한국환경농학회지 제18권 제1호(1999)
Korean Journal of Environmental Agriculture
Vol. 18, No. 1, pp. 28~34

휴·폐광지역 오염토양의 phytoremediation을 위한 식물자원 검색

김정규·임수길·이상환·이창호·정창윤
고려대학교 응용생명환경화학과

Evaluation of Heavy Metal Pollution and Plant Survey around Inactive and Abandoned Mining Areas for Phytoremedation of Heavy Metal Contaminated Soils

Jeong-Gyu Kim, Soo-Kil Lim, Sang-Hwan Lee, Yong-Man Yoon, Chang-Ho Lee and Chang-Yoon Jeong *(Dept. of Agricultural Chemistry, College of Natural Resources, Korea University, Seoul, Korea, 136-701, Tel (02)3290-3024, Fax (02)921-7628, e-mail : lemonkim@mail.korea.ac.kr)*

ABSTRACT : This study was carried out to assess heavy metal pollution at 16 abandoned mining areas and to get basic data for phytoremediation. In most of surveyed area, there was no vegetation cover and soil reaction shows in low to moderate pH. Low CEC, low organic matter content were the general properties of these soils. Heavy metals content of these soils were exceed background level of unpolluted soil in Korea, especially Cu content was 2,634mg/kg at Jeil site, 3,415 mg/kg Zn, 8.03mg/kg Cd at Yonhwa 2 site. This is far above tolerance limit. In plant survey, very often observed plants were *Pinus densiflora*, and *Robinia psuedo-acacia* in woody plant, *Artemisia princeps*, and *Dianthus sinensis* in herbs. *Artemisia princeps* had higher concentration of Zn, Cd and Dianthus sinensis had higher concentration than other plants. From the results, heavy metal concentration in plants and plant' s ecotype properties, could be said that *Artemisia princeps* and *Miscanthus sinensis* have a potential of soil remediation plant.
More studies are demanded to find the heavy metal tolerance species and to understand physiology property of tolerance plants, soil condition, climate etc., for successful soil remediation by plants

Key words : Heavy metals, Phytoremediation, hyperaccumulator

서 론

국내에는 전국적으로 약 2,000여개의 휴·폐금속 광산이 산재되어 있으며 대부분의 휴·폐광산에서 광미와 광재 그리고 갱도가 그대로 방치되고 있어 갱내수의 하천유입, 비산먼지, 광미유실등으로 인하여 인근지역의 농토, 임야 및 생활환경이 오염될 가능성이 상존하고 있다.[1]

기존의 물리·화학적인 토양정화기술[2-5]이 막대한 자금과 노동력을 필요로 하기 때문에 오염토양을 경제적으로 정화시킬 수 있는 기술개발을 위한 여러 가지 시도들이 전개되어 오고 있다. 이러한 모색들 중의 하나인 식물학적 오염토양 복원방법, 소위 phytoremediation은 토양으로부터 유해한 오염물질을 제거·안정화·무독화시키는데 식물을 이용하는 것이며 green remediation, botanical remediation이라고도 하고, 저렴한 비용과 환경교란을 최소화 할 수 있다는 이점이 있다.[6]

외국의 경우 1990년대에 들어서면서 중금속을 비롯한 방사능물질, 유기화합물 등에 대한 정화 식물종의 선발과 정화능의 극대화, 오염현장에의 적용 가능성 등에 대해 활발히 연구[7]가 진행되고 있는 반면 국내의 경우 중금속으로 인한 토양오염수준과 작물중의 중금속함량을 조사하는 연구[8,9]에 국한되어 있고, phytoremediation에 이용 가능한 야생식물의 탐색 연구[10]와 조사 식물의 활용에 대한 연구는 미진하며, 자생식물의 오염물질 함량에 대해서도 지속적인 연구는 적은 실정이다.

식물을 이용한 오염토양의 정화·복원, phytoremediation은 정화목표에 도달하기까지 많은 시간이 소요된다는 점과 오염의 정도가 심각한 지점에서는 적용에 한계가 있다는 사실 등의 이유로 토양정화방법으로 광범위하게 사용되고 있지는 않지만 비용이 저렴하고 환경친화적인 기술이라는 점에서 관심이 점차 증폭되고 있다.

본 연구는 16개 휴·폐광산을 대상으로 토양특성, 식물

Table 1. The outline of surveyed mining area

Mine	Element	Site	AbandonYear	Preceeding study o/x	Survey subject
Keudo	Cu	Kangwon Taebaek		o	soil contamination and plant survey
Okdong	Coal	Kangwon Young-Wol	1982	x	〃
Tehung	Au	Chungbuk No-Eun	1960	o	〃
Asia	W	Kyungbuk Ul-Chin		x	〃
Jeil	Au,Ag,Cu	Kyungnam Ham-An	1975	o	soil contamination
Ehung	Au,Ag	Kyungnam Ham-An	1977	o	soil contamination and plant survey
Jangsung	Coal	Kangwon		x	soil contamination
Yonhwa	Zn,Pb,Cu	Kangwon Sam-Chuk		x	soil contamination and plant survey
Yonhwa2	Zn,Pb,Cu	Kangwon Sam-Chok	1987	o	〃
Ilkwang	Au,Ag,Cu	Kyungnam Yang-San	1983	o	〃
Hambak	Coal	Kangwon	1986	x	〃
Mulkum	Fe	Kyungnam Yang-San	1991	o	soil contamination
Sangdong	W, Mo	Kangwon Young-Wol	1992	o	plant survey
Daduk	Au	Kyungbuk Bong-Hwa	1950	o	〃
Darak	Au	Kyungbuk Sang-Ju	1950	o	〃
Sihung	Pb,Zn	Kyunggi Kwang-Myung	1950	o	〃

분포, 식물체 중 중금속함량을 조사하여 중금속에 내성이 있는 식물을 파악함으로써 중금속오염토양 정화를 위한 기초자료를 얻고자 수행하였다.

재료 및 방법

토양 및 식물시료의 채취

1996년 8월에서 9월사이 16개 광산에서 토양채취 및 식생조사를 실시하였다. 토양의 경우 18개 지점에서 채취하였고 식물체는 식생조사를 통해 우점종으로 조사된 식물체를 채취하였다. 조사된 16개 광산의 개요는 table 1과 같다.

조사방법

각 조사지역에서 생육하고 있는 초본 및 목본을 조사함과 동시에 식물체와 토양을 채취하고 농촌진흥청의 분석법에 준하여 토성(Pipetting법), pH(1:5 H_2O), 유기물(Tyurin법), 유효인산(Bray No. 1법), 치환성양이온(1N-NH_4OAc치환침출법), 양이온치환용량(1N-NH_4OAc치환침출법), 석회소요량(ORD법), Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Cd등의 중금속(0.1N HCl침출법)을 측정하였다. 식물체는 ternary solution(HNO_3:H_2SO_4:$HClO_4$ =10:1:4)으로 습식분해한 후 AAS로 중금속함량을 측정하였다.

결과 및 고찰

휴·폐광 지역 토양의 이화학적 특성

Table 2. Physicochemical properties of the soils from the mining area

Site	Soil texture (USDA)	pH (1:5)	O.M %	TKN	Av. P mg/kg	CEC cmol(+)/kg	Lime requirement $CaCO_3$ kg/ha
Keudo 1	SiC	6.33	0.79	0.03	6.05	16.80	88
Keudo 2	SL	7.35	0.36	0.09	3.12	5.56	70
Keudo 3	LS	6.68	0.50	0.12	1.47	1.50	88
Okdong 1	SCL	5.10	10.79	1.53	1.19	7.22	245
Okdong 2	SCL	2.76	8.27	0.07	4.14	9.27	350
Tehung 1	SC	7.46	5.40	1.32	3.30	2.25	35
Teheung2	SCL	3.92	0.36	0.11	7.43	7.01	193
Asea 1	S	6.43	0.58	0.07	27.42	2.13	70
Asea 2	SL	5.84	0.72	0.09	66.03	2.09	53
Jeil 1	SCL	7.43	7.19	0.60	5.30	13.98	70
Jeil 2	SCL	6.35	11.15	1.25	6.44	13.68	140
Ehung	SCL	6.76	1.80	0.14	36.46	11.68	105
Jangsung	SiCL	3.72	9.35	0.57	4.33	7.76	298
Yonhwa	SL	7.26	0.86	0.03	4.06	2.04	88
Yonhwa 2	S	7.86	8.32	0.17	6.85	5.90	88
Ilkwang	LS	3.76	0.29	0.13	9.18	3.47	158
Hambek	SCL	6.68	11.51	0.96	20.83	7.55	88
Mulkum	SL	6.72	0.94	0.10	8.65	10.65	105

조사된 휴 · 폐광지역 토양은 table 2와 같이 대부분 사질계 토양이었는데 사질식양토(SCL)가 가장 많았다. 이는 이들 지역에는 수분 스트레스에 강한 식물이 개척종으로서 적합할 것임을 의미하는 것이다. 토양 pH의 경우 광산지역 토양이 산성으로 기울어져 있을 것이라는 예상과는 달리 중성 혹은 알칼리성을 보이는 지점들도 다수 존재하였고 옥동 2지점(2.76), 태흥2지점(3.92), 장성(3.72), 일광(3.76) 등 극단적인 산성을 띠는 지점들도 존재하였다. 옥동탄광 지점의 경우 갱내수의 pH가 2.82에 달하는 강산성을 띠고 있었다. 이들 지역의 경우 토양 내 중금속 함량 자체보다는 산성에 의한 중금속의 유효도 증가로 인한 독성이 우려되는 부분이라 할 수 있다. 즉, 산성토양에서는 중금속의 식물체로의 흡수가 증가되어 독성을 나타내기 쉽게 될[11,12] 것이다.

유기물함량은 대부분의 조사지역에서 대체적으로 우리나라 경작지 토양의 평균함량인 2-3%[13]보다 낮았다. 이는 조사지점 대부분이 피복식물 없이 나대지로 존재하기 때문이라 생각된다. 옥동, 만세항, 장성 등의 석탄광에서 유기물 함량이 높게 조사된 것은 석탄중의 무기탄소가 분석결과에 영향을 미쳤기 때문으로 생각된다. 낮은 C/N율로 보아 휴 · 폐광지역 토양식생복원에 있어서 유기물의 보강이 필요할 것으로 보여진다.

유효인산 함량도 10mg/kg에 못 미치는 지역이 상당수 나타나고 있고, 높은 지점의 경우에도 60mg/kg 정도에 그치고 있어 인산의 보강도 식생복원에 반드시 고려되어야 한다고 생각된다. 양이온치환용량은 대체로 우리 나라 경작지 토양 평균인 9.2cmol(+)/kg[14]보다 낮았다. 유해중금속이 대부분 양이온이라는 것을 감안하면 이들 토양이 중금속을 효율적으로 흡착할 수 없어 지표수나 강우 등에 의해 중금속이 비교적 쉽게 용탈되어 환경 내로 확산되기 용이한 조건임을 의미한다.

휴 · 폐광산 토양중의 중금속 함량

토양의 중금속 함량은 table 3에 나타낸 바와 같이 광종에 영향을 받음을 알 수 있다. 토양중 금속함량의 경우 Al 0.8-181mg/kg, Fe 0.09-39.76mg/kg, Mn 0.14-7.72mg/kg, Zn 0.72-383.68mg/kg, Cu 0.89-2,636.0mg/kg, Cd 0.96-8.03mg/kg의 범위에 있었으나 동일지역에서도 지점에 따라서 큰 편차를 보이고 있었고 채광 금속종에 따라서 특정 금속의 함량이 높은 것으로 조사되었다. 그리고 금속광이 탄광에 비해서 토양중 중금속함량이 높은 것이 대부분이었으나 함백탄광에서는 Zn과 Cu가 각각 344, 262mg/kg으로 높은 수준으로 검출되었다. 이 값들은 전 등[15]이 조사한 우리 나라의 비오염지역 토양중 중금속 분포치 Cd 0.2-1.7, Cu 9-48, Zn 59-115mg/kg 와 김 등[12]이 조사한 전국 밭토양 자연함유량, Cd 0.157, Zn 8.50, Cu 3.05mg/kg을 상회하는 값들이 대부분이었고, 토양환경보전법 상의 토양오염 우려기준 Cd 1.5, Cu 50mg/kg과 대책기준 Cd 4, Cu 125mg/kg을 상회하는 지점도 있었다.

선행된 다른 연구와 중복 조사된 휴 · 폐광산중에는 토양중 중금속의 농도가 선행연구와 유사한 값을 보이는 경우도 있었지만 선행연구에 비해서 중금속함량이 높게 조사된 경우도 있었다. 대표적으로 연화 제2광산의 경우 본 조사에서는 선광장으로 보이는 지점에서 3,415mg/kg이었고, Cd의 경우에도 8.03 mg/kg으로 토양환경보전법의 대책기준을 훨씬 초과하는 양이 검출되었지만, 박[1]은 갱구로부터 거리별로 조사한 결과 토양중 Zn이 43.5-395.6 mg/kg의 범위에 존재한다고 보고한 바 있다. 그리고 제일광산의 경우도 Cu가 2,634mg/kg으로 박[1]의 연구 결과에 비해서 높게 검출되었는데 이러한 차이는 시료채취지점과 방법 등에서 기인되는 것이라 생각된다. 옥동의 경우 인공적으로 소나무와 억새를 식재하였지만, 조사당시에는 생육이 불량하였다. 중금속의 식물유효도는 중금속의 총량에 의해서보다 형태에 의해 지배된다고 알려져 있다.[8,11] 따라서, 무연탄광인 옥동은 중금속함량이 타 광산에 비해서 높지 않음에도 불구하고 토양반응이 산성으로 기울어져 있어 중금속이 식물유효도가 높은 형태로 존재하여 해를 입었을 것이라고 추정된다. 토양중 중금속의 형태별 분포는 주로 중금속 자체의 특성과 토양성질에 의해 지배되며 이에 관여하는 토양의 성질은 pH, 유기물함량, 산화환원전위 및 다른 공존이온 등으로 알려져 있다.[11]

조사된 토양중 중금속 함량들은 0.1N HCl 침출법으로 측정되어 토양중 중금속의 동태나 식물유효도를 대변하는 값은 아니다. 토양중에 존재하는 중금속은 여러 종류의 화

Table 3. Heavy metal contents in abandonded mining area

Site	Al	Fe	Mn	Zn	u	Cd
			mg/kg			
Keudo 1	2.68	1.75	2.36	14.87	328.99	1.11
Keudo 2	0.89	7.00	1.61	30.28	264.54	1.14
Keudo 3	1.03	8.54	1.61	66.24	591.21	1.23
Okdong 1	74.59	8.36	4.32	8.54	5.26	0.97
Okdong 2	106.39	39.76	1.29	4.50	4.53	1.09
Tehung 1	2.62	21.41	0.14	57.31	1.50	1.09
Teheung2	181.23	9.38	41.22	106.42	19.77	1.07
Asea 1	2.86	5.71	0.75	2.39	38.61	1.77
Asea 2	13.60	5.10	0.69	68.86	189.18	1.25
Jeil 1	1.18	0.09	0.22	0.72	0.89	0.96
Jeil 2	1.76	20.18	78.72	153.76	2634.10	3.24
Ehung	1.83	9.68	3.05	61.91	811.93	1.65
Jangsung	72.64	8.67	1.26	8.59	6.21	1.01
Yonhwa	2.49	0.18	13.43	382.68	41.28	5.89
Yonhwa 2	3.97	39.77	4.76	3415.12	19.09	8.03
Ilkwang	141.60	9.79	2.01	12.50	24.55	1.33
Hambek	1.97	2.27	0.50	344.40	262.95	1.36
Mulkum	1.54	9.68	5.46	3.58	76.99	3.40

Table 4. Endemic Plants in Abandoned Mining Area

Site	Herbs	Trees
Keudo	*Urtica thunbergiana, Erigeron annuus, Oenothera odorata, Setaria viridis, Persicaria hydropiper, Bidens frondosa*	*Pinus densiflora, Alnus hirsuta , Prunus serrulata, Lonicera japonica*
Okdong 1	*Ranunculus japonicus, Miscanthus sinensis*	*Pinus densiflora, Robinia pseudo-acacia*
Okdong 2	*Miscanthus sinensis, Artemisia montana*	*Pinus densiflora, Robinia pseudo-acacia*
Teheung	*Miscanthus sinensis, Artemisia montana, Erigeron annuus, Humulus japonicus*	*Pinus densiflora, Lespedeza bicolor*
Asia	*Typha orientalis, Artemisia princeps, Pedicularis resupinata*	*Pinus densiflora*
Ehung	*Dianthus sinensis*	*Pinus densiflora, Robinia pseudo-acacia, Paulownia coreana*
Yonhwa 1	*Artemisia princeps, Oenothera odorata*	*Pinus densiflora, Robinia psedo-acacia*
Yonhwa 2	*Artemisia princeps, Oenothera odorata, Kummerowia striata*	*Pinus densiflora, Taxodium distichum, Betula platyphylla*
Ilkwang	*Artemisia princeps, Miscanthus sinensis*	*Pinus densiflora, Alnus japonica*
Hambek	*Ranunculus japonicus, Artemisia princeps, Oenothera odorata, Chenopodium album, Phalaris arundinacea*	*Pinus densiflora, Acer ginnale, Lespedeza bicolor*
Sangdong	*Erigeron canadensis, Artemisia princeps, Chenopodium album, Oenothera odorata*	*Pinus densiflora, Taxodium distichum*
Daduk	*Heteropappus hispidus, Chrysanthemum zawadskii, Artemisia montana, Plantago asiatica, Miscanthus sinensis, Commelina communis*	*Pinus densiflora, Lespedeza bicolor, Robinia pseudo-acacia, Paulownia coreana, Quercus serrata*

학적 형태로 존재하고 있으며 이들의 동태와 식물에 대한 해작용도 다르게 나타난다. 중금속으로 오염된 토양을 식물을 활용하여 정화하고자 할 경우 토양중 중금속의 존재 형태가 영향을 미칠 수 있으므로 토양중의 동태나 식물유효도와 관련한 추가적인 연구가 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

식생조사

조사 휴·폐광지역에서 우점하여 생육하고 있는 식물종들은 table 4와 같다. 초본은 국화과 식물인 쑥과 벼과 식물인 억새가 출현빈도가 가장 높았고 목본은 소나무와 아카시나무가 빈도가 높았다. 이들 식물들은 전국적으로 고르게 분포하고 건조한 토양에서 잘 서식하는 생태적 특징이 있다. 정 등[17]이 아연광산 일대의 식물종과 식물체내의 중금속 함량을 조사한 결과 국화과 식물인 쑥바귀와 미역취가 중금속 함량이 높았다고 한 보고와 연결시켜 볼 때, 국화과 식물의 경우 중금속에 대해서 내성을 가지고 있는 것으로 판단된다. 소나무의 경우도 박[1]이 전국 휴·폐광지역 조사에서 휴·폐광 지역에서 출현 빈도가 높고 체내 중금속 함량도 높은 것이라 보고된 바 있다.

옥동탄광의 소나무와 억새, 연화 제2광산의 낙우송과 자작나무는 식생복구용으로 인공식재한 것으로 조사당시 생육상황은 불량하였다. 연화광산의 경우 복토한 후 낙우송과 자작나무를 식재하였으나 복토의 깊이가 얕은 지점에서는 고농도의 중금속에 의해 해를 받은 것으로 보이고 옥동의 경우 토양의 pH가 강산성을 띠고 있어 토양중 중금속의 용해도가 증가하였기 때문에 토양중 중금속의 함량 자체는 높지 않았어도 해를 미쳤으리라 생각된다. 옥동과 연화의 예에서 오염토양의 정화에 있어 목본을 활용하는 것이 오염물질의 순환을 장기화시킨다는 점에서는 유리하지만 초본으로 안정된 식피를 조성하고 목본을 투입시키는 것이 효과를 극대화 할 수 있다고 짐작된다. 소나무 외에도 중금속에 대한 내성을 가진 목본으로는 은행나무, 메타세쿼이어 등이 보고되고 있다.[18]

식물체중 중금속 함량

우점 자생식물 중 1-2종을 선별하여 체내 중금속 함량을 측정한 결과는 table 5와 같다. 식물체내의 중금속 함량은 토양내 중금속의 함량에 영향을 받음을 알 수 있다. 쑥을 채취한 연화, 아세아, 일광, 함백의 경우 토양중 Zn의 함량은 연화>함백>아세아>일광의 순이었는데 이는 쑥내 Zn의 함량에 있어서도 같은 경향이었고 Cu, Cd의 경우에 있어서도 유사한 경향이었다. 조사 식물체중 상당수는 Kabana 등[19]이 제시한 식물체의 독성함량범위인 Cd 3-8, Cu 25-50, Zn 700-4,000, Cr 75-100mg/kg을 초과하는 체내 농도를 보이고 있었다.

각기 다른 지점에서 서식하고 있는 식물체의 체내 중금속 함량을 절대적으로 비교한다는 것은 무리가 있지만 Cd의 경우 연화광산의 쑥이 지상부와 지하부에 각각 26.85, 18.00 mg/kg를 함유하고 있어 가장 체내 농도가 높은 것으로 나타났고 쑥>억새>패랭이>비름의 순으로 나타났다. 그리고 지상부/지하부의 농도비로서 중금속 축적능을 평가해볼 때 대부분의 다른 식물들의 경우 지하부의 농도가 훨씬 높은 반면 쑥은 Cd에 대해 지상부의 농도가 오히려 높거나 1과 유사한 값을 보이고 있어 Cd에 대한 축적능이 우수한 것으로 판단된다. 일광과 태흥광산의 경우 토양 중 Cd의 함량이 1mg/kg정도로 비슷하고 토양의 이화학적 특성도 유사함에도 억새의 경우 태흥광산에서 체내 함량이

Table 5. Heavy metal concentration of herbs plant at abandonded mining area

Site	Plant	Plant part	Metal content(mg/kg)		
			Zn	Cu	Cd
Keudo	*Persicaria hydropiper* (여뀌)	leaf, stem	50.36	40.88	1.53
		root	50.67	113.21	4.60
Yonhwa 1	*Artemisia princeps* (쑥)	leaf, stem	77.68	34.01	17.15
		root	374.11	37.66	22.86
Yonhwa 2	*Artemisia princeps* (쑥)	leaf, stem	1192.00	103.36	26.85
		root	2853.00	134.39	18.00
	Plantago asiatica (질경이)	leaf, stem	54.73	88.51	12.93
		root	86.05	146.38	25.19
Asea	*Artemisia princeps* (쑥)	leaf, stem	38.90	42.33	5.33
		root	46.30	80.95	5.92
Okdong	*Amaranthus magostanus* (비름)	leaf, stem	105.75	26.48	2.37
		root	208.75	40.03	3.55
	Raununculus japonicus (미나리아재비)	leaf,stem	58.43	61.28	3.55
Ilkwang	*Artemisia princeps* (쑥)	leaf,stem	63.40	27.94	7.62
	Micanthus sinensis (억새)	leaf,stem	88.13	23.08	1.19
Ehung	*Dianthus sinensis* (패랭이꽃)	leaf, stem	65.14	405.73	5.72
Teheung	*Micanthus sinensis* (억새)	leaf,stem	169.85	20.18	8.29
Hambaek	*Artemisia princeps* (쑥)	leaf, stem	118.85	39.83	3.07
		root	140.67	74.42	2.30
	Oenothera odorata (달맞이꽃)	leaf, stem	83.53	32.49	3.07
		root	170.76	51.36	3.83

1.19와 8.29mg/kg으로 차이를 보였는데 이는 토양중 중금속의 존재형태가 달랐기 때문으로 추찰된다.

Zn은 연화광산에서 채취한 쑥에서의 체내 농도가 지상부 1,192, 지하부 2,853mg/kg으로 가장 높은 것으로 조사되었다. 식물체중 Zn의 함량은 쑥>달맞이꽃>억새>여뀌>비름의 순이었다.

Cu의 경우 패랭이꽃>여뀌>달맞이꽃의 순으로 함량이 높았다. 패랭이꽃의 경우 405.73 mg/kg으로 가장 함량이 높아, 구리 광산지역에 패랭이꽃의 이용가능성을 검토할 필요가 있다고 생각된다. 이 외에 정 등[17]이 아연광산 인근지역 자생식물중의 중금속 함량을 조사한 결과에서 다년생 식물로 고비, 쑴바귀, 쇠뜨기, 미역취 등이 중금속을 다량 함유하고 있는 식물종으로 보고한 바 있고 이 등[18]은 중금속을 인위적으로 처리한 토양에서 실험한 결과 흰줄무늬비비추, 맥문동 등의 중금속흡수량이 높다고 보고한 바 있지만 본 조사에서는 이러한 식물종들이 포함되지 않아 절대적인 비교는 할 수 없었다.

Baker 등[20]은 hyperaccumulator를 지상부 건물당 Cd 0.01, Cu 0.1, Zn 1.0%이상을 함유하는 식물이라 정의하였는데 본 조사에서는 식물체중에서 Baker 등이 제시한 의미에서의 hyperaccumulator(축적종)는 발견되지 않았다.

본 조사에서는 체내 중금속의 농도로서만 중금속에 대한

Table 6. Ecotype Characteristics of Herb Plants

Plant	Family	Habitation	Life Cycle	Height
Artemisia princeps(쑥)	Compositae	Hills & moors	perennial	60-120cm
Artemisia montana(산쑥)	Compositae	Hills & moors	perennial	1.5-2m
Chrysanthemum zawadskii(구절초)	Compositae	Hills & moors	perennial	30cm
Aster ciliosus(개쑥부쟁이)	Compositae	Hills & moors	biennial	30-100cm
Erigeron annuus(개망초)	Compositae	Hills & moors(naturalized plant)	annual, biennial	50-130cm
Erigeron canadensis(망초)	Compositae	Hills & moors(naturalized plant)	annual, biennial	50-100cm
Humulus japonicus(한삼덩굴)	Moraceae	Level gorund	annual	vine
Ranunculus japonicus(미나리아재비)	Ranunculaceae	Sunny place	perennial	30-70cm
Oenothera odorata(달맞이꽃)	Onagraceae	Hills & moors(naturalized plnat)	biennial	30-100cm
Urtica thunbergiana(쐐기풀)	Urticaceae	shaded gorund and forest edge at Hills & moors,	perennial	50-80cm
Dianthus sinensis(패랭이꽃)	Caryophyllaceae	Level ground, marsh	perennial	30-40cm
Miscanthus sinensis(억새)	Gramineae	sunny place at Hill, high lands	perennial	1-2m
Commelina communis(닭의장풀)	Commelinaceae	Hills & moors	annual	30-50cm
Typha orientalis(부들)	Typhaceae	ponds & streams	perennial	80-150
Pedicularis resupinata(송이풀)	Scrophulariaceae	Hills	perennial	30-70

내성을 평가하였지만, 식물은 금속에 대하여 체내 대사산물에 의한 킬레이팅[21], 액포내부로의 축적[22], 지상부로의 수송, 중금속의 흡수억제[23] 등 식물 종에 따라 다양한 내성기작을 가질 수 있다고 알려져 있기 때문에 phytoextraction, phytostabilization 등의 적용 영역들을 고려할 때 적용영역·방법에 따른 식물의 선발을 위해 식물종 마다 내성기작에 대한 구체적인 연구가 뒤따라야 한다고 생각된다.

본조사의 결과 체내 중금속 농도로 본 중금속에 대한 내성정도와 생태적 특징을 종합하여 볼 때 중금속 오염토양의 정화에 적용가능성이 있는 초본류로 쑥과 억새를 들 수 있다. 쑥과 억새의 경우 체내 중금속 함량이 다른 식물체에 비해서 높은 것으로 보아 내성 역시 가지고 있다고 보이고 두 식물이 다년생이라는 점, 뿌리 밀도가 높고 겨울철에도 지하경이 생존한다는 점에서 피복, 안정화식물로서 가치가 있다고 보여진다.

Phytoremediation이 자연적인 식생복원보다는 인위적이고 적극적인 복원작업이라는 점을 감안할 때 활용할 식물체의 경우 서식처가 특정지역에 국한되는 것이 아니라 전국적이어야 한다는 점과 대부분의 휴·폐광지가 산간 고지대에 분포하고 보습, 보수성이 낮은 토양이기 때문에 내건성, 내한성이 요구되며 지속적인 피복상태를 유지해야 하기 때문에 1년초보다는 다년초, 생체생산량이 많은 식물이 우선적으로 요구된다고 할 수 있다.

그러나 쑥과 억새를 오염토양에 의도적으로 투입하는 효율적인 방안과 쑥과 억새등으로 피복이 되었을 경우 최종적으로 목본이 투입되어 활착될 수 있는지의 여부에 대한 평가가 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

요 약

전국의 16개 휴·폐광 지역에서 토양중 중금속함량과 식생조사를 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다. 조사 휴·폐광산 대부분의 경우 피복식물이 없는 나대지로 존재하고 있었고 유기물함량, CEC 등이 낮은 값을 가지고 있는 등 대체로 척박한 토양조건을 가지고 있었으며 특정 중금속으로 인한 오염의 정도가 토양환경보전법상의 우려기준과 대책기준을 초과하는 지점도 있었다. 식물종들의 분포를 조사한 결과 목본은 소나무, 아카시나무 등이, 초본은 쑥과 억새의 출현빈도가 높았다. 쑥은 지상부에 Zn과 Cd를 각각 1,191, 26.35mg/kg을 함유하였고, 패랭이꽃은 Cu를 405mg/kg 함유하여 체내 농도가 가장 높은 것으로 조사되었다.

체내 중금속함량, 건물생산량, 생육기간등을 고려할 때 쑥, 억새, 달맞이꽃등이 토양정화식물로서의 가치가 있다고 생각된다. 앞으로 쑥을 비롯한 내성이 있는 식물종에 대한 조사는 물론 생리적 특성, 토양조건, 기후조건 등에 대한 지속적 연구가 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

사 사

본 논문은 1995년도 교육부 농학계 거점연구소 지원연구비(유용식물을 이용한 오염토양 정화기술개발)의 일부로 시행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Park, Y. H. (1994). Management Practices of inactive and abandoned metalliferous mine areas in Korea. Korean Environment Technology & Research. KETRI/1994/RE-14, 588 p.
2. Jimmy, J., B.R. Sabey, and W.L. Lindsay. (1978). Influence of pH, Phosphrous and incubation time on the solubility and plant uptake of Cadmium. J. Environ. Qual 7(2):286-290
3. Kim, K. S. (1980). 토양중 중금속의 생물학적 제거방법 시험, 농업기술연구소보: 37-50.
4. Choi, Jyung, Jyung-Jae Lee, and Nam-Ho Hur. (1991). Development of Several Methods to Remove Cadmium from Soil Contaminated with Cadmium. Korean J. Environmental Agriculture 10(2):128-132
5. Huh, Jong-Soo, Ju-Sik Cho, and Mun-Gyu Han. (1992). Mechanism of Cadmium Accumulation in the Cell of Cadmium-Tolerant Bacterium. Pseudomonas putida. Korean J. Environmental Agriculture 11(1):67-76
6. Cunningham, Scott D. and W. Ow. David. (1996). Promises and Prospects of Phytoremediation. Plant Physiol. 110:715-719
7. Salt, D.E., R.D. Smith, and I. Raskin. (1998). Phytoremediation. Annual. Rev. Plant. Physiol. Plant Mol. Biol. 49:643-668
8. Yoo, Sun-Ho, Kye-Hoon Kim, and Hae-Nam Hyun. (1985). Sequential extraction of cadmium, zinc, copper and lead in soils near zinc-mining sites. Korean J. Soil Sci. Fert. 18(2):71-77
9. Lee, Jong-Pal, No-Kwuan Park, Seon-Do Park, Boo-Sull Choi, and Bok-Jin Kim. (1996). Effects of Heavy Metal Contents in Soils Near Old Zinc-Mining Sites on the Growth of and their Uptake by Soybean. Korean J. Environ. Agriculture 15(3)275-283
10. Kang, Byeung-Hoa, Sang-In Shim, Sang-Gak Lee, Kwnag-Ho Kim, and Ill-Min Jung. (1998). Study on the potential of phytoremediation using wild plants for heavy metal pollution, Korean J. Environ. Agriculture 17(4):310-317

11. Lim, H. SooKil, Lee Young-Jun, and Ho-Jin Choi. 1991. Effects of Soil Solution pH on Adsorption and Desorption of Cd, Cu, and Zn by Soils. Korean J. Environ. Agriculture 10(2) 119-127

12. Kim, B. Y., K. S. Kim, H. K. Cho, I. H. Cho, K. D. Woo. (1990). 한국 밭토양 및 곡물중 중금속 자연함유량에 관한 조사연구. 농시논문집 32(2):57-68 (in Korean)

13. Park, Y.D. (1991). The present situation of using nitrogen fertilizer and its effects on upland crops in Korea. In "International serminar on increasing nitrogen efficiency in upland crop production" June 23-30, 1991. RDA-FFTC

14. Park, J. K., K.S. Lee, and S. K. Lee. (1995). Agricultural Soil Resources and Fertility Maintenace. Proceedings of Agricultural Science Sypmosium. pp. 69-98 (in Korean)

15. Chon, H. T. and M. C. Chung. (1991). 함우라늄 흑색세일 분포지역에서의 유해성 원소들의 분산에 관한 지구화학적 연구. 한국자원공학회지. 24:245-260 (in Korean)

16. Chon, H. T. (1996). Earth pollution around mining areas. Proceedings of Workshop on the Pollution around mining areas. pp. 2-16 (in Korean)

17. Jung, Ki-Chai, Bok-Jin Kim, and Sang Guk Han. (1993). Survey on Heavy Metals Contents in Native Plant near Old Zinc-Mining Sites. Korean J Environ. Agriculture 12(2):105-111

18. Lee, K.C., H.J. Lee, M.H. Lee, S.S. Kim, D.H. Kim, S.D. Kim, J.S. Shim, and Y.H. Kim. (1992). A study on soil remediation methods of contaminated land - in biological methods - Annual Report of National Institute of Environmental Research 14:231-254

19. Kabata-Pendias, A., and Pendias, H. (1984). Trace elements in soil and plants. CRC Press Inc., New York 315p

20. Baker, A.J.M. and R.R, Brooks. (1989). Terrestical higher plants which hyperaccumulate metallic element - A review of their distribution, ecology and phytochemistry. Biorecovery. 1:81-126

21. Robinson, N.J., A.M.Tommey, C.Kuske, and P.J.Jackson. (1993). Plant metallothioneins. Biochem. J. 295:1-10

22. Vogeli-Lange.R. and G.J.Wagner. (1990). Subcellular localization of Cd-binding peptides in tobacco leaves. Implications of a transport function for Cd-binding peptides. Plant. Physiol. 92:1086-1093

23. Salt, Ilya Raskin, D.E., M.Blaylock, and P.B.A.Nanda. (1995). Phytoremediation : A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. Biotechnology. 13:468-473