

충남 사문암 지역 토양 식물체 및 계류의 중금속 오염^{1*}

김명희² · 송석환³ · 민일식² · 장인수⁴

Heavy Metal Pollutions of the Top Soil, Plants and Stream Water from the Serpentinite Area, Chungnam^{1*}

Myung-Hee Kim², Suck-Hwan Song³, Ell-Sik Min², In-Soo Jang⁴

요 약

충남 사문암 지역인 광천, 홍성, 백동, 대흥 및 유구지역의 토양, 식물체(참억새, 쑥, 리기다소나무) 및 지표수, 갯내수의 중금속 함량을 분석한 결과 사문암 토양의 Ni, Cr 및 Co 원소가 변성암 토양에 비하여 10~13배 높았으며, 이 원소들이 serpentine factor로 생각된다. 사문암 지역간에는 이들 원소의 차이가 뚜렷하지 않았다. 변성암 토양 식물체에서보다 사문암 토양 식물에서 Ni, Cr, Co 등이 높았다. 리기다소나무의 원소 흡수량은 비교적 낮았고, 3종 식물에서 대체로 뿌리의 원소 함량이 지상부 함량보다 높았으며, 사문암 토양에서는 Ni, Cr, Co, Mo, Sc, As 및 Fe 원소들이 쑥보다 참억새에서 높았다. 사문암 토양에서 생육하는 식물체 지상부의 생물학적 흡수계수는 Ni, Cr, Co, Zn, Sc, As 및 Fe 원소는 쑥에서 높고 Mo 원소는 참억새에서 높은 반면, 뿌리의 생물학적 흡수계수는 Ni, Cr, Co, Mo, Sc, As 및 Fe 원소는 참억새에서 높고 Zn은 쑥에서 높았다. 사문암 토양에서 뿌리로부터 지상부로 원소 전이는 Ni, Cr, Co, Zn, As 및 Fe 원소에 대해 쑥에서 높았고 Mo와 Sc 원소는 리기다소나무에서 높았다.

따라서 사문암 토양에서 참억새가 중금속의 흡수율은 높고 중금속에 대한 내성은 강할 것으로 사료된다. 대흥지역에서 광산의 오염이 지표수 및 갯내수의 Ni, Cr, Co, Zn 및 Fe 등의 원소 농도를 높게 하였으며 비오염 계류는 오염계류의 원소 농도를 희석시켰다.

주요어 : 참억새, 쑥, 리기다소나무, 중금속, 생물학적 흡수계수

ABSTRACT

Heavy metal concentrations in the soils, plants(*Miscanthus sinensis*, *Artemisia vulgaris* and *Pinus rigida*), stream water and ground water were investigated for Kwangcheon, Hongseong, Baekdong, Daeheung and Yoogoo serpentine area, Chungnam Province, Korea. The area was divided into two soil types : serpentine and metamorphic soils. The nickel, chromium and cobalt concentrations in the serpentine soil had 10~13 times more than those in metamorphic soil. These elements were supposed as the serpentine factor of these area. The concentration of

* 본 연구는 중부대학교 교내연구개발비에 의하여 이루어짐

1 접수 5월 25일 Received on May 25, 2000

2 중부대학교 생명자원학부 Division of Life Resources Science, Joongbu Univ., Chungnam 312-940, Korea

3 중부대학교 기술공학부 Division of Applied Science & Technology, Joongbu Univ., Chungnam 312-940, Korea

4 대전대학교 생물학과 Dept. of Biology, Taejon Univ., Taejon 300-716, Korea

these elements did not show significant differences among the sample sites in the serpentine soil. The absorptions of nickel, chromium and cobalt concentrations by plants are higher in the serpentine soils than in metamorphic soils. The absorption of the heavy metal was low in *P. rigida* relative to other two plants. The heavy metal concentration on the plants were higher in the root than above ground parts in three plant species. The concentrations of nickel, chromium, cobalt, molybdenum, scandium, arsenic and iron were higher in *M. sinensis* than in *A. vulgaris* in the serpentine soils. In plants over serpentine soils, the biological absorption coefficients of the above ground parts were high in nickel, chromium, cobalt, zinc, scandium, arsenic and iron of *A. vulgaris*, in molybdenum of *M. sinensis*, whereas those of the roots were high in nickel, chromium, cobalt, molybdenum, scandium, arsenic and iron of *M. sinensis*, in zinc of *A. vulgaris*. The transportation of elements from root to above ground parts in serpentine soils were high in *A. vulgaris* to nickel, chromium, cobalt, zinc, arsenic and iron, in *P. rigida* to molybdenum, scandium. These result suggested that *M. sinensis* had high absorption of the heavy metal and high tolerance against heavy metal in the serpentine soils. In Daeheung mining area, the stream water and mine water polluted by mining development were very high in nickel, chromium, cobalt, zinc and iron concentrations and unpolluted stream water decreased the concentrations of heavy metal of polluted stream water.

KEY WORDS : *Miscanthus sinensis*, *Artemisia vulgaris*, *Pinus rigida*, **HEAVY METAL**, **BIOLOGICAL ABSORPTION COEFFICIENTS**

서론

우리 나라의 사문암체는 충남 서부지역과 울산 및 안동지역에 주로 분포하고 있다. 이 중 충남 서부지역에는 광천, 홍성, 정전, 백동, 대홍, 비봉 및 유구지역을 중심으로 석면, 활석 또는 제철용제 등을 채광하기 위하여 광산으로 개발되었다.

세계적으로 사문암 지역은 미국 서부와 동부, 캐나다 동부, 쿠바, 브라질 등의 열대아메리카, 노르웨이, 스웨덴, 핀란드 등의 북서 유럽, 이탈리아, 그리스, 유고, 알바니아 등의 중앙 유럽 및 남부 유럽, 러시아, 이란, 인도 등의 중앙아시아, 일본, Zimbabwe, 남아프리카, New Caledonia, 말레이 군도, 오스트레일리아 서부, 뉴질랜드 등에 분포하고 있다 (Brooks, 1987). 전세계적으로 사문암 토양의 척박성은 식생이 자라는 데 좋은 기후를 갖는 지역에서 조차 식물생육이 부진함을 보여 주었다 (Gordon and Limpman, 1926). 사문암 토양의 불모성과 이들 토양에 침입하는 식생 특성에 관련된 factor, 또는 원인 factor를 "serpentine factor"라 정의하였다 (Brooks, 1987). Kruckeberg(1951)는 캘리포니아의 사문암 토양은 독특한 식물군이 출현하고 있으며 이 토양을 분석한 결과 Mg, Cr, Ni 함량이 매우 높았으며 Ca, N, P 등은 현저히 낮고 가급

Mo의 결핍도 나타난다고 하였다. Hunter(1954)와 Crooke(1956)는 사문암 토양의 불모성을 설명하기 위하여 조사한 결과 이들 토양은 P, K, Ca의 결핍이 일반적인데 어떤 경우는 그 불모성의 원인이 중금속 독성과 관련이 있다고 지적하였다. Robinson 등 (1935)은 사문암 토양의 미량원소 함량 측정 결과 Ni과 Cr 함량이 매우 높다고 하였고 이들 두 원소는 특히 용해 상태에서 식물에 독성이 있다고 하였다. Crooke(1956)는 Aberdeenshire의 사문암 토양 불모성에 기여하는 factor로서 Ni의 중요성을 설명하였다.

본 연구는 충남 사문암 지역 중 광천, 홍성, 백동, 대홍 및 유구지역을 중심으로 토양, 식물체 및 지표수, 갯내수의 중금속 함량을 분석하여 사문암 토양의 serpentine factor와 지역별, 식물체별 원소의 흡수량 차이와 토양 독성 원소가 수질에 미치는 영향을 파악하였다.

조사 및 분석 방법

1. 조사지의 개황

본 조사대상지역은 광천, 홍성, 백동, 대홍 및 유구

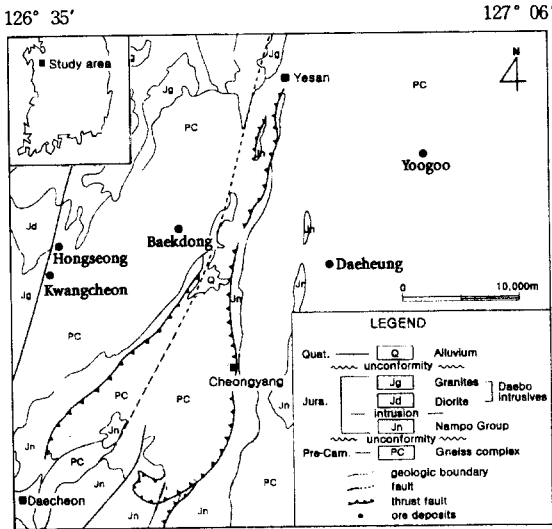


Figure 1. Sample localities and geologic map of the serpentine area, Chungnam Province, Korea (• : Sample locality)

지역은 북위 36° 30' ~ 36° 38', 경도 126° 36' ~ 127° 00'의 범위에 걸쳐 있는 충남 서부지역에 위치한다(Figure 1). 이 지역의 지질은 선캄브리아기의 편마암 복합체를 기반암으로 하여 이와 관입 및 부정합 관계에 있는 변성퇴적암류, 중생대 퇴적암류 및 이를 관입하는 후기의 관입 암체들로 구성되어 있다(엄상호와 이민성, 1963; 이종혁과 김성수, 1963). 이 지역들의 초염기성 암체들은 백동은 동서방향이고 다른 지역들의 그것은 북북동방향의 연장성을 가지며 규모면에서 폭은 수십 미터, 길이는 수킬로미터의 연장을 보여 준다. 초염기성암의 구성광물은 신선한 것은 감람석, 사방회석, 각섬석, 침정석 등을 포함하며, 사문암화될수록 사문석, 자철석의 함량이 높고 지역에 따라서는 주로 약선대를 따라 활석화되어 나타난다(지정만과 김규봉, 1977; 우영균 등, 1991; 최성호, 1995). 광천, 홍성 및 백동 광산은 일제시대부터 석면과 활석광산으로 개발되었고 홍성 광산은 최근까지 제철용제로 사용하기 위하여 개발되다가 폐광되었다. 대홍과 유구는 활석광산으로 개발되었다(김규봉, 1972). 광천, 홍성, 백동 및 대홍지역은 비교적 넓은 면적이 개발되었고 유구지역은 그 범위가 매우 협소하였다. 이들 지역은 광산개발 후 일부만이 복토되고 식재되었을 뿐 대부분이 방치된 상태이다. 따라서 광산 일대지역의 식물상은 다양하지 않았으며 식물의 생육 상태는 불량하였다. 그러나 폐광 후 복토한 지

역에 식재된 아카시나무(*Robinia pseudoacacia*), 리기다소나무(*Pinus rigida*) 등의 생육 상태는 양호하였다.

본 조사지역들 중 광천과 홍성의 사문암 풍화토양에 분포하는 식물은 대나물(*Gypsophila oldhamiana*), 개솔새(*Cymbopogon tortilis* var. *goeringii*), 참억새(*Miscanthus sinensis*) 등이 출현빈도가 높았으며, 싸리(*Lespedeza bicolor*), 아카시나무 등도 출현하였다(김명희 등, 1997). 백동의 사문암 풍화토에는 대나물, 개솔새 및 개여뀌(*Persicaria blumei*) 등이 출현하였다. 또한 광천과 홍성의 주변암인 변성암과 사문암의 혼합 풍화토에는 박주가리(*Metaplexis japonica*), 인동덩굴(*Lonicera japonica*), 환삼덩굴(*Humulus japonicus*), 싸리, 대나물, 패랭이꽃(*Dianthus sinensis*), 쑥(*Artemisia vulgaris*), 비수리(*Lespedeza cuneata*), 미역취(*Solidago virgaurea* var. *asiatica*) 및 노박덩굴(*Celastrus orbiculatus*) 등이 출현하고 백동지역에서는 비수리, 참싸리(*L. cyrtobotrya*), 닭의장풀(*Commelina communis*), 패랭이꽃, 참억새, 쑥, 산달래(*Allium grayi*), 산초나무(*Zanthoxylum ailanthoides*) 등이 출현하고 있다. 주변 산림 식생은 주로 소나무(*Pinus densiflora*), 졸참나무(*Quercus serrata*)와 식재된 리기다소나무, 일본잎갈나무(*Larix leptolepis*) 등으로 구성된 혼효림이었다. 유구지역은 채광 규모가 협소하여 황폐 정도가 비교적 크지 않았는데 참억새를 비롯하여 큰기름새(*Spodiopogon sibiricus*), 강아지풀(*Setaria viridis*), 큰달맞이꽃(*Oenothera lamarckiana*), 이고들빼기(*Youngia denticulata*), 썸바귀(*Ixeris dentata*), 쑥(*A. princeps* var. *orientalis*, *A. vulgaris*), 개쑥부쟁이(*Aster ciliatus*), 망초(*Erigeron canadensis*), 등근털제비꽃(*Viola colina*), 제비꽃(*V. mandshurica*), 장구채(*Melandryum firmum*), 새콩(*Amphicarpaea edgeworthii* var. *trisperma*), 채고추나물(*Hypericum attenuatum*) 등이 출현하고 있었다. 본 조사대상 지역 중 광천, 홍성 및 백동지역에서는 대나물이 우점하여 출현하고 있으나 대홍 및 유구지역은 대나물이 출현하지 않았다.

2. 시료채취 및 분석

(1) 토양시료

토양시료로 사용하기 위하여 사문암체를 개발한 충

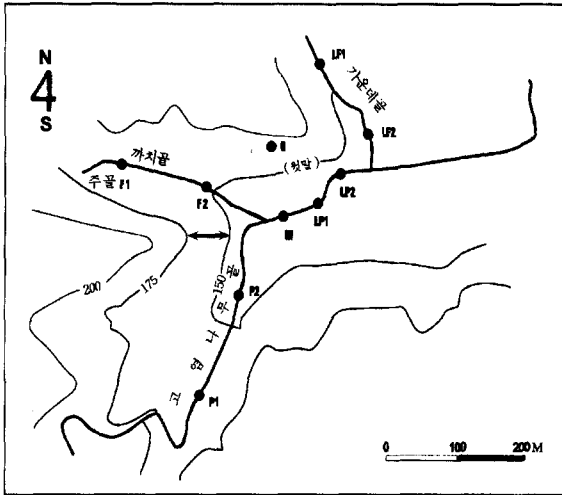


Figure 2. Sample site of stream water and ground water from Deaheung mine area

남 서부지역 중 광천, 홍성, 백동, 대흥, 유구 광산 지역의 사문암 풍화토와 대조구로 주변 지역인 변성암 풍화토를 채취하였다. 토양시료는 각 처소에서 3 지점의 0~10cm의 표토층에서 각각 1kg 정도를 채취하여 잘 혼합 후 시료로 사용하기 위하여 polyethylene vinyl 에 넣어 실험실로 운반하였다. 토양은 10일간 풍건시킨 후 2mm 체로 쳐서 분석시료로 사용하였다. 준비된 분석용 시료는 캐나다의 ACTLABs(Activation Laboratories Ltd.)에서 ELAN 6000 ICP에 의하여 Ni, Cr, Co, Mn, Cu, Zn, Mo, As, Sc 및 Fe를 측

정하였다(Hoffman, 1997).

(2) 식물체시료

식물체시료는 사문암 풍화토양에 공히 출현하는 참억새(*M. sinensis*)와 쭉(A. vulgaris), 리기다소나무를 표본으로 선정하여 채취하였다. 홍성과 대흥지역에서는 어린 리기다소나무를 발견할 수 없었다. 시료는 크기가 균일한 것을 골라 뿌리까지 채취하여 polyethylene vinyl에 넣어 실험실로 운반하여 증류수로 세척하여 표면의 이물질을 제거한 다음 공기가 잘 통하는 실험실에서 2주간 충분히 말렸다. 식물체의 중금속 함량을 측정하기 위하여, 지상부(잎과 줄기)와 지하부(뿌리)로 나누어 plastic bag에 밀봉하여 캐나다의 ACTLABs의 INAA(Instrumental Neutron Activation Analysis) 방법에 의하여 (Hoffman, 1997) Ni, Cr, Co, Zn, Mo, As, Sc 및 Fe를 측정하였다. 대조구로 나타낸 값은 광천 2개소, 백동 1개소의 변성암 풍화토양에서 생육하는 중금속 함량을 평균한 값이며, 사문암 토양에서 생육하는 식물체의 값은 광천, 홍성, 백동, 대흥 및 유구 지역의 평균값이다.

(3) 지표수와 갭내수시료

본 조사대상 지역중 수계가 형성되어 있는 대흥 광산지역에서 지표수와 갭내수시료를 채취하였으며 수계의 분포도는 Figure 2와 같다. P1과 P2는 폐광지에 인접한 지류의 지표수이고, F1과 F2는 광산으로 개발되지 않은 산림의 계곡 지류의 지표수이며, M은 P와 F지류의 합류지점이며 LP1과 LP2는 P지역으로부터 350여 미터 떨어지고 P지역보다 규모가 작은

Table 1. Heavy metal concentration of top soil from serpentine area, Chungnam Province(SP: serpentine soil, MM: metamorphic soil)

Type	Site	Ni	Cr	Co	Mn	Cu	Zn	Mo	Sc	As	Fe (%)
SP	Kwangcheon	1490	747	62	501	49	40	2.0	3	10	3.140
	Hongseong	1470	984	109	1150	60	48	2.0	5	10	4.190
	Baekdong	1633	540	69	653	4	46	2.0	4	10	4.010
	Daeheung	1342	679	62	505	25	97	0.2	12	174	5.250
	Yoogoo	1276	870	83	437	64	47	2.0	7	14	6.540
	average	1442	764	77	649	40	55	1.64	6.2	11.8	4.626
MM	KC1	284	144	33	780	48	73	6	10	15	3.89
	KC2	18	39	11	617	13	48	2	7	48	3.91
	BD	18	41	9	832	11	53	2	6	10	3.10
	average	106	74	7.6	743	24	58	3.3	7.6	24.3	3.63
	SP/MM	13.6	10.3	10.1	0.9	1.7	1.0	0.5	0.8	0.5	1.3

하류 폐광지점의 지표수이며 G는 갯내 지하수이고 LF1과 LF2는 광산개발이 안 된 하부 산림지역의 지류이다. 이상의 지점에서 시료를 채취하여 Ni, Cr, Co, Zn, Sc, Mn, Cu, Fe 및 pH를 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 토양의 화학조성치

충남 사문암체를 개발한 광천, 홍성, 백동, 대흥 및 유구 광산지역의 토양 중금속 함량을 분석한 결과는 Table 1과 같다. 광산 일대의 사문암 토양의 Ni, Cr, Co의 함량은 변성암 토양에 비하여 10 ~ 13배 가 높게 나타났으며, 이 중 Ni의 함유 비율이 가장 높았다. 이들 지역의 식생출현율이 빈약하고 생육이

불량한 것은 이들 원소 함량이 높은 것과 밀접한 것으로서 이 지역의 serpentine factor로 사료된다. 우리나라 자연적인 토양의 Cu는 16ppm, Zn은 40ppm으로 알려져 있으며(서운수 등, 1982), EPA(1988)는 Cu가 50ppm을 초과할 경우 매우 오염된 퇴적물로 규정하고 있다. 우리나라의 전·답, 과수원, 임야 등의 토양오염 우려 기준 As는 6mg/kg로 되어 있다(환경부, 1999). 사문암 토양의 불모성 원인에 대하여 Baker 등(1992)과 Reeves 등(1983)은 Ni, Cr 및 Co의 독성 때문이라 하고 Crooke(1956)는 Aberdeenshire의 사문암 토양 불모성에 기여하는 factor로서 Ni의 중요성을 설명하였다. Roberts와 Proctor(1992)는 사문암 토양의 독특한 식생을 결정 짓는 요인을 첫째 낮은 필수 주 영양소, 둘째, 어떤 종류의 미량원소 결핍, 셋째, Ni, Cr, Co, Mg 등을 다량 함유한 독성

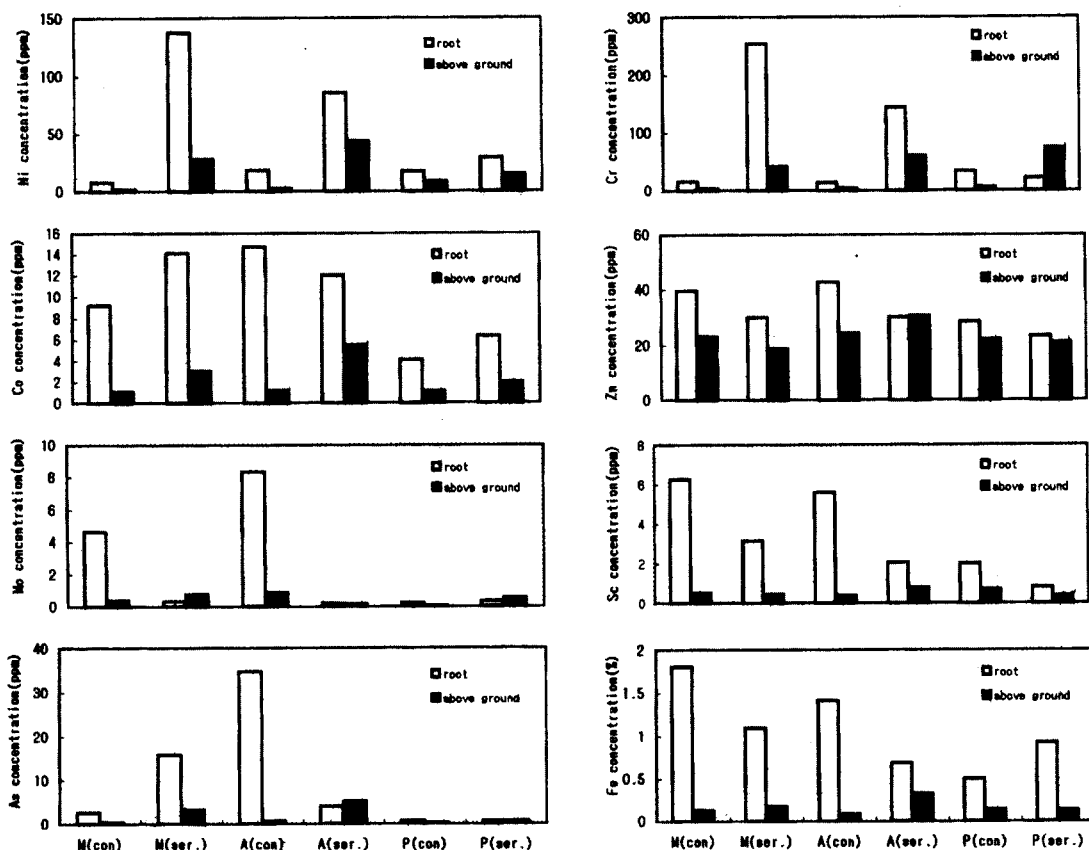


Figure 3. Average heavy metal concentrations for the plants from the metamorphic(con) and serpentine soils(ser.) in Chungnam Province (M: *M. sinensis*, A: *A. vulgaris*, P: *P. rigida*)

Table 2. Biological absorption coefficients for elements in plants growing in serpentine area, Chungnam Province

Soil type	plant species	vegetation part	Ni	Cr	Co	Zn	Mo	Sc	As	Fe
metamorphic soil	<i>M. sinensis</i>	above ground	0.0189	0.0581	0.1408	0.3966	0.1152	0.0684	0.0148	0.0347
		root	0.0724	0.2104	1.2105	0.6844	1.4030	0.8250	0.1066	0.4975
	<i>A. vulgaris</i>	above ground	0.0219	0.0581	0.1539	0.4195	0.2606	0.0513	0.0148	0.0240
		root	0.1729	0.1928	1.9382	0.7357	2.5303	0.7368	1.4292	0.3895
	<i>P. rigida</i>	above ground	0.0802	0.0858	0.1513	0.3793	0.0152	0.0908	0.0128	0.0386
		root	0.1651	0.4595	0.5395	0.4914	0.0682	0.2632	0.0253	0.1380
serpentine soil	<i>M. sinensis</i>	above ground	0.0196	0.0547	0.0390	0.0287	0.4488	0.0681	0.2692	0.0377
		root	0.0953	0.3325	0.1836	0.0462	0.1866	0.5081	1.3361	0.2380
	<i>A. vulgaris</i>	above ground	0.0304	0.0791	0.0714	0.0471	0.0951	0.1274	0.4385	0.0698
		root	0.0592	0.1890	0.1564	0.0465	0.1146	0.3319	0.3446	0.1475
	<i>P. rigida</i>	above ground	0.0102	0.0289	0.0260	0.0323	0.3250	0.0597	0.0571	0.0289
		root	0.0203	0.0973	0.0818	0.0359	0.1849	0.1322	0.5613	0.1999
Brooks(1973)			0.0750	0.0075	0.0500	2.2500	0.1000	-	-	0.0300

원소, 넷째, 건조 등의 물리적 요인을 들고 있다.

Ni, Cr 및 Co 원소를 지역별로 비교하여 보면 사문암 지역간에는 뚜렷한 차이가 나타나지 않았는데 이는 이들 원소가 모암인 사문암체의 일반적 특징을 나타내고 있으며 외적인 환경요인이 이들 오염 원소를 제거하는 데 영향을 미치지 않은 것으로 사료된다. 송석환 등(1999)은 모암과 풍화토양의 원소 함량을 조사·비교하고 대체로 상부토양은 그들의 모암 조성을 반영한다고 하였다. 김명희 등(1998)은 광천, 안동, 울산 지역 사문암 토양의 Ni, Cr, Co 원소 농도가 지역에 따라 큰 차이가 나타나지 않았다고 하였다.

대조구인 변성암 풍화토양에 비하여 사문암 토양에서 상대적으로 낮은 원소는 Mn, Zn, Mo 및 As 등 이었다. As 원소는 대흥 광산지역에서 특별히 높게 나타나 As 원소에 대하여는 추후 반복적인 분석을 통하여 대흥지역에서 특별히 높아야 할 이유가 있는지 여부를 밝혀야 할 것으로 생각된다.

Kruckeberg(1951)는 초염기성암으로부터 풍화된 토양에서 가끔 Mo의 결핍이 나타난다고 하였다.

2. 식물체의 화학조성치

조사대상 지역에서 공히 출현하는 참억새, 쭉 및 리기다 소나무의 중금속 함량을 분석한 결과이다 (Figure 3). 변성암 풍화토양과 사문암 풍화토양에 생육하는 식물의 원소 함량을 비교하면 참억새의 경우 Ni, Cr, Co 및 As 원소가 사문암 토양에서 높았으며 쭉의 경우는 Ni, Cr 원소가, 리기다소나무의 경우는 Ni, Cr, Co 및 Fe가 사문암 토양에서 높았다. 식물체 뿌리의 원소 함량은 변성암 토양에서는 Ni, Co, Zn, Mo 및 As 함량은 참억새보다 쭉에서 높았으며 사문암 토양에서는 Ni, Cr, Co, Zn, Mo, Sc, As 함량이 쭉보다 참억새에서 높았다. 사문암 토양에서 리기다소나무의 원소 흡수량은 Mo를 제외한 모든 원소들의 흡수량이 가장 낮았다. 식물체의 지상부 원

Table 3. Above ground / root concentration ratio for element in plants growing in serpentine area, Chungnam Province

Soil type	plant species	Ni	Cr	Co	Zn	Mo	Sc	As	Fe
metamorphic soil	<i>M. sinensis</i>	0.261	0.276	0.116	0.579	0.082	0.083	0.139	0.070
	<i>A. vulgaris</i>	0.127	0.301	0.079	0.570	0.103	0.070	0.010	0.062
	<i>P. rigida</i>	0.486	0.187	0.280	0.772	0.223	0.345	0.506	0.280
serpentine soil	<i>M. sinensis</i>	0.206	0.165	0.212	0.621	2.405	0.134	0.202	0.158
	<i>A. vulgaris</i>	0.514	0.419	0.457	1.013	0.830	0.384	1.273	0.473
	<i>P. rigida</i>	0.503	0.297	0.318	0.900	1.758	0.452	0.102	0.145

Table 4. The heavy metal concentration of stream water and ground water in Daeheung serpentine area, Chungnam Province

Sample site	Ni	Cr	Co	Zn	Sc	Mn	Cu	Fe	pH
P1	1.56	1.1	0.154	6.3	6	0.3	1.1	269	6.76
P2	0.61	1.8	0.108	4.7	5	0.1	1.3	202	6.95
F1	0.11	0.5	0.041	0.5	8	0.1	0.2	76	7.20
F2	0.12	0.5	0.042	0.5	7	0.1	0.3	67	7.20
M	0.37	0.5	0.065	3.7	6	0.1	0.2	121	7.07
LP1	0.34	0.6	0.063	1.5	6	0.1	0.4	120	7.08
LP2	0.70	0.5	0.073	0.5	6	0.1	0.2	131	7.09
G	12.10	1.1	0.152	0.5	11	0.1	0.2	40	7.12
LF1	0.10	0.6	0.029	0.5	7	0.1	0.2	46	7.30
LF2	0.20	0.5	0.031	0.5	6	0.1	0.2	82	7.22

소 함량은 변성암 토양에서는 Ni, Cr, Co, Zn, Mo 및 As 함량은 참억새보다 속에서 높았으며 사문암 토양에서는 Ni, Cr, Co, Zn, Sc, As 및 Fe 함량이 속에서 높았다. 식물체 부위별 원소 함량은 대부분 지상부보다 지하부에서 높았다.

식물에서의 원소 함량과 이동을 비교할 때 식물체 분석치/토양원소 함량으로 구한 생물학적 흡수계수를 사용한다(Brooks, 1983). 본 조사대상 지역을 변성암과 사문암 지역으로 나누어 각 식물종별로 지상부와 뿌리로 구분하고 각 중금속종에 대하여 나타낸 생물학적 흡수계수는 Table 2와 같다. 변성암 토양에서 생육하는 식물체 지상부의 생물학적 흡수계수는 Ni, Cr, Sc 및 Fe 원소는 리기다소나무에서 가장 높았으며, Co, Zn, Mo 및 As 원소는 속에서 가장 높았다. 뿌리의 생물학적 흡수계수는 Ni, Co, Zn, Mo 및 As 원소는 속에서 높고 Cr은 리기다소나무에서 높았으며 Sc 및 Fe는 참억새에서 높았다. 사문암 토양에서 생육하는 식물체 지상부의 생물학적 흡수계수는 Ni, Cr, Co, Zn, Sc, As 및 Fe 원소는 속에서 가장 높았고 Mo 원소는 참억새에서 높은 반면, 뿌리의 생물학적 흡수계수는 Ni, Cr, Co, Mo, Sc, As 및 Fe 원소는 참억새에서 가장 높고 Zn은 속에서 높았다. 또한 3종의 식물에서 대부분 원소의 경우 지상부보다는 뿌리의 흡수계수가 높았다. 원소별로 보면 대체로 Ni, Cr, As 및 Fe 등의 생물학적 흡수계수가 낮았으나 Zn의 경우 변성암 지역이 사문암 지역보다 높은 경향이 나타났다.

각 식물체의 뿌리에서 지상부로의 원소 전이를 파악하기 위하여 뿌리에 대한 지상부 원소 함량 비율을 보면(Table 3) 사문암 지역에서 생육하는 속에서의 원소 전이는 높고 참억새에서의 원소 전이는 낮게 나타났다. 이상의 결과로 고찰해 볼 때 사문암 풍화

토양에서 문제가 되는 원소들을 흡수 정화하는 데 참억새가 보다 효과적임을 알 수 있고 사문암 지역에서 참억새의 생육이 양호한 것으로 보아 중금속에 대한 내성도 강할 것으로 사료된다. 또한 속보다 참억새가 원소의 흡수량이 많음에도 불구하고 내성이 큰 것은 뿌리에서 지상부로의 전이율이 낮은 것도 한 요인이 될 것으로 생각된다. 김명희 등(1999)은 사문암 토양에서 생육하는 속의 Fe:Ni의 비율로 참억새보다 속이 Ni에 대한 내성이 약할 것이라 하였다. 정기채 등(1993)과 임수길 등(1996)은 광산 주변 식물체의 연구에서 식물의 종류 및 중금속 종류에 따라 흡수력과 내성의 차이가 있다고 하였다. 식물은 성장에 필수적인 원소를 선택적으로 흡수하므로 중금속이 주변 식물에 미치는 영향은 암석이나 토양의 원소 함량뿐만 아니라 각 지역의 식생, 온도, 강수량, 시간, 토양의 특성 등 다양한 요인으로 해석된다(전효택과 정명채, 1991). Chaney 등(1997)은 중금속 오염 토양의 토착종인 내금속성 식물을 선발하여 오염원을 제거 할 수 있을 것이라 하였다. 지상부와 뿌리의 함량을 비교하면 일부 경우를 제외하고 뿌리에서 높은 것으로 나타났다. 전효택과 정명채(1991)는 Ca, K, Zn 등은 10~0.1의 범위에 있고 식물성장에 비교적 영향이 적은 Mo와 식물 성장에 유해한 Cr, Co 및 Ni 등의 생물학적 흡수계수는 0.1 이하였다고 하였다.

3. 수계의 화학조성치

각 표본지역의 지표수 또는 갭내수에 대한 중금속 원소들을 분석한 결과 광산 오염의 영향으로 보이는 원소는 Ni, Cr, Co, Zn, Fe 등이었으며 pH도 차이가 있었다(Table 4). 청정지역인 F1과 F2, LF1과

LF2는 지역간에 큰 차이가 나타나지 않았다. 오염지류와 청정지류의 합류지점인 M지점의 Ni, Co, Fe 원소 농도로 알 수 있는 것은 비오염계류가 오염계류의 원소 농도를 많이 희석시키고, 계류 아래쪽으로 갈수록 농도가 낮아짐을 알 수 있다. 갯내 지하수의 Ni 농도는 매우 높았다. pH의 경우 다른 사문암 토양은 pH 7.0~9.5의 범위로 매우 강알칼리를 나타냈으나(김명희와 민일식, 1999), 대홍의 활석광 개발지는 오염지가 산림지보다 pH가 낮은 것으로 나타났다.

인용문헌

- 김규봉(1972) 한국의 활석광상. 지질광상조사연구보고. 국립지질조사소 제14호: 5-121.
- 김명희, 민일식(1999) 사문암 지역에서 생육하는 썩에서의 중금속 동태. 충북대학교 논문집 13: 47-58.
- 김명희, 민일식, 송석환(1997) 사문암 지역에서 생육하는 대나무(*Gypsophila oldhamiana*)의 중금속 함량. 한국생태학회지 20(5): 385-391.
- 김명희, 민일식, 송석환(1998) 울산시의 사문암 및 유문암 지역 표토와 식물체의 중금속 함량 비교. 환경생태학회지 13(2): 176-183.
- 서운수, 문화희, 김인기, 김학협, 전성환, 지달현(1982) 토양 중 중금속의 수직분포도 조사. 서울특별시 보건환경연구소보 21: 136-140.
- 송석환, 김명희, 민일식, 장인수(1999) 충남 서부 백동사문암 지역 식물체의 중금속 함량. 한국토양환경학회지 4(2): 113-125.
- 엄상호, 이민성(1963) 1/5만 대홍지질도폭 설명서. 국립지질조사소.
- 우영균, 최석원, 박기화(1991) 충남 예산지구 활석광상의 성인에 관한 연구. 한국광물지질학회지 24(4): 363-378.
- 이종혁, 김성수(1963) 홍성지질도폭 및 설명서. 국립지질조사소.
- 임수길, 김정규, 김동엽(1996) 유용식물을 이용한 오염토양 정화기술 개발. 제1회 농업과학심포지엄 21세기 농업과학 연구의 발전방향. 교육부 농업과학 심사 평가위원회, 236-241쪽.
- 전효택, 정명채(1991) 함우라늪 흑색세일 분포지역에서의 유독성 원소들의 분산에 관한 지구화학적 연구. 한국광물지질학회지 24(3): 245-260.
- 정기채, 김복진, 한상국(1993) 아연광산 인접지역 야생식물 중의 중금속 함량 조사. 한국환경농학회지 12: 105-111.
- 지정만, 김규봉(1977) 사문석의 활석화과정에 관한 연구. 광산지질 10: 67-74.
- 최성호(1995) 충청남도, 홍성, 광천, 정전지역에 분포하는 초염기성암의 변질작용. 고려대학교 대학원 석사학위 논문 96쪽.
- 환경부(1999) 환경백서. 환경부 597쪽.
- Baker, A. J., M. J. Proctor and R. D. Reeves(1992) The vegetation of ultramafic(serpentine) soils. Intercept Ltd, Andover 234pp.
- Brooks, R. R.(1983) Biological methods of prospecting for minerals. John Wiley & Sons, 321pp.
- Brooks, R. R.(1987) Serpentine and its vegetation: A multidisciplinary approach. Dioscorides Press, Portland, Oregon, 454pp.
- Chaney, R. L., M. Malik, Y. M. Lee, S. L. Brown, J. S. Angle and A.J.M. Baker(1997) Phytoremediation of soil metals. Manuscript for current opinions in biotechnology.
- Crooke, W. M.(1956). Effect of soil reaction on uptake of nickel from a serpentine soil. Soil Sci. 81: 269-276.
- EPA.(1988) Quality criteria for water, USEPA(U.S. Environmental Protection Agency)-42013-21-016, Washington D.C.
- Gordon, A. and C. B. Lipman(1926) Why the serpentine and other magnesian soils infertile? Soil Sci. 22: 291-302.
- Hoffman, E. L.(1997) Instrumental Neutron activation in geo-analysis. J. of Geochemical Exploitation 44: 297-319.
- Hunter, J. G.(1954) Nickel toxicity in a Southern Rhodesian soil. S. Africa J. Sci. 51: 133-135.
- Kruckeberg, A. R.(1951) Intraspecific variability in the response of certain native plant species to serpentine soil. Am. J. Botany 38: 408-419.
- Reeves, R. D., R. M. MacFarlane and R. R. Brooks(1983) Accumulation of nickel and zinc by western North American genera containing serpentine tolerant species. Am. J. Bot. 70: 1297-1303.
- Roberts, B. A. and J. Proctor. 1992. The ecology of areas with serpentinized rocks. A world view. Kluwer, Dordrecht.
- Robinson, W. O., G. Edgington and H. G. Byers(1935) Chemical studies of infertile soils derived from rocks high in magnesium and generally high chromium and nickel. U.S. Dep. Ag. Tech. Bull. 471: 1-17.