Korean J. Limnol. 40 (1) : 121~129(2007)

부영양 저수지에서 남조류의 발달과 천이 및 영향 요인

김 호 섭 · 황 순 진[1,*] · 공 동 수

(국립환경과학원 한강물환경연구소, [1]건국대학교 환경과학과)

Cyanobacterial Development and Succession and Affecting Factors in a Eutrophic Reservoir.

Kim, Ho-Sub, Soon-Jin Hwang[1,*] and Dong-Soo Kong (Han River Environment Research Laboratory, National Institute of Environmental Research, Gyeonggi 476-823; [1]Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

This study was conducted to evaluate the causes and effects of cyanobacterial development and succession in a shallow eutrophic reservoir from March 2003 to February 2004. Phytoplankton succession, sedimentation rate, and sediment composition were analyzed. Algal bioassay also was conducted with the consideration of light, water temperature and nutrients. Cyanobacteria dominated throughout the year, except for spring season (March~April) in which diatoms and flagellates dominated. Total cell density increased in July and November when P loading through inflows was high. *Oscillatoria* spp. and *Aphanizomenon* sp. were dominant in May and June, respectively, but replaced with *Microcystis* spp. in July. Thereafter, *Microcystis* spp. sustained until December, and again shifted to *Oscillatoria* spp. and *Aphanizomenon* sp. The dominance of *Oscillatoria* spp. in May was accompanied with high TN/TP ratio and the increase of water temperature and light intensity. While the dominance of *Microcystis* spp. was related with relatively low TN/TP ratio, ranging from 46 to 13 (average: 27). The sedimentation rate was highest in March (0.6 m day^{-1}) when diatoms dominated. During the period of cyanobacterial dominance, relatively high sedimentation rate was observed in May (0.4 m day^{-1}) and October (0.36 m day^{-1}). C/N ratio of the sediment ranged 6~8. Inorganic P concentration in the pore water was low when DO concentration was <2 mg O_2 L^{-1} in the hypolimnion, reflecting the P release from the sediment. Cyanobacterial growth rate depended on phosphorus concentration and water temperature, and high P concentration compensated for the low temperature in the growth rate. Our results suggest that the potential of cyanobacterial development and substantiality in eutrophic reservoirs be high throughout the year, as being supplied with enough P, and emphasize the consideration of sediment management for the water quality improvement and algal bloom control.

Key words : Cyanobacteria, eutrophic reservoir, TN/TP ratio, phosphorus, sediment management

서 론

담수생태계에서 식물플랑크톤 군집의 계절적인 천이는 수체의 물리 · 생물 · 화학적 요인들의 복합적인 변화와 연계하여 연속적이고 예측 가능한 생물학적 반응이다 (Reynolds, 1984). 예를 들면, 온대지역의 부영양 호수에서 식물플랑크톤은 봄에는 규조류, 여름에는 남조류가 우

* Corresponding author: Tel: 02) 450-3748, Fax: 02) 456-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

점하는 일반적인 천이양상을 나타낸다. 특히, 남조류는 전 세계적으로 부영양 호소에서 대발생하며, 이들의 형태, 생리적 특성, 화학적 조성으로 인해 먹이망 내에서 포식에 의한 생물학적 조절이 어렵고 또한 다른 조류에 비해 경쟁적으로 우세하여 수질관리의 큰 장해요인이다.

선행연구의 결과에서, 수온, 광도, 영양염 농도를 포함하는 물리 · 화학적 인자들과 남조류 종들 간의 부력기작의 차이는 수체 내에서 남조류 종 조성과 생물량 발달에 영향을 미치는 중요한 요인들로 제기되어 왔다(Thomas and Walsby, 1986; Carpenter and Kitchell, 1993; Konopka *et al.*, 1993; Fujimoto and Sudo, 1997). 대부분의 남조류는 성장에 높은 수온(>20°C)을 선호하나(Van der Westhuizen and Eloff, 1985; Watanabae and Oishi, 1985; Fujimoto and Sudo, 1997), 일부 사상성 남조류는 색소 조절을 통해 낮은 광도 조건에서도 탁월한 적응 능력을 가지는 것으로 조사되었다(Tang *et al.*, 1997). 조류 성장의 제한영양염인 인은 남조류의 부력조절 뿐만 아니라 생물량을 결정하는 중요한 요인으로 보고되었다(Reynolds, 1984; Romo and Miracle, 1994). 한편, 남조류의 천이 시에 침강량이나 퇴적층내 유기물이 증가도 관찰되고 있다(Klemer, 1973; Klemer, 1976; Thomas and Walsby, 1986; Konopka *et al.*, 1993).

부영양 호소에서 남조류의 번성과 발달에 관여하는 요인이나 기작에 대해서는 상당한 연구결과들이 축적되었으나, 그 결과는 대상 호소의 특성과 환경적 요인들에 의해 다르게 나타날 수 있다. 우리나라의 거의 모든 정수시스템은 인공저수지이며, 이 중에서도 대부분은 소규모이며 건설된지 오래되어 저층에 유기물의 퇴적정도가 매우 높다. 또한 대부분 부영양화 상태이며 그 결과 연중 남조류의 번성이 관찰되고 있다(Hwang *et al.*, 2003). 이러한 남조류 대발생은 저수지의 건전한 생태적 기능과 친수성, 이수목적 등에 악영향을 미치므로 수질관리의 주된 대상으로 부각되고 있다(황, 2006). 따라서 남조류 군집 변화와 관련된 환경요인들이 언제, 어떻게 작용하는가에 대한 평가는 저수지의 부영양화와 수질관리에 매우 중요한 정보를 제공한다.

본 연구는 부영양상태의 저수지에서 우점하는 남조류의 성장과 천이 및 지속기간에 영향을 미치는 요인들을 파악하고자 하였다. 이를 위해 계절에 따른 환경요인과 남조류 군집 변화를 조사하였고, 환경요인 변화에 따른 남조류 군집의 반응과 연계하여 침강량과 퇴적물내 유기물 분포를 분석하였다. 또한 수온과 영양염, 광도 조건에 따른 남조류 성장률 비교실험을 통해, 남조류 발달에 미치는 환경요인의 상대적 중요성을 평가하였다.

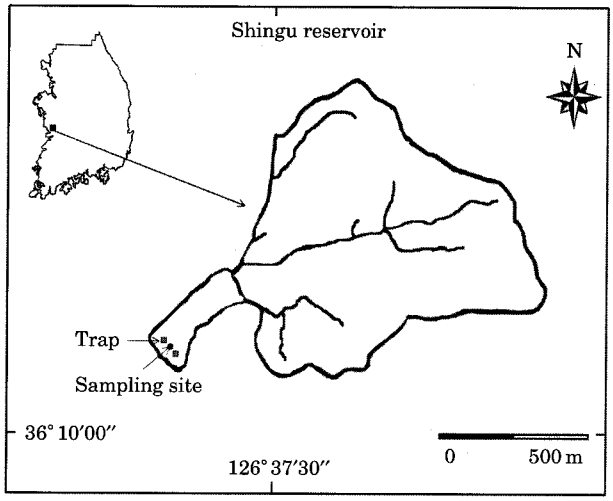

Fig. 1. Map showing the study reservoir and sites.

재료 및 방법

1. 대상저수지 및 조사지점

본 연구의 대상저수지는 수표면적인 0.1 km^2이고 평균수심이 3.9 m이며 부영양상태의 농업용 저수지이다(김과 황, 2004). 유역면적은 2.55 km^2이며, 상류부에는 유로연장이 짧은 2개의 소하천이 연결되어 있다(Fig. 1). 유역에서 발생하는 주 오염원은 축산폐수로서 총 오염발생부하량의 75.6%를 차지한다(농업기반공사, 2001). 조사는 만수위시 수심이 7 m를 유지하는 제방 부근에서 2003년 3월부터 2004년 2월까지 월 2회 실시하였다.

2. 식물플랑크톤 분석

식물플랑크톤 종 조성 및 현존량을 분석하기 위한 시료는 수심별(0, 3, 5 m)로 채수하였다. 식물플랑크톤의 정량분석은 Sedgwick-Rafter 계수판을 이용하여 광학현미경하(×200)에서 규조류(Bacillariophyceae), 남조류(Cyanophyceae), 녹조류(Chlorophyceae)로 구분하여 동정하고 계수하였으며 와편모조류(Dinophyceae)와 은편모조류(Cryptophyceae)는 출현종과 밀도가 작아 두 분류군 모두를 편모조류(flagellate algae)로 구분하였다. 종 조성과 생물량에 대한 세부적인 분석방법은 김과 황(2005)에 나타나 있다.

3. 침강량 및 성분분석

식물플랑크톤 조사지점과 동일한 횡방향의 두 지점의

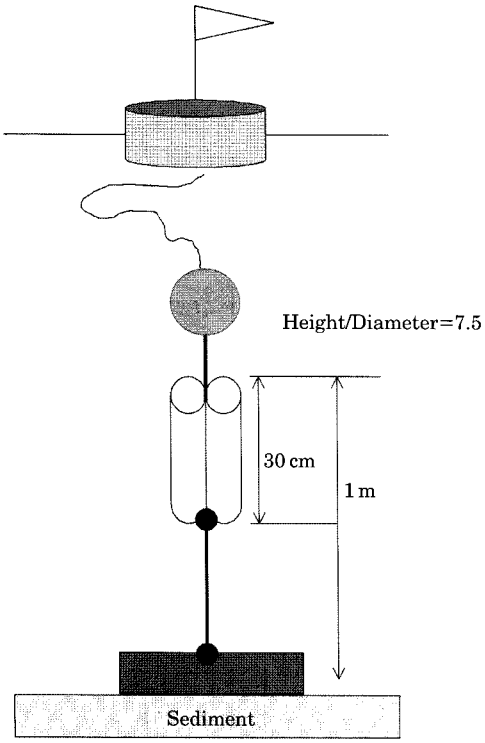

Fig. 2. A schematic diagram of the suspended sediment trap used in this study.

내부직경이 7.5 : 1 (30 cm : 4 cm)의 비율로 제작된 trap을 2개씩 총 4개를 퇴적층으로부터 1 m 상층부에 설치하였다(Fig. 2). 설치 당시 각 trap에는 증류수를 채웠고, 수질조사를 위한 시료채취 기간 동안(2주일 간격) 회수하여 상등수를 제거한 후 일정량의 증류수를 넣어 침전물 세척한 후 산 세척된 폴리에틸렌 병에 담아 운반하였다. Trap 설치 전과 후의 수질을 조사하기 위해 표층(0 m)과 중층(3 m)에서 시료를 채수하여 부유물질, 엽록소 *a* 농도, 총인, 총질소 농도를 측정하였다. 부유물질은 원수를 GF/F여과지로 여과한 후 105°C dry oven에서 24시간 이상 건조 한 다음 무게차로 계산하였고, 휘발성고형물은 부유물질이 측정된 여과지를 500°C에서 2시간 동안 태운 후의 잔유물의 무게와 건중량과의 무게 차이로부터 계산하였다(APHA, 1995). 엽록소 *a* 농도는 시료를 GF/F 여과지로 여과한 후 메탄올을 넣어 24시간 냉암소에서 보관하여 엽록소 *a*를 추출한 후 흡광도를 측정하여 계산하였다(Marker, 1972; Marker *et al.*, 1980). 총인과 총 질소는 원수를 persulfate로 전처리한 후 각각 ascorbic acid법과 카드늄환원법으로 분석하였다(APHA, 1995).

침전물의 건중량, 휘발성고형물, 엽록소 *a* 농도, 총인, 총질소 농도는 일정량의 침전물을 GF/F여과지로 여과하여 침강량을 계산하으며, 분석은 수질분석과 동일한 방법을 따랐다.

$$\text{침강량(Settling flux of material; } S_f) = \frac{\text{Constituent} \times V}{A \times T}$$

Constituent: SS, VSS, Chl. *a*, TP and TN (SS and VSS unit: g m^{-2} day^{-1} TN and TP unit: mg m^{-2} day^{-1})
V (L): Volume of the constituent collected in the trap
T (day): Exposed period of the sediment trap
A (m^2): The area of the trap opening (0.0013 m^2)

Trap으로 측정된 엽록소 *a* 농도에 대한 침강량(S_f)과 수중의 농도(C)를 나누어 부유물질의 침강속도(Settling velocity: S_v)를 계산하였다. 수중 농도(C)는 Trap을 퇴적층의 1 m 상부에 설치하였기 때문에 Trap 설치 전과 후의 표층과 중층에서의 평균값을 사용하였다.

$$S_v\,(\text{m day}^{-1}) = \frac{S_f}{C}$$

침전율(Settling rate: S_r)은 침강속도를 조사당시의 평균수심($\bar{z}$)으로 나누어 계산하였다.

$$S_r\,(\text{day}^{-1}) = \frac{S_v}{\bar{z}}$$

4. 퇴적물 분석

퇴적물은 식물플랑크톤 조사지점에서 중력식 채니기(gravity corer)를 이용하여 채집하였고, 냉장 보관하여 실험실로 운반하였다. 시료의 함수율과 강열감량은 침강량에 대한 부유물질과 휘발성 고형물분석과 동일한 방법으로 계산하였다. 퇴적물 내 간극수는 원심분리를 통해 분리하였으며, 분리한 간극수는 GF/F 여과지로 여과한 후 냉동보관하였다. 간극수내 용존총인(TDP: total dissolved phosphorus) 농도는 persulfate로 전처리한 후 용존무기인(DIP: dissolved inorganic phosphorus) 농도 측정과 동일하게 ascorbic acid법으로 분석하였다(APHA, 1995). 퇴적물의 인, 질소 그리고 탄소 함량 측정을 위해 건조된 시료를 막자사발로 마쇄하였다. 총인 농도는 마쇄된 토양시료 일부를 perchloric acid로 분해한 후 Vanado-molybdophosphoric acid colorimetric법으로 분석하였다(APHA, 1995). 총질소와 탄소함량을 측정하기 위해서 토양 건조시료 일부에 1 N HCl를 넣어 hot plate에서 가열하여 건조한 후 다시 마쇄하여 CHN elemental analyzer (Perkin-Elmer 2400)를 이용해 분석하였다.

5. 남조류 성장 제한요인 분석

2003년 12월부터 2004년 2월까지 4회에 제한 영양염과 수온 그리고 광도에 따른 남조류의 성장율을 비교하였다. 식물플랑크톤 혼합시료는 망목 크기가 30 μm인 네트를 이용하여 표층에서 채집하였고, 망목의 크기가 200 μm인 네트로 다시 여과하여 대형동물플랑크톤을 제거하였다. 식물플랑크톤 혼합시료의 우점종은 *Oscillatoria* spp., *Aphanizomenon* sp. 등과 같은 사상성 남조류였다. 남조류가 포함된 시료 50 mL를 250 mL 용량의 삼각플라스크에 담은 후에 KNO_3(10 mg N L^{-1})와 KH_2PO_4(10 mg P L^{-1})를 일정량씩 첨가하였다. 그 후에 GF/F 여과지로 여과한 원수로 최종 부피 100 mL를 만들었다. 실험 조건은 영양염이 첨가되지 않은 대조구(Control), 인(+P)과 질소(+N)가 각각 1 mg L^{-1} 첨가한 처리구 그리고 질소와 인 두 가지를 각각 1 mg N L^{-1} 첨가한 처리구(N+P)로 구분하였으며, 실험은 3반복으로 수행되었다.

결 과

1. 남조류 군집 변화

본 연구대상 저수지에서 식물플랑크톤 군집 중에 남조류가 해빙 후 3월과 4월을 제외하고는 년중 우점하였고, 남조류 종간의 계절적인 천이가 나타났다(Fig. 3). 3월부터 5월 초까지 *Melosira varians, Aulacoseira ambigua*와 같은 규조류와 *Rhodomonas* sp.와 같은 편모조류가 우점하였다. 7월부터 12월 초까지 남조류 중 *Microcystis aeruginosa*가 우점하였고, 7월($2.5 \pm 0.06 \times 10^5$ cells mL^{-1})과 11월($2.5 \pm 0.02 \times 10^5$ cells mL^{-1})에 높은 세포밀도를 나타냈다. 7월부터 12월까지 *Microcystis aeruginosa* 우점했던 기간 외에는(5월 중순부터 6월까지, 12월 말부터 이듬해 봄철까지) *Oscillatoria* spp., *Aphanizomenon* sp.와 같은 사상성 남조류가 우점하였다.

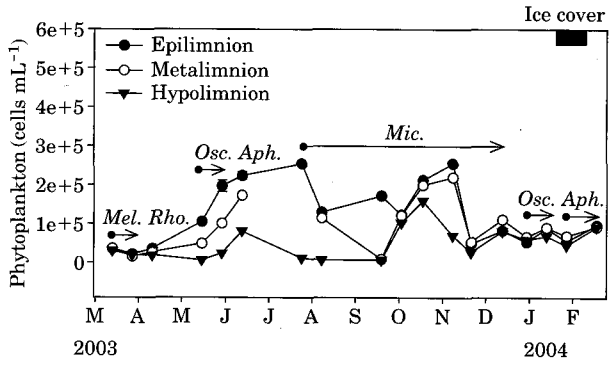

Fig. 3. Temporal change of phytoplankton cell density in the study reservoir from March 2003 to February 2004. *Mel., Rho., Osc., Aph*, and *Mic.* indicate *Melosira, Rhodomonas, Oscillatoria, Aphanizomenon*, and *Microcystis*, respectively.

2. 침강율

엽록소 *a* 침강량은 11.1~27.1 mg Chl. *a* m^{-2} day^{-1}의 범위로 10월에 가장 높았으며 수층간의 세포밀도 차이가 현저하게 나타난 8월에 가장 낮았다(Fig. 4, Table 1). 엽록소 *a*의 침강속도(S_v)는 규조류가 우점한 시기인 4월 11일에 0.55 m day^{-1}로 가장 빨랐고 8월 8일에 0.2 m day^{-1}로 가장 느렸다. 남조류 우점시기인 5~11월 기간 중에는, 5월(*Oscillatoria* spp. 우점 시작기)에 0.4 m day^{-1}로 가장 빨랐고 침강량이 많았던 10월에도 0.36 m day^{-1}로 비교적 빠른 침강속도를 보였다.

부유물질과 휘발성고형물 침전율의 계절적인 변화는 엽록소 *a* 침전율과 유사하였으며($r > 0.90$, $n=8$, $p < 0.01$),

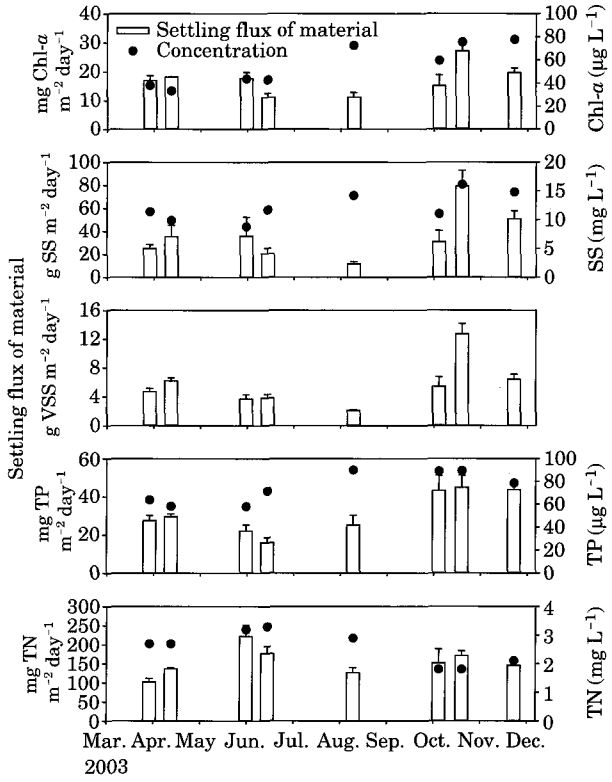

Fig. 4. Settling flux of Chl. *a*, SS, VSS, TP and TN, and average concentration of chl. *a*, SS, TP and TN in the water column (epilimnion and metalimnion) before and after trap establishment from March to November, 2003.

Table 1. Settling flux (S_f), settling velocity (S_v) and settling rate (S_r) of material of the syudy reservoir from March to November, 2003.

Date	Chl. *a*				SS			
	Conc.	S_f	S_v	S_r	Conc.	S_f	S_v	S_r
	$\mu g\ L^{-1}$	$mg\ m^{-2}\ day^{-1}$	$m\ day^{-1}$	day^{-1}	$mg\ L^{-1}$	$g\ m^{-2}\ day^{-1}$	$m\ day^{-1}$	day^{-1}
Mar. 28	38.2±10.5	17.0±1.6	0.45	0.07	11.4±1.9	25.1±3.5	2.2	0.33
Apr. 11	33.4±5.7	18.2±0.1	0.55	0.08	9.9±0.4	35.4±9.9	3.6	0.51
May 30	43.9±4.3	17.7±2.1	0.40	0.06	8.8±1.7	22.3±3.5	2.5	0.38
Jun. 13	42.9±5.3	11.1±1.4	0.26	0.05	11.7±1.3	20.7±4.6	1.8	0.31
Aug. 8	72.6±26.4	11.2±1.6	0.15	0.02	14.2±1.2	11.7±1.9	0.8	0.11
Oct. 3	59.5±8.3	15.1±3.7	0.25	0.04	11.0±3.1	30.8±9.8	2.8	0.43
Oct. 18	75.4±7.7	27.1±2.2	0.36	0.06	16.1±1.9	79.0±13.7	4.9	0.76
Nov. 21	77.7±27.2	19.6±1.6	0.25	0.04	14.8±2.0	43.9±6.1	3.0	0.47
Date	TP				TN			
	Conc.	S_f	S_v	S_r	Conc.	S_f	S_v	S_r
	$\mu g\ L^{-1}$	$mg\ m^{-2}\ day^{-1}$	$m\ day^{-1}$	day^{-1}	$mg\ L^{-1}$	$g\ m^{-2}\ day^{-1}$	$m\ day^{-1}$	day^{-1}
Mar. 28	63.9±8.1	27.5±2.6	0.43	0.07	2.7±0.1	101.8±9.7	0.04	0.01
Apr. 11	58.3±2.5	29.5±1.5	0.51	0.07	2.7±0.0	136.5±2.3	0.05	0.01
May 30	58.1±5.1	22.1±3.2	0.38	0.06	3.2±0.0	222.4±28.9	0.07	0.01
Jun. 13	71.5±8.4	16.0±2.6	0.22	0.04	3.3±0.1	176.9±18.9	0.05	0.01
Aug. 8	90.0±10.4	25.1±5.1	0.28	0.04	2.9±0.3	126.2±13.3	0.04	0.01
Oct. 3	88.9±11.0	43.2±7.9	0.49	0.07	1.8±0.2	151.3±36.9	0.08	0.01
Oct. 18	89.3±10.7	44.8±6.4	0.50	0.08	1.8±0.1	170.9±12.8	0.10	0.01
Nov. 21	78.5±2.8	43.6±2.8	0.55	0.09	2.1±0.1	145.1±17.0	0.07	0.01

Conc.: Average concentrations of Chl. *a*, SS, TP and TN in water column (epilimnion and metalimnion) before and after trap establishment

침강속도는 0.8～3.6 m day^{-1}의 범위를 보였다. 부유물질 중 휘발성고형물의 함량은 평균 17%였고, 수중 부유물질 농도에 비해 침강량이 작았던 8월을 제외하고는 부유물질 농도와 침강량은 양의 상관성을 보였다(r=0.76, n=8, p=0.045). TP 침강량은 16.0～44.8 mg P m^{-2} day^{-1}의 범위로 10월에 가장 높았고 6월에 가장 낮았다. 8월을 제외하고는 TP 침강량은 표층과 중층의 평균 엽록소 *a* 농도(r=0.81, n=8, p=0.027) 및 총인 농도(r=0.75, n=8, p=0.05)와 양의 상관성을 보였다. 반면에 TN 침강량은 수위감소 직전인 5월 말에 222.4 mg N m^{-2} day^{-1}로 가장 높았고 3월에 101.8 mg N m^{-2} day^{-1}로 가장 낮았으며, 침강율(S_r)은 0.01 day^{-1}로 계절에 따른 변화 없이 엽록소 *a*, SS, TP에 비해 매우 낮은 수준이었다(Table 1).

3. 퇴적물 조성

조사기간 동안 퇴적물의 함수율은 59.2～68.3% (평균 64.6%), 강열감량은 6.3～10.4% (25.9～35.1 mg g^{-1})의 범위를 나타냈으며, 시기별로는 3월(9.1%, 34.2 mg g^{-1})과 11월(10.4%, 35.1 mg g^{-1})에 높은 값을 보였다(Fig. 5). 간극수내 인 농도는 5월 말에 가장 높았다. 7월말～11월 기간 동안에는 간극수내 용존무기인 농도 뿐만 아니라 용존 총인에 대한 용존무기인의 비율(13.6～24.5%)도 다른 시기(30～85.7%)에 비해 낮게 나타났다. 퇴적물 내 탄소와 인 함량은 각각 27.6～30.5 mg C g^{-1}, 0.8～1.1 mg P g^{-1}의 범위를 보여 계절에 따른 큰 변화가 없었던 반면, 질소함량은 3.4～4.9 mg N g^{-1}의 범위로 10～12월 기간 동안에 높았다(Table 2). 퇴적물 내 탄소:질소:인 평균 무게비는 28:4:1이었으며, C/P와 C/N비는 각각 26～35, 6～8의 범위를 보였다.

Table 2. Carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) contents in the sediment of the study reservoir from March to October 2003. DW indicates dry weight.

Date Day/Mon/Yr	C	N	P	C/N	C/P	N/P
	mg C · DW g^{-1}	mg P · DW g^{-1}	mg P · DW g^{-1}			
28/03/03	29.0	3.6	0.82	8	35	4
30/05/03	29.9	3.8	1.07	8	28	4
25/07/03	27.7	3.4	1.07	8	26	3
08/08/03	27.6	3.5	1.06	8	26	3
03/10/03	30.5	4.0	1.14	8	27	3

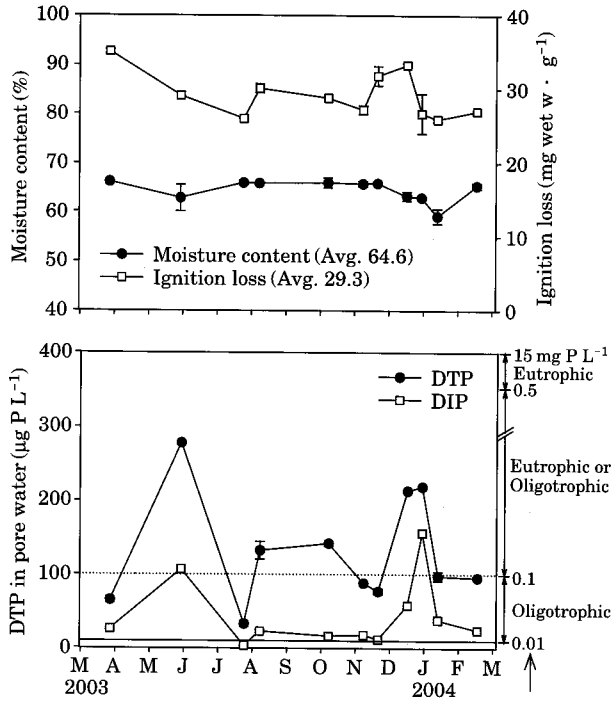

Fig. 5. Moisture content, ignition loss in the sediment, and DTP (dissolved total P), DIP (dissolved inorganic P) concentrations in the pore water in the study reservoir from March 2003 to February 2004. The ranges indicated by the arrows are criteria, which were established based on the phosphorus concentration in the pore water (Enell and Löfgren, 1988).

4. 수온, 광도, 영양염에 따른 남조류 성장률

영양염 첨가실험 모두에서 인이 첨가된 경우에 남조류의 성장률이 높게 나타난 반면, 질소가 처리된 곳에서의 성장률은 대조구와 유사하게 나타나($p>0.05$, ANOVA), 인이 겨울철 남조류 성장의 제한영양염으로 판명되었다 (Fig. 6).

인(혹은 인+질소)이 첨가된 처리구의 수온 20°C, 광도 85±5 μE m^{-2} s^{-1} 조건에서의 성장률은 광도 50±5 μE m^{-2} s^{-1} 하의 다른 수온조건의 처리구에 비해 각각 평균 2.3배 (4°C 조건), 4.9배 (3°C 조건) 높게 나타났다. 광도는 동일하나 수온 2°C에서의 성장률은 수온 20°C 처리구에 비해 평균 9.8배 낮았다.

수온은 20°C로 동일하나 광도 85±5 μE m^{-2} s^{-1} 조건에서의 성장률은 광도 20±2 μE m^{-2} s^{-1} 처리구에 비해 평균 1.8배 높았다. 광도가 85±5 μE m^{-2} s^{-1}로 동일하나 수온이 20°C 조건에서의 성장율은 5°C인 처리구에 비해 평균 5배 정도 높았다. 수온과 광도가 상이한 조건의 성장률을 비교할 때, 수온 20°C, 광도 20±2 μE m^{-2} s^{-1} 조건에서의 성장률은 수온 5°C, 광도 85±5 μE m^{-2} s^{-1}의 처리구에 비해 평균 2.6배 높았다.

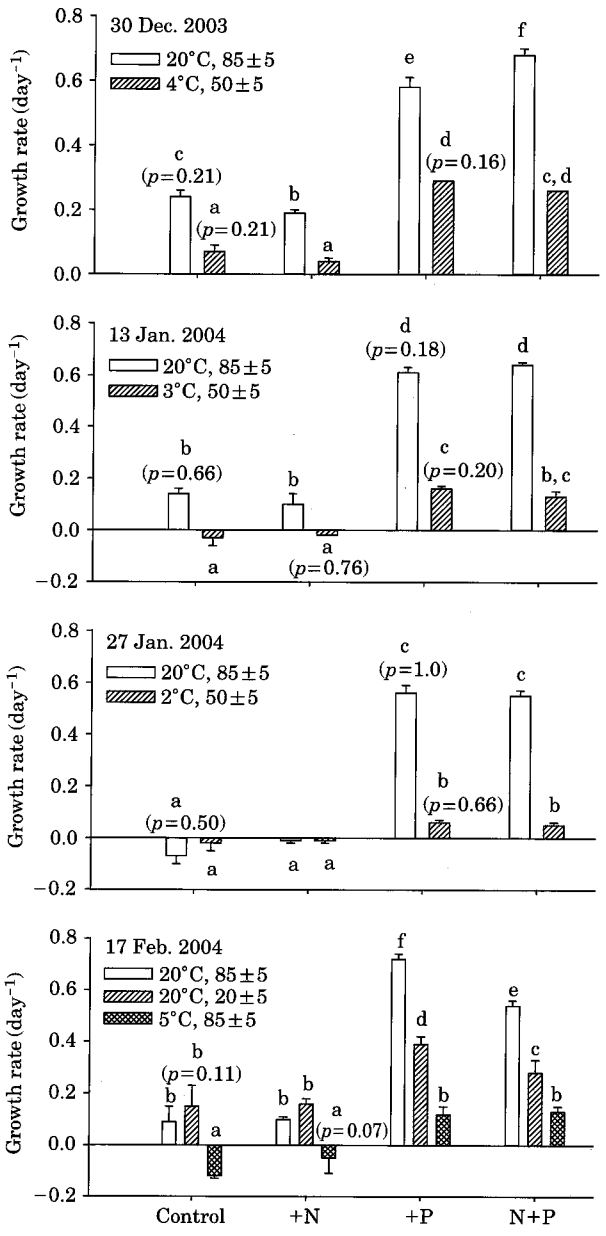

Fig. 6. Growth rates of phytoplankton (cyanobacteria) in the various cases conditioned by nutrients addition, temperature and light intensity changes.

고 찰

본 연구대상 저수지에서 남조류, 특히 *Microcystis*의 연중 지속적인 출현의 중요한 영향인자는 높은 인 농도

에 연관된 것으로 나타났다. 본 연구 대상저수지에 대한 선행연구에서 *Microcystis aeruginosa*가 가장 우점하였던 7월 이후 시기는 총인 농도(평균: 108.7 mg L^{-1})가 매우 높았고 그 결과 TN/TP 비도 평균 27±5로 다른 시기에 비해 낮은 것으로 제시된 바 있다(김과 황, 2005). Reynolds (1993)는 인의 농도가 높고 TN/TP 비가 낮은 조건에서 남조류, 특히 *Microcystis aeruginosa*가 우점함을 보고하였다. 보다 구체적으로, Smith (1983)와 Smith 등 (1987)은 남조류가 번성하는 부영양 호수들에서 TN/TP 비가 30 이하임을 보여주었다. 즉, 본 저수지의 외부 혹은 퇴적물로부터 인의 공급량 증가가 결과적으로 TN/TP비를 감소시켜 *Microcystis*를 포함하는 남조류 발달의 중요한 원인이 된 것으로 판단된다(Trimbee and Prepas, 1987; Sheffer *et al.*, 1997; Ping *et al.*, 2003).

한편, 부영양 호수에서 남조류가 장기간에 걸쳐 우점하는 또 다른 원인 중의 하나는 이들의 종 특이적인 부력조절 기능이며, 이는 수온과 광도, 영양염 농도 등의 영향을 받는 것으로 나타나고 있다(Thomas and Walsby, 1986; Konopka *et al.*, 1993). 특히, 사상성 남조류는 보통 TN/TP비가 높고 낮은 수온과 광조건에서 우점하며(Zevenboom *et al.*, 1982; Wasmund, 1989; Reynolds, 1993; Cichra *et al.*, 1995; Fujimoto and Sudo, 1997), 높은 광도와 영양염 조건에서는 부력조절 능력이 저하될 수 있다(Konopka *et al.*, 1993). 이러한 결과들은 본 조사대상 저수지에서 *Microcystis aeruginosa*의 발달기간 외 동안(5월 중순부터 6월까지, 12월 말부터 이듬해 봄철까지)에 나타난 *Oscillatoria*와 *Aphanizomenon*의 발달(Fig. 3)을 설명할 수 있다. 연구기간 중 5월은 심층부에 뚜렷한 수온성층이 형성되었고 높은 투명도와 총인의 증가가 나타난 시기였으며, 수온도 12°C에서 20°C로 상승한 시기였다(김과 황, 2005).

또한, 동절기 동안 남조류의 생물량 감소와 더불어 *Microcystis*에서 다시 *Oscillatoria*로의 우점종의 변화는 낮은 수온에서 *Microcystis* spp.의 성장률 감소와 부력기능 저하와 관련되어 설명될 수 있다. *Microcystis*의 성장률은 15°C 이하 수온에서 점차 감소하고(Krüger and Eloff, 1978; Nicklisch and Kohl, 1983; Kappers, 1984; Reynolds, 1984; Robarts and Zohary, 1987), 약 10°C에서 부력기작을 상실하여 퇴적층으로 침전하는 것으로 보고된 바 있다(Thomas and Walsby, 1986). 이러한 선행연구 결과와 *Microcystis*가 우점하고 침강량이 조사된 7월부터 11월 까지의 수온분포를 고려할 때(22.6~11.4°C) 가장 높은 침강량은 수온이 가장 낮았던 11월로 예측가능하나 본 연구에서는 수층간의 세포밀도 차이가 적은 10월에 나타났다(김과 황, 2004). 이는 11월에 유입수를 통해 공급된 인(연간 총 인 유입부하량의 17.1%)의 양이 10월에 비해 많았기 때문에(김과 황, 2004), 이러한 고농도의 인 조건이 낮은 수온에 대한 민감도를 감소시켰을 것으로 판단할 수 있다(Reynolds, 1984; Romo and Miracle, 1994). 본 연구의 서로 다른 수온과 광도, 영양염 조건에서의 현장조류 성장률 비교실험에서도 인이 첨가된 낮은 수온 조건에서의 성장률이 높은 수온의 인이 첨가되지 않은 대조구에서의 성장률과 유사함으로써 수온에 대한 민감도가 감소됨이 나타났다(Fig. 6).

저수지 바닥에 축적된 유기물은 계절적인 변화를 보이지는 않았으나, 유기물 분석결과 퇴적물의 C/N비는 평균 7±0.8로 나타나 이들이 대부분 식물플랑크톤에 의한 내부기원유기물로 추정되었다. 선행 연구 결과들에 의하면, 식물플랑크톤을 포함한 수생식물의 C/N비는 4~10 정도이고 육상식물은 20 이상이다(Redfield *et al.*, 1963; Meyers and Ishiwatari, 1993). 또한 퇴적물의 C/N비는 부식 정도를 판별하는 기준(humosity)으로도 사용되고 있어(Hansen, 1961) C/N비가 10 이상인 호수를 polyhumic lake로, 10 이하인 호수를 oligohumic lake로 분류하고 있다. 이러한 기준을 토대로 할 때 본 연구 대상저수지는 oligohumic lake이며, 식물플랑크톤과 부식질의 중간단계로 유기물 분해의 초기단계로 유추가능하며, 수층에서 침강된 식물플랑크톤이 퇴적물에 포함된 유기물의 상당부분에 기여했을 것으로 생각할 수 있다. 본 연구 대상 저수지는 유입수량이 적을 뿐만 아니라 유입되는 질소와 인이 식물플랑크톤에 의해 동화되는 용존인(86.8%)이나 무기질소(78%)형태로 유입되기 때문에(김과 황, 2004) 퇴적층 내 유기물에 대한 외부기원 유기물의 기여가 상대적으로 적은 것으로 판단 할 수 있다.

본 저수지 퇴적물 내 인함량은 0.82~1.14 mg P g^{-1} 범위로 대형 인공호인 안동호와 합천호와 유사한 수준이었으나(국립환경과학원, 2003), 저수지의 규모를 감안한다면 인 공급원으로서 퇴적층은 본 연구대상 저수지에서 더 중요하게 고려되어야 한다. 한편, 본 연구에서 9~11월 동안 간극수 내 용존 무기인의 농도가 감소한 결과는 퇴적물의 부식화도와 저층의 희박한 산소환경으로 생각할 수 있다. 본 연구대상 저수지에서와 같이 유기물 분해 초기단계의 퇴적 환경에서, 성층이 형성되고 심층에서 산소가 희박한 환원적 환경이 조성되는 경우에는 철이나 알루미늄과 결합되었던 인이 수체로 확산되기 때문에(Bostrom *et al.*, 1982), 7월과 8월 표층과 심층간 용존 무기인 농도의 큰 차이(김과 황, 2004)는 간극수내 용존무기인의 용출이 원인인 것으로 판단된다. 그 결과 간극수

내 용존총인(DTP) 중 대부분이 유기인 형태(68%) (김과 황, 2004)로 나타난 것으로 추정할 수 있다. 이러한 퇴적 환경 특성은 외부로부터 인 공급이 없는 시기에도 퇴적층 유기물의 분해를 통해 용출된 무기인이 조류 성장에 크게 기여할 수 있다(Trimbee and Prepas, 1987; Sheffer *et al.*, 1997).

본 연구의 결과 부영양상태의 연구대상 저수지에서 남조류 종간의 천이는 인 농도, 수온, 빛 등에 복합적으로 작용하여 반응한 결과로 판단되며, 특히 인의 농도는 종의 천이와 더불어 수온에 대한 민감도를 변화시켜 동절기에도 남조류가 생존할 수 있는 원인으로 제시되었다. 본 연구의 결과는, 바닥층에 유기물이 크게 퇴적된 국내의 많은 소형 부영양 저수지에서 연중 남조류의 발달과 지속가능성을 시사하며, 수질개선과 조류제어를 위해 퇴적물 관리(특히, 인의 저감)를 매우 중요하게 고려해야 함을 강조한다.

적 요

본 연구는 부영양 저수지에서 남조류의 발달과 천이에 영향을 미치는 요인들과 그 결과를 평가하기 위하여, 2003년 3월부터 2004년 2월까지 현장 조사를 통하여 남조류 종조성과 밀도변화, 침전특성, 퇴적물 특성을 분석하였다. 또한 인, 수온, 광도를 달리한 조건에서의 남조류 성장률을 비교하였다. 식물플랑크톤은 봄철(3~4월)에 규조류와 편모조류가 우점한 시기를 제외하고는 연중 남조류가 우점하였고, 7월과 11월에 높은 밀도 증가가 관찰되었다. 남조류 우점기간 중 5월에는 *Oscillatoria* spp., 6월에는 *Aphanizomenon* sp.이 우점하였고, 7월부터 11월까지는 *Microcystis* spp.가 우점종으로 나타났다. *Oscillatoria* spp.가 우점하고 침강율이 높았던 5월에는 수온, 광도 그리고 TN/TP 비가 높았던 반면, *Microcystis* spp.가 우점한 7월부터 11월까지의 TN/TP 비는 상대적으로 낮은 범위(평균 27)를 보였다. 침강속도는 규조류가 우점한 3월 가장 높았고, 남조류의 우점종 기간 중에서는 5월과 10월이 다른 시기와 비교할 때 빨랐다. 퇴적물의 C/N 비는 6~8의 범위였고, 간극수내 무기인의 농도는 심층에 산소농도가 희박(<2 mg O_2 L^{-1})하였던 시기에 감소하였다. 남조류의 성장률은 영양염 농도와 수온에 크게 의존하였고, 특히 높은 인 농도는 낮은 수온에서도 남조류가 발달하는 원인으로 나타났다. 본 연구의 결과는, 인이 충분하게 공급되는 국내의 많은 소형 부영양 저수지에서 연중 남조류의 발달과 지속가능성을 시사하며, 수질개선과 조류제어를 위해 인의 저감(특히, 퇴적층 관리)을 매우 중요하게 고려해야 함을 강조한다.

사 사

본 연구는 농림부 기획연구과제(과제 302003-03-2-SB010)인 '농업용저수지의 녹조 제어기법개발 연구'의 일환으로 수행되었음.

인 용 문 헌

국립환경연구원. 2003. 낙동강수계 수중생태계 수질모델인자 조사 최종보고서.

김호섭, 황순진. 2004. 얕은 부영양 저수지의 육수학적 특성: 계절에 따른 수질변화, 육수지 **37**: 180-192.

김호섭, 황순진. 2005. 얕은 부영양저수지의 동 · 식물플랑크톤 군집변화 특성, 육수지 **38**: 18-29.

농업기반공사. 2001. 농업용수 수질측정망 조사 보고서.

황순진. 2006. 농업용 저수지의 녹조제어 기법 및 대책. 농어촌과 환경. 통권 제93호(인쇄중).

APHA. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th ed., APHA-AWWA-WEF, Washington, D.C., USA.

Bostrom, B., M. Janson and C. Forsberg. 1982. Phosphorus release from lake sediments. *Arch. Hydrobiol.* **18**: 5-59.

Carpenter, S.R. and J.R. Kitchell. 1993. Cascading trophic interactions and lake productivity. *Bioscience* **35**: 634-639.

Cichra, M.F., S. Badylak, N. Henderson, B.H. Rueter and E.J. Philips. 1995. Phytoplankton community structure in the open water zone of a shallow subtropical lake (Lake Okeechobee, Florida, U.S.A.). *Arch. fur Hydrobiologie, Advances in Limnology* **45**: 157-175.

Enell, M. and S. Löfgren. 1988. Phosphorus in interstitial water: method and dynamics. *Hydrobiologia* **170**: 103-132.

Fujimoto, N. and R. Sudo. 1997. Nutrient-limited growth of *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium tenue* and competition under various N : P supply ratios and temperatures. *Limnol. Oceonogr.* **42**: 250-256.

Hansen, K. 1961. Lakes types and lake sediments. *Verh. Int. Ver. Limnol.* **14**: 285-290.

Hwang, S-J., C.G. Yoon, S.K. Kweon. 2003. Water quality and limnology of Korean reservoirs. *Paddy and Water Environment* **1**: 43-52.

Kappers, F.I. 1984. On population dynamics of the cyano-

bacterium *Microcystis aeruginosa*. Ph.D. thesis, University of Amsterdam.

Klemer, A.R. 1973. Factors affecting the vertical distribution of a blue-green alga. Ph.D thesis, University of Minnesota.

Klemer, A.R. 1976. The vertical distribution of *Oscillatoria agardhii* var. *isothrix*. *Arch. Hydrobiol.* **78**: 343-362.

Konopka, A.E., A.R. Klemer, A.E. Walsby and B.W. Ibelings. 1993. Effects of macronutrients upon buoyancy regulation by metalimnetic *Oscillatoria agardhii* in Deming Lake, Minnesota. *J. Plankton Res.* **15**: 1019-1034.

Krüger, G.H. and J.N. Eloff. 1978. The effect of temperature on specific growth rate and activation energy of *Microcystis* and *Synechococcus* isolates relevant to the onset of natural blooms. *J. Limnol. Soc. sth. Afr.* **4**: 9-20.

Marker, A.F.H. 1972. The use of acetone and methanol in the estimation of chlorophyll in the presence of phaeophytin. *Freshwater Biol.* **2**: 361-385.

Marker, A.F.H., E.A. Nusch, I. Rai and B. Riemann. 1980. The measurement of photosynthetic pigments in freshwaters and standardization of methods: Conclusions and recommendations. *Arch. Hydrobiol. Beih.* **14**: 91-106.

Meyers, P.A. and R. Ishiwatari. 1993. Lacustrine organic geochemistry-an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *OrgGeochum* **20**: 867-900.

Nicklisch, A. and J.G. Kohl. 1983. Growth kinetics of *Microcystis aeruginosa* (Kutz) Kutz as a basis for modelling its population dynamics. *Int. Rev. ges. Hydrobiol.* **68**: 317-326.

Ping, X.L., L. Sixin, T. Huijuan and L. Hong. 2003. The low TN; TP ratio, a cause or a result of *Microcystis* blooms? *Water Res.* **37**: 2073-2080.

Redfield, A.C., B.H. Ketchum and F.A. Richards. 1963. The influence of organisms on the composition of sea water. p. 26-27. *In*: The sea, 2 (M.N. Hill, ed.). Interscience, New York.

Reynolds, C.S. 1993. The Ecology of freshwater Phytoplankton. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. p. 384.

Reynolds, C.S. 1984. Phytoplankton periodicity: the interactions of form, function and environmental variability. *Freshwater Biol.* **14**: 111-142.

Robarts, R.D. and T. Zohary. 1987. *Microcystis aeruginosa* and underwater light attenuation in a hypertrophic lake (Hartbeespoort Dam, South Africa). *J. Ecol.* **72**: 1001-1017.

Romo, R. and R. Miracle. 1994. Long-term phytoplankton changes in a shallow hypertrophic lake, Albufera of Valencia (Spain). *Hydrobiologia* **275/276**: 153-164.

Sheffer, M., S. Rinaldi, A. Grangnani, L.R. Mur and E.H. Nes. 1997. On the dominance of filamentous cyanobacteria in shallow, turbid lakes. *Ecol.* **78**: 272-282.

Smith, V.H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science* **221**: 669-671.

Smith, V.H., E. Willen and B. Karlsson. 1987. Predicting the summer peak biomass of four species of blue-green algae (cyanphyta/cyanobacteria) in Swedish lakes. *Wat. Res. Bull.* **23**: 397-402.

Tang, E.P.Y., R. Tremblay and W.F. Vincent. 1997. Cyanobacterial dominance of polar freshwater ecosystems: Are high-latitude mat-formers adapted to low temperature. *J. Phycol.* **33**: 171-181.

Thomas, R.H. and A.E. Walsby. 1986. The effects of temperature on recovery of buoyancy by *Microcystis*. *J. Gen. Microbiol.* **132**: 1665-1672.

Trimbee, A.M. and E.E. Prepas. 1987. Evaluation of total phosphorus as a predictor of the relative biomass of blue-green algae with emphasis on Alberta lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **44**: 1337-1342.

Van der Westhuizen, A.J. and J.N. Eloff. 1985. Effect of temperature and light on the toxicity and growth of the blue-green alga *Microcystis aeruginosa* (UV-006). *Planta* **163**: 55-59.

Wasmund, N. 1989. Live algae in deep sediment layers. *Int. Rev. Ges. Hydrobiol.* **74**: 589-597.

Watanabae, M.F. and S. Oishi. 1985. Effects of environmental factors on toxicity of a cyanobacterium (*Microcystis aeruginosa*) under culture conditions. *Applied and Environmental Microbiology* **49**: 1342-1344.

Zevenboom, W., A.B. de Vaate and L.R. Mur. 1982. Assessment of factors limiting growth rate of *Oscillatoria agardhii* in hypereutrophic Lake Wolderwijd, 1978, by use of physiological indicators. *Limnol. Oceanogr.* **27**: 39-52.

(Manuscript received 28 November 2006,
Revision accepted 13 March 2007)