

Research Paper

물리적 녹조 제거 장치의 제거 효율 평가 방안

박별님*,*** · 김경미**,*** · 조영철***

K-water*, 충북보건환경연구원**, 충북대학교 환경공학과***

Evaluation Methods for the Removal Efficiency of Physical Algal Removal Devices

Pyeol-Nim Park*,*** · Kyung-Mi Kim**,*** · Young-Cheol Cho***

K-water*

Chungcheongbuk-do Research Institute of Health & Environment**

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University***

요약: 국내 상수원에서 주기적으로 발생하는 녹조에 대응하기 위하여 다양한 종류의 녹조제거기술이 개발되어 적용 중이다. 이러한 기술들은 녹조제거 원리가 다르기 때문에 이들의 제거 효율을 비교·평가하기는 어렵다. 본 연구에서는 대청호 서화천 수역에서 이동식 녹조제거장치를 사용하여 제거 작업을 시행한 결과를 활용하여, 녹조제거 효율을 평가할 수 있는 표준화된 방법을 제안하였다. 녹조 제거 작업시 수거된 슬러지의 양, 함수율, 클로로필-a의 농도로부터 작업 구간 중 클로로필-a의 농도 감소량($\Delta\text{Chl-a}$)을 계산하였다. 또한 작업 대상 수역의 면적, 일일 최대 작업 면적과 $\Delta\text{Chl-a}$ 로부터 대상 수역에서 1 mg/m^3 의 클로로필-a 농도를 저감하는데 필요한 작업일수(WD)를 계산하였다. 작업 전후 수체에서 클로로필-a의 농도 저감율, 제거 기술의 처리 용량, 작업 대상 수역의 수체 용량으로부터 녹조제거능을 계산하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서 사용된 이동식 녹조제거장치의 녹조제거능은 $6.64\%/day$ (대청호 서화천 수역 대상, 약 $500,000\text{ m}^3$)이었으며, 이는 다른 물리·화학적 녹조제거 기술의 녹조제거능($0.02\sim 4.72\%/day$)에 비해 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시한 조류제거효율 평가 방법을 활용하여 국내에서 적용되고 있는 녹조제거 기술의 비교 평가가 가능할 것이며, 국립환경과학원이 운영하고 있는 「조류제거시설 설치·운영 및 살포용 조류제거물질 사용지침」에서 물리적 또는 물리·화학적 복합 조류제거기법의 조류제거 성능 및 제거 효율 평가를 판정하는 방법으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

주요어: 녹조, 녹조제거능, 상수원, 대청호, 제거효율 평가

Abstract: In response to the periodic occurrence of cyanobacterial blooms in Korean freshwaters, various types of cyanobacteria removal technologies are being developed and implemented. Due to the differing principles behind these technologies, it is difficult to compare and evaluate their removal efficiencies. In this study, a standardized method for evaluating cyanobacteria removal efficiency

First Author: Pyeol-Nim Park, Tel: +82-42-629-2385, E-mail: ppn82@kwater.or.kr, ORCID: 0000-0002-4368-7864

Corresponding Author: Young-Cheol Cho, Tel: +82-43-261-3577, E-mail: choy@chungbuk.ac.kr, ORCID: 0000-0001-7444-143X

Co-Author: Kyung-Mi Kim, Tel: +82-43-220-5982, E-mail: skybluemi@korea.kr, ORCID: 0009-0007-3216-2652

Received: 30 August, 2023. Revised: 11 October, 2023. Accepted: 24 October, 2023.

was proposed by utilizing the results of removal operations using a mobile cyanobacteria removal device in the Seohwacheon area of Daechung Reservoir. During removal operations, the decrease in chlorophyll-*a* (chl-*a*) concentration ($\Delta\text{Chl-}a$) in the working area was calculated based on the amount of collected sludge, the efficiency rate, and the concentration of chl-*a*. Additionally, the required working days (WD) to reduce the chl-*a* concentration to 1 mg/m^3 in the target area was calculated based on the area of the target zone, the maximum daily working area, and the efficiency rate. A method for calculating the cyanobacteria removal capacity was proposed based on the reduction rate of chl-*a* concentration in the water before and after the operation, the treatment capacity of the removal technology, and the water volume of the target area. The cyanobacteria removal capacity of the mobile cyanobacteria removal device used in this study was $6.64\%/ \text{day}$ (targeting the Seohwacheon area of Daechung Reservoir, approximately $500,000 \text{ m}^2$), which was higher compared to other physical or physicochemical cyanobacteria removal technologies ($0.02\sim 4.72\% / \text{day}$). Utilizing the evaluation method of cyanobacteria removal efficiency presented in this study, it will be possible to compare and evaluate the cyanobacteria removal technologies currently being applied in Korea. This method could also be used to assess the performance and efficiency of physical or physicochemical combined cyanobacteria removal techniques in the “Guidelines for the Installation and Operation of Algae Removal Facilities and the Use of Algae Removal Agents” operated by the National Institute of Environmental Research.

Keywords : cyanobacteria, cyanobacteria removal capacity, water sources, Daechung Reservoir, removal efficiency evaluation

I. 서론

지구 온난화에 따른 기온상승, 오염원의 증가 등으로 인해 부영양화 현상이 점차 심해지고 있으며, 이로 인한 남조류의 과다증식(이하 녹조)은 전세계적으로 중요한 수질 문제로 대두되고 있다(Ahn et al. 2015; Huisman et al. 2018; Nazari-Sharabian et al. 2018). 증식된 조류가 분해될 때 용존산소 감소로 인한 어류 등 수생생물의 폐사가 일어날 수 있으며, 상수원에서 조류가 과다증식한 경우에는 이취미 발생, 여과지 폐색 등이 일어날 수 있다(Camargo & Alonso 2006; Lee et al. 2013). 특히 일부 남조류는 microcystins (MCs)와 같은 독소를 생산하기 때문에 가축이나 야생동물의 폐사를 일으키기도 한다(Haddix et al. 2007; Funari & Testai 2008).

국내 호소에서 하절기에 대규모로 발생하는 녹조 문제를 해결하기 위하여 다양한 기술이 개발되었다. 조류 제거 기술은 물리적, 화학적, 생물학적, 복합적 공법으로 나눌 수 있다(KEC 2012; Lee et al. 2013;

Byeon et al. 2016). 물리적 공법은 물순환장치, 가압여과장치, 초음파, 선박교란, 미세기포장치, 조류 확산방지막, 수류차단막 등이 있으며, 화학적 공법은 응집제에 의한 부상 또는 침전 처리, 오존 처리, naphthoquinone 같은 살조제 처리법이 있다. 생물학적 방법으로 혼합 미생물 처리, 인공 습지, 식물 재배섬, 동물플랑크톤 도입 등이 사용되고 있다. 복합처리공법은 물리적 공법, 화학적 공법 또는 생물학적 공법의 장점을 융합하여 개발된 기술로 응집제 살포를 통해 부상된 조류를 수거선박으로 제거하는 방식, 미세기포와 응집제를 혼용하여 적용하는 방식, 생물막이 형성된 티타늄볼을 사용하여 조류를 제거하는 방식 등이 개발되어 현장에 적용된 바 있다(Lee et al. 2013; Byeon et al. 2016). 일반적으로 물리적 공법은 많은 비용과 장치가 요구되고 다량의 바이오매스(biomass) 및 부산물 등이 발생하며, 화학적 공법은 2차 오염 및 수생태계에 대한 직·간접적 피해가 있는 것으로 보고되고 있으며, 생물학적 공법은 현장 적용 시 시공간적 변이와 계절적, 수리적 영향에 따라

녹조 저감 효율이 큰 영향을 받는 것으로 보고되고 있다(Byeon et al, 2016).

국내에서는 녹조로 인한 피해 예방을 위하여 「조류 제거시설 설치·운영 및 살포용 조류제거물질 사용지침」을 정하여 운영하고 있다. 이 지침에서는 조류 제거시설을 물리적, 화학적, 생물학적, 복합적 처리시설로 구분하고 있으나, 주로 화학적 처리 방법인 조류제거물질의 등록 및 사용에 대한 내용으로 이루어져 있으며, 물리적 조류제거시설의 조류 제거 성능 및 제거 효율 평가와 관련된 내용은 부재하다. 국립환경과학원에 등재(2023년 5월 9일 기준)된 조류제거물질은 총 14종으로 폴리염화알루미늄(Poly Aluminum Chloride, PAC)과 같은 응집제와 마이팅션 등 살포제가 있다(국립환경과학원 조류제거물질 등록 현황; <https://www.nier.go.kr/>).

선행 연구에서 실제 하천과 호소에서 적용된 28개 조류저감기술의 현장적용 자료를 조사하고, 이를 분류한 후 적용 가능성을 분석하였다(Byeon et al, 2016). 분류 기준은 공법구분(물리적, 화학적, 생물학적, 복합적), 적용 수체의 유속(정체, 흐름), 적용 시점(사전예방, 초기, 대량발생 및 회수)이었으며, 각 조류저감기술에 대하여 경제성(cost effectiveness), 현장 적용성(field applicability), 효과 지속성(effect durability), 수생태 안전성(eco-friendliness)을 기준으로 적용 가능성을 평가하였다. 경제성 부분에서는 미생물 제제, 일부 광물기반 천연 응집제 및 수류순환장치 등이 비교적 저비용으로 현장 적용 가능한 것으로 조사되었으며, 현장 적용성에서는 가압부상장치와 컨베이어 벨트 및 탈수장치를 탑재한 현장가압부상 방식의 이동식 녹조제거선이 가장 우수한 것으로 조사되었다(Byeon et al, 2016). 그러나 알려진 대부분의 기술은 소규모 실험 장치에서 처리 효율이 높지만 처리 규모가 크지 않기 때문에 대규모 수체에 적용하기는 어려운 실정이며, 실제 현장에 적용되어 활용되고 있는 기술들의 조류저감효율은 기대에 미치지 못하고 있는 실정이다. 특히 국내 상수원 또는 4대강과 같은 대규모 수체에 적용하기 위해서는 기술의 경제성, 현장 적용성, 효과 지속성, 수생태 안전성에 대한 검토가 필요하다(Lee et al, 2013; Byeon et al,

2016; Joo et al, 2018; Park et al, 2019). 따라서 대규모 수역에 적용 가능하고 경제적이며, 지속적인 효과를 지닌 조류 제거 기술의 개발이 필요하며, 이의 조류제거효율을 평가할 수 있는 객관적인 평가방법이 요구된다.

국내에서 개발된 다양한 물리·화학적 조류제거기술 중 한국환경공단에서 검토한 기술의 조류저감효율은 29.9~97.8%의 범위로 알려졌다(KEC 2012). 이들 중 90% 이상의 고효율을 나타낸 오존마이크로버블, 고효율가압부상, 지멘트스고속처리시스템, 비접촉 플라즈마 기술 등은 반응조 내에서 조류를 응집·부상시켜 제거하는 것으로, 반응조의 유입수와 유출수에서 클로로필-*a*의 농도 차이를 활용하여 조류 저감 효율을 산출한 것이기 때문에 실제 녹조가 발생하는 수역에서 해당 기술의 저감 효율을 의미하지 않는다. 본 연구에서는 K-water에서 개발된 이동형 녹조제거장치를 사용하여 대청호 서화천 수역에서 녹조 제거 작업을 수행한 자료를 활용하여, 물리적 또는 물리·화학적 복합 녹조 제거 기술의 조류 제거 효율을 표준화할 수 있는 방법을 제안하고, 이를 활용하여 국내에서 사용된 물리·화학적 녹조 제거 기술의 조류 제거 능력을 비교하였다.

II. 연구방법

1. 조류제거장치의 구조 및 적용

본 연구에서 사용된 이동식 녹조제거장치는 5개의 모듈로 구성되어 있다. 이들은 1) 주요 시스템을 구성하기 위한 본체 및 부력재, 2) 농축 채집, 이송을 담당하는 이송호퍼, 3) 여과, 탈수를 위한 스크린 컨베이어, 4) 조체의 탈리, 수집을 하는 슬러지 제거기 및 5) 수거물질 분리대이다. 그 외 보조기구로 엔진, 발전기, 모터 및 조타장치 등을 포함하고 있으며, 응집제를 살포할 수 있는 장치가 별도로 설치되어 있다(Figure 1; Shin et al, 2014). 본체는 4,000 mm × 8,000 mm로 강판, 사각강판이며, 부력재는 특수 고무 4개가 장착되어 있어 부분적 파손이나 예기치 못한 사고를 대비할 수 있도록 되어있다. 이송호퍼는 V자 구조로 폭은 5 m, 깊이는 0.4 m로 높낮이 조정

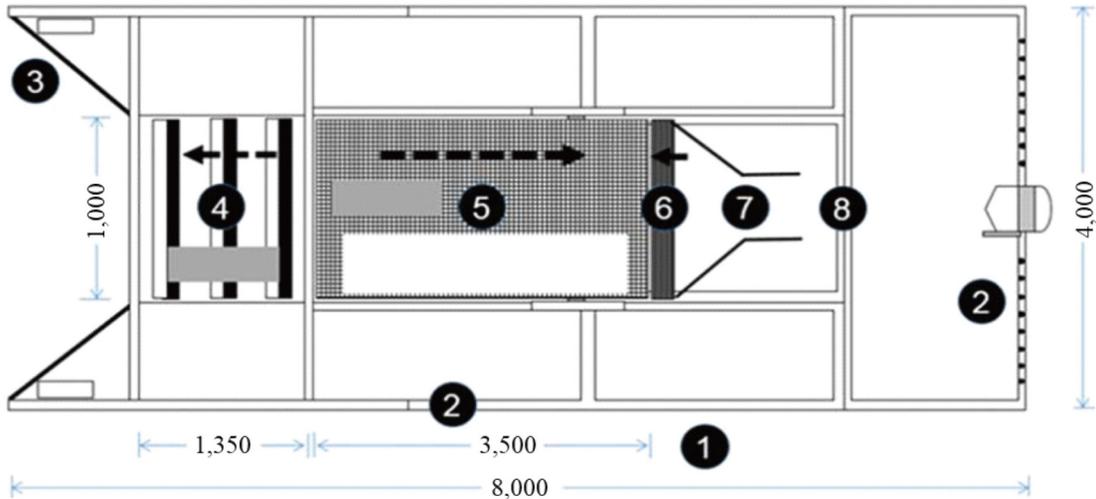


Figure 1. Structure of physical algal removal devices. Module 1 (① buoyant, ② main frame); Module 2 (③ algae thickener, ④ transfer hopper); Module 3 (⑤ screen conveyor); Module 4 (⑥ sludge remover); Module 5 (⑦ separator of algae and waste, ⑧ algae collector)

이 가능하며, 스크린 컨베이어는 stainless 재질로 32mesh의 스크린으로 구성되어 있다. 슬러지 제거기는 스크린에 부착된 조류 슬러지를 제거하는 역세 브러쉬와, 브러쉬를 청소할 수 있는 스크레퍼로 이루어져 막힘현상을 방지할 수 있게 설계되었다. 수집된 조류 슬러지는 섞여 있는 나뭇가지, 비닐류 등을 분리 후 자루에 담아 운반, 처리가 이루어진다.

이동식 녹조제거장치는 2015년 8월 19일부터 10월 15일까지 대청호 서화천 수역의 수정가든(조류경보제 관찰지점; 36°21′31.2″N, 127°33′39.1″E)에서 부소담약(36°21′04.7″N, 127°33′48.4″E)까지 구간에서 육안 상의 조류 집적 및 발생이 심한 지역을 대상으로 운영되었다. 녹조 수거 작업은 응집제를 살포한 후 응집 여부를 육안으로 확인하고, 응집된 조류를 이동식 녹조제거장치를 사용하여 수거하였다.

응집제는 PAC(11%)을 사용하였으며, 원액을 주입할 경우 비중에 의해 가라앉기 때문에 3배 희석된 용액을 사용하였고, 수체 중 응집제 농도는 약 30 mg/L가 되도록 살포하였다. 응집 시간은 평균 3~4시간이었으며 응집 정도에 따라 반응 시간을 증감하였다. 응집제 살포 및 반응 시간을 포함하여 일 평균 8시간 동안 작업을 시행하였다. 이동식 녹조제거장치의 1일 작업 범위는 조류 발생 정도에 따라 10,000~80,000

m²이었으며, 1일 평균 수거 면적은 47,000 m²이었다. 수거된 조류는 1차 건조를 거쳐 옥천군 매립장에 최종 매립하였다.

2. 수시료 및 슬러지 시료의 분석

이화학적 항목에 대한 분석은 작업구간을 기준으로 상류와 하류 지점 및 작업 구간으로 나누어 실시하였으며, 조사 시기는 작업 전·후로 구분하였다. 분석 항목은 수시료의 경우에는 수온, pH, 용존산소(DO), 전기전도도(EC), 클로로필-a, 조류 종류별 세포수 밀도를 분석하였으며, 수거 슬러지의 경우에는 슬러지 수거량, 함수율, 클로로필-a 농도를 분석하였다.

수질 항목 중 수온, pH, DO, EC는 휴대용 수질자동계측기(YSI 6600VD, YSI Inc., OH, USA)를 사용하여 현장에서 측정하였다. 수시료 중 클로로필-a의 농도는 수질오염공정시험기준(MOE 2016)에 따라 분석하였다. 수거 슬러지의 클로로필-a 함량은 슬러지 1 g wet weight(ww, 습윤중량)를 증류수 100 mL에 희석한 후, 수질오염공정시험기준에 따라 분석하였다. 슬러지의 함수율로부터 슬러지 건조 중량 당 클로로필-a 농도로 환산하였다. 조류 종류별 세포수 밀도는 수질오염공정시험기준(MOE 2016)에 따라 분석하였다. 시료 500 mL를 루골용액(최종농도 2%,

v/v)으로 고정시키고 24시간 정치 후 syphon을 이용하여 상층액을 제거하여 농축하였으며, 정량 분석용 Sedgwick-Rafter Chamber에 1 mL을 분취한 후 15분 정도 방치시키고, 광학현미경(Eclipse E600, Nikon, Japan)을 사용하여 조류 속별로 분류하고 계수하였다.

국내 호소에서 하절기에 주요 우점 조류인 *Microcystis* 속 남조류는 MCs를 생성하는 것으로 알려져 있다(Carmichael and Boyer 2016; Chernova et al. 2020). MCs는 건강한 상태의 조류에서는 세포 내에 존재하며, 세포 사멸 시 방출되어 수생 생물에게 해를 끼칠 수 있다(Wert et al. 2014; Walls et al. 2018). 따라서 화학적 방법을 사용하여 조류를 제거할 때 조체의 분해로 인해 MCs가 수체로 방출되는지 여부를 확인할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 응집제 주입 및 수거 과정에서 응집제에 의해 조체가 파괴되어 남조류독소가 방출되는지 확인하기 위하여 실험실 내 실험을 수행하였다. 현장에서 채집된 수시료에 PAC의 최종 농도가 30 mg/L가 되도록 주입한 후, 1 시간, 4 시간, 10 시간, 24 시간 경과 후 시료를 각각 채집하여 용존성 MCs의 농도를 분석하였다. 용존성 MCs의 농도는 「먹는물 수질감시항목 운영 등에

관한 고시」(환경부고시 제2018-140호)에서 제시된 방법에 따라 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 조류 제거 작업에 따른 수질 변화 분석

대청호 서화천 수역에서 2015년 8월 19일부터 10월 15일까지 10회에 걸쳐 수거된 조류 슬러지의 양은 총 17,200 kg ww로 1회 작업시 250~3,500 kg ww 범위였고, 평균 1,720 kg ww/회이었다(Table 1). 수거된 슬러지의 함수율은 평균 94.0% (90.3~97.7% 범위)이었다. 함수율과 습윤 중량으로부터 계산된 총 슬러지의 건조 중량은 5.8~265.9 kg dry weight (dw)이었으며, 1회 작업시 제거량은 평균 109.9 kg dw이었다. 수거된 슬러지에 포함된 클로로필-a의 농도는 3차 작업인 9월 10일 시료부터 분석하였으며, 평균 10.74 mg/g ww (7.12~14.82 mg/g ww)이었다. 슬러지의 함수율 및 제거량으로부터 계산된 클로로필-a의 제거량은 94.0 kg dw/day (1.52~361.5 kg dw/day)이었다(Table 1).

조류제거 작업 기간에 수온은 19.4~30.1℃의 범위로 측정되었는데, 작업에 의한 영향보다는 측정 시

Table 1. Amount of collected sludge and water content and chlorophyll-a concentration in sludge

Date	Water content (%)	[Chl-a] ^a in sludge		Operation area (m ² /day)	Sludge Collected			[Chl-a] reduction in water ^d (mg/m ³)
		mg/g ww ^b	mg/g dw ^b		kg ww	kg dw	Chl-a (kg dw)	
Aug. 19	93.4	- ^c	-	50,000	2,250	148.1	-	-
Sep. 01	92.7	-	-	10,000	375	27.2	-	-
Sep. 10	90.3	0.141	1.454	70,000	2,750	265.9	0.387	5.523
Sep. 15	94.6	0.096	1.784	80,000	3,500	189.0	0.337	4.215
Sep. 17	90.5	0.083	0.876	40,000	1,750	166.4	0.146	3.643
Sep. 18	93.2	0.108	1.597	40,000	1,375	93.0	0.148	3.712
Oct. 07	95.6	0.071	1.635	80,000	2,250	98.0	0.160	2.003
Oct. 08	95.1	0.148	3.000	40,000	1,400	69.2	0.208	5.188
Oct. 14	97.7	0.113	4.883	10,000	250	5.8	0.028	2.827
Oct. 15	97.2	0.099	3.519	50,000	1,300	36.4	0.128	2.562
Average				47,000				3.709

^a Chlorophyll-a concentration

^b ww, wet weight; dw, dry weight

^c Not determined

^d Calculated using eq. (1)

Table 2. Change of environmental parameters in operation area according to algal removal operation

Date	Operation	Water Temp. (°C)	Conductivity (μS/cm)	pH	DO (mg/L)	Chlorophyll- <i>a</i>	
						Conc. (mg/m ³)	Removal Efficiency ¹ (%)
Aug. 19	Before	30.1	541	9.19	13.4	34.8	37.0
	After	28.2	289	8.50	10.7	21.9	
Sep. 01	Before	25.8	285	8.64	8.8	137.6	73.5
	After	26.3	303	8.13	8.6	36.5	
Sep. 10	Before	27.1	353	8.53	9.8	33.3	13.7
	After	25.0	360	8.39	10.0	28.7	
Sep. 15	Before	24.8	294	8.98	9.4	86.4	55.2
	After	26.5	308	8.56	8.8	38.7	
Sep. 17	Before	24.7	336	8.72	8.7	39.8	42.5
	After	26.2	276	8.54	8.1	22.9	
Sep. 18	Before	25.2	322	8.41	8.8	43.4	27.6
	After	27.2	289	8.34	9.1	31.4	
Oct. 07	Before	22.0	299	8.17	8.4	455.1	82.9
	After	22.7	254	8.92	10.3	77.7	
Oct. 08	Before	20.7	289	8.10	9.5	141.3	10.6
	After	21.2	328	8.13	11.1	126.3	
Oct. 14	Before	19.4	325	9.01	9.6	204.2	63.4
	After	19.5	235	8.76	10.8	74.7	
Oct. 15	Before	19.9	299	9.16	9.8	29.4	8.5
	After	19.5	247	8.72	9.8	26.9	

간에 의한 영향이 크게 나타났다(Table 2). 작업 구간 및 작업 구간의 상류, 하류의 수온 차이는 없었다. 작업 구간, 상류, 하류에서 DO와 EC에는 변화가 없었으며, 수거 작업 전·후의 차이도 없는 것으로 나타났다.

조류제거 작업 구간에서 작업 전 pH는 8.1~9.2이었으며, 작업 후에는 8.1~8.9의 범위였다. 일부 작업 시기를 제외하고, 대부분의 시기에 작업 후 pH가 감소하였으며, 감소 정도는 평균 0.19(-0.75~0.69)이었다(Table 2). 일반적인 응집제는 수산화기(OH⁻)와 결합하여 flocc을 형성하는 과정에서 pH를 감소시키지만, PAC의 경우 자체의 염기도를 가지고 있어 응집 과정에서 수산화기와 반응에 의한 pH 감소는 적다고 알려져 있다(Cheong 2008). 조류는 수중에 있는 무기탄소(HCO₃⁻)를 소모하여 광합성을 하기 때문에 이들이 과다증식할 경우 pH가 상승하며, 하절기에 수체 중 pH의 상승은 녹조 발생의 지표로 여겨지

기도 한다(Park et al. 2005; Kim et al. 2019). 따라서 작업 구간에서 pH가 저하된 것은 조류 제거로 인하여 조류의 밀도가 낮아졌음을 의미한다. 남조류 생장의 적합한 pH는 7.5~9.0 범위이며, pH 8.0~8.6 범위에서 최적 생장을 나타내고, pH 6 이하에서는 남조류 생장이 저해된다(Reynolds and Walsby 1975). 또한 높은 pH에서는 다른 조류에 비해 남조류가 상대적으로 경쟁적 우위를 점하게 된다(Paerl and Tucker 1995; Ji et al. 2017; Yang et al. 2018). 따라서 조류의 수거로 인해 수체의 pH가 내려가면 남조류의 생장이 억제되거나, 남조류에 비해 다른 조류가 우점하면서 유해 남조류에 의한 위해 정도가 감소될 수 있다.

조류 제거 작업시 전·후로 작업 구간에서 클로로필-*a*의 농도 및 남조류 세포수 밀도를 분석하여 제거효율을 산정하였다. 작업 구간에서 작업 전 클로로필-*a*의 농도는 29.4~455.1 mg/m³이었으며, 작업 후

농도는 21.9~126.3 mg/m³이었다(Figure 2). 작업 전·후의 클로로필-a 저감율은 평균 41.5% (8.5~82.9% 범위)이었으며, 녹조 발생 정도에 따라 차이가 크게 나타났다. 클로로필-a의 농도가 35 mg/m³ 이하일 경우에 저감율은 평균 19.8%이었으며, 35~100 mg/m³ 일 때에는 평균 41.8%, 100 mg/m³ 이상일 때는 평균 57.6%의 저감율을 나타내었다. 작업 구간의 상류와 하류에서 클로로필-a의 농도를 분석한 결과, 작업 전·후의 차이가 없는 것으로 나타났다(*t*-test, *p*>0.05). 따라서 작업 구간에서 클로로필-a의 농도 변화는 조류 수거 작업에 의해 조류가 제거되었

기 때문인 것으로 판단된다.

작업 기간 중 6회에 걸쳐 작업 전·후에 조류 종류별 세포수 밀도를 분석하였다(Figure 3). 작업 전 조류세포수 밀도는 4,717~101,200 cells/mL이었으며, 클로로필-a의 농도와 조류세포수 밀도의 상관계수(*R*²)는 0.76으로 높았다(회귀분석, *p*<0.05). 작업 후 작업 구간에서 조류세포수 밀도는 1,558~18,882 cells/mL이었으며, 제거효율은 평균 72.1%이었고, 39.1~93.7%의 범위였다. 작업 구간에서 우점한 조류는 남조류인 *Microcystis* 속이었으며, 작업 전·후 시료에서 조류 중 *Microcystis*의 평균 비율은 각각 66.4, 60.1%로 작업 후 시료에서 낮았으나, 통계적인 유의성은 없었다(*paired t*-test, *p*=0.58).

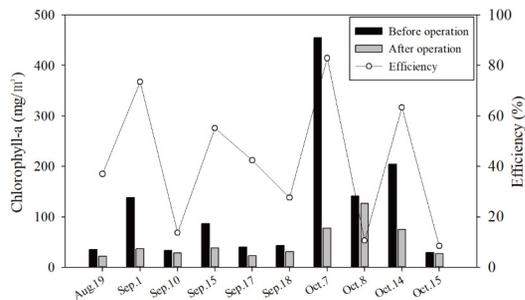


Figure 2. Change of chlorophyll-a concentration in operation area according to algal removal operation.

2. 조류 제거 작업시 남조류독소 농도 분석

응집제를 처리하였을 때 시간이 경과하면서 응집체가 흰색으로 변하는 현상이 관찰됨에 따라 응집제에 의한 조체 사멸 및 MCs의 방출 가능성에 대해 분석하였다. 현장에서 채수한 시료에 응집제를 30 mg/L (최종 농도)로 처리한 후 시간 별로 수체 중 용존성 MCs의 농도를 측정하였다. MC-lysine-arginine (MC-LR)의 경우 1 시간까지는 검출한계(0.1 µg/L) 이하로 측정되었으며, 4 시간이 경과한 후 0.19 µg/L로 검출되었고, 이후 감소하는 경향을 나타내었다(Table 3). MC-tyrosine-arginine (MC-YR)의 경우 모든 시료에서 검출한계 이하의 값을 나타내었다. MC-arginine-arginine (MC-RR)은 모든 시료에서 검출되었는데, 대체적으로 10시간까지 증가하다가 이후 감소하였다. 국내 호소 시료에서 MCs의 종류별 농도를 분석한 선행 연구에 따르면, 대청호를 비롯한 국내 대부분의 호소에서 MC-RR의 농도가 가장 높은 것으로 알려져 있다(Kim et al, 2010; Oh et al, 2010). 따라서 채취된 현장 시료에 있는 조체 중 MC-RR 함량이 가장 높기 때문에 응집제를 처리한 시료에서 MC-RR의 농도가 가장 높게 나타난 것으로 판단된다.

MCs는 간독소로서 인간을 포함한 가축, 수생 생물에게 독성을 나타내는 것으로 알려져 있다(Shi et al, 2021). 1998년 브라질 Caruaru에 있는 신장투

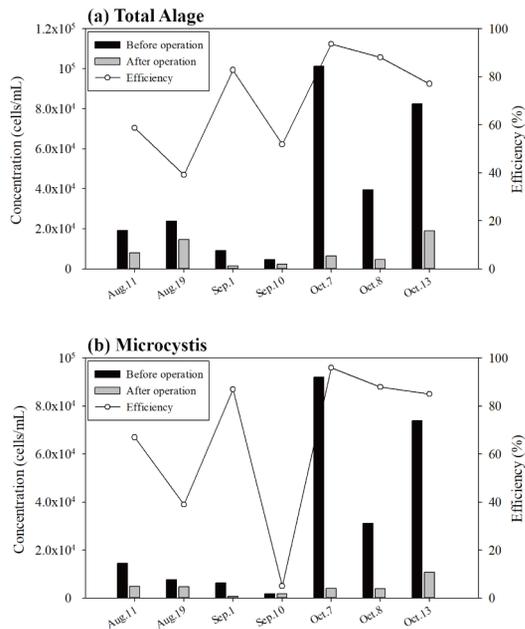


Figure 3. Change of algae (a) and Microcystis (b) concentrations according to algal removal operation.

Table 3. Change of microcystins concentrations with time when 30 ppm of polyaluminium chloride was treated

Sample	Concentration ($\mu\text{g/L}$)		
	Microcystin-LR	Microcystin-RR	Microcystin-YR
Untreated water	nd*	0.22	nd
30 ppm, 1hr	nd	0.13	nd
30 ppm, 4hr	0.19	0.37	nd
30 ppm, 10hr	0.13	0.44	nd
30 ppm, 24hr	0.11	0.24	nd

* under detection limit, <0.1 $\mu\text{g/L}$

석센터에서 MCs에 의한 사망 사건이 발생한 이후, WHO (세계보건기구)는 먹는물에서 MCs 중 독성이 가장 강한 것으로 알려진 MC-LR에 대하여 1 $\mu\text{g/L}$ 의 잠재적 허용기준을 설정하였으며(Falconer et al. 1999), 최근에 총 MCs에 대한 기준으로 전환하였다(Fastner and Humpage 2021). 또한 WHO는 친수용수(recreational water)에 대해서도 24 $\mu\text{g/L}$ 의 기준을 설정하였다(Fastner and Humpage 2021). 본 연구에서 응집제를 처리하였을 때 검출된 MC-LR과 MC-RR의 최대 농도는 각각 0.19, 0.44 $\mu\text{g/L}$ 로 WHO의 먹는물 및 친수용수에 대한 잠재적 허용기준 이하였기 때문에 응집제 처리 시 방출되는 MCs에 의한 수생생물의 영향은 미미할 것으로 판단된다.

3. 이동식 녹조제거장치의 조류 제거 효율

처리수역에서 수거된 슬러지의 클로로필-a 농도 및 수거량을 근거로 작업 구간에서 조류 제거량을 계산하였다. 이동식 녹조제거장치 운영 구간에서의 클로로필-a의 1회 당 제거량은 0.028~0.387 kg dw 범위로, 평균 0.193 kg dw이었다. 작업 구간의 1 m 수심까지 동일한 농도의 클로로필-a가 분포한다고 가정하였을 때, 작업에 의한 클로로필-a의 제거량과 작업 수체의 부피로부터 식(1)을 사용하여 작업 구간 중 클로로필-a의 농도 감소량($Chl-a_{reduction}$)을 계산하였다. 식(1)에서 $Chl-a_{sludge}$ 는 일일 작업을 통하여 제거된 슬러지에 포함된 클로로필-a의 양(kg dw/day)이며, WAD는 일일 작업 면적(m^2/day), D는 작업 수심(1 m)이다. 식(1)을 사용하여 작업 구간에서 감소된 클로로필-a 농도를 계산한 결과, 2.00~5.52 mg/m^3 의 범위였고, 평균 3.71 mg/m^3 이었다(Table 1).

$$Chl-a_{reduction}(\text{mg}/\text{m}^3) = \frac{Chl-a_{sludge}(\text{kg dw}/\text{day}) \times 1,000,000}{WAD(\text{m}^2/\text{day}) \times D(\text{m})} \quad (1)$$

선행 연구에서 이동식 녹조제거장치의 최대 일일 작업면적은 500,000 m^2/day 로 제시되었으나(Shin et al. 2014), 본 연구에서 실제로 작업한 일일 최대 작업 면적이 80,000 m^2 이었다(Table 1). 대청호에서 해마다 주기적으로 녹조가 발생하고 있는 서화천 추소리 수역의 면적은 약 500,000 m^2 이므로, 서화천 작업 구역 전체에서 이동형 녹조제거장치를 사용하여 제거 작업을 실시할 때 작업 소요일은 약 6.3일로 계산되었다. 서화천 추소리 수역에서 클로로필-a의 농도를 1 mg/m^3 저감하는데 필요한 작업일수(WD)는 식(2)를 사용하여 계산할 수 있다. 식(2)에서 Area는 작업 대상 수역의 면적(서화천 추소리 수역의 면적은 약 500,000 m^2), WAD_{max} 는 일일 최대 작업 면적이며, $Chl-a_{reduction}$ 은 식(1)에서 계산된 1일 작업에 의한 수체 중 클로로필-a의 농도 감소량을 나타낸다. 본 연구에서 적용된 이동형 녹조제거시설에 대한 WD를 계산한 결과 1.69 day이다. 즉 서화천 추소리 수역에서 클로로필-a의 농도를 1 mg/m^3 저감하기 위하여 1.69 day의 작업이 필요하다는 의미이다.

$$WD(\text{day}) = \frac{Area(\text{m}^2)}{WAD(\text{m}^2/\text{day})} \times \frac{(\text{mg}/\text{m}^3)}{Chl-a_{reduction}(\text{mg}/\text{m}^3/\text{day})} \quad (2)$$

선행 연구에서 조사된 다양한 물리적 제거 기술의 처리 용량은 120~36,000 m^3/day 의 범위였다(KEC 2012; Table 4). 대청호의 서화천 추소리 수역(약 500,000 m^2)에서 이들 기술로 추소리 수역의 수심 1 m 내에 있는 녹조를 제거한다면 13.9~4,167일이 소요되는 것으로 계산되었다.

Table 4. Removal efficiency and removal capacity of the physico-chemical algal removal technologies

Algal Removal Technology ^a	Removal Efficiency ^b (%)	Operation Volume (m ³ /day)	Removal Capacity (RC _{500K}) ^c (%)
Integrated organic matter removal vessel	29.9	30,000	1.79
On-site pressurized floating method	65.5	36,000	4.72
Ozone microbubbles	91.9	120	0.02
Aggregation floating using Water Health	85.5	3,333	0.57
Water circulation device using sunlight	53.6	11,520	1.23
Super Dissolved Air Flotation (SDAF) method	90.6	3,000	0.54
High-speed processing system using Zimentos	97.8	10,000	1.96
Water treatment system using non-contact plasma	90.6	2,100	0.38
Mobile algal removal device (This study)	41.5	80,000	6.64

^a Ref) KEC 2012.

^b Removal efficiency of chlorophyll-a

^c Calculated using eq. (2)

녹조제거기술의 효율을 평가할 때 기술의 녹조제거 효율만을 사용하는 것 보다 식(3)와 같이 작업 수역에 대한 녹조제거능(Removal Capacity, RC_{V_w})을 제시하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 식(3)에서 RE는 녹조제거효율(%)로 작업 전후 수체에서 클로로필-a의 농도 저감율(%)이며, V_o 는 처리 용량(m³)이고, V_w 는 작업 수역의 수체 용량(m³; 녹조 밀집 수심인 1 m까지 작업 수행)이다.

$$\text{Removal Capacity}(RC_{V_w}; \%/\text{day}) = \text{RE}(\%) \times \frac{V_o(\text{m}^3/\text{day})}{V_w(\text{m}^3)} \quad (3)$$

대청호 서화천의 추소리 수역(약 500,000 m²)이며, 이 지역에서 수심 1 m의 수체에서 작업을 수행한다면 작업 수역의 수체 용량(V_w)은 500,000 m³이다. 선행 기술을 대상으로 500,000 m³의 수체에 대한 녹조제거능(RC_{500K})을 계산한 결과, 0.02~4.72%/day이였으며, 제거 기술의 일일 처리 용량이 녹조제거능을 산출하는데 중요한 요인으로 작용하는 것으로 나타났다(Table 4). 본 연구에서 사용된 이동식 녹조제거장치의 녹조제거능(RC_{500K})은 6.64%/day로 기존의 기술에 비해 높게 나타났다.

녹조가 상수원에서 발생할 때 관리 필요성이 가장 크며, 국내에서는 팔당호, 대청호, 낙동강 등 대규모의 상수원에서 녹조가 발생하기 때문에 이들 지역에 적용 가능한 녹조제거기술의 개발이 필요하다. 선행

연구에서 높은 녹조 제거효율을 나타내는 다양한 기술들이 제시되었으나, 대규모 수체에서 적용 가능한 기술을 선정하기 위해서는 녹조제거효율 뿐 아니라 본 연구에서 제안한 바와 같이 처리용량을 고려한 녹조제거능에 대한 자료가 제시되어야 할 것이다.

대청호는 금강 중류에 위치하고 있으며, 저수면적 대비 유역면적의 비율(약 56.8배)이 높고 상류 지역의 거주 인구 및 오염부하가 높기 때문에 비슷한 규모의 타 호소에 비해 녹조 발생에 취약하다(Noh et al. 2014). 특히 대청호 상류의 지류인 서화천의 추소리 수역은 대청호에서 녹조 현상이 가장 많이 일어나는 지역으로 매년 녹조가 주기적으로 발생하고 있다(Kim et al. 2003). 서화천의 상류에 옥천하수종말처리장과 다수의 축산 시설이 밀집되어 있기 때문에, 이 지역은 대청호 지천의 총인 발생부하량의 약 72%를 차지한다(Oh et al. 2004; Oh & Cho 2015; Kal et al. 2020). 추소리 수역의 녹조는 장마기간(6월 말~7월 중순)의 강수량 영향을 크게 받는다. 장마기간에 강수량이 많을 경우에는 서화천 상류에서 증식된 조류가 수류와 함께 하류로 이동하여 대청호 본류로 확산되며, 강수량이 적을 경우에는 추소리 수역에서 녹조 현상이 집중적으로 발생한다(Shin et al. 2016).

서화천 상류에서 발생하는 녹조를 억제·조절하기 위하여 조류 확산 방지막, 초음파제거기, 천연조류제거제 살포, 가압부상공법, 비접촉형 플라즈마 융합형

조류제거설비, 유도가열건조형 플라즈마 설비를 포함한 다양한 기술이 적용되었다(Kim et al. 2013; Oh et al. 2013; Oh & Cho 2015). 하지만 이들은 제거 효율이 낮거나, 시설비, 운영비에 비해 처리 용량이 작아 서화천 수역과 같은 대규모 수체에서 녹조를 제거하기에 한계가 있었다. 본 연구에서 사용된 이동식 조류제거장치는 유속에 상관없이 하천이나 호소에서 적용 가능하며, 현장 적용성과 효과 지속성이 “우수”할 뿐 아니라 경제성과 환경친화성이 “좋음”으로 분류되어 녹조 발생 초기 또는 과다증식 기간에 모두 적용할 수 있는 기술로 평가되었다(Byeon et al. 2016). 또한 본 연구에서 대청호 서화천 상류에서 이 장치를 적용한 결과, 기존의 기술에 비해 녹조제거능이 뛰어났을 뿐 아니라, 대규모 수체에도 적용 가능하며, 남조류독소인 MCs의 유출이 적기 때문에, 이동식 녹조 제거장치는 대규모 상수원에서 발생한 녹조를 효과적으로 관리할 수 있는 기술인 것으로 판단된다.

IV. 결론

국내 상수원에서 주기적으로 발생하는 녹조에 대응하기 위하여 다양한 종류의 녹조제거기술이 개발되어 적용 중이다. 이러한 기술들은 녹조 제거 원리가 다르기 때문에 이들의 제거효율을 비교·평가하기는 어렵다. 본 연구에서는 실제 녹조가 발생한 수체에서 해당 기술의 녹조제거효율만을 사용하는 것 보다 해당 기술의 녹조 처리 용량 및 작업 수역의 수체 용량(녹조 밀집 수심인 1 m까지 작업 수행)을 이용한 녹조제거능(Removal Capacity)의 계산을 통한 평가 방법을 제안하였다. 이 방법을 활용하여 국내에서 적용되고 있는 녹조 제거 기술의 비교 평가가 가능할 것이며, 국립환경과학원이 운영하고 있는 「조류제거시설 설치·운영 및 살포용 조류제거물질 사용지침」에서 물리적 또는 물리·화학적 복합 조류제거기법의 조류 제거 성능 및 제거 효율 평가를 판정하는 방법으로 활용 가능할 것으로 판단된다.

사사

이 논문은 충북대학교 국립대학육성사업(2022) 지원을 받아 작성되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Ahn C-Y, Lee CS, Choi JW, Lee S, and Oh H-M. 2015. Global occurrence of harmful cyanobacterial blooms and N, P-limitation strategy for bloom control. *Korean J Environ Biol.* 33: 1-6. [Korean Literature]
- Byeon KD, Kim GY, Lee I, Lee S, Park J, Hwang T, and Joo JC. 2016. Investigation and evaluation of algae removal technologies applied in domestic rivers and lakes. *J Korean Soc Environ Eng.* 38: 387-394. [Korean Literature]
- Camargo JA, Alonso A. 2006. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. *Environ Int.* 32: 831-849.
- Carmichael WW, Boyer GL. 2016. Health impacts from cyanobacteria harmful algae blooms: Implications for the North American Great Lakes. *Harmful Algae.* 54: 194-212.
- Cheong C-J. 2008. Removal of microalgae using inorganic coagulants in coagulation and sedimentation processes for water treatment. *J. Korean Soc Environ Eng.* 30: 85-89. [Korean Literature]
- Chernova E, Sidelev S, Russkikh I, Korneva L, Solovyova V, Mineeva N, Stepanova I, Zhakovskaya Z. 2020. Spatial distribution of cyanotoxins and ratios of microcystin to biomass indicators in the reservoirs of the Volga, Kama and Don Rivers, the European part of Russia. *Limnologica.* 84: 125819.
- Falconer I, Bartram J, Chorus I, Kuiper-Goodman T, Utkilen H, Burch M, Codd G. 1999.

- Safe levels and safe practices, pp. 155-178. In I Chorus and J Bartram (eds.), *Toxic Cyanobacteria in Water-A Guide to their Public Health Consequences, Monitoring and Management*, E&FN Spon, London, UK.
- Fastner J, Humpage A. 2021. Hepatotoxic cyclic peptides-microcystins and nodularins, pp. 21-52. In I Chorus and M Welker (eds.), *Toxic Cyanobacteria in Water-A Guide to their Public Health Consequences, Monitoring and Management*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Funari E, Testai E. 2008. Human health risk assessment related to cyanotoxins exposure. *Crit. Rev. Toxicol.* 38: 97-125.
- Haddix PL, Hughley CJ, Lechevallier MW. 2007. Occurrence of microcystins in 33 US water supplies. *Journal-American Water Works Association* 99: 118-125.
- Huisman J, Codd GA, Paerl HW, Ibelings BW, Verspagen JM, Visser PM. 2018. Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology* 16: 471-483.
- Ji X, Verspagen JM, Stomp M, Huisman J. 2017. Competition between cyanobacteria and green algae at low versus elevated CO₂: Who will win, and why? *J Exp Bot.* 68: 3815-3828.
- Joo JC, Park JR, Ahn CH, Kim GY, Lee MJ. 2018. Decision-making protocol to select the optimal algae removal technologies for water bodies with different characteristics. *The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers* 66: 26-31. [Korean Literature]
- Kal B-S, Mun H-S, Hong S-H, Park C-D, Min K-O, Park J-B. 2020. A study on the applicability of load duration curve for the management of nonpoint source pollution in Seohwacheon basin. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 23: 174-191. [Korean Literature]
- KEC. 2012. *Algae Reduction Technology to Improve Safety of Aquatic Ecosystem*, pp. 135-208. Korea Environment Corporation, Incheon, Republic of Korea. [Korean Literature]
- Kim D-S, Lee H-K, Maeng S-J, Hwang S-J, Shin J-K. 2003. An evaluation of aquatic environment in the Okchon stream-embayment watershed, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment*. 36: 181-190. [Korean Literature]
- Kim H-B, Park H-K, Shin K, Moon J-S. 2010. The characteristics of toxin production in the Korean toxic cyanobacteria. *J Korean Soc Water Environ.* 26: 834-840. [Korean Literature]
- Kim S, Chung S, Park H, Cho Y, Lee H. 2019. Analysis of environmental factors associated with cyanobacterial dominance after river weir installation. *Water* 11: 1163.
- Kim S-K, Kim D-K, Kang S, Ahn J, Kim I-H, Yun S, Lee S, Lee W. 2013. Removal of algae by natural coagulants of soil origin. *J Korean Soc Environ Eng.* 35: 883-888. [Korean Literature]
- Lee CS, Ahn C-Y, La HJ, Lee S, Oh H-M. 2013. Technical and strategic approach for the control of cyanobacterial bloom in fresh waters. *Korean J Environ Biol.* 31: 233-242. [Korean Literature]
- MOE. 2016. *Standard Methods for Analysis of Water Pollution*. Ministry of Environment, Republic of Korea, Sejong, Republic of Korea. [Korean Literature]
- Nazari-Sharabian M, Ahmad S, and Karakouzian M. 2018. Climate change and eutrophication: A short review. *Engineering, Technology and Applied Science Research* 8: 3668-3672.

- Noh S, Park H, Choi H, Lee J. 2014. Effect of climate change for cyanobacteria growth pattern in Chudong station of Lake Daechung. J Korean Soc Water Environ. 30: 377-385. [Korean Literature]
- Oh K-H, Cho Y-C. 2015. Evaluation of contamination level of the sediments from Chusori and Chudong areas in Daechung Reservoir. J Korean Soc Environ Eng. 37: 277-284. [Korean Literature]
- Oh K-H, Han AW, Cho Y-C. 2010. Analysis of sequence diversity of mcyA gene involved in microcystin synthesis in Korean reservoirs. Korean J Microbiol. 46: 162-168. [Korean Literature]
- Oh K-H, Jeong D-H, Yang S-Y, Jeon T-W, Cho Y-C. 2013. Effects of submerged aerator on the growth of algae in Daechung Reservoir. J Korean Soc Environ Eng. 35: 268-275. [Korean Literature]
- Oh Y-T, Park J-C, Kim D-S, Rhyu JK. 2004. Pollutant characteristics of nonpoint source runoff in Okcheon stream. J Korean Soc Water Environ. 20: 657-663. [Korean Literature]
- Paerl HW, Tucker CS. 1995. Ecology of blue-green algae in aquaculture ponds. J World Aquac Soc. 26: 109-131.
- Park C, Yoon D, Park SH, Park N-S. 2019. An experimental study for removing algae particles using a metal mesh membrane. Desalin Water Treat. 149: 52-57.
- Park H-K, Lee H-J, Kim E-K, Jung D-I. 2005. Characteristics of algal abundance and statistical analysis of environmental factors in Lake Paldang. J Korean Soc Water Environ. 21: 584-594. [Korean Literature]
- Reynolds CS, Walsby AE. 1975. Water-blooms. Biol Rev. 50: 437-481.
- Shi L, Du X, Liu H, Chen X, Ma Y, Wang R, Tian Z, Zhang S, Guo H, Zhang H. 2021. Update on the adverse effects of microcystins on the liver. Environ Res. 195: 110890.
- Shin J-K, Kang B-G, Hwang S-J. 2016. Water-blooms (green-tide) dynamics of algae alert system and rainfall-hydrological effects in Daechong Reservoir, Korea. Korean Journal of Ecology and Environment 49: 153-175. [Korean Literature]
- Shin J-K, Kim H, Kim SW, Chong S-A, Moon BC, Lee S, Choi JW. 2014. A practical new technology of removing algal bloom: K-water gate water combine. Korean Journal of Ecology and Environment 47: 214-218. [Korean Literature]
- Walls JT, Wyatt KH, Doll JC, Rubenstein EM, Rober AR. 2018. Hot and toxic: Temperature regulates microcystin release from cyanobacteria. Sci Total Environ. 610: 786-795.
- Wert EC, Korak JA, Trenholm RA, Rosario-Ortiz FL. 2014. Effect of oxidant exposure on the release of intracellular microcystin, MIB, and geosmin from three cyanobacteria species. Water Res. 52: 251-259.
- Yang J, Tang H, Zhang X, Zhu X, Huang Y, Yang Z. 2018. High temperature and pH favor *Microcystis aeruginosa* to outcompete *Scenedesmus obliquus*. Environ Sci Pollut Res. 25: 4794-4802.