

저온기 부영양 수계의 구조발생에 대한 한국산 논우렁이의 섭식특성

유 영 훈 · 김 백 호 · 황 순 진*

(건국대학교 생명환경과학대학 환경과학과)

Grazing Characteristics of Native Snail *Cipangopaludina chinensis malleata* on the Hibernial Diatom Bloom in Eutrophic Lake and Stream. Yoo, Young-Hun, Baik-Ho Kim and Soon-Jin Hwang* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

Grazing rate (GR) and feces production (FP) of freshwater snail *Cipangopaludina chinensis malleata* on two hibernial diatom communities were examined in a laboratory. Snail with the similar size (4.2~5.8 cm) were collected from the Gunsan and Okgu district (Jeonbuk), transferred to the artificial management system in laboratory, and starved for 3 day before the experiment. The feeding experiments were conducted at various conditions such as passage of time (0, 1, 4 and 7 hr), snail density (0.0, 0.5, 1.0, 2.0 and 4.0 ind. L⁻¹) and kinds of prey (cold lake and stream water). One prey used in this study is the water of Lake Ilgam, the other is that of Han river. Lake Ilgam water was dominated by *Synedra ulna* (69.1%) and *Scenedesmus* sp. (6.6%), while Han river was by *Asterionella formosa* (69.4%) and *Diatoma vulgare* (27.7%). With the increment of snail density and time, the Chl-*a* concentration of two experimental waters were clearly decreased. Chl-*a* of Han river rapidly was decreased after 1 hour of snail treatment, while that of Ilgam lake was decreased after 4 hour. On the passage of time, a highest GR (1.94 L g⁻¹ h⁻¹) showed at 1 hr, and then, decreased gradually to 0.04 L g⁻¹ h⁻¹ by 7 hr. The highest FP (0.11 mg L⁻¹) showed at 7 hr. These results indicate that native snail *Cipangopaludina chinensis malleata* may be applied as a potential bio-filter to control diatom blooms in the cold lake and stream.

Key words : freshwater snail, *Cipangopaludina chinensis malleata*, hibernial diatom blooms, grazing characteristics, feces production

서 론

수계의 부영양화는 물의 효율적 이용과 생태계의 건강성을 저해하는 조류의 비정상적인 대발생을 초래한다. 또한 조류의 대발생은 저층의 산소고갈과 저서생물을 고사시키며 독성물질을 용출시켜 용수로서의 기능을 상실하게 한다(이 등, 2003). 소형 저수지인 일감호는 1975년

이후부터 유입되는 영양염에 대하여 관리가 이루어지고 있으나, 유기물과 영양염을 다량 함유한 퇴적층으로 인해 고온기마다 남조류(*Microcystis aeruginosa*)가 우점하는 등의 부영양화의 특징을 가지고 있다(황 등, 2008). 한강의 중·하류 또한 생활하수 및 비점오염원으로 부영양화된 팔당호의 영향을 크게 받고 있다. 또한, 하천수로 내수중보, 교각 등 시설물의 증가로 정체수역이 많아지고 있으며 바닥에 쌓인 유기물로 인한 악취와 미관상 좋지

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

못한 조류가 대번성하여 문제시 되고 있다(서울시, 1998; 서울시정개발연구원, 1998). 이러한 문제는 수온이 높은 여름뿐만 아니라 봄, 가을 및 겨울 등 수온이 낮은 시기에서도 나타나고 있으며, 온난화로 인한 평균 기온 상승으로 악취를 유발시키는 박테리아 등의 활성화와 조류대발생이 증가하여 인근 주민의 건강한 생활과 환경에 악영향을 주고 있다(Penalozza *et al.*, 1990; Toranzo *et al.*, 1990; Rodger *et al.*, 1994). 이런 부영양화와 평균 기온상승은 식물성플랑크톤을 급격히 성장시키며, 고온기에는 남조류가, 저온기에는 규조류가 우점하는 만성적인 담수적조현상을 일으킨다. 그 중 저온기의 규조류는 수체내 번성하여 비릿한 냄새와 함께 갈색의 수화현상을 일으키고 정수장내 침전지와 여과막을 폐색하는 등 경제적인 손실을 유발한다. 최근 저온기 조류를 제어하는 데 있어, 여러 단점을 가진 물리적 및 화학적 방법보다 이를 보완할 수 있는 생물을 사용한 친환경적 방법의 조류제어법에 대한 관심이 고조되고 있다(Lampert *et al.*, 1986; Jack and Throp, 2000; 최, 2004; Xian *et al.*, 2007).

담수에서 서식하는 복족강과 이매패강 생물은 미세 박테리아로부터 동물플랑크톤에 이르기까지 다양한 크기의 생물 및 무생물 입자들을 섭식한다(Dame *et al.*, 1985; Vaughn and Hakenkamp, 2001). 또한 패류의 섭식과정에서 생성된 체외 부산물은 다시 조류군집의 성장에 이용될 수 있는 것으로 알려져 있다(Dame, 1996; Christian and Berg, 2000; Davis *et al.*, 2000). 최근 들어, 이런 수중 생물이 가진 조류제어 능력을 수질개선에 이용하고자 하는 관심이 높아지고 있으나(Noordhius *et al.*, 1992; Hwang *et al.*, 2001), 실제 현장에 적용한 연구사례는 매우 빈약하다. 국내 생물의 생태 및 서식특성에 대한 선행연구는 이매패와 관련된 연구(Hwang *et al.*, 2001, 2004; 황 등, 2002; 김 등, 2004; 박, 2004)가 있을 뿐이다.

논우렁이는 전국 전역에 분포한다. 또한 각종 오염에 대한 내성이 강하고(권 등, 1985), 남조류(*Microcystis aeruginosa*)에 높은 여과율을 보이며 수질개선에 대해 가능성이 제시되어 왔다(황 등, 2008). 하지만 아직까지 저온기에 우점하는 규조류에 대한 실험은 보고된 바 없으며 관련된 생태, 생리학적인 연구 또한 빈약하다.

본 연구는 부영양 수계 저수지 및 하천에서 수중의 생물량 조절이 가능한 섭식 생물을 사용하여 수체내 조류나 영양염을 제어하는 수질개선 연구의 일환으로 저온기 동안 규조류가 번성하였던 일감호와 한강 현장수에 대해 논우렁이의 조류 섭식특성-섭식율(GR, grazing rate)과 배설물 생산(FP, feces production)을 각각 조사하였다.

재료 및 방법

1. 일감호와 한강의 개황

본 연구의 대상 수역인 일감호와 한강은 매년 과도한 영양염으로 인해 계절에 상관없이 조류가 대발생하고 있다. 일감호는 건국대학교에 위치한 인공호수로 수표면적은 약 55,661 m²이며 최대 수심이 2.0 m 정도이다. 수량은 지하수와 생활용수에 의해 유지되며, 매년 11월 말부터 이듬해 2월 중순까지 결빙기를 갖는다(김 등, 2003). 한강은 남한강, 북한강이 팔당호에서 만나 합류하고, 서울시 중심을 관통하며 서해안으로 유입되는 유로연장 469.7 km, 유역면적 26,219 km²인 국내 대형하천 중 하나이다. 고온기인 여름철에는 집중되는 강우와 팔당댐의 방류로 인해 빠른 수체 이동이 이루어지고 있으며, 저온기에는 상대적으로 느린 유속으로 부분적인 정체수역이 발생한다(김 등, 2007).

2. 논우렁이 채집 및 관리

본 연구에 사용한 논우렁이는 2007년 8월 27일, 2007년 11월 16, 17일 사이에 금강수계 중 충청북도 보령과 전라북도 옥구의 농수로 또는 소형 못의 진흙 바닥에서 총 308개체를 손으로 채집하였다. 채집한 논우렁이는 곧바로 아이스 박스에 넣어 실험실로 옮긴 다음, 탈염시킨

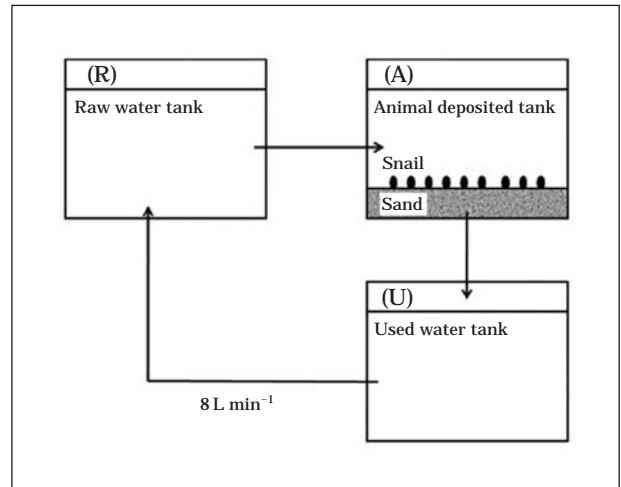


Fig. 1. Artificial snail management system used in this study (R: Raw water tank; A: Animal deposited tank; U: used water tank). Each arrow in the direction of water flow.

수돗물로 2~3회 세척한 후, 본 연구팀에서 제작한 순응 수조에서 유지하였다.

순응 수조는 크게 원수 탱크(R), 배양수 탱크(A), 사용수 탱크(U) 등 3단계로 나누었으며, (R)-(A)-(U) 순서대로 실험수가 순환하도록 시스템화 하였다(Fig. 1). 사용수 탱크의 유지수는 소형 전기펌프(UP-400, 협신펌프, 한국)를 이용하여, 3개의 탱크에 8 L min^{-1} 의 유속으로 순환하도록 조절하였다.

탱크는 생물의 순응이 쉽도록 채집장소와 유사하게 조성하였다. 사용수 탱크(U)의 유지수가 일정한 유속(8 L min^{-1})으로 원수탱크(R)에 흐르고 연속적으로 배양수 탱크(A)로 흐르도록 고안되었으며, 배양수 탱크(A)는 경안천에서 공급 받은 모래를 탈염수로 세척한 후 논우렁이가 서식할 수 있는 환경을 제공하였다. 모든 탱크는 항온기로 $8 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 수온을 유지시켰다. 유지수는 기본적으로 탈염한 수돗물에 규조류 대발생을 일으킨 일감호(서울) 또는 한강(떡섬부근)의 현장수를 유지수의 20%로 첨가하였다. 수조에서 미미하게 증발된 물의 손실은 탈염한 수돗물로 보충하였으며, 1개월을 주기로 수조와 모래를 세척하였다. 논우렁이의 먹이로는 규조류 대발생이 일어난 현장수를 1주일에 한번씩 보충해 주었으며, 실험 3일 전부터는 건강하고 크기가 유사한 개체를 선별하여 먹이 공급을 중단하였다.

3. 패류의 건중량

논우렁이의 유기물 함량(ash free dry weight, AFDW, g)을 측정하기 위해 각고가 다양한 논우렁이(2.5~7.0 cm, n=108)를 선별하였다. 일반적으로 논우렁 패각의 각정에서 저순까지의 길이를 각고(Height, H)라고 한다(권등, 1993).

논우렁이는 껍질을 제거한 후 미리 무게가 측정된 도가니에 넣어 100°C dry oven에서 48시간 동안 건조시킨 후 500°C furnace (HY-8000S, YUYU SCIENTIFIC)에서 30분간 태웠으며, 전·후의 무게 차이로써 유기물 함량을 구하였다. 실험에 직접 사용된 패류의 건중량은 예비실험에서 측정된 패류의 각고 길이와 유기물 양 간의 관계식(regression function)을 이용하여 추정하였다($\text{AFDW} = 0.83274 - 0.67192X + 0.1611X^2$, $r^2 = 0.8863$, $n = 108$, $p < 0.0001$) (Fig. 2).

4. 조류 현존량 및 엽록소 a

매 시간 채수한 시료 10 mL을 Whirl-Pak bags에 담아 Lugol's solution (최종 농도 2%)으로 고정하였다. 고정한

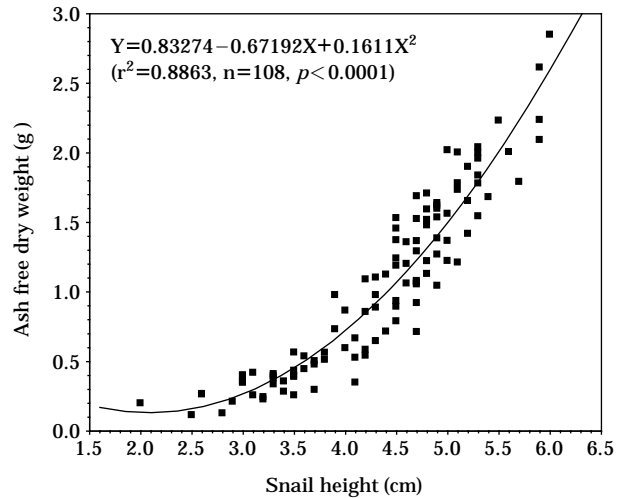


Fig. 2. Relationship between ash free dry weight (g) and body height (cm) of *Cipangopaludina chinensis malleata* collected from Gunsan and Okgu district, Korea.

식물플랑크톤은 Sedgwick-Rafter 계수판을 이용하여 400배의 광학현미경(Axiovert 40CFL, Zeiss, Germany)에서 중 동정 및 계수하였다.

엽록소 a는 Standard Methods (APHA, 1995)의 방법을 따라 채취한 시료를 잘 혼합하여 GF/F (Whatman Inc. England) 여과지로 여과하였다. 그리고 여과지에 90% 아세톤을 첨가하여, 24시간 동안 냉암소에서 보관하여 색소를 추출한 뒤 20분 동안 원심분리 후 상등액을 취한 다음 흡광광도계(Otpizen 2120UV, MECASYS, Korea)를 이용하여 측정 및 산정하였다. 산정식은 다음과 같다(APHA, 1995).

엽록소 a ($\mu\text{g L}^{-1}$) = $Y \times$ 상등액량(L)/여과한 시료의 양(L)

$$Y = 11.64X^1 - 2.16X^2 + 0.10X^3$$

$$X^1 = \text{흡광도}(663 \text{ nm}) - \text{흡광도}(750 \text{ nm})$$

$$X^2 = \text{흡광도}(645 \text{ nm}) - \text{흡광도}(750 \text{ nm})$$

$$X^3 = \text{흡광도}(630 \text{ nm}) - \text{흡광도}(750 \text{ nm})$$

5. 여과율 및 배설물 생산

논우렁이의 섭식율(GR)은 일정 시간 동안 논우렁이에 의해 섭식된 조류 농도를 엽록소 a의 변화를 토대로 계산하였다.

$$\text{GR} (\text{L g}^{-1} \text{ h}^{-1}) = V \times [\ln(\text{Ti}/\text{Tt}) - \ln(\text{Ci}/\text{Ct})] / \text{B}/\Delta t$$

여기서, V는 원수의 부피, Ci와 Ct는 대조구의 초기와 처리시간(t)에서의 엽록소 a 농도, Ti와 Tt는 처리구의

Table 1. Hydrological characteristics of experimental water used in this study.

Contents	Lake Ilgam	Han river
Sampling date	January 15, 2008, AM 10:00	January 15, 2008, AM 11:00
Temperature (°C)	4.6	2.6
Conductivity (ms cm ⁻¹)	314.6	108.2
Dissolved oxygen (mg L ⁻¹)	11.5	16.7
pH	8.1	8.7
Turbidity (NTU)	6.8	2.8
Chl- <i>a</i> (µg L ⁻¹)	26	47
Cell density (cells mL ⁻¹)	22,300	16,460
Dominant species	<i>Synedra ulna</i> (69.1%) <i>Scenedesmus</i> sp. (6.6%)	<i>Asterionella formosa</i> (69.4%) <i>Diatoma vulgare</i> (27.7%)

초기와 처리시간 (t)에서의 엽록소 *a* 농도 (µg L⁻¹), B는 논우렁이 건중량 (g), Δt는 처리시간 (h)이다.

실험기간 동안 논우렁이에 의해 생성된 배설물량 FP는 실험을 종료한 7시간째에 수조의 바닥층에 생성된 유기물 덩어리를 60 µm mesh로 여과한 다음, 여과물을 GF/F (Whatman Inc., England) 여과지로 여과하여 SS (Suspended solid)를 측정하였다. 실험시간 동안 논우렁이의 FP는 다음과 같은 식에 계산하였다.

$$FP (mgDW g^{-1} h^{-1}) = (St - Sc) / B / \Delta t$$

여기서 St와 Sc는 처리구와 대조구에서 처리시간 동안 발생한 SS농도 (mg L⁻¹), B는 논우렁이 무게 (g), Δt는 처리시간 (h)이다.

6. 논우렁이의 섭식 실험

본 실험은 서로 다른 두 수계인 일감호, 한강 현장수와 논우렁이 밀도, 시간에 차이를 두고 논우렁이의 저온기 규조류 섭식능을 측정하여 GR, FP를 각각 산출하였다. 실험에 사용한 실험수는 2008년 1월 15일에 채수한 일감호(서울)와 한강(떡섬부근)의 현장수를 사용하였으며, 수질특성을 측정하기 위해 일감호와 한강 현장에서 사용 직전에 보정한 다항목 수질 측정기 (YSI 6920, MDS., USA)를 사용하였다. 대상항목으로는 실험수의 수온, 용존산소, 전기전도도, pH, 탁도 등이 있다. 논우렁이 섭식 실험조건으로는 수온 15 ± 1.0°C, 광도 55 µmol m⁻² s⁻¹를 유지하였으며, 실험에서는 일감호와 한강의 현장수를 채수한 후 500 µm Mesh로 거른 다음 두 실험수의 온도가 안정화되었을 때 실험을 시작하였다. 수조는 3 L 부피 (가로 23 × 세로 12 × 높이 13 cm)의 아크릴로 이루어져 있으며, 여기에 각각 현장수를 2 L씩 담고, 논우렁이 밀도는 0, 0.5, 1, 2 및 4 ind. L⁻¹로 실험을 실시하였다. 시료 채취는 모든 실험에서 동일하게 실시하였는데, 실험시작 후

0, 1, 4 및 7시간에 표층으로부터 3 cm 아래층에서 피펫으로 최대한 교란이 일어나지 않도록 실험수를 채수하였다. 시료는 각각 시간마다 일정량 채취하여 밀도분석과 엽록소 *a* 분석에 사용하였으며, 대조구 및 실험구는 모두 3회씩 반복하여 실험하였다.

7. 자료분석

대조군과 패류가 처리된 수조 내 평균 엽록소 *a* 양의 차이를 비교하기 위하여 ANOVA 분석을 실시하였으며, 자료분석은 SPSS (ver. 12.0 Korea) 소프트웨어를 이용하였고, 통계적 유의수준은 *p* < 0.05를 기준으로 하였다.

결 과

1. 현장수의 수질 및 식물플랑크톤

2008년 1월 15일 오전 11시 일감호의 현장수의 수온 4.6°C이고, 한강의 현장수는 2.6°C였다. 또한 일감호의 전기전도도는 314.6 ms cm⁻¹으로 한강의 108.2 ms cm⁻¹보다 약 3배 가량 더 높았다. 일감호의 용존산소는 11.5 mg L⁻¹으로 한강의 16.7 mg L⁻¹보다 5.2 mg L⁻¹ 정도 낮았다. 일감호의 탁도는 6.8 NTU, 한강의 탁도는 2.8 NTU였다. 두 현장수에서 측정된 엽록소 *a*의 농도는 일감호에서 26 µg L⁻¹, 한강에서는 47 µg L⁻¹로 한강의 현장수에서 더 높게 측정되었으나, 조류 밀도분석으로는 일감호에서 22,300 cell mL⁻¹, 한강에서는 16,460 cell mL⁻¹로 일감호 현장수가 한강보다 약 26% 많았다 (Table 1).

일감호의 현장수에서 우점종은 *Synedra ulna*가 69.1%를 차지하였고, 아우점종은 *Scenedesmus* sp.가 6.6%로 나타났다. 한강의 현장수에서는 *Asterionella formosa*가 69.4%로 우점하였고, 아우점종은 *Diatoma vulgare*로 27.7%였다 (Table 1).

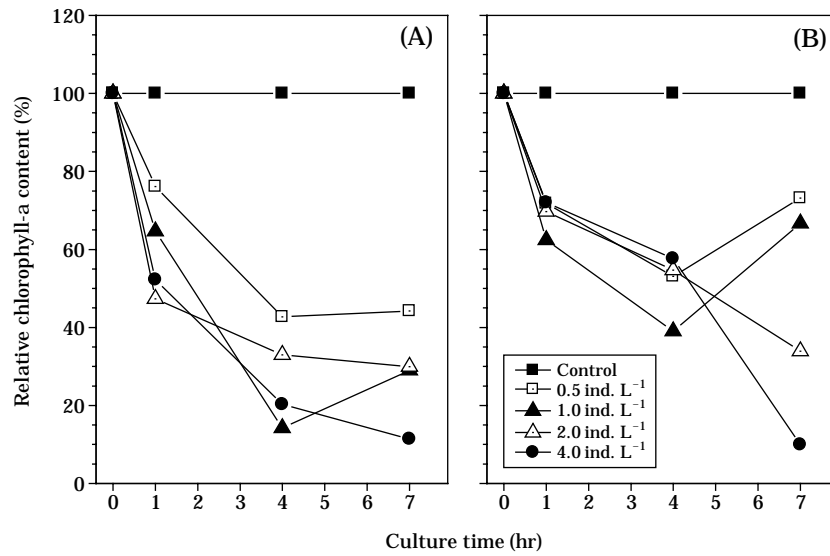


Fig. 3. Variation of chlorophyll *a* in the presence of *Cipangopaludina chinensis malleata* at different densities (A: Lake Ilgam, B: Han river).

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

Bivalves	mL m g ⁻¹ h ⁻¹	Food sources	References
<i>Corbicula leana</i>	0.74 ~ 3.05	Mesotrophic lake water	Hwang <i>et al.</i> , 2004
	0.24 ~ 0.87	Hypertrophic lake water	Hwang <i>et al.</i> , 2004
<i>Unio douglasiae</i>	0.07 ~ 0.80	<i>Microcystis</i> blooming water	Lee <i>et al.</i> , 2008
	0.12 ~ 1.43	Diatom blooming water	Lee <i>et al.</i> , 2008
<i>Cipangopaludina chinensis malleata</i>	0.02 ~ 1.35	<i>Microcystis</i> blooming water	Hwang <i>et al.</i> , 2008
	0.04 ~ 1.94	Diatom blooming water	This study

2. 엽록소 a의 변화

논우렁이의 밀도가 증가할수록, 시간이 경과할수록 규조류의 밀도와 엽록소 a 농도의 감소 폭은 컸다. 일감호 현장수의 경우 모든 밀도(0.5, 1.0, 2.0 및 4.0 ind. L⁻¹)에서 실험 종료시간까지 엽록소 a의 농도가 감소하였으며, 그 중 논우렁이 밀도 1.0 ind. L⁻¹에서는 실험 시작 후 4시간까지 감소 폭이 가장 컸다. 4시간 이후부터 실험 종료 7시간까지는 논우렁이 밀도가 높아질수록 엽록소 a의 농도가 뚜렷하게 감소하였다. 한강의 현장수는 모든 밀도에서 실험 4시간까지 엽록소 a의 감소가 확인되었다. 또한 실험 4시간째 논우렁이 밀도 1.0 ind. L⁻¹에서 엽록소 a의 감소가 가장 크게 나타났다. 4시간 이후부터 실험 종료 7시간까지는 논우렁이 밀도가 높은(2.0, 4.0 ind. L⁻¹) 실험군에서만 엽록소 a가 감소하였고, 저농도(0.5, 1.0 ind. L⁻¹)에서는 엽록소 a가 감소하지 않았다. 일감호와 한강의 두 현장수 모두 모든 논우렁이 밀도에서 시간

의 흐름에 따라 지속적인 조류 밀도가 감소하였으나 실험종료인 7시간의 논우렁이 저밀도(0.5, 1.0 ind. L⁻¹)에서는 조류 섭식이 뚜렷하지 않는 반면 고밀도(2.0, 4.0 ind. L⁻¹)에서는 조류 섭식이 확인되었다(Fig. 3).

3. 조류의 현존량 변화

논우렁이는 일감호와 한강의 저농기 규조류 밀도를 모두 감소시켰으나, 몇몇 종은 증가하거나, 증가하다 다시 감소하는 등 여러 패턴이 나타났다(Table 3).

일감호의 우점종인 *Synedra ulna*는 대조군에서 실험 7시간 후 조류 밀도의 43.4%가 감소하였다. 그러나 논우렁이를 처리한 처리군의 *Synedra ulna* 밀도는 실험 7시간 이후 74.8%(0.5 ind. L⁻¹), 74.6%(1.0 ind. L⁻¹), 73.5%(2.0 ind. L⁻¹), 83.4%(4.0 ind. L⁻¹)로 대조군에 비해 30% 이상 감소하였다. *Scenedesmus sp.*는 대조군에서 7시간 후 30.3%가 감소하였고, 논우렁이 밀도에 따라 65.1~

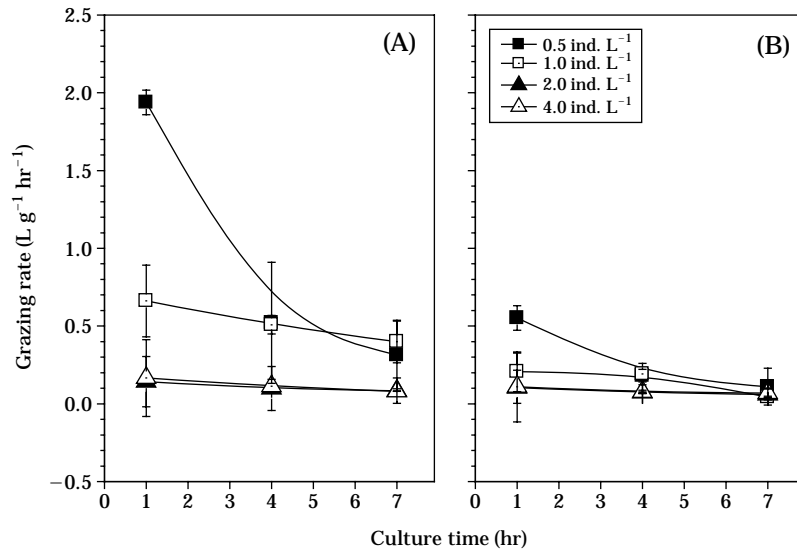


Fig. 4. Variation of grazing rates in the presence of *Cipangopaludina chinensis malleata* at different densities (A: Lake Ilgam, B: Han river).

85.6% 범위로 감소하였다. 반면 대조군에서 *Nitzschia* sp.는 7시간까지 40% 감소하였으며, 논우렁이를 처리한 실험구에서 초기 1시간째 조류 밀도가 17.8~48.9% 증가한 후 4시간부터 실험 7시간까지는 급격히 감소하였다(Table 3).

한강의 우점조류인 *Asterionella formosa*는 대조군에서 7시간 이후에 36.3% 감소하였으며 논우렁이를 처리한 처리군은 논우렁이 밀도별 조류 밀도가 92.3% (0.5 ind. L⁻¹), 80.7% (1.0 ind. L⁻¹), 80.3% (2.0 ind. L⁻¹), 93.5% (4.0 ind. L⁻¹)로 감소하였다. 이는 대조군에 비해 44% 이상 높은 조류감소효과를 보여준다. 대조군에서 *Diatoma vulgare*는 실험 7시간 28.1% 감소하였으며, 논우렁이 밀도별 각 처리군에서는 조류밀도가 78.9% (0.5 ind. L⁻¹), 76.3% (1.0 ind. L⁻¹), 79.5% (2.0 ind. L⁻¹), 95.6% (4.0 ind. L⁻¹)로 감소하였다. 이는 대조군에 비해 50%이상 감소한 것이다. 그러나 *Cyclotella* sp.는 대조군 포함 초기 실험군에서 시간의 흐름에 따라 급격히 증가하였으나 논우렁이가 처리된 처리군에서는 그 증가폭이 작았으며, 고밀도인 4.0 ind. L⁻¹에서는 7시간 후 조류 밀도가 대조군 농도에 비해 16.7% 감소하였다(Table 3).

4. 규조류 섭식능

논우렁이의 규조류 섭식능은 일감호와 한강 현장수 모두 논우렁이 밀도 0.5, 1.0 ind. L⁻¹에서 시간이 지남에 따라 섭식율의 크기가 감소하는 경향이 나타났다. 반면 밀

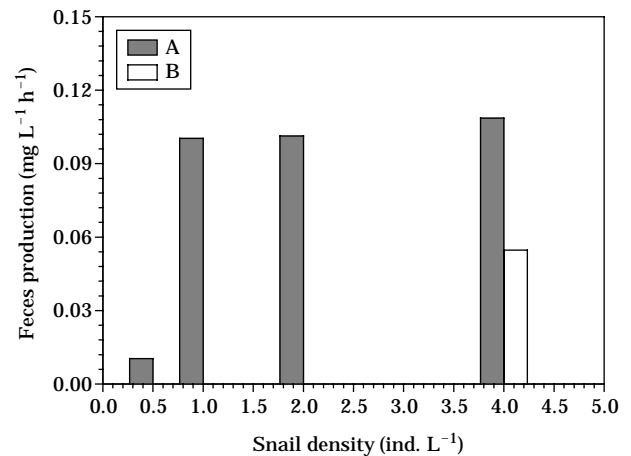


Fig. 5. Feces production of *Cipangopaludina chinensis malleata* at different densities by seven hours (A: Lake Ilgam, B: Han river).

도 2.0, 4.0 ind. L⁻¹에서는 시간에 따른 섭식율의 변화를 확인할 수 없었다(Fig. 4). 섭식율은 초기 1시간 0.5 ind. L⁻¹에서 일감호 현장수에 가장 높은 1.94 L g⁻¹ h⁻¹로 나타났다으며 7시간 4.0 ind. L⁻¹에서 0.081 L g⁻¹ h⁻¹로 가장 낮았다. 한강 현장수에서 가장 높은 섭식율은 초기 1시간 동안 논우렁이 밀도 0.5 ind. L⁻¹에서 0.55 L g⁻¹ h⁻¹로 가장 높았고, 7시간 경과 후 논우렁이 밀도 1.0 ind. L⁻¹에서 0.043 L g⁻¹ h⁻¹로 가장 낮았다.

5. 배설물 생산

논우렁이는 일감호 현장수의 0.5 ind. L^{-1} 를 제외한 모든 논우렁이 밀도에서 개체당 유기물 생산량이 비슷하였으며, 한강의 현장수에서는 논우렁이 밀도 4.0 ind. L^{-1} 에서만 유기물 생산이 되었다(Fig. 5). 일감호 현장수에 대한 논우렁이의 FP는 논우렁이 밀도 4.0 ind. L^{-1} 에서 0.11 mg L^{-1} 로 가장 높게 나타났으며, $1.0, 2.0$ 및 4.0 ind. L^{-1} 에서는 각 개체당 비슷한 양의 유기물을 생산하였다. 그에 비해 0.5 ind. L^{-1} 에서는 유기물 생산량은 다른 논우렁이 밀도의 유기물 생산량에 10% 수준이었다. 한강 현장수에서는 4.0 ind. L^{-1} 에서 0.05 mg L^{-1} 의 생산하였으며 일감호의 같은 논우렁이 밀도에서의 45% 생산하였다. 또한 4.0 ind. L^{-1} 이외의 밀도에서는 FP가 생산되지 않았다.

고 찰

이매패류와 논우렁이를 사용하여 오염된 하천이나 저수지 등의 수질정화에 사용한 사례는 이미 여러 차례 보고된 바 있다(Kehde, 1972; Osenberg, 1989; Weber and Lodge, 1990). 본 연구에서는 저온기 규조류에 대한 논우렁이의 섭식능을 확인하였고, 또한 고온기 남조류에 대한 섭식능 실험(황 등, 2008)과 비교해 보았다.

논우렁이의 섭식율은 고온기 남조류보다 저온기 규조류 제어에 더 효과적이며 또한 한강($0.04 \sim 0.56 \text{ L g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)보다 일감호($0.06 \sim 1.94 \text{ L g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)에서 더 높았다. 논우렁이의 규조류 섭식능은 개체당 $0.04 \sim 1.94 \text{ L g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 범위의 섭식율을 나타냈으며 이는 부영양 저수지 식물플랑크톤을 대상으로 한 *Corbicula leana*(김 등, 2004), *Unio douglasiae*(이 등, 2008) 등과 유사한 수준이었다(Table 2).

일감호의 현장수에서 실험 1시간째 논우렁이 밀도 1.0 ind. L^{-1} 에서 $1.94 \text{ L g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 로 가장 높은 섭식율을 나타냈으며, 한강에서 가장 높게 나타난 1시간째 논우렁이 밀도 1.0 ind. L^{-1} 에서 $0.55 \text{ L g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 보다 높은 것을 알 수 있다. 논우렁이는 한강의 실험수보다 일감호의 실험수의 조류를 더 효율적으로 제어한다는 사실을 알 수 있었다. 또한 섭식율은 대체적으로 시간에 흐름에 따라 감소하는 경향이 나타났는데 이는 시간의 흐름에 따라 실험 수조의 조류의 밀도가 급격히 감소하였기 때문으로 사료된다.

논우렁이는 높은 동물 밀도 시간이 흐를수록 높은 효율을 보였는데 특히 이매패인 말조개(*Unio douglasiae*)의 섭식율보다 높은 효과를 보였다(이 등, 2008). 논우렁

이는 치설을 이용하여 먹이를 섭취하고 체내 또는 체외에 축적한 다음 서서히 소화시키는 과정(Dawen *et al.*, 2006)을 거치며, 이때 생기는 조류 응집물은 이매패가 생산한 유기물보다 더 단단하고 끈끈한 점액질로 쌓여있어 오랫동안 유지된다. 이는 다른 박테리아나 수서 곤충에게 섭식이 용이한 먹이를 제공하며 보다 많은 생물과의 먹이관계를 가능하게 한다. 다른 이매패에서 볼 수 없는 논우렁이만의 섭식특성은 부영양 수계의 조류 및 유기물 제어가능성이 높음을 시사해준다.

적 요

본 연구는 2008년 1월 15일 한강과 일감호의 저온기 조류에 대한 논우렁이의 섭식능력과 유기물 생산을 조사하기 위해 조류의 종류와 논우렁이 밀도를 달리하여 실험을 실시하였다. 실험을 위해 금강수계에 농수로 등에서 서식하는 논우렁이를 직접 채집하여, 실험실로 옮긴 다음 직접 제작한 순응 수조에서 순응시키고 유지하였다. 실험은 비슷한 크기의 개체를 사용하였으며 논우렁이의 규조류에 대한 섭식율은 선행연구에서 알려진 남조류 섭식에 비해 높게 나타났다. 또한 논우렁이 밀도가 높을수록 시간이 지날수록 엽록소 *a*의 농도를 감소시켰는데, 실험 4시간째에서는 한강 현장수 일감호 현장수 모두 논우렁이 밀도 4.0 ind. L^{-1} 보다 1.0 ind. L^{-1} 에서 효율이 높았다. 배설물생산은 일감호 현장수 중에서 개체당 논우렁이 밀도 0.5 ind. L^{-1} 에 가장 적은 배설물이 생산되었으며 논우렁이 밀도 4.0 ind. L^{-1} 에서 가장 많은 배설물이 생산되었다. 저온기 규조류가 대발생하는 호수 및 하천에 한국산 논우렁이의 적용은 유기물의 효과적 제어가 보일 것으로 사료되었다.

사 사

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

인 용 문 헌

- 권오길. 1993. 원색한국패류도감. 아카데미서적, p. 6-201.
권오길, 조동현, 박만갑, 이준상. 1985. 북한강 담수산 패류의

- 분포상에 관한 연구. 한국패류학회지 **1**: 1-4.
- 김갑수, 나유미. 2007. 한강의 수질 현황 및 개선방안. 한국환경공학회지 **29**(11): 1169-1178.
- 김호섭, 박정환, 공동수, 황순진. 2004. 참재첩을 이용한 부영양호의 수질개선. 한국육수학회지 **37**(3): 332-343.
- 김호섭, 황순진, 고재만. 2003. 도심의 얇은 인공호인 일감호의 수질변화특성과 퇴적환경의 평가. 한국육수학회지 **36**(2): 161-171.
- 박정환. 2004. 담수산 이매패류가 수생태계의 생태학적 수준의 변화에 미치는 영향에 관한 연구: Mesocosm 연구. 건국대 석사논문.
- 박혜경. 2004. 팔당호의 식물플랑크톤 사진집. 국립환경연구원 한강환경연구소, p. 7-37.
- 서울시. 1998. 한강생태계 조사연구.
- 서울시정개발연구원. 1998. 한강 조류발생 방지대책 및 수질개선 방안 연구.
- 이연주, 김백호, 김난영, 엄한용, 황순진. 2008. 수온, 먹이농도, 패각 크기가 *Microcystis aeruginosa*에 대한 말조개의 여과율 및 배설물 생산에 미치는 영향. 한국하천호수학회지 **41**(S): 61-67.
- 이재수, 김영철, 황길순. 2003. 장마 전, 후의 농업용 저수지 퇴적물의 변화분석. 대한토목학회지 **23**(4): 359-368.
- 최희진. 2004. 남조 *Microcystis aeruginosa*를 분해하는 살조세균의 분리 동정 및 특성. 한양대 석사논문.
- 황순진, 김호섭, 최광현, 박정환. 2002. 국내 담수산 조개의 여과 섭식능 비교와 섭식활동이 수질에 미치는 영향. 한국육수학회지 **35**: 92-102.
- 황순진, 전미진, 김난영, 김백호. 2008. 한국산 논우렁이의 유해조류 섭식율 및 배설물 생산. 한국하천호수학회지 **41**(S): 77-85.
- APHA. 1995. Standard methods of the examination of water and wastewater (19th ed). American Public Health Association, Washington, D.C.
- Christian, A.D. and D.J. Berg. 2000. The role of unionid bivalves (Mollusca; Unionidae) in headwater streams. *Journal of the North American Benthological Society* **17**: 189.
- Dame, R.F. 1996. Ecology of marine bivalves: An ecosystem approach. CRC Press, Boca Raton, 254p.
- Dame, R.F., R. Zingmark and D. Nelsen. 1985. Filter feeding coupling between the estuarine water column and benthic subsystems, p. 521-526. *In: Estuarine Perspectives* (Kennedy, V.S., ed.). Academic Press, New York.
- Davis, W.R., A.D. Christian and D.J. Berg. 2000. Seasonal nitrogen and phosphorus cycling by three unionid bivalves (Unionidae: bivalvia) in headwater streams, p. 1-10. *In: Freshwater Mollusk Symposium Proceeding*. (Tankersley, R.S., D.O. Warmolts, G.T. Watters, B.J. Armitage, P.D. Johnson and R.S. butler, eds.). Ohio Biological Survey, Columbus, OH, USA.
- 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.
- Hwang, S.J., H.S. Kim and J.K. Shin. 2001. Filter-feeding effect of a freshwater bivalve (*Corbicula leana* PRIME) on phytoplankton. *Korean Journal of Limnology* **34**(4): 298-309.
- 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 Korea Lakes. *Hydrobiologia* **515**: 161-179.
- Jack, J.D. and J.H. Thorp. 2000. Effects of the benthos suspension feeder *Dreissena polymorpha* on zooplankton on a large river. *Freshwater Biology* **44**: 569-579.
- Kehde, P.M. and J.L. Wilhm. 1972. The effects of grazing by snails on community structure of periphyton in laboratory streams. *American Malacological Bulletin* **5**: 9-19.
- Lampert, W., W. Flecker, H. Rai and B.E. Taylor. 1986. Phytoplankton control by grazing zooplankton: A study on the spring clear-water phase. *Limnology and Oceanography* **31**: 478-490.
- Noordhuis, R., H. Reeders and A. Bij De Vaate. 1992. Filtration rate and pseudofaeces in zebra mussel and their application in water quality management, 262p. *In: The Zebra Mussel Dreissena polymorpha*, Ecology, Biological Monitoring and First Application in the Water Quality Management (Neuman, D. and H.A. Jenner, 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.
- Penaloza, R., M. Roias, I. Vila and F. Zambrano. 1990. Toxicity of a soluble peptide from *Microcystis* sp. to zooplankton and fish. *Freshwater Biology* **24**: 233-240.
- Rodger, H.D., T. Turnbull, C. Edwards and G.A. Codd. 1994. Cyanobacterial (blue-green-algal) bloom associated pathology in brown trout, *Salmo trutta* L., in Loch Leven, Scotland. *Journal of Fish Diseases* **17**: 177-181.
- Toranzo, A.E., F. Nieto and J.L. Barja. 1990. Mortality associated with cyanobacterial bloom in farmed rainbow trout in Galicia (Northwestern, Spain). *Bulletin of the European Association of Fish Pathologists* **10**: 106-107.
- Vaughn, C.C. and C.C. Hakenkamp. 2001. The functional role of burrowing bivalves in freshwater ecosystems.

Freshwater Biology **46**: 1431-1446.

Weber, L.M. and D.M. Lodge. 1990. Periphytic food and predatory crayfish: relative roles in determining snail distribution. *Oecologia* **82**: 33-39.

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.

(Manuscript received 5 June 2008,
Revision accepted 7 September 2008)