

발 간 등 록 번 호

11-1543000-000711-01

농업용저수지 녹조방지를 위한  
천적생물 적용기술 실규모  
실용화연구(최종)

Practical application of algal bloom control technique using  
natural predators in agricultural reservoir (Final)

2014. 12

농림축산식품부  
한국농어촌공사



# 제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “농업용저수지 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술  
실규모 실용화연구(최종)” 과제의 보고서로 제출합니다.

2014 년 12 월 31 일

주관연구기관명 : 한국농어촌공사  
연구책임자 : 남귀숙  
연구원 : 홍대벽, 이의행  
신재훈, 김미리내

공동연구기관 : 경희대학교  
연구책임자 : 장광현  
연구원 : 서동일, 고순미  
Nakano Sho

협동연구기관 : (주) 아쌈  
연구책임자 : 권오병  
연구원 : 박선구, 김민규  
권동민







## 요 약 문

1. 과 제 명 : 농업용저수지 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술  
실규모 실용화연구(최종)

2. 연구기간 : 2013년 1월~2014년 12월(총 2년 중 최종년도)

### 3. 연구의 배경 및 필요성

- 1만 7천여 농업용저수지 및 담수호에서 부영양화로 인한 녹조발생이 점차 심화됨에 따라 녹조 사전예방 및 관리에 대한 다각적 모색이 이루어지고 있음
- 지금까지의 녹조관리는 주로 사후방제 위주였으며, 비용투자 대비 비효율적이라는 이유로 최근에는 사전예방에 관심을 가지게 됨
- 사전예방 대책은 녹조발생으로 인한 경제적 손실을 방지하고, 생태적 안전성 및 국민 건강성 고려 차원에서 효과적임
- 인, 질소 저감 대책을 제외한, 생태적으로 건강하고, 안전하며, 지속 가능한 효과를 나타내는 사전예방 대책의 개발은 향후 녹조관리에 중요한 기술로 시의적절함
- 녹조원인생물이 수생태계의 1차 생산자인 식물플랑크톤이므로 녹조 제어를 위한 생태적 접근은 녹조관리의 근원적 대책으로 중요함
- 본 연구에서 개발하고자 하는 기술은 생태계 먹이구조 개선을 통한 생물조절(Biomanipulation)의 한 방법으로 포식자를 이용한 하향 조절(Top-Down control)을 근간으로 함
- 즉, 호소생태계내에서 식물플랑크톤을 포식하는 동물플랑크톤의 녹조 제어 능력에 착안한 것으로 녹조발생이 심각한 농업용저수지의 손상된 생태구조를 정상화시킴으로 녹조를 제어하는 방법임
- 본 연구의 기술은 호소내 자연상태에서 식물플랑크톤과 끈임 없이 경쟁하며 식물플랑크톤을 포식하는 동물플랑크톤의 녹조제어 능력에

### 착안한 것임

- 이는 생태계내의 먹이망 기능을 강화하여 녹조발생을 억제하는 방법으로 지속성과 선택성이 높으며, 이후 상위 먹이망으로 연결되어 2차 오염의 우려가 전혀 없을 뿐만 아니라 생태먹이망을 정상화시켜, 건강성을 회복하는 장점을 가짐
- 따라서, 녹조발생이 심각한 농업용저수지에 녹조를 효과적으로 제어하는 천적생물 적용기술을 이용하여 건강하고 안전한 수환경 보전기술의 완성이 필요함
- 본 기술은 2010년부터 2012년까지 「농업용수원의 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 개발」 과제를 통해 농업용저수지에 적용가능한 천적생물을 분리, 확보하고, 이를 녹조발생수역에 대량 살포할 수 있는 10톤 및 30톤 배양규모의 천적생물 배양장치를 개발하여 최적화하였으며, 녹조발생이 심각한 저수지에 직접 살포하여 농업용수 수질기준이하의 녹조제어 효과를 확인한 바 있음
- 본 연구에서는 기 개발된 pilot 규모의 천적생물 배양장치를 실규모로 확대 적용하여 실규모 천적생물 적용 모델 및 기술 개발, 최적 설계/관리 시스템을 확립하여 녹조발생 우려가 높은 저수지의 녹조제어 기술로 즉시 적용할 수 있는 완성 모델을 제시하고자 함

## 4. 주요연구내용

### 4.1 연구목적

- 농업용저수지의 녹조방지를 위한 실규모 천적생물 적용 모델 개발 및 기술완성
- 실규모 천적생물 배양장치의 경제성을 최대한 고려한 최적 설계/관리 방안 확립
- 수질개선 방안과 연계한 안전하고 효과지속적인 사업화 방안 제시

### 4.2 1차년도(2013년)

- 천적생물 배양장치의 실규모 현장적용



- 녹조원인 생물 및 자연 천적생물 분포특성 분석
- 실규모 배양장치 현장설치
- 실규모 배양장치 시험가동
- 배양장치 운영 및 현장살포
  - 천적생물 종주공급 및 거동분석
  - 천적생물 배양장치 대량배양 및 시기별 운영
  - 천적생물 현장살포 및 효과 증대방안
- 녹조제어 효과 분석 및 연중 활용방안
  - 녹조제어 효과분석
  - 연중 운영 및 활용방안
- 녹조제어 효과향상 및 안정성확보를 위한 생물조절 연계방안
  - 녹조제어 효과향상을 위한 생물조절 연계방안

#### 4.3 2차년도(2014년)

- 배양장치 운영 및 현장살포
  - 천적생물 종주공급 및 거동분석
  - 천적생물 배양장치 대량배양 및 시기별 운영
  - 천적생물 현장살포 및 효과 증대방안
- 녹조제어 효과 분석 및 연중 활용방안
  - 녹조제어 효과분석
  - 연중 운영 및 활용방안
- 녹조제어 효과향상 및 안정성확보를 위한 생물조절 연계방안
  - 녹조제어 효과향상을 위한 어류 조절방안 분석
- 실규모 천적생물 배양장치의 최적 설계/관리 모델 개발
  - 실규모 배양장치 최적모델 제시
  - 최적 설계/관리 시스템 개발
- 수질개선연계 및 사업화방안 제시
  - 배양장치의 타공법 비교 적용타당성 분석
  - 수질개선연계 및 사업화방안 제시

## 5. 연구결과 요약

- 연구대상지인 초대저수지는 저수용량 100만톤이상, 축산과 농경에 의한 오염이 심각하여 녹조발생이 빈번한 전형적인 중규모 농업용저수지로 녹조제어를 위한 표본으로 적합함
- 천적생물 적용기술의 완성을 위해 실규모 수준인 100톤 규모의 천적생물 배양장치를 현장에 설치하고 최적 적용방안을 제시함
  - 천적생물 배양장치 적용 원리는 녹조발생 구역인 초대저수지에서 물을 취수하여 자연분포 천적생물을 선택분리, 배양하여 증식, 방류함으로써 구역의 녹조를 포식 제거하는 하향의 생물조절(Top-down control)임
  - 실규모의 천적생물 배양장치는 시설안전성이 높은 육상형 장치로 적용하였으며, 천적생물 장치의 규모는 배양조 기준 10 m<sup>2</sup> 규모 6계열과 20 m<sup>2</sup> 규모 2계열로 설치함
  - 주요공정은 저수지 원수유입(양수), 선택분리(원수분리조), 먹이생물 배양, 천적생물 배양, 현장살포로 이루어짐
  - 2013년 4월~5월, 지반이 약한 홍만수면 부지에 스테인레스 재질로 경관을 고려한 배 모양의 천적생물 배양장치를 설치하였으며, 지반강화를 위한 기초공사를 실시하고 주요장치는 공장제작 후 현장 조립, 제작하여 설치 완료함
  - 2013년 운영결과 문제점을 파악하고, 2014년 기능개선을 위한 보수보강을 실시함
  - 천적생물 적용효과 증진을 위해 간이침강장치와 Cage, 인공식물섬을 도입하여 효과를 분석하고, 최적 적용방안을 모색함
- 실규모 배양장치의 기능을 개선한 최적의 적용모델과 설계인자를 제시하고, 적정 설계규모를 제시함
  - 최적모델의 경우 하우스형의 단층구조로 온도조절과 포식생물에 대한 유지관리가 용이하게 함
  - 최적 설계인자는 선행연구를 통해 분석된 천적생물(물벼룩)의 Chl-*a* 저감량을 기준으로 해당저수지의 Chl-*a* 농도를 목표농도(< 35 mg/m<sup>3</sup>)로 저감시 저수지 용량에 따른 배양장치 적정규모를 계산함
  - 최적 설계인자식에 따른 초대저수지의 천적생물 배양장치 적정규모는 유입오염원이 지속적이고, 녹조발생정도가 심해 200톤 규모이상이 필요한 것으로 나타남
- 연구대상지인 초대저수지의 물리, 화학 생물학적 환경 분석 결과는 다음과 같음



- 관개기와 집중강우기에 저수율 변동이 컸으며, chemical oxygen demand, total nitrogen, total phosphorus 등은 모든 시기에 농업용수 기준인 환경기준 IV등급을 초과하고 있음
  - 식물플랑크톤 현존량은 평균  $5.7 \times 10^4$  cells/ml로 높은 수준을 유지하였으며, 녹조 발생 원인종은 *Anabaena* sp., *Oscillatoria* sp., *Microcystis* sp. 등 남조류가 대부분이었음
  - Chlorophyll -a는 평균 146.4 mg/m<sup>3</sup>로 전체시기의 87% 이상이 100 mg/m<sup>3</sup>을 초과하여 계절변화에 상관없이 높은 농도를 보였으며, 과영양상태(Hyper-eutrophy, TSI > 70)로 나타남
- 본기술에서 개발한 천적생물 종주는 *Daphnia similoides*, *Daphnia galeata* 및 *Simocephalus ventulus* 3종으로 저수지에서 분리 배양하여 현장에 도입하였고, 2014년의 경우 천적생물 배양장치를 2월부터 가동하여 천적생물 개체군 밀도를 효과적으로 증가시켜 4월부터 살포가 이루어짐
- 천적생물 배양장치의 최대 천적생물 개체군 밀도는 878 inds./L의 *D. galeata*로 높게 나타났으며, *S. ventulus*는 534 inds./L, *D. similoides*는 256 inds./L로 증가하는 것으로 나타남
  - 지속적인 높은 살포량으로 인해 저수지 내에 서식하는 천적생물의 밀도가 현저히 증가하였으나, 여름철의 경우 높은 수온 등의 영향으로 천적생물 배양장치 내 개체군 밀도가 낮게 유지되어, 수온의 조절, 천적생물 포식자 유입방지 등이 필요한 것으로 나타남
- 천적생물 현장살포에 따른 녹조제어 효과는 다음과 같음
- 2013년에는 6월 배양장치 가동 후 총  $46.9 \times 10^6$ 개체의 지각류가 살포되었으며, 천적생물 안정화와 본격적인 증가가 이루어진 9월~10월 이후 *D. galeata*가 최대  $10.0 \times 10^6$ 개체/회 살포됨
  - 2014년은 2월부터 배양장치를 가동하여 연간 총  $193.5 \times 10^6$ 개체가 살포되었으며, 1회 살포시 살포개체수는 4월  $1.0 \times 10^6$ 개체/회 이상, 5월  $20.0 \times 10^6$ 개체/회로 2013년 1회 최대 살포량보다 2배 이상 높게 나타나 천적생물 배양장치의 배양성능이 개선됨을 확인함
  - 일주일 간격의 살포기간 중 3~4일 간격으로 배양시설 내의 천적생물 밀도를 조사한 결과, 모든 천적생물은 일주일 간격의 살포로 인한 유출의 영향을 받지 않고 지속적으로 증가하여 개체군 밀도가 회복되는 것으로 나타나, 천적생물 배양시설은 증식된 천적생물을 일주일 간격으로 지속살포가 가능한 것으로 판단됨



- Cage 적용결과 Cage에서 추가 증식하여 살포된 천적생물 *S. ventulus*의 살포량은 2013.11.11에 최대  $2.1 \times 10^6$ 개체가 살포되었으며, Cage 내 개체군 증가율은 0.37로 나타나, 일주일간 33배로 효과적임
  - 천적생물 은신처로서 인공식물섬 패치를 도입한 결과 설치하지 않은 지점에 비해 서식밀도가 증가하여 그 효과가 확인되었으며, *D. galeata*는 인공식물섬 P1지점에서, *S. ventulus*는 인공식물섬 P2지점에서 상대적으로 높은 개체군 밀도를 보였고, 규모별 적용결과 50m<sup>2</sup>가 가장 효율적인 적정 면적임을 보임
  - 천적생물 현장살포에 따라 Chl-*a*는 2013년에 평균 36.6%, 2014년에 평균 65.3%의 제거효과를 보였으며, 제거효율의 향상을 확인하였음
  - 살포한 천적생물이 수변 습지대에서 높은 서식율을 보였으며, 장기살포에 따라 살포 천적생물인 *D. galeata*와 *S. ventulus*의 분포공간이 확대되고 있는 것을 확인함
  - 장기살포에 따른 천적생물 정착효과를 보면, 2013년에는 저수지내에서 *S. ventulus*가 거의 발견되지 않았으나, 2014년에는 저수지 내 천적생물의 개체군 밀도가 큰 폭으로 증가하였으며, 모든 조사 지점에서 분포하는 것으로 확인되어 정착효과가 나타남
- 2013년 6월 이후 천적생물과 육식어류를 도입하고 초대저수지의 생태계 먹이구조 변화와 생물조절 효과를 분석함
- 초대저수지의 어류상은 천적생물 주요 포식자인 잉어과 어류가 극우점하여 이들 개체군을 조절하기 위해 최상위포식자로 메기 치어를 투입하는 생물조절 연계방안을 도입함
  - 메기치어 투입 후 16개월(486일) 경과 후 평균 980 g이 증가한 성어가 관찰되었으며, 안정동위원소 분석 결과, 투입된 메기는 피라미와 치리를 섭식하는 것으로 나타나, 천적생물 투입과 육식 어류를 이용한 녹조제어가 효과적일 것으로 기대됨
  - 안정동위원소 분석결과, 살포 천적생물인 *S. ventulus*는 발생한 녹조를 주로 섭식하는 것으로 나타나 녹조발생수역의 녹조저감과 물질순환에 있어서 중요한 천적생물로 분석됨
  - 호소의 활발한 물질순환으로 과잉 성장하는 육식어류(메기)는 지역주민으로 구성되는 수질관리 협의체가 중심되어 유입 오염총량에 해당되는 잉여바이오매스를 포획제거하고, 발생수익은 수질관리 비용으로 환원하여 지속가능한 호소관리체계가 완성됨



- 생태계 먹이구조를 개선하기 위한 본 기술은 최소 2~3년의 적용기간이 필요하지만, 식물플랑크톤 - 천적생물 - 어류로 안정화되는 먹이구조 정상화로 자생적 제어가 가능함
  - 100톤 규모의 실규모 천적생물 배양장치를 2013년 6월 초대저수지 홍수면 부지에 설치하여 1년 4개월 동안 운영한 결과, 천적생물 배양성능 및 녹조제어, 호내 정착효과가 관찰되고 있으며, 생태적 관리방안인 만큼 최소 2~3년의 안정화기간을 거친 후 자생적 제어가 가능할 것으로 기대함
  - 초대저수지 수질관리협의회에서 주도적으로 시행한 2주간의 잉여 어류포획 예비 타당성 조사결과, 메기를 포함한 104 kg의 어류가 포획 제거되었으며, 발생 수익은 약 187만원으로 추정되는 등 생태적 관리와 연계하여 지역주민단체 주도의 수질관리 체계 활성화가 가능한 것으로 사료됨
- 천적생물 적용기술의 수질개선연계방안을 모색한 결과 녹조제어와 함께 COD, TP의 제거효율도 높게 나타나 수질개선사업의 침강지내, 인공습지 후반부 등의 적용으로 시너지 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료됨
- 천적생물 적용기술의 사업화 방안을 위해 녹조발생에 취약한 농업용수 수질 측정망 저수지를 18개소를 선별하여 수환경, 동식물플랑크톤 조성 등에 근거하여 타당성을 분석한 결과 TP농도가 수질기준을 만족함에도 Chl-*a* 농도가 높은 저수지를 적용가능 지구로 판단하여 제안하였으며, 동식물플랑크톤 분포특성을 근거로 사업화 규모 및 방안을 제시함
- 최근 3년간(2012~2014) 농업용수 수질측정망 data의 Chl-*a*, COD, TP 분석결과와 수질개선사업지구, 중점관리저수지 지정여부 등을 종합적으로 검토하여 천적생물의 적용 가능성이 높은 사업화 지구 6개 저수지를 선별, 적용방안을 제시함

## 6. 기대효과 및 실용화 방안

### 6.1 기대효과

- 녹조가 심각한 농업용저수지의 비정상적 생태계 구조를 개선하여 녹조를 제어하는 자연 생태적이며, 건강한 녹조제어 기술 완성



- 생물조절기술의 적용으로 수질개선은 물론 건강한 호소관리 및 생태적 가치 상승
- 지역주민 협의체인 수질관리협의회와 협력 체계 구축 및 조직 활성화에 기여
- 4대강 등 국가전역 녹조 문제 대응능력 강화 및 사전예방 체계 확보

## 6.2 실용화방안

- 녹조 발생이 우려되는 중규모 이상 농업용저수지의 녹조 제어 기술로 실적용
- 녹조문제가 심각한 농업용저수지에 즉시 투입, 활용
- 손상된 생태구조를 가진 저수지의 생태건강성 증진 사업에 활용
- 내수면 자원화 사업의 주요 먹이원으로 어족자원의 활성화 및 구조 개선사업에 활용





## SUMMARY

1. **Subject** : Practical application of algal bloom control technique using natural predators in agricultural reservoir(Final)
2. **Research Period** : January, 2013~December, 2014
3. **The background and necessity of research**
  - Most of 17,543 agricultural reservoirs are old and shallow, and organic substances have been accumulated for a long time. The reservoirs are experiencing eutrophication and consequent ecosystem disturbances caused by algal blooming due to etrophication.
  - Management strategy has been focused on post-bloom reduction, however, recent strategy is being shifted to prevention of bloom based on the view point of efficiency considering cost/benefit.
  - Prevention strategy is more efficient because of reducing economic loss, securing ecological safety and human health management.
  - Development of sustainable and eco-friendly management method excluding phosphorus and nitrogen controlling is necessary for bloom control in reservoirs.
  - Since major components of water bloom are primary producers, ecological approach is important for fundamental contermeasures for water bloom controlling in water bodies.
  - The present study is focusing on the biomanipulation method based on Top-Down control which improves food web structure of eutrophicated systems.



- The biomanipulation methods recover and use the grazing abilities of zooplankton which was suppressed by eutrophication.
- The present research develops the useful method focusing on controlling ability of secondary producers playing as main grazers in reservoirs.
- This method is sustainable and efficient by use of improving the food web structure and the major function of zooplankton, and consequently improve the energy flow from the primary producers to top predators, and focuses on the recovery of sound ecosystem structure and function.
- To complete the development of method, it is necessary to apply the present biomanipulation method to eutrophicated agricultural reservoirs and secure the sound water environments.
- This application can improve the function of food web and prevent the occurrence of water bloom selectively and consistently, and normalize the ecological food web of the system and ecosystem health without secondary pollutants.
- For the application of the methods to real systems, it is necessary to complete the several main procedures, establishment of superior grazers(predators), techniques for maintaining biomass of predators in the fields, and optimum management plan.
- The present technique is developed through the previous project [development of application technique of predators to prevent water bloom in agricultural reservoirs] by set up the 10-tons and 30-tons culture facilities for the discharging increased predators to the reservoir using the applicable predators that separated and incubated, and its effects on decrease the water bloom abundances were observed from the target reservoir.



- The present research applied the previously developed pilot culture facility to agricultural reservoir with larger size, and development of realscale predator application system and optimum design/management system, and applicable completed technique will be suggested.

## 4. Contents and Scope

### 4.1 Research objectives

- Development and completion of applicable realscale predator techniques for algal bloom prevention in agricultural reservoirs
- Suggestion of optimum design/management of realscale predator culturing facility based on economic feasibility
- Suggestion of industrialization of safe and consistent bio-manipulation method connecting water quality improvement.

### 4.2 First year(2013)

- Application of mass culture facility with practical size to the field.
  - Analysis of characteristics of algal bloom organisms and natural predators distribution
  - Practical size facility application set up and test application.
- Application of culture system and introduction of natural predators to the reservoir
  - The culture device operating and field discharge
  - Mass culture of natural predators in the field and seasonal management.
  - Development of efficient discharge and water bloom controlling
- Analysis of water bloom controlling effects and strategy for consistent application
  - Analysis of algal bloom controlling effects
  - Consistent application throughout the year



- Strategy for connecting biological control for high efficiency and ecological safety
  - Application of biological control for high efficiency of algal bloom control.

#### 4.3 Second year(2014)

- The culture device operating and field discharge
  - Supply and behavior analysis of predator
  - Mass culture of natural predators in the field and seasonal management.
  - Development of efficient discharge and water bloom controlling
- Suggestion of industrialization of safe and consistent biomanipulation method connecting water quality improvement.
  - Estimation of efficiency and applicability
  - Corporative application with water quality improvement and commercialization

### 5. Results and Conclusions

- Chodea reservoir is typical middle sized agricultural reservoir receiving the pollution of agriculture and livestock, and proper sample for the application of algal bloom controlling method.
- The scale for the application were determined based on the article 10 m<sup>3</sup> predators organisms cultured family size 6 and size 20 m<sup>3</sup> two series, a total of 100 m<sup>3</sup> scale
  - Contents of the culture facility are using the eutrophicated reservoir water, and separate and culture the natural predators, and discharge increased predators to reduce algal biomass using Top-down control.
  - Main components of the facility are inflow of reservoir water, selective separation, culture of food for predator, culture of predator, and discharge to reservoir
  - The facility(boat-shape) was set up at the littoral area of Chodae Reservoir, and basement construction for supporting the facility was carried out on the land. Main parts were produced partly, and moved to the field and assembled at the target area



- Through the test application in 2013, the problems during the application were monitored and main function was improved in 2014.
- For higher efficiency, cage and artificial island were applied to the reservoir, and final applicable method was estimated.
- Realscale facility and function were improved and final applicable model and design for the management was suggested, and proper size of design was estimated
  - Optimum model is house-type one layer structure with temperature control and management of predator
  - Optimum design components are size of facility based on the suggestion from the previous research(based on the chl. a reducing ability of predator species) setting at final concentration of chl. a as 35 mg/m<sup>3</sup>.
  - Based on suggested optimum design components considering proper size of facility, larger than 200 tons-size facility is necessary for Chodae Reservoir because of consistent inflow of pollution sources from the catchment area, and serious algal bloom in the system.
- Target reservoir, Chodae Reservoir's physical, chemical and biological characteristics are
  - Water reserve rate was dynamically changed during the irrigation period and rainy season, and all water quality parameters including COD, TN and TP exceeded the environmental standard level IV.
  - Biomass of phytoplankton was average  $5.7 \times 10^4$  cells/mL, and bloom occurred frequently with dominances of cyanobacteria such as *Anabaena* sp., *Oscillatoria* sp., and *Microcystis* sp.
  - Average Chl-*a* concentration was 146.4 mg/m<sup>3</sup>, more than 87% of period showed Chl-*a* concentration of higher than 100 mg/m<sup>3</sup>, regardless of seasons, and the trophic status of the reservoir was hyper-eutrophic(TSI > 70).
  - The used natural predator species in the present research were *Daphnia similides*, *Daphnia galeata* and *Simocephalus ventulus*, and culture facility was initiated from February in 2014, and the first discharge of increased predator to the reservoir was made in Aril.
  - Maximum population density of predator was 878 inds./L for *D. galeata*, and *S. ventulus* and *D. similoides* showed maximum densities of 534 and



256 ind./L, respectively.

- Increased discharge amount of predators in 2014 induced the increase of predator densities in the reservoir, however, their densities were maintained low during summer because of high water temperature and possible negative impacts of presence of aquatic insects in the culture tanks of facility.
  - Proper treatment for lowering water temperature and prevent aquatic macroinvertebrates are necessary
- Effects of discharge of predator to the reservoir are;
- In July 2013, total of  $46.9 \times 10^6$  individuals of predator were introduced to the reservoir since April, and average predator discharge density per discharge event was higher than  $1.0 \times 10^6$  individuals/discharge in April and  $20.0 \times 10^6$  individuals/discharge in May. The discharge density was two times higher than that in 2013, and suggesting the improvement of culturing facility was successfully made.
  - Discharge of predators was carried out one a week, and the density of predators in culturing facility was checked 3~4 days interval, and the one week interval of discharge is proper without loss of population density of predators in the culturing facility. The population was recovered after the discharge within a week, and consistent discharge of maximum predator density is possible.
  - The application of cage showed that consequent growth rate of *S. ventulus* was 0.37, and suggested that cage is efficient in increasing certain predators in the system.
  - The application of artificial island as refuge for discharged predators showed that the density collected near the artificial island was higher than the places without artificial island, and proper area of the island was 50 m<sup>2</sup>.
  - The densities of predators were higher in the littoral vegetation area, and the habitats for *D. galeata* and *S. ventulus* are enlarged due to the consistent discharge of predators.
  - Long period of discharge showed that the density of *S. ventulus* of which density was extremely low during 2013, was dramatically increased in 2014, and their distribution was confirmed from the most of survey points in 2014.
- The impact of introduction of piscivorous fish as food web



cascade components in the reservoir was analyzed.

- Fish community of Chodae Reservoir was dominated by Cyprinidae, and *Silurus asotus* was introduced to control planktivorous fish.
  - Juveniles of *S. asotus* was introduced in 2013, and 16 months later, adult fish with average 980 g biomass increase was confirmed, and stable isotope analyses indicated that they mainly consumed pale chub and *Hemiculter eigenmanni*, and their consumption on planktivorous fish can work as biomanipulation components.
  - Food web analysis using stable isotope of carbon and nitrogen indicated that *S. ventulus* can consume algal biomass as their food, and it has been suggested that *S. ventulus* plays an important role in matter cycling in eutrophicated reservoir.
  - For consistent impact of biomanipulation impact, local people can collect over-growing fish amount from the reservoir, and improve the function of food web of eutrophicated reservoir. The income by catching over-growing fish can be used as management cost for sustainable management of reservoir water quality and ecosystem.
- The present method improving the food web structure and function of reservoir requires minimum 2~3 years application, however, once stabilized, sustainable management using food web function connecting phytoplankton-predator-fish matter cycling.
  - 100 ton size realscale facility was set up in July 2013 at Chodae Reservoir, and one year 4 months application suggested that efficiency of culture facility and controlling effects of algal bloom, and stabilization of predator in the reservoir. This ecological management requires minimum of 2~3 years of stabilization for complete application.
  - Application of predators induced reduction of COD and TP as well as algal biomass decrease, and synergy effects with sedimentation facility and artificial wet land application to the eutrophicated reservoirs.
  - For further application of biomanipulation using predator to other reservoirs, 18 reservoirs were selected, and water quality and



species composition of phytoplankton and zooplankton were analyzed. Despite TP concentration satisfy the water quality standard but high Chl-*a* concentration is maintained reservoirs are possible target reservoirs. Based on characteristics of plankton community distribution and composition, proper application scale and general plan are suggested.

## 6. Expected effects and commercialization plan

### 6.1 Expected effects

- Application of successful eco-friendly algal bloom management method which can improve water quality and bloom problem through normalization of eutrophicated ecosystem structure and function.
- Obtaining ecologically sound reservoir with high water quality through the application of biomanipulation
- Suggestion of realscale application of algal bloom management method and transmission of new management tool to operating departments.
- Preparing the advanced prevention for algal bloom and improving ability to react against algal bloom occurrences in 4 major rivers

### 6.2. Plan for actual application to agricultural reservoirs

- Application as algal biomass management method to middle-sized reservoir susceptible to algal bloom occurrence.
- Immediate application to highly eutrophicated reservoirs experiencing algal bloom
- Application to recovery of damaged reservoir ecosystems to ecosystem health
- Increase activity of inland fisheries through high value fisheries resource development and improvement of inland fisheries systematic structure considering local communities



# 차례



<b>제1장 서론</b> .....	<b>1</b>
제1절 연구배경 및 필요성 .....	3
제2절 연구목적 및 추진체계 .....	6
1. 연구목적 .....	6
2. 추진전략 및 추진체계 .....	7
제3절 연구사 .....	10
1. 농업용 호소의 녹조제거 기술 및 적용사례 .....	10
2. 생물조절을 이용한 녹조제어 연구 동향 .....	13
3. 포식성 천적생물을 이용한 녹조 제어 기술 연구 현황 .....	19
 <b>제2장 본 론</b> .....	 <b>25</b>
제1절 연구내용 및 방법 .....	27
1. 실규모 천적생물 배양장치 현장 적용 .....	27
2. 천적생물 배양장치 운영 및 현장살포 .....	29
3. 녹조제어 효과 분석 및 연중 활용방안 .....	33
4. 생물조절 연계방안(먹이연쇄) .....	39
5. 농업용저수지 수질개선 연계 및 사업화방안 .....	42
제2절 실규모 천적생물 배양장치 현장 적용 .....	44
1. 연구대상지 선정 .....	44
2. 실규모 천적생물 배양장치 기본계획 및 설계 .....	46
3. 실규모 천적생물 배양장치 세부 구성 및 현장 설치 .....	55
4. 천적생물 배양장치 기능개선 .....	65
5. 천적생물 배양장치 최적규모 산정식 및 설계인자 .....	70
6. 천적생물 배양장치 최적 설계디자인/운영/관리 시스템 .....	74



제3절 천적생물 배양장치 운영 및 현장살포 .....	77
1. 천적생물 종주 및 자연분리 종의 배양특성 및 공급 .....	77
2. 천적생물 배양장치내 천적생물 배양특성 .....	80
3. 천적생물 현장살포 및 효과증대방안 .....	89
4. 천적생물 배양장치 최적 운영 및 효율적 살포방안 .....	101
제4절 녹조제어 효과 분석 및 연중 활용방안 .....	103
1. 초대저수지의 수환경 및 녹조발생 특성 .....	103
2. 녹조제어 효과 .....	122
3. 천적생물 배양장치 연중 활용방안 .....	131
제5절 생물조절 연계방안(먹이연쇄) .....	137
1. 초대저수지 생태계 먹이구조 및 물질순환 .....	137
2. 어류를 이용한 생물조절 연계방안 .....	146
제6절 농업용저수지 수질개선 연계 및 사업화방안 .....	154
1. 천적생물 적용기술의 타공법 비교 적용타당성 분석 .....	154
2. 농업용저수지의 수질개선 연계방안 .....	155
3. 사업화방안: 천적생물과 어류를 이용한 생태적 관리방안 .....	157
<b>제3장 결 론 .....</b>	<b>177</b>
제1절 실규모 천적생물 배양장치 현장 적용 .....	179
제2절 천적생물 배양장치 운영 및 현장살포 .....	180
제3절 녹조제어 효과 분석 및 연중 활용방안 .....	181
제4절 생물조절 연계방안 .....	182
제5절 농업용저수지 수질개선 연계 및 사업화방안 .....	183
연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도 .....	185
연구개발결과의 활용계획 .....	187
참 고 문 헌 .....	189
연 구 참 여 자 .....	199

# 표 목 차

(표 1.1) 국내 연구사례 및 기술의 특징 .....	18
(표 2.1) 수질분석 항목 및 방법 .....	34
(표 2.2) 실규모 천적생물 배양장치 적용 대상 후보지 .....	44
(표 2.3) 천적생물 배양장치 설계인자 .....	51
(표 2.4) 유입유량 산정값 .....	52
(표 2.5) 원수분리조 설계요소 및 부대시설 .....	53
(표 2.6) 식물플랑크톤 배양조 설계요소 및 부대시설 .....	53
(표 2.7) 천적생물 배양조 설계요소 및 부대시설 .....	54
(표 2.8) 천적생물 배양장치 각부 명칭, 구성요소 및 기능 .....	55
(표 2.9) 공정별 주요 설비 .....	58
(표 2.10) 기존 펌프 사양과 업그레이드 펌프 사양 비교 .....	68
(표 2.11) Chl-a 저감량과 저수지 용량에 따른 배양장치 규모 산정 .....	72
(표 2.12) 최적 설계요소 및 최적 설계인자 .....	73
(표 2.13) 천적생물 배양장치 점검 리스트 .....	75
(표 2.14) 100 m <sup>3</sup> 천적생물 배양장치 운영사항 .....	76
(표 2.15) 초대저수지 현장 살포에 사용된 천적생물의 종류와 특징 .....	77
(표 2.16) 천적생물 종주 배양 특성 .....	78
(표 2.17) 종주 유지 배양 및 현장공급을 위한 실내 대량 배양 조건 .....	79
(표 2.18) 2014년 천적생물 종별 월 총 살포량 .....	90
(표 2.19) 간이 침강장치의 수질개선효과 .....	94
(표 2.20) 초대저수지의 시기별 식물플랑크톤 우점종 및 우점율 .....	108
(표 2.21) 초대저수지 동물플랑크톤 시기별 종 조성 분포율(%) .....	110
(표 2.22) 초대저수지의 어류 종조성 및 생태특성(2013, 투망&족대) .....	115
(표 2.23) 초대저수지의 어류 종조성 및 생태특성(2014, 투망&족대) .....	115
(표 2.24) 초대저수지의 어류 종조성 및 생태특성(2014, 외통발) .....	116



(표 2.25) 본 기술의 우수성 .....	133
(표 2.26) 육식어종 선정 기준 .....	149
(표 2.27) 도입한 메기의 시기별 생체량 변화 .....	151
(표 2.28) 잉여수산자원 포획 .....	152
(표 2.29) 녹조제어기술 비교 .....	154
(표 2.30) 녹조제어기술 경제성평가 .....	155
(표 2.31) Chl-a, COD, TP 살포 전, 후 농도변화 및 수질개선 효율 .....	156
(표 2.32) 동식물플랑크톤 특성에 따른 후보저수지 시설 재원 .....	157
(표 2.33) Chl-a, COD, TP 기준 초과 저수지 .....	158
(표 2.34) 후보지의 총인(TP)과 Chl-a의 상관관계 .....	159
(표 2.35) 동식물플랑크톤 특성에 따른 후보저수지의 시기별 식물플랑크톤 우점종 .....	160
(표 2.36) Chl-a, TP 농도에 근거한 분류 및 특성 .....	163
(표 2.37) 구분 I 에 해당하는 측정망 저수지 .....	164
(표 2.38) 최근 3년간 Chl-a 높은 측정망 저수지 .....	165
(표 2.39) 순성저수지 천적생물 적용방안 .....	166
(표 2.40) 전대저수지 천적생물 적용방안 .....	167
(표 2.41) 용풍저수지 천적생물 적용방안 .....	168
(표 2.42) 신구저수지 천적생물 적용방안 .....	169
(표 2.43) 효촌저수지 천적생물 적용방안 .....	170
(표 2.44) 기흥저수지 천적생물 적용방안 .....	171

## 그림목차

<그림 1.1> 연차별 연구목표 .....	6
<그림 1.2> 국내외 전문가 활용 .....	7
<그림 1.3> 국제 학술 세미나 개최 .....	8
<그림 1.4> 생태적 녹조관리 워크숍 개최 .....	8
<그림 1.5> 연차별 연구 추진 체계 .....	9
<그림 1.6> 농업용저수지의 수온과 총인 농도가 Chl-a 증가에 미치는 영향 · 10	
<그림 1.7> 호소생태계의 먹이망과 호소내 층위별 생물활동 .....	11
<그림 1.8> 녹조방지기술과 현장적용 타당성 .....	13
<그림 1.9> 수중생태계의 영양구조와 생물관리의 구분 .....	14
<그림 1.10> 천적생물을 이용한 수질 개선의 예 .....	16
<그림 1.11> 수중생태계의 영양구조와 생물관리의 구분 .....	17
<그림 1.12> 건강한 생태계와 부영양화 생태계의 플랑크톤 먹이망 .....	19
<그림 1.13> 천적생물과 호소내 생태계 먹이망에서 천적생물의 위치, 역할 .....	20
<그림 1.14> 천적생물 배양장치 발전사 .....	22
<그림 1.15> 천적생물 적용기술의 지적재산권과 연구성과물 .....	22
<그림 1.16> 환경 신기술 인증서 .....	23
<그림 2.1> 천적생물 배양장치 조사 지점도 .....	30
<그림 2.2> 오염물질 간이 침강장치 효과분석 지점 .....	31
<그림 2.3> Cage 효과분석 지점 .....	32
<그림 2.4> 인공식물섬 적용 지점 및 조건 .....	33
<그림 2.5> 초대저수지 수질이화학적 모니터링 지점 .....	34
<그림 2.6> 초대저수지 어류 모니터링 지점 .....	35
<그림 2.7> 어류 현장조사 .....	36
<그림 2.8> 천적생물 현장살포 효과분석 지점 .....	38
<그림 2.9> 섭식특성 도출을 위한 위내용물 분석 .....	41



<그림 2.10> 과잉 물고기 포획 .....	42
<그림 2.11> 초대저수지 유역개황도 .....	45
<그림 2.12> 녹조수역의 생태피라미드와 관리방향 .....	46
<그림 2.13> 천적생물 적용기술 공정도 .....	47
<그림 2.14> 처리공정 모식도 .....	47
<그림 2.15> 천적생물 배양장치 조감도 .....	48
<그림 2.16> 설치위치 및 시설 예정부지 .....	49
<그림 2.17> 배양장치 배치계획 평면도 및 단면도 .....	50
<그림 2.18> 원수분리조 구조 .....	52
<그림 2.19> 천적생물 배양조 구조 .....	54
<그림 2.20> 천적생물 배양장치 구성도 .....	56
<그림 2.21> 기초공사 진행과정 .....	59
<그림 2.22> 기초공사 시공도 .....	60
<그림 2.23> 배양장치 제작 설치과정 .....	61
<그림 2.24> 배양장치 설치 모습 .....	62
<그림 2.25> 침강지 설치위치 및 설치모습 .....	63
<그림 2.26> 방류배관 및 인공식물섬 설치모습과 설치위치 .....	64
<그림 2.27> 분리막 추가 설치 전·후 .....	66
<그림 2.28> 차양막 설치 모습 .....	67
<그림 2.29> 단열재 설치 모습 .....	67
<그림 2.30> 원수펌프 위치변화 .....	68
<그림 2.31> 기존 산기관과 교체한 산기관 .....	68
<그림 2.32> 인공식물섬 초기 배치와 서식규명을 위한 재배치 .....	69
<그림 2.33> 인공식물섬 설치 과정 .....	69
<그림 2.34> 현장 적용 중인 천적생물의 조류 저감 능력 .....	71
<그림 2.35> 배양장치의 현재구성과 최적구성 .....	73
<그림 2.36> 배양장치의 현재형태와 최적형태 .....	73
<그림 2.37> 천적생물 최적 디자인안 .....	74
<그림 2.38> 비닐하우스 설치 모양 .....	74

<그림 2.39> 자연분리 천적생물의 배양 특성 ..... 79

<그림 2.40> 식물플랑크톤 배양조 및 천적생물 배양조의 수환경 변화 ..... 81

<그림 2.41> 배양장치 내 식물플랑크톤 현존량 변화 ..... 82

<그림 2.42> 천적생물 배양조의 천적생물 조성의 계절변화 ..... 84

<그림 2.44> 배양장치의 규모별 천적생물 개체군 밀도 ..... 86

<그림 2.45> 천적생물의 종별 배양 특성 ..... 87

<그림 2.46> 현장 배양장치 내 천적생물 군집과 수질항목을 이용한  
주성분분석(CCA) ..... 88

<그림 2.47> 천적생물 살포량의 계절변화 ..... 90

<그림 2.48> 천적생물 종별 살포량의 계절적 변화 ..... 91

<그림 2.49> 강우시 침강장치 전후 모습 ..... 92

<그림 2.50> 간이 침강장치 설치에 따른 강우시와 평시 수환경 특성 ..... 93

<그림 2.51> Cage 적용모습 ..... 95

<그림 2.52> Cage 수환경 특성 ..... 96

<그림 2.53> Cage 내 식물플랑크톤과 천적생물 현존량 및 종조성, Chl-a 변화 ... 97

<그림 2.54> 인공식물섬 적용 조건별 수환경 특성 ..... 99

<그림 2.55> 초대저수지 기상 및 저수율 현황 ..... 103

<그림 2.56> 초대저수지 수온, DO, pH, EC 특성 ..... 105

<그림 2.57> 초대저수지 COD, TN, TP, TN/TP ratio 특성 ..... 106

<그림 2.58> 시기별 정점별 식물플랑크톤 현존량 및 종조성 변화 ..... 107

<그림 2.59> 초대저수지 출현 주요 동물플랑크톤 종 ..... 109

<그림 2.60> 초대저수지 동물플랑크톤 종 조성 ..... 110

<그림 2.61> 초대저수지 동물플랑크톤 조성 상대풍부도 ..... 111

<그림 2.62> 조사기간 중 초대저수지 동물플랑크톤 군집의 계절 분포 ..... 112

<그림 2.63> 초대저수지 출현 어종 ..... 118

<그림 2.64> 초대저수지 투명도(SD) 및 Chl-a 변화 ..... 120

<그림 2.65> 초대저수지 Chl-a의 시기별 변화 ..... 120



<그림 2.66> 식물플랑크톤 우점종에 따른 수온, N, P, Chl-a, 현존량 변화 특성 ..... 121

<그림 2.67> 식물플랑크톤 우점종에 따른 영양염류 특성 ..... 121

<그림 2.68> 초대저수지 부영양화지수(TSI) 분석 ..... 122

<그림 2.69> Chl-a의 농도 변화 ..... 123

<그림 2.70> Chl-a의 제거효과 ..... 123

<그림 2.71> 배양장치 내 식물플랑크톤 제거효과 ..... 125

<그림 2.72> 천적생물 살포에 따른 Chl-a 변화 ..... 127

<그림 2.73> 천적생물 살포에 따른 식물플랑크톤 변화 ..... 128

<그림 2.74> 천적생물 살포에 따른 동물플랑크톤 변화 ..... 129

<그림 2.75> 살포 천적생물의 누적 개체군 밀도 공간분포 ..... 130

<그림 2.76> 농업용저수지의 녹조발생 유형과 제어방안 ..... 132

<그림 2.77> 천적생물 적용조건 ..... 132

<그림 2.78> 녹조제어 전략 ..... 134

<그림 2.79> 사전예방 기술로써 천적생물 배양장치 운영방안 ..... 135

<그림 2.80> 녹조방제 기술로써 천적생물 배양장치 운영방안 ..... 136

<그림 2.81> 천적생물 배양장치의 연중 운영방안 ..... 136

<그림 2.82> 초대저수지의 먹이망 구조(2013년 5월) ..... 138

<그림 2.83> 초대저수지의 먹이망 구조(2013년 9월) ..... 139

<그림 2.84> 초대저수지의 먹이망 구조(2013년 11월) ..... 140

<그림 2.85> 초대저수지의 먹이망 구조(2014년 5월) ..... 141

<그림 2.86> 초대저수지의 먹이망 구조(2014년 10월) ..... 142

<그림 2.87> 초대저수지 서식생물의 먹이망 위치 ..... 144

<그림 2.88> 생산자-일차소비자 먹이원 기여율 분석 ..... 145

<그림 2.89> 초대저수지 저차생물과 어류간의 먹이망을 통한 생물학적 상호작용 ..... 146

<그림 2.90> 초대저수지 어류 위내용물 분석 ..... 147

<그림 2.91> 육식어류 도입에 따른 어류상 변화 ..... 150

<그림 2.92> mixing model을 통한 메기의 먹이원 기여율 분석 ..... 153



<그림 2.93> 어류를 이용한 생물조절 연계 및 개선 방향 ..... 153

<그림 2.94> Chl-a, COD, TP 제거효율 ..... 156

<그림 2.95> 동식물플랑크톤 특성에 따른 후보 저수지의 수환경 변화 ..... 158

<그림 2.96> 동식물플랑크톤 특성에 따른 후보저수지의 수환경 분포 및  
4개 그룹 제안 ..... 159

<그림 2.97> 후보지의 시기별 식물플랑크톤 종조성 변화 ..... 161

<그림 2.98> 후보 대상지 동물플랑크톤 조성 및 개체수 분포와 천적생물  
출현 개체수, 군집조성 비교결과를 나타내는 클러스터분석  
결과와 MDS(Multi-dimensional Scaling) ..... 162

<그림 2.99> 전국 825개 측정망 저수지의 최근 3년간 Chl-a, TP 농도 분포 .. 163

<그림 2.100> 사업화방안 : 천적생물과 어류를 이용한 생태적 관리 체계 .... 175



# 제1장 서론

---

제1절 연구배경 및 필요성

제2절 연구목적 및 추진체계

제3절 연구사





## 제1장 서론

### 제1절 연구배경 및 필요성

전국에 걸쳐 분포하고 있는 17,543여개의 크고 작은 농업용 호소 중 대하천에 조성된 담수호를 제외하면 대부분이 건설된 지 오래되어 저층 유기물의 퇴적정도가 매우 높고 수심이 얕으며, 규모가 작은 중소형 저수지가 대부분을 차지하고 있다(Kim et al. 2010). 이들 저수지들은 집수역으로부터 유입된 인과 질소 등 오염물질로 인해 식물플랑크톤의 생산력증가와 녹조현상 등부영양화에 의한 생태계 교란이 발생하고 있다(Kim et al. 2010). 특히, 저수지 인근에 위치한 축사 등 특정지역에서 유래하는 점오염원과 농경지 등 비점오염원으로부터 유입된 유기물과 영양염류가 다량으로 축적되어 남조류에 의한 녹조를 유발하고 있다(Takamura and Watanabe 1987; Kwon et al. 2011). 이 외에도 농업용 호소의 수환경은 지역적인 기후, 유역내 토지이용현황과 오염원 특징, 지형, 그리고 호수 규모 등 물리구조적 특징과 유입수량, 수체 흐름, 물 순환 등 수리수문학적 체계에 영향을 받을 수 있다(Kim and Hwang 2004; Yoon et al. 2007).

최근 들어 생활수준의 향상에 따라 수량 뿐 아니라 수질에 대한 기대치가 높아지면서 합리적인 수질오염관리의 필요성이 강조되고 있다(Jeon et al., 2002). 지금까지 농업용수의 질적 관리는 수질환경기준에 근거한 수질관리로 이루어져 왔으며 수질기준을 초과하는 호소에 대해 호소에 유입되는 오염물질을 저감하는 농업용수 수질개선사업을 시행하고 있다. 이와 같은 수질개선사업이 농업용 호소의 수질관리는 물론 영양염류 저감을 통한 녹조관리 기능을 가지고 있으나, 농업용 호소가 물리구조적 측면에서 녹조발생에 유리한 조건을 가지고 있고, 최근 녹조문제가 첨예하게 대두되면서 녹조관리를 위한 별도의 관리정책 마련 필요성을 인식하고 있지만 뚜렷한 대안을 찾지 못하고 있다(한국농어촌공사, 2013). 특히, 기후 온난화와 극단화 현상이 심화되면서 호소와 정체 하천에서의 녹조발생이 주요 환경문제로 대두되고 있지만, 폐쇄성 수역인 호소와 정체 하천에서의 녹조발생은 성서나 고문헌에서도 그 근거를 찾아볼 수 있을 정도의 유구한 역사를 가지고 있으며, 질소와 인을 기반으로 한 생물활동이 지속되는 한 앞으로도 계속 일어나는 자연계의 한 현상으로 이해해야

한다는 움직임도 나타나고 있다(남, 2012). 하지만, 현시점에서의 녹조는 그 발생시기와 기간이 장기화되고 생태건강성을 저해하는 등 과거의 그것과는 차원이 다른 유해한 환경문제로 발전하였으며, 과도한 인간 활동의 결과이므로 정확한 현상 파악과 현명한 관리를 통해 지속적으로 해결해 나가야 할 필요성이 있다.

농림축산식품부에서는 농업용호소의 수질관리를 위해 중규모이상의 용수가치가 높은 825개 저수지와 담수호로 구성된 농업용수 수질측정망 지구를 선정하여 년 4회의 수질조사를 실시하고 있으며, 이들의 유효저수량은 2,729 백만톤으로 우리나라 전체 농업용호소의 75%를 차지하여 농업용 호소 수자원량의 상당부분을 관리하고 있다. 농업용호소의 대표적인 수질관리 항목은 식물플랑크톤에 의한 호소 내부 생산 유기물량에 직접적인 영향을 받고 있는 화학적 산소요구량(COD)과 식물플랑크톤의 주요 영양분인 총인(TP), 총질소(TN)로써, 수질관리항목과 조류(藻類, algae) 발생 특성은 매우 밀접하게 관련되어 있다(농식품부, 2011). 2012년 농업용수 수질측정망 보고서(농식품부, 2012)에 따르면, 전체 조사대상 저수지 및 담수호(825개소)의 16.7%(138개소)가 COD에 근거한 농업용수 기준 수질환경 IV등급을 초과하고 있으며, Vollenweider 기준에 따라 분류한 부양화도는 전체 시설 825개소 중 부영양화단계에 접어들고 있는 중부영양호 이상의 저수지가 45.7%(중부영양 38.7%, 부영양 7.0%)로 전년도(농식품부, 2011년) 76.6%보다는 감소하였으나, 2010년 33.2%보다는 증가하고 있어 녹조발생에 취약한 농업용저수지와 담수호에 대한 적극적인 녹조관리 정책이 필요하다.

녹조관리란 저수지와 댐, 정제하천구간 등 녹조발생이 우려되거나 발생빈도가 높은 수역을 대상으로 녹조발생을 사전 예방하는 예방관리와 녹조 발생 이후 발생된 녹조를 단시간에 효과적으로 제거하는 방제관리 등을 구분하여 녹조발생 피해를 최소화하기 위한 다양한 관리대책의 적용을 말한다.

사전예방대책의 대표적인 예는 점, 비점오염관리를 통한 인 저감 대책을 들 수 있다. 그러나, 녹조를 사전예방하기 위해서는 총인농도 기준 0.03 mg/L 수준까지 낮추어야 하며, 이 정도의 고도처리를 위해서는 막대한 비용이 소요되므로 비용대비 효율이 낮고 처리효율의 한계에 직면해 있다. 특히, 저농도의 비점오염원이 분산되어 있는 농촌유역의 경우 이와 같은 사전예방대책은 불가능하다고 볼 수 있다.

그러므로 지금까지의 녹조관리는 사전예방보다는 발생 후 방제관리에 치중하여 왔으며, 녹조발생에 따른 경제적 피해와 녹조 방제 비용 등 국가적



손실을 감수해야 했다. 사후 방제를 위해 주로 적용되고 있는 기술은 황토, 산화제 살포 등 화학적 처리기술이며, 화학적 또는 천연응집제 등을 이용한 부상분리 기술 등이 적용되기도 한다. 그러나, 수없이 많은 녹조방제 기술이 개발되고, 적용되어 왔으나 아직까지 뚜렷한 성공사례가 없으며, 비용과 효율 측면에서 미봉책에 그치는 경우가 허다하였다.

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

그동안 이루어진 연구 성과를 바탕으로 녹조발생이 심각한 부영양의 중규모 저수지에서 실규모의 천적생물 배양장치를 설치하여 녹조 생물을 효과적으로 포식, 제어하는 천적생물을 대량배양, 살포함으로써 녹조 포식, 제어 효율을 증가시켜 녹조 발생을 제어할 수 있는 실규모의 사전예방 기술을 개발하고자 하였다.

이를 위해, 축산에 의한 오염원이 지속적으로 유입되는 저수용량 104만톤의 중규모 농업용저수지, 초대저수지를 대상으로 녹조 원인 생물을 효과적으로 포식하는 천적생물을 자연분리, 확보함과 동시에 천적생물 종주를 대량배양 할 수 있는 실규모의 천적생물 배양장치를 현장적용하여 녹조 발생 수역에 살포함으로써 녹조제어 성능을 분석하고 실규모 실용화방안을 제시하고자 하였다.

연구 최종년도(2개년의 2차년도)인 올해는 1차년도 연구결과를 바탕으로 실규모 천적생물 배양장치의 기능향상을 통한 최적화 방안 모색은 물론 1년 이상의 장기 적용을 통한 생태계 변화와 녹조제어 효과를 분석하여 육식 어류와 연계한 생물조절 방안으로써 천적생물 적용기술의 완성과 사업화 방안을 모색하고자 한다.

## 제2절 연구목적 및 추진체계

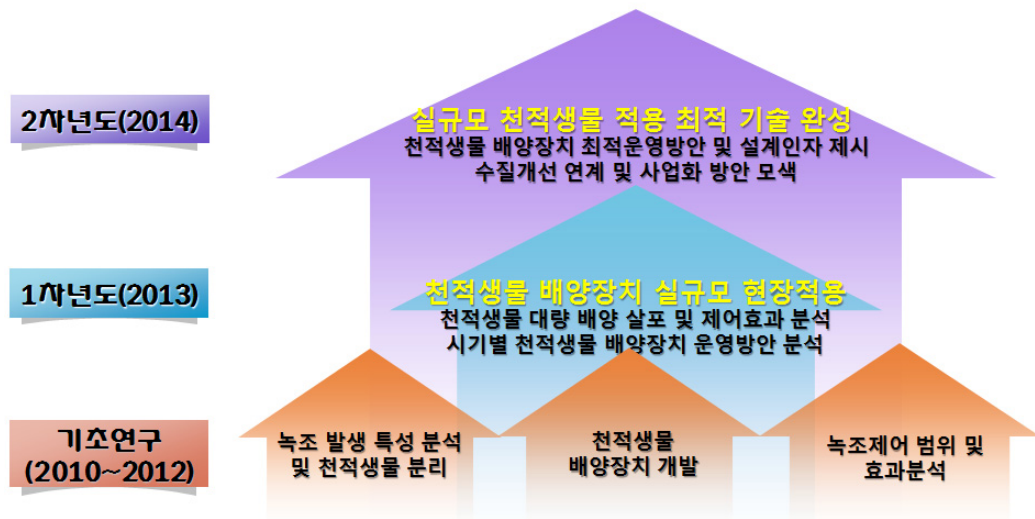
### 1. 연구목적

본 연구의 최종 목적은 녹조발생이 심각한 중규모 농업용저수지를 대상으로 실규모의 천적생물 배양장치를 현장 적용하여 실용화 모델을 개발하고 최적 기술을 완성하는 것으로 연구의 성격은 「실용화 기술 개발」이다.

세부적으로는 실규모 장치의 기능개선과 최적운영 방안제시, 녹조제어 효과 분석, 경제성 등을 감안한 최적 설계/관리방안제시와 수질개선 방안과 연계한 사업화 방안 제시 등이 주요 연구 목적이며, 1차년도에는 그중에서 실규모 장치 현장적용과 기능개선, 최적운영방안 제시 등에 치중한 연구 목표를 달성하고자 하였다.

연차별 세부목표는 그림 1.1과 같으며, 최종년도인 금년도에는 100톤의 실규모 천적생물 배양장치에서 실규모 적용을 위한 최적규모산정, 설계인자 및 최적운영 방안 등 기술의 완성과 수질개선과 함께 연계한 사업화 방안을 제시하는 것이 주요한 목표이다.

### 농업용저수지 녹조제어를 위한 실규모 천적생물 적용기술 완성



<그림 1.1> 연차별 연구목표





## 2. 추진전략 및 추진체계

연구의 추진은 지난 3년간의 기초연구 결과와 1차년도 실규모 적용연구 결과를 분석하여 피드백하고, 연구결과의 연계성과 효과적 활용을 위해 기존 참여해 온 전문 연구기관과 공동연구를 수행함과 동시에 원천기술 공동개발 전문 기업체와 협동연구를 수행하는 등 산·학·연의 공조체제를 통해 연구효율성을 향상하고 실용화를 조속 추진할 수 있도록 하였다.

기 연구결과와 국내외 선행 연구자료를 충분히 활용하여 중복연구를 방지하도록 노력하였으며, 현장 밀착형 연구를 통해 사업화시 발생 가능한 현장 애로 사항을 해소할 수 있도록 하였다.

또한, 관련 분야 국내외 전문 연구진 등과 네트워크를 구축하여 전문기술 교류 및 공동세미나를 추진하고, 관련 학술단체와 연계하여 활발한 학술활동과 기술 교류를 통해 연구 기술을 더욱 발전시켰다(그림 1.2). 그리고, 일본육수학회 학술발표대회 등 국제학술 발표를 통해 기술을 교류하고, 특허 등 산업재산권 확보, 환경신기술인증 등 기술의 우수성 확보에 주력하고자 하였다.

특히, 2014년 6월에 정부를 비롯한 유관기관 전문가 100여명을 초대하여 천적생물 적용기술의 시연회와 생태적 녹조관리 위요습을 실시하여 천적생물과 육식어류를 이용한 녹조관리방안에 대한 전문가 의견을 수렴하고, 개발 기술의 완성도와 대외신인도 증진 노력을 하였다.



<그림 1.2> 국내외 전문가 월용(2013년 9월)



<그림 1.3> 국제 학술 세미나 개최(2013년 10월)



<그림 1.4> 생태적 녹조관리 워크숍 개최(2014년 6월)



주요 연구 추진 체계는 그림 1.5와 같다.



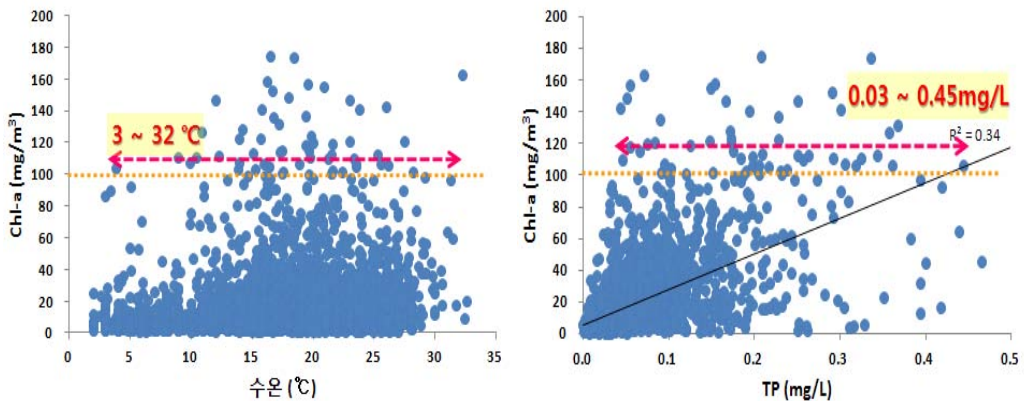
<그림 1.5> 연차별 연구 추진 체계

### 제3절 연구사

#### 1. 농업용 호소의 녹조제거 기술 및 적용사례

녹조발생 원인은 녹조 원인 식물플랑크톤이 성장하기에 좋은 조건으로 높은 영양염류(질소, 인), 햇빛(긴 일조시간), 긴 체류시간, 적정 수온 등을 들 수 있다. 이 중에서 햇빛, 수온, 강우에 의존하는 체류시간 등의 원인은 인간의 힘으로 어찌할 수 없는 것들이다. 하지만, 높은 영양염류는 인간 활동으로 인한 점, 비점오염의 결과로 수질개선 노력을 통해 저감할 수 있는 인간의 부분이기는 하다. 그러나, 총인관리에는 비용 대비 처리 한계가 있으며, 녹조가 발생 가능한 인의 농도 역시 우리가 기대하는 수준보다 훨씬 낮다는 사실은 매우 비관적이다. 우리나라에서 가장 빈번하게 녹조를 발생시키는 *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Aphanizomenon* 속의 남조류는 질소, 인이 매우 낮은 열악한 성장조건에서도 우점하여 대발생할 수 있는 전략을 이미 가지고 있기 때문이다.

농업용저수지의 녹조발생 특성을 다년간 분석한 결과(그림 1.6), 녹조발생 수준인 엽록소-a(Chl-a) 100mg/m<sup>3</sup> 이상의 녹조발생 수준을 보이는 총인농도(TP)는 0.03~0.45 mg/L으로 호소 수질환경 기준 중 농업용수 수질기준인 IV 등급의 총인 농도 0.1 mg/L 보다도 훨씬 낮은 0.03 mg/L농도에서도 녹조가 발생하는 것으로 나타났으며(농림축산식품부, 2012), 지금의 환경정책으로는 0.03 mg/L의 총인관리는 불가능하므로 총인농도 관리만으로는 녹조발생을 방지할 수 없음을 시사하고 있다.



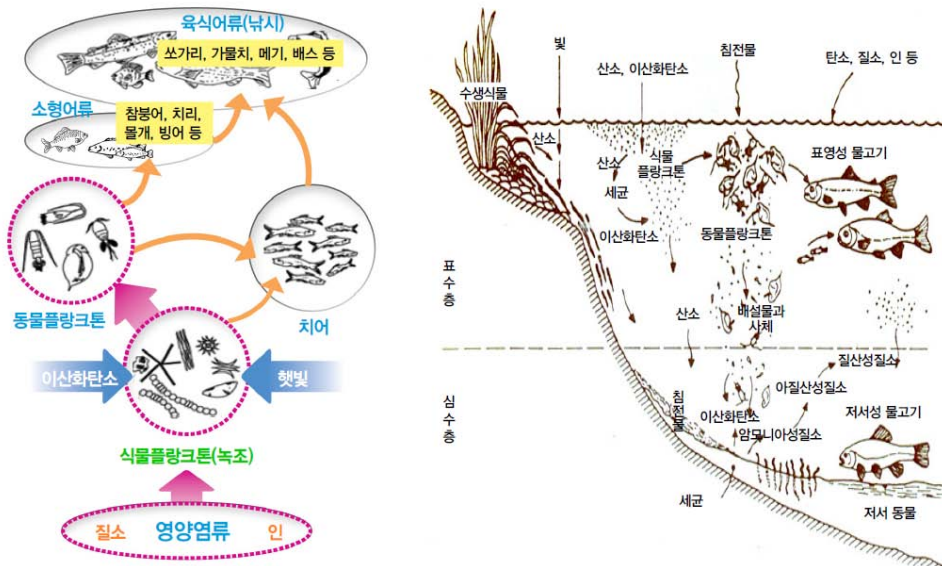
<그림 1.6> 농업용저수지의 수온과 총인 농도가 Chl-a 증가에 미치는 영향



여기에 온난화와 극단화를 유발하는 기후변화는 동절기 결빙일수 감소, 가뭄으로 인한 일사량 및 체류시간 증가 등 녹조발생에 더욱 좋은 조건을 제공하게 될 것이다. 특히, 동절기의 수온증가는 매우 우려스러운 수준을 보여주는 데, 앞서 언급한 농업용저수지에서의 녹조발생 수준의 수온변화를 보면 3~32 ℃로 3 ℃의 낮은 온도에서도 발생가능 하였다. 그동안 수온이 15 ℃ 이상을 보이는 4~6월, 9~10월을 녹조발생 시기로 보아 왔는데 앞으로 온난화가 가속화되면 녹조발생 시기는 결빙기와 강우기를 제외한 모든 기간으로 확대될 것으로 예상된다. 실제 부영양화가 심각한 농업용저수지의 Chl-a를 분석한 결과 해빙기인 2월 말 부터 결빙기인 12월 중순까지 농업용수 수질관리 기준(35 mg/m<sup>3</sup>)이상의 수준을 보이고 있음을 확인할 수 있었다(농림축산식품부, 2012).

따라서, 기존의 녹조관리 정책으로는 효과적 관리가 어려우며 새로운 방향 제시가 요구된다.

지금까지 녹조관리는 사전예방보다는 발생 후 방제관리에 치중하여 왔으며, 녹조발생에 따른 경제적 피해와 녹조 방제 비용 등 국가적 손실을 예방할 수 없었다. 또한, 녹조 발생 후 방제를 위해 주로 적용되고 있는 기술은 황토, 산화제 살포, 화학적 또는 천연응집제 등을 이용한 부상분리 기술 등이 있으나, 이들 기술은 효과 지속성에 한계가 있으며, 많은 비용과 잔류 화학물질에 의한 생태적 피해 등 안전하고 효과적인 방안은 되지 못한다.



<그림 1.7> 호소생태계의 먹이망과 호소내 증위별 생물알동

가장 안전하고 이상적인 녹조관리 방안은 사전예방이다. 이를 위해 녹조 발생의 원인중 하나인 인의 차단에 총력을 기울여 왔으나 앞서 언급한 바와 같이 녹조관리의 한계가 있기 때문에 녹조발생 원인을 다각화하고 재조명 할 필요가 있다. 그 중 한 가지가 단순 이화학적 반응에 의해 이루어지는 수체(water body)로 보아 오던 녹조발생 호소에 대한 시각을 많은 생명체가 먹고, 먹히며 평형을 유지해가는 복잡 다양한 시스템, 즉 하나의 생태계로 전환하는 것이다. 다시말해, 저수지, 담수호, 댐호와 같은 호소에서 녹조발생을 포함하여 나타나는 모든 현상을 외부에서 유입된 영양염류(무기물)를 이용하여 생산자(식물플랑크톤, 수생식물)가 성장하고, 이를 1차 소비자(동물플랑크톤과 수서곤충, 치어 등)가 포식하고, 이후 소형어류, 육식어류 등 2차, 3차 소비자로 전달되며, 동시에 배설물과 사체 등(유기물)은 분해자에 의해 다시 영양염류(무기물)로 돌아가는 등 복잡한 먹이망에 의해 순환되는 활발한 생명활동의 결과로 인식하는 것이다(그림 1.7). 녹조와 같은 수환경의 이상 현상은 이와 같은 생태계 순환고리에 문제가 발생하여 정상적인 기능을 수행하지 못하여 발생한 것으로 오랜 기간 동안 오염물질에 노출되어 각각의 생태적 지위(ecological niche)에 있는 생물체들이 이상증식 또는 도태되어 생태계 순환 기능이 왜곡되고 손상된 결과로 시각을 전환하는 것이다.

따라서, 장기적인 부영양화와 오염물질 유입에 따라 왜곡되고 손상된 생태계 먹이망과 생태기능을 회복하여 정상화시킨다면 녹조발생 빈도를 줄일 수 있을 것이다. 특히, 녹조원인 남조류가 대발생한 녹조발생수역에 이를 포식할 수 있는 1차 소비자로서 동물플랑크톤 군집의 기능을 회복시키는 것은 남조류의 효과적 제거는 물론 사전 예방도 가능하게 해준다.

한국농어촌공사 농어촌연구원에서는 녹조발생이 심각한 농업용저수지를 대상으로 손상된 생태계 먹이망의 회복을 위해 녹조 원인생물 포식성 동물플랑크톤을 녹조발생수역에 적극 도입할 수 있는 방안연구를 다년간 수행하여 왔다. 이는 녹조발생이 우려되는 농업용저수지 등 손상된 비정상적 호소생태계에서 생태기능 회복하여 건강한 생태계로 전환하기 위한 첫 번째 단계이며, 향후 인위적으로 도입하여 정착시킨 동물플랑크톤을 포식하는 소형어류와 소형어류를 포식하는 육식어류 등을 순차적으로 도입하고 관리하여 생태계 먹이망 및 물질순환 구조를 정상화시키고 결과적으로 건강한 생태계의 동적 균형 상태를 유지하여 생산자인 남조류 등이 대발생하지 않도록 유도할 계획이다. 물론 이렇게 되기까지 장기간의 시간이 요구되고, 꾸준한 노력이 필요

하지만, 이것이야 말로 녹조를 관리하는 가장 효과적인 대응방안일 뿐만 아니라 우리가 추구해 나가야 할 방향이다.

## 2. 생물조절을 이용한 녹조제어 연구 동향

정체수역인 농업용 호소의 녹조제어를 위해 다양한 물리, 화학, 생물학적 방법이 개발되고, 적용되어 왔다(그림 1.8). 그동안 개발되어온 녹조방지기술 관련 특허를 분석해보면, 등록된 총 139건 중 화학적 기술이 차지하는 비율이 가장 크고, 물리적 기술이 뒤를 이었다. 생물학적 기술의 개발은 상당히 부진한 편이다. 녹조를 제어하기 위한 기술로서 필요한 중요 사항으로 효율성과 안전성, 경제성과 지속성, 방제보다 예방대책이 주가 되어야 한다는 것이다.

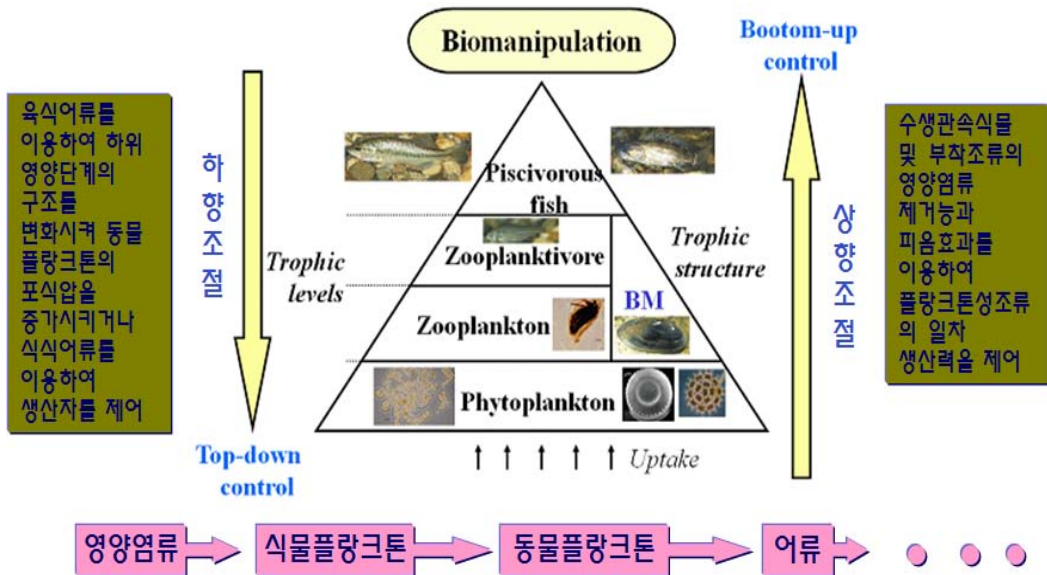


<그림 1.8> 녹조방지기술과 연장적용 타당성

녹조가 발생한 소규모 메조코즘에서 현장 test한 결과를 보면, 세프레마와 같은 산화성의 화학적 기술의 효과가 가장 큰 것으로 나타났지만 2차 독성에 대한 안전성을 장담하기 힘들고, 미세기포와 분말황토의 경우 초기에만 효과를 나타낼 뿐 지속성이 없었다.

천적생물을 이용한 생물학적 기술의 경우 초기 제거효과는 낮지만 지속적으로 감소하여 녹조를 제어하는 능력을 보였으며, 특히, 생태계 안전성이 높으며, 생태계 기능강화를 통한 지속가능한 녹조제어 방법이라 할 수 있다. 이와 같은 생물조절 기술은 다양한 생태계 구성요소와 환경조건의 변화와 복잡성에 따라 현장적용성이 낮기 때문에 성공확을 역시 낮은 기술로 모두가 기피해온 부분이 크지만 녹조현상 역시 생태계 불균형에 따라 나타나는 하나의 현상으로 생태계 균형을 찾아가는 해결방법이 가장 근본적 해결책으로 타당하다고 할 수 있다.

수질환경의 개선을 위해 대형생물의 적극적인 이용은 일찍부터 자연정화의 하나로서 인식되어져 왔으나 이러한 기능을 인위적으로 극대화하려는 시도는 1950년대 말 전후로 구체화되어 주로 유럽을 중심으로 시작되었는데, Shapiro et al.(1975)은 이를 Biomanipulation이라 명명하고 “수질개선을 위한 자연산 수생생물 군집의 관리”라고 정의하였다(그림 1.9).



<그림 1.9> 수중생태계의 영양구조와 생물관리의 구분





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.

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.

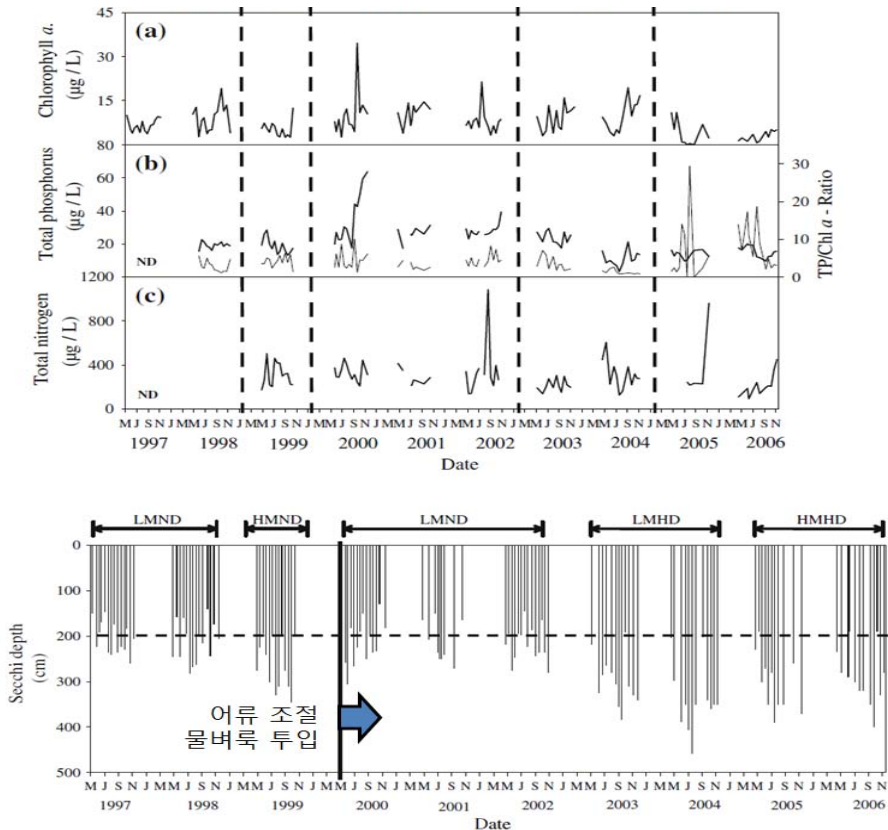
50년대와 60년대초의 생물관리에 관한 연구는 주로 동물플랑크톤에 대한 포식 및 수질에 대한 어류의 영향에 중점이 있었다(Gophen, 1990). 고전적인 육수학적 개념에서는 호수 영양단계내 물질의 역동적 흐름이 식물플랑크톤에 의해 흡수된 영양염류가 동물플랑크톤 및 어류의 상위 영양단계를 변형시키는 단일방향의 상향조절능(bottom-up force)에 의해 이루어지는 것으로 인식되어 왔다(Straskraba, 1965). 따라서 상위 영양단계 구조의 인위적인 변형을 통하여 하위 영양단계를 변형시키는 하향조절능(top-down force)에 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 군집구조에 대한 플랑크톤 포식어류의 영양염류 매개효과(nutrient-mediated effect)등이 생물관리 연구에 포함되고 있으며, 호수나 저수지의 수질개선에 대한 장기 예측을 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

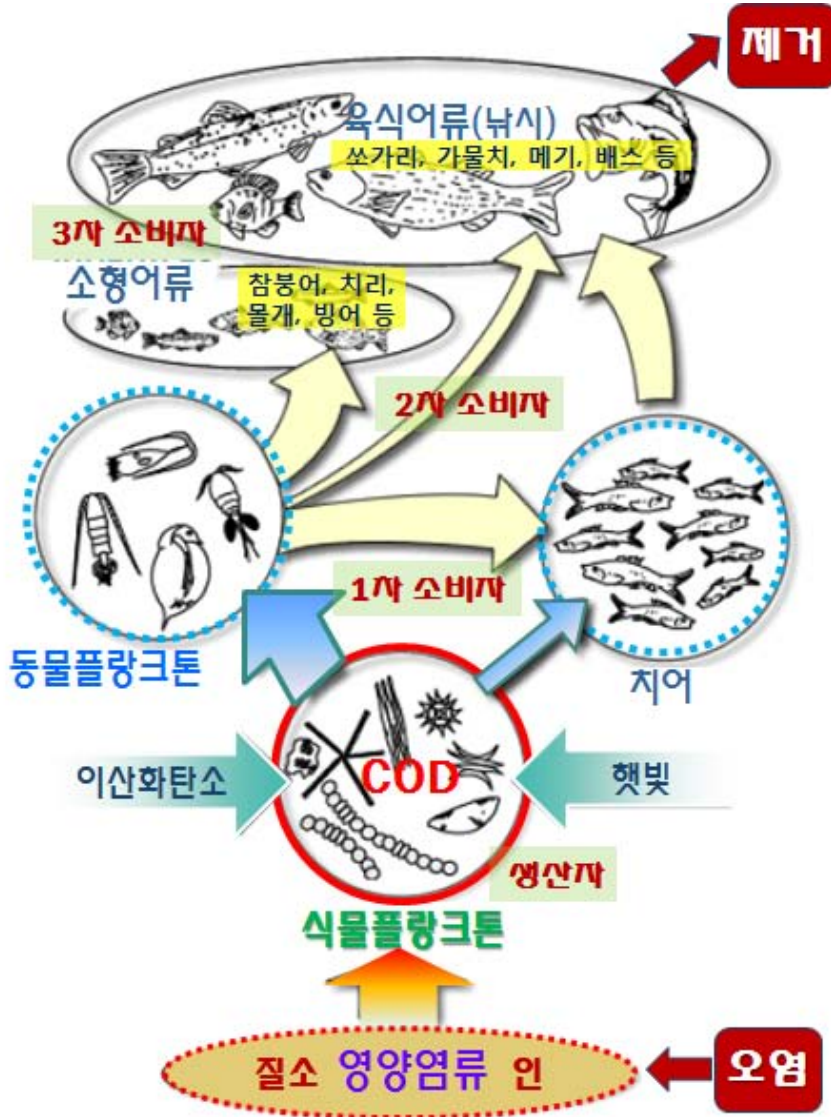
fish) 역시 생물관리 기술의 하나로서 연구되어 왔다(Opuszynski, 1978).

최근 보고된 물벼룩을 이용한 생물학적 상호작용을 이용한 수질개선의 예로 일본의 시라카바 호수를 들 수 있다(그림 1.10). 해발 1,400 m 에 위치한 이 호수의 경우 냉수성 육식어종인 무지개 송어를 이용하여 물벼룩을 포식하는 플랑크톤 섭식 어류인 빙어의 개체군을 제어하였다. 동시에, 이 호수에서 서식하지 않는 *Daphnia galeata*를 방류하였다. 무지개 송어의 방류는 이 호수의 빙어 개체군 밀도를 감소시켰고, 수년간의 반복 방류를 통해 *Daphnia galeata* 개체군의 정착을 유도하였다. 적용 5년 후 수질 개선이 감지되었고, 특히 투명도의 증가로 인해 수질의 가시적 개선이 성공적으로 이루어졌다(Ha et al. 2013). 그림 1.10에서와 같이 일반적으로 부영양화된 저수지에서는 활용 가능한 천적생물이 서식하지 않는 특성을 가지고 있다.



**<그림 1.10> 천적생물을 이용한 수질 개선의 예; 2000년 천적생물 물벼룩의 방류와 육식어류투입 이후 수질 변화(위) 와 투명도 증가(아래) (일본 시라카바 호수, Ha et al. 2013)**

어류의 포식압과 풍부한 먹이에 의해 보다 효율적으로 증식하는 소형의 동물플랑크톤이 경쟁에서 우위를 차지하기 때문이다. 따라서, 지속적으로 천적생물의 밀도를 높게 유지하기 위해서는 조류를 섭식하는 물벼룩과 같은 천적생물을 투입하는 것과 함께, 어류의 포식압 조절을 필요로 한다.



<그림 1.11> 수중생태계의 영양구조와 생물관리의 구분

생물관리 기술은 유럽의 부영양화된 저수지 및 호수를 개선하는데 성공적으로 적용된 사례가 적지 않으며, 수질관리에 있어서 생물관리의 통합



개념은 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 유역 관리의 어려움과 화학적 처리의 갖가지 피해를 줄여보고자 하는 것도 있지만 실제적으로 영양염류를 충분히 감소시켰음에도 불구하고 과도한 녹조발생을 조절하지 못한 경우가 보고되고 있기 때문이다. 즉 수자원의 적절한 관리를 위해서는 영양염류의 관리를 통한 상향조절과 생태피라미드의 상위 영양단계 생물을 이용한 하향조절, 두가지 측면을 병행한 종합적인 관리를 해야 한다 (그림 1.11).

최근에 제시되고 있는 생물조절과 관련된 국내 연구사례 및 기술의 특징을 표 1.1에 나타내었다.

(표 1.1) 국내 연구사례 및 기술의 특징

구 분	기술의 특징	
이매패류 이용기술		<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 이매패류의 여과섭식특성을 이용하여 조류를 제어하는 생물여과기술</li> <li>▶ 주요이용생물 : 말조개</li> <li>▶ 실용화 실적 : 연구단계</li> </ul>
대형 무척추 동물 이용기술		<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 조류와 같은 입자성 유기물질의 섭취기능 이용</li> <li>▶ 주요이용생물 : 줄새우</li> <li>▶ 실용화 실적 : 연구단계</li> </ul>
우렁이 이용기술		<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 부착조류 및 저질층 유기물 섭식</li> <li>▶ 주요이용생물 : 논우렁이</li> <li>▶ 실용화 실적 : 연구단계</li> </ul>
인공식물섬		<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 영양물질의 경쟁적 이용, 피음효과, 생물학적 흡착과 미생물의 작용에 의한 조류 제어기술</li> <li>▶ 주이용 목적은 생물 서식처 복원</li> <li>▶ 실용화 실적 : 상품화 및 현장적용</li> </ul>



### 3. 포식성 천적생물을 이용한 녹조 제어 기술 연구 현황

#### 가. 포식성 천적생물(동물플랑크톤)의 개념

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

건강한 생태계에서는 녹조생물인 식물플랑크톤과 1차 소비자인 동물플랑크톤의 포식-피식관계가 정상적으로 이루어져 식물플랑크톤 군집의 크기가 작고 일정하게 유지되고 있는 반면, 부영양화가 이루어진 녹조발생 수역에서는 지속적이고 과도한 스트레스로 인해 식물플랑크톤을 포식하는 천적생물로서의 기능을 가지는 동물플랑크톤이 매우 적게 분포하거나 존재하지 않아 식물플랑크톤 군집의 크기가 비정상적으로 커지면서 녹조가 빈발한다(그림 1.12).



<그림 1.12> 건강한 생태계와 부영양화 생태계의 플랑크톤 먹이망



일반적으로 건강한 생태계는 스스로 각 단계의 생태적 지위(ecological niche)와 군집의 크기를 조절하는 조절기능과 그로 인해 안정화되어 가려는 동적 평형의 항상성을 유지하는 기능을 가지고 있다. 따라서, 어떠한 호수 생태계라 할지라도 생산자이면서 녹조 원인생물인 식물플랑크톤의 군집크기를 조절하려는 자연적인 포식자 또는 경쟁자(천적생물)가 항상 공존하고 있는데, 세균, 곰팡이, 바이러스 등 미생물과 동물플랑크톤 같은 원생생물, 조개류, 어류 등이 그것이다. 이 중에서 식물플랑크톤 대부분을 포식하며 그 조절기능이 가장 큰 동물플랑크톤의 기능적 이해와 활용이 무엇보다 중요할 것으로 확신하여 이를 포식성 천적생물로 명명하고 연구 대상으로 선정하였다(그림 1.13).

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



<그림 1.13> 천적생물과 호소내 생태계 먹이망에서 천적생물의 위치, 역할



본 연구는 2007년부터 2009년까지 3년간 『새만금수역 적·녹조현장적용시험연구』의 일환으로 시작되었으며, 새만금수역의 적용가능한 다양한 방제물질의 적용시험과 함께 천적생물 도입타당성을 분석하였고, 해수호인 새만금호에서 적조원인 생물에 대한 천적생물을 탐색하였으며, 천적생물을 현장에서 대량배양할 수 있는 장치의 초기모델을 창출하였다(그림 1.14).

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

2010년부터는 해수종이 아닌 담수성 식물플랑크톤에 대한 천적생물 적용방안을 연구하였다. 2010년~2011년 2년간 새만금 수역에서 개발된 천적생물 배양기술을 이용하여 국토해양부 재원으로 정제하천에서 포식성 천적생물을 이용한 조류제어기술 개발 연구를 진행하였다. 문제는 담수성 식물플랑크톤에 대한 천적생물 탐색이었다. 1차년도에는 섬모충류 등 배양조건이 까다로운 천적생물들을 분리하여 현장배양에 고전하였으며, 2차년도에 지각류인 대형 물벼룩 수종을 분리하여 성공할 수 있었다. 배양장치도 2세대로 발전하였으며, 배양조건도 최적화하였다. 또한, 하천에 설치한 배양장치의 안전성에 대한 부분도 고려하였고, 하천에서 주로 문제가 되는 규조류, 와편모 조류의 대발생에 대한 제어효과도 검증할 수 있었다.

하천과 동시에 농업용저수지에서 녹조제어를 위한 천적생물 적용기술 개발 연구가 2010년~2012년, 3년간 진행되었다. 소규모 농업용저수지인 전대저수지에서 녹조 발생의 주요 원인인 남조류를 효과적으로 포식하는 천적생물을 분리 배양하고, 소규모 배양장치와 배양조건 등 천적생물 최적 적용기술을 개발하였다.

2007년부터 지금까지 5개의 지적재산권을 확보하였으며, 1건의 환경신기술 인증을 확보한 상태이다. 또한, 천적생물 적용매뉴얼과 다수의 학술상을 수상하는 등 다방면에서 기술의 우수성을 입증해 왔다(그림 1.15~16).



<그림 1.14> 천적생물 배양장지 발전사

천적생물 배양장지 관련 지적재산권

천적생물 매뉴얼



천적생물 기술의 관련학외 우수논문 수상 현황



<그림 1.15> 천적생물 적용기술의 지적재산권과 연구성과물





제446호

## 신기술인증서

1. 기술명 : 현장에서 배양된 천적 동물플랑크톤을 이용한 녹조제어기술
  2. 기술 보유자
    - 가. 법인명 : (주)아섬/한국농어촌공사
    - 나. 법인등록번호 : 110111-2028862 / 135271-0000021
    - 다. 소재지 : 경기도 과천시 추사로 128, 2층 / 경기도 의왕시 안양판교로 98(포일동 487)
  3. 기술 개요
    - 호소수를 취수, 동·식물 플랑크톤을 분리하여 각각 최적의 조건에서 배양하고, 배양된 식물플랑크톤을 먹이원으로 공급하여 천적생물(동물플랑크톤)을 대량으로 배양한 후, 다시 호소로 공급함으로써 수역 내 녹조현상을 제어하는 기술
  4. 신기술 범위
    - 저수지 등 수계로부터 천적생물을 선택, 배양한 후 이를 다시 수계에 방류하여 녹조현상을 제어하는 기술
  5. 유효기간 : 발급일로부터 5년(2014.8.7~2019.8.6)
  6. 기 타
    - 환경신기술은 유효기간내에서만 인정됩니다.
    - 유효기간 연장이 필요한 경우는 기간 만료일 120일 전까지 유효기간 연장신청서를 제출하시기 바랍니다.
- 「환경기술 및 환경산업 지원법」 제7조, 같은 법 시행령 제18조의5제1항 및 같은 법 시행규칙 제6조제3항에 따라 위의 기술을 환경 분야 신기술로 인증합니다.

2014년 8월 7일

환경부장관



<그림 1.16> 환경 신기술 인증서



## 제2장 본 론

제1절 연구내용 및 방법

제2절 실규모 천적생물 배양장치 현장 적용

제3절 천적생물 배양장치 운영 및 현장살포

제4절 녹조제어 효과 분석 및 연중 활용방안

제5절 생물조절 연계방안(먹이연쇄)

제6절 농업용저수지 수질개선 연계 및 사업화방안





## 제2장 본론

### 제1절 연구내용 및 방법

#### 1. 실규모 천적생물 배양장치 현장 적용

##### 가. 연구대상지 선정

천적생물 적용기술의 완성을 위해 범용화 할 수 있는 대상지의 선정이 매우 중요하다. 다음의 조건에 따라 최적의 연구대상지를 선정하였다.

- 최근 3년간(2010~2012) Chl-a 평균농도가 70 mg/m<sup>3</sup> 이상인 저수지
- 평균수심 2.5 m 이상 저수지
- 지속적인 외부오염원(예, 유료낙시터 등)이 없는 저수지
- 유효저수량 20만톤 이상의 농업용저수지
- 수시 평가점검 및 유지관리를 위해 접근의 편리성이 있는 저수지

대상저수지 결정 후 배양장치를 설치할 수 있는 연구대상 부지를 선정하기 위해 만곡부, 수생식물 현황, 녹조가 모이는 곳(녹조발생시기인 4월~10월 중 풍향고려, 청문조사) 분석을 통해 설치 부지를 선정하였다.

##### 나. 실규모 천적생물 배양장치 기본계획 및 설계

###### (1) 천적생물 배양장치 기본계획

유효저수량 104만톤 규모의 초대저수지에 적용 가능한 천적생물 배양장치로써 100톤(20톤 2 set, 10톤 6 set, 육상형)의 실규모 배양장치를 계획하고 적용하였다. 배양장치의 형태, 기본구상, 기본설계, 현장시공 등의 절차를 수행하였다.

##### 다. 실규모 천적생물 배양장치 세부 구성 및 현장 설치

###### (1) 실규모 천적생물 배양장치 세부 구성

천적생물 배양장치의 실규모 적용기술 개발과 천적생물 배양 성능의 향상을 위해 필수장치와 기능향상을 위한 부대장치로 구분하여 세부 구성하였다.



## (2) 실규모 천적생물 배양장치의 현장 설치

2013년 4월 착공을 시작하여, 논으로 임대영농중인 홍만수면 부지를 대상으로 지반침하 및 건설장비가 진입이 가능하도록 기초공사를 진행하였다.

### 라. 천적생물 배양장치 기능개선

#### (1) 천적생물 배양장치 운영상 문제점 도출

천적생물 배양장치의 기능향상을 위해 천적생물 배양장치 가동기간동안 발생하는 문제점을 기록하고 분석하여 운영, 유지관리 방안 도출에 활용하고자 하였다.

#### (2) 천적생물 배양장치 기능개선

천적생물 배양장치 운영상 문제점 도출 결과에 따라 기능개선 방안을 모색하여 보수 보강작업을 실시하고 기능개선 효과를 평가하였다.

### 마. 천적생물 배양장치 최적규모 산정식 및 설계인자

#### (1) 천적생물 배양장치 최적규모 산정식

천적생물 배양장치의 적정 규모를 산정하기 위해 물벼룩의 성장특성 및 저감 조류 생체량을 고려하여, 적용 저수지에 대해 다음 사항을 전제하여 추정하였다.

- 저수지내 어류 포식압으로 인한 개체군 손실은 고려하지 않음
- 저수지의 조류대발생시 투명도가 0.5 m 이하임을 감안하여 유광층을 표층 1 m 구간으로 한정하고, 저수지 평균수심 기준 유광층 비율(평균 수심 4 m 경우 저수용량의 1/4)을 실저감 저수지 용량으로 가정
- 천적생물 배양장치에서 살포되는 천적생물 밀도는 평균 138 inds./L(초대저수지 실 가동 개체군 밀도)로 가정

#### (2) 천적생물 배양장치 최적 설계인자

실규모로 조성된 3단 복층 독립구조를 가진 현 구조의 운영, 유지관리, 배양성능 시 문제점 등 단점을 보완하고, 배양성능 개선, 시설설치비, 유지관리비, 운전용이성 등의 효율화 방안으로 최적 설계인자를 도출하였다.

### 바. 천적생물 배양장치 최적 설계디자인/운영/관리 시스템

#### (1) 천적생물 배양장치 최적 설계디자인



기존의 3단 복층의 선박형 구조를 기능개선 및 최적 설계인자를 고려하고, 비용효율화 및 운영, 유지관리 용이성, 배양 안정화 등을 추구할 수 있는 최적 디자인을 제시하였다.

## (2) 천적생물 배양장치 최적 운영/관리 시스템

실규모 천적생물 배양장치의 운영 및 유지관리를 통해 도출된 문제점을 바탕으로 시행착오의 최소화와 효율화를 기할 수 있도록 최적 운영/관리 시스템을 도출하였다.

## 2. 천적생물 배양장치 운영 및 현장살포

### 가. 천적생물 종주 및 자연분리 종의 공급 및 배양특성

#### (1) 천적생물 종주 및 자연분리 종의 공급

실내 배양에서는 다양한 천적생물 종의 섭식능력과 현장 적응 능력을 평가하고, 알맞은 환경에 다양한 천적생물을 적용할 수 있도록 다수의 천적생물 종주를 배양하여 종주를 유지하였다. 종주분리 천적생물인 *Daphnia similoides*는 실내 증식수조를 설치, 운영하여 증식시키고 이 증식수조를 통해 증식된 *D. similoides*을 현장의 천적생물 배양조에 투입하여 현장 적응 전 적응과 추가 증식을 유도시켰다.

자연분리 천적생물은 현장에서 분리된 동물플랑크톤 중 천적생물로 활용이 가능한 지각류의 자연 증가를 유도하였으며 초대저수지의 경우 *D. galeata*와 *S. ventulus*가 현장원수에서 천적생물 배양장치로 유입되어 자연 증가하였으며, 매 배양장치 조사(주 1회) 시에 각 배양장치의 개체군 밀도를 조사하여 개체군 밀도가 높은 배양장치에서 개체군 밀도가 낮은 배양장치로 이동, 투입하였다. 현장에서의 개체군 밀도의 정량적인 계수가 불가능하므로 네트로 채집하여 개체군 밀도를 직접 확인 후 천적생물의 밀도가 높을 경우 약 1,000~2,000개체를 네트로 조심스럽게 채집하여 천적생물 밀도가 낮은 배양수조로 이동 시켜 모든 수조에서 천적생물이 증가하도록 유도하였다.

#### (2) 천적생물 종주 및 자연분리 종의 배양특성

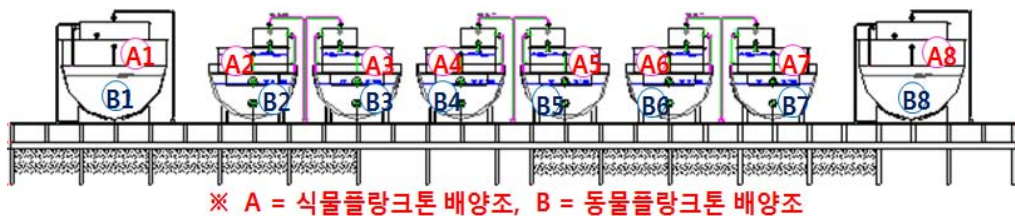
종주분리 천적생물과 자연분리 천적생물의 종주는 현장에서 일정 개체를 채집, 실험실에서 배양하여 종주를 유지하였다. 종주분리 천적생물인 *D. similoides*의 경우 종주를 유지함과 동시에 현장에 설치된 대량배양 수조에 투입하기 위해 50~75 L 규모의 배양장치에서 대량 증식을 유지하였다.

반면 자연분리 천적생물인 *D. galeata*와 *S. ventulus*는 종주 유지를 위한 소규모 배양은 가능하지만(1 L 미만 비이커 배양), *D. simioides*와 같이 대용량에서 증식은 어려운 것으로 나타났다.

#### 나. 천적생물 배양장치내 천적생물 배양특성

##### (1) 천적생물 배양장치 내 수환경 조사

천적생물 배양장치에서 천적생물 종주와 자연천적의 대량배양이 이루어지면서 변화하는 수질환경 분석을 위해 2013.5.24.~11.18, 2014.2.25.~12.2 까지 월 2회 이상 빈도로 총 91회에 걸쳐 모니터링을 실시하였다. 조사지점은 배양장치 유입수(CD-0), 식물플랑크톤 배양조(A1~A8)와 천적생물 배양조(B1~B8)의 총 17지점이다(그림 2.1). 종합수질측정장치(YSI, ProPlus)를 이용하여 수온(Water temperature, W.temp., °C), 용존산소량(Dissolved oxygen, DO, mg/L), 수소이온농도(pH), 전기전도도(Electric conductivity, EC, µS/cm) 항목을 측정하였으며, 분석방법은 표 2.1과 같다.



<그림 2.1> 천적생물 배양장치 조사 지점도

##### (2) 천적생물 배양장치 내 식물플랑크톤 현존량 분석

천적생물 배양장치 내 식물플랑크톤은 표층수 250 ml를 채수통에 직접 채수하여 lugol's solution으로 최종농도 2%가 되게 고정하였다. 실험실로 옮긴 시료는 균일하게 혼합시킨 후 Sedgwick-Rafter Chamber를 이용하여 광학현미경(Zeiss, Axiophot) 아래에서 200배로 계수하고 400배로 동정하였다. 정(1993), 수자원연구소(2000) 등의 문헌을 참고하였다.

##### (3) 천적생물 배양특성

천적생물 배양장치 내 배양특성을 파악하기 위해 주 1~2회 현장 천적생물 배양장치에서 플랑크톤 넷를 이용하여 천적생물을 채집, 고정(포르말





린, 최종농도 5%)하여 현미경 하에서 천적생물 종조성과 개체군 밀도를 분석하였다. 종에 따른 배양 특성 분석을 위해서 2014년에는 4월에서 11월까지의 천적생물 조성과 개체군 밀도와 배양장치 수질과의 상관관계를 CCA분석을 통해 평가하였다.

## 다. 천적생물 현장살포 및 효과증대방안

### (1) 천적생물 현장 살포

2013.5.20에 배양시설 공사 및 시운전이 완료된 후 2013.6.28~12.16까지 대량배양된 천적생물을 대상으로 현장살포를 실시하였으며, 2014년에는 2.25부터 조기가동하여 2014.4.24~12.9까지 현장 살포를 진행하였다. 강우기 탁수 유입기와 동절기 결빙기에는 살포하지 않았으며, 살포방법은 자연유하 조건으로, 1회 살포량은 전체 배양규모의 2/3에 해당하는 70톤 규모로 하였다.

### (2) 천적생물 효과증대방안

#### (가) 간이 침강장치

천적생물의 적용효과를 향상시키기 위해 초대저수지 유입부에 차수막을 이용한 오염물질 간이 침강장치를 적용하였다(그림 2.2).



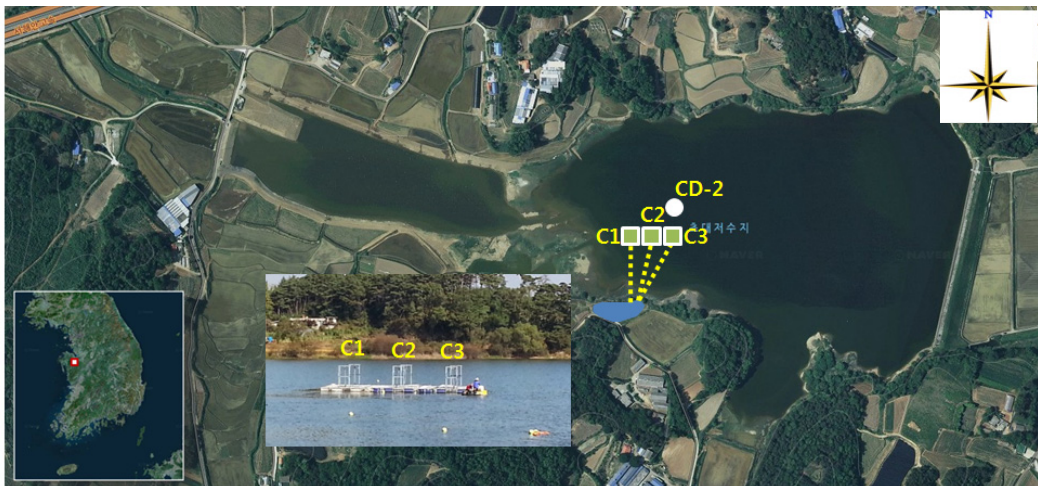
〈그림 2.2〉 오염물질 간이 침강장치 효과분석 지점

침강장치의 상류는 침강지, 하류는 저수지로 구분하여 강우시와 평시의 수환경 특성과 수질개선 효과를 알아보았고, 강우시와 평시의 구분은 4일 누적강우 5 mm를 기준으로 하였다. 분석항목은 부유물질(Suspended solids, SS, mg/L), TN, TP를 이용하였으며, 분석방법은 표 2.1과 같다.

(나) Cage

천적생물의 어류포식과 유실방지는 물론 현장 추가배양이 가능한 cage(C1~C3) 3개조(각 15톤)를 2013.9.9에 현장설치를 완료하였다(그림 2.3). 2013.10.15~11.18까지 35일간 8회 살포하였고, 천적생물 현장살포 시 cage로 20톤/회가 살포되도록 하여 증식효과를 분석하였다.

Cage 내 수환경 특성은 현장에서 종합수질측정장치(YSI, ProPlus)를 이용하여 수온, DO, pH, EC 항목을 측정하였으며, 분석방법은 표 2.1과 같다. 또한, 천적생물 기능개선 효과분석을 위해 동·식물플랑크톤 현존량과 우점종, Chl-a 변화를 조사하였다.

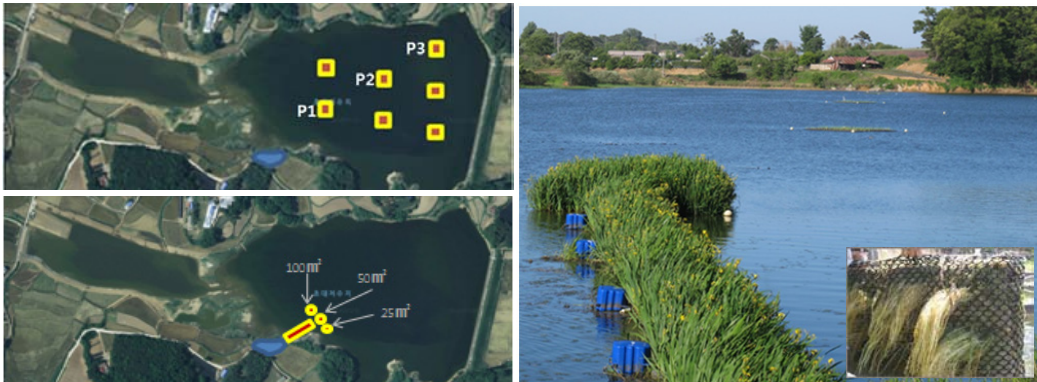


<그림 2.3> Cage 효과분석 지점

(다) 인공식물섬

천적생물의 은신처 및 서식공간 제공을 목적으로 기존 방류부 외에 인공식물섬을 2014.4.17에 추가로 설치한 후 2014.4.21.~8.27까지는 인공식물섬 (25 m<sup>2</sup>)의 거리별(P1, P2, P3) 조건을 적용하였고, 2014.9.1.~11.18까지는 면적별(P1: 25 m<sup>2</sup>, P2: 50 m<sup>2</sup>, P3: 100 m<sup>2</sup>) 조건을 적용하였다(그림 2.4). 또한, 천적생물 살포지점인 CD-1을 제외한 타지점과 비교하였다.

인공식물섬 적용에 따른 거리별, 면적별 수환경 특성은 종합수질측정장치(YSI, ProPlus)를 이용하여 수온, DO, pH, EC 항목을 측정하였으며, 분석방법은 표 2.1과 같다. 또한, 천적생물 기능개선 효과분석을 위해 동물플랑크톤 현존량을 알아보았다.



〈그림 2.4〉 인공식물섬 적용 지점 및 조건

### 라. 천적생물 배양장치 최적 운영 및 효율적 살포방안

2013년 6월 천적생물 배양장치 현장설치 이후 2년에 걸친 천적생물 배양, 시설운영과 녹조제어를 위한 현장살포를 수행하면서 획득한 결과를 바탕으로 최적 운영방안과 효과적 살포방안을 제시하였다.

## 3. 녹조제어 효과 분석 및 연중 활용방안

### 가. 초대저수지의 수환경 및 녹조발생 특성

#### (1) 초대저수지의 수환경 특성 분석

##### (가) 기후환경 및 저수율 특성분석

초대저수지의 기상현황은 기상청(<http://www.kma.go.kr>)의 서산기상대 일평균기온, 강수량 및 일조시간 자료를 이용하였으며, 저수율 변화는 한국농어촌공사 농업기반시설관리시스템(<http://rims.ekr.or.kr/>)의 저수율현황 자료를 이용하여 2013.1.1~2014.12.17까지 2년간 분석을 실시하였다.

##### (나) 수질이화학적 특성분석

##### ◦ 시간적범위

조사 기간과 조사빈도는 2013.3.8.~2014.11.18.까지 월 2회 이상의 빈도로 총 98회에 걸쳐 실시하였다.

##### ◦ 공간적범위

조사대상 지점은 유입부(CD-C), 중앙부(CD-5), 유출부(CD-11)로 구분

하여 3개 정점에서 실시하였다(그림 2.5).



<그림 2.5> 쇼대저수지 수질이와학적 모니터링 지점

- 분석항목 및 분석방법

(표 2.1) 수질분석 항목 및 방법

Parameter	Method	Preservation and pretreatment	Materials
W.temp.	-	Direct measuring	YSI ProPlus
DO		Direct measuring	YSI ProPlus
pH		Direct measuring	YSI ProPlus
EC		Direct measuring	YSI ProPlus
COD	Acid digestion by $\text{KMnO}_4$	add $\text{H}_2\text{SO}_4$ conc.( $<\text{pH } 2$ ) preserved in low temp.	-
SS	Filtering method of GF/C	-	
TN	UV Spectrophotometric method	add $\text{H}_2\text{SO}_4$ conc.( $<\text{pH } 2$ ) preserved in low temp.	Spectrophotometer HP 8453
TP	Spectrophotometric method (Ascorbic acid)	add $\text{H}_2\text{SO}_4$ conc.( $<\text{pH } 2$ ) preserved in low temp.	Spectrophotometer HP 8453
Chl-a	Spectrophotometric method (Aceton extraction)	Extraction of filtered GF/F by acidified aceton	Spectrophotometer HP 8453





수질이화학적 모니터링 시, 종합수질측정장치(YSI, ProPlus)를 이용하여 수온, DO, pH, EC 항목을 현장에서 측정하였다. 실내분석 항목으로는 COD, TN, TP 등이 있으며, 현장에서 반돈채수기(Wild co.)를 이용하여 수면 하 1 m 지점에서 시료를 채수한 후, 1 L 폴리에틸렌 병에 전처리하여 밀봉하고, 냉암조건에서 실험실로 운반한 시료를 이용하여 수질오염공정시험기준(환경부, 2011)에 의거해 분석하였다. 또한, TN과 TP 결과를 이용해 TN:TP ratio를 도출하여 초대저수지의 녹조발생에 영향을 미치는 제한영양염의 영향을 살펴보았다.

#### (다) 생물학적 특성 분석

##### ◦ 시간적범위

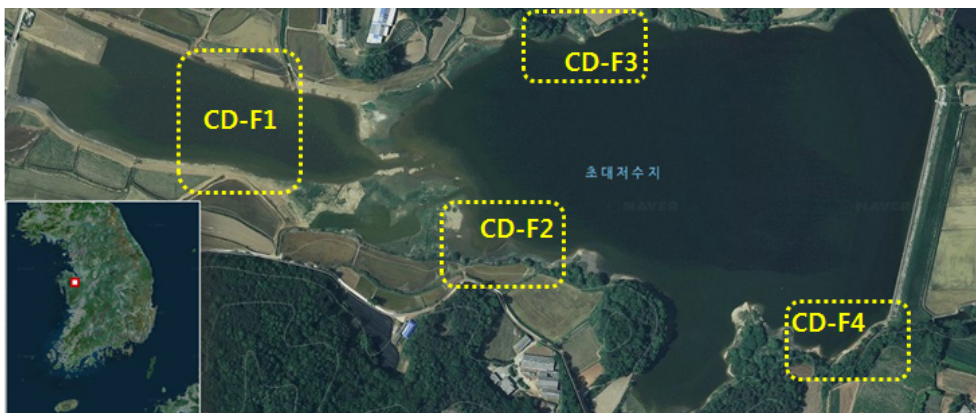
동·식물플랑크톤의 생물학적 특성분석은 수질이화학적 특성 분석기간과 동일하게 이루어졌다.

초대저수지에 서식하는 어류의 종조성 및 생태특성을 파악하기 위해, 2013.3.11.~2014.11.7.의 기간 중 집중강우에 의해 수체가 불안정한 7~8월을 제외한 수체가 안정한 시기인 봄철(3~5월)과 가을철(9~11월)에 총 8회(4회/년) 현장조사를 실시하였다.

##### ◦ 공간적범위

동·식물플랑크톤의 생물학적 특성분석은 수질이화학적 특성 분석지점과 동일하게 이루어졌다.

초대저수지 어류 조사지점은 저수지 유입부(CD-F1), 천적생물 살포지점(CD-F2), 천적생물 살포지점 맞은편(CD-F3), 저수지 유출부(CD-F4)의 4개 지점으로 구분하여 실시하였다(그림 2.6).



<그림 2.6> 초대저수지 어류 모니터링 지점

◦ 분석항목 및 분석방법

식물플랑크톤(Phytoplankton, cells/ml)은 현장 표층수 500 ml를 채수통에 직접 담아 lugol's solution으로 최종농도 2%가 되게 고정하였으며 실험실로 옮겨, 균일하게 혼합시킨 후 Sedgwick-Rafter Chamber를 이용하여 광학현미경(Zeiss, Axiophot) 아래에서 200배로 계수하고 400배로 동정하였으며, 정(1993), 수자원연구소(2000) 등의 문헌을 참고하였다.

동물플랑크톤(Zooplankton, inds./L)는 윤충류, 지각류 및 요각류를 대상으로 플랑크톤네트(망목 63  $\mu$ m)로 저층 0.5 m 이상 지점부터 수직 예인하여 시료를 분리, 채집하여 포르말린으로 고정하였다. 고정된 시료는 광학현미경을 통해, 속 또는 중 수준으로 동정, 계수한 후 여과량을 산술 계산하여 군집조성과 개체군 밀도를 분석하였다.

1~8차 조사에서는 투망(Casting net, 망목 7 × 7 mm)과 족대(Kick net, 망목 4 × 4 mm)를 이용하여 가슴장화를 착용하고 접근이 가능한 장소에서 조사를 실시하였으며, 투망투척횟수는 8회/지점(총 32회)로 한정하였고, 족대는 보조도구로서 조사자의 판단에 의해 필요시 활용하였다 또한, 5~8차 조사에서는 함정어구인 외통발(5 × 5 mm, Ø 0.65 m, 3 m)을 추가 적용하였으며, 투망과 족대조사가 어려운 구간에서 고무보트를 이용해 24시간 조사를 실시하였고, 1식/지점(총 4식)로 한정하였다(그림 2.7).



<그림 2.7> 어류 연장조사(좌: 투망, 중: 족대, 우: 외통발)

채집한 어류는 Nelson(1994)의 분류체계를 따랐으며, 김과 박(2002), 이와 노(2006)에 의거해 동정 및 계수 후 바로 풀어주는 것을 원칙으로 하되, 위내용물 분석을 위해 종별·크기별로 1~5개체씩 현장에서 위장을 적출하여 10% 포르말린 용액으로 고정하였다. 채집된 어류의 개체수를 산정할 때 어류체장의 길이가 20 mm 이하의 동정이 불가능한 치어는 제외하였다.

어류의 생태특성 분석을 위한 내성도 및 영양단계 분석은 ‘수생태계 건강성 조사계획 수립 및 지침(환경부 2008)’의 분류기준에 의거해 실시하였다.



내성도 특성(Tolerance guilds)은 수질 및 서식지의 질적 저하에 민감하게 반응하는 정도에 따라 민감종(Sensitive species), 중간종(Intermediate species), 내성종(Tolerant species)으로 구분하였다.

수체 내 에너지 흐름을 반영하는 영양단계 분석(Trophic guilds)은 수생태계에서 가장 높은 영양단계를 차지하는 육식종(Carnivores)과 주로 수서 무척추동물을 섭식하는 충식종(Insectivores), 동·식물질을 가리지 않고 섭식하는 잡식종(Omnivores)으로 대별하여 분석하였으며, 식성의 분류기준은 다양한 먹이원이 존재할 때, 각 종이 가장 선호하는 자원(Primary source of food)에 근거하였다.

## (2) 초대저수지의 녹조발생 및 부영양화 특성

### (가) 녹조발생 특성

초대저수지의 녹조발생 특성을 살펴보기 위해 투명도(Secchi depth, SD, m)와 Chl-a, 식물플랑크톤 현존량을 분석하여 비교하였다. SD는 지름 30 cm의 플라스틱 원판에 4개로 분할된 흑백판(Secchi disc)을 이용하여, 직사광선이 비치지 않는 수면에서 수중으로 가라앉혀 흑백판의 검은색과 흰색의 경계가 구분되지 않는 지점의 깊이인 투명도 수심(Secchi depth)을 측정하였으며, Chl-a는 시료 250 mL를 채수하여 GF/F에 여과하여 냉동보관한 후 수질오염 공정시험기준(환경부, 2011)의 흡광광도법에 의해 분석하였다(표 2.1).

### (나) 부영양화 특성

초대저수지의 부영양화 특성을 알아보기 위하여, 부영양화지수(Trophic State Index, TSI) 분석을 실시하였으며, TN은 Kratzer and Brezonik(1981)의 지수산정 방식을 따랐고, TP, Chl-a, SD는 Carlson(1977)의 지수산정 방식에 따랐다.

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

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

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

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

## 나. 녹조제어 효과

### (1) 천적생물 배양장치

천적생물 배양장치에서 천적생물 종주와 자연천적의 대량배양이 이루어

어지면서 제거되는 녹조의 제어효과를 분석하기 위해 2013.5.24.~11.18, 2014.2.25.~12.2까지 월 2회 이상 빈도로 총 91회에 걸쳐 배양장치 유입수(CD-0), 식물플랑크톤 배양조(A1~A8)와 천적생물 배양조(B1~B8)의 총 17 지점을 대상으로 조사하였으며(그림 2.1), 분석항목은 Chl-a 및 동·식물플랑크톤으로 분석방법은 수환경조사와 동일하게 하였다.

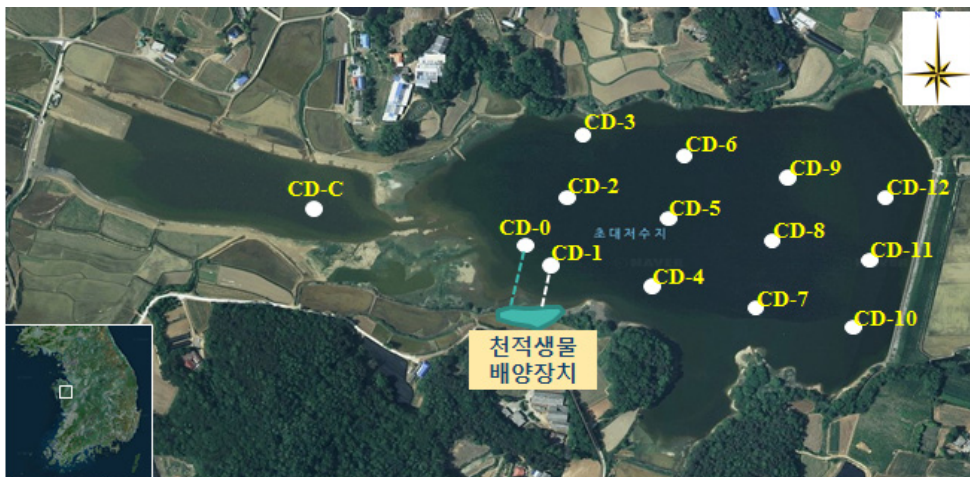
배양장치 내 녹조제거율은 각 배양장치에서 분석된 Chl-a 값과 식물플랑크톤 현존량을 대상으로 아래 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{녹조제거율(Chl-a, 식물플랑크톤, \%)} = \frac{[(\text{유입수 농도} - \text{천적생물 배양조 농도}) / \text{유입수 농도}] \times 100$$

## (2) 초대저수지

천적생물 현장살포에 따른 녹조제어 효과분석을 위하여, 천적생물 살포 영향이 없는 대조구(CD-C), 살포지점 인근의 유입원수 취수부(CD-0), 살포지점(CD-1)과 등간격의 지점들(CD-2~CD-12)로 구분하여 총 14개 지점을 선정하였으며, 각 지점에는 관측 부표(drafter)를 띄운 후 천적생물 살포효과 분석에 활용하였다(그림 2.8).

천적생물 배양장치에서 대량 배양한 천적생물은 CD-1에 살포하였으며, 2013.9.30.~10.8까지 9일간, 2014.9.29.~10.23까지 25일간의 천적생물 살포에 따른 Chl-a, 식물플랑크톤 현존량, 동물플랑크톤 개체수 변화와 녹조제어효과를 분석하였다. 또한, 살포 천적생물인 *D. galeata*와 *S. ventulus*의 누적 개체수를 분석하여 장기살포에 따른 천적생물 정착효과를 알아보았다.



<그림 2.8> 천적생물 연장살포 효과분석 지점





## 다. 천적생물 배양장치 연중 활용방안

### (1) 천적생물을 이용한 녹조제어 전략

농업용저수지의 녹조발생 유형을 분류하고, 천적생물 적용가능성을 제시하였으며, 경쟁이 되는 유사 공법과의 차별성과 우수성을 제시하여 천적생물 적용기술의 녹조제어 전략을 나타냈다.

### (2) 천적생물 배양장치의 연중 운영 및 활용방안

천적생물 배양장치의 운영과 활용방안을 정립하고, 초대저수지의 시기별 녹조 발생특성에 따른 연중 천적생물 배양장치 운영방안을 제시하였다.

## 4. 생물조절 연계방안(먹이연쇄)

### 가. 초대저수지 생태계 먹이구조 및 물질순환

#### (1) 생태계 먹이구조

녹조발생수역의 물질순환구조 및 특성을 분석하기 위하여 탄소 및 질소 안정동위원소를 이용하였다. 물질 순환 구조 파악을 위한 먹이망 구조 분석은 2013년 5, 9, 11월 3회, 2014년 5월 10월 2회 걸쳐 실시하였으며, 수체에 존재하는 식물플랑크톤과 유기물을 포함하는 POM(Particulate organic matter), 동물플랑크톤과 어류를 채집하여 전처리를 거친 후 이들 시료의 탄소와 질소 안정동위원소비를 측정하였다.

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 해주며 (Vander Zander and Rasmussen, 2001), 동물플랑크톤과 같이 위내용물 분석이 어려운 생물종의 섭식성향을 파악하는데 유용하게 사용된다(Doi et al. 2008; 2009). 특히, 위 내용물 분석이 불가능한 Daphnia의 영양단계를 정량적으로 평가함으로써, 어류를 정점으로 하는 복잡한 하천 생태계의 먹이망 구조를 간단히 파악할 수 있다(Polis and Strong, 1996; Yoshioka et al., 1994).

본 연구에서는 동위원소 분석을 위해 채집된 생물시료를 냉동보관, 안정동위원소 측정기를 이용하여 질소, 탄소 안정동위원소비율을 이용하여 정량적으로 분석하였다. 각 시료의 동위원소비는 표준시료가 함유한 탄소와 질소의 동위원소비(13C : 12C, 15N : 14N)를 기준으로 천분율로 나타낸 동위



원소비를 측정하고(Vander Zander and Rasamussen, 2001), 먹이원 평가에는 탄소의 동위원소비를, 영양단계의 평가에는 질소동위원소비를 이용하여 먹이망내 생물학적 상호작용을 평가하였다.

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

유기물을 포함한 POM 시료의 경우 탄산염 제거를 위해 1 N 농도의 염산처리를 실시하였다. 또한 식물플랑크톤의 분류군별 안정동위원소 비를 구별하여 측정하기 위해 채집된 초대저수지 원소를 각각 크기가 다른 망목의 네트로 걸러 < 20  $\mu\text{m}$ , 20~50  $\mu\text{m}$ , 50~200  $\mu\text{m}$ , >200  $\mu\text{m}$  등으로 나누어 안정동위원소를 측정하였다. 동위원소비는 CF-IRMS 질량분석계(부산대학교 공동기기센터)를 이용하여 질소, 탄소 안정동위원소비율을 이용하여 정량적으로 분석하였다.

## (2) 영양단계 및 물질순환

동위원소비가 분석된 생물의 먹이사슬 내 영양단계 및 물질순환은 질소 안정동위원소 값을 이용하여 계산하였다. 영양단계 상승에 따른 경험적 질소 동위원소(15N) 축적율을 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

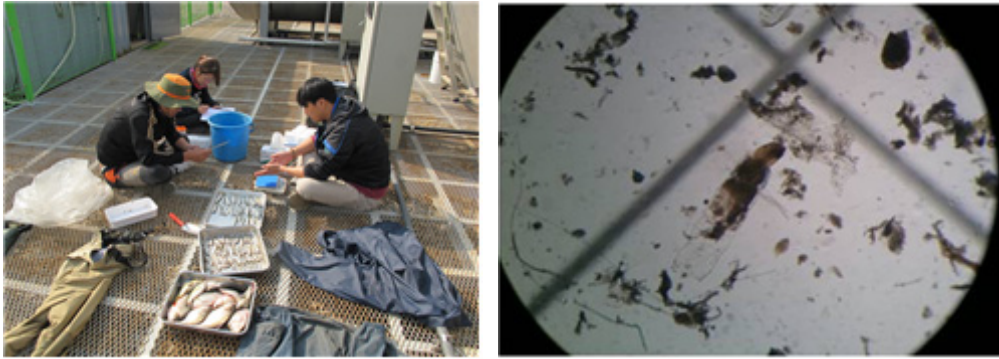
$$\text{TL(영양단계)} = (\text{대상생물 질소동위원소비} - \text{POM 질소동위원소비}) / 3.4 + 1$$

먹이원의 기여율은 복수의 대상 먹이원의 탄소, 질소 안정동위원소비의 좌표값을 이용하여 고려된 먹이원 대상 생물들의 기여율 총합 1에 대한 각 먹이원 생물의 기여율로 계산하였고, R-software SIAR package를 이용하여 Iso-mixng model을 통해 분석하였다(Parnell et al. 2010; Syvaranta et al. 2011).

## 나. 어류를 이용한 생물조절 연계방안

### (1) 초대저수지 섭식특성 도출을 위한 위내용물 분석

어류의 섭식특성은 2013.5.27.~11.1까지 총 3회 현장조사(2~4차 조사)에서 채집한 어류를 대상으로 실시하였으며, 종별·크기별로 1~5개체씩 현장에서 위장을 적출하여 10 % 포르말린 용액으로 고정하였고, 해부현미경(Leica S8AP0,  $\times 80$ )을 이용하여 동물플랑크톤 이상의 분류군에 대한 어류 개체 당 섭식 개체수를 계수하였다(그림 2.9).



〈그림 2.9〉 섭식특성 도출을 위한 위내용물 분석

### (2) 육식어류 도입 및 어류상의 변화

초대저수지의 생물조절을 위한 최상위포식자 도입을 위하여 초대저수지 수변에서 실시한 어류조사(2차조사 기준)를 바탕으로 어류자원량을 추정하였다. 이때, 생태계 피라미드 안정화를 위하여 최상위포식자의 비율은 5% 내외가 적합한데, 안전율 2배를 계산하여 초대저수지 추정 어류자원량의 10% 수준으로 투입하였다.

$$\text{어류자원량(추정)} = (\text{총 개체수} / \text{어류 포획면적}) \times \text{수표면적}$$

$$[\text{어류 포획면적} = \text{투망포획면적} \times \text{투망투척횟수}]$$

또한, 육식어류 도입 전인 2차조사(2013.5.27~28)와 도입 후의 동일시기인 6차조사(2014.5.29.~30)의 어류 종조성과 상대풍부도(RA)를 비교하여 육식어류 도입에 따른 초대저수지의 어류상 변화를 알아보았다.

### (3) 생물조절 연계방안

메기 도입에 따른 생물조절효과를 알아보기 위해 도입한 메기의 재포획을 통한 시기별 체장·체중을 측정하여, 도입한 메기의 생체량(습증량 기준) 변화를 분석하였다.

과잉 물고기 포획 및 생태구조 정상화 유도를 위해 당진시 초대저수지 수질관리협의체의 도움을 받아 2014.11.26에 설치하였으며, 2013.12.9까지 2주간 3~4일 간격으로 4회에 걸쳐 포획을 실시하였다. 어구는 빙어삼각망(7 × 7 mm, 유입어망 3 × 20 m, 3통발), 붕어삼각망(17 × 17 mm, 유입어망 3 × 25 m, 3통발)을 각 1식 이용하였다(그림 2.10).



<그림 2.10> 과잉 물고기 포획

## 5. 농업용저수지 수질개선 연계 및 사업화방안

### 가. 천적생물 적용기술의 타공법 비교 적용타당성 분석

#### (1) 천적생물 적용기술의 타공법 비교

천적생물 이용기술은 생물학적 처리 기술로서 타공법 중 가압부상시설의 물리화학처리, 천연수질개선제의 화학적 처리, 초음파 이용기술과 물순환 처리기술의 물리적 처리 등과 경제성 및 장·단점을 비교하였다.

#### (2) 경제성 및 적용타당성 분석

경제성 및 적용타당성 분석은 한국환경공단에서 2012년 발간한 “수생태 안정성 향상을 위한 조류저감기술”에서 소개된 각 기술의 설치비와 월간



관리비용 등을 내구도 최대 10년을 기준으로 하여 100만톤의 호소를 중심으로 다시 계산한 수치로 비교하고, 각 기술의 장점과 단점을 비교하였다.

#### 나. 농업용저수지의 수질개선 연계방안

천적생물 대량 배양 및 현장살포 후 녹조제어 효과 분석과 함께 주요 수질관리 인자인 COD, TP 항목의 개선효과를 분석하였다. 조사정점은 수질조사 대표지점인 CD-5를 중심으로 분석하였으며, 분석시기는 천적생물 살포에 따른 녹조제어 효과 분석시기와 동일하게 하였다.

#### 다. 사업화방안: 천적생물과 어류를 이용한 생태적 관리방안

##### (1) 적용 후보 저수지 분석

전국 1만 8천여개의 저수지 중 경기(고잔, 과림, 기흥, 왕송, 일월), 충북(백마, 연제, 오성, 용곡, 이담, 금정, 삼기), 충남(신창), 경북(대맥, 용천, 하동), 경남(봉산, 송고, 장척)의 19개 저수지를 대상으로 2014년 5월~11월까지 수환경변화와 식물플랑크톤 및 천적생물의 분포에 대해 농업용수 수질 기준(Chl-a: 35 mg/m<sup>3</sup>, COD: 8.0 mg/L, TP: 0.15 mg/L)을 기준으로 분석하여 본 연구내용을 적용할 수 있는 적용타당성 저수지를 분석 선별하였다.

##### (2) 천적생물과 어류를 이용한 생태적 관리방안

천적생물과 육식어류를 이용한 생태적 관리의 실천적 방안으로 각 농업용호소의 수질관리 협의회와 협력하여 지속가능한 실천계획을 제시하였다.

또한 녹조발생 우려가 있는 주요 농업용호소에 대한 사업후보지를 선정하고, 적용방안을 제시하였다.



## 제2절 실규모 천적생물 배양장치 현장 적용

### 1. 연구대상지 선정

#### 가. 대상지 선정조건 및 후보지

농업용저수지의 녹조제어를 위해 천적생물 적용기술을 다년간 개발해 왔으며, 실용화를 위한 실규모 천적생물 배양장치 적용대상지를 선정하고자 하였다. 범용화 될 수 있는 실규모 실용화기술의 완성을 위해서는 대상지의 선정이 매우 중요하다. 대상지 선정조건은 5가지로 다음과 같다.

- 최근 3년간(2010~2012) Chl-a 평균농도가 70 mg/m<sup>3</sup> 이상인 저수지
- 평균수심 2.5 m 이상 저수지
- 지속적인 외부오염원(예, 유료낙시터 등)이 없는 저수지
- 유효저수량 20만톤 이상의 농업용저수지
- 수시 평가점검 및 유지관리를 위해 접근의 편리성이 있는 저수지

제시한 선정조건을 토대로 농업용수 수질측정망 지구와 단기 수질개선 대책 지구 등을 대상으로 분석하였으나 녹조가 발생하는 대부분의 저수지가 유료낙시터로 운영되고 있어 생태계 교란이 예상되었으므로 배제하였고, 최종 대상 후보지로 경기 수원 지역의 일월저수지와 충남 당진의 초대저수지를 선정하였다. 2개 저수지를 면밀히 검토한 결과 중규모 농업용저수지 규모이면서, 오염의 형태가 전형적인 농촌지역을 대변하는 초대저수지가 녹조발생이 심각한 농업용저수지의 대표 표본이 될 수 있을 것으로 기대되어 최종적으로 초대저수지를 선정하게 되었다(표 2.2).

(표 2.2) 실규모 천적생물 배양장치 적용 대상 후보지

저수지	평균수심 (m)	유효저수량 (천m <sup>3</sup> )	관개면적 (ha)	COD (mg/L)	Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	오염원
일월저수지	2.5	299	126	15.9	191.5	2.749	0.179	생활하수 하수처리수
초대저수지	4.3	1,040	206	15.6	127.5	4.912	0.252	축산폐수 농업비점

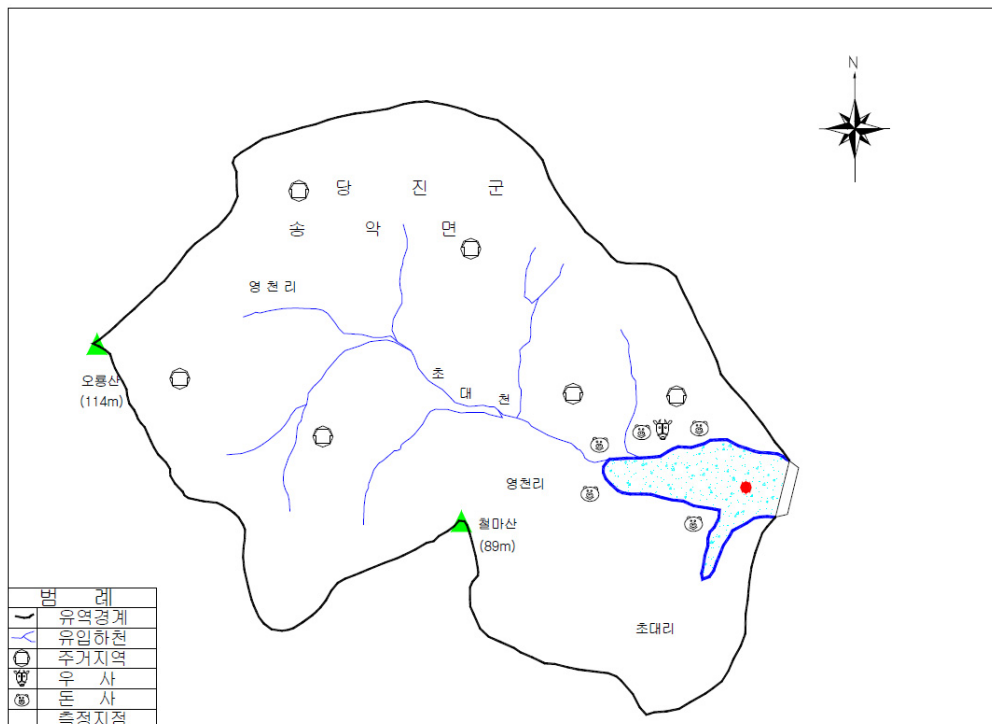


### 나. 초대저수지의 제원 및 일반현황

충남 당진시 신평면 초대리에 위치한 초대저수지는 1975년에 조성되었으며, 중규모 농업용저수지로서 유입부 습지대가 발달하였다(한국농어촌공사 농업기반시설관리시스템, <http://rims.ekr.or.kr/>).

유역은 신평면 초대2리, 송악읍 영천리 등 2개리가 해당되며, 서쪽의 오룡산(114 m), 남쪽의 철마산(89 m) 등 비교적 낮은 산지로 이루어진 방추형 유역을 형성하고 있다. 주유입하천은 오룡산 계곡에서 발원한 초대천으로, 여러 골짜기에서 발원한 소하천들과 합류하여 저수지로 유입되고 있다.

유역내 농경지의 비율이 높아 농경배수에 의한 비점오염과 저수지에 인접한 둔사와 우사로 부터 유출되는 축산계 오염이 주요 오염원으로 수질에 영향을 미치고 있다. 특히, 오염 배출원의 위치가 저수지에 인접하여 저수지의 부영양화에 직접적인 영향을 미치고 있어 축산 분뇨의 처리와 세척수 관리가 필요하다(그림 2.11).



〈그림 2.11〉 초대저수지 유역개황도

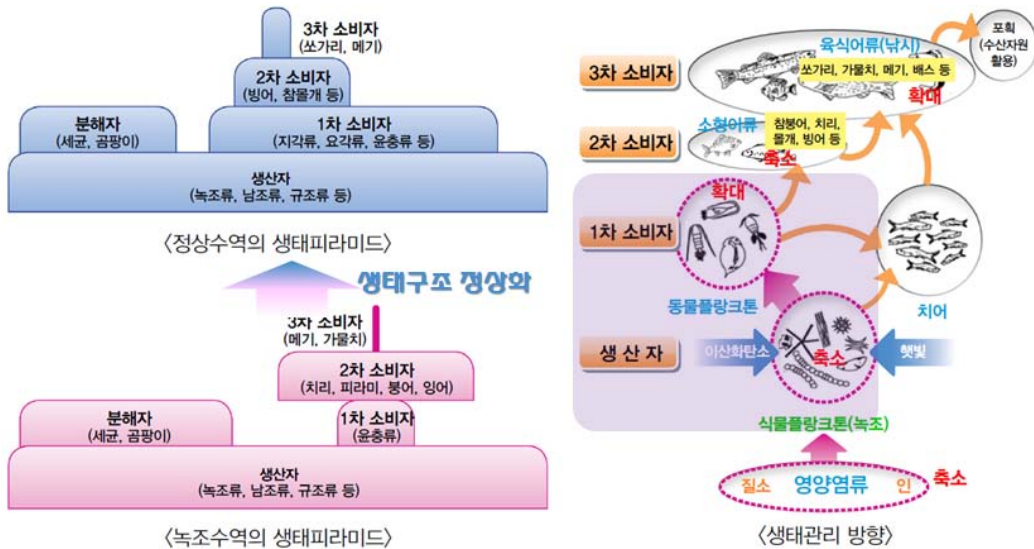


## 2. 실규모 천적생물 배양장치 기본계획 및 설계

### 가. 실규모 천적생물 배양장치 기본계획

#### (1) 기본원리

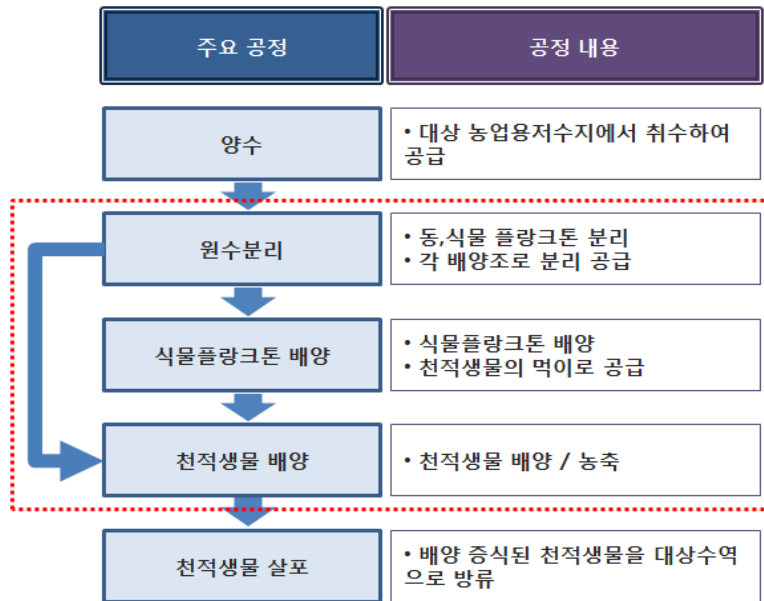
천적생물 적용기술은 녹조발생 수역인 저수지에서 물을 취수하여 수중에 자연 분포하는 녹조 포식성 동물플랑크톤(천적생물)을 선택·분리·배양하여 개체수를 증식시킨 후 다시 녹조발생 수역에 방류하여 녹조를 포식, 제거하는 원리로 손상된 생태계 먹이구조를 개선하여 녹조 제어를 달성하는 기술이다. (그림 2.12)



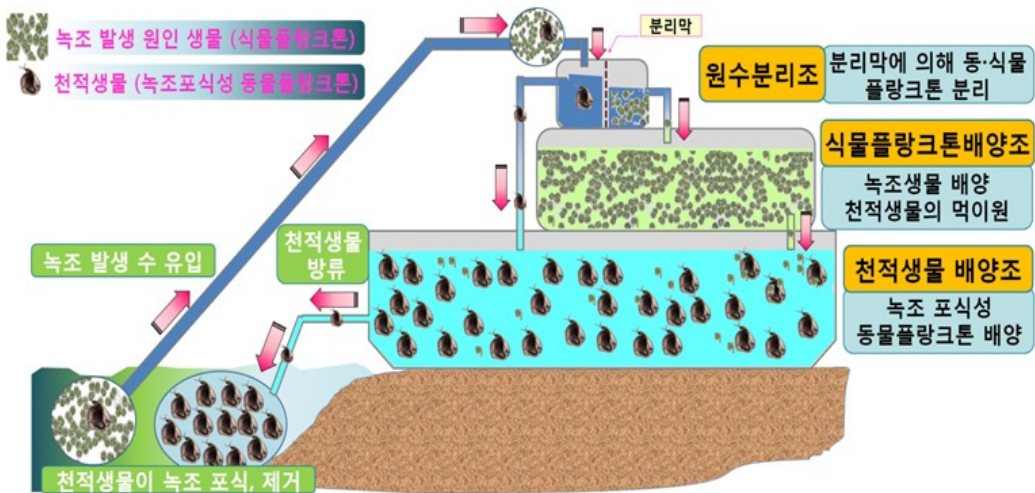
〈그림 2.12〉 녹조수역의 생태피라미드와 관리방향

녹조 방지를 위한 천적생물 적용기술의 처리공정은 농업용저수지로부터 원수를 양수하여 배양장치로 유입시키는 유입단계(양수)와 배양장치의 원수 분리조를 통해 동·식물 플랑크톤을 선택 분리하는 원수분리단계(원수분리조), 먹이생물 배양단계(식물플랑크톤 배양조), 천적생물 배양단계(천적생물 배양조) 및 배양된 천적생물을 대상 유역에 살포하는 살포단계로 구성되며 공정도도 나타내면 그림 2.13, 그림 2.14와 같다.





〈그림 2.13〉 천적생물 적용기술 공정도



〈그림 2.14〉 처리공정 모식도

## (2) 핵심기술

천적생물 적용기술의 목적은 천적생물의 안정적인 배양 증식을 유도하여 녹조발생수역에 적용함으로써 효과적인 녹조제어를 달성하는데 있다. 이러한 목적을 달성하기 위한 천적생물 적용기술의 핵심은 다음과 같다.



- 자연수역내에 분포하는 천적생물의 분리기술
- 수중 어류, 수서곤충 등을 배제하여 천적생물을 배양하는 기술
- 녹조 제어에 효과적인 종주 확보 및 안정적 배양기술
- 현장 상황에 맞는 천적생물 배양장치 적용 및 선택적 살포기술



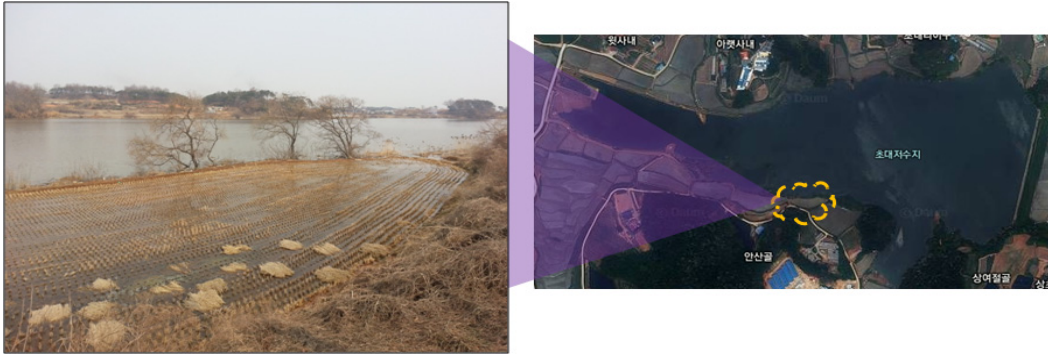
<그림 2.15> 천적생물 배양장치 조감도

### (3) 기본계획

#### (가) 대상지 및 설치위치

본 연구 과제를 수행할 대상 저수지는 충남 당진군 초대면 신평리에 위치하는 초대저수지로서 선행 연구과제(농업용수원의 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 개발, 2010년 1월~2012년 12월)를 수행한 전대저수지와 지리적으로 가까운 곳에 위치하고 있다.

천적생물 배양장치는 저수지와 근접한 거리에 설치하는 것이 운영과 관리에 유리하기 때문에 설치위치를 선정할 때는 저수지 수변 부지가운데 중·상류부 이상에서, 적정 수두를 확보할 수 있는 곳을 선정한다. 이러한 전제조건을 고려하여 배양장치 설치에 필요한 수변부지의 확보, 접근성 등이 우수한 초대저수지를 연구 대상지로 선정하였다(그림 2.16).



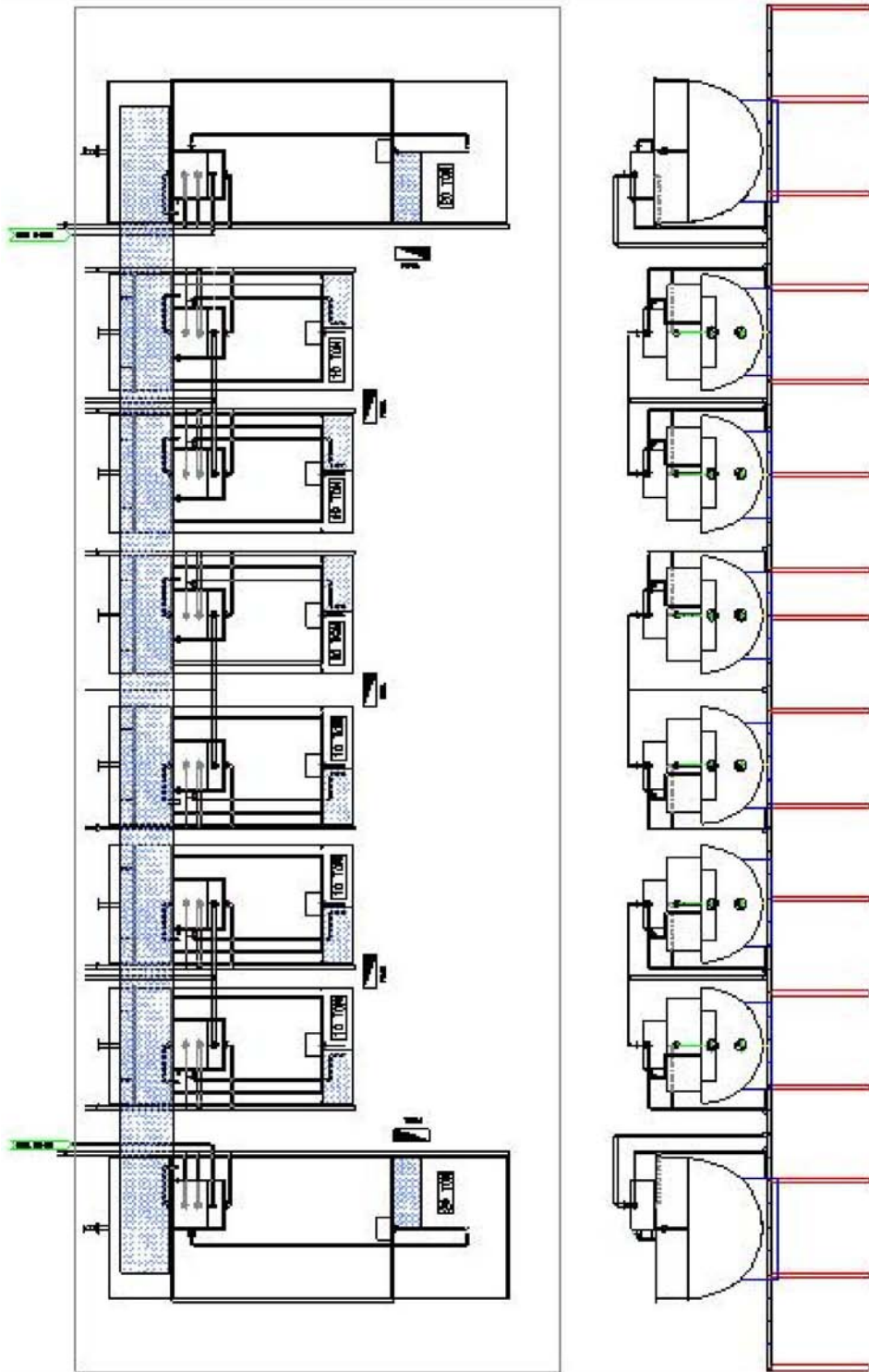
〈그림 2.16〉 설치위치 및 시설 예정부지

배양장치의 설치 예정부지는 기존에 논으로 사용하던 곳으로서 지반이 무르고 침하의 우려가 있으나 60cm 정도의 표토를 걷어내면 단단한 지반이 나타나는 곳이다. 이를 고려하여 설치부지에 골재를 포설하고 다짐을 한 후 2 m 깊이로 파일을 시공하여 지반을 강화하였고, 부등침하를 방지하고자 배양장치의 배치를 좌우 대칭으로 계획하였다(그림 2.16).

#### (나) 배양장치 설치계획

천적생물 배양장치는 초대저수지 수변에 육상형으로 설치하도록 계획하였다. 배양장치의 배양규모는 총 100 m<sup>3</sup> 규모로서, 천적생물 배양조 기준 10 m<sup>3</sup> 규모 6계열과 20 m<sup>3</sup> 규모 2계열로 계획하였으며, 시설의 구성은 배양장치 1계열당 각각 원수분리조 1 set, 식물플랑크톤 배양조 1 set, 천적생물 배양조 1 set로 구성하고, 식물플랑크톤 배양조를 천적생물 배양조 위에 올려 설치면적을 최소화하였다(그림 2.17). 또한, 저수지의 물을 유입펌프를 이용하여 배양장치의 원수분리조에 유입시킨 후 자연유하흐름을 유지하도록 배치하였으며 저수지내 살포지점에는 식물섬 50 m<sup>2</sup>를 설치하고 방류관을 식물섬 위에 고정하여 살포배관의 처짐 현상을 방지하는 동시에 식물섬 중앙에 살포하여 동물플랑크톤의 은신처 역할을 할 수 있도록 계획하였다.

- 배양장치는 초대저수지 수변 농지(논)를 활용하여 육상형으로 설치
- 기초용 베이스 위에 배양장치를 설치하여 자연유하를 위한 수두 확보
- 식물섬 위에 부유형으로 살포배관을 설치하여 원활한 살포 유도
- 관리용 Walkway와 외부인 출입방지를 위한 울타리 설치
- 설치 예정지 주변의 정지작업을 통한 차량 주차공간 확보



〈그림 2.17〉 배양장치 배식계의 평면도(상) 및 단면도



### (다) 부대시설

초대저수지에 천적생물 이용기술을 적용함에 있어서 이용기술의 효과 향상과 연구 활동의 능률을 높이기 위해 천적생물 배양장치 외에 아래와 같이 부대시설의 설치를 계획하였다.

- 오염물질 침강장치 조성 : 초대저수지 상류 유입부에 차수막을 이용한 침강장치를 설치하여 입자성 오염물질의 유입을 차단하여 제거함
- Cage : 살포한 천적생물이 포식자에게 잡아먹히는 것을 방지하고, 유속에 유실되는 것을 방지할 뿐만아니라, 수역 살포전 추가 증식과 환경적응 유도 등을 위해 망목 500  $\mu\text{m}$ 의 Cage를 조성함
- 인공식물섬 : 저수지에 살포된 천적생물이 포식자로부터 안전하게 은신할 수 있는 서식공간을 조성함

### 나. 실규모 천적생물 배양장치 설계

#### (1) 배양장치 설계인자

천적생물 배양장치를 설계하여 현장에 적용할 경우 적용대상 저수지의 형상, 입지조건, 접근성 등을 고려하여 위치를 선정하고 배양장치의 용량을 결정한다. 배양장치의 용량이 결정되면 체류시간을 근거로 각 배양조별 규격을 산정하고 이후 유량 등을 고려하여 기계장비의 사양을 선정, 설계에 반영한다. 본 실규모 실용화 연구에서 배양장치 규모는 총 배양용량 100  $\text{m}^3$  규모(10  $\text{m}^3$  6 set, 20  $\text{m}^3$  2 set)로 하였으며 저수지 홍·만수면 부지에 육상형 배양장치를 설치하는 것으로 설계하였다(표 2.3).

**(표 2.3) 천적생물 배양장치 설계인자**

구 분	설 계 인 자		비 고
장치용량	10 $\text{m}^3$	20 $\text{m}^3$	천적생물 배양조 용량
설치 계열수	6	2	
체류시간	식물플랑크톤 배양조 : 2.5 day 천적생물 배양조 : 4.0 day		
장치형식	육상형 Package Type		

#### (2) 배양장치 세부설계

##### (가) 유입유량 결정



각 배양조의 적정 체류시간 확보와 원수펌프의 사양을 결정하기 위해 유입 유량을 결정한다(표 2.4).

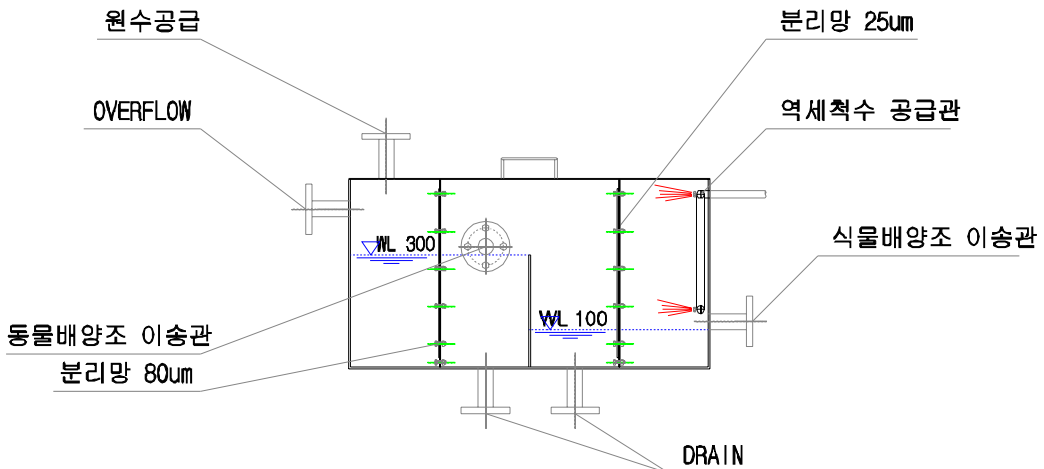
(표 2.4) 유입유량 산정값

구 분		설 계 조 건	비 고
10 m <sup>2</sup> 배양장치	유입유량	2.5 m <sup>3</sup> /day = 1.74 l/min	
	계산근거	유입유량 = 장치용량 ÷ 체류시간 = 10 m <sup>3</sup> ÷ 4 day	
20 m <sup>2</sup> 배양장치	유입유량	5.0 m <sup>3</sup> /day = 3.47 l/min	
	계산근거	유입유량 = 장치용량 ÷ 체류시간 = 20 m <sup>3</sup> ÷ 4 day	

유입펌프는 수중펌프 Type으로서 앞서 산정한 유입유량과 양정을 고려하여 펌프 사양을 결정하였다.

(나) 원수분리조

원수분리조의 체류시간은 10분 이상으로 하며 유입수 중 식물플랑크톤과 동물플랑크톤을 분리할 수 있는 구조로 한다. 동·식물 플랑크톤의 분리를 위해 25 μm의 메쉬망을 사용하는데, 메쉬망의 청소는 자동 세척이 될 수 있도록 메쉬망 전면부에 역세척 노즐과 역세척 펌프를 설치하여 timer에 의한 자동 운전이 가능하도록 하였다. 또한 식물플랑크톤 배양조와 천적생물 배양조로의 이송관에는 각각 밸브를 설치하여 정확하게 유량을 조절할 수 있도록 하였다(그림 2.18, 표 2.5).



<그림 2.18> 원수분리조 구조(측단면도)



(표 2.5) 원수분리조 설계요소 및 부대시설

구 분	설 계 조 건		비 고
	10m <sup>3</sup>	20m <sup>3</sup>	
유입유량	1.74 ℓ/min	3.47 ℓ/min	
체류시간	10 min 이상		
필요용량	0.017 m <sup>3</sup> 이상	0.035 m <sup>3</sup> 이상	
규 격	1.0 mW × 1.0 mL × 0.5 mH		
원수펌프	25A × 4.2 ℓ/min × 0.29 kw × 7 MH		
부대시설	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 유입 배관 32A</li> <li>- 동물배양조 이송관 32 A</li> <li>- 식물배양조 이송관 32 A</li> <li>- 역세척수 공급관 15 A</li> <li>- DRAIN 및 OverFlow 50 A</li> <li>- 분리망 25 μm(전면부 80 μm)</li> </ul>		

## (다) 식물플랑크톤 배양조

식물플랑크톤 배양조는 설계기준 체류시간이 2.5일로서 식물플랑크톤의 성장조건을 고려하여 유효수심을 0.5 m 이내로 낮게 유지하고 충분한 일조량을 확보할 수 있도록 상부 개방형 구조로 하였다(표 2.6).

(표 2.6) 식물플랑크톤 배양조 설계요소 및 부대시설

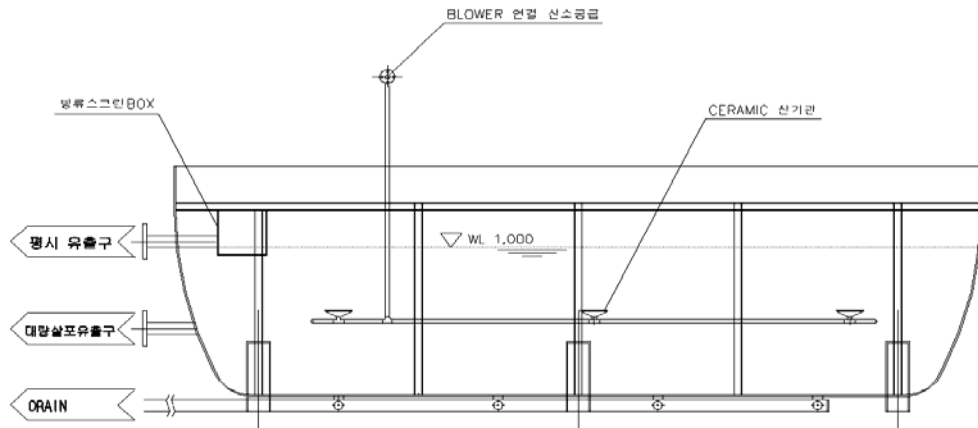
구 분	설 계 조 건		비 고
	10m <sup>3</sup>	20m <sup>3</sup>	
유입유량	1.74 ℓ/min	3.47 ℓ/min	
체류시간	2.5 day		
필요용량	3.125 m <sup>3</sup> 이상	6.25 m <sup>3</sup> 이상	유입유량의 50%
규 격	2.0 mW × 3.0 mL × 0.7 mH	3.0 mW × 4.5 mL × 0.7 mH	
실 용량	3.6 m <sup>3</sup>	6.75 m <sup>3</sup>	
부대시설	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 유출 배관 32A</li> <li>- 수중 교반기(0.29kw 수중펌프 사용)</li> </ul>		

(라) 천적생물 배양조

천적생물 배양조는 배양장치의 전체 규모를 결정하는 요소로서 천적생물 배양조 용량은 체류시간 4일을 기준으로 계획한다. 유효수심은 1m 이상으로 하며 수면적의 50 % 이상은 햇빛에 직접적인 노출이 되지 않도록 식물플랑크톤 배양조를 상부에 설치하였다. 산소공급을 위해 수심 1/3지점에 Ceramic 산기관을 설치하고 배양조는 반 원통형 구조로 바닥면에 경사를 주어 배양조 운영상 발생하는 이물질 등의 배출이 용이한 구조로 하였다. 또한 천적생물의 대량 방류를 위해 수심의 1/3지점에 별도의 방류구를 설치하여 운영할 수 있도록 하였다(표 2.7, 그림 2.19).

(표 2.7) 천적생물 배양조 설계요소 및 부대시설

구 분	설 계 조 건		비 고
	10m'	20m'	
유입유량	1.74 ℓ/min	3.47 ℓ/min	
체류시간	4.0 day		
필요용량	10.0 m' 이상	20.0 m' 이상	유입유량의 50%
규 격	2.5 mW × 5.04 mL × 1.25 mH	3.0 mW × 8.24 mL × 1.5 mH	반 원통형
실 용량	10.8 m'	20.5 m'	
부대시설	-. 평시 유출관 65A -. 대량살포 유출관 65A -. 산소공급용 BLOWER -. CERAMIC 산기관		



<그림 2.19> 천적생물 배양조 구조(측단면도)





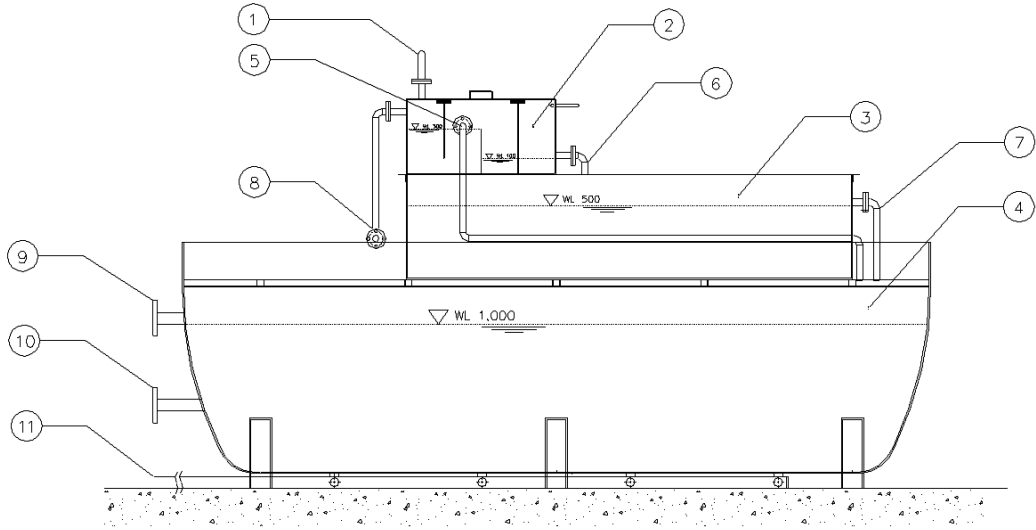
### 3. 실규모 천적생물 배양장치 세부 구성 및 현장 설치

#### 가. 천적생물 배양장치 세부 구성

배양장치는 취수한 농업용저수지 원수로부터 식물플랑크톤과 동물플랑크톤을 분리하는 원수분리조와 식물플랑크톤을 배양하는 식물플랑크톤 배양조 및 동물플랑크톤을 배양하기 위한 천적생물 배양조로 구성되며 3단의 일체형 구조로 하여 설치 면적을 최소화하였다(표 2.8, 그림 2.20).

(표 2.8) 천적생물 배양장치 각부 명칭, 구성요소 및 기능

명 칭	구성 요소	기 능
유입장치	- 유입펌프 및 유입관 ①	- 저수지 원수를 취수하여 배양장치로 공급
	- 부유체 및 프레임	- 펌프 설치 및 일정 수심 유지
	- 계류시설	- 유입장치 위치 유지 및 이탈방지
원수분리조 ②	- 플랑크톤 분리망	- 식물플랑크톤과 동물플랑크톤을 분리(25 $\mu$ m)
	- 세척 노즐	- 분리망을 자동 세척하는 장치
	- 식물플랑크톤 이송관 ⑥	- 식물플랑크톤 분리 공급
	- 천적생물 이송관 ⑤	- 천적생물 분리 공급
	- 월류배관 ⑧	- 유량 과투입 방지
	- 드레인 배관	- 세척수 배출
	- 전동밸브	- 자동세척공정시 배관 개폐
식물플랑크톤 배양조 ③	- 교반장치	- 식물플랑크톤 배양조 교반
	- 분리조 분리망 세척 펌프	- 원수분리조 분리망 세척수 공급
	- 식물플랑크톤 이송관 ⑦	- 천적생물 배양조에 먹이원 공급
	- 수서곤충 유출 방지망	- 천적생물 배양조 유입 방지
천적생물 배양조 ④	- 공기 공급장치	- Blower와 산기관으로 구성, 자동 on/off
	- 천적생물 유출관 ⑨	- 천적생물 상시 살포
	- 대량살포 방류관 ⑩	- 천적생물 일시 살포
	- 드레인 ⑪	- 침전물 및 청소 세척수 배출
	- 곤충유입 방지망	- 수서곤충 유입 방지
	- 천적생물 유출 방지망	- 유출부에 75 $\mu$ m 메쉬망을 설치
Cage	- 메쉬망	- 천적생물 유출과 어류의 유입을 방지
	- 프레임	- 폭 3 m, 길이 5 m, 깊이 1.5 m, 메쉬망 지지
	- 부유체	- 메쉬망 유지 및 관리자 작업공간 확보



<그림 2.20> 천적생물 배양장치 구성도

### (1) 원수분리조

저수지에서 취수된 물은 먼저 원수분리조로 유입된다. 원수분리조는 식물 플랑크톤과 동물플랑크톤을 각각 배양하기 위해 저수지 원수 중의 식물 플랑크톤과 동물 플랑크톤을 분리하여 각각의 배양조로 이송하는 역할을 수행한다.

유입된 원수 중 물고기 알이나 수서곤충의 유충 등 동물플랑크톤을 직접 섭식하는 포식자의 유입을 방지하기 위해 80  $\mu\text{m}$ 의 분리망을 이용하여 여과하고 이후 25  $\mu\text{m}$  망목의 분리망을 통해 식물플랑크톤과 동물플랑크톤이 분리된다. 25  $\mu\text{m}$  분리망을 통과한 물은 동물 플랑크톤이 걸러지고 식물 플랑크톤은 통과한 물로서 식물플랑크톤 배양조로 이송되고, 통과하지 못한 물은 천적생물 배양조로 이송한다.

분리망은 매우 망목이 작은 망으로서 오염물질에 의해 폐쇄가 발생할 수 있기 때문에 이를 방지하기 위하여 투과방향의 반대쪽에 세척 노즐을 설치하여 주기적으로 자동 세척을 실시하였다. 세척수로 사용한 물은 분리망을 통과한 식물플랑크톤 배양조의 물을 이용하였으며 식물 플랑크톤 배양조 내에 역세척 펌프를 설치하여 운영하였다.



### (2) 식물플랑크톤 배양조

식물플랑크톤 배양조는 원수분리조에서 분리되어 이송된 식물 플랑크톤을 배양하며, 천적생물 배양조에 먹이원을 공급하기 위한 반응조이다. 적절한 일조량 확보하고자 수심 50 cm 이하의 평판형 구조로 형성하였고 배양장치의 구성상 배양장치 최상부에 개방형으로 설치하였다.

식물 플랑크톤 배양조 내부에는 침전물의 부패에 따른 배양 조건의 변화를 방지하기 위하여 교반장치를 구비하였고, 분리조 분리망의 세척을 위한 역세척 펌프를 설치하였다. 배양된 식물 플랑크톤은 이송관을 통하여 자연 유하로 천적생물 배양조로 이송된다. 이때, 식물 플랑크톤 배양조를 통하여 수서 곤충이 동물 플랑크톤 배양조로 유입되는 것을 방지하기 위해 500  $\mu\text{m}$  망목의 수서곤충 유출 방지망을 설치하였다.

### (3) 천적생물 배양조

천적생물 배양조는 원수분리조에서 분리된 동물 플랑크톤을 배양하기 위한 반응조이다.

배양된 동물 플랑크톤은 배양조 상부의 유출관을 통하여 저수지로 공급되며, 천적생물의 대량 방류를 위해 수심의 1/3지점에 별도의 대량 살포 유출구를 설치하였다. 배양조 상부의 평시 배출관 전면부에는 필요시 동물 플랑크톤을 농축하기 위한 75  $\mu\text{m}$  망목의 유출 방지망을 설치하였으며 동물 플랑크톤 배양조 상부 개방구간에는 수서 곤충의 유입을 방지하기 위한 방충망을 설치하였다.

(4) 공정별 주요 설비사양

(표 2.9) 공정별 주요 설비

공정명	설비명	규격(제원)	수량	비고(재질)
원수 분리조	분리조	1.0 mW × 1.0 mL × 0.5 mH	1	STS
	유입 펌프	25 A, 200 ℓ/min, 0.35 kw, 11 mH	1	수중펌프
	분리망	25 μm,	1	STS Mesh
	세척노즐	8 A	12	황동
	유입 배관	32 A	1	PE, STS
	천적배양조 이송관	32 A	1	PVC
	식물배양조 이송관	32 A	1	PVC
	역세척수 공급관	15 A	1	PE Hose
	DRAIN 및 Overflow	50 A	1	PVC
	반송 방지망	75 μm	1	STS Mesh
식물플랑크톤 배양조	배양조	2.0 mW × 3.0 mL × 0.6 mH	1	STS
	수중교반기	25 A, 150 ℓ/min, 0.2 kw, 9 mH	1	수중펌프
	천적배양조 이송관	32 A	1	PVC
	수서곤충 유출방지망	500 μm	1	STS
	역세척 펌프	25A, 150 ℓ/min, 0.2 kw, 9 mH	1	수중펌프
천적생물 배양조	배양조	2.5 mW × 5.0 mL × 1.3 mH	1	STS, 반원형
	Blower	25 A, 0.12 m <sup>3</sup> /min, 0.2 kW	1	25 A
	Air 배관	25 A	1	PVC
	산기관	250 mm	3	Ceramic
	평상시 유출관	65 A	1	STS, PE
	유출 방지망	75 μm	1	STS
	대량 살포 배관	65 A	1	STS, PE
	DRAIN	50 A	4	PVC

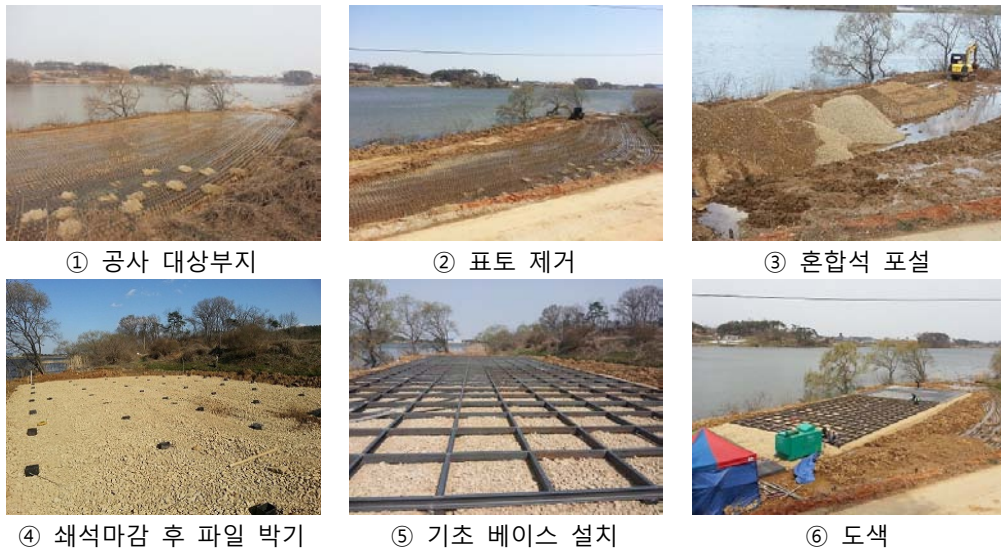


## 나. 천적생물 배양장치 현장설치

천적생물 배양장치의 현장설치는 2013.4.8 ~ 5.12 까지 진행되었다. 설치 부지는 초대저수지 수변의 홍·만수면 부지로서 지반 침하 및 홍·만수시 침수가 예상되므로 기초공사가 필요하였으며, 천적생물 배양장치 설치공사 외에 저수지 유입부에 침강지 조성공사, 방류부 인공식물섬 및 Cage 설치공사와 조사지점 표시를 위한 부표 설치공사로 진행되었다.

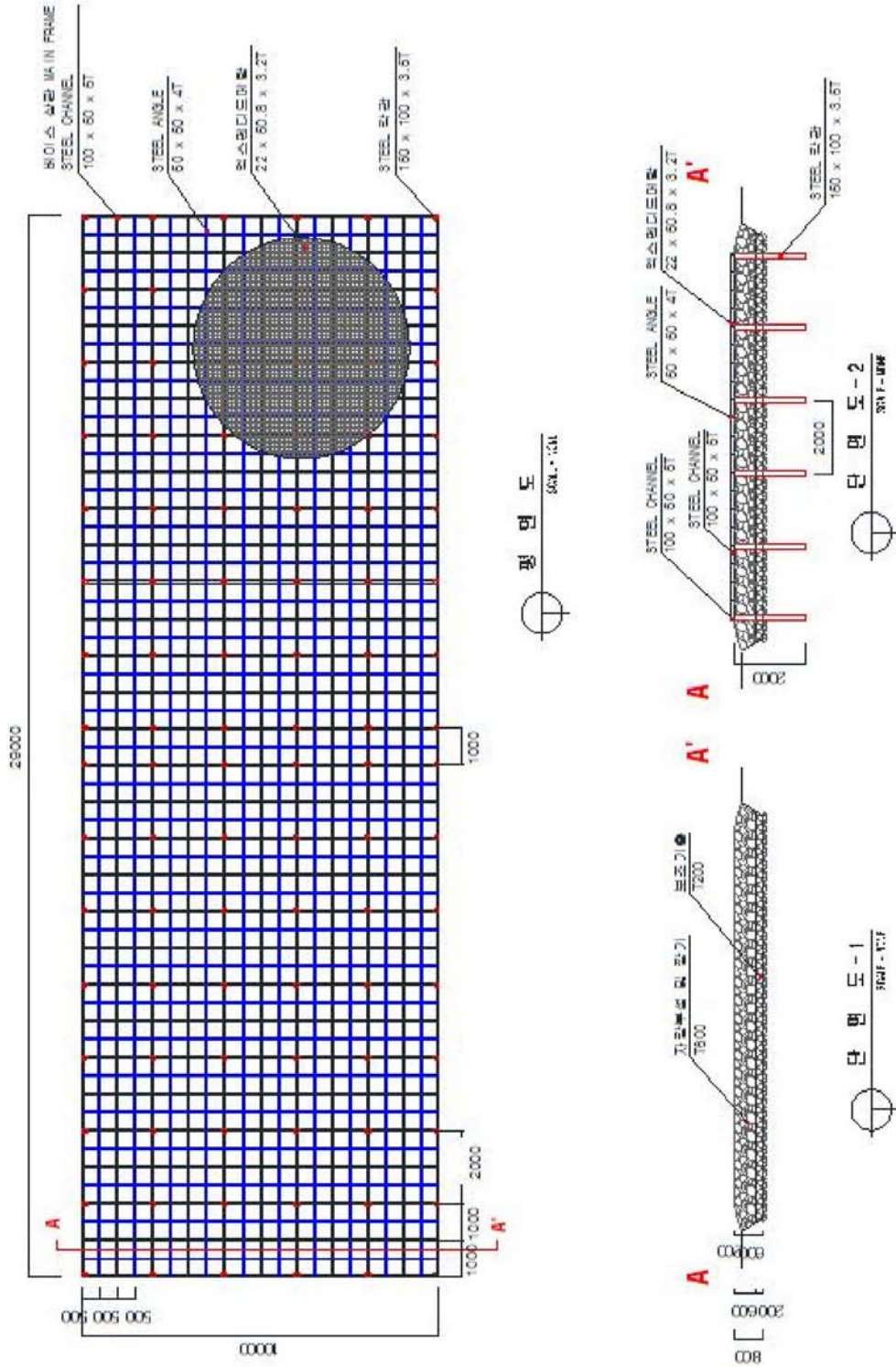
### (1) 기초공사

기초공사는 2013.4.8 부터 14일 간에 걸쳐 진행하였다. 기존에 논으로 사용되던 부지의 표토를 약 60 cm 정도 걷어내고 잡석과 쇄석을 살포하여 다졌으며 침수 및 부등침하를 방지하고자 2 m 간격으로 파일을 설치한 후 상부에 베이스를 설치하였다(그림 2.21).



<그림 2.21> 기초공사 진행과정

잡석 포설과 쇄석마감은 1 m 높이로 조성하여 지반고를 높였으며 베이스는 H형강을 2 m 간격 장방형으로 용접하였고 그 사이에 1 m 간격으로 ㄱ형강을 보강하였으며 상부에 EX메탈로 마감하였다(그림 2.22).



<그림 2.22> 기조공사 시공도





## (2) 배양장치 제작설치

천적생물 배양장치는 설치공사 기간을 단축하고 작업의 효율성을 높이기 위해 배양조 별로 사전에 공장에서 제작하였다. 기초공사가 완료된 후 제작된 각 부분을 현장에 반입하여 조립하였으며 이후 각 부분별 배관공사와 기계장비 설치공사 및 전기공사를 진행하였다(그림 2.23).



① 현장 반입



② 천적생물 배양조



③ 배양장치 조립



④ 조립 및 배관시공



⑤ 전기 배선 및 판넬설치



⑥ 제작완료

〈그림 2.23〉 배양장치 제작 설치과정



<그림 2.24> 배양장치 설치 모습





### (3) 침강지 조성

초대저수지 유입부 상류에 입자성 물질의 유입을 방지하고자 차수막을 이용한 간이형 오염물질 침강장치를 조성하였다(그림 2.25).



〈그림 2.25〉 침강지 설치위치 및 설치모습

### (4) 인공식물섬 설치

대상수역에 살포한 천적생물의 생존율을 높이고 녹조제어효과를 지속시키기 위해 방류구 말단을 수역에 설치한 인공식물섬 중앙부에 연결하였다.



인공식물섬은 노랑꽃창포 등 수생식물이 식재되어 수면에 조성된 부도(浮島, Floating Island)로서 하부에 수생식물의 뿌리가 잘 발달되어 있기 때문에 물고기로부터 천적생물의 은신처 역할을 한다.

인공식물섬 설치는 방류배관의 말단 지점에 25 m<sup>2</sup>(5 m × 5 m)로 조성하였으며, 방류배관의 처짐을 방지하고자 배관 경로를 따라 추가로 설치하였고 인공식물섬의 이동 방지를 위해 수중계류를 설치하여 고정하고 방류구는 인공식물섬의 정 중앙에 천적생물 배양액이 투입될 수 있도록 연결한다.



<그림 2.26> 방류배관 및 인공식물섬 설치모습(좌)과 설치위치(우)

### (5) 시운전

배양장치 및 부대시설의 설치공사 완료 후 정상가동에 앞서 시운전을 실시하였다. 시운전을 통해 배양장치가 정상 운전시 발생할 수 있는 기능적 오류를 사전 점검하였으며, 설치계획에 적합하게 시공되었는지 여부를 점검하였다. 시운전을 통한 점검내용은 다음과 같다.

- 배관이 정상적으로 설치되었는지 확인
- 밸브는 정상위치에 설치되어 조작이 가능하며 정상 작동하는지 확인
- 펌프, 송풍기 및 기타 기계장비들의 무부하 Test를 통해 동작 점검
- 천적생물 배양장치의 각 배양조에 물을 채운 후 부하 Test 실시
- 누수 및 배관의 오접합 부분 점검
- 유입 및 유출이 정상적으로 이루어지는지 확인
- 각 장비들의 자동 운전시간을 콘트롤 패널의 timer를 통해 Setting하고 5일간 운영
- 시운전 종료 및 정상운전 시작



## 4. 천적생물 배양장치 기능개선

### 가. 천적생물 배양장치 문제점 도출

#### (1) 원수펌프의 잦은 고장 발생

저수지의 원수를 원수분리조로 유입시키는 원수펌프가 자주 고장나는 문제가 발생하였다. 설계단계에서 장치 내부로 유입시키는 펌프를 선택할 때 3단구조의 배양장치 높이와 취수지점의 거리를 고려하여 최대양정이 9m까지 취수가 가능한 모델을 선택했으나, 예상보다 거리에 비해 양정이 높아 펌프 과부하로 잦은 고장이 발생하였고, 펌프의 upgrade가 필요하였다.

#### (2) 천적생물 배양조 내부 수서곤충 및 어류 발생

배양장치를 설치 후 가동 중 전체 천적생물 배양조 안에서 수서곤충이 발생하였고, 20m<sup>3</sup> 배양조 중 1개조에서 천적생물의 가장 큰 포식자인 어류도 발생하였다. 원수펌프의 설치위치가 수심이 낮았고, 저수지 바닥에 쌓인 다량의 퇴적물이 펌프를 통해 배양조 내부로 유입되면서 퇴적물 속에 있던 어란과 수서곤충의 알이 함께 유입되어진 것으로 보여졌다. 따라서 원수분리조 내부에서도 천적생물 배양장치로 유입되는 분리수에 어란과 수서곤충의 알을 차단할 수 있는 분리막의 설치가 필요하며, 원수펌프의 설치지점을 수심이 깊은 곳으로 이동시켜야 한다고 판단하였다.

#### (3) 여름철 직사광선에 의한 수온 상승

7월로 접어들면서 저수지의 수온이 상승하는 동시에 배양조 내부에서도 급격한 수온상승이 일어났다. 식물플랑크톤 배양조의 수체는 직사광선에 노출되어 온도상승이 더 심하였고, 천적생물 배양조는 직사광선을 차단하는 구조이긴 하지만 스테인리스 특성상 외부의 높은 온도가 수온을 상승시키는 요인으로 작용하여 천적생물 배양에 영향을 주게 되었다. 직사광선을 차단하고 배양장치의 열전도율을 낮출 수 있는 방법이 요구되었다.

#### (4) 수체에 영향을 주는 교반 및 DO농도

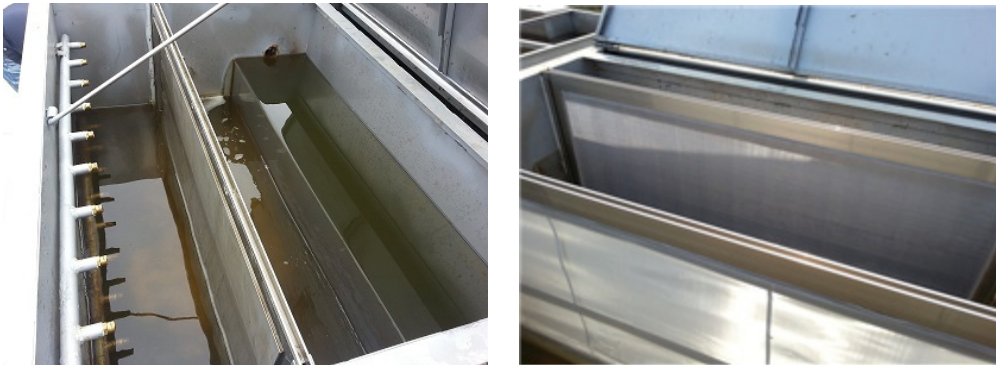
천적생물은 수체가 강하게 교반이 되면 스트레스를 받아 배양에 영향을 주게 된다. 설치된 디스크형태의 산기관은 공기방울이 크고 넓게 퍼져나가 수체를 강하게 교반하고 산소 전달에도 효율적이지 못한 것으로 나타났다.

## 나. 기능개선

### (1) 원수분리조 분리막 추가 설치

기존 25  $\mu\text{m}$ 의 1단 분리막을 사용하였으나 천적생물 배양조에 어란 및 수서곤충의 유입을 방지하고자 2단 분리막으로 구조를 변경하였다. 변경 초기에는 100  $\mu\text{m}$ 의 분리막을 설치하였으나 분리와 관리의 효율성을 고려하여 500  $\mu\text{m}$ 로 교체하였다. 분리막의 재질은 기존 P.E망의 내구성이 약하여 스테인리스 재질로 변경하였다(그림 2.27).

내구성이 강한 스테인리스 재질의 분리막 중 500  $\mu\text{m}$  분리막의 경우 25  $\mu\text{m}$  분리막에 비해 공극이 크기 때문에 솔로 청소를 해도 잘 찢어지지 않지만 25  $\mu\text{m}$  분리막은 솔로 청소를 할 때 주의하지 않으면 쉽게 찢어지는 경향이 있다. P.E망 보다는 내구성이 있다고 판단되지만 가급적이면 솔질보다는 역세척으로 청소를 하는 것이 바람직하다. 분리막은 소모품으로 분류해야 하며, 교체주기는 실규모 연구를 진행하며 25  $\mu\text{m}$  분리막은 약 6개월 1회 정도 교체를 진행하는 것이 좋으며, 500  $\mu\text{m}$  분리막은 약 12개월에 1회 정도 교체를 진행하는 것이 좋다고 판단된다.



<그림 2.27> 분리막 추가 설치 전(좌)·후(우)

### (2) 차양막 및 단열재 설치

여름철 직사광선으로 식물플랑크톤 배양조와 천적생물 배양조의 수온이 급격히 상승하는 것을 막기 위해 식물플랑크톤 배양조 위로 차양막(투과율 : 56%, 2겹)을 설치하였고(그림 2.28), 천적생물 배양조에는 단열재(3 mm 부직포, 2겹)을 설치하였다(그림 2.29).





〈그림 2.28〉 차양막 설치 모습



〈그림 2.29〉 단열재 설치 모습

### (3) 원수펌프 업그레이드 및 위치조정

원수펌프는 가동 초기 w사 제품으로 선정하여 PD-200이라는 펌프를 활용하였으나, 양수지점의 거리가 약 50 m이고 육상으로도 약 3 m 펌핑되기 때문에 과부하로 인해 자주 교체를 진행했다. 그래서 한 단계 업그레이드 하여 PD-350으로 교체를 진행한 결과 펌프의 수명이 길어지고 원수를 유입시키는데 큰 문제가 없었다(표 2.10).

원수펌프를 설치한 위치는 초기 저수지 중앙부 보다는 습지대와 더 가까웠는데, 이곳의 수심이 낮아 많은 어란과 수서곤충이 함께 유입이 되었으며 장치내부로 퇴적물까지 유입이 되어 연구 초기에 문제점으로 드러났다. 원수펌프의 설치 위치를 저수지 중앙부로 약 50여 미터 이동시켰고, 후에 저수지 수위가 테크 공사로 인해 저수율이 30% 이하로 떨어졌을 때 약 50여 미터를 더 이동하게 되었다(그림 2.30).

(표 2.10) 기존 펌프 사양과 업그레이드 펌프 사양 비교

구 분	사용전력	최대양수량	최대양정	비 고
PD-200	200 w/h	150 ℓ/min	9 m	
PD-350	350 w/h	200 ℓ/min	11 m	



<그림 2.30> 원수펌프 위치변화

#### (4) 산기관 교체

초기에 천적생물 배양조 내에 설치한 디스크형 산기관은 공기방울의 크기가 크고 산기관 형태로 인해 넓게 퍼져나갔다. 천적생물 배양조 수체를 강하게 교반하여 천적생물이 스트레스를 받았고, 산소전달 효율이 떨어져 DO농도가 낮은 편에 속해 배양하는데 어려움이 발생하였다. 넓게 퍼져나가지 않아 약하게 교반되고, 산소전달 효율이 높은 스틱형 고압산기관으로 교체를 진행하여 문제를 해결하였다(그림 2.31).

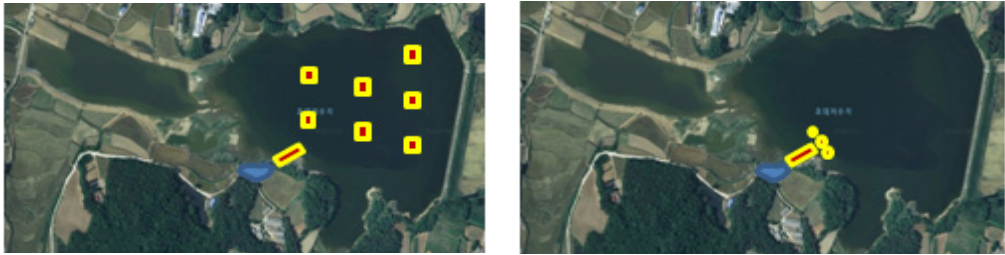


<그림 2.31> 기존 산기관(좌)과 교체한 산기관(우)



### (5) 천적생물 서식처 조성(인공식물섬)

천적생물이 저수지에 살포되면 소형어류나 수서곤충과 같은 천적에 노출되어 효과를 거두기 어려운 관계로 천적생물이 은신 또는 서식할 수 있는 환경이 필요하게 되었다. 2013년 연구결과 천적생물은 수변식생대를 따라 분포하고 있음을 확인하고 인공식물섬과 같은 식생공간을 서식처로 조성하게 되었다. 인공식물섬에 수면 아래로 길게 뿌리를 내리는 노랑꽃창포를 식재하였고, 천적생물은 노랑꽃창포 뿌리 사이에 은신하여 가장 큰 천적인 소형어류의 포식을 피할 수 있다. 설치 초기에는 인공식물섬 25 m<sup>2</sup>를 제작하여 각 7개소로 설치하여 저수지 전역에 등간격으로 배치하였으나(175 m<sup>2</sup>), 이후 식물섬 규모에 따른 천적생물의 서식효과를 규명하기 위하여 살포지점 전방에 등 간격으로 100 m<sup>2</sup>, 50 m<sup>2</sup>, 25 m<sup>2</sup>로 재배치하였다(그림 2.32).



〈그림 2.32〉 인공식물섬 초기 배치(좌)와 서식규명을 위한 재배치(우)



〈그림 2.33〉 인공식물섬 설치 과정



인공식물섬의 제작은 단위개체로 제작된 인공식물섬을 현장에서 하차하여 25 m<sup>2</sup>로 조립한 뒤 노랑꽃창포를 식재하면서 물가로 띄운다. 식재가 끝나면 식물섬 패치별로 보트로 지정된 위치로 인양하여 7개소 모두 계류를 하였다(그림 2.33).

#### 다. 기능개선 효과

##### (1) 원수분리조 분리막 설치 효과

천적생물 배양조 내에서 발생하는 수서곤충의 종류 및 개체수가 상당히 줄어들고 어류가 발생하는 것을 완전히 차단하였다.

##### (2) 차양막 및 단열재 설치 효과

여름철에 식물플랑크톤 배양조의 수온을 하강시키고, 천적생물 배양조의 수온상승을 차단하였다.

##### (3) 원수펌프 업그레이드 및 위치이동 효과

원수의 잦은 고장이 발생하는 문제점을 해결하였고, 위치이동을 통해 퇴적물의 유입을 차단하였다.

##### (4) 산기관 교체 효과

천적생물 배양조로 주입되는 공기방울의 크기가 교체 전 보다 상당히 작아져 수체를 크게 교반하지 않고, 산소전달에 효율을 개선하였다.

##### (5) 인공식물섬 설치 효과

인공식물섬을 설치하여 저수지로 살포한 천적생물들이 서식하며, 포식자로부터 은신할 수 있는 공간을 확보하였다.

### 5. 천적생물 배양장치 최적규모 산정식 및 설계인자

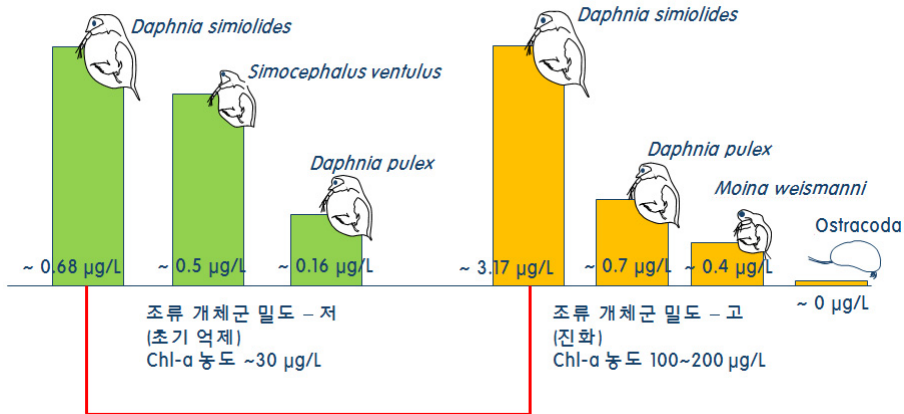
#### 가. 천적생물 배양장치 최적규모 산정식

##### (1) 천적생물의 남조류 섭식능

천적생물 배양장치의 적정 규모를 산정하고, 현장에서의 효과를 예측하기 위해 선행연구에서 도출된 천적생물의 남조류 섭식능력을 이용하였다. 섭식 실험 결과, 조류의 개체군 밀도가 낮았던 경우(Chl-*a* 농도 30 µg/L)에는 종주분리 천적생물인 *D. similoides*의 섭식능력이 가장 높은 것으로 나타났고 조류의 개체군 밀도가 높았던 경우(Chl-*a* 농도 100~200 µg/L) 역시 종주분리



천적생물인 *D. similoides*의 섭식 능력이 가장 높은 것으로 나타났다. 물벼룩의 경우 체장에 따라 섭식능력이 영향을 받으므로, 현장에서 증가한 자연천적생물의 경우, 유사한 체장의 대상 물벼룩의 섭식능력으로 평가하였다.



〈그림 2.34〉 연장 적용 중인 천적생물의 조류 저감 능력

## (2) 규모산정 전제조건

천적생물 배양장치의 적정 규모를 산정하기 위해 물벼룩의 성장특성 및 저감 조류 생체량을 고려하여, 적용 저수지에 대해 다음 사항을 전제하여 추정하였다.

- 저수지내 어류 포식압으로 인한 개체군 손실은 고려하지 않음
- 저수지의 조류대발생시 투명도가 0.5 m 이하임을 감안하여 유광층을 표층 1 m 구간으로 한정하고, 저수지 평균수심 기준 유광층 비율(평균 수심 4 m 경우 저수용량의 1/4)을 실저감 저수지 용량으로 가정
- 천적생물 배양장치에서 살포되는 천적생물 밀도는 평균 138 inds./L(초대저수지 실 가동 개체군 밀도)로 가정

## (3) 최적 규모산정식

배양 장치의 최적 규모는 배양장치에서 천적생물이 살포되어 현장에서 증가, 한달간 주 1회 살포 시 목표로 하는 Chl-*a* 농도를 저감시킬 수 있는 개체군 밀도에 도달할 수 있는 배양장치의 용량으로 산정하였다.

이 산정을 위해 천적생물의 증식 특성은 선행연구를 통해 도출된 요인을 다음과 같이 고려하였다.

- 천적생물의 Chl-*a* 저감량은 살포되어 증가하는 천적생물의 증, 개체군 평균크기(성체와 어린 개체)를 고려하여 섭식실험에서 사용된 지각류 종(*D.*



*similoides*, *D. pulex*, *S. ventulus*)의 평균 섭식량인 1.4 µg/L를 적용

- 현장에 살포 된 후 사망률은 0로 가정
- 개체군 성장률은 남조류(*Microcystis*)와 타 섭식 가능한 녹조류를 혼합하여 섭식한 경우의 평균 개체군 성장률로 알려진 0.25로 가정(Lüring, 2003)
- 주 1회 살포되는 천적생물은 목표 Chl-*a* 농도 저감을 위한 현장의 최대 개체군 밀도를 한계수용 개체군 밀도(K)로 하는 별도의 개체군으로 로지스틱 성장식을 적용하여 현장의 전체 천적생물 개체군 밀도로 산정

$$dN/dt = rN(K-N)/K$$

이러한 적정규모 산정식을 적용할 경우 Chl-*a* 농도 저감량과 저수지 용량에 따른 적정 배양장치 규모는 다음과 같다.

**(표 2.11) Chl-*a* 저감량과 저수지 용량에 따른 배양장치 규모 산정**

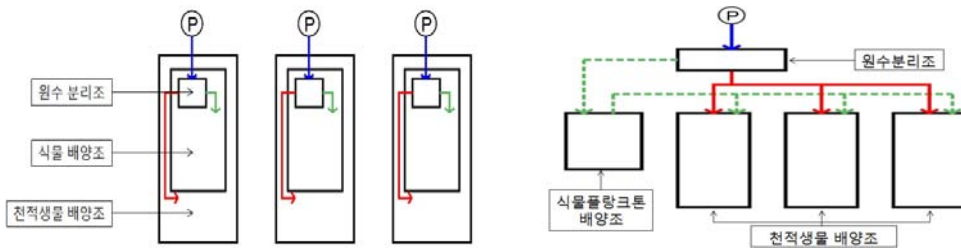
Chl- <i>a</i> 농도 저감량	저수지 용량		
	100만톤	75만톤	50만톤
200 → 35 mg/m <sup>3</sup>	300톤	280톤	200톤
150 → 35 mg/m <sup>3</sup>	260톤	180톤	140톤
100 → 35 mg/m <sup>3</sup>	140톤	100톤	70톤
70 → 35 mg/m <sup>3</sup>	80톤	60톤	40톤

#### 나. 천적생물 배양장치 최적 설계인자

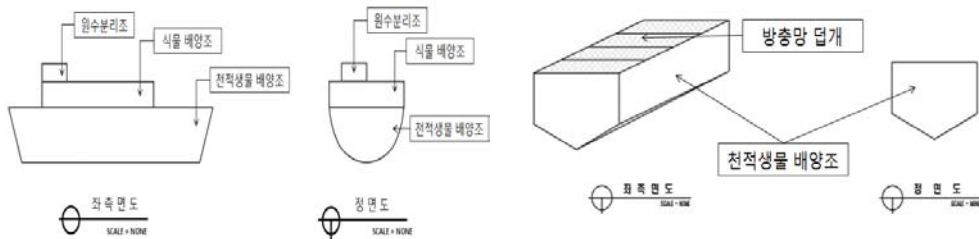
##### (1) 천적생물 배양장치 최적구성 및 최적형태

3단 복층의 독립구조를 가진 기존 배양장치의 유지관리상 단점을 보완하고, 시설설치비, 유지관리비, 운전용이성 등을 효율화 시키는 방안으로 단층의 집중시설로 최적화하였다(그림 2.35). 100톤 규모의 배양장치를 설치할 때 1조의 원수분리조, 1조의 식물플랑크톤 배양조, 20톤 규모의 천적생물 배양조로 구성되며, 천적생물 배양장치 간 연결배관을 구성하여 배양조별 이식을 용이하게 하고, 천적생물 배양조 내 수서곤충, 어류 등 포식자 유입시 제거관리가 용이하다.

기존 반원형 구조의 배양조 하부에 경사를 주어 슬러지가 바닥면으로 가라앉도록 하여 천적생물 배양조 내에 청소 관리가 용이하도록 하였다. 천적생물 상부로는 곤충의 유입을 차단하기 위해 방충망 덮개를 설치한다(그림 2.36).



〈그림 2.35〉 배양장치의 연재구성(좌)와 직적구성(우)



〈그림 2.36〉 배양장치의 연재형태(좌)와 직적형태(우)

(2) 최적 설계인자

(표 2.12) 직적 설계요소 및 직적 설계인자

구 분	설 계 요 소	설 계 인 자
원수 분리조	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 원수펌프 1식/1조 : 350 w, 11 m, 200 ℓ/min</li> <li>- 분리막 1식/1조 : 500 μm 스테인리스 메시망</li> <li>- 원수의 조류 농도가 낮아 천적생물의 배양이 원활하지 않을 때만 식물 플랑크톤 배양조로 원수 이송</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 규격(용량) 1.0 mW × 1.0 mL × 0.7 mH (0.5 m<sup>3</sup>, 유효수심 0.5 m)</li> <li>- 체류시간 : 10 min 이상</li> <li>- 유입유량 : 36.97 ℓ/min</li> </ul>
식물 플랑크톤 배양조	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 교반펌프 1식/1조 : 200 w, 9 m, 150 ℓ/min</li> <li>- 일시적 가동 : 원수의 조류 농도가 낮아 천적생물의 배양이 원활하지 않을시 가동</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 규격(용량) 2.5 mW × 4.5 mL × 0.7 mH (6.75m<sup>3</sup>, 유효수심 0.6m)</li> <li>- 체류시간 : 2.5 day</li> <li>- 유입유량 : 1.87 ℓ/min</li> </ul>
천적생물 배양조	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 브로와 1식/1조 : 60 ℓ/min, 천적생물의 생존에 필요한 산소를 천적생물 배양조에 주입하기 위하여 설치</li> <li>- 산기장치 4식/1조 : 고압스틱형, 효율적인 산소전달과 수체의 교반을 목적으로 설치</li> <li>- 방충망 5식/1조 : 배양조 상부에 2 mW × 1 mL로 제작된 방충망을 설치(가장 전면부는 0.5 mW × 0.4 mL 2식 따로 설치)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 규격(용량) [3.0 mW × 1.2 mH + (3 mW × 0.7 mH)/2] × 5.4 mL (20.65m<sup>3</sup>, 유효수심 1.6 m)</li> <li>- 체류시간 : 4.0 day</li> <li>- 유입유량 : 3.59 ℓ/min</li> </ul>



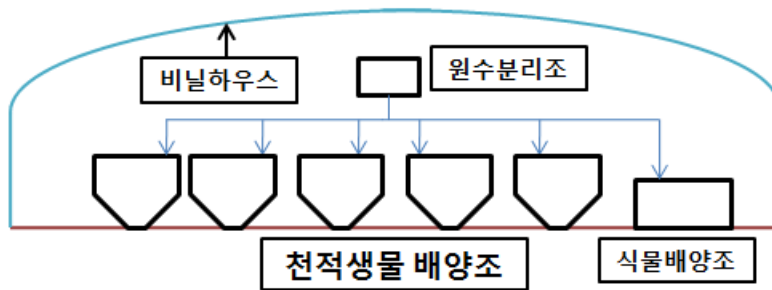
## 6. 천적생물 배양장치 최적 설계디자인/운영/관리 시스템

### 가. 천적생물 배양장치 최적 설계디자인

#### (1) 최적 설계디자인



<그림 2.37> 천적생물 최적 디자인안



<그림 2.38> 비닐하우스 설치 모양



천적생물 배양장치의 최적 디자인안은 초대저수지에 설치한 3단구성의 배양장치에서 원수분리조와 식물플랑크톤 배양조가 분리 설치되어 공통으로 관리되고, 천적생물 배양조는 각각 독립적으로 설치한다.

## (2) 세부 명칭 및 해설

배치된 4개의 큰 배양조가 천적생물을 배양할 천적생물 배양조이고, 가장 오른쪽에 배치된 배양조가 원수의 먹이원 농도가 낮을 때 선택적으로 가동되는 식물플랑크톤 배양조이다. 가장 뒤쪽에 높이 설치된 작은 박스가 원수분리조이고, 원수분리조로 유입되는 원수는 펌프를 통해 이송되고 각 천적생물 배양장치와 식물플랑크톤 배양조로 원수를 분리하여 자연유하 방식으로 이송하게 된다. 또한 비닐하우스를 설치하여 배양장치의 수온상승에 차단한다.

### 나. 천적생물 배양장치 최적 운영/관리 시스템

(표 2.13) 천적생물 배양장치 점검 리스트

관리사항	내 용
펌프점검	- 원수펌프는 천적생물 살포 시 잠시 중단하고, 살포 후 재가동 될 때 주로 펌프에 이상이 생길 수 있으므로 재가동시 점검 - 교반펌프는 역세척 펌프와 달리 가동시간이 길어서 노후화로 인한 소음 및 오작동이 발생할 수 있으므로 1회/1주 점검 - 역세척 펌프는 가동시간이 매우 짧은 관계로 수명이 2년 이상으로 판단
브로와 점검	- 노후화로 인한 공기중입량 감소 시 교체가 필요하므로 1회/1주 점검
분리막 관리	- 역세척 펌프를 통해 분리막 청소를 진행하지만 다량의 이물질이 막에 부착될 경우 인력으로 청소 필요, 1회/1일 점검
누수 점검	- 각 배양조와 배관들 사이에 누수가 발생하여 적정수위 및 유량이 유지되지 않는 경우 점검 및 교체
배양조 관리	- 연간 운영종료 나 운영시작 시 배양조에 누적된 오염물질 제거 필요 - 운영 중에도 유입수 성상에 따라 오염물질이 다량 누적되어 수질이 악화될 경우 가동을 중단하고 제거
동절기 관리	- 동절기 운영 종료시 배관, 밸브에 물이 남는 경우 동파되므로 완전배수를 통해 파손 대비

본 연구를 통하여 2년간 천적생물 배양장치를 관리한 결과, 점검사항은 펌프, 브로와, 누수 점검이 필요하다고 판단한다. 펌프의 경우 사용주기에 따라 수명도 결정되는데 원수펌프는 24시간 가동됨에 따라 살포시 가동을 잠시 멈추면 재가동 되면서 고장이 발생하는 패턴이 발견되었다. 평균적으로 8~9개월 사용하면 수명이 끝나고, 빠른 경우 6개월 만에 고장이 발생하며, 늦어도 1년 정도 사용하면 교체가 필요하다고 판단된다. 교반펌프와 브로와의 경우 하루 약 20시간 정도 가동이 되는데 가동시간이 길어 수명은 약 18개월로



판단되며, 1회/1주 점검이 필요하다. 역세척 펌프는 하루 약 30분 정도 가동하므로 2년간 운영해온 결과 1건의 고장도 발생하지 않았으며 앞으로도 모니터링을 진행하면서 수명에 대한 판단도 고려해 볼 필요가 있다.

분리막은 역세척 펌프로 하루 3번 10분씩 청소를 진행하지만 원수의 조류 농도가 높을 경우 다량의 이물질이 부착하므로 1회/1일 확인하여 인력으로 청소가 필요하다. 3월부터 11월까지 배양장치를 가동하고 나면 원수분리조와 각 배양조 내부는 오염물질이 누적되는데 운영종료나 운영시작 할 때 내부를 청소하여 누적된 오염물질을 제거해야 한다. 동절기에는 배관이나 밸브에 물이 차있으면 동파로 인해 파손되므로 영하의 날씨가 되기 전에 밸브를 모두 열어 완전히 배수하여 동파에 대비해야 한다.

## (2) 최적 운영/관리 방안

식물플랑크톤 배양조의 체류시간은 평시 2.5 day지만 유입원수의 성상에 따라 1.5 day로 탄력 조절이 가능하며, 천적생물 배양조의 체류시간 역시 평시 4.0 day지만 상황에 따라 2.5 day로 탄력적인 운영이 가능하다. 체류시간에 따라 원수분리조로 유입되는 유입유량도 100 m<sup>3</sup> 천적생물 배양장치 기준으로 최소 17.93 l/min에서 최대 31.81 l/min까지 조정되며, 식물플랑크톤 배양조(6.75 m<sup>3</sup>) 유입유량은 체류시간 2.5 day 일 때 1.88 l/min에서 체류시간 1.5 day 일 때 3.13 l/min까지 유입되며, 20 m<sup>3</sup> 천적생물 배양조 기준으로 체류시간 4.0 day 일 때 3.59 l/min에서 체류시간 2.5 day 일 때 5.74 l/min까지 조절이 가능하다. 원수펌프는 항시 가동을 진행하며 교반펌프는 2시간 동안 100분, 역세척 펌프는 8시간 동안 10분씩 가동한다.

(표 2.14) 100 m<sup>3</sup> 천적생물 배양장치 운영사항

시스템 가동	천적생물 배양장치 운영사항	비고
원수펌프 가동	24 hour/day	수동관리
식물플랑크톤 배양조 체류시간	1.5~2.5 day	
천적생물 배양조 체류시간	2.5~4.0 day	
원수분리조 유입유량	17.93 ~ 31.81 l/min	밸브조정
식물플랑크톤 배양조 유입유량	1.88 ~ 3.13 l/min	밸브조정
각 천적생물 배양조 유입유량(20m <sup>3</sup> )	3.59 ~ 5.74 l/min	밸브조정
식물플랑크톤 배양조 교반펌프 가동	100 min / 2 hour	자동관리
역세척 펌프 가동	10 min / 8 hour	자동관리



### 제3절 천적생물 배양장치 운영 및 현장살포

#### 1. 천적생물 종주 및 자연분리 종의 배양특성 및 공급

##### 가. 천적생물 종주 및 자연분리 종의 배양특성

###### (1) 천적생물 종주의 배양특성

###### (가) 천적생물 종주 분리 및 종주 특성

실내 배양에서는 다양한 천적생물 종의 섭식능력과 현장 적응 능력을 평가하고, 알맞은 환경에 다양한 천적생물을 적용할 수 있도록 표 2.15와 같은 다수의 천적생물 종주를 배양하여 종주를 유지하였다.

(표 2.15) 소대꺼수지 연장 살포에 사용된 천적생물의 종류와 특징




천적생물		크기	증식특성	조류 섭식율
종주분리 천적생물	<i>Daphnia similoides</i>	 ~2.8 mm	(종주분리) 고수온에 강하고 7~8월 천적 생물 배양조에 대량 투입 시 증가	최대 3.17 mg/m <sup>3</sup> /day
자연분리 천적생물	<i>Daphnia galeata</i>	 ~2.3 mm	(자연분리) 봄, 가을에 증가 고밀도 증식이 가능하고 높은 조류 섭식율을 나타냄	최대 0.74 mg/m <sup>3</sup> /day (유사 물벼룩으로부터 예측)
	<i>Simocephalus ventulus</i>	 ~2.5 mm	(자연분리) 9월 이후 300개체/L 이상 고밀도 증식, 증식속도 빠름	최대 0.5 mg/m <sup>3</sup> /day

###### (나) 천적생물 종주 배양 특성

선행연구를 통하여 국내 저수지 환경에 적용이 가능하고 조류 섭식 능력이 검증된 천적생물들의 종주를 확보하고, 식물플랑크톤 발생 시기에 맞추어 천적생물 배양조에 원활히 공급하기 위해 실내 증식수조를 설치, 운영 하였다. 이 증식수조를 통해 증식된 물벼룩을 현장의 천적생물 배양조에 투입하여 현장 적용 전 적응과 추가 증식을 유도시켰다.



(표 2.16) 천적생물 종주 배양 특성

천적생물			배양특성
종주분리 천적생물	<i>Daphnia similoides</i>		종주유지가 쉽고 대량증식에도 용이함
자연분리 천적생물	<i>Daphnia galeata</i>		배양조건(먹이, 수질 등)이 까다로워 장기간 종주유지가 어려움
	<i>Simocephalus ventulus</i>		종주유지는 쉬우나 실내 배양 시 고밀도로 증가하지 않음으로 대량증식은 어려움

(2) 자연분리 종의 배양특성

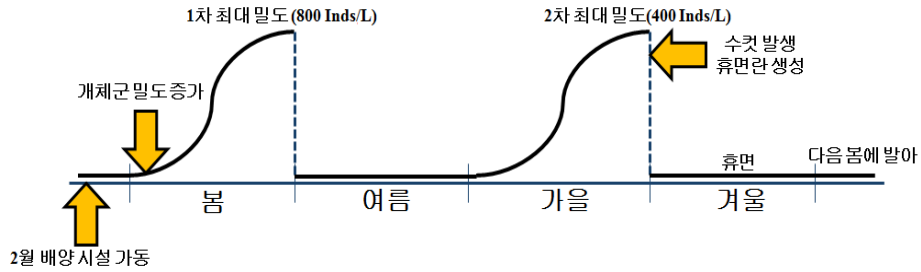
(가) 자연분리 천적생물의 분포 및 분리

초대저수지에서 실제 서식하는 개체군 밀도는 매우 낮으나, 원수 유입을 통해 자연적으로 분리하여 천적생물 배양조에서 증식이 가능한 *Similoides ventulus* 및 *Moina weismanni*와 같은 자연 천적생물의 경우도 하루에 저감시킬 수 있는 조류 생체량이 각각 0.5, 0.4  $\mu\text{g/L}$ 로 나타나, 이들 자연천적생물의 개체수가 확보될 경우, 현장에서 조류저감의 효율성이 매우 높을 것으로 나타났다. 실제 천적생물 대량배양 장치 증식 결과 이들 자연천적생물의 살포량은 최대  $10.0 \times 10^6$ 개체에 이르러, 적절한 개체수를 유지할 경우 저수지 수질 개선에 유용하게 활용될 수 있는 것으로 분석되었다.

(나) 자연분리 천적생물의 종 특성 및 배양

초대저수지에서 서식하는 자연분리 천적생물은 크게 *D. galeata*, *S. ventulus* 두 종으로 나타난다. 이 두 종은 2월 천적생물 대량배양시설 가동 후 3월 말부터 개체군 밀도가 증가하기 시작하였고 여름 전인 5월에 최대밀도로 나타났다. 그 후 수온이 상승한 여름철에는 낮은 개체군 밀도를 유지하였다. 수온이 내려간 9월 초부터 증가하는 경향을 보였고 10월에 2차 최대밀도를 나타냈다. 11월부터는 천적생물의 수컷이 발생되면서 휴면란이 생성되기 시작하였다.





〈그림 2.39〉 자연분리 천적생물의 배양 특성

## 나. 천적생물 종주 및 자연분리 종의 배양특성

### (1) 천적생물 종주 공급

#### (가) 천적생물 종주 공급방안

배양실험을 통해 현장적응과 조류 섭식효과가 검증된 천적생물의 실내 대량배양은 50~75 L의 수조를 이용하여 실시하였다.

(표 2.17) 종주 유지 배양 및 연장공급을 위한 실내 대량 배양 조건

배양목적	기본 배양 조건	배양 조건 및 유의사항
종주유지 배양	<ul style="list-style-type: none"> <li>●적정배양크기: 1 L</li> <li>●배양수 : 24시간 이상 산소공급하며 저장해 둔 수돗물 또는 식물플랑크톤 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 Daphnia를 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 Daphnia을 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 되게 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>●산소공급시 수조내 강한 수류가 생기지 않게 주의</li> </ul>

먹이공급과 함께 주기적인 물 교환이 이루어지도록 적절한 농도의 시

관용 클로렐라를 잘 섞은 물(24시간 이상 에어레이션 시킨 수도물) 약 2 L을 하루 두 번 투여하여 5% 가량의 물이 매일 순환되도록 수조를 유지시킴으로 인해 고밀도의 물벼룩을 실내 배양조에서 유지시켰다(표 2.17).

#### (나) 천적생물 종주 공급 빈도 및 양

종주분리 천적생물의 경우 실내배양 장치에서 배양된 천적생물을 주 1회 간격으로 약 5,000개체 이상을 각 천적생물 대량배양 장치에 투입하였다. 각 장치를 주기적으로 조사하여 천적생물의 밀도가 비교적 높은 대량배양장치에서 천적생물을 채집하여 밀도가 낮은 대량배양장치로 투입하였다.

대량배양 장치의 천적생물 개체군 밀도는 플랑크톤 네트를 이용하여 채집된 천적생물 밀도를 눈으로 확인하여, 천적생물의 밀도가 높을 경우 약 1,000~2,000개체를 네트로 채집, 천적생물 밀도가 낮은 배양수조로 이동 시켜 증가를 유도하였다.

## 2. 천적생물 배양장치내 천적생물 배양특성

### 가. 천적생물 배양장치내 수환경 특성

#### (1) 이화학적 특성

본 연구기간 중 천적생물 배양장치에서의 수환경 변화를 살펴본 결과(그림 2.40), 수온은 식물플랑크톤 배양조의 10톤 배양조에서 3.1~31.7 °C(평균 20.6 °C), 20톤 배양조에서 2.5~31.5 °C(평균 20.5 °C), 천적생물 배양조의 10톤 배양조에서 1.7~29.6 °C(평균 18.6 °C), 20톤 배양조에서 2.3~30.2 °C(평균 19.0 °C)로 나타났다. 배양조 규모에 따른 변화는 크지 않았으며, 천적생물 배양조에 비해 식물플랑크톤 배양조에서 다소 높게 나타났다.

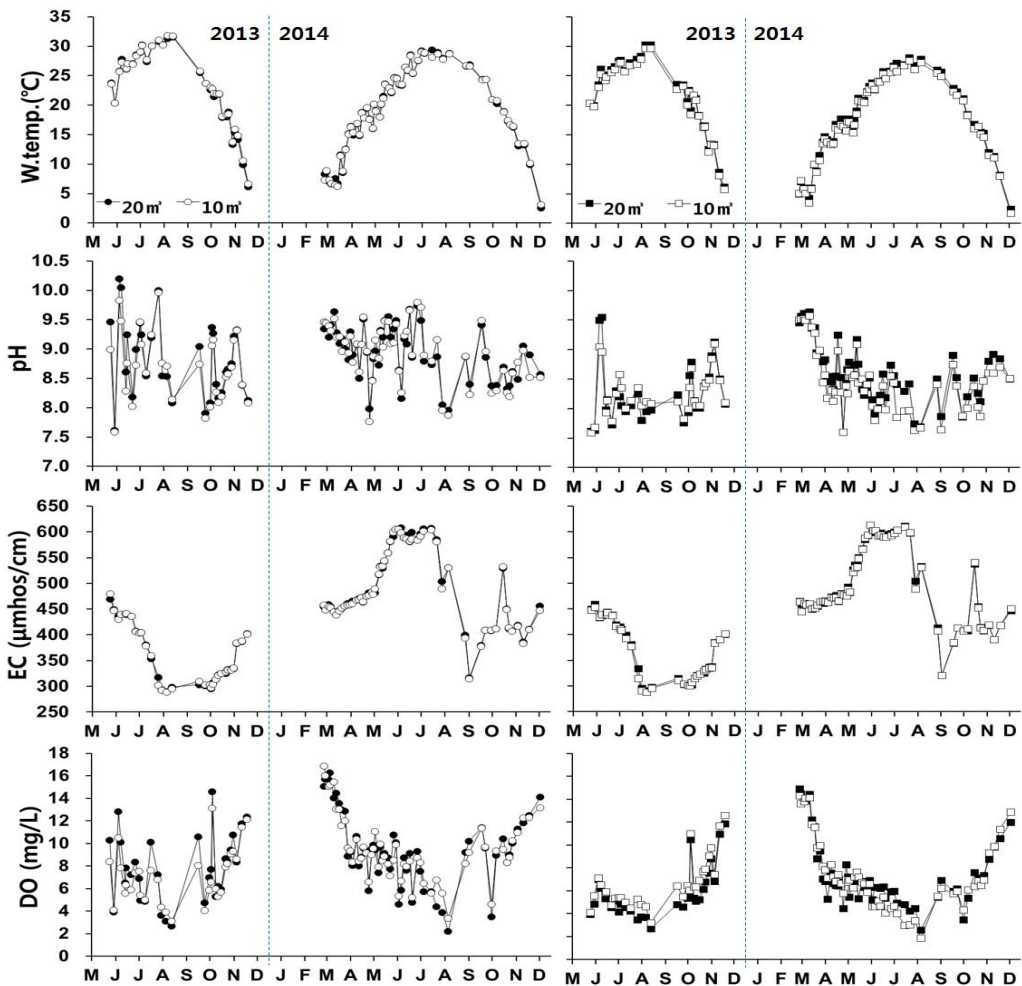
pH는 식물플랑크톤 배양조의 10톤 배양조에서 7.6~10.0(평균 8.9), 20톤 배양조에서 7.6~10.2(평균 8.9), 천적생물 배양조의 10톤 배양조에서 7.6~9.6(평균 8.4), 20톤 배양조에서 7.6~9.6(평균 8.5)로 수온과 같게 배양조 규모별 차이는 크지 않았으며, 식물플랑크톤 배양조에서 다소 높게 나타났다. 시기별로는 춘계에 다소 높고 하계에 다소 낮게 나타나는 경향을 보였다.

EC는 식물플랑크톤 배양조의 10톤 배양조에서 289~605  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 445  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), 20톤 배양조에서 289~608  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 446  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), 천적생물 배양조의 10톤 배양조에서 288~613  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 448  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), 20톤 배양조에서 290~613  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 449  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )로 배양조 규모에 따라 10톤 배양조보다 20톤 배양조에



서 다소 높게 나타났다. 배양조별로는 식물플랑크톤 배양조에 비해 천적생물 배양조에서 조금 높게 나타났으며, 시기별로는 2013년에 비해 2014년에 전반적으로 높게 나타났으며, 춘계와 추계보다 하계에 높은 값을 보였다.

DO는 식물플랑크톤 배양조의 10톤 배양조에서 3.2~16.9 mg/L(평균 8.7 mg/L), 20톤 배양조에서 2.2~16.3 mg/L(평균 8.9 mg/L), 천적생물 배양조의 10톤 배양조에서 19.~14.3 mg/L(평균 7.1 mg/L), 20톤 배양조에서 2.6~14.9 mg/L(평균 6.9 mg/L)로 배양조 규모에 따른 차이는 크게 나타나지 않았다. 식물플랑크톤 배양조에 비해 천적생물 배양조에서 다소 낮게 나타났으며, 시기별로는 전기전도도와 같게 2013년에 비해 2014년에 전반적으로 다소 높게 나타났으며, 춘계와 추계보다 하계에 낮은 값을 보였다.

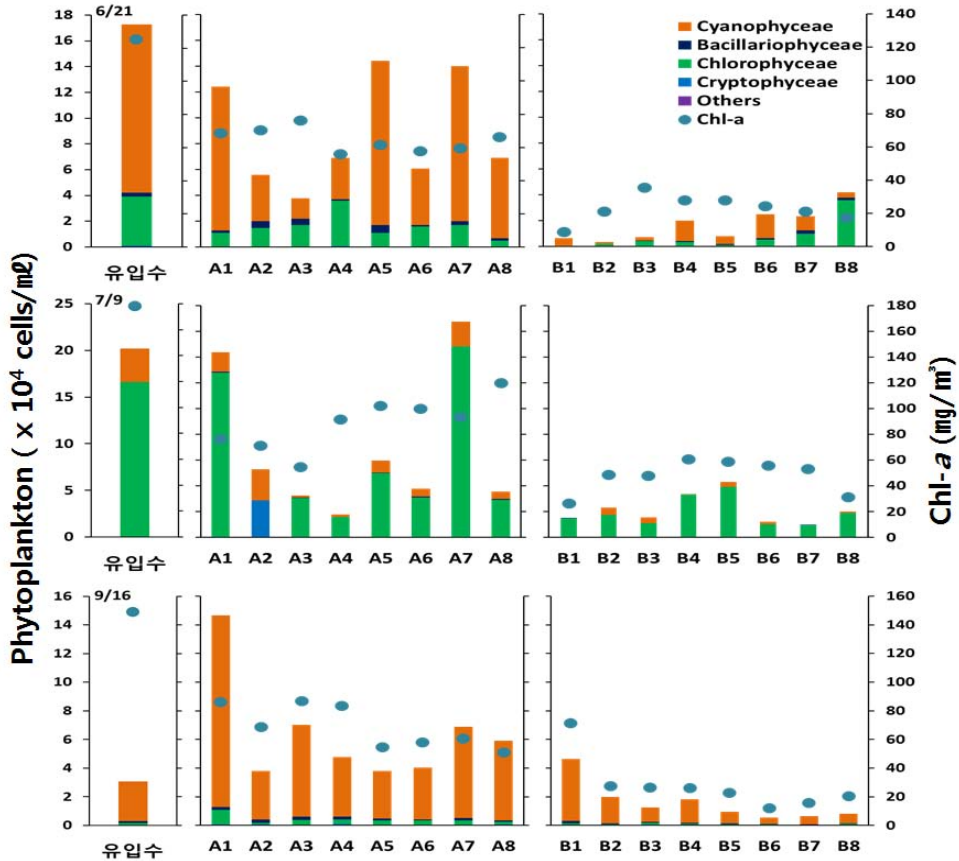


<그림 2.40> 식물플랑크톤 배양조(좌) 및 천적생물 배양조(우)의 수환경 변화



## (2) Chl-*a* 및 식물플랑크톤 현존량 변화

2013년 배양장치에서 식물플랑크톤 현존량 및 종조성 변화는 유입수 평균  $1.3 \times 10^5$  cells/ml, 식물배양조 평균  $1.0 \times 10^5$  cells/ml, 천적생물 배양조 평균  $2.8 \times 10^4$  cells/ml로 나타났다(그림 2.41).



〈그림 2.41〉 배양장치 내 식물플랑크톤 현존량 변화

세부적으로, 6월의 경우 유입수( $1.7 \times 10^5$  cells/ml) 대비 식물플랑크톤 배양조에서는  $3.8 \sim 14.4 \times 10^4$  cells/ml(평균  $8.8 \times 10^4$  cells/ml)로 다소 감소한 후 천적생물 배양조에서는  $3.5 \sim 42.0 \times 10^3$  cells/ml(평균  $1.7 \times 10^4$  cells/ml)로 현저히 감소하였다. 7월의 경우에도 유입수( $2.0 \times 10^5$  cells/ml) 대비 식물플랑크톤 배양조에서는  $4.5 \sim 41.9 \times 10^4$  cells/ml(평균  $1.7 \times 10^5$  cells/ml)로 다소 감소하였으며, 천적생물 배양조에서는  $2.3 \sim 10.8 \times 10^4$  cells/ml(평균  $5.4 \times 10^4$  cells/ml)로 현저히 감소하는 것을 볼 수 있었다. 9월에는 유입수( $4.2 \times$



$10^4$  cells/ml) 대비 식물플랑크톤 배양조에서  $3.2\sim 8.8 \times 10^4$  cells/ml(평균  $5.5 \times 10^4$  cells/ml)로 식물플랑크톤이 증식하였으며, 천적생물 배양조에서는  $1.3\sim 9.2 \times 10^4$  cells/ml(평균  $4.9 \times 10^4$  cells/ml)로 현저히 낮아지는 것을 확인하였다. 배양장치 내 식물플랑크톤의 종조성 또한 현존량 감소와 함께 녹조 발생 원인 중이며, 배양장치 내 우점종인 남조류와 녹조류의 감소가 천적생물 배양장치에서 크게 감소하는 것을 볼 수 있었다.

## 나. 천적생물 배양특성

### (1) 시기별 배양특성

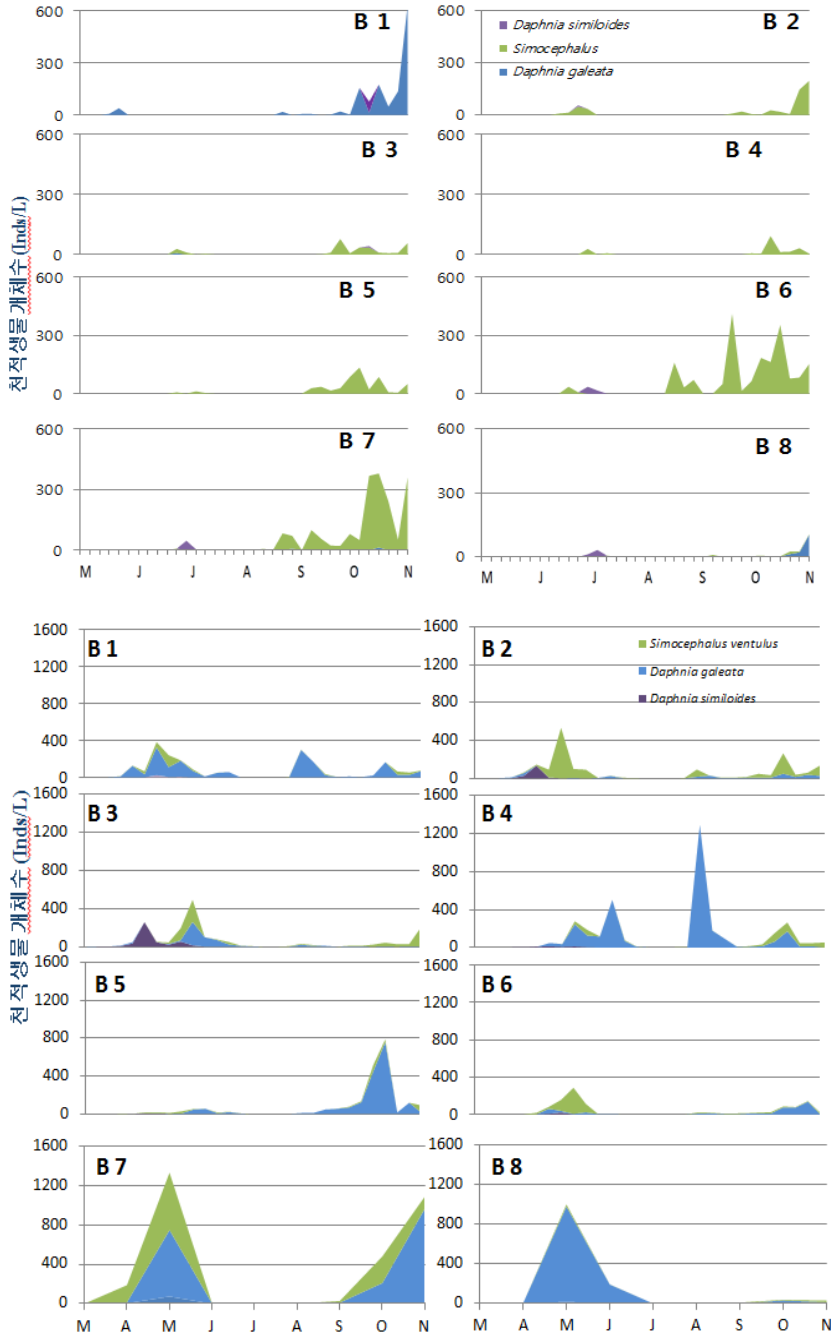
2013년에는 지각류 천적생물의 경우 초기 종주분리 천적생물 *D. similoides*를 집중 투입한 결과 일부 배양조에서 *D. similoides*가 증가하였다. 5월 설치 이후 *S. ventulus* 및 *M. weismanni*등이 증가하였으나 7월 이후에는 배양조 살포 이후 배양조 내 물의 전체 교환과 이후 계속된 강우 등의 영향으로 인해 다소 낮은 천적생물 밀도가 유지되었다. 천적생물 배양조의 천적생물 개체군 밀도는 10월 이후 본격적으로 증가하여 모든 수조에서 높은 밀도로 유지되었다. 증가한 천적생물은 수조에 따라 상이한 것으로 나타났으며 특히 20톤 용량의 천적생물 배양조 B-1과 B-8에서는 *D. galeata*가 증가하였고, 10톤 용량의 배양조의 경우 *S. ventulus*가 급격히 증가하였다.

현장의 환경요인에 따라 증식이 용이한 천적생물 종이 상이함으로 선행연구결과를 바탕으로 효과적인 천적생물 증식을 위해 봄철에는 종주분리 천적생물을 증식시키고, 하절기에는 자연분리된 천적생물을 중심으로 천적생물 배양조의 천적생물 조성을 조절하였다. 하절기 이후 자연천적생물 *S. ventulus*의 증가가 이루어져, 이 종을 천적생물 배양조에 접종하여 증식을 유도하였다.

2014년의 경우 3월부터 종주분리 천적생물인 *D. similoides* 집중 투입으로 인해 4월부터 *D. similoides*의 개체군 밀도가 증가하였으나 5월 이후 다소 낮은 천적생물 밀도가 유지되었다. 자연분리 천적생물인 *S. ventulus*의 경우 4월 말부터 증가하기 시작하여 5월에는 600 inds./L 이상의 아주 높은 고밀도로 증식하는 것으로 나타났고, 수온이 높은 하절기에는 낮은 개체군 밀도를 유지하였으나 수온이 다소 낮아진 9월부터 다시 증가하여 높은 개체군 밀도를 보였다. *D. galeata*의 경우 4월부터 증가하기 시작하여 5월에는 20톤 용량의 천적생물 배양조 B-8에서 800 inds./L 이상의 아주 높은 개체군 밀도를 보였다. 수온이 증가한 하절기에는 낮은 개체군 밀도를 유지하였고 9



월 이후 증가하기 시작하여 10톤 용량의 천적생물 배양조 B-3에서 1,200 inds./L의 고밀도로 증식하였다(그림2.42).

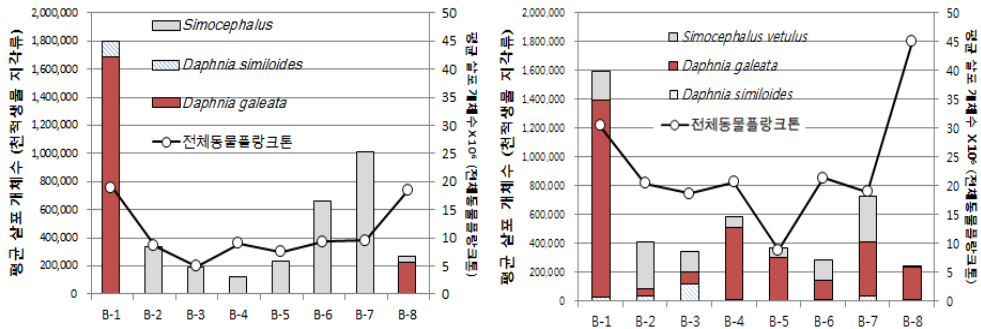


<그림 2.42> 천적생물 배양조의 천적생물 조성의 계절변화(상 : 2013년, 아 : 2014년)



## (2) 규모별 배양특성

천적생물 배양장치는 2013년과 2014년 우점하는 천적생물이 다소 상이한 것으로 나타났으나, *D. galeata*, *S. ventulus*를 중심으로 증가하였다. 2014년의 경우 3월부터 일주일 간격으로 실내에서 종주 분리된 천적생물을 지속적으로 투입하여 4월 중순 이후 *D. similoides*가 본격적으로 증가하였으며, 이후 자연 분리되어 증식한 천적생물이 높은 개체군 밀도를 유지하는 특성을 보였다. 천적생물 배양장치 운영기간 중(2013년~2014년) 배양장치 내 천적생물의 평균 개체군 밀도는 20톤 규모의 B-1 배양장치에서 가장 높은 것으로 나타났으나, 수조에 따른 우점종과 개체군 밀도의 차이를 보였다. 2014년의 경우 대부분의 배양수조에서 천적생물의 개체수가 증가, 이에 따른 현장 살포량이 증가하였다(그림 2.43).



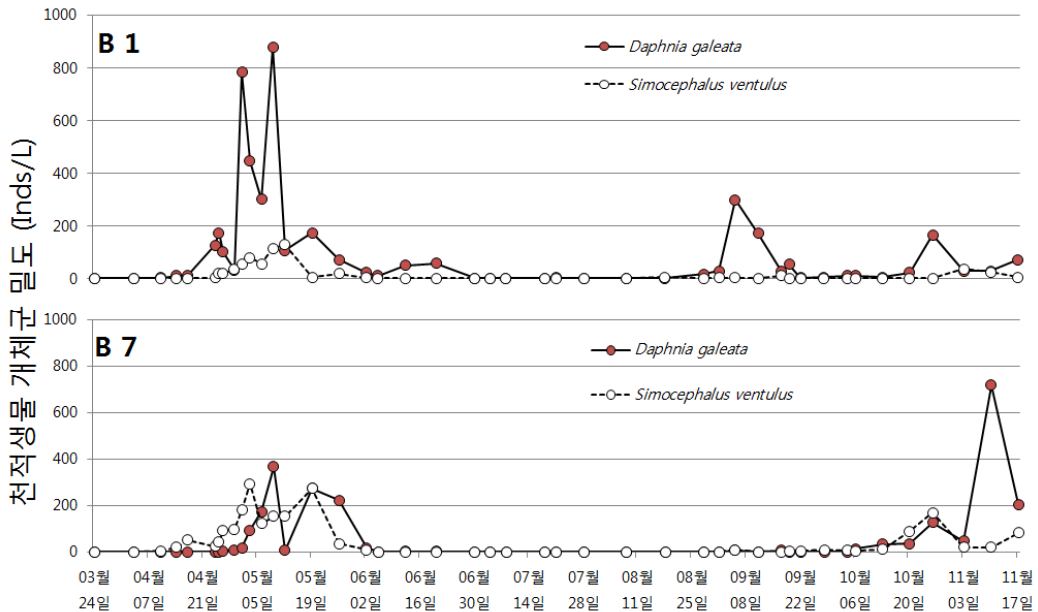
〈그림 2.43〉 현장 천적생물 배양장치 운영기간 중 천적생물 평균 살포 개체수

20톤 규모의 배양장치에서 가장 많은 살포량을 나타낸 B-1 배양장치와 10톤 규모의 배양장치 중에서 가장 많은 살포량을 나타낸 B-7 배양장치의 자연분리 천적생물 중 별 살포량을 분석한 결과 자연천적생물인 *D. galeata*는 20톤 규모의 배양장치인 B-1 배양장치에서의 개체군 밀도가 높은 반면, *S. ventulus*는 10톤 규모의 배양장치인 B-7 배양장치에서 개체군 밀도가 높았다(그림 2.44). B-1 배양장치에서 *D. galeata*는 5월에 800 inds./L 이상의 고밀도로 증식하는 것으로 나타났고 9월과 11월에도 높은 밀도로 증식을 하였다. B-7 배양장치에서 *D. galeata*는 5월 400 inds./L 이상의 고밀도 증식을 하였고 11월에 다시 700 inds./L 이상으로 증식하였다. *S. ventulus*의 경우 B-1 배양장치에서는 낮은 밀도를 유지하였지만 B-7 배양장치에서는 5월과 10월 200 inds./L 이상으로 증식을 하였다.

20톤 규모의 배양장치인 B-1 배양장치의 천적생물 개체군 밀도가 높은

이유는 10톤 규모의 배양장치에 비해 수체 유동이 적고 주기적으로 방류할 때 다음 살포 전까지 증식할 수 있는 천적생물의 개체군 밀도가 상대적으로 많이 남아있기 때문으로 사료된다.

대량배양장치의 규모는 종주분리 천적생물을 활용할 경우 10톤 규모가, 자연천적생물의 증식을 유도할 경우 20톤 규모가 효율적으로 판단되어, 시기적으로 천적생물 증가에 영향을 미치는 환경요인이 변할 경우, 두 규모를 동시에 운영하는 것이 적합할 것으로 판단된다.



<그림 2.44> 배양장치의 규모별 천적생물 개체군 밀도

### (3) 천적생물 종별 배양특성

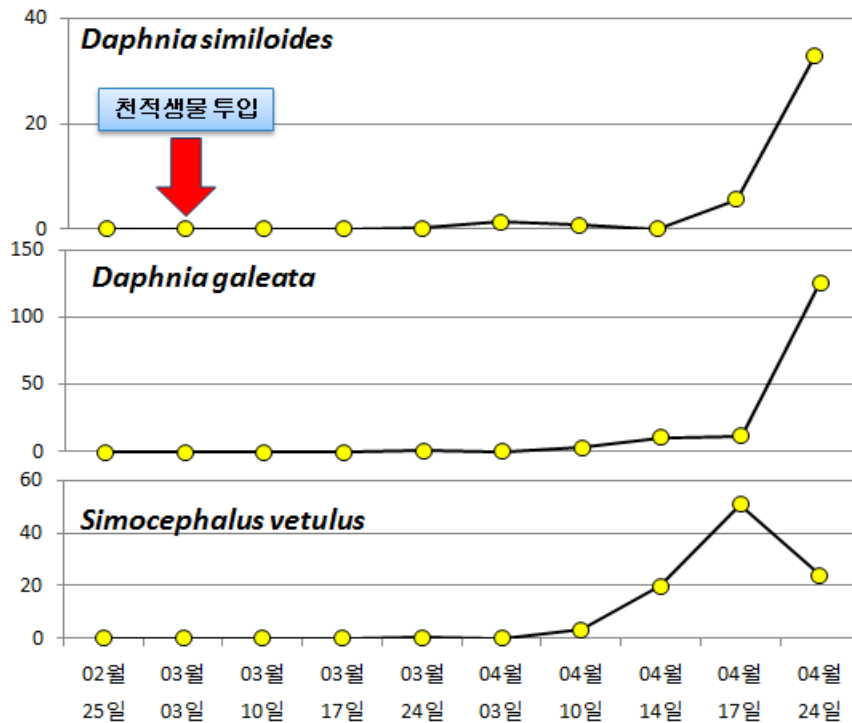
2013년과 달리 2014년에는 배양시설의 조기 설치가 이루어졌고 이에 따라서 봄철 수온의 증가와 함께 천적생물의 투입 및 자연분리로 인한 증가가 빠른 시간에 이루어졌다. 2014.3.3부터 종주분리 천적생물인 *D. similoides*의 투입이 이루어졌고, 투입 후 약 40일 뒤인 2014.4.14부터 증가하는 경향을 나타냈다. 자연발생 천적생물인 *D. galeata*는 2014.4.17부터 100 inds./L 이상의 고밀도로 증식하는 경향을 보였고 *S. ventulus*는 다른 천적생물 보다 조금 이른 4월 초부터 증가하는 것으로 나타났다(그림 2.45).

자연천적생물의 경우 저수지 환경에 보다 잘 적응할 수 있는 능력을





가지고 있는 것으로 판단되므로, 자연분리에 의해 천적생물이 확보될 경우 자연 천적생물을 활용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다. 종주분리 천적생물의 경우, 대상 저수지에서 천적생물이 분리되지 않거나, 기타 환경변화로 인해 자연분리 천적생물의 증식이 순조롭게 이루어지지 않을 경우, 대체 천적생물로 활용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.



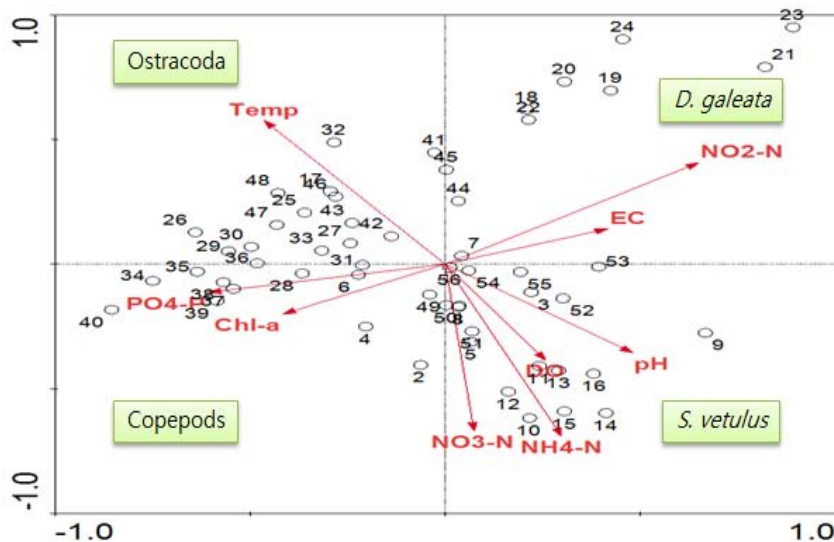
〈그림 2.45〉 천적생물의 증별 배양 특성

#### (4) 천적생물 배양에 영향을 미치는 환경인자 분석

천적생물 배양장치 내의 천적생물 군집구성 및 살포량 변화에 영향을 미치는 요인을 주성분 분석을 통해 분석한 결과 질소와 인의 농도, DO농도 및 Chl-*a*에 따라 우점 천적생물이 영향을 받는 것으로 나타났다. NO<sub>2</sub>-N이 증가할 경우 *D. galeata*가 우점하였고 NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N의 농도가 증가하였을 때는 *S. ventulus*가 우점하는 것으로 나타났다. 수온이 증가하고 DO가 감소할 경우 주요 천적생물인 *D. galeata*와 *S. ventulus* 모두 감소하고 패충류가 우점하는 것으로 분석되었으며, 인 농도가 증가하고 Chl-*a*가 증가할 경우 요각류가 우점하는 것으로 분석되었다(그림 2.46).

수온은 지각류의 성장에 큰 영향을 미치는 인자로, 일반적으로 25 ℃ 이상의 수온에서는 일부 지각류의 성장저해가 나타나는 것으로 알려져 있다. 따라서 수온이 높았던 하절기의 경우 패충류를 제외한 천적생물의 개체군 밀도가 제한적이었던 것으로 판단된다.

영양염류의 경우 일반적으로 인이 결핍되는 경우 천적생물로 사용되는 물벼룩의 성장에 제한요인으로 작용하는 것이 알려져 있으나(Urabe et al., 1997), 본 연구기간 중 천적생물의 조성에는 이와 같은 인의 영향은 분석되지 않았고, 배양장치 내 인농도가 증가하는 시기에는 요각류가 증가하는 현상이 관찰되었다. 반면, 천적생물인 *D. galeata*의 증가와 *S. vetulus*의 증가의 경우 질산염 및 암모니아 농도와의 상관성이 관찰되었다. 높은 암모니아 농도는 물벼룩에게 독성으로 작용할 가능성이 있으나, 본 연구기간 중 초대저수지의 원수를 사용한 물벼룩 성장 실험의 경우 적절한 질소원의 높은 농도에서는 오히려 물벼룩의 개체군 성장에 플러스요인으로 작용하는 것으로 분석되었다.



<그림 2.46> 연장 배양장치 내 천적생물 군집과 수질양목을 이용한 주성분분석(CCA)



### 3. 천적생물 현장살포 및 효과증대방안

#### 가. 천적생물 현장살포

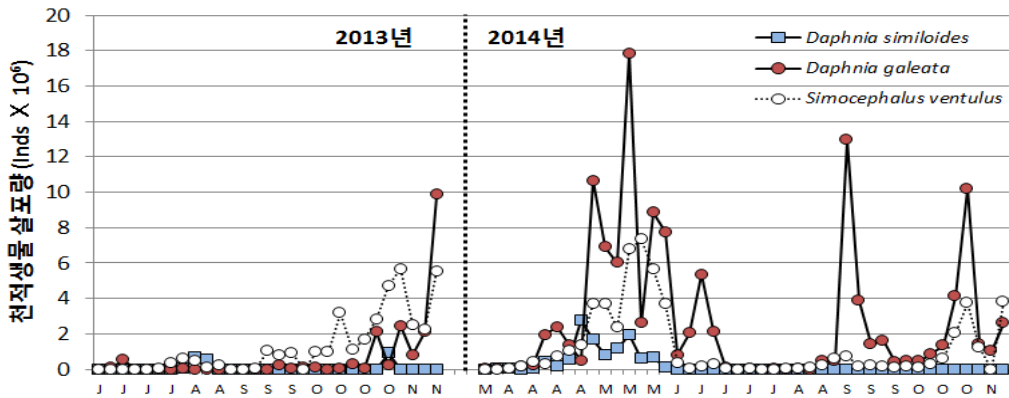
##### (1) 현장 살포 조건

천적생물 배양조의 천적생물 개체수가 100 inds./L 이상이 되면 천적생물 배양조의 70% 살포 후 일주일 이내에 대량배양 장치의 천적생물 개체군 밀도가 회복하는 것으로 분석되었다. 따라서 천적생물의 살포는 배양장치 내 천적생물 개체군 밀도가 100 inds./L, 살포 간격은 일주일 1회가 적절한 것으로 판단된다.

##### (2) 현장 살포량

천적생물 배양조에서 증식되어 초대저수지 현장으로 살포된 천적생물의 조성과 개체수를 그림 2.47에 요약하였다. 살포된 천적생물의 조성과 개체수는 천적생물 배양조에 따라 상이한 것으로 나타났다. 2013년의 경우 살포 개체수는 20톤 용량인 B-1 배양조에서 평균  $1.8 \times 10^6$ 개체로 가장 높은 것으로 나타난 반면, B-4 배양조에서는 평균 살포 개체수가  $0.1 \times 10^6$ 개체로 가장 낮은 것으로 나타났다. 2014년에도 마찬가지로 20톤 용량인 B-1 배양조에서 평균  $1.6 \times 10^6$ 개체로 가장 높은 것으로 나타난 반면, 같은 20톤 용량의 배양조인 B-8에서는 평균  $0.2 \times 10^6$ 개체로 가장 낮은 것으로 나타났다. 시기별로는 2013.10.15 이전 전체 살포량이  $2.0 \times 10^6$ 개체 이하로 유지되었으나 2013.10.21 살포부터 증가 경향을 나타내어 2013.11.18 최대 살포량을 나타내었다. 2013.11.18의 경우 *D. galeata*  $9.8 \times 10^6$ 개체와 *S. ventulus*  $5.5 \times 10^6$ 개체가 초대저수지로 살포되었다. 2014년은 배양장치를 조기에 가동시킴에 따라 4월부터 *D. galeata*가  $18.0 \times 10^6$  개체 이상 살포 되는 등 아주 높은 살포량을 보였다. 같은 시기에 *S. ventulus*는 약  $8.0 \times 10^6$ 개체가 저수지로 살포되었다. 수온이 높은 하절기에는 살포를 중단하였고 9월부터 다시 살포를 시작하였다. 이때, *D. galeata*는  $12.0 \times 10^6$ 개체 이상 살포되었고 *S. ventulus*는  $2.0 \times 10^6$ 개체 이하의 낮은 살포량을 나타냈다. 10월 이후 *S. ventulus*의 살포량은  $4.0 \times 10^6$  이상으로 증가하였다.

천적생물 배양장치의 천적생물조성은 각 배양장치 상황에 따라 상이한 것으로 나타나, 20톤 배양수조에서는 *D. galeata*가 가장 높은 개체군 밀도를 나타낸 반면 타 배양장치에서는 *S. ventulus*가 우점하는 경향을 나타냈다.

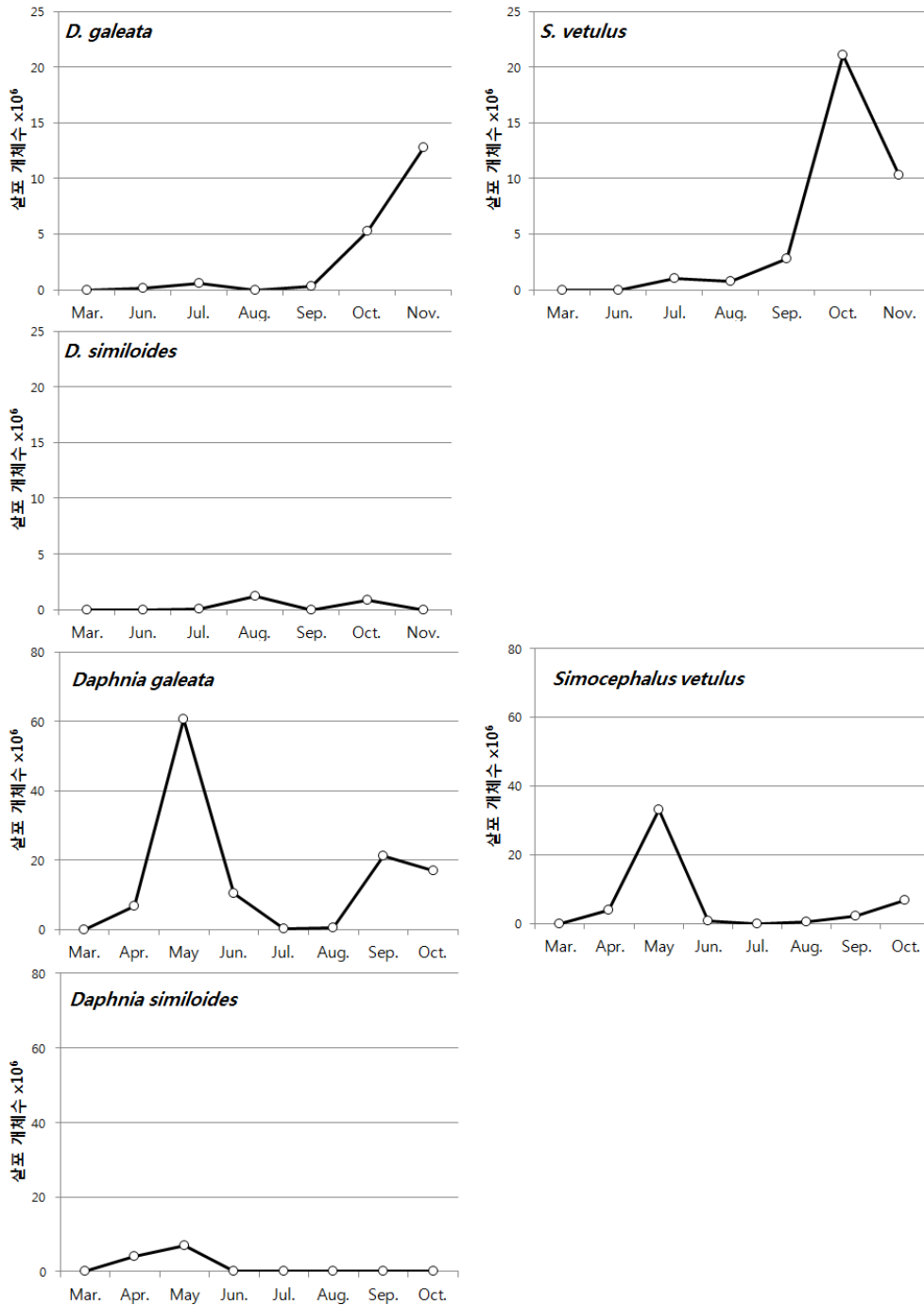


<그림 2.47> 천적생물 살포량의 계절변화

(표 2.18) 2014년 천적생물 증별 월 증 살포량

	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	합계
<i>D. similoides</i>	3.9 ×10 <sup>6</sup>	6.9 ×10 <sup>6</sup>	0	0	0	0	0	0	10.8 ×10 <sup>6</sup>
<i>D. galeata</i>	6.2 ×10 <sup>6</sup>	60.6 ×10 <sup>6</sup>	10.4 ×10 <sup>6</sup>	0.07 ×10 <sup>6</sup>	0.4 ×10 <sup>6</sup>	21.2 ×10 <sup>6</sup>	17.0 ×10 <sup>6</sup>	11.3 ×10 <sup>6</sup>	127.4 ×10 <sup>6</sup>
<i>S. ventulus</i>	3.3 ×10 <sup>6</sup>	33.1 ×10 <sup>6</sup>	0.8 ×10 <sup>6</sup>	0.03 ×10 <sup>6</sup>	0.3 ×10 <sup>6</sup>	2.1 ×10 <sup>6</sup>	6.7 ×10 <sup>6</sup>	6.0 ×10 <sup>6</sup>	52.7× 10 <sup>6</sup>
합계	13.5× 10 <sup>6</sup>	100.7 ×10 <sup>6</sup>	11.3 ×10 <sup>6</sup>	0.1 ×10 <sup>6</sup>	0.8 ×10 <sup>6</sup>	23.3 ×10 <sup>6</sup>	23.8 ×10 <sup>6</sup>	17.4 ×10 <sup>6</sup>	191.0 ×10 <sup>6</sup>

천적생물 증별 살포량 변화를 분석한 결과, 2013년의 천적생물은 자연 천적생물의 접종과 증식으로 인해 10월 이후 살포량이 증가한 것으로 나타났다, 특히 *S. ventulus*와 *D. galeata*의 경우 뚜렷한 증가경향을 나타내었다. *D. galeata*와 달리 *S. ventulus*의 경우 모든 배양조에서 개체군 밀도가 증가하였으며 전 시기에 걸쳐 살포되었다. 반면 *D. similoides*의 경우 일시적으로 높은 살포량을 보이고 대부분의 시기에는 살포량이 낮게 유지되었다. 2014년의 경우 *D. galeata*는 5월과 9월 이후 살포량이 증가한 것으로 나타났고, *S. ventulus*의 경우 5월에 살포량이 급격히 증가하였다가 5월 이후 다소 감소하였다. 반면, *D. similoides*는 집중 투입하였을 시 개체군 밀도가 증가하였던 4월 말부터 살포량이 증가하였고, 5월 이후에는 감소하여 낮은 살포량을 유지하였다(그림 2.48).

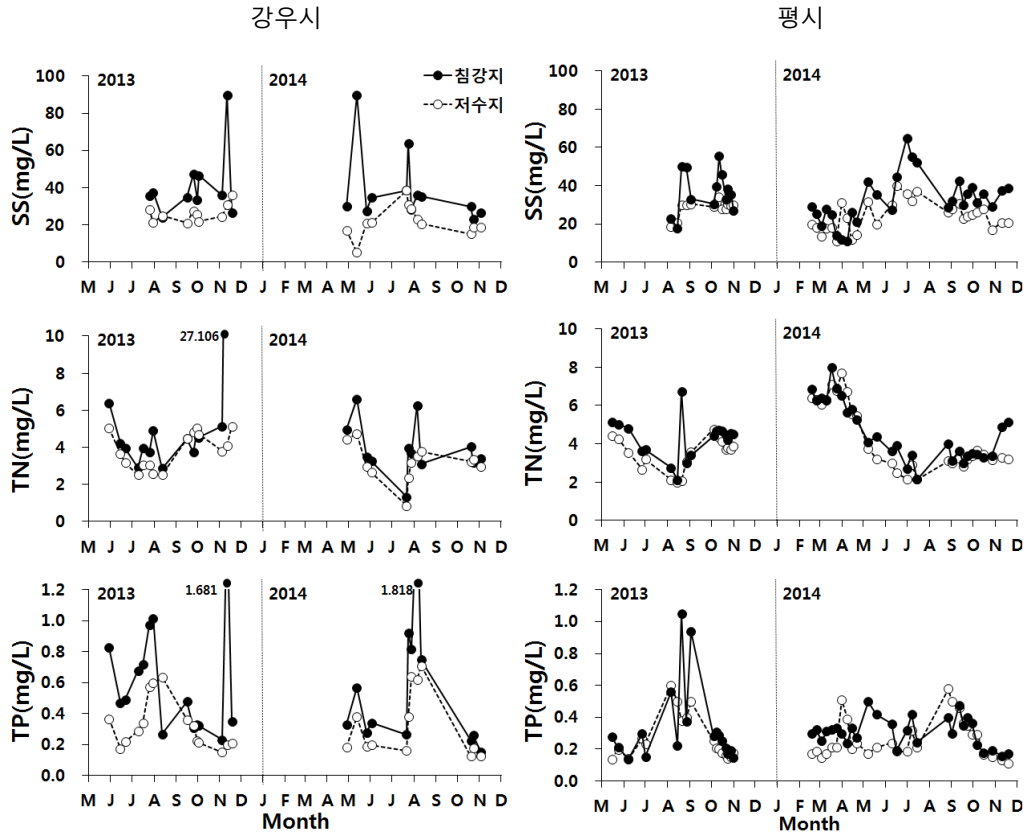


〈그림 2.48〉 천적생물 종별 살포량의 계절적 변화(상 : 2013, 아 : 2014)





/L)에 높게 나타났다. 저수지에서는 5.3~40.0 mg/L(평균 24.8 mg/L)의 범위로 침강지보다 낮게 나타났으며, 침강지와 반대로 평시(10.8~40.0 mg/L, 평균 25.4 mg/L)보다 강우시(5.3~38.7 mg/L, 평균 23.8 mg/L)에 오히려 낮게 나타났다.



<그림 2.50> 간이 침강장지 설치에 따른 강우시(좌)와 평시(우) 수환경 특성

TN은 침강지에서 1.328~27.106 mg/L(평균 4.732 mg/L)의 범위를 보였으며, 평시(2.905~7.983 mg/L, 평균 4.461 mg/L)보다 강우시(1.328~27.106 mg/L, 평균 5.193 mg/L)에 높게 나타났다. 저수지에서는 0.851~7.961 mg/L(평균 3.822 mg/L)의 범위로 침강지보다 낮게 나타났으며, 침강지와 반대로 평시(1.970~7.691 mg/L, 평균 3.985 mg/L)보다 강우시(0.851~5.135 mg/L, 평균 3.544 mg/L)에 오히려 낮게 나타났다.

TP는 침강지에서 0.138~1.818 mg/L(평균 0.419 mg/L)의 범위를 보였으며, 평시(0.138~1.049 mg/L, 평균 0.320 mg/L)보다 강우시(0.152~1.818 mg/L, 평균 0.588 mg/L)에 높게 나타났다. 저수지에서는 0.112~0.711 mg/L(평균 0.288 mg/L)의 범위로 침강지보다 낮게 나타났으며, 침강지와 반대로 평시(0.197~0.769 mg/L, 평균 0.398 mg/L)보다 강우시(0.152~1.818 mg/L, 평균 0.588 mg/L)에 오히려 낮게 나타났다.

/L)의 범위로 침강지보다 낮게 나타났으며, 침강지와 마찬가지로 평시(0.112~0.601 mg/L, 평균 0.265 mg/L)보다 강우시(0.125~0.711 mg/L, 평균 0.326 mg/L)에 높게 나타났다.

(다) 수질개선 효과

간이 침강장치 설치에 의해 SS는 침강장치 유입수(11.0~90.0 mg/L)에 비해 침강장치 하류(5.3~40.0 mg/L)에서 감소하여 -158.3~94.1%(평균 22.7%)의 제거효율을 보였다. 평시에는 -158.3~53.8%(평균 25.0%)의 제거효과를 보였으며, 강우시에는 -35.8~94.1%(평균 40.4%)로 침강장치에 의한 높은 입자성 물질(SS)의 제거효과를 확인하였다. 특히, 평시보다 강우시 평균 15.4% 높은 제거효과를 보였다(표 2.19).

TN은 침강장치 유입수(1.328~27.106 mg/L)에 비해 침강장치 하류(0.851~7.961 mg/L)에서 감소하여 -29.5~84.9%(평균 13.6%)의 제거효율을 보였다. 평시에는 -19.5~69.2%(평균 10.7%)의 제거효과를 보였으며, 강우시에는 -29.5~84.9%(평균 31.8%)로 침강장치에 의한 높은 TN 제거효과를 확인할 수 있었다. 특히, 평시보다 강우시 평균 21.1% 높은 제거효과를 보였다(표 2.19).

TP는 침강장치 유입수(0.138~1.818 mg/L)에 비해 침강장치 하류(0.112~0.711 mg/L)에서 감소하여 -137.7~88.0%(평균 19.0%)의 제거효율을 보였다. 평시에는 -124.2~65.5%(평균 17.0%)의 제거효과를 보였으며, 강우시에는 -137.7~88.0%(평균 44.7%)로 침강장치에 의한 높은 TP 제거효과를 확인할 수 있었다. 특히, 평시보다 강우시 평균 27.7% 높은 제거효과를 보였다(표 2.19).

(표 2.19) 간이 침강장치의 수질개선효과

조건		SS(mg/L)			TN(mg/L)			TP(mg/L)		
		평균	최대	최소	평균	최대	최소	평균	최대	최소
강우시	침강지 유입수	39.8	90.0	23.0	5.193	27.106	1.328	0.588	1.818	0.152
	침강지 하류	23.8	38.7	5.3	3.544	5.135	0.851	0.326	0.711	0.125
	제거율	40.4	94.1	-35.8	31.8	84.9	-29.5	44.7	88.0	-137.7
평시	침강지 유입수	33.9	65.0	11.0	4.461	7.983	2.095	0.320	1.049	0.138
	침강지 하류	25.4	40.0	10.8	3.985	7.691	1.970	0.265	0.601	0.112
	제거율	25.0	53.8	-158.8	10.7	69.2	-19.5	17.0	65.5	-124.2

침강장치 적용효과 분석에 따르면, 침강장치는 저수지로 유입되는 오염





물질을 효과적으로 감소시키는 것으로 나타났으며, 강우시 제거효과는 평균 30%를 상회하였고, 최대 80%를 초과하는 높은 제거효과를 보여 저수지의 부영양화를 유발하는 영양염류와 부유물질의 저수지 유입을 억제하는 것으로 판단되었다.

#### (라) 천적생물 기능개선 효과

강우시 토사나 현탁물질의 유입으로 탁도가 증가하는 것은 천적생물의 성장환경을 악화시키므로 간이 침강장치의 도입에 따른 SS의 제거는 천적생물 기능개선에 효과적이다. 아울러, 녹조원인 물질인 TP와 TN의 제거효과도 높아 녹조예방기능과 천적생물 생육환경 개선의 기능을 가진 오염물질 침강장치의 병행 적용은 매우 권장할 만하다. 특히, 설치비용이 기능대비 매우 저렴하여 가성비가 높은 공법으로 추천할 수 있다.

### (2) Cage

#### (가) 적용조건

Cage는 천적생물 배양장치에서 대량 배양된 천적생물의 기능향상을 위해 도입하는 부대장치로서 천적생물이 안전하게 녹조를 포식하고 성장할 수 있는 공간을 제공한다.



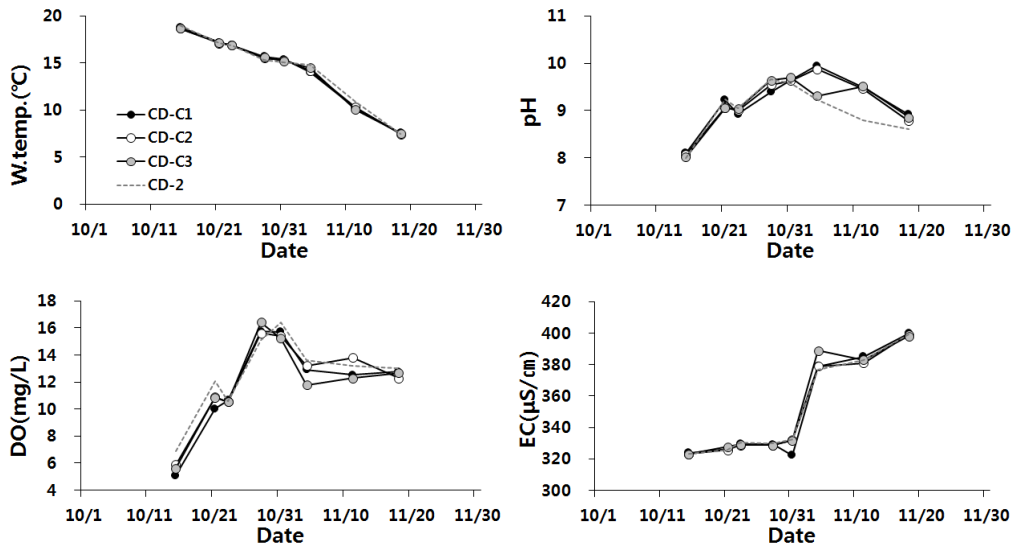
<그림 2.51> Cage 적용모습

Cage의 적용은 수역에 천적생물 포식자가 많아 살포 즉시 제거될 가능성이 높은 저수지, 강우로 인한 체류시간 감소 또는 유속이 빨라 천적생물의 유실이 예상될 경우, 천적생물 배양장치의 규모가 다소 작아 저수지내 추가 증식이 필요한 경우에 효율적이다. 반면, 수중에 유기물 또는 현탁물질이 많은 경우 cage의 메쉬망에 침착하여 물순환을 방해함으로써 cage 내 환경조건을 악화시킬 수 있으므로 이에 대한 유지관리를 강화해야 한다.

(나) 수환경 특성

수온은 cage 내에서 7.4~18.8 ℃(평균 14.5 ℃)의 범위로 나타났으며, 계절적 요인으로 점차 감소하는 경향을 보였고, CD-C1은 평균 14.5 ℃, CD-C2은 평균 14.4 ℃, CD-C3은 평균 14.5 ℃로 cage별 차이가 없었다. 인근에 지점인 CD-2는 7.5~19.0 ℃(평균 14.6 ℃)로 cage 내외의 차이가 거의 없었다.

DO는 cage 내에서 5.1~16.4 mg/L(평균 12.0 mg/L)의 범위로 나타났으며, 강우로 인해 일조시간이 0.6시간/일이었던 2013.11.15.에 평균 5.5 mg/L를 보인 것을 제외하고 10 mg/L을 초과하였다. cage별로 CD-C1은 평균 11.9 mg/L, CD-C2은 평균 12.2 mg/L, CD-C3은 평균 11.9 mg/L로 큰 차이가 없었으며, 인근에 지점인 CD-2는 6.9~16.4 mg/L(평균 12.6 mg/L)로 cage보다 다소 높았으나 큰 차이는 없었다.



<그림 2.52> Cage 수환경 특성

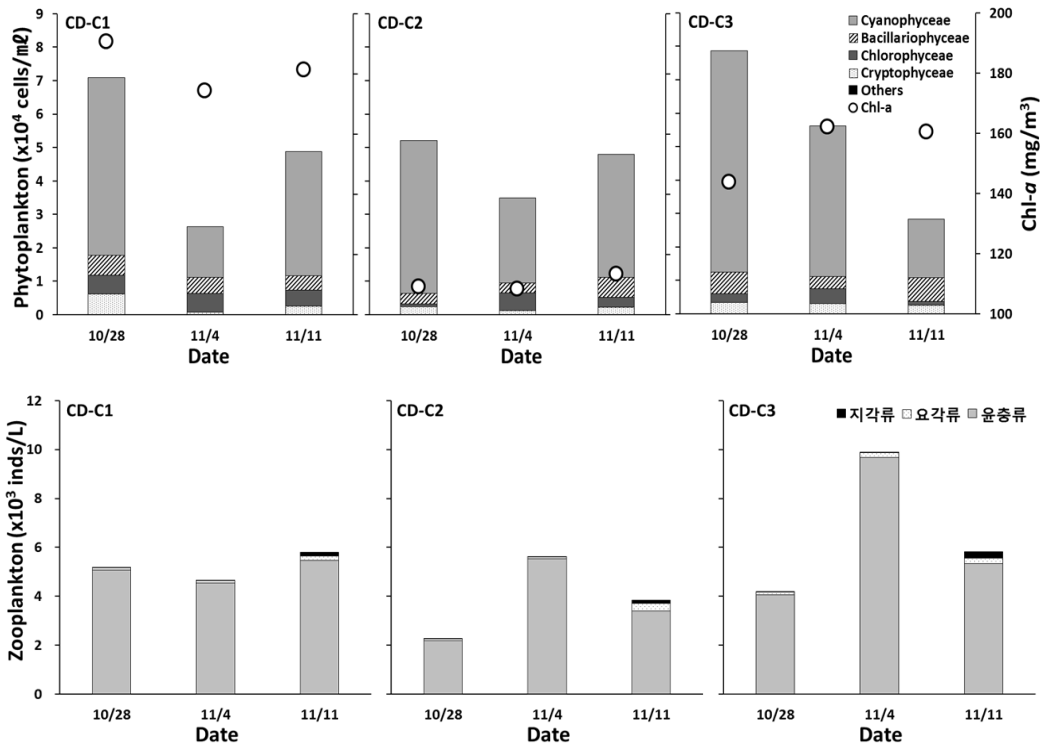


pH는 cage 내에서 8.0~10.0(평균 9.2)의 범위로 나타났으며, DO와 유사한 변화양상을 보였고, cage별로 CD-C1은 평균 9.2, CD-C2은 평균 9.2, CD-C3은 평균 9.1로 차이가 없었다. 인근에 지점인 CD-2는 8.0~9.7(평균 9.0 mg/L)로 cage에서 다소 높았으나 큰 차이는 없었다.

EC는 cage 내에서 322~400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )의 범위로 나타났으며, cage별로 CD-C1은 평균 349  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , CD-C2은 평균 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , CD-C3은 평균 351  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 큰 차이가 없었고, 인근에 지점인 CD-2는 323~399  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )로 cage 내외의 차이가 없었다.

#### (다) 천적생물 기능개선 효과

Cage 내 천적생물 살포에 따라 천적생물은 살포 초기인 2013.10.28에 CD-C1~CD-C3 평균 3,867 inds./L, 주요 녹조 포식 천적생물인 지각류는 평균 3.0 inds./L였던 것에 비해 살포 후기인 2013.11.11에는 전체 천적생물 평균 5,159 inds./L, 지각류 평균 181.4 inds./L로 지각류의 개체수가 증가한 것을 확인할 수 있었다.



<그림 2.53> Cage 내 식물플랑크톤과 천적생물 연존량 및 증포성, Chl-a 변화

Cage 내 식물플랑크톤의 현존량은 살포 초기인 2013.10.28에 평균  $7.0 \times 10^4$  cells/ml 로 높게 나타났던 것에 비해 살포 후기인 2013.11.11에는 평균  $3.9 \times 10^4$  cells/ml로 초기에 비해 현저히 낮아지는 것을 볼 수 있었으며, Chl-*a*는 2013.10.28에 평균 147.9 mg/m<sup>3</sup>, 2013.11.4에 평균 148.3 mg/m<sup>3</sup>, 2013.11.11에 평균 151.7 mg/m<sup>3</sup>로 큰 차이를 보이지 않았다(그림 2.53).

### (3) 인공식물섬

#### (가) 적용조건

현장에 살포된 천적생물이 호내에 안정적으로 정착하기 위해서는 3 m 이상의 수심 또는 은신처가 필요하지만, 대부분의 농업용저수지는 저수율 변동에 따라 수심변화가 심해 천적생물 안정화에 불리한 조건을 가지고 있다.

이러한 불리한 조건을 극복하고자 천적생물의 은신처 및 서식공간 제공을 목적으로 기존 방류부 외에 인공식물섬을 설치할 수 있다.

인공식물섬의 적용은 수심이 낮아 포식어류에 노출되기 쉬운 조건일 경우, 수변식생대 등 천적생물이 선호하는 서식공간이 부족한 경우, 극심한 수위변동으로 천적생물의 유실이 심할 것으로 예상될 경우 등에 효율적으로 도입할 수 있다.

#### (나) 수환경 특성

##### ◦ 인공식물섬 거리조건별 수환경 특성

수온은 P1에서 17.0~29.3 °C(평균 23.9 °C), P2에서 17.0~29.7 °C(평균 23.7 °C), P3에서 16.8~31.2 °C(평균 23.8 °C)의 범위로 거리조건별 수온 차이가 거의 없었으며, 타지점은 16.9~30.0 °C(평균 23.8 °C)로 저수지내 지점간 수온 차이는 거의 없었다.

DO는 P1에서 5.5~20.4 mg/L(평균 12.7 mg/L), P2에서 5.8~19.8 mg/L(평균 12.6 mg/L), P3에서 4.7~21.3 mg/L(평균 12.6 mg/L)의 범위로 거리조건별 DO 차이가 없었으며, 타지점은 5.4~20.1 mg/L(평균 13.2 mg/L)로 인공식물섬 적용지점에 비해 저수지 내에서 다소 높게 나타났다.

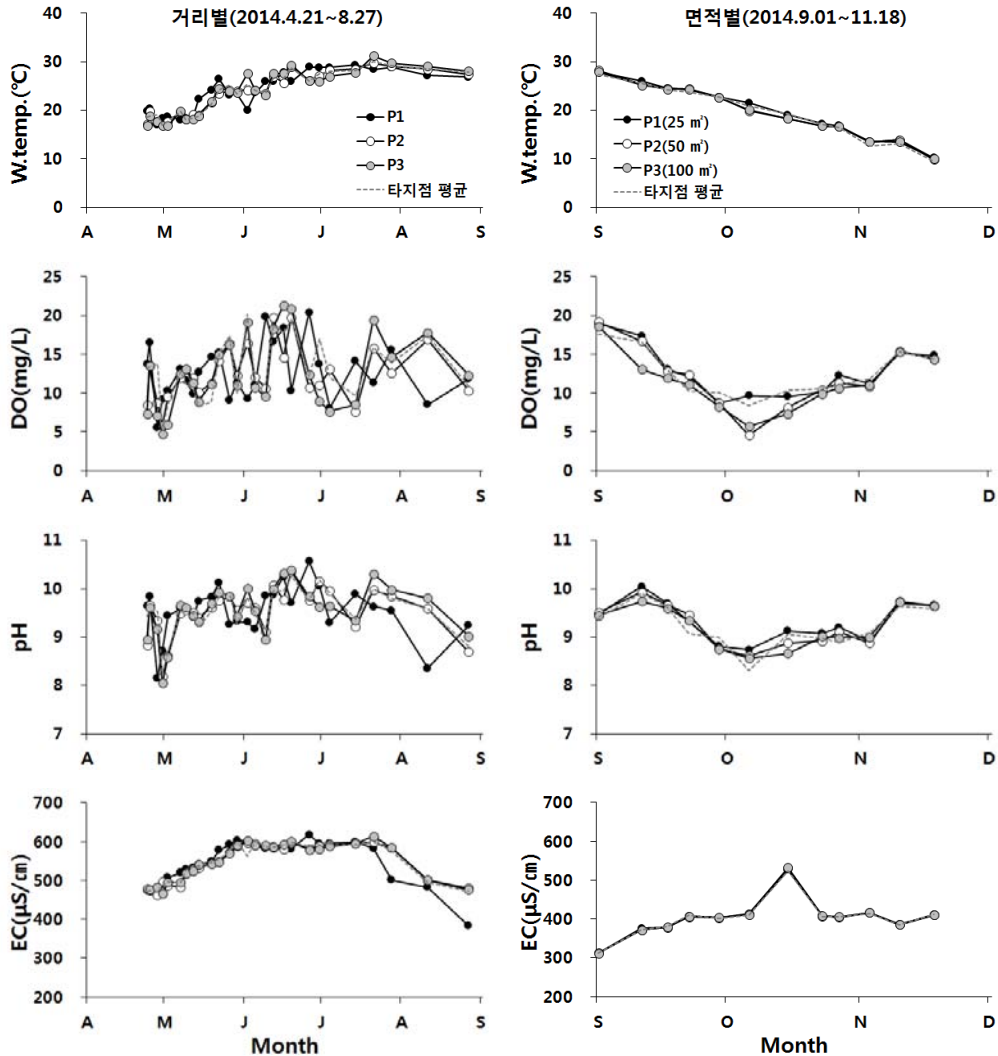
pH는 P1에서 8.2~10.6(평균 9.5), P2에서 8.2~10.4(평균 9.5), P3에서 8.1~10.4(평균 9.6)의 범위로 거리조건별 pH 차이가 없었으며, 타지점은 8.2~10.6(평균 9.5)로 저수지내 지점간 pH 차이는 거의 없었다.

EC는 P1에서 383~618 μS/cm(평균 546 μS/cm), P2에서 384~599 μS/cm(평균 542 μS/cm), P3에서 383~614 μS/cm(평균 543 μS/cm)의 범위로 거리



조건별 EC 차이가 없었으며, 타지점은 381~600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 543  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )로 저수지내 지점간 EC 차이는 거의 없었다.

인공식물섬 적용에 따른 수환경 특성은 거리조건별 차이를 보이지 않았으며, 전반적으로 저수지내에서 유사한 특성을 보였다.



〈그림 2.54〉 인공식물섬 적용 조건별 수환경 특성(좌: 거리별, 우: 면적별)

○ 인공식물섬 면적조건별 수환경 특성

수온은 P1(25  $\text{m}^3$ )에서 10.2~27.9  $^{\circ}\text{C}$ (평균 19.8  $^{\circ}\text{C}$ ), P2(50  $\text{m}^3$ )에서 9.8~28.2  $^{\circ}\text{C}$ (평균 19.5  $^{\circ}\text{C}$ ), P3(100  $\text{m}^3$ )에서 10.1~27.9  $^{\circ}\text{C}$ (평균 19.4  $^{\circ}\text{C}$ )의 범위로

인공식물섬 면적이 증가함에 따라 수온이 다소 감소하였으나 큰 차이를 보이지 않았다. 타지점은 9.8~27.4 °C(평균 19.4 °C)로 인공식물섬 설치지점과 유사한 수온을 보였다.

DO는 P1에서 8.7~18.9 mg/L(평균 12.8 mg/L), P2에서 4.6~19.2 mg/L(평균 12.1 mg/L), P3에서 5.7~18.6 mg/L(평균 11.6 mg/L)의 범위로 인공식물섬 면적이 증가함에 따라 DO가 감소하였으며, 타지점은 8.4~17.6 mg/L(평균 12.5 mg/L)로 나타났다.

pH는 P1에서 8.7~10.1(평균 9.3), P2에서 8.6~9.9(평균 9.3), P3에서 8.6~9.7(평균 9.2)의 범위로 면적조건별 pH 차이가 없었으며, 타지점은 8.3~9.9(평균 9.2)로 저수지내 지점간 pH 차이는 거의 없었다.

EC는 P1에서 311~526 µS/cm(평균 403 µS/cm), P2에서 312~530 µS/cm(평균 403 µS/cm), P3에서 311~532 µS/cm(평균 403 µS/cm)의 범위로 면적조건별 EC 차이가 없었으며, 타지점은 312~523 µS/cm(평균 402 µS/cm)로 저수지내 지점간 EC 차이는 거의 없었다.

인공식물섬 적용에 따른 수환경 특성은 수온과 DO는 면적이 증가함에 따라 다소 감소하는 경향을 보였으며, pH와 EC는 면적조건별 차이를 보이지 않아 전반적으로 저수지내에서 유사한 특성을 보였다.

#### (다) 천적생물 기능개선 효과

4월에서 6월에는 천적생물의 개체군 밀도가 지점에 따라 상이하였으나, 천적생물이 살포되는 CD-1 지점을 제외한 타지점에 비해 인공식물섬 지점에서의 개체군 밀도가 높게 나타났다. *D. galeata*의 경우 살포지점과 거리가 가까운 P1 지점에서 개체군 밀도가 다른 지점보다 높게 나타났고, *S. ventulus*의 경우 P2 지점에서 다른지점보다 상대적으로 높은 개체군 밀도를 나타냈다.

인공식물섬의 배치를 P1은 식물섬 1개(25 m<sup>2</sup>), P2는 식물섬 2개(50 m<sup>2</sup>), P3는 식물섬 4개(100 m<sup>2</sup>)로 변경한 9월 이후에는 천적생물이 살포되는 CD-1 지점을 제외한 타지점에 비해 인공식물섬에서의 *S. ventulus*의 개체군 밀도가 높게 나타났다. 인공식물섬 면적에 따른 개체군 밀도는 *S. ventulus*가 인공식물섬 면적 50 m<sup>2</sup>에서 가장 높게 나타났고, *D. galeata*는 발견되지 않았다. 인공섬의 경우 인공 서식처로 살포된 천적생물의 피난처로 작용할 가능성이 있으므로 특히 수중에서 수생식물의 서식을 유도할 수 있는 구조를 고려하여 적용하면 효과적일 것으로 사료된다.



#### 4. 천적생물 배양장치 최적 운영 및 효율적 살포방안

##### 가. 천적생물 배양장치 최적 운영 방안

천적생물 배양장치의 최적 운영을 위해서는 안정적인 유지관리 계획의 수립이 필수적이다. 특히 자연환경에서 미소생물을 배양하는 것은 상당히 까다롭고, 많은 변수를 가지고 있기 때문에 더더욱 중요하다. 대상 저수지의 주변 상황과 물리·구조적 특성에 따라 운영방향이 달라지기 때문에 각 저수지의 특성을 잘 반영한 유지관리방안이 적절히 수립되어야만 목적에 따른 기능을 발휘할 수 있을 것이다. 최적의 유지관리를 위해 필요한 사항은 시설 운영의 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 유지관리가 필요하며, 다음과 같은 사항에 초점을 맞추어 실시해야 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.
- 천적생물 배양조의 먹이생물 공급비율, 먹이생물의 질 등을 항상 관찰하고, 관리하여야 한다.
- 먹이생물의 질적 관리를 위해 식물플랑크톤 배양조에서 배양상태 등을 꼼꼼히 체크해야 한다.
- 대량 배양된 천적생물의 살포과정에서 중요한 살포장치의 상태를 항상 점검하여 시의 적절하게 현장살포 할 수 있도록 관리해야 한다.
- 배양조 내에서 비정상적인 생물의 발견 및 증식여부를 관찰하여 즉시 보고 및 조치해야 한다.

##### 나. 천적생물 배양장치 효율적 살포방안

천적생물 배양조의 천적생물 개체수를 최대 개체수로 회복시킬 수 있는 일주일 간격으로 실시하여야한다. 또한, 살포배관을 다양화하여 호소 전면 살포와 배양장치 인근에 집적된 녹조 구간 살포 등 시기에 따른 살포방안 선택이 가능하도록 한다.

또한, 천적생물 배양장치에서 천적생물 살포량을 극대화하고 살포된 천적생물의 생존율을 높이기 위해서는 다음과 같은 사항이 고려되어야 한다.



- 배양장치의 천적생물 개체군 밀도는 100 inds./L일 경우 살포 후 개체군 밀도의 회복이 잘 이루어짐으로 살포 시 배양장치의 개체군 밀도를 고려해야 한다.
- 천적생물은 서식 어류의 선택적 포식압을 받게 되므로, 대상 저수지의 플랑크톤 섭식 어류의 조절이 수반되어야 한다.
- 살포된 천적생물이 포식되지 않고 정착하기 위해 살포시간은 야간(일몰 이후)이 적절하다.
- 살포된 천적생물의 생존율을 높이기 위해서는 천적생물의 피난처로 작용할 수 있는 수생식물 대 조성 및 이와 유사한 인공섬 등의 적용을 고려해야 한다.





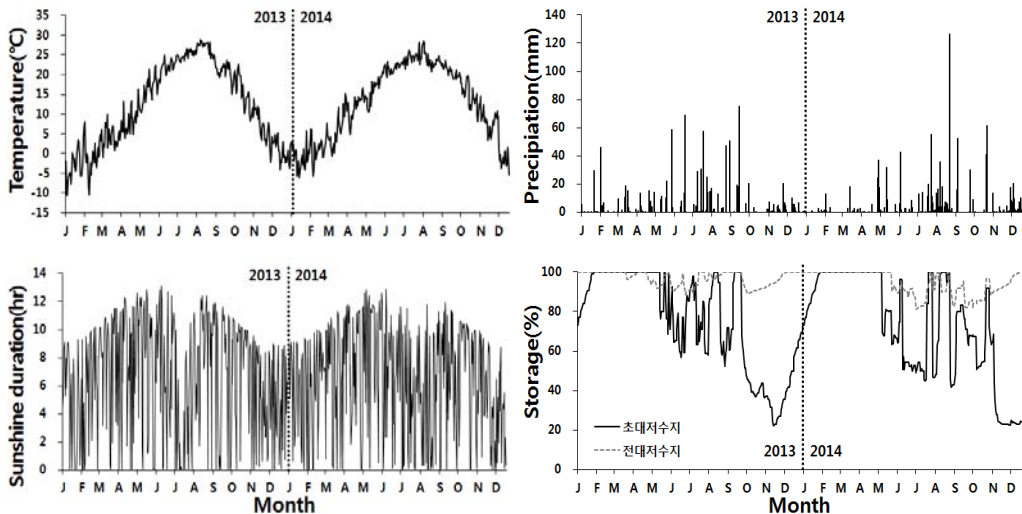
## 제4절 녹조제어 효과 분석 및 연중 활용방안

### 1. 초대저수지의 수환경 및 녹조발생 특성

#### 가. 초대저수지의 수환경 특성 분석

##### (1) 기상 및 저수율 현황

초대저수지의 기상현황은 기상청(<http://www.kma.go.kr>)의 서산기상대 일평균기온, 강수량 및 일조시간 자료를 이용하였으며, 저수율 변화는 한국농어촌공사 농업기반시설관리시스템(<http://rims.ekr.or.kr/>)의 저수율현황 자료를 이용하여 2013.1.1.~2014.12.17까지 2년간 분석을 실시하였다(그림 2.55).



〈그림 2.55〉 초대저수지 기상 및 저수율 연앙

일평균기온은  $-10.8 \sim 28.8$  °C(평균 12.4 °C)의 범위, 연구기간 중 12월~2월은 영하의 기온을 보였으며, 5월~10월은 식물플랑크톤의 최적생장온도인 15 °C 이상의 기온을 보였고, 특히 6월~9월은 평균 20 °C 이상의 고수온기로 남조류가 번성하기 알맞은 조건을 보였다.

연간 총 강수량은 2013년 1022.7 mm(강우일수 118일), 2014년 984.2 mm(강우일수 112일)로서, 45% 이상의 강우가 7~9월에 발생하였는데, 2013년에는 47.1%(481.8 mm), 2014년에는 50.9%(500.7 mm)의 강우가 집중하였다.

연간 평균 일조시간은 2013년과 2014년에 각각 평균 6.5시간/일(2,383시

간/년), 평균 6.4시간/일(2,255시간/년)으로 큰 차이를 보이지 않았다. 일조시간은 온도 및 영양염류와 함께 대규모 녹조발생의 주요원인으로 알려져 있는데, 매년 녹조발생으로 문제가 되고 있는 대청호는 6.5시간/일의 일조시간(2,373시간/년)을 보여(김, 2012), 초대저수지와 큰 차이가 없는 것으로 나타나 녹조발생에 매우 유리한 조건을 제공하고 있는 것으로 판단되었다.

저수율은 22~100%(평균 74.7%)로 관개기와 집중강우기에 저수율 변동이 컸으며, 특히 가을철 수위감소가 심각하였다. 2013년은 10월부터 50% 이하(평균 35.4%)로 감소하여 11.13에 최소치인 22%까지 저하되었으며, 2014년에도 11.6부터 30% 미만(평균 23.8%)으로 감소하였다. 이는 인근에 위치한 전대저수지(송악읍 전대리)의 저수율(2년간 평균 95.7%)과 비교하여 큰 차이를 보였다. 이러한 저수율 감소는 식물플랑크톤의 천적생물인 동물플랑크톤의 피신처 및 서식처의 감소를 유발시키고, 이로 인해 천적생물 군집의 증가억제와 지속적인 유출로 인해 천적생물의 정착이 어렵게 되는 요인으로 작용할 것으로 판단되었다.

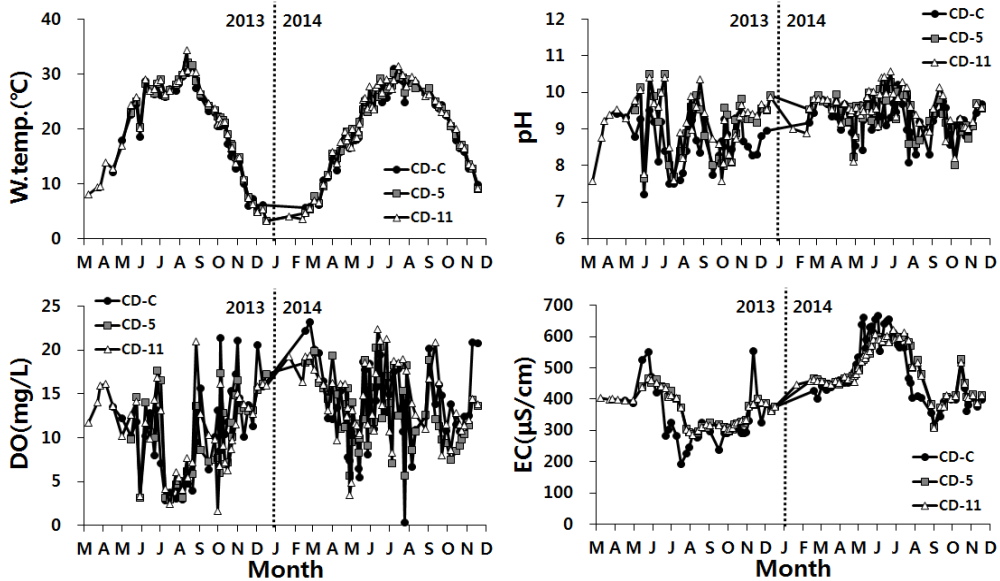
## (2) 수질이화학적 특성

초대저수지의 수질이화학적 특성을 분석하기 위하여, 2013.3.8.~2014.11.18의 기간동안 유입부(CD-C), 중앙부(CD-5), 유출부(CD-11) 3개 정점에서 수온(W.temp.), 용존산소량(DO), 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 화학적산소요구량(COD), 총질소(TN), 총인(TP), TN:TP ratio(N/P)의 항목에 대한 수질 모니터링을 실시하였다.

### (가) 수온, DO, pH, EC 특성

수온은 3.3~34.3 °C(평균 20.5 °C)의 범위로 계절별 변이를 보였으며, 하절기인 6~9월은 25°C를 초과하는 고수온기로 나타났고, 2013년은 3.3~34.3 °C(평균 20.7 °C), 2014년은 3.6~31.4 °C(평균 20.3 °C)로 나타났다. 전체지점에서 조사가 이루어진 2013.5~2014.11의 지점별 수온은 유입부(평균 20.5 °C)에 비해 중앙부(평균 20.9 °C)와 유출부(평균 21.0 °C)에서 비교적 높게 나타났다.

DO는 0.3~23.2 mg/L(평균 12.4 mg/L)의 범위로 강우기(7~8월)의 일부 시기에 5 mg/L 내외의 농도를 보인 것을 제외하면 과포화 상태였으며, 2013년은 1.6~21.3 mg/L(평균 10.6 mg/L), 2014년은 0.3~23.2 mg/L(평균 13.6 mg/L)로 나타났다. 지점별로는 중앙부(평균 12.0 mg/L)가 유입부(평균 12.3 mg/L)와 유출부(평균 12.8 mg/L)에 비해 낮았으나, 큰 차이를 보이지 않았다.



〈그림 2.56〉 소대꺼수지 수온, DO, pH, EC 특성

pH는 7.2~10.6(평균 9.2)의 범위로 DO와 유사한 시기별 변화양상을 보였으며, 2013년은 7.2~10.5(평균 9.0), 2014년은 8.0~10.6(평균 9.4)로 나타났다. 지점별로는 유입부(평균 9.0)에 비해 중앙부(평균 9.3)와 유출부(평균 9.4)에서 다소 높게 나타났다.

EC는 192~666  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 434  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )로 범위로 갈수기인 봄철(4~5월)에 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  이상의 높은 값을 보인 후, 하절기(7~9월)에 집중강우에 의한 희석효과로 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  내외로 감소하였으며, 2013년은 192~553  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 331  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), 2014년은 309~666  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 495  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )로 2014년에 전반적으로 증가하여 나타났다. 각 지점별로 시기별 변화양상은 유사하였으나, 유입부에서는 변화폭이 474  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 중앙부(313  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )나 유출부(335  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )에 비해 크게 나타났는데, 이는 유역으로부터 유입되는 오염물질의 양이 크게 영향을 주고 있으며, 얕은 수심(평균 1.5 m)으로 퇴적물의 영향에 의한 오염 부하 변화가 크기 때문으로 판단되었다.

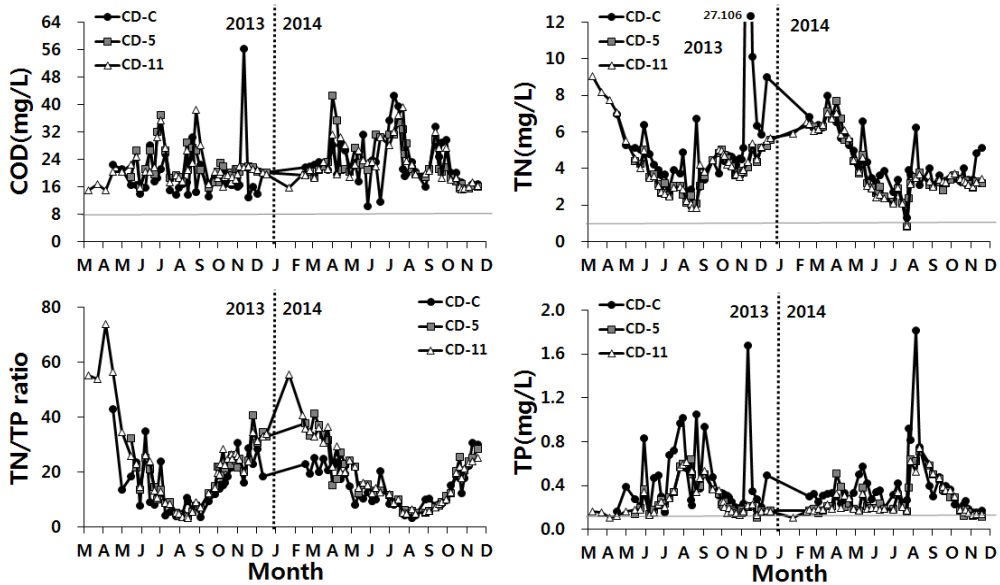
#### (나) COD, TN, TP, TN:TP ratio 특성

COD는 10.3~56.2 mg/L(평균 21.9 mg/L)의 범위로 전체시기에 농업용수 수질기준( $\leq 8$  mg/L)을 초과하는 심각한 수준을 보였으며, 2013년은 12.9~56.2 mg/L(평균 20.7 mg/L), 2014년은 10.3~42.6 mg/L(평균 23.0 mg/L)으로 나타났다. 지점별로는 유입부(평균 21.0 mg/L)에 비해 호내(중앙부 평균 22.6 mg/L)

/L, 유출부 22.0 mg/L)에서 높게 나타났다.

TN은 0.851~27.106 mg/L(평균 4.306 mg/L)의 범위로 2014.7.21.을 제외한 전체시기에 농업용수 수질기준( $\leq 1$  mg/L)을 초과하였으며, 2013년은 1.825~27.106 mg/L(평균 4.481 mg/L), 2014년은 0.851~7.983 mg/L(평균 4.137 mg/L)로 나타났다. 시기별로 봄철(3~4월)에는 평균 5 mg/L을 초과하는 높은 농도를 보였으나, 강우기에 감소한 후 저수기인 가을에 다시 증가하였고, 지점별로는 유입부에서 평균 4.858 mg/L(중양부 평균 3.886 mg/L, 유출부 평균 4.178 mg/L)로 가장 높게 나타났으며, 특히 2013.11.11에는 최대 27.106 mg/L까지 증가하였다.

TP는 0.105~1.818 mg/L(평균 0.317 mg/L)의 범위로 전체시기에 농업용수 수질기준( $\leq 0.1$  mg/L)을 초과하였으며, 2013년은 0.105~1.681 mg/L(평균 0.325 mg/L), 2014년은 0.106~1.818 mg/L(평균 0.311 mg/L)로 나타났다. 시기별로는 TN과 반대로 7월까지 증가한 후 감소하는 경향을 보였는데, 이는 TP의 농도가 여름철 강우 강도에 의해 결정되고(An, 2000), TP 변동이 TN 보다 강우와 더 밀접(안과 신, 2005)하게 나타난다는 보고와 일치한다. 지점별로는 유입부에서 평균 0.412 mg/L(중양부 평균 0.280 mg/L, 유출부 평균 0.263 mg/L)로 가장 높게 나타났으며, 특히 2011.11.11에는 최대 1.681 mg/L까지 증가하였다.



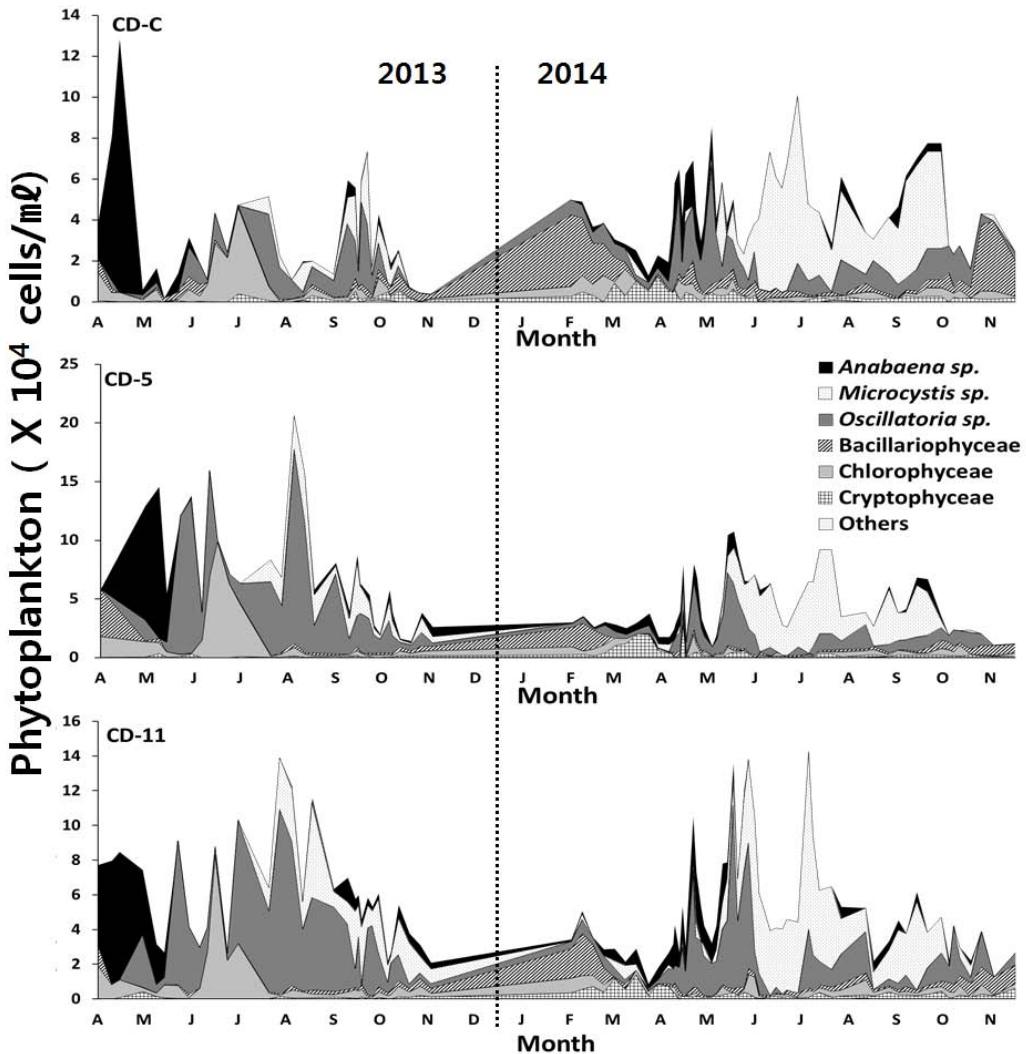
<그림 2.57> 소대저수지 COD, TN, TP, TN/TP ratio 특성



녹조발생 및 녹조원인종의 천이에 영향을 미치는 제한영양염 간접지표 (Fugimoto and Sudo, 1997; Smith, 1983)로 활용되는 TN:TP ratio는 3.4~73.9(평균 18.1)로 나타났으며, 분석데이터 238개 중 50.8%가 TN:TP ratio > 16로 인이 제한요인으로, 주로 강우기에 해당되는 15.5%가  $7 < \text{TN:TP ratio}$ 로 질소 제한 요인이 작용하였다.

### (3) 생물학적 특성

#### (가) 식물플랑크톤 분포



<그림 2.58> 시기별 정점별 식물플랑크톤 연존량 및 종조성 변화

초대저수지의 식물플랑크톤의 현존량은  $1.8 \sim 205.9 \times 10^3$  cells/ml(평균  $49.6 \times 10^3$  cells/ml)으로 나타났으며, 정점별로 CD-C 에서  $1.8 \sim 128.3 \times 10^3$  cells/ml(평균  $40.0 \times 10^3$  cells/ml), CD-5 에서  $9.2 \sim 205.9 \times 10^3$  cells/ml(평균  $55.7 \times 10^3$  cells/ml), CD-11 에서  $6.8 \sim 142.5 \times 10^3$  cells/ml(평균  $53.1 \times 10^3$  cells/ml) 로 저수지 중앙부인 CD-5 에서 가장 높게 나타났다. 2013년(평균  $7.6 \times 10^4$  cells/ml)이 2014년( $4.6 \times 10^4$  cells/ml)에 비해 높게 나타났으며, 상류 유입부인 CD-C 에서 다소 낮게 나타났다. 시기별로는 춘계인 4월과 하계와 추계로 들어서는 8월~9월에 높게 나타나는 경향을 보였다(그림 2.58).

(표 2.20) 초대저수지의 시기별 식물플랑크톤 우점종 및 우점율

Y	M	Dominant Species					
		CD-C		CD-5		CD-11	
2013	A	<i>Anabaena</i> sp.	(87.2%)	<i>Anabaena</i> sp.	(57.2%)	<i>Anabaena</i> sp.	(89.1%)
	M	<i>Anabaena</i> sp.	(63.6%)	<i>Anabaena</i> sp.	(88.7%)	<i>Anabaena</i> sp.	(73.5%)
	J	<i>Oscillatoria</i> sp.	(46.0%)	<i>Oscillatoria</i> sp.	(60.6%)	<i>Oscillatoria</i> sp.	(78.7%)
	J	<i>Chlorococum</i> sp.	(88.9%)	<i>Chlorococum</i> sp.	(87.6%)	<i>Chlorococum</i> sp.	(82.2%)
	A	<i>Oscillatoria</i> sp.	(69.2%)	<i>Oscillatoria</i> sp.	(57.6%)	<i>Oscillatoria</i> sp.	(68.2%)
	S	<i>Oscillatoria</i> sp.	(60.6%)	<i>Microcystis</i> sp.	(42.8%)	<i>Oscillatoria</i> sp.	(54.1%)
	O	<i>Microcystis</i> sp.	(59.6%)	<i>Oscillatoria</i> sp.	(56.9%)	<i>Microcystis</i> sp.	(50.4%)
	N	<i>Stephanodiscus</i> sp.	(90.0%)	<i>Microcystis</i> sp.	(34.5%)	<i>Microcystis</i> sp.	(63.2%)
2014	J	<i>Stephanodiscus</i> sp.	(43.8%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.	(43.8%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.	(43.8%)
	F	<i>Stephanodiscus</i> sp.	(68.5%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.	(65.5%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.	(49.8%)
	M	<i>Cryptomonas ovata</i>	(40.5%)	<i>Cryptomonas ovata</i>	(68.2%)	<i>Cryptomonas ovata</i>	(48.2%)
	A	<i>Oscillatoria</i> sp.	(65.2%)	<i>Oscillatoria</i> sp.	(47.1%)	<i>Anabaena</i> sp.	(54.4%)
	M	<i>Oscillatoria</i> sp.	(67.4%)	<i>Oscillatoria</i> sp.	(78.3%)	<i>Oscillatoria</i> sp.	(59.7%)
	J	<i>Microcystis</i> sp.	(84.7%)	<i>Microcystis</i> sp.	(83.4%)	<i>Microcystis</i> sp.	(75.4%)
	J	<i>Microcystis</i> sp.	(81.4%)	<i>Microcystis</i> sp.	(80.8%)	<i>Microcystis</i> sp.	(92.3%)
	A	<i>Microcystis</i> sp.	(55.5%)	<i>Microcystis</i> sp.	(53.5%)	<i>Microcystis</i> sp.	(38.5%)
	S	<i>Microcystis</i> sp.	(77.4%)	<i>Microcystis</i> sp.	(69.7%)	<i>Microcystis</i> sp.	(63.1%)
	O	<i>Oscillatoria</i> sp.	(67.6%)	<i>Oscillatoria</i> sp.	(57.9%)	<i>Oscillatoria</i> sp.	(80.6%)
	N	<i>Stephanodiscus</i> sp.	(80.7%)	<i>Oscillatoria</i> sp.	(58.8%)	<i>Oscillatoria</i> sp.	(52.6%)
	D	<i>Stephanodiscus</i> sp.	(64.8%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.	(54.6%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.	(41.0%)

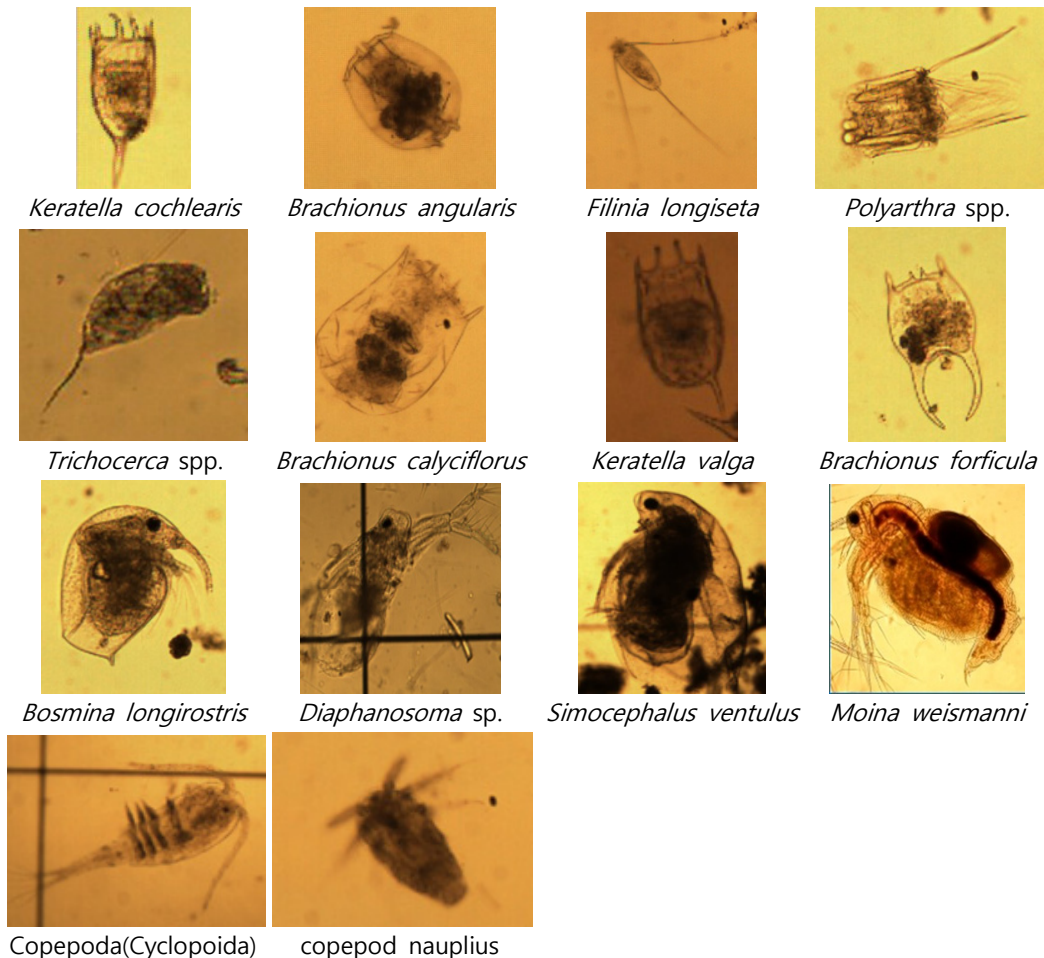
종 분포의 경우 모든 정점에서 대부분 남조류(Cyanophyceae)가 우점하였으나, 비교적 많은 강우가 내린 2013년 7월에는 녹조류(Chlorophyceae)가 우점하는 경향을 보였다. 남조류가 우점 하였던 시기 중 봄철인 4월~5월의 경우 주로 *Anabaena* sp.가 우점하였으며, 다른 시기에는 대부분 *Oscillatoria* sp. 가 우점하였다. 그러나, 정점 CD-11 에서는 *Microcystis* sp. 가 조금 더 우세한 경향을 보였으며, 늦가을인 11월 저수지 유입부인 CD-C 에서는 규조류인



*Stephanodiscus* sp. 가 우점하는 것으로 나타났다. 2014년에는 동절기인 1~2월에 *Stephanodiscus* sp.가 우점한 후, 그 외의 시기에는 2013년과 같은 양상을 보이며 대부분 *Oscillatoria* sp.와 *Microcystis* sp.가 우점종으로 나타났다.

(나) 동물플랑크톤 분포

초대저수지의 동물플랑크톤 군집은 전형적인 부영양화 호수의 종조성을 나타내었다. 출현 동물플랑크톤은 13속 26종으로 대표적인 우점종은 윤충류로 나타났으며, *Keratella cochlearis*, *Brachionus angularis*, *Filinia longiseta* 등의 소형 윤충류가 우점하였다(그림 2.59). 지각류로는 *Bosmina longirostris*, *Diaphanosoma* 등의 부영양화 수역에서 주로 출현하는 종들이 우점하였다(그림 2.59).



〈그림 2.59〉 초대저수지 출현 주요 동물플랑크톤 종

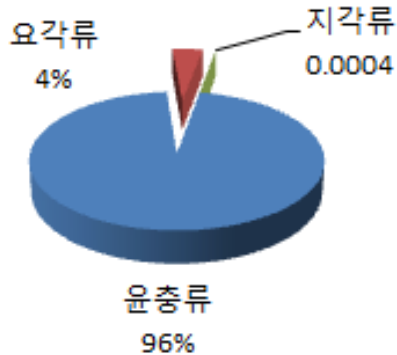


(표 2.21) 초대저수지 동물플랑크톤 시기별 종 조성 분포율(%)

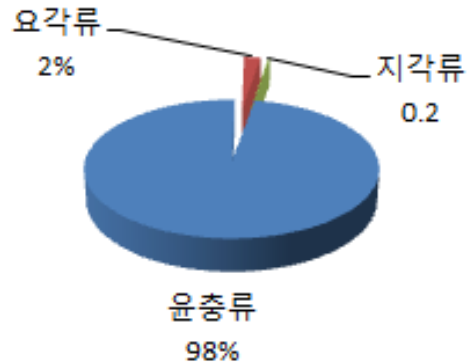
2013년	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월
윤충류	98.627	96.928	94.721	95.363	90.047	85.596	96.017	98.984
지각류	0.003	0.399	0.130	0.024	0.346	0.274	0.023	0.003
요각류	1.369	2.671	5.148	4.612	9.606	14.128	3.959	1.012
2014년	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월
윤충류	99.622	97.761	98.011	94.825	91.876	96.093	96.986	94.291
지각류	0.0001	0.0062	0.089	0.326	1.011	0.328	0.137	2.676
요각류	0.376	2.232	1.898	4.847	7.112	3.578	2.876	3.031

일반적으로 부영양화 수역은 높은 어류 포식압과 먹이 경쟁 등으로 인해 윤충류가 우점하며 지각류 중에서도 크기 및 섭식성향이 유사한 소형 지각류 *Bosmina longirostris*가 우점하게 된다(Obertegger and Manca 2011). 초대저수지의 경우 완전한 윤충류 우점 수역으로 부영양화 호수의 전형적인 플랑크톤 군집 조성을 나타냈다(그림 2.60).

전체 동물플랑크톤 조성 (2013년)



전체 동물플랑크톤 조성 (2014년)



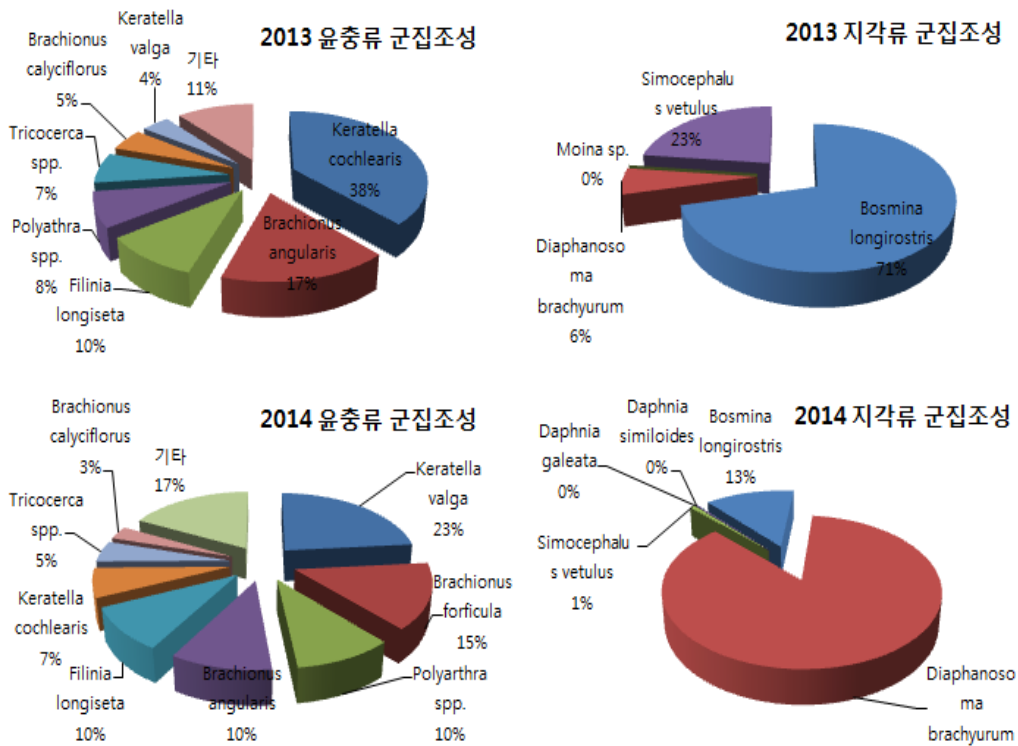
<그림 2.60> 초대저수지 동물플랑크톤 종 조성

조사가 진행된 2013년 4월에서 11월까지 윤충류가 전체 동물플랑크톤 밀도의 96%를 차지하였고, 요각류가 4%, 지각류가 차지하는 비율은 단지 0.0004%에 그치는 것으로 나타났다. 윤충류 중에서는 소형 윤충류 *Keratella cochlearis*가 윤충류 밀도의 38%를 차지하며 연중 우점하는 것으로 나타났고, *Brachionus calyciflorus*가 17%, *Filinia longiseta*가 10%를 차지한 반면



*Polyarthra* spp.의 상대풍부도는 8%로 나타났다. 지각류 군집에서는 부영양화 수역에서 우점하는 *Bosmina longirostris*가 71%로 우점하였고, 천적생물로 활용 가능한 *Simocephalus* 및 *Moina*의 상대풍부도는 높지 않은 것으로 나타났다.

2014년의 경우 2월부터 11월까지 조사를 진행하였고 윤충류가 전체 동물플랑크톤 밀도의 98%를 차지하였다. 요각류가 2%로 2013년보다 줄어들었고 지각류의 경우 0.2%로 2013년 0.0004%에 비해 크게 증가하였다. 윤충류 중에서는 소형 윤충류인 *Keratella valga*와 *Brachionus foeniculus*가 각각 23%, 15%로 우점하는 것으로 나타났다. 지각류 군집에서는 *Diaphanosoma brachyurum*이 우점하였고, 천적생물로 활용 가능한 *S. ventulus* 및 *D. galeata*의 상대풍부도는 높지 않은 것으로 나타났다(그림 2.61).



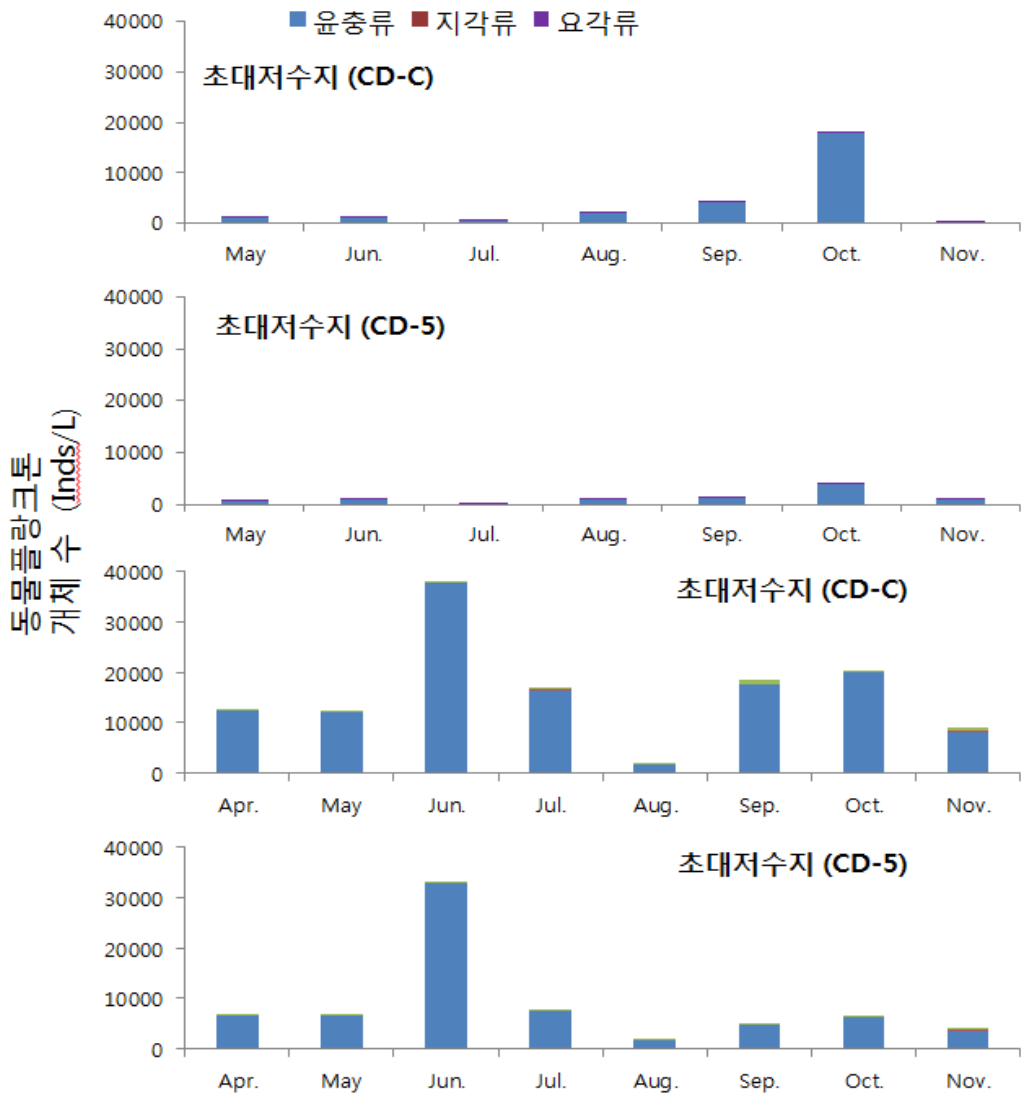
<그림 2.61> 초대저수지 동물플랑크톤 조성 상대풍부도

초대저수지의 동물플랑크톤의 2013년 계절분포는 유입부(CD-C)의 경우 연중 윤충류가 전체 개체군 밀도의 90% 이상을 차지하여 우점하였으며 지각류 및 요각류의 밀도는 연중 낮았다. 전체 동물플랑크톤 밀도는 10월 이후 증가하여 2013.10.8. 6,319 inds./L로 최대치를 보였으며 11월 이후 급격히 감소하



였다. 동물플랑크톤 밀도가 가장 높았던 2013.10.8 역시 윤충류 개체수가 6,250 inds./L로 동물플랑크톤의 대부분을 차지하는 것으로 나타났다.

2014년의 계절분포는 유입부(CD-C)의 경우 2013년 보다 증가된 동물플랑크톤의 밀도를 나타냈고 특히, 6월 동물플랑크톤의 밀도가 가장 높았다. 수온이 증가한 하절기(7~8월)에는 밀도가 감소하였고 9월 이후 다시 증가하였다(그림 2.62).



<그림 2.62> 조사기간 중 초대저수지 동물플랑크톤 군집의 계절 분포



일반적인 생물조절의 경우 어류의 포식압이 낮아질 경우 지각류의 증가로 수질개선 효과가 나타나게 되나 초대저수지의 경우 부영양화의 지속적인 진행으로 수질개선 효과를 가져 올 지각류 군집이 소형의 *Bosmina longirostris*에 의해 우점되고, 조류 섭식 능력을 가진 지각류의 개체수가 매우 낮은 것으로 나타났다. 따라서 본 조사 결과, 효과적인 수질개선과 생태계먹이망을 통한 물질순환 구조를 개선하기 위해서는 어류조절과 함께 인위적인 천적생물의 유입이 필요한 것으로 사료되었다.

#### (다) 어류분포

초대저수지에 서식하는 어류의 종조성 및 생태특성을 파악하기 위하여, 저수지 유입부(CD-F1), 천적생물 살포지점(CD-F2), 천적생물 살포지점 반대 호안(CD-F3), 저수지 유출부(CD-F4)의 4개 지점을 선정하여, 2013.3.11.~2014.11.7까지, 총 8회(4회/년) 현장조사를 실시하였다.

초대저수지의 어류는 총 10과 17종 5,690개체가 출현하였으며, 잉어과(Cyprinidae)가 7종, 망둑어과(Gobiidae)가 2종, 미꾸리과(Cobitidae), 동자개과(Bagridae), 메기과(Siluridae), 송사리과(Adrianichthyidae), 드렁허리과(Synbranchidae), 검정우럭과(Centrarchidae), 동사리과(Odontobutidae)와 벵골붕어과(Belontiidae)가 각각 1종씩 채집되었다. 이들 어류 중 잉어과 어류가 7종 5,587개체(98.2%)로 단연 우점하는 것으로 나타났는데, 잉어과 어류의 종수 및 비율이 높게 나타나는 것은 서·남해로 흐르는 하천의 어류 종조성 특징과 일치한다(전, 1980; Lee et al., 2008).

우점종은 참붕어(*Pseudorasbora parva*, 47.7%), 아우점종은 치리(*Hemiculter eigenmanni*, 28.0%)로 나타났으며, 피라미(*Zacco platypus*, 11.8%), 붕어(*Carassius auratus*, 7.2%)가 주요 우세종으로 나타났다. 초대저수지는 우점종과 아우점종이 전체 어류 군집의 75% 이상을 차지하는 서식종 평준화 현상이 일어나는 것으로 확인되었으며, 이와 같은 서식종 평준화 현상은 정체성 호소의 일반적인 특징으로 알려져 있다(김 등, 2005).

외래도입어종은 생태계교란야생동식물(환경부 야생동식물보호법)로 지정된 배스(*Micropterus salmoides*, 0.2%)를 비롯해, 교잡종에 의한 생태계교란이 우려되는 떡붕어(*Carassius cuvieri*, 2.7%)가 출현하여 총 2.9% 비율을 차지하였다. 배스는 단 9개체만이 채집되었으나, 채집된 개체는 147~225 mm의 산란이 가능한 성어로서, 보통 1개의 둥지에 수백~1만개까지의 알을 산란하며, 수컷이 알과 치어를 보호하는 습성을 가지고 있기 때문에(김과 박,

2002) 배스 개체군 증가로 인한 저수지의 생태교란(종 단순화 등)이 우려되었다.

한국고유종은 치리(아우점종), 왜매치(*Abbottina springeri*), 얼룩동사리(*Odontobutis interrupta*)의 3종이 출현하여 전체 17종 중 17.6%의 종 비율로 한반도 평균 고유종 비율(22.5%; 남, 1996)보다 낮게 나타났다.

수생태계 건강성 조사계획 수립 및 지침(환경부, 2008)의 분류기준에 의거한 어류의 생태학적 특성 중 내성도 분석에 따르면, 수질 및 서식지의 질적 저하에도 불구하고 종수 및 분포범위가 증가하는 내성종(US EPA, 1991)이 99.8 %의 높은 개체수 비율을 차지한 반면, 수질 오염도에 따라 쉽게 사라지는 민감종은 전혀 출현하지 않았다.

에너지 흐름을 반영하는 영양단계 특성 분석에 따르면(환경부, 2008), 잡식종(Omnivores)이 98.6%로 단연 높은 개체수 비율을 보였는데, 동·식물질을 가리지 않고 섭식하는 잡식종은 유기오염물질의 증가와 서식지의 단순화에도 불구하고 이와 같은 환경에 적합한 섭식특이성을 보이기 때문이다. 수서무척추동물을 섭식하는 충식종(Insectivores)은 동자개(*Pseudobagrus fulvidraco*), 벵어(*Macropodus ocellatus*), 밀어(*Rhinogobius brunneus*)의 3종(40개체, 0.7%), 어류 및 다른 척추동물을 섭식하는 육식종(Carnivores)은 메기(*Silurus asotus*), 배스, 얼룩동사리, 드렁허리(*Monopterus albus*)의 4종(40개체, 0.7%)이 출현하였다.

지점별로는 잉어, 붕어, 떡붕어, 참붕어, 피라미, 치리가 전체지점에서 모두 출현하였다. 저수지 유입부로서 수심이 얇고 환경변화가 큰 CD-F1는 9종 1,282개체가 출현하였으며, 참붕어(55.1%), 치리(15.2%), 피라미(14.6%), 붕어(11.1%)가 10% 이상의 상대풍부도로 우세하게 나타났고 왜매치는 본 지점에서만 출현하였다. 천적생물 살포지점으로서 다양한 수생식물이 분포하는 CD-F2는 15종(1,226개체)이 출현하여 가장 다양한 종이 채집된 지점으로서, 대륙송사리(*Oryzias sinensis*), 드렁허리, 벵어는 본 지점에서만 채집되었으며, 참붕어(48.3%), 치리(21.9%), 붕어(10.4%)가 우세하게 나타났다. 천적생물 살포지점의 반대호안에 위치한 CD-F3은 12종 1,458개체가 출현하였으며, 참붕어(45.9%), 치리(38.2%)가 우세하게 나타났다. 저수지 유출부로서 수심이 깊은 제방인근 지점인 CD-F4는 1,462개체(9종)이 출현하여 가장 많은 개체가 채집된 지점으로서, 치리(38.9%), 참붕어(33.7%), 피라미(17.8%)가 우세하게 나타났다.



(표 2.22) 초대저수지의 어류 종조성 및 생태특성(2013, 투망&죽대)

종명	환경부(2008)		CDF-1				CDF-2				CDF-3				CDF-4				RA (%)
	수질 내성도	섬식 특성	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th	
			CDF-1				CDF-2				CDF-3				CDF-4				
잉어과(Cyprinidae)																			
잉어( <i>Gyrinus carpio</i> )	TS	O	5	1	1	2	2	2	2	1	1	2	1	1	2	1	2	21	1.3
붕어( <i>Carassius auratus</i> )	TS	O	1	1	4	17	6	21	6	20	1	7	6	8	9	8	6	121	7.6
♯떡붕어( <i>Carassius cuvieri</i> )	TS	O					4	8	12	10	1	4	7	53	3.3				
참붕어( <i>Pseudorasbora parva</i> )	TS	O	6	1	31	1	10	11	61	1	12	5	57	7	6	76	285	17.9	
*왜매치( <i>Abbottina springeri</i> )	TS	O				3											3	0.2	
피라미( <i>Zacco platypus</i> )	TS	O	4	2	9	1	11	2	5	37	11	1	60	2	8	153	9.6		
*치리( <i>Hemiculter eigenmanni</i> )	TS	O	8	88	10	6	15	87	31	24	175	43	134	95	63	161	940	59.1	
미꾸리과(Cobitidae)																			
미꾸라지( <i>Misgurnus mizolepis</i> )	TS	O					1											1	0.1
메기과(Siluridae)																			
메기( <i>Silurus asotus</i> )	TS	C												1				1	0.1
송사리과(Adrianchthyidae)																			
대륙송사리( <i>Oryzias sinensis</i> )	TS	O					1	1										2	0.1
검정우럭과(Centrarchidae)																			
♯베스( <i>Micropterus salmoides</i> )	TS	C																2	0.1
동사리과(Odontobutidae)																			
*얼룩동사리( <i>Odontobutis interrupta</i> )	IS	C					1											3	0.2
망둑어과(Gobiidae)																			
갈문망둑( <i>Rhinogobius giurinus</i> )	TS	O						1										1	0.1
버들붕어과(Belontiidae)																			
버들붕어( <i>Macropodus ocellatus</i> )	TS	I								2	3							5	0.3
TNS			3	5	5	6	5	9	7	7	3	7	5	9	1	6	5	6	14
TNI			14	100	18	68	25	138	60	123	7	243	56	219	1	179	80	260	1,591

♯: 외래도입종, \*: 고유종, TNS: 총 종수, TNI: 총 개체수, TS: 내성종, IS: 중간종, C: 육식종, I: 총식종, O: 잡식종, RA: 상대풍부도, 1st: 2013.3.27, 2nd: 2013.5.27 ~ 28, 3rd: 2013.9.10 ~ 11, 4th: 2013.10.31 ~ 11.1



(표 2.23) 조대계수지의 어류 종조성 및 생태특성(2014, 투망&족대)

종명	환경부(2008)		CDF-1				CDF-2				CDF-3				CDF-4				TNI	RA (%)	
	수질 내성도	섭식 특성	5th	6th	7th	8th	5th	6th	7th	8th	5th	6th	7th	8th	5th	6th	7th	8th			
잉어과(Cyprinidae)																					
잉어( <i>Gyrinus carpio</i> )	TS	O	13	2		6		1							1	1	2			26	1.2
붕어( <i>Carassius auratus</i> )	TS	O	10	27	4	73	9	23	2	38	20	8	3	8	18	8	4	2	257	12.1	
#땃붕어( <i>Carassius cuvieri</i> )	TS	O	2	2	4	7		2	3	28				7	33	3	5	3	99	4.6	
찬붕어( <i>Pseudorasbora parva</i> )	TS	O	17	21	1	51	43	63	94	30	80	55	1	18	76	90	5	19	664	31.1	
피라미( <i>Zacco platypus</i> )	TS	O	59	83	14	3	14	62	2	16	5	14		10	16	104	3	60	465	21.8	
*치리( <i>Hemiculter eigenmanni</i> )	TS	O	33	16	8	11	39	29	16	26	115	19	28	22	84	42	69	38	595	27.9	
동자개과(Bagridae)																					
동자개( <i>Pseudobagrus fulvidraco</i> )	TS	I							6					1	1				8	0.4	
송사리과(Adrianichthyidae)																					
대륙송사리( <i>Oryzias sinensis</i> )	TS	O					4												4	0.2	
드렁허리과(Synbranchidae)																					
드렁허리( <i>Monopterus albus</i> )	TS	C					2												2	0.1	
검정우럭과(Centrarchidae)																					
#베스( <i>Micropterus salmoides</i> )	TS	C												1		4	2		7	0.3	
동사리과(Odontobutidae)																					
*얼룩동사리( <i>Odontobutis interrupta</i> )	IS	C					1							1					2	0.1	
망둑어과(Gobiidae)																					
갈문망둑( <i>Rhinogobius giurinus</i> )	TS	O	1				1												3	0.1	
밀어( <i>Rhinogobius brunneus</i> )	IS	I																	1	0.1	
TNS			7	6	5	6	8	6	6	5	4	6	5	8	7	6	5	6	13		
TNI			135	151	31	151	113	180	123	138	220	98	34	68	233	249	86	123	2,133		

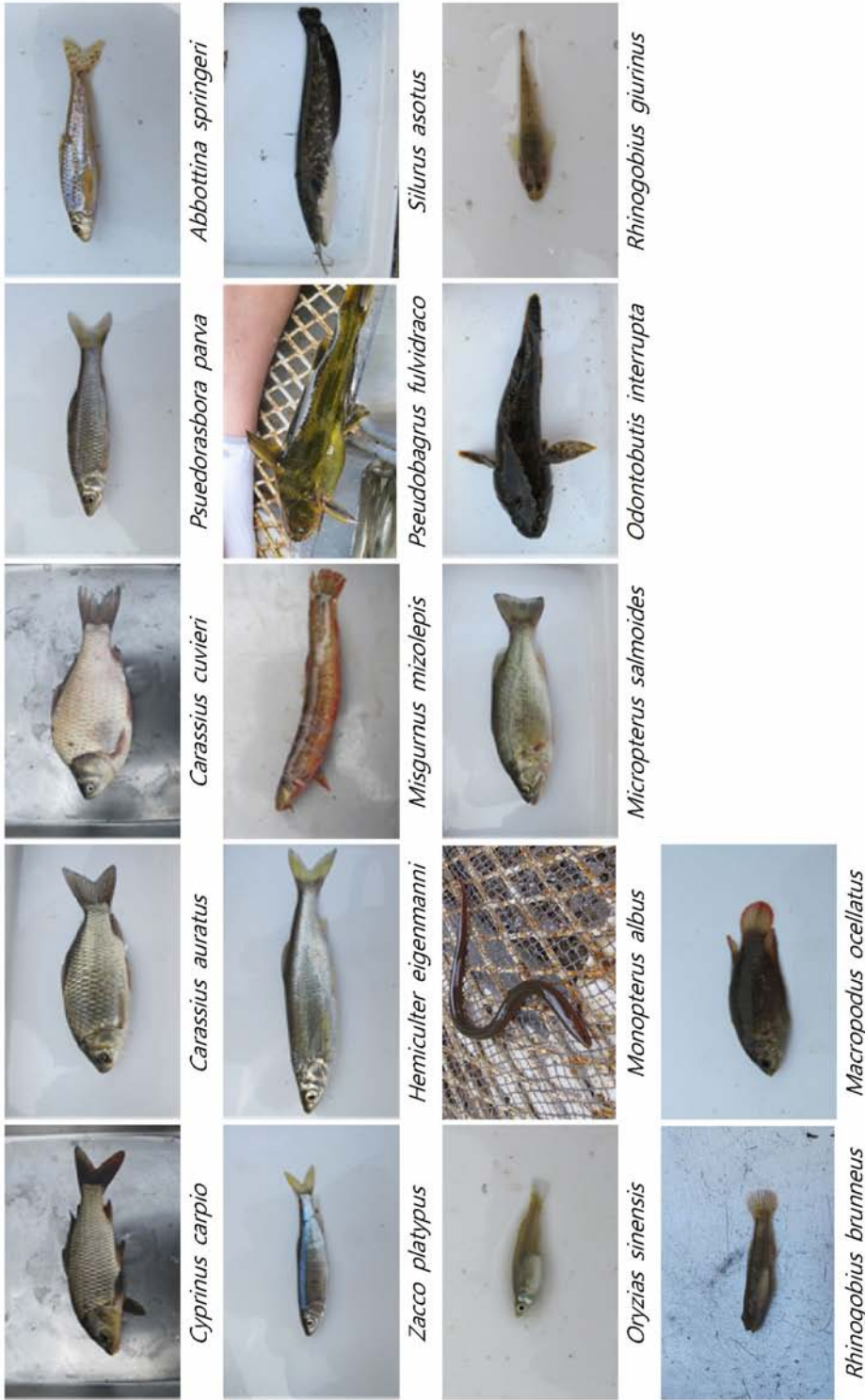
丰: 외래도입종, \*: 고유종, TNS: 총 종수, TNI: 총 개체수, TS: 내성종, IS: 중간종, C: 육식종, I: 종식종, O: 잡식종, RA: 상대풍부도, 5th: 2014.4.24 ~ 25, 6th: 2014.5.29 ~ 30, 7th: 2014.9.25 ~ 26, 8th: 2014.11.6 ~ 7



(표 2.24) 초대개수기의 어류 종조성 및 생태특성(2014, 외동발)

종명	환경부(2008)		CDF-1			CDF-2			CDF-3			CDF-4			TNI	RA (%)
	수질 내성도	섭식 특성	6th	7th	8th	6th	7th	8th	6th	7th	8th	6th	7th	8th		
잉어과(Cyprinidae)																
잉어( <i>Cyprinus carpio</i> )	TS	O							1						1	0.1
붕어( <i>Carassius auratus</i> )	TS	O	4		1	3			6	2		7	6		29	1.7
<sup>#</sup> 떡붕어( <i>Carassius cuvieri</i> )	TS	O											2		2	0.1
참붕어( <i>Pseudorasbora parva</i> )	TS	O	135	192	252	214	6	59	243	158	39	201	8	4	1,511	88.7
피라미( <i>Zacco platypus</i> )	TS	O	8		5	5			18			2	1	3	47	2.8
*치리( <i>Hemiculter eigenmanni</i> )	TS	O	9	3	3	2			15	6		16			54	3.2
미꾸라지(Cobitidae)																
미꾸라지( <i>Misgurnus mizolepis</i> )	TS	O	1		1				7						9	0.5
동자개과(Bagridae)																
동자개( <i>Pseudobagrus fulvidraco</i> )	TS	I						14	1	3	5				23	1.3
메기과(Siluridae)																
메기( <i>Silurus asotus</i> )	TS	C				5	6	1	9						21	1.2
동사리과(Odontobutidae)																
*얼룩동사리( <i>Odontobutis interrupta</i> )	IS	C					1			1					2	0.1
망둑어과(Gobiidae)																
갈문망둑( <i>Rhinogobius giurinus</i> )	TS	O						1					1		2	0.1
밀어( <i>Rhinogobius brunneus</i> )	IS	I						3							3	0.2
TNS			5	2	5	5	4	6	8	5	1	4	5	2	12	
TNI			157	195	262	229	27	70	302	172	39	226	18	7	1,704	

후: 외래도입종, \*: 고유종, TNS: 총 종수, TNI: 총 개체수, TS: 내성종, IS: 중간종, C: 육식종, I: 충식종, O: 잡식종, RA: 상대풍부도, 6th: 2014.5.29~30, 7th: 2014.9.25~26, 8th: 2014.11.6~7



〈그림 2.63〉 조대저수시 출연 어종





시기별로는 잉어(*Cyprinus carpio*), 붕어, 참붕어, 피라미, 치리의 5종이 전체시기에 모두 출현하였으며, 왜매치는 4차, 드렁허리는 5차, 밀어는 8차에만 채집되었다. 1차에는 5종 47개체가 출현하여 치리(48.9%)가 우점하였으며, 연구기간 중 가정 적은 종과 개체가 채집되었는데, 이는 시기적(3월)으로 10℃ 내외의 낮은 수온이 영향을 미쳤을 것으로 판단되었다. 2차에는 9종 660개체가 출현하여, 치리가 67.4%로 우점하였으며, 3차에는 10종 214개체가 출현하여 치리(68.7%)의 우점율은 더욱 증가하였는데, 이 시기에는 저수지 수변에 마름(*Trapa japonica*)군락이 대규모 번성하여 조사에 어려움이 발생하였다. 4차에는 11종 670개체가, 5차에는 11종 701개체가 출현하였으며, 치리는 각각 48.5%, 38.7%, 참붕어는 각각 33.6%, 30.8%로 우점하였는데, 참붕어의 풍부도가 점차 증가하는 경향을 보였다. 6차에는 11종 1,592개체, 7차는 10종 686개체, 8차에는 11종 858개체가 출현하였으며, 참붕어가 각각 64.2%, 67.8%, 55.0%로 우점하였다.

수생식물의 발달에 따른 수변조사의 어려움 극복과 상위먹이단계에 위치한 종을 채집하고자 6차부터는 조사도구를 추가(외통발)하였다. 조사도구를 추가한 6~8차 조사에서 투망과 족대에서는 총 11종 1,432개체가 출현하여 참붕어(448개체, 31.3%), 피라미(371개체, 25.9%), 치리(324개체, 22.6%)의 비율이 높게 나타났으며, 외통발에서는 12종 1,704개체가 출현하여 참붕어가 88.7%(1,511개체)로 단연 우점하였다. 투망과 족대를 이용한 조사에서는 베스(3개체, 0.2%)가, 외통발을 이용하였을 때는 미꾸라지(9개체, 0.5%)와 메기(21개체, 1.2%)가 추가로 채집되었다.

## 다. 초대저수지의 녹조발생 및 부영양화 특성

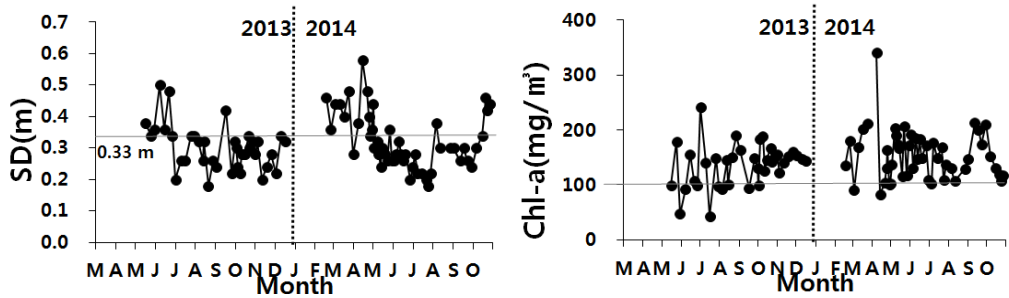
### (1) 녹조발생특성

#### (가) 투명도(SD) 및 Chl-*a* 변화

조류발생의 간접지표인 투명도(SD)는 0.18~0.58 m(평균 0.31 m)로 과영양상태를 보였으며, 2013년 0.18~0.50 m(평균 0.30 m), 2014년 0.18~0.58 m(평균 0.32 m)로 2014년에 7~8월을 제외하면 다소 개선되어 나타났다.

정체수역의 부영양화 및 녹조발생에 의한 1차생산력을 가장 잘 반영하는 간접지표인 Chl-*a*는 42.8~340.4 mg/m<sup>3</sup>(평균 146.4 mg/m<sup>3</sup>)로 농업용수 수질기준(Chl-*a* ≤ 35 mg/m<sup>3</sup>)을 모두 초과하였으며, 전체시기의 87% 이상이 100 mg/m<sup>3</sup>을 초과하여 계절변화에 상관없이 전반적으로 조류대발생 수준의 높은

농도를 보였다(그림 2.64).



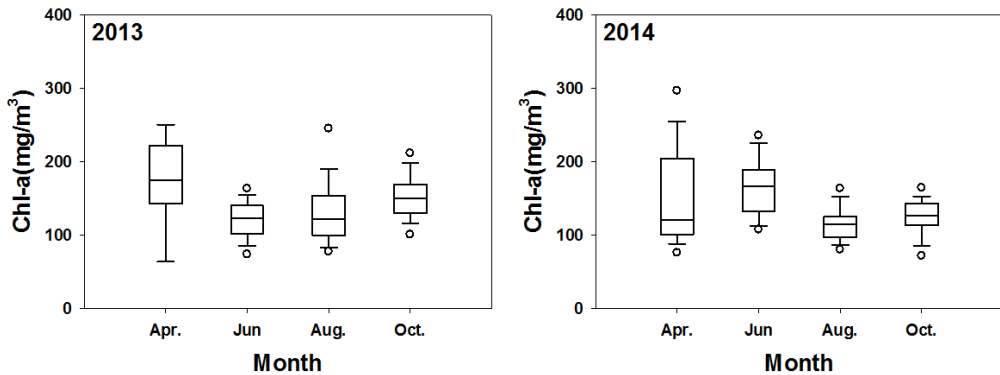
〈그림 2.64〉 초대저수지 투명도(SD) 및 Chl-a 변화

(나) 초대저수지 Chl-a의 2013년과 2014년 시기별 변화

2013년 천적생물 살포 전 4월(n=11)에는 평균 175.4 mg/m<sup>3</sup>에서 봄철 살포기간인 6월(n=56)에 평균 121.0 mg/m<sup>3</sup>로 살포전에 비해 31% 감소하였으나, 하절기(비살포기간)인 8월(n=70)에는 평균 133.2 mg/m<sup>3</sup>, 가을철 살포기간인 10월(n=126)에는 152.6 mg/m<sup>3</sup>으로 나타났다.

2014년 천적생물 살포 전 4월(n=98)에는 평균 152.5 mg/m<sup>3</sup>에서 봄철 살포기간인 6월(n=112)에 평균 165.2 mg/m<sup>3</sup>로 다소 증가하였으나, 하절기(비살포기간)인 8월(n=28)에는 평균 115.7 mg/m<sup>3</sup>, 가을철 살포기간에는 10월(n=56)에 123.8 mg/m<sup>3</sup>으로 살포 전에 비해 19% 감소되었다.

천적생물 살포 2년차인 2014년 Chl-a의 변화경향은 2013년과 달리 점차 감소하는 것으로 나타나 향후 지속적인 천적생물 살포가 이루어진다면 녹조 제어효과가 더욱 증가할 것으로 기대된다.

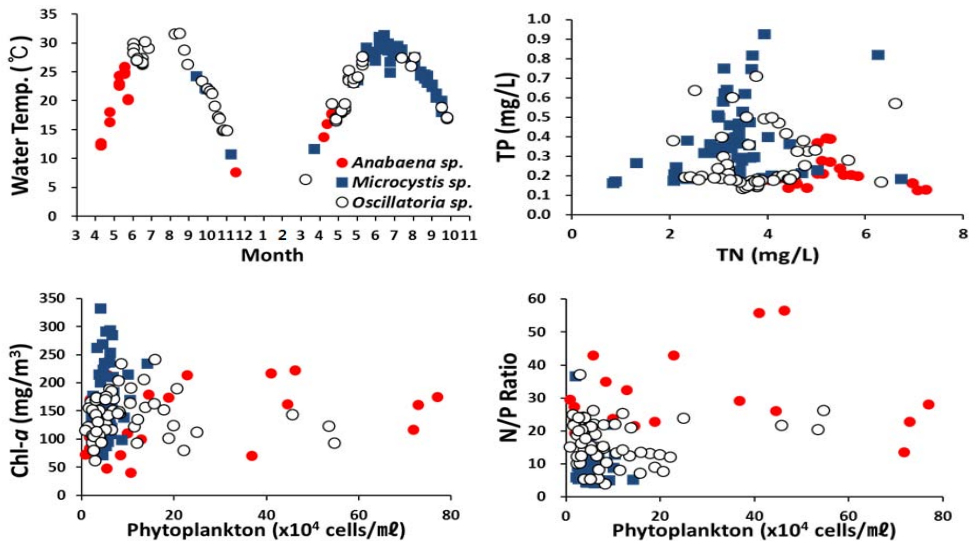


〈그림 2.65〉 초대저수지 Chl-a의 시기별 변화(2013년 vs. 2014년)

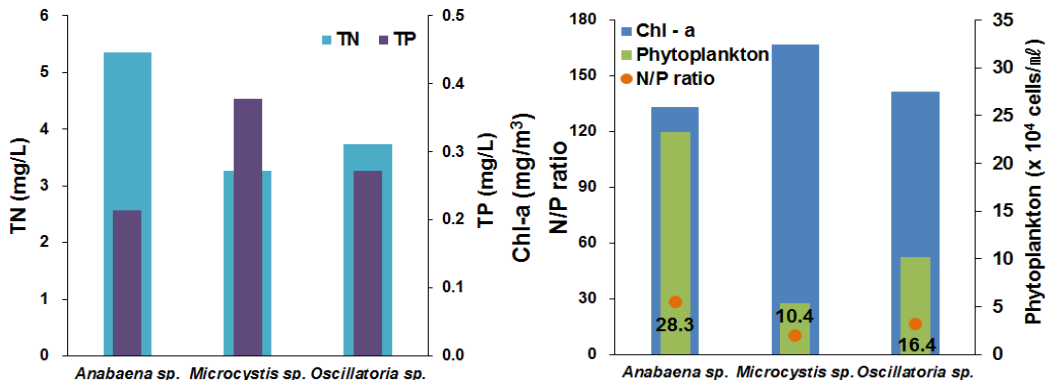


(다) 녹조원인종(우점종)의 녹조발생 환경특성

식물플랑크톤 우점종에 따른 수환경 특성을 분석한 결과, *Anabaena* sp.는 수온이 낮은 봄철에 주로 출현하였으며, TN이 4 mg/L 이상으로 다소 높고, TP가 0.5 mg/L 이하로 다소 낮을 때 출현하는 경향을 보였다. *Oscillatoria* sp.는 식물플랑크톤 현존량이  $4.0 \times 10^5$  cells/ml 이하이고 N/P ratio가 30 이하일 때, 또한 TN 농도가 약 2~6 mg/L의 범위일 때 주로 출현하는 특성을 보였다. *Microcystis* sp.는 식물플랑크톤 현존량이  $2.0 \times 10^5$  cells/ml 이하로 비교적 낮고, N/P ratio가 10~30 범위일 때 주로 출현하는 특성을 보였으며, 2014년에는 출현빈도가 다소 증가하였다.



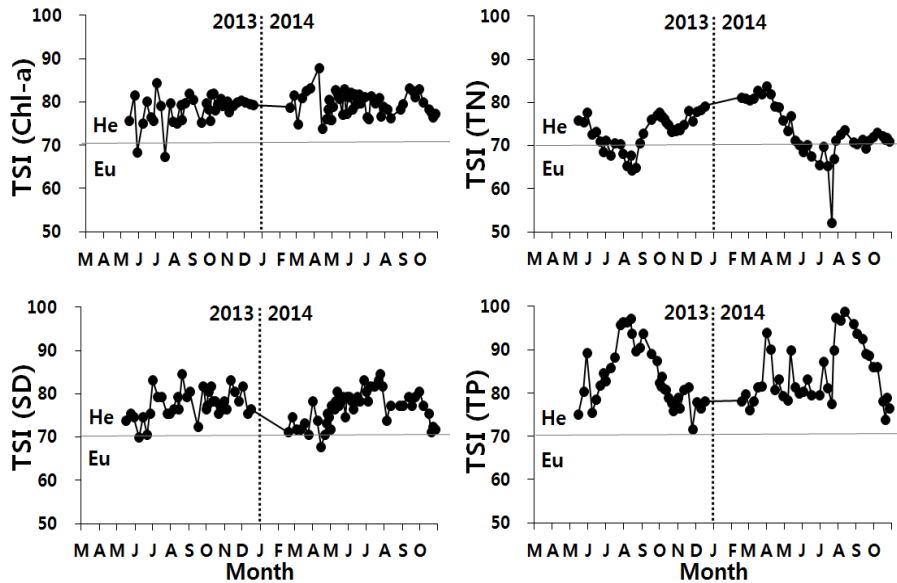
<그림 2.66> 식물플랑크톤 우점종에 따른 수온, N, P, Chl -a, 현존량 변화 특성



<그림 2.67> 식물플랑크톤 우점종에 따른 영양염류 특성

## (2) 부영양화 특성

초대저수지의 부영양화 특성 분석을 위해 TSI 분석을 TN, TP, Chl-*a*, SD 4개 항목에 수행한 결과, TSI(TN)은 52.1~83.9(평균 73.3)로 나타났으며, TSI(TP)는 71.5~98.8(평균 83.6), TSI(Chl-*a*)는 67.5~87.8(평균 79.0), TSI(SD)는 84.7~67.8(평균 77.0)로 나타났다. 이러한 결과는 모든 항목에서 기준을 초과하는 과영양상태(Hyper-eutrophy, He; TSI > 70)로 나타났으며, 특히 TP에 의한 부영양화가 가장 심각한 것으로 나타났다.



<그림 2.68> 초대저수지 부영양화지수(TSI) 분석(50<Eu<70<He)

## 2. 녹조제어 효과

### 가. 천적생물 배양장치의 녹조제어 효과

#### (1) Chl-*a*의 변화 및 제어효과

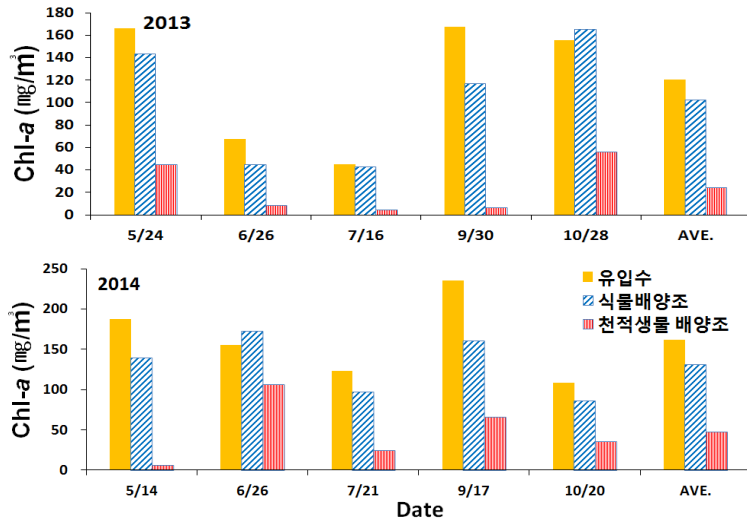
연구기간 중 유입수의 Chl-*a*는 45.0~235.1 mg/m<sup>3</sup>(평균 144.7 mg/m<sup>3</sup>)로 나타났으며, 식물플랑크톤 배양조에서는 42.9~172.0 mg/m<sup>3</sup>(평균 127.7 mg/m<sup>3</sup>), 천적생물 배양조에서는 4.4~105.8 mg/m<sup>3</sup>(평균 40.7 mg/m<sup>3</sup>)로 나타났다.

시기별로 2013년에는 유입수의 Chl-*a* 45.0~167.2 mg/m<sup>3</sup>(평균 120.2 mg/m<sup>3</sup>)로 나타났으며, 식물플랑크톤 배양조에서는 42.9~165.0 mg/m<sup>3</sup>(평균 102.5

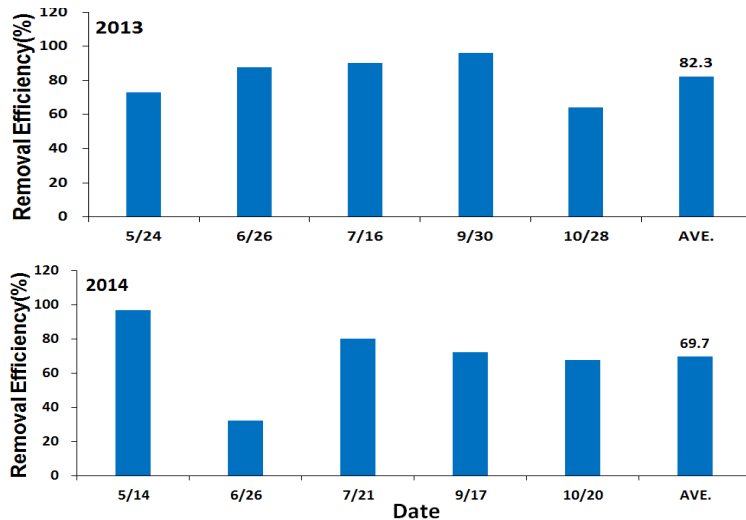


mg/m<sup>3</sup>), 천적생물 배양조에서는 4.4~55.8 mg/m<sup>3</sup>(평균 23.9 mg/m<sup>3</sup>)로 나타났다.

2014년에는 유입수의 Chl-*a*는 108.1~235.1 mg/m<sup>3</sup>(평균 169.3 mg/m<sup>3</sup>), 식물플랑크톤 배양조의 Chl-*a*는 86.0~172.0 mg/m<sup>3</sup>(평균 135.2 mg/m<sup>3</sup>), 천적생물 배양조에서의 Chl-*a*는 6.3~105.8 mg/m<sup>3</sup>(평균 57.5 mg/m<sup>3</sup>)로 나타났다. 2014년에 유입수 농도가 증가하면서 천적생물 배양조에서의 농도 또한 다소 증가하였으나 여전히 천적생물 배양조에서 Chl-*a*는 유입수와 식물플랑크톤 배양조보다 현저히 낮게 나타났다(그림 2.69).



<그림 2.69> Chl-*a*의 농도 변화



<그림 2.70> Chl-*a*의 제거효과

유입수 대비 천적생물 배양조에서의 Chl-*a* 제거율 결과, 2013년은 평균 82.3%, 2014년은 평균 54.1%로 2014년 5월 14일에 96.6%로 가장 높은 값을 보였다(그림 2.70).

## (2) 식물플랑크톤 현존량 변화 및 제어효과

배양장치에서 식물플랑크톤 현존량의 변화에 대해 분석한 결과, 유입수에서  $4.2 \sim 59.0 \times 10^4$  cells/ml(평균  $22.5 \times 10^4$  cells/ml)로 나타났으며, 10톤 식물배양조에서  $1.8 \sim 22.0 \times 10^4$  cells/ml(평균  $7.7 \times 10^4$  cells/ml), 천적생물 배양조에서  $1.4 \sim 2.2 \times 10^4$  cells/ml(평균  $1.6 \times 10^4$  cells/ml)로 변화하였다. 20톤 식물배양조에서  $2.2 \sim 36.0 \times 10^4$  cells/ml(평균  $12.3 \times 10^4$  cells/ml), 천적생물 배양조에서  $2.8 \sim 20.0 \times 10^3$  cells/ml(평균  $10.9 \times 10^3$  cells/ml)로 나타났다.

시기별로 2013년 6월 유입수에서  $3.7 \times 10^5$  cells/ml로 나타난 현존량이 10톤 식물배양조에서  $2.2 \times 10^5$  cells/ml, 천적생물 배양조에서  $2.2 \times 10^4$  cells/ml로 변화하였으며, 20톤 식물배양조에서  $3.6 \times 10^5$  cells/ml, 천적생물 배양조에서  $1.2 \times 10^4$  cells/ml로 변화하였다. 유입수 대비 천적생물 배양조에서 크게 감소하였으며, 특히 녹조를 유발시키는 남조류인 *Oscillatoria* sp.가 선택적으로 크게 감소하는 것을 볼 수 있었다.

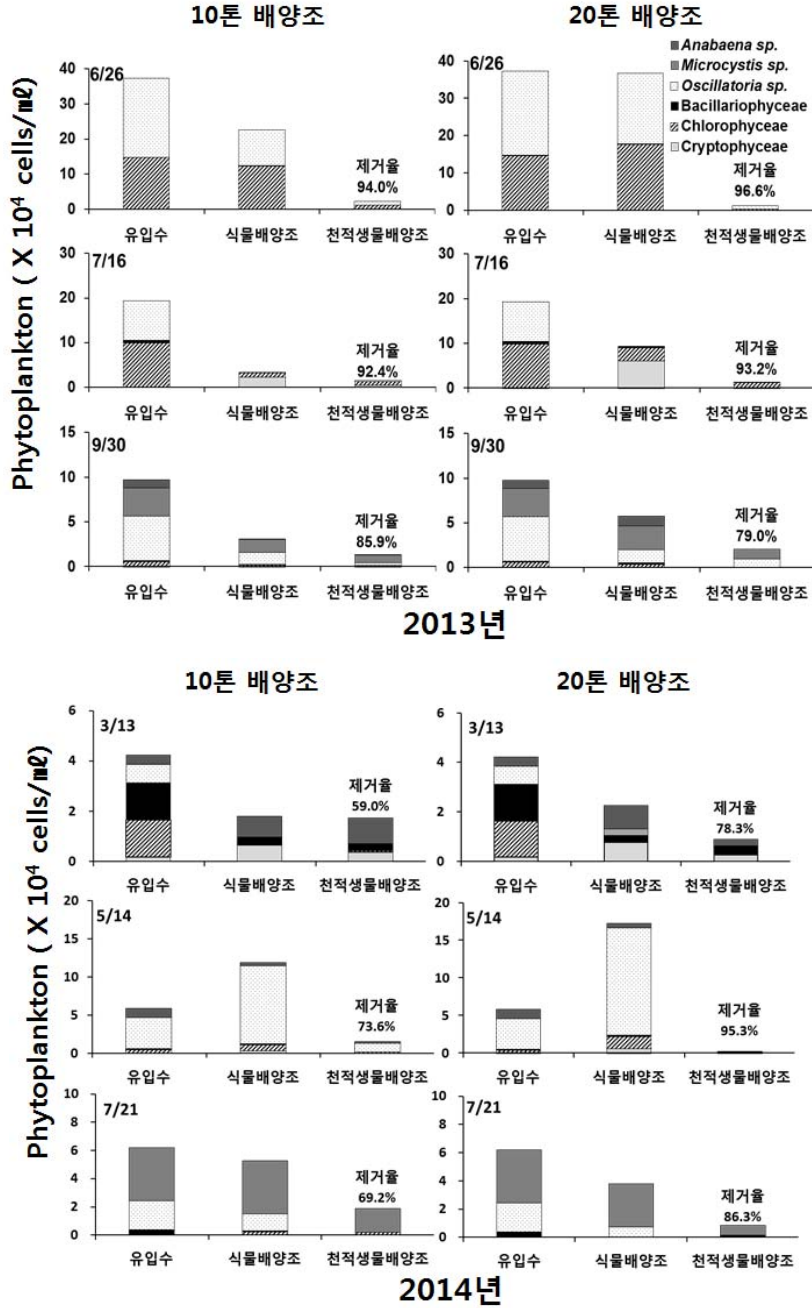
7월 유입수에서  $1.9 \times 10^5$  cells/ml로 나타난 현존량이 10톤 식물배양조에서  $3.3 \times 10^4$  cells/ml, 천적생물 배양조에서  $1.4 \times 10^4$  cells/ml로 변화하였으며, 20톤 식물배양조에서  $9.4 \times 10^4$  cells/ml, 천적생물 배양조에서  $1.3 \times 10^4$  cells/ml로 변화하였다. 유입수 대비 천적생물 배양조에서 크게 감소하였으며, 특히 녹조를 유발시키는 남조류인 *Oscillatoria* sp. 가 선택적으로 크게 감소하는 것을 볼 수 있었다.

9월 유입수에서  $9.7 \times 10^4$  cells/ml로 나타난 현존량이 10톤 식물배양조에서  $3.0 \times 10^4$  cells/ml, 천적생물 배양조에서  $1.4 \times 10^4$  cells/ml로 변화하였으며, 20톤 식물배양조에서  $5.7 \times 10^4$  cells/ml, 천적생물 배양조에서  $2.0 \times 10^4$  cells/ml로 변화하였다. 유입수 대비 천적생물 배양조에서 크게 감소하였으며, 특히 녹조를 유발시키는 남조류인 *Anabaena* sp., *Microcystis* sp., *Oscillatoria* sp.가 선택적으로 크게 감소하는 것을 볼 수 있었다.

2014년 3월 유입수에서  $4.2 \times 10^4$  cells/ml로 나타난 현존량이 10톤 식물배양조에서  $1.8 \times 10^4$  cells/ml, 천적생물 배양조에서  $1.7 \times 10^4$  cells/ml로 변화하였으며, 20톤 식물배양조에서  $2.2 \times 10^4$  cells/ml, 천적생물 배양조에서  $9.1 \times 10^3$  cells/ml로 변화하였다. 유입수 대비 천적생물 배양조에서 크게 감



소하였으며, 특히 녹조를 유발시키는 남조류인 *Anabaena* sp., *Microcystis* sp., *Oscillatoria* sp. 가 선택적으로 크게 감소하는 것을 볼 수 있었다.



<그림 2.71> 배양장기 내 식물플랑크톤 제거효과

5월 유입수에서  $5.9 \times 10^5$  cells/ml로 나타난 현존량이 10톤 식물배양조에서  $1.1 \times 10^5$  cells/ml, 천적생물 배양조에서  $1.5 \times 10^4$  cells/ml로 변화하였으며, 20톤 식물배양조에서  $1.7 \times 10^5$  cells/ml, 천적생물 배양조에서  $2.8 \times 10^3$  cells/ml로 변화하였다. 유입수 대비 천적생물 배양조에서 크게 감소하였으며, 특히 녹조를 유발시키는 남조류인 *Oscillatoria* sp. 가 선택적으로 크게 감소하는 것을 볼 수 있었다.

7월 유입수에서  $6.1 \times 10^4$  cells/ml로 나타난 현존량이 10톤 식물배양조에서  $5.2 \times 10^4$  cells/ml, 천적생물 배양조에서  $1.9 \times 10^4$  cells/ml로 변화하였으며, 20톤 식물배양조에서  $3.8 \times 10^4$  cells/ml, 천적생물 배양조에서  $8.5 \times 10^3$  cells/ml로 변화하였다. 유입수 대비 천적생물 배양조에서 크게 감소하였으며, 특히 녹조를 유발시키는 남조류인 *Microcystis* sp., *Oscillatoria* sp.가 선택적으로 크게 감소하는 것을 볼 수 있었다.

배양조별 평균 효율은 20톤 배양조에서 88.1%, 10톤 배양조에서 79.0%로 나타났으며, 식물플랑크톤의 제거율은 59.6~95.3%의 범위로 나타났다. 2013년과 2014년 모두 10톤 배양조보다 20톤 배양조에서 다소 높은 제거율을 보여 다소 규모가 큰 20톤 배양조가 안정적임을 알 수 있었다.

#### 나. 초대저수지의 녹조제어 효과

천적생물 배양장치에서 대량 배양한 천적생물은 초대저수지 중앙부(CD-1)에 살포하였으며, 2013.9.30.~10.8까지 9일간, 2014.9.29.~10.23까지 25일간의 천적생물 살포에 따른 Chl-*a*, 식물플랑크톤 현존량, 동물플랑크톤 개체수 변화와 녹조제어효과를 분석하였다.

##### (1) 천적생물 살포에 따른 Chl-*a* 변화

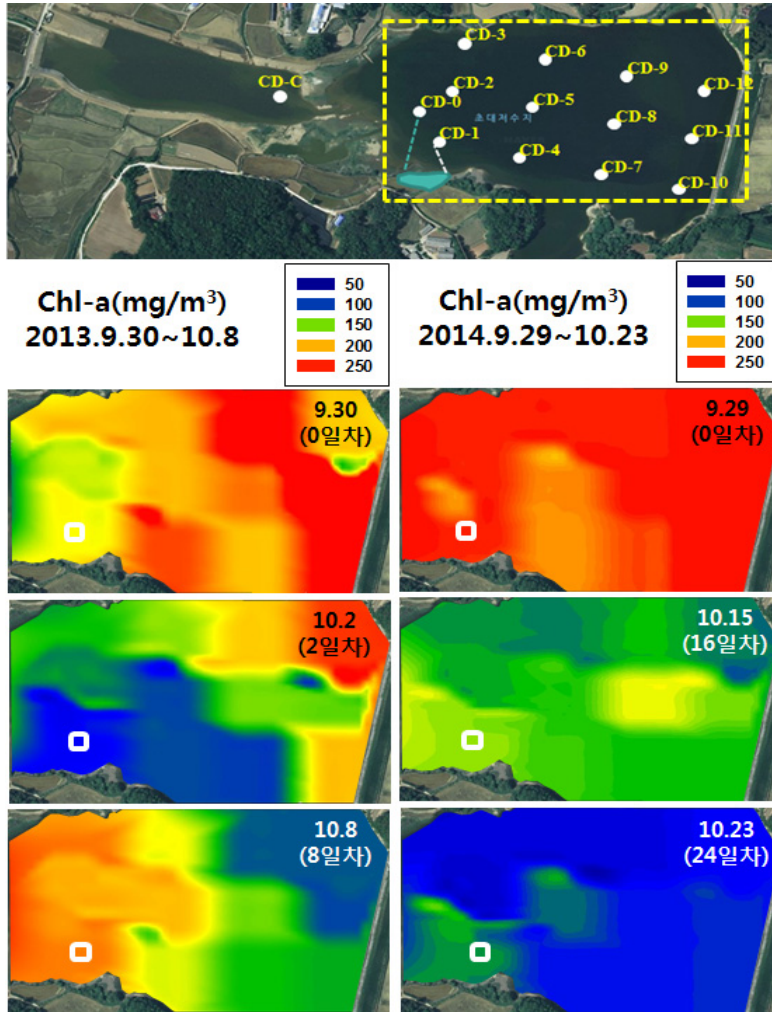
2013년(2013.9.30 살포, 9일간) 현장살포에 따라, Chl-*a* 농도는 살포 전(0일차) 평균 209.4 mg/m<sup>3</sup>에서 2일차에 평균 132.8 mg/m<sup>3</sup>으로 감소하여 평균 36.6%가 제거된 것으로 나타났다. 지점별로 천적생물의 영향이 없는 대조구인 CD-C에서는 살포 전 109.6 mg/m<sup>3</sup>에서 8일차에 233.1 mg/m<sup>3</sup>으로 213%로 증가하였으나, 천적생물 살포지점(CD-1)은 살포 전 167.2 mg/m<sup>3</sup>에서 2일차에 81.8 mg/m<sup>3</sup>으로 51.1%가 제거되었으며, 제방인근(CD-11)은 살포 전 395.4 mg/m<sup>3</sup>에서 8일차에 98.5 mg/m<sup>3</sup>으로 75.1%의 제거효율을 보여주었다.

2014년(2014.9.29 살포, 25일간) 현장살포에 따라, Chl-*a* 농도는 살포 전(0일차) 평균 259.7 mg/m<sup>3</sup>에서 24일차에 평균 90.1 mg/m<sup>3</sup>으로 감소하여 평균





65.3%가 제거된 것으로 나타났다. 지점별로 천적생물 살포지점 인근(CD-2)은 살포 전 246.8 mg/m<sup>3</sup>에서 24일차에 68.3 mg/m<sup>3</sup>으로 72.3%가 제거되었으며, 제방인근(CD-10)은 살포 전 388.4 mg/m<sup>3</sup>에서 24일차에 91.5 mg/m<sup>3</sup>으로 76.4%가 제거되어, 저수지 전반에 걸쳐 41.0~76.4%의 녹조제어효과를 보여주었다.



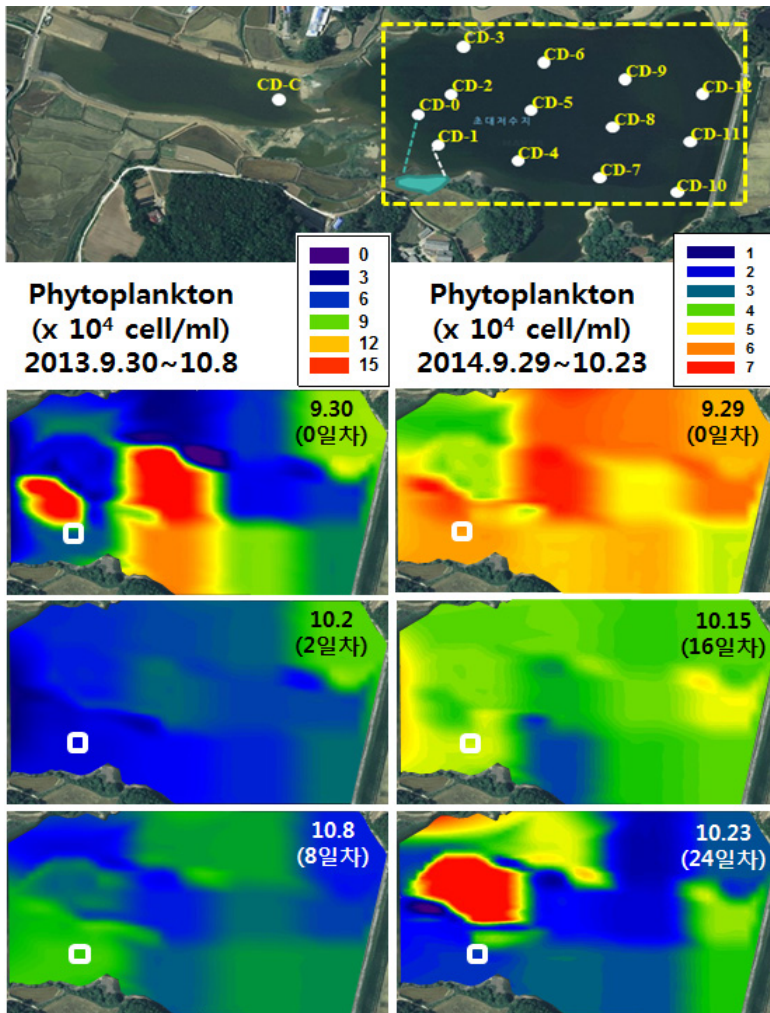
〈그림 2.72〉 천적생물 살포에 따른 Chl-a 변화

## (2) 천적생물 살포에 따른 식물플랑크톤 현존량 변화

2013년(2013.9.30 살포, 9일간) 현장살포에 따라, 식물플랑크톤 현존량은 살포 전(0일차) 평균  $7.7 \times 10^4$  cell/ml에서 2일차에  $5.5 \times 10^4$  cell/ml로 감소하여 평균 29.3%가 제거된 것으로 나타났다. 지점별로 천적생물의 영향이 없는 대조구인 CD-C에서는 살포 전  $1.9 \times 10^4$  cell/ml에서 8일차에  $7.3 \times 10^4$

cell/ml으로 375%로 증가하였으나, 천적생물 살포지점 인근(CD-0)에서는 살포 전  $17.5 \times 10^4$  cell/ml에서 2일차에  $3.9 \times 10^4$  cell/ml로 77.9%가 제거되었으며, 호내 중앙부(CD-5)는 살포  $15.8 \times 10^4$  cell/ml에서 8일차에  $5.3 \times 10^4$  cell/ml로 66.2%의 제거효율을 보였다.

2014년(2014.9.29 살포, 25일간) 현장살포에 따라, 식물플랑크톤 현존량은 살포 전(0일차) 평균  $5.5 \times 10^4$  cell/ml에서 24일차에 평균  $3.3 \times 10^4$  cell/ml으로 감소하여 평균 39.6%가 제거된 것으로 나타났다. 지점별로 살포지점과 인근(CD-0)에서 54.0~65.3%, 호내 중앙부(CD-5)에서 65.7%, 살포지점 반대 호안(CD-9)에서 최대 73.8%가 제거되어 녹조제어 효과를 보여주었다.

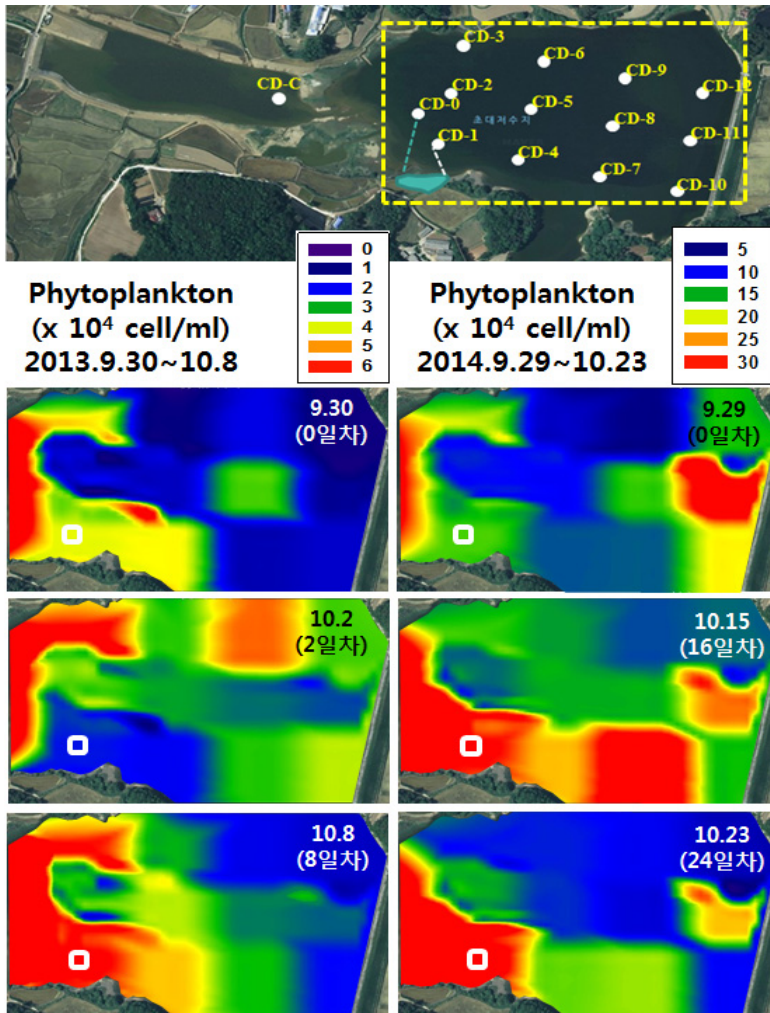


<그림 2.73> 천적생물 살포에 따른 식물플랑크톤 변화



### (3) 천적생물 살포에 따른 동물플랑크톤 개체수 변화

2013년(2013.9.30 살포, 9일간) 현장살포에 따라, 동물플랑크톤 개체수는 살포 전(0일차) 평균  $2.9 \times 10^2$  inds./L에서 8일차에  $7.8 \times 10^2$  inds./L로 평균 265%가 증가한 것으로 나타났다. 2일차에는 살포지점의 반대 호안방향으로 증가하여 CD-2에서 211%, CD-6에서 331%, CD-12에서 411%까지 증가하였으며, 8일차에는 살포 하류구간으로의 확대보다는 살포지점 인근에서 확대되는 경향을 보였다.



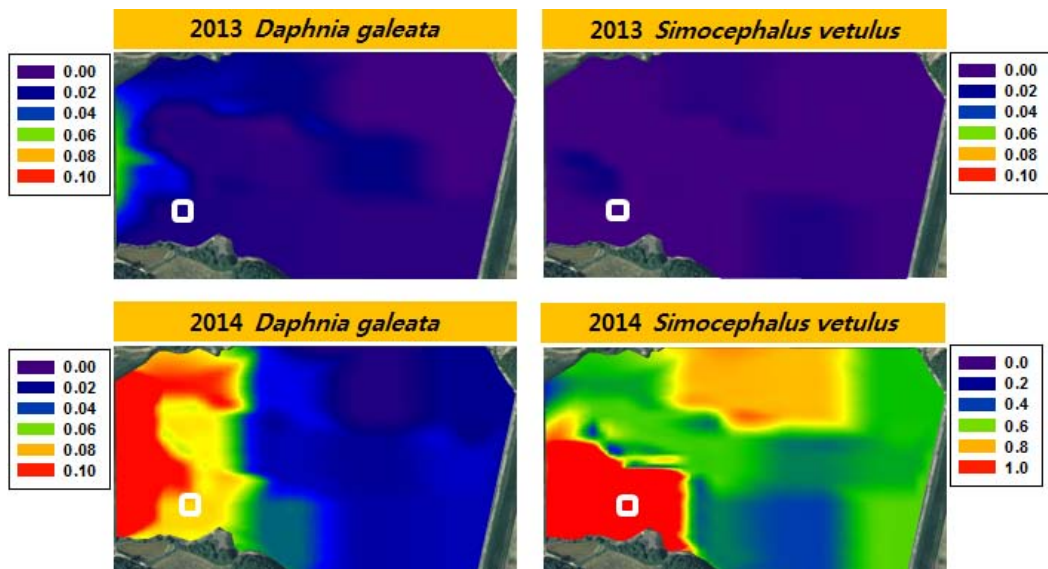
<그림 2.74> 천적생물 살포에 따른 동물플랑크톤 변화

2014년(2014.9.29 살포, 25일간) 현장살포에 따라, 동물플랑크톤 개체수는 살포 전(0일차) 평균  $16.5 \times 10^2$  inds./L에서 16일차에  $22.6 \times 10^2$  inds./L로 평균 137%가 증가한 것으로 나타났다. 특히 살포지점 인근에서 186~223%의 증가를 보였고, 수변부를 따라 200% 내외로 증가하는 경향을 보여주었다.

#### (4) 장기살포에 따른 천적생물 정착효과

살포 천적생물인 *D. galeata*와 *S. ventulus*의 공간분포(연구기간 중 채집된 누적 개체수)를 보면, 살포지점 인근을 중심으로 개체군 밀도가 증가한 것을 확인하였다.

*D. galeata*는 2013년에 지점별 0~0.057 inds./L(총 0.181 inds./L)가 채집되었으나, 2014년에는 지점별 0.008~0.538 inds./L(총 1.095 inds./L)로 증가하였으며, 특히 살포지점 인근을 중심으로 0.068~0.538 inds./까지 출현한 것으로 나타났다. *S. ventulus*는 2013년에 0~0.012 inds./L(총 0.029 inds./L)가 채집되어 *D. galeata*보다 적은 개체군 밀도를 보였으나, 2014년에는 0.387~2.831 inds./L(총 11.522 inds./L)로 저수지 전반에 걸쳐 큰 폭으로 증가하였으며, 모든 조사 지점에서 분포하는 것으로 확인되었다. 이는 2013년에 비해 2014년의 경우 살포가 빠른 시기에 이루어졌고 천적생물 살포량이 크게 증가하였기 때문인 것으로 사료되었다.



<그림 2.75> 살포 천적생물의 누적 개체군 밀도 공간분포(2013년 vs. 2014년)





### 3. 천적생물 배양장치 연중 활용방안

#### 가. 천적생물을 이용한 녹조제어 전략

##### (1) 농업용저수지의 녹조발생 유형과 적용방안

농업용저수지의 녹조발생 원인에 따른 유형을 분류하면 오염형, 저수심형, 생태계 손상형 등 크게 3가지로 나눌 수 있다. 오염형은 고농도의 축산폐수가 유입되는 저수지(전대저수지, 초대저수지 등)와 유역 직상류 또는 호내에 하수처리장 방류수가 유입되는 저수지(기흥저수지, 서호저수지 등)가 해당되며, 이런 경우 유입되는 오염물질을 저감하는 기술의 도입이 반드시 이루어져야 한다. 하수처리장 방류수가 유입될 경우 방류수의 총인농도가 농업용수 수질기준(TP  $\leq 0.1$  mg/L) 보다 높은 경우 더욱 처리강도를 높여야 한다. 하수처리수가 유입되는 경우 동절기에도 고온의 오염수가 지속적으로 유입되어 녹조발생이 가중되며, 이는 그다음해의 녹조를 더욱 심화시키는 원동력이 되기도 하므로 더욱 강력한 수질관리가 요구된다. 저수심형의 경우 전층이 생산층으로 녹조발생에 유리한 조류배양장의 역할을 함으로써 녹조발생에 취약한 형태를 보인다. 실제 농업용저수지 중 수심이 4 m 이하의 저수지에서 녹조 발생이 빈번한 것을 확인할 수 있으며, 이는 분해층 발달이 미약하여 물질분해 기능이 낮은 원인도 있다. 저수심형의 저수지중 천적생물의 서식공간으로 적합한 평균수심 2.5 m 이상의 저수지에서는 천적생물을 이용한 녹조제어 기능을 도입할 수 있다.

또한, 녹조 포식성 동물플랑크톤 분포율이 낮고, 육식어류가 없어 소형어류만 분포하는 등 생태계 먹이구조가 손상된 저수지의 경우를 생태계 손상형으로 분류하였으며, 천적생물을 이용한 녹조제어 전략을 효과적으로 적용할 수 있다(그림 2.77). 이와 같은 저수지에 천적생물을 적용할 경우 대형지각류를 대상으로 20%이상의 분포비율을 확보할 수 있도록 해야 하며, 분포밀도는 3개체/L를 목표로 한다. 동시에 천적생물을 포식하는 소형어류의 개체군을 감소시키기 위해 육식어류를 병행하여 먹이망이 균형을 맞추도록 조절한다면 더욱 효과적으로 녹조를 제어할 수 있다.

천적생물을 이용한 녹조제어 기술은 천적생물의 인위적 도입으로 인해 생태계의 기능을 변환시키는 방안으로 천적생물은 방아쇠 효과(Trigger effect)를 역이용하는 것이다. 따라서 3년 정도의 다소 긴 시간이 요구되는 장기 대책으로 이해해야 하며, 선행연구 결과에서 1차년도에는 효과가 거의

없다가 2~3차년에 가시적 효과가 나타나는 것을 염두에 두면, 단기간의 적용으로 성공과 실패를 논해서는 안 될 것으로 사료된다.



<그림 2.76> 농업용저수지의 녹조발생 유형과 제어방안



<그림 2.77> 천적생물 적용조건

(2) 천적생물을 이용한 녹조제어 전략

천적생물을 이용한 녹조제어 기술과 경쟁가능한 국내외 유사 기술로는 응집부상 또는 가압부상과 같이 화학적 응집제를 이용한 응집제거기술과 황토살포, 미생물처리, 물리적 순환장치, 초음파, 오존 같은 전기적 처리 기술 등이 있다.

녹조발생수역에서 조류를 응집 부상시켜 제거하는 응집부상처리 및 천연물질 처리는 호수외로 많은 양의 조류를 제거하여 폐기하는 방법으로 처리량에 따라 녹조제거에 효과적이라 할 수 있으나, 수거되지 못한 일부의 양이 호내 퇴적물에 침강하여 재 부유 할 수 있는 문제점이 있으며, 특히, 화학적 응집제를 처리하는 경우 생태계에 독성을 남길 수 있다.

미생물 제제의 경우 7~8월 같이 수온이 높아 미생물의 활성을 최적화



할 수 있는 조건에서는 효과를 보이지만, 녹조가 주로 발생하는 3~5월, 9~10월 수온이 높지 않은 시기에는 효과가 크지 않은 것으로 나타나 녹조발생 시기와 잘 맞지 않아 비효율적이다.

초음파, 오존, 살조세균 등의 기술은 녹조를 호내에서 사멸시키는 방법으로 사멸된 녹조로부터 영양염류가 재용출되어 재발생을 유도하므로 일시적 효과는 있으나 장기적으로는 문제가 되는 기술로 판단된다. 물순환 장치는 성층이 형성되는 6 m 이하의 저수지에서는 효과가 있을 수 있으나 녹조발생 저수지 대부분이 평균 수심 4 m 이하에 분포하고 있어 퇴적물 교란에 따른 녹조발생 촉진으로 녹조 발생 저수지에의 적용은 문제가 있다.

따라서, 녹조발생의 특성과 대상수역의 조건, 생태적 건강성 등을 모두 감안한 효과적인 녹조제거 공법의 적용이 필요하다.

천적생물로써 녹조 포식성 동물플랑크톤을 이용한 녹조제어 시도는 국내에서 간헐적으로 이루어져 왔으나 실내 배양기를 통해 대량배양한 후 현장으로 운반하여 살포한 경우에 국한하였으며, 운반에 따른 경비 발생과 운반과정동안 생물체의 스트레스, 살포시 가혹한 현장 환경에의 적응실패 등의 이유로 농업용저수지와 같은 대규모 호수에서 성공한 사례는 없다.

(표 2.25) 본 기술의 우수성

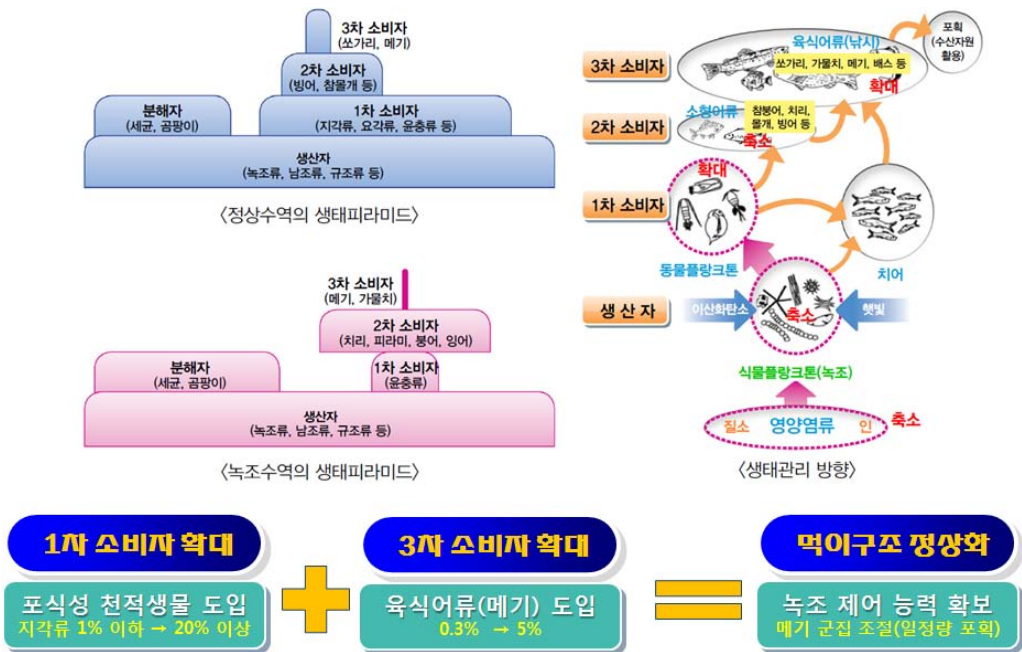
구 분	주요 내용
현장적용성 우수	○실내배양, 현장운반의 기술보다 현장 대량배양 기술이 천적생물의 포식 효율, 살포개체수에 대비 비용이 저렴하여 현장적용성이 우수한 것으로 판단됨
비용경제적 기술	○소요비용은 배양장치 설치비와 운영비로 연간 운영비는 양수와 산소 공급에 필요한 전기료와 현장관리인 인건비 정도로운반비 NO, 화학약품비 NO 등 경제적 기술임
천적생물 대량공급 가능	○배양장치의 살포 주기는 주 1회이며, 매주 살포 가능함. 1회 70톤 살포 하며, 30톤은 추가 배양을 위한 seed로 활용하여 1주일 후 반복 살포, 대량공급 가능
쉬운 유지관리	○운영과 관리에 별도의 기술과 노하우가 필요치 않음 ※현재 시설 운영, 관리하는 현장관리인은 60세 이상의 농업종사자임
생태계 건강성 회복 기술	○장기적으로 생태계 먹이구조의 안정화를 유도하여 건강성을 회복함으로써 녹조발생을 자체 제어할 수 있는 예방기술임

이 분야에서 선진국가라 할 수 있는 일본의 경우 동물플랑크톤과 물고기 조절을 통한 녹조제어 연구를 시도한바 있으나, 상업화에는 실패하였다.

현재, 중국 등 녹조문제가 심각한 일부 국가에서 현장 대량배양을 시도하고 있는 실정이다.

본 기술이 타 녹조제거 기술과 차별화 되는 가장 큰 요인은 생태계 건강성 회복에 있다. 물론 인위적으로 천적생물을 공급하여 녹조를 제거하고 있지만, 이런 과정을 통해 장기적으로 생태계 먹이구조의 안정화를 유도하여 건강성을 회복함으로써 녹조발생을 자체 제어할 수 있도록 해준다는 점이 가장 우수하고, 차별화된 전략이다(표 2.25).

또한, 천적생물을 포식하는 소형어류를 저감하기 위해 육식어류를 병행하여 적용한다면, 먹이구조의 정상화를 유도하기에 충분하며, 도입된 육식어류는 수산자원으로 포획하여 경제적으로 활용할 수도 있다.



<그림 2.78> 녹조제어 전략

이와 같이 영양염류에서 시작된 오염물질이 먹이망을 따라 생산자와 소비자를 따라 이동하여 인간에 이르게 되면 물질의 선순환 고리가 완성되어 환경용량이 확대되는 생태적 자정작용이 원활히 이루어지게 된다(그림 2.79).

이 기술은 지금까지 녹조방제를 위해 적용되어 왔던 다양한 물리화학적





기술들의 유해성, 단편적 효과 등 적용한계를 극복하고, 생태적으로 안전하며, 건강한 기술로써 기존 기술을 대체 할 수 있을 뿐만 아니라 미생물 제제 등과 같은 수입품을 대체하여 수입대체 효과를 가질 수 있다.

녹조방제대책에 급급한 기존의 녹조기술에 대응하여 사전예방 기능과 생태구조 개선을 통한 지속가능한 기술로 녹조발생이 우려되는 농업용저수지와 담수호는 물론 4대강 보구간 등에서 적극 활용이 가능하다.

녹조의 사전 예방을 통해 녹조발생시 생성되는 독성물질과 방제에 사용되는 유해 화학물질 등을 원천 차단하여 안전하고 건강한 청정용수 확보는 물론 생태건강성 회복과 안전한 국민 먹거리 생산에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

## 나. 천적생물 배양장치 연중 활용 방안

### (1) 천적생물 배양장치의 운영방안

천적생물 적용기술의 효과적 운영방안은 다음과 같이 크게 2가지이다.



<그림 2.79> 사전예방 기술로써 천적생물 배양장치 운영방안

사전예방 기술은 녹조 발생 이전에 자연분포 천적생물을 대량 배양하여 연속 살포함으로써 수역 내 녹조 포식압을 증가시켜 녹조의 대량발생을 사전 억제한다.

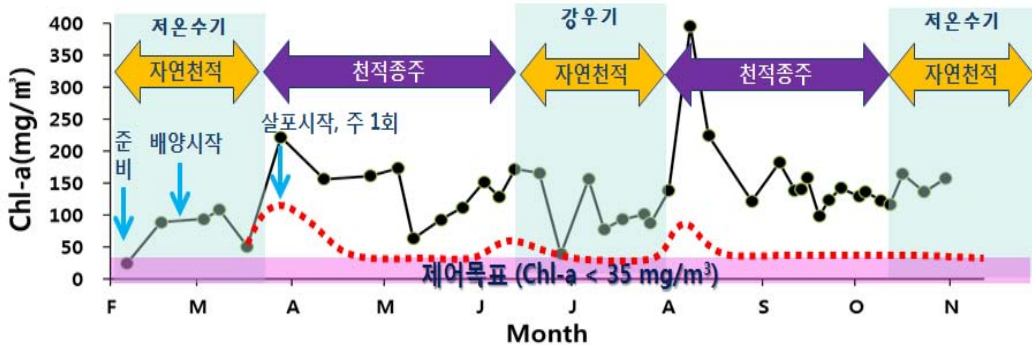
녹조방제 기술은 녹조가 심각하게 발생한 경우 녹조포식에 효과적이며, 천적생물 종주를 선택 공급, 대량배양, 살포하여 단시간에 녹조를 포식 제거하며, 이후 재발생을 억제한다.



<그림 2.80> 녹조방제 기술로써 천적생물 배양장치 운영방안

(2) 천적생물 배양장치의 연중 활용방안

연중활용 목표는 농업용수 기준인 Chl-a 35mg/m<sup>3</sup>이하 유지이며, 녹조 발생 전 사전예방 및 대발생 완화를 목적으로 한다. 녹조의 사전예방을 위해 이른 봄 조기배양을 할 경우, 자연분포 천적생물을 이용한 배양장치 운영이 필요하며, 해빙기인 2월말~4월초의 저온수기와 7~8월의 강우기에 적절한 방법이다. 녹조가 본격적으로 발생하는 4월~7월, 9월~10월에는 조류발생속도가 매우 빠르기 때문에 천적생물 종주를 이용한 적극적인 운영을 한다. 연중 조류발생 특성과 천적생물 배양특성을 감안한 최적 운영방안은 그림 2.81과 같이 수립하였다.



<그림 2.81> 천적생물 배양장치의 연중 운영방안



## 제5절 생물조절 연계방안(먹이연쇄)

### 1. 초대저수지 생태계 먹이구조 및 물질순환

#### 가. 생태계 먹이구조

##### (1) 안정동위원소비를 이용한 초대저수지 먹이망 구조

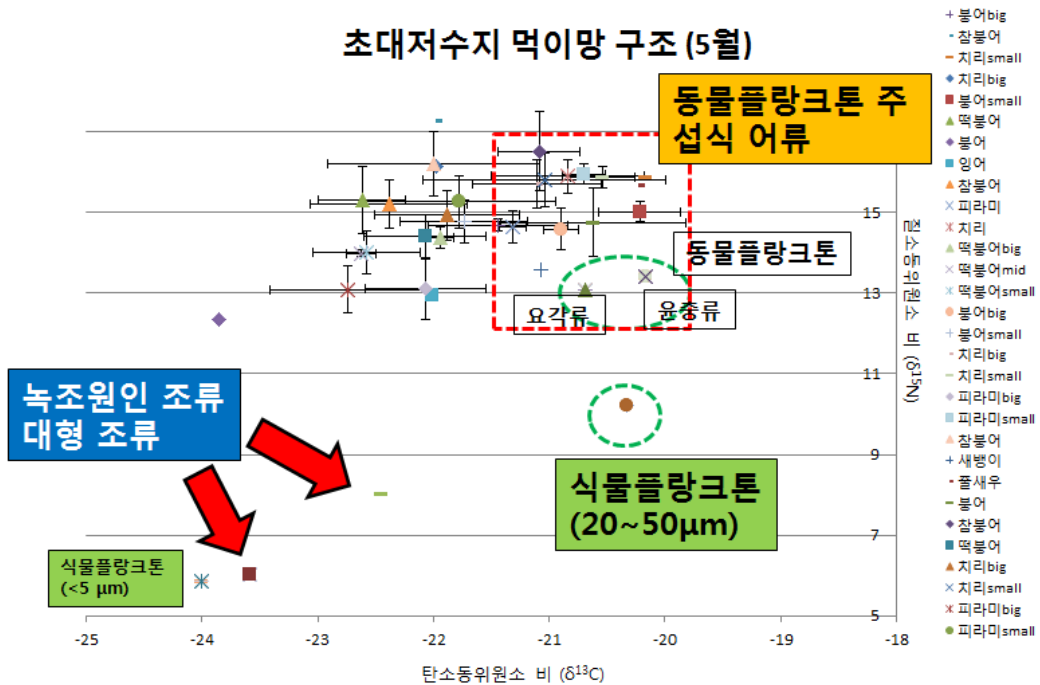
2013년에는 5월, 9월, 11월 3회, 2014년에는 5월, 10월 2회에 걸쳐 초대저수지에서 채집된 어류와 동물플랑크톤 및 식물플랑크톤의 탄소, 질소 동위원소비를 이용하여 초대저수지 먹이망의 구조를 분석하였다. 특히 식물플랑크톤의 경우 크기별로 나누어 안정동위원소를 측정, 크기가 큰 군체를 이루는 식물플랑크톤 그룹과 녹조류 등 작은 크기로 동물플랑크톤에게 먹이가 되는 그룹을 나누어 안정동위원소를 측정하였다.

2013년 5월 조사의 경우, 식물플랑크톤은 크기에 따라 상이한 안정동위원소 값을 나타내었고 그 결과, 초대저수지의 동물플랑크톤과 갑각류 및 어류들은 20~50  $\mu\text{m}$  크기의 식물플랑크톤을 먹이로 이용하는 반면 다른 크기의 식물플랑크톤은 먹이원으로 섭식하지 않을 가능성이 큰 것으로 분석되었다. 초대저수지의 먹이망 구조는 20~50  $\mu\text{m}$  크기의 식물플랑크톤을 주요 일차생산자 먹이원으로 하여 동물플랑크톤 및 갑각류(새뱅이), 어류 군집으로 구성되어 있는 것으로 나타났다.

2013년 5월의 어류 중간 탄소 동위원소비 폭은 -23~-20‰로 그리 넓지 않아 이 시기의 어류 종들은 유사한 먹이원을 가지는 것으로 판단된다. 먹이사슬 내에서의 영양단계를 나타내는 질소 동위원소비의 차이 역시 크지 않은 것으로 나타났다. 특히, 참붕어, 붕어 및 잉어 등은 동물플랑크톤과 동일한 범위의 탄소동위원소 비를 나타내, 이들 어류가 주로 동물플랑크톤을 섭식하고 있는 것으로 나타났다(그림 2.82). 또한 크기가 200  $\mu\text{m}$  이상의 녹조발생 원인이 되는 대형의 식물플랑크톤은 타 생물들과 상이한 탄소동위원소 비를 나타내 초대저수지 생태계 물질순환에서 이들의 생체량 및 에너지는 상위단계인 어류로 전달되지 않는 것으로 분석되었다. 또한 이 시기에는 요각류와 윤충류가 유사한 질소동위원소 비를 나타내, 이 시기의 요각류는 주로 식물플랑크톤을 섭식하는 것으로 나타났다. 동일한 어종의 경우에도 상이한 탄소 및 질소 동위원소비를 나타내는 경우가 많아, 지역적인 먹이원의 차이가 존재하는 것으로 생각된다. 떡붕어와 같이 많은 종에서 각 개체에 따라 매우 상이한

안정동위원소비를 나타내고 있는 경향이 있어, 장소 또는 시간에 따라 서로 다른 먹이원을 섭취하고 있을 가능성이 나타났다.

한편, 갑각류인 새뱅이와 줄새우의 경우, 새뱅이는 동물플랑크톤과 유사한 질소 동위원소비를 나타내, 이들이 먹이사슬 내에서 1차 소비자의 위치에 있는 것으로 판단되나, 줄새우의 경우 동물플랑크톤 및 새뱅이에 비해 높은 질소 안정동위원소비를 나타내 줄새우의 경우 보다 육식성 먹이를 섭취하고 있는 것으로 판단된다.



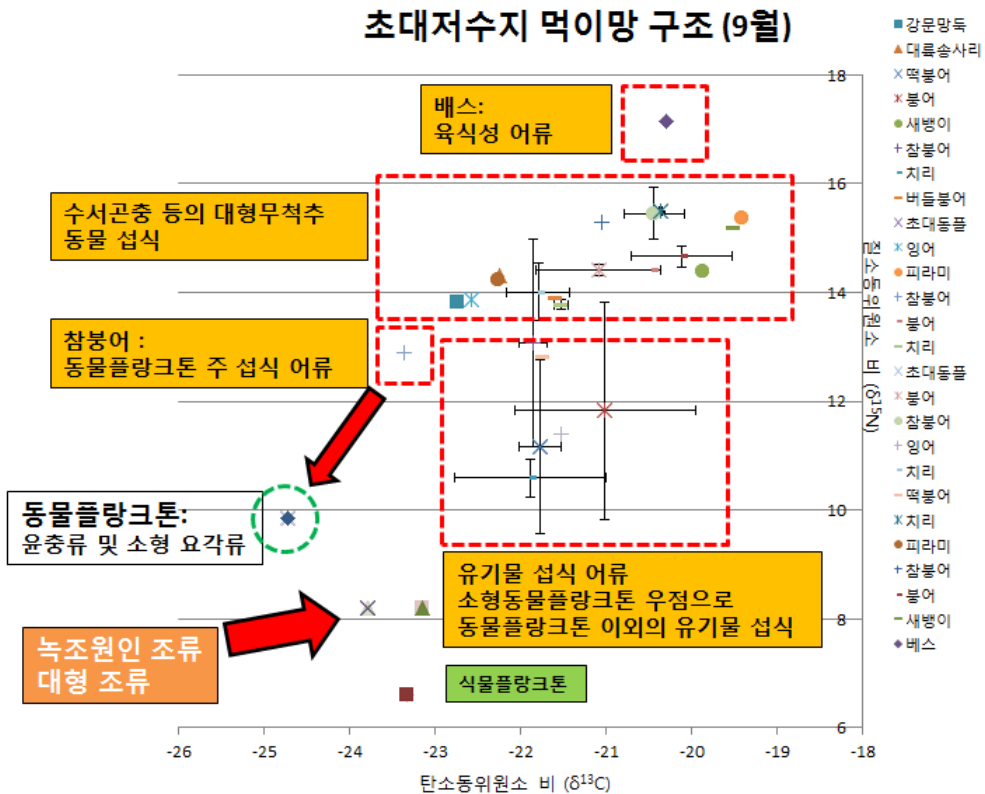
<그림 2.82> 초대저수지의 먹이망 구조(2013년 5월)

2013년 9월 조사의 경우에도 식물플랑크톤은 크기에 따라 상이한 안정동위원소 값을 나타내었다. 5월과 달리 이 조사시기에는 전체적인 식물플랑크톤의 사이즈별 여과가 불가능하여 세부적인 크기로 나누지 못하였고 >200 μm 크기의 식물플랑크톤 생체량이 분석에 충분할 만큼 여과되지 않아 생태계 물질순환에서 녹조원인 식물플랑크톤의 역할을 분석하지 못하였다.

9월의 경우 탄소 동위원소비의 범위가 -19~-24‰ 로 5월에 비해 폭이 매우 넓은 것으로 나타나, 어류 종들의 먹이원 분화가 일어나고 있는 것으로 여겨진다(그림 2.83). 질소 동위원소비의 폭도 넓은 것으로 나타났다. 반면,



동물플랑크톤의 탄소 동위원소비와 어류의 탄소 동위원소비의 차이가 큰 것으로 나타나, 이 시기의 어류들의 동물플랑크톤 섭식은 강하지 않은 것으로 분석되었다. 반면 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 탄소 동위원소비의 차이는 크지 않아, 일차 및 이차생산자의 생체량이 어류군집에게 이용되지 않고 있음을 나타낸다. 또한 일부 붕어와 참붕어는 개체간의 탄소, 질소 안정동위원소비의 차이가 큰 것으로 나타났다.

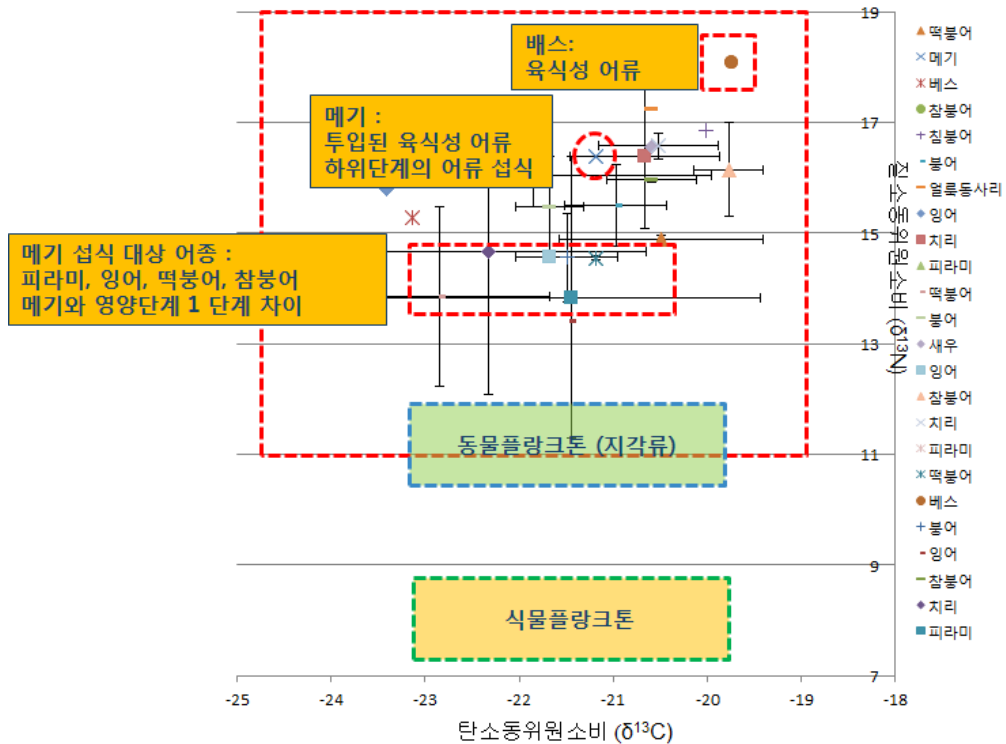


〈그림 2.83〉 초대저수지의 먹이망 구조(2013년 9월)

2013년 9월 초대저수지의 경우, 지각류 및 요각류 개체군 밀도가 매우 낮고, 소형 윤충류의 개체군 밀도 상대풍부도가 높게 유지되었다. 윤충류의 경우 크기가 작아, 어류가 타 먹이원을 섭식할 때 우연히 섭식되는 경우가 대부분이고 어류가 윤충류를 선택적으로 섭식하지 않는다. 따라서 9월 조사시기에는 윤충류의 우점으로 인해 어류가 일차생산자-일차소비자의 생물학적 상호작용으로 인한 물질순환이 연결되지 않고 있음을 이야기 한다. 반면 이

시기의 어류들은 질소안정동위원소가 식물플랑크톤과 비교해 높지 않아 식물 플랑크톤 기원의 유기물을 주 먹이원으로 섭취하고 있는 것으로 사료된다. 하지만 다른 어류와 달리 참붕어의 경우 동물플랑크톤과 유사한 탄소 동위원소비를 나타내, 이 어류가 동물플랑크톤을 주로 섭취하는 것으로 여겨진다. 반면 상위단계의 어류들의 경우 위내용물분석에서 동물플랑크톤 보다는 파리목의 저서성 무척추동물 및 기타 곤충의 잔해가 빈번하게 나오는 것으로 보아 저수지내 일차생산과 관련 없는 에너지원을 이용하고 있을 것으로 추정된다. 반면 배스의 경우 영양단계 값 계산에서 4.1로 계산되어 먹이사슬 4차에 속하는 상위포식자인 것으로 조사되었다.

### 초대저수지 먹이망 구조 (11월)



<그림 2.84> 초대저수지의 먹이망 구조(2013년 11월)

2013년 11월의 경우, 전체적인 질소 동위원소비가 상승하는 경향을 나타내었고, 식물플랑크톤을 중심으로 한 일차생산자의 탄소 동위원소비와 어류의 탄소 동위원소비의 범위가 큰 차이를 보였다(그림 2.84). 어류의 질소 동

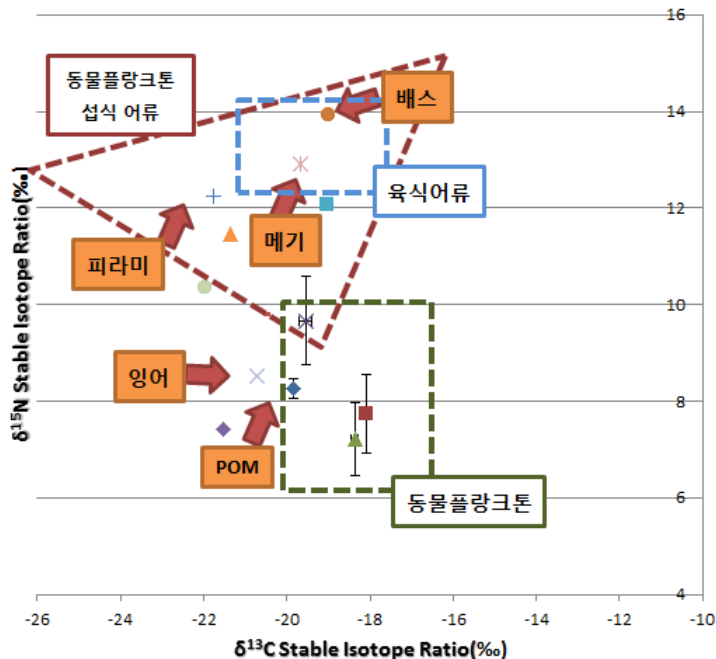


위원소비의 경우 11~18%의 범위로 2 단계의 영양단계 폭을 나타내었으며, 식물플랑크톤과 어류의 탄소 동위원소비의 폭도 4% 이상의 차이를 나타냈다.

어류 중 개체간의 안정동위원소비의 차이도 큰 것으로 나타났으며, 동물플랑크톤의 경우 어류 및 식물플랑크톤과 상이한 동위원소비 범위를 나타냈다. 어류 위내용물 분석결과는 이 시기의 어류는 관속식물 및 유기물, 대형 무척추동물의 섭식이 많고 개체간의 위내용물의 차이도 큰 것으로 나타났다. 어류 중에서는 배스가 상위포식자인 것으로 나타났다. 치리와 피라미, 참붕어의 경우 탄소, 질소 안정동위원소 값의 개체간 차이가 매우 큰 것으로 나타났다.

질소 동위원소비의 경우 부영양화, 축산폐수 등과 같은 인공적인 질소원에 의해 그 값이 높아지는 경향이 발생한다. 초대저수지의 경우 주변으로부터의 축산폐수 유입이 예상되며 여름철 강우 이후 유입된 외부 질소유입원에 의한 일차생산자의 증가로 인해 식물플랑크톤의 질소 동위원소비가 높은 값을 나타내는 것으로 여겨진다. 반면 어류의 경우 저수지내 일차생산자 기원의 먹이원 보다는 대형곤충 및 저서성무척추 동물 등 타 먹이원을 섭취하고 있는 것으로 사료된다.

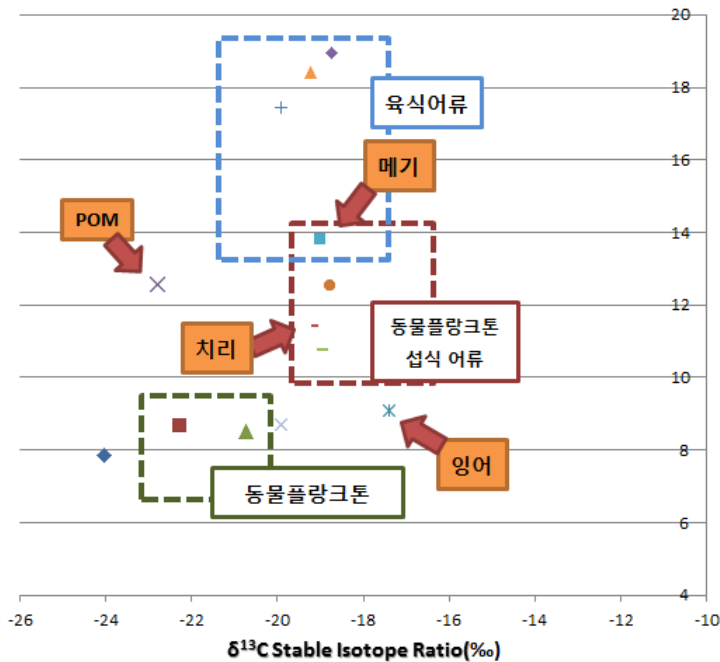
### 초대저수지 먹이망 구조 (5월)



<그림 2.85> 초대저수지의 먹이망 구조(2014년 5월)

2014년 5월의 경우, 식물플랑크톤을 주요 먹이원으로 하여 동물플랑크톤 및 갑각류(줄새우), 어류군집으로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 어류의 탄소 안정동위원소비의 폭은 -19~22‰로 그리 넓지 않아 이 시기의 어류들은 유사한 먹이원을 가지는 것으로 판단되었다. 먹이사슬 내에서의 영양단계를 나타내는 질소 동위원소 비의 차이 역시 크지 않은 것으로 나타났다. 피라미, 치리 등은 동물플랑크톤과 동일한 범위의 탄소동위원소 비를 나타내, 이들 어류가 주로 동물플랑크톤을 섭식하고 있는 것으로 나타났고 잉어, 갈문망둑 등은 유기물을 주로 섭식하는 반면, 배스와 메기는 육식성 어류인 것으로 분석되었다(그림 2.85). 식물플랑크톤은 타 생물들과 상이한 탄소 동위원소 비를 나타내 초대저수지 생태계 물질순환에서 이들의 생체량 및 에너지는 상위단계인 어류로 전달되지 않는 것으로 분석되었다. 또한 요각류와 윤충류가 유사한 질소 동위원소 비를 나타내 요각류와 윤충류 모두 주로 식물플랑크톤을 섭식하는 것으로 나타났다.

초대저수지 먹이망 구조 (10월)



<그림 2.86> 초대저수지의 먹이망 구조(2014년 10월)

2014년 10월의 경우, 어류의 탄소 안정동위원소의 폭이 -18 ~ 20‰로





그리 넓지 않아 이 시기의 어류들은 매우 유사한 먹이원을 가지고 있는 것으로 분석되었다. 치리 등의 물고기는 동물플랑크톤과 비슷한 탄소 안정동위원소 비를 나타내 이 시기에 치리가 동물플랑크톤을 섭식하는 것으로 나타났다. 이 시기에는 메기와 얼룩동사리가 육식성 어류로 분석되었고 특히, 얼룩동사리는 가장 높은 질소 안정동위원소 비를 나타내 최상위 포식자 역할을 하는 것으로 나타났다(그림 2.86).

## (2) 영양단계 평가

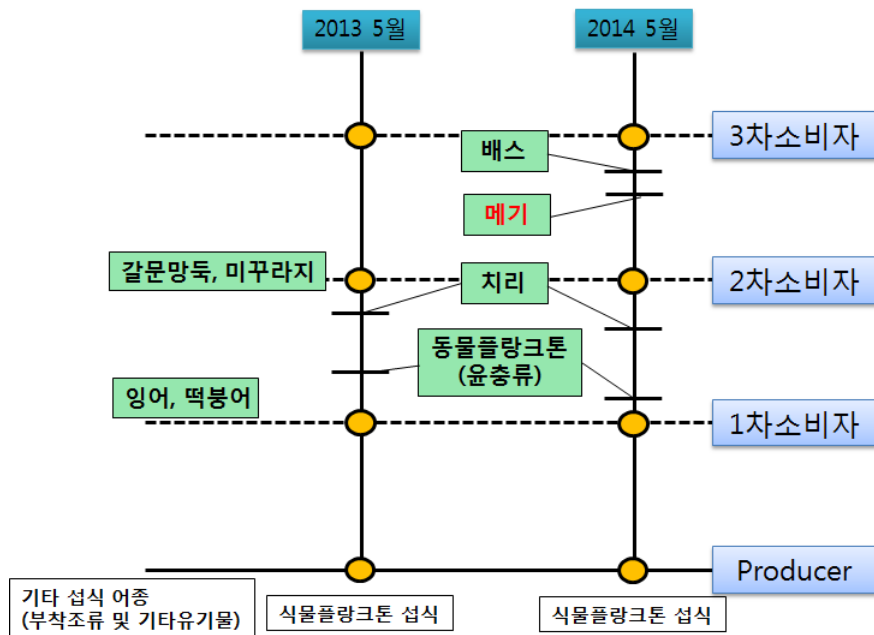
초대저수지에 서식하는 어류 종들의 질소 안정동위원소를 이용하여 이들의 먹이사슬 내 영양단계의 위치를 정량적으로 계산하여 나타내었다(그림 2.87). 어류의 경우 잡식성이므로 일회성 위내용물 분석의 경우 단기적인 먹이원의 파악은 가능하나 소화시간 이상의 기간에 대해서는 먹이원 분석이 어렵고, 먹이의 종류에 따라서는 먹이 내용물의 정량적인 분석이 불가능한 경우가 발생한다. 이런 경우 질소 안정동위원소비를 이용하면 선행연구를 통해 알려진 질소동위원소 농축비율을 이용해 영양단계의 위치를 정량적으로 계산하는 것이 가능하다.

어류조사와 함께 먹이사슬의 근간이 되는 식물플랑크톤을 포함한 POM의 질소동위원소비를 동시에 분석하여 초대저수지 서식 어류의 영양단계를 분석한 결과 많은 어류가 1차 소비자로 유기물을 섭식하고 있는 것으로 나타났다. 잉어, 떡붕어, 피라미, 붕어 등은 동물플랑크톤과 유사한 영양단계의 위치를 나타냈다. 반면 치리와 참붕어는 동물플랑크톤을 섭식하는 2차 소비자의 위치를 차지하고 있는 것으로 나타났다.

초대저수지 서식 어류의 전반적인 먹이사슬 영양단계의 구성과 계절별로 실시된 어류군집 및 저차생물의 안정동위원소비 분석을 통해 초대저수지의 경우 계절에 따라 먹이망 구조가 달라지며 이를 통한 물질순환 양상도 상이할 것으로 예상된다. 봄철의 경우 요각류를 중심으로 한 동물플랑크톤이 어류의 주 먹이가 되어 먹이사슬이 형성되나, 여름철의 경우 소형 윤충류 중심의 동물플랑크톤 군집이 형성되어 어류들은 유기물 및 저서성 생물들의 먹이를 주로 섭취하는 것으로 예상된다. 특히 식물플랑크톤에서 기원하는 유기물이 어류의 먹이원으로 사용되고 있는 것으로 예상된다. 이러한 부영양화 특유의 먹이망 구조는 먹이의 질 저하, 일차생산자 생체량 이용을 저하, 미생물먹이환을 통한 비능률적 에너지 전달 등 물질순환의 문제점을 안고 있다.

2013년 5월에는 육식어류의 밀도가 낮아(2013년 5월 기준 0.3%) 최상

위 포식자로서의 역할을 많이 하지 못했지만, 2014년 5월에는 메기, 배스 등의 육식어류가 2차 소비자인 치리 등과 같은 주로 동물플랑크톤을 섭식하는 물고기를 섭식하는 것으로 나타났다(그림 2.87). 육식어류는 투입한 천적생물을 섭식하는 소형어류를 조절하여 녹조제어 효과를 높이고 동시에 저수지 내의 물질순환을 조절하는 최상위 포식자로서 매우 중요하다. 메기 이외의 저수지에서 서식하고 있는 육식어류인 얼룩동사리와 배스도 높은 질소 안정동위원소비를 나타내 초대저수지에서 최상위 포식자 역할을 하는 것으로 분석되었다. 따라서, 메기의 투입과 함께 기존에 서식하고 있는 얼룩동사리와 같은 토착 포식어류의 보호 및 활용도 중요할 것으로 판단된다.



<그림 2.87> 초대저수지 서식생물의 먹이망 위치

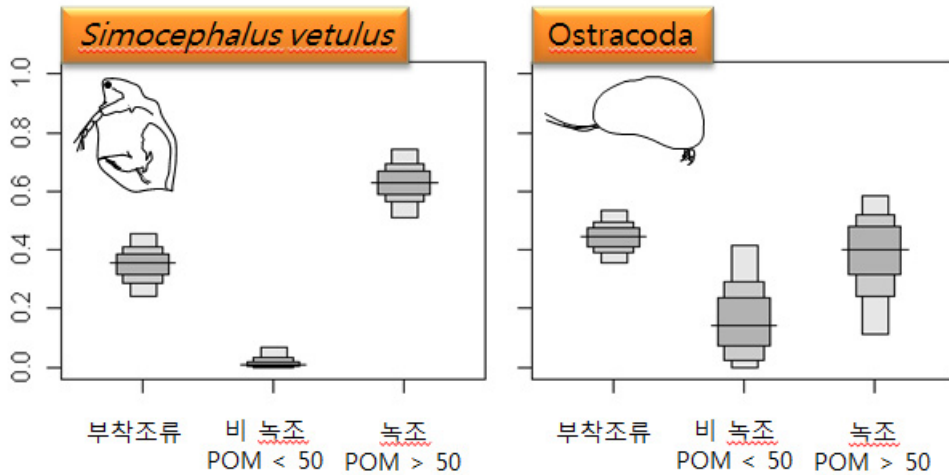
## 나. 물질순환

### (1) 초대저수지 녹조 섭식을 통한 물질순환

현장에 살포되는 천적생물의 녹조 섭식 여부와 타 생물과의 생물학적 상호작용을 분석하기 위해서 탄소 및 질소 안정동위원소비를 이용하여 먹이망 구조를 정량적으로 분석하였다. 현장에서 증가된 자연 천적생물인 *S. ventulus*는 먹이원의 약 60%가 녹조발생 원인이 되는 크기가 큰 식물플랑크톤인 것으로 분석되었다. 살포된 천적생물인 *S. ventulus*와 같은 대형 지각류



는 발생한 녹조를 섭식하고 소형어류에게 선택적으로 섭식하는 과정을 통해 저수지 물질순환에 기여할 것으로 판단된다(그림 2.88).



〈그림 2.88〉 생산자-일차소비자 먹이원 기여율 분석

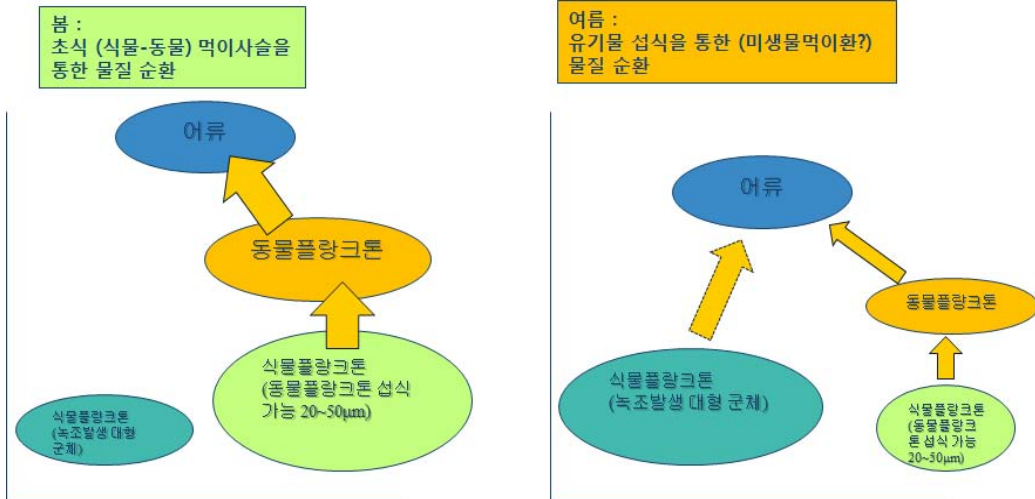
## (2) 생물조절 적용가능성

초대저수지의 먹이망 구조는 전형적인 부영양화 호수의 성격을 띠고 있으며 물질순환은 소형 동물플랑크톤의 섭식을 기초로 이루어지고 있는 것으로 사료된다. 소형 동물플랑크톤의 섭식은 조류 생체량의 대부분을 차지하는 입자가 큰 조류조성과 연결되지 못하고 입자의 크기가 작은 일부 조류에 국한되어 있는 것으로 나타났다. 특히 녹조가 대량발생하는 여름의 경우 수체의 높은 유기물 양으로 인해 많은 생물이 녹조발생에 기인하는 유기물에 의존하고 있는 것으로 나타났다(그림 2.89). 이러한 유기물 의존의 물질순환의 경우 유기물 분해 등과 관련한 미생물의 작용이 증대되어 미생물 먹이환(Microbial loop)의 역할이 증대되어 수체의 비효율적인 물질순환 고리를 형성하게 된다(Weisse 2007).

반면 섭식실험을 통한 천적생물의 섭식능력 검증에서 *Daphnia*, *Simocephalus* 및 *Moina* 의 경우 현재 저수지에서 우점하고 있는 윤충류 및 요각류보다 섭식할 수 있는 식물플랑크톤의 범위가 넓으며 높은 Chl-*a* 농도에서 조류를 효과적으로 섭식하는 것으로 나타나, 수체에서 이들 천적생물이 조류를 섭식할 경우 전체적인 조류 생체량을 저감시킬 수 있을 것으로 기대된다.

또한 2013년도 메기 치어의 방류를 통해 초대저수지로 유입되는 천적생물에 대한 어류의 포식압을 육식성 어류인 메기의 도입으로 낮추게 되면

천적생물의 개체군 밀도를 높이고 분포영역을 넓혀 대형의 조류를 포함한 수체의 유기물 농도를 감소시키고 천적생물의 식물플랑크톤 섭식을 통해 단절된 일차생산자에서 상위 영양단계 생물로의 물질순환을 가능하게 하리라 예상된다.



<그림 2.89> 소대저수지 저서생물과 어류간의 먹이망을 통한 생물학적 상호작용

## 2. 어류를 이용한 생물조절 연계방안

### 가. 육식어류 도입 및 어류상의 변화

#### (1) 초대저수지 어류 위내용물 분석

초대저수지에 서식하는 어류의 섭식특성을 알아보기 위하여, 2013.5.27.~11.1에 실시한 3차례 현장조사(2~4차 조사)에서 출현한 어류를 이용하여 위내용물 분석을 실시하였다(그림 2.90).

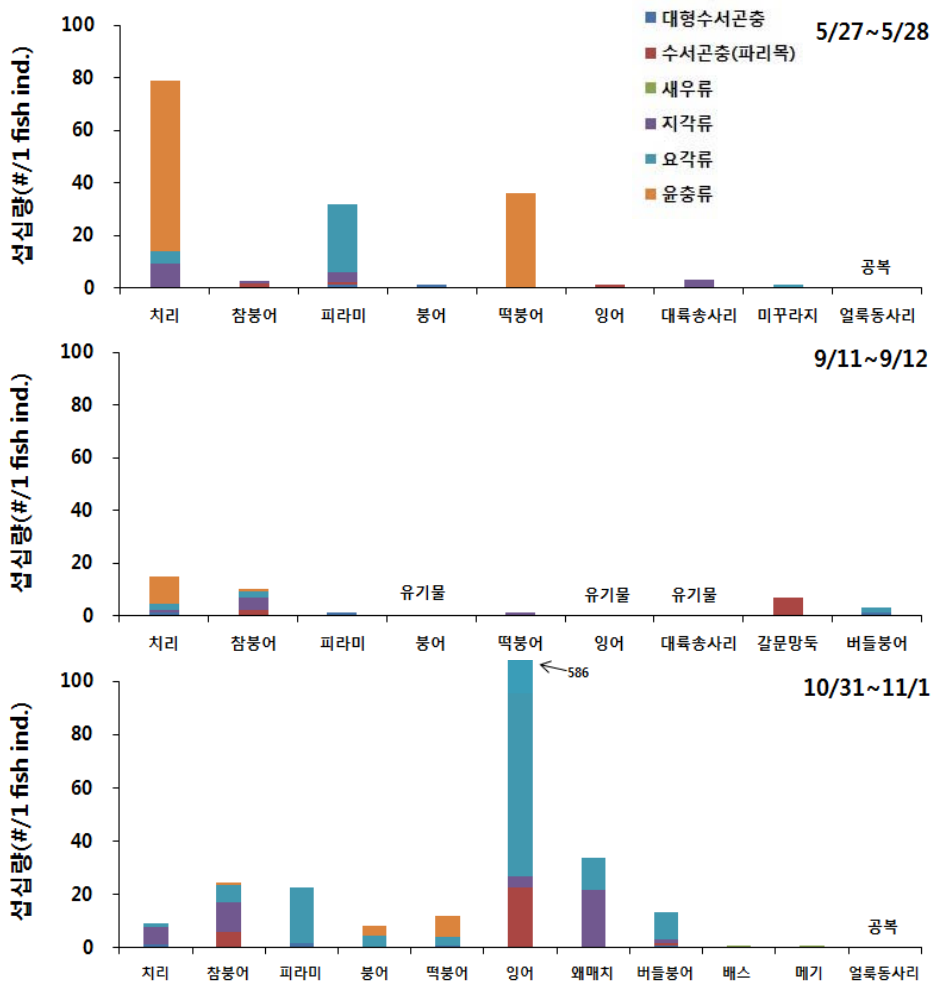
잉어과 어류인 치리, 참붕어, 피라미, 붕어, 떡붕어, 잉어, 왜매치는 식물 및 유기물질의 섭식량이 많았으며, 수서곤충도 상당히 섭식하여 잡식성의 섭식특성을 보였다. 그 중, 치리, 참붕어, 피라미는 동물플랑크톤(지각류, 요각류, 윤충류)의 주요 포식자로 나타났으며, 붕어와 떡붕어는 유기물질, 식물질, 수서곤충, 동·식물플랑크톤을 닥치는대로 섭식하였다. 잉어는 입이 아래쪽에 위치하여 저층의 유기물을 주로 섭식하였으며, 이 과정에서 수서곤충과 요각류가 다수 섭식된 것으로 판단되었다. 왜매치는 잉어와 마찬가지로 입이 아래쪽에 위치



하고 있으며, 지각류와 요각류를 주로 섭식하여 저층에 서식하는 동물플랑크톤의 주요 포식자로 나타났다.

대륙송사리와 미꾸라지는 대부분 유기물을 섭식하였으며, 평균 3 inds. 내외의 동물플랑크톤을 섭식하였다. 갈문망둑은 수서곤충을 섭식하는 것으로 나타났으며, 버들붕어는 대부분 수서곤충을 섭식하였고 동물플랑크톤(10월 요각류 평균 7 inds.)도 일부 섭식하였다.

최상위소비자 육식어류인 얼룩동사리, 메기, 배스에 대해 위내용물 분석을 실시한 결과, 얼룩동사리는 공복상태였으며, 메기와 배스는 새우류를 섭식한 것으로 나타났다.



〈그림 2.90〉 소대저수지 어류 위내용물 분석

## (2) 초대저수지 육식어류 도입

육식어류 도입 전(2차조사 기준), 초대저수지의 어류 종조성은 잉어과(99.4%)가 극우점하는 것으로 나타났으며, 이들 잉어과 어류는 대부분 잡식성의 섭식특성을 보이는 2차 소비자이다. 이 기간에 초대저수지의 주요 우점종의 지위를 보이는 치리(67.4%)는 영양단계 내에서 동물플랑크톤(천적생물)의 주요 포식자로서, 생물조절이 필요한 주요 어종으로 나타났다. 반면, 초대저수지에서 동물플랑크톤 섭식어류를 포식하는 육식어류는 얼룩동사리 1종(0.3%)만이 출현하여 최상위포식자(육식어류)의 도입에 따른 초대저수지의 생물조절이 필요한 것으로 사료되었다.

육식어류 도입을 위하여, 초대저수지 수변에서 실시한 어류조사(2차조사 기준)를 바탕으로 어류자원량을 추정하였다. 현장조사는 투망을 이용하였으며, 투망투척횟수는 총 32회(8회/지점)이고 투망포획면적이  $10 \text{ m}^2/\text{회}(1.8 \text{ m} \times 1.8 \text{ m} \times \pi)$ 이므로, 조사당시 어류 포획면적은  $320 \text{ m}^2$ 로 나타났다. 조사당시 어류는 660개체가 출현하였으며, 이는  $2.1 \text{ 개체}/\text{m}^2$ 에 해당하는데, 초대저수지의 수표면적인  $24.1 \text{ ha}(241,000 \text{ m}^2)$ 임을 감안하면 500,000개체 이상의 어류가 서식하고 있을 것으로 추정되었다. 그러나 조사기법의 특성상 호안 조사만(수심이 깊은 구간 배제)을 수행하였으며, 망목사이즈에 의한 치어 및 소형개체는 포함되지 않았고, 수심 및 서식특성 차이로 실제 서식어류의 개체수는 추정량을 상회할 것으로 판단되었다.

최상위포식자인 육식어종 도입을 위하여, 1차적으로 저수지 내 서식하는 어종을 대상으로 적용하고자 하였으나, 조사당시 채집된 육식어종인 얼룩동사리는 최대 200 mm 미만으로 육식어종 중 비교적 소형이고, 구입의 어려움이 있어서 도입 후보어종에서 제외되었다. 이에 따라, 도입을 위한 후보종으로 현장조사에서 채집되지 않은 종을 도입하기로 결정하였으며, 대형종이면서 구입을 통한 현장방류가 용이한 쏘가리, 가물치, 메기를 후보어종으로 고려하였다. 쏘가리는 수질오염에 민감하고 충분한 양의 적용하기에는 단가가 높아 초대저수지의 적용에 어려움이 있는 것으로 판단되었으며, 메기와 가물치는 수질오염에 대한 내성이 강하고 서식조건(유속이 느리고 진흙이 깔린 하상 선호)이 초대저수지에 적합하였으나, 가물치의 적용단가가 높아 메기를 최종적으로 선정하였다(표 2.26).

메기는 저서성 어종이지만, 야간 섭식활동 중에는 저층과 중층을 오가며 거의 모든 종류의 수중동물을 섭식하고 강한 탐식성을 보이게 때문에 잉



어과 어류가 극우점하는 초대저수지에서 높은 포식효과를 보일 것으로 판단되었다. 또한, 적은 개체의 대형개체를 살포하는 것보다는 성어에 가까운 치어를 대규모 도입하여 적응시키는 것이 더욱 효과적일 것으로 예상하여 치어를 도입하기로 결정하였다.

(표 2.26) 육식어종 선정 기준

구 분	메기	가물치	쏘가리
포식효과	대부분의 수중동물	어류 및 양서류	어류
수질오염 내성	내성이 강함	내성이 강함	오염에 민감
적용가능 치어 크기	100 mm	100 mm	50 mm
구입가격	84원/개체	800원/개체	1000원/개체
최종 순위	1	2	3

생태계 피라미드 안정화를 위하여 최상위포식자의 비율은 5% 내외가 적합한데(중앙내수면연구소 문의), 안전을 2배를 계산하여 2013.6.27에 최상위포식자인 메기를 초대저수지 추정 어류자원량의 10% 수준인 50,000개체 도입하였다. 이때, 적용한 치어는 체장 100 mm급으로 성어와 거의 같은 형질을 가진 개체로서, 대형개체에 비해 포식력은 떨어지지만 도입한 개체군이 적절히 적용한다면 개체의 성장과 함께 뛰어난 효과를 볼 수 있을 것으로 기대되었다.

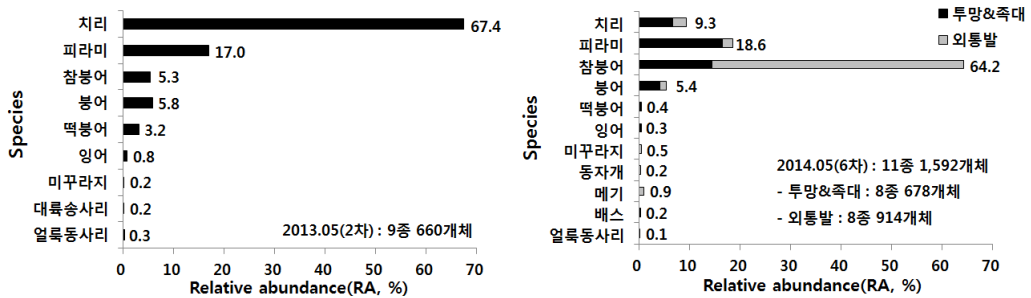
### (3) 초대저수지 어류상의 변화

육식어류 도입에 따른 초대저수지의 어류상 변화를 알아보기 위해, 육식어류 도입 전인 2차(2013.5.27~28)와 도입 후의 동일시기인 6차(2014.5.29~30)의 종조성과 상대풍부도(RA)를 비교하였다(그림 2.91).

초대저수지의 최상위포식자는 메기도입 전, 얼룩동사리 1종(2개체)이 출현하여 0.3%의 상대풍부도를 보였으나, 메기도입(2013.6.27) 337일 경과 후에는 메기(0.9%)를 포함한 육식어류 3종(메기, 배스, 얼룩동사리)의 상대풍부도는 1.1%로 증가하였다. 이때, 주행성인 배스와 야행성이지만 수변저층에 서식하는 얼룩동사리는 투망을 통해 채집되었으나, 야행성이면서 주간에는 수심이 깊은 곳의 저층에 주로 서식하는 메기는 함정어구인 외통발을 통해 채집됨에 따라, 육식어류 도입효과 분석을 위한 적절한 조사기법이 포함되어야 하는 것으로 판단되었다.

2차의 우점종이었던 치리(445개체, 67.4%)는 메기도입 후 6차에서 개체수(148개체)와 상대풍부도(9.3%) 측면에서 큰 감소를 보인 반면, 참붕어는 2

차 17.0%(112개체)에서 6차 64.2%(1,022개체)로 우점하였다. 또한, 동일한 조사도구를 이용한 결과에서도 참붕어는 33.8%(229개체)로 피라미(18.6%, 296개체)와 함께 우점종의 지위를 차지하는 것으로 나타났는데, 치리의 개체수 감소는 4절의 (다)에서 언급한바와 같이 4차부터 확인되었으며, 상대풍부도뿐만 아니라 개체수 측면에서도 지속적으로 감소하는 경향을 보였는데 정수역의 표층-중층에 주로 서식하는 치리(김과 박, 2002)는 도입한 메기의 주요 먹이원으로서 역할을 하고 있는 것으로 판단되었다. 참붕어는 수생식물이 밀집한 호안에 주로 서식하는 특성을 보이는데(한 등, 2009), 이와같은 서식특성에 의해 수변부에 설치한 외통발에서 대규모로 출현한 것으로 사료되며, 수생식물의 은신처 역할로 치리에 비해 메기의 포식압이 적은 것으로 판단되었다. 향후, 다양한 먹이조건 및 서식지 구성에 따른 섭식실험을 통한 메기의 먹이선호도 분석이 필요할 것으로 판단되었다.



<그림 2.91> 육식어류 도입에 따른 어류상 변화

## 나. 생물조절 연계방안

### (1) 육식어류 도입에 따른 생물조절효과

메기 도입에 따른 생물조절효과를 알아보기 위해 도입한 메기의 재포획을 통한 시기별 체장·체중을 측정하였다.





육식어류의 상대풍부도 증가를 위해, 2013.6.27에 최상위 포식자인 메기를 50,000개체(체장 100 mm급)를 도입하였다. 도입한 메기의 생체량(습증량 기준)은 평균 8.3 g(평균 94 mm, n=50)에서 4개월(127일) 후 70.5 g(200 mm, n=1)으로 62.2 g(106 mm)의 증가를 보였다. 11개월(337일) 후에는 평균 229.8 g(평균 288 mm, n=7)로 190일간 159.7 g(88 mm)이 증가하였으며, 16개월(486일) 후에는 평균 988.4 g(평균 492 mm, n=6)으로 149일간 758.6 g(204 mm)이 증가하였다(표 2.27).





도입한 메기의 생체량 증가는 동절기를 포함한 기간보다 먹이활동이 활발한 하절기 동안 주로 이루어진 것으로 보이며, 증가한 생체량만큼 동물 플랑크톤을 섭식하는 소형어류인 치리 개체군이 감소한 것으로 판단되었다.

(표 2.27) 도입안 메기의 시기별 생체량 변화

시기	도입	127일	337일
	2013.6.27	2013.11.1	2014.5.30
사진			
체장	평균 94 mm	200 mm	평균 288 mm
체중	평균 8.3 g	70.5 g	평균 229.8 g
시기	486일		
	2014.9.26		
사진			
체장	평균 492 mm		
체중	평균 988.4 g		

## (2) 과잉 물고기 포획 및 생태구조 정상화 유도방안

저수지 내 잉어수산자원을 제거하고, 물질의 계외 배출을 위해 당진시 초대저수지 수질관리협의체의 도움을 받아 2014.11.26.~12.9까지 2주간 4회에 걸쳐 과잉 물고기 포획을 실시하였다.

4차례에 걸친 포획결과, 잉어, 붕어, 메기, 동자개, 장어, 참붕어, 치리, 피라미, 새우 등이 총 103.6 kg 포획되었으며, 이들 중 잉어, 붕어, 메기, 동자개, 장어, 새우 등은 내수면 어업자원으로서 수익성이 높은 것으로 나타났다(표 2.28). 또한, 초대저수지의 주요 우점종이면서 살포한 천적생물을 포식하는 것으로 나타난 참붕어, 치리, 파라미 등의 포획은 천적생물 군집 안정화에 기여할 수 있을 것으로 기대되었다. 본 포획시기가 수온 10 ℃ 이하의 저수온기임을 감안한다면, 향후 어류활동이 활발한 고수온기에 적용시 수익이 더욱 증가할 것으로 판단되었다.

초대저수지의 활발한 물질순환으로 과잉 성장하는 어류는 지역주민으로 구성된 수질관리협의회가 중심이 되어 잉여수산자원을 포획·제거함으로써 유입 오염총량에 해당하는 바이오매스의 계외 배출을 유도할 수 있다. 또한, 이를 통해 발생한 수익은 수질관리 비용으로 환원하여 지속가능한 저수지 관리와 생태구조의 정상화를 유도할 수 있을 것으로 사료되었다.

(표 2.28) 잉여수산자원 포획

4회 포획	잉어	붕어	메기	동자개	장어	잡고기	합계
개체수 (#)	2	30	1	4	1	다수	
무게 (kg)	<b>0.5</b>	<b>2.9</b>	<b>1.0</b>	<b>0.3</b>	<b>0.2</b>	<b>99.0</b>	<b>103.9</b>
단가(원/kg)	14,000	12,900	10,000	17,900	200,000	17,900	
가격(원)	7,000	37,000	10,000	4,000	40,000	1,772,000	1,870,000
- 잡고기 : 새우(대부분), 참붕어, 치리, 피라미 등 - 단가는 인터넷 판매가 기준(잡고기 단가는 새우가 기준), 천원 이하 절삭							

### (3) 어류를 이용한 생물조절 연계방안

초대저수지 내 플랑크톤 섭식어류 저감을 유도하기 위해 도입된 메기의 경우 최상위 포식자인 배스와 잡식성 어류의 중간 단계에 위치하였다. 11월 조사에서 채집된 메기와 메기의 하위 영양단계에 위치하는 어류 종들 및 동물플랑크톤 등의 저차 생물의 안정동위원소 값을 이용하여 먹이원 기여율을 안정동위원소 mixing model로 분석한 결과 메기의 먹이원 기원의 90% 가량이 어류인 것으로 나타났다(그림 2.92).

먹이원 기여율이 가장 높은 어류는 붕어로 먹이원의 34%를 차지하였고, 피라미가 32%, 치리가 24%를 차지하고 있는 것으로 분석되었다. 한편 동물플랑크톤은 7%에 그쳐 채집된 몸길이 20 cm 의 메기는 육식성향을 강하게 나타내는 것으로 분석되었다. 현재 투입된 메기가 성장을 계속할 경우 내년에는 보다 강한 어류 섭식성향을 띠게 되어 초대저수지에서 식물플랑크톤의 천적생물인 물벼룩을 선택적으로 섭식하는 플랑크톤 섭식 어류의 개체수를 조절할 수 있으리라 예상된다.

녹조유발 농업용저수지 대부분이 녹조 포식 1차소비자(천적생물, 대형지각류)의 분포율이 현저히 낮으며, 그 원인은 이들 1차소비자를 포식하는 소형어류 군집의 대형화 때문이다. 따라서 저수지내 소형어류를 포식하는 육식어류를 도입하여 소형어류의 군집크기를 감소시키는 하향조절 유도, 녹조를 포식하는 천적생물의 개체군을 증가시켜 녹조제어를 달성할 수 있다.



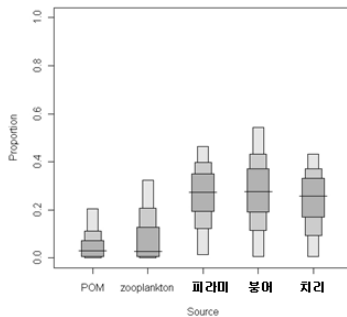
초대저수지의 경우 육식어류인 메기를 도입하여 하향조절(Top down manipulation) 유도하였으며, 국내 농업용저수지에 적용가능한 육식어류로 가물치, 메기, 쏘가리, 무지개송어 등이 있다.

도입 개체수는 해당 저수지의 어류 전수조사 결과를 바탕으로 총 출현율의 5% 개체수에 생존율(40~50%)을 감안하여 산정하고, 방류 시기는 산란기인 5~6월 정도가 적합하며 성어 도입이 효과적이거나 치어의 경우 10 cm 이상의 개체를 도입하는 것이 효과적이다.

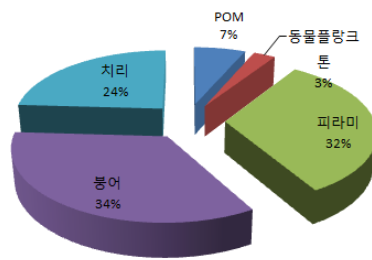
**ISOMIXING MODEL (SIAR Package) :**  
 유기물과 동물플랑크톤,  
 메기보다 하위 영양단계에 위치하는 어류 중  
 을 선정하여 추정  
 먹이 기여율과 50, 75, 99% 신뢰구간 추정

메기는  
 동물플랑크톤 및 유기물의 직접섭취율은 매우  
 낮고 플랑크톤 섭식의 가능성이 있는  
 붕어, 피라미 를 주 먹이원으로 섭취하고 있음

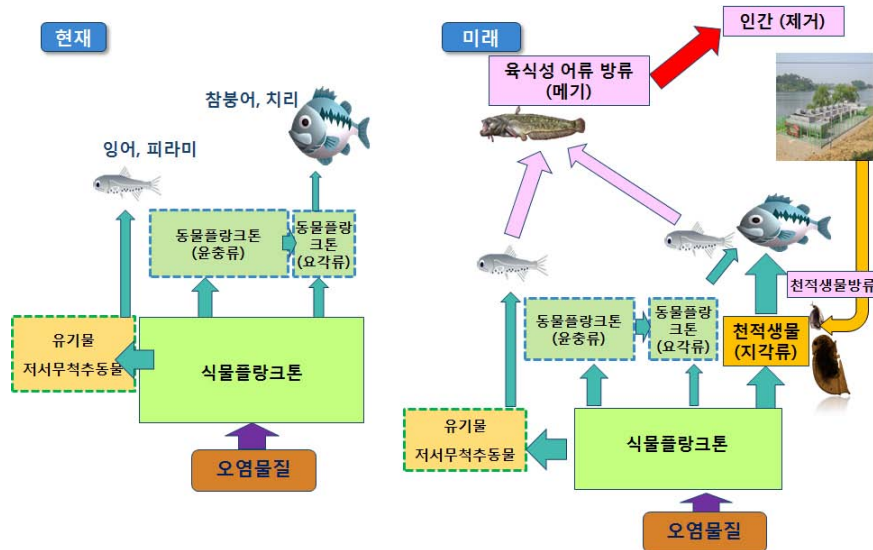
Proportions by group: 1



메기에 대한 먹이 기여율 계산 결과



<그림 2.92> mixing model을 통한 메기의 먹이원 기여율 분석



<그림 2.93> 어류를 이용한 생물조절 연계 및 개선 방안



## 제6절 농업용저수지 수질개선 연계 및 사업화방안

### 1. 천적생물 적용기술의 타공법 비교 적용타당성 분석

#### 가. 천적생물 적용기술의 타공법 비교

##### (1) 천적생물 적용기술과 타공법 장·단점 비교

현장에서 사용하고 있는 대표적인 녹조제어 공법은 가압부상공법과 약품을 이용한 응집 처리방법, 초음파를 이용한 처리방법, 물순환 처리방법 등으로 분류할 수 있다. 2~3년간 장기간 적용으로 생태구조를 개선하여 녹조를 제어하는 본 기술은 타 공법에 비해 동력 및 약품사용 등의 유지관리 비용이 상대적으로 적고, 넓은 수역에 지속적인 효과가 나타난다.

(표 2.29) 녹조제어기술 비교

구 분	천적생물 이용기술	가압부상시설 물리화학처리	수질개선제 화학적 처리	초음파 이용 물리적 처리	물순환 처리 물리적 처리
원 리	천적생물 이용, 녹조의 증식을 억제하는 생물 조절 기법 활용	미세기포와 응집제 혼합, 오염물을 수면 위로 부상, 제거	천연수질 개선제를 수면에 살포, 수중 바닥 조류 슬러지부상 제거	다파장 초음파를 연속 발생, 수중 진동으로 기낭 및 세포막 파괴	특정 장소에 물순환을 일으켜 산소를 용해 시키고 물을 대류시킴
장 점	효과지속 넓은수계 효과 생태건강성 2차오염 없음 약품사용 없음	단기간 내 처리 가능	단기간 내 처리 가능	단기간 내 처리 가능	2차오염없음 유지비 없음
단 점	2-3년 장기간 적용	효과범위 제한 시간 제한 생태독성증가	효과범위 제한 시간 제한 슬러지 발생 처리비용 많음	소형호소 적합 조류외 미생물 파괴	일부면적 처리 좁은수역 효과 사용기간 짧음
경제성 비교	1	6	95	5	-

#### 나. 경제성 및 적용타당성 분석

##### (1) 경제성

저수용량 100만 m<sup>3</sup> 규모의 농업용호소에서 타 기술과 초기 투자비 및 유지관리비를 비교해 보면 m<sup>3</sup>당 처리단가는 타 공법에 비해 최소 50%이상 경제적이다. 위 경제성평가는 한국환경공단에서 작성한 자료를 근거로 작성하였다. 전체적으로 10년을 가동한다고 가정하고 가압부상시설의 경우 시설



비와 운전관리비를 종합하여 보면 실 처리단가는  $\text{m}^3$ 당 232.5원으로 평가되고, 천연응집제는 시설비 없이 운전관리비만 통계를 내었고 실 처리단가는  $\text{m}^3$ 당 1,313.3원으로 평가되었다. 초음파 기술의 설치비와 운전관리비 종합 실 처리단가는 778.7원으로 나타나 천적생물 이용기술 127.7원과 비교하면 전반적으로 본 기술의 경제성이 더 뛰어나다고 볼 수 있다.

(표 2.30) 녹조제어기술 경제성평가(단위 : 천원)

구 분	천적생물 이용기술*	가압부상 시설	천연응집제 이용	초음파 이용 기술	물순환 처리 기술	
처 리 대 상( $\text{m}^3$ )	1,000,000	30,000 $\text{m}^3$ /일	1,000,000	1,000,000	-	
시 설 비	999,947	400,000	-	330,000	60,000/EA	
운 전 관 리 비	인 건 비	2,117	8,317	81,662	10,556	-
	전 력 비	141	5,642	10,000	-	-
	소모품·약품 비	50	1,875	150,000	1,100	-
	예비·슬러지처리	462	1,093	21,000	3,300	-
	원 간 소 계	2,770	16,927	262,662	14,956	-
실 처리단가(원/ $\text{m}^3$ )	127.7	232.5	1,313.3	778.7	-	

\* 천적생물 배양용량 100  $\text{m}^3$  기준

## (2) 적용타당성

경제성으로도 본 기술의 타당성이 더 높다고 할 수 있으나 기술적 측면에서 가압부상시설과 천연수질개선제의 경우 단기간 내 처리효과를 볼 수 있다는 장점은 가지고 있지만, 효과범위의 제한과 가동시간 제한 및 잔류독성 증가위험, 슬러지발생, 처리비용 증가의 단점이 있다. 초음파기술은 적용범위의 한계로 소형호수에 적합하며 파괴된 세포의 영양분유출이 녹조 재발생에 기여할 가능성이 크다. 물순환기술은 2차오염이 없고, 유지비가 들지 않지만 가동 규모상 연못과 같은 아주 좁은 수역에서만 효과가 입증된다는 단점이 있어, 100만 $\text{m}^3$  규모엔 적용하기 어렵다. 본 기술은 효과가 나타나기까지 2-3년이라는 장기간의 적용시간이 필요하지만 효과가 지속되고, 넓은 수계에 효과적이며, 약품사용 및 2차오염이 없어 생태적으로 건강한 처리방법이다.

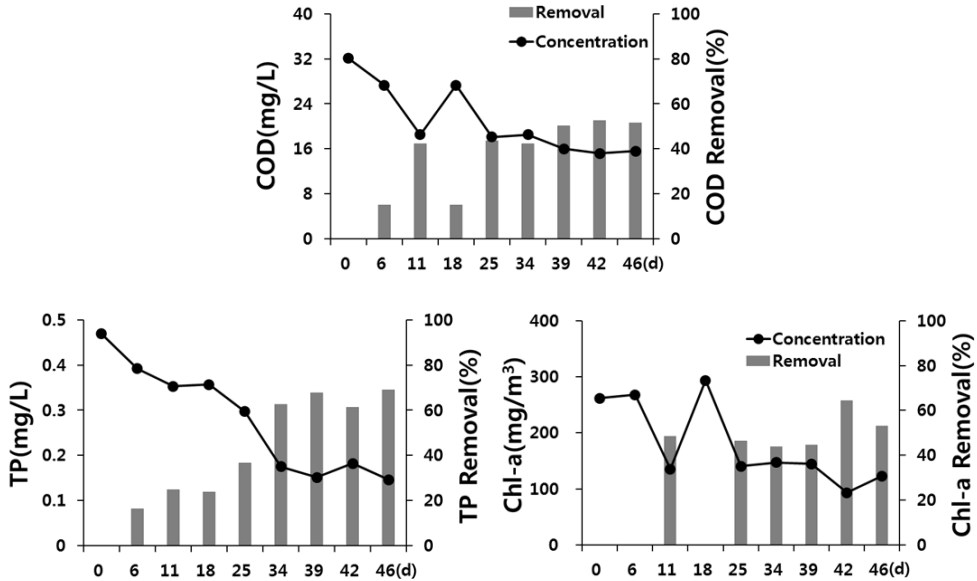
## 2. 농업용저수지의 수질개선 연계방안

### 가. 천적생물 살포에 따른 수질개선 효과

천적생물 살포기간 동안(2014.9.11~10.27, 47일간) Chl-*a* 감소와 함께 COD, TP의 농도변화를 분석한 결과, 녹조발생이 심각한 호중양(CD-5)의 살포 전 수질농도 COD 32.1 mg/L, TP 0.469 mg/L, Chl-*a* 261.8 mg/ $\text{m}^3$ 에서 살포 후



COD 15.2 mg/L, TP 0.146mg/L, Chl-*a* 93.5 mg/m<sup>3</sup>로 크게 감소하였다(그림 2.94).



<그림 2.94> Chl-*a*, COD, TP 제거효율(2014.9.11~10.27, 47일간)

천적생물 살포에 따른 Chl-*a* 제거효율은 64.3%였으며, 동시에 COD 52.6%, TP 68.9%로 수질개선효과가 높게 나타났다. 따라서, 천적생물 살포에 따른 녹조제어와 함께 수질개선효과도 크게 나타나고 있어 천적생물 적용기술을 수질개선 사업과 연계가능함을 시사하였다(표 2.31).

(표 2.31) Chl-*a*, COD, TP 살포 전, 후 농도변화 및 수질개선 효율

Chl- <i>a</i> (mg/m <sup>3</sup> )			COD(mg/L)			TP(mg/L)		
살포전	살포후	효율(%)	살포전	살포후	효율(%)	살포전	살포후	효율(%)
261.8	93.5	64.3	32.1	15.2	52.6	0.469	0.146	68.9

#### 나. 수질개선사업 연계방안

천적생물 적용기술은 녹조원인생물을 포식, 제거하는 생태적 녹조제어 기술이나, COD와 TP의 개선효과도 동시에 나타나므로 수질개선 사업중 침강지내 오염물질 집적에 따른 녹조발생 저감 및 COD, TP의 개선효과 향상을 위해 병행 적용할 경우 매우 효과적일 것으로 사료된다.

또한, 수질개선 사업의 인공습지 말단부에 적용하여 인공습지 처리후



유출되는 잔존 COD와 TP를 제거하고, 동시에 천적생물의 호내도입으로 2차적인 녹조제어 유도함으로써 시너지효과를 발생시킬 수 있다.

따라서, 본 기술은 개별적용도 가능하지만, 수질개선 사업과 연계하여 수질개선사업으로 진행되는 침강지내에서 인공식물섬, 물순환장치를 대체하거나 병행하여 도입할 수 있으며, 인공습지 후처리시설로 도입하여 인공습지내 잔존하는 조류 제거는 물론, 호내에 방류되어 녹조를 사전 예방할 수 있어 녹조 예방 차원으로 활용할 수 있다.

### 3. 사업화방안: 천적생물과 어류를 이용한 생태적 관리방안

#### 가. 동식물플랑크톤 특성에 따른 후보저수지 분석

농업용수 수질측정망 지구 중 녹조발생 우려가 있는 전국 19개 저수지를 주요 지역본부의 담당자 추천을 받아 수환경조사와 함께 동·식물플랑크톤을 분석하였다.

(표 2.32) 동식물플랑크톤 특성에 따른 후보저수지 시설 개원

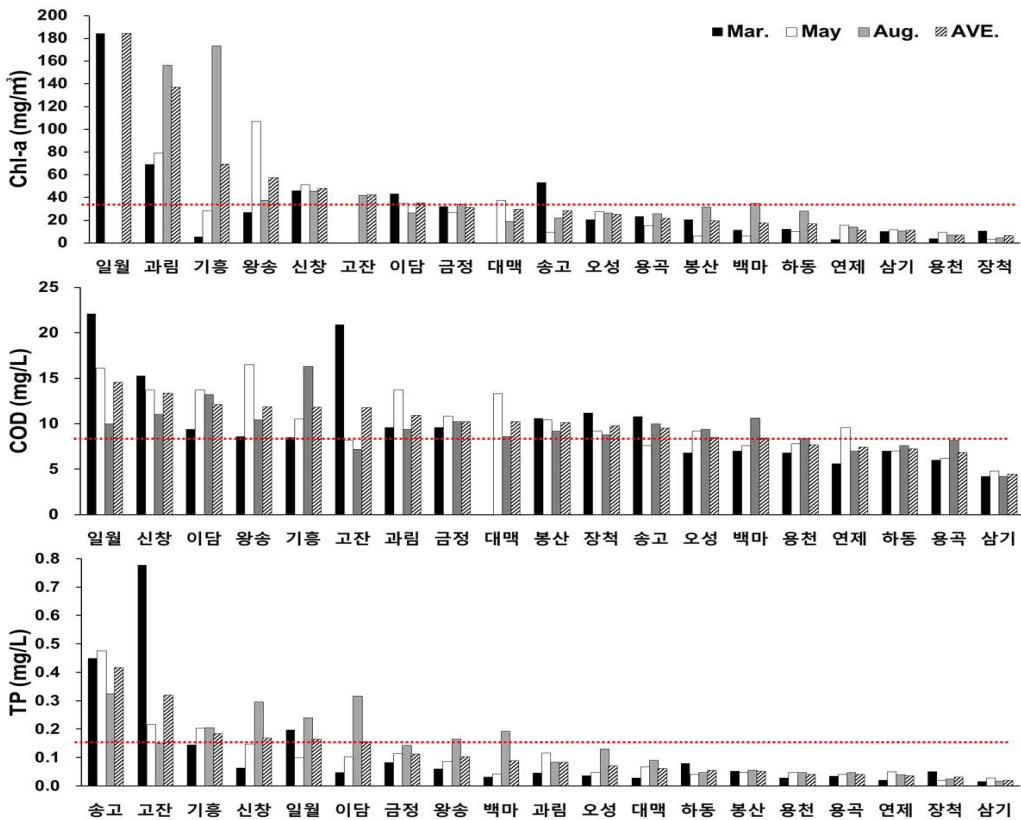
지역	해당 저수지	만수면적(ha)	유효저수량(천 m <sup>3</sup> )	주오염원
경기	고잔	11.7	409.0	생활계
	과림	13.4	366.0	생활계
	기흥	231.2	11630.0	생활계
	왕송	83.6	2077.3	생활계
	일월	18.0	299.0	생활계
충남	신창	23.8	615.0	생활계
충북	금정	14.8	381.6	생활계
	백마	18.1	891.7	토지계
	삼기	26.4	2811.2	축산계
	연제	23.0	519.3	축산계
	오성	9.0	572.0	축산계
	용곡	22.6	915.3	축산계
	이담	17.8	644.0	축산계
경남	봉산	78.2	2280.2	축산계
	송고	5.2	143.6	생활계
	장척	54.8	2000.4	축산계
경북	대맥	10.2	501.0	축산계
	용천	17.1	1043.5	축산계
	하동	13.6	669.1	생활계

(1) 후보 저수지 시설 재원 및 수환경 특성

2014년 3월, 5월, 8월, 10월의 Chl-a, COD, TP 농도에 근거하여 농업용수기준(환경기준 IV등급)을 초과하는 지구를 분류하였다. 그 결과 Chl-a(> 35 mg/m<sup>3</sup>) 기준 일월 등 7개, COD(> 8 mg/L) 기준 신창 등 12개, TP(> 0.15 mg/L) 기준 송고 등 6개 지역으로 구분되었다(표 2.33).

(표 2.33) Chl-a, COD, TP 기준 초과 저수지

구분	기준	대상 후보지
Chl-a(mg/m <sup>3</sup> )	35 ≤	고잔, 과림, 기흥, 신창, 왕송, 이담, 일월(총 7개)
COD(mg/L)	8 ≤	고잔, 과림, 금정, 기흥, 대맥, 봉산, 백마, 송고, 신창, 오성, 왕송, 이담, 일월,장척(총 14개)
TP(mg/L)	0.15 ≤	고잔, 기흥, 송고, 신창, 이담, 일월(총 6개)



<그림 2.95> 동식물플랑크톤 특성에 따른 후보 저수지의 수환경 변화

연구기간 중 대상저수지의 Chl-a는 3월에 3.1~184.3 mg/m<sup>3</sup>(평균 34.0 mg

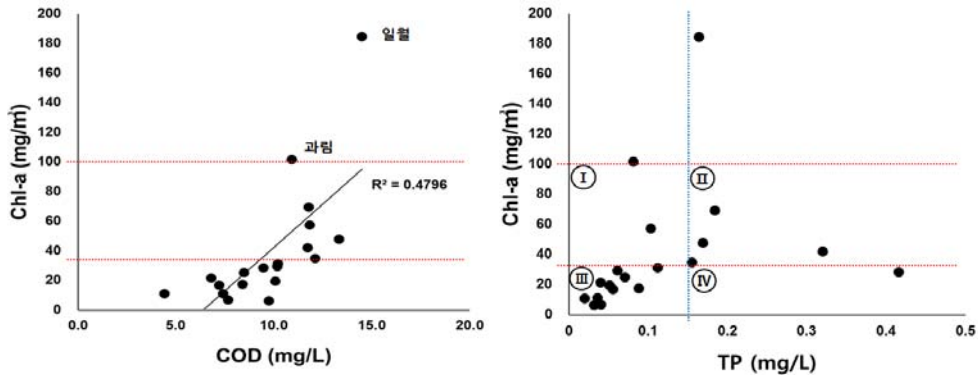




/m<sup>3</sup>)로 일월저수지에서 가장 높게 나타났으며, 5월 3.2~107.0 mg/m<sup>3</sup>(평균 28.1 mg/m<sup>3</sup>)로 왕송저수지에서 가장 높게 나타났고, 8월 4.6~173.4 mg/m<sup>3</sup>(평균 41.0 mg/m<sup>3</sup>)로 기흥저수지에서 가장 높게 나타났다(그림 2.95).

COD는 3월에 4.2~22.1 mg/L(평균 10.0 mg/L)로 일월저수지에서 가장 높게 나타났으며, 5월 4.8~16.5 mg/L(평균 10.3 mg/L)로 왕송저수지에서 가장 높게 나타났고, 8월 4.2~16.3 mg/L(평균 9.5 mg/L)로 기흥저수지에서 가장 높게 나타났다(그림 2.95).

TP는 3월에 0.016~0.778 mg/L(평균 0.118 mg/L)로 고잔저수지에서 가장 높게 나타났으며, 5월 0.019~0.475 mg/L(평균 0.104 mg/L)로 송고저수지에서 가장 높게 나타났고, 8월 0.016~0.324 mg/L(평균 0.137 mg/L)로 이담저수지에서 가장 높게 나타났다(그림 2.95).



<그림 2.96> 동식물플랑크톤 특성에 따른 후보저수지의 수환경 분포 및 4개 그룹 제안

(표 2.34) 후보지의 총인(TP)과 Chl-a의 상관관계

구분	특성	대상 후보지	천적생물 적용성
I	내부 요인에 의한 녹조발생	과림, 왕송	적용 타당성 높음
II	외부 오염요인에 의한 녹조발생	고잔, 기흥, 신창, 이담, 일월	오염정도에 따라 적용 가능
III	청정 안전 용수	금정, 대맥, 봉산, 백마, 삼기, 연제, 오성, 용곡, 용천, 장척, 하동	불필요
IV	잠재 외부 오염요인에 의한 녹조발생 가능	송고	오염정도에 따라 적용 가능

이들 저수지 중, 천적생물 사업화 방안 모색을 위하여 녹조발생의 외부 요인인 TP 농도가 높지 않음에도 불구하고 녹조발생에 취약한 농업용저수지를 분류하였다. 분류기준으로는 농업용수 수질기준인 TP 0.15 mg/L, Chl-*a* 35 mg/m<sup>3</sup>를 사용하여, 분포에 따라 4개 그룹으로 구분하였다(그림 2.96)

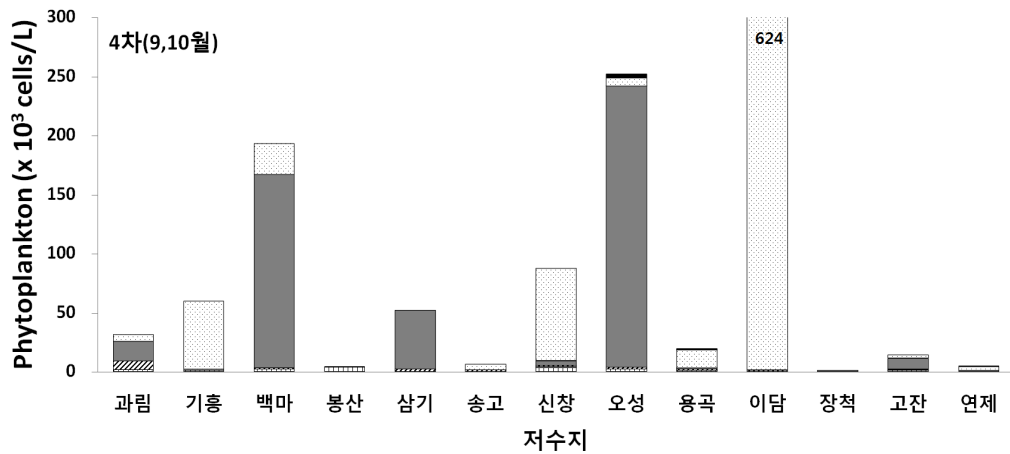
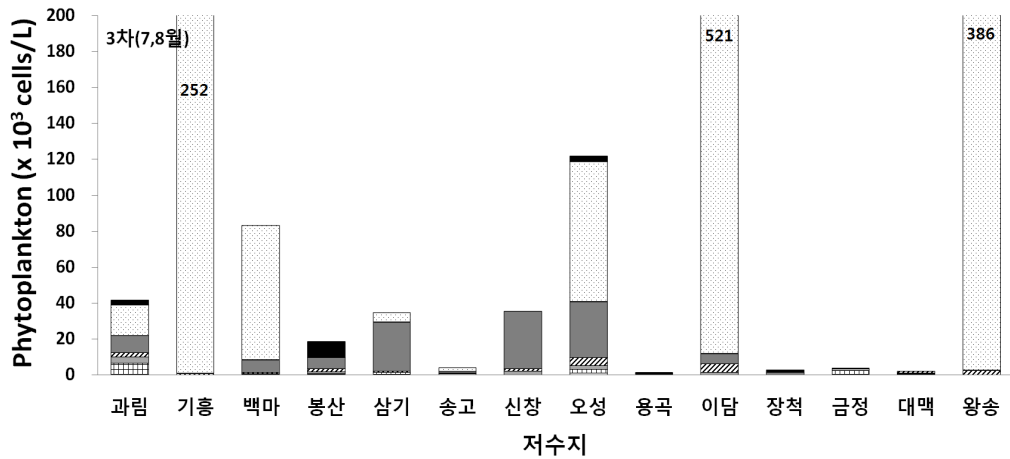
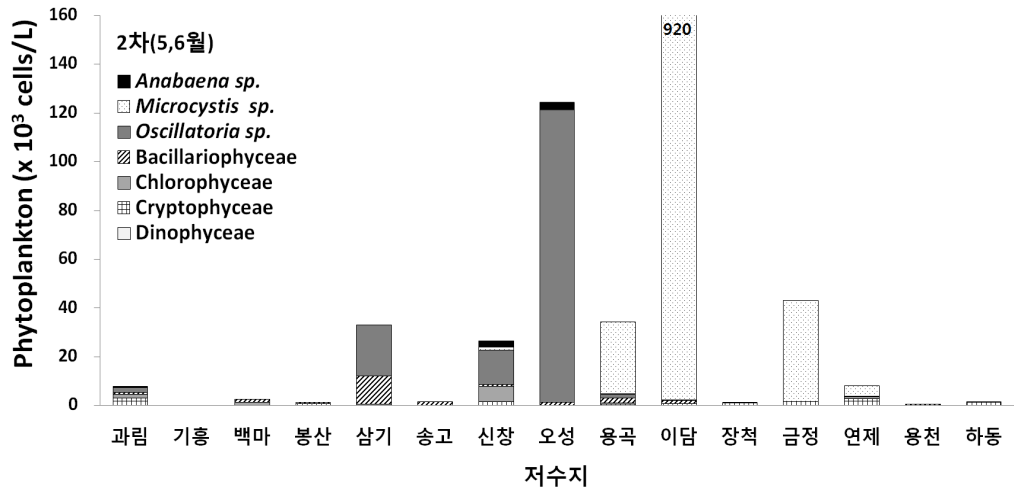
이러한 결과에 따라 I 그룹인 TP < 0.15 mg/L, Chl-*a* > 35 mg/m<sup>3</sup>에 해당되는 2개(과림, 왕송) 저수지가 오염형보다는 생태구조 불균형의 저수지로 천적생물 사업화 지구로 타당한 것으로 판단되었다(표 2.34).

(2) 동식물플랑크톤 특성에 따른 후보저수지의 녹조발생 특성 및 식물플랑크톤 종조성 변화

후보지의 시기별 식물플랑크톤 분석 결과 대부분의 지구에서 모든 시기에 남조류가 가장 많은 비중을 차지하는 것을 볼 수 있었다. 남조류 중 *Microcystis* sp. 가 42 %, *Oscillatoria* sp. 가 22 %, *Anabaena* sp. 가 5 %의 비중으로 우점하였고, 갈조류인 *Cryptomonas ovata* 가 20 %의 우점율을 보였다. 시기별로는 춘계인 2차(5, 6월)시기에는 이담저수지에서 가장 높은 현존량을 보였으며, 하계인 3차(7, 8월)시기에는 기흥저수지, 이담저수지, 왕송저수지에서 높은 현존량을 보였다. 추계인 4차(9, 10월)시기에는 이담저수지가 가장 높은 현존량을 보여, 모든 시기에 이담저수지에서 가장 높은 값을 나타내는 것을 볼 수 있었다(그림 2.97).

(표 2.35) 동식물플랑크톤 특성에 따른 후보저수지의 시기별 식물플랑크톤 우점종

Site	Dominant Species		
	2차(5,6월)	3차(7,8월)	4차(9,10월)
과림	<i>Cryptomonas ovata</i>	<i>Microcystis</i> sp.	<i>Oscillatoria</i> sp.
기흥		<i>Microcystis</i> sp.	<i>Microcystis</i> sp.
백마	<i>Scenedesmus</i> spp.	<i>Microcystis</i> sp.	<i>Oscillatoria</i> sp.
봉산	<i>Cryptomonas ovata</i>	<i>Anabaena</i> sp.	<i>Cryptomonas ovata</i>
삼기	<i>Oscillatoria</i> sp.	<i>Oscillatoria</i> sp.	<i>Oscillatoria</i> sp.
송고	<i>Nitzschia</i> spp.	<i>Microcystis</i> sp.	<i>Microcystis</i> sp.
신창	<i>Oscillatoria</i> sp.	<i>Oscillatoria</i> sp.	<i>Microcystis</i> sp.
오성	<i>Oscillatoria</i> sp.	<i>Microcystis</i> sp.	<i>Oscillatoria</i> sp.
용곡	<i>Microcystis</i> sp.	<i>Cryptomonas ovata</i>	<i>Microcystis</i> sp.
이담	<i>Microcystis</i> sp.	<i>Microcystis</i> sp.	<i>Microcystis</i> sp.
장척	<i>Cryptomonas ovata</i>	<i>Anabaena</i> sp.	<i>Cryptomonas ovata</i>
금정	<i>Microcystis</i> sp.	<i>Cryptomonas ovata</i>	
연제	<i>Microcystis</i> sp.		<i>Microcystis</i> sp.
용천	<i>Nitzschia</i> spp.		
하동	<i>Cryptomonas ovata</i>		
대맥		<i>Nitzschia</i> spp.	
왕송		<i>Microcystis</i> sp.	
고잔			<i>Oscillatoria</i> sp.

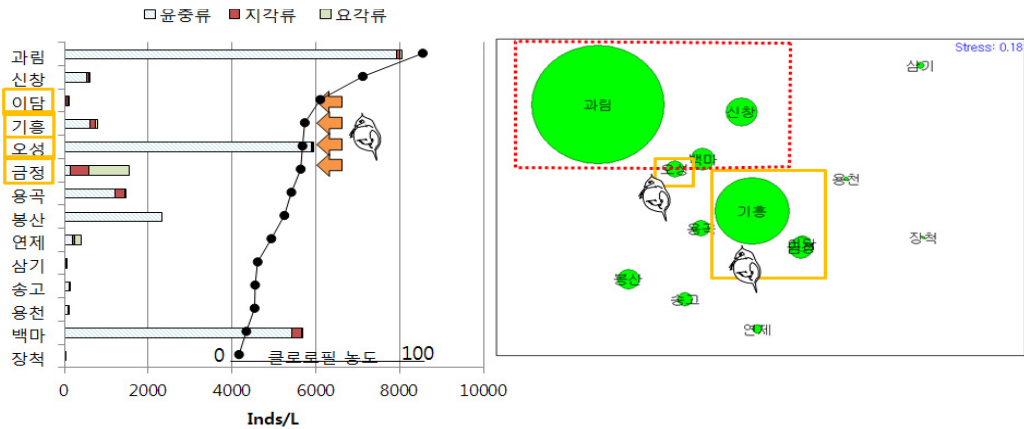


<그림 2.97> 후보지의 시기별 식물플랑크톤 종조성 변화

### (3) 동식물플랑크톤 특성에 따른 후보저수지의 동물플랑크톤의 분포 및 천적생물 특성

대상후보 저수지의 동물플랑크톤 조성은 용곡저수지, 금곡저수지, 백마저수지 등 일부 저수지에서 지각류의 상대풍부도가 높은 것으로 나타났으나, 대부분의 저수지에서 윤충류가 우점하였다.

천적생물은 Chl-*a* 농도가 20~50 mg/m<sup>3</sup> 사이의 저수지에서 출현하는 것으로 나타났으며, 오성저수지, 금정저수지, 이담저수지 및 기흥저수지에서 천적생물인 *D. galeata*가 출현하였다. 특히 금정저수지는 300 inds./L의 높은 개체군 밀도를 보였으나, 하절기에는 출현하지 않았다(그림 2.98).



<그림 2.98> 후보 대상지 동물플랑크톤 조성 및 개체수 분포와 천적생물 출현 개체수, 군집조성 비교결과를 나타내는 클러스터분석 결과와 MDS(Multi-dimensional Scaling)

#### 나. 측정망 저수지 적용 후보지 분석

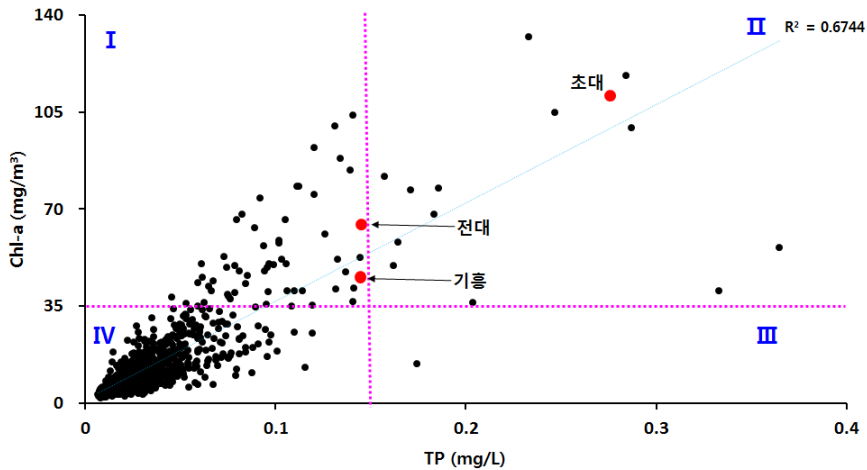
##### (1) 측정망 저수지 적용 후보지

천적생물 적용기술의 사업화 후보지를 모색하기 위해, 최근 3년(2012~2014년)간 측정망 825개 농업용호소의 TP, Chl-*a* 농도를 평균하여 나타내었다. 각 호소의 최근 3년간 Chl-*a*와 TP 농도 분포도에 Chl-*a*는 농업용수 수질기준 35 mg/m<sup>3</sup>, TP는 0.15 mg/L 기준의 선으로 구분한 결과, 그림 2.99와 같이 4개의 분류군으로 구분되었다.

I 구간에 해당되는 저수지는 Chl-*a* 35 mg/m<sup>3</sup> 이상, TP 0.15 mg/L 이하의 저수지로 57개소가 분포하였으며, 대표적인 저수지로 전대저수지와 기흥저수지가 있고 내부요인에 의한 녹조발생 위험이 있는 것으로 사료되었다.



Ⅱ구간에 해당되는 저수지는 Chl-*a* 35 mg/m<sup>3</sup> 이상, TP 0.15 mg/L 이상의 저수지로 14개소가 분포하였으며, 대표적인 저수지로 초대저수지가 있고 외부 오염물질 유입에 인한 녹조발생 위험이 높은 것으로 나타났다. Ⅲ구간에 해당 되는 저수지는 Chl-*a* 35 mg/m<sup>3</sup> 이하, TP 0.15 mg/L 이상의 저수지로 경남 밀양에 위치한 가산저수지 1개소가 분포하였으며, Ⅳ구간의 저수지는 Chl-*a* 35 mg/m<sup>3</sup> 이하, TP 0.15 mg/L 이하의 저수지로 753개소가 분포하였고 농업용수로 이용하기 적합한 저수지로 나타났다.



<그림 2.99> 전국 825개 측정망 저수지의 최근 3년간 Chl-*a*, TP 농도 분포

(표 2.36) Chl-*a*, TP 농도에 근거한 분류 및 특성

구분	분류기준	개소 (%)	특성	천적생물 적용성
I	Chl- <i>a</i> > 35 mg/m <sup>3</sup> & TP ≤ 0.15mg/L	57개소 (6.9%)	내부 요인에 의한 녹조발생	적용 타당성 높음
Ⅱ	Chl- <i>a</i> > 35 mg/m <sup>3</sup> & TP > 0.15 mg/L	14개소 (1.7%)	외부 오염물질 유입에 의한 녹조발생	조건부 적용가능
Ⅲ	Chl- <i>a</i> ≤ 35 mg/m <sup>3</sup> & TP > 0.15 mg/L	1개소 (0.1%)	외부 오염에 의한 녹조 잠재성 높음	조건부 적용가능
Ⅳ	Chl- <i>a</i> ≤ 35 mg/m <sup>3</sup> & TP ≤ 0.15 mg/L	753개소 (91.3%)	청정 안전 용수	불필요

농업용저수지 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 후보지를 선정하기 위해 측정망 저수지의 데이터를 활용하여 후보지를 분석한 결과 I 구간에 해당되는 저수지가 천적생물 적용기술 사업화 타당성이 높다고 판단되었다. 이



들 저수지 중 다음의 선정조건에 기준하여 분석평가한 결과 순성저수지를 비롯한 6개저수지를 최종 사업후보 저수지로 선정하였다(표 2.36).

- 최근 3년간(2012~2014) Chl-*a* 평균농도가 35 mg/m<sup>3</sup> 이상인 저수지
- 최근 3년간(2012~2014) TP 평균농도가 0.15 mg/L 이하인 저수지
- 평균수심 2.5 m 이상 저수지
- 중점 관리 저수지
- 수질 개선 사업 예정 저수지

(표 2.37) 구분 I 에 해당하는 측정망 저수지

연번	지구명	중점 관리 저수지	수질 개선 사업 예정지	지역	유역 면적 (ha)	유효 저수량 (천 m <sup>3</sup> )	만수 면적 (ha)	평균 수심 (m)	COD (mg/L)	T-P (mg/L)	Chl- <i>a</i> (mg/m <sup>3</sup> )	주 오염원	후보지
1	순성	○	○	충남	850	1,357	39.7	3.4	12.5	0.120	92.1	축산계	○
2	죽산	○		충남	143	615	23.8	2.6	13.0	0.139	83.8	축산계	
3	전대	○	○	충남	234	587	15.6	3.8	13.9	0.145	64.3	축산계	○
4	고남			충남	430	1,073	20.4	5.3	9.8	0.102	57.5	생활계	
5	만년			충북	724	619	12.2	5.1	10.6	0.133	51.9	생활계	
6	용풍	○	○	경기	500	715	24.7	2.9	10.9	0.103	51.8	축산계	○
7	동명	○		경북	2,660	1,451	33.0	4.4	11.4	0.106	50.3	축산계	
8	덕평	○		충북	256	898	10.6	8.5	12.1	0.099	49.7	토지계	
9	고현			경북	3,500	1,036	24.3	4.3	8.6	0.079	49.5	생활계	
10	신구	○	○	충남	257	404	9.7	4.2	13.0	0.095	47.4	축산계	○
12	효촌	○	○	경기	303	1,395	43.0	3.2	8.8	0.062	45.4	축산계	○
13	어천	○		경기	380	894	25.4	3.5	8.0	0.060	43.2	생활계	
14	입장	○		충남	752	622	18.2	3.4	9.3	0.085	43.1	생활계	
15	용담	○		경기	700	1,128	37.7	3.0	8.5	0.065	42.0	생활계	
16	이담	○		충북	535	644	17.8	3.6	10.8	0.114	40.5	축산계	
17	홍중	○		경기	710	483	14.5	3.3	7.0	0.075	39.2	생활계	
18	기산(포천)			경기	872	1,162	14.2	8.2	7.8	0.077	37.5	토지계	
19	내현			충남	260	758	13.3	5.7	8.6	0.053	36.0	축산계	
20	만수(안성)	○		경기	375	614	22.3	2.8	10.5	0.095	35.5	축산계	
21	수룡	○	○	충남	750	1,285	50.0	2.6	9.9	0.120	35.3	생활계	

- i) 평균 수심 2.5m 이하 제외
- ii) 유효저수량 150만톤 이상 제외
- iii) 수질개선사업 기시행지구 제외
- iv) 지자체 관할 저수지 제외



또한 TP의 농도가 낮으면서 Chl-a 농도가 높은 저오염 녹조우려 저수지분류(I)를 통해 선정된 6개의 후보저수지는 최근 3년간 평균 Chl-a 농도가 높은 저수지 순으로 나열한 표 2.38의 주요 녹조우려 저수지의 상위 순위에 랭크되어 있어 선정의 타당성이 높은 것으로 나타났다.

(표 2.38) 최근 3년간 Chl-a 높은 측정망 저수지

연번	지구명	중점관리저수지	수질개선사업예정지	지역	유역면적(ha)	유효저수량(천 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	만수면적(ha)	평균수심(m)	COD(mg/L)	T-P(mg/L)	Chl-a(mg/m <sup>3</sup> )	주오염원	후보지
1	광혜			충북	1,040	4,025	50	8.0	17.6	0.284	117.9	축산계	
2	초대	○	○	충남	470	1,026	24	4.3	18.0	0.276	110.8	축산계	
3	순성	○	○	충남	850	1,357	40	3.4	12.5	0.120	92.1	축산계	○
4	아산호	○		경기	163,400	82,892	2,429	3.4	10.3	0.113	78.1	생활계	
5	기천	○		경기	755	2,164	39	5.5	11.9	0.171	76.8	생활계	
6	전대	○	○	충남	234	587	16	3.8	13.9	0.145	64.3	축산계	○
7	삼교호	○		충남	163,950	62,787	2,017	3.1	9.4	0.165	57.9	축산계	
8	고남	○		충남	430	1,073	20	5.3	9.8	0.102	57.5	생활계	
9	성산(영암)	○		전남	909	797	31	2.6	12.2	0.365	56.1	생활계	
10	일로2(제2호)	○		전남	560	1,623	41	4.0	10.8	0.073	52.9	축산계	
11	만년			충북	724	619	12	5.1	10.6	0.133	51.9	생활계	
12	용풍	○	○	경기	500	715	25	2.9	10.9	0.103	51.8	축산계	○
13	동명	○		경북	2,660	1,451	33	4.4	11.4	0.106	50.3	축산계	
14	맹동			충북	706	12,270	105	11.7	9.8	0.097	50.1	토지계	
15	덕평			충북	256	898	11	8.5	12.1	0.099	49.7	토지계	
16	고현			경북	3,500	1,036	24	4.3	8.6	0.079	49.5	생활계	
17	신구	○	○	충남	257	404	10	4.2	13.0	0.095	47.4	축산계	○
18	대정(고창)	○		전남	1,128	2,360	54	4.4	9.9	0.086	45.9	생활계	
19	기흥(신갈)	○		경기	5,300	11,630	231	5.0	10.0	0.145	45.5	생활계	○
20	효촌	○	○	경기	303	1,395	43	3.2	8.8	0.062	45.4	축산계	○
21	어천	○		경기	380	894	25	3.5	8.0	0.060	43.2	생활계	

- i) 수질개선사업 기시행지구 제외
- ii) 지자체 관할 저수지 제외

## (2) 후보 저수지 제원, 지역현황 및 수환경변화

선정된 6개 후보저수지에 대한 시설제원과 오염원 현황, 저수율 변화 및 수질환경의 변화를 바탕으로 천적생물 배양장치의 적용방안을 제시하였다.



(표 2.39) 순성저수지 천적생물 적용방안

시설제원	관리주체	유역면적 (ha)	유효저수량 (천 m <sup>3</sup> )	만수면적 (ha)	평균수심 (m)	주 오염원
		당진지사	850	1,357	40	3.4
오염원 현황 및 저수율	<p>충남 당진시 면천면 원동리</p>					
천적생물 적용 대상지						
수질환경 변화						
천적생물 적용 방안	저수용량 (천 m <sup>3</sup> )	Chl-a 농도(mg/m <sup>3</sup> )		적용규모(m <sup>3</sup> )		비고
		평균(3년)	최대(2014)	평균기준	최대기준	
	1,357	92.1	110.7	320	400	





(표 2.40) 전대저수지 천적생물 적용방안

시설제원	관리주체	유역면적 (ha)	유효저수량 (천 m <sup>3</sup> )	만수면적 (ha)	평균수심 (m)	주 오염원
	당진지사	234	587	16	3.8	축산계
오염원 현황 및 저수율	<p>충남 당진시 송악면 전대리</p>					
천적생물 적용 대상지						
수질환경 변화						
천적생물 적용 방안	저수용량 (천 m <sup>3</sup> )	Chl-a 농도(mg/m <sup>3</sup> )		적용규모(m <sup>3</sup> )		비고
		평균(3년)	최대(2014)	평균기준	최대기준	
	587	64.3	82.9	70	80	



(표 2.41) 용풍저수지 천적생물 적용방안

시설제원	관리주체	유역면적 (ha)	유효저수량 (천 m <sup>3</sup> )	만수면적 (ha)	평균수심 (m)	주 오염원
		여주이천시사	500	715	25	2.9
오염원 현황 및 저수율	<p>경기 이천시 장호원읍 송산리</p>					
천적생물 적용 대상지						
수질환경 변화						
천적생물 적용 방안	저수용량 (천 m <sup>3</sup> )	Chl-a 농도(mg/m <sup>3</sup> )		적용규모(m <sup>3</sup> )		비고
		평균(3년)	최대(2014)	평균기준	최대기준	
	715	51.8	83.7	60	180	



(표 2.42) 신구저수지 천적생물 적용방안

시설제원	관리주체	유역면적 (ha)	유효저수량 (천 m <sup>3</sup> )	만수면적 (ha)	평균수심 (m)	주 오염원
	보령지사	257	404	10	4.2	축산계
오염원 현황 및 저수율	<p>충남 보령시 주산면 신구리</p>					
천적생물 적용 대상지						
수질환경 변화						
천적생물 적용 방안	저수용량 (천 m <sup>3</sup> )	Chl-a 농도(mg/m <sup>3</sup> )		적용규모(m <sup>3</sup> )		비고
		평균(3년)	최대(2014)	평균기준	최대기준	
	404	47.4	136.9	20	120	



(표 2.43) 요존저수지 천적생물 적용방안

시설제원	관리주체	유역면적 (ha)	유효저수량 (천 m <sup>3</sup> )	만수면적 (ha)	평균수심 (m)	주 오염원
	파주시사	303	1,395	43	3.2	축산계
오염원 현황 및 저수율	<p>경기 양주시 남면 두곡리</p>					
천적생물 적용 대상지						
수질환경 변화						
천적생물 적용 방안	저수용량 (천 m <sup>3</sup> )	Chl-a 농도(mg/m <sup>3</sup> )		적용규모(m <sup>3</sup> )		비고
		평균(3년)	최대(2014)	평균기준	최대기준	
	1,395	45.4	127.8	70	600	



(표 2.44) 기흥저수지 천적생물 적용방안

시설제원	관리주체	유역면적 (ha)	유역저수량 (천m <sup>3</sup> )	만수면적 (ha)	평균수심 (m)	주 오염원
	평택지사	5,300	11,630	231	5.0	생활계
오염원 현황 및 저수율	<p>경기 용인시 기흥구 고매동</p>					
천적생물 적용 대상지						
수질환경 변화						
천적생물 적용 방안	저수용량 (천m <sup>3</sup> )	Chl-a 농도(mg/m <sup>3</sup> )		적용규모(m <sup>3</sup> )		비고
	11,630	평균(3년)	최대(2014)	평균기준	최대기준	
		45.5	576.8	10	320	침강지 용적 201.6천m <sup>3</sup> 기준

(가) 순성저수지

충남 당진에 위치한 순성저수지는 유역면적 850 ha, 유효저수량 1,357천 m<sup>3</sup>, 만수면적 39.7 ha, 평균수심은 3.4 m이며, 축산계가 주요염원이다.

최근 3년간 Chl-*a*는 19.2~226.4 mg/m<sup>3</sup>(평균 92.1 mg/m<sup>3</sup>)로 녹조 발생 우려가 높았으며, COD는 9.2~19.3 mg/L(평균 12.5mg/L) 범위로 농업용수 기준을 초과하고 있었다. TP는 0.060~0.210(평균 0.120 mg/L)로 농업용수 수질 기준을 초과하여 지속적인 오염원 관리가 요구되며, 동시에 천적생물을 이용한 생태적 수질관리방안의 도입이 필요한 것으로 사료된다.

(나) 전대저수지

충남 당진에 위치한 전대저수지는 유역면적 234ha, 유효저수량 587천 m<sup>3</sup>, 만수면적 15.6 ha, 평균수심은 3.8 m이며, 축산계가 주요염원이다.

최근 3년간 Chl-*a*는 10.0~153.4 mg/m<sup>3</sup>(평균 64.3 mg/m<sup>3</sup>)로 녹조 발생 우려가 높았으며, COD는 8.2~18.9mg/L(평균 13.9mg/L) 범위로 농업용수 기준을 초과하고 있었다. TP는 0.064~0.331(평균 0.145 mg/L)로 농업용수 수질 기준을 초과하여 지속적인 오염원 관리가 요구되며, 동시에 천적생물을 이용한 생태적 수질관리방안이 필요한 것으로 사료된다.

(다) 용풍저수지

경기 이천에 위치한 용풍저수지는 유역면적 500 ha, 유효저수량 715천 m<sup>3</sup>, 만수면적 24.7 ha, 평균수심은 2.9 m이며, 축산계가 주요염원이다.

최근 3년간 Chl-*a*는 25.8~83.7 mg/m<sup>3</sup>(평균 51.8 mg/m<sup>3</sup>)로 녹조 발생 우려가 높았으며, COD는 8.2~15.3 mg/L(평균 10.9mg/L) 범위로 농업용수 기준을 초과하고 있었다. TP는 0.047~0.246(평균 0.103 mg/L)로 농업용수 수질 기준을 초과하여 지속적인 오염원 관리가 요구되며, 동시에 천적생물을 이용한 생태적 수질관리방안이 필요한 것으로 사료된다.

(라) 신구저수지

충남 보령에 위치한 신구저수지는 유역면적 257 ha, 유효저수량 404천 m<sup>3</sup>, 만수면적 9.7 ha, 평균수심은 4.2 m이며, 축산계가 주요염원이다.

최근 3년간 Chl-*a*는 15.3~136.9 mg/m<sup>3</sup>(평균 47.4 mg/m<sup>3</sup>)로 녹조 발생 우려가 높았으며, COD는 6.6~27.2 mg/L(평균 13.0mg/L)범위로 농업용수 기준을 초과하고 있었다. TP는 0.038~0.228(평균 0.095 mg/L)로 농업용수 수질 기준을 만족하였지만 녹조발생의 우려가 높아 천적생물을 이용한 생태적 수질





관리방안이 필요한 것으로 사료된다.

(마) 효촌저수지

경기 양주에 위치한 효촌저수지는 유역면적 303 ha, 유효저수량 1,395천 m<sup>3</sup>, 만수면적은 43 ha, 평균수심은 3.2 m 이며, 축산계가 주요염원이다.

최근 3년간 Chl-*a*는 19.1~127.8 mg/m<sup>3</sup>(평균 45.4 mg/m<sup>3</sup>)로 녹조 발생 우려가 높았으며, COD는 4.8~21.9(평균 8.8mg/L) 범위로 농업용수 기준을 초과하고 있었다. TP는 0.030~0.104(평균 0.062 mg/L)로 농업용수 수질기준을 만족하였지만 녹조발생의 우려가 높아 천적생물을 이용한 생태적 수질관리방안이 필요한 것으로 사료된다.

(바) 기흥저수지

경기 용인에 위치한 기흥저수지는 유역면적 5,300 ha, 유효저수량 11,630천 m<sup>3</sup>, 만수면적 231 ha, 평균수심은 5.0 m 인 대규모 저수지로 생활계가 주요염원이다. 유역은 용인시의 11개 동을 포함하고 있으며 유역의 50% 이상이 200~400 m 이하의 낮은 구릉지로 다양한 토지이용형태를 보이는 등 대부분의 지역이 도시화 되어 생활계 오염이 증가 되고 있고 특히 2014년 10월 Chl-*a* 576.8 mg/m<sup>3</sup>로 급증하여 녹조문제로 인한 민원이 발생 하고 있어 녹조제어 및 수질개선 요구가 높은 저수지이다. 특히, 2014년 환경부에서 국내 1호 중점관리 저수지로 지정되고 정부와 지자체의 관심이 높다.

최근 3년간 Chl-*a*는 5.4~576.8 mg/m<sup>3</sup>(평균 45.5 mg/m<sup>3</sup>)로 녹조 발생 우려가 높았으며, COD는 4.8~21.9(평균 10.0 mg/L) 범위로 농업용수 기준을 초과하고 있었다. TP는 0.113~0.454(평균 0.145 mg/L)로 농업용수 수질기준을 초과하여 지속적인 오염원 관리가 요구되며, 동시에 천적생물을 이용한 생태적 수질관리방안이 필요한 것으로 사료된다.

다. 사업화 방안 : 천적생물과 어류를 이용한 생태적 관리방안

녹조에 취약한 농업용저수지 대부분이 녹조포식자인 천적생물(대형 지각류)의 분포율이 낮으며, 이는 오염으로 인한 유해환경 조성(낮은 DO, 입자성 유기물 등)과 천적생물을 포식하는 소형어류 군집의 대형화 때문이다.

본 기술은 부영양화된 호소생태계에서 소실되어 희소화된 대형 물벼룩, 즉 천적생물을 복원하는 한 방법이다. 천적생물의 대량 투입을 생태교란으로 우려하는 사람들도 있지만 이는 구조 왜곡이 아닌 생태 복원의 개념으로 접근하는 것이 맞다. 즉, 손상되어 비정상화된 생태계를 정상화시키고, 건강성

을 회복하는 것이다.

천적생물 배양장치에서 대량 배양된 천적생물은 저수지에서 발생하는 녹조를 효과적으로 포식 제거하지만, 소형어류의 좋은 먹이자원이다. 이 때문에 대량 살포한 천적생물들의 소실되는 문제가 발생하지만, 어류 포식에 따라 소실된 천적생물은 생태계 먹이망 상위단계의 에너지원으로 작용한다. 다시말해 오염물질 → 식물플랑크톤 → 동물플랑크톤 → 소형어류 → 육식어류로의 물질순환 고리가 형성되는 것이다. 문제는 천적생물을 포식하여 증가된 소형어류 군집의 조절이다. 이를 위해 소형어류를 포식하는 육식어류의 도입이 필요하였다. 육식어류의 도입으로 소형어류의 개체군이 포식되어 조절되고, 또한, 녹조를 포식할 수 있는 대형물벼룩, 즉 천적생물이 호소내에서 군집화하여 식물플랑크톤 현존량을 효과적으로 제어할 수 있게 된다.

농업용저수지에 적용가능한 육식어류로 가물치, 메기, 쏘가리 등이 있으며, 도입개체수는 해당 저수지의 어류조사 결과를 바탕으로 총 출현율의 5% 개체수에 생존율(40~50%)을 감안하여 산정하면 된다. 육식어류의 방류 시기는 산란기인 5~6월, 성어도입이 효과적이나 10 cm이상의 치어를 도입하면 효과적이다. 그러나 육식어류 도입 이후 그대로 방치하면 육식어류의 과밀화로 생태계 균형이 파괴될 수 있다.

따라서, 저수지에 육식어류 도입 후, 지속적으로 공급되는 오염물질과, 생산자, 소비자의 연결고리를 강화시키는 천적생물의 지속적인 방류로 수산자원의 증식속도가 타저수지에 비해 매우 높을 것으로 사료되며, 증가된 수산자원을 계외로 지속적으로 배제할 수 있다면 오염물질을 바로바로 처리하는 것과 같은 효과가 나타난다. 이런 결과로 저수지의 수질이 개선되고 녹조가 예방될 수 있다.

저수지내 잉여 수산자원은 지역주민 협의회로서 각 저수지에 결성되어 있는 수질관리 협의회와 긴밀한 협조를 함으로서 정량 수확할 수 있다. 이와 같은 어업행위의 주목적이 수질개선과 녹조예방에 있음을 인식시키고, 적절한 시기에 적정량의 포획을 할 수 있는 어획 체계를 구축하여야한다. 대상저수지의 어류 자원조사를 통해 잉여 수산자원의 포획계획 수립이 가능하다.

포획된 잉여수산자원은 판매를 통해 수익을 창출하고, 발생 수익은 수질관리 협의회 수질관리 사업비로 전환하여 천적생물 배양장치의 관리, 운영, 치어방류, 운영비 등으로 사용할 수 있도록 한다. 수질관리 주체의 입장에서 별도 비용 투입없이 지속가능한 수질관리를 수행할 수 있는 장점을



가지고 있어 권장할 만하다. 초대저수지의 경우 동절기 2주간의 잉여자원 포획으로 약 187만원 정도의 수익을 창출하여 향후 본격적인 활동 수행시 수질 관리에 충분한 비용이 발생될 수 있을 것으로 기대한다.

이와 같이 천적생물과 육식어류의 도입에 따라 내수면 어업과 연계한 생태적 관리체계의 구축은 수질관리 비용 확보는 물론 생태계 기능 정상화 및 기능강화로 자생적 녹조제어를 유도할 수 있다.



〈그림 2.100〉 사업와방안 : 천적생물과 어류를 이용한 생태적 관리 체계

아울러, 사업화 후보지로 유입되는 오염물질이 크지 않고, 녹조발생 우려가 있는 저수지 중 수질개선 예정지이면서 중점관리 저수지로 지정된 6개 농업용호소를 제안하였다. 효과적인 사업화를 위해 좀 더 면밀한 검토가 필요하며, 저수지별 최적 적용방안을 수립할 필요가 있다. 천적생물 적용기술의 사업화 시에는 대상호소의 물리적 특성에 따른 녹조집적구간을 분석하고, 포식어류에 대한 자원량 조사를 통해 적정 육식어류 도입을 병행하는 것이 효과적이다. 또한, 시설적용이후, 최소 2~3년의 정착기간이 요구되므로 장기간의 녹조제어 효과분석은 물론 생태계 변화 모니터링을 실시하여야하며, 그 결과를 토대로 지속적인 진화발전을 유도하여 최상의 기술로 자리매김할 수 있도록 하여야한다.



## 제3장 결론

- 제1절 실규모 천적생물 배양장치 현장 적용
- 제2절 천적생물 배양장치 운영 및 현장살포
- 제3절 녹조제어 효과 분석 및 연중 활용방안
- 제4절 생물조절 연계방안
- 제5절 농업용저수지 수질개선 연계 및 사업화 방안





## 제3장 결론

### 제1절 실규모 천적생물 배양장치 현장 적용

연구대상지는 저수용량 100만톤이상, 축산과 농경에 의한 오염이 심각하여 녹조발생이 빈번한 전형적인 중규모 농업용저수지로 녹조제어를 위한 표본으로 적합한 초대저수지로 선정하였다.

천적생물 적용기술의 완성을 위해 실규모 수준인 100톤 규모의 천적생물 배양장치를 현장에 설치하고 최적 적용방안을 제시하였다.

천적생물 배양장치 적용 원리는 녹조발생 수역인 초대저수지에서 물을 취수하여 자연분포 천적생물을 선택분리, 배양하여 증식, 방류함으로써 수역의 녹조를 포식 제거하는 하향의 생물조절(Top-down control)이다.

실규모의 천적생물 배양장치는 시설안전성이 높은 육상형 장치로 적용하였으며, 천적생물 장치의 규모는 배양조 기준 10 m<sup>3</sup> 규모 6계열과 20 m<sup>3</sup> 규모 2계열로 설치하였다. 주요공정은 저수지 원수유입(양수), 선택분리(원수분리조), 먹이생물 배양, 천적생물 배양, 현장살포로 이루어진다. 2013년 4월~5월, 지반이 약한 홍만수면 부지에 스테인레스 재질로 경관을 고려한 배모양의 천적생물 배양장치를 설치하였으며, 지반강화를 위한 기초공사를 실시하고 주요장치는 공장제작 후 현장 조립, 제작하여 설치 완료하였다.

2013년 운영결과 문제점을 파악하고, 2014년 기능개선을 위한 보수보강을 실시하였으며, 천적생물 적용효과 증진을 위해 간이침강장치와 Cage, 인공식물섬을 도입하여 효과를 분석하고, 최적 적용방안을 모색하였다.

실규모 배양장치의 기능을 개선한 최적의 적용모델과 설계인자를 제시하고, 적정 설계규모를 제시하였다. 최적모델로 제시한 하우스형의 단층구조 시스템은 온도조절과 포식생물에 대한 유지관리가 용이하다. 최적 설계인자는 선행연구를 통해 분석된 천적생물(물벼룩)의 Chl-*a* 저감량을 기준으로 해당저수지의 Chl-*a* 농도를 목표농도(< 35 mg/m<sup>3</sup>)로 저감시 저수지 용량에 따른 배양장치 적정규모를 계산하였다. 최적 설계인자 규모산정식에 따른 초대저수지의 천적생물 배양장치 적정규모는 유입오염원이 지속적이고, 녹조발생정도가 심해 200톤 규모이상이 필요한 것으로 나타났다.

## 제2절 천적생물 배양장치 운영 및 현장살포

본기술에서 개발한 천적생물 종주는 *Daphnia similoides*, *Daphnia galeata* 및 *Simocephalus ventulus* 3종으로 저수지에서 분리 배양하여 현장에 도입하였고, 2014년의 경우 천적생물 배양장치를 2월부터 가동하여 천적생물 개체군 밀도를 효과적으로 증가시켜 4월부터 살포가 이루어졌다.

천적생물 배양장치 최대 천적생물 개체군 밀도는 878 inds./L의 *D. galeata*로 높게 나타났으며, *S. ventulus*는 534 inds./L, *D. similoides*는 256 inds./L로 증가하는 것으로 나타났다.

증가된 살포량으로 인해 저수지 내에 서식하는 천적생물의 밀도가 현저히 증가하였으나, 여름철의 경우 높은 수온 등의 영향으로 천적생물 배양장치 내 개체군 밀도가 낮게 유지되어, 수온의 조절, 천적생물 포식자 유입방지 등이 필요한 것으로 나타났다.

2013년 6월에 천적생물 배양장치 운영을 시작하여 배양 최적 조건과 배양성능을 분석하여 평가하였다.

2013년에는 6월 배양장치 가동 후 총  $46.9 \times 10^6$ 개체의 지각류가 살포되었으며, 천적생물 안정화와 본격 증가가 이루어진 9월~10월 이후 *D. galeata*가 최대  $10.0 \times 10^6$ 개체/회가 살포되었다.

2014년은 2월부터 배양장치를 가동하여 연간 총  $193.5 \times 10^6$ 개체가 살포되었으며, 1회 살포시 살포개체수는 4월  $1.0 \times 10^6$ 개체/회 이상, 5월  $20.0 \times 10^6$ 개체/회로 2013년 1회 최대 살포량보다 2배 이상 높게 나타나 천적생물 배양장치의 배양성능이 개선됨을 확인하였다.

일주일 간격의 살포기간 중 3~4일 간격으로 배양시설 내의 천적생물 밀도를 조사한 결과, 모든 천적생물은 일주일 간격의 살포로 인한 유출의 영향을 받지 않고 증가하여 개체군 밀도가 회복되는 것으로 나타나, 천적생물 배양시설은 증식된 천적생물을 일주일 간격으로 지속적으로 살포 가능한 것으로 판단되었다.

Cage 적용결과 Cage에서 추가 증식하여 살포된 천적생물 *S. ventulus*의 살포량은 2013.11.11에 최대  $2.1 \times 10^6$ 개체였으며, Cage 내 개체군 증가율은 0.37로 나타나, 일주일간 33배로 증가하여 효과적이었다. 천적생물 은신처로서 인공식물섬 패치 도입 결과 설치하지 않은 지점에 비해 서식밀도가 증가하여 그 효과가 확인되었으며, 도입면적은 50 m<sup>2</sup>가 가장 효율적임을 보였다.



### 제3절 녹조제어 효과 분석 및 연중 활용방안

연구대상지인 초대저수지의 물리, 화학 생물학적 환경 분석 결과는 관개기와 집중강우기에 저수율 변동이 컸으며, COD, TN, TP 등은 모든 시기에 농업용수 기준인 환경기준 IV등급을 초과하고 있었다. 식물플랑크톤 현존량은 평균  $5.7 \times 10^4$  cells/ml로 녹조발생이 빈발하였으며, 녹조 발생 원인종은 *Anabaena* sp., *Oscillatoria* sp., *Microcystis* sp. 등 남조류가 대부분이었다. Chl-*a*는 평균  $146.4 \text{ mg/m}^3$ 로 전체시기의 87% 이상이  $100 \text{ mg/m}^3$ 을 초과하여 계절변화에 상관없이 높은 농도를 보였으며, 과영양상태(Hypereutrophy, TSI > 70)로 나타났다.

천적생물 현장살포에 따라 Chl-*a*는 2013년에 평균 36.6%, 2014년에 평균 65.3%의 제거효과를 보였으며, 제거효율의 향상을 확인하였다. 살포한 천적생물이 수변 습지대에서 높은 서식율을 보였으며, 장기살포에 따라 살포 천적생물인 *D. galeata*와 *S. ventulus*의 분포공간이 확대되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 장기살포에 따른 천적생물 정착효과를 보면, 2013년에는 저수지내에서 *S. ventulus*가 거의 발견되지 않았으나, 2014년에는 저수지 내 천적생물의 개체군 밀도가 큰 폭으로 증가하였으며, 모든 조사 지점에서 분포하는 것으로 확인되어 정착효과가 나타난 것으로 사료되었다.

향후 천적생물 배양장치에 적용할 종은 종주분리 천적생물인 *D. similoides*보다 자연분리 천적생물인 *D. galeata*와 *S. ventulus*의 개체군 밀도가 대부분 계절 동안 높게 나타났으며 살포 후에도 초대저수지 내에서 생존율이 높은 것으로 나타났다. 따라서 자연분리 천적생물의 우선적 활용이 중요할 것으로 사료된다.

## 제4절 생물조절 연계방안

2013년 6월 이후 천적생물과 육식어류를 도입하고 초대저수지의 생태계 먹이구조 변화와 생물조절 효과를 분석하였다.

초대저수지의 어류상은 천적생물 주요 포식자인 잉어과 어류가 극우점하여 이들 개체군을 조절하기 위해 최상위포식자로 메기 치어를 투입하는 생물조절 연계방안을 도입하였다.

메기치어 투입 후 16개월(486일) 경과 후 평균 980 g이 증가한 성어가 관찰되었으며, 안정동위원소 분석 결과, 투입된 메기는 피라미와 치리를 섭식하는 것으로 나타나, 천적생물 투입과 육식 어류를 이용한 녹조제어가 효율적으로 이루어 질것으로 기대되었다.

안정동위원소 분석결과, 살포 천적생물인 *S. ventulus*는 발생한 녹조를 주로 섭식하는 것으로 나타나 녹조발생수역의 녹조저감과 물질순환에 있어서 중요한 천적생물로 분석되었다.

호소의 활발한 물질순환으로 과잉 성장하는 육식어류(메기)는 지역주민으로 구성되는 수질관리 협의체가 중심되어 유입 오염총량에 해당되는 잉어 바이오매스를 포획제거하면서 완성되며, 발생수익은 수질관리 비용으로 환원하여 지속가능한 호소관리체계가 완성되었다.

생태계 먹이구조를 개선하기 위한 본 기술은 최소 2~3년의 적용기간이 필요하지만, “식물플랑크톤-천적생물-어류”로 안정화되는 먹이구조 정상화로 자생적 제어가 가능할 것으로 사료된다.

100톤 규모의 실규모 천적생물 배양장치를 2013년 6월 초대저수지 홍수면 부지에 설치하여 1년 4개월 동안 운영한 결과, 천적생물 배양성능 및 녹조제어, 호내 정착효과가 관찰되고 있으며, 생태적 관리방안인 만큼 최소 2~3년의 안정화기간을 거친 후 자생적 제어가 가능할 것으로 기대한다.





## 제5절 농업용저수지 수질개선 연계 및 사업화방안

천적생물 적용기술의 수질개선연계방안을 모색한 결과 녹조제어와 함께 COD, TP의 제거효율도 높게 나타나 수질개선사업의 침강지내, 인공습지 후반부 등의 적용으로 시너지 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료되었다.

천적생물 사업 적용 요건은 천적생물 배양장치 규모와 이에 따른 Chl-*a* 농도 저감량으로 보았을 때, 100톤 배양장치 설치의 경우 저수지 용량 75만톤 이하, Chl-*a* 농도 100 mg/m<sup>3</sup>이하의 저수지에 효과적으로 적용 가능할 것으로 판단되며 천적생물 안정화를 고려하면 1) 저수지 어류 조성량과 생체량, 2) 저수지 수심 수초대와 같은 천적생물 서식조건, 3) 저수지 내 천적생물 존재 여부가 중요한 조건으로 판단된다.

천적생물 적용기술의 사업화 방안을 위해 녹조발생에 취약한 농업용수 수질 측정망 저수지를 18개소를 선별하여 수환경, 동식물플랑크톤 조성 등에 근거하여 타당성을 분석한 결과 TP농도가 수질기준을 만족함에도 Chl-*a* 농도가 높은 저수지를 적용가능 지구로 판단하여 제안하였으며, 동식물플랑크톤 분포특성을 근거로 사업화 규모 및 방안을 제시하였다.

최근 3년간(2012~2014) 농업용수 수질측정망 data의 Chl-*a*, COD, TP 분석결과와 수질개선사업지구, 중점관리저수지 지정여부 등을 종합적으로 검토하여 천적생물의 적용 가능성이 높은 사업화 지구 6개 저수지를 선별, 적용방안을 제시하였다.





## 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

연구개발 목표	연구개발 목표 달성 실적	달성도	대외기여도
○천적생물 배양 장치 기능개선	○실규모 천적생물 배양장치 문제점을 진단하고 해결방안을 모색함	100 %	천적생물 배양장치의 기능개선을 통해 최적화 방안 제시
○배양장치 운영 및 현장살포	○실규모 천적생물 배양장치의 최적 운영 및 대량 살포 방안을 모색하고, 효과향상을 위한 보조장치 도입방안 제시함	100 %	배양장치의 효율적 운영 및 살포방안제시로 녹조 제어 성공 추진, 효율화를 통한 비용절감에 기여
○녹조제어 효과 분석 및 연중 활용방안 제시	○천적생물 현장살포에 따른 저수지의 녹조제어효과를 제시하였고, 기능향상을 위한 침강장치와 Cage, 인공식물섬의 적용효과, 녹조 사전예방과 방제를 위한 연중활용 방안을 제시함	100 %	천적생물 적용기술의 실용화를 위한 실무자료 제공
○녹조제어 효과향상 및 안정성확보를 위한 생물조절 연계방안	○천적생물 포식어류의 감소를 위해 육식어류를 도입하고, 생태계 먹이구조 변화를 분석하고, 지역 주민 협의체를 활용한 지속가능한 생물조절 시행방안을 제시함	100 %	농업용저수지의 효율적 관리를 위한 생태관리 방안 실무 기초자료 제공
○실규모 천적 생물 배양 장치의 최적 설계/관리 모델 개발	○천적생물 배양장치의 최적 모델과 설계/관리방안을 제시하고, 최적 규모 산정 등 설계인자를 제시함	100 %	천적생물 적용기술의 실용화를 위한 실무자료 제공
○수질개선 연계 및 사업화 방안 제시	○수질개선사업과의 연계방안을 제시하고 적용성이 높은 후보저수지를 제안하여 향후 사업화 방안을 제시함	100 %	수질개선 사업의 효율화를 위한 정책 방안 제공





## 연구개발결과의 활용계획

연구과제명	농업용저수지 녹조방지를 위한 친적생물 적용기술 실규모 실용화연구(최종)		
연구기간	2013. 1.~2014. 12.	연구방법	공동연구, 협동연구
연구비	총연구비 : 299백만원 (공동 : 62.6백만원) -'14년도 : 149백만원 (공동 : 22.6백만원, 협동 : 현물투자)		
연구책임자	남귀숙		
활용부서 및 과제담당관	농림축산식품부 (박봉수 사무관)		
기대효과 활용계획	<p>■ 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 기술적 측면                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 녹조가 심각한 저수지의 단절된 생태계 구조를 개선하여 녹조를 제어하는 자연생태적이며, 건강한 기술 개발</li> <li>- 녹조발생시 효과적 녹조방제는 물론 사전예방이 가능하고 지속가능한 기술 개발</li> <li>- 수질개선사업과 연계하여 생태적 관리기술 개발</li> </ul> </li> <li>○ 경제·산업적 측면                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 녹조발생으로 수산양식자원에 미치는 많은 경제적 피해를 사전 예방할 수 있으며, 또한 용수이수목적에 따른 추가 정수처리 비용 절감 등 경제적 이득이 높음</li> <li>- 기존의 고가 약품비 및 기기설치비를 대체하여 비용절감 효과가 매우 크며, 유지관리비 등 절감요인 발생</li> <li>- 생태건강성 증진은 물론 어족자원을 풍부하게 하는 녹조 제어기술의 적용으로 건강한 호소관리 및 생태적가치 상승</li> </ul> </li> </ul> <p>■ 활용계획</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 농업용호소의 녹조방지 및 수질개선기술로 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 국토부</li> <li>○ 지자체 관리 호소 및 정체수역의 수질개선사업에 활용</li> </ul>		
보고서 발간부수	80부		
배부계획 (배부처)	농림축산식품부 8부, 평가위원 3부, 공사 20부, 공공기관 10부, 대학 14부, 도서관 및 연구기관 10부, 공동연구기관 3부, 협동연구기관 3부, 보관본 10부		



# 참고문헌









## » 참고문헌 «

- 고명훈, 박종영, 이용주. 2008. 옥정호에 도입된 배스 *Micropterus salmoides*의 식성 및 어류상에 미치는 영향. 한국어류학회지. 20(1): 36-44.
- 공건화, 이재훈, 안광국. 2009. 우리나라 주요 인공호의 투명도에 대한 수질 및 수중 부유물 영향 분석. 한국하천호수학회지. 42(2): 2231-231.
- 공동수, 양상용, 황동진, 류홍일, 류재근. 1994. 대형생물에 의한 수질개선 기법. 환경생물학회 춘계심포지움. 15-36.
- 국토해양부. 2010. 포식성 천적생물을 이용한 녹조방지기술 개발(1). 국토해양부.
- 국토해양부. 2011. 포식성 천적생물을 이용한 녹조방지 기술개발(2). 국토해양부.
- 김동욱. 2012. 대청호 조류문제 해법. 워터저널. 96: 22-24.
- 김병석, 박연기, 박경훈, 신진섭, 김진화, 윤성명, 안용준. 2006. 실내사육조건에서 한국산 *Daphnia* 중간 life cycle 비교. 농약과학회지. 10: 196-200.
- 김익수, 박종영. 2002. 한국의 민물고기. 교학사.
- 김치홍, 이완옥, 이종관, 홍관의. 2005. 청평호의 어류군집. 한국어류학회지. 17: 123-130.
- 김호섭, 황순진. 2004. 육수학적 특성에 따른 국내 저수지의 부영양화 유형분석-엽록소 *a*와 수심을 중심으로. 한국육수학회지. 37(2): 213-226.
- 남귀숙, 송영희, 이의행, 배요섭, 홍대벽. 2011. 포식성 천적생물을 이용한 녹조방지 기술개발. 물과미래. 44: 49-56.
- 남귀숙, 이종택, 배요섭, 엄한용, 장규상. 2013. 농업용 호소의 장기간 조류발생과 수환경 특성. 한국관개배수논문집. 20(2): 166-179.
- 남명모. 1996. 한국산 담수어류의 현황. '96 한국육수학회 심포지움. 31-45.

- 농림축산식품부. 2003. 농업환경오염 복원기술 개발.
- 농림축산식품부. 2003. 부착조류시스템을 이용한 농촌유역 수질개선 기법 개발.
- 농림축산식품부. 2004. 농업용수 수질개선 시험연구(최종).
- 농림축산식품부. 2004. 농업용수 수질개선을 위한 인공습지 설계관리 요령.
- 농림축산식품부. 2005. 농업용저수지의 녹조제어 기법개발.
- 농림축산식품부. 2010. 2010 농업용수 수질측정망조사 보고서.
- 농림축산식품부. 2010. 농업용수원의 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 개발(I).
- 농림축산식품부. 2011. 2011 농업용수 수질측정망조사 보고서.
- 농림축산식품부. 2011. 농업용수원의 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 개발(II).
- 농림축산식품부. 2012. 2012 농업용수 수질측정망조사 보고서.
- 농림축산식품부. 2012. 농업용수원의 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 개발(최종).
- 농림축산식품부. 2013. 농업용저수지 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 실규모 실용화연구(I).
- 수자원연구소. 2000. 댐 저수지의 조류사진집. 아카데미서적.
- 신현선, 김범철. 2012. 호수조사법. 수생태복원사업단.
- 안광국, 김재경, 이상재. 2008. 영양염류, 투명도 및 엽록소를 이용한 인공호의 영양상태, 경험적 모델 분석 및 변수들 간의 상호관계. 한국환경생물학회지. 26(3): 252-263.
- 안광국, 신인철. 2005. 산간 계류성 하천의 계절적 수질변동에 대한 몬순강우의 영향. 한국육수학회지. 38: 389-394.
- 이완옥, 노세윤. 2006. 특징으로 보는 한반도 민물고기. 지성사.
- 전상린. 1980. 한국산 담수어의 분포에 관하여. 중앙대박사학위논문. 서울.
- 정민민, 김형신, 노섬. 1999. 기수산 물벼룩 *Diaphanosoma celebensis*의 안정 배양을 위한 배양 용기의 크기 선택. 한국수산과학회지. 32: 466-469.
- 정용. 1993. 한국담수조류도감. 아카데미서적.



- 최기철, 이원규. 1994. 우리가 정말 알아야 할 우리 민물고기 백 가지. 현암사.
- 최성현, 임병진. 2003. 배양조건에 따른 물벼룩의 개체생산 특성. 한국하천호수학회지. 36: 208-214.
- 한국농어촌공사. 2013. 녹조, 손상된 생태기능 회복으로 해결. RRI 포커스 14.
- 한정호, 이의행, 안광국. 2009. 마산저수지의 어류 종조성 및 생태 지표 특성 분석. 한국하천호수학회지. 42(2): 212-220
- 환경부 국립환경과학원. 2008. 수생태계 건강성 조사 및 평가. 환경부.
- 환경부. 2011. 수질오염공정시험기준. 환경부고시 제2011-103호.
- Alonso, C., V. Rocco, P. Barriga and M.A. Battini. 2004. Surface avoidance by freshwater zooplankton: field evidence on the role of ultraviolet radiation. *Limnology and Oceanography*. 49: 225-232.
- An, K.G. 2000. Regulating bluegreen dominance in a reservoir influenced by Asian monsoon. *Hydrobiol.* 432: 37-48.
- Arndt, H. and B. Nixdorf. 1991. Spring clear-water phase in a eutrophic lake: control by herbivorous zooplankton enhanced by grazing on components of the microbial web. *Verhandlungen der Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*. 24: 879-883.
- Benndorf, J., H. Kneschke, K. Kossatz and W. Penz. 1984. Manipulation of the pelagic food web by stocking with predacious fishes. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie*. 69: 407-428.
- Benndorf, J., J. Kranich, T. Mehner and A. Wagner. 2001. Temperature impact on the midsummer decline of *Daphnia galeata*: an analysis of long-term data from the biomanipulated Bautzen Reservoir(Germany). *Freshwater Biology*. 46: 199-211.
- Burns, C.W. 1969. Relation between filtering rate, temperature, and body size in four species of *Daphnia*. *Limnol. Oceanogr* 14: 693-700.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol.*



- Oceanogr. 22: 361-369.
- Carlson, R.E. 1991. Expanding the trophic state concept to identify non-nutrient limited lakes and reservoirs. Enhancing the States's Lake Management Programs. 59-71.
- Chang, K.H. and T. Hanazato. 2003. Vulnerability of cladoceran species to predation by the copepod *Mesocyclops leuckarti*: laboratory observations on the behavioural interactions between predator and prey. Freshwat. Biol. 48: 476-484.
- Doi, H., K.H. Chang, T. ando, I. Ninomiya, H. Imai and S. Nakano. 2009. Resource availability and ecosystem size predict food-chain length in pond ecosystems. Oikos 118: 138-144.
- Doi, H., K.H. Chang, Y. Obayashi, M. Yoshihara, M. Shime, T. Yamamoto, T. Nishibe 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.
- Fugimoto, N. and R. Sudo. 1997. Nutrient-limited growth of *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium tenue* and competition under various N : P supply ratios and temperatures. Limnol. Oceanogr. 42: 250-256.
- Gilbert, J.J. 1985. Competition between rotifers and *Daphnia*. Ecology. 66: 1943-1950.
- Gillooly, J.F. 2000. Effect of body size and temperature on generation time in zooplankton. Journal of Plankton Research. 22: 241-251.
- Gophen, M., 1990. Biomanipulation: retrospective and future development. Hydrobiologia. 200/201: 1-11.
- Grey, J. and R.I. Jones. 2001. Seasonal changes in the importance of the source of organic matter to the diet of zooplankton in Loch Ness, as indicated by stable isotope analysis. Limnol. Oceanogr. 46: 505-513.
- Ha, J.Y., M. Saneyoshi, H.D. Park, H. Toda, S. Kitano, T. Homma,

- T. Shiina, Y. Moriyama, K.H. Chang and T. Hanazato. 2013. Lake restoration by biomanipulation using piscivore and *Daphnia* stocking: results of the biomanipulation in Japan. *Limnology*. 14: 19-30
- Havens, K.E. 2000. Using Trophic Index (TSI) values to draw inferences regarding phytoplankton limiting factors and seston composition from routine water quality monitoring data. *Korean J. Limnol.* 33(3): 187-196.
- Hrbacek, J., M. Dvorakova, V. Korinek and L. Prochazkova. 1961. Demonstration of the effect of the fish-stock on the species composition of zooplankton and the intensity of metabolism of whole plankton association. *Verh. Int. Cver. Limnol.* 14: 192-195.
- Jeon, J, C.G. Yoon, J.H. Ham, H.I. Kim and S.J. Hwang. 2002. Effects of Physical Parameters on Water Quality in Agricultural Reservoirs. *Korean J. Limnol.* 35(1): 28-35.
- Kim, H.S. and S.J. Hwang. 2004. Effects of nutrients and N/P ratio Stoichiometry on phytoplankton growth in an eutrophic reservoir. *Korean J. Limnol.* 37(1): 36-46.
- Kim, H.W., G.H. La, K.S. Jeong, J.H. Park, Y.J. Huh, S.D. Kim, J.E. Na, M.H. Jung and H.Y. Lee. 2010. Assessing the plankton dynamics in lakes and reservoirs ecosystem in the southwestern parts of Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 28(2): 86-94.
- 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.
- Kwon, O.K., J.W. Park, G.Y. Chung, J.E. Lee and E.W. Seo. 2011. Effect of environmental factors on the growth of *Microcystis aeruginosa*(cyanobacteria) in agricultural reservoirs. *J. Life Sci.* 21(8): 1183-1189.
- Lampert, W. 1981. Inhibitory and toxic effects of blue-green algae



- on *Daphnia*. Int. Revue ges. Hydrobiol. Hydrogr. 66(3): 285-298.
- Lee, E.H., H.M. Kim, J.K. Lee, M.S. Byeon and K.G. An. 2008. Fish Fauna and Guild Compositions in Geum River Watershed. Korean J. Limnol. 41(4): 490-498.
- McQueen, D.J. and V.A. Story. 1986. Impact of hypolimnetic aeration on zooplankton and phytoplankton populations. Environmental technology letters. 7: 31-44.
- Nelson, K. 1994. Long-term retention of memory for preverbal experience: Evidence and implications. Memory. 2: 467-475.
- O'Brien, W.J. 1979. The predator-prey interaction of planktivorous fish and zooplankton. American Scientist. 67: 572-581.
- Obertegger, U. and M. Manca. 2011. Response of rotifer functional groups to changing trophic state and crustacean community. J. Limnol. 70: 231-238.
- Opuszynski, K. 1978. The influence of the silver crap (*Hypophthalmichthys molitrix* Val.) on eutrophication of the environment of crap ponds, Part VII Recapitulation. Roczniki Nauk Rolniczych H. 94(2): 127-151.
- Pagano, M. 2008. Feeding of tropical cladocerans (*Moina micrura*, *Diaphanosoma excisum*) and rotifer (*Brachionus calyciflorus*) on natural phytoplankton: effect of phytoplankton size - structure J. Plank. Res. 30: 401-414.
- Parnell, A.C., R. Inger, S. Bearhop and A.L. Jackson. 2010. Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation. PLoSOne e9672.
- Pinto-Coelho, R., B. Pinel-Alloul, G. Methot and K.E. Havens. 2011. Crustacean zooplankton in lakes and reservoirs of temperate and tropical regions: variation with trophic status. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 62: 348-361.
- Polis and Strong. 1996. Food web Complexity and Community

- Dynamics. The American Naturalist. 147(5): 813-846.
- Rigler, F.H. 1982. The relation between fisheries management and limnology. Trans. am. Fish. Soc. III: 121-132.
- Shapiro, J. 1975. Biomanipulation : the Next phase - making it stable. Hydrobiologia. 200/201: 13-27.
- Shapiro, J. and D.I. Wright. 1984. Lake restoration by biomanipulation :Round Lake, Minnestota, the first two years. Freshwater. Biol. 14: 371-383.
- Smith, V.H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. Science. 221: 669-671.
- Sommer, U., F. Sommer, B. Santer, E. Zollner, K. Jurgens, C. Jamieson, M. Boersma 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.
- Syvaranta, J., H. Hamalainen, T. Keskinene, J. Karjalainen and R.I. Jones. 2011. Itered energy flow pathways in a lake ecosystem following manipulation of fish community structure. Aquatic Science. 73: 79-89.
- Takamura, N and M.M. Watanabe. 1987. Seasonal changes in the biomass of four species of *Microcystis* in lake Kasumigaura. Jpn. J. Limnol. 48: 139-144.
- Takamura, N. 1988. Ecology of water bloom of blue-green algae,

- with special reference to *Microcystis*. Jpn. J. Phycology. 36: 65-79.
- Theiss, J, L. Zielinski and H. Lang. 1990. Biomanipulation by introduction of herbivorous zooplankton. A helpful shock for eutrophic lakes, Hydrobiologia. 200/201: 59-68.
- US EPA. 1991. Technical support document for water quality-based toxic control. EPA 505-2-90-011. U.S. EPA. Office of water, Washington, DC. USA.
- 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.
- Weisse, T. 2007. The microbial food web and its sensitivity to eutrophication and contaminant enrichment: a cross-system overview. Int. Rev. Hydrobiol. 76: 327-337.
- Yoon C.G., S.B. Lee, K.W. Jung and J.Y. Han. 2007. Analysis of relationship between water quality parameter in agricultural irrigation reservoir and land uses of associated watersheds. Korean J. Limnol. 40(1): 31-39.
- Yoshioka, S., T. Yabuki, T. Sagiya, T. Tada, M. Matsu'ura. 1994. Interplate coupling in the Kanto district, central Japan, deduced from geodetic data inversion and its tectonic implications. Tectonophysics. 229: 181-200.



## 연구 참여자

목 차	소 속	참여자	비 고
1장 서론	농어촌연구원 경희대학교	남귀숙 장광현	
2장 본론	농어촌연구원 농어촌연구원 농어촌연구원 농어촌연구원 농어촌연구원 농어촌연구원 농어촌연구원 농어촌연구원 경희대학교 경희대학교 경희대학교 경희대학교 (주)아쌈 (주)아쌈 (주)아쌈 (주)아쌈	남귀숙 류연수 김진욱 박진경 이의행 신재훈 김미리내 주혜진 장광현 서동일 고순미 Nakano Sho 권오병 박선구 김민규 권동민	
3장 결론	농어촌연구원 농어촌연구원 경희대학교	홍대벽 남귀숙 장광현	



## 주 의

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

### ■ 발 행 처

연구과제명 : 농업용저수지 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 실규모 실용화연구(최종)	
발 행 일	2014. 12
발 행 인	박 정 환
발 행 처	한국농어촌공사 농어촌연구원
주 소	경기도 안산시 상록구 해안로 870번지 전 화 031 - 400 - 1700 FAX 031 - 409 - 6055
■ 이 책의 내용을 무단 전재하거나 복사하면 법에 저촉됩니다. 단, 이 책의 출처를 명시하면 인용이 가능합니다.	