

한강 친수활동구간 조류독소 마이크로시스틴 분포 및 남조류 발생 영향요인

물환경생태팀

하현주 · 오석률 · 윤호균 · 조수석 · 양진영 · 김지희 · 문병진 · 윤중섭 · 전재식 · 정 권

Distribution of Cyanobacterial Toxins(Microcystins) and Potential Causes of Cyanobacterial Occurrence at Recreational Sites in the Han River

Aquatic Ecology Team

**Hyun-ju Ha, Seok-ryul Oh, Ho-kyun Yoon, Soo-seock Cho,
Jin-young Yang, Ji-hee Kim, Byeong-jin Moon,
Joong-seop Yun, Jae-sik Jeon and Kweon Jung**

Abstract

The occurrence of cyanobacteria in the Han River is a serious environmental and public health concern. Weekly surveys of cyanobacteria and microcystin concentrations at the recreational sites on this river, from April to November 2016, revealed that *Microcystis* was the dominant species, but its level did not exceed the critical threshold(20,000 cells/mL) in the algal bloom warning system. Microcystin-LR concentrations were lower than the national drinking water guideline of 1.0 µg/L. Both total nitrogen(TN) and total phosphorus(TP) levels were lower in 2016, when no algal bloom warning was issued, than in 2015, when a warning was issued. The prominent decrease in TP might have been attributable to lower amounts of TP in the wastewater discharged from sewage treatment plants in the Han River watershed the TP standard for treated wastewater was strengthened from 1 to 0.5 mg/L in early 2016. The Han River recreational sites showed high cyanobacteria densities when the TN:TP ratio was <20. Furthermore, low precipitation and discharge from the Paldang Reservoir upstream might have caused the growth of cyanobacteria.

Key words : Cyanobacteria, *Microcystis*, microcystin-LR, TN:TP ratio, treated wastewater discharge

서론

호수나 하천에서 발생하는 식물플랑크톤 이상증식은 녹조 또는 유해조류변성(Harmful Algal Blooms : HABs)으로 불리며 기후변화에 의한 수온상승, 영양염류의 유입, 물 흐름의 정체 등이 원인이며 주로 남조류에 의해 발생된다. 녹조는 우리나라 뿐 만 아니라 전 세계적으로 발생하는 현상으로, 특히 미국의 오대호(The Great Lakes) 중의 하나인 Eri호, 중국의 태호 등에서 심각한 문제로 보고되었다(1).

남조류의 이상증식은 물색을 변하게 하고 햇빛과 산소를 차단하여 수질 악화, 물고기 폐사 등을 일으켜 수생태계의 균형을 무너지게 한다. 또한 조류 독소와 이취미 물질 등 남조류 대사산물로 인해 음용수 공급에 악영향을 가져올 우려가 있다. 그러나 최근 정수시설이 발달됨에 따라 음용수의 독성문제는 취수원이 단독인 농촌지역이나 정수시설이 잘 갖추어지지 않은 후진국에서 일어나는 사례가 대부분이다(2). 세계보건기구(WHO)와 국립환경과학원 등에 따르면, 조류독소는 응집·침전, 염소소독공정을 갖추고 있는 표준처리시설에서 99% 이상, 오존과 입상활성탄 공정이 추가된 고도처리시설에서는 더 완벽한 제거가 가능하다(3). 환경부가 2012년 6월부터 2016년 6월까지 한강, 금강, 낙동강 등 3대강 수계 64개 정수장 수돗물 시료(총 2,951건)를 검사한 결과, 이들 시료에서 조류독소(Microcystin)가 모두 불검출되어 수돗물이 조류로부터 안전한 것으로 발표하였다(3).

남조류의 독성 위험은 정수장에서 거의 완벽하게 처리하는 음용수보다는 실제로 원수를 직접 이용하는 친수활동 시 더 높아 여러 국가들이 친수 관련 위험기준을 수립하여 관리를 수행하고 있다(2). 잠실수중보 하류는 한강 친수활동구간으로 여름철이면 윈드서핑, 워터보드, 한강수상안전체험 등 한강물과 직접 접촉하거나 카약, 오리보트 경주대회, 한강도강체험, 낚시 등 간접 접촉하는 방식으로 다양한 수상활동이 이루어지는 공간이다. 여름철은 수상활동이 가장 활발한 기간인데, 남조류 발생 및 증식도 주로 여름철에 활발하기

때문에 남조류로 인한 친수활동 안전성을 확인할 필요가 있다.

남조류가 배출하는 독소 중 대표적인 독소는 마이크로시스틴으로 주로 스킴을 이루는 마이크로시스틴스(Microcystis), 아나베나(Anabaena) 세포에서 많이 발견된다. 마이크로시스틴은 세포의 사멸, 용균(lysis)을 통해 수중으로 방출되며 급성간독성을 일으킬 수 있다(3). 친수활동에 의한 남조류 독소 노출경로는 피부노출, 비의도적인 경구 섭취, 호흡기관 흡입 등으로 나눌 수 있다. 피부노출의 경우에는 친수활동 시 수영복을 착용하였을 때 독성에 노출되기 쉽다. 이는 수영복 속으로 들어간 남조류 세포가 마찰에 의해서 깨지고, 이를 통해 마이크로시스틴과 같은 독소들이 피부에 닿는 노출기회가 많아져 알레르기성 피부발진을 일으킬 확률이 높아지기 때문이다. 해외에서는 친수활동 중 남조류 독성 관련 피해사례는 직접 구강 섭취하거나 흡입한 사례가 가장 많이 보고되었으며 또한 이 경우가 독성의 위험이 가장 크다(2).

국내에서는 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 개정으로 2016년부터 상수원과 친수구역을 분리해서 기준과 항목을 다르게 정하였다. 전국 조류경보제 시행구간은 총 28개 구간으로 그 중 친수활동구간은 한강 잠실수중보 하류가 유일한 구간이다. 친수구역의 경우 남조류 세포수 20,000 cells/mL 이상이면 관심, 100,000 cells/mL 이상이면 경계로 설정되어 있어, 상수원과 통합한 이전보다 기준이 완화되어 2016년에는 관심 단계 이상으로 발령된 경우가 없었다. 그러나 상수원과 물의 사용목적이 다르므로 상수원 보호기준을 친수구역에 적용하게 되면 필요보다 더 강하게 관리하게 되는 것이므로 발령기준을 다르게 하는 것이 합리적이다. 조류경보제 발령기준 변경 내용은 표 1과 같다. 친수활동구간에서 조류경보제 관심단계가 발령되면 냄새물질과 조류독소를 추가 분석하고 조치사항으로는 낚시·수상스키·수영 등 친수활동, 어패류 어획·식용 등의 자제 권고 및 이에 대한 공지(현수막 설치 등)가 있다. 또한 필요한 경우 조류제거물질 살포 등 조류 제거 조치를 하여야 한다. 경계단계가 발령되면 관심단계와 비슷하나 친수활동, 어패류 어획·식용이 금지된다.

친수활동구간에서 조류독소 관리기준은 별도로 없으며 2013년부터 상수원수에서 남조류 독소 마이크로시스틴에 대한 감시기준으로 1.0 μg microcystin-LR/L를 정하여 운영하고 있으며 이는 WHO 먹는물 기준과 같다. 마이크로시스틴은 Adda(3-amino-9-methoxy-2,6,8-trimethyl-10-phenyldeca-4,6-dienoic acid)라는 독특한 구조를 가진 아미노산을 포함한 7개의 아미노산으로 구성된 cyclic heptapeptide 구조를 가지며 지금까지 약 80종이 알려져 있다(4). MCs 중 가장 독성이 강한 microcystin-LR에 대한 LD50(복강내 주사, mouse)은 25~125 $\mu\text{g}/\text{kg}$ bw(일반적으로 60 $\mu\text{g}/\text{kg}$ bw가 사용됨)로 알려져 있다(4).

이에 본 연구에서는 기후변화에 따라 발생강도가 점차 증가하고 있는 남조류에 대해 친수활동구간으로 지정된 한강 하류에서 세포수, 마이크로시

스틴 농도 수준 등을 파악함으로써 한강 수질의 안전성 확보를 위한 기초자료로 이용하고자 한다. 또한 조류경보가 발령된 2015년과 발령되지 않은 2016년 환경인자를 비교 분석하여 녹조 발생과의 관련성을 분석하고자 한다.

재료 및 방법

1. 조사 지점

한강 잠실수중보 하류 친수활동 구간 내 조류독소 분포를 조사하기 위해 조류경보제 2~4구간인 5개 지점에서 2016년 4월부터 11월까지 주 1회 시료를 채수하여 분석하였다. 채수는 수표면에서 50 cm 깊이 이내에서 실시하였다. 서울시 조류경보제는 그림 1과 같이 1~4구간으로 운영되고 있



Fig. 1. Sampling sites(a : Seongsu Bridge, b : Hannam Bridge, c : Hangang Bridge, d : Mapo Bridge, e : Seongsan Bridge) in the recreational region of the Han River.

Table 1. Guidelines for cyanobacterial bloom warning system in Han river

Guidance level(~2015)		Guidance level(2016~)		
Attention	15 mg/m ³ Chlorophyll-a and 500 Cyanobacterial cells/mL	Water supply source	Attention	1,000 Cyanobacterial cells/mL
			Warning	10,000 Cyanobacterial cells/mL
Warning	25 mg/m ³ Chlorophyll-a and 5,000 Cyanobacterial cells/mL	Recreational water body	Bloom	1,000,000 Cyanobacterial cells/mL
			Attention	20,000 Cyanobacterial cells/mL
Bloom	100 mg/m ³ Chlorophyll-a and 1,000,000 Cyanobacterial cells/mL		Warning	100,000 Cyanobacterial cells/mL

으며 1구간은 강동대교~잠실대교 구간으로 상수원 지역, 2~4구간은 잠실대교~행주대교 구간으로 친수구역으로 지정되어 있다. 5개 지점은 상류로부터 2구간의 (a)성수대교와 (b)한남대교, 3구간의 (c)한강대교와 (d)마포대교, 4구간의 (e)성산대교이다.

2. 측정 항목 및 시험 방법

수체 중 마이크로시스틴, 클로로필-a, 총인, 총질소 분석을 위해 2L 채수하였고 남조류 세포수 분석을 위해 시료 100 mL를 채수하여 Lugol 용액 (2 v/v%)으로 현장에서 고정하여 4℃에서 보관하였다. 클로로필-a는 수질오염공정시험기준에 따라 GF/C 여과지(Whatman, UK)로 시료 적당량을 여과한 후 아세톤으로 클로로필을 추출하여 분광광도계(Shimadzu, Japan)로 흡광도를 측정하였다. 총인과 총질소는 수질오염공정시험기준 ES 04362.2 b와 ES 04363.4b에 따라 연속흐름법(BLTec, Japan)으로 측정하였다. 남조류 세포수는 광학현미경(Carl zeiss, DE/Axio Imager M2) 100~200배 하에서 종별로 동정하였으며, 세즈윅-라프터(Sedgwick-Rafter) 챔버를 이용하여 mL당 세포수로 계산하였다. 남조류 세포수는 마이크로시스틴스(*Microcystis*), 아나베나(*Anabaena*), 아파니조메논(*Aphanizomenon*), 오실라토리아(*Oscillatoria*)속 세포수의 합으로 구하였다.

남조류 독소는 대표적인 남조류 독소인 마이크로시스틴-LR(MC-LR), 마이크로시스틴-RR(MC-RR), 마이크로시스틴-YR(MC-YR), 마이크로시스틴-LA(MC-LA)의 4개 항목을 분석하였다. 그 외 수온, 용존산소, 투명도, 탁도 등은 현장 측정기(YSI 6820V2, USA)로 측정하였다.

2. 마이크로시스틴 시험 방법

1) 시험방법

(1) 표준물질 및 시약

표준물질인 MC-LR, MC-RR, MC-YR는 cyano(Cyano Biotech GmbH, Germany)에서 메탄올 1 mL에 10 µg이 용해된 제품을 구입하였고, MC-LA는 100 µg 표준물질을 구입하였다. 기기분석

에 사용되는 아세토니트릴(Acetonitrile), 개미산(Formic acid), 메탄올(Methanol) 등은 Wako사(Japan) HPLC급을 사용하였다.

(2) 표준용액 제조 및 검정곡선

각 표준물질 10 µg/mL을 각각 100 µL씩 취하고 100 mL 증류수에 혼합하여 4가지 MC mix 10 µg/mL를 1차 표준용액으로 한다. 검정곡선은 0.1, 0.2, 0.5 1.0 µg/L로 하며 1차 표준용액을 적절히 희석하여 2차 표준용액으로 한다. 검정곡선 검증 및 시료 정량은 외부표준법을 이용한다.

(3) 전처리 및 기기분석

마이크로시스틴 시험방법은 먹는물 수질감시항목 운영 등에 관한 고시 별표 3. 먹는물 수질감시항목 시험방법 14. 마이크로시스틴-액체크로마토그래프-텐덤질량분석법으로 실시하였다. 조류독소 분석은 조류세포와 물 속 용존 농도를 구분하지 않고 분석하였다. 분석기기는 Equan Max/TSQ 모델의 on-line SPE HPLC MS/MS(Thermo Scientific, USA)를 사용하였다.

전처리 방법은 시료 일정량을 바이알에 분취하여 초음파 분쇄기에 넣고 얼음으로 중탕하면서 조체를 파쇄시킨다. 파쇄 시간은 총 30분으로 하되, 연속 파쇄 시 시료의 급격한 온도 상승이 발생되므로 4분 30초 파쇄 후 30초 방치를 반복한다. 파쇄가 끝난 후 현미경으로 세포의 완전 파쇄를 확인한다. 완전 파쇄가 이루어지지 않은 경우 파쇄 과정을 반복한다. 조체가 모두 파쇄된 시료를 GF/C 여지를 사용하여 여과한다. 여과한 시료는 온라인 SPE에 시료를 넣고 농축컬럼을 통과한 후 HPLC로 주입된다. 시료 주입량은 1000 µL이다. 온라인 SPE 및 HPLC 분석 조건은 표 2와 같고 MS/MS 분석 조건은 표 3과 같다.

2) 정도 관리

먹는물 수질감시항목 시험방법에 따라 방법검출한계(MDL ; Method Detection Limit), 정확도, 정밀도 등 정도관리를 수행하였다.

방법검출한계는 분석법에 제시된 정량한계부근

Table 2. Analytical Conditions of HPLC with online-SPE(solid phase extraction)

Pump	SPE Pump			Analytical Pump			
Column	Hypersil GOLD aQ(20 mm)			Hypersil GOLD C18(50 mm)			
Mobile phase	A : 0.1% Formic acid B : Acetonitrile C : D.I. water			A : 0.1% Formic acid B : Acetonitrile C : D.I. water			
		Time	B%	C%	Time	A%	B%
		0.0	0	100	0.0	95	5
		1.3	100	0	6.0	5	95
		8.0	0	100	8.1	95	5
	12.2	0	100	12.0	95	5	
Injection volume	1000 μ L						

의 농도를 정제수에 첨가한 시료 7개를 준비하여 각 시료를 분석절차와 동일하게 측정하여 평균값과 표준편차를 구한다. 본 연구에서는 0.2 μ g/L 시료 7개를 분석하였다. 방법검출한계는 3.14 \times 표

준편차로 구하며 시험방법에서 제시한 정량한계 (0.1 μ g/L) 이하이어야 한다.

정확도와 정밀도를 구하기 위해서 정제수에 정량한계의 1배~10배가 되도록 동일하게 표준물질을 첨가한 시료를 4개 이상 준비하여, 분석절차와 동일하게 측정하여 평균값과 표준편차를 구한다. 본 연구에서는 0.5 μ g/L 시료 5개를 분석하였다. 정확도는 첨가한 표준물질의 농도에 대한 측정 평균값의 상대백분율로 구한다. 정밀도는 측정값의 % 상대표준편차로 계산한다. 상대표준편차는 표준편차/평균 \times 100(%)로 구한다.

Table 3. Analytical Conditions in MS-MS

Item	Condition
Source	ESI (electrospray ionization)
Polarity	Positive
Spray Voltage(V)	4000
Sheath gas(Arb)	45
Vaporizer emperature($^{\circ}$ C)	350
Aux gas(Arb)	15
Ion sweep gas(Arb)	360
Tube Lens(V)	80~200
Collision energy(V)	5~55

결과 및 고찰

1. 마이크로시스틴 분석 정도관리 결과

표 4와 같이 마이크로시스틴 분석 정도관리를 수행한 결과 0.2 μ g/L 시료 7개를 분석하여 구한

Table 4. Quality control results of the analytical method

Compound	Criteria	MDL(μ g/L)	Accuracy(%)	Precision(%)
		below 0.1	75~125	below 25
Microcystin-LR		0.052	100.3	3.3
Microcystin-RR		0.043	103.9	2.2
Microcystin-YR		0.048	103.9	4.1
Microcystin-LA		0.060	105.9	2.3

Table 5. Number of samples, number of N.D.(Not Detected) and detection range of microcystins levels at each site

Site	Number of samples	MC-LR		MC-RR		MC-YR	MC-LA
		# of N.D.	Detection range ($\mu\text{g/L}$)	# of N.D.	Detection range ($\mu\text{g/L}$)	# of N.D.	# of N.D.
(a) Seongsu Bridge	34	31	0.1~0.2	31	0.2	34	34
(b) Hannam Bridge	34	31	0.1~0.3	31	0.2~0.5	34	34
(c) Hangang Bridge	34	31	0.1~0.7	28	0.1~0.7	34	34
(d) Mapo Bridge	34	26	0.1~0.5	26	0.2~0.7	34	34
(e) Seongsan Bridge	34	27	0.1~0.7	26	0.1~1.2	34	34

방법검출한계(MDL)는 마이크로시스틴 4개 항목이(0.043~0.060) $\mu\text{g/L}$ 범위로 나타나 분석법에 제시된 정량한계 0.1 $\mu\text{g/L}$ 이하를 만족하였다. 정확도는 0.5 $\mu\text{g/L}$ 시료 5개를 분석하여 표준물질의 농도에 대한 측정 평균값의 상대백분율 측정값의 %로 구하였으며 마이크로시스틴 4개 항목이(100.3~105.9)% 범위로 나타나(75~125)% 범위 내로 들어야 한다는 규정에 만족하였다. 정밀도는 0.5 $\mu\text{g/L}$ 시료 5개를 분석하여 측정값의 % 상대표준편차로 계산하였으며 마이크로시스틴 4개 항목이 (2.1~4.1)%로 나타나 25% 이하이어야 한다는 규정을 만족하였다.

2. 한강 친수구간 마이크로시스틴 분포

2016년 4월~11월까지 한강 친수구간 5개 지점에서 주 1회 남조류 세포수 및 남조류 독소를 조사한 결과 대부분의 경우 우점종은 *Microcystis*였으며, 일부 *Anabaena*, *Aphanizomenon*이 검출되었다. 남조류 세포수는 평균 418(0~16,478) cells/mL, MC-LR은 평균 0.0(0.0~0.7) $\mu\text{g/L}$, MC-RR은 평균 0.1(0.0~1.2) $\mu\text{g/L}$ 로 검출되었으며, 남조류 독소 MC-YR, MC-LA는 검출되지 않았다. 지점별 결과는 표 5와 같으며 조류경보제 관심 단계(20,000 cells/mL) 이하였고, 남조류 독소도 먹는물 감시항목 수질기준 MC-LR 1.0 $\mu\text{g/L}$ 이상 검출된 경우는 없었다. 따라서 2016년 한강 친수구간에서는 남조류나 남조류 독소의 위해로부터 안전하다고 할 수 있었다.

남조류는 5,000 cells/mL 이상은 1회 검출되었

으며 이 값이 최대값 16,478 cells/mL이다. 이것은 8월 17일 성산대교에서 검출되었으며 이 때 남조류 독소도 MC-LR 0.7 $\mu\text{g/L}$, MC-RR 1.2 $\mu\text{g/L}$ 로 최대값을 나타냈다.

지점별 남조류 세포수 및 MC-LR, MC-RR의 농도 분포는 그림 2와 같다. 2구간에서 4구간으로 갈수록, 즉 하류로 갈수록 남조류 세포수 및 마이크로시스틴 농도가 높아짐을 알 수 있다. 남조류 세포수가 가장 높은 성산대교 지점은 8월에 가장 높고 9월, 10월까지 조류가 존재함을 알 수 있고 다른 지점도 비슷하게 나타났다.

해외 국가별 친수보호를 위한 조류경보체계를 보면 WHO, 호주, 프랑스에서는 우리나라와 같이 남조류 세포수로 단계별 경보를 발령한다. 독일, 네덜란드에서는 마이크로시스틴 농도로 미국 오하이오주에서는 마이크로시스틴 외에 아나톡신-a (Anatoxin-a), 실린드로스퍼몐신(cylindrospermopsin), 삭시톡신(Saxitoxin) 농도로 단계별 경보를 발령한다. 마이크로시스틴 농도 기준으로 보면 독일과 네덜란드에서는 마이크로시스틴 10 $\mu\text{g/L}$, 미국 오하이오주는 마이크로시스틴 6 $\mu\text{g/L}$ 이상에서 단계별 경보를 발령하고 이에 따른 대응조치를 취하도록 한다(2). 우리나라에서는 친수구간에서 마이크로시스틴 농도기준이 없지만 다른 나라의 독소 기준을 참고하더라도 친수구간에서는 남조류 독소 마이크로시스틴으로부터 안전하다고 할 수 있다.

대청호는 대전을 비롯한 충청지역에 생활용수와 하천 유지용수 공급을 위해 축조된 다목적 댐으로

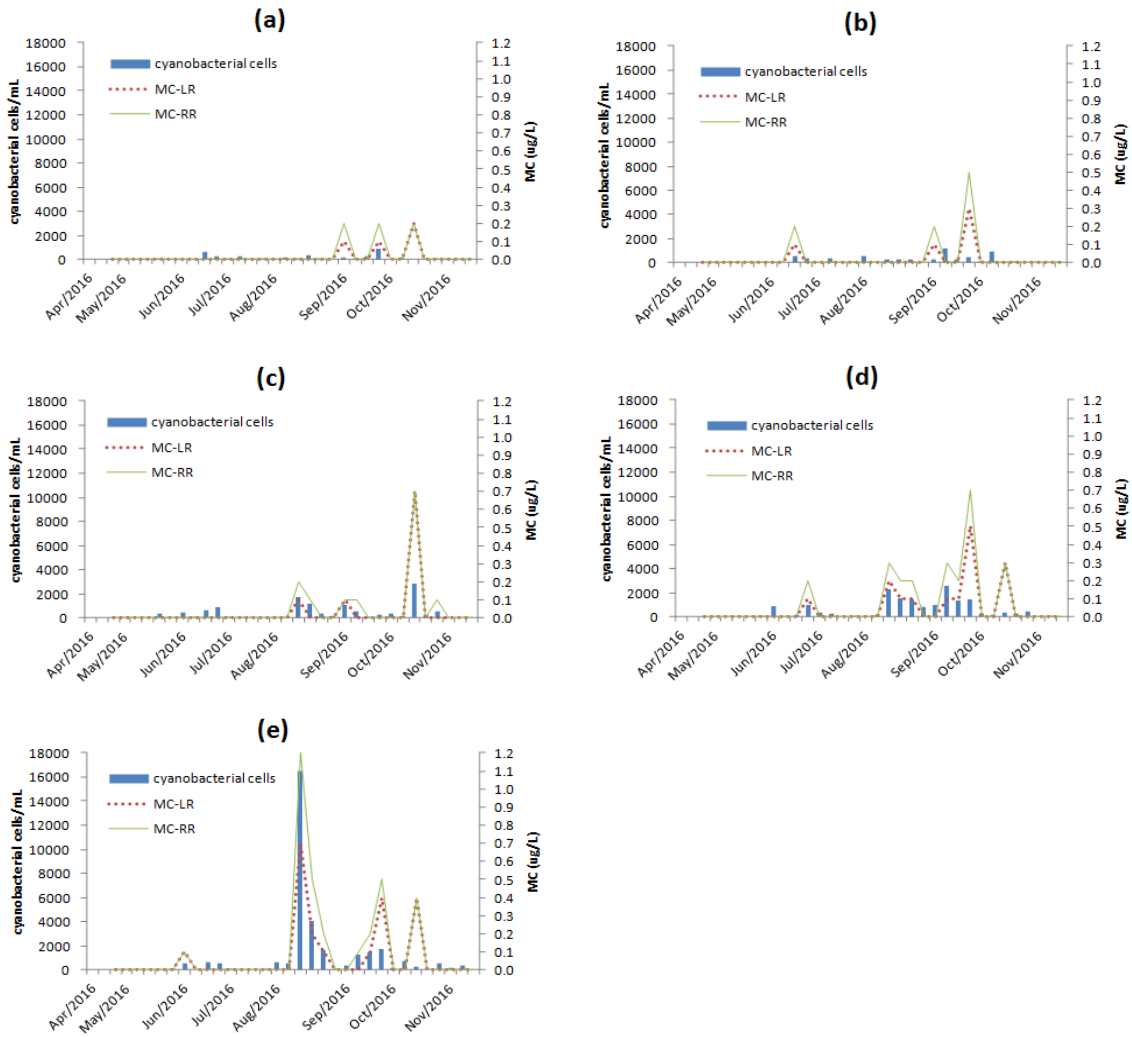


Fig. 2. Weekly variation in cyanobacterial cells, microcystin-LR(MC-LR) and microcystin-RR(MC-RR) at study sites (a) Seongsu Bridge, (b) Hannam Bridge, (c) Hangang Bridge, (d) Mapo Bridge and (e) Seongsan Bridge in Han River.

서 수체의 체류시간이 길고 오염물질이 장기간 체류되어 매년 여름철 부영영화 현상이 일어나는 곳이다. 2014년 대청호의 상류 지점과 중류 지점 총 6개 지점을 선정하여 남조류 독소를 분석한 결과 상류 지점인 장계, 추소에 집중되어 녹조현상이 발생하였고, 조류독소는 총 마이크로시스틴이 최대 54.2 $\mu\text{g/L}$ 검출되었다(6). 2015년 국내 공공수역에서 남조류 독소 조사 결과를 보면 MCs 농도로 한강 이포보에서 (0.10~0.56) $\mu\text{g/L}$, 낙동강 강정고령보에서 (0.11~9.72) $\mu\text{g/L}$, 금강 백제보에

서 (0.08~14.92) $\mu\text{g/L}$, 영산강 죽산보에서 (0.11~17.12) $\mu\text{g/L}$ 검출되었다(7). 상기 연구 결과들과 비교해 보면 한강 친수구간에서 남조류 및 마이크로시스틴은 국내 다른 호소, 하천에 비해 농도가 낮음을 알 수 있다.

3. 녹조 발생 영향인자 분석

녹조 발생과 관련된 환경인자로 수온, DO, TN, TP, 상류 댐 방류량 등을 들 수 있다. 상류 댐 방류량은 한강홍수통제소의 팔당댐 방류량 자료를

참고하였고, 자료 해석을 위해 서울시에서 운영하는 선유 수질자동측정소 자료를 이용하였다.

한강의 녹조 발생 특성은 최근 10년간(2005년~2014년) 팔당호(호소)에서 7~8월에 발생하여 점차 한강 본류(하천)로 확대되는 경향이었으며 한강 하류에서는 발생 빈도가 낮았다. 그러나 2015년에는 한강하류부터 녹조가 심화되어 1998년 조류경보제 운영 이후 최초로 한강 하류에서 조류경보가 발령되었다. 남조류 개체수도 4구간 성산대교 지점에서 최대 150,500 세포수/mL를 기록하였다. 이때 마이크로시스틴도 최대 MC-LR 4.1 $\mu\text{g/L}$ 검출되었다(8). 한강 하류 친수구간에서 조류경보가 발령 될 때의 수질 환경과 발령 되지 않을 때의 수질 환경과의 차이를 알아보기 위해 2015년과 2016년의 수질 환경을 분석하였으며 그 결과는 표 6과 같다. 남조류 세포수와 클로로필-a 농도는 2015년 5,659 세포수/mL, 24.4 mg/m^3 , 2016년 418 세포수/mL, 18.4 mg/m^3 으로 각각 나타났다. 녹조가 심한 2015년은 수온은 22.3 $^{\circ}\text{C}$, DO는 7.0 mg/L 로 2016년 21.6 $^{\circ}\text{C}$, 8.2 mg/L 에 비해 수온은 0.7 $^{\circ}\text{C}$ 높고 DO는 1.2 mg/L 낮았다. 남조류는 규조류와는 달리 수온이 높을 때 잘 발생한다고 알려져 있는데 남조류의 최대 성장속도는 기온이 25 $^{\circ}\text{C}$ 이상일 때 도달하고, 남조류의 최적기온은 녹조류와 규조류보다 높아서 여름철에 많이 발생한다(9). 2015년과 2016년 수온 자료에서 20 $^{\circ}\text{C}$ 이상에서 특히 25 $^{\circ}\text{C}$ 이상일 때 남조류 밀도수가 높았다.

또한 녹조는 총질소, 총인의 농도가 높을 때 잘 발생한다고 하는데, 각 농도는 2015년 4.291 mg/L , 0.217 mg/L 이며 2016년 3.529 mg/L , 0.069 mg/L 로 특히 총인 농도가 낮았다. 2016년은 2015년에 비해 각각 18%, 68% 감소하였다. 이것은 2016년 초 물재생센터의 방류수 총인 수질 기준이 1 mg/L 에서 0.5 mg/L 로 강화되어 한강 본류로 유입되는 물재생센터의 방류수 총인 농도가 낮았기 때문으로 사료되었다. 한강 본류에서 2016년 총인 농도가 낮은 것은 서울시 선유 수질자동측정소에서도 관측되었는데, 선유 수질자동측정소는 (e) 성산대교 지점에서 1.5 km 상류에 위치한 측정소로 매 시간 수온, DO, 총유기탄소, 총인,

총질소 등 수질 인자를 측정하고 있다. 4월에서 11월까지 선유 측정소의 총질소는 2015년 3.785 mg/L , 2016년 3.034 mg/L 로 20% 감소하였고 총인은 2015년 0.229 mg/L , 2016년 0.089 mg/L 로 61% 감소하였다. 본 연구의 측정지점과 측정 횟수는 다르지만 한강 하류는 2016년이 2015년에 비해 총질소와 총인이 감소하였고 특히 총인의 감소가 컸다는 것을 확인할 수 있다.

녹조 발생 예측 인자로 TN:TP의 비를 사용할 수 있는데, TN:TP 비가 29:1 이하로 떨어질 때 남조류 개체수가 증가하고, 29:1 이상으로 증가할 때 감소한다는 연구 결과가 있다(10, 11). 한강 상수원 구역에서 남조류 우점 예측인자 도입에 관한 연구에서도 29이하 일 때 남조류 개체수가 증가함을 조사하였다(12). 또한 캐나다 전역의 246 곳의 수역에 대해 10여 년간 조류독소, TN, TP를 분석한 결과 TN:TP가 23 이하일 때 마이크로시스틴이(5.6 \pm 8.4) mg/L , TN:TP가 23 이상일 때 마이크로시스틴이(1.5 \pm 2.3) mg/L 로 나타나 TN:TP의 비가 낮을 때 남조류 독소가 증가한다고 한다(13). 한강 친수구역의 경우 TN:TP의 비가 2015년 28, 2016년 59로 나타났다. 그림 3은 2015년 한강 하류 끝 지점인 성산 지점에서 남조류 개체수, 수온, TN/TP를 보여주는데, TN:TP의 비가 20 이하일 때 남조류 개체수가 높았다. 한강 선유수질측정소에서 매시간 측정하는 TN, TP 자료를 녹조 발생의 사전 예측 인자로 활용할 수 있으나, 보다 세밀한 연구와 현장 조사가 필요하다.

2015년 녹조 발생의 주요 원인 중 하나로 팔당댐 방류량을 들 수 있는데 한강홍수통제소 자료에 따르면 그림 4에서와 같이 팔당댐 방류량은 2005년~2013년 9년간은 400 CMS 이상으로 평균 571 CMS이었으나 2014년부터 2016년까지 각각 198, 131, 260 CMS로 급격하게 감소하였다. 댐 방류량은 댐 수위를 일정하게 유지하기 위해 유입량, 즉 강수량에 따라 방류량을 조정한다. 그림 4에서와 같이 서울지역 강수량 연도별 추이와 팔당댐 방류량의 연도별 추이는 비슷하다. 특히 2014년부터 방류량이 급격하게 감소한 것은 강수량이 적었기 때문인 것으로 판단된다. 녹조의 조절에

Table 6. Averages and standard deviations of environmental parameters at study sites (a) Seongsu Bridge, (b) Hammam Bridge, (c) Hangang Bridge, (d) Mapo Bridge and (e) Seongsan Bridge in Han River during 2015~2016

Year	Site	# of samples	Cyanobacterial cells (cells/mL)	Chlorophyll-a (mg/m ³)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	TN/TP	Water temp. (°C)	pH	DO (mg/L)	Conductivity (µS/cm)	Paldangdam discharge (m ³ /s)
2015	(a)	53	3250 ± 4293 (0~22500)	22.9 ± 13.9	3.498 ± 0.810	0.084 ± 0.085	61 ± 39	22.8 ± 4.9	7.4 ± 0.2	8.0 ± 1.6	281 ± 58	
	(b)	53	3132 ± 4047 (0~14883)	23.6 ± 14.6	5.316 ± 1.457	0.290 ± 0.124	20 ± 6	23.0 ± 4.7	7.3 ± 0.2	6.5 ± 1.6	330 ± 74	
	(c)	53	5842 ± 16108 (0~114264)	25.2 ± 16.8	4.468 ± 0.923	0.243 ± 0.083	20 ± 7	22.9 ± 4.8	7.3 ± 0.3	5.8 ± 2.1	313 ± 63	
	(d)	53	5182 ± 11340 (0~70197)	21.3 ± 12.6	4.158 ± 1.007	0.242 ± 0.081	19 ± 7	22.7 ± 4.8	7.3 ± 0.2	5.4 ± 2.0	312 ± 62	130.6
	(e)	53	10890 ± 26455 (0~150500)	28.9 ± 25.5	4.016 ± 1.098	0.226 ± 0.083	20 ± 7	22.9 ± 4.9	7.5 ± 0.3	5.9 ± 2.3	344 ± 151	
	(a)~(e)	265	5659 ± 15137 (0~150500)	24.4 ± 17.4	4.291 ± 1.231	0.217 ± 0.116	28 ± 25	22.3 ± 4.8	7.4 ± 0.3	7.0 ± 2.1	302 ± 90	
2016	(a)	34	111 ± 192 (0~866)	16.5 ± 9.5	2.824 ± 0.670	0.041 ± 0.019	83 ± 42	21.3 ± 4.9	7.6 ± 0.5	9.0 ± 2.4	246 ± 51	
	(b)	34	172 ± 282 (0~1170)	15.7 ± 9.8	4.277 ± 1.437	0.080 ± 0.034	60 ± 24	21.6 ± 4.7	7.5 ± 0.4	8.0 ± 2.3	289 ± 70	
	(c)	34	354 ± 601 (0~2850)	18.6 ± 12.3	3.544 ± 1.051	0.071 ± 0.025	54 ± 21	21.7 ± 5.0	7.5 ± 0.4	8.0 ± 2.3	270 ± 58	
	(d)	34	502 ± 698 (0~2550)	19.2 ± 11.7	3.462 ± 0.955	0.072 ± 0.020	51 ± 20	21.6 ± 5.1	7.5 ± 0.4	7.9 ± 2.2	268 ± 56	259.7
	(e)	34	951 ± 2857 (0~16478)	21.8 ± 13.6	3.538 ± 0.954	0.082 ± 0.028	48 ± 21	21.8 ± 5.2	7.7 ± 0.3	8.1 ± 2.2	278 ± 69	
	(a)~(e)	170	418 ± 1368 (0~16478)	18.4 ± 11.5	3.529 ± 1.130	0.069 ± 0.030	59 ± 29	21.6 ± 4.9	7.6 ± 0.4	8.2 ± 2.3	270 ± 62	

() : min.~max.

강수량과 방류량이 중요함을 통계처리 결과로 설명한 연구도 있다(14). 또한 대청호의 녹조와 강우-수문학적 영향에서 상류 댐의 조절 방류로 인해 대청호의 상류수역은 녹조에 취약하며 조류경보 발령은 저수지의 수문-여수로 방류의 유무와 관련성이 컸다는 연구도 있다(15).

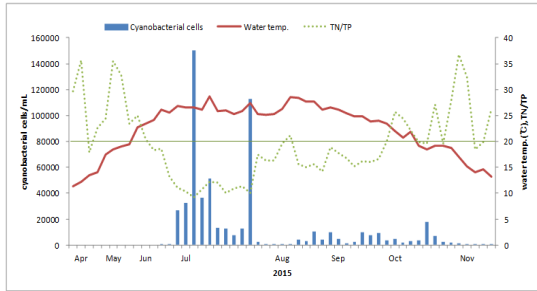


Fig. 3. Weekly variation in the concentration of cyanobacterial cells, water temperature, TN/TP ratio at Seongsan Bridge in 2015.

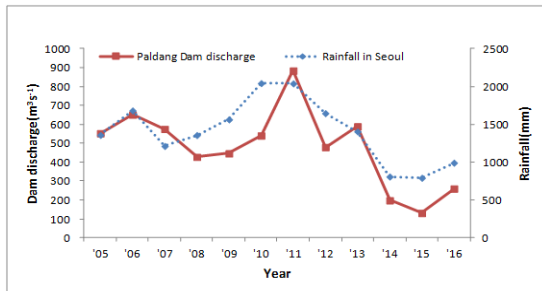


Fig. 4. Annual variation of rainfall in Seoul and Paldang dam discharge during 2005~2016.

결론

기후 변화에 따라 발생강도가 점차 증가하고 있는 남조류에 대해 친수활동구간으로 지정된 한강 하류에서 남조류 세포수, 마이크로시스틴 농도를 분석하였다. 또한 녹조 발생과 관련된 환경인자를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 마이크로시스틴 분석 정도관리를 수행한 결과

방법검출한계(MDL)는 마이크로시스틴 4개 항목이(0.043~0.060) $\mu\text{g/L}$ 범위로 나타나 분석법에 제시된 정량한계 0.1 $\mu\text{g/L}$ 이하를 만족하였다. 정확도는 마이크로시스틴 4개 항목이(100.3~105.9)% 범위로 나타나(75~125)% 범위 내로 들어야 한다는 규정에 만족하였으며, 정밀도는 마이크로시스틴 4개 항목이(2.1~4.1)%로 나타나 25%이하이어야 한다는 규정을 만족하였다. 이로써 마이크로시스틴 분석 결과 신뢰성을 확보할 수 있었다.

2. 2016년 4월~11월까지 한강 친수구간 5개 지점에서 주 1회 남조류 세포수 및 남조류 독소를 조사한 결과, 우점종은 대부분 *Microcystis*였으며, 조류경보제 관심 단계(20,000 cells/mL) 이상은 발령되지 않았다. 남조류 독소도 먹는물 감시항목 수질기준 MC-LR 1.0 $\mu\text{g/L}$ 이상 검출된 경우는 없어서 2016년 한강 친수구간에서는 남조류나 남조류 독소의 위해로부터 안전하다고 할 수 있었다. 하류로 갈수록 남조류 세포수 및 마이크로시스틴 농도가 높아졌으며 8월에 가장 높고 9월, 10월까지 조류가 존재하였다. 또한 한강 친수구간에서 남조류 및 마이크로시스틴은 국내 다른 호소, 하천에 비해 농도가 낮았다.

3. 조류경보가 발령되었던 2015년과 발령되지 않은 2016년의 환경 인자를 비교한 결과, 2016년이 2015년에 비해 총질소와 총인이 감소하였고 특히 총인의 감소가 컸다. 한강 하류는 TN:TP의 비가 20 이하일 때 남조류 개체수가 높았다. 또한 적은 강수량과 이에 따른 상류 팔당댐의 적은 방류량도 녹조 발생의 원인이 된 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. 환경부 : 녹조(綠潮), 녹조현상은 무엇인가?, 2016.
2. 한혜진 외 : 물환경 및 기후변화를 고려한 유

- 해녹조 대응체계 및 정책 개선방안 연구, 한국환경정책평가원, 2014.
3. 환경부 보도자료 : 수돗물 안심하고 마셔도 됩니다, 2016.
 4. WHO : Guidelines for safe recreational water environments : Coastal and fresh waters. Vol. 1, World Health Organization, 2003.
 5. Welker, M, Brunke, M, Preussel, K, Lippert, I and von Dohren, H : Diversity and distribution of *Microcystis* (cyanobacteria) oligopeptide chemotypes from natural communities studied by single-colony mass spectrometry. *Microbiol.* 150:1785~1796, 2004.
 6. 태은아 외 : LC/MS 법 이용한 대청호 독소 분석, 한국물환경학회 학술발표회 p.374~375, 2014.
 7. 충북대학교 산학협력단 : 담수환경에서 조류 독소의 생물농축에 관한 연구(I), 2015.
 8. 조수석 : 한강 조류경보제 운영 결과, 서울특별시보건환경연구원, 2015.
 9. Robarts, RD and Zohary, T : Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloomforming cyanobacteria, *New Zealand J. Mar. Freshwater Res.*, 21: 391~399, 1987.
 10. Smith, VH : Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton, *Science*, 221(4611):669~671, 1983.
 11. Xie, L, Xie, P, Li, S, Tang, H and Liu, H : The low TN:TP ratio, a cause or a result of microcystis blooms?, *Water Res.*, 37:2073~2080, 2003.
 12. 김태균 외 : 한강 유역 조류경보제에 남조류 우점 예측인자 도입에 관한 연구, 대한환경공학회지, p.378~385, 2014.
 13. Diane M. Orihel, et al. : High microcystin concentrations occur only at low nitrogen-to-phosphorus ratios in nutrient-rich Canadian lakes, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*:1457~1462, 2012.
 14. 유호식 외 : 팔당호 방류량과 조류발생요인들의 상관성, 유기물자원화학회지, p.61~66, 2013.
 15. 신재기 외 : 대청호 조류경보제의 녹조현상 동태와 강우-수문학적 영향, 한국하천호수학회지, p.153~175, 2016.