

## 개체 크기와 온도가 홍합 (*Mytilus californianus*)의 금속 흡수율에 미치는 영향

이 정 석 · 이 병 권<sup>1\*</sup> · 이 인 태<sup>1</sup>

(주)네오엔비즈 부설 환경안전연구소 <sup>1</sup>전남대학교 해양학과

### Influence of Body Size and Ambient Temperature on the Uptake Rate of Cd, Se, and Zn in the California Mussel, *Mytilus californianus*

Jung-Suk Lee, Byeong-Gweon Lee<sup>1\*</sup> and In-Tae Lee<sup>1</sup>

Institute of Environmental Protection and Safety, NeoEnBiz Co., 549-11 (Rm 201), Banpo-dong, Seocho-gu, Seoul 137-044, Korea

<sup>1</sup>Department of Oceanography, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

**Abstracts** - A radiotracer study was conducted to evaluate the influence of body size and temperature on the uptake rates of Cd, Se and Zn in the California mussel, *Mytilus californianus*. Uptake rates of Cd, Se and Zn were determined simultaneously with clearance of the mussels with 3 different size classes (0.07, 0.24 and 0.73 g flesh dry weight individual<sup>-1</sup>) and at 4 different temperatures (3, 8, 13 and 21°C). The weight-specific uptake rates of 3 elements significantly decreased with body size, but increased with temperature. Simultaneously measured clearance rates of mussels were closely associated with metal uptake rates. The significant association of clearance rates and metal uptake rates of mussels emphasizes the importance of functional role of water pumping activity in the metal uptake process in filter-feeding organisms

**Key words** : *Mytilus californianus*, mussel, metal uptake, clearance rate, body size, temperature

### 서 론

연안생태계의 대표적 생물인 이매패류는 대부분 여과 식자(filter feeder)로서 다량의 해수를 아가미로 처리해서 생명 유지에 필요한 먹이와 산소 및 영양염류를 얻고 노폐물을 제거한다(Jørgensen 1990). 이매패류는 해수를 여과하는 과정에서 불가피하게 금속과 유기화합물을 비

롯한 수 많은 오염 물질을 흡수하게 되고, 물질에 따라서는 해수에 비해 수천, 수만 배 이상 높은 농도로 축적하기도 한다(Phillips 1980). 이와 같이 생물 체내에 축적된 오염 물질의 농도는 서식환경의 여러 매질에 존재하는 오염 물질 중 생물이용가능한(bioavailable) 농도에 장기간 노출된 정도를 반영한 것이다. 따라서 대부분의 연안 생태계에서 흔히 볼 수 있는 홍합, 굴 등 이매패류에 축적된 오염 물질의 농도를 조사하여 환경의 오염 정도를 시공간적으로 파악하는 생물모니터링 사업(biomonitoring program)이 우리 나라를 비롯한 많은 나라에서 수행되

\* Corresponding author: Byeong-Gweon Lee, Tel. 062-530-3467, Fax. 062-530-3469, E-mail. blee@chonnam.ac.kr

고 있다(Widdows and Donkin 1992).

해양생물은 주로 먹이섭식을 통해서 중금속을 흡수축적하지만, 해수에 존재하는 용존태(dissolved phase)로부터 흡수하는 것도 미량금속 축적 경로의 하나이다. 기존 연구에 따르면 다양한 물리화학적 요인(e.g. pH, 염분, 수온, 용존유기물, 경도 등)과 생물학적 요인(e.g. 개체크기, 성별, 생식주기 등)이 수생 생물의 용존 상태의 미량 금속 흡수 과정에 영향을 미치는 것으로 알려져 왔다(Campbell 1995). 이매패류의 경우 개체의 크기와 미량 금속 축적의 관련성에 대한 연구자들의 관심은 매우 오래 전부터 있어왔다. 많은 연구에서 개체의 크기가 커질수록 금속의 축적 농도가 감소하는 경향이 보고되고 있지만, 종종 그 반대의 경향에 대한 조사 결과도 있어왔다(Boyden 1977; Strong and Luoma 1981; Lee 2002). 이 분야에서 선구적인 연구를 수행했던 Boyden (1977)은 개체 크기와 체내 축적 농도는 크게 음, 양 그리고 중립의 상관관계로 나눌 수 있지만 자연적인 환경에서는 음의 상관관계가 일반적이라고 하였고, 그 이유는 개체의 크기가 커질수록 신진대사율이 감소하는 일반적인 경향과 관계가 있을 것으로 추정하였다. 개체크기-농도 관계의 형태는 생물의 크기에 따라 변화하는 미량금속 흡수나 성장률의 함수임이 역학 모델링(kinetic modeling)을 통해 밝혀진 바 있다(Wang and Fisher 1997). 하지만 미량금속 흡수가 개체 크기에 따라 변화하는 근본적인 기작에 대해서는 거의 연구된 바 없다.

중요한 환경적인 요인으로서 온도는 변온동물의 생리적 활성화와 밀접한 관련이 있다. 주변 온도가 증가할수록, 이매패류와 같은 무척추 동물의 금속 흡수율(uptake rate)이 증가한다는 것이 일반적인 가정이다. 하지만 실제로는 이매패류를 비롯한 수생 생물의 미량금속 축적에 대한 수온의 영향에 대하여 체계적으로 조사된 연구 사례는 매우 적은 것이 사실이다(Croteau *et al.* 2002). 특히 수온은 생리활성도에 영향을 미칠 수 있지만, 물의 점성도(viscosity)와 같은 물리적 조건에도 영향을 미칠 수 있으므로 수온의 영향을 단순한 생리활성도에 대한 영향에 한정하여 파악하는 것은 바람직하지 않다(Podolsky 1994).

최근에는 독성역학 모델(toxicokinetic model)을 이용해 수생 생물의 금속 축적 농도를 예측하고 금속 축적과정에 대한 제반 요인들의 영향을 이해하고자 하는 시도가 있어왔다(Wang *et al.* 1996; Lee *et al.* 1998). 독성역학 모델은 금속의 흡수와 배출에 관련된 대상 생물의 생리적 변수를 실험적으로 측정함으로써 가변적인 환경에서 대상 생물이 축적하게 될 금속의 농도를 예측할 수 있도록 고안된 수학적 모델이다. 하지만 용존 금속의 흡수율

과 같이 독성역학 모델의 핵심적인 생리적 변수들이 온도 조건이나 개체의 크기가 달라짐에 따라 어떻게 변할 수 있는지에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

몇몇 연구자들은 여과식자의 여수율(clearance rate or filtration rate)과 금속 흡수율 간에는 밀접한 관련성이 있다고 주장한 바 있다. 예를 들어, Tran *et al.* (2001)은 용존 산소의 농도가 감소함에 따라 이매패류인 *Corbicula fluminea*의 여수율이 증가하였고 이에 따라 용존 카드뮴의 흡수율도 증가함을 보고하였다. 이는 여수율이 증가하게 되면 단위 시간 동안 아가미를 통과하는 물의 양이 증가하게 되고 물속의 용존 오염 물질이 생체로 유입될 수 있는 기회가 증가한 결과라고 해석할 수 있다. 여러 종류의 이매패류의 여수율과 금속 흡수율과의 비교를 통해서, 개별 종(species)의 여과 능력의 차이는 종에 따른 금속 흡수율의 차이와 상관성이 높다는 것을 최근의 한 연구에서 보고된 바 있다(Wang 2001). 다양한 물리화학적, 생물학적 요인들에 의해 여수율과 금속의 흡수율과 같은 생리적인 변수들은 영향을 받을 수 있다. 하지만 수온이나 개체 크기와 같이 중요한 요인들이 이매패류의 여수율에 미치는 영향과 이들이 금속 체내 흡수 과정과의 관련성에 대해서는 아직까지 연구된 바 없다.

본 연구에서는 다양한 크기를 갖는 캘리포니아 홍합 *Mytilus californianus*를 다양한 수온 조건 하에서 카드뮴( $^{109}\text{Cd}$ ), 셀레늄( $^{75}\text{Se}$ ) 그리고 아연( $^{65}\text{Zn}$ )의 방사성 동위원소(radioisotope)에 노출시킴으로써 개체의 크기와 주변 수온 변화가 여수율과 용존 금속 흡수율에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 통해 이매패류의 여과 활동과 금속 흡수 과정의 관련성에 대해 평가하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 실험생물의 준비

연안에 서식하는 홍합 *M. californianus*는 2002년 1월 미국 캘리포니아 북부 해안에 위치한 Halfmoon Bay에서 채집되었다. 채집된 홍합은 각장이 2cm에서 5.5cm의 다양한 크기를 가졌고, 채집된 지 10일 이내에 실험에 이용되었다. 채집 당시 해수의 수온은 약 8°C였고, 염분은 34 psu였다. 채집된 홍합의 각장(L)과 육질부 건중량(W)의 관계식은  $W = 0.0074 SL^{2.82}$  ( $r^2 = 0.979$ )의 함수로 설명되었다.

실험실로 가져온 홍합은 실험실 배양 조건과 4가지 실험 온도(3, 8, 13, and 21°C)에 서서히 순치하였다. 순치과정에서 배양 수온의 변화는 하루 2°C를 넘지 않도록 하였다. 실험에 이용된 홍합은 각장의 길이에 따라 3개의

구간(Small, Medium, Large)으로 구분하였고, 각 크기 구간의 건중량(평균±표준편차)은 각각  $0.07 \pm 0.02$ ,  $0.24 \pm 0.03$ 과  $0.73 \pm 0.16$  g이었다.

## 2. 여수율의 측정 방법

본 연구에서 홍합의 여수율은 일정 부피의 해수내 부유 플랑크톤의 제거 속도를 이용하여 측정되었다(Widows 1985). 여수율의 측정법은 정수식(static system)과 유수식(flow-through system)이 있으나 본 연구에서는 방사성 동위원소의 처리 문제로 인하여 오염 해수의 양이 적은 정수식을 이용하였다. 각 실험 온도에 순치된 홍합을 1리터의 해수(34 psu)에 넣고 규조류 *Phaeodactylum tricornutum*을  $\sim 5 \times 10^4$  cells ml<sup>-1</sup>의 농도로 첨가한 다음 홍합이 여과를 시작한 순간부터 해수내 규조류의 농도를 연속적으로 측정하였다. 여수율의 측정은 개체별로 이루어졌고 각 온도별, 크기 구간별로 5개체씩 측정하였다. 규조류 농도의 측정은 형광측정기를 이용하였으며 매 측정시마다 현미경으로 개수하여 규조류 농도와 현광량과의 점정선을 작성하였다. 해수의 현광량 측정은 시료 채취 직후 최단 기간내에 실시하였고, 해수내 규조류 농도의 변화에 따른 영향을 최소화하기 위해서 최초 규조류 농도에서 20% 이상 감소할 때까지의 데이터만을 여수율 계산에 이용하였다. 홍합이 들어있는 해수내 규조류의 농도( $C_t$ )는 아래의 식과 같이 시간( $t$ )에 따라 지수적으로 감소하였다.

$$C_t = C_0 \cdot e^{-b^* \cdot t} \quad \text{Eq. 1}$$

이때  $C_0$ 는 시작 시점( $t = 0$ )의 규조류 농도이고,  $b^*$ 는 기울기이다. 이렇게 구해진 기울기를 이용하여 홍합의 개체별 여수율( $CR_{ind}$ )과 무게에 따른 여수율( $CR_{wt}$ )을 아래의 식과 같이 계산하였다.

$$CR_{ind} (L \cdot h^{-1}) = V \cdot b^* \quad \text{Eq. 2}$$

$$CR_{wt} (L \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}) = V \cdot b^* \cdot W^{-1} \quad \text{Eq. 3}$$

이때,  $V$ 는 해수의 부피이고  $W$ 는 개체의 육질부 건중량을 의미한다. 여수율의 측정은 금속 흡수 실험의 직전과 직후에 반복하여 실시되었다.

## 3. 금속 흡수율의 측정

용존 금속의 흡수율은 동위원소 추적자를 이용한 순간 흡수율 측정법을 이용해 측정하였다(Lee et al. 1998). 실험 해수는 37 kBq의 <sup>109</sup>Cd, 130 kBq의 <sup>75</sup>Se, 그리고 52 kBq의 <sup>65</sup>Zn를 0.45 μm의 필터로 여과시킨 1리터의 해수에 첨가하여 제조하였다. 이렇게 제조된 실험 해수를 네

가지 온도(3, 8, 13, 21°C)의 항온기에 하루 이상 둔 다음 각각의 온도에 순치된 홍합들을 실험 해수에 넣고 2~7 시간동안 방사성동위원소에 노출시킨 다음, 홍합의 육질부와 패각을 분리한 후 육질부에 흡수된 동위원소의 양을 감마카운터로 정량하였다. 이와 함께 홍합의 노출 이전과 이후 실험 해수내 동위원소의 농도도 함께 정량하였다. 금속 흡수율의 측정은 개체별로 이루어졌고 각 온도별, 크기 구간별로 5개체씩 측정하였다.

순간 금속 흡수율은 아래의 방정식을 통해 계산되었다.

$$k_u = A_{tiss} \cdot t^{-1} \cdot W^{-1} \cdot A_w^{-1} \quad \text{Eq. 4}$$

이때  $k_u$  (mL · g<sup>-1</sup> · h<sup>-1</sup>)는 금속 흡수율,  $A_{tiss}$ 는 노출된 홍합 육질부내 방사능 총량(dpm),  $t$ 는 노출 시간(h),  $W$ 는 개체의 육질부 건중량(g) 그리고  $A_w$ 는 실험해수내 방사능 농도(dpm mL<sup>-1</sup>)를 의미한다. 이와 함께 금속 흡수 효율( $\alpha_M$ )은 아래 금속흡수율( $k_u$ )과 여수율( $CR_{wt}$ )과의 관계식을 이용하여 계산하였다.

$$k_u (mL \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}) = \alpha_M \cdot CR_{wt} (L \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}) \cdot 1000 \quad \text{Eq. 5}$$

## 4. 방사능과 자료의 분석

동위원소의 방사능 측정은 3-inch well-type NaI crystal detector를 장착한 감마카운터를 이용하였다. <sup>109</sup>Cd의 photon emission은 88 keV, <sup>75</sup>Se은 264 keV, 그리고 <sup>65</sup>Zn은 1,115 keV에서 측정되었다. 방사능의 측정은 시료에 따라 2분에서 5분간 이루어졌고 측정 에러는 보통 5% 미만이었다. 모든 방사능량은 방사붕괴에 대해 보정한 다음 계산에 이용되었다.

통계적인 유의성은 항상( $\alpha = 0.05$ 에서 검증되었다. 생물의 무게에 대한 측정치는 모두 건중량을 기준을 한 것이다. 분산분석과 회귀분석을 포함한 모든 통계적인 분석은 Statistica®를 이용하였다.

## 결 과

### 1. 홍합(*Mytilus californianus*)의 여수율

금속 흡수 실험의 직전과 직후에 실시된 여수율 측정치는 대체로 유사한 값을 보였지만 직후에 측정된 값이 약 5% 가량 높게 나타났다. 금속의 흡수율 등과 비교를 위해서 사용된 여수율 값은 두 값의 평균값이다.

개체의 무게를 고려하지 않은 개체별 여수율( $CR_{ind}$ )은 각각의 실험 온도에서 건중량이 증가함에 따라 증가하였고, 각각의 크기 구간에서는 실험 온도에 따라서 증가하

**Table 1.** Mean shell length (SL: cm), flesh dry weight (FDW: g), individual clearance rates ( $CR_{ind}$ :  $L h^{-1}$ ) and weight-specific clearance rates ( $CR_{wt}$ :  $L g^{-1} h^{-1}$ ) for *Mytilus californianus* with three different size classes (Small, Medium and Large) under four different temperatures (3, 8, 13 and 21°C). Significant power regression equations between FDW and  $CR_{ind}$  or  $CR_{wt}$  were shown ( $p < 0.001$ ) at each temperature. Five individual mussels were used for each temperature and size classes

Temp. (°C)	Size Class	SL (cm) Mean	FDW (g)		$CR_{ind}$ ( $L h^{-1}$ )		$CR_{wt}$ ( $L g^{-1} h^{-1}$ )		FDW- $CR_{ind}$ Regression	FDW- $CR_{wt}$ Regression
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD		
3	S	2.2	0.06	0.02	0.04	0.00	0.73	0.03	$Y = 0.23X^{0.61}$ $R^2 = 0.992$	$Y = 0.23X^{-0.39}$ $R^2 = 0.980$
	M	3.5	0.25	0.02	0.09	0.12	0.37	0.50		
	L	5.0	0.71	0.17	0.20	0.10	0.27	0.14		
8	S	2.0	0.05	0.01	0.32	0.03	6.00	0.60	$Y = 2.89X^{0.64}$ $R^2 = 1.000$	$Y = 2.89X^{-0.36}$ $R^2 = 0.999$
	M	3.4	0.27	0.04	0.88	0.12	3.30	0.45		
	L	5.3	0.91	0.07	1.99	0.58	2.17	0.64		
13	S	2.4	0.10	0.01	0.66	0.20	6.58	1.93	$Y = 4.11X^{0.78}$ $R^2 = 0.995$	$Y = 4.11X^{-0.22}$ $R^2 = 0.938$
	M	3.5	0.24	0.02	1.45	0.42	5.92	1.72		
	L	4.8	0.60	0.14	2.69	0.10	4.46	0.17		
21	S	2.1	0.06	0.01	0.42	0.16	7.14	1.77	$Y = 6.53X^{0.96}$ $R^2 = 0.997$	NS*
	M	3.3	0.20	0.02	1.54	0.31	7.55	1.54		
	L	5.1	0.70	0.12	4.47	1.17	6.39	1.67		

\*not significant.

는 경향을 보였다 (Table 1). 반면에 무게를 고려한 통합의 여수율( $CR_{wt}$ )은 개체 여수율을 건중량으로 나눈 값으로 각 실험 온도에서 개체의 무게가 증가함에 따라 감소하는 특징을 보였다. 개별 크기 구간에서의  $CR_{wt}$  값은 수온이 증가함에 따라 유의하게 증가하는 경향을 보였다 ( $p < 0.001$ ). 하지만 21°C에서 통합의  $CR_{wt}$ 은 크기 구간별 차이가 유의하게 나타나지 않았다 (Table 1; Fig. 1A). 여수율에 대한 수온의 영향은 상대적으로 큰 개체들에서 보다 뚜렷하게 나타났다 (Fig. 1A). 전반적으로 각 크기 구간에서 최대 여수율은 약  $7 L \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$  내외였다.

## 2. 통합(*Mytilus californianus*)의 금속 흡수율

통합의 원소별 흡수율은 전반적으로 아연이 가장 빨랐고 다음은 카드뮴과 셀레늄의 순이었다 (Fig. 1). 이원배치법에 의한 분산분석 결과 개체의 크기와 수온은 모두 유의하게 모든 금속 흡수율에 영향을 미쳤다. 모든 원소에서 흡수율은 개체 크기에 따라 감소하였고 수온에 따라서는 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 1). 하지만 이러한 크기와 수온의 영향은 카드뮴과 아연에서 보다 뚜렷하게 나타났다.

## 3. 여수율과 금속 흡수율의 관계

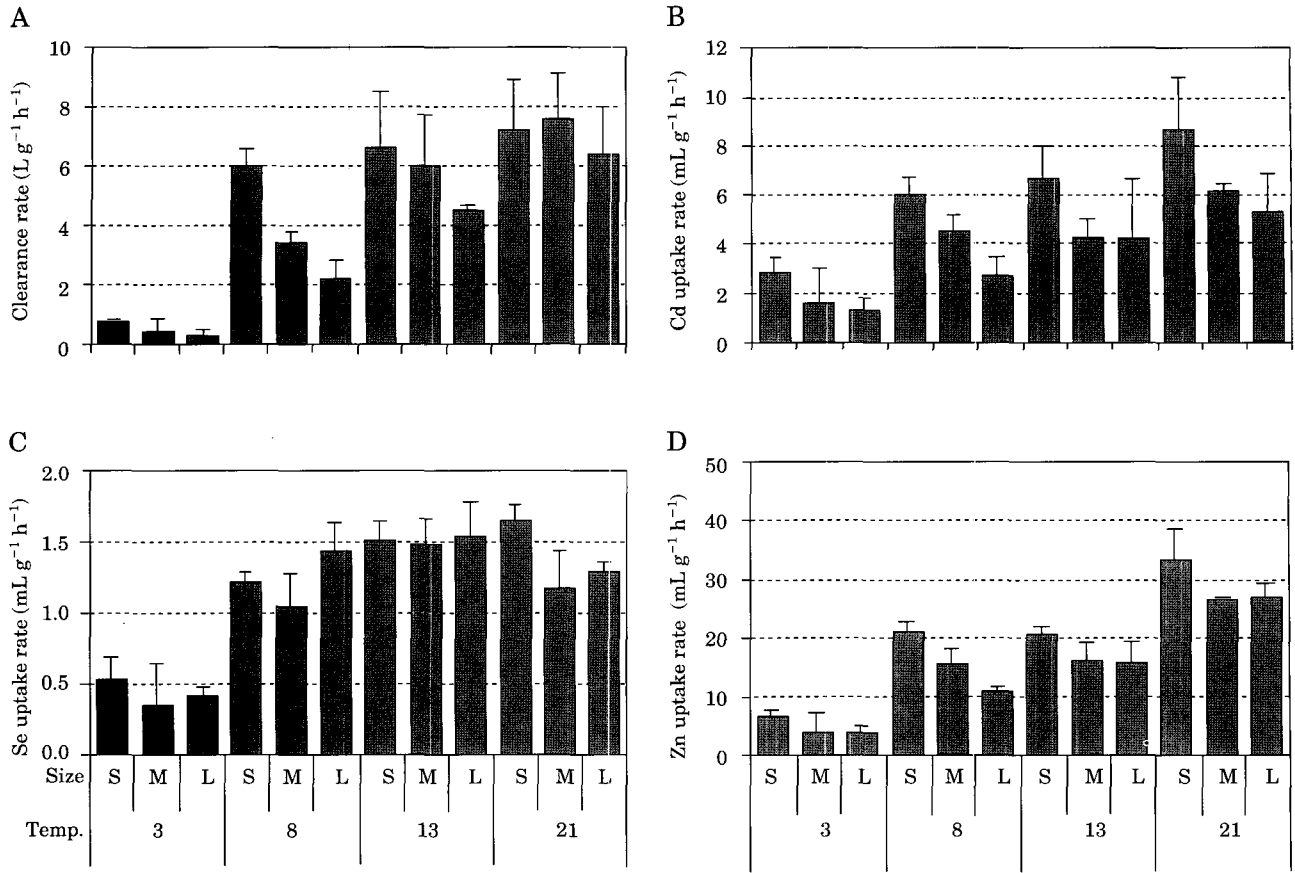
네 가지 온도 조건 하에서 세 크기 구간의 통합의 평균 여수율과 금속 흡수율의 관계는 모든 원소에서 매우 관련성이 큰 것으로 나타났다 (Fig. 2 A). 평균 여수율과 금속 흡수율은 지수함수로 가장 잘 설명이 되었다. 하지

만 셀레늄의 경우 3°C를 제외한 나머지 수온에서의 측정 자료만을 이용하게 되면 여수율과 흡수율 간 유의한 관계가 나타나지 않았다 (Fig. 2B). 통합의 금속 흡수 효율 ( $\alpha$ )은 아연이 0.3~1.4%의 범위를 보여 가장 높았고, 카드뮴이 0.07~0.45%로 그 다음, 셀레늄이 0.02~0.15%로 가장 낮게 나타났다. 원소별로 흡수 효율은 여수율이 증가할수록 낮아지는 것으로 나타났다 (data not shown).

## 고 찰

### 1. 여수율과 금속 흡수에 대한 수온의 영향

통합(*M. californianus*)의 여수율에 대한 수온의 영향은 일반적인 변온동물의 신진대사율에 대한 수온의 영향과 관련이 있는 것으로 보인다. 이매패류의 여수율에 대한 수온의 영향에 대한 기존 연구들은 본 연구에서와 같이 일정한 온도 범위 내에서는 일반적으로 수온의 증가에 따라 여수율이 증가하는 경향을 보고하고 있다 (Mishima and Odum 1963; Robinson *et al.* 1983). 미국 Chesapeake 만에 서식하는 저서 이매패류의 섭식률과 수온과의 관계를 연구한 Gerritsen and Irvine (1994)는 생물 종의 적응 범위 내에서는 수온과 여수율의 관계가 가설적인  $Q_{10}$  법칙을 따르지만, 적응 범위를 초과하거나 지나치게 낮은 온도 범위에서는  $Q_{10}$  법칙으로 예측되는 여수율 보다 매우 낮은 여수율을 보일 것으로 추정하고 있다. 하지만 여과 능력과 수온의 관계는 단순한 신진대사율에 대한

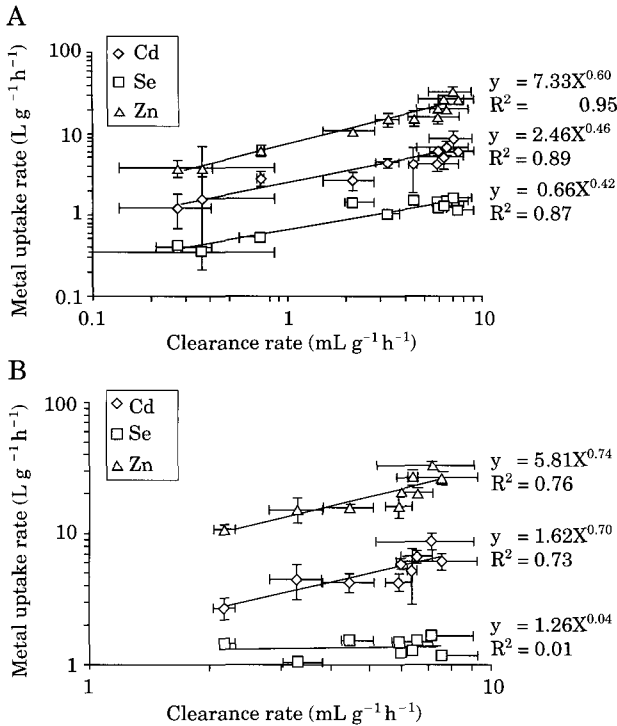


**Fig. 1.** (A) Weight-specific clearance rates ( $CR_{w_i}$ ;  $L g^{-1} h^{-1}$ ) and uptake rate constants ( $k_u^*$ ) of Cd (B), Se (C), and Zn (D) by the *Mytilus californianus* with three different size classes (Small, Medium and Large) under four different temperature conditions (3, 8, 13 and 21°C). Error bars indicate standard deviation of the mean value (N = 5).

수온의 영향만을 반영하지는 않는다고 주장하는 학자들도 있다. 수온은 생물의 생리적 대사 능력에도 영향을 미치지만 물의 점성에도 영향을 미치기 때문이다 (Podolsky 1994). 물의 점성은 수온에 반비례하는 경향이 있으므로 낮은 수온에서는 점성이 높아져 이매패류와 같은 여과식자의 여과 과정에서 마찰에너지를 증가시킬 수 있다. 따라서 낮은 수온에서 여수율이 낮은 것은 부분적으로 높은 점성에 의한 것으로 볼 수도 있다 (Jørgensen 1990). Podolsky (1994)는 수온에 따른 여수율 변화의 약 절반 정도가 점성의 변화에 기인한다고 추정하였다.

비록 체계적인 연구는 매우 드물지만 수온의 변화는 수생 생물의 용존 금속의 축적과도 깊은 관련이 있는 것으로 여겨져 왔다. 일반적으로 수온의 증가는 금속 흡수율을 증가시키는 것으로 알려져 왔지만 그 관계는 연구에 따라서 매우 다르게 나타나는 것이 일반적이다. 세 종의 이매패류를 이용하여 수온과 금속 축적과의 관계를 조사한 Jackim *et al.* (1977)은 *Mulinia lateralis*와 *Mya arenaria*의 경우 수온 증가에 따라 카드뮴의 축적량이

늘어났지만 *Mytilus edulis*의 경우에는 아무런 관계가 없는 것으로 나타남을 보고한 바 있다. 이처럼 수온 증가가 항상 금속 축적량의 증가로 이어지는 것은 아니며 종에 따라, 지역에 따라 또는 원소에 따라서 다양한 결과가 나타날 수 있다 (Croteau *et al.* 2002). 본 연구에서는 세 원소 모두 흡수율과 수온이 유의한 관련성이 있는 것으로 나타났다. 하지만 3°C에서 실험한 개체들은 낮은 수온으로 인한 스트레스로 인해 대사율이 너무 감소한 것으로 보이며, 8°C 이상에서 실험한 결과들만을 살펴보면 카드뮴이나 아연과는 달리 셀레늄의 흡수율은 수온과 무관한 것으로 나타났다. 이러한 차이는 원소별로 흡수 기작이 다르기 때문인 것으로 보인다. 카드뮴과 아연은 2가 양이온으로 주로 칼슘 채널 등을 통해 흡수되는 반면 셀레늄은 해수중에 4가(selenite)나 6가 음이온(selenate)의 형태로 존재하므로 주로  $SO_4^{2-}$ 와 유사한 경로를 통해 체내로 흡수되는 것으로 알려졌다. 하지만 흡수 경로의 차이가 구체적으로 수온 변화에 따른 흡수율 변화에 어떻게 관련되어 있는 지에 대해서 구체적으로 연구된 바는 아



**Fig. 2.** (A) Relationships between weight-specific clearance rates ( $\text{mL g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) and metal uptake rates ( $\text{L g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) by the *Mytilus californianus* at four difference temperatures (3, 8, 13 and 21°C). (B) Same relationships without data from 3°C.

직까지 없다. 다만 수온 변화에 따라 대사율과 여수율이 증가하여도 셀레늄의 흡수율을 일정하게 유지하려는 조절 기작이 있을 것으로 추정해 볼 수 있다. 반면 *M. californianus*에 의한 카드뮴과 아연의 흡수율은 각 크기 구간별로 수온이 증가함에 따라 비례적으로 증가하는 패턴을 보였는데 이러한 경향은 수온 증가에 따른 여수율의 증가 경향과 매우 유사하게 나타난 점은 특기할 만 하다.

**2. 여수율과 금속 흡수에 대한 개체 크기의 영향**

개체의 크기는 수온과 마찬가지로 생물의 신진대사와 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 왔다. 이때폐류의 경우 크기에 따라서 효소활성도, 호흡율, 여수율 등 생리적인 과정이 크게 영향을 받을 수 있다는 연구 결과가 많이 있다. 특히 여수율의 경우에는 일정 온도 조건 하에서 크기에 따라 감소하는 경향이 일반적이다(Meyhöfer 1985; Riisgard 2001). 하지만 여수율과 크기의 관계는 단순히 대사율과 크기의 관계로 치환될 수 없다는 주장도 있어왔는데, 일례로 Johns et al. (1992)는 *Mytilus edulis*의 여수율과 크기의 관계는 크기에 따른 형태적인 변화와 관련이 깊다고 주장하였다. 즉 개체의 크기가 증가할

수록 아가미의 표면적과 같은 체표면적이 비례적으로 감소하기 때문에 이에 따라 여수율도 감소한다는 것이다. 따라서 개체 크기에 따른 여수율의 변화는 크기에 따른 신진대사와 체표면적 변화가 모두 관련이 있을 것으로 추정되지만 어떤 요인이 더 중요한 지에 대해서는 알려져 있지 않다.

개체의 크기와 금속 축적의 관련성은 금속 오염 평가를 위해 생물의 체내 축적량을 조사하던 연구의 초기 단계부터 연구자들의 관심을 끌어왔다(Phillips 1980). 일반적인 가설은 크기가 커질수록 흡수율은 감소할 수 있다는 것이지만, 실제 현장과 실험실 연구에서 크기와 축적량의 관계는 매우 다양하게 나타나고 있다. 본 연구에서는 카드뮴과 아연의 경우 개체의 크기가 증가함에 따라 흡수율은 감소하는 일반적인 경향을 보인 반면, 셀레늄의 경우에는 크기의 영향이 다소 복잡하게 나타났다. 특기할 만한 점은 21°C의 실험결과에서처럼 여수율에 대해서보다 카드뮴이나 아연의 흡수율에 대한 크기의 영향이 상대적으로 뚜렷하다는 점인데, 크기의 영향이 단순히 여수율에 의해서만 좌우되지는 않는다 점을 보여주는 결과이다. 이와 유사하게 Gilek et al. (1996)은 *M. edulis*의 PCB 흡수율이 개체 크기가 증가함에 따라 감소하였고 또한 여수율의 변화 양상과 매우 상관성이 높음을 보고한 바 있다.

**3. 홍합 (*M. californianus*)의 여수율과 금속 흡수율의 관계**

홍합의 금속 흡수율이 단순히 여수율에 의해 조절된다고 볼 수는 없지만, 본 연구에서 밝혀진 두 생리적 변수의 높은 관련성은 시사하는 바가 크다. 수온 변화나 개체 크기의 변화에 따른 금속의 생체 축적량 변화는 단순하게 개체의 크기나 수온에 따른 신진대사의 변화에 기인하는 것은 아닐 것으로 추정된다. 앞서 설명한 바와 같이 개체의 크기나 수온의 변화는 신진대사뿐만 아니라 생물의 형태적인 특징이나 해수의 물리적인 특성을 포함한 여러 요인들에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 영향은 수온이나 크기가 다른 조건 하에서 홍합의 금속 축적에 영향을 미칠 수 있는데, 본 연구 결과는 이러한 영향의 상당부분은 여수율의 변화에 의해서 설명될 수 있을 것으로 추정된다. 용존 산소의 변화를 통해 여수율을 조절했던 Tran et al. (2001, 2002)의 결과 역시 *Corbicula fluminea*의 여수율이 약 10배 증가함에 따라 카드뮴의 축적율이 2주 노출기간에 약 2배 증가함을 보인바 있다. 이는 여수율이 증가함에 따라 용존 카드뮴이 아가미를 통해 체내로 유입될 확률이 증가하기 때문으로 판단된

다. 이와 같이 여수율이 증가하는 만큼 금속의 흡수율이 증가하지 않는 것은 여수율이 증가하면 금속의 흡수 효율이 떨어지기 때문으로 보인다(Wang 2001). 이때 패류를 비롯한 여과식자들의 금속 축적에 있어서 여수율의 영향은 매우 큰 것으로 판단되며 향후 이에 대한 연구는 생물 종에 따른 금속 축적 능력의 차이를 밝히고, 금속 축적에 영향을 미치는 제반 환경 요인과 생물 요인에 대한 체계적인 이해를 도울 수 있을 것으로 판단된다.

## 적 요

캘리포니아 홍합(*Mytilus californianus*)의 용존 Cd, Se, Zn의 흡수율에 대한 개체 크기와 수온의 영향을 평가하기 위하여 방사성 동위원소를 이용한 실험을 수행하였다. 세 개의 크기 구배(0.07, 0.24 and 0.73 g; 육질부 건중량)를 갖는 홍합의 용존 금속 흡수율과 여수율은 동시에 4개의 온도 구배(3, 8, 13 and 21°C)에서 측정되었다. 세 원소의 흡수율은 개체 크기가 증가함에 따라 유의하게 감소한 반면, 수온이 증가함에 따라 유의한 증가를 보였다. 홍합의 여수율은 전반적으로 용존 금속의 흡수율과 뚜렷한 상관관계를 보였는데, 이는 여과식자인 홍합이 용존 금속을 흡수하는 과정에 있어서 해수 여과 능력의 기능적인 중요성을 보여주는 결과이다.

## 사 사

이 논문은 2001년도 학술진흥재단의 지원(KRF-2001-041-H00018)에 의하여 연구되었습니다. 본 논문을 정성껏 심사해주신 심사위원님께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Boyden CR. 1977. Effect of size upon metal content of shellfish. J. Mar. Biol. Ass. UK. 57:675-714.
- Campbell PGC. 1995. Interaction between trace metals and aquatic organisms: A critique of the free-ion activity model. In: Metal Speciation and Bioavailability in Aquatic Systems (Tessier, A., Turner, D.R., eds.). pp. 45-102. John Wiley and Sons Ltd, New York.
- Croteau M-N, L Hare and A Tessier. 2002. Influence of temperature on Cd accumulation by species of the bio-monitor *Chaoborus*. Limnol. Oceanogr. 47:505-514.
- Gerritsen J and DE Irvine. 1994. Suspension-feeding bivalves and the fate of primary production: an estuarine model applied to Chesapeake Bay. Estuaries 1: 403-416.
- Gilek M, M Bjoerk and C Naef. 1996. influence of body size on the uptake, depuration, and bioaccumulation of polychlorinated biphenyl congeners by Baltic sea blue mussels, *Mytilus edulis*. Mar. Biol. 125:499-510.
- Jackim E, G Morrison and R Steele. 1977. Effects of environmental factors on radiocadmium uptake by four species of marine bivalves. Mar. Biol. 40:303-308.
- Johns HD, OG Richards and TA Southern. 1992. Gill dimensions, water pumping rate and body size in the mussel *Mytilus edulis* L. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 155: 213-237.
- Jørgensen CB. 1990. Bivalve filter feeding: hydrodynamics, bioenergetics, physiology and ecology. pp.140. Olsen & Olsen, Fredensborg, Denmark.
- Lee JS. 2002. A Study on the Natural Variation of Tissue Metal Concentrations in Razor Clam, *Sinonovacula constricta* (Lamarck) from Mudflat in the Namyang Bay, pp. 171 Ph. D Thesis, Seoul National University.
- Lee BG, WG Wallace and SN Luoma. 1998. Uptake and loss kinetics of Cd, Cr and Zn in the bivalves *Potamocorbula amurensis* and *Macoma balthica*: effects of size and salinity. Mar. Ecol. Prog. Ser. 175:177-189.
- Meyhöfer E. 1985. Comparative pumping rates in suspension-feeding bivalves. Mar. Biol. 85:137-142.
- Mishima J and EP Odum. 1963. Excretion rate of Zn65 by *Littorina irrorata* in relation to temperature and body size. Limnol. Oceanogr. 8:39-44.
- Phillips DJH. 1980. Quantitative aquatic biological indicators: their use to monitor trace metal and organochlorine pollution. pp.488. Applied Science Publishers Ltd., London.
- Podolsky RD. 1994. Temperature and water viscosity: physiological versus mechanical effects on suspension feeding. Science 265:100-103.
- Riisgard HU. 2001. On measurement of filtration rates in bivalves—the stony road to reliable data: review and interpretation. Mar. Ecol. Prog. Ser. 211:275-291.
- Robinson WR, RH Peters and J Zimmermann. 1983. The effects of body size and temperature on metabolic rate of organisms. Can. J. Zool. 61:281-288.
- Strong CR and SN Luoma. 1981. Variation in the correlation of body size with concentrations of Cu and Ag in the bivalve *Macoma balthica*. Can. J. Fish. Aqu. Sci. 38:1059-1064
- Tran D, A Boudou and J-C Massabuau. 2001. How water oxygenation level influences cadmium accumulation pattern in the Asiatic clam *Corbicula fluminea*: a laboratory and field study. Environ. Toxicol. Chem. 20:

- 2073-2080.
- Tran D, A Boudou and J-C Massabuau. 2002. Relationship between feeding-induced ventilatory activity and bioaccumulation of dissolved and algal-bound cadmium in the Asiatic clam *Corbicula fluminea*. Environ. Toxicol. Chem. 21:327-333.
- Wang WX, NS Fisher and SN Luoma. 1996. Kinetic determination of trace element bioaccumulation in the mussel *Mytilus edulis*. Mar. Ecol. Prog. Ser. 140:91-113.
- Wang WX and NS Fisher. 1997. Modeling the influence of body size on trace element accumulation in the mussel *Mytilus edulis*. Mar. Ecol. Prog. Ser. 161:103-115.
- Wang WX. 2001. Comparison of metal uptake rate and absorption efficiency in marine bivalves. Environ. Toxicol. Chem. 20:1367-1373.
- Widdows J. 1985. Physiological procedures. In: The Effects of Stress and Pollution on Marine Animals (Bayne B.L. Brown, D.A., Burns, K., Dixon, D.R. Ivaovici, A., Livingston, D.R., Lowe, D.M., Moore, M.N., Stebbing, A.R.D., and Widdows, J. eds.). pp.161-179. Praeger, New York.
- Widdows J and P Donkin. 1992. Mussels and environmental contaminants: bioaccumulation and physiological aspects. In: The Mussel *Mytilus*: Ecology, Physiology, Genetics and Culture (Gosling, E. ed.). pp. 383-424. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

Manuscript Received: July 28, 2004

Revision Accepted: August 20, 2004

Responsible Editorial Member: Inn-Sil Kwak  
(Hanyang Univ.)