

한국산 논우렁이의 유해조류 섭식율 및 배설물 생산

황순진 · 전미진 · 김난영 · 김백호*

(건국대학교 환경과학과)

Grazing Rate and Pseudofaeces Production of Native Snail *Cipangopaludina chinensis malleata* Reeve on Toxic Cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. Hwang, Soon-Jin, Mi-Jin Jeon, Nan-Young Kim and Baik-Ho Kim* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

Grazing rates (GR) and pseudofaeces production (PFP) of native snail, Chinese mystery snail (*Cipangopaludina chinensis malleata* Reeve) on natural colonial morphs of *Microcystis aeruginosa* was measured. *C. chinensis* was collected from the upstream of the Geum River (Boryeong, Korea), where they co-habituated with *Unio douglasiae* and *Lanceolaria acrorhyncha*. The experiments were performed to evaluate the GR and PFP at different conditions such as; incubation time (1, 3, 5, 7, 9 and 11 hr), body size (3 to 6.1 cm, n=28), snail density (0.5, 1, 1.5 and 2.0 ind. L⁻¹) and prey concentration (168.3, 336.7, 505.0 and 673.0 µg Chl-a L⁻¹). All experiments were triplicated, and conducted in transparent acrylic vessel (3 L in volume). Regarding feeding time, a highest GR (0.538 L gAFDW⁻¹ h⁻¹) and PFP (7.18 mgAFDW⁻¹) appeared at 1 hr and 7 hr after snail stocking, respectively. Interestingly, the snail, smaller than 4.5 cm in body size, showed a wide range of GR (-4.173~1.087 L gAFDW⁻¹ h⁻¹) for the initial period (1 and 4 hrs of stocking), compared to those greater than 4.5 cm, which showed a stable FR, higher than 0.5 L gAFDW⁻¹ h⁻¹. Upon density effect, the density of 1.5 ind. L⁻¹ induced the most effective inhibition on *Microcystis* biomass with highest PFP. On the prey concentration, highest GR (0.897 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹) and PFP (3.67 mg gAFDW⁻¹) were induced at the level of 168.3 µg Chl-a L⁻¹ and 673 µg Chl-a L⁻¹, respectively. GR and PFP of this freshwater snail on the cyanobacterial bloom (*M. aeruginosa*) varied with the feeding conditions, and they were comparatively high for a short period of time less than 7 hrs regardless of the stocking condition. Our results suggest that this freshwater snail has a potential to control cyanobacterial bloom when provided with suitable condition.

Key words : Chinese mystery snail, *Cipangopaludina chinensis malleata*, grazing rate, pseudofaeces production, *Microcystis aeruginosa*

서 론

부영양화로 인한 조류 대발생 및 수질악화에 대한 관심도가 날로 증가하고 있으며, 지금까지 계속적으로 논란

이 되어 왔던 물리-화학적 조류제어 방법의 대안으로 다양한 기능성 생물을 적용하는 생태공학적인 연구가 활발하게 진행되고 있다. 생물조절(biomanipulation)을 통한 수질개선에 이용된 생물로는 어류(Carpenters *et al.*, 1985; Fukushima *et al.*, 2000), 동물플랑크톤(Lampert *et al.*,

* Corresponding author: Tel: (02) 452-3749, Fax: (02) 452-3749, E-mail: white-t@hanmail.net

1986), 살조세균 (Manage *et al.*, 1999; Sigeo *et al.*, 1999; Choi, 2004), 패류 (Heath *et al.*, 1995; Lavrentyev *et al.*, 1995; Jack and Thorp, 2000), 수생식물 (Hill, 1986; Xian *et al.*, 2007; Zhenbin *et al.*, 2007) 등이 알려져 왔다.

패류의 여과-섭식능을 이용한 현장 조류제어 (large-scale experiments)는 북미나 유럽을 중심으로 진행되어 왔으며 (Reeders and de Vaate 1990; Heath *et al.*, 1995; Jack and Thorp, 2000), 얼룩말조개는 대표적인 예이다 (Noordhuis *et al.*, 1992; Strayer *et al.*, 1998; Ibelings *et al.*, 2003; Dionisio Pres *et al.*, 2005). 그러나 이들은 부착성 군거생활을 하기 때문에 수체 내 각종 부착기질·관개식물 및 댐 관련 건축물의 기능을 마비시키고 (MacIsaac and Sprules 1991; Ahlstedt, 1994; Enserink, 1999), 급격한 환경변화에 따른 높은 패사율과 실내유지 어려움 등이 지적되어 왔다 (Scheller, 1997; Strayer *et al.*, 1998; Hwang *et al.*, 2004). 국내에서는 재첩과 말조개의 섭식능에 대한 약간의 연구는 있었으나 (Kim *et al.*, 2004), *Dreissena polymorpha*와 같은 군서형 패류나 다른 국내산 패류를 이용한 조류제어 연구는 매우 빈약하다.

논우렁이 (*Cipangopaludina chinensis malleata* Reeve)는 큰논우렁이 (*C. japonica* Von Martens)와 함께 전세아강 (Prosobranchia), 논우렁이과 (Viviparidae)에 속하며 주로 논, 수로, 연못 등의 진흙이나 물가에 서식한다 (Clench and Fuller, 1965). 아직까지 두 종에 대한 분류학적 명칭과 경계가 분명하지 않지만, 원산지는 아시아 중남부 중국, 일본, 베트남, 태국, 필리핀, 자바, 한국 등이며, 농산물 이동 경로를 따라 미국에 정착한 것으로 판단된다 (<http://www.in.gov/dnr/fishwild/fish/ais/snail.htm>). 특히 이들은 온도(저온)에 대한 내성이 강하고, 월동하는 패류 중 가장 수명이 길며, 주로 부착조류와 debris 등을 섭취하기 때문에 수심이 낮고 오염된 연못이나 하천의 정화에 응용되기도 한다 (Kehde and Wilhm, 1972; Kim and Park, 1987; Osenberg, 1989; Weber and Lodge, 1990; Hahm and Son, 1995). 국내산 논우렁이는 한강, 낙동강, 금강 등을 중심으로 전국에 고르게 분포하고 있으나 (Kwon *et al.*, 1985), 농약이나 중금속에 의한 수질오염으로 인해 낮은 개체수를 보이며 (Park *et al.*, 1997), 특히 유해조류의 제어와 같은 저수지 수질개선에 적용된 사례는 보고된 바 없다.

본 연구는 부유성 조류인 남조류 *Microcystis aeruginosa*에 대한 국내산 자생 논우렁이 (*C. chinensis malleata*)의 섭식능을 파악하기 위하여, 매년 남조류가 대발생하는 소형저수지 (일감호, 서울)의 현장수를 대상으로

다양한 크기, 개체밀도, 먹이밀도, 그리고 시간에 따른 섭식율 (grazing rate) 및 배설물생산 (pseudofaeces production)을 조사하였다.

재료 및 방법

1. 동물채집 및 관리

실험에 사용한 논우렁이 (*C. chinensis malleata*)는 2006년 8월부터 9월 사이 금강 (충남 보령) 유역에서 저인망 그물로 채집하거나 주변 농경지 수로나 소형 못에서 직접 채집하였다 (Fig. 1). 채집한 패류는 곧바로 실험실로 옮겨, 탈염시킨 수돗물로 2~3회 세척하고, 임의로 제작한 3단계 순환조 (원수조, 배양조, 사용조)에 넣고 순환시켰다. 원수조는 2~3일간 탈염시킨 수돗물을 넣고, 냉각기를 이용하여 채집 당시 수온 ($18.5^{\circ}\text{C} \pm 1.0$)을 유지하였으며, 먹이로는 상업용 클로렐라 (*Chlorella*TM, 아쿠아넷)를 3~4일에 한번씩 공급하였다. 배양조는 모래와 자갈로 구성되었으며, 사용조는 여과기를 거쳐 일정한 유속 (15 L h^{-1})으로 원수조로 다시 이동하도록 제작하였다. 3개 순환조는 2~3주에 한번씩 세척 후 탈염 수돗물로 교체하였으며, 운동력이나 섭식능이 현저히 떨어지거나 부유한 개체는 사망한 것으로 판단하여 제거하였다.

2. 개체 크기와 유기물 함량

논우렁이의 크기는 일반적으로 각정에서 저순까지의 최대 높이, 각고 (height)를 가르킨다 (Kwon, 1993). 실험기간 동안 채집된 논우렁이의 크기별 배설물 함량을 파악하기 위하여, 총 108개체 유기물 함량 (Ash free dry weight, AFDW)을 측정하였다. 먼저, 배양조에서 꺼낸 우렁이를 탈염수돗물로 2~3회 정도 세척하여 불순물을 최대한 제거하고, 신속하게 껍질과 근육으로 분리하였다. 유기물 함량을 측정하기 위하여, 500°C muffle furnace에서 1시간 정도 방치한 다음 무게를 측정한 도가니에 앞에서 분리된 근육을 넣고 100°C dry oven에서 48시간 동안 건조시켜 건중량을 측정하였다 (W1). 건중량을 잰 다음 도가니를 다시 500°C furnace에 넣어 30분간 완전히 태운 다음 100°C dry oven으로 옮겨 48시간 정도 방치한 다음 무게를 측정하였다 (W2). 논우렁이의 유기물 함량은 결국 근육질을 태우기 전후의 무게차 (W2-W1)로 계산되었으며, 섭식능 실험시 사용된 우렁이의 유기물함량을 추정하기 위해 앞에서 측정한 각 우렁이의 크기 및 무게와의 AFDW간의 상관성을 확인하여 크기 또는 무게를 이용한

유기물 함량을 산정하였다.

3. 섭식율 및 배설물 생산

논우렁이 섭식율 (grazing rate, GR)은 일정시간 동안 우렁이에 의해 소모되는 수중 내 엽록소의 변동량으로 산정하였다. 계산식은 다음과 같다. $GR = V \times \ln(C/M) / W \times t$, 단, 여기서 V는 실험에 사용된 물의 총량으로 단위는 리터(L), C와 M은 대조군과 실험군의 엽록소 a의 농도로서 단위는 $\mu\text{g L}^{-1}$, W는 사용된 우렁이의 유기물함량(AFDW)으로 단위는 $\text{L gAFDW}^{-1} \text{h}^{-1}$, t는 실험시간으로 단위는 시간(h)이다. 엽록소 a 농도는 수질공정시험법(환경부, 1995)에 따라 측정하였는데, 대조군과 실험군에서 채취한 시료를 잘 혼합하여 GF/C 여과지(Whatman Inc., England)로 여과하여 90% 아세톤을 넣고 24시간 동안 냉암소에서 추출한 뒤 원심분리기로 20분 동안 분리하고 흡광도를 측정하여 계산하였다. 배설물 생산량(pseudo-faeces production)은 일정시간이 경과한 후 대조군과 실험군에 생성된 조류괴(algal mass, green pellet)를 다른 실험수와 최대한 섞이지 않도록 진공펌프(DOA-V30-BN, GAST, USA)로 꺼내 이를 다시 75 μm Nylon net로 걸러

여과하고 남은 pellet만을 spoid로 꺼내 이미 70°C dry oven에서 건조시켜 무게를 측정한(W1) 용기에 넣고, 다시 70°C dry oven에서 30분 동안 다음 무게를 측정하여(W2), 두 무게의 차이(W2-W1)을 우렁이의 유기물 생산량으로 사용하였다.

4. 유해조류 섭식실험

논우렁이의 섭식실험은 크게 개체의 크기와 밀도, 먹이 밀도, 그리고 시간별로 실시하였으며, 섭식실험에 사용한 실험수는 매년 6월부터 11월 초까지 남조류 *Microcystis aeruginosa* 대발생이 일어나는 소형저수지의 현장수(일감호, 서울)를 이용하였다. 현장수의 90% 이상은 *Microcystis aeruginosa*가 차지하였고(엽록소 농도, 526.7 $\mu\text{g L}^{-1}$), 각 섭식실험에서는 이를 적절한 농도로 희석하여 사용하였다. 모든 섭식실험은 투명한 아크릴수조(3 L)를 사용하였으며, 실험수 2 L, 수온 25°C \pm 1.0, 광도 70 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 광주기 14 D : 10 L 조건 하에서 실시하였다. 시료채취는 정해진 시간에 교란이 일어나지 않도록 표층 15 cm에 이미 설치해 놓은 튜브를 통해 연결된 부분에 주사기를 꽂아 실험종류에 따라 10~50 mL씩 채취하였다.

개체크기에 따른 섭식실험은 크기가 다른(각고 3.0~6.1 cm) 우렁이 28개체를 배양조로부터 꺼내 실험수(엽록소 농도, 543.7 $\mu\text{g L}^{-1}$)가 들어있는 수조에 1 ind. L⁻¹ 밀도로 투입한 다음 1, 4, 7, 13, 24시간 간격으로 엽록소 변화를 조사하였다. 우렁이를 투입하지 않은 대조군 및 실험군은 모두 3회씩 반복실험을 실시하였다.

먹이밀도(엽록소 a 농도) 섭식실험은 플랑크톤 네트(20 μm)를 이용하여 현장수를 농축한 다음(엽록소 농도, 673.4 $\mu\text{g L}^{-1}$) 탈염수돗물로 25%씩 4단계(168.3, 336.7, 505.0, 673.4 $\mu\text{g L}^{-1}$)로 희석하고, 각 실험군에 동일한 밀도의 우렁이(1 ind. L⁻¹)를 각각 투입한 다음 시간별 엽록소 변화를 조사하였다. 앞의 두 실험과 마찬가지로 우렁이를 투입하지 않은 대조군 및 실험군은 모두 3회씩 중복실험을 실시하였다.

시간별 섭식실험은 각 측정시간별로 실험군을 회수하

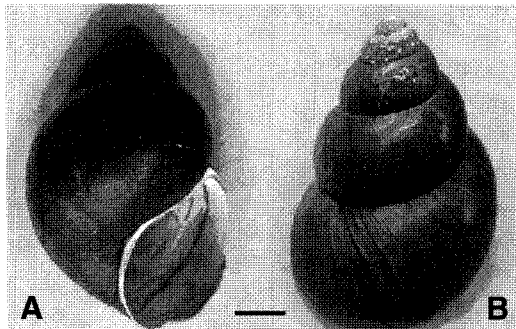


Fig. 1. Photographs of Chinese mystery snail, *Cipangopaludina chinensis malleata* (A: the height, B: front-side) collected from the Geum River (Boryeong, Korea) from May 2007 to June 2007. The black bar indicates 1cm.

Table 1. Experimental design of freshwater snail *Cipangopaludina chinensis malleata*.

Experiments	Culture time	Animal size	Mussel density	Prey conc.
Tank volume	3 L	3 L	3 L	3 L
Replication	3 × 6	1 × 28	3 × 4	3 × 4
Food	<i>Microcystis</i>	<i>Microcystis</i>	<i>Microcystis</i>	<i>Microcystis</i>
Mussel densities (ind. L ⁻¹)	1	0.5	0.5, 1, 1.5, 2	1
Initial chlorophyll a conc. ($\mu\text{g L}^{-1}$)	825.42	543.74	247.77	673.4, 505, 336.7, 168.3
Sampling time (hr)	0, 1, 3, 5, 7, 9, 11	0, 1, 4, 7, 13, 24	0, 1, 4, 7	0, 1, 4, 7

여 엽록소 변화와 유기물 생산량을 동시에 측정하였다. 실험은 현장수(엽록소 농도, 825.4 $\mu\text{g L}^{-1}$)를 각각 동일하게 넣고, 각고가 유사한 크기의 우렁이(4.6~5.4 cm)를 1 ind. L^{-1} 로 각각 투입한 다음 시간별로(1, 3, 5, 7, 9, 11시간) 회수하여 우렁이의 섭식율과 유기물량을 각각 측정하였다.

우렁이 개체밀도에 따른 유해조류 제어실험은 각고가 유사한 우렁이(각고 4.5~5.0 cm)를 선별하여, 실험조(엽록소 농도, 247.8 $\mu\text{g L}^{-1}$)에 밀도를 4단계로 나누어 투입한 다음 크기실험과 동일하게 시간별 엽록소 변화를 조사하였다. 우렁이를 투입하지 않은 대조군 및 실험군은 모두 3회씩 중복실험을 실시하였다.

5. 자료분석

각 3회씩 중복 실험한 실험군과 대조군 엽록소량의 차

이를 비교하기 위하여, t-test와 ANOVA분석을 실시하였다. 우렁이의 크기 및 무게에 대한 유기물 함량과의 상관성은 다중회귀식을 이용하였다(SPSS 12.0).

결 과

1. 개체크기에 따른 유해조류 섭식율

2006년 8월부터 9월 사이에 금강(충남 보령)유역에서 채집된 약 3,000개체의 눈우렁이 중 실험에 사용된 총 108개체의 크기(각고)는 2.0~6.1 cm 범위였으며, 약 4.5 cm를 중심으로 하는 bimodal patterns를 보였다(Fig. 2A). 또한 유기물 함량은 각 개체의 크기에 높은 상관성을 나타냈다(Fig. 2B, $r=0.89$, $p<0.0001$).

눈우렁이 크기에 따른 섭식능은 실험초기(1시간)에는 전체적으로 불안정한 반면, 시간이 경과함에 따라 점차

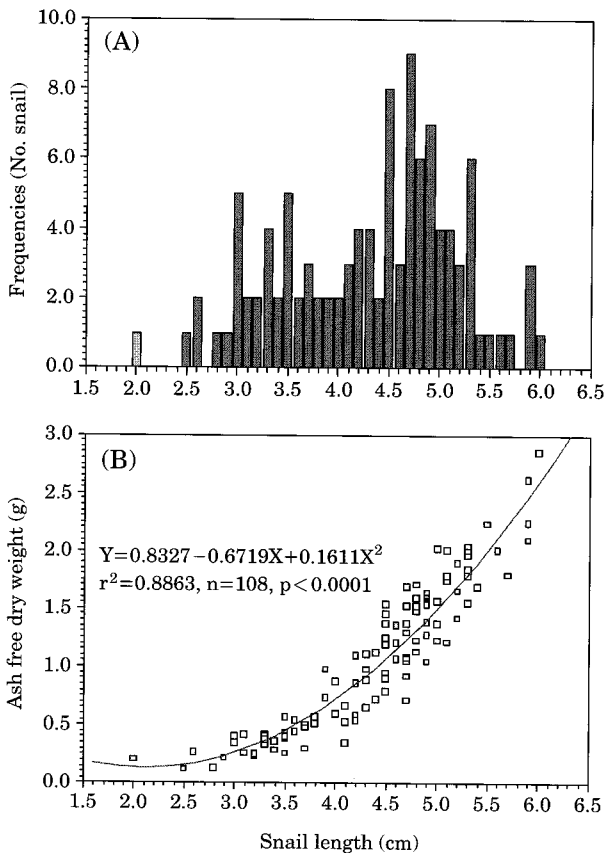


Fig. 2. Morphological parameters of Chinese mystery snail, *Cipangopaludina chinensis malleata* collected from the Geum river (Boryeong, Korea) from August 2006 to September 2006. (A) Normal distribution of snail, (B) Relationship between AFDW (Ash free dry weight) and height (cm).

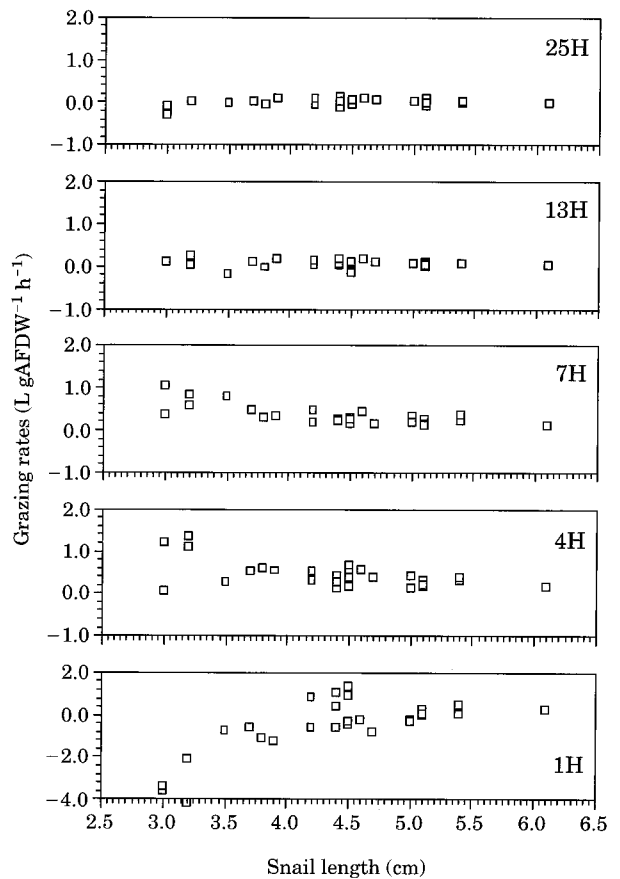


Fig. 3. Changes in grazing rates (GR) and pseudofaeces production (FPF) of freshwater snail *Cipangopaludina chinensis malleata* with the passage of feeding time.

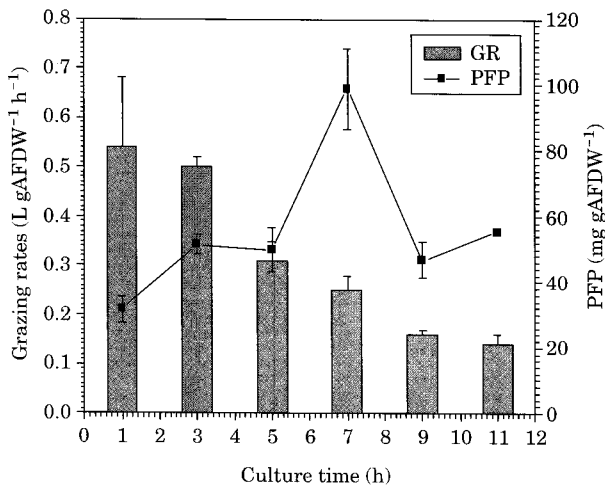


Fig. 4. Changes of grazing rate (GR) of freshwater snail *Cipangopaludina chinensis malleata* with different body size (cm).

안정되고 증가하다가 25시간째에는 다시 감소하는 패턴을 보였다 (Fig. 3). 또한 크기가 4.5 cm 이상 큰 우렁이일수록 실험시간에 상관없이 높고 안정된 섭식율을 보인 반면, (-0.79~1.35 L gAFDW⁻¹ h⁻¹), 4.5 cm 이하의 크기에서는 실험초기에 낮은 섭식율을 보였으나, 시간이 경과함에 따라 증가하였다 (-4.17~1.35 L gAFDW⁻¹ h⁻¹). 전체적으로 논우렁이는 크기에 상관없이 남조류 *Microcystis aeruginosa*가 우점하였던 현장수를 7시간째 최고의 섭식율을 보이다가 점차 감소하는 특징을 나타냈다.

2. 먹이농도에 따른 먹이섭식율 및 유기물 생산

먹이농도 (Chl-a)를 4단계로 조절하여 실험한 결과, 가장 낮은 먹이농도 (168.3 µg L⁻¹)에서 가장 높은 섭식율 (0.897 L gAFDW⁻¹ h⁻¹)을 나타냈으며, 가장 높은 먹이농도 (673.4 µg L⁻¹)에서 가장 낮은 섭식율 (0.357 L gAFDW⁻¹ h⁻¹)을 나타냈다 (Fig. 4). 한편, 유기물생산은 예상했던 대로 먹이농도에 비례하여 증가하였는데, 가장 높은 먹이농도 (673.4 µg L⁻¹)에서 가장 높은 유기물 (51.2 mg AFDW⁻¹)을 생산하였으며, 가장 낮은 먹이농도 (168.3 µg L⁻¹)에서 가장 낮은 유기물 (21.3 mg AFDW⁻¹)을 각각 생산하였다 (Fig. 4).

3. 시간에 따른 먹이섭식율 및 유기물 생산

비교적 크기가 큰 우렁이 (>4.5 cm)를 대상으로 시간별 먹이섭식율과 유기물 생산을 측정한 결과, 1시간째 최고섭식율 (0.538 L gAFDW⁻¹ h⁻¹)을 보였으며 점차적으로

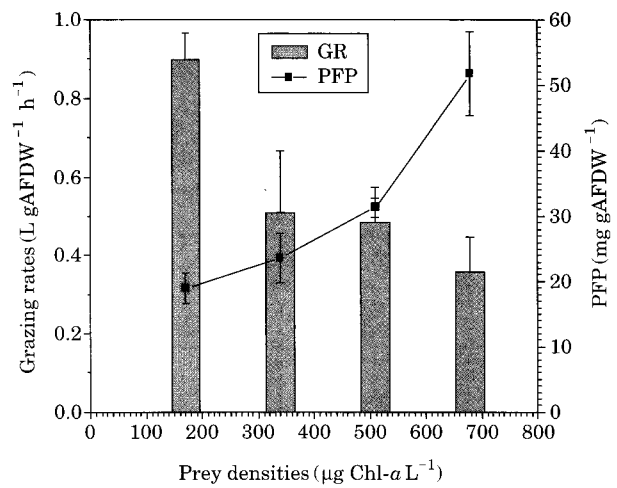


Fig. 5. Relationship between grazing rate (GR) and pseudofaeces productions (PFPs) of freshwater snail *Cipangopaludina chinensis malleata* at different densities.

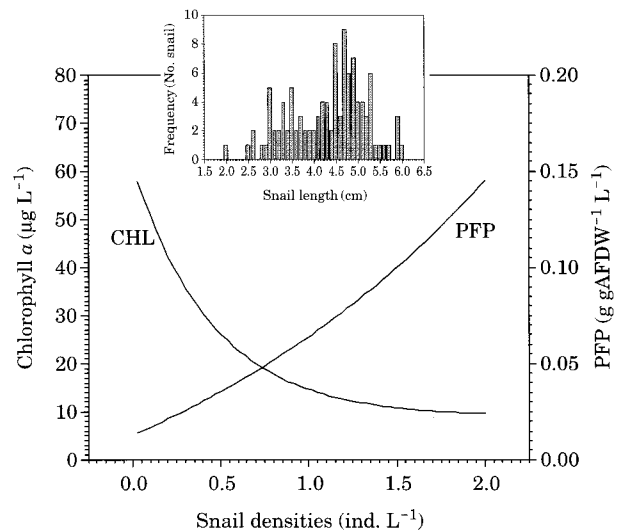


Fig. 6. Grazing rates (GRs) and pseudofaeces productions (PFPs) of freshwater snail *Cipangopaludina chinensis malleata* on different density of food quality, based on concentration of chlorophyll a (µg L⁻¹).

감소하여 11시간째 가장 낮은 섭식율 (0.175 L gAFDW⁻¹ h⁻¹)을 나타냈다. 유기물 생산은 7시간째 최고치 99.5 mg AFDW⁻¹를 보였으며, 평균 50.3 mg AFDW⁻¹의 수준을 보였다. 결과적으로 논우렁이는 투입 초반에 높은 섭식능을 보이며, 투입 후 7시간째 가장 많은 유기물을 생산하였다 (Fig. 5).

Table 2. Comparison of filtering and grazing rates of freshwater and marine filter-feeding bivalves.

Bivalves	FR L mussel ⁻¹ d ⁻¹	mL mgAFDW ⁻¹ h ⁻¹	Food source	References
<i>Dreissena polymorpha</i>	0.09~0.50	1.21~6.72	Meso-and eutrophic lake phytoplankton	Hwang, 1996
	0.19~0.96		Lake phytoplankton	Lewandowski and Stanczykowska, 1975
	0.48~2.4	4.0~41	Eutrophic lake phytoplankton Lab. Cultured phytoplankton	Reeders <i>et al.</i> , 1989 Fanslow <i>et al.</i> , 1995
<i>Diplodon chilensis</i>	2.4~24		Eutrophic lake phytoplankton	Soto and Mena, 1999
<i>Corbicula fluminea</i>	0.38~1.64		Suspended particles (NTU measurement)	Cohen <i>et al.</i> , 1984
<i>Corbicula leana</i>	1.58~7.80	0.74~3.05	Mesotrophic lake phytoplankton	Hwang <i>et al.</i> , 2004
	0.36~1.64	0.24~0.87	Hypertrophic lake phytoplankton	Hwang <i>et al.</i> , 2004
<i>Cardium edul</i>	1~72		Marine phytoplankton	Loo and Rosenberg, 1989
<i>Unio douglasiae</i>		0.07~0.80	<i>Microcystis</i> blooming water	Lee <i>et al.</i> , 2008
<i>Cipangopaludina chinensis malleata</i>		0.02~1.35	<i>Microcystis</i> blooming water	This study

4. 우렁이 밀도에 따른 조류제어 및 유기물 생산

논우렁이를 4단계 밀도로 투입한 후 조류제어 효과와 유기물 생산량을 각각 조사하였다. 예상했던 대로 투입된 우렁이의 밀도가 증가할수록 엽록소 *a*는 뚜렷하게 감소하였고, 유기물 생산량은 증가하였다 (Fig. 6). 그러나 우렁이밀도가 1.5 ind. L⁻¹ 이상에서는 조류제어 효과가 더 이상 큰 차이를 보이지 않은 반면, 유기물 생산량은 계속적으로 증가하였다.

고 찰

논우렁이를 이용하여 오염된 연못이나 하천의 수질정화에 사례는 이미 보고된 바 있으나 (Kehde, 1972; Osenberg, 1989; Weber and Lodge, 1990; Hahm and Son, 1995), 부영양호수나 저수지에서 군체를 형성하며 독소를 발생시키는 부유성 남조 (*Microcystis aeruginosa*) 제어에 관한 연구는 보고된 바 없다. 본 연구에서 논우렁이 (*Cipangopaludina chinensis malleata* Reeve)의 남조류 섭식능은 0.023~1.348 L gAFDW⁻¹ h⁻¹로서 부영양 저수지 식물플랑크톤을 대상으로 한 여과성 이매패 *Corbicula leana* (Kim *et al.*, 2004), *Unio douglasiae* (Lee *et al.*, 2008) 등과 거의 유사한 섭식능을 나타냈다 (Table 2). 특히 이들은 개체의 크기, 먹이농도 및 시간에 따라 섭식능의 차이가 뚜렷하였으며, 유기물 생산 역시 유사한 패턴을 보였다. 이러한 결과는 지금까지 오염된 연못이나 하천

바닥의 유기물 또는 부착조류만을 섭취하는 것으로 알려진 (Osenberg, 1989; Weber and lodge, 1990) 논우렁이의 새로운 섭식유형이며, 연구에서 논우렁이가 생산한 pseudofaeces가 동일한 조건에서 말조개 등 다른 패류가 생산한 것보다 더 오랫동안 형태를 유지하며 보다 효과적인 투명도 감소를 가져오는 것으로 나타났다. 따라서 부유성 남조 *M. aeruginosa*의 대발생 수역에 논우렁이의 적용이 새로운 생태공학적인 수질개선 기술로서 활용될 충분한 가치가 있다고 사료되었다.

논우렁이의 섭식능은 실험시간과 개체크기에 따라 뚜렷한 차이를 보였다 (Fig. 3). 특히 4.5 cm보다 작은 크기에서는 실험초기 (~1시간)에 곧바로 섭식활동을 하지 않고, 4시간 이후부터 서서히 증가하다가 7시간째 최고치를 보였으며, 다시 실험종료 (~25시간)까지 서서히 감소하였다. 이에 반해 4.5 cm 이상에서는 실험시간에 상관없이 증가하다가 7시간째를 경계로 감소하였다. 또한 크기가 작은 논우렁이는 성체보다 투입초기에는 낮은 섭식능을 보이지만 7시간째에는 성체보다 오히려 더 높은 섭식능을 일시적으로 나타냈다. 따라서 논우렁이는 전체적으로 투입 후 7시간까지 높은 섭식능을 보이다가 점차 감소하는 패턴을 보이며, 크기가 작은 미성숙한 개체일 경우 갑작스런 먹이에 대한 적응시간이 요구되는 것으로 사료되었다.

다양한 섭식실험에 투입한 논우렁이는 실험종료까지 25시간 동안 단 한 개체도 사망하지 않았다. 이는 남조류가 우점한 현장수를 대상으로 한 섭식실험에서 실험초기

에 높은 패사율을 보였던 *Corbicula* (Kim *et al.*, 2004), *Unio* (Lee *et al.*, 2008)와는 대조적인 결과로 한국산 논우렁이가 남조에 대한 높은 내성을 갖고 있음을 시사해 주고 있다. 일반적으로 수질개선을 위한 생물제재 적용시 암모니아와 인 등의 영양염 증가와 호흡에 의한 용존산소 감소 등은 이미 잘 알려진 사실이다 (Holland *et al.*, 1995; Fukushima *et al.*, 2000). 본 연구에서 동물투입후 수질변화(질소, 인)에 대한 연구는 이루어지지 않았으나 논우렁이의 경우, 실험초기에 활발하게 먹이를 섭취하여 체내 또는 체외에 축적한 다음 이를 서서히 소화하는 특징을 갖기 때문에 (Dawen *et al.*, 2006), 소화과정 동안 배설물이나 영양물질의 수증으로의 불가피한 배출이 이루어질 것으로 판단되며, 본 연구에서는 7시간째 이후부터 섭식율 감소가 일어났다. 만일 현장 수체에 적용할 경우, 배출된 영양물질에 의한 조류의 성장을 유도할 것으로 예상되기 때문에 이러한 부작용을 최소화하기 위하여 논우렁이는 대상 수체에 직접 장기간 적용하는 것보다 1) 메소코즘 크기나 모델생태계 실험을 거쳐 가장 적합한 생물제재 적용시간을 설정하여 가능하면 짧은 시간 내에 수확하여야 하고, 2) 운동성이 좋은 논우렁이의 원활한 수확을 위해 담체 (carrier)나 매질 (matrix)을 동시에 이용할 필요가 있다고 판단되었다.

논우렁이는 먹이농도가 높은 것보다 낮은 조건에서 보다 높은 섭식율을 보였으며, 일정한 밀도 이상에서는 조류밀도가 더 이상 감소하지 않았다. 이러한 현상은 부영양수계 보다는 식물플랑크톤 밀도가 낮은 영양상태의 수체에서 높은 여과율이 보였던 다른 패류 연구에서는 흔히 관찰되는 결과이며 (Sprung and Rose, 1988; Reeders and Bij de Vaate, 1990; Bontes *et al.*, 2007), 섭식율과 마찬가지로 배설물의 생산은 먹이농도에 비례하여 증가하였다. 조류제어를 위한 논우렁이의 적용시기는 최대섭식율 (조류밀도가 매우 낮은) 또는 최대유기물생산량 (조류밀도가 매우 높은) 시기보다는 조류발생 초기, 수온감소 등으로 인하여 조류성장이 느리거나 밀도가 감소한 대발생 후기가 적합할 것으로 사료되었다. 뿐만 아니라 어느 정도 이상의 우렁이 밀도 (1.5 ind. L⁻¹)에서는 밀도 증가에 따른 조류제어효과가 보이지 않았는데, 이는 먹이감소, pH, 제한된 먹이에 대한 경쟁 등 다양한 원인이 보고되고 있다 (Lassen, 1975; Young, 1975; Brown, 1979, 1997; Servos *et al.*, 1985; Jokinen, 1987; Lodge *et al.*, 1987; Kershner and Lodge, 1990; Bendell and McNicol, 1993). 따라서 논우렁이를 이용한 부영양호수의 조류제어는 섭식율과 유기물 생산을 고려할 수 있는 조류밀도, 그리고 여기에 부합되는 개체수의 투입에 의해 그 효과를 예측할 수 있을

것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 국내산 논우렁이를 이용하여 남조류 *Microcystis aeruginosa*에 대한 섭식율 (grazing rate, GR) 및 배설물 생산 (pseudofaeces production)을 분석하였다. 섭식 효과를 확인하기 위해 다양한 시간, 개체크기, 개체밀도, 먹이농도 조건 하에서 실험하였다. 모든 실험은 3반복 되었으며 실험수는 매년 *M. aeruginosa*가 빈번하게 발생하는 일감호(서울소재)의 현장수를 이용하였다. 실험 결과, 논우렁이는 투입 후 1시간 후에 0.538 L gAFDW⁻¹ h⁻¹의 최고 GR를 보이다가 7시간을 경계로 서서히 감소하였으며 유기물 생산량은 7시간 후에 50.30 mg AFDW⁻¹로 가장 많은 양을 나타냈다. 서로 다른 크기조건에서 각 고가 4.5 cm 미만인 동물의 여과율 수치의 변화가 크고 13시간 후에 비슷한 수치가 나타나는 반면, 4.5 cm 이상인 것은 FR의 변화폭이 -0.789~1.348 L gAFDW⁻¹ h⁻¹로 비교적 좁고 4시간 이후부터 크기의 증가에 상관없이 유사한 수치가 반복되었다. 밀도는 1.5 ind. L⁻¹에서 9.7 µg L⁻¹로 가장 낮은 엽록소 *a* 농도를 나타냈으며 그 이상에서는 밀도의 증가에 상응하는 섭식능의 효과를 나타내지 않았으며 밀도가 커짐에 따라 PFPs도 증가하였다. 먹이농도는 원수의 엽록소 *a* 농도가 168.3 µg L⁻¹로 낮을 때 0.897 L gAFDW⁻¹ h⁻¹의 가장 높은 여과율을 보인 반면 PFPs는 673 µg L⁻¹의 높은 원수 농도에서 25.85 mg AFDW⁻¹를 나타내 먹이농도와 비례하는 결과를 보였다. 따라서, 국내산 논우렁이는 수표면에 부유하는 유해조류 제어에 효과적일 것으로 판단되며, 현장에서의 적용방법 및 생태계에서의 작용에 관한 후속 연구가 요구된다.

사 사

본 연구는 농림부 핵심 전략 연구과제 “생물조절(먹이연쇄)을 통한 농업용저수지 수질관리 기법개발” (306009-03-2-CG000)에 의해 수행되었음.

인 용 문 헌

- 권오길. 1993. 원색한국패류도감. 아카데미서적. p. 6.
 권오길, 조동현, 박갑만, 이준상. 1985. 북한강 담수산 패류의 분포상에 관한 연구. 한국패류학회지 1: 1-4.

- 김종배, 박일웅. 1987. 논우렁이의 영양학적 성분에 관한 연구. *군산대 수산과학연구소* **21**: 37-47.
- 김호섭, 박정환, 공동수, 황순진. 2004. 참재첩을 이용한 부영양호의 수질개선. *육수지* **97**: 332-343.
- 박갑만, 정영현, 김재진, 정평림. 1997. 한국산 논우렁이와 큰논우렁이의 28S rDNA 유전자 염기서열 분석. *한국패류학회지* **13**: 91-96.
- 이연주, 김백호, 김난영, 엄한용, 황순진. 2008. 수온, 먹이농도, 패각 크기가 *Microcystis aeruginosa*에 대한 말조개의 여과율 및 배설물 생산에 미치는 영향. *한국하천호수학회지* **41** (Special issue): 61-67.
- 최희진. 2004. 남조 *Microcystis aeruginosa*를 분해하는 살조세균의 분리 동정 및 특성. *한양대 석사학위논문*.
- 함규황, 손성원. 1995. 주남저수지의 저토질과 논우렁이의 (*Cipangopaludina chinensis malleata*) 생체조직내 중금속 함량의 분석. *경남대학교 환경문제연구소. 환경연구*, **17**: 5-17.
- Ahlstedt, S.A. 1994. Invasion and impacts of the zebra mussel in the United States. *Journal of Shellfish Research* **13**: 330.
- Bendell, B.E. and D.K. McNicol. 1993. Gastropods from small northeastern Ontario lakes: their value as indicators of acidification. *Canadian Field-Naturalist* **107**: 267-272.
- Bontes, B.M., A.M. Verschoor, L.M.D. Pires, E. Van Donk and Bas W. Ibelings. 2007. Functional response of *Anodonta anatine* feeding on a green algae and four strains of cyanobacteria, differing in shape, size and toxicity. *Hydrobiologia* **584**: 191-204.
- Brown, K.M. 1979. The adaptive demography of four freshwater pulmonate snails. *Evolution* **33**(1): 417-432.
- Carpenter, S.R., J.F. Kitchell and J.R. Hodgson. 1985. Cascading trophic interactions and lake productivity. *Bioscience* **35**: 634-639.
- Clench, W.J. and S.L.H. Fuller. 1965. The genus *Viviparus* (Viviparidae) in North America. *Occasional Papers on Mollusks* **2**: 385-412.
- Dawen, Z., X. Ping, L. Yaqin and L. Gaodao. 2006. Bioaccumulation of the hepatotoxic microcystins in various organs of a freshwater snail from a subtropical Chinese lake, Taihu Lake, with dense toxic *microcystis* blooms. *Environmental Toxicology and Chemistry* **26**: 171-176.
- Dionisio Pires, L.M., B.M. Bontes, E. Van Donk and B.W. Ibelings. 2005. Grazing on colonial and filamentous, toxic and non-toxic cyanobacteria by the zebra mussel *Dreissena polymorpha*. *Journal of Plankton Research* **27**: 331-339.
- Enserink, M. 1999. Biological invaders sweep in. *Science* **285**: 1834-1836.
- Fanslow, D.L., T.F. Naleph and G.A. Lang. 1995. Filtration rates of the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) on natural seston from Saginaw Bay, Lake Huron. *J. Great Lakes. Res.* **21**: 486-500.
- Fukushima, M., N. Takamura, B.H. Kim, M. Nakagawa, L. Sun and Y. Zheng. 2000. The responses of an aquatic ecosystem to the manipulation of the filter-feeding silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*). *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **27**: 1-7.
- Heath, R.T., G.L. Fahnenstiel, W.S. Gardner, J.F. Cavalletto and S.J. Hwang. 1995. Ecosystem-level effects of zebra mussel (*Dreissena polymorpha*): An enclosure experiment in Saginaw Bay, Lake Huron. *J. Great Lakes Res.* **21**: 501-516.
- Hill, B.H. 1986. The role of aquatic macrophytes in nutrient flow regulation in lotic ecosystems. *American Society for testing and materials*. Philadelphia. pp. 157-167.
- Holland, R.E., T.H. Johengen and A.M. Beeton. 1995. Trends in nutrient concentration in Hatchery Bay, western Lake Erie, before and after *Dreissena polymorpha*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **52**: 1202-1209.
- Hwang, S.-J. 1996. Effects of zebra mussel (*Dreissena polymorpha*): on phytoplankton and bacterioplankton: Evidence for size-selective grazing. *Korean Journal of Limnology* **29**: 363-378.
- Hwang, S.-J., H.-S. Kim, J.-K. Shin, J.-M. Oh and D.-S. Kong. 2004. Grazing effects of a freshwater bivalve (*Corbicula leana* PRIME) and large zooplankton on Phytoplankton communities in two Korean lakes. *Hydrobiologia* **515**: 161-179.
- Ibelings, B.W., M. Vonk, F.J. Los, D.T. van der Molen and W.M. Mooij. 2003. Fuzzy modeling of cyanobacterial surface waterblooms, validation with 12 years of NOAA-AVHRR satellite images. *Ecological Applications* **13**: 1456-1472.
- Jack, J.D. and J.H. Thorp. 2000. Effects of the benthos suspension feeder *Dreissena polymorpha* on zooplankton on a large river. *Freshwater Biol.* **44**: 569-579.
- Jokinen, E.H. 1987. Structure of freshwater snail communities: species-area relationship and incidence categories. *American Malacological Bulletin* **5**: 9-19.
- Kehde, P.M. and J.L. Wilhm. 1972. The effects of grazing by snails on community structure of periphyton in laboratory streams. *American Midland Naturalist* **87**: 2-24.
- Kershner, M.W. and D.M. Lodge. 1990. Effect of substrate architecture on aquatic gastropod-substrate association. *Journal of the North American Benthological Society* **9**: 319-326.

- Lampert, W., W. Flecker, H. Rai and B.E. Taylor. 1986. Phytoplankton control by grazing zooplankton: A study on the spring clear-water phase. *Limnol. Oceanogr.* **31**: 478-490.
- Lassen, H.H. 1975. The diversity of freshwater snails in view of the equilibrium theory of island biogeography. *Oecologia* **19**: 1-8.
- Lavrentyev, P.J., W.S. Gardner, J.F. Cavaletto and C. Beaver. 1995. Effect of zebra mussel on protozoa and phytoplankton from Saginaw Bay, Lake Huron. *J. Great Lakes Res.* **21**: 545-557.
- Lodge, D.M., K.M. Brown, S.P. Klosiewski, R.A. Stein, A.P. Covich, B.K. Leathers and C. Bronmark. 1987. Distribution of freshwater snails: spatial scale and the relative importance of physicochemical and biotic factors. *American Malacological Bulletin* **5**: 73-84.
- Loo, L.-O. and R. Rosenberg. 1989. Bivalve suspension-feeding dynamics and benthic-pelagic coupling in a eutrophicated marin bay. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **130**: 253-276.
- Maclsaac, H.J. and J.H. Sprules. 1991. Ingestion of small-bodied zooplankton by zebra mussels (*Dreissena polymorpha*): Can cannibalism on larvae influence population dynamics?. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **48**: 2051-2059.
- Manage, P.M., Z. Kawabata and S. Nakano. 1999. Seasonal changes in densities of cyanophage infectious to *Microcystis aeruginosa* in hypereutrophic pond. *Hydrobiologia* **411**: 211-216.
- Nalepa, T.F. and D.W. Schloesser (eds.). 1993. Zebra mussels: Biology, impacts, and control. CRC Press, Boca Raton, p. 810.
- Noordhuis, R., H. Reeders and A. Bij De Vaate. 1992. Filtration rate and pseudofaeces in zebra mussel and their application in water quality management. p. 262. In: Neuman, D. and H.A. Jenner the zebra mussel *Dreissena polymorpha*, Ecology, Biological monitoring and first application in the water quality management (eds.). Gustav Fischer, New York.
- Osenberg, C.W. 1989. Resource limitation, competition and the influence of life history in a freshwater snail community. *Oecologia* **79**: 512-519.
- Reeders, H.H., A. Bij de Vaate and F.J. Slim. 1989. The filtration rate of *Dreissena polymorpha* (Bivalvia) in three Dutch lakes with reference to biological water quality management. *Freshwater Biol.* **22**: 133-141.
- Reeders, H.H. and A. Bij de vaate. 1990. Zebra mussel (*Dreissena polymorpha*): a new perspective for water quality management. *Hydrobiologia* **200/201**: 437-450.
- Scheller, J.L. 1997. The effect of dieoffs of asiatic clams (*Corbicula fluminea*) on native freshwater mussel (Unionidae). Thesis for Ph.D. Virginia Polytechnic institute and State University, Blacksburg, VA. pp. 34-38.
- Servos, M.R., J.B. Rooke and G.L. Mackie. 1985. Reproduction of selected Mollusca in some low alkalinity lakes in south-central Ontario. *Canadian Journal of Zoology* **63**(3): 511-515.
- Sigeo, D.C., R. Glenn, M.J. Andrews, E.G. Bellinger, R.D. Butler, H.A.S. Epton and R.D. Hendry. 1999. Biological control of cyanobacteria: principles and possibilities. *Hydrobiologia* **395/396**: 161-172.
- Soto, D. and G. Mena. 1999. Filter feeding by the freshwater mussel, *Diplodon chilensis*, as a bicontrol of salmon farming eutrophication. *Aquaculture* **171**: 65-81.
- Sprung, M. and U. Rose. 1988. Influence of food size and food quality of the feeding of the mussel *Dreissena polymorpha*. *Oecologia* **77**: 526-532.
- Stanczykowska, A. and K. Lewandowski. 1975. The occurrence and role of bivalves of the family Unionidae in Mikolajskie Lake. *Ekologia Polska*, **23**: 317-334.
- Strayer, D.L., L.C. Smith and D.C. Hunter. 1998. Effect of the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) invasion on the macrobenthos of the freshwater tidal Hudson River. *Can. J. Zoo.* **76**: 419-425.
- Weber, L.M. and D.M. Lodge. 1990. Periphytic food and predatory crayfish: relative roles in determining snail distribution. *Oecologia* **82**: 33-39.
- Wu, Z., P. Deng, X. Wu, S. Luo and Y. Gao. 2007. Allelopathic effects of the submerged macrophyte *Potamogeton malaiianus* on *Scenedesmus obliquus*. *Hydrobiologia* **591**(1): 465-474.
- Xian, Q., H. Chen, H. Zou and D. Yin. 2007. Allelopathic activity and nutrient competition between *Ceratophyllum demersum* and *Microcystis aeruginosa*. *Allelopathy* **19**: 227-232.
- Yamamuro, M. and I. Koike. 1993. Nitrogen metabolism of the filter-feeding bivalve *Corbicula japonica* and its significance in primary production of a brackish lake in Japan. *Limnol. Oceanogr.* **38**: 997-1007.
- Young, J.O. 1975. Preliminary field and laboratory studies on the survival and spawning of several species of Gastropoda in calcium-poor and calcium-rich waters. *Proceedings of the Malacological Society of London (England)* **41**(5): 429-437.