

# *Potamocorbula amurensis*와 *Macoma balthica*의 개체의 크기와 염분이 은의 흡수 및 배출에 미치는 영향

최태섭, 이정석<sup>1</sup>, 이병권, 김광용

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

## Uptake and Loss Kinetics of Silver in the Asian Clam, *Potamocorbula amurensis* and Balthic Clam, *Macoma balthica*: Effects of Body Size and Salinity

Tae Seob Choi, Jung-Suk Lee<sup>1</sup>, Byeong-Gweon Lee and Kwang Young Kim

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

<sup>1</sup>Institute of Environmental Protection and Safety, NeoEnBiz Co., Digital Valley 2-904, 481-10, Gasan-dong, Geumcheon-gu, Seoul 153-783, Korea

### ABSTRACT

A series of radiotracer experiments were employed to quantitatively compare the biokinetics of uptake from the dissolved phase (influx rates), uptake from the various types of food source (assimilation efficiency), and loss (efflux) of Ag between *Potamocorbula amurensis* and *Macoma balthica*. Simultaneously, influx rates of dissolved Cd in both clams were determined to compare with those of Ag. Effects of salinity on influx rates were evaluated in these 2 euryhaline species, as were effects of clam size. Influx rate of Ag and Cd ( $\mu\text{g g}^{-1}$  [dry wt.]  $\text{d}^{-1}$ ) increased linearly with metal concentrations. Influx rates of Ag in both clams were 3 to 4 times those of Cd. Absolute influx rates of the 2 metals were 4 to 5 times greater in *P. amurensis* than *M. balthica*, probably because of differences in biological attributes (*i.e.* clearance rate or gill surface area). As salinity was reduced from 20 to 2.5 psu, the influx rate of Cd in *P. amurensis* increased 4-fold and that of Ag increased 6-fold, consistent with expected changes in speciation. Weight-specific metal influx rates ( $\mu\text{g g}^{-1}$  [dry wt.]  $\text{d}^{-1}$ ) were negatively correlated with the tissue dry weight of

the clams, but most rate constants determining physiological turnover of assimilated metals were not affected by clam size.

**Keywords:** Uptake and loss kinetic, Ag, Cd, *Potamocorbula amurensis*, *Macoma balthica*.

### 서 론

인간의 활동과 산업의 발전으로 인해 중금속을 비롯한 많은 종류의 독성 물질들이 수서환경으로 유입되어 연안 생태계 훼손과 수산자원 오염과 같은 환경적인 문제를 야기하고 있다. 특히 입자반응성이 높은 중금속은 빠른 속도로 입자에 흡착하여 저층에 퇴적됨으로서 잔류성이 매우 강할 뿐만 아니라 이곳에 서식하는 다양한 생물 종들에게 치명적인 독성효과를 보이게 됨으로 인하여 수많은 생태독성학 (ecotoxicology) 연구자들의 주목을 받아 왔다 (Luoma *et al.*, 1995).

특히, 저서생태계에 서식하는 무척추동물은 오염에 대해 민감하며, 서식환경에 유입된 다양한 종류의 독성물질을 체내에 농축하는 생리 특성을 보인다 (Bordin *et al.*, 1996). 이러한 특성으로 인해 연안생태계에 대한 독성물질의 오염을 평가하고 감시하는데 있어 무척추동물인 이매패류가 흔히 이용되고 있다 (Brown and Luoma, 1995; Lee *et al.*, 1998). 이매패류는 연체동물의 한 종류로서 좌우대칭의 패각이 관절치로 서로 맞물리는 형태를 이루고 있으며, 아가미의 섬모운동으로 입수관을 통해 많은 양의 물을 여과하고 아가미를 거쳐 출수관을 통하여 나가는 과정을 통해 물과 먹이로부터 흡수한 유해물질을

Received January 12, 2005; Accepted May 28, 2005

Corresponding author: Lee, Jung-Suk

Tel: (82) 2-863-4744 e-mail: bioassay@paran.com

1225-3480/21107

© The Malacological Society of Korea

체내에 농축시키게 된다. 또한 운동성이 현저히 낮아 퇴적물 속에 고착생활을 영위하는 특성으로 인하여 독성물질의 유입 경로에 따른 효과를 평가하기에 매우 적합한 생물이다. 미국의 경우, Mussel Watch 프로그램은 이매패류의 한 종류인 담치와 굴과 같은 이매패류를 오염감시종 (biomonitor species)으로 선택하여 여러 연안의 중금속 및 유기독성물질의 오염수준을 파악하고 있다 (Beliaeff *et al.*, 1997; O'Connor, 2002).

은 (Ag) 은 카드뮴 (Cd) 과 마찬가지로 환경에 자연적으로 존재하는 중금속이다. 비록 그 양이 극히 미미한 미량 금속 (trace metals) 이며, 일정 농도 이하에서는 독성이 나타나지 않는다는 특성을 가지고 있지만, 수서생물, 특히 저서생물에게는 수은 (Hg), 구리 (Cu) 와 함께 가장 치명적인 독성물질로서 수서환경에 광범위하게 유입 및 분포하고 있다 (Purcell and Peters, 1998).

오염물질이 생물에 미치는 잠재적인 악영향을 예측하고 평가하는데 있어 가장 중요한 단계는 생물 체내 농도수준과 생물에 미치는 독성효과 사이의 관계를 규명하는 것이다 (Yoo *et al.*, 2002). 이제까지의 많은 생태독성학적 연구를 통해서 은은 구리, 수은과 함께 연안환경에 서식하는 무척추동물과 해조류에 독성이 가장 강한 중금속의 하나로 알려져 있다 (Bryan, 1984). 그리고 연안에 서식하는 생물들 중 특정한 생물의 초기 생활사에는 매우 낮은 농도의 은에도 매우 민감한 것으로 알려져 있으며, 특히 이매패류의 초기 생활사는 은에 대해서 가장 민감하게 반응한다고 한다 (Bryan and Langston, 1992). 또한 은은 무척추 동물을 비롯하여 식물플랑크톤, 해조류 중 일부 종류, 굴에 가장 쉽게 농축되는 원소이기도 한다 (Fisher *et al.*, 1984; Luoma *et al.*, 1995). 해수에 들어있는 용존태의 은은 상대적으로 안정된 용존형태와 유입원으로부터 광범위하게 확산된다는 점 때문에 인간에 의한 오염물질의 유입에 대한 효과적인 지시자로 인식하고 있다 (Sanudo-Willhelmy and Flegal, 1992). Cherry *et al.* (1983) 은 연체동물을 대상으로 미량금속의 농축 계수 (enrichment factor) 를 비교하였다. 농축 계수는 해수 중에 들어있는 미량금속의 농도에 대한 연체동물 소화관에 들어있는 미량금속의 농도 비율로 정의할 수 있다. Cherry *et al.* (1983) 의 결과는 은에 대한 농축 계수가 다른 모든 미량금속보다 월등히 초과하고 있음을 보였다.

또, 은은 사진 또는 이미지 산업에서 광범위하게 이용되어져 왔고, 전기산업 또는 그와 관련된 산업에서도 활용도 매우 높은 금속의 종류이다. 또한 산업적 이용으로부터 환경으로의 유입경로와 이들이 수생 또는 육상 생물에 노출될 가능성에 대해서도 잘 알려져 있다 (Purcell and Peters, 1998). 그러나 은은 화합물 (silver compounds)의 형태에 따라 독성의 효과가

다르게 나타남으로 인해 어떤 형태로 환경에 유입 되는가가 매우 중요한 문제이며, 통상 이온상태의 은이 수서생물에게는 가장 치명적인 독성을 갖는 것으로 알려져 있다 (Hogstrand and Wood, 1998).

생물활동에 전혀 이용되지 않는 은과 카드뮴은 생물 체내에 소량 존재하여도 독성을 발휘하는 class B metal로 분류되는 독성물질이며 (Mason and Jenkins, 1995), 이따이따이병의 발병원인으로서 인간뿐만 아니라 해양생물에게도 큰 위협이 되고 있다 (Clark, 2001). 특히 이매패류에 대해 광범위한 생리적 독성효과를 갖는 것으로 알려져 있다 (Brown and Luoma, 1995). 일반적인 미량금속의 speciation은 염분 농도에 영향을 받으며, 생물농축은 생물의 크기나 염분 농도의 영향을 받는다 (Fisher, 1996; Lin and Dunson, 1993).

저서생물에 의한 독성물질 흡수 및 농축에 영향을 미치는 요인은 다양하다. 염분, pH, 산화환원전위 (redox potential), 용존유기탄소, 온도, 경쟁 이온 (competing ions), 저서생물의 먹이에 대한 기호 (food preference) 등 다양한 환경적 요인이 존재하며 (Bjerregaard and Depledge, 1994), 이외에 중요한 생물학적 내부 요인은 생물의 크기, 성별, 성숙단계(연령), 영양상태, 계절에 따른 대사능력의 차이 등을 고려할 수 있다 (Luoma *et al.*, 1983; Wang and Fisher, 1997). 대부분의 치사독성에 관련된 독성연구들은 실험적인 한계로 인해 수일에서 수십일 정도의 기간에 독성 영향을 평가한다. 그러나 다년생인 이매패류의 경우 길게는 수년 이상 오염 물질에 노출될 수 있으므로 단기간의 치사독성에 관련된 결과를 통해 현장의 영향을 평가하는데 한계를 가지고 있다. 또한 사망을 초래하지 않는 농도 수준에서도 심각한 생리화학적 영향을 미칠 수 있다는 것도 치사독성 연구가 가지는 단점이라 할 수 있다 (Kim *et al.*, 2004). 그러므로 중금속으로 오염된 수서환경에 서식하는 저서생물에 대한 영향을 연구하는데 있어 중금속 흡수경로 및 속도를 이해하는 것은 생태독성학적 측면에서 뿐만 아니라, 오염된 환경의 규제와 관리에서도 매우 중요하다 (Yoo *et al.*, 2002).

실험생물인 *Macoma balthica*와 *Potamocorbula amurensis*는 기수역에 서식하는 이매패류로서 대서양과 태평양 동부 연안의 갯벌에 널리 분포하며, 환경독성연구에 널리 이용되는 종들이다 (Cain and Luoma, 1985; Thomas *et al.*, 1998; Schlekot *et al.*, 2000; Werner 2004).

본 연구에서는 하구에 서식하는 대표적인 이매패류인 *Potamocorbula amurensis*와 *Macoma balthica*를 대상으로 용존태의 은과 카드뮴의 생물농축 kinetics 요인들을 측정하고 비교하고자 하였다. 또한, 본 연구를 위하여 방사능추적자 (radiotracer) 를 활용하는 기법을 이용하여 입자성 은이 다양한 먹이원 (미세조류가 풍부한 퇴적물, 멸균된 퇴적물 그

리고 미세조류 등) 과 결합되어 체내에 들어왔을 때의 생물이용도 (bioavailability) 를 규명하고자 하였다. 그리고 또한 저서생물의 중금속 생물 농축에 영향을 미치는 다양한 환경 및 생물학적 내부 요인들 중, 생물의 크기와 염분 농도의 영향을 평가하였다. 이는 염분과 관련하여 금속의 존재 형태에 영향을 미칠 것으로 판단되었으며, 생물의 크기는 대사율과 관계가 있을 것이라는 가정 하에 이루어졌다. 부가적으로 생물 체내에 축적된 은의 생리적인 배출율 (turnover rate) 을 측정하기 위해 21일 이상 탈장시키는 실험을 병행하였다. 이때패류의 중금속 축적은 아가미를 통한 용존태 중금속의 흡수경로와 오염된 퇴적물과 먹이의 섭식을 통한 흡수경로로 구분할 수 있다. 따라서 용존태의 중금속 만을 가지고 농축 속도를 측정하는 것은 결과를 현장에 적용하였을 때 중금속의 위해성을 과소평가할 우려가 있어 세 가지 종류의 먹이 (미세조류가 풍부한 퇴적물, 멸균한 퇴적물, 미세조류) 에 중금속을 오염시켜 흡수 및 배출 속도를 평가하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 실험생물의 준비

이때패류 *Macoma balthica*는 infaunal facultative deposit-feeder로서 미국 샌프란시스코 만 남쪽에 위치하는 Palo Alto 갯벌에서 채집하였으며, *Potamocorbula amurensis*는 광염성의 여과식자로서 샌프란시스코 만 북쪽, 미국지질조사국 (USGS) 정기 관측 정선 중 한 곳 (Station 4.1) 에서 Van Been grab을 이용하여 2001년 2월에 채집하였다 (Brown and Luoma, 1995).

실험생물은 실험 1주일 전에 채집하였으며, 채집된 실험생물은 실험실로 옮겨와 여과된 해수를 이용하여 패각에 묻은 퇴적물을 제거하고, 실험계획 상의 염분농도 구배 (2.5, 5, 10, 20 psu)와 온도 조건 (10°C)에 1 주일에 걸쳐 단계적으로 순치하였다. 순치하는 동안 매일 자체 배양한 규조류 (*Phaeodactylum tricornutum*) 를 먹이로 공급하였다. 실험에 이용된 해수는 연안에서 채수한 해수 (34 psu) 를 0.22 μm 여과 카트리지를 이용해 여과하고, 3차 증류수 (18 MΩ) 를 이용하여 희석한 후 사용하였다.

### 2. 은의 동화 효율의 측정

먹이의 종류에 따른 동화효율 (assimilation efficiency; AE) 의 차이를 측정하기 위해 방사선 동위원소인 <sup>110m</sup>Ag와 <sup>109</sup>Cd로 표지된 다양한 먹이원 (algal-rich sediment, sterile sediment, algae) 을 *Potamocorbula amurensis*와 *Macoma balthica*를 대상으로 약 1-2 시간 정도 섭식시킨 후, pulse-chase method를 이용하여 AE를 측정하였다. 이때패류의 체내에 동화되지 않은 방사능을 탈장과정을 통해 배설물

로 배출한 후, 남아있는 방사능의 세기를 측정하여 이를 체내에 농축된 것으로 간주하였다.

### 3. 은과 카드뮴의 흡수율 측정

*Potamocorbula amurensis*와 *Macoma balthica*를 대상으로 용존태 (dissolved phase) 의 은과 카드뮴의 흡수율 (influx rate) 은 다양한 염분농도 조건 (2.5, 5, 10, 20 psu) 에 이때패류를 노출시켜 측정되었다. 흡수율을 측정하기 위해 준비된 해수에는 방사성 동위원소 <sup>110m</sup>Ag와 <sup>109</sup>Cd로 표지하였으며, 안정동위원소 (stable metal) 로 0.1에서 10 μg L<sup>-1</sup>까지 5 개의 농도 구배를 만들어 노출시켰다. 실험에 이용된 배양액은 은과 카드뮴의 질산으로 희석된 표준용액을 만들고, 이를 희석시켜 실험 농도구배를 만들었다. 방사성 동위원소는 안정동위원소의 추적자로 이용되었으며, 표지된 농도는 각 처리구 별로 180 kBq 이었다.

흡수율에 대한 중금속 농도의 효과는 멱함수인 다음 식 (1) 을 이용하여 측정되었다.

$$I_w = k_u C_w^b \quad (1)$$

여기서,  $I_w$ 는 이때패류 체내로의 중금속 흡수율 (μg metal g<sup>-1</sup> [dry wt] d<sup>-1</sup>) 을 의미하며,  $k_u$ 는 중금속 용존태로부터 체내로 흡수되는 효율에 대한 상수,  $C_w$ 는 해수 중에 들어있는 중금속의 농도,  $b$ 는 파워상수로  $I_w$ 와  $C_w$ 사이의 로그 상관관계의 경사도를 의미한다. 또한 모든 상관관계에서 경사도,  $b$ 는 1에 가까워진다 (Lee et al., 1998).

또한, 흡수율에 대한 생물의 크기 효과를 평가하기 위해 파워함수인 다음 식 (2)를 이용하여 상관관계를 분석하였다.

$$I_i = aW^c \quad (2)$$

여기서,  $a$ 는 절편상수이며,  $c$ 는 로그로 전환된  $I_i$  (dpm g<sup>-1</sup> [dry wt.] d<sup>-1</sup>)와  $W$ 사이의 상관에서 경사도를 의미한다.

### 4. 은의 배출율의 측정

체내에 동화된 은에 대한 실험생물의 배출율 (efflux rate) 은 5일 동안 은으로 오염된 규조류와 퇴적물, 그리고 용존태의 은에 노출시킨 후, 이후 21일 동안 깨끗한 해수로 옮겨 탈장 (depuration) 시키면서 측정하였다. 먹이원으로 이용된 규조류는 *Phaeodactylum tricornutum*이었으며, 0.22-μm의 필터로 여과된 2 liter의 해수에 아연과 EDTA가 제거된 f/2 배양액을 사용하여 증식시켰으며, 증식과정 동안 염분농도는 20 psu로 맞춰주었다. 배양액은 363 kBq <sup>109</sup>Cd 과 265 kBq <sup>110m</sup>Ag의 방사성 동위원소를 이용하여 표지하고, 먹이로 제공되었다. 방사성동위원소로 표지하는 과정은 약 4일 동안이

**Table 1.** Assimilation efficiency (AE, %) of Ag from three types of diets (algal-rich sediment, sterile sediment, algae). Two different methods were used to calculate AEs.

	<i>Macoma balthica</i>			<i>Potamocorbula amurensis</i>		
	Algal-rich sediment	Sterile sediment	Algae	Algal-rich sediment	Sterile sediment	Algae
AE-1	22.3 ± 1.8	22.1 ± 2.2	17.0 ± 3.3	14.2 ± 1.1	17.6 ± 3.1	16.1 ± 2.2
AE-2	27.0 ± 4.1	31.2 ± 5.0	23.5 ± 6.1	16.7 ± 2.2	20.8 ± 5.0	19.8 ± 1.0
Mean	24.6	26.6	20.3	15.4	19.2	18.0

AE-1:  $C_f / C_0$ ; AE-2:  $C_f / (C_f + C_{feces})$

where  $C_f$  = final tissue activity;  $C_0$  = initial tissue activity;  $C_{feces}$  = sum of activities in collected feces during depuration.

있으며, 명암주기를 16 h : 8 h 이었으며, 18°C로 조절된 배양기 안에서 표지하였다. 배양하는 동안 배양용기를 하루에 두 번 정도 가볍게 흔들어 식물플랑크톤이 응집되는 것을 방지하였으며, 기체의 교환이 용이할 수 있도록 하였다.

식물플랑크톤의 배양 후, 방사능동위원소로 표지된 1 liter 분량의 식물플랑크톤을 배양액과 함께 염분농도가 20 psu이며 0.22- $\mu$ m 필터로 여과된 해수 5 liter가 담겨있는 유리 용기에 옮겨 담았다. 그리고 종별로 60 개체씩 배양액에 7일간 노출시켰으며, 수온은 10°C 였다. 4일째 되는 날에 용기속의 해수를 새로운 여과된 해수로 교체하였으며, 방사선동위원소로 표지된 식물플랑크톤은 그대로 남겨두었다. 7일 동안 방사선동위원소로 표지된 먹이와 해수에 노출시킨 후, 깨끗한 해수로 옮겨 패각에 묻어있을 수 있는 입자들은 여과된 해수를 이용하여 제거하였다. 이후 조개들은 각장을 측정하여 5 개의 크기 그룹으로 분류하고 각각의 그룹에 최소한 4 개 이상이 되도록 5 개의 그룹으로 분류하였으며, 크기를 구분한 후 바로 패각과 이매패류 체내의 총 방사능을 측정하였다. 남아있는 그룹들은 탈장을 시키기 위하여 새로운 용기로 옮겼으며, 활성탄소 필터를 이용하여 방사능물질을 제거할 수 있도록 고안된 해수 순환수조에서 21일간의 탈장과정을 진행하였다. 이매패류 체내에 농축된 중금속들이 탈장될 수 있도록 21일간 방사선동위원소로 표지하지 않은 깨끗한 먹이 (*Phaeodactylum tricornutum*) 을 제공하면서 21일간 배양하였다.

탈장 (depuration) 과정을 진행하는 동안, 크기별로 분류한 각 그룹들은 매일 개체별 방사능이 측정되었다. 그리고 총 21일의 탈장과정 중 1, 3, 7, 10, 16일째에 무작위로 3 개의 시료를 선택하여 패각과 체내의 방사능 분포를 측정하였다. 탈장과정을 진행하는 21일 동안 5 개의 크기 그룹에서 시료 각각 4 개를 골라 해부한 후, 이매패류 패각과 체내의 총 방사능을 측정하였다. 이매패류 체내의 방사능의 세기에 있어서 시간적인 변화 추이는 주기적으로 해부하여 패각과 체내의 방사능을 측정하여 얻은 비율을 이용해 보정하여 구하였다. 그리고 측정이 끝난 이매패류 조직은 60°C의 건조기에서 일정한 무게

가 될 때까지 건조시켜 건중량을 측정하였다.

### 5. 방사능의 측정

방사능 (radioactivity) 은 well 타입의 NaI crystal detector가 장착된 감마 카운터를 이용하여 측정하였다. 방사성 동위원소인 <sup>109</sup>Cd에 의한 광전자의 방출 (photon emission) 은 88 keV 대역에서, <sup>110m</sup>Ag에 의한 광전자 방출은 200 keV 대역에서 측정되었다. 광전자 방출을 통해 방사능 세기에 대한 측정시간은 5분 동안이었으며, 얻어진 값들은 표준 방사능 세기와 반감기 교정을 통해 dpm (disintegration per minute) 으로 전환하였다. 최종적으로, 금속의 흡수율은  $\mu$ g metal g<sup>-1</sup> [dry wt] d<sup>-1</sup>로 표현하였다.

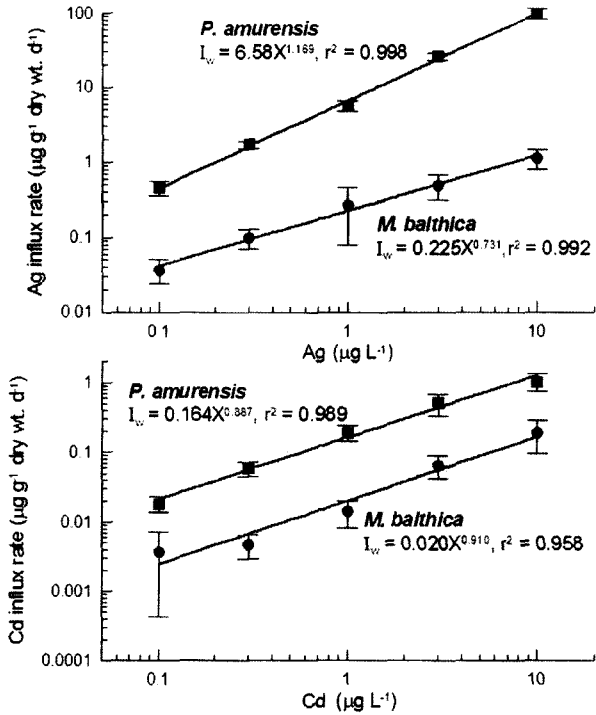
## 결 과

### 1. 먹이 내 은의 동화 효율

본 실험에서는 세 종류의 먹이 (algal-rich sediment, sterile sediment, algae) 에 존재하는 은의 동화효율을 측정하였다. 실험 결과 *Macoma balthica*의 은 동화 효율 (AE) 은 algal-rich sediment가 25%, sterile sediment가 27% 그리고 algae가 20%로 나타나, 각각 15, 19, 18%를 보인 *Potamocorbula amurensis*에 비해 모두 높게 나타났다 (Table 1). 특징적으로 두 종간의 은의 동화효율 (AE) 의 차이는 퇴적물을 먹이로 한 경우에 크게 나타났지만, 미세조류를 먹이로 한 경우에는 상대적으로 적었다. 따라서 *M. balthica*의 경우에는 퇴적물 먹이에 존재하는 은의 AE가 미세조류에 존재하는 그것보다 큰 반면에 *P. amurensis*의 경우에는 별다른 차이를 보이지 않았다.

### 2. 용존 은과 카드뮴의 흡수율

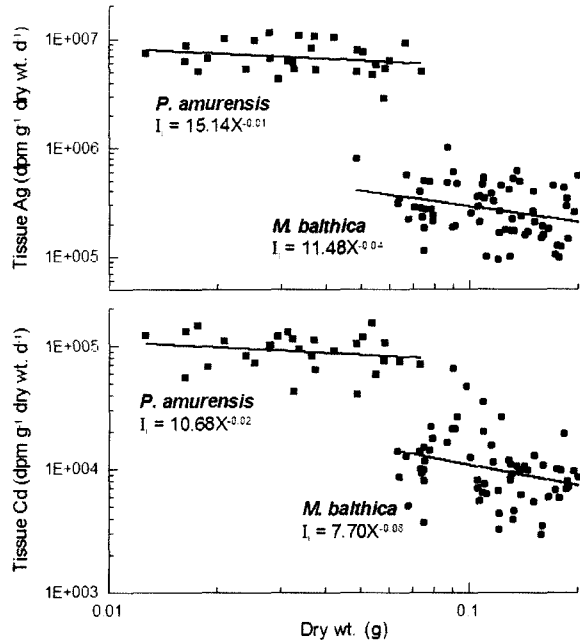
이매패류 체내로 은과 카드뮴의 흡수율은 노출시간과 용존 농도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 1). *Potamocorbula amurensis*가 *Macoma balthica*보다 은과 카드뮴의 흡수에 있어서 상대적으로 빠른 것으로 나타났다. 카



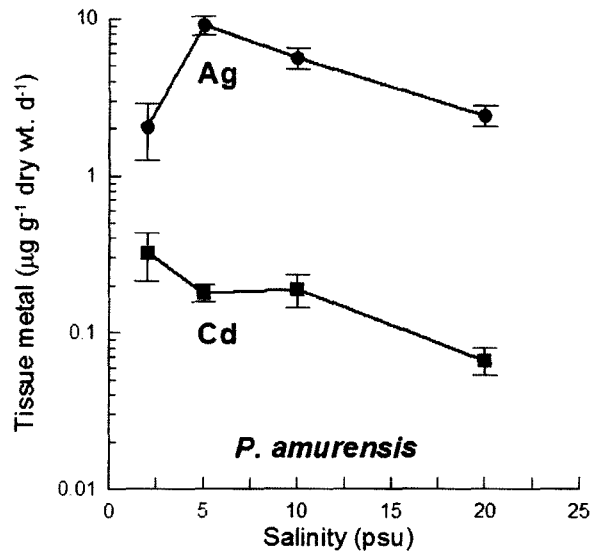
**Fig. 1.** Relationship between influx rates of Ag and Cd ( $\mu\text{g g}^{-1}[\text{dry wt}] \text{d}^{-1}$ ) in *Potamocorbula amurensis* (■) and *Macoma balthica* (●) and dissolved metal concentration ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Each data represents a mean of 6 composite of 1-8 pooled clams. Error bar represents standard deviation. Log transformed metal influx rate ( $I_w$ ) and dry weight of clams ( $C_w$ ) were linearly regressed in a power function.

드름은 *P. amurensis*가 *M. balthica*에 비해 약 8 배 빠르게 흡수하는 것으로 나타났다. 또한, *P. amurensis*에 의한 은의 흡수율은 *M. balthica*에 비해 무려 30 배나 빠른 양상을 보였다. 두 종 모두 카드뮴보다 은을 더 빠른 속도로 흡수하는 것으로 나타났다. *P. amurensis*는 카드뮴에 비해 은에 대하여 약 40 배 정도 빠른 흡수율을 보였으며, *M. balthica*는 약 11 배 정도 빠른 흡수율을 보였다.

흡수율에 대한 생물 크기 (건중량) 효과를 측정하기 위해 모든 실험구의 방사선 동위원소 흡수율 자료를 합쳐 이매패류의 무게 자료와 함께 도시하였다 (Fig. 2). 이것은 해수 중에 들어 있는 은과 카드뮴의 농도와 이매패류의 흡수율이 직선 상관관계에 있었으며, 모든 처리구들이 초기에 동일한 방사능량으로 오염되었기 때문에 가능한 것이다. 그 결과, 은과 카드뮴의 흡수율은 이매패류의 크기 (건중량)와는 역 상관관계를 보였다 (Fig. 2). 이것은 다른 연구결과와도 일치하는 결과로서 (Lee *et al.*, 1998), 체중 특이성을 갖는 대사율 (metabolic rate) 과 크기의 변이 때문인 것으로 보인다. 파워함수를 이용한 상



**Fig. 2.** Relationship between influx rates of  $^{110m}\text{Ag}$  and  $^{109}\text{Cd}$  ( $\text{dpm g}^{-1}[\text{dry wt}] \text{d}^{-1}$ ) to *Potamocorbula amurensis* (■) and *Macoma balthica* (●) and dry weight of 1-8 pooled clams (g). Log transformed isotope influx rate ( $I$ ) and dry weight of clams ( $W$ ) were linearly regressed.



**Fig. 3.** Influx rates of Ag (●) and Cd (■) ( $\mu\text{g g}^{-1}[\text{dry wt}] \text{d}^{-1}$ ) to *Potamocorbula amurensis* from dissolved phase at different salinity (psu). Each data represents a mean ( $\pm$  S.D) of 6 composite samples of 3 pooled clams.

관관계에서 *Potamocorbula amurensis*의 기울기 (c) 는 은 이 -0.01, 카드뮴이 -0.02였으며, *Macoma balthica*의 경우는 은이 -0.04, 카드뮴이 -0.08 이었다. 이매패류의 크기가 은과 카드뮴의 흡수율에 미치는 영향은 *P. amurensis* 보다는 *M. balthica*에서 더 분명하게 나타났다.

본 연구에서 은과 카드뮴의 흡수율은 염분 농도가 증가함에 따라 대체로 감소하는 것으로 나타났다 (Fig. 3). 그러나 은의 경우, 5 psu 이상에서 흡수율이 염분 농도가 증가하면서 감소하는 경향을 보인 반면, 가장 낮은 염분 농도인 2.5 psu에서 다시 감소하는 경향을 보였다. 이는 *Potamocorbula amurensis*로 아연 (Zn) 에 대해 흡수율을 측정했을 때와 유사한 경향을 보였다. 카드뮴은 2.5 psu에서 20 psu로 염분 농도가 증가하면서 흡수율은 약 5 배 정도 감소하였다 (Fig. 3). 은은 염분 농도가 5 psu에서 20 psu로 증가하면서 흡수율은

약 3.7 배 정도 감소하였다.

### 3. 체내 동화된 은의 배출

본 연구에서는 먹이의 종류에 따라 은의 장 체류시간이 달라질 수 있음을 보여주고 있다 (Fig. 4). 특히 *Macoma balthica*의 경우 순수한 미세조류만을 섭식했을 때, 다른 경우보다 초기 배출이 빨랐으며, *Potamocorbula amurensis*는 미세조류와 퇴적물이 결합한 먹이를 섭식했을 때 가장 빠른 초기 배출을 보였다 (Fig. 4). 두 종 모두 순수하게 퇴적물만을 섭식했을 때 은의 배출이 가장 느리게 나타나고 있으며, 이는 단지 퇴적물 입자와 결합된 은이 더 많이 이매패류의 체내에 농축되고 있음 보여준 것이다. 초기의 빠른 배출 이후 단계에서의 은 배출은 이미 체내에 농축된 은의 생리적인 turnover에 기인한 배출로 간주할 수 있다.

이매패류 체내에 축적된 금속의 배출 (efflux) 은 중금속의 장 체류시간에 의해 영향을 받는다. 초기의 빠른 배출과정은 오염물질 배출의 일반 특징이며 (*Potamocorbula amurensis*의 경우는 초기 약 20 시간, *Macoma balthica*는 초기 약 40 시간), 그 이후는 오염물질의 배출속도가 느려진다. 초기 빠른 배출과정은 이매패류가 섭취한 중금속이 미처 체내에 농축되지 못하고 배설물로 체외로 배출되는 것으로 설명할 수 있으며, 이매패류 두 종의 먹이의 장 체류시간은 이 시간과 유사하다고 할 수 있다.

이매패류의 체내에 농축된 은의 배출을 측정하기 위해 먹이와 해수에 방사선 동위원소를 표지한 후 5일간 노출시켰으며, 이 과정을 통해 체내에 농축된 은은 21일간의 탈장과정 동안 이매패류의 체내로부터 단계적으로 배출되었다 (Fig. 5). *Potamocorbula amurensis*는 탈장과정 초기 2일 동안, *Macoma balthica*는 초기 4일 동안 가장 빠르게 체내에 축적된 은을 배출하였으며, 그 이후 일정한 속도로 단계적으로 배출하였다. 이 과정은 이매패류 장 내용물을 배출시키는 과정에서 아직 체내에 흡수되지 않은 중금속들이 배설물로 배출되는 과정과 관련 있다. 이매패류의 체내에 완전히 농축된 중금속의 배출은 일반적으로 느리게 진행이 되고, 체내에 흡수되지 않고 초기에 배설물을 통해 배출되는 것에 비해 개체들 간의 편차가 그리 크지 않다. 이매패류 체내에 농축된 중금속의 생리적 turnover는 일차 지수함수로 분석할 수 있으며, 그 식은 다음과 같다.

$$C(t) = ae^{kt} \quad (3)$$

여기서,  $C(t)$ 는 날짜 t에 이매패류 체내에 남아있는 오염물질의 비율을 의미하며, a는 상수, k는 배출속도 상수를 의미한다. 이매패류 먹이의 장내 체류 시간은 *P. amurensis*의 경우 먹이 섭취 후 약 24시간 까지이며, *M. balthica*는 72시간에서 96

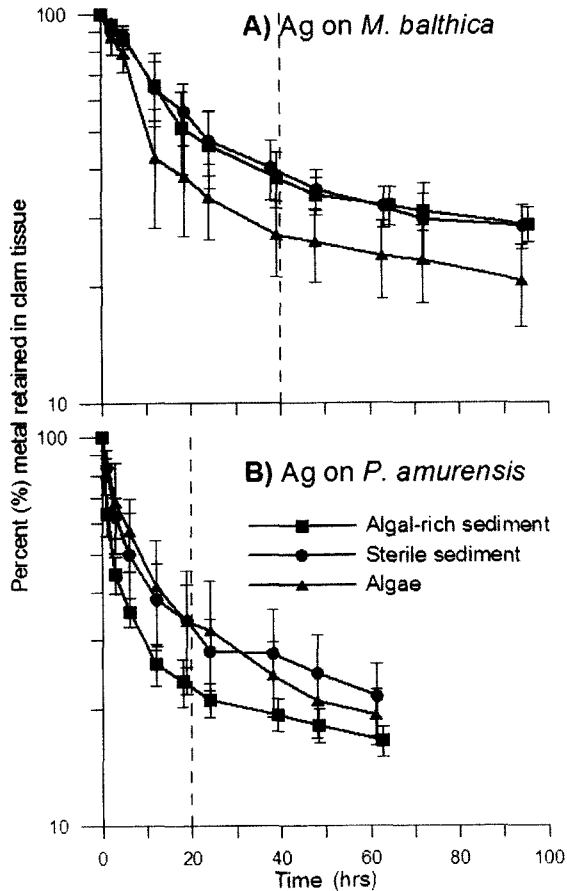


Fig. 4. Retention of radiotracers,  $^{110m}\text{Ag}$  in the soft tissue of *Potamocorbula amurensis* and *Macoma balthica* following ingestion of various food types, algal-rich sediment (■), sterile sediment (●) and algae (▲). Each data represents a mean ( $\pm$  S.D) of 4 composite samples of 3 pooled clams.

시간 정도인 것으로 알려져 있다 (Decho and Luoma, 1991). 식 (3) 을 이용하여 계산한 은의 배출 속도 상수는 *P. amurensis*의 경우 0.044 d<sup>-1</sup>이었으며, *M. balthica*는 0.025 d<sup>-1</sup>이었다 (Fig. 5). *P. amurensis*가 *M. balthica*에 비해 중금속의 흡수와 배출에서 상대적으로 빠른 경향을 보였다.

### 고 찰

오염물질에 의한 생물영향을 정확히 평가하고 판단하기 위해서는 생물이 서식하는 환경에 존재하는 오염물질의 농도와 노출된 생물이 오염물질을 축적하는 농도 및 속도, 체내 축적 농도 그리고 생물에 미치는 효과에 대한 종합적인 자료가 뒷받침 되어야한다 (Chapman, 1995). 본 연구에서는 기수역에서 서식하는 두 종류의 광염성 이매패류인 *Potamocorbula amurensis*와 *Macoma balthica*를 대상으로 은의 농축 및 배출 속도, 그리고 중금속 농축에 영향을 미치는 것으로 알려진 생물의 크기 및 염분의 효과를 평가하였으며, 또한 다양한 먹이에 중금속을 오염시켜 섭식시킨 후, 먹이의 종류에 따른 배출 속도의 차이를 측정하였다.

이매패류의 먹이 섭식은 운동성이 낮은 고착생물이기 때문에 서식환경의 영향을 강하게 받는다고 할 수 있다. 특히 이매패류는 서식생태에 관계없이 대개 많은 양의 물을 여과하여 먹이를 섭취하는 여과식자로서 물과 입자가 함께 아가미나 소화관으로 유입되어 세포막을 통한 수송이나 소화과정을 거쳐 체내

에 농축되게 된다. 오염물질에 오염된 미세조류의 경우 소화 흡수의 과정을 거쳐 체내에 농축되는 반면, 퇴적물은 입자에 흡착된 오염물질이 소화관 벽을 통해 좀 더 빠르게 흡수될 가능성 때문에 퇴적물의 오염이 먹이의 오염보다 더 강한 영향을 미칠 수 있으며, 독성의 효과도 더 빠르게 나타날 것이다. 자유이온 활성도 모델 (free ion activity model) 에 근거한 Di Toro *et al.* (1992) 의 평형분배 (equilibrium partitioning) 이론은 공극수나 해수에 용존태로 존재하는 중금속만이 생물에게 영향을 미친다고 주장한다. 하지만 본 연구의 결과는 용존태의 중금속과 함께 오염된 퇴적물을 포함한 먹이 섭식을 통해서도 중금속이 농축될 수 있음을 보였다. Yoo *et al.* (2002) 의 결과는 *Macoma balthica*에 의한 중금속 농축은 먹이 섭식이 다른 흡수경로보다 우세한 것으로 결론짓고 있다. 그래서 급성 및 만성 독성 효과를 측정할 때, 반드시 퇴적물을 포함한 먹이 섭식을 통한 영향을 고려해야 한다. 미세조류나 퇴적물과 같은 입자성 물질의 섭식에 의한 은의 농축은 먹이의 종류나 생물 생물종간에 따라 달라질 수 있다. 하지만 이매패류의 먹이로서 미세조류나 퇴적물 입자의 섭식은 해양이나 하구의 저서생태계에서 상위 영양단계로의 중금속 농축에 잠재적인 중요한 요인으로 고려되어야만 한다 (Luoma *et al.*, 1995).

중금속 흡수율과 용존태 중금속 농도가 직선 상관관계를 보이는 것은 이매패류의 중금속에 대한 조절기작인 능동적인 것이 아닌 수동적인 흡수에 기인함을 보여주는 것이다 (Roesijadi and Robison, 1994). 이매패류에 대한 중금속 흡수에 대한 대부분의 연구들은 이매패류의 체내에서 중금속을 조절하는 기능이 없다고 결론내리고 있다 (Phillips, 1990). 따라서 단위시간 동안 이매패류의 아가미를 통과하는 물의 양이 중금속 흡수에 강하게 영향을 미친다고 할 수 있다 (Borchardt, 1983; Riisgard *et al.*, 1987). 또한 이매패류에 의한 중금속의 흡수는 종 특이성이 존재하고, 종 특이성에는 여수율, 아가미 표면적 또는 중금속 이온에 대한 아가미 세포막의 투수율 등이 중요한 요인으로 작용할 것이다 (Lee *et al.*, 1998). *Macoma balthica*에 비해 더 많은 양의 중금속을 흡수한 *Potamocorbula amurensis*는 상대적으로 *M. balthica*보다 더 빠른 여수 능력을 가지고 있으며, 아가미의 구조가 잘 발달되어 있다 (Gilbert, 1977). Wang *et al.* (1996) 의 결과는 담치류인 *Mytilus edulis*에 의한 용존태 중금속 흡수 상수 ( $k_1$ ) 가 Cr (VI) (0.1) < Cd (0.365) < Zn (1.044) 의 순서로 증가하고 있다고 보고했다. 본 연구의 결과는 *M. balthica*의 경우 은은 0.225로 담치류에 의한 카드뮴 흡수 상수보다 낮은 값을 보였고, 카드뮴은 0.020으로 담치류의 크롬 흡수상수보다 낮은 값을 보였다. *P. amurensis*의 경우 은이 6.58로 담치류의 아연보다 높은 값을 보였고, 카드뮴은 0.164로 담치류

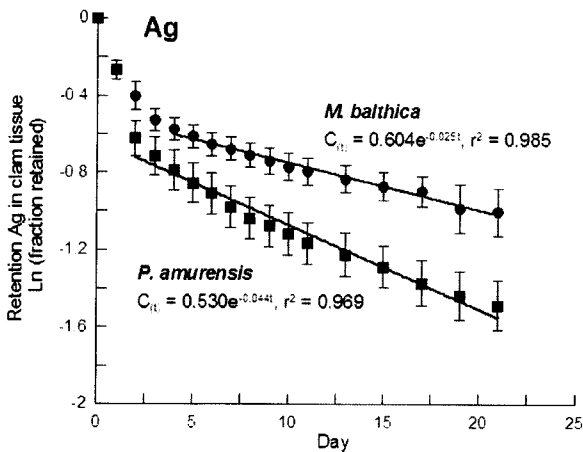


Fig. 5. Retention of assimilated Ag in the soft tissue of *Potamocorbula amurensis* (■) and *Macoma balthica* (●) following depuration of unabsorbed digestive materials for 2 days (*P. amurensis*) and 4 days (*M. balthica*). Each data represents a mean ( $\pm$  S.D) of 6 composite samples of 3 pooled clams. Linear regressions were made between fraction metal retained in the clam tissue (C) and depuration time (t).

의 카드뮴 흡수상수보다 낮았다. 본 연구의 결과와 담치류의 카드뮴 흡수상수를 종합했을 때, *M. balthica* < *P. amurensis* < *Mytilus edulis* 순으로 카드뮴을 많이 흡수할 것을 보인다.

크기 또는 무게의 차이와 같은 이매패류 개체 간의 변이는 중금속의 생물농축에도 많은 영향을 미친다 (Lee *et al.*, 1998). 대체적으로 많은 연구 결과들이 생물의 크기 또는 무게와 생물농축 간에 역 상관관계에 있음을 보였다 (Ringwood, 1989; Wang and Fisher, 1997). 기존의 연구결과에서 체내 중금속 함량과 생물의 크기를 피팅한 파워함수의 경사도 (c)는 -0.3 - -0.6 범위였다. 그러나 본 연구에서는 -0.01 - 0.08의 범위를 보여 상대적으로 생물 크기의 효과는 적은 것으로 나타났다. 생물 체내의 중금속 함량과 생물의 크기가 역 상관관계를 보이는 것은 크기에 따른 대사율의 차이 (Ringwood, 1989; Newman and Heagler, 1991), 또는 아가미 표면적의 차이 (Wang and Fisher, 1997)로 설명할 수 있다. 또한 생물의 크기 또는 무게가 증가하면서 체내의 중금속 농축이 줄어드는 것은 늘어난 체중에 의한 희석효과와 성체보다는 어린 개체들이 성장을 위한 에너지의 요구로 더 많은 양의 물을 여과하기 때문인 것으로 보인다. 일반적으로, 작은 개체의 성장률이 큰 개체보다 빠르다는 것이 이 결과를 뒷받침하고 있다 (Hamburger *et al.*, 1983). 만약 중금속 흡수율과 여수율을 동시에 측정할 수 있다면 둘 간의 상관관계를 좀 더 명확히 밝힐 수 있을 것이다.

기수나 해수에서 중금속의 지화학적 존재형태는 염분 농도에 의해 강하게 영향을 받는다 (Luoma *et al.*, 1995). 용존태 중금속의 생물 이용도는 해수 중의 총 중금속농도보다는 자유이온 활성도가 중금속의 흡수를 결정한다 (Di Toro *et al.*, 1992; Campbell, 1995). 해수내 용존태의 은은 thermodynamic 모델을 통해 해수 중에서 강력한 염소화합물 ( $\text{AgCl}^0$ ,  $\text{AgCl}$ ,  $\text{AgCl}^{2-}$ ,  $\text{AgCl}^{3-}$ )이 주종 (dominant speciation)을 이룸이 밝혀졌다 (Cowan *et al.*, 1985). 그리고 하구나 해양환경에서 은의 강력한 생물농축은 부분적으로 은의 중성 염소화합물 ( $\text{AgCl}^0$ )의 높은 생물이용도 때문이다 (Engel *et al.*, 1981). 이에 반해 카드뮴은 해수 중에서 상대적으로 약하게 염소이온 ( $\text{Cl}^-$ )과 결합하는 것으로 알려져 있다 (Lee *et al.*, 1998). 또한 대체로 20 psu의 해수에서 자유 카드뮴 이온 ( $\text{Cd}^{2+}$ )은 화학평형 모델을 기초로 했을 때, 총 용존태 카드뮴의 5-7% 수준으로 가정할 수 있다 (Blust *et al.*, 1992). 이에 반해 염분 농도가 0.01 psu 미만인 담수에서 자유 이온 ( $\text{Ag}^+$ )은 90% 이상이다 (Hogstrand and Wood, 1998). 또한 본 연구에서 *Potamocorbula amurensis*에서 카드뮴의 흡수상수보다 은의 흡수상수가 무려 40 배 높게 측정된 것도 이를 뒷받침하는 결과로 보인다.

하지만 2.5 psu에서 은의 체내 함량이 5 psu에서 보다 낮게 나타난 역전 현상은 생물학적 요인과 지화학적 요인을 함께 고려해야 설명 가능하다. *Potamocorbula amurensis*가 서식 가능한 염분 범위는 비록 0.5에서 30 psu로 매우 넓지만 실제로 가장 높은 밀도를 보이는 최적 염분범위는 5에서 20 psu 정도로 알려져 있다. 따라서 2.5 psu에서 실험한 *P. amurensis* 개체들은 저염분으로 인한 생리적 스트레스를 받았을 가능성이 있고 이에 따라 여수율 (clearance rate)과 같이 금속 흡수율에 영향을 미칠 수 있는 생리적 활성이 감소한 결과 5 psu에서 실험한 개체들보다 낮은 은의 흡수율을 보였다는 추론이 가능하다. 다만 동일한 염분 변화에 따른 카드뮴 흡수율이 은 흡수율과 다른 경향을 보인 것은 그 구간에서의 염분 변화가 은과 카드뮴의 존재형태 대해 미치는 영향이 다르기 때문인 것으로 보인다. 즉, 유기탄소의 영향이 없다고 가정할 때, 2.5 psu에서 5 psu로 증가하는 동안 용존 은의 경우  $\text{AgCl}^0$ 의 비율이 줄면서  $\text{AgCl}^{2-}$ 와  $\text{AgCl}_3^{2-}$ 의 비율이 증가하는 반면 카드뮴의 경우  $\text{Cd}^{2+}$ 의 비율이 줄고  $\text{CdCl}^+$ 와  $\text{CdCl}_2$ 의 비율이 증가할 것으로 예상되는데, 이와 같은 염분 변화에 따른 존재형태의 변화가 생물이용도에 미치는 영향은 자유이온의 비율이 감소하는 카드뮴에 있어서 더 클 것으로 추정된다.

이매패류 체내로 유입된 중금속들은 미처 체내에 농축되지 않고 장 내에 머물러 있던 것이 탈장과정을 통해 빠르게 체외로 배출되고, 그 이후 느린 속도의 중금속 배출과정은 1차 지수함수로 표현하는 것이 가능하다 (Fig. 5). 그리고 초기에 체내에 농축되지 않은 중금속의 배출과 후기에 체내 농축된 중금속의 배출이 연결되어 1 개의 식으로 피팅이 가능하다. 그러나 본 연구의 결과는 초기배출과 후기의 배출이 분리되어 나타났다. 그래서 1차 지수함수를 이용한 피팅은 후기 배출에 국한하였다. 본 연구의 결과처럼 초기 배출과 후기 배출이 나뉘지는 경우는 이매패류 종들의 생리적인 turnover나 세포 내에서의 중금속의 분포 등과 같은 중금속이나 종 특이성과 중금속에 대한 노출기간이 영향을 미친다 (Cutshall, 1974).

*Potamocorbula amurensis*나 *Macoma balthica*와 같이 저서생태계에 서식하는 이매패류 개체 또는 개체군이 수은이나 카드뮴과 같은 금속성 오염물질에 의해 받는 스트레스가 어느 정도 발휘되는지를 평가하기 위해서는 이들 종의 중금속 흡수율이나 배출율이 우선적으로 측정되어야 한다. 본 연구의 결과를 바탕으로 체내에 흡수된 중금속의 분포, 그리고 이들이 발현하는 독성효과의 결과를 얻어서 효과적으로 오염물질의 독성 영향을 평가하고 이들을 규제하는 기준을 제시할 수 있을 것이다. 그러므로 앞으로의 연구는 이들 이매패류에 의한 생물 농축의 잠재성과 결과에 대한 보다 나은 이해를 위해서 세포 또는 생화학적 수준에서의 연구가 연결되어야 할 것이다.



## REFERENCES

- Beliaeff, B., O'Connor, T.P., Daskalakis, D.K. and Smith, P.J. (1997) U.S. mussel watch data from 1986 to 1994: temporal trend detection at large spatial scales. *Environmental Science and Technology*, **31**: 1411-1415.
- Bjerregaard, P. and Depledge, M.H. (1994) Cadmium accumulation in *Littorina littorea*, *Mytilus edulis* and *Carcinus maenas*: the influence of salinity and calcium ion concentrations. *Marine Biology*, **119**: 385-395.
- Blust, R., Kochelbert, E. and Balillieul, M. (1992) Effect of salinity on the uptake of cadmium by the brine shrimp *Artemia franciscana*. *Marine Ecology Progress Series*, **84**: 245-254.
- Borchardt, T. (1983) Influence of food quantity on the kinetics of cadmium uptake and loss via food and seawater in *Mytilus edulis*. *Marine Biology*, **76**: 67-76.
- Bordin, G., McCourt, J., Raposo, F.C. and Rodriguez, A. (1996) Trace metals in the marine bivalve *Macoma balthica* in the westerschelde estuary, The Netherlands. Part 3: Variability of the role of cytosol in metal uptake by the clams. *Science of the Total Environment*, **180**: 241-255.
- Brown, C.L. and Luoma, S.N. (1995) Use of the euryhaline bivalve *Potamocorbula amurensis* as a biosentinel species to assess trace metal contamination in San Francisco Bay. *Marine Ecology Progress Series*, **124**: 129-142.
- Bryan, G.W. (1984) Pollution due to heavy metals and their compounds. *Marine Ecology*, **5**: 1290-1431.
- Bryan, G.W. and Langston, W.J. (1992) Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review. *Environmental Pollution*, **76**: 89-131.
- Cain, D.J. and Luoma, S.N. (1986) Effect of seasonally changing tissue weight on trace metal concentrations in the bivalve *Macoma balthica* in San Francisco Bay. *Marine Ecology Progress Series*, **28**: 209-217.
- Campbell, P.G.C. (1995) Interaction between trace metals and aquatic organism: a critique of the free-ion activity model. *In: Metal Speciation and Bioavailability in Aquatic Systems*. (ed. by Tessier, A. and Turner, D.R.). pp. 45-102. John Wiley & Sons Ltd, New York.
- Chapman, P.M. (1995) Ecotoxicology and pollution-key issues. *Marine Pollution Bulletin*, **31**: 167-177.
- Cherry, R.D., Heyraud, M. and Higgo, J.J.W. (1983) Polonium-210: its relative enrichment in the hepatopancreas of marine invertebrates. *Marine Ecology Progress Series*, **13**: 229-236.
- Clark, R.B. (2001) *Marine Pollution*. Fifth edition, pp. 230, Oxford University Press, New York.
- Cowan, C.E., Jenne, E.A. and Crecelius, E.A. (1985) Silver speciation in seawater: the importance of sulfide and organic complexation. *In: Marine and Estuarine Geochemistry*. (ed. by Sigleo, A.C. and Hattori, A.). Lewis Publishers, Inc., Chelsea, MI.
- Cutshall, N. (1974) Turn over of zinc-65 in oysters. *Health Physics*, **26**: 327-331.
- Decho, A.W. and Luoma, S.N. (1991) Time-courses in the retention of food material in the bivalves *Potamocorbula amurensis* and *Macoma balthica*: significance to the assimilation of carbon and chromium. *Marine Ecology Progress Series*, **78**: 303-313.
- Di Toro, D.M., Mahony, J.D., Hansen, D.J., Scott, K.J., Carson, A.R. and Ankely, G.T. (1992) Acid volatile sulfide predicts the acute toxicity of cadmium and nickel in sediments. *Environmental Science and Technology*, **26**: 96-101.
- Engel, D.W., Sunda, W.G. and Fowler, B.A. (1981) Factors affecting trace metal uptake and toxicity to estuarine organisms. I. Environmental parameters. *In: Biological Monitoring of Marine Pollutants*. (ed. by Vernberg, J.F., Calabrese, A., Thurberg, F.P. and Vernberg, W.B.) pp. 127-144. Academic Press, NY.
- Fisher, H. (1986) Influence of temperature, salinity, and oxygen on the cadmium balance of mussels *Mytilus edulis*. *Marine Ecology Progress Series*, **32**: 265-278.
- Fisher, N.S., Bohe, M. and Teyssie, J.L. (1984) Accumulation and toxicity of Cd, Zn, Ag, and Hg in four marine phytoplankters. *Marine Ecology Progress Series*, **18**: 201-213.
- Fisher, N.S., Teyssie, J.L., Fowler, S.W. and Wang, W.X. (1996) Accumulation and retention of metals in mussels from food and water: comparison under field and laboratory conditions. *Environmental Science and Technology*, **30**: 3232-3242.
- Gilbert, M.A. (1977) The behavior and functional morphology of deposit feeding in *Macoma balthica* (Linne, 1758). *New England Journal of Mollusk Study*, **43**: 18-27.
- Hamburger, K., Mohlenberg, F., Randlov, A., and Riisgard, H.U. (1983) Size, oxygen consumption and growth in the mussel *Mytilus edulis*. *Marine Biology*, **75**: 303-306.
- Hogstrand, C. and Wood, C.M. (1998) Toward a better understanding of the bioavailability, physiology, and toxicity of silver in fish: implications for water quality criteria. *Environmental Toxicology Chemistry*, **17**: 547-561.
- Kim, C.-K., Kim, D.-H., Lee, J.-S. and Lee, K.-T. (2004) Influence of heavy metals, ammonia, and organotin compounds on the survival of arkshell clams, *Scapharca broughtonii*. *Korean Journal of Malacology*, **20**: 93-105. [in Korean]
- Lee, B.-G., Wallace, 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.

- Lin, H.C. and Dunson, W.A. (1993) The effects of salinity on the acute toxicity of cadmium to the tropical, estuarine, hermaphroditic fish, *Rivulus marmoratus*: comparison of Cd, Cu, and Zn tolerance with *Fundulus heteroclitus*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **25**: 45-47.
- Luoma, S.N., Cain, D.J., Ho, K. and Hutchinson, A. (1983) Variable tolerance to copper in two species from San Francisco Bay. *Marine Environmental Research*, **10**: 209-222.
- Luoma, S.N., Ho, Y.B. and Bryand, G.W. (1995) Fate, bioavailability and toxicity of silver in estuarine environments. *Marine Pollution Bulletin*, **31**: 44-54.
- Mason, A.Z. and Jenkins, K.D. (1995) Metal detoxification in aquatic organism. *In: Metal Speciation and Bioavailability in Aquatic Systems*. (ed. by Tessier, A. and Turner, D.R.). pp. 479-680, John Wiley & Sons, New York.
- Newman, M.C. and Heagler, M.G. (1991) Allometry of metal bioaccumulation and toxicity. *In: Metal Ecotoxicology: concepts and applications*. (ed. by Newman, M.C. and McIntosh, A.W.). pp 91-130. Lewis Publishers, Chelsea, MI.
- O'Connor, T.P. (2002) National distribution of chemical concentration in mussels and oysters in the USA. *Marine Pollution Bulletin*, **53**: 117-143.
- Phillips, D.J.H. (1990) Use of macroalgae and invertebrates as monitors of metal levels in estuaries and coastal waters. *In: Heavy Metals in the Marine Environment*. (ed. by Furness, R.W. and Rainbow, P.S.). pp 81-100. CRC Press.
- Purcell, T.W. and Peters, J.J. (1998) Sources of silver in the environment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **17**: 539-546.
- Riisgard, H.U., Bjornestad, E. and Mohlenberg, F. (1987) Accumulation of cadmium in the mussel *Mytilus edulis*: kinetics and importance of uptake via food and seawater. *Marine Biology*, **96**: 349-353.
- Ringwood, A.H. (1989) Accumulation of cadmium by larvae and adults of an Hawaiian bivalve, *Isognomon californicum*, during chronic exposure. *Marine Biology*, **102**: 499-504.
- Roesijadi, G. and Robinson, W.E. (1994) Metal regulation in aquatic animals: mechanism of uptake, accumulation and release. *In: Aquatic Toxicology: Molecular, Biochemical and Cellular Perspectives*. (ed. by Malins, D.C. and Ostrander, G.K.). pp. 387-420. Lewis Publishers, Boca Raton.
- Sanudo-Willhelmy, S. and Flegal, R. (1992) Anthropogenic silver in the southern California Bight: a new tracer of sewage in coastal waters. *Environmental Science and Technology*, **26**: 2147-2151.
- Schlekat, C.E., Dowdle, P.R., Lee, B.-G., Luoma, S.N. and Oremland, R.S. (2000) Bioavailability of particle-associated Se to the bivalve *Potamocorbula amurensis*. *Environmental Science and Technology*, **34**: 4504-4510.
- Wang, W.X. and Fisher, N.S. (1997) Modeling the influence of body size on trace element accumulation in the mussel *Mytilus edulis*. *Marine Ecology Progress Series*, **161**: 103-115.
- Wang, W.X., Fisher, N.S. and Luoma, S.N. (1996) Kinetic determinations of trace element bioaccumulation in the mussel *Mytilus edulis*. *Marine Ecology Progress Series*, **140**: 91-113.
- Werner, I. (2004) The influence of salinity on the heat-shock protein response of *Potamocorbula amurensis* (Bivalvia). *Marine Environmental Research*, **58**: 803-807.
- Yoo, H., Lee, I.-T. and Lee, B.-G. (2002) Influence of Ag and Cu contaminated sediments on the bioaccumulation and chronic toxicity to the clam *Macoma balthica*. *Korean Journal of Environmental Biology*, **20**: 136-145. [in Korean]