

몇가지 영양염 결핍이 팔당댐의 식물플랑크톤군집에 미치는 영향

김백호 · 최지영 · 황순진¹ · 한명수*

(한양대학교 생명과학과, ¹건국대학교 지역건설환경공학과)

Influences of Nutrient Deficiency on the Phytoplankton Community in Pal'tang Reservoir, Korea. Kim, Baik-Ho, Choi Ji-Young, Hwang Soon-Jin¹ and Han Myung-Soo* (Department of Life Science, Hanyang University Seoul 133-791, Korea, ¹Department of Biological System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

To understand the effect of nutrient deficiency on the plankton community in three stations with different water qualities in Pal'tang Reservoir, Korea, phytoplanktons (>10 µm) were cultured in nutrient enrichment Allen's media (AM) and nutrient-deficient Allen's media. A distinct shift in the species composition and biomass of phytoplankton (as chlorophyll-a) showed in all treatments. In particular, it was very interesting that the new development of cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* occurred by the Fe-deficient AM. Except for Si, a community growth (as chlorophyll-a) was inhibited in all nutrient deficient treatments. Species diversity after nutrient deficiency was changed to below 2.0; slightly increased in N and P-deficiency, while decreased in Si and Fe, respectively. As suggested, dominance was entirely opposite to diversity. Therefore, the nutrient deficient effectively induced the succession of species and biomass, phytoplankton community, suggesting a possibility as a reliable tool to control the algal bloom in eutrophic lakes and reservoirs.

Key words : Allen's media, nutrient deficiency, phytoplankton community, diversity, biomass

서론

우리나라를 비롯한 중위도권 많은 나라들의 부영양호수 및 하천에서 고온기 동안에는 남조, 저온기에는 규조, 편모조 등의 대발생이 매우 보편화된 현상으로 나타나고 있으며, 이들의 직, 간접적 제어를 위한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다. 국내 대부분의 인공댐들은 호수 유입부와 댐 접근 지점간의 물리적, 생물학적 특성이 크게 다르기 때문에 조류가 집중적으로 발생하는 유입부만을

대상으로 물리적 또는 화학적 처리를 적용하는 게 현실적으로 어려운 실정이다 (Ahn *et al.*, 2003; Park, M.H., 2003). 뿐만 아니라 최근 생태공학적 제어 방안의 하나로 서 동일 수역에서 서식하고 있는 박테리아, 동물플랑크톤, 섬모충 등을 이용한 생물학적 제어 (Siggie *et al.*, 1999; Kim and Han, 2003; 장 등, 2003; Ormerod, 2003)가 활발하지만 아직 현장에 직접 적용한 예는 없다.

식물플랑크톤의 성장에 중요한 영양물질 (C, N, P)은 체내에 106:16:1 (C:N:P, 원자비) 또는 41:7:1 (중량비)로 존재하며 (Redfield, 1958), 대개 종마다 성장에 필요한

* Corresponding author: Tel: 02) 2290-1704, Fax: 02) 2296-1741, E-mail: hanms@hanyang.ac.kr

최적 N/P, C/Si, N/Si, Si/P, 다양한 mineral 등을 갖는다 (Lund, 1950; Schindler, 1974; Tezuka, 1985; Jan *et al.*, 1995; Peter and Wasele, 1996; Naoshi *et al.*, 1997; Graneli *et al.*, 1999; Koike *et al.*, 2001; Crosta *et al.*, 2002). 대개 온대성 수역에서 수중 N/P 비가 증가하면 남조 중심의 식물플랑크톤 군집은 녹조나 규조로 전환되며, 낮은 N/P나 높은 인 수준에서 질소가 상대적으로 감소할 경우 남조가 다시 증가하는 특성을 보인다 (Schindler, 1977; Reynolds, 1978, 1980; Smith, 1982). 한편, 인에 비해 규소가 상대적으로 증가하면 규조가 우점한 반면 감소하면 다시 남조로 전환된다 (Wetzel, 1983; Reynolds, 1984; Takamura *et al.*, 1998). 이는 결국 수중내 식물플랑크톤 종조성은 영양물질의 절대적 농도 뿐만 아니라 이들의 상대적 비율에 의해 결정됨을 알 수 있다. 한편, 수중내 특정 영양염의 감소나 결핍은 식물플랑크톤의 성장저해나 종 조성 변화를 유도하거나 (Hutchins, 1995; Takeda *et al.*, 1995; Hutchins and Bruland, 1998), 세포 형태변화 또는 chlorophyll, cytochrome, nitrate reductase 생성억제 등을 유도하였다 (Anderson and Morel, 1982; Brand *et al.*, 1983; Weinberg, 1989; Sunda *et al.*, 1995). 그러나 영양염 조절은 자연 호수나 저수지 등에서 인위적으로 재현하기가 매우 어렵기 때문에 일반적으로 영양물질의 농도나 상대적 비율이 서로 다른 수계의 식물플랑크톤 군집을 비교하는 정도이다. 부영양호수에서 조류제어의 궁극적인 목표는 수계내 총식물플랑크톤 현존량 감소를 통하여 안정된 수자원을 확보하는 것이지만, 저자들은 가장 문제가 되고 있는 조류종 (target algae)의 성장조건을 전환시켜 새로운 종조성을 갖도록 유도함으로써 현재 당면하고 있는 조류제어의 실마리를 찾는 것도 중요하다고 판단하였다.

본 연구는 영양염 결핍이 식물플랑크톤 군집에 미치는 영향을 파악하고자, 팔당호내 3개 지점에서 채수한 현장수를 대상으로 Allen 배지에서 4가지 영양물질 (N, P, Si, Fe)를 각각 결핍시키고 일정시간 배양한 다음 식물플랑크톤 종 출현, 우점도 지수, 다양도 지수 등을 대조군과 비교 조사하였다.

재료 및 방법

1. 시료채취 및 조사지점의 개황

시료채취는 수도권 상수원인 팔당댐의 3개 지점, 남한강과 북한강이 만나는 합류부인 죽자도 인근 수역 (St. 1),

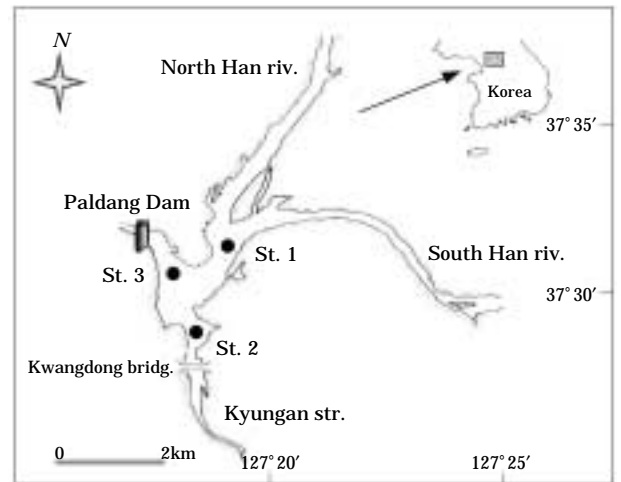


Fig. 1. A map showing the sampling sites in Pal'tang Reservoir, Korea.

경안천 상류인 광동교 인접지점 (St. 2), 팔당댐 앞 지점 (St. 3)에서 실시하였다. 시료채취 순서는 지점 1, 2, 3순으로 오전 10:00에 시작하여 11:30에 종료하였다. 다른 지점에 비해 St. 2는 주변에 많은 골프장을 포함한 위락 시설 및 축산 농가들이 밀집되어 있고, 하류로 갈수록 유속이 급격히 감소하여 갈수기에 매우 심한 정체 현상과 매년 규조 및 남조 대발생이 일어나고 있다 (한 등, 1995; 김 등, 2003).

2. 수질조사

시료채취지점의 환경요인 조사를 위하여 수온, pH, DO 및 전도도는 현장수질측정계기인 HYDROLAB (Hydrolab, 1995), 투명도는 Secchi disc (지름 20 cm)를 이용하여 현장에서 직접 측정하였다. COD와 SS는 수질오염공정시험 방법 (환경부, 1995)에 따라 분석하였고, 영양염류 (T-N, T-P, DTN, DTP, NO₃-N, NH₃-N, PO₄-P는 Auto analyzer (Integral plus, Alliance, France)를 이용하여 분석하였다. DTN, DTP 측정은 채수된 시료를 GF/C filter로 여과하여 시료로 사용하였다. Chlorophyll-a는 GF/C 여과기로 시료 적당량을 여과 후 90% 아세톤으로 암냉소에서 24시간 동안 엽록소를 추출하여 663, 645, 630 그리고 750 nm의 파장에서 흡광광도계 (Carry 1E, Varian)를 이용하여 측정하고 계산하였다 (APHA, 1995).

3. 조류배양

서로 다른 영양 조건하에서 식물플랑크톤 군집 특성을

Table 1. Chemical composition of Allen's media*.

Chemical	Contents (mg L ⁻¹)
NaNO ₃	1,500
K ₂ HPO ₄	39
MgSO ₄ ·7H ₂ O	75
Na ₂ CO ₃	21
CaCl ₂	27
Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O	58
EDTA	1
Citric acid	6
Ferric citrate	6
H ₃ BO ₃	2.86
MnCl ₂ ·4H ₂ O	1.81
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.22
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.39
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.08
Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	0.05

* pH 7.8

알아보기 위하여, 대조군으로 Allen media (AM, Table 1) 과 AM으로부터 N (NaNO₃), P (K₂HPO₄), Si (Na₂SiO₃·9H₂O), Fe (Ferric citrate)이 각각 결핍된 배지를 조성하여 일정기간 배양한 후, 대조군과 실험군의 식물플랑크톤 군집을 비교 분석하였다. 현장수에 포함되어 있는 동물플랑크톤은 10 µm nylon mesh로 여과하거나, 해부현미경 (×50)하에서 capillary로 직접 제거하였다. 현장수에 포함된 영양물질의 영향을 최소화하기 위하여 실험 전에 AM를 이용하여 약 2시간 동안 2회에 걸쳐 세척한 후 적용하였다. 조류배양은 50 mL 시험관(Pyrex, USA)에 처리된 시료를 3 mL씩 각각 접종한 다음, 현장 온도조건과 동일하게 조절된 배양기(광도 135 µmol photons s⁻¹ m⁻², 12h : 12h (L : D) cycle)에서 실시하였다.

4. 식물플랑크톤 동정 및 군집분석

출현된 식물플랑크톤의 계수를 위하여, 배양 초기와 배양 종료시 각 시료를 채수하여 Lugol's solution으로 고정하고 (APHA, 1995), Sedgwick-Rafter Chamber를 사용하여 저배율 (×200)에서 세포수를 계수하였으며, 종 동정은 광학현미경 1,000배 (Axioplan, Zeiss, Germany)에서 실시하였으며, 다양한 문헌을 참고하였다 (Geitler, 1932; Desikachary, 1959; Ettl, 1978; Komárek and Fott, 1983; Popovsky and Pfiester, 1990; Krammer and Lange-Bertalot, 1991; Green and Leadbeater, 1994; Sandgren et al., 1995). 동일 속에서 뚜렷한 식별형질의 차이를 보이지 않는 것들은 모두 미동정 처리하였다. 군집특성을 파악하기 위하여, 출현종수와 개체수를 근거로 한 우점도

Table 2. Water quality of three sampling stations in Pal'tang Reservoir, Korea.

Site	St. 1	St. 2	St. 3
WT (°C)	17.1	17.5	17.4
pH	8.1	8.7	8.1
DO (mg L ⁻¹)	8.8	10.6	8.7
Conductivity (µmhos cm ⁻¹)	115	344	112
Turbidity (NTU)	92	43	125
SD (m)	1.4	0.9	1.1
COD (mg L ⁻¹)	2.6	5.4	1.8
SS (mg L ⁻¹)	2.4	15.4	3.0
T-N (µg L ⁻¹)	2.318	6.477	2.249
T-P (µg L ⁻¹)	0.045	0.355	0.059
DTN (µg L ⁻¹)	2.204	5.613	2.044
DTP (µg L ⁻¹)	0.019	0.189	0.028
NO ₃ -N (µg L ⁻¹)	1.784	4.913	1.716
NH ₃ -N (µg L ⁻¹)	0.300	0.334	0.245
PO ₄ -P (µg L ⁻¹)	0.009	0.113	0.009
Chl-a (µg L ⁻¹)	3.1	151.2	16.9

지수 (McNaughton, 1967), 종다양도 지수 (Pielou, 1966) 등을 계산하였다.

결 과

1. 식물플랑크톤 종 조성

3개 현장수 (> 10 µm)는 녹조-*Golenkinia*, *Eudorina*, *Coelastrum*, *Actinastrum*, *Cosmarium*와 규조-*Cyclotella*가 우점하였으며, 대조군 (AM)에서는 녹조 *Scenedesmus*가 뚜렷하게 우점하였다 (Table 3). 지점 3의 현장수에서는 *Scenedesmus*가 전혀 관찰되지 않았다. 각 영양염 결핍에 따른 식물플랑크톤 종조성 변화는 현장수에 따라 차이를 보였다. 지점 1에서는 현장수에서 출현된 종의 절반이상이 관찰되지 않았고, 주로 남조-*Phormidium*, 녹조-*Eudorina*, *Golenkinia*, *Pediastrum* 등이 사라졌으며, 규조-*Navicula*, *Achnanthes* 등은 새롭게 출현하였다. 지점 2에서도 출현종 감소가 일어났는데, Si, Fe 결핍군에서는 규조가 쇠퇴한 반면, Fe 결핍군에서는 남조-*Aphanocapsa elachista*, *Microcystis aeruginosa*, 녹조-*Dictyosphaerium pulchellum* 등이 새롭게 출현하였다. 한편, 지점 3의 경우, N, P 결핍군에서 현장수나 대조군보다 더 많은 종이 출현하였는데, 규조-*Cyclotella*, 남조-*Anabaena*, *Chroococcus* 등이 새롭게 나타났다 (Table 3). 결과적으로 영양염 결핍은 현장수 종류에 따라 다소 차이를 보였으나, 크게 N, P 결핍에 의한 규조, 남조 발달, 그리고 Si, Fe 결핍에 의해 규조류 쇠퇴현상이 뚜렷

Table 3. Species distribution and abundance (cells mL⁻¹) of phytoplankton in nutrient-deficient Allen's media

Species	St.1						St.2						St.3						
	FL	AM	-N	-P	-Si	-Fe	FL	AM	-N	-P	-Si	-Fe	FL	AM	-N	-P	-Si	-Fe	
Anabaena sp.															2,600				
Aphanocapsa elachista									400			11,200							
Chroococcus limneticu												24,350			300				
Microcystis aeruginosa																			
Phormidium sp.	1,000																		
Acanthosphaera Zacharisi	50																		
Actinastrum hantzschii						9,750	1,550	7,500	50				12,000						81,300
Cosmarium ecornis													2,800		150	750			
Cosmarium sp. 1			1,200			12,950	3,600						700			2,300			
Cosmarium sp. 2							400	7,750			7,400		2,600		250				5,900
Cosmarium sp. 3																		200	
Crucigenia lauterbornei	700																		
Dictyosphaerium pulchellum																			1,000
Eudorina elegans	11,250																		
Golenkinia paucipina	100	150				4,900	100					50							
Kirchneriella obesa												650							
Microactinium pusillum	1,050	250						200											
Pediastrum duplex	400																		
Pediastrum simplex	300																		
Scenedesmus acutus	3,850		600		3,750	2,300	50	14,800			36,500	400		900		800	18,400		3,850
Scenedesmus quadricauda								5,950						200					
Scenedesmus sp. 1	4,200													48,000					21,900
Scenedesmus sp. 2	3,200	6,900	750	1,900	11,150	700	100	14,900			12,300			4,500					10,500
Scenedesmus sp. 3	3,100		500		100						9,600			150					2,350
Schroederia setigera							250		50			100							
Tetradesmus sp.								1,050			5,000								
Coelastrum cambricum	5,500		1,050	850															
Achnanthes sp.			100				150		150	50		7,600							
Cyclotella meneghinana	650		10,500	5,900	100	750	4,150		2,200	4,300									850
Melosira italica																			
Navicula sp.			300		250		900		150										
Rhizosolenia longiserta							600												
Stephanodiscus sp.							1,500			1,900									
Synedra ulna	100						400		150										400

*The symbols FL: filtrate (GF/C) of lake water as a media, AM: Allen's media, -N, -P, -Si and -Fe: Allen's media without N, P, Si and Fe, respectively.

하게 나타났다. 또한 현장수에 비해 대조군(AM)에서는 대부분 녹조류가 강하게 우점하였으나, N, P 결핍시 뚜렷하게 감소된 반면, Si, Fe 결핍시에는 크게 감소하지 않았다.

2. 식물플랑크톤 개체수와 Chlorophyll-a 농도

영양염 결핍에 따른 조류개체수의 변동을 살펴보면

(Table 3, Fig. 2A), 지점 1에서는 전체적으로 $9.85 \times 10^3 \sim 2.65 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ 범위를 보였으며, N, P, Si 결핍군에서는 대조군의 각각 66.1%, 90.6% 103%이었으며, Fe 결핍군에서는 대조군보다 2배에 가깝게 (178%) 세포수가 증가하였다. 지점 2에서는 $6.3 \times 10^3 \sim 7.1 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ 로서 N, P, Si 결핍군에서 각각 21.1%, 13.0%, 20.3%로

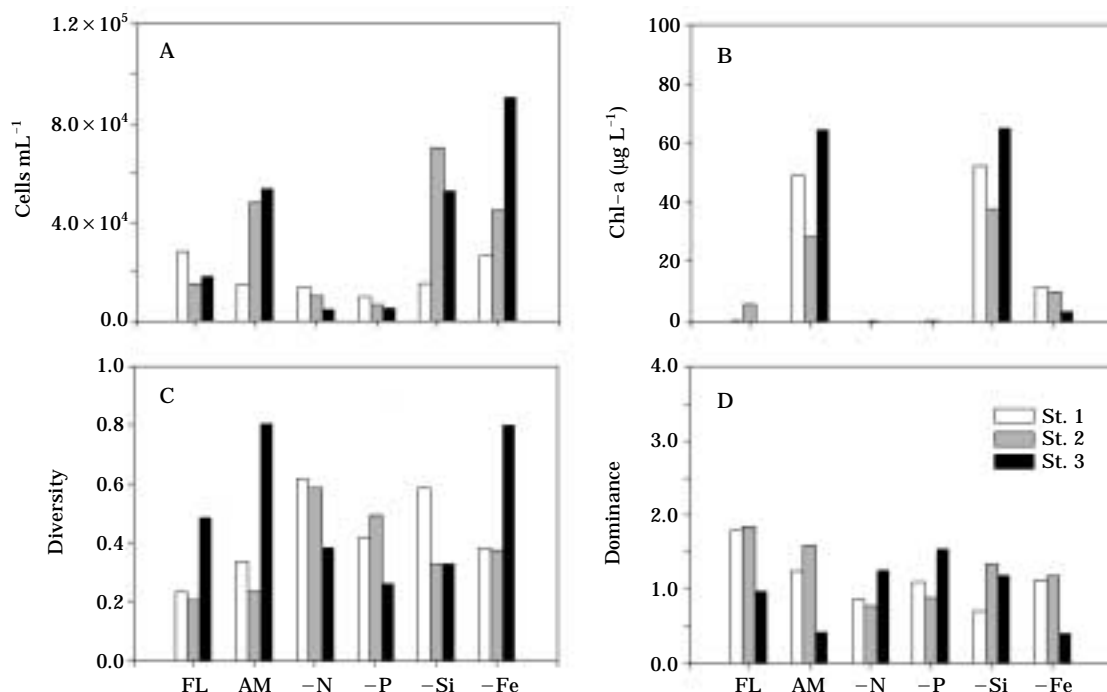


Fig. 2. Abundance (A, cells mL⁻¹), chlorophyll-a (C, µg L⁻¹), diversity (B, H') and dominance indices (D, DI) of three phytoplankton communities in nutrient-deficient Allen's media, Allen's media and filtrate. The symbols FL: filtrate of lake water as media, AM: Allen's media, -N, -P, -Si and -Fe : Allen's media without N, P, Si and Fe, respectively.

Table 4. Relative abundances (%) of major dominant phytoplankton in four nutrient-deficient Allen's media and natural condition.

Media*	St. 1	St. 2	St. 3
FL	<i>Eudorina elegans</i> (40.0%) <i>Coelastrum</i> sp. (19.5%)	<i>Golenkinia</i> sp. (32.8%) <i>Cyclotella</i> sp. (27.8%)	<i>Actinastrum hantzschii</i> (66.3%) <i>Cosmarium</i> sp. 1 (15.5%)
AM	<i>Scenedesmus</i> sp. 1 (46.3%) <i>Scenedesmus</i> sp. 2 (28.2%)	<i>Scenedesmus</i> sp. 1 (30.8%) <i>Scenedesmus acutus</i> (30.6%)	<i>Scenedesmus</i> sp. 1 (89.3%) <i>Scenedesmus</i> sp. 2 (8.4%)
-N	<i>Cyclotella</i> sp. (77.8%) <i>Coelastrum</i> sp. (7.8%)	<i>Actinastrum</i> sp. (73.5%) <i>Cyclotella</i> sp. (21.6%)	<i>Anabaena</i> sp. (55.3%) <i>Melosira</i> sp. (26.6%)
-P	<i>Cyclotella</i> sp. (59.9%) <i>Scenedesmus</i> sp. 2 (19.3%)	<i>Cyclotella</i> sp. (64.2%) <i>Stephanodiscus</i> sp. (28.4%)	<i>Cosmarium</i> sp. 2 (43.4%) <i>Cyclotella</i> sp. (16.0%)
-Si	<i>Scenedesmus acutus</i> (72.6%) <i>Scenedesmus</i> sp. 1 (24.4%)	<i>Scenedesmus acutus</i> (51.6%) <i>Scenedesmus</i> sp. 1 (17.4%)	<i>Scenedesmus</i> sp. 1 (41.2%) <i>Scenedesmus acutus</i> (34.6%)
-Fe	<i>Cosmarium</i> sp. 2 (49.0%) <i>Actinastrum hantzschii</i> (36.9%)	<i>Microcystis aeruginosa</i> (53.7%) <i>Aphanocapsa</i> sp. 2 (24.7%)	<i>Actinastrum hantzschii</i> (89.5%) <i>Cosmarium</i> sp. 3 (6.5%)

*The symbols FL: filtrate (GF/C) of lake water as media, AM: Allen's media, -N, -P, -Si and -Fe : Allen's media without N, P, Si and Fe, respectively.

뚜렷한 감소를 보인 반면, Si 결핍균에서 대조군의 146%로 크게 증가하였다. 한편, 지점 3에서는 전체적으로 1.8

Table 5. First order growth of phytoplankton community in each nutrient-deficient media. The growth was represented by the concentration of chlorophyll-*a* ($Y = a + bX$).

Media*	Materials	a	b	r	p
FL	St. 1	0.020	0.015	0.85	<0.0001
	St. 2	0.147	0.499	0.97	<0.0001
	St. 3	-0.026	0.010	0.96	<0.0001
AM	St. 1	-12.822	4.895	0.96	<0.0001
	St. 2	-5.967	2.786	0.97	<0.0001
	St. 3	12.955	3.912	0.88	<0.0001
-N	St. 1	0.105	-0.0001	-0.03	0.8869
	St. 2	0.525	0.0068	0.18	0.5520
	St. 3	-0.006	0.001	0.47	0.0511
-P	St. 1	0.027	0.001	0.75	<0.0001
	St. 2	0.397	0.030	0.67	0.0124
	St. 3	-0.008	0.002	0.57	0.0128
-Si	St. 1	-2.849	3.340	0.94	<0.0001
	St. 2	-8.461	3.461	0.97	<0.0001
	St. 3	9.262	3.918	0.91	<0.0001
-Fe	St. 1	-2.455	0.967	0.95	<0.0001
	St. 2	-2.0650	0.908	0.95	<0.0001
	St. 3	-2.0918	0.496	0.93	<0.0001

*The symbols FL: filtrate (GF/C) of lake water as media, AM: Allen's media, -N, -P, -Si and -Fe: Allen's media without N, P, Si and Fe, respectively.

$\times 10^3 \sim 9.1 \times 10^4$ cells mL⁻¹로서 N, P 결핍균에서 대조군의 각각 3%, 9.9%로서 가장 크게 감소하였고, Si 결핍균에서 98.9%로서 대조군과 유사하였으며, Fe 결핍균에서 169%로 뚜렷하게 개체수 증가를 보였다 결국, 영양염 결핍에 따른 조류 개체수의 변동은 현장수에 따라 다소 차이를 보였으나, 종 출현과 유사하게 N, P, Si 결핍균에서는 개체수가 크게 감소하거나 대조군과 유사하였는데, Fe 결핍균에서는 반대로 개체수가 크게 증가하였다.

식물플랑크톤 성장(총 chlorophyll-*a* 양)은 지점 1에서 가장 높은 성장(71 $\mu\text{g L}^{-1}$)을 보였으며, 지점 3에서 55 $\mu\text{g L}^{-1}$, 지점 2에서 41 $\mu\text{g L}^{-1}$ 를 보였다(Table 5, Fig. 3). 또한 3개 현장수 공히 유사한 성장패턴을 보였는데, N, P 결핍균에서는 뚜렷한 성장저해를 보인 반면, Si 결핍균에서는 성장저해가 거의 나타나지 않았다. 남조 *Microcystis* 발달을 유도하였던 Fe 결핍균에서는 지점 1, 2, 3 순으로 성장을 보였으나, 모두 10 $\mu\text{g L}^{-1}$ 미만이었다.

3. 식물플랑크톤 군집

영양염이 결핍된 배지에서 일정시간 배양한 다음 각 실험군에서 출현된 식물플랑크톤의 종수 및 세포수를 근거로 우점도 지수와 다양도 지수를 계산한 결과는 다음과 같다. 전체적으로 실험군의 우점도 지수는 0.21~0.81의 범위로서 지점 3를 제외한 모든 결핍균에서 대조군보다 높은 수치를 보였다(Fig. 2B). 또한 지점 3의 경우, N,

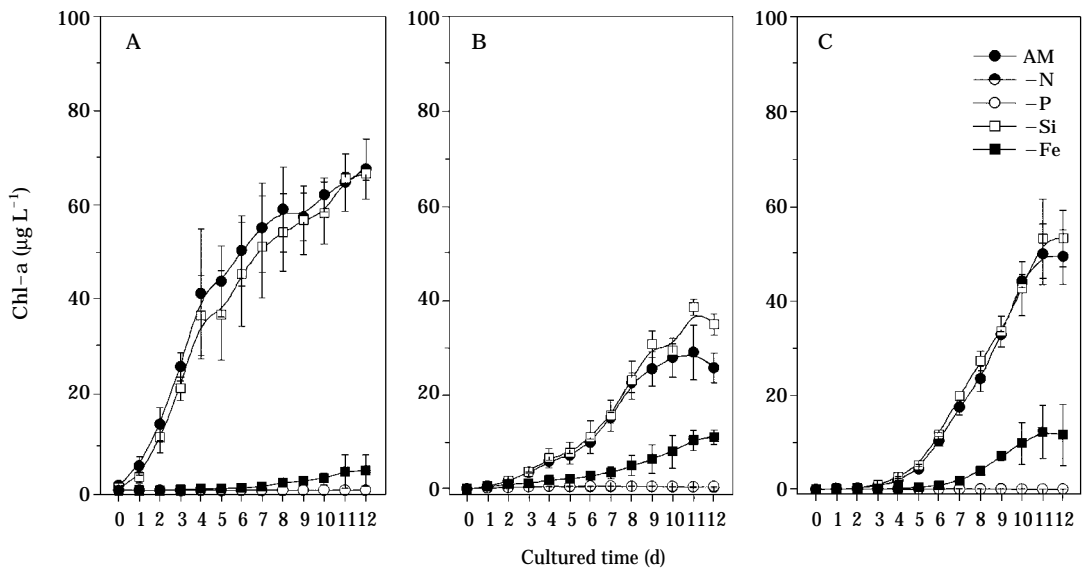


Fig. 3. Growth patterns of three phytoplankton communities in nutrient-deficient Allen's media, Allen's media and filtrate. The symbols FL: filtrate of lake water as media, AM: Allen's media, -N, -P, -Si and -Fe: Allen's media lack N, P, Si and Fe, respectively.

P, Si 결핍군에서는 지점 1, 2보다 낮은 우점도를 보인 반면, 대조군, Fe 결핍군에서는 0.8에 가까운 높은 우점도를 보였다. 팔당호 식물플랑크톤의 군집 다양도지수 (H')는 전체적으로 2 이하 (0.41~1.85)의 낮은 수치를 보였다 (Fig. 2D). 지점 1과 2에서는 N, P 결핍에 따라 다양도 지수가 감소한 반면, 지점 3에서는 오히려 증가하였다. 한편, 지점 2의 경우, Si, Fe 결핍군에서 N, P 결핍군보다 더 높은 다양도 지수를 보였다. 결과적으로 영양염 결핍에 따른 식물플랑크톤 군집의 우점도 및 다양도 지수의 변동은 N, P 결핍은 군집의 우점도 감소 및 다양도 증가를 보였고, Si, Fe 결핍은 우점도 증가 및 다양도 감소를 보였다.

고 찰

본 연구에서 영양염의 조절(결핍)이 식물플랑크톤 군집 변화의 중요한 요소가 될 수 있음이 밝혀졌다. 특히 대조군으로 사용하였던 *Allem media* (AM)에 식물플랑크톤 (>10 µm)를 도입할 경우, 3개 현장수 모두 녹조 (*Scenedesmus*)를 발달시켰는데, AM이 *Bold Basal*과 함께 녹조류의 집적배양에 매우 효과적이지만 (Maxwell, 1991), 특정조류만을 우점적으로 발달시킨 것은 이례적이다. 특히 팔당호의 댐 근접부인 지점 3의 경우, 현장수에서는 단 한 개체도 관찰되지 않았던 것과는 달리 질소 (N)를 제외한 AM, 그리고 P, Si, Fe 결핍군에서의 4종의 녹조 *Scenedesmus*, N, P 결핍군에서 *Anabaena*, *Cyclotella* 등의 발달은 흥미로운 결과이다. 또한 영양염이 결핍된 실험군의 식물플랑크톤의 종출현은 영양염의 종류나 현장 채수지점에 따라 차이를 보였다. 전체적으로 N, P 결핍군에서는 남조와 규조가 발달한 반면 녹조는 쇠퇴하였고, Si, Fe 결핍군에서는 녹조가 발달한 반면 규조가 쇠퇴하였다. 전체적으로 N, P, Si 결핍에 의해서 속 (*genus*) 수준에서 천이현상이 일어났으며, Fe 결핍에서는 종 (*species*) 수준에서의 천이가 일어났다. 각 현장수에 대하여, 지점 2에서는 Fe 결핍시 남조 (*Microcystis*, *Aphanocapsa*)의 발달 및 녹조 저해가 일어난 반면 지점 1, 3에서는 녹조가 발달하였다. 이상과 같이 동일 영양염에 대해서도 지점간의 서로 다른 결과를 보인 것은 아직 정확하게 설명할 수는 없으나, 일차적으로 팔당호내에서도 이화학적 환경요인이 크게 다른 3개 지점의 현장 식물플랑크톤의 종조성 차이에서 비롯된 것으로 사료된다.

본 연구에서 Si 결핍의 경우, 규조쇠퇴 및 녹조발달을 유도하였는데 남조나 녹조가 높은 대조군 군집성장과 매

우 유사한 성장을 보였다. 이는 영양염 결핍시 모든 종류에서 뚜렷한 식물플랑크톤의 종 천이가 유도되었으나 총 생물량을 조절하기 위해서는 영양염의 종류보다 현장수의 종 조성에 대한 세밀한 관찰이 요구된다고 판단된다. 뿐만 아니라 영양염 결핍으로 인한 식물플랑크톤의 성장 저해 및 종조성의 변화 (Hutchins, 1995; Takeda *et al.*, 1995; Hutchins and Bruland, 1998) 또는 세포형태변화 (Sunda *et al.*, 1995), 세포내 chlorophyll, cytochrome, nitrate reductase 생성이나 새로운 단백질의 생성 등은 이미 잘 알려져 왔다 (Sunda *et al.*, 1981; Anderson and Morel, 1982; Brand *et al.*, 1983; Weinberg, 1989; Bibby *et al.*, 2001). 따라서 특정수역의 조류제어를 위한 영양염 조절은 조류의 종 천이와 생물량의 변동 등을 유도할 수 있도록 현장수의 정확한 상태파악은 물론 대상조류와 영양물질간의 관계에 대한 연구가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서 새로운 남조발달을 유도하였던 철 (Fe)은 지점 2에서만 남조 *Microcystis aeruginosa*의 발달시켰을 뿐 다른 지점에서는 관찰되지 않았다. 지점 2는 지점 1과 3에 비하여 영양물질 (N, P)이 가장 높은 수준을 보였으며, 녹조와 규조가 높은 밀도를 나타낸 지점이다. 일반적으로 철 (Fe)은 식물플랑크톤의 성장을 촉진하며 (Goldman, 1972; Murphy *et al.*, 1976; Jackson and Hecky, 1980; DeHaan *et al.*, 1985; Takeda and Obata, 1995; Hyenstrand *et al.*, 1999), *Dinobryon*, *Synura*, *Uroglena* 같은 Chrysoophyceae (Munch, 1972; Van Dork, 1982; Ishida *et al.*, 1982), 규조 (Takeda *et al.*, 1995; Zeitler *et al.*, 1996; Gall *et al.*, 2001), 질소고정 남조 등의 현존량을 증가하였다 (Hyenstrand *et al.*, 1999). 이에 반해 철 결핍이나 감소는 식물플랑크톤의 성장 제한이나 사상형 남조 *Aphanizomenon ovalisporum*의 생산력 감소 등을 유도하였다 (Polingher *et al.*, 1995; Fitzwater *et al.*, 1996). 본 연구에서 철이나 질소 결핍에 따른 남조 (예, *Microcystis*, *Anabaena*)의 성장현상은 지금까지 보고된 바 없는 흥미로운 결과이며, 수중내 먹이관계 또는 광합성시스템 (Bibby *et al.*, 2001; Boekema *et al.*, 2001) 등에 관한 추후 연구가 요구된다.

사실상 우리나라처럼 호수나 하천으로 지속적인 유기물 유입 및 자체 생성유기물이 증가하고 있는 상황에서 조류의 근본적 제어는 매우 어려운 과제이다. 특히 대부분의 호소가 중 또는 부영양에서 과영양 상태로 진행중임을 감안한다면, 조류제어를 위한 새로운 기술 개발은 매우 시급하다. 자연계에서 영양물질의 완전제거는 거의 불가능하지만, 본 연구에서처럼 수중내 영양물질의 상대

적 비의 조절함으로써 target algae의 종 천이를 유도하거나 절대적인 생물량을 줄일 수 있다면 조류에 의한 부작용을 줄일 수 있는 가능성은 배제할 수 없다. 다만 이로 인하여 새롭게 출현한 종이 수 환경에 미치는 영향과 자연수계에서 적절한 영양물질의 농도비율 조절 등에 대한 연구가 필요하다.

적 요

영양염 (N, P, Si, Fe) 결핍이 팔당호내 서로 다른 3개 지점의 식물플랑크톤 군집 (> 10 µm)에 어떠한 영향을 미치는지 파악하기 위하여 채수한 현장수를 결핍배지에서 일정시간 배양한 후 대조군과 비교 조사하였다. 조사결과, 현장수는 공히 영양물질과 현장수 종류에 따라 서로 다른 종 천이 및 생물량을 나타냈다. 영양염 결핍에 따른 종 천이는 N, P, Si 결핍군에서는 속 (genus) 수준에서, Fe 결핍에서는 종 (species) 수준에서 일어났다. 특히 Fe 결핍에서 남조 *Microcystis aeruginosa*, N 결핍에서 *Anabaena*의 발달은 매우 흥미로운 결과이다. 또한 모든 결핍군에서 뚜렷한 성장저해 현상을 보였으나 Si 결핍군에서는 생물량 변동이 거의 없었다. 식물플랑크톤 군집은 영양염 결핍과 채수지점에 따라 차이를 보였는데, 전체적으로 N, P 결핍군에서는 우점도 감소 및 다양도 증가를 보였으며, Si, Fe 결핍군과는 반대 결과를 보였다. 따라서 영양염 결핍은 조사지점에 따라 다소 차이를 보였으나 식물플랑크톤 종 천이, 생물량 변동 등의 뚜렷한 군집변화를 유도함으로써 수계내 문제조류의 근본적 해결의 가능성을 시사해 주었다.

사 사

본 연구는 국가지정연구실사업 (2000-N-NL-01-290) 과 2001년도 한강기초조사사업의 지원을 받아 수행하였으며, 실험에 도움을 주신 이육세, 정혜진, 김보라 양에게 감사드립니다.

인 용 문 헌

김종민, 박준대, 노혜란, 한명수. 2003. 소양호와 팔당호 수질의 수직 및 계절적 변화. 한국육수학회지 **35**: 10-20.
장은희, 김정동, 한명수. 2003. 남조류 분해세균 HY0210-AK1

의 분리와 특성 및 *Anabaena cylindrica* 분해 활성. 환경생물학회지 **21**: 194-202.

한명수, 어윤열, 유재근, 유광일, 최영길. 1995. 팔당호의 생태학적 연구 2. 식물플랑크톤의 군집구조의 변화. 한국육수학회지 **28**: 335-344.

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.

Allen, M.M. 1984. Cyanobacterial cell inclusions. *Annu. Rev. Microbiol.* **38**: 1-25.

Anderson, G.C. and F.M.M. Morel. 1982. The influences of aqueous iron chemistry on the uptake of iron by the coastal diatom *Thalassiosira weissflogii*. *Limnol. Oceanogr.* **27**: 789-813.

APHA. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th Ed. APHA, AWWA, WPCF, Washington, p.1134.

Bibby, T.S., J. Nield and J. Barber. 2001. Iron deficiency induces the formation of an antenna ring around trimeric photosystem I in cyanobacteria. *Nature* **412**: 743-745.

Boekema, E.J., A. Hifney, A.E. Yakushevskaya, M. Piotrowski, W. Keegstra, S. Berry, K.P. Michel, E.K. Pistorius and J. Kruip. 2001. A giant chlorophyll-protein complex induced by iron deficiency in cyanobacteria. *Nature* **412**: 745-748.

Brand, L.E., W.G. Sunda and R.R. Guillard. 1983. Limitation of marine phytoplankton reproduction rates by zinc, manganese and iron. *Limnol. Oceanogr.* **28**: 1182-1198.

Crosta, X., A. Shemesh, M.E. Salvignac, H. Glider and R. Yam. 2002. Late quaternary variations of elemental ratios (C/Si and N/Si) in diatom-bound organic matter from the Southern Ocean. *Deep-Sea Res. II* **49**: 1939-1952.

DeHaan, H., M.J.W. Veldhuis and J.R. Moed. 1985. Availability of dissolved iron from Tjeukemeer, The Netherlands, for iron-limited growing *Scenedesmus quadricauda*. *Water Res.* **19**: 235-239.

Desikachary, T.V. 1959. Cyanophyta. ICAR New Delhi, p. 686.

Ettl, H. 1978. Xanthophyceae. 1. Sussw.-Fl. (2 Ed.) **3**: 1-530.

Fitzwater, S.E., K.H. Coale, R.M. Gordon, K.S. Johnson and M.E. Ondrusek. 1996. Iron deficiency and phytoplankton growth in the equatorial Pacific. *Deep-Sea Research II* **43**: 995-1015.

Gall, M.P., P.W. Boyd, J. Hall, K.A. Safi and H. Chang.

2001. Phytoplankton processes. Part 1: Community structure during the Southern Ocean Iron Release Experiment (SOIREE). *Deep-Sea Res. II* **48**: 2551–2570.
- Geitler, L. 1932. Cyanophyceae. *Krypt-Fl.* **14**: 1–1196.
- Goldman, C.R. 1972. The role of minor nutrients in limiting the productivity of aquatic ecosystem. *In*: nutrient and eutrophication (ed. By Likens GE), pp.22–44, Lawrence, Kansas: American Society of Limnology and Oceanography Special Symposium No.
- Graneli, E., P. Carlsson and C. Legrand. 1999. The role of C, N, P in dissolved and particulate organic matter as a nutrient source for phytoplankton growth, including toxic species. *Aquatic Ecology* **33**: 17–27.
- Green, J.C., B.S.C. Leadbeater. 1994. The haptophyte algae. Systematic Association, Special 51, Oxford, p. 446.
- Hutchins, D.A. 1995. Progress in Phycological Research. Vol. II. (Eds. Chapman D, Round F). pp.1–49. Biopress, Bristol.
- Hutchins, D.A. and K.W. Bruland. 1998. Iron-limited diatom growth and Si : N uptake ratios in a coastal upwelling regime. *Nature* **393**: 561–564.
- Hyenstrand, P., E. Ryding and M. Gunnerhed. 1999. Response of pelagic cyanobacteria to iron additions–enclosure experiments from Lake Erken. *J. Plankton. Res.* **22**: 1113–1126.
- Ishida, Y., B. Kimura, H. Nakahara and H. Kadota. 1982. Analysis of major nutrient effecting Uroglena a bloom in the northern Lake Biwa, by use of algal bioassay. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.* **48**: 1281–1287.
- Jackson, T.A. and R.E. Hecky. 1980. Depression of primary productivity by humic matter in lake and reservoir waters of boreal forest zone. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **37**: 2300–2317
- Jan, C., J.C. Roos and A.J.H. Pieterse. 1995. Nutrients, dissolved gases and pH in the Vaal River at Balkfontein, South Africa. *Arch. Hydrobiol.* **133**: 173–196.
- Kim, B.H. and M.-S. Han. 2003. Usage of bio-agents to control cyanobacterial and diatomal bloom in Pal'tang reservoir, a Korean freshwater. Annual Meeting of Korean Society of Limnology, Ecology, and Environmental Biology, P 7~8, June 20~21, Taegu University, Taegu, Korea.
- Koike, I., H. Ogawa, T. Nagata, R. Fukuda and H. Fukuda. 2001. Silicate to Nitrate ratio of upper sub-artic Pacific and the Bering sea basin in summer; its implication for phytoplankton dynamics. *J. Oceanogr.* **57**: 253–260.
- Komárek, J. and B. Fott. 1983. Chlorophyceae (Chlorococcales). *In*: Das Phytoplankton des Subwassers– Systematik und Biologie (ed. by Huber–Pestalozzi G.), pp. 747–945. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Krammer, K. and H. Lange–Bertalot. 1991. Bacillariophyceae. 3. Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. Süswasser–flora von Mitteleuropa. (2 Ed.) **2**(3): 1–576. Gustav Fischer, Stuttgart.
- Lund, J.W.G. 1950. Studies on *Asterionella formosa* HASS. Nutrient depletion the spring maximum. *J. Ecol.* **38**: 1–35.
- Maxwell, C.D. 1991. Floristic changes in soil algae and cyanobacteria in reclaimed metal–contaminated land at Sudbury, Canada. *Water, Air and Soil Pollution* **60**: 381–393.
- McNaughton, S.J. 1967. Relationship among functional properties of California Glassland. *Nature* **216**: 168–169.
- Munch, C.S. 1972. An ecological study of the planktonic chrysophytes of Hall Lake, Washington. Ph.D. Thesis. Seattle: University of Washington.
- Murphy, T.P., D.R.S. Lean and C. Nalewajko. 1976. Blue–green algae: their excretion of iron–selective chelators enables them to dominate other algae. *Science* **192**: 900–902.
- Naoshi, J., S. Takeda and C.S. Wong. 2001. Change in the concentrations of iron in different size fractions during a phytoplankton bloom in controlled ecosystem enclosures. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **258**: 237–255.
- Ormerod, S.J. 2003. Restoration in applied ecology: editor's introduction. *J. Appl. Ecol.* **40**: 44–50.
- Park, M.H., C.Y. Ahn, B.D. Yoon and H.M. Oh. 2003. Growth inhibition of *Microcystis aeruginosa* by rice straw extract. *Letter Applied Microbiol.* Submitted.
- Peter, A.T. and H. Wasele. 1996. Nutrient limitation of phytoplankton in the upper Swan River estuary, Western Australia. *Mar. Freshwater Res.* **47**: 659–667.
- Pielou, E.C. 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. *J. Theo. Biol.* **13**: 131–144.
- Pollinger, U., B. Kaplan and T. Berman. 1995. The impact of iron and chelators on Lake Kinneret phytoplankton. *J. Plankton. Res.* **17**: 1977–1992.
- Popovsky, J. and L.A. Pfiester. 1990. Dinophyceae (Dinoflagellata). *In* "Süswasserflora von Mitteleuropa" (Eds. by Ettl H, Gerloff J, Hyenig H, Mollerhauer D) Brgründet von A. Pascher, Band 6. pp.272. Gustav Fischer Verlag, Jenna Stuttgart.
- Redfield, A.C. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Sci.* **46**: 205–255.

- Reynolds, C.S. 1978. The plankton of the northern-west Midland meres. Occasional Papers of the Caradoc and Severn Valley Field Club. No. 236+xxiii.
- Reynolds, C.S. 1984. The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge University Press.
- Sandgren, C.D., J.P. Smol and J. Kristiansen. 1995. Chrysophyte algae. Ecology, phylogeny and development. Cambridge University Press. p.399.
- Schindler, D.W. 1974. Eutrophication and recovery in experimental lakes: implications for lake management. *Science* **184**: 897-899.
- Schindler, D.W. 1977. Evolution of phosphorus limitation in lakes. *Science* **195**: 260-262.
- Sigee, D.C., R. Glenn, M.J. Andrews, E.G. Bellinger, R.D. Butler, H.A.S. Epton and R.D. Hendry. 1999. Biological control of Cyanobacteria : principles and possibilities. *Hydrobiologia* **395/396**: 161-172.
- Smith, V.H. 1982. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis. *Limnol. Oceanogr.* **27**: 1101-1112.
- Sunda, W.G. and S.A. Huntsman. 1995. Iron uptake and growth limitation in oceanic and coastal phytoplankton. *Mar. Chem.* **50**: 189-206.
- Takamura, N., T. Hanazato, T. Iwakuma, Y. Nojiri, A. Otsuki and M. Aizaki. 1998. Long-term Monitoring of Nutrients, Plankton and Benthos in Lake Kasumigaura. In: Iwakuma T. (Ed.) Long-term ecological research in the east Asia-pacific region: biodiversity and conservation of terrestrial and freshwater ecosystems. Center for Global Environmental Research, Tsukuba, Japan, pp.155-165.
- Takeda, S. and H. Obata. 1995. Response of equatorial Pacific phytoplankton to subnanomolar Fe enrichment. *Mar. Chem.* **50**: 219-227.
- Takeda, S., A. Kamatani and K. Kawanobe. 1995. Effects of nitrogen and iron enrichments on phytoplankton communities in the northwestern Indian Ocean. *Mar. Chem.* **50**: 229-241.
- Tezuka, Y. 1985. Rainfall as a factor regulating the appearance of *Anabaena* Bloom in the South Basin of Lake Biwa. *Jpn. J. Limnol.* **46**: 8-14.
- Van Dork, E. 1982. Factors influencing phytoplankton growth and succession in Lake Maarsseveen (I) Ph.D. Thesis. University of Arsterdam.
- Weinsberg, E.D. 1989. Cellular regulation of iron assimilation. *Quart. Rev. Biol.* **64**: 261-290.
- Wetzel, R.G. 1983. A comparative study of the primary productivity of higher aquatic plants, periphyton and phytoplankton in a saline lake. Ph D. Diss. Univ. California. Davis.
- Zeitler, E.R., R.J. Olson, B.J. Binder, S.W. Chisholm, S.E. Fitzwater and R.M. Gordon. 1996. Iron-enrichment bottle experiments in equatorial Pacific: responses of individual phytoplankton cells. *Deep-Sea Res. II* **43**: 1017-1029.

(Manuscript received 20 November 2003,
Revision accepted 28 February 2004)