

울산시의 사문암 및 유문암 지역 표토와 식물체의 중금속 함량 비교¹

김명희² · 민일식³ · 송석환⁴

Comparison of the Heavy Metal Concentrations of the Soils and Plants at the Serpentine and Rhyolite Resions in Ulsan City

Myung-Hee Kim², Ell-Sik Min³, Suck-Hwan Song⁴

요 약

울산지역의 사문암과 유문암 토양 및 쑥과 참억새의 중금속 함량을 비교하기 위하여 중금속 농도를 분석한 결과 사문암 풍화토의 Ni, Cr 및 Co 함량은 매우 높았다. Ni은 1,483~1,524ppm, Cr은 372~435ppm, Co는 68~79ppm였으며, 유문암 풍화토의 Zn 함량은 222ppm으로 사문암 풍화토보다 높았다. 사문암 풍화토에서 생육하는 쑥의 중금속 함량은 Ni이 108~195ppm, Cr이 135~180ppm, Co가 10.2~22.5ppm으로 유문암 풍화토의 쑥보다 높았고, Zn은 유문암 토양 쑥에서 높았다. 참억새의 경우는 Ni, Cr, Co, As, Sc, Mo 및 Fe가 사문암 토양에서 높았고, Zn 흡수는 유문암 토양에서 많았다. 쑥의 중금속 함량은 대체적으로 지상부가 지하부보다 높았으나, 참억새의 경우는 지하부가 높은 경향을 나타내었다. 토양과 식물체(쑥과 참억새)의 중금속 함량을 비교해 보면 Ni, Cr, Co, As, Sc, Mo 및 Fe의 함량은 토양이 식물체보다 높았으나, 유문암 토양에 있는 쑥의 Zn 흡수는 토양보다 다소 높았다. 식물체의 Fe:Ni 비율은 유문암 토양보다는 사문암 토양이, 참억새보다는 쑥이 낮게 나타났다.

주요어 : 쑥, 참억새, 독성화, Fe:Ni 비율

ABSTRACT

This study investigated for comparison of the heavy metal concentrations of the soil and plants in the serpentine and the rhyolite resions in Ulsan. The sampled plants were *Artemisia vulgaris* and *Miscanthus sinensis*. The serpentine soils were high in nickel(1,483~1,524ppm), chromium(372~435ppm) and cobalt(68~79ppm) concentrations and low in zinc(45ppm) concentrations, whereas the rhyolitic soils showed high zinc(222ppm) concentrations. The nick-

1 접수 5월 31일 Received on May 31, 1999

2 중부대학교 생명자원학부 원예학전공 Maj. of Horticultural Science, Div.of National Life Science, Joongbu Univ., Chungnam, 312-940, Korea (mhkim600@joongbu.ac.kr)

3 중부대학교 생명자원학부 산림자원학전공 Maj. of Forestry Science, Div.of National Life Science, Joongbu Univ., Chungnam, 312-940, Korea. (esmin@joongbu.ac.kr)

4 중부대학교 기술학부 환경공학전공 Maj. of Environmental Engineering, Div. of Applied Science & Technology, Joongbu Univ., Chungnam, 312-940, Korea (shsong@joongbu.ac.kr)

el(108~195ppm), chromium(135~180ppm) and cobalt(10.2~22.5ppm) concentrations in the *A. vulgaris* were high in the serpentine soils relative to the rhyolitic soils, whereas zinc(>126ppm) concentration was high in the rhyolitic soils. The concentrations of nickel, chromium, cobalt, arsenic, scandium, molybdenum and iron were high in *M. sinensis* in the serpentine soil, whereas zinc concentration was high in the rhyolitic soils. The heavy metal concentration of *A. vulgaris* was higher in the above-ground part than roots, but *M. sinensis* was higher in the root than above-ground part. Comparing with plants, the soils were high in most of the elements. However, zinc concentration of the *A. vulgaris* was higher than that of soils in the rhyolitic soils. Both for the *A. vulgaris* and *M. sinensis*, ratio of the iron to nickel concentration was lower in the serpentine soil(45 and 60ppm, respectively) than that in the rhyolitic soil(793 and 925ppm, respectively).

KEY WORDS : *Artemisia vulgaris*, *Miscanthus sinensis*, TOXIFICATION, Fe : Ni RATIO

서론

16세기경 초염기성암 풍화토의 척박성과 이 풍화토 위의 식생군이 빈약하다고 알려진 이래 Amidei(1841)와 Pancic(1859)은 사문암 지역의 종의 분포가 빈약하고 식물이 왜성이며 건성형으로 잎은 협소하고 황화 현상과 목질화, 세포벽의 후막화 현상 및 근계분포가 발달되어 있음을 보고하였다. Rune(1953)는 북아메리카와 북서유럽의 사문암 식생연구 결과 비사문암 지역에 비하여 식물 분포와 종이 빈약하며, 생태적, 형태적으로 식생형의 차이가 있으며, 사문암 지역에는 산성과 염기성 식물이 공존하고 있고 특정한 과 또는 속의 식물이 우점하고 있다고 하였다. Krause(1958)는 초염기성 지역에 대한 초기의 연구들을 요약 보고하였다.

사문암 토양의 불모성에 대하여 Hilgard(1906)는 Ca보다 과도한 Mg의 독성 때문이라 하였으며, West(1912)는 Ni과 Cr 독성 때문이며 Gordon과 Lipman(1926)은 식물 양료의 함량이 낮기 때문이라 하였고 Robinson *et al.*(1935)은 Cr과 Ni 농도가 높기 때문이라 하였다.

사문암 토양은 일반적으로 Fe, Cr, Ni, Co 같은 친철성 원소들이 풍부한 반면 Ca, N, P, K 같은 식물양료 함량은 매우 적다. 사문암 토양의 척박성은 토양의 화학적 조성과의 연관이 있는데 사문암 구성광물 중 Fe과 Mg은 전이원소인 Ni, Co, Cr, Sc에 의해 치환되기 때문이다. 또한 점토 함량과 Ca/Mg의 비율이 비사문암 토양에 비하여 낮기 때문에 식생에 독성을 유발하고 적응이 안된 식생의

생존과 생육을 억제한다.

초염기성암에 함유된 미량원소들은 식물체의 양료 역할을 할 뿐만 아니라 사문암 토양의 식생형태에 영향을 미친다. 북아메리카와 유럽의 사문암 토양에서는 Ni 내성 생태형이 출현하는데 Ni 내성은 사문암지역 고유종의 주요 특징이다(Jaffre *et al.*, 1976). Brooks와 Wither(1977)는 아프리카 사문암 지역의 식물체에서 Co-hyperaccumulators 종을 보고하였다. 따라서 사문암 토양의 식생 형태를 이해하기 위해서는 이들 미량원소의 함량을 아는 것이 필수적이다.

우리 나라의 사문암은 충남 서부지역과 경상도의 안동 및 울산지역에 분포하고 있다. 사문암은 페리도타이트, 반려암, 대리암, 규산질 돌로마이트의 화학적 변질, 즉 사문암화 과정을 통해 형성된다(지정만과 김규봉, 1977). 사문암의 생성기원에 대해서는 일찍이 여러 이론이 논란되어 왔으나, Bowen과 Tuttle(1949)의 실험연구에 의해 열수기원으로 받아들여지게 되었다. 우리 나라 사문암 지역에 대한 연구는 암석학적, 광물학적, 지화학적, 광상학적 연구가 대부분이며 토양과 식생에 대한 연구는 매우 적다(김택진 등, 1997; 김명희 등, 1997; 민일식 등, 1998).

본 연구는 울산지역의 울산 철광산과 인근 유문암 풍화토양의 중금속 농도와 이들 지역에 출현하는 썩과 참억새의 중금속 농도를 측정하고 토양의 지화학적 조성치와 식물체의 조성치를 비교하여 이 지역의 토양오염 정도와 식물체에 의한 흡수 차이를 규명하는 데 목적이 있다.

조사 및 분석 방법

1. 조사지의 개황

본 조사지역은 한반도의 남동부 북위 35° 37' 30", 동경 129° 20' 00"인 경남 울주군 농소면 달천리에 위치하고 있으며, 이 지역은 고생대 조선누층군의 대석회암통에 대비되는 석회암층과 중생대 경상누층군, 퇴적암층인 울산층과 이들 지층을 관입하고 있는화산암류, 사문암 그리고 화강암류로 구성되어 있다(김옥준, 1985; 최현일, 1980; 김정호, 1981)(Figure 1). 본 연구대상 지역인 울산광산은 자철석과 사문석을 주로 생산하여 왔으며 그 외에 회중석, 유비철석 등도 채광되고 있다. 이 지역에서는 충남홍성과 광천의 사문암 지역에서 출현하던 대나물(*Gypsophila oldhamiana*)은 발견되지 않았으며, 오이풀(*Sanguisorba officinalis*), 씬바귀(*Ixeris dentata*), 큰까치수영(*Lysimachia clethroides*), 쑥(*Artemisia vulgaris*), 패랭이꽃(*Dianthus sinensis*), 민들레(*Taraxacum mongolicum*), 사철쑥(*Artemisia capillaris*), 오리새(*Dactylis glomerata*), 참억새(*Miscanthus sinensis*), 박주가리(*Metaplexis japonica*), 개느삼(*Echinosophora koreensis*), 환삼덩굴(*Humulus japonicus*), 머느리베짚(*Persicaria perfoliata*), 쇠뜨기(*Equisetum arvense*), 소리쟁이(*Rumex crispus*), 노박덩굴(*Celastrus*

orbiculatus) 등의 식물이 출현할 뿐 식생이 빈약하였다. 유문암 지역은 도시개발로 식생이 파괴되었으며 취명아주(*Chenopodium glaucum*), 명아주(*Chenopodium album* var. *centrorubrum*), 개여뀌(*Persicaria blumei*), 개망초(*Erigeron annuus*), 뿌리뱅이(*Youngia japonica*) 등이 출현하였다.

2. 시료채취 및 분석

(1) 토양시료

시료채취는 사문암 풍화토(US-I, US-II, US-III)와 유문암 풍화토(US-IV)로 구분하여 채취하였으며, 시료채취 지점은 Figure 1과 같다. 토양시료는 3 지점의 0~10cm 깊이의 표토층에서 각각 1kg 정도를 채취하여 잘 혼합한 후 시료로 사용하기 위하여 polyethylene vinyl에 넣어 실험실로 운반하였다. 토양은 10일간 풍건시킨 후 2mm 체로 쳐서 분석 시료로 사용하였다. 준비된 분석용 시료는 캐나다의 ACTLABS(Activation Laboratories Ltd.)에서 ICP에 의하여 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)으로 만들어 냉각시킨 후 증류수 10ml를 첨가한 후 Thermo Jerrel Ash Enviro II ICP로 Ni, Cr, Co, Zn, Mo, As, Sc 및 Fe를 측정하였다.

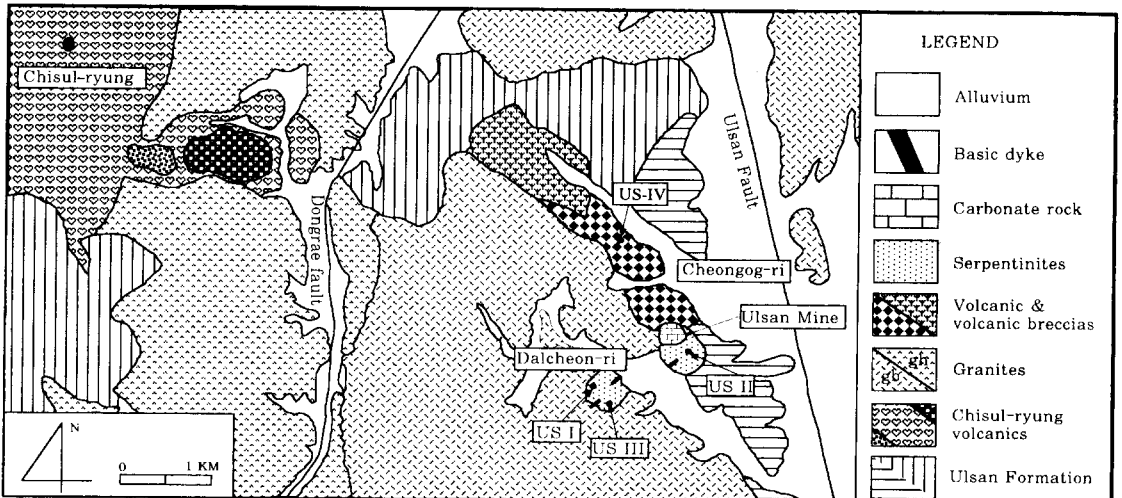


Figure 1. Geological map of the serpentine mine area from Ulsan(US-I, US-II, and US-III for samples of serpentine area and US-IV for those of rhyolitic area)

Table 1. Heavy metal concentration of the top soils from serpentine area, Ulsan

Site	Soil type	pH	Ni	Cr	Co	Zn	As	Sc	Mo	Fe
			(ppm)							
US-I	serpentine soil	7.87	1,524	372	79	45	10	4	5	2.81
US-II	serpentine soil	8.06	148	435	74	46	150	5	6	2.93
US-III	serpentine soil	7.80	1,227	301	68	65	131	6	5	4.11
	average		1,411	369	74	52	97	5	5	3
US-IV	rhyolitic soil	7.72	74	80	41	222	10	9	2	2.93
Ser./Rhy.	ratios		19.1	4.6	1.8	0.23	9.7	0.6	2.5	1.02

(2) 식물체시료

식물체시료는 사문암 풍화토양과 유문암 풍화토에서 생육하는 쑥(*A. vulgaris*)과 참억새(*M. sinensis*)를 채취하였다. 시료는 크기가 균일한 것을 골라 뿌리까지 채취하여 polyethylene vinyl에 넣어 실험실로 운반하여 증류수로 세척하여 표면의 이물질 제거한 다음 공기가 잘 통하는 실험실에서 2주간 충분히 말렸다. 식생의 중금속 함량을 측정하기 위하여, 지상부(잎과 줄기)와 지하부(뿌리)로 나누어 plastic bag에 밀봉하여 캐나다의 ACTLABS의 INAA로 분석하였다. 분석 방법은 식생시료를 90°C로 건조시켜 파쇄한 후 15g의 시료를 칭량하여 약 30ton으로 압착시켜 제조한 briquette에 15분간 $7 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 파장으로 빛을 조사하고 7일 후 부식된 시료에 대하여 gamma ray spectra에 의하여 측정하는 INAA(Instrumental Neutron Activation Analysis) 방법에 의하여(Hoffman, 1997) Ni, Cr, Co, Zn, Mo, As, Sc 및 Fe를 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 토양의 화학조성치

본 조사지역 토양 내의 중금속 농도는 Table 1과 같다. 사문암 토양과 유문암 토양의 pH는 7.7 이상으로 알칼리 토양이었으며, 유문암 토양보다는 사문암 토양이 다소 pH가 높았다. Sc와 Zn을 제외한 Ni, Cr, Co, As, Mo, Fe 원소는 유문암 토양보다 사문암 토양에서 높게 나타났으며, 특히 사문암 풍화토의 Ni는 1,227~1,524ppm, Cr은 301~435ppm, Co는 68~79ppm, As는 평균 97ppm으로 유문암 토양에 비하여 Ni는 19배, Cr은 4배, As는 9배 이상 높았다. Sc 함량은 유문암 토양보다 사

문암 토양에서 더 낮게 나타났는데 김명희 등(1997)은 홍성 사문암 지역 연구에서 주변 변성암 토양보다 사문암 토양의 Sc함량이 낮음을 보고한 바 있다. Mo는 유문암 토양보다 사문암 토양에서 높게 나타났는데, 김명희 등(1997)의 사문암 토양과 사문암과 변성암 혼합 풍화토 및 변성암 토양에 대한 연구 결과에서는 풍화토 종류간에 Mo의 농도 차이가 나타나지 않았다고 하였다. Zn은 유문암 토양이 222ppm으로 사문암보다 유문암 토양에서 훨씬 높게 나타났는데 Lounamaa(1956)는 핀란드의 사문암 풍화토와 화강암 풍화토의 원소 조성을 조사한 결과 Zn은 화강암 풍화토에서 높았으며, Mo 함량은 두 토양에서 비교적 소량(3.0~3.4ppm)이 함유되어 있었다고 하였다. 김명희 등(1997)은 사문암보다 변성암 토양의 Zn이 높게 나타났다고 하였다. 사문암 토양 내의 원소 함량은 Fe > Ni > Cr > As > Co > Zn의 순으로 나타났는데 이는 Lyons(1973)와 김명희 등(1997)의 결과와 대체로 일치하고 있다.

2. 식물체의 화학조성치

Figure 2는 쑥의 평균 중금속 농도이다. US-III 지역에서는 쑥이 채취되지 않았다. 사문암 토양(US-I, US-II)에서 생육하는 쑥의 중금속 농도를 살펴보면, 사문암 지역의 Ni, Cr, Co 및 As 농도는 뚜렷이 높게 나타나, Ni는 108~195ppm, Cr은 135~180ppm, Co는 10.2~22.5ppm이었으며, Zn과 Sc 농도는 유문암 지역에서 높게 나타났다. 이러한 결과는 사문암과 비사문암 토양에서 자라는 식물체에 대한 연구 결과인 Vanselow(1966)와 Brooks(1983) 및 김명희 등(1997)의 연구 결과와 일치하고 있다. Fe 농도는 사문암과 유문암 지역간에 뚜렷한 차이가 나타나지 않았는데, 김명희와 만일식(1998)은 모암이 다른 풍화토양에서 자라는 참억새의 원소 함량에서 Fe의 흡수는 모암에 따른 차이

Table 2. Nickel, iron and cobalt concentrations and its iron/nickel and cobalt/nickel ratios of *Artemisia vulgaris* and *Miscanthus sinensis*

Species	Site	Soil type	Vegetation part	Ni (ppm)	Fe (ppm)	Co (ppm)	Fe/Ni	Co/Ni
<i>Artemisia vulgaris</i>	US-I	serpentine	above-ground	220	0.885	26	40.23	0.118
			root	170	0.683	19	40.18	0.112
	US-II	serpentine	above-ground	130	0.601	11	46.23	0.085
			root	87	0.450	9.4	51.72	0.108
	US-IV	rhyolitic	above-ground	36	0.631	4.3	175.28	0.119
			root	5	0.705	4.8	1,410.00	0.960
<i>Miscanthus sinensis</i>	US-I	serpentine	above-ground	-	-	-	-	-
			root	-	-	-	-	-
	US-II	serpentine	above-ground	140	0.884	13	63.14	0.093
			root	370	2.120	31	57.30	0.084
	US-IV	rhyolitic	above-ground	23	0.181	2.6	78.70	0.113
			root	5	0.886	6.7	1,772.00	1.340

가 뚜렷하지 않았다고 하였고, 민일식 등(1998)은 사문암 지역 리기다소나무에 의한 Fe의 흡수는 높게 나타났다고 하였다. 많은 연구자들은 식물중에 따라 중금속의 흡수율이 상이함을 밝힌 바 있다(이기철 등, 1992; 정기채 등, 1993; 임수길 등, 1996). US-I과 US-II 지역은 같은 사문암 지역임에도 불구하고 US-II 지역의 토양과 썩의 As 농도는 높는데, US-I 지역의 토양과 썩의 As 농도가 낮은 것은 좀더 규명해야 될 것으로 사료된다.

Figure 3은 참억새의 평균 중금속 농도이다. US-I과 US-III 지역에서는 참억새가 채취되지 않았다. 참억새의 중금속 농도는 Zn을 제외한 다른 원소는 유문암 지역보다 사문암 지역에서 높게 나타났다. 김명희와 민일식(1998)은 모암이 다른 풍화토양에서 자라는 참억새의 중금속 함량 연구에서 Zn 흡수는 모암에 따라 뚜렷한 차이가 나타나지는 않았으나 사문암 토양보다 흑색세일 토양에서 토양내 원소 함량에 비하여 참억새에 의한 Zn 흡수가 높았다고 하였

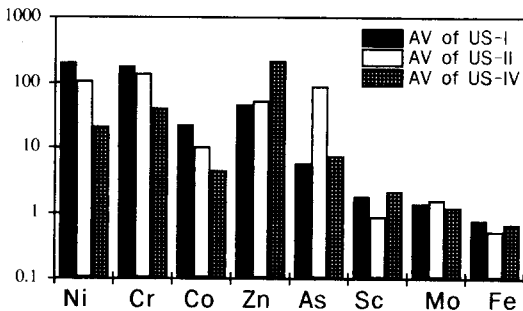


Figure 2. Average heavy metal concentrations of *A. vulgaris*(AV) for the top soils from serpentine area, Ulsan. All elements are in ppm except Fe(wt %). Scale is logarithm. The other abbreviations are in the Table 1

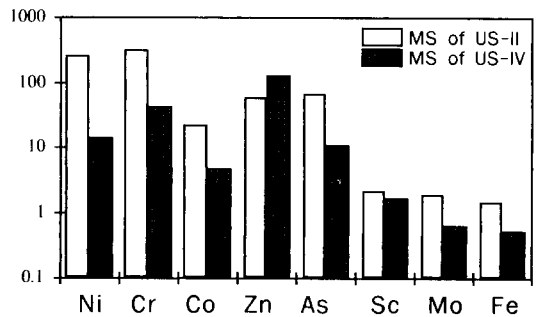


Figure 3. Average heavy metal concentrations of *M. sinensis*(MS) for the top soils from serpentine area, Ulsan. All elements are in ppm except Fe(wt %). Scale is logarithm. The other abbreviations are in the Table 1

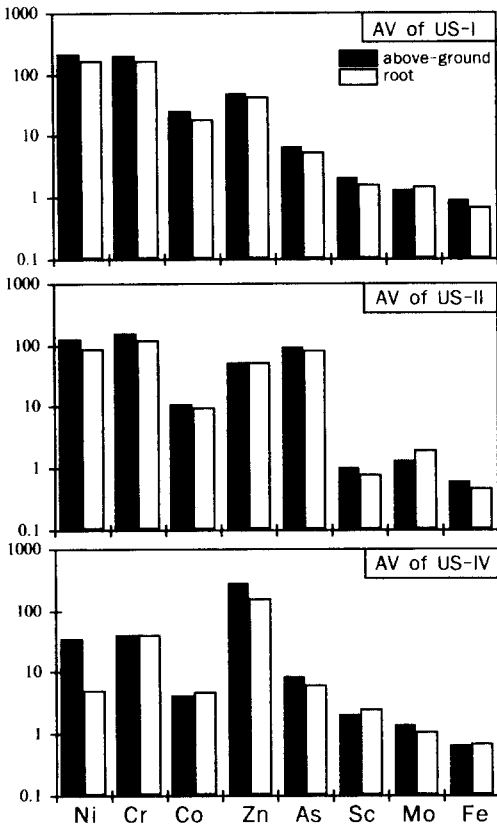


Figure 4. Heavy metal concentrations between above-ground and root of *A. vulgaris*(AV) from serpentine area, Ulsan. All elements are in ppm except Fe(wt %). Scale is logarithm. The other abbreviations are in the Table 1

다. Alina와 Henryk(1985)는 축적되는 원소 함량은 식물체의 연령과 관련된 원소들의 특징에 따라 좌우된다고 하였다.

Figure 4는 쑥의 지상부와 뿌리의 원소 함량을 비교하기 위하여 지역별로 나타낸 것이다. 대체적으로 지상부가 뿌리보다 높게 나타났는데 사문암 지역에서는 Mo를 제외한 모든 원소가 지상부에서 높았고 유문암 지역에서는 Co와 Sc를 제외한 원소가 지상부에서 높았다. Zn 흡수는 유문암 지역에서 뚜렷하게 높았다. Figure 5는 참억새의 지상부와 뿌리의 원소 함량을 비교하기 위하여 지역별로 나타낸 것이다. 대체적으로 뿌리가 지상부보다 높게 나타났는데 사문암

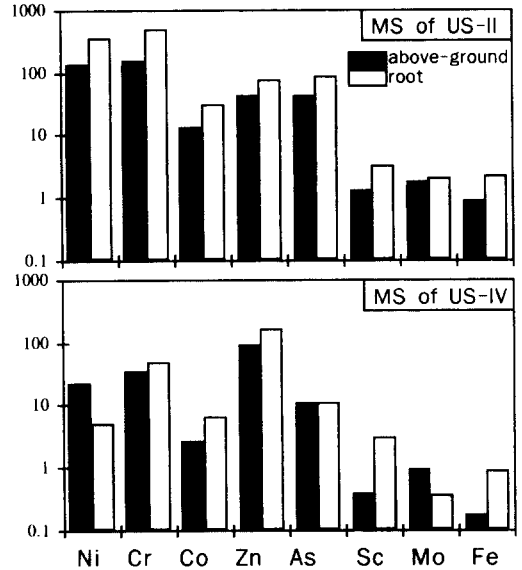


Figure 5. Heavy metal concentrations between above-ground and root of *M. sinensis*(MS) from serpentine area, Ulsan. All elements are in ppm except Fe(wt %). Scale is logarithm. The other abbreviations are in the Table 1

지역에서는 전 원소가 뿌리에서 높았으며 유문암 지역에서는 Ni과 Mo를 제외한 원소가 뿌리에서 높게 나타났다. 김명희와 민일식(1998)은 모암이 다른 풍화토양에서 생육하는 참억새의 중금속 함량에서 대부분의 원소들이 지상부보다 뿌리에서 높았으며, 흑색세일 풍화토에서는 Ni과 Mo의 함량이 뿌리보다 지상부에서 높게 나타났다고 하였는데 이는 유문암 토양과 흑색세일 토양에서 Ni과 Mo가 공히 지상부에서 높았음을 의미한다. 이로써 식물체의 뿌리에서 지상부로 원소 이동은 식물 종류, 원소의 종류 및 토양 모재의 종류에 따라 서로 다를 수 있다. Lounamaa(1956)는 사문암과 화강암 풍화토의 관목과 초본류의 중금속 함량 연구에서 Ni, Cr, Co 및 Mo 함량이 사문암 풍화토 식생에서 모두 높게 나타났으며, Zn은 화강암 풍화토의 식생에서 높게 나타났고, 관목류에 의한 Zn의 흡수는 사문암과 화강암의 풍화토간에 차이가 나타나지 않았다고 보고하였다.

본 조사지역 식물체 시료의 Ni, Co 및 Fe의 함량으로 Fe/Ni과 Co/Ni의 비율을 Table 2에 나타내었

다. Ni 독성은 같은 토양에서 성장하는 여러 종간에 미치는 영향이 상당히 상이하다. 토양의 Ni 함량에 따라 생육의 차이가 있으며 잎의 chlorosis 또는 necrosis 증상을 나타낸다. Mizuno(1968)는 Ni 독성작용에 대한 식물의 저항성을 나타내는 지표로 Fe:Ni의 비율을 사용하는데, 식물체 내의 Ni와 Fe의 함량 자체보다 이들 비율이 Ni 독성작용과 연관이 크다고 하였다.

Table 2에서 보는 바와 같이 사문암 풍화토 쭉의 Fe:Ni는 평균 44.59, 역새는 60.22이고, 유문암

토양의 쭉은 792.64, 역새는 925로 유문암 토양보다는 사문암 토양이, 역새보다는 쭉이 Ni에 대한 내성이 약할 것으로 사료된다. 즉 Ni 농도가 높은 사문암 지역에서 Fe:Ni의 비율이 낮게 나타나기도 하지만 같은 사문암 지역인 US-II의 쭉과 참억새를 비교할 때 Ni 농도가 높음에도 불구하고 참억새가 Fe:Ni의 비율이 높은 반면 Ni 농도가 낮은 쭉이 Fe:Ni의 비율이 낮게 나타나 Ni에 대한 내성이 약할 것으로 사료된다. 또한 유문암 토양에서는 뿌리보다 지상부가 Ni 독성에 대하여 내성이 약할 것으로 사료된다. 김명희 등(1997)은 사문암 토양과 사문암과 변성암 혼합 풍화토 위에서 생육하는 대나물의 Fe:Ni 비율을 보고 사문암 지역의 대나물이 Ni 독성에 대하여 내성이 낮을 것이라고 하였으며, 김명희와 민일식(1998)은 모암이 다른 풍화토에서 생육하는 참억새 연구에서 다른 풍화토보다 사문암 풍화토가 뿌리보다는 지상부가 Ni 독성에 내성이 약할 것이라고 하였다. Brooks와 Wither(1977)는 모암이 다른 풍화토 위의 *Rinoria bengalensis*의 Co와 Ni 함량을 조사하여 초염기성 풍화토의 식물에서 Co/Ni 비율이 다른 암석 위의 식물에서보다 상당히 낮음을 보고 이는 초염기성 발생의 기준이 된다고 하였다. 본 조사에서도 대체로 사문암 지역의 쭉과 참억새에서 Co/Ni 값이 낮게 나타났다. 김명희와 민일식(1998)은 또한 사문암 지역 참억새에서 Co:Ni 값이 낮음을 보고한 바 있다.

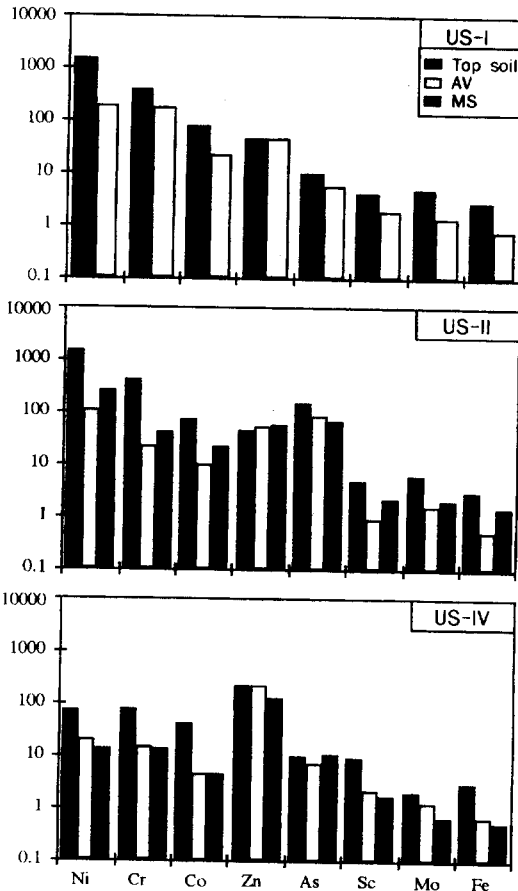


Figure 6. Comparisons of heavy metal concentrations between top soil and plant [*A. vulgaris*(AV) and *M. sinensis*(MS)] from serpentine area, Ulsan. All elements are in ppm except Fe(wt %). Scale is logarithm. The other abbreviations are in the Table 1

3. 토양과 식물체의 원소 함량 비교

Figure 6은 토양과 식물체(쭉과 참억새)의 중금속 농도를 비교한 것이다. 전체적으로 Ni, Cr, Co, As, Sc, Mo 및 Fe의 농도는 토양이 식물체보다 높았으나, Zn은 토양과 식물체가 비슷하거나 유문암 토양의 쭉이 토양보다 다소 높은 것으로 보아 식물체에 의한 Zn의 흡수는 뚜렷이 높음을 알 수 있다. 또한 식물체 내 Cr과 As의 농도가 토양 농도와 차이가 적은 것으로 보아 쭉과 참억새에 의한 이들 성분의 흡수도 뚜렷함을 알 수 있다.

인용문헌

- 김명희, 민일식, 송석환(1997) 사문암 지역에 생육하는 대나물(*Gypsophila oldhamiana*)의 중금속 함량. 한국생태학회지 20(5): 385-391.
- 김명희, 민일식(1998) 모암이 다른 풍화토양에서 생육

- 하는 참억새(*Miscanthus sinensis*)의 중금속 함량. 중부대학교 농업개발연구소 논문집 6: 6-16.
- 김옥준(1985) 울산철산의 성인. 제18차 광산지질학회 학술발표 요약문, 190쪽.
- 김정호(1981) 경남 울산광산 일대에 분포하는 사문암에 관한 연구. 부산대 석사학위논문.
- 김택진, 김용범, 이남주, 심재국(1997) 사문암 지역의 식생에 관한 연구. 1997년도 한국생태학회 춘계학술 발표대회, 20~21쪽.
- 민일식, 김명희, 송석환(1998) 서로 다른 모암과 토양의 미량원소 특성 및 리기다소나무의 원소 함량. 환경생태학회지 12(1): 22-29.
- 이기철, 이홍재, 이민효, 김성수, 김동호, 김상돈(1992) 오염토양의 정화방법에 대한 연구(1) - 식물에 의한 정화방법 연구 -. 국립환경연구원보 14: 231-254.
- 임수길, 김정규, 김동엽(1996) 유용식물을 이용한 오염토양 정화기술 개발. 제1회 농업과학 심포지엄 21세기 농업과학 연구의 발전방향. 교육부 농업과학 심사평가위원회, 236~241쪽.
- 정기채, 김복진, 한상국(1993) 아연광산 인접지역 야생식물 중의 중금속 함량조사. 한국환경농학회지 1: 105-111.
- 지정만, 김규봉(1977) 사문석의 활석화 과정에 관한 연구. 광산지질 10(2): 75-92.
- 최현일(1980). 울산지역 경상계지층의 지질 및 지화학적 연구. 자원개발연구소.
- Alina, K. P. and P. Henryk(1985) Trace elements in soils and plants. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 256pp.
- Amidei, G.(1841) Species di piante osservate nei terreni serpentinesi. Atti Terza Riunione Scienz. It. Fireze, pp. 523-524.
- Bowen, N. L. and O. F. Tuttle(1949) The system. MgO-SiO₂-H₂O. Geol. Soc. An. Bull. 60: 439-460.
- Brooks, R. R.(1983) Biological methods of prospecting for minerals. Wiley, New York, 280pp.
- Brooks, R. R. and E. D. Wither(1977) Nickel accumulation by *Rinorea bengalensis*[Wall.] O. K. J. Geochem. Explor. 7: 295-300.
- Gordon, A. and C. B. Lipman(1926) Why the serpentine and other magnesian soils infertile? Soil Sci. 22: 291-302.
- Hilgard, E.(1906) Soils. Macmillan, New York, 210pp.
- Hoffman, E. L.(1997) Instrumental neutron activation in geoanalysis. Journal of Geochemical Exploration 44: 297-319.
- Jaffre, T., R. R. Brook, J. Lee and R. D. Reeves(1976) *Sebertia acuminata*: A hyper accumulator of Nickel from New Caledonia. Science 193: 579-780.
- Krause, W.(1958) Andere Bodenspezialisten. In Handbuch der Pflanzenphysiologie. V.4. Springer, Berlin, pp. 755-806.
- Lounamaa, J.(1956) Trace elements in plants growing wild on different rocks in Finland. Ann. Bot. Soc. Vanamo, 29: 1-196.
- Lyons, M. T.(1973) Soil factors controlling the vegetation of the Coolac serpentinite belt in New South Wales. MSc Thesis, Univ. NSW.
- Mizuno, N.(1968) Interaction between iron and nickel and copper and nickel in various plant species. Nature 219: 1,271-1,272.
- Pancic, J.(1859) Die Flora der Serpentine berg ein Mittel-Serbien. Verh. Zool.-Bot. Ges. Wien. 9: 139-150.
- Robinson, W. O., G. Edgington and H. G. Byers(1935) Chemical studies of infertile soils derived from rocks high in magnesium and generally high in chromium and nickel U.S. Dep. Ag. Tech. Bull. 471: 1-17.
- Rune, O.(1953) Plant life on serpentine and related rocks in the north of Sweden. Acta Phytogeogr. suecica. 31: 1-139.
- Vanselow, A. P.(1966) Nickel. In(H.D. Chapman ed.) Diagnostic Criteria for Plants and Soils. Univ. Calif. Div. Agr. Sci. 303-309.
- West, W.(1912) Notes on the flora of shetland with some ecological observations. J. Bot. Lond., 50: 265-275, 297-306.