

서울 경기지역의 공원 연못 및 한강 수계내 조류독소 Microcystin-LR의 분포

서 미 연^{1,3} · 김 백 호² · 한 명 수^{1,2,*}

(¹한양대학교 환경과학과, ²생명과학과, ³서울시 보건환경연구원)

Distribution of Cyanotoxin Microcystin-LR in Han River System and Ecological Park in Seoul and Kyunggi Districts. Suh, Mi-Yeon^{1,3}, Baik-Ho Kim¹ and Myung-Soo Han^{1,2,*}
(¹Department of Environmental Science, ²Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea; ³Seoul Metropolitan Government, Research Institute of Public Health and Environment)

To determine the content of hazard microcystin (MC) in Han River system and Ecological Ponds in Seoul City and Kyunggi district, a most toxic derivative, microcystin-LR (MCLR) of 15 samples of 7 ponds, 4 rivers and 4 reservoirs during low precipitation and cold season in 2003 were analyzed by ELISA method. With the change of water temperature (0.4~21.9°C), cyanobacteria including *Microcystis aeruginosa* dominated the cold phytoplankton community in small ecological ponds such as Kyungbokgung Kyunghyaeru (KBP), Seokchon reservoir (SCR), Yangsoori Ryukgakji (YSS), having the long residence time. Contents of MCLR (the detection limit; 0.05 µg L⁻¹) were high in cyanobacteria-rich sites, especially, *Microcystis aeruginosa*. Total MCLR, cell extracted type plus dissolved type, were 1.39 µg L⁻¹ in KBP, 0.55 µg L⁻¹ in SCR and 0.59 µg L⁻¹ in YSS, in the first sampling having a high temperature (>20°C), while some detected only in YSS during the cold season. As expected, the MCLR content was correlated with *Microcystis aeruginosa* (r = 0.526 for cell extracted type, r = 0.433 for dissolved type). Therefore, low concentration of MCLR detected in small ponds and Han river system in Seoul metropolitan city and Kyunggi district, maybe hardly affect human recreation activity, especially the drinking water supply.

Key words : cyanotoxin, ecological park, Han-river system, microcystin-LR (MCLR), *Microcystis aeruginosa*, Seoul and Kyunggi district

서 론

부영양 호수나 하천 또는 크고 작은 공원 연못 등지에서 대발생하는 남조류와 규조류는 비경제적 수처리과정을 요구하고, 경관악화나 이, 취미 또는 조류독소에 의한 생태계 파괴 및 보건학적 위험성은 21세기 새로운 환경

문제의 하나이다. 서울시와 같이 인구집중지역에서 상수 원수로 이용되는 호수나 하천 그리고 시민들의 생태공원으로 이용되는 각종 공원내 소형 연못 등은 점차적으로 오염이 심화되어 조류발생 빈도가 더욱 증가되고 있다 (조 등, 2001). 현재 서울시는 20여개에 가까운 생태 공원 연못과 저온기 동안 체류시간이 긴 한강 수계를 가지고 있어, 부영양화가 증가되고, 가뭄과 같은 조건이 장기화

* Corresponding author: Tel) 02)-2220-0956, Fax) 02)-2296-1741, E-mail: hanms@hanyang.ac.kr

Table 1. Physical characteristics of 15 sampling sites in Seoul-Kyunggi districts.

Sites	Symbol	Area (m ²)	Storage (m ³)	Avr. depth (m)	Sediment-type	Resources
Kyungbok palace	KBP	11,613	-	1.9	Silt, clay	Ground water
Kyungan stream	KAS	-	-	6.0	Clay, silt	Kwangju-Yongin city
Yongsan park	YSP	6,708	6,000	1	Mud	Tap water
Paltang dam	PTD	23,800	240 million	16~20	Silt, sand	Han river
Hangang bridge	HGB	-	-	-	Clay, silt	Han river
Seokchon reservoir	SCR	147,400	737,000	5	Silt, clay	Han river
Kildong eco. park	KDP	4,900	4,900	1	Mud	Ground water
Yeuido eco. park	YEP	476	476	1	Silt, mud	Ground water
Bundang central park	BDP	13,520	-	1	Silt, mud	Yuldong reservoir
Chonho bridge	CHB	-	-	-	Clay, silt	Han river
Ilsan lake-park	ISP	299,900	453,000	2	Silt, mud, sand, clay	Han river/Koyang city
Banpo bridge	BPB	25,000	-	2	Clay, silt	Han river
Juam lake	JAR	1,010	450 million	13.3	-	Posung-Hwasun str.
Sangsa lake	SSR	135	250 million	27.3	-	Lake Juam-Isa str.
Yangsoori Ryukgakji	YSS	-	30	3	Clay	Han river

된다면, 남조류 대발생 가능성이 매우 높다(서 등, 2000).

일반적으로 독성물질을 생성하는 조류로는 남조, 황색 편모조, 와편모조 등 다양하며, 특히 남조류에 속하는 *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Microcystis*, *Nodularia*, *Nostoc*, *Oscillatoria* 등이 대부분이다. 대표적인 독소로는 microcystin, nodularin, anatoxin 등이며 간독성 및 신경 독성을 일으킨다(Carmichael, 1992, 1994; Codd, 1994; Yoo *et al.*, 1994; Bagchi, 1996). 독소 microcystin (MCs)은 고리형태의 peptide구조이며, 현재 세계적으로 약 64종의 유도체가 알려지고 있다(Kaya, 1999). 유도체중 microcystin-LR (MCLR)은 5가지 기본 아미노산에 leucine과 arginine을 갖고 있으며, 가장 강한 독성을 보이고(Krishnamurthy *et al.*, 1986; Carmichael *et al.*, 1988; Watanabe *et al.*, 1989), 수중 내 *Microcystis* 현존량, 총 MCs 농도와도 매우 밀접한 관계를 갖는다(Vasconcelos *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 1998; NIER, 1998).

조류독소 MCs의 독성은 다른 식물이나 균류에서 만들어지는 allelochemical보다는 훨씬 강하지만 방선균 같은 세균에서 생성되는 물질보다는 비교적 약한 편이다(Carmichael, 1992). 현재 캐나다, 호주, 일본 등 국가에서는 수질 기준으로 포함하려는 계획이 있으며(Kuiper-Goodman *et al.*, 1994; Watanabe *et al.*, 1996), WHO에서는 이미 1.0 mg L⁻¹을 잠정적인 권장기준으로 정하였다(WHO, 1998). 국내에서도 이들 물질의 잠재적 위험성 때문에 상수원수 및 공원연못 등에서의 위해성 평가 및 수질기준 설정을 위한 기초적 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구는 서울-경기 지역에 위치한 공원연못이나 한강 수계 내 조류독소의 함량을 파악하기 위하여, 강우가 비교

적 적은 2004~2005년 저온기 동안 수중내 기초환경요인 및 조류독소량(조체성 및 용존성)을 각각 조사하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점 및 조사기간

조사지점은 한강을 중심으로 서울 수도권 지역 공원내 호수 7개 지점(경복궁내 경회루, 용산가족공원, 여의도 생태공원, 길동생태공원, 일산호수공원, 분당중앙공원, 석촌호수), 한강으로 유입되는 지천수 경안천 1개 지점, 한강 본류 4개 지점(팔당대교, 천호대교, 한강대교, 반포 인공섬), 양수리 육각지 1개 지점, 서울권역을 벗어난 전라남도 순천시 소재 주암호와 상사호 2개 지점 등 총 15개 지점을 선정하였다(Table 1). 조사는 2004년 10월 2~3일, 12월 4~5일, 2005년 2월 5~6일까지 총 3회 실시하였다.

2. 환경요인 분석

환경요인 중 수온, pH, 용존산소 측정은 Portable multi-parameter (YSI 610-D, USA)를 이용하여 현장에서 직접 측정하였다. BOD와 영양염 분석은 5 L Van Dorn 채수기를 이용하여 현장수 4L를 폴리에틸렌 채수통에 넣고 Ice box에 넣어 실험실로 운반하였다.

생물학적 산소요구량(BOD)은 시료 300 mL를 2개의 BOD병에 넣고 한 개는 초기용존산소를 측정하고, 나머지 BOD병은 20°C BOD incubator에서 5일간 배양 후

용존산소를 측정하여 초기용존산소 소모량으로 유기물을 산정하였다. 총질소는 수중의 질소화합물을 알칼리성 과황산칼륨의 존재하에 120°C에서 유기물과 함께 분해하여 질산이온으로 산화시킨 다음, 산성에서 자외부 (220 nm) 흡광도를 측정하여 질소를 정량하였다. 총인은 유기물을 산화 분해하여 모든 인 화합물을 인산염 (PO₄) 형태로 변화시킨 다음, 인산염을 아스코르빈산 환원 흡광도법으로 880 nm에서 측정하였다. Chlorophyll a의 농도는 현장수 500 mL를 GF/C (Whatman 1.2 μm, England) filter로 여과하고, GF/C 여지를 90% acetone 10 mL 용액에 넣어 마쇄한 다음 하룻밤 냉암소에 방치하여 엽록소를 추출한 다음 2,000 rpm에서 20분간 원심분리하고 상등액을 취하여 UV/Visible Spectrophotometer (DU 800, Beckman Coulter, Inc., Fullerton, California, USA)를 사용하여 Multiple wavelength에서 측정하였다.

3. 식물플랑크톤 분석

식물플랑크톤의 동정과 계수를 위해 5 L Van Dorn 채수기로 현장수를 채수한 후, 250 mL 폴리에틸렌 채집병에 시료를 넣고, Lugol 용액으로 (최종농도 1%) 고정하여 실험실로 운반하였다. 실험실에서 72시간 이상 침강시킨 후 시료의 조류 농도에 따라 2~5배 농축을 실시하였고, 시료의 광산화에 대한 오차를 최소화하기 위해 알루미늄 호일로 빛을 차단시켰다. 농축한 시료는 잘 혼합한 후, Sedgewick-Rafter Counting Chamber에 시료 1 mL을 꺼내 광학현미경 (Nikon eclipse 600, ×100배)에서 군체 또는 세포수를 계수하였다. 출현종의 동정은 구조류는 Cox (1996), 남조류는 Akiyama *et al.* (1981), 와편모조류는 Abé (1981) 등의 문헌을 참고하였다.

4. 조류독소 Microcystin (MC) 측정

조사지점의 수중내 남조독소 MC 측정은 가장 독성이 강한 MC-LR type (LD50; 50 μg kg⁻¹)만을 측정하였다 (Yasuno *et al.*, 2000). MCLR양은 크게 1) 조체성 (cell extraction), 2) 용존성 (dissolved)으로 구분하여 효소면역학적 방법 (ELISA, enzyme-linked immunosorbent assay)으로 분석하였다 (Nagata *et al.*, 1997). 분석을 위하여 시료 1000 mL를 GF/C 여과지에 여과 시킨 후 여과지에 걸러진 조체성 시료는 시험관에 넣고 methanol 10 mL를 가하고 동결 보관하였다. 동결 보관한 시료를 해동하여 10 μL를 취해 증류수 990 μL를 micro centrifuge tube에 넣은 후 ELISA 분석에 사용하였다. 용존성 독소는 동결 보관한 후 해동하여 특별한 처리없이 ELISA 분

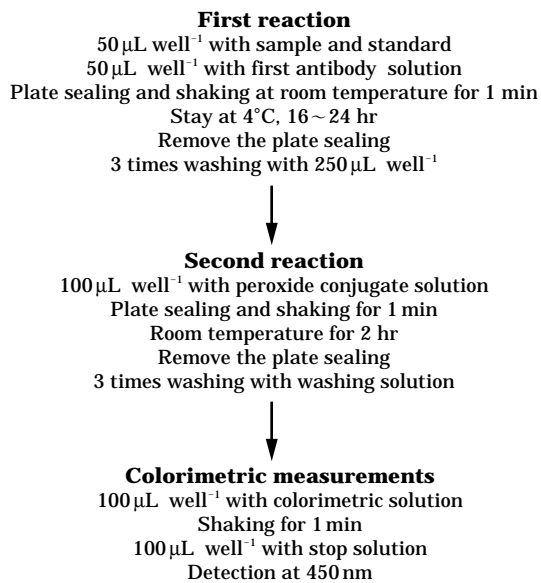


Fig. 1. Schematic steps for the measurement of cyanotoxin in Microcystin-LR.

석에 사용하였다 (Fig. 1). 독소 분석은 microcystins의 ADDA 잔기의 monoclonal antibody를 microplate의 well에 고정화시킨 반응 kit (Mitsubishi Kagaku Bio-clinical Laboratories, Inc. Tokyo, Japan)를 사용하였고 검출한계는 0.05 μg L⁻¹이다. Microcystin standard는 ELISA kit에서 제공된 표준 물질을 50, 100, 200, 400, 1600 pg mL⁻¹를 well plate에 각각 50 μL씩 접종하고, microplate reader (Labsystem iEMS Reader MF, Finland)를 이용하여 450 nm에서 측정한다. 구해진 검량선을 기준으로 시료중의 MCLR농도를 Ascent S/W (Labsystem)의 4계수 logistic 곡선에 의한 회귀식을 사용하여 정량하였다.

5. 자료분석

남조 *Microcystis aeruginosa*의 출현과 남조독소 Microcystin-LR (조체성 및 용존성)의 상호관계를 파악하기 위하여, Pearson's correlation coefficient를 이용하여 상관성 분석을 실시하였다.

결 과

1. 물리화학적 환경요인

조사시기 동안 물리화학적 환경요인들의 변화는 Table 2와 같다.

Table 2. Physicochemical factors of 15 sampling sites in Seoul-Kyunggi districts.

	No	KBP	KAR	YSP	PTD	HGB	SCR	KDP	YEP	BDP	CHB	ISP	BPB	JAR	SSR	YSS
WT	1	21.2	20.3	20.3	19.8	19	21	17.4	17.5	19	19.1	20.5	18	21.9	21.6	18.6
	2	13.5	14.5	12.8	14.1	14.8	14.3	10.3	12.4	14.3	13	13.3	14.2	18.9	18.7	13.8
	3	5.2	4.2	3.8	1.1	1.2	0.4	3.2	4.3	1.3	1.3	2.4	1.7	1	1	0.4
DO	1	8.1	8.4	8.7	9	8.2	9.8	8.3	7.7	9.1	9.4	8.4	8.2	7.3	7.6	9.7
	2	8.5	8.5	9.2	9.4	8.6	9.6	9	8.1	8.7	9	8.8	8.3	7.3	7.6	9.8
	3	7.8	8.3	8.3	9	8.3	8.2	7.8	8	8.7	8	8.6	8	7.3	7.3	9.6
pH	1	11.1	9.1	10	11.1	7.1	9.7	9.1	5.5	11.5	10.3	9.2	7	10.4	7	6.9
	2	12.1	11.7	11.3	10.8	7.4	10.8	9.7	6.3	11.7	11.4	10.9	5.9	9.1	10.1	10.2
	3	14.6	14	15.9	14	14	14	14	14	15.5	14	14.5	14	9.5	9.5	15
Cond	1	354	253	222	132	192	126	297	497	148	119	122	164	51	54	8
	2	371	331	245	93	252	128	299	508	156	159	127	240	52	55	118
	3	387	300	319	95	200	120	290	300	150	90	147	100	51	45	90
BOD	1	3.2	1.6	4.6	1.8	3.3	2.2	2.6	2.6	3.3	1	0.8	3.2	1.1	1.1	2.4
	2	3.2	5	3.9	1.6	2.8	2.4	4.9	0.9	1.8	1.4	1.2	2.1	1	0.6	2.8
	3	1.9	6.9	2.4	1.5	3.2	2.7	3.7	2	1.5	2.4	0.7	3.5	1.4	1	2
TN	1	0.797	3.686	0.72	1.872	3.494	1.027	1.776	0.672	0.653	1.642	0.173	2.726	0.614	0.49	0.806
	2	0.499	3.158	0.346	0.72	3.341	0.509	0.95	1.171	0.73	1.594	0.336	2.88	1.238	1.238	0.672
	3	2.717	5.213	1.958	2.534	6.73	1.824	3.389	2.976	2.333	3.562	1.411	5.846	2.141	2.477	1.584
TP	1	0.125	0.12	0.134	0.024	0.178	0.086	0.077	0.072	0	0.034	0	0.158	0.043	0.01	0.029
	2	0.206	0.504	0.187	0.499	0.499	0.288	0.269	0.192	0.034	0.034	0.13	0.302	0.11	0.01	0.13
	3	0.037	0.152	0.046	0.05	0.315	0.056	0.074	0.046	0.056	0.054	0.009	0.268	0.057	0.057	0.038
Chl- <i>a</i>	1	25.4	18.6	27.8	22.1	6.7	40.6	19.8	43	13.8	12.4	2.1	7.3	0.2	0.4	0.6
	2	4.3	11.6	6	6.3	2.9	9.6	7.8	2.7	2.9	5.8	1.1	2.4	2.1	2	1.9
	3	16.8	33.1	9.5	6.3	22.5	7.4	18.6	10.9	5	16.1	2.5	14.6	15	4.8	10.4
CMC	1	1.271	0.039	0.094	0.032	0.028	0.501	0.026	0.022	0.088	0.033	0.025	0.035	0.153	0.042	0.51
	2	0.153	0.052	0.043	0.011	0.006	0.039	0.006	0.005	0.046	0.012	0.004	0.006	0.012	0.011	1.49
	3	0.003	0.004	0.005	0.002	0.005	0.007	0.006	0.002	0.004	0.003	0.004	0.003	0.005	0.002	0.462
DMC	1	0.119	0.044	0.078	0.037	0.045	0.052	0.037	0.048	0.069	0.059	0.049	0.046	0.005	0.005	0.081
	2	0.018	0.016	0.012	0.004	0.006	0.019	0.007	0.005	0.005	0.005	0.021	0.013	0.03	0.032	0.225
	3	0.037	0.002	0.027	0.011	0.026	0.024	0.024	0.024	0.037	0.028	0.019	0.024	0.023	0.031	0.494

WT: water temperature (°C), DO: dissolved oxygen (mg L⁻¹), Cond: electric conductivity (μmhos cm⁻¹), BOD: biochemical oxygen demand (mg L⁻¹), TN & TP: total nitrogen and phosphate (mg L⁻¹), CMC: microcystin by cell extraction, DMC: dissolved microcystin by filtration.

수온은 전체적으로 0.4~21.9°C의 변화를 보였으며, 1차 조사(17.4~21.9), 2차 조사(10.3~18.9°C), 3차 조사(0.4~5.2°C)로 계절성이 뚜렷하였는데, 3차 조사에서는 주암호, 상사호를 제외한 전 수계에서 결빙되었다. DO는 전체적으로 5.5~15.9 mg L⁻¹의 범위로서, 3차 조사(14.0~15.9 mg L⁻¹)에서는 지점간 큰 차이를 보이지 않았으며, 대부분 지점이 과포화 상태를 나타냈다. pH는 7.3~9.8의 범위를 보였으며, 남조 *Microcystis aeruginosa*가 bloom를 형성하는 양수리 육각지에서 평균 pH 9.7로 가장 높았다. 팔당댐 또한 평균 9.1로서 동일 수계의 하류, 반포대교, 한강대교에 비해 높은 pH를 나타냈다. 조사 기간 중 가장 낮은 pH는 상사호(pH 7.7)였으며, 나머지 지점들은 평균 pH 7.9~8.8 범위로서 약 알칼리

성을 나타냈다. 전도도(Conductivity)는 51~508 μmhos cm⁻¹ 범위로서 조사 기간 및 지점간에 큰 차이를 나타냈으며, 2차 조사시 여의도생태공원에서 가장 높았다. 또한 사람의 출입이 비교적 잦은 경복궁 경회루(354→371→387)와 용산가족공원(222→245→319)은 조사가 진행됨에 따라 점차 증가한 반면, 나머지 대부분 지점에서는 큰 변화를 보이지 않았다. 상수원으로 사용되고 있는 경안천은 조사 기간 동안 모두 250 이상의 높은 전도도를 나타냈다.

생물학적 산소요구량은 전체적으로 0.6~6.9 mg L⁻¹의 범위로서 조사시기에 따른 차이는 보이지 않았으나 경안천(1.6→5.0→6.9)에서는 조사시기에 따라 점차 증가하였고, 용산가족공원(4.6→3.9→2.4)과 분당중앙공원(3.3

Table 3. To be continued.

Species	KBP		KAS		YSP		PTD		HGB		SCR		KDP		YEP		BDP		CHB		ISP		BPB		JAR		SSR		YSS	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<i>Coelastrum</i> sp.									+		+++					++	+		++					+	+					
<i>Coel. sphaericum</i>														+																
<i>Cosmarium</i> sp.					++	+					++					+++			++	+									+++	
<i>Crucigenia</i> sp.									+														+							
<i>Crucigenia tetrapedia</i>			+											+																
<i>Dictyosphaerium</i> sp.								+		+																		+		
<i>Elakatothrix gelatinosa</i>								++					+			+			+			+						+		
<i>Eudorina</i> sp.			+			+					+			++	+					+									+	
<i>Eudorina elegans</i>													+							+										
<i>Golenkinia</i> sp.			+			+			+	+			+			++	+			+		+								
<i>Micractinium</i> sp.									+				+					+						+						
<i>Monoraphidium</i> sp.	+			+		+								+											+			+++		
<i>Mon.griffithii</i>	+													+																
<i>Pandorina</i> sp.								+											+											
<i>Pediastrum biwae</i>											+																			
<i>Ped. boryanum</i>											+++					+			+										+	
<i>Ped. duplex</i>				+		+	+				++	+		+													+			
<i>Ped. simplex</i>	+			+				+		+	++++	++				+				+										
<i>Ped. tetras</i>									++	+						+				+							+			
<i>Scene. acuminatus</i>	++				+		+		++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+									+++		
<i>Scene. acutus</i>																				+									++	
<i>Scene. armatus</i>													+																	
<i>Scene. bernadii</i>								+		+					+															
<i>Scene. denticulatus</i>																														
<i>Scene. disciformis</i>																														
<i>Scene. ecornis</i>												+																		
<i>Scene. obliquus</i>																													+	
<i>Scene. opoliensis</i>														+																
<i>Scene. quadricauda</i>	++	++	+				+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++				++		+					+++			
<i>Scene. quadrispina</i>																													+	
<i>Scenedesmus</i> sp.		+	+			++		+		+					+	+				++	+	+								
<i>Schroederia</i> sp.									+																					
<i>Sphaerocystis</i> sp.								+							+			+												
<i>Staurastrum</i> sp.	+			+				+	++	++	++					++			+			++++	++				+			
<i>Sta. chaetoceras</i>	+																												++	
<i>Sta. cingulum</i>																												+		
<i>Sta. iotantum</i>																											+			
<i>Tetraedron minimum</i>																												+	+	

→ 1.8 → 1.5) 등에서는 점차 감소하는 양상을 보였다. 총 질소는 0.173~5.598 mg L⁻¹범위로서 일산호수공원이 가장 낮고 한강대교 지점이 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 수온이 감소할수록 여의도생태공원(0.07 → 1.2 → 1.9)과 반포인공섬(2.7 → 2.9 → 4.7)은 점차 증가한 반면, 양수리 육각지(0.8 → 0.7 → 0.4)는 오히려 감소하였다. 한편, 총인은 0.0~0.5 mg L⁻¹의 범위로서 조사지점 및 시기에 따라 큰 차이를 나타냈다. 1, 3차 조사에서는 한강대교에서 각각 0.178 mg L⁻¹, 0.315 mg L⁻¹로 최고치를 나타낸 반면, 2차조사에서는 경안천에서 0.504 mg L⁻¹로

최고치를 나타냈다. 수온이 가장 낮았던 3차조사에서는 대부분 낮은 농도를 보였다.

조사기간 동안 Chl-a는 0.2~43.0 mg m⁻³의 범위로서 조사시기 및 지점간 큰 차이를 보였는데, 주암호, 상사호, 일산호수에서 낮게 나타난 반면, 1차 조사에서는 석촌호수(40.6), 여의도공원(43.0), 2차 조사에서는 경안천(11.6), 석촌호수(9.6), 3차 조사에서는 경안천(33.1), 한강대교(22.5), 길동생태공원(18.6), 경복궁(16.8) 등에서 높게 나타났다.

2. 식물플랑크톤 군집특성

조사기간동안 출현된 식물플랑크톤은 총 91 분류군이었으며, 녹조류 45종, 규조류 31종, 남조류 11종, 황색편모조류 2, 갈색편모조류 1, 유글레나류 1종으로 구성되었으며, 종 출현은 조사시기 및 조사지점에 따라 2~26 분류군까지 큰 차이를 나타냈다 (Table 3). 조사시기별로는 1차 조사에서는 64종, 2차 조사 66종, 3차 조사 55종이 각각 출현하였으며, 분류군별로는 녹조류 (30종 → 32종 → 23종), 규조류 (21 → 20 → 23), 남조류 (10 → 10 → 6), 황색편모조류 (1 → 2 → 1), 갈색편모조류 (1 → 1 → 1), 유글레나류 (1 → 1 → 1) 등의 순이었다. 녹조류는, 석촌호수, 양수리 육각지에서, 규조류는 팔당댐, 분당중앙공원, 천호대교, 반포대교에서, 남조류는 경복궁 경회루, 한강대교, 석촌호수, 양수리 육각지에서 집중적으로 출현을 하였으며, 유글레나류는 BOD와 전기전도도가 비교적 높았던 길동생태공원에서 3차례 조사 모두 출현하였다. 각 조사지점별 출현 종 현황을 보면, 전체적으로 석촌호수 (20 → 16 → 18), 길동생태공원 (17 → 20 → 14), 한강대교 (26 → 18 → 6)에서 다양한 종 출현을 보였으며, 일산호수 (12 → 7 → 2), 상사호 (17 → 6 → 5)에서 낮은 분포를 보였다.

식물플랑크톤 총 현존량은 수온감소에 따라 뚜렷하게 감소하였다 (Fig. 2). 1차 조사에서는 양수리 육각지에서 91,116 cells mL⁻¹로 가장 많은 현존량을 나타냈으며, 주로 *Monoraphidium* sp., *M. aeruginosa* 등이 우점하였으며, 일산호수공원이 634 cells mL⁻¹로 가장 낮은 현존량을 보였다. 2차 조사의 경우, 경복궁 경회루에서 268,086 cells mL⁻¹로서 조사 기간 동안 가장 높은 출현을 보였는데, 주로 남조류 *Lyngbya contorta*와 *M. aeruginosa*가 총 현존량의 80%를 차지하였다. 또한 양수리 육각지에서는 *Monoraphidium* sp.과 *M. aeruginosa*가 여전히 높은 밀도를 보였으며, 나머지 지점에서는 규조류 *Aulacoseira granulata*가 우점하였다. 3차 조사에서는 1, 2차 조사에 비해 현저하게 현존량의 감소를 보였으나, 양수리 육각지에서 *Monoraphidium* sp.과 *M. aeruginosa*가 다른 지점에 비해 높은 현존량을 나타냈다. 용산가족공원에서는 *Monoraphidium* sp.가 육각지에 비해 높은 밀도를 보였으며, 일산호수공원에서는 녹조류 *Cosmarium* sp.와 *Chlamydomonas* sp.의 6 cells mL⁻¹ 개체수만이 출현하였다.

3. 남조 우점종의 변동

조사기간 동안 *Microcystis aeruginosa*를 포함하여 남조류가 우점하였던 지점은 경복궁 경회루 (KBP), 석촌호

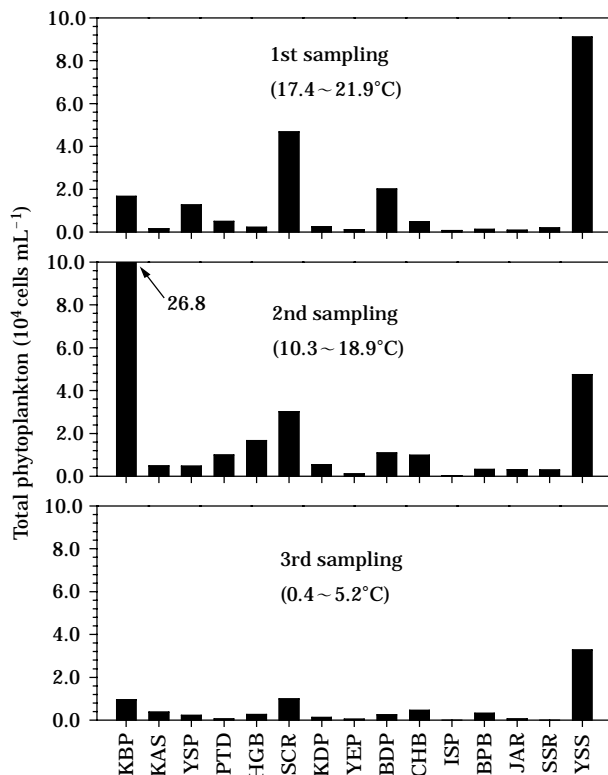


Fig. 2. Standing crops of phytoplankton of 15 sampling sites in Seoul-Kyunggi districts.

수 (SCR), 양수리 육각지 (YSS)의 3개 지점으로 밝혀졌다 (Fig. 3).

1) 경복궁 경회루

1차조사에서 남조류 총현존량은 16,395 cells mL⁻¹로서 총 식물플랑크톤의 99%를 차지하였고, *M. aeruginosa* (165 cells mL⁻¹)는 남조류의 1%정도였다. 2차조사에서 남조류 (268,086 cells mL⁻¹)는 총현존량의 96%를 차지하였고, *M. aeruginosa* (24,200 cells mL⁻¹)는 남조류의 9.4%로 나타났다. 3차조사에서는 남조류가 현저하게 감소하였고 규조류 *Nitzschia acicularis* (9,330 cells mL⁻¹)가 우점하였으며, 남조 *Plectonema* sp. (170 cells mL⁻¹)를 제외한 다른 남조류는 관찰되지 않았다.

2) 석촌호수

1차조사에서 남조류는 27,895 cells mL⁻¹로서 총현존량 (46,720 cells mL⁻¹)의 60%를 차지하였고, *M. aeruginosa* (16,800 cells mL⁻¹)는 남조류의 60%를 차지하였다. 2차 조사에서는 녹조 (*Coelastrum* sp.)와 규조류 (*Asterionella gracillima*, *Fragillaria crotonensis*)가 우점하였는데, 남조류 (2,020 cells mL⁻¹)는 총현존량 (30,098 cells mL⁻¹)의

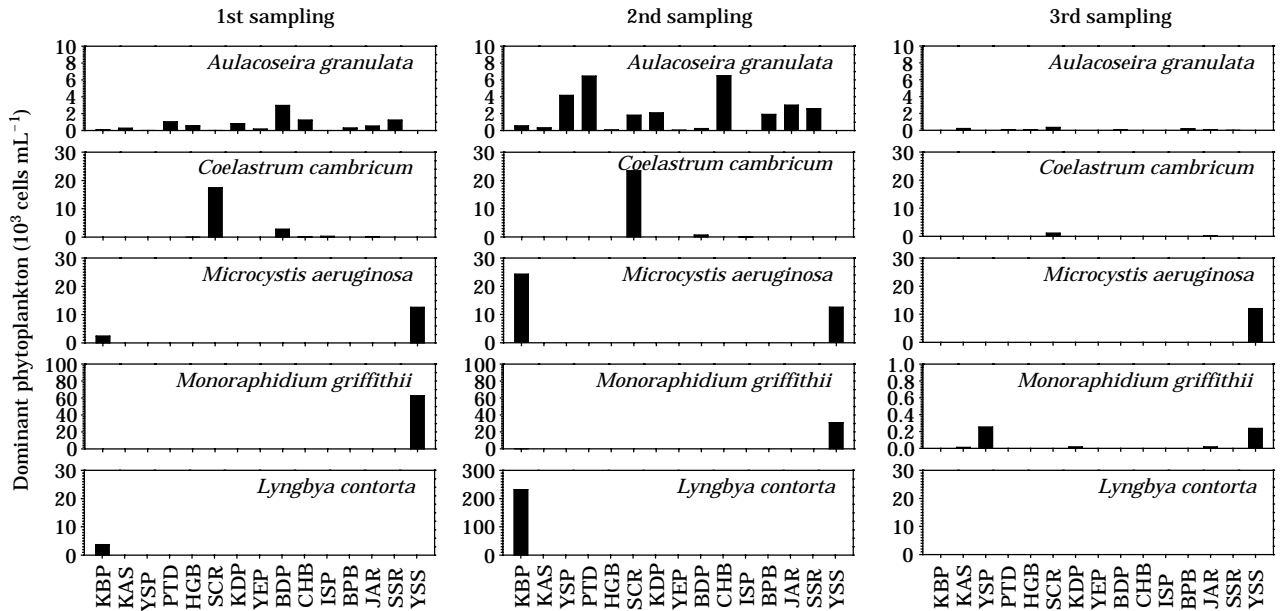


Fig. 3. Abundance of dominant phytoplankton species of 15 sampling sites in Seoul-Kyunggi districts.

6%정도였으며, *M. aeruginosa*는 관찰되지 않았다. 3차조사에서도 남조류는 낮게 나타났는데 (2,160 cells mL⁻¹), 총현존량(9,935 cells mL⁻¹)의 22%였으며, *M. aeruginosa* (1,250 cells mL⁻¹)는 남조류의 약 58%를 차지하였다.

3) 양수리 육각지

1차조사에서 남조 *Microcystis aeruginosa* (12,500 cells mL⁻¹)는 제1우점종으로 총현존량 (91,116 cells mL⁻¹)의 13.7%를 차지하였으며, 다른 남조류는 관찰되지 않았다. 2차조사에서 남조류 (14,690 cells mL⁻¹)는 총현존량 (47,430 cells mL⁻¹)의 30%를 차지하였으며, *M. aeruginosa* (12,500 cells mL⁻¹)는 남조류의 85%를 차지하였다. 3차조사에서도 남조류 (31,880 cells mL⁻¹)가 총현존량 (32,706 cells mL⁻¹)의 98%를 차지하였고, *M. aeruginosa* (12,000 cells mL⁻¹)는 남조류의 27%를 차지하였다.

4. 남조 *Microcystis aeruginosa*와 독소 Microcystin-LR

조사기간 동안 조류독소 (Microcystin-LR, 측정한계, 0.05 µg L⁻¹)는 남조 *Microcystis aeruginosa*의 출현이 높았던 경복궁 경희루, 석촌호수, 양수리 육각지 등 3개 지점에서 높게 검출되었다 (Table 2, Fig. 4). 조체성 (cell-extraction)과 용존성 (dissolved)를 합한 총 독소량은 1차 조사에서는 경복궁 경희루에서 1.39 µg L⁻¹, 석촌호수에서 0.55 µg L⁻¹, 양수리에서 0.59 µg L⁻¹로 각각 높게 나타

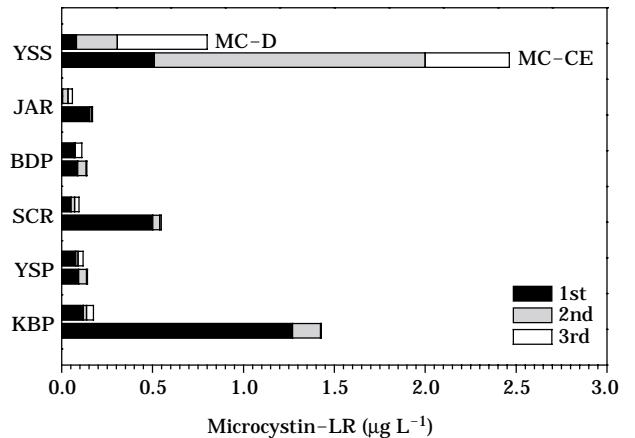


Fig. 4. Microcystin concentrations at 6 sites showing the highest standing crops of phytoplanktons.

났으며, 2, 3차조사에서는 양수리에서만 1.72, 0.96 µg L⁻¹로 각각 검출되었다. 조체성 독소는 1차조사에서는 위에서 언급한 3개 지점 이외에 용산가족공원, 분당중앙공원, 주암호 등에서 소량이 검출되었으며 (<0.1 µg L⁻¹), 2차조사에서는 경복궁과 양수리를 제외한 경안천, 분당중앙공원에서 소량이 검출되었다 (<0.1 µg L⁻¹). 3차조사에서는 양수리 육각지에서만 검출되었다. 한편, 용존성 독소는 1차조사에서는 3개 지점 이외에 용산가족공원, 한강대교, 여의도생태공원, 분당가족공원, 천호대교, 일산호수, 반포

Table 4. The dominant species and dominant index (DI) of phytoplankton community in Seoul-Kyunggi districts.

Sites	1 st sampling	DI	2 nd sampling	DI	3 rd sampling	DI
KBP	<i>Aphanocapsa</i> sp.- <i>Lyngbya contorta</i>	0.83	<i>Lyngbya contorta</i> - <i>Microcystis aeruginosa</i>	0.87	<i>Nitzschia acicularis</i> - <i>Plectonema</i> sp.	1.00
KAS	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> - <i>Aulacoseira granulata</i>	0.42	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> - <i>Microcystis wesenbergii</i>	0.73	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> - <i>Chlamydomonas</i> sp.	0.
YSP	<i>Merismopedia</i> sp.- <i>Golenkinia</i> sp.	0.66	<i>Aulacoseira granulata</i> - <i>Synedra acus</i> sp.	0.08	<i>Closteriopsis longissima</i> - <i>Aphanocapsa</i> sp.	0.58
PTD	<i>Plectonema</i> sp.- <i>Aulacoseira granulata</i>	0.61	<i>Aulacoseira granulata</i> - <i>Phormidium</i> sp.	0.17	<i>Aulacoseira distans</i> - <i>Asterionella gracillima</i>	0.50
HGB	<i>Plectonema</i> sp.- <i>Aulacoseira granulata</i>	0.45	<i>Oscillatoria</i> sp.- <i>Scenedesmus quadricauda</i>	0.57	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> - <i>Aulacoseira solida</i>	0.92
SCR	<i>Microcystis wesenbergii</i> - <i>Coelastrum</i> sp.	0.36	<i>Coelastrum</i> sp.- <i>Merismopedia</i> sp.	0.07	<i>Asterionella gracillima</i> - <i>Fragillaria crotonensis</i>	0.40
KDP	<i>Scenedesmus quadricauda</i> - <i>Aulacoseira granulata</i>	0.40	<i>Aulacoseira granulata</i> - <i>Scenedesmus quadricauda</i>	0.25	<i>Eudorina elegans</i> - <i>Phormidium</i> sp.	0.60
YEP	<i>Aulacoseira granulata</i> - <i>Stephanodiscus</i> sp.	0.12	<i>Scenedesmus quadricauda</i> - <i>Pediastrum duplex</i>	0.49	<i>Chlamydomonas</i> sp.- <i>Dinobryon divergens</i>	0.70
BDP	<i>Scenedesmus quadricauda</i> - <i>Aulacoseira granulata</i>	0.76	<i>Scenedesmus quadricauda</i> - <i>Cosmarium</i> sp.	0.87	<i>Scenedesmus quadricauda</i> - <i>Nitzschia</i> sp.	0.66
CHB	<i>Plectonema</i> sp.- <i>Aulacoseira granulata</i>	0.44	<i>Phormidium</i> sp.- <i>Synedra acus</i>	0.29	<i>Cyclotella</i> sp.- <i>Aulacoseira distans</i>	0.93
ISP	<i>Coelastrum</i> sp.- <i>Oscillatoria</i> sp.	0.12	<i>Oscillatoria</i> sp.- <i>Coelastrum</i> sp.	0.73	<i>Cosmarium</i> sp.- <i>Chlamydomonas</i> sp.	1.00
BPB	<i>Merismopedia</i> sp.- <i>Plectonema</i> sp.	0.49	<i>Aulacoseira granulata</i> - <i>Phormidium</i> sp.	0.23	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> - <i>Synedra acus</i>	0.88
JAR	<i>Aulacoseira granulata</i> - <i>Rhizosolenia longiseta</i>	0.18	<i>Aulacoseira granulata</i> - <i>Melosira distans</i>	0.01	<i>Aulacoseira ambigua</i> - <i>Aulacoseira solida</i>	0.68
SSR	<i>Aulacoseira granulata</i> - <i>Rhizosolenia longiseta</i>	0.21	<i>Aulacoseira granulata</i> - <i>Dictyosphaerium</i> sp.	0.05	<i>Aulacoseira granulata</i> - <i>Aulacoseira solida</i>	0.31
YSS	<i>Monoraphidium</i> sp.- <i>Microcystis aeruginosa</i>	0.69	<i>Monoraphidium</i> sp.- <i>Microcystis aeruginosa</i>	0.65	<i>Aphanocapsa</i> sp.- <i>Microcystis aeruginosa</i>	0.61

Table 5. Correlation coefficients among biological and physicochemical parameters.

	WT	pH	DO	COND	BOD	TN	TP	CMC	DMC	T-phyto	Chl-a	CYANO
pH	0.049											
DO	-0.789	0.030										
COND	-0.024	-0.220	-0.131									
BOD	-0.087	0.094	0.068	0.386								
TN	-0.509	-0.278	0.325	0.094	0.347							
TP	0.029	0.132	-0.207	0.231	0.411	0.283						
CMC	0.218	0.344	-0.083	-0.033	0.094	-0.265	-0.067					
DMC	-0.084	0.366	0.121	-0.149	-0.004	-0.129	-0.184	0.555				
T-phyto	0.307	0.411	-0.264	-0.136	0.064	-0.217	-0.141	0.338	0.098			
Chl-a	0.025	0.007	0.067	0.389	0.438	0.262	-0.040	0.085	0.056	0.128		
CYANO	0.049	0.089	0.045	0.205	0.101	-0.178	0.085	0.139	0.085	0.066	-0.058	
SC-M	0.101	0.425	-0.027	-0.001	0.074	-0.251	-0.027	0.526	0.433	0.470	0.044	0.766

COND: Conductivity, TN: Total Nitrogen, TP: Total Phosphorus, CMC: microcystin by cell extraction, DMC: dissolved microcystin by filtration, T-phyto: total standing crops of phytoplankton, CYANO: Cyanobacteria, SC-M: Standing crops of *Microcystis aeruginosa*. Probability value was significantly $p < 0.05$.

대교에서도 소량이 검출되었으며 ($>0.05 \mu\text{g L}^{-1}$), 2, 3차 조사에서는 조체성 독소와 마찬가지로 각각 양수리 육각지에서만 검출되었다.

조사기간 동안 출현된 남조 *Microcystis aeruginosa*와 조체성 또는 용존성 독소간의 상관성 분석 결과 (Table 5), 남조류 총현존량은 식물플랑크톤 현존량 및 엽록소 *a* 량과는 매우 낮은 상관성을 보인 반면 ($r = 0.066$, $r = -0.058$), 남조 *M. aeruginosa* 현존량과도 밀접한 관계를 보였다 ($r = 0.766$). 또한 남조 *M. aeruginosa*가 높은 출현을 보인 지점에서는 조체성 ($r = 0.526$) 및 용존성 독소 ($r = 0.433$)가 비교적 많이 검출되었다.

고 찰

남조 독소 Microcystin-LR (MCLR)은 다른 유도체에 비해 가장 높은 독성 ($\text{LD}_{50}: 50 \mu\text{g kg}^{-1}$)을 지니며, MCRR 보다 독성이 4배 이상 강하다 (최 등, 1997). 조사 결과, 서울 경기지역 공원 연못 및 한강수계의 MCLR는 국내 다른 지역 (최 등, 1997; NIER, 1998; Srivastava *et al.*, 1999)에 비해 매우 낮은 농도를 나타냈다. 특히 조사기간 중 가장 높은 농도를 보였던 양수리 육각지, 경북궁, 석촌호수 등 역시 수온이 높았던 시기 ($>20^\circ\text{C}$)에만 검출됨으로서, 국내에서 고온기 동안 남조 *Microcystis* 밀도가 높았던 의암호, 옥정호, 합천댐, 안동댐 (김 등, 1999)이나 낙동강 (최 등, 1997; NIER, 1998; Srivastava *et al.*, 1999)에 비하면, 약 1/100~1/1,000 정도로 낮은 수준이었다. 한강수계 (김 등, 1999)와는 비슷한 수준이었다.

조류독소가 높았던 3개 지점에서의 MCLR는 대부분 조체성이었으나 *Microcystis aeruginosa* 세포밀도가 낮거나 관찰되지 않은 지점에서도 소량의 용존성 MCLR가 검출되었다. 이들 대부분은 정수과정을 거치는 동안 소멸되지만, 조류제거 과정이 없는 간이정수장 등에서는 검출될 가능성이 높다 (김 등, 1999). 최근 4년간 한강수계의 남조는 하절기 집중 강우와 팔당댐의 높은 방류량에 밀도가 점차 감소하고 있으며 (서 등, 2005), 이, 취미가 문제되고 있을 뿐 (Yoo *et al.*, 1994), 조류독소에 의한 사람이나 동물에게 심각한 피해를 줄 정도는 아닌 것으로 판단되었다.

전체적으로 독소 MCLR는 *Microcystis aeruginosa*의 현존량과 상관성을 나타냈다. 이러한 결과는 3개 지점에서 더욱 뚜렷하였는데, 조체밀도와 상관성이 높다는 Kotak *et al.* (1995), Park *et al.* (1996)의 연구결과와도 일치한다. 뿐만 아니라 MCLR이 높았던 지점에서는 *Lyng-*

bya contorta, *Aphanocapsa* sp., *Oscillatoria* sp., *Phormidium* sp. 등과 같은 남조류가 높게 출현하였는데, 이 중 *Oscillatoria* sp. 역시 MCLR을 생성하는 대표적인 종으로 알려져 있다 (Carmichael, 1992, 1994; Codd, 1994; Yoo *et al.*, 1994; Bagchi, 1996).

매년 고온기 동안 남조 *Microcystis aeruginosa*가 높은 밀도를 보였던 주암호의 경우 (Kim, 2004), 1차조사에서만 소량 ($0.15 \mu\text{g L}^{-1}$)이 검출되었을 뿐 저온기에는 극히 낮았다. 이에 반해, 주말이나 휴일에 많은 사람이 찾아오는 경북궁 경희루, 석촌호수, 분당중앙공원, 용산가족공원 등에서는 소량이긴 하나 MCLR이 지속적으로 검출되었으며, 수온이 더욱 낮아지면 대부분 수계에서 검출한계 이하이거나 검출되지 않았다. 따라서 수온이 낮아질수록 남조류의 감소와 함께 조체성 또는 용존성 MCLR가 감소되었으며 규조류가 높았던 천호대교, 반포대교, 한강대교에서는 조체성 독소보다 용존성 독소가 상대적으로 더 높았다.

조사기간 중 *Microcystis aeruginosa*의 높은 현존량과 microcystin-LR량을 보였던 양수리 육각지와 경북궁 경희루, 석촌호수 등은 대부분 인공적으로 조성된 소형연못으로서 체류시간이 길고 인근 녹지와외의 네트워크가 형성되어 있지 않으며 수처리 시설이 없는 공통점을 가지고 있다. 특히 이들은 강우기에도 외부로부터 수체순환이 일어나지 않고 증발이나 지하침투 등으로 인하여 수위가 낮아지면 지하수나 수돗물을 직접 보충하여 유지하고 있다. 경북궁 경희루, 석촌호수의 경우, 매년 고온기에 *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria* 등의 남조류가 대발생하며 (한양대, 2002; 윤 등, 2004) 경북궁 경희루 역시 바닥층의 산소고갈과 영양염 용출로 인하여 여름철 남조류가 우점하는 특징을 나타내고 있다 (윤 등, 2004). 따라서 서울-경기지역 공원 연못이나 한강수계의 조류독소 (MCLR)의 농도가 비록 낮을지라도 남조 대발생이 우려되는 소형 연못등의 효율적인 수자원 관리대책이 시급하다고 판단되었다.

적 요

서울 경기지역 공원 연못 및 한강 수계내의 수중 조류독소 Microcystin (MC)의 분포를 파악하기 위하여, 수도권 공원 연못 7개소, 한강수계 4개소, 경안천 1개소, 양수리 육각지 1개소, 대조군 2개소를 포함 총 15개 지점을 대상으로 강우가 적은 저온기 동안, 3차례에 걸쳐 수중내 환경요인, 조류 현존량, 조류 독소량을 조사하였다. 조

류독소는 유도체중 가장 독성이 강한 Microcystin-LR (MCLR)만을 대상으로 하였으며 ELISA법으로 분석하였다. 조사기간 동안 수온(0.4~21.9°C)을 비롯한 대부분의 환경요인들은 계절성과 지역성이 뚜렷하였다. 조류 현존량은 수온 변화에 민감하였고 ($r = 0.307$), *Microcystis aeruginosa*를 포함하여 남조류는 경북궁 경회루, 석촌호수, 양수리 육각지 등에서 우점하였다. 조류독소 MCLR (측정한계 $0.05 \mu\text{g L}^{-1}$)는 남조 *Microcystis aeruginosa* 출현이 높았던 지점에서 높게 검출되었으며, 조체성과 용존성을 합한 총 MCLR은 1차조사시 경북궁 경회루 ($1.39 \mu\text{g L}^{-1}$), 석촌호수 ($0.55 \mu\text{g L}^{-1}$), 양수리 육각지 ($0.59 \mu\text{g L}^{-1}$)에서 각각 높게 나타났으나, 2, 3차 조사에서는 양수리 육각지에서만 검출되었다. 남조류 총현존량은 조류 현존량 ($r = 0.066$)이나 엽록소 *a*량 ($r = -0.058$)과는 낮은 관계를 보였으며, *M. aeruginosa* 현존량 ($r = 0.766$)과는 매우 높은 관계를 나타냈다. 조류독소 MCLR은 남조 *M. aeruginosa* 현존량이 높았던 지점에서 높게 검출되었다 (조체성: $r = 0.526$, 용존성: $r = 0.433$). 따라서, 서울, 경기지역 공원 연못이나 한강수계의 조류독소는 주로 정체성 연못에서 남조 *Microcystis aeruginosa*에 의해 형성되지만, 여가활동이나 상수원 공급에는 위험성이 낮은 것으로 판단되었다.

감사의 말씀

본 연구의 원활한 수행을 도와주신 경북공관리사무소, 한강물환경연구소, 주암댐관리사무소, 길동생태공원관리사무소, 한강시민공원사업소 관계자 여러분께 심심한 사의를 포함합니다. 본 연구는국가지정연구실사업 (2000-N-NL-01-290)의 지원을받아 수행하였습니다.

인 용 문 헌

김범철, 김은경, 표동진, 박호동, 허우명. 1995. 국내호수에서의 남조류 독소발생. 한국수질보전학회지. **11**: 231-237.
 김범철, 김호섭, 박호동, 최광순, 박종근. 1999. 국내 호수에서 발생한 남조류의 microcystin 함량과 독성평가. 한국육수학회지 **32**: 288-294
 서미연, 김교봉, 김린태, 길혜경, 유승성, 김두래, 윤호균, 류동구, 이종현, 배경석, 김민영. 2000. 한강하류의 부영양화에 관한 환경생태적 연구. 서울시보건환경연구원보. **36**: 361-367.
 서미연, 김백호, 배경석, 한명수. 2005. 한강 하류의 남조류 및 환경요인의 년간 (2000~2003)변화에 대하여. 한국육수학회지 **38**: 315-321.

윤춘경, 황순진, 김호섭, 정광욱, 구원석, 유경아. 2004. 경북궁 수환경조사 보고서. 문화재청 경북공관리사무소.
 조항문, 임경미, 김미형, 심효석. 2001. 서울시 도시공원내 연못 수질관리 방안. 서울시정개발연구원. 171
 최병욱, 노영호, 이종수. 1997. 한국산 남조류 *Microcystis*로부터 생산된 Microcystin 구조와 생물활성에 관한 연구. 공업화학 **8**: 610-616.
 한양대학교. 2002. 석촌호수 수질관리 종합대책에 관한 연구 용역보고서. 한양대학교 자연과학연구소.
 환경부. 2004. 수질오염공정시험방법.
 Abé, T.H. 1981. Studies on the order Peridiniidae an unfinished monograph of the armoured dinoflagellata. The Nippon Printing and Publishing Co., Tokyo.
 Akiyama, M.T., K. Loiya, H. Imahori, S. Kasaki, H. Kumano, E. Kobayashi, K. Yakahashi, M. Tsumura, H. Hirano, T. Hirose and Yamagishi. 1981. Illustration of the Japanese Freshwater Algae. Uchidarockakuho Publishing Co., Tokyo.
 Bagchi, S.N. 1996. Cyanobacterial toxins. *J. Sci. Ind. Res.* **55**: 715-727.
 Carmichael, W.W. and R.S. Saffermann. 1992. A status report on planktonic cyanobacteria (blue-green algae) and their toxins. EPA/600/R92/079.
 Carmichael, W.W. 1994. An overview of toxic cyanobacteria research in the united states. In *Toxic cyanobacteria: current status of research and management*. Ed. Steffensen D.A. and Nicholson B.C. Australian Center for Water Quality Research, Salisbury, Australia.
 Carmichael, W.W., V.R. Beasley, D.L. Bunner, J.N. Eloff, I. Falconer, P. Gorham, K-I. Harada, T. Krishnamurthy, M.-J. Yu, R.E. Moore, K.L. Rinehart, M. Runnegar, O. M. Skulberg and M.F. Watanabe. 1988. Naming of heptapeptide toxins of cyanobacteria (blue-green algae). *Toxicon* **26**: 971-973.
 Codd, G.A. 1994. Toxic blooms of cyanobacteria in lake Alexandrina, South Australia-Learning from history. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.* **45**:731-736.
 Cox, E.J. 1996. Identification of freshwater diatom from live material. Chapman & Hall. London.
 Kaya, K. and T. Sano. 1999. Total microcystin determination using erythro-2-methyl-3-(methoxy-d₃)-4-Phenylbutyric acid (MMPB-d₃) as the internal standard. *Anal. Chim. Acta.* **386**: 107-112.
 Kim, B.H. and S.O. Hwang. 2004. The structure of the plankton community and the cyanobacteria bloom during the rainy season in mesoeutrophic lake (Lake Juam), Korea. *Kor. J. Sanit.* **19**: 51-59.
 Kotak, B.G., A. K-Y. Lam and E.E. Prepas. 1995. Variability of the hepatotoxin microcystin-LR in hypereu-

- trophic drinking water lakes. *J. Phycol.* **31**: 248–263.
- Krishnamurthy, T., W.W. Carmichael and E.W. Sarver. 1986. Investigations of freshwater cyanobacteria (blue-green algae) toxic peptides. I. Isolation, purification and characterization of peptides from *Microcystis viridis*. *Tetrahedron Lett.* **26**: 4695–4698.
- Kuiper–Goodman, S. Tine, H. Gupta, Combley and B.H. Thomas. 1994. Microcystins in drinking water. Risk assessment and derivation of a possible guidance value for drinking water. In *Toxic cyanobacteria : current status of research and management*. Ed. D.A. Steffensen and B.C. Nicholson. Australian Center for Water Quality Research, Salisbury, Australia.
- Lee, J.A., V.C. Srivastava, A.R. Choi, W. Kim and M.J. Park. 1998. Composition of microcystin from cyanobacteria water blooms of the Sonatong Reservoir, Korea. *Kor. J. Limnol.* **31**: 251–257.
- Nagata, S., T. Tsutusmi, A. Hasegawa, F. Yoshida and Y. Ueno. 1997. Enzyme Immunoassay for direct determination of microcystins in environmental water. *J. Assoc. Off. Anal. Chem. Int.* **80**: 408–417.
- NIER (National Institute of Environmental Research). 1998. *A survey on the blue-green algal toxins in the Nakdong River and toxin removal approaches*. Seoul, Korea. 300pp.
- Park, M.J., I.Y. Hwang, A.R. Choi and J.A. Lee. 1996. A study on the blue-green algal toxin of the Sonaktong Reservoir. *Algae.* **11**: 149–154.
- Srivastava, V.C., A.R. Choi, W. Kim and J.A. Lee. 1999. Horizontal and vertical distribution of protein phosphatase inhibitions of microcystin class in the Nakdong River, Korea. *Algae.* **14**: 67–72.
- Vasconcelos, V.M., K. Sivonen, W.R. Evans., W.W. Carmichael and M. Namikoshi. 1996. Hepatotoxic microcystin diversity in cyanobacteria blooms collected in Portuguese Freshwaters. *Wat. Res.* **30**: 2377–2384.
- Watanabe, M.F., K.-I. Harada, K. Matsuura, M. Watanabe and M. Suzuki. 1989. Heptapeptide toxin production during the batch culture of two *Microcystis* species (cyanobacteria). *J. Appl. Phycol.* **1**: 161–165.
- Watanabe, M.F., K.-I. Harada, W.W. Carmichael and H. Fujiki. 1996. *Toxic Microcystis*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- WHO. 1998. Guidelines for drinking water quality, addendum to volume 1: Recommendations. WHO, Geneva, Switzerland.
- Yasuno, M., Y. Sugaya, K. Kaya and M.M. Watanabe. 2000. Variations in the toxicity of *Microcystis* species to *Moina macrocopa*. In: Watanabe, M.M., Kaya, K. (Eds.), *Advances in Microalgal and Protozoal Studies in Asia*. Global Environmental Forum, Tsukuba, National Institute for Environmental Studies, Japan, pp. 43–51.
- Yoo, R.S., W.W. Carmichael, R.C. Hoehn and S.E. Hrudey. 1994. *Cyanobacteria (blue-green algal) toxins: a resource guide*. AWWARF, Denver, USA.

(Manuscript received 6 April 2005,
Revision accepted 6 May 2005)