

## 시아노박테리아(남조류) 대발생 관리방안<sup>1)</sup>

- 유네스코의 해양과학위원회(SCOR)의 정책입안자를 위한 과학적 요약 -



류 재 근<sup>2)</sup>

한국에코과학클럽 회장, 환경미생물학 박사  
한국자연환경보전협회 회장(23, 24대/현 명예이사)  
전) 국립환경과학원 원장, 한국교통대학교 석좌교수  
전) 대통령국가과학기술자문위원(2001~2004년)  
현) 한국환경학술단체연합회 회장

### 머리말

우리나라 하천·호소의 부영양화 문제는 1980년부터 연구가 시작되었으며, 주로 남조류, 녹조류, 규조류, 편모조류 등이 연구되어 왔다. 연구 결과 우리나라 조류 대발생의 주요 원인은 총인(Total Phosphorus)과 총질소(Total Nitrogen)와 같은 영양염류이며, 특히 총인이 주요 제한요인으로 나타났다. 따라서 수질관리의 근원적인 대책으로 하수처리, 폐수처리, 축산폐수처리 등 총인 제거를 위한 기술 개발 및 적용에 우선적인 정책을 추진해 왔다.

그 결과, 우리나라의 많은 호수의 수질이 과거보다 개선되었으나, 아직도 하수나 폐수, 축산폐수뿐만 아니라 농경지 비료, 농약, 산림, 도로 등 비점오염원에서 발생하는 인산 및 질소에 대하여 여러 가지 대책 방안이 지속적으로 요구되고 있다. 특히 4대강 사업 이전부터 낙동강 하구를 비롯한 한강, 금강, 영산강 등의 하류뿐만 아니라 대청호에서도 조류 대발생이 이슈가 되어 왔으며 하수 및 폐수처리의 고도화, 축산폐수처리의 고도화 등을 계속적으로 강화하고 있음에도 불구하고 아직 4대강의 인산 농도는 조류의 성장을 촉진하는 수준에 머물고 있어 이를 저감하는 데 국가적으로 총력을 기울이고 있다.

본인은 1991년 유네스코에서 발간된 「정책결정자를 위한 부영양화 관리 방안」을 국문으로 번역하여 한국에 소개한 바 있다. 이 자료는 세계 각국에서 남조류 대발생 시에 수질을 개선하는 방안 11가지를 사용하여 성공한 사례와 실패한 사례를 담고 있다. 이 자료는 우리나라 하천·호소 수질관리를 위한 지침서에 좋은 참고가 되었다.

이번에는 지난 2019년에 UNESCO에서 해양학 연구위원회에 의뢰하여 발간된 「정책결

1) Solutions for Managing Cyanobacterial (blue-green algae) Blooms - A Scientific Summary for Policy Makers

2) RYU, Jae Keun, Korea Federation of Environmental Societies(KOFES), E-mail: ryu1773@naver.com

정자를 위한 남조류 대발생을 제어하는 기법」이라는 자료를 소개하고자 한다. 이 자료에 담고 있는 정보를 현장의 수질관리자가 손쉽게 이해하고 현장에 잘 적용될 수 있는지를 빨리 평가하여 지속적으로 이슈가 되고 있는 남조류 대발생을 하루빨리 근절하기를 바라는 마음에 서둘러 소개하고자 한다.

이 보고서는 유해조류 대발생 연구 프로그램인 Global HAB의 지구생태학 및 해양학 연구위원회(SCOR-IOC Scientific Steering Committee of Harmful Algal Blooms Research Program Global HAB)가 동료 연구자들과 함께 작성하였다.

GlobalHAB(2014년 이후)는 수생 생태계의 유해조류 대발생에 대한 이해와 예측, 그 영향의 관리 및 완화를 목적으로 하는 국제 프로그램으로서, 유네스코의 해양과학위원회(SCOR)와 정부 간 해양위원회(IOC)가 후원한다.

저자 : M.A. Burford(그리피스 대학교), C.J. 고블러(스토니 브룩 대학교), D.P. 해밀턴(그리피스 대학교), P.M. 비서(암스테르담 대학교), M. 루링(와게닝겐 대학교), G.A. 코드(둔디 대학교)

이 보고서를 인용할 때는 참고문헌정보를 다음과 같이 작성하여야 한다.

M.A. Burford et al. 2019. Solutions for managing cyanobacterial blooms: A scientific summary for policy makers. IOC/UNESCO, Paris(IOC/INF-1382)

이 보고서는 다양한 대학과 지역의 학자들에 의해 작성되었다. 이 보고서는 GlobalHAB 후원자 및 저자가 제공하는 간략한 정보로서 엔지니어링 또는 기타 전문 서비스를 제공하려고 시도하지 않는다는 이해를 바탕으로 게시된다. 그러한 서비스가 필요한 경우 적절한 전문가의 도움을 받아야 한다. 또한 후원자와 저자는 본문에 언급된 제품이나 상업 서비스를 보증하지 않는다. 이 출판물에 사용된 명칭과 자료의 표현은 SCOR과 IOC 사무국 측의 의견을 의미하는 것은 아니다.

그리피스 대학교 퀸즐랜드 예술대학 라이브 웹 스튜디오에 의한 디자인.

IOC/UNESCO 2019년 발행

## 유해조류 대발생을 유발하는 남조류(청록조류)

조류는 바다, 담수호, 강, 하천 그리고 웅덩이 등 물이 있는 곳이면 어디서나 자란다. 조류는 수중먹이그물을 떠받치고 있으며, 수중생태계의 동물에게 영양분을 제공하고 미생물과 함께 환경전체를 통해 에너지흐름과 영양소순환에 기여한다. 그러나 영양과다로 인해 조류가 대량 발생하는 경우에는 문제가 생긴다. 그러한 영양소들은 강우와 그로 인한 농

경지에 뿌려진 비료의 유출과 토양침식, 배출된 하수와 기타 고농도 영양소의 발생원을 포함한 많은 발생원들로부터 유입된다.

담수, 해수 및 기수에서 대량 발생할 수 있는 주요 조류집단 중의 하나가 남조류(청록조류로도 알려진)다. 남조류는 엄밀히 말하면 조류가 아니다. 남조류는 더 오래된 생물형태이기는 하지만 광합성을 위해 햇빛을 필요로 하는 등 조류와 공통된 몇 가지 특징들을 가지고 있다. 남조류는 호소나 웅덩이, 보, 저수지와 같은 고여 있는 물, 또는 유속이 완만한 강 등에서 잘 번성한다. 남조류는 그러한 환경에서 번성할 수 있는데, 그것은 물의 체류기간이 더 길어지면 많은 남조류의 성장과 대발생을 가능하게 하기 때문이다. 남조류는 다른 조류집단보다 물 위에 더 쉽게 뜰 수 있다.

남조류 대발생 또는 cyanoHABs의 주요 문제들 중의 하나는 몇몇 생물종들은 독성이 있을 수 있다는 것이다. 그 독소(남조류독소)는 사람과 동물에게 다양한 건강 영향을 줄 수 있으며, 그 영향은 가벼운 것에서 심각한 것으로 범위가 넓고, 전체 생태계에 영향을 준다. 인간과 동물이 마시는 물은 일반적으로 마시기 전에 정수하여 독성물질을 제거할 필요가 있다. 이 때 상당한 정수비용이 들어간다. 많은 나라에서 남조류를 시험하는 방법들을 사용할 능력이 없기 때문에 부지불식간에 그들이 건강 위험에 노출될 수 있다.

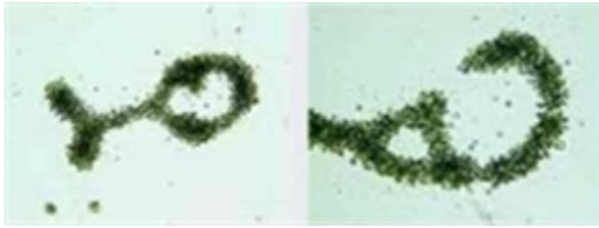
대발생의 독성이 없을 경우에도 그들의 야간의 산소의 사용(=호흡), 그리고 대발생 남조류의 부패로 인해 저-산소 조건이 발생할 수 있으며, 그로 인해 물고기와 기타 동물이 죽을 수 있다. 남조류는 흙냄새/곰팡이냄새, 또는 그 배설물과 부패 등으로 계란 썩는 냄새와 같은 악취를 유발할 수 있고, 호소 물가로 밀려 올라와서 물의 위락 사용에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 남조류는 수영하는 사람들에게 심한 피부염을 유발할 수도 있다.

남조류 대발생을 방지하기 위해 사용할 수 있는 연못/호소수역의 관리 및 저감 약품, 방법 및 도구들이 많이 있다. 그러나 어떤 약품과 접근방식이 특정 수역에 가장 효과적인 인지를 결정하는 것은 때로는 매우 어렵다. 여기서는 남조류유해조류 대발생 방지를 위한 약품과 물리적, 화학적 그리고 생물적 해결방안을 개관하고, 그들의 이점과 상대적 비용에 대한 몇 가지 세부사항을 살펴본다. 좀 더 세부적인 정보를 담고 있는 다른 간행물도 알아본다.

## 우점종

### *일반적으로 일어나는 시아노유해조류 대발생*

우리는 독성물질을 가진 조류로서 지구적 대발생을 일으키는 가장 우점하는 몇몇 유해 남조류속에 대해 자세히 살펴보았다. 지구전체에서 발생하는 문제의 우점 독성생물속은 다음과 같다.



마이크로시스티스  
사진: Glenn McGregor

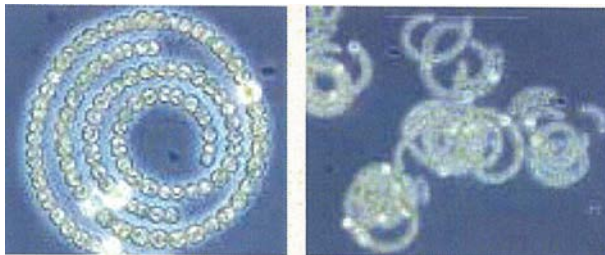
남조류는 대발생을 일으키는 가장 일반적인 속(*genera*)으로서 남극을 제외한 모든 대륙에서 발생한다. 남조류는 다당류에 의해 연결된 원형세포의 군락에서 번식하는데, 부유성이 매우 높고 수면에 뚜렷한 더깍이를 만든다. 남조류의 모든 대발생이 독성인 것은 아니지만 강력한 독성물질, 마이크

로시스틴 및 아나톡신-A 독성물질을 생산할 수 있다. 세계적으로 마이크로시스틴은 아마도 수역에서 가장 일반적인 남조류독성물질이고 세계보건기구가 건강보호을 위해 음용수와 위락용수의 지침농도를 설정한 유일한 남조류독성물질이다.

라피디오프시스는 일반적으로 발생하는 속으로 당초에는 따뜻한 기온을 좋아하는 것으로 믿었으나 세계의 온대지역에서도 점점 더 많이 발견되고 있다. 그것은 섬유 형태를 가지며 물속의 용해질소(질산염, 암모늄) 농도가 낮을 경우 대기 중의 질소를 사용(질소고정)할 수 있다. 그것은 몇몇 국가, 예를 들어 호주 같은 나라에서는 시린드로스페르모프시스 독성물질을 생산하는 한편, 많은 다른 나라들, 예를 들어 미국 같은 나라에서는 그 속은 일반적으로 독성이 없다.



라피디오프시스(=시린드로스페르모프시스)  
사진: Glenn McGregor



돌리코스페르뎀 (중전의 아나베나)  
사진: Michele Burford

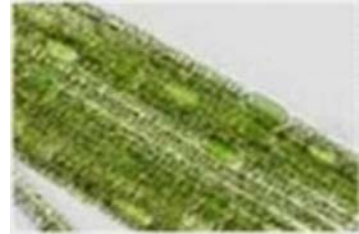
돌리코스페르뎀은 질소고정이 가능한 유해남조류 대발생(*cyanoHABs*)의 섬유성 생물속이다. 그것은 세계 전역에서 발생하며 광범위한 독성물질을 생산할 수 있고, 마이크로톡신, 아나톡신, 색시톡신, 그리고 시린드로스페르모톡신이 거기에 포함된다.



**플랑크토티릭스**  
사진: Nordicmicroalgae.org

섬유질의 생물속인 플랑크토티릭스는 세계적으로 온대지방의 우점종이며, 열대지방과 아열대 지방에서는 보고되는 것이 많지 않다. 그것은 마이크로시스틴 독성물질을 생산한다.

이 섬유질 생물종은 다른 대부분의 일반적인 대발생 남조류와 많은 속성을 공유한다. 아파니조메논은 마이크로시스틴, 아나톡신, 색시톡신 및 시린드로스페르모프신을 생산할 수 있으며, 세계 전역에서 발견된다.



**아파니조메논**  
사진: Alchetron.com

## 전 세계 시아노유해조류 대발생

시아노유해조류 대발생은 세계 전역에서 일어나며, 담수호, 못 및 저수지에서 대부분 발생하지만, 기수와 해수에서도 발생한다. 몇몇 주목할 만한 시아노박테리아 대발생은 환경적, 사회적 및 경제적으로 주요한 영향을 미친다. 중국의 태호, 북미의 에리호 및 발틱해가 이러한 사례에 포함된다. 2007년 중국 장수성 태호의 독성 마이크로시스티스 대발생은 호수 주위 200만 명의 급수에 영향을 주었고 많은 경제적 비용을 지불하게 하였다. 그 대발생은 관리방법의 개선을 촉진하였다. 저수지 영양염류 부하의 감축, 수중식물의 식목, 수면부유물 걷어내기, 조류의 취수장 유입방지, 그리고 생물자원의 채취가 성행하였다. 채취된 생물자원은 다른 용도, 즉 비료 등으로 사용되었다.



**용존공기부상수처리기술에 의한 마이크로시스티스 채취**  
사진: Michele Burford



출처: [blog.nationalgeographic.org](http://blog.nationalgeographic.org)

북미의 5대호는 세계 전체 가용 담수의 약 18%를 저수하고 있는 중요한 수원이다. 2011년, 에리호에서 기록적인 독성 마이크로시스티스 대발생이 있었는데, 그 면적이 5,000 km<sup>2</sup>에 이르렀다. 마이크로시스틴이 오하이오 주 톨레도 시의 상수도까지 침투하여 2014년 50만 명 이상의 주민들의 음용수 공급이 잠시 동안 중단되었다.

매해 여름 발트해에는 200,000 km<sup>2</sup>에 달하는 면적에 독성 시아노박테리아인 노두랄리아 및 아파니조메논의 대발생이 일어난다. 대발생의 강도와 지속시간은 인간유발부영양화와 기후변화로 인해 해마다 증가해왔으며, 이러한 대발생은 주요 환경적, 사회적 및 경제적 영향을 미치고 있다.



출처: [earth.esa.int](http://earth.esa.int)

## 물 관리의 난제들

시아노유해조류 대발생 관리는 3개의 핵심요소로 구성된다. 감시, 저감 및 예측이다. 가장 효과적인 장기적인 저감대책은 저수지로 들어오는 영양염류를 줄이기 위해 집수구역의 영양염류를 관리하는 것이다. 그러나 그것은 장기적인 투자가 필요한 장기적 전략이다.

영양염류 부하를 줄이는데 사용되는 가장 일반적인 방법에는 하수처리장 개선, 강우유출수의 효과적인 관리, 경사면·도랑, 강의 침식방지, 농지의 과다 비료 사용 저감, 영양염류 부하 차단 및 정화를 위한 저류지와 습지의 설치 등이 있다.

영양염류 저감은 시아노유해조류 대발생의 지속적인 방지를 위한 가장 효과적인 접근방식인 것이 거듭 증명되어 왔지만, 효과가 발생하자면 수십년이 걸린다. 이러한 적극적인 수단에 더하여 시아노박테리아 대발생에 의한 심각하고 직접



적인 인간과 동물 건강 위협은 취수장 저감전략으로 대발생에 신속히 대응하기 위한 반응 방법을 바람직하게 한다. 활용가능한 방법과 약품이 많이 있을 경우 가장 효과적인 방법을 결정하는 것이 어려울 경우가 있다. 이 문서는 수역과 대발생의 형태에 따른 활용 가능한 접근방식의 장단점과 적합성에 대한 정보를 제공하고자 한다.

## 대발생 저감을 위한 수역내 대처 방법들

### 물리적 접근방법들

#### 거름망(여과망)/방지벽

유분거름망, 방책 또는 막벽을 사용하여 수면에 떠 있는 대발생 시아노유해조류를 농축하여 제거하거나 취수지점 밖으로 비껴가게 할 수도 있다. 대발생 시아노유해조류를 제거하는 이러한 방지벽의 효과를 정량화하기는 어렵지만 그들은 용수공급취수구를 어느 정도 보호하는데 사용되어 왔다. 중국 태호의 마이크로시스티스 대발생 기간 중 수차례 사용된 예가 있다.



사진: Rijkswaterstaat



사진: Miquel Lurling

#### 초음파

고출력 초음파는 파력으로 모든 생물체를 파괴할 수 있다. 그러나 상대적으로 높은 에너지비용이 들어간다. 고주파초음파는 시아노박테리아의 부유조절능력을 파괴할 수 있지만, 수주 투과력은 극히 제한적이다. 저출력, 저주파초음파의 효과에 대한 증거는 없다.



### 수면혼합기/분수

수면혼합기나 분수의 목적은 수면의 물을 혼합하여 부유 시아노박테리아가 수면에 축적되어 대발생을 하지 못하게 하는 것이다. 그러한 체제의 효과성은 대발생의 강도와 혼합율에 따라 달라진다. 그러한 체제는 일반적으로 대발생이 발생하지 않게 하기 위해 높은 에너지 투입을 필요로 한다. 그러한 혼합지역 중에는 혼합지대 바로 바깥지역에 조류축적을 일으킬 수도 있다. 그들은 독소를 지닌 연무질을 만들 수 있다.

### 산화처리

포기/산화처리 방법을 사용하여 저층수의 산소농도를 높일 수 있다. 저층수를 수면으로 끌어 올리는 기포펌프나 선형 또는 원형 산기장치에 의한 주입장치와 같은 여러 가지 방법이 있다. 산화처리는 저층수에 산소를 직접 주입하는 방법도 사용할 수 있다.

그 목적은 무엇보다도 저층수의 산소농도를 높여 저층퇴적 영양염류, 특히 조류 대발생을 일으킬 수 있는 인의 배출을 저감하는 것이다. 이 장치는 수면과 분리된 냉수층이 있는 깊고 층화화한 수역에만 적당하다. 그 방법은 기반시설 설치비용과 운영비용 측면에서 매우 비싸다. 연구결과들은 그 결과가 장단점이 있음을 보여주고 있다.

### 준설 또는 굴착

많은 수역, 특히 얇고/거나 진흙 퇴적물이 많은 수역에는 그 수역의 가장 큰 영양염류 발생원은 퇴적물일 수 있다. 따라서 준설은 시아노유해조류 대발생을 자극하고 물에서 대발생을 일으키는 시아노유해조류의 씨앗이 되는 영양염류를 가진 퇴적물을 제거할 수 있다. 굴착 또한 수역의 물을 먼저 뺀 후면 효과적이다. 이 방법은 상대적으로 비용이 더 들고 시간도 걸리고, 바닥의 퇴적물을 휘저어 일시적으로 수질을 나쁘게 할 수 있다. 그



리고 일반적으로 큰 수역에는 적합하지 않다. 그리고 퇴적물 처분과 처리의 문제도 있다.

### 저층수 빼내기

이 방법은 호소나 저수지로부터 낮은 농도 산소나 높은 영양염류를 함유한 저층수를 빼내거나 중력공급 방법을 사용하는 것이다. 빼낸 물은 하류로 방류된다. 이 방법의 원리는 시아노유해조류 대발생에 필요한 영양염류를 억제하는 것이다. 다른 물리적 방법들과 함께 이 방법은 저층수의 온도가 지표수의 온도보다 낮고 저층수의 산소농도가 낮은 경우에 사용된다. 이 방법은 상대적으로 비용이 낮지만 저층수를 빼내기 위해 중력공급을 위한 높이가 필요하다. 이 방법의 약점은 낮은 산소와 높은 영양염류를 가진 물이 하류로 방류될 때 물고기와 다른 수중생물에 나쁜 영향을 미칠 수 있다는 것이다.

### 인공적 저층혼합

수면혼합층을 깊게 하고 수면축적이나 혼합을 방지하여 수면 발생 조류를 조류성장에 부적합한 저층으로 수면의 조류를 보내도록 설계된 수면 혼합기나, 그 대신 물 전체를 혼합하는 것과 같은 상당히 많은 인공적 순환 접근방식이 있다. 이러한 방법의 성패는 거기에 있는 시아노박테리아의 형태에 크게 의존한다. 이 방법은 예를 들어 마이크로시스티스와 같이 수면더껍이를 형성하는 생물종에 잘 사용된다. 이 생물종의 경우, 수면더껍이는 순환이 증가되면 파괴된다. 인공순환은 작은 수역이나 큰 호소의 작은 일부만 혼합할 필요가 있을 때 효과적이다. 설치비용은 다른 방식보다 낮지만 에너지비용이 많이 든다.

### 화학적 접근방법들

#### 과산화수소

시아노유해조류 대발생을 방지하는 일반적인 화학물질의 하나가 과산화수소다. 정확한 용량과 균등 혼합되게 사용되면 과산화수소는 다른 조류나 수중 동식물에게 영향을 주지 않으면서 시아노유해조류를 선별적으로 죽이거나 억제할 수 있다. 과산화수소의 이점은 그것이 빨리 물과 산소로 바뀌어 잔류영향이 없다는 것이다. 각각의 시아노박테리아의 생물종과 수역에 필요한 과산화수소의 양은 다르기 때문에 최적사용량은 시험을 해 보아야 알 수 있다.

마이크로시스티스와 같은 저항성이 강한 시아노유해조류의 경우 과산화수소는 동물성플랑크톤에 해를 주지 않고 완전히 제거하기는 어려울 수 있다.

진핵생물 조류가 많은 호소에서는 과산화수소의 분해속도가 너무 빨라 효과적으로 시아노박테리아를 죽이는 데는 시간이 충분하지 못할 것이다. 나아가, 수백 헥타르 이상의 넓은 수역에서 과산화수소의 사용은 현실적으로 무리이고 비용효과적이지 않다. 그러나 과

산화수소는 정수장에서 시아노유해조류와 그 독소를 제거하는 데는 도움이 될 수 있다.

### 황산구리

역사적으로 황산구리는 저수지와 호소에서 시아노유해조류 방지를 위해 사용되어온 유명한 방법이었다. 그러나 먹이그물에 대한 구리의 독성영향에 대한 지식이 많이 알려지고 퇴적물에 있는 그 잔류성에 대한 관심이 커짐에 따라 세계적으로 많은 공공기관들이 그 사용을 금지 또는 억제하고 있다.

### 유네스코의 해양과학위원회(SCOR) 발간



사진: Andy Bruere



사진: Andy Bruere

### 지구화학적 화합물

백반은 황산알루미늄으로 물속에서 덩어리를 형성한다. 백반은 시아노박테리아를 포집하여 물로부터 인산염을 흡수하고 퇴적물에서도 조류 대발생의 일부를 일으키는 조류에게 필요한 주요 영양염류를 제거하기도 한다. 상업적 제품인 “포스락”은 인산염 함유의 진흙으로서 인산염과 함께 안정된 광물을 형성하면서 시아노박테리아의 인 사용을 차단하는 것이다. 백반은 인 부하가 외부적이 아닌(예, 강우유출수로부터) 내부적(예, 바닥퇴적물로부터)인 경우에 가장 유용하며, 일단 백반의 결합력이 없다면 다시 사용할 수 있다.

### 퇴적물 덮기

퇴적물 덮기는 기존의 바닥퇴적물과 그 위에 있는 수주 사이에 적극적 또는 소극적인 물리적 장벽을 만드는 것이다. 예를 들어, 포스락은 적극적인 장벽의 역할을 하며 그 두께는 단 몇 밀리미터면 충분하다. 이와 대조적으로 모래 덮기는 소극적인 것으로 아마도

훨씬 더 두꺼운 덮개가 필요할 것이다. 덮개는 영양염류가 퇴적물로부터 물속으로 빠져나가는 것을 막도록 설계된다. 준설처럼 덮개는 시간을 잡아먹고 비용이 많이 든다.

## 생물적 접근방법들

### 생물적 처리

다양한 박테리아, 곰팡이 및 효모 제품들이 그들의 효과는 증명을 필요로 하지만 시아노유해조류 방지를 위한 잠재적인 수단으로 고려되고 있다. 몇몇 검토결과는 이들 제품의 효과에 대해서는 거의 증거가 없음을 보여주고 있다. 모든 것은 모든 곳에 있으며 환경이 선택한다는 미생물 생태학의 중심 명제에 따르면, 그러한 제품을 통해 도입된 미생물은 수역에 이미 있을 가능성이 크며 그러한 미생물의 확산 가능성이 있고 시아노 유해조류의 성장의 억제는 환경적 조건들의 기능이고 지금 말한 미생물의 도입은 아닐 것이다.

### 식물추출물질

시아노유해조류를 방지할 수 있는 대부분의 일반적 식물제품은 보릿짚과 벼짚으로, 성글고 썩은 짚이 압축되고 싱싱한 짚보다 더 효과적이다. 짚으로부터 추출된 폴리페놀은 햇빛을 받으면 과산화수소를 발생하며 그것이 진핵생물 조류가 아닌 시아노유해조류만 골라서 억제한다는 증거가 있다. 짚은 시아노유해조류를 억제하는 항미생물화물을 분비하는 곰팡이의 성장을 돕는다는 증거도 있다. 보릿짚은 시아노유해조류뿐 아니라 모든 종류의 조류를 억제하는 경우가 있지만 성공여부는 반반이다. 그러나 그 방법은 상대적으로 저렴하고 직접적이다. 소규모 수역에서의 현실적으로 많이 사용된다.

다양한 다른 식물제품들이 시험되고 있으나 연구는 제한적이며 적용 가능하고, 대규모 적용의 경우 비용 효과적이기 위해서는 더 많은 노력이 필요하다.

### 먹이그물의 생물조작

영양염류 농도 감축을 위한 단기적인 방법으로 물고기의 도입 또는 제거 방법을 사용할 수 있지만 집수구역이나 유역의 영양염류 감축전략의 필요성을 대신하는 것은 아니다. 저서초식물고기의 제거는 바닥으로부터의 입자들과 거기에 붙은 영양염류의 재부상을 감소시킬 수 있다. 그러나 이것은 퇴적물 발생 영양염류가 가장 큰 발생원이고 물고기의 밀도가 매우 높은 경우에만 효과가 있다. 일단 그러한 물고기가 없어지면 침수수생 식물이 등장하여 영양염류 농축을 감축하는데 도움을 줄 수 있다. 또한, 동물플랑크톤 섭식 물고기 종의 제거는 동물플랑크톤의 밀도를 높여 시아노유해조류를 포함한 일차생산자의 섭식을 증가시킨다. 그러나 그것은 항상 효과가 있는 것은 아니다. 동물플랑크톤생물종 중에는 소화나 다루기가 어렵거나 경우에 따라서는 시아노독소 때문에 시아노유해조류의 섭

식을 적극적으로 기피하기 때문이다.

대신 물고기 중에는 시아노유해조류 포식자를 포식하는 것도 있다. 총체적으로 물고기의 도입은 단기전략으로는 유용하지만 장기적으로 안정되고 효과적인 체제로 만들기는 가능하지 않다. 기타 중요한 요소들로는 동물플랑크톤을 먹는 물고기 생물종의 불충분한 제거나 복원이다.

또 하나 시아노유해조류방지가 가능한 방법은 조류와 시아노박테리아를 직접 먹는 여과섭식 물고기를 넣는 것이다. 이 방법은 고도영양 호소에 적용되는 것으로, 예를 들어, 아영양호 또는 영양호로서 동물플랑크톤의 조류 섭식이 비 효과적인 곳이다. 그러나 그 성과는 기타 물고기들이 상당한 양의 영양염류를 발생시키기 때문에 한마디로 말할 수 없다. 여과섭식 조개류의 도입이 시아노박테리아 섭식강도를 높이는 또 다른 전략이 있다.

### 수생식물

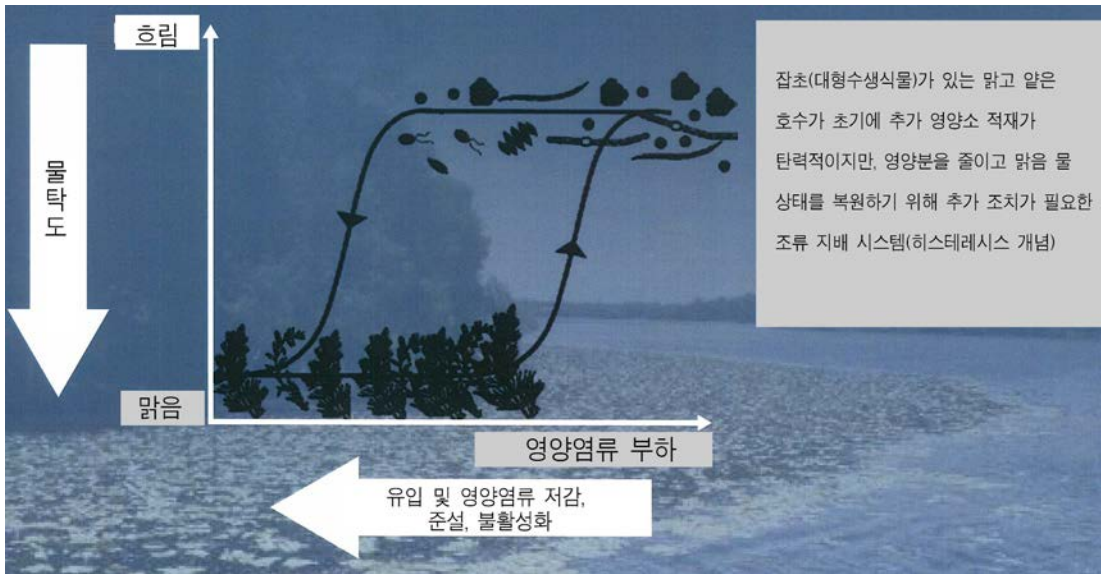
수생식물은 시아노유해조류녹조와 영양염류 먹이경쟁을 하며 수역에 그들을 지울 수 있다. 그리하여 시아노유해조류녹조 방지에 유용한 역할을 할 수 있다. 그러나 수역이 얇지 않으면 그들의 효과는 제한적이다. 그들은 일반적으로 햇빛이 투과하는 깊이 정도만 자라기 때문이다. 그 대신 수면생활형 번식체를 가진 뿌리식물은 그들의 성장이 얇은 수역에 여전히 한정되어 있지만 호소 내의 빛 투과에 의존하지 않는다. 더욱이 몇몇 외래 생물종의 성장은 비생산적일 수 있으며, 수역을 질식시키고 저 산소 조건을 만들어 퇴적물로부터 영양염류가 유리되어 물고기와 기타 수생생물을 죽인다. 어린 싹이나 번식체의 장소변경 또는 도입을 통한 수생생물 성장 촉진은 기타 시아노유해조류녹조 방지방법과 함께 사용될 때 가장 효과적일 가능성이 높다.

### 떠 있는 섬 및 습지

어떤 경우에는 식물을 다양한 크기의 떠 있는 섬에 심을 수 있다. 섬에 있는 식물은 끊임없이 영양염류를 제거하는 동시에 섬은 물에 그들을 만든다. 철사우리를 만들어 그 떠 있는 녹조덩이를 잡아두는데 사용할 수 있다. 섬 위에 있는 식물생체량은 계속해서 자라도록 버려두거나 시간을 두고 채취할 수 있다. 그러한 구조물을 유지하려면 상당한 시간을 소비할 수 있다.

습지는 영양염류를 시아노유해조류가 먹기 전에 제거하는 수단을 제공할 수 있다. 그러나 영양염류 제거를 최적화하기 위해서는 추가적인 토지와 지속적인 유지노력이 필요하다.

이력현상의 개념은 수초(대형수생식물)가 있는 맑고 얇은 호소는 영양염류의 추가적인 부하에 탄력적이지만, 영양염류 감축과 깨끗한 물 상태로 회복하기 위한 추가적인 조치를 하지 않으면 조류-우점 상태로 급속히 빠져들어 갈 수 있다.



호소내 관리방안 요약

관리 유형	조치	목표조류	비용	과학적 증거	어려운 점
물리적 방법	초음파	시아노 유해조류 대발생	*높음(고출력초음파일 경우) *중간(저출력초음파일 경우)	*고주파초음파는 시아노 박테리아의 부력조절 능력을 파괴할 수 있지만 수중투과력은 매우 제한적이다. *저주파초음파효과는 과학적으로 입증되지 않았다	고주파장치는 현장에서 충분한 투과력을 발생하게 할 수 없다.
	방책 및 차폐막	부유성 시아노 유해조류 대발생	낮음	고출력장치는 모든 생물체를 죽인다.	*방책은 고밀도이고 부력이 있을 때만 효과적이다. *표면터핑이는 바람에 의해 쉽게 부서지지만, 바람의 적시 발생이 어려울 수 있다.
	수면혼합기	부유 시아노 유해조류, 끌고루 혼합	중간~높음	효과적이지만 호수의 물리적, 화학적, 생물학적 조건에 대한 이해가 필요하다.	*방법론은 비교적 간단하지만 혼합 구역의 위험구역 지정이 필요하다. *혼합기 또는 분수용 에너지에 대한 지속적인 투자가 필요하고, 운영으로 인한 소음과 황화수소로 인한 악취가 발생할 수 있다.
	분수	부유 시아노 유해조류, 끌고루 혼합	중간~높음	이점에 대한 증거가 제한적이다.	*분수는 효과 대비 막대한 에너지를 낭비한다. *분수 유지관리 문제가 있으며, 소음 및 황화수소로 인한 악취가 발생할 수 있다.
	산화 (미세기포 포함)	용존산소 (저층수)와 영양염류	높음	효과적이지만 호수의 물리적, 화학적, 생물학적 조건에 대한 이해가 필요하다.	*현장에서 산소생산이나 저장탱크가 필요할 수 있다. *심층수의 산화로 악취가 발생하지 않기 때문에 비 성층화보다 큰 이점의 가능성이 있다.
	준설	퇴적물 영양염류 저장	높음	효과적이지만 호수의 물리적, 화학적, 생물학적 조건에 대한 이해가 필요하다.	*처리 비용이 매우 비싸다. *준설 퇴적도의 처분이 문제다. *작업 중 재 부유 퇴적물이 계속적인 조류문제가 될 수 있다.
	비성층화	용존산소 (심층수), 영양염류 및 시아노 유해조류	높음	*마이크로시스티스와 같은 일부 종에 대한 효과를 뒷받침하는 상당한 과학적 증거가 있다. *라피디옵시스 (=Cylindrospermopsis)에는 효과적이지 않을 수 있다.	*물 혼합 시 공기흐름, 기포크기 및 에너지효율 최적화를 위한 신중한 설계가 필요하다. *전원 공급 장치에 대한 지속적인 투자와 포기장치 유지가 필요하다. *세부적인 공학적 설계가 필수다. *작동 시 소음이 발생할 수 있지만 분수나 혼합처리에 비해 줄어든다.
	저층수 끌어올리기	용존산소, 영양염류 (심층수)	낮음~중간	효과적인 관리기술이 될 수 있다.	*저층수를 끌어올릴 수 있는 능력이 있어야 한다. *방류된 저층수의 저 산소 및 고농도 영양염류가 하루에 부정적인 영향을 줄 수 있다.
	햇빛 차단기술	시아노 유해조류	중간~높음	이점에 대한 증거는 제한적이다.	*큰 수역에는 적합하지 않다. *수상처리시설은 유지보수가 필요할 수 있다. *차양덮개 및 기타 부유장치는 퇴적물 영양염류 생성 증가에 예상외 결과를 초래할 수 있다.
	흐름조작	시아노 유해조류	낮음	하천체제 이점에 대한 상당한 증거가 있다.	흐름을 조작 능력 여부에 달려있다.

호소내 관리방안 요약(계속)

관리 유형	조치	목표조류	비용	과학적 증거	어려운 점
화학적 방법	과산화수소	시아노 유해조류	중간	*시아노박테리아 표적의 효과성에 대한 상당한 과학적 증거가 있지만, 용량 최적화가 필요하다.	*선박에 의한 산화수소 주입이 필요할 수 있다. *과산화수소 사용 위험의 안전 제어가 가능하다.
	지구화학적 화합물 (예: 명반, 포스락, 수중 인산염 등)	인 (수중 및 퇴적물)	중간~높음	*사용량 및 배경 조건이 적절할 경우 그 이점이 많은 문헌에 나타나 있다.	*방법 및 목표(예, 수체 또는 퇴적물의 인산 공급원). *적절한 조건 및 용량에서 매우 효과적 일 수 있다. *경미한 잔류영향(예: 화학물질의 저층 퇴적물 잔류)의 위험이 있다.
	침전물 덮기	내부 (퇴적물) 영양염류	높음	수역의 특성과 사용량에 따라 효과가 달라진다는 증거가 있다.	*바닥 퇴적물을 덮어 영양염류가 상층의 물속으로 들어가는 것을 막는다. *퇴적물 처리기간 계산을 위해 처리을 고려가 필요하다.
	식물 추출물	시아노 유해조류	낮음	소규모수역에서 효과성이 증명된 식물성 물질이다(예: 보릿짚)	*보릿짚이 썩으면서 독성 시아노 유해 조류를 촉진하는 약간의 증거가 있다. *그리고 대발생 방지효과도 보증된 것이 없다.
생물적 방법	생물적 처리 (중균 살포)	조류	낮음	매우 제한적	*도입생물체가 토착생물체를 반드시 이긴다는 보장은 없다. *지속적인 중균 재살포가 필요하다.
	먹이그물의 생물조작	생체 이용가능 영양염류	높음	*수역의 특성에 따라 효과에 대한 증거는 엇갈린다.	*동물플랑크톤이나 물고기를 조작하는 것과 같은 먹이그물 통제의 어려움은 악명이 높다.
	수생식물	영양염류 (질소 및 인)	높음	*부유 및 침수식물이 사용된다. *얕은 수역에서 효과가 입증된다.	*비싸고, 새들의 사용(물에 떠 있는 식물)에 의해 분변오염 및 영양염류가 증가될 수 있다. *효과가 있기 위해서는 많은 수의 식물들이 필요하다.

참고문헌

Ashley, K.I., 1985. Hypolimnetic aeration: practical design and application. *Water Research* 19: 735-740.

Atkins, R.I., Rose, T., Brown, R.S. and Robb, M., 2001. The Microcystis cyanohABs bloom in the Swan River- February 2000. *Water Science & Technology* 43: 107-114.

Beutel, M.W. and Horne, A.J., 1999. A review of the effects of hypolimnetic oxygenation on lake and reservoir water quality. *Lake and Reservoir Management* 15(4): 285-297.

Bormans, M., Maršálek, B. and Jančula, D., 2016. Controlling internal phosphorus loading in lakes by physical methods to reduce cyanobacterial blooms: a review. *Aquatic Ecology* 50: 407-422.

Cao, X., Song, C., Li, Q. and Zhou, Y., 2007. Dredging effects on P status and phytoplankton density

- and composition during winter and spring in Lake Taihu, China. *Hydrobiologia* 581: 287.
- Carey, C.C., Ibelings, B.W., Hoffmann, E.P., Hamilton, D.P. and Brookes, J.D., 2012. Eco-physiological adaptations that favour freshwater cyanoHABs in a changing climate. *Water Research* 46: 1394-1407.
- Douglas, G.B., Hamilton, D.P., Robb, M.S., Pan, G., Spears, B.M. and Lürling, M., 2016. Guiding principles for the development and application of solid-phase phosphorus adsorbents for freshwater ecosystems. *Aquatic Ecology* 50: 385-405.
- Drábková, M., Admiraal, W. and Maršálek, B., 2007. Combined exposure to hydrogen peroxide and light selective effects on cyanoHABs, green algae, and diatoms. *Environmental Science & Technology* 41: 309-314.
- Gantzer, P.A., Bryant, L.D. and Little, J.C., 2009. Effect of hypolimnetic oxygenation on oxygen depletion rates in two water-supply reservoirs. *Water Research* 43: 1700-1710.
- Gensemer, R.W. and Playle, R.C., 2010. The bioavailability and toxicity of aluminum in aquatic environments. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 29: 315-450.
- Hamilton, D.P. and Dada, A., 2016. Lake management: A restoration perspective. In: *Advances in New Zealand Freshwater Science*. Jellyman PG, Davie TLA, Pearson CP, Harding JS (Eds). New Zealand Freshwater Sciences Society and New Zealand Hydrological Society Publishers, pp. 531-552.
- Hamilton, D.P., Wood, S.A., Dietrich, D.R. and Puddick, J., 2014. Costs of harmful blooms of freshwater cyanoHABs. In: *CyanoHABs. An Economic Perspective*. Sharma NK, Rai AK, Stal LJ (Eds), John Wiley & Sons, Ltd., pp. 245-256.
- Jeppesen, E., Søndergaard, M., Jensen, J.P., Havens, K.E., Anneville, O., Carvalho, L., Coveney, M.F., Deneke, R., Dokulil, M.T. and Foy, B.O.B., 2005. Lake responses to reduced nutrient loading- an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies. *Freshwater Biology* 50: 1747-1771.
- Jeppesen, E., Søndergaard, M., Liu, Z. eds (2017) *Lake restoration and management in a climate change perspective*. *Water* (special issue) 9(2).
- Kurmayer, R., Deng, L. and Entfeller, E., 2016. Role of toxic and bioactive secondary metabolites in colonization and bloom formation by filamentous cyanobacteria *Planktothrix*. *Harmful Algae* 54: 69-86.
- Li, Y., Tang, C., Wang, C., Anim, D.O., Yu, Z. and Acharya, K., 2013. Improved Yangtze River diversions: Are they helping to solve algal bloom problems in Lake Taihu, China- *Ecological Engineering* 51: 104-116.
- Lürling, M. and Tolman, Y., 2014a, Beating the blues: Is there any music in fighting cyanoHABs with ultrasound?. *Water Research* 66: 361-373.
- Ma, H., Cui, F., Liu, Z. and Zhao, Z., 2012. Pre-treating algae laden raw water by silver carp during *Microcystis* dominated and non-*Microcystis*-dominated periods. *Water Science & Technology* 65: 1448-1453.
- Mackay, E.B., Maberly, S.C., Pan, G., Reitzel, K., Bruere, A., Corker, N., Douglas, G., Egemose, S., Hamilton, D., Hatton-Ellis, T., Huser, B., Li, W., Meis, S., Moss, B., Lürling, M., Phillips, G., Yasseri, S. and Spears, B.M., 2014. Geoen지니어링 in lakes: Welcome attraction or fatal distraction- *Inland Waters* 4: 349-356.



- Nürnberg, G.K., 2007. Lake responses to long-term hypolimnetic withdrawal treatments. *Lake and Reservoir Management* 23(4): 388-409.
- O'Brien, K.R., Burford, M.A. and Brookes, J.D. 2009. Effects of light history on primary productivity in a *Cylindrospermopsis raciborskii*-dominated reservoir. *Freshwater Biology*, 54: 272-282.
- Oosterhout, F. and Lürling, M., 2011. Effects of the novel 'Flock & Lock' lake restoration technique on *Daphnia* in Lake Rauwbraken (The Netherlands). *Journal of Plankton Research* 33: 255-263.
- Pavlineri, N., Skoulikidis, N.T. and Tsihrintzis, V.A., 2017. Constructed floating wetlands: A review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis. *Chemical Engineering Journal* 308: 1120-1132.
- Pearson, L.K., Hendy, C.H. and Hamilton, D.P., 2016. Dynamics of silicon in lakes of the Taupo Volcanic Zone, New Zealand, and implications for diatom growth. *Inland Waters* 6(2): 185-198.
- Peterson, S.A., 1982. Lake restoration by sediment removal. *Journal of the American Water Resources Association* 18: 423-436.
- Quilliam, R.S., van Niekerk, M.A., Chadwick, D.R., Cross, P., Hanley, N., Jones, D.L., Willby, A.J.A. and Oliver, D.M., 2015. Can macrophyte harvesting from eutrophic water close the loop on nutrient loss from agricultural land- *Journal of Environmental Management* 152: 210-217.
- Sharpley, A., Jarvie, H.P., Buda, A., May, L., Spears, B. and Kleinman, P., 2013. Phosphorus legacy: Overcoming the effects of past practices to mitigate future water quality impairment. *Journal of Environmental Quality* 42: 1308-1326.
- Singleton, V. and Little, J.C., 2006. Designing hypolimnetic aeration and oxygenation systems - a review. *Environ. Sci. Technol.* 40: 7512-7520.
- Tammeorg, O., Möls, T., Niemistö, J., Holmroos, H. and Horppila, J. 2017. The actual role of oxygen deficit in the linkage of the water quality and benthic phosphorus release: Potential implications for lake restoration. *Science of the Total Environment* 599-600: 732-738.
- Triest, L., Stiers, I. and Van Onsem, S., 2016. Biomanipulation as a nature based solution to reduce cyanobacterial blooms. *Aquat Ecol.* 50: 461-483.
- Williamson, C.E., Overholt, E.P., Pilla, R.M. et al. 2015. Ecological consequences of long-term browning in lakes. *Scientific Reports* 5: 18666.
- Vincent, W.F., 2009. Effects of Climate Change on Lakes. In: *Encyclopedia of Inland Waters* (ed. G.E. Likens), Elsevier, Oxford, vol. 3, pp. 55-60.
- Visser, P.M., Ibelings, B.W., Bormans, M. and Huisman, J., 2016. Artificial mixing to control cyanobacterial blooms: a review. *Aquatic Ecology* 50: 423-441.
- Xiaochuang, L., Dreher, T.W. and Li, R., 2016. An overview of the diversity, occurrence, genetics and toxin production of the bloom-forming *Dolichospermum* (*Anabaena*) species. *Harmful Algae* 54: 54-68.
- Zebek, E. 2014. Response of cyanobacteria to the fountain-based water aeration system in Jeziorak Mały urban lake. *Limnological Reviews* 14: 51-60.
- Zhang, H., Lyu, T., Bi, L., Tempero, G., Hamilton, D.P. and Pan, G., 2018. Combating hypoxia/anoxia at sediment-water interfaces: A preliminary study of oxygen nanobubble modified clay materials. *Science of The Total Environment* 637: 550-560.