

카드뮴에 오염된 토양에서 성장한 애기장대의 식물기관에 축적된 카드뮴 농도

박 종 범

신라대학교 의생명과학대학 생물과학과
(2008년 5월 28일 접수; 2008년 8월 8일 수정; 2008년 8월 8일 채택)

Accumulated Concentration of Cadmium in the Plant Organs of *Arabidopsis thaliana* Grown in the Soil Contaminated with Cadmium

Jong-Bum Park

Department of Biological Sciences, Silla University, Busan 617-736, Korea
(Manuscript received 28 May, 2008; revised 8 August, 2008; accepted 8 August, 2008)

Abstract

This study was performed to examine the accumulated concentrations (conc.) of cadmium (Cd) in the organs of *Arabidopsis thaliana* grown in the soil with different conc. of Cd. The official standard conc. of Cd of pollutant exhaust notified by the Korean ministry of environment (0.1 mg/L) and ten times higher (1 mg/L) and fifty times higher (5 mg/L) conc. and no Cd in the soil as control were used for this investigation. The results showed that accumulated conc. of Cd in the stems of plant grown in the soil with different conc. (0.1, 1 and 5 mg/L) were increased 9%, 24% and 286% respectively, compared with normal plant stem. The accumulated conc. of Cd in the leaf of plant grown in the soil with official standard conc. and conc. ten times higher and conc. fifty times higher were increased 3%, 22% and 453%, respectively, compared with normal plant leaf. The accumulated conc. of Cd in the root of plant grown in the soil with 0.1 and 1 mg/L conc. of Cd were increased 6%, 19%, respectively, compared with normal plant root. However, it was observed about 84% of increased accumulation of the Cd in the root of plant, when highest (5 mg/L) conc. was used. The accumulated conc. of Cd in the different organs of *Arabidopsis thaliana* were increased according to increase of Cd conc. in the soil. When official standard conc. and ten times higher conc. of Cd were used, the accumulated conc. of Cd increased average 6%, 21%, respectively, compared with normal plant organ, and the accumulated conc. of Cd between leaf, stem and root were not significant. However, the accumulated conc. of Cd in the plant organs grown in the conc. fifty times higher were increased about 285%, compared with normal plant. In addition, the accumulated conc. of Cd in different organs of *Arabidopsis thaliana* exhibited wide differences between organs, that is, stem was increased 118% than root, leaf was increased 256%, 64% than root and stem, respectively. These results show that accumulated conc. of Cd in *Arabidopsis thaliana* with highest (5 mg/L) conc. of Cd in soil, were much higher in the leaf than the stem or root in proportion to the conc. of Cd contaminated within the soil.

Key Words : Cadmium, Accumulated concentration, *Arabidopsis thaliana*, Soil

속을 말하는데, 중금속 중 인체에 해로운 수은과 카드뮴, 납 등은 유해중금속이라고 할 수 있다. 유해중금속은 산업폐수, 쓰레기 처리장의 침출수, 자동차 배기가스, 하수처리장, 광산, 화학비료 등에서 배출되어 토양과 하천을 오염시켜 중요한 환경문제를 유발 시킨다¹⁾. 유해중금속은 스트레스와 마찬가지로 식물의 생리적 작용에 변화를 유발하여 성장력 감소나 전체적인 식물생장을 극도로 억제시키기도 한다²⁾. 어떤 식물은 비교적 높은 농도의 중금속을 식물체의 피해 없이 흡수하거나 축적할 수 있다. 이러한 중금속의 독성에 반응하는 식물에 대한 많은 연구에도 불구하고 고등식물의 중금속 축적과 중금속 저항성의 기작에 관한 연구보고는 많지 않다^{3,4)}.

카드뮴은 금속을 정련할 때의 부산물로서 나오는데, 오염의 발생원은 금속의 채광, 정련에 따른 것이 대부분이다. 최근에는 공장폐수 등에 함유되어 있는 카드뮴에 의한 식품의 오염, 특히 쌀의 오염이 밝혀져서 공해문제로 대두되었다. 카드뮴은 소화기나 호흡기, 피부 등을 통해서 몸 안에 흡수될 수 있으며, 체내에 들어온 카드뮴은 간으로 이동되어 저분자 단백질과 결합되고 주로 간과 신장에 저장된다. 또한 카드뮴은 신장을 통해 몸 밖으로 배출된다고는 하지만 대부분의 양은 배출되지 않고 신장의 피질이나 간에 축적되어 중독을 일으키게 된다. 따라서 카드뮴에 중독 될 경우 시간이 경과 할수록 신장피질과 간에 카드뮴 축적량은 점점 늘어나게 된다. 카드뮴 과잉 축적으로 우리 몸에 나타나는 증상은 다양한데, 먼저 심장과 혈관구조에 영향을 주며, 칼슘대사를 억제하고 후각중추 장애를 일으키며, 골연화증, 생식장애피부염, 신장 기능저하, 폐 기능장애, 간 기능장애 등의 다양한 증세가 나타난다^{5,6)}. 카드뮴은 아연이나 구리처럼 필수중금속이 아니고 고등식물을 포함하여 모든 생물체에 독성물질이다. 따라서 식물세포는 카드뮴의 독성작용을 중화시키기 위하여 많은 방어기작을 촉진 시킨다⁷⁾. 많은 식물에서 카드뮴과 같은 중금속의 독성 제거가 phytochelatins (PCs)라고 하는 cysteine-rich peptide의 합성과 관련이 있음이 보고되었다^{3,8)}. 이런 연구 결과 카드뮴이 cysteine thiols에 의해 결합되는 곳에 비독성의 PCs-Cd 복합체가 존재하는 것으로 보고되었다. 그러나 *in vivo*에서 카드뮴의 독성제거와 PCs-Cd 복합체의

형성에 관한 연구는 아직까지 보고된바 없다⁹⁾.

애기장대(*Arabidopsis thaliana*)는 십자화과 장대나물속의 일년생 초본식물로서 식물학 연구에서 모델식물로 광범위하게 이용되고 있다^{10,11)}. 저자는 애기장대를 실험재료로 하여 여러 가지 농도의 카드뮴이 애기장대의 잎, 줄기, 뿌리 등의 생장에 미치는 영향을 연구하여 보고한 바 있다¹²⁾. 그러나 토양 속에 축적된 카드뮴에 노출된 식물에서 식물체 내의 각 영양기관에 축적된 카드뮴의 농도를 조사한 연구결과는 아직 보고된 바 없다. 따라서 본 연구는 이전 연구의 후속연구로 환경부고시 오염물질 배출기준농도와 이보다 10배, 50배 높은 농도의 카드뮴을 첨가한 토양에서 생장한 애기장대 식물체의 줄기, 뿌리, 잎 등 각 영양기관에 축적된 카드뮴의 농도를 조사, 연구하였다. 이러한 연구는 중금속에 내성을 가지는 식물의 연구 또는 식물체를 이용한 중금속 제거에 대한 기초적인 자료를 제공하게 될 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

애기장대(*Arabidopsis thaliana*) Col-O 종자는 미국 Ohio State University의 Arabidopsis Biological Resource Center (ABRC)에서 분양받아 실험재료로 사용하였으며, 애기장대에 처리한 카드뮴은 시판중인 표준용액(Kanto Chemical Co.)을 구입하여 사용하였다.

2.2. 애기장대의 배양

애기장대 종자를 원예용 상토(한아름, 신성케미컬)가 담긴 묘판에 파종한 후 랩을 씌워 2일 동안 4℃에서 저온 처리한 다음 식물생장배양기에 옮겨서 배양하였다. 배양 약 2주 후면 싹이 나오는데 이때 랩을 제거하고 3-4일 마다 계속 수분상태를 점검하여 적절한 습도가 유지되도록 수시로 증류수를 공급하여 주었다. 식물생장배양기내의 환경조건은 16시간의 명 처리와 8시간의 암 처리로 조성된 광주기하에서 온도는 23±1℃로, 습도는 약 80%로 유지되도록 조절하여 주었다.

2.3. 카드뮴 처리

식물생장배양기내에서 약 15일 정도 배양한 애기

장대에 환경부에서 고시한 오염물질 배출기준치 농도(0.1 mg/L)와 이보다 10배(1 mg/L), 50배(5 mg/L) 높은 농도로 제조한 3가지의 카드뮴 용액을 각각 처리하였으며, 대조구는 카드뮴 용액을 처리하지 않고 증류수를 공급하였다. 카드뮴 용액 처리는 애기장대에 습도를 유지시키기 위하여 공급하여 주는 증류수에 카드뮴 용액을 각각 농도별로 첨가하여 4일 간격으로 250 ml 씩 애기장대(25개체)에 공급하여 45일간 배양하였다.

2.4. 식물체 영양기관 내 카드뮴 측정

애기장대에 3가지 다른 농도의 카드뮴 용액을 처리하여 45일간 배양한 성체식물의 각 영양기관에 축적된 카드뮴의 농도는 원자흡광분광계(atomic absorption spectrophotometer, Thermo Jarrel Ash AA-scan 4)를 사용하여 측정하였다. 애기장대 식물체에 묻어 있던 원예용 상토를 깨끗이 세척하여 물기를 제거한 다음 줄기, 뿌리, 잎 등을 분리하여 절단한 후 약 48시간 동안 동결 건조시킨 재료를 1 g씩 100 ml의 질산에 녹여서 건조시킨 후 냉각하여 30 ml의 염산으로 다시 분해시키고 불용액을 여과한 다음 100 ml 플라스크에 정량하였다. 동일한 방법으로 준비된 blank 용액과 같이 air-acetylene 불꽃을 이용하여 326.1 nm 파장에서 5 ppm, 10 ppm, 15 ppm으로 각각 준비된 표준용액을 사용하여 검량선을 작성하고 blank용액과 준비된 시료 순으로 카드뮴 성분을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 줄기 내 카드뮴 농도

3가지 농도의 카드뮴 용액을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대의 줄기 내에 축적된 카드뮴 농도를 측정한 결과는 Fig. 1과 같다. 토양에 첨가한 카드뮴의 농도가 환경부 고시 오염물질 배출기준농도(0.1 mg/L)와 이보다 10배 높은 농도(1 mg/L)에서 성장한 애기장대 줄기에 축적된 카드뮴 농도는 카드뮴이 첨가되지 않은 토양에서 성장한 애기장대 정상식물의 줄기에서보다 각각 약 9%, 24% 증가하여 비교적 낮은 증가율을 나타내었다(Fig. 1). 반면에 50배 높은 농도(5 mg/L)의 카드뮴을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대의 줄기에 축적된 카드뮴 농도는 정상

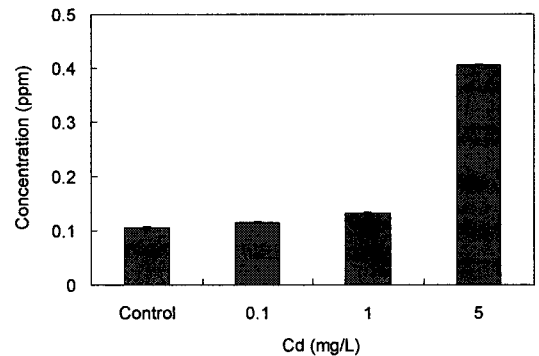


Fig. 1. Cadmium concentration in the stem of *Arabidopsis thaliana* treated with cadmium for 45 days.

식물 줄기보다 약 286% 증가하여 매우 높은 증가율을 나타내었다(Fig. 1). 이러한 결과는 오염물질 배출기준농도(0.1 mg/L)와 이보다 10배 높은 농도(1 mg/L) 및 50배 높은 농도(5 mg/L) 등 3가지 농도의 카드뮴 용액을 애기장대에 처리하여 줄기생장에 미치는 영향을 조사한 결과, 3가지 농도의 카드뮴을 처리한 식물의 줄기생장이 모두 정상 식물의 줄기생장과 유사한 성장을 나타내었다는 연구보고¹³⁾와 비교되는 결과이다. 이러한 연구보고는 환경부 고시 오염물질 배출기준 농도보다 50배 높은 농도의 카드뮴을 처리한 애기장대에서도 카드뮴이 애기장대의 줄기생장에 별 다른 영향을 미치지 않았음을 나타내고 있다. 이와 같은 연구보고와 본 실험결과는 토양 속에 오염된 카드뮴의 농도가 증가함에 따라 줄기생장은 크게 영향을 받지 않았으나, 줄기 속에 축적되는 카드뮴의 농도는 증가하였음을 나타내고 있다. Baker 등¹⁴⁾은 십자화과 식물인 *Thlaspi caerulescens*은 토양 속에 축적된 카드뮴농도보다 약 10배나 높은 카드뮴을 경엽부에 축적하고 있는 것으로 보고하고, 이 식물을 카드뮴 hyperaccumulator 라고 하였다. Howden 등⁵⁾은 *Brassica juncea*, *B. napus*, *B. rapa* 등 배추속 식물 3종과 *Thlaspi caerulescens*를 중금속에 오염된 토양에서의 경엽부 생중량을 비교하였을 때 배추속 3종과 *Thlaspi caerulescens*의 카드뮴 제거는 거의 비슷한 것으로 보고하였다. 이런 결과는 오염물질 배출기준농도와 이보다 10배 및 50배 높은 농도의 납에 오염된 토양에서 성장한 애기장대의 줄기에 축적된 납의 농도는 각 농도별로 큰 차이 없이 약 20~30% 증가하여 비

교적 유사한 증가율을 나타내었다는 연구보고¹⁵⁾와는 다른 결과로 이것은 중금속의 종류가 다르기 때문에 줄기에 축적되는 정도도 다르기 때문일 것으로 사료된다.

3.2. 잎 내 카드뮴 농도

3가지 농도의 카드뮴 용액을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대의 잎 내에 축적된 카드뮴 농도를 측정한 결과는 Fig. 2와 같다. 환경부고시 오염물질 배출기준농도(0.1 mg/L)와 이보다 10배 높은 농도(1 mg/L)의 카드뮴을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대의 잎에 축적된 카드뮴의 농도는 카드뮴을 첨가하지 않은 토양에서 성장한 애기장대 정상식물의 잎에 축적된 카드뮴의 농도와 비교하여 각각 약 3%, 22% 증가하여 비교적 낮은 증가율을 나타내었다(Fig. 2). 그러나 50배 높은 농도(5 mg/L)의 카드뮴을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대의 잎에 축적된 카드뮴 농도는 정상 식물 잎보다 약 453% 증가하여 매우 높은 증가율을 나타내었다(Fig. 2). 이러한 증가율은 줄기 내에 축적된 카드뮴의 농도와 비슷한 경향을 나타내었다. 이 결과는 오염물질 배출기준농도(0.1 mg/L)와 이보다 10배 높은 농도(1 mg/L) 및 50배 높은 농도(5 mg/L) 등 3가지 농도의 카드뮴 용액을 각 농도별로 처리한 애기장대의 전체적인 잎 성장을 정상 식물의 잎 성장과 비교한 결과, 3가지 농도의 카드뮴용액을 처리한 애기장대의 모든 잎 성장은 정상식물의 잎 성장과 비교하여 전체적으로 촉진되었으며, 특히 오염물질 배출기준농도보다 10배 높은 농도(1 mg/L)에서는 잎 개수와 잎 표면적이

증가하는 등 전반적인 잎 생장이 매우 촉진되었다는 연구보고¹³⁾와는 비교되는 결과이다. 이러한 연구 보고는 토양 속에 오염물질 배출 기준농도보다 50배가 높은 농도의 카드뮴이 축적되어도 애기장대의 잎 생장은 촉진되었음을 나타낸다. 이와 같은 연구 보고와 본 실험결과는 토양 속에 오염된 카드뮴의 농도가 증가함에 따라 애기장대의 잎 생장은 촉진되었으며, 잎 속에 축적되는 카드뮴의 농도 또한 농도에 비례하여 증가하였음을 나타내고 있다. Davis 등¹⁶⁾은 니켈 hyperaccumulator인 *Psychotris douarrei*의 잎은 nonaccumulator인 *Ficus webbianai* 잎보다 약 180배나 더 많은 니켈을 축적하고 있으며, 또한 아연, 크롬, 코발트, 납은 각각 2.5배, 1.5배, 13배, 6.5배 더 높은 농도를 가지고 있음을 보고하였다. 한편 Mazen¹⁷⁾은 *Corchorus olitorius*를 카드뮴(5 µg/ml)에 오염된 토양에서 성장시켰을때 잎에 정상식물보다 20배 높은 카드뮴이 축적되었음을 보고하였다. 본 연구결과는 오염물질 배출기준농도와 이보다 10배 및 50배 높은 농도의 납에 오염된 토양에서 성장한 애기장대의 잎에 축적된 납의 농도는 정상식물의 잎에 축적된 납 농도와 비교하여 약 45~60% 증가하여 각 농도별로 큰 차이 없는 비교적 유사한 증가율을 나타내었다는 연구보고¹⁵⁾와는 다른 결과이다.

3.3. 뿌리 내 카드뮴 농도

3가지 농도의 카드뮴 용액을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대의 뿌리 내에 축적된 카드뮴 농도를 측정한 결과는 Fig. 3과 같다. 토양에 첨가한 카드뮴의 농도가 환경부 고시 오염물질 배출기준농도(0.1

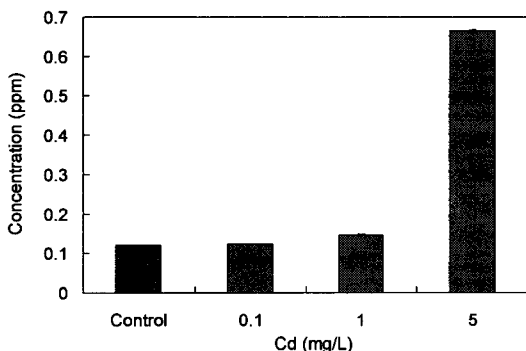


Fig. 2. Cadmium concentration in the leaf of *Arabidopsis thaliana* treated with cadmium for 45 days.

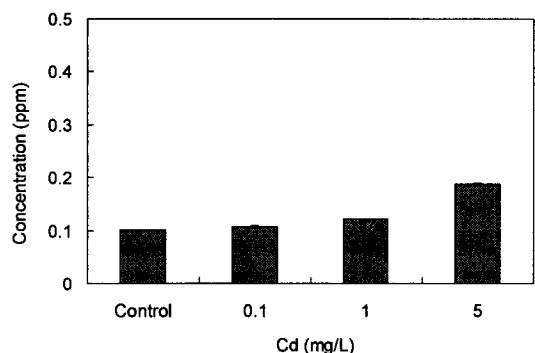


Fig. 3. Cadmium concentration in the root of *Arabidopsis thaliana* treated with cadmium for 45 days.

mg/L)와 이보다 10배 높은 농도(1 mg/L)에서 성장한 애기장대의 뿌리에 축적된 카드뮴 농도는 카드뮴이 첨가되지 않은 토양에서 성장한 애기장대 정상 식물의 뿌리에서보다 각각 약 6%, 19% 증가하여 비교적 낮은 증가율을 나타내었다(Fig. 3). 반면에 50배 높은 농도(5 mg/L)의 카드뮴을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대의 뿌리에 축적된 카드뮴 농도는 카드뮴이 첨가되지 않은 토양에서 성장한 정상 식물 뿌리보다 약 84% 증가하여 비교적 높은 증가율을 나타내었다(Fig. 3). 이러한 결과는 오염물질 배출기준농도(0.1 mg/L)와 이보다 10배 높은 농도(1 mg/L) 및 50배 높은 농도(5 mg/L) 등 3가지 농도의 카드뮴 용액을 애기장대에 처리하여 뿌리 생장에 미치는 영향을 조사한 결과, 3가지 농도의 카드뮴을 처리한 식물의 뿌리 생장이 모두 정상 식물의 뿌리 성장과 거의 유사한 성장을 나타내었다는 연구보고¹³⁾와 비슷한 결과이다. 이러한 연구보고는 환경부 고시 오염물질 배출기준 농도와 이보다 10배 및 50배 높은 농도의 카드뮴을 처리한 애기장대에서도 카드뮴이 애기장대의 뿌리 생장에 거의 영향을 미치지 않았음을 나타내고 있다. 이와 같은 연구보고와 본 실험 결과는 토양 속에 축적된 카드뮴의 농도가 증가함에 따라 뿌리 생장은 크게 영향을 받지 않았으나, 뿌리 속에 축적되는 카드뮴의 농도는 증가하였음을 나타내고 있는데, 이것은 줄기나 잎에 축적된 카드뮴의 농도 증가와는 다른 경향을 나타내었다. 오염물질 배출기준농도보다 50배 높은 농도의 카드뮴이 첨가된 토양에서 성장한 애기장대의 줄기나 잎에 축적된 카드뮴 농도는 정상식물과 비교하여 각각 약 286%, 453% 증가하여 매우 높은 증가율을 나타내었으나, 뿌리에서는 약 84% 증가하여 상대적으로 낮은 증가율을 나타내었다. Salt 등^{18,19)}은 *Brassica juncea*는 뿌리조직 속에 카드뮴을 액체배지에서보다 500배 높은 농도까지 축적할 수 있음을 보고하였고, Dushenkof 등²⁰⁾은 해바라기 뿌리는 우라늄으로 오염된 물로부터 우라늄을 30,000배 농축하였고, Heaton 등²¹⁾은 담배 뿌리는 1-5 ppm 수은이 포함된 액체배지에 노출되었을 때 배지속의 수은 농도를 거의 100배 정도 감소시켰다고 보고하였다. 또한 Yoshihara 등²²⁾은 *Athyrium yokoscense*를 카드뮴이 들어있는 배지에서 조직배양하여 유도된 캘러스조

직과 기관분화된 조직을 조사한 결과 카드뮴 농도가 잎이나 줄기보다 뿌리에서 더 높은 농도가 관찰되었음을 보고하였다. 본 연구는 토양 속에 첨가한 납의 농도가 증가함에 따라 뿌리 내에 축적된 납의 농도도 증가하는 경향을 나타내었으며, 특히 오염물질 배출기준농도보다 50배 높은 농도에서는 약 861%라는 비약적인 증가를 나타내었다는 연구보고¹⁵⁾와는 다른 결과이다. 이러한 결과는 납은 주로 애기장대의 뿌리에 많이 축적되는 반면 토양 속에 축적된 카드뮴의 농도가 증가할수록 애기장대의 뿌리보다는 잎에 더 많은 카드뮴이 축적되었음을 보여주고 있다.

3.4. 식물체 전체 카드뮴 농도

3가지 농도의 카드뮴 용액을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대의 식물체 전체에 축적된 카드뮴 농도를 측정된 결과는 Fig. 4와 같다. 환경부고시 오염물질 배출기준농도(0.1 mg/L)와 이보다 10배 높은 농도(1 mg/L)의 카드뮴을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대의 식물체 내에 축적된 카드뮴의 농도는 카드뮴을 첨가하지 않은 토양에서 성장한 애기장대 정상식물의 체내에 축적된 카드뮴의 농도와 비교하여 각각 약 6%, 22% 증가하여 비교적 낮은 증가율을 나타내었다(Fig. 4). 반면 오염물질 배출기준농도보다 50배 높은 농도(5 mg/L)에서는 약 285% 증가하여 매우 높은 증가율을 나타내었다(Fig. 4). 이러한 결과는 오염물질 배출기준농도(0.1 mg/L)와 이보다 10배 높은 농도(1 mg/L)의 카드뮴 용액을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대 식물체 전체에 축적된

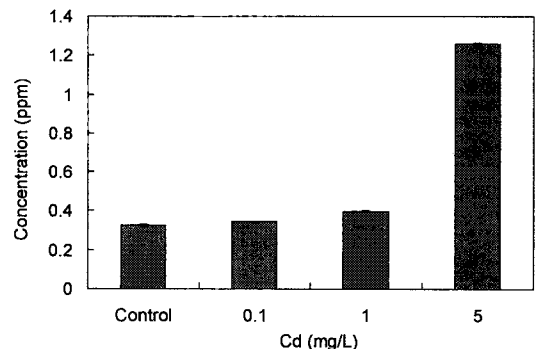


Fig. 4. Cadmium concentration of plant body of *Arabidopsis thaliana* treated with cadmium for 45 days.

카드뮴의 농도는 정상식물체에 축적된 카드뮴 농도보다 평균 약 0.2배 증가하였으나, 오염물질 배출기준농도보다 50배 높은 농도(5 mg/L)의 카드뮴 용액을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대 식물체 내에 축적된 카드뮴의 농도는 정상식물체보다 약 2.8배 증가하였음을 보여주고 있다.

4. 결 론

3가지 농도의 카드뮴을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대(*Arabidopsis thaliana*)에서 식물체에 축적된 카드뮴의 농도를 조사하였다. 환경부 고시 오염물질 배출기준 농도(0.1 mg/L)와 10배 높은 농도(1 mg/L)의 카드뮴이 첨가된 토양에서 성장한 식물의 줄기에 축적된 카드뮴의 농도는 정상 식물의 줄기와 비교하여 각각 약 9%, 24% 증가하였으나, 50배 높은 농도(5 mg/L)의 카드뮴이 첨가된 토양에서 성장한 식물의 줄기에 축적된 카드뮴 농도는 정상식물 줄기보다 약 286% 증가하였다. 오염물질 배출기준 농도(0.1 mg/L)와 10배 높은 농도(1 mg/L)의 카드뮴이 첨가된 토양에서 성장한 식물의 잎에 축적된 카드뮴의 농도는 정상 식물의 잎과 비교하여 각각 약 3%, 22% 증가하였으나 50배 높은 농도(5 mg/L)의 카드뮴이 첨가된 토양에서 성장한 식물의 잎에 축적된 카드뮴 농도는 정상식물 잎보다 약 453% 증가하였다. 오염물질 배출기준 농도(0.1 mg/L)와 10배 높은 농도(1 mg/L)의 카드뮴이 첨가된 토양에서 성장한 식물의 뿌리에 축적된 카드뮴의 농도는 정상식물 뿌리에 비하여 각각 약 6%, 19% 증가하였으나, 50배 높은 농도(5 mg/L)의 카드뮴에서는 약 84% 증가한 것으로 나타났다. 토양 속에 첨가된 카드뮴의 농도가 증가할수록 식물체의 각 기관에 축적된 카드뮴의 농도도 약간씩 증가하여 오염물질 배출기준 농도(0.1 mg/L)와 이보다 10배 높은 농도(1 mg/L)에서는 정상식물의 각 기관보다 평균 약 6%, 21% 증가하였는데, 잎, 줄기, 뿌리사이의 카드뮴 농도 차이는 크지 않았다. 오염물질 배출기준농도보다 50배 높은 농도(5 mg/L)의 카드뮴에서 성장한 식물의 각 기관 내에 축적된 카드뮴 농도는 정상식물보다 약 285% 증가하였으며, 기관별로 차이가 많이 나타나 줄기는 뿌리보다 약 118%, 잎은 뿌리보다 약

256%, 줄기보다 64% 증가한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 토양 속에 오염된 카드뮴의 농도가 증가할수록 애기장대 식물의 뿌리나 줄기보다는 잎에 더 많은 카드뮴이 축적되었음을 나타내고 있다.

참 고 문 헌

- 1) Cobbett C. S., 2002, Phytochelatin and metallothioneins: roles in heavy metal detoxification and homeostasis, *Annu. Rev. Plant Biol.*, 53, 159-182.
- 2) Mazon A. M. A., 2004, Accumulation of four metals in tissues of *Corchorus olitorius* and possible mechanisms of their tolerance, *Biologia Plantarum*, 48, 267-272.
- 3) Hall J. L., 2002, Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance, *J. Exp. Bot.*, 53, 1-11.
- 4) Tari I., Szalai G., Lorincz Z. S., Balint A., 2002, Changes in thiol content in roots of wheat cultivars exposed to copper stress, *Biol. Plant.*, 45, 255-260.
- 5) Howden R., Andersen C. R., Goldsbrough P. B., Cobbett C. S., 1995, A cadmium-sensitive, glutathione-deficient mutants of *Arabidopsis thaliana*, *Plant Physiol.*, 107, 1067-1073.
- 6) Howden R., Andersen C. R., Goldsbrough P. B., Cobbett C. S., 1995, Cadmium-sensitive, *cad1* mutants of *Arabidopsis thaliana* are phytochelatin deficient, *Plant Physiol.*, 107, 1059-1066.
- 7) Toppi L. S., Gabbriellini R., 1999, Response to cadmium in higher plant, *Environ. Exp. Bot.*, 41, 105-130.
- 8) Cobbett C. S., 2000, Phytochelatin and their roles in heavy metal detoxification, *Plant Physiol.*, 123, 825-832.
- 9) Gzyl J. E., Gwozdz A., 2005, Selection in vitro and accumulation of phytochelatin in tolerant cell line of cucumber (*Cucumis sativus*), *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 80, 59-67.
- 10) Meyerowitz E. M., 1989, *Arabidopsis*, a really useful weed, *Cell*, 56, 263-269.
- 11) Langridge J., 1994, *Arabidopsis thaliana*, a plant *Drosophila*, *BioEssays*, 16, 775-778.
- 12) Park Y. S., Park J. B., 2002, Effects of heavy metals on growth and seed germination of *Arabidopsis thaliana*, *J. Environ. Sci.*, 11, 319-325.
- 13) Park J. B., 2004, Effects of cadmium on growth of *Arabidopsis thaliana*, *J. Environ. Sci.*, 13, 1103-1108.
- 14) Baker A. J. M., McGrath S. P., Sidoli C. M. D., Reeves R. D., 1994, The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants, *Res. Conserv. Rec.*, 11, 41-

- 49.
- 15) Park J. B., 2007, Accumulated concentration of lead in plant organ of *Arabidopsis thaliana* exposed to lead, *J. Life Science*, 17, 1414-1418.
- 16) Davis M. A., Pritchard S. G., Botd R. S., Prior S. A., 2001, Developmental and induced responses of nickel-based and organic defences of the nickel-hyperaccumulating shrub, *Psychotria douarrei*, *New Phytologist*, 150, 49-58.
- 17) Mazen A. M. A., 2004, Calcium oxalate deposits in leaves of *Corchorus olitorius* as related to accumulation of toxic metals, *Russian J. Plant Physiology*, 51, 281-285.
- 18) Salt D. E., Prince R. C., Pickering I. J., Raskin I., 1995, Mechanism of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard, *Plant Physiol.*, 109, 1427-1433.
- 19) Salt D. E., Kramer U., 1999, Mechanism of metal hyperaccumulation in plant, New York, John Wiley and Sons, 231-246.
- 20) Dushenkof S., Vasudev D., Kapulnik Y., Gleba D., Fleisher D., Ting K. C., Ensley B., 1997, Removal of uranium from water using terrestrial plants, *Environ. Sci. Technol.*, 31, 3468-3474.
- 21) Heaton A. C. P., Rugh C. L., Wang N. J., Meagher R. B., 1998, Phytoremediation of mercury and methylmercury polluted soils using genetically engineered plants, *J. Soil Contam.*, 7, 497-509.
- 22) Yoshihara T., Tsunokawa K., Mitano Y., Arashima Y., Hodoshima H., Shoji K., Shimada H., Goto F., 2005, Induction of callus from a metal hypertolerant fern, *Athyrium yokoscense*, and evaluation of its cadmium tolerance and accumulation capacity, *Plant Cell Report*, 23, 579-585.