살포(F라인)의 일별 동물플랑크톤 개체수 변화 .....	117
<그림 2.62> 10 m <sup>3</sup> 살포로 인한 거리별 동물플랑크톤 개체수 및 Chl- <i>a</i> 변화 .....	119
<그림 2.63> 30 m <sup>3</sup> 살포로 인한 거리별 동물플랑크톤 개체수 및 Chl- <i>a</i> 변화 .....	119
<그림 2.64> 10월 살포실험 기간 중의 식물플랑크톤 생체량의 시, 공간 분포 변화 양상 .....	120
<그림 2.65> 10월 살포실험 기간 중의 동물플랑크톤 밀도와 식물플랑 크톤 생체량과의 상관관계 .....	121
<그림 2.66> <i>Daphnia</i> 천적생물 살포 이후 식물플랑크톤 종조성 변화 ...	122
<그림 2.67> 천적생물 보호 및 유지 cage 개요 .....	123
<그림 2.68> 천적생물 cage 효과 .....	124

# 제 1 장

## 서 론

제1절 연구배경 및 필요성

제2절 연구목적 및 추진체계

제3절 연구사

제4절 녹조 원인생물과 천적생물



# 제1장 서론

## 제1절 연구배경 및 필요성

농업용저수지 및 담수호의 영양상태 증가에 따라 녹조발생 피해가 빈발하고 있음에도 효율적인 녹조관리체계는 미흡한 수준에 이르고 있다.

2010년 농업용수 수질측정망 보고서(농림수산식품부, 2010)에 나타난 농업용저수지 또는 담수호의 부영양화 상황을 보면 전체 연구대상 저수지 및 담수호(826개소)의 13.8%가 COD 기준 농업용수 수질기준인 IV등급을 초과하고 있으며, 초과 시설의 주요 오염원은 45.1%가 축산, 34.4%가 생활계로서 전체 80%를 차지하고 있다. 시설수를 기준으로 농업용수 수질기준(IV등급, COD 8 mg/L 초과)을 가장 많이 초과한 지역은 대구·경북(43개소)이며, 그 외 인천·경기, 대전·충남이 각각 15개소가 수질기준을 초과하였다. 또한, 권역별 농업용수 수질기준(IV등급, COD 8 mg/L 초과) 초과율은 낙동강권역(18.6%)에서 가장 높게 나타났으며, 그 외 금강권역(16.1%), 한강권역(15.9%), 영산강권역(11.4%), 섬진강권역(5.5%) 등의 순으로 조사되어 낙동강권역의 대구, 경북지역의 적극적인 녹조관리가 필요한 것으로 사료되었다.

Vollenweider(1976)의 총인과 총질소를 기준에 따라 분류한 부양화도는 2010년 현재 전체 시설 825 개소 중 부영양화단계에 접어들고 있는 중부영양호 이상의 저수지가 33.2%로 녹조발생에 취약한 이들 저수지에 대한 적극적인 녹조관리 기술 개발이 필요한 실정이다.

기존에 유사연구가 많이 진행되었으나 뚜렷한 성공사례가 없으며, 지금도 중소기업체에서 개발한 각종 녹조방지 화학물질을 적용하고 있는 사례가 빈번하여 2차 오염 피해가 상당히 우려되는 상황이다.

따라서 기연구된 녹조제어기술을 종합 분석하여 저수지 및 담수호의 녹조발생을 효과적으로 제어할 수 있으며, 생태적으로 안전한 생물학적 제어기술을 개발하고 범용화 할 필요가 있다. 본 연구에서는 1차년도에 설치하여 운영한 천적생물 배양장치를 이용하여 녹조제어 효과와 적용범위를 분석하며 그 규모를 확대하고, 기능을 향상 시켜 저수지 및 담수호의 녹조방지를 위한 생물학적 제어기술로 개발하고자 하였다.

## 제2절 연구목적 및 추진체계

### 1. 연구목적

본 연구는 3년간의 계획으로 진행될 예정이며 올해는 2차년도에 해당된다. 연구의 최종목표는 농업용수원의 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 개발이다. 연구목표의 성격은 「기술개발/공중개발」이며, 연차별 세부목표는 그림 1.1과 같다.



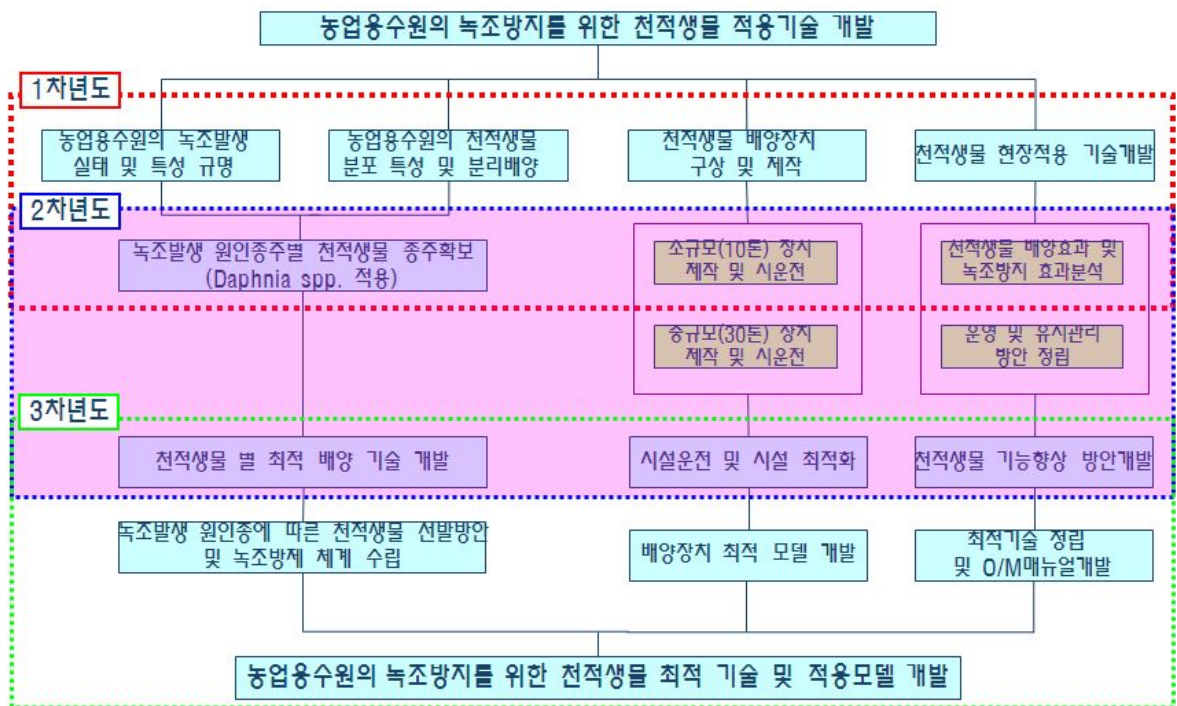
<그림 1.1> 연차별 연구목표

## 2. 추진전략 및 추진체계

연구의 추진은 장기 모니터링 자료를 확보하고 있는 농업용수 수질측정망 자료를 적극 활용하여 수질 및 부영양화 특성을 파악하고자 하며, 국내 외 녹조방지 및 녹조제어 기술과 연구에 대한 자료를 분석하고 활용하고자 한다.

농업용수원의 녹조제어를 위해 동물플랑크톤 분리 연구 수행 경험을 가진 국내 전문 교수진 확보하여 공동연구를 추진하였으며, 천적생물 배양기술을 공동 개발한 (주)아셈과 협동연구를 전문기술은 물론 현물투자를 통해 공동 기술 개발을 추진하고자 하였다. 또한, 관련 분야 국내외 전문 연구진 등과 네트워크를 구축하여 전문 기술 교류 및 공동세미나를 추진하고자 하였다.

주요 연구 추진체계는 그림 1.2와 같다.



<그림 1.2> 연차별 연구 추진 체계



### 제3절 연구사

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.

국내에서 하향조절에 관한 연구사례는 인공실험지나 소형 연못에서의 부분적인 적용사례가 있었으나 그 기작과 실효성 여부에 대한 증거는 충분치 않다.

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.

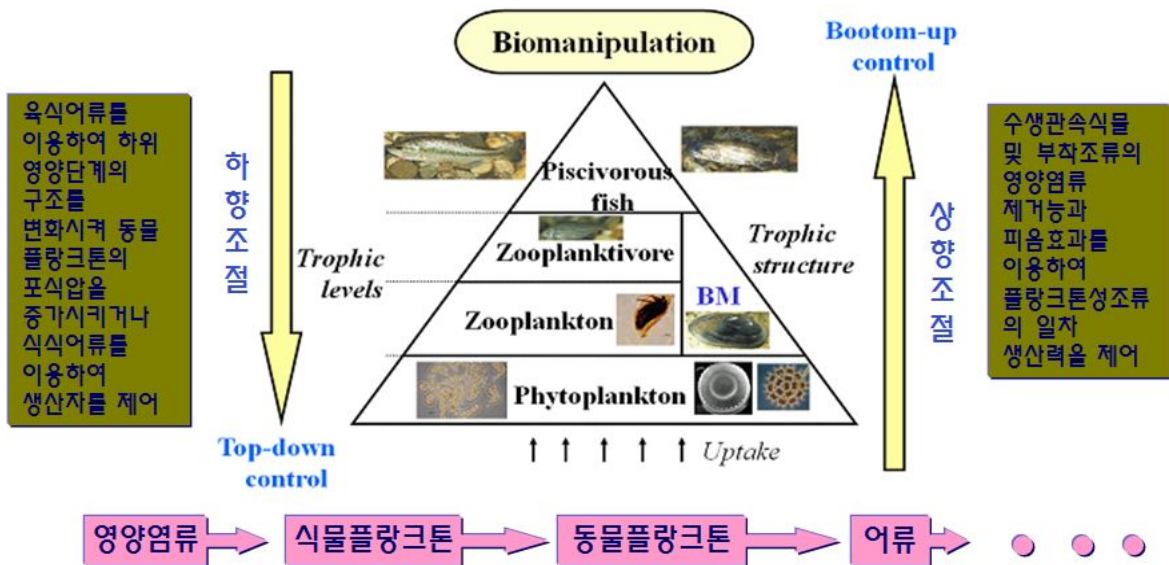
최근까지 수계 부영양화의 위해성을 억제하기 위한 대부분의 노력들은 영양염류의 삭감을 통한 식물플랑크톤 증식 억제에 목표를 둔 것으로, 호수 생태계의 구조에 대한 고전적인 육수학적 접근은 영양염류→식물플랑크톤→동물플랑크톤→어류에 이르는 단일방향의 물질흐름에 기본을 둔 것이었다.

생태적 피라미드(ecological pyramid)에서 최상의 영양단계(trophic level)를 점하는 어류의 생태적 역할은 일반적인 호수 생태계의 경우 그 생산성이 일차생산성(primary productivity)에 비해 현저히 작다는 이유만으로도 다분히 과소평가 되어온 경향이 있다.

즉 전통적인 먹이사슬의 흐름을 역행하여 어류가 하위 영양단계를 조절하며 그에 따라 수질 역시 변화할 수 있다는 개념은 비교적 최근에 들어 대두된 것이다. 즉 “어류는 수중생태계에서 수질에 효과적으로 영향을 줄 수

있는 구성자로서 크게 고려되어 오지 않았으며, 이는 육수학의 분야에 수산 생물학의 분야가 접목되어 오지 않은(Rigler, 1982)” 이유가 되었다.

생물관리는 수생관속식물 및 부착조류의 영양염류 제거능과 피음효과를 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 1.3> 수중생태계의 영양구조와 생물관리의 구분

현재까지 수행된 하향조절의 실험 중 가장 흔히 적용되어온 방법은 rotenone과 같은 독성이 적은 살충제를 살포하거나(Stenson et al., 1978; Henrikson et al., 1980, Shapiro and Wright, 1984), 수체를 완전배수하여 동물플랑크톤 포식어(zooplanktivorous fish)를 제거하고 초식압을 증가시켜 녹조를 제어하는 방법이였다(Guralti, 1990).

동물플랑크톤 포식어는 먹이에 대한 크기선택성(Size-selective)을 가지며(O'Brien, 1979), 이는 대형 동물플랑크톤의 개체군을 억제함에 따라 간접적으로 식물플랑크톤 개체군을 변화시켰다(Schol et al., 1985).

따라서 동물플랑크톤 포식어를 제거하면 동물플랑크톤의 양이 증가함은 물론 대형 종으로 종구성이 변화되어 먹이크기의 영역이 넓어짐에 따라 식물플랑크톤의 양이 감소하고 종구성이 소형화되었다.

동물플랑크톤의 초식압을 증가시키기 위해 일반적으로 적용되는 또 하

나의 방법은 대형 육식어류(piscivorous fish)를 투입하여 동물플랑크톤 포식어를 감소시키는 방법인데 무지개송어(rainbow trout; Bendorf et al., 1984)나 테레어(cichlid; Zaret and Paine, 1973)와 같은 종류가 이용되었다.

식물플랑크톤 섭식어류(phytoplanktivorous fish)를 투입하여 식물플랑크톤의 현존량을 제어하는 방법에는 주로 백연(silver carp; Borutskij, 1973; Kajak et al., 1975; Januszko, 1974; Opuszynski, 1978, 1980; Spataru and Gophen, 1985, Starling and Rocha, 1990)이 이용되고 있으며 기타 청어류(gizzard shad; Mummert and Drenner, 1986; Drenner et al., 1984, 1986)가 이용되고 있다.

초식성어류(plantivorous fish)를 투입하여 과도번성한 수초를 생물학적으로 제거하는 방법에는 초어(grass fish, Shireman and Smith, 1983; Wiley et al., 1986; Small et al., 1985; Rembi et al., 1978; Del Fosse et al., 1976)가 주로 이용되고 있으며, 기타 틸라피아류(blue tilapia; Hendricks and Noble, 1979)나 갑충류(Room et al., 1981; Goyer and Stark, 1984) 및 나방류(Center et al., 1984)가 이용되고 있다.

Shapiro(1990)는 하향조절의 핵이 되는 동물플랑크톤의 초식압이 자연수체에서 안정적으로 유지되는 보호(refuge) 전략을 7가지로 정리한 바 있다. 어류는 동물플랑크톤에 비해 낮은 수온과 저산소 농도에 대한 내성이 약하여 성층의 형성시 변온층(thermocline)과 변산소층(oxycline)을 거슬러 심수층으로 이동할 수 없으므로 각각 저온보호(temperature refuge)나 저산소보호(oxygen refuge)가 나타나며, 또한 약한 빛에서는 가시거리가 짧아 포식이 제한되므로 일주기를 갖는 동물플랑크톤은 낮시간에는 수심이 깊은 무광층에서 밤에는 섭식활동을 하는 표층에서 각각 저광보호(light refuge)를 받는다. 대형 수생식물은 빛을 차단하고 물리적인 벽을 만듦으로 해서 어류의 포식활동을 제한하여 동물플랑크톤은 식생보호(macrophyte refuge)를 받으며, 수체내 식물플랑크톤 군체 등에 의한 포식간섭에 따른 간섭보호(interference refuge)와 육식어에 의해 식생보호, 포식어는 개방수역에 남고 포식압이 낮은 소형 동물플랑크톤 포식어만 선택적으로 식생보호를 받고 있는 연안대로 도피함으로써 나타나는 행태보호(behavioural refuge), 어류 자체의 포식효율이 낮음에 따른 저포식율보호(inefficiency refuge)를 받고 있다.

이상의 보호전략 중 빛과 수온 및 용존산소에 의한 보호는 수심이 깊고 성층이 형성되는 호수에서 일반적인 것이다. 따라서 수심이 얕아 동물플

랑크톤이 어류의 포식압에 노출되는 정도가 큰 얇은 호수에서는 수생식물대를 조성하는 것이 유효할 수 있다.

국외에서 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).

부영양화와 녹조발생에 대한 전통적인 관리방법은 하수 및 폐수의 고도처리를 통한 영양염류의 유입억제, 호소내적 방법으로는 화학 살조제나 침전제의 살포, 점토 등의 복토제를 이용한 퇴적물의 복토, 수중폭기 및 순환, 퇴적물의 준설, 녹조 및 수초제거 등이 있으나, 그 대부분은 경제적 부담이

크고 화학적인 방법은 생태계 및 이수 그 2차 장애를 일으킬 가능성을 내포하고 있다. 이에 반해 생물관리는 영양물질을 관리하는 대신 자연의 수생생물을 이용하여 수질을 개선하는 것이다. 그러나 이 방법도 호수 저층을 교란시키는 저서생물(benthos)의 행태학, 직간접적인 수생관속식물과의 영향간에 서로 상호관계가 얽혀 있어서 아직까지는 설명하기 어려운 부분들이 많고 (Horppila and Kairesalo, 1990) 논란도 적지 않다.

또한 식물플랑크톤의 변화가 동물플랑크톤의 초식압에 따른 것인지, 아니면 직간접적인 영양염의 첨가효과에 의한 것인지 혹은 대형식물 또는 어류와의 경쟁에 의한 결과인지는 규명하기 어려운 한계가 있다. Victoria 호수의 경우처럼 대형 육식어류가 도입되어 초식어류가 제거됨에 따라 수질이 악화된 부정적 사례(Ochumba and Kibaara, 1989)나 rotenone의 살포가 어류뿐만 아니라 동물플랑크톤까지 제거한 부정적 사례(Gophen, 1990)가 있으며, 미제거 동물플랑크톤 포식어에 의한 효과제한(McQueen et al., 1986), 동물플랑크톤 포식어에 대한 육식어의 비효율적 포식(Jenkins, 1967; Cooper et al., 1971; Lawrence, 1958; Hambright et al., 1986), 육식어 효과의 단기성, 녹조의 시초와 점액, 독성 등에 의한 동물플랑크톤의 비효율적 섭식(Porter et al., 1981), 상기한 요인에 더해 nannophytoplankton에 대한 식물플랑크톤 섭식어의 비효율적 섭식(Borutskij, 1973; Drenner et al., 1984)이나 동물플랑크톤 섭식성(Spataru and Gophen, 1985), 수초 섭식어류에 의한 수초대의 파괴와 어류 배설에 따른 수환경의 악화(Rembi et al., 1978; Harris, 1986) 등의 비판적인 시각에 접하고 있다.

그러나 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 과도한 녹조발생을 조절하지 못한 경우가 각종 수계에서 보고되고 있기 때문이다. 즉 수자원의 적절한 관리를 위해서는 영양염류의 관리를 통한 상향조절능 및 생태피라미드의 상위 영양단계 생물을 이용한 하향조절능의 양 측면을 병행하여 종합적인 관리를 추구해야 한다.

## 1. 동물플랑크톤 및 기타 후생동물에 의한 녹조 제어

대형 동물플랑크톤을 배양하여 직접 투입하는 방법(Theiss et al., 1990)에는 주로 섭식율이 높은 대형 지각류인 *Daphnia magna*가 이용되고 있으나 실험실의 폐쇄환경이나 어류가 없는 자연수체에서는 그 효과가 분명하지만 어류에 의한 포식압의 제한을 받는 조건에서는 그 효과가 불투명하다.

수역에서 플랑크톤성 식물플랑크톤은 주로 동물플랑크톤 및 원생동물에 의해 섭식되기 때문에 식물플랑크톤 양이 많은 수역에 동물플랑크톤의 양이 많은 것이 오래전부터 경험적으로 알려져 왔다.

동물성플랑크톤의 섭식은 식물플랑크톤 현존량의 증가를 억제할 뿐만 아니라 식물플랑크톤 군집의 크기조성 및 종구성을 변화시킨다.

소형동물은 종류에 따라 여과섭식(filter feeding) 혹은 직접포식(raptorial feeding)을 하며, 여과속도는 먹이의 밀도가 높으면 감소하고 밀도가 낮으면 최대화 된다.

Braband(1983)는 사상성 남조류 *Oscillatoria agardhii*에 대해 섬모충류 *Nassula ornata*가 수온 5 ~ 20 °C에서 지속적인 포식을 보이며 증식을 억제함을 보고한 바 있다.

Arnold(1971)는 남조류 *Anacystis nidulans*, *Synechococcus elongata*, *S. cedrorum*, *Merismopedia* sp., *Anabaena flosaquae*, *Synechocystis* sp., *Gloecocapsa alpicola*와 녹조류 *Ankistrodesmus falcatus*, *Chlorella vulgaris*에 대한 *Daphnia pulex*의 섭식율을 비교 실험한 결과 녹조류보다 남조류에 대한 섭식율이 낮음을 보고한 바 있다.

Takayuki(1987)는 일본의 Kasumigaura 호소에서 분리한 *Microcystis aeruginosa*에 대한 지각류 *Moina micrura*의 섭식능을 13 °C에서 실험한 결과 *Microcystis* 군체를 섭식가능한 크기로 분리하여도 섭식하지 않았으나, 분해된 *Microcystis*는 중요한 식이원이 됨을 보고하였다.

Heimbuch(1978)는 산화지에서 녹조를 제거하기 위하여 *Daphnia magna*를 투입한 결과 TN, TP와 휘발성 부유물질의 제거효과가 큼을 보고하였다. 동물성플랑크톤의 처리조는 어류 사육시설과 연결하여 적용시킬 수 있으며 이때 어류 대사물질은 다시 식물플랑크톤의 성장에 재공급할 수 있었다. 그리고 *Daphnia magna* 배양조의 유출수는 수생식물조에 유입시켜 영양염류를 제거하여 최종 방류할 수도 있다.

Inamori(1990)는 *Microcystis viridis*에 의하여 생성되는 cynoviridine의 90%를 Bio-film reactor에 접종한 *Aelosoma hemprichi*(Oligocheta)와 *Philodina erthropthalma*(Rotatoria)의 포식으로 제거하였다. Sudo et al.(1989)은 이취미물질을 생성하는 사상성조류인 *Phormidium tenue* 배양조에 섬모충류 *Trithigmostom cucullulus*를 25 ~ 200 N/ml로 접종하여 암소에서 정치배양한 결과 Chl-*a*의 제거율이 63 ~ 80%, 탁도의 제거율이 71%이었음을 보고한 바 있다.

Inamori(1988)는 부영양 호수에서 발생하는 *Microcystis wesenbergii*의 분해 역할을 하는 미소후생동물인 *Aelosoma hemprichi*(Oligocheta) MA계, *Philodina erthropthalma*(Rotatoria) MP계, *Aelosoma hemprichi*(Oligocheta)의 *Philodina erthropthalma*(Rotatoria) MAP계를 광조사계(4,000 lux)와 광차단계로 분리하여 실험한 결과 광차단계의 경우 광조사계에 비해 TOC 제거율이 높았는데, 이는 미소동물의 존재가 *M. wesenbergii*의 분해를 직접 촉진하는 것외에 조체분해에 수반되는 유기물 증대로 세균류를 증식시켜, 간접적인 *M. wesenbergii*의 분해를 촉진시키는 작용을 하고 있음을 시사하였다.

Lampert(1987)는 *Daphnia*가 담수의 먹이연쇄에서 중앙의 위치를 점유하여 섭식대사를 통해 세균과 식물플랑크톤의 군집에 영향을 끼침을 보고하였다. 섭식율(feeding rate)은 먹이의 농도에 비례하며, 빛, 산소, pH 및 군집도에 따라서 영향을 받는데, 일반적으로 최적 포식율의 온도는 약 20 °C이나 오랜 기간 동안 적응된 후라면 최적온도 역시 변화한다고 하였다.

## 2. 관련기술의 국내외 연구동향

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

자연정화방법을 기본적으로 이용하는 생태공학적 수질개선 기법은 아직도 다양한 방법들이 연구개발되는 과정에 있으나, 그 중에서 인공습지의

개발과 적용부분에서는 큰 성과를 거두어 왔다(예: Kadlec and Knight, 1996; Etinier and Guterstam, 1997). 국내에서도 인공습지 적용기술의 발전은 괄목할 만하여(농림수산식품부, 2004), 농업용수 수질개선을 위한 인공습지의 설계·관리의 가이드라인(농림수산식품부, 2004)을 제시하는 수준에 이르렀다.

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

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

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

### 3. 국내 농업용저수지를 대상으로 한 연구 동향

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



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

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

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

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

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

가 선행되지 않고서는 관리가 어려울 수밖에 없다.

농업용저수지를 생태학적 측면을 이해하고 이를 수질개선에 활용하고자 하는 노력이 시도되고 있으나(농림수산식품부, 2005), 생물학적 측면을 종합적으로 이해하는 부분은 상당히 드물다. 또한, 생물 자체를 대상으로 할 뿐만 아니라 생물들이 서식하는 안정된 서식처를 확보하는 측면의 연구는 더욱 큰 의미를 가지고 있다. 즉, 생물은 안정된 서식공간이 확보되어야만 이를 통해 성장과 활성을 발휘하게 되는 기본적인 생태학적 법칙을 고려해 주어야 한다.

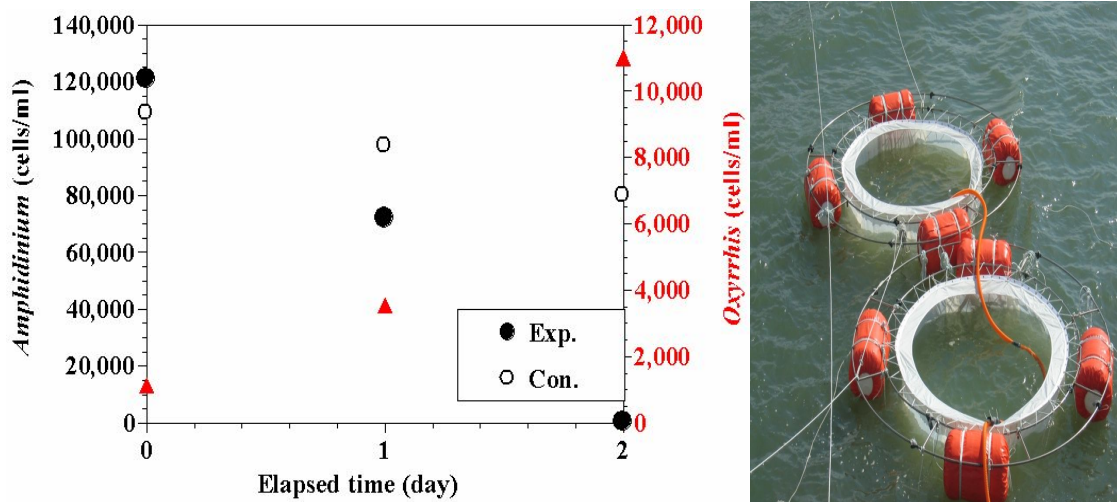
최근에 수행되었거나 현재 수행되고 있는 농업용저수지의 수질관리에 대한 정부차원의 연구들을 표 1.1에 제시하였다. 여기에서 제시된 대부분의 선행 연구들이 생물조절을 이용하는 본 연구와 어느 정도 연관이 있는 것은 사실이나, 본 연구에서 추구하는 생물자체를 이용하거나 생물을 조절하는 방법과 더불어 유용한 생물들이 서식하는 공간(서식처)의 구조적 기능적 부분을 부여하는 종합적인 생물조절의 연구로써 차별성이 매우 크다.

(표 1.1) 국내 관련 선행연구의 사례

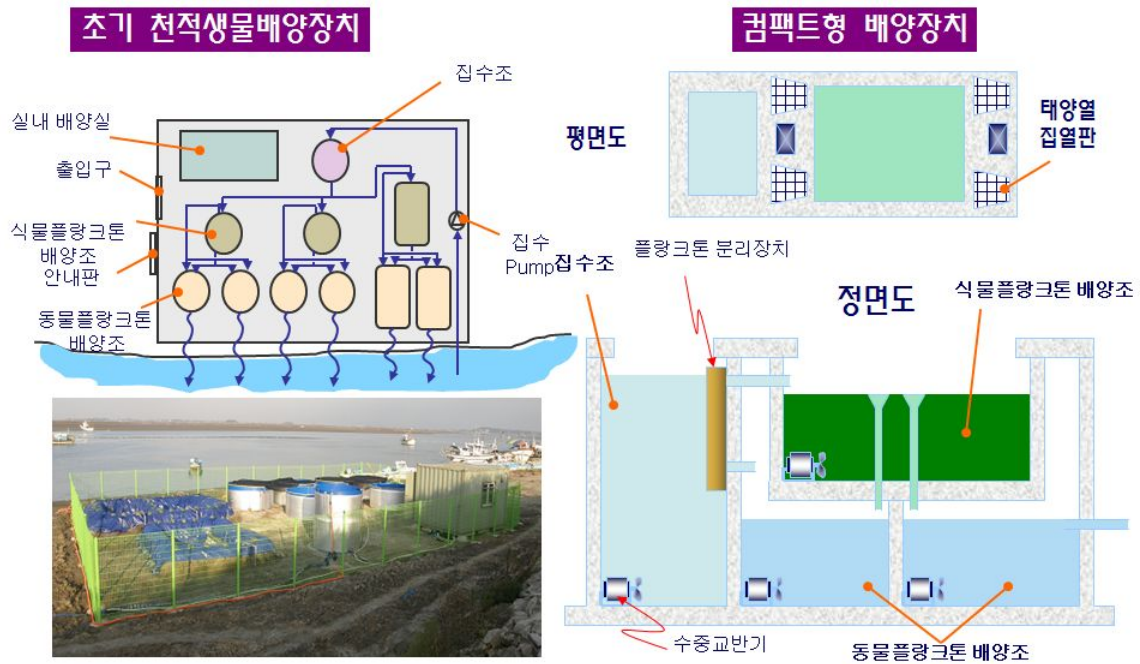
연구수행 기관 및 지원기관	연구개발의 내용	연구개발성과의 활용현황
건국대 (농림수산식품부, 2005)	농업용 저수지의 녹조제어 기법개발 -어류의 남조류 섭식 및 농업용 저수지 적용에서의 가능성 -가압부상기술의 개선 및 농업용 저수지 적용 -농업용저수지에서의 인의 불활성화 기술 -농업용저수지 퇴적물의 환경친화적 흡입식준설기법의 개발 및 개선 -농업용 저수지의 유형분류에 따른 관리방안	-농업용 저수지 관리정책에 활용 -진공 흡입식 준설기술의 농업용 저수지 시범사업 및 사업화 -농업용저수지 외 타 수역에 응용 -교육 및 언론 홍보 -타 연구사업에 활용 -국내외 학회 및 학술지 발표 -특허 및 실용신안
농업기반공사 (농림수산식품부, 2003)	농업용 저수지의 수질개선 시험연구 -자연정화 처리시스템(바이오파크) 연구 -농촌유역 비점오염원 관리모델 연구 -인공습지의 효율성 및 적용성	-자연친화적 비점오염 정화기술의 모델로 활용 -수생식물의 정화효과 -타 연구 및 사업에 활용 -인공습지 설계, 관리 지침 작성
건국대 (농림수산식품부, 2003)	부착조류시스템을 이용한 농촌유역 수질개선 기법개발 -부착조류의 성장특성 및 인제거 효과 -부착조류 수질개선 시스템 개발 -타기술과의 접목 및 연계방안	-부착조류 수질개선 시스템 특허 -인공습지와 부착조류 시스템 연계방안 개발 -타 연구사업 활용
고려대 (농림수산식품부, 2003)	농업환경오염복원기술개발 -토양오염 복원기술 -지표수 및 지하수오염 복원기술	-토양 및 지표수오염 복원기술 특허 및 국내외 연구발표 -토양오염 복원정책에 활용 -패류를 이용한 수질개선 기법개발 -타 연구사업에 활용 -교육 및 홍보
강원지역 환경기술 개발센터 (환경기술진흥원, 2004)	호소 및 저수지 연안대의 생태계 복원 -미생물 부착여재 및 자연친화적 소재를 이용한 홍만수위 부분 토양복원 -인공식물섬, 인공어초, 토양미생물제 개발	-호소 및 저수지 연안대 절터면 복원기술 활용 -호소경사면녹화장치 특허 -식물생장복원 미생물균제 특허
한국건설 기술연구원 (국토 해양부, 2011)	자연공생 호소실험사업 -호소설계인자 및 최적관리방안제시 -오염호소수질회복방안 및 관리방안 -퇴적토 적정처리방안	-호소설계인자 및 최적관리방안 제시 -오염호소수질회복방안 및 관리방안
한국농어촌공사 (국토 해양부, 2011)	천적생물을 이용한 녹조방지 기술개발 -소규모 천적생물 배양장치의 녹조제어 효과분석 -녹조제어기술의 활용방안 제시	- 실제 현장에서 활용 가능한 매뉴얼 제시 - 수질통합시스템과의 연계 방안 마련

#### 4. 천적을 이용한 제어 기술 연구 현황

천적을 이용한 방제기술은 1995년 이후 해양 적조 방제에 적극적으로 개발, 적용해 온 기술로 해양 적조제어에 있어서는 현장적용단계에 와 있는 친환경적인 방법이다. 이 기술은 본 기관이 2007년부터 2009년까지 『새만금 적·녹조 대책 연구』의 일환으로 실시한 기술로 천적생물을 적용하여 적조를 제어하는데 성공한 사례가 있다.



<그림 1.4> 천적생물 현장 대량 살포시험 결과(3 m<sup>2</sup>)



<그림 1.5> 선형 연구에서 개발한 천적생물 배양장치

또한, 한국농어촌공사에서는 중규모이상 농업용저수지를 대상으로 적·녹조 제어 및 부영양화 방지를 위한 다각적인 연구를 진행해왔다. 특히, 1997년부터 시작된 인공습지, 인공식물섬 등 자연정화기법을 이용한 저수지 수질 개선 및 부영양화 방지연구를 현재까지 발전시켜오고 있으며, 2002년부터는 좀 더 본격적인 적·녹조 연구를 시작하였는데, 그 첫단계로서 「농업용 저수지의 녹조제어 기법개발」 연구는 어류의 남조류 섭식 및 농업용 저수지 적용에서의 가능성, 가압부상기술의 개선 및 농업용 저수지 적용, 농업용저수지에서의 인의 불활성화 기술, 농업용저수지 퇴적물의 환경친화적 흡입식준설 기법의 개발 및 개선, 농업용 저수지의 유형분류에 따른 관리방안 등의 분야로 진행하였다. 이후 2006년부터 2009년까지 「생물조절(먹이연쇄)을 통한 농업용저수지 수질관리 기법개발」 연구를 진행하였으며, 본연구의 천적생물을 이용한 현장적용시험의 모태가 되는 과제이기도 하였다. 생물조절 연구에서는 어류와 패류, 원생동물 등 생물을 이용하여 농업용저수지의 적·녹조 원인생물을 제거하는 다양한 연구를 진행하여 최적의 생물조합을 도출하였다.

## 제4절 녹조 원인생물과 천적생물

### 1. 녹조현상과 녹조 원인생물

녹조현상이란 부영양화 된 호소나 유속이 느린 하천에서 부유성의 식물플랑크톤이 대량 증식하여 수면에 집적하고 물의 색깔을 현저하게 녹색으로 변화시키는 현상을 말한다. 최근까지도 가장 흔하게 사용되어왔던 수화(물꽃현상, water-bloom), 즉 특정수역에서 식물플랑크톤이 대량 증식하여 물색을 변화시키는 현상과 중복되어 사용되기도 하지만 대량 증식하는 식물플랑크톤의 종류에 따라 물색이 달라지기 때문에 녹조현상을 수화와 동일한 의미로 사용하는 것은 잘못된 것이다.

수화라는 표현은 일반적인 식물플랑크톤의 대량증식현상을 모두 포함하는 말로 훨씬 넓은 범위의 의미를 가지고 있다. 녹조현상은 수화현상의 한 종류로 남조류<sup>1)</sup>의 대량증식으로 인해 물색이 녹색으로 변색하는 현상만을 의미하며 일본어로는 ‘아오코’라고도 한다. 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 식물플랑크톤들은 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 종, 예를 들어

---

1) 남조류(藍藻類) 또는 시아노박테리아(Cyanobacteria)라고 하며 광합성을 통해 산소를 만드는 세균이다. 원핵식물로 식물플랑크톤에 속하는 이들은 거의가 단세포, 군체 및 실 모양인 다세포체를 이룬다. 편모는 없고 분열법·포자법 등으로 무성 생식을 한다. 때로는 물 속에서 폭발적인 증식을 하여 물의 색깔을 변하게 하기도 한다. 유성 생식이 전혀 알려져 있지 않은 점으로 미루어 보아, 남조식물은 식물플랑크톤 중에서도 가장 원시적인 무리로 생각되고 있다. 현재 알려져 있는 남조식물은 약 150속 2,000종이다. 이들은 바닷물이나 민물에 살며, 또 토양속이나 나무 줄기 위 등에서도 산다. 일반적으로 물이 있는 곳이면 어디에서든지 살 수 있다. 다음과 같은 특징을 갖는다.

- (1) 세포 내에 핵·엽록체·미토콘드리아·액포 등의 세포 기관이 분화되어 있지 않다.
- (2) 동화 색소로는 엽록소 a와 남조소, 홍조소 등의 피코빌린 색소를 갖고 있다. 이들 색소는 틸라코이드라는 납작한 주머니 모양의 구조물 안이나 표면에 붙은 상태로 세포 속에 흩어져 있다.
- (3) 광합성 결과 체내에 저장되는 동화 물질은 남조 녹말이다.
- (4) 세포벽을 구성하는 주요 물질은 뮤코펩티드라는 화합물이며, 세포벽 바깥쪽에는 점질물의 층이 있다.
- (5) 무성 생식만을 하며, 유성 생식에 대해서는 전혀 알려져 있지 않다.
- (6) 생식 세포에는 편모가 없어서 헤엄을 칠 수가 없다.

*Microcystis aeruginosa* 중에서도 strain에 따라 독소를 생산하거나 하지 않는 것도 있기 때문에 녹조현상이 발생하였을 경우 그 원인식물플랑크톤이 표 1.2에 나타난 유독 남조류에 속하는 지를 확인하고 유독 남조류일 가능성이 높을 경우 독성검사를 통하여 독소생산유무를 확인하여야 한다(Takamura 1988).

(표 1.2) 녹조발생 원인 생물과 특징(Watanabe et al., 1994)

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 호소, 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

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 1.3) 유독 남조류와 그 독(Watanabe et al, 1994)

유독 남조류	생산 독소의 종류
<i>Anabaena</i>	Anatoxin-a
<i>A. circinalis</i>	Anatoxin-a, Anatoxin-a(s)
<i>A. flos-aquae</i>	Microcystin-LR
<i>A. lemmermanii</i>	Anatoxin-a
<i>A. solitaria</i>	Anatoxin-a
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	Saxitoxin, Neosaxitoxin
<i>Coelosphaerium kutzingianum</i>	Anatoxin-a
<i>Cylindrospermopsis rachiborskii</i>	Anatoxin-a
<i>Cylindrospermum</i> sp.	Cylindrospermopsin(간장독)
<i>Gomphosphaeria naegeliana</i>	Anatoxin-a
<i>Microcystis aeruginosa</i>	Anatoxin-a
<i>M. viridis</i>	Microcystin-LR, YR, RR, LA 등
<i>Nostoc</i> sp.	Microcystin-RR,YR, LR, LA
<i>Oscillatoria</i>	Microcystin-LR 등
<i>O. agardhii</i>	Microcystin-RR 등
<i>O. agardhii</i> var. <i>isothrix</i>	Microcystin-RR 등
<i>O. formosa</i>	Homoanatoxin-a
<i>Oscillatoria</i> sp.	Anatoxin-a
<i>Umezakia natans</i>	Cylindrospermopsin

## 2. 녹조 방지(부영양화) 대책

부영양화 방지를 위해서는 유역의 오염원을 관리하는 것이 가장 투자의 효율이 크고 확실한 방법이나 유역 오염원이 관리가 불가능할 때에는 호수 내에서 사후저감대책을 쓰기도 한다.

가. 화학적 응집침전에 의한 인불활성화(phosphorus inactivation)

화학적 응집침전에 의해 수중의 인과 부유물을 제거하는 방법이다. 황



산반토(alum,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )가 주로 많이 사용되며 lime( $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ),  $\text{FeCl}_3$  등도 사용된다. 황산반토 수용액을 호수표면에 살포한다.  $\text{Al}^{3+}$ 은 인산이온과 결합하면 안정한 불용성침전  $\text{AlPO}_4$  을 만든다.  $\text{Al}^{3+}$ 은 중성에서  $\text{Al}(\text{OH})_3$  침전을 만들면서 이 floc은 수중의 녹조 등의 부유물과 함께 침강하며 수중의 인산이온도 함께 흡착되어 침전한다.

저질로부터의 인용출이 큰 호수에서는 alum을 투입하여 저질의 표면을 덮어 인의 용출을 차단하는 방법으로도 사용한다. 황산반토를 첨가하면 pH가 낮아지며 pH가 6이하로 낮아지면 알루미늄의 침전이 용해되므로 pH 6까지만 첨가하여야 한다. pH가 낮아지는 것은 남조류의 우점에 저해가 되므로 우점종을 남조류에서 해가 없는 녹조류로 천이시키는 효과를 가진다.  $\text{m}^3$ 당 2-5 원이내의 약품비용으로 정화할 수 있으므로 여건이 적절한 곳에서는 경제성 있는 수질개선책이 될 수 있다.

황산반토의 응집침전의 효과가 오래 지속될 수 있으려면 저질의 교란이나 외부로부터의 인유입이 없어야 한다. 따라서 체류시간이 짧은 인공호에서는 외부유입수량이 많기 때문에 효과가 오래 지속될 수 없다. 체류시간이 긴 자연호에서는 한 번의 투여로 수년간 수질개선의 효과를 볼 수 있다. 그러나 저수지에서는 강우 시 마다 많은 인이 유입하므로 연간 수차례 강우 후 투여하는 것이 좋다.

일산의 호수공원에서 자연적인 유입수가 없으므로 유입수를 황산반토를 이용하는 화학적 처리를 거쳐 인과 부유물을 제거한 후 호수로 유입시키고 있다. 독일의 Bahnwach 저수지에서는 유입수를 모두 전처리댐에 모아 처리장으로 보내어 철을 이용한 응집침전법으로 처리한 후 본 댐에 유입시켜 수질을 개선하고 있다.

#### 나. 전처리댐(pre-reservoir)

호수의 상류 유입부에 작은 댐을 건설하여 유입수를 체류시킴으로써 인의 침강을 유도하여 본 댐의 수질을 개선하는 방법이다. 전처리 댐에 체류하는 동안 식물플랑크톤이 성장하면서 수중의 인을 흡수하여 침강하기 쉬운 입자상으로 바뀐다. 표토와 결합된 입자상인, detritus, 식물플랑크톤, 등은 전처리댐에서 체류시킴으로써 일부를 침강제거할 수 있다. 전처리 댐에서의 침전을 촉진하기 위하여 응집제를 투여하거나 화학적 처리시설을 통과시켜 처리하기도 한다.

#### 다. 호수내 수초대에 의한 영양염류 제거

호숫가의 습지식생은 영양염류와 부유물을 감소시키는데 기여할 수 있다. 습지의 식물 줄기사이에서는 물의 유동이 감소하여 미립부유물이 쉽게 침강한다. 이때 인을 포함하는 입자들이 침강하여 영구퇴적될 수 있다. 또한 식물의 인, 질소 흡수능력은 수중의 영양염류 농도를 감소시킬 수 있다. 특히 부영양화의 피해가 큰 여름에 식물이 많이 성장하여 호수의 인, 질소를 감축하고 부영양화의 피해가 적은 겨울에는 수초의 분해에 의해 영양염류를 일부 용출시키므로 여름에 부영양화에 의한 피해를 줄이는데 기여할 수 있다. 수초대가 없는 경우이거나 수위변동이 커서 수초대가 형성되지 못하는 곳에서는 인공 수초섬(浮島 floating island)을 만들기도 한다. 일본의 가스미가우라 호변에 만든 biopark에서는 호수물을 끌어들여 호숫가에 만든 수초밭을 통과 시킴으로써 수질을 정화하고 있다.

#### 라. 선택적 중층방류에 의한 홍수탁류배출

우리 나라의 인부하 특성은 여름의 홍수기에 집중된다. 여름 홍수기에 홍수기에 유입하는 탁류에는 높은 농도의 인이 포함되어 있다. 홍수기의 유입수는 호수표층수에 비하여 수온이 낮기 때문에 중층류를 형성한다. 저수지의 발전방류구가 중층에 형성되어 있는 경우에는 이를 통하여 탁류가 배출된다. 가을의 혼합기까지 배출되지 않으면 탁수가 표층에까지 확산되며, 다음해 봄에 식물플랑크톤 번성의 원인이 된다. 이 탁수의 수직확산을 최소화하고 빠른 시간내에 중층의 방류구를 통하여 하류로 배출함으로써 표수층의 인농도 증가를 막을 수 있다.

#### 마. 저질산화(sediment oxidation)

호수 심층의 저질 표면이 혐기성화되면 저질의 철( $Fe^{3+}$ )이 환원되어 ( $Fe^{2+}$ ) 용해됨으로써 철과 결합되어 있던 인이 용출된다. 이를 억제하기 위하여 공기펌프로 심층에 산소를 공급하면 저질의 산화환원전위가 높아져 인의 용출을 억제할 수 있다.

그러나 심수층과 표수층이 교란되면 저질의 영양염류가 표수층으로 공급되어 오히려 식물플랑크톤의 성장을 촉진하는 수가 있으므로 심수층에 산소를 공급하여 다시 심수층에 공급하는 방법으로 성층을 유지하는 설비를 사용하는 것이 바람직하다. 특히 수심이 얇은 호수에서는 심층수를 순환시키면

식물플랑크톤의 폭발적인 증가를 유발할 수 있다.

산소가 소비된 심수층에서는 질산이온이 산소를 대신하여 전자수용체 역할을 할 수 있으므로 저질속에 질산염을 첨가하여 저질의 산화환원 전위를 높이고 철의 환원을 막을 수 있다. 저질표면에 질산염을 유입시켜 주거나 직접 저질속에 주입하는 방법을 사용한다.

#### 바. 인공 폭기에 의한 성층파괴(destratification)

수심이 깊은 호수에서 심수층을 폭기하면서 상하층을 순환하여 인위적으로 성층을 파괴하면 식물플랑크톤이 빛이 없는 깊은 곳까지 혼합되므로 식물플랑크톤이 받는 빛이 부족하여 식물플랑크톤의 양이 감소하게 된다. 이 방법은 특히 강한 빛을 좋아하는 남조류의 감소에 효과가 크다. 즉, 강한 빛을 요구하는 남조류는 감소하고 약한 빛에 적응하는 규조류로 대체됨으로써 수중의 냄새, 독소발생 등의 남조류 피해를 줄일 수 있다. 평균수심이 약15m이상으로 깊은 호수에서는 식물플랑크톤의 현존량이 감소한다. 그러나 수심이 얕은 곳이거나 수직혼합이 충분하지 않은 곳에서는 식물플랑크톤의 총량이 오히려 증가하게 되므로 주의를 요한다.

#### 사. 준설(sediment removal)

유기물과 영양염류가 많은 저질을 제거함으로써 호수저질로부터의 내부부하량을 감소시킬 수 있다. 그러나 일반적으로 준설은 수심을 깊게 하여 저수량을 늘이는 효과는 확실하나, 수질개선의 효과는 불확실하며 비용이 많이 드는 방안으로서 경제성이 없는 경우가 대부분이다.

#### 아. 생물조절(Biomanipulation)

수생식물에 의한 호수의 수질정화는 자생 수생식물을 순치한 후 제거하는 ‘순치관리’와 식물을 이식재배한 후 제거하는 ‘재배관리’로 구분할 수 있다. 재배관리는 순치관리에 비해 식물이식의 노력이 필요하나 오염된 장소에 규모를 조절하여 관리할 수 있는 장점이 있다. 국내에서 자연수역에서 수생식물의 정화능에 관한 연구는 80년대 말에 시작되었다. 오(1990)는 경남 진양군과 창녕군에 있는 정양호, 우포, 용산저수지의 수질연구와 함께 관속수생식물의 중간 상호관계를 분석하고 세 호소의 연순생산량, 생산과정의 질소와 인 흡수량 및 분해에 의한 배출량을 측정하여 관속수생식물에 의한 부영양화의 감소를 연구하였다. 김과 조(1991 a,b)는 팔당호의 관속수생식물에 대한

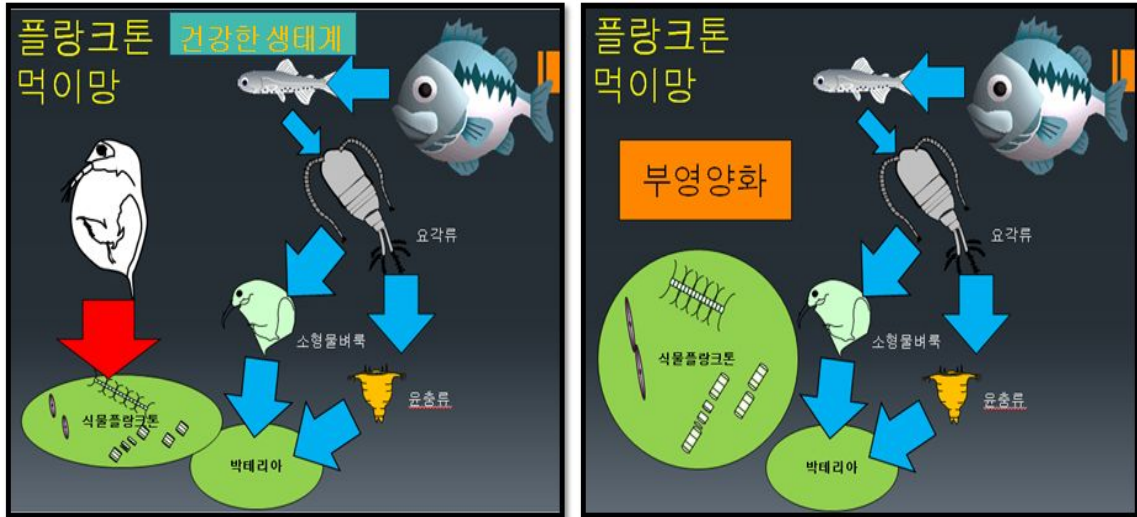
연순생산량, 질소와 인의 흡수와 배출량을 계산하였다. 이(1993 a,b)는 이삭물 수세미(*Myriophyllum spicatum*)에 부착된 부수성 종속영양세균(분변성 대장균 등)에 의한 수질정화 효과를 연구하였고, 조 등(1994)은 팔당호 연안대에서 저토와 수체의 무기염류 및 이온에 대한 수생식물의 생장과 고사에 따른 반작용을 연구하였다. 공 등(1993), 공 등(1996)은 팔당호 수생식물의 건물생산량과 에너지효율, 질소, 인의 흡수효과와 수초제거선에 의한 수초제거관리, 팔당호 내 부영양화된 만입부에 재배한 부레옥잠의 생산성 및 질소와 인의 흡수능, 재이용성을 논의하였다. 안과 공(1995)은 호소수에서의 생이가래(*Salvinia natans*)의 성장능 및 질소와 인의 제거율을 검토하였다. 국내에서 자연상태의 부착조류에 관한 연구는 주로 미소식물상이나 이입속도 및 오수 생물학적 연구(Choe and Jung, 1990)가 주를 이루어왔으나 수처리에 적용한 사례는 공 등(1996)에 의한 대형 사상성 부착조류를 이용한 오염된 하천에서의 영양염류 제거에 관한 실험이 있을 뿐이다. 하향조절의 분야에서는 국내산 수생식물에 대한 초어의 초식특이성과 식물플랑크톤 초식자인 백연의 식물플랑크톤 증식 억제, 초어의 섭식율과 수중 선택성, *Daphnia magna*의 녹조제거능에 관한 소형 실내실험(공 등, 1994), 안(1994)에 의한 백연 재배조의 미생물 체외효소의 활성도 변화, 김 등(1996)에 의한 인공연못에서의 동물플랑크톤 초식효과에 관한 연구가 부분적으로 수행된 바 있으나, 하향조절능에 의한 먹이사슬 구조의 변화 및 수질변화에 대한 종합적인 연구는 이루어진 바 없다. 현재 백연은 국내에서 식품으로서 가치가 인정되지 않는 어종이지만, 사료 등의 간접적인 이용방법이 개발되면 수질에 악영향을 미치는 녹조를 유용한 생물자원으로 전환할 수 있다는 점에서 이상적이다.

### 3. 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. 이 동물플랑크톤은 크고 작은 어류의 먹이원이 되어 생태계 순환이 이루어지는데 수질관리의 주요 목적이 식물플랑크톤을 억제하는데 있으므로 이 식물플랑크톤을 포식하는 동물플랑크톤의 양을 키워 식물플랑크톤 양을 줄이는 목표를 가지고 있다.

건강한 생태계의 경우 녹조생물인 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 포식

-피식관계가 원활히 이루어져 식물플랑크톤 군집의 크기가 작게 유지되고 있는 반면, 부영양화된 수역의 경우 식물플랑크톤을 포식하는 천적생물로서의 기능을 가지는 동물플랑크톤의 군집이 매우 작거나 없어 식물플랑크톤 군집의 크기가 비정상적으로 커지면서 녹조가 발생하게 된다(그림 1.6).



<그림 1.6> 건강한 생태계와 부영양화 생태계의 플랑크톤 먹이망



<그림 1.7> 천적생물과 호소내 생태계 먹이망에서 천적생물의 위치, 역할

생태계 내에는 녹조 원인생물인 식물플랑크톤의 자연적인 포식자 또는 경쟁자(천적생물)이 항상 공존하고 있는데, 세균, 곰팡이, 바이러스 등 미생물과 동물플랑크톤 같은 원생생물, 조개류, 어류 등이 그것이다. 이중에서 특히, 포식에 의해 식물플랑크톤을 제거하는 생물군을 천적생물이라 칭하였다(그림 1.7).

녹조가 발생하는 수역의 현장에서 이들 천적생물을 분리하여 포식자의 개체수를 선택적으로 증가시키고, 녹조 원인생물과 천적생물은 거의 유사한 환경을 공유하여 생태계내 평형관계를 유지하게 되면 자연스럽게 녹조와 같은 이상 생태계에서 발생하는 문제를 사전에 예방할 수 있게 된다. 따라서, 식물플랑크톤이 과도하게 번식할 수 있는 불안정한 조건의 부영양화 수역에 인위적으로 천적생물의 개체수를 증가시키면 이것이 녹조 식물플랑크톤의 초기 성장을 억제하여 녹조를 제어하는 방안이 된다.

본 연구에서는 천적생물 중에 동물플랑크톤을 이용한 녹조방지 기술을 개발하고자 한다.



# 제 2 장

## 본 론

제1절 연구내용 및 방법

제2절 전대저수지 녹조발생 특성 및 수환경 모니터링

제3절 천적생물 종주 분리 및 종주의  
최적 배양기술 개발

제4절 천적생물 배양장치 설치 및 시설운영, 유지관리

제5절 천적생물 배양장치 배양성능

제6절 천적생물 대량 살포 효과분석

제7절 천적생물 배양장치의 적용범위 및  
규모 산정, 녹조제어 성능 평가





## 제2장 본론

### 제1절 연구내용 및 방법

#### 1. 전대저수지 녹조발생 특성 및 수환경 모니터링

##### 가. 모니터링 시기 및 환경조건

모니터링은 2011년 3월 24일 ~ 10월 12일까지 월 1회 이상 실시하였으며(표 2.1), 본 연구대상지의 환경조건은 기상청(<http://www.kma.go.kr/>) 자료 중 서산기상대의 자료(2011년 3월 1일 ~ 11월11일)를 이용하였다.

모니터링 기간 중, 기온은 3 ~ 4월까지 10 °C 미만의 낮은 기온을 보이다가 6 ~ 9월에 20 °C 이상의 기온을 보였다. 모니터링 전 선행강우는 7월 모니터링(149.5 mm)을 제외하고, 누적강우량이 20 mm 미만으로 강우에 의한 수체의 교란은 영향을 미치지 않았을 것으로 판단되었다.

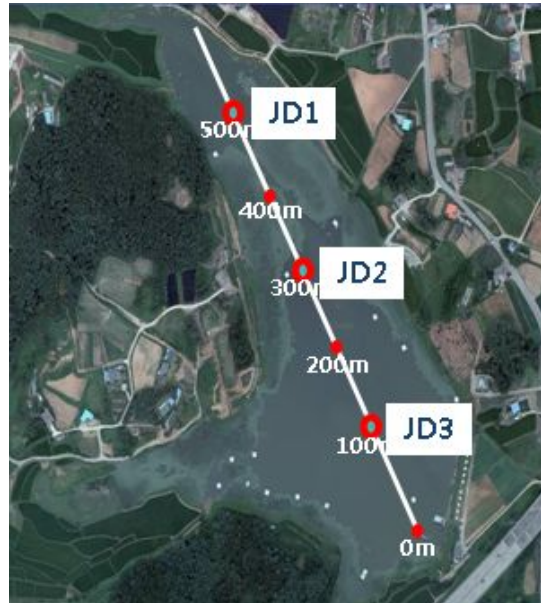
(표 2.1) 모니터링 시기 및 환경조건

차수	모니터링 시기	기온(°C)	선행강우량(mm) [모니터링 전 5일 누적강우량]
1	3월 24일	2.7	16.0
2	4월 6일	8.2	0.0
3	4월 13일	9.6	0.5
4	5월 19일	17.8	0.0
5	6월 17일	21.0	0.5
6	7월 29일	25.7	149.5
7	8월 24일	22.7	3.5
8	9월 5일	21.7	0.0
9	10월 12일	14.7	0.0

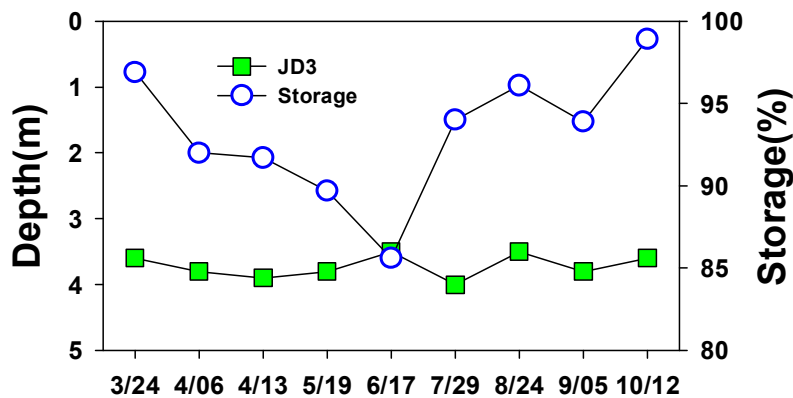
##### 나. 연구대상지 특성 및 모니터링 지점

본 연구대상지인 전대저수지는 유역면적 234 ha, 만수면적 15.58 ha, 수혜면적 105 ha, 제방높이 7.8 m(15.6 EL.m), 평균수심 3.77m, 총저수량 619 천m<sup>3</sup>(유효저수량: 587 천m<sup>3</sup>)의 소규모 농업용저수지이다.

모니터링 지점은 저수지 상류 유입부인 JD1, 중류에 위치한 JD2, 저수지 중앙의 수심이 가장 깊은 JD3으로 대별하였으며, 일정간격으로 구분하였다. 연구기간 동안 호중앙부(JD3)의 수심은 3.5 ~ 4.0 m(평균 3.7 m)의 분포를 보였으며, 저수율은 85.6 ~ 98.9%의 범위(평균 93.2%)를 보였다.



<그림 2.1> 모니터링 지점



<그림 2.2> 전대저수지의 수심 및 저수율 변화

#### 나. 모니터링 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, 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(PO<sub>4</sub>-P, mg/L) 엽록소-a(Chl-a, mg/m<sup>3</sup>) 항목에 대한 분석을 실시하였으며, 분석방법은 수질 오염공정시험기준(환경부, 2011)에 준하였으며, 표 2.2와 같다.

식물플랑크톤(Phyto., cells/ml)은 현장수를 500 ml 채수통에 직접 담아 lugol's solution으로 2%가 되게 고정하였으며, 동물플랑크톤(Zoo., inds./L)은 2 L 비이커를 이용하여 채수한 후 플랑크톤네트(망목 63 µm)에 거르는 작업을 5회 반복하여 총 10 L 정량채집하여 현장에서 5% 포르말린으로 고정하여 실내분석을 실시하였다.

(표 2.2) 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 <sub>4</sub>	add H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc.(<pH 2) preserved in low temp.	-
SS	Filtering method of GF/C	-	-
TN	UV Spectrophotometric method	add H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc.(<pH 2) preserved in low temp.	Spectrophotometer HP 8453
TP	Spectrophotometric method (Ascorbic acid)	add H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc.(<pH 2) preserved in low temp.	Spectrophotometer HP 8453
PO <sub>4</sub> -P	Spectrophotometric method (Molybdenic acid)	Filtered by GF/C, and preserved in low temp.	Spectrophotometer HP 8453
Chl-a	Spectrophotometric method (Aceton extraction)	Extraction of filtered GF/C by acidified aceton	Spectrophotometer HP 8453

#### 다. 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.

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

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

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

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

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.

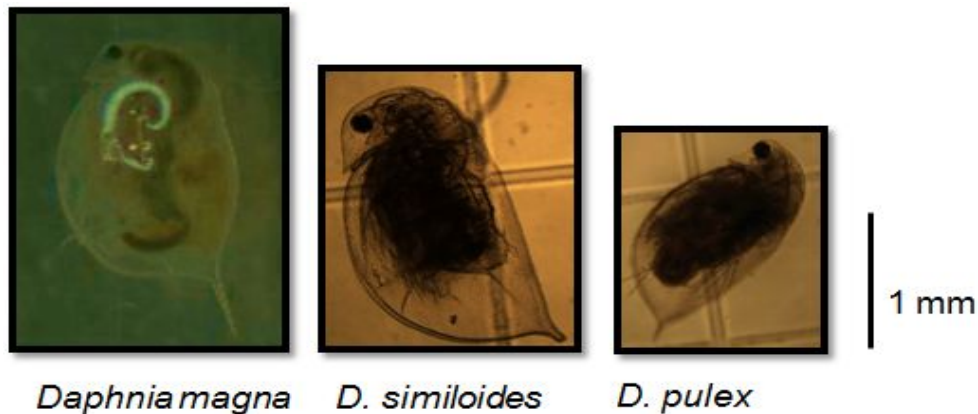
#### 라. 천적생물 분포현황

연구대상지인 전대저수지에 자연 서식하고 있는 천적생물의 시공간분포를 파악하고 천적생물로 활용하기 위해 2011년 3월부터 10월에 걸쳐 동물플랑크톤 군집의 종조성과 개체군 밀도 변화를 정점 JD1, JD2, JD3에서 정기 모니터링 하였다. 녹조 제어능력을 가진 대형 지각류 및 대형 윤충류의 시, 공간적 분포를 파악하고, 기타 동물플랑크톤 군집조성을 분석하기 위해 표층수 10 L를 채수, 플랑크톤네트(망목 63  $\mu\text{m}$ )를 이용하여 동물플랑크톤을 분리하고 포르말린으로 고정하였다. 고정된 시료는 광학현미경을 통해, 속 또는 중 수준으로 동정, 계수하여 군집조성과 개체군 밀도의 계절변화를 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 2.3> 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℃), 적정 먹이양(클로렐라,  $6.6 \times 10^5$  cells/ml) 조건에서 개체군 성장을 비교하였다. 또한 다양한 먹이조건과 온도에서의 성장을 비교하기 위해 먹이농도를 저농도( $3.3 \times 10^5$  cells/ml), 중농도( $6.6 \times 10^5$  cells/ml), 고농도( $2.0 \times 10^6$  cells/ml) 조건에서, 수온 20, 25, 30℃로 변화시킨 조건에서 실험한 후 평가하였다.

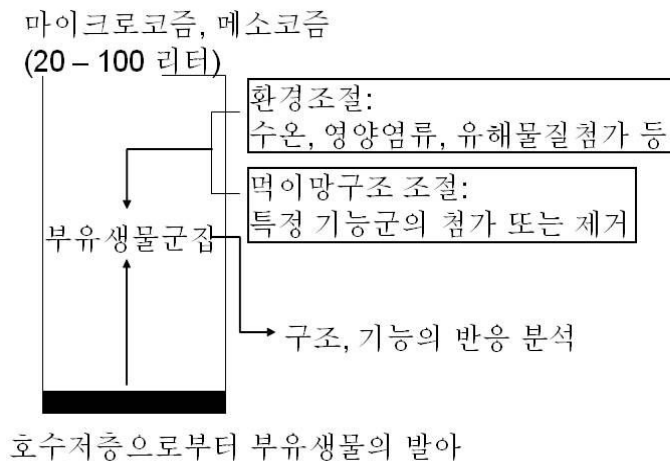
3종의 천적생물 후보 종들의 녹조제어능력을 평가하기 위해서 녹조 번성 시기의 부영양화된 저수지인 기흥저수지와 전대저수지의 원수를 이용하여 실

험실 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 ℃, 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 2.4> *Daphnia pulex* 및 *Daphnia similoides* 1차 배양 실험

### 3. 천적생물 배양장치의 대량배양 성능

#### 가. 자연분리 천적생물 배양성능

연구대상지역에 서식하는 천적생물의 자연분리를 통해 봄철 4월 19일 ~ 5월 17일과 가을철 11월 4일 ~ 11월 11일에 천적생물 대량배양을 실시하였고, 실험기간동안 배양장치 내 수질변화 및 동·식물플랑크톤의 변화량을 표 2.3와 같은 운영조건으로 실험하고 분석하였다. 모니터링 지점은 10 m<sup>3</sup> 배양장치는 그림 2.5와 같이 유입(Inflow1), 식물플랑크톤 배양조(A-p, B-p), 동물플랑크톤 배양조(A-z, B-z)로 구분하였고, 30 m<sup>3</sup> 배양장치는 그림 2.6와 같이 유입(Inflow2), 식물플랑크톤 배양조(G-p, H-p, I-p), 동물플랑크톤 배양조(G-z, H-z, I-z)로 구분하였다.

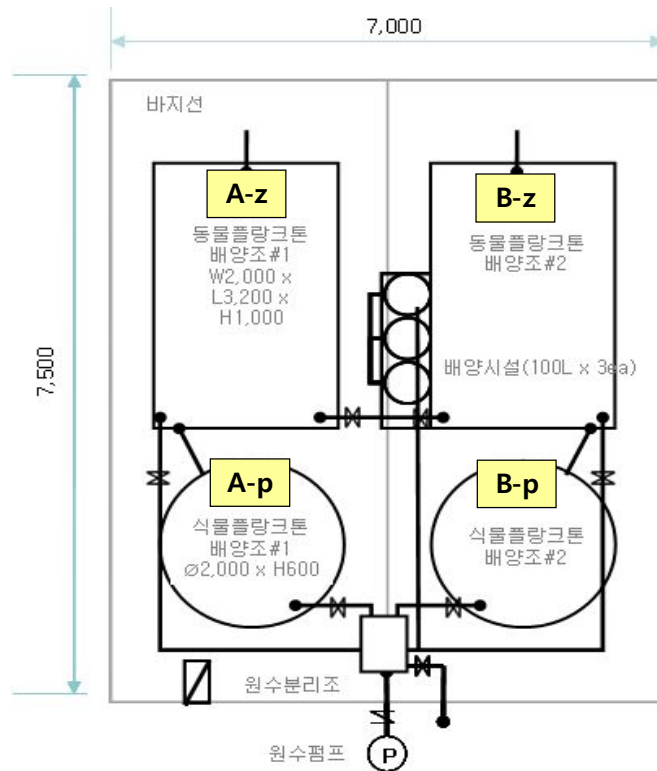
(표 2.3) 천적생물 배양장치 운영조건

기간		천적생물	모니터링 지점	분석 내용
1차	4/19 ~ 5/17	자연분리종	Inflow1, A-p, A-z, B-z	수온, DO, COD, Chl- <i>a</i> , TN(태별), TP(태별), 식물플랑크톤(500 ml), 동물플랑크톤(45 μm net, 10 L)
2차	5/18 ~ 6/17	<i>Daphnia</i> spp.	Inflow1, A-z, B-z	동물플랑크톤(컬럼샘플러, 길이 0.6 m, 1.2 L) 중층 3회 + 벽면 3회 채수 후, 63μm net (경희대학교)
3차	7/5 ~ 7/31			
4차	8/6 ~ 9/18			
5차	9/27 ~ 10/17		A-z, B-z, G-z, H-z, I-z	
6차	11/04 ~ 11/11	자연분리종	Inflow1, A-p, A-z, Inflow2, G-p, G-z	수온, pH, Chl- <i>a</i> , TN, TP(태별), 식물플랑크톤(500 ml), 동물플랑크톤(45 μm net, 10 L)

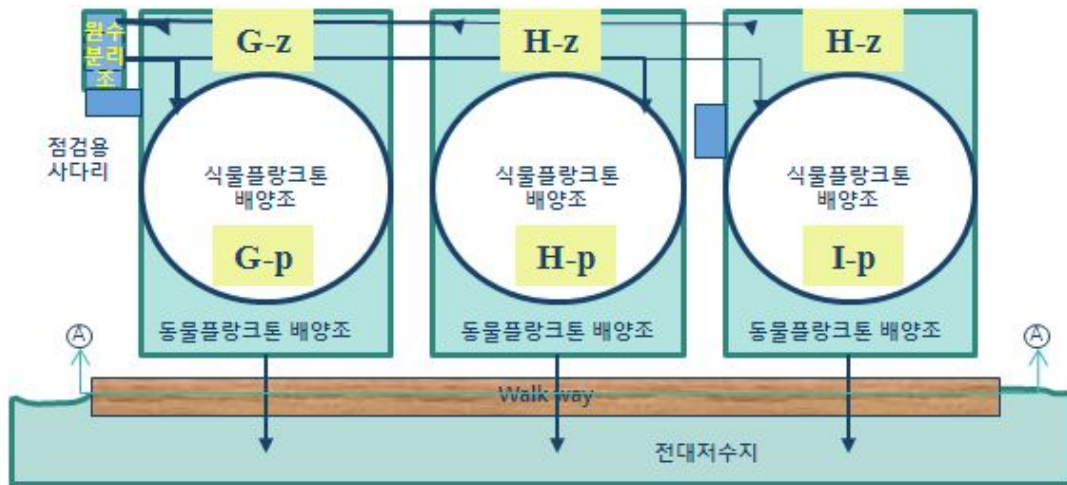
봄철 실시한 1차 자연분리 천적생물 배양성능 실험은 수상형 배양장치에서 1차년도에 도출한 최적의 배양조건으로 식물플랑크톤 배양조 체류시간 3일과 동물플랑크톤 배양조 4일에 맞춰 대량배양 실험을 실시하였다.

가을철 실시한 2차 실험은 수상형 배양장치와 육상형 배양장치 두 군데에서 모두 배양을 실시하여 수질 분석 및 동·식물플랑크톤의 변화량을 표 2.3과 같은 운영조건으로 실험하고 분석하였다.





<그림 2.5> 수상형 배양장치(10 m<sup>2</sup>) 조사 지점도



<그림 2.6> 육상형 천적생물 배양장치(30 m<sup>2</sup>) 조사 지점도

#### 나. *Daphnia* 천적생물 배양성능

75 L 규모의 실내 배양수조에서 1차 배양된 천적생물 종주를 현장으로 이동하여 6 ~ 8월 동안 10m<sup>2</sup> 규모 수상형 천적생물 배양장치(5 m<sup>2</sup>, 2조)에 접종하여 대량배양을 실시하였으며, 10월에는 30 m<sup>2</sup> 규모 육상형 천적생물 배양장치(10 m<sup>2</sup>, 3조)에 접종, 배양하여 최적 배양 조건 실험을 실시하였다.

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 2.3와 같은 조건으로 실험, 분석하였다. 또한, 저수지 중앙의 자연분포 천적생물과 동물플랑크톤 군집의 종조성, 개체군 밀도 변화를 분석하여 천적생물 배양장치내 천적생물의 대량 배양성능을 평가하였다.

#### 4. 천적생물 현장살포 효과분석

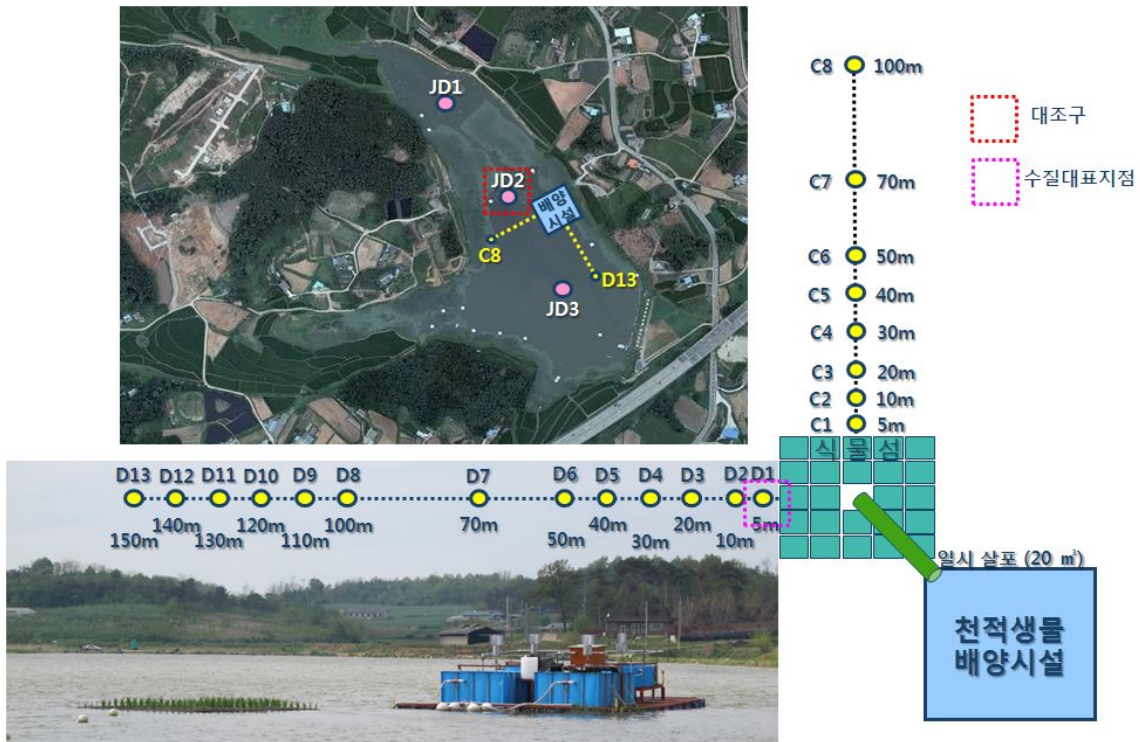
##### 가. 자연분리형 천적생물 현장살포 효과분석

자연분리형 천적생물의 녹조제거 효과를 분석하기위해 5월 17일부터 6월 9일까지 천적생물 배양장치에서 대량 배양한 자연분리형 천적생물을 녹조 발생 수역에 일시 살포한 후 거리별, 시간별 천적생물 및 녹조원인 식물플랑크톤 개체수를 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

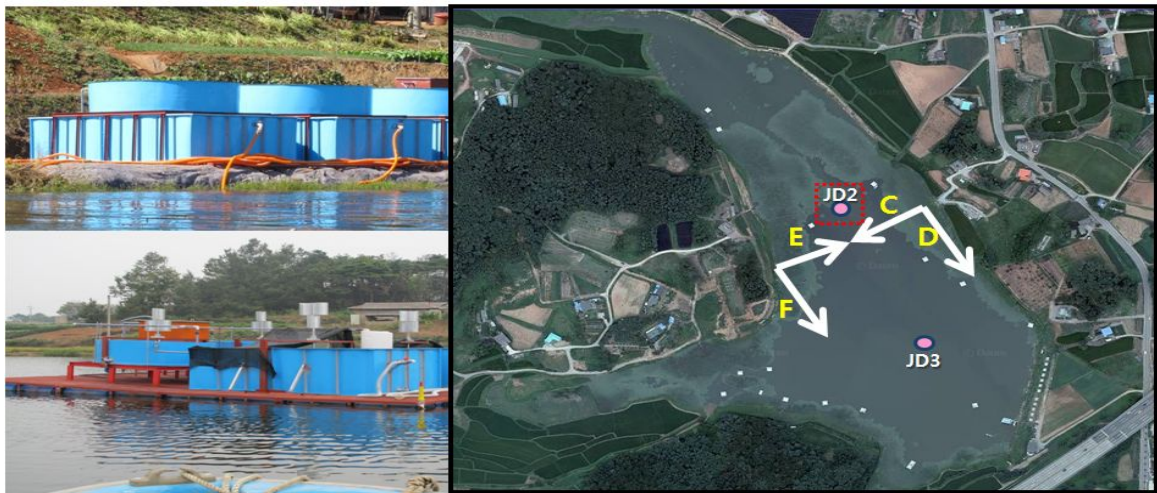
기간		천적생물	모니터링 지점	분석 내용	플랑크톤 분석
1차	5/17 ~ 6/09	자연분리종	JD1, JD2, JD3 C1 ~ C8 D1 ~D13	수온, DO, COD, Chl- <i>a</i> , TN(태별), TP(태별),	식물플랑크톤(500mL), 동물플랑크톤(63μm net, 10L)
2차	6/17 ~ 6/28				
3차	10/17 ~ 11/03	<i>Daphnia</i> spp.	JD1, JD2, JD3 M1, M2 C1 ~ C8 D0 ~ D13 E0 ~ E6 F1 ~ F7	수온, pH, EC, COD, Chl- <i>a</i> , TN(태별), TP(태별),	식물플랑크톤(500mL), 동물플랑크톤(63μm net, 수심별 수직끌기)

살포시험은 자체 제작한 관측 부표(drafter)를 활용하였다. 천적생물을 투입하기 전에 살포수역의 수평방향에 13개의 부표와 수직방향 8개의 부표를 띄우고 천적생물을 일시에 투입한 다음 각 부표마다 t = 0(투입직전), 2, 4, 6, 8, 10, 13, 16, 23일 단위로 동물플랑크톤과 식물플랑크톤 현존량을 분석하여 주요 이동방향과 범위에 따른 녹조제거 효과를 분석하였다.



<그림 2.7> 부수형 천적생물 배양장치 살포 지점

나. *Daphnia* 천적생물 현장살포 효과분석



<그림 2.8> *Daphnia* 대량 살포 지점

*Daphnia* 천적생물의 녹조제거 효과를 분석하기 위해 10월 17일부터 11월 3일까지 천적생물 배양장치에서 대량 배양한 천적생물을 녹조발생 수역에 일시 살포한 후 거리별, 시간별 천적생물 및 녹조원인 식물플랑크톤 개체수를 분석하였다.

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

살포시험은 자체 제작한 관측 부표(drafter)를 활용하였다. 천적생물을 투입하기 전에 10개의 부표를 살포수역의 수평방향과 수직방향으로 띄우고 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.

## 5. 천적생물 배양장치의 적용범위 및 규모 산정, 녹조제어 성능 평가

### 가. 자연분리 천적생물 현장 적용범위 및 규모산정

자연분리 천적생물의 현장 적용범위와 규모산정은 대량배양 및 살포 실험에서 도출된 값을 기준으로 계상하였다.

녹조발생 농도에 따라 천적생물 투입량은 각각 달라지는데, 녹조발생시 Chl-*a* 농도 기준으로  $100 \text{ mg/m}^3$ 구간에서부터  $30 \text{ mg/m}^3$ 구간까지 반경 50 m 면적 내 식물플랑크톤 농도를 Chl-*a*  $25 \text{ mg/m}^3$ 까지 제어할 때 필요한 천적생물 투입량을 분석하여 제시하였고 그 계산식은 다음과 같다.

Chl-*a* 농도에 따른 살포거리당 최적개체수 \* {(제거율 평균/(Chl-*a* 농도/Chl-*a* 25)}

최적개체수\*{Chl-*a* 농도 /대조구 Chl-*a* 농도} = Chl-*a* 농도에 따른 살포거리당 최적개체수

### 나. 천적생물 배양장치의 녹조제어 성능 평가

천적생물 대량살포 실험에서 도출된 녹조 제어량을 기준으로 나온 결과를 토대로 천적생물 배양장치의 녹조제어 성능평가를 실시하였다.

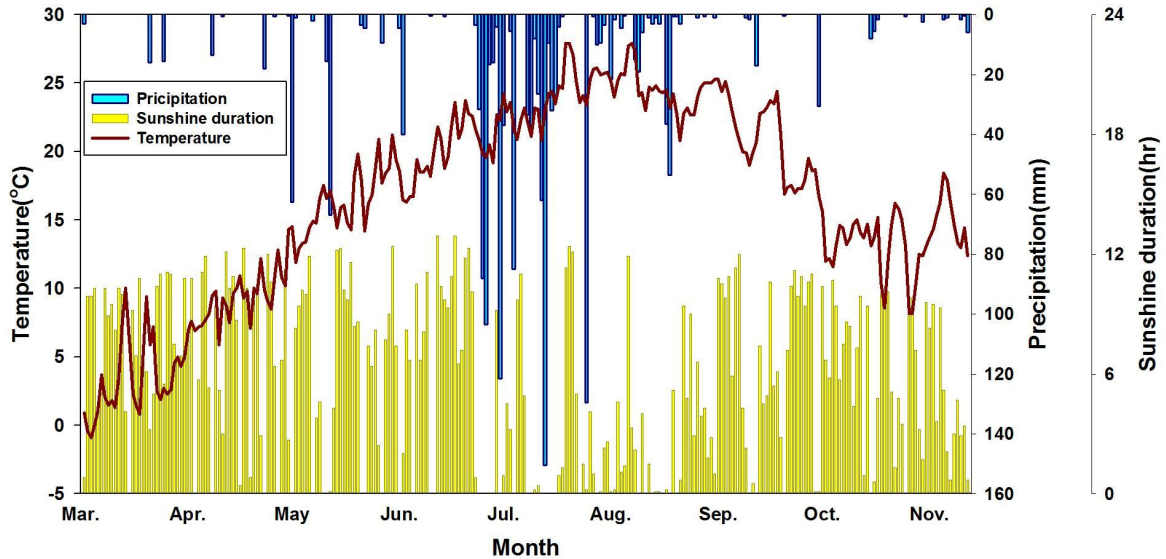
천적생물 배양장치에서 배양된 최적의 개체수를 녹조발생구역에 투입했을 시 살포 1일차부터 14일차까지 반경 100 m 면적의 평균 녹조 제거율을 제시하여 녹조제어 성능과 살포주기를 산출하였다.

녹조 제거율 계산식은 다음과 같다

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

## 제2절 전대저수지 녹조발생 특성 및 수환경 모니터링

### 1. 기상현황



<그림 2.9> 전대저수지의 기상조건

기상자료는 서산기상대 자료를 이용하여 2011년 3월 1일부터 11월 11일까지 분석하였다.

연구 기간 중 기온은 평균: 16.4 °C로 나타났으며, 계절별로 -9.0 ~ 27.9 °C로 3월에 영하의 낮은 기온을 보이고 11월에는 9월 중순과 유사할 정도의 높은 기온분포를 보였으며, 5월 ~ 9월, 11월 일부기간에 15 °C 이상의 기온을 보이고 있어 녹조발생에 유리한 조건을 보였다.

총 강수량은 1587.8 mm로 나타났으며, 시기별로는 6월에 462.6 mm의 강우로 기간 중 29.1%가 집중하였고, 7월은 656.5 mm의 강우로 기간 중 41.3%가 집중하였다. 특히 7월 12일에는 150.5 mm가 집중하였다.

평균 일조시간은 5.6시간으로 나타났으며, 3, 4, 9월의 일조시간이 6.7 ~ 7.7시간으로 높게 나타났고, 집중강우가 발생한 7월에는 평균 2.7시간의 낮은 일조시간을 보였다. 본격적인 대량살포 실험이 이루어진 5월과 10월에는 각각 6.3시간으로 녹조제어 실험을 하는데 양호한 일조량을 보여주었다.

## 2. 수질현황

연구기간 중 수온(W.temp.) 변화는 평균 20.7 °C로서, 7.5 ~ 27.6 °C의 범위로 나타났다. 지점별로 JD1의 수온은 평균 20.6 °C로 8.1 ~ 27.1 °C의 범위를 보였으며, JD2의 수온은 평균 20.8 °C로 8.5 ~ 27.0 °C의 범위를 보였고, JD3의 수온은 평균 20.6 °C로 7.5 ~ 27.6 °C의 범위를 보여 지점별 차이보다는 계절적 변이가 크게 나타났다.

pH 변화는 평균 9.1로서, 7.7 ~ 9.8의 범위로 나타났다. 지점별 평균은 JD1과 JD2는 9.1, JD3은 9.0으로 지점별 차이는 보이지 않았으며, 시기별로는 강우와 흐린 기상상태로 7월에 7.7 ~ 8.4의 범위로 낮은 pH를 보인 것을 제외하고 큰 차이를 보이지 않았다.

전기전도도(EC)는 평균 232  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서, 156 ~ 325  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위로 나타났다. 지점별로 JD1의 EC는 평균 227  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로, 157 ~ 293  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위를 보였으며, JD2의 EC는 평균 233  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 157 ~ 305  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위를 보였고, JD3의 EC는 평균 237  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 156 ~ 325  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위를 보여, 유입부(JD1)에서 호내(JD3)로 갈수록 점차 증가하는 경향을 보였다. 시기별로 집중강우가 발생한 7월은 희석효과에 의해 평균 157  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 나타나, 6월에 평균 284  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 나타난 것에 비해 급격히 감소하였으며, 이후 점차 증가하였다.

용존산소량(DO)은 평균 11.5 mg/L로서, 6.6 ~ 16.8 mg/L의 범위로 나타났다. 지점별로 JD1의 DO는 평균 12.0 mg/L로 7.8 ~ 16.4 mg/L의 범위를 보였으며, JD2의 DO는 평균 11.5 mg/L로 6.6 ~ 16.8 mg/L의 범위를 보였고, JD3의 DO는 평균 11.0 mg/L로 7.1 ~ 15.5 mg/L의 범위를 보여, 지점별 큰 차이를 보이지 않았다. 또한, 시기별로는 계절변화에 의해 점차 감소하다 집중강우에 의한 영향을 받은 7월에 가장 낮게 나타났으며, 이 후 재증가 하였다.

화학적 산소요구량(COD)은 평균 15.7 mg/L로서, 7.8 ~ 19.6 mg/L의 범위로 나타났다. 지점별로는 유입부인 JD1에서 평균 16.3 mg/L로 가장 높게 나타났으며, 9.6 ~ 19.6 mg/L의 범위를 보였다. 호내인 JD3은 평균 15.0 mg/L로 나타났으며, 7.8 ~ 18.0 mg/L의 범위를 보여, 호내로 갈수록 점차 감소하는 경향을 보였다. 시기별로는 강우에 의한 희석효과로 7월에 평균 8.7 mg/L을 보인 것을 제외하고, 모든 시기에 12.0 mg/L을 초과하는 것으로 나타나, 농업용수 수질기준(COD < 8 mg/L)을 초과하는 심각한 유기물 오염현상을 보였다.

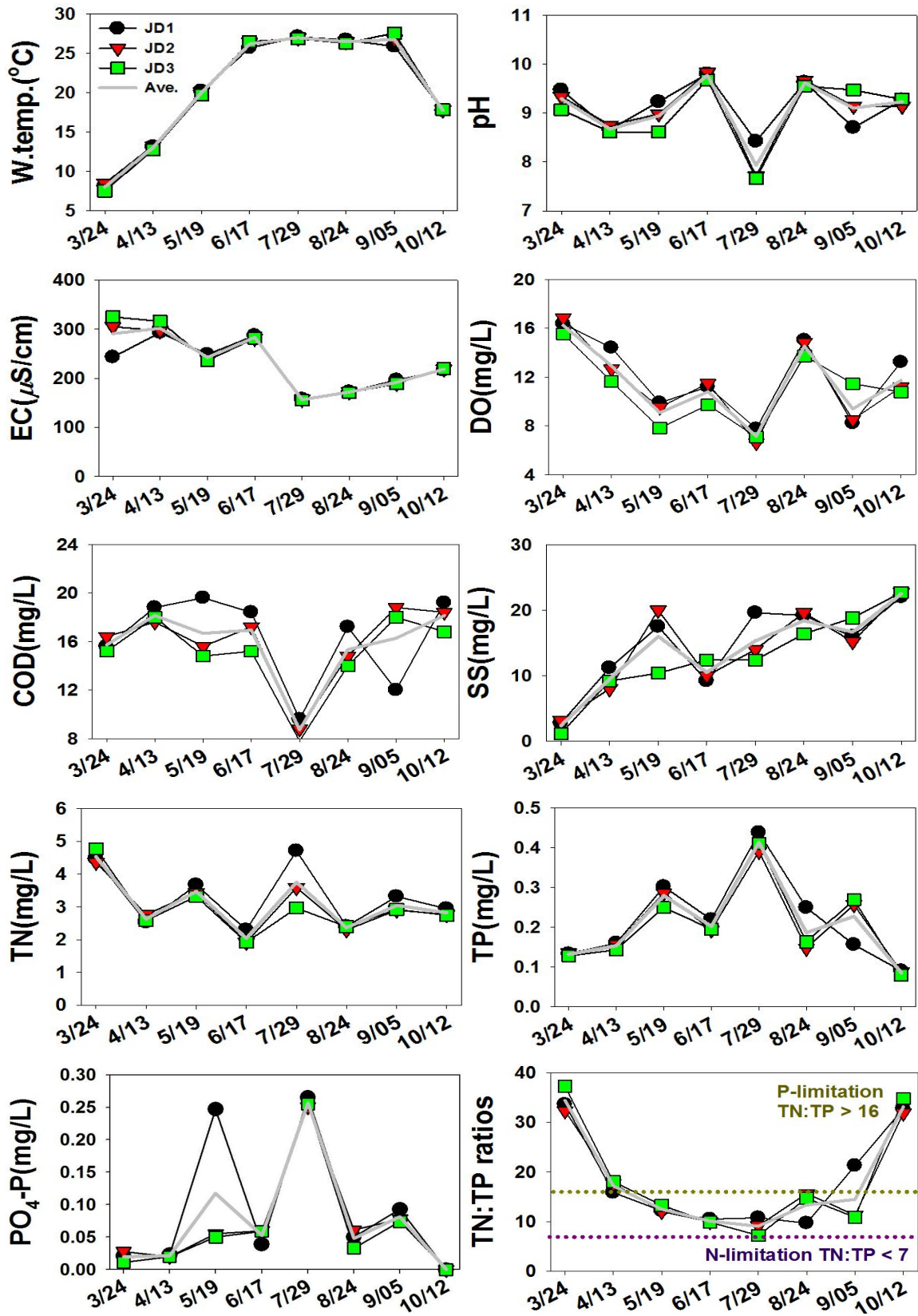
부유물질(SS)은 평균 13.9 mg/L로서, 1.2 ~ 22.7 mg/L의 범위로 나타났다. JD1은 평균 14.7 mg/L로 2.8 ~ 22.0 mg/L의 범위를 보였으며, JD2는 평균 14.1 mg/L로 3.2 ~ 22.7 mg/L의 범위를 보였고, JD3은 평균 12.9 mg/L로 1.2 ~ 22.7 mg/L의 범위를 보여, 지점별로는 COD와 마찬가지로 유입부인 JD1에서 가장 높게 나타났고, 시기별로는 점차 증가하는 경향을 보였다.

총질소(TN)는 평균 3.086 mg/L로서, 1.922 ~ 4.771 mg/L의 범위로 전체시기에 농업용수 수질기준(TN < 1.0 mg/L)을 초과하는 것으로 나타났다. JD1은 평균 3.295 mg/L로 2.297 ~ 4.712 mg/L의 범위를 보였으며, JD2는 평균 3.008 mg/L로 1.992 ~ 4.363 mg/L의 범위를 보였고, JD3은 평균 2.954 mg/L로 1.922 ~ 4.771 mg/L의 범위를 보여, 지점별로는 유입부인 JD1에서 가장 높게 나타났다. 또한, 시기별로는 3월(평균 4.535 mg/L)에 최고치를 보인 후, 6월(평균 2.047 mg/L)까지 점차 감소하였고, 집중강우의 영향으로 7월(평균 3.757 mg/L)에 급격히 증가한 것으로 나타났다.

총인(TP)은 평균 0.210 mg/L로서, 0.079 ~ 0.438 mg/L의 범위로 나타났다. JD1은 평균 0.218 mg/L로 0.090 ~ 0.438 mg/L의 범위를 보였으며, JD2는 평균 0.207 mg/L로 0.087 ~ 0.391 mg/L의 범위를 보였고, JD3은 평균 0.205 mg/L로 0.079 ~ 0.411 mg/L의 범위를 보여, TN과 마찬가지로 유입부인 JD1에서 가장 높게 나타났다. 또한, 시기별로는 3 ~ 9월까지 농업용수 수질기준(TP < 0.1 mg/L)을 초과하는 것으로 나타났으며, 특히 7월은 집중강우의 영향으로 모든 지점에서 최고치를 보였다.

인산염인( $\text{PO}_4\text{-P}$ )은 평균 0.750 mg/L로서, 불검출 ~ 0.265 mg/L의 범위로 나타났다. JD1은 평균 0.092 mg/L로 불검출 ~ 0.265 mg/L의 범위를 보였으며, JD2는 평균 0.069 mg/L로 불검출 ~ 0.251 mg/L의 범위를 보였고, JD3은 평균 0.063 mg/L로 불검출 ~ 0.255 mg/L의 범위를 보여, TP와 마찬가지로 유입부인 JD1에서 가장 높게 나타났다. 또한, 시기별로는 5 ~ 7월까지 0.005 이상으로 높게 나타났으며, 7월에 0.257 mg/L로 가장 높은 값을 보였다.

TN:TP ratios는 연구기간동안 평균 18.0로서, 7.2 ~ 37.3의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD1과 JD3 평균 18.3, JD2 평균 17.5로 큰 차이를 보이지 않았으나, 시기별로는 4월에 평균 34.4로 최고치를 보인 후, 7월까지 평균 9.1로 감소한 후, 10월까지 평균 33.1로 증가하였다. 이때, 3월 ~ 4월, 10월은 인이 제한(TN:TP > 16)으로 작용하였으나, 5월 ~ 9월은 인 영양염의 증가로 인과 질소가 동시( $7 < \text{TN:TP} < 16$ )에 영향을 미치는 것으로 나타났다.



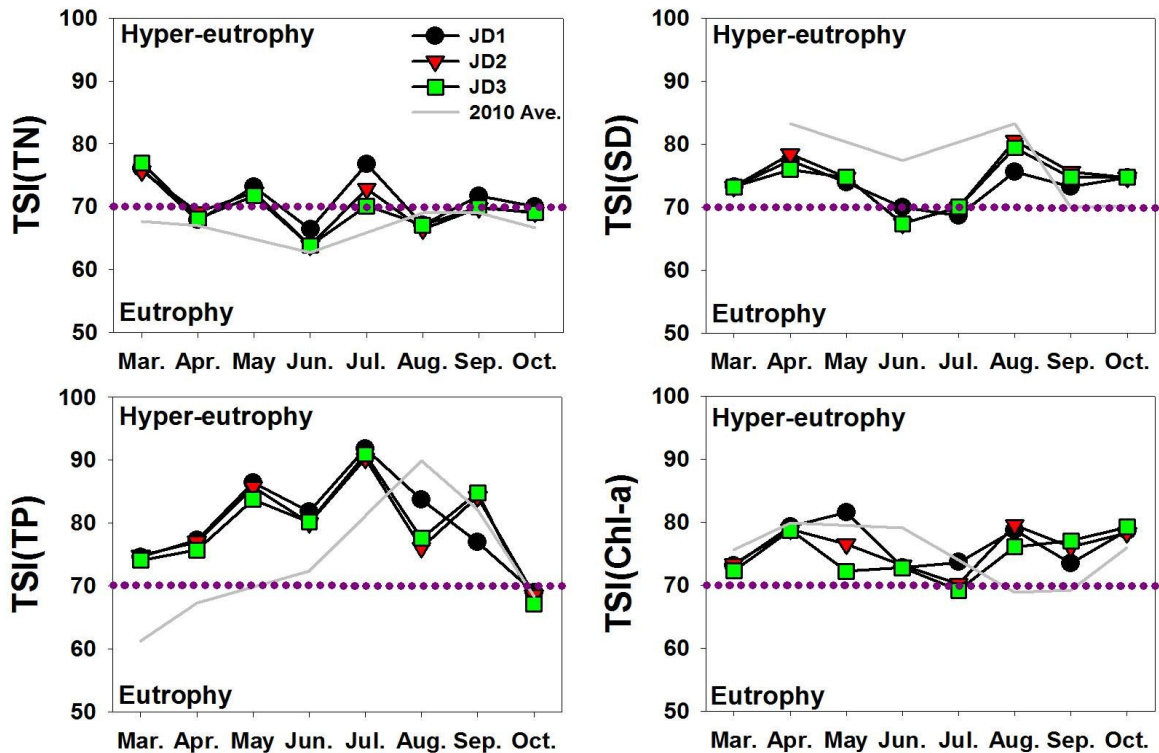
<그림 2.10> 전대저수지의 지점별·시기별 수질변화



### 3. 부영양화 및 녹조발생현황

#### 가. 전대저수지 부영양화 특성

전대저수지의 부영양화특성을 파악하기 위하여, Kratzer and Brezonik(1981; TN) 및 Carlson(1977; TP, SD, Chl-*a*)에 의한 부영양화지수 (Trophic State Index, TSI) 분석을 실시하였다.



<그림 2.11> 전대저수지의 부영양화지수(TSI) 분석

TSI(TN)은 평균 70.2로서, 63.9 ~ 77.0의 범위로 과영양상태(Hyper-eutrophy, He)로 나타났으며, 2010년에 평균 67.0으로 부영양상태(Eutrophy, Eu)로 나타난 것에 비해 부영양화가 더욱 진행된 것으로 나타났다. 또한, 지점별로는 JD1에서 평균 71.2), JD2에서 평균 69.9, JD3에서 평균 69.6로 유입부에서 가장 높게 나타났다. 또한, 시기별로 3월은 평균 76.3의 과영양상태(He)로 최고치를 보인 반면, 6월은 평균 64.7의 부영양상태(Eu)로 기간 중 최소치를 보여, 시기별 차이가 크게 나타났다.

TSI(TP)는 평균 79.7로서, 67.2 ~ 91.9의 범위로 10월을 제외하고, 전체시기에 과영양상태(He)로 나타났으며, TN과 마찬가지로 2010년에 평균

73.6로 나타난 것에 비해 부영양화가 더욱 진행된 것으로 나타났다. 또한, 지점별로는 JD1에서 평균 80.2, JD2에서 평균 79.6, JD3에서 평균 79.3으로 유입부에서 가장 높게 나타났다. 또한, 시기별로는 7월에 평균 91.0로 최고치를 보였으며, 10월은 평균 68.2로 최소치를 보였으나, 전반적으로 부영양화가 심각한 것으로 나타났다.

TSI(SD)는 평균 73.8로서, 67.4 ~ 80.6의 범위로 나타났으며, 6월에 평균 68.2, 7월에 평균 69.5로 부영양상태(Eu)를 보인 것을 제외하고, 전체시기에 과영양상태(He)로 나타났으며, 2010년의 평균 73.6와 유사한 TSI(SD)를 보였다. 지점별로는 영양염류와는 달리 수심이 가장 낮은 JD2(평균 74.3)에서 가장 부영양화가 진행된 것으로 나타났다.

TSI(Chl-*a*)는 평균 75.6로서, 69.2 ~ 81.6의 범위로 나타나, 7월 29일에 JD3에서 69.2를 보인 것으로 제외하고, 전체시기에 과영양상태(He)로 나타났으며, 2010년의 평균 74.8과 비교해서 다소 높게 나타났으나, 큰 차이를 보이지 않았다.

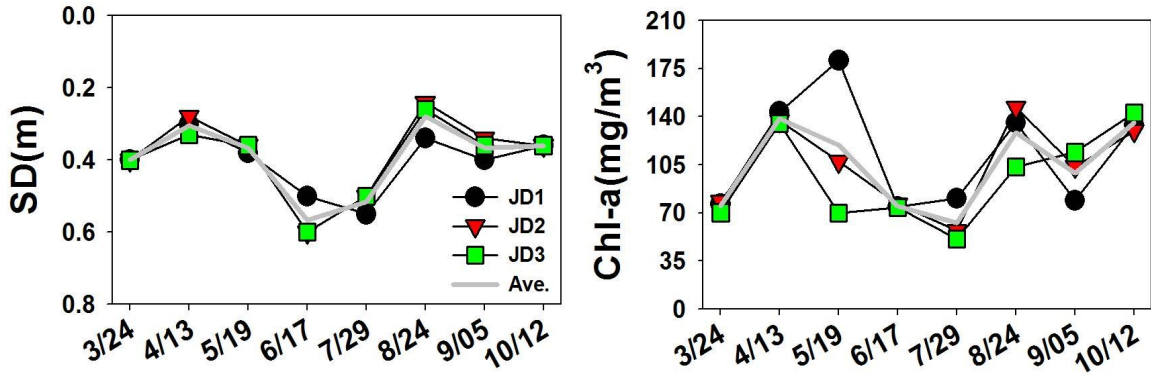
전대저수지의 부영양화지수는 전반적으로 과영양상태(TSI > 70)로 나타났으며, 특히 유입부인 JD1에서 부영양화가 가장 심각한 것으로 나타나, 본 연구대상지의 상류에서 유입되는 고농도의 영양염류에 의해 본 저수지의 부영양화가 더욱 진행되고 있는 것으로 판단되었다. 또한, Chl-*a*의 시기별 변화는 SD와 유사한 경향을 보임에 따라, Chl-*a*와 같은 유기성부유물(VSS)에 의해 본 연구대상지의 투명도가 많은 영향을 받고 있는 것으로 판단되었으며, TN 및 TP와 같은 영양염류는 Chl-*a*의 농도변화 영향을 미치고 있는 것으로 판단되었다.

#### 나. 전대저수지의 녹조발생특성

SD는 평균 0.4 m로서, 0.24 ~ 0.60 m 범위의 매우 낮은 투명도를 보였다. 지점별로 JD1은 평균 0.40 m로 0.30 ~ 0.55 m의 범위를 보였으며, JD2는 평균 0.39 m로 0.24 ~ 0.60 m의 범위를 보였고, JD3은 평균 0.40 m로 0.26 ~ 0.60 m의 범위를 보여, 지점별 변화보다는 시기별 변화가 큰 것으로 나타났다.

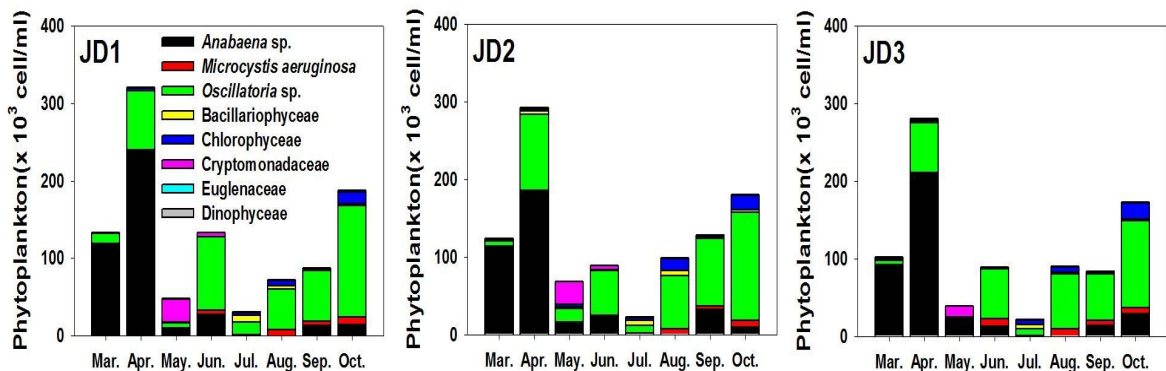
Chl-*a*는 평균 104.2 mg/m<sup>3</sup>로서, 51.1 ~ 181.1 mg/m<sup>3</sup>의 범위로 나타났다. JD1은 평균 113.1 mg/m<sup>3</sup>로 74.3 ~ 181.1 mg/m<sup>3</sup>의 범위를 보였으며, JD2는 평균 104.6 mg/m<sup>3</sup>로 57.0 ~ 146.9 mg/m<sup>3</sup>의 범위를 보였고, JD3은 평균 95.1 mg/m<sup>3</sup>로 51.1 ~ 142.7 mg/m<sup>3</sup>의 범위를 보여, 지점별로는 유입부인 JD1에서 가장

높게 나타났다. 또한, 시기별로는 전체시기에 농업용수 수질기준( $\text{Chl-a} < 35 \text{ mg/m}^3$ )을 초과하였고, 특히 일부시기에는 평균  $100 \text{ mg/m}^3$ 을 초과하는 조류경보 수준을 보였다.



<그림 2.12> 지점별 SD 및 Chl-a 변화

본 연구대상지인 전대저수지의 녹조( $\text{Chl-a}$ )와 투명도( $\text{SD}$ )의 변화양상을 지점별, 시기별 일부 차이는 있으나, 비교적 일치하는 경향을 보임에 따라, 녹조발생에 의한 수체 내 유기성 부유물 증가로 호내 투명도가 영향을 받고 있는 것으로 판단되었다. 특히,  $\text{Chl-a}$ 는 평균  $100 \text{ mg/m}^3$ 을 초과하는 높은 농도를 보였으며,  $\text{SD}$ 는 평균  $0.4 \text{ m}$ 의 매우 낮은 투명도를 보임에 따라, 본 연구대상지의 녹조가 심각한 수준으로 나타났다.



<그림 2.13> 지점별 시기별 식물플랑크톤 현존량 및 종조성

연구기간동안 본 연구대상지의 식물플랑크톤 현존량은 평균  $120.6 \times 10^3 \text{ cells/ml}$  ( $109.7 \sim 126.6 \times 10^3 \text{ cells/ml}$ )로 나타났다.

시기별로는 집중강우가 발생한 7월(JD1:  $31.1 \times 10^3 \text{ cells/ml}$ , JD2:  $22.7 \times 10^3 \text{ cells/ml}$ , JD3:  $21.4 \times 10^3 \text{ cells/ml}$ )에 가장 낮은 현존량을 보였으며, 4월(JD1:  $320.6 \times 10^3 \text{ cells/ml}$ , JD2:  $292.2 \times 10^3 \text{ cells/ml}$ , JD3:  $280.0 \times 10^3$

cells/ml)에 가장 높은 현존량을 나타냈다.

봄철(3 ~ 4월)에는 남조류(Cyanophyceae)인 *Anabaena* sp.가 우점하였으나, 5월에 갈색편모조류(Cryptomonadaceae)인 *Cryptomonas* spp.가 JD1과 JD2에서 우점하였으며, 하계로 접어들면서 *Oscillatoria* sp.가 우점하였다.

(표 2.5) 지점별 식물플랑크톤 우점종 특성

	JD1	JD2	JD3
Mar.	<i>Anabaena</i> sp. (88.9%)	<i>Anabaena</i> sp. (92.3%)	<i>Anabaena</i> sp. (89.9%)
Apr.	<i>Anabaena</i> sp. (74.6%)	<i>Anabaena</i> sp. (63.8%)	<i>Anabaena</i> sp. (75.2%)
May	<i>Cryptomonas</i> spp. (61.6%)	<i>Cryptomonas</i> spp. (61.1%)	<i>Anabaena</i> sp. (61.8%)
Jun.	<i>Oscillatoria</i> sp. (70.7%)	<i>Oscillatoria</i> sp. (65.4%)	<i>Oscillatoria</i> sp. (72.7%)
Jul.	<i>Oscillatoria</i> sp. (49.8%)	<i>Oscillatoria</i> sp. (44.8%)	<i>Oscillatoria</i> sp. (39.6%)
Aug.	<i>Oscillatoria</i> sp. (73.0%)	<i>Oscillatoria</i> sp. (70.3%)	<i>Oscillatoria</i> sp. (78.0%)
Sep.	<i>Oscillatoria</i> sp. (74.9%)	<i>Oscillatoria</i> sp. (67.7%)	<i>Oscillatoria</i> sp. (71.2%)
Oct.	<i>Oscillatoria</i> sp. (76.4%)	<i>Oscillatoria</i> sp. (77.6%)	<i>Oscillatoria</i> sp. (65.1%)

#### 4. 천적생물 분포현황

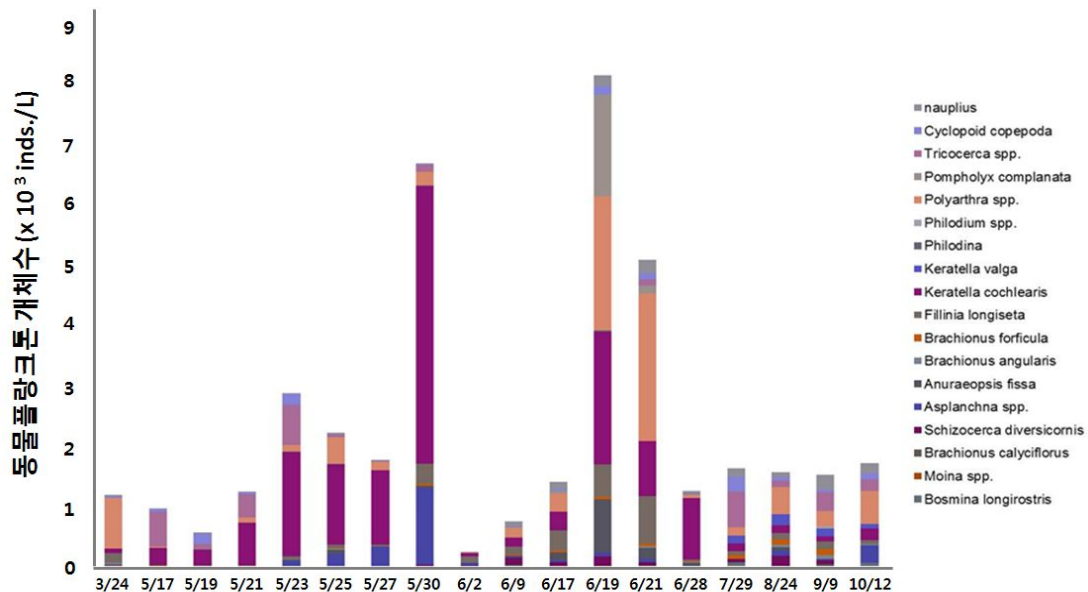
전대저수지에서 녹조를 제어할 수 있는 천적생물인 동물플랑크톤의 종조성은 부영양화호수가 가지는 전형적인 종조성으로 박테리아 및 식물플랑크톤을 섭식하는 소형 윤충류가 연중 우점하고, 발생하는 녹조를 제어할 수 있는 천적생물로서의 기능을 가진 대형 지각류는 분포하지 않는 것으로 나타났다.

연구기간 중 동물플랑크톤 군집변화를 집중적으로 정기 모니터링한 지점 JD2에서의 동물플랑크톤 군집의 계절변화를 살펴보면, 동물플랑크톤 군집은 소형 윤충류인 *Polyarthra* spp.와 *Keratella cochlearis*가 연중 우점하며, 전체 동물플랑크톤 개체수는 5월에서 6월 최고치를 보이고, 7월 이후 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 5월에서 6월 사이에는 천제 동물플랑크톤의 개체수가 8,000 inds./L에 달하는 고밀도를 나타내었다(그림 2.14).

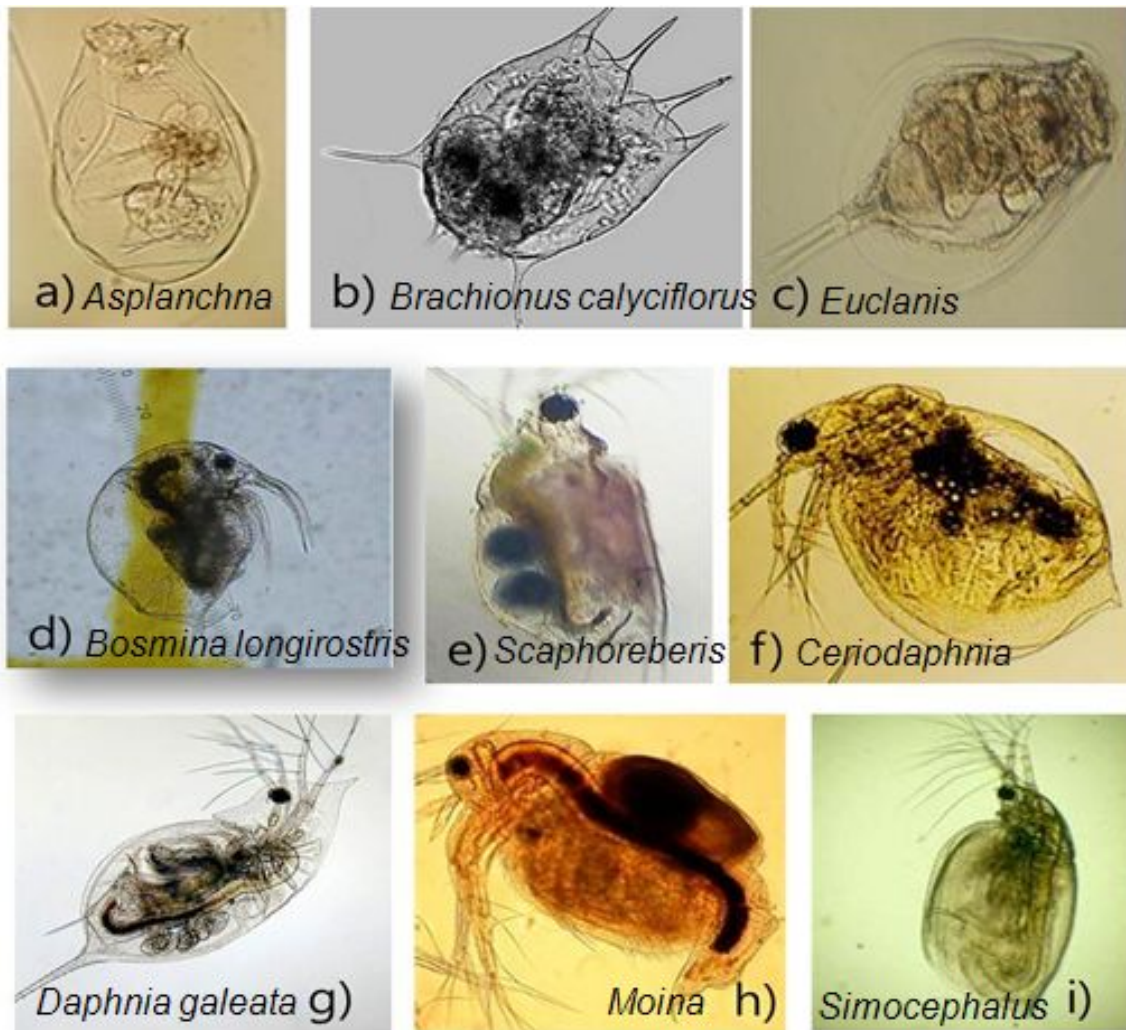
하지만, 최대 개체수가 5,000 inds./L에 달하는 것으로 나타난 *Keratella cochlearis* 등의 소형 윤충류는 저감 대상인 녹조발생을 유도하는 남조류는 섭식하지 못하는 것으로 알려져있다. 반면, 윤충류 중 녹조제어 능력을 가진 것으로 사료되는 중형 및 대형 윤충류인 *Brachionus* 속, *Asplanchna* 속 등은 3월에서 5월 사이 일시적으로 증가하였으나, 소형 윤충류에 비해 연중 낮은 개체군 밀도를 나타냈다(그림 2.14).

(표 2.6) 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
		<i>Schizocerca diversicornis</i>	식물플랑크톤	중
대형	<i>Asplanchna</i> spp.	식물플랑크톤 및 타 윤충류	고	
	<i>Brachionus calyciflorus</i>	식물플랑크톤	저	
지각류 대형 중형 소형	<i>Moina</i> sp.	식물플랑크톤	저	
	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	박테리아	저	
	<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		

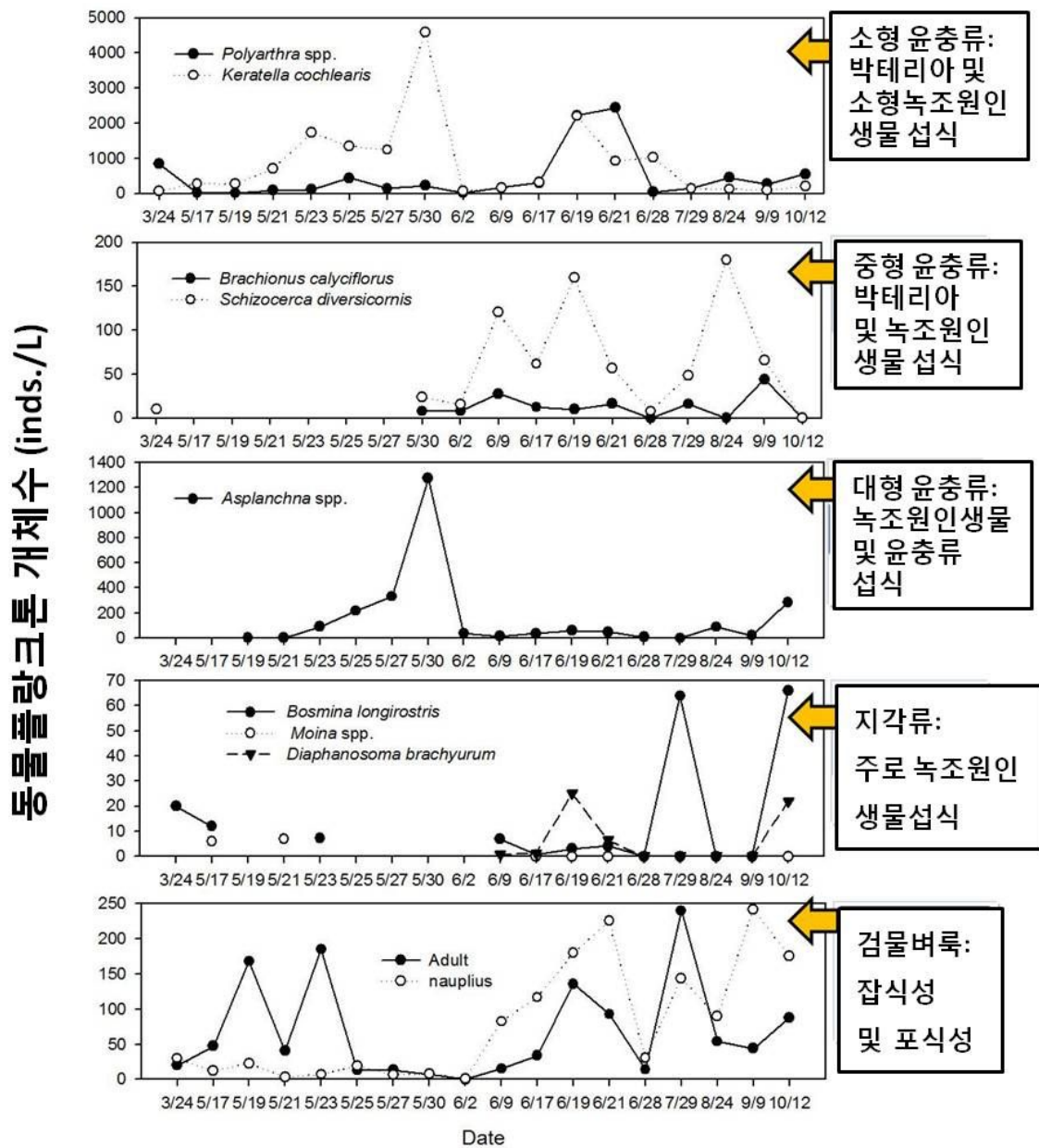


<그림 2.14> 전대 저수지의 동물플랑크톤 군집의 개체군 밀도 계절변화



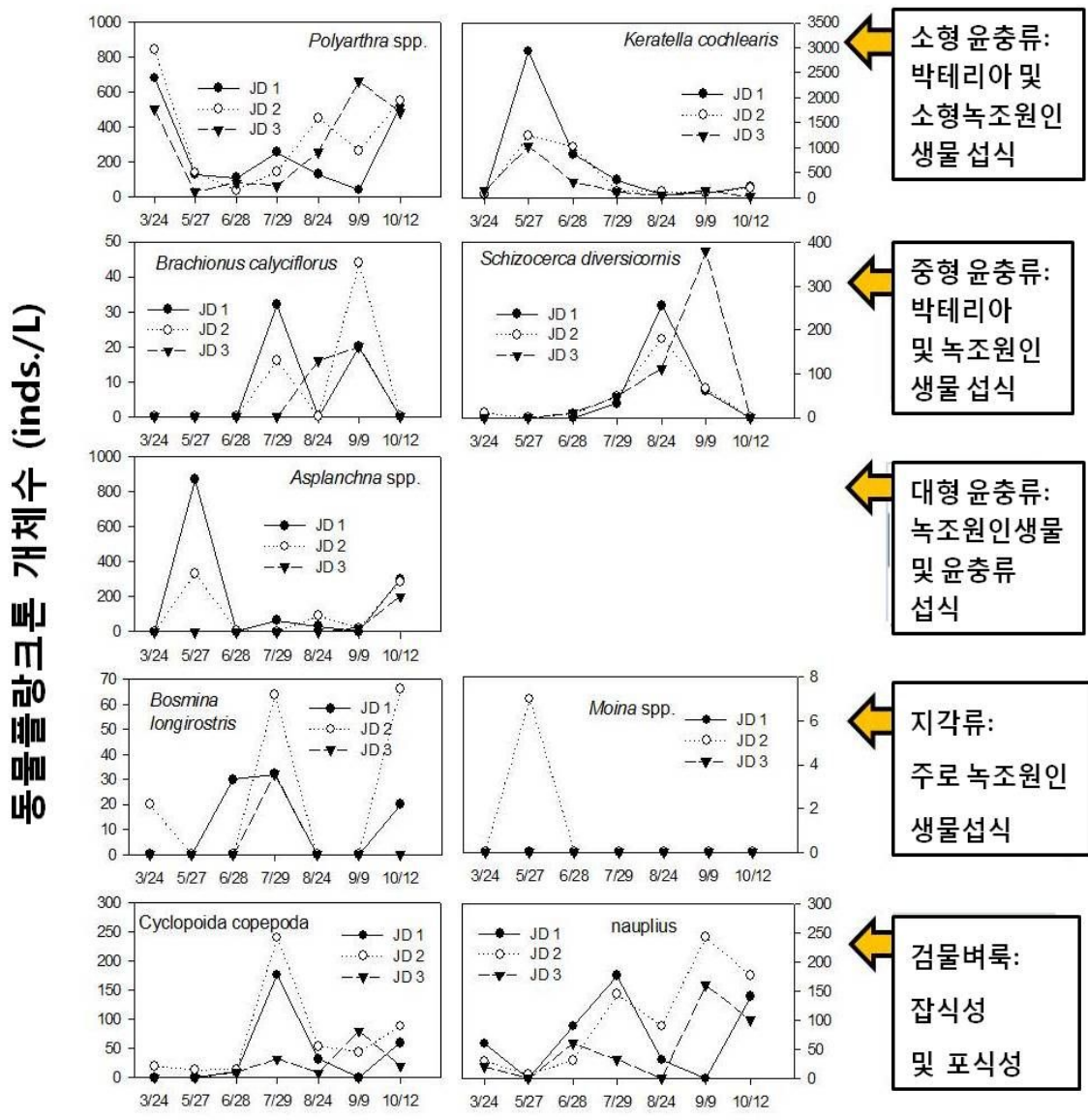
<그림 2.15> 저수지에 출현하는 동물플랑크톤

녹조제어 능력에 따라 출현 동물플랑크톤을 소형 윤충류(박테리아 및 식물플랑크톤 섭식: 녹조제어 능력 낮음), 중형 윤충류 및 대형 윤충류(식물플랑크톤 섭식 가능) 및 지각류(크기에 따라 녹조 섭식)로 나누어 보면, 녹조제어 능력을 가진 대형 지각류의 경우 *Moina*속이 확인되었으나, 출현시기가 춘기(5월)로 한정되었고, 출현 개체군 밀도도 10 inds./L 미만으로 매우 낮은 것으로 나타났다. 반면, 박테리아 및 분해된 식물플랑크톤을 섭식하는 기타 지각류(*Bosmina longirostris* 와 *Diaphanosoma* 속)의 출현시기는 제한적이거나 높은 개체군 밀도를 보이는 것으로 나타났다(그림 2.16).



<그림 2.16> 전대저수지 동물플랑크톤 분포특성

전체 모니터링 지점의 동물플랑크톤 출현시기와 개체군 밀도의 계절변화를 비교 분석한 결과, 우점 동물플랑크톤 개체군의 출현패턴은 분석된 세 지점(JD1, JD2, JD3)에서 계절적 출현양식은 유사하나, 지점에 따라 상이한 개체군 밀도 분포를 나타냈다. 천적생물로 활용이 가능한 대형 지각류인 *Moina* spp.의 경우, JD2에서 가장 높은 개체군 밀도를 보이는 것으로 나타난 반면, 다른 모니터링 지점(JD1, JD3)에서는 개체군 밀도가 매우 낮은 것으로 분석되었다(그림 2.17).



<그림 2.17> JD1, JD2, JD3에서의 동물플랑크톤 개체군의 연 변화



### 제3절 천적생물 종주 분리 및 종주의 최적 배양기술 개발

#### 1. 녹조 원인종에 대한 포식능이 우수한 천적생물 종주분리

##### 가. 천적생물 종주 후보종

천적생물 종주 후보종으로 대형 동물플랑크톤으로 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,  $6.6 \times 10^5$  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 생존율 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 2.18).

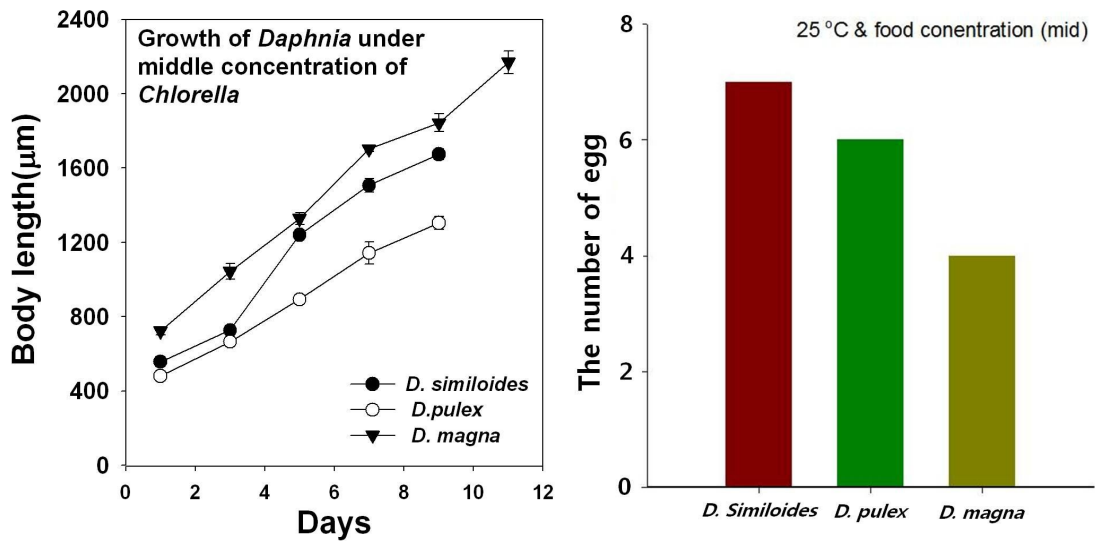
동일한 조건에서 산란 시 단위생식 알의 수(포란수)는 많을수록 개체군의 성장 속도가 빠르며, 생존율 역시 높게 평가되므로 천적생물 종주로서 중요한 요소이다. 동일한 조건에서 포란수는 *D. similoides*가 평균 약 7개로 가장 많았으며, *D. pulex* 6개, *D. magna*가 평균 4개로 가장 적은 것으로 나타나 *D. similoides*가 가장 유리한 것으로 판단되었다.

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 것으로 나타났고, 성장특성 측면에서는 *D. similoides* 와 *D. pulex*가 종주로서 유용할 것으로 판단되었다.

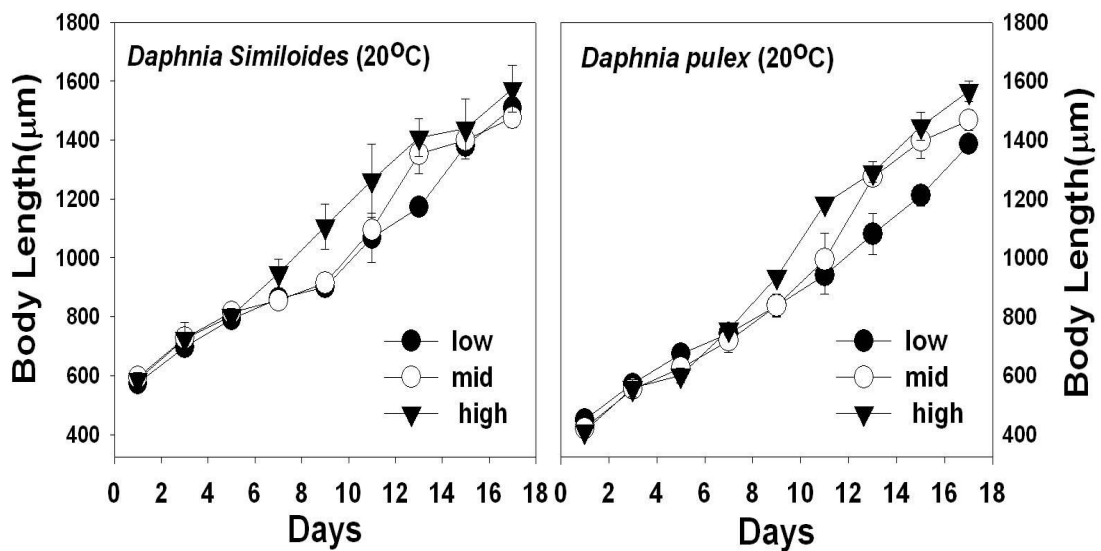
*D. magna*의 경우, 외래유입종이며 수체보다 저층에서 섭식하는 경향이 높아 국내 수생생태계의 적용시 생태계 안정성, 먹이망 교란 등의 문제점이 존재하여, 천적생물 종주 후보종에서 배제하였다.

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

다른 성장경향을 클로렐라 농도를 조절하여 평가한 결과, *D. similoides*와 *D. pulex* 의 개체 성장과 번식은 세가지 먹이농도인 저농도( $3.3 \times 10^5$  cells/ml), 중농도( $6.6 \times 10^5$  cells/ml), 고농도( $2.0 \times 10^6$  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 2.19), *Daphnia*는 높은 식물플랑크톤 생체량에서 성장저해가 나타난다는 보고(Porter et al. 1982)와 상반되는 결과를 보였다.



<그림 2.18> 천적생물 후보종의 적정먹이농도에서의 성장곡선 및 포란수 비교



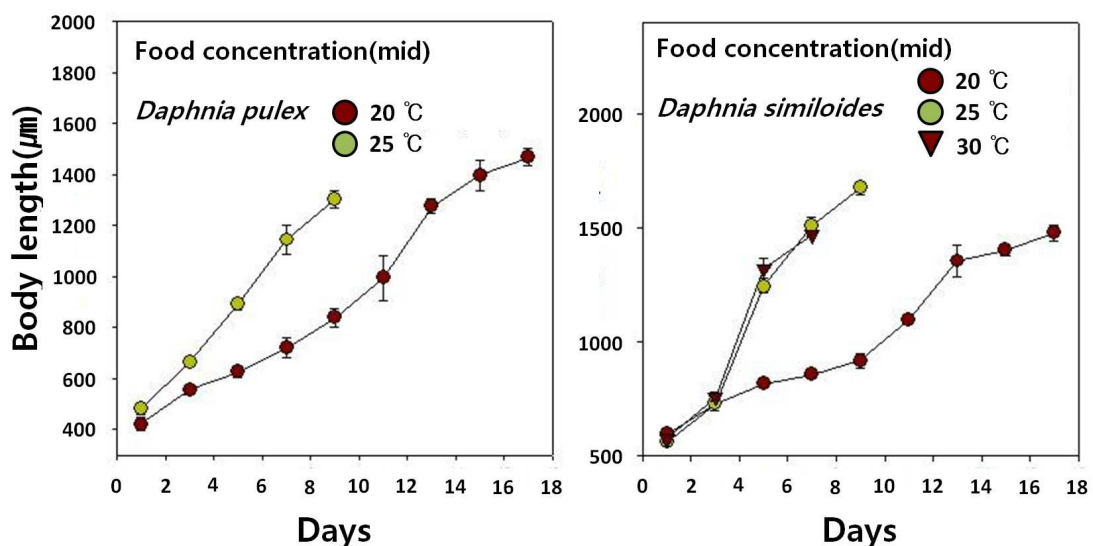
<그림 2.19> 후보 천적생물(*Daphnia*) 2종의 먹이농도(low:  $3.3 \times 10^5$  cells/ml, mid:  $6.6 \times 10^5$  cells/ml, high:  $2.0 \times 10^6$  cells/ml)에 따른 성장 비교

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 적용하여 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.

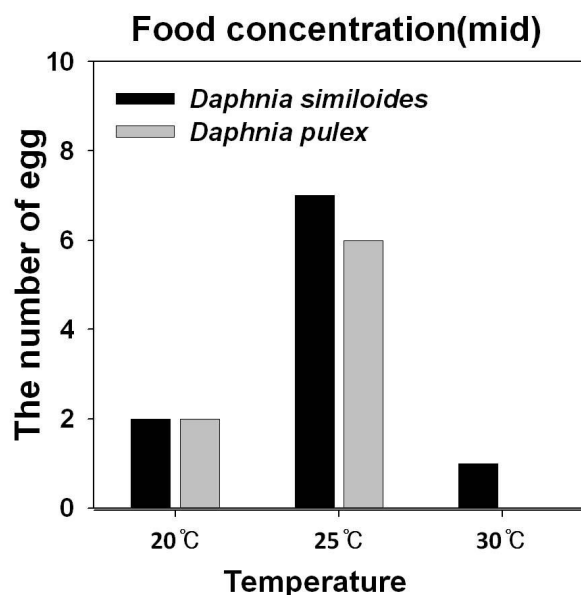
수온은 *Daphnia*의 성장에 큰 영향을 미치는 요인이며, 특히 여름철의 고온은 많은 *Daphnia* 종에게 치명적으로 작용하기도 한다(Burns, 1969). 하계 현장에 설치된 천적생물 배양장치에서 대량배양하기 위해서는 30℃의 수온에서도 성장 저해 없이 개체군이 유지되는 것이 필수조건이라 할 수 있다. 후보 천적생물의 온도에 대한 민감성을 평가하기 위해 20, 25, 28 및 30℃에서의 개체군 성장을 분석하였다.

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 2.20).



<그림 2.20> 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 ℃에서 이들 *Daphnia* 종의 생존율이 저하되는 것으로 나타났다. 암컷 개체당 포란수의 경우 25 ℃에서는 *D. pulex*, *D. similoides* 모두 평균 약 6개의 포란수를 나타냈으나, 30 ℃에서는 *D. pulex*는 단위생식란을 전혀 가지지 못했으며, *D. similoides*도 포란수가 크게 감소하였다(그림 2.21).



<그림 2.21> *D. pulex*와 *D. similoides*의 온도별 암컷개체 포란수

개체군의 온도 영향 실험과 별도로 온도에 따른 생존실험을 진행한 결과, *D. pulex*는 28 ℃에서는 사망율이 낮으나, 30 ℃에서 사망율이 급격히 증가하여 개체군 유지가 불가능하고 실험에 사용된 개체군이 모두 절멸하였다. *D. similoides*는 30 ℃에서 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 ℃이상의 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 2.7) 천적생물 후보종의 섭식효과 평가를 위한 섭식 대상생물과 초기 생체량

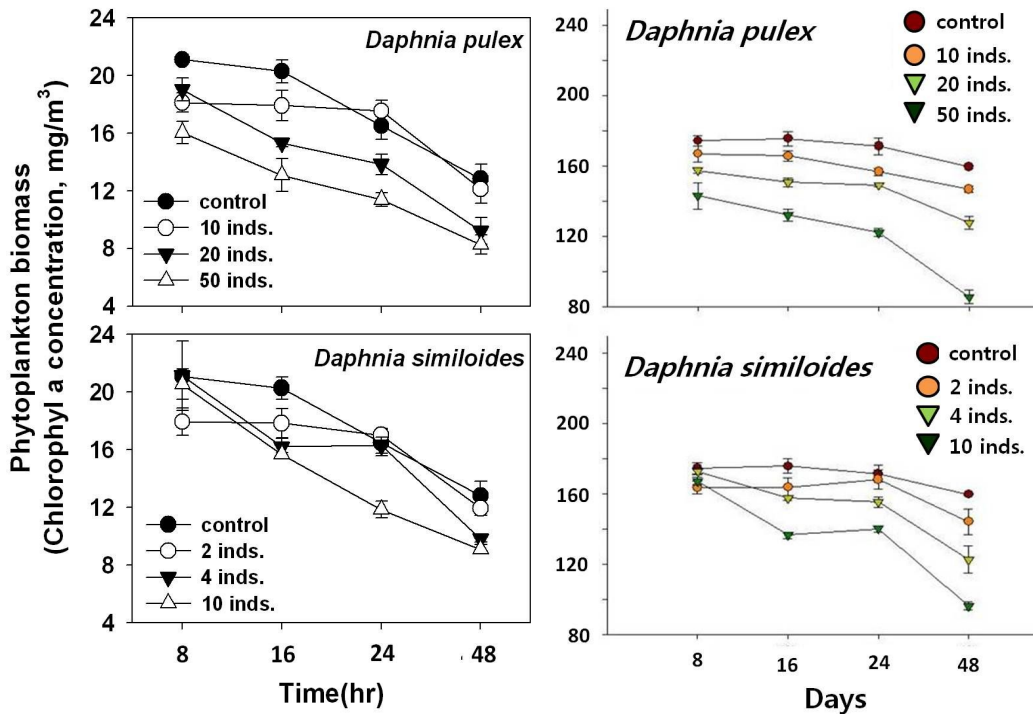
초기 Chl- <i>a</i> 농도	우점식물플랑크톤	원수채취지점	사용 <i>Daphnia</i> 종
~20 mg/m <sup>3</sup>	남조류( <i>Microcystis</i> )	기흥 저수지	<i>Daphnia pulex</i> <i>Daphnia similoides</i>
~200 mg/m <sup>3</sup>	남조류( <i>Oscillatoria</i> )	전대 저수지	<i>Daphnia pulex</i> <i>Daphnia similoides</i>
~120 mg/m <sup>3</sup>	남조류( <i>Oscillatoria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



<그림 2.22> 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, 고밀도의 밀도로 조절하여 투입한 후 녹조제어효과를 평가한 결과, *D. similoides*와 *D. pulex*는 서로 유사한 녹조

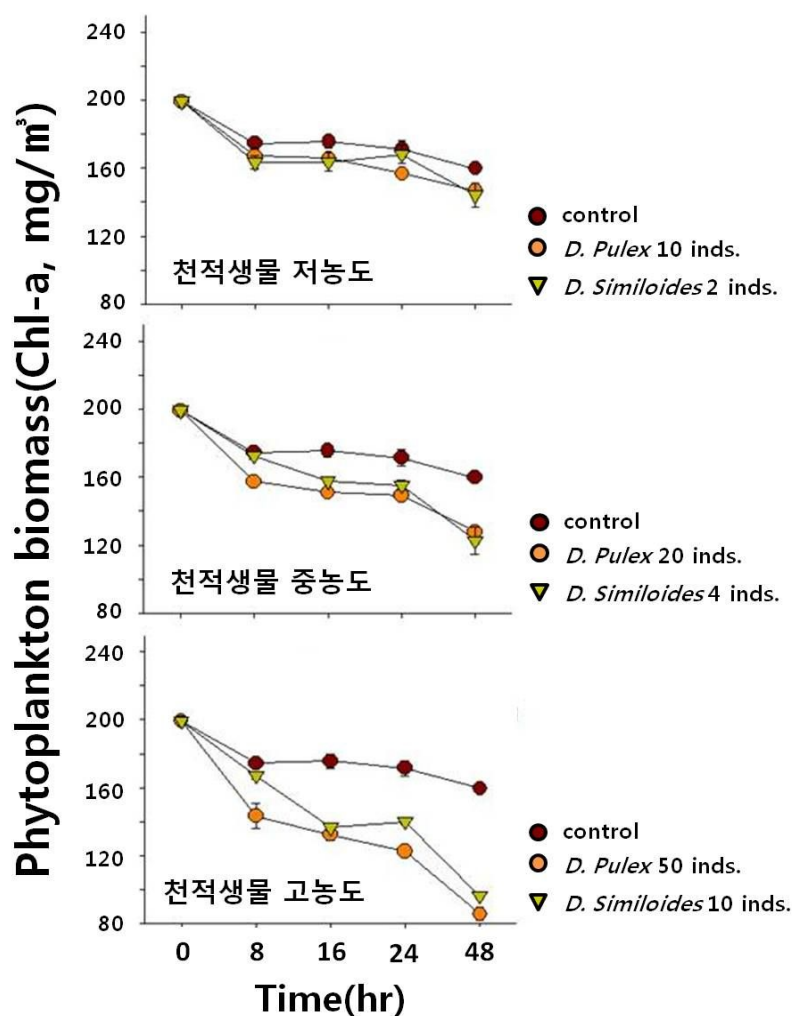
제어 능력을 가지고 있는 것으로 나타났다. 실험초기 Chl-*a* 농도가 20 mg/m<sup>3</sup> 일 경우, *Daphnia*을 이용한 녹조제어 효과를 보기 위해서는 *D. pulex*는 40 inds./L, *D. similoides*는 4 inds./L 이상일 경우 Chl-*a* 농도를 절반이상 저감시키는 것으로 나타났으며, 48시간 경과 후 10 mg/m<sup>3</sup> 이하로 저감되었고, 대조구와 비교한 결과 *Daphnia*에 의한 저감량은 투입한 *Daphnia*의 생체량과 비례하여 증가하였다(그림 2.23). *D. pulex*와 *D. similoides*는 체장이 서로 달라 개체당 생체량이 다르기 때문에 본 실험에서는 동일한 생체량이 되도록 개체수를 조절하였다. 개체수 측면에서는 *D. similoides*가 보다 적은 개체수임에도 불구하고 개체당 섭식능력이 높아 효과적으로 식물플랑크톤 생체량을 저감시키는 것으로 나타났다.



<그림 2.23> 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 전대 저수지의 물을 사용하여 두 종류 *Daphnia*의 섭식능력을 동일한 방법으로 평가한 결과, 약 200 mg/m<sup>3</sup>의 Chl-*a* 농도가 *Daphnia* 투입 후 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, 단위생체량

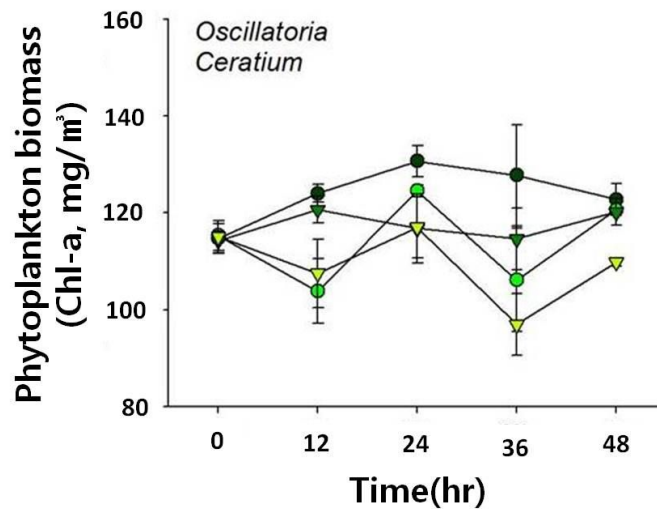
에 따른 녹조제어량은 두 종에서 유사한 것으로 나타났으며(그림 2.24), 두 종 모두 생체량이 증가함에 따라 녹조제어량도 증가하였다. 적용한 두 종의 천적생물 체장을 이용하여 건조중량을 감안, 동일한 생체량으로 조정하였을 경우 500 ml 당 낮은 생체량(*D. pulex* 10개체, *D. similoides* 2개체)일 때에는 녹조제어가 나타나지 않았고, 중간 생체량(*D. pulex* 20개체, *D. similoides* 4개체)부터 녹조제어 효과가 나타나기 시작하여 높은 생체량(*D. pulex* 50개체, *D. similoides* 10개체)에서 녹조제어 효과가 뚜렷이 나타났다. 따라서, 천적생물로 인한 녹조제어의 효과를 위해서는 *D. pulex* 100 inds./L 및 *D. similoides* 10 inds./L가 요구되었다.



<그림 2.24> *Oscillatoria*에 대한 *D. pulex* 와 *D. similoides* 의 녹조제어효과

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/m<sup>3</sup>에서 *D. similoides*로 인한 Chl-a 감소 효과가

나타나지 않았다. 투입한 *D. similoides*의 최고 개체군 밀도에서도 48시간 경과 시 Chl-*a* 농도의 저감 현상이 관찰되지 않았다(그림 2.25). 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 존재하는 식물플랑크톤의 종조성에 의해 섭식을 통한 녹조제어 효과가 영향을 받은 것으로 사료된다.



<그림 2.25> 남조류 *Oscillatoria*와 와편모조류 *Ceratium* 공동 우점 현장 원수에 대한 *D. similoides*의 녹조제어 능력 평가

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

<p>조기식물플랑크톤 농도 20 mg/m<sup>3</sup> (남조류, <i>Microcystis</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>D. similoides</i> = 0.68 mg / m<sup>3</sup> / day</li> <li>▪ <i>D. pulex</i> = 0.16 mg / m<sup>3</sup> / day</li> </ul>	<p>조기식물플랑크톤 농도 200 mg/m<sup>3</sup> (남조류, <i>Oscillatoria</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>D. similoides</i> = 3.17 mg / m<sup>3</sup> / day</li> <li>▪ <i>D. pulex</i> = 0.74 mg / m<sup>3</sup> / day</li> </ul>
--	--

<그림 2.26> *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/m<sup>3</sup>를 저감시킬 수 있는 최고 효과를 보여주어었다(그림 2.26). 즉, 녹조발생 수역에서 *D. similoides* 밀도를 10 inds./L로 유지하였을 경우 하루에 약 30 mg/m<sup>3</sup>의 식물플랑크톤 생체량을 저감할 수 있는 것으로 평가되었다.



*Daphnia*의 섭식능력은 성장에 따른 개체 크기, 생체량이나 개체수와 같은 성장관련 변수 뿐 아니라, 온도 등 현장의 환경요인에 의해서도 달라기 때문에 평가의 어려움은 있으나, 짧은 시간에 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.

하지만, 종주배양과 천적생물 배양장치 내에서의 배양조건과 개체수, 생체량의 증식관계 등을 고려하여 녹조발생 수역의 환경조건에 부합하는 최선의 종을 선정하는 것이 효과를 극대화할 수 있는 방안으로 사료되므로, 다양한 녹조원인종과 녹조발생 환경에서의 반복실험과 현장적용 시 제어효과에 대한 추가적인 검증이 필요할 것으로 사료된다.

## 2. 천적생물 종주 배양(100 L) 및 종주의 대량 배양 최적조건



<그림 2.27> 실내 대량배양수조의 구조와 배양 조건

천적생물 종주로서 *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 고밀도의 *Daphnia*를 실내 배양조에서 유지시킬 수 있는 것으로 나타났다(그림 2.27)

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.

배양 수조내에서 개체군 증가율을 계산한 결과, 초기 투입 후 고밀도에 이르기까지의 평균 개체군 밀도 증가율은 약 0.5인 것으로 나타났다. 배양초기 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.

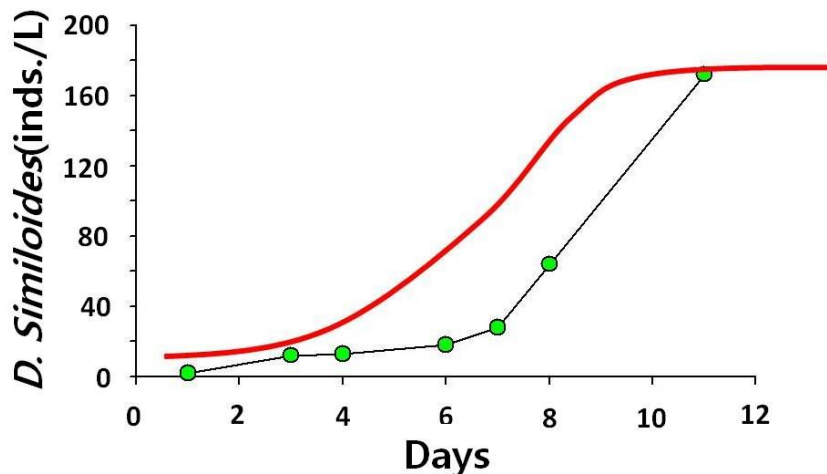
수조에서 천적생물이 고밀도로 유지되고, *Daphnia*는 표면 근처에서 무리를 형성하여 높은 개체군 밀도를 나타내는 것이 관찰되었다. 하지만, 먹이 부족으로 인한 어린개체의 감소 및 먹이 과다 공급으로 잉여의 클로렐라가 소비되기 전 대량 침전, 수질악화를 유발하여 급격한 개체수 감소 등이 빈번히 발생하였다. 다수의 배양수조를 이용하여 고밀도를 유지, 각 수조의 개체수 변화를 관찰하며 고밀도 개체수 수조에서 일정 개체수를 저밀도 개체수로 분산시키며 수조를 유지하면 다수의 배양수조에서 *Daphnia*의 대량배양이 가능한 것으로 나타났다.

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

고밀도 배양수조를 유지할 경우 75 L 수조에서 한 번에 약 2,000 ~ 3,000 개체를 주기적으로 채취 할 수 있어 이들 개체를 녹조발생 수역의 편적생물 배양장치로 옮겨 대량배양이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 녹조발생 수역에 설치된 천적생물 배양장치내에 실내 종주배양 수조를 만들 경우, 먹이 공급과 물순환으로 인해 발생하는 overflow에 포함된 *Daphnia* 개체가 실외의 천적생물 배양조로 자동 공급되는 방법으로 적용하면 종주배양과 현장 대량배양장치가 연계되어 주기적인 *Daphnia* 자동화 공급시스템이 확보될 것으로 생각된다.

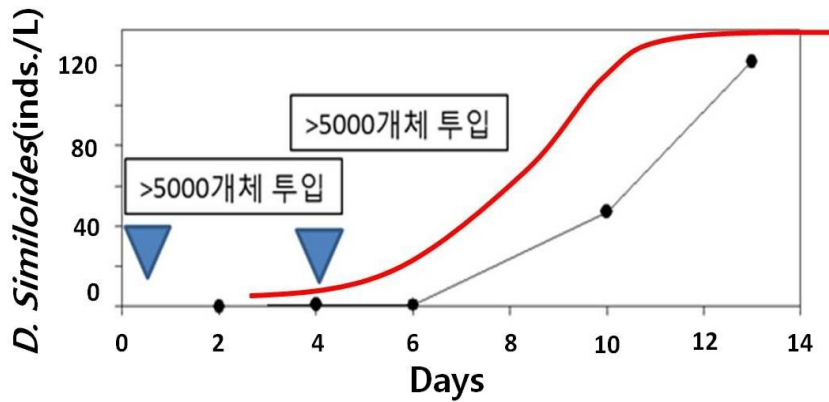
실내에서 고밀도 종주 배양된 *D. similoides*는 2 L 용기에 약 1,000 ~ 2,000 개체를 수용하여 신속하게 현장으로 이동하였으며, 현장의 천적생물 배양장치의 천적생물 배양조에 투입되었다. 천적생물 배양조에서 녹조가 발생된 전대저수지의 물속에 포함된 식물플랑크톤을 먹이로 공급하여 배양하였을 때 1회당 약 5,000개체 이상을 2회 반복 투입하였을 경우 개체수가 100 inds./L 이상으로 증가하는데 약 13일이 소요되었다.

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



<그림 2.28> 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 2.29> 천적생물 배양장치에서 *D. similoides*의 개체군 밀도 증가 경향

천적생물 배양장치에서의 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 2.28, 그림 2.29).

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, 천적생물로서 동물플랑크톤의 저수지 생태계 먹이망 내 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).

녹조발생수역에 설치된 천적생물 배양장치에서 천적생물 종주인 *Daphnia*의 섭식성향을 파악하기 위해 안정동위원소비를 이용해 *Daphnia*가 수체의 식물플랑크톤을 섭취하는지, 수조에 부착된 유기물을 섭취하는지를 분석하였으며, 천적생물이 녹조발생 수역에 살포 후 수역에 존재하는 녹조원인 생물을 섭식하여 녹조제어에 실제로 기여하는 지를 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). 특히, 위 내용물 분석이 불가능한 *Daphnia*의 영양단계를 정량적으로 평가함으로, 어류를 정점으로 하는 복잡한 하천 생태계의 먹이망 구조를 간단히 파악할 수 있다.

본 연구에서는 동위원소 분석을 위해 채집된 생물시료를 냉동보관, 안정동위원소 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, 먹이원 평가에는 탄소의 동위원소비를, 영양단계의 평가에는 질소동위원소비를 이용하여 먹이망내 생물학적 상호작용을 평가하였다.

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

실내에서 종주 배양한 *D. similoides*를 투입한 천적생물 배양조와 자연 분리된 천적생물 배양조의 먹이망 구조를 분석한 결과, 투입된 *D. similoides*

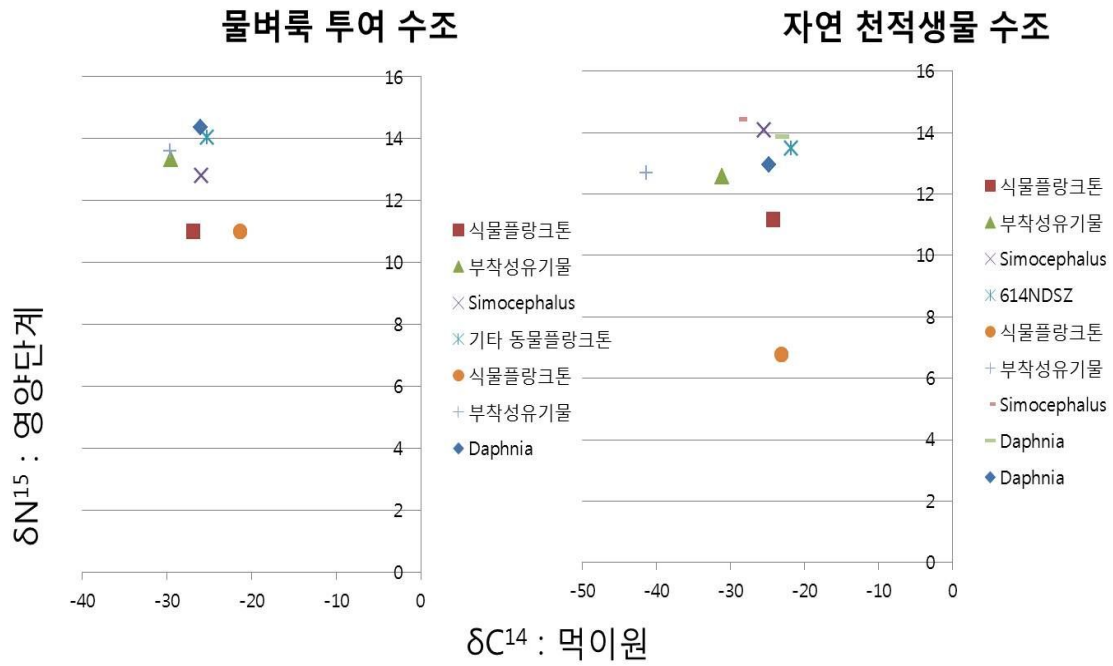
와 함께 출현한 자연분리 천적생물인 지각류도 수조의 식물플랑크톤을 주로 섭식하는 것으로 나타나, *D. similoides*와 자연분리 천적생물은 녹조발생 수역에서 식물플랑크톤 농도를 저감시키는데 효과적일 것으로 판단되었다.

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  $\mu\text{m}$  필터)과 대형 식물플랑크톤(> 20  $\mu\text{m}$ )에 대해 안정동위원소비를 측정하여 이들의 생물학적 상호작용을 분석하였다.

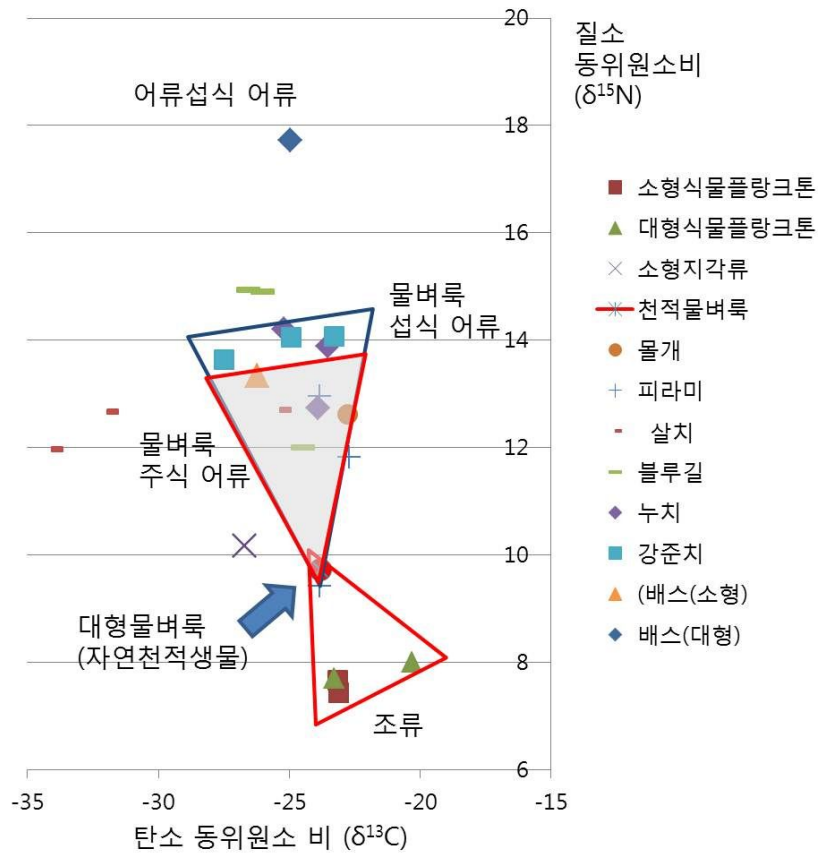
소형 및 대형 식물플랑크톤은 대형 지각류에게 주로 포식되는 것으로 나타났고, 대형 지각류는 식물플랑크톤의 주요 섭식자지만 동시에 물개, 피라미, 소형 블루길에게 주로 섭식당하고 있는 것으로 나타났다. 반면, *Bosmina longirostris*와 윤충류는 소형 식물플랑크톤을 주로 섭식하는 것으로 나타났다.

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 2.30> *D. similoides* 배양조와 자연분리 천적생물 배양조의 먹이망 구조



<그림 2.31> 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 2.8에 요약하여 나타내었다.

(표 2.8) 실내 및 현장 대량배양 최적 조건

배양목적	기본 배양 조건	배양 조건 및 유의사항
종주 유지 배양	<ul style="list-style-type: none"> <li>●적정배양크기: 1 L</li> <li>●배양수 : 24시간 이상 산소공급하며 저장해 둔 수돗물 또는 식물 플랑크톤 배양용 배지</li> <li>●수온: 20 ~ 25 °C</li> <li>●먹이: 클로렐라</li> <li>●산소공급: 불필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●온도조절이 되는 배양기 또는 실험실내 배양</li> <li>●클로렐라 <math>5 \times 10^5</math> cells/ml가 되도록 매일 1회 공급</li> <li>●찌꺼기가 생기면 물교환 (월 1회, 채를 이용 <i>Daphnia</i>를 새 비이커로 이동)</li> </ul>
실내 대량 배양	<ul style="list-style-type: none"> <li>●적정배양크기: 50 ~ 100 L</li> <li>●배양수: 24시간 이상 산소공급하며 저장해 둔 수돗물</li> <li>●수온: 20 - 25 °C</li> <li>●먹이: 클로렐라</li> <li>●산소공급: 표면에 에어레이션</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●비이커에서 배양한 천적생물 <i>Daphnia</i>을 대형 배양 용기에 100개체 이상 되도록 투입하여 배양 시작</li> <li>●온도조절이 되는 실내에서 배양</li> <li>●클로렐라 <math>1 \times 10^5</math> cells/ml 가 되도록 하여 1일 2회 공급</li> <li>●50 L 수조 기준으로, 먹이는 2 L 원수에 클로렐라를 섞어 공급하여, 먹이 공급 시 수조 저층 물 교환(1일 교환율 10% 이하가 되도록 조절)</li> <li>●불필요한 미생물의 증가를 막기 위해 영양분이 들어간 배양용 배지 사용 지양</li> <li>●주기적으로 저층의 찌꺼기 펌프를 이용하여 배출 (월 1회)</li> <li>●산소 공급은 수조 내 강한 물흐름이 생기지 않도록 주의</li> </ul>
천적생물 배양장치 대량 배양	<ul style="list-style-type: none"> <li>●배양수조: 1 m<sup>3</sup> 이상</li> <li>●수온: 실외에서 30 °C 넘지 않도록 주의</li> <li>●먹이: 적용대상 하천 또는 저수지의 원수 필터 후 공급</li> <li>●산소공급: 약한 에어레이션 공급</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●실내 대량 배양의 천적생물 <i>Daphnia</i> 1,000개체 이상 실외 대량 배양 수조에 투입하여 배양 시작</li> <li>●수온이 30도가 넘지 않도록 필요한 경우 천막 등으로 직사광선 차단 필요</li> <li>●먹이를 포함한 원수 유입과 스크리닝한 원수 유출로 물 교환(인공섬 살포시설 수조 참고)</li> <li>●산소 공급 시 수조 내의 강한 물흐름이 생기지 않도록 주의</li> <li>●유입되는 먹이원이 와편모조류 등 섭식이 곤란하거나 독성 플랑크톤일 경우 주의</li> <li>●수서곤충의 증가로 인한 개체수 감소 주의</li> </ul>



## 제4절 천적생물 배양장치 설치 및 시설운영, 유지관리

### 1. 천적생물 배양장치 설치 및 시설운영

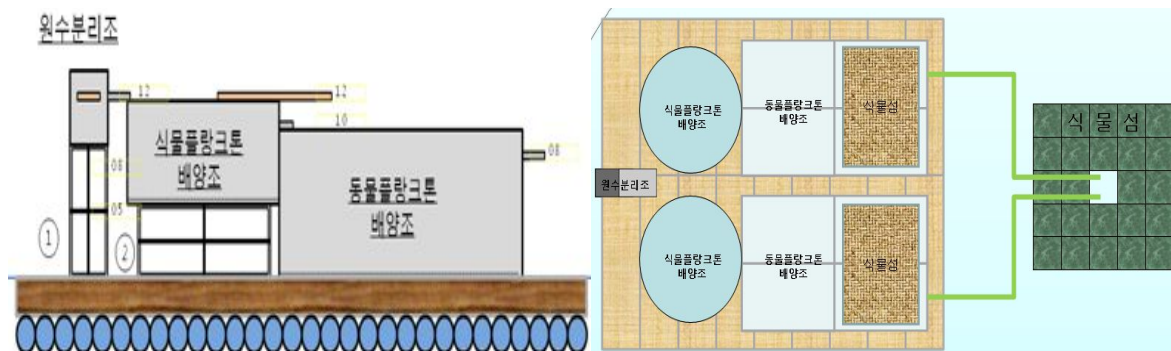
#### 가. 설치 기본계획

녹조발생이 심각한 농업용저수지인 전대저수지를 대상으로 녹조방지를 위해 소규모 천적생물 배양장치를 현장에 직접 적용하여 현장적용 효과 및 적용타당성을 검토하고자 하였다.

녹조제어를 위한 천적생물 배양장치는 전대저수지의 녹조발생 특성과 천적생물 분포 특성, 현장 살포의 적용성 등을 고려하여 녹조발생수역의 수면에 직접 적용가능한 수상부유형(수상형) 장치를 고안하여 1차년도에 제작, 설치하였다. 2차년도에는 전대저수지 수변의 홍만수면 부지를 활용하여 육상형 장치를 고안하여 설치하였다. 1차년도에 제작한 수상형장치는 천적생물 배양조 기준 5m<sup>2</sup> 규모 2계열 구성되어 있으며, 원수분리조, 식물플랑크톤배양조를 평면으로 배열하여 부력체를 이용, 물위에 띄운 형태이다(그림2.32).

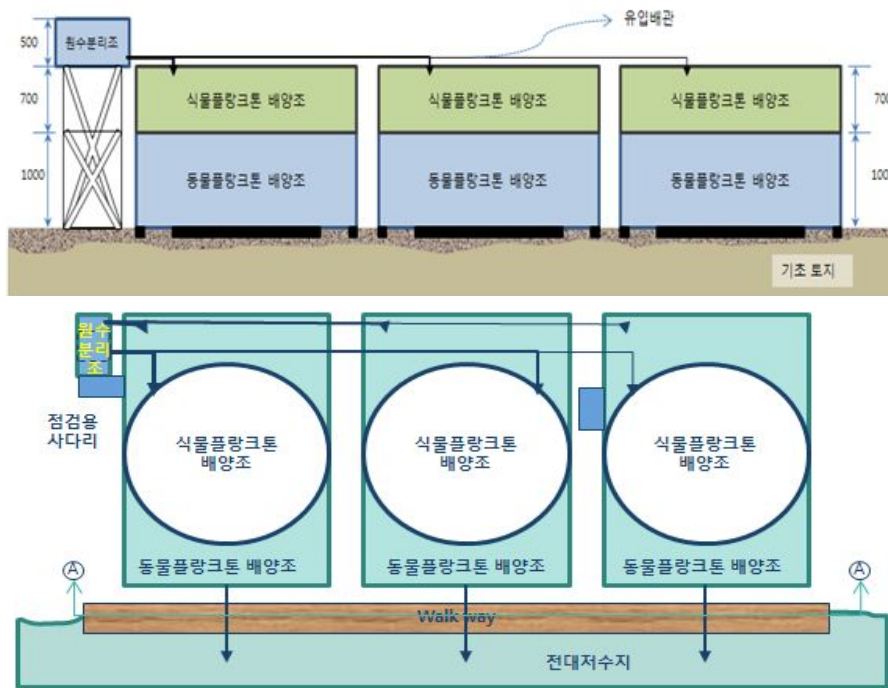
(표 2.9) 천적생물 배양장치 규모

구 분		2010 년도	2011 년도	비 고
시설규모		10 m <sup>2</sup>	30 m <sup>2</sup>	
1일 유입량		4 m <sup>3</sup> /day	10 m <sup>3</sup> /day	2.5 배 증가
식물 플랑크톤 배양조	유량	2 m <sup>3</sup> /day	5 m <sup>3</sup> /day	
	체류시간	1.5 day	3.0 day	1차년도 결과반영
	유효용량	3 m <sup>3</sup>	15 m <sup>3</sup>	5 배 증가
동물 플랑크톤 배양조	유량	4 m <sup>3</sup> /day	10 m <sup>3</sup> /day	
	체류시간	2.5 day	4.0 day	1차년도 결과반영
	유효용량	10 m <sup>3</sup>	40 m <sup>3</sup>	4 배 증가

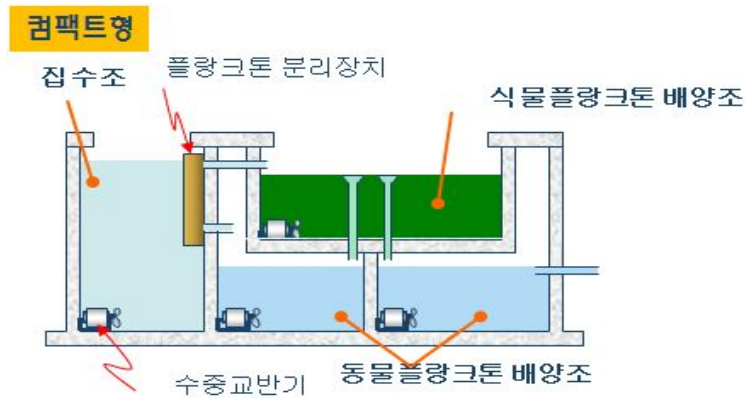


<그림 2.32> 수상형 배양장치(10m<sup>2</sup>) 평면도

육상형 배양장치는 천적생물배양조 기준 10 m<sup>3</sup> 규모 3계열로 제작·설치하였으며, 시설 구성은 원수분리조 1set, 식물플랑크톤 배양조 3 set, 동물플랑크톤 배양조 3 set로 구성하고, 수상형장치와 달리 식물플랑크톤 배양조를 천적생물 배양조위에 올려 실용신안을 확보하고 있는 콤팩트형 시설을 변형하여 설치면적을 최소화하였다(그림 2.33). 또한, 저수지의 물을 유입펌프를 이용하여 배양장치의 원수분리조에 유입시킨 후 자연유하흐름을 유지하도록 배치하였으며 저수지내 살포지점에는 식물섬 25 m<sup>2</sup>를 설치하고 방류관을 식물섬 중앙에 고정하여 살포된 동물플랑크톤의 은신처 역할을 할 수 있도록 구성하였다.



<그림 2.33> 육상형 천적생물 배양장치(30 m<sup>3</sup>) 평면도



<그림 2.34> 실용신안 등록된 콤팩트형 구상도

금년도에는 1차년도(2010년)에 설치한 10 m<sup>3</sup> 규모(천적생물 배양조 기준)의 수상형 배양장치와 올해 설치한 30 m<sup>3</sup> 규모(천적생물 배양조 기준)의 육상형 배양장치를 함께 운영하여 총 40 m<sup>3</sup> 규모로 중규모의 배양장치 적용 효과를 검증하고자 하였다(표 2.9).

## 나. 수상형 장치의 보강 및 시설운영

### 1) 천적생물 배양장치 보강 및 기능향상

1차년도에 설치하여 운영한 10 m<sup>3</sup> 규모의 수상형 배양장치는 최적운영 방안 도출과정에서 몇 가지 보강해야 할 사항이 발견되었다.

첫째, 체류시간 4일의 연속흐름 배양조건에서 유입 유량만큼 상시 방류되는 시스템의 특성상 천적생물 배양조 내 고밀도 천적생물 배양이 이루어지지 않았다. 이를 개선하기 위해 천적생물 배양조에서 저수지로 자연 연속방류되는 유출구에 75  $\mu$ m 규격의 메쉬망을 추가로 설치하여 천적생물 배양조내에서 배양된 큰 사이즈 동물플랑크톤의 유출을 방지할 수 있도록 구조를 개선하였다(그림 2.35).

둘째, 원수분리조에 유입된 잉여수의 방류시 큰 사이즈의 동물플랑크톤을 포획하기 위한 목적의 스테인레스 재질의 75  $\mu$ m 네트가 정기적 관리를 위한 청소과정에서 파손되는 문제점이 발생하여 동일 규격의 P.E 재질 네트로 교체 설치하였다. 이후 네트가 파손되는 문제점은 개선되었다(그림 2.35).

셋째, 천적생물 배양조의 동물플랑크톤들이 원활한 성장을 위해서는 균질한 산소공급이 중요하다. 기존에는 풍력교반기를 설치하여 저수지의 바람을 이용한 간헐적 교반에 의존하였으나, 동물플랑크톤의 고밀도 성장을 위해 배양조 하부에 송풍기와 산기장치를 추가로 설치하여 배양조의 용존산소 농도를 높이고 균질한 교반이 이루어지도록 개선하였다(그림 2.36).



<그림 2.35> 천적생물 배양조 유출부 개선



<그림 2.36> 원수분리조 스크린 개선

넷째, 천적생물의 녹조제어 효과를 규명하기 위해 천적생물을 대량배양한 후 일시에 대량살포하고, 거리별 부표를 설치하여 효과분석을 시행하였다. 1차년도에 설치한 부표는 횡방향과 종방향 각각 100 m 구간에 일정간격으로 설치하였으나, 1차년도 연구결과 종방향으로 100 m 구간까지 녹조제어의 효과가 관찰되어 종방향 1개 구간에 대해 부표를 50 m 연장하여 총 150 m 에 걸쳐 설치하고 거리별 효과분석을 할 수 있도록 보장하였다(그림 2.37).



<그림 2.37> 산소 공급 개선

## 2) 천적생물 배양장치 운영조건

1차년도에 이루어진 천적생물 배양장치의 배양조건에 따른 배양효과분석 결과 식물플랑크톤 배양조의 체류시간은 식물플랑크톤의 특성상 3일 조건이 가장 적절하게 나타났으며, 동물플랑크톤 배양조는 체류시간 4일에서 비교적 안정적인 최적조건으로 판명되었다. 천적생물의 배양에 필요한 먹이생물(식물플랑크톤)의 적절한 공급을 위해 먹이 공급 비율에 따른 배양효과 분석 결과, 먹이원 50%에 원수 50%를 공급했을 때 비교적 안정적으로 유지되는 것으로 나타났으며, 먹이 공급이 클 경우(60%) 오히려 먹이생물 과잉공급에 따른 저해효과가 있는 것으로 관찰되었다. 원수분리조는 25  $\mu\text{m}$  메쉬망 + 에코톤매트 미설치 조건, 인공식물섬의 적정 피복률은 80% 보다 40% 피복율이 적절한 것으로 나타났다.

이에 따라 2차년도 천적생물 배양장치의 운영조건은 표2.10 과 같이 결정하고, 천적생물 대량배양을 실시하였다.

(표 2.10) 배양장치 운영조건

원수분리조	25 $\mu\text{m}$ 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 지	풍력교반	풍력교반
인 공 식 물 섬	-	40 %
자 광 막	-	50 %
배 양 방 식	연속배양	연속배양 (배양역만 배출)
공 기 공 급	-	산기관으로 연속공급



<그림 2.38> 천적생물 배양장치 운영 모습(10 m<sup>3</sup>, 2010년도 설치)

### 3) 천적생물 배양장치 운영

수상형의 천적생물 배양장치의 운영은 시설보강 작업이 종료된 4월 13일부터 시작되어 11월 16일까지 진행되었다.

세부 운영사항은 표 2.11과 같다.

(표 2.11) 수상형 배양장치(10 m<sup>3</sup> 규모) 운영

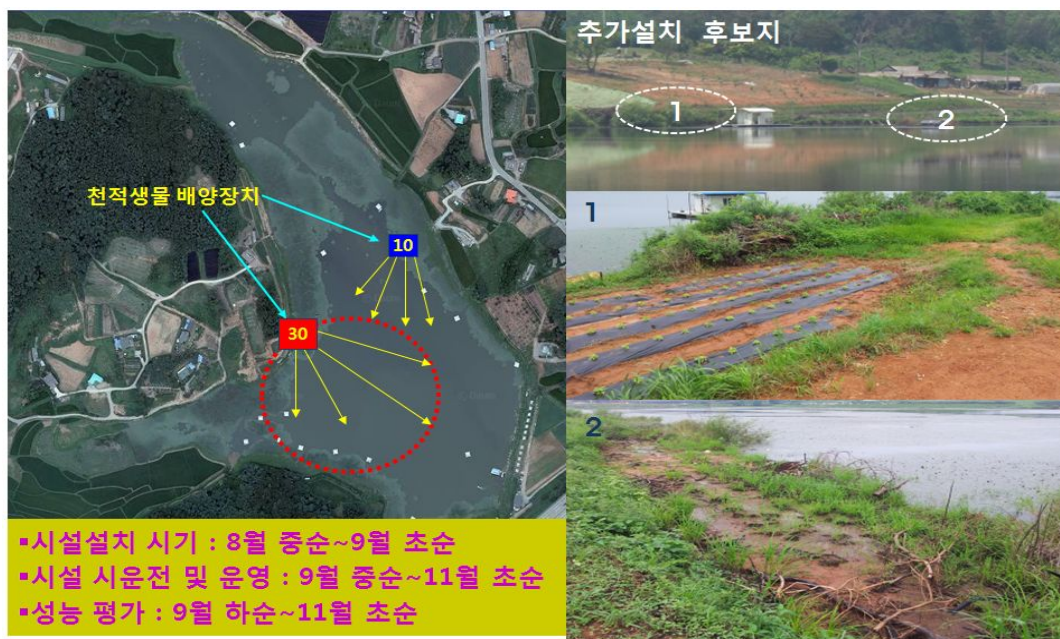
배양기간	현장조사	분석항목	특이사항
4/13	배양시설 예비가동	수온, EC, DO, pH, COD, Chl- <i>a</i> , TN,, TP, PO <sub>4</sub> -P, Phyto., Zoo.	- 수상 배양장치(10 m <sup>3</sup> 규모) 예비 가동을 통한 이상유무 점검 - 천적생물 배양조 유출부에 스크린 네트(80 μm) 설치
4/19 ~ 5/17 (29일간)	자연분리종 대량배양	수온, DO, COD, Chl- <i>a</i> , TN, TP, , PO <sub>4</sub> -P, Phyto., Zoo.	- 천적생물 배양조에 교반용 산기관 추가 설치 - 봄철 현장에 서식하는 자연분리종 을 이용한 대량배양 실험
5/18 ~ 6/17 (31일간)	천적생물 접종배양	수온, DO, pH, Zoo.	- 경희대학교에서 천적생물( <i>Daphnia</i> spp.)을 접종하여 대량배양 실시
7/05 ~ 7/31 (26일간)	천적생물 접종배양	수온, DO, pH, Zoo.	- 경희대학교에서 천적생물( <i>Daphnia</i> spp.)을 접종하여 대량배양 실시 - 천적생물을 수시로 접종하여 대량 배양 실험 실시 - 지속적인 집중강우 발생
9/5 ~ 9/30 (26일간)	천적생물 접종배양	수온, DO, pH, Zoo.	- 경희대학교에서 천적생물( <i>Daphnia</i> spp.)을 접종하여 대량배양 실시 - 천적생물을 수시로 접종하여 대량 배양 실험 실시
10/6 ~ 10/17 (12일간)	천적생물 접종배양	수온, DO, pH, Zoo.	- 경희대학교에서 천적생물( <i>Daphnia</i> spp.)을 접종하여 대량배양
11/04 ~ 11/16 (13일간)	자연분리종 대량배양	수온, pH, Chl- <i>a</i> , TN, TP, PO <sub>4</sub> -P, Phyto., Zoo.	- 육상 및 수상 배양장치에서 현장 분리종을 이용한 대량배양 실험 실시

다. 육상형 장치(30 m<sup>3</sup>) 설치 및 운영

#### 1) 시설 설치 대상 후보지

30 m<sup>3</sup> 규모의 육상형 천적생물 배양장치를 설치하기 위해 전대저수지 수변의 가능한 부지를 조사하였다. 일단 수상형장치의 유효범위를 감안하여

수상형 장치가 설치된 지점의 건너편 부지에 중점을 두어 살펴본 결과 2개의 후보지를 최종 결정할 수 있었다. 그림 2.39와 같이 2개의 후보지 중 1지점은 사유지가 일부 포함되어 장기사용시 문제가 발생할 수 있어 홍만수면부지로서 공사의 소유로 되어있는 2지점을 최종 선택하였다. 2지점의 경우 지대가 낮아 홍수기 침수의 우려가 있어 시설 설치전 지반을 다지는 작업을 추가 실시하였다.

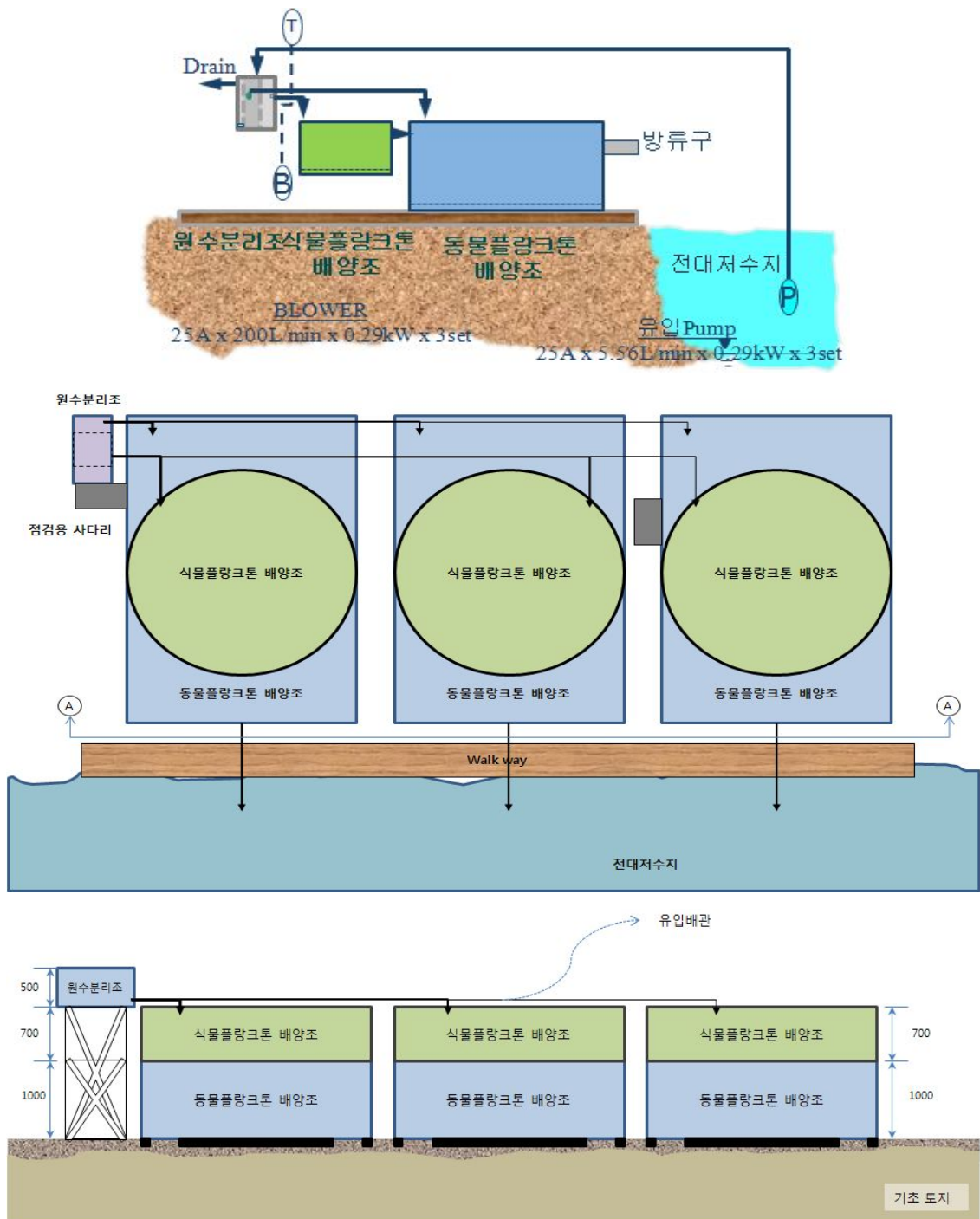


<그림 2.39> 육상형 장치 설치 후보지

## 2) 배양장치의 모식도 및 세부 설치

### 가) 배양장치의 형태 및 모식도

30 m<sup>3</sup> 규모의 육상형 배양장치는 그림 2.40과 같이 전대저수지의 물을 양수한 후 원수분리조에서 동물플랑크톤과 식물플랑크톤을 분리하고, 각 분리된 식물플랑크톤은 먹이생물 배양조로, 동물플랑크톤은 천적생물 배양조로 유입되어 대량 배양된 후 목적으로 하는 천적생물을 저수지로 방류하는 시스템으로 구성되어 있다. 육상형의 천적생물 배양장치는 육상의 소요부지를 최소화하기 위해 10 m<sup>3</sup> 규모의 동물플랑크톤 배양조위에 먹이생물 배양조인 식물플랑크톤 배양조를 엮어 놓은 형태로 선행연구에서 제시한 콤팩트형 구조(실용신안)을 변형하여 적용하였다.



<그림 2.40> 육상형 배양장치 측면도, 평면도, 정면도

나) 배양장치 세부 제원 및 설치

원수분리조는 유입 원수에 포함된 식물플랑크톤과 동물플랑크톤을 분리하여 각 배양조로 공급할 수 있는 구조로 하였으며 제원은 표 2.12와 같다.



(표 2.12) 원수분리조의 제원

구 분	제 원	비 고
체류시간	38 min	
규 격	0.5 mW x 1.0 mL x 0.4 mWH x 1 set	장방형
특기사항	- 분리부 25 $\mu$ m 메쉬망 설치 - Overflow부 75 $\mu$ m 메쉬망 설치	

식물플랑크톤 배양조는 태양광이 잘 조사되도록 상부 개방구조로 하고 낮은 수심을 유지하여 식물플랑크톤이 잘 성장할 수 있는 구조로 하였으며 제원은 표 2.13과 같다.

(표 2.13) 식물플랑크톤 배양조의 제원

구 분	제 원	비 고
체류시간	3 day	
규 격	$\Phi$ 3.0 x 0.55 mWH x 3 set	원형
특기사항	- 수중교반기	

동물플랑크톤 배양조는 식물플랑크톤 배양조로부터 먹이원을 공급받아 동물플랑크톤을 배양하여 개체수를 증식시키고 살포대상지역으로 일시 또는 연속적으로 살포할 수 있는 구조로 하였으며 제원은 표 2.14와 같다.

(표 2.14) 동물플랑크톤 배양조의 제원

구 분	제 원	비 고
체류시간	4 day	
규 격	3.0 mW x 4.5 mL x 0.8 mWH x 3 set	장방형
특기사항	- 수중교반기	

밸브류는 모두 게이트 밸브를 사용하여 유입 유량의 미량 조절이 용이하도록 하였고 원수분리조와 동물플랑크톤 배양조 유출부의 메쉬망은 P.E 재질을 적용하여 찢어지는 현상을 방지하였다.

동물플랑크톤 배양조 유출부에 75  $\mu$ m 메쉬망을 설치하였으며 쉽게 탈부착이 가능하다. 원수의 유입은 24hr 연속적으로 유입되며 각각의 교반기는 콘트롤 판넬에 설치된 타이머로 자동 작동된다.



<그림 2.41> 육상형 천적생물 배양장치 설치 모습



<그림 2.42> 천적생물 cage 설치 운영모습

### 다) 천적생물 배양 및 보호를 위한 cage 제작 및 적용

육상형 또는 수상형의 천적생물 배양장치는 천적생물 배양조의 규모가 한정되어 비용측면 또는 소요부지 측면에서 대규모의 적용에 한계가 있다. 또한, 배양장치에서 고밀도 배양후 녹조발생수역에 방류되었을 때 녹조를 포식하기 이전에 어류에 포식되어 녹조제어 효과가 반감될 가능성이 높다. 이에 대한 보완책으로 천적생물 배양장치에 대량 배양된 천적생물을 2차 증폭 배양이 가능하고, 어류 포식으로부터 보호받을 수 있는 cage의 적용은 상당히 효과적이라 사료된다. 배양장치에서 배양된 천적생물을 cage로 방류하게 되면 수역의 녹조생물을 포식하면서 2차 증식을 하게 되고, 또한, cage 내부에는 어류가 들어올수 없어 어류로부터 안전한 공간이 된다.

본 연구에서 적용한 cage는 500  $\mu\text{m}$  메쉬망으로 둘러싸인 73  $\text{m}^3$  규모로 (6 m  $\times$  6 m  $\times$  1 m  $\times$  2조) 제작하였으며, 사각 철제 프레임에 천재질의 메쉬망으로 둘러 싸인 형태이다. cage는 천적생물 배양장치에서 방류된 천적생물을 수역 내에서 추가 배양한 후 수역으로 다시 살포할 수 있는 구조로 일부 구간이 개폐 가능한 구조로 제작하였다.

### 3) 육상형 배양장치의 운영

육상형 배양장치의 운영조건은 수상형 배양장치와 동일하게 각배양조의 체류시간은 식물플랑크톤 배양조 3일, 동물플랑크톤 배양조 4일로 운영하였으며, 동물플랑크톤 배양조의 산소공급은 펌프를 이용하여 교반 공급하였으며, 먹이생물 공급비율은 50%로 하였다.

운영기간은 시설설치가 완료된 10월 6일부터 진행하여 11월 16일까지 진행되었다. 세부 운영조건은 표 2.15와 같다.

(표 2.15) 육상형 배양장치(30  $\text{m}^3$  규모) 운영

배양기간	현장조사	분석항목	특이사항
10/6 ~ 10/17 (12일간)	천적생물 접종배양 ( <i>Daphnia</i> spp.)	수온, DO, pH, Zoo.	- 육상 배양장치(30 $\text{m}^3$ 규모) 추가 설치 - 경희대학교에서 천적생물( <i>Daphnia</i> spp.)을 접종하여 대량배양 실시
11/04 ~ 11/16 (13일간)	자연분리종 대량배양	수온, pH, Chl-a, TN, TP, PO <sub>4</sub> -P, Phyto., Zoo.	- 가을철 현장에 서식하는 자연분리 종을 이용한 대량배양 실험 실시

## 2. 유지관리방안

### 가. 유지관리 기본 방향

천적생물 배양장치의 최적 운영을 위해서는 안정적인 유지관리 계획의 수립이 필수적이다. 특히 자연환경에서 미소생물을 배양하는 것은 상당히 까다롭고, 많은 변수를 가지고 있기 때문에 더욱 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 풍력교반장치 상태와 먹이생물 공급비율, 먹이생물의 질 등을 항상 관찰하고, 관리하여야 한다.
- 먹이생물의 질적 관리를 위해 식물플랑크톤 배양조에서 배양상태 등을 꼼꼼히 체크해야 한다.
- 대량배양된 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.

### 나. 유지관리

천적생물 배양장치의 유지관리는 상시근무 현장관리인을 두어 일상적인 유지관리를 수행하고, 매월 현장실험전 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 2.16) 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

### (1) 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 2.17과 표 2.18은 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(메조코즘 포함), 부체 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.

### (2) 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 부체, 부교 등 외곽 시설에 대한 손상 방지 작업 등이 그것이다. 또한 동절기 배관의 파손 또는 시설운영에 따른 시

간경과로 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 2.17) 천적생물 배양장치 현장시설 점검표

구 분	점 검 사 항 (기록사항은 일일근무일지에 기록)	2011년 ( / )월 점검사항 √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	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	○ 수조내 혐잡물제거	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
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	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	○ 수조내 혐잡물제거	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
유출부	○ 유출배관의 정상위치 확인	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
	○ 유출부 주변 이물질 제거	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
	○ 유출부 경광등정상작동 확인·조치	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
	○ 유출배관 안전관리 및 조치	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	○ 매조코즘 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 2.18) 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



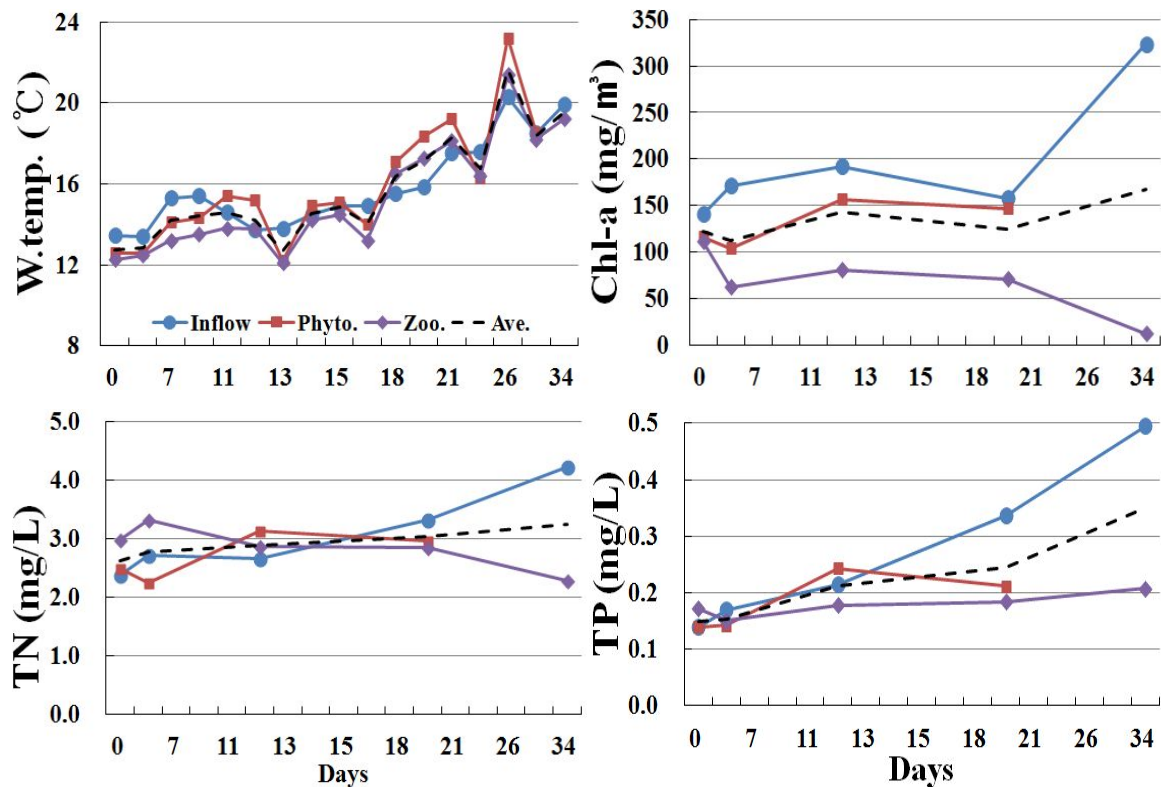
## 제5절 천적생물 배양장치 배양성능

### 1. 자연분리 천적생물 배양성능

가. 1차 배양(4 ~ 5월, 봄철)

#### (1) 배양장치 수질조건

2011년 4월 13일부터 5월 17일까지 수상형 배양장치(10 m<sup>3</sup>)에서 실시한 봄철 대량배양성능 실험은 현장종의 자연분리를 통해 실시하였으며, 이 기간 동안 수온(W.temp.), Chl-a, TN, TP 항목에 대한 수질변화를 분석하였다.



<그림 2.43> 봄철 자연분리 천적생물 대량배양에 따른 수상형 배양장치의 수질변화

수온(W.temp.)은 배양기간 동안 평균 15.6 °C, 12.1 ~ 23.2 °C의 범위로 나타났다. 유입수(Inflow)에서 평균 15.8 °C로 13.4 ~ 20.3 °C의 범위를 보였으며, 배양조에서는 식물플랑크톤 배양조(Phyto.)에서 평균 15.8 °C로 12.2 ~ 23.2 °C의 범위를 보였고, 동물플랑크톤 배양조(Zoo.)에서 평균 15.3 °C로 12.1 ~ 21.4 °C의 범위를 보여, 배양장치별 일부 차이를 보였으나 전반

적으로 시간이 지남에 따라 점차 증가하는 양상을 보였다. 배양조별로 식물플랑크톤 배양조는 유입수와 평균 수온은 동일하였으나, 수온 차이는 더 크게 나타났으며, 동물플랑크톤 배양조는 가장 낮은 평균 수온을 보였는데, 이는 배양조 내 설치된 식물섬의 차광효과에 의한 것으로 판단되었다.

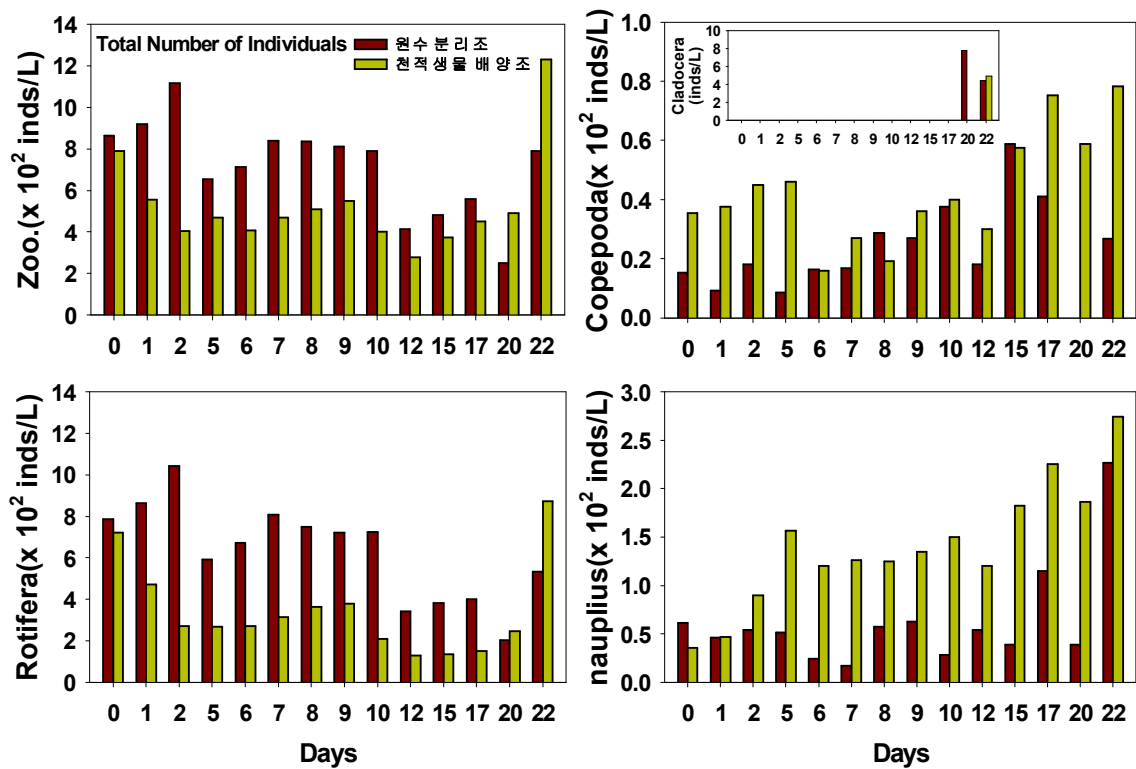
Chl-*a*는 배양기간 동안 평균 131.5 mg/m<sup>3</sup>, 12.2 ~ 323.5 mg/m<sup>3</sup>의 범위로 나타났다. 유입수(Inflow)의 평균 196.8 mg/m<sup>3</sup>로 나타났으며, 140.5 ~ 323.5 mg/m<sup>3</sup> 범위의 고농도 현장유입수의 영향으로, 식물플랑크톤 배양조(Phyto.)는 평균 130.6 mg/m<sup>3</sup>로 나타났으며, 103.9 ~ 155.9 mg/m<sup>3</sup>의 범위로, 100 mg/m<sup>3</sup> 이상의 높은 농도를 유지하며, 배양이 진행됨에 따라 점차 증가하였다. 반면, 동물플랑크톤 배양조(Zoo.)는 배양초기 110.8 mg/m<sup>3</sup>(4월 13일)에 비해 5월 17일에는 12.2 mg/m<sup>3</sup>까지 감소하였는데, 이는 동물플랑크톤 배양조의 배양에 의한 녹조저감효과로 판단되었다.

총질소(TN)는 배양기간 동안 2.884 mg/L, 2.253 ~ 4.215 mg/L의 범위로 나타났다. 유입수(Inflow)는 2.368 ~ 4.215 mg/L의 범위로 나타나, 평균 3.054 mg/L의 고농도 유입수가 배양조로 유입되었다. 배양조별로는 식물플랑크톤 배양조(Phyto.)에서 평균 2.705 mg/L로 2.253 ~ 3.128 mg/L의 범위를 보였으며, 동물플랑크톤 배양조(Zoo.)에서 평균 2.858 mg/L로 2.277 ~ 3.318 mg/L의 범위를 보였다. 본 배양실험에서의 TN은 고농도의 유입수의 영향으로 배양장치에서도 높은 농도분포를 보인 것으로 판단되었으며, 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다.

총인(TP)은 배양기간 동안 평균 0.213 mg/L, 0.138 ~ 0.495 mg/L의 범위로 나타났다. 유입수(Inflow)는 0.139 ~ 0.495 mg/L의 범위로 나타나, TN과 마찬가지로 평균 0.271 mg/L의 고농도 유입수가 배양조로 유입되었으며, 식물플랑크톤 배양조(Phyto.)에서 평균 0.183 mg/L로 0.138 ~ 0.242 mg/L의 범위를 보였고, 동물플랑크톤 배양조(Zoo.)에서 평균 0.178 mg/L로 0.150 ~ 0.207 mg/L의 범위를 보였다. 본 실험의 고농도 유입수의 영향으로 배양장치에서도 높은 농도분포를 보였으며, 식물플랑크톤 배양조에서는 일부 감소하는 경향을 보였으나, 동물플랑크톤 배양조에서는 시간이 지남에 따라 점차 증가하였다.

## (2) 배양장치 배양성능

현장에서 서식하는 천적생물을 자연 분리하여 현장배양장치에서 대량 배양하였으며, 원수분리조와 현존량을 비교하였다.



<그림 2.44> 천적생물 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 원수분리조보다 56%, 지각류는 60% 감소하였고, 요각류는 186%, 노플리우스는 224%로 크게 증가하였다.

원수분리조에서 지각류는 배양 20일차와 22일차에 8 inds./L와 4 inds./L 출현한 것 이외에는 발견되지 않았고, 요각류는 평균 23 inds./L가 출현하였다. 윤충류는 배양 20일차에 최소 203 inds./L에서 배양 2일차 최대 1,044 inds./L로 평균 630 inds./L가 출현하였다. 노플리우스는 배양 7일차에 최소 17 inds./L에서 배양 17일차 115 inds./L로 평균 623 inds./L가 출현하였다. 원수분리조에서는 지각류, 요각류, 노플리우스, 윤충류 순으로 많은 개체수가 출현하였다.

천적생물 배양조에서 지각류는 원수분리조와 마찬가지로 배양 22일차에 5 inds./L가 출현한 것 이외에는 발견되지 않았고, 요각류는 배양 6일차에 최소 16 inds./L에서 배양 22일차 최대 78 inds./L로 평균 43 inds./L가 출현하였다. 윤충류는 배양 12일차에 최소 130 inds./L에서 배양 22일차에 최대 872 inds./L로 평균 343 inds./L가 출현하였다. 노플리우스는 배양 0일차 최소

35 inds./L에서 배양 마지막 날인 22일차 274 inds./L로 평균 141 inds./L가 출현하였다. 원수분리조에서와 마찬가지로 천적생물 배양조에서도 지각류, 요각류, 노플리우스, 윤충류 순으로 많은 개체수가 출현하였다.

원수분리조에서 분리된 소형 동물플랑크톤인 윤충류는 7 ~ 10일 주기로 배양 유동성을 보였고, 노플리우스의 개체수 증가는 뚜렷하여 요각류 성체의 증가에 영향을 미쳤다.

결론적으로 원수분리조에서 분리된 천적생물의 현존량과 천적생물 배양조와의 현존량을 비교한 결과, 일부 분류군간의 차이가 있었으나 천적생물 배양조의 배양성능이 월등한 걸로 분석되었다.

## 나. 2차 배양(11월, 가을)

### (1) 배양장치 수질조건

수온이 급격히 감소하는 시기인 11월 4일부터 11월 11일까지 수상형 배양장치(10 m<sup>3</sup>)와 육상형 배양장치(30 m<sup>3</sup>)에서 실시한 가을철 대량배양성능 실험은 현장종의 자연분리를 통해 실시하였으며, 이 기간동안 수온(W.temp.), Chl-a, TN, TP 항목에 대한 수질변화 분석을 8회 실시하였다.

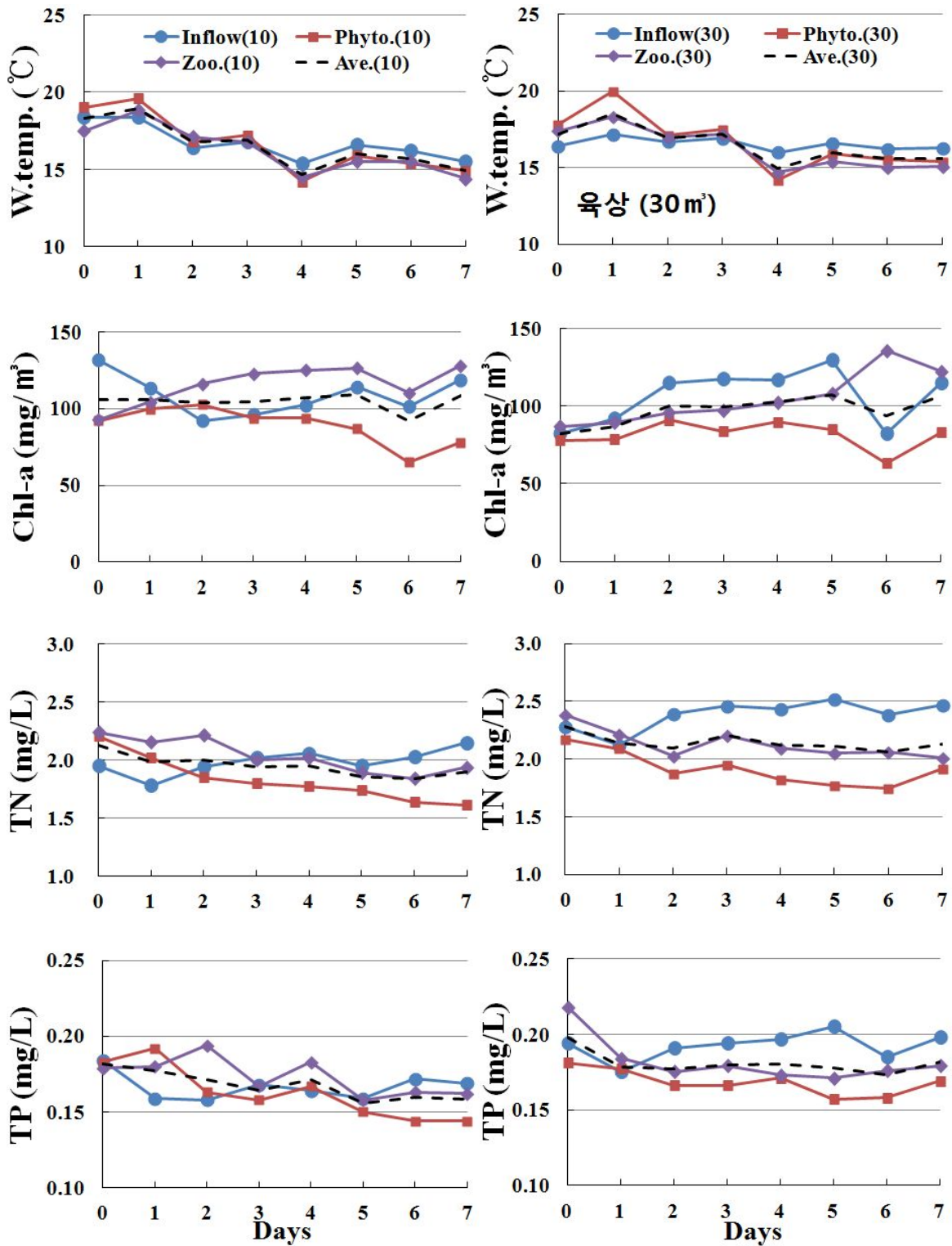
수온(W.temp.)은 배양기간 동안 평균 16.5 °C, 14.2 ~ 20.0 °C의 범위로 나타났다. 유입수(Inflow)는 평균 16.6 °C로, 15.4 ~ 18.4 °C의 범위를 보였으며, 전반적으로 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 양상을 보였다. 배양조 별로 식물플랑크톤 배양조(Phyto.)는 수상형 배양장치에서 평균 16.6 °C로 14.2 ~ 19.6 °C의 범위를 보였으며, 육상형 배양장치에서 평균 16.7 °C로 14.2 ~ 20.0 °C의 범위를 보였다. 반면, 동물플랑크톤 배양조는 평균 16.3 °C로 식물플랑크톤 배양조에 비해 낮은 수온을 보였는데, 식물플랑크톤 배양조는 태양광을 직접적으로 받을 수 있지만, 동물플랑크톤 배양조는 수상형 배양장치의 식물섬, 육상형 배양장치의 식물플랑크톤 배양조에 의한 차광효과가 있기 때문에 평균 수온의 감소가 유발된 것으로 판단되었다. 반면, 수온 변화폭은 유입수에 직접적인 영향을 받는 식물플랑크톤 배양조는 수상형 배양장치에서 5.4 °C, 육상형 배양장치에서 5.8 °C의 수온변화를 보였으며, 차광효과가 있는 동물플랑크톤 배양조는 수상형 배양장치에서 4.4 °C, 육상형 배양장치에서 3.6 °C의 수온변화를 보여 식물플랑크톤 배양조의 수온의 변화폭이 크게 나타났다.

Chl-a는 배양기간 동안 평균 102.3 mg/m<sup>3</sup>, 63.3 ~ 135.7 mg/m<sup>3</sup>의 범위로 나타났다. 유입수(Inflow)는 수상형 배양장치에서 평균 109.1 mg/m<sup>3</sup>로 92.2

~ 131.6 mg/m<sup>3</sup>의 범위를 보였으며, 육상형 배양장치에서 평균 108.4 mg/m<sup>3</sup>로 82.4 ~ 129.4 mg/m<sup>3</sup>의 범위를 보여 유입수의 농도는 큰 차이가 없었다. 식물플랑크톤 배양조(Phyto.)는 수상형 배양장치에서 평균 88.4 mg/m<sup>3</sup>로 64.9 ~ 102.5 mg/m<sup>3</sup>의 범위를 보였으며, 육상형 배양장치에서 평균 86.0 mg/m<sup>3</sup>로 63.3 ~ 122.0 mg/m<sup>3</sup>의 범위를 보였다. 또한, 동물플랑크톤 배양조(Zoo.)는 수상형 배양장치에서 평균 116.8 mg/m<sup>3</sup>로 92.8 ~ 128.2 mg/m<sup>3</sup>의 범위를 보였으며, 육상형 배양장치에서 평균 104.9 mg/m<sup>3</sup>로 87.0 ~ 135.7 mg/m<sup>3</sup>의 범위를 보였다. 본 가을철 대량배양에서는 봄철과 달리, 유입수 및 배양조에서 모두 높은 Chl-*a* 농도를 유지하고 있는 것으로 나타났다.

총질소(TN)는 배양기간 동안 평균 2.000 mg/L, 1.341 ~ 2.523 mg/L의 범위로 나타났다. 유입수(Inflow)는 수상형 배양장치에서 평균 1.986 mg/L로 1.783 ~ 2.150 mg/L의 범위를 보였으며, 육상형 배양장치에서 평균 2.276 mg/L로 1.414 ~ 2.523 mg/L의 범위를 보여, 고농도 유입수가 배양조로 유입된 것으로 나타났다. 식물플랑크톤 배양조(Phyto.)는 수상형 배양장치에서 평균 1.823 mg/L로 1.609 ~ 2.206 mg/L의 범위를 보였으며, 육상형 배양장치에서 평균 1.863 mg/L로 1.428 ~ 2.168 mg/L의 범위를 보였다. 또한, 동물플랑크톤 배양조(Zoo.)는 수상형 배양장치에서 평균 2.011 mg/L로 1.808 ~ 2.237 mg/L의 범위를 보였으며, 육상형 배양장치에서 평균 2.044 mg/L로 1.341 ~ 2.387 mg/L의 범위를 보여 높은 농도분포를 보였다.

총인(TP)는 배양기간 동안 평균 0.171 mg/L, 0.118 ~ 0.218 mg/L의 범위로 나타났다. 유입수(Inflow)는 수상형 배양장치에서 평균 0.163 mg/L로 0.130 ~ 0.184 mg/L의 범위를 보였으며, 육상형 배양장치에서 평균 0.189 mg/L로 0.159 ~ 0.205 mg/L의 범위를 보여 TN과 마찬가지로 고농도 유입수가 배양조로 유입된 것으로 나타났다. 식물플랑크톤 배양조(Phyto.)는 수상형 배양장치에서 평균 0.158 mg/L로 0.118 ~ 0.192 mg/L의 범위를 보였으며, 육상형 배양장치에서 평균 0.169 mg/L로 0.157 ~ 0.181 mg/L의 범위를 보였다. 또한, 동물플랑크톤 배양조(Zoo.)는 수상형 배양장치에서 평균 0.168 mg/L로 0.128 ~ 0.194 mg/L의 범위를 보였으며, 육상형 배양장치에서 평균 0.180 mg/L로 0.161 ~ 0.218 mg/L의 범위를 보여 높은 농도분포를 보였다.



<그림 2.45> 가을철 자연분리 천적생물 대량배양에 따른 현장배양장치 수질변화 (좌: 수상형 배양장치 10 m<sup>3</sup>, 우: 육상형 배양장치 30 m<sup>3</sup>)

본 가을철 대량배양실험에서는 계절적요인으로 수온은 점차 감소하였다. Chl-*a*는 유입수 및 배양조에서 모두 높은 농도를 유지하고 있는 것으로 나타났으며, 동물플랑크톤 배양조에서 Chl-*a* 농도가 점차 감소하던 봄철과 달리 점차 배양이 진행됨에 따라 점차 증가하였는데, 동물플랑크톤 현존량과의 비교가 필요할 것으로 판단되었다. 또한, 영양염류 농도는 유입수 및 배양조에서 전반적으로 높은 농도를 유지하여 영양염류 결핍은 없었으며, 식물플랑크톤 배양조는 점차 감소하는 경향을 보였으나, 고농도의 유입수의 영향으로 감소폭은 적게 나타났다. 동물플랑크톤 배양조는 식물플랑크톤 배양조에 비해 높은 영양염 농도범위를 유지하였다.

## (2) 배양장치 배양성능

봄철에 이어 현장에서 서식하는 천적생물을 자연 분리하여 11월 4일에서 11월 11일까지 8일간 대량 배양하였으며, 10 m<sup>3</sup> 배양장치와 추가 설치된 30 m<sup>3</sup> 배양장치에서 배양된 동물플랑크톤을 원수분리조의 동물플랑크톤 현존량과 비교, 분석하였다.

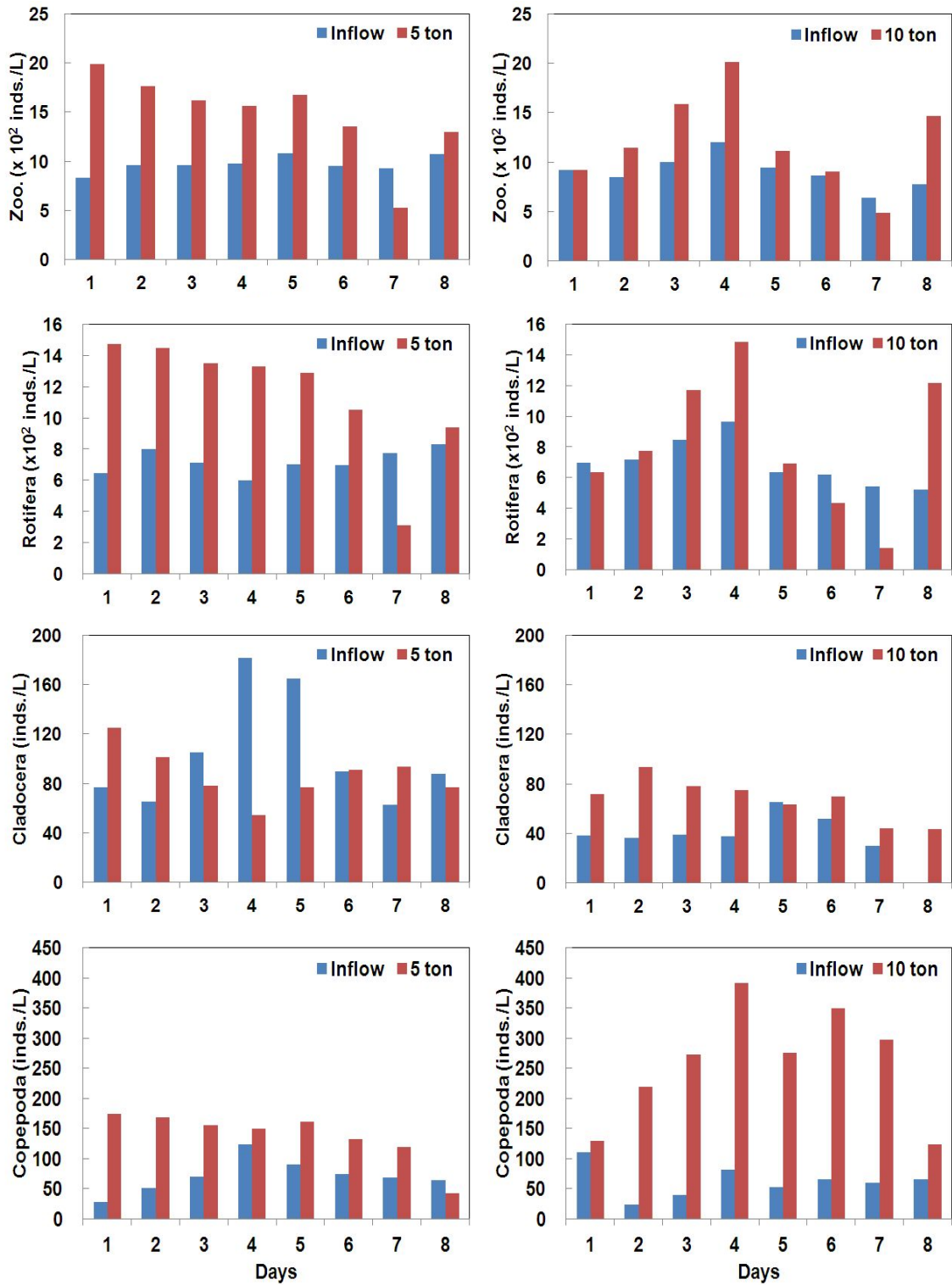
배양 일자별로 비교해보면, 10 m<sup>3</sup> 배양조에서는 유입수가 배양 1일째 833 inds./L에서 배양 8일째 1,072 inds./L로 평균 970 inds./L로 큰 변동없이 유입되었고, 10 m<sup>3</sup> 배양조에서 배양 1일째 1,988 inds./L에서 배양 8일째 1,302 inds./L로 평균 1,473 inds./L로 유입수에서 들어오는 동물플랑크톤의 양에 비해 배양성능이 뛰어난 것으로 확인되었다.

30 m<sup>3</sup> 배양조에서 유입수가 배양 1일째 919 inds./L에서 배양 8일째 774 inds./L로 평균 899 inds./L로 큰 변동없이 유입되었고, 30 m<sup>3</sup> 배양조에서는 배양 1일째 923 inds./L에서 배양 8일째 1,465 inds./L로 평균 1,204 inds./L로 유입수에서 들어오는 동물플랑크톤의 양에 비해 배양성능이 뛰어난 걸로 확인되었다.

결론적으로, 유입수와 배양조 내에서 서식하는 동물플랑크톤의 개체수를 비교해본 결과, 10 m<sup>3</sup> 배양조에서는 유입수보다 평균 152% 증가하였고, 30 m<sup>3</sup> 배양조에서는 134% 증가하는 양상을 보여 30 m<sup>3</sup> 배양조보다 10 m<sup>3</sup> 배양조에서 배양성능이 조금 더 우수한 것으로 나타났다.

각 분류군별로 살펴보면, 운충류는 10 m<sup>3</sup> 배양조에서 유입수보다 160%, 30 m<sup>3</sup> 배양조에서 118% 증가하였고, 지각류는 10 m<sup>3</sup> 배양조에서 21% 감소하였고, 30 m<sup>3</sup> 배양조에서 180% 증가하였다. 또한, 요각류는 10 m<sup>3</sup> 배양조에서 유입수보다 193% 증가하였고, 30 m<sup>3</sup> 배양조에서 414%로 크게 증가하였다. 노

플리우스는 10 m<sup>3</sup> 배양조에서 유입수보다 130% 증가하였고, 30 m<sup>3</sup> 배양조에서 50% 감소하였다.



<그림 2.46> 자연분리형 천적생물 대량배양효과



종합해보면, 자연분리 천적생물의 전체 생물량으로 배양조 규모에 따른 배양성능을 비교해보면 10 m<sup>3</sup> 배양조가 30 m<sup>3</sup> 배양조보다 유입수에서 들어오는 동물플랑크톤의 개체수에 비해 배양성능이 18% 정도 높은 것으로 나타났다. 하지만, 분류군별로는 10 m<sup>3</sup> 배양조에서는 윤충류, 노플리우스가 30 m<sup>3</sup> 배양조보다 배양성능이 좋았고, 30 m<sup>3</sup> 배양조에서는 지각류, 요각류가 10 m<sup>3</sup> 배양조에서보다 월등히 배양효과가 좋았다. 이런 결과를 바탕으로 자연분리 천적생물의 분류군별로 배양조 성능 비교를 계절별로 분석하여 현장 적용 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 2. *Daphnia* 천적생물 배양성능

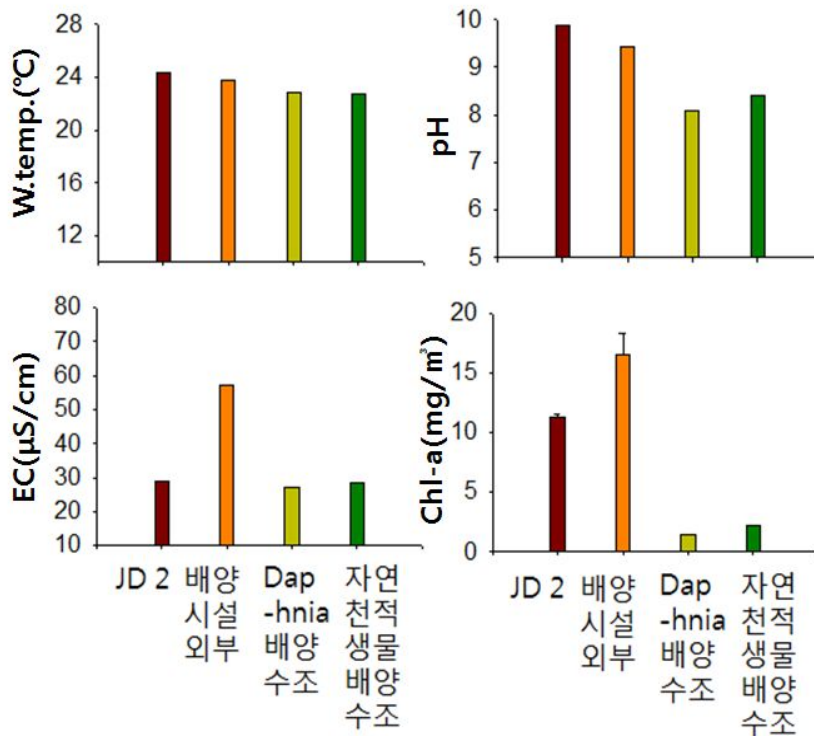
실내 고밀도 종주 배양한 *Daphnia*를 천적생물 배양장치에 적정 개체수로 투입한 후 천적생물 배양장치 내에서 고밀도를 형성하기 까지 2주 정도가 소요되는 것으로 나타났으며, 비교적 빠른 시간 내 천적생물의 대량증식이 가능한 것으로 나타났다.

대량배양 기간동안 전대저수지와 인공식물섬 주변, *Daphnia* 배양조, 자연분리 천적생물 배양조의 기초수질을 비교한 결과, *Daphnia* 및 자연분리 천적생물 배양조에서 pH 및 전기전도도가 낮게 나타났으며, 특히, Chl-*a* 농도가 낮게 유지되는 것이 나타났는데, 이는 천적생물 개체군 밀도 증가에 따라 배양조 내 식물플랑크톤이 낮은 농도로 저감되는 것으로 나타났다.

배양장치에서 증식된 *Daphnia similoides*의 대량 살포 직전 천적생물 배양조내에서 최고 개체군 밀도는 800 inds./L 이상인 것으로 나타났다.

*Daphnia* 천적생물 종주를 천적생물 배양장치에서 대량 배양했을 때 최대 천적생물 개체군 밀도는 5 m<sup>3</sup> 배양조에서  $4 \times 10^6$ 개체 이상으로 계산되었으며, 실제 배양조 내에서 저층 및 벽면에 *Daphnia*가 밀집하여 존재하고 있는 것을 고려하면 천적생물 배양장치를 통해 대량배양하여 일시 살포할 수 있는 천적생물 양은 m<sup>3</sup>당 약  $1.6 \times 10^6$ 개체인 것으로 사료되었다.

천적생물 대량 배양을 통해 방류할 수 있는 개체군 밀도는 배양조의 구조적 개선과 배양조건 최적화를 통해 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 판단되며, 배양조내 개체군의 시간적 변화를 추적하여 최고 밀도를 형성하는 시점에서 방류한다면 녹조발생 수역에서 녹조제어 효과를 더욱 높일 수 있을 것으로 사료된다.



<그림 2.47> 전대저수지 호중양(JD 2), 배양장치 유입수, *Daphnia* 배양수조 및 자연분리 천적생물 배양수조에서 기초 수질 비교(수온, pH, 전기전도도, Chl.a)

(표 2.19) 천적생물 배양장치에서 배양가능한 *Daphnia* 및 자연 천적생물 개체수

	대량배양수조 방류수 중 최고 농도	최대 가능 방류량 (5 m³ 수조)	수조내 밀집분포 고려한 실제 가능 방류량(m³당)
<i>Daphnia similoides</i> (투입천적생물)	835 inds./L	4,175,000 inds.	167,000 inds./m³
<i>Moina spp.</i> (자연천적생물)	45 inds./L	225,000 inds.	9,000 inds./m³
<i>Bosmina longirostris</i> (자연천적생물)	1285 inds./L	1,285,000 inds.	257,000 inds./m³

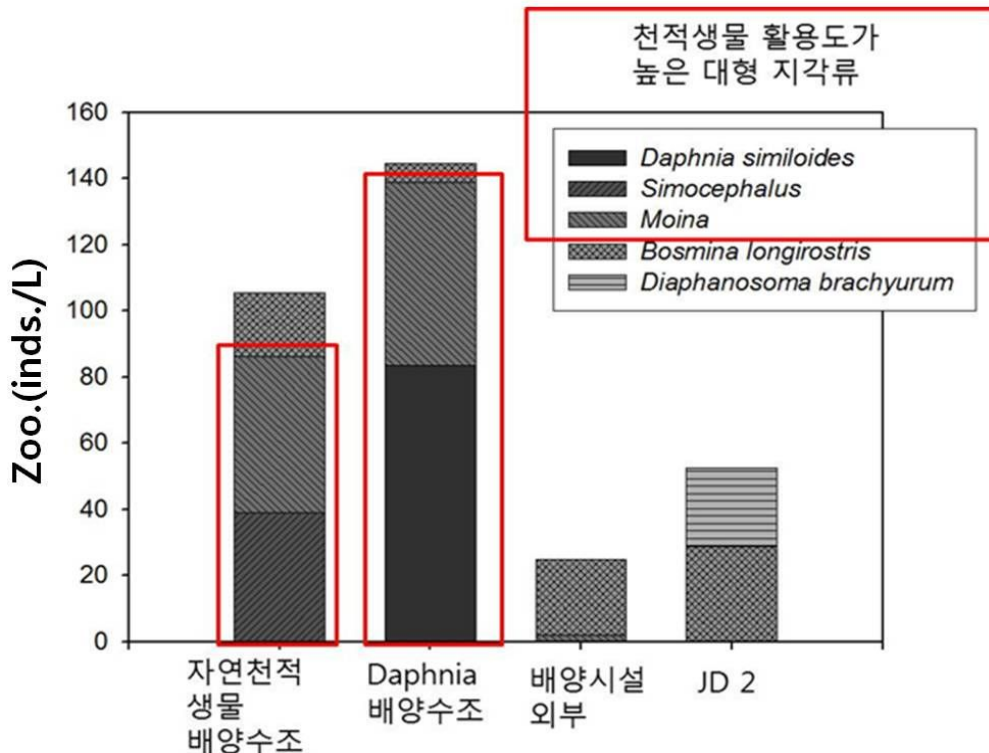
천적생물 배양장치의 2개 배양조 각각에 자연분리 천적생물과 천적생물 종주인 *Daphnia*를 분리 배양하여 자연분리 천적생물과 천적생물 종주 배양의 대량배양 성능 차이를 비교 분석하였다.

천적생물 배양장치는 현장의 자연환경조건에 장시간 노출되어 배양되며, 녹조발생 수역의 물을 여과, 배양하여 먹이공급을 하기 때문에 천적생물

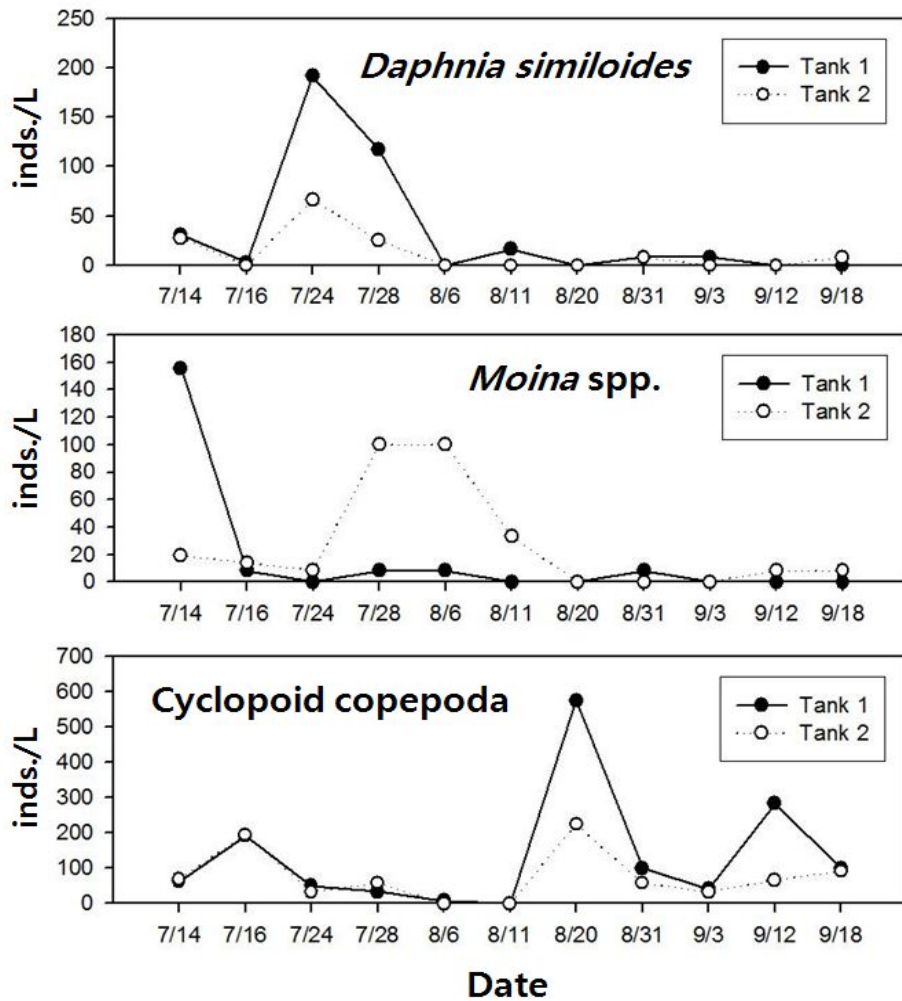
종주인 *Daphnia* 만 투입하여 대량배양한다 하더라도 *Daphnia* 이외에 자연분포 천적생물이 동시에 서식, 증가하는 것으로 나타났다. 천적생물 배양장치는 현장 수역과 달리 어류에 의한 포식압이 없어 전대저수지에서는 저밀도로 존재하던 녹조제어 능력을 가진 자연분포 천적생물이 대량 증식할 수 있는 환경을 동시에 제공하는 것으로 나타났다.

특히, 녹조제어 능력을 가지고 있는 *Moina* 속의 대형 지각류는 전대저수지의 정기 모니터링 지점에서는 L당 개체수가 10개체 이하로 연중 낮은 개체군 밀도를 보이거나 천적생물 배양장치안에서 종주배양하여 투입한 *Daphnia* 와 더불어 천적생물 배양조에서 높은 개체군 밀도를 나타냈다. 또한, 수체의 유기물 및 분해된 남조류 등을 섭식하는 것으로 알려진 *Bosmina longirostris* 역시 천적생물 배양조내에서 증식이 확인되었다.

따라서, 천적생물 배양장치에서는 천적생물 종주인 *Daphnia*의 대량 증식과 함께 자연 분포 천적생물의 증식이 동시에 이루어져 녹조제어를 위한 현장 살포시 녹조발생 수역에서 다양한 종류의 식물플랑크톤과 유기물질을 효과적으로 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다.



<그림 2.48> 천적생물 배양장치의 천적생물 배양조(자연분리 및 *Daphnia* 투입수조), 유입수와 호 중앙(JD 2)의 동물플랑크톤 종조성과 개체군 밀도 비교



<그림 2.49> 부유형 대량배양 수조(좌, 우)에서의 투입 *Daphnia* 및 자연 천적생물과 기타 우점 동물플랑크톤 개체군 밀도의 계절 변화

자연분리 천적생물 배양조에서는 *Moina*속의 지각류와 주로 수초대에 서식하는 것으로 알려진 대형 지각류인 *Simocephalus* sp. 등의 자연분포 천적생물이 높은 개체군 밀도로 성장하는 것이 확인되었다.

하지만, 녹조발생 수역에서 녹조제어에 활용할 수 있는 천적생물의 개체군 밀도는 자연분리 천적생물배양조 보다 *Daphnia*를 고밀도로 투입한 천적생물 종주 배양조에 더욱 높게 나타났다(그림 2.48).

*Daphnia* 투입 후 천적생물 배양조의 천적생물 개체군 밀도변화를 장기간 분석한 결과, 배양조내 천적생물 개체군 밀도는 지속적인 고밀도 투입에도 불구하고 계절에 따라 상이하게 나타났는데, 7월까지의 투입한 *D. similoides*가 높은 밀도로 증가되고, 수조 내 고밀도가 유지되었으나, 8월에

는 투입한 *D. similoides* 보다 자연 서식 천적생물인 *Moina*의 개체군 밀도가 보다 높은 것으로 나타났으며, 8월 이후에는 천적생물의 밀도가 급격히 감소하는 경향을 보였다(그림 2.49).

이러한 천적생물 배양조내 개체군 밀도의 증감은 배양조 내의 수온, 수질변화와 유입되는 원수에 포함된 식물플랑크톤의 종류, 배양조 내의 수서곤충의 증가 등이 원인으로 생각되며, 지속적인 천적생물의 고밀도 유지를 위해서는 수온조절, 유입 원수 조절, 외부 생물 유입 차단 및 배양조내 수질관리 등 배양시설의 관리가 필요할 것으로 나타났다.

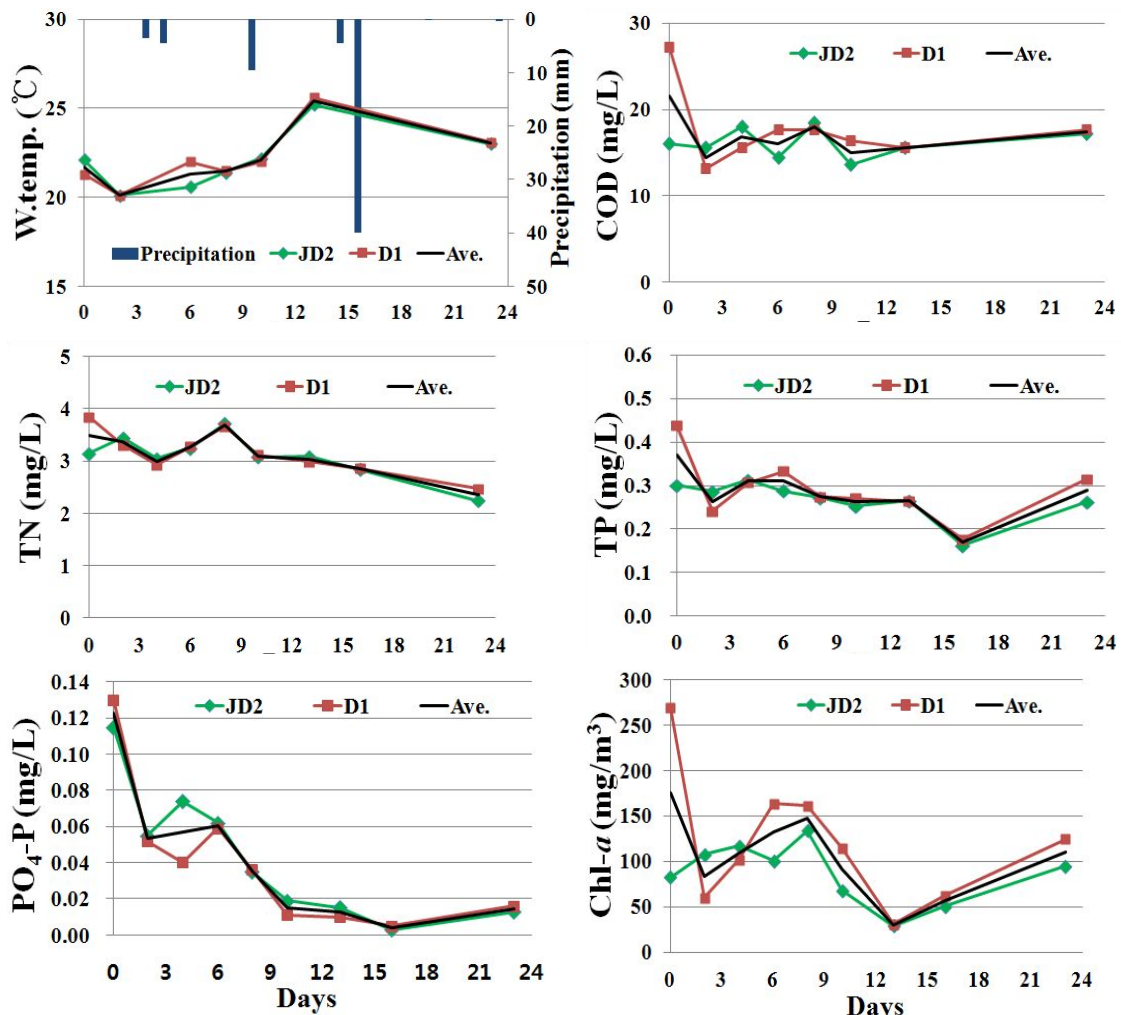
특히, 천적생물 배양조 내의 에어레이션의 조절(물리적 저항요인 감소), 곤충의 산란을 방지할 수 있는 위치 선정(현재의 수생식물 지역에 설치된 인공섬의 경우, 잠자리 등 *Daphnia* 포식생물의 밀도가 높고 접근, 산란이 용이함) 등을 고려할 필요가 있는 것으로 사료되었다.

## 제6절 천적생물 대량 살포 효과분석

### 1. 자연분리 천적생물 대량살포 효과분석

#### 가. 수질환경 조건 및 변화

현장종의 자연분리를 통해 수상형 배양장치(10 m<sup>3</sup>)에서 대량배양한 천적생물을 현장에 일시 살포하여, 5월 17일부터 6월 9일까지 23일간 살포효과 분석을 실시하였으며, 대조구인 JD2와 살포지점인 D1지점의 수온, COD, TN, TP, PO<sub>4</sub>-P, Chl-*a* 항목에 대한 분석을 실시하였다.



<그림 2.50> 자연분리형 천적생물 현장살포에 따른 수질변화

강수량은 살포효과분석기간 동안 5차례에 걸쳐 총 62.5 mm의 강우가 발생하였으며, 살포 15일차에는 40 mm의 강우가 발생하였다.

수온(W.temp.)은 살포효과분석기간 동안 평균 22.2 °C, 20.1 ~ 25.4 °C의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD2에서 평균 22.1 °C로 20.1 ~ 25.2 °C의 범위를 보였으며, D1에서 평균 22.2 °C로 20.1 ~ 25.6 °C의 범위를 보여, 대조지점과 살포지점의 수온차는 거의 없었으며, 시간이 갈수록 증가하는 경향을 보였다.

화학적 산소요구량(COD)은 살포효과분석기간 동안 평균 16.9 mg/L, 14.4 ~ 21.6 mg/L의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD2에서 평균 16.1 mg/L로 13.6 ~ 18.4 mg/L의 범위를 보였고, D1에서 평균 17.6 mg/L로 13.2 ~ 27.2 mg/L의 범위를 보였다. 대조구인 JD2는 0일차에 16.0 mg/L에서 이후 큰 변화 없이 증감을 반복하였다. 반면, 살포지점인 D1은 살포당시 27.2 mg/L의 높은 값을 보였으나, 살포 2일차에 13.2 mg/L까지 감소하였는데, 이는 살포한 천적 생물에 의한 현장 녹조의 섭식에 따른 유기물 농도가 감소를 유발하였을 것으로 판단되었다.

총질소(TN)는 살포효과분석기간 동안 평균 3.126 mg/L, 2.359 ~ 3.686 mg/L의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD2에서 평균 3.091 mg/L로 2.242 ~ 3.713 mg/L의 범위를 보였으며, D1은 평균 3.161 mg/L로 2.475 ~ 3.836 mg/L의 범위를 보여, 전반적으로 2 mg/L을 초과하였다. 대조구와 살포지점에서 TN 변화는 서로 유사하게 나타나 지점별 차이는 거의 없었으며, 시기별로 일부차이는 있었으나, 점차 감소하는 경향을 보였다.

총인(TP)은 살포효과분석기간 동안 평균 0.279 mg/L, 0.1710 ~ 0.370 mg/L의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD2에서 평균 0.267 mg/L로 0.163 ~ 0.313 mg/L의 범위를 보였으며, D1에서 평균 0.291 mg/L로 0.176 ~ 0.438 mg/L의 범위를 보였으며, 살포 0일차를 제외하고, 대조구와 살포지점의 TN 변화는 서로 유사하였다. 시기별로는 0일차에 최고치를 보인 후, 16일차까지 점차 감소하였으나, 이후 급격히 증가하였다.

인산염인( $PO_4-P$ )은 살포효과 분석기간 동안 0.004 ~ 0.123 mg/L(평균 0.042 mg/L)의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD2에서 0.003 ~ 0.115 mg/L(평균 0.043 mg/L)의 범위를, D1에서 0.005 ~ 0.130 mg/L(평균 0.040 mg/L)로 지점별 차이가 거의 없었으며, 시기별로는 0일차에 0.123 mg/L로 최고치를 보인 후, 16일차까지 점차 감소한 후 이후 TP의 증가와 함께 다소 증가하였다.

Chl-*a*는 살포효과분석기간 동안 평균 103.9 mg/m<sup>3</sup>, 30.0 ~ 175.9 mg/m<sup>3</sup>로 나타났다. 지점별로 JD2는 평균 87.1 mg/m<sup>3</sup>로 29.0 ~ 133.7 mg/m<sup>3</sup>의 범위를 보였으며, D1은 평균 120.8 mg/m<sup>3</sup>로 30.9 ~ 269.1 mg/m<sup>3</sup>의 범위를 보여, 살포지점의 Chl-*a*가 높게 나타났다. 그러나 대조지점인 JD2는 살포당시 82.7 mg/m<sup>3</sup>에서 2일차에 107.7 mg/m<sup>3</sup>로 증가한 반면, 살포지점인 D1지점은 살포당시 269.1 mg/m<sup>3</sup>에서 2일차에 59.8 mg/m<sup>3</sup>까지 급격히 감소함에 따라, 천적생물 대량살포에 따른 녹조제어 효과로 기대되었다. 또한, D1과 JD2의 변화양상이 TP의 변화와 일치하였는데, 인영양염의 농도변화가 Chl-*a*에 영향을 미쳤을 것으로 판단되었다.

#### 나. 살포효과

천적생물 배양장치에서 자연분리 천적생물을 대량 배양하여 전대저수지의 녹조발생 수역에 대량 살포한 후 총 21개 지점을 대상으로 동물플랑크톤 밀도변화에 대한 모니터링을 실시한 결과, 소형운충류, 대형운충류 및 지각류는 살포로 인해 살포지점 주변에서 동물플랑크톤 밀도가 다소 증가하는 것으로 나타났다(그림 2.51).

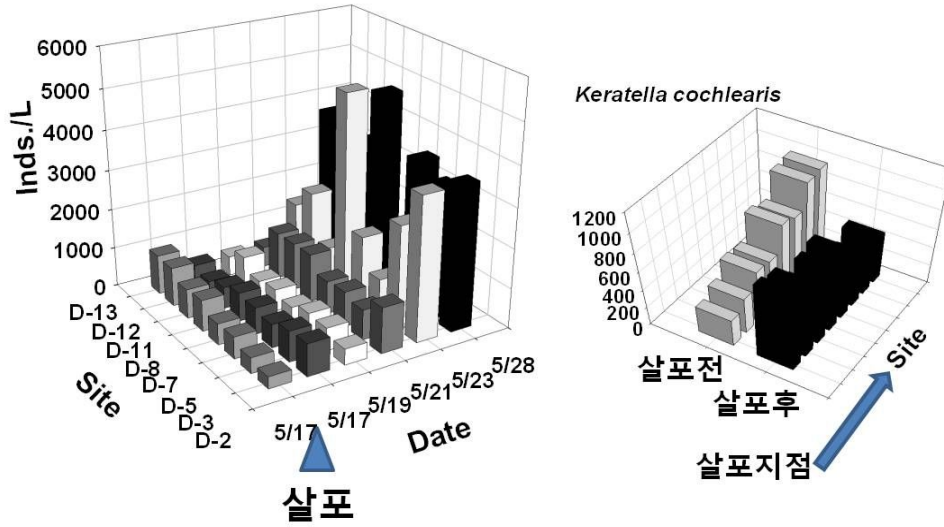
일반적으로 녹조류 및 규조류를 섭식하는 것으로 알려진 대형 운충류 *Asplanchna* spp. 와 녹조류, 분해된 남조류를 섭식하는 것으로 알려진 소형 지각류 *Bosmina longirostris*의 경우 살포 후 개체군 밀도가 증가하는 것으로 나타났다.

특히, 소형지각류인 *B. longirostris*의 경우, 살포 전에는 살포지점 주변에서 개체수가 확인되지 않았으나 천적생물 배양장치에서 대량배양 후 살포했을 때 살포지점에서 높은 밀도를, 살포지점과 멀어질수록 개체수 밀도가 낮아지는 것이 확인되었다(그림 2.51).

자연분리 배양하여 살포한 동물플랑크톤의 개체수는 섭식능력이 뛰어난 천적생물 종이 적고, 개체수도 낮은 것으로 나타났지만, 현장 살포 3일 이내에 일시적인 개체수의 증가가 발생하여 천적생물 살포효과가 있는 것으로 나타났다.

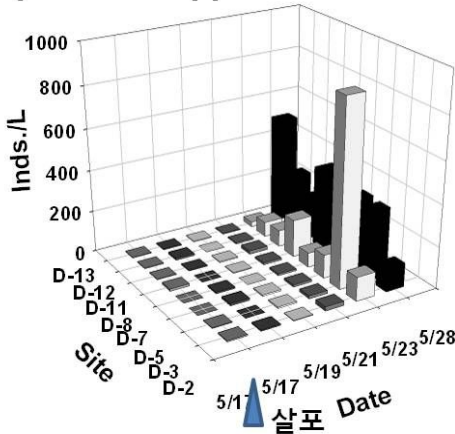


***Keratella cochlearis***

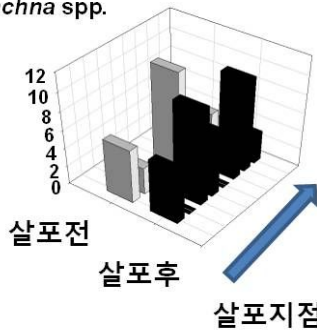


<그림 2.51> 살포로 인한 소형윤충류(우점종, *Keratella cochlearis*)의 지점별 개체수밀도 변화(D0 지점에서 살포를 실시)

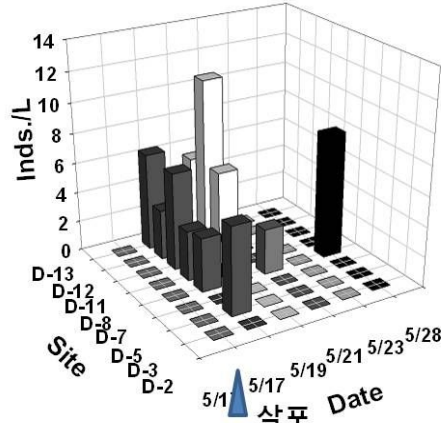
***Asplanchna spp.***



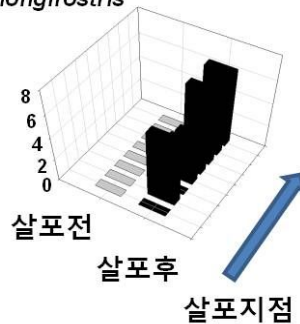
***Asplanchna spp.***



***Bosmina longirostris***



***Bosmina longirostris***



<그림 2.52> 살포로 인한 대형 윤충류(*Asplanchna spp.*) 와 소형 지각류(*Bosmina longirostris*)의 지점별 개체수밀도 변화(D0 지점에서 살포 실시)

천적생물의 녹조제거 효과를 분석하기 위해 천적생물 배양장치에서 대량 배양한 자연 분리 천적생물을 녹조발생 수역에 일시 살포한 후 거리별, 시간별 천적생물 및 녹조원인 식물플랑크톤 개체수를 분석하였다.

살포효과를 시간별로 분석해보면, 우선 C라인(횡단면방향)에서는 살포 직전 식물플랑크톤 양인 Chl-*a*가 243 mg/m<sup>3</sup> 이었는데, 살포 2일째 78.7 mg/m<sup>3</sup> 까지 감소하였다. 2일째 이후부터 조금씩 증가하여 8일째 150.6 mg/m<sup>3</sup>이 되었으나 그 후 동물플랑크톤이 급속히 증가하여 13일째 최고치인 14,114 inds./L 일 때, Chl-*a*는 살포 전에 비해 87% 감소하여 최저 농도인 31.2 mg/m<sup>3</sup> 까지 줄어들었다. 그 후 동물플랑크톤 개체수가 감소하면서 Chl-*a*는 다시 증가하는 양상을 보였다.

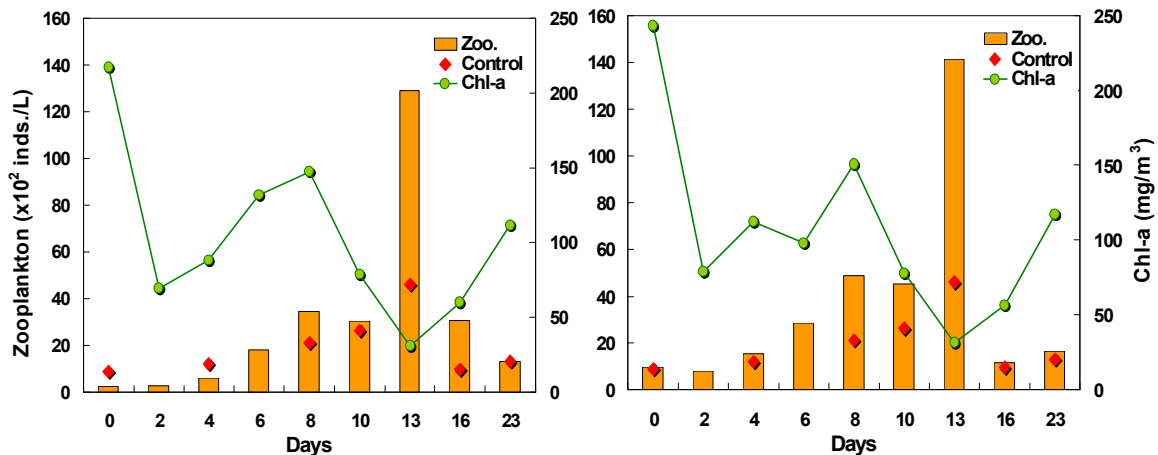
동물플랑크톤 현존량 변화를 살펴보면, 살포전 956 inds./L에서 살포 후 점차 증가하여 2일째 767 inds./L, 4일째 1,208 inds./L, 8일째 4,877 inds./L, 13일째 최고치인 14,114 inds./L까지 증가하여 살포 전과 비교했을 때, 1,604%까지 증가하였다.

D라인(제방방향)에서는 살포 직전 식물플랑크톤 양인 Chl-*a*가 217 mg/m<sup>3</sup> 이었는데, 살포 2일째 69.3 mg/m<sup>3</sup> 까지 감소하였다. 2일째 이후부터 조금씩 증가하여 8일째 147.3 mg/m<sup>3</sup>이 되었으나 그 후 동물플랑크톤이 급속히 증가하여 13일째 최고치인 12,890 inds./L 일 때, Chl-*a*는 살포 전에 비해 85.7% 감소하여 최저 농도인 31.0 mg/m<sup>3</sup> 까지 줄어들었다. 그 후 동물플랑크톤 개체수가 감소하면서 Chl-*a*는 다시 증가하는 양상을 보였다.

동물플랑크톤 현존량 변화를 살펴보면, 살포전 250 inds./L에서 살포 후 점차 증가하여 2일째 259 inds./L, 4일째 605 inds./L, 8일째 3,424 inds./L, 13일째 최고치인 12,890 inds./L까지 증가하여 살포 전과 비교했을 때, 5,156% 까지 증가하였다.

결과적으로, 자연분리 천적생물 살포 이후 양방향에서 지속적으로 개체수가 증가하여 13일째 C라인에서는 살포 전에 비해 1,604배 증가한 14,114 inds./L가 발견되었고, D라인에서 5,156% 증가한 12,890 inds./L로 최고 현존량을 보였다.

식물플랑크톤 양인 Chl-*a*는 양방향에서 지속적으로 감소하여 13일째 C라인에서는 살포 전 243 mg/m<sup>3</sup>에 비해 87배 감소한 31.2 mg/m<sup>3</sup>으로 나타났고, D라인에서는 살포 전 217 mg/m<sup>3</sup>에서 85.7% 감소한 31.0 mg/m<sup>3</sup>로 최저치를 보였다.



<그림 2.53> 대량 살포로 인한 제방방향(D라인)과 횡단면방향(C라인)의 일별 동물플랑크톤 개체수 변화

살포효과를 거리별로 분석하기 위해 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 110, 120, 130, 140, 150 m 간격으로 1 ~ 23일 동안 관찰하였다.

기간별로 효과가 더 뛰어난 D라인으로 거리별 분석을 해보았을 때, 5 m 지점에서는 살포 직전 식물플랑크톤 양인 Chl-*a*가 269 mg/m<sup>3</sup> 이었는데, 살포 2일째 59.8 mg/m<sup>3</sup> 까지 감소하였다. 2일째 이후부터 조금씩 증가하여 6일째 163.6 mg/m<sup>3</sup>이 되었으나 그 후 동물플랑크톤이 급속히 증가하여 13일째 최고치인 14,076 inds./L 일 때, Chl-*a*는 살포 전에 비해 88.5% 감소하여 최저 농도인 30.9 mg/m<sup>3</sup> 까지 줄어들었다. 그 후 동물플랑크톤 개체수가 감소하면서 Chl-*a*는 다시 증가하는 양상을 보였다.

동물플랑크톤 현존량 변화를 살펴보면, 살포 후 점차 증가하여 2일째 314 inds./L, 6일째 3,011 inds./L, 8일째 4,722 inds./L, 13일째 최고치인 14,076 inds./L까지 증가하여 살포 전과 비교했을 때, 4,482% 까지 증가하였다.

10 m 지점에서는 살포 직전 식물플랑크톤 양인 Chl-*a*가 268.3 mg/m<sup>3</sup> 이었는데, 살포 2일째 74.6 mg/m<sup>3</sup> 까지 감소하였다. 2일째 이후부터 조금씩 증가하여 8일째 152.8 mg/m<sup>3</sup>이 되었으나 그 후 동물플랑크톤이 급속히 증가하여 13일째 최고치인 14,076 inds./L 일 때, Chl-*a*는 살포 전에 비해 88.3% 감소하여 최저 농도인 31.5 mg/m<sup>3</sup> 까지 줄어들었다. 그 후 동물플랑크톤 개체수가 감소하면서 Chl-*a*는 다시 증가하는 양상을 보였다.

동물플랑크톤 현존량 변화를 살펴보면, 살포 후 점차 증가하여 2일째 262 inds./L, 4일째 459 inds./L, 6일째 2,871 inds./L, 13일째 최고치인 15,411 inds./L까지 증가하여 살포 전과 비교했을 때, 5,036% 까지 증가하였다.

20 m 지점에서는 살포 직전 식물플랑크톤 양인 Chl-*a*가 259.4 mg/m<sup>3</sup> 이었는데, 살포 2일째 71.5 mg/m<sup>3</sup> 까지 감소하였다. 2일째 이후부터 조금씩 증가하여 8일째 168.9 mg/m<sup>3</sup>이 되었으나 그 후 동물플랑크톤이 급속히 증가하여 13일째 최고치인 15,040 inds./L 일 때, Chl-*a*는 살포 전에 비해 88.5% 감소하여 최저 농도인 29.9 mg/m<sup>3</sup> 까지 줄어들었다. 그 후 동물플랑크톤 개체수가 감소하면서 Chl-*a*는 다시 증가하는 양상을 보였다.

동물플랑크톤 현존량 변화를 살펴보면, 살포 후 점차 증가하여 2일째 262 inds./L, 4일째 400 inds./L, 6일째 2,970 inds./L, 13일째 최고치인 15,040 inds./L까지 증가하여 살포 전과 비교했을 때, 4,423% 까지 증가하였다.

40 m 지점에서는 살포 직전 식물플랑크톤 양인 Chl-*a*가 215.6 mg/m<sup>3</sup> 이었는데, 살포 2일째 70.8 mg/m<sup>3</sup> 까지 감소하였다. 2일째 이후부터 조금씩 증가하여 8일째 188.1 mg/m<sup>3</sup>이 되었으나 그 후 동물플랑크톤이 급속히 증가하여 13일째 최고치인 17,536 inds./L 일 때, Chl-*a*는 살포 전에 비해 85.3% 감소하여 최저 농도인 31.7 mg/m<sup>3</sup> 까지 줄어들었다. 그 후 동물플랑크톤 개체수가 감소하면서 Chl-*a*는 다시 증가하는 양상을 보였다.

동물플랑크톤 현존량 변화를 살펴보면, 살포 후 점차 증가하여 2일째 221 inds./L, 4일째 590 inds./L, 8일째 4,325 inds./L, 13일째 최고치인 17,536 inds./L까지 증가하여 살포 전과 비교했을 때, 6,518% 까지 증가하였다.

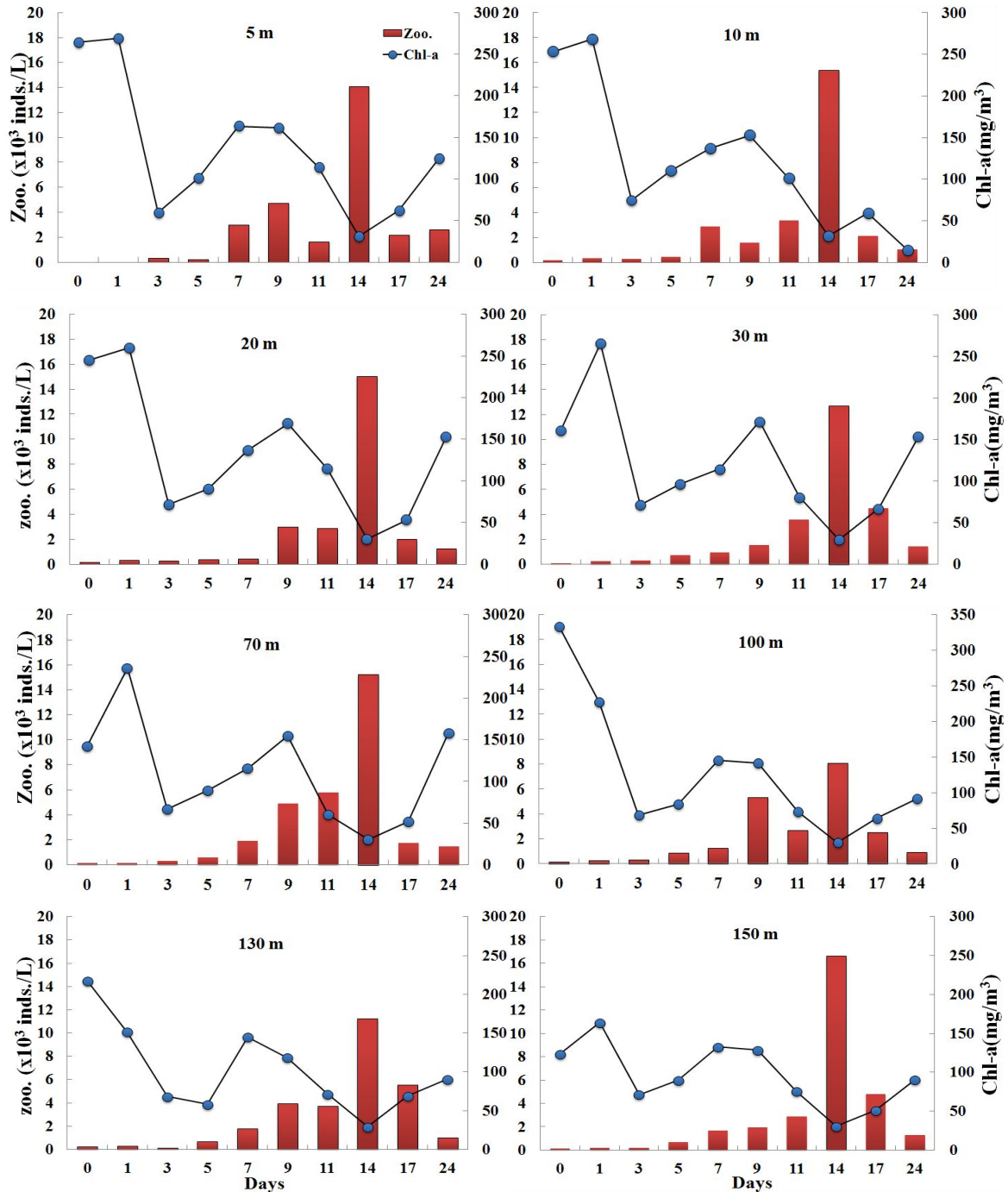
70 m 지점에서는 살포 직전 식물플랑크톤 양인 Chl-*a*가 236.3 mg/m<sup>3</sup> 이었는데, 살포 2일째 67 mg/m<sup>3</sup> 까지 감소하였다. 2일째 이후부터 조금씩 증가하여 8일째 154.8 mg/m<sup>3</sup>이 되었으나 그 후 동물플랑크톤이 급속히 증가하여 13일째 최고치인 15,232 inds./L 일 때, Chl-*a*는 살포 전에 비해 87.3% 감소하여 최저 농도인 30.1 mg/m<sup>3</sup> 까지 줄어들었다. 그 후 동물플랑크톤 개체수가 감소하면서 Chl-*a*는 다시 증가하는 양상을 보였다.

동물플랑크톤 현존량 변화를 살펴보면, 살포 후 점차 증가하여 2일째 284 inds./L, 4일째 579 inds./L, 8일째 4,914 inds./L, 13일째 최고치인 15,232 inds./L까지 증가하여 살포 전과 비교했을 때, 9,120% 까지 증가하였다.

150 m 지점에서는 살포 직전 식물플랑크톤 양인 Chl-*a*가 163.7 mg/m<sup>3</sup> 이었는데, 살포 2일째 71.2 mg/m<sup>3</sup> 까지 감소하였다. 2일째 이후부터 조금씩 증가하여 6일째 132.3 mg/m<sup>3</sup>이 되었으나 그 후 동물플랑크톤이 급속히 증가하여 13일째 최고치인 16,640 inds./L 일 때, Chl-*a*는 살포 전에 비해 81.3% 감소하여 최저 농도인 30.6 mg/m<sup>3</sup> 까지 줄어들었다. 그 후 동물플랑크톤 개체

수가 감소하면서 Chl-*a*는 다시 증가하는 양상을 보였다.

동물플랑크톤 현존량 변화를 살펴보면, 살포 후 점차 증가하여 2일째 198 inds./L, 4일째 707 inds./L, 8일째 1,920 inds./L, 13일째 최고치인 16,640 inds./L까지 증가하여 살포 전과 비교했을 때, 8,237% 까지 증가하였다.

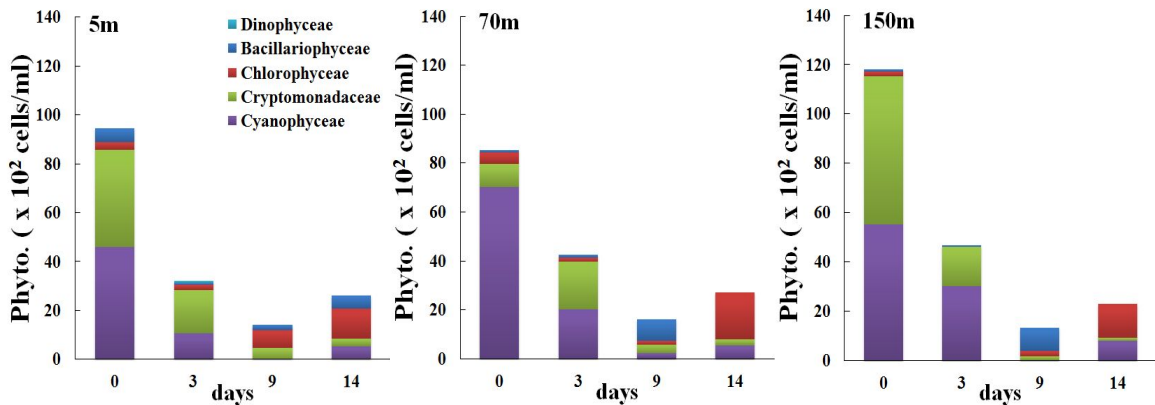


<그림 2.54> 대량 살포로 인한 제방방향(D라인)의 거리별 동물플랑크톤 개체수 변화

결과적으로, 살포 거리별 동물플랑크톤의 현존량과 클로로필의 평균값을 비교 했을 때 동물플랑크톤의 개체수는 살포일 이후 점차 증가하여 모든 지점에서 13일에 최고치를 보이다가 감소하였다. 식물플랑크톤 양인 Chl-a는 살포 직후 감소하다 8일째 증가하고 13일째 다시 급격히 감소하여 대량 배양하여 살포한 천적생물이 녹조원인생물의 제거에 일부 효과가 관찰되었다.

천적생물 살포 이후 식물플랑크톤의 현존량 변화는 살포지점으로부터의 거리가 멀어짐에 따라 녹조제어효과 감소하는 양상을 보였으며, 시간이 지남에 따라 이 효과는 현저히 낮아지는 모습을 보였다.

식물플랑크톤의 종조성은 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 우점하였다.



<그림 2.55> 살포 이후 식물플랑크톤 종조성 변화

살포 일자별로 자세히 살펴보면, 살포 0 일차 때 전체 식물플랑크톤의 현존량에서 규조류 2.6%, 녹조류 3.5%, 갈색편모조류 34.7%, 남조류 59.1% 순으로 우점하였고, 살포 3일차에는 규조류 2.4%, 녹조류 3.5%, 갈색편모조류 44.8%, 남조류 48.4% 순이었으며, 살포 9일차에는 규조류 46.3%, 녹조류 26.5%, 갈색편모조류 22.1%, 남조류 5%였다. 살포14일차에는 규조류 6.8%, 녹조류 59.4%, 갈색편모조류 8.9%, 남조류 24.9%순으로 출현하였다.

천적생물 살포 후 녹조원인생물의 분류군별 저감효과를 분석해본 결과, 전대저수지에서 가장 우점하여 녹조발생에 크게 영향을 미친 *Oscilatoira*가 속하는 남조류의 감소율이 살포 9일째는 98%, 살포 14일째는 89%에 달하는 것으로 확인되었다. 또한 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

## 2. *Daphnia* 천적생물 대량살포 효과분석

천적생물 종주 *D. similoides*를 천적생물 배양장치에서 대량배양한 후 봄철(6월), 가을철(10월) 2차례에 걸쳐 녹조발생수역에 대량살포하여 자연분리 천적생물과의 효과 비교는 물론 녹조제어 성능을 평가하였다.

### 가. 1차 살포(6월, 봄)

천적생물 종주인 *D. similoides*를 수상형 배양장치(10 m<sup>3</sup>)에서 대량배양한 후 천적생물을 현장에 일시 살포하여, 6월 17일부터 6월 28일까지 12일간 살포효과 분석을 실시하였으며, 대조지점인 JD2와 천적생물 살포지점인 D0지점의 수온, COD, TN, TP, PO<sub>4</sub>-P, Chl-*a* 항목에 대한 분석을 실시하였다.

#### (1) 수질환경 변화

*Daphnia* 1차 살포효과분석기간 동안 강수량은 총 263 mm의 집중강우가 발생하였으며, 살포 4일차 분석 후, 강우가 시작되어 실험종료 시까지 강우가 발생하였으며, 7 ~ 8일차에 191.5 mm가 집중하여, 본 효과분석 실험에 막대한 영향을 미쳤다.

수온(W.temp.)은 살포효과분석기간 동안 평균 26.4 °C, 24.4 ~ 28.0 °C의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD2는 평균 26.1 °C로 23.8 ~ 28.2 °C의 범위를 보였으며, D0은 평균 26.6 °C로 25.0 ~ 27.7 °C의 범위를 보여, 지점별 수온차이는 거의 없었다. 시기별로는 살포당시 JD2에서 26.4 °C, D0에서 27.1 °C였던 수온은 4일차에 JD2에서 28.2 °C, D0에서 27.7 °C까지 증가하였으나, 집중강우와 함께 11일차에는 JD2에서 23.8 °C, D0에서 25.0 °C까지 감소하였다.

COD는 살포효과분석기간 동안 평균 17.6 mg/L, 14.4 ~ 22.6 mg/L의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD2에서 평균 15.5 mg/L로 9.4 ~ 22.0 mg/L의 범위를 보였으며, D0은 평균 19.7 mg/L로 15.6 ~ 23.2 mg/L의 범위를 보여, 대조지점에 비해 살포지점에서 높게 나타났다. 살포 당시 JD2에서 17.2 mg/L, D0에서 20.0 mg/L의 농도를 보였으나, 2일차에 JD2에서 22.0 mg/L, D0에서 23.2 mg/L로 증가한 후, 4일차에 JD2에서 9.4 mg/L D0에서 20.0 mg/L부터 감소하는 경향을 보였다. 그러나 살포지점과 대조지점의 COD변화의 차이가 크게 나타났는데, 이는 D0지점의 마름균락이 채수 시 교란을 야기했기 때문으로 판단되었다.

총질소(TN)는 살포효과분석기간 동안 평균 2.325 mg/L, 1.797 ~ 3.338 mg/L의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD2에서 평균 2.236 mg/L로 1.797 ~ 3.421 mg/L의 범위를 보였으며, D0은 평균 2.413 mg/L로 1.672 ~ 3.254 mg/L의 범위를 보여, 대조지점에 비해 살포지점에서 높게 나타났다. 시기별로 대조지점인 JD2와 살포지점인 D0은 반대의 양상을 보였는데, 대조지점인 JD2는 살포당시 1.922 mg/L에서 4일차에 1.797 mg/L까지 감소하였으나, 살포지점인 D0은 살포당시 1.672 mg/L에서 4일차에 2.513 mg/L까지 증가하였으며, 집중강우 이후 11일차에는 JD2에서 3.421 mg/L, D0에서 3.254 mg/L까지 증가하여 높은 증가량을 보였다.

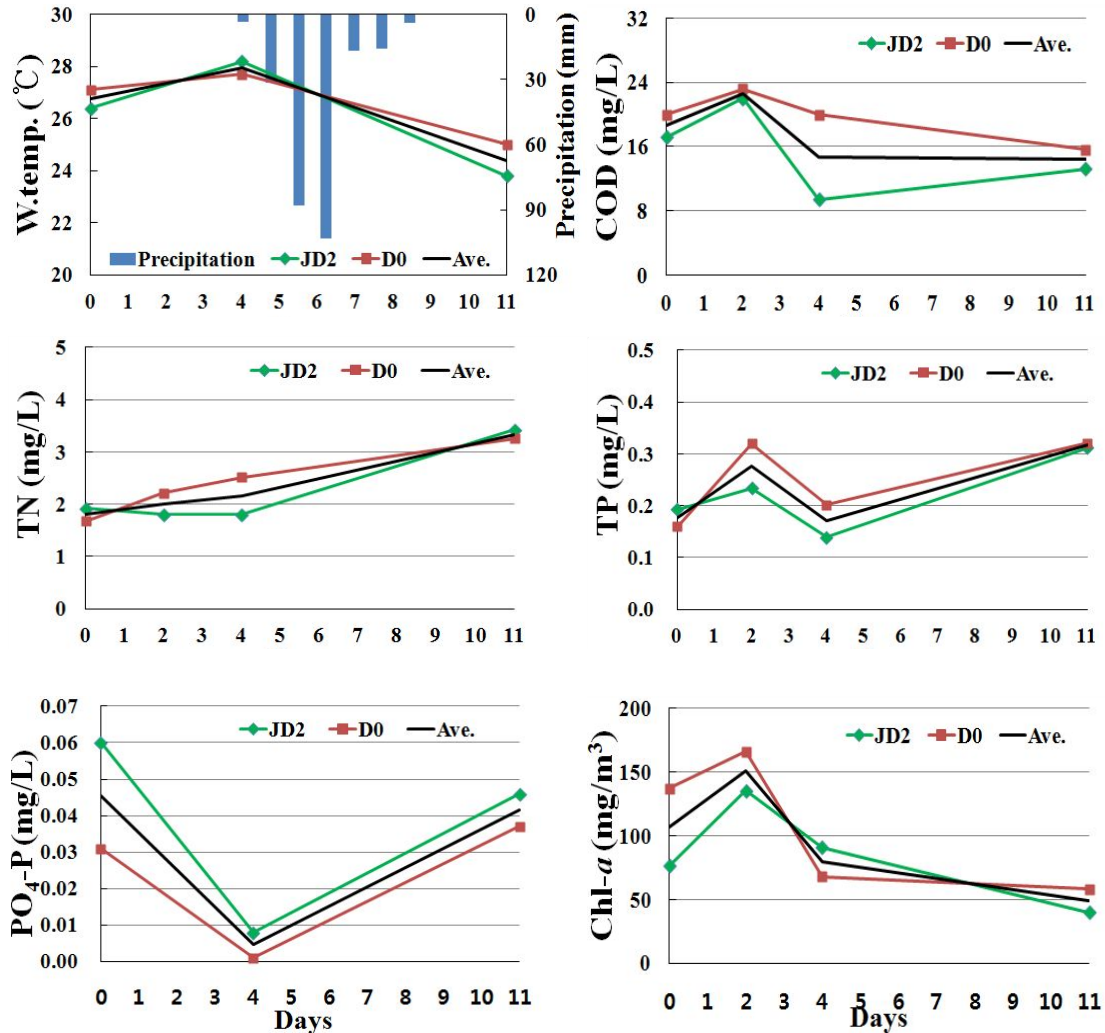
총인(TP)은 살포효과분석기간 동안 평균 0.235 mg/L, 0.171 ~ 0.317 mg/L의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD2에서 평균 0.220 mg/L로 0.139 ~ 0.312 mg/L의 범위를 보였으며, D0은 평균 0.251 mg/L로 0.160 ~ 0.321 mg/L의 범위를 보여, 대조지점에 비해 살포지점에서 높게 나타났다. 살포당시 JD2에서 0.193 mg/L, D0에서 0.160 mg/L로 나타났으며, 2일차에는 JD2에서 0.234 mg/L, D0에서 0.320 mg/L)까지 증가하였으나, 4일차에는 JD2에서 0.139 mg/L, D0에서 0.202 mg/L까지 감소하였다. 이후 TN과 마찬가지로 11일차에는 JD2에서 0.312 mg/L, D0에서 0.321 mg/L로 최고치를 보여 모두 높은 증가량을 보였다.

인산염인( $\text{PO}_4\text{-P}$ )은 살포효과분석기간 동안 평균 0.031 mg/L로, 0.005 ~ 0.046 mg/L의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD2에서 평균 0.038 mg/L로 0.008 ~ 0.060 mg/L의 범위를 보였으며, D0은 평균 0.023 mg/L로 0.001 ~ 0.037 mg/L의 범위를 보였다. 살포당시 JD2에서 0.060 mg/L, D0에서 0.031 mg/L로 나타났으며, 4일차에는 JD2에서 0.008 mg/L, D0에서 0.001 mg/L까지 감소하였다. 이후 4일차부터 시작한 집중강우의 영향으로 11일차에는 JD2 0.046 mg/L, D0 0.037 mg/L로 모두 높은 농도를 나타내었다.

Chl-*a*는 살포효과분석기간 동안 96.5 mg/m<sup>3</sup>, 49.2 ~ 150.7 mg/m<sup>3</sup>의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD2에서 평균 85.7 mg/m<sup>3</sup>로 40.1 ~ 135.4 mg/m<sup>3</sup>의 범위를 보였으며, D0에서 107.3 mg/m<sup>3</sup>로 58.2 ~ 166.0 mg/m<sup>3</sup>의 범위로 나타났다. 살포당시, JD2에서 76.4 mg/m<sup>3</sup>, D0에서 137.1 mg/m<sup>3</sup>로 나타났으며, 2일차에 JD2에서 135.4 mg/m<sup>3</sup>, D0에서 166.0 mg/m<sup>3</sup>까지 증가하였으나, 4일차에는 JD2에서 91.0 mg/m<sup>3</sup>, D0에서 67.9 mg/m<sup>3</sup>)로 감소하였다. 살포초기, 살포지점인 D0은 대조지점인 JD2에 비해 초기 증가값이 적고, 이후 급격히 감소하는 것



으로 보아 천적생물 대량살포에 의한 효과로 판단되었으나, 집중강우에 의해 이후 살포효과 분석이 불가능하였다. 이 후, 11일차에는 JD2는 40.1 mg/m<sup>3</sup>, D0은 58.2 mg/m<sup>3</sup>까지 감소하여 최소치를 보였으나, 이는 강우의 영향에 의한 것으로 판단된다.



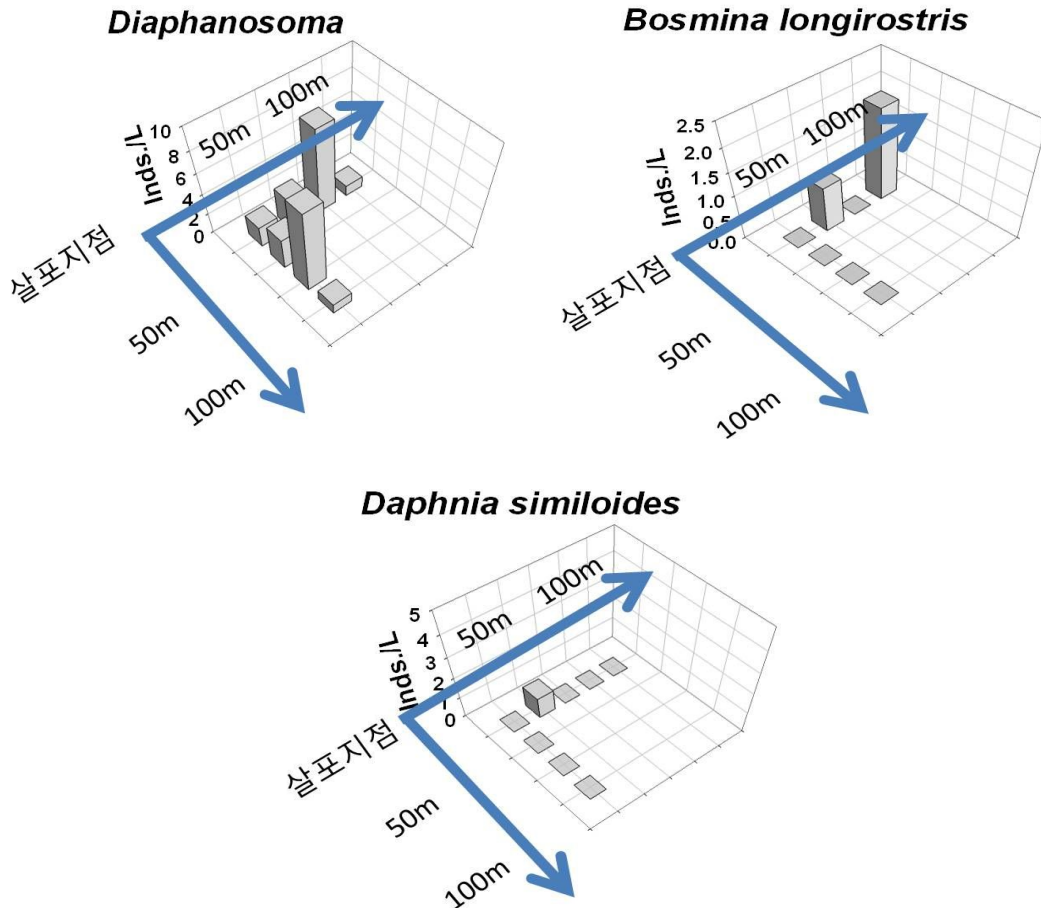
<그림 2.56> *Daphnia* 천적생물 현장살포에 따른 수질변화(1차 살포, 6월)

## (2) 살포효과

실내 종주배양한 천적생물 *Daphnia*를 6월 7일 천적생물 배양장치에 투입하여 대량배양 한 후, 6월 14일에 녹조발생수역에 대량 살포하였으며, 그 후 11일간 살포구간내 천적생물 분포와 식물플랑크톤 현존량을 분석하였다.

천적생물 배양시설에서 대량배양되어 살포된 천적생물은 종주 배양한 *D. similoides*(235 inds./L) 외에 *D. galeata*(원수로부터 유입된 현장 분리종,

225 inds./L) 및 *Moina* spp.(35 inds./L), *D. pulex*(20 inds./L) 등으로 천적생물로써 녹조제어 효과가 높은 대형 지각류의 개체수가 총 515 inds./L로 비교적 높은 밀도를 보여주었다. 이외에 소형 지각류인 *Bosmina longirostris* 도 1,885 inds./L로 높은 개체군 밀도로 증식하여 살포된 것으로 나타났다.



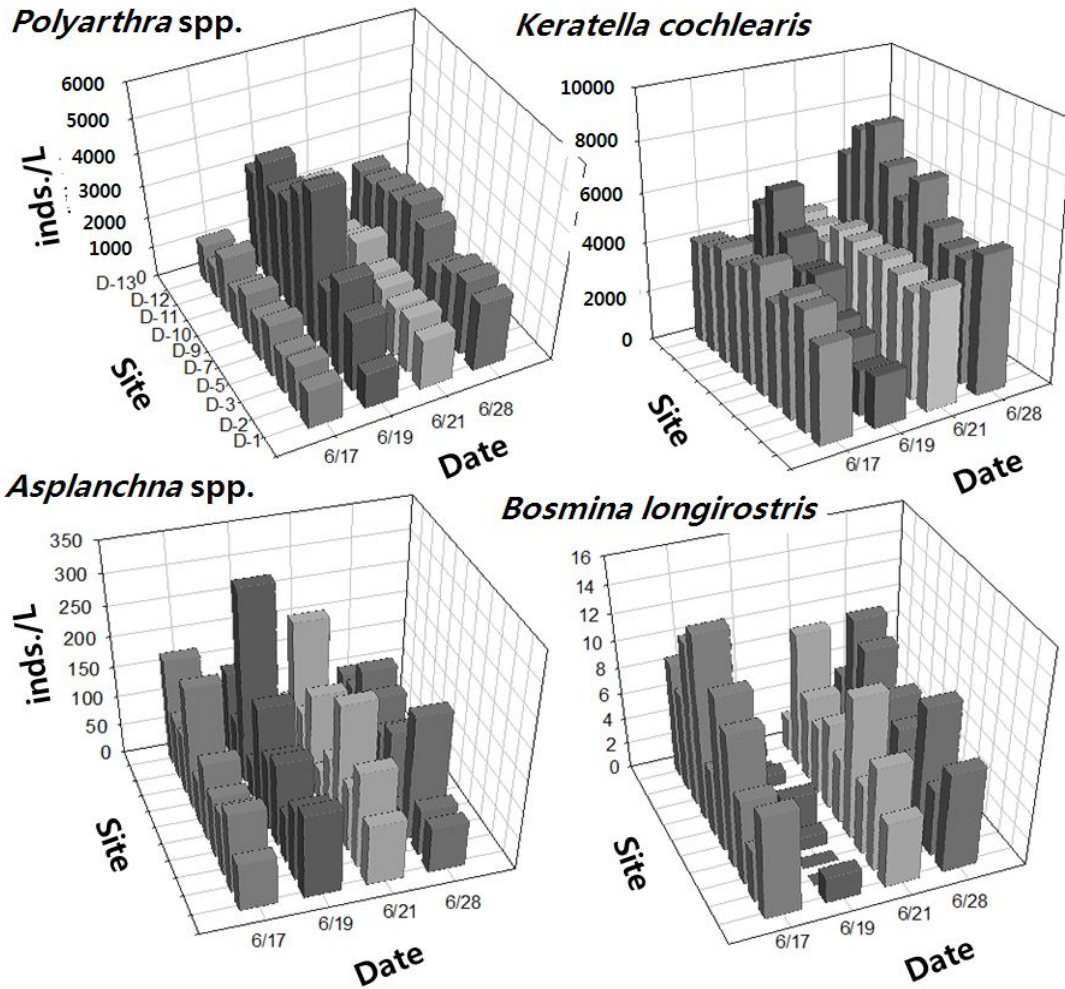
<그림 2.57> 천적생물 종주 살포 후 자생 지각류(*Diaphanosoma*, *Bosmina*)와 살포된 천적생물(*Daphnia similoides*)의 공간분포

천적생물 배양장치로부터 살포된 천적생물은 *D. similoides*, *D. galeata*, *D. pulex*의 경우 약  $4.8 \times 10^6$  이상으로 나타났다.

살포 이후 살포한 천적생물 및 수계내 분포하는 동물플랑크톤의 군집변화를 추적하기 위해 표면시료 및 플랑크톤 네트를 이용한 저층에서 표면까지에 인하여 채집한 시료를 분석한 결과 전대저수지에서 우점하는 소형, 대형 윤충류를 포함한 동물플랑크톤은 지점별 또는 시간별로 큰 개체군 밀도차를 보였으나, 살포된 천적생물의 분포는 뚜렷한 경향을 나타내지 않는 것으로 나타났다

천적생물 종주로서 천적생물 배양장치에서 대량배양되어 살포된 *D.*

*similoides*의 살포 효과범위를 파악하기 위해 시,공간분포를 분석한 결과 살포 24시간 경과 후 인위적으로 투입된 *D. similoides*가 살포지점 부근에서 채집되었다. 하지만, 그 이후에 채집된 시료에는 *D. similoides*가 채집되지 않는 것으로 나타나, 살포된 천적생물은 살포 후 비교적 짧은 기간(수 일 이내) 수체에서 식물플랑크톤 섭식작용을 수행하는 것으로 판단되었다.

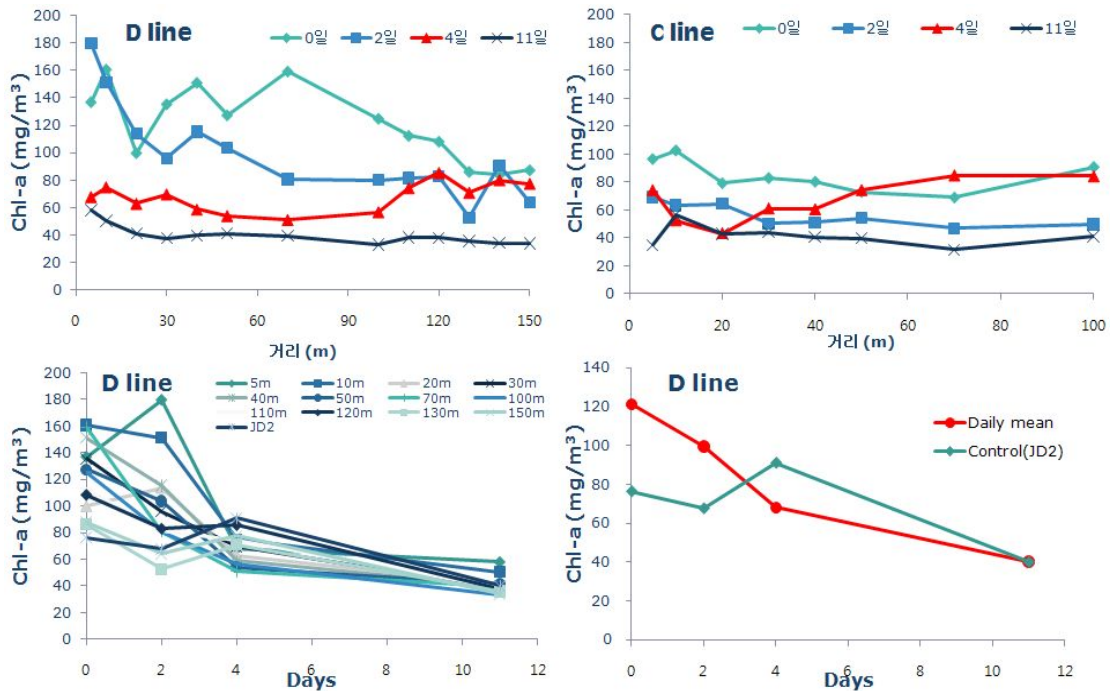


<그림 2.58> 천적생물 종주 살포 후 서식처에 서식하는 소형 및 중, 대형 유충류의 시, 공간분포

천적생물 살포 후 살포지점으로 부터의 거리별로 경과일수에 따른 식물플랑크톤 현존량을 Chl-*a* 기준으로 살펴본 결과 시간이 경과함에 따라 Chl-*a* 농도는 점차 감소하여 나타났으며, D line의 경우 2일차에는 30 m, 4일차에는 70 m 11일차에는 100 m에서 최소값을 보였다.

D line에서 대조구와 일 평균 Chl-*a* 값을 비교한 결과, 살포구역인 대

조구의 Chl-*a* 농도 76.4 mg/m<sup>3</sup>보다 초기값 농도가 121.2 mg/m<sup>3</sup>으로 높았음에도 불구하고 살포 4일차에는 대조구가 91 mg/m<sup>3</sup>이었고, D line이 68.1 mg/m<sup>3</sup>으로 살포구역에서 더 낮은 Chl-*a* 값을 유지하여 살포 10일차 이후까지 그 효과가 지속되는 양상을 보여주었다(그림 2.59).



<그림 2.59> 살포 후 식물플랑크톤 현존량 변화(Chl-*a*)

## 나. 2차 살포(10월, 가을)

천적생물 종주인 *D. similoides*를 수상형 배양장치(10 m<sup>3</sup>)와 육상형 배양장치(30 m<sup>3</sup>)에서 대량배양한 후 천적생물을 현장에 일시 살포하여, 10월 17일부터 11/3일까지 18일간 살포효과 분석을 실시하였으며, 대조지점인 JD2와 수상형 배양장치의 살포지점인 D0지점, 육상형 천적생물 배양장치의 살포지점인 E0지점의 수온, COD, TN, TP, PO<sub>4</sub>-P, Chl-*a* 항목에 대한 분석을 실시하였다.

### (1) 수질환경 변화

강수량은 살포효과분석기간 동안 총 3.1 mm의 강우가 발생하였으며, 살포 12일차에 2.5 mm의 강우가 발생하였으나, 본 효과분석에 영향을 미치지 않았을 것으로 판단되었다.

수온(W.temp.)은 살포효과분석기간 동안 평균 16.5 °C, 15.7 ~ 17.5 °C의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD2에서 평균 16.6 °C로 15.6 ~ 17.5 °C의

범위를 보였으며, D0에서 평균 16.6 °C로 15.1 ~ 18.2 °C의 범위를 보였고, E0에서 평균 16.2 °C로 14.3 ~ 16.9 °C의 범위를 보여, 계절적요인에 의해 20 °C 미만의 수온을 보였다. 지점간 수온 차이는 10일차에 D0에서 16.8 °C, E0에서 14.3 °C로 2.5 °C 차이를 보인 것을 제외하고, 1 °C 내외의 차이를 보였으며, 시기별로도 3 °C 내외의 차이만을 보임에 따라, 수온에 의한 지점간 영향은 없을 것으로 판단되었다.

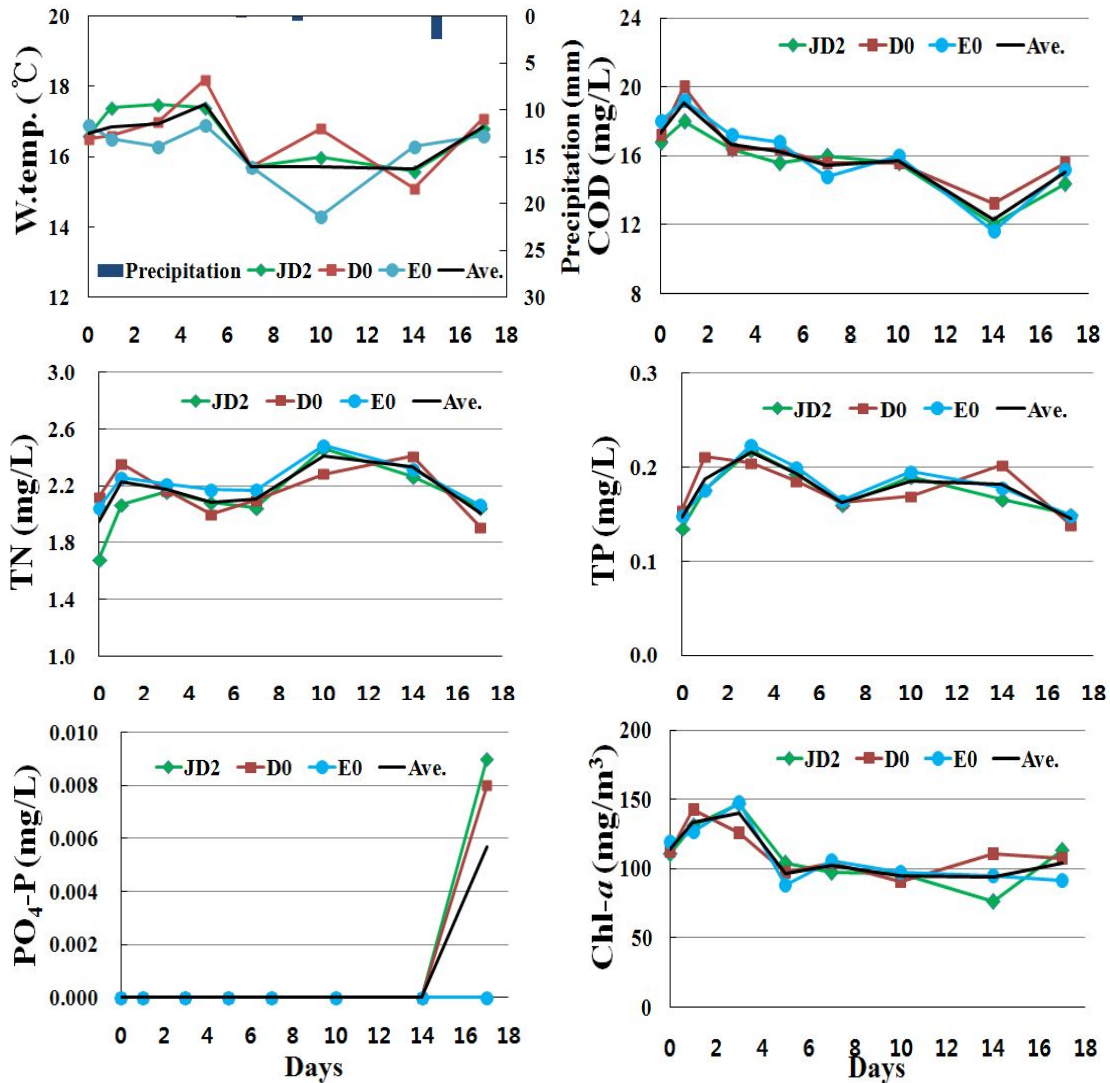
COD는 살포효과분석기간 동안 평균 16.0 mg/L, 12.3 ~ 19.1 mg/L의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD2에서 평균 15.6 mg/L로 12.0 ~ 18.0 mg/L의 범위를 보였으며, D0에서 평균 16.3 mg/L로 13.2 ~ 20.0 mg/L의 범위를 보였고, E0에서 평균 16.1 mg/L로 11.6 ~ 19.2 mg/L의 범위를 보여, 대조지점에 비해 살포지점에서 높게 나타났다. 살포 당시 JD2에서 16.8 mg/L, D0에서 17.2 mg/L, E0에서 18.0 mg/L로 나타났으며, 1일차에 JD2에서 18.0 mg/L, D0에서 20.0 mg/L, E0에서 19.2 mg/L까지 증가한 후, 점차 감소하는 경향을 보였다.

총질소(TN)는 살포효과분석기간 동안 평균 2.161 mg/L, 1.948 ~ 2.410 mg/L의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD2에서 평균 2.102 mg/L로 1.683 ~ 2.460 mg/L의 범위를 보였으며, D0에서 평균 2.167 mg/L로 1.910 ~ 2.411 mg/L의 범위를 보였고, E0은 평균 2.215 mg/L로 2.043 ~ 2.486 mg/L의 범위를 보여 전반적으로 높은 TN농도범위를 보였다. 살포당시 대조지점은 1.683 mg/L로 나타났으나, 살포지점은 2 mg/L을 초과하는 높은 농도를 보였다. 시기별로 JD2는 3일차에 2.157 mg/L까지 증가하였으며, 살포지점인 D0와 E0은 1일차에 각각 2.355 mg/L, 2.256 mg/L까지 증가한 후 감소하는 경향을 보였으나, 7일 이후 재증가하였다.

총인(TP)은 살포효과분석기간 동안 평균 0.177 mg/L, 0.146 ~ 0.216 mg/L의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD2에서 평균 0.174 mg/L로 0.135 ~ 0.218 mg/L의 범위를 보였으며, D0에서 평균 0.178 mg/L로 0.138 ~ 0.211 mg/L의 범위를 보였고, E0에서 평균 0.180 mg/L로 0.149 ~ 0.224 mg/L의 범위를 보여, 대조지점에 비해 살포지점에서 높게 나타났다. 살포당시 JD2에서 0.135 mg/L, D0에서 0.155 mg/L, E0에서 0.149 mg/L로 나타났으며 3일차까지 증가하여 0.2 mg/L를 초과한 후, 7일차에 JD2에서 0.160 mg/L, D0에서 0.162 mg/L, E0에서 0.165 mg/L까지 감소하였으나, 이후 재증가하였다.

인산염인( $PO_4-P$ )은 살포효과분석기간 동안 평균 0.001 mg/L, 불검출 ~

0.006 mg/L의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD2에서 평균 0.001 mg/L로 불검출 ~ 0.009 mg/L의 범위를 보였으며, D0에서 평균 0.001 mg/L로 불검출 ~ 0.008 mg/L의 범위를 보였고, E0에서는 검출되지 않았다. 살포 이후 14일차까지는 전 지점에서 인산염인( $\text{PO}_4\text{-P}$ )이 검출되지 않았으며, 16일차에만 JD2에서 0.009 mg/L, D0에서 0.008 mg/L의 값을 나타내었다. 이는 녹조발생 수역에서 식물플랑크톤이 가용한 대부분의 인산염인을 모두 흡수한 때문으로 사료된다.



<그림 2.60> *Daphnia* 천적생물 현장살포에 따른 수질변화(2차 살포, 10월)

Chl-*a*는 살포효과분석기간 동안 평균 110.0 mg/m<sup>3</sup>, 94.0 ~ 140.1 mg/m<sup>3</sup>의 범위로 나타났다. 지점별로는 JD2에서 평균 109.5 mg/m<sup>3</sup>로 76.6 ~ 146.9 mg/m<sup>3</sup>의 범위를 보였으며, D0에서 평균 111.5 mg/m<sup>3</sup>로 90.9 ~ 142.5 mg/m<sup>3</sup>의

범위를 보였고, E0에서 평균 108.9 mg/m<sup>3</sup>로 88.4 ~ 147.9 mg/m<sup>3</sup>의 범위를 보였다. 살포지점(D0, E0)의 Chl-*a*는 살포 초기에는 호내(JD2)의 농도변화에 따라 증가하는 경향을 보였으나, 천적생물 살포 3 ~ 5일차에 대조지점의 Chl-*a*에 비해 비교적 감소하는 경향을 보였다. 대조지점인 JD2는 살포당시 111.0 mg/m<sup>3</sup>에서 3일차에 146.9 mg/m<sup>3</sup>까지 증가한 후, 14일차에 76.4 mg/m<sup>3</sup>까지 감소하는 경향을 보였다. 수상형 배양장치의 살포지점인 D0은 살포당시 112.6 mg/m<sup>3</sup>에서 호내 전반적인 Chl-*a* 농도증가와 함께 1일차에 142.5 mg/m<sup>3</sup>까지 증가하였으나, 대조지점과 달리 감소하기 시작하여 5일차에 97.4 mg/m<sup>3</sup>까지 감소하였으나, 이후 7일차(104.4 mg/m<sup>3</sup>)까지 재증가하며, 증감을 반복하였다. 육상형 배양장치 살포지점인 E0은 살포당시 118.8 mg/m<sup>3</sup>에서 JD2와 마찬가지로 3일차에 147.9 mg/m<sup>3</sup>까지 증가하였으나, 이후 5일차에 88.4 mg/m<sup>3</sup>로 대조지점에 비해 급격한 감소를 보였다.

## (2) 살포효과

천적생물인 *Daphnia*의 녹조제어 효과를 분석하기 위해 10 m<sup>3</sup> 규모와 30 m<sup>3</sup> 규모의 천적생물 배양장치 각각에서 대량 배양한 *Daphnia*를 녹조발생 수역에 일시 살포한 후 거리별, 시간별 천적생물 및 Chl-*a*를 분석하였다.

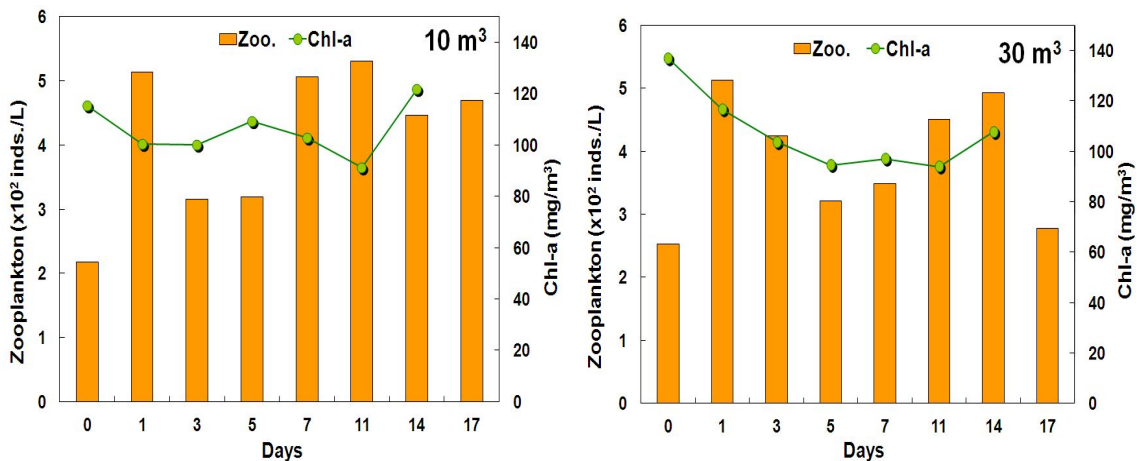
살포효과를 시간별로 분석해본 결과, D라인(10 m<sup>3</sup> 살포)에서는 살포 직전 식물플랑크톤 양인 Chl-*a*가 115.3 mg/m<sup>3</sup> 이었는데, 살포 2일째 100.5 mg/m<sup>3</sup> 까지 감소하였다. 4일째 109.3 mg/m<sup>3</sup>으로 조금 상승하였으나, 그 후 동물플랑크톤이 증가하여 11일째 최고치인 530 inds./L 일 때, Chl-*a*는 살포 전에 비해 20.9% 감소하여 최저 농도인 91.2 mg/m<sup>3</sup> 까지 줄어들었다. 그 후 동물플랑크톤 개체수가 감소하면서 Chl-*a*는 다시 증가하는 양상을 보였다.

동물플랑크톤 현존량 변화를 살펴보면, 살포 전 217 inds./L 이었다가 살포 직후 증가하여 1일째 513 inds./L 크게 증가한 뒤, 5일째까지 일부 감소하였다가, 11일째 최고치인 530 inds./L까지 증가하여 살포 전과 비교했을 때, 244% 까지 증가하였다.

F라인(30 m<sup>3</sup> 살포)에서는 살포 직전 식물플랑크톤 양인 Chl-*a*가 137 mg/m<sup>3</sup> 이었는데, 살포 이후 5일째까지 지속적으로 감소하여 94.5 mg/m<sup>3</sup> 까지 줄어들었다. 그 후 조금 더 감소하여 11일째 동물플랑크톤이 450 inds./L 일 때, Chl-*a*는 살포 전에 비해 31.5% 감소하여 최저 농도인 93.8 mg/m<sup>3</sup> 까지 줄어들었다. 그 후 동물플랑크톤 개체수가 감소하면서 Chl-*a*는 다시 증가하는 양상을 보였다.

동물플랑크톤 현존량 변화를 살펴보면, 살포 직후 증가하여 1일째 최고치인 513 inds./L을 보인뒤 5일째까지 감소하였고 그 후, 다시 증가하여 살포 14일째 493 inds./L까지 증가하였다. 살포 전과 최고치를 비교하였을 때 202% 까지 증가하였다.

결과적으로, 모든 지점에서 *Daphnia* sp.는 관찰되지 않았고, 다른 천적생물의 개체수 변화를 분석하였다. 10 m<sup>3</sup> 배양조 살포 직후 현존량이 증가하여 살포 전 217 inds./L에서 513 inds./L으로 증가하였으나, 3 ~ 5일째 다소 감소하였다가 7일째 이후부터 17일째 까지 447 ~ 530 inds./L으로 일정한 개체수가 관찰되었다. 30 m<sup>3</sup> 배양조에서 배양한 천적생물을 살포 한 결과, 살포 전 253 inds./L에서 살포직후 513 inds./L로 증가하였으나, 그 후 5일째 321 inds./L까지 감소하다가 14일째 493 inds./L로 다시 증가하였다. Chl-*a*를 분석한 결과, 10 m<sup>3</sup> 배양조 방향에서는 살포전 115mg/m<sup>3</sup>에서 11일째 91.2 mg/m<sup>3</sup>로 낮아졌고, 30 m<sup>3</sup> 방향에서는 살포 전 137 mg/m<sup>3</sup>에서 11일째 93.8 mg/m<sup>3</sup>로 다소 낮아졌다.



<그림 2.61> 천적생물 10 m<sup>3</sup> 살포(D라인)와 30 m<sup>3</sup> 살포(F라인)의 일별 동물플랑크톤 개체수 변화

살포효과를 거리별로 분석하기위해 0, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 150 m 간격으로 0 ~ 17일 동안 관찰한 보면, 0 m 지점에서는 살포 직전 식물플랑크톤 양인 Chl-*a*가 112.6 mg/m<sup>3</sup> 이었는데, 살포 1일째 다소 증가하였다가 그 후 지속적으로 감소하여 동물플랑크톤이 최고로 증가한 11일째 최고치인 691 inds./L 일 때, Chl-*a*는 살포 전에 비해 19.3% 감소하여 최저 농도인 90.9 mg/m<sup>3</sup> 까지 줄어들었다. 그 후 동물플랑크톤 개체수가 감소하면서 Chl-*a*는 다시 증가하는 양상을 보였다.



동물플랑크톤 현존량 변화를 살펴보면, 살포 후 바로 증가하여 1일째 432 inds./L, 4일째 544 inds./L, 7일째 616 inds./L, 11일째 최고치인 691 inds./L까지 증가하여 살포 전과 비교했을 때, 204% 까지 증가하였다.

10 m 지점에서는 살포 직전 식물플랑크톤 양인 Chl-*a*가 118 mg/m<sup>3</sup> 이었는데, 살포 1일째 다소 증가하였다가 그 후 지속적으로 감소하여 11일째, Chl-*a*는 살포 전에 비해 26.4% 감소하여 최저 농도인 86.9 mg/m<sup>3</sup> 까지 줄어들었다.

동물플랑크톤 현존량 변화를 살펴보면, 살포 후 바로 증가하여 1일째 620 inds./L이었다가 3일째 감소후 다시 증가하여 7일째 554 inds./L까지 증가하여 살포 전과 비교했을 때, 189% 까지 증가하였다.

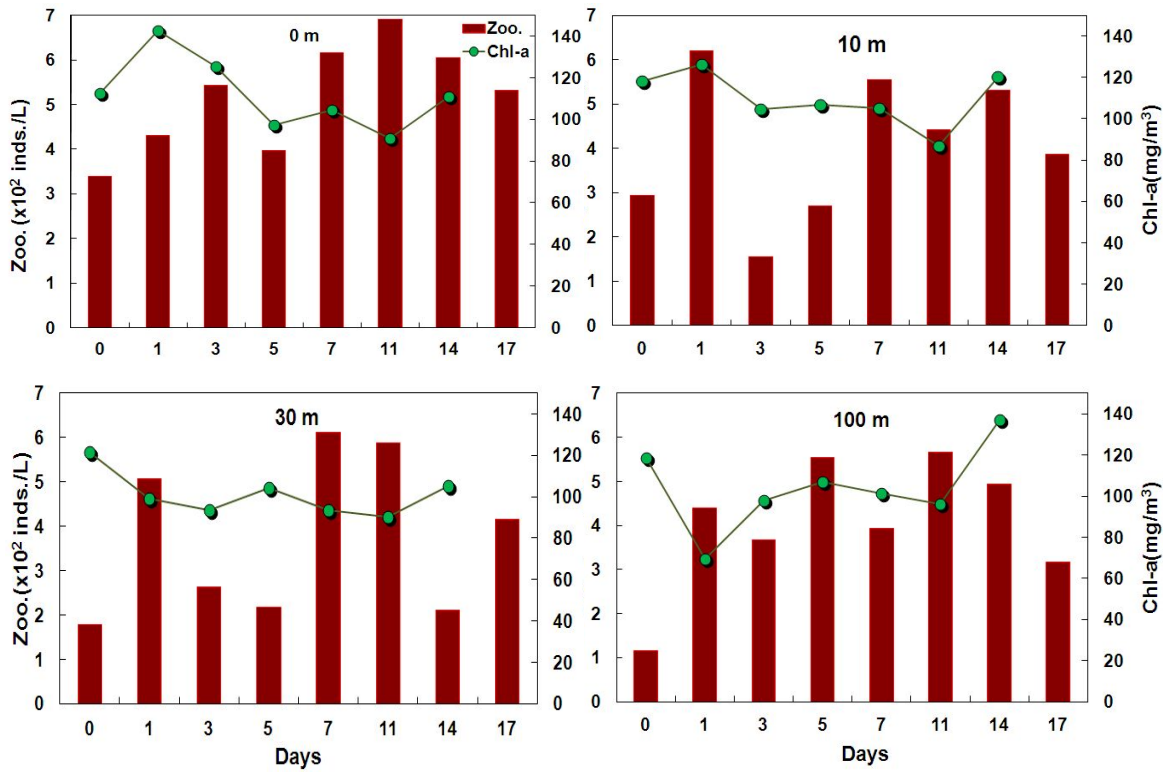
30 m 지점에서는 살포 직전 식물플랑크톤 양인 Chl-*a*가 121.5 mg/m<sup>3</sup> 이었는데, 살포 이후 지속적으로 감소하여 살포 11일째 Chl-*a*는 살포 전에 비해 25.7% 감소하여 최저 농도인 90.3 mg/m<sup>3</sup> 까지 줄어들었다. 그 후 동물플랑크톤 개체수가 감소하면서 Chl-*a*는 다시 증가하는 양상을 보였다.

동물플랑크톤 현존량 변화를 살펴보면, 살포 후 바로 증가하여 1일째 508 inds./L였다가 그 후 다소 감소하였다가 7일째 최고치인 612 inds./L까지 증가하여 살포 전과 비교했을 때, 345% 까지 증가하였다.

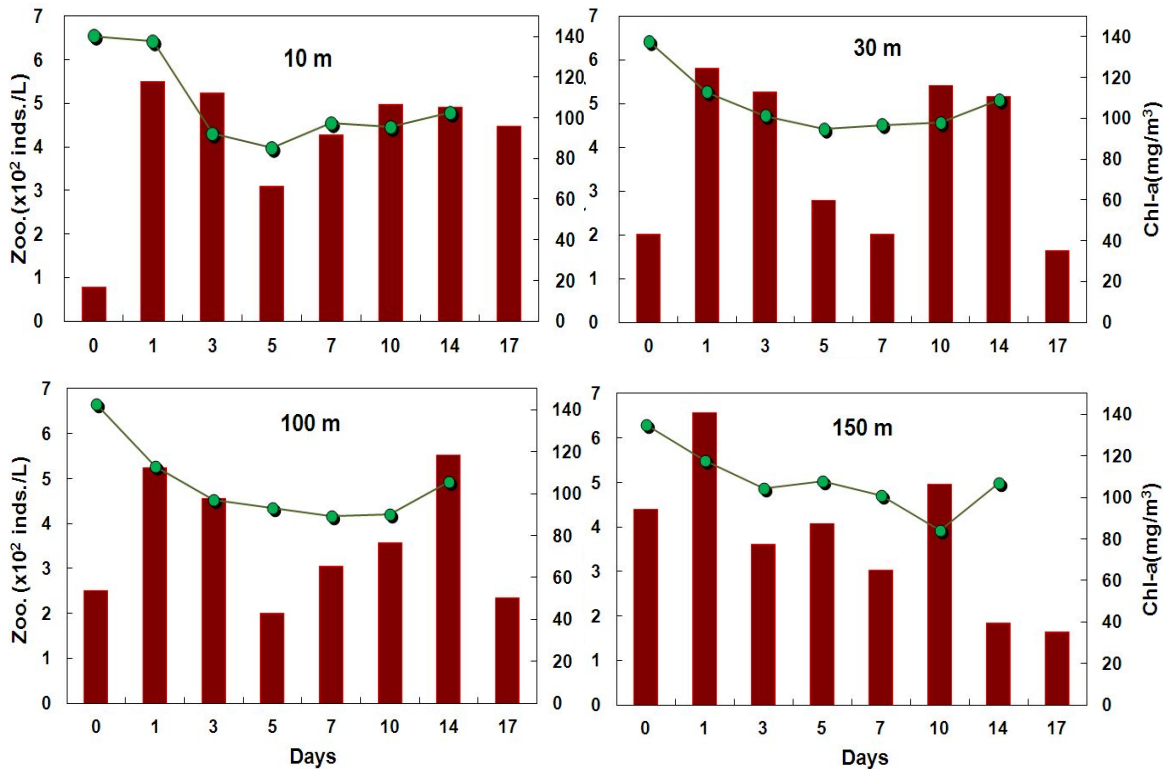
100 m 지점에서는 살포 직전 식물플랑크톤 양인 Chl-*a*가 118.4 mg/m<sup>3</sup> 이었는데, 살포 직후 감소하여 살포 1일째 69.2 mg/m<sup>3</sup> 이었다가 그 후 증가하는 양상을 보였다. 살포 전 Chl-*a*에 비해 41.6% 감소한 수치이다.

동물플랑크톤 현존량 변화를 살펴보면, 살포 후 바로 증가하여 1일째 439 inds./L였다가 그 후 증가와 감소가 반복되다가 11일째 최고치인 567 inds./L까지 증가하여 살포 전과 비교했을 때, 489% 까지 증가하였다.

결과적으로, 거리별 동물플랑크톤의 현존량과 Chl-*a*의 평균값을 비교했을 때 10 m<sup>3</sup> 살포지점의 동물플랑크톤 개체수는 3 ~ 5일째 다소 낮아지다가 7일째 이후 다시 증가하였다. 식물플랑크톤 양인 Chl-*a*는 10 m 지점에서 다소 낮아졌는데 다른 지점에서는 일정부분 변동이 관찰되었다. 30 m<sup>3</sup> 살포 지점의 동물플랑크톤의 개체수는 살포 직후 증가하였으나 5일째 전후로 감소하다가 다시 증가하였다. Chl-*a*는 모든 지점에서 살포 이후 감소하기 시작하여 10일째까지 지속적으로 감소하였다.



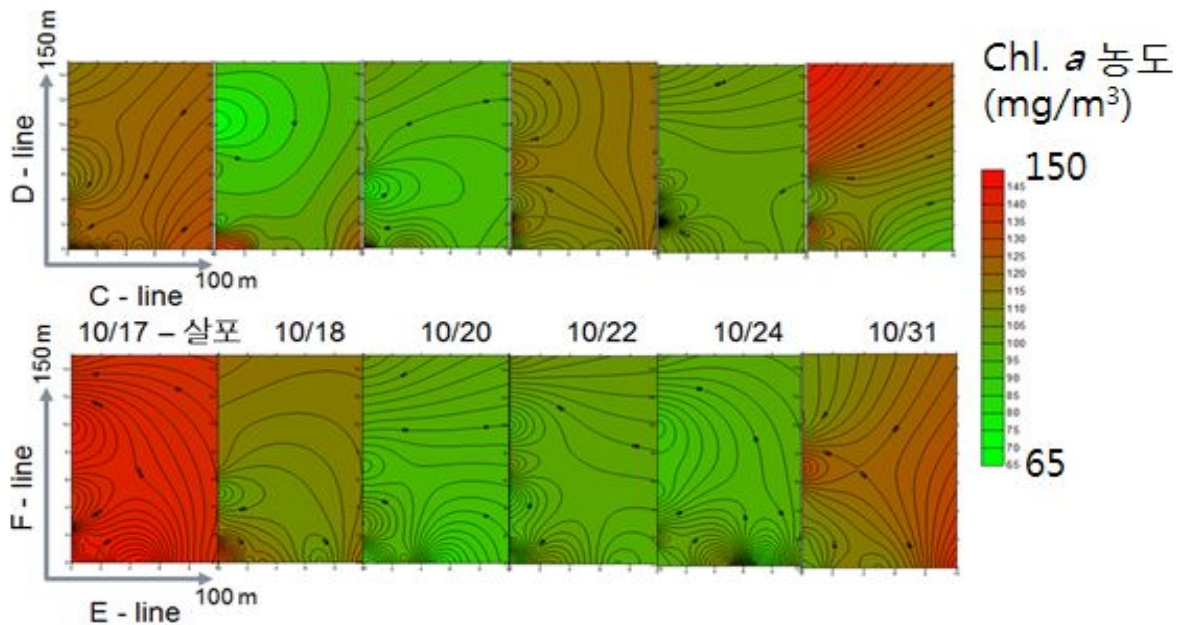
<그림 2.62> 10 m<sup>3</sup> 살포로 인한 거리별 동물플랑크톤 개체수 및 Chl-a 변화



<그림 2.63> 30 m<sup>3</sup> 살포로 인한 거리별 동물플랑크톤 개체수 및 Chl-a 변화

천적생물 배양장치에서 대량배양된 천적생물 종주와 더불어 증식된 자연분리 천적생물을 전대저수지의 녹조발생구간에 살포했을 때 살포지점과 인접한 일부구간에서 녹조제어효과가 일부 나타났다.

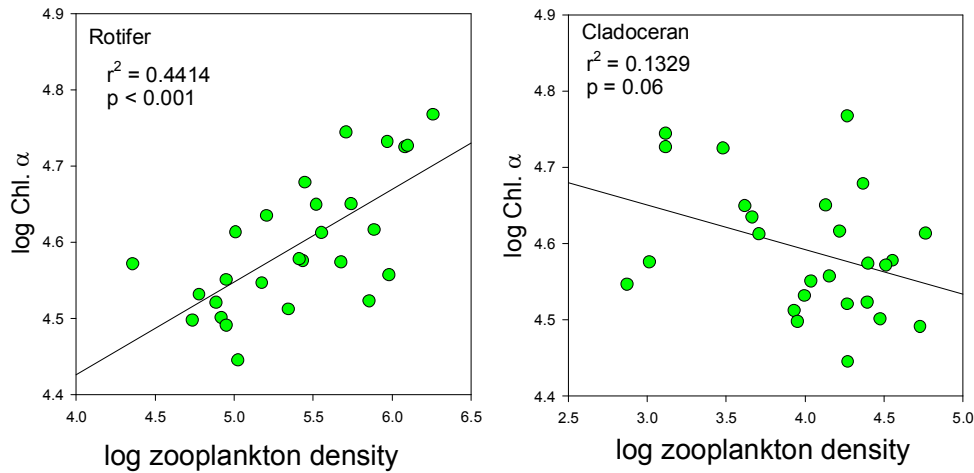
10 m<sup>3</sup> 규모 수상형 배양장치의 살포효과 분석구간인 C, D line과 30 m<sup>3</sup> 규모의 육상형 배양장치의 살포효과 분석구간인 E, F-line의 살포 후 일별 Chl-*a* 농도의 공간분포를 분석한 결과, 두 살포구간 모두 살포 이후 Chl-*a* 농도가 감소하는 것이 관찰되었다. 살포 직전 전대저수지의 살포 대상 구간에서 100 mg/m<sup>3</sup> 이상의 높은 Chl-*a* 농도를 나타내고 있었으나, 살포 직후부터 Chl-*a* 농도가 점차 감소하기 시작하여 두 구간 모두에서 살포 3일후 가장 낮은 Chl-*a* 농도를 나타내었다. 감소된 Chl-*a* 농도는 이후 다시 점차 증가하여 살포 2주일 경과 후에는 살포이전의 높은 Chl-*a* 농도를 보이는 것으로 나타났다(그림 2.64).



<그림 2.64> 10월 살포실험 기간(10월 17일 ~ 10월 31일) 중의 식물플랑크톤 생체량의 시, 공간 분포 변화 양상

반면, 대량살포로 인한 녹조제어 효과 분석기간동안 천적생물 살포 영향을 전혀 받지 않는 정기 모니터링 지점(JD1 ~ JD3)에서는 살포구간과 유사한 Chl-*a* 농도의 감소경향은 관찰되지 않았을 뿐 만 아니라 오히려 증가하였으며, 살포구간에서와 같은 Chl-*a* 농도의 감소 경향은 관찰되지 않았다.

따라서, 천적생물 살포구간에서 Chl-*a* 농도변화로 판단컨대, 천적생물 대량 살포로 인한 녹조제어 효과가 있었음을 확인할 수 있었다.



<그림 2.65> 10월 살포실험 기간(10월 17일 ~ 10월 31일) 중의 동물플랑크톤 밀도와 식물플랑크톤 생체량과의 상관관계

또한, 살포효과 분석기간 중의 Chl-*a* 농도의 시, 공간분포와 동물플랑크톤 개체군 밀도의 시, 공간 분포는 윤충류와 양의 상관관계를, 지각류와 음의 상관관계를 가지는 것으로 나타나 지각류의 경우 개체수 증가에 따라 Chl-*a* 농도 감소, 즉 녹조제어효과가 있음을 시사하였다(그림 2.65).

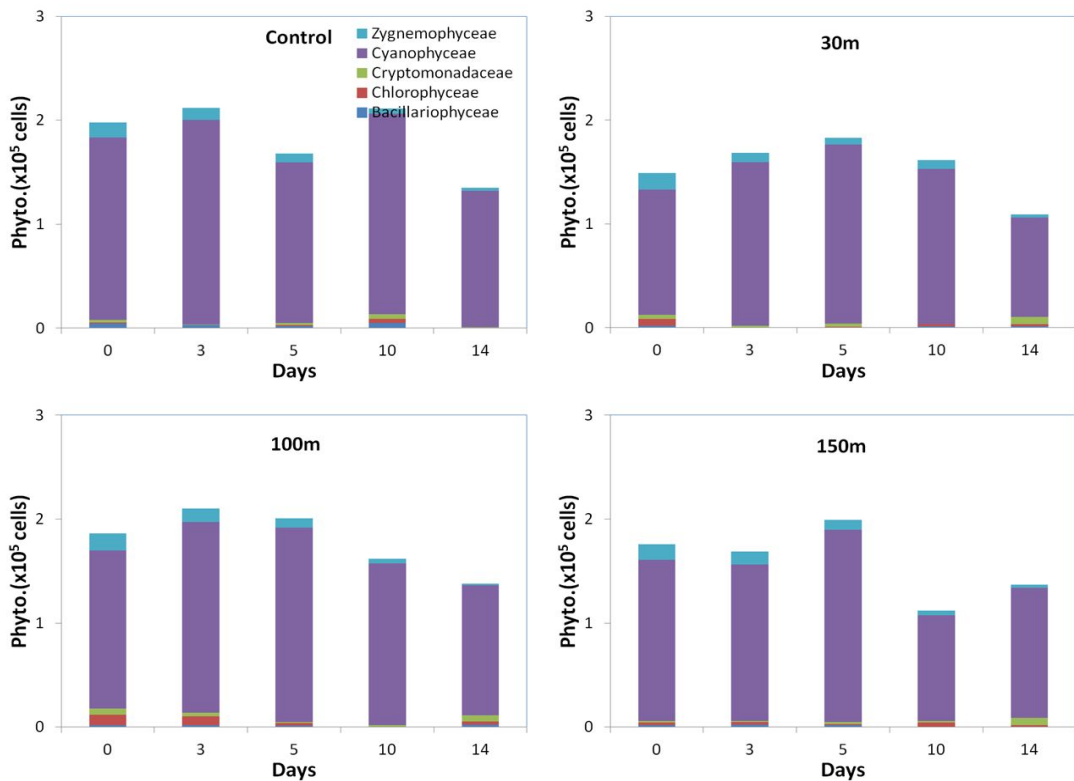
그러나, 봄철 자연분리 천적생물을 대량배양하여 살포한 경우와 달리 수역내 천적생물의 개체군 증가와 녹조제어효과가 매우 낮게 미미하게 나타났는데, 이는 비교적 큰 사이즈의 천적생물이 높은 어류 포식압에 그대로 노출되어 살포이후 선택적으로 포식되었기 때문으로 추정하고 있다.

천적생물 살포효과 분석기간 동안 전대저수지에서는 소형 지각류인 *Bosmina longirostris*가 우점종으로 나타나 이시기에는 오히려 크기가 적어 어류의 포식압을 덜 받고 있는 소형 지각류 *Bosmina longirostris*를 자연 분리 배양하여 녹조제어에 활용하는 것이 더욱 효과적일 것으로 사료되었다.

결과적으로, 가을철 전대저수지의 녹조발생구간에서 천적생물 *Daphnia* 를 대량 배양하여 살포하였으나, 대량배양 속도도 봄철에 비해 낮고, 살포 후에도 녹조제어효과가 미미한 것으로 나타나 가을철 *Oscillatoria* sp. 등의 남조류 번성이 가속화되는 시기에는 *Daphnia* 천적생물 종주의 적용은 다소 곤란한 것으로 나타났다. 이 시기에는 *Daphnia* 등의 특정 대형 동물플랑크톤을 배양하여 살포하는 것보다 현장에 서식하는 동물플랑크톤을 자연분리한 후 대량 배양시켜 주기적으로 살포하여 생물량을 증가시켜주는 것이 더욱 효과적일 것이라 판단된다.

봄철 식물플랑크톤의 종조성과는 다르게 가을철에는 남조류가 거의 극우점하는 상황에서 *Daphnia* 천적생물의 포식이 원활히 이루어지지 않아 대조구와 식물플랑크톤 현존량을 비교해 봤을 때 감소율이 크게 낮아지지 않았다.

남조류의 저감효과를 살포 거리별로 자세히 분석해본 결과, 30 m 지점에서 감소율이 18.3%, 100 m 지점에서 5.6%, 150 m 지점에서 15.7%가 감소되는 것으로 나타났다. 봄철 자연분리 천적생물 살포시보다는 감소율이 낮았지만 *Daphnia* 천적생물 살포도 녹조원인생물의 저감에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.



<그림 2.66> *Daphnia* 천적생물 살포 이후 식물플랑크톤 종조성 변화

#### 다. 천적생물 최적운영방안

녹조발생이 심각한 전대저수지의 녹조제어를 위해 포식성 천적생물을 대량배양하여 현장 살포 하였을 때 봄철의 자연분리 천적생물 적용시에는 대량배양 성능 및 대량살포에 따른 녹조제어효과가 우수하였으며, 또한 유사한 시기에 천적생물 종주인 *Daphnia* 천적생물을 적용하였을 때에도 강우로 인해 완벽한 검증은 이루어 지지 않았지만 녹조제어를 위한 적용성이 높은 것으로 사료되었다.

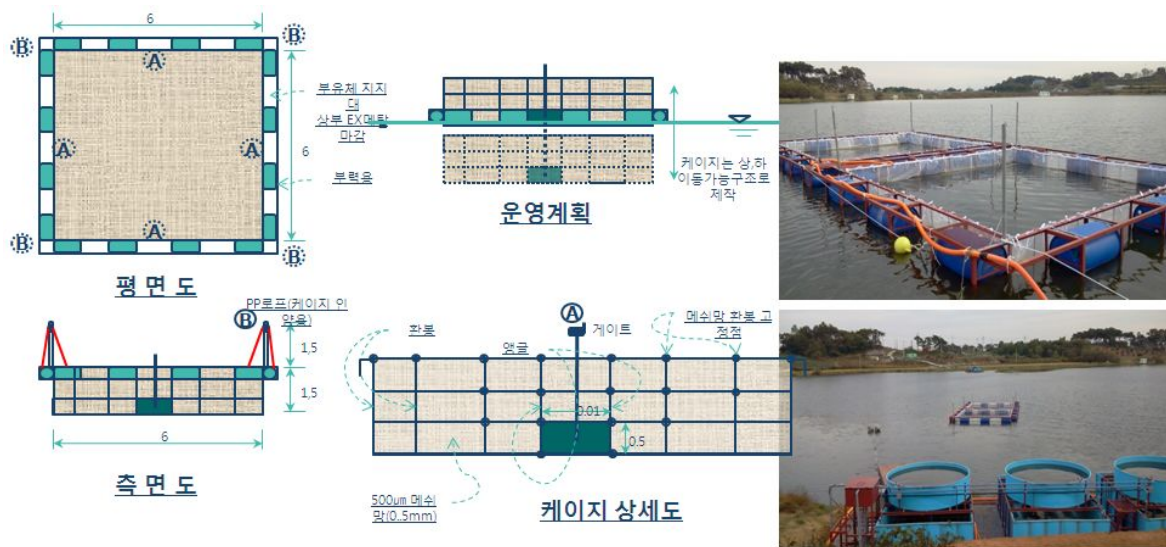
그러나, 가을철에는 천적생물 종주인 *Daphnia* 천적생물을 대량 배양이 원활하게 이루어지지 않고, 현장 살포한 경우에도 어류에 의한 포식으로 녹조제어 효과가 미흡한 것으로 나타나 가을철 *Daphnia* 천적생물의 적용성은 낮은 것으로 사료되었다.

따라서, 전대저수지에서 효과적인 녹조제어를 위한 시기별 천적생물 최적 운영방안은 다음과 같이 제시하고자 한다.

- 봄철 : *Daphnia* 천적생물 대량 배양 및 연속 살포 (4일 주기, 천적생물 배양조 규모의 80% 살포, 5반복 실시 후 초기화 하여 재배양 실시)
- 가을철 : 자연분리 천적생물 대량 배양 및 연속 살포 (4일 주기, 천적생물 배양조 규모의 80% 살포, 5반복 실시 후 초기화 하여 재배양 실시)
- 각 시기별 적용시 cage를 도입하여 추가배양 후 수역 살포하는 것으로 운영 함
- 녹조발생 초기인 3월부터 지속적으로 실시하여 초기제어 방안으로 운영함

이와 같이 제시한 최적 운영방안은 3차년도에 시험 적용하여 적용방안의 검증 및 녹조제어 효과를 최종 평가할 계획이다.

#### 라. 천적생물 보호 및 유지방안

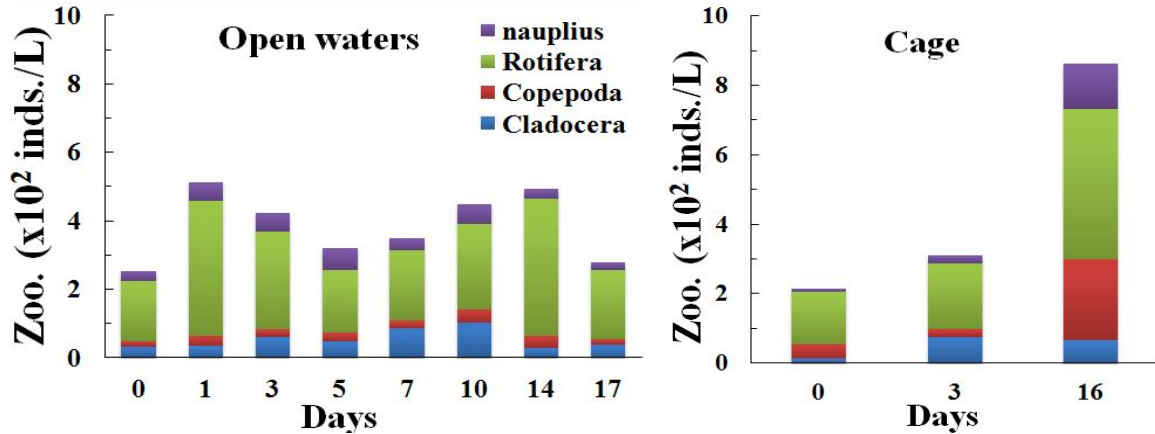


<그림 2.67> 천적생물 보호 및 유지 cage 개요

천적생물 현장살포 이후 어류의 포식, 희석 등에 의한 녹조제어효과의 상실부분을 현장에 직접 살포 시와 비교분석 하기 위한 천적생물 보호 cage를 설치하여 천적생물 추가 배양(증폭) 및 녹조제어에 활용하였다. 2011년 10

월 ~ 11월까지 36 m<sup>3</sup> × 2조의 규모로 설치하였다. 2 mm 메쉬사이즈의 플랑크톤 네트로 이루어진 5 m × 5 m × 1 m(25 m<sup>3</sup>) 규모의 사각 cage를 제작하여 분석하였다.

천적생물 cage 적용방법은 대량배양 된 천적생물을 방류하여 2차 증식 후 수역 살포하였다. 포식자인 물고기로부터 보호하면서 지속적인 녹조제어 실현에 도움이 될 것이라 판단된다.



<그림 2.68> 천적생물 cage 효과

천적생물 살포 직후 개방수역에서는 개체수가 늘어나다가 점차 감소 후 다시 증가하여 14일째 최대 493 inds./L까지 증가하였고, 윤충류 67%, 지각류 14%, 노플리우스 11%, 요각류 7% 순으로 우점하였다.

반면에 천적생물을 cage 안에 살포하여 천적생물의 개체수를 확인해본 결과, 살포 전 213 inds./L에서 살포 16일째 861 inds./L까지 증가하는 양상을 보였다. 분류군별로 살펴보면, 노플리우스 2,100% 요각류 541%, 지각류 534%, 윤충류 285% 증가한 양상을 보여, 개방수역에 살포한 것보다 천적생물 증가율이 높았다.

천적생물을 직접 현장에 살포시 어류로부터 천적생물을 보호하고 지속성을 높이기 위한 cage 실험을 실시하였는데 cage 안에서 천적생물이 점점 증식하여 수역보다 더 많은 개체수를 확보할 수 있다는 장점을 이용하여 향후 활용방안 모색이 필요할 것으로 판단된다.

종합적으로 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.

## 제7절 천적생물 배양장치의 적용범위 및 규모 산정, 녹조 제어 성능 평가

### 1. 천적생물 배양장치의 적용범위 및 규모 산정

#### 가. 자연분리 천적생물 현장 적용범위 및 규모산정

##### (1) 자연분리 천적생물 최적 살포조건

자연분리 천적생물의 현장 적용범위와 규모산정을 위해서는 배양장치 내 최적 살포조건을 확립하는 것이 우선 필요하다. 대량배양실험에서 도출된 값을 기준으로 정리해보면 자연분리 천적생물의 경우 배양기간은 5일, 5 m<sup>3</sup> 배양조 기준에서 개체수는 1,000 inds./L, 최적배양 개체수는 10<sup>7</sup>이 적절하다고 판단된다.

(표 2.20) 자연분리 천적생물 최적 살포조건

투입종	배양기간	L 당 개체수 (10 m <sup>3</sup> 배양조기준)	최적배양개체수 (10 m <sup>3</sup> 배양조기준)
자연분리 천적생물	5일 배양	2,000	1 x 10 <sup>7</sup>

##### (2) 자연분리 천적생물 최적 배양규모

녹조발생 농도에 따라 천적생물 살포량은 각각 달라지는데, 녹조발생시 Chl-*a* 수치가 100 mg/m<sup>3</sup> 일 때 24.8 × 10<sup>6</sup>을 투입해야만 제어목표인 25 mg/m<sup>3</sup>에 도달 할 수 있다. 이 수치는 최적 배양 개체수 기준으로 25 m<sup>3</sup>의 배양규모가 필요하다. 식물플랑크톤 농도(Chl-*a*)를 모니터링하여 각 농도별 적정량의 천적생물을 살포하기 위해 배양규모를 고려하여 대비하는 것이 중요하다.

녹조발생 농도별 천적생물 투입량은 Chl-*a* 기준으로 100 mg/m<sup>3</sup>구간에서부터 30 mg/m<sup>3</sup>구간까지 반경 50 m 면적 내 식물플랑크톤 농도를 Chl-*a* 25 mg/m<sup>3</sup>까지 제어할 때 필요한 천적생물 투입량은 표 2.21과 같다.



(표 2.21) 식물플랑크톤 농도(Chl-a)별 천적생물 투입량 및 배양규모

Chl-a(mg/m <sup>3</sup> )	100	90	80	70
투입량(개체)	24.8 x 10 <sup>6</sup>	20.0 x 10 <sup>6</sup>	15.8 x 10 <sup>6</sup>	12.1 x 10 <sup>6</sup>
배양규모(m <sup>3</sup> )	25.1	20.3	16.0	12.3
Chl-a(mg/m <sup>3</sup> )	60	50	40	30
투입량(개체)	8.9 x 10 <sup>6</sup>	6.2 x 10 <sup>6</sup>	4.0 x 10 <sup>6</sup>	2.2 x 10 <sup>6</sup>
배양규모(m <sup>3</sup> )	9.0	6.3	4.0	2.3

나. 종주분리 천적생물인 *Daphnia*에 의한 식물플랑크톤 생체량 제거(반감) 속도와 필요 천적생물량

종주분리 천적생물인 *Daphnia*의 식물플랑크톤 생체량 제거 속도와 필요 천적생물량을 산출해보니 중형 *Daphnia*인 *Daphnia pulex*는 100 m<sup>3</sup> 대상 최적 살포량이 1.0 × 10<sup>7</sup>이었으며, 대형 *Daphnia*인 *D. similoides*는 100 m<sup>3</sup> 대상 최적 살포량이 2.0 × 10<sup>6</sup>을 투입하면 48시간 내에 제거되었다.

(표 2.22) 천적생물에 의한 식물플랑크톤 생체량 제거(반감) 속도와 필요 천적생물량

녹조 제어 방법	천적생물	대상 종 (실험, 검증대상)	식물플랑크톤 농도 (mg/m <sup>3</sup> )	개체당 녹조제어량 (mg-chl-a / m <sup>3</sup> /day)	제거 소요 시간*	녹조제어시 필요천적생물밀도	100 m <sup>3</sup> 대상 최적살포량 (10 m <sup>3</sup> 수조배양시 천적생물밀도)
초기 억제	중형 <i>Daphnia</i> ( <i>Daphnia pulex</i> )	남조류 ( <i>Microcystis</i> )	30	0.16	48hr	100 inds./L	10,000,000개체 (1,000 inds./L)
	대형 <i>Daphnia</i> ( <i>Daphnia similoides</i> )			0.68		20 inds./L	2,000,000개체 (200 inds./L)
진화	중형 <i>Daphnia</i> ( <i>Daphnia pulex</i> )	남조류 ( <i>Oscillatoria</i> )	200	0.74	48hr	100 inds./L	10,000,000개체 (1,000 inds./L)
	대형 <i>Daphnia</i> ( <i>Daphnia similoides</i> )			3.17		20 inds./L	2,000,000개체 (200 inds./L)

※ 식물플랑크톤 생산량을 고려하지 않은 섭식 저감량

## 2. 천적생물 배양장치의 녹조제어 성능 평가

천적생물 배양장치에서 최적배양 농도인  $5 \times 10^6$ 을 녹조발생구역에 투입했을 시 살포 1일차 100 m까지 평균 녹조 제거율이 61.3%였고, 살포 3일차에는 평균 제거율이 61.8%였으며, 5일차에는 18.7%로 제거율이 급격히 감소하였다. 이 결과를 바탕으로 녹조 발생시 3일 주기로 천적생물의 최적 생물량을 투입하는 것이 녹조를 제어를 하는데 적절하다고 판단된다.

(표 2.23) 살포효과에 따른 녹조(Chl-*a*) 제거율

구분	살포1일차	살포3일차	살포5일차	살포9일차	살포14일차
5 m	52.0	67.0	6.1	6.05	9.91
10 m	52.1	58.8	(-2.1)	11.0	8.16
20 m	53.7	60.5	16.3	1.6	12.83
30 m	52.7	60.5	10.9	(-0.1)	13.12
40 m	61.5	60.95	13.7	(-9.6)	7.58
50 m	63.5	60.1	11.4	5.5	5.54
70 m	57.8	63.0	17.54	9.8	12.24
100 m	59.4	62.0	22.04	17.4	12.54
110 m	61.0	62.8	27.6	21.2	7.58
120 m	67.5	62.7	31.5	27.0	5.54
130 m	73.0	62.4	46.25	31.1	15.45
140 m	71.8	61.5	24.85	38.01	4.96
150 m	70.8	60.7	17.05	25.21	10.79
<b>평균</b>	<b>61.3%</b>	<b>61.8%</b>	<b>18.7%</b>	<b>14.2%</b>	<b>9.7%</b>

\* 녹조 발생 구간에서 녹조제어시 필요한 천적생물 살포량과 살포효과 지속 기간별 필요한 천적생물 살포량(반경 50 m, Chl-*a*: 100 mg/m<sup>3</sup> → Chl-*a* 25 mg/m<sup>3</sup>)



# 제 3 장

## 결 론

제1절 전대저수지 녹조발생 특성 및 수환경 모니터링

제2절 천적생물 종주 분리 및 최적 배양기술 개발

제3절 천적생물 배양장치 설치 및 시설 운영, 유지관리

제4절 천적생물 배양장치 대량배양 성능

제5절 천적생물 현장살포 효과분석

제6절 천적생물 배양장치의 적용범위 및  
규모 산정, 녹조제어 성능 평가



## 제3장 결론

### 제1절 전대저수지 녹조발생 특성 및 수환경 모니터링

연구대상지인 전대저수지의 녹조발생특성과 수환경 특성을 분석하기 위해 2011년 3월 24일부터 10월 12일까지 총 9회(월 1회)에 걸쳐 모니터링을 실시하였으며, 주요 항목은 수온, SD, 수심, DO, pH, EC, COD, SS, TN, TP, Chl-a 및 동·식물플랑크톤으로 시기별, 지점별로 분석하였다.

연구기간 중 기온 분포는  $-9.0 \sim 27.9$  °C(평균:  $16.4$  °C)로 3월에 영하의 낮은 기온을, 11월에는 평년 동일시기보다 높은 기온분포를 보였으며, 5월 ~ 9월 그리고 11월의 일부기간에  $15$  °C이상의 기온을 보이고 있어 녹조발생에 유리한 조건을 보였다. 수온변화는  $7.5 \sim 27.6$  °C(평균  $20.7$  °C)로 나타났으며, 지점별 차이보다는 계절적 변이가 크게 나타났다.

COD는 연구기간 동안  $7.8 \sim 19.6$  mg/L(평균  $15.7$  mg/L)의 범위로 선형강우  $149.5$  mm를 보였던 7월에  $7.8 \sim 9.6$  mg/L(평균  $8.7$  mg/L)로 급감한 것을 제외하면 농업용수 수질기준( $8$  mg/L)을 초과하는  $12$  mg/L이상으로 높게 나타났으며, 지점별로는 유입부인 JD1(평균  $16.3$  mg/L)에서 가장 높았고, 하류지점인 JD3(평균  $15.0$ )으로 갈수록 감소하였다.

전대저수지의 전반적 수질은 대부분 항목에서 농업용수 기준을 만족하지 못하였으며, 특히, 영농활동이 활발한 5월과 강우가 집중된 7월에 영양염류가 증가하였고, 유입부의 농도가 높게 나타남에 따라 유역에서 유입되는 오염물질이 수질에 영향을 미치는 것으로 사료되었다.

Chl-a는  $51.1 \sim 181.1$  mg/m<sup>3</sup>(평균  $104.2$  mg/m<sup>3</sup>)로 전시기에 농업용수 수질기준( $\text{Chl-a} < 35$  mg/m<sup>3</sup>)을 초과하였으며, 3월과 7월을 제외한 대부분의 시기에 평균  $100$  mg/m<sup>3</sup>을 초과하는 조류대발생 수준을 보여주고 있음. 지점별로는 JD1  $74.3 \sim 181.1$  mg/m<sup>3</sup>(평균  $113.1$  mg/L), JD2  $57.0 \sim 146.9$  mg/m<sup>3</sup>(평균  $104.6$  mg/L), JD3  $51.1 \sim 142.7$  mg/m<sup>3</sup>(평균  $95.1$  mg/L)로 유입부인 JD1에서 녹조발생이 심각하였다.

연구기간동안 식물플랑크톤 현존량은 지점평균  $109.7 \sim 126.6 \times 10^3$  cells/ml(전평균  $120.6 \times 10^3$  cells/ml)로 유입부인 JD1에서 높게 나타났으며, 시기별로는 4월(유입부(JD1):  $320.6 \times 10^3$  cells/ml, 중류(JD2):  $292.2 \times 10^3$

cells/ml, 제방앞(JD3):  $280.0 \times 10^3$  cells/ml)에 가장 높은 현존량을 보였고 집중강우가 발생한 7월에 가장 낮은 현존량을 보였다.

봄철(3 ~ 4월)에는 남조류인 *Anabaena* sp.가 우점하였으며, 5월에는 갈색편모조류인 *Cryptomonas* spp.가 유입부(JD1)와 중류(JD2)에서 우점하였고, 6월부터 10월까지 *Oscillatoria* sp.가 우점하여 남조류인 *Anabaena* sp.와 *Oscillatoria* sp.에 의한 녹조발생에 대해 적절한 제어방안의 수립이 필요하다.

전대저수지에 서식하고 있는 동물플랑크톤 종조성 분석결과, 연중 풍부하게 출현하는 동물플랑크톤 대부분이 식물플랑크톤 및 박테리아를 섭식하는 윤충류로 나타나 녹조제어에는 그 효과가 미미하였으며, 연구기간 동안 녹조제어 능력을 가진 대형 지각류의 경우 *Moina* 속이 확인되었으나 출현시기가 봄철(5월)로 한정되었고, 출현밀도도 10 inds./L로 매우 낮아 동물플랑크톤에 의한 자연적인 녹조제어는 불가능한 것으로 판단된다.

## 제2절 천적생물 종주 분리 및 최적 배양기술 개발

농업용저수지에서 녹조제어를 위해 포식성 천적생물로서 유용한 동물플랑크톤 종주를 분리하고, 실내 및 현장에서 대량 배양 가능한 최적배양조건을 검토하였다.

전대저수지에는 녹조제어에 효과적인 천적생물이 자연서식하지 않는 것으로 확인되었으며, 일반적으로 호수 및 저수지에서 생태계에 미치는 영향이 적고 식물플랑크톤 섭식효과가 뛰어난 천적생물로서 *Daphnia* spp.를 종주로 분리하였다.

천적생물 종주의 증식특성과 식물플랑크톤 섭식효과를 비교분석한 결과, *D. pulex*와 *D. similoides*가 다양한 조건에서 빠른 개체군 증가를 보이고, 식물플랑크톤 섭식 능력이 뛰어난 것으로 나타났으며, 특히, *D. similoides*는 여름철 고수온 조건에서도 높은 적응능력을 보여 천적생물로 적합한 것으로 판단된다.

전대저수지 물을 이용하여 천적생물에 의한 녹조제어 실내 실험 결과, 천적생물 *Daphnia*를 이용할 경우 개체당 Chl-a 의 최대 저감 효과는 조류대발생 초기 단계인  $50 \text{ mg/m}^3$ 에서 *D. pulex*가  $0.16 \text{ mg/m}^3$ , *D. similoides*가  $0.68 \text{ mg/m}^3$ 에 이르고, 조류대발생 시 Chl-a( $200 \text{ mg/m}^3$ )에서 *D. pulex*가  $0.74 \text{ mg/m}^3$ , *D. similoides*가  $3.17 \text{ mg/m}^3$ 로 나타나, 녹조발생 상황에서 높은 제어

능력을 가지고 있는 것으로 확인되었다.

저수지의 녹조발생시 천적생물 배양장치에 천적생물 초기 접종액을 공급하기 위한 *Daphnia* 고밀도배양은 50 ~ 75 L의 수조에서 적정량의 먹이공급과 함께 주기적인 물 교환을 병행하여 실시하였으며, 실내 고밀도 대량배양 시스템을 확립하였다.

### 제3절 천적생물 배양장치 설치 및 시설 운영, 유지관리

녹조제어를 위한 천적생물 배양장치는 전대저수지의 녹조발생 특성과 천적생물 분포특성, 현장살포 적용성 등을 고려하여 1차년도에 천적생물 배양조 기준 10 m<sup>3</sup> 규모의 수상형 장치를 제작, 설치하였으며, 전년도 운영결과를 바탕으로 일부장치의 기능개선을 수행하였다.

전년도 수상형 배양장치의 운영결과를 바탕으로 결정한 천적생물 배양장치의 최적 운영조건인 먹이생물(식물플랑크톤) 배양조 체류시간 3일, 천적생물(동물플랑크톤) 배양조 체류시간 4일, 먹이생물 공급비율 50% 의 조건에서 2011년 4월부터 11월까지 배양장치를 운영하였다.

또한, 전대저수지 수변 홍만수면 부지를 활용하여 천적생물 배양조 기준 30 m<sup>3</sup> 규모의 육상형 장치를 8 ~ 9월 중 설치하여 10 ~ 11월 동안 운영하였다.

추가 설치한 육상형 배양장치는 10 m<sup>3</sup> 규모(동물플랑크톤 배양조 기준)의 배양조를 3계열 설치하고 각각 독립적으로 운영되도록 구성하였다.

원수분리조는 유입 원수에 포함된 식물플랑크톤과 동물플랑크톤을 분리하여 각 배양조로 공급할 수 있는 구조로 제작 설치하였고, 식물플랑크톤 배양조는 태양광이 잘 조사되도록 상부를 오픈하고 낮은 수심을 유지하여 식물플랑크톤이 잘 성장할 수 있도록 제작 설치하였다.

동물플랑크톤 배양조는 식물플랑크톤 배양조로부터 먹이원을 공급받아 동물플랑크톤 개체수를 증식시키고 살포대상지역으로 일시 또는 연속적으로 살포할 수 있는 구조로 제작 설치하였다.

녹조발생수역에 천적생물을 방류했을 때 어류 포식 등의 위험에서 천적생물을 보호하고 녹조제어 능력을 향상시키기 위한 방안으로 저수지 내에서 천적생물의 2차 증폭 배양이 가능하고, 어류 포식으로부터 보호받을 수 있는 cage를 적용하였다.

배양장치에서 배양된 천적생물을 cage로 방류하게 되면 수역의 녹조생



물을 포식하면서 2차 증식을 하게 되고, cage 내부에는 천적생물의 포식자인 어류가 들어올 수 없어 어류로부터 안전한 공간 확보가 가능하다.

Cage 규모는 500  $\mu\text{m}$  메쉬망으로 둘러싸인 72 $\text{m}^3$  (6 m  $\times$  6 m  $\times$  1 m  $\times$  2조)이며, 사각 철제 프레임에 천재질의 메쉬망으로 둘러싼 형태이며, cage 구조는 천적생물 배양장치에서 방류된 천적생물을 수역 내에서 추가 배양한 후 수역으로 다시 살포할 수 있도록 일부구간이 개폐 가능하도록 제작하였다.

#### 제4절 천적생물 배양장치 대량배양 성능

전년도에 설치한 수상형(10  $\text{m}^3$ ) 배양장치에서 전대저수지의 현장수에 포함된 천적생물을 자연분리하여 봄철(4월 13일 ~ 5월 17일)과 가을철(11월 4일 ~ 11월 11일) 두 차례에 걸쳐 대량배양 성능 실험을 실시하였다.

봄철(4 ~ 5월)에 이루어진 자연분리 천적생물 대량배양에 필요한 수질 환경조건을 분석한 결과는 다음과 같다.

수온(W.temp.)은 12.1 ~ 23.2  $^{\circ}\text{C}$ (평균 15.6  $^{\circ}\text{C}$ )로 계절변화에 따라 점차 증가하였으며, 각 단계의 평균 TN은 유입수 3.054 mg/L, 식물플랑크톤 배양조 2.705 mg/L, 동물플랑크톤 배양조 2.858 mg/L로 비교적 높은 수준을 유지하였고, TP 역시 유입수 0.271 mg/L, 식물플랑크톤 배양조 0.183 mg/L, 동물플랑크톤 배양조 0.178 mg/L로 높은 농도를 보여 동물 및 식물플랑크톤 배양에 필요한 충분한 영양염이 포함되어 있어 온도장애 또는 영양염 고갈에 의한 성장 제한현상은 나타나지 않았다.

봄철(4 ~ 5월) 천적생물 배양장치에서 대량 배양된 동물플랑크톤은 윤충류 64.5%, 노플리우스 27.2%, 요각류 8%, 일부 지각류 등의 비율로 출현하였으며, 윤충류와 지각류는 천적생물 배양조에서 오히려 50 ~ 60% 감소하였고, 요각류와 노플리우스는 천적생물 배양조에서 각각 186%, 224%로 크게 증가하였다.

가을철(11월), 자연분리 천적생물 대량배양성능 실험은 기설치된 수상형(10  $\text{m}^3$ )과 신규 설치한 육상형(30  $\text{m}^3$ ) 장치에서 동시에 이루어졌다.

배양기간 동안 수온은 수상형 배양장치의 경우 16.3 ~ 16.7 $^{\circ}\text{C}$ 의 범위로 유입수(Inflow)에서 식물플랑크톤 배양조, 동물플랑크톤 배양조로 이동하면서 점차 감소하였으며, 육상형 배양장치의 경우 역시 16.3 ~ 16.7 $^{\circ}\text{C}$ 의 범위로 식물플랑크톤 배양조 > 유입수 > 동물플랑크톤 배양조 순으로 나타났

고, 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 양상을 보였으나 전반적으로 15 °C 이상의 수온을 보여 동물 및 식물플랑크톤 배양에 저수온으로 인한 생육저해는 나타나지 않았다.

가을철(11월) 동물플랑크톤 배양조에서의 천적생물 대량배양 성능을 유입수 비교한 결과 수상형의 10 m<sup>3</sup> 배양조에서는 동물플랑크톤 개체수가 유입수보다 평균 152%, 육상형의 30 m<sup>3</sup> 배양조에서는 134% 증가하였다.

동물플랑크톤 분류군별로는 윤충류는 수상형의 10 m<sup>3</sup> 배양조에서는 160%, 육상형의 30 m<sup>3</sup> 배양조에서 118% 증가하였고, 지각류는 10 m<sup>3</sup> 배양조 83%, 30 m<sup>3</sup> 배양조 180%로 증가하였으며 요각류는 10 m<sup>3</sup> 배양조 193%, 30 m<sup>3</sup> 배양조에서 414%로 크게 증가하였다.

동물플랑크톤 배양조에서 대량 배양된 동물플랑크톤 중 천적생물로서 기능을 가진 지각류와 요각류의 증가율이 수상형의 10 m<sup>3</sup> 배양조보다 육상형의 30 m<sup>3</sup> 배양조에서 훨씬 높아 배양용량이 큰 30 m<sup>3</sup> 배양조의 천적생물 대량배양성능이 우수한 것으로 판단된다.

실내 고밀도 배양에 성공한 천적생물 종주 *D. similoides* 의 천적생물 배양장치에서의 대량배양성능을 분석한 결과 실내에서 고밀도 배양한 *D. similoides*를 천적생물 배양장치의 천적생물 배양조에 초기접종한 후 2주 이내에 고밀도로 증식하는 것을 확인하였다.

천적생물 배양조내의 *Daphnia* 개체군 밀도를 분석한 결과, 배양조에서 증식한 천적생물 *D. similoides*의 최고 밀도는 800 inds./L 이상인 것으로 나타났다으며, 대량 배양하여 방류 가능한 *D. similoides*의 양은 m<sup>3</sup>당 약 16만 개체 정도로 추정된다.

## 제5절 천적생물 현장살포 효과분석

자연분리 및 천적생물 종주를 천적생물 배양장치에서 각각 대량배양한 후 일시에 녹조발생 수역으로 살포하여 시간별 공간별 녹조제어 효과를 분석하여 녹조제어범위와 제어성능을 제시하고자 하였다.

봄철(5월) 수역에 분포하는 천적생물을 자연분리 및 대량 배양하여 천적생물을 현장에 일시 살포(5월 17일)하여 이후 23일간 거리별 살포효과를 추적조사 하였다.

자연분리 천적생물의 일시살포 후 거리별, 시간별 분포 특성을 보면,

살포 이후 양방향에서 지속적으로 개체수가 증가하여 C(횡단면방향)에서 살포 전 956 inds./L가 13일째 14,114 inds./L로 급증하였고, D(제방방향)에서는 살포 전 250 inds./L에서 13일째 12,890 inds./L로 천적생물 살포에 따라 녹조 발생 수역의 동물플랑크톤 현존량이 크게 증가하였다.

Chl-a는 살포직전 C라인(횡단면방향) 243 mg/m<sup>3</sup>, D라인(제방방향) 217 mg/m<sup>3</sup>이었으나 살포 후 시간이 경과하면서 C, D 양방향모두 지속적으로 감소하여 13일째 C라인에서는 87% 감소한 31.2 mg/m<sup>3</sup>으로, D라인에서는 85.7% 감소한 31.0 mg/m<sup>3</sup>로 농업용수 기준 35 mg/m<sup>3</sup>보다 낮은 최저수준을 보여 조류 대발생 기준(100 mg/m<sup>3</sup>)보다 2배 이상의 심각한 녹조발생 수준에서 농업용수 수환경기준 만족 수준까지 녹조가 제어되었다.

천적생물 살포에 따라 거리별 식물플랑크톤의 현존량 변화는 살포지점으로부터의 멀어질수록 증가하여 거리에 따라 녹조제어효과 감소를 관찰하였으며, 또한 시간이 경과함에 따라서도 제어효과가 감소하여 적정규모에서 주기적 살포가 필요한 것으로 사료된다.

살포 후 녹조원인 생물인 식물플랑크톤의 종조성 변화를 보면 살포 전과 살포 후 3일까지는 남조류와 갈색편모조류가 크게 우점한 반면 천적생물의 제어효과에 의해 남조류와 편모조류의 현존량과 비율이 급감하는 것을 관찰할 수 있었으며, 살포 9일 이후에는 녹조발생원인 생물인 유해 남조류는 제거되고 녹조류가 우점하였다.

결론적으로 천적생물을 이용하여 저수지의 주요 녹조발생원인 생물인 남조류가 효과적으로 제어되는 것으로 사료된다.

천적생물 종주 *D. similoides*를 천적생물 배양장치에서 대량배양한 후 봄철(6월), 가을철(10월) 2차례에 걸쳐 녹조발생 수역에 대량 살포하여 자연분리 천적생물과의 효과 비교는 물론 녹조제어 성능을 제시하고자 하였다.

봄철(6월) *D. similoides*를 대상으로 대량살포를 실시한 후 11일간 시간별 공간별 녹조제어효과를 분석하였다.

대량 배양 되어 살포된 천적생물 중 *Daphnia*는 약 2백만 개체 이상으로 추정되지만 24시간 후에는 살포구간에 관찰되었으나 그 이후에는 관찰되지 않아 비교적 짧은 기간(수 일 이내) 녹조제어 작용을 수행하거나 강우의 영향을 크게 받은 것으로 사료되었다.

천적생물 살포 후 거리별 경과일수에 따른 식물플랑크톤 현존량을 Chl-a 로 살펴본 결과 시간이 경과함에 따라 Chl-a 농도는 점차 감소하였으며, D

line의 경우 2일차에는 30 m, 4일차에는 70 m, 11일차에는 100m에서 최소 값을 보이는 등 강우가 시작되기 전 다소의 녹조제어 효과가 관찰되었다.

가을철(10월) 천적생물 종주인 *Daphnia*에 대한 2차 대량살포는 수상형의 10m<sup>3</sup> 배양장치와 육상형의 30 m<sup>3</sup> 배양장치에서 동시에 시행한 후 14일 동안 수상형 배양장치 살포지점 D0, 육상형 배양장치 살포지점 E0, 그리고 대조구로써 저수지 중앙의 JD2지점에서 살포효과를 분석하였다.

천적생물 살포 후 거리별로 경과일수에 따른 식물플랑크톤 현존량을 Chl-a 로 살펴본 결과 시간 경과에 따라 Chl-a 농도는 점차 감소하였다. 대량 살포된 천적생물의 생체량은 167 × 10<sup>3</sup> inds./m<sup>3</sup>에서 최고 835 × 10<sup>3</sup> inds./m<sup>3</sup>인 것으로 나타났으며, 배양수조 개선과 배양조건 개선을 통해 살포 생체량을 높일 수 있을 것으로 예상된다.

10m<sup>3</sup> 살포구간인 D line(제방방향)의 경우 대조구와 일 평균 Chl-a 값을 비교한 결과 2일차에는 30 m, 4일차에는 70 m 11일차에는 100m에서 최소 값을 보였으며, 살포구역(D)보다 초기값이 낮았던 대조구였음에도 불구하고 4일차 이후에는 살포구역에서 더 낮은 Chl-a 값을 유지하여 천적생물 살포에 따른 녹조제어 효과를 보여준다.

수직 채집하여 분석한 *Daphnia* 개체들은 현장에서 개체수가 낮은 것으로 나타났고, 기타 대형 지각류도 그 개체수가 매우 낮았고, 서식처에 존재하는 우점 소형 윤충류 및 대형윤충류를 포함한 동물플랑크톤은 지점별 또는 시간별로 큰 개체군 밀도차를 보였으나, 천적생물 살포에 의한 뚜렷한 영향은 나타나지 않았다.

천적생물 배양장치에서 대량 배양된 자연분리 및 종주분리 천적생물 살포시, 자연 분리된 천적생물의 살포는 살포 주변지역의 천적생물의 밀도를 높이며 식물플랑크톤 생체량을 저감시키는 것으로 나타났으며, 대량배양을 통해 살포된 종주분리 천적생물(*Daphnia*)은 살포 후 수체의 체류시간은 24 시간으로 비교적 짧은 것으로 나타났다.

천적생물 *Daphnia*의 체류시간을 연장시키고, 수체 내 녹조제어를 효과적으로 유도하기 위해서는 살포량 증가(고밀도 배양), 살포시기 및 방법(반복 살포), *Daphnia* 섭식 어류 시, 공간 분포 조절 등이 병행되어야 할 것으로 분석된다.

## 제6절 천적생물 배양장치의 적용범위 및 규모 산정, 녹조 제어 성능 평가

자연분리 천적생물의 현장 적용범위와 규모산정을 위해서는 배양장치 내 최적 살포조건을 확립하는 것이 우선 필요하며, 대량배양실험에서 도출된 값을 기준으로 정리해보면 자연분리 천적생물의 경우 배양기간은 5일, 10 m<sup>3</sup> 배양조 기준에서 개체수는  $2 \times 10^3$  inds./L, 최적배양 개체수는  $10^7$ 이 적절하다고 사료된다.

녹조발생 농도에 따라 천적생물 살포량은 각각 달라지는데, 녹조발생시 Chl-a 수치가 100 mg/m<sup>3</sup> 일 때  $24.8 \times 10^6$  개체를 투입해야만 제어목표인 25 mg/m<sup>3</sup> 에 도달 할 수 있으며, 이 수치는 최적 배양 개체수 기준으로 25 m<sup>3</sup>의 배양규모가 필요하다.

종주분리 천적생물인 *Daphnia*의 식물플랑크톤 생체량 제거 속도와 필요 천적생물량을 산출해보니 중형 *Daphnia*인 *Daphnia pulex*는 100 m<sup>3</sup> 대상 최적 살포량이  $1.0 \times 10^7$ 개체였으며, 대형 *Daphnia*인 *D. similoides*는 100 m<sup>3</sup> 대상 최적 살포량  $2.0 \times 10^6$ 개체를 투입하면 48시간 내에 제거되었다.

천적생물 배양장치에서 최적배양 농도인  $5 \times 10^6$ 개체를 녹조발생구역에 투입했을 시 살포 1일차 100 m까지 평균 녹조 제거율이 61.3%였고, 살포 3일차에는 평균 제거율이 61.8%였으며, 5일차에는 18.7%로 제거율이 급격히 감소하였으며, 이 결과를 바탕으로 녹조 발생시 3일 주기로 천적생물의 최적생물량을 투입하는 것이 녹조를 제어를 하는데 적절하다고 사료된다.

## 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도

연구개발 목표	연구개발 목표 달성 실적	달성도	대외기여도
○중규모 천적생물 현장배양장치의 추가설치 및 시설운영	○기존 10 m <sup>2</sup> 장치에 30 m <sup>2</sup> 규모의 배양장치를 전대저수지 수변 홍만수면 부지에 추가 설치완료하고 운영함	100%	100% 농업용수원인 저수지에 실질적으로 적용하여 현실적인 대안방안 제시
○천적생물 현장 배양장치의 배양성능 및 현장살포 효과분석	○녹조발생시기인 봄철과 가을철을 대상으로 자연분리형 및 <i>Daphnia</i> 를 대상으로 배양성능 실험과 현장살포 효과분석을 완료함	100%	100% 농업용수 수질개선 및 녹조방지사업의 주요 기술로 정책결정에 기여하고, 기술실용화로 실무부서의 효율적인 녹조방제사업에 기여
○천적생물 배양 장치의 적용범위 및 규모 산정	○현장살포 결과 바탕으로 적용범위는 150 m, 유효기간은 14일로 산정함	100%	100% 농업용수원의 녹조 제어 범위에 대한 기초자료 제공
○천적생물을 이용한 녹조제어 성능 평가	○Chl- <i>a</i> 기준 200 mg/m <sup>3</sup> 이상의 녹조발생수역에서 농업용수 기준인 35 mg/m <sup>3</sup> 이하로 제어되어 효과가 있음이 입증됨	100%	100% 농업용수원의 녹조방제 목표설정에 대한 기초자료 제공



## 연구개발결과의 활용계획

연구과제명	농업용수원의 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 개발(II)		
연구기간	2010. 1. ~ 2012. 12.	연구방법	공동연구, 협동연구
연구비	총연구비 : 330백만원(공동 : 109백만원, 위촉 : ○ 백만원) - '11년도 : 148.3백만원(공동 : 32.3백만원, 협동 : 현물투자)		
연구책임자	남귀숙		
활용부서 및 과제담당관	농림수산식품부(유재중 사무관)		
기대효과 활용계획	<p>■ 기대효과</p> <p>○ 기술적 측면</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 농업용수원의 녹조방제를 통해 호소의 COD감소 등 수질개선 효과에 크게 기여하게 됨</li> <li>- 농업용수원의 생태 건강성을 유지하고, 어족자원을 풍부하게 하는 생물학적 녹조제어기법을 통해 건강한 호소관리 가능</li> <li>- 녹조방지로 인한 농업용수원의 생태적 가치 상승</li> </ul> <p>○ 경제·산업적 측면</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 녹조발생으로 인한 수산양식자원에 미치는 많은 경제적 피해를 보상받을 수 있으며, 또한 용수이수목적에 따른 추가적인 정수처리 비용 절감 등 경제적 이득이 높음</li> <li>- 기존에 적용되어 오던 고가의 약품비 및 기기설치비를 비용경제적인 본 기술로 대체할 경우 비용절감 효과가 매우 크며, 유지관리비 등 절감요인 발생</li> </ul> <p>■ 활용계획</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 저수지 및 담수호의 녹조방지기술로서 현장적용 및 보급</li> <li>○ 저수지 및 담수호의 수질관리 정책에 반영</li> <li>○ 기술의 보급 및 상용화</li> </ul> <p>■ 활용부서(또는 기관 등)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 공사 수자원관리처 또는 환경부 및 한국수자원공사</li> <li>○ 전국 지자체 관리 호소 및 정체수역의 수질개선사업에 활용</li> </ul>		
보고서발간부수	50부		
배부계획 (배부처)	농림수산식품부 3부, 공사내 관련부서 15부, 보관본 6부, 정부등 유관기관 10부, 공동연구기관 3부, 협동연구기관 3부 연구기획실 : 10부(공사 도서관 등 자료실)		





## 참 고 문 헌



## 참고문헌

- 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.
- 김병석, 박연기, 박경훈, 신진섭, 김진화, 윤성명, 안용준 2006. 실내사육조건에서 한국산 *Daphnia* 종간 life cycle 비교. 농약과학회지, 10, 196-200.
- 김호섭, 황순진. 2004. 육수학적 특성에 따른 국내 저수지의 부영양화 유형분석 -엽록소 a와 수심을 중심으로. 한국육수학회지. 37(2): 213-226
- 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
- 수자원 연구소. 2000. 댐 저수지의 조류사진집. 아카데미서적.
- 안광국, 신인철. 2005. 산간 계류성 하천의 계절적 수질변동에 대한 몬순강우의 영향. 한국육후학회지. 38(1): 54-62
- 안운주, 공동수. 1995. 생이가래를 이용한 영양물질의 제거방안 연구. 대한환경공학회지 18:593-603.
- 정용. 1993. 한국담수조류도감. 아카데미서적.
- 환경부. 2011. 수질오염공정시험기준. 환경부고시 제2011-103호

- Burns, C.W. 1969 Relation between filtering rate, temperature, and body size in four species of *Daphnia*. *Limnol. Oceanogr* 14: 693-700.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* 22: 361-369.
- 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.
- 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.
- Horppila, J. and Kairesalo, 1990. A Fading recovery: the role of roach in maintaing 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. *Veřl. 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. *Treatmenr wetlands*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- 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.

- McQueen, D.J. Story, V.A. 1986. Impact of hypolimnetic aeration on zooplankton and phytoplankton populations. *Environmental technology letters*. 7:31-44
- Porter, K. G., Gerritsen, J. and Orcutt, Jr., J. D. 1982. The effect of food concentration on swimming patterns, feeding behavior, ingestion, assimilation, and respiration 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.
- Schol, A.T., R.A. Soltero, K.O. McKee, E. Anderson, and J.K. Uehara, 1985. Biomanipulation of a trout fishery and its effect on zooplankton composition, phytoplankton biovolume and water quality of Medical Lake, Spokane Co., Washington, USA. *Proc.4th Annu.Conf.Int.Symp. N. Am. Lake Manage. Sco.*, 4:48-56.
- 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.
- 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.

- 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. 1st. Ital. Idrobiol.*, 33: 53-83.

## 분야별 공동연구 참여자 명단

구 분	전공	성 명	직 위	업무 분야	경 력
주관연구기관 한국농어촌공사 농어촌연구원	환경공학	홍대벽	수석연구원 (물환경팀장)	연구지도 및 연구 방향 제시	박 사
	미생물학	남귀숙	주임연구원 (연구총괄)	연구 총괄 배양시설 효과분석	박 사
	생물학	송영희	연구원	동물플랑크톤 특성 분석	석 사
	생명과학	이의행	연구원	수질환경 및 녹조 발생 분석	석 사
	생명과학	김미리내	연구원	식물플랑크톤 조사 및 분석	석 사
공동연구기관 (경희대)	생태학	장광현	조교수 (환경학 및 환경공학과)	연구 총괄 현장조사 및 천적 생물 분리 배양	박 사
	환경공학	손용익	학 생 (환경학 및 환경공학과)	현장조사 및 현장 배양장치 천적생물 관리	학사
	환경공학	표세희	학 생 (환경학 및 환경공학과)	천적생물 실내 배 양, 현장 시료 분석	학사
협동연구기관 (주)아쌈	환경과학	권오병	대표이사	연구 총괄	박 사
	환경공학	박선구	영업이사	배양장치구상 및 경제성분석	석 사
	환경공학	김민규	연구소 소장	배양장치 설치 및 운영	석 사
	환경공학	조인기	연구소 차장	배양장치 보수 및 유지관리	석 사






## **부 록**

- 부록 1. 협동연구 협약체결서**
- 부록 2. 실용신안 등록증(2건)**



# 부록 1. 협동연구 협약체결서



## 협동연구 및 기술실시 협약서

2010. 4. 29

**한국농어촌공사 농어촌연구원**  
**(주)아셈 (ASSUM Ecological Systems INC)**

## 협동연구 및 기술실시 협약서

한국농어촌공사 농어촌연구원(이하 '농어촌연구원'라 한다)과 (주)아셈(이하 '아셈'이라 한다)은 「농업용수원 확보방지를 위한 원격생물 적용기술개발」 연구와 관련하여 다음과 같이 협약을 체결한다.

**제1조 : 목 적**  
본 협약서는 주관연구기관인 농어촌연구원과 협동연구기관인 아셈이 상호 협력하여 공동으로 수행하는 「농업용수원 확보방지를 위한 원격생물 적용기술 개발」(이하 '원격생물 적용기술 개발'이라 한다)과 관련한 협력의 범위 및 역할, 처리절차, 권리, 의무 등 필요한 사항을 규정함을 목적으로 한다.

**제2조 : 범위 및 내용**  
본 협약서의 범위는 농어촌연구원과 아셈이 공동으로 수행하는 「농업용수원 확보방지를 위한 원격생물 적용기술 개발」 연구에 국한하며 그 내용은 다음과 같다.  
(1) 원격생물 적용기술 개발에 필요한 재료 또는 장치(이하 '개발재료'라 한다) 및 시공방법 개발(이하 '개발공법'이라 한다)과 그 성과물의 산업재산권 취득 및 시범시범  
(2) 원격생물 적용기술 개발에 필요한 재료 및 장치개발(이하 제1항과 같이 '개발재료'라 한다)과 그 성과물의 산업재산권 취득  
(3) 상기 제1, 2항과 관련한 성과물의 실용화

**제3조 : 역할분담**

농어촌연구원	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 농업용수원에서 특화된 생물 및 원격생물 공구 확보</li> <li>○ 농업용수원에서 특화된 생물 분석 및 목표종 선정</li> <li>○ 원격생물 공구 분리 및 확보</li> <li>○ 원격생물 공구의 최적 배양조건 제시</li> <li>○ 농업용수원에서 원격생물 배양장치의 최적운영방법 제시</li> <li>○ 원격생물 배양장치의 최적배양 생물 및 배양조건 분석</li> <li>○ 원격생물 공구배양 및 특화된생물 운영체계 수립</li> <li>○ 원격생물 적용기술의 효과분석 및 현장적용성 검토</li> <li>○ 농업용수원에서 적용방안 및 통제법 분석</li> <li>○ 원격생물 적용기술의 개발효과분석</li> <li>○ 원격생물 적용기술의 현장적용 효과 검토</li> <li>○ 원격생물 적용기술의 적용대상 입지 및 여건 제시</li> <li>○ 원격생물 적용기술을 이용한 특조방제 체계 수립</li> </ul>
아셈	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 산업재산권 출원 및 등록</li> <li>○ 원격생물 배양기술 개발 및 기술 개발</li> <li>○ 원격생물 배양기술 현장적용 및 장치 제작, 설치</li> <li>○ 원격생물 배양기술 개발 및 장치 보수, 보강</li> <li>○ 원격생물 현장 상용기술 개발</li> <li>○ 원격생물 배양장치 개발 및 설계인과 도출</li> <li>○ 원격생물 기술피용을 위한 설계 factor 도출</li> <li>○ 최적 시설 규모 선정 및 비용산출</li> <li>○ 장치 자동화 및 최적 시스템 제안</li> <li>○ 표준운영도 작성 및 운영법 분석</li> <li>○ 원격생물 적용기술의 최적 운영 및 유지관리방법 제시</li> <li>○ 원격생물 적용기술의 운영 방법연구</li> <li>○ 최적 유지관리방법 제시</li> </ul>
결 통	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 자재 역할분담 연구성과물의 산업재산권 취득 노력</li> <li>○ 자재 역할분담 연구성과물의 실용화 및 확산 노력</li> </ul>

**제4조 : 협동연구 개요**  
(1) 연구과제명 : 농업용수원 확보방지를 위한 원격생물 적용기술 개발  
(2) 연구 기간 : 2010년 4월 체결일 ~ 2012년 12월 31일 (3년간)  
(3) 협약 기관 : 한국농어촌공사 농어촌연구원, (주)아셈  
(4) 연구개발비 : 사업상관만(참여기업 연구비 별도)  
(5) 협약 당사자의 연구비(이하 '협동연구비'라 한다) 분담

(단위 : 백만원)

구 분	협동연구기간 (2010년~2012년)				투자비율
	2010	2011	2012	계	
농어촌연구원	현금: 80	현금: 200	현금: 150	현금: 430	67%
아셈	현금: 60	현금: 80	현금: 75	현금: 215	33%
계	계 : 140	계 : 280	계 : 225	계 : 655	100%

(6) 상기 연구비는 원격생물 적용기술개발을 위한 시험시공비, 설계, 모델 개발비 등을 모두 포함한다.

**제5조 : 협동연구 개발비 관리 및 사용**  
(1) 농어촌연구원은 아셈으로부터 현금 출자없이 모두 현물모양 지급받는다.  
(2) 협동연구 과정에서 현물 추가 비용 발생시 농어촌연구원과 아셈은 우선적으로 제4조 제5항에서 정한 현금과 현물 부담액을 조달하여 출당한다.  
(3) 농어촌연구원과 아셈은 협동연구 완료나 중단 또는 협약 폐지시 연구개발비 관리 및 사용과 관련하여 별도로 협의하여 결정한다.

**제6조 : 협동연구 결과의 보고, 발표 및 배포**  
(1) 협동연구 결과 보고서는 농어촌연구원과 아셈 공동명의로 작성하며, 농어촌연구원은 아셈에게 20부를 제공한다.  
(2) 농어촌연구원과 아셈은 협동연구 결과 발표시 농어촌연구원과 아셈 공동명의로 발표하여야 하며, 이때 발표하고자 하는 당사자는 사전에 상대방에게 통보 후 동의를 구하여야 한다.

**제7조 : 협동연구 성과물의 귀속**  
(1) 협동연구 성과물이란 협동연구의 결과물인 개발공법과 개발재료의 기

술사항을 말한다.

- (2) 본 협동연구 성과물로 취득한 산업재산권은 농어촌연구원과 아협 공동 소유로 하되 출원, 등록 및 유지 관련 발생하는 제반비용은 제3조의 역할 분담에 따라 부담한다. 단, 협동연구이전에 취득한 지적재산권은 명의는 공동으로 하지 않으나 기술 실시에 있어 독점적 전용실시권을 제8조와 같이 아협에 부여하며, 이에 대한 기술료는 별도 지급하도록 한다.

**제8조 : 협동연구성과물의 실용화**

- (1) 농어촌연구원은 농어촌공사가 발주 또는 시행하는 원적생물 적용기술에 대해 협동연구 성과물을 적용함을 원칙으로 한다.  
(2) 농어촌연구원과 아협은 타 기관(국가기관, 정부출연기관 및 지방자치단체 등)의 발주현장에 협동연구 성과물의 적용 확대를 위하여 상호 협력한다.

**제9조 : 기술실시**

- (1) 독점적 전용실시권 : 농어촌연구원은 개발공법에 대하여, 아협은 개발재료에 대하여 각각 독점적 전용실시권을 가지며 독점적 전용실시권은 본 협동연구를 통해 얻어지는 개발공법의 국내 적용 및 개발재료의 국내 생산 또는 판매하는 행위 및 권리를 말한다. 단, 농어촌연구원 및 아협이 국외에서 실시하고자 하는 경우에는 사전에 별도 협의하기로 한다.  
(2) 기술실시 기간 : 기술실시 기간은 산업재산권 출원일로부터 10년까지로 한다.

**제10조 : 기술료 계산 및 지급**

- (1) 기술실시 대가 : 아협은 독점적 전용실시 기간 동안 발생한 개발재료 및 장치에 대한 순공사비의 3%를 연구투자비용 67:33(농어촌연구원:

아협)의 비율금액(이하 '기술료'라 한다)을 주관연구기관인 농어촌연구원에 지급한다.

- (2) 기술실시 기간 및 대가 변경 : 농어촌연구원과 아협은 기간 및 요율 변경이 필요한 경우 상호 협의하여 조정 할 수 있다.  
(3) 계산분기 : 기술료 계산은 독점적 전용실시 기간동안 개발재료의 매출액에 대하여 매년 1월1일부터 12월31일까지 1년 단위로 하여 당해 기술료를 익년도 3월말까지 농어촌연구원에 지급한다.  
(4) 매출액 계산 : 매출액 계산은 개발재료의 국내 판매분에 대한 부가가치세를 제외한 총매출액으로 한다.  
(5) 자료제출 : 아협은 농어촌연구원에 기술료 지급시 기술료 산출근거 및 아협의 대표자가 날인한 매출확인서, 결산보고서 1부를 제출하여야 한다.  
(6) 지급지연 : 아협이 기술료 저불을 정당한 사유 없이 지연하는 경우 농어촌연구원은 연체이자를 청구 할 수 있으며, 이때의 연체이자율은 연5%로 한다.  
(7) 지급중단 : 아협은 수요자의 결재지연, 부도 등으로 인하여 개발재료에 대한 물품대금을 지급받지 못하였을 경우 해당내역을 농어촌연구원에 서면 통보 후 해당부문에 대한 기술료 지급을 연기하거나 중단할 수 있다.  
(8) 기술료 확인 : 농어촌연구원은 아협의 기술료 지급시 확인이 필요하다고 판단되는 경우 담당직원 또는 대리인으로 하여금 관련자료를 확인하게 할 수 있으며, 이때 아협의 회계상의 오류 등으로 인하여 차액이 발생한 경우 아협은 그 차액을 즉시 농어촌연구원에 지급하여야 한다.

**제11조 : 기술개발**

- (1) 농어촌연구원과 아협은 필요한 경우 본 협동연구를 통해 개발된 기술을 개발할 수 있으며, 이 경우 농어촌연구원과 아협은 사전에 상호

협의하여 추진하여야 한다. 이때 개발된 기술의 소유는 농어촌연구원과 아협의 공동소유로 한다.

- (2) 아협은 제1항의 개발재료가 독점적 전용실시 기간중에 공급될시 본 계약에 의해 실시되는 것으로 하며 제10조의 기술료를 지급하여야 한다.

**제12조 : 협약의 변경 및 해지**

- (1) 이 협약은 당사자 일방의 요청이 있거나 필요한 경우에 협약사항을 당사자간의 서면합의에 의해 유효하게 변경할 수 있다.  
(2) 당사자 일방에게 다음 각 호에 의한 사유 발생시 상대방은 서면으로 통보함으로써 본 협약을 해지할 수 있다.  
가. 중대한 협약위반으로 연구개발의 계속 수행이 곤란하다고 판단될 때나, 협동연구개발 수행이 정지상태가 되어 소기의 연구개발 성과를 기대하기 곤란하거나 완수할 능력이 없다고 판단될 때  
다. 추가하는 연구개발의 목표가 타 연구개발의 수행에 의하여 성취되어 동 연구개발을 계속할 필요성이 인정되지 아니할 때  
라. 기타 중대한 사유로 인하여 동 연구개발을 계속할 수 없다고 인정될 때  
(3) 상기 제2항의 규정에 의한 해지의 원인을 제공한 당사자는 본 협동연구개발과 관련하여 취득한 각종 기술정보를 상대방에게 제공하여야 하며, 본 연구개발로 발생한 모든 이익에 대한 권리를 주장하지 못한다.

**제13조 : 신의성실의 의무**

본 협약이 목적하는 바를 상호 충족시기에 필요한 제반사항에 대하여 농어촌연구원과 아협은 신의 성실을 다하여 적극 협조하여야 하며, 협약을 성실히 이행하여야 한다.

**제14조 : 비밀유지**

농어촌연구원과 아협은 본 협동연구의 수행으로 발생하는 유무형의 성과물에 대한 비밀을 유지하여야 하며, 상호 동의 없이 외부에 공개하거나 제3자에게 제공할 수 없다. 이 의무는 그 인멸 및 파용자나 그 승계인을 통하여 사실상 위반됨이 없도록 하는 의무를 포함하며, 본 계약이 해제 또는 해지 되었을 경우에도 계속 유효하다.

**제15조 : 불가항력**

농어촌연구원과 아협은 본 협약을 이행함에 있어, 천재지변 또는 불가항력으로 발생하거나 기타 일방의 고의, 과실 또는 태만에 의하지 아니한 하자로 인하여 발생한 손실 또는 손해에 대하여도 그 일방은 상대방에게 책임을 지지 아니한다.

**제16조 : 손해배상**

농어촌연구원과 아협은 본 협약을 위반하여 어느 일방이 상대방에게 손해를 끼쳤을 때에는 이를 즉시 배상하여야 한다.

**제17조 : 명칭사용**

농어촌연구원과 아협은 본 협약과 관련하여 취득한 정보 및 상호 제공한 보고서나 문서의 일부 또는 전부에 대한 그 원본이나 복제, 복사물의 광고, 판매촉진, 기타 선전의 목적 및 정송상의 자료로 사용하지 아니함을 원칙으로 하되 상대방의 동의를 구한 경우에는 예외로 한다.

**제18조 : 해석 및 관할법원**

본 협약과 관련하여 혹은 생방의 의무이행과 관련하여 분쟁이나 이견이 발생하는 경우, 농어촌연구원과 아협은 이를 상호 협의하여 원만히 해결토록 노력하여야 하며 이러한 분쟁이나 이견이 원만히 해결되지 않을 경우에는 일반 상관례에 따르되, 본 협약과 관련하여 발생한 법적분쟁은 수원지방법원 인산지원을 관할 법원으로 한다.

제19조 : 협약의 효력

- (1) 본 협약서의 효력은 쌍방이 서명날인한 날로부터 유효하다.
- (2) 본 협약은 농어촌연구원과 아썸이 협동연구 및 기술실시에 관한 기본적인 사항을 규정한 것으로 향후 작성될 모든 문서에 대해 우선한다.

제20조 : 관계법령 준수

농어촌연구원과 아썸은 협동연구 및 기술실시 관련하여 관계법령 및 관련규정 등이 있는 경우 이를 준수하여야 한다.

제21조 : 기타사항

협약은 본 협약서 및 유첨서류, 계약기간중 농어촌연구원과 아썸이 상호 협의하여 작성된 서류일체로 하며, 본 협약을 증명하기 위하여 협약서 2통을 작성, 날인하여 각 1통씩 보관한다.

2010 년 4 월 29 일

박 해 성

농어촌연구원 원장

代) 농어촌환경연구소장 강창현

강 창 현


권 오 병

(주) 아썸 대표이사

권오병

4/29

## 부록 2. 실용신안 등록증 (1)



# 실용신안등록증

CERTIFICATE OF UTILITY MODEL REGISTRATION

<b>등록 제 20-0453403 호</b> <small>(PATENT NUMBER)</small>	<b>출원번호</b> <small>(APPLICATION NUMBER)</small>	제 2009-0016647 호
	<b>출원일</b> <small>(FILING DATE YY/MM/DD)</small>	2009년 12월 22일
	<b>등록일</b> <small>(REGISTRATION DATE YY/MM/DD)</small>	2011년 04월 21일


**고안의 명칭 (TITLE OF THE DEVICE)**  
 식물성 플랑크톤 및 동물성 플랑크톤의 배양조를 상하부에 컴팩트하게 구비한 플랑크톤 배양장치

**실용신안권자 (OWNER OF THE UTILITY MODEL RIGHT)**  
 등록사항란에 기재

**고안자 (DEVISER)**  
 등록사항란에 기재


위의 고안은 「실용신안법」에 따라 실용신안등록원부에 등록되었음을 증명합니다.  
(THIS IS TO CERTIFY THAT THE DEVICE IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE.)

2011년 04월 21일



특 허 청

KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE



실용신안등록증 발급일은 신청일로부터 제1회 심사일로부터 제1회 심사일로부터 14일 이내에 부여의 등록원부에 기재된 바와 일치하여야 합니다.

## 등록사항

실용신안 등록 제 20-0453403 호

(REGISTRATION NUMBER)

실용신안권자 (OWNER OF THE UTILITY MODEL RIGHT)

한국농어촌공사(135271-0\*\*\*\*\*)

경기 의왕시 포일동 487번지

주식회사 아셈(110111-2\*\*\*\*\*)

경기도 과천시 주암동 179-1 엘그린빌딩 2층

고안자 (DEVISER)

남귀숙(680923-2\*\*\*\*\*)

경기도 안산시 상록구 사동 1512 푸르지오6차 622-702

송영희(770624-2\*\*\*\*\*)

서울특별시 서초구 방배4동 대우디오빌 1916호

홍대벽(580102-1\*\*\*\*\*)

경기도 안산시 상록구 성포동 585-3 삼환빌라 101-302

배요섭(700227-1\*\*\*\*\*)

경기도 성남시 분당구 야탑동 탑마을 경남아너스빌 702동 1401호

박선구(700419-1\*\*\*\*\*)

인천 서구 불로동 328 퀸스타운 동성아파트 206-1704

권오병(550315-1\*\*\*\*\*)

서울특별시 강남구 개포동 658-1 개포6차 우성아파트 2-504

김민규(710217-1\*\*\*\*\*)


경기도 김포시 사우동 857 풍년마을진흥아파트 111동 403호

조인기(741217-1\*\*\*\*\*)

경기 남양주시 평내동 유진마젤란아파트 1301동 1403호



## 부록 2. 실용신안 등록증 (2)



**실용신안등록증**  
CERTIFICATE OF UTILITY MODEL REGISTRATION

<p>등록 제 20-0455558 호 (PATENT NUMBER)</p>	<p>출원번호 (APPLICATION NUMBER) 출원일 (FILING DATE YY/MM/DD) 등록일 (REGISTRATION DATE YY/MM/DD)</p>	<p>제 2010-0012526 호 2010년 12월 03일 2011년 09월 05일</p>
--	--	---

고안의 명칭 (TITLE OF THE DEVICE)  
호소 내 부유형 플랑크톤 배양장치

실용신안권자 (OWNER OF THE UTILITY MODEL RIGHT)  
등록사항란에 기재

고안자 (DEVISER)  
등록사항란에 기재

위의 고안은 「실용신안법」에 따라 실용신안등록원부에  
등록되었음을 증명합니다.  
(THIS IS TO CERTIFY THAT THE DEVICE IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE KOREAN  
INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE.)

2011년 09월 05일



특 허 청  
KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE



본 등록증과 실용신안 등록증은 「실용신안법」 제 20 조 제 10항 제 2호 제 2단 제 2호에 따라 10년간 효력이 발생하며, 등록원부에 기재된 바에 따라 효력이 발생합니다.

## 등록사항

실용신안등록제 20-0455558 호  
(REGISTRATION NUMBER)

실용신안권자 (OWNER OF THE UTILITY MODEL RIGHT)  
한국농어촌공사(135271-0\*\*\*\*\*)  
경기 의왕시 포일동 487번지

주식회사 아셈(110111-2\*\*\*\*\*)  
경기도 과천시 주암동 179-1 엘그린빌딩 2층

고안자 (DEVISER)

남귀숙(680923-2\*\*\*\*\*)  
경기도 안산시 상록구 사동 1512 푸르지오6차 622-702

홍대벽(580102-1\*\*\*\*\*)  
경기도 안산시 상록구 성포동 585-3 삼환빌라 101-302

송영희(770624-2\*\*\*\*\*)  
서울특별시 서초구 방배4동 대우디오빌 1916호

이의행(820127-1\*\*\*\*\*)  
대전광역시 중구 태평1동 260-21

배요섭(700227-1\*\*\*\*\*)  
경기도 성남시 분당구 야탑동 탑마을 경남아너스빌 702동 1401호

권오병(550315-1\*\*\*\*\*)  
서울특별시 강남구 개포동 658-1 개포6차 우성아파트 2-504

박선구(700419-1\*\*\*\*\*)  
인천 서구 불로동 328 퀸스타운 동성아파트 206-1704

김민규(710217-1\*\*\*\*\*)  
경기도 김포시 사우동 857 풍년마을진흥아파트 111동 403호

조인기(741217-1\*\*\*\*\*)  
경기 남양주시 평내동 유전마켈란아파트 1301동 1403호



## 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

연구과제명	
발 행 일	2011. 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.	