

수온, 먹이농도, 패각 크기가 *Microcystis aeruginosa*에 대한 말조개의 여과율 및 배설물 생산에 미치는 영향

이연주 · 김백호 · 김난영 · 엄한용¹ · 황순진*

(건국대학교 환경과학과, ¹한국농촌공사 농어촌연구원)

Effects of Temperature, Food Concentration, and Shell Size on Filtering Rate and Pseudofeces Production of *Unio douglasiae* on *Microcystis aeruginosa*. Lee, Yeon-Ju, Baik-Ho Kim, Nan-Young Kim, Han-Yong Um¹ and Soon-Jin Hwang* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul, Korea; ¹Rural Research Institute, Gyeonggi 426-908, Korea)

This study was conducted to evaluate filtering rate (FR) and pseudofeces production (PFP) of a freshwater filter-feeding bivalve, *Unio douglasiae*, on a toxic cyanobacterium (*Microcystis aeruginosa*). The experiments were conducted under the various conditions of water temperature (5~35°C), mussel size (5.6~13.3 cm) and food concentrations (49~491 µg Chl-*a* L⁻¹). Among the applied temperature, the maximum FR (0.41 L · gAFDW⁻¹ · hr⁻¹) and PFP (0.47 mg · gAFDW⁻¹ · hr⁻¹) were observed at 15 and 25°C, respectively. Both weight-based FR and PFP were not correlated with the mussel size, and the values lied in a limited range with some degree of variation. Likewise, no significant relations between FR and PFP was observed in the mussel size. The FR values were negatively correlated with food concentration, while PFP showed positive correlation. Among the applied food concentrations, the maximum FR (0.34 L · gAFDW⁻¹ · hr⁻¹) and PFP (0.06 mg · gAFDW⁻¹ · hr⁻¹) appeared in 113 µg Chl-*a* · L⁻¹ and 491 µg Chl-*a* · L⁻¹, respectively. These results indicate that the grazing of *Unio douglasiae* are affected by various parameters, and it may be applied as an effective biofilter to inhibit *Microcystis* bloom under appropriate application. However, further studies on the fate of excreted pseudofeces are needed to understand their possibility of stimulating nuisance algal growth.

Key words : freshwater bivalve, *Unio douglasiae*, *Microcystis aeruginosa*, filtering rate, pseudofaeces production

서 론

담수생태계에서 여과섭식 특성을 가진 이매패류(bivalve)는 미세 박테리아로부터 동물플랑크톤에 이르기까지 다양한 크기의 생물 혹은 무생물 입자들을 섭식한다(Dame *et al.*, 1985; Vaughn and Hakenkamp, 2001). 또한 이들에 의한 무기형태의 영양염 혹은 faeces와 pseu-

dofaeces와 같은 물질의 배출은 패류의 섭식과 관련되어 나타나는 주요한 결과들이다(Kryger and Riisgard, 1988; Welker and Walz, 1998; Strayer, 1999). 패류 섭식과정의 부산물은 식물플랑크톤(James, 1987; Lauritsen and Mozley, 1989)과 저서성 조류 군집의 성장에 이용될 수 있는 것으로 알려져 있다(Dame, 1996; Christian and Berg, 2000; Davis *et al.*, 2000).

최근 들어 이매패류가 가진 여과능력을 조류제어와 관

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

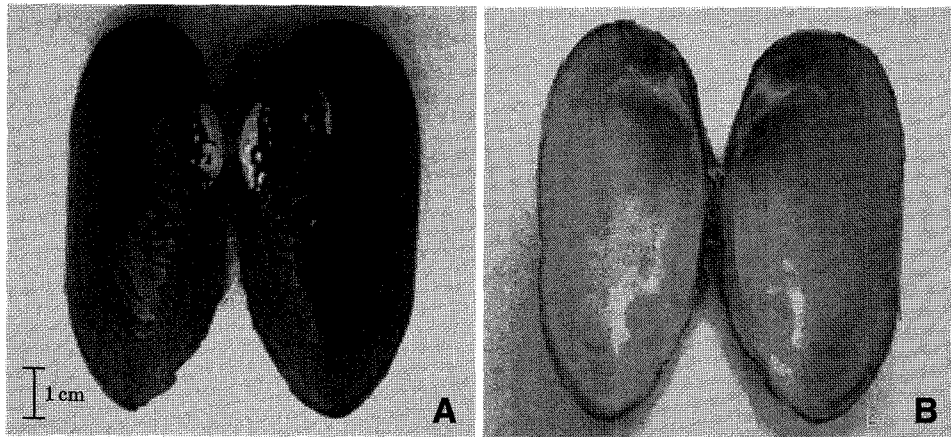


Fig. 1. Morphotype of *Unio douglasiae* collected from the Keum River (Boryung, Korea). A: Out-side view, B: Inside-view (bar length: 1 cm).

련된 수질개선에 이용하고자 하는 관심이 높아지고 있으나(Noorhius *et al.*, 1992; Hwang *et al.*, 2001) 실제 현장 적용을 위한 연구는 크게 미흡한 실정이다. 특히 국내에서 패류의 생태학 및 섭식에 대한 선행연구로는 재첩 (*Corbicula* spp.)과 관련된 일부 연구(Hwang *et al.*, 2001, 2004; 황 등, 2002; 김 등 2004; 박, 2004)를 제외하고는 거의 없다. 더욱이 국내 전역에 분포하면서 오염내성이 강하고 개체당 여과율이 높은(황 등, 2002) 말조개(*Unio douglasiae*)는 부영양상태의 수체에 대한 수질개선과 관련하여 큰 잠재력이 제기되고 있으나, 관련된 생리생태학적 연구는 거의 없는 현실이다.

본 연구는 부영양 저수지의 수질개선을 위해 생물학적 여과자인 말조개의 현장적용성 검토를 위한 생리생태학적 연구의 일환으로 다양한 조건(수온, 먹이농도, 조개의 크기) 하에서 유해남조 *Microcystis aeruginosa*에 대한 여과율과 배설물(pseudofaeces) 생산율을 분석하였다.

재료 및 방법

1. 말조개 채집 및 유지

실험에 사용한 말조개는 2007년 1월 충청남도 보령지역의 하천 바닥에서 저인망 그물로 채집하였다. 패각은 두껍고 크며 검은 색을 띠고 있어 다른 유사종과 뚜렷하게 구별된다. 각편은 앞쪽으로 치우쳐 있고 태각 부위에만 작은 돌기들이 있으며, 성장맥이 나타나고 적갈색 인대가 뚜렷하다. 껍질의 안쪽은 외투흔이 뚜렷하고 은백색의 광택을 띤다(Fig. 1).

채집한 말조개는 실험실로 가져온 다음, 탈염시킨 수돗

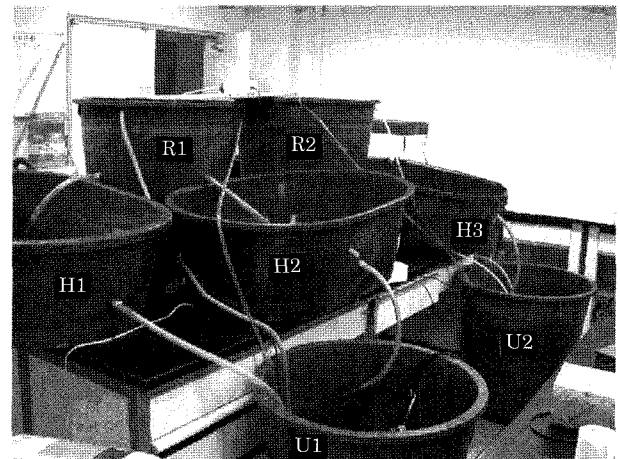


Fig. 2. Artificial mussel management system (R1, R2: Raw water tanks; H1, H2 and H3: mussel habituated tanks; U1 and U2: used water or filtered water).

물로 2~3회 세척하고, 본 연구팀이 자체적으로 제작한 순환식 수조에 넣어 순화시켰다. 수조는 크게 원수탱크, 사육탱크, 사용수 탱크 등 3단계로 나누어 시스템화하였으며, 사용수 탱크의 물은 여과기를 거친 후 소형 전기펌프(ID-50)를 이용하여 원수탱크로 유입하도록 하였다(Fig. 2). 사육탱크는 하천(경안천)에서 채취한 모래를 탈염수돗물로 세척한 후 바닥에 깔고, 냉각기를 이용하여 채집 당시 수온($18.5^{\circ}\text{C} \pm 1.0$)을 유지시켰다. 유지수는 기본적으로 현장수(부영양호수의 물: 일감호, 서울) 또는 탈염소 수돗물을 이용하였으며, 증발에 의한 물의 손실은 탈염소 수돗물로 보충하였다. 2개월에 한 번씩 패각에 붙은 유기물을 탈염소 수돗물로 세척하였고 유지수는 월 1

회색 현장수로 교체하였다. 패류의 먹이로는 현장수 이외에 녹조 *Chlorella*TM (한국)를 5일 간격으로 1 mL씩 제공하였으며, 패각이 열려있거나 운동성이 전혀 없는 패류를 사망한 것으로 판단하여 제거하였다. 실험에 사용된 말조개는 길이 5.5~11.4 cm (평균 7.5 cm)의 건강한 개체로서 실험 전 3일부터 먹이공급을 중단하였다.

2. 말조개 여과율 및 배설물 생산을 측정

실험에 사용된 말조개의 여과율 (filtering rate, FR)을 측정하기 위하여, 먼저 말조개의 유기물함량 (Ash free dry weight, AFDW)을 측정하였다. FR산정에 적용한 패류의 구조적 특성 (패각의 길이와 폭, 무게)은 각 패류의 AFDW와 회귀식 (regression function)을 이용하였는데, 본 실험에서는 상관성 (r)이 가장 높게 나타난 패각의 길이 (L)를 적용하였다 [(AFDW=0.0295L²-0.0824L-0.2625), r²=0.85, p<0.0001] (Fig. 3).

말조개의 유기물함량은 142개체 (패각 크기: 3.7~14.4 cm)의 근육을 껍질로부터 분리하여 용기에 담아 100°C Dry Oven에서 48시간 동안 건조시킨 후 무게를 측정하고, 이를 다시 500°C furnace (HY-8000S, YUYU SCIENTIFIC)에서 30분간 태운 다음 측정된 무게의 차이를 각 패류의 유기물함량으로 간주하였다 (김, 2004).

말조개의 여과율은 일정시간 먹이 섭식실험을 종료한 다음, 대조군과 패류 처리군의 수층 내 엽록소-a 농도의 차이를 사용된 패류의 유기물 함량 (회귀식에 의해 구한 값)으로 나누어 계산하였다. FR의 산출식은 다음과 같다.

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

여기서, V는 원수의 부피, C_t · C_i는 대조군의 초기와 처리시간 (t)에서의 엽록소-a의 농도, T_t · T_i는 처리구의 초기와 처리시간 (t)에서의 엽록소-a의 농도 (μg L⁻¹), B는 말조개 건중량 (gAFDW)이다.

말조개의 배설물은 실험 종료시에 바닥층에 가라앉은 배설물을 모두 채취하여 GF/F 여과지로 여과한 후 SS를 측정하였다. 이때, 바닥층에 포함된 섭식되지 않은 채 침전된 조류에 대해서는 대조군을 통해 보정하였다.

실험기간 동안 말조개의 배설물 PFP (Pseudofeces production)는 다음과 같은 식에 의하여 계산하였다.

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

여기서, S_t와 S_c는 실험군과 대조군의 배설물 양, 처리 시간은 t, B는 말조개 건중량 (gAFDW)이다.

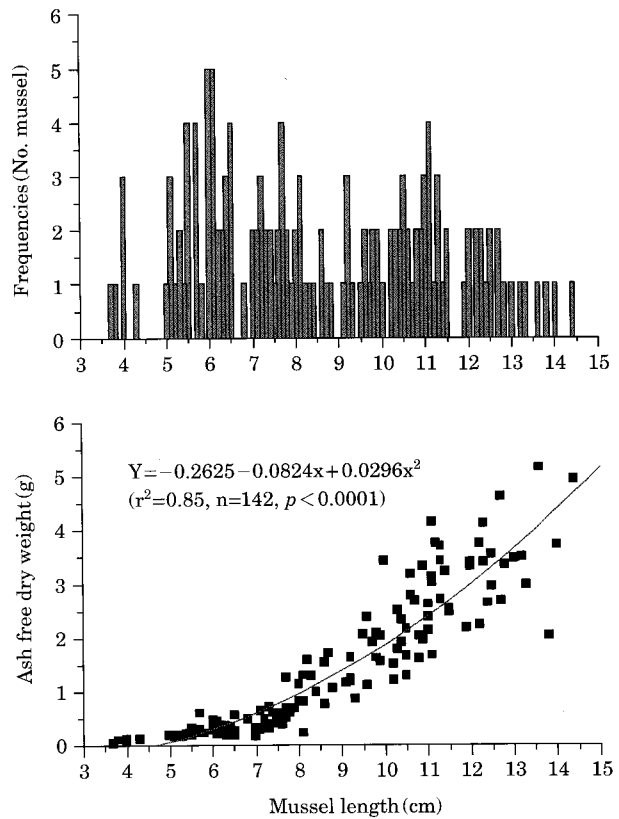


Fig. 3. Relationship between ash free dry weight (AFDW, g) and body length (cm) of *Unio douglasiae* collected from the Keum river (Boryung, Korea) (n=142).

3. 말조개 여과율 및 배설물 생산을 측정을 위한 실험조건 조성

수온, 먹이의 밀도, 패류 크기 및 패류의 밀도와 같은 다양한 조건에서 말조개의 여과율을 측정하였다. 실험에 사용된 물은 인공적으로 조류 대발생을 일으킨 실험수 (blooming water)이다. 매년 *Microcystis aeruginosa*가 대발생하는 부영양호의 현장수와 저니토를 대형 유리수조 (50 × 65 × 120 cm)에 넣고 25°C ± 1.0 수온, 78 μmol 광도, 12 L:12 D 광주기를 조성한 후, CB배지를 넣어 인공적으로 남조류의 대발생을 유도하였다 (최종 엽록소-a의 농도는 500 μg L⁻¹ 수준).

수온실험은 4단계 (5, 15, 25, 35°C)로 조절된 배양기에서 실시하였다. 5°C와 15°C는 배양기 (B2-1000M, JEIO TECH), (J-MP1, JISICO)에서, 25°C와 35°C는 일정량의 물을 담은 수조 (31 × 45 × 35 cm)에 heater를 사용하여 온도를 일정하게 유지하였다. 실험은 수조에 9 L의 실험수 (엽록소-a 농도: 499.37 μg L⁻¹, 우점종: *Microcystis*

aeruginosa)를 각각 동일하게 넣고, 각 수조에 3개체의 말조개를 투입하여 실시하였다.

먹이밀도(엽록소-*a* 농도) 실험은 3L 수조에서 실험수를 탈염시킨 수돗물로 희석하여 49, 113, 265, 491 $\mu\text{g Chl-}a \cdot \text{L}^{-1}$ 가 되도록 조절한 후 실시하였다. 각 먹이 밀도 실험은 3번 반복하여 실시하였다. 실험조건은 25°C 수온에서 실시하였으며, 말조개 밀도는 0.7 ind. $\cdot \text{L}^{-1}$ (3L당 2개체)로 하였다.

말조개의 크기에 따른 실험은 다양한 크기의 (범위 5.6 ~ 13.3 cm)를 선별하여, 3L 수조에 실험수(엽록소-*a* 농도: 139 $\mu\text{g L}^{-1}$, 우점종: *Microcystis aeruginosa*)를 각각 2L씩 동일하게 넣은 다음 0.5 ind. $\cdot \text{L}^{-1}$ (2L당 1개체)를 투입하여 실시하였다.

여과율 측정을 위한 시료채취는 모든 실험에서 동일하게 실시하였는데, 실험시작 후 0, 1, 4, 7시간에 표층으로부터 15 cm 아래층에서 피펫으로 최대한 교란이 일어나지 않도록 하여 각각 50 mL씩 채취한 후 filtering하였다. 실험을 종료한 7시간째에는 중간층을 포함하여, 표층과 바닥층을 모두 채취하였으며, 바닥층으로부터의 시료 채취는 전기펌프를 이용하였다. 채취된 시료는 잘 혼합하여 GF/C (Cat No 1822 047, Whatman) 여과지로 여과한 후 90% 아세톤을 넣어 24시간 동안 냉암소에서 추출하였다. 엽록소-*a* 농도는 흡광광도계를 이용하여 측정하였다 (APHA, 1995).

결 과

1. 수온에 따른 여과율 및 배설물 생산

본 연구에서 처리한 수온 조건 중, 15°C에서 0.41 L $\cdot \text{gAFDW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 가장 높은 여과율이 나타났고, 25°C에서는 약간 감소하였으나 통계적인 유의성은 없었다 ($r=0.174, p>0.05$). 5°C에서 가장 낮은 여과율(0.11 L $\cdot \text{gAFDW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$)을 나타냈으며, 그 다음으로 35°C에서 낮은 여과율을 보였다. 배설물 생산량은 온도가 높아질수록 증가하는 경향을 나타냈으며, 25°C와 35°C에서 거의 비슷하게 0.46 mg $\cdot \text{gAFDW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ 정도의 배설물 생산율을 나타냈다 (Fig. 4).

2. 먹이농도에 따른 여과율 및 배설물 생산

말조개의 여과율은 높은 먹이 농도보다는 낮은 먹이 농도에서 높게 나타났으며, 적용한 엽록소-*a* 농도 중 113 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 가장 높게 나타났다 (0.34 L $\cdot \text{gAFDW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$)

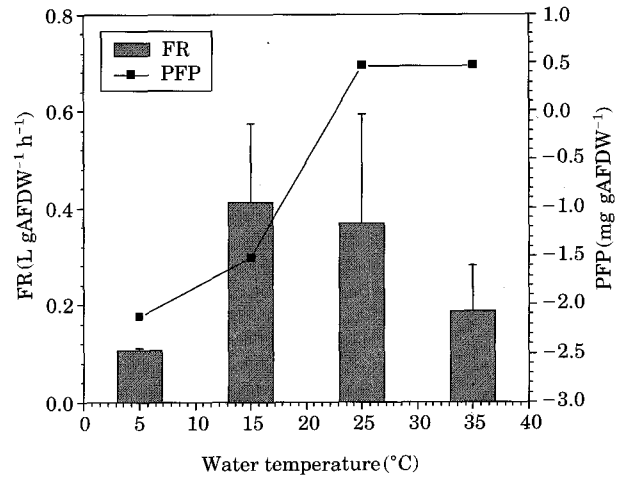


Fig. 4. Filtering rate (FR) and pseudofaeces production (PFP) of *Unio douglasiae* at different water temperature (5, 15, 25 and 35°C).

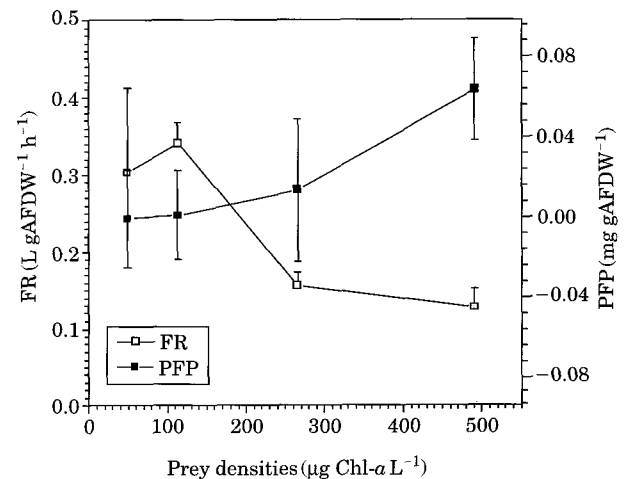


Fig. 5. Filtering rate (FR) and pseudofaeces production (PFP) of *Unio douglasiae* at different phytoplankton (mostly *Microcystis aeruginosa*) density based on chlorophyll-*a* ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) concentration.

(Fig. 5). 가장 낮은 여과율은 적용한 최고농도인 491 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 나타났으나, 265 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서와 비교할 때 별 차이는 없었다.

가장 높은 배설물 생산율은 여과율이 가장 낮게 나타났던 엽록소-*a* 농도 491 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 0.06 mg $\cdot \text{gAFDW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 나타났다 (Fig. 5). 전반적으로 배설물의 생산율은 먹이농도와 비례하고 여과율에 반비례하는 경향을 보여 주었다.

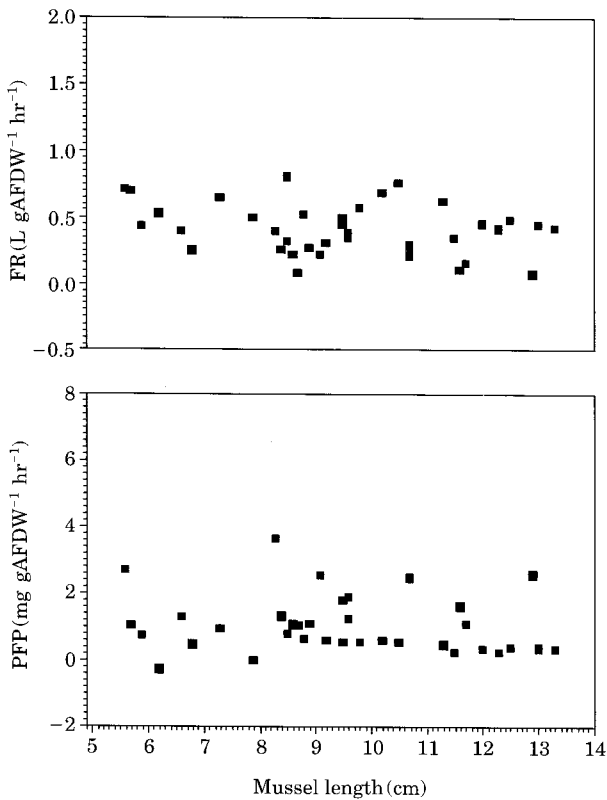


Fig. 6. Filtering rate (FR) and pseudofaeces production (PFP) of *Unio douglasiae* with different size.

3. 패각 크기에 따른 여과율 및 배설물 생산

패각 길이 5.6~13.3 cm인 말조개의 여과율은 0.06~0.80 L · gAFDW⁻¹ · hr⁻¹의 범위로 나타났으며, 전반적으로 약간의 변이는 있었으나 단위 무게당 여과율은 평균 0.43 L · gAFDW⁻¹ · hr⁻¹으로 개체의 크기와 상관없는 결과를 보여주었다(Fig. 6).

여과율과 마찬가지로 단위 무게당 배설물 생산율도 개체의 크기와 상관없이 나타났으며, -0.31~3.61 mg · gAFDW⁻¹ · hr⁻¹ (평균 1.06 mg · gAFDW⁻¹ · hr⁻¹)의 범위를 보였다(Fig. 6). 배설물의 생산은 여과율 및 패류의 크기와는 통계적 상관성이 나타나지 않았으며(FR: r = -0.182, p > 0.05, n = 39, PFP: r = 0.034, p > 0.05, n = 39), 특히 8.5 cm 크기 이상에서는 변이가 상당히 적고 거의 비슷한 수준으로 나타났다(Fig. 6).

말조개는 실험초기(~1시간)에 곧바로 섭식활동을 하지 않고, 4시간 이후부터 서서히 증가함을 보였다. 또한 크기가 작은 말조개는 성체보다 투입초기에는 낮은 여과율을 보이지만 7시간째에는 크기에 상관없이 거의 비슷한 여과율을 나타냈다. 따라서 말조개는 전체적으로 투입

후 4시간까지는 갑작스러운 먹이에 대한 적응시간이 요구되는 것으로 사료되었다.

고찰

본 연구에서 *Microcystis aeruginosa*에 대한 말조개(*Unio douglasiae*)의 여과율은 0.06~0.80 L · gAFDW⁻¹ · hr⁻¹ (0.60~38.44 L · mussel⁻¹ · day⁻¹)로 나타났다. 여과율의 변이는 말조개의 크기, 수온, 먹이농도에 따라 뚜렷하였으며, 배설물 생산율 역시 유사한 패턴을 보였다.

다양한 수온에서 적용한 말조개의 여과율은 15°C에서 가장 높게 나타났으며, 일반적으로 패류의 여과율은 10~20°C의 수온범위에서 높다는 결과와 일치하였다(Walz, 1978; Reeders and Vate, 1990; Fanslow *et al.*, 1995). 또한 비교적 먹이농도가 낮은 실험군에서 높은 여과율을 보였는데, 일반적으로 패류의 여과율은 부유물질 농도와 밀접한 상관성이 있으며(Sprung and Rose, 1988; Reeders and Bij de Vaate, 1990; Hwang, 1996), 입자성 물질에 대한 패류의 여과율이 남조류가 우점한 부영양 환경에서보다는 중영양 혹은 빈영양 상태의 환경에서 더 높게 나타난다는 결과와도 일치한다(Welker and Walz, 1998; Bontes *et al.*, 2007).

본 연구에서 다양한 크기의 말조개를 적용한 결과 무게당 여과율과 개체 크기의 관계는 유의한 상관성이 없이 여과율도 일정한 여과율 범위 내에서 나타났다. 그러나 말조개가 일정 크기 이상인 경우(8.5 cm 이상)에는 배설물 생산율의 변이가 작아지고 거의 비슷한 수준으로 나타났다. 이러한 결과는 무게당 여과율이 동일종 내의 패류의 크기보다는 패류 종간 여과능력과 보다 더 큰 관계가 있음을 시사한다(Fanslow *et al.*, 1995). 그러나 일부 선행연구들에서는 동일종 간이라도 종에 따라서는 개체의 크기가 작을수록 여과능력이 높을 수 있다는 결과를 제시하고 있다(Fanslow *et al.*, 1995; Hwang, 1996; Hwang *et al.*, 2001; 황 등, 2002).

패류의 여과율은 패류 종간에 차이가 있고(Borcherd-ing, 1992; Fanslow *et al.*, 1995), 먹이원의 밀도(Dorgelo and Smeenk, 1998), 패류의 밀도(Welker and Walz, 1998), 그리고 수온(Fanslow *et al.*, 1998) 등과 같은 여러 환경요인에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 얼룩말 조개나 재첩 등 다른 패류 종에 대한 선행연구와 비교할 때, 적용한 먹이원(주로 식물플랑크톤)의 종조성은 차이가 있으나, 밀도실험에서 나타난 결과는 유사함을 보였는데(Heath *et al.*, 1995; Hwang, 1996;

Soto and Mena, 1999), 이 결과는 결국 말조개가 *Microcystis aeruginosa*에 대해서도 높은 섭식율을 갖는 것으로 판단할 수 있다.

개체의 크기와 생물의 신진대사율은 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있는데, 이매패류의 경우 크기에 따라서 효소활성도, 호흡율, 여과율 등 생리적인 과정이 크게 영향을 받을 수 있다는 연구 결과가 보고되었으며(Meyhofer, 1985), 특히 여과율의 경우에는 크기에 따라 감소하는 경향이 일반적이다(Riisgard, 2001). 하지만 여과율과 개체 크기의 관계는 단순히 대사율과 크기의 관계로 치환될 수 없다는 주장도 제기되었는데, 그 예로 Johns et al. (1992)는 해양성 이매패류인 *Mytilus edulis*의 여과율과 개체 크기의 관계는 크기에 따른 형태적인 변화와 관련이 깊다고 주장하였다. 즉 개체의 크기가 증가할수록 아가미의 표면적과 같은 체표면적이 비례적으로 감소하기 때문에 이에 따라 여과율도 감소한다는 것이다. 따라서 개체크기에 따른 여과율의 변화는 크기에 따른 신진대사율과 체표면적 변화가 모두 관련이 있을 것으로 추정되지만 어떤 요인이 더 중요한 지에 대해서는 아직 알려져 있지 않다.

결론적으로, 말조개의 여과율과 배설물 생산율은 다양한 요인들에 의해 영향을 받으며, 같은 종 내에서도 환경적 조건에 따라 차이를 나타냈다. 본 연구의 결과로 판단할 때 말조개는 수온이 낮고 수심이 얇은 부영양 저수지에서 남조류 대발생 초기에 적용하면 높은 여과율로 수질을 개선하는 데 효과적일 것으로 사료되나, 적용방법 및 생산된 배설물의 수중 내의 변화 등에 대한 연구가 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

적 요

유기물이 풍부한 유수역에서 서식하는 이매패 말조개를 대상으로 여과율(filtering rate, FR) 및 배설물 생산율(pseudofaeces production, PFP)에 대한 최적조건을 파악하기 위하여, 다양한 수온(5~35°C), 먹이농도(49~491 µg 엽록소-a · L⁻¹), 패류크기(5.6~13.3 cm) 조건 하에서 섭식실험을 실시하였다. 말조개는 적용한 5~35°C의 온도범위 내에서, 수온 15°C에서 가장 최고 FR을 보였으며, 5°C에서 최저치를 나타냈다. 먹이밀도는 낮을수록 높은 FR을 보였고, 높을수록 높은 배설물 생산율을 나타냈으며, 개체의 크기는 단위무게당 FR 및 PFP에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 결론적으로, 말조개의 여과율과 배설물 생산율은 다양한 요인들에 의해 영향을

받는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과로 판단할 때, 말조개는 수온이 낮고 수심이 얇은 부영양 저수지에서 남조류 대발생 초기에 적용하면 높은 여과율로 수질을 개선하는 데 효과적일 것으로 사료되나, 적용방법 및 생산된 배설물의 수중에서의 영향 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 농림부 핵심 전략 연구과제 “생물조절(먹이연쇄)을 통한 농업용저수지 수질관리 기법개발”(306009-03-2-CG000)에 의해 수행되었음.

인 용 문 헌

- 김호섭, 박정환, 공동수, 황순진. 2004. 참재첩을 이용한 부영양호의 수질개선. *육수지* 37(3): 332-343.
- 박정환. 2004. 담수산 이매패류가 수생태계의 생태학적 수준의 변화에 미치는 영향에 관한 연구: Mesocosm 연구. 건국대학교 이학 석사학위 논문.
- 황순진, 김호섭, 최광현, 박정환. 2002. 국내 담수산 조개의 여과 섭식능 비교와 섭식활동이 수질에 미치는 영향. *육수지* 35: 92-102.
- APHA. 1995. Standards methods of the examination of water and wastewater (19thED). American Public Health Association, Washington, D.C.
- Beaver, J.R., T.L. Crisman and R.J. Brock. 1991. Grazing effects of an exotic bivalve (*Corbicula fluminea*) on hypereutrophic lake water. *Lake and Reserv. Manage.* 7(1): 45-51.
- 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 four strains of cyanobacteria, differing in shape, size and toxicity. *Hydrobiologia* 584: 191-204.
- Christian, A.D. and D.J. Berg. 2000. The role of unionid bivalves (Mollusca: Unionidae) in headwater streams. *J. Amer. Benthol. Soc.* 17: 189.
- Dame, R.F., R. Zingmark and D. Nelson. 1985. Filter feeding coupling between the estuarine water column and benthic subsystems. pp. 521-526. In: *Estuarine Perspectives* (Kennedy, V.S. ed.) Academic Press, New York.
- Dame, R.F. 1996. Ecology of marine buvalves: An ecosystem approach. CRC Press, Boca Raton, p. 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. 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. buttler 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. *Verhandlungen Internat. Vereini. 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.
- 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.
- Hwang, S.-J., H.-S. Kim and J.-K. Shin. 2001. Filter-feeding effect of a freshwater bivalve (*Corbicula leana* PRIME) on phytoplankton. *Korean J. Limnol.* **34**(4): 298-309.
- 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., 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.
- James, M.R. 1987. Ecology of the freshwater mussel *Hydriella mensiesi* (Gray) in a small oligotrophic lake. *Arch. Hydrobiol.* **108**: 337-348.
- Kryger, J. and H.U. Riisgrd. 1988. Filtration rate capacities in six species of European freshwater bivalves. *Oecologia* **77**: 34-38.
- Lauritsen, D.D. and S.C. Mozley. 1989. Nutrient excretion by the Asiatic clam *Corbicula fluminea*. *J. Amer. Benthologi. Soc.* **8**: 134-172.
- Noordhuis, R., H. Reeders and A. Bij De Vaate. 1992. Relationship between carbon content, cell volume and area in phytoplankton. *Limnol. and Ocea.* **11**: 307-311.
- 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. Vaate. 1990. Zebra mussel (*Dreissena polymorpha*): a new perspective for water quality management. *Hydrobiol.* **200/201**: 437-450.
- Soto, D. and G. Mena. 1999. Filter feeding by the freshwater mussel, *Diplodon chilensis*, as a bicontrol of salmon farming eutrophication. *Aquaculture* **171**: 65-81.
- 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.
- Strayer, D.L. 1999. Effects of alien species on freshwater mollusks in North America. *J. Amer. Benthologi. Soc.* **17**: 81-94.
- Vaughn, C.C. and C.C. Hakenkamp. 2001. The functional role of burrowing bivalves in freshwater ecosystems. *Freshwater Biol.* **46**: 1431-1446.
- 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.* **82**: 482-499.
- 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.

(Manuscript received 31 December 2007,
Revision accepted 4 February 2008)