

세 종의 이매패류 *Corbicula fluminea*, *Potamocorbula amurensis*, *Macoma balthica*의 여수율과 금속 흡수율과의 관계에 대한 연구

이정석, 이병권¹

(주)네오엔비즈 부설 환경안전연구소, ¹전남대학교 해양학과

Relationship between Clearance Rates and Metal Uptake Rates of *Corbicula fluminea*, *Potamocorbula amurensis* and *Macoma balthica*: Influence of Water Temperature and Body Size

Jung-Suk Lee and Byeong-Gwon Lee¹

Institute of Environmental Protection and Safety, ENeoEnBiz Co., Byeoksan Digital Valley II-904, 481-10, Gasan-dong,
Geumcheon-gu, Seoul 153-483, Korea

¹Department of Oceanography, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

ABSTRACT

A series of radiotracer studies were conducted to evaluate the influence of water temperature and/or body size on the clearance rates and uptake rates of Cd, Se and Zn in the Asiatic clam, *Corbicula fluminea*, Asian clam *Potamocorbula amurensis* and Balthic clam, *Macoma balthica*. Uptake rates of Cd, Se and Zn were estimated simultaneously with clearance rate of clams under 3 different water temperature conditions (5, 13 and 21°C). The weight specific clearance and metal uptake rates of *P. amurensis* were increased with temperature, however, no consistent temperature effect was observed for the other clams. The variation of uptake rates of Cd, Se and Zn along with temperature or body size in each clam species was well associated with clearance rates. The inter-species as well as the intra-species difference of metal uptake rates could be well explained by the variation of clearance rates of clam individuals.

Keywords: *Corbicula fluminea*, *Potamocorbula*

amurensis, *Macoma balthica*, Clearance rate, Temperature, Metal uptake.

서 론

이매패류는 연안생태계의 대표적인 여과식자 (filter feeder)로서 해수를 통해 직접 먹이와 산소를 얻으며 살아간다. 이 과정에서 이매패류는 불가피하게 중금속이나 유기오염 물질과 같은 여러 유해물질을 흡수하며, 물질에 따라서는 해수와 비교해 체내에 수천에서 수십만 배 이상 높은 농도로 유해 물질을 축적하는 생물농축 (bioconcentration) 현상을 일으키게 된다 (Widdows and Donkin, 1992). 특히 굴이나 홍합과 같은 여러 이매패류 종류는 중금속과 같은 오염물질에 대한 조절 (regulation) 기작이 어류와 비교해 덜 발달되어 있어 환경에 존재하는 오염물질의 존재량을 잘 반영하는 오염지시생물 (biomonitor)로서 전세계적으로 널리 이용되고 있다 (Phillips, 1980).

이매패류를 비롯한 해양생물은 주로 먹이섭식이나 해수에 직접 노출되는 경로를 통해서 유해오염물질을 흡수하게 된다. 기존 연구에 따르면 유해오염물질 흡수과정에 영향을 미치는 환경적 요인과 생물 내재적 요인의 종류는 매우 많다. 중금속의 축적에 영향을 미치는 주된 환경적 요인으로는 수온, 염분, pH, 용존유기물량, 경도 등이 있으며 생물내재적 요인으로는 개체의 크기, 연령, 성별, 생식주기 등이 알려져 있다 (Langston and Spence, 1995).

Received January 12, 2005; Accepted May 28, 2005
Corresponding author: Lee, Byeong-Gweon
Tel: (82) 62-530-3467 e-mail: blee@chonnam.ac.kr
1225-3480/21106

© The Malacological Society of Korea

수온은 이매패류와 같은 수생생물의 생리생태에 매우 큰 영향을 미치는 환경요인이다. 따라서 일정한 수온 범위 내에서는 이매패류의 생리적 활성과 밀접한 상관관계가 있는 것으로 볼 수 있다. 수온 증가는 이매패류의 생리적 활성을 증가시킴으로써 결과적으로는 성장과 생식을 촉진하게 된다. 이매패류와 같은 여과식자의 경우 수온 증가는 여수율 (clearance rate)의 증가를 유발할 수 있다고 한다 (Jørgensen, 1990). 즉 수온이 증가하면 대사율이 증가하게 되고, 이에 따라 체내 산소 요구량이 증가하면 보다 빠르게 산소를 공급하기 위해서 여수율이 증가하게 되는 것이 주된 이유라고 알려져 있다. 하지만 이매패류를 비롯한 모든 생물은 자신에게 적합한 수온 범위가 어느 정도 정해져 있으므로 내성 한계 이상으로 증가된 수온은 오히려 생리적 활성을 떨어뜨리는 원인이 될 수 있으므로, 수온과 생리활성도의 관계, 나아가 수온과 여수율과의 관계는 실제적으로는 훨씬 복잡한 양상을 나타낼 수 있다 (Jørgensen, 1990).

최근에는 수온 증가에 따른 여수율의 증가 현상에는 생리적 활성도 변화 이외에 물의 점성 변화도 상당한 기여를 하는 것으로 보고된 바 있다 (Podolsky, 1994). 따라서 수온 증가의 영향을 단순히 생리활성도의 변화에 한정하는 것은 옳지 않으며, 점성도 변화와 같은 물리적 요인이 어떻게 여과식자의 생리생태에 영향을 미칠 수 있는지 평가하는 것도 중요한 과제가 될 수 있다. 물의 온도와 점성은 반비례 관계에 있으므로 수온 증가는 점성도의 감소를 일으키고 이에 따라 여과과정에서 발생하는 마찰력도 감소하게 되어 여수율은 증가할 개연성이 있다.

일부 연구자들은 여과식자, 특히 이매패류의 오염물질 흡수 속도와 여수율 사이에는 밀접한 관련성이 있다고 주장하고 있다. 최근 Tran *et al.* (2001, 2002)은 용존 산소 농도나 먹이 농도와 같은 외부요인의 변화에 의해 *Corbicula fluminea*의 여수율이 증가하게 되면 카드뮴의 흡수율도 증가한다는 결과를 보고하고 있다. 여수율의 증가는 단위시간동안 아가미를 지나는 물의 양의 증가를 의미하므로, 용존 카드뮴과 아가미 조직의 접촉확율은 여수율 증가에 비례하여 증가하게 된다. 다만 아가미를 통과하는 물의 유속이 증가하게 되면 아가미를 통해 흡수되는 오염물질의 흡수효율 (absorption efficiency)은 감소하게 되므로 여수율 증가와 오염물질의 흡수율 증가는 단순 비례의 관계는 될 수 없다. 따라서 Wang (2001)은 여러 이매패류 종들의 금속 흡수율과 종별 여수율 사이에는 밀접한 상관관계가 있음을 밝힌 바 있다. 하지만 그의 연구에서 하나의 이매패류 종에 속하는 개체들 사이에서는 금속 흡수율과 여수율 사이의 유의한 관련성을 찾아내지 못하였다. 저자는 그 원인을 여수율 증가에 따른 흡수효율의 감소에서 찾아보고자 하였지만, 수온이나 개체의 크기와 같은 중요한 요인들이 이매패

류의 여수율과 금속의 흡수율에 어떠한 영향을 미치며, 그 과정에서 여수율과 금속 흡수율 사이에는 어떠한 관련성이 있는지에 대한 연구는 거의 이루어지지 못하고 있다.

본 연구에서는 세 종의 이매패류 *Potamocorbula amurensis*, *Macoma balthica* 그리고 *Corbicula fluminea*의 여수율과 카드뮴 (Cd), 셀레늄 (Se), 아연 (Zn)의 흡수율에 대한 수온의 영향을 규명하고자 하였다. *P. amurensis*와 *M. balthica*의 경우에는 하나의 일정한 크기의 개체들만을 이용하였고, *C. fluminea*의 경우 세 개의 크기 집단으로 나누어 여수율과 금속의 흡수율에 대한 수온의 영향을 조사하였다. 이를 통해 이매패류의 여수율과 금속 흡수율의 기능적 관련성에 대해 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험생물

연안 퇴적물에 서식하는 *Potamocorbula amurensis*와 *Macoma balthica*, 그리고 *Corbicula fluminea*는 2002년 1월 미국 샌프란시스코만의 여러 정점에서 채집하였다. 채집당시 수온과 염분은 *P. amurensis*와 *M. balthica*의 경우 약 10°C에 20 psu 이하였고, *C. fluminea*의 경우 약 8°C에 0 psu 이하였다. *P. amurensis*와 *M. balthica*는 일정한 크기의 개체들을 골라 실험에 이용하였다. 실험에 이용된 *P. amurensis*의 평균 각장은 1.6 cm, 평균 건중량은 0.014 g였고, *M. balthica*의 평균 각장은 2.3 cm, 평균 건중량은 0.078 g이었다. 실험에 이용된 *C. fluminea*는 크기별로 세 개의 그룹으로 나누었는데, 소형 그룹은 평균 각장 1.5 cm에 평균 건중량 0.073 g, 중형 그룹 각장 2.1 cm에 건중량 0.23 g, 대형 그룹은 각장 3.1 cm에 건중량 0.61 g이었다.

실험실로 가져온 이매패류 개체들은 3 가지 수온 조건 (5, 13, 21°C)에 서서히 순치 (acclimation) 하였다. 수온은 하루에 1-2°C씩 변화하여 최종적인 실험 조건에 도달하도록 하였고, 순치과정에서 매일 미세 규조류인 *Phaeodactylum tricorutum*을 먹이로 공급하였다.

2. 여수율의 측정

이매패류의 여수율은 일정 부피의 배양액에 부유 플랑크톤의 제거 속도를 이용하여 측정되었다 (Widdows 1985). 여수율의 측정법은 정수식과 유수식이 있으나 본 연구에서는 방사성 동위원소의 처리 문제로 인하여 오염 해수의 양이 적은 정수식을 이용하였다. 각 실험 온도에 순치된 이매패류를 1 리터의 배양액에 넣고 규조류 *Phaeodactylum tricorutum*을 5×10^4 cells/ml 이하의 농도로 첨가한 다음, 이매패류가 여과를 시작한 순간부터 배양액의 플랑크톤의 농도를 연속적으로 측정하였다. 여수율의 측정은 개체별로 이루어졌고 각 수온별

또는 크기별로 5 개체씩 측정하였다. 규조류 농도의 측정은 형광측정기를 이용하였으며 매 측정시 마다 현미경으로 개수하여 규조류 농도와 형광량과의 검량선을 작성하였다. 배양액의 형광량 측정은 시료 채취 직후 최단 기간 내에 실시하였고, 배양액내 규조류 농도의 변화에 따른 영향을 최소화하기 위해서 최초 규조류 농도에서 20% 이상 감소할 때까지의 자료만을 여수를 계산에 이용하였다. 여수율의 계산 방법은 Widdow (1985)의 방법을 따랐다.

3. 금속 흡수율의 측정

용존 금속의 흡수율은 동위원소 추적자를 이용한 순간 흡수율 측정법을 이용하여 측정하였다 (Lee *et al.*, 1998). 실험에 이용된 배양액은 37 kBq의 ¹⁰⁹Cd, 130 kBq의 ⁷⁵Se, 그리고 52 kBq의 ⁶⁵Zn를 1리터의 염수 (4 or 20 psu) 에 첨가하여 제조하였다. 배양액은 세 가지 수온 (5, 13, 21°C) 의 항온기에 하루 이상 둔 다음 실험에 이용하였다. 온도에 순치한 실험생물은 먼저 여수율을 측정한 다음 금속 흡수율 측정에 이용하였다. 각 수온별로 실험생물을 방사성 동위원소를 주입한 배양액에 넣고 2 시간 동안 노출시킨 다음에 다시 여수율을 측정하였고, 이후 육질부와 패각을 분리한 후 육질부에 흡수된 동위원소의 양을 감마카운터로 정량하였다. 순간 금속 흡수율은 Lee *et al.* (1998) 의 방법을 따랐다.

4. 방사능과 자료의 분석

방사능의 측정은 3-inch well type NaI crystal detector 를 장착한 감마카운터를 이용하였다. ¹⁰⁹Cd의 photon emission은 88 eV, ⁷⁵Se는 264 eV, 그리고 ⁶⁵Zn은 1,115 eV 에서 측정되었다. 방사능의 측정은 5분간 이루어졌고 측정 오차는 5% 미만이었다.

각 수온간 또는 크기간 결과의 유의성 검정에는 분산분석 (ANOVA) 을 이용하였고, 여수율과 금속 흡수율 간의 관계 분석에는 회귀분석을 이용하였다. 결과의 통계적인 유의성은 항상 $\alpha = 0.05$ 에서 이루어졌고, 모든 통계적인 분석은 Statistica®를 이용하였다.

결 과

1. 여수율과 금속 흡수율에 대한 수온의 영향

이매패류 *Potamocorbula amurensis*의 여수율은 수온에 따라 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 1). 가장 낮은 온도인 5°C에서 여수율 ($Lg^{-1}h^{-1}$) 은 14 ± 3 (mean \pm S.D.) 였지만, 13°C에서는 17 ± 6 , 21°C에서는 25 ± 11 로 크게 증가하였다 ($p < 0.01$). *P. amurensis*의 카드뮴, 셀레늄 및 아연의 흡수율은 모두 수온에 따라서 유의한 증가 경향을 보였다 (Fig. 1). 가장 높은 온도인 21°C에서의 금속 흡수율은 5°C에서와 비

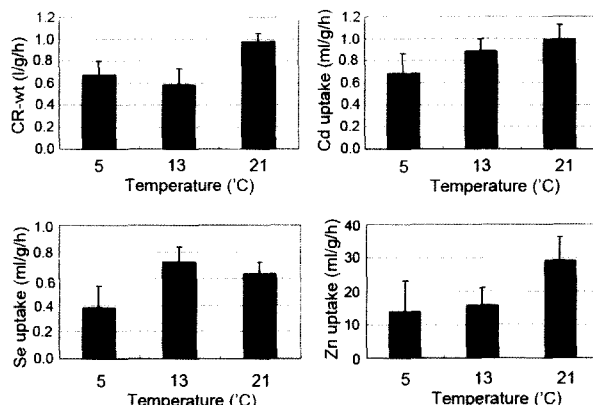


Fig. 1. Clearance rate and dissolved uptake rate of cadmium (Cd), selenium (Se) and zinc (Zn) by *Potamocorbula amurensis* incubated at 5, 13 and 21°C.

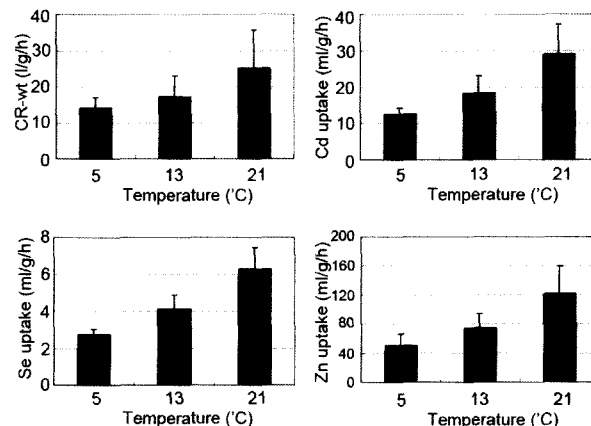


Fig. 2. Clearance rate and dissolved uptake rate of cadmium (Cd), selenium (Se) and zinc (Zn) by *Macoma balthica* incubated at 5, 13 and 21°C.

교해 원소에 상관없이 약 2.4 배가 큰 것으로 나타나, 같은 온도 변화에 따른 여수율의 증가비인 1.8 배보다 크게 나타났다. 이매패류 *Macoma balthica*의 여수율은 가장 높은 온도인 21°C에서 가장 컸으나, 중간 온도인 13°C에서 가장 낮았고, 5°C에서는 오히려 13°C에서보다 다소 큰 여수율을 보였다 (Fig. 2). *M. balthica*의 카드뮴과 아연 흡수율은 수온 증가에 따라 비례하여 증가하는 경향을 보였으나, 셀레늄의 흡수율은 13°C에서 가장 높게 나타나 수온의 영향이 뚜렷하지 않았다 (Fig. 2).

2. 여수율과 금속 흡수율에 대한 수온과 개체 크기의 영향

이매패류 *Corbicula fluminea*의 여수율에 대한 수온의 영향은 개체 크기에 따라서 다르게 나타났다. 크기가 작은 소형

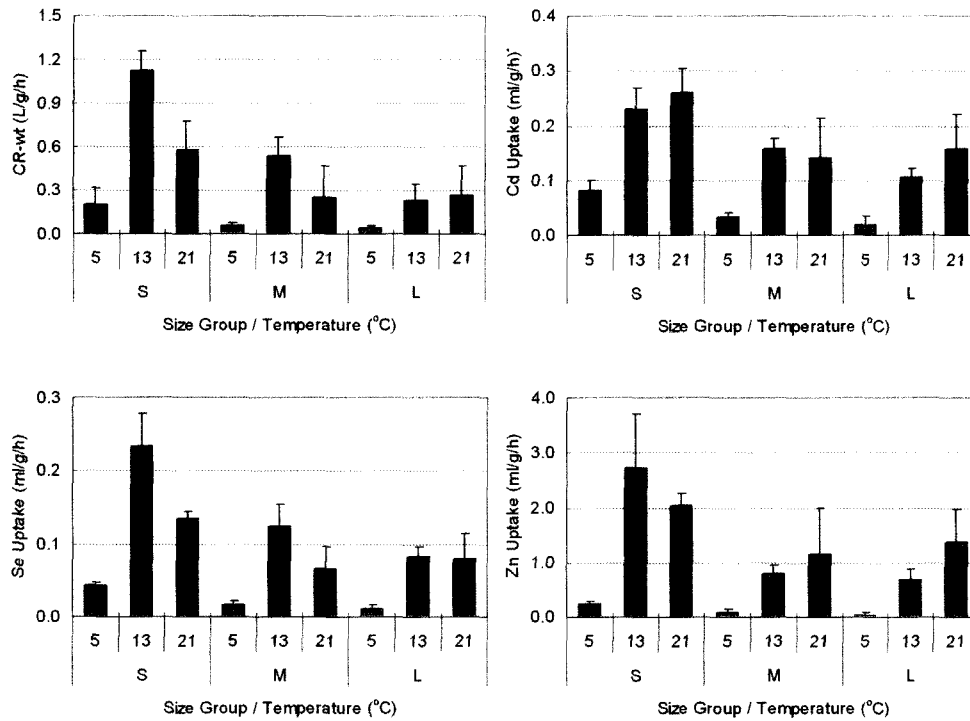


Fig. 3. Clearance rate and uptake rate of cadmium (Cd), selenium (Se) and zinc (Zn) by small (S), medium (M) and large (L)-sized groups of *Corbicula fluminea* incubated at 5, 13, and 21 °C.

군과 중형군에서는 5°C에서 가장 낮은 여수율을, 그리고 13°C에서 가장 높은 여수율을 보였고, 대형군에서는 5°C에서 가장 작은 여수율을, 그리고 13°C에서와 근소한 차이지만 21°C에서 가장 큰 여수율을 보였다 (Fig. 3). 금속 흡수율 역시 수온의 영향이 매우 복잡하게 나타났는데, 카드뮴의 경우 중형군, 셀레늄의 경우 모든 크기 그룹, 그리고 아연의 경우 소형군이 13°C에서 최대 흡수율을 보였고, 나머지는 모두 21°C에서 최대 흡수율을 보였다 (Fig. 3).

이매패류 *Corbicula fluminea*의 여수율은 동일한 수온에서 소형군이 가장 큰 것으로 나타났다 (Fig. 3). 5°C와 13°C에서는 대형군의 여수율이 가장 작았지만, 21°C에서는 중형과 대형군간의 여수율 차이가 거의 없었다. 이와 같은 경향은 모든 금속 흡수율에서 거의 일정하게 나타나 여수율과 금속 흡수율 간에는 밀접한 관련성이 있음을 보여주고 있다.

3. 여수율과 금속 흡수율간의 관계

본 실험에서 측정된 세 종의 이매패류의 여수율과 금속 흡수율 결과와 Lee *et al.* (2004) 이 측정된 홍합류 (*Mytilus californianus*)의 여수율과 금속 흡수율 결과를 이용하여 두 생리적 파라미터간의 관계를 Fig. 4에 도시하였다. 실험에 이

용된 모든 금속의 흡수율은 여수율과 하나의 멱함수 (power function) 로 잘 설명이 되었다. 여수율과의 관련성은 카드뮴 흡수율이 가장 큰 것으로 나타났고 ($r^2 = 0.93$), 그 다음은 셀레늄 ($r^2 = 0.90$)과 아연 흡수율 ($r^2 = 0.82$)의 순이었다. 동일한 수온 조건에서는 *Corbicula fluminea*의 여수율과 금속 흡수율이 가장 낮았고, *Macoma balthica*, *M. californianus* 그리고 *Potamocorbula amurensis*의 순으로 증가하는 경향을 보였다.

고 찰

이매패류의 여수율은 일반적으로 수온의 증가에 따라 증가하는 경향이 있는 것으로 알려져 왔다. 많은 연구자들이 생리 생화학적 활성도에 대한 온도의 규정력을 표현한 Q_{10} 의 원리 (온도 10°C 증가에 따라 신진대사율은 2배가 증가한다는 원리)가 여수율에 대해서도 적용될 수 있다고 믿어왔다 (Robinson *et al.*, 1983). 하지만 최근 수온이 물의 점성에 영향을 미침으로써 여수율에 영향을 미칠 수 있다는 연구 결과가 나오에 따라 온도와 여수율의 관계는 단순한 Q_{10} 의 원리로만 파악될 수 없다는 사실이 알려졌다 (Jørgensen 1990). 따라서 수온 증가

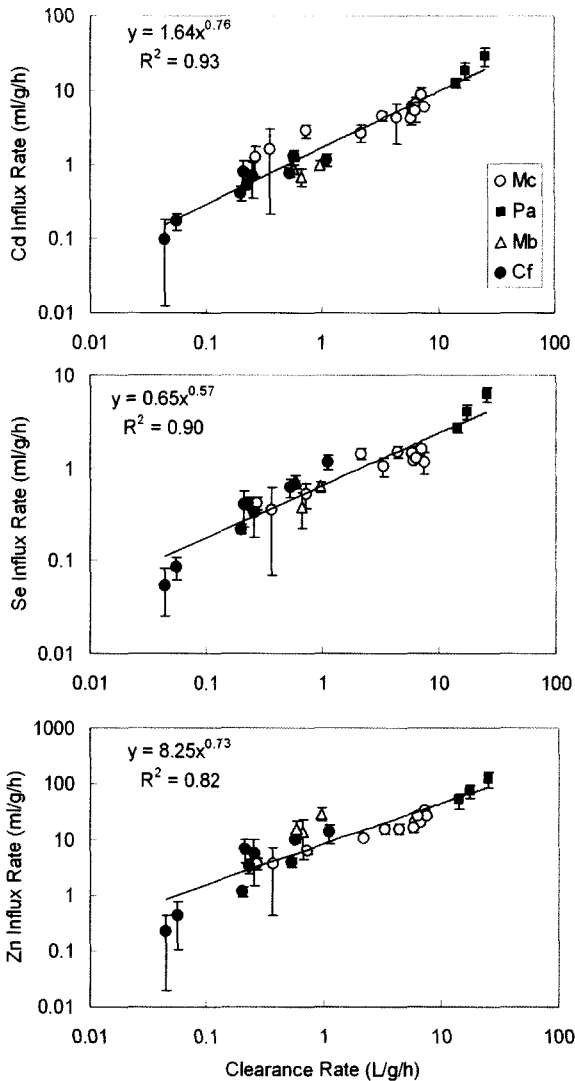


Fig. 4. Relationship between clearance rates and uptake rates of cadmium (Cd), selenium (Se) and zinc (Zn) for four bivalve species, *Potamocorbula amurensis* (Pa), *Macoma balthica* (Mb) and *Corbicula fluminea* (Cf) from this study, and *Mytilus californianus* (Mc) from Lee *et al.* (2004).

는 점성도를 감소시켜 생리활성도 증가와 함께 여수율의 증가를 더욱 가속화할 것으로 예상할 수 있다. 본 연구와 기존 연구 (Lee *et al.*, 2004) 에서도 *Potamocorbula amurensis*와 *Macoma californianus*의 경우 수온 상승에 따른 여수율의 증가 경향이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다. 하지만 *M. balthica*나 *Corbicula fluminea*의 수온별 여수율 결과를 통해 알 수 있는 것처럼 여수율과 수온의 관계가 항상 일정한 것은 아니다. *M. balthica*의 경우 5°C에서의 여수율이 13°C에서

보다, *C. fluminea*의 경우 13°C에서의 여수율이 21°C에서보다 크게 나타난 것은 수온변화에 의한 생리적 활성도나 점성도 변화와 같은 일반적인 영향을 뛰어넘는 생물학적 요인이 있음을 암시하고 있다. 특히 *C. fluminea*의 경우 비록 일주일 이상의 순치기간 동안 서서히 수온을 증가시켰음에도 불구하고, 21°C에 노출된 개체들이 고온으로 인한 생리적 스트레스 (thermal stress)를 받아 생리적 활성도가 크게 둔화된 결과 여수율이 감소하였을 가능성이 있다. 수온 변화에 대한 내성은 종의 특성으로 *C. fluminea*가 다른 이매패류보다 더 좁은 내성범위를 갖고 있을 가능성이 있다. *M. balthica*의 수온별 여수율은 5°C와 13°C에서 유의한 차이가 없었지만 21°C에서 유의하게 큰 값을 보였다. 이는 이 종이 상대적으로 저온에서도 일정한 생리활성도를 유지할 수 있는 능력이 타 종에 비해 뛰어날 가능성을 시사한다. 하지만 불행히도 기존 문헌에서 각 이매패류의 종 특이적 온도 내성범위에 관련된 체계적 연구 결과를 찾아볼 수 없었다.

여수율에 대한 수온의 영향은 종에 따라 다르게 나타날 뿐만 아니라 한 종 내에서도 개체의 크기에 따라 다르게 나타날 수 있음이 본 연구의 *Corbicula fluminea* 결과와 *Macoma californianus*를 이용한 기존 연구에서 확인된 바 있다 (Lee *et al.*, 2004). 이는 여수율이 단순히 수온의 변화나 개체 크기의 변화 또는 생리적 활성도의 변화에 의해 종속적으로 변화하지 않으며, 매우 복잡한 여러 요인에 의해 조절되는 생리적 변수임을 보여주는 것이다.

금속의 흡수율에 대한 수온의 영향 역시 지금까지는 Q₁₀의 원리에 의해 설명되어 왔다. 하지만 이러한 설명을 뒷받침할 만한 많은 연구가 수행되지 못한 것이 사실이며, 기존 연구 결과는 수온 증가는 대체로 금속 흡수율의 증가를 일으키지만 종에 따라 또는 지역에 따라 예외적인 경우가 존재한다는 사실을 확인하는데 그쳐왔다 (Jackim *et al.*, 1977; Croteau *et al.*, 2002). 본 연구에서 역시 금속 흡수율에 대한 수온의 영향은 종에 따라 다르게 나타남을 보여주고 있다. 특히 *C. fluminea*의 경우 모든 원소에서 낮은 수온에서 높은 금속 흡수율을 보이는 결과가 관찰되었으며 이러한 경향은 여수율에서 나타난 경향과 매우 유사하였다. 이는 금속 흡수율에 대한 여수율의 밀접한 관련성을 시사하는 것으로 비록 금속 흡수율이 여수율에 의해서만 조절되는 것은 아니라 할 지라도 여수율이 금속 흡수율에 중요한 조절인자의 하나가 될 수 있음을 보여주는 것이다.

여수율과 금속 흡수율과의 관련성은 여러 종의 결과를 함께 도시함으로써 보다 뚜렷하게 알 수 있는데, 이러한 결과는 종간의 금속 흡수율 차이를 야기하는 중요한 생리적 변수의 하나로서 여수율의 중요성을 보여주는 것이다. Fig. 4에 나타난 관계식에서 양변을 로그로 치환하였을 때 기울기에 해당하는 지

수는 카드뮴과 아연의 경우 약 0.7, 셀레늄의 경우 약 0.6이었는데 이는 여수율이 10 배 증가할 때 금속 흡수율은 약 5 배 (100.7) 함을 의미한다. 즉, 여수율이 10 배 증가하게 되면 단위 시간동안 아가미를 통과하는 물의 양이 10 배 증가하게 되고 이에 따라 금속의 흡수 효율 (absorption efficiency) 은 약 2 배 감소함을 의미한다. 이를 통해 단위 시간 동안 보다 많은 물을 처리할수록 물 속의 용존 금속과 표피의 접촉량은 증가하겠지만 단위 접촉량에 따른 흡수량은 감소하게 됨을 알 수 있다. 또한 양변을 로그로 치환하였을 때 절편에 해당하는 값은 아연이 8.3으로 카드뮴의 1.7과 셀레늄의 0.65보다 각각 5 배에서 13 배 큰 것으로 나타나, 아연의 흡수 효율이 가장 큰 것으로 나타났다.

지금까지 이매패류의 종에 따른, 또는 수온과 개체 크기와 같은 요인에 따른 금속 흡수율의 차이가 생리활성도의 차이 또는 표피조직의 표면적과 흡수 능력의 차이에 의한 것으로 막연하게 이해되어 왔다. 하지만 본 연구 결과를 통해 종간 또는 종내 변이 (inter- or intra-species variation) 의 상당부분이 여수율의 변화로 설명 가능함을 알 수 있었다. 이는 향후 생물 종에 따른 금속 축적 능력 차이를 유발하는 원인을 규명하고, 여과 식자의 금속 축적 과정에 대한 체계적인 이해를 증진하는데 기여할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Croteau, M.N., Hare, L. and Tessier, A. (2002) Influence of temperature on Cd accumulation by species of the biomonitor *Chaoborus*. *Limnology and Oceanography*, **47**: 505-514.
- Jackim, E., Morrison, G. and Steele, R. (1977) Effects of environmental factors on radiocadmium uptake by four species of marine bivalves. *Marine Biology*, **40**: 303-308.
- Jørgensen, C.B., Larsen, R.S. and Riisgård, H.U. (1990) Effects of temperature on the mussel pump. *Marine Ecology Progress Series*, **64**: 89-97.
- Langston, W.J. and Spence, S.K. (1995) Biological factors involved in metal concentrations observed in aquatic organisms. *In: Metal Speciation and Bioavailability in Aquatic Systems*. (ed. by Tessier, A. and Turner, D.R.). pp. 407-478. John Wiley & Sons, Chichester.
- Lee, B.G., Wallas, W.G. and Luoma, S.N. (1998) Uptake and loss kinetics of Cd, Cr and Zn in the bivalves *Potamocorbula amurensis* and *Macoma balthica*: effects of size and salinity. *Marine Ecology Progress Series*, **175**: 177-189.
- Lee, J.S., Lee B.G. and Lee I.T. (2004) Influence of body size and ambient temperature on the uptake rate of Cd, Se, and Zn in the California mussel, *Mytilus californianus*. *Korean Journal of Environmental Biology*, **22**(3): 438-445. [in Korean]
- Phillips, D.J.H. (1980) Quantitative aquatic biological indicators: their use to monitor trace metal and organochlorine pollution. Applied Science Publishers Ltd., London.
- Podolsky, R.D. (1994) Temperature and water viscosity: physiological versus mechanical effects on suspension feeding. *Science*, **265**: 100-103.
- Robinson, W.R., Peters, R.H. and Zimmermann, J. (1983) The effects of body size and temperature on metabolic rate of organisms. *Canadian Journal of Zoology*, **61**: 281-288.
- Tran, D., Boudou, A. and Massabuau, J.C. (2001) How water oxygenation level influences cadmium accumulation pattern in the Asiatic clam *Corbicula fluminea*: a laboratory and field study. *Environmental Toxicology Chemistry*, **20**: 2073-2080.
- Tran, D., Boudou, A. and Massabuau, J.-C. (2002) Relationship between feeding-induced ventilatory activity and bioaccumulation of dissolved and algal-bound cadmium in the Asiatic clam *Corbicula fluminea*. *Environmental Toxicology Chemistry*, **21**: 327-333.
- Wang, W.X. (2001) Comparison of metal uptake rate and absorption efficiency in marine bivalves. *Environmental Toxicology Chemistry*, **20**: 1367-1373.
- Widdows, J. (1985) Physiological procedures. *In: The Effects of Stress and Pollution on Marine Animals*. (ed. by Bayne, B.L., Brown, D.A., Burns, K., Dixon, D.R., Ivanovici, A., Livingston, D.R., Lowe, D.M., Moore, M.N., Stebbing, A.R.D. and Widdows, J.). pp. 161-178. Praeger Publishers, New York.
- Widdows, J. and Donkin, P. (1992) Mussels and environmental contaminants: bioaccumulation and physiological aspects. *In: The Mussel Mytilus: Ecology, Physiology, Genetics and Culture*. (ed. by Gosling, E.). pp. 383-424. Elsevier, Amsterdam.