Korean J. Environ. Biol. 26(4) : 367~376(2008)

동복호의 식물플랑크톤 출현 패턴

정명화 · 박종환[1] · 김상돈[1] · 김동호[1] · 장남익[1] · 이학영*

전남대학교 자연과학대학 생물학과, [1]국립환경과학원 영산강물환경연구소

Seasonality of Phytoplankton in Dongbok Lake, Korea

Myung Hwa Jeong, Jonghwan Park[1], Sangdon Kim[1], Dongho Kim[1], Namik Chang[1] and Hak Young Lee*

Department of Biological Science, Chonnam National University
[1]Yeongsan-River Environment Research Laboratory

Abstract – **The seasonality of phytoplankton in Dongbok lake was analysed from March to November 2003. The concentrations of TN and TP showed nearly constant level except high concentrations in May at dam site of Dongbok lake. Chlorophyll *a* concentration was highest at dam site in May with 225.3 μg L^{-1}, and high in spring and fall and low in summer at upper and central regions of Dongbok lake. A total of 108 phytoplankton species was identified as an algal flora of Dongbok lake. They were 54 Chlorophyceae, 30 Bacillariophyceae, 12 Cyanophyceae, and 12 species of other taxa. Total cell biomass of phytoplankton showed peaks in May～June and August ～September, and low biomass in July at dam site. However, upper and central regions of Dongbok lake showed no clear patterns in cell biomass. Maximum biomass was 7,158 cells mL^{-1} at dam site in May with the blooms of *Peridinium bipes* f. *occulatum*. The general seasonality of phytoplankton in Dongbok lake was Bacillariophyceae-Dinophyceae/Bacillariophyceae-Cyanophyceae/ Chlorophyceae/ Bacillariophyceae-Bacillariophyceae in 2003.**

Key words : phytoplankton, chlorophyll *a*, seasonality, Dongbok Lake

서 론

생물은 평균적으로 약 70%의 물을 함유하고 있으며 생물체가 생명현상을 영위하는 데도 많은 양의 물을 필요로 한다(Krebs 1985; Campbell and Reece 2007). 인간도 생명을 유지하기 위한 양질의 물을 필요로 한다. 그런데 오늘날 지구생태계는 인구의 폭발적인 증가에 따른 각종 용수의 수요 증가와 인간 활동의 확대에 따른 수질의 오염으로 인한 이용가능한 물의 절대량 감소로 인해 전 세계적인 물기근을 겪고 있으며 이는 인류에게 새로운 위기가 되고 있다(Barnes and Mann 1991; Wetzel 1999).

우리나라는 몬순지역에 위치하고 있는 까닭에 강우가 6월에서 8월 사이에 집중하고 있어 연평균 1,200 mm 이상의 강우가 있음에도 불구하고 물 부족의 잠재적 위협 속에 살고 있다. 이에 따라 각종 용수의 확보를 위해 많은 저수지와 인공호를 내륙의 주요 강 유역에 건설하였는데, 이들 저수지와 인공호수는 대부분 대도시의 하수나 농업, 축산폐수의 유입이 많이 이루어지는 지역에 위

*Corresponding author: Hak Young Lee, Tel. 062-530-3401, Fax. 062-530-3409, E-mail. haklee@chonnam.ac.kr

치하여 부영양화의 과정을 겪게 되었다(Shubert 1984).

부영양화에 따른 조류의 과잉번식으로 수중 식물플랑크톤의 개체수가 증가하면 이들 조류가 호소 표면에 넓게 떠 있는 연녹색의 녹조대를 형성하게 되는데 이러한 현상이 발생하면 호소수에서 이취미가 발생하고 시각적으로도 불쾌감을 주어 용수 이용자들로 하여금 물에 대한 신뢰를 상실하게 한다(Odum 1971; Harper 1992). 이러한 문제점들 외에도 조류의 과잉번식은 투명도 저하와 같은 수질 악화를 유발할 뿐만 아니라 호소의 물을 원수로 사용하는 정수장의 물 처리비용을 증가시키고 처리수의 수질도 떨어지게 하는 결과를 초래한다(Harper 1992; Baker and Humpage 1994). 따라서 수자원의 효율적인 관리를 위하여 조류의 동태(dynamics)를 파악하고 성쇠(wax and wane)의 요인을 추적하는 것은 매우 중요하다(Shubert 1984; Horne and Goldman 1994; Lampert and Sommer 1997).

호소에서 과도한 조류의 증식을 제어하기 위해서는 조류 증식의 패턴 분석이 필연적으로 선행되어야 한다(Harper 1992; Baker and Humpage 1994). 광주광역시의 상수원으로 이용되고 있는 동복호는 수질의 관리를 위해 조류와 환경요인에 대한 많은 조사가 있어왔으나 아직 조류제어에 대한 대책이 뚜렷이 제시된 것이 없다. 동복호에서의 조류와 환경조사는 정과 조(1988, 1996)에 의해 조류의 계절별 동태와 환경과의 상관성이 조사되었고, 동복호의 조류제어 방안에 대한 연구(조와 이 1999; 광주시상수도사업본부 2000a), 수질변화에 따른 조류의 상관관계가 조사되었다(광주시상수도사업본부 2000b). 그러나 많은 조사에도 불구하고 조류의 출현패턴에 대한 연구는 없었다.

따라서 동복호에서 시기별, 수 환경 상황별 조류의 출현패턴을 조사하여 조류발생 제어의 방안을 강구하기 위해 본 연구를 수행하였다. 본 연구의 목표는 동복호의 조류 출현패턴을 조사하여 계절과 환경의 변화에 따른 조류발생의 정도를 평가하여 그에 따른 상수원의 보호 대책의 수단을 도출하는 데 있다.

재료 및 방법

1. 조사대상 호소와 조사지점

본 연구를 위한 조류조사는 동복호의 3 지점에서 2003년 3월부터 11월 사이에 이루어졌다(Fig. 1). 최 상류에 위치한 St. 1은 동복호의 주요 유입지천인 동복천, 내북천 그리고 길성천이 합류하는 지점으로 동복호 상

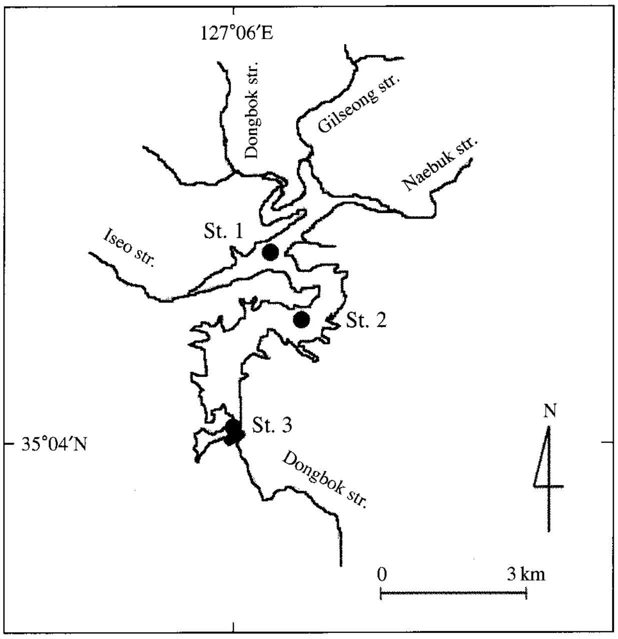

Fig. 1. Map showing the sampling stations in the Dongbok Lake.

류로 불리는 지역이고, St. 2는 동복댐과 상류의 중간 지점으로 동복호 중류라 불리는 수질측정망의 동복호 2에 해당하는 지점이며, St. 3은 동복호 하류라 불리는 동복댐앞 지점이다.

2. 조사방법

재료수의 채집은 조사지역의 표층(50 cm depth)에서 이루어졌으며, 영양염류 조사를 위한 시료는 냉동 운반한 후 실험실에서 공정시험법(1992)에 제시된 방법을 따라 측정하였다.

클로로필(chlorophyll *a*)의 농도를 측정하기 위한 시료는 표층수 300 mL를 0.45 μm membrane filter (47 mm MFS, Adventec)로 여과한 다음 냉동 건조, 보관 후 filter를 screw capped tube에 넣고 90% acetone 10 mL을 넣어 4°C 어두운 곳에서 24시간 정도 용출하였다(Wetzel and Likens 2000). 용출된 시료를 4,000 rpm에서 10분간 원심분리 한 후 상등액을 취하여 cuvette에 옮겨 UV-Visible Spectrophotometer (Genesys 5, Spectronic)로 흡광도를 측정하여 클로로필의 농도를 계산하였다(Wetzel and Likens 2000).

식물플랑크톤의 종을 동정하기 위한 시료는 표층수 1 L를 Lugol's Iodine solution으로 고정한 후 24시간 이상 암소에 정치하여 침전시킨 뒤 상등액 900 mL를 siphon으로 제거하고 남은 100 mL의 재료수를 잘 교반하여 slide glass에 적하한 후 400배와 800배의 현미경하에서

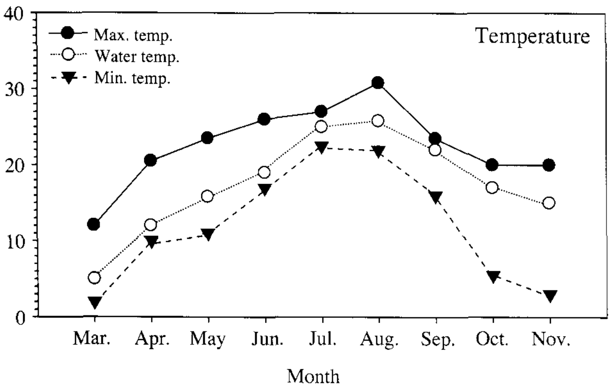

Fig. 2. Monthly variations of temperature in the Dongbok Lake.

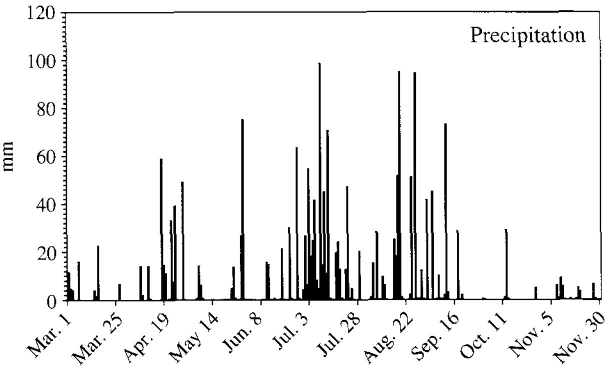

Fig. 3. Monthly variations of precipitation in the Dongbok Lake.

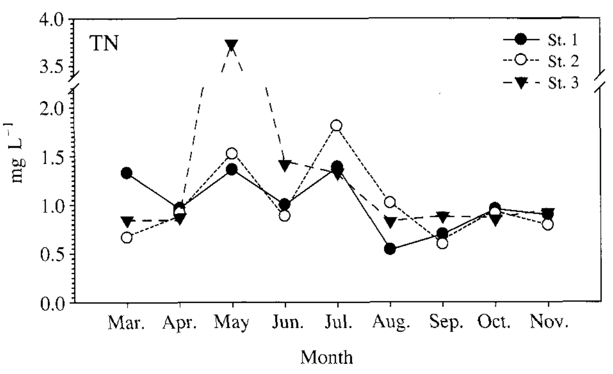

Fig. 4. Monthly variations of TN in the Dongbok Lake.

종을 동정하였다. 개체수의 밀도가 낮은 환경에서 채취한 시료는 0.45 μm의 membrane filter (47 mm MFS, Adventec)로 재료수 300~500 mL를 여과한 후 petri dish에서 재부유시켜 관찰하였다.

식물플랑크톤의 현존량(standing crop)은 재료수 10 mL를 settling chamber에 부어 24시간 동안 침전시킨 후 Inverted microscope (CK40-F200, Olympus)과 light microscope (Axiolab, Zeiss)에서 200배와 400배의 배율하에서 대각선으로 20~40 fields를 계수한 후 mL당 전체의 개체수로 환산하였다(Utermöhl 1957). 개체수가 적은 지점에서는 조류종 동정을 위해 농축한 시료 2 mL를 Sedgewick-Rafter Chamber에 넣어 잘 퍼지게 한 후 계수하였다.

결과 및 고찰

조사기간 동안 동복호 지역의 기온은 8월에 가장 높았고 3월에 가장 낮게 나타났다(Fig. 2). 8월의 기온은 최고온도가 30°C를 넘었고 최저온도도 22.5°C를 기록했다. 3월의 최저 기온은 2.5°C로 조사 기간 중 가장 낮았으며 최고기온도 12.5°C였다. 8월의 최고 기온 이후 기온은 급격히 감소하여 11월의 조사에서는 평균기온이 11.5°C로 나타났다. 수온은 기온과 연동하여 변동하였다. 최고의 수온은 8월에 측정되었고, 최저의 수온은 3월에 나타났다.

강우량은 장마와 태풍에 의해 7월과 8월에 집중되었던 예년과는 달리 5월부터 10월까지 지속적인 강우가 나타나 3월부터 10월까지의 강우량이 1,400 mm를 넘는 높은 강우량을 기록했다. 또 5월부터 10월까지의 강우량은 1,200 mm 이상으로 예년의 연강우량 수준이 이 기간에 집중된 것으로 나타났다(Fig. 3). 최고 강우는 8월 19일부터 8월 27일 사이에 집중되었고, 10월 14일 이후에는 강우가 없었다.

동복호에서 TN 농도의 조사지점과 조사 시기에 따른 변화는 5월을 제외하고는 크지 않았다(Fig. 4). 조사기간 동안 상류(St. 1)에서 TN의 농도는 8월과 9월에 낮게 나타났고 3월, 5월, 7월에 상대적으로 높게 나타났다. 중류(St. 2)에서의 TN의 농도는 5월, 6월, 7월에 상대적으로 높게 나타났고, 3월, 4월, 9월에는 상대적으로 낮은 TN 농도를 나타냈다. 하류(St. 3)에서의 TN 농도는 5월의 조사에서 3.734 mg L^{-1}로 나타나 동복호의 전 조사기간과 조사지점 중 최고의 농도를 나타냈고, 6월과 7월에도 비교적 높은 농도를 나타냈다. 8월 이후 TN의 농도는 낮게 나타났으며 3월과 4월의 농도도 상대적으로 낮았다.

이번 조사에서 나타난 TN의 농도는 2000년 광주시상수도사업본부(2001)의 조사에서 측정된 TN의 농도보다 훨씬 높은 수치이다. 그러나 수도권 상수원인 팔당호의 TN보다는 낮은 것으로 나타났다(김 등 2008). 또 2000년 동복호 조사에서는 상류, 중류, 하류의 TN 농도가 모두 7월에 최고의 농도를 나타냈고 4월과 9월에 비교적

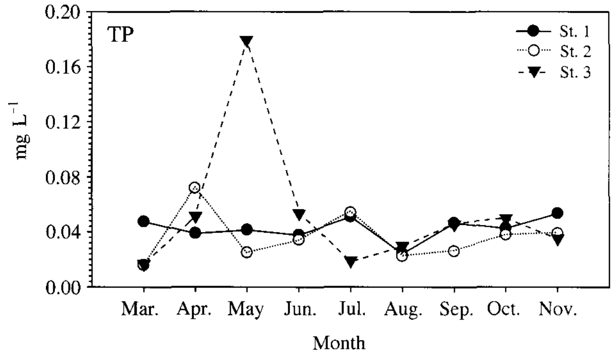

Fig. 5. Monthly variations of TP in the Dongbok Lake.

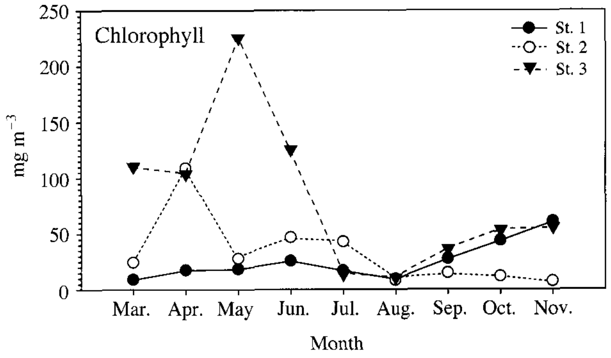

Fig. 6. Monthly variations of Chlorophyll-*a* in the Dongbok Lake.

높은 농도를 나타냈었는데, 이번 조사에서는 상류, 중류, 하류의 TN 농도 분포가 서로 다르게 나타났다.

동복호에서 TP의 농도변화도 하류의 5월 결과를 제외하고는 월별, 지점별 차이가 크지 않았다(Fig. 5). 상류에서 TP의 농도는 8월에 가장 낮았고 그 밖의 조사기간에는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 전체적인 농도는 0.05 mg L^{-1} 이하로 나타났다. 중류에서 TP의 농도는 조사기간 동안 약간의 차이를 나타냈고, 하류에서 TP의 농도는 5월에 0.18 mg L^{-1}로 나타나 전체 조사기간 동안 동복호 전 지점 중 가장 높은 농도를 기록하였다. 그러나 5월을 제외한 나머지 조사기간에는 TP의 농도에 큰 차이가 없었다.

2000년의 동복호 조사(광주시상수도사업본부 2001)에서 측정되었던 TP의 농도와 비교했을 때 이번 조사의 TP 농도는 5월의 하류에서 결과를 제외하면 큰 차이가 없었다.

동복호 하류에서 5월에 TN과 TP의 농도가 연중 최고치를 기록한 것은 이 시기의 조류최대량과 연관되어 유기인(organic phosphate)의 농도 기여가 있었기 때문으로 볼 수 있지만(Kalff 2002) TN의 고농도에 대한 설명으로는 부족하다. 또 TN과 TP의 농도가 조류의 최대성장을 유발했다고 보는 것도 이 수역의 평균적 농도가 제한요인(limiting factor)으로 작용할 수준 이상이라는 사실에서 적당한 설명이 될 수 없다(Lampert and Sommer 1997; Kelly and Whitton 1998). 따라서 조류 최대량, TN과 TP의 최대농도 사이의 상호작용이 있었을 가능성이 있는 것으로 추측할 수 있다. 동복호 상류, 중류, 하류에서 측정된 TN과 TP의 농도에서 동복호 표층의 여름철 영양단계는 중영양-부영양 단계에 속하는 것으로 나타났다(Kalff 2002).

동복호 각 수계의 상층에서 클로로필(chlorophyll *a*)의 농도는 8월에 가장 낮고 봄철에 높은 것으로 나타났다(Fig. 6).

상류의 클로로필 농도는 10~60 μg L^{-1}로 나타났다. 이것은 2000년 조사(광주시상수도사업본부 2001)에서 동복호 상류의 클로로필 농도가 10~70 μg L^{-1}였던 것과 거의 동일한 결과이다. 그러나 최대 농도가 이번 조사에서는 11월에 나타났고 최저 농도가 3월에 나타났는데 2000년 조사에서는 최대농도가 8월과 10월이었고 최저농도는 4월에 나타났다. 또 최고농도도 이번 조사에서는 60.6 μg L^{-1}였으나 2000년 조사에서는 70 μg L^{-1}였다.

중류에서의 클로로필 농도는 7.1~108.4 μg L^{-1}로 나타났는데 이것은 2000년의 중류에서 나타났던 1~45 μg L^{-1}의 결과와 차이가 있었다. 또, 클로로필 농도의 월별 분포에서도 많은 차이가 있었다. 즉 2000년 조사에서는 7월에 가장 높은 농도를 나타냈고 8월과 9월에 높았는데 이번 조사에서는 4월에 가장 높고 8월에 가장 낮게 나타났다. 또 최저 농도는 2000년의 조사에서는 11월에서 2월까지 겨울에 낮게 나타났으나 이번 조사에서는 8월 이후 낮게 나타났다.

하류에서 클로로필은 3월부터 6월까지 100 μg L^{-1} 이상의 높은 농도를 나타냈다. 5월에는 225.3 μg L^{-1}의 농도를 나타내어 동복호의 전 조사기간 중 가장 높은 농도를 나타냈다. 상층의 클로로필 농도는 7월부터 급격히 감소하여 8월에 최소의 농도를 나타냈고 9월과 10월에 30 μg L^{-1} 이상의 농도를 나타내다가 11월에 다시 50 μg L^{-1} 이상의 농도를 나타냈다.

클로로필의 농도는 수중 식물플랑크톤의 척도가 되지만 개체수에 기초한 생물량과는 차이를 나타내는 경우가 많다(Wetzel and Likens 2000). 본 조사에서도 식물플랑크톤의 개체수와 클로로필의 농도사이에는 많은 불일치가 있었다. 이것은 각 종의 기하학적 구조가 다르고 이에 따른 부피의 차이가 있으며 결국 체내 광합성 색소의 차이를 나타내기 때문이다. 따라서 더 정확한 생물량을 조사하기 위해서는 개체의 생물량(클로로필 농도와 식물플랑크톤 체적 그리고 탄소량 생체량)을 추가적

으로 조사하는 것이 타당하다고 생각된다(Strathmann 1967; Lewis 1978; Horne and Goldman 1994).

동복호에서 동정된 식물플랑크톤은 상류에서 78종, 중류에서 71종, 그리고 하류에서 63종으로 총 108종이었다. 출현한 식물플랑크톤을 분류군별로 정리하면 녹조류가 가장 많은 54종이었고, 규조류가 30종, 그리고 남조류가 12종이었으며 와편모조류가 3종이었다. 또 유글레나류는 6종이었고, 황색편모조류는 2종이었으며, 은편모조류가 1종이었다. 이와 같은 종조성은 한 호수에서 1년간의 조사로 동정되는 식물플랑크톤의 종 수가 70~200종인 것에 잘 일치하는 결과지만 부영양이 진행된 호수에서의 조류상으로는 다양성이 낮은 편이다(Kalff 2002; Grover and Chrzaowski 2006).

수역별 출현 종수의 분포현황에서는 상류가 가장 다양한 종조성을 보였고 하류로 갈수록 낮아지는 양상을 나타냈다(Fig. 7). TN과 TP 등의 영양염류 농도가 상류보다 높았던 하류에서의 종다양성이 더 낮은 것은 하류에서 특정종(*Peridinium* spp.)의 과우점(predominate)으로 인해 다른 조류종이 경쟁에서 성공적이지 못한 때문으로 판단된다(Graham and Wilcox 1999).

동복호 상류의 조사에서 밝혀진 가장 많은 종은 6월에 동정된 21종이었다. 출현종의 다양도의 계절적 패턴에서는 3월에서 4월 사이에 감소하다가 5월부터 증가하여 6월에 최고를 기록한 후 다시 낮아졌고 8월부터 다시 증가하였다.

동복호 중류에서는 6월에 28종의 식물플랑크톤이 동정되어 가장 다양한 종조성을 나타냈으며, 패턴분석에서 6월에서 9월 사이에 다양도가 높고 3월에서 5월 사이와 10월과 11월에 다양도가 낮은 것으로 나타났다.

동복호 하류에서도 가장 높은 종 다양도는 6월에 나타났는데 총 22종의 식물플랑크톤이 동정되었다. 최저의 종 조성은 3월의 6종이었다. 동정된 종의 월별 분포에서는 6월의 peak와 9월에서 11월 사이의 second peak가 있었고, 3월에서 5월 사이의 봄철과 7월에서 8월 사이의 여름철에는 낮은 종 조성을 나타냈다.

본 조사기간 동안 동복호 상류, 중류, 하류의 전체 조사지역에서 두 계절 이상을 출현한 이 수역의 보편종은 *Ankistrodesmus falcatus* var. *mirabilis*, *Asterionella formosa*, *Aulacoseira granulata*, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*, *Chlorella* sp., *Cyclotella stelligera*, *Fragilaria crotontensis*, *Melosira distans*, *Nitzschia palea*, *Peridinium bipes* f. *occulatum*, *Peridinium* sp., *Scenedesmus denticulatus*, *Scenedesmus oblique*, *Staurastrum* sp., *Synedra ulna*, *Tetraedron* sp., 그리고 *Trachelomonas volvocina*의 17종이었다. 이들 보편종은 *Peridinium* spp.와 *Trachelomonas volvocina*를 제외한 대부분 규조류와 녹조류로 본 조사가 이루어진 수역의 대표적 조류가 규조류와 녹조류임을 확인할 수 있었다. 조사기간 동안 동복호의 각 지점별 출현종 현황은 조사된 3 수역에 보편적으로 출현한 종 수가 17종에 불과한 사실에서 알 수 있는 것처럼 수역 간에 그다지 높지 않은 유사성을 보여주었다.

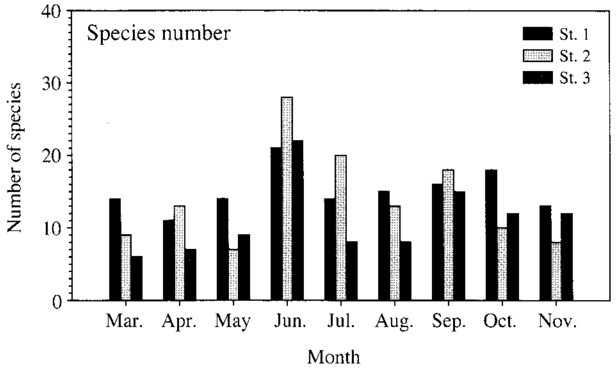

Fig. 7. Monthly variations of number of phytoplankton species in the Dongbok Lake.

2003년 3월부터 11월까지 동복호의 상류에서는 *Ankistrodesmus falcatus* var. *mirabilis*, *Asterionella formosa*, *Cyclotella stelligera*, *Fragilaria crotontensis*, *Peridinium bipes* f. *occulatum*, 그리고 *Synedra ulna*가 전 조사기간 동안 출현빈도가 높은 종이었다. 그밖에 *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* f. *sprialis*, *Melosira distans*, *Scenedesmus denticulatus*, *Scenedesmus oblique*, *Scenedesmus quadricauda*, *Scenedesmus* sp., *Staurastrum* sp., *Tetraedron* sp. 등의 종도 출현빈도가 높았다.

동복호 중류에서 높은 출현 빈도를 보인 종들은 *Ankistrodesmus falcatus* var. *mirabilis*, *Cyclotella stelligera*, *Fragilaria crotontensis*, *Melosira distans*, *Synedra ulna* 등 5종으로 이들은 전 조사기간 동안 관찰되었다. *Asterionella formosa*, *Aulacoseira granulata*, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*, *Phormidium tenue*, *Scenedesmus denticulatus*, *Scenedesmus longispina*, *Scenedesmus* sp., *Tetraedron* sp. 등도 자주 관찰되는 종이었다.

동복호 하류의 출현종 중 관찰의 빈도가 높았던 종은 *Asterionella formosa*, *Cyclotella stelligera*, *Fragilaria crotontensis*, *Melosira distans*, *Peridinium bipes* f. *occulatum*, *Synedra ulna*의 6종으로 3월부터 11월까지 전 조사기간 동안 관찰되었다. 이들 종 외에 *Ankistrodesmus falcatus* var. *mirabilis*, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*, *Nitzschia palea*, *Peridinium* sp., *Scenedesmus denticulatus*, *Scenedesmus oblique*, *Tetraedron* sp.도 비교적 높은 출현

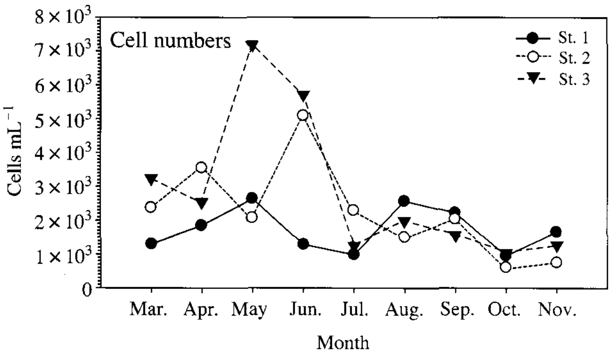

Fig. 8. Monthly variations of cell numbers in the Dongbok Lake.

빈도를 나타냈다.

식물플랑크톤의 개체수는 동복호의 상류와 중류, 그리고 하류에서 서로 다른 양상으로 변동하였다(Fig. 8).

동복호 상류에서 식물플랑크톤 개체수는 상층에서는 5월과 8~9월의 두 번의 peak를 나타냈다. 조류 개체수의 곡선에서 두 번의 peaks는 온대지방의 호수에서 수체의 수직혼합이 일어나는 봄(spring turnover)과 가을(fall turnover)에 조류의 번성(spring blooms와 fall blooms)이 일어나는 일반적인 경향(Sze 1997; Wetzel 1999)과 일치하는 결과로 볼 수도 있지만 중류와 하류의 결과나 여름철에 제한요인이 되지 않는 영양상태와 식물플랑크톤 섭식어류나 동물플랑크톤의 조사결과가 없는 상태에서 단정적으로 판단하기는 어렵다. 5월의 식물플랑크톤 개체수 peak에서는 *Cyclotella stelligera* (1,182 cells mL^{-1}), *Peridinium bipes* f. *occulatum* (424 cells mL^{-1}), *Asterionella formosa* (334 cells mL^{-1}) 등이 우점했었고 8월의 peak에서는 *Microcystis aeruginosa* (1,230 cells mL^{-1})와 *Fragilaria crotonensis* (697 cells mL^{-1})가 우점했으며, 9월의 peak에서는 *Fragilaria crotonensis* (733 cells mL^{-1})와 *Cyclotella stelligera* (432 cells mL^{-1})가 우점했다.

동복호 중류에서 관찰된 식물플랑크톤 개체군 밀도는 조사기간 중 많은 변이를 보여주었다. 최고의 개체수는 6월의 5,091 cells mL^{-1}이었는데, 이때 우점종이었던 *Fragilaria crotonensis*의 밀도가 2,638 cells mL^{-1}로 나타났다. 그밖에 *Tetraedron* sp., *Cyclotella stelligera* 등이 600 cells mL^{-1} 이상의 높은 밀도를 나타냈다. 조사기간 중 최저의 식물플랑크톤 개체수는 10월과 11월에 기록되었는데 이 시기에는 1,000 cells mL^{-1} 이하의 낮은 밀도로 나타났다.

동복호의 하류에서는 식물플랑크톤 개체수의 계절별 변화가 컸다. 4월부터 6월 사이에 높은 현존량을 나타냈으며 최고의 현존량은 5월에 나타났는데, 이때의 개체군 밀도는 7,000 cells mL^{-1} 이상으로 동복호의 전 조사지점 중 가장 높은 수준이었다. 이 시기의 우점 식물플랑크톤은 *Aphanocapsa* sp.로 5,700 cells mL^{-1}의 높은 밀도를 나타냈고, *Cyclotella stelligera*도 1,069 cells mL^{-1}의 높은 밀도를 나타냈다. 동복호 하류의 상층에서는 6월에도 5,700 cells mL^{-1}의 높은 개체군 밀도를 나타냈는데, 이때에는 *Fragilaria crotonensis*가 3,231 cells mL^{-1}의 높은 밀도를 나타냈다. 동복호 하류에서는 전체적으로 초여름에 해당하는 5월부터 6월 사이에 높은 개체수를 보여주었다. 그러나 상류에서와는 달리 가을철의 second peak는 관찰되지 않았고 8월 이후 거의 비슷한 수준을 유지하였다. 동복호의 식물플랑크톤 개체수 밀도는 다른 호수들에 비해 낮은 수준이었다(Fathi *et al.* 2001).

동복호 상류에서의 조사기간 동안 출현한 주요 우점종은 *Cyclotella stelligera*가 10월을 제외한 전 조사기간 동안 우점종으로 출현하여 가장 보편적인 우점종이었고 *Peridinium bipes* f. *occulatum*도 3월과 8월을 제외한 전 조사기간 동안 우점하였다. 그밖에 *Asterionella formosa*와 *Fragilaria crotonensis*도 우점의 빈도가 높았다.

우점종의 분류군별 현황에서는 규조류가 전체 우점종의 60.0%를 차지하였고, 와편모조류가 17.5%, 녹조류가 12.5%, 그리고 남조류가 10.0%였다.

동복호 중류의 주요 우점종은 *Peridinium bipes* f. *occulatum*, *Cyclotella stelligera*, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* 등이 총 9회의 조사기간 중 5회에 걸쳐 우점하는 것으로 나타났고, *Asterionella formosa*가 4회 우점종으로 조사되었다. 동복호 중류에서도 규조류가 전체 우점종의 57.9%를 차지하여 가장 일반적인 우점 분류군이었고, 녹조류가 20.1%, 와편모조류가 13.2%, 그리고 남조류가 7.8%를 차지하였다.

동복호 하류의 주요 우점 식물플랑크톤은 *Peridinium bipes* f. *occulatum*으로, 조사가 이루어진 2003년 3월부터 11월까지 매월 우점하는 것으로 조사되었다. 또 *Fragilaria crotonensis*도 10월과 11월을 제외한 전 조사기간에 우점하였으며 *Cyclotella stelligera*도 총 5회에 걸쳐 우점종으로 조사되었다. 동복호 하류의 주요 우점 분류군은 규조류로 전체 우점종의 56.4%를 차지하였고, 와편모조류가 25.6%로 상류나 중류에서보다 높은 우점빈도를 나타냈으며 녹조류와 남조류는 전체 우점종의 10% 씩을 차지하였다.

동복호에서 식물플랑크톤의 분류군에 따른 분포양상은 조사수역과 수층에 따라 다양한 양상을 나타냈다 (Fig. 9a-c).

식물플랑크톤의 계절적 성장 패턴에서는 상류는 조사기간 동안 남조류와 규조류, 그리고 녹조류가 교대로 우점하는 분류군으로 나타났다(Fig. 9a). 규조류는 3월, 5

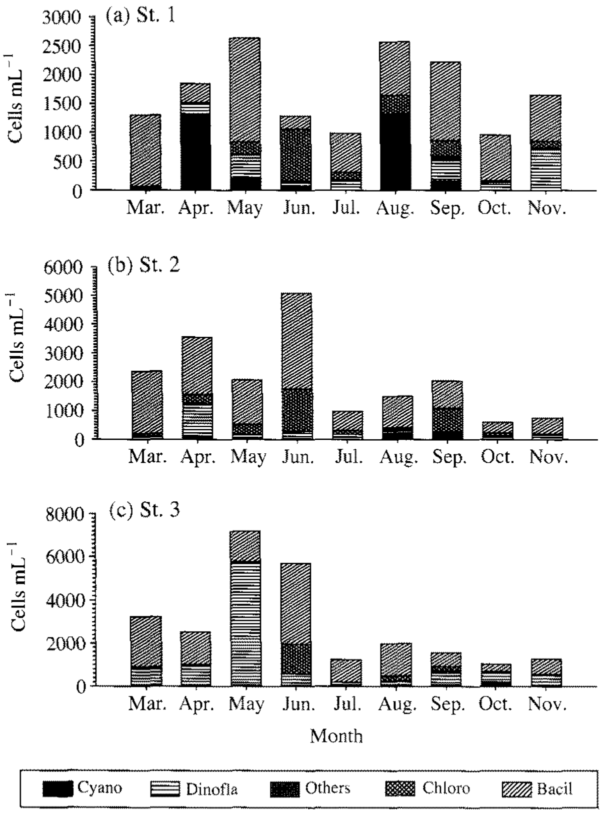

Fig. 9. Monthly variations of cell numbers of each phytoplankton taxon in the Dongbok Lake.

월, 7월, 그리고 9월부터 11월까지 가장 높은 밀도를 나타냈고, 5월에는 1,801 cells mL^{-1}로 조사기간 중 최고의 개체수를 나타내었다. 전체적으로 이 수역의 춘계에 해당하는 3월과 5월 사이에 개체군 밀도가 높았고 6월에 가장 낮았으며 7월 이후 다시 높아졌다.

규조류의 개체수를 결정하는 주요 종은 3월에는 *Asterionella formosa*와 *Fragilaria crotonensis*였고, 5월에는 *Cyclotella stelligera*와 *Fragilaria crotonensis*였다. 7월의 규조류 개체수는 5월과 마찬가지로 *Cyclotella stelligera*와 *Fragilaria crotonensis*의 개체수에 의해 결정되었다.

남조류는 4월과 8월에 두 번의 높은 밀도(>1,200 cells mL^{-1})를 보여주었다. 그러나 그 밖의 시기에는 매우 낮은 밀도로 나타났다. 4월의 남조류 우점에 가장 크게 기여한 종은 *Aphanocapsa* sp.였고 8월의 우점에 기여한 종은 *Phormidium tenue*였다.

Peridinium bipes f. *occulatum*의 성쇠에 의해 좌우되는 와편모조류의 밀도는 5월과 9월에 성장이 나타났고, 11월에 규조류와 더불어 가장 우점하는 분류군이었다.

녹조류는 6월에 가장 밀도가 높은 우점분류군이었으나 나머지 시기엔 낮은 밀도로 출현하였다.

따라서 동복호 상류에서 조사기간 동안 우점한 식물플랑크톤 분류군은 규조류, 남조류, 녹조류라고 할 수 있다.

동복호 중류에서 전 조사기간 동안 주요 우점 식물플랑크톤 분류군은 규조류로 상류의 결과와 약간의 차이가 있었다(Fig. 9b).

규조류 우점의 정도는 3월에서 6월 사이에 높게 나타났다. 3월에서 6월 사이에 동복호의 중류에서 규조류 우점을 유발한 종은 3월과 4월에는 *Asterionella formosa*였고, 5월에는 *Cyclotella stelligera*였으며 7월에는 *Fragilaria crotonensis*였다.

7월 이후 규조류의 우점 정도가 낮아지기 시작하여 9월 이후에는 녹조류나 와편모조류와 비슷한 낮은 밀도로 출현하였다.

녹조류는 6월과 9월에 규조류를 제외한 다른 분류군에 비해 높은 출현량을 나타냈다. 6월의 녹조류 개체군 밀도는 동복호 상류의 상층에서보다 높은 것으로 나타났다.

와편모조류는 4월에 비교적 높은 출현밀도를 나타냈으나 나머지 기간에는 출현 정도가 매우 낮았다.

남조류는 전 조사기간 동안 동복호 중류의 상층에서 매우 낮은 출현 밀도를 보여주었다. 8월과 9월에 *Anabaena* sp.와 *Phormidium tenue*에 의해 약간의 출현이 관찰되었을 뿐이었다.

유글레나류, 은편모조류, 황색편모조류 등과 같은 기타 조류들은 동복호 중류의 상층에서 거의 발견되지 않았다.

동복호 하류에서는 규조류와 와편모조류의 우점이 뚜렷했다(Fig. 9c).

규조류는 5월과 10월을 제외한 전 조사기간 동안 가장 우점도가 높은 분류군이었다. 가장 높은 우점도는 6월에 나타났는데 이때 *Fragilaria crotonensis*가 높은 개체수로 출현하였다. 9월 이후에는 전체 식물플랑크톤의 출현 개체수가 감소하면서 규조류 우점의 정도가 급격히 감소하였다.

동복호 하류의 와편모조류의 우점은 봄철에 집중되었다. 3월부터 개체수를 증가시키던 와편모조류는 5월에 5,000 cells mL^{-1}이 넘는 높은 개체군 밀도를 나타내면서 가장 우점하는 식물플랑크톤 분류군이 되었다. 동복호에서 와편모조류의 우점을 결정지은 종은 *Peridinium bipes* f. *occulatum*이었다. 이 종은 이미 동복호에서 상수원 수질의 안정적 공급에 많은 문제를 유발하여 집중적으로 관리되고 있는 종으로 해마다 봄철과 여름철에 동복호 하류를 중심으로 과다증식을 해 왔다(정과 조

1988, 1999; 광주광역시상수도사업본부 2001). 2000년 조사에서는 봄(5월), 여름(8월), 가을(11월), 겨울(1월) 모두 *Peridinium bipes* f. *occulatum*의 과다증식에 의한 와편모조류의 우점이 관찰되었으나 본 조사에서는 5월에만 우점분류군으로 나타났다. 또 출현의 밀도도 2000년의 조사에서는 조사기간 중 100,000 cells mL^{-1} 이상의 높은 밀도를 나타냈으나 본 조사에서는 가장 높은 밀도가 5,500 cells mL^{-1}의 수준이었다. 이와 같은 결과는 채집의 시점과 빈도의 차이에서 비롯된 것으로 판단된다. 대부분 조류는 2주 이내에 최대성장을 이룰 수 있으므로 한 달에 한번 씩 하는 채집은 최대량의 시기를 놓칠 수도 있다. 실제로 정기 채집의 중간에 이루어진 관찰에서 동복호 하류 수역에 와편모조류의 blooms이 형성된 것을 관찰할 수 있었다(personal observation). 또 조사가 이루어진 상류와 중류사이, 그리고 중류와 하류 사이에서 하류와 다른 시기의 와편모조류 blooms이 관찰되기도 했다. 여러 사항을 고려하더라도 2003년의 조사 결과는 동복호 하류의 와편모조류 분포 양상이 예년과는 다르다는 것을 알 수 있었다.

녹조류는 6월에 1,000 cells mL^{-1} 이상의 밀도로 출현하였으나 나머지 기간에는 개체수가 많지 않았다.

동복호 조류 중 주요 우점종의 동태는 상류, 중류, 하류에서 다양한 패턴을 나타내었다(Fig. 10a-c).

동복호 상류에서는 *Asterionella formosa*의 우점이 뚜렷했다(Fig. 10a). *Asterionella formosa*는 상층에서 봄철의 우점 종이었고 가을에도 주요 우점종으로 나타났으며, 중층에서도 우점종으로 나타났는데, 특히 4월에는 2,500 cells mL^{-1}의 높은 출현빈도를 나타냈다.

*Cyclotella stelligera*는 5월과 7월에 가장 우점하는 종으로 나타나 여름철의 주요 종으로 조사되었으며, *Fragilaria crotonensis*는 8월과 9월의 가장 출현빈도가 높은 종이었다. 동복호의 주요 식물플랑크톤인 *Peridinium bipes* f. *occulatum*은 11월에 1,500 cells mL^{-1}로 가장 높은 세포수를 나타내었고 나머지 기간에는 주요 종으로 조사되었다. *Peridinium bipes* f. *occulatum*과 규조류 사이에는 경쟁관계나 상호작용의 효과는 없는 것으로 나타났다.

동복호 중류에서도 *Asterionella formosa*의 봄철 우점이 뚜렷했다(Fig. 10b). *Asterionella formosa*는 3월부터 5월까지 1,500 cells mL^{-1} 이상의 밀도로 나타났다. 그러나 6월 이후 *Asterionella formosa*의 개체수는 100 cells mL^{-1} 이하의 매우 낮은 수준으로 감소하였다.

6월에는 *Fragilaria crotonensis*가 2,500 cells mL^{-1}을 초과하는 밀도로 최우점하였다가 7월부터는 낮은 출현량을 나타냈다. *Cyclotella stelligera*는 5월과 6월만 주요

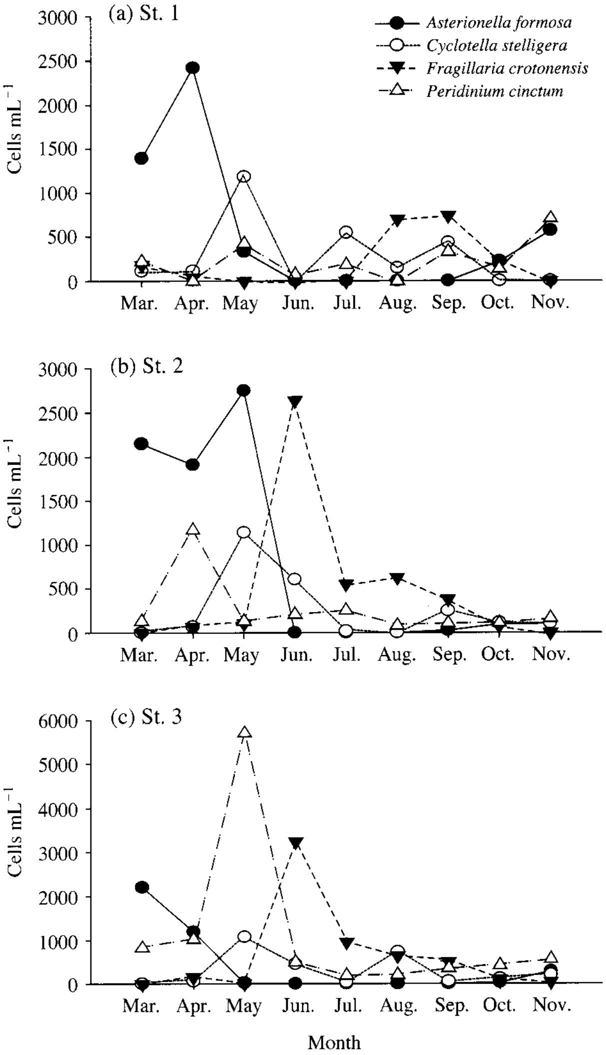

Fig. 10. Dynamics of dominant phytoplankton species in the Dongbok Lake.

종으로 나타났다. *Peridinium bipes* f. *occulatum*은 4월에 *Astrionella formosa* 다음으로 풍부하게 출현하였으나 동복호의 주요 종으로 인식될 수준은 아니었다. 동복호 중류에서 모든 주요 종들이 7월 이후에는 매우 낮은 출현량을 나타냈다.

동복호 하류에서는 *Peridinium bipes* f. *occulatum*과 *Astrionella formosa*의 봄철 우점이 뚜렷했다(Fig. 10c). 그 밖에 *Fragilaria crotonensis*는 6월에 최우점종으로 나타난 후 감소하였고 *Cyclotella stelligera*는 4월에 *Peridinium bipes* f. *occulatum*과 함께 우점하였다.

동복호의 상류, 중류, 하류에서 식물플랑크톤의 종조성, 개체수밀도, 우점종 등에 많은 차이를 보인 것은 수환경의 차이에 의한 것으로 보인다(Moss 1988; Fathi 2001; Hirose *et al.* 2003; Muylaert *et al.* 2003).

적 요

동복호의 수중생태계 구조를 파악하기 위한 조사의 일환으로 상류, 중류, 하류의 식물플랑크톤의 출현패턴을 조사하였다. TN과 TP 농도의 조사지점과 조사시기에 따른 변화는 5월을 제외하고는 크지 않았다. 클로로필의 농도는 상류와 중류에서는 8월에 가장 낮고 봄과 가을에 높은 것으로 나타났고, 하류에서는 5월에 최고의 농도를 나타냈다.

동정된 식물플랑크톤은 상류에서 78종, 중류에서 71종, 그리고 하류에서 63종으로 총 108종이었다. 녹조류가 54종, 규조류가 30종, 그리고 남조류가 12종이었으며 와편모조류와 그 밖의 조류가 12종이었다. 출현개체수 분포는 상류에서는 5월과 8~9월의 두 번의 peak를 나타냈고, 중류에서는 5월의 감소를 제외하면 봄과 가을의 높은 현존량과 여름의 낮은 현존량 패턴을 보여주었으며, 하류에서는 5월과 6월 사이에 높은 현존량을 나타냈다. 최고의 현존량은 하류에서 5월에 7,158 cells mL^{-1}의 높은 개체군 밀도를 나타냈는데, 이 시기의 우점종은 *Peridinium bipes* f. *occulatum*이었다. 동복호에서 식물플랑크톤 분류군의 분포양상은 조사수역에 따라 다양한 양상을 나타냈다. 그러나 전반적으로 규조류-와편모조류/규조류-남조류/녹조류/규조류-규조류가 교대로 우점하는 분류군으로 나타났다.

참 고 문 헌

공정시험법. 1992. 수질오염 · 폐기물 · 토양오염. 공정시험방법. 동화기술. 서울.

광주시상수도사업본부. 2000a. 황산동과 항생제를 이용한 *Microcystis*와 *Peridinium*의 조류제어 효과 비교. p. 29.

광주시상수도사업본부. 2000b. 다년간에 걸친 동복호 수질변화와 조류관계 해석. p. 29.

광주시상수도사업본부. 2001. 동복호 수변식물에 의한 수질오염 최소화 방안연구. p. 45.

김용전, 최승억, 안태석. 2008. 팔당호 인공식물섬 공극수에서 미생물 개체수와 체외 효소활성도. 한국육수학회지. 41:19-25.

정 진, 조영관. 1988. 동복호에서 장해성 조류의 계절별 동태 및 환경요인과의 상관성. 한국육수학회지. 31:345-352.

정 진, 조영관. 1996. 환경요인에 따른 동복호에서의 식물성플랑크톤의 계절적 분포. 대한위생학회지. 11:27-37.

조영관, 이대행. 1999. 상수원에서 살조제를 이용한 녹조제어 방안. 시정연구. 20:243-286.

Barnes RSK and KH Mann. 1991. Fundamentals of Aquatic Ecology. Blackwell Scientific Publications, Oxford.

Bec B, J Husseini-Ratrema, Y Collos, P Souchu and A Vaquer. 2005. Phytoplankton seasonal dynamics in a Mediterranean coastal lagoon: emphasis on the picoeukaryote community. J. Plankton Res. 27:881-894.

Campbell NA and JB Reece. 2007. Biology with Mastering Biology. 8th Ed. Benjamin Cummings, New York.

Fathi AA, PHMA Abdelzaher, RJ Flower, M Ramdani and MM Kraiem. 2001. Phytoplankton communities of North African wetland lakes: the CASSARINA Project. Aquatic Ecology 35:303-318.

Graham LE and LW Wilcox. 1999. Algae. Prentice Hall, New York.

Grover JP and TH Chrzanowski. 2006. Seasonal dynamics of phytoplankton in two warm temperate reservoirs: association of taxonomic composition with temperature. J. Plankton Res. 28:1-17.

Harper D. 1992. Eutrophication of Freshwaters-Principles, Problems and Restoration-Chapman and Hall, London.

Hirose M, Y Nishibe, M Ueki and S Nakano. 2003. Seasonal changes in the abundance of autotrophic picoplankton and some environmental factors in hypereutrophic Furuike Pond. Aquatic Ecology 37:37-43.

Horne AJ and CR Goldman. 1994. Limnology. 2nd Ed. McGraw-Hill Inc., New York.

Kalff J. 2002. Limnology. Prentice Hall, New Jersey.

Krebs CJ. 1985. Ecology-The Experimental Analysis of Distribution and Abundance-3rd Ed. Harper & Row Publishers, New York.

Lampert W and U Sommer. 1997. Limnoecology-The Ecology of Lakes and Streams-Oxford University Press, Oxford.

Muylaert K, S Declerck, V Geenens, J Van Wichelen, H Degans, J Vandekerkhove, K Van der Gucht, N Vloemans, W Rommens, D Rejas, R Urrutia, K Sabbe, M Gillis, K Decleer, L De Meester and W Vyverman. 2003. Zooplankton, phytoplankton and the microbial food web in two turbid and two clearwater shallow lakes in Belgium. Aquatic Ecology 37:137-150.

Nabout JC, IS Nogueira and LG Oliveira. 2006. Phytoplankton community of floodplain lakes of the Araguaia River, Brazil, in the rainy and dry seasons. J. Plankton Res. 28:181-193.

Odum EP. 1971. Fundamentals of Ecology. International Thomson Publishing, New York.

Shubert LE. 1984. Algae as Ecological Indicators. Academic Press, London.

Strathmann RR. 1967. Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volume or plasma volume. Limnol. Oceanogr. 12:411-418.

Sze PA. 1998. Biology of the Algae. 3rd Ed. WCB McGraw-

Hill, Boston.
Utermöhl HZ. 1957. Vervolkommung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. Mitt. Int. Ver. Limnol. 9:38.
Wetzel RG. 1999. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd Ed. Academic Press, San Diego.
Wetzel RG and GE Likens. 2000. Limnological Analyses. Springer, New York.

Manuscript Received: October 24, 2008
Revision Accepted: November 18, 2008
Responsible Editor: Yongsik Sin