

부영양호수에서 남조류 bloom이 동물플랑크톤 군집변화에 미치는 영향

김호섭* · 김범철¹ · 최은미¹ · 황순진

(건국대학교 지역생태시스템공학과, ¹강원대학교 환경과학과)

Effects of Cyanobacterial Bloom on Zooplankton Community Dynamics in Several Eutrophic Lakes. Kim, Ho-Sub*, Bomchul Kim¹, Eunmi Choi¹ and Soon-Jin Hwang (Department of Biological Systems Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea, ¹Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

Toxin production and low digestibility of cyanobacteria are known to cause low exploitability of cyanobacteria by zooplankton. In this study, we compared relative tolerance and compatibility of zooplankton taxa in eight eutrophic lakes, exposed to frequent cyanobacterial blooms, during the summer season of 1999. *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria* and *Phormidium* were common cyanobacteria in all lakes. Filamentous forms of cyanobacteria were more abundant in lakes with relatively lower NO₃-N concentration (<0.2 mgN/l) and TN/TP ratio (<20), compared with other lakes where colonial cyanobacteria dominated. Rotifers were dominant zooplankton in most lakes, and among them, *Keratella*, *Polyarthra* and *Hexathra* were common. The laboratory feeding experiment showed that relative copepods that greatly decreased (90%) after 4 day when cyanobacteria were used as the food source of zooplankton, while rotifers gradually increased with the change of dominant taxa from *Keratella* through *Pompholyx* to *Monostyla*. These results suggest that rotifers may be capable of coexisting with cyanobacteria by exploiting them for the food source.

Key words : Cyanobacteria, Rotifers, TN/TP weight ratio, Zooplankton

서론

수 생태계의 먹이망 내에서 동물플랑크톤은 식물플랑크톤, 원생동물과 박테리아를 섭식함으로써 상위영양단계로 에너지를 전달하는 역할을 한다 (Hwang and Heath, 1999; Kim *et al.*, 2000). 동물플랑크톤의 계절적인 천이는 자연환경 요인과 주요먹이원인 식물플랑크톤의 종 구성과 풍부도, 동물플랑크톤 중간 경쟁 및 어류의 섭식활동을 통해 나타나며, 이 중에서 먹이로 이용되는 식물플랑크톤 천이는 동물플랑크톤의 군집 변화를 야기하는 중요한 원인이 된다. 예를 들면, 여름철 부영양

호수에서 대량 발생하는 남조류는 동물플랑크톤이 쉽게 섭식할 수 없는 크기와 형태, 그리고 독소를 생성하는 특성 때문에 동물플랑크톤의 군집변화에 큰 영향을 미칠 수 있다 (Lampert, 1987; Benndorf and Henning, 1989; Reynolds, 1989).

일반적으로, 독성 남조류가 번성할 때 몸체가 큰 갑각류(지각류, 요각류)보다는 윤충류가 우점하는 것으로 알려져 있다 (Edmondson and Litt, 1982). 한편으로는, 남조류에 대해 동물플랑크톤의 내성도 발달하는 것으로 보고되고 있다 (Gilbert, 1990; DeMott, 1991). Gilbert (1990)는 Vermont호에서 채집한 *Daphnia pulex*가 동일 호수에서 발생한 *Anabaena affinis*를 성장에 이용할 수 있

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

으나, 다른 수체에서 분리한 *Daphnia pulex*는 동일한 남조류를 먹이원으로 사용했을 때 빠르게 사망하는 것을 관찰하였다. 이러한 결과는 동일한 종이라 하더라도 환경 및 적응의 상태에 따라 남조류에 대한 이용률과 내성이 다를 수 있음을 의미한다.

남조류와 동물플랑크톤의 섭식관계는 남조류에 대한 동물플랑크톤 적응기작과 선택적 섭식을 통해 독성 남조류의 섭식을 회피하는 행동학적 기작 그리고 독소에 대한 낮은 민감도를 가지는 생리적인 기작과 관련되어 설명되고 있다 (DeMott and Moxter, 1991). 선행연구에 따르면, *Bosmina longirostris* (Fulton, 1988)와 *Monia macrocopa* (Hanazoto and Yasuno, 1987)를 제외한 대부분의 갑각류의 성장은 억제되는 반면 (Edmondson and Litt, 1982), *Brachionus calyciflorus*와 같은 일부 유충류들은 남조류 독소에 내성이 있고 남조류를 먹이원으로 사용될 수 있는 것으로 보고되고 있다 (Fulton and Paerl, 1987).

남조류와 동물플랑크톤에 대한 많은 연구들이 이루어지고 있음에도 불구하고 아직까지 남조류의 생리와 섭식 관계를 이해하기에는 미흡한 점이 있다. 특히, 섭식 실험의 경우는 대부분이 실험실에서 이루어지고 있기 때문에, 연구결과들의 현장 적용이나 여러 수체의 조사를 통한 배양실험결과와의 확인이 요구된다. 본 연구에서는 남조류 발생이 보고되고 있는 여러 부영양 호수에서 동물플랑크톤의 군집구조를 파악하였고, 남조류를 먹이원으로 이용한 동물플랑크톤 배양실험에서 시간에 따른 동물플랑크톤 밀도와 우점종의 변화를 관찰함으로써 군집별 생존능력을 비교하였다. 이외에도, 조사 수체의 환경 요인들과 남조류 종 조성 사이의 상호 관계성을 고찰하였다.

재료 및 방법

1. 조사대상 호수 및 조사시기

본 연구는 1999년 여름철에 남조류가 발생하는 것으로 보고되고 있는 몇개 부영양호수를 대상으로 이루어졌다 (조사호수의 세부적인 개황은 아래의 논문참조 : 김 등, 1988; 김 등, 1995; 김 등, 1999; 이, 1999; 허 등, 1999; 김과 이, 2000; 허 등, 2000). 춘천에 위치한 동면저수지는 수심이 낮고 규모가 작은 농업용저수지로 여름철 남조류가 번무하는 것이 관찰되고 있으며, 본 연구에서 조사된 엽록소 *a*와 총인 농도를 이용하여 계산된 부영양화도 지수는 평균 53으로 호수의 영양상태가 부영



Fig. 1. The map showing the study lakes.

양호의 수준임을 나타냈다 (Vollenweider, 1968; Carlson, 1977; Forsberg and Ryding, 1980; Kratzer and Brezonik, 1981).

동해안에 위치한 화진포, 영랑호에서는 6월과 8월에 월 2회 실시하였고, 도암호에서는 8월에, 충주호, 안동호, 임하호, 대청호에서는 9월에 각 1회 조사하였다 (Fig. 1). 동면저수지에서는 8월 22일부터 10월 22일까지 매주 1회 조사하였다.

2. 이화학적 분석

현장에서 수온과 pH를 측정하였고, 수질 분석을 위한 시료는 각 호수의 표층에서 채취하여 당일 실험실로 운반하여 GF/C filter로 여과하였다. 여과지는 분석 전 (일주일 이내)까지 -20°C 에서 냉동 보존하였다가 엽록소 *a* 측정에 사용하였다. 총인 (total phosphorus; TP)과 총질소 (total nitrogen; TN) 분석을 위해 원수에 20N 황산을 첨가하여 (최종 부피의 0.1%) pH 2로 조절한 후 냉장 보관하였다. 인산염 인 ($\text{PO}_4\text{-P}$)은 ascorbic acid 법으로, 질산성 질소 ($\text{NO}_3\text{-N}$)는 cadmium 환원법으로 측정하였다. 총인 (TP)는 persulfate로 분해한 후, ascorbic acid법

으로 인산이온농도를 측정하였으며, 총질소(TN)는 per-sulfate로 분해한 후 cadmium 환원법으로 nitrate의 농도를 정량하였고, 부유물질(SS)은 무게 중량법으로 측정하였다(APHA, 1992). 엽록소 *a* 농도는 여과지에 90% 아세톤 5 ml를 가한 후 homogenizer 로 분쇄하여 냉암소에서 2시간 추출한 후 흡광도를 측정하였고, Lorezen법(1967)으로 계산하였다.

3. 조류 동정 및 계수

남조류 계수를 위해 표층 시료를 500 ml 폴리에틸렌 병에 담아 Lugol 용액(최종부피의 2%)으로 고정하였고, 동물플랑크톤 계수를 위한 시료는 플랑크톤 네트(mesh size, 80 μ m)로 채집하여 포르말린 용액(최종 부피의 5%)으로 고정하였다. 동·식물플랑크톤의 정량분석을 위하여 농축한 시료를 1 ml Sedgwick-Rafter cell에 담은 후 300배 광학현미경하에서 500 cell 이상 계수하였다. 동물플랑크톤 군집은 윤충류, 요각류, 그리고 지각류로 구분하였고, 300개체 이상을 계수하였다. 각각의 플랑크톤은 농축 volume, counting cell의 계수면적을 환산하여 최종적으로 정량하였다.

4. 배양 실험

실험에 사용된 동물플랑크톤은 1999년 9월에 소양호에서 동물플랑크톤 네트(mesh size, 80 μ m)로 채집하였고, 남조류는 1999년 8월에 춘천시 동면저수지에서 채집하여 실험 전까지 MA배지에서(Table 1) 배양하면서 사용하였다(Watanabe, 1996). 동물플랑크톤 배양 실험은 광(약 125 μ E/m²/s) 주기가 14 : 10 (Light : Dark)이고, 온도가 25°C로 조절된 배양기에서 20일 동안 이루어졌다. 20 ml 시료병 16개에 농축 동물플랑크톤 시료를 각각 10 ml씩 첨가하였고, 동물플랑크톤의 먹이원으로 사용된 남조류는 배양초기(0 day)와 4, 10 및 14일에 1 ml씩 넣어주었다. 동물플랑크톤의 군집 조사를 위해 2~3일 간격으로 2개의 시료 모두 포르말린으로 고정하였으며, 고정된 시료는 농축하여 전량을 동물플랑크톤 계수에 사용되었다.

결과 및 고찰

1. 수체의 화학적 특성과 남조류의 생물량

조사된 호수에서 pH는 모두 8 이상이었고, 무기영양염류의 농도는 큰 차이를 보이지 않았으나, 총인의 농도는 호수에 따라 차이를 보였다(Table 2). 화진포와 영랑

Table 1. Composition of MA media used for cultivation of cyanobacteria (Watanabe, 1996).

Compound	Amount
	mg
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	50
KNO ₃	100
NaNO ₃	50
Na ₂ SO ₄	40
MgCl ₂ ·6H ₂ O	50
β -Sodiumglycerophosphate	100
Na ₂ EDTA	5
FeCl ₂ ·6H ₂ O	0.5
MnCl ₂ ·4H ₂ O	5
ZnCl ₂	0.5
CoCl ₂ ·6H ₂ O	5
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.8
H ₃ BO ₃	20
Bicine	500
Distilled water	1,000 ml
pH 8.6	

Table 2. The results of several limnological parameters in study lakes. The value of each parameter is average. Chl. *a*, TP, DIP, TN, NO₃-N and SS represents chlorophyll *a*, total phosphorus, dissolved inorganic phosphorus, total nitrogen, nitrate and suspended solids, respectively.

Lake	pH	TP	DIP	Chl. <i>a</i>	TN	NO ₃ -N	SS
		μ g/l			mg/l		
Hwajinpo	9.6	139.8	13.5	18.6	1.4	0.1	9.8
Youngrang	8.9	50.5	6.6	5.5	1.6	0.6	10.9
Doam	9.1	60.9	8.4	13.8	3.2	2.8	7.8
Dongmyun	8.3	49.1	8.5	6.5	1.3	0.7	8.4
Chungju	8.5	18.9	3.6	0.7	2.0	1.7	1.0
Andong	8.7	8.3	4.2	3.9	1.3	1.0	4.2
Imha	8.6	26.3	7.0	7.1	1.7	1.2	5.8
Daechung	8.6	19.8	2.9	2.4	1.5	1.2	2.4

호, 도암호 및 동면저수지에서 총인 농도가 다른 호수들에 비해 높았다. 용존 무기인 농도는 화진포에서 13.5 μ g/l로 가장 높았고 대청호에서 2.9 μ g/l로 가장 낮았다. 무기질소(NO₃-N) 농도는 화진포에서 0.1 mg/l 이하로 다른 호수들에 비해 상대적으로 낮은 농도로 존재하였다. 총 질소 농도는 가장 높은 농도를 나타낸 도암호(3.2 mg/l)를 제외하고 거의 비슷한 수준이었다(1.3~2.0 mg/l). 엽록소 *a*는 화진포(18.6 μ g/l)와 도암호(13.8 μ g/l)에서 높게 나타났고, 안동호에서 가장 낮았다(0.7 μ g/l). 부유물질 농도는 수심이 얇아 바람에 의한 교란으로 무기현탁물의 영향을 받을 수 있는 화진포와 영랑호를 제외하고는 식물플랑크톤의 생물량과 양의 상관관계($r^2 =$

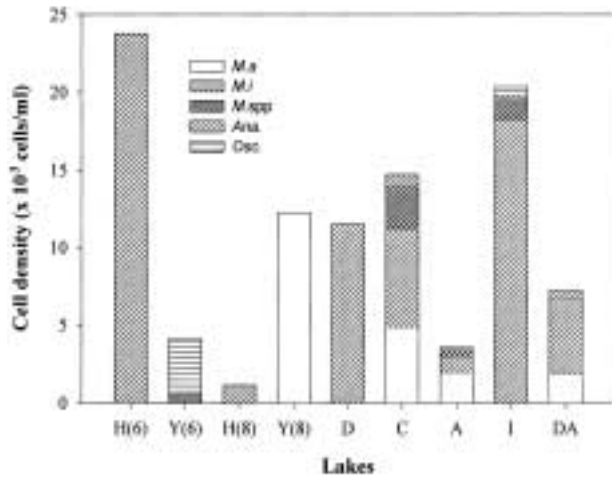


Fig. 2. Cell density of cyanobacteria in study lakes during summer season, 1999. (M.a; *Microcystis aeruginosa*, M.i; *Microcystis ichthyoblabe*, M. spp.; *Microcystis* spp., Ana.; *Anabaena* spp., Osc.; *Oscillatoria* spp., H; L. Hwajinpo, Y; L. Youngrang, D; L. Doam, C; Chungju A; L. Andong, I; L. Imha, DA; L. Daechung, (6); June, (8); August).

0.74)가 있었다.

남조류는 조사한 모든 호수에서 관찰되었으며 세포밀도는 시기별, 호수별로 상당한 변이를 보였다(Figs. 2, 3). 가장 높은 세포밀도는 화진포에서 6월에 나타났다(2.3×10^4 cells/ml). 화진포에서는 6월과 8월 모두 *Anabaena*속의 종들만이 관찰되었고, 영랑호에서는 6월 *Oscillatoria*속의 종들이 우점했던 반면에 8월에는 *Microcystis aeruginosa*가 우점하였다. 그 외 호수에서는 2~3속의 남조류가 혼합 출현하였는데 *Anabaena*가 우점종으로 조사된 도암호를 제외하고는 대부분 *Microcystis*속의 종들이 우점하였다.

동면저수지에서는 *Microcystis aeruginosa*가 우점하였고, 엽록소 *a* 변동은 남조류의 세포밀도변동과 상관($r^2 = 0.86$) 있었다(Fig. 3(a)). 9월 22일에 나타난 남조류 세포밀도의 급격한 감소는 조사직전에 있었던 집중강우로 인하여 유입된 탁류 때문인 것으로 추정된다(Fig. 3(b)). Holz *et al.* (1997)은 clay와 같은 입자성 물질에 의해 탁도가 증가된 시기에 식물플랑크톤의 생물량이 감소하고 남조류에서 녹조류로의 우점종 변화를 보고한 바 있다.

조사대상으로 한 호수에서 남조류 출현종 조성 또는 분포양상은 수중에 잔존하는 인과 질소 농도에 의한 영향이 큰 것으로 볼 수 있었다. 남조류 군집 내 우점종을 조절하는 인자로는 질소와 인과 같은 영양염, 광도 그리고 수온 등이 있다. 일반적으로 TN/TP비가 높고 수심이

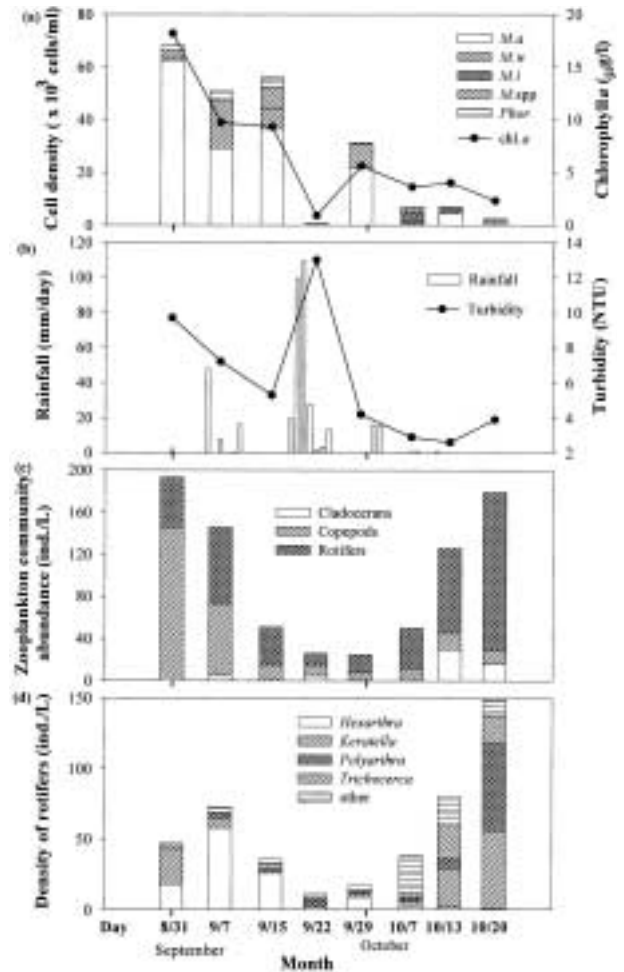


Fig. 3. Weekly variations of (a) cyanobacterial cell density, species composition and chlorophyll *a* concentration, (b) rainfall and turbidity, (c) density of three zooplankton groups, and (d) rotifers in Dongmyon reservoir from 31 August to 20 October, 1999. The positive correlation between cyanobacteria abundance and chlorophyll *a* concentration ($r^2 = 0.86$, $n = 8$, $p = 0.01$) was observed. Others include mostly *Filinia* and *Monostyla* (M.a: *Microcystis aeruginosa*, M.w: *Microcystis wesenbergii*, M.i: *Microcystis ichthyoblabe*, M. spp.; *Microcystis* spp.; Phor.: *Phormidium* sp.).

얕으며 투명도가 낮은 호수에서는 *Oscillatoria*가 우점하고, TN에 비해 상대적으로 TP의 농도가 높아 TN/TP비가 낮고 수심이 깊은 부영양호수에서는 *Anabaena*와 *Microcystis*가 우점하는 것으로 보고되고 있으며(Reynolds, 1993; Fujimoto and Sudo, 1997), *Anabaena*는 *Microcystis*보다는 다소 낮은 수온 상태를 선호하는 것으로 알려져 있다(Fujimoto and Sudo, 1997; Havens *et al.*, 1998). 무기질소 농도가 가장 낮았던 화진포에서 출

Table 3. Cyanobacteria (cells/ml) and zooplankton abundance (ind/l). The values in parentheses are relative abundances (%) of zooplankton.

Lake	Hwajinpo		Youngrang		Doam	Chungju	Andong	Imha	Daechung
	Jun.	Aug.	Jun.	Aug.	Aug.	Sep.	Sep.	Sep.	Sep.
Cyanobacteria	23,780	1,124	4,102	12,228	12,456	7,227	3,567	14,746	20,344
Copepods	115 (9)	56 (47)	8 (1)	14 (5)	2 (0)	7 (55)	10 (4)	12 (35)	12 (12)
Cladocerans						2			
Rotifers (total)	1,191 (91)	63 (53)	640 (99)	244 (95)	548 (100)	3 (27)	222 (96)	21 (65)	83 (88)
<i>Asplanchna</i>			8				6		
<i>Ascomorpha</i>	6								
<i>Askenasia</i>		2							
<i>Brachionus</i>	166		10	9					
<i>Colurella</i>		11						3	5
<i>Filinia</i>									1
<i>Hexarthra</i>		8			20		15	1	6
<i>Keratella</i>	1,019		568	16	110		21	1	3
<i>Polyarthra</i>				106	299	3	160	12	56
<i>Synchaeta</i>			41						
<i>Trichocerca</i>					114		5	1	1
Unknown		42	13	113	5		15	3	11

현한 남조류는 *Anabaena*속으로 이들은 질소고정능력을 가지고 있어 일반적으로 질소가 제한된 호수에서 우점종으로 나타나고 있다 (Smith *et al.*, 1995).

2. 동물플랑크톤 군집 조성

동물플랑크톤의 주요 분류군인 지각류, 요각류 및 윤충류 중 동면저수지만 8월말에 요각류가 우점하였을 뿐 그외는 윤충류가 우점하였고, 조사시기 및 호수에 따라 개체 밀도와 우점종 조성은 달랐다 (Table 3, Fig. 3(c), (d)). 화진포에서의 동물플랑크톤 밀도는 6월에 비해 8월에 90% 이상 감소하였고 6월에 우점하였던 *Keratella*는 출현하지 않았다. 영랑호에서는 6월에 *Keratella*가, 8월에는 총 개체수의 감소와 함께 6월에 출현하지 않았던 *Polyarthra*가 우점종으로 나타났다. 그 외 동면저수지를 제외한 호수들에서도 *Polyarthra*가 우점하였다.

동면저수지에서 조사 초기인 8월 31일에는 동물플랑크톤 군집 중 요각류의 구성비율이 높았으나 (74%) 남조류 세포밀도의 감소와 더불어 요각류의 밀도가 감소하였고, 점차 윤충류의 구성비율이 증가하였다 (Fig. 3(c)). 남조류가 발생한 시기에 동물플랑크톤 내 군집변화는 남조류의 먹이원으로서의 이용성과 동물플랑크톤의 섭식 형태, 박테리아 등의 대체먹이원에 대한 이용률 그리고 독소에 대한 민감도 차이로 설명할 수도 있을 것이다. 크기가 큰 요각류나 지각류가 윤충류를 먹이원으로 이용하거나 서로 경쟁함으로써 윤충류의 성장을 억제할

수 있으나 (Gilbert and Stemberger, 1985), 상대적으로 먹이원으로서 남조류에 대한 이용도가 낮고, 남조류가 생성하는 독소에 대해 윤충류 보다 더 민감하게 반응하기 때문에 (Gilbert, 1990), 남조류 bloom은 요각류나 지각류와 같은 포식자의 성장을 억제하고 그로 인해 윤충류의 동물플랑크톤 군집 내 풍부도가 증가될 수 있다. 그러나, 온대수역에서 보통 총 동물플랑크톤 개체수의 3분의 1를 윤충류가 차지하고 있기 때문에 (Wetzel, 1983), 남조류와 동물플랑크톤 군집 변화와의 관계를 이해하기 위해서는 현장에서의 더 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

동면저수지에서 동물플랑크톤 밀도와 우점종은 집중강우를 전후로 변화하였는데, 강우 전의 주요 동물플랑크톤 군집은 요각류였고, 강우 이후에는 윤충류였다. 9월 22일 조사에 앞서 많은 강우가 있었고 탁도가 높은 유입수가 유입되었다 (Fig. 3(b)). 이 시기에 나타난 동물플랑크톤 밀도의 급격한 감소는 많은 영양염과 clay와 같은 입자성물질이 포함된 유입수에 의한 희석과 방류구를 통한 유실 그리고 clay 혹은 먹이원의 부족에 따른 성장률의 감소 등과 같은 여러 가지 요인이 복합적으로 기인된 것으로 판단된다. Hwang *et al.* (1996)은 clay밀도가 매우 높아 투명도가 <50 cm인 부영양 만에서 윤충류의 수적으로 큰 우점도를 관찰하였다. Clay는 윤충류 보다 지각류의 성장률을 더 억제하고, 특히 먹이원으로 이용할 수 있는 식물플랑크톤이 부족한 경우에는 적은

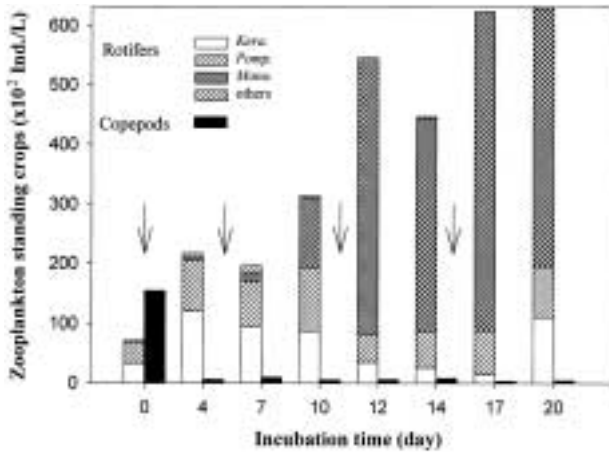


Fig. 4. Daily variation of rotifer abundance in 20d-laboratory experiment. Others include mostly *Asplanchna*, *Colurella*, *Lecance*, *Ploesome* and *Trichocerca*. Arrows (↓) indicate time points of cyanobacteria supplied.

양의 clay에 의해서도 지각류의 성장이 현저하게 억제되는 것으로 알려져 있다 (Kirk and Gilbert, 1990).

조사기간 동안 동면저수지에서의 윤충류 군집 내 우점종 변화는 강우 전 남조류의 세포밀도가 가장 높았던 8월 31일에는 *Keratella*가 우점하였고 강우 전까지 *Hexathra*의 밀도가 증가하였다. 강우 이후에는 윤충류를 포식할 수 있는 요각류 (Gilbert and Stemberger, 1985)와 먹이원으로 적절하지 않은 남조류의 밀도가 감소한 반면, *Keratella*와 *Polyarthra*가 밀도의 증가와 함께 우점하였다 (Fig. 3(d)).

3. 남조류의 동물플랑크톤 군집에 대한 영향

동물플랑크톤의 종류에 따라 남조류를 먹이원으로 이용하여 생존하는 능력이 다를 것으로 생각되므로 장기간 남조류를 급이함으로써 생존하는 동물플랑크톤 종을 관찰하였다. 남조류 급이배양에 사용한 동물플랑크톤 시료의 배양초기의 조성비는 요각류가 171×10^2 ind/L (67%), 윤충류가 71×10^2 ind/L (31%) 그리고 지각류가 5×10^2 ind/L (2%)였다 (Fig. 4). 그러나 배양 4일 후에는 지각류는 관찰되지 않았고 요각류 점유율도 3%로 감소된 반면에 윤충류는 점유율이 97%로 증가한 후 실험이 종료될 때까지 94% 이상의 높은 점유율을 보였으므로 윤충류는 장기간 남조류를 먹이원으로 이용하여 생존할 수 있음을 보여주었다. 윤충류의 밀도증가와 함께 우점종은 배양초기에서 4일 동안은 *Keratella*와 *Pompholyx*가 우점하였으나 배양 4일 후부터 *Keratella*의 밀도는

감소하였고 *Pompholyx*는 배양 10일 이후에 감소하기 시작하였다. *Pompholyx*가 최대 밀도를 나타낸 배양 10일부터 *Monostyla*의 밀도는 남조류가 공급된 직후(12일, 17일)에 뚜렷하게 증가하였다. 본 연구에서는 동물플랑크톤의 밀도를 자연상태보다 높게 유지하였으므로 몸의 크기가 큰 지각류와 요각류가 공간적 장애에 의한 스트레스로 사망률이 증가하였을 가능성도 배제할 수 없다 (Gilbert and Stemberger, 1985). 그러나, 윤충류가 가장 장기간 생존함으로써 자연상태에서 남조류가 우점한 호수에서 윤충류가 우점하는 양상과 일치하는 결과를 보여주었다.

적 요

남조류가 빈번하게 발생하는 부영양 호수를 대상으로 남조류 발생시 동물플랑크톤의 군집구조를 파악하였고, 남조류를 먹이원으로 하는 동물플랑크톤 배양실험을 통해 시간에 따른 동물플랑크톤 밀도와 우점종의 변화를 관찰하였다. 조사대상으로 한 모든 호수에서 남조류가 관찰되었다. 다른 호수에 비해 질소가 식물플랑크톤의 성장을 억제할 수 있는 정도의 농도(0.1 mg/l 이하)로 존재하고 있었던 화진포에서는 *Anabaena*속의 종만이 출현하였고, 그 외 다른 호수에서는 *Microcystis*속의 종들이 우점종으로 나타났다. 남조류가 관찰된 호수에서의 동물플랑크톤 군집은 윤충류가 우점하였고 각 호수마다 우점종에는 차이가 있었으나 *Keratella*, *Polyarthra*가 우점종으로 조사되었다. 동면저수지에서는 다른 호수들에서의 결과와는 달리 남조류의 세포밀도가 높았던 시기에 요각류의 구성비가 높았으나, 남조류의 생물량 감소와 더불어 요각류의 생물량은 감소하였고, 윤충류의 밀도는 증가하였다. 윤충류 군집 내 우점종은 *Keratella*, *Hexathra* 그리고 *Polyarthra*였다. 남조류를 먹이로 공급하여 동물플랑크톤 군집 변화를 관찰한 배양실험에서는 남조류 주입 4일 후 요각류의 밀도가 급격하게 감소하였으나(약 90%), 윤충류는 *Keratella* → *Pompholyx* → *Monostyla*로 바뀌는 우점종 변화와 더불어 밀도가 지속적으로 증가하였다. 이상의 결과는, 윤충류가 군체 형성 혹은 독소생성 등으로 동물플랑크톤의 섭식 활동을 억제할 수 있는 남조류에 대해 상대적으로 높은 적응 능력을 가지고 있음을 시사한다.

인 용 문 헌

김범철, 김호섭, 박호동, 최광순, 박종근. 1999. 국내 호수에서

- 발생한 남조류의 microcystin 함량과 독성평가. 한국육수학회지 **32**: 288-294.
- 김범철, 안태석, 조규송. 1988. 한강수계 인공호의 부영양화에 관한 비교연구. 한국육수학회지 **21**: 151-163.
- 김범철, 허우명, 황길순. 1995. 도암호의 부영양화 실태. 한국육수학회지 **28**: 233-240.
- 김철호, 이정호. 2000. 대청호 하류에서 환경요인과 *Anabaena cylindrica* 성장억제세균의 계절별 분포변화. 한국육수학회지 **33**: 128-135.
- 김두섭, 안태석. 1992. 소양호에서 동물플랑크톤 섭식작용에 관한 연구. 한국미생물학회지 **30**: 129-133.
- 이정호. 1999. 대청호의 년중 식물플랑크톤 군집 동태. 한국육수학회지 **32**: 358-366.
- 허우명, 권상용, 김범철, 박주현. 2000. 안동호 수질의 장기적인 변화. 한국육수학회지 **33**: 260-266.
- 허우명, 김범철, 전만식. 1999. 동해안 석호의 부영양화 평가. **32**: 141-151.
- APHA. 1992. Standard Methods for the examination of water and wastewater, 18th ed., American Public Health Association, Washington, D.C., U.S.A.
- Benndorf, J. and M. Henning. 1989. *Daphnia* and toxic blooms of *Microcystis aeruginosa* in Bautzen Reservoir (GDR). *Int. Rev. Ges. Hydrobiol.* **74**: 233-248.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 361-369.
- DeMott, W.R. 1991. Effects of toxic cyanobacteria and purified toxins on the survival and feeding of a copepod and three species of *Daphnia*. *Limnol. Oceanogr.* **36**: 1346-1357.
- DeMott, W.R. and F. Moxter. 1991. Foraging on cyanobacteria by copepods: Responses to chemical defenses and resource abundance. *Ecol.* **72**: 1820-1834.
- Edmondson, W.T. and A.H. Litt. 1982. *Daphnia* in Lake Washington. *Limnol. Oceanogr.* **27**: 272-293.
- Fosberg, C. and S. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. *Arch. Hydrobiol.* **89**: 189-207.
- Fujimoto, N. and R. Sudo. 1997. Nutrient-limited growth of *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium tenue* and competition under various N:P supply ratios and temperatures. *Limnol. Oceanogr.* **42**: 250-256.
- Fulton, R.S. 1988. Resistance to blue-green toxins by *Bosmina longirostris*. *J. Plankton Res.* **10**: 771-778.
- Fulton, R.S. and H.W. Paerl. 1987. Toxic and inhibitory effects of the blue-green alga *Microcystis aeruginosa* in herbivorous zooplankton. *J. Plankton Res.* **9**: 837-855.
- Gilbert, J.J. 1990. Differential effects of *Anabaena affinis* on cladocerans and rotifers: mechanisms and implications. *Ecol.* **7**: 1727-1740.
- Gilbert, J.J. and R.S. Stemberger. 1985. Control of *Keratella* populations by interference competition from *Daphnia*. *Limnol. Oceanogr.* **30**: 180-188.
- Hanazato, T. and M. Yasuno. 1987. Evaluation of *Microcystis* as food for zooplankton in a eutrophic lake. *Hydrobiol.* **144**: 251-259.
- Holz, J.C., K.D. Hoagland, R.L. Spawn, A. Popp and J.L. Andersen. 1997. Phytoplankton community response to reservoir aging, 1968-92. *Hydrobiol.* **346**: 183-192.
- Hwang, S.J. 1995. Carbon dynamics of plankton dynamics in nearshore and offshore Lake Erie: The significance of the microbial loop for higher trophic levels. Ph.D. dissertation, Kent State university, USA.
- Hwang, S.-J., R.T. Heath and R.J. Garno. 1996. Contrasting zooplankton community structure in Sandusky Bay and Lake Erie. *Kor. J. Ecol.* **19**: 491-518.
- Hwang, S.-J. and R.T. Health. 1999. Zooplankton bacterivory at nearshore and offshore site of Lake Erie. *J. Plankton Res.* **21**: 699-719.
- Kim, H.J., S.-J. Hwang and G.J. Joo. 2000. Zooplankton grazing on bacteria and phytoplankton in the regulated Nakdong River (Korea). *J. Plankton Res.* **22**: 1559-1577.
- Kirk, K.L. and J.J. Gilbert. 1990. Suspended clay and the population dynamics of planktonic rotifers and cladocerans. *Ecol.* **71**: 1741-1755.
- Kratzer, C.R. and Brezonik, P.L. 1981. A carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Wat. Res. Bull.* **17**: 713-717.
- Lampert, W. 1987. Laboratory studies on zooplankton-cyanobacteria interactions, N.Z.J. *Mar. Freshwat. Res.* **21**: 483-490.
- Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equation. *Limnol. Oceanogr.* **12**: 343-346.
- Park, H.D., B.C. Kim, E.K. Kim and T. Okino. 1998. Hepatotoxic microcystins and neurotoxic anatoxin-a in cyanobacterial blooms from Korean lakes. *Environ. Toxicol. Wat. Qual.* **13**: 225-234.
- 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. 1993. The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge University press, Cambridge, U.K. 384.
- Smith, V.H., V.J. Bierman and B.L. Jones. 1995. Historical trends in the lake Okeechobee ecosystem IV. Nitrogen : phosphorus ratios, cyanobacterial dominance, and nitrogen fixation potential. *Arch. Hydrobiol* (Suppl.).

107: 71–88.

Vollenweider, R.A. 1968. The scientific basis of lake and stream eutrophication, with particular reference to phosphorus and nitrogen as eutrophication factors. Tech. Rep. OECD. Paris. DAS/CSI/68. **27:** 1–182.

Watanabe, M.F. 1996. Production of Microcystins, p. 38. *In:*

Toxic Microcystis (M.F. Watanabe, K-I. Harada, W.W. Carmichael and H. Fujiki eds.). CRC, Boca Raton, Florida.

Wetzel, R. 1983. Limnology, CBS College publishing, New York.