

포식성 천적생물을 이용한 녹조방지 기술개발



남 귀 속 |
한국농어촌공사 농어촌연구원
물환경연구팀 주임연구원
leo612@ekr.or.kr



송 영 희 |
한국농어촌공사 농어촌연구원
물환경연구팀 연구원
songyh@ekr.or.kr



이 의 행 |
한국농어촌공사 농어촌연구원
물환경연구팀 연구원
end220@ekr.or.kr



배 요 섭 |
새만금사업단
환경관리팀 계장
paeyo@ekr.or.kr



홍 대 벽 |
한국농어촌공사 농어촌연구원
물환경연구팀 팀장
db_hong@ekr.or.kr

1. 농업용수원의 녹조발생 현황

현재 국내에서 농업용수원으로 이용되고 있는 농업용저수지와 담수호의 수는 18,000여개에 이르고 있으며, 수리시설로써 관리되고 있지 못하는 작은 소(沼)를 포함하면 그 수는 헤아리기가 어렵다.

이들 농업용 저수지와 담수호는 대표적인 정체수역으로 유역에서 유입되는 오염물질과 장기간의 물질 퇴적으로 인한 퇴적층의 증가로 인해 영양상태가 증가하여 녹조발생 피해가 빈발하고 있다.

농림수산식품부와 한국농어촌공사는 이들 농업용저수지와 담수호 대부분 시설에 대한 시설관리주체(일부는 환경부, 지자체)로서 2년마다 17,000여 개소에 대한 수질 일제조사를 시행하고 있으며, 중규모이상의 주요 농업용수원 825개소에 대해 매년 4회이상의 수질측정망 조사를 시행하며 수질현황과 관리에 필요한 정책 추진 및 조치를 취하고 있다.

2007년~2009년 3개년 동안 실시된 농업용수 수질 측정망 조사의 농업용저수지 및 담수호 826개소의 수질 조사결과(총 1,840회)를 분석해 보면(농림수산식품부, 2007, 2008, 2009), 10.4%에 달하는 192회의 조사에서 농업용수 수질기준인 수질 및 수생태 기준 IV등급에 해당하는 35 mg/m³를 초과하고 있었다. 특히, 녹조발생을 나타내는 조류대 발생 수준인 100 mg/m³이상의 농도를 나타내는 경

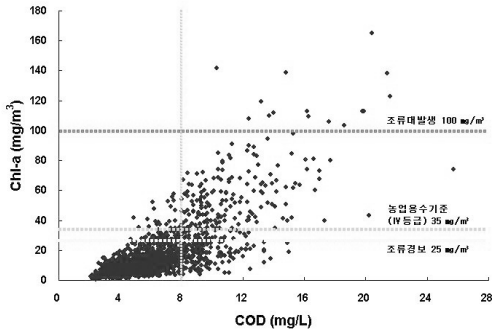


그림 1. 농업용수 수질측정망 지구의 COD와 Chl-a의 분포특성(2007~2009)

우가 15회로 0.8%를 차지하고 있었는데, 이는 분기별로 이루어지는 본 조사보다 실제 각 농업용저수지에서 발생하는 녹조 발생 현황은 훨씬 높을 것으로 사료된다(그림 1).

2009년의 측정망 조사결과를 바탕으로 Vollenweider의 총인과 총질소를 기준에 따라 분류한 부양화도는 전체 시설 중 중부영양호 이상의 저수지가 38.5%로 부영양화단계에 접어들고 있는 수준으로 녹조발생에 취약한 중부영양상태 이상의 저수지에 대한 적극적인 녹조관리 기술 개발이 필요한 실정으로 나타났다.

지역별로는 2009년 Chl-a(엽록소-a) 기준(35 mg/m³) 초과시설 총 61개소 (전체 지구수의 7.4%) 중 충청남도가 28개소로 가장 많고, 경기도가 10개소의 순으로 나타나 인구활동이 높고, 유로남시, 수상스키 등의 레저 활동이 많은 경기도, 충청남도 일대의 녹조 문제가 심각하게 나타나는 것으로 판단되었다(그림 2).

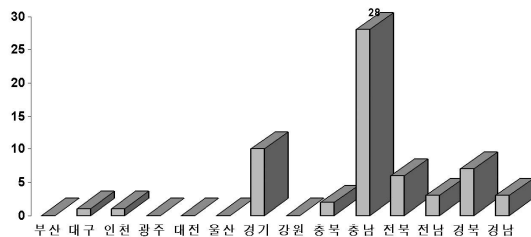


그림 2. 농업용수 수질측정망 지구의 Chl-a 초과시설 (총61개소)의 지역별 분포특성(2009)

2. 녹조제어 기술 개발 현황

지금까지 저수지와 담수호의 수질관리와 수질개선을 위해 정부와 지자체를 중심으로 한 다양한 노력들이 이루어지고 있으나, 저수지와 담수호의 녹조 원인생물과 발생현황에 전반적인 이해가 부족하고, 녹조제어를 위한 효과적인 기술개발이 이루어지지 않아 적극적인 대처가 어려운 현실에 처해있다. 기존에 녹조방지를 위한 물리, 화학적, 생물학적 기술개발이 진행되어 왔으나 농업용저수지와 담수호 수역에 직접 적용했을 때 뚜렷한 성공사례가 없으며, 지금도 중소기업에서 개발한 각종 녹조방지 화학물질을 적용하고 있는 사례가 빈번하지만, 생태건강성 저해 등 2차 오염 피해가 상당히 우려되는 상황이다.

현재 농업용저수지에 적용가능한 녹조관리기술의 적용효과와 조건은 표 1과 같으며, 수질오염이 심각한 농업용저수지의 단기수질대책으로 적용가능한 공법과 수질개선 특성을 표 2에 정리하였다.

대표적으로 사용되고 있는 물리적 방법으로는 퇴적물 준설 및 피복, 수위저하 및 희석, 선택방류, 인공 물순환, 폭기 및 층위파괴, 유로변경, 전기적 처리 등이 있으며, 이중, 퇴적물 준설과 인공순환은 현재 적용되고 있는 반면 나머지 공법들은 실효성이 입증되고 있지 못하고 있다.

화학적 공법중에서는 응집부상, 화학제재 사용, 인분활성화, 천연물질 등의 사용이 검토되고 있으나, 국내 기후 여건상 강우현상과 연계되어 적용당시 단기적 효과밖에 기대할 수 없다. 특히, 이러한 방법들은 직접적이고 효과가 뚜렷하지만 비용이 많이 들고 일시적이며, 다른 생물에 대한 독성(Lee, 1980) 또는 화학물질에 의한 2차적인 환경오염(Sevrin-Reyssac and Pletikosic, 1990)과 같은 부정적 요소를 가지고 있다.

이러한 점에서 최근 세계적으로 부각되고 있는 생태친화적 방법으로서의 생물학적 공법의 도입은 매우 시기적절하다.

표 1. 농업용저수지에 적용가능한 녹조관리 기술의 사례와 조건

처리방법	단기간효과	장기간효과	비용	조건
준설	E	E	H	·수심이 얇고 내부부하가 큰 저수지
수위저하	G	F	L	·수량의 유지가 용이하고, 수생식물의 피복도가 높아 수질에 문제가 되는 저수지
퇴적물피복	E	F	H	·내부부하가 큰 저수지 ·비용이 많이 들고 유지보수가 어려워 적용이 어려움
생물조절 (Biomaniplulation)	G-P	E	L	·단독적용보다는 다른공법과의 연계적용시 효과 상승 ·생물서식처의 확보와 동시에 고려되어야함 ·생태계구조와 기능에 대한 사전조사가 선행되어야함 ·경제성이 높고 친환경적 ·물리·화학적 방법에 비해 효과 발현에 장시간 필요
생물수확	E	F	H	·비교적 소규모의 부영양하고 외부부하가 적은 저수지에 적용가능함 ·수생식물은 수질에 미치는 긍정적인 효과와 부정적인 효과에 대한 검토 후에 수확시기 등을 결정하여 적용 ·수확된 생물의 처리방법이 수립되어야 함
인분활성화	E	F	L	·내부부하가 큰 부영양 저수지에 적용가능 ·국내기후 여건상 적어 어려움
유로변경	E	F	H	·외부부하가 크고, 유로거리가 짧은 저수지에 적용가능
희석	E	E	H	·희석수로 사용가능한 수원이 인근에 위치한 경우 적용가능
폭기	P	F	H	·수심이 깊고 규모가 작은 저수지에 적용가능 ·심층폭기는 심층무산소층이 형성되고 내부부하가 큰 저수지에 적용가능 ·전층폭기는 내부부하보다는 외부부하가 크고 수심이 깊은 저수지에 적용가능
응집부상	E	P-G	H	·부영양화와 녹조현상 정도가 심한 저수지에 적용가능 ·단기간내에 큰 효과를 기대하는데 유리 ·효과지속성은 낮음
선택적방류	E	E	H	·내부부하가 큰 저수지에 적용가능하며 도수관 설치가 용이한 저수지에 설치가능
미생물처리	E	P-G	H	·유입되는 유기물 부하가 큰 저수지에 적용가능 ·부영양화와 녹조현상 정도가 심한 저수지에 적용가능
천연물질처리	E	P-G	H	·단기간내에 큰 효과를 기대하는데 유리 ·효과지속성은 낮음
물리화학처리	E	P-G	L	·부영양화와 녹조현상 정도가 심한 저수지에 적용가능 ·단기간내에 큰 효과를 기대하는데 유리 ·효과지속성은 낮음
전기적처리	E	P-G	H	·부영양화와 녹조현상 정도가 심한 저수지에 적용가능 ·단기간내에 큰 효과를 기대하는데 유리 ·효과지속성은 낮음

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

(자료) 농림수산식품부, 생물조절(먹이연쇄)을 통한 농업용저수지 수질관리 기법개발(2009)

생물학적 공법으로는 생물조절(Biomaniplulation)가 있다. 범주에 포함되는 인공습지, 인공부도, 초어도입, 동물플랑크톤 도입, 패류, 미생물제재 등으로 인공습지, 인공부도 정도만 저수지 규모에서 널리 이용되고 있는 실정으로 아직 대부분은 아직까지 소규모의 폐쇄성 수역 (하수정화처리장 방류수, 골프장 연못 등)에 한정되어 적용되고 있다.

따라서 지금까지 연구된 녹조제어기술을 종합 분석하여 옥석을 가리고, 저수지 및 담수호의 녹조발생을 효과적으로 제어할 수 있으며, 생태적으로 안전한 생물학적 제어기술을 개발하고 범용화할 필요

3. 포식성 천적생물을 이용한 녹조방지기술

우리 연구원에서는 생태계 먹이망중 녹조생물인 식물플랑크톤을 포식하는 동물플랑크톤에 초점을 맞추어 선행연구를 통해 입증된 해수호인 새만금호의 적조생물 포식형 동물플랑크톤 배양장치를 저수지 및 담수호의 녹조방지를 위한 기술로 변형하고 그 기능을 향상시켜 녹조방지를 위한 생물학적 제

어기술로 개발하여 실용화하고자 하였다.

본 연구는 생태친화적 관점에서 농업용저수지와 담수호의 정체수역에서 효율적인 녹조관리를 위한 생물 및 수생태에 기반을 둔 환경친화적 조절기법을 개발함을 목적으로 하며, 이를 달성하기 위해 하천 정체수역의 생태계 생물자원의 파악과 먹이연쇄의 구조와 기능의 이해를 바탕으로 생물조절작용의 기능성이 높은 미소, 유용생물들을 선별, 확보하여 이들의 안정적 성장과 증식을 위한 서식처를 개발하고 호소 수계에서 유효한 효과를 보일 수 있는 현장적용 연구를 수행하고자 한다.

1) 연구의 기본개념

본 연구는 저수지와 담수호와 같은 호소 생태계 내에서 자연적으로 이루어지는 먹이연쇄(Food web)를 이용한 것으로 물속의 영양물질은 1차생산자인 식물플랑크톤(phytoplankton)이 영양원으로 이용하여 성장하고, 이 식물플랑크톤은 동물플랑크톤(zooplankton)의 주요 먹이원이 된다. 이 동물플랑크톤은 크고 작은 물고기의 먹이원이 되어 생태계 순환이 이루어지는데 수질관리의 주요목적이

식물플랑크톤을 억제하는데 있으므로 이를 포식하는 동물플랑크톤의 양을 키워 식물플랑크톤 양을 줄이는 데 중점을 두고 있다.

생태계내에는 녹조 원인생물인 식물플랑크톤의 자연적인 포식자 또는 경쟁자(천적생물)이 항상 공존하고 있으며, 현장에서 이들을 분리하여 포식자의 개체수를 선택적으로 증가시키고, 녹조 원인생물과 천적생물은 거의 유사한 환경을 공유하여 생태계내 평형관계를 유지하려 한다. 따라서, 식물플랑크톤이 과도하게 번식할 수 있는 불안정한 조건의 부영양화수역에 인위적으로 천적생물의 개체수를 증가시키면 이것이 녹조 식물플랑크톤의 초기 성장을 억제하여 녹조를 제어하는 기본 원리가 된다.

본연구의 과제명에 포함된 용어인 “포식성 천적생물”이란 식물플랑크톤을 포식하는 포식자로서 물고기, 패류, 동물플랑크톤 중 먹이섭식의 선택성이 높은 동물플랑크톤에 한정하여 정의하였다(그림 3).

2) 연구의 주요 내용

본 연구는 농업용저수지와 담수호와 같은 정체 호소에서 녹조발생 특성을 규명하고, 생태계 구성원

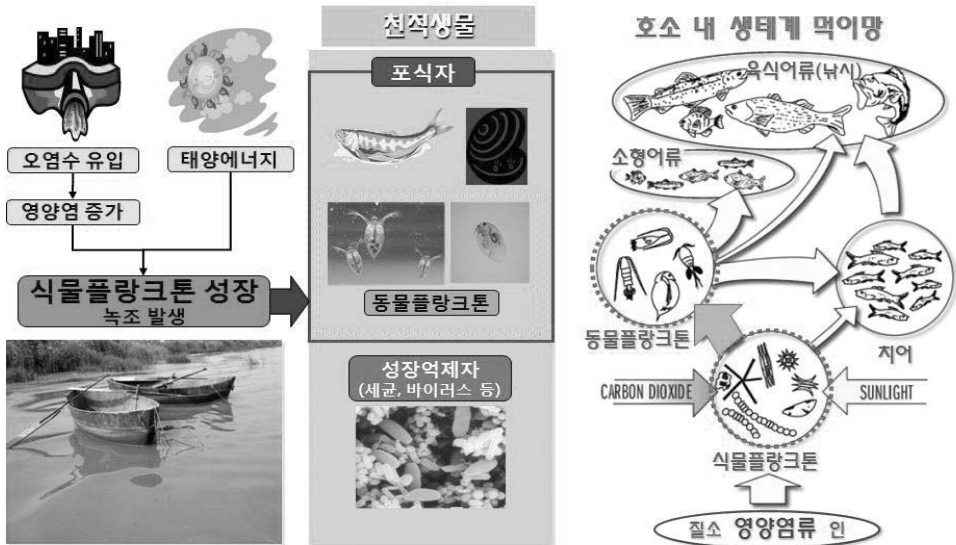


그림 3. 포식성 천적생물의 개념과 호소내 먹이 생태망의 구조

들의 특성을 파악하여 포식성 천적생물을 분리 확보하고, 현장배양하여 적용하는 현장기술개발연구로서 환경요인으로서 수온을 비롯한 현장 수질이화학적 특성과 생물자원으로서 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 어류 등의 분포특성 조사하고, 각 생물군의 밀도, 생체량, 포식-피식자와의 섭식관계, 천적생물로서 유용생물의 분리하고, 이들 천적생물의 최적 성장 조건 확립과 현장배양시설에서의 대량배양 성능 및 최적운영조건 설정 등과 함께 녹조발생수역에 천적생물 적용시 살포방법과 횡수, 살포량, 그에 따른 녹조제어효과를 분석, 평가하고자 하였다.

가장 핵심적인 연구 분야는 녹조발생 원인 생물을 효과적으로 제어할 수 있는 포식성 천적생물을 선별 적용하여 현장에서 대량배양하고 최적의 효과를 나타낼 수 있는 배양규모 및 살포방안 확립에 있다.

연구대상지는 녹조발생빈도가 가장 높은 충남 당진의 전대저수지로 유효저수량 58.7만톤, 수면적 15.6 ha의 유묘낚시가 이루어지고 있는 소규모 농

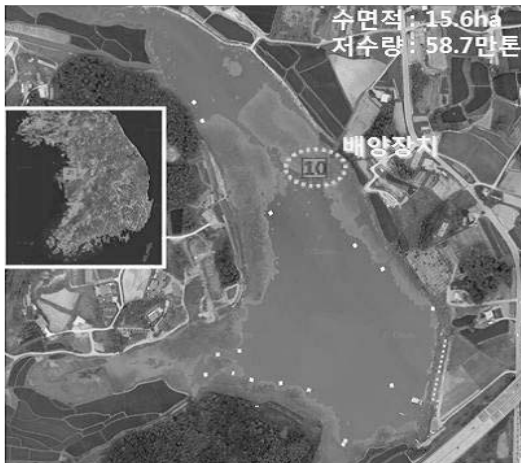


그림 4. 전대저수지와 배양장지 위치

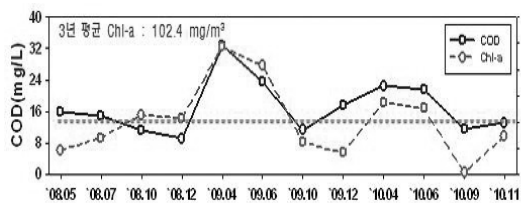


그림 5. 전대저수지의 최근 3년간 COD와 Chl-a 변화

업용저수지이다(그림 4). 전대저수지의 주요오염원은 축산계이며, 최근 3년간(2008~2010년) 평균 엽록소 a(Chl-a) 농도는 102.4 mg/m³ 으로 녹조발생이 심각한 수준이다. 그림 5에서 붉은 점선은 조류대발생 기준인 100 mg/m³ 을 나타낸 기준선으로 일부시기를 제외한 대부분의 시기에 이 기준을 초과하여 나타난 것을 알 수 있다.

본 연구에서 전대저수지의 녹조제어를 위해 적용된 포식성 천적생물 배양장치의 기본구조와 설치전경은 그림 6과 같다.

녹조 원인 생물의 대발생 제어 및 초기 성장 역제를 통해 녹조를 방지하는 포식성 천적생물 배양장치의 기본 개념은 다음과 같다.

- 녹조 원인생물이 있는 곳에는 자연적인 포식자 또는 경쟁자(천적생물)가 항상 같이 존재한다.
- 녹조 원인생물과 천적생물은 거의 유사한 환경조건을 공유하여 생태계내 평형관계를 유지하려 한다.
- 따라서, 수역에 공존하는 녹조 생물과 천적생물 중 인위적으로 천적생물의 개체수를 증가시키면 다소 불안정한 생태계(부영양화수역)라 하더라도 천적생물의 경쟁적 우위를 확보할 수 있다.

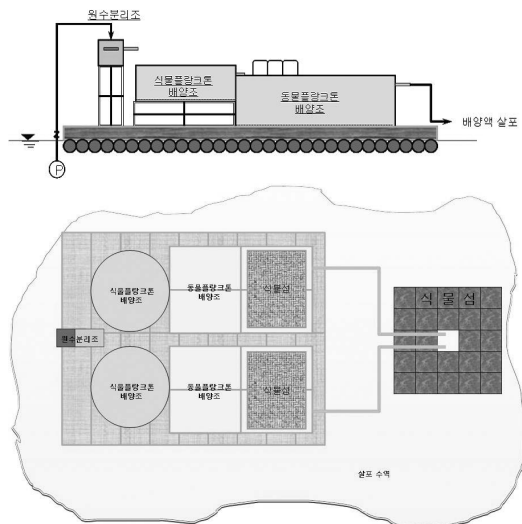


그림 6. 포식성 천적생물 배양장치의 개요도

요약하면, 천적생물 배양장치의 원리는 녹조가 발생하는 부영양수역의 물속에서 녹조원인 생물과 공존하며 생태계먹이망을 형성하는 다양한 미소생물 중에서 녹조원인 생물을 가장 잘 잡아먹는 천적생물, 즉, 동물플랑크톤에 초점을 두고, 이들 동물플랑크톤의 개체수를 인위적으로 늘려 녹조원인생물을 제거하는 것이다.

천적생물배양장치는 원수분리조와 식물플랑크톤 배양조(먹이생물공급조), 동물플랑크톤 배양조(천적생물 배양조)로 구분하였으며, 이를 패키지형태로 구조를 단순화하여 소요부지 감소등 비용절감효과를 유도하는 형태로 설치할 수 있었으나, 본 연구에서는 저수지 수면에 직접 적용한 수면 부상형으로 설치하였다.

포식성 천적생물 배양장치는 녹조발생 수역의 현장수를 일정량 양수한 다음 「원수분리조」에서 수중에 존재하는 동물플랑크톤과 식물플랑크톤을 크기에 따라 각각 분리하여 먹이생물인 식물플랑크톤은 식물플랑크톤 배양조로 이송되어 먹이생물로서 대량 배양되어 진후 동물플랑크톤 배양조로 공급되어 지고, 또한, 원수분리조에서 분리된 동물플랑크톤은 동물플랑크톤 배양조로 이송되어 식물플랑크톤 배양조에서 공급되는 고밀도의 식물플랑크톤을 먹이원으로 대량 증식된 후 녹조발생수역으로 방류되는 형태로 운영된다.

포식성 천적생물 배양장치는 기본적으로 녹조의 대량발생을 사전에 방지하는 초기제어 방법으로 운



그림 7. 포식성 천적생물 배양장치의 모습

영하고 한다. 따라서, 평상시 녹조의 초기억제방안과 대량발생 녹조제어 방안이 별도로 운영할 필요가 있다.

만약 부영양화된 저수지에 녹조가 심각하게 발생한 경우에는 녹조원인생물에 부합하는 단일 종 또는 2~3종의 혼합 종을 대량 배양하여 타겟형 녹조제어를 할 수 있도록 배양장치를 운영하는데 이는 그림 8-a 와 같이 선택적 종주배양 방법으로 선택성이 높은 천적생물 종주를 집중배양하여 녹조 원인생물을 집중 공략함으로써 대발생한 녹조생물을 단시간에 제어하는 기작이다. 이를 위해서는 녹조발생 예상 수역의 범위와 대상수량을 정확히 예측하여 필요한 천적생물량을 수역에 살포할 수 있어야 한다.

녹조가 심각하지 않은 평상시 천적생물 배양장치의 운영은 자연수계에 분포하는 동물플랑크톤의 군집량을 확대하여 녹조 원인생물이 대발생하지 않도록 초기억제하는 방법인 자연분리배양 방법으로 진행된다(그림 8-b). 즉, 저수지 내에 분포하는 동물

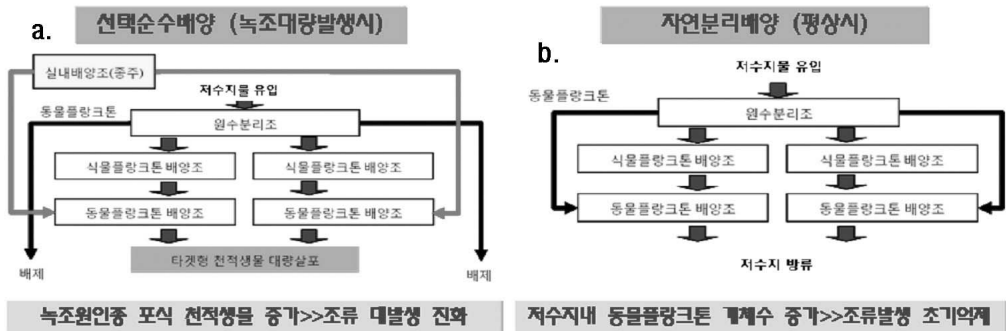


그림 8. 천적생물 배양장치 운영방안

플랑크톤을 천적생물 배양장치에서 분리하여 대량 배양한 후, 수역으로 연속 방류함으로써 청수현상이 발생하는 시기와 같이 수역내 동물플랑크톤의 개체수를 증가시켜 녹조원인생물의 군집을 억제하는 역할을 하게한다.

이와 같이 천적생물 배양장치의 효과적인 운영을 위해서는 시기별 전략적 대응방안 수립이 필요하며, 이를 위해서는 먼저 호소의 정체수역에서 발생 가능한 녹조발생 원인종과 발생시기, 발생규모 등의 사전 예측과 모니터링이 필요하다.

저수지의 녹조발생 시기는 저수지의 오염특성에 따라 상이하지만 전반적으로 3~6월, 9~10월 이다. 7월과 8월은 일시적인 녹조현상이 발생할 수 있으나 강우기의 특성상 유량이 풍부하고, 탁수 발생 및 지속율이 높아 장기간의 문제를 일으키지 않는다.

그렇다면 시기별로 특정 지어지는 녹조원인 생물을 사전 모니터링하여 그에 대응하는 천적생물을

종주를 보관하다가 모니터링 결과에 따라 적절한 시기에 종주배양을 시작하여 천적생물을 대량배양한 후 현장에 살포하는 과정으로 진행되어야 한다.

천적생물을 종주단계에서 대량배양수준까지 증폭시키기 위해서는 최소 3주의 시간이 소요되므로 초기 대응 방제를 위해서는 3주 예보 체계를 구축하고 있어야 한다. 또한, 신속한 방제를 위해서는 천적생물 대량배양 장치는 녹조가 자주 발생하는 수역의 인근지역 또는 수역내에 설치되어 있는 것이 운영에 유리하다.

천적생물의 적용방법은 녹조 모니터링 결과 농업용수 수질기준인 IV인 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률에 의한 호소 기준인 Chl-a 35 mg/m³에 해당되는 수준에 도달했을 때 천적생물 종주배양을 실시하여 조류 대발생 수준에서 미치기 전에 대량살포가 이루어 질 수 있도록 하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

녹조발생시 천적생물을 이용한 녹조방제 목표는 Chl-a 기준 35 mg/m³이하로 감소시키는 것으로 하였으며, 천적생물 배양장치를 통한 천적생물 배양밀

도의 목표는 동물플랑크톤 중에 따라 상이하지만 평균 기준은 103~104 inds./L 수준으로 설정하였다.

본 연구는 2010년 ~ 2012년 (3개년)간 계획되고 진행되고 있으며 현재 포식성 천적생물의 분리, 최적 배양조건, 현장살포에 따른 녹조제어 효과분석이 수행 중에 있다.

4. 결론

폐쇄성 정체수역인 농업용저수지와 담수호의 수질관리 현안사항은 무엇보다 녹조관리에 있다고 본다. 저수지와 담수호의 수질개선을 위해 유역으로부터 유입되는 인, 질소 등의 영양염류 저감에 총력을 기울이는 것도 녹조 발생을 억제하기 위한 수단에 불과하므로 결과적으로 녹조제어기술이 가장 효과적인 수질관리 및 개선방법이라고 할 수 있다.

포식성 천적생물을 이용하여 녹조를 제어하고자 하는 본 연구기술이 완성이 되면, 저수지와 담수호의 수질개선은 물론 동물플랑크톤에서 어류로 연결되는 먹이사슬이 강화되어 결국 호소내 어족자원이 풍부해 지고, 이어서 조류 등의 육상 생물의 다양성도 풍부해져 생태건강성과 생물 다양성을 증진시키는 효과까지 기대 할 수 있을 것으로 판단된다.

사실 본 기술의 기본개념과 이해는 이미 오래전에 인식하고 있었지만, 현장적용의 어려움 때문에 그 누구도 시도하지 못하고 있는 실정이다. 국내는 물론 외국에서도 유사한 시도는 수차례 이루어 졌지만, 아직 저수지와 담수호 같은 대형 수체에 적용하여 성공한 바 없는 예민한 기술로서 기술개발의 난항은 예상되지만, 끈기있게 연구에 매진하고자한다.

무엇보다 생태적으로 안전하고, 건강한 녹조제어 기법의 개발에 가장 큰 의의를 두고 있으며, 향후 저수지와 담수호, 나아가 대형 댐호의 수질 및 수생태 관리에 본 연구기술이 크게 기여할 수 있기를 바란다. ☺

● 참고문헌

1. 농림부. 2005. 농업용저수지의 녹조제어 기법개발
2. 농림수산식품부. 2007. 2007 농업용수 수질측정망조사 보고서
3. 농림수산식품부. 2008. 2008 농업용수 수질측정망조사 보고서
4. 농림수산식품부. 2009. 2009 농업용수 수질측정망조사 보고서
5. 농림수산식품부. 생물조절(먹이연쇄)을 통한 농업용저수지 수질관리 기법개발(2009)
6. 농림수산식품부. 2010. 2010 농업용수 수질측정망조사 보고서
7. 농림수산식품부. 2010. 농업용수원의 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 개발(I)
8. Lee, R. E. 1980. Phycology. Cambridge University Press, Cambridge. 478 pp.
9. Sevrin-Reyssac J, Pletikoscic M (1990). Cyanobacteria in fish ponds. *Aquacult* 88:1-20
10. Shapiro, J. 1975. Biomanipulation : the Next phase - making it stable. *Hydrobiologia*, 200/201:13-27.
11. Shapiro, J. and D.I. Wright, 1984. Lake restoration by biomanipulation :Round Lake, Minnesota, the first two years. *Freshwater. Biol.*, 14:371-383.