

충남 서부 백동 사문암지역 식물체의 중금속 함량

송 석 환·김 명 희*·민 일 식**·장 인 수***

중부대학교 공과대학 환경공학과, *중부대학교 자연과학대학 원예학과,
중부대학교 자연과학대학 산림자원학과, *대전대학교 이과대학 생물학과

Heavy metal concentration of plants in Baekdong serpentine area, western part of Chungnam

Suckhwan Song, Myung-Hee Kim*, Eil-Sik Min** and In-Soo Jang***

Dept. of Environmental Engineering, College of Engineering, Joongbu Univ.

*Dept. of Horticultural Science, College of Natural Science, Joongbu Univ.

**Dept. of Forest Resources, College of Natural Science, Joongbu Univ.

***Dept. of Biology, College of Science, Taejon Univ.

ABSTRACT

Heavy metal elements were analysed to assess degrees of heavy metal contents for the plants, *M. sinensis*, *A. vulgaris* and *G. oldhamiana*, from the Baekdong serpentine area within the western part of Chungnam. The area was divided into two sites: serpentine area (SP, consisting of serpentinite, SP) and non-serpentine area (NSP, containing amphibole schist, AS and gneiss, GN). Their host rocks(R) and top soils(S) were also collected from the each site. As the results of the study, the plants contain high concentration of Ni, Cr, Co in the SP and Fe, Zn in the AS and GN. Plants from the AS of the NSP contain mainly high content in the most of elements. Averages of Ni, Co and Cr for the plants decreased in the order of SP, AS and GN. In the total element contents, *M. sinensis* and *A. vulgaris* decreased in the order of Fe > Ni or Cr > Zn > Co > As > Sc within the SP and in the order of Fe > Zn > Cr > Ni, within the GN. Comparing among the parts of plants, root parts were higher in the most of elements than the above grounds. In the relative element ratios of plants collected from the SP and GN (SP/GN),

M. sinensis was lower than *A. vulgaris* in the most of elements, suggesting that the *M. sinensis* shows low absorption within the infertile serpentine soil and high absorption within the fertile gneiss soil. In the element contents of the top soils and their host rocks, the SP shows higher Ni, Co and Cr contents than the others. Their total contents decreased from SP to AS and GN, suggesting that the soils reflect the composition of their host rocks. Total element contents of the SP decreased in the order of Fe > Cr or Ni > Co > Zn > As > Sc and , for the GN, in the order of Fe > Zn > Cr > Ni > Co or Sc, respectively. In the relative element ratios, R/S of the SP decreased in the order of Cr > As > Fe > Sc > Co > Ni > Zn and , for the GN, in the order of Sc > Fe > Ni > Zn > Cr > Co. Comparing with plants within the each site, their top soils were higher than the plants in the most of elements, and their increase and decrease trends for each element are similar. Differences of element contents between the top soils and plants decreased in the order of SP, AS and GN. Plants of the GN were more similar to their soils than those of the others, suggesting that each plant species show different absorptions within the different soils. Comparing with the plants of GN, higher Ni, Co, Cr contents within those of the SP and their survival within the infertile serpentine soil suggest that the *M. sinensis*, *A. vulgaris* and *G. oldhamiana* may be the tolerance species in the serpentine soil. Comparisons with the upper crust show that *M. sinensis*, and *A. vulgaris* within the SP show high Ni and Cr contents, suggestive of hyperaccumulation. Upper results with the previous studies for the contaminated soils developed as parent materials with the serpentinites suggest additional studies for ecological behaviors for the plant and degrees of accumulations for the elements need to know phytoextraction of the heavy metal elements within the soils.

Key words : heavy metal contents, *M. sinensis*, *A. vulgaris*, *G. oldhamiana*, serpentinite, amphibole schist, gneiss

요 약 문

충남 서부 백동 사문암 지역에서 식물체내 중금속 오염정도를 알기 위해 사문암 지역과 각섬석 편암 및 편마암을 포함하는 인접 변성암으로 구성된 비 사문암 지역으로 나누어 식물체를 채취하였고 이들과 관계를 알기 위해 식물체가 서식하는 근접 지점에서 상부토양 및 모암시료도 채취 분석하였다. 이 결과 식물체에서 사문암 지역은 Ni, Cr, Co 함량이, 비 사문암 지역은 Fe, Zn 함량에서 각각 높았고 두 비 사문암 지역 중 대부분 원소가 각섬석 편암 지역에서 높았다. 식물체내 평균 Ni, Co, Cr 함량은 사문암, 각섬석 편암 및 편마암 순으로 감소하였고 썩과 참억새의 절대원소함량은 사문암 지역에서 Fe, Ni 또는 Cr, Zn, Co, As, Sc 순서로, 편마암 지역에서는 Fe, Zn, Cr, Ni 순서로 감소했고 식물체 부분 별 차이에서 대부분 원소에서 지하부가 높았다. 사문암과 편마암 지역 식물체 원소 함량 상대비에서 썩

에 비해 참억새가 대부분의 원소에서 낮은 값을 보였는데 이는 쑥보다 참억새가 척박한 사문암 토양내에서의 낮은 흡수량을, 그리고 비옥한 편마암 토양에서 높은 흡수량을 보이고 있음을 암시한다. 암석과 토양의 절대 원소 함량 비교에서 사문암 지역이 높은 Ni, Co 및 Cr 함량을 보였고, 이들 원소의 함량은 사문암, 각섬석 편암 및 편마암의 순으로 감소했는데 이는 상부토양이 모암조성을 반영하기 때문일 것으로 추정된다. 암석 및 상부토양의 절대 원소함량에서 사문암지역은 Fe, Cr 또는 Ni, Co, Zn, As, Sc, 편마암지역은 Fe, Zn, Cr, Ni, Co 또는 Sc 순서로 각각 감소했으며 암석과 토양의 상대비는 사문암 지역이 Cr, As, Fe, Sc, Co, Ni, Zn, 편마암 지역은 Sc, Fe, Ni, Zn, Cr, Co 순서로 각각 감소했다. 상부토양과 식물체의 원소 함량 비교에서 토양이 대부분 원소에서 높았고, 각 원소의 증감에 따라 식물체와 토양은 유사한 경향을 보였다. 토양과 식물체의 각 원소 함량차이에서 사문암, 각섬석 편암, 편마암 순으로 감소했으며 편마암지역 토양이 식물체의 함량에 가장 근접했다. 토양과 식물체의 각 원소함량 관계에서 동종의 개체일지라도 상부토양차이에 따라서 식물체내 원소 흡수량은 상당한 차이를 보였다. 척박한 사문암 지역의 식물이 변성암 지역의 식물과 비교하여 높은 Ni, Co, Cr 함량을 보이면서도 생존하는 것은 이들 식물이 척박한 사문암 지역에서도 생존할 수 있는 내성종임을 암시한다. 상부지각 암석 평균치와 비교에서 사문암 지역의 쑥과 참억새는 상부지각 암석 평균치보다 Ni, Cr 함량에서 높았는데 이는 사문암 지역 식물체내에는 이들 원소들이 과량 축적되었음을 의미한다. 위 연구 결과와 기존 사문암을 모재로 발달된 중금속에 오염된 토양에 대한 연구들을 재고해 보았을 때 식물체를 이용한 토양내 중금속 제거를 위해서는 사문암 지역내 식물체의 생태학적인 연구와 중금속 축적정도등과 같은 추가적인 연구가 필요함을 강력히 암시한다.

주제어 : 중금속 함량, 참억새, 쑥, 대나무, 사문암, 각섬석 편암, 편마암

1. 서 론

충남 서부 백동 지역에서는 안구상 형태로서 수백 meter 신장되어 산출되는 사문암이 분포하고 있다. 이 사문암지역에서는 인접 변성암 지역과는 두드러지게 다른 식생의 종 및 분포빈도 그리고 토양의 특성을 보이며 식물체내의 중금속 함량에서도 커다란 차이를 보이고 있다.

기존 전세계적인 연구들은 사문암 지역 토양이 척박하며 이런 척박성은 부분적으로 계절적, 지질학적 및 다른 요인들에 좌우되어 차이가 있기 때문이기도 하지만^{1, 2)} 근본적으로는 토양내 Fe, Mg, Cr 및 Ni 같은 높은 중금속 함량과 Ca, Mg, N, P, K 등과 같은 낮은 영양염류와 관련이 있다^{3, 4, 5)}.

또한 사문암 지역은 많은 강우가 있다 하더라도 광물의 우세한 입상조직 때문에 토양 함수량이 낮고³⁾, 다른 토양층에 비해 상대적으로 점토광물의 함량이 적어서 이온치환능력이 낮으며⁶⁾ 상부토양 바로 밑에 암석층이 분포하므로 식물 생장에 매우 불리한 환경조건을 보이기 때문일 수 있다⁷⁾. 기존 사문암 지역 식물에 대한 연구들은 이 지역에서 식물종의 출현빈도와 피도가 매우 낮으며, 발육상태가 부진한 건성형으로 엽폭이 좁고 황화 및 각질화를 보이며, 또한 넓은 근계분포를 형성하고 있음이 지적되고 있다^{4, 6)}.

사문암체 주변 식물체의 특성에 관한 연구는 16세기부터 시작되어⁶⁾ 19세기에 서유럽에서 체계적으로 연구되었다^{7, 8)}. 미국 캘리포니아 사문암 지역

의 연구⁹⁾는 사문암지역 식물체내에 Fe, Cr, Ni의 함량이 높고 일부 식물체는 Ni가 1,000ppm 이상이 검출됨을 지적하였고 러시아의 연구들은 사문암지역이 Fe, Mg, Cr, Ni 및 Pt와 같은 광석의 보고로¹⁰⁾ 이곳은 비정상적인 chloritic 형태의 식물종들이 우점하며 이들 식물체의 Ni과 Cr 함량 또한 인접 비사문암 지역에 비해 높게 나타남이 지적되었다¹¹⁾. 한편 일본지역 연구는 사문암 지역 식생은 지중해와 유사하고 넓은 온도범위($\pm 40^{\circ}\text{C}$)와 큰 고도차에 의해 유럽과 아메리카 보다 출현종이 풍부하여 높은 종다양성을 형성하고 있으나¹²⁾ 이곳에서 출현하는 식물체 또한 Ni와 Cr 함량이 높게 나타남을 지적하기도 하였다¹³⁾.

한국의 경우 사문암체가 충남 서부지역^{14, 15)}과 울산¹⁶⁾ 및 안동지역¹⁷⁾에 주로 분포하고 있다. 충남서부 사문암 지역에 대해 암석학적, 광물학적, 지화학적^{18, 19)} 및 광상학적^{20, 21)}으로 이미 되어 있고 안동¹⁷⁾과 울산지역^{16, 22)}은 암석학적, 광물학적 및 광상학적 연구가 일부 되어있는 상태이다. 하지만 사문암 토양과 이곳에 서식하는 식물체내 중금속함량에 대한 연구는 일부 지역에 대해 제한적인데 김명희 등²³⁾은 홍성 및 광천 사문암지역의 경우 식생이 빈약하며 이곳에 분포하는 식물체내에 높은 중금속 함량이 있음을 지적한바 있다.

본 연구는 충남 사문암 지역 중 백동 지역 식생의 중금속 함량에 대해 알아보고 이들과 상부토양 및 모암과의 관계에 대해 알아보고자 하였다. 또한 이런 식생, 토양간의 중금속 함량관계를 규명하여 토양으로부터 이들 원소들을 흡수하여 토양을 정화하는 능력을 밝혀 식물체를 이용해서 중금속 오염원의 확산을 방지할 수 있는 가능성을 규명하는데 있어서의 예비자료로서 삼고자 한다. 이를 위해 사문암 및 대조구인 비사문암 지역을 설정하고 두 지역에서 대표적인 식생을 설정하여 채취하고 상부토양 및 모암 시료도 채취, 분석하여 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 조사지 개황

본 지역은 크게 선캄브리아기의 편마암 복합체를 기반암으로 하여 이와 관입 및 부정합 관계에 있는 변성퇴적암류, 중생대 퇴적암류 및 이를 관입하는 후기의 관입암체들로 구성되어 있다^{14, 15)}. 선캄브리아기의 편마암복합체는 시대미상의 반화강암질 편마암에 의해 관입되고 있다(Fig. 1).

편마암복합체는 주로 흑운모, 호상, 안구상 편마암으로 구분되며 석영, 사장석, 알칼리 장석, 흑운모, 각섬석, 석류석 및 녹리석을 포함한다. 변성퇴적암류인 월현리층은 석영, 사장석, 알칼리 장석, 흑운모, 각섬석을 포함하는 함-흑운모, 흑운모-각섬석 편암과 각섬석, 흑운모, 사장석을 주로 포함하는 변성 염기성암으로 구성되어 있다.

중생대 퇴적암류로 월명산층은 역암, 흑색사암, 흑색 함탄질 셰일 등으로 구성되어 있다. 사암은 점이적인 모래 입자에서 자갈 입자로 변화를 보이며 셰일은 주 구성광물로 석영, 흑운모, 각섬석, 사장석등을 포함한다. 아미산층을 구성하는 중립질의 흑색 및 함탄질 셰일은 함탄질 물질, 석영, 흑운모, 알칼리 장석, 사장석, 자철석등을 주로 포함한다. 시대미상의 반화강암질 편마암은 사장석, 알칼리 장석, 흑운모를 주로 포함한다. 한편 주라기 말에서부터 백악기에 해당되는 산성인 핑크 장석화강암, 페그마타이트, 반화강암과 염기성암인 각섬암과 같은 다수의 관입암체들이 분포하고 있다.

연구대상인 사문암체는 EW 방향으로 신장되는 렌즈상 암체로 주변 편마암류와는 거의 수직 단층으로 접하며, 신선한 암석의 경우 다량의 감람석, 사방휘석, 각섬석, 침정석을 주로 함유하는 듀나이트에서 하즈버자이트에 해당되고 부분적으로 사문암화가 진행되어 사문석, 활석, 녹리석, 자철석이 풍부하게 포함한다.

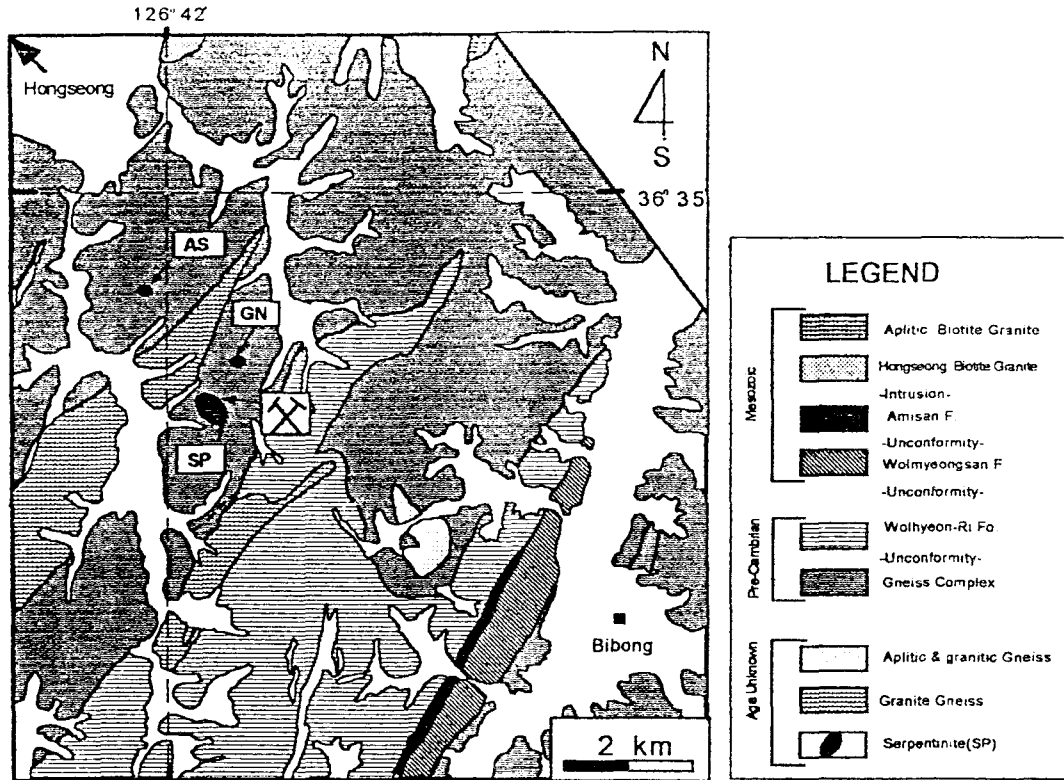


Fig. 1. Geological map of the Baekdong mine area in the western part of Chungnam. Sample localities (•) of rocks(abbreviations : SP for serpentinite, AS for amphibole schist, and GN for gneiss)

본 조사지역은 석면과 황석을 채굴했던 광산으로 개발 후 일부 만이 복토되고 식재되어 방치된 상태이다. 이 지역에 분포하는 식생으로 사문암지역은 주로 대나물(*Gypsophila oldhamiana*), 개솔새(*Cymbopogon tortilis* var. *goeringii*) 및 개여뀌(*Persicaria blumei*) 등이 있다. 사문암 풍화토와 변성암 풍화토에는 상기한 3종 외에 비수리(*Lespedeza cuneata*), 참싸리(*L. cyrtobotrya*), 닭의장풀(*Commelina communis*) 등이 군생하고 있었다. 또한 패랭이꽃(*Dianthus sinensis*), 참억새(*Miscanthus sinensis*), 쑥(*Artemisia vulgaris*), 산달래(*Allium grayi*), 양지꽃(*Potentilla fragarioides* var. *major*), 산초나무

(*Zanthoxylum ailanthoides*) 등이 출현하고 있다. 폐광 후 복토한 지역에 식재된 아까시나무(*Robinia pseudo-acacia*)는 생육상태가 매우 좋았다. 그러나, 본 사문암체에 출현하는 식물종은 홍성과 광천의 사문암체와 마찬가지로²³⁾ 극히 제한적이었으며 또한 사문암 지역의 식생은 열악한 토양의 생육조건으로 빈약하였고 식물상 또한 다양하지 못했다.

2.2 시료 채취 및 분석

1997년 8월부터 1998년 4월까지 4회에 걸쳐 지질조사를 실시하여 연구지역을 사문암 풍화토와 인

Table 1. Heavy metal contents of plants in Baekdong serpentinite area, Chungnam Province. (All element are in ppm except Fe(wt %)). Abbreviations; G for *Gypsophila oldhamiana*, M for *Miscanthus sinensis*, A for *Artemisia vulgaris*, SP for Serpentine area, NSP for Non-Serpentine area, SP for Serpentinite, AS for Amphibole schist, GN for Gneiss, U for above ground and L for root.

Type	Name		Ni	Co	Cr	Sc	As	Fe	Zn
SP	SP-G1	U	5	1.7	10	0.45	0.40	0.102	17
		L	50	1.9	16	0.19	0.37	0.074	15
		Avg.	27.5	1.8	13	0.32	0.39	0.09	16
	SP-G2	U	9	3.4	14	0.84	0.40	0.18	20
		L	51	4.6	41	0.7	0.46	0.20	13
	Avg.	30	4	27.5	0.77	0.43	0.19	16.5	
SP	SP-M	U	16	1.8	21	0.27	1.2	0.098	22
		L	95	9.0	130	1.20	1.4	0.482	20
		Avg.	55.5	5.4	75.5	0.735	1.3	0.29	21
NSP	AS-M	U	2	1.4	7.1	0.64	0.41	0.157	25
		L	8	6.3	26	4.5	0.98	0.857	39
		Avg.	5	3.85	16.5	2.57	0.7	0.51	32
	GN-M	U	4	2.6	13	0.98	4.4	0.451	25
		L	6	3.0	12	1.30	1.5	0.426	26
	Avg.	5	2.8	12.5	1.14	2.95	0.44	25.5	
	SP/GN	Avg.	11.1	1.93	6.04	0.64	0.44	0.66	0.82
SP	SP-A	U	39	4	42	0.6	0.81	0.179	32
		L	73	9	60	1.3	1.50	0.331	29
		Avg.	56	6.5	51	0.95	1.16	0.255	30.5
NSP	AS-A	U	3	1.9	7.6	1.1	0.43	0.228	34
		L	43	6.9	19	4.8	1.2	0.916	52
		Avg.	23	4.4	13.3	2.85	0.82	0.57	43
	GN-A	U	3	1.2	5.5	0.37	0.57	0.129	20
		L	2	1.3	5.3	0.65	0.40	0.183	9
	Avg.	2.5	1.25	5.4	0.51	0.49	0.16	14.5	
	SP/GN	Avg.	22.4	5.2	9.444	1.863	2.381	1.635	2.103

접 비 사문암인 각섬석 편암과 편마암을 포함하는 변성암 풍화토 지역으로 나누어 식물체, 상부토양 및 모암시료를 채취하였다(Fig. 1).

본 연구에서는 시료 분석치에 대한 신뢰도를 높

이기 위해 각 대조구를 대표하는 3 개 이상 시료를 암석 및 토양에서 채취하여 대표시료로 하였고 식물체의 경우 암석 및 토양이 채취되는 지점의 직경 2 m 범위내에서 같은 개체 3 개를 채취하여 지상

부(잎과 줄기)와 지하부(뿌리)로 분리하고 각각 혼합하여 각 지역에 대한 대표시료로 하였다.

채취된 상부토양시료는 약 1kg을 잘 혼합시킨 후 실험실로 운반, 3주간 풍건시킨 후 2mm 체로 쳐서 시료로 준비하였다. 암석시료는 상부토양과 동일한 곳에서 채취하였고, 광물 특성을 조사할 목적으로 박편을 제작하여 광물조합을 관찰하였다. 준비된 암석과 토양시료는 캐나다의 ACTLABs (Activation Laboratories Ltd.)에서 ICP로 분석하였다. 분석 방법은 0.5g의 시료를 질산(0.6ml)과 염산(1.8ml)을 사용하여 95°C에서 반응이 멈출 때까지 약 2시간 동안 용해시켜 액상(Aqua regia)을 만들어 냉각시킨 후 증류수 10ml을 첨가한 후 Thermo Jerrel Ash Enviro II ICP로 분석하였다.

식물체 시료는 사문암과 변성암 풍화토에서 각각 쭉과 참억새, 사문암체에서만 출현하는 대나무를 채취하여 실험실에서 증류수로 수회의 세척을 거쳐 이물질을 최대한 제거하였다. 또한 실험실에서 3주간 충분히 기건시킨 후에 캐나다의 ACTLABs에서 INAA로 분석하였다. 분석 방법은 시료를 90°C로 건조시켜 과쇄한 후 15g을 칭량하여 약 30 ton으로 압축시켜 제조한 briquette에 15분간 $7 \cdot 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 의 파장으로 빛을 조사하고 7일 후 부식된 시료를 INAA를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 식물체의 원소 함량

사문암과 변성암 풍화토에서 채취한 식물체의 분석 결과(Table 1, Fig. 2)에서 사문암지역 식물체에서는 Ni, Cr, Co에서 높았고 인접 변성암지역인 각섬석 편암 및 편마암 지역 식물들은 Fe, Zn 함량에서 높았다. 또한 두 변성암지역 식물체의 비

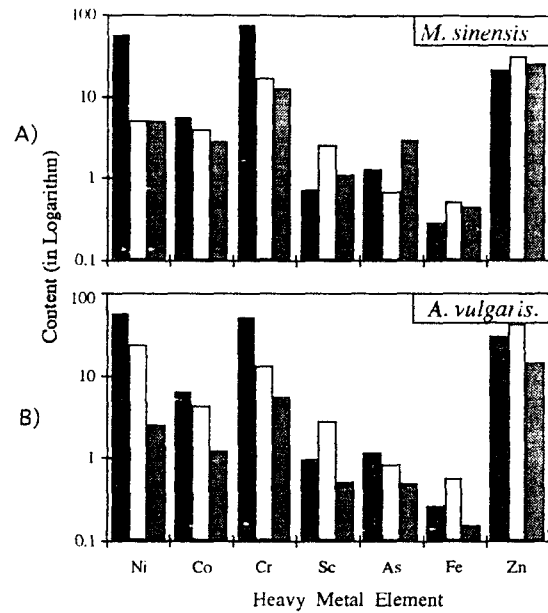


Fig. 2. Heavy metal element contents of the plants(avg.) from the Baekdong serpentine area. All elements are in ppm except Fe(wt %)

교에서 참억새 및 쭉의 경우 As, Ni를 제외한 모든 원소에서 각섬석 편암지역에서 높았다. 평균 원소함량의 경우 식물체에서 Ni, Co, Cr에서 사문암, 각섬석 편암 및 편마암 순으로 감소되었다(Fig. 2).

각 식물의 지상부와 지하부의 관계(Table. 1)를 고려해볼 때 대부분의 원소 함량에서 지하부가 높았으나 사문암지역의 모든 식물에서 지상부가 Zn 함량에서 높았으며 사문암체에만 출현하는 대나무의 경우 지상부에서 Sc 함량이 높았다. 한편 편마암지역 참억새 및 쭉의 경우 지상부에서 Cr, As 함량이 높았다.

또한 사문암 지역과 편마암 지역의 식물체 원소 함량비에서 참억새가 쭉보다 대부분의 원소에서 낮은 값을 보였는데, 참억새가 척박한 사문암 토양에서 쭉보다 흡수량이 적었고 비옥한 편마암 토양에서 흡수량이 많았음을 의미한다(Fig. 3).

Table 2. Heavy metal contents of rocks and their top soils in Baekdong serpentine area, Chungnam Province. (All Element are in ppm except Fe(wt %)). * from Taylor and McLennan (1981) and ** from Taylor and McLennan (1985). Abbreviations; *SP* for Serpentine area and *NSP* for Non-Serpentine area.

Type	Name		Ni	Co	Cr	Sc	As	Fe	Zn
<i>SP</i>	Serpentinite	Rock(SR)	2137	98	2885	6	29	6.74	57
		Soil(SS)	1633	69	540	4	10	4.01	46
		SR/SS	1.309	1.420	5.343	1.5	2.9	1.681	1.239
<i>NSP</i>	Amphibole Schist	Rock(SA)	122	40	500	36.2	-	7.157	100
		Soil(SS)	18	9	41	1	-	3.10	53
		SA/SS	6.778	4.444	12.195	362	-	2.309	1.887
	Gneiss	Rock(GR)	9	2	12	3.4	-	2.315	42
		Soil(GS)	6	4	9	1	-	1.36	31
		GR/GS	1.5	0.5	1.333	3.4	-	1.702	1.355
	Rock ratio	SR/GR	237.4	49	240.4	1.765	-	2.911	1.357
	Top soil ratio	SS/GS	272.2	17.25	60	4	-	2.949	1.484
	Upper crust*		20	10	35	11	1.5	3.5	71
	Bulk crust**		105	29	185	30	1.0	7.07	80

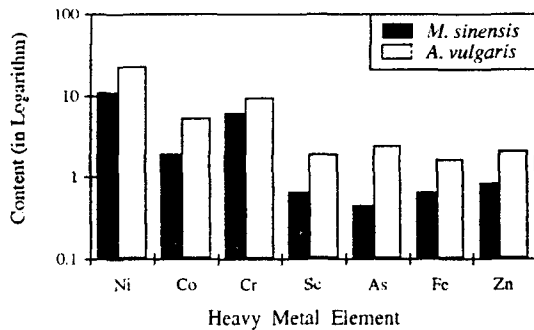


Fig. 3. Relative ratios(SP/GN) of heavy metal element contents for the plants(avg.) from the serpentine and gneiss soils of the Baekdong serpentine area. Abbreviations *SP* and *GN* in the Table 1. All elements are in ppm except Fe(wt %)

식물체의 절대 원소함량(Table. 1, Fig. 2)은

쑥과 참억새의 경우 사문암지역에서 Fe, Ni 또는 Cr, Zn, Co, As, Sc 순서로, 각섬석 편암 지역에서는 Fe, Zn, Cr, Ni, Co, Sc, As, 그리고 편마암지역에서는 Fe, Zn, Cr, Ni 순서로 각각 감소했다. 또한 사문암지역에서만 발견되는 대나무은 Fe, Ni, Zn 또는 Cr, Co, As 또는 Sc 순서로 감소했다.

이런 사문암 지역 식물체의 높은 중금속 함량은 국내연구의 경우 김명희 등²³⁾에 의해 기존에 지적된바 있으며 전세계의 연구에서도 Baker²⁴⁾ 등에 의해서도 보고된바 있다.

한편 위에 언급한 바와 같이 식물체의 종에 따른 흡수량의 차이와 부분에 따른 함량차이에 대한 연구들은 다양한 의견을 제시하는데 아래와 같다.

임수길 등²⁵⁾은 폐광 지역에서는 쑥, 도꼬마리(*Xanthium strumarium*), 망초(*Erigeron canadensis*) 및 달맞이꽃(*Oenothera odorata*)

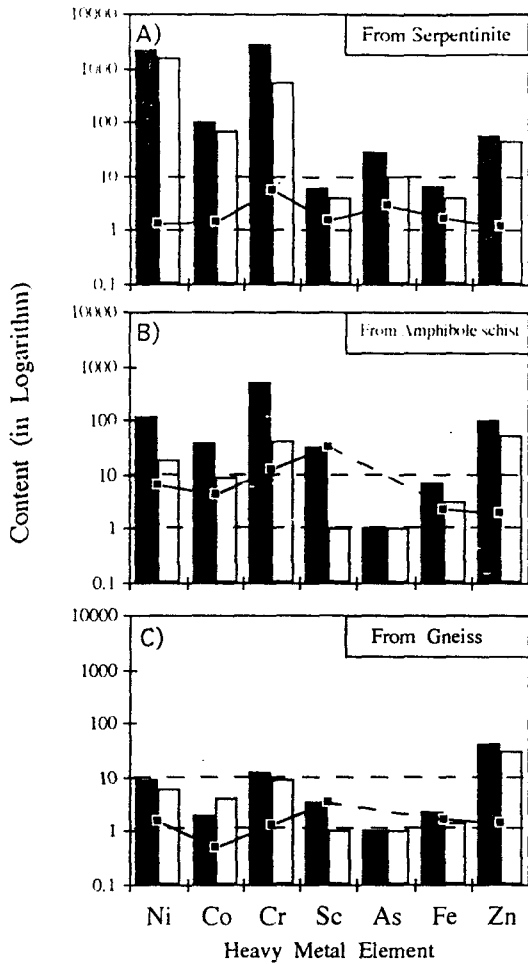


Fig. 4. Heavy metal element contents of rock (■) and top soil(□), and their relative ratios(Rock/Top Soil, thin line) from the Baekdong serpentine area. All elements are in ppm except Fe(wt %)

등이 중금속을 많이 축적한다는 사실을 밝혀냈다. 그 외에 정기채 등²⁶⁾은 광산 주변 식물체의 연구에서 식물의 종류 및 중금속 종류에 따라 흡수력과 내성의 차이가 있으며 특히 Cu는 속새과 식물, Zn은 마디풀과 식물이 높은 체내 함량을 보이고 있음을 지적했다.

식물체의 각 부분의 흡수량 차이에 대한 연구에

서 양액을 이용한 실험을 통하여 Homer 등²⁷⁾은 *Alyssum troidii*가 Pb 함량에서 뿌리에서 높은 축적량을 보였으며 Nanda 등²⁸⁾은 *B. juncea*가 Co 함량에서 뿌리에 비해 잎에서 높은 축적량이 보임을 지적했다.

이런 대부분 식물체는 토양에서 흡수되는 원소 함량이 일반적으로 뿌리표면의 유용한 pool(울혈)에 비례하²⁹⁾, 뿌리에 흡착되는 원소기작은 치환성 양이온, 킬레이트화되는 물질 및 그의 운반자에 의한 세포내로의 이동, 뿌리나 줄기 등에 의하여 영향³⁰⁾을 받을 수 있다. 또한 뿌리 주위의 토양수분 pH 변화는 뿌리가 흡수할 수 있는 유용한 원소들의 비율에 영향을 준다^{27, 31)}. 식물체내에 흡수된 원소는 세포막을 통과하여 원형질에 부유하면서 각각의 기관에 축적되는 것으로 미루어 보아^{27, 28, 29)} 축적되는 원소함량은 위에 언급된 내용들과 관련된 원소들의 특징에 좌우되어²⁹⁾ 식물의 종에 따라 기관별로 중금속이 선택적으로 축적되고 있음을 시사한다.

3.2 상부토양 및 암석의 원소 함량

암석 및 상부토양에 대한 중금속 결과치(Table 2, Fig. 4)에서 일반적으로 암석의 경우 사문암 지역이 다른 지역에 비해 Ni, Co 및 Cr의 함량이 높았고, 이들 원소의 절대함량은 사문암, 각섬석 편암 및 편마암의 순으로 감소했다. 또한 각섬석 편암은 사문암 및 편마암 지역 암석보다 Sc, Fe, Zn 함량이 높았다.

상부토양은 사문암 지역이 그 외 지역에 비해 Ni, Co, Cr, Sc, Fe의 함량이 높았고 각섬석 편암은 다른 지역의 암석보다 Zn이 높았으며 대부분 원소의 절대 함량은 사문암, 각섬석 편암 및 편마암의 순으로 감소하였다 (Fig. 5). 이와 같이 토양과 암석에서 조사된 원소함량 차이의 유사한 경향은 조사지의 대부분 상부토양이 그들의 모암조성을

반영하기 때문으로 생각된다.

암석의 상대적인 원소 함량관계(Table 2)에서, 사문암은 Fe, Cr, Ni, Co, Zn, As, Sc, 각섬석 편암은 Fe, Cr, Ni, Zn, Co, Sc, 그리고 편마암은 Fe, Zn, Cr, Ni, Sc, Co 순서로 각각 감소했다. 상부토양의 상대적인 함량(Fig. 5)은 사문암 지역이 Fe, Ni, Cr, Co, Zn, As, Sc, 각섬석 편암 지역은 Fe, Zn, Cr, Ni, Co, Sc, 그리고 편마암 지역은 Fe, Zn, Cr, Ni, Co, Sc 순서로 각각 감소했다(Table 2, Fig. 3).

암석과 토양의 상대비율(Table 2)은 사문암 지역이 Cr, As, Fe, Sc, Co, Ni, Zn, 각섬석 편암 지역은 Sc, Cr, Ni, Co, Fe, Zn, 그리고 편마암 지역은 Sc, Fe, Ni, Zn, Cr, Co 순서로 각각 감소했다.

사문암과 편마암의 암석과 토양의 비율(Table 2)은 암석에서 Cr, Ni, Co, Fe, Sc, Zn, 토양은 Ni, Cr, Co, Sc, Fe, Zn 순서로 각각 감소했다. 또한 일반적으로 편마암이 다른 지역 암석에 비해 상부토양에 근접하고 있으며, 각섬석 편암이 가장 두드러진 차이를 보였다.

3.3 상부토양과 식물체의 관계

각 원소에 대한 상부토양과 식물체의 원소함량 관계(Fig. 5)에서 토양이 식물체보다 대부분 원소 함량에서 높았고, 각 원소의 증가와 감소에 따라 식물체와 토양은 각 원소에서 유사한 증가와 감소 경향을 보였다. 또한 토양과 식물체의 각 원소에 대한 함량차이에서 사문암, 각섬석 편암, 편마암 순으로 감소했으며 편마암지역의 토양이 식물체의 함량에 가장 근접했다.

각섬석 편암 지역의 상부토양에서는 썩이, 편마암 지역 토양은 참역새가 토양조성에 각각 유사하였고, 사문암 지역 토양의 경우는 참역새와 썩이 대나무보다 토양의 분석치에 근접하였다(Fig. 5).

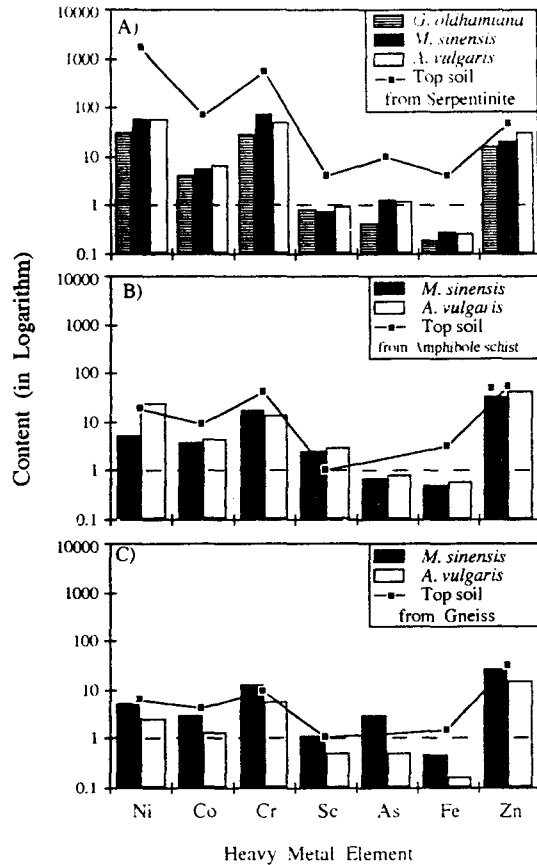


Fig. 5. Heavy metal element contents for the plants from different top soils of the Baekdong serpentine area. All elements are in ppm except Fe(Wt %)

특히 변성암류 중에 각 원소에서 참역새는 Sc 함량이 각섬석 편암 토양에 유사했고 Cr 함량은 편마암 토양에 유사했으며 썩은 Ni, Sc 함량에서 각섬석 편암 토양에 유사했다. 즉 원소함량 관계에서 동종의 개체일지라도 상부토양에 차이에 따라서 식물체내 원소 흡수량은 상당한 차이를 나타냄을 암시한다.

한편 척박한 사문암 지역 식물이 변성암 지역 식물과 비교해 볼때 Ni, Co, Cr의 높은 함량을 보이며 생존하는 것은 이들 식물이 척박한 사문암 지역

에서도 생존할수 있는 내성종임을 암시한다.

상부지각의 암석 평균치³⁰⁾와 비교할 때 사문암 지역의 쑥과 참억새는 상부지각의 암석 평균치보다 Ni, Cr 함량에서 높았고 그 외 원소 함량은 낮았다. 즉 사문암 지역의 식물체내에는 Ni와 Cr 함량이 일반 지표의 암석보다 과량으로 축적되었음을 의미한다.

3.4 식물체를 이용한 중금속 이온의 축출

최근 중금속 오염 토양 위에 토착종인 내금속성 식물을 효과적으로 경작시킬수 있다면 그 식물을 활착시켜 오염원을 제거할수 있으리라는 많은 의견들이 제기되고 있다³¹⁾. Ebbs 등³²⁾ 은 Brassica spp 와 *Thlaspi caerulescens* 의 중금속 축적 정도와 생산량을 비교한 결과 Brassica spp 가 Zn 제거에 효과적임을 언급했고 Baker 등³³⁾ 등은 포장규모로 실험한 결과에서 *Thlaspi caerulescens* 및 *Alyssum*을 이용하여 어느 정도의 Zn 및 Ni 제거됨을 언급하였다. Nanda 등²⁸⁾은 *B. juncea*를 이용하여 토양 침출액 중에 Pb 농도를 어느정도 감소시킬수 있음을 지적했다.

한국의 경우도 김규식 등³⁴⁾은 중금속을 회색시킨 후 식물체의 흡수 정도를 조사하였는데 은시원사시나무(*Populus tomentiglandulosa*), 왕골(*Cyperus exaltatus* var. *iwasakii*), 해바라기(*Helianthus tuberosus*) 순으로 흡수량이 많았고, 이길철 등³⁵⁾은 쥐똥나무가 높은 중금속 흡수량을 보이는 종이라 지적했다.

앞에서 언급했듯이 본 연구 지역의 대표적인 식물체에 대한 연구에서 참억새 및 쑥은 주변 비 사문암지역 것들에 비해 높은 중금속 함량을 보였다.

이런 기존 연구 결과들은 아직은 시작 단계이지만 한국의 경우도 앞으로 사문암을 모재로 발달된 토양에서 서식하는 식물체의 출현빈도, 피도, 발육 상태 등과 같은 생태적인 연구와 식물체내의 중금

속 축적정도를 규명하여 중금속에 오염된 토양에서 효과적으로 중금속의 제거하기 위한 방법으로 추가적인 연구가 필요함을 강력히 암시한다고 볼 수 있다.

4. 결 론

1. 사문암지역 식물체들은 Ni, Cr, Co함량에서 높았고 인접 비 사문암 지역 식물들은 Fe, Zn 함량에서 높았으며 비 사문암인 변성암 지역 비교에서 대부분 원소의 경우 각섬석 편암 지역에서 높았다.
2. 식물체내 평균 Ni, Co, Cr 함량의 경우 사문암, 각섬석 편암 및 편마암 순으로 감소되었고 쑥과 참억새의 절대 원소함량은 사문암지역에서 Fe, Ni 또는 Cr, Zn, Co, As, Sc 순서로, 편마암지역에서는 Fe, Zn, Cr, Ni 순서로 감소했고 식물체의 부분별 차이에서 대부분 원소에서 지하부가 높았다.
3. 사문암과 편마암 지역 식물체 원소함량 상대비에서 참억새가 쑥보다 대부분의 원소에서 낮은 값을 보였는데, 참억새가 척박한 사문암 토양에서 쑥보다 흡수량이 적었고 비옥한 편마암 토양에서 흡수량이 많았음을 의미한다.
4. 암석 및 토양의 원소함량 비교에서 사문암 지역에서 Ni, Co 및 Cr 함량이 높았고, 이들 원소의 함량은 사문암, 각섬석 편암 및 편마암의 순으로 감소됐는데 이는 상부토양이 모암조성을 반영하기 때문으로 생각된다.
5. 암석 및 상부토양의 각 원소 상대적인 함량비교에서 사문암지역은 Fe, Cr 또는 Ni, Co, Zn, As, Sc, 편마암지역은 Fe, Zn, Cr, Ni, Co 또는 Sc 순서로 각각 감소했으며 암석과 토양의 상대비는 사문암 지역이 Cr, As, Fe, Sc, Co, Ni, Zn, 편마암 지역은 Sc, Fe, Ni, Zn, Cr, Co 순서로 각각 감소했다.

6. 상부토양과 식물체의 비교에서 토양이 식물체보다 대부분 원소에서 높았고, 각 원소의 증가와 감소에 따라 식물체와 토양은 유사한 증, 감 경향을 보였다.
 7. 토양과 식물체의 각 원소 함량차이에서 사문암, 각섬석 편암, 편마암 순으로 감소했으며 편마암 지역 토양이 식물체 함량에 가장 근접했다.
 8. 토양과 식물체의 각 원소함량 관계에서 동종의 개체일지라도 상부토양 종류에 따라서 식물체내 원소 흡수량은 상당한 차이를 보였다. 또한 척박한 사문암 지역의 식물이 변성암 지역의 식물과 비교하여 높은 Ni, Co, Cr 함량을 보이면서도 생존하는 것은 이들 식물이 척박한 사문암 지역에서도 생존할수 있는 내성증임을 암시한다.
 9. 상부지각의 암석 평균치와 비교할 때 사문암 지역의 쑥과 참억새는 상부지각 암석 평균치보다 Ni, Cr 함량에서 높았는데 이는 사문암 지역 식물체내에는 이들 원소들이 과량 축적되었음을 의미한다.
 10. 위 연구와 기존 사문암을 모재로 발달된 중금속속 오염된 토양에 대한 연구들을 재고해 보았을 때 식물체를 이용한 토양내 중금속 제거를 위해서는 사문암 지역내 식물체의 생태학적인 연구와 중금속 축적정도등과 같은 추가적인 연구가 필요함을 강력히 암시한다.
- ### 참 고 문 헌
1. Lee, J., Brooks, R. R., Reeves, R. D. and Boswell, C. R. "Soil Factors Controlling a New Zealand Serpentine Flora", *Plant and Soil*, **42**, pp153-160 (1975).
 2. Slingsby, D. R. and Brown, D. H. "Nickel in British Serpentine Soils", *J. Ecol.*, **65**, pp597-618 (1977).
 3. Krause, W. *Andere Bodenspezialisten. In Handbuch der Pflanzenphysiologie*. **4**. Springer, Berlin pp755-806 (1958).
 4. Baker, A. J. M., Protocor, J., and Reeves, R. D. *The Vegetation of Ultramafic (Serpentinite) Soils*, Intercepts Ltd., Andover, United Kingdom (1992).
 5. O' Hanley, D. S. *Serpentinites; Records of Tectonic and Petrological History*, Oxford University Press. Inc., New York (1996).
 6. Brooks, P. R. *Serpentine and its Vegetation: A Multidisciplinary Approach*, 1st Edition, Dioscorides Press, Portland (1987).
 7. Rune, O. "Plant Life on Serpentes and Related Rocks in the North of Sweden", *Acta Phytogeogr. Suecica*, **31**, pp1-139 (1953).
 8. Pancic, J. "Die Flora der Serpentinberge in Mittel-Serbien. Verh", *Zool. Bot. Ges. Wien*, **9**, pp139-150 (1859).
 9. Kruckeberg, W. R., *California Serpentes: Flora, Vegetation, Geology, Soils, and Management Problems*, University of California Press, Berkeley (1984).
 10. Derry, D. R. *World atlas of Geology and Mineral deposits*, Mining Journal Books, London (1980).
 11. Storozheva, M. M. "Teratological Phenomena in *Pulsatilla patens* under the Conditions of Nickel Ore Field(in Russ.)", *Trudy Biogeokhim. Lab.*, **10**, pp64-75 (1954).
 12. Susuki, J. *Ultrabasic Rocks and Associated Ore Deposits of Hokkaido Japan*", *J. Fac. Sci. Hokk. Univ. Ser.*, **8**, pp175-210 (1952).
 13. Yamagata, N. and Murakami, Y. "A cobalt - Accumulating plant, *Clethra barbinervis* siev. et Zucc.", *Nature Lond.*, **181**, pp1808-1809 (1958).
 14. 엄상호, 이민성, *대흥지질도폭 및 설명서*, 국립지질조사소 (1963).
 15. 이종혁, 김성수, *홍성지질도폭 및 설명서*, 국립지질조사소 (1963).
 16. 최수용, 황진연, 김정진, *이윤중 울산사문암체의 광물학적, 지구화학적 연구*, 지질학회

- 지, **26**, pp105-118 (1990).
17. 황진연, 김정신, 옥수석 안동지역 사문암 광상의 구성광물 및 성안에 대한 연구, 광산지질, **26**, pp1-10 (1993).
 18. Wee, S. M., Choi, S., G. and So, C. G. "Preliminary Study on Ultramafic Rocks from the Chungnam Province, Korea", *Econ. Environ. Geol.*, **27**, pp171-180 (1994).
 19. Song, S. H., Choi, S. G. and Woo, J. G. "Genetic Implications of Ultramafic Rocks from the Bibong Area in the Kyeonggi Gneiss Complex", *Econ. Environ. Geol.*, **30**, pp477-491 (1997).
 20. Song, Y. and Moon, H. S. "Supergene Chloritization and Vermiculitization in Hornblende Gneiss, the Cheongyang Area", *J. Korean Inst. Mining Geol.*, **24**, pp 233-244 (1991).
 21. 윤상필, 문희수, 송윤구. "초염기성암기원의 평안 및 대홍활석광상의 성인과 광물화학". *자원환경지질*, **27**, pp131-145 (1994).
 22. 김규한, 박재경, 양종만, Hiroshi Satake 울산 철광산지역 사문암의 사문암화작용에 관한 연구, 광산지질, **26**, pp267-278 (1993).
 23. 김명희, 민일식, 송석환. "사문암지역에서 생육하는 대나물(*Gypsophola oldhamian*)의 중금속 함량, 한국생태학회지, **20**, pp385-391 (1997).
 24. Baker, A. J. M. and Brooks, R. R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic element-A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, **1**, pp81-126 (1989).
 25. 임수길, 김정규, 김동엽. "유용식물을 이용한 오염토양 정화기술 개발", 제1회 농업과학 심포지엄 21세기 농업과학 연구의 발전방향. 교육부 농업과학 심사평가위원회, pp 236-241 (1996).
 26. 정기채, 김복진, 한상국. "아연광산 인접지역 야생식물체의 중금속함량 조사". *한국환경농학회지*, **12**, pp105-111 (1993).
 27. Homer, F. A., Morrison, R. S. Brooks, R. R., Clemens, J. and Reeves, R. D. "Comparative Studies of Nickel, Cobalt and Copper Uptake by Some Nickel Hyperaccumulators of the Genus *Alyssum*", *Plant and Soil*, **138**, pp195-205 (1991).
 28. Nanda. K. P. B. A., Viatcheslave, D., Harry, M. and Ilya, R. "Phytoextraction: The use of Plants to Remove Heavy Metalsfrom Soils", *Environ. Sci. Technol.*, **29**, pp 1232-1235 (1995).
 29. Alina, K.-P. and Henryk, P. Trace Elements in Soils and Plants, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida (1985).
 30. Taylor, S.R. and McLennan, S. M. "The Composition and Evolution of Continental Crust: Rare Earth Element Evidence from Sedimentary Rocks", *Phil. Tran. Roy. Soc.*, A301, 381pp (1981).
 31. Chaney, R. L., Malik, M., Lee, Y. M., Brown, S. L. Angle J. S. and Baker, A. J. M. Phytoremediation of soil metals. "Manuscript for Current opinions in biotechnology", (1997).
 32. Ebbs, S. D., Lasat, M. N., Brady, D. J., Cornish, J. Gorden, R., and Korchian, L. V. Phytoextraction of Cadimum and Zinc from the contaminated soils. *J. Environ. Qual.*, **26**, pp1424-1430 (1997).
 33. Baker, A. J. M., McGrath, S. P., Sidoli, C. M. D. and Reeves, R.D. The possibility of in sit heavy metal decontamination of polluted soils using crops metal accumulating plants. *Resources Conservation and Recycling*, **11**, pp41-49 (1994).
 34. 김규식. "토양중 중금속의 생물학적 제거 방법시험". 농업기술연구소보, pp37-50 (1980).
 35. 이길철, 이홍재, 이민효, 김성수, 김동호, 김상돈. "오염토양의 정화 방법에 대한 연구(1)-식물에 의한 정화 방법 연구". *국립환경연구원보*, **14**, pp231-254 (1992).