Journal of Korean Society on Water Environment, Vol. 40, No. 1, pp. 1-10 (January, 2024)
pISSN 2289-0971 eISSN 2289-098X https://doi.org/10.15681/KSWE.2024.40.1.1

연구논문

경기남부권 농업용 저수지의 유해 남세균 발생 및 독소물질 잔류 특성

김민주[a] · 김영기[b,†]

한경국립대학교 화학공학전공, 화학기술연구소

Characteristics of Harmful Cyanobacteria Occurrence and Toxin Residual in Agricultural Reservoirs of Southern Gyeonggi

Kim Minju[a] · Kim Young-Kee[b,†]

Department of Chemical Engineering, Research Center of Chemical Technology, Hankyong National University

(Received 16 October 2023, Revised 29 December 2023, Accepted 8 January 2024)

Abstract

Algal blooms occur seasonally in the eutrophicated rivers or reservoirs, and some harmful cyanobacteria species produce toxic substances, which are directly or indirectly harmful to the ecosystem and terrestrial animals. So, the monitoring and control of harmful cyanobacteria occurrence and toxins residual in the aquasystem are important to preserve the water environment and secure public health. In this study, the four harmful cyanobacteria occurrences and toxic substance concentrations of two agricultural reservoirs in the southern part of Gyeonggi Province were investigated from August to October 2022. Among four harmful cyanobacteria (*Microcystis* sp., *Anabaena* sp., *Oscillatoria* sp., *Aphanizomenon* sp.), three kinds of cyanobacteria except *Oscillatoria* sp. were observed, and *Microcystis* sp. was the dominant cyanobacteria except for *Anabaena* sp. dominant result of a sample collected on October at reservoir B. The cell density of cyanobacteria was influenced by season and weather due to the length of daytime and concentrations of organic carbon and nitrogen. Three kinds of microcystin and anatoxin-a were quantitatively analyzed as total (in the cell body and water) and extracellular (in water) concentrations. The maximum total concentrations of anatoxin-a, microcystin-LR, microcystin-RR, and microcystin-YR were 0.1291 μg/L, 0.2776 μg/L, 0.3721 μg/L, and 0.0306 μg/L, respectively, in reservoir A and 0.3274 μg/L, 0.1495 μg/L, 0.2037 μg/L, and 0.0153 μg/L, respectively, in reservoir B.

Key words : Agricultural reservoirs, *Anabaena*, Cyanotoxin, Harmful cyanobacteria, *Microcystis*, *Oscillatoria*

[a] 석사과정(Master Student), minju@hknu.ac.kr, https://orcid.org/0009-0001-1879-4932
[b] Corresponding author, 교수(Professor), kim@hknu.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-5790-8760

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

지구온난화로 높아진 수온과 변화된 강수량, 일조량과 함께 오폐수의 수계로의 유입으로 인하여 하천과 보, 저수지 등 담수생태계의 부영양화가 심각하게 진행되고 있다(Ho et al., 2019; Hou et al., 2022; Mathias et al., 2018; Taranu et al., 2015). 일반적으로 담수생태계는 북반구의 온대지역을 기준으로 수온이 낮은 봄, 가을, 겨울에는 규조류, 여름철에는 남조류(cyanobacteria, 남세균)가 우점하는 것으로 알려져 있다(Joung and Park, 2010). 따라서, 남세균은 여름철 담수생태계의 조류 대발생을 일으키는 주범으로 볼 수 있다. 남세균 중 생태계와 인간에게 심각한 영향을 끼칠 수 있는 독성물질을 생성하는 종을 유해 남세균(harmful cyanobacteria)이라고 하며, 다양한 종이 존재하지만 가장 많은 출현 빈도를 보이는 유해 남세균은 마이크로시티스(*Microcystis*), 아나베나(*Anabaena*), 오실라토리아(*Oscillatoria*), 아파니조메논(*Aphanizomenon*)이고 우리나라를 포함한 많은 국가들이 4종의 유해 남세균을 관리하고 있다(Svirčev et al., 2019).

마이크로시스티스속 남세균들은 대표적인 시아노톡신(cyanotoxin)인 마이크로시스틴(microcystin)을 생성하며 관능기에 따라 다양한 종류의 마이크로시스틴이 존재한다. 가장 일반적으로 관찰되는 마이크로시스틴은 관능기로 각각 류신, 아르기닌, 티록신을 가지는 마이크로시스틴-LR, 마이크로시스틴-RR, 마이크로시스틴-YR 등이 있다(Lee et al., 2010). 마이크로시스틴은 종류별로 독성의 차이가 존재하며, 마이크로시스틴-LR의 경우 반수치사량(LD50)이 50 μg/kg로 강한 독성을 가지는 것으로 보고되어 있다(Humbert, 2009). 이 독소물질은 만성 간 손상을 일으키고 사람의 경우 장기적으로 암을 유발한다는 연구가 있어, 환경부와 국립환경과학원에서는 마이크로시스틴의 4가지 형태(-RR, -YR, -LR, -LA) 중 상대적으로 독성이 강한 마이크로시스틴‐LR을 감시항목으로 지정하고, 세계보건기구(World Health Organisation, WHO)의 권고 기준과 동일하게 검출한계를 1 μg/L 이하로 지정하여 관리하고 있다(WHO, 2003). 일부 남세균은 수환경 내 질소 농도가 낮은 경우 대기로부터 질소를 고정하여 암모이나를 생성하여 생화학적으로 이용할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 대표적으로 아나베나와 아파니조메논 속의 남세균이 이런 능력을 가지고 있다(Cottingham et al., 2015; Kang et al., 2014; Schindler et al., 2016). 따라서 질소성분이 부족한 수환경에서 다른 종류의 조류는 성장하기 어렵지만 질소고정능력을 가지는 남세균은 증식하는 것이 가능해 우점종이 될 수 있다. 아나베나가 생성하는 독소는 마이크로시스틴과 아나톡신(anatoxin)이며, 인체에 대해 신경독성 및 간독성을 가지는 특징이 있다(Mathias et al., 2018; Ryu et al., 2016). 오실라토리아는 단위세포가 실모양으로 일렬로 연결된 형태를 가지고 있으며 세포 내 공기주머니가 있어 수중에서 부유하는 특징을 갖는다. 대부분의 남세균들은 20~30°C에서 성장을 하지만 오실라토리아속 남세균은 20°C 이하와 30°C 이상의 수온에서도 성장할 수 있다(Singh et al., 2012). 오실라토리아가 생성하는 독소는 아나베나와 동일하며, 인체에 대한 간독성과 신경독성을 가진다(Eriksson et al., 1988). 아파니조메논은 단위세포가 실모양으로 일렬 연결되어 군체를 형성하는 특징을 가지는 남세균이다. 아파니조메논의 가장 큰 특징은 위에서 언급한 세 종류의 남세균과 달리 독소로 삭시톡신(saxitoxin)을 생성하는 것으로 삭시톡신은 강력한 신경독소물질로 마비성 증상을 유발할 수 있다(Cottingham et al., 2015; Ryu et al., 2017).

유해 남세균에 의한 담수생태계의 오염은 많은 국가에서 보고되어 있고, 수환경과 인간 건강에 심각한 영향을 초래하고 있다. 미국 Environmental Protection Agency (EPA)에서 2007년 조사한 결과를 보면 유해 남세균의 독소에 노출될 위험이 있는 호소를 가지고 있는 주가 38개에 이르는 것으로 보고하고 있다. 그 중 South Dakota와 Illinois 주는 전체 호소 중 각각 70%, 60% 수준의 호소에서 독소가 검출된 것으로 나타났다(EPA, 2009). 또한 Minnesota 주 호소의 부영양화로 인해 발생된 유해 남세균에 의해 마이크로시스틴이 대량 발생한 사건과 조류의 확산 및 독소의 인체 위험성에 대한 많은 연구들은 유해 남세균이 인간 건강과 생태계에 얼마나 위험할 수 있는지를 보여주고 있다(Heiskary et al., 2014; Lindon and Heiskary, 2009). 이러한 조사 및 연구결과를 바탕으로 많은 국가 및 환경 관련 기관들은 조류 발생의 모니터링과 관리에 많은 노력을 하고 있다. 미국의 경우 지질 조사국(United States Geological Survey, USGS)에서는 식수원 및 생태계 보호를 위해 하천과 호소의 남세균에 의한 녹조현상을 관찰, 관리하기 위하여 남세균-독성 연구소를 설립하여 체계적인 대응조치를 취하고 있다. USGS에서 조사하여 2016년 발표한 결과에서도 미국 내 최소 35개 주 이상에서 유해남세균에 의한 독소발생이 일어난 것으로 보고하고 있다(USGS, 2016).

현재까지 우리나라에서 유해 남세균에 의해 발생된 독소로 인한 직접적인 인명피해가 보고된 바는 없으며, 우리나라의 주요 수계에 대한 조사에서 수계유역의 독소농도는 기준농도인 1 μg/L보다 낮은 것으로 보고되어 있다(Kim et al., 2009; Lee et al., 2012). 주요 수계 중 낙동강 수계 구간에서는 낙동강의 하류로 갈수록 유해 남세균 발생이 심해지는 경향을 보이고 있으며, 수온이 상승하는 여름철마다 빈번하게 유해 남세균이 발생하는 것으로 보고되어 있고(Woo et al., 2020), 2022년에는 낙동강 수계에서 마이크로시스틴의 잔류농도가 높다는 주장이 제기되어 논란이 된 바 있다. 팔당호와 울산 회야호 등 호소의 경우 낙동강 유역처럼 유해 남세균이 발생하는 것은 아니지만 크게 번성할 가능성이 높다는 연구결과가 보고된 바 있다(Choi et al., 2013; Kim et al., 2009). 현재까지 우리나라의 대부분 수계에 존재하는 독소의 농도는 WHO에서 관리하는 유해 독소량 권고기준인 microcystin-LR 1 μg/L 이하인 것으로 보고되어 있다(Choi et al., 2013; Woo et al., 2020). 하지만, 하천과 호소 등에 남세균의 발생과 유해독소의 잔류가 확인되고 있고, 생태계 내 농축으로 생태계 건강성에 영향을 끼칠 우려가 있으므로 지속적인 관찰은 중요하다. 특히, 농업용 저수지의 농업용수로 생산된 농산품은 인간에 의해 최종 소비되므로 상세한 관찰

이 필요한데도 아직까지 많은 연구결과가 보고되지 못하고 있다.

본 연구에서는 농업용수 공급을 위해 활용되고 있는 경기도 남부권의 농업용 저수지 두 곳에 대하여 남세균의 발생 특성과 남세균에 의해 생성된 독소물질 분석 결과를 제공하여 농업용 저수지의 남세균 발생 관리에 활용할 수 있는 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. Materials and Methods

2.1 채수 위치 및 시료채취

경기도 남부권의 농업용 저수지를 대상으로 남세균의 발생과 독소물질 잔류량 조사를 수행하였다. 농업용 저수지는 강이나 강류로부터 유입되는 물의 유속을 조절하며, 자연재해(홍수, 폭우)로부터 물 공급을 안전하게 유지하는 역할을 한다. A 저수지와 B 저수지는 수자원 보호와 안정적인 농업용수 공급을 위해 현재 이용 중인 농업용 저수지로 2020년과 2021년에 본 연구진에 의해 수행된 경기도 남부권 농업용 저수지 8곳에 대한 조류 발생 기초조사 결과로부터 남세균의 발생이 지속적으로 관찰되었던 곳으로 선정하였다(Fig. 1). A 저수지와 B 저수지에 대한 현황 정보를 Table 1에 나타내었다.

유해 남세균 발생 조사는 2022년 여름철에 수행하였으나, 6월과 7월은 각각 가뭄에 의한 시료 채취의 한계와 집중 호우로 인한 저수지 월류, 희석에 의한 조류 미발생으로 인하여 조사를 수행하지 못하였다. 따라서, 8월, 9월, 10월에 시료 채취를 통해 남세균 발생 현황과 독소 분석을 수행하였다. 수질 시료의 채취 위치는 저수지 중류이고 연안에서 중심 방향으로 약 40 m 떨어진 정점에서 이루어졌으며, 구체적으로 A 저수지의 채수 위치는 37.0893°N 127.2861°E이며, B 저수지의 채수 위치는 37.0192°N 127.1857°E이다. 수질시료의 채취는 표층수(surface water)와 저층수(bottom water)를 대상으로 반돈식 채수기를 이용하여 진행하였으며 표층의 경우 수면에서 15 cm 아래에서 시료를 채취하였으며 저층은 바닥에서 15 cm 위에서 시료를 채취하였다. 저층 시료를 채취하는 과정에서 퇴적층의 재부유에 의한 입자성 오염물질 유입을 최소화하기 위하여 수심 체크 후 채수기를 퇴적층의 교란을 방지하며 설치하였다. 시료 채취 방법 및 보관은 수질오염 공정시험방법을 기준으로 진행하였으며, 채취한 시료는 멸균된 1 L 채수병 용기에 담아 1시간 이내에 실험실로 이송하여 분석 전까지 4°C로 냉장 보관하였다. 분석은 채수 시점에서 24시간 이내에 완료하였다.

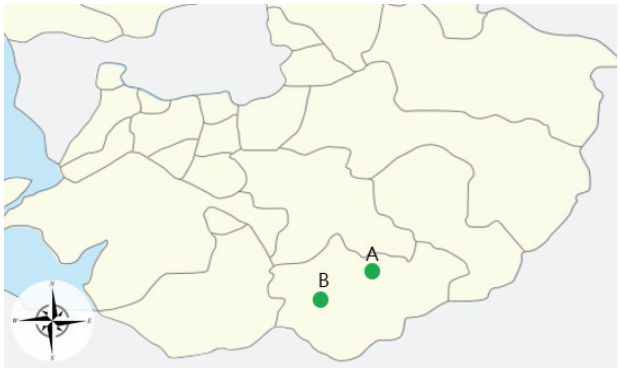

Fig. 1. Locations of agricultural reservoirs of southern Gyeonggi-do investigated in this study.

2.2 시료 분석방법

채취된 시료에 대해 수질 분석, 4종의 유해 남세균(*Microcystis* sp., *Anabaena* sp., *Oscillatiria* sp., 및 *Aphanizomenon* sp.) 개체수 분석과 남세균이 생산하는 독소인 microcystin-LR (MC-LR), microcystin-RR (MC-RR), microcystin-YR (MC-YR), anatoxin-a에 대한 분석을 수행하였으며 구체적인 방법은 아래와 같다.

2.2.1 시료 수질 분석

농업용 저수지 채취 시료의 수질 분석을 위한 항목은 수심, 수온, pH, 용존산소(disolved oxygen, DO), 부유물질(suspended solids, SS), 총유기탄소량(total organic carbon, TOC), 총질소(total nitrogen, TN), 총인(total phosphorous, TP)을 수행하였다. 수심의 경우 줄에 추를 달고 측정하였으며, 수온 및 용존산소는 portable D.O. meter (HI-9146, Hanna Instruments, Inc., Woonsocket, RI, USA)를 이용하여 현장 측정을 수행하였다. pH 분석은 pH meter (SevenEasy pH, Mettler-Toledo AG, Columbus, OH, USA)를 이용하여 수행하였다. 부유물질의 경우 수질오염 공정시험기준의 부유물질 분석법을 따라 GF/C 멤브레인(Whatman plc, Maidstone, UK)을 이용하여 여과를 수행하고 여과 전후의 건조질량 차이를 이용하여 질량농도로 표시하였다. TOC 분석은 TOC-L 분석기(Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan)를 이용하였고, 총인, 총질소, COD는 Hach(Hach company, Loveland, CO, USA) 및 Shimadzu 수질분석기를 이용하여 각각의 분석용 kit인 TNT 844 (Hach company, Loveland, CO, USA), TNM-L (SHIMADZU Corporation, Japan), COD digestion vials (Hach company, Loveland, CO, USA)를 이용하여 수질오염공정시험기준에 부합하게 분석을 수행하였다.

2.2.2 유해 남세균 개체수 분석

현미경 계수 분석을 통해 남세균 개체수를 확인하였으며, 계수 방법은 조류 경보제 운영 매뉴얼의 식물플랑크톤(조류)

Table 1. Hydrological characteristics of the investigated agricultural reservoirs

Site	Watershed area (km^2)	Surface area (km^2)	Water capacity ($\times 10^6$ m^3)	Mean depth (m)
A	71	29.698	15.217	3.5
B	3.75	1.402	0.615	1.7

분석법(National Institute of Environmental Research, 2020)을 기준으로 하여 수행하였다. Lugol 용액으로 고정하고 원심분리를 통해 농도를 조절하여 위상차 현미경(TCM-400, Labomed, Los Angeles, CA, USA)을 이용하여 계수 및 동정하여 개체수를 산출하였다. 계수 시 무작위로 최소 10회 이상 반복하여 아래 식에 의해 부피당 개체수를 계산하였다.

$$\text{개체수}/mL = \frac{C}{A \times D \times N} \times 1000 \quad (1)$$

여기서, C = 계수된 개체수의 합, A = 혈구계수기 면적 (mm^2), D = 검경한 격자의 깊이 (mm), N = 검경한 시야의 횟수

2.2.3 독소물질 정량분석

유해 남세균에 의해 발생한 독소성분을 분석하기 위해 조류 경보제 운영 매뉴얼의 마이크로시스틴:액체크로마토그래프-텐덤질량분석법을 참고하여(National Institute of Environmental Research, 2020) 전처리와 고성능 액체크로마토그래프(LTQ, Thermo Fisher Scientific, San Jose, CA, USA)와 텐덤질량분석기(TSQ, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)를 이용하여 정량 분석을 수행하였다.

남세균 조체 내부와 수체 내 용존을 구분하지 않고 전체 독소 농도를 분석하기 위해서 다음과 같은 전처리를 수행하였다. 채수한 시료 200 mL를 바이알에 분취하여 초음파분쇄기(Homogenizer, Hangzhou MIU Instruments, Hangzhou, China)에 넣고 얼음과 차가운 물로 중탕하면서 조체를 파쇄시킨다. 현미경으로 세포의 완전 파쇄를 확인하여 파쇄가 이루어지지 않은 경우 파쇄 과정을 반복한다. 조체가 모두 파쇄된 시료를 GF/C 유리섬유필터를 이용하여 여과한다. 여과액에 존재하는 독소물질은 고상추출기기(Waters, MA, USA)를 이용하여 농축 및 정제 후 메탄올로 용해하여 LC-MS/MS를 사용하여 분석하였다.

남세균 조체 내 존재하는 조류독소물질을 분석하기 위한 시료의 전처리방법은 아래와 같다. 시료 채수 후 GF/C 유리섬유 필터를 이용하여 조체를 여과하였다. 조체가 걸러진 여과지를 건조시킨 후, 건조된 조체만 수거하여 5 v/v% 아세트산 용액을 첨가한 후 초음파분쇄기로 완전히 세포를 파쇄하였다. 파쇄가 끝난 시료는 원심분리기를 이용하여 분리한 후 상등액을 취하였다. 얻어진 상등액은 고상추출장치를 통해 농축 및 정제를 하였고 고성능 액체크로마토그래프를 사용하여 분석하였다.

3. Results and Discussion

3.1 농업용 저수지 수질분석 결과

농업용 저수지의 유해 남세균 발생은 지역 유입수 특성, 저수지 인근 환경, 강수량 및 일조량을 포함하는 기후 특성 등 다양한 요인에 영향을 받는다. 우리나라 대부분의 저수지는 농업용 저수지이며 이는 저수지의 유역면적의 비가 높을수록 생활계 오염원과 축산계 및 토지계에서 배출되는 비점오염원으로부터 오염물질이 유입될 가능성이 높아진다. 오폐수 유입 증가로 인한 영양염류 농도 증가는 남세균의 대량증식으로 이어지며 이에 따라 독소 생성 및 잔류물 증가로 이어질 수 있다.

Table 2는 2022년 8월, 9월, 10월의 조사 대상 농업용 저수지에서 채취한 수질 시료의 수온, pH, 부유물질(SS), 총유기탄소량(TOC), 총질소(TN), 총인(TP) 농도 분석 결과이다. pH의 경우 표층수보다 저층수에서 낮은 경향을 보였으며, A 저수지의 경우 평균 7.83, B 저수지의 경우 평균 8.23으로 측정되었다. 시기별로는 두군데 저수지 모두 9월에 측정된 pH가 가장 높았다. 호소 생활환경기준(Ministry of Environment, 2023)에 따르면 9월에 측정된 B 저수지의 표층수 시료를 제외하고는 모두 적정 pH 범위(6.5-8.5) 내에 있었다. 용존산소농도는 두 저수지 모두 양호한 특성(호소 생활환경 기준 상 좋음(5.0 mg/L 이상) 또는 매우좋음(7.5 mg/L 이상)에 해당함)을 보였으며, A 저수지보다는 B 저수지의 DO 농도가 전반적으로 높은 것으로 분석되었다. SS의 경우 표층에 비해 저층에서 농도가 높게 나타났으며, 조사한 8월, 9월, 10월에 각각 A 저수지의 경우 평균 14, 6, 5.5 mg/L, B 저수지의 경우 14, 10, 8.5 mg/L로 측정되어 B 저수지의 농도가 A 저수지보다 약간 높게 나타났다. 호소 생활환경기준에 따르면, A, B 저수지 모두 SS 농도는 평균적으로 보통 수준(5-15 mg/L)으로 평가되었으나, A 저수지는 8월, B 저수지는 8, 9월에 저층의 경우 나쁨 수준(15 mg/L 이상)으로 측정되었다.

TOC의 경우 전반적으로 8월, 9월이 높고, 10월에 크게 낮아지는 특성을 보였다. 모든 저수지에서 표층보다 저층에서 약간 높은 TOC 농도가 검출되었으나 큰 차이를 보이지는 않았다. 유역면적이 넓은 A 저수지에 비해 B 저수지의 TOC 농도가 높은 수준을 보였다. 8월과 9월에 채취한 시료 분석 결과에 의하면 A 저수지의 경우 호소 생활환경기준 상 나쁨 수준(8 mg/L 이하)이며, B 저수지는 매우 나쁨 수준(8 mg/L 초과)으로 평가된다. 하지만, 두 저수지 모두 10월의 TOC 농도는 모두 매우 좋음(2 mg/L 이하)으로 개선되는 결과를 보였다.

TN은 조사 대상 저수지에서 비슷한 결과를 보였으며, TOC 농도 변화와 유사한 경향을 보인다. 수심에 따른 차이는 거의 없었으며 평균 농도가 10월을 제외한 시점에서 호소 생활환경기준의 매우나쁨(1.5 mg/L 초과)에 해당되었다. 10월에 A 저수지는 좋음(0.3 mg/L 이하), B 저수지는 매우 좋음(0.2 mg/L 이하) 수준의 수질로 분석되었다. TP는 TOC나 TN과는 다른 경향을 보였으며, A 저수지의 경우 10월>9월>8월, B 저수지의 경우 9월>10월>8월 순으로 높은 농도를 나타냈다. 호소 생활환경기준에 따라 분류하면 A 저수지와 B 저수지 모두 분석 대상 전기간에서 매우 나쁨 수준(0.15 mg/L 초과)으로 나타났다. 2017년 8-10월 경기도의 다른 저수지 3곳을 분석한 연구결과(Jeong et al., 2017)에서도 TN의 농도는 최대 4.694 mg/L에서 최소 1.369 mg/L, TP의 농도는 최대 0.103 mg/L에서 최소 0.031 mg/L, TOC의 농도는 최대 6.3 mg/L에서 최소 3.2 mg/L로 본 연구에서 얻은 결과와 유

Table 2. Water environment factors in the investigated agricultural reservoirs in 2022

Site	Month	Depth	T (°C)	pH	DO (mg/L)	SS (mg/L)	TOC (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
A	Aug	S	26.0	8.19	6.85	11	6.037±0.246	2.724±0.460	0.183±0.010
		B	26.0	7.9	6.62	17	6.358±0.509	2.445±0.200	0.252±0.010
	Sep	S	23.5	8.21	7.47	5	6.321±0.479	3.762±0.190	0.439±0.040
		B	23.1	7.94	7.94	7	6.593±0.389	4.261±0.570	0.409±0.000
	Oct	S	15.5	7.39	7.39	2	0.447±0.010	0.210±0.010	0.623±0.020
		B	15.7	7.37	7.37	9	0.485±0.040	0.203±0.000	0.535±0.010
B	Aug	S	25.5	7.96	5.63	11	9.685±0.449	2.354±0.270	0.691±0.000
		B	25.0	7.53	7.53	17	9.818±0.250	2.907±1.200	0.393±0.010
	Sep	S	22.8	9.04	9.04	4	8.528±0.249	3.954±0.140	1.670±0.000
		B	22.0	8.24	8.24	16	8.674±0.368	3.946±0.160	1.280±0.040
	Oct	S	16.3	8.54	8.54	5	0.602±0.010	0.151±0.000	0.994±0.080
		B	16.0	8.09	8.09	12	0.634±0.020	0.151±0.010	0.752±0.070

※ S and B in depth mean surface water and bottom water, respectively.

사한 범위에 있는 것을 보여주며, 경기도 인근 저수지의 수질오염지표 농도가 상대적으로 높은 것을 확인할 수 있다.

조사된 2곳의 농업용 저수지는 밀집된 거주지에 위치하지 않으며 축산 농가와 경작지로 주위가 둘러쌓여있는 특징을 공통적으로 가지고 있다. 따라서 수질 특성은 오염 농도와 변화 특성에서 크게 차이가 나지는 않았다. 시기별 농도의 변화는 다량의 우수 유입에 따라 축산계 및 농업계 오염물의 유입이 많은 8, 9월의 유기물 및 영양염류 농도가 높은 특징을 보여주며 이는 농업지역 저수지의 일반적인 특성과 유사한 것으로 판단된다. 높은 유기물 및 영양물질의 농도뿐 아니라, 하절기의 높은 수온과 많은 일조량은 남세균이 대량 발생하기에 좋은 환경으로 판단된다.

3.2 농업용 저수지 남세균 발생현황

2022년 8-10월 조사 대상 저수지의 남세균 발생 현황을 확인하기 위하여 4종의 유해 남세균*(Microcystis* sp., *Anabaena* sp., *Oscillatiria* sp. 및 *Aphanizomenon* sp.) 개체수를 분석한 결과를 Fig. 2에 표시하였다. A 저수지의 경우 *Microcystis*속 남세균이 우점종이었고, 수온이 높았던 8월, 9월, 10월 순으로 *Microcystis* 개체수가 많이 관찰되었다. 이는 25-35°C에서 최적의 성장성을 보이는 *Microcystis* 남세균의 특징에 부합하는 것으로 보인다. *Anabaena*속 남세균은 시기별 세 개의 시료에서 비슷한 농도로 관찰되었으며, 다른 2가지 속(*Oscillatiria* 및 *Aphanizomenon*)의 남세균은 관찰되지 않았다. 유해 남세균의 최대 합계 개체수는 8월 표층수에서 관찰된 1.8×10^4 cells/mL로 친수활동구간 남세균 발생 관심단계 발령 기준인 4종 남세균 합계 2.0×10^4 cells/mL보다 낮았다. 하지만 8월, 9월, 10월에 채취된 표층수와 저층수 시료 모두에서 1.0×10^4 cells/mL 이상의 남세균이 관찰되어 관심단계 기준에 거의 근접한 발생량을 확인할 수 있었다(National Institute of Environmental Research, 2020).

B 저수지의 경우 A 저수지에 비해 남세균 검경 개체수는 적었으나, *Oscillatiria* 속을 제외한 *Microcystis, Anabaena, Aphanizomenon* 3종류의 남세균이 관찰되었다. 또한 A 저수지와 달리 계절에 따라 우점종이 달라지는 현상을 보여 8월에는 *Microcystis*가 대부분을 차지했으나, *Anabaena*가 9월 시료에서 상당한 수준으로 관찰되기 시작하여 10월 시료에서는 *Microcystis*를 제치고 우점종이 될 정도로 많이 관찰되었다. 앞에서 설명한 바와 같이 *microcystis*는 25°C 이상에서 최적 성장을 보이지만 *Anabana*는 20-25°C에서 최적의 성장성을 보이는 것에 의한 영향으로 판단된다. 또한, *Aphanizomenin*이 적은 양이기는 하지만 모든 시료에서 관찰되었다. B 저수지의 8월, 9월, 10월 채취 시료 모두 A 저수지와 동일하게 유해남세균 합계 개체수가 2.0×10^4 cells/mL 이하였기 때문에 조류경보 관심 단계에 해당되지 않는 농도였다.

조사대상 A와 B 저수지의 남세균 발생 현황을 기존에 발표된 선행 연구의 결과와 비교하여 Table 3에 제시하였다. 선행 연구결과 중 여름철(7월-10월)의 분석결과를 사용하여 본 연구의 결과와 비교할 수 있도록 하였다. 선행 연구는 주로 상수원을 대상으로 한 것으로 A와 B 저수지의 발생농도는 팔당호보다는 높고 대청호보다는 낮은 수치를 보였고, 회야호의 남세균 발생농도와 유사한 범위에 있었다.

3.3 마이크로시스틴과 아나톡신 분석 결과

분석대상 기간에 조사대상 농업용 저수지에서 발생한 유해 남세균은 *Microcystis, Anabaena, Aphanizomenin*의 세 종류였다. 세 종의 남세균은 cyanotoxin을 생성하며 *Microcystis*는 microcystin, *Anabaena*는 microcystin과 anatoxin, *Aphanizomenin*은 saxitoxin을 생성하는 것으로 알려져 있다. 본 연구의 대상인 A 저수지에서는 *Aphanizomenin*이 관찰되지 않았고 B 저수지에서는 적은 개체수가 확인되었으나 두 군데 모두에서 saxitoxin 잔류량은 검출되지 않았다. Microcystin과 anatoxin은 두 곳의 저수지에서 채수한 많은 시료에서 검출되었다. Microcystin 동질체 중 3종(LR, RR, YR)과 anatoxin-a를 정

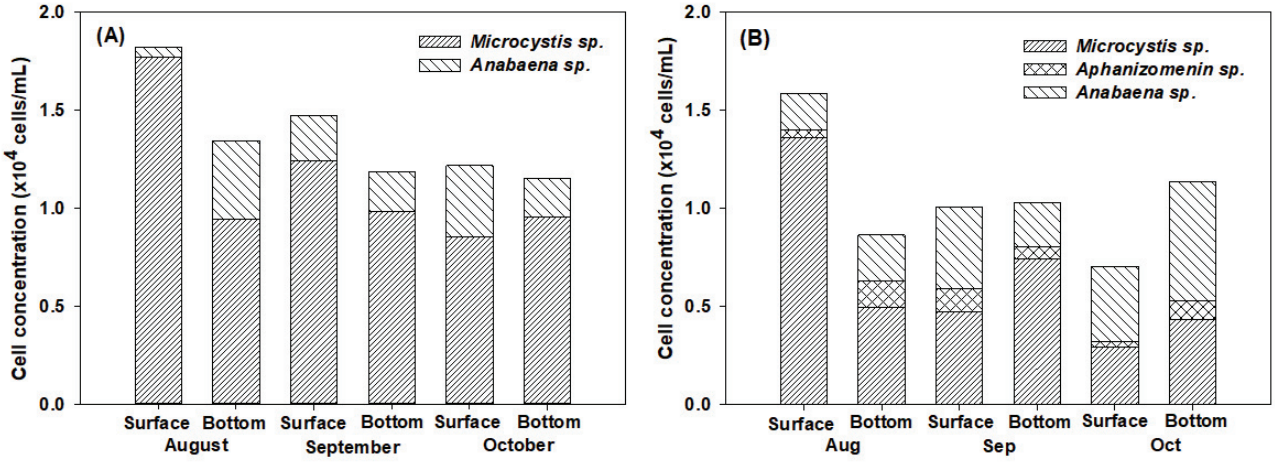

Fig. 2. Seasonal change of harmful cyanobacteria abundance in agricultural reservoirs in southern Gyeonggi-do. (A) reservoir A and (B) reservoir B.

Table 3. Comparison of cyanobacteria occurrence in reservoirs and lakes

Site	*Microcystis* conc. ($\times 10^4$ cells/mL)	*Anabaena* conc. ($\times 10^4$ cells/mL)	Ref.
A	0.85-1.77[a] (1.12)[b]	0.054-0.36[a] (0.24)[b]	This study
B	0.29-1.36[a] (0.63)[b]	0.026-0.13[a] (0.080)[b]	This study
Hoeya	0-1.128[a]	0-0.048[a]	Choi et al., 2013
Paldang	0-0.007[a]	0-0.146[a]	Kim et al., 2009
Daechung	3.09[c]	~3.8[c]	Joung et al., 2011

[a] concentration of minimum-maximum
[b] average concentration
[c] maximum concentration

량분석한 결과는 Fig. 3에 도시하였다. A 저수지와 B 저수지에서 채취한 시료에 존재하는 남세균 조체와 수체 독소물질량의 합은 각각 (A)-1, (B)-1에 나타내었으며, 수체에 존재하는 독소물질만 분석한 결과는 (A)-2, (B)-2에 나타내었다. 남세균에 의해 생성된 독소물질은 주로 세포 내에 존재하는 것으로 알려져 있다. 하지만, 세포 사멸에 의해 독소물질의 수체로의 유출과 유출된 독소의 자연분해가 일어날 수 있다. 시료 채취 시점의 남세균 내 독소량과 수체에 잔류하고 있는 독소량을 구분하여 평가하기 위해 본 연구에서는 수체 내 독소 농도와 조체 내 및 수체 독소물질의 합계 농도를 각각 분석하였다. Microcystin-LR (MC-LR), microcystin_RR (MC-RR), microcystin-YR (MC-YR) 및 anatoxin-a가 검출된 양을 저수지별로 비교하면 아래와 같다.

A 저수지의 경우, 조체와 수체에 존재하는 독소물질의 합계 최대농도는 MC-LR 0.2776 μg/L, MC-RR 0.3721 μg/L, MC-YR 0.0306 μg/L, anatoxin-a 0.1291 μg/L로 나타났다(Fig. 3 (A)-1). 수체에만 존재하는 독소 최대농도는 MC-LR 0.0825 μg/L, MC-R 0.1245 μg/L, MC-YR 0.0136 μg/L, anatoxin-a 0.0777 μg/L로 나타났다(Fig. 3 (A)-2). B 저수지의 경우, 조체와 수체에 존재하는 독소물질의 합계 최대농도는 MC-LR 0.1495 μg/L, MC-RR 0.2037 μg/L, MC-YR 0.0153 μg/L, anatoxin-a 0.3274 μg/L로 나타났다(Fig. 3 (B)-1). 수체에만 존재하는 독소 최대농도는 MC-LR 0.0155 μg/L, MC-RR 0.0214 μg/L, anatoxin-a 0.2998 μg/L이고, MC-YR은 검출되지 않았다(Fig. 3 (B)-2). 모든 시료에서 검출된 독소물질의 농도는 WHO 권고기준인 MC-LR 농도 1 μg/L보다 낮게 분석되었다. 대상 농업용 저수지의 cyanotoxin 잔류농도를 기존 선행연구들과 비교하여 Table 4에 제시하였으며, 선행연구의 데이터가 제한적이긴 하지만 희야호나 대청호의 독소물질 농도와 본 연구의 결과가 유사한 농도범위를 가지는 것으로 확인되었다(대청호의 MC 농도는 동질체 구분없이 표시되어 있음).

독소물질의 시기별 분석결과를 구체적으로 살펴보면, A 저수지의 경우 8월 표층에서는 MC_RR만 검출되고 저층에는 anatoxin-a 및 MC-LR, MC-RR이 검출되었다. 9월은 표층, 저층 모두 MC-RR과 anatoxin-a가 검출되었으며 10월에는 표층과 저층에 MC-LR, RR, YR이 검출되었다. Fig. 2 (A)를 보면 A 저수지의 경우 모든 시료에서 *Microcystis*와 *Anabaena*가 검출되었으며, Fig 3 (A)-1과 2에 나타낸 바와 같이 두 종류의 유해 남세균이 생성하는 microcystin과

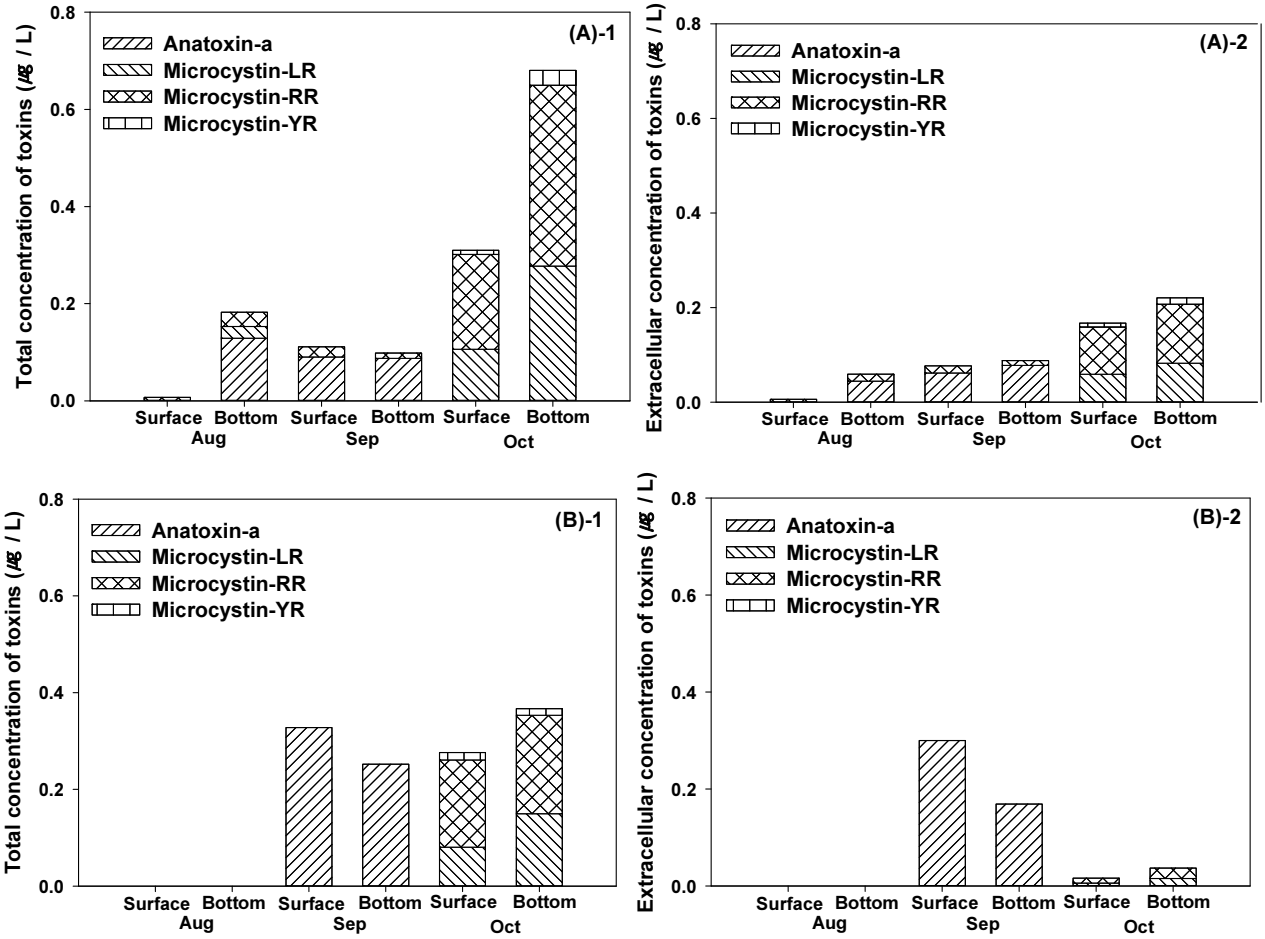

Fig. 3. Seasonal changes of four toxins concentrations from harmful cyanobacteria agricultural reservoirs in agricultural reservoirs of southern Gyeonggi-Do (A) reservoir A and (B) reservoir B. ((A)-1 and (B)-1 represent total concentration, which is the sum of concentrations in the cell body and water. (A)-2 and (B)-2 represent extracellular concentration, which is concentration in water.)

Table 4. Comparison of cyanotoxins concentrations in reservoirs and lakes (Unit : μg/L)

Site	MC_LR	MC_RR	MC_YR	Anatoxin-a	Reference
A	0-0.278[a]	0.007-0.372[a]	0-0.031[a]	0-0.129[a]	This study
B	0-0.150[a]	0-0.204[a]	0-0.015[a]	0-0.327[a]	This study
Hoeya	0.424[b]	0.117[b]	No data	No data	Choi et al., 2013
Daechung	>0.6[b,c]			No data	Joung et al., 2011

[a] concentration of minimum-maximum
[b] maximum concentration
[c] microcystin concentration without congeners distinction

anatoxin-a가 검출되었다. 남세균의 개체수는 상대적으로 8월과 9월이 10월보다 많았으나. 독소 농도는 10월이 높게 나타났다. 이 결과는 *Microcystis*의 성장은 25°C 이상에서 최대화되지만 microcystin 생성은 상대적으로 낮은 온도인 20°C 이하에서 최대로 활성화된다는 기존 연구 결과(Imai et al., 2009; Lee et al., 2010)와 부합하며, 저수지 독소잔류량은 남세균에 의한 생성뿐 아니라 분해에 의해서도 영향을 받는 것으로 보인다. 8월 표층 시료에서 anatoxin-a가 검출되지 않은 것도 강한 자외선과 높은 농도의 유기물에 의한 독소의 광분해 및 N-부산물로 전환이 원인일 수 있다(Park et al., 2019; Tak et al., 2018). B 저수지도 동일한 경향을 보여, 일조량 많고 총유기탄소 농도가 높았던 8월에는 남세균은 검출이 되지만, 독소물질은 검출이 되지 않은 것을 확인할 수 있다. A 저수지와 마찬가지로 높은 수온으로 인한 독소 생산 제한과 자외선과 유기탄소 성분으로 인한 자연분해가 원인일 수 있다. 9월에 채취한 시료에서는 A와 B 저수지 모두에서 독소물질의 수체내 존재량이 조체와 수체의 합과 크게 차이가 나지 않았다.

8월, 9월에 A, B 저수지에서 채취한 시료에서는 관찰된 유해 남세균 개체수에 비해 독소물질의 양이 많지 않고(B저수지 9월 시료는 상당한 양이 존재하지만), 10월에 채취한 시료에서는 남세균 개체수에 비해 많은 독소물질이 분석되었다. 타연구자에 의한 남세균에 대한 연구결과에 의하면 TN, TOC의 농도 높고 일조량이 큰 시기에는 남세균이 성장을 주로 하고 독소물질 생성이 활발하게 이루어지지 않으며(본 연구의 8, 9월 시료처럼), 질소와 인의 농도가 낮은 환경에서는(본 연구의 10월 시료처럼) 군집형태의 성장을 하는 것으로 알려져 있다(Li et al., 2014). 기존에 보고된 연구에서 군집이 60㎛ 이상으로 성장을 하면 독소 생성량이 증가한다는 것이 밝혀졌으며 이러한 현상이 낮은 수온과 더불어 10월의 독소물질농도가 높은 이유로 여겨진다(Álvarez et al., 2020; Wang et al., 2013).

독소물질의 자연적 분해에 대한 연구결과를 살펴보면, microcystin은 많은 세균에 의해 분해가 되는 것으로 보고되어 있다. MC-LR의 경우 자연에서 분해가 어렵지만, 일정량 분해는 이루어지며(Watanabe et al., 1992), MC-RR의 경우 *Sphingomonas* sp. 세균에 의해 분해 가능하고(Valeria et al., 2006), MC-YR의 경우 M-LR보다는 분해가 잘되는 것으로 알려져있다(Watanabe et al., 1992). 8월, 9월에 *Microcystis* sp.와 *Anabaena* sp.가 존재하였음에도 생성물인 microcystin이 검출되지 않은 것은 높은 농도의 유기탄소와 질소량, 많은 일조량, 높은 수온으로 남세균 성장에 최적의 상태라 독소 생성량이 적었으며, 독소의 자연분해에는 상대적으로 유리한 조건이 조성된 것때문으로 보인다. 10월에 *Anabaena*가 존재하였음에도(특히, B저수지는 상당한 개체수가 존재함) antoxin-a가 검출되지 않았으며, 이를 설명하기 위해서는 anatoxin-a 생성과 자연적 분해에 대한 생물학적 연구가 추가적으로 필요할 것으로 보인다.

4. Conclusion

본 연구에서는 2022년 8월부터 10월까지 경기도 남부권 농업용 저수지 두 곳를 대상으로 유해 남세균 발생량과 남세균 생산 독소 농도에 대한 분석을 수행하였다. 분석한 시료 중 유해 남세균의 최대 합계 개체수는 1.8×10^4 cells/mL으로 관찰되었으며, 조사한 저수지에서 발생한 남세균은 *Microcystis, Anabaena, Aphanizomenin* 속이었으며, 우점종은 *Microcystis* 속이었다(*Anabaena*가 우점종인 B저수지 10월 시료 제외), A 저수지의 경우, *Microcystis* 개체수는 최대 1.77×10^4 cells/mL, 최소 0.85×10^4 cells/mL이고, *Anabaena* 개체수는 최대 0.36×10^4 cells/mL, 최소 0.054×10^4 cells/mL이며, *Aphanizomenin*과 *Oscillatiria* 속은 관찰되지 않았다. B저수지의 경우, *Microcystis* 개체수는 최대 1.36×10^4 cells/mL, 최소 0.29×10^4 cells/mL이고, *Anabaena* 개체수는 최대 0.13×10^4 cells/mL, 최소 0.026×10^4 cells/mL이며, *Aphanizomenin* 개체수는 최대 0.04×10^4 cells/mL, 최소 0.008×10^4 cells/mL로 확인되었고, *Oscillatiria* 속은 관찰되지 않았다. 전체적으로 친수활동구간 남조류 발생경보 관심단계 발령 기준보다 낮은 개체수를 보였다. 유해 남세균의 성장은 수온, TN, TN/TP Ratio, TOC에 대해 상관관계를 보였다. 남세균 독소 분석 결과에서는 anatoxin-a, MC-LR, MC-RR, MC-YR이 검출되었고, 이들의 최대농도는 A 저수지에서 각각 0.1291, 0.2776, 0.3721, 0.0306 μg/L이며 B 저수지에서는 각각 0.3274, 0.1495, 0.2037, 0.0153 μg/L이었다. 독성이 가장 강한 MC-LR의 경우 WHO 권고기준이 1 μg/L이며, 조사된 독소물질은 모두 이 권고기준을 초과하지 않았다. 전반적으로 환경기준을 초과하는 수준의 유해 남세균 발생과 독소 잔류량을 보이진 않았지만 환경적 요인 및 기후변화에 따라 남세균의 발생이 크게 달라질 수 있고 농업용 저수지에서 공급되는 농업용수로 재배되는 농산물이 인간에 의해 최종적으로 소비되므로 생태계 보전과 인간 건강 확보를 위한 지속적인 남세균 발생 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (과제번호 2020003030001)

References

Álvarez, S. D., Kruk, C., Escalera, G. M., Montes, M. A., Segura, A. M., and Piccini, C. (2020). Morphology captures toxicity in *Microcystis aeruginosa* complex: Evidence from a wide environmental gradient, *Harmful Algae*, 97, 101854.

Choi, Y. A., Han, N. S., Lim, E. K., Kim, Y. M., Jeon, C. J., and Lee, B. H. (2013). Characteristics of cyanobacterial occurrence and concentration distribution of cyanotoxins in Hoeya reservoir, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 35(12), 943-952. [Korean Literature]

Cottingham, K. L., Ewing, H. A., Greer, M. L., Carey, C. C., and Weathers, K. C. (2015). Cyanobacteria as biological drivers of lake nitrogen and phosphorus cycling, *Ecosphere*, 6(1), 1-19.

Environmental Protection Agency (EPA). (2009). *National lakes assessment: A collaborative survey of the nation's lakes,* EPA 841-R-09-001, Office of Water and Office of Research and Development, Washington, D.C., 61-83. https://www.epa.gov/sites/default/files/2013-11/documents/nla_newlowres_fullrpt.pdf

Eriksson, J. E., Meriluoto, J. A., Kujari, H. P., and Skulberg, O. M. (1988). A comparison of toxins isolated from the cyanobacteria *Oscillatoria agardhii* and *Microcystis aeruginosa*, *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 189(2), 207-210.

Heiskary, S., Lindon, M., and Anderson, J. (2014). Summary of microcystin concentrations in Minnesota lakes, *Lake and Reservoir Management*, 30(3), 268-272.

Ho, J. C., Michalak, A. M., and Pahlevan, N. (2019). Widespread

global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s, *Nature*, 574(7780), 667-670.

Hou, X., Feng, L., Dai, Y., Hu, C., Gibson, L., Tang, J., Lee, Z., Wang, Y., Cai, X., and Liu, J. (2022). Global mapping reveals increase in lacustrine algal blooms over the past decade, *Nature Geoscience*, 15(2), 130-134.

Humbert, J. F. (2009). *Chapter 27 - Toxins of Cyanobacteria, Handbook of toxicology of chemical warfare agents,* Gupta, R. C. (ed), Academic Press, Cambridge, MA, 371-379.

Imai, H., Chang, K. H., and Nakano, S. I. (2009). *Growth responses of harmful algal species Microcystis (Cyanophyceae) under various environmental conditions*, Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry－Environmental Research in Asia, Obayashi, Y., Isobe, T., Subramanian, A., Suzuki, S., and Tanabe, S. (eds.), Terrapub, Tokyo, Japan, 269-275.

Jeong J. Y., Choi, Y. H., Na, K. H., Shin, J. H., Kim, J. S., Yoon, M. R., and Kim, T. H. (2017). Characteristics of phytoplankton and cyanobacteria in the key management reservoirs, *The Report of Gyeonggi-do Institute of Health and Environment*, 30, 173-180. [Korean Literature]

Joung, S. H. and Park, H. K. (2010). Seasonal succession characteristic of phytoplankton community in lake Doam, *Journal of Korean Society on Water Environment,* 26, 673-680. [Korean Literature]

Joung, S. H., Oh, H. M., Ko, S. R., and Ahn, C. Y. (2011). Correlations between environmental factors and toxic and non-toxic Microcystis dynamics during bloom in Daechung reservoir, Korea, *Harmful Algae*, 10(2), 188-193.

Kang, P. G., Lee, S. J., Byeon, M. S., Yoon, S. A., Kim, H. Y., Lee, H. K., and Hwang, S. J. (2014). Current status and perspectives in the akinete study of the blue-green algal genus *Anabaena*, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 47(1), 1-12. [Korean Literature]

Kim, J. G., Lee, S. H., Bang, H. H., and Hwang, H. O. (2009). Characteristics of algae occurrence in lake Paldang, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 31(4), 325-331. [Korean Literature]

Lee, I., Kim, J., Ahn, J. M., and Yang, D. S. (2018). Simultaneous determination of seven cyanobacterial toxins in river water by liquid chromatography-tandem mass spectrometry, *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis,* 21(2), 78-86. [Korean Literature]

Lee, K. R., Jheong, W. H., Kim, J. H., and Kim, H. S. (2010). Effects of the temperature and light intensity on the growth and microcystin production of three species of Microcystis (*M. aeruginosa, M. ichthyoblabe, M. viridis*), *Korean Journal of Limnology,* 43(3), 400-408. [Korean Literature]

Lee, K. R., Shin, Y. N., Lee, J. A., Lee, J. K., and Kim, H. S. (2012). Distribution of toxic and non-toxic Microcystis in Korean water supply, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 49(4), 393-399. [Korean Literature]

Li, M., Zhu, W., Dai, X., Xiao, M., Appliah-Sefah, G., and Nkrumah, P. N. (2014). Size-dependent growth of Microcystis colonies in a shallow, hypertrophic lake: Use of the RNA-to-total organic carbon ratio, *Aquatic Ecology*, 48, 207-217.

Lindon, M. and Heiskary, S. (2009). Blue-green algal toxin (microcystin) levels in Minnesota lakes, *Lake and Reservoir Management*, 25(3), 240-252.

Mathias, A. C., Jankowiak, J. G., Kramer, B. J., Goleski, J. A., Huang, I. S.., Zimba P. V., Bittencourt-Oliveira M. C., and Gobler, C. J. (2018). Succession and toxicity of *Microcystis* and *Anabaena* blooms are controlled by nutrient-dependent allelopathic interactions, *Harmful Algae*, 74, 67-77.

Ministry of Environment. (2023). *Enforcement decree of the framework act of environmental policy*, Attached form No.1, Presidential Decree No.33591, Enforcement Date 04. Jul, 2023.

National Institute of Environmental Research. (2020). *Operational manual for algae alert system*, Goverment publication registaration No. 11-1480523-004075-01, ISBN 978-89-6558-509-1, 30, 55-59. [Korean literature]

Park, J. A., Yang, B. R., Jang, M., Kim, J. H., Kim, S. B., Park, H. D., Park, H. M., Lee, S. H., and Choi, J. W. (2019). Oxidation and molecular properties of microcystin-LR, microcystin-RR and anatoxin-a using UV-light-emitting diodes at 255 nm in combination with H_2O_2, *Chemical Engineering Journal*, 366, 423-432.

Ryu, H. S., An, S. M., Lim, C. K., Shin, R. Y., Park, J. G., and Lee, J. H. (2017). Analysis of potential toxigenicity and phylogeny using target genes in Aphanizomenon flos-aquae (Cyanophyceae) strains isolated from the Nakdong river, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 50(1), 137-147. [Korean Literature]

Ryu, H. S., Park, H. K., Lee, H. J., Shin, R. Y., and Cheon, S. U. (2016). Occurrence and succession pattern of cyanobacteria in the upper region of the Nakdong river: Factors influencing Aphanizomenon bloom, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 32(1), 52-59. [Korean Literature]

Schindler, D. W., Carpenter, S. R., Chapra, S. C., Hecky, R. E., and Orihel, D. M. (2016). Reducing phosphorus to Curb lake eutrophication is a success, *Environmental Science & Technology,* 50(17), 8923-8929.

Singh, N. K., Parmar, A., Sonani, R. R., and Madamwar, D. (2012). Isolation, identification and characterization of novel thermotolerant Oscillatoria sp. N9DM: Change in pigmentation profile in response to temperature, *Process Biochemistry*, 47(12), 2472-2479.

Svirčev, Z., Lalić, D., Savić, G. B., Tokodi N., Backović, D. D., Chen, L., Meriluoto, J., and Codd, G. A. (2019). Global geographical and historical overview of cyanotoxin distribution and cyanobacterial poisonings, *Archives of Toxicology*, 93(9), 2429-2481.

Tak, S. Y., Kim, M. K., Lee, J. E., Lee, Y. M., and Zoh, K. D. (2018). Degradation mechanism of anatoxin-a in

UV-C/H_2O_2 reaction, *Chemical Engineering Journal*, 334, 1016-1022.

Taranu, Z. E., Gregory-Eaves, I., Leavitt, P. R., Bunting, L., Buchaca, T., Catalan, J., Domaizon, I., Guilizzoni, P., Lami, A., McGowan, S., Moorhouse, H., Morabito, G., Pick, F. R., Stevenson, M. A., Thompson, P. L., and Vinebrooke, R. D. (2015). Acceleration of cyanobacterial dominance in north temperate-subarctic lakes during the Anthropocene, *Ecology Letters,* 18(4), 375-384.

The United States Geological Survey (USGS). (2016). *Cyanobacterial (blue-green algal) blooms: Tastes, odors, and toxins*. https://www.usgs.gov/centers/kansas-water-science-center/science/cyanobacterial-blue-green-algal-blooms-tastes-odors-and (accessed 22 Jan. 2024)

Valeria, A. M., Ricardo, E. J., and Stephan, P., and Alberto W. D. (2006). Degradation of Microcystin-RR by *Sphingomonas* sp. CBA4 isolated from San Roque reservoir (Córdoba-Argentina), *Biodegradation*, 17(5), 447-455.

Wang, X., Sun, M., Xie, M., Liu, M., Luo, L., Li, P., and Kong, F. (2013). Differences in microcystin production and genotype composition among Microcystis colonies of different sizes in lake Taihu, *Water Research*, 47(15), 5659-5669.

Watanabe, M. F., Tsuji, K., Watanabe, Y., Harada, K. I., and Suzuki, M. (1992). Release of heptapeptide toxin (microcystin) during the decomposition process of *Microcystis aeruginosa*, *Natural Toxins*, 28(2), 48-53.

Woo, C. Y., Yoon, S. R., Kim, S. G., and Lee, W. T. (2020). Occurrence of harmful blue-green algae at algae alert system and water quality forecast system sites in Daegu and Gyeongsangbuk-do between 2012 and 2019, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 42(12), 664-673. [Korean Literature]

World Health Organisation (WHO). (2003). *Cyanobacterial toxins: Microcystin-LR in drinking-water*, https://www.who.int/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/cyanobacterial-toxins-background-document.pdf?sfvrsn=46de6339_4.