

왕우렁이를 이용한 식물플랑크톤 대발생 제어

이 민 혁 · 김 민 지¹ · 김 용 재*

대진대학교 생명과학과, ¹분당대진고등학교

Control of Phytoplankton Bloom using Apple Snail (*Pomacea canaliculata*: Ampullariidae)

Min Hyuk Lee, Min Ji Kim¹ and Yong Jae Kim*

Department of Life Science, Daejin University, Pocheon 487-711, Korea

¹Bundang Daejin High School, Seongnam 463-831, Korea

Abstract - This study is measured the change of chlorophyll-*a* concentration and phytoplankton density, the grazing rates (GR) and pseudofaeces production (PFP), by grazing of freshwater apple snail, *Pomacea canaliculata*, to investigated that the snails are able to control of phytoplankton bloom. The experiments are performed to evaluate the GR and PFP at different conditions such as incubation time (0, 2, 4, 6, 8, 10 and 12 hr), shell height (1.0 to 4.0 cm, n=108), snail density (1, 1.5, 2.5, 3.5 and 5 indiv. L⁻¹) and food concentration (200, 400, 600, 800 and 1000 µg L⁻¹). Regarding feeding time, the highest GR (2.5 L. gAFDW⁻¹ h⁻¹) and PFP (15.3 mg AFDW⁻¹) showed at 4 hr after snail stocking, respectively. The snail, smaller than 1.5 cm in body size, showed the highest of GRs (2.54 L. gAFDW⁻¹ h⁻¹) for the initial period (2 hr of stocking), compared to those greater than 1.5 cm, which showed a stable FR, higher than 0.099 L. gAFDW⁻¹ h⁻¹. Upon snail density effect, the density of 5 indiv. L⁻¹ induced the most effective inhibition on phytoplankton biomass with the highest PFP. On the food concentration, the highest GR (0.54 L. gAFDW⁻¹ h⁻¹) and PFP (8.5 mg gAFDW⁻¹) were induced at the level of 600 µg L⁻¹, respectively. We checked that it is possible to control of phytoplankton bloom by the grazing of apple snail as well as Reeve. However, it required a through research for the remove of pseudofaeces and 2nd problem by the decomposition of the organic materials.

Key words : freshwater apple snail, *Pomacea canaliculata*, phytoplankton bloom, grazing rates, pseudofaeces

서 론

수계의 1차 생산자로서 호수나 하천 생태계에 매우

중요한 위치를 차지하고 있는 식물플랑크톤은 수질의 변화에 대해 민감한 반응을 나타내고 있다 (Stoermer 1978). 즉, 식물플랑크톤은 호수, 하천 등의 부영양화에 따라 생산의 폭증으로 수중 산소의 고갈과 그에 따른 생태계 파괴, 악취 발생 및 독성 증가 등으로 여러 가지 피해를 야기 시킨다 (Reynolds 1984). 특히 호수의 부영

*Corresponding author: Yong Jae Kim, Tel. 031-539-1851, Fax. 031-539-1850, E-mail. yjkim@daejin.ac.kr

양화에 따른 식물플랑크톤의 과다 증식 즉 bloom을 국내에서는 녹조현상이라고 하며, 녹조현상의 원인종의 대부분은 남조류로서, 주로 수체의 표면에 부유하며 스크(scum)을 형성하고 종에 따라서는 독소를 함유하고 있다. 남조류 독소는 수 생태계내의 어류 등을 포함한 담수생물은 물론 사람이 이용하는 상수원에도 영향을 미친다 (Carmichael 1899). 우리나라에서 호수의 부영양화에 따른 식물플랑크톤의 녹조현상을 제어하기 위한 가장 기초적인 모니터링 연구들은 많이 진행되고 있지만, 부영양화를 제어하고 녹조현상을 제거하기 위한 연구는 미비한 실정이다.

이와 같은 부영양화와 녹조현상을 생물조절기법을 이용한 인위적인 수중 먹이 연쇄를 조작을 통해 식물플랑크톤의 현존량 감소를 유도함으로써 수중의 투명도 증가 및 영양염 농도 변화를 유도하고 있다 (Kim *et al.* 2001; Lee *et al.* 2008). 외국에서는 호수의 수질관리를 위해 이 기법을 널리 이용해 오고 있으며, 특히 어류를 투입하여 수질회복 및 호수관리 방안으로 사용하고 있으나 (Hunt and Matveev 2005), 수중에 어류 투입으로 조류와 같은 하위 그룹의 생물량을 인위적으로 감소시킴으로서, 수질변화와 경제성을 동시에 추구하고 있다 (Lee *et al.* 2008). 한편 국내에서는 최근 외래어종 및 갑각류 등을 도입한 결과 고유종의 소멸을 가져오고 있고, 새와 포유류 감소, 부영양화의 유도 등 생태계의 혼란을 유발시키고 있다 (An *et al.* 2007).

왕우렁이 (apple snail; *Pomacea canaliculata*: Ampullariidae)는 연체동물 복족류에 속하며 원산지는 열대지방인 중남미, 아프리카 및 동남아시아 등에 10속 약 120여 종이 서식하고 있다. 본 종은 잡식성이고 산란수가 월 1000~1200개로 번식력이 빠르고 세계에서 식용으로 많이 양식을 하고 있다 (Lee *et al.* 2002). 왕우렁이의 1983년 식용목적으로 국내에 도입하여 양식되어 왔으며, 2001년도에 농림부 조사에 의하면 잡식성의 왕성한 먹이섭성을 이용하여 논 잡초 제초용으로 방사되는 등 친환경 농업의 일환으로 50개 시, 군에서 이용하고 있다. 자연 생태계로 방출된 왕우렁이는 국내 환경에 적응, 귀화생물로 정착하여 많은 논과 하천에 서식하고 있다 (Lee *et al.* 2002).

외래종으로 왕성한 섭식능을 보이는 왕우렁이를 이용하여 호수나 하천에 만성 부영양화로 인한 남조류 대발생을 생물학적 제어가 가능한지를 판단하는 기초자료를 확보하고자 본 연구를 실시하였다.

재료 및 방법

1. 동물채집 및 관리

실험에 사용한 왕우렁이 (*Pomacea canaliculata*: Ampullariidae)는 충청북도 괴산의 자연 농법의 벼농사에 적용시키기 위해 양식을 하는 양식장으로부터 구입하였다. 채집한 패류는 곧바로 실험실로 옮겨, 탈염시킨 수돗물로 2~3회 세척하고, 임의로 제작한 3단계 순환조(원수조, 배양조, 사육조)에 넣고 순화시켰다. 원수조는 2~3일간 탈염시킨 수돗물을 넣고, 냉각기를 이용하여 채집 당시 수온 ($18.5^{\circ}\text{C} \pm 1.0$)을 유지하였으며, 먹이로는 상업용 *Chlorella*TM (대상 클로렐라, 아쿠아넷)을 3~4일에 한 번씩 공급하였다. 배양조는 모래와 자갈로 구성되었으며, 사육조는 여과기를 거쳐 일정한 유속 (15 L h^{-1})으로 원수조로 다시 이동하도록 제작하였다. 3개 순환조는 2~3주에 한 번씩 세척 후 탈염 수돗물로 교체하였으며, 운동력이나 섭취능이 현저히 떨어지거나 부유한 개체는 사망한 것으로 판단하여 제거하였다.

2. 개체 크기와 유기물 함량

왕우렁이의 크기는 일반적으로 각정에서 저순까지의 최대 높이, 각고 (height)를 가르킨다 (Kwon 1993). 실험기간 동안 채집된 왕우렁이의 크기별 배설물 함량을 파악하기 위하여, 총 50개체의 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 전기로 (muffle furnace)에서 1시간 정도 방치한 다음 무게를 측정 한 도가니에 앞에서 분리된 근육을 넣고 100°C dry oven에서 48시간 동안 건조시켜 건중량을 측정하였다 (W1). 건중량을 쟀 다음 도가니를 다시 500°C furnace에 넣어 30분간 완전히 태운 다음 100°C dry oven으로 옮겨 48시간 정도 방치한 다음 무게를 측정하였다 (W2). 왕우렁이의 유기물 함량은 근육질을 태우기 전후의 무게차 (W2- W1)로 계산되었으며, 섭식능 실험시 사용된 왕우렁이의 유기물함량을 추정하기 위해 앞에서 측정한 각 왕우렁이의 크기 및 무게와의 AFDW간의 상관성을 확인하여 크기 또는 무게를 이용한 유기물 함량을 산정하였다.

3. 섭식율 및 배설물 생산

섭식율 (grazing rate, GR)은 일정시간 동안 왕우렁이에

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 왕우렁이의 유기물함량(AFDW)으로 단위는 $\text{L} \cdot \text{gAFDW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, t는 실험시간으로 단위는 시간(h)이다. 엽록소 농도는 수질공정시험법(Ministry of Environment 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(pseudofaeces productions)은 일정시간이 경과한 후 대조군과 실험군에 생성된 조류괴(algal mass, green pellet)를 다른 실험수와 최대한 섞이지 않도록 스포이드로 꺼내 이를 다시 75 m Nylon net로 걸러 여과된 다음 남은 pellet만을 spoid로 꺼내 이미 70°C dry oven에서 건조시켜 무게를 측정(W1) 용기에 넣고, 다시 70°C dry oven에서 30분 동안 다음 무게를 측정하여(W2), 두 무게의 차이(W2-W1)를 왕우렁이의 유기물 생산량으로 사용하였다.

4. 식물플랑크톤 제어실험

왕우렁이의 섭식실험은 크게 개체의 크기와 밀도, 먹이밀도, 그리고 시간별로 실시하였다. 섭식실험에 사용한 실험수는 실험실에서 배양한 식물플랑크톤으로 (Chl-a 농도, $1,000 \mu\text{g L}^{-1}$), 각 섭식실험에서는 이를 적절한 농도로 희석하여 사용하였다. 모든 섭식실험은 투명한 아크릴수조(3L)를 사용하였으며, 실험수 2L, 수온 $25^\circ\text{C} \pm 1.0$, 광도 $70 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 조건하에서 10시간 실시하였다. 시료채취는 정해진 시간에 교란이 일어나지 않도록 포

층 15 cm에 이미 설치해 놓은 tube를 통해 연결된 부분에 주사기를 꽂아 실험종류에 따라 10~50 mL씩 채취하였다.

개체크기에 따른 섭식실험은 크기가 다른(각고 1.0~4.0 cm) 왕우렁이 25개체를 배양조로부터 꺼내 실험수(엽록소 농도, $1,000 \mu\text{g L}^{-1}$)가 들어있는 수조에 1 indiv. L^{-1} 밀도로 투입한 다음 1, 2, 4, 6, 8, 12시간 간격으로 엽록소 변화를 조사하였다. 우렁이를 투입하지 않은 대조군 및 실험군은 모두 3회씩 중복실험을 실시하였다.

먹이농도(Chl a 농도) 섭식실험은 plankton net (20 μm)를 이용하여 현장수를 Chl a, $1,000 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 농축한 다음 탈염수돗물로 25%씩 4단계(200, 400, 600, $800 \mu\text{g L}^{-1}$)로 희석하고, 각 실험군에 동일한 밀도의 왕우렁이(1 indiv. L^{-1})를 각각 투입한 다음 시간별 엽록소 변화를 조사하였다. 앞의 두 실험과 같이 왕우렁이를 투입하지 않은 대조군 및 실험군은 모두 3회씩 중복실험을 실시하였다.

시간별 섭식실험은 각 측정시간별로 실험군을 회수하여 엽록소 변화와 유기물 생산량을 동시에 측정하였다. 실험은 현장수(Chl a 농도, $1,000 \mu\text{g L}^{-1}$)를 각각 동일하게 넣고, 각고가 유사한 크기의 우렁이(2.5~3.5 cm)를 1 indiv. L^{-1} 로 각각 투입한 다음 시간별로(1, 2, 4, 6, 8, 10, 12시간) 회수하여 왕우렁이의 섭식율과 유기물량을 각각 측정하였다.

결 과

1. 크기에 따른 왕우렁이의 식물플랑크톤 섭식율 및 유기물 생산율

2008년 충청북도 괴산 지역에서 양식하고 있는 왕우렁이를 실험에 사용된 총 533개체의 크기(각고)는 1.0

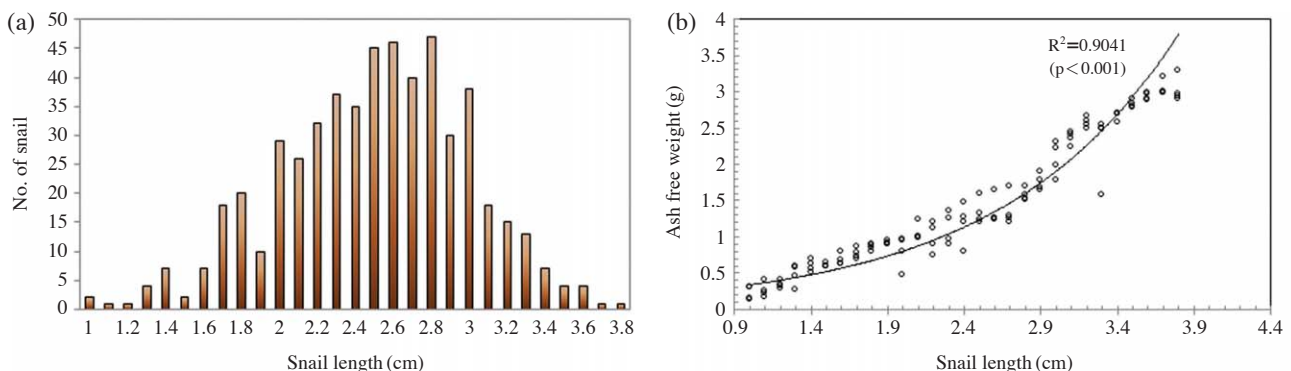
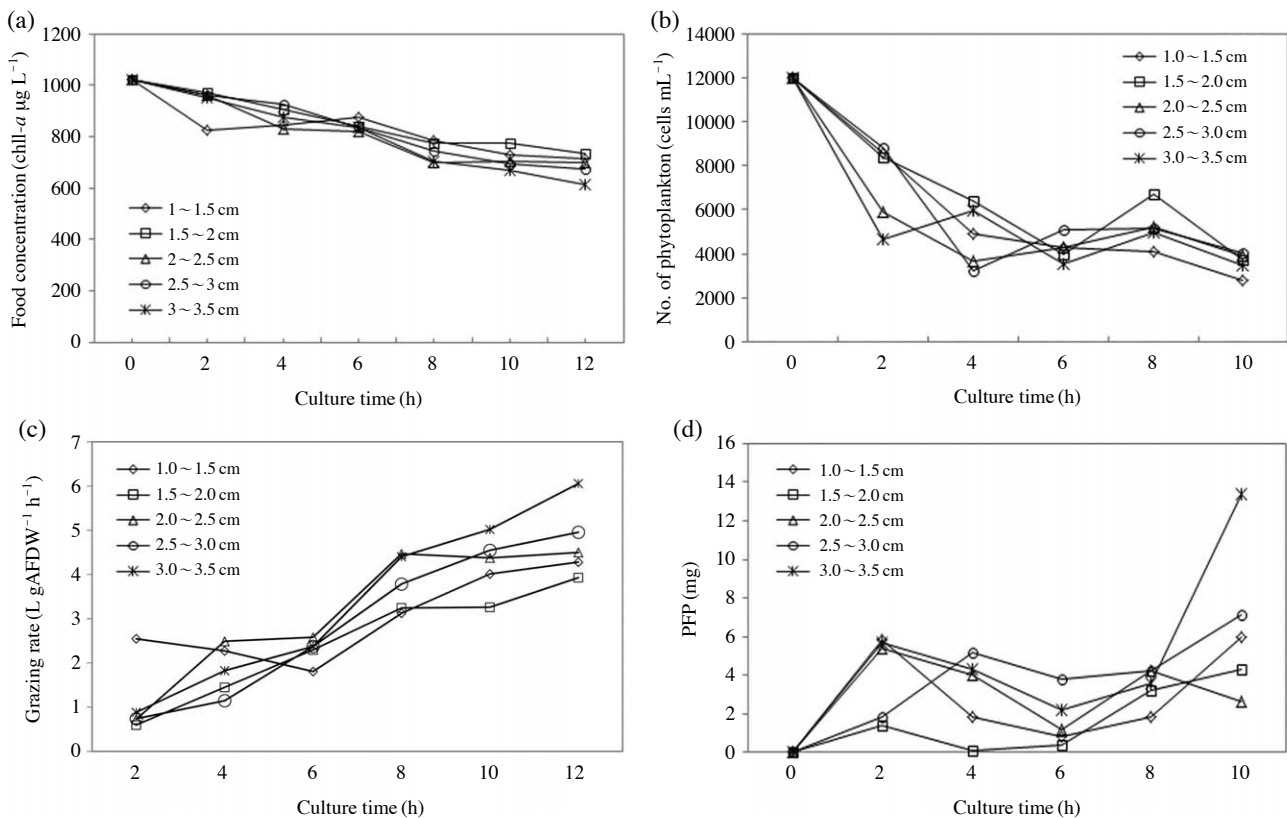


Fig. 1. Morphological parameters of apple snail, *Pomacea canaliculata* collected from the Goesan (Korea) from 2010. (a) Normal distribution of snail, (b) Relationship ($r^2=0.9041$, $p<0.001$) between AFDW (Ash free dry weight, mg) and shell height (cm).

Table 1. Grazing effects of snail (*Pomacea canaliculata*) at different kinds of shell height, food density (Chl-*a* concentration, $\mu\text{g L}^{-1}$) and snail density on the phytoplankton blooming water for 12 hours. a; slope of 1st order regression, b; y-value.

Experiments	Gradients	1 st order regression			
		a	b	r ²	p
Shell height	1.0 ~ 1.5 cm	-21.127	953.818	0.711	0.01067
	1.5 ~ 2.0 cm	-24.782	1009.279	0.957	0.00008
	2.0 ~ 2.5 cm	-28.754	991.950	0.878	0.00117
	2.5 ~ 3.0 cm	-31.538	1025.511	0.972	0.00003
	3.0 ~ 3.5 cm	-35.054	1019.736	0.982	0.00001
Food concentration	200 ($\mu\text{g L}^{-1}$)	-4.477	284.632	0.810	0.0036
	400 ($\mu\text{g L}^{-1}$)	-8.071	480.371	0.671	0.0149
	600 ($\mu\text{g L}^{-1}$)	-10.491	650.275	0.867	0.0014
	800 ($\mu\text{g L}^{-1}$)	-13.307	845.929	0.776	0.0055
	1000 ($\mu\text{g L}^{-1}$)	-15.527	945.561	0.853	0.0019
Snail density	0.5 indiv. L ⁻¹	-34.446	952.279	0.960	0.00007
	1.0 indiv. L ⁻¹	-33.414	936.542	0.949	0.00013
	2.5 indiv. L ⁻¹	-35.280	884.311	0.794	0.00443
	3.5 indiv. L ⁻¹	-42.671	965.757	0.972	0.00003
	5.0 indiv. L ⁻¹	-44.073	868.439	0.922	0.00037

**Fig. 2.** Changes of (a) Food concentration (chl-*a* $\mu\text{g L}^{-1}$), (b) phytoplankton density (cells mL^{-1}), (c) grazing rate ($\text{L}_2 \text{gAFDW}^{-1} \text{h}^{-1}$), (d) pseudofaeces productions (PPF mg AFDW^{-1}) by grazing of freshwater apple snail *Pomacea canaliculata* with different shell heights.

~3.8 cm 범위였으며, 약 2.6~2.8 cm를 중심으로 하는 bimodal patterns를 보였다 (Fig. 1a). 또한 유기물 함량은 각 개체의 크기에 높은 상관성 ($r^2=0.9041$, $p<0.001$)을

나타냈다 (Fig. 1b).

왕우렁이 각고 크기에 따른 섭식율은 실험초기부터 시간이 경과함에 따라 점차 증가하였다 (Table 1). 각고

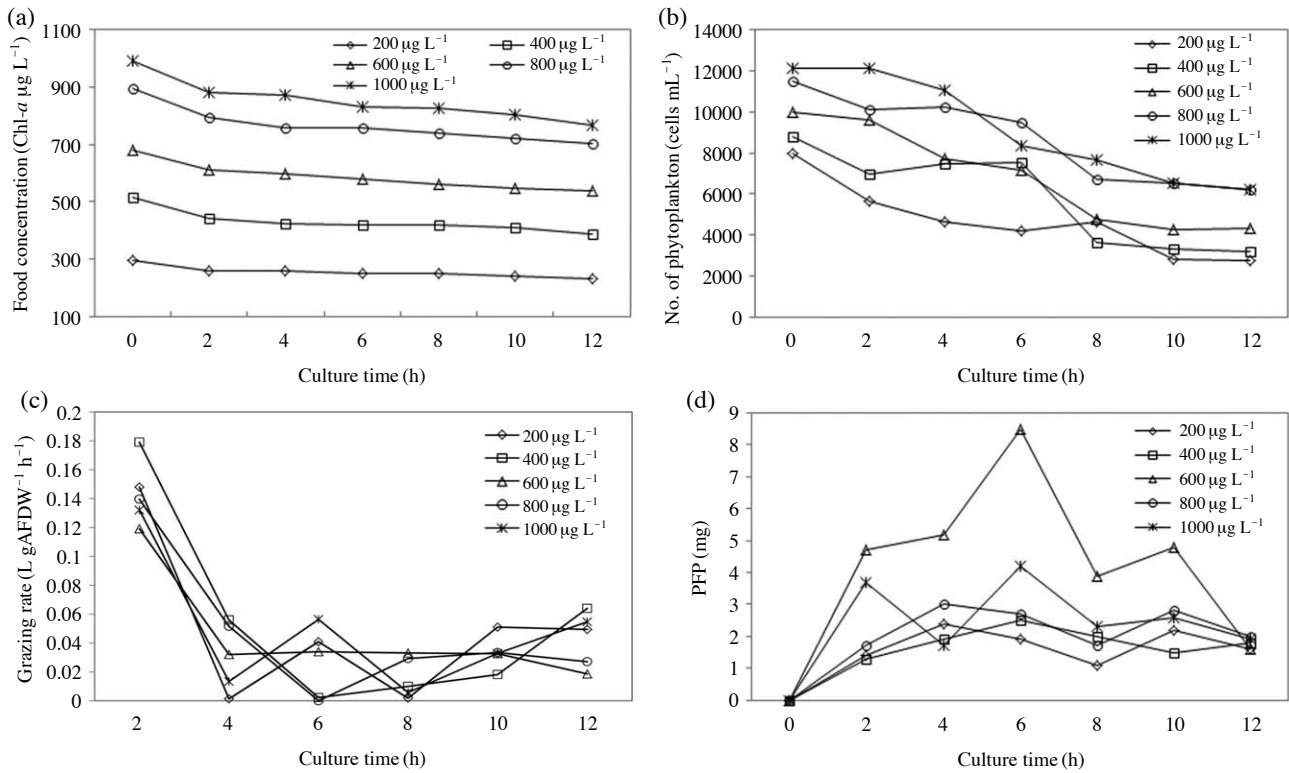


Fig. 3. Changes of (a) Food concentration ($\text{chl-}a \mu\text{g L}^{-1}$), (b) phytoplankton density (cells mL^{-1}), (c) grazing rate ($\text{L gAFDW}^{-1} \text{h}^{-1}$), (d) pseudofaeces productions (PPF mg AFDW^{-1}) by grazing of freshwater apple snail *Pomacea canaliculata* with different food concentrations.

3.0 cm 이상의 큰 왕우렁이는 섭식 시간이 경과함에 따라 섭식량이 점차 증가하였으며, 10시간 이후에 엽록소 농도는 40.1%의 높은 감소율을 나타내었다(Fig. 2a). 3.0 cm 이하의 왕우렁이 중에 1.0~1.5 cm의 크기가 실험초기에 낮은 섭식율을 보였으나, 시간이 경과함에 따라 섭식율은 증가하였다(30.5~34.3%). 식물플랑크톤 밀도의 변화는 실험 초기에 각고의 크기에 따라 차이를 나타내었으나, 10시간 이후에는 전체적으로 감소되는 경향을 나타내었다(Fig. 2b).

크기가 큰 왕우렁이의 많은 섭식으로 먹이밀도(식물플랑크톤 밀도)는 실험 초기에 뚜렷하게 감소하였지만, 작은 크기의 왕우렁이는 초기(실험 2시간)에 섭식량이 적었다. 그러나, 시간이 경과함에 따라 큰 개체와 작은 개체 모두 왕성한 섭식에 의해 식물플랑크톤 세포 밀도는 뚜렷한 감소 현상을 나타내었다(Fig. 2b, Table 1).

왕우렁이의 개체 크기에 따른 섭식율에 대한 실험 초기에 가장 크기가 작은 1.0~1.5 cm 왕우렁이의 섭식율이 $2.54 \text{ L gAFDW}^{-1} \text{h}^{-1}$ 로 가장 높았으며 실험 중, 후반까지 가장 높은 섭식율을 나타내었다. 그러나 2.5 cm 이상의 큰 우렁이는 오히려 초기 섭식율이 매우 낮았으며,

실험 4시간 이후부터 약 $0.11 \text{ L gAFDW}^{-1} \text{h}^{-1}$ 의 섭식율을 나타내었다(Fig. 2c).

유기물생산은 크기와는 상관없이 시간이 경과하는 동안 증감이 반복되었으며, 실험 10시간째 최대로 증가하였다. 여러 크기의 각고 중에 3.0 cm 크기의 왕우렁이는 $13.4 \text{ mg AFDW}^{-1}$ 의 가장 많은 유기물을 생산하였다(Fig. 2d).

2. 먹이농도에 따른 먹이섭식율 및 유기물 생산

먹이농도($\mu\text{g Chl-}a \text{ L}^{-1}$)에 따른 섭식율을 비교한 결과(Table 1), 높은 농도의 먹이를 공급할 때 왕우렁이의 섭식율은 증가하였고, 특히 $1000 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도에서 가장 높게 나타났지만 $600 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도에서 높은 상관성을 나타냈다($r^2=0.867$). 먹이농도($\mu\text{g Chl-}a \text{ L}^{-1}$)를 5단계로 조절하여 실험한 결과, 엽록소 농도는 $400 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 먹이농도에서 12시간 실험동안 가장 높은 감소율(25%)을 나타내었다. $800 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 높은 농도에서 섭식에 의한 감소율은 20% 정도로 오히려 낮았다(Fig. 3a).

먹이 농도별 식물플랑크톤 밀도는 농도에 따른 왕우

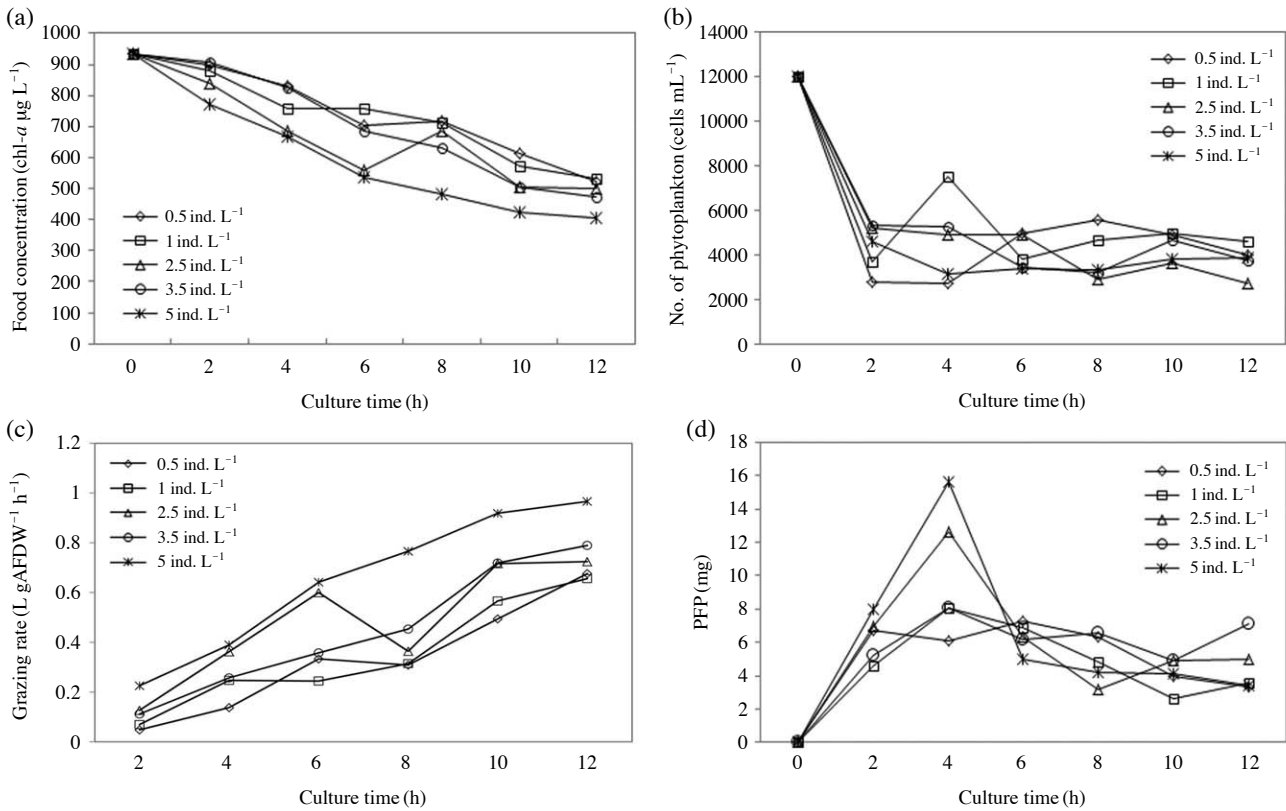


Fig. 4. Changes of (a) Food concentration (chl-*a* $\mu\text{g L}^{-1}$), (b) phytoplankton density (cells mL⁻¹), (c) grazing rate (L gAFDW⁻¹ h⁻¹), (d) pseudofaeces productions (PPP mg AFDW⁻¹) of freshwater apple snail *Pomacea canaliculata* with different snail densities.

렁이의 섭식상태가 일정하지 않았으며 밀도의 감소 경향도 실험초기에서 중반까지는 불규칙하였으나 중, 후반에는 일정한 감소 경향을 나타내었다. 먹이 농도가 높은 1000 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 식물플랑크톤 밀도는 배양기간 동안 56.7%까지 감소하였으며, 먹이 농도가 가장 낮은 200 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 65.0%로 가장 높은 감소율을 나타내었다(Fig. 3b). 농도에 따른 왕우렁이의 섭식율은 먹이농도 600 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 가장 높은 섭식율(0.54 L gAFDW⁻¹ h⁻¹)을 나타냈으며, 나머지 먹이농도에서 섭식율은 0.048~0.17 L gAFDW⁻¹ h⁻¹ 범위로 낮았다(Fig. 3c).

유기물생산은 먹이농도에 따라 불규칙한 변화를 나타내었다. 먹이농도 600 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 섭식 시간별로 가장 큰 변화를 나타내었으며 섭식 6시간에 8.5 mg AFDW⁻¹로 최대였으며, 이후에 감소하였다. 본 농도에서 유기물 생산량은 28.7 mg AFDW⁻¹로 최대였다. 반면에 가장 높은 먹이 농도에서 불규칙한 변화 경향을 나타내었으며 가장 낮은 먹이농도(200 $\mu\text{g L}^{-1}$)에서 가장 낮은 유기물(10.6 mg AFDW⁻¹)을 생산하였다(Fig. 3d).

3. 왕우렁이 밀도에 따른 먹이 섭식율 및 유기물 생산

평균 크기의 왕우렁이(2.5~3.0 cm)의 밀도에 따른 엽록소 농도 변화를 비교한 결과, 0.5~2.5 indiv. L⁻¹에서 감소율이 비슷하였고 3.5 indiv. L⁻¹에서 가장 높았다($r^2=0.972$, $p<0.01$). 왕우렁이 밀도에 따른 먹이 섭식율의 상관관계($r^2=0.972$, $p<0.01$)는 높았다(Table 1). 실험 초기에 2 indiv. L⁻¹ 밀도에서 불규칙한 변화를 나타내었으나 중, 후반으로 갈수록 안정적인 감소 경향을 나타내었다. 왕우렁이 밀도가 가장 높은 실험조(5 indiv. L⁻¹)에서 실험 초기부터 중반까지 지속적으로 최대로 감소하였다(59.3%). 그러나 0.5~5 indiv. L⁻¹의 밀도에서는 큰 차이 없이 감소하는 높은 상관성($r^2=0.79\sim0.96$, $p<0.01\sim0.001$)을 나타내었다(Fig. 4a, Table 1).

식물플랑크톤 밀도의 변화는 엽록소 농도의 변화와 같이 일정한 변화 경향을 나타내지 않았으며 매우 불규칙하였다. 또한 왕우렁이 밀도와도 상관성($r^2=0.83\sim0.94$, $p<0.001$)이 높았다(Fig. 4b). 왕우렁이의 밀도에 따른 먹이 섭식율에서, 0.5 indiv. L⁻¹의 섭식율은 섭식 2

시간에 $0.048 \text{ L} \cdot \text{gAFDW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 로서 가장 낮았으며 이후에 약간 증가하는 경향을 나타내었다. $5 \text{ indiv} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 밀도에서 섭식율은 섭식 초기에 $0.22 \text{ L} \cdot \text{gAFDW}^{-1}$ 로서 가장 높았으며, 실험동안 지속적으로 높게 나타났다 (Fig. 4c).

전반적으로 섭식율은 왕우렁이 밀도가 높을 때 그 섭식율이 높았다. 유기물 생산은 실험 2시간에서 4시간까지 지속적으로 증가하였으며, 6시간 이후에는 감소하였다. 유기물은 왕우렁이 밀도가 가장 높은 $5 \text{ indiv} \cdot \text{L}^{-1}$ 에서 섭식 4시간에 가장 높았으며, 총 실험동안 $40.3 \text{ mg AFDW}^{-1}$ 로 가장 많았다. 다음으로는 $2.5 \text{ indiv} \cdot \text{L}^{-1}$ 순으로 조사되었으며 $1 \text{ indiv} \cdot \text{L}^{-1}$ 에서 가장 적었다 (Fig. 4d).

고 찰

우렁이는 식용으로 단백질을 원하고, 또한 열을 식혀주며, 갈증을 해소하고 소변을 잘 나오게 하는 등 유용성이 동의보감 탕액편에 기록되어 있다 (Lee et al. 2002). 국내에 서식하는 우렁이류는 논우렁이 (*Cipangopaludina chinensis malleata*), 큰우렁이 (*C. japonica*) 등으로서 논, 수로, 연못 등의 진흙이나 물가에 서식한다 (Clench and Fuller 1965). 이들의 원산지는 아시아 중남부, 중국, 일본, 베트남 등의 동남아시아, 한국 등이며, 이들은 농산물 이동 경로를 따라 미국에 정착한 것으로 보고되고 있다 (Hwang et al. 2008). 본 실험에서 생물 재료로 이용한 왕우렁이 (apple snail; *Pomacea canaliculata*: Ampullariidae)는 원산지가 열대지방인 중남미, 아프리카 및 동남아시아 등에 10속, 120여종이 서식하고 있다. 왕우렁이는 1983년 식용목적으로 국내에 도입하여 양식되어 왔으며, 2001년도에 농림부 조사에 의하면 잡식성의 왕성한 먹이섭식을 이용하여 논잡초 제초용으로 방사되는 등 친환경 농업의 일환으로 50개 시, 군에서 이용하고 있다. 자연 생태계로 방출된 왕우렁이는 국내 환경에 적응, 귀화생물로 정착하여 많은 논과 하천에 서식하고 있다 (Lee et al. 2002).

이들은 예로부터 우리나라를 비롯한 많은 아시아 국가에서 식용 또는 약용으로 사용하여 왔으며, 양식이 어려워 뿐만 아니라 농약이나 수질오염에 의해 개체수가 감소하고 있다. 최근 국내에 유입되어 식용 또는 생물농약으로 사용하고 있는 지역명, 왕우렁이 (apple snail, *Pomacea canaliculata* Lamarck)는 다양한 먹이를 섭취함으로써 논우렁이의 먹이 및 서식처에 대한 경쟁자로서

우려되어 왔으나 아직까지 피해사례는 보고된 바 없다. 다만, 왕우렁이가 논우렁이처럼 월동이 하지 않아 자연 상태에서 부화가 되기 어렵기 때문에 크게 문제가 될 것으로 보이지 않으나 지구온난화에 의한 한반도의 아열대화 현상은 논우렁이의 서식처 변화는 물론 왕우렁이의 자연부화율이 증가할 것으로 보아 앞으로 외래종에 대한 체계적인 연구가 절실히 필요하다.

논우렁이를 이용하여 오염된 연못이나 하천의 수질정화에 사례는 이미 보고된 바 있으나 (Kehde 1972; Osenberg 1989; Weber and Lodge 1990), 왕우렁이를 이용하여 수질정화에 적용시켜 본 사례는 없었다. 본 실험에서 왕우렁이의 식물플랑크톤 섭식능은 $0.048 \sim 2.545 \text{ L} \cdot \text{gAFDW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 로서 부영양 저수지의 식물플랑크톤을 대상으로 한 논우렁이 (Hwang et al. 2008), 여과성 이매패 *Corbicula leana* (Kim et al. 2004), *Unio douglasiae* (Lee et al. 2007) 등과 거의 유사한 섭식능을 나타냈다. 왕우렁이의 섭식율은 개체의 크기, 먹이농도 및 시간에 따라 명확한 차이는 없었으나 가장 높은 밀도에서 최고의 섭식율을 나타내었다. 유기물 생산 역시 유사한 패턴을 보였다. 이러한 결과는 지금까지 오염된 연못이나 하천바닥의 유기물, 부착조류 그리고 수생식물을 섭식하는 것으로 알려져 있으며, 본 실험에서 플랑크톤도 섭식하는 것을 관찰하였다. 왕우렁이가 생산한 pseudofaeces가 동일한 조건에서 논우렁이와 비슷한 형태를 유지하며 다른 패류보다는 오랫동안 형태 유지를 함으로서 (Hwang et al. 2008) 효과적인 투명도 감소를 유도하였다.

왕우렁이의 섭식에 따른 엽록소 농도의 감소와 식물플랑크톤 밀도의 감소는 실험시간 등 여러 가지 조건에 따라 명확한 경향성을 나타내었다. 특히 크기가 작은 개체는 실험초기에 곧바로 섭식활동을 왕성하게 하였으며, 4시간 이후부터 거의 일정한 섭식형태를 나타내었다. 크기가 큰 개체들은 실험시간에 상관없이 일정한 섭식을 나타내고 있음으로서 Hwang et al. (2008)의 결과와는 다소 차이를 나타내었다.

다양한 섭식실험에 투입한 왕우렁이는 논우렁이와 같이 실험종료까지 사망하지 않았으며 이는 남조류가 우점한 현장수를 대상으로 한 섭식실험에서 실험초기에 높은 폐사율을 보였던 *Corbicula* (Kim et al. 2004), *Unio* (Lee et al. 2007)와는 대조적인 결과로 한국산 논우렁이 뿐만 아니라 왕우렁이도 식물플랑크톤의 bloom 및 남조류에 대한 높은 내성을 갖고 있음을 시사해 주고 있다 (Hwang et al. 2008). 본 연구에서 우렁이 투입 후 수질정화에 대한 조사는 이루어지지 않았다. 논우렁이는 실험

초기에 활발하게 먹이를 섭취하여 체내 또는 체외에 축적한 다음 이를 서서히 소화하는 특징을 갖기 때문에 (Dawen *et al.* 2006) 소화과정 동안 마쇄물이나 영양물질의 수준으로 배출되는 것으로 보고하였으며 (Hwang *et al.* 2008), 본 실험에서 7시간째 이후부터 섭식율 감소가 일어났으며, 논우렁이의 결과와 유사하였다 (Hwang *et al.* 2008).

왕우렁이는 먹이농도가 높은 것보다 $600 \mu\text{g L}^{-1}$ 조건에서 보다 높은 섭식율 ($\text{GR} = -10.49, r^2 = 0.87, p < 0.01$)을 보였으며, 높은 밀도의 먹이 농도에서도 일정한 속도로 감소하는 경향을 나타내었다. 식물플랑크톤 밀도가 낮은 영양상태의 수체에서 높은 여과율을 나타내는 다른 패류 (Sprung and Rose 1988; Reeders and Bij de Vatte 1990; Bontes *et al.* 2007)와는 상이한 결과였다. 섭식율과 같이 배설물의 생산도 $600 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 먹이농도에서 가장 많았다. 조류제어를 위한 왕우렁이의 적용시기는 왕우렁이의 수온에 대한 적응시기를 결정한 다음 활동이 왕성한 시기에 적합할 것으로 사료된다.

적 요

본 실험은 왕우렁이를 대상으로 대발생한 식물플랑크톤을 제어할 수 있는 가를 파악하기 위해 섭식율 (grazing rate, GR) 및 유기물 생산 (pseudofaeces production)을 조사하였다. 섭식 효율을 조사하기 위해 시간 (12시간), 개체크기, 개체밀도, 먹이농도 조건 등의 조건을 달리하여 실험하였다. 왕우렁이는 투입 후 2시간 후에 $2.5 \text{ L. gAFDW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 의 최고 GR를 보이다가 12시간까지 일정한 섭식 경향을 나타내었다. 유기물 생산량은 4시간 후에 $15.3 \text{ mg AFDW}^{-1}$ 로 가장 많은 양을 나타냈다. 서로 다른 크기조건에서 각고가 1.5 cm 미만의 섭식율 변화가 크고 6시간 후에 비슷하였으며, 중간 크기 (2.5 cm)가 3.0 cm 이상인 것보다 섭식율이 높았다. 밀도가 5 indiv. L^{-1} 에서 엽록소 *a* 농도감소율이 가장 높았으며, 그 외의 밀도에서는 비슷한 변화를 나타내었다. 유기물 생산 역시 밀도가 높은 실험군에서 4시간에 최대로 증가하였다. 먹이농도가 $600 \mu\text{g L}^{-1}$ 일 때 $0.54 \text{ L. gAFDW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 의 가장 높은 섭식율과 유기물 생산을 나타내었다. 본 연구에서 왕우렁이뿐만 아니라 논우렁이를 이용하여 식물플랑크톤 대발생을 제어 가능성을 본 연구를 통해 확인하였지만, 이들이 배설한 유기물의 제거 및 배설물의 분해에 다른 2차 문제에 대한 철저한 연구가 필요하다.

사 사

본 연구는 2015년도 대전대학교 교내연구비에 의해 수행함.

REFERENCES

- An KG and WM Yang. 2007. Water quality characteristics in Keum river watershed. *Korean J. Limnol.* 40(1):110-120.
- Bontes BM, ML Verschoor, MD Pires, EV Donk and BW 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.
- Carmichael WW. 1899. Toxins of freshwater algae. pp.121-147. In *Handbook of Natural Toxins* (Tu AT ed.). Marcel Dekker, New York.
- Clench WJ and SLH Fuller. 1965. The genus *Viviparus* (Viviparidae) in North America. *Occasional Paper Mollusk.* 2:385-412.
- Dawen Z, Ping X, Yaqin L, Jun C and Gaodao L. 2007. Bioaccumulation of the hepatotoxic microcystins in various organs of a freshwater snail from a subtropical Chinese lake, Taihu Lake, with dense toxic *Microcystis* blooms. *Environ. Toxicol. Chem.* 26:171-176.
- Hunt RJ and VF Matveev. 2005. The effects of nutrients and zooplankton community structure on phytoplankton growth in a subtropical Australian reservoir: An enclosure study. *Limnologia* 35:90-101.
- Hwang SJ, MJ Jeon, NY Kim and BH Kim. Grazing Rate and Pseudofaeces Production of Native Snail *Cipangopaludina chinensis malleata* Reeve on Toxic Cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. *Korean J. Limnol.* 41:77-85.
- Kehde PM and JL Wilhm. 1972. The effects of grazing by snails on community structure of periphyton in laboratory streams. *Amer. Midland Nat.* 87:2-24.
- Kim BH, MS Han, MG Choe, SO Hwang, M Fukushima and N Takamura. 2001. Effects of fish biomanipulation on plankton communities and water quality in a shallow-hypertrophic lake. Published by Institute for Environmental Science. Wonkwang Univ. Korea. *EnvSciencs.* 10:1-7.
- Kim HS, JH Park, DS Kong and SJ Hwang. 2004. Water Quality Improvement with the Application of Filter-feeding Bivalve (*Corbicula leana* Prime) in a Eutrophic Lake. *Korean J. Limnol.* 37:332-343.
- Lee SB, MH Koh, YE Na and JH Kim. 2002. Physiological and Ecological Characteristics of the Apple Snails. *Korean J.*

- Environ. Agricult. 21:50-56.
- Lee SJ, JY Lee and KG An. 2007. Top-down Fish Biomanipulation Experiments on Algal Removal Effects. Korean J. Limnol. 40:431-438.
- Lee SJ, JY Lee, JH Lee, DY Bae, EH Lee, JH Han, SJ Hwang and KG An. 2008. Removal Effects of Chlorophyll-a and Cyanobacteria Using Laboratory-scale Biomanipulation Tests. Korean J. Limnol. 41:86-92.
- Lee YJ, BH Kim, NY Kim, HY Um and SJ Hwang. 2008. Effects of temperature, food concentration, and shell size on filtering rate and pseudofeces production of *Unio douglasiae* on *Microcystis aeruginosa*. Korean J. Limnol. 41:61-67.
- Ministry of Environment. 1994. Official test methods of water quality. <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/F001/000/128547.pdf>. accessed data:2014.1220
- Osenberg CW. 1989. Resource limitation, competition and the influence of life history in a freshwater snail community. Oecologia 79:512-519.
- Reeders HH and AB Vaate. 1990. Zebra mussel (*Dreissena polymorpha*): a new perspective for water quality management. Hydrobiologia. 200/201:437-450.
- Reynolds CS. 1984. The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge Univ. Press, London, 384 pp.
- 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.
- Stoermer EF. 1978. Phytoplankton assemblages as indicators of water quality in the Laubrentian Great Lakes. Trans. Amer. Micros. Soc. 97:2-16.
- Weber LM and DM Lodge. 1990. Periphytic food and predatory crayfish: relative roles in determining snail distribution. Oecologia 82:33-39.

Received: 25 February 2015

Revised: 24 March 2015

Revision accepted: 24 March 2015