

# 식물정화공법에서 다양한 중금속의 식물체로의 흡수 및 축적 특성 비교: 식물체 종류, 중금속 종류, 토양 내 중금속 농도를 중심으로

정슬기<sup>1</sup> · 김태성<sup>2</sup> · 문희선<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> 서울대학교 공과대학 건설환경공학부, <sup>2</sup> (주)해천이티에스, <sup>3</sup> 서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부

## Characteristics of Heavy Metals Uptake by Plants: Based on Plant Species, Types of Heavy Metals, and Initial Metal Concentration in Soil

Seulki Jeong<sup>1</sup> · Tae Sung Kim<sup>2</sup> · Hee Sun Moon<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

<sup>2</sup>Haechun Environment Total Solution co.

<sup>3</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

### ABSTRACT

Phytoextraction, one type of phytoremediation processes, has been widely used in the removal of heavy metals from polluted soil. This paper reviewed literature on metal uptake by plants and characterized the metal uptake by types of metals (Zn, Cu, Pb, Cd, and As), plant species, initial metal concentrations in soil and the distribution of metals in different parts of plants. The potential of metal accumulation and transport by plants was closely related to plants species, types of metals, and initial metal concentrations in soil. The plants belonging to *Brassicaceae*, *Solanaceae*, *Poaceae*, and *Convolvulaceae* families have shown the high potential capacity of Cd accumulation. The *Gentianaceae*, *Euphorbiaceae*, and *Polygonaceae* families have exhibited relatively high Pb uptake potential while the *Pteridaceae* and *Cyperaceae* families have shown relatively high Zn uptake potential. The *Pteridaceae* family could uptake a remarkably high amount of As compared with other plant families. The potential metal accumulation per plant biomass has increased with increasing initial metal concentration in soil up to a certain level and then decreased for Cd and Zn. For As, only *Pteris vittata* had a linear relationship between initial concentration in soil and potential of metal uptake. However, a meaningful relationship for Pb was not found in this study. Generally, the plants having high metal uptake potential for Cd or Pb mainly accumulated the metal in their roots. However, the *Euphorbiaceae* family has accumulated more than 80% of Pb in shoot. Zn has evenly accumulated in roots and stems except for the plants belonging to the *Polygonaceae* and *Rosaceae* families which accumulated Zn in their leaves. The *Pteridaceae* family has accumulated a higher amount of As in leaves than roots. The types of metals, plant species, and initial metal concentration in soil influence the metal uptake by plants. It is important to select site-specific plant species for effective removal of metals in soil. Therefore, this study may provide useful and beneficial information on metal accumulation by plants for the in situ phytoremediation.

**Key words** : Heavy metals, Phytoremediation, Accumulator, Plant species

### 1. 서 론

중금속으로 인한 토양오염문제는 휴·폐광산, 산업시설 및 농경지 등 광범위한 부지에서 발생되고 있으며, 생체 내 중금속의 축적에 의한 독성 영향에 대한 우려가 세계적으로 점차 증가하고 있는 추세이다(Mattina et al.,

2003; Chehregani et al., 2009). 토양 내의 중금속은 토양 입자에 쉽게 흡착되어 토양 내 중금속 축적을 유발할 뿐만 아니라 다른 유기오염물질과는 달리 안정한 형태의 화합물로 쉽게 분해되기 어렵다. 또한, 토양 내 오래 잔류하는 특성 때문에 자연계의 자정능력으로는 복구가 거의 불가능하며, 생물체 내에 고농도로 축적될 수 있다(Cao

\*Corresponding author : hmoon@snu.ac.kr

원고접수일 : 2010. 3. 22 심사일 : 2010. 4. 12 게재승인일 : 2010. 6. 9

질의 및 토의 : 2010. 8. 31 까지

et al., 2002; Boularbah et al., 2006).

중금속으로 오염된 토양을 정화하는 방법으로 크게 물리·화학적 처리방법 및 생물학적 처리방법 등이 있다. 토양 세척 공법, 고형화·안정화 공법, 동전기 공법, 열탈착 공법 등과 같은 중금속 오염토양의 물리·화학적 처리 방법은 오염 토양 정화에 소요되는 시간이 짧은 반면에 비용이 많이 들고, 2차 오염 물질이 발생될 수 있다는 단점이 있다(Kumino et al., 2001; 구소연 외, 2006). 따라서, 최근에는 상대적으로 친환경적인 처리 방법인 미생물 또는 식물을 이용한 생물학적 처리방법(Bioremediation)이 많이 연구되고 있다. 특히 식물을 이용하여 토양 및 지하수 내 중금속을 제거하는 식물상 정화공법(Phytoremediation)은 환경교란을 최소화 할 수 있는 친환경적인 처리방법으로 각광 받고 있다(Reeves and Baker, 2000; Antonkiewicz and Jasiewicz, 2002; Igwe and Abia, 2006).

식물상 정화공법은 크게 식물의 뿌리를 통해 중금속을 흡수하고, 이를 줄기, 잎 등으로 이동시켜 식물체 내에 중금속을 축적하여 토양 내의 중금속을 제거하는 식물상 추출(Phytoextraction) 방법과 식물의 뿌리를 이용하여 토양 입자가 유실되지 못하게 토양 층에 고정시켜 중금속의 이동을 제한하여 생물이 이용할 수 없도록 안정화시키는 식물상 안정화(Phytostabilization) 방법으로 구분된다.(구소연 외, 2006; Ghosh and Singh, 2005). 특히, 식물의 중금속 흡수와 뿌리 및 지상부의 축적양상은 중금속의 종류와 식물 종에 따라 크게 달라지며, 토양의 pH, 유기물(SOM; Soil Organic Matter), 양이온교환능력(CEC; Cation Exchange Capacity) 등으로 대표되는 토양 특성과 근권 주변 미생물에 의해서도 영향을 받는다고 알려져 있다(Stoltz and Greger, 2002; Rosselli et al., 2003; Yoon et al., 2006).

한편, 식물이 토양의 중금속을 흡수하는 특징에 따라 지상부가 높은 중금속 축적량을 가지는 축적종(accumulator), 중금속의 지상부로의 운반을 제한하여 낮은 중금속 함량을 지니는 차단종(excluder), 토양의 중금속 농도에 비례하여 지상부의 농도도 비례하는 지시종(indicator)로 구별된다(Brooks et al., 1980; Baker, 1981). 현재까지의 연구들은 단순히 토양의 중금속 식물상 복원효율 향상을 위한 단일 중금속에 대한 중금속 축적 식물의 축적 능력에 관하여 연구가 활발하게 진행되고 있다(Reeves and Baker, 2000; Kraemer, 2005). 그러나, 아직까지 토양 초기 중금속의 농도, 중금속의 종류 및 식물 종 그리고 중금속 축적 식물 부위에 대한 중금속 축적 특성과의 상관관계에 대한 전반적인 분석을 한 연구는 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 식물체의 중금속 축적 능력 특성에 영향을 주는 요인 즉, 토양 내 중금속의 종류 및 초기농도와 식물 종간의 상관관계를 문헌 조사를 통하여 자료를 분석하고 그 특성을 고찰하고자 한다. 이러한 연구는 오염 중금속에 따라 토양 내 중금속을 제거하는 잠재적 능력을 가진 식물 종을 선별하고, 식물체 내 중금속 축적 양상 등에 관한 전반적인 정보를 제공하여 중금속으로 오염된 토양의 식물상 정화기법 적용 시, 현장특성에 맞는 중금속 축적 식물 선정 시 유용하게 사용될 것이다.

## 2. 연구 방법

본 연구에서는 일반적으로 중금속 오염토양에서 가장 많이 발견되는 중금속 종인 카드뮴(Cd), 납(Pb), 아연(Zn), 비소(As)를 대상으로 각각 150, 180, 240, 110 여개의 식물체에 의한 중금속 축적에 관한 문헌 자료를 수집하였다(Table 1). 수집된 자료는 중금속 종류와 식물의 family(과)별로 크게 분류하여 각각의 영향인자들에 대한 중금속 축적 특성의 상관관계를 분석하였다. 수집한 자료를 근거로 식물 종 중 다른 종에 비해 중금속을 축적하는 능력이 상대적으로 높은 식물 종(축적 종)을 제시하고, 이들을 별도로 분석하여 토양 내 중금속이 식물체 내에 축적되는 부위를 뿌리, 줄기, 잎 등으로 나누어 중금속의 축적 양상을 살펴보았다. 이러한 자료 분석 과정에서는 식물체의 중금속 흡수 및 축적을 촉진하는 화학물질이나 토양특성 및 미생물의 영향이 있는 자료들은 분석에서 제외하였다. 또한, 수집된 자료에서 식물체의 중금속 축적 농도 자료 중 축적 부위를 분류하지 않고, 식물체 내 전체 중금속 농도만을 제시한 자료는 식물의 부위별 중금속 축적 정도 비교에서는 제외하고 분석하였다. 그리고 식물체 부위별 축적 정도는 식물체 전체 축적 농도에 대한 각 부위별 축적 농도의 비율을 사용하여 비교 제시 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 중금속 종류에 따른 식물 과(family)별 식물체 내 중금속 축적 특성

식물 종들을 과명(family) 분류 단계로 분류하여 토양 내 카드뮴의 흡수 및 축적 특성을 분석한 결과, Brassicaceae(십자화과), Solanaceae(가지과), Poaceae(벼과), Convolvulaceae(메꽃과) 순으로 각각 평균 108.2 ( $\pm 40.3$ ) mg/kg, 103.1 ( $\pm 79.6$ ) mg/kg, 73.6 ( $\pm 32.6$ ) mg/kg, 71.9 ( $\pm 30.7$ ) mg/kg 농도의 높은 카드뮴 축적 능

**Table 1.** The literatures reviewed on heavy metal uptake by plants in this study

Family	Metals	References
Alliaceas	Cd, Pb, As, Zn	Cao et al., 2004; Cui et al., 2004; Mingorance et al., 2007; Liu et al., 2008
Amaranthaceae	Cd, Pb, As, Zn	Rio et al., 2002; Cui et al., 2004; Clemente et al., 2005; Mingorance et al., 2007; Chehregani et al., 2009
Apiaceae	As, Zn	Rio et al., 2002; Cao et al., 2004; Cui et al., 2004
Apocynaceae	Pb, Zn	Mingorance et al., 2007
Araceae	Pb, As, Zn	Cao et al., 2004; Liu et al., 2008
Asteraceae	Cd, Pb, As, Zn	Rio et al., 2002; Mattinal et al., 2003; Cao et al., 2004; Cui et al., 2004; Clemente et al., 2005; Boularbah et al., 2006; Yoon et al., 2006; Mingorance et al., 2007; Liu et al., 2008; Chehregani et al., 2009
Boraginaceae	Cd, Pb, Zn	Boularbah et al., 2006; Chehregani et al., 2009
Brassicaceae	Cd, Pb, As, Zn	Shallari et al., 1998; Yadav et al., 1998; Rio et al., 2002; Cao et al., 2004; Cui et al., 2004; Clemente et al., 2005; Hammer et al., 2006; Wei et al., 2006; Mingorance et al., 2007; Ghosh and Singh et al., 2005; Boularbah et al., 2006; Mingorance et al., 2007; Sasmaz et al., 2008; Chehregani et al., 2009
Chenopodiaceae	Cd, Pb, Zn	Boularbah et al., 2006; Chehregani et al., 2009
Convolvulaceae	Cd, Pb, As, Zn	Rio et al., 2002; Cao et al., 2004; Cui et al., 2004; Clemente et al., 2005; Ghosh and Singh et al., 2005; Wei et al., 2006; Mingorance et al., 2007
Crassulaceae	Cd, Pb, As, Zn	Cao et al., 2004; Cui et al., 2004; Mingorance et al., 2007
Cucurbitaceae	Cd, Pb, As, Zn	Mattinal et al., 2003; Cui et al., 2004; Wei et al., 2006; Mingorance et al., 2007
Cyperaceae	Cd, Pb, As, Zn	Stoltz et al., 2002; Cao et al., 2004; Yoon et al., 2006
Elaeagnaceae	Cd, Pb, Zn	Stoltz et al., 2002; Chehregani et al., 2009
Euphorbiaceae	Cd, Pb, As, Zn	Yadav et al., 1998; Rio et al., 2002; Cao et al., 2004; Liu et al., 2008; Chehregani et al., 2009
Fabaceae	Cd, Pb, As, Zn	Rio et al., 2002; Cui et al., 2004; Wei et al., 2006; Yoon et al., 2006; Mingorance et al., 2007; Liu et al., 2008; Chehregani et al., 2009
Gentianaceae	Pb, Zn	Yoon et al., 2006
Jussiaea	As	Cao et al., 2004
Lamiaceae	Cd, As, Zn	Cao et al., 2004; Boularbah et al., 2006; Chehregani et al., 2009
Mackinlayaceae	As	Rio et al., 2002; Cao et al., 2004
Malvaceae	Cd, Pb, As, Zn	Rio et al., 2002; Clemente et al., 2005
Plantaginaceae	Cd, Pb, Zn	Rio et al., 2002; Boularbah et al., 2006; Yoon et al., 2006
Poaceae	Cd, Pb, As, Zn	Rio et al., 2002; Stoltz et al., 2002; Cao et al., 2004; Ghosh and Singh et al., 2005; Boularbah et al., 2006; Yoon et al., 2006; Mingorance et al., 2007; Chehregani et al., 2009; Li et al., 2009
Polygonaceae	Pb, As, Zn	Cao et al., 2004; Liu et al., 2008; Chehregani et al., 2009
Primulaceae	Cd, Pb, As, Zn	Rio et al., 2002
Pteridaceae	Pb, As, Zn	Cao et al., 2004; Wei et al., 2006; Liu et al., 2008
Rosaceae	Cd, Pb, Zn	Yoon et al., 2006; Chehregani et al., 2009
Salicaceae	Cd, Pb, As, Zn	Stoltz et al., 2002
Scrophulariaceae	Cd, Pb, Zn	Boularbah et al., 2006; Liu et al., 2008
Solanaceae	Cd, Pb, As, Zn	Rio et al., 2002; Mattinal et al., 2003; Cao et al., 2004; Clemente et al., 2005; Wei et al., 2006
Tropaeolaceae	Cd, Pb, Zn	Cui et al., 2004; Mingorance et al., 2007
Verbenaceae	Pb, As, Zn	Cao et al., 2004; Yoon et al., 2006
Zingiberaceae	Cd, Pb, Zn	Cui et al., 2004; Rio et al., 2002

보였다(Fig. 1(a)). 납의 경우에는, 평균  $1396.5(\pm 34.7)$  mg/kg으로 *Gentianaceae*(용담과)에 해당하는 식물이 상대적으로 가장 높은 납 축적 정도를 보였다(Fig. 1(b)). 그 다음으로는 *Euphorbiaceae*(대극과) 종이  $806.3(\pm 1070.7)$  mg/kg으로 높은 축적 능력을 보였으며, *Polygonaceae*(마디

풀과,  $648.8\pm 797.78$  mg/kg) 중도 비교적 높은 납 축적량을 보였다. 그러나 이러한 식물들은 중금속 축적 능력이 있어서 높은 표준편차 값을 나타냈다. 카드뮴과 비교해 볼 때, 대부분 납 축적 능력을 가진 식물들은 카드뮴보다 높은 농도의 납을 생체에 축적할 수 있는 것으로 나타났다. 한

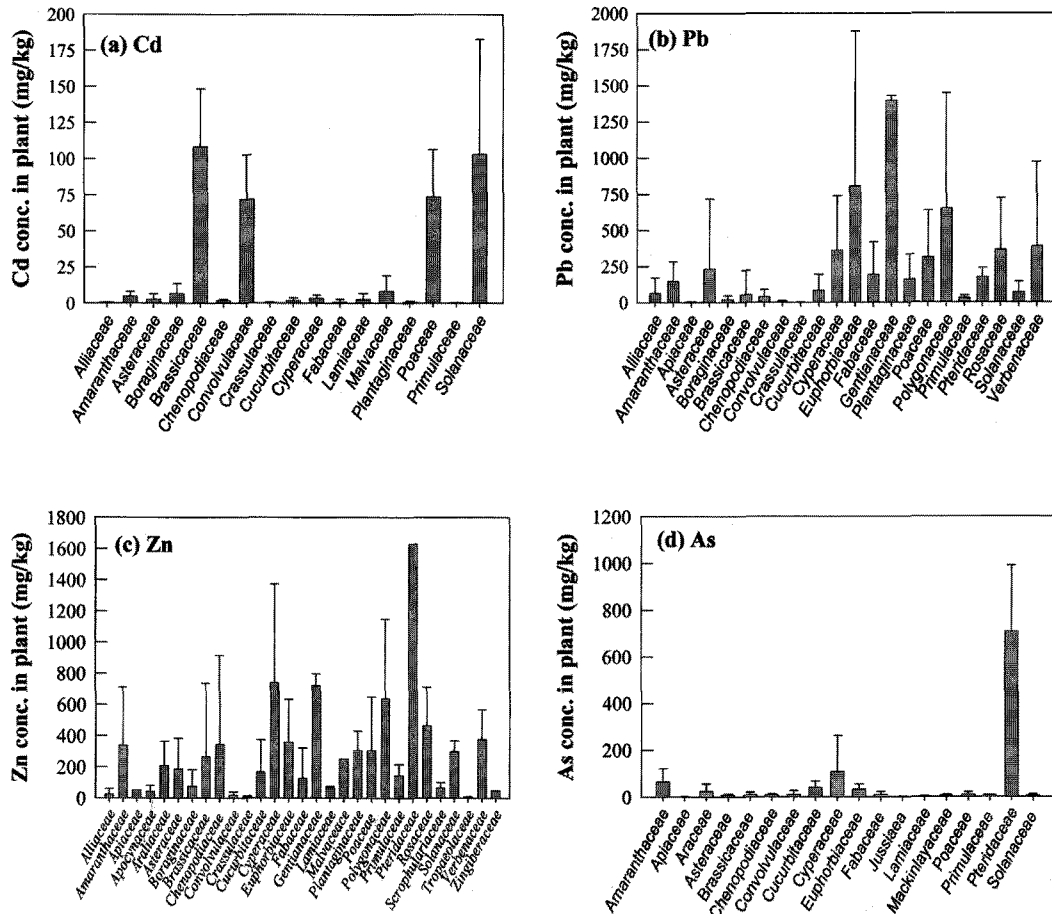


Fig. 1. The metal uptake by different family group of plants: (a) Cd, (b) Pb, (c) Zn and (d) As (The error bar in figure means the standard deviation).

편, 다른 중금속에 비해 상대적으로 높은 용해도를 가지는 아연은 카드뮴이나 납에 비해 비교적 다양한 식물 종들이 축적할 수 있는 것으로 나타났다(Fig. 1(c)). 아연 축적 능을 가진 식물체 내 아연 농도는 200-400 mg/kg 범위로 비슷하지만 그 중 가장 높은 농도의 아연을 축적할 수 있는 식물은 *Pteridaceae*(고사리과)에 해당하는 식물로 1000 mg/kg 이상의 아연을 축적할 수 있었다. 이외에도 *Cyperaceae*(사초과)가 평균 738.4( $\pm$ 633.40) mg/kg, *Rosaceae*(장미과)는 738.0( $\pm$ 247.1) mg/kg, *Gentianaceae*(용담과)는 721.5( $\pm$ 74.2) mg/kg, *Polygonaceae*(마디풀과), 638.5( $\pm$ 511.0) mg/kg 정도 아연을 식물체 내에 축적하는 것으로 조사되었다. 한편, 비소는 다른 중금속류들과 특이할 만하게 *Pteridaceae*(고사리과)에 속하는 식물종이 다른 식물 종에 비해 월등히 높은 비소 축적 능력을 보였다(Fig. 1(d)). 이는 기존의 비소 오염 토양에 대해 식물정화공법으로 *Pteris cretica*, *Pteris vittata* 등과 같은 고사리과에 속하는 식물들이 주로 많이 이용되어 연구되어 오고 있는

점과도 일치한다(Ma et al., 2001; Chen et al., 2002; Wei and Chen, 2006). 한편, Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 같은 식물 과에서 중금속의 축적 정도가 차이가 나는 것은 첫째, 과(family) 분류보다 더 좁은 범위에 속하는 종(genus)의 차이에 기인한 것이라 사료된다. 같은 식물 과인 *Solanaceae*에 속하는 *Solanum nigrum* L.과 *Datura innoxia* 경우, 각각 평균 1.6 mg/kg(n=1)과 32.5 mg/kg(n=4)의 서로 다른 카드뮴 축적 능력을 보였다. 물론, 자료의 좀더 정확한 분석을 위해서는 종(species)과 속(genus) 단계까지 나누어 분석하는 것이 바람직하겠으나, 기존 문헌들로부터 충분한 자료를 수집하는 것에는 무리가 있어 본 연구에서는 과(family) 분류단계를 적용하였다. 두 번째로 같은 식물 과에서 나타나는 중금속 축적능의 편차는 본 연구에서 활용한 여러 문헌자료의 데이터들이 얻어진 실험 조건에서 기인할 수도 있다. 자료 분석에 이용한 데이터들의 대부분은 실험실 규모에서 이루어진 경우였으나 일부는 현장 규모의 실험에서 얻어진 자료들도 포함됨으

로써 서로 다른 현장, 실험 환경, 및 실험자의 차이로부터 기인한 표준편차라고 생각 된다. 한 예로, *Brassicaceae* (십자화과)에 해당하는 *Brassica juncea* 종은 같은 식물 종으로 실험한 경우, 다른 인위적인 화학물질이나 미생물의 투여가 이루어지지 않았을지라도 토양 내 유사한 초기 카드뮴 농도에 대해 식물체내 카드뮴 농도가 최저 0.01 mg/kg부터 최고 174.8 mg/kg등으로 다양하게 나타났다(Cui et al., 2004, Ghosh and Singh, 2005). 마지막으로, 식물이 성장하는 토양의 특성에 따라 식물체의 중금속 축적 정도는 영향을 받게 된다(Brun et al., 1998). 중금속을 인공오염(spiking)시킨 토양을 사용하는 경우, 해당 중금속의 aging이 오래 일어나지 않아 식물이 이용 가능한 형태의 중금속 함량이 많아지게 되고, 자연히 식물체의 중금속 축적 능에 영향을 미친다(Ghosh and Singh, 2005). 반면에, 중금속이 오랜 시간 aging 되어 있는 토양(e.g. 현장토양)을 사용할 경우 식물체가 이용 가능한 형태의 중금속 함량이 적으므로 식물체의 중금속 축적량은 적은 것으로 나타났다(Cui et al., 2004; 이병규 외, 2005).

### 3.2. 토양 내 중금속 초기 농도의 영향

토양 내 중금속의 초기 농도에 대한 식물체의 중금속 축적에 대한 영향을 살펴보기 위해 약 150여 개의 자료를 수집하여 다양한 식물체의 종류에 대해 토양 내 카드뮴 초기농도(0-100 mg/kg)별 식물체 내 카드뮴 축적 농도를 분석한 결과, 앞선 언급한 *Brassicaceae*, *Convolvulaceae*, *Poaceae* 등과 같은 카드뮴 축적 종의 경우에는 0 mg/kg에서 100 mg/kg의 초기 카드뮴 농도 범위에서는 농도가 증가할수록 높은 농도의 카드뮴을 식물체로 흡수하여 축적하는 것으로 나타났다(Fig. 2(a)). 반면, 토양 내 카드뮴 초기농도가 200 mg/kg 이상이 되면 *Phragmites karka* 과 같은 식물체는 생장에 저해를 받았으며, 카드뮴의 축적 또한 저해되었다(Ghosh and Singh, 2005). 따라서, 토양 내 카드뮴 초기농도는 100 mg/kg 정도가 식물체에 의한 카드뮴 축적의 역치 농도라고 할 수 있다(Chehregani et al., 2009). 또한, 그림에서 볼 수 있듯이, 토양 내 카드뮴 초기농도가 약 50 mg/kg 일 때, 식물종에 따라서 내 카드뮴의 농도는 상당한 차이를 보인다(각각 113.4과 9.6 mg/kg). 한 예로, *Cyperaceae*와 *Salicaceae*에

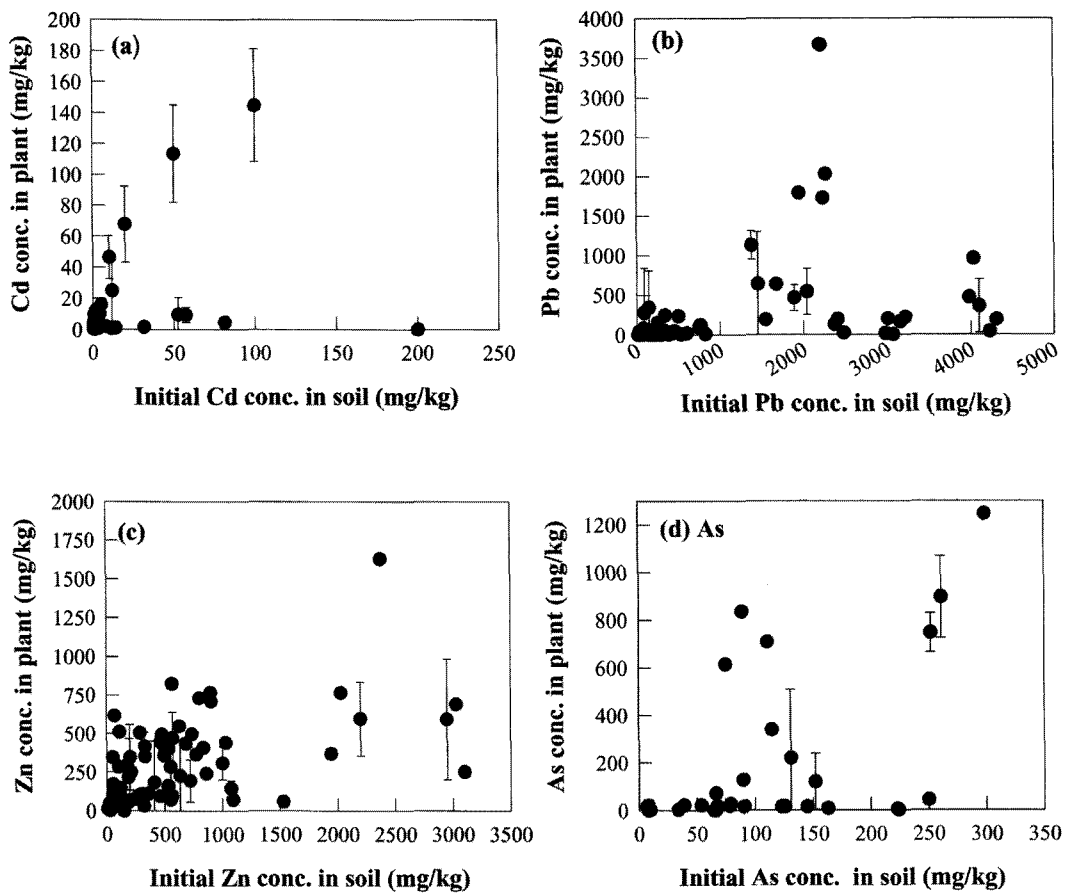


Fig. 2. The accumulated metal concentration in plant at different initial metal concentration in soil: (a) Cd, (b) Pb, (c) Zn and (d) As.

속하는 식물은 카드뮴 축적 능이 높지 않은 것으로 알려져 있다. 카드뮴의 경우와는 달리 토양 내 납 초기농도에 따른 다양한 식물체에 축적된 납의 농도는 서로 큰 상관관계는 찾을 수 없었다(Fig. 2(b)). *Asteraceae*과 *Fabaceae* 등과 같은 몇 종류를 제외하면 토양 내 납 초기 농도에 관계없이 대부분 1000 mg/kg 이하의 식물체 내 납 축적을 보인다. 그리고 토양 내 납의 농도가 약 2000 mg/kg 이상의 범위에서는 식물체에 의한 납 축적 능이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 토양 내 아연 초기농도에 대한 식물체 내 아연 농도 영향을 살펴보면, 전체적으로 토양 내 초기농도가 0~1000 mg/kg의 범위에서는 아주 선형적인 경향을 보이는 것은 아니나 전체적으로 농도가 증가함에 따라 증가하다가 1000 mg/kg 이상의 농도에서는 감소하는 경향을 보인다. 실제로 Fig. 2(c)에서 보면 토양 내 초기 아연 농도가 2300 mg/kg 일 때, 1500 mg/kg 이상 식물체 내에 축적되어 전체적인 경향을 벗어난다. 토양 내 비소 초기농도에 따른 식물체 내 비소 농도에 대해서는 전체적으로는 큰 경향을 보이지는 않는다(Fig. 2(d)). 다만 앞에서 언급한 카드뮴, 납, 아연의 경우 토양 내 초기농도의 증가에 따라 같이 증가하다 일정 농도가 되면 어느 정도 감소하는 경향을 보였는데, 비소는 이와 같은 경향은 보이지 않는다. 오히려 토양 내 비소의 농도가 조사한 데이터 중 최고 농도인 299 mg/kg에서 식물체

내 비소농도가 1246 mg/kg으로 가장 높은 농도에 해당되었다. 물론 식물체 내 비소농도가 1246 mg/kg으로 측정된 식물 종은 *Pteridaceae*에 해당하는 *Pteris cretica*로 비소를 잘 축적하는 종으로 널리 알려진 식물이다. 실제로 *Pteridaceae* 과에 속하는 식물종인 *Pteris vittata L.*의 토양 내 초기 비소농도에 따른 비소 축적 능을 비교해 본 결과(Fig. 3), 토양 내 비소 농도가 500 mg/kg 범위에서도 2000 mg/kg 이상의 높은 비소 축적 능을 보였다(Cao et al., 2004).

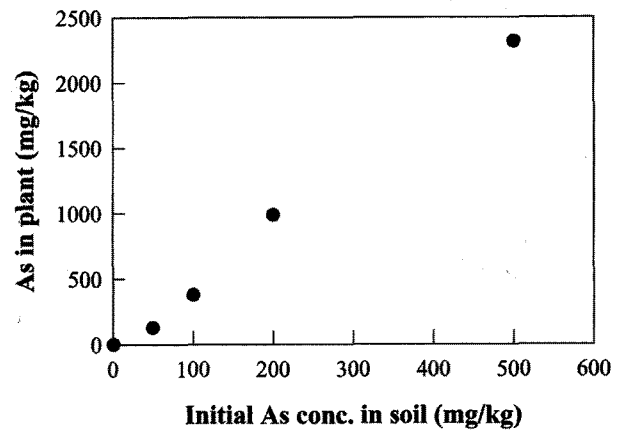


Fig. 3. Arsenic uptake concentration by *Pteris vittata L.* in different initial arsenic concentrations in soil.

Table 2. The distribution of metals in different parts of plants

Metals	Plants (Family)	Distribution of Accumulated Metals in Plants (%)						No. data
		Root	Stem	Leave	Bean	Shoot	Shoot and Leave	
Cd	<i>Brassicaceae</i>	43.67	18.74	21.39	2.48	11.54	2.18	33
	<i>Convolvulaceae</i>	55.56	26.09	18.35	-	-	-	8
	<i>Poaceae</i>	38.42	16.38	29.11	-	1.58	14.51	13
	<i>Solanaceae</i>	37.49	22.77	39.74	-	-	-	7
Pb	<i>Cyperaceae</i>	93.30	-	-	-	6.70	-	5
	<i>Euphorbiaceae</i>	-	-	14.82	-	85.18	-	3
	<i>Fabaceae</i>	49.33	-	-	-	37.31	13.37	10
	<i>Gentianaceae</i>	64.31	-	-	-	32.83	2.85	3
Zn	<i>Polygonaceae</i>	28.84	-	-	-	24.27	46.89	4
	<i>Cyperaceae</i>	78.01	-	-	-	21.99	-	5
	<i>Gentianaceae</i>	57.80	-	-	-	42.20	-	3
	<i>Polygonaceae</i>	16.23	-	74.56	-	9.22	-	4
As	<i>Pteridaceae</i>	57.37	-	-	-	42.63	-	3
	<i>Rosaceae</i>	11.94	-	77.17	-	10.89	-	4
	<i>Pteridaceae</i>	40.27	-	59.73	-	-	-	16
	<i>Cyperaceae</i>	95.55	-	-	-	4.45	-	3
	<i>Amaranthaceae</i>	10.53	-	1.20	-	88.27	-	4

### 3.3. 식물의 부위별 중금속 축적 정도 비교

상대적으로 높은 중금속 축적 능력을 가진 식물 종들에 대해 식물부위별 중금속 축적 비율을 비교하였다. 먼저 카드뮴 축적 식물 중(e.g. *Brassicaceae*, *Convolvulaceae*, *Poaceae*, *Solanaceae*)들의 식물 부위별 카드뮴 축적 비율을 살펴보면, 흡수된 카드뮴의 40~50% 이상이 뿌리에 축적되는 뿌리 축적 종(root accumulator)이다(Table 2). 뿌리 다음으로 식물 종에 따라 근소한 차이를 보이지만 주로 잎과 줄기에 축적한다. *Brassicaceae*의 경우는 아직 작은 비율이지만 열매에 축적되기도 했다. 납의 경우, *Cyperaceae*는 90% 이상 뿌리에 축적하였고, *Gentianaceae* 과의 식물 종도 60% 이상의 납이 뿌리에 축적되었다. 이는 토양 내 중금속을 흡수하여 식물체 내에 축적은 하지만 대부분의 중금속이 뿌리에 머물면서 토양 내에 그대로 존재하므로 중금속 제거가 제대로 되지 않을 가능성이 있음을 의미한다. 반면, *Euphorbiaceae*에 속하는 식물은 80% 이상의 납을 shoot(새싹, 순)에 축적하는 양상을 보였다. 일반적으로 식물의 지상부(주로 잎)에 일정 농도 이상의 중금속이 축적가능한 경우(예, 카드뮴의 경우, 100 mg/kg 이상, 납의 경우, 1000 mg/kg 이상), 그 식물 종을 해당 중금속에 대한 과축적종(hyperaccumulator)이라 한다(Chen and Cutright, 2001). 한편, 아연의 경우, 전체적으로 식물체의 뿌리, 줄기에 골고루 축적되었고, *Cyperaceae*, *Gentianaceae*, *Pteridaceae* 과에 해당하는 식물은 주로 뿌리와 shoot에 나누어 축적되었는데, 뿌리에 축적되는 비율이 상대적으로 조금 높았다. *Polygonaceae*와 *Rosaceae* 과 식물의 경우 뿌리나 shoot(새싹, 순)에 축적되는 비율보다 잎에 축적되는 아연의 비율이 월등히 높은 특징을 나타내었다. 비소 축적 종 식물은 뿌리, 잎, shoot(새싹, 순)에 나누어 비소를 축적한다. 다만 잎에 축적되는 비율이 다른 중금속보다 훨씬 낮았고, 다른 식물에 비해 비소 축적 능력이 월등히 높았던 *Pteridaceae*의 경우, 뿌리보다 잎(약 60%)에 많이 축적하는 특징을 보인다.

## 4. 결 론

중금속의 종류, 토양 내 중금속의 초기농도의 변화, 및 중금속 축적 능력을 가지는 식물 종에 따른 식물 종의 중금속 흡수 및 축적 특성을 알아보았다. 중금속의 종류에 따라 식물체내에 중금속을 축적할 수 있는 식물 종은 다르게 나타났으며, 카드뮴은 *Brassicaceae*(십자화과)와 *Solanaceae*(가지과)에 해당하는 식물이, 납과 아연은 *Gentianaceae*(용담과), *Polygonaceae*(마디풀과), *Cyperaceae*

(사초과)등에 해당하는 식물이 중금속 축적 능력이 우수하였다. 특히, 비소의 경우는 *Pteridaceae*(고사리과)에 속하는 식물의 중금속 축적 능력이 월등히 높은 것으로 나타났다. 카드뮴, 아연의 경우 토양 내 중금속의 초기 농도와 식물체 내의 중금속 축적 량 사이의 상관관계가 보였으나, 납과 비소의 경우에는 토양 내 중금속의 초기농도와 식물체 내 중금속이 축적 정도 사이의 뚜렷한 상관관계는 찾을 수 없었다. 또한, 식물 및 중금속의 종류에 따라 식물체 내에서 축적되는 부위는 다르게 나타났다.

토양 내 중금속 제거를 위해 식물상 정화방법을 적용할 때, 중금속 종류 및 토양에 맞는 식물 종의 선정은 무엇보다 중요하다. 이러한 관점에서 볼 때 본 연구의 결과는 오염 중금속에 따라 토양 내 중금속을 제거할 수 있는 잠재적 능력을 가진 식물 종을 선별하고, 축적 가능한 중금속 농도, 축적 양상 등의 정보를 제공함으로써 토양 내 중금속의 식물상 정화 시 현장특성에 맞는 중금속 축적 식물 선정에 유용하게 사용될 것이다.

## 사 사

본 연구는 2010년 (주) 해천엔지니어링의 지원과 서울대학교 지구환경과학부 및 건설환경공학부 두뇌한국21사업에 의해 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다. 또한 2010년도 환경부의 재원으로 GAIA 연구단 Project의 지원을 받아 수행된 연구로 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- 구소연, 조경숙, 2006, 중금속 오염 토양의 식물상 복원에 있어 식물과 근권 세균의 상호작용, *Kor. J. Microbiol. Biotechnol.*, **34**, 83-93.
- 이병규, 고일하, 김행아, 2005, 단계추출법에 의한 울산지역 토양 중의 중금속 Partitioning 특성연구, *대한환경공학회지*, **27**, 25-35.
- Antonkiewicz, J. and Jasiewicz, C., 2002, The use of plants accumulating heavy metals for detoxification of chemically polluted soils, *J. Pol. Agric. Univ.*, **5**, 121-143.
- Baker, A.J.M., 1981, Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. *J. Plant Nutr.*, **3**, 643-654.
- Boularbah, A., Schwartz, C., Bitton, G., Abouddrar, W., Ouhammou, A., and Morel, J.L., 2006, Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: 2. Assessment of metal accumulation and toxicity in plants, *Chemosphere*, **63**, 811-817.
- Brooks, R.R., Reeves, R.D., Morrison, R.S., Malaisse, F., 1980,

- Hyperaccumulation of copper and cobalt-a review, *Soc. Royale de Botanique de Belgique*, **113**, 166-172.
- Brun, L.A., Maillet, J., Richarte, J., Herrmann, P., and Remy, J.C., 1998, Relationships between extractable copper, soil properties and copper uptake by wild plants in vineyard soils, *Environ. Pollut.*, **102**, 151-161.
- Cao, X., Ma, L.Q., Chen, M., Singh, S.P., and Harris, W.G., 2002, Impacts of phosphate amendments on lead biogeochemistry in a contaminated site, *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 296-304.
- Cao, X., Ma, L.Q., and Tu, C., 2004, Antioxidative responses to arsenic in the arsenic-hyperaccumulator Chinese brake fern (*Pteris vittata* L.), *Environ. Pollut.*, **128**, 317-325.
- Chehregani, A., Noori, M., and Yazdi, H.L., 2009, Phytoremediation of heavy-metal-polluted soils: Screening for new accumulator plants in Angouran mine (Iran) and evaluation of removalability, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **72**, 1349-1353.
- Chen, H. and Cutright, T., 2001, EDTA and HEDTA effects on Cd, Cr, and Ni uptake by *Helianthus annuus*, *Chemosphere*, **45**, 21-28.
- Chen, T.B., Wei, C.Y., Huang, Z.C., Huang, Q.F., and Lu, Q.G., 2002, Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation, *Chinese Sci. Bull.*, **47**, 902-905.
- Clemente, R., Walker, D.J., and Bernal, M.P., 2005, Uptake of heavy metals and As by *Brassica juncea* grown in a contaminated soil in Aznalco'llar (Spain): The effect of soil amendments, *Environ. Pollut.*, **138**, 46-58.
- Cui, Y.J., Zhu, Y.G., Zhai, R.H., Chen, D.Y., Huang, Y.Z., Qiu, Y., and Liang, J.Z., 2004, Transfer of metals from soil to vegetables in an area near a smelter in Nanning, China, *Environ. Int.*, **30**, 785-791.
- Ghosh, M. and Singh S.P., 2005, A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts, *Appl. Ecol. Environ. Res.*, **3**, 1-18.
- Hammer, D., Keller, C., McLaughlin, M.J., and Hamon, R.E., 2006, Fixation of metals in soil constituents and potential remobilization by hyperaccumulating and non-hyperaccumulating plants: Results from an isotopic dilution study, *Environ. Pollut.*, **143**, 407-415.
- Igwe, J.C. and Abia, A.A., 2006, A bioseparation process for removing heavy metals from wastewater using biosorbents, *Afr. J. Biotechnol.*, **5**, 1167-1179.
- Krämer, U., 2005, Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils, *Curr. Opin. Biotech.*, **16**, 133-141.
- Kumino, T., Seaki K., Nagaoka, K., Oyaizu, H., and Matusmoto, S., 2001, Characterization of copper-resistant bacterial community in rhizosphere of highly copper-contaminated soil, *Eur. J. Soil Biol.*, **37**, 95-102.
- Li, N.Y., Li, Z.A., Zhuang, P., Zou, B., and McBride, M., 2009, Cadmium Uptake From Soil by Maize With Intercrops, *Water Air Soil Pollut.*, **199**, 45-56.
- Liu, X., Gao, Y., Khan, S., Duan, G., Chen, A., Ling, L., Zhao, L., Liu, Z., and Wu, X., 2008, Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on contaminated sites and their potential accumulation capacity in Heqing, Yunnan, *J. Environ. Sci.*, **20**, 1469-1474.
- Ma, L.Q., Kenneth, M.K., Tu, C., Zhang, W.H., Cai, Y., and Kennelley, E.D., 2001, A fern that hyperaccumulating arsenic, *Nature*, **409**, 579.
- Mattina, M.I., William, L.B., Musante, C., and White, J.C., 2003, Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil, *Environ. Pollut.*, **124**, 375-378.
- Mingorance, M.D., Valdés, D., and Rossini, O.S., 2007, Strategies of heavy metal uptake by plants growing under industrial emissions, *Environ. Int.*, **33**, 514-520.
- Reeves, R.D. and Baker, A.J.M., 2000, Metal-accumulating plants. In: Raskin, I. (Ed.), *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean Up the Environment*, John Wiley & Sons, Inc., pp.193-229.
- Río, M.D., Font, R., Almela, C., Vélez, D., Montoro, R., and Bailón, A.D.H., 2002, Heavy metals and arsenic uptake by wild vegetation in the Guadiamar river area after the toxic spill of the Aznalco'llar mine, *Biotechnol. J.*, **98**, 125-137.
- Rosselli, W., Keller, C., and Boschi, K., 2003, Phytoextraction capacity of trees growing on metal contaminated soil, *Plant Soil*, **256**, 265-72.
- Sasmaz, A., Obek, E., and Hasar, H., 2008, The accumulation of heavy metals in *Typha latifolia* L. grown in a stream carrying secondary effluent, *Ecol. Eng.*, **33**, 278-284.
- Shallari, S., Schwartz, C., Haskob, A., and Morela, T.J.L., 1998, Heavy metals in soils and plants of serpentine and industrial sites of Albania, *Sci. Total Environ.*, **209**, 133-142.
- Stoltz, E. and Greger, M., 2002, Accumulation properties of As, Cd, Cu, Pb and Zn by four wetland plant species growing on submerged mine tailings, *Environ. Exp. Bot.*, **47**, 271-280.
- Wei, C.Y. and Chen, T.B., 2006, Arsenic accumulation by two brake ferns growing on an arsenic mine and their potential in phytoremediation, *Chemosphere*, **63**, 1048-1053.
- Yadav, S.K., Juwarkar, A.A., Kumar, G.P., Thawale, P.R., Singh, S.K., and Chakrabarti, T., 1998, Heavy metals in soils and plants of serpentine and industrial sites of Albania, *Bioresour. Technol.*, **100**, 4616-4622.
- Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q., and Ma, L.Q., 2006, Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site, *Sci. Total Environ.*, **368**, 456-464.