

토양중 카드뮴과 납의 Phytoextraction을 위한 식물재배 연구

정구복* · 김원일 · 문광현

농업과학기술원

Studies on the Phytoextraction of Cadmium and Lead Contaminated Soils by Plants Cultivation

Goo-Bok Jung*, Won-Il Kim, and Kwang-Hyun Moon (National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea, E-mail : gbjung@rda.go.kr)

ABSTRACT : In order to select more proper plants for phytoextraction at the heavy metal polluted areas, 11 species of non-edible plants were cultivated at the cadmium(Cd) and Lead(Pb) treated soils and analyzed the content of the absorbed Cd and Pb in each part of plants. Plants include three fibers(*Linum usitatissimum*, *Cannabis sativa*, *Gossypium* spp.), three flowers(*Calendula officinalis*, *Rhododendron lateritium*, *Portulaca grandiflora*), and five trees(*Pinus thunbergii*, *Magnolia kobus*, *Populus nigra* x *P. maximowiczii*, *Euonymus japonica*, *Fraxinus rhynchophylla*). Yield of tree species were higher than that of fiber and flower species. Cd and Pb were highly accumulated in root rather than leaves and stems. The Cd content of plants was in the order *Portulaca grandiflora* > *Calendula officinalis* > *Gossypium* spp. > *Linum usitatissimum*, Pb was *Cannabis sativa* > *Linum usitatissimum* > *Fraxinus rhynchophylla*. Total absorbed Cd by each plant was in the order *Populus nigra* x *P. maximowiczii* > *Euonymus japonica* > *Rhododendron lateritium*, but Pb was *Populus nigra* x *P. maximowiczii* > *Rhododendron lateritium* > *Euonymus japonica*. Total absorbed Cd and Pb contents in plants were negatively correlated with the residual Cd and Pb in the treated soils. It was estimated that *Populus nigra* x *P. maximowiczii*, *Euonymus japonica*, *Fraxinus rhynchophylla*, and *Rhododendron lateritium* were the most effective species for phytoextraction in the polluted area considering yield and heavy metal uptake.

Key words : Phytoextraction, Cadmium, Lead, Soil pollution

서 론

농업생태계에서 토양의 중금속오염은 주로 산업폐기물 침출수, 공장폐수 및 광산폐수 등의 유입에 기인하고 그에 따른 농업생산성 저하 및 농산물오염으로 인·축에 피해를 줄 수 있다. 우리나라의 종합적인 토양오염도 평가 및 토양오염의 복원정책은 1996년 토양환경보전법이 시행되면서 수립되었다고 할 수 있다. 오염토양의 개량방법들은 크게 물리적, 화학적 및 생물학적인 방법으로 분류할 수 있다. 물리적인 방법에는 반전심경, 객토, 배토, 삭토 등의 방법이 있고 화학적인 방법으로는 유해물질의 불용화, 흡착, 용탈, 세척 등이 있다^{1,2)}. 오염토양의 복원방법중 기존의 물리·화학적 방법이 고비용 및 2차 오염 문제를 야기하고 있어 최근에는 식물을 이용하여 오염물질을 제거하거나 유해하지 않도록 조치하는 기술인 Phytoremediation에 대한 관심이 커지고 있다¹⁻⁶⁾. 특히 우리나라 농경지의 주요오염원인 휴·폐광산이 전국에 산재하고 지역적으로 고립되어 처리비용이 높은 점으로 볼 때 식물을 이용한 복원기술이 타당할 것으로 판단된다^{2,7,8,9)}. 식물정화기

술(Phytoremediation)중 토양의 금속성분 정화기법은 식물축적(Phytoaccumulation)이라고 불리는 식물추출(Phytoextraction)과 식물뿌리를 통한 흡수 및 축적, 뿌리내 흡착 및 침전 등으로 오염물질을 고정시키는 식물안정화(Phytostabilization)기법이 대표적인 기술이다^{1,2,4)}. 최근의 국내외 연구는 오염물질을 고농도로 축적하는 식물(hyperaccumulator)의 탐색 및 축적능 평가, 식물독성과 생리변화, 오염물질별 축적기작 및 내성 연구 등이 수행되고 있다¹⁰⁻¹⁵⁾.

본 연구는 중금속 오염지에 대한 phytoremediation용 중금속 축적식물의 선발을 위하여 비 식용작물이면서 경제성 작물인 섬유류 3종, 화훼류 3종 및 수목류 5종을 공시하여 카드뮴 및 납 처리토양에서 재배한 후 각 식물의 함량 및 흡수량을 평가하였다.

재료 및 방법

공시식물

토양의 카드뮴 및 납에 대한 축적 식물종 탐색시험에 공시한

Table 1. Ecological characteristics of the plant used pot experiment

Plant species	Family	Life cycle	Plant height(m)	Flowering season
<i>Linum usitatissimum</i>	Linaceae	annual	1	6
<i>Cannabis sativa</i>	Cannabaceae	annual	2.5	7~8
<i>Gossypium</i> spp.	Malvaceae	annual	0.6	8~9
<i>Calendula officinalis</i>	Compositae	biennial	0.2~0.3	7
<i>Rhododendron lateritium</i>	Ericaceae	perennial	0.8	7
<i>Portulaca grandiflora</i>	Portulacaceae	annual	0.1~0.2	8~10
<i>Pinus thunbergii</i>	Pinaceae	perennial	10	5
<i>Magnolia kobus</i>	Magnoliaceae	perennial	8	3
<i>Populus nigra</i> x <i>P. maximowiczii</i>	Salicaceae	perennial	15~30	4~5
<i>Fraxinus rhynchophylla</i>	Oleaceae	perennial	15	5
<i>Euonymus japonica</i>	Celastraceae	perennial	3	7

식물은 섬유류인 아마(*Linum usitatissimum*), 대마(*Cannabis sativa*), 목화(*Gossypium* spp.) 등 3종, 화훼류인 메리골드(*Calendula officinalis*), 영산홍(*Rhododendron lateritium*), 채송화(*Portulaca grandiflora*) 등 3종, 수목류인 해송(*Pinus thunbergii*), 목련(*Magnolia kobus*), 양황철(*Populus nigra* x *P. maximowiczii*), 사철나무(*Euonymus japonica*), 물푸레나무(*Fraxinus rhynchophylla*) 등 5종을 공시하였다.

공시식물중 섬유류 3종, 화훼류 3종은 농촌진흥청 산하기관인 작물시험장 및 원예시험장에서 분양받았으며 수목류는 임목육종연구소 및 종묘회사를 통하여 구입하였다. 자연상태에서 생육하는 공시식물의 생태적 특성은 표 1과 같다.

시험방법 및 처리내용

재배한 포트 규모는 지름 58cm(1/400a pot), 깊이 50cm의 무저pot에 카드뮴과 납이 처리된 토양 60 kg을 충전하여 시험하였고 무재배를 포함하여 각 식물을 4반복으로 수행하였다. 토양의 중금속 처리는 카드뮴의 경우 $CdCl_2 \cdot 2 \frac{1}{2}H_2O$ 를 이용하여 15 mg kg^{-1} , 납의 경우 $PbCl_2$ 를 이용하여 100 mg kg^{-1} 으로 처리하였다. 공시토양은 사양토로 이화학적 특성은 표 2와 같이 토양 pH 및 유기물은 일반 밭토양과 유사하였고, 인산 및 양이온은 일반 밭토양보다 낮게 나타났다. 시험대상 중금속인 카드뮴 및 납함량은 일반 밭토양의 평균치보다 낮은 함량을 보였다.

Table 2. Physico-chemical properties of the soil used

Texture	pH (1:5)	OM (g kg^{-1})	Av. P_2O_5 (mg kg^{-1})	Ex. Cations (Cmol kg^{-1})			Cd --(mg kg^{-1})--	Pb
				K	Ca	Mg		
SL	5.8	23.0	34.0	0.11	1.40	0.30	0.058	2.29

식물재배방법 및 시비량

포트작업 및 중금속 처리는 4월 초에 수행하였고 파종 및 정식은 3월 말에서 5월초까지 수행하였다. 시비량은 섬유작물인 아마, 대마, 목화의 경우 농진청 표준시비량을 적용하였고, 화훼작물 및 수목류는 농가 및 임업연구원의 관행시비량에 맞추어 시비하였다. 수확은 8월말부터 10월초까지 식물에 따라 수확기에 맞추어 수행하였다. 식물별 포트당 주수는 대마, 목화 및 메리골드가 5주, 수목류인 사철나무, 물푸레나무, 양황철, 목련 및 해송이 4주, 아마 25주, 영산홍이 3주, 채송화 13주를 정식하였다.

토양 및 식물체의 분석방법

토양 채취는 식물을 수확한 후 대표성을 갖도록 지름 20mm용 시료채취기를 이용하여 10지점의 혼합시료를 사용하였다. 시험전 후 토양의 시료 조제는 풍건하여 분쇄한 후 20mesh체를 통과시켜 일반 화학성분 분석에 이용하였고 토양을 다시 유발에서 미세하게 갈아 중금속 분석용으로 사용하였다. 토양의 화학성분 분석은 토양 화학분석법¹⁶⁾에 준하여 pH(1:5)는 pH-meter법, 유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법, 치환성양이온은 1N-Ammonium Acetate(pH 7.0)로 침출 여과하여 분석용 시료로 이용하였다. 토양의 카드뮴과 납 분석은 토양오염공정시험방법¹⁷⁾에 준하여 토양 10g을 100ml 삼각후라스크에 취하여 0.1N-HCl 50ml를 가하고 30°C에서 각각 1시간 진탕한 후 여과하여 분석용시료로 이용하였다.

식물체는 수확한 시료를 물과 증류수로 세척하여 잎, 줄기, 뿌리의 부위별로 분리하여 잘게 썰어 비닐하우스내에서 1차 건조하고 건조기내에서 2차 건조하여 분쇄기로 갈아 분석시료로 사용하였다. 식물체 분해는 식물체 3g을 취하여 분해액인 삼상용액($HNO_3:HClO_4:H_2SO_4=10:4:1$)을 40ml씩 가한 후 하루정도 침지한 다음 열판상에서 분해하고 No. 5B여지로 여과하였다¹⁶⁾.

전처리한 토양 및 식물체의 화학성분, 카드뮴 및 납 정량은 원자흡광분광광도계(Model IL-251)를 이용하여 측정하였다. 토양의 유효인산은 발색시킨 후 흡광광도계(Beckman, DU-650)를 이용하여 비색 정량하였다^{16,17)}.

결과 및 고찰

중금속 오염토양에 대한 식물학적복원에 적합한 식물종 탐색을 위하여 카드뮴 및 납 처리토양에서 포트 재배한 공시식물의 부위별 건물생산량은 표 3과 같다. 각 부위별 건물량은 대체로 줄기에서 높게 나타났고 식물별 총 건물량은 섬유류의 경우 목화, 화훼류는 영산홍, 수목류는 양황철이 높게 나타났다. 공시식물의 총 건물량은 양황철>물푸레나무>사철나무>영산홍 순으로 나타나 섬유류 및 화훼류보다 수목류에서 높게 나타났다.

공시식물의 부위별 카드뮴함량과 흡수량은 표 4와 같다. 식물 부위별 Cd함량은 뿌리에서 가장 높았고 대체로 줄기, 잎 순으로 나타났다. 부위별 카드뮴 함량을 식물별로 살펴보면 잎과 줄기부

Table 3. Dry weight yield in leaf, stem and root of testing plants (Unit : g pot⁻¹, DW)

Plants species	Leaf	Stem	Root	Sum
<i>L. usitatissimum</i>	16.3	47.4	4.8	68.4
<i>C. sativa</i>	36.1	82.4	22.0	140.5
G. spp.	127.2	115.5	47.3	289.9
<i>C. officinalis</i>	44.6	43.1	2.9	90.6
<i>R. lateritium</i>	144.8	270.0	126.5	541.2
<i>P. grandiflora</i>	26.1	30.3	2.6	59.0
<i>P. thunbergii</i>	129.0	80.0	58.7	267.7
<i>M. kobus</i>	57.5	133.7	81.1	272.3
<i>P. n x P. maxim.</i>	1128.8	2066.2	449.2	3644.2
<i>F. rhynchophylla</i>	158.3	563.6	371.8	1093.7
<i>E. japonica</i>	167.8	484.5	304.5	956.8

위는 메리골드 및 채송화가 높았고, 뿌리는 채송화 및 아마가 높게 나타났다. 각 부위별 함량과 건물량을 고려한 평균 카드뮴 함량은 채송화>메리골드>목화>아마 순으로 높게 나타났다. 식물의 카드뮴 농도를 지상부/지하부의 농도비로 중금속 축적정도를 비교해 보면 대부분의 공시식물이 지하부의 농도가 매우 높는데 목화 및 메리골드의 경우 다른 식물에 비하여 지상부의 카드뮴 농도가 높게 나타났다. 식물에 의한 정화기법에서 식물탐색 및 연구대상이 되는 hyperaccumulator는 지상부 건물당 Cd 0.01, Cu 0.1, Pb 0.1, Zn 1% 이상을 함유하는 식물²⁴⁾로 정의 하였는데 본 연구 결과 메리골드 및 채송화에서 카드뮴이 100 mg kg⁻¹ 이상의 농도를 보였다. 전국에 산재된 휴폐광산 인근에서 자생하는 식물종을 조사한 결과 정 등¹⁰⁾은 *Osmunda japonica*(고비)의 Cd 농도가 잎 242.0, 줄기 291.1, 뿌리 59.5 mg kg⁻¹이었고, 다른 식물종보다 고사리과가 Cd 축적이 높은 것으로 보고하였으며, 김 등⁹⁾은 쑥의 지상부가 Cd 26.4, Zn 1,191 mg kg⁻¹으로 다른 식물보다 체내 축적이 높다고 하였다. 또한 강 등⁸⁾은 중금속을 처리하여 양액 재배한 결과 Cd 축적량이 미국돼지풀에서 Cd 311, Cu 368 mg kg⁻¹로 보고하였고, 김 등⁷⁾은 토양에서 재배시험을 한 결과 메리골드의 Cd 함량이 161.7 mg kg⁻¹으로 보고하였다. 카드뮴 축적종으로 보고된 식물 및 농도는 *Thlaspi caerulescens*에서 경엽 중 1,800⁴⁾ mg kg⁻¹, 1,740¹¹⁾ mg kg⁻¹, 1,140¹²⁾ mg kg⁻¹ 이었고, Brown 등^{11,12)}은 중금속에 대한 내성이 컸으며 건물생산량의 감소가 되지 않는 상태에서 Cd 1,000 mg kg⁻¹이상을 축적한다고 하였다. 식물별 카드뮴 총 흡수량은 양황철>사철나무>영산홍>목화>물푸레나무 순으로 나타나 건물량이 높은 식물이 다른 식물에 비해 흡수량이 많은 것으로 나타났다. 각 식물부위별 카드뮴 흡수량을 보면 아마, 목화, 메리골드, 채송화 및 양황철이 줄기에서, 영산홍, 해송, 목련, 물푸레나무, 사철나무 등은 뿌리부위에서 높게 나타났다. 식물별 카드뮴 흡수량 순위를 볼 때 잎은 양황철, 줄기는 양황철, 목화 및 사철나무, 뿌리는 사철나무, 영산홍, 양황철, 물푸레나무 순으로 높게 나타났다.

Table 4. Cadmium content and uptake in leaf, stem and root of testing plants

Plants species	Cd content (mg kg ⁻¹)			Cd uptake (mg pot ⁻¹)			
	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root	Sum
<i>L. usitatissimum</i>	50.1	88.0	290.8	0.82	4.15	1.38	6.35
<i>C. sativa</i>	10.6	25.6	143.6	0.38	2.11	3.20	5.79
G. spp.	35.4	127.2	170.6	4.39	13.78	7.96	26.13
<i>C. officinalis</i>	102.8	150.6	158.2	4.62	6.47	0.46	11.57
<i>R. lateritium</i>	21.4	17.6	204.9	3.12	4.76	25.99	33.87
<i>P. grandiflora</i>	93.3	128.4	537.4	2.42	3.85	1.41	7.68
<i>P. thunbergii</i>	11.9	33.8	92.4	1.58	2.74	5.49	9.81
<i>M. kobus</i>	3.0	2.9	109.0	0.17	0.39	8.80	9.37
<i>P. n x P. maxim.</i>	13.9	14.3	48.7	15.54	28.89	21.77	66.20
<i>F. rhynchophylla</i>	3.6	5.3	55.8	0.57	2.97	20.46	24.00
<i>E. japonica</i>	2.2	26.3	160.4	0.37	12.71	48.33	61.41

식물복원에 이용할 수 있는 축적종은 빠른 생장과 높은 건물 생산량을 가지며 지하부에서 지상부로의 중금속 이동 축적이 용이한 특성을 지녀야 한다는 보고^{12,4)}들로 볼 때, 본 시험결과 카드뮴 농도가 높은 식물종이 건물생산량이 낮고 카드뮴 흡수량이 수목류보다 낮아 효율성이 떨어진다고 할 수 있다. 이러한 측면에서 최근의 여러 보고^{23,56)}에서는 축적식물의 선발·적용에 있어 오염물질의 유효도 및 건물생산량과 관련한 토양개량제, 미생물, 킬레이트 화합물 등의 농경학적 방법 모색과 식물의 생리 생화학적 접근 등의 연구를 강조하였다.

공시식물의 부위별 납 함량과 흡수량은 표 5와 같다. 식물 부위별 납 함량은 뿌리가 줄기 및 잎보다 높게 나타났다. 부위별 납 함량을 식물별로 살펴보면 모든 부위에서 아마 및 대마가 높았다. 각 부위별 함량과 건물량을 고려한 평균 납 함량은 대마>아마>물푸레나무>사철나무>해송 순으로 높게 나타났다.

식물에 의한 정화기법에서 식물탐색 및 연구대상이 되는 hyperaccumulator는 지상부 건물당 Pb 0.1% 이상을 함유하는 식물²⁴⁾로 정의 하였는데, 본 연구 결과 엽 7.6~35.1, 줄기 6.4~38.7 mg kg⁻¹로 나타나 축적종은 발견되지 않았다. 지금까지 보고³⁾된 0.1%이상의 납 축적종은 4종 정도로 이들 대부분은 열대 및 온대 지역의 식물종이다. 보고된 납 축적 식물종 및 농도는 *Thlaspi rotundifolium* (8,200 mg kg⁻¹ in shoots)⁴⁾, *Armeria maritima* ssp. *halleri*(1,760 mg kg⁻¹ in roots)¹⁵⁾, *Biscutella laevigata*(1,934 mg kg⁻¹ in roots)¹⁴⁾ 등으로 카드뮴 및 아연이 흡수 이동이 용이하여 엽중의 농도가 높은 반면 납 및 구리 축적종들은 뿌리에 고정되어 축적되는 것으로 알려져 있다.

식물별 납의 총 흡수량은 양황철>물푸레나무>사철나무>영산홍 순으로 높았으며 식물 부위별 납 흡수량은 잎과 줄기는 양황철, 뿌리는 양황철, 물푸레나무 및 사철나무에서 높게 나타났다. 각 식물부위별 납 흡수량을 보면 아마가 줄기에서 높았고, 나머

Table 5. Lead content and uptake in leaf, stem and root of testing plants

Plants species	Pb content (mg kg ⁻¹)			Pb uptake (mg pot ⁻¹)			
	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root	Sum
<i>L. usitatissimum</i>	32.4	38.7	92.4	0.52	1.84	0.44	2.80
<i>C. sativa</i>	35.1	21.3	135.0	1.29	1.74	3.09	6.12
G. spp.	11.2	15.6	65.6	1.44	1.80	3.09	6.33
<i>C. officinalis</i>	10.7	9.1	93.2	0.47	0.39	0.27	1.13
<i>R. lateritium</i>	7.6	11.7	62.3	1.12	3.14	7.81	12.08
<i>P. grandiflora</i>	10.7	8.9	69.2	0.28	0.27	0.18	0.73
<i>P. thunbergii</i>	10.3	14.5	75.4	1.32	1.16	4.45	6.92
<i>M. kobus</i>	15.9	10.5	39.7	0.90	1.39	3.20	5.49
<i>P. n x P. maxim.</i>	18.2	10.7	68.9	20.52	21.85	30.47	72.84
<i>F. rhynchophylla</i>	10.9	8.8	60.4	1.68	4.92	21.93	28.53
<i>E. japonica</i>	9.8	6.4	66.0	1.64	3.13	19.85	24.63

지 식물들은 뿌리에서 높게 나타났다. 위의 결과 식물의 납 흡수량은 카드뮴과 비슷하게 건물생산량이 높은 수목류에서 높게 나타났고 뿌리에서 고정되어 축적되는 납의 특성을 볼 때 카드뮴보다 토양내 유효도 및 흡수 이행에 관련한 연구가 필요하다고 생각된다.

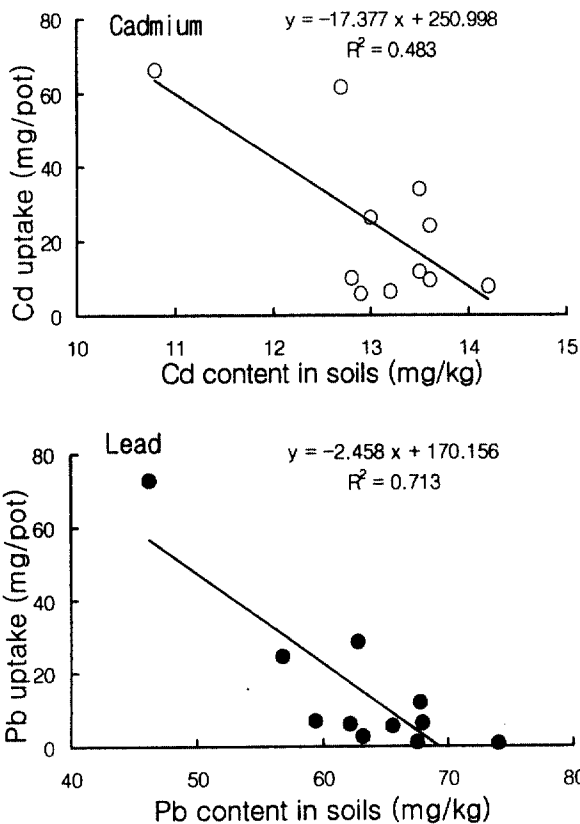


Fig. 1. Relationships between heavy metals uptake in plants and residual heavy metals in soil.

시험후 토양에 잔류한 카드뮴, 납 함량과 식물별로 흡수한 카드뮴 및 납의 총 흡수량과의 관계는 그림 1과 같다. 토양의 카드뮴 자연감수율이라 할 수 있는 무재배의 경우 카드뮴 및 납 감소율이 8.1, 14.3%로 나타났고 식물을 재배한 결과 무재배보다 감소율이 높게 나타났다. 시험후 토양의 잔류 Cd 및 Pb 함량은 각 식물의 총 흡수량이 높을수록 잔류량은 적은 고도의 부의 상관을 보였다. 또한 식물별 Cd 및 Pb의 총 흡수량이 높은 양황철, 사철나무, 영산홍, 물푸레나무 등 수목류를 재배한 토양의 카드뮴 및 납 감소율이 다른 식물재배보다 높게 나타났다.

본 연구 결과에서도 식물체내 중금속 농도가 높은 식물이 기존의 축적종으로 보고된 식물들의 문제점으로 지적된 낮은 건물생산량으로 인하여 총 흡수 제거량이 낮게 나타났다. 따라서 식물학적 복원의 방향성으로 중금속 내성을 지닌 축적식물 선발과 토양내 유효도를 높이고 건물생산량을 높일 수 있는 토양관리 연구가 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

요 약

중금속 오염토양에 대한 식물복원법(phytoremediation)중 phytoextraction에 적합한 식물종의 탐색을 위하여 비식용식물인 섬유류 3종, 화훼류 3종 및 수목류 5종을 대상으로 Cd과 Pb를 각각 15, 100 mg kg⁻¹으로 조절하여 처리한 토양에서 pot 재배한 후 식물중에 흡수된 함량 및 그 흡수량을 조사하였다.

식물의 건물생산량은 양황철, 물푸레나무, 사철나무 등 수목류가 섬유류 및 화훼류보다 높게 나타났다. 식물의 부위별 Cd 및 Pb함량은 줄기와 잎보다 뿌리에서 높았고, 식물별 Cd 함량은 체송화, 메리골드, 목화, 아마 순으로 높았으며 Pb 함량은 대마 및 아마에서 높게 나타났다. 식물의 Cd 및 Pb 총 흡수량은 양황철, 사철나무, 물푸레나무, 영산홍 순으로 높게 나타났다. 식물의 Cd 및 Pb 총 흡수량은 시험후 토양에 잔류한 Cd, Pb 함량과 고도의 부의 상관성을 보였다. 식물의 건물생산량 및 흡수량을 볼 때 양황철, 사철나무, 물푸레나무 및 영산홍 등이 토양정화식물로의 가치가 있다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. Salt, D. E., M. Blaylock, P.BAN. Kumar, S: Dushenkov, BD. Ensley, I. Chet, I. Raskin. 1995. Phytoremediation. A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Bio/Tech.* 13 : 468~474.
2. Kim J. G., and S. H. Lee. 1999. Phytoremediation. *Proceedings of 30th Meeting & Symposium on "Remediation - Technology and Prospect"* of the Korean Society of Environmental Agriculture. pp. 57~88.
3. Salt, D. E., R. D. Smith, and I. Raskin. 1998.

- Phytoremediation. Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 49 : 643~668.
4. Baker. A. J. M., and R. R. Brooks. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements - A review of their distribution, ecology and phytochemistry. Biorecovery. 1 : 81~126.
 5. Chaney. R. L., M. Malik, Y. M. Li, S. L. Brown, J. S. Angle, and A. J. M. Baker. 1997. Phytoremediation of soil metals. Current Opinions in Biotechnology. 8 : 279~284.
 6. Cunningham. S. D., and D. W. Ow. 1996. Promises and prospects of phytoremediation. Plant Physiol. 110 : 715~719.
 7. Kim B. Y., K. S. Kim, and J. K. Cho. 1989. Studies on the cadmium removal from soil through crops cultivation. J. Korean Soc. Soil Sci. Fert. 22(2) : 111~115.
 8. Kang B. H., S. I. Shim, S. G. Lee, K. H. Kim, and I. M. Chung. 1998. Study on the potential of phytoremediation using wild plants for heavy metal pollution. Kor. J. Environ. Agric. 17(4) : 312~318.
 9. Kim J. G., S. K. Lim, S. H. Lee, Y. M. Yoon, C. H. Lee, and C. Y. Jeong. 1999. Evaluation of heavy metal pollution and plant survey around inactive and abandoned mining areas for phytoremediation of heavy metal contaminated soils. Kor. J. Environ. Agric. 18(1) : 28~34.
 10. Jung K. C., B. J. Kim, and S. G. Han. 1993. Survey on heavy metals contents in native plant near old zinc mining sites. Kor. J. Environ. Agric. 12(2) : 105~111.
 11. Brown. S. L., R. L. Chaney, J. S. Angle, and A. J. M. Baker. 1994. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and bladder campion for zinc and cadmium contaminated soil. J. Environ. Qual. 23 : 1151~1157.
 12. Brown. S. L., R. L. Chaney, J. S. Angle, and A. J. M. Baker. 1995. Zinc and Cadmium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solution. Soil Sci. Am. J. 59 : 125~133.
 13. Ebbs. S. D., M. M. Lasat, D. J. Brady, J. Cornish, R. Gordon, and L. V. Kochian. 1997. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil. J. Environ. Qual. 26 : 1424~1430.
 14. Wenzel. W. W., and Jockwer. F. 1999. Accumulation of heavy metals in plants grown on mineralised soils of the Austrian Alps. Environmental Pollution. 104 : 145~155.
 15. Muller. H. W., F. van. Oort, B. Gelie, and M. Balabane. 2000. Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter. Environmental Pollution. 109 : 231~238.
 16. NIAST(National Institute of Agricultural Science and Technology). 1988. Methods of Soil Chemical Analysis.
 17. Ministry of Environment. 1996. Standard Test Method for Soil Pollution.