

광교저수지 녹조관리사업 평가 및 개선방안

Evaluation of Gwanggyo Reservoir Green Algae Management Project and
Improvement Direction

강은하
Eunha Kang



광교저수지 녹조관리사업 평가 및 개선방안

Evaluation of Gwanggyo Reservoir Green Algae Management Project and
Improvement Direction

강은하

CONTENTS

연구요약

| | |
|----------------------------|-----------|
| 01 서론 | 01 |
| 제1절 연구배경 및 목적 | |
| 제2절 연구내용 및 방법 | |
| 02 광고저수지 녹조관리 여건 분석 | 03 |
| 제1절 광고저수지 수계 특성 | |
| 제2절 광고저수지 녹조관리사업 현황 분석 | |
| 03 선행연구 고찰 | 15 |
| 제1절 녹조제거 사례 고찰 | |
| 제2절 녹조 및 조류제거제 유해성 고찰 | |
| 04 녹조관리사업 평가 및 시사점 | 27 |
| 제1절 수질정화장치 운영 평가 및 시사점 | |
| 제2절 조류제거제 운영 평가 및 시사점 | |
| 제3절 녹조 모니터링 운영 평가 및 시사점 | |
| 제4절 녹조관리사업 평가 총평 | |
| 04 광고저수지 녹조관리 개선방안 | 43 |
| 제1절 녹조관리사업 개선방안 | |
| 제2절 기후변화 대응 중장기 녹조관리 방향 | |
| 05 결론 | 57 |
| 제1절 연구 결과 및 정책제언 | |
| 참고문헌 | 59 |

연구요약

연구목적

- 수원시 비상급수원인 광교저수지는 적은 유량 및 비점오염원 영향으로 녹조가 잘 생기는 여건임
 - 광교저수지는 유입·유출 유량이 적은 비상급수원이자 축산계 오염원 및 주변 인접 도로로부터 비점오염원이 유입되어 부영양화지수가 ‘부영양’인 녹조가 발생되기 쉬운 여건으로 관리가 필요
 - 광교저수지는 비상취수원인 동시에 광교산과 저수지를 찾는 방문객이 많은 친수적 공간이기도 함
 - 녹조는 여름철 유해조류가 과번식하는 현상으로 녹조의 유해조류독소는 건강 및 수생태계에 악영향을 주어 녹조의 적극적 관리가 필요
- 본 연구에서는 광교저수지의 최근 4년간 녹조관리사업에 대한 중간 평가를 통해 녹조관리사업의 향후 개선방안을 제안하고자 하였음
 - 수원시는 2020년부터 수질정화장치와 조류제거제 살포를 통해 최근 4년간 조류경보제 미발령을 유지
 - 조류제거제와 수질정화장치를 사용한 적극적 녹조관리사업에 대한 중간점검을 통해 조류제거제의 안정성 및 사업의 적절성을 평가하고 유해조류독소의 관리방안 및 중장기적인 녹조관리방안을 제안하고자 하였음

주요 내용 및 결과

- 광교저수지의 수질은 2등급(약간 좋음)이나 부영양화 지수가 “부영양”으로 높아 녹조가 잘 생기는 여건으로 유해조류독소(마이크로시스틴)를 내는 마이크로시스티스와 아나베나 유해남조류가 관찰됨
 - 광교저수지 상수원보호구역 내 축산계 오염원, 광교산 등산로와 음식점 및 휴게시설, 영동고속도로로 인한 비점오염원 유입으로 광교저수지는 파장저수지에 비해 부영양화 지수가 높아

2019년 녹조 경보 98일이 발령되는 등 녹조 문제가 심각하였음

- 녹조세포 내 존재하는 유해조류독소 마이크로시스틴은 인체 유입시 간세포와 신경계 영향을 주는 잠재적 발암물질로 집중관리대상임
- 마이크로시스틴은 조류 세포 파괴 후에도 수중에 최장 21일까지 잔존하며 수생태계 및 인체에 피해를 주는 물질임
- 수원시는 2020년부터 수질정화장치 도입, 생화학 조류제거제 운영, 녹조모니터링 확대 운영 등 녹조관리사업을 추진하여 2023년까지 녹조경보발령 0일의 성과를 거두었으며 세부 사업별 성과 평가에 따른 개선방안은 다음과 같음
 - (수질정화장치 사업) 2022년부터 부력수차 수류확산장치 운영으로 수면 파동을 일으켜 녹조 스크 형성을 억제하고 물순환을 통해 수온 저감 효과가 있었으나 1대 당 수류면적이 작아 향후 저수지 하류 정체 구역 중심 확대 운영이 필요
 - 녹조 발생 초기 효과적이나 대규모 녹조 발생이나 강우로 인한 외부오염물질 유입 시에는 녹조방재선(부유물질 직접 제거) 운영 지속이 필요
 - (조류제거제 사업) 생화학조류제거제 (※정우티엔에스의 마이팅션)를 사용하여 유해남조류가 과증식하기 전에 세포를 사멸시켜 조류대발생을 예방하였으며 효과가 최장 40일 지속되었음
 - (조류제거제 사업) 조류제거제 살포시 아연, 마그네슘, 황산이온의 수중 농도 불균형 대비 수질 측정 강화, 아연의 퇴적토양 축적 여부에 대한 영향평가, 조류세포의 급격한 사멸 후 유해독소의 수생태계 유출 가능성에 대한 평가를 통해 장기간 조류제거제 사용 시 안정성 확보 필요
 - 아연은 어류 축적 시 장기조직 변화 및 생리적 장애 유발 가능
 - (녹조모니터링 사업) 녹조 모니터링지점을 11개 지점으로 확대, 유해남조류 세포수 유추 가능한 피코시아닌 현장 측정으로 빠른 녹조발생지표 추정이 가능하였으며 조류제거제 살포 후 1~2주간 집중 영향평가가 필요

정책제언

- 수원시의 녹조관리사업은 물리화학적 관리사업 종합 운영, 조류제거제의 수생태계 환경영향 모니터링, 조류독소 영향평가 및 저감의 세가지로 운영할 것을 제안함
- 물리화학적 녹조관리사업 종합 운영은 매년 5~10월 기존 수질 항목에 피코시아닌을 추가한 녹조모니터링을 상시 운영하고 부력수차 수질정화장치를 저수지 하류의 상습 정체구역에

추가 배치 운영(기존 1대를 4대 이상)하며 조류제거제는 최소량 최소횟수 원칙(1.0톤 이하로 세포가 서서히 사멸되도록 살포)으로 유해남조류 세포수 모니터링을 병행하며 살포할 것을 제안함

- 조류제거제 주성분인 아연, 마그네슘, 황산이온을 조류제거제 사용 직후 2주간 취수탑에서 모니터링하고, 조류제거제 사업 5년차 이후에 저수지 퇴적 토양의 수산화아연 농도 측정을 통해 아연의 장기적 수생태 환경 영향 평가를 제안
- 조류제거제에 의한 세포 사멸 후 수중 마이크로시스틴의 유출여부 (조류제거제 사용 직후 수중 마이크로시스틴 2주간 측정) 실험평가를 통해 조류제거제에 의한 유해남조류 세포 사멸 후에도 유해독소의 안정성에 대한 평가를 실시하고, 조류경보 뿐만 아니라 조류제거제 사용 직후 3주 이내 상수 원수 취수 금지 및 친수활동 금지를 통해 유해독소의 환경에의 영향을 미연에 방지할 것을 제안
- 기후변화에 대응하는 중장기 녹조관리 방향은 근본적으로 녹조발생 원인물질인 영양염류의 저수지 유입을 사전에 방지하는 것임
 - 영양염류가 저수지로 직접 유입되지 않도록 저수지 유입부에 수생식물을 식재한 침강지를 조성하도록 제안함
 - 저수지 상류 및 주변 도로는 강우 시 비점오염물질의 저수지 유입통로가 되므로 투수성 포장, 침투도랑, 생태저류형 침투 화분 등을 조성하여 비점오염원의 부하량을 낮출 것을 제안함
 - 침강지와 도로 비점오염저감시설은 광교산 및 광교저수지의 심미적 가치도 높일 수 있도록 설치하여 광교저수지의 친수공간으로서의 매력을 높이는 것이 필요함
 - 상수원보호구역의 농업 및 축산업 시설에 대한 오수 우회 식생수로 및 가축분뇨 처리시설 설치 지원, 오수관로 개량화 등 점오염원 관리도 지속적으로 추진해야 함
 - 장기적으로 수돗물의 조류독소 정수처리기준을 강화하여 조류독소의 정수 유입 가능성을 사전에 방지하도록 제안

주제어: 광교저수지, 녹조, 상수원수 관리, 비점오염관리

01

서론

제1절 연구배경 및 목적

1. 연구배경 및 목적

- 수원시 비상급수원 광고저수지의 녹조관리를 위해 2020년부터 추진한 녹조관리사업에 대한 중간 평가 및 향후 지속 방향 정비가 필요
 - 광고저수지는 수원시 비상급수 상수원이나 유입·유출 유량인 적은 저수지 특성상 여름철 녹조현상이 자주 발생 (2019년 조류경보제 관심 단계 최장 98일간 발령)
 - 수원시 상수도사업소는 2020년부터 수질정화장치와 조류제거제 살포를 통해 조류 발생을 방지해 2020년 이후 최근 4년간 조류경보제 미발령을 유지
- 최근 4년간 광고저수지 녹조관리사업에 대한 중간평가를 통해 녹조제거방식의 환경적 안정성을 검토하고 개선방안을 제시하고자 함
- 광고저수지의 지속적인 녹조관리를 위하여 화학적 녹조관리사업의 환경 영향을 판단할 수 있는 방안 및 그 영향을 최소화할 수 있는 관리방안과 중장기적 관점의 녹조 예방을 위한 정책방향을 제시하고자 함

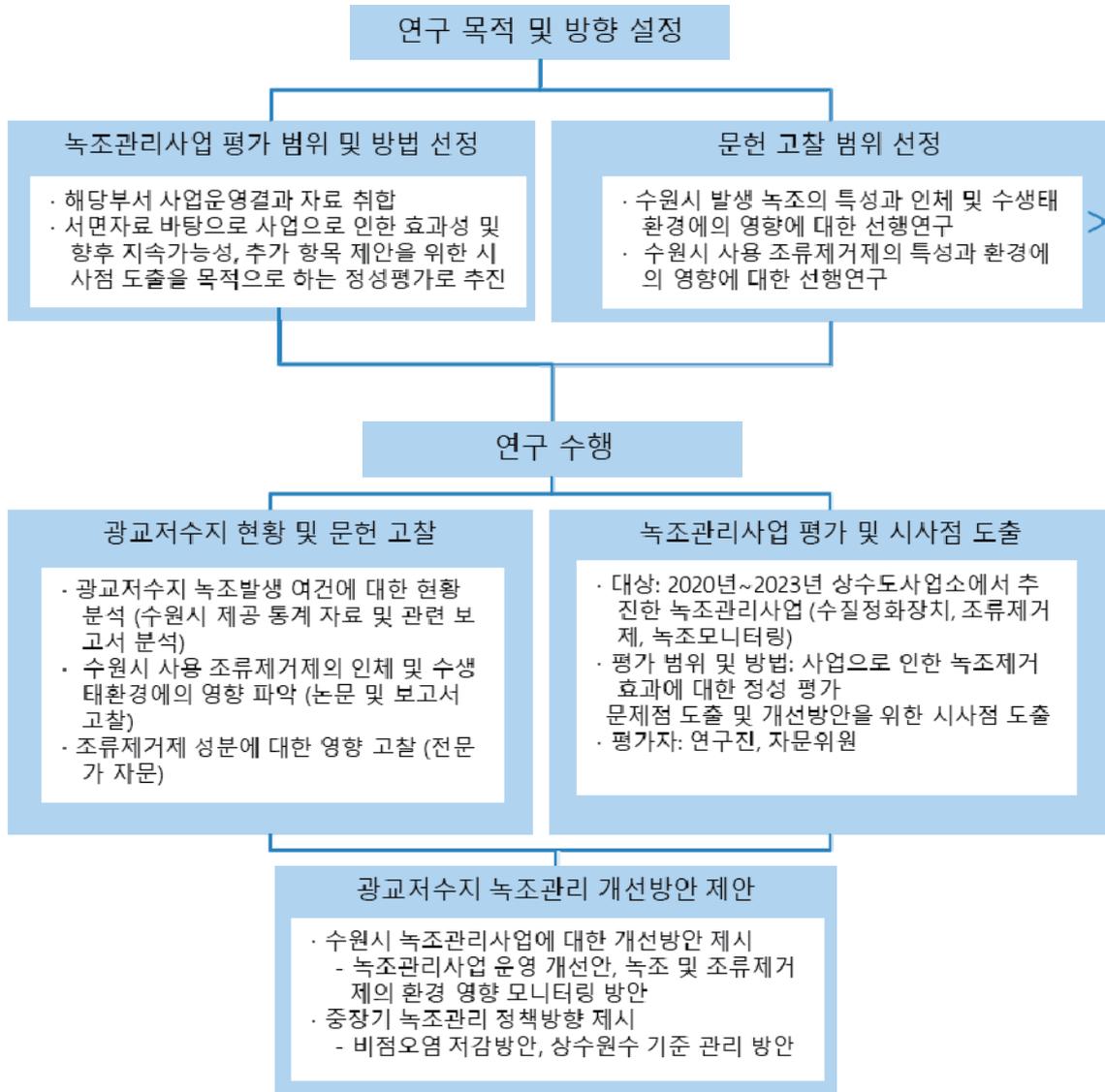
제2절 연구내용 및 방법

1. 연구내용 및 방법

- 광고저수지 녹조관리사업 중간평가: 현장 조사, 관련자료 분석, 전문가 자문
- 조류 및 조류제거제의 환경에의 영향 파악: 문헌 고찰, 전문가 자문
- 녹조관리사업 개선방안 및 중장기 대책 제안: 관련자료 분석 결과 및 전문가 자문 종합 판단

□ 연구 수행 체계는 다음과 같음

그림 1-1 | 연구수행체계



평가대상 자료:
2020~2023년 상수도사업소 녹조관리사업 운영 결과보고서

의견 수렴
- 전문가 자문회의
- 중간보고회

02

광고저수지 녹조관리 여건 분석

제1절 광고저수지 수계 특성

1 • 수원시 비상급수 취수원으로서의 광고저수지

- 광고저수지는 광고산맥 발원 광고천과 주변 소하천의 물줄기가 모여진 수원시 북쪽에 위치한 저수지로 비상급수 취수원이며 주변 지역은 상수원보호구역으로 지정되어 있음
- 광고저수지 인접 10.277km²는 광고상수원보호구역으로 지정되어 있으며 1일 취수능력은 50천m³/일임

그림 2-1 | 광고저수지 현황사진



자료 : 수원시청 공식홈페이지_수원관광(www.suwon.go.kr/web/visitsuwon/)

- 광고저수지 인근은 수변 산책로 및 광고산 산행로가 조성되어 있어 수원시민의 대표적 휴식 공간으로서의 역할도 존재
 - 광고저수지 일대는 광고산 입지 및 수려한 자연미로 인해 연중 시민이 많이 찾는 산행로 및 수변산책로임
 - 광고저수지 둘레에 산책로가 조성되어 있고 자전거도로와 주말농장, 음식점과 같은 편의 및 관광 시설이 위치하여 방문객의 만족도가 높음
 - 봄·가을 산행 철에는 유동인구가 많아 저수지로의 비점오염 유입 가능성이 높아 관리가 필요함
- 광고저수지는 상수원수이지만 주변 환경 여건으로 인해 호소 수질 등급 2등급(약간 좋음, 2020년~2023년), 3등급(보통, 2019년)으로 다소 낮음
 - 상수원수로 사용 가능한 호소 수질 등급은 보통 이상 등급이나 약간좋음 등급 이상의 관리가 바람직함
 - 보통 등급은 고도 정수처리 이후 생활용수로 사용 가능, 약간좋음 등급은 일반적 정수처리 후 생활용수로 사용 가능 (환경정책기본법 시행령 제2조 이하 환경기준)
 - 광고산 상류 광고천 및 주변 소하천의 유입 수량이 적어 저수 기간이 길고 강우시 주변 대지, 산책로, 도로에서 비점오염원이 유입되어 취수원 계획구역 II구역에 해당되어 수질관리계획 수립 필요
 - 최근 3년간 연평균 수질이 1a(매우좋음) 등급인 구역은 취수원 계획구역 I 구역에 해당되어 수질관리계획이 간소해짐
 - I 구역을 제외한 구역은 II구역으로 계획지표, 오염원 관리계획, 재정계획을 포함하는 수질관리계획 수립이 필요
- 광고저수지는 상수원이자 수원시민 휴식공간으로 상수원 수질과 주변 경관으로 동시에 관리해야 하는 특성이 있음

2 • 광고저수지 수질 현황

- 광고저수지(하광고 소류지 1개소)와 유입하천(수원천, 광고천 등 9개소)에 대해 월 1회 수질을 측정하여 모니터링 함

그림 2-2 | 수원시 하천 및 호소 현황



- 수원시 하천 및 호소의 수질 측정 결과는 다음과 같으며 광교상수원보호구역 및 광교저수지와 인접한 하천(예: 수원천, 광교상수원보호구역 소하천)의 수질이 가장 좋음
- 하광교소류지 수질이 2023년에는 좋음 등급으로 다른 저수지에 비해 개선되었음

그림 2-3 | 하천 및 호소 수질 현황

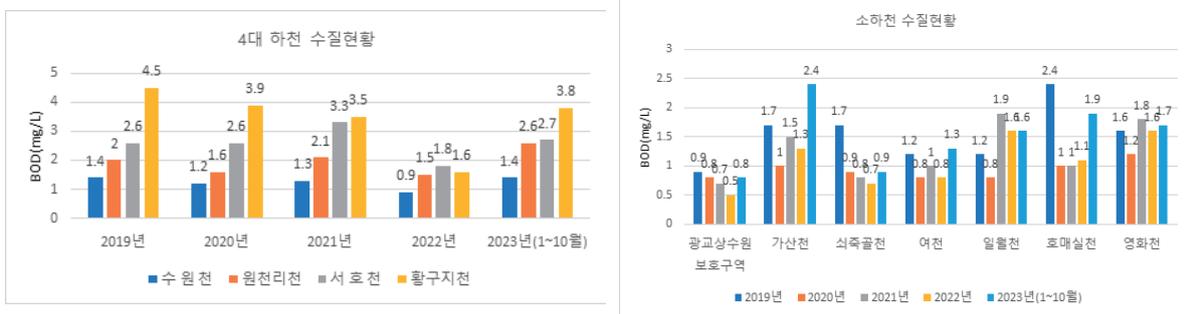


표 2-1 | 하천 수질 현황

(BOD : mg/L)

| 구분 | 2019년 | 2020년 | 2021년 | 2022년 | 2023년(1~10월) |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 수원천 | 1.4 (Ib, 좋음) | 1.2 (Ib, 좋음) | 1.3 (Ib, 좋음) | 0.9 (Ia, 매우좋음) | 1.4 (Ib, 좋음) |
| 원천리천 | 2.0 (Ib, 좋음) | 1.6 (Ib, 좋음) | 2.1 (II, 약간좋음) | 1.5 (Ib, 좋음) | 2.6 (II, 약간좋음) |
| 서호천 | 2.6 (II, 약간좋음) | 2.6 (II, 약간좋음) | 3.3 (III, 보통) | 1.8 (Ib, 좋음) | 2.7 (II, 약간좋음) |
| 황구지천 | 4.5 (III, 보통) | 3.9 (III, 보통) | 3.5 (III, 보통) | 1.6 (Ib, 좋음) | 3.8 (III, 보통) |
| 광고상수원 보호구역 | 0.9 (Ia, 매우좋음) | 0.8 (Ia, 매우좋음) | 0.7 (Ia, 매우좋음) | 0.5 (Ia, 매우좋음) | 0.8 (Ia, 매우좋음) |
| 가산천 | 1.7 (Ib, 좋음) | 1.0 (Ia, 매우좋음) | 1.5 (Ib, 좋음) | 1.3 (Ib, 좋음) | 2.4 (II, 약간좋음) |
| 쇠죽골천 | 1.7 (Ib, 좋음) | 0.9 (Ia, 매우좋음) | 0.8 (Ia, 매우좋음) | 0.7 (Ia, 매우좋음) | 0.9 (Ia, 매우좋음) |
| 여천 | 1.2 (Ib, 좋음) | 0.8 (Ia, 매우좋음) | 1.0 (Ia, 매우좋음) | 0.8 (Ia, 매우좋음) | 1.3 (Ib, 좋음) |
| 일월천 | 1.2 (Ib, 좋음) | 0.8 (Ia, 매우좋음) | 1.9 (Ib, 좋음) | 1.6 (Ib, 좋음) | 1.6 (Ib, 좋음) |
| 호매실천 | 2.4 (II, 약간좋음) | 1.0 (Ia, 매우좋음) | 1.0 (Ia, 매우좋음) | 1.1 (Ib, 좋음) | 1.9 (Ib, 좋음) |
| 영화천 | 1.6 (Ib, 좋음) | 1.2 (Ib, 좋음) | 1.8 (Ib, 좋음) | 1.6 (Ib, 좋음) | 1.7 (Ib, 좋음) |

자료 : 수원시 내부자료

표 2-2 | 호소 수질 현황

(BOD : mg/L)

| 구분 | 2019년 | 2020년 | 2021년 | 2022년 | 2023년(1~10월) |
|--------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 하광교소류지 | 4.2 (III, 보통) | 2.5 (Ib, 좋음) | 3.6 (II, 약간좋음) | 4.6 (III, 보통) | 2.5 (Ib, 좋음) |
| 신대저수지 | 3.5 (II, 약간좋음) | 3.8 (II, 약간좋음) | 3.5 (II, 약간좋음) | 2.5 (Ib, 좋음) | 3.9 (II, 약간좋음) |
| 원천저수지 | 3.0 (Ib, 좋음) | 3.5 (II, 약간좋음) | 3.0 (Ib, 좋음) | 2.4 (Ib, 좋음) | 3.3 (II, 약간좋음) |
| 만석거 | 3.9 (II, 약간좋음) | 5.5 약간나쁨(IV) | 3.9 (II, 약간좋음) | 3.0 (Ib, 좋음) | 6.0 약간나쁨(IV) |
| 서호저수지 | 5.9 약간나쁨(IV) | 6.7 (V, 나쁨) | 4.5 (III, 보통) | 3.9 (II, 약간좋음) | 5.7 약간나쁨(IV) |
| 일월저수지 | 5.1 약간나쁨(IV) | 8.2 (V, 나쁨) | 4.4 (III, 보통) | 3.3 (II, 약간좋음) | 5.8 약간나쁨(IV) |

자료 : 수원시 내부자료

- 광교저수지에 대한 조류경보제 발령 및 조류 발생 현황은 2020년 이후 미발생으로 유지 중
 - 광교저수지는 2019년까지 조류경보제가 8월~10월 사이 발령되다가 2020년 녹조관리사업 추진 이후 현재('23.12.)까지 미발령 유지 중
 - 특히 2018년, 2019년 연속으로 70일 이상 발령된 녹조현상은 적극적 녹조관리사업을 시작하게 된 계기가 되었음
 - 유해남조류는 녹조류나 규조류와 달리 저수지 내 녹조현상(과도 성장으로 물의 색깔이 짙은 녹색으로 변하는 현상)을 일으켜 유해남조류 세포수는 조류경보제 발령 기준이 됨
 - ※ 2회 연속 유해남조류 세포수가 기준 (관심단계: 1,000 cells/ml~10,000 cells/ml; 경계단계: 10,000 cells/ml~1,000,000 cells/ml; 조류대발생: 1,000,000 cells/ml 이상) 초과시 단계별로 발령 (물환경보전법 제21조)

표 2-3 | 2020~2023년 광고저수지 조류경보제 발령 현황

(2023.12.22. 기준)

| 구분 | 2018년 | 2019년 | 2020년 | 2021년 | 2022년 | 2023년 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 광고저수지 | 77일 | 98일 | 0일 | 0일 | 0일 | 0일 |
| 대청호 | 77일 | 85일 | 84일 | 71일 | 36일 | 112일 |
| 낙동강 | 72일 | 102일 | 46일 | 123일 | 178일 | 108일 |

자료 : 2024 녹조저감사업 추진방향(2023); 수원시

□ 광고저수지와 파장저수지의 부영양화 지수 비교시 광고저수지만 부영양 상태

- 광고저수지의 경우, 부영양화 지수 기준 50 보다 5.5 더 높으며, 파장저수지는 기준보다 5.4 낮음
- 광고저수지와 파장저수지 모두 호소환경수질기준 II등급 수준이며 클로로필만으로는 저수지 두 곳 모두 부영양 조건임
- 그러나 광고저수지는 총인 농도가 높아 전체적인 부영양 상태로 평가되었으며, 파장저수지는 총인농도가 낮아 중영양 상태로 평가되었음. 실질적으로 광고저수지는 녹조현상이 심하고 파장저수지는 녹조현상이 발생하지 않은 결과를 가져왔음
 - 총인은 조류의 먹이가 되는 영양염류로 외부에서 유입되는 비점오염원이나 저수지 퇴적물로부터 용출되어 녹조현상에 영향을 줌

그림 2-4 | 광고저수지와 파장저수지의 연도별 부영양화 지수 비교



자료 : 2021년 광고저수지 녹조저감사업 종합결과 보고(2022); 수원시

표 2-4 | 광고저수지와 파장저수지의 부영양화 지수 비교

(2018~2020 평균값)

| 구분 | 기준 | 광고저수지 | | 파장저수지 | |
|-----------------------------|---------------------------------------|-------|-----|-------|-----|
| 부영양화 단계 | | 부영양 | | 중영양 | |
| 부영양화 지수 | • 부영양 : 50~70 • 중영양 : 30~50 | 55.5 | 부영양 | 44.6 | 중영양 |
| COD (mg/L) | - | 5.8 | | 4.5 | |
| 클로로필-a (mg/m ³) | • 부영양 : 8~25 • 중영양 : 2.8~8 | 18.5 | 부영양 | 8.1 | 부영양 |
| 총인 (mg/L) | • 부영양 : 0.035~1 • 중영양 : 0.01~0.035 | 0.045 | 부영양 | 0.016 | 중영양 |

자료 : 2021년 광고저수지 녹조저감사업 종합결과 보고(2022); 수원시

3 · 광고저수지 인접 토지 이용 현황

- 광고저수지 주변은 수원시 상수원보호구역으로 상수원 수질관리계획을 수립하여 비점 및 점오염원을 관리하고 있음
- 상수원보호구역 지정(1971년) 이전부터 운영하던 농업이나 축산업이 현재 운영 중
 - 상수원 보호구역 내 젓소와 한우 약 330마리, 가금류 50마리 사육 중
 - 폐수배출시설 없음
 - 총괄 T-P 부하량은 약 16.8 kg/일로 약 95%가 축산계에 기인함 (수원시 상수원 수질관리계획 수립, 2018)
- 광고산 등산로 이용객을 위한 음식점이 주변에 위치하고 있으며, 미신고음식점의 경우 하수처리시설 설치 및 적정 운영이 중요
- 영동고속도로와 수원북부순환로가 광고저수지 상류부를 통과하여 비점오염원 처리시설을 운영하고 있음

제2절 광고저수지 녹조관리사업 현황 분석

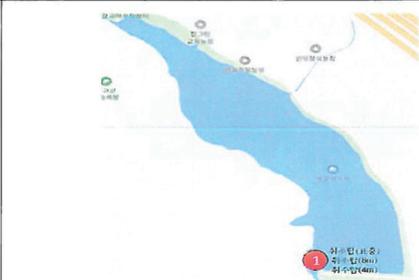
1 • 녹조관리사업 추진 현황 분석

□ 녹조 발생 예방 및 제거를 위한 물리적 제거 및 생화학적 제거 사업을 2020년부터 단계적으로 추진하였음

○ 조류발생 모니터링 확대 운영

- 기존 취수탑 1 지점에 대해 조류경보제 수질모니터링만 운영하던 것을 2020년 확대하여 상하류 11 지점에서 일 1회 ~ 주 1회 목측 및 수질을 측정함
- 기존: 수온, pH, DO, 탁도, 투명도, 클로로필-a, 이취이물질, 유해남조류 세포수, 조류독소를 측정함
- 2020년 확대: 수온, pH, 클로로필-a, DO, EC, 탁도, TN, NH₄-N, NO₃-N, TP, PO₄-P, 아연을 측정함

그림 2-5 | 녹조현황 모니터링 확대

| 구분 | 평 시 | 중점관리 |
|-------|---|--|
| 목적 | 조류경보 자체 모니터링 | 녹조 현장 모니터링 |
| 지점 | 취수탑 1지점 | 지형·특성별 11지점 |
| 방법 | 층별 통합채수, 주 1회 (※조류경보제 발령 시 주 2회 이상) | 지점 층별 별도채수, 주 1회 이상 |
| 분석 항목 | 맑은물생산과 도보건환경연구원 | 현장측정 시험분석 |
| | 수온, pH, DO, 탁도, 투명도, TOC 클로로필a, 이취이물질, 유해남조류세포수 | 수심, 수온, pH, DO, 피코시아닌 탁도, 클로로필a |
| 채수 위치 |  |  |

※ 녹조 현장 모니터링 확대 : (2022년) 4항목 → (2023년) 7항목

자료 : -광고저수지 녹조저감사업- 2022년 종합결과 및 2023 운영계획(2022); 수원시

○ 조류제거제(마이팅션) 살포

- 조류제거제 마이팅션은 환경부 한강유역환경청의 사용승인('21.3.)을 받은 조류제거제로 생태독성시험을 통과('18.5., '18.7.)하였음
- 마이팅션은 「먹는물관리법」에 의한 수처리제 자가기준 및 자가기격 인정을 받았음 ('17.9.)
- 사용한 조류제거제의 원리는 조류 제거물질이 남조류 세포내 침투하여 엽록소 구조를 파괴하여 녹조를 야기하는 유해남조류를 선택적으로 사멸시키는 방식임

- 조류발생 모니터링을 통해 유해남조류 농도가 올라가는 초기 시점을 선택하여 조류제거제를 살포하여 녹조 발생을 예방함
- 조류제거제 살포량은 회당 0.5~1.1톤으로 환경부 기준(연 2회, 살포 후 농도 0.5 mg/L 이하 유지되도록 사용) 내로 운영됨

그림 2-6 | 마이팅션 사용 전·후 비교



자료 : 조류제거물질 사후영향조사 보고서(2022); 수원시상수도사업소

- 수질정화장치 설치 운영
 - 자동수질정화장치(에코비(고정식), 에코봇(이동식)은 펌프를 사용하여 저수지를 이동하며 부유 녹조를 흡입·여과하여 제거함
 - 부력수차 수류확산장치는 녹조 정체구역에서 수면 파동을 발생하여 녹조 영김 및 스크 형성을 억제하여 성장을 둔화시킴
- 유입 부유오염물질 제거
 - 녹조방재선, 뜰채, 집게차 등을 사용하여 강우 시 저수지에 유입된 쓰레기 및 부유오염물질을 제거함

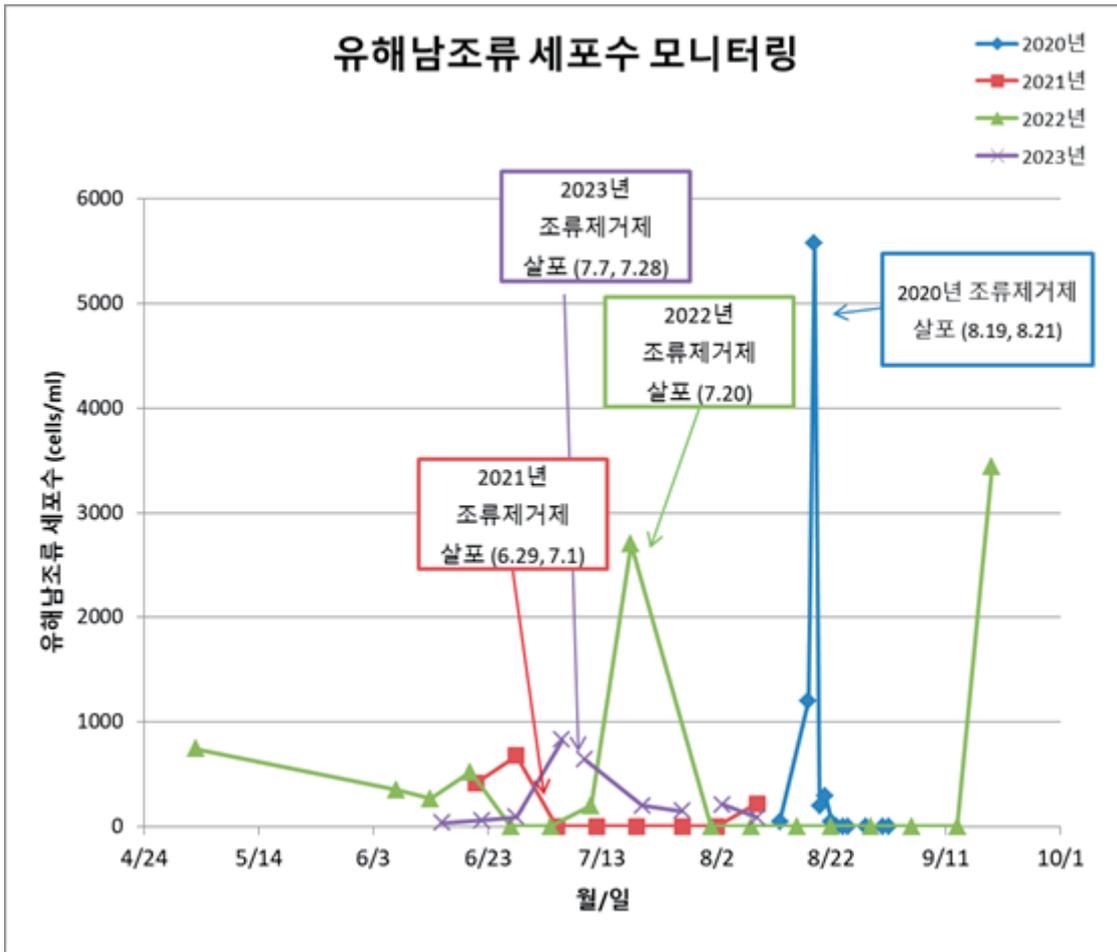
표 2-5 | 연도별 녹조관리사업 추진 현황

| 구분 | 사업내용 | 기간 |
|-------|--|----------------------|
| 2020년 | 1. 조류 발생현황 모니터링 확대 운영 | 5월~12월 (매일 또는 매주) |
| | 2. 조류 발생으로 조류제거제(마이팅션) 살포 | 8월 |
| | 3. 자동수질정화장치(에코비) 설치, 살수장치 및 녹조 방재선 운영 | 5월~12월 |
| | 4. 강우 시 유입 오염물질 제거 (녹조 방재선 및 뜰채로 쓰레기 및 부유오염물질 제거) | 7월~9월 |
| 2021년 | 1. 조류 발생현황 모니터링 확대 운영 | 5월~12월 (매일 또는 매주) |
| | 2. 조류 발생으로 조류제거제(마이팅션) 살포 | 6월, 7월 |
| | 3. 자동수질정화장치(에코비, 에코봇) 운영 | 5월~12월 |
| 2022년 | 1. 조류 발생현황 모니터링 확대 운영 | 5월~12월 (매일 또는 매주) |
| | 2. 조류 발생으로 제거제(마이팅션) 살포 | 7월 |
| | 3. 자동수질정화장치(에코봇) 운영 | 1월~12월 |
| | 4. 부력수차 수질정화장치 운영 | 7월~12월 |
| 2023년 | 1. 조류 발생현황 모니터링 확대 운영 | 4월~12월 |
| | 2. 조류 발생으로 제거제(마이팅션) 살포 | 7월 |
| | 3. 자동수질정화장치(에코봇) 운영 | 4월~12월 |
| | 4. 부력수차 수질정화장치 운영 | 1월~12월 |

- 녹조발생 예방에는 조류제거제(마이팅션) 살포가 가장 효과가 있었으며 수질정화장치 운영은 녹조 확산을 늦추는 효과가 있었음

 - 조류제거제 살포 이후 유해남조류 세포수는 급격히 감소하여 최장 55일까지 0 cells/ml를 유지하였음
 - 이동식 및 고정식 수질정화장치는 장치 주변에 대한 목적을 통해 물리적 제거 및 성김 방지 현상을 볼 수 있었으나 계량화된 효과 확인은 불가

그림 2-7 | 2020~2023년 조류제거제 살포와 유해남조류 세포수 모니터링



자료 : 수원시 내부자료 정리 및 재작성

03

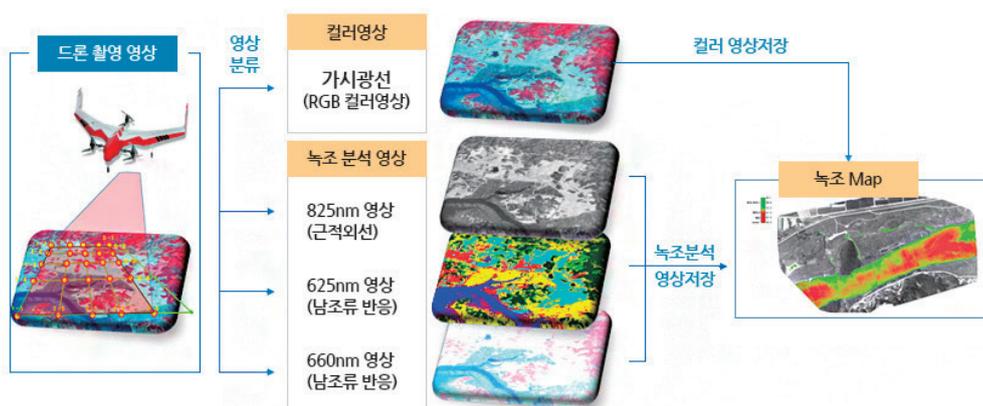
선행연구 고찰

제1절 녹조제거 사례 고찰

1 • 국내 녹조관리 사례

- 국내에서는 녹조발생 대응기술로서 수중폭기, 전자파, 차광막과 같은 물리적 제어와 산화제, 응집제를 이용한 화학적 제어, 세균, 천적 생물 등을 이용한 생물학적 제어방식을 적용하고 있으며, 화학적 녹조제거기술에는 진흙, 응집제, 황산동, 염소, 오존 등의 물질이 주로 이용되고 생물학적 녹조제거기술은 천적생물, 살조생물, 미생물 성장조절물질, 식물 등의 이용, 생분해성 제재 등이 있음(한국과학기술기획평가원, 2019)
- 한국수자원공사에서 무인항공 녹조모니터링 실시하고 있으며, 다중분광 카메라가 탑재된 무인항공기를 활용하여 대청댐, 충주댐, 남강댐 등 광범위한 지역 녹조모니터링을 실시함

그림 3-1 | 무인항공 녹조모니터링 기술



무인항공 녹조 모니터링 기술 개요

자료 : 한국수자원공사(<https://www.kwater.or.kr/>)

- 팔당호의 녹조발생 예방을 위해 한강유역환경청은 녹조대응반을 구성 ('23.6.) 하여 남조류 모니터링 강화, 오폐수 배출시설과 축산분뇨처리시설 점검을 통해 오염물질 유입을 사전에 차단함 (한강청

보도자료, 23.8.7.)

- 녹조대응반은 환경부, 관계부처(행안부, 농림부 등), 지자체, 수자원공사 등 유관기관으로 구성됨
 - 오염원 유입 감시를 위한 하천변 순찰 강화, 드론 이용 항공 감시, 주 2회 남조류 측정을 실시함
 - 녹조 발생시 자체 비상대응반 통해 즉시 조류차단막과 조류제거선 투입하여 제거함
 - 팔당호는 오염원 유입 차단, 녹조 발생 후 물리적 제거활동을 투입하고 정수처리 고도화를 통해 녹조로부터의 수질 영향을 최소화하는 정책을 추진함
- 대청호는 2022년 금강수계녹조대책 및 조류경보제를 운영하고, 조류대책위원회를 개최하여 녹조 발생시 대응방안에 대해 합동훈련을 실시하고, AI 기술을 활용한 녹조예측 기술 시범을 도입함
- AI 기술 활용 녹조 예측 시스템은 한국전자통신연구원에서 2022년까지 개발한 ‘직독식 수질 복합 센서 및 초분광 영상 기반 시공간 복합 인공지능 녹조 예측 기술’로 클로로필, 남조류, 유속 및 인산염 등 9가지 물질을 측정하는 수질 복합센서와 초분광 영상을 통해 실시간 녹조를 측정하고 예측함
 - 최근 수자원공사에서는 수중흡입식 녹조제거선, 나노버블 활용 표층 녹조 제거, 조류증식 억제제를 위한 수중폭기시설 가동, 조류차단막 운영과 함께 인공식물섬과 습지 운영을 통해 질소와 인 감소에 노력하고 있음(연합뉴스, 2023.9.27.)

2 • 국외 녹조 예방 사업사례

- 미국 EPA(환경부)는 상수원수에 대한 녹조 제거시 먹는 물 수질 기준 준수 원칙 하에 염소, 오존, 활성탄 처리를 통해 녹조를 제거하도록 권장함
- UN IOC(Intergovernmental Oceanographic Commission: 정부간 해양학위원회)에서는 다음과 같은 녹조예방 및 관리 방법을 제시함 (www.globalhab.info; https://www.globalhab.info/files/Cyano_mitigation_GlobalHAB2019.pdf)
- 물리적 방법
 - 스크린과 장벽 설치 : 표면에 떠 있는 조류를 모아서 제거하거나 취수지점과 이격시킴. 효과 정량화는 어려움
 - 고효율 초음파 : 초음파에 접촉하는 유기물을 파괴하나 고에너지로 높은 비용 소요, 얇은

층에만 효과적임

- 표면 믹서/분수 : 지표수를 혼합하여 조류에 표층에 축적되어 번성하지 못하도록 함. 단 혼합구역 바로 외부지역에 오히려 녹조 스킴이 발생하거나 독소가 포함된 에어로졸을 생성할 수도 있음
- 폭기/산소화 : 바닥 퇴적물의 인산염 방출을 줄여 조류 번식을 줄임. 지표수와 분리된 낮은 수온의 성층 수역이 있는 경우에만 적합하며 높은 운영 비용 필요
- 준설/굴착: 얇거나 진흙퇴적물이 많이 축적된 수역에서 효과적임. 고비용 및 장시간이 소요되므로 대규모 저수지에는 부적합
- 저층수 회수 : 저수지의 저층수를 방류하여 영양염류량이 많은 물을 제거하는 방법. 저층수가 지표수보다 온도가 낮고 산소농도가 낮은 경우 가능. 단 방류되는 저층수가 저수지 하류 수생태계에 영향을 줄 수 있음
- 인공 수직 순환 : 표면 혼합층을 깊게 하여 수직으로 물을 순환시켜 표층에 스킴을 형성하는 마이크로시스티스 종에 효과적임. 작은 수역에 효과적이거나 에너지 고비용

○ 화학적 접근법

- 과산화수소 : 적정 용량으로 균질하게 분포할 경우 수생태계에 영향을 주지 않고 유해 남조류(CyanoHAB) 제거에 효과적임. 그러나 마이크로시스티스는 과산화수소에 내성이 강해 완전히 제거하지 못할 수 있으며, 수역이 넓은 경우 비용대비 효율적이지 않을 수 있음
- 황산구리 : 기존에 사용되었으나 먹이 사슬에의 구리 독성 영향으로 사용 금지

○ 지구화학적 화합물(황산 알루미늄) : 조류를 흡착하고 수중의 인 성분을 흡수해서 조류 성장에 필요한 영양염류를 제거하는 방식으로 작용함. 인 성분이 저수지 외부 유입에 의해서가 아니고 퇴적물층에서 주로 공급되는 경우 효과적임

○ 퇴적물 덮개(capping) : 기존 퇴적물과 그 위의 물에 물리적인 장벽을 설치하는 방식으로 퇴적물로부터 영양염류가 물층으로 유입되는 것을 방지함. 고비용으로 운영되며 외부에서 영양염류가 유입되는 경우 효과적이지 않음

○ 생물학적 접근

- 생물학적 처치 : 박테리아, 곰팡이나 효모를 사용하여 조류 성장을 억제하는 방식은 그 효과가 밝혀지지 않았음
- 식물 추출물 : 보리나 벧짚을 사용하여 조류 억제가 가능한 과산화수소를 생성하거나 곰팡이 성장을 지원하는 방식으로 작은 수역에서 성공 가능하나 안정적인 결과를 위해서는 더

많은 연구가 필요함

- 먹이사슬의 생체조작 : 어류 유입이나 제거는 영양염류 농도를 줄이기에 가능하고 퇴적층에서 파생되는 영양분이 주 공급원일 경우에 효과적임. 조류를 먹이로 먹는 어류나 조개류를 주입하는 방법도 있음. 그러나 특정 어종 제거로 인해 오히려 조류가 증가하는 등 수생태계에의 또 다른 영향을 통해 부작용이 생길 수 있음
- 습지나 수생식물 식재 : 얇은 수역에서 수생식물이 영양염류를 사용하기 때문에 조류 생성을 억제할 수 있음. 습지나 식물섬도 유사한 역할을 하는데, 유지관리 비용이 많이 들며 식물 식재로 인한 영양염류 제거에는 상당한 시간이 소요되기도 함

- 조류 억제 원칙은 조류 생성을 예방하는 것으로 조류의 먹이가 되는 영양염류를 차단하는 것임
 - 조류 성장의 원인이 영양분의 외부 유입 (주변 농지의 비료, 비점오염원, 축산 농가 등)이면 이를 사전에 방지하는 것이 우선이며, 내부 퇴적물이 원인인 경우 퇴적물과 물층과의 분리, 준설, 수생식물을 활용한 영양염류의 소모와 같은 방법을 사용함.
 - 물순환을 원활하게 하여 조류 성장을 억제하는 물리적인 방법을 쓰기도 함
- 조류제거제는 부산물이 남지 않는 것(예: 과산화수소)을 사용하는 것을 제안하나 운용 시 과산화수소의 안전관리, 용량의 최적화 선정 등 운전 방법을 정하는 것이 중요함
- 2004년 미국 스탠포드 대학에서 안정화를 통한 오염퇴적물 원위치 정화 관련 기술 제안을 최초로 발표하였으며, 미국과 유럽 등에서 유기오염물질 오염퇴적물 정화를 위한 대안 중의 하나로 인정받고 있음
- 퇴적물 표면에 소립자/분말 활성탄을 살포한 후 현장에서 장치를 이용하여 혼합하는 기술과 활성탄을 5cm 정도의 두께로 퇴적물 표면에 도포한 후 저서무척추동물의 생태학적 기능인 생물교란을 이용하여 장기간에 걸쳐 자연혼합을 시키는 기술을 시도함(한국과학기술기획평가원, 2019)
- 호주 머레이(murray) 강¹⁾에서 매년 대규모 녹조가 발생하여 사회적 문제가 대두됨. 이에 녹조저감 방안 마련을 위해 다양한 대안을 제시하였는데. 상부 댐에서 일시적인 방류와 보의 일시적 수위 저하 등과 같은 대안을 검토하였고 보의 수문을 열어 물의 흐름을 확보하고 수위를 낮추어 녹조관리를 하였음

1) 4대강 녹조발생 위험성과 정부대응의 문제점(한국수자원학회지, 박창근, 2015) 참조

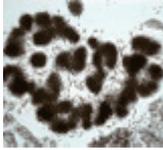
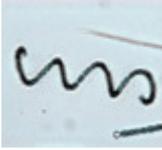
제2절 녹조 및 조류제거제 유해성 고찰

1 • 조류독소의 유해성

- 유해남조류는 인체 및 수생태계에 피해를 주는 마이크로시스틴(Microcystins), 아나톡신(Anatoxin), 삭시톡신(Saxitoxins)의 독소를 생성함
 - 환경부에서는 독성물질을 배출하여 유해한 영향을 줄 수 있는 남조류 4종 (마이크로시스티스, 아나베나, 오실라토리아, 아파니조메논)을 유해남조류로 지정하여 관리하고 있으며 (표 1-5), 마이크로시스틴(Microcystins), 아나톡신(Anatoxin), 삭시톡신(Saxitoxins) 등의 독소를 생성함
 - 조류독소 중에서는 마이크로시스틴이 대표적이며, 70여 가지의 변종이 있으나 마이크로시스틴-LR의 독성이 가장 강한 것으로 알려져 있으며, 이러한 조류독소를 포유류가 흡수할 경우 간세포나 신경계에 영향을 받을 수 있음(환경부, 2016)
 - 마이크로시스틴은 간 기능에 영향을 미쳐 인간과 야생동물의 사망을 유발할 정도로 치명적이며, 만성적으로 노출될 경우 잠재적인 발암물질로 분류됨
 - 워싱턴 카네기 대학교의 연구²⁾에 따르면, 수온이 20~25℃에 이르게 되면 마이크로시스틴이 위험한 수준으로 번성할 가능성이 크다고 밝힘
 - 아나톡신-a(s)는 자연발생적 유기인산화합물인 콜린에스테라아제 반응 억제제로 알려져 있으며, 경련, 떨림, 설사, 구토 등을 유발함

2) Carnegiescience
 (<https://carnegiescience.edu/climate-increasing-risk-high-toxin-concentrations-northern-us-lakes>)

표 3-1 | 유해남조류 4종 특징

| 구분 | 마이크로시스티스 (Microcystis) | 아나베나 (Anabaena) | 오실라토리아 (Oscillatoria) | 아파니조메논 (Aphanizomenon) |
|---------|---|---|--|---|
| 현미경 사진 |  |  |  |  |
| 단위세포 형태 | 길이 4~8 μ m 구형 혹은 타원형 | 길이 7~15 μ m 구형 혹은 타원형 | 직경 4~6 μ m 길이 2.5~4 μ m 원동형 | 직경 4~6 μ m 길이 5~15 μ m 원동형 |
| 군체 형태 | 수백~천여개의 단위 세포가 모여 군체를 형성 | 세포가 염주형태로 나선형 혹은 직선으로 연결 | 단위세포가 실모양으로 일렬로 연결 | 단위세포가 실모양으로 일렬로 연결, 군체 형성 |
| 생활상 | 세포 내에 공기주머니가 있어 수표면에 부유하면서 성장 | 세포 내에 공기주머니가 있어 수표면에 부유하면서 성장 | 세포 내에 공기주머니가 있어 수표면 혹은 수중에 부유 | 세포 내에 공기주머니가 있어 수표면에 부유 |
| 최적 성장온도 | 25 $^{\circ}$ C~35 $^{\circ}$ C (고온성) | 20 $^{\circ}$ C~25 $^{\circ}$ C | 20 $^{\circ}$ C이하 | 20 $^{\circ}$ C전후 |
| 발생시기 | 늦봄 ~ 늦가을 | 봄, 초여름, 가을 | 봄 ~ 가을 | 봄, 가을, 초겨울 |
| 독성물질 | 마이크로시스틴 (Microcystins) | 마이크로시스틴 (Microcystins) 아나톡신 (Anatoxin) | 마이크로시스틴 (Microcystins) 아나톡신 (Anatoxin) | 삭시톡신 (Saxitoxins) |
| 영향 | 간독소, 곰팡이냄새, 흙냄새 | 간독소, 신경독소, 곰팡이냄새, 흙냄새 | 간독소, 신경독소, 곰팡이냄새, 흙냄새 | 신경독소, 곰팡이냄새, 흙냄새 |

자료 : 물환경정보시스템 홈페이지_녹조현상(http://211.114.21.27/web/contents/contentView/?pMENU_NO=196)

□ 유해조류로 인한 수생태계 및 인체 피해사례는 다음과 같음

- 일본 효고 현 니시노미야시의 신 연못(Shin pond, Nishinomiya, Hyogo, Japan)³⁾에서 마이크로시스틴에 의해 흰뱀검둥오리 20여 마리가 폐사함
 - 남조류의 한 종류인 마이크로시스티스(Microcystis aeruginosa)가 생산하는 독소인 마이크로시스틴(Microcystin, 이하 MC)에 의해 야생조류가 폐사한 것으로 확인되었음
 - MC는 7개의 아미노산으로 형성된 환형펩타이드이고, 남조 세포 내에 존재하며, 세포막이 손상되면 외부로 방출되며 음용수를 통해 생물의 체내에 들어간 MC는 간에 특이한 독성을

3) 남조류에서 발생하는 독소의 문제점과 대책(대한환경공학회지, 전봉석 외 5, 2015) 참조

발현함

- 미국 펜실베이니아에서 남조류가 발생한 호수에서 수영 후 약 60여명이 두통과 복통, 구토, 설사, 눈 염증, 발진 등의 증상을 보였는데 이는 아나베나(Anabaena)가 원인으로 밝혀짐
- 1995년 오스트레일리아에서 남조류가 번성한 물에서 친수활동을 하는 역학연구를 실시하였는데, 친수활동 후 2~7일 내 설사와 구토, 독감증상, 피부발진, 구강궤양, 눈·귀의 염증 발생 등이 관찰되었음⁴⁾
- 조류독소는 생태계에도 악영향을 미치는데, 식물성·동물성 플랑크톤, 무척추동물, 어류 등에게 독성영향을 미치며, 이를 먹이로 삼는 물새에게도 영향을 미칠 수 있음(한혜진 외, 2014)
- 조류의 유해독소는 애완동물, 가축 등에도 독성 영향을 미치게 되는데, 사람에게 노출되는 경로는 물의 흡입을 통한 경구 노출, 공기를 통한 흡입, 피부를 통한 직접 노출을 통해 다양한 염증 및 질환을 일으킬 수 있음⁵⁾
- 수변 공원을 같이 이용하는 반려동물의 경우, 해당 저수지의 물을 직·간접적으로 흡입하여 질환을 일으키며 경구 및 털에 남아있는 녹조들이 같이 이용하는 사람에게 2차 노출이 될 수 있음⁶⁾

2 • 화학적 조류제거제의 환경에의 영향 고찰

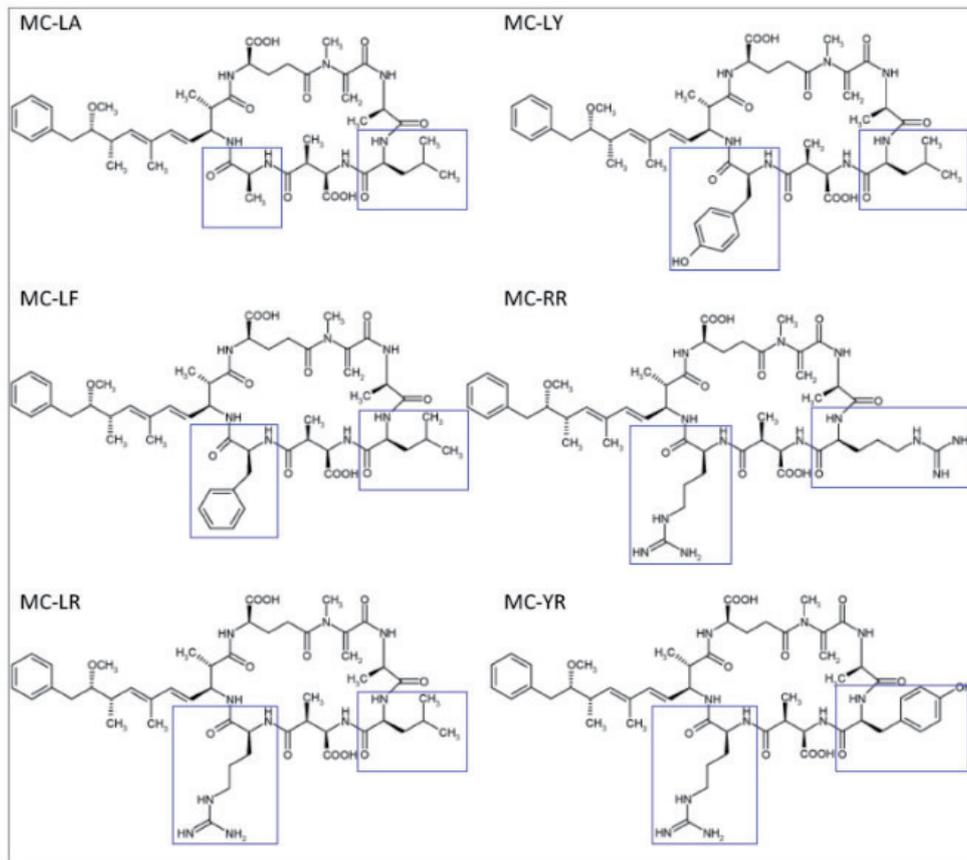
- 국내에서 사용되었던 기존 녹조제거 방식은 황산동 살포, 황토 살포 등이 있는데, 황산동 살포의 경우, 살포 후 효과기간이 7일에서 10일로 그 이후 조류군집이 다시 재구축되며, 수계 생물계의 독성 유발로 현재 사용하지 않고 있음
- 황토 살포의 경우, 대표적인 녹조제거 방법으로 사용되었지만 살포 후 일부 녹조가 다시 부상하거나 바닥에서 부패하여 2차 환경오염을 야기하는 경우가 있음
- 녹조 원인 생물인 남세균(시아노박테리아)이 치사량보다 낮은 농도의 유해물질에 노출되면 녹조 독소인 마이크로시스틴을 더 많이 배출한다는 연구 결과가 제시됨. 대신 항생제·중금속 등 유해물질 농도가 치사량보다 많으면 남세균이 죽으면서 마이크로시스틴 농도도 낮아지게 됨(중앙일보, 2022.08.30.)

4) 물환경 및 기후변화를 고려한 유해녹조 대응체계 및 정책 개선방안 연구(한국환경정책평가연구원. 한혜진 외, 2014) 참조
 5) Cyanobacterial toxins: occurrence, modes of action, health effects and exposure routes(Codd, G. A., C. J. Ward, and S. G. Bell. 1996) 참조
 6) Cyanobacteria (Blue-green Algae) in Our Waters: Agricultural best management practices (BMPs)(Sallenave, Rossana., 2021), Acute animal and human poisonings from cyanotoxin exposure—A review of the literature(Wood, Roslyn. 2016) 참조

- 조류제거를 위해 사용되는 일부 조류제거제에 남세균의 성장을 촉진하는 호르메시스 반응이 나타나는 경우가 있음
- 이는 낮은 농도의 조류제거제를 사용하면 조류의 번식을 촉진시키지만, 과량 살포하면 생태계를 파괴하는 부작용을 나타낼 수 있음
- 등록되지 않은 조류제거물질 사용에 대한 엄격한 규제 및 방지대책이 필요함(워터저널. 2023.10.04)
 - 조류제거물질을 등록하는 것은 조류제거물질의 효과성과 효율성, 생태계 무독성 확보 등 생태계에 대한 악영향을 방지하기 위한 것임
 - 따라서 조류제거를 위해 등록되지 않은 물질을 사용하는 것은 엄격히 금지되어야 하며, 등록되지 않은 물질을 사용하는 사례 조사를 통해 방지대책을 세우는 것이 시급함
- 전문가 자문을 통해 파악한 조류제거제 사용이 환경에 주는 부작용은 다음과 같음
 - 조류제거제 성분이 저수지 내 수질이나 생태환경에 영향을 미칠 가능성이 있음
 - 조류제거제를 살포한 환경의 경우, 제한적 확산으로 인해 살포 위치에 따라 제거제의 농도가 불균형해질 수 있어 중금속의 농도 확인이 필요함
 - 아연(Zn)의 수질 기준은 3.0mg/L 이하이며, 아연의 농도가 높을 경우, 구토, 탈수 등 급성 중독을 나타낼 수 있어 조류제거제의 장기간 사용시 침전 토양에 대한 아연 농도 분석이 진행될 필요가 있음
 - 아연은 주로 뼈, 피부, 근육조직에 축적이 되는데 어류의 경우, 아가미에서 최고 함량을 보이며, 골격, 내장, 근육 순으로 축적이 됨으로서 아가미로 호흡하는 어류의 호흡과 배설장애 등 조직의 구조적 변형이 일어남
 - 아연을 측정하는 방법으로 유도결합플라스마 원자발광분광법(정량한계 0.07mg/kg)을 사용하여 채취 토양에서 아연 침전이 이루어지는지에 대한 확인이 필요함
 - 침전 및 퇴적이 진행되고 있는지가 중요하기 때문에 과거 데이터와 함께 살포 전, 살포 후의 비교 분석과 미량 농도까지의 분석이 필요함
 - 이에 수생태계 환경적 영향을 파악하기 위한 측정항목은 pH, DO, 탁도, TN, TP, NH₃-N, NO₃-N, PO₄-P 등의 항목에 대하여 측정이 필요하며 조류제거제 ‘마이팅션’을 사용할 경우 주성분 물질에 대한 추가적인 수질분석이 필요할 것임
 - 현장에서 즉각적으로 측정할 수 있는 pH 미터, DO 미터, 육안법 또는 NTU 탁도 센서를 사용하여 측정할 수 있으며, 그 외의 측정 항목은 샘플링 하여 분석이 가능함

- TN, TP, NH₃-N, NO₃-N, PO₄-P의 경우, 흡광광도법을 사용하여 흡광 광도계를 이용하여 측정 및 분석을 할 수 있으며, 용이한 분석을 위하여 Humas사의 수질분석 키트 등을 활용하면 빠른 분석이 가능함
- ‘마이팅션’의 주성분 중 신규 측정항목으로 추가가 필요한 물질은 중금속인 아연이 해당되는데, 중금속도 Humas사의 수질분석 키트와 흡광광도법을 사용한 흡광 광도계를 이용하여 측정이 가능함
- ICP-MS (유도결합플라즈마 분석기)등의 분석방법으로 ppb 단위의 분석도 가능하지만, 아연의 수질 기준이 3.0 mg/L 이하로 ppm 수준의 분석으로도 수질 평가가 충분히 가능하므로 분석의 편리성 및 경제성을 생각하여 흡광 광도계를 활용한 분석을 진행하는 것이 효율적일 것으로 판단됨
- 수질 분석 및 샘플링 주기는 살포 전, 살포 직후, 24시간, 48시간으로 진행하여 기준치 대비 감소 유무를 확인할 필요가 있음
- 저수지 특성상 수체의 대표성을 나타내기 위해 깊이에 따른 샘플 채취가 필요하며, 녹조가 주로 발생하는 여름철의 경우, 표층수 온도가 올라가기 때문에 성층화가 일어나므로 샘플링을 수표면에서만 하지 않고 수표면 바로 아래 시료 및 수온약층 위 시료, 저수지 바닥으로부터 1m에서 시료 채취 및 분석이 필요함
- 전문가 자문을 통해 파악한 조류제거제를 이용한 조류제거방식의 유해성은 다음과 같음
 - 우리나라에서 주로 여름철에 우점하는 유해 남조류 중 하나인 ‘Microcystis aeruginosa’의 경우, 같은 속에 속하더라도 MCY gene의 유무 및 발현 정도에 따라 ‘Microcystin’이라는 유해 물질을 체내에 생산할 수 있는 것으로 알려져 있음(정원화 외, 2007).
 - ‘Microcystin’의 경우, 고리 구조의 heptapeptide로 그 구조가 복잡하여 쉽게 분해되지 않는 난분해성 물질인 것으로 알려져 있음
 - 이는 소량의 섭취이나 접촉으로도 인체에 간장염, 위장염, 피부염 등을 일으킬 수 있음

그림 3-2 | Microcystin의 다양한 형태



자료 : He, X., Stanford, B. D., Adams, C., Rosenfeldt, E. J., & Wert, E. C. (2017). Varied influence of microcystin structural difference on ELISA cross-reactivity and chlorination efficiency of congener mixtures. *Water Research*, 126, 515-523

- 조류제거를 위해 이전에 일반적으로 사용되었던 화학처리제의 경우, 살조제의 형태로 남조류를 제거하는 것에 대해 효과적이지만 세포 내에 있던 독소가 수계로 방출되는 위험이 있음
- ‘마이팅션’을 이용하여 유해남조류를 제거하는 경우, 조류세포를 터트리면서 사멸시키는 기작을 활용하므로, 이때 세포가 깨지면서 마이크로시스틴이라는 물질이 생태계로 유입될 가능성이 있음
 - 세포 파괴와 함께 유출되는 마이크로시스틴은 최장 23일까지 잔존할 수 있으며, 수서세균에 의해 주로 분해됨 (정원화 외, 남조류 독소생성 및 소실 메카니즘 연구, 국립환경과학원 (2007))
 - 호주에서는 경험적인 사례에 의하여 살조제에 의한 상수처리 후 본류에 반송하기 전에 마이크로시스틴의 잔류 가능성을 낮추기 위해 최소 7-10일간 저류 시킬 것을 추천 (정원화 외, 남조류 독소생성 및 소실 메카니즘 연구, 국립환경과학원 (2007))
- 조류를 제거하는 면에서는 효과를 나타내겠지만, 세포를 터트리려 사멸시키는 것에 대한 위험성

이 따르므로 마이팅션을 사용함에 따름스 마이크로시스틴의 유출 가능성을 확인하는 실험이 필요함

- 마이크로시스틴을 생산하는 *Microcystis aeruginosa*를 배양한 후, 배양액에 적정량의 마이팅션을 살포하고, 살포하지 않은 배양조를 대조군으로 두어 마이크로시스틴의 농도를 비교할 필요가 있음

- 마이크로시스틴을 분석할 수 있는 여러 가지 방법 중, 일반적으로 사용하는 Enzyme-Linked-Immuno-Sorbent-Assay(ELISA) kit 또는 High-Performance-Liquid-Chromatography(HPLC)를 활용하여 분석할 수 있음

- 마이크로시스틴의 특성에 맞는 분석 방법을 활용하여 마이크로시스틴의 농도를 확인하고, 마이크로시스틴이 유출되는 경우 이 물질을 분해하고 제어하는 기술이 필요함

3 시사점

- 미국 EPA에서는 화학적 방법인 조류제거제는 영양분 관리, 퇴적물 관리, 생태계 복원과 같은 방법이 효과적이지 않을 때 사용하는 최후의 수단으로 사용하도록 권고하며 구리 기반, 과산화물 기반, 과산화수소, 과망간산칼륨, 황산알루미늄이 그 예가 됨
- 화학 처리에 대한 과도한 의존은 농업이나 도시 유출수와 같은 원인으로 인한 영양 오염인 녹조의 근본 원인 해결이 아니기 때문에 화학적 처리와 영양분 감소, 퇴적물 제어와 생태계 복원 전략을 결합하는 통합 관리 접근법을 통해 장기적인 녹조관리 방법을 사용하는 것이 중요함
- 유해남조류에서 검출되는 마이크로시스틴은 사멸 후에도 수생태계 내에 존재하며 영향을 주기 때문에 세포가 깨지면서 수생태계에 유입되지 않도록 관리해야 함
- 녹조제거제 사용시 수생태계로 아연이 유입될 경우 어류 조직의 변형 및 인체유입시 건강 피해를 주므로 유해성분 농도 모니터링이 필요
- 광교저수지는 상수원보호구역으로 「수원시 상수원 수질관리계획」에 의하여 오염원 관리가 이루어지고 있으므로 오염원관리 모니터링을 실시하고 생태계 복원 전략과 함께 화학적 처리 및 물리적 처리를 적절히 병행하는 것이 필요함

04

녹조관리사업 평가 및 시사점

제1절 수질정화장치 운영 평가 및 시사점

1. 자동수질정화장치(에코봇) 운영 평가

- 광교저수지의 녹조현상 모니터링을 위해 2021년 5월부터 자동수질정화장치(에코봇)을 설치하여 운영 중
 - 에코봇은 자율이동식으로 저수지 전역을 이동하며 수중펌프를 통해 표층에 형성된 녹조 스크럼을 흡입하고 여과하여 제거함(일일처리 영역: 2,500m²)
 - 에코봇의 수질 분석 항목은 수온, PH, DO, EC, 피코시아닌, 탁도 등 6가지 항목으로 실시간 자동 측정함
 - 표층 10cm 아래 실시간(1분 간격)으로 저수지 내 모든 지점을 측정하고, 그림의 6개 지점은 중점관리지점으로 10분간 정지하여 측정함
 - 1, 2, 6지점은 녹조의 발생이 높은 지점이며, 3, 4지점은 비점오염원이 저수지로 유입되는 지점, 5지점은 수심이 가장 깊은 지점임

그림 4-1 | 2022년 광교저수지 에코봇 중점관리지점



자료 : 자동수질정화장치(에코봇) 운영결과 보고(2022); 수원시

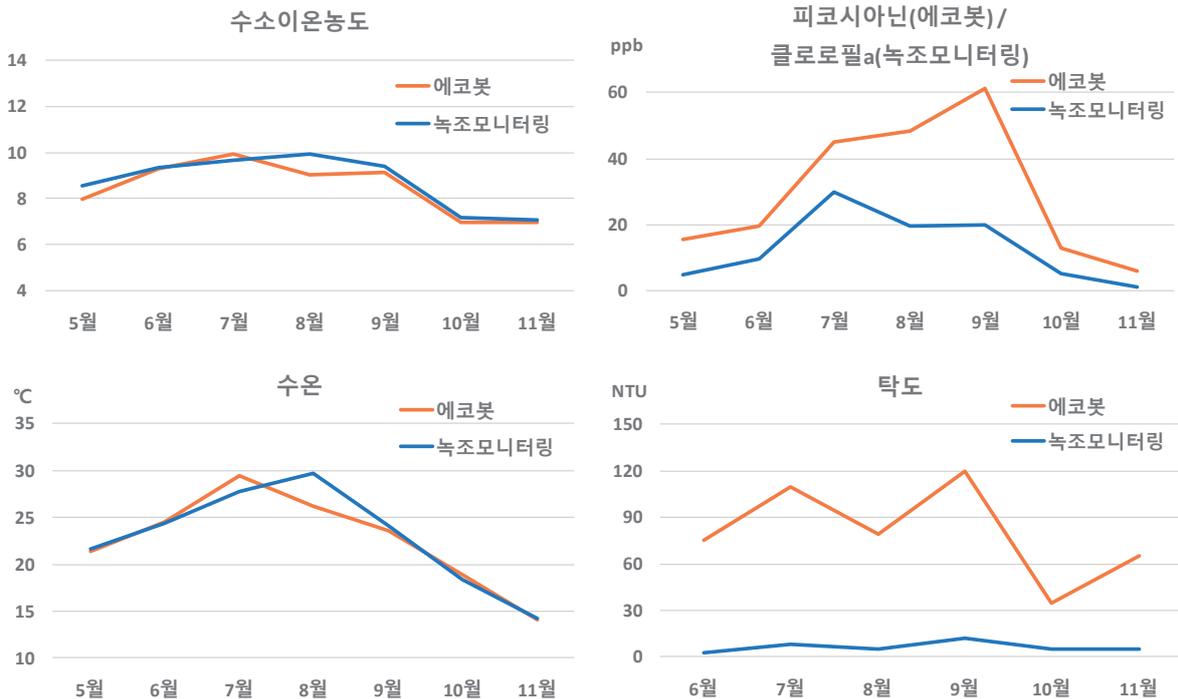
- 에코봇이 자동측정한 수질 항목은 직접 채수하여 측정(주1회)한 값과 비교 결과, 수온과 수소이온농도는 유사하게, 클로로필-a와 탁도는 다르게 나타났으며 피코시아닌은 유사한 경향성을 보였음
 - 모니터링을 위해 직접 채수하여 분석하는 항목은 수온, 수소이온농도, 클로로필-a, 탁도 등 4개의 항목을 분석함
 - 에코봇은 협잡물의 측정장비 부착과 같은 오류로 인해 탁도의 경우 직접 채수하여 측정한 값보다 과대평가되었음
 - 2023년 피코시아닌의 자동측정값과 모니터링 실측값의 수치 차이는 크나 높고 낮은 경향성은 유사 (다소 시간차는 존재)하여 녹조생성여부 및 발생정도 파악이 가능하였음

그림 4-2 | 광교저수지 에코봇 현황 사진



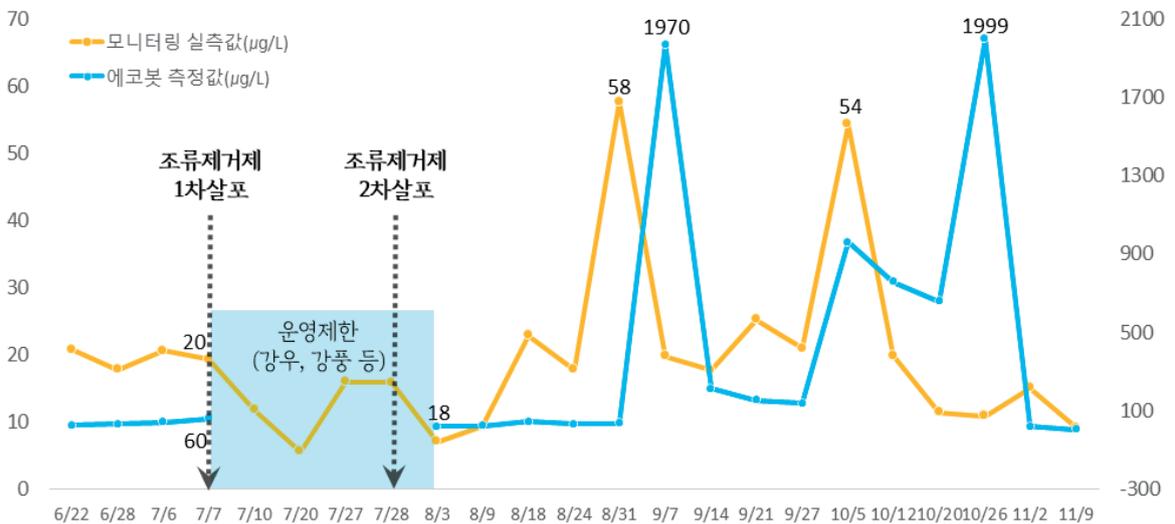
자료 : 수원시 공식 블로그

그림 4-3 | 2022년 에코봇 측정값과 녹조모니터링 결과 비교



자료 : 자동수질정화장치(에코봇) 측정결과분석(2022); 수원시

그림 4-4 | 2023년 피코시아닌의 에코봇 측정값과 녹조모니터링 결과 비교 (단위: $\mu\text{g/L}$)



자료 : 2023년 광고저수지 녹조저감사업 종합결과 보고(2023); 수원시

- 남조류와 전체 조류의 양의 차이로 인해 피코시아닌과 클로로필의 경향이 다른 것으로 나타났으며, 7월에는 전체 조류의 양이 가장 많았으며, 남조류는 9월에 가장 높은 것을 알 수 있음
- 지점별 측정 결과는 피코시아닌, 수소이온농도, 수온, 용존산소에서 6지점의 값이 유사하게

나타났으나 탁도는 다르게 나타났음

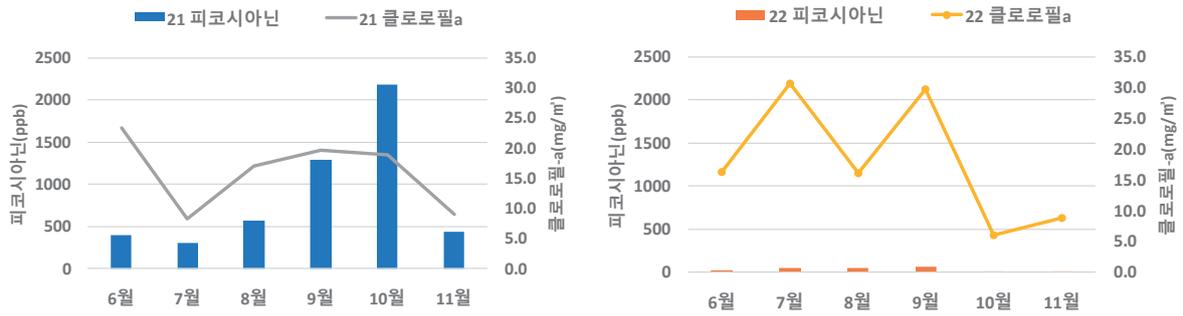
- 탁도는 부유물질의 농도를 측정하기에 측정장비에 협잡물이 부착된 경우나 부유물질이 측정지점에서 균일하게 분포되지 않은 경우 과대 또는 과소 측정될 수 있음

그림 4-5 | 2022년 에코봇 지점별 측정항목 결과 비교



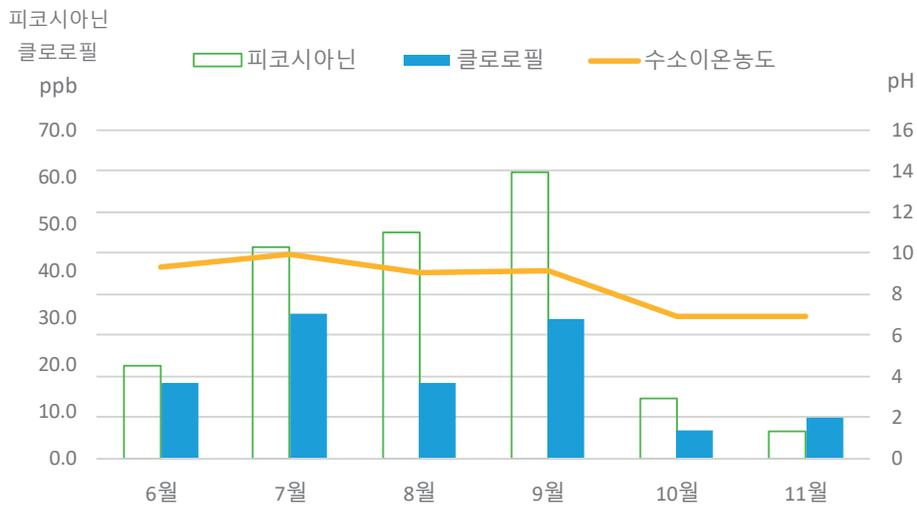
자료 : 자동수질정화장치(에코봇) 측정결과분석(2022); 수원시

그림 4-6 | 2021~2022년 광교저수지 내 피코시아닌과 클로로필-a 비교



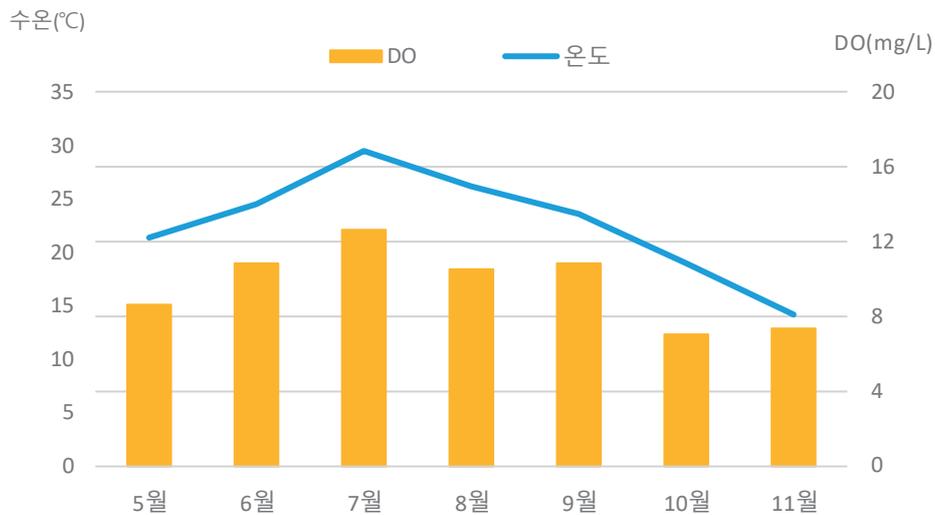
자료 : 자동수질정화장치(에코봇) 운영결과 보고(2022); 수원시

그림 4-7 | 2022년 광교저수지 클로로필-a과 수소이온농도 비교



자료 : 자동수질정화장치(에코봇) 측정결과분석(2022); 수원시

그림 4-8 | 2022년 광교저수지 DO와 수온 경향성 비교



자료 : 자동수질정화장치(에코봇) 측정결과분석(2022); 수원시

- 에코봇 실시간 측정을 통해 수온이 28℃~30℃에서 남조류 생성이 최적화되는 것을 파악
 - 초반 수온이 28℃ 이상 시 피코시아닌 농도가 높아졌으며, 남조류 최적 생성 온도는 20~30℃, 초기생성온도는 28~30℃이며, 오전·오후 평균 수온 차는 하절기의 경우 1.1℃, 봄가을의 경우 0.4℃로 확인됨
- 에코봇의 피코시아닌 자동 측정으로 피코시아닌이 일정 농도 (예: 2022년 40ppbv 이상시 조류제거제 살포) 이상 관측시 조류제거제를 사용할 수 있었음
- 협잡물 유입시 필터 폐색 및 탁도 측정 오류, 폭우나 강풍시 고장 위험 등 운영 어려움 존재

2. 부력수차 수류확산장치 운영 평가

- 부력수차 수류확산장치는 2022년 7월 이후 민·관 협력 지원사업으로 운영 중
 - 고정식으로 녹조 정체구역 (광고저수지 제방 반딧불이 화장실 앞)에 설치
 - 작동원리: 저수지에 인위적 수면 파동을 발생시켜 수중에 산소 공급 및 물 순환 유도
 - 효과: 대규모 녹조 발생 전에는 녹조류 영킴 및 스킴 형성 억제 및 발생 후 남조류 성장 둔화 및 부유물질 영킴 방지
- 부력수차 수류확산장치를 사용함에 따라 녹조 영킴 현상이 줄어드는 것을 육안으로 확인하였으나 (그림 4-9 참조) 정량적 측정을 통한 효과 산정은 어려웠음
- 광고저수지의 면적은 310,000㎡로 부력수차 수질정화장치 한 대로는 (1대당 수류면적 8,000㎡) 저수지의 저수량 및 면적대비 용량이 부족

그림 4-9 | 부력수차 수질정화장치 현황 사진



자료 : 2024 녹조저감사업 추진방향(2023); 수원시상수도사업소

3 • 시사점

- 물리적 녹조 제거 장치는 필터를 통해 녹조 스킴을 제거하거나 물리적으로 스킴 영킴 현상을 완화하는 방식으로 운영되기 때문에 넓은 저수지 면적을 커버할 만큼 충분한 용량인지가 중요
 - 저수지 표층을 대상으로 운전되기 때문에 처리 부피가 적어 대규모 녹조가 발생한 후에는 주요 제거 방법으로 활용하기에 한계가 있음
- 녹조가 대규모로 발생하기 전 또는 적은 규모로 녹조가 발생하는 경우 상시적으로 저수지의 물 흐름을 원활하게 하고 산소를 공급해준다는 면에서 효과가 있으므로 확대 운영 검토가 필요
 - 에코봇은 자동 이동 방식으로 인해 날씨에 따라 험잡물 끼임이나 고장 위험이 높기 때문에 장기적으로 사용하기에는 어려움
 - 부력수차 수류확산장치는 고정식으로 고장 위험이 적으나 한 대 만으로는 저수지 전체를 대상으로 할 수 없기에 향후 운영 대수를 늘리는 것이 필요함
 - 부력수차 수류확산장치는 직접 스킴을 제거하는 것이 아니라 영킴 현상을 방지해서 남조류 성장을 둔화시키는 방식이기 때문에 정량적 효과를 판단할 수 있는 자료를 확보하는 것이 필요함
 - 예) 부력수차 수류확산장치 사용 전 후 탁도나 남조류 농도 비교, 또는 실험실에서 실시한 장치의 녹조 발생 예방 효과 자료 확보 등
- 인접 토지에서의 영양염류 유입이 많고 유입/유출 유량이 적은 광교저수지 특성상 제시한 물리적 수질정화장치 단독 운영보다는 영양염류 유입 사전 차단 및 시기에 따른 화학적 조류제거제 사용과 병행하여야 효과가 높아질 것임

제2절 조류제거제 운영 평가 및 시사점

1 • 조류제거제 운영 평가

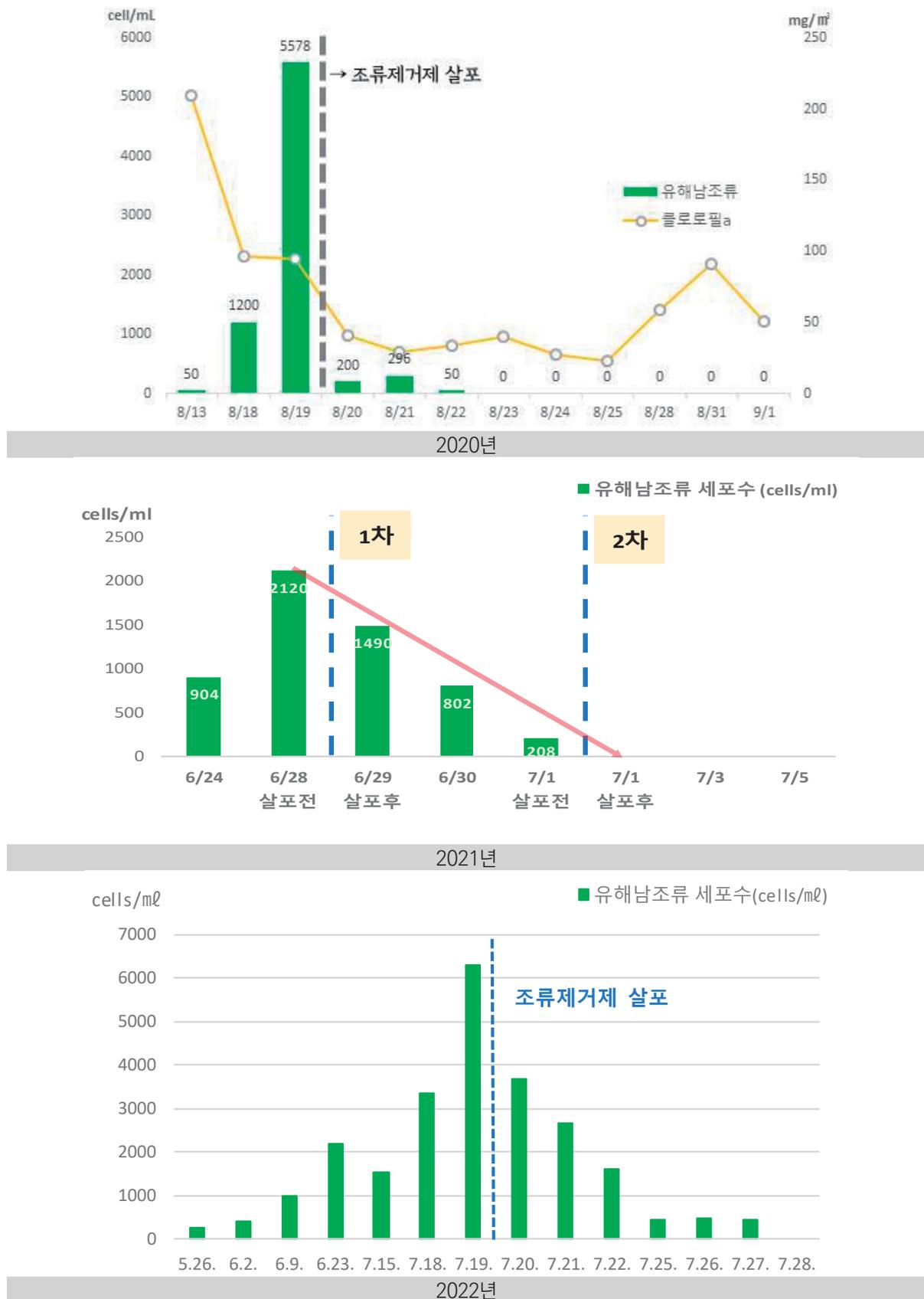
- 2020년 8월부터 다음의 조류제거물질을 사용하여 조류 확산 방지 사업을 추진
 - 수원시는 마이팅션((주)정우티엔에스, 2014년 4월 국립환경과학원 인증)이라는 조류제거제를 도입하였음

- 마이팅션은 구성성분 아연(Zn)과 엽록소 구성성분 마그네슘(Mg)의 이온교환을 통해 치환작용을 하여 세포벽이 얇은 단세포 조류로만 침투해 광합성 작용을 억제하고 엽록소 기능을 상실하게 하여 조류를 사멸시키는 원리를 가지고 있음⁷⁾
 - 일반 줄기식물 같은 다세포 조류에서는 세포 내 침투가 어려워 남조류만 선택적으로 성장을 억제시켜 고사 시킬 수 있음⁸⁾
- 조류제거제의 효과 평가를 위해 투입 전·후(48시간 후)에 조류 다량 발생지점에서 시료 채수 후 수질검사 실시
- 2020~2023년 총 4년의 사업 결과 조류제거제 살포 후 유해 남조류 세포수가 현저히 감소하였으며 효과가 40일 이상 지속되었음 (그림 3-9, 3-10, 표 3-1 참조)
 - 2021년의 경우 조류제거제 2톤 살포 후 1일 후에 바로 남조류 세포수가 1,000 cells/ml 이하로 낮아졌으나, 2022년에는 1.1톤 살포한 후 7일 후에 1,000 cells/ml 이하로 낮아졌음
 - 살포량이 많을수록 남조류 세포수가 빨리 낮아졌으나 7일 이후에는 모든 경우에서 200 cells/ml 이하로 낮아지는 효과가 있었음
 - 조류제거제 살포 후 2021년에는 40일 후, 2022년에는 55일 이후 남조류 세포수가 높아져 최소 40일 이상 효과를 보여줌
 - 단 남조류 세포수 측정 간격이 일정하지 않아 정량적인 지속기간을 평가하기에는 무리가 있었음
 - 1일 간격, 3일 간격, 7일 간격 등 일정한 간격 없이 측정이 이루어졌음

7) -2020 광고저수지 녹조저감사업-녹조제거제 긴급방제 사업 결과 보고(수원시, 2020) 참조

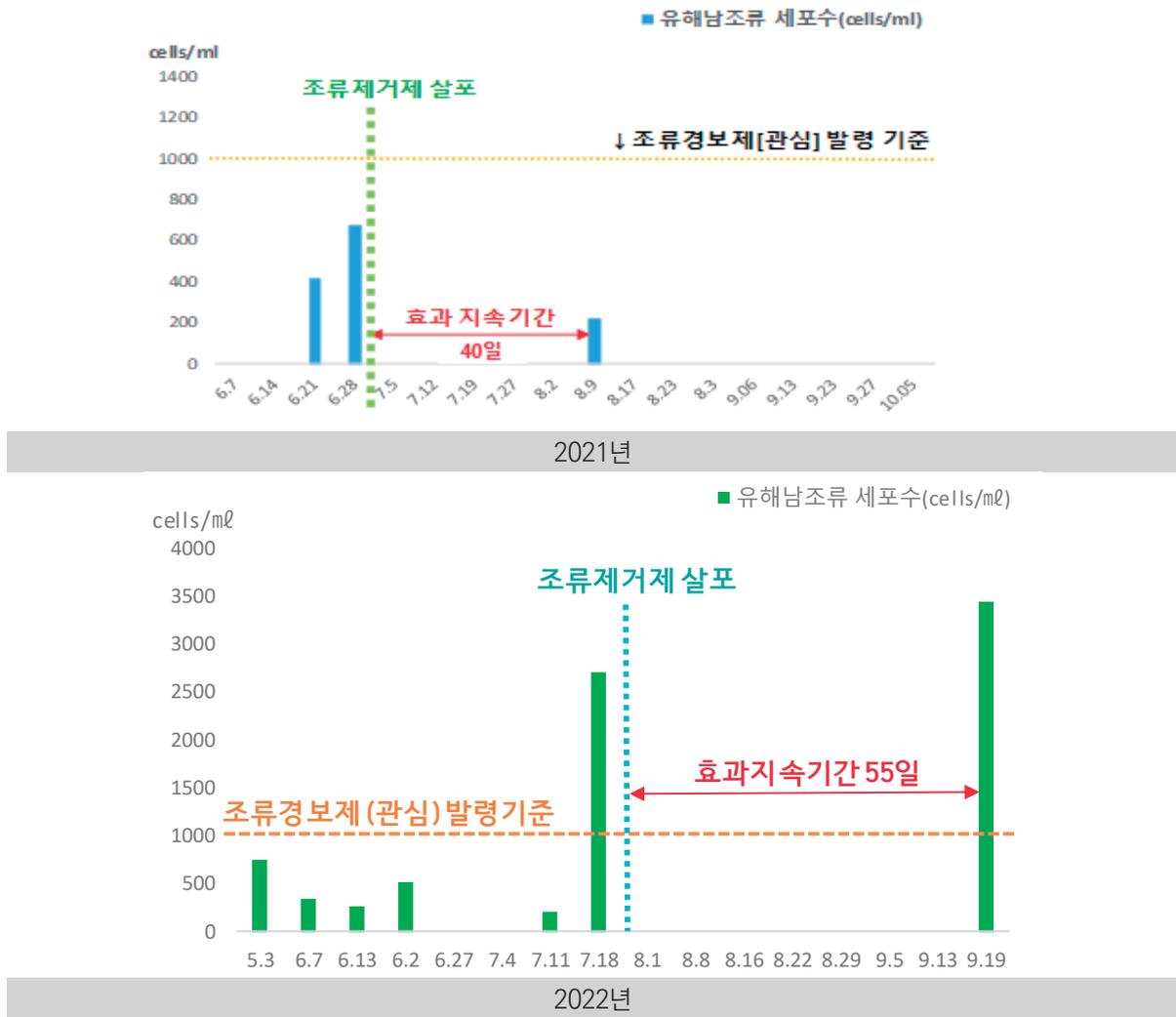
8) 마이팅션 친환경 녹조제거 신기술 카탈로그(정우티엔에스) 참조

그림 4-10 | 2020~2022년 조류제거제 사용 후 조류 세포수 관찰 결과



자료 : 녹조제거제(마이팅션) 사용 결과 보고 -광고저수지 녹조저감사업- (2020,2021,2022); 수원시

그림 4-11 | 2021~2022년 조류제거제 효과 지속기간



자료 : 녹조제거제(마이팅션) 사용 결과 보고 -광고저수지 녹조저감사업- (2021,2022); 수원시

표 4-1 | 2020~2022년 광고저수지 조류제거제 사용 결과 종합

| 구분 | 2020년 | 2021년 | 2022년 |
|--------------------|--------|--------|--------|
| 살포시기 | 8월 19일 | 6월 29일 | 7월 20일 |
| 반응기간 ¹⁾ | 확인 불가 | 확인 불가 | 7일 |
| 남조류 재출현 시기 | 확인 불가 | 40일 후 | 55일 후 |
| 사용량 | 2톤 | 1.5톤 | 1.1톤 |
| *유해남조류 세포수 | 5,578 | 2,120 | 6,300 |

1) 반응기간은 조류제거제 살포 후 녹조 경보 해제 기준 농도(2회 연속채취시 유해남조류 세포수 1,000 cells/ml 미만인 경우)까지 되는데 걸리는 시간을 의미

* 유해남조류 세포수는 조류제거제 살포시점 측정된 농도이며, 상대적 비교를 위한 자체 기준에 의한 산정방식에 따름

자료 : “녹조제거제(마이팅션) 사용 결과 보고-광고저수지 녹조저감사업-(2022); 수원시” 참고하여 연구진이 재작성

- 수원시에서 조건에 따른 조류제거제 투입 시기를 나타낸 매뉴얼을 작성(그림 3-11)하여 추진
 - 유해남조류 출현 시기와 장마 출현시기에 따른 조류제거제 사용 시기를 나타낸 것으로 유해남조류가 7월 이후 출현하고 여름철 강수량이 많은 경우 1회 살포, 6월 남조류 출현이나 여름철 강수량이 적은 경우 2회 살포하도록 함
 - 유해남조류 상시 모니터링이 수반되어야 매뉴얼대로 운영 가능

그림 4-12 | 2021년 조류제거제 사용 매뉴얼



자료 : 녹조제거제(마이팅션) 사용 결과 보고 -광교저수지 녹조저감사업- (2021); 수원시

2 • 시사점

- 조류제거제 살포로 녹조가 사멸하였고 투입 후 40일 이상 그 효과가 지속되어 녹조 초기 발생시 적절하게 사용하면 연 1~2회 살포로 녹조 예방이 가능하여 최소용량 사용을 위한 매뉴얼 보완과 함께 지속사업으로 추진하는 것이 바람직
- 조류제거제 투입시기 결정을 위한 유해남조류 세포수 상시 모니터링이 병행되어야 함
 - 매년 6월부터 10월까지 3일 간격으로 상시적으로 유해남조류 세포수 모니터링
 - 측정의 편의성을 위해 자동측정장치 활용도 가능하며 주로 녹조류가 초기 출현되는 지점을 선정하여 동일한 지점에서 측정
 - 유해남조류 세포수가 1000 cell/ml 이상시 조류제거제 사용
- 조류제거제 사용량은 최소 용량 최소 횟수를 원칙으로 운영

- 조류제거제는 1.0톤 1회 투입하고 세포수 상시 모니터링을 통해 유해남조류 세포수가 1000 cells/ml 이상 되면 재살포
- 물리적 녹조제거장치 (예: 부력수차 수류확산장치)를 6월부터 10월 상시 운영하며 조류제거제의 효과 극대화 유도
- 조류제거제의 생태환경에의 영향평가 위해 다음 항목 측정이 필요
 - 조류제거제 살포 후 마이크로시스틴 농도 측정
 - 조류제거제 살포 후 아연 및 중금속 농도 측정

제3절 녹조 모니터링 운영 평가 및 시사점

1. 녹조 모니터링 운영 평가

- 녹조제거제 사용 시기 결정 및 조류발생 현황 파악을 위해 2020년부터 직접 채수하여 녹조 발생현황 모니터링
 - 운영 시기 : 2020년 8월~10월, 2021년 6월~8월, 2022년 5월~9월까지 취수탑 인접 지점에서 채수 (표 4-2)
 - 채수 지점 : 취수탑 인접 지점
 - 측정 항목 : 2020년부터 유해남조류, 수온, 클로로필-a 측정, 2022년에 마이크로시스티스, 아나베나 추가
 - 2022년부터는 유해남조류를 마이크로시스티스와 아나베나 두 종류로 구분하여 측정

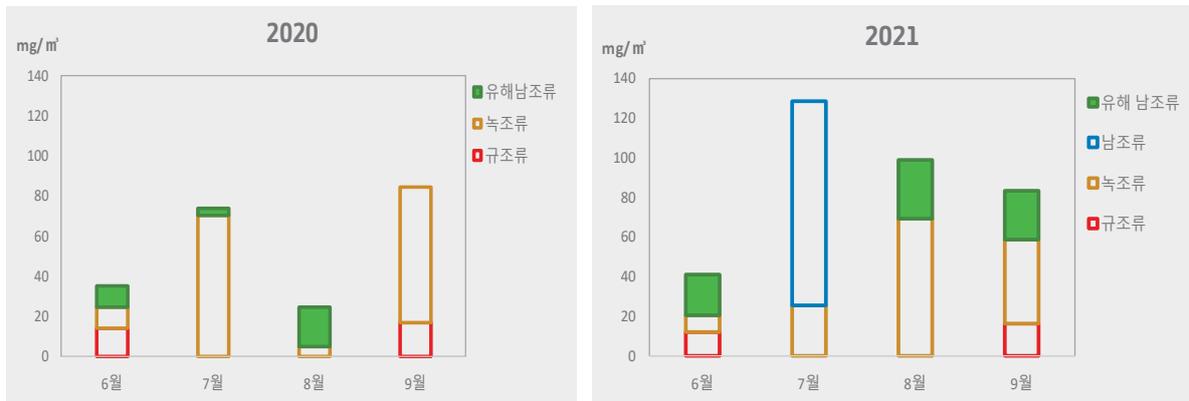
표 4-2 | 2020년 광교저수지 모니터링 결과

| 채수일자 | 수온(°C) | 클로로필-a(mg/m ³) | 조류종 | 유해남조류(cell/mL) |
|-------|--------|----------------------------|------|----------------|
| 2020년 | 08.18 | 27.5 | | |
| | 08.19 | 23.5 | 남조류 | |
| | 08.21 | 14.0 | 남조류 | |
| | 08.23 | 24.5 | 남조류 | |
| | 08.31 | 28.1 | 녹조류 | |
| | 09.07 | 23.5 | 녹조류 | |
| | 09.08 | 22.3 | - | |
| | 09.14 | 22.7 | - | |
| | 09.21 | 22.0 | - | |
| | 09.28 | 22.2 | - | |
| | 10.05 | 20.7 | 규조류 | |
| | 10.12 | 19.1 | - | |
| | 10.19 | 18.1 | - | |
| | 10.26 | 15.1 | 규조류 | |
| 2021년 | 06.21 | 24.8 | 20 | 420 |
| | 06.28 | 27.5 | 15.4 | 680 |
| | 07.05 | 25.2 | 14.2 | 0 |
| | 07.12 | 27.3 | 16.9 | 0 |

| 채수일자 | 수온(°C) | 클로로필-a(mg/m³) | 조류종 | 유해남조류(cell/mL) |
|-------|--------|---------------|------|----------------|
| 07.19 | 29.7 | 12.9 | | 0 |
| 07.27 | 31.3 | 42.4 | | 0 |
| 08.02 | 29.9 | 32.3 | | 0 |
| 08.09 | 29.7 | 19.7 | | 220 |
| 2022년 | 05.30 | 24 | 15 | 745 |
| | 06.07 | 23.3 | 24.7 | 352 |
| | 06.13 | 26.1 | 15 | 266 |
| | 06.20 | 24.7 | 21.4 | 520 |
| | 06.27 | 26.3 | 16.2 | 0 |
| | 07.04 | 29.5 | 10.7 | 0 |
| | 07.11 | 29 | 59.4 | 200 |
| | 07.18 | 27.3 | 40.1 | 2700 |
| | 08.01 | 28.6 | 27.9 | 0 |
| | 08.08 | 28.4 | 25.4 | 0 |
| | 08.16 | 25.9 | 14.4 | 0 |
| | 08.22 | 27.9 | 10.3 | 0 |
| | 08.29 | 24.1 | 8.1 | 0 |
| | 09.05 | 24.1 | 6.8 | 0 |
| | 09.13 | 23.9 | 17.4 | 0 |
| | 09.19 | 25.2 | 21.5 | |

자료 : 수원시 내부자료 참고하여 연구진 재작성, 미측정시 빈칸으로 남겨 두었음

그림 4-13 | 2020년과 2021년 조류 구성 비교



자료 : 2021년 녹조제거제(마이팅션) 사용 결과 보고-광고저수지 녹조저감사업-(2021); 수원시

2 • 시사점

- 2020년부터 2022년까지 3년간의 녹조 모니터링을 분석한 결과, 전체적인 데이터 구분의 통일성이 부족한 것으로 파악됨
- 조류 발생 현황을 살펴봤을 때 채수일자, 수온까지는 3년간 공통적으로 작성되었고 유해남조류의 종에 대한 조사가 이루어졌지만 문서상 공통된 기재가 부족하여 사업기간 동안의 조류 구성 변화 등에 대한 명확한 비교·분석을 실시하기엔 어려움이 있는 것으로 사료됨
- 이에 현장 모니터링에 대한 검사 목록을 지정하고 명확한 데이터 구축을 위해 세부계획과 중장기 계획을 설계하여 모니터링 체계를 구축하는 것이 필요함
- 또한, 주요 모니터링 지점과 주기적인 시기를 지정하여 데이터를 축적하면 기후, 기온 등 환경적 요인과 외부적 요인 등에 대한 변화와 명확한 비교 분석·평가가 가능할 것임

제4절 녹조제거사업 평가 총평

1 • 광교저수지의 조류제거사업 요약

- 광교저수지는 대규모 녹조발생을 예방하기 위하여 조류제거제와 부력수차 수류확산장치를 사용하는 등 생화학적 및 물리적 방법을 적절히 사용하여 4년동안 녹조경보 발생일 0일의 성과를 거두었음
 - 에코봇과 같은 자동수질측정장치 및 녹조제거장치를 시범적으로 사용하여 그 효과를 평가하고 장기 사용여부에 대해 판단하였음
 - 에코봇은 제거범위의 협소 및 운영 유지관리 어려움으로 인해 지속사용하지 않기로 함
 - 조류제거제 사용용량의 최소화를 위해 수질 모니터링을 확대하고 물리적 장치를 병행 운영하였음
 - 녹조의 수생태 및 인체 유해성 평가를 위해 마이크로시스틴을 3개월에 한번씩 측정하였음

2 • 시사점

- 조류제거제는 최소량을 사용하여 급격한 세포분해를 통해 수생태계에 노출될 수 있는 유해독소(예:

마이크로시스틴)를 미연에 방지하는 것이 바람직

- 세포의 광합성 저해를 통한 조류의 사멸에는 약 일주일의 시간이 필요하므로 조류제거제 사용 후 세포수가 1-2일 내에 급격히 사라지지 않고 서서히 줄어들도록 유지하는 것이 바람직
 - 과량의 조류제거제 사용 시 조류 세포가 사멸하는 것이 아니라 분해되어 마이크로시스틴이 그대로 수중에 남아있을 수 있음
 - 조류제거제 1.5톤 사용시 1일 이내 세포수 완전 소멸, 1톤 사용시 약 7일에 걸쳐 서서히 낮아졌으므로 1톤 이하로 사용하도록 제안
- 조류제거제 사용 후 물리적 조류제거장치 (직접 조류를 채취하여 제거)를 같이 사용하여 세포분해 후 수중에 남아있을 수 있는 유해독소를 물리적으로 제거하는 것이 바람직
- 대표적 유해독소인 마이크로시스틴 모니터링을 조류제거제 사용 후 1~2주간 실시하여 조류 사멸과 함께 마이크로시스틴도 동시에 제거되었음을 확인하는 것이 필요
- 조류제거제의 아연과 중금속 성분이 수중이 끼칠 수 있는 영향의 모니터링을 위해 조류제거제 사용 후 1~2주간 아연과 중금속 모니터링을 실시하는 안정성 평가가 필요
- 부력수차 수류확산장치는 물의 순환을 유도하여 산소 공급 및 수온 상승 예방과 함께 녹조 스크 생성을 예방하므로 저수지 전역에 확대 설치하여 물리적 효과를 얻는 것이 바람직

05

광교저수지 녹조관리 개선방안

제1절 녹조관리사업 개선방안

1 • 물리화학적 녹조제거사업 종합 운영 방안

- (종합) 생화학적 제거 방법인 조류제거제 살포와 물리적 제거 방법인 수질정화장치의 동시 운영
 - 조류제거제 살포시기 결정을 위해 매년 6월부터 녹조모니터링 실시, 조류제거제는 최소량, 최소 횟수를 원칙으로 살포하고 수질정화장치(예: 부력수차 수질정화장치)를 추가 확보하여 저수지 전면에 대해 운영할 것과 조류제거제 살포 후 유해독소 및 조류제거제 부산물 농도 모니터링을 제안함
 - 구체적인 운영 내용은 다음과 같으며 이를 바탕으로 사업 추진 매뉴얼을 보완하여 운영
- 녹조 모니터링 상시 운영
 - 매년 6월부터 10월까지 주1회 이상 (가급적 3~4일 간격) 정기적으로 취수탑에서 채수 및 직접 측정
 - 측정항목: 수온, pH, DO, 탁도, TN, TP, NH₃-N, NO₃-N, PO₄-P, 피코시아닌, 아연, 마그네슘, 황산이온
 - 수온, pH, DO, 탁도, TN, TP, NH₃-N, NO₃-N, PO₄-P: 수생태계 환경 영향 파악 목적
 - 수온, pH, DO, 탁도: 온도계, pH미터, DO미터, 탁도센서 사용하여 현장 측정
 - TN, TP, NH₃-N, NO₃-N, PO₄-P: 채수하여 실험실에서 흡광광도법으로 분석 또는 수질분석키트 사용
 - 피코시아닌: 형광농도분석기를 사용한 현장 측정으로 남조류 세포수 추정 목적
 - 조류제거제 사용 시기 결정 및 효과 확인시 필요
 - 아연, 마그네슘, 황산이온: 조류제거제 사용시 부산물의 수생태계 환경 영향 추적 목적으로 조류제거제 사용 전후 측정 (구체적인 내용은 수생태계 환경 영향 모니터링 방안에 기술)

○ 피코시아닌과 유해남조류 세포수와의 선형관계 실험을 통해 환산식 산정

- 유해남조류 세포수는 채수하여 실험실내에서 직접 세포수를 세는 방식으로 농도 산정에 시간이 걸리나 형광농도분석기는 센서를 통해 현장에서 피코시아닌 농도를 측정할 수 있음

• 최재윤 외(2022)가 사용한 형광농도분석기는 SEQUOIA사의 LISST-HAB임

- 최재윤 외(2022)와 2023년 분석자료를 참고하여 유해남조류 세포수와 피코시아닌 농도와의 선형 환산식 산정 후 사용

• 최재윤 외(2022)에서 얻은 환산식은 다음과 같음

$$\text{유해남조류 세포수 (cell/ml)} = 326.95 \times [\text{피코시아닌(ppb)}] + 50.484 \quad (r^2=0.927)$$

표 5-1 | 녹조 모니터링 항목 및 시기 제안

| 측정항목 | 측정시기 | 목적 |
|--|--|---------------------|
| 수온, pH, DO, 탁도, TN, TP, NH ₃ -N, NO ₃ -N, PO ₄ -P | 매년 6월~10월, 주 1회 이상 (가급적 3~4일 간격) | 녹조 및 수질 모니터링 |
| 피코시아닌 | 매년 6월~10월, 주 1회 이상 (가급적 3~4일 간격) | 유해남조류 세포수 추정 |
| 아연, 마그네슘, 황산이온 | 조류제거제 사용 전 후 (조류제거제 살포 전, 직후, 24시간 이후, 48시간 이후) | 조류제거제의 수생태계 영향 모니터링 |

□ 조류제거제 운영 방안

○ 피코시아닌 농도로 환산한 유해남조류 세포수가 1000 cells/ml 이상시 조류제거제 사용

- 사용 중인 조류제거제는 (주)정우티엔에스의 마이팅션으로 사용시 최소용량(1.0톤 미만)으로 살포

- 조류제거제 살포 1주일 후 유해남조류 세포수(피코시아닌 농도로의 환산 가능)가 낮아지는 지 모니터링

• 과량 살포로 인해 유해남조류 세포수가 급격히 낮아지지 않도록 용량 조절이 필요

• 최소 용량을 사용하여 조류의 활성을 제어하고 수표면에 떠오르면 필터와 같은 물리적 방법으로 조류를 제거하는 방안 검토

- 조류제거제 투입 전후 아연, 마그네슘, 황산이온 농도 모니터링을 통해 조류제거제의 수생태환경에의 영향 평가

- 조류제거제 사용 직후부터 7~10일간 마이크로시스틴 측정으로 남조류 사멸 후 저수지에의 유해독소 잔류 여부 확인 (최장 23일까지 잔존했다는 기록(정원화 외 2007))

□ 수질정화장치 운영 확대 방안

- 부력수차 수질정화장치는 표면에 파동을 일으켜 물순환을 유도하여 녹조 스크 생성을 억제하므로 조류제거제 사용과 병행 운영이 필요
 - 부력수차 수질정화장치는 6월 녹조 모니터링과 함께 상시 운영하여 물순환 유도
- 저수지 하류 상습 녹조 발생지역 대상 추가 도입
 - 현재 1대의 저류면적은 8,000m²로 (저수지 전체 면적 310,000m²) 물 흐름이 정체되는 저수지 하류 대상 3~4대 추가 설치
 - 녹조제거제 최소화 사용(최소량 및 최소횟수)와 함께 수질정화장치 확대 운영 후 운영효과를 파악하여 저수지 상류까지의 확대 여부 검토
 - 4대를 추가 설치하여도 저수지 전체 면적에 영향을 줄 수 있는 것은 아니나 녹조는 물흐름이 정체되는 하류에서 발생하기 시작하므로 녹조 초기 대응으로는 가능할 것으로 예상
 - 4대 추가 운영 후 녹조 초기 발생 위치가 상류(수질정화장치 미설치 구간)로 옮겨간다면 장기적으로 수질정화장치를 추가 확보하거나 물순환 범위를 넓이는 다른 방법에 대한 검토 필요

2 • 조류독소 영향평가 및 저감 방안

□ 조류제거제에 의한 조류세포 사멸 후 마이크로시스틴의 유출 및 잔존율 평가

- 마이크로시스틴을 생산하는 *Microcystis aeruginosa* 배양 후, 배양액에 적정량의 마이팅션 조류제거제를 살포하여 살포하지 않은 대조군과의 마이크로시스틴 농도 비교
 - 조류제거제 농도에 따른 조류세포 사멸율, 세포 파괴 후 마이크로시스틴의 저수지 유출 정도 등을 실험적으로 평가
- 마이크로시스틴 분석 방법은 Enzyme-Linked-Immuno-Sorbent-Assay(ELISA) kit 사용과 High-Performance-Liquid-Chromatography(HPLC) 활용 분석이 가능
 - ELISA kit 사용의 경우 비교적 분석 방법이 간단하지만, 마이크로시스틴의 종류를 구별할

수 없다는 단점이 있음

- 한편 HPLC의 경우, Photodiode Array(PDA)나 Mass Spectrometry(MS)를 붙여 마이크로시스틴의 농도를 측정하며 그 구조별 농도를 파악할 수 있음

- HPLC 사용 분석은 0.1%의 Trifluoroacetic acid(TFA)가 혼합된 42% Acetonitrile solution을 membrane filter로 거른 후 mobile phase로 활용하여 이루어짐. 샘플은 0.2 μm 필터를 사용하여 거른 후 분석하며, 분리된 피크는 UV detector의 238 nm 파장대를 활용하여 측정함 (Kim et al., 2018).

□ 조류제거제 사용 후 저수지 수중 조류독소의 잔존여부 모니터링

- 조류제거제 살포 후 조류세포가 파괴되면서 세포 내 마이크로시스틴이 수중에 유출될 수 있기 때문에 조류 세포수 급감 후에도 수중의 마이크로시스틴의 농도 모니터링이 필요
- 조류제거제 살포 전, 직후, 24시간, 48시간 이후, 2주 동안 수중 마이크로시스틴의 농도를 측정
 - 녹조 모니터링 중 조류제거제의 수생태계 영향 모니터링 (아연, 마그네슘, 황산이온 수질 분석)과 같이 진행 가능
 - 마이크로시스틴 분석법은 상단의 HPLC 사용 또는 ELISA kit 사용법을 참고

□ 먹는 물에의 조류독소 유입 방지를 위해 조류경보 발령시 뿐만 아니라 조류제거제 사용 후 3주간은 취수하지 않고 수변구역 친수활동도 금지 권장

- 조류 내 마이크로시스틴의 상수원수로의 유입을 최소화하기 위하여 조류제거제 사용 후 3주 이내에는 상수원수로 취수하지 않도록 권장
 - 3주는 녹조 세포 분해후 마이크로시스틴이 수중에 잔존할 수 있는 기간임 (정원화 외, 2007)
 - 조류제거제 사용으로 인해 유해남조류 세포수는 급감하였어도 난분해성 물질인 마이크로시스틴은 수중 잔존 가능
- 조류제거제 사용 시기 광교저수지 수변구역에의 친수활동을 금지하도록 권장
 - 마이크로시스틴은 저수지 수표면에서 공기중에 부유하는 물방울 내 함유되어 호흡을 통해 체내 유입될 수 있으므로 친수활동 금지를 권장

□ 산책로 인근 수변구역에는 녹조발생 위험시기인 7월~9월에 폭기시설이나 분수 운영하지 않도록 권장

- 여름철 녹조발생 시기 폭기시설이나 분수를 통해 유해조류독소 포함한 물방울이 공기 중으로

확산할 수 있으므로 운영이나 신규 설치 지양

- 분수나 폭기시설은 고여있는 저수지 물 순환을 원활하게 하고 수중에 산소를 공급하는 긍정적 효과가 있으나 조류나 조류 독성물질이 포함된 물방울을 공기 중으로 전파시키는 역할을 함기도 함
- 유해독소는 물의 흡입을 통한 경구 노출뿐만 아니라 공기를 통한 흡입이나 피부를 통한 직접 노출로도 염증이나 질환 유발 가능 (Wood and Roslyn, 2016)
- 조류제거제 사용시에도 수중 조류 세포수는 적으나 세포 파괴후 용출된 마이크로시스틴이 잔존 가능하므로 조류 발생시기와 마찬가지로 폭기시설 운영 지양

3 • 조류제거제 수생태환경에의 영향 평가 방안

□ 조류제거제 주성분인 아연, 마그네슘, 황산이온에 대한 수질 분석

- 자연상태에서 조류제거제 살포시 제한적 확산으로 인해 살포 위치에 따른 제거제 농도 불균형이 있을 수 있으므로 취수탑에서의 중금속 농도 모니터링 시행
 - 조류제거제 사용 전·후 2주 이내 아연, 마그네슘, 황산이온의 집중 모니터링 추진
 - 아연 : 수질분석키트(예: Humas사), 흡광광도법으로 ppm 수준으로 분석
 - 측정 주기 : 조류제거제 살포 전, 살포 직후, 24시간 후, 48시간 후로 진행하여 기준치 대비 감소 유무 평가 (아연 수질기준: 3 mg/L)
 - 시료 채취 위치 : 저수지 수체의 대표성 나타내기 위해 깊이별로 수표면 바로 아래, 수온약층 위, 저수지 바닥으로부터 1m 위에서 시료 채취

□ 저수지 퇴적 토양의 아연 침전 농도 측정으로 조류제거제의 장기적 수생태환경 영향 평가

- 아연의 수질 기준은 3.0mg/L 이하로 현재 조류제거제 사용 기준인 0.5 mg/L는 수중에 균일하게 확산된다는 가정 하에 영향이 미미할 것으로 판단되나, 장기간 토양 침전시에는 축적 가능
 - 조류제거제 마이팅션은 투입시 pH가 5.8로 저수지 pH가 10.5~10.6일 때 48시간 이후 pH가 10.1~10.3으로 감소될 수 있고 pH 10에서 아연이 수산화아연($Zn(OH)_2$)으로 저수지 바닥 토양에 침전될 수 있음
 - 수산화아연의 염의 형태로 토양에 장기간 축적될 경우 수중 pH 변화에 의해 아연이온으로 수중에 용출될 수 있고 토양 내 수산화아연 형태나 수중의 아연 이온은 어류가 흡입할

수 있음

- 장기적으로 사용시 퇴적 토양에 축적된 아연은 어류나 패류에 흡입되어 어류 조직 변화가 일어날 수 있음
 - 아연은 어류에 축적시 장기 조직 변화 및 생리적 장애 유발 가능 (신명자 외, 2011)
- 장기간 축적 여부 측정을 위해 조류제거제 사업 5년차(2024년) 이후 저수지 바닥 퇴적물 채취하여 아연 농도 측정
 - 살포 지점 및 취수구 근처의 바닥 침전물을 채취하여 토양오염공정시험기준 (ES07406.2, ES07400.2) 에 의거 하여 분석
 - 이 시험방법은 토양 중 아연을 측정하는 방법으로 미량분석을 위해 흡광광도법이 (정량한계 0.5 mg/kg) 아닌 유도 결합플라스마-원자발광분광법을 사용하여 (정량한계 0.07 mg/kg) 채취 토양에서 아연 침전이 이루어지는지 확인해야 함
 - 침전 및 퇴적이 진행되고 있는지가 중요하기 때문에 과거 데이터와의 비교분석이 필요한데, 조류제거제 사용 이전 (2019년 이전)에 측정한 결과가 없을 경우 2025년, 2028년 등 수년에 한번씩 측정하는 것이 필요
 - 분석 주기는 저수지의 깊이와 유속에 따라 달라질 수 있으며 살포 전과 살포 후의 분석이 필요하기에 7월 조류제거제 살포 전과 살포 후 2회 분석하는 것 제안
 - 조류제거제 사용으로 인해 퇴적 토양에 아연의 축적이 진행되는 것으로 판단 시 토양 및 수중에서의 아연 농도를 정기적 (반기별 또는 연도별)을 통해 기준농도 이하로 관리되도록 관리계획 수립

제2절 기후변화 대응 중장기 녹조관리 방향

1 • 저수지 유입부 비점오염저감습지 조성

- 저수지 유입부에 연꽃 및 부유식물을 식재한 침강지(비점오염저감습지)를 조성하여 저수지에 들어오는 질소와 인과 같은 오염물질 유입을 차단
 - 기후변화로 인해 여름철 폭염 일수가 증가하고 마른 장마 기간이 늘어난다면 저수지 수온이 상승하게 되고 녹조발생 여건이 용이해질 수 밖에 없음
 - 발생하는 조류의 생성을 억제하고 생성된 조류를 제거하는 것은 한계가 있으며, 보다 근본적으로 저수지의 녹조 발생 원인을 제어해야 함

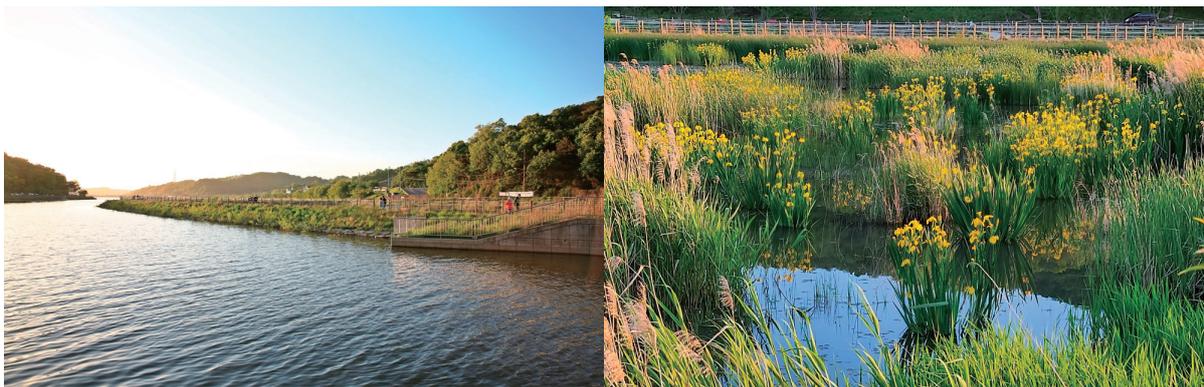
- 광교저수지 상류 유입부를 통해 하천수와 영양염류가 유입되므로 침강지를 통해 영양염류가 저수지로 직접 유입되는 양을 줄이도록 함
- 친수적 관점의 공원 역할을 할 수 있도록 조성하여 방문객 및 주민 친화도를 높임
 - 기존의 광교저수지 쉼터와 연계하여 연꽃이나 부유식물을 식재하여 공원의 역할을 할 수 있도록 심미적으로 조성할 필요가 있음

그림 5-1 | 광교저수지 상류 유입부 현황 사진



자료 : 네이버 지도

그림 5-2 | 물왕저수지 침강지 조성 현황 사진



자료 : 경기관광 홈페이지(<https://ggtour.or.kr/>)

- 조류생성 원인물질인 영양염류의 소모를 위해 저수지 얇은 구역에 수생식물 및 습지, 식물섬 조성
 - 저수지의 얇은 구역은 물흐름이 정체되어 있고 수표면 온도가 높아 녹조가 쉽게 생길 수 있으므로

수생식물 식재 및 식물섬 조성을 통해 물순환을 활발하게 하고 영양염류가 퇴적물로 쌓이지 않고 식물이나 수생생물에 의해 소모되도록 조성

○ 유사 사례로는 가락바위 식물성을 들 수 있음

- 충남 아산시 가락바위 저수지는 저수지 내부 퇴적물이 쌓이면서 수심이 얕아지고 수질 악화가 우려되는 상황에서 퇴적물 제거를 위한 1만톤의 준설작업 후 재오염 방지 위해 식물섬 조성

- 생태 식물섬은 농구경기장 33개 면적인 14,000㎡ 규모로 저수지 면적의 40%를 차지하며 총 6개의 식물섬으로 만들어짐

□ 수질하천과에서는 광고산 상생위원회 운영을 통해 상수원보호구역 주민 지원 및 환경보호 사업을 추진하고 있으므로 이와 연계하여 비점오염저감습지 조성 계획을 수립하는 것을 제안

그림 5-3 | 가락바위 저수지 생태 식물섬 조성 사진



자료 : 삼성디스플레이 홈페이지(<https://news.samsungdisplay.com/28569/>)

2. 광교저수지 상수원보호구역 도로 비점오염저감시설 설치

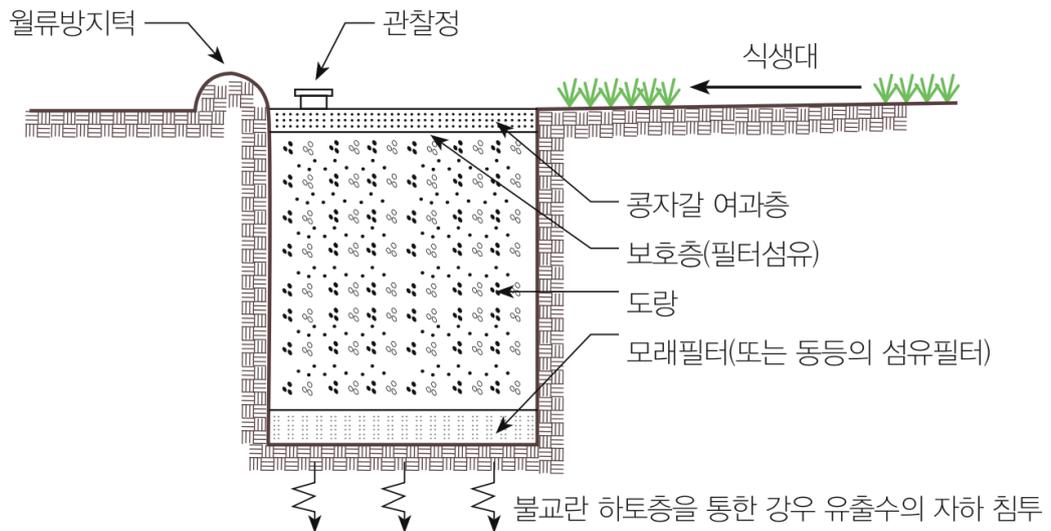
- 상수원 상류의 모든 도로는 비점오염원의 유입경로이기에 도로로부터의 비점오염원 유입을 차단하는 것이 중요하나 광교산 상수원보호구역의 도로가 일반 포장 또는 흙길로 구성되어 있어 강우시 비점오염물질이 하천과 저수지로 바로 유입되는 통로가 됨
- 비점오염저감시설 중 투수성 포장, 침투도랑, 생태저류형 침투화분 및 빗물정원은 총인 저감효율이 높으므로 도로 여건에 맞추어 시설 설치 제안
 - 특히 투수성 포장은 오염물질 저감효율이 전반적으로 좋아 수원천 및 저수지 주변 도로에의 투수성 포장이 필요함
- 도로 정비 및 건설을 담당하는 해당구(장안구) 건설과와 상수원보호구역 주민지원사업을 추진하는 수질하천과와 협조를 통해 사업 추진 제안
 - 비점오염저감시설별 오염물질 저감 효율은 다음과 같으며 총인의 저감 효율이 높은 시설 우선 설치 검토

표 5-2 | 비점오염저감시설에 따른 오염물질 부하 저감률 (%)

| 구분 | | BOD | T-N | T-P |
|------------|----------|-----|-----|-----|
| 저류형 | 저류지 | 34 | 28 | 36 |
| | 지하저류조 | 25 | 24 | 20 |
| | 인공습지 | 53 | 37 | 60 |
| 침투형 | 투수성 포장 | 75 | 83 | 65 |
| | 침투저류지 | 69 | 59 | 69 |
| | 침투도랑 | 77 | 62 | 73 |
| | 침투통/관/측구 | 53 | 72 | 46 |
| 여과형 | 식생여과대 | 44 | 43 | 42 |
| | 식생수로 | 34 | 45 | 51 |
| | 모래여과시설 | 50 | 46 | 54 |
| 생태저류형 | 침투화분 | 75 | 73 | 72 |
| | 빗물정원 등 | 54 | 49 | 65 |
| 와류형 시설 | | 16 | 11 | 22 |
| 스크린형 시설 | | 15 | 9 | 19 |
| 시설형(응집/침전) | | 80 | 20 | 85 |

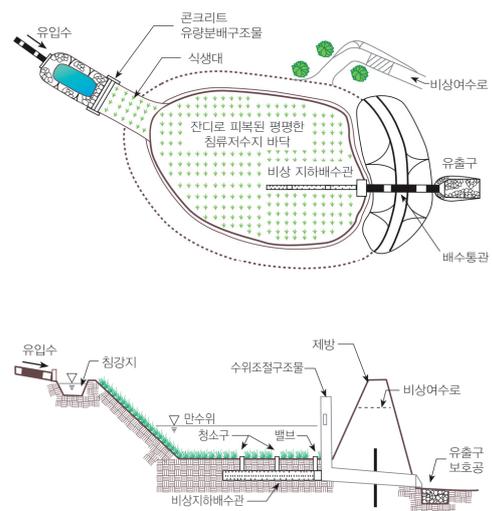
자료 : 수원시 상수원 수질관리계획 수립(2018); 수원시

그림 5-4 | 침투도랑 설치 사례 사진



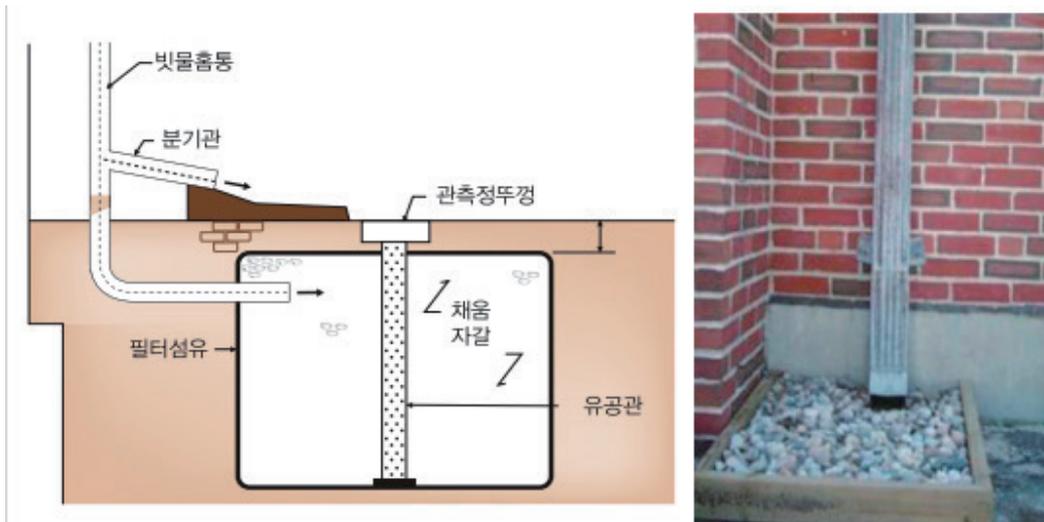
자료 : 비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼(2020); 환경부

그림 5-5 | 침투저류지 설치 예



자료 : 비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼(2020); 환경부

그림 5-6 | 침투조 설치 예



자료 : 비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼(2020); 환경부

그림 5-7 | 유공포장 설치 예 및 단면도



자료 : 비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼(2020); 환경부

그림 5-8 | 잔디포장 설치 예



자료 : 비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼(2020); 환경부

그림 5-9 | 식생수로 설치 예



자료 : 비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼(2020); 환경부

3 • 상수원보호구역 축산계 오염원 관리

- 광교저수지 상수원보호구역의 농업 및 축산업에서의 질소와 인의 저수지 유출을 최소화하기 위한 관리 정책 추진 지속
 - 질소와 인은 녹조 생장을 위한 영양분으로 근본적인 녹조 예방을 위해서는 저수지로의 질소와 인의 유입을 최소화하는 것이 중요
 - 축산시설의 오수가 저수지로 직접 유입되지 않도록 우회 식생수로나 인공습지 조성 및 가축분뇨 처리시설 설치지원 및 관리
 - 축산분뇨가 우천시 저수지나 하천으로 유입되지 않도록 비가림막이나 축산분뇨 처리 시설 설치 지원
 - 상수원보호구역 오수관로 개량화 및 점검을 통해 오수의 저수지 유입 방지
 - 우천시 전답 및 과수원에서의 비료 및 농업폐기물과 같은 오염원이 저수지로 유입되지 않도록 비료 저장공간 확보 및 비가림막 운영
- 현재 상수원보호구역 수질관리계획은 수질하천과에서 10년 단위로 수립 (2025년 목표연도로 2018년 수립 완료)하여 운영 중으로 추진상황 점검을 통해 계획대로 오염원 관리사업이 잘 추진되도록 모니터링

4 • 먹는 물 감시기준 강화

- 수돗물 생산과정에서의 조류독소 대응을 위해 정수처리 기준 강화
 - 현재는 조류독소 마이크로시스틴-LR에 대해 정량한계 목표 값이 0.1 $\mu\text{g/L}$ 이하 (표시한계 0.1 $\mu\text{g/L}$)를 마이크로시스틴류(6종)에 대해 0.05 $\mu\text{g/L}$ 이하 (표시한계 0.05 $\mu\text{g/L}$)로 강화할 것 제안
 - 환경부 녹조 종합관리대책 (2023.6.1.)에서 ‘중장기 대책’으로 위의 기준 강화를 제시하였음
 - 수원시에서 선제적으로 자체 기준을 강화하고 광교저수지 취수시 수돗물 생산과정에서의 농도 기준을 강화할 수 있음

06

결론

제1절 연구 결과 및 정책 제언

1 연구 결과

- 광교저수지의 상수원으로서의 안정적 수질관리를 위한 목적으로 본 연구에서는 광교저수지에서 추진한 녹조관리사업에 대해 중간평가를 실시하고 개선방안을 도출하여 중장기적 녹조관리방안을 제안하였음
- 광교저수지의 수질은 2등급(약간 좋음)이나 부영양화 지수가 '부영양'으로 높아 녹조가 잘 생기는 여건이며 인체와 수생태환경에 유해한 유해조류독소(마이크로시스틴)를 내는 마이크로시스티스와 아나베나 유해남조류가 관찰되어 유입오염원 차단뿐만 아니라 저수지의 직접적인 녹조제거사업이 필요하였음
- 유해조류독소 마이크로시스틴의 세포 파괴 후 수중 잔존 가능성, 조류제거제 주성분인 아연의 토양 축적 가능성을 도출하여 녹조 및 녹조제거사업의 수생태환경에의 영향을 파악하고 사업 개선방안에 제시하였음
- 수원시는 2020년부터 녹조관리사업을 추진하여 최근 4년간 녹조경보발령일수 0일의 성과를 거두어 사업의 효과성과 적절성을 보여주었으며 주요 사업에 대한 평가 및 개선방안은 다음과 같음
 - (수질정화장치) 2022년부터 부력수차 수류확산장치 운영으로 녹조 스킴 형성 억제 효과를 달성하였으나 1대당 수류면적이 작아 향후 저수지 하류 정체 구역 중심 확대 운영이 필요
 - (조류제거제 사업) 생화학조류제거제를 조류증식 초기 사용하여 조류대발생을 예방하는 성과를 거두었음. 단 조류제거제의 장기 사용 시 토양 축적 영향평가, 조류세포 급격한 사멸 후 유해조류독소의 수생태계 유출 가능성 평가가 필요
 - (녹조모니터링 사업) 녹조 모니터링지점을 11개 지점으로 확대, 유해남조류 세포수 유추 가능한 피코시아닌 현장 측정으로 빠른 녹조발생지표 추정이 가능하였으며 향후 조류제거제 살포 후 1~2주간 집중 영향평가가 필요

2 · 정책 제언

- 수원시의 녹조관리사업은 물리화학적 관리사업 종합 운영, 조류제거제의 수생태계 환경영향 모니터링, 조류독소 영향평가 및 저감대책의 세가지로 지속 및 확대 운영을 제안
 - 물리화학적 녹조관리사업은 피코시아닌을 추가한 녹조모니터링 상시 운영, 부력수차 수질정화장치의 저수지 하류에의 추가 운영, 조류제거제의 최소량 최소횟수 원칙 매년 지속 살포를 제안
 - 조류제거제의 환경에의 영향 평가 위해 아연, 마그네슘, 황산이온의 조류제거제 사용 직후 2주간 취수탑 모니터링, 저수지 퇴적 토양의 수산화아연 농도 측정 제안
 - 조류제거제 사용 직후 마이크로시스틴의 수증 잔존 여부 평가를 통해 유해독소의 안정성 평가 추진 제안
 - 조류경보 및 조류제거제 사용 후 3주 이내 상수 원수 취수 및 친수활동 금지를 통해 유해독소의 환경에의 영향을 미연에 방지할 것 제안
- 기후변화에 대응하는 중장기 녹조관리 방향으로 녹조발생원인물질인 영양염류의 저수지 유입 예방을 위해 상수원보호구역에 침강지 조성 및 비점오염저감시설 설치 제안
 - 저수지 유입부에 수생식물을 식재한 침강지를 조성하여 영양염류의 저수지 유입 방지
 - 저수지 상류 및 주변 도로에의 투수성 포장, 침투도랑, 생태저류형 침투화분 조성을 통해 비점오염원 유입 통로 차단
 - 침강지와 도로 비점오염저감시설은 광고산 및 광고저수지의 심미적 가치도 높일 수 있도록 설치하여 광고저수지의 친수공간으로서의 매력을 높이는 것 필요
 - 상수원보호구역의 농업 및 축산업 시설에 대한 오수 우회 식생수로 및 가축분뇨 처리시설 설치 지원, 오수관로 개량화 등 점오염원 관리 지속
 - 장기적으로 수돗물의 조류독소 정수처리기준을 강화하여 조류독소의 정수 유입 가능성을 사전에 차단
- 녹조관리사업 추진 5년차 이후 녹조제거제 및 녹조의 수생태 환경 장기 영향 평가를 통해 상수원의 안정성 확보 노력이 지속되어야 할 것이며 향후 녹조관리사업 추진 시에는 수생태 환경 영향평가가 병행되어야 할 것임
- 녹조관리는 저수지를 대상으로 하지만 녹조발생여건을 조성하는 것은 상류의 상수원보호구역이기 에 상수원보호구역의 오염원 관리와 친환경적 토지 이용 및 공간에 대한 개선 노력 (예: 불필요한 차량의 통행 금지, 이용객에 대한 환경교육 등)이 수반되어야 할 것임

참고문헌

REFERENCE

국문 자료 |

(주)정우티엔에스. **마이팅션 친환경 녹조제거 신기술 카탈로그**

박창근. (2015). **4대강 녹조발생 위험성과 정부대응의 문제점**. 한국수자원학회지. Vol. 48 No 10. 2015. 10

수원시 상수도사업소. (2022). **조류제거물질 사후영향조사 보고서**

수원시. (2018). **수원시 상수원 수질관리계획 수립**

수원시. (2020). **-2020 광고저수지 녹조저감사업- 녹조제거제 긴급방제 사업 결과 보고**

수원시. (2021). **-2021 광고저수지 녹조저감사업- 녹조제거제(마이팅션) 사용 결과 보고**

수원시. (2022). **2021년 광고저수지 녹조저감사업 종합결과 보고**

수원시. (2022). **-2022 광고저수지 녹조저감사업- 녹조제거제(마이팅션) 사용 결과 보고**

수원시. (2022). **-광고저수지 녹조저감사업- 자동수질정화장치(에코봇) 운영 결과 보고**

수원시. (2022). **-광고저수지 녹조저감사업- 자동수질정화장치(에코봇) 측정 결과 분석**

수원시. (2023). **2024 녹조저감사업 추진방향**

수원시. (2023). **-광고저수지 녹조저감사업- 2022년 종합결과 및 2023년 운영계획**

정원화, 이경락, 김종민, 최희진. (2007). **남조류 독소생성 및 소실 메커니즘 연구**. 국립환경과학원

한혜진, 이병현, 김호정. (2014). **물환경 및 기후변화를 고려한 유해녹조 대응체계 및 정책 개성방안 연구**. 한국환경정책평가연구원

환경부. (2020). **비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼**

토양오염공정시험기준 (22.07.25 개정)

신명자, 이종은, 서울원. (2011). **아연 축적으로 인한 붕어 (Carassius auratus) 조직의 변화**. 한국하천호수학회지 44.1 (2011): 85-94.

영문 자료 |

Codd, G. A., C. J. Ward, and S. G. Bell. **Cyanobacterial toxins: occurrence, modes of action, health effects and exposure routes.** *Applied Toxicology: Approaches Through Basic Science*, Proceedings of the 1996 EUROTOX Congress Meeting Held in Alicante, Spain, September 22–25, 1996. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997.

He, X., Stanford, B. D., Adams, C., Rosenfeldt, E. J., & Wert, E. C. (2017). **Varied influence of microcystin structural difference on ELISA cross-reactivity and chlorination efficiency of congener mixtures.** *Water Research*. 126, 515–523

Sallenave, Rossana. (2021). **Cyanobacteria (Blue-green Algae) in Our Waters, Agricultural best management practices (BMPs).**

Wood, Roslyn. (2016). **Acute animal and human poisonings from cyanotoxin exposure—A review of the literature.** *Environment international* 91 (2016): 276–282.

Sabour, B., Loudiki, M., Oudra, B., Vasconcelos, V., Oubraim, S., & Fawzi, B. (2005). **Dynamics and toxicity of *Anabaena aphanizomenoides* (Cyanobacteria) waterblooms in the shallow brackish Oued Mellah lake (Morocco).** *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 8(1), 95–104.

Kim, S., Yun, Y. S., & Choi, Y. E. (2018). **Development of waste biomass based sorbent for removal of cyanotoxin microcystin-LR from aqueous phases.** *Bioresource technology*, 247, 690–696.

Heikal, F. El-Taib, et al. **Impact of pH and temperature on the electrochemical and semiconducting properties of zinc in alkaline buffer media.** *RSC advances* 8.7 (2018): 3816–3827.

신문기사 / 웹페이지 / 통계자료 |

Dr. Anna Michalak. (2023.10.12.) **Climate is increasing risk of high toxin concentrations in Northern U.S. lakes**. Carnegiescience.

<https://carnegiescience.edu/climate-increasing-risk-high-toxin-concentrations-northern-us-lakes>

강찬수. (2022.08.30.). **농도 낮은 항생제에 노출되면 남세균 녹조, 독소 더 내뿜는다**. 중앙일보.

<https://www.joongang.co.kr/article/25098017#home>

경기관광플랫폼. <https://ggtour.or.kr/>

김동욱. (2023.10.04.). **조류제거물질 등록 및 사용 권한 변경 필요**. 워터저널

<https://www.waterjournal.co.kr/news/articleView.html?idxno=70935>

네이버 지도. <https://map.naver.com/>

물환경정보시스템. **녹조현상**. http://211.114.21.27/web/contents/contentView/?pMENU_NO=196

삼성디스플레이. (2021.07.28.). **저수지 안에 못보던 섬이 생겼다?! 삼성디스플레이, 친환경 '생태 식물섬' 조성**.

<https://news.samsungdisplay.com/28569/>

수원시 공식블로그. (2022.06.02.). **수원 걷기 좋은 길 광고저수지**. <https://blog.naver.com/suwonloves/222756081063>

수원시청. **수원관광**. <https://www.suwon.go.kr/web/visitsuwon/>

한국수자원공사. **수질수생태 개선**. https://www.kwater.or.kr/busi/water01/prevention04Page.do?s_mid=1820

연구책임자 강은하 (수원시정연구원 연구위원)

비상임연구원 최서영

SRI-정책 2023-20

광교저수지 녹조관리사업 평가 및 개선방안

Evaluation of Gwanggyo Reservoir Green Algae Management Project and Improvement Direction

발행인 김성진

발행처 수원시정연구원

경기도 수원시 권선구 수인로 126

(우편번호) 16429

전화 031-220-8001 팩스 031-220-8000

<http://www.suwon.re.kr>

인쇄 2024년 01월 22일

발행 2024년 01월 22일

ISBN 979-11-6819-158-7

© 2023 수원시정연구원

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처 표시해 주십시오.

강은하. 2023. 「광교저수지 녹조관리사업 평가 및 개선방안」. 수원시정연구원.

비매품

SRI-정책

2023-20

광교저수지 녹조관리사업 평가 및 개선방안

Evaluation of Gwanggyo Reservoir Green Algae Management Project and Improvement Direction

SRI 수원시정연구원
SUWON RESEARCH INSTITUTE

16429 수원시 권선구 수인로 126 더함파크

TEL 031.220.8001 | FAX 031.220.8000

www.suwon.re.kr

비매품/무료



9 791168 191587

ISBN 979-11-6819-158-7