

저온기 부영양 수계의 구조 발생에 대한 말조개의 섭식특성

이 송 희 · 황 순 진 · 김 백 호*

(건국대학교 생명환경과학대학 환경과학과)

Grazing Effects of Freshwater Bivalve *Unio douglasiae* on the Hibernial Diatom Bloom in the Eutrophic Lake and Stream. Lee, Song-Hee, Soon-Jin Hwang and Baik-Ho Kim* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

Filtration rates and fecal production of freshwater bivalve, *Unio douglasiae* on two kinds of hibernial diatom communities were measured simultaneously in a laboratory. One community is the Han River (HAN), which dominated by *Asterionella Formosa*, *Stephanodiscus hantzschii* (ca. 98% of total phytoplankton). The other community is the Ilgam Lake (IL), which dominated by *Synedra ulna*, *Scenedesmus* sp. *Microcystis aeruginosa* (ca. 82%). The HAN water has higher concentrations of nutrient (TN and TP) and chlorophyll *a* (Chl-*a*), lower turbidity and conductivity than the IL water. Water sampling for the feeding experiment was conducted in the same day (Jan 15, 2008) and similar time (AM 10:00 for HAN, AM 11:00 for IL). Mussels with the similar size (6.0 ± 0.5 cm) were collected from the Gunsan and Okgu district (Jeonbuk), and starved in a laboratory for 2 days before the experiment. The experiment comprised CON (no addition of mussel), LOW (addition of mussel at 0.3 indiv. L⁻¹), MID (1.0 indiv. L⁻¹) and HIGH (2.0 indiv. L⁻¹), respectively. With the increment of mussel density and time, the concentration of Chl-*a* in two diatom communities were clearly decreased; Chl-*a* of HAN gradually decreased after 1 hour of mussel treatment, while that of IL decreased as soon as mussel introduction. In 7 hours of treatment, the former was removed finally up to about 90% of control, while the later was remained as about 50%. Under the presence of mussel, total phytoplankton density was shifted as the similar patterns to that of Chl-*a* ($r=0.705$, $P<0.0001$), however, there showed the drastic differences following a species. Based on the concentration of Chl-*a*, filtration rate of *U. douglasiae* averaged 0.266 L g⁻¹ h⁻¹ (0.115 to 0.442) on HAN and 0.577 L g⁻¹ h⁻¹ (0.146 to 1.428) on IL water, respectively. There were no differences in feces production among the mussel density in the HAN water (ANOVA, $P>0.5$), while in IL water, including lots of seston, the HIGH mussel produced the higher fecal materials, over one hundred times of LOW. These results suggest that freshwater bivalve *Unio douglasiae* have the alternative potential, as a filter-feeder of seston in turbid lake, and a biological controller of diatom bloom in cold stream.

Key words : cold eutrophic waters, diatom community, freshwater bivalve, *Unio douglasiae*, filtration, feces production

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

서 론

담수산 이매패는 주로 수체 내 다양한 크기의 입자성 물질을 수확하고 배설물을 생산하여 (Dame *et al.*, 1985; Loo and Rosenberg, 1989; Jack and Throp, 2000; Vaughn and Christine, 2001), 수체와 퇴적층과의 기능적 가교인 이른바 pelagic-benthic coupling의 핵심적 구성원으로서 수중생태계의 물질순환에 중요한 역할을 한다 (Heath *et al.*, 1995; Dame, 1996). 이들의 여과능에 영향을 주는 요인-수온 (Reeders and Vate, 1990; Fanslow *et al.*, 1995), 수질 (Englund and Heino, 1996; Soto and Mena, 1999), 먹이종류 및 밀도 (Hwang, 1996; Hwang *et al.*, 2001) 등은 패류의 성장과 서식분포를 결정하는 데 매우 중요하다.

패류의 섭식능에 대한 국내의 초기 연구는 외래침입종인 얼룩말조개 (zebra mussel)에 대한 연구가 집중적으로 진행되었으나 (Holland, 1993; Nicholls and Hopkins, 1993), 인공구조물에 밀생하여 여러 가지 부작용을 일으키는 문제 때문에 최근에는 밀생하지 않고 운동성이 강한 재첩과 같은 다른 종류의 패류에 대한 관심이 증가하고 있다 (Cohen *et al.*, 1984; Caraco *et al.*, 1997; Dionisio Pires *et al.*, 2005).

패류의 여과능을 이용한 유해조류 제어에 대한 연구가 활발히 시도되고 있으나 (Noorhius *et al.*, 1992; Mellina *et al.*, 1995; Dame, 1996), 이들 대부분의 연구는 해양 또는 기수역에서 서식하는 종을 대상으로 하고 있으며, 밀생하지 않은 담수패류를 이용한 조류제어 연구는 매우 미진하여 국내에서는 재첩을 이용한 실험실적 연구가 시도되었을 뿐이다 (김 등, 2004, 2005; 황 등, 2005).

말조개 (*Unio douglasiae*)는 오래 전부터 재첩과 함께 우리나라 대부분의 하천과 호소에 서식하는 대표적인 담수산 패류이다 (길, 1976; 권과 최, 1982). 이들은 낮은 수온과 용존산소, 그리고 높은 유기물 오염에 대한 저항성이 강하고, 다른 패류에 비해 단위시간당 유기물(조류) 섭식율이 높으며 (Hwang *et al.*, 2004), 남조 *Microcystis aeruginosa*와 같은 유해조류 제어를 위한 유용생물로 이용되고 있다 (김 등, 2008; 박 등, 2008; 이 등, 2008).

일반적으로 부영양수계에서 저온기 동안 규조류의 밀도가 높으며 (Kilham *et al.*, 1986; Leitao, 1995), 국내에서도 겨울철 동안 결빙되지 않은 호수 (Han *et al.*, 2002; Hong *et al.*, 2002; Kim and Hwang, 2004)와 하천 (이와장, 1997; Cho *et al.*, 1998; Ha *et al.*, 2002; 정 등, 2003; 서 등, 2005) 등에서 규조류가 우점하는 경우가 많이 보

고되고 있다. 이와 같은 규조발생은 고온기에 남조발생과는 다르게 독소발생이나 피해 등은 아직까지 보고된 바 없으나, 정수과정이나 수돗물 냄새에 영향을 주는 것으로 알려져 왔다 (Oksiyuk, 1965; Sakevich, 1970; Lim *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2001).

본 연구는 국내 하천이나 호수에서 풍부하게 분포하는 말조개를 대상으로 저온기에 높은 규조발생을 보이는 한강과 일감호의 현장수에 대한 섭식특성을 비교하기 위하여, 실험당일 비슷한 시간에 채수한 두 시료를 수조에 넣고 패류를 채집하였던 현장밀도보다 다소 높은 3가지 밀도 (0.3, 1.0, 2.0 indiv. L⁻¹)로 각각 조절하여 각 시료에 대한 패류의 여과율 및 배설물 생산 등을 조사하였다.

재료 및 방법

1. 패류채집 및 관리

실험에 사용된 패류는 여과섭식성 담수산 이매패 말조개 (*Unio (Nodularia) douglasiae*)로서 작은말조개, 귀이빨대칭이, 펼조개, 재첩, 논우렁이 등과 함께 우리나라 대부분의 하천에서 서식하기도 하며 (길, 1976; 권과 최, 1982), 이들은 남자루 같은 어류들의 산란처를 제공하기도 한다 (백 등, 2002). 또한 유기물이 풍부하고 용존산소가 비교적 낮은 하천의 보 또는 진흙 층이 발달된 농수로 등에서 높은 밀도를 보인다 (박 등, 2008).

말조개 채집은 출현밀도가 비교적 높은 금강 및 만경강 수계에서 저인망 그물 또는 직접 손으로 채집하였으며, 수확된 패류는 곧바로 Ice box에 넣어 실험실로 옮긴 다음, 탈염시킨 수돗물로 2~3회 부드럽게 세척한 후 임의로 제작한 패류관리조에 넣어 순응시켰다. 패류관리조는 크게 먹이를 공급하는 원수조, 사육조, 그리고 사육조를 통과한 물을 폭기 및 여과하여 원수조에 재공급하는 유지조 등 3개 조로 구성되었으며, 위치에너지를 이용하여 물을 이동시키고, 유지조에서 원수조로는 소형펌프 (ID-50, 서울)를 이용하여 8 L min⁻¹ 속도로 순환시켰다. 사육조는 채집현장에서 동시에 수집한 자갈과 모래를 3~4 cm 두께로 바닥에 깔았으며, 월 1회씩 탈염수로 세척하였다. 유지수는 현장수 (일감호, 서울)를 유지조에 매주 60 L씩 주 1회씩 넣었으며, 증발로 손실된 부분은 탈염-폭기수로 보충하였다. 패류가 유지되는 동안 패각이 열려있거나 운동력과 섭취능이 현저히 떨어진 개체는 사망한 것으로 판단하여 제거하였다. 실험에 사용된 패류는 건강상태가 양호한 성체를 선별하여 실험 3일 전부터 먹이 공급을 중단하였다.

2. 패류건중량

말조개의 건중량(Ash-free dry-weight: AFDW)을 구하기 위하여, 크기가 다양한 패류를 선별하여(3.7~14.4 cm, n=222) 탈염수돗물로 2~3회 정도 세척하고 불순물을 제거한 다음, 길이와 무게를 측정하였다. 측정이 끝난 패류는 해부용 칼을 이용하여 패각과 내장-근육 부위를 분리하였다. 패각을 제외한 모든 부분을 미리 계측한 도가니에 담고 100°C dry oven에서 48시간 동안 건조시킨 다음 도가니의 무게를 측정하였다(W₁). 건중량을 잰 도가니를 500°C furnace (HY-8000S, YUYU SCIENTIFIC)에 넣고 30분간 태운 다음, 100°C dry oven으로 옮겨 48시간 방치시킨 후 다시 무게를 측정하였다(W₂). 최종적으로 말조개의 AFDW는 두 무게 차이(W₁-W₂)로 계산하였다. 한편, 실험에 사용하였던 패류의 AFDW는 앞에서 구한 각 패류의 길이 및 무게에 대한 이들의 AFDW와 가장 높은 상관성을 보였던 패류의 길이(AFDW=0.0295L²-0.0824L-0.2625, r²=0.85, p<0.0001)를 이용하여 사용된 패류의 AFDW를 추정하였다.

3. 섭식실험

연구에 사용한 실험수는 규조류가 우점하였던 2008년 1월 15일 서울시 건국대학교에 위치한 일감호(오전 10:00)와 한강 특섬유원지 부근(오전 11:00)에서 채수하여 실험실로 운반하고, 1mm Nylon mesh로 여과하였다(Table 1). 섭식실험은 말조개의 밀도를 달리하여 실시하였는데, 앞에서 여과한 일감호 원수를 식물플랑크톤이 균일하게 되도록 잘 혼합한 후 플라스틱 수조에 넣고, 말조개를 넣지 않은 대조군(0.0 indiv. L⁻¹)과 1마리를 넣은 LOW (0.3 indiv. L⁻¹), 3마리를 넣은 MID (1.0 indiv. L⁻¹),

그리고 6마리를 넣은 HIGH (2.0 indiv. L⁻¹) 등 3개 조로 구성하였다. 한강 실험수 역시 일감호와 동일한 방법으로 동시에 실시하였다. 실험조건은 형광등을 이용하여 60.0 μmol m⁻² sec⁻¹의 광을 주고 온도는 18~19°C로 유지하였다. 시료채취는 모든 실험에서 동일하게 실시하였는데, 패류를 투입하기 전(0 hr), 투입 이후 각각 1, 4, 7시간째 중층(표층에서 10 cm 아래 부분)에서 최대한 교란이 일어나지 않도록 채취하여, 수중내 Chl-a, 조류현존량, 여과율 및 배설물 생산 등을 각각 분석하였다.

4. 패류의 여과율 및 배설물 생산

말조개의 여과율(Filtering rate: FR)은 일정시간 동안 섭식실험을 진행한 다음, 수중내 Chl-a 농도의 변화를 패류의 건중량으로 나눈 값을 의미하며, 앞에서 언급한 바와 같이 사용된 패류의 건중량(AFDW, g)은 패각의 길이(cm)를 이용하여 추정된 값을 이용하였으며, 여과율 FR(L g⁻¹ h⁻¹)은 다음과 같은 식에 의하여 산출하였다.

$$FR=(M/n) [(lnC_1 - lnC_2)/t]$$

M은 수조의 부피(L), n은 패류의 건중량(g), C₁과 C₂는 수중내 초기 또는 최종적인 엽록소 농도(μg L⁻¹), t는 배양시간.

실험기간 동안 패류에 의해 생성된 배설물(Feces production: FP)은 대조군 및 패류 처리군의 수조 바닥에 가라앉은 pellet를 포함한 자연침전물 모두를 소형펌프를 이용하여 조심스럽게 수거하여 500 μm mesh로 여과한 다음 다시 GF/F로 여과한 후 100°C에서 24시간 건조 후 무게를 측정하여 무게중량법에 의하여 부유물질(SS)을 측정하였다(APHA, 1995). 최종적으로 대조군(S₁)과 처리

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

Contents	Han river	Lake Ilgam
Localities	N 37° 31'30", E 127° 04'30"	N 37° 31'50", E 127° 05'10"
Sampling time	2008-01-15 AM 10:00	2008-01-15 AM 11:00
Temperature (°C)	1.35	4.43
Conductivity (μs cm ⁻¹)	108	316
Salinity (‰)	0.09	0.25
DO saturation (%)	131	99
pH	8.4	8.1
Turbidity (NTU)	1.7	7.8
TN (mg L ⁻¹)	6.24	1.22
TP (mg L ⁻¹)	0.36	0.06
Chl-a (μg L ⁻¹)	47.13	25.43
Cell density (cells mL ⁻¹)	20,587	22,013
Dominant species	<i>Asterionella formosa</i> (51.2%) <i>Stephanodiscus hantzschii</i> (44.7%)	<i>Synedra ulna</i> (58.1%) <i>Scenedesmus</i> sp. (21.3%)

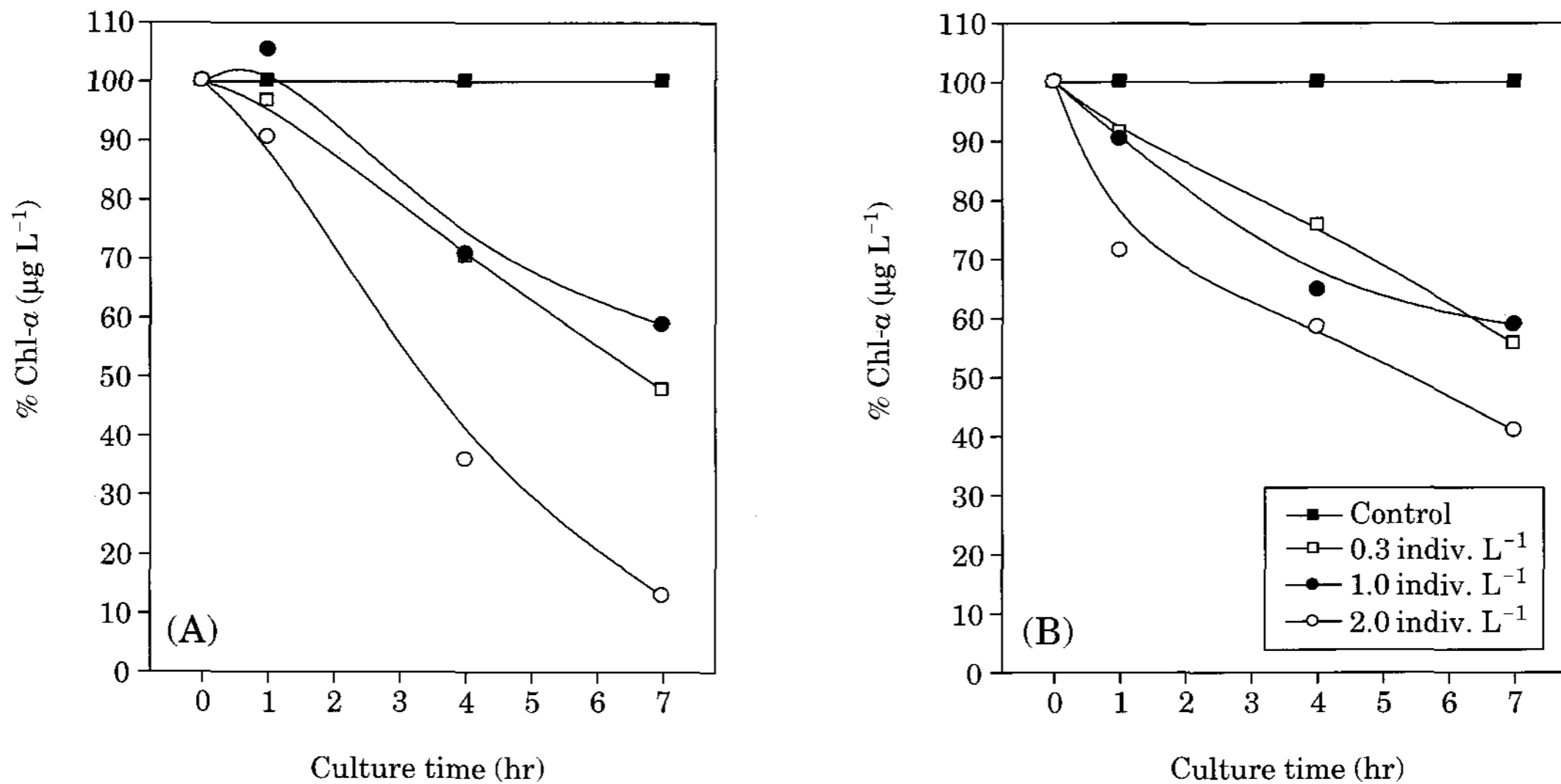


Fig. 1. Changes in the concentration of chlorophyll *a* of two different diatom communities in the presence of freshwater bivalve *Unio douglasiae* at different densities (0.3, 1.0 and 2.0 indiv. L⁻¹). (A) Han River, where *Asterionella formosa* and *Stephanodiscus hantzschii* occupied over 97% of total phytoplankton, (B) Lake Ilgam, where *Synedra ulna*, *Scenedesmus* sp. and *Microcystis aeruginosa* occupied 81.5% of total phytoplankton.

군(S₂)의 평균 무게차이를 패류의 건중량으로 나눈 값을 FP로 산정하였다. 남조류 중 균체의 크기가 500 μm 이상 일 경우, 다소 낮게 계산될 수 있다. FP(mg g⁻¹ h⁻¹)는 다음과 같은 식에 의하여 계산하였다.

$$FP = (M/n) (S_1 - S_2) / t$$

M은 수조의 부피(L), n은 패류의 건중량(g), S₁과 S₂는 대조군과 처리군의 바닥층 SS 농도(mg L⁻¹), t는 배양시간.

5. 실험수의 환경요인조사

현장의 수온과 pH, Conductivity, 용존산소 측정은 Portable multiparameter를 이용하여 직접 측정하였다(YSI, 600QS-O-M, USA). 영양염 분석을 위한 시료는 5 L Van Dorn 채수기를 이용하여 채수후 4 L 폴리에틸렌 채수통에 시료를 넣고 ice box에 담아 실험실로 운반한 후 수질 오염공정시험방법(환경부, 2004)에 준하여 분석하였다. 총질소(TN)는 알칼리성 과황산칼륨의 존재하에 120°C에서 유기물과 함께 분해하여 질산이온으로 산화시킨 다음 산성에서 자외부 흡광도를 측정하여 정량하는 자외선 흡광광도법을 이용하였으며, 총인(TP)은 시료중의 유기물을 산화 분해하여 모든 인 화합물을 인산염(PO₄) 형태로 변화시킨 다음 인산염을 아스코르빈산환원 흡광광도법을 이용하여 UV/Visible Spectrophotometer (Thermo, evolution 500, 2005)로 정량하였다. 현장수와 실험수조내 엽록

소 *a* 분석은 동일한 방법으로 실시하였는데, GF/C필터로 채수 Sample을 여과한 후 24시간 동안 90% 아세톤 10 mL으로 4°C 암상태 하에서 추출하였다. 추출한 시료는 500G로 20분간 원심분리한 후 상층액을 분광광도계를 이용하여 측정하였다(APHA, 1995).

조류현존량은 측정시간별로 각 수조에서 1 mL를 채취하여 Lugol's solution로 고정한 후 Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 광학현미경(Axiostar plus, ZEISS, Germany) 하에서 계수하였다. 패류에 의한 조류현존량의 변화, 즉 조류제어율(algal removal ability: ARA)은 다음과 같은 식에 의하여 계산하였다.

$$ARA (\%) = (1 - \text{처리군} / \text{대조군}) * 100.$$

6. 자료분석

대조군과 패류가 처리된 수조내 평균 엽록소-*a*량의 차이를 비교하기 위하여, ANOVA 분석을 실시하였으며, 말조개의 크기 및 무게에 대한 유기물 함량과의 상관성은 다중회귀식을 이용하였다(SPSS 12.0).

결 과

1. 실험수의 특징

2008년 1월 15일 오전 10:00(한강)와 오전 11:00(일

Table 2. Algal removal ability (ARA) of mussel *Unio douglasiae* at different densities on the different diatom communities. ARA (%)=(1-experiment/control)*100. LOW: addition of mussel at density of 0.3 indiv. L⁻¹, MID: addition of mussel at density of 1.0 indiv. L⁻¹, HIGH: addition of mussel at density of 2.0 indiv. L⁻¹. Negative value means the increase of algal density by the introduction of mussel.

Site	Species	Time (hr)								
		LOW			MID			HIGH		
		1	4	7	1	4	7	1	4	7
Han River	<i>Asterionella formosa</i>	13.4	5.0	32.3	28.5	18.6	72.1	32.9	74.9	96.6
	<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	29.8	0.9	33.0	52.2	23.4	77.2	56.2	51.3	98.0
	<i>Microcystis aeruginosa</i>	53.1	78.6	100.0	43.8	57.1	100.0	100.0	57.1	100.0
	<i>Aulacoseira granulata</i>	83.3	-	-	100.0	-	-	45.8	-	-
	<i>Diatoma vulgare</i>	66.7	-20.0	-	100.0	100.0	-	66.7	100.0	-
	<i>Pinnularia major</i>	50.0	100.0	25.0	16.7	25.0	100.0	-50.0	100.0	100.0
	<i>Melosira varians</i>	0.0	0.0	-	-33.3	0.0	-	100.0	0.0	-
	<i>Navicula</i> sp.	40.0	100.0	-	20.0	100.0	-	60.0	100.0	-
Lake Ilgam	<i>Ankistrodesmus falcatus</i> var. <i>mirabilis</i>	-	100.0	-	-	100.0	-	-	100.0	-
	<i>Synedra ulna</i>	-33.5	8.3	22.3	26.4	26.8	42.7	-4.5	63.3	83.4
	<i>Scenedesmus</i> sp.	-21.1	15.6	27.7	28.1	16.8	43.1	-0.5	49.7	77.2
	<i>Diatoma vulgare</i>	-35.4	-10.2	57.1	27.7	-6.8	59.3	1.5	42.4	94.3
	<i>Microcystis aeruginosa</i>	31.3	53.3	6.5	42.5	52.0	25.8	70.0	64.0	71.0
	<i>Chroococcus</i> sp.	65.8	94.8	-116.7	52.7	73.3	66.7	34.2	91.1	0.0
	<i>Cryptomonas</i> sp.	-21.7	-86.7	53.3	-4.3	46.7	-30.0	-47.8	40.0	30.0
	<i>Tetraedron</i> sp.	53.8	48.1	42.4	82.7	33.3	45.5	50.0	50.0	68.2
	<i>Pediastrum simplex</i>	-	-4.2	100.0	-	37.5	78.3	-	100.0	100.0
	<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	7.7	69.2	62.5	30.8	0.0	37.5	38.5	61.5	68.8
	<i>Aulacoseira granulata</i>	-	40.0	-	-	30.0	-	-	100.0	-
	<i>Scenedesmus acuminatus</i>	100.0	100.0	45.5	62.5	-63.6	63.6	12.5	100.0	45.5
	<i>Melosira varians</i>	30.0	-	100.0	40.0	-	50.0	0.0	-	100.0
<i>Navicula</i> sp.	66.7	40.0	100.0	66.7	-20.0	100.0	66.7	40.0	100.0	

감호)에서 채수된 실험수는 수온을 비롯한 용존산소, 염분도, 탁도, 전도도 및 엽록소 a 등은 뚜렷한 차이를 보였으나, 조류현존량은 비슷하였다(Table 1). 탁도나 전도도는 일감호에서 높았으며, 영양염(TN, TP)은 한강에서 각각 5배 이상 높았다. 한강실험수는 *Asterionella formosa*, *Stephanodiscus hantzschii*가 전체 조류현존량의 약 98%를 차지하였고, 일감호는 *Synedra ulna*, *Scenedesmus* sp.가 현존량의 약 71%를 차지하였다.

2. 엽록소 및 조류현존량의 변화

종 조성이 서로 다른 실험수에 패류를 밀도별로 적용하고, 시간별로 수조내 엽록소량을 조사한 결과, 엽록소량은 전체적으로 시간이 경과할수록, 그리고 투입된 말조개 밀도가 증가할수록 감소하였으나 적용된 패류밀도와 시료에 따라 감소 패턴은 약간의 차이를 보였다(Fig. 1). 한강시료에 패류적용 1시간째까지는 엽록소 감소율은 적었으며, MID에서는 약간 증가하였고(105.4%), HIGH에서는 10% 미만으로 감소하였다(Fig. 1A). 4시간째에는

LOW (70.3%), MID (70.8%), HIGH (64.13%), 7시간째에는 LOW (52.23%), MID (41.22%), HIGH (87.14%) 등으로 패류밀도에 따라 엽록소 농도는 뚜렷이 감소하였다. 일감호에서는 엽록소 농도가 전체적으로 한강과 비슷한 감소 패턴을 보였으나, 7시간째 HIGH에서 60% 미만 엽록소 감소율이 낮았다(Fig. 1B). 패류적용 1시간째에는 모든 밀도군에서 LOW, MID에서는 10% 미만으로 감소하였고, 4시간째에는 LOW (24.29%), MID (35.27%), HIGH (41.56%)로 감소하였으며, 7시간째에는 LOW (44.35%), MID (41.1%), HIGH (59.1%) 순으로 패류밀도에 따라 감소하였다.

말조개를 적용한 후 조류현존량의 변화는 엽록소 감소 패턴과 유사하였다(r=0.705, P<0.0001, Table 2). 한강수 실험에서 우점하였던 *Asterionella formosa*, *Stephanodiscus hantzschii*의 현존량은 모든 밀도군에서 시간에 따라 뚜렷하게 감소하였으며, HIGH에서 7시간째에는 높은 제거율(ARA=96.6%, 98.0%)을 나타냈다. 한편, *Pinnularia major* (ARA=-50.0%, HIGH)와 *Melosira varians* (ARA=-33.3%, MID)는 패류적용 1시간까지 조류밀도가 증가

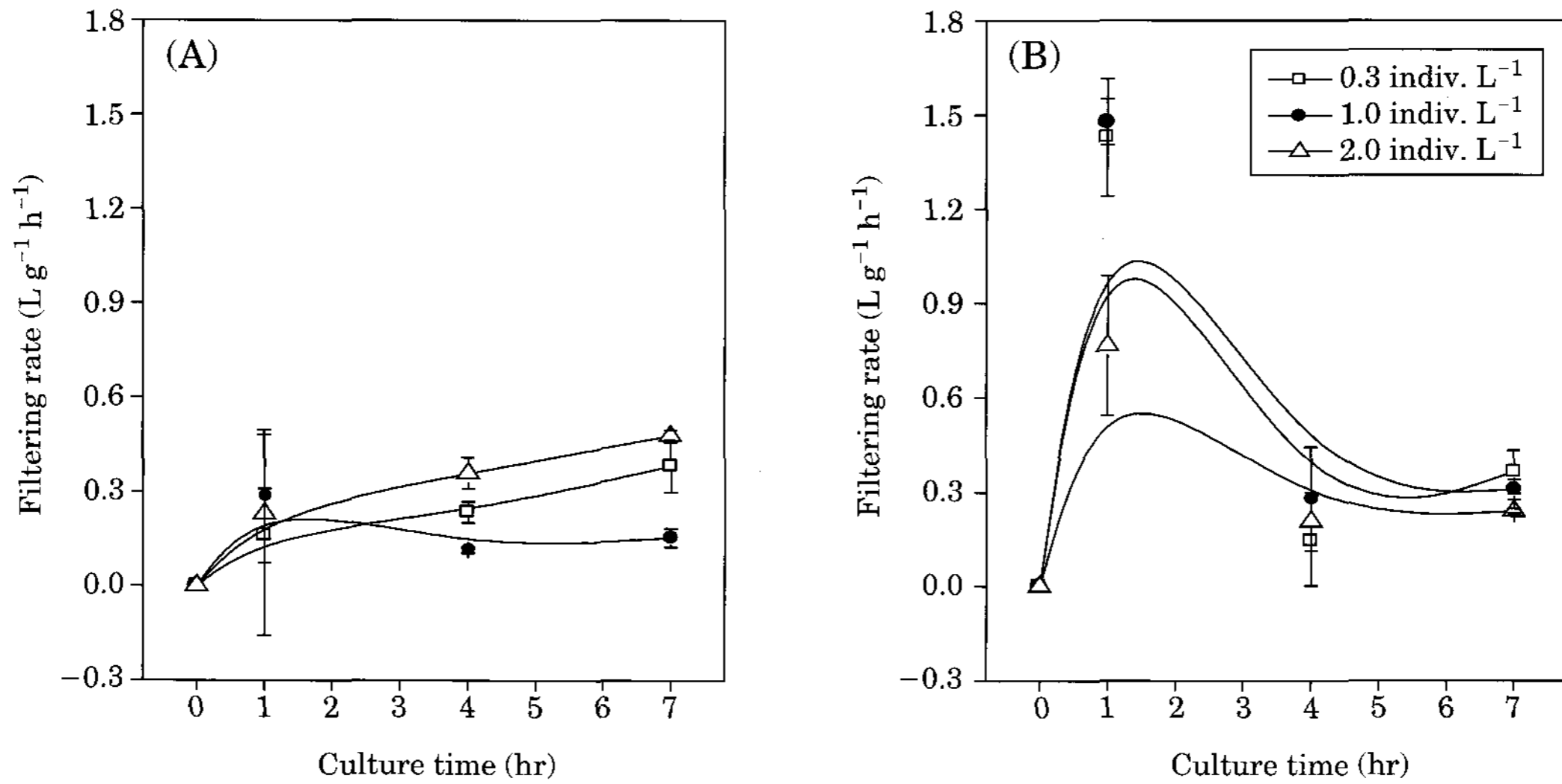


Fig. 2. Changes in the filtering rates of freshwater bivalve *Unio douglasiae* at different densities (0.3, 1.0 and 2.0 indiv. L⁻¹) on the different diatom communities. (A) Han River, where *Asterionella formosa* and *Stephanodiscus hantzschii* occupied over 97% of total phytoplankton, (B) Lake Ilgam, where *Synedra ulna*, *Scenedesmus* sp. and *Microcystis aeruginosa* occupied 81.5% of total phytoplankton.

하였으며, *Diatoma vulgare* (ARA=-20.0%, LOW)는 4시간까지도 계속적으로 증가하였다. 일감호에서 우점하였던 3분류군-*Synedra ulna*, *Scenedesmus* sp., *Diatoma vulgare*에 대한 낮은 밀도 패류적용 1시간까지 제어율이 (ARA=-33.5%, -21.1%, -35.4%) 낮았으며, 7시간째에도 *Synedra ulna*, *Scenedesmus* sp.는 30% 미만 제거율을 나타냈다. 고밀도의 패류적용 1시간까지 성장 및 제거율이 낮았으나 (ARA=-4.5%, -0.5%, 1.5%) 7시간째에는 높은 조류 제거율 (ARA=83.4%, 77.2%, 94.3%)을 각각 나타냈다. 또한, 두 시료에서 공히 출현하였던 *Navicula* sp.는 모든 밀도군에서 강한 제어율을 보였으며, 남조 *Microcystis aeruginosa*는 HIGH에서만 시간이 경과할수록 제어율이 증가하였다.

3. 패류의 규조류 여과능

규조류에 대한 말조개의 여과능은 패류적용 초기(1시간째) 큰 차이를 보였으나, 시간이 경과한 7시간째에는 점차 비슷한 수준에 도달하였다 (Fig. 2). 한강의 평균 여과율은 0.266 L g⁻¹ h⁻¹ (0.115~0.442), 일감호는 0.577 L g⁻¹ h⁻¹ (0.146~1.428)을 나타냈다. 한강시료에 대하여 패류적용 4시간째 MID에서 최저치(0.12 L g⁻¹ h⁻¹)를 보인 반면 (Fig. 2A), 일감호에서는 LOW와 MID에서 패류적용 1시간째 최고치(1.43 L g⁻¹ h⁻¹)를 각각 나타냈다 (Fig. 2B). 한편, 일감호에서 높은 여과율을 나타낸 것은 적용

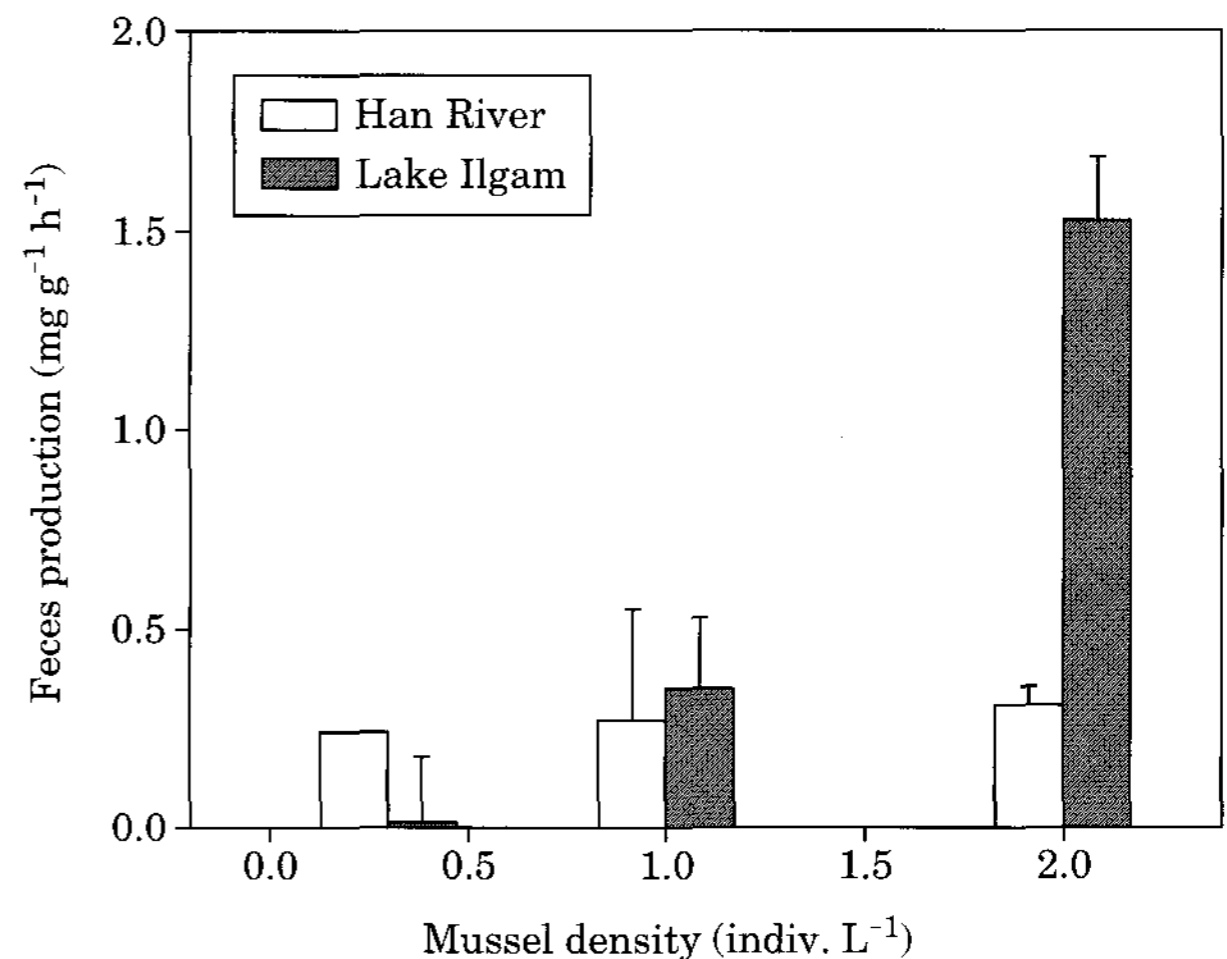


Fig. 3. Comparison of feces- and pseudofeces production of freshwater bivalve *Unio douglasiae* at different densities (0.3, 1.0 and 2.0 indiv. L⁻¹) on the different diatom communities. Han River; diatoms *Asterionella formosa* and *Stephanodiscus hantzschii* occupied over 97% of total phytoplankton, Lake Ilgam; *Synedra ulna*, *Scenedesmus* sp. and *Microcystis aeruginosa* occupied 81.5% of total phytoplankton.

1시간 때 급격한 여과율 증가가 원인이며, 시간이 경과할수록 급속한 감소를 보였다.

Table 3. Comparison of filtering rates (FR) of various freshwater and marine bivalves.

Bivalves	FR (L g ⁻¹ h ⁻¹)	Food sources	References
<i>Dreissena polymorpha</i>	1.21~6.72	Hypertrophic lake water	Hwang, 1996
<i>Corbicula leana</i>	0.24~0.87	Hypertrophic lake water	Hwang <i>et al.</i> , 2004
<i>Anodonta anatina</i>	0.24~0.49	Cultured algae	Bontes <i>et al.</i> , 2007
<i>Unio douglasiae</i>	0.06~0.80	Lake water (<i>Microcystis</i> ≈ 95% of total biomass)	Lee <i>et al.</i> , 2008
	0.09~0.46	Lake water (<i>Oscillatoria</i> ≈ 90%)	Park <i>et al.</i> , 2008
	0.15~1.43	Lake water (<i>Synedra-Scenedesmus</i> ≈ 79%)	This study
	0.12~0.44	Stream water (<i>Asterionella-Stephanodiscus</i> ≈ 98%)	This study

4. 패류의 배설물 생산

종 조성이 서로 다른 현장수에 동일한 밀도의 말조개를 각각 7시간 동안 섭취한 후 말조개가 생산한 배설물량을 측정된 결과, LOW와 HIGH군에서 시료에 따른 배설물 생산량 차이가 뚜렷하였다(Fig. 3). 일감호에서는 LOW(0.014 mg g⁻¹ h⁻¹)보다 HIGH(1.525 mg g⁻¹ h⁻¹)에서 100배 이상의 높은 배설물 생산을 보인 반면, 한강시료에서는 LOW(0.243 mg g⁻¹ h⁻¹)와 HIGH(0.310 mg g⁻¹ h⁻¹) 간에 유의한 차이를 보이지 않았다(ANOVA, P>0.5). 동일한 패류밀도에서 배설물 생산량은 LOW에서 한강시료가 일감호보다 약 17배 이상의 높은 생산량을 보인 반면, HIGH에서 일감호가 한강보다 약 5배 정도 높은 배설물을 생산하였다.

고 찰

본 연구는 저온기 동안 규조류 대발생을 일으키고, 수질 및 식물플랑크톤 종 조성이 서로 다른 한강과 일감호의 현장수에 대한 말조개의 밀도별 섭식특성을 비교 조사하였다. 말조개는 현장수-한강(*Asterionella formosa*, *Stephanodiscus hantzschii*, 우점율 약 98%), 일감호(*Synedra ulna*, *Scenedesmus* sp., *Microcystis aeruginosa*, 우점율 약 82%) 각각에 대하여 패류적용 시간에 따라 엽록소량의 뚜렷한 감소를 보였으나, 패류밀도에 있어서 시료 간에 약간의 차이를 나타냈다. 실험초기 현장수의 엽록소량이 일감호에 비하여 약 2배 정도 높았던 한강은 높은 밀도 처리군에서만 강한 엽록소 감소를 보였으며, 일감호는 패류밀도간에 큰 차이는 보이지 않았다. 이와 같이 동일한 밀도에서 섭식능의 차이는 종 조성의 차이로 인한 조류의 크기 및 형태가 주된 원인으로 판단되나(Shumway and Cucci, 1987; Shumway, 1990; Ward *et al.*, 1998), 외부로부터 영양염 공급이 없는 제한된 공간에 낮은 엽록소량은 물론 독성남조 *Microcystis aeruginosa*의 높은 현존량 및 상대적으로 나쁜 수질 등

이 말조개의 낮은 섭식능을 유도하였을 것으로 사료되었다.

패류적용에 따른 조류현존량의 감소는 엽록소와 유사하였으나(r=0.705, P<0.0001), 현장수와 식물플랑크톤 종에 따라 심한 차이를 보였다. 한강에서 조류현존량은 일감호와 비슷하였으나 두 우점종 *Asterionella formosa* (ARA=96.6%), *Stephanodiscus hantzschii* (98.0%)을 제외한 대부분의 출현종이 모든 밀도군(LOW, MID, HIGH)에서 7시간째 100%에 가깝게 제거된 반면, 일감호는 고밀도 패류군(HIGH)에서 적용 1시간까지는 약간의 증가(*Synedra ulna*=-4.5%, *Scenedesmus* sp.=-0.5%) 및 감소(*Diatoma vulgare*=1.5%)를 보였으나 4시간째부터 감소하기 시작하여 7시간째에는 높은 제거율(ARA=83.4%, 77.2%, 94.3%)을 보였다. 그러나 패류처리 이후 조류현존량 변화는 실험의 오차가 심하고, 패류밀도와 조류현존량 간의 상관성은(r<0.2) 낮았으며, 이런 특징은 한강보다 다양한 조류가 출현되었던 일감호에서 더욱 심하였으며, 한강은 남조류가 대발생하였던(*M. aeruginosa*가 전체의 95%를 차지) 현장수를 이용한 말조개 섭식실험(박 등, 2008; 이 등, 2008)과 유사하였다.

엽록소량을 이용한 말조개의 여과능은 패류적용 1시간째 두 시료 간에 차이가 큰 반면, 그 이후로 점차 유사한 수준에 도달하였다. 일반적으로 동일 밀도의 패류에서 먹이농도(조류)가 낮을수록 여과능이 높다고 알려져 왔다(Fanslow *et al.*, 1995; Hwang *et al.*, 2001). 본 연구에서는 엽록소량이 높았던 한강시료에 대한 초기여과율은 일감호보다 낮았으나 시간이 경과할수록 증가하여 7시간째에는 증가하였다. 남조류에 대한 말조개 섭식실험의 결과(이 등, 2008)와 비교하면, 일감호보다 한강시료와 비슷한 패턴을 보였다. 또한 말조개의 규조류 여과능은 남조류인 *Microcystis*(이 등, 2008)와 *Oscillatoria*(박 등, 2008)가 우점하였던 호수의 현장수를 대상으로 한 결과에 비해 약 2~3배 이상의 높았으며, 형태적으로 유사한 *Anodonta anatina*(Bontes *et al.*, 2007)보다 높은 여과능을 나타내(Table 3), 한국산 말조개의 규조류 섭식능은 매우 높은

것으로 사료되었다.

한강과 일감호 현장수는 말조개를 처리하지 않은 대조군에서 남조 *M. aeruginosa*가 각각 $16.0 \text{ cells mL}^{-1}$, $5.5 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 낮은 밀도를 보였으나, 시간이 갈수록 한강 시료에서는 서서히 감소하는 반면 일감호에서는 점차 증가하였다. 이러한 경향은 패류를 적용한 모든 처리군에서도 유사하였으며 엽록소 변화와는 차이를 보였다. 시간이 경과할수록 일감호 시료에 대한 패류의 낮은 여과능은 점차 증가한 *M. aeruginosa*나 독소에 의한 영향으로 판단되었으나 말조개가 조류독소(microcystin)를 잘 흡수하고 남조 *M. aeruginosa*가 대발생하는 수계에서도 서식한다는 보고(Yokoyama and Park, 2002)가 있어 추가적인 연구가 필요하다.

성격이 다른 시료에 대하여 일정한 시간 동안 말조개가 생산한 배설물의 양은 시료와 적용밀도에 따라 상당한 차이를 나타냈다(Fig. 3). 높은 엽록소 농도와 낮은 탁도 및 조류현존량을 보인 한강시료에서는 시간 또는 패류밀도에 상관없이 유사한 수준을 보인 반면, 일감호 시료는 LOW와 HIGH 간에 100배 이상의 뚜렷한 차이를 보였다. 이러한 차이는 일감호의 경우, 매년 남조발생을 막기 위한 수중 폭기로 인한 수체내 seston량 증가가 결국 배설물의 상당부분을 차지한 것으로 판단되며, 특히 HIGH군에서 높은 배설량을 보인 것은 높은 밀도 때문에 이동시 몸에서 떨어져 나온 불가피한 고형물 증가가 원인으로 판단되었다.

이상의 결과를 종합하여 보면, 특성이 다른 두 수계의 저온기 규조류에 대한 국내산 말조개의 여과능은 정체성 수역보다 하천에서 뚜렷하였으며, 고형물이 많은 정체수역에서 높은 배설물을 생산하였다. 결국, 말조개의 조류 여과능은 정체수역에서는 탁도가 높은 고형물로 인하여 다소 과소평가될 수 있지만, 수질개선(예, 탁도 증가)에 도움이 될 수 있을 것으로 사료되었다.

적 요

서로 다른 물리-화학적 성격이 다른 저온기 두 부영양 수계에서 우점하는 규조류 중심의 현장수에 대한 한국산 말조개 (*Unio douglasiae*)의 섭식특성-여과능 및 배설물 생산을 각각 비교 조사하였다. 두 실험수 모두 패류밀도가 증가할수록 뚜렷한 엽록소 *a* 감소를 보였으며, 한강시료는 1시간 이후부터, 일감호 시료는 패류 처리와 함께 즉시 감소였다. 한강시료는 고밀도 처리에서 감소율이 높았으며(약 90%), 일감호시료는 패류밀도 간에 다소 차이

는 보였으나 고밀도군에서도 50% 정도 감소하였다. 조류 현존량의 변화경향은 엽록소와 유사하였으며, 시료와 조류종에 따라 차이를 보였다. 패류의 조류여과능은 패류적용 1시간째 시료 간에는 큰 차이를 보였으나 시간이 경과할수록 유사한 수준에 도달하였다. 배설물 생산은 한강 시료에서는 밀도간에 차이가 적었으며 일감호의 높은 전도도와 탁도, 낮은 DO 포화도에서는 밀도 간에 100배 이상의 큰 차이를 나타냈다. 특히 일감호에서 고밀도 패류 적용시, 낮은 엽록소(조류) 감소 및 높은 배설물 생산 등은 소화가 어려운 고형물의 축적효과가 높아 저온기 동안 탁도가 높은 하천 및 호수의 수질개선에 매우 효과적일 것으로 사료되었다.

사 사

본 연구는 학술진흥재단 기초연구과제지원사업(KRF-2007-313-F00050)에 의하여 수행되었으며, 실험을 도와 주신 김난영, 이연주, 유영훈 분들께 감사드립니다.

인 용 문 헌

- 권오길, 최준길. 1982. 의암호의 패류에 관한 연구(2) 의암호의 패류상과 어류의 패류내 산란에 관한 연구. 한국육수학회지 15: 39-50.
- 길봉섭. 1976. 담수산 이매패의 생태학적 연구- 분포와 형태변이. 한국육수학회지 9: 29-38.
- 김건희, 김백호, 박명환, 황순진. 2008. 담수패류(*Unio douglasiae*)와 침수식물(*Potamogeton crispus*)의 유해 남조 *Oscillatoria* sp. 성장억제 효과. 한국육수학회지 41(S): 68-76.
- 김호섭, 공동수, 황순진. 2005. 얇은 부영양 저수지의 동, 식물 플랑크톤 군집 변화 특성. 한국육수학회지 38: 18-29.
- 김호섭, 박정환, 공동수, 황순진. 2004. 참재첩을 이용한 부영양호의 수질개선. 한국육수학회지 37: 332-343.
- 박구성, 김백호, 엄한용, 황순진. 2008. 남조류 대발생 환경에서 수심과 용존산소 변화에 따른 담수산 이매패(말조개)의 생존율, 여과율 및 배설물 생산. 한국하천호수학회지 41(S): 50-60.
- 백현민, 송호복, 권오길. 2002. 홍천강 상류에 서식하는 묵납자루, *Acheilognathus signifer*의 연령과 성장. 한국어류학회지 14: 254-261.
- 서미연, 김백호, 배경석, 한명수. 2005. 한강하류의 남조류 및 환경요인의 연간(2000~2003) 변화에 대하여. 한국육수학회지 38: 315-321.
- 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.
- 정승원, 이진환, 유중수. 2003. 한강 하류의 환경학적 연구 V. 식물 플랑크톤 군집 대발생의 특징. *Algae* **18**: 255-262.
- 환경부. 2004. 수질오염공정시험방법.
- APHA. 1995. Standards methods for the examination of water and wastewater (19thED.). American Public Health Association, Washington, D.C.
- Bontes, B.M., A.M. Verschoor, L.M.D. Pires, E. Van Donk and Bas W. Ibelings. 2007. Functional response of *Anodonta anatina* feeding on a green alga and four strains of cyanobacteria, differing in shape, size and toxicity. *Hydrobiologia* **584**: 191-204.
- Caraco, N.F., J.J. Cole, P.A. Raymond, D.L. Strayer, M.L. Pace, S.E.G. Findlay and D.T. Fischer. 1997. Zebra mussel invasion in a large, turbid river: phytoplankton response to increased grazing. *Ecology* **78**: 588-602.
- Cohen, R.R.H., P.V. Dresler, E.J.P. Phillips and R.L. Cory. 1984. The effect of the Asiatic calm, *Corbicula fluminea*, on phytoplankton of the Potomac River, Maryland. *Limnol. and Oceanogr.* **29**: 170-180.
- 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*. *J. Plankton Res.* **27**: 331-339.
- Dame, R.F., R. Zingmark and D. Nelson. 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.
- Dame, R.F. 1996. Ecology of marine bivalves: An ecosystem approach. CRC Press, Boca Raton, 254 p.
- Englund, V.P.M. and M.P. Heino. 1996. Valve movement of the freshwater mussel *Anodonta anatina*: a reciprocal transplant experiment between lake and river. *Hydrobiologia* **328**: 49-56.
- Fanslow, D.L., T.F. Nalepa 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**: 489-500.
- Ha, K., M.H. Jang and G.J. Joo. 2002. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities along a regulated river system, the Nakdong river, Korea. *Hydrobiologia* **470**: 235-245.
- Heath, R.T., G.L. Fahnenstiel, W.S. Gardner, J.F. Cavaletto 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.
- Holland, R.E. 1993. Changes in plankton diatoms and water transparency in Hatchery Bay, Bass Island area, western Lake Erie since the establishment of the zebra mussel. *J. Great Lakes Res.* **19**: 617-624.
- Hong, S.S., S.W. Bang and M.S. Han. 2002. Effects of rainfall on the hydrological conditions and phytoplankton community structure in the riverine zone of the Pal'tang Reservoir, Korea. *J. Freshwater Ecol.* **17**: 507-519.
- Hwang, S.J. 1996. Effects of zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) on phytoplankton and bacterioplankton: Evidence for size-selective grazing. *Kor. J. Limnol.* **29**: 363-378.
- Hwang, S.J., H.S. Kim and J.K. Shin. 2001. Filter feeding effects of a freshwater bivalve (*Corbicula leana* PRIME) on phytoplankton. *Kor. J. Limnol.* **34**: 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 Biol.* **44**: 569-579.
- Kilham, P., S. Kilham and R.E. Hecky. 1986. Hypothesized resource relationships among African planktonic diatoms. *Limnol. Oceanogr.* **31**: 1169-1181.
- Lee, C.W., C.W. Jung, S.W. Han, L.S. Kang and J.H. Lee. 2001. The removal of algae by oxidation and coagulation processes. *J. Korean Soc. Environ. Eng.* **23**: 1527-1536.
- Leitao, M. 1995. Eutrophication du Loir et son incidence sur l'usine d'eau potable de la Fleche (Sar the). *Technol. Sci. Methods* **1**: 31-37.
- Lim, Y.S., W.S. Song, J.S. Cho, H.J. Lee and J.S. Heo. 2000. The effect of algae on coagulation and filtration of water treatment process. *Korean J. Environ. Agricul.* **19**: 13-19.
- Loo, L-O. and R. Pillsbuty. 1989. Bivalve suspension-feeding dynamics and benthic-pelagic coupling in a eutrophicated marine bay. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **130**: 253-276.
- Mellina, E., J.B. Rasmussen and E.L. Mills. 1995. Impact of zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) on phosphorus cycling and chlorophyll in lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **52**: 2553-2573.
- Nicholls, K.H. and G.J. Hopkins. 1993. Recent changes in Lake Erie (north shore) phytoplankton: cumulative impacts of phosphorus loading reductions and the zebra mussel introduction. *J. Great Lakes Res.* **19**: 637-647.

- Noordhuis, R., H. Reeders and A. Bij De Vaate. 1992. Relationship between carbon content, cell volume and area in phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* **11**: 307-311.
- Oksiyuk, O.P. 1965. *Stephanodiscus hantzschii* Grun. as an aromatic organisms capable of giving fish smell to water. *Gidrobiologiya Zhurnal* **1**: 50-53.
- Phelps, H.L. 1994. The Asiatic Clam (*Corbicula fluminea*) invasion and system-level ecological change in the Potomac River Estuary near Washington, DC. *Estuaries* **17**: 614-621.
- Reeders, H.H. and A.B. Bij de Vaate. 1990. Zebra mussels (*Dreissena polymorpha*): a new perspective for water quality management. *Hydrobiologia* **200/201**: 437-450.
- Sakevich, A.I. 1970. The discovering of methylamines in the culture of *Stephanodiscus hantzschii* Grun. *Gidrobiologiya Zhurnal* **6**: 98-100.
- Shumway, S.E. 1990. A review of the effects of algal blooms on shellfish and aquaculture. *J. World Aquacul. Soc.* **21**: 65-104.
- Shumway, S.E. and T.L. Cucci. 1987. The effects of the toxic dinoflagellate *Protogonyaulax tamarensis* on the feeding and behaviour of bivalve molluscs. *Aquatic Toxicol.* **10**: 9-27.
- Sprung, M. and U. Rose. 1988. Influence of food size and quality of the feeding of the mussel *Dreissena polymorpha*. *Oecologia* **77**: 526-532.
- Vaughn, C.C. and C.C. Hakenkamp. 2001. The functional role of burrowing bivalves in freshwater ecosystems. *Freshwater Biol.* **46**: 1431-1446.
- Ward, J.E., J.S. Levinton, S.E. Shumway and T. Cucci. 1998. Particle sorting in bivalves: in vivo determination of the pallial organs of selection. *Marine Biol.* **131**: 283-292.
- Winkel, E.H. and C. Davids. 1982. Food selection by *Dreissena polymorpha* Pallas (Mollusca: Bivalvia). *Freshwater Biol.* **12**: 533-558.
- Yokoyama, A. and H.D. Park. 2002. Depuration kinetics and persistence of the Cyanobacterial toxin Microcystin-LR in the freshwater bivalve *Unio douglasiae*. *Environ. Toxicol.* **18**: 61-67.

(Manuscript received 22 May 2008,
Revision accepted 4 June 2008)