

특별기고

정책결정자를 위한 남조류 대발생의 원인과 관리대책

류재근

한국환경영향평가학회 고문

1. 서론

조류는 바다, 담수호, 강, 하천 그리고 웅덩이 등 물이 있는 곳이면 어디서나 자란다. 조류는 수중 먹이그물을 떠받치고 있으며, 수중생태계의 동물에게 영양분을 제공하고 미생물과 함께 환경전체를 통해 에너지흐름과 영양소순환에 기여한다. 그러나 영양과다로 인해 조류가 대량 발생하는 경우에는 문제가 생긴다. 조류가 증식한 물을 음용수로 이용할 경우 정수처리와 여과과정을 거쳐도 불쾌한 맛과 냄새가 남는 등의 문제가 있으며, 그 처리비용과 시간도 많이 소요된다.²⁸⁾ 조류 대량 발생을 유발하는 영양소들은 강우와 그로 인한 농경지에 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.²⁹⁾ 남조류는 그러한 환경에서 번성할 수 있는데, 그것은 물의 체류기간이 더 길어지면 많은 남조류의 성장과 대발생을 가능하게 하기 때문이다. 남조류는 다른 조류 집단보다 물 위에 더 쉽게 뜰 수 있다.

남조류대발생 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. 인간

과 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.²⁸⁾

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 올라와 물의 위락 사용에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 남조류는 수영하는 사람들에게 심한 피부염을 유발할 수도 있다.

남조류대발생을 방지하기 위해 사용할 수 있는 연못/호소수역의 관리 및 저감 약품, 방법 및 도구들이 많이 있다. 그러나 어떤 약품과 접근방식이 특정 수역에 가장 효과적인 지를 결정하는 것은 때로는 매우 어렵다. 여기서는 남조류유해조류대발생 방지를 위한 약품과 물리적, 화학적 그리고 생물적 해결방안을 개관하고, 그들의 이점과 상대적 비용에 대한 몇 가지 세부사항을 살펴보고자 한다.

2. 유해조류 대발생을 유발하는 남조류

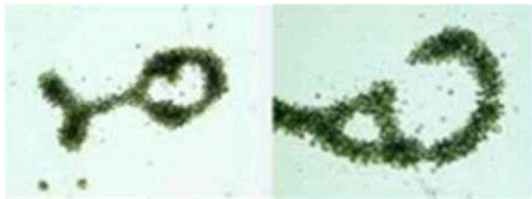
우리는 독성물질을 가진 조류로서 지구적 대발생을 일으키는 가장 우점하는 몇몇 유해 남조류속에 대해 자세히 살펴보았다. 지구 전체에서 발생하는 문제의 우점 독성생물속은 다음과 같다.

1) 마이크로시스티스

마이크로시스티스는 대발생을 일으키는 가장 일반

적인 속(*genera*)으로서 남극을 제외한 모든 대륙에서 발생한다. 남조류는 다당류에 의해 연결된 원형세포의 군락에서 번식하는데, 부유성이 매우 높고 수면에 뚜렷한 더끼이를 만든다. 남조류의 모든 대발생이 독성인 것은 아니지만 강력한 독성물질, 마이크로시스틴 및 아나톡신-A 독성물질을 생산할 수 있다.

세계적으로 마이크로시스틴은 아마도 수역에서 가장 일반적인 남조류독성물질이고 세계보건기구가 건강보호를 위해 음용수와 위락용수의 지침농도를 설정한 유일한 남조류독성물질이다.²⁹⁾



출처: Glenn McGregor
 <그림 1> 마이크로시스틴스.

2) 라피디오프시스

라피디오프시스는 일반적으로 발생하는 속으로 당 초에는 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(질소 고정)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.²⁹⁾

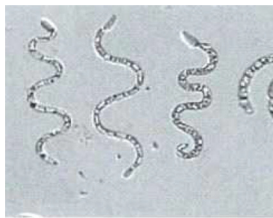
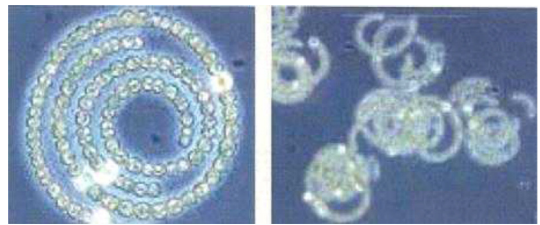


사진: Glenn McGregor
 <그림 2> 라피디오프시스.

3) 돌리코스페룸

돌리코스페르툼은 질소고정이 가능한 유해남조류 대발생(*cycanoHABs*)의 섬유성 생물속이다. 그것은 세계 전역에서 발생하며 광범위한 독성물질을 생산할 수 있고, 마이크로톡신, 아나톡신, 색시톡신, 그리고 시린드로스페르모톡신이 거기에 포함된다.²⁹⁾



출처: Michele Burford
 <그림 3> 돌리코스페르툼(중전의 아나베나).

4) 플랑크토티릭스

섬유질의 생물속인 플랑크토티릭스는 세계적으로 온대지방의 우점종이며, 열대지방과 아열대지방에서는 보고되는 것이 많지 않다. 그것은 마이크로시스틴 독성물질을 생산한다.²⁹⁾

5) 아파니조메논

이 섬유질 생물종은 다른 대부분의 일반적인 대발생 남조류와 많은 속성을 공유한다. 아파니조메논은 마이크로시스틴, 아나톡신, 색시톡신 및 시린드로스 페르모프신을 생산할 수 있으며, 세계 전역에서 발견된다.²⁹⁾

3. 우리나라 녹조 발생

국내 호소에서 녹조현상이 발생하는 원인, 즉 부영양화되는 원인으로는 크게 몇가지로 나누어 볼 수 있다. 우선 환경기초시설 및 법제환경의 미비를 들 수 있다. 과거 90년대 초에는 하수처리율이 약 45%에 불과하며 그것도 하수관거의 보급 및 정비율이 낮아 실제 처리율은 더욱 낮은 상태였다. 또한 하수처리장의 하수처리방식이 대부분 유기물의 제거를 주목적인 활성슬러지법으로 되어 있어 실제 부영양화 원인물질인 질소나 인에 대한 처리가 매우 미비한 하였다. 이렇게 처리되지 않은 질소, 인 등이 호소에 유입될 경우 호소 내에서

조류에 의해 이용되어 조류의 대량증식이 일어나므로 외부로부터 유입되는 유기물량은 감소해도 조체로 대변되는 유기물이 호소내에서 생산되므로 수체내 유기물량은 감소하지 않게 된다. 또한 이런 영양물질의 주 발생원인 농·축산폐수는 관리되지 않는 비점오염원으로 거의 처리되지 않은 상태로 바로 호소로 유입되며 특히 풍수기에 대량이 직접 호소로 유입되어 이후 부영양화, 녹조현상을 유발한다.

그러나 1968년 공해방지법의 시행령에서 처음 공공하수처리시설의 방류수 수질기준이 설정될 때에는 영양염류를 포함하지 아니하였다. 이후 하폐수 배출기준에서 영양염류에 대한 기준이 1991년 2월 2일자에 수질환경기본법(현재 물환경보전법)이 제정되어 1996년 1월 1일부터 영양염류가 방류수 수질기준에 포함되어 시행되었다. 당시 방류수 수질기준은 분뇨, 하수, 폐수 종말처리장 순으로 총인 기준이 각각 16, 8, 16ppm이었다.

현재는 공공하수처리시설의 방류수수질기준은 하수도법에 따라 처리용량 500m³ 이상 규모의 처리장의 총인 방류수 기준은 방류지역에 따라 1지역의 경우 0.2ppm, 2지역의 경우 0.3ppm, 3지역의 경우 0.5ppm, 4지역의 경우 2ppm 이하로 설정되었다. 또한 처리용량이 500m³ 이하 50m³ 이상인 처리시설의 경우는 총인 2ppm이하, 50m³ 이하 규모의 처리시설에서는 4ppm으로 설정되어있다.

현재 우리나라는 선진국보다도 더 하수도 보급률이 높아 세계 최고수준인 94.3% 수준이다. 특히, 소규모 하수처리장까지 고도처리로 A2O공법이나, Media 공법, SBR공법, MBR공법 등을 사용하여 선진국도 우리나라 수처리기술을 따라오기가 힘들 정도로 수준이 높다.

두 번째 원인으로 유역환경의 변화를 들 수 있다. 즉 유역의 인구비, 산업지가 기하 급수적으로 증가하면서 오염부하의 절대량이 증가하게 되었다. 또한 농축산 활동이 증가하여 가두리양식장 등 영양물질 부하가 큰 업종이 증가하고 농경지에서의 비료사용량도 증가하였다. 그외에도 관광지 및 위라지 개발, 도로 전용 등으로 산림면적이 감소하였고 용지개발로 인한 벌채후 토양에서의 영양물질 유출은 산림피복지에 비해 수십배 이상 높다. 지방자치제도가 시행되면서 이익우선의 지

자체는 요식업소 입지제한에 대한 조례를 정하고 않고 규제가 완화되어 호소주변에 요식업소가 난립하게 된 것도 또하나의 원인으로 볼 수 있다.

부영양화의 원인으로 또 한가지 수환경의 변화를 들 수 있는데 취수원 확보를 위해 저류시설의 축조가 본격화되어 하천에 단단식으로 댐과 하구언이 형성되어 하천 전체가 거대한 정체수역으로 변모하게 되어 영양염류의 축적, 조류의 증식과 축적도가 증가하게 되었다. 또한 하천에 댐을 세워 조성된 인공호들은 유역면적이 크고 정체수역이 많아 외부오염부하량 및 내생산 오염부하량의 영향이 크다. 또 습지매립, 골재채취, 하상정비, 둔치개발, 과도한 용수이용 등 유기 및 무기물질부하의 환경용량이 초과된 상태이다.

특히 우리나라는 선진국보다 하상계수가 높기 때문에 홍수시 상류의 농경지로부터 사용된 비료 및 축산 등에서 유출되는 영양염류가 하류지역의 댐 및 저수지, 보 등으로 유입해 정체되는 지역에서 수온될 때 남조류 등이 크게 번식하게 되어 부영양화가 이뤄지는 지역이 많았다.

위에서 지적한 바와 같이, 부영양화가 진행되어 조류가 과도하게 자라 녹조현상이 발생하게 되면 우선 쉽게 눈에 띄어서 수체의 경관적인 면과 이용적인 면에서 사용을 방해 하게 된다. 식물플랑크톤의 증식으로 말미암아 수중에 유기물질 양이 증가하고 이 상태에서 상수원수로 공급될 경우 정수처리과정을 거친다 하더라도 이취미를 낸다. 이는 주로 남조류에 의해서 만들어지는 저분자 유기물 즉, geosmin 및 2methyl isoborneol 등에서 기인된다. 또한 남조류가 발생하는 독소 중에 대표적인 마이크로시스틴 독소도 냄새 제거하는 방법과 같은 방법으로 오존처리 및 활성탄을 사용하여 안전한 수돗물을 공급하고 있는 것으로 본다. 이에따라 상수처리를 고도처리함으로써 국민에게 안전한 급수를 공급할 수 있게 체계를 만들었으나, 조류에 대한 그 어느때보다 국민의 관심이 커, 이 문제에 대하여 관련 부처에서는 매년 수질개선에 노력하고 있다.

1) 남조류 독소를 분석하는 방법은 다음과 같다

남조류가 생성한 마이크로시스틴 독소를 분석하는 방법으로 ELISA법과 LC/MSMS분석법을 사용하고 있

는데, 그 방법을 소개한다.

ELISA(Enzyme-Linked Immunosorbent Assay; 효소결합면역흡착분석)법은 마이크로시스틴류(Microcystines; MCs)를 항원으로 하여 항원-항체 간 특이적 결합 반응과 효소를 이용한 발색반응으로 타겟을 정성·정량하는 분석방법이다. 이 방법은 마이크로시스틴류 전체 총 농도를 측정하는 것으로 개별물질 분석보다는 정확성이 낮다. 미국 EPA에서는 ELISA법의 표시한계(Reporting level)를 0.3 µg/L로 제시하고 있으며, 그 미만의 값은 신뢰도가 낮아 표기하지 않는다. ELISA법은 분석시간이 짧고 비교적 저렴한 비용이 드는 반면 정확성이 낮아 주로 마이크로시스틴류의 유무를 신속, 간편하게 판단하기 위한 스크리닝 목적에 적합하다.

LC/MSMS분석법(액체크로마토그래프-텐덤질량분석법)은 시료에서 마이크로시스틴류를 추출하여 고성능액체크로마토그래프로 개별물질을 분리한 다음 텐덤질량분석기로 기기분석하는 방법으로 ISO 및 미국 EPA 등에서 표준분석방법으로 사용한다. 특히, WHO 등 국내·외 기준에서 제시하고 있는 건강 위해성이 큰 마이크로시스틴-LR을 포함하여 6종의 개별 물질을 선택적으로 측정하므로 정확성이 높다. 그리고, 미국 EPA에서 제시한 표시한계는 0.005~0.09 µg/L로 ELISA법에 비해 1/3배~1/60배 더 낮은 농도로 분석이 가능하다. 다만, 고가의 장비와 분석비용, 숙련된 분석자가 필요하며, 분석소요시간이 길어 신속성이 떨어진다.

우리나라는 마이크로시스틴 중 건강 위해성이 크고 검출 빈도가 높은 마이크로시스틴-LR을 WHO 가이드라인과 동일하게 먹는물감시기준 1.0 µg/L로 관리하고 있으며, 분석방법도 표준방법인 LC/MSMS분석법을 사용하고 있다. 그러나, 270여종의 마이크로시스틴류 전체를 대상으로 하는 경우, 표준물질의 확보가 어려워 LC/MSMS 분석이 곤란한 경우, 신속하게 분석결과가 필요한 경우 등 그 목적이나 여건에 따라서는 검출한계가 높고 상대적으로 정확성이 낮아도 ELISA법이 유용한 대안이 될수 있다.

따라서, 상수원수나 하천수에 ELISA법을 이용하여 조류독소물질을 사전 모니터링하고 정확한 농도분석이 필요한 경우 LC/MSMS 기기분석을 실시하는 등의 활용방안을 면밀히 검토한 후 상수원에서 원수를 분석

하면 효과적인 대체방안이 나올 것으로 사료된다.

4. 전 세계 남조류 대발생 전망

시아노유해조류대발생은 세계 전역에서 일어나며, 담수호, 못 및 저수지에서 대부분 발생하지만, 기수와 해수에서도 발생한다. 몇몇 주목할 만한 시아노박테리아대발생은 환경적, 사회적 및 경제적으로 주요한 영향을 미친다. 중국의 태호, 북미의 에리호 및 발틱해가 이러한 사례에 포함된다. 2007년 중국 장수성 태호의 독성 마이크로시스틴스 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.²⁹⁾

1) 북미 5대호

북미의 5대호는 세계 전체 가용 담수의 약 18%를 저수하고 있는 중요한 수원이다. 2011년, 에리호에서 기록적인 독성 마이크로시스틴스 대발생이 있었는데, 그 면적이 5,000 km²에 이르렀다. 마이크로시스틴이 오하이오 주 톨레도 시의 상수도까지 침투하여 2014년 50만 명 이상의 주민들의 음용수 공급이 잠시 동안 중단되었다.²⁹⁾

2) 발트해

매해 여름 발트해에는 200,000 km²에 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.²⁹⁾

5. 조류 관리 동향

시아노유해조류 대발생 관리는 3개의 핵심요소로 구성된다. 감시, 저감 및 예측이다. 가장 효과적인 장기적인 저감대책은 저수지로 들어오는 영양염류를 줄이기 위해 집수구역의 영양염류를 관리하는 것이다. 그

려나 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 시아노유해조류대발생의 지속적인 방지를 위한 가장 효과적인 접근방식인 것이 거듭 증명되어 왔지만, 효과가 발생하자면 수십 년이 걸린다. 이러한 적극적인 수단에 더하여 시아노박테리아 대발생에 의한 심각하고 직접적인 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.²⁹⁾

6. 남조류 대발생 저감을 위한 하천호소 내 대처 방안 제시

1) 물리적 처리 방법

(1) 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 마이크로시스티스대발생 기간 중 수차례 사용된 예가 있다.

(2) 초음파

고출력 초음파는 파력으로 모든 생물체를 파괴할 수 있다. 그러나 상대적으로 높은 에너지비용이 들어간다.

고주파 초음파는 시아노박테리아의 부유조절능력을 파괴할 수 있지만, 수주 투과력은 극히 제한적이다. 저출력, 저주파초음파의 효과에 대한 증거는 없다.

음용수가 아닌 수질의 관리를 위한 마이크로시스틴 기준은 다음과 같다. 마이크로시스틴의 측정기준으로 설정한 국가도 있으나, 대부분의 국가에서 클로로필-a 측정값을 기준으로 제시하고 있으며, WHO 기준에서도 클로로필-a 세포수와 농도 기준 중에 선택하여

기준을 설정할 것을 권고하고 있다.

(3) 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.²¹⁾

(4) 산화처리

포기/산화처리 방법을 사용하여 저층수의 산소농도를 높일 수 있다. 저층수를 수면으로 끌어 올리는 기포 펌프나 선형 또는 원형 산기장치에 의한 주입장치와 같은 여러 가지 방법이 있다. 산화처리는 저층수에 산소를 직접 주입하는 방법도 사용할 수 있다. 그 목적은 무엇보다 저층수의 산소농도를 높여 저층퇴적 영양염류, 특히 조류 대발생을 일으킬 수 있는 인의 배출을 저감하는 것이다. 이 장치는 수면과 분리된 냉수층이 있는 깊은 층화화한 수역에만 적당하다. 그 방법은 기반시설 설치비용과 운영비용 측면에서 매우 비싸다. 연구 결과들은 그 결과가 장단점이 있음을 보여주고 있다.¹⁵⁾

(5) 준설

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. 그리고 일반적으로 큰 수역에는 적합하지 않다. 그리고 퇴적물 처분과 처리의 문제도 있다.^{19) 23) 28)}

(6) 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 시아노유해조류대발생에 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.^{17) 28)}

(7) 인공적 저층혼합

수면혼합층을 깊게 하고 수면층적이나 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 수면터끼이를 형성하는 생물종에 잘 사용된다. 이 생물종의 경우, 수면터끼이는 순환이 증가되면 파괴된다. 인공순환은 작은 수역이나 큰 호소의 작은 일부만 혼합할 필요가 있을 때 효과적이다. 설치비용은 다른 방식보다 낮지만 에너지비용이 많이 든다.²⁰⁾

2) 화학적 처리 방법

(1) 과산화수소(H₂O₂)

남조류 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 저항성 강한 남조류의 경우 과산화수소는 동물성플랑크톤에 해를 주지 않고 완전히 제거하기는 어려울 수 있다. 진핵생물 조류가 많은 호소에서는 과산화수소의 분해속도가 너무 빨라 효

과적으로 시아노박테리아를 죽이는 데는 시간이 충분하지 못할 것이다. 나아가, 수백 헥타르 이상의 넓은 수역에서 과산화수소의 사용은 현실적으로 무리이고 비용효과적이지 않다. 그러나 과산화수소는 정수장에서 시아노유해조류와 그 독소를 제거하는 데는 도움이 될 수 있다.²⁴⁾

(2) 황산구리(CuSO₄)

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.²⁹⁾

(3) 지구화학적 화합물(응집제 사용)

백반은 황산알루미늄으로 물속에서 덩어리를 형성한다. 백반은 시아노박테리아를 포집하여 물로부터 인산염을 흡수하고 퇴적물에서도 조류대발생의 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 없으면 다시 사용할 수 있다.^{16) 27)}

(4) 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.^{27) 29)}

3) 생물학적 처리방법

(1) 생물학적 처리

다양한 박테리아, 곰팡이 및 효모 제품들이 그들의 효과는 증명을 필요로 하지만 시아노유해조류 방지를

위한 잠재적인 수단으로 고려되고 있다. 몇몇 검토결과를 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 억제에는 환경적 조건들의 기능이고 지금 말한 미생물의 도입은 아닐 것이다.²²⁾

(2) 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.

(3) 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 없다면 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. 동물플랑크톤

생물종 중에는 소화나 다루기가 어렵거나 경우에 따라서는 시아노독소 때문에 시아노유해조류의 섭식을 적극적으로 기피하기 때문이다.²⁶⁾

대신 물고기 중에는 시아노유해조류 포식자를 포식하는 것도 있다. 총체적으로 물고기의 도입은 단기전략으로는 유용하지만 장기적으로 안정되고 효과적인 체제로 만들기는 가능하지 않다. 기타 중요한 요소들은 동물플랑크톤을 먹는 물고기 생물종의 불충분한 제거나 복원이다.¹⁸⁾

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 효과적일 수 있다. 그러나 그 성과는 기타 물고기들이 상당한 양의 영양염류를 발생시키기 때문에 한마디로 말할 수 없다. 여과섭식 조개류의 도입이 시아노박테리아 섭식강도를 높이는 또 다른 전략이 있다.

(4) 수생식물

수생식물은 시아노유해조류녹조와 영양염류 먹이 경쟁을 하며 수역에 그늘을 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.

(5) 부도 및 습지 이용

어떤 경우에는 식물을 다양한 크기의 부도에 심을 수 있다. 섬에 있는 식물은 끊임없이 영양염류를 제거하는 동시에 섬은 물에 그늘을 만든다. 철사우리를 만들어 그 떠있는 녹조덩이를 잡아두는데 사용할 수 있다.

〈표 1〉 하천 호소 내 처리방안

관리 유형	조치	목표조류	비용	과학적 증거	어려운 점
물리적 방법	초음파음파	시아노 유해조류 대발생	*높음 (고출력 초음파일 경우) *중간 (저출력 초음파일 경우)	*고주파초음파는 시아노 박테리아의 부력조절 능력을 파괴할 수 있지만 수중무과력은 매우 제한적이다. *저주파초음파 효과는 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. *표면터깅이는 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 퇴적토의 처분이 문제다. *작업 중 재 부유 퇴적물이 지속적인 조류문제가 될 수 있다.
	비성층화	용존산소 (심층수) 영양염류 및 시아노 유해조류	높음	*마이크로스시스티스와 같은 일부 종에 대한 효과를 뒷받침하는 상당한 과학적 증거가 있다. *라피디옵시스 (=Cylindrospermopsis)에서는 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 필요하다. *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 저산소 및 고농도 영양염류가 하류에 부정적인 영향을 줄 수 있다.

<표 1> 계속

관리 유형	조치	목표조류	비용	과학적 증거	어려운 점
	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 능력여 여부에 달려있다.
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, 수중인산염 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.	*바다 퇴적물을 덮어 영양염류가 상층의 물속으로 들어가는 것을 막는다. *퇴적물 처리기간 계산을 위해 처리율 고려가 필요하다.
	식물 추출물	시아노 유해조류	낮음	소규모수역에서 효과성이 증명된 식물서어 물질이다 (예:보릿짚)	*보릿짚이 썩으면서 독성 시아노 유해조류를 촉진하는 약간의 증거가 있다. *그리고 대발생 방지효과도 보증된 것이 없다.
생물적 방법	생물적 처리 (종균 살포)	조류	낮음	매우 제한적	*도입생물체가 토착생물체를 반드시 여긴다는 보장은 없다. *지속적인 종균 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.

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 계속적인 유

지노력이 필요하다. 이력현상의 개념은 수초(대형 수생식물)가 있는 맑고 얕은 호소는 영양염류의 추가적인 부하에 탄력적이지만, 영양염류 감축과 깨끗한 물 상태로 회복하기 위한 추가적인 조치를 하지 않으면 조류-우점 상태로 급속히 빠져들어 갈 수 있다.²⁵⁾

7. 결론

우리나라는 다른 나라(미국, 캐나다, 독일, 영국, 프랑스, 브라질, 멕시코 등)의 하천, 호소의 특성과 크게 다르다. 첫째로 사계절 중 7,8,9월의 여름철 중에 집중 강우 발생시에 댐이나 저수지, 보에 물을 저장해두지 않으면 물부족현상이 발생하게 된다. 둘째로는 하천의 하상계수가 미국, EU국가들에 비해 10~20배 더 높으므로 홍수때 하천의 물이 빠르게 바다로 유출되기 때문에 관리가 힘들다. 셋째로는 유역의 면적이 짧고 화강암질의 기반암이 넓게 분포되어있어 울창한 산림에서도 물의 저장량이 30% 수준밖에 되지않고 대부분의 산림은 5%수준밖에 침투가 되지않는 문제가 있다. 넷째로 다른나라보다 논이나 밭에 비료를 많이 사용하므로 비가 올 때 하천으로 다량 유출되어 댐이나 보, 저수지에 체류되고 저장되어 온도가 25℃ 이상으로 상승하면 남조류가 크게 증가하게된다. 이처럼 우리나라 하천 및 호소의 그 특성을 고려하여 수질 관리를 철저히 하여야 한다.

남조류 대량발생의 세계적인 관리 대책 세가지 방법을 잘 검토하여 우리나라에 적합한 방법을 다음과 같은 방안을 고려하여 남조류 관리에 정책결정을 하여야 한다. 외부로부터 유입되는 인의 차단에 대한 시설과 방법으로부터 개선되는 수질 및 영양단계가 부영양화의 관리 목표에 도달하기에 충분하지 못할 경우, 모델링 예측 또는 처리 후 모니터링 결과에 따라 세계적으로 많이 사용하는 호소 내 관리방안(in-lake treatment)을 생각하여야한다. 예를 들어 수심이 낮은 호수에서 유입 인부하량의 75~90%가 제거되어도 부영양화 상태가 그대로 유지되어 나타나는 경우가 있다. 이처럼 얕은 호수 및 저수지는 특히 민감하여 수체가 바람에 의해서 혼합되기 쉽고 조류생체량에 빛이 도달하는 층(euphotic zone)이 더 많이 존재하기 때문이다.

이러한 다양한 방법을 통해 부영양화 조절 방안을 실시할 때에는 저감 방안 실시 전후의 충분한 정보를 확보하고, 수행 이후에 호소 생태계와 수질에 대한 지속적인 모니터링을 통해 적절한 방안이 수행 되었는지를 평가하고, 향후의 사후관리 방향을 올바르게 설정하여야 한다. 이러한 사후관리 모니터링과 평가는 유사한 부

영양화 문제를 갖고있는 다른 호소 환경에서 유용하게 사용할 수 있다.

세계적으로 많이 사용하는 하천 및 호소 관리방법을 우리나라의 현실에 맞게 계속 연구검토하여 우리나라가 2000년부터 기후가 아열대기후로 변화하면서 발생되는 하천호수 관리에 대한 대비로 폭우에 의한 댐 붕괴나 저수지 붕괴 등을 잘 관리하기 바라며, 기후변화에 따른 국지성 강우, 가뭄으로 댐이나 저수지의 저수량이 부족하면서 온도가 상승되어 남조류가 대량 발생되지 않도록 잘 관리하기 바란다.

IPCC 보고서에 의하면 우리나라는 기후변화에 따라 2000년대부터 아열대 기후대로 변하고 있어 그에 대한 대책으로 과거 기존의 1274mm가 내리던 강우 패턴에 사용하던 수질관리 방법에서 1600~1700mm 강수량으로 과거보다 500mm가 더 오며, 일부지역으로 한정되어 집중 폭우에 대응하는 남조류 관리를 계속 조사연구하여 추진하기 바란다. 하천, 댐, 저수지 등 남조류 관리대책 및 수질개선을 목적으로 하는 여러 사업에 이 논고가 참고가 되길 바란다.

참고문헌

1. 류재근, 우리나라 주요 호소의 특성과 수질 개선 방안, 제34회 수공학연구발표회논문집, 한국수문학회, 1992, 13-27p
2. 류재근, 녹조현상의 원인규명 및 발생저감방안, 국립환경연구원, 1999.
3. 류재근, 21세기 하천, 호소의 부영양화 관리방안, KIST특별강연요약집, 2000.
4. 류재근, 정책결정자를 위한 부영양화 관리방안, 국립환경과학원, 2012.
5. 류재근, 우리나라 하천, 호소의 부영양화 관리방안, 서울시립대학교, 2015.
6. 류재근, 시아노박테리아 남조류 대발생의 관리 솔루션, 유네스코, 2020.
7. UNESCO 해양과학위원회, Solutions for managing cyanobacterial blooms - A scientific summary for policy makers.