

장기재배 시험에 의한 중금속 오염토양의 식물정화

정구복* · 김원일 · 이종식 · 김경민¹⁾

농업과학기술원 환경생태과 · ¹⁾연세대학교 환경공학과

(2001년 11월 6일 접수, 2002년 1월 24일 수리)

Phytoremediation of Soils Contaminated with Heavy Metal by Long-Term Cultivation

Goo-Bok Jung*, Won-Il Kim, Jong-Sik Lee and Kyung-Min Kim¹⁾ (National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea, ¹⁾Dept. of Environmental Engineering, Yonsei University, Wonju 220-710, Korea,)

Abstract : In order to select proper plants for phytoremediation at heavy metal contaminated areas, eight species of non-edible plants were cultivated at the heavy metal contaminated soils near a metal smelter. The content of the absorbed heavy metals (Cd, Cu, Pb and As) at different part of the plants were analyzed. Plants included five tree species (*Populus nigra* x *P. maximowiczii*, *Euonymus japonica*, *Acer palmatum*, *Celtis sinensis*, *Buxus microphylla*), two flower species (*Rhododendron lateritium*, *Calendula officinalis*), and lawn (*Zoysia japonica*). Biomass yield of tree species was higher than those of flower or lawn species. Heavy metals were highly accumulated in roots compared to those in leaves and stems. The concentrations of Cd, Cu, Pb, and As in *Buxus microphylla* were greater than those in other plant species. Total absorbed Cd and Pb contents, from high to low by each plant in experimental plots were in the order of *Populus nigra* x *P. maximowiczii*, *Celtis sinensis* and *Acer palmatum*. They were *Celtis sinensis*, *Populus nigra* x *P. maximowiczii* and *Buxus microphylla* for Cu, and *Buxus microphylla*, *Acer palmatum* and *Populus nigra* x *P. maximowiczii* for As. It was estimated that among eight plant species used in the experiment *Populus nigra* x *P. maximowiczii*, *Buxus microphylla*, *Acer palmatum*, and *Celtis sinensis* were the most effective species for phytoremediation in the heavy metals polluted areas considering biomass yield and heavy metal uptake.

Key words : heavy metals, phytoremediation, heavy metal-contaminated soil

서 론

우리나라의 종합적인 토양오염도 평가와 토양오염의 복원정책은 1996년 토양환경보전법이 시행되면서 수립되었다고 할 수 있다. 농업환경에서 중금속 오염에 대한 종합 평가는 오염원의 확산 방지와 정화를 목적으로 수행되고 오염토양의 정화방법은 크게 물리적, 화학적 및 생물학적인 방법으로 분류할 수 있다^{1,2)}. 토양 정화기법중 기존의 물리·화학적 방법은 고비용 및 2차 오염 문제를 야기하고 있어 최근에는 식물을 이용하여 오염물질을 제거, 안정화 또는 유해하지 않도록 조치하는 기술인 식물학적 오염 토양 정화방법(phytoremediation)에 대한 관심이 커지고 있다¹⁻⁶⁾.

식물학적 정화방법중에서 토양 중금속에 대한 중요한 정화기법은 중금속 고축적 식물종(hyperaccumulator)을 이용하여 뿌리

조직에서 토양중에 존재하는 금속을 흡수하고 지상부로 수송하여 조직에 축적시킨 후 수확하여 정화시키는 식물추출방법(phytoextraction), 그리고 고농도의 중금속에 대한 내성식물을 이용하여 토양중에서 중금속의 이동성 및 생물학적 유효도를 감소시켜서 토양내에서 확산을 차단하고 고정시키는 식물안정화(phytostabilization) 기법이 대표적인 기술이다^{1-4,6)}.

식물추출을 위한 오염물질 제거에 있어 대상식물의 이용범위는 오염물질별 흡수능과 식물부위의 전이 능력에 따라 좌우된다고 볼 수 있다. 이러한 대상 식물중 지상부여 중금속 함량이 카드뮴이 100 mg/kg 이상, 구리, 납, 니켈 1,000 mg/kg 이상, 아연과 망간이 10,000 mg/kg 이상이 고축적 식물종으로 정의하고 있다^{2,4,6)}. 또한 식물추출에 이용되는 식물종은 기본적으로 특정원소의 체내 축적, 빠른 성장속도 및 큰 건물생산량이 요구되며 수확이 용이하여야 한다^{3,5,7)}. 최근의 국내외 연구는 오염물질을 고농도로 축적하는 고축적 식물의 탐색, 축적능 평가, 식물독성과 생리 변화, 오염물질별 축적기작 및 내성 연구 등이 수행되고 있다⁸⁻¹⁶⁾.

*연락처:

Tel: +82-31-290-0210 Fax: +82-31-290-0277

E-mail: gbjung@rda.go.kr

본 연구는 중금속 오염지에 대한 식물학적 복원용 식물종의 선발을 위하여 비식용식물이면서 경제성 식물인 수목류 5종, 화훼류 2종 및 잔디를 대상으로 제련소 인근에 위치한 중금속 오염지에서 3년간 재배하여 연차별로 식물중에 흡수된 카드뮴, 구리, 납 및 비소의 농도와 흡수량을 비교하였다.

재료 및 방법

공시식물 및 토양

중금속 오염토양에 대한 식물학적 복원을 위한 식물종 선발을 위하여 양황철 (*Populus nigra* x *P. maximowiczii*), 사철나무 (*Euonymus japonica*), 단풍나무 (*Acer palmatum*), 팽나무 (*Celtis sinensis*), 회양목 (*Buxus microphylla*) 등 수목류 5종, 영산홍 (*Rhododendron lateritium*), 메리골드 (*Calendula officinalis*) 등 화훼류 2종 및 잔디 (*Zoysia japonica*)를 공시하였다. 자연상태에서 생육하는 공시식물의 생태적 특성은 Table 1과 같고, 공시식물중 화훼류와 잔디는 농촌진흥청 산하기관인 원예시험장에서 분양 받았으며, 수목류는 임목육종연구소와 종묘회사에서 구입하였다.

시험은 중금속 오염지인 장항제련소 인근인 충남 서천군 장항읍 장암리에 위치한 오산통 (烏山統, Osan Series)포장에서 수행하였다. 공시토양의 이화학적 성질과 중금속함량은 Table 2와 같다. 토성은 양토, 유기물, 유효인산 및 치환성 칼슘함량은 일반 발토양 평균보다 높았으며, 치환성 칼륨 및 마그네슘함량은 낮게 나타났다. 토양의 중금속함량은 카드뮴 1.93, 구리 102.0, 납 141.1, 비소 61.4 mg/kg로 비오염지 발토양의 평균함량 (카드뮴 0.135, 구리 2.77, 납 3.47, 비소 0.57 mg/kg)¹⁷⁾과 비교하여 매우 높았으며, 토양환경보전법의 토양오염우리기준 (카드뮴 1.5, 구리 50, 납 100, 비소 6 mg/kg)¹⁸⁾을 초과하였다.

Table 1. Ecological characteristics of the plants used in the experiment

Plants	Family	Life cycle	Plant height (m)	Flowering season
<i>Populus nigra</i> x <i>P. maximowiczii</i>	Sailceae	perennial	15~30	April~May
<i>Euonymus japonica</i>	Celastraceae	perennial	3	July
<i>Acer palmatum</i>	Aceraceae	perennial	10	May~June
<i>Celtis sinensis</i>	Ulmaceae	perennial	20	April
<i>Buxus microphylla</i>	Buxaceae	perennial	0.6	April
<i>Rhododendron lateritium</i>	Ericaceae	perennial	0.8	July
<i>Calendula officinalis</i>	Compositae	biennial	0.2~0.3	July
<i>Zoysia japonica</i>	Gramineae	perennial	0.1~0.2	May~June

시험규모 및 식물재배방법

포장시험은 3년간 수행하였으며 시험규모는 1개 시험구가 가로 2 m x 세로 1.65 m (3.3 m²)로 무재배를 포함한 9처리, 시험구 배치는 난괴법 3반복 (총 시험구 27개구) 시험으로 전체 시험구는 가로 28.0 m, 세로 8.0 m로 면적 224 m² 규모로 수행하였다. 시험구 사이는 가로 1 m, 세로 0.8 m 간격을 두었으며 식물당 재식주수는 3.3 m²당 48주를 공시하였고, 잔디는 시험면적에 해당되는 양을 정식하였다. 1년차 시험에서 포장선생, 파종 및 묘목정식은 3월 말에서 4월 말까지 수행하였고, 1년생 작물인 메리골드는 매년 4월 초에 정식하였다.

시비량은 화훼류와 수목류 모두 퇴비를 10 ton/ha씩 1년차에 사용하였고, 화학비료와 삼림용 고품복합비료 (N:P:K=12:16:4)를 원예시험장과 임업연구원의 표준시비량에 맞추어 시비하였다. 시험포장의 제조작업은 연 4회 (5, 7, 8, 10월) 실시하였고, 생육조사시 육안으로 판단하여 불량 및 고사식물은 1년차에 다시 정식하였다.

식물체의 수확은 수확시기를 3년간 동일 시기인 10월 초에 맞추어 수확을 하였으며 1년생인 메리골드는 매년 전 개체를 수확하였다. 또한 다년생인 화훼류와 수목류는 매년 시험구별 대표성을 갖추기 위하여 구획을 4등분하여 각각 3개 개체씩 총 12개체를 수확하여 건물량 환산과 분석용 시료로 사용하였다. 각 식물개체당 건물중은 12개체에 대한 부위별 평균치를 부위별 개체당 건물중으로 하였고, 면적당 총 건물중은 부위별 건물중을 합하고 재식두수 (44주/3.3 m²)를 계산하여 연차별로 총 건물중을 계산하였다.

토양 및 식물의 분석방법

토양시료 채취는 시험전 토양의 경우 시험구당 10개 지점을 채취하여 혼합시료로 조제하여 분석하였다. 토양시료는 풍건하여 분쇄한 후에 2 mm체를 통과시켜 일반 화학성분 분석에 이용하였고 토양을 다시 유발에서 미세하게 갈아 중금속 분석용으로 사용하였다. 토양의 이화학성 분석은 토양화학분석법¹⁹⁾에 준하였고, 토양의 중금속분석은 토양오염공정시험방법²⁰⁾에 준하여 토양 10 g

Table 2. Physico-chemical properties of the soil used in the experiment

Texture	Part. size dist (g/kg)			pH (1:5)	OM (g/kg)	Av.P ₂ O ₅ (mg/kg)	CEC (cmol ⁺ /kg)
	Clay	Silt	Sand				
Loam	90	414	496	6.6	29.0	794.0	11.4
Ex. cations (cmol ⁺ /kg)				Heavy metal (mg/kg)			
K	Ca	Mg		Cd	Cu	Pb	As
0.36	7.23	0.81		1.93	102.0	141.1	61.4

Table 3. Dry weight of leaf, stem and root of the plants used for the experiment (unit : g, dry weight/plant)

Plants	1st yr.				2nd yr.				3rd yr.			
	Leaf	Stem	Root	TDW ^a	Leaf	Stem	Root	TDW ^a	Leaf	Stem	Root	TDW ^a
<i>P. nigra</i> x <i>P. m.</i>	32.6	63.1	38.7	5.3	408.7	1120.5	370.5	91.2	446.1	2141.9	420.1	144.4
<i>E. japonica</i>	6.7	5.2	5.0	0.8	44.7	63.8	43.9	7.3	83.9	199.3	94.2	18.1
<i>A. palmatum</i>	11.2	23.1	16.5	2.4	63.4	98.4	99.1	12.5	111.6	347.8	179.7	30.7
<i>C. sinensis</i>	16.9	18.6	15.8	2.5	226.3	358.7	178.3	36.6	292.5	1087.7	363.6	83.7
<i>B. microphylla</i>	22.1	36.6	33.5	4.4	66.6	73.3	69.3	10.0	84.7	125.2	83.1	14.1
<i>R. lateritium</i>	10.1	16.8	26.3	2.5	20.1	25.3	29.4	3.6	38.3	43.9	45.0	6.1
<i>C. officinalis</i>	20.6	39.3	6.9	3.2	28.5	18.2	6.5	2.6	29.1	56.6	10.2	4.6
<i>Z. japonica</i>	87.1	-	74.6	7.8	112.6	-	113.0	10.8	145.8	-	128.4	13.2

^a Total dry weight of the plant in experimental plot (unit : kg, DW/3.3m²).

을 100 mL 삼각플라스크에 취하여 0.1 N-HCl (비소의 경우 1 N-HCl) 50 mL를 가하고 30°C에서 각각 1시간 진탕한 후 여과하여 분석용시료로 이용하였다.

식물체는 시험구별로 수확한 12개체를 잎, 줄기, 뿌리로 나누어 부위별로 혼합시료로 하여 물과 증류수로 세척한 후 잘게 썰어 비닐하우스내에서 1차 건조하고, 건조기내에서 2차 건조한 후 분쇄기로 같이 분석용 시료로 사용하였다. 식물체중의 중금속 분석은 식물체 혼합시료 3 g을 250 mL 삼각플라스크에 취하여 분해액인 삼상용액 (HNO₃:HClO₄:H₂SO₄=10:4:1, v/v/v)을 40 mL씩 가한 후 하루 정도 침지한 다음 열판상에서 분해하고 Toyo No. 5 B여지로 여과하여 분석용 시료로 사용하였다. 전처리한 여액중의 양이온과 중금속함량의 정량은 원자흡광분광분석기 (Instrumentation Laboratory, IL-251)를 이용하여 측정하였다^{19,20)}.

결과 및 고찰

중금속 오염토양에 대한 식물의 재배시험 결과 연차별로 각 시험구의 식물부위별 건물중 및 총 건물중은 Table 3과 같다. 연차별로 식물부위별 건물중은 재배된 식물의 대부분이 뿌리 및 잎보다 줄기에서 높았으며, 다만 영산홍은 뿌리, 잔디는 잎에서 높은 경향이였다. 연차별 건물중의 증가폭이 양황철, 적단풍, 팽나무 등 수목류가 다른 식물에 비하여 높았고 영산홍, 메리골드 및 잔디는 낮게 나타났다. 3년차 경우의 건물중은 잎이 양황철>팽나무>잔디>적단풍, 줄기가 양황철>팽나무>적단풍>사철나무, 뿌리가 양황철>팽나무>적단풍 순으로 높게 나타났다. 식물의 각 부위를 합하고 재식주수를 감안한 시험구당 (3.3 m²) 총 건물중은 1년차에 잔디 및 회양목이 높았으나 2년차부터 양황철, 적단풍, 팽나무가

증가폭이 크게 나타났다. 특히 3년차 경우의 건물중은 양황철>팽나무>적단풍>사철나무>회양목 순으로 높게 나타났다.

시험재배 연수에 따른 식물부위별 카드뮴함량은 Table 4와 같다. 잎과 줄기의 카드뮴 함량은 메리골드>양황철>영산홍, 뿌리는 회양목>메리골드>사철나무 순으로 높게 나타났다. 모든 식물에서 잎과 줄기보다 뿌리의 카드뮴 함량이 높았고, 특히 뿌리에서 높은 식물은 회양목, 사철나무이었다.

또한 연차별 함량수준은 1년차에 비하여 2, 3년차에 높았으나 증가폭이 크지 않았고, 부위별 함량은 3년차에 잎 1.5~7.9 mg/kg, 줄기 1.8~15.8 mg/kg, 뿌리 6.5~18.1 mg/kg이었다. 식물의 카드뮴 농도를 지상부/지하부의 농도비로 중금속 축적정도를 비교해 보면 대부분 식물이 지하부의 농도가 매우 높는데 메리골드의 경우에는 지상부의 카드뮴 농도가 높게 나타났다. 식물에 의한 정화기법에서 식물탐색 및 연구대상이 되는 고축적 식물은 지상부 건물당 카드뮴이 0.01% 이상을 함유하는 식물로 정의²⁴⁾ 하였는데 본 연구에서 카드뮴 고축적종 식물은 없는 것으로 나타났다. 그러나 우리나라에서 전국 휴폐광산 인근에서 자생하는 식물종을 조사한 결과, 고사리과 카드뮴 축적이 높았고 고비 (*Osmunda japonica*) 및 쪽의 잎에서 각각 242.0 및 26.8 mg/kg까지 축적 되었으며 같은 식물종이라도 조사지역 및 농도에 따라 축적정도가 상이한 것으로 나타났다^{9,10)}. 또한 김 등⁷⁾은 카드뮴을 15 mg/kg 농도로 처리한 토양에서 재배한 결과, 메리골드에서 카드뮴이 161.7 mg/kg으로 높아 본 연구결과와 차이가 났는데 이는 토양내의 카드뮴 농도와 오염원, 기상 등 재배적 조건의 차이에 기인한다고 볼 수 있다. 카드뮴 축적종으로 보고된 식물인 *Thlaspi caerulescens*종은 카드뮴에 대한 내성이 다른 식물종보다 컸으며 경엽중 카드뮴 농도는 1,140~1,800 mg/kg이었고,

Table 4. Cadmium content in leaf, stem and root of the plants used for the experiment (unit : mg/kg)

Plants	1st yr.			2nd yr.			3rd yr.		
	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
<i>P. nigra</i> x <i>P. m.</i>	7.7	1.9	4.3	3.1	2.8	6.0	4.6	4.0	6.5
<i>E. japonica</i>	2.5	1.2	5.0	2.6	2.6	9.6	1.5	1.8	8.9
<i>A. palmantum</i>	2.3	1.1	2.6	3.1	4.9	9.4	2.5	3.0	7.9
<i>C. sinensis</i>	3.0	2.2	3.8	1.4	1.3	4.1	1.8	2.3	6.6
<i>B. microphylla</i>	3.1	1.6	11.1	1.8	2.1	18.2	2.4	3.4	18.1
<i>R. lateritium</i>	4.8	2.2	2.7	2.6	2.7	3.7	3.6	3.5	6.9
<i>C. officinalis</i>	12.3	4.6	5.2	9.0	10.0	10.0	7.9	15.8	11.6
<i>Z. japonica</i>	1.8	-	2.1	2.5	-	7.3	2.4	-	8.2

건물생산량의 감소가 되지 않는 상태에서 카드뮴 1,000 mg/kg 이상을 축적한다고 하였다^{4,11,12}.

연차별 식물부위별 구리함량은 Table 5와 같다. 양황철, 적단풍 및 팽나무의 구리함량은 뿌리>잎>줄기 순으로 높았고 사철나무 및 회양목은 뿌리>줄기>잎 순으로 나타났으며 영산홍은 줄기, 메리골드는 앞에서 구리함량이 높았다. 부위별 식물간 구리함량 비율을 살펴보면 대체로 공시식물은 뿌리의 구리함량 비율이 높았는데, 특히 높은 식물은 회양목이며 양황철, 팽나무, 영산홍 등은 부위별 함량차이가 크지 않았다. 엽의 구리함량은 메리골드>영산홍>적단풍, 줄기는 영산홍>회양목>사철나무, 뿌리는 회양목>잔디>사철나무 순으로 높았다. 연차별 구리함량의 수준은 카드뮴에 비하여 증가폭이 작았으며 다른 부위보다 줄기의 구리함량의 증가폭이 큰 것으로 나타났다.

식물추출을 위한 식물탐색 대상인 고축적 식물은 지상부 건물당 Cu가 0.1% 이상을 함유하는 식물로 정의²⁴ 하였는데, 본 연구 결과 축적종은 발견되지 않았다. 강 등⁷은 양액재배 결과 구리가 미국 돼지풀 유묘에서 368 mg/kg, 광산 인근 야생식물종 쇠뜨기 잎 104.6 mg/kg, 패랭이 꽃 지상부 405.7 mg/kg으로 다른 식물종보다 구리 축적이 크다고 하였다^{9,10}. 지금까지 보고된⁴ 0.1% 이상의 구리 축적 식물종은 전 세계에 24종 정도로 *Ipomoea alpina* (지상부, 12,300 mg/kg)², *Minuartia verna* (뿌리, 1,074 mg/kg)¹⁴ 등이 보고되었다.

연차별 식물부위별 납 함량은 Table 6과 같다. 각 식물의 납 함량은 뿌리가 잎과 줄기보다 다소 높았으나 식물별 함량 차이는

Table 5. Copper content in leaf, stem and root of the plants used for the experiment (unit : mg/kg)

Plants	1st yr.			2nd yr.			3rd yr.		
	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
<i>P. nigra</i> x <i>P. m.</i>	12.3	5.5	20.4	19.5	6.6	20.2	22.2	10.6	20.4
<i>E. japonica</i>	6.6	7.9	60.2	12.1	19.9	52.0	13.6	19.4	69.7
<i>A. palmantum</i>	15.2	1.5	35.4	25.0	9.1	41.6	31.3	10.2	61.4
<i>C. sinensis</i>	15.8	3.0	25.1	18.8	14.8	29.0	23.5	25.1	36.0
<i>B. microphylla</i>	8.4	13.9	197.6	12.3	39.4	166.8	16.4	60.2	223.3
<i>R. lateritium</i>	23.7	38.7	17.9	43.2	63.8	55.5	31.7	58.3	50.6
<i>C. officinalis</i>	31.8	8.0	31.6	22.7	19.3	31.3	33.6	16.4	28.5
<i>Z. japonica</i>	15.3	-	30.6	21.2	-	62.3	17.7	-	66.6

카드뮴 및 구리보다 적은 경향이였다. 각 식물의 부위별 납 함량은 3년차에 잎 8.8~11.4 mg/kg, 뿌리 20.8~53.7 mg/kg으로 줄기 5.6~25.9 mg/kg보다 식물별 함량차이가 적게 나타났다. 식물별 납 함량은 차이가 적은 잎을 제외하고, 줄기는 회양목 및 영산홍, 뿌리는 사철나무, 회양목 및 잔디에서 높게 나타났다.

식물로부터 토양 중금속의 추출을 위한 연구에서 선발대상으로 하고 있는 고축적 식물은 지상부 건물당 납 함량이 0.1% 이상을 함유하는 식물로 정의²⁴ 되는데, 본 연구 결과 모든 부위에서 100 mg/kg 이하로 나타나 축적종은 발견되지 않았다. 지금까지 보고된⁴ 0.1% 이상의 납 축적종은 4종 정도로 이들 대부분은 열대 및 온대지역의 식물종이다. 보고된 납 축적종 및 농도는 *Thlaspi rotundifolium* (지상부, 8,200 mg/kg)⁴, *Armeria maritima* ssp. *halleri* (뿌리, 1,760 mg/kg)¹⁵, *Biscutella laevigata* (지상부, 1,090 mg/kg)¹⁴ 및 *Minuartia verna* (지상부, 2,180 mg/kg)¹⁴ 등이며, 중금속의 식물체 흡수이행은 카드뮴 및 아연이 지상부로의 전이가 용이하여 잎중의 농도가 높은 반면 납 및 구리 축적종들은 뿌리에 축적되는 것으로 보고되고 있다^{11,15}.

연차별 식물부위별 비소함량은 Table 7과 같다. 각 식물의 비소함량은 뿌리가 잎과 줄기보다 높았으며 식물별로는 회양목, 사철나무 및 영산홍 뿌리에서 매우 높게 나타났다. 각 식물의 부위별 비소함량은 3년차에 잎 1.3~11.8 mg/kg, 줄기 1.5~6.5 mg/kg으로 뿌리 2.5~242.8 mg/kg보다 식물별 함량차이가 적게 나타났다. 특히 회양목의 경우 뿌리에서 1년차 및 3년차가 각각 119.7 및 242.8 mg/kg으로 다른 식물보다 매우 높게 나타났다.

Table 6. Lead content in leaf, stem and root of the plants used for the experiment (unit : mg/kg)

Plants	1st yr.			2nd yr.			3rd yr.		
	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
<i>P. nigra</i> x <i>P. m.</i>	20.4	15.4	21.7	9.0	5.7	28.0	8.8	8.6	31.1
<i>E. japonica</i>	13.8	28.0	42.4	9.8	8.6	29.4	6.9	11.0	48.6
<i>A. palmantum</i>	7.9	30.7	50.5	12.3	5.0	32.7	8.6	5.6	40.1
<i>C. sinensis</i>	8.5	4.3	12.7	9.3	5.0	17.1	9.2	11.9	31.7
<i>B. microphylla</i>	8.2	18.5	36.6	8.6	17.7	43.3	8.9	25.9	53.0
<i>R. lateritium</i>	10.1	24.6	26.9	18.8	19.0	21.3	10.1	24.1	25.6
<i>C. officinalis</i>	10.3	8.6	26.3	16.8	13.0	28.7	10.3	8.6	20.8
<i>Z. japonica</i>	11.4	-	38.1	14.1	-	50.1	11.4	-	53.7

Table 7. Arsenic content in leaf, stem and root of the plants used for the experiment (unit : mg/kg)

Plants	1st yr.			2nd yr.			3rd yr.		
	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
<i>P. nigra</i> x <i>P. m.</i>	1.0	0.9	1.4	1.5	1.1	2.9	2.6	1.5	3.0
<i>E. japonica</i>	0.9	0.9	8.1	1.1	1.2	31.4	4.8	2.1	38.2
<i>A. palmantum</i>	3.3	1.5	9.6	21.0	4.8	19.9	11.8	1.5	35.9
<i>C. sinensis</i>	1.4	1.0	1.8	2.7	1.4	1.9	1.3	1.5	2.9
<i>B. microphylla</i>	5.8	4.2	119.7	10.0	7.6	234.5	6.7	5.9	242.8
<i>R. lateritium</i>	2.8	2.1	5.9	4.2	2.6	8.1	8.4	6.5	45.5
<i>C. officinalis</i>	6.9	5.4	6.4	9.1	4.7	7.0	6.7	5.8	2.5
<i>Z. japonica</i>	0.9	-	4.4	1.0	-	4.6	4.0	-	13.7

Wong 등¹⁶⁾은 금광 광미사 인근의 야생식물을 조사한 결과 속새과 식물인 *Equisetum sylvia* 및 *Equisetum fluviatile*에서 비소 농도가 각각 418 및 371 mg/kg으로 나타나 다른 식물종보다 높았다고 하였다.

본 시험 결과 3년차 식물에 흡수 축적된 중금속 농도와 시험 전 토양의 농도 비율을 보면 카드뮴이 잎 0.78~4.09, 줄기 0.93~8.19, 뿌리 4.93~9.38, 구리가 잎 0.13~0.33, 줄기 0.10~0.59, 뿌리 0.20~2.19, 납이 잎 0.05~0.08, 줄기 0.04~0.18, 뿌리 0.15~0.38, 비소가 잎 0.02~0.19, 줄기 0.02~0.11, 뿌리 0.04~3.95로 나

Table 8. Total cadmium and copper uptake of the plants used for the experiment (unit : mg/3.3 m²)

Plants	Cd			Cu		
	1st yr.	2nd yr.	3rd yr.	1st yr.	2nd yr.	3rd yr.
<i>P. nigra</i> x <i>P. m.</i>	21.0	317.0	644.2	51.2	1097.3	1972.4
<i>E. japonica</i>	2.3	33.9	63.8	18.7	196.6	555.9
<i>A. palmantum</i>	4.5	77.1	131.7	37.8	317.0	866.8
<i>C. sinensis</i>	7.3	73.3	261.6	34.5	707.7	2270.6
<i>B. microphylla</i>	23.9	73.8	102.5	351.2	732.6	1319.2
<i>R. lateritium</i>	7.5	11.1	28.8	65.3	197.5	290.2
<i>C. officinalis</i>	22.5	24.2	59.7	56.8	57.8	105.4
<i>Z. japonica</i>	15.5	53.3	67.6	174.8	452.8	534.4

Table 9. Total lead and arsenic uptake of the plants used for the experiment (unit : mg/3.3m²)

Plants	Pb			As		
	1st yr.	2nd yr.	3rd yr.	1st yr.	2nd yr.	3rd yr.
<i>P. nigra</i> x <i>P. m.</i>	94.6	980.5	1699.7	5.4	138.1	273.8
<i>E. japonica</i>	21.7	109.3	352.9	2.5	72.2	212.1
<i>A. palmantum</i>	78.3	216.8	486.1	11.1	181.2	397.0
<i>C. sinensis</i>	20.3	332.8	1302.5	3.4	69.7	146.0
<i>B. microphylla</i>	100.1	233.8	403.0	206.2	838.4	1031.1
<i>R. lateritium</i>	58.7	71.2	124.7	10.5	18.6	127.5
<i>C. officinalis</i>	35.1	43.4	48.0	19.2	18.7	26.3
<i>Z. japonica</i>	185.0	348.4	410.8	19.6	30.4	112.2

타났다. 따라서 카드뮴은 뿌리에 많이 축적되고 지상부로의 전이도 높았으며 회양목 뿌리에서 구리 2.19, 비소 3.95을 제외하면 구리, 납, 비소는 카드뮴보다 뿌리내 흡수뿐만 아니라 지상부로의 전이도 아주 낮게 나타났다^{11,15)}.

연차별 식물부위의 흡수량을 농도와 건물량을 계산하여 구하고 개식주수 (48주)를 계산하여 얻은 면적당 카드뮴 및 구리의 총 흡수량은 Table 8과 같다. 시험구 면적 (3.3 m²)당 총 카드뮴 흡수량은 3년차에 양황철>팽나무>단풍나무>회양목 순으로 높았고, 연차별 흡수량 증가는 건물중의 증가폭이 큰 수목류인 양황

철, 적단풍, 팽나무 및 회양목이 높았으며 상대적으로 메리골드, 영산홍 및 잔디는 낮게 나타났다. 작물별 흡수량 증가율은 회양목, 영산홍, 메리골드 및 잔디가 3~4배, 사철나무, 적단풍, 양황철 및 팽나무가 28~36배로 나타났고, 총 흡수제거량은 양황철이, 1년차 대비 흡수증가율은 팽나무가 가장 높게 나타났다.

식물별 총 구리 흡수량은 3년차에서 팽나무>양황철>회양목>단풍나무 순으로 높았고 특히 회양목은 1년차에 다른 식물보다 흡수량이 높았다. 연차별 흡수량의 증가는 건물중 증가 비율이 높은 수목류가 23~67배로 높았고, 다른 식물은 2~4배로 나타났다.

연차별 식물의 납과 비소의 총 흡수량은 Table 9와 같다. 식물별 총 납의 흡수량은 3년차에는 양황철>팽나무>단풍나무 순으로 높았고 1년차는 잔디가 다른 식물보다 높았다. 식물의 연차별 납 흡수 증가율은 3년차에서 1년차와 비교하여 팽나무 65배, 양황철 16배, 사철나무 16배로 높은 경향을 보였고 영산홍, 메리골드 및 잔디는 2배 정도로 낮게 나타났다. 식물별 총 비소 흡수량은 연차에 관계 없이 회양목, 적단풍, 양황철 등이 높았으며, 특히 회양목은 3년 동안 다른 식물보다 비소 흡수량이 5~10배 정도 높은 것으로 나타났다. 식물의 연차별 비소 흡수량 증가는 건물중 증가폭이 큰 수목류인 적단풍, 팽나무, 양황철 및 사철나무가 36~85배로 높았고 회양목은 1년차 흡수량이 상대적으로 높아 증가폭이 낮게 나타났다.

토양내 중금속 제거를 위한 식물종의 선택에 있어서 식물종은 중금속이 지상부로의 이행성이 매우 높아 고농도로 축적할 수 있어야 하고, 또한 특정 중금속에 대한 흡수력이 큰 식물로 높은 건물생산량과 경제적 가치도 있어야 한다^{1,2,4)}. 본 시험에 사용된 식물들은 지상부로의 이행성이 낮고 고농도의 중금속 축적도 발견되지 않았으나 건물중이 높은 양황철, 회양목, 단풍나무 및 팽나무 등은 중금속 흡수량이 높고 매년 떨어지는 중금속이 함유된 잎을 제거한다면 중금속으로 오염된 토양의 정화식물로 이용할 수 있는 가치가 있다고 생각된다. 또한 최근의 여러 보고^{2,3,5,6)} 등으로 미루어 볼 때 특정원소의 축적종들로 보고된 식물들이 건물생산량이 낮아 총 흡수 제거량이 낮은 문제점이 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 축적종의 건물생산량을 높이기 위한 토양내 중금속 유효도, 토양개량제, 미생물 및 킬레이트 화합물 등과 관련된 여러 가지 요인들의 상관관계를 규명할 수 있는 종합적인 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

요 약

중금속 오염토양에 대한 식물학적 복원에 적합한 식물종 탐색을 위하여 수목류 5종, 화훼류 2종 및 잔디를 대상으로 체련소 인근 중금속 오염지 포장에서 3년간 재배하여 연차별로 식물중에 흡수된 중금속 함량을 조사하였다.

식물의 건물중은 양황철, 팽나무, 적단풍, 사철나무, 회양목 순이었고, 연차별 건물중의 증가도 팽나무, 양황철, 적단풍이 높게

나타났다. 식물의 중금속은 지하부가 지상부보다 높은 함량을 보였으며, 식물중 회양목은 뿌리에서 매우 높게 나타났다. 공시식물의 3년차 총 흡수량은 카드뮴이 양황철, 팽나무, 단풍나무, 구리가 팽나무, 양황철, 회양목, 납이 양황철, 팽나무, 단풍나무, 비소가 회양목, 단풍나무, 양황철 순으로 높게 나타났다. 이상의 결과에서 식물의 건물중과 중금속 흡수량을 볼 때 양황철, 회양목, 단풍나무 및 팽나무 등이 중금속으로 오염된 토양에 대한 정화 식물로 이용할 수 있을 것으로 생각되었다.

참 고 문 헌

1. Salt, D. E., Blaylock, M., Kumar, P.B.A., Dushenkov, S., Ensley, B. D., Chet, I. and Raskin, I. (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 Lee, S. H. (1999) Phytoremediation, 「Proceedings of 30th Meeting & Symposium on "Remediation - Technology and Prospect"」. *Kor. J. Environ. Agric.* 57-88.
3. Salt, D. E., Smith, R. D. and Raskin, I. (1998) Phytoremediation, *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 49, 643-668.
4. Baker, A. J. M. and Brooks, R. R. (1989) Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements - A review of their distribution, ecology and phytochemistry, *Biorecovery* 1, 81-126.
5. Chaney, R. L., Malik, M., Li, Y. M., Brown, S. L., Angle, J. S. and Baker, A. J. M. (1997) Phytoremediation of soil metals, *Current Opinions in Biotechnology* 8, 279-284.
6. Cunningham, S. D. and Ow, D. W. (1996) Promises and prospects of phytoremediation, *Plant Physiol.* 110, 715-719.
7. Kang, B. H., Shim, S. I., Lee, S. G., Kim, K. H. and Chung, I. M. (1998) Study on the potential of phytoremediation using wild plants for heavy metal pollution, *Kor. J. Environ. Agric.* 17(4), 312-318.
8. Kim, B. Y., Kim, K. S. and Cho, J. K. (1989) Studies on the cadmium removal from soil through crops cultivation, *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 22(2), 111-115.
9. Kim, J. G., Lim, S. K., Lee, S. H., Yoon, Y. M., Lee, C. H. and Jeong, C. Y. (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., Kim, B. J. and Han, S. G. (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., Chaney, R. L., Angle, J. S. and Baker, A. J. M. (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., Chaney, R. L., Angle, J. S. and Baker, A. J. M. (1995) Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solution, *Soil Sci. Am. J.* 59, 125-133.
13. Ebbs, S. D., Lasat, M. M., Brady, D. Cornish, J., Gordon, J. R. and Kochian, L. V. (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., Oort, F. van., Gelie, B. and Balabane, M. (2000) Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter, *Environmental Pollution* 109, 231-238.
16. Wonga, H. K. T., Gauthierb, A. and Nriaguc, J. O. (1999) Dispersion and toxicity of metals from abandoned gold mine tailings at Goldenville, Nova Scotia, Canada, *The Science of The Total Environment* 228(1), 35-47.
17. NIAST (National Institute of Agricultural Science and Technology) (1999) Survey on the changes of heavy metal contents of agricultural field in Korea. A counter measuring studies to the changes of agricultural environment. p.33-60.
18. Ministry of Environment (Korea) (1999) Soil Environmental Conservation Act.
19. NIAST (National Institute of Agricultural Science and Technology) (1988) Methods of Soil Chemical Analysis. p.15-230.
20. Ministry of Environment (Korea). (1999) Standard Test Method for Soil Pollution.