

Microcystis와 공존하는 동물플랑크톤 군집의 계절변화 및 안정동위원소비의 차이

이재용 · 김재구 · 정유경 · 김범철*

(강원대학교 환경과학과)

Isotopic Differences among Zooplankton Taxa and Seasonal Variation of Zooplankton Community Coexisting with *Microcystis*. Lee, Jaeyong, Jaiku Kim, Yukyong Jung and Bomchul Kim* (Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

We used stable isotope analysis to investigate the hypothesis that zooplankton were not able to utilize *Microcystis* as a food source. We also studied seasonal variation of the zooplankton community in a eutrophic Wangsong reservoir. The dominant copepod species changed from *Cyclops vicinus* to *Thermocyclops taihokuensis*. Density of zooplankton was suppressed by high density of *Microcystis* in June and the density of phytoplankton and chlorophyll a concentration was lowest in July. The difference in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ between cladocerans (*Daphnia galeata* and *Bosmina longirostris*) and copepods showed the maximum difference of 12‰ and 4‰, respectively, indicating different energy sources and trophic positions between two taxonomic groups. The difference in $\delta^{13}\text{C}$ between *Microcystis* and zooplankton ranged from 3~7‰, supporting the hypothesis that *Microcystis* could not be used as food source of zooplankton.

Key words : stable isotope, eutrophic reservoir, *Microcystis*, cladocerans, copepods

서 론

부영양호에서 동물플랑크톤 군집의 변화는 남세균인 *Microcystis*의 출현과 관련을 가지는 것으로 알려져 있다(임 등, 1997; 김 등, 2000; 이 등, 2005). 특히 *Microcystis*의 출현 이후 동물플랑크톤 군집은 대형동물플랑크톤인 지각류에서 요각류 또는 유충류와 같은 소형동물플랑크톤으로 군집 변화를 보인다.

*Microcystis*의 출현에 따른 동물플랑크톤의 성장억제 기작은 실내 배양실험 및 현장에서의 군집변동을 통해 직·간접적으로 알려져 있으며(최와 임, 2003; Ferrão-Filho and Azevedo, 2003), 이는 *Microcystis*가 생성하는 독소인 microcystin이 동물플랑크톤에 의한 포식을 저해

하기 때문으로 사료된다(Carmichael, 1992; Park *et al.*, 1998; 하 등, 2003). 따라서 *Microcystis*의 증식이 있는 시기에는 동물플랑크톤이 직접적으로 *Microcystis*를 먹이 원으로서 이용하기에는 부적합하다(Chen and Xie, 2003). *Microcystis*가 증식하는 수환경에 노출된 동물플랑크톤은 먹이에 대한 섭식능력의 저해를 받고 성장이 억제되거나 또는 개체수의 감소를 겪는다. 예를 들어, 남세균의 영향을 받는 부영양호에서 출현하는 동물플랑크톤의 군집은 전장분포 및 밀도가 크게 감소되며(Geller and Muller, 1981; Orcutt and Pace, 1984), 남세균인 *Microcystis aeruginosa*가 번성하는 경우 지각류인 *Daphnia*의 현존량이 급격히 감소하거나 사라진다고 한다(Zankai and Ponyi, 1986). 그럼에도 불구하고 동물플랑크톤은 *Microcystis*의 군체에서 분리된 세포에 대해서는 직접 또는 간

* Corresponding author: Tel: 033) 252-4443, Fax: 033) 251-3991, E-mail: bkim@kangwon.ac.kr

접적인 영양단계를 통해 이용하는 것으로 알려져 있다 (Hanazato and Yasuno, 1987; Liu *et al.*, 2002). Yoshioka *et al.* (1994)는 부영양호에서 다른 동물플랑크톤 분류군과는 달리 요각류인 *Eodiaptomus japonicus*가 *Microcystis*를 섭식 제거할 수 있음을 제시한 바 있다. 유휴류인 *Brachionus calyciflorus*는 남세균 독성에 대한 내성이 강해 독성물질을 생성하는 *Anabaena*, *Microcystis* 등과 공존하여 살 수 있는 종으로 알려져 있다 (Starkweather and Keller, 1983; Fulton and Paerl, 1987).

안정동위원소분석은 계절에 따른 동·식물플랑크톤의 군집비교 또는 실내배양 실험결과를 정복시킴으로써 기존의 연구결과를 검증하고 호수의 영양상태에 따른 먹이 연쇄구조를 파악하는 데 유용한 정보를 제공할 수 있다 (심과 안, 1992; Quiblier *et al.*, 1994). 탄소안정동위원소비 ($\delta^{13}\text{C}$)는 먹이와 섭식자 사이에 작은 분별 (fractionation)의 차이 (<1%)를 보이기 때문에 공존하는 동물플랑크톤의 에너지기원의 차이를 파악하는 데 적용하고 있다 (DeNiro and Epstein, 1978). 질소안정동위원소비 ($\delta^{15}\text{N}$)는 큰 분별의 차이 (2~5%)를 이용하여 주로 영양단계를 이해하기 위한 추적자로 활용하고 있다 (DeNiro and Epstein, 1978; DeNiro and Epstein, 1981; Minagawa *et al.*, 1984; Vander Zanden and Rasmussen, 2001).

동물플랑크톤과 잠재적인 먹이원 사이의 탄소안정동위원소비의 차이는 호수의 영양상태가 빈영양에서 부영양화 할수록 외부기원유기물에 의한 기여에 비해 내부생성 유기물에 의존하는 경향이 커진다고 하였다 (Grey *et al.*, 2000). 동물플랑크톤은 선호하는 내부생성유기물(식물플랑크톤)과 같은 먹이원이 부족한 환경에서는 먹이전환을 통해 직·간접적으로 외부기원유기물을 이용할지도 모른다 (Hessen *et al.*, 1990; Grey *et al.*, 2001). Grey *et al.* (2001)에 따르면 동물플랑크톤은 수체 내 외부기원유기물의 기여가 상대적으로 커지는 시기에는 식물플랑크톤 이외의 외부기원유기물을 간접적으로 이용한다고 추정할 바 있다.

다른 영양 단계의 호수들에서 섭식기능이 다른 지각류와 요각류 사이의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 는 호수의 유역환경 및 잠재적인 먹이기원에 따라 분명한 차이가 있음을 보인 바 있다 (Lee *et al.*, 2002; Pulido-Vilena *et al.*, 2005). 이러한 차이는 여과섭식을 하는 지각류와 선택적인 섭식 기능을 가지는 요각류 사이에 선호하는 먹이의 기원을 달리하기 때문이다. 식물플랑크톤을 먹이원으로 하는 동물플랑크톤은 식물플랑크톤과 유사한 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 보이고 비슷한 계절변동 패턴을 보인다 (DeNiro and Epstein, 1978; Zohary *et al.*, 1994; Grey *et al.*, 2001).

또한 국내의 많은 대형댐 및 저수지와 같은 담수생태계는 외부로부터 과도한 영양염의 유입으로 식물플랑크톤의 과다증식에 따른 부영양화를 겪고 있다. 부영양호에서 동물플랑크톤은 수온의 상승에 따른 무산소층의 발달과 함께 남세균의 증식에 노출되기 쉬운 수환경이 될 수 있다 (Park and Kim, 1995). 부영양한 호수에서 *Microcystis*가 출현하는 시기에 섭식기능이 다른 지각류와 요각류 사이의 먹이원의 차이를 예측한 연구는 거의 없다 (Yoshioka *et al.*, 1994). 따라서 동물플랑크톤 내에서 섭식 기능의 차이를 보이는 지각류와 요각류를 분리한 시료의 분석은 빈영양호수에서 뿐만 아니라 부영양호에서 상위영양단계의 에너지원으로서 기여하는 먹이의 기원 및 먹이연쇄구조를 파악하는 데 중요한 실마리를 제공해 줄 것으로 본다 (Hessen *et al.*, 1990; Grey *et al.*, 2001; Pulido-Vilena *et al.*, 2005).

본 연구는 부영양호인 왕송저수지에서 동·식물플랑크톤의 개체수의 계절변동을 파악하고 안정동위원소분석을 통해 *Microcystis*가 동물플랑크톤의 직접 먹이원으로 이용 가능성에 대하여 검토하였다.

재료 및 방법

1. 조사시기 및 지점

조사는 2007년 11월에서 2008년 10월 사이에 월별 9회에 걸쳐 실시하였다. 왕송저수지는 농업용수를 저장하는 저수지로 부곡하수처리장에서 유출되는 방류수가 주 유입수원이다. 왕송저수지의 유역면적은 약 15.6 km²이다. 평균 수심은 2 m로 체류일수는 46일로 짧으며 연 중 1월에서 3월 사이에 결빙을 보인다 (경기도보건환경연구원, 2004). 왕송저수지의 총인과 총질소 농도는 각각 58.0~646.0 $\mu\text{g L}^{-1}$, 2.35~5.09 mg L⁻¹의 범위였다 (Table 1).

2. 동식물플랑크톤의 군집 변동

수질자료는 표층수를 대상으로 측정하였다. 수온 (Cole Parmer Instrument Co, 93909-62)과 pH (DENVER model 15)는 현장에서 측정하였다. 총인 분석용 시료는 250 mL에 18 N 황산 0.25 mL를 첨가하여 냉장보관 후 Standard Methods에 따라 각각 persulfate digestion method로 분해하고 ascorbic acid method에 의한 흡광광도법으로 측정하였다 (APHA, 1998). 총질소는 persulfate digestion method로 분해하고 cadmium reduction method에 의해 측정하였다 (APHA, 1998).

Table 1. Average environmental parameters in Wangsong reservoir.

Year	Month	WT (°C)	pH	TN (mg L ⁻¹)	TP (µg L ⁻¹)
2007	Nov.	6.0	7.6	4.25	137
	Dec.	9.0	-	4.12	116
2008	Apr.	17.0	9.2	4.84	77
	May	21.9	9.4	-	97
	Jun.	30.0	10.9	5.09	70
	Jul.	29.1	7.8	3.20	646
	Aug.	28.8	10.5	2.35	172
	Sep.	21.5	7.4	3.53	58
	Oct.	18.5	8.1	4.30	163

3. 동·식물플랑크톤의 군집 조사

동물플랑크톤은 제방에서 63 µm 네트(Wisconsin)를 이용하여 5 m 수평끌기를 하였다. 동물플랑크톤 시료는 글루타르알데하이드로 현장에서 고정(최종 4%)하였다. 식물플랑크톤은 표층에서 채수한 시료를 500 mL 채수병에 담아 Lugol 용액으로 고정하여 침강시킨 후 사이폰을 이용 농축하였다. 동·식물플랑크톤 시료는 Sedgewick-Rafter 계수 chamber를 사용하여 광학현미경(Olympus BX50) 하에서 1 mL당 증별 개체수를 계수하였다. 엽록소 *a* 측정용 시료는 GF/C 여과지로 여과 후 암상태에서 냉동보관하였다. 엽록소 *a* 측정용 시료는 90% acetone을 넣은 homogenizer에서 마쇄한 후에 원심분리시켜 상층액을 흡광광도법으로 측정하였다(APHA, 1998).

4. 탄소 및 질소안정동위원소분석

탄소 및 질소안정동위원소분석을 하기 위한 동식물플랑크톤에 대한 시료는 현장에서 농축하였다. 실험실로 운반 후 분석을 위한 시료를 얻기 위해 3 L 비이커에 넣어 냉장고 내에서 24시간 암실 보관하였다.

식물플랑크톤은 수표면에 부유하는 특징이 있는 남세균은 우선적으로 스포이드를 이용하여 얻어 냈다. 비이커의 바닥에 침강된 bulk 식물플랑크톤은 200 µm mesh로 침강한 동물플랑크톤 및 200 µm mesh 이상의 유기물을 제거하였다. 식물플랑크톤을 45 µm mesh에 걸러 bulk 식물플랑크톤을 얻었다.

동물플랑크톤은 분류군에 따라 시료의 분리 방법을 달리하여 스포이드로 분리하였다. 동물플랑크톤 분류군 중 *Daphnia galeata* (*D. galeata*)와 *Bosmina longirostris* (*B. longirostris*)는 수표면에 부상하거나 또는 비이커의 벽면에 부착시켜 분리하였다. 요각류는 비이커 벽면에 물려

유영하는 현상을 이용하여 스포이드를 이용하여 분리하였다. 중 수준의 분리와 1 mg 이상의 분석 시료를 얻기 어려운 시기에는 비이커의 중층에 유영하는 동물플랑크톤을 망목 200 µm 네트를 이용하여 bulk 상태로 얻어 분석에 이용하였다. 분리한 동·식물플랑크톤의 시료는 수차례의 증류수 세척 후 현미경을 통해 분리 상태를 확인 후 동결건조시켰다.

POM (particulate organic matter)는 현장수를 45 µm 네트로 여과하여 동물플랑크톤을 제거하였고 450°C에서 미리 태워 둔 GF/F 여과지를 이용하여 현장수 500 mL 이상을 여과 후 동결건조시켰다.

안정동위원소분석을 위한 모든 시료의 경우 4시간에서 12시간 동안 1.0 N HCl (pH=2)에 침적 또는 혼중을 통해 무기탄소를 제거시켰다(Lorrain *et al.*, 2003). 각 시료에 대한 탄소와 질소동위원소분석은 원소질량분석기(EuroEA-IsoPrime irms, GV Instruments, UK, 한양대학교 공동기기장비센터)를 사용하였다. 안정동위원소비는 질량분석기를 이용하여 분석된 표준시료와 분석시료 간의 동위원소비 차이를 δ(‰)로 표현하였고 표준물질은 탄소에 대해 Vienna PeeDee Belemnite (VPDB), 질소는 대기 N₂를 표준물질로 정의하였다.

$$\delta X (\text{‰}) = [R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1] \times 10^3$$

X는 ¹³C와 ¹⁵N을 나타내고 R_{sample}과 R_{standard}는 분석시료와 표준시료의 동위원소비(¹³C/¹²C과 ¹⁵N/¹⁴N)이다. 분석에 대한 정밀도는 0.3‰ 이하였다.

결 과

1. 동물플랑크톤군집의 변동

동물플랑크톤군집 내 분류군 사이의 밀도에 따른 계절 변동은 4월에 2,270 ind. L⁻¹에서 6월에는 269 ind. L⁻¹로 급격히 감소하였고 이후 점차 증가하여 9월 말에는 최대 밀도(3,131 ind. L⁻¹)를 보였다(Fig. 1). 지각류에서 *D. galeata*는 5월 말에 368 ind. L⁻¹로 최대 밀도를 보였고 6월(13 ind. L⁻¹)에는 급격한 감소를 보였으나 10월(189 ind. L⁻¹)에 다시 증가하였다. *B. longirostris* 4월과 5월에 각각 637 ind. L⁻¹, 241 ind. L⁻¹의 밀도를 보였다(Fig. 1). 요각류는 성충의 밀도는 33 ind. L⁻¹ 이하로 극히 낮았으나 우점종의 경우 뚜렷한 출현 시기의 차이를 보였는데, 11월에서 5월 사이 *Cyclops vicinus*가 우점하였고 7월에서 10월 사이에는 *Thermocyclops taihokuensis*가 우점하

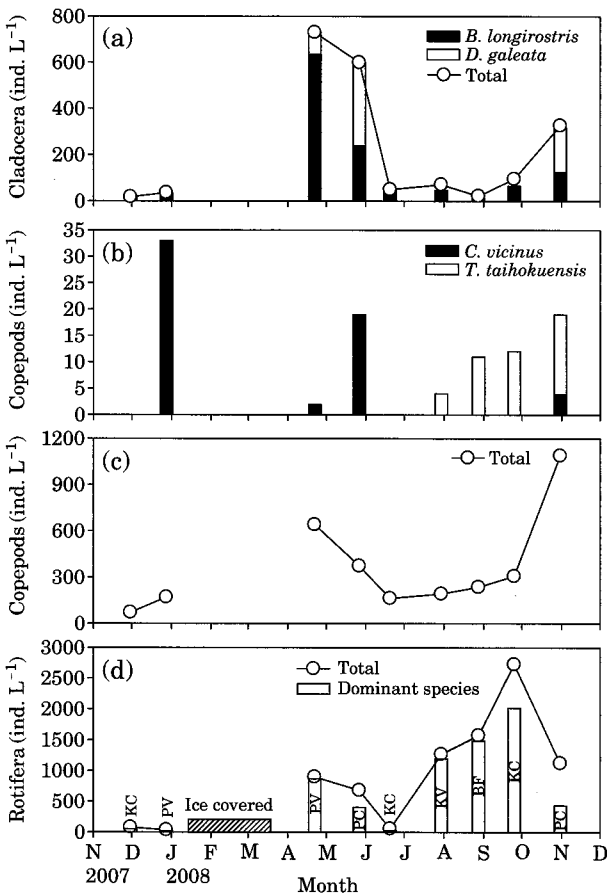


Fig. 1. Seasonal variation in zooplankton density (ind. L⁻¹) in Wangsong reservoir (a, cladocera; b, *Cyclops vicinus* and *Thermocyclops taihokuensis*; c, total copepod; d, rotifera). Line and bar graphs represent total density and cell number of zooplankton, respectively. Abbreviations in the rotifer groups are as follows: KC, *Keratella cochlearis* var. *tecta*; PV, *Polyarthra vulgaris*; BF, *Brachionus forficula*; PC, *Pompholyx complanata*; KV, *Keratella valga*.

였다. Copepodid는 7월에서 9월 사이에 64~120 ind. L⁻¹의 범위를 보였다. Nauplius가 최대 밀도를 보이는 시기는 4월(628 ind. L⁻¹)과 10월(1,011 ind. L⁻¹)이었다. 유충류는 7월에서 10월 사이에는 1,124~2,727 ind. L⁻¹의 범위 안에서 밀도증가를 보였으나 *Cyclops*가 출현하는 기간에는 36~900 ind. L⁻¹의 범위로 급격한 감소를 보였다. 유충류는 매월 우점하는 종이 다르게 나타났는데 개체수의 급감이 있는 6월 이후 *Keratella*속이 주로 우점종으로 출현하였다. 시기별 우점종은 *Polyarthra vulgaris*, *Pompholyx complanata*, *Keratella valga*, *Brachionus forficula*, 그리고 *Keratella cochlearis* var. *tecta*, *Pompholyx complanata*로 변화를 보였다.

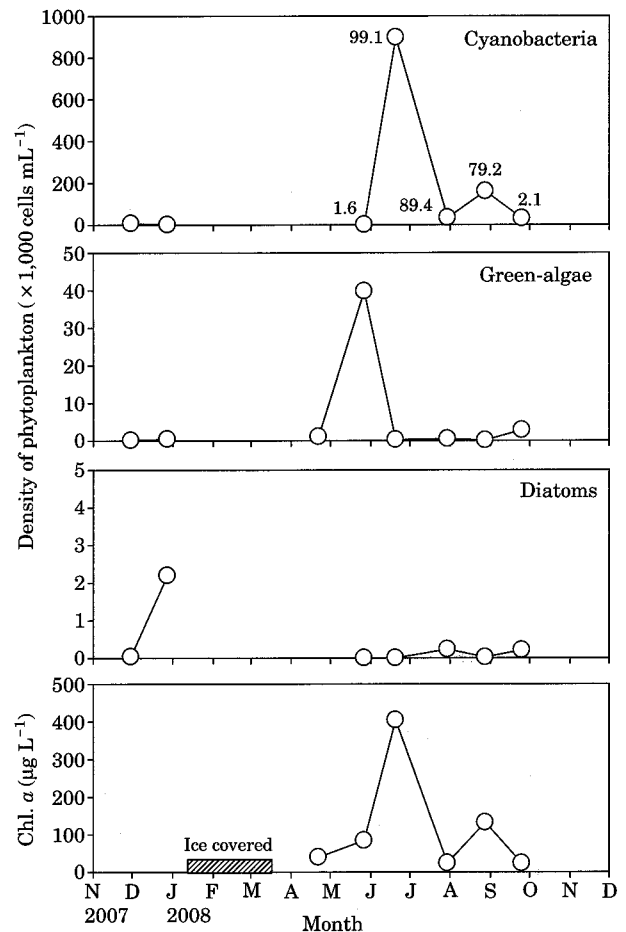


Fig. 2. Seasonal variation in phytoplankton taxonomic group (cells mL⁻¹) and chlorophyll-a concentration (µg L⁻¹) in Wangsong reservoir. The numbers in the top panel (cyanobacteria) indicate percentage (%) of *Microcystis* sp. in the total phytoplankton community.

2. 식물플랑크톤군집의 변동

식물플랑크톤군집의 밀도는 4월(817 cells L⁻¹)과 5월(15,257 cells L⁻¹)에는 녹조류(*Pediastrum*, *Scenedesmus*)의 출현이 빈번하였고 5월에는 녹조류의 증식(점유율, 97%)과 더불어 *Microcystis*의 출현(796 cells L⁻¹)이 있었다(Fig. 2). 남세균이 우점하는 시기는 11월(7,088 cells L⁻¹) 그리고 6월(897,039 cells L⁻¹)에서 9월(30,197 cells L⁻¹) 사이였고 강우 이후 7월에는 33,155 cells L⁻¹로 감소를 보였다. 남세균은 시기에 따라 우점하는 종의 변동을 보였는데 *Microcystis aeruginosa*는 6월(888,757 cells L⁻¹, 99%)과 7월(16,172 cells L⁻¹, 47%)에 큰 점유율을 보였고 8월(126,023 cells L⁻¹, 77%)에는 *Microcystis wesenbergii*가, 9월에는 *Phormidium* sp. (24,937 cells L⁻¹, 74%)가

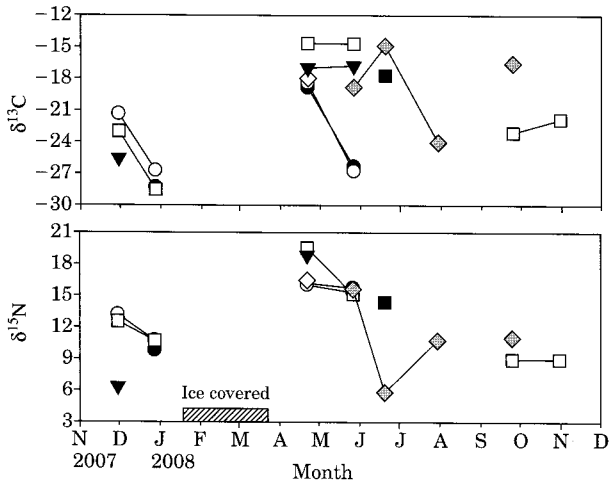


Fig. 3. Stable isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) of zooplankton collected in Wangsong reservoir. Closed and open circles represent *Daphnia galeata* and *Bosmina longirostris*, respectively. Closed and open squares represent bulk zooplankton and copepods, respectively. The inverted triangle represents POM (particulate organic matter). Closed and open diamonds indicate *Microcystis* sp., and bulk phytoplankton, respectively.

높은 점유율을 보였다. 비록 12월에 규조류인 *Stephanodiscus hantzschii*가 우점하였지만 조사기간 동안 규조류는 $2,196 \text{ cells L}^{-1}$ 이하의 낮은 밀도를 보였다.

식물플랑크톤의 현존량을 반영하는 엽록소 *a*의 농도는 $24 \sim 404 \mu\text{g L}^{-1}$ (median = $83.9 \mu\text{g L}^{-1}$)의 범위로 *Microcystis aeruginosa*가 우점하는 시기인 6월에 최대를 보였고 7월에는 최소값을 보였다(Fig. 2).

3. 탄소·질소안정동위원소비의 차이

식물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 녹조류와 *Cryptomonas*가 우점하는 시기인 4월에 -18.5‰ 를 보였다. *Microcystis*의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 $-24.0 \sim -14.9\text{‰}$ ($-18.5\text{‰} \pm 3.4$, $n=4$)의 범위를 보였다(Fig. 3). POM의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 $-16.8 \sim -25.6\text{‰}$ ($-20.5 \pm 4.0\text{‰}$, $n=3$)의 범위를 보였다(Fig. 3).

4월의 경우 지각류(*D. galeata*와 *B. longirostris*)와 식물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 사이에는 거의 차이를 보이지 않았다. *Microcystis*의 출현이 시작된 5월에 *Microcystis*의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 지각류의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 8‰ 의 상당한 차이를 보였다. 요각류의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 식물플랑크톤(4월)과 *Microcystis*(5월)의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 사이에는 각각 3.3‰ , 4.1‰ 의 차이를 보였다.

지각류는 *Microcystis*의 증식 전과 후에 잠재적인 먹이

원으로서 POM의 $\delta^{13}\text{C}$ 과 뚜렷한 차이를 보였다. 남세균이 우점하는 시기에 POM의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 지각류에 비해 $1.4 \sim 10.0\text{‰}$ 범위에서 무거웠고, 녹조류가 우점하는 5월에는 10‰ 가량의 상당한 차이를 보였다. 요각류는 POM에 비해 평균 2.3‰ 무거웠다.

지각류와 요각류의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 각각 $-28.3 \sim -18.4\text{‰}$ ($-23.4 \pm 4.4\text{‰}$, $n=6$), $-28.5 \sim -14.7\text{‰}$ ($-20.8 \pm 6.0\text{‰}$, $n=6$)의 범위를 보였다. 지각류와 요각류 사이의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 차이는 11월과 12월에는 거의 보이지 않았으나, 4월과 5월에는 각각 3.7‰ 와 12.1‰ 의 뚜렷한 차이를 보였다(Fig. 3).

*Microcystis*의 $\delta^{15}\text{N}$ 는 $5.8 \sim 16.5\text{‰}$ ($12.1 \pm 3.9\text{‰}$, $n=6$)의 범위로, 6월에 가장 가벼운 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 보였다. POM의 $\delta^{15}\text{N}$ 는 각각 $6.3 \sim 18.8\text{‰}$ ($12.2 \pm 4.6\text{‰}$)의 범위를 보였다(Fig. 3). 4월에 식물플랑크톤의 $\delta^{15}\text{N}$ 은 요각류의 $\delta^{15}\text{N}$ 와 3.9‰ 의 차이를 보였으나 *B. longirostris*와는 거의 일치하였다. 5월에는 *Microcystis*의 $\delta^{15}\text{N}$ 과 지각류 또는 요각류 모두에서 거의 차이가 없었다(Fig. 3).

POM의 $\delta^{15}\text{N}$ 는 규조류가 우점하는 시기에는 지각류에 비해 6.8‰ 가벼웠고, 녹조류의 출현이 있는 4월에는 2.8‰ 가량 무거웠다. 요각류의 $\delta^{15}\text{N}$ 는 POM에 비해 $0.7 \sim 6.2\text{‰}$ 범위에서 무거웠다.

지각류의 $\delta^{15}\text{N}$ 는 $9.8 \sim 16.2\text{‰}$ ($13.5 \pm 2.8\text{‰}$, $n=6$)의 범위였고, 요각류의 $\delta^{15}\text{N}$ 는 $9.0 \sim 19.5\text{‰}$ ($12.6\text{‰} \pm 4.1$, $n=6$)의 범위를 보였다. 지각류인 *B. longirostris*와 *D. galeata* 사이의 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 차이는 거의 없었다. 4월에 요각류의 $\delta^{15}\text{N}$ 은 *B. longirostris*의 $\delta^{15}\text{N}$ 에 비해 3.5‰ 무거운 값을 보였으나 11월과 12월 그리고 5월에는 거의 차이가 없었다.

고찰

1. 남세균의 출현에 따른 동식물플랑크톤 군집의 변동

식물플랑크톤 군집의 종조성의 변화는 규조류에서 녹조류 그리고 남세균의 순으로 천이하였는데, 이는 다른 호수에서의 식물플랑크톤의 천이 과정과 일치하였다(김 등, 1995; 김 등, 2003). 또한 녹조류에서 남세균으로의 우점종의 변화는 질소농도의 감소가 원인으로 제시한 바 있다(허 등, 1997). 7월에 식물플랑크톤의 현존량의 급격한 감소는 강우에 의한 방류의 영향으로 판단된다.

식물플랑크톤의 군집의 천이는 동물플랑크톤군집의 변동에도 영향을 미친다. 왕송저수지에서 녹조류의 밀도가

높았던 5월에는 *D. galeata*와 *C. vicinus*의 밀도가 증가하였다. 그러나 *Microcystis*의 밀도가 증가한 이후에는 *D. galeata*와 *C. vicinus*와 같은 대형동물플랑크톤의 소멸할 뿐만 아니라 소형동물플랑크톤인 *B. longirostris*와 윤충류의 개체수의 감소가 뚜렷이 나타났다. *Microcystis*의 밀도의 감소 이후 윤충류는 점차적으로 증가하는 양상을 보였다. 이는 대부분의 부영양한 호수에서 보이는 현상과 일치한다(임 등, 1997; 김 등, 2000; 이 등, 2005). 김 등 (2000)은 남조류에 대한 동물플랑크톤의 생존 가능성을 배양실험을 통해 관찰한 결과에서 지각류와 요각류는 배양 4일 후 급감한 반면에 윤충류는 오히려 97%의 높은 점유율을 보인 바 있다.

왕송저수지에서는 *Microcystis*의 밀도가 높은 시기임에도 불구하고 윤충류, 특히 *Keratella cochlearis*와 같은 소형동물플랑크톤은 뚜렷한 밀도의 증가를 보였다. *Keratella*는 다른 종들에 비해 먹이가 부족한 환경에서도 더 오랫동안 견딜 수 있는 것으로 알려져 있다(Kirk, 2002). *Microcystis*의 군체가 박테리아에 의해 분해 또는 붕괴되는 과정에서 생성된 detritus 또는 단일 세포는 윤충류 및 요각류의 Nauplius의 증식을 유발할 수 있다(Hanazato and Yasuno, 1987; Liu et al., 2002; Panosso et al., 2003; Yang et al., 2006). 윤충류의 증식은 윤충류를 포식하는 동물플랑크톤의 부재로 인해 증가했을지도 모른다. 왕송저수지에서 *T. taihokuensis*의 밀도가 증가하는 시기에는 윤충류의 밀도 또한 증가하는 양상을 보였으나 *C. vicinus*의 출현과 함께 윤충류의 밀도는 감소하였다. *C. vicinus*는 직접적으로 윤충류를 섭식하는 것으로 알려져 있다(Brandl, 2005; Devetter and Seda, 2006).

대형동물플랑크톤을 선호적으로 포식하는 어류의 포식 압 또한 윤충류의 밀도를 증가시키는 간접적인 원인일 수 있다(Korponai et al., 1997). 그러나 대형동물플랑크톤의 소멸 과정이 *Microcystis*의 출현으로 인한 영향 때문인지 어류에 의한 top-down 효과에 의한 영향인지에 대해서는 본 연구에서는 알 수 없다. 예를 들어, 남세균이 우점하는 6월 이후 동물플랑크톤의 급격한 밀도의 감소는 *Microcystis*의 allelopathy 효과 때문일지도 모른다(Burn and Dodds, 1999; 하 등, 2003).

왕송저수지에서 우점하는 요각류의 성체의 종조성은 *Microcystis*의 출현에 따른 윤충류의 밀도의 감소를 전후하여 뚜렷한 변화를 보였다. Kobari and Ban (1998)는 수온에 따른 요각류의 출현시기를 제시하였는데, *C. vicinus*는 낮은 수온에서 주로 출현을 하는 반면에 *T. taihokuensis*는 10°C 이상에서 잘 적응하는 종으로 보고하고 있다. 왕송저수지의 수온은 4월에서 10월 사이에 17~30°C의

범위를 보였다. *T. taihokuensis*가 출현하기 시작한 시기는 높은 수온(29.1°C)을 보인 7월 말 이후였다. 비록 *C. vicinus*의 밀도가 감소하는 시기의 수온이 30°C로 높은 수온이 제한요인일 수 있으나 5월의 수온이 22°C인 시기에도 높은 밀도를 보였다. 따라서 *C. vicinus*의 밀도가 감소한 요인으로 높은 수온의 영향 이외에 *Microcystis*의 출현이 있는 시기 이후 먹이원인 윤충류의 밀도의 감소도 원인으로 작용한 것으로 사료된다.

2. *Microcystis*의 출현 전후의 동물플랑크톤 분류군의 안정동위원소비의 비교

남세균의 출현을 전후하여 잠재적인 먹이원으로서 POM과 지각류와의 $\delta^{13}\text{C}$ 사이에는 상당한 차이를 보였고 요각류 또한 일정한 차이를 보였다. 이는 지각류와 요각류가 POM으로부터 먹이원을 각각 서로 다른 $\delta^{13}\text{C}$ 의 먹이원을 선택적으로 이용하고 있음을 의미한다. Grey et al. (2000)은 빈영양호에 비해 부영양호에서 동물플랑크톤과 bulk POM 사이에 $\delta^{13}\text{C}$ 의 차이는 적은 것으로 보고한 바 있다. 하지만 본 연구의 결과에서는 동물플랑크톤이 섭식하기 어려운 *Microcystis*의 출현이 있는 시기에 동물플랑크톤과 POM 사이에 $\delta^{13}\text{C}$ 의 차이가 오히려 크게 나타났다. 이와 같은 차이는 현장에서 시료를 채취 시에 표층수를 얻었기 때문에 실질적으로 POM은 남세균의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 거의 일치하는 것으로 판단된다. 따라서 남세균이 bloom을 일으키는 시기에 동물플랑크톤의 잠재적인 먹이원을 파악하고자 할 때에는 POM에서 남세균을 먼저 제거하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

동물플랑크톤은 계절에 따라 먹이 전환(diet shift)을 하는 것으로 알려져 있다(Grey et al., 2001). 왕송저수지에서 식물플랑크톤의 현존량은 12월, 4월과 5월을 제외한 대부분의 시기를 남세균이 점유하고 있다. *Microcystis*의 출현이 없던 11월과 12월에는 지각류와 요각류 사이의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 차이는 거의 일치하는 $\delta^{13}\text{C}$ (1.7‰)을 보인 반면에 *Microcystis*의 출현과 녹조류의 밀도가 상대적으로 높아지기 시작하는 5월에는 상당한 차이(12.1‰)를 보였다(Fig. 3). 다시 말해서, 녹조류가 높은 점유율을 차지하는 4월에는 지각류가 식물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 에 가까운 먹이원을 이용한다는 것을 시사한다. 비록 요각류와 식물플랑크톤의 $\delta^{15}\text{N}$ 사이에는 영양단계 사이의 fractionation (trophic level=3.4‰)과 일치하지만 $\delta^{13}\text{C}$ 의 상당한 차이(3‰ 이상)는 잠재적인 먹이원(0.8‰)과는 거리가 있다(Vander Zanden and Rasmussen, 2001). 한편 5월에 출현하기 시작한 *Microcystis*의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 동물플랑크톤(지각

류와 요각류)과 분명한 차이를 보였다. 이는 지각류와 요각류는 에너지원으로 *Microcystis*에 대한 직접적인 섭식을 회피한다는 기존의 가설과 일치하는 결과였다(최와 임, 2003; Yang *et al.*, 2006). 다시 말해서 *Microcystis*가 증식하는 시기에는 섭식기능이 다른 지각류와 요각류가 서로 다른 에너지 흐름에 의존함을 의미한다.

*Microcystis*의 출현 이후 지각류와 요각류 사이의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 차이는 크게 나타났다. 반면에 여과섭식을 하는 지각류인 *D. galeata*와 *B. longirostris*의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 같은 변동의 양상을 보여 둘 사이의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 차이는 보이지 않았다. 몇몇 연구에 따르면 지각류와 요각류 사이의 커다란 $\delta^{13}\text{C}$ 의 차이는 지각류와 요각류 사이의 지방함량과는 거의 무관하여, 체내에서 지방을 추출한 후에도 여전히 차이가 존재하는 것으로 나타났다(Kling *et al.*, 1992; Syväranta *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2008). 따라서 왕송저수지에서 공존하는 지각류와 요각류 사이의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 차이는 먹이원의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 차이가 뚜렷하기 때문으로 사료된다.

*Microcystis*의 증식이 있는 시기의 pH는 10.0 이상을 보였는데, 이들 시기에는 식물플랑크톤과 CO_2 사이의 동위원소의 fractionation이 작게 일어나거나 HCO_3^- 를 직접 이용하기도 한다. 따라서 식물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 무거운 값을 보일 수 있다. 또한 몇몇 연구에서 남세균과 식물플랑크톤 사이의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 커다란 차이에 대해서 언급된 바가 있다(Zohary *et al.*, 1994; Vuorio *et al.*, 2006). 부영양호에서 부유능력을 가지는 *Microcystis*는 무거운 $\delta^{13}\text{C}$ 의 대기 CO_2 (약 -8%)에 접촉하기가 쉬운 반면에, 부유능력이 없는 식물플랑크톤은 심층의 분해 CO_2 를 상대적으로 이용하기 쉬워 가벼운 $\delta^{13}\text{C}$ 를 가지기 쉽다. 이는 식물플랑크톤이 남세균에 비해 심층에 분포하면서 저층에서 표층으로 확산하는 가벼운 $\delta^{13}\text{C}$ 를 가지는 분해 CO_2 를 보다 빠르게 이용할 수 있기 때문이다(Gu and Alexander, 1996; Gu and Schelske, 1996; Schindler *et al.*, 1997). Vuorio *et al.* (2006)는 식물플랑크톤 분류군 또는 종 사이에 분명한 $\delta^{13}\text{C}$ 차이를 보인 바 있는데, 남세균의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 규조류 또는 녹조류에 비해 최대 -19% 까지 무거운 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 가짐을 보인 바 있다. 이러한 차이는 지각류와 요각류 사이의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 커다란 차이를 설명할 수 있다. Quiblier *et al.* (1994)은 남세균의 현존량이 80% 이상을 점유하는 호수에서도 녹조류가 가지는 색소가 *Daphnia*에서 검출되는 것을 확인한 바 있다. 또한 박 등(2005)은 *Cosmarium*과 *Scenedesmus*와 같은 녹조류는 남세균과 혼재하여 경쟁할 수 있음을 제시한 바 있다. 실제적으로 왕송저수지에서도 남세균의 밀도가 높지만 *Scenedesmus*의 출현이 지속적으로 보였다. 비록 본 연구에서는

식물플랑크톤 내 남세균을 제외한 다른 식물플랑크톤 분류군의 낮은 현존량으로 $\delta^{13}\text{C}$ 를 측정하기 위한 시료를 분리하지 못했지만, 이상의 연구들은 남세균의 bloom이 있는 시기에도 동물플랑크톤이 녹조류를 먹이원으로 선택한다는 것을 시사한다.

다른 광합성 식물플랑크톤과는 달리 질소고정능력이 있는 남세균의 $\delta^{15}\text{N}$ 은 낮은 값을 보이는데 이는 대기 N_2 ($\delta^{15}\text{N}=0\%$)을 이용하기 때문이다(Gu and Alexander, 1993; Yoshioka *et al.*, 1994). Vuorio *et al.* (2006)는 중영양에서 부영양의 호수들에 분포하여 질소고정을 하는 남세균과 질소고정을 하지 않는 *Microcystis*의 $\delta^{15}\text{N}$ 이 각각 $-2.1\sim-1.6\%$, $0.9\sim 8.4\%$ 의 범위를 보인 바 있다. 왕송저수지에서는 *Microcystis*의 $\delta^{15}\text{N}$ 은 $5.8\sim 15.6\%$ 의 범위로 상당한 변동폭을 보였다. 이는 일본의 부영양호인 Suwa호에서의 $6\sim 9\%$ 의 범위에 비해 상당히 차이를 보였다(Yoshioka *et al.*, 1994). 이는 왕송저수지에서 출현하는 남세균 중 질소고정능력이 있는 종의 출현이 미미하였기 때문으로 사료된다.

한편 다른 시기에 비해 6월에 *Microcystis*는 가벼운 $\delta^{15}\text{N}$ (5.8%)을 보였다. 이는 조사 하루 전에 83 mm의 강우와 함께 외부로부터 유입한 질소원이 원인으로 보인다. 이 시기의 왕송저수지의 총질소의 농도는 다른 시기에 비해 5.09 mg N L^{-1} 로 가장 높았다. 6월의 강우기와는 달리 수체가 안정적이고 *Microcystis*가 증식하는 시기에는 탈질화 및 식물플랑크톤의 성장 동안에 수체에서 질소원으로 ^{14}N 의 우선적인 이용으로 인해 수체에는 점차적으로 ^{15}N 의 누적되는 현상이 예상된다.

요각류인 *C. vicinus*는 다른 동물플랑크톤 분류군(*D. galeata*와 *B. longirostris*)에 비해 무거운 $\delta^{15}\text{N}$ 을 가졌다. 왕송저수지에서 *C. vicinus*가 출현하는 시기에는 윤충류의 밀도가 감소하는 시기와 일치하였는데, *C. vicinus*는 윤충류를 섭식할 수 있는 것으로 알려져 있다(Devetter and Seda, 2006). 또한 요각류는 원생동물을 효과적으로 제거할 수도 있다(Burns and Schallenberg, 2001). 요각류인 *C. vicinus*가 다른 동물플랑크톤 분류군(*D. galeata*와 *B. longirostris*)에 비해 무거운 $\delta^{15}\text{N}$ 을 가지는 원인은 에너지 이용 경로의 차이 또는 영양단계에서 높게 위치하는 먹이를 이용하기 때문으로 사료된다. 따라서 *Microcystis*의 bloom시기에는 microbial loop를 통한 에너지 흐름이 중요하게 작용할지도 모른다(Coffin *et al.*, 1989; Yang *et al.*, 2006).

왕송저수지에서 지각류와 요각류 사이의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 의 측정 결과는 섭식기능이 다른 두 동물플랑크톤 분류군은 서로 다른 영양단계의 먹이원을 이용한다는 것을 알

수 있었다.

본 연구는 식물플랑크톤종의 계절에 따른 천이 과정에서 *Microcystis*의 출현 전후 공존하는 지각류(*D. galeata*와 *B. longirostris*)와 요각류(*C. vicinus*) 사이에는 탄소·질소안정동위원소비의 차이가 있음을 보였다. 결과적으로 *Microcystis*의 성장기에는 동물플랑크톤은 *Microcystis*를 직접 먹이원으로 이용하기 어렵다는 기존의 연구 결과를 확인하였다. 부영양호에서 상위영양단계의 에너지원을 예측하기 위한 방법으로 섭식기능이 다른 동물플랑크톤을 대상으로 한 두 가지의 다른 동위원소(탄소와 질소)를 이용하는 것은 호수생태계에서 상위영양단계로의 에너지의 흐름을 이해하고 예측하는 기초자료로서 이용될 수 있을 것이다.

섭식이 다른 두 동물플랑크톤의 분류군 사이의 탄소·질소안정동위원소비의 차이가 먹이원 및 영양단계의 차이임을 검증하기 위한 추가적인 연구가 필요하다. 최근에는 소비자와 먹이원 사이의 아미노산의 $\delta^{15}\text{N}$ 를 측정하여 소비자의 먹이원 및 영양단계를 동시에 평가하고자 하는 연구가 제시되고 있다(McClelland and Montoya, 2002).

적 요

본 연구에서는 부영양한 저수지에서 동물플랑크톤 군집의 계절변동을 파악하고 안정동위원소분석을 통해 동물플랑크톤이 *Microcystis* 섭식을 회피한다는 기존의 가설을 확인하고자 하였다. 요각류는 *Cyclops vicinus* (*C. vicinus*)에서 *Thermocyclops taihokuensis* (*T. taihokuensis*)로 우점종의 천이를 보였다. 계절변동에 따른 동물플랑크톤군집 밀도는 *Microcystis*의 밀도가 가장 높았던 6월에 가장 낮았고, 식물플랑크톤의 밀도 및 Chl. *a* 농도는 7월에 낮게 나타났다. 지각류와 요각류 사이에 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 는 각각 최대 12‰과 4‰의 차이를 보였으며, 이는 왕송저수지에서 지각류(*D. galeata*와 *B. longirostris*)와 요각류(*C. vicinus*)는 서로 다른 영양단계에 위치하고 다른 에너지원을 이용함을 시사하였다. *Microcystis*와 동물플랑크톤(지각류와 요각류)의 $\delta^{13}\text{C}$ 사이에 보이는 3~7‰의 차이는 동물플랑크톤이 *Microcystis*를 직접 이용하기 어렵다는 기존의 가설을 지지하였다.

사 사

본 연구는 환경부 수생태복원사업단 Eco-STAR project

[과제명: 호수생태계 통합적 건강성 평가기법 개발(08-IV-11)]의 지원으로 수행되었으며, 저자 중 이재용은 「2008년도 2단계 BK21사업」의 지원비를 받았습니다. 현장조사와 분석에 적극 협조해 준 강원대학교 환경생태학연구실 동료들과 많은 조언을 해준 J.S. Owen에게 감사드립니다.

인 용 문 헌

- 경기도보존환경연구원. 2004. 2004년 경기도 6개 호소 생물상 조사. p. 16.
- 김명운, 김민호, 조장천, 김상중. 1995. Cyanobacteria의 증식에 따른 대청호 생태계내의 생물군집 변화. 한국육수학회지 **28**(1): 1-9.
- 김호섭, 김범철, 최은미, 황순진. 2000. 부영양호수에서 남조류 bloom이 동물플랑크톤 군집변화에 미치는 영향. 한국육수학회지 **33**(4): 366-373.
- 김호섭, 박제철, 황순진. 2003. 수심이 얇은 부영양 인공호(일감호)의 동·식물플랑크톤 동태학. 한국육수학회지 **36**(3): 286-294.
- 박재충, 박정원, 김종달, 신재기. 2005. 안동호에서 환경요인과 식물플랑크톤의 시·공간적인 변동. 한국조류학회지 **20**(4): 333-343.
- 심두섭, 안태석. 1992. 소양호에서 동물플랑크톤의 섭식작용에 관한 연구. 한국미생물학회지 **30**: 129-133.
- 이재용, 김범철, 吉岡崇仁, 日野修次. 2008. 두 삼림호수에 공존하는 동물플랑크톤종의 다른 안정동위원소비. 한국하천호수학회지 **41**(3): 294-300.
- 이지민, 이정준, 박종근, 이정호, 장천영, 윤성명. 2005. 대청호 남조류 대발생기의 동물플랑크톤상 및 *Microcystis aeruginosa*와 물벼룩류 개체군 변동의 상관관계. 한국육수학회지 **38**(2): 146-159.
- 임병진, 김범철, 유광일, 유재근. 1997. 낙동강에서 남조류 대발생시 동물플랑크톤의 군집 변화. 한국육수학회지 **30**(4): 337-346.
- 최성현, 임병진. 2003. 배양조건에 따른 물벼룩의 개체생산 특성. 한국육수학회지 **36**(2): 208-214.
- 하 경, 장민호, 정종문, 주기재. 2003. 동물플랑크톤 배양여과액에 의한 *Microcystis aeruginosa*의 성장, 형태 및 microcystin 생성량의 변화. 한국육수학회지 **36**(1): 1-8.
- APHA (American Public Health Association). 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed. American Public Health Association, Washington DC.
- Brandl, Z. 2005. Freshwater copepods and rotifers: predators and their prey. *Hydrobiologia* **546**: 475-489.
- Burn, C.W. and A. Dodds. 1999. Food limitation, predation

- and allelopathy in a population of *Daphnia carinata*. *Hydrobiologia* **400**: 41-53.
- Burns, C.W. and M. Schallenberg. 2001. Calanoid copepods versus cladocerans: Consumer effects on protozoa in lakes of different trophic status. *Limnol. Oceanogr.* **46**: 1558-1565.
- Carmichael, W.W. 1992. Cyanobacteria secondary metabolites - the cyanotoxins. *Journal of Applied Bacteriology* **72**: 445-459.
- Chen, F. and P. Xie. 2003. The effects of fresh and decomposed *Microcystis aeruginosa* on cladocerans from a subtropical Chinese Lake. *Journal of Freshwater*. **18**(1): 97-104.
- Coffin, R.B., B. Fry and R.T. Wright. 1989. Carbon isotopic compositions of estuarine bacteria. *Limnol. Oceanogr.* **34**: 1305-1310.
- DeNiro, M.J. and S. Epstein. 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica Cosmochimica* **42**: 495-506.
- DeNiro, M.J. and S. Epstein. 1981. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochimica Cosmochimica* **45**: 341-351.
- Devetter, M. and J. Šěda. 2006. Regulation of rotifer community by predation of *Cyclops vicinus* (Copepoda) in the Římov reservoir in spring. *Internat. Rev. Hydrobiol.* **91**: 101-112.
- Ferrão-Filho, A.S. and S.M.F.O. Azevedo. 2003. Effect of unicellular and colonial forms of toxic *Microcystis aeruginosa* from laboratory cultures and natural populations on tropical cladocerans. *Aquatic Ecology* **37**: 23-35.
- Fulton, R.S. and H.W. Paerl. 1987. Effect of colonial morphology on zooplankton utilization of algal resources during blue-green algal (*Microcystis aeruginosa*) blooms. *Limnology and Oceanography* **32**: 634-644.
- Geller, W. and H. Müller. 1981. The filtration apparatus of Cladocera: filter mesh-sizes and their implications on food selectivity. *Oecologia* **49**: 316-321.
- Grey, J., R.I. Jones and D. Sleep. 2000. Stable isotope analysis of the origins of zooplankton carbon in lakes of differing trophic state. *Oecologia* **123**: 232-240.
- Grey, J., R.I. Jones and D. Sleep. 2001. Seasonal changes in the importance of the source of organic matter to the diet of zooplankton in Loch Ness, as indicated by stable isotope analysis. *Limnol. Oceanogr.* **46**: 505-513.
- Gu, B. and C.L. Schelske. 1996. Temporal and spatial variations in phytoplankton carbon isotopes in a polymictic subtropical lake. *Journal of Plankton Research* **18**: 2081-2092.
- Gu, B. and V. Alexander. 1993. Estimation of N₂ fixation based on differences in the natural abundance of ¹⁵N among freshwater N₂-fixing and non-N₂-fixing algae. *Oecologia* **96**: 43-48.
- Gu, B. and V. Alexander. 1996. Stable carbon isotope evidence for atmospheric CO₂ uptake by cyanobacterial surface scums in a eutrophic lake. *Applied and Environmental Microbiology* **62**(5): 1803-1804.
- Hanazato, T. and M. Yasuno. 1987. Evaluation of Microcystis as food for zooplankton in a eutrophic lake. *Hydrobiologia* **144**: 251-259.
- Heo, W.M. and B. Kim. 1997. The change in N/P ratio with eutrophication and cyanobacterial blooms in Lake Soyang, Korea. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **26**: 491-495.
- Hessen, D.O., T. Andersen and A. Lyche. 1990. Carbon metabolism in a humic lake: Pool sizes and cycling through zooplankton. *Limnol. Oceanogr.* **35**(1): 84-99.
- Kirk, K. 2002. Competition in variable environments: experiments with planktonic rotifers. *Freshwater Biology* **47**: 1089-1096.
- Kling, G.W., B. Fry and W.J. O'Brien. 1992. Stable isotopes and planktonic trophic structure in Arctic lakes. *Ecology* **73**(2): 561-566.
- Kobari, T. and S. Ban. 1998. Life cycles of two limnetic cyclopoid copepods, *Cyclops vicinus* and *Thermocyclops crassus*, in two different habitats. *Journal of Plankton* **20**(6): 1073-1086.
- Korponai, J., K. Mátyás, G. Paulovits, I. Tátral and N. Kovács. 1997. The effect of different fish communities on the cladoceran plankton assemblages of the Kis-Balaton Reservoir, Hungary. *Hydrobiologia* **360**: 211-221.
- Lee, J.Y., T. Yoshioka and T. Hanazato. 2002. Faunal trophic interaction in an oligotrophic-dystrophic lake (Shirakoma-ike, Japan). *Limnology* **3**: 151-158.
- Liu, H., P. Xie, F. Chen, H. Tang and L. Xie. 2002. Enhancement of planktonic rotifers by *Microcystis aeruginosa* blooms: an enclosure experiment in a shallow eutrophic lake. *Journal of Freshwater Ecology* **17**: 239-247.
- Lorrain, A., N. Savoye, L. Chauvaud, Y.M. Paulet and N. Naulet. 2003. Decarbonation and preservation method for the analysis of organic C and N content and stable isotope ratios of low-carbonated suspended particulate material. *Analytica Chimica Acta* **491**: 125-133.
- McClelland, J.W. and J.P. Montoya. 2002. Trophic relationships and the nitrogen isotopic composition of amino acids in plankton. *Ecology* **83**: 2173-2180.
- Minagawa, M., A.W. David and R.K. Isaac. 1984. Comparison of Kjeldahl and Combustion Methods for Measurement of Nitrogen Isotope Ratios in Organic Matter. *Anal. Chem.* **56**: 1859-1861.

- Orcutt, J.D. and M.L. Pace. 1984. Seasonal dynamics of rotifer and crustacean zooplankton populations in a eutrophic, monomictic lake with a note on rotifer sampling techniques. *Hydrobiologia* **119**: 73-80.
- Panosso, R., P. Carlsson, B. Kozlowsky-Suzuki, S.M.F.O. Azevdo and E. Granéli. 2003. Effect of grazing by a neotropical copepod, *Notodiaptomus*, on a natural cyanobacterial assemblage and on toxic and non-toxic cyanobacterial strains. *Journal of Plankton Research* **25**: 1169-1175.
- Park, H.D., C. Iwami, M.F. Watanabe, K.I. Harada, T. Okino and H. Hayashi. 1998. Temporal variabilities of the concentrations intra- and extracellular microcystin and toxic *Microcystis* species in a hypertrophic lake, Lake Suwa, Japan (1991-1994). *Env. Tox. Wat. Qual.* **13**: 61-72.
- Park, S.K. and J.H. Kim. 1995. Cross correlation analysis of environmental factors affecting water-bloom of *Microcystis aeruginosa* (Cyanophyta). *Korean Journal of Limnology* **28**(4): 381-391.
- Penaloza, R., M. Rojas, I. Vila and F. Zambrano. 1990. Toxicity of a soluble peptide from *Microcystis* sp. to zooplankton and fish. *Freshwater Biology* **24**: 233-240.
- Pulido-Villena, E., I. Reche and R. Morales-Baquero. 2005. Food web reliance on allochthonous carbon in two high mountain lakes with contrasting catchments: a stable isotope approach. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **62**: 2640-2648.
- Quiblier, C., G. Bourdier, C. Amblard and D. Pepin. 1994. Separation of phytoplanktonic pigments by HPLC for the study of phyto-zooplankton trophic relationships. *Aquatic Sciences* **56**(1): 1015-1621.
- Schindler, D.E., S.R. Carpenter, J.J. Cole, J.F. Kitchell and M.L. Pace. 1997. Influence of food web structure on carbon exchange between lakes and the atmosphere. *Science* **277**: 248-251.
- Starkweather, P.L. and P.E. Kellar. 1983. Utilization of cyano-bacteria by *Brachionus calyciflorus*: *Anabaena flos-aquae* (NRC-44-1) as a sole or complementary food source. *Hydrobiologia* **104**: 373-178.
- Syväranta, J., H. Hämäläinen and R.I. Jones. 2006. Within-lake variability in carbon and nitrogen stable isotope signatures. *Freshwater Biology* **51**: 1090-1102.
- Vander Zanden, M.J. and J.B. Rasmussen. 2001. Variation in $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ trophic fractionation: Implications for aquatic food web. *Freshwater Biology* **51**: 807-822.
- Vuorio, K., M. Meili and J. Sarvala. 2006. Taxon-specific variation in the stable isotopic signatures ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) of lake phytoplankton. *Limnology and Oceanography* **46**: 2061-2066.
- Yang, Z., F. Kong, X. Shi and H. Cao. 2006. Morphological response of *Microcystis aeruginosa* to grazing by different sorts of zooplankton. *Hydrobiologia* **563**: 225-230.
- Yoshioka, T., E. Wada and H. Hayashi. 1994. A stable isotope study on seasonal food web dynamics in a eutrophic lake. *Ecology* **75**(3): 835-864.
- Zohary, T., J. Erez, M. Gophen, I. Berman-Frank and M. Stiller. 1994. Seasonality of stable carbon isotopes within the pelagic food web of Lake Kinneret. *Limnology and Oceanography* **39**: 1030-1043.

(Manuscript received 17 September 2009,
Revision accepted 9 December 2009)