Algae
Volume 20(3): 197-205, 2005

대청호의 식물플랑크톤 군집 변화

박종근* · 이정준[1]

(한국수자원공사 수자원연구원 국제수돗물종합검사센터, [1]대구대학교 생물교육과)

Community Dynamics of Phytoplankton in Lake Daecheong

Jong-Geun Park* and Jung Joon Lee[1]

International Drinking Water Center, KIWE, KOWACO, Daejon 306-711, and
[1]Department of Biology Education, Daegu University, Kyungsan 712-714, Korea

Temporal variability in lake phytoplankton is controlled by a complex between hydrological and chemical factors, and biological interactions. We explored annual change of phytoplankton in Lake Daecheong, using phytoplankton analysis data from 1997 to 2002 (except 2000). The standing crop of phytoplankton was ranged from 3.5 x 10 to 1.5 x 10^6 cells mL^{-1} and the highest mean value was at site 1. The class composition ratios of phytoplankton standing crop were divided into three classes. From January to March, diatoms showed a dominance (68.1-77.7%). From April to June, diatoms were mixed with cryptomonad etc. or blue-green algae. From July to October, blue-green algae showed a dominance (54.7-84.0%). In the case of green algae, the class composition ratios were below 10%. But green algae appeared all the year round.

Key Words: blue-green algae, diatom, dominant species, Lake Daecheong, phytoplankton, rainfall, succession

서 론

호소에서의 식물플랑크톤의 생물량과 계절적 천이는 기후와 수문학적 체계, 유역 특성, 영양염류 등의 물리 · 화학적 요인과 종사이의 경쟁, 생태적 위치 등의 생물학적 요인들이 복합적으로 작용하면서 일어난다(Sommer *et al.* 1986; Reynolds *et al.* 1987; Kimmel *et al.* 1990; 심 2003). 온대지역의 호소에서는 봄과 가을에는 규조류가 우점하며, 여름에는 녹조류와 남조류가 우점 하는 것이 일반적이다(Sommer *et al.* 1986). 식물플랑크톤의 천이는 외부로부터 많은 영양염류가 유입되거나, 퇴적물로부터 용출되는 영양염류가 혼합하는 시기에 발생한다고 알려져 있다(Lathrop and Carpenter 1990). 이러한 식물플랑크톤은 수중생태계의 1차 생산자로서, 전체 생태계의 구조 변화 및 발전 방향을 결정짓는다. 또한 수질 환경 변화에도 민감하게 반응하기 때문에, 다른 생물군보다 수계 환경 변화에 대한 지표생물로 중요하게 활용되고 있다.

ILEC(1988–1993)의 보고 자료에 따르면, 전체 담수 수계 중 부영양화한 수계의 비율은 아시아–태평양권에서 54%, 유럽권 53%, 아프리카권 28%, 북아메리카권 48%, 남아메리카권 41%에 이른다(Bartram and Carmichael 1999). 부영양화의 상징적 현상인 수화(water bloom)는 심한 이취미를 유발시키며 독성물질을 생성하는 등, 수자원으로서의 가치는 물론 수중생태계의 균형과 질서를 파괴한다. 부영양화된 호수에서는 규조류와 남조류가 우점한다고 알려져 있는(Negro *et al.* 2000) 것처럼 우리나라에서도 매년 여름철이면 남조류 수화가 발생하고 있는 실정이다.

대청호에서는 남조류 수화 발생이 김 등(1984)에 의해서 최초로 보고 된 이래, 다양한 방법과 관점을 가지고 환경요인과 식물플랑크톤 생태에 관한 연구가 보고 되어 왔다. 대청호에서 식물플랑크톤의 계절적 변화를 최초로 보고한 경우는 1987년 4월부터 9월까지 식물플랑크톤 변화를 월 1회 분석한 경우였다(정 1995). 이 후의 논문은 단순히 식물플랑크톤의 변화만을 살펴보지 않고, 질소와 인 등의 영양염류 농도 변화도 같이 연구하여 식물플랑크톤 발생과 수질 특성

*Corresponding author (gogun@kowaco.or.kr)

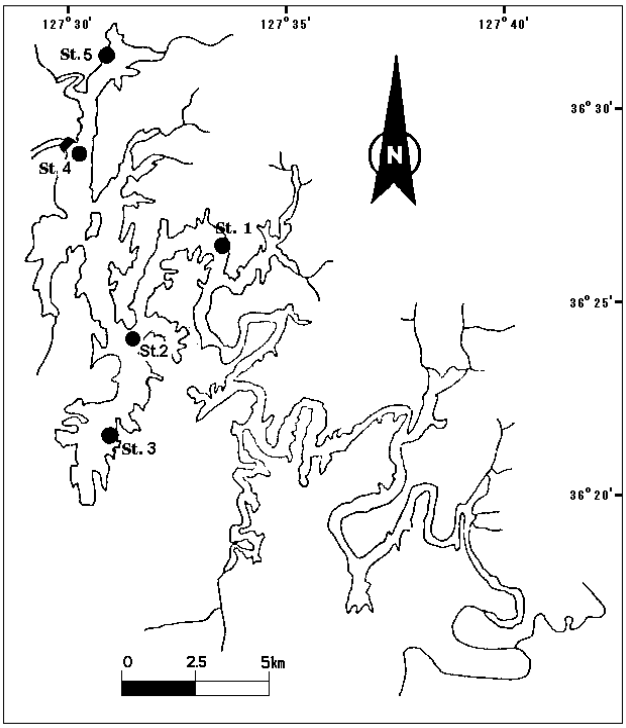

Fig. 1. Map showing the sampling sites in Lake Daecheong.

등을 파악하고자 하였다(신 1999; 이 1999). 이 외에도 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 종속영양 세균과의 증식 비교를 한 연구(김 등 1995), 세균 분포와 환경요인과의 관계(이와 민 1995; 이 등 1996), 남조류 성장 억제 세균에 관한 연구(김 등 1998) 등이 있다.

매년 여름철에 남조류 수화 발생의 악순환을 겪고 있는 우리나라는 인공호의 수화 원인 생물인 식물플랑크톤을 중심으로 생태계의 구조와 균형에 대한 거시적인 조사가 필요하다. 또한 각각의 조사 항목을 유기적으로 연관시키면서 전체적인 관점에서 고찰할 필요성이 있다. 그러나 현재까지 대청호를 대상으로 한 대부분의 연구 보고는 조사 기간을 1년으로 하거나, 1년 중에 남조류 수화 발생 기간만을 설정하여 단기간에 걸쳐 연구되었다. 따라서 개괄적인 식물플랑크톤 발생 현황 및 우점종 규명, 환경요인과의 상관성 분석 등의 성과가 있었으나, 1년 이상의 축적된 자료를 통한 연도별 식물플랑크톤 변화 양상, 남조류 수화 기작에 대한 고찰이 이루어지지 않았다. 그러나 식물플랑크톤의 계절적 변화와 남조류 수화 양상은 매년 다르다. 효과적인 식물플랑크톤 수화 제어 방안 수립에는 개별적인 연중 변화를 이해하고, 이를 장기간 연구하여 식물플랑크톤 수화 기작을 이해하는 것이 필요하다.

본 연구는 대청호에서 1997년부터 2002년까지(2000년 제외) 식물플랑크톤을 조사하여 식물플랑크톤 군집 발달과 소멸을 이해하고자 수행하였다.

Table 1. Sites and schedule of annual phytoplankton investigation. (Jan: January, Mar: March, Jun: June, Sep: September, Oct: October, ※: not investigated.)

Year	Site 1	2	3	4	5	Period	Frequency	The number of fieldwork
1997	○	○	○	-※	○	Mar.-Sep.	1/Month	7
1998	○	-	○	○	○	Jan.-Oct.	2-4/Month	32
1999	○	-	○	○	○	Jan.-Oct.	2-4/Month	30
2001	○	○	○	○	○	Jun.-Oct.	2-4/Month	18
2002	○	○	○	○	○	Jan.-Oct	2-4/Month	30

재료와 방법

대청호는 금강수계에 대청댐을 건설하면서 생성된 인공호로, 동경 127° 25'–127° 40', 북위 36° 20'–36° 30'에 위치한다. 대청호는 전라북도 장수군 신무산을 발원으로 하여 3도 12군에 걸쳐 있으며, 유역 면적은 4,314 km^2, 유로 총 길이는 251 km이고, 대청댐의 저수용량 14억 9천만 m^3이다.

식물플랑크톤 조사는 대청호 내 5개 정점(Fig. 1)을 대상으로 1997년 3월부터 2002년 10월까지(2000년 제외) 조사하였다. 조사 빈도는 여름철에는 주 1 회, 그 이외의 기간에는 월 2회 조사를 기본으로 하였고, 세부 일시 및 정점은 Table 1에 정리 하였다. 식물플랑크톤 현존량을 구하기 위한 정량시료는 수심 30 cm 전 · 후에서 채수하여 루골(Lugol) 용액으로 고정한 후 자연침강법을 사용하여 농축하였다. 정성시료는 망목 20 μm 크기의 식물플랑크톤 네트로 채집한 시료를 포르말린으로 고정하였고, 동정 시에는 농축한 정량 시료를 함께 사용하였다. 정량 분석은 Sedgwick–Rafter chamber를 사용하여 Schoen(1988)의 방법으로 계수하였다. 식물플랑크톤의 분류와 동정은 Prescott(1962)와 Simonsen(1979)의 기준을 준수하였다.

결 과

식물플랑크톤 현존량 변화

조사 기간 동안 식물플랑크톤 현존량은 3.5 × 10–1.5 × 10^6 cells mL^{-1} 범위였고, 2001년 8월 6일에 정점 1에서 최대였다. 수온이 높은 7월부터 9월까지 현존량이 높았으며, 그 양은 1997년을 제외하고는 5.0 × 10^4 cells mL^{-1} 이상이었다(Fig. 2). 조사 정점별 평균 현존량은 수심이 가장 깊은 정점 4에서 평균 8.2 × 10^3 cells mL^{-1}(SD: 1.6 × 10^4)로 가장 낮았고, 정점 1에서 평균 4.1 × 10^4 cells mL^{-1}(SD: 1.9 × 10^5)로 가장 높았다.

1997년 식물플랑크톤 현존량은 6월부터 증가하여 8월에

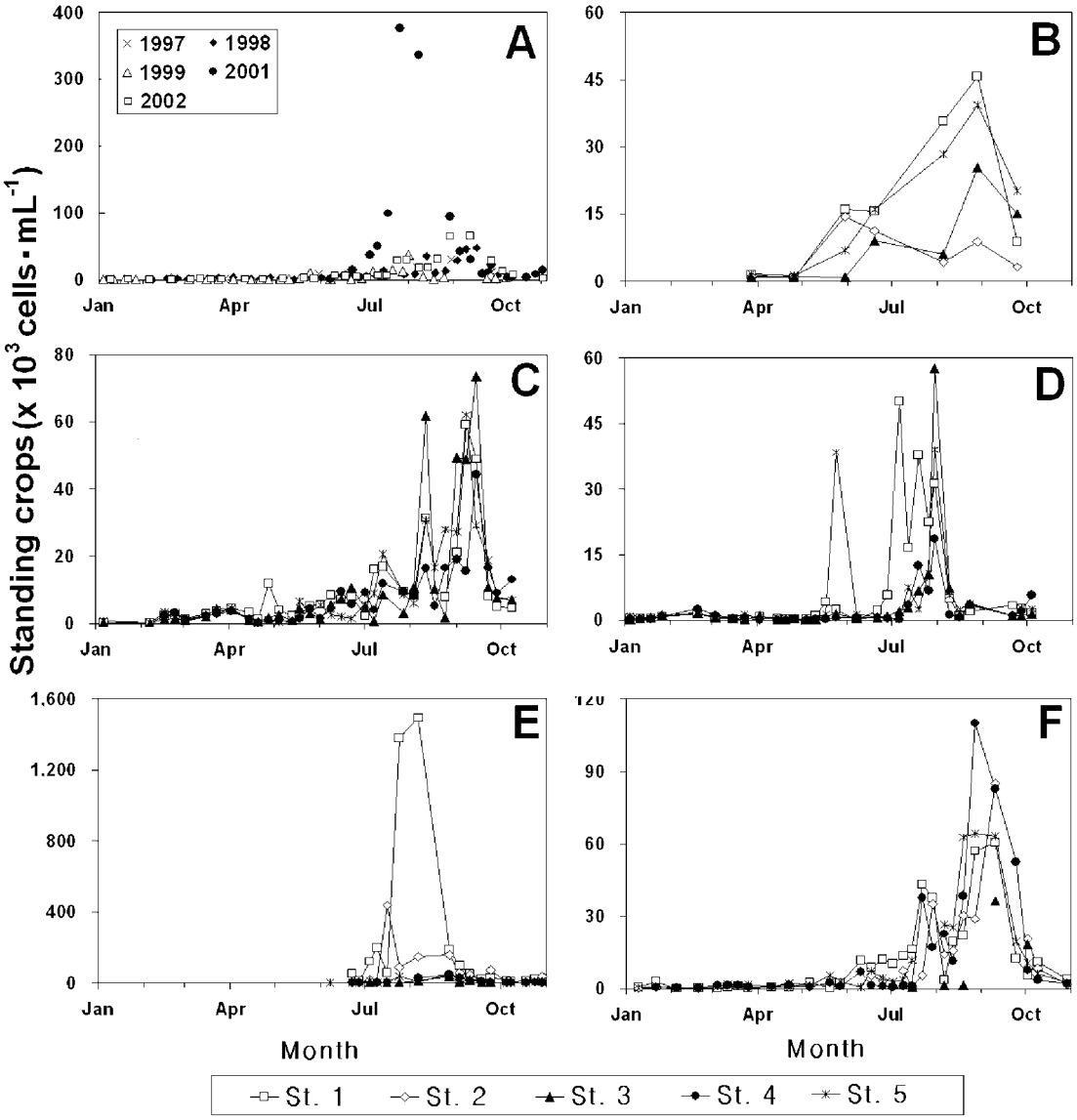

Fig. 2. Fluctuation of phytoplankton standing crops in Lake Daecheong. A, mean values of sites; B, year 1997; C, year 1998; D, year 1999; E, year 2001; F, year 2002.

최고였으며, 9월부터 다시 감소하였다(Fig. 2A). 최소 현존량은 4월 1일, 정점 1에서 7.9 × 10^2 cells mL^{-1}이었으며, 최대는 8월 28일, 정점 1에서 4.6 × 10^4 cells mL^{-1}이었다.

1998년 7월 7일 이후부터 정점 1에서 현존량이 1.6 × 10^4 cells mL^{-1}로서 10,000 cells mL^{-1} 이상으로 증가하기 시작하여 (Fig. 2C), 7월 13일에는 평균 1.5 × 10^4 cells mL^{-1}(SD: 5.3 × 10^3)로 증가하였다. 이러한 증가 추세는 잠시 주춤하다가 8월 11일부터 9월 14일까지 높은 현존량을 보였다. 1998년 최소 현존량은 2월 6일 정점 3에서 4.9 × 10 cells mL^{-1}이었다. 이 시기에 4개 정점의 평균 현존량은 6.8 × 10 cells mL^{-1}(SD: 2.0 × 10)로 조사 기간 동안 가장 낮았다.

1999년 식물플랑크톤 현존량은 7월부터 각 정점별로 10,000 cells mL^{-1} 이상이었다(Fig. 2D). 현존량의 감소는 8월 9일부터 시작되었고 그 평균값은 4.8 × 10^3 cells mL^{-1}(SD: 2.6 × 10^3)이었다. 이 후 10월 4일 조사까지 1.3 × 10^3–3.3 × 10^3 cells mL^{-1} 범위였다. 1999년 8월과 9월의 식물플랑크톤 현존량은 1998년의 10분의 1수준이었다. 1999년 1월부터 6월까지 식물플랑크톤 조사 시기별 평균 현존량은 대부분 1,000 cells mL^{-1} 이하였다. 다만 2월 9일 조사에서는 평균 1.8 × 10^3 cells mL^{-1}(SD: 5.4 × 10^2)로 모든 정점에서 1,000 cells mL^{-1} 이상이었다.

2001년 7월 24일과 8월 6일 정점 1에서 식물플랑크톤 현존량은 각각 1.4 × 10^6 cells mL^{-1}, 1.5 × 10^6 cells mL^{-1}로 다른 연도보다 24.6–32.7배 높았다. 이 외에도 7월 16일부터 8월 27일까지는 정점 1, 2에서 100,000 cells mL^{-1} 이상이었다(Fig. 2E). 이 후 식물플랑크톤 현존량이 10,000 cells mL^{-1} 이하로

Table 2. Dominant species in Lake Daecheong during the study period

Dominant species	Dominant frequency	Dominant species	Dominant frequency
Class Cyanophyceae		**Class Chlorophyceae**	
Anabaena circinalis	1	*Ankyra ocellata*	1
Anabaena planctonica	26	*Coelastrum astroideum*	1
Anabaena spiroides var. *crassa*	17	*Coelastrum cambricum*	1
Aphanizomenon flos-aquae	10	*Coelastrum polychordum*	1
Limnothirx sp.	1	*Coelastrum sphaericum*	1
Merismopedia tenuissiama	1	*Coenochloris* sp.	2
Microcystis aeruginosa	103	*Elakatothrix gelatinosa*	1
Microcysits ichthyoblabe	39	*Eudorina elegans*	4
Oscillatoria limosa	25	*Monoraphidium arcuatum*	1
Phormidium sp.	2	*Pediastrum simplex*	1
Planktothrix agardhii	2		
Pseudanabaena limnetca	4	**Class Cryptophyceae**	
Woronichinia naegeliana	2	*Cryptomonas ovata*	4
		Cryptomonas sp.	5
Class Bacillariophyceae		*Rhodomonas* sp.	39
Asterionella formosa	25		
Aulacoseira ambigua	15	**Class Chrysophyceae**	
Aulacoseira distance var. *alpigena*	6	*Dinobryon cylindricum*	1
Aulacoseira granulata	40	*Dinobryon divergens*	3
Cyclotella meneghiniana	1	*Dinobryon sociale*	2
Fragilaria crotonensis	21		
Stephanodiscus hantzschii	24	**Not classified**	
Synedra acus	27	*Unidentified flagellate* sp.	1
Total			461

감소한 시기는 정점 1에서는 10월 5일이었고, 다른 4개 정점에서는 9월 18일이었다. 정점 1에서 식물플랑크톤 평균 현존량은 2.2×10^5 cells mL^{-1}(SD: 4.6×10^5)로 정점 2의 6.3×10^4 cells mL^{-1}(SD: 1.1×10^5)보다 3.5배 높았다. 그리고 정점 3, 4 그리고 5의 평균 현존량보다 22.2–25.3배 높은 값이었다.

2002년은 7월 말에 정점 3을 제외하고는 급격히 증가하는 추세를 보였다(Fig. 2F). 7월부터 9월까지는 시기별 식물플랑크톤 평균 현존량이 10,000 cells mL^{-1} 이상으로, 9월 10일에 평균 6.6×10^4 cells mL^{-1}(SD: 2.0×10^4)로 절정을 이룬 후 급격히 감소하였다. 2002년 1월부터 5월까지 시기별 평균 현존량은 1.6×10^2–2.7×10^3 cells mL^{-1} 범위였다. 2002년 정점별 평균 식물플랑크톤 현존량은 1.0×10^4–1.4×10^4 cells mL^{-1}로 정점별로 유사한 값을 보였다.

식물플랑크톤 우점종의 변화

조사 기간 동안 미동정종 8종을 포함하여 5강 18과 26속 38종이 우점종으로 분석되었다. 강별 출현 횟수는 남조강 233회(50.5%), 규조강 159회(34.5%), 녹조강 14회(3.0%), 갈색편모조강 및 기타 조류가 54회(11.9%)였다(Table 2). 남조강은 6월부터 10월, 규조강은 1월부터 6월에 주로 출현하였다.

남조강은 미동정종 2종을 포함하여 6과 10속 13종이 우점종으로 분석되었다. 이 중 *Microcystis aeruginosa*는 남조강이 우점종으로 출현한 233회 중 103회(44.2%)로 가장 많이 조사되었고, 그 시기는 6월부터였다. *Anabaena planctonica*는 4월에 3회 우점종으로 조사되었고, 그 후 6월부터 8월까지 10회 미만으로 출현하였다. *Anabaena spiroides* var. *crassa*는 8월과 9월에 우점종으로 출현하였다. 연중 남조강의 우점종 경향은 7월부터 9월까지는 주로 *Microcystis* 속의 종이 우점을 하였으며, 환경요인 변화에 따라 *Aphanizomenon flos-aquae*, *Anabaena* spp. *Oscillatoria limosa* 등, 다른 남조강의 종들이 우점을 하였다.

전체 우점종에 대한 규조강의 우점 횟수는, 1월부터 3월 사이에는 80.0% 이상이었고, 4월부터 6월까지는 40.0% 이상이었다(Fig. 3A). 결과적으로 1월부터 6월까지의 대청호의 주요 우점종은 규조강이었다. *Asterionella formosa*는 1월부터 5월 사이에서만 우점종으로 조사되었고, 그 중 월별 규조강 우점 횟수에 대한 상대빈도는 3월에 36.8%로 가장 높았다. 이와 비슷하게 *Aulacoseira ambigua*, *Aulacoseira distans* var. *alpigena* 그리고 *Stephanodiscus hantzschii*는 2월과 3월에 상대빈도 20.0% 이상이었다. *Fragilaria crotonensis*는 5월과 6월에,

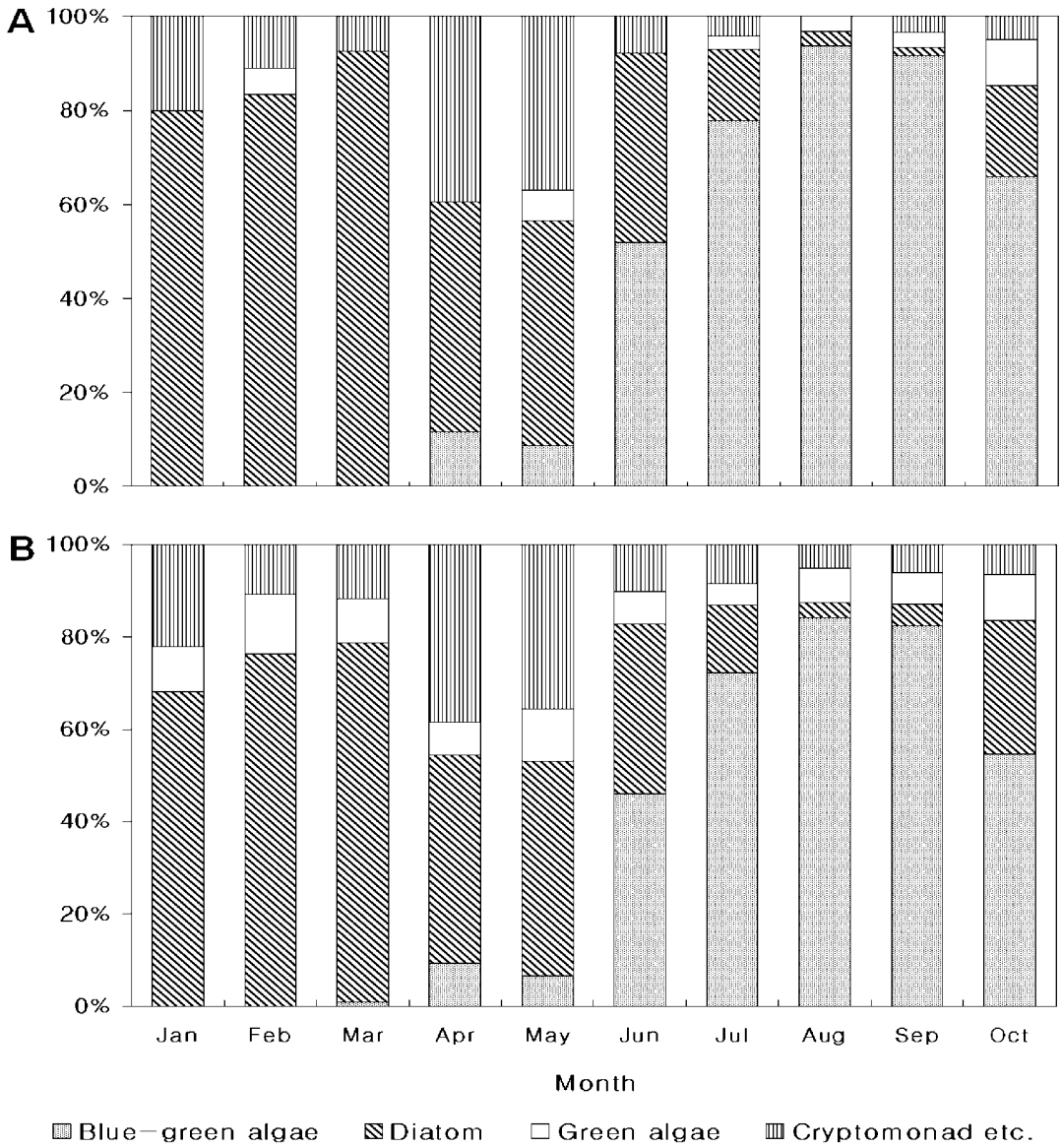

Fig. 3. Comparison between relative frequency of dominant species (A) and monthly mean values of class composition (B) in Lake Daecheong during the study period.

*Synedra acus*는 4월에 상대빈도 50.0%였다. 다만 *Aulacoseira granulata*는 6월에 10회, 평균 현존량 5.6 × 10^2 cells mL^{-1} (SD: 8.5 × 10^2)와 7월에 11회, 평균 현존량 2.4 × 10^3 cells mL^{-1}(SD: 2.9 × 10^3)로 우점하였다. *A. granulata*는 다른 규조류에 비해 상대적으로 수온이 높은 시기에 우점종으로 조사되었다.

녹조강은 6속 10종이 우점종으로 조사되었고, 그 횟수는 월별 0–4회로 출현종에 대한 상대빈도는 10.0% 이하였다 (Fig. 3A). 가장 빈도가 높은 종은 *Eudorina elegans*로 5월과 10월에 각각 2회였다. 갈색편모조강 및 기타 조류는 1월부터 7월까지 우점종으로 출현하여 4월과 5월에 각각 39.5%, 37.0%로 그 비중이 다른 시기에 비해 높았다(Fig. 3A). 그 중 *Rhodomonas* sp.가 갈색편모조강 및 기타 조류의 우점종 출현 횟수의 72.2%이었다. *Rhodomonas* sp.는 8월과 9월을 제외하고는 전 기간에 걸쳐 우점종으로 기록되었고, 현존량의 평균 범위는 1.4 × 10^2–4.7 × 10^3 cells mL^{-1}로 5월에 가장 높았다.

식물플랑크톤 군집의 강별 변화

조사 기간 동안 1월부터 10월까지의 식물플랑크톤 군집에 대한 강별 구성을 전체 현존량에 대한 비율로 분석하였다. 1월부터 3월까지는 규조류가 평균 68.1–77.7%로 우세하였고, 4월부터 6월 동안은 규조류와 다른 편모조류 또는 규조류와 남조류가 강별로 35.0–46.0%의 범위를 이루었다. 이 후 7월부터 10월 동안은 남조류가 54.7–84.0%로 식물플랑크톤 현존량의 대부분을 이루었다.

조사 기간 동안 남조류는 1월과 2월에는 출현 기록이 없었

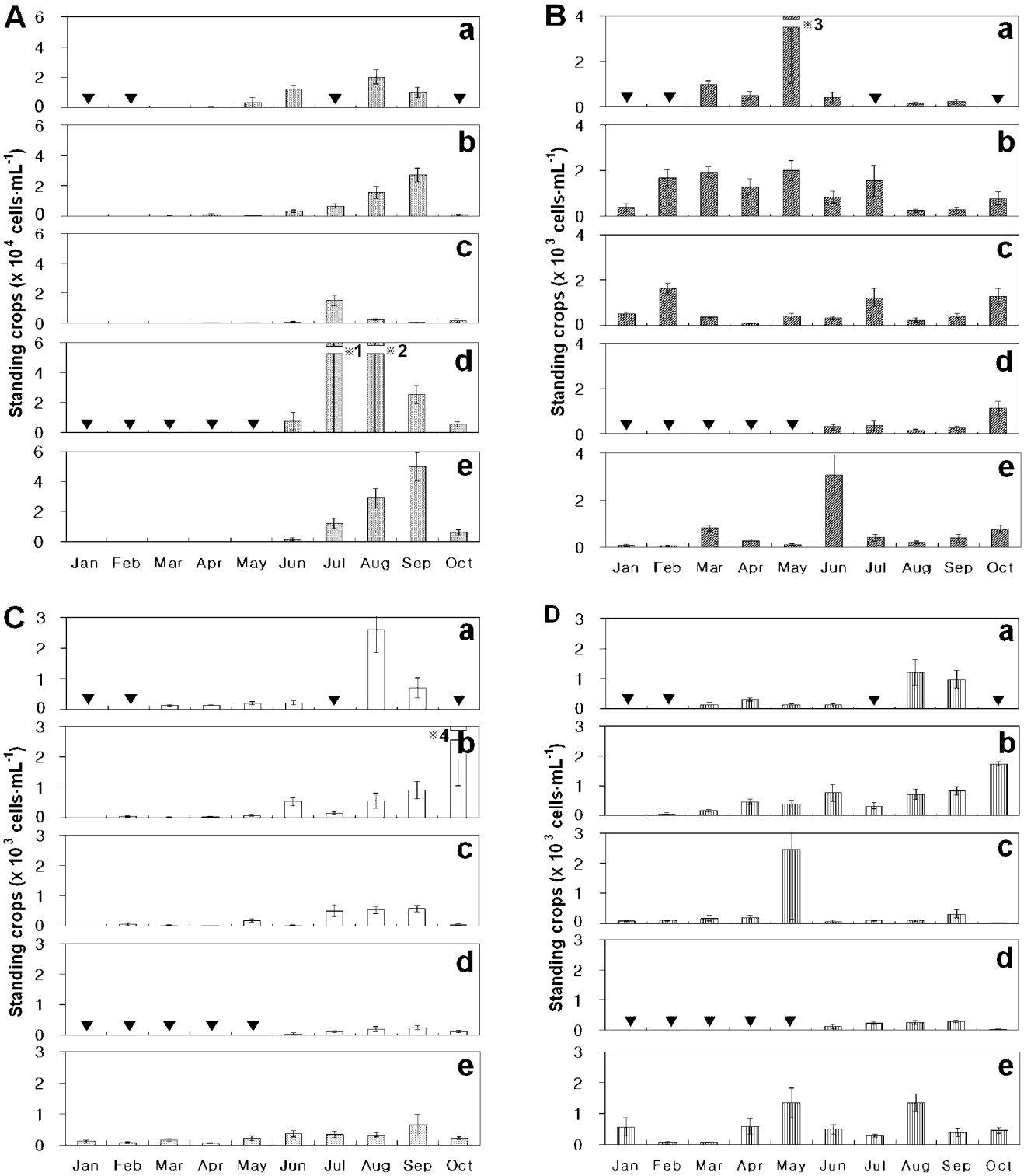

Fig. 4. Change of monthly standing crops by class in Lake Daecheong during the study period. A, blue-green algae; B, diatom; C, green algae; D, cryptomonads etc; (a), year 1997; (b), year 1998; (c), year 1999; (d), year 2001; (e), year 2002; ▼ = not investigated, ※1 = 1.4 × 10^5 cells mL^{-1}, ※2 = 2.0 × 10^5 cells mL^{-1}, ※3 = 6.0 x 10^3 cells mL^{-1}, ※4 = 4.5 x 10^3 cells mL^{-1}.

으며, 3월부터 5월까지는 조사 연도와 정점에 따라 1회 또는 2회로 월 평균 현존량 1,000 cells mL^{-1} 이하로 출현하였다 (Fig. 4A). 연중 가장 이른 시기에 출현한 경우는 1998년 3월 24일 정점 3에서 *Pseudanabaena limnetica*로 현존량은 1.6 × 10^3 cells mL^{-1}이었다.

식물플랑크톤 현존량에 대한 남조류 구성비의 월 평균은, 4월과 5월에 각각 9.2 ± 21.8%와 6.6 ± 15.0%로 낮았다. 6월에 평균은 46.0 ± 39.3%로 증가하기 시작하여 8월에 84.0 ±

16.7%로 최고였으며 9월까지 유지 되었다. 10월에는 54.7 ± 33.8%로 감소하였다(Fig. 3B). 남조류 구성비가 가장 높았던 시기는 2001년 8월에 정점 1이었다. 이 기간의 남조류 평균 현존량은 8.4 × 10^5 cells mL^{-1}(SD: 9.2 × 10^5)로 전체 식물플랑크톤의 99.8 ± 1.2%였으며, 모든 조사 정점에서 97.2% 이상이었다.

규조류가 출현하는 양상은 조사 연도와 정점에 따라 변화가 있었다. 1998년은 1월부터 4월 초까지, 1999년은 1월부터 3월 초까지 정점 1에서 규조류가 식물플랑크톤 현존량의 80.0% 이상이었고, 정점 4의 경우는 1998년은 4월 중순까지, 1999년은 5월 초까지 80% 이상이었다. 그러나 2002년 1월과 2월에는 규조류의 구성비가 50.0% 이하였다. 2월부터 5월까지 규조류 월 평균 현존량은 1998년에 1,000 cells mL^{-1} 이상이었으나, 다른 조사 연도에는 1,000 cells mL^{-1} 이하였다. 다만 1999년 2월과 2002년 6월에는 1,000 cells mL^{-1} 이상이었다(Fig. 4B).

녹조류는 조사 기간 동안 지속적으로 출현하였으나, 식물플랑크톤 현존량에 대한 구성비는 4.7–12.8%로 낮았다(Fig. 3B). 녹조류의 월 평균 현존량이 1,000 cells mL^{-1} 이상인 시기는 1997년 8월과 1998년 10월이었다(Fig. 4C). 1997년 8월은 *Coelastrum cambricum*, 1998년 10월은 *Eudorina elegans*에 의해 녹조류가 증가하였다.

갈색편모조류를 비롯한 기타 편모조류는 4월과 5월에 각각 38.5 ± 32.1%, 35.6 ± 34.1%로 다른 기간에 비해 높은 구성비를 보였다(Fig. 3B). 다른 조류와 같이 편모조류의 출현 양상도 조사 정점과 연도에 따라 차이가 있었다. 편모조류의 연도별 월 평균 현존량이 1,000 cells mL^{-1} 이상인 시기는 1997년 8월, 1998년 10월, 1999년 5월, 2002년 5월과 8월이었다(Fig. 4D). 이러한 현존량은 1997년 8월은 *Cryptomonas ovata*, 1998년 10월과 1999년 5월은 *Rhodomonas* sp., 2002년 5월은 *Dinobryon divergens*와 *Dinobryon sociale* 그리고 2002년 8월은 *Rhodomonas* sp.에 의해 증가되었다.

고 찰

일반적으로 식물플랑크톤의 개체군별 적응 수온의 범위는 각기 달라, 계절적인 차이에 의해 식물플랑크톤 군집의 종조성 및 군집구조에 있어서도 지대한 영향을 미친다. 예를 들어 빈번히 겨울철 수화를 일으키는 규조류인 *Asterionella formosa*는 수온 25°C 이상에서는 생육이 불가능하다(Lampert and Sommer 1997). 대청호에서 *A. formosa*가 우점종으로 기록된 것은 1월부터 5월까지로 국내 댐저수지에서 보편종으로 출현한다는 이전의 보고와 일치하였다(이와 조 1994; 김 1996; 장과 전 1996; 이 등 2000). *A. formosa*의 출현 빈도가 높은 3월의 연도별 평균 수온은 5.9–7.0°C이었다. *A. formosa*가 우점종으로 기록된 가장 높은 수온은 1998년 5월 13일에 정점 4로 18.7°C이었다.

Microcystis 속의 최적 생육 수온을 25°C 이상(Mur *et al.* 1999)이라고 한 것과 같이 대청호 표층수온이 25°C을 상회하는 6월 초순부터 *Microcystis* 속의 종이 우점종으로 자주 출현하였다. 또한 7월부터 9월까지 환경요인 변화에 따라 *Aphanizomenon flos-aquae*, *Anabaena planctonica*, *A. spiroides* var. *crassa*, *Oscillatoria limosa*가 우점을 하였다. 이러한 결과는 대청호 수화의 원인종이 *Anabaena* spp. *Microcystis* spp. *Oscillatoria* spp.라는 이전의 보고와 일치하였다(오와 김 1995; 정 등 2005; Ahn *et al.* 2002). 또한 국내 다른 호소에서도 7월부터 9월 동안 위에 언급한 4가지 속의 종이 대발생한다는 보고(김 등 2003; 김 등 2004; Jeon and Cho 2004)로 보아 국내 호소의 일반적인 현상인 것으로 사료된다.

Reynolds(1984)는 호수에서 계절적으로 우세한 조류 종들을 19개 군으로 분류하고, 이를 다시 공통적인 생리 특성을 바탕으로 세 개의 군(I, II, III)으로 나누었다. 대청호의 우점종중 10회 이상 기록된 종은 남조강 4속 6종, 규조강 5속 6종, 갈색편모조강 1속 1종이었다. 이 중 자료에 언급되지 않은 *Oscillatoira limosa*를 제외한 *Anabaena* spp., *Microcystis* spp., *Aphanizomenon flos-aquae*는 *MacArthur*와 Wilson(2001)이 제시한, 환경에 적응하여 그 수를 수용한계까지 유지하는 K형으로 부력조절 기능이 있고 높은 온도와 강한 빛에도 잘 견디는 종으로 III군에 속한다. 이 외의 규조류와 *Rhodomonas* sp.는 좋은 조건에서 빠르게 성장하는 r형으로 봄과 여름철에 물의 혼합이 잘되는 층에서 유리하며 각각 II군과 I군에 속한다. 대청호에서도 성층화화 현상과 물의 온도가 높은 여름철에는 주로 III군에 속하는 종들이 우세하였고, 물의 혼합과 적당한 영양염류가 있는 겨울부터 이른 여름까지는 II군에 속하는 종들이 우세하였다. I군에 속하는 *Rhodomonas* sp.는 II군과 III군 사이의 천이 중간단계에 나타난다고 제시하였는데(Harper 1992), 대청호에서도 규조류에서 남조류로 천이의 중간 시기라 할 수 있는 4월부터 5월 사이에 우세하였다. 그러나 제시된 이론에서 여름철에는 녹조강에 속하는 종들이 우세하고 남조류는 늦은 여름부터 우세하다고 하였지만, 대청호에서는 여름철에 녹조류가 우세하지 않고 6월부터는 남조류가 우세한 것이 다른 점이었다.

여름철부터 초가을까지 남조류 수화 발생은 아열대 및 온대지역 호소의 정체 수역에서는 일반적인 현상이다(Carmichael and Falconer 1993). 또한 영양염의 유입이 제한되지 않는 정체 수역에서의 남조류 생장은 수온성층의 형성 정도에 지배받는다(Fay 1983). 대청호의 경우 1997년과 1998년 8월에는 식물플랑크톤 현존량이 크게 감소하였으나, 2001년 8월에는 남조류 수화가 조사 기간 동안 가장 크게 발생하였다. 이러한 원인은 여름철 강우 양상의 차이 때문인 것으

로 사료된다. 1997년과 1998년에는 8월에 200–300 mm의 집중 강우가 있은 반면에, 2001년은 6월 29일부터 30일까지 42.8 mm와 7월 30일부터 8월 1일까지 52.8 mm의 강우가 있었다. 집중 강우에 의해 식물플랑크톤 현존량이 감소하는 이유는 유입수의 증가로 인해 식물플랑크톤이 쓸려 내려가는 flushing 효과와 수층이 불안정해지면서 남조류 생장이 저해받기 때문인 것으로 해석된다. 2001년도 남조류가 대발생한 이유는 수층 불안정화와 flushing 효과를 발생할 만한 100 mm 이상의 집중 강우가 없이, 7월부터 8월 동안의 높은 일사량과 적절한 강우에 의한 7월초와 8월초의 영양염류 재공급에 의한 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사 연구사업(1997–2002)에 의해 수행하였으며, 연구에 참여해 주신 모든 연구원과 자료수집과 현장조사에 도움을 주신 한국수자원공사 직원에게 깊은 감사를 드립니다. 논문 교정에 수고를 아끼지 않으신 심사의원들께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

김대균, 최애란, 이혜경, 권오섭, 김종설. 2004. 회야댐 저수지에서 물리 · 화학적 환경요인에 따른 식물플랑크톤과 세균 군집의 변화. 한국육수학회지 **37:** 26–35.

김동근, 서윤수, 송준상, 이문호, 최재덕, 박건현, 최광수. 1984. 대청호 부영양화에 관한 종합연구. 국립환경연구소, 서울. 192 pp.

김명운, 김민호, 조장천, 김상종. 1995. Cyanobacteria의 증식에 따른 대청호 생태계내의 생물군집 변화. 한국육수학회지 **28:** 1–9.

김용재. 1996. 팔당호의 식물플랑크톤 군집의 생태학적 고찰과 지표종을 이용한 영양단계 평가. 한국육수학회지 **29:** 323–345.

김철호, 이정호, 최영길. 1998. 수화와 시안세균(*Anabaena cylindrica*) 생장 억제 미생물 분포도의 상관관계. 한국미생물학회지 **34:** 188–193.

김호섭, 박제철, 황순진. 2003. 수심이 얕은 부영양 인공호(일감호)의 동 · 식물플랑크톤 동태학. 한국육수학회지 **36:** 286–294.

신재기. 1999. 대청호에서 수환경 요인과 식물플랑크톤의 변동. 환경생물학회지 **17:** 529–541.

심재형. 2003. 플랑크톤 생태학. 서울대학교출판부, 서울. 382 pp.

오희목, 김도한. 1995. 대청호의 남조류 수화발생에 대한 단기적 예측. 한국육수학회지 **28:** 127–135.

이기성, 민병례. 1995. 대청호의 종속영양미생물 분포와 세포의 효소 활성도의 계절별, 수심별 변화. 한국육수학회지 **28:** 447–454.

이기종, 이일규, 한석균, 안태영. 1996. 대청호의 세균분포에 미치는 환경요인. 환경생물학회지 **14:** 169–176.

이은주, 조규송. 1994. 소양호 식물성플랑크톤의 연간변화. 한국육수학회지 **27:** 9–22.

이정호. 1999. 대청호의 연중 식물플랑크톤 군집 동태. 한국육수학회지 **32:** 358–366.

이정호, 백인호, 김철호. 2000. 식물플랑크톤 분포도에 따른 운문호의 선택취수 수심 결정. 한국육수학회지 **33:** 311–318.

장윤경, 전숙례. 1996. 팔당댐 담수지역의 식물플랑크톤에 관한 연구 2. 식물플랑크톤 종 조성 변화. *Algae* **11:** 217–229.

정상진. 1995. 대청호의 식물 플랑크톤상에 관한 연구. 환경생물학회지 **13:** 83–106.

정승현, 안치용, 최애란, 장감용, 오희목. 2005. 대청호에서 강우와 식물플랑크톤 군집의 관계. 환경생물학회지 **23:** 57–63.

Ahn C.Y., Chung A.S. and Oh H.M. 2002. Rainfall, phycocyanin. and N:P ratios related to cyanobacterial blooms in a Korean large reservoir. *Hydrobiologia* **474:** 117-124.

Bartram J. and Carmichael W.W. 1999. Introduction. In: Chorus I. and Bartram J. (eds), *Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management*. E & FN Spon, London. pp. 1-14.

Carmichael W.W. and Falconer I.R. 1993. Disease related to freshwater blue-green algae toxins and control measures. In: Falconer I.R. (ed.), *Algal toxins in seafood and drinking water.* Academic Press, San Diego. pp. 187-209.

Fay P. 1983. *The blue-green*. Edward Arnold, London. 88 pp.

Harper D. 1992. *Eutrophication of freshwater, principles, problems and restoration*. Chapman & Hall, London. 327 pp.

Jeon S.I. and Cho K.J. 2004. Primary productivity of phytoplankton in the shallow and hypertophic river (Seonakdong river). *Korean J. Limnol.* **37:** 57-63.

Kimmel B.L., Lind O.T. and Paulson L.J. 1990. Reservoir primary production. In: Thornton K.W., Kimmel B.L. and Payne F.E. (eds), *Reservoir limnology: Ecological perspectives*. John Wiley & Sons, New York. pp. 133-194.

Lampert W. and Sommer U. 1997. *Limnoecology: The ecology of lakes and streams.* Oxford University Press, Oxford. 398 pp.

Lathrop R.C. and Carpenter S.R. 1990. Zooplankton and their relationship to phytoplankton. In: Kitchell J.F. (ed.), *Food Web management*. Springer-Verlag, New York. pp. 127-150.

MacArthur R.H. and Wilson E.O. 2001. *The theory of island biogeography*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey. 224 pp.

Mur L.R., Skulberg O.M. and Utkilen H. 1999. Cyanobacteria in the environment. In: Chorus I. and Bartram J. (eds), *Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management*. E & FN Spon, London. pp. 15-40.

Negro AI., Hoyos C.D. and Vega J.C. 2000. Phytoplankton structure and dynamics in Lake Sanabria and Valparaiso reservoir (NW Spain). *Hydrobiologia* **424:** 25-37.

Prescott G.W. 1962. *Algae of the western great lakes area with an illustrated key to the genera of desmids and freshwater diatoms*. WM. C. Brown Company Publisher, Dubuque. 977 pp.

Reynolds R.D. 1984. Phytoplankton periodicty: the interactions of form, function and environmental variability. *Freshwater Biology* **14:** 114-142.

Reynolds R.D., Olilver R.L. and Walsby A.E. 1987. Cyanobacterial dominance: The role of buoyancy regulation in dynamic lake environments. *N.Z.J. Mar. Freshwat. Res.* **21:** 379-390.

Schoen S. 1988. Cell counting. In: Lobban C.S., Chapman D.J. and Kremer B.P. (eds), *Experimental phycology: a laboratory manual*. Cambridge University Press, New York. pp. 16-22.

Simonsen R. 1979. The diatoms system: Ideas on Phylogeny. *Bacillaria* **2:** 9-71.

Sommer U., Gliwicz Z.M., Lampert W. and Duncan A. 1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh water. *Arch. Hydrobiol*. **106:** 433-471.

Received 22 July 2005
Accepted 17 September 2005