

Original article

## 제천천 하류 지역에서 녹조 발생 현황 및 원인 분석

전유호 · 김도환 · 오경희 · 조영철\*

충북대학교 공과대학 환경공학과

**Status and Causes of Cyanobacterial Blooming in the Downstream of Jecheon Stream.** Yu-Ho Jeon (0000-0001-7993-2596), Do-Hwan Kim (0000-0002-7940-5574), Kyoung-Hee Oh (0000-0002-4373-7593) and Young-Cheol Cho\* (0000-0001-7444-143X) (Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Republic of Korea)

**Abstract** The occurrence of cyanobacterial blooming and the contaminant sources were analyzed in the downstream of Jecheon Stream, a tributary of Chungju Reservoir. The concentrations of chlorophyll a at the Myungseo Fishing Point (GPS; 37°03'25.5"N, 128°03'13.6"E) were 399.2 and 184.8 mg m<sup>-3</sup> on October 18, 2015 and September 25, 2016, respectively, and the concentrations of total microcystins, a cyanobacterial toxin mainly produced by *Microcystis*, were 124.09 and 79.71 µg L<sup>-1</sup>, respectively. The occurrence of cyanobacterial blooming at the downstream of Jecheon Stream was closely related to the water level of Chungju Reservoir. The cyanobacterial blooming occurred after the increase of water level in Chungju Reservoir, when the water body stagnated. As a result of analyzing National Water Quality Monitoring Data of the upper region of Jecheon Stream, the main source of pollutant was Jangpyeong Stream, the tributary of Jecheon Stream, and the discharge water from Jecheon Wastewater Treatment Plant located in Jangpyeong Stream was considered to be the most important source of contaminant.

**Key words:** Jecheon Stream, cyanobacterial blooming, microcystins, contamination source, water level of Chungju Reservoir

### 서 론

국내 호소에서 하절기에 주기적으로 일어나는 조류의 과다증식(이하 녹조 현상)은 수체의 색을 변화시킬 뿐 아니라 geosmin이나 2-MIB와 같은 냄새물질을 발생시켜 음용수의 가치를 떨어뜨리기도 하며, 독소를 생산하는 남조류가 대량 증식하는 경우 인간이나 가축에 해를 끼치기도 한다(Park,

2007; Funari and Testai, 2008). 부영양화된 호소에서 녹조 현상이 일어날 때 *Microcystis* 또는 *Anabaena*속 남조류가 우점하며, 국내 호소에서는 남조류 중 *Microcystis*속이 우점하는 경우가 많은 것으로 알려져 있다(Ahn *et al.*, 2003). *Microcystis*는 scum을 형성하는 남조류로, 일부 종의 경우 간독소인 microcystins (MCs)를 생성하여 정수 비용 증가 등 경제적인 문제와 독소로 오염된 물의 음용 또는 접촉을 통해 공중 위생 문제를 일으킬 수 있다(Funari and Testai, 2008).

녹조 발생에 영향을 미치는 요인은 물리적 요인, 화학적 요인, 생물학적 요인 및 기후 변화 요인으로 구분되며, 물리

Manuscript received 21 December 2021, revised 18 June 2022,  
revision accepted 21 June 2022

\* Corresponding author: Tel: +82-43-261-3577, Fax: +82-43-264-2465  
E-mail: choy@chungbuk.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

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, provide the original work is properly cited.

적 요인 중 가장 중요한 것은 수온, 체류시간, 광량으로 알려져 있다(Dai *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2019). 생물학적 요인은 다른 수생 생물과의 영양염류에 대한 경쟁, 생물 종 간의 천이 등이 중요한 것으로 알려져 있다(Ahn, 2018). 최근에는 온실가스에 의한 기후 변화로 인해 녹조 발생의 강도 및 기간이 길어질 것으로 예상되고 있다(Ma and Wang, 2021).

화학적 요인 중 가장 중요한 것은 인(phosphorus)과 질소(nitrogen)와 같은 영양염류의 농도이다(Kotak *et al.*, 2000; Orihel *et al.*, 2012; Newell *et al.*, 2019; Chang *et al.*, 2020). 일부 남조류는 공기 중의 질소(N<sub>2</sub>)를 고정하여 사용하기 때문에 인보다 남조류의 성장 제한요인으로서의 기능이 낮으며, 질소 부하를 줄이는 것만으로는 남조류의 성장을 조절하기 어려운 것으로 알려져 있다(Schindler *et al.*, 2008; Facey *et al.*, 2021). 따라서 담수생태계에서 인의 가용성이 남조류 성장을 제한하는 가장 중요한 요인이며, 남조류 성장을 조절하기 위하여 외부 또는 내부 오염원으로부터 인의 유입을 조절하는 것이 가장 중요한 것으로 여겨진다(Schindler *et al.*, 2008).

국내에서는 상수원으로 사용되는 하천 및 호소에서 유해 녹조 발생으로 인한 피해를 최소화하기 위해 조류경보제를 실시하고 있다(NIER, 2020). 충주호는 팔당호, 대청호, 주암호와 더불어 1998년부터 최초로 조류경보제가 실시되고 있으며, 댐앞과 청풍고 지점이 조류경보제 대상 지점이다. 충주호에서는 조류경보제 실시 이후 2018년에 댐앞 지점에서 13일간(10월 4일부터 16일까지) “관심” 단계가 발령된 적이 있으나, 다른 호소에 비해 녹조 발생 빈도가 매우 낮다(NIER, 2020). 하지만, 충주호의 유입 지천인 제천천과 고교천에서는 유해남조류에 의한 녹조가 주기적으로 발생하고 있는 것으로 알려져 있다. 제천천에서 발생하는 녹조는 일부 언론(충북인뉴스, 2008년 9월 22일; 중원신문, 2014년 10월 13일)을 통하여 알려졌으며, 아직까지 연구 논문 등의 학술 자료를 통하여 보고된 바가 없다. 특히 제천천은 충주호의 주요한 유입 지천으로서 제천천에서 발생하는 녹조가 충주호 수질에 영향을 미칠 가능성이 있기 때문에 제천천에서 녹조 발생의 현황 및 원인 파악과 더불어 이에 대한 대책 마련이 시급한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 제천천 하류 지역의 녹조 현황을 제시하고, 녹조 발생에 영향을 미치는 요인 및 오염원을 추정하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 시료 채취

제천천에서 녹조 발생의 현황과 오염원을 파악하기 위

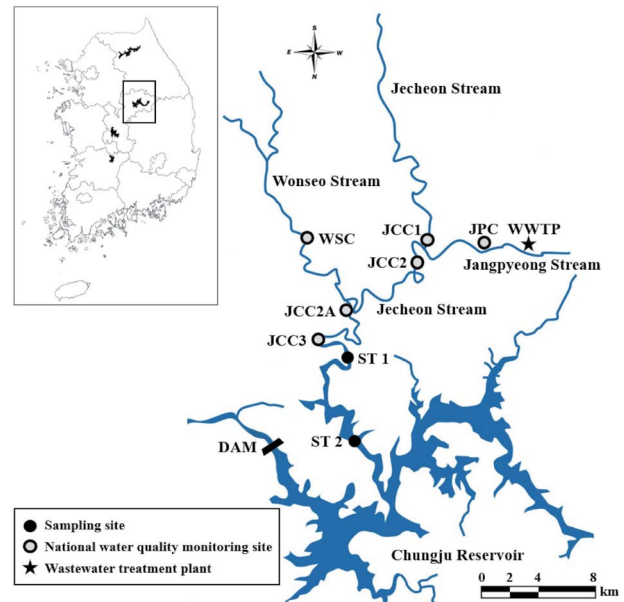


Fig. 1. Map of sampling location. Abbreviations are JCC, Jecheoncheon; JPC, Jangpyeongcheon; and WSC, Wonseocheon.

하여 제천천 하류에 위치한 명서남시터 지점(ST 1; 37°03' 25.5"N, 128°03'13.6"E)과 미라실마을 지점(ST 2; 37°00' 40.3"N, 128°03'09.1"E)에서 수시료를 채취하여 분석하였다(Fig. 1). ST 1에서는 2015년 6월 5일부터 2016년 10월 16일까지 10회(2015년 6회, 2016년 4회)에 걸쳐 시료를 채취하였으며, ST 2에서는 8회(2015년 7월 17일, 8월 4일, 8월 26일, 9월 15일, 10월 7일; 2016년 8월 15일, 9월 25일, 10월 16일)에 걸쳐 시료를 채취하였다. 수시료는 하천의 중심부에서 비이커를 사용하여 표층수를 채취하였다.

### 2. 수질 분석 항목 및 방법

채취된 시료를 냉장 상태를 유지하여 실험실로 옮긴 후 채취 당일에 이화학적, 생물학적 항목에 대하여 분석하였다. 분석 항목은 수온, pH, 전기전도도, 클로로필 a, 총질소, 총인, 식물플랑크톤 종류별 세포수 밀도, MCs의 종류별 농도였다. 수온, pH, 전기전도도는 휴대용 다항목 수질측정기(HQ40d Dual-Input Digital Multi-Meter, Hach Co.)를 사용하여 현장에서 측정하였으며, 나머지 항목은 실험실에서 분석하였다. 클로로필 a, 총질소, 총인의 농도와 식물플랑크톤 종류별 세포수 밀도는 수질오염공정시험기준(MOE, 2016)에 따라 분석하였다. MCs의 종류별 농도는 HPLC-PDA법을 사용하여 분석하였으며, 입자성(조체성) 독소에 대하여 분석하였다. 채취된 시료를 GF/C(Whatman, UK)로 여과한 후, acetic acid(5%)와 초음파 파쇄기(Ultrasonic Processor,

한국코프로텍)로 추출하였다. 추출액에서 MCs를 정제하기 위하여 ODS column (Sep-Pak Vac 3 cc; Waters, Milford, MA, USA)을 사용하였으며, 농축을 위하여 evaporator (Hurricane-Lite; 청민테크)와 질소 (99.99%)를 사용하였다. 이후 HPLC-PDA법으로 MCs의 농도를 분석하였다(Table 1). MCs의 종류별 분석을 위하여 표준 MCs-LR, -YR, -RR을 Sigma-Aldrich Co. (St. Louis, MO, USA)로부터 구입하여 사용하였다.

제천천의 오염원 분석 및 녹조 발생 원인 규명을 위하여 수질 측정망 자료 및 충주호의 수위 자료를 확보하여 분석하였다. 명서남시터 지점의 상류에는 6개의 수질측정망 지점이 있으며, 제천천 본류에 위치한 제천천1 (JCC1), 제천천 2 (JCC2), 제천천2A (JCC2A), 제천천3 (JCC3) 지점과 제천천의 유입 지천인 장평천(JPC), 원서천(WSC)에 각각 1개의 지점이 있다(Fig. 1). 이들 지점에서 2015년부터 2016년까지 측정된 자료를 국립환경과학원 물환경정보시스템(water.nier.go.kr)에서 내려 받아 분석하였다. 충주호의 수위 자료는 K-water 물정보포털(www.water.or.kr)로부터 확보하였다.

**Table 1.** Conditions for analysis of microcystins in water samples.

HPLC Model	Waters 1525
Detector	Photodiode array detector (Waters 2998)
Autosampler	Waters 2707
Analysis program	Empower Pro
Column	Xterra RP18 column (5 µm particle size, 15 cm × 3.9 mm I.D.; Waters)
Mobile phase	Acetonitrile : water : tri-fluoroacetic acid = 32 : 68 : 0.05 (volume)
Flow rate	0.8 mL min <sup>-1</sup>

## 결과 및 고찰

### 1. 제천천 하류의 녹조 발생 현황 분석

제천천 하류에 위치한 명서남시터 지점(ST 1)의 표층에서 클로로필 a 농도는 2015년 8월까지 평균 10.1 mg m<sup>-3</sup>이었으나, 이후 급격히 증가하여 10월 18일에는 399.2 mg m<sup>-3</sup>이었다(Table 2). 2016년에는 8월에 평균 12.4 mg m<sup>-3</sup>이었다가 9월 25일에는 184.8 mg m<sup>-3</sup>으로 매우 높은 농도를 나타내었다. 조류 종류별 세포수 밀도를 분석한 결과, 2015년 8월까지는 녹조류인 *Scenedesmus* 또는 규조류인 *Cyclotella*가 우점하였으며, 남조류는 관찰되지 않았다(Table 3). 2015년 10월 18일에는 남조류인 *Microcystis*가 우점종이었으며, 세포수 밀도는 135,667 cells mL<sup>-1</sup>이었다. 2016년에는 8월 5일에 *Microcystis*가 287 cells mL<sup>-1</sup>로 우점하였으나, 이후 녹조류인 *Pediastrum*으로 천이된 후, 9월 25일에는 *Microcystis*가 784,667 cells mL<sup>-1</sup>로 높은 밀도를 나타내었다.

남조류의 경우 최적 성장 온도가 20~30°C이기 때문에 수온이 20°C 이상인 하절기에 호소에서 우점하게 된다(Berg and Sutula, 2015). 명서남시터 지점에서 2015년 6월부터 8월까지 수온은 23.0~27.8°C로 남조류 성장에 적합한 수온을 유지하였으나 남조류가 관찰되지 않았다. 이는 충주호의 수위가 2015년 8월 22일까지 명서남시터 지점의 고도(122.8 El.m) 이하(2015년 8월 22일의 충주호 수위는 122.8 El.m)였으므로, 하류(댐) 방향으로 물이 흘러 호소수가 정체되지 않았기 때문에 수온과 상관없이 남조류의 과다성장이 일어나지 않은 것으로 판단된다. 남조류의 성장은 영양염류 및 수온 이외에도 유속에 의해 조절되는데, 남조류 성장에 저해를 일으키는 최소 유속은 0.03~0.06 m s<sup>-1</sup>로 알려져 있다(Mitrovic *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2015).

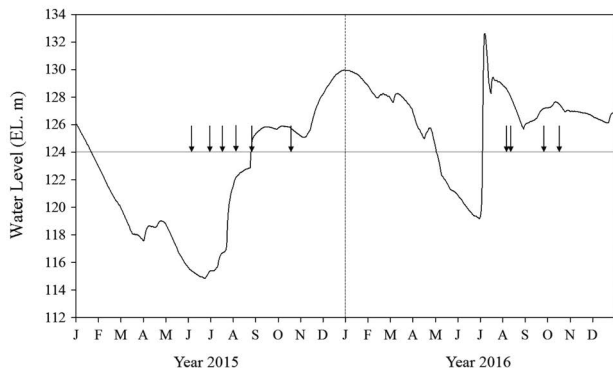
**Table 2.** Variation of environmental parameters at the Myungseo Fishing Point (ST 1) at Jecheon Stream.

Date	Water temp. (°C)	pH	Conductivity (µS cm <sup>-1</sup> )	Chlorophyll a (mg m <sup>-3</sup> )	T-P (mg L <sup>-1</sup> )	T-N (mg L <sup>-1</sup> )
2015-06-05	nd <sup>1</sup>	8.57	367	15.2	0.053	1.769
2015-06-30	27.8	8.79	272	10.5	0.061	2.147
2015-07-17	23.7	8.94	289	7.3	0.047	2.261
2015-08-04	23.1	8.17	168	4.5	0.080	2.731
2015-08-26	23.0	8.20	334	13.2	0.065	2.557
2015-10-18	19.3	9.11	258	399.2	0.469	8.574
2016-08-05	31.8	9.15	nd <sup>1</sup>	10.6	0.062	2.937
2016-08-11	32.6	9.12	293	14.1	0.059	2.302
2016-09-25	23.9	10.25	219	184.8	0.420	6.648
2016-10-16	20.8	9.50	248	37.0	0.055	2.160

<sup>1</sup>not determined

**Table 3.** Concentration and dominant genus of phytoplankton at the Myungseo Fishing Point (ST 1) at Jecheon Stream.

Date	Total phytoplankton		Cyanophyceae		Chlorophyceae		Bacillariophyceae	
	cells mL <sup>-1</sup>	Dominant	cells mL <sup>-1</sup>	Dominant	cells mL <sup>-1</sup>	Dominant	cells mL <sup>-1</sup>	Dominant
2015-06-05	1,078	<i>Scenedesmus</i>	0	—	739	<i>Scenedesmus</i>	133	<i>Navicula</i>
2015-06-30	3,700	<i>Cyclotella</i>	0	—	400	<i>Scenedesmus</i>	3,300	<i>Cyclotella</i>
2015-07-17	3,067	<i>Cyclotella</i>	0	—	92	<i>Scenedesmus</i>	2,967	<i>Cyclotella</i>
2015-08-04	756	<i>Cyclotella</i>	0	—	72	<i>Scenedesmus</i>	683	<i>Cyclotella</i>
2015-08-26	2,250	<i>Cyclotella</i>	0	—	67	<i>Scenedesmus</i>	2,183	<i>Cyclotella</i>
2015-10-18	135,667	<i>Microcystis</i>	135,667	<i>Microcystis</i>	0	—	0	—
2016-08-05	380	<i>Microcystis</i>	287	<i>Microcystis</i>	60	<i>Volvox</i>	33	<i>Cyclotella</i>
2016-08-11	917	<i>Pediastrum</i>	0	—	717	<i>Pediastrum</i>	200	<i>Cyclotella</i>
2016-09-25	785,167	<i>Microcystis</i>	784,667	<i>Microcystis</i>	0	—	500	<i>Cyclotella</i>
2016-10-16	3,717	<i>Aulacoseira</i>	494	<i>Microcystis</i>	56	<i>Volvox</i>	3,167	<i>Aulacoseira</i>

**Fig. 2.** Water level of Chungju Reservoir in year 2015 and 2016. Arrows indicate the date of sampling at the Myungseo Fishing Point (ST 1) at Jecheon Stream.

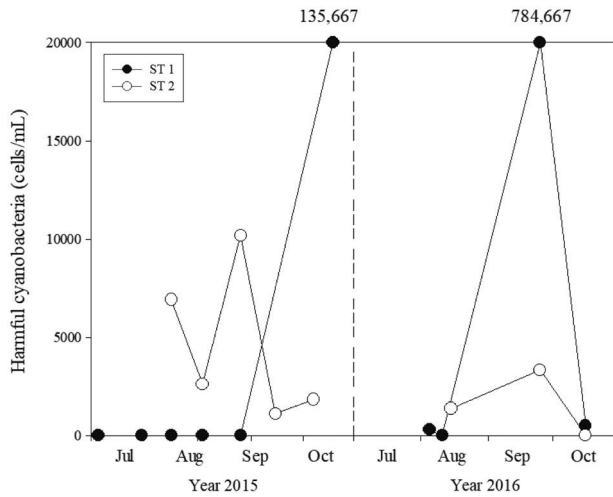
2016년 8월 5일과 8월 11일에 명서남시터 지점(ST 1)의 표층 수온은 각각 31.8과 32.6°C로 매우 높았으며, 수심이 각각 5.9, 5.3 m로 깊었으나, 남조류의 세포수 밀도가 각각 287, 0 cells mL<sup>-1</sup>로 높지 않았다(Table 2). 충주호의 수위는 2016년 7월 4일~6일 사이에 내린 228 mm의 강우에 의해 132.6 El.m (2016년 7월 7일)까지 상승하였으며, 8월 29일까지 지속적으로 감소하였다(Fig. 2). 이는 2015년과 마찬가지로 2016년 8월에 수온 및 수심이 남조류의 과다 증식에 적합한 조건이었으나, 수위가 지속적으로 감소하면서 하류(담) 방향으로 물의 흐름이 발생하여 명서남시터에서 녹조가 발생하지 않은 것으로 보인다. 2016년 8월 29일부터 10월 12일까지 충주호 수위가 지속적으로 증가하였으며, 이 시기에 명서남시터에서 녹조가 발생하였다.

이상의 결과로 볼 때 명서남시터의 녹조 발생은 충주호의 수위 및 수위 변화에 따라 조절되고 있음을 알 수 있다. 즉

수온이 남조류의 성장에 적합한 조건에서 충주호의 수위가 상승하여 명서남시터의 고도 이상을 유지하게 되면 명서남시터 인근의 물 흐름이 상류로 역류하거나 정체되면서 명서남시터 지점을 중심으로 녹조가 발생하는 것으로 판단된다.

선행 연구에서 본류의 수위 상승이 지류의 정체 및 부영양화에 미치는 결과가 다수 발표되었다. 대청호에서 본류 유역의 강우가 지류보다 많거나 저수지의 수위가 증가할 때에는 본류로부터 지류 방향으로 역류가 발생하며, 이에 따라 유입수와 영양염류는 수위가 하강할 때까지 갇혀 있게 된다(Jung and Hwang, 2003; Shin and Hwang, 2017). 팔당댐 방류량에 비해 상류로부터 유입이 많아지는 시기에는 댐에 의한 블로킹 현상이 발생하며, 이에 따라 경안천 유입부 방향으로 역류하거나, 북한강의 유입량이 많을 경우에는 남한강 수역 방향으로 역류하는 현상이 발생한다. 역류가 발생하는 지류에서는 체류시간이 길어진다(Na and Park, 2005). 중국의 Yangtze River의 지류인 Xiangxi River의 경우 Yangtze River에 있는 댐으로부터 역류가 Xiangxi River의 부영양화 및 녹조 발생에 영향을 미치는 것으로 나타났다(Luo *et al.*, 2022).

명서남시터 지점의 하류인 미라실마을 지점(ST 2)에서 2015년 7월부터 10월까지 5회, 2016년 8월부터 10월까지 3회에 걸쳐 유해남조류 세포수 밀도를 측정하였다. 2015년 8월 26일에 미라실마을 지점의 표층에서 유해남조류 세포수 밀도는 10,175 cells mL<sup>-1</sup>이었으며, 9월 15일과 10월 7일에는 각각 1,104와 1,829 cells mL<sup>-1</sup>이었다(Fig. 3). 모든 시료에서 측정된 유해남조류는 *Microcystis*속 남조류였다. 명서남시터 지점(ST 1)에서는 2015년 8월 26일까지 유해남조류가 출현하지 않았으며, 10월 18일에 135,667 cells mL<sup>-1</sup>의 *Microcystis*가 출현하였다. 2016년의 경우 미라실마을 지점에서 8월 15일과 9월 25일에 각각 1,367과 3,328 cells mL<sup>-1</sup>



**Fig. 3.** Variation of the concentrations of harmful cyanobacteria, which is the sum of cyanobacteria in genera of *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, and *Aphanizomenon*.

의 *Microcystis*가 출현하였으며, 10월 18일에는 유해남조류가 출현하지 않았다. 명서남시터 지점에서는 2016년 8월 5일에 287 cells mL<sup>-1</sup>의 유해남조류가 출현하였으며, 8월 15일에는 발견되지 않았다. 이후 9월 25일에는 784,667 cells mL<sup>-1</sup>의 *Microcystis*가 출현하였다. 이상의 결과를 보면 명서남시터 지점에서 녹조가 발생하기 이전 시기에 명서남시터 하류에서 *Microcystis*의 밀도가 높았다. 따라서 충주호의 수위 상승으로 인한 역류에 의하여 명서남시터 하류로부터 유해남조류가 상류로 확산되면서 명서남시터 지점의 녹조 발생에 필요한 조류를 공급하는 것으로 판단된다.

**2. Microcystins 농도 분석**

명서남시터 지점에서 2015년 10월과 2016년 9월에 우점한 조류는 남조류 중 *Microcystis*이었으며, 이들은 대표적인 남조류 독소인 MCs의 주요 생산자로 알려져 있다(Zurawell *et al.*, 2005). 2015년 10월 18일에 명서남시터 지점의 표층 시료에서 총 MCs의 농도는 124.09 µg L<sup>-1</sup>이었으며, MCs 중 독성이 가장 강한 것으로 알려진 MC-LR (Rinehart *et al.*, 1994)이 66.35 µg L<sup>-1</sup> (53.5%)로 MC-RR, MC-YR에 비해 높은 농도를 나타내었다(Table 4). 2016년 9월 25일에는 MC-LR, RR, YR이 각각 35.0, 63.8, 1.1%로 MC-RR의 비율이 가장 높았다.

MCs는 7종의 아미노산으로 구성된 환형(cyclic heptapeptide) 구조이며 치환된 아미노산의 종류에 따라 270종 이상의 변이체가 있는 것으로 알려져 있으며, 호소에서는 주로 MC-LR, -RR, -YR이 발견된다(Welker *et al.*, 2004;

**Table 4.** Concentration and composition of microcystins at the the Myungseo Fishing Point (ST 1) at Jecheon Stream.

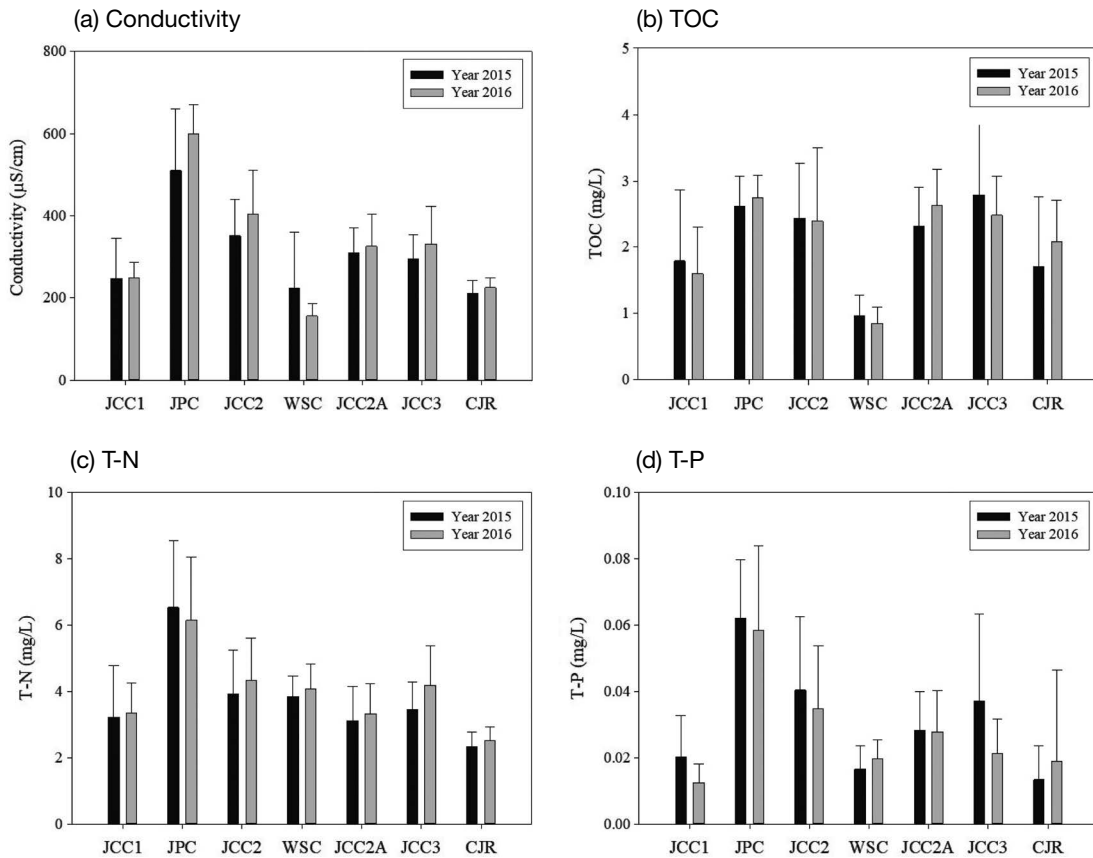
Date	Microcystins (MC, µg L <sup>-1</sup> )			
	MC-LR	MC-RR	MC-YR	Total
2015-10-18	66.35	48.73	9.02	124.09
2016-09-25	27.93	50.89	0.89	79.71

Znachor *et al.*, 2006; Bouaïcha *et al.*, 2019). MCs를 분석한 국내 선행 연구 결과에 따르면, 국내 호소에서는 MCs 중 MC-LR에 비해 MC-RR이 대체로 높은 비율을 나타내는 것으로 알려져 있으나(Park *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2010; Oh *et al.*, 2012), 2015년 10월 18일 명서남시터 시료에서는 MC-LR의 비율이 가장 높았다. MCs의 종류는 *Microcystis*의 종 조성 또는 MCs를 생산하는 남조류의 종류에 따라 다른 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2001; Znachor *et al.*, 2006). 또한 MCs의 생산에 관여하는 효소인 MC synthase 중 McyAA1와 McyBA1의 유전자형(genotype)에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다(Christiansen *et al.*, 2008). 따라서 명서남시터에서 MC-LR의 비율이 높은 원인을 규명하기 위하여 명서남시터 지점에서 *Microcystis*의 종 조성 및 MC synthase의 유전자 염기서열에 대한 분석이 필요할 것으로 판단된다. 또한 명서남시터 지점에서 유해남조류가 과다증식할 경우 남조류독소인 MCs의 농도가 매우 높아질 가능성이 있으며, 이는 충주호 본류로 확산되면서 수생태의 건강성에 영향을 미칠 가능성이 있기 때문에 이에 대한 체계적인 대책의 수립이 요구된다.

**3. 수질측정망 자료를 통한 오염원 유입 현황 분석**

수체로의 영양염류 유입은 외부부하 또는 내부부하에 의해 일어난다. 외부부하는 외부의 점오염원 또는 비점오염원으로부터 유입되는 영양염류에 의해 발생하며, 내부부하는 호소 내의 퇴적물로부터 영양염류의 용출에 의해 발생한다(Oh *et al.*, 2015). 명서남시터 지점의 하상을 조사한 결과 자갈로 이루어져 있어 내부부하의 가능성이 매우 낮은 것으로 판단되었다. 따라서 명서남시터에서 발생하는 남조류 과다증식에 필요한 영양염류는 명서남시터 지점의 상류로부터 유입된 것으로 판단된다.

명서남시터 지점의 상류에 위치한 6개의 수질측정망 지점에 대하여 2015년과 2016년까지 측정 자료를 확보하여 분석하였다. 제천천1 (JCC1) 지점에서 2015년과 2016년의 전기전도도의 평균은 각각 248(±97)과 249(±38) µS cm<sup>-1</sup>이었으며, 장평천(JPC) 지점에서는 각각 511(±151)와 600(±



**Fig. 4.** Variation of annual average of environmental parameters at the National Water Quality Monitoring Site at the Jecheon Stream. The bars represent the standard deviations. The abbreviations are as follows; JCC1, Jecheoncheon1; JPC, Jangpyeongcheon; JCC2, Jecheoncheon2; WSC, Wonseocheon; JCC2A, Jecheoncheon2A; JCC3, Jecheoncheon3; and CJR, Chungju Reservoir.

70)  $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 6개 지점 중 가장 높은 값을 나타내었고, 장평천과 제천천의 합류 이후 지점인 제천천2 (JCC2) 지점에서는 각각  $352(\pm 88)$ 와  $404(\pm 108)$   $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 제천천1 (JCC1) 지점에 비해 높고 장평천(JPC) 지점에 비해 낮았다 (Fig. 4). 전기전도도는 물질에서 전류가 잘 흐르는 정도를 나타내는 물리량으로 하수처리장 방류수에서 높은 값을 나타낸다(Nam *et al.*, 2017). 장평천 지점의 상류에는 제천하수종말처리장이 있기 때문에 처리장의 방류수로 인하여 장평천 지점의 전기전도도 값이 높으며, 장평천과 제천천 합류 지점 이후인 제천천2 (JCC2) 지점은 제천천1 (JCC1) 지점에서 내려오는 물에 의해 희석되어 전기전도도가 장평천(JPC) 지점에 비해 낮아지는 것으로 판단된다. 명서남시터 지점의 상류에 위치한 제천천3 (JCC3) 지점에서 2015년과 2016년의 평균 전기전도도는 각각  $294(\pm 60)$ 와  $331(\pm 92)$   $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 제천천1 (JCC1) 지점에 비해 높았다. 제천천1 (JCC1) 지점과 제천천3 (JCC3) 지점 사이에는 대규모 공공하수처리 시설이 없기 때문에, 제천천3 (JCC3) 지점의 높은 전기전도

도는 장평천의 영향인 것으로 판단된다. 원서천(WSC) 지점에서 2015년과 2016년에 측정된 전기전도도의 평균은 각각  $224(\pm 136)$ 와  $156(\pm 29)$   $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 제천천 지점들에 비해 낮았다. 또한 TOC의 분석 결과에서도 제천천 상류의 6개 지점 중 원서천(WSC)에서 가장 낮은 값을 나타내었다.

총인(T-P)의 농도를 보면, 장평천(JPC) 지점에서 2015년과 2016년에 각각  $0.062(\pm 0.018)$ 와  $0.059(\pm 0.025)$   $\text{mg L}^{-1}$ 로 6개 지점 중 가장 높은 값을 나타내었다. 전기전도도와 마찬가지로 장평천 합류 이후인 제천천2 (JCC2) 지점의 농도가 합류 이전인 제천천1 (JCC1) 지점에 비해 높아졌으며, 제천천2A (JCC2A)와 제천천3 (JCC3) 지점에서도 제천천1 (JCC1) 지점에 비해 높은 값을 나타내었다. 장평천(JPC) 지점에서 시기에 따른 총인의 농도 변화를 보면 주로 봄부터 가을(2015년에는 4월부터 9월까지, 2016년에는 7월부터 11월) 기간의 총인 농도가 다른 시기에 비해 높은 것으로 나타났다.

선행 연구에서 제천천 상류(장평천 합류 전)와 주요 지점인 장평천 및 원서천을 대상으로 2017년에 강우 시 하천의

유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)를 측정된 결과, 총인에 대한 EMC가 각각 0.154, 0.507, 0.237 mg L<sup>-1</sup>로 장평천이 가장 높았다(HRWMC, 2018). 따라서 장평천이 제천천 하류인 명서낙시터 지점에서 일어나는 녹조 발생의 주요 오염원인 것으로 판단된다. 특히 장평천에는 제천하수종말처리장의 방류수가 유입되고 있으며, 2018년 기준으로 장평천에 대한 처리장 방류수의 유량 기여율은 평균 26.0%였다. 제천하수종말처리장 방류수의 합류 전·후 지점에서 2018년 6월부터 8월까지 4회에 걸쳐 강우 시 총인에 대한 EMC를 측정된 결과, 각각 0.066~0.344 mg L<sup>-1</sup>와 0.086~0.436 mg L<sup>-1</sup>의 범위로, 방류수 합류 이후 총인에 대한 EMC가 1.24~2.18배 증가한 것으로 나타났다. 이에 따라 제천하수종말처리장이 장평천의 주요 오염원일 가능성이 제기되었다(HRWMC, 2018). 장평천의 지천인 미당천 상류에는 산업단지(제천 일반산업단지, 제천 제2일반산업단지, 제천 제2바이오밸리)와 농공단지가 조성되어 있어서 오염원으로 작용할 가능성이 높다. 따라서 명서낙시터에서 발생하는 녹조에 대한 대책을 수립하기 위하여 장평천에 있는 오염원에 대한 세밀한 조사가 필요할 것으로 판단된다.

### 결론

본 연구에서는 충주호의 주요 유입 지천인 제천천 하류에서 주기적으로 발생하는 녹조의 현황과 오염원을 분석하였다. 제천천 하류에 위치한 명서낙시터에서 녹조의 발생은 충주호의 수위 및 수위 변화에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉 하절기에 충주호의 수위가 124 El.m 이상이 된 후 지속적으로 상승하거나 유지할 경우에 녹조가 발생하였다. 명서낙시터의 녹조 발생에 필요한 조류는 수위 상승 과정에서 명서낙시터 하류 지역으로부터 공급되는 것으로 판단된다. 명서낙시터 지점에서 녹조의 우점종은 *Microcystis*속 남조류였으며, 이들이 생산하는 남조류독소인 MCs의 농도가 매우 높았을 뿐만 아니라, MCs 중 독성이 가장 강한 것으로 알려진 MC-LR의 농도가 가장 높은 것으로 나타났다. 따라서 이 지역에서 남조류에 의한 녹조 현상이 일어날 경우 수생태 건강성 악화와 남조류독소로 인한 인체 위해성이 발생할 가능성이 있으므로 이에 대한 체계적인 대책의 수립이 요구된다.

충주호로 유입되는 제천천과 남한강 본류에 대한 연간 인부하량을 계산한 결과, 제천천의 유역 면적이 남한강 본류에 비해 1/4 정도인데 연간 인부하량은 비슷하게 나타나 제천천 유역의 인부하가 충주호 수질에 미치는 영향이 큰 것으로 조사되었다(Kwak, 2005). 또한 남한강 본류 및 충주호

유입 하천에 대한 오염도를 분석한 선행 연구에서, 제천천 및 이의 유입 지천인 장평천의 오염도가 높으며 이들이 충주호의 수질에 영향을 미치는 것으로 나타났다(Kim, 2001). 명서낙시터의 주요 오염원은 장평천에 위치한 제천하수종말처리장 또는 장평천의 지류인 미당천의 상류에 위치한 농공산업단지인 것으로 추정되며, 이들 시설에 대한 정밀 모니터링을 통해 각각의 오염 기여도 및 오염원의 특성을 분석함으로써, 장평천 수질 개선을 위한 적절한 대책이 수립되어야 할 것으로 판단된다.

### 적요

충주호의 지류인 제천천 하류에서 주기적으로 발생하는 남조류 과다증식의 현황과 오염원을 분석하였다. 2015년 10월 18일과 2016년 9월 25일에 제천천 하류의 명서낙시터 지점(GPS; 37°03'25.5"N, 128°03'13.6"E)에서 클로로필 a의 농도는 각각 399.2, 184.8 mg m<sup>-3</sup>이었으며, 남조류독소인 microcystins의 농도는 각각 124.09, 79.71 µg L<sup>-1</sup>이었다. 명서낙시터 지점에서 남조류 과다증식은 충주호의 수위 및 수위변화와 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다. 즉 수온이 남조류 성장에 적합한 조건에서 충주호 수위가 상승하여 수체가 정체되는 시기에 남조류 과다증식이 발생한다. 제천천에 위치한 환경부의 수질측정망 자료를 분석한 결과, 제천하수종말처리장이 위치한 장평천이 주요 오염 지류인 것으로 나타났다.

**저자정보** 전유호(충북대학교 환경공학과 대학원생), 김도환(충북대학교 환경공학과 대학원생), 오경희(충북대학교 환경공학과 박사후연구원), 조영철(충북대학교 환경공학과 교수)

**저자기여도** 개념설정: 전유호, 김도환, 오경희, 조영철, 조사 및 분석: 전유호, 김도환, 오경희, 조영철, 자료 분석: 전유호, 김도환, 원고 초안작성: 전유호, 김도환, 원고 교정: 오경희, 연구비 수주: 조영철

**이해관계** 본 연구는 이해관계의 충돌 여지가 없습니다.

**연구비** 본 연구는 원주지방환경청과 한강수계관리위원회의 연구비 지원에 받아 수행된 연구입니다.

### REFERENCES

Ahn, C.Y. 2018. Prospect and roles of molecular ecogenetic techniques in the ecophysiological study of cyanobacteria. *Korean Journal of Environment and Ecology* 51: 16-28.

- Ahn, C.Y., H.S. Kim, B.D. Yoon and H.M. Oh. 2003. Influence of rainfall on cyanobacterial bloom in Daechung Reservoir. *Korean Journal of Ecology and Environment* **36**: 413-419.
- Berg, M. and M. Sutula. 2015. Factors Affecting the Growth of Cyanobacteria with Special Emphasis on the Sacramento-San Joaquin Delta. Southern California Coastal Water Research Project Technical Report 869, California, USA.
- Bouaïcha, N., C.O. Miles, D.G. Beach, Z. Labidi, A. Djabri, N.Y. Benayache and T. Nguyen-Quang. 2019. Structural diversity, characterization and toxicology of microcystins. *Toxins* **11**(12): 714.
- Chang, M., S. Teurlinx, J.H. Janse, H.W. Paerl, W.M. Mooij and A.B. Janssen. 2020. Exploring how cyanobacterial traits affect nutrient loading thresholds in Shallow Lakes: a modeling approach. *Water* **12**: 2467.
- Christiansen, G., W.Y. Yoshida, J.F. Blom, C. Portmann, K. Gademann, T. Hemscheidt and R. Kurmayer. 2008. Isolation and structure determination of two microcystins and sequence comparison of the *mcvABC* adenylation domains in *Planktothrix* species. *Journal of Natural Products* **71**: 1881-1886.
- Dai, R., P. Wang, P. Jia, Y. Zhang, X. Chu and Y. Wang. 2016. A review on factors affecting microcystins production by algae in aquatic environments. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* **32**(3): 1-7.
- Facey, J.A., T.A. Rogers, S.C. Apte and S.M. Mitrovic. 2021. Micronutrients as growth limiting factors in cyanobacterial blooms; a survey of freshwaters in South East Australia. *Aquatic Sciences* **83**: 1-11.
- Funari, E. and E. Testai. 2008. Human health risk assessment related to cyanotoxins exposure. *Critical Reviews in Toxicology* **38**: 97-125.
- HRWMC (Han River Watershed Management Committee). 2018. Investigation of Water Pollution Characteristics and Countermeasures at the Jecheon Stream (II). Han River Watershed Management Committee, Hanam, Republic of Korea.
- Jung, T.S. and J.H. Hwang. 2003. Modeling of water circulation and suspended sediment transport in Lake Daecheong. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy* **6**: 67-82.
- Kim, B., H.S. Kim, H.D. Park, K. Choi and J.G. Park. 1999. Microcystin content of cyanobacterial cells in Korean reservoirs and their toxicity. *Korean Journal of Limnology* **32**: 288-294.
- Kim, G.Y. 2001. A Study on the Water Quality Management for Stream and Lake. MS thesis, Yonsei University, Republic of Korea.
- Kim, H.S., B. Kim, H.D. Park, Y. Katagami and S.J. Hwang. 2001. Dynamics of cyanobacterial toxins in the downstream river of Lake Suwa. *Korean Journal of Limnology* **34**: 45-53.
- Kim, S.J., S.W. Chung, H.S. Park, Y.C. Cho, H.S. Lee and Y.J. Park. 2019. Analysis of environmental factors associated with cyanobacteria dominance in Baekje Weir and Juksan Weir. *Journal of Korean Society on Water Environment* **35**: 257-270.
- Kotak, B.G., A.K.Y. Lam, E.E. Prepas and S.E. Hrudey. 2000. Role of chemical and physical variables in regulating microcystin-LR concentration in phytoplankton of eutrophic lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **57**: 1584-1593.
- Kwak, S. 2005. Limnological and Ecological Study of Lake Chungju. MS thesis, Samyook University, Republic of Korea.
- Lee, J.J., J. Lee, H.K. Park, J. Moon, H. Kim, J. Seo, H. Lee and J. Park. 2010. Assessment of microcystin analysis methods for convenient monitoring, p. 643-644. In: Proceeding of the 2010 Autumn Co-Conference of the Korean Society of Water and Wastewater and Korean Society on Water Environment. Korean Society of Water and Wastewater and Korean Society on Water Environment.
- Luo, W., X. Luo, J. Lu and M. Bo. 2022. Contribution of the reservoir backflow to the eutrophication of its tributary: a case study of the Xiangxi River, China. *Hydrology Research* **53**: 467-482.
- Ma, J. and P. Wang. 2021. Effects of rising atmospheric CO<sub>2</sub> levels on physiological response of cyanobacteria and cyanobacterial bloom development: A review. *Science of The Total Environment* **754**: 141889.
- Mitrovic, S.M., L. Hardwick and F. Dorani. 2011. Use of flow management to mitigate cyanobacterial blooms in the Lower Darling River, Australia. *Journal of Plankton Research* **33**: 229-241.
- MOE (Ministry of Environment, Korea). 2016. Standard Methods for Analysis of Water Pollution. Ministry of Environment, Sejong, Republic of Korea.
- Na, E.-H. and S.-S. Park. 2005. A three-dimensional modeling study of Lake Paldang for spatial and temporal distributions of temperature, current, residence time, and spreading pattern of incoming flows. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **27**: 978-988.
- Nam, W.K., I.W. Choi, Y.Y. Kim, H.S. Lim, M.J. Kim, C.K. Lim, S.H. Kim and T.H. Kim. 2017. A plan to improve Bokha Stream quality using water quality and pollution source analyses. *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis* **20**: 174-182.
- Newell, S.E., T.W. Davis, T.H. Johengen, D. Gossiaux, A. Burtner, D. Palladino and M.J. McCarthy. 2019. Reduced forms of nitrogen are a driver of non-nitrogen-fixing harmful cyanobacterial blooms and toxicity in Lake Erie. *Harmful Algae* **81**: 86-93.
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2020. Manual for Operating the Algae Warning System. National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea.
- Oh, K.H., D.H. Jeong, S.H. Shin and Y.C. Cho. 2012. Simultaneous quantification of cyanobacteria and *Microcystis* spp. using real-time PCR. *Journal of Microbiology and Biotech-*



- nology* **22**: 248-255.
- Oh, K.H., Y.J. Kim and Y.C. Cho. 2015. Effects of sediments on the growth of algae at Chusori Area in Daechung Reservoir. *Journal of Korean Society on Water Environment* **31**: 533-542.
- Orihel, D.M., D.F. Bird, M. Brylinsky, H. Chen, D.B. Donald, D.Y. Huang, A. Giani, D. Kinniburgh, H. Kling, B.G. Kotak, P.R. Leavitt, C.C. Nielsen, S. Reedyk, R.C. Rooney, S.B. Watson, R.W. Zurawell and R.D. Vinebrooke. 2012. High microcystin concentrations occur only at low nitrogen-to-phosphorus ratios in nutrient-rich Canadian lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **69**(9): 1457-1462.
- Park, H.D., B. Kim, E. Kim and T. Okino. 1998. Hepatotoxic microcystins and neurotoxic anatoxin-a in cyanobacterial blooms from Korean lakes. *Environmental Toxicology and Water Quality* **13**: 225-234.
- Park, H.K. 2007. Survey method relating freshwater phytoplankton for the management of water resources. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **29**: 593-609.
- Rinehart, K.L., M. Namikoshi and B.W. Choi. 1994. Structure and biosynthesis of toxins from blue-green algae (cyanobacteria). *Journal of Applied Phycology* **6**: 159-176.
- Schindler, D.W., R.E. Hecky, D.L. Findlay, M.P. Stainton, B.R. Parker, M.J. Paterson, K.G. Beaty, M. Lyng and S.E.M. Kasian. 2008. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **105**: 11254-11258.
- Shin, J.-K. and S.-J. Hwang. 2017. Dynamics of Phosphorus-Turbid Water Outflow and Limno-Hydrological Effects on Hypolimnetic Effluents Discharging by Hydropower Electric Generation in a Large Dam Reservoir (Daecheong), Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**: 1-15.
- Welker, M., M. Brunke, K. Preussel, I. Lippert and H. von Dohren. 2004. Diversity and distribution of *Microcystis* (cyanobacteria) oligopeptide chemotypes from natural communities studied by single-colony mass spectrometry. *Microbiology* **150**: 1785-1796.
- Zhang, H., R. Chen, F. Li and L. Chen. 2015. Effect of flow rate on environmental variables and phytoplankton dynamics: results from field enclosures. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology* **33**: 430-438.
- Znachor, P., T. Jurczak, J. Komárková, J. Jezberová, J. Mankiewicz, K. Kaštovská and E. Zapomělová. 2006. Summer changes in cyanobacterial bloom composition and microcystin concentration in eutrophic Czech reservoirs. *Environmental Toxicology* **21**: 236-243.
- Zurawell, R.W., H. Chen, J.M. Burke and E.E. Prepas. 2005. Hepatotoxic cyanobacteria: a review of the biological importance of microcystins in freshwater environments. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B* **8**: 1-37.