

남조류 대발생 환경에서 수심과 용존산소 변화에 따른 담수산 이매패 (말조개)의 생존율, 여과율 및 배설물 생산

박구성 · 김백호 · 엄한용¹ · 황순진*

(건국대학교 환경과학과, ¹한국농촌공사 농어촌연구원)

Effects of Dissolved Oxygen and Depth on the Survival and Filtering Rate and Pseudofeces Production of a Filter-feeding Bivalve (*Unio douglasiae*) in the Cyanobacterial Bloom. Park, Ku-Sung, Baik-Ho Kim, Han-Yong Um¹ and Soon-Jin Hwang* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; ¹Rural Research Institute, Gyeonggi 426-908, Korea)

We performed the experiment to evaluate the effect of different DO concentrations (0.5, 4.5 and 9.0 mgO₂ L⁻¹) and water depths (20, 50 and 80 cm) on the filtering rate, mortality, and pseudofeces production of *Unio douglasiae* against the cyanobacterial bloom (mainly *Microcystis aeruginosa*). A solitary-living bivalve *U. douglasiae* was collected in the upstream region of the North Han River (Korea). The harvested mussels were carefully transferred to the laboratory artificial management system, which was controlled temperature (18±2°C), flow rate (10 L h⁻¹), food (*Chlorella*TM), sediment (pebble and clay), light intensity (ca. 20 μmol photons), and photocycle (12 L : 12 D). In the field observation, the mussel mortality was significantly correlated with water temperature, pH and DO concentration (P<0.05). The mortality was decreased with water depth; 65, 90, 80% of mortality at 20, 50, 80 cm water-depth, respectively. Filtering rate (FR) showed the highest value at 50 cm water depth, and thereby the concentration of chlorophyll-*a* decreased continuously by 94% of the control at the end of the experiment. In contrast, FR decreased by 34% of the initial concentration at 20 cm water depth. Over the given water-depth range, the mussel FR ranged from 0.15~0.20 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹ during the 18 hrs of experiment, and thereafter, they appeared to be approximately 0.11, 0.26 and 0.30 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹ at 20, 50 and 80 cm water depth, respectively. FR was highest with the value of 0.46 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹ at 0.5 mgO₂ L⁻¹ at the early stage of the experiment, while it increased with DO concentration. Maximum pseudofaeces production was 11.2 mg gAFDW⁻¹ hr⁻¹ at 9.0 mgO₂ L⁻¹. Our results conclude that *U. douglasiae* has a potential to enhance water quality in eutrophic lake by removing dominant cyanobacteria, but their effects vary with environmental parameters and the water depth at which they are located.

Key words : dissolved oxygen, depth, filtering rate, survival rate, *Unio douglasiae*, cyanobacterial bloom

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

서 론

부영양 호수나 하천에서 나타나는 조류 대발생의 문제 해결을 위해 다양한 시도들이 계속되어 왔으나 그 결과는 아직 미흡한 수준이다. 최근 물리적-화학적 방법의 단점을 보완할 수 있는 생물학적이고 친환경적 방법을 이용한 조류제어에 관심이 고조되고 있다.

수심이 낮고 유기물이 풍부한 수역에서 서식하는 여과 섭식성 이매패류(filter-feeding bivalves)는 수중에 분포하는 작은 입자성 유기물, 박테리아, 식물플랑크톤을 여과섭식하며 (Vaughn and Christine, 2001; Pires *et al.*, 2005), 소화하기 어렵거나 불필요한 입자들은 아가미를 통해 점액질과 혼합하여 가분(假糞, Pseudofaeces) 형태로 배설(Pires, 2005)하며 이 과정에서 무기태 영양염을 배출한다(Davis *et al.*, 2000). 특히 이매패류의 주요 먹이원은 수체에 존재하고 이들의 가분은 퇴적층에 축적되어 이매패류는 탄소와 영양염 동태학의 차원에서 수체와 퇴적층의 기능적 연계(pelagic-benthic coupling)를 만들어 내게 된다(Hwang *et al.*, 1998, 2004).

이매패류의 여과섭식 특성은 이들을 수중의 유기물을 제거하는 생물학적 필터로서 활용하는 차원으로 발전하였다(e.g., Reeder *et al.*, 1992). 이러한 여과성 패류를 이용한 수질정화 사례로서, 얼룩말 조개(Zebra mussel)를 이용한 실내(Naddafi *et al.*, 2007) 및 현장 연구(Reeder *et al.*, 1992; Holland, 1993; Smit *et al.*, 1993), 다른 종류들의 이매패(Soto and Mena, 1999; Chen *et al.*, 2001; Hwang *et al.*, 2004; Bontes *et al.*, 2007)의 수질정화(조류제어)에 대한 연구가 보고되고 있다. 그러나 이들 연구들은 패류적용에 따른 기존 토착종의 개체 감소나 서식지 환경 변화를 비롯하여, 배수로, 배수관, 선박엔진의 막힘(부착성 패류의 경우) 등 부정적인 효과 이외에도 연한 매질 바닥의 호수나 하천에서는 적응성이 낮다는 단점을 보여주고 있다. 이러한 점에서 조류제어나 수질정화를 위한 패류의 선정은 자연적 서식처를 갖고 있는 국내 자생패류가 타당할 것이다. 지금까지 국내에서 자생하는 참재첩을 이용한 조류제어 연구(김 등, 2004; Hwang *et al.*, 2004)를 제외하고는 선행사례가 거의 없다.

패류의 생존 및 섭식활동에 있어서 수온과 용존산소가 가장 큰 영향을 주는 요인에 포함된다. 패류는 대개 수온 변화에 민감하며, 동시에 용존 산소의 변화로 말미암아 대사활동이 크게 제약을 받지만 종에 따라 수온이나 용존산소 변화에 능동적으로 적응하는 패류도 존재한다(McMahon, 1991; Chen *et al.*, 2001). 따라서 수온변화가

심한 우리나라 하천이나 수심이 깊은 호수(하층의 용존 산소 농도가 매우 낮은 곳)에서 서식하는 패류가 산소조절능력이 좋은 것으로 보고되고 있다.

국내산 말조개(*Unio douglasiae*)는 우리나라 전국의 하천과 호수에 분포하며, 비교적 오염이 심한 곳에서도 생존하고 있는 것으로 확인되고 있다. 이들은 참재첩보다 개체당 조류 제어능이 매우 높다(Hwang *et al.*, 2004). 따라서 조류제어에 대한 말조개의 잠재력은 상당히 높은 것으로 판단되며 이를 적용하기 위해서는 하천이나 호수, 특히 패류를 적용할 대상수역의 환경요인과 말조개의 생존 및 여과능에 대한 다양한 실험적 연구가 요구된다.

본 연구는 부영양 저수지에서 대발생하는 유해조류의 친환경적 제어를 위한 기반연구로서 이미 본 연구팀(Hwang *et al.*, 2004)에 의해 섭식능이 밝혀진 말조개를 대상으로 수심 및 용존산소에 따른 먹이여과율과 생존율 그리고 배설물생산(pseudofaeces productions) 정도를 파악하고자 시도되었다.

재료 및 방법

1. 실험중(말조개) 채집 및 시료 준비

연구에 사용한 원수는 실내에서 인위적으로 남조류 대발생을 유도한 시료와 탈염시킨 수돗물을 적절하게 혼합하여 사용하였다. 남조류 Bloom이 심하게 나타나는 도심의 얕은 인공호의 퇴적물을 100 L 유리 수조 바닥에 10 cm 두께로 깔고, 탈염된 수돗물과 호수 물을 혼합하여 넣은 후, 형광등을 이용하여 $70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 광을 24시간 동안 지속적으로 주어서 인공적인 Bloom을 형성하였다. 남조류 Bloom이 일어난 원수의 식물플랑크톤은 95% 이상 *Oscillatoria* sp.가 우점하는 것으로 나타났다.

말조개는 북한강 유역(남이섬)과 금강 유역(부여)에서 수심 0.5~1 m인 진흙 바닥의 강기슭에서 채집하였다. 채집된 패류는 물이 순환되는 실내 배양 시스템에서 유지하였으며, 먹이로는 부영양호의 식물플랑크톤과 액상 클로렐라(대상클로렐라 (주)대상, 한국)를 혼합하여 2일 간격으로 주었으며, 실험 시작 3일 전부터 먹이를 주지 않았다. 말조개의 유기물함량(Ash Free Dry Weight: AFDW)은 말조개 142개체의 AFDW와 패각 길이와의 상관관계식을 이용하여 구하였다.

원수의 식물플랑크톤 우점종 및 조성을 분석하기 위해서 채수된 시료의 일정량을 Whirl-Pak bags에 담아 Lugol 용액(최종 농도 2%)으로 고정하였다. 고정된 식물플랑크톤은 Sedgwick-Rafter 계수판을 이용하여 광학현

미경($\times 200$; Zeiss, Germany)에서 중 동정 및 계수하였다.

2. 저수지에서 수심에 따른 말조개 생존율 실험

저수지의 수체 내에서 말조개의 생존율을 알아보기 위하여, 보령군에 위치한 부영양상태의 신규저수지를 선정하여 갈수기시에도 최저 수심이 1.5 m 이상 유지되도록 설치한 Mesocosm (가로 8 m \times 세로 4 m) 내에서 실험을 실시하였다. 말조개를 수중에 위치시키기 위하여 가로, 세로, 높이가 각각 40 cm \times 30 cm \times 15 cm의 크기로 제작한 플라스틱 상자를 이용하였고, 플라스틱 상자는 1.5 cm 망목의 플라스틱판을 이용하여 제작하여 물의 유·출입이 자유롭도록 만들었다. 제작한 플라스틱 상자에 패각의 길이가 6.0 ± 1.0 cm인 말조개 20개체씩을 넣어 수표면에서 각각 20, 50, 80 cm 수심에 위치하도록 설치하였다. 말조개의 생존 확인은 플라스틱 상자를 설치한 2007년 2월 27일부터 5월 21일까지 매주 단위로 3개월 동안 진행하였고, 오후 2~3시 사이의 일정시간에 관찰하였다.

또한, 수질 측정기(YSI 6920, YSI Inc., USA)를 이용하여 설치 지점의 수온, DO, Conductivity, pH, 탁도(NTU)를 측정하였고, 원수 1 L을 채수하여 SS, 엽록소-a, $\text{NH}_4\text{-N}$ 을 측정하였다. 엽록소-a 농도는 Standard Methods (APHA, 1995)의 방법에 따랐으며, 시료를 여과한 GF/F 여과지(Whatman Inc., England)를 90% 아세톤 10 mL에 넣어 24시간 동안 냉암소에서 추출하여 원심분리기로 20분 동안 분리한 후 흡광도를 측정하여 계산하였다. $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도는 인도페놀법을 이용하여 측정하였고, 부유물질(SS)은 원수 0.1 L을 GF/F 여과지에 여과하여 100°C에서 24시간 건조 후 무게를 측정하여 무게중량법에 의하여 분석하였다(APHA, 1995).

현장 실험 기간 동안 생존한 말조개의 생존율(Survival Rate: SR)은 다음과 같은 식에 의하여 구하였다.

$$\text{SR}(\%) = N_t / N_i \times 100$$

여기서 N_i 와 N_t 는 초기 말조개 개체수와 조사일(t)에서의 말조개 개체수이다.

현장 물리화학적 환경요인들과 말조개의 생존율간의 상관성을 알아보기 위하여, one way ANOVA를 이용하여 비교분석하였고(SPSS 12.0), 통계적 유의수준은 $P < 0.05$ 를 기준으로 하였다.

3. 수심에 따른 말조개 여과율 측정

수심에 따른 말조개 여과율을 측정하기 위하여 투명한

아크릴 원통형 수조(ϕ 27 cm, 높이 1.1 m)를 이용하여 실내에서 실험하였고, 인공적으로 남조류 Bloom을 형성한 원수를 엽록소-a 농도 $80 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 희석하여 각 수조에 45 L씩 채운 후 수심이 90 cm가 되도록 하였다(Fig. 1A). 말조개를 수중에 위치시키기 위하여 수표면에서 각각 20, 50, 80 cm 깊이의 수조 벽에 흠을 만들어 2 cm 망목의 스텐레스 망을 설치하였고, 패각 길이가 8.9~11.0 cm (평균 9.8 ± 1.0 cm)의 말조개 3개체씩을 각 수조에 투입하여 엽록소-a 농도 변화를 측정하였다.

수조 내 시료의 채수는 고무호스(ϕ 5 mm)를 이용하여 수면부터 80 cm 깊이까지의 시료를 200 mL를 채수하여, GF/F 여과지로 여과하여 엽록소-a 농도를 측정하였다. 채수는 실험 개시 후 각각 0, 4, 8, 12, 18, 30, 48, 72 hr에 실시하였다.

수조 내의 수온은 20°C를 유지하였고, 빛은 조류의 침강을 최소화하기 위해서 24시간 동안 지속적으로 $70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 광도 조건을 유지하였다.

말조개의 여과율(Filtering Rate: FR)은 일정시간 동안 말조개에 의해 여과된 물의 총량을 말하며, 엽록소 a 농도의 변화를 토대로 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$\text{FR} (\text{L gAFDW}^{-1} \text{hr}^{-1} \text{ or } \text{L Ind.}^{-1} \text{hr}^{-1}) \\ = V \times [\ln(T_i/T_t) - \ln(C_i/C_t)] / B / \Delta t$$

여기서, V는 원수의 부피, C_i 와 C_t 는 대조구의 초기와 처리시간(t)에서의 엽록소 a 농도, T_i 와 T_t 는 처리구의 초기와 처리시간(t)에서의 엽록소 a 농도($\mu\text{g L}^{-1}$), B는 말조개 건중량(gAFDW) 또는 개체수(Ind.), Δt 는 처리 시간(hr)이다.

4. DO 농도에 따른 말조개 여과율 측정

DO 농도에 따른 말조개의 여과율 변화를 측정하기 위하여, 남조류 Bloom이 발생한 수조의 원수를 엽록소-a 농도 $200 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 희석한 실험수의 DO 농도를 각각 0.5, 4.5, 9.0 $\text{mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ 로 조정하여 실험하였다. 농도가 낮은 0.5와 4.5 $\text{mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ 의 농도를 맞추기 위하여 질소가스로 폭기·환원하여 조정하였고, 9.0 $\text{mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ 의 농도는 기포기를 이용하여 조정하였다. 실험은 2 L 용량의 투명한 아크릴 사각 수조에 원수를 1.5 L씩 채운 후, 패각 길이가 6.5~7.1 cm (평균 6.7 ± 0.3 cm)인 말조개를 각 수조에 1개체씩 투입하였다. 실험기간 동안 수조 내의 DO농도 변화를 최소화하기 위하여 개방된 수조의 상위 부분을 비닐랩으로 밀봉하여, 공기의 유입을 막았다(Fig. 1B).

채수는 각각 0, 4, 8, 12, 24 hr에 실험에 이용한 시료

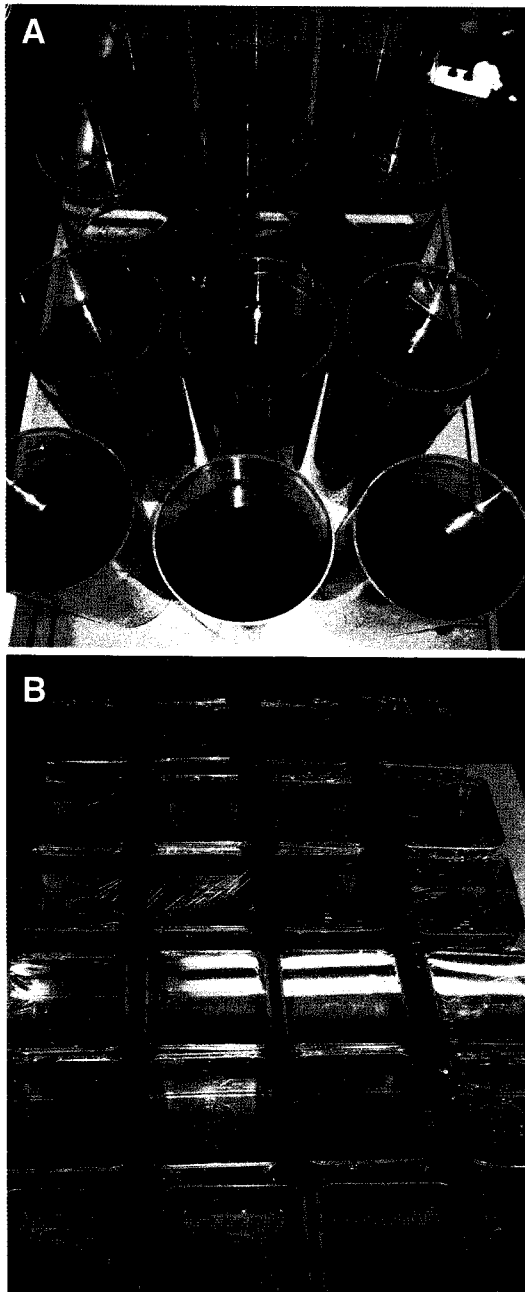


Fig. 1. Filtration experiments of *Unio douglasiae* in the different depths (A) and DO concentrations (B).

1.5 L 전체를 취하였으며, 그 중 1.4 L은 수중의 엽록소-a 농도 측정을 위해 사용하였고, 바닥부의 나머지 0.1 L은 Pseudofeces production (PPF)을 측정하기 위하여 사용하였다. 1.4 L은 표면부터 상층부를 채수하였고, 채수 시 수조 내의 교란을 최소화하기 위하여 직경 5 mm 실리콘 튜브를 이용하여 수위 차에 의해 천천히 채수하였다. 채수한 1.4 L의 원수는 잘 혼합한 후 400 mL를 GF/F 여과

지로 여과하여 엽록소-a 농도를 측정하였다. 말조개의 PFP를 측정하기 위하여 수조에 남아 있는 0.1 L의 원수와 수조의 바닥층을 증류수로 세척하여 GF/F 여과지로 여과하여 SS를 측정하였다.

실험기간 동안 말조개의 PFP는 다음과 같은 식에 의하여 계산하였다.

$$PPF (mgDW gAFDW^{-1} hr^{-1}) = (S_t - S_c) / B / \Delta t$$

여기서, S_t 와 S_c 는 처리구와 대조구에서 처리시간 동안 발생한 SS 농도($mg L^{-1}$), B는 말조개 무게($gAFDW$), Δt 는 처리 시간(hr)이다.

결 과

1. 현장저수지에서 수심별 말조개 생존율

말조개를 설치한 지점의 수온은 계절적 변화 특성에 따라 겨울철 8.4°C의 낮은 수온에서 봄철 동안 지속적으로 증가하여 실험 종료 시점에서는 20°C까지 상승하였다(Fig. 2). DO 농도는 수온이 상승함에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 실험초기 12.5 $mg L^{-1}$ 로 높은 농도에서, 지속적으로 감소하여 실험 종료 시점에는 9.9 $mg O_2 L^{-1}$ 까지 감소하였다. 수중의 엽록소-a 농도는 24.7 ~ 53.3 $\mu g L^{-1}$, 부유물질(SS)의 농도는 7.2 ~ 16.7 $mg L^{-1}$ 의 범위를 나타냈다. 엽록소-a 농도는 실험 중간에 24.7 $\mu g L^{-1}$ 까지 감소한 시기(4월)를 제외하고는, 실험기간 동안 높은 생물량을 유지하였고, 부유물질의 농도는 엽록소-a 농도 변화와 유사한 변화를 나타내지는 않았다. 암모니아(NH_4-N) 농도는 초기 0.50 $mg L^{-1}$ 에서 0.02 $mg L^{-1}$ 까지 지속적으로 감소하였고, 실험기간 동안 낮은 농도를 유지하였다(Fig. 2).

수심별 말조개의 생존율은 실험 마지막 시점에서 수심이 가장 얇은 20 cm에서 65%로 가장 낮게 나타났고, 50 cm와 80 cm 수심에서는 각각 90, 80%로 나타나 20 cm 수심보다는 높았다(Fig. 3). 현장의 환경요인 중 수온과 pH가 높을수록, DO의 농도는 낮을수록 말조개의 생존율이 감소하는 것으로 나타났다. 수심 20 cm에서 수온과 pH 변화가 말조개의 생존율과 높은 상관성을 나타냈고(각각 $r = -0.964, p < 0.001$; $r = -0.856, p < 0.05$), DO 농도도 높은 상관성($r = 0.798, p < 0.05$)을 나타냈다. 수심 50 cm에 위치한 말조개의 생존율도 수온과 상관성이 가장 높게 나타났고($r = -0.847, p < 0.05$), DO 농도($r = 0.763, p < 0.05$), pH($r = -0.762, p < 0.05$) 순으로 나타났다. 수심을 가장 깊게 유지한 80 cm의 조건에서도 수온과 상관성

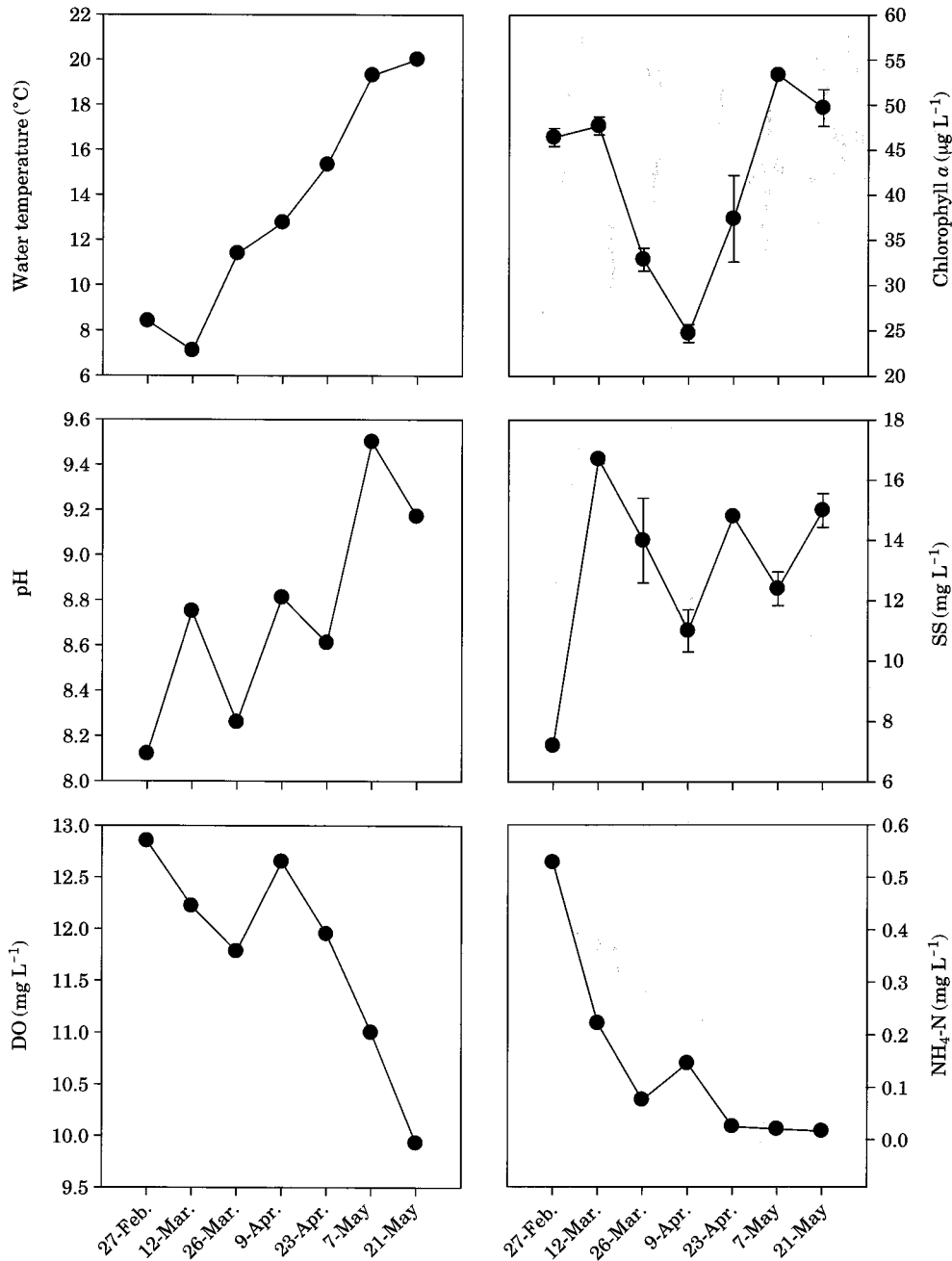


Fig. 2. Temporal change of water temperature, Chl- α , pH, SS, DO, and NH₄-N in the outdoor mesocosm.

이 가장 높게 나타났고 ($r = -0.927$, $p < 0.01$), DO 농도 ($r = 0.854$, $p < 0.05$)와 pH ($r = -0.884$, $p < 0.01$) 순으로 나타났다. 환경요인 중 수온이 말조개의 생존율과 가장 밀접한 관계를 가지며, DO 농도와 pH의 변화도 말조개의 생존율에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면에, 엽록소- α 농도, 부유물질(SS)과 암모니아의 농도와는 상관성이 나타나지 않았다.

2. 수심에 따른 말조개 여과율

말조개를 투입하지 않은 대조구에서는 초기 엽록소- α 농도가 $77.9 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 $51.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 까지 34% 정도 감소하였지만, 말조개를 투입한 모든 처리구에서는 실험기간 동안 엽록소- α 농도가 지속적으로 감소하였고, 특히 수심이 50 cm와 80 cm에 말조개를 투입한 처리구는 $5 \mu\text{g L}^{-1}$

까지 감소하여 94.2% 이상의 높은 감소를 보였다(Fig. 3).

수심에 따른 말조개의 여과율은 실험 초기(4~18 hr)에는 각 처리구에 따라 크게 차이를 보이지 않았지만, 18 hr 이후 수심이 낮은 표층(수심 20 cm)에 비해 상대적으로 깊은 수심(50, 80 cm)에서 높게 나타났다(Fig. 4). 여과율은 초기(4 hr)에 0.24~0.27 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹의 범위를

로 비슷한 경향을 나타냈고, 이후 지속적으로 감소하여 18 hr에 0.15~0.20 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹의 범위를 나타냈다. 실험 18시간이 경과한 이후 20 cm 수심에서의 여과율은 약간의 증감을 나타냈지만 실험 종료시점까지 0.11±0.02 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹ 정도의 비슷한 여과율을 유지하였다. 반면 50 cm와 80 cm 수심에 설치한 말조개의 여과율은 점차적으로 증가하여 실험 종료시점에 각각 0.26, 0.30 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹을 보였다.

수심에 따른 말조개의 여과율의 범위는 50 cm 수심에서 0.09~0.27 (평균: 0.18±0.07) L gAFDW⁻¹ hr⁻¹로 비교적 높게 나타났고, 80 cm 수심에서는 0.13~0.30 (평균: 0.17±0.07) L gAFDW⁻¹ hr⁻¹, 20 cm 수심에서는 0.10~0.24 (평균: 0.15±0.05) L gAFDW⁻¹ hr⁻¹로 나타났다. 개체당 여과율은 전체적으로 0.17~0.51 L Ind.⁻¹ hr⁻¹의 범위를 나타냈으며, 50 cm 수심에서 최대 여과율을 나타냈고, 평균 0.33±0.13 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹로 가장 높았다. 20 cm와 80 cm 수심에서의 개체당 여과율은 각각 평균 0.27±0.09, 0.28±0.12 L Ind.⁻¹ hr⁻¹로 비슷하게 나타났다.

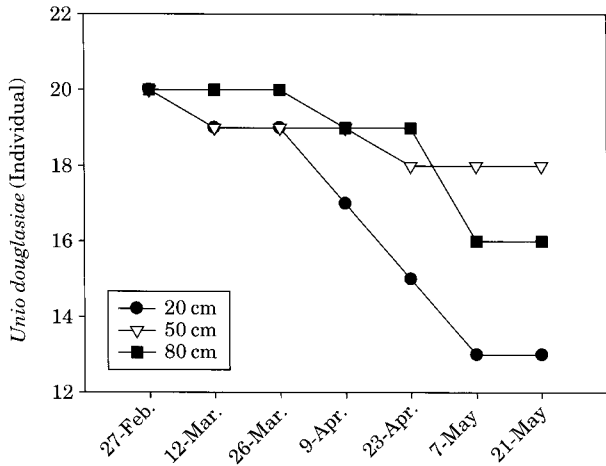


Fig. 3. Density change of *Unio douglasiae* in the outdoor mesocosm.

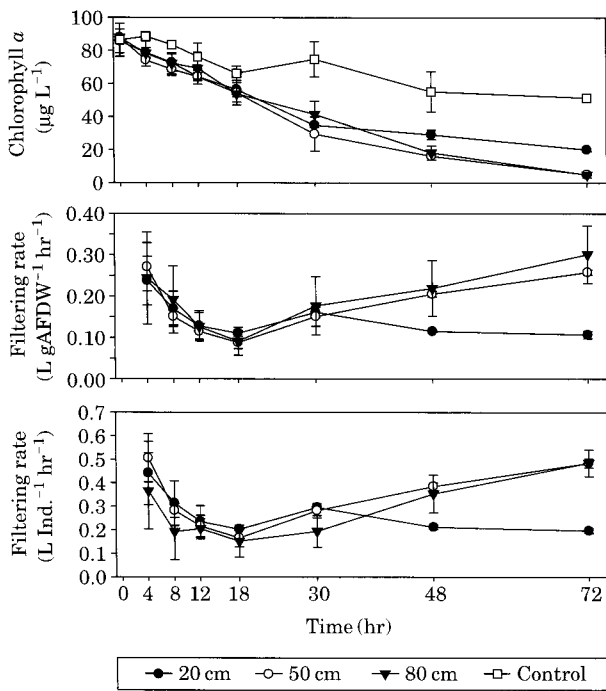


Fig. 4. Temporal change of Chl-*a* and filtering rate of *Unio douglasidae* at different depths (20, 50, 80 cm).

3. DO 농도에 따른 말조개 여과율

말조개를 투입하지 않은 대조구에서 실험기간 동안 엽록소-*a* 농도는 190.0 µg L⁻¹에서 282.6 µg L⁻¹까지 지속적으로 증가하였지만, 말조개를 투입한 모든 처리구는 지속적인 엽록소-*a* 농도의 감소를 나타냈다(Fig. 5). 처리구의 엽록소-*a* 농도의 감소경향은 처리구별로 큰 차이를 나타내지는 않았다.

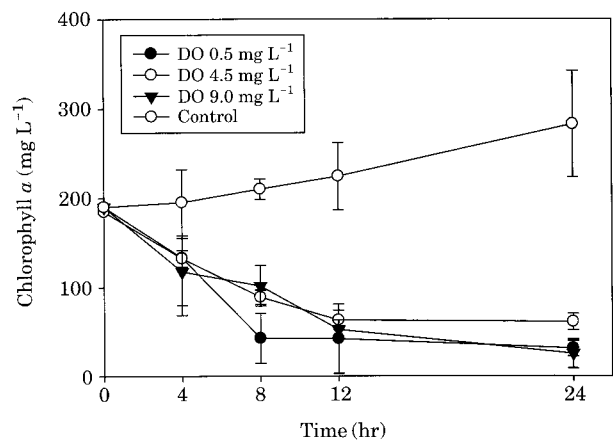


Fig. 5. Temporal change of Chl-*a* concentration in the control (without mussel) at 8.8 mgO₂ L⁻¹ of DO concentration (20°C) and the treatment (with mussel) at the different DO concentration (0.5, 4.5, 9.0 mgO₂ L⁻¹ in 20°C).

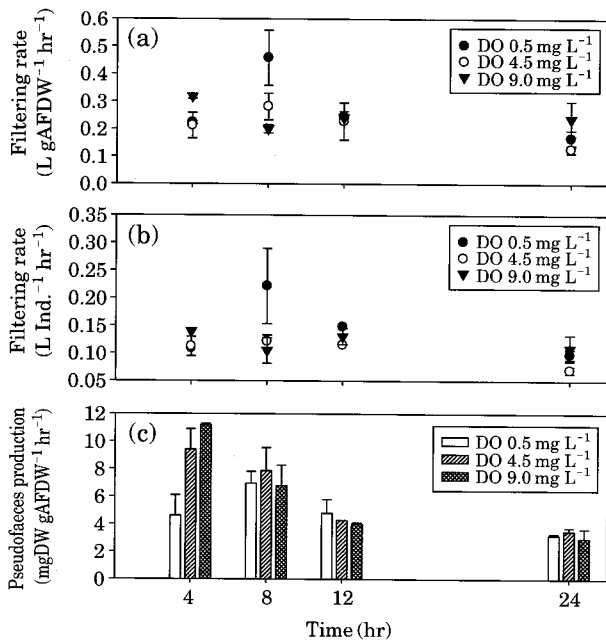


Fig. 6. Filtering rate (a, b) and pseudofeces production (c) of *Unio douglasiae* at the different DO concentrations (0.5, 4.5, 9.0 $mgO_2\ L^{-1}$).

DO 농도를 가장 낮게 조절한 0.5 $mgO_2\ L^{-1}$ 에서의 여과율 변동이 0.17~0.46 (Ave: 0.27 ± 0.04) $L\ gAFDW^{-1}\ hr^{-1}$ 로 가장 크게 나타났고, 4.5와 9.0 $mgO_2\ L^{-1}$ 은 각각 0.13~0.21 (Ave: 0.21 ± 0.02) $L\ gAFDW^{-1}\ hr^{-1}$, 0.20~0.32 (Ave: 0.25 ± 0.03) $L\ gAFDW^{-1}\ hr^{-1}$ 로 상대적으로 변화가 적게 나타났다 (Fig. 6a). 개체당 여과율은 0.5 $mgO_2\ L^{-1}$ 에서 0.22 $L\ Ind^{-1}\ hr^{-1}$ 로 가장 높았고, 평균 $0.14 \pm 0.06\ L\ Ind^{-1}\ hr^{-1}$ 로, 9.0 $mgO_2\ L^{-1}$ 에서 $0.12 \pm 0.02\ L\ Ind^{-1}\ hr^{-1}$, 4.5 $mgO_2\ L^{-1}$ 에서 $0.11 \pm 0.02\ L\ Ind^{-1}\ hr^{-1}$ 보다 높게 나타났다 (Fig. 6b).

말조개의 PFP는 실험 초기에 DO 농도가 높을수록 높게 나타났다. 실험 8 hr 이후 DO 농도에 따른 PFP는 비슷한 경향을 보였으며, 시간이 경과함에 따라 점차 감소하였다. 9.0 $mgO_2\ L^{-1}$ 에서는 실험 초기(4 hr)에 각각 11.2 $mg\ gAFDW^{-1}\ hr^{-1}$ 로 가장 높은 배설물 생산량을 보였고, 0.5 $mgO_2\ L^{-1}$ 에서는 8 hr 시점에서 7.0 $mg\ gAFDW^{-1}\ hr^{-1}$ 로 가장 높게 나타냈다 (Fig. 6c).

고찰

패류의 생존율에 영향을 미치는 요인은 수온, DO 농도, 수심 등의 물리적·화학적 환경적 요인과 패류의 먹이원

인 식물플랑크톤 밀도와 종조성, 다른 생물과의 경쟁과 같은 생물학적 요인 등 다양하게 나타난다 (Dorgelo and Smeenk, 1988; Hwang, 1996). 본 연구의 현장조사에서 수온, DO 농도, pH가 말조개의 생존율과 밀접한 관계를 가지는 것으로 관찰되었고, 특히 수온의 영향이 가장 크게 나타났다. 수온이 증가할수록 말조개의 폐사율이 증가하였고, 상대적으로 수온의 변화가 가장 심한 표층에서 생존율이 가장 낮게 나타났다. 패류의 폐사는 수온이 너무 높거나 낮을 때 발생하며 (Sickel, 1986), Owen and Cahoon (1991)은 수온이 30°C로 증가하여 서식처가 혐기성 상태가 조성되는 경우에 15시간 내 패류의 50% 폐사가 발생함을 관찰하였다. 또한, 수온의 증가 (15 → 25°C)는 이매패의 장기 내에 축적되는 남조류의 독소량을 증가 ($130 \pm 11 \rightarrow 250 \pm 40\ \mu g\ gDW^{-1}$)시키며 (Yokoyama, 2002), 16°C에서 25°C로 수온이 증가하는 경우 이매패의 종에 따라 산소 소비율이 2~4배 정도 증가하는 것이 보고되었다 (Chen *et al.*, 2001). 이처럼 수온의 상승은 패류의 산소 소비량 및 섭식율의 증가, 동화율과 활동성의 감소, 수중 산소 농도의 감소 그리고 패류의 용존산소 소모 증가를 야기하며, 암모니아 배출량 증가로 인해 암모니아 독성에 의한 폐사가 야기되기도 한다 (Buddensiek, 1993). Belanger *et al.* (1991)에 따르면 24°C 수온에서 암모니아의 농도가 0.74 $mgO_2\ L^{-1}$ 인 경우 13일 이내에 패류 전체가 폐사되었다.

본 연구에서 엽록소-a 농도와 말조개의 폐사율과는 유의한 상관성을 나타내지 않았다. 이는 실험기간 동안 24.7 $\mu gChl-a\ L^{-1}$ 이상의 식물플랑크톤 생물량이 유지되었기 때문에 먹이부족 혹은 먹이경쟁 등에 의한 영향은 크지 않았던 것으로 판단된다.

생존률 관찰기간 동안 DO 농도는 9.9~12.9 $mgO_2\ L^{-1}$ 로 높게 유지되었다. 광합성이 이루어지지 않는 밤 동안 식물플랑크톤의 호흡으로 인한 DO의 감소가 발생하더라도 패류는 DO 농도가 낮아질수록 산소소비를 감소시키며 (Chen *et al.*, 2001), 산소가 없는 상태에서 7일 동안 90%의 생존율을 가질 수 있는 생리적인 특성 (Horne and McIntosh, 1979)을 감안할 때, DO 농도가 상대적으로 높게 유지된 현장에서 말조개의 폐사에 대한 직접적 영향은 크지 않았을 것으로 판단된다. 높은 암모니아 농도도 패류의 폐사 원인이 될 수 있으나, 실험 초기를 제외한 나머지 기간에는 0.03 $mg\ L^{-1}$ 이하로 낮은 농도를 유지하였기 때문에 말조개의 폐사에 직접적인 영향은 거의 없었을 것으로 추정된다. 또한 말조개 자체의 암모니아 배출의 영향도 개방된 공간에 설치하였기 때문에 크지 않았을 것으로 판단된다.

본 연구에서 pH도 말조개의 생존율과 밀접한 관계를 나타냈다. 담수패류의 일종인 *Hyriopsis bialatus*은 30~45°C의 수온에서 pH 7 정도일 때 위와 장의 소화활성효소 활성이 가장 높으며, pH가 증가하거나 감소할수록 활동이 감소하며 (Mayuva *et al.*, 2004), pH가 5 이하인 경우 담수패류 (*Anodonta cygnea* L.)는 패각을 달아 활동시간을 줄이는 것으로 알려져 있다 (Pynnönen and Judith, 1995). 이와 같이 pH는 말조개의 신진대사에 영향을 줌으로써 폐사에 간접적으로 영향을 주었을 것으로 판단된다.

본 연구에서 나타난 말조개의 폐사의 원인은 특정한 원인에 의한 것보다는 말조개의 생리적 상태에 영향을 주는 수중에서의 위치(수심), DO 농도, 수온, pH 등과 같은 여러 요인이 복합적으로 작용한 것으로 판단된다. 수심과 DO 농도에 따른 실내 실험이 진행되는 동안 말조개의 폐사가 관찰되지 않은 것으로 미루어 보아, 환경변화가 말조개의 폐사에 영향을 주기 위해서는 1~3일의 짧은 기간 보다는 1주 이상의 긴 기간 동안 지속적으로 영향을 주어야 하는 것으로 판단된다.

말조개는 다른 담수 이매패인 참재첩에 비해 초기 폐사율이 낮은 것으로 나타났다. 김 등(2004)에 의하면 참재첩의 경우 초기 744 mussels m⁻² 밀도에서 9일 후 557 mussels m⁻² 개체로 감소하여, 25% 정도의 폐사율을 나타낸 반면, 말조개의 경우 초기 20개체로 2주 동안 0~5% 정도의 폐사율을 나타냈다. 패류의 초기 폐사율은 기존의 환경에서 새로운 환경으로의 변화에 대한 적응의 여부에 의한 것으로 판단되며, 20개체를 이용한 말조개의 생존율 실험에서 이들이 차지한 면적을 환산할 때 250 mussels m⁻² 정도로 나타나지만, 말조개는 참재첩에 비해 몸

체가 3~4배 이상 크기 때문에 말조개가 차지하는 면적은 참재첩과 비슷하여 이매패의 밀도에 의한 폐사율의 차이는 미미한 것으로 판단된다. 일반적으로 말조개는 하천 중·하류의 유속이 느리거나 정체되어 있고 진흙이나 미세한 모래로 이루어진 하상이나 강기슭에서 많이 발견되며, 참재첩의 경우 일정 유속이 유지되는 하천 중류의 모래질의 하상의 서식지에서 주로 발견된다. 말조개의 서식지가 상대적으로 부영양화나 유기물과 영양염 같은 오염의 정도가 크게 나타나기 때문에, 부영양화된 저수지의 환경에 대한 적응성이 말조개가 더 높은 것으로 판단된다.

담수 이매패의 여과율은 먹이원인 식물플랑크톤의 종 조성 (Hwang, 1996; Pires *et al.*, 2005; Bontes *et al.*, 2007) 과 밀도 (Dorgelo and Smeenk, 1998), 패류의 밀도 (Welker and Walz, 1998), 수온 (Fanslow *et al.*, 1995) 등 여러 환경요인에 의해 복합적으로 영향을 받는다. 본 연구에서 측정된 말조개의 여과율은 말조개의 수중 위치(수심)와 DO 농도에 따라 다르게 나타났다. 말조개의 최대 여과율은 DO 0.5 mgO₂ L⁻¹에서 실험 초기 (8 hr)에 0.46 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹로 나타났지만, PFP 생성율은 다른 시간에 비해 큰 차이를 나타냈다. DO 농도가 혐기성에 가까울 정도로 낮은 경우에 말조개는 섭식을 위한 여과보다는 호흡을 위해 여과율을 증가시키는 것으로 판단된다. 수심 실험에서 채수 시간 간의 엽록소-a 농도를 기준으로 산출한 말조개의 여과율은 실험초기 4 hr에서 0.50~0.52 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹로 비슷한 범위를 나타냈고, 72 hr에서는 0.09~0.47 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹로 대조군의 초기 농도를 기준으로 한 여과율보다 약간 높게 나타났으나, 수심에 따른 여과율은 동일한 경향을 나타냈다. 실험 초기 높은 여과율은 낮은

Table 1. Filtering rates of the freshwater mussels.

Bivalve	Filtering rate		Environmental condition	Food source	Reference
	L gAFDW ⁻¹ hr ⁻¹	L Ind. ⁻¹ day ⁻¹			
<i>Anodonta anatina</i>	0.24~0.49			Lab. Cultured phytoplankton	Bontes <i>et al.</i> , 2007
<i>Dreissena polymorpha</i>	1.21~6.72			Hypertrophic lake phytoplankton	Hwang, 1996
	4.0~41.0			Lab. Cultured phytoplankton	Franslow <i>et al.</i> , 1995
<i>Corbicula leana</i>	0.24~0.87	0.24~0.87		Hypertrophic lake phytoplankton	Hwang <i>et al.</i> , 2004
	0.74~3.05	0.74~3.05		Mesotrophic lake phytoplankton	Hwang <i>et al.</i> , 2004
	0.46~0.61	0.46~0.61		Hypertrophic lake phytoplankton	Kim <i>et al.</i> , 2004
<i>Unio douglasiae</i>	0.22~0.46	1.83~4.71	DO 0.5 mg L ⁻¹	<i>Oscillatoria</i> sp.	This study
	0.13~0.28	1.12~2.20	DO 4.5 mg L ⁻¹		
	0.20~0.32	1.90~2.74	DO 9.0 mg L ⁻¹		
	0.11~0.24	4.71~10.59	Depth 0.2 m		
	0.09~0.27	3.98~12.14	Depth 0.5 m		
	0.09~0.30	3.65~11.65	Depth 0.8 m		

DO 농도와 같은 부적절한 생물 환경으로 인하여 말조개의 여과율을 증가시키는 것으로 판단되며, 일정 시간이 지난 이후 대조군의 식물플랑크톤이 사멸과 침전 등이 상대적으로 적어지는 시기를 수체가 안정화된 것으로 판단할 때, 실험 종료 시점에서 50, 80 cm 수심에서 높은 여과율은 감소하는 식물플랑크톤의 밀도에 의해서 먹이 섭식을 위하여 증가하는 것으로 판단된다. 다른 담수산 이매패의 먹이(식물플랑크톤) 밀도에 따른 실험에서도 먹이 밀도가 낮아질수록 여과율이 증가하는 것으로 보고되었다(Hwang, 1996; Bontes *et al.*, 2007). 다른 수심에 비해 20 cm 수심에서의 낮은 여과율은 수체 내의 순환이 상대적으로 약한 표층에 위치하였고, 환경요인의 변화가 가장 민감하여 말조개의 생리적인 부분에 영향을 미침으로 인하여 낮게 평가된 것으로 판단된다.

말조개의 개체당 여과율은 수심에 실험에서 3.61~12.14 L Ind.⁻¹ day⁻¹ 보였고, DO 농도에 따라서 1.12~4.71 L Ind.⁻¹ day⁻¹로 나타났다(Table 1). 수심실험에서 개체당 여과율이 높게 나타난 것은 말조개의 크기가 평균 9.8 cm로 DO 농도 실험에 사용한 말조개의 평균 6.7 cm 크기보다 큰 것으로 사용하였고, 식물플랑크톤의 농도가 2배 정도 낮았기 때문으로 판단된다. 다른 담수산 이매패의 여과율 연구결과와 비교해 볼 때, 말조개의 단위 중량당 여과율은 참재첩에 비해 2~3배 이상 낮은 것으로 나타났으나, 개체당 여과율은 4배 이상 높게 나타났다. 말조개와 크기와 형태가 비슷한 *Anodonta anatina*의 여과율과는 비슷한 수치를 나타냈다. 말조개의 몸체의 크기가 클수록 여과율이 낮아지고, 먹이 농도가 낮을수록 여과율이 높아지는 것은 기존의 다른 이매패 연구결과(Fanslow *et al.*, 1995; Hwang *et al.*, 2001; Bontes *et al.*, 2007)와 같은 경향을 보였다.

국내 약 18,800개의 저수지 대부분이 저수량 100만 톤 미만이고 평균 수심이 10 m 이하이며, 갈수기 기간 동안 평균 수심이 더 낮아지는 수리학적 특성을 가지고 있다(한농공, 2001). 말조개의 여과율이 높게 나타난 50, 80 cm 수심은 저수지 평균 수심과 비교해 볼 때, 표층에서 중층 사이 정도의 수심으로 판단되며, 80 cm 이상의 깊은 수심에 대한 말조개의 여과율에 대하여 추후 연구가 필요할 것으로 판단된다. 해당 수심에 말조개의 서식처를 조성 후 지속적으로 일정 수심을 유지하기 위해서는 인공식물섬과 같은 부유성 구조물을 이용하면 효과적일 것으로 사료되어진다.

말조개의 개체당 여과율은 다른 담수산 이매패에 비해 비슷하거나 높고, 다른 담수산 이매패에 비해 환경변화에 대한 초기 적응이 상대적으로 높기 때문에, 부영양 호수

에서 조류제어를 위한 말조개의 이용가능성은 상당히 높을 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 부영양 저수지에서 대발생하는 유해조류의 생물학적 제어를 위한 연구의 일환으로, 여과 섭식성 이매패 말조개(*Unio douglasiae*)를 대상으로 수심 및 용존산소에 따른 여과율, 생존율 및 배설물 생산량을 조사하였다.

현장에서 말조개의 생존율은 20 cm 수심에서 가장 낮게 나타났고, 50 cm와 80 cm 수심에서 상대적으로 높게 나타났다. 말조개 생존율은 수온, pH, DO 농도와 높은 상관성을 나타냈고, 엽록소-*a* 농도, 부유물질(SS)과 암모니아 농도와는 유의한 상관성을 나타내지 않았다. 수심실험에서 대조군의 엽록소-*a* 농도는 25% 정도 감소한 반면, 수심 50, 80 cm 처리군에서는 95% 정도까지 감소하였다. 말조개 여과율은 실험 18 hr까지 0.15~0.20 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹ 범위를 보였으나, 이후 20 cm 처리군은 0.11 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹까지 감소한 반면, 50, 80 cm 처리군에서는 각각 0.26, 0.30 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹로 증가하였다. DO 실험에서는 대조군의 엽록소-*a* 농도는 지속적으로 증가한 반면, 말조개를 투입한 모든 처리군에서는 감소하였다. 말조개 여과율은 8 hr 후 0.5 mgO₂ L⁻¹ 농도에서 0.46 L gAFDW⁻¹ hr⁻¹로 가장 높게 나타났으나 이후 DO 농도에 따라 큰 차이를 나타내지 않았다. 말조개에 의한 배설물 생산은 실험 초기 DO 농도가 낮을수록 높게 나타났지만, 시간이 지남에 따라 감소하여 실험 시작 24시간 후에는 3.0 mg gAFDW⁻¹ hr⁻¹ 정도로 비슷한 수준에 도달하였다.

이상의 결과를 종합할 때, 유해조류 제어를 위해 수층에서 말조개를 이용할 경우 용존산소에는 크게 영향을 받지 않으므로 표층보다는 좀 더 아래쪽(50, 80 cm)에 설치하는 것이 효과적일 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 농림부 핵심 전략 연구과제 “생물조절(먹이 연쇄)을 통한 농업용저수지 수질관리 기법개발”(306009-03-2-CG00)에 의해 수행되었음.

인 용 문 헌

김호섭, 박정환, 공동수, 황순진. 2004. 참재첩을 이용한 부영양

- 호의 수질개선. 육수지 **37**(3): 332-343.
- 농업기반공사. 2001. 농업용수 수질측정망 조사 보고서.
- 황순진, 김호섭, 최광현, 박정환. 2002. 국내 담수산 조개의 여과섭식능 비교와 섭식활동이 호수 수질에 미치는 영향. 육수지 **35**: 92-102.
- APHA. 1995. Standards methods for the examination of water and wastewater (19thED.). American Public Health Association, Washington, D.C.
- Belanger, S.E. 1991. The effect of dissolved oxygen, sediment, and sewage treatment plant discharges upon growth, survival and density of asiatic clams. *Hydrobiologia* **281**: 113-126.
- Belanger, S.E., J.L. Farris, D.S. Cherry and J. Cairns. 1985. Sediment preference of the freshwater Asiatic clam, *Corbicula fluminea*. *The Nautilus* **99**: 66-73.
- 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.
- Buddensiek, E.H., H. Engel, S. Fleischauer-Rossing and K. Wachtler. 1993. Studies on the chemistry of interstitial water taken from defined horizons in the fine sediments of bivalve habitats in several northern German Lowland Waters II: Microhabitats of margaritifera margaritifera L., *Unio Crassus* (Philipsson) and *Unio tumidus* Philipson. *Arch. Hydrobiol.* **127**: 170-180.
- Chen, L., G.H. Alan and J.N. Richard. 2001. Comparison of oxygen consumption in freshwater mussels (Unionidae) from different habitats during declining dissolved oxygen concentration. *Hydrobiologia* **450**: 209-214.
- 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 (Tankersley, R.S., D.O. Warmolts, G.T. Watters, B.J. Armitage, P.D. Johnson and R.S. butler eds.) Ohio Biological Survey, Columbus, OH, USA.
- Dorgelo, J. and J.W. Smeenk. 1988. Contribution to the ecophysiology of *Dreissena polymorpha* (Pallas) (Mollusca: Bivalvia): Growth, filtration rate and respiration. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **23**: 2202-2208.
- 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.
- 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.
- Horne, F.R. and S. McIntosh. 1979. factors influencing distribution of mussel in the Blanco River of Central Texas. *The Nautilus* **84**: 120-133.
- Hwang, S.-J. 1996. Effects of zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) on phytoplankton and bacterioplankton: Evidence for size-selective grazing. *Korean J. Limnol.* **29**: 363-378.
- Hwang, S.-J., A.D. Steiman and K.E. Havens. 1998. Phosphorus kinetics of planktonic and benthic assemblages in a shallow subtropical lake. *Freshwater Bio.* **40**: 729-745.
- Hwang, S.-J., H.-S. Kim and J.-K. Shin. 2001. Filter feeding effects of a freshwater bivalve (*Corbicula leana* PRIME) on phytoplankton. *Korean 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.
- Kirsi, S.P. and Judith huebner. 1995. Effects of episodic low pH exposure on the valve movements of the freshwater bivalve. *Water Res.* **29**: 2579-2582.
- Mayuva, A., E. Arunee, K. Uthaiwna, T. Amara, M. Mingkwan, P. Pannee and R.-T. Krisna. 2004. Temperature and pH characteristics of amylase and proteinase of adult freshwater pearl mussel, *Hyriopsis (Hyriopsis) bialatus* Simpson 1900. *Aquaculture* **234**: 575-586.
- McMahon, R.H. 1991. Mollusca: Bivalvia. In Thorp, J.H. and A.P. Corvich (eds), Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates. Academic Press, New York, pp. 315-399.
- Naddafi, R., K. Pettersson and P. Eklov. 2007. The effect of seasonal variation in selective feeding by zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) on phytoplankton community composition. *Freshwater Bio.* **52**: 823-842.
- Owen, D.A. and L.B. Cahoon. 1991. An investigation into the use of exotic and native bivalves as indicators of eutrophication induced hypoxia. *J. Elisha Mitchell Scientific Soc.* **107**: 71-74.
- Pires, L.M.D., 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.
- Pynnooen, K.S. and Judith huebner. 1995. Effects of episodic low pH exposure on the valve movements of the freshwater bivalve. *Water Res.* **29**: 2579-2582.
- 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). *Hydrobiologia* **239**: 53-63.
- Sickel, J.B. 1986. *Corbicula* population mortalities: Factors influencing population control. *Am. Malacol. Bull.* **2**(Special edition): 89-94.
- Smit, H.A., E.H. Bij de vaate, van Nes and R.H. Noordhuis. 1993. Colonization, ecology and positive aspects of zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) in The Netherlands. pp. 55-77. *In: Zebra Mussels: Biology, Impact, and Control* (Nalepa, T.F. and D.W. Schloesser eds.). Lewis Publishers, Boca raton, FL.
- 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.
- Vaughn, C.C. and C.C. Hakenkamp. 2001. The functional role of burrowing bivalves in freshwater ecosystems. *Freshwater Biol.* **46**: 1431-1446.
- 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.
- 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 31 December 2007,
Revision accepted 4 February 2008)