

국내 담수산 조개의 섭식활동이 호수 수질에 미치는 영향

황순진* · 김호섭 · 최광현 · 박정환 · 신재기

(건국대학교 지역건설환경공학과)

Comparison of Filtering Abilities of Korean Freshwater Bivalves and Their Filtering Effects on Water Quality. Hwang, Soon-Jin*, Ho-Sub Kim, Kwang-Hyun Choi, Jung-Hwan Park, and Jae-Ki Shin (Department of Biological Systems Engineering, Konkuk University, Hwayang-dong, Kwangjin-gu, Seoul, 143-701, South Korea)

This study was conducted to compare filtering abilities of three species of freshwater mussels (*Cobricula fluminea*, *Corbicula leana* and *Unio douglasiae*) and to evaluate their filter feeding effects on water quality change in experimental enclosure systems. Mussel feeding in both laboratory and enclosure resulted in decrease of particulate material, such as chlorophyll, total P, SS. In the treatment with 600 individuals of mussels, chlchlorophyll concentration and net primary productivity decreased from $87.3 \pm 4.5 \mu\text{g/L}$ and $106.3 \pm 8.8 \mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ to nearly the same level as the mussel-free enclosure ($25.0 \pm 0.5 \mu\text{g/L}$ and $15.6 \pm 13.3 \mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$, respectively) ($P < 0.05$, $n = 6$, ANOVA). In concert with the decrease of chlorophyll concentration, not only was the transparency enhanced from 0.48 m to 1.2m but also the suspended solids and total phosphorus decreased from $22.0 \pm 1.0 \text{mg/L}$ to $7.5 \pm 0.5 \text{mg/L}$ and $133 \pm 0.8 \mu\text{g/L}$ to $70 \pm 0.0 \mu\text{g/L}$, respectively ($P < 0.001$, $r^2 > 0.71$, $n = 11$). Although slight decrease of SRP concentration and the increase of inorganic nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$ and $\text{NO}_2\text{-N}$) were observed in the mussel addition enclosure, there was no statistical difference between two enclosures. Based on the filtering rate on phytoplankton and nutrient release rate in forms of feces and pseudofeces, *Corbicula leana* appeared to be the most efficient filter-feeder among three mussel species. These results indicate that *Corbicula* play an important role in controlling particulate sestons and thus it could be applied as a biocontroler for the water quality management in lakes and reservoirs with algal blooms.

Key words : Mussel, Filtering ability, Enclosure, Biocontrol, Water quality management

서 론

조개의 섭식활동은 수생태계의 물질순환에 중요한 영향을 미친다. 질소순환에 미치는 영향은 해양생태계에서 중요하게 고려되고 있는 반면, 담수생태계에서는 인 순환과 관련된 조개의 중요성이 평가되고 있다 (Arnott and Vanni, 1996; Dame, 1996). 물질순환에 대한 조개의

역할은 많은 연구에서 식물플랑크톤 섭식을 통해 조류, 세균 등의 미생물들이 직접 이용할 수 있는 무기영양염이 배출되어 수체 내의 농도가 증가되는 것으로 나타나고 있다 (James, 1987; Quigley *et al.*, 1993; Yamamuro and Koike, 1993; Gardner *et al.*, 1995; Arnott and Vanni, 1996; Dame, 1996; Davis *et al.*, 2000).

조개의 섭식활동이 물질순환에 영향을 주는 경로는 수층으로부터 퇴적층으로 침강된 입자성 형태의 인과

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

질소 중의 일부가 이온형태의 인과 질소로 전환되는 것과, 조개의 섭식활동 중에 나타나는 직접적인 용출 그리고, 퇴적물의 교환을 통해 퇴적물로부터의 질소의 용출을 간접적으로 증가시키는 것이다 (Matisoff *et al.*, 1985). 조개의 여과능력은 종마다 차이가 나고 있으며, 수온 (Fanslow *et al.*, 1995), 식물플랑크톤의 종 조성과 밀도 (Fanslow *et al.*, 1995; Hwang, 1996; Soto and Mena, 1999; Hwang *et al.*, 2001), 식물플랑크톤의 크기 (Winkel and Davids, 1982; Sprung and Rose, 1988) 등의 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

조개에 의한 수질개선효과와 관련된 연구는 대부분이 해양성 조개를 대상으로 이루어져 있고 일부 연구들이 담수산 조개, 특별히 얼룩말 조개를 대상으로 진행되고 있다. 최근 북미와 유럽에서는 얼룩말 조개 (*Dreissena polymorpha Pallas*)가 조류를 섭식함으로써 호수의 투명도를 증가시키고, 엽록소 *a* 농도를 감소시킬 수 있는 효과적인 섭식자로 알려짐에 따라 (Reeders *et al.*, 1989; Reeders and Vaate, 1990, 1992), 부영양화된 중·소규모의 저수지에서 조개를 이용해 조류를 조절함으로써 수질을 개선하고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 한강과 낙동강 수계에서도 미국 플로리다의 여러 호수에서 관찰된 바 있는 재첩 (*Corbicula fluminea*)이 발견되고 있으며, 이들이 많이 서식하는 호수에서는 그렇지 않은 호수에 비해 물의 투명도가 높게 관찰되고 있다.

국내에서 이루어진 담수산 조개에 대한 연구는 대부분이 서식지 형태나 생활사에 대한 내용에 국한되어 있을 뿐 (최, 1971; 길, 1976; 이, 1976; 최, 1976; 권, 1984; 권과 박, 1985; 권 등, 1986), 수질개선에 이용하고자 시도된 연구는 매우 적다 (정 등, 1997, 1998; 최 등, 1998; Hwang *et al.*, 2001). 국내에서 주로 발견되는 참재첩이나 재첩은 부영양상태에 내성을 가지는 종으로, 여과능력이 우수하기 때문에 국내 소규모 부영양 호소의 수질개선을 위한 이용 잠재성을 가진다.

본 연구에서는 국내 담수산 조개들 간의 섭식능력을 비교하였고, 현장 수준의 규모로 만들어진 인공연못에 적용하여 수질에 대한 영향을 평가함으로써 현장 적용 가능성을 검토하였다.

재료 및 방법

1. 조개 채집

실험에 필요한 조개는 북한강 상류의 수심 1~2 m 정

도의 지점에서 채집하였다. 채집된 조개는 실험 전까지 바닥에 모래를 깔고 부영양호수의 물을 채운 플라스틱 통에서 관리되었다. 물은 일주일에 1회 교환하였다. 조개의 섭식실험에 앞서 실험에 사용될 모든 조개들은 크기를 측정 후 GF/C 여과지로 여과한 부영양한 물이 채워진 플라스틱 용기에서 48시간 동안 순화되었다.

2. 담수산 조개의 여과능 비교실험

조개 종간의 섭식을 비교 실험에는 비교적 오염에 대한 내성이 강한 것으로 알려진 참재첩 (*Corbicula leana*) 과 그 외 재첩 (*Corbicula fluminea*), 말조개 (*Unio douglasiae*)가 사용되었다. 조개간의 섭식능력 평가는 부영양호에서 채수된 물을 200 μm 로 여과한 여과수 1.0 L가 채워진 1.5 L 플라스틱용기에서 실시되었다. 실험은 4월에 실시되었으며, 배양액으로 사용된 부영양호의 식물플랑크톤은 규조류인 *Synedra acus*가 우점하였고, *Aulacoseria ambigua*, *Navicula sp.*와 일부 남조류 (*Microcystis wesenbergii*, *Oscillatoria sp.*, *Lyngbya contorta*)와 녹조류가 (*Scenedesmus quadricauda*) 관찰되었다. 실험은 3반복으로 수행되었으며, 조개가 없는 상태의 플라스틱 용기 3개를 포함해 조개 종류별 한 개체 씩 투입된 플라스틱 용기 12개가 실험실내에 설치되었다. 조개 종별 여과율과 수질에 대한 영향을 평가하기 위해서 조개를 넣어주기 전과 실험종료 (24시간) 후 12개의 용기 모두에서 식물플랑크톤의 생물량과 수질변화 (Chl. *a*, TP, TN, SRP 및 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_3\text{-N}$)에 대한 조사를 위하여 일정양의 표층수를 채취하였다. 조개류의 섭식활동에 의한 부산물로 나타나는 배설물 (pseudofeces)은 사이폰을 이용하여 바닥의 침전물이 교환되지 않는 부분까지의 물을 제거한 후에 GF/F 여과지로 여과하여 회수되었다. 여과지에 잔유된 여과물을 부유물질 측정방법과 동일한 방법으로 계산하여 각 처리구에서의 배설물 양으로 나타냈다.

식물플랑크톤의 사망률 ($R: \text{day}^{-1}$)은 실험 전 후의 수층 내 엽록소 *a* 농도를 바탕으로 다음 식에 따라 계산되었다.

$$R (\text{day}^{-1}) = (\ln N_t - \ln N_0) / t$$

여기서, N_0 와 N_t 는 조개의 투입 전과 실험 종료 후의 수층내 엽록소 *a* 농도이고, t 는 경과시간 (24 hr)이다.

조개의 여과율 ($\text{FR}; \text{ml mg AFDW}^{-1} \text{h}^{-1}$)은 실험 종료 후 조개가 없는 처리구와 각 처리구의 수층 내 엽록소 *a* 농도 차이를 조개의 유기물함량으로 나누어 계산하였

Table 1. Chemical characteristics of domestic wastewater added to enclosures. N.D denotes under detection limit (<0.02 mg N/l).

Parameters	Unit	
Amount add	l	80
Total P	mg/l	11.4
Soluble reactive phosphorus (PO ₄ -P)	mg/l	5.6
Total N	mg/l	305.2
Amonium N (NH ₃ -N)	mg/l	287.0
Nitrate N (NO ₃ -N)	mg/l	0.86
Nitrite N (NO ₂ -N)	mg/l	N.D
BOD	mg/l	22.5
COD	mg/l	221.1
Suspended solids (SS)	mg/l	33.0

다 (FR; ml mg AFDW⁻¹ h⁻¹).

$$FR \text{ (ml mg AFDW}^{-1} \text{ h}^{-1}\text{)} = V \times \ln(C_t/M_t) / (W \times t)$$

여기서, V (l)는 실험에 사용된 호소수의 양이며, C_t 와 M_t 는 각각 조개가 없는 용기와 첨가된 용기에서의 t 시간 경과 후의 수층내 엽록소 a 농도이고, W 는 조개의 유기물함량 (AFDW, mg)이다. 조개의 유기물함량 (Ash Free Dry Weight; AFDW)은 실험 종료 후 조개 생체조직을 껍질로부터 분리하여 500°C에서 태워 무게가 측정된 도가니에 담아 100°C에서 2일 동안 건조시킨 후 측정된 무게와, 다시 500°C에서 30분간 태운 후 측정된 무게의 차이로부터 계산하였다.

3. 인공연못의 설계 및 조성

2001년 8월에 2개의 인공연못 (enclosure, 가로×세로×깊이 = 2×2×2 m)을 설치하였고, 바닥에는 30 cm 두께로 모래를 채웠다. 2001년 8월 6일에 부영양호에서 채수한 6 m³의 물을 채웠으며, 조류의 성장을 위해 생활하수를 8월 22일부터 26일까지 하루에 16 L씩 모두 80 L를 인공연못 모두에 첨가하였다 (Table 1). 2개의 인공연못은 조개를 투입하지 않은 곳은 대조구 (control)로, 조개를 투입한 곳은 처리구 (treatment)로 구분하였다.

2001년 9월 8일에 바닥에 모래를 채운 후 100개체의 조개를 분산시켜 담은 4개의 바구니를 1.3 m 수심에 설치하였으며, 매일 조개의 생존 여부 및 수질분석을 위한 시료를 0.5 m 수심에서 사이폰을 이용하여 채수하였다. 조개의 생존율은 100%로 인공연못에서의 조개 생존 가능성이 확인됨에 따라, 2001년 10월 18일에는 바구니를 제거하고 새로운 500개체와 함께 (총 600개체) 처리구 바닥에 분산시켰다. 조개를 넣기 전까지는 1주일 1회,

600개체를 넣은 이후에는 2001년 12월 4일까지 1주일 3번 수질분석을 위한 시료를 10시에서 12시 사이에 채취하였고, 투명도는 매일 측정하였다. 수심에 따른 광도의 변화는 광도계 (Li-Cor LI-250)를 이용하여 측정하였다.

4. 수질 분석

수질분석을 위한 시료는 0.5 m에서 사이폰을 이용하여 채수하였고 2N 염산으로 미리 세척된 10 L 플라스틱 용기에 담았다. 수온과 투명도, 수소이온농도는 현장에서 측정되었으며, 용존산소는 일정량의 시료를 BOD병에 담아 고정된 후 azide modification 방법으로 정량하였다. 채취된 시료는 실험실로 2시간 내에 운반하여 GF/F filter로 여과하였다. 여과지는 분석 전 (일주일 이내)까지 -20°C에서 냉동 보관하였다가 부유물질 (SS)과 엽록소 a 측정에 사용하였다. 부유물질 (SS)은 무게 증량법으로 측정하였으며 (APHA, 1995), 엽록소 농도는 여과지에 90% 아세톤 5 ml를 가한 후 homogenizer로 분쇄하여 냉암소에서 2시간 추출한 후 흡광도를 측정하였으며, Lorezen법 (1967)에 따라 chlorophyll a (chl. a)와 pheophytin a (pheo. a)로 구분하여 계산하였다. 조개 종간의 여과율 비교에서는 chl. a 농도만을 사용하였고, 인공연못에서는 chl. a 와 pheo. a 의 농도를 더한 값을 엽록소 (엽록소 농도 혹은 chlorophyll로 표기함) 농도로 사용하였다. 여과액은 용존 무기영양염 분석을 위해, 그리고 원수는 입자성영양염 분석을 위해서 각각 2N 염산으로 세척된 250 ml 플라스틱 용기에 담아 분석 전까지 -20°C에서 냉동 보관하였다. 분석은 일주일 이내에 모두 이루어졌다.

용존무기인 (soluble reactive phosphorus; SRP)는 ascorbic acid 법으로 분석되었고, 암모니아 (NH₃-N)와 아질산성 (NO₂-N), 질산성 질소 (NO₃-N)는 각각 phenate (4500 NH₃-F, APHA, 1995), Colorimetric (4500 NO₂-B, APHA, 1995) 그리고 카드뮴 환원법으로 측정하였다. 총인 (TP)은 과망간산칼륨 (persulfate)으로 분해한 후, ascorbic acid 법으로 용존무기인 농도를 측정하였으며, 총질소 (TN)는 과망간산칼륨으로 분해한 후 카드뮴 환원법으로 질산성질소의 농도를 정량하였다. 화학적 산소 요구량 (COD_{Mn})는 알칼리성 과망간산법으로 측정하였다 (환경부, 1996). 현장법을 이용한 순 1차생산력 (Net primary productivity; NPP) (이하 1차 생산력으로 표기) 측정을 위해 측정당시의 광도를 기준으로 두 곳에서 비슷한 (약 200 μEm² s⁻¹) 광도를 나타내는 수심에 2개의

BOD병을 설치하였다. 1차생산력은 실험에 사용된 시료 내 초기 DO농도(DO₀)와 일정시간(t) 배양후의 용존산소농도(DO_t)의 차이에 탄소(C)와 산소(O₂)의 질량비(12/32)를 곱해줌으로서 계산하였다.

$$NPP(\mu\text{g C L}^{-1} \text{ hr}^{-1}) = \frac{(DO_t - DO_0)}{t} \times 12/32 \times 1000$$

4. 통계분석

처리구간의 여과율 차이와 수질인자들의 계절별 변화는 one-way ANOVA를 이용해 분석하였고, 요인간의 상호관계는 Pearson's correlation analysis를 통해 수행되었다(SPSS 10.0). 처리구 사이의 변수들의 비교는 Student t-test를 이용하였다. 유의 수준은 P<0.05를 기준으로 하였다.

결과 및 고찰

1. 담수산 조개간 여과능 비교

조개 종들간의 섭식에 따른 수체내 엽록소 농도와 총인의 뚜렷한 감소가 관찰되었다(Fig. 1) (P<0.05, ANOVA). 24시간 동안 조개의 섭식활동에 의한 엽록소 농도의 가장 큰 감소는 참재첩과 말조개에서 나타났으며, 총인의 감소율은 참재첩(Corbicula leana)에서 가장 두드러졌다. 수체 내 부유물질의 감소는 참재첩과 말조개가 있는 처리구에서 관찰되었고 재첩에서는 대조구와 큰 차이가 없었다. 섭식에 의해 배설물의 형태로 침강된 부유물질의 양은 대조구에 비해 재첩과 참재첩이 첨가된 처리구에서 현저히 높았으며, 말조개가 있는 처리구와 대조구간의 유의적인 차이는 없었다(P>0.05, ANOVA)(Fig. 2).

실험 전·후 조개가 투입된 처리구에서의 엽록소 a 농도를 기초로 계산된 감소율(R)에서는 수층 내 부유물질에 대한 제거량이 가장 높았던 참재첩에서 가장 높았으며(1.59±0.18/day), 조개의 크기가 고려된 여과율(FR)에서는 참재첩과 재첩이 각각 0.63±0.06 ml AFDW mg⁻¹ hr⁻¹, 0.64±0.21 ml AFDW mg⁻¹ hr⁻¹로 차이가 없었으나 말조개의 경우는 식물플랑크톤의 사망율(R = 0.55±0.21/day)과 여과율(0.25±0.10 ml AFDW mg⁻¹ hr⁻¹) 모두 낮게 조사되었다(P<0.05, ANOVA)(Fig. 1). 말조개에 비해 상대적으로 크기가 작은 재첩이나 참재첩에서의 높은 여과율은 동일한 환경조건 하에서 조개

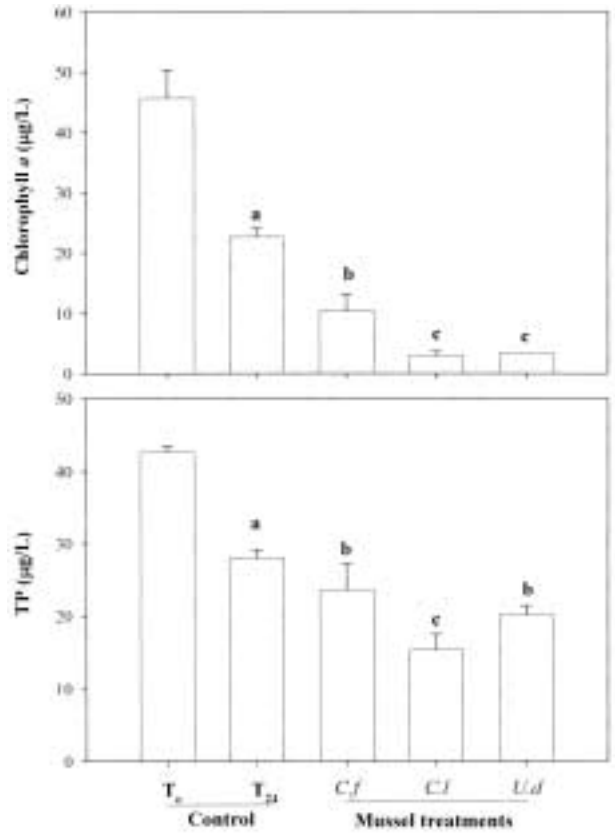


Fig. 1. Chlorophyll (chl. a+phco. a) and total phosphorus (TP) concentration in water column of each treatment after 24 hr feeding. C.f, C.l and U.d denotes Corbicula fluminea, Corbicula leana and Unio douglasiae, respectively. a, b, and c indicates significant difference between control and other treatment (P<0.05, ANOVA).

의 여과능력은 조개의 크기 보다는 종에 따라 차이가 나며, 오히려 작은 크기의 조개일수록 여과능력이 뛰어난 수 있음을 의미한다(Franslow et al., 1995; Hwang, 1996; Hwang et al., 2001). Hwang et al. (2001)은 부영양 수준의 조류 밀도하에서 참재첩의 여과율이 0.24~0.87 ml AFDW mg⁻¹ hr⁻¹의 범위이며, 동일한 조개 종이라 하더라도 조류 종 구성과 밀도의 차이는 여과율의 변화를 야기할 수 있음을 보고하였다.

조개의 섭식에 따른 수중 내 무기영양염류의 증가와 더불어 조개 중간에 배출되는 농도의 차이도 관찰되었다(Table 2). 아질산성 질소(NO₂-N)는 재첩에서 다소 증가하였을 뿐 다른 처리구에서는 대조구와 비교해 큰 차이는 없었다(P>0.1, Student t-test). 그러나 암모니아성 질소(NH₃-N)는 대조구에 비해 모든 처리구에서 현저히 증가하였고 말조개에서 가장 높게 나타났다. 용존

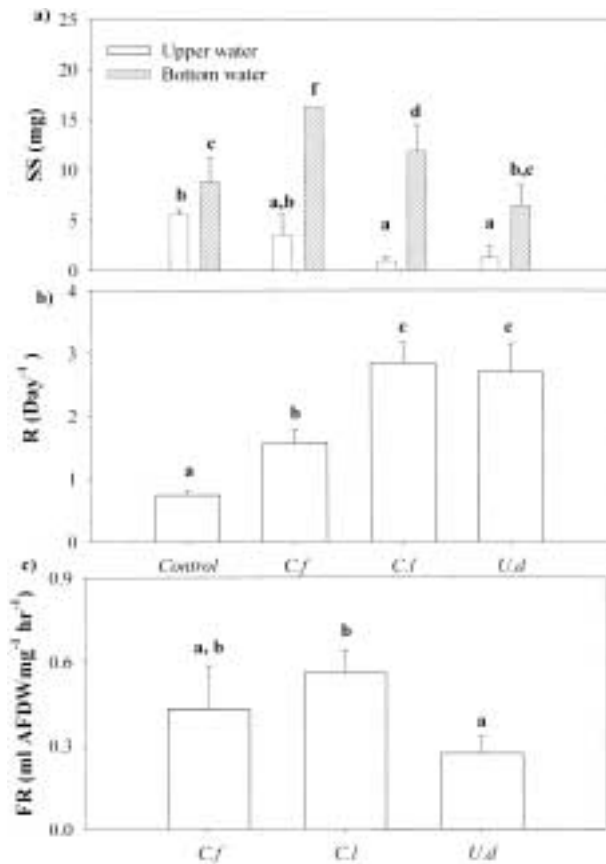


Fig. 2. Suspended solids amount (mg) in upper water and bottom water (a), Exponential death rate (R) (b) and filtering rate (FR) (c) of phytoplankton in each treatment of feeding experiment after 24 hr. C.f, C.l and U.d denotes *Corbicula fluminea*, *Corbicula leana* and *Unio douglasiae*, respectively. a, b, and c indicates significant difference between control and other treatment ($P < 0.05$, ANOVA).

인은 말조개에서 대조구에 비해 약 1.5배 증가한 것을 제외하고는 차이가 없었다 ($P > 0.05$, ANOVA). 조개들은 수중으로부터 섭취된 물질을 체내에 저장할 수 있는 능력이 있으며, 저장 시간은 말조개 등의 석패 (Unionidae)

조개가 1,790에서 2,849일 정도로 73~91일의 재첩과 (Corbiculidae) 조개 보다 상대적으로 긴 것으로 조사되고 있다 (Lewandowski and Stanczykowska, 1975, Avolizi, 1976; McMahon, 1991). 본 연구에서는 체내 물질 저장 시간이 상대적으로 긴 것으로 알려진 말조개에서 암모니아와 용존인의 배출량이 많았다. 이러한 상반된 결과는 조류에 대한 감소율을 나타낸 참재첩과 말조개가 처리된 곳에서 나타난 수중 내 암모니아와 용존인의 차이처럼 조개간의 소화력 차이에 기인된 것으로 생각할 수 있다. 그러나, 수중 물질순환에 대한 좀더 정확한 이해를 위해서는 조개의 섭식형태, 먹이원의 양과 질에 따라 배출되는 영양염의 차이 뿐만 아니라 배출된 영양염을 이용하는 생물에 대한 특성까지 검토되어야 할 필요가 있다.

2. 인공연못에서 조개의 섭식에 따른 수질의 변화

투명도, 엽록소 농도 그리고 1차생산력에 대한 조개의 섭식의 뚜렷한 영향이 관찰되었다 (Fig. 3). 100개체의 조개를 이용한 생존율 실험이 시작되는 시기에는 두 실험구 내 투명도의 큰 차이는 없었다. 9월 24일 이후 대조구에서 투명도가 증가한 반면 처리구에서는 감소하였다. 600개체의 조개 투입 이후에는 처리구의 투명도가 0.48 m에서 1.2 m까지 증가하였고, 동일한 시기에 대조구에서는 1.2 m였던 투명도가 11월 중순경에 0.75 m까지 감소하였다가 처리구와 비슷한 수준으로 다시 증가하였다. 100개체의 조개가 투입된 시기에 처리구와 대조구 사이에서 탁도를 비롯한 입자성물질의 뚜렷한 차이가 나타난 후에, 아질산성과 암모니아성 질소 그리고 용존인 (SRP)이 서로 다른 시기에 일시적으로 증가하였다. 이러한 용존성 물질의 증가는 조개가 600개체 투입된 이후에는 관찰된 바 없고, 지속성이 없었기 때문에 조개에 의한 영향이기 보다는 외부로부터 이물질이 유입된 영향으로 사료된다.

처리구에서 투명도의 증가가 나타난 시기에 엽록소

Table 2. Inorganic nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$) and phosphorus concentration in each treatment at the start of the experiment (T_0) and after 24 hr (T_{24}). a, b, and c indicates significant difference between control and other treatment ($P < 0.05$, ANOVA). N.D denotes under detection limit (< 0.02 mg N/l).

Treatment	$\text{NO}_2\text{-N}$ ($\mu\text{g N/l}$)		$\text{NH}_3\text{-N}$ (mg N/l)		$\text{NO}_3\text{-N}$ ($\mu\text{g/l}$)		$\text{PO}_4\text{-P}$ ($\mu\text{g/l}$)	
	T_0	T_{24}	T_0	T_{24}	T_0	T_{24}	T_0	T_{24}
Control	17.5 ± 0.1	18.4 ± 0.41 ^a	0.05 ± 0.01	0.17 ± 0.02 ^a	N.D.	N.D.	9.0 ± 0	7.6 ± 0.96 ^a
<i>Corbicula fluminea</i>		22.6 ± 0.92 ^b		0.30 ± 0.02 ^b		N.D.		7.0 ± 0.54 ^a
<i>Corbicula leana</i>		20.6 ± 1.30 ^{ab}		0.28 ± 0.03 ^b		N.D.		6.8 ± 0.62 ^a
<i>Unio douglasiae</i>		21.2 ± 2.78 ^{ab}		0.41 ± 0.01 ^c		N.D.		11.6 ± 2.84 ^b

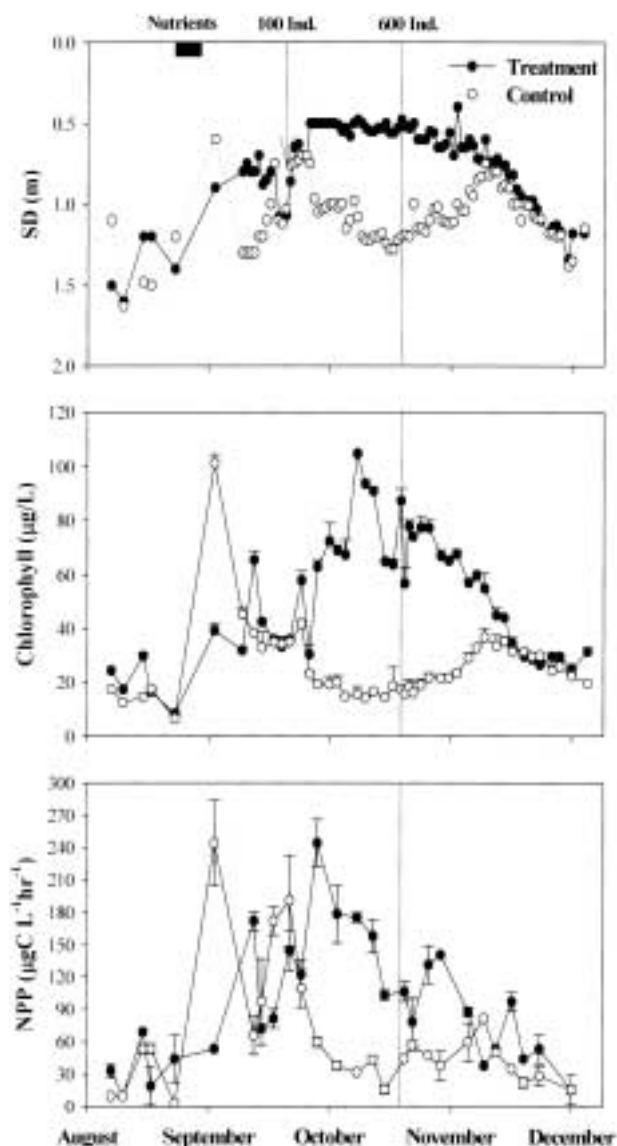


Fig. 3. The variation of secchi disk transparency (SD), chlorophyll concentration (chl. *a*+pheo. *a*), and net primary productivity (NPP) in control and mussel treatment enclosure.

농도 또한 최대 $87.3 \pm 4.5 \mu\text{g/L}$ 에서 시간의 경과에 따라 $25.0 \pm 0.5 \mu\text{g/L}$ 까지 지속적으로 감소하였던 반면, 대조구에서는 동일한 시기 동안에 초기 $17.4 \pm 0.5 \mu\text{g/L}$ 에서 최대 $36.7 \pm 3.4 \mu\text{g/L}$ 까지 증가하였다가 다시 비슷한 수준 ($22.3 \pm 1.0 \mu\text{g/L}$)으로 감소하였다. 식물플랑크톤 생물량의 감소와 더불어 식물플랑크톤의 1차 생산력도 두 처리구에서 비슷한 경향으로 감소하였다 ($r^2 > 0.54$, $n = 54$, $P < 0.001$). 조개 600개체가 투입된 시기에는 처리구에서의 1차 생산력은 $106.3 \pm 8.8 \mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 로 대조구에

($43.8 \pm 0.0 \mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$) 비해 2.5배 정도 높았으나, 11월 이후에는 대조구와 비슷한 수준까지 감소하였다 ($15.6 \pm 13.3 \mu\text{gC L}^{-1} \text{hr}^{-1}$) ($P < 0.05$, $n = 6$, ANOVA).

조개는 입자성 물질에 대한 탁월한 여과능력을 가지고 있으며, 이러한 특성으로 인해 부영양 수역의 생물학적 수질정화자로서의 이용가능성이 검토되고 있다. 지금까지 알려진 바에 따르면, 먹이원에 대한 조개 종간의 포식형태가 서로 상이한데, 얼룩말 조개의 경우는 선택적 섭식을 하는 반면에, 본 연구에서 사용된 참재첩이나 재첩은 무차별섭식을 하는 것으로 알려져 있다 (Lauritsen, 1986; Way *et al.*, 1990; Hwang *et al.*, 2001). 이러한 조개의 먹이원에 대한 선택성 유무 외에도 섭식능력에 영향을 주는 환경적인 요인으로서 비교적 낮은 수온 ($10 \sim 20^\circ\text{C}$) (Walz, 1978; Reeders and Vaate, 1990; Fanslow *et al.*, 1995), 정체수역 보다는 유속이 있는 환경에서의 섭식능력이 뛰어나다. 그 외에도 먹이원으로 이용되는 조류의 종조성 및 현존량 그리고 조개의 밀도도 섭식능력과 밀접한 관련이 있다 (Winkel and Davids, 1982; Sprung and Rose, 1988). 남조류가 우점하는 시기의 *Corbicula leana*의 여과능력은 다소 낮아지며, 수체내 조류의 밀도가 높은 부영양상태 보다는 중영양 혹은 빈영양 상태의 환경에서 더 높은 여과능력을 나타낸다 (Hwang *et al.*, 2001). 즉, 식물플랑크톤의 풍부도에 비해 조개의 밀도가 너무 낮은 경우는 식물플랑크톤 풍부도 감소와 수질 향상에 대한 조개의 역할은 적을 것이며 (Dame, 1996; Strayer *et al.*, 1999), 본 연구에서 100개체가 ($25 \text{ 개체}/\text{m}^2$) 투입된 이후의 수질변화가 없었던 것은 동일한 이유로 설명될 수 있을 것이다. Welker and Walz (1998)는 본 연구에서 600개체가 투입된 시기의 밀도 ($125 \text{ 개체}/\text{m}^2$)보다 2배 이상 높은 밀도로 ($350 \text{ 개체}/\text{m}^2$) unionids가 존재하는 하천에서의 뚜렷한 수질향상을 보고한 바 있다.

조개가 투입된 처리구에서 용존산소는 11월 중순까지는 두 처리구사이의 큰 차이가 없었으며, $7 \text{ mg O}_2/\text{L}$ 이상의 높은 수준으로 유지되고 있었다 (Fig. 4). pH는 두 인공연못 사이의 차이가 11월 중순 이후에 나타났고, 처리구에 비해 대조군에서 높았다 ($P < 0.001$, $n = 6$, Student *t*-test). 조개의 섭식에 따른 무기영양염의 뚜렷한 증가는 관찰되지 않았으며, 두 인공연못에서의 시간에 따른 변화는 거의 일치하였다 ($P > 0.3$, Student *t*-test).

두 인공연못에서의 용존인 (SRP) 농도는 하수주입 후 다소 증가하였다가 감소하였으며, 조개의 섭식에 따른 처리구에서의 농도 증가는 관찰되지 않았다 (Fig. 4). 암모니아성 질소 ($\text{NH}_3\text{-N}$)와 아질산성 질소 ($\text{NO}_2\text{-N}$)는 처

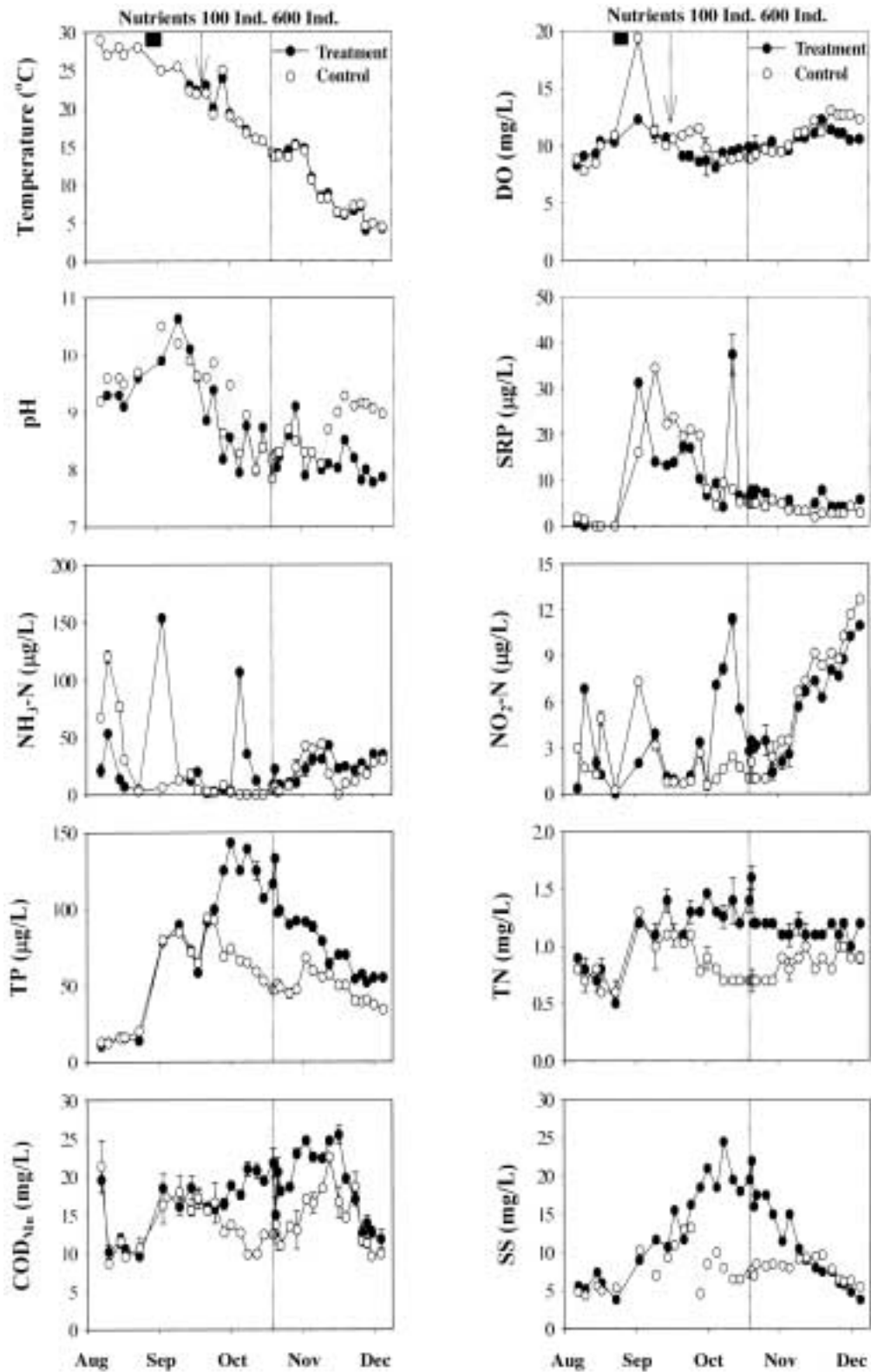


Fig. 4. The variation of temperature, dissolved oxygen (DO), pH, soluble reactive phosphorus (SRP), ammonium nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$), nitrite nitrogen ($\text{NO}_2\text{-N}$), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), chemical oxygen demand (COD_{Mn}), and suspended solids concentration in control and mussel treatment enclosure.

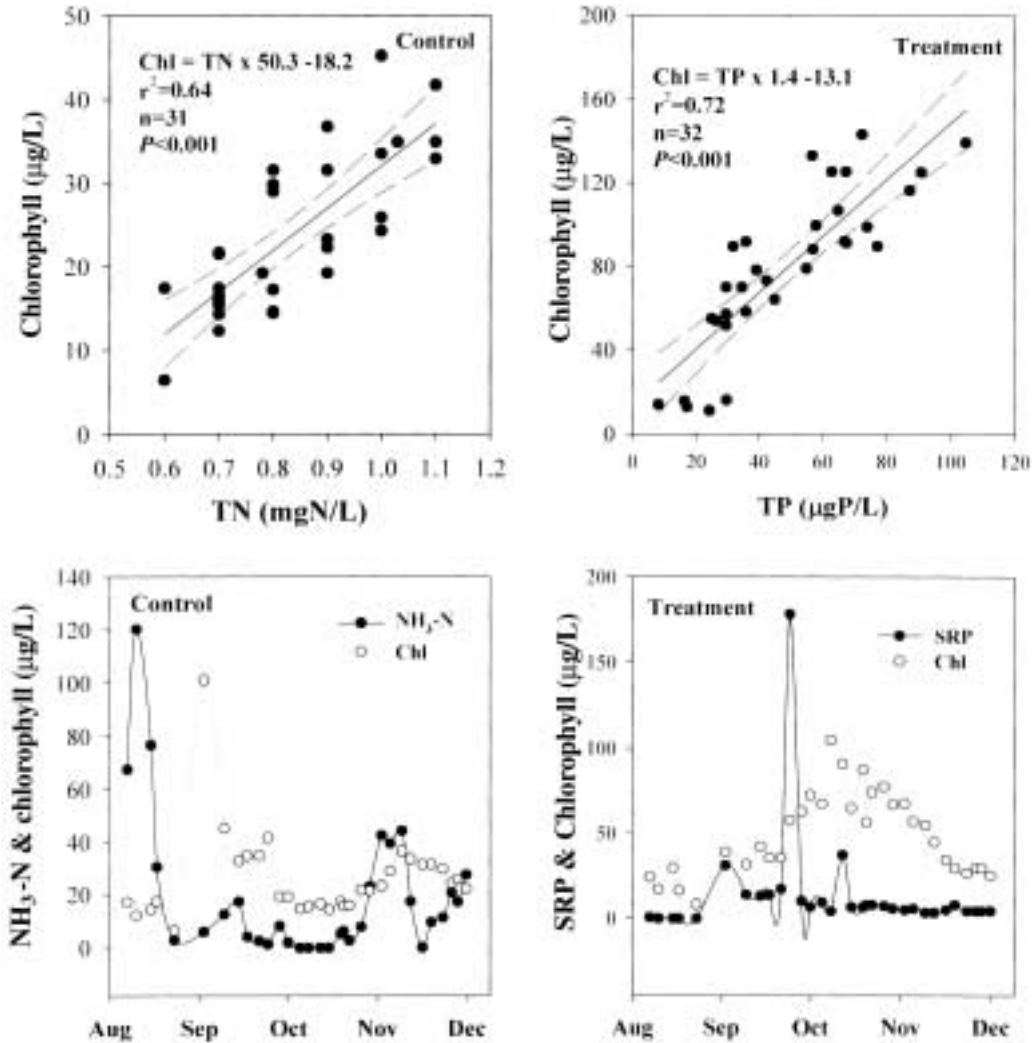


Fig. 5. The relationships of among total phosphorus (TP), soluble reactive phosphorus (SRP), total nitrogen (TN), ammonium nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) and chlorophyll concentration (chl. a + phe. a) in control and mussel treatment enclosure.

리구에 600개체의 조개가 투입된 이후부터 증가하였고 (Fig. 4), 질산성 질소 ($\text{NO}_3\text{-N}$)는 실험 내내 검출되지 않았다. 조개의 섭식과정 중에 인공연못에서 나타난 총인, 엽록소 농도 그리고 용존인은 감소한 반면, 아질산성 질소와 암모니아성 질소의 증가는 채집과 잠재집의 여과 능력에 대한 실내 실험에서 나타난 결과와 일치한다 (Table 2).

엽록소 농도와 1차생산력의 변화와는 달리 화학적 산소요구량은 지속적으로 처리구에서 높았다 (Fig. 4). 처리구의 영양상태는 대조구에 비해 높은 수준에 있었기 때문에 비록 조류의 양이 현저하게 감소하였다 하더라도, 식물플랑크톤 외에 박테리아, 원생동물 그리고 동물플랑크톤과 같은 다른 유기물형태의 생물들이 높은 생물량

을 유지하고 있어 화학적 산소요구량에 기여했을 가능성이 있다. 이러한 결과는 조개와 함께 동물플랑크톤에 의한 식물플랑크톤 생물량의 감소 가능성도 고려할 수 있다. 그러나, 연구 기간 동안 대조구에 비해 처리구에서의 동물플랑크톤 생물량이 높았으나 ($P < 0.01$, $n = 15$, t -test), 식물플랑크톤 생물량이 현저히 감소하는 시기에 동물플랑크톤의 생물량의 감소와 더불어 크기가 큰 지각류로의 우점종의 변화가 나타나 (자료 미 포함), 한편으로는 식물플랑크톤 뿐만 아니라 동물플랑크톤 또한 조개의 먹이원으로 이용되었을 가능성이 있다. 조개는 식물플랑크톤 뿐만 아니라 크기가 작은 *Polyathra remata*, *Keratella crassa*와 같은 윤충류와 작은 요각류부터 심지어 길이가 $400\mu\text{m}$ 정도인 동물플랑크톤까지 얼

룩말조개의 먹이원으로 이용될 수 있는 것으로 알려져 있다 (Shevtsova *et al.*, 1986; Masclsaac and Sprules, 1991). Lake Huron의 Saginaw bay에서는 얼룩말 조개의 출현 이후 동·식물 플랑크톤 생물량이 동시에 감소되어 플랑크톤 생물량 감소에 대한 얼룩말 조개의 영향이 크다고 평가된바 있다 (Bridgeman *et al.*, 1995).

총인 ($r^2 = 0.73$, $n = 32$, $P < 0.001$)과 부유물질 ($r^2 = 0.79$, $n = 32$, $P < 0.001$) 농도의 변화는 엽록소 농도의 변화와 밀접한 관련이 있었다. 그러나, 엽록소 농도와 총질소, 총인과의 관계에서는 대조구의 경우 엽록소 농도가 총질소 농도 ($r^2 = 0.64$, $n = 31$, $P < 0.001$)와 처리구에서는 총인 농도 ($r^2 = 0.72$, $n = 32$, $P < 0.001$)의 변화와 상호 관련된 것으로 나타났다 (Fig. 5). 실제 각 처리조의 수체내 무기영양염과 엽록소 농도 변화에서 엽록소 농도의 증가는 대조구에서는 수체내 암모니아성 질소의 증가 이후에, 처리구에서는 용존인의 증가 이후에 나타났다 (Fig. 5). 이러한 결과는 대조구에서 질소가, 처리구에서는 인이 조류 성장에 제한인자로 작용했을 가능성을 제시한다. 조개의 섭식 과정 중에 암모니아 형태의 질소가 우선적으로 배출되며 (Burton, 1983), 조개의 섭식 과정 중에 배출되는 질소의 양이 인에 비해 상대적으로 높은 것으로 알려져 있다 (Hecky and Kilham, 1988). Yamamuro and Koike (1993)은 일본 기수호에 서식하는 *Corbicula japonica*가 섭식과정 중에 배출되는 암모니아가 ($4.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) 섭취한 먹이원의 약 43%이며, feces와 pseudofeces 형태로 배출되는 질소 ($4.6 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)와 거의 비슷한 수준임을 제시하였다. 이러한 결과를 토대로 할 때, 처리구에서는 조개의 섭식과정 중에 우선적으로 배출되는 암모니아 형태의 질소가 식물플랑크톤에 의해 이용됨으로써 (Matisoff *et al.*, 1985; Dame, 1996) 상대적으로 더 많은 양의 인을 성장에 필요로 함에 따라 식물플랑크톤이 인 농도에 의해 제한된 반면, 대조구에서는 질소에 의해 제한되었을 것으로 생각할 수 있다.

결과적으로 본 연구에서는 조개의 여과성 섭식활동에 의해 수체 내 식물플랑크톤을 포함한 입자성 물질의 뚜렷한 감소와 더불어 투명도의 증가가 나타난 반면, 수체내 무기영양염 농도에 미치는 영향은 적은 것으로 나타났다. 이러한 결과들은 소규모 부영양호소들의 수질개선을 위한 조개의 적용가능성을 제시한다.

사 사

본 연구는 농림부 기획연구과제 (과제 H0273500)인

‘농업환경 복원기술 개발 연구’의 일환으로 수행되었음.

적 요

본 연구는 담수산 조개 종간의 여과능력과 실험적으로 조성된 인공연못에서 조개의 여과섭식이 수질에 미치는 영향을 평가하기 위해 이루어졌다. 실내 실험과 인공연못에서의 섭식실험 모두에서 조개에 의한 엽록소, 총인, 부유물질과 같은 입자성 물질의 감소가 관찰되었다. 600개체의 조개가 투입된 처리구에서, 엽록소 농도와 순 1차 생산력은 $87.3 \pm 4.5 \mu\text{g/L}$ 와 $106.3 \pm 8.8 \mu\text{g C L}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ 에서 대조구와 거의 동일한 수준인 $25.0 \pm 0.5 \mu\text{g/L}$ 와 $15.6 \pm 13.3 \mu\text{g C L}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ 까지 감소하였다 ($P < 0.05$, $n = 6$, ANOVA). 엽록소 농도의 감소와 동시에, 투명도는 0.48 m에서 1.2 m까지 향상되었고, 부유물질과 총인 농도는 각각 $22.0 \pm 1.0 \text{ mg/L}$ 에서 $7.5 \pm 0.5 \text{ mg/L}$, $133 \pm 0.8 \mu\text{g/L}$ 에서 $7.5 \pm 0.0 \mu\text{g/L}$ 까지 감소하였다 ($P < 0.001$, $r^2 > 0.71$, $n = 11$). 비록 처리구에서 SRP 농도의 약간의 감소와 무기질소 ($\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$)의 증가가 관찰되었다 하더라도, 대조구의 농도와 비교할 때 유의적인 차이는 없었다. 식물플랑크톤에 대한 여과율과 섭식과정 중에 feces와 pseudofeces와 같은 형태로의 영양염 배출을 고려할 때, *Corbicula leana*가 가장 효과적인 여과 섭식자였다. 이러한 결과들은 *Corbicula*가 입자성물질을 조절함에 있어 중요한 역할을 수행하며, 조류가 대량 발생하는 호소의 수질관리를 위해 생물학적 수질조절자로서 적용할 수 있음을 제시한다.

참 고 문 헌

- 권오길, 이상준, 박갑만. 1986. 의암호의 패류에 관한 연구. 한국육수학회지 **19**: 51-56.
- 권오길, 박갑만. 1985. 의암호의 패류에 관한 연구. 한국육수학회지 **18**: 27-38.
- 권오길. 1984. 의암호 패류에 관한 연구. 한국육수학회지 **17**: 51-56.
- 길봉섭. 1976. 전라북도산 담수패류의 분포와 현존량. 한국육수학회지 **9**: 14-20.
- 이춘구. 1976. 빛죽이의 폐각생장에 관한 연구. 한국육수학회지 **9**: 45-48.
- 정의영, 신윤경, 최문술. 1997. 새만금호의 수질예측과 그에 따른 대책 I. 환경 오염원이 잠재침 (*Corbicula leana*)의 여과수작용 및 산소소비에 미치는 영향. 한국패류학회지 **13**: 203-210.

- 정의영, 신윤경, 최문술. 1998. 새만금호의 수질예측과 그에 따른 대책 II. 담수수질 정화처리자인 참재첩 (*Corbicula leana*)의 대사생리에 미치는 중금속 오염원의 급성독성 영향. 한국패류학회지 **14**: 51-59.
- 최기철. 1971. 대합과 가무락의 증폐증산을 위한 생태학적 연구. 한국육수학회지 **4**: 9-20.
- 최문술, 정의영, 신윤경. 1998. 새만금호의 수질예측과 그에 따른 대책 3. 환경오염원이 담수산 미세조류 *Cryptomonas ovata*의 증식과 참재첩 (*Corbicula leana*) 섭이율에 미치는 영향. 한국패류학회지 **14**: 167-172.
- 최신석. 1976. 대합 (*Meretrix lusoria*)의 인공방란 및 치폐사육에 관한 연구. 한국육수학회지 **9**: 7-14.
- 환경부, 1996. 수질오염공정시험법.
- APHA. 1995. Standard Methods for the water and wastewater, 18th ed. American Public Health Association, Washington DC.
- 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. *Hydrobiol.* **51**: 163-180.
- Bridgeman, T.B., G.L. Fahnenstiel, G.A. Lang, and T.F. Nalepa. 1995. Zooplankton grazing during the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) colonization of Saginaw Bay, Lake Huron. *J. Great Lakes Res.* **21**: 567-573.
- Burton, R.F. 1983. Ionic regulation and water balance. pp. 291-352. *In: The Mollusca.* (A.S.M. Saleuddin and K.M. Wilbur eds.). Academic Press, New York.
- Dame, R.F. 1996. Ecology of marine bivalves: An ecosystem approach. CRC Press, Boca Raton, 254pp
- 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. pp. 1-10. *In: Freshwater Mollusk Symposium Proceeding.* (R.S. Tankersley, D.O. Warmolts, G.T. Watters, B.J. Armitage, P.D. Johnson and R.S. Butler 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.
- 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 Lakes Res.* **21**: 529-544.
- Hecky, R.E. and P. Kilham. 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnol. Oceanogr.* **33**: 796-822.
- 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.
- James, M.R. 1987. Ecology of the freshwater mussel *Hydriddella mensiesi* (Gray) in a small oligotrophic lake. *Arch. Hydrobiol.* **108**: 337-348.
- Lauritsen, D.D. 1986. Filter-feeding in *Corbicula fluminea* and its effect on seston removal. *J. North Amer. Benthol. Soc.* **5**: 165-172.
- Lewandowski, K. and A. Stanczykowska. 1975. The occurrence and role of bivalves of the family Unionidae in Mikolajskie Lake. *Ekologia Polska*, **23**: 317-334.
- Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equation. *Limnol. Oceanogr.* **12**: 343-346.
- Masclsaac, H.J. and J.H. Sprules. 1991. Ingestion of small-bodied zooplankton by zebra mussels (*Dreissena polymorpha*): Can cannibalism on larvae influence population dynamics?. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **48**: 2051-2059.
- Matisoff, G., J.B. Fisher, and S. Matis. 1985. Effect of microinvertebrates on the exchange of solutes between sediments and freshwater. *Hydrobiol.* **122**: 19-33.
- McMahon, R.F. 1991. Mollusca: bivalvia. pp. 315-390. *In: Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates* (J.H. Thorp 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 Lakes. pp. 295-306. *In: Zebra Mussels: Biology, Impacts, and Control.* (Y.F. Nalepa and D.W. Schloesser eds.). Lewis Publishers/CRC Press, Boca Raton, FL.
- Reeders, H.H., A. Bij de Vaate, and F.J. Slim. 1989. The filtration rate of *Dreissena polymorpha* (Bivalvia) in three Dutch lakes with reference to biological water quality management. *Freshwater Biol.* **22**: 133-141.
- Reeders, H.H. and A. Bij de Vaate. 1990. Zebra mussel (*Dreissena polymorpha*): a new perspective for water quality management. *Hydrobiol.* **200/201**: 437-450.

- Reeders, H.H. and A. Bij de Vaate. 1992. Bioprocessing of polluted suspended matter from the water column by the zebra mussel (*Dreissena polymorpha Pallas*). *Hydrobiol.* **239**: 53-63.
- Shevtsova, L.V., G.A. Zhdanova, V.A. Movchan, and A.B. Primak. 1986. Experimental interrelationship between *Dreissena* and planktic invertebrates. *Hydrobiol. J.* **22**: 36-39.
- Soto, D. and G. Mena. 1999. Filter feeding by the freshwater mussel, *Diplodon chilensis*, as a biocontrol of salmon farming eutrophication. *Aquaculture.* **171**: 65-81.
- Sprung, M. and U. Rose. 1988. Influence of food size and quality of the feeding of the mussel *Dreissena polymorpha*. *Oecologia* **77**: 526-532.
- Strayer, D.L. 1999. Effects of alien species on freshwater mollusks in North America. *J. Amer. Bentholog. Soc.* **17**: 81-94.
- Ten Winkel, E.H. and C. Davids. 1982. Food selection by *Dreissena polymorpha Pallas* (Mollusca: Bivalvia). *Freshwater Biol.* **12**: 533-558.
- Walz, N. 1978. The energy balance of the freshwater mussel *Dreissena polymorpha PALLAS* in laboratory experiments and in Lake Constance: I. Pattern of activity, feeding, and assimilation efficiency. *Arch. Hydrobiol./Supp.* **55**: 83-105.
- Way, C.M., D.J. Hornbach, C.A. Miller-way, B.S. Payne, and A.C. Miller. 1990. Dynamics of filter feeding in *Corbicula fluminea* (Bivalvia: Corbiculidae). *Can. J. Zoo.* **68**: 115-120.
- Welker, M. and N. Walz. 1998. Can mussels control the plankton in rivers?—a planktonological approach applying a Lagrangian sampling strategy. *Limnol. Oceanogr.* **43**: 753-762.
- 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.

(Received 1 May 2002, Manuscript accepted 31 May 2002)