

수심이 얇은 부영양 인공호 (일감호)의 동·식물플랑크톤 동태학

김 호 섭 · 박 제 철¹ · 황 순 진*

(건국대학교 지역건설환경공학과, ¹금오공과대학교)

Dynamics of Phytoplankton and Zooplankton of a Shallow Eutrophic Lake (Lake Ilgam). Kim, Ho-Sub, Je-Chul Park¹ and Soon-Jin Hwang* (Department of Biological Systems Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea, ¹Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Kumi 730-701, Korea)

This study was attempted to understand seasonal dynamics of phyto- and zooplankton communities in shallow, eutrophic Lake Ilgam and to compare them with the PEG (Plankton Ecology Group) model. Seasonal succession pattern of phytoplankton community was similar to PEG model as Chlorophyceae and Bacilliphyceae increase during spring and autumn followed by increase of Cyanophyceae. However, based on the cell density and biomass, a dominant phytoplankton community differed with PEG model; Cyanophyceae had been a dominant community throughout a year, except for ice-cover period during which Chlorophyceae was a dominant group. In spring, when ice melted and dissolved nutrients in water column increased, the increase of Chlorophyceae occurred; when nutrients (DIN and DIP) rapidly decreased, Cyanophyceae increase occurred. *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Lyngbya*, *Merismopedia* were major dominant species of Cyanophyceae and their cell density and/or biomass was the highest in October 2000 ($12.9 \pm 5.8 \times 10^5$ cells/ml, $3.5 \pm 0.9 \times 10^3$ μ gC/l). Cyanophyceae biomass showed positive relationship with chlorophyll *a* ($r^2 = 0.71$, $P < 0.001$) and TP concentration ($r^2 = 0.62$, $P < 0.001$). Small-sized rotifers such as *Keratella cochlearis*, increased between March and May when Chlorophyceae increased. Both high standing crop of copepods and cladocerans, such as *Diaphanosoma brachyurum* and *Bosmina longirostris* occurred between June and September accompanied with the increase of Dinophyceae and Bacillariophyceae. There was no evidence that clear-water phase was caused by zooplankton grazing. The diversity and evenness index of phyto- and/or zooplankton increased with chlorophyll *a* concentration. These results suggest zooplankton grazing and limiting nutrient deficiency could lead to change of phytoplankton biomass, but not the phytoplankton community in Lake Ilgam.

Key words : phytoplankton, zooplankton, PEG model, Lake Ilgam

서 론

Sommer *et al.* (1986)에 의하면 PEG (Plankton Ecology

Group)모델에서 조사된 24개의 서로 다른 호수, 저수지 그리고 연못에서 나타나는 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 계절적인 천이는 불규칙적인 물리적 사건들에 의해 교란될 수 있다하더라도, 예측이 가능하고 방향성이

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

있는 것으로 이해되고 있다. 온대 담수호에서 여름에 비해 상대적으로 일조시간이 짧고 수온이 낮은 봄과 가을에는 규조류가 우점하고, 여름으로 갈수록 남조류의 생물량이 증가하는 것이 일반적인 현상이다 (Sommer *et al.*, 1986). 먹이가 부족하고 수온이 낮은 겨울에는 성장률이 느린 요각류 유생과 몇몇의 성체만이 존재하며, 지각류는 퇴적층에서 휴지기를 보내기 때문에 거의 출현하지 않는다 (Agbeti and Smol, 1995). 봄이 되면 수온 상승으로 동물플랑크톤 활동성이 증가하고, 먹이원이 되는 식물플랑크톤의 증가로 섭식률이 증가하여 연 중 최대 생물량을 나타낸다 (Sommer *et al.*, 1986; 김 등, 1999).

수온과 빛은 식물플랑크톤의 천이를 일으키는 가장 중요한 요소이며 제한영양염류의 농도와 섭식압 등은 생물량을 결정하는 주 원인인 것으로 알려져 있다 (Hutchinson, 1957; Reynolds *et al.*, 1987; Carpenter and Kitchell, 1993; 김 등, 1999). 식물플랑크톤 대 발생이 외부로부터 많은 영양염류가 유입된 이후나, 퇴적물로부터 재 용출된 영양염류가 수층내로 확산되는 혼합시기에 주로 나타나기 때문에 (김, 1998; Lathrop and Carpenter, 1990) 동·식물플랑크톤의 종 구성과 생물량의 계절적인 천이 과정은 수체의 영양상태 뿐만 아니라 영양염류의 공급원과 수체의 혼합 시기 등에 따라 차이가 있을 수 있다 (Sommer *et al.*, 1986).

수심이 얇은 온대호수에서 성층형성은 바람이 없는 시기에 국한되며, 바람에 의한 수체의 불규칙적인 교란은 심층에 산소전달 뿐만 아니라 퇴적층으로부터 영양염류의 재용출, 재부유된 입자의 빛 제한 등을 야기함으로써 식물플랑크톤 성장에 영향을 주게 된다. 수체로 재부유된 입자들에 의한 빛 제한은 낮은 광도에 적응력을 가진 종으로의 변화와 더불어 생물량의 감소를 야기한다 (Hoyer and Jones, 1983; Philips *et al.*, 1997). 얇고 부영양한 호수에서 동물플랑크톤에 의한 식물플랑크톤의 Top-down 효과는 상대적으로 적어 PEG모델에서 제시된 부영양 호수에서의 봄과 가을철 식물플랑크톤 생물량의 급격한 감소는 관찰되지 않을 수 있으며 (Gulati, 1983; Scheffer, 1998), 동물플랑크톤의 증가와 종조성의 변화는 먹이 이용율보다는 수온과 같은 다른 요인에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Sommer *et al.*, 1986).

본 연구는 수심이 얇고 부영양한 호수에서 계절에 따른 동·식물플랑크톤 천이 과정을 PEG모델과의 비교, 수질인자와의 상관성 분석을 통해 이해하고자 이루어졌다.

재료 및 방법

1. 조사 기간 및 시료채취

조사는 2000년 3월부터 2002년 9월까지 월 1회 일감호의 가장 깊은 지점 (최대수심 1.8 m)에서 이루어졌다. 2000년 1월과 2월에는 호수결빙으로 인해 조사가 이루어지지 않았으나, 2001년 12월과 2002년 1월에는 얼음 위에서 조사되었고, 2000년 9월은 표층만 조사하였다. 식물플랑크톤 조사를 위한 시료는 0, 1.0, 1.5 m에서 Van Dorn 채수기를 이용하여 채취한 후 비닐 팩 (whirl-pak bag)에 담아 루골용액으로 고정하여 보관하였다. 동물플랑크톤은 망목의 크기가 63 μm 인 네트를 이용하여 수심 1 m에서 수직에인 한 후 whirl-pack에 담았다. 현장에서 sucrose-formaline을 최종 농도가 5%가 되도록 첨가한 후 실험실로 운반하여 관찰 전까지 실온 암소에서 보관하였다.

2. 식물플랑크톤 조사

식물플랑크톤의 정량분석은 1 ml Sedgwick-Rafter 계수관을 이용하여 광학현미경 하에서 규조류 (Bacillariophyceae), 남조류 (Cyanophyceae), 녹조류 (Chlorophyceae), 와편모조류 (Dinophyceae), 은편모조류 (Cryptophyceae)로 분류하여 동정하고 계수하였다. 식물플랑크톤은 동정시 출현종의 가로, 세로 길이를 측정하여 Kellar *et al.* (1980)이 제시한 공식으로 체적 ($V: \mu\text{m}^3$)을 계산하였으며, 체적당 탄소함량은 규조류, 남조류 및 녹조류의 경우 Mullin *et al.* (1996)이 제시한 식을 이용하였고 (규조류: $10^{(-0.427+0.784(\log V_{\mu\text{m}^3}))}$ μgC , 녹조류와 남조류: $10^{(-0.460+0.866(\log V_{\mu\text{m}^3}))}$ μgC), 편모조류는 Starthmann (1967)이 제시한 식을 이용하였다 ($200 \text{ fgC}/\mu\text{m}^3$).

3. 동물플랑크톤 조사

동물플랑크톤의 정량·정성 분석은 Sedgwick-Rafter 계수관에 넣어 광학현미경 하에서 윤충류, 지각류, 요각류로 분류하여 실시하였다 (Stemberger, 1979; Balcer *et al.*, 1984; 조, 1993). 관찰시 출현 종에 대한 가로, 세로 길이를 모두 측정하였고 평균값을 생물량 계산에 이용하였다. 윤충류 체적은 Downing and Rigler (1984)가 제시한 식에 따라 계산하였고, 동물플랑크톤의 비중을 1.025로 가정하여 습중량을 계산한 후 습중량의 10%를 건중량으로 계산하였다 (Hall *et al.*, 1976; Pace and Orcutt,

1981). 동물플랑크톤의 생물량 ($\mu\text{gC/l}$)은 건중량의 48%를 탄소량으로 고려하여 (Andersen and Hessen, 1991) 산출하였다. 예외적으로 윤층류 중 *Asplanchna*속과 *Synchaeta*속은 몸체가 매우 약해서 약간의 충격에도 쉽게 파괴되고 다른 종에 비해 수분함량이 많기 때문에 건중량은 습중량의 4%로 하였다 (Dumont *et al.*, 1975). 지각류와 요각류의 건중량은 Length-Dry weight 관계식을 이용하여 계산하였고 (Culver *et al.*, 1985), 건중량의 48%를 탄소량으로 보았다.

4. 통계분석

동·식물플랑크톤과 수질인자와의 상관성 분석은 Pearson's correlation analysis와 요인분석 (principal component analysis)을 통해 수행하였고 (SPSS 10.0), 유의 수준은 $P < 0.05$ 를 기준으로 하였다. 수질분석 자료는 김 등 (2003)에서 제시한 수심별 자료의 평균값을 사용하였다. 동·식물플랑크톤의 출현종과 개체수를 이용한 Shannon의 다양도지수는 MVSP (Multi Variate Statistical Package 3.1)를 통해 분석하였다. 동·식물플랑크톤의 정량 분석 오차는 10% 미만이었으며, 식물플랑크톤의 계절별 변화에서는 0, 1, 1.5 m 수심에서의 평균값과 표준편차를 제시하였으며, 표준편차는 식물플랑크톤 현존량 (cells/l) 혹은 생물량 ($\mu\text{gC/l}$)의 표준과 심층간 차이를 의미한다.

결과 및 고찰

1. 식물플랑크톤의 계절변화

PEG모델에서 온대호수의 일반적인 식물플랑크톤 계절 천이는 봄철에 소형 중심형 규조류의 번성 후, 여름에는 영양염류와 수온 증가 혹은 상승 등의 영향으로 와편모조류나 남조류로 종 조성이 바뀌게 되며, 수온 감소와 더불어 혼합층의 깊이가 깊어지는 가을철에는 규조류가 다시 우점하고, 겨울철에는 생물량이 감소하는 것으로 설명되고 있다 (Sommer *et al.*, 1986).

일감호에서 식물플랑크톤 분류군별 계절적인 천이는 봄과 가을에 PEG모델에서 제시된 규조류가 아닌 녹조류의 현존량이 증가하였고, 2002년 1월부터 3월까지 녹조류가 우점 하였던 것을 제외하고는 조사기간 내내 남조류가 우점 하였다 (Fig. 1a, b). 시기적인 차이는 있으나 매년 12월 중순부터 2월 중순까지 약 2개월에 걸쳐 결빙되는 겨울동안에는 현존량의 감소와 더불어 녹조류가

우점 하였으며, 해빙 후 수체 내 용존 무기염의 (DIN과 DIP) 농도가 증가하였던 봄 (3~5월)까지 지속적으로 우점 하였다. 일감호에서 봄철에 성장을 위해 많은 인을 필요로 하는 녹조류의 (Holm and Armstrong, 1981; Tilman, 1982; Sommer, 1983; Tilman and Kiesling, 1984) 뚜렷한 증가는 수온상승, 광도 증가 그리고 수체 내 인의 농도가 다른 계절에 비해 풍부하기 때문인 것으로 판단된다 (김 등, 2003). 녹조류와 은편모조류는 인의 재순환이 적절하지 않은 경우에 성장이 억제되기 때문에 봄철 수체내 식물플랑크톤의 성장 이후 수체 내 인과 질소와 같은 영양염류의 고갈은 부영양호수에서 우점종이 남조류로 바뀌는 원인이 될 수 있다 (Sommer *et al.*, 1986).

2002년 5월과 6월에 영양염 첨가에 따른 식물플랑크톤 성장 실험에서 질소가 제한되는 것으로 나타났고, 수체 내 용존무기질소의 농도 또한 2001년 5월과 2002년 4월에 $38 \mu\text{gN/l}$ 이하로 감소함에 따라 (김 등, 2003), 수체 내 질소 농도의 감소가 여름철 녹조류에서 남조류로의 우점종의 변화와 관련이 있었던 것으로 생각된다. 2001년과 2002년 6월에 나타난 식물플랑크톤 생물량의 일시적인 감소 현상 또한, 일감호에서 식물플랑크톤에 대한 동물플랑크톤 영향을 배제할 수는 없다 하더라도 식물플랑크톤 성장에 필요한 인과 질소와 같은 영양염이 시기적으로 제한됨으로써 나타난 결과로 사료된다 (김 등, 2003).

조사기간 중 6월부터 11월까지는 남조류인 *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Lyngbya*, *Merismopedia*속내 종들이 증가하였으며, 생물량은 2000년 10월에 최대를 ($12.9 \pm 5.8 \times 10^5$ cells/ml, $3.5 \pm 0.9 \times 10^3 \mu\text{gC/l}$) 나타냈다. 남조류의 현존량과 생물량이 증가는 수온과 양의 상관관계를 나타냈으며 ($r^2 = 0.64$, $P = 0.027$), 엽록소 *a* ($r^2 = 0.71$, $P < 0.001$), TP농도 ($r^2 = 0.62$, $P < 0.001$)와도 밀접한 상관성을 나타냈다 (Fig. 2). 일반적으로 봄에 우점하는 것으로 알려진 규조류는 여름과 가을동안에 현존량의 증가가 나타났다 (Fig. 1c). 이러한 결과는 빈영양 호수 (봄철 DIP 농도: $< 14 \mu\text{gP/l}$)나 얇은 호수들의 경우에 (호수의 최대 수심: 1.5 m) 봄에 규조류의 성장이 제한된다는 PEG모델과 일치한다 (Sommer *et al.*, 1986).

은편모조류와 와편모조류는 상대적으로 적은 현존량을 나타냈으며 3월부터 11월 사이에 현존량과 생물량의 증가가 관찰되었다 (Fig. 1d, e). 와편모조류는 성층이 형성되지 않는 호수나 성층이 형성되었다 하더라도 체류시간이 짧은 호수에서는 출현하지 않으며, 현존량은 호수의 영양상태에 따라 일정한 경향을 보이지는 않는 것

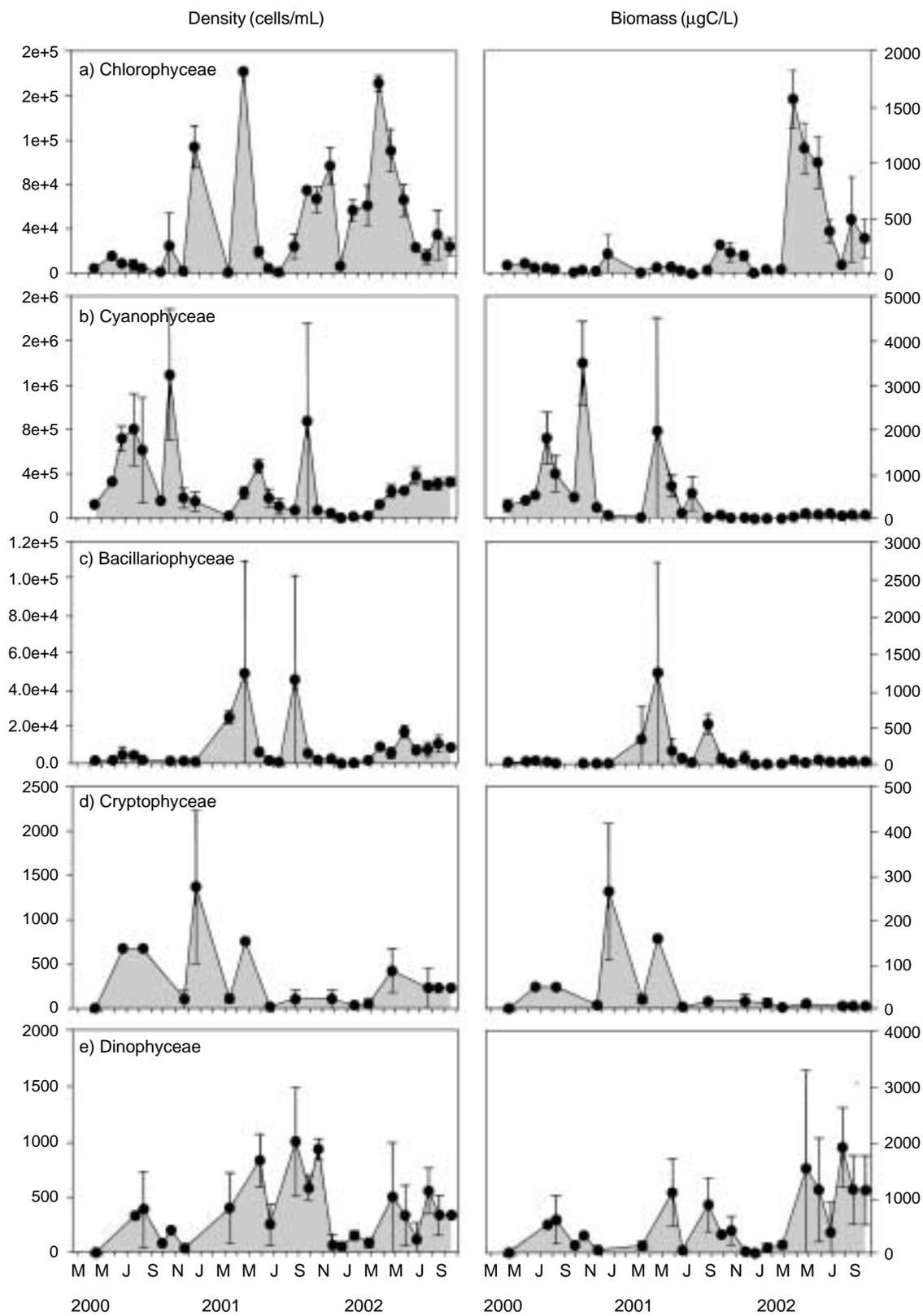


Fig. 1. Monthly variation of density and biomass of the major phytoplankton communities in Lake Ilgam from March 2000 to September 2002.

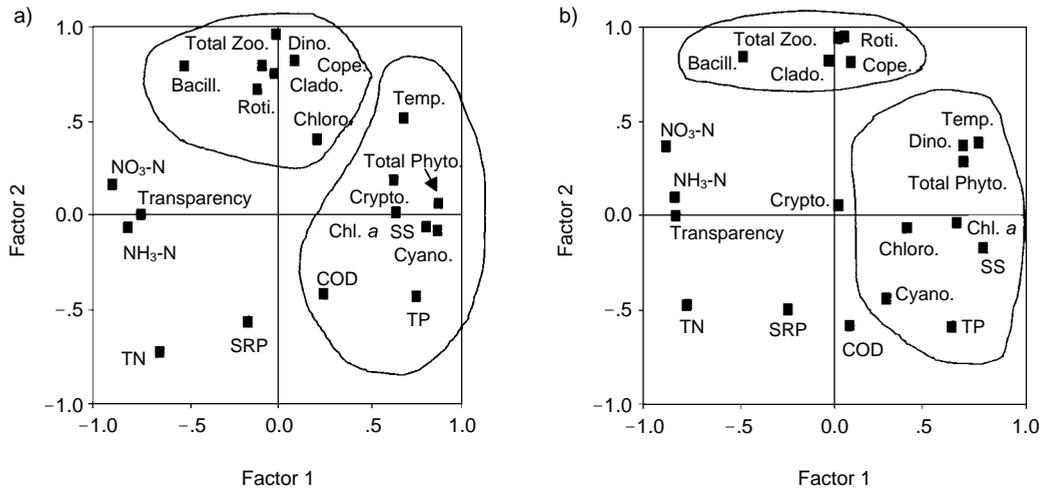


Fig. 2. Relationship between (a) abundance, (b) biomass of phyto-, zooplankton and other water quality parameters. Chlora., cyano., bacill., crypto., dino., roti., cope., and clado., denote Chlorophyceae, Cyanophyceae, Bacillariophyceae, Cryptophyceae, and Dinophyceae, rotifers, copepods, and cladocerans, respectively. Total Phyto., and Total zoo. denote a sum of all phytoplakton and zooplankton community, respectively.

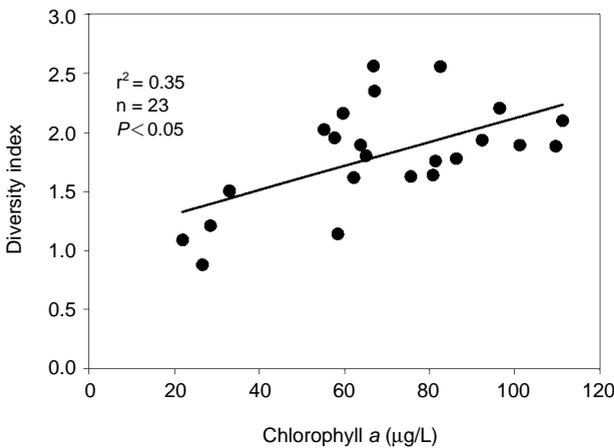


Fig. 3. Relationships of between diversity index of phytoplankton and chlorophyll *a* concentration in Lake Ilgam from March 2000 to September 2002.

으로 알려져 있다 (Sommer *et al.*, 1986). 일감호에서 외편모조류는 수온이 높은 시기에 주로 출현하는 것으로 나타났으며 ($r^2 > 0.73$, $P < 0.05$), 식물플랑크톤 현존량과 생물량에 대한 기여도는 요인분석 결과에서 나타났듯이 현존량은 적었으나 전체 생물량에 대한 기여도는 우점종으로 나타난 남조류와 유사하였다 (Figs. 1e, 2).

일감호에서 출현한 군집 구성종의 다양도지수 (Diversity Index)는 1.7 ± 0.1 로 엽록소 *a* 농도와 양의 상관관계를 나타내 생물량 증가 시 다양성이 증가하는 것으로

나타났다 (Fig. 3). 생물의 다양성은 부영양 호수보다 빈영양 호수에서 높으며 (Wetzel, 1983), 빛과 영양염 등과 같은 물리·화학적 환경요인들이 식물플랑크톤의 성장을 제한하여 생물량이 적은 시기에 다양성이 증가함이 보고된 바 있다 (Interlandi and Kilham, 2001). 그러나, PEG 모델에서는 본 연구결과와 같이 부영양한 호수와 성층이 형성되는 호수에서 식물플랑크톤의 현존량이 증가하는 시기에 다양성이 회복되는 것으로 나타났다 (Sommer *et al.*, 1986). 이와 같이 영양상태와 다양성의 관계는 여전히 상반된 의견이 제시되고 있기 때문에 (Connell, 1978; Sommer, 1984, 1993, 1995; Reynolds *et al.*, 1993), 지역적 고유성 즉 환경의 이질성에 의해 다양하게 나타날 수 있다는 것이 더 설득력 있어 보인다 (Hutchinson, 1961; Richerson *et al.*, 1970).

2. 동물플랑크톤의 계절변화

호수가 결빙된 기간 동안에는 동물플랑크톤의 현존량이 급격히 감소하였고 지각류는 관찰되지 않았다 (Fig. 4). 조사기간 동안 개체수로서의 점유율은 윤충류가 71 ~ 100%로 가장 높았고, 요각류 (29 ~ 2.4%), 지각류 (< 2%)순이었다. 동물플랑크톤의 현존량과 생물량은 녹조류가 우점한 3월부터 5월 사이에 윤충류의 증가가 나타났고 요각류와 지각류는 6월부터 9월 사이에 증가양상을 나타냈다 (Fig. 4). 동물플랑크톤 군집 조성의 다양도지수는 1.4 ± 0.6 로 식물플랑크톤과 마찬가지로 엽록소

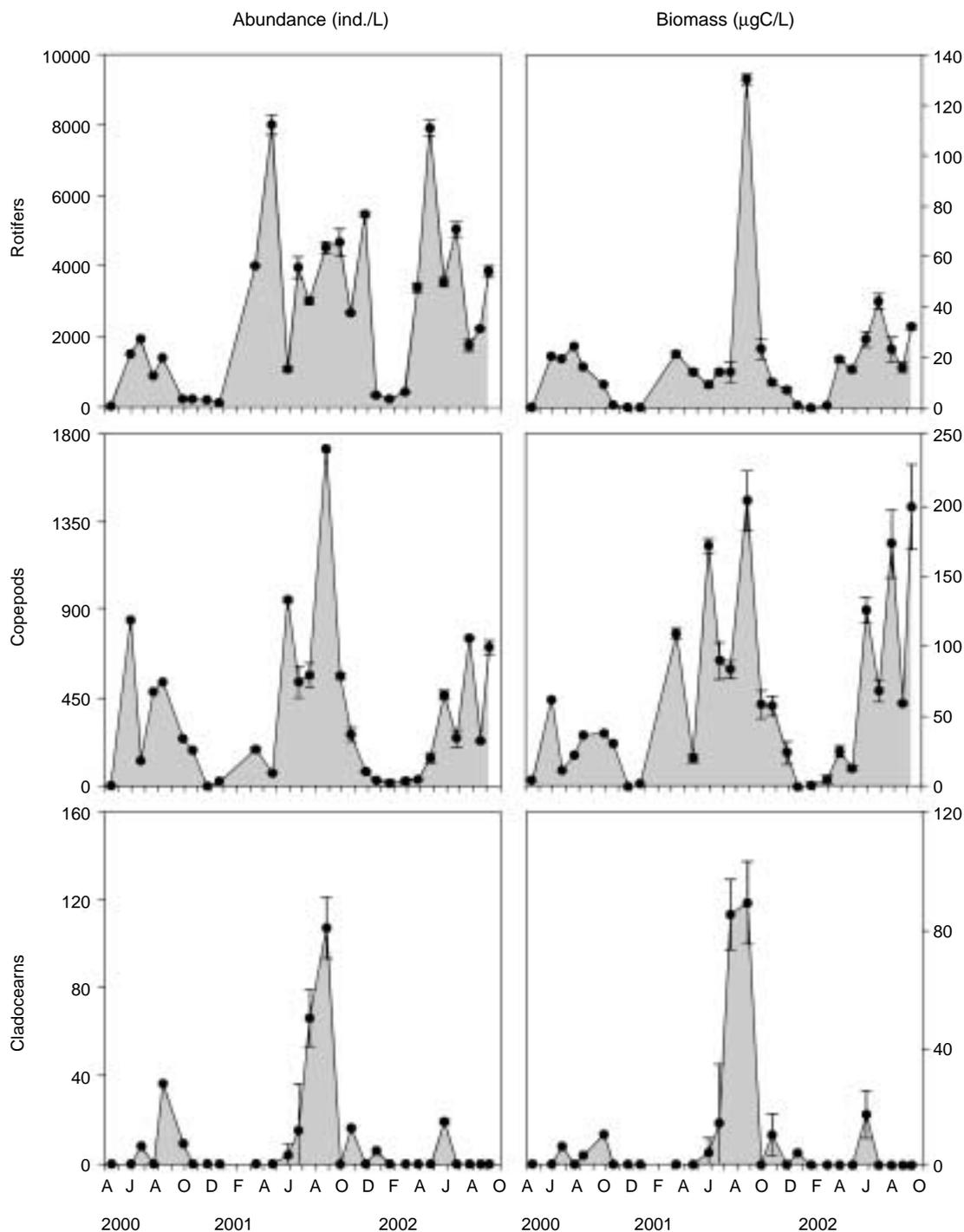


Fig. 4. Monthly variation of abundance and biomass of zooplankton in Lake Ilgam from March 2000 to September 2002.

a 농도와 양의 상관관계를 보였다 (Fig. 5).

윤충류는 2000년을 제외하고는 4월에 최대 현존량을 나타냈고 *Keratella cochlearis*와 같은 크기가 작은 종이 우점하였으며, 5월과 6월에는 *Pompholyx*속과 *Brachi-*

*onus*속 내 종들의 현존량이 증가하였다. 요각류는 2000년 4월과 2002년 3월을 제외하고는 성체보다는 대부분 유생의 비율이 70% 이상으로 높았으며 현존량의 증가시키는 지각류 (*Diaphanosoma brachyurum*, *Bosmina*

longirostris 등)와 마찬가지로 식물플랑크톤 중 외편모조류와 규조류 현존량 증가 시기와 유사하였다 (Fig. 2). 대부분의 온대 호수에서 봄에 풍부도가 증가하는 동물플랑크톤은 본 연구에서 나타난 결과와 마찬가지로 짧은 세대교번과 수 일내에 기하급수적인 증가를 보이는 소형 윤충류가 해당하며, 크고 성장율이 느린 지각류와 요각류 등은 그 후에 증가한다 (Sommer *et al.*, 1986).

본 연구에서는 윤충류의 증가 시기는 녹조류와 규조

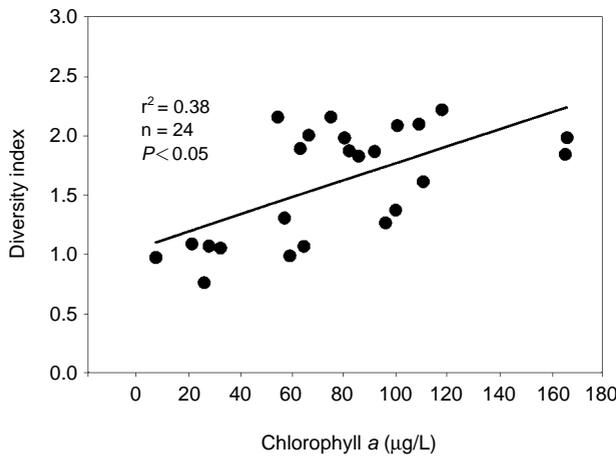


Fig. 5. Relationships of between diversity index of zooplankton and chlorophyll a concentration in Lake Ilgam from April 2000 to September 2002.

류의 증가 시기와 유사하였고 ($r^2 = 0.72, P < 0.01$), 요각류와 지각류는 외편모조류의 현존량 증가시기와 ($r^2 = 0.73, P < 0.01$)와 양의 상관관계가 있었으나 (Fig. 2), 동물플랑크톤 증가시 식물플랑크톤의 감소나 투명도 증가는 관찰되지 않았다 (Fig. 6). 대형 동물플랑크톤의 증가와 섭식에 용이한 소형식물플랑크톤이 최대 성장한 이후에 나타나는 청수기 현상은 주로 봄철에 성층이 형성되는 호수에서 나타나며, 먹이 생물의 고갈이나 섭식에 용이하지 않은 식물플랑크톤으로 천이가 일어나는 경우 멈추게 된다 (Lampert *et al.*, 1986; Sommer *et al.*, 1986; Vanni and Temte, 1990; 김 등, 1999). 수심이 얇은 부영양 호수에서는 청수기의 시기가 뚜렷하지 않을 수도 있고 (Gulati, 1983), 수심이 깊은 호수에서와 달리 여름이나 가을에 나타날 수도 있다 (Scheffer, 1998).

본 연구에서 청수기가 관찰되지 않은 것은 한달 간격으로 조사가 이루어진 반면, 이와 같은 현상은 성층이 형성되는 부영양 호수에서 봄철 식물플랑크톤의 최대 성장량 이후에 나타나 한 달 이상 지속되지 않는 것으로 알려져 있기 때문에 (Lampert *et al.*, 1986; Sommer *et al.*, 1986; Vanni and Temte, 1990; 김 등, 1999) 제대로 확인되지 못하였을 가능성이 있다. 그러나, 일감호는 결빙 시기와 봄철을 제외하고 동물플랑크톤의 섭식이 용이하지 않은 남조류가 우점하였고 (Lampert, 1987; Benndorf and Henning, 1989; Reynolds, 1989) 지각류의 높은 현존량도 2001년 7월과 8월을 제외하고는 관찰되지 않았

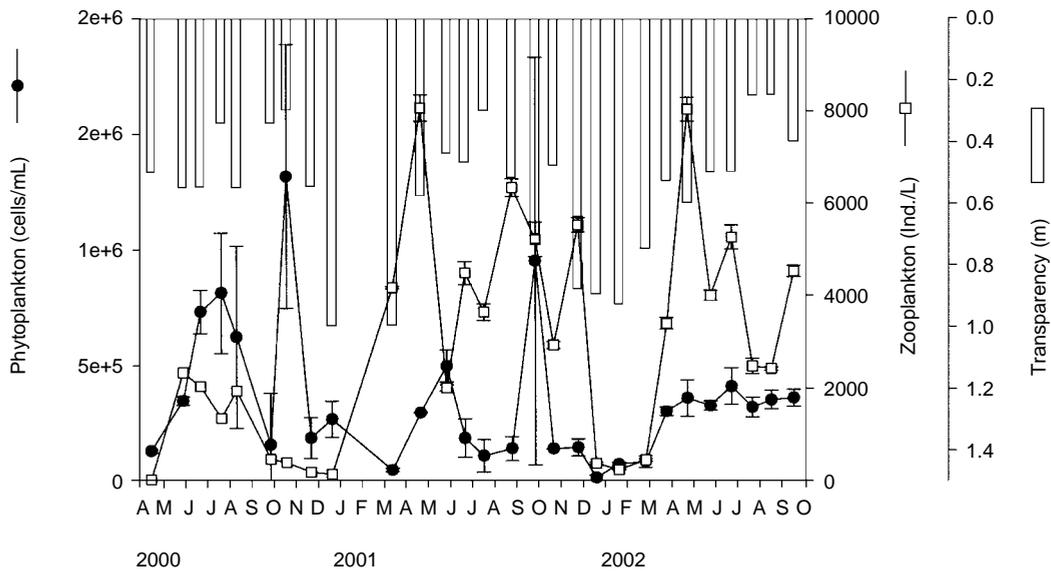


Fig. 6. Monthly variation of total density of phytoplankton, zooplankton and transparency in Lake Ilgam from March 2000 to September 2002.

으며 요각류도 성체보다는 유생의 비율이 높기 때문에 동물플랑크톤에 의한 식물플랑크톤의 Top-down 영향은 적었을 것으로 판단된다(Gulati, 1983; Scheffer, 1998).

적 요

본 연구는 수심이 얕고 부영양화가 지속되고 있는 인공호수에서의 동·식물플랑크톤의 종 구성과 현존량의 계절변화, 수질인자와의 상관관계 그리고 PEG모델과의 비교를 위해 실시되었다. 식물플랑크톤의 분류군 별 계절적 출현양상은 봄과 가을에 녹조류와 규조류가 우점하고 여름에 남조류의 현존량이 증가함에 따라 PEG모델과 유사하였다. 그러나 현존량에 의한 우점종의 변화는 2002년 1월부터 3월까지 녹조류가 우점했던 것을 제외하고는 조사기간 내내 남조류가 우점 함으로써 PEG 모델과 다르게 나타났다. 수체 내 영양염의 증가가 나타난 봄철 녹조류가 증가하였고, 무기영양염의 감소와 함께 남조류의 우점비율이 증가하였다. 주요출현 남조류는 *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Lyngbya*, *Merismopedia*속내 종들이었고, 2000년 10월에 가장 높은 현존량을 나타냈으며 ($12.9 \pm 5.8 \times 10^5$ cell/ml, $3.5 \pm 0.9 \times 10^3$ μ gC/l), 엽록소 a ($r^2 = 0.71$, $P < 0.001$), TP농도 ($r^2 = 0.62$, $P < 0.001$)와 양의 상관관계를 나타냈다. 녹조류가 우점한 3월부터 5월 사이에 윤충류인 *Keratella cochlearis*와 같은 크기가 작은 윤충류의 증가가 나타났다. 성체보다는 대부분 유생의 비율이 (70% 이상) 높았던 요각류와 지각류 (*Diaphanosoma brachyurum*, *Bosmina longirostris* 등)의 현존량 증가는 식물플랑크톤 중 외편모조류와 규조류가 증가한 6월과 9월 사이에 나타났다 ($r^2 = 0.73$, $P < 0.01$). 본 연구기간동안 동물플랑크톤 섭식에 의한 청수기는 관찰되지 않았으며, 동·식물플랑크톤의 다양성은 식물플랑크톤의 생물량 증가 시 회복되는 것으로 나타났다. 본 연구결과에서는 부영양 호수에서 동물플랑크톤의 섭식이나 제한영양염의 결핍이 식물플랑크톤의 현존량에 영향을 줄 수 있으나 군집의 변화를 야기하지는 못함이 제시되었다.

사 사

본 연구의 현장조사에 도움을 준 건국대학교 육수학/생태공학 연구실의 박구성, 최광현, 박정환, 이정환, 유영선에게 감사드립니다. 원고심사를 위해 노력해 주신 두 분 심사위원께 감사를 드립니다.

인 용 문 헌

김법철, 김재욱, 전만식, 황순진. 1999. 소양호 동·식물플랑크톤의 계절변동. 한국육수학회지 **32**: 127-134.

김윤희, 1998. 홍수시 소양호에서 중층탁류의 이동 및 영향에 관한 연구. 강원대학교 환경학과 석사학위논문.

김호섭, 황순진, 고재만. 2003. 도심의 얇은 인공호인 일감호의 수질변화특성과 퇴적환경의 평가. 한국육수학회지 **36**: 161-171.

조규승. 1993. 한국담수동물플랑크톤 도감. 아카데미서적.

Agbeti, M.D. and J.O. Smol. 1995. Winter limnology: Comparison of physical, chemical and biological characteristics in two temperate lakes during lakes during ice over. *Hydrobiol.* **304**: 221-234.

Andersen, A. and D.O. Hessen. 1991. Carbon, nitrogen, and phosphorus contents of freshwater zooplankton. *Limnol. Oceanogr.* **36**: 807-814.

Balcer, M.D., N.L. Korda and S.I. Dodson. 1984. Zooplankton of the greatlakes. A guide to the identification and ecology of the common crustacean species. The university of Wisconsin Press.

Benndorf, J. and M. Henning. 1989. *Daphnia* and toxic blooms of *Microcystis aeruginosa* in Bautzen Reservoir (GDR). *Int. Rev. Ges. Hydrobiol.* **74**: 233-248.

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

Connell, J. 1978. Diversity in tropical rainforests and coral reefs. *Sci.* **199**: 1304-1310.

Culver, D.A., M.M. Boucherle, D.J. Bean and J.W. Flethcer. 1985. Biomass of freshwater crustacean zooplankton from Length-Weight regressions. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **42**: 1380-1390.

Downing, J.A. and H.R. Frank. 1984. A manual on methods for the assessment of secondary productivity in freshwaters. Blackwell Scientific Publications.

Dumont, H.J., L.V. De Velde and S. Dumont. 1975. The dry weight estimate of biomass in a selection of Cladocera, Copepoda, and Rotifera from the plankton, periphyton, and benthos of continental waters. *Oecologia.* **91**: 75-97.

Gulati, R.D. 1983. Zooplankton and its grazing as indicators of trophic status in Dutch lakes. *Environmental Monitoring and Assessment* pp. 343-354.

Hall, D.T., S.T. Threlkeld, C.W. Burns and P.H. Crowley. 1976. The size-efficiency hypothesis and the size structure of zooplankton communities. *Annual Review of Ecology and Systematics* **7**: 177-208.

Holm, N.P. and D.E. Armstrong. 1981. Role of nutrient limitation and competition in controlling the popula-

- tions of *Asterionella formosa* and *Microcystis aeruginosa* in semi-continuous culture. *Limnol. Oceanogr.* **26**: 622-634.
- Hoyer, M.V. and J.R. Jones. 1983. Factors affecting the relation between phosphorus and chlorophyll *a* in USA midwestern reservoirs. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **40**: 192-199.
- Hutchinson, C.E. 1957. A treatise on limnology. I, Geography Physics and Chemistry. New York, John Wiley and Sons Inc. 1015pp.
- Hutchinson, C.E. 1961. The paradox of the plankton. *Am. Nat.* **95**: 137-147.
- Interlandi, S.J. and S.S. Kilham. 2001. Limiting resources and the regulation of diversity in phytoplankton community. *Ecol.* **82**: 1270-1282.
- Kellar, P.E., S.A. Paulson and L.J. Paulson. 1980. Methods for biological, chemical and physical analyses in reservoirs. Tech. Rep. Lake Mead Limnological Res. Center, Univ. Nevada, Las Vegas. 234pp.
- Lampert, W., W. Flecker, H. Rai and E. Taylor. 1986. Phytoplankton control by grazing zooplankton: A study on the spring clear-water phase. *Limnol. Oceanogr.* **31**: 478-490.
- Lampert, W. 1987. Laboratory studies on zooplankton-cyanobacteria interactions, *N.Z.J. Mar. Freshwat. Res.* **21**: 483-490.
- Lathrop, R.C. and S.R. Carpenter. 1990. Zooplankton and their relationship to phytoplankton, pp.127-150. *In*: Food Web management (J.F. Kitchell, ed.). Springer-Verlag, New York.
- Mullin, M.M., P.R. Sloan and R.W. Eppley. 1966. Relationship between carbon content, cell volume, and area in phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* **11**: 307-311.
- Pace, M.L. and J.D. Orcutt. 1981. The relative importance of protozoans, rotifers, and crustaceans in a freshwater zooplankton community. *Limnol. Oceanogr.* **26**: 822-830.
- Phlips, E.J., M. Cichra, K.E. Havens, C. Hanlon, S. Badylak, B. Rueter, M. Randall and P. Hansen. 1997. Relationships between phytoplankton dynamics and the availability of light and nutrients in a shallow subtropical lake. *J. Plankton Res.* **19**: 319-342.
- Reynolds, R.D., R.L. Oliver and A.E. Walsby. 1987. Cyanobacterial dominance: The role of buoyancy regulation in dynamic lake environments. *N.Z.J. Mar. Freshwat. Res.* **21**: 379-390.
- Reynolds, C.S. 1989. Relationships among the biological properties, distribution and regulation of production by planktonic cyanobacteria. *Toxicity Assessment* **4**: 229-255.
- Reynolds, C.S., J. Padisak and U. Sommer. 1993. Intermediate disturbance in the ecology of phytoplankton and the maintenance of species diversity: a synthesis. *Hydrobiol.* **249**: 183-188.
- Richerson, P., R. Armstrong and C.R. Goldman. 1970. Contemporaneous disequilibrium, a new hypothesis to explain "the paradox of the plankton." Proceedings of the Academy of science (USA) **67**: 1710-1714.
- Scheffer, M. 1998. Seasonal dynamics of plankton and fish, pp. 168-169 *In*: Ecology of shallow lakes (M. Scheffer, ed.). Chapman & Hall, London · Weinheim · New York · Tokyo · Melbourne · Madras.
- Sommer, U. 1983. Nutrient competition between phytoplankton species in multispecies chemostat experiment. *Arch. Hydrobiol.* **96**: 399-416.
- Sommer, U. 1984. The paradox of the plankton: fluctuations of phosphorus availability maintain diversity of phytoplankton in flow-through cultures. *Limnol. Oceanogr.* **29**: 633-636.
- Sommer, U., Z.M. Gliwicz, W. Lampert and A. Duncan. 1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Arch. Hydrobiol.* **106**: 433-471.
- Sommer, U. 1993. Disturbance-diversity relationships in two lakes of similar nutrient chemistry but contrasting disturbance regimes. *Hydrobiol.* **249**: 59-65.
- Sommer, U. 1995. An experimental test of the intermediate disturbance hypothesis using cultures of marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* **40**: 1271-1277.
- Stemberger, R.S. 1979. A guide to rotifers of the Laurentian Great Lakes. EPA-600/4-79-021.
- Strathmann, R.R. 1967. Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volume or plasma volume. *Limnol. Oceanogr.* **12**: 411-418.
- Tilman, D. 1982. Resource competition and community structure. Princeton Univ. Press, Princeton, N. J.
- Tilman, D. and R.L. Kiesling. 1984. Freshwater algal ecology: Taxonomic trade-offs in the temperature dependence of nutrient competitive abilities. *In*: Current perspectives of microbial ecology. *Am. Sco. Microbiol.* pp. 314-896.
- Vanni, M.J. and J. Temte. 1990. Seasonal patterns of grazing and nutrient limitation of phytoplankton in a eutrophic lake. *Limnol. Oceanogr.* **12**: 411-418.
- Wetzel, R.G. 1983. Limnology. Saunders College Publishing, Philadelphia, Pennsylvania, USA.

(Manuscript received 5 July 2003,

Revision accepted 25 August 2003)