

수도권 주요 공원 연못의 수질 특성과 남조류 대발생

박명환¹ · 서미연² · 황순진¹ · 김용재³ · 한명수⁴ · 김백호^{1,4,*}

(¹건국대학교 환경과학과, ²서울시 보건환경연구원,
³대진대학교 생명과학과, ⁴한양대학교 생명과학과)

Cyanobacterial Blooms and Water Quality of Major Recreational Park Ponds in the Capital Region. Park, Myung-Hwan¹, Mi-Yeon Suh², Soon-Jin Hwang¹, Yong-Jae Kim³, Myung-Soo Han⁴ and Baik-Ho Kim^{1,4,*} (¹Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; ²Seoul Metropolitan Government, Research Institute of Public Health and Environment, Seoul 137-130, Korea; ³Department of Life Science, Daejin University, Gyeonggi 487-711, Korea; ⁴Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea)

The seasonal dynamics of phytoplankton and water quality were evaluated bimonthly at 7 park ponds in the capital region from October 2004 to August 2005. With out the change of water temperature (0.4~26.0°C), cyanobacteria dominated in park ponds such as Gyungbokgung Gyunghyaeru and Seokchon reservoir. The standing crops of phytoplankton was significant related with cell densities of cyanobacteria ($r=0.993$), while they did not significant correlation with environmental factors. Almost of all park ponds in the capital region were classified as eutrophic state with high TP concentrations and TN/TP ratios less than 10. Major dominant cyanobacteria were as followed; *Anabaena* sp., *Aphanocapsa elachista*, *Lyngbya contorta*, *Merismopedia elegans*, *Microcystis aeruginosa*, *M. wesenbergii*, *Microcystis* sp., *Oscillatoria* sp., *Phormidium tenue*, and *Plectonema* sp. To date, although the concentration of chlorophyll-*a* and cyanobacterial densities in the capital region was below the 'danger' level of WHO guidelines value, the monitoring of cyanobacterial densities and its toxin (microcystin) in recreational/bath water should be continued.

Key words : capital region, park ponds, cyanobacterial bloom, water quality

서 론

급속한 경제발달과 더불어 개발위주의 도시화로 인해 오늘날의 도시는 점차 인공적이고 메마른 공간으로 변모 되었으며, 열악해진 도시환경 개선과 생활수준 향상으로 인한 여가활동 수요의 증가에 따라 도시 내에 생태적 공간인 공원의 확보가 주요 관심사로 등장하고 있다(이와 문, 2001). 공원은 시민들의 휴식 및 여가공간으로 활용 될 수 있을 뿐만 아니라 도시공해를 감소시키는 역할을

함으로써 시민들에게 직·간접적인 이익을 제공한다. 또한 공원은 도시의 미관 및 경관을 개선시키고 자연환경 및 생태계를 보존 유지하는 역할을 담당하는 역할을 할 뿐만 아니라 도시의 인공적 환경 속에서 자연의 일부를 끌어들이 자연과 인공의 조화를 창출하고, 쾌적성과 보건, 안전성에 이바지함으로써 인간의 정서함양에도 도움이 된다(김, 2007). 이러한 공원 내에 포함되는 수공간인 연못은 비교적 규모가 작아 인공적으로 조성이 용이한 편이므로 많은 공원 내에는 연못이 확보되어 있으며, 공원 연못은 단순히 도시환경의 개선차원뿐만 아니라 다양

* Corresponding author: Tel: 02) 452-3749, Fax: 02) 452-3749, E-mail: white-t@hanmail.net

한 동·식물의 서식처로서 생물다양성 증진에도 그 효과가 있다(이와 장, 2000; 이와 문, 2001).

그러나 크고 작은 공원 연못에서 대발생하는 조류(algae)는 비경제적 수처리 과정을 요구하고, 경관악화나 이·취미 또는 조류독소에 의한 생태계 파괴 및 보건학적 위험성은 21세기 새로운 환경문제의 하나이다. 서울시를 포함한 수도권에서 시민들의 생태공원으로 이용되는 각종 공원 내 소형 연못 등은 점차적으로 오염이 심화되어 조류발생 빈도의 증가와 더불어 조류독소가 검출되고 있다(조 등, 2001; 서 등, 2005). 그럼에도 불구하고, 지금까지 수도권 공원 연못에 대한 수질 및 생태조사는 매우 부족한 실정이다.

최근까지 소규모 연못의 수질 및 생태와 관련하여 여러 연구자들에 의해 조사가 이루어졌지만, 여가 활용 공간의 하나인 골프장 연못과 관련한 연구(박 등, 2001; Ahn *et al.*, 2003; 김과 안, 2005; 고 등, 2006; 안과 김, 2006), 대학교 공간 내의 연못에 대한 연구(정과 김, 1982; 김 등, 1998; 김 등, 2003; 김 등, 2004), 연못 내 서식 생물 중 수생식물과 수서곤충 등에 대한 연구(이와 장, 2000; 황 등, 2005)가 대부분이었으며, 수도권에 분포하는 주요 공원 연못의 수질변화와 조류에 대한 연구는 거의 없다(서 등, 2005). 또한 수도권 주요 연못은 많은 사람들이 휴식공간으로 이용하는 장소임에도 불구하고, 공원 연못의 영양상태 파악에 대한 연구는 매우 적은 편이고, 상수원과 농업용수로 이용되는 수계의 조류 및 영양상태 평가를 위한 연구들은 활발하게 진행되었다(김, 1996, 1999; 서 등, 2003; 정 등, 2004; 박, 2005; 유 등, 2005). 서울시에는 20여 개에 가까운 생태 공원연못이 분포하고 있는데, 부영양화가 증가되고, 관리 소홀이나 가뭄과 같은 조건이 장기화된다면, 남조류 대발생과 이에 따른 독소 증가의 가능성이 매우 높으며(서 등, 2005), 공원을 이용하는 사람들에게 건강과 심미적인 악영향을 끼칠 수 있다.

따라서 상수원과 농업용수뿐만 아니라 공원 연못 등에서의 수질 평가를 위한 기초적 연구도 필요하다고 판단

된다. 본 연구의 목적은 2004~2005년 동안 수중의 기초 환경 요인 및 식물플랑크톤 조사를 통해 수도권 지역에 위치한 주요 공원 연못의 연중 식물플랑크톤 변동과 수질을 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점 및 기간

조사지점은 수도권 지역 주요 공원 연못인 경복궁 내 경회루, 용산가족공원, 석촌호수, 길동생태공원, 여의도 생태공원, 분당중앙공원, 일산호수공원 등 7개 지점을 선정하였다(Fig. 1). 이들 연못 중 일산호수공원, 분당중앙공

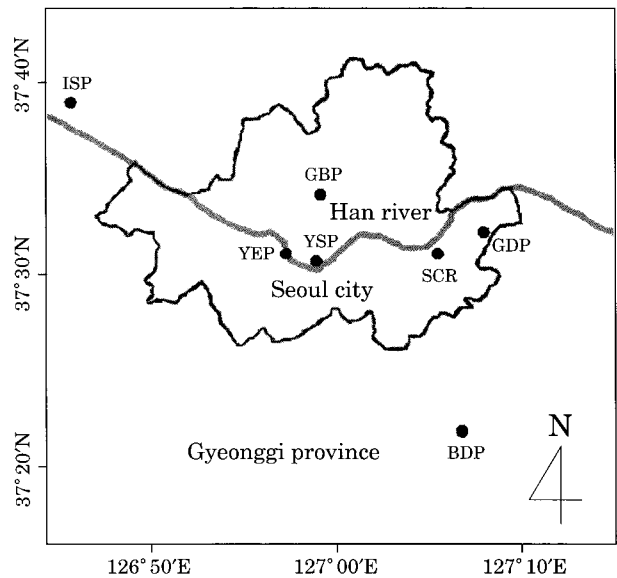


Fig. 1. A map showing the 7 sampling sites. GBP, Gyeongbok palace; YSP, Yongsan park; SCR, Seokchon reservoir; GDP, Gildong eco. park; YEP, Yeouido eco. park; BDP, Bundang central park; ISP, Ilsan lake-park.

Table 1. Physical characteristics of major park ponds in the capital region.

Sites	Symbol	Area (m ²)	Storage (m ³)	Avg. depth (m)	Types of sediments	Water resources
Gyeongbok palace	GBP	11,613	700	1.9	Silt, clay	Ground water
Yongsan park	YSP	6,708	6,000	0.5~2	Silt, mud	Tap water
Seokchon reservoir	SCR	147,400	737,000	4~5	Silt, clay	Han river
Gildong eco. park	GDP	4,900	2,530	1~2.5	Silt, mud	Ground water
Yeouido eco. park	YEP	580	476	0.8	Silt, mud	Ground water
Bundang central park	BDP	420,989	127,347	1~1.5	Silt, mud	Yuldong reservoir
Ilsan lake-park	ISP	300,000	453,000	0.5~3	Silt, mud, sand, clay	Han river/Koyang city

원, 석촌호수는 다른 공원 연못들에 비해 규모가 큰 편에 속하고, 평균수심이 4~5m 정도인 석촌호수를 제외하면 대부분 공원 연못의 평균수심은 2m를 넘지 않았으며, 바닥의 퇴적물은 주로 입자가 작은 silt, mud, clay와 같은 물질이 존재하는 특징을 보였다(Table 1). 현장 조사는 2004년 10월부터 2005년 8월까지 매 2개월 간격으로 총 6회 실시하였다.

2. 수중 환경요인의 분석

환경요인 중 수온, pH, 용존산소 측정은 휴대용 다항목 수질측정기(YSI 610-D, USA)를 이용하여 현장에서 직접 측정하였다. 생물학적 산소요구량(BOD)과 영양염은 5L 반돈 채수기를 이용하여 현장수 4L를 폴리에틸렌 채수통에 넣고 아이스박스에 보관 후 실험실로 운반하여 분석하였다.

BOD는 현장수 300 mL를 2개의 BOD병에 넣고 한 개는 초기 용존산소를 측정하고, 나머지 BOD병은 20°C BOD 배양기에서 5일간 배양 후 용존산소를 측정하여 초기 용존산소 소모량으로 유기물을 산정하였다. 영양염 분석을 위한 시료는 각 정점 표층에서 약 10 cm 아래의 물을 채수하여 산처리된 폴리에틸렌병(1L)에 담아 실험실로 운반한 후 GF/F filter로 여과하여 분석하였다. 총질소(TN)는 persulfate법에 따라 시료에 포함되어 있는 모든 질소를 질산염으로 산화시킨 후 분석하였고, 총인(TP)은 persulfate법에 따라 인을 무기 인산염으로 산화시킨 후 분석하였다(APHA, 1995). 엽록소-a의 농도는 현장수 500 mL를 GF/filter를 이용하여 여과한 시료에 90% 아세톤을 가하여 냉암소에서 24시간 추출한 후 2,000 rpm에서 20분간 원심분리하고 상등액을 취하여 범용분광광도계(DU 800, Beckman Coulter, Inc., Fullerton, California, USA)를 사용하여 다중파장에서 측정하

Table 2. Physicochemical factors of major park ponds in the capital region.

	Time*	GBP	YSP	SCR	GDP	YEP	BDP	ISP		Time	GBP	YSP	SCR	GDP	YEP	BDP	ISP	
WT	1	21.2	20.3	21.0	17.4	17.5	19.0	20.5	TN	1	0.797	0.720	1.027	1.776	0.672	0.653	0.173	
	2	13.5	12.8	14.3	10.3	12.4	14.3	13.3		2	0.499	0.346	0.509	0.950	1.171	0.730	0.336	
	3	5.2	3.8	0.4	3.2	4.3	1.3	2.4		3	2.717	1.958	1.824	3.389	2.976	2.333	1.411	
	4	8.4	9.2	6.8	9.2	8.4	9.8	7.9		4	0.096	0.020	0.269	0.020	0.758	0.106	0.010	
	5	24.4	25.5	22.9	24.5	22.4	23.2	25.5		5	0.662	0.509	1.123	0.442	0.720	0.787	0.077	
	6	22.5	22.2	26.0	21.3	21.6	23.2	23.1		6	1.766	0.586	0.826	0.691	0.768	1.584	0.595	
pH	1	8.1	8.7	9.8	8.3	7.7	9.1	8.4	TP	1	0.125	0.134	0.086	0.077	0.072	-	-	
	2	8.5	9.2	9.6	9.0	8.1	8.7	8.8		2	0.206	0.187	0.288	0.269	0.192	0.034	0.13	
	3	7.8	8.3	8.2	7.8	8.0	8.7	8.6		3	0.037	0.046	0.056	0.074	0.046	0.056	0.009	
	4	8.7	8.9	9.3	8.9	8.4	9.1	8.9		4	0.523	0.254	0.326	0.043	0.326	0.029	0.125	
	5	8.7	8.5	8.9	8.1	7.4	8.3	9.0		5	0.067	0.053	0.154	0.091	0.024	0.024	0.024	
	6	8.2	8.0	9.0	7.9	7.3	8.8	8.6		6	0.053	0.072	0.038	0.168	0.106	0.038	0.288	
DO	1	11.1	10.0	9.7	9.1	5.5	11.5	9.2	TN/TP	1	6.4	5.4	11.9	23.1	9.3	-	-	
	2	12.1	11.3	10.8	9.7	6.3	11.7	10.9		2	2.4	1.9	1.8	3.5	6.1	21.5	2.6	
	3	14.6	15.9	14.0	14.0	14	15.5	14.5		3	73.4	42.6	32.6	45.8	64.7	41.7	156.8	
	4	11.0	11.2	12.0	12.3	10.0	12.2	10.6		4	0.2	0.1	0.8	0.5	2.3	3.7	0.1	
	5	14.8	11.4	12.1	8.9	13.2	12.1	11.8		5	9.9	9.6	7.3	4.9	30.0	32.8	3.2	
	6	10.5	7.9	9.4	9.0	3.4	10.4	9.0		6	33.3	8.1	21.7	4.1	7.2	41.7	2.1	
Cond.	1	354	222	126	297	497	148	122	Chl-a	1	25.4	27.8	40.6	19.8	43	13.8	2.1	
	2	371	245	128	299	508	156	127		2	4.3	6.0	9.6	7.8	2.7	2.9	1.1	
	3	387	319	120	290	300	150	147		3	16.8	9.5	7.4	18.6	10.9	5.0	2.5	
	4	47	40	19	31	58	29	17		4	12.1	12.9	14.9	13.2	5.2	4.9	0.3	
	5	374	276	166	305	565	215	160		5	19.1	8.1	21.2	7.5	6.6	15.3	3.0	
	6	318	189	155	232	365	167	135		6	43.2	37.8	13	20.7	25.8	34.7	2.4	
BOD	1	3.2	4.6	2.2	2.6	2.6	3.3	0.8	WT, water temperature (°C); DO, dissolved oxygen (mg L ⁻¹); Cond, electric conductivity (μS cm ⁻¹); BOD, biochemical oxygen demand (mg L ⁻¹); TN & TP, total nitrogen and phosphate (mg L ⁻¹); TN/TP, TN/TP ratio; Chl-a, Chlorophyll a (μg L ⁻¹).									
	2	3.2	3.9	2.4	4.9	0.9	1.8	1.2										
	3	1.9	2.4	2.7	3.7	2.0	1.5	0.7										
	4	2.3	3.2	3.1	3.1	1.3	1.7	1.5										
	5	5.4	3.0	2.4	3.6	1.6	3.4	1.7										
	6	2.6	3.2	1.3	3.5	1.7	2.4	1.1										

WT, water temperature (°C); DO, dissolved oxygen (mg L⁻¹); Cond, electric conductivity (μS cm⁻¹); BOD, biochemical oxygen demand (mg L⁻¹); TN & TP, total nitrogen and phosphate (mg L⁻¹); TN/TP, TN/TP ratio; Chl-a, Chlorophyll a (μg L⁻¹).

*1, Oct. 2004; 2, Dec. 2004; 3, Feb. 2005; 4, Apr. 2005; 5, Jun. 2005; 6, Aug. 2005.

였으며, Lorenzen법 (1967)에 따라 계산하였다. 연못의 영양상태는 엽록소-*a*, 총질소(TN), 총인(TP) 농도를 이용해 Carlson (1977)과 Kratzer and Brezonik (1981)가 제시한 영양상태지수(TSI)를 기준으로 하여 평가하였다.

3. 식물플랑크톤 분석

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

결 과

1. 환경요인

2004년 10월부터 2005년 8월 사이의 조사시기 동안 물리, 화학적 환경요인들의 변화는 Table 2와 같다. 수온은 전체적으로 0.4~26.0°C의 변화를 보였으며, 1차 조사인 2004년 10월에 17.4~21.2°C, 2차 조사인 2004년 12월에 10.3~14.3°C, 3차 조사인 2005년 2월에 0.4~5.2°C, 4차 조사인 2005년 4월에 6.8~9.8°C, 5차 조사인 2005년 6월에 22.4~25.5°C, 6차 조사인 2005년 8월에 21.3~26.0°C의 범위를 나타내었으며 조사시기에 따른 계절성이 뚜렷하였다. 용존산소는 전체적으로 3.4~15.9 mg L⁻¹의 범위로서, 수온이 가장 낮았던 3차 조사(14.0~15.9 mg L⁻¹)에서는 각 지점간 큰 차이를 보이지 않았다. pH는 7.3~9.8의 범위를 보였으며, 석촌호수는 조사기간 동안 평균 pH 9.1로서 다른 지역 공원 연못보다 높은 pH를 나타냈다. 전기전도도(electric conductivity)는 17~565 μS cm⁻¹ 범위로서 조사 기간 및 지점간에 큰 차이를 나타냈는데, 여의도 공원은 조사기간 동안 평균 382 μS cm⁻¹로서 다른 지역 공원 연못보다 매우 높은 전기전도도를 나타냈다. 생물학적 산소요구량은 전체적으로 0.7~5.4 mg L⁻¹의 범위를 나타냈고, 각 지점간 큰 차이를 보이지 않았다. 총질소는 조사기간 동안 0.01~3.39 mg

L⁻¹ 범위로 나타났다. 한편, 총인은 0.024~0.523 mg L⁻¹의 범위로서 조사지점 및 시기에 따라 큰 차이를 보였는데, 경복궁 경회루와 석촌호수는 조사기간 평균 0.169 mg L⁻¹, 0.158 mg L⁻¹를 각각 나타내며 다른 지점보다 좀더 높은 농도를 나타냈다. TN/TP비는 0.1~156.8로 조사되었으며, 각 지점별 평균 TN/TP비는 11.3~32.9로서 분당중앙공원을 제외한 대부분의 연못에서 10 이하의 낮은 TN/TP비를 나타냈다. 조사기간 동안 엽록소-*a*는 0.3~43.2 μg L⁻¹의 범위로서 조사시기 및 지점간 큰 차이를 보였다.

2. 식물플랑크톤의 종조성 및 우점종

조사기간동안 출현된 식물플랑크톤은 총 90종이었으며, 녹조류 48종, 규조류 23종, 남조류 11종, 와편모조류 4종, 황색편모조류 2종, 갈색편모조류 1종, 유글레나류 1종으로 구성되었으며, 종 출현은 조사시기 및 조사지점에 간에 차이를 나타냈다(Table 3). 조사시기별로는 1차 조사에서는 44종, 2차 조사 54종, 3차 조사 36종, 4차 조사 25종, 5차 조사 36종, 6차 조사 46종이 각각 출현하여 2차 조사인 2004년 12월에 가장 많은 출현종수가 기록되었는데, 이때에 출현한 종은 녹조류와 규조류가 대부분이었다. 조사지점별로는 경복궁 내 경회루 38종, 용산가족공원 37종, 석촌호수 37종, 길동생태공원 43종, 여의도 생태공원 35종, 분당중앙공원 43종, 일산호수공원 26종이 각각 출현하여 길동생태공원과 분당중앙공원에서 가장 많은 출현종수가 기록되었다.

녹조류는 지점간 출현종수의 차이가 거의 없었으나 엽록소-*a* 농도가 가장 낮았던 일산호수공원에서 가장 적은

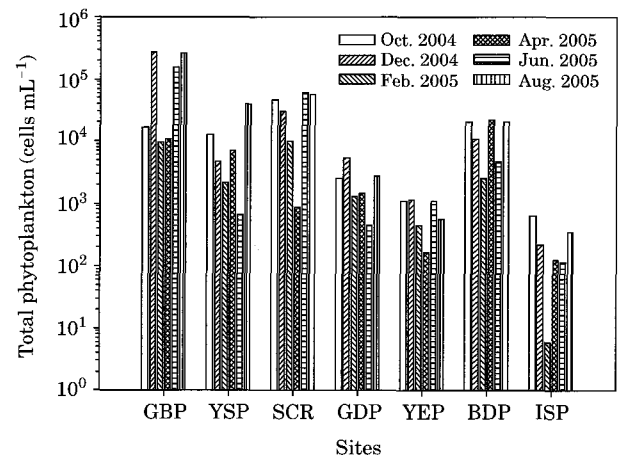


Fig. 2. Standing crops of phytoplankton of major park ponds in the capital region.

10종이 출현했고, 규조류는 조사지점별로는 8~14종이 출현하여 지점간 큰 차이가 없었으며, 남조류는 경복궁 경회루, 용산가족공원, 석촌호수에서 집중적으로 출현을 하였다. 와편모조류는 5차 조사와 6차 조사에서만 출현하였으며, 황색편모조류, 갈색편모조류, 유글레나류는 시기별, 지점별로 고르게 출현하였다.

식물플랑크톤의 총 현존량 분포는 각 지점별로 뚜렷하

게 나타났다(Fig. 2). 경회루에서 평균 총 현존량이 가장 높게 나타났으며 2004년 12월과 2005년 8월에 각각 2.7×10^5 cells mL⁻¹과 2.6×10^5 cells mL⁻¹의 범위였고, 이때 *Lyngbya contorta*, *Microcystis aeruginosa*, *M. wesenbergii*와 같은 남조류가 총 현존량 중 95% 이상을 차지하였다. 평균 총 현존량이 두 번째로 높게 나타난 곳은 석촌호수로서 이곳에서는 2005년 6월에 6.1×10^4 cells mL⁻¹

Table 4. The dominant species of phytoplankton community of major recreational park ponds in the capital region.

Sampling time	Sites	1 st - and 2 nd dominant species
Oct. 2004	GBP	<i>Aphanocapsa elachista</i> - <i>Lyngbya contorta</i>
	YSP	<i>Merismopedia elegans</i> - <i>Golenkinia</i> sp.
	SCR	<i>Microcystis wesenbergii</i> - <i>Coelastrum</i> sp.
	GDP	<i>Scenedesmus quadricauda</i> - <i>Aulacoseira granulata</i>
	YEP	<i>Aulacoseira granulata</i> - <i>Stephanodiscus</i> sp.
	BDP	<i>Scenedesmus quadricauda</i> - <i>Aulacoseira granulata</i>
	ISP	<i>Coelastrum</i> sp.- <i>Oscillatoria</i> sp.
Dec. 2004	GBP	<i>Lyngbya contorta</i> - <i>Microcystis aeruginosa</i>
	YSP	<i>Aulacoseira granulata</i> - <i>Synedra acus</i>
	SCR	<i>Coelastrum</i> sp.- <i>Merismopedia elegans</i>
	GDP	<i>Aulacoseira granulata</i> - <i>Scenedesmus quadricauda</i>
	YEP	<i>Scenedesmus quadricauda</i> - <i>Pediastrum duplex</i>
	BDP	<i>Scenedesmus quadricauda</i> - <i>Cosmarium</i> sp.
	ISP	<i>Oscillatoria</i> sp.- <i>Coelastrum</i> sp.
Feb. 2005	GBP	<i>Nitzschia acicularis</i> - <i>Plectonema</i> sp.
	YSP	<i>Closteriopsis longissima</i> - <i>Aphanocapsa elachista</i>
	SCR	<i>Asterionella gracillima</i> - <i>Fragillaria crotonensis</i>
	GDP	<i>Eudorina elegans</i> - <i>Phormidium tenue</i>
	YEP	<i>Chlamydomonas</i> sp.- <i>Dinobryon divergens</i>
	BDP	<i>Scenedesmus quadricauda</i> - <i>Nitzschia</i> sp.
	ISP	<i>Cosmarium</i> sp.- <i>Chlamydomonas</i> sp.
Apr. 2005	GBP	<i>Nitzschia</i> sp.- <i>Synedra acus</i>
	YSP	<i>Anabaena</i> sp.- <i>Dinobryon divergens</i>
	SCR	<i>Aulacoseira granulata</i> - <i>Asterionella gracillima</i>
	GDP	<i>Aulacoseira granulata</i> - <i>Scenedesmus quadricauda</i>
	YEP	<i>Navicula</i> sp.- <i>Gyrosigma spencerii</i>
	BDP	<i>Scenedesmus quadricauda</i> - <i>Nitzschia</i> sp.
	ISP	<i>Dinobryon divergens</i> - <i>Oscillatoria</i> sp.
Jun. 2005	GBP	<i>Lyngbya contorta</i> - <i>Microcystis wesenbergii</i>
	YSP	<i>Scenedesmus quadricauda</i> - <i>Staurastrum cristatum</i>
	SCR	<i>Aphanocapsa elachista</i> - <i>Microcystis</i> sp.
	GDP	<i>Scenedesmus quadricauda</i> - <i>Crucigenia tetrapedia</i>
	YEP	<i>Aphanocapsa elachista</i> - <i>Scenedesmus quadricauda</i>
	BDP	<i>Scenedesmus quadricauda</i> - <i>Cosmarium</i> sp.
	ISP	<i>Coelastrum cambricum</i> - <i>Cosmarium</i> sp.
Aug. 2005	GBP	<i>Lyngbya contorta</i> - <i>Microcystis wesenbergii</i>
	YSP	<i>Oscillatoria</i> sp.- <i>Aphanocapsa elachista</i>
	SCR	<i>Microcystis</i> sp.- <i>Pediastrum biwae</i>
	GDP	<i>Phormidium tenue</i> - <i>Crucigenia tetrapedia</i>
	YEP	<i>Scenedesmus quadricauda</i> - <i>Merismopedia elegans</i>
	BDP	<i>Cosmarium</i> sp.- <i>Scenedesmus quadricauda</i>
	ISP	<i>Scenedesmus quadricauda</i> - <i>Oscillatoria</i> sp.

Table 5. Correlation coefficients among biological and physicochemical parameters in recreational park ponds in the capital region.

	WT	pH	DO	Cond.	BOD	TN	TP	TN/TP	Chl- <i>a</i>	T-phyto
pH	-0.031									
DO	-0.490	0.181								
Cond.	0.237	-0.666	-0.151							
BOD	0.154	0.072	0.099	0.169						
TN	-0.403	-0.385	0.395	0.345	-0.039					
TP	-0.183	0.243	-0.213	-0.252	0.102	-0.312				
TN/TP	-0.382	-0.238	0.474	0.133	-0.296	0.628	-0.455			
Chl- <i>a</i>	0.369	-0.169	-0.336	0.235	0.335	0.187	-0.136	-0.038		
T-phyto	0.226	0.052	0.091	0.207	0.236	0.016	-0.015	-0.063	0.280	
Cyano	0.220	-0.010	0.079	0.239	0.230	0.017	-0.017	-0.057	0.260	0.993

*WT, water temperature; DO, dissolved oxygen; Cond, electric conductivity; BOD, biochemical oxygen demand; TN, total nitrogen; TP, total phosphorus; TN/TP, TN/TP ratio; Chl-*a*, chlorophyll *a*; T-phyto, total standing crops of phytoplankton; Cyano, cyanobacteria. probability value was significantly $p < 0.05$

로서 가장 높았고, 이때 *Aphanocapsa elachista*, *Microcystis* sp.와 같은 남조류가 총 현존량 중 70% 이상을 차지하였다. 평균 총 현존량이 가장 낮게 나타난 곳은 일산호수공원으로서 2004년 12월에 634 cells mL⁻¹로 최고였고, 이때 녹조 *Coelastrum* sp.와 남조 *Oscillatoria* sp.가 우점하였다(Table 4).

조사시기 및 지점에 따른 주요 우점종은 Table 4와 같다. 조사시기와 지점에 따라 녹조류 *Coelastrum* sp., *Cosmarium* sp., *Scenedesmus quadricauda* 및 규조류 *Aulacoseira granulata*, *Asterionella gracillima*, *Fragillaria crotonensis*와 남조류의 우점현상이 뚜렷하였다. 남조류 주요 우점종은 *Anabaena* sp., *Aphanocapsa elachista*, *Lyngbya contorta*, *Merismopedia elegans*, *Microcystis aeruginosa*, *M. wesenbergii*, *Microcystis* sp., *Oscillatoria* sp., *Phormidium tenue*, *Plectonema* sp. 등 10종이었다. 특히, 높은 식물플랑크톤 총 현존량을 나타낸 경복궁 내 경회루와 석촌호수는 10°C 이하의 낮은 수온이 측정된 2005년 2월과 4월을 제외한 모든 시기에 경복궁 내 경회루에서는 남조류가 총 현존량 중 90% 이상을 차지하였고, 석촌호수는 20°C 이상의 수온이 측정된 2004년 10월, 2005년 6월과 8월에 각각 60, 72, 92%를 차지하였다.

3. 환경요인과 식물플랑크톤간의 상관관계

조사기간 동안 출현한 식물플랑크톤과 환경요인간의 상관성 분석 결과(Table 5), 식물플랑크톤 총 현존량 및 남조류 총 현존량은 엽록소-*a* 농도와는 유의한 상관성이 없었던 반면에 ($r=0.28$, $r=0.26$), 식물플랑크톤 총 현존량과 남조류 총 현존량간에는 매우 밀접한 관계를 보였다 ($r=0.99$). 이와 관련하여, 전 조사기간과 모든 지점의 식

물플랑크톤 현존량 중 남조류 현존량이 차지한 비율은 약 78%로서, 수도권 주요 공원 연못에서 출현하는 식물플랑크톤 중에서 남조류의 출현 빈도와 개체수가 매우 높았다. 또한 식물플랑크톤 총 현존량 및 남조류 총 현존량은 다른 여러 가지 환경요인들간에는 유의한 상관성을 나타내지 않았다.

4. 영양상태 평가

수도권 지역 주요 공원 연못의 영양상태를 평가하기 위해 2004년 10월부터 2005년 8월 사이에 조사한 엽록소-*a*, 총질소(TN), 총인(TP) 농도를 부영양화도 지수인 영양상태지수(TSI)로 변환하였다(Fig. 3). 그 결과, 조사항목과 시기별로 영양상태 평가가 다르게 나타났으나, 일산호수공원을 제외한 지점간 영양상태 평가의 차이는 크지 않았다. 일산호수공원을 제외하면, 조사항목별로 TSI(CHL)는 주로 부영양상태를 나타냈고, TSI(TN)는 중영양상태와 부영양상태를 나타냈으며, TSI(TP)는 부영양상태와 과영양상태를 나타내었다. 시기별 평균 TSI(CHL)는 2차와 4차 조사에서 중영양상태, 1차, 3차, 5차, 6차에서 부영양상태였다. 시기별 평균 TSI(TN)는 4차 조사에서 빈영양상태, 1차, 2차, 5차에서 중영양상태, 3차에서 부영양상태였으며, 시기별 평균 TSI(TP)는 모든 시기에서 부영양상태와 과영양상태를 나타내었다. 지점별 평균 TSI(CHL)는 일산호수공원이 35, 다른 공원 연못들은 52~59로서 비슷한 영양상태였고, 지점별 평균 TSI(TN)는 일산호수공원이 30, 다른 공원 연못들은 40~54를 나타냈으며, 지점별 평균 TSI(TP)는 55~73로서 TSI(CHL)과 TSI(TN)의 지수보다 높은 영양상태지수를 나타내었다.

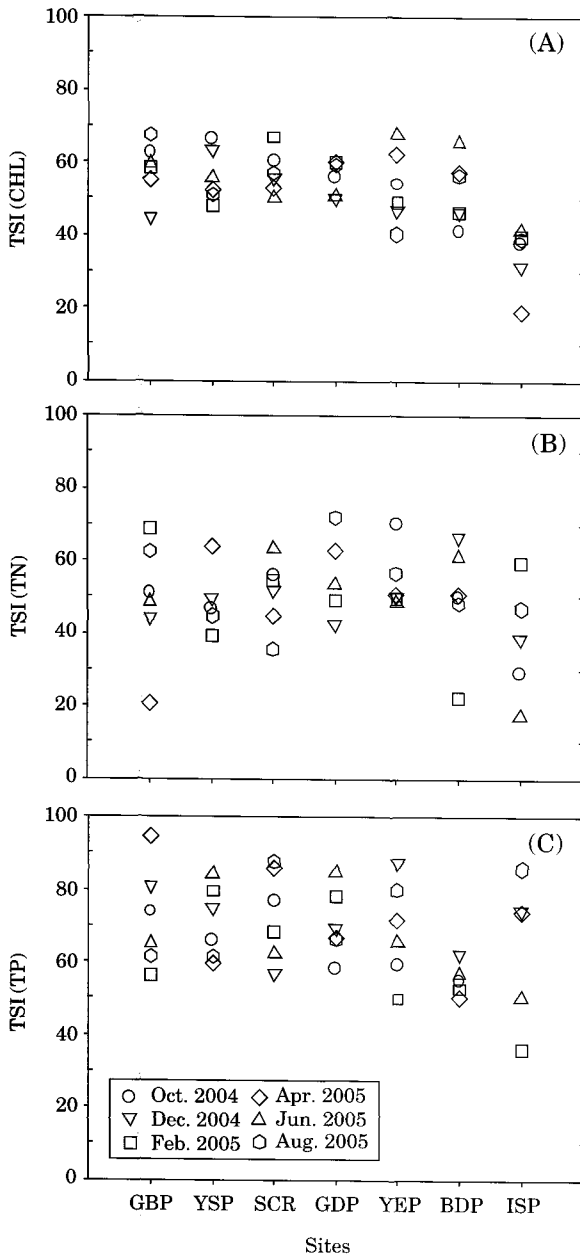


Fig. 3. Trophic state index (TSI) values based on ten months of bimonthly sampled data from major park ponds in the capital region. A, chlorophyll a; B, total nitrogen; C, total phosphorus.

고찰

수도권의 주요 공원 내 연못은 높은 인 농도로 인한 부영양상태가 나타났으며, 남조류가 주요 출현 식물플랑크톤이었다. 또한 높은 인 농도로 인해 TN/TP비는 대부분의 연못에서 10 이하였으며, 조사기간 동안 각 지점별

평균 TN/TP비는 11.3~32.9 나타내었다. 일반적으로 영양염 비율을 토대로 한 영양상태 평가에서 TN/TP비가 10 이하의 범위에서는 질소가 제한요인으로 작용하며, TN/TP비가 30 이상의 범위에서는 인이 조류의 성장에 미치는 제한요인으로 작용하는데 (Smith, 1982; Sigua *et al.*, 2006), 수도권 공원 연못의 조류 성장에는 질소가 주요한 제한요인으로 작용한다고 볼 수 있다. 그리고 TN/TP비가 30 이하의 범위에서 남조류의 성장률이 높아지는데, 이러한 조건의 TN/TP비가 수도권 공원 연못에서의 남조류 우점 현상을 촉진시켰다고 볼 수 있다 (Kim *et al.*, 2007).

Carlson (1977)의 영양상태지수 (TSI) 기준에 따르면, TSI (TP)가 30 이하일 때 빈영양상태, 50 이하일 때 중영양상태, 70 이하일 때 부영양상태, 70 이상일 때 과영양상태로 평가하는데, 분당중앙공원을 제외한 수도권 주요 공원 연못의 TSI (TP)는 부영양상태를 넘어 과영양상태였다. TSI가 60 이상일 경우는 여러 조류 중 남조류의 우점이 나타나는데, 이러한 관점에서도 역시 수도권 공원 연못에서 남조류 우점 현상을 설명할 수 있다. 또한 남조류 우점 현상은 조류 독소 발생과 밀접한 관련이 있는데 (Kotak *et al.*, 1995; Park *et al.*, 1996), 이미 수도권 공원 연못에서 남조류 독소인 microcystin-LR이 검출된 바 있다 (서 등, 2005). 식물플랑크톤 총 현존량이 높게 나타난 경북공 경회루와 석촌호수는 출현종 중 남조류가 큰 비중을 차지했는데, 역시 이러한 장소에서 $1.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상과 $0.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상의 microcystin-LR이 각각 검출되었다 (서 등, 2005).

조사기간 중 높은 남조류 현존량을 보였던 경북공 경회루, 석촌호수 등은 대부분 인공적으로 조성된 연못으로서 체류시간이 길고 인근 녹지와 네트워크가 형성되어 있지 않으며 수처리 시설이 없는 공통된 특징을 가지고 있다. 특히 이들은 강우기에도 외부와의 수체 순환이 일어나지 않고, 증발이나 지하침투 등으로 인하여 수위가 낮아지면 지하수나 수돗물을 직접 보충하여 유지하고 있다. 경북공 경회루는 바닥층의 산소고갈과 영양염 용출로 인하여 여름철 남조류가 우점하는 특징을 나타내고 있다 (윤 등, 2004). 경북공 경회루, 석촌호수의 경우, 매년 고온기에 *Microcystis* spp., *Anabaena* spp., *Oscillatoria* spp. 등의 남조류가 대발생하는데 (윤 등, 2004; 이와 한, 2004), 본 조사기간 중에도 *Aphanocapsa elachista*, *Lyngbya contorta*, *Microcystis aeruginosa*, *M. wesenbergii*, *Microcystis* sp. 등의 같은 남조류가 우점하였다. 따라서 수도권 공원 연못이나 독성 남조 대발생이 우려되는 다른 소형 생태 연못 등의 지속적인 효율적인 관리대책이 필요하다고 사료된다.

세계보건기구(WHO)는 microcystin-LR에 대한 음용수 수질기준을 $1.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 정하였으며(WHO, 1998), 이러한 기준치는 이미 미국, 영국, 프랑스, 체코, 브라질 등 여러 국가에서 음용수 수질기준에 적용하고 있고, 호주와 캐나다는 음용수 공급용 최소 microcystin-LR 기준치로 $1.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 와 $1.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 를 각각 채택하였다(Carmichael, 2001; Figueiredo *et al.*, 2004; Hoeger *et al.*, 2005; Znachor *et al.*, 2006). 이와 더불어 세계보건기구(WHO)는 공원 연못을 포함한 recreational/bath water의 microcystin-LR에 대한 수질기준을 $20 \sim 100 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 정하였다(WHO, 2003). 따라서 국내에서도 공원 연못 등에서 남조류 대발생과 이에 따른 독소 증가의 가능성이 매우 높기 때문에 상수원수뿐만 아니라 공원 연못 등에 대한 조류 독소기준 설정 및 지속적인 모니터링이 필요하다고 판단된다.

적 요

본 연구는 수도권 지역에 위치한 주요 공원 연못의 연중 식물플랑크톤 변동과 수질을 파악하고자, 공원 연못 7개소를 선정하여 2004년 10월부터 2005년 8월까지 매 2개월 간격으로 수중 내 기호환경 요인 및 식물플랑크톤에 대한 조사를 각각 실시하였다. 조사기간 동안 수온($0.4 \sim 26.0^\circ\text{C}$)을 비롯한 대부분의 환경요인들은 계절성과 지역성이 뚜렷하였다. 식물플랑크톤 총 현존량은 남조류 총 현존량과 매우 밀접한 관계를 보였다($r=0.99$). 그러나 식물플랑크톤 총 현존량과 남조류 총 현존량은 다른 여러 가지 환경요인들간에 유의한 상관성을 나타내지 않았다. 수도권 주요 공원 연못은 높은 인 농도로 인한 부영양상태가 나타났으며, 계절에 상관없이 남조류가 우점하였다. TN/TP비는 대부분의 연못에서 10 이하이고, 공원 연못에 주로 출현한 남조류는 *Anabaena sp.*, *Aphanocapsa elachista*, *Lyngbya contorta*, *Merismopedia elegans*, *Microcystis aeruginosa*, *M. wesenbergii*, *Microcystis sp.*, *Oscillatoria sp.*, *Phormidium tenue*, *Plectonema sp.* 등 10종으로 조사되었다. 이들 남조류는 대부분 독성을 나타내는 조류로서, 공원 연못 등에 대한 조류 독소기준 설정 및 지속적인 모니터링이 필요하다고 판단된다.

사 사

본 연구는 2004년 한국학술진흥재단의 지원(KRF-

2004-050-C00018)에 의하여 수행되었음.

인 용 문 헌

- 고소라, 인치용, 정승현, 김희식, 오희목. 2006. 부영양 연못에서 초음파 작동에 따른 식물플랑크톤의 군집 변화. *환경생물* **24**: 221-229.
- 김성훈, 오경미, 유금환, 박희경. 1998. 소규모 연못의 수질개선 방안에 관한 연구: 사례연구. *한국물환경학회지* **14**: 297-304.
- 김수봉, 정승호, 김기호. 2004. 대학 캠퍼스 내 생태연못 도입에 관한 연구. *환경과학논집* **9**: 191-199.
- 김용재. 1996. 팔당호의 식물 플랑크톤 군집의 생태학적 고찰과 지표종을 이용한 영양단계 평가. *육수지* **29**: 323-345.
- 김용재. 1999. 덕동호의 식물플랑크톤 군집과 LTSI에 의한 호소의 영양상태평가. *한국조류학회지* **14**: 161-167.
- 김재홍. 2007. 울산지역 도시공원의 가치측정. *한국정책과학학회보* **11**: 151-177.
- 김창환, 안득수. 2005. 수도권 지역 골프장의 연못식생 평가. *한국환경과학회지* **14**: 279-288.
- 김호섭, 박제철, 황순진. 2003. 수심이 얇은 부영양 인공호(일감호)의 동·식물플랑크톤 동태학. *육수지* **36**: 286-294.
- 박명환, 이석준, 윤병대, 오희목. 2001. 규산질다공체와 미생물 응집제의 녹조제어 효과. *환경생물* **19**: 129-135.
- 박종근. 2005. 대청호의 수질 환경요인과 영양단계 평가. *육수지* **38**: 382-392.
- 서미연, 김백호, 한명수. 2005. 서울 경기지역의 공원 연못 및 한강 수계 내 조류독소 Microcystin-LR의 분포. *육수지* **38**: 237-248.
- 서정관, 유재정, 이재정, 양상용, 정익교. 2003. 운문호의 식물플랑크톤 군집동태와 영양단계 평가. *한국조류학회지* **18**: 135-143.
- 안득수, 김창환. 2006. 골프장 연못의 생태적 관리를 위한 환경특성 분석. *한국조류학회지* **33**: 51-77.
- 유순주, 채민희, 황중연, 이재안, 박종경, 최태봉. 2005. 담수 이후 용담호 영양상태 변동 요인 분석. *한국물환경학회지* **21**: 360-367.
- 윤춘경, 황순진, 김호섭, 정광욱, 구원석, 유경아. 2004. 경북공수환경조사 보고서. 문화재청 경북공관리사무소.
- 이옥세, 한명수. 2004. 체류시간이 서로 다른 부영양 수계에서 플랑크톤군집의 생태학적 특성. *육수지* **37**: 263-271.
- 이은엽, 문석기. 2001. 생태연못 조성공법 적용후의 자연상태 변화분석. *한국환경복원녹화기술학회지* **4**: 1-15.
- 이은희, 장하경. 2000. 생태연못 조성을 위한 이론적 고찰 및 사례연못 평가. *한국환경복원녹화기술학회지* **3**: 10-23.
- 정미희, 김호섭, 최정일, 황순진. 2004. 화옹호의 식물플랑크톤과 환경요인. *육수지* **37**: 193-204.

- 정윤숙, 김준호. 1982. 연못 생태계의 영양구조와 에너지 유전. *한국식물학회지* **25**: 123-133.
- 조항문, 임경미, 김미형, 심효석. 2001. 서울시 도시공원 내 연못 수질관리 방안. 서울시정개발연구원. 171.
- 황정미, 이성진, 배연재. 2005. 서로 다른 온도 조건에서 연못 하루살이 (*Cloeon dipterum*: 꼬마하루살이과, 하루살이목) 유충의 성장. *환경생물* **23**: 114-119.
- Abé, T.H. 1981. Studies on the order Peridinidae an unfinished monograph of the armoured dinoflagellata. The Nippon Printing and Publishing Co., Tokyo.
- Ahn, C.-Y., M.-H. Park, S.-H. Joung, H.-S. Kim, K.-Y. Jang and H.-M. Oh. 2003. Growth inhibition of cyanobacteria by ultrasonic radiation: laboratory and enclosure studies. *Environ. Sci. Technol.* **37**: 3031-3037.
- Akiyama, M., T. Loiya, K. Imahori, H. Kasaki, S. Kumano, H. Kobayashi, E. Takahashi, K. Tsumura, M. Hirano, H. Hirose and T. Yamagishi. 1981. Illustration of the Japanese Freshwater Algae. Uchidarockakuho Publishing Co., Tokyo.
- APHA. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th ed. American Public Health Association, Washington, DC., USA.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 361-369.
- Carmichael, W.W. 2001. Health effects of toxin-producing cyanobacteria: "The CyanoHABs". *Hum. Ecol. Risk Assess.* **7**: 1393-1407.
- Cox, E.J. 1996. Identification of freshwater diatom from live material. Chapman & Hall. London.
- Figueiredo, D.R., U.M. Azeiteiro, S.M. Esteves, F.J.M. Goncalves and M.J. Pereira. 2004. Microcystin-producing blooms-a serious global public health issue. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **59**: 151-163.
- Hoeger, S.J., B.C. Hitzfeld and D.R. Dietrich. 2005. Occurrence and elimination of cyanobacterial toxins in drinking water treatment plants. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* **203**: 231-242.
- Kim, H.-S., S.-J. Hwang, J.-K. Shin, K.-G. An and C.-G. Yoon. 2007. Effects of limiting nutrients and N:P ratios on the phytoplankton growth in a shallow hypertrophic reservoir. *Hydrobiologia* **581**: 255-267.
- Kotak, B.G., A.K.Y. Lam and E.E. Prepas. 1995. Variability of the hepatotoxin microcystin-LR in hypereutrophic drinking water lakes. *J. Phycol.* **31**: 248-263.
- Kratzer, C.R. and P.L. Brezonik. 1981. A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Res. Bull.* **17**: 713-715.
- Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equation. *Limnol. Oceanogr.* **12**: 343-346.
- 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.
- Sigua, G.C., M.J. Williams, S.W. Coleman and R. Starks. 2006. Nitrogen and phosphorus status of soils and trophic state of lakes associated with forage-based beef cattle operations in Florida. *J. Environ. Qual.* **35**: 240-252.
- Smith, V.H. 1982. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis. *Limnol. Oceanogr.* **27**: 1101-1112.
- WHO. 1998. Guidelines for drinking water quality, addendum to volume 1: Recommendations. WHO, Geneva, Switzerland.
- WHO. 2003. Algae and cyanobacteria in fresh water. In: Guidelines for safe recreational water environments. Vol. 1: Coastal and fresh waters. WHO, Geneva, Switzerland.
- 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. *Environ. Toxicol.* **21**: 236-243.

(Manuscript received 31 December 2007,
Revision accepted 4 February 2008)