

## 금소리쟁이(*Rumex maritimus*)의 카드뮴, 아연 내성에 관한 연구

김진희·이인숙  
이화여자대학교 생물학과

### Studies on Cadmium and Zinc Detoxification of *Rumex maritimus*

Kim, Jin-Hee and In-Sook Lee

Department of Biology, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

#### ABSTRACT

The studies on the potentiality of biomonitoring heavy metal pollution in coastal region of industrial complex were performed to investigate the heavy metal accumulation and induction of metal-binding protein (MBP) as detoxification process using *Rumex maritimus*. Bioconcentration in organs and MBP in root of *R. maritimus* was investigated for the research of the tolerance of heavy metals. The bioconcentration of cadmium and zinc in organs showed 3.6~8.0 times in root higher than in shoot, so it was found that heavy metal accumulated selectively in root. MBP increased absorbance in 254 nm and decreased in 280 nm, because it was composed of high cysteine content and low aromatic acids, so absorbance had large difference between 254 nm and 280 nm. The existence of MBP in the 10~20 fraction was ascertained with anion exchange chromatography and it was identified that concentration of heavy metal increased according as an exposure concentration of medium increased in QAE Sephadex A-25 elution profile. These results suggested that MBP could play a role in biomarker determining the bioconcentration of plant. This study demonstrated a possibility that removal ability of heavy metal of *R. maritimus* resulted from detoxification process and MBP could be utilized as a biomarker of heavy metal pollution.

*Key words* : Bioconcentration, Detoxification, Metal-binding protein, *Rumex maritimus*.

#### 서론

오늘날 인구의 도시밀집과 급격한 공업화로 인하여 수질오염이 현대 사회의 새로운 문제점으로 대두되고 있다. 특히, 산업폐수에 함유된 중금속 물질은 하천수와 호소수에 영향을 미칠 뿐만 아니라 토양에 침적되고 식물에 농축됨에 따라 식물의 생장에 영향을 미치며 또한 물의 자정작용에 크게 영향을 주고 있다 (Smlide 1981).

중금속 물질은 생체세포 내에서 이온 상태로 생체단백질과 착화합물을 형성하여 생화학적으로 안정되며, 수중 생태계에 유입되면 수중생태계를 구성하는 동물, 식물 및 미생물 등에 축적되어 결국에는 인간에게까지 피해를 주게 된다. 최근에는 여러 지역에서 이들 중금속의 농도가 자연상태보다 2~3배 높게 나타나고 있으며, 심한 경우에는 90배가 넘는다는 보고도 있다 (이와 최, 1980).

고등식물은 일반적으로 미생물보다 생체량이 크고 환

\* 이 논문은 1996년도 이화여자대학교 교내 연구비의 지원으로 이루어졌음.

경요인의 변화에 대한 민감성이 작으며, 종에 따라서는 체내에 중금속 원소를 고농도로 축적함으로써 중금속 내성식물 (metallophyte)로 분류되는 것도 있다. 착생 생물인 식물은 사람이나 동물보다 한정된 지역의 스트레스에 계속적으로 노출되므로 여러가지 독성물질의 biomarker로 이용할 수 있다. 중금속 biomarker인 중금속 내성식물은 많은 양의 중금속 이온을 흡수하고 0.5~0.8 g/kg 정도의 농도까지 저장하는 것도 있다. 이것은 보통 식물이 함유한 중금속 농도의 100~1,000배 정도의 높은 농도이다. 토마토, 양배추, 벼와 같은 고등식물의 잎에서 metallothionein과 비슷한 성질을 지닌 metal-binding protein (MBP)이 발견되면서 MBP에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

최근에는 고등식물의 이와 같은 능력을 오염된 물이나 토양의 정화처리에 이용하려는 시도가 진행되고 있으며, 이와 관련하여 수중의 오염물질에 대한 식물의 흡수 능력에 관한 연구도 다수 진행되고 있다. 이른바 식물 치료법 (phyto-remediation)이라 불리는 이 방법은 해바라기, 인도겨자 등이 땅 속에 있는 우라늄, 납, 아연 등 인체에 치명적인 영향을 미치는 중금속을 흡수하는 능력이 탁월하다는 점을 활용해 중금속으로 오염된 토지를 회복시키려는 기술이다. 이 방법을 쓰면 비록 금속을 회수하지 못하더라도 오염된 지역의 중금속을 98%까지 제거할 수 있다. 그러나 이러한 처리시설들은 설치 및 운영에 많은 비용이 들므로, 오염물질의 농도가 그리 높지 않은 폐수에 대한 소규모 처리시설에는 실용화하기 어려운 경제적 문제가 있다. 그러나 식물치료법은 비용이 매우 저렴하다는 최대 장점을 갖는데 물리화학적 처리에 의한 오염처리 비용의 10분의 1밖에 들지 않는다. 또 외국에서는 중금속에 높은 제거율을 보이는 부레옥잠을 수질 정화 처리 체계 (FAMS: Floating Aquatic Macrophyte based treatment System)에 이용하여 (Reddy and Tucker 1983, Orth and Sapkota 1988) 오염된 수질의 생물감시자 (biomonitor)로서 응용하고 있다. FAMS는 화학물질을 이용한 정화 system과는 달리 2차적으로 발생하는 부산물에 의한 독성 피해가 없어서 생태계의 파괴없이 수질 정화가 가능한 방법이다.

본 연구는 우리 나라 해안가에 서식하는 금소리쟁이를 이용하여 임해공단 주변의 중금속 오염을 제거할 수 있는지에 초점을 맞추어 내성기작으로서 카드뮴과 아연의 식물체내의 축적과 중금속 스트레스하에서도 정상적인 대사활동을 영위할 수 있는 특수한 생리적 현상인 metal-binding protein (MBP)을 조사하였다. 본 연구의

목적은 식물을 이용해서 카드뮴과 아연에 오염된 생태계를 정화하는 방안을 모색하고 그 내성기작으로서의 MBP를 biomarker로 이용하기 위한 기초자료를 얻는데 있다.

## 재료 및 방법

### 재 료

본 실험에 사용한 금소리쟁이는 광양산업 과학기술연구소에서 분양받아 pot에 심어 조도 8,000 Lux, 습도 70%, 온도 25°C, 명 14시간, 암 10시간 조건으로 growth chamber에서 재배했다. 지상부가 약 7 cm 가량 성장한 유식물을 2ℓ 폴리에틸렌 비이커에 20개체씩 이식하고, 합성배양액으로 수경재배를 하여 실험에 사용하였다. 수경재배 기간동안 배양액은 1주일에 한번씩 교체하였고, 식물체는 스폰지에 고정하여 용액 위에 떠 있도록 하였으며, 소형 에어펌프를 사용하여 뿌리에 산소를 공급하는 동시에 용액이 잘 혼합되도록 하였다.

### 방 법

#### 1. 금소리쟁이의 부위별 중금속 축적량 조사

배양액 1.5ℓ에 CdCl<sub>2</sub>로 1.25, 2.5, 5.0mg Cd/ℓ과 ZnSO<sub>4</sub>로 5, 10, 20mg Zn/ℓ으로 처리한 처리구와 대조구에 노출 5일 후 금소리쟁이를 채취하여 증류수로 여러 번 씻은 후 지상부 (잎, 줄기)와 지하부 (뿌리)로 나누어 동결 건조기에서 36시간 건조시킨 후 호박 막자사발에서 분쇄하여 microwave (MDS 2000)에서 digestion 시켜 원자흡광분석기 (Perkin-Elmer, AAnalyst 100)로 카드뮴과 아연의 농도를 측정하였다. 3반복으로 측정 후 SAS Package를 이용하여 통계 처리하였다.

#### 2. Metal-binding protein 분리

배양액 1.5ℓ에 CdCl<sub>2</sub>로 1.25, 2.5, 5.0mg Cd/ℓ과 ZnSO<sub>4</sub>로 5, 10, 20mg Zn/ℓ으로 처리한 처리구와 대조구를 growth chamber에서 5일간 재배하였다. 재배 조건은 앞의 실험방법과 동일한 조건으로 하였다. 실험재료로 금소리쟁이 뿌리를 채취하여 증류수로 여러 번 씻은 후 Rauser (1984)방법으로 metal-binding protein을 분리하였다.

뿌리조직 추출과정은 물기를 제거한 뿌리 (약 4g)에 extraction buffer (5 mM ascorbate, 1 mM 2-mercaptoethanol, 20  $\mu$ M KCN, 20 mM Tris-HCl, pH 8.0) 약 4 ml를 가하여 호박 막자사발로 완전히 갈아서 4점의 가아제 천으로 여과한 후 2 ml의 buffer를 가하여 재여과하였고, 20,000 g에서 20분 동안 원심분리하여 상층액을 회수하였다. 뿌리조직 추출물은 60°C에 3분 동안 방치한 후 -70°C Deep freezer에 보관하였다가 실험에 사용하였다. 추출물의 단백질의 양은 Bovine Serum Albumin (BSA)을 표준 시료로 Lowry (1951)의 방법으로 결정하여 전체 단백질 함량이 2 mg/ml 되도록 동일하게 상층액을 취하여, 10 mM Tris-HCl Buffer, pH 8.0으로 평형시킨 QAE Sephadex A-25 (sigma) resin을 column (1.6 cm $\times$ 7 cm)에 packing한 후 200 ml gradient 0~800 mM NaCl, 10 mM Tris-HCl buffer, pH 8.0을 31~32 ml/h로 흘려서 130 drop fraction으로 받은 각각의 분획들을 단백질량은 UV-VIS spectrometer (Hitach, U-2000)로 280 nm와 254 nm에서 흡광도를 측정하고, 중금속의 농도는 원자 흡광분석기로 측정하였다.

### 결과 및 고찰

#### 금소리쟁이의 카드뮴과 아연의 축적량

금소리쟁이의 중금속 체내 축적 경향은 노출 농도보다 80~850배 이상 생물농축하였다 (Fig. 1). 카드뮴은 지상부에서 건량 25 mg당 대조구에서는 0.12  $\mu$ g을 생물농축하였고, 1.25, 2.5, 5 mg Cd/l 처리구에서는 3.17, 5.41, 19.37  $\mu$ g을 생물농축하였다. 그리고 지하부에서는 대조구에서 0.19  $\mu$ g, 1.25, 2.5, 5 mg Cd/l 처리구에서는 21.81, 43.73, 37.18  $\mu$ g을 생물농축하였다. 아연은 지상부에서 건량 25 mg당 대조구에서는 1.77  $\mu$ g을 생물농축하였고, 5, 10, 20 mg Zn/l 처리구에서는 10.02, 19.87, 32.03  $\mu$ g을 생물농축하였다. 그리고 지하부에서는 대조구에서 3.35  $\mu$ g을 생물농축하였고, 5, 10, 20 mg Zn/l 처리구에서는 52.98, 86.15, 115.88  $\mu$ g을 생물농축하였다. 이는 부레옥잠에 의한 납, 카드뮴 및 수은 등의 흡수량이 저농도의 처리구보다 고농도의 처리구에서 높게 검출된다는 Muramoto와 Oki (1983)의 실험 결과와 수생식물인 *Eldoea nuttallii*의 잎과 뿌리에서 아연과 구리의 흡수량이 농도에 따라 증가한다고 보고한 Werff와 Ernst (1979)의 실험 결과와 일치하였다.

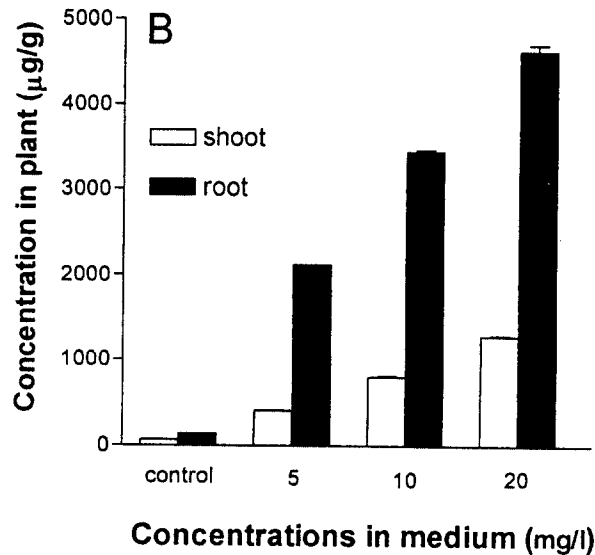
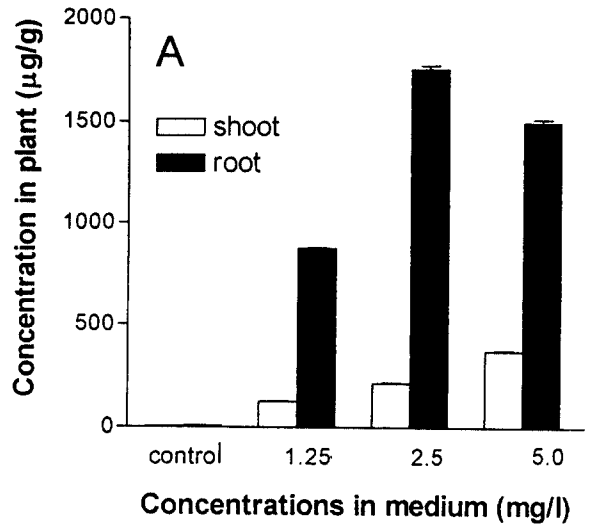


Fig. 1. Bioconcentration of cadmium, zinc in shoot and root of *Rumex maritimus* in medium for 5days. A : Cd, B : Zn treated.

또한 지상부보다는 지하부에 카드뮴은 대략 3.5~8.0배 이상, 아연은 대략 3.5~5.5배 이상 축적한 것으로 나타나 금소리쟁이는 뿌리에 선택적으로 중금속을 축적함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 부레옥잠, 겨이삭, 옥수수, 소리쟁이, 마름, 그리고 고마리 등에서 나타난 부위별 중금속 흡수량에 대한 실험 결과와 유사한 경향을 나타냈다. 미나리도 카드뮴과 아연 모두 지상부보다 지하부에 더 많이 축적했고 카드뮴은 지상부에는

지하부의 1/30 정도밖에 축적하지 않는 것으로 나타났다 (이 1996). 이는 뿌리세포에 흡수된 카드뮴이 지상부로 이동하지 않았음을 나타내는 것이다. 그러나 금소리쟁이는 카드뮴을 지하부의 1/8~2/7 정도로 지상부에 축적하였는데, 이는 종에 따라 줄기와 잎 등으로 이동하는 중금속량이 다를 수 있다 (O'Keefe *et al.* 1984). 잎과 줄기에서 농축된 중금속 농도에 대해 Jones 등 (1973) 및 Erickson과 Mortimer (1975)는 토양층에 함유된 중금속을 뿌리에서 일차적으로 농축하고 이를 다시 잎과 줄기로 이동시킴에 따라 잎과 줄기의 중금속 함량의 변화는 뿌리의 중금속 농축량에 의해서 영향을 받는다고 했다. 이는 금소리쟁이의 카드뮴 제거능력을 증가시키는 중요한 요인의 하나일 것이다. 노출 농도보다 금소리쟁이의 잎과 줄기에 농축된 중금속의 농도가 높게 나타난 것은 배양액에 함유된 중금속 이온이 확산을 통해 뿌리로 전이되고 뿌리에서 일차 농축된 중금속이 뿌리로부터 다시 식물체의 잎과 줄기로 전이되는 반면, 뿌리에 작용하는 물질 이동, 모세관 현상 및 중력 효과 등과 같은 작용에 의해 뿌리로부터 분비되는 중금속 이온의 양이 극히 적기 때문이라고 사료된다. 또한, 중금속의 노출 농도와 금소리쟁이의 부위에 따른 축적량간에는 유의적인 차이를 보였다 ( $p \leq 0.01$ ). 이는 관속 식물 내에 농축된 중금속량은 식물의 서식지인 토양이나 물의 중금속 함량에 영향을 받는다 (Franzin and McFarlane 1980)는 여러 연구 결과와 일치한다.

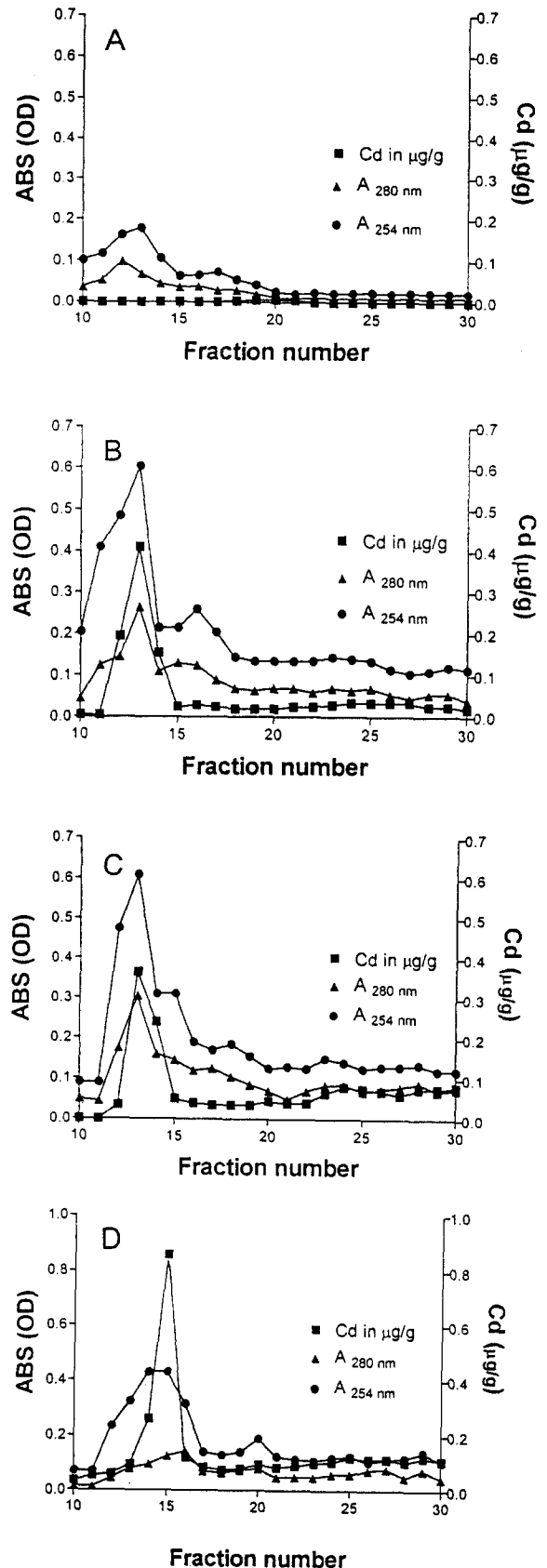
## Metal-binding protein의 분리

### 1. Metal-binding protein 유도

QAE Sephadex A-25의 elution profile의 중금속 peak를 보인 부분에서 방향족 아미노산을 감지하는 280 nm와 -SH기를 가진 아미노산을 감지하는 254 nm의 흡광도가 제일 큰 차이를 보이며, 또 이 부분에서 254 nm 흡광도에서 peak를 보인다 (Fig. 2, Fig. 3). 이것으로 metal-binding protein (MBP)이 방향족 아미노산을 적게 가지고 있고, 시스테인을 많이 가진 단백질인 것을

**Fig. 2.** QAE Sephadex A-25 elution profile of root extract of *Rumex maritimus* cultivated in medium.

A : control, B : 1.25 mg Cd / ℓ, C : 2.5 mg Cd / ℓ, D : 5.0 mg Cd / ℓ treated. The Cd-binding protein fractions were eluted by linear gradient of NaCl(....., 0~ 800 mM).



고려하면 elution profile을 볼 때 금소리쟁이의 뿌리에서 MBP가 유도되었음을 알 수 있다. 이런 결과는 여러 실험 결과와 일치한다 (Rauser 1984).

본 실험의 결과는 Cd-binding protein과 Zn-binding protein이 모두 15분획 근처에서 salt gradient가 100 mM 정도의 농도일 때 MBP가 분리되어져서 다른 고등 식물의 anion exchange chromatography에서의 elution profile과는 다르게 빨리 분리되어 나왔다 (Rauser 1984). 그것은 추출물의 양이 적었기 때문으로 사료된다. 그래서 증금속에 의해 유도되는 MBP가 한 종류인지 증금속 종류에 따라 다른지는 밝힐 수 없으나, 미나리의 뿌리 (이 1996)와 벼의 뿌리 (Davin *et al.* 1978)에서는 카드뮴과 아연에 각각 다른 MBP가 결합한다고 알려져 있다.

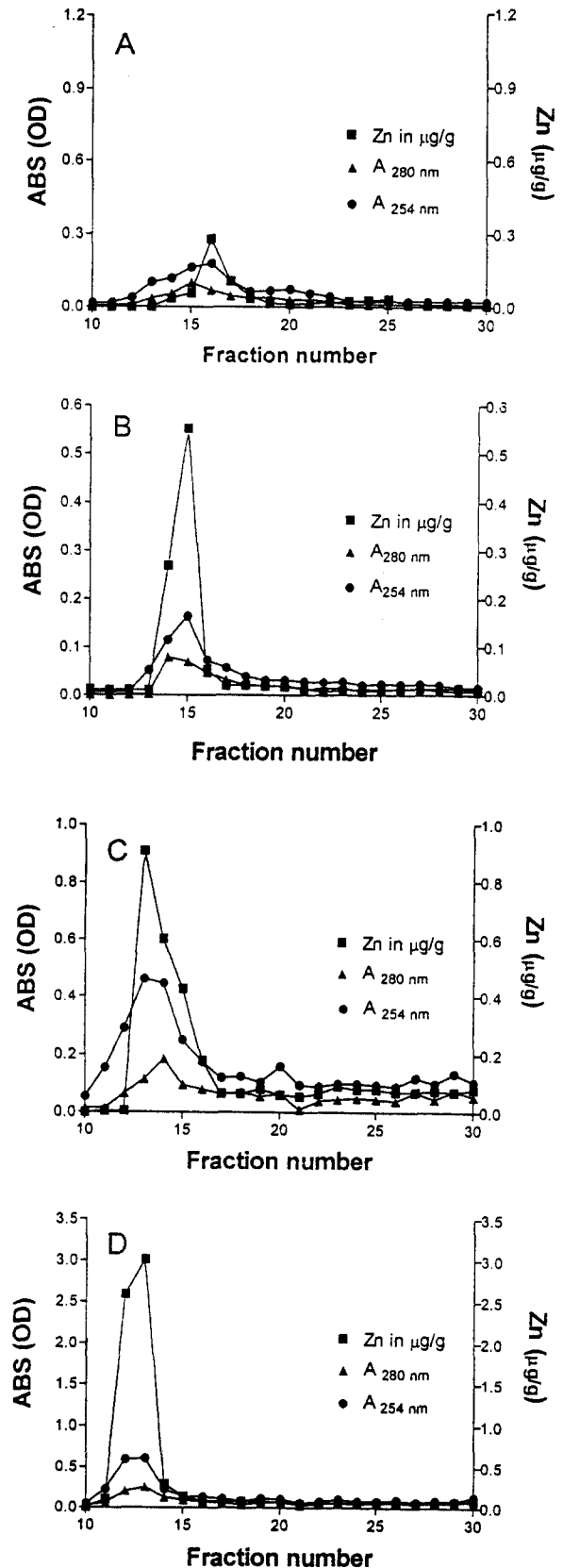
**2. 배양액의 카드뮴과 아연의 농도와 metal-binding protein과의 관계**

Fig. 2. A와 Fig. 3 A는 카드뮴과 아연을 처리하지 않은 대조구로 금소리쟁이가 원래 갖고 있는 단백질량과 증금속량을 보여준 것인데, MBP는 어느 정도 자연 상태에서 소량 존재하다가 증금속에 노출되면 다량 유도되는 것을 Fig. 2와 Fig. 3에서 알 수 있었다. 그리고 254 nm와 280 nm의 흡광도 증감의 경향이 같게 나타났으며 254 nm의 흡광도가 280 nm에서의 흡광도보다 약 2.6배 높게 나타났다. 이는 담배와 양배추에서 Cd-binding complexes의 fraction의 254 nm의 흡광도가 280 nm에서의 흡광도보다 약 3배 높게 나타난 결과와 비슷하다 (Wagner and Trotter 1982).

Elution profile에서 카드뮴은 대조구보다 노출 농도 1.25 mg Cd/l에서 증금속의 양이나 단백질의 흡광도가 높게 나타났으나, 노출 농도 2.5 mg Cd/l에서는 비슷한 수치로 나타났고 노출 농도 5.0 mg Cd/l에서는 증금속의 양은 증가하였으나 단백질의 양이 감소하였다. 이는 부위별 증금속 축적량 조사시 4일째 생장 관찰에서 노출 농도 5.0 mg Cd/l에서는 황화현상을 보이는 것과 관계가 있는 것 같다. Elution profile에서 아연은

**Fig. 3.** QAE Sephadex A-25 elution profile of root extract of *Rumex maritimus* cultivated in medium.

A : control, B : 5.0 mg Zn/l, C : 10.0 mg Zn/l, D : 20.0 mg Zn/l treated. The Zn-binding protein fractions were eluted by linear gradient of NaCl(....., 0~800 mM).



대조구에서보다 노출 농도가 증가할수록 중금속의 280 nm과 254 nm의 흡광도가 모두 증가함을 보였다. 아연은 카드뮴과 다르게 고농도에서도 5일 동안의 노출기간 동안에 황화현상을 보이지 않았는데, 이는 고농도에서도 단백질의 양이 증가하는 현상과 관계가 있는 것 같다. 그리고 아연은 대조구와 노출 농도 5.0 mg Zn/l의 단백질양과 비슷하다. 이는 원래 가지고 있는 MBP가 5.0 mg Zn/l에서 흡수한 아연을 결합할 수 있다는 것을 보여준다. 결국 카드뮴과 아연에 높은 농도로 노출될수록 MBP가 증가한다고 볼 수 있다. Ding 등 (1994)은 부레옥잠에서 MBP가 카드뮴량에 비례하여 증가한다고 보고하고 카드뮴량과 MBP의 양이 유의적인 상관관계를 나타낸다고 했다 ( $p \leq 0.001$ ). 그 밖에도 여러 실험 결과에서 카드뮴이 결합한 정도에 비례하여 MBP가 생성된다는 것이 확인되어졌다 (Gupta and Goldsbrough 1991, Obata and Umebayashi 1993, Fett et al. 1994). De Vos 등 (1992)은 *Silene cucubalus*를 구리에 노출시키면 phytochelatin의 합성이 증가하고 glutathione의 양이 감소한다고 했다. MBP는 중금속 이온의 반작용을 나타내므로 중금속 독성 정도를 나타내는 biomarker의 역할을 할 수 있을 것으로 기대되어진다. MBP가 최대량 생성될 수 있는 양과 식물세포가 내성을 가질 수 있는 중금속 이온의 관계가 직접적이라고 밝혀졌다 (Jackson et al. 1987). MBP의 축적은 환경에서 중금속에 대한 특수한 반응이므로 생물농축을 연구하는데 상당한 매개 변수로서 MBP를 사용할 수 있는 가능성을 제시한다. MBP의 축적은 금속 이온을 탐지하기가 어려울 때 중금속량을 직접적으로 결정하는 원자흡광 분석기처럼 중금속을 인지할 수 있는 가치가 있다고 알려져 있다 (Ding et al. 1994). MBP의 양은 중금속 이온의 종류에 관계없이 수질의 중금속 오염을 biomonitor할 수 있는 매개 변수로 세포 생물 분석학에 기초를 두는 biomonitor와 비교할 때, MBP의 축적은 시간을 덜 소비하고, 더 총괄적이고 감도가 좋을 수 있다.

## 적 요

금소리쟁이를 이용하여 임해공단 주변의 중금속 오염을 biomonitor할 수 있는지에 중점을 두어 내성기작으로서 축적과 metal-binding protein (MBP)의 유도에 대해 조사하였다. 금소리쟁이의 부위별 중금속 축적량의 차이와 특히, 축적량이 높은 뿌리의 MBP를 조사하였다. 금소리쟁이의 부위별 조사에서는 지상부보다는 지하

부에 약 3.6~8.0배 이상 중금속을 축적하는 것으로 나타나 뿌리에 더 선택적으로 축적함을 알 수 있었다. 그리고 중금속 독성에 대한 근본적인 내성을 나타낼 수 있게 한 MBP는 시스테인을 많이 함유하고 있어 254 nm에서의 흡광도가 높게 나타나고 그것에 비해 방향족 아미노산은 매우 적게 함유되어 있어 280 nm에서의 흡광도는 낮게 나타나 두 흡광도 사이에 큰 차이를 나타낸다. MBP 유도를 anion exchange chromatography를 통해 10~20분획에서 확인하였고 배양액의 노출 농도가 높아질수록 MBP가 유도된 분획의 중금속 함량이 증가하였다. 이러한 결과는 MBP가 중금속의 생물농축 정도를 나타내는 biomarker의 역할을 할 수 있다는 것을 보여 준다.

본 연구는 금소리쟁이의 중금속 제거능이 내성에 의한 결과임을 밝혔고, 수질의 중금속 오염 biomarker로서 MBP를 이용할 수 있으리라는 가능성을 제시하고 있다.

## 인 용 문 헌

- 이단래, 최연호. 1980. 낙동강수계의 수질보전을 위한 조사연구. 환경보전 1: 39~55.
- 이수연. 1996. 미나리 (*Oenanthe stolonifera* DC.)의 Cd, Zn 제거능과 내성에 관한 연구. 한국생태학회지 19: 519~528.
- Davin, P., E. Marante, J.M. Mousny and C. Myhe-naere. 1978. Absorption, distribution and binding of cadmium and zinc in rice plants. Plant and Soil 50: 329~341.
- De Vos, C.H.R., M.J. Vonk, R. Vooijs and H. Schat. 1992. Glutathione depletion due to copper-induced phytochelatin synthesis causes oxidative stress in *Silene cucubalus*. Plant Physiol. 98: 853~858.
- Ding, X., J. Jiang, Y. Wang, W. Wang and B. Ru. 1994. Bioconcentration of cadmium in Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in relation to thiol group content. Environmental Pollution 84: 93~96.
- Erickson, C. and D.C. Mortimer. 1975. Mercury uptake in rooted higher aquatic plants; Laboratory studies. Verhandlungen der Internationalen Verinigung Für theoretische und angewandte limnologie 19: 2087~2093.

- Fett, J.P., J. Cambria, M.A. Oliva, C.P. Jordao. 1994. Absorption and distribution of cadmium in water hyacinth plants. *Jr. of Plant Nutrition* 17: 1219~1230.
- Franzin, W.G. and G.A. McFarlane. 1980. An analysis of the aquatic macrophyte, *Myriophyllum exalbescens*, as an indicator of metal contamination of aquatic ecosystems near a base metal smelter. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 24: 597~605.
- Gupta, S.C. and P.B. Goldsbrough. 1991. Phytochelatin accumulation and cadmium tolerance in selected tomato cell lines. *Plant Physiol.* 97: 306~312.
- Hale, M.G. and B.A. Whitton. 1978. Zinc, cadmium and lead in water, sediments and submerged plants of the Derwent reservoir, Northern England. *Water Res.* 12: 307~319.
- Jackson, P.J., C.J. Vnkefer, J.A. Doolen, K. Watt and N.J. Robinson. 1987. Poly ( $\gamma$ -glutamyl cysteinyl)-glycine : its role in cadmium resistance in plant cells. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 84: 6619~6623.
- Jones, L.H.P., C.R. Clement and M.J. Hopper. 1973. Lead uptake from solution by Perennial ryegrass and it's transport from roots to shoots. *Plant and Soil* 38: 403~414.
- Muramoto, S. and Y. Oki. 1983. Removal of some heavy metal from polluted Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 30: 170~77.
- Obata, H. and M. Umebayashi. 1993. Production of SH compounds in higher plants of different tolerance to Cd. In : Barrow NJ. ed. *Plant nutrition-from genetic engineering to field practice*. Dordrecht. The Netherlands : Kluwer Academic Publishers. pp. 791~794.
- O'Keefee, D.H., J.K. Hardy and R.A. Rao. 1984. Cadmium uptake by the water hyacinth : Effects of solution factors. *Environ. Pollut. (Ser. A)* 34: 133~147.
- Orth, H.M. and D.P. Sapkota. 1988. Upgrading a facultative pond by implanting water hyacinth. *Wat. Res.* 22: 1503~1511.
- Rausser, W.E. 1984. Isolation and partial purification of cadmium-binding protein from roots of the grass *Agrostis gigantea*. *Plant Physiol.* 74: 1025~1029.
- Reddy, K.R. and J.C. Tucker. 1983. Growth and nutrient uptake of water hyacinth on effect of nitrogen production. *J. Environ. Qual.* 37: 236~246.
- Smlide, K.W. 1981. Heavy metal accumulation in crops grown on sewage sludge amended with metal salts. *Plant and Soil* 6: 3~14.
- Wagner, J.G. and M.M. Trotter. 1982. Inducible cadmium binding complexes of cabbage and tobacco. *Plant Physiol.* 69: 804~809.
- Werff, M.M. and W.H.O. Ernst. 1979. Kinetics of copper and zinc uptake by leaves and roots of on aquatic plant, *Elodea nuttallii*. *Z. Pflanzsenphysiol.* 92: 1~9.

(1998년 3월 5일 접수)