

## 토양 내 카드뮴, 납, 아연 농도에 따른 내음성 바위취(*Saxifraga stolonifera*)의 중금속 내성 평가

주진희 · 윤용한\*

건국대학교 산림과학과  
(2010년 1월 26일 접수; 2010년 3월 19일 수정; 2010년 4월 7일 채택)

### Evaluation of the Heavy Metal Tolerance of *Saxifraga stolonifera*, Shade Groundcover Plant, to Different Concentrations of Cd, Pb and Zn in Soil

Jin-Hee Ju, Young-Han Yoon\*

Department of Forest Science, Konkuk University, Chungju 380-701, Korea  
(Manuscript received 26 January, 2010; revised 19 March, 2010; accepted 7 April, 2010)

#### Abstract

This study attempted to facilitate various groundcover plants, related to phytoremediation material, and advance shade plants with a heavy metal tolerance to contaminated soil in an urban shade space. *Saxifraga stolonifera*, which has commonly been used a landscape shade plants, was evaluated to determine its heavy metal tolerance to different concentrations(Control, 100mg · kg<sup>-1</sup>, 250mg · kg<sup>-1</sup> and 500mg · kg<sup>-1</sup> treatment) of Cd, Pb and Zn in soil.

The growth of *Saxifraga stolonifera* showed no significant tendency after the initial transplantation, but showed distinct changes with the respective treatment heavy metal types and concentrations over time. Especially, severe chlorosis, with more yellowish green leaves, was observed, with inhibition at Cd concentrations greater than 100mg · kg<sup>-1</sup>. Conversely, no external symptoms or growth retardation were observed with Pb and Zn concentrations less than 500mg · kg<sup>-1</sup>. Therefore, *Saxifraga stolonifera* can be applied as a long term phytoremediation species in soil contaminated with low concentrations of heavy metal in urban shade spaces.

**Key Words** : Phytoremediation, Heavy metal tolerance, *Saxifraga stolonifera*, Landscape plants, Shade plants, Green space

#### 1. 서론

토양오염물질들 중 중금속은 독성이 강하고 분해되지 않으며 생태계 먹이연쇄로 인간에게까지 영향을 줄 수 있기 때문에 그 심각성이 부각되고 있다(Kang

등, 2008). 식물재배정화법(phytoremediation)은 토양으로부터 유해한 오염물질을 제거, 안정화, 무독화 하는데 식물종 혹은 식생대를 이용하여 오염된 토양의 확산을 방지하며 토양의 생태적 기능을 회복시키기 위해 친환경적인 정화기술을 이용하는 것으로 이와 같은 개발은 지속가능한 발전을 꾀할 수 있어 관심이 주목되고 있다(김과 이, 1999). 외국의 경우 1990년대에 들어서면서 각각의 오염물질에 대해 정화기능을 가지고 있는 식물체의 선발과 정화 등의 극대화 방안,

\*Corresponding Author: Young-Han Yoon, Department of Forest Science, Konkuk University, Chungju 380-701, Korea  
Phone: +82-43-840-3538  
E-mail: yonghan7204@kku.ac.kr

오염현장에 적용, 평가 등에 대해 활발한 연구가 진행되고 있다. 특히, 식물체의 선발에 있어서는 우리나라도 중금속 축적식물 또는 내성식물을 탐색하는 연구가 있지만(최와 장, 2003), 식용작물이거나 양지성식물이 대부분이다.

도시 자연녹지 토양 중 중금속 함량은 토양환경보전법상 토양오염 우려기준치 이하로 나타났으나 우리나라 전국 평균 중금속 함량보다 높은 수준이며 함량별로는 납(Pb) > 아연(Zn) > Cu(구리) > Cd(카드뮴) 순으로 나타나 도시 내 중금속 토양오염 정화에 대한 방안이 필요한 실정이다(김과 박, 2000). 특히, 도시 내 고층건물, 옹벽, 벽 등 수직공간이 늘어남에 따라 생겨나는 영구음지나 일음지에 대한 식물학적 토양오염기술 적용방안이 요구된다. 하지만 지금까지 이러한 식물정화재배법에 검증된 식물은 주로 양지성식물로 현장적용범위가 한계가 있어, 음지성식물의 탐색은 매우 의미 있는 일이라고 하겠다. 또한 외래종 침입에 의한 생태교란 가능성을 염두했을 때 국가 고유의 자생식물에 대한 중금속 내성평가는 추후 활용성을 극대화할 수 있는 근거자료가 된다. 한편, 식물재배정화법에 있어 수종선정은 매우 중요한 요소로, 일반적으로 식물의 생장량과 중금속 흡수량은 비례하기 때문에(이, 2008), 중금속 내성평가를 함에 있어 생육특성을 살펴보는 것은 매우 필요하다고 하겠다.

이에 본 연구는 자생식물 중 음지식물이면서 조경용으로 식재되는 바위취(*Saxifraga stolonifera*)를 대상으로 토양 내 아연, 납, 카드뮴 농도에 따른 내성을 평가함으로써 도시 내 음지 중금속오염지에 대한 내성 지피식물을 선발하고, 다양한 생태적 환경복원소재로서의 실효성을 높이고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험구 설정

실험구는 가로 300 mm×세로 200 mm×높이 250 mm의 폴리에틸렌 재질의 배수구가 없는 용기를 자체 제작하였다. 이는 토양 내 중금속이 관수에 의해 외부로 방출되는 것을 방지하기 위한 조치로, 배수불량을 고려해 용기의 하부 50 mm를 펄라이트(perlite)를 이용해 배수층을 조성해 주었다. 중금속 종류는 토양오

염실태결과 중금속 오염도(환경부, 2007)를 기준으로 가장 높은 경향을 나타낸 아연과 납, 그리고 인체의 피해정도가 가장 심한 카드뮴으로 선정하였다. 또한 중금속 농도 수준은 우리나라 아연에 대한 최고 중금속 측정량(환경부, 2007)과 기존의 연구의 중금속 농도 처리를 기준으로(Anthony 등, 2006), 무처리, 100 mg·kg<sup>-1</sup>, 250 mg·kg<sup>-1</sup>, 500 mg·kg<sup>-1</sup> 등으로 차이를 두어 펄라이트:인공배합토=1:1인 배합토와 혼합하였다.

### 2.2. 연구재료

2009년 2월에 지름 12 cm 화분의 바위취를 구입하여 1개월간 온실에서 순화시켰다. 2009년 3월에 각각의 중금속 농도처리 된 배합토에 각각 10개씩 식물을 식재하여 2009년 9월까지 생육실험을 진행하였다. 실험 중 온실의 환경조건은 평균온도가 22.0±4.0℃, 습도는 50±5.0%, 낮 동안의 평균 광도는 150~200 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 이었고, 관수는 일주일에 500 ml씩 총 2회 실시하였다. 실험구 배치는 완전임의 배치하였으며 처리별 생육상태를 알아보기 위해 초장, 엽장, 엽수, 엽록소함량 등을 매달 측정하였다. 초장의 경우 식물의 정단부까지의 길이, 엽장은 평균적인 잎의 길이를 측정하였다. 엽록소함량은 엽록소계(SPAD-502, Minolta Camera Co., Osaka, Japan)을 이용하여 중간엽에서 5번씩 반복 조사하였다. 생육실험 동안의 생육차이를 나타내기 위해 매달 측정된 생육수치와 초기수치에 대한 차이를 생육변화율로 계상하였다.

## 3. 결과 및 고찰

중금속 농도수준에 따른 바위취의 초장 변화율에 있어 카드뮴(Cd)처리구의 경우 시간이 경과됨에 따라 무처리 > 100 mg·kg<sup>-1</sup> > 500 mg·kg<sup>-1</sup> > 250 mg·kg<sup>-1</sup> 순으로 저농도와 고농도간의 뚜렷한 변화율을 나타내었다. 납(Pb)처리구에서는 초기에는 250 mg·kg<sup>-1</sup> 와 500 mg·kg<sup>-1</sup>의 농도처리가 무처리와 100 mg·kg<sup>-1</sup>보다 높은 초장변화율을 보여주었으나 8월에는 무처리 > 250 mg·kg<sup>-1</sup> > 100 mg·kg<sup>-1</sup> > 500 mg·kg<sup>-1</sup> 순으로 무처리와 250 mg·kg<sup>-1</sup>간의 차이는 크지 않았다. 아연(Zn)처리구의 경우 초기에는 무처리와 100 mg·kg<sup>-1</sup>에서 상승경향을 나타내었으나 7월부터 500 mg·kg<sup>-1</sup>처리구와 100

mg·kg<sup>-1</sup>에서 급격한 감소율을 나타낸 반면 무처리구와 250 mg·kg<sup>-1</sup>에서 다소 증가하였다(Fig. 1).

지역에 따른 토양오염기준을 살펴보면, 카드뮴의 경우, 1지역에서는 4 mg·kg<sup>-1</sup>, 2지역에서는 10 mg·kg<sup>-1</sup>, 3지역에서는 60 mg·kg<sup>-1</sup>으로 규정되고 있으며, 납은 1지역에서는 200 mg·kg<sup>-1</sup>, 2지역에서는 400 mg·kg<sup>-1</sup>, 3지역에서는 700 mg·kg<sup>-1</sup>으로, 아연의 경우, 1지역에서는 300 mg·kg<sup>-1</sup>, 2지역에서는 600 mg·kg<sup>-1</sup>, 3지역에서는 2,000 mg·kg<sup>-1</sup>으로 제시되고 있다(환경부, 2007). 이러한 규정을 근거로 살펴볼 때, 본 연구에서의 카드뮴 농도처리가 토양오염기준보다 매우 높아 100 mg·kg<sup>-1</sup> 이상의 농도처리에서는 무처리에 비해 확연한 초장변화율을 보여주고 있다. 반면에 납과 아연의 경우 농도설정 수준이 비슷하거나 낮게 처리되어 500 mg·kg<sup>-1</sup> 처리별 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다. 하지만, 목본 식물인 배나무의 납(Pb) 농도별 수고의 특징을 살펴본 결과, 무처리의 경우 초기에는 급격한 신장을 보이다가 생장이 완만한 반면, Pb를 처리한 나

무는 처리수준에 상관없이 무처리에 비해 생육 초기부터 생장이 억제되는 것으로 나타났다(전과 최, 2007). 이와 비교해 볼 때, 바위취의 경우 납처리에 있어 무처리구에 비해 250 mg·kg<sup>-1</sup>농도처리에서 무처리구와 큰 차이를 보이지 않아 납(Pb)에 대한 내성이 있는 것으로 판단된다.

바위취의 엽장은 카드뮴(Cd)처리구에서는 꾸준히 엽장의 크기가 증가하는 경향을 보였으나 농도수준별 차이가 확연하게 드러나 특히, 100 mg·kg<sup>-1</sup>이상의 농도에서는 엽장왜소화가 뚜렷하게 나타났다. 이러한 결과는 토양 내 카드뮴이 다른 증금속에 비하여 식물체로 흡수이동이 용이한 원소이고 식물체에 흡수되면 체내의 단백질 등과 금속 유기 복합체를 형성하여 식물의 대사작용을 저해하여 생장이 억제되는 것(전과 최, 2006)으로 해석된다.

납(Pb)처리구에서 엽장은 7월까지 꾸준히 성장하는 추세를 보였으나 그 이후에는 다소 감소하거나 더딘 경향을 나타내어 8월에는 무처리 > 250 mg·kg<sup>-1</sup>

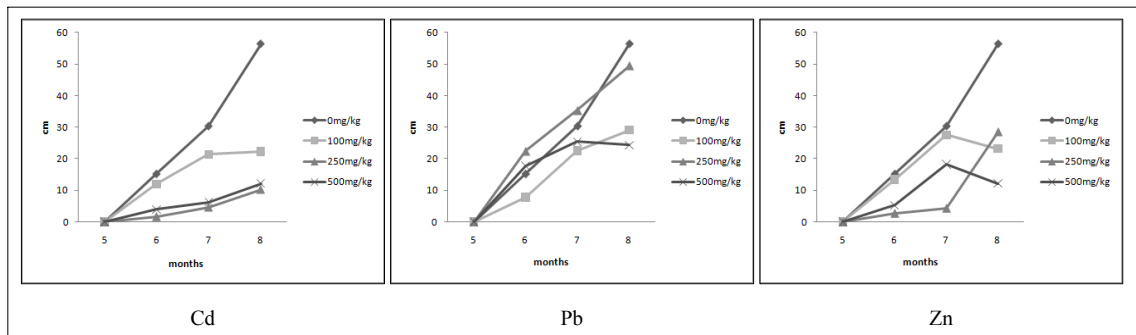


Fig. 1. Change of plant height of *Saxifraga stolonifera* as affected by different heavy metal concentration.

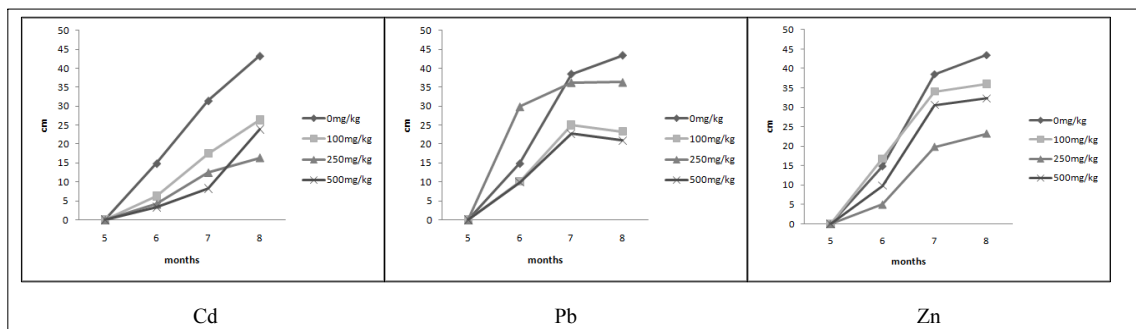


Fig. 2. Change of leaf length of *Saxifraga stolonifera* as affected by different heavy metal concentration.

100 mg·kg<sup>-1</sup> > 500 mg·kg<sup>-1</sup> 순으로 나타났다. 아연(Zn) 처리구에서는 시간이 경과됨에 따라 점차 증가하는 경향을 나타냈으나 7월 이후에는 완만한 성장률을 보였다. 초장변화율과는 달리 농도별 확연한 차이는 나타나지 않았으나 무처리 > 100 mg·kg<sup>-1</sup> > 500 mg·kg<sup>-1</sup> > 250 mg·kg<sup>-1</sup> 순으로 농도별 엽장차이를 보였다(Fig. 2).

카드뮴(Cd) 처리구에서의 바위취의 엽폭변화를 살펴보면, 초기에는 농도가 높은 500 mg·kg<sup>-1</sup>에서 가장 넓었으나 시간이 경과함에 따라 무처리구가 완만한 상승세를 보인 반면, 급격하게 좁아지는 경향을 나타내었으며, 특히 500 mg·kg<sup>-1</sup>와 250 mg·kg<sup>-1</sup>에서 그 변화가 비교적 뚜렷하였다. 납(Pb) 처리에서는 100 mg·kg<sup>-1</sup>을 제외하고 농도가 높을수록 무처리구보다 엽폭이 넓어지는 현상을 보였다. 아연(Zn) 처리도 농도가 높을수록 엽폭이 넓어지는 경향이 매우 뚜렷하였다(Fig. 3).

엽수 변화율에 있어 카드뮴(Cd) 처리구에서는 시간

이 경과할수록 농도차이에 상관없이 무처리에 비해 엽수의 감소가 뚜렷하였다. 납(Pb) 처리구의 경우 모든 처리구에서 점차 증가하는 경향을 나타내었고, 농도처리간 엽수 변화율의 차이는 뚜렷하지 않았다. 아연(Zn) 처리구의 엽수 변화율은 7월까지의 점차 증가하였으나 이후에는 완만한 성장세를 보였으며 100 mg·kg<sup>-1</sup> > 무처리 > 250 mg·kg<sup>-1</sup> > 500 mg·kg<sup>-1</sup> 순으로, 무처리구보다는 100 mg·kg<sup>-1</sup>에서 엽수가 많아지는 것으로 나타났다(Fig. 4).

카드뮴(Cd) 처리구에서 바위취의 엽록소함량은 무처리 > 100 mg·kg<sup>-1</sup> > 500 mg·kg<sup>-1</sup> > 250 mg·kg<sup>-1</sup> 순으로 농도가 높을수록 엽록소함량이 낮아 초장의 변화율과 유사한 경향을 나타냈다. 납(Pb) 처리구에서는 250 mg·kg<sup>-1</sup> > 무처리 > 100 mg·kg<sup>-1</sup> > 500 mg·kg<sup>-1</sup> 순으로 무처리구보다 250 mg·kg<sup>-1</sup> 농도처리구에서 높았다. 아연(Zn) 처리구에서는 100 mg·kg<sup>-1</sup> > 250 mg·kg<sup>-1</sup> > 무처리 > 500 mg·kg<sup>-1</sup> 순으로 대조구인 무처리보다 100 mg·kg<sup>-1</sup>에서 엽록소함량이 높았다(Fig. 4). 따라서, 카드

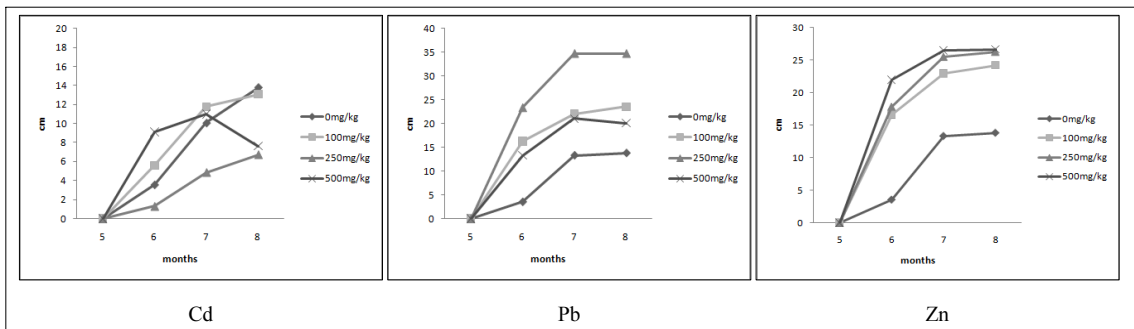


Fig. 3. Change of leaf width of *Saxifraga stoloniferaas* by affected different heavy metal concentration.

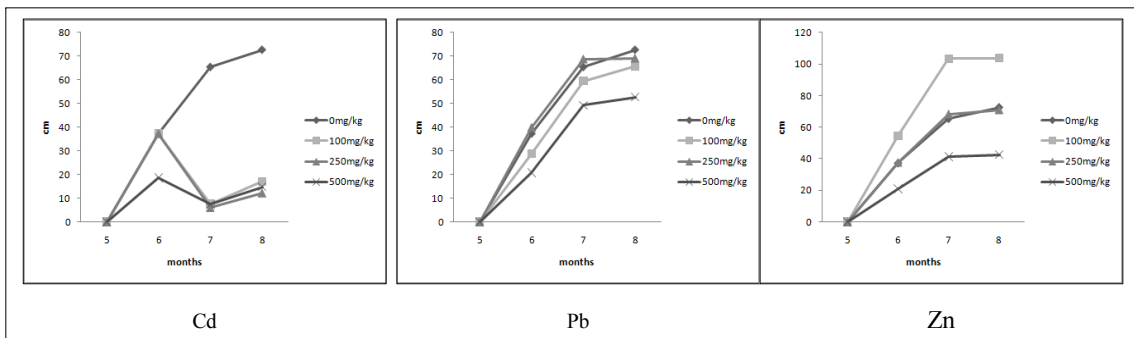


Fig. 4. Change of number of leave of *Saxifraga stoloniferaas* by affected different heavy metal concentration.

높 농도처리를 제외하고 납과 아연처리구에서는 무처리보다는 처리구에서 엽록소함량이 높은 것으로 나타났다.

일반적으로 중금속에 오염된 작물은 잎이 황화되고 생장이 억제되므로 수량이 감소한다(Yang과 Lee, 1990). 특히 식물체가 카드뮴을 많이 흡수하면 엽록소의 생합성과정 중 촉매작용에 필요한 SH-group에 카드뮴이 결합됨으로 엽록체의 전자전달계에 영향을 미쳐 생합성이 저해된다고 하였다(Nriagu, 1980). 하지만 본 연구에서 납과 아연 농도처리에 따른 잎의 황화 등의 증상이 카드뮴처리에 비해 확인하지 않았던 것은 Pb이 토양에서 음이온과 침전물을 형성하여 불용성이 형태로 변하고, 타 양이온과 길항적 관계에 의하여 식물체에 흡수가 잘 되지 않으며, 식물체에 흡수된 Pb이 식물체 내에서 음이온과 침전되어 잎의 황화를 유발할 정도로 잎에 축적되지 않았기 때문이라 판단된다.

Yang과 Lee(1990)는 상추를 카드뮴 농도별(0.1-20 mg·L<sup>-1</sup>)로 수경재배하여 조사한 결과, 1 mg·L<sup>-1</sup> 이상 처리에서 뚜렷한 황화현상이 나타났다고 하였으며

무에서 잎 전체가 황화(Moon *at al*, 1990)되었다는 보고로 볼 때, 카드뮴에 대한 바위취의 내성 농도는 이보다 높은 것으로 판단된다.

식물의 중금속 과다장에는 성장량 및 수량 감소 그리고 잎의 황화 등이 일반적인데 잎의 황화는 Cd, Cu, Zn, Co, Ni, Cr 등이 과다 흡수될 때 발생된다고 알려졌다(전과 최, 2007). 바위취의 대체적인 장애 증상을 보면 100 mg·kg<sup>-1</sup> 이상의 수준의 카드뮴처리에서 잎이 황록색으로 변하는 황화현상과 왜소화현상이 나타났으나 고사되지는 않았다. 반면, 납의 경우 250 mg·kg<sup>-1</sup>에서, 아연의 경우 100 mg·kg<sup>-1</sup>에서 생육이 양호하고 황화현상이 나타나지 않아 도시 내 저농도 중금속 오염지역에 장기적 식물재배수종으로 적용 가능성을 보여주고 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 자생식물 중 음지식물이면서 조경용으로 흔히 이용되는 바위취(*Saxifraga stolonifera*)를 대상으로 토양 내 아연, 납, 카드뮴 농도(무처리, 100 mg·

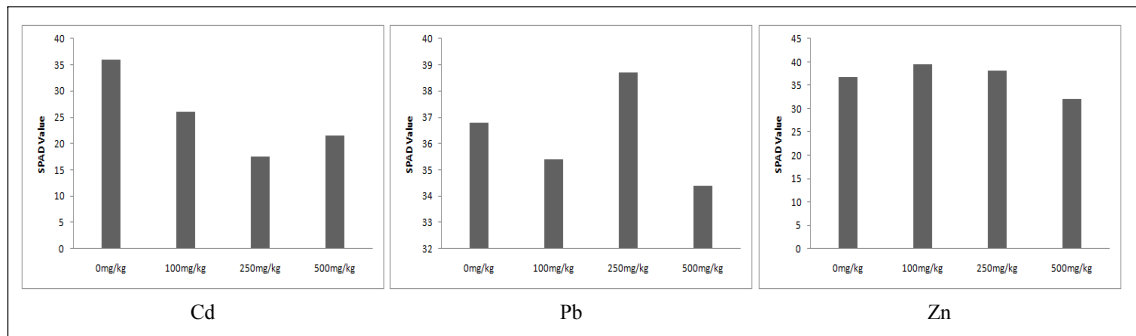


Fig. 5. Total Chlorophyll contents of *Saxifraga stolonifera*as by affected different heavy metal concentration.

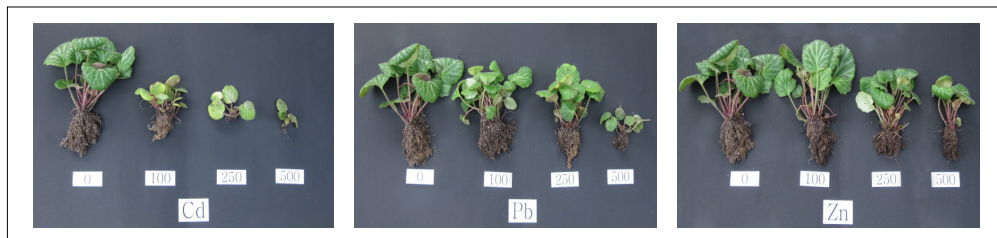


Fig. 6. Result of growth on the *Saxifraga stolonifera*as by affected different heavy metal concentration.

kg<sup>-1</sup>, 250 mg·kg<sup>-1</sup>, 500 mg·kg<sup>-1</sup>)에 따른 내성을 평가함으로써 도시 내 음지 중금속오염지에 대한 내성 지표 식물을 선발하고, 다양한 생태적 환경복원소재로서의 실효성을 높이고자 한다.

식재초기에는 식물의 생육상태가 양호했으나, 시간이 경과됨에 따라 중금속 종류와 농도별 생육상태 차이가 뚜렷하게 구별되었다. 특히, 100 mg·kg<sup>-1</sup> 이상의 수준의 카드뮴(Cd)처리에서 잎이 황록색으로 변하는 황화현상과 왜소화현상이 나타나는 등 생육이 부진하였으나 고사되지는 않았다. 반면, 납(Pb)과 아연(Zn)의 경우 500 mg·kg<sup>-1</sup> 이하의 농도처리에서 외부적인 생육장애현상을 발견할 수 없어 도시 내 저농도 중금속 오염지역에 장기적 식물재배정화수종으로 적용 가능할 것으로 판단되며, 추후 바위취에 의한 토양 내 중금속 흡착정도에 관한 지속적인 연구가 필요하다고 본다.

#### 참 고 문 헌

- 김계훈, 박순남, 2000, 중부 지역 도시 자연녹지 토양중 NO<sup>3-</sup>, SO<sup>4</sup><sup>2-</sup> 및 중금속 분포, 한국환경농학회지, 19(4), 351-357.
- 김정규, 이상환, 1999, 식물을 이용한 토양복원 - Phytoremediation, 한국환경농학회 심포지움 및 학술발표회 논문집, 57-88.
- 전병두, 최종승, 2006, 배양액의 카드뮴 수준에 따른 배나무 유목의 생육 및 카드뮴 축적, 한국원예과학기술지, 24(3), 364-369.
- 전병두, 최종승, 2007, 배양액의 납 수준에 따른 배나무 유목의 생육과 납 축적, 한국원예과학기술지, 25(2), 145-149.
- 이덕범, 2008, 식물을 이용한 임해준설매립지 중금속 오염토양의 정화에 관한 연구, 박사학위논문, 순천대학교.
- 최문경, 장매희, 2003, 아연폐광지역의 식물복원을 위한 썩과 해바라기의 생리·생화학적 반응과 중금속 축적, 한국원예과학기술지, 21(4), 451-456.
- 환경부, 2008, 토양측정망 및 실태조사결과, 환경부, 328pp.
- Anthony, G. K., Singh, B., Bhatia, N. P., 2006, Heavy metal tolerance in common fern species, Australian Journal of Botany, 55(1), 63-73.
- Kang, K. C., Kim, S. S., Choi, J. W., Kwon, S. H., 2008, Sorption of Cu<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> onto acid- and base-pretreated granular activated carbon and activated carbon fiber samples, J. Ind. Eng. Chem., 14(1), 131-135.
- Moon, Y. H., Kim, Y. H., Kim, H. S., 1990, Effects of heavy metals Cr, Ni, Cd, Cu, Zn on growth of radish and Chinese cabbage in soils, Kor. J. Environ. Agric., 9, 113-119.
- Nriagu, R. D., 1980, Cadmium in the environment, Part 1, Ecological cycling, 639-648.
- Yang, Y. J., Lee, B. Y., 1990, Effect of heavy metal treatments on the growth and uptake in hydroponically cultured lettuce, J. Kor. Soc. Hort. Sci., 31, 37-41.