

CROM를 이용한 부영양 저수지의 유기물 제어: 이매패의 종 특이성에 대하여

이주환 · 황순진 · 박선구¹ · 황수옥² · 유춘만³ · 김백호*

(건국대학교 환경과학과, ¹(주)아썸 호소생태연구소,
²전남대학교 생물학과, ³한국수자원공사 팔당권관리사무소)

Continuous Removal of Organic Matters of Eutrophic Lake Using Freshwater Bivalves: Inter-specific and Intra-specific Differences. Lee, Ju-Hwan, Soon-Jin Hwang, Sun-Gu Park¹, Su-Ok Hwang², Chun-Man Yu³ and Baik-Ho Kim* (Departments of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; ¹Research of Limnology, ASSUM, Gyeonggi 427-070, Korea; ²Paldang Dam Office, Korea Water Resources Corporation, Gyeonggi, Korea; ³Departments of Biology, Chonnam University, Gwangju 500-757, Korea)

Inter- and intra-specific differences in removal activities, filtering rates (FR) and production of feces-and pseudo-feces (PF) between a native freshwater bivalve in Korea, *Anodonta woodiana* Lea and *Unio douglasiae* Griffith et Pidgeon, were compared using a continuous removal of organic matters (CROM) system. The CROM system comprised five steps; input of polluted water, control of water flow, mussel treatment, analysis of water quality and discharge of clean water. The study was designed to compare the removal activity of organic matters between *A. woodiana* and *U. douglasiae*, and the intra-specific differences between density and length in *A. woodiana*. Results clearly indicate that two kinds of mussels had obvious removal activities of seston in the eutrophic reservoir. First, if both are similar in shell length, there were no significant inter-specific differences in removal activity between *A. woodiana* and *U. douglasiae* ($P > 0.5$), but FRs of *U. douglasiae* was relatively high due to low ash-free dry weight. Second, if both are same in animal density, the smaller mussels (1~2 years old) showed a higher filtering rate and production of feces- and pseudo-feces and less release of ammonium than the larger mussels. Third, if both are same in biomass, FRs and PF of mussels were higher in the low-density tank than the high-density tank, while the concentration of $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ released was similar to each other ($P > 0.5$). Therefore, these results suggest that CROM system using a young bivalve *A. woodiana* can be applied to control the nuisance seston in eutrophic lake system, if a relevant species and density were selected. Additional pilot tests to optimize the age and density of domestic bivalves were needed for the generalization of CROM operation.

Key words : CROM system, water quality improvement, seston, eutrophic lake, freshwater bivalves, inter-specific, intra-specific

* Corresponding author: Tel: 02) 450-3748, Fax: 02) 452-3749, E-mail: oelael@konkuk.ac.kr

서 론

우리나라는 20세기 초부터 농업용수를 비롯한 생활용수를 확보하기 위해 전국에 많은 저수지들을 조성하여 왔으나, 이들 대부분은 급속한 산업화와 함께 기능의 다양화에 따른 수량부족 및 부영양화 등으로 양적, 질적 관리의 어려움에 직면하고 있다. 일반적으로 호소의 부영양화는 수심이 얕고 표면적이 넓을수록 쉽게 발생되며(Rawson, 1995), 국내 많은 저수지가 고령화에 의한 퇴적물 증가로 수량이 감소하였고 전체의 약 40%가 부영양 또는 과영양 상태이다(Hwang *et al.*, 2003; 농어촌연구원, 2005).

부영양 호소의 수질개선을 위하여 준설, 심층수 방류, 응집 및 부상분리, 살조제, 인불활성제 처리 등과 같은 물리-화학적 기술들이 개발, 적용되어 왔다(Jeffries and Mills, 1990; Welch, 1992). 이들은 빠르고 뚜렷한 효과를 보이지만 처리 비용이 많이 들고, 지속적인 효과를 얻기 위해 반복적인 기술적용이 불가피하며, 2차 오염이 우려되는 단점이 있다(Sevrin-Reyssac and Pletikosic, 1990). 최근 생물학적 기술로서 어류(Carpenter *et al.*, 1985; Fukushima *et al.*, 1999), 동물플랑크톤(Lampert *et al.*, 1986), 살조세균(Sigee *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 2008), 패류(Heath *et al.*, 1995; Lavrentyev *et al.*, 1995; Jack and Thorp, 2000), 수생식물(Hill, 1986; Zhenbin *et al.*, 2007) 등 기능성 생물을 이용하는 방법들이 각광을 받고 있다. 그러나 이들 역시 실험실이나 극히 제한된 공간(microcosm, mesocosm)에서 재현한 것으로 저수지 현장에 직접 적용하거나 성공한 사례는 드물고, 대량화 및 처리이후 생물관리의 어려움 등 기술의 완성도가 떨어지는 단점을 갖고 있다.

본 연구팀은 부영양 저수지 수질개선을 위한 물리-화학적 또는 생물학적 연구를 수행하여 왔으며(황 등, 2001; 김 등, 2004; 김 등, 2005; 박 등, 2006; 박 등, 2008), 최근 국내 하천에 흔히 분포하며 오염내성이 강한 이매패(말조개, 펄조개)의 높은 유기물 제어능을 보고하였다(김 등, 2003; Hwang *et al.*, 2004; 이 등, 2008a, b; 황 등, 2008; 이 등, 2009). 그러나 이들 패류 역시 현장에 직접 도입함에 있어서 대량배양이나 처리이후 생물관리의 어려움, 그리고 기능생물의 현장적용에 대한 관련 기관들의 이해부족 및 법규미비 등, 생물을 이용한 수질개선 기술의 안정화가 현실적으로 매우 어렵다는 사실을 확인하였다.

한편, 김 등(2009)은 패류를 직접 현장에 도입하지 않고 비교적 낮은 밀도하에서 부영양 저수지의 표층수를

실내로 유입한 다음 이를 패류조에 연속적으로 통과시켜 유기물을 제거하고 처리수는 저수지로 환원시키며, 동시에 생성된 배설물은 침전, 건조하여 토양화하는 이른바 CROM (continuous removal of organic matters using bivalves) 기술을 개발하였다. 이 기술은 McIvor (2004)가 토산종 패류를 수처리과정의 전처리용으로 이용한 사례에서 응용한 것으로서 패류적용 방법(수심, 유속, 집축기질)이나 배설물 처리 과정 등에서 차별성을 갖는다.

본 연구는 앞에서 언급한 바와 같이 기능성 생물(패류)을 이용한 부영양 저수지의 유기물 제어 및 수질개선을 목적으로 김 등(2009) 등이 개발한 CROM 장치를 이용하여 패류의 종류(말조개, 펄조개)와 패각길이(또는 연령), 적용밀도에 따른 유기물 제어능을 비교, 분석하였다.

재료 및 방법

1. 연구동물

실험에 사용한 패류는 국내산 이매패인 펄조개(*Anodonta woodiana* Lea)와 말조개(*Unio douglasiae* Griffith et Pidgeon)로 국내 대부분의 하천에 서식하며 어류의 산란장소를 제공한다(길, 1976; 권과 최, 1982; 박 등, 2008). 이들은 대개 동일한 하천에서 함께 출현되지만 전자는 유기물이 풍부하고 모래나 펄이 발달된 관개용 수로에서 후자는 하천의 상류에서 비교적 높게 분포하며, 먹이로는 플랑크톤이나 바닥의 유기물을 주로 섭취한다(권과 최, 1982; 김 등, 2009). 패류의 채취는 금강 및 만경강의 지류에서 성체만을 채집하였으며 채집된 패류는 곧바로 Ice box에 넣어 실험실로 운반한 다음 탈염 수돗물로 2~3회 씻고 관리조에 넣어 3개월 이상 순응시켰다. 실험에는 건강한 패류만을 골라 실험당일까지 2~3일 동안 먹이공급을 중단하였다.

2. 패류의 여과율, 배설물 생산량 및 제어율

패류의 여과율 및 배설물 생산량을 측정하기 위하여 패각길이가 다양한 표본 개체를 선별하여 이들의 유기물량을 직접 측정하고 실측치와 패류의 길이, 폭, 무게 중 가장 높은 상관성을 갖는 관계식을 토대로 실험에 사용한 패류의 유기물량을 추정하였다(Hwang *et al.*, 2004; 김 등, 2009). 측정결과 두 패류종의 유기물량과 요소별 상관성분석에서 각 패류의 유기물량은 패각길이와 가장 높은 상관성을 나타냈다(펄조개, $r^2=0.923$, $n=59$, $P<0.0001$; 말조개, $r^2=0.850$, $n=142$, $P<0.0001$, Fig. 2). 패

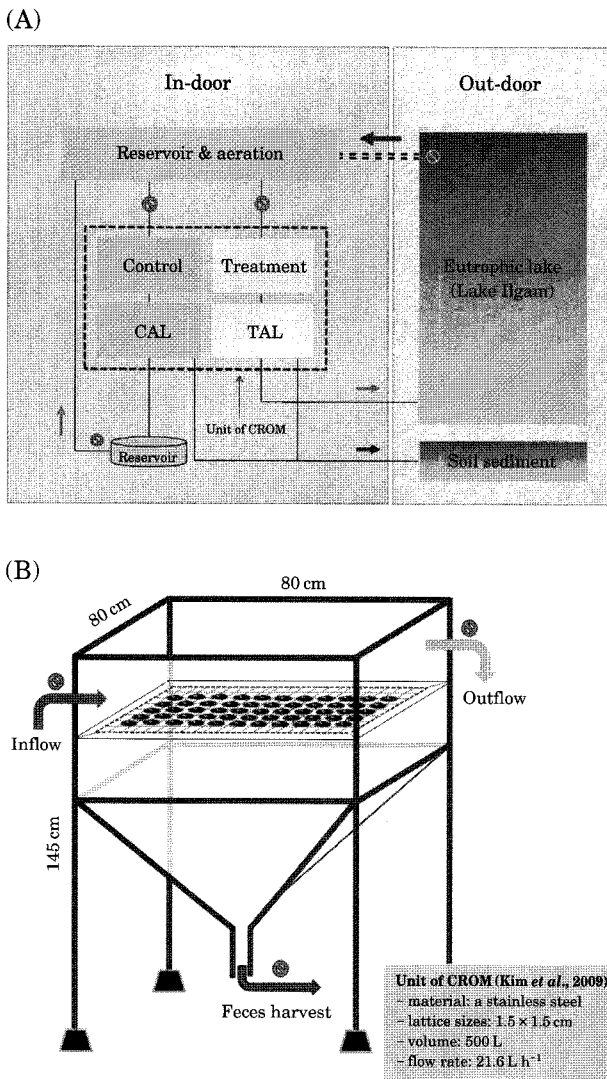


Fig. 1. Schematic diagram of CROM system established at in-door and out-door (A) and core unit of CROM system (B), that developed by Kim *et al.* (2009). In figure A, CAL and TAL, analysis of control and treatment waters, respectively.

류의 유기물 여과율(FR, filtering rates)은 일정시간 후 대조군과 패류 처리군 수체 중의 Chlorophyll-*a* (Chl-*a*) 농도 차이를 패류의 유기물량으로 나누어 계산하였다 (Coughlan, 1969). 여과율 계산식은 다음과 같다. $FR (L g^{-1} d^{-1}) = V/M \times \ln(T/C)/t$, V는 실험수의 부피(L), M는 사용된 패류의 유기물량(g), C, T는 대조군과 처리군의 Chl-*a* 농도($\mu g L^{-1}$), t는 실험시간이다. 패류의 배설물 생산량(PF, production of feces- and pseudo-feces)은 대조군 및 처리군에서 생성된 바닥 침강물량의 차이를 유기물량으로 나누어 계산하였다(김 등, 2009). 배설물 계산

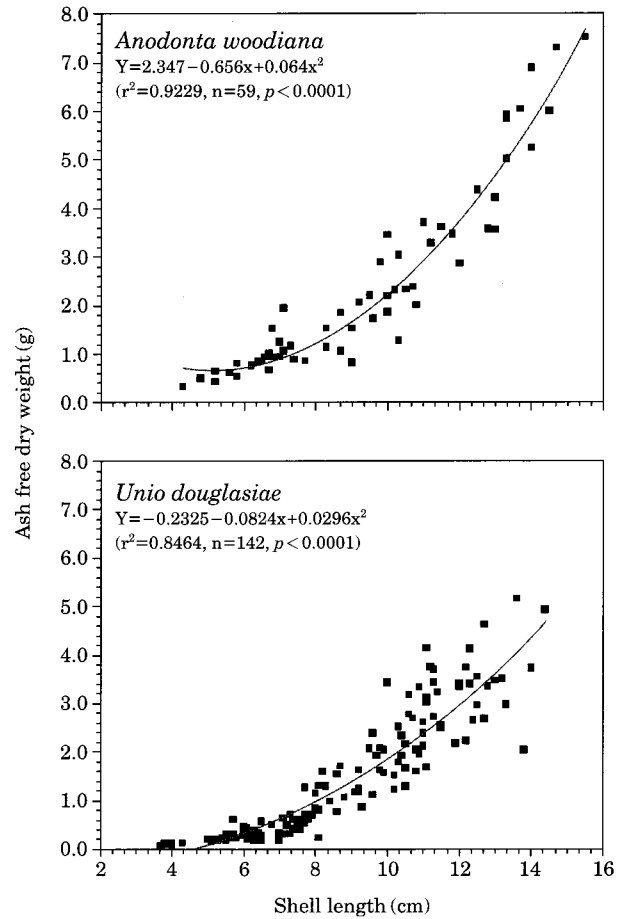


Fig. 2. Relationship between ash-free dry-weight (g) and shell length (cm) of *Anodonta woodiana* (n=59) collected from a tributary to the Geum river, and of *Unio douglasiae* (n=142) collected from Gapyung stream, South Korea.

식은 다음과 같다. $PF (mg g^{-1} d^{-1}) = (V/M) (S_2 - S_1) t^{-1}$, V는 실험수의 부피(L), M은 패류의 유기물량(g), S_1 S_2 는 대조군과 처리군의 침강물 무게(mg), t는 실험시간이다.

패류의 유기물 제어능(RA, Removal activities)은 대조군 및 처리군의 Chl-*a*와 SS의 농도 차이를 퍼센트로 나타낸 것으로 다음과 같은 식에 의하여 구하였다.

$RA (\%) = 1 - (C_t/C_o) * 100$, C_t 는 처리군의 Chl-*a* 또는 SS 농도, C_o 는 대조군의 Chl-*a* 또는 SS 농도이다.

3. 실험디자인

CROM은 김 등(2009)과 동일하게 현장수를 유입하는 수중펌프, 저류조, 유량조절기, 처리조, 분석조 등으로 구성하였고 분석조를 통과한 처리수는 저수지로 다시 환원

Table 1. The experimental designs and operation conditions of the CROM study.

Experiments	Inter-specific		Intra-specific			
			Shell length		Animal density	
	YAW	AUD	YAW	AAW	YAW	YAW
Types of mussels	YAW	AUD	YAW	AAW	YAW	YAW
Mussel density (ind. L ⁻¹)	1.0		0.5		2.2	5.4
Total weight (kg)	1.64	1.78	10.50	30.10	5.00	
Shell length (cm)	6.87±0.50	6.75±0.60	8.09±0.91	11.35±1.82	8.51±1.00	6.17±0.85
Shell width (cm)	3.82±0.33	3.56±0.41	4.74±0.67	6.71±1.02	5.04±0.61	3.64±0.47
Total AFDW (g)	0.90±0.10	0.50±0.20	1.33±0.37	3.42±1.60	1.53±0.54	0.81±0.12
Tank volume (L)	50		500		24	
Flow rate (L h ⁻¹)	24.0		22.0		10.2	
Total capacity (m ³ d ⁻¹)	0.58		0.52		0.25	
Filtration area (m ²)	0.25		0.64		0.19	
Exp. periods (date)	17 to 25 February, 2009		4 March to 15 May, 2009		22 March to 9 May, 2009	
Temperature (°C)	2.8~12.5 (~5.5)		11.9~21.8 (~15.8)		13.5~20.4 (~16.5)	
Exp. time (day)	9		42		18	
Sampling time (AM)	10:00		11:00		11:00	

YAW: young mussels of *Anodonta woodiana* Lea, AAW: adult mussels of *Anodonta woodiana* Lea, AUD: adult mussels of *Unio douglasiae* Griffith et Pidgeon, AFDW: ash-free dry-weight of mussels

하도록 설계하였다(Fig. 1A). 모든 실험은 광도 40~45 μmol m⁻² sec⁻¹, 광주기 12D:12L, 온도 20±1°C로 자동 조절되는 실험실에서 진행하였으며, 운영 중 사망한 패류는 크기가 비슷한 패류로 교체하였다. 패류의 유기물 제어활동과 그에 따른 환경요인 변화를 조사하기 위하여 매일 같은 시간에 분석조의 수질을 조사하였다. 유기물 제어실험은 크게 종간(inter-specific) 및 종내(intra-specific)로 나누어 실시하였으며 전자는 패각길이가 서로 유사한 펄조개와 말조개의 유기물 제어능을 비교하였고, 후자는 펄조개만을 대상으로 1) 동일한 밀도에서 패류크기가 서로 다른 조건에서(패각길이), 2) 동일한 패각연령에서 패류밀도가 서로 다른 조건에서(패류밀도), 각각 유기물 제어능을 비교하였다(Table 1).

종간실험은 패각길이가 거의 비슷한 말조개와 펄조개를 동일하게 50 개체씩(1 indiv. L⁻¹) 처리조에 넣고 유속 24 L h⁻¹로 9일 동안 부영양호(일감호, 서울)의 표층수를 통과시켰다. 처리조는 PVC재질의 직육면체(59×42×38 cm)로서 처리용량은 총 50 L이다. 패류의 유기물 제어능 및 수질변화를 파악하기 위하여 매일 같은 시간에 분석조로부터 시료를 채수하였다. 패류가 생산한 배설물은 3일 간격으로 수거하여 대조군과 처리군의 건조 중량 차이를 패류의 배설물 생산량으로 추정하였다.

종내실험은 펄조개를 대상으로 패각길이와 밀도가 서로 다른 조건에서 패류의 유기물 제어능, 수질 및 배설물 생산량 등을 각각 조사하였다. 첫째, 패각길이에 따른 유기물 제어능을 비교하기 위하여, 펄조개를 동일한 밀도(0.5 indiv. L⁻¹)의 1~2년 유패(YA)와 2년 이상 성패

(AA)로 나누어 각각 처리조에 투입하였다. 처리조는 stainless steel재질(80×80×145 cm)로서 처리용량은 총 500 L이다. 처리조의 내부에는 수표면 10 cm 아래에 격자형 패류 거치대(75×75 cm)를 설치하고 그 위에 패류를 넣은 다음(Fig. 1B), 부영양호(일감호, 서울)의 표층수를 유속 22 L h⁻¹로 42일 동안 통과시켰다. 처리조의 하부는 역삼각뿔 형태로 패류의 배설물이 자연스럽게 모일 수 있도록 하였고 수확이 가능하도록 밸브를 설치하였다. 실험기간 동안 3일 간격으로 모아진 배설물을 수거하여 대조군과 처리군의 건조 중량 차이를 패류의 배설물 생산량으로 추정하였다. 둘째, 패류밀도에 따른 유기물 제어능을 비교하기 위하여 패각길이가 거의 유사한 1년생 펄조개(YA)를 서로 다른 밀도(2.2 indiv. L⁻¹, 5.4 indiv. L⁻¹)로 각각 투입하였다. 처리조는 PVC재질의 직육면체(55×35×15 cm)로서 처리용량은 총 24 L였으며 18일 동안 운영하였다.

4. 환경요인 및 자료분석

CROM 운영기간 동안 대조군 및 처리군의 수온, pH, 전기전도도, 용존산소(DO), 탁도(NTU) 등은 Portable multi-parameter (YSI 600QS-O-M, YSI inc., USA)를 이용하여 매일 같은 시간에 측정하였고, Chl-*a*, 부유물질(SS) 및 영양염 분석을 위하여 같은 시간에 대조군과 처리군에서 조심스럽게 시료를 채수하였다. Chl-*a*는 수질공정시험법(환경부, 1995)에 따라 채취한 시료를 GF/C filter (Whatman Inc., England)로 여과하여 90% 아세톤을 넣

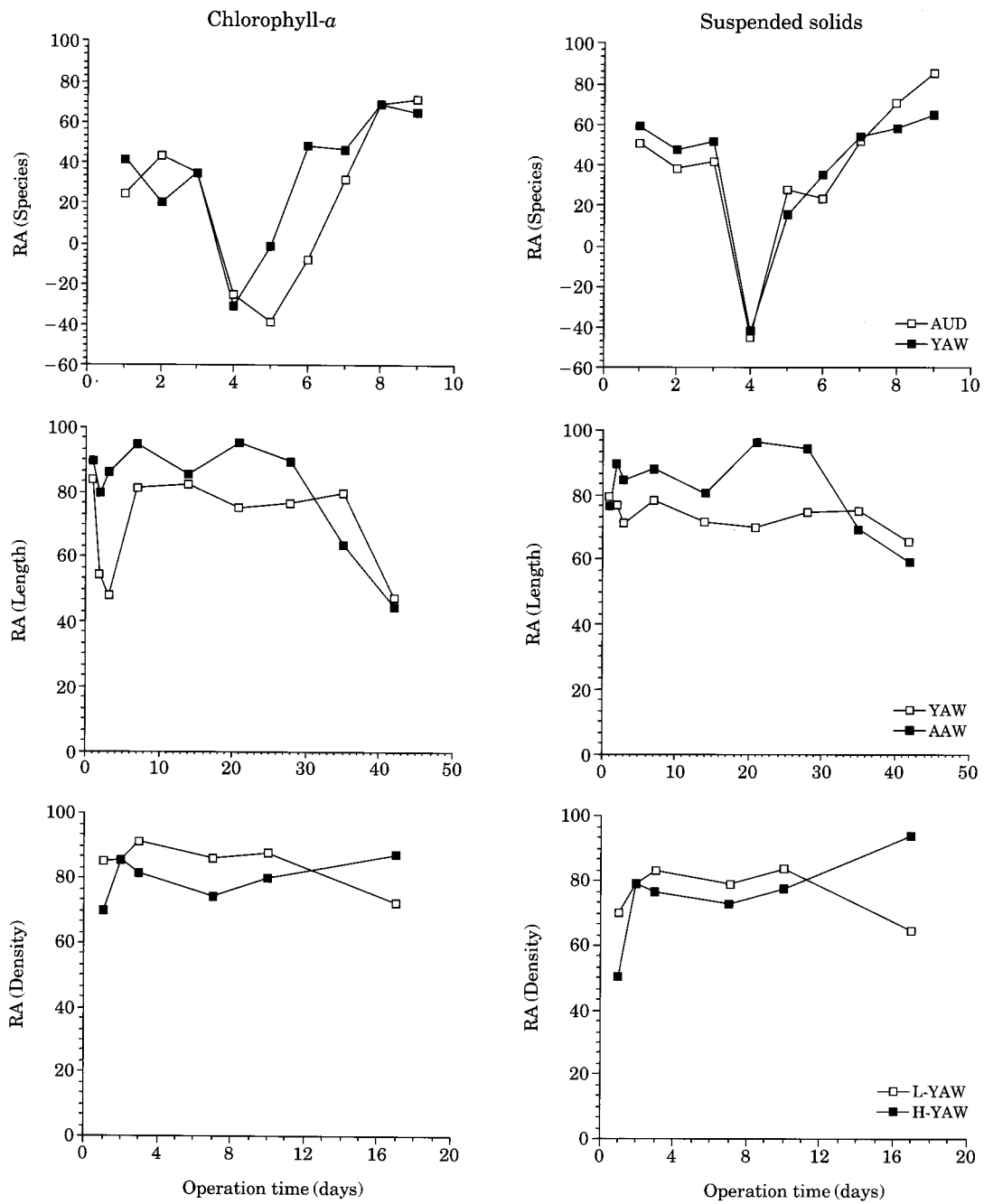


Fig. 3. Removal activities (%) of freshwater bivalve *Anodonta woodiana* and *Unio douglasiae* on chlorophyll-*a* and suspended solids in the operation of CROM system. YAW=young mussels of *A. woodiana*, AUD=adult mussels of *Unio douglasiae*, AAW=adult mussels of *A. woodiana*, H-YAW and L-YAW=young mussels of *A. woodiana* at high and low density, respectively.

고 24시간 동안 냉암소에서 추출한 후 20분간 원심분리기로 분리하여 흡광도를 측정하여 계산하였다. SS는 미리 100°C dry oven에서 건조하여 무게를 잴 GF/C filter를 이용하여 일정량의 시료를 여과하고 다시 100°C dry

oven에서 24시간 건조시킨 후 측정된 무게에서 filter의 무게를 빼 양으로 계산하였다. NO₂-N, NH₃-N는 각각 Colorimetric (4500 NO₂-B, APHA, 1995), phenate (4500 NH₃-F, APHA, 1995)법으로, NO₃-N과 TN은 과망간산칼

륨(persulfate)으로 분해한 후 cadmium reduction법으로 측정하였다. PO₄-P은 ascorbic acid법으로 분석하였으며, TP은 persulfate 분해 후 ascorbic acid법으로 용존무기인 농도를 측정하였다. 패류적용에 따른 수체내 유기물 및 수질변화의 관계를 파악하기 위하여 Turkey's THD test와 ANOVA를 실시하였고 분석($\alpha=0.05$)은 SPSS package (ver. 12.0.1, SPSS inc., 2004 release)를 이용하였다.

결 과

1. 유기물 제어능

패각길이가 비슷한 펄조개와 말조개의 유기물 제어능(RA)은 실험도중 강설(수온감소)에 의한 일시적인 간섭이 있었으나 서로 유사한 패턴을 보였다. 또한 Chl-*a*와 SS에 대한 평균 제어능(실험기간 동안 측정된 제어능의 평균)을 통계분석한 결과 역시 유의한 차이를 보이지 않았다(Chl-*a*: $F=3.566, P=0.044$; SS: $F=5.197, P=0.013$). 패각길이 실험에서는 크기가 다른 펄조개는 대조구와 비교해 Chl-*a*와 SS농도가 각각 70% 이상 감소하였으며, 패각길이가 긴 패류가 더 높은 제어능(평균 80.9%)을 나타냈다(Chl-*a*: $F=30.499, P<0.0001$; SS: $F=163.270, P<0.0001$). 한편, 패각길이가 비슷한 펄조개를 밀도가 다르게 처리할 경우, 대조구와 비교해 Chl-*a*, SS 모두 각각 평균 80% 이상 감소하였으며, 고밀도 처리군에서 최고 84.7%의 제어율을 보였다(Chl-*a*: $F=14.871, P<0.0001$; SS: $F=39.495, P<0.0001$). 이러한 결과는 패류의 유기물 제어능이 패류의 종류보다는 패각길이(체중)나 처리밀도에 절대적으로 의존되어 있음을 시사한다(Fig. 3).

2. 패류의 여과율 및 배설물 생산

패류종이 서로 다른 실험에서, 크기가 비슷한 경우 말조개의 여과율($0.330 \text{ L g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)이 펄조개($0.261 \text{ L g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)보다 더 높게 나타났으며, 배설물 생산량 역시 말조개 $2.367 \text{ mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$, 펄조개 $1.247 \text{ mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 등으로 말조개가 약 2배 정도 높은 수치를 보였다. 펄조개 종내에서 평균 여과율은 패각길이가 짧은 개체군($0.099 \text{ L g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)이 긴 개체군($0.056 \text{ L g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)보다, 배설물 역시 짧은 개체군($2.031 \text{ mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$)이 긴 개체군($1.125 \text{ mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$)보다 각각 약 2배 정도 높게 나타났다. 또한 패류밀도가 낮을 수록 패류의 여과율 및 배설물 생산량은 더 높게 나타났다. 여과율은 저밀도 처리군($0.240 \text{ L g}^{-1} \text{ d}^{-1}$)이 고밀도 처리군($0.151 \text{ L g}^{-1} \text{ d}^{-1}$)보다, 배설물은 저밀도 처리군(0.889

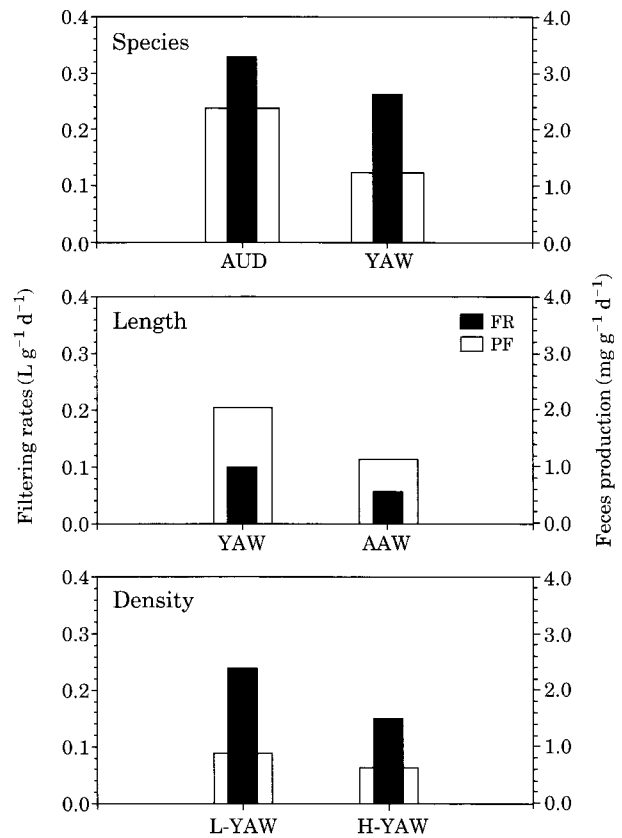


Fig. 4. Filtering rate (FR) and production of feces- and pseudo-feces (PF) of *Anodonta woodiana* and *Unio douglasiae*. YAW=young mussels of *A. woodiana*, AUD=adult mussels of *U. douglasiae*, AAW=adult mussels of *A. woodiana*, L-YAW and H-YAW=young mussels of *A. woodiana* at low and high density, respectively.

$\text{mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$)이 고밀도 처리군($0.648 \text{ mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$)보다 각각 1.5배 정도 높은 수치를 보였다. 이상의 결과에서 패류의 여과율 및 배설물 생산은 말조개가 펄조개보다 높게 나타났으며, 펄조개의 경우, 패각길이가 작고 밀도가 낮은 개체군에서 각각 높게 나타났다(Fig. 4).

3. 환경요인의 변화

크기가 비슷한 말조개와 펄조개를 각각 처리한 다음 환경요인 변화를 살펴보면 두 처리군 모두 SS($F=5.197, P=0.013$), 탁도($F=19.228, P<0.0001$), NH₄-N($F=38.773, P<0.0001$) 등에서 유의한 변화를 보였으나 패류간에 차이는 보이지 않았다(Fig. 5). 패각길이가 서로 다른 펄조개 개체군을 동일한 밀도로 처리할 경우, SS($F=163.274, P<0.0001$), 탁도($F=23.132, P<0.0001$), NH₄-N($F=$

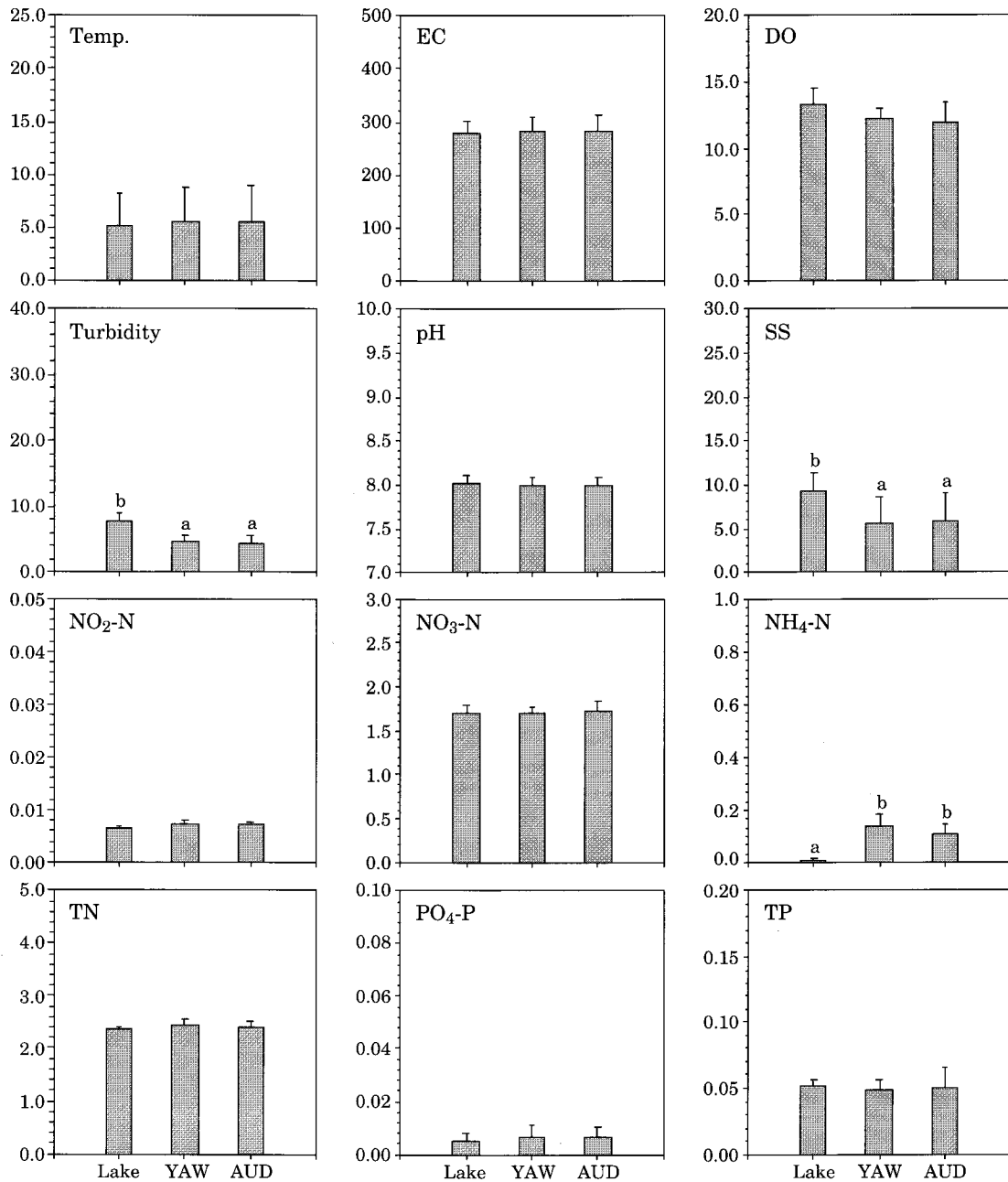


Fig. 5. Effects of freshwater bivalve *Anodonta woodiana* and *Unio douglasiae* on the environmental parameters. YAW= young mussels of *A. woodiana*, AUD=adult mussels of *U. douglasiae*. Temp.=water temperature, EC=electrical conductivity, DO=dissolved oxygen, SS=suspended solids, TN=total nitrogen, TP=total phosphorus. Alphabets (a, b and c) are significant differences by analysis of Turkey's THD test.

75.554, $P < 0.0001$) 등에서는 뚜렷한 변화를 보였으나, 패각 길이에 대한 유의한 차이는 보이지 않았고, TN, NH₄-N, TP, PO₄-P는 패각길이가 더 긴 종이 더 많이 배출하였다 (Fig. 6). 반면, 비슷한 크기의 펄조개를 서로 다른 밀도로 처리할 경우, SS ($F=39.495$, $P < 0.002$), 탁도 ($F=42.242$,

$P < 0.0001$), NH₄-N ($F=39.091$, $P < 0.0001$) 이외에도 NO₂-N ($F=10.921$, $P < 0.002$), PO₄-P ($F=14.620$, $P < 0.001$) 등에서 유의한 변화를 보였으며, 특히 NH₄-N와 NO₂-N 등은 고밀도 처리군에서 보다 높게 배출하였으나 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다 (Fig. 7; Table 2).

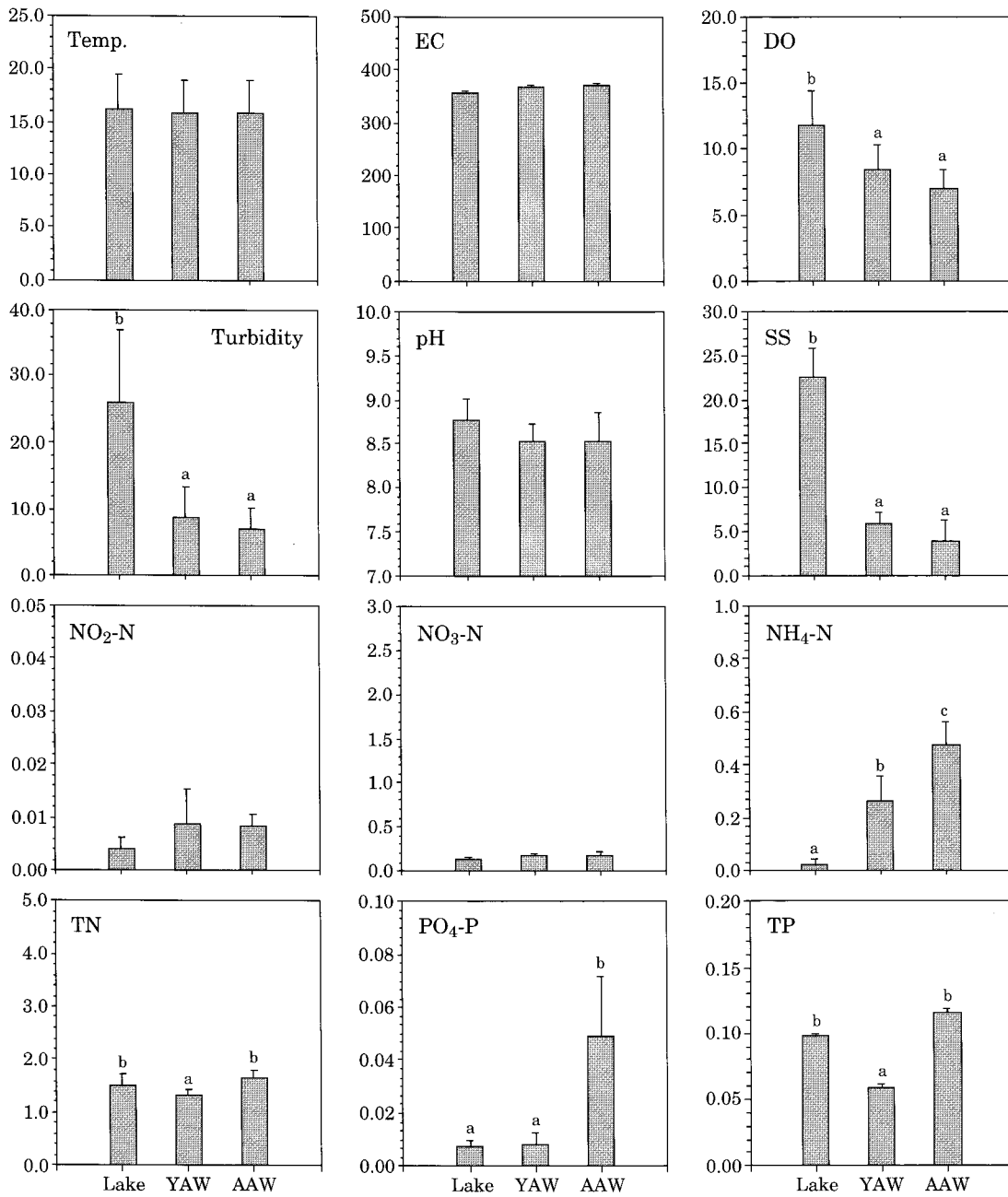


Fig. 6. Effects of freshwater bivalve *Anodonta woodiana* with different shell length on the environmental parameters. YAW=young mussels of *A. woodiana*, AAW=adult mussels of *A. woodiana*. Temp.=water temperature, EC=electrical conductivity, DO=dissolved oxygen, SS=suspended solids, TN=total nitrogen, TP=total phosphorus. Alphabets (a, b and c) are significant differences by analysis of Turkey's THD test.

고찰

부영양 저수지의 현장수를 연속형 유기물 제어기술(김동, 2009)에 유입하여 국내산 이매패의 중간 또는 종내

차이에 따른 유기물 제어능과 배설물 생산량을 비교하고자, 1) 패각길이가 유사한 국내산 이매패 말조개와 펄조개를 대상으로 섭식실험을 실시하였고, 2) 실내 관리조에서 사망율이 비교적 낮은 펄조개만을 대상으로 패각길이와 처리밀도에 따른 섭식특성을 각각 비교, 조사하였다.

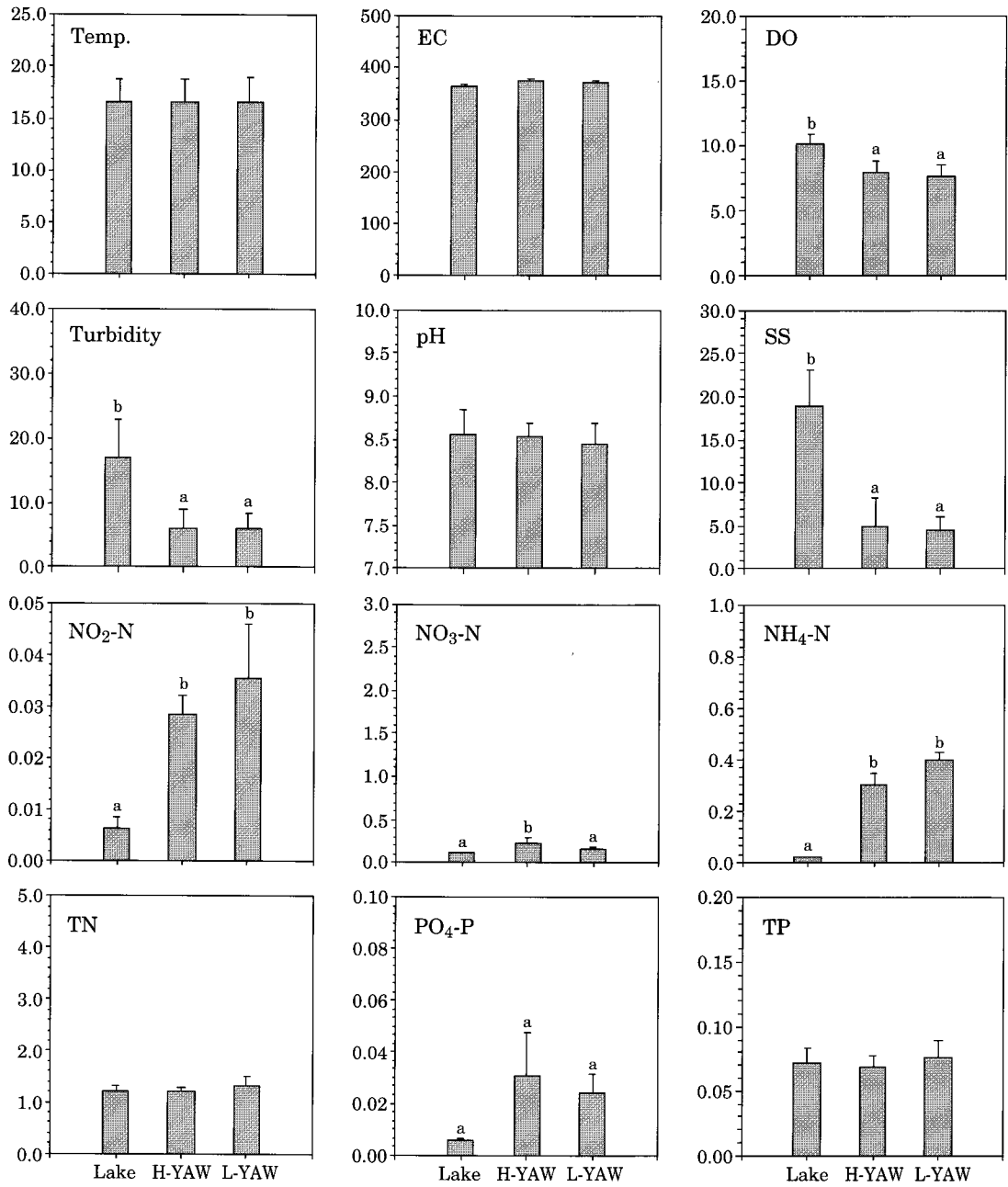


Fig. 7. Effects of freshwater bivalve *Anodonta woodiana* with different animal density on the environmental parameters. L-YAW and H-YAW=young mussels of *A. woodiana* at low and high density, respectively. Temp.=water temperature, EC=electrical conductivity, DO=dissolved oxygen, SS=suspended solids, TN=total nitrogen, TP=total phosphorus. Alphabets (a, b and c) are significant differences by analysis of Turkey's THD test.

첫째, 패각길이가 비슷할 경우 두 패류(AUD, YAW)의 유기물 제어능(RA)은 서로 비슷하였고 시간에 따른 변화도 유사한 패턴을 나타냈다. 한편 동일종에서 크기가 서로 다른 꺾조개를 대상으로 한 실험에서는 크기가 클수록 더 높은 유기물 제어능을 보였다. 이상의 결과로 보

면, 패류의 유기물 제어능은 중간 차이(Fanslow *et al.*, 1995) 보다는 패각길이에 의존하여 길이가 길수록(연령이 증가할수록) 더 높은 제어능을 보임을 알 수 있었다.

둘째, 패각길이가 비슷한 말조개와 꺾조개의 유기물 여과율(FR)은 제어능과 다르게 말조개에서 더 높게 나타

Table 2. Summary of ANOVA on environmental quality by the stocking of mussels in the CROM study.

Study	Parameters	Unit	Control	T1	T2	N	F	P
Mussel type	Temperature	°C	5.20±3.02	5.58±3.44	5.51±3.25	9	0.035	P=0.966
	Conductivity	µs cm ⁻¹	277.8±25.48	281.9±29.71	281.00±27.30	9	0.055	P=0.946
	DO	mg L ⁻¹	13.25±1.33	11.95±1.51	12.20±0.87	9	2.589	P=0.096
	Turbidity	NTU	7.72±1.42 ^b	4.43±1.30 ^a	4.62±1.04 ^a	9	19.228	P<0.0001
	pH	-	8.02±0.09	8.00±0.09 ⁵	8.01±0.07	9	0.127	P=0.881
	SS	mg L ⁻¹	9.37±2.0 ^b	5.77±3.28 ^a	5.68±2.88 ^a	9	5.197	P=0.013
	Chl- <i>a</i>	µg L ⁻¹	6.88±2.18 ^b	4.88±1.99 ^{a,b}	4.40±2.09 ^a	9	3.566	P=0.044
	NO ₂ -N	µg L ⁻¹	6.48±0.32	7.15±0.71	7.09±0.89	9	2.679	P=0.089
	NO ₃ -N	mg L ⁻¹	1.69±0.09	1.72±0.12	1.69±0.08	9	0.160	P=0.853
	NH ₄ -N	µg L ⁻¹	9.07±5.54 ^a	109.22±34.75 ^b	137.84±44.10 ^b	9	38.773	P<0.0001
	TN	mg L ⁻¹	2.32±0.01	2.39±0.12	2.44±0.14	9	1.006	P=0.381
	SRP	µg L ⁻¹	5.12±2.94	6.22±4.44	6.67±4.71	9	0.339	P=0.716
	TP	µg L ⁻¹	51.93±4.37	49.68±15.53	52.27±11.80	9	0.327	P=0.724
Shell length	Temperature	°C	16.09±3.41	15.75±3.22	15.79±3.19	42	0.030	P=0.971
	Conductivity	µs cm ⁻¹	66.12±88.83	67.66±90.12	67.71±89.36	42	0.001	P=0.999
	DO	mg L ⁻¹	11.83±2.53 ^b	8.36±1.88 ^a	6.92±1.54 ^a	42	13.871	P<0.0001
	Turbidity	NTU	26.37±10.14 ^b	8.85±4.53 ^a	6.84±3.35 ^a	42	23.132	P<0.0001
	pH	-	8.77±0.24	8.54±0.19	8.53±0.33	42	2.239	P=0.128
	SS	mg L ⁻¹	22.58±3.17 ^b	5.96±1.20 ^a	3.93±2.40 ^a	9	163.270	P<0.0001
	Chl- <i>a</i>	µg L ⁻¹	24.77±8.99 ^b	7.42±4.67 ^a	3.98±2.68 ^a	9	30.499	P<0.0001
	NO ₂ -N	µg L ⁻¹	4.10±2.05	8.68±6.85	8.27±2.43	9	3.027	P=0.067
	NO ₃ -N	mg L ⁻¹	0.12±0.04	0.17±0.03	0.17±0.04	9	3.670	P=0.041
	NH ₄ -N	µg L ⁻¹	22.29±23.98 ^a	261.88±94.86 ^b	472.20±92.38 ^c	9	75.554	P<0.0001
	TN	mg L-1	1.49±0.23 ^b	1.30±0.12 ^a	1.67±0.14 ^b	9	9.698	P<0.001
	SRP	µg L ⁻¹	7.45±2.09 ^a	8.57±4.39 ^a	49.05±22.57 ^b	9	28.438	P<0.0001
	TP	µg L ⁻¹	98.83±16.40 ^b	58.83±8.58 ^a	115.41±24.37 ^b	9	24.376	P<0.0001
Mussel density	Temperature	°C	16.54±2.31	16.56±2.37	16.53±2.27	17	0.001	P=0.999
	Conductivity	µs cm ⁻¹	36.60±1.42	37.33±1.36	37.65±1.39	17	2.549	P=0.089
	DO	mg L ⁻¹	10.17±0.70 ^b	7.61±0.92 ^a	7.97±0.93 ^a	17	43.677	P<0.0001
	Turbidity	NTU	17.00±5.94 ^a	6.09±2.20 ^a	5.99±2.86 ^a	17	42.242	P<0.0001
	pH	-	8.56±0.28	8.44±0.26	8.54±0.15	17	1.285	P=0.286
	SS	mg L ⁻¹	18.98±4.14 ^b	4.41±1.56 ^a	5.00±3.37 ^a	6	39.495	P<0.0001
	Chl- <i>a</i>	µg L ⁻¹	22.37±10.81 ^b	3.23±1.64 ^a	4.94±3.98 ^a	6	14.871	P<0.0001
	NO ₂ -N	µg L ⁻¹	6.42±1.94 ^a	35.39±25.70 ^b	28.48±3.69 ^b	5	10.921	P<0.002
	NO ₃ -N	mg L ⁻¹	0.10±0.01 ^a	0.15±0.02 ^a	0.21±0.07 ^b	5	14.125	P<0.001
	NH ₄ -N	µg L ⁻¹	19.86±12.36 ^a	396.88±119.55 ^b	304.78±99.64 ^b	5	39.091	P<0.0001
	TN	mg L ⁻¹	1.19±0.11	1.32±0.16	1.21±0.07	5	3.193	P=0.077
	SRP	µg L ⁻¹	5.35±0.92 ^a	24.32±7.15 ^b	30.45±17.01 ^b	5	14.62	P<0.001
	TP	µg L ⁻¹	72.22±11.23	76.72±12.08	69.32±8.74	5	0.866	P=0.445

Control: only lake water without mussels

T1: AUD in Mussel kind, YAW in Shell length, L-YAW in Mussel density.

T2: YAW in Mussel kind, AAW in Shell length, H-YAW in Mussel density.

DO: dissolved oxygen, SS: suspended solids, Chl-*a*: chlorophyll-*a*, TN: Total nitrogen, SRP: soluble reactive phosphorus, TP: total phosphorus
Alphabets (a, b and c) are significant differences by analysis of Turkey's THD test

났다. 패류의 여과율은 개체의 유기물량에 반비례하므로 결국 AUD의 높은 여과율은 YAW보다 적은 개체의 유기물량(AFDW)이 주된 원인으로 판단된다. 동일종 패류에서는 개체의 크기가 작을수록 더 높은 여과율을 나타낸다고 보고되고 있으며(Fanslow *et al.*, 1995; Hwang, 1996; Hwang *et al.*, 2001; 황 등, 2002), 이는 유사한 패각길이

를 갖는 패류일지라도 개체의 유기물량(AFDW)이 적을수록 유기물 여과능이 높음을 의미한다.

셋째, 동일종 펄조개를 대상으로 서로 다른 밀도로 처리할 경우, 저밀도 처리군(L-YAW: 1.0)이 고밀도 처리군(H-YAW: 1.7)보다 약 1.8배 정도 높은 여과율을 나타냈다. 본 실험에서 사용된 현장수는 매일 기상이나 기후에

따라 변동되는 특성을 갖고 있기 때문에 처리 원수의 유기물량 또한 패류 섭식활동에 영향을 줄 수 있다. 앞에서 언급한 실험들보다 수온증가로 인하여 Chl-*a*량이 3배 이상 증가하였음에도 고밀도 처리군에서 여과율이 낮은 것은 패류의 높은 밀도에 따른 강한 먹이 경쟁 때문인 것으로 판단된다.

패류의 배설물 생산은 실험기간 동안 여과율과 거의 유사한 패턴을 보였다. 그러나 처리용량이 크고 처리밀도가 다른 실험에 비해 낮았던 패각길이 실험에서는 다른 두 실험에서보다 낮은 여과율에도 불구하고 상대적으로 높은 배설물을 생산하였다. 이는 비록 처리밀도는 낮았지만 큰 처리용량으로 인해 다른 실험보다 2~4배 정도로 개체 수가 많았던 것이 원인인 것으로 판단된다. 또한 다른 실험보다 현장수 Chl-*a*가 높았으나 처리밀도가 가장 낮아 상대적으로 여과율은 낮았다. Hwang *et al.* (2001)은 동일한 패류일지라도 조류밀도가 여과율에 절대적인 영향을 준다고 보고하였으며, 일반적으로 조류밀도가 낮은 수체에서 패류는 높은 여과율을 보이며 (Sprung and Rose, 1988; Reeders and Vaate, 1990; Bontes *et al.*, 2007), 반대로 높은 조류밀도에서는 낮은 여과율과 높은 배설물을 보인다는 선행연구(이 등, 2008)와 일치하였다.

패류처리에 따른 수질환경요인의 변화는 이미 알려진 대로 탁도와 SS에서 큰 감소가 일어났으며, DO농도의 경우 비교적 저온기 ($5.20 \pm 3.02^{\circ}\text{C}$)였던 중간 실험에서는 패류처리에 따른 큰 변화가 일어나지 않았으나 평균기온이 약 16°C 이상으로 상승했던 패류크기와 패류밀도 실험에서는 패류처리에 따라 DO농도의 유의한 감소가 나타났다. 이것은 수온의 상승과 관련이 있는데, 수온의 상승은 패류의 산소소비량 및 섭식율의 증가, 동화율과 같은 활동성의 감소, 수중 산소 농도의 감소 그리고 패류의 용존산소 소모 증가를 야기한다고 알려진 선행연구(Budniewski *et al.*, 1993)와 일치한다.

영양염 농도의 변화는 패류 처리군 모두에서 $\text{NH}_4\text{-N}$ 과 $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 농도가 증가하였다. 패류의 섭식에 따른 주요 기작 중의 하나는 $\text{NH}_4\text{-N}$ 와 $\text{PO}_4\text{-P}$ 같은 무기 영양염의 배출과정으로 알려져 있다 (James, 1987; Arnott and Cloem, 1992; Quigley *et al.*, 1993; Yamamura and Koike, 1993; Gardner *et al.*, 1995; Dame, 1996; Davis *et al.*, 2000). 이러한 $\text{NH}_4\text{-N}$ 와 $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 증가는 다른 생물을 이용한 생물 조절에서도 흔히 발견되는 현상으로 (Fukushima *et al.*, 1999; 김 등, 2000; 김 등, 2005) 실제 패류를 적용하기 위해서는 발생하는 영양염을 제거하거나 활용할 수 있는 방법이 개발되어야 할 것으로 사료된다. 그러나 암모니아와 용존인의 증가와는 상반되게 길이 실험에서 TN, TP의 감

소가 발생했다. 이는 패류의 특징과 관련된 현상으로 사료되는데, 패류는 수중으로부터 섭취된 물질을 체내에 저장할 수 있는 능력이 있으며, 저장 시간은 석패과 패류가 약 1,700~2,900일 정도로 알려져 있다 (Lewandowski and Stanczykowska, 1975; Avolizi, 1976; McMahon, 1991). 그러나 이러한 결과는 온도가 낮았던 실험에서는 나타나지 않았으며, 같은 패류 종 내에서도 패각 길이가 짧은 패류에서만 나타났는데 이러한 특성을 이용하기 위해서는 패류의 온도에 따른 섭식형태, 먹이의 양과 질에 따라 배출되는 영양염의 차이뿐만 아니라 배출된 영양염을 이용할 수 있는 생물에 대한 특성까지 검토되어야 할 것으로 사료된다.

부영양 저수지의 유기물제어를 위해 CROM을 이용하여 패류의 종류와 패각길이, 적용밀도를 달리해서 실험한 결과 말조개의 여과율이 필조개보다 높았으며, 같은 종내에서는 패각길이가 짧은 패류가 더 높은 여과율을 나타냈다. 영양염 역시 패각길이가 짧은 패류가 더 낮은 배출량을 나타냈다. 또한 실험기간 동안 수온이 20°C 이하일 때 패류의 사망은 거의 나타나지 않았으며 이를 통해 실제 서식처와 다른 환경에서도 패류의 높은 생존 가능성을 확인 할 수 있었다. 향후 적정 온도와 밀도, 적당한 먹이가 공급될 시 패류의 장기간 이용이 가능할 것으로 판단된다. 이상의 결과 패류 적용시 패각길이가 짧은 패류를 적용하는 것이 더 효과적일 것이며, 여과효율과 생존율에 영향을 미치는 수온, 유속 등에 대한 추후 연구가 필요할 것이라고 사료되었다.

적 요

부영양 저수지의 수질개선을 목적으로 연속형 유기물 제어(CROM) 기술을 이용하여 이미 제어능이 밝혀진 국내산 이매패 말조개와 필조개를 대상으로 이종간 또는 동종간의 유기물 섭식 특성을 비교 조사하였다. CROM은 매일 저수지 표층수를 직접 실내로 유입하였으며 저장조 및 조절조, 처리조, 분석조 등으로 구성하였다. 섭식 실험은 온도와 광도가 일정하게 조절된 실험실에서 실시하였으며, 패류 처리 후 여과율, 제어능, 수질(영양염) 및 배설물 생산량 등을 측정하였다. 실험결과 패각길이가 비슷할 경우 이종간에 유기물 제어능은 서로 비슷하였으나 여과율의 경우에는 말조개가 더 높게 나타났다. 동일종(동밀밀도) 내에서는 패각길이가 긴 개체들이 더 높은 제어능을 나타냈으며, 반대로 여과율은 패각길이가 짧은 개체가 높았다. 한편 동일종에서 처리밀도가 다를 경우 저밀도 처리군이 고밀도 처리군 보다 더 높은 여과율을 나

타냈다. 배설물 생산은 여과율과 유사한 패턴을 보였으며 처리밀도와 먹이농도 변화가 배설물 생산에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 두 종류의 패류는 평균 70% 이상의 뚜렷한 유기물(Chl-*a*, SS) 제어율을 나타냈으며 섭식활동에 따른 NH₄-N나 PO₄-P과 같은 무기영양염의 배출량은 패각길이나 처리밀도에 따라 크게 영향을 받는 것으로 밝혀졌다. 결론적으로 CROM기술을 이용한 부영양 저수지의 유기물 제어는 적절한 패류의 종류나 밀도의 결정을 통하여 충분히 현장에 적용 가능한 생물학적 기법으로 판단되며, 부산물 처리 및 자원화를 비롯한 추후 연구가 필요하다고 사료되었다.

사 사

본 연구는 2009년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(2009-0070746)이며, 실험을 도와주신 배수련, 김용진님에게 감사 드립니다.

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 이매패에 관한 생태학적 연구-분포와 형태변이. 한국육수학회지 9: 29-38.

김백호, 백순기, 황수옥, 황순진. 2009. 담수산 이매패 필터개를 이용한 흐름형 유기물 제어(CROM) 운영-퇴적물의 영향. 한국하천호수학회지 42: 161-171.

김백호, 정승원, 서종근, 서미연, 한명수. 2005. 살조세균 적용이 식물플랑크톤 군집과 조류독소 분포에 미치는 영향. 한국육수학회지 38: 261-270.

김백호, 최민규, 황수옥, 고춘전자. 2000. 부영양호의 enclosure 내에서 어류의 밀도조절이 수질 및 플랑크톤 군집에 미치는 영향. 한국육수학회지 33: 358-365.

김호섭, 박정환, 공동수, 황순진. 2004. 참채첩을 이용한 부영양호의 수질개선. 한국육수학회지 37: 332-343.

김호섭, 정동일, 이일국, 황순진. 2005. 가압부상법을 이용한 부영양 저수지의 수질개선. 한국육수학회지 38: 378-381.

김호섭, 황순진, 고재만. 2003. 도심의 얇은 인공호인 일감호의 수질변화특성과 퇴적환경의 평가. 한국육수학회지 36: 161-171.

농어촌연구원. 2005. 농업용수 수질개선 실용화 연구 1차년도 보고서. p. 1.

박구성, 김백호, 엄한용, 황순진. 2008. 남조류 대발생 환경에서 수심과 용존산소 변화에 따른 담수산 이매패(말조개)의

생존율, 여과율 및 배설물 생산. 한국하천호수학회지 41: 50-60.

박구성, 황순진, 김호섭, 공동수, 신재기. 2006. 하수처리수를 이용한 인공수로에서 사상성 부착조류의 성장에 영향을 미치는 요인들. 한국육수학회지 39: 100-109.

박선구, 조인기, 권오병, 문정수, 엄한용, 황순진. 2008. 인공식물섬에 의한 조류(algae) 및 영양염류의 제거. 한국하천호수학회지 41: 93-98.

이송희, 백순기, 황순진, 김백호. 2009. 부영양호수의 저온기와 고온기 식물플랑크톤에 대한 말조개의 섭식능 비교. 한국하천호수학회지 42: 115-123.

이송희, 황순진, 김백호. 2008a. 저온기 부영양 수계의 규조발생에 대한 말조개의 섭식특성. 한국하천호수학회지 41: 237-246.

이송희, 황순진, 김백호. 2008b. 저온기 규조발생 억제제를 위한 패류의 혼합적용. 한국하천호수학회지 41: 402-411.

이연주, 김백호, 김난영, 엄한용, 황순진. 2008. 수온, 먹이농도, 패각 크기가 *Microcystis aeruginosa*에 대한 말조개의 여과율 및 배설물 생산에 미치는 영향. 한국하천호수학회지 41: 61-67.

황순진, 김호섭, 최광현, 박정환, 신재기. 2002. 국내 담수산 조개의 섭식활동이 호수 수질에 미치는 영향. 한국육수학회지 35: 92-102.

황순진, 전미진, 김난영, 김백호. 2008. 한국산 논우렁이의 유해조류 섭식율 및 배설물 생산. 한국하천호수학회지 41: 77-85.

APHA. 1995. Standards methods for the examination of water and wastewater (19th ed). American Public Health Association, Washington, D.C.

Arnott, D.L. and J.E. Cloern. 1992. Trophic interactions and direct physical effects control phytoplankton biomass and production in an estuary. *Limnol. Oceanogr.* 37: 946-955.

Avolizi, R.J. 1976. Biomass turnover in populations of viviparous sphaeriid clams: comparisons of growth, fecundity, mortality and biomass production. *Hydrobiologia* 51: 163-180.

Bontes, B.M., A.M. Verschoor, L.M.D. Pires, E. Van Donk and B.W. Ibelings. 2007. Functional response of *Anodonta anatina* feeding on a green alga four strains of cyanobacteria, differing in shape, size and toxicity. *Hydrobiologia* 584: 191-204.

Buddensiek, E.H., H. Engel, S. Fleischauer-Rossing and K. Wachtler. 1993. Studies on the fine sediments of bivalve habitats in several northern German Lowland Water II: Microhabitats of margaritifera L., *Unio Crassus* Philipsson and *Unio tumidus* Philipsson. *Arch. Hydrobiol.* 127: 170-180.

Carpenter, S.R., J.F. Kitchell and J.R. Hodgson. 1985. Cas-

- cading trophic interactions and lake productivity. *Bio-science* **35**: 634-639.
- Choi, H.J., B.H. Kim, J.D. Kim and M.S. Han. 2005. *Streptomyces neyagawaensis* as a control for the hazardous biomass of *Microcystis aeruginosa* (Cyanobacteria) in eutrophic freshwater. *Biol. Control* **33**: 335-343.
- Coughlan, J. 1969. The estimation of filtration rates from the clearance of suspensions. *Mar. Biol.* **2**: 256-258.
- Dame, R.F. 1996. Ecology of marine bivalves: An ecosystem approach. CRC Press, Boca Raton, 254.
- 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. 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. buttler, eds.). Ohio Biological Survey, Columbus, OH, USA.
- 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.
- Fukushima, M., N. Takamura, L. Sun, M. Nakagawa, K. Matsushige and P. Xie. 1999. Changes in plankton community following introduction of filter-feeding planktivorous fish. *Freshwater Biol.* **42**: 719-736.
- Gardner, W.S., J.F. Cavaletto, T.H. Johengen, J.R., Johnson, R.T. Heath and J.B. Cotner. 1995. Effects of the zebra mussel, *Dreissena polymorpha*, on community nitrogen dynamics in Saginaw Bay, Lake Huron. *J. Great Lake Res.* **21**: 529-544.
- 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.
- Hill, B.H. 1986. The role of aquatic macrophytes in nutrient flow regulation in lotic ecosystems. American Society for testing and materials. *Philadelphia*, p. 157-167.
- 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., C.G. Yoon and S.K. Kwon. 2003. Water quality and limnology of Korean reservoirs. *Paddy & Environment* **1**: 43-52.
- 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.
- Hwang, S.J., H.S. Kim and J.K. Shin. 2001. Filter feeding effects of a freshwater bivalve (*Corbicula leana* PRIME) on phytoplankton. *Korean Journal of Limnology* **34**: 298-309.
- 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.
- James, M.R. 1987. Ecology of the freshwater mussel *Hydriddella mensiesi* (Gray) in a small oligotrophic lake. *Arch. Hydrobiol.* **108**: 337-348.
- Jeffries, M, D. Mills. 1990. Freshwater Ecology: Principals and Applications. Belhaven Press, London.
- Kim, B.H., M. Sang, S.J. Hwang and M.S. Han. 2008. *In situ* bacterial mitigation of the toxic cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*: implications for biological bloom control. *Limnol. Oceanogr. Methods* **6**: 513-522.
- 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.
- Lavrentyev, P.J., W.S. Gardner, J.F. Cavaletto and C. Beaver. 1995. Effects of zebra mussel on protozoa and phytoplankton from Saginaw Bay, Lake Huron. *J. Great Lakes Res.* **21**: 545-557.
- Lewandowski, K. and A. Stanczykowska. 1975. The occurrence and role of bivalves of the family Unionidae in Mikolajskie Lake. *Ekologia Polska* **23**: 317-334.
- Manage, P.M., Z. Kawabata and S. Nakano. 2000. Algicidal effect of the bacterium *Alcaligenes denitrificans* on *Microcystis* spp. *Aquat. Microb. Ecol.* **22**: 111-117.
- McIvor, A.L. 2004. Freshwater mussels as biofilters. Ph.D. Thesis. Pembroke College. 157.
- McMahon, R.F. 1991. Mollusca: bivalvia. p. 315-390. In: Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates (Thorp, J.H. and A.P. Covich, eds.). Academic Press, New York.
- Quigley, M.A., W.S. Gardner and W.M. Gordon. 1993. Metabolism of the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) in lake St. Clair of the Great Lake. p. 295-306. In: Zebra Mussels: Biology, Impacts, and Control (Nalepa, Y.F. and D.W. Schloesser, eds.). Lewis Publishers/CRC Press, Boca Raton, FL.
- Rawson, D.S. 1955. Morphometry as a dominant factor in the productivity of large lakes. *Verh. Int. Ver. Limnol.* **12**: 164-175
- 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.

- Sevrin-Reyssac, J. and M. Pletikosic. 1990. Cyanobacteria in fish ponds. *Aquaculture* **88**: 1-20.
- Sigee, 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.
- 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.
- Welch, E.B. 1992. Ecological Effects of Wastewater. 2nd ed. Chapman & Hall, New York.
- Wu, Z., P. Deng, X. Wu, S. Luo and Y. Gao. 2007. Allelopathic effects of the submerged macrophyte *Potamogeton malaianus* on *Scenedesmus obliquus*. *Hydrobiologia* **592**: 465-474.
- 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.

(Manuscript received 4 August 2009,
Revision accepted 14 September 2009)