

서로 다른 모암과 토양의 미량원소 특성 및 리기다소나무의 원소 함량¹

민일식² · 김명희³ · 송석환⁴

The Trace Element Characteristics of Rocks, Top Soils, and *Pinus rigida* Growing on Soils Derived from Different Parent Rocks¹

Ell-Sik Min², Myung-Hee Kim³, Suck-Hwan Song⁴

요 약

충남지역의 사문암과 변성암 및 흑색셰일지역의 암석, 토양 및 그 위에서 생육하는 리기다소나무의 미량원소 함량을 측정하여 모암별 토양의 원소함량과 식물체의 흡수관계를 조사하였다. Ni, Cr 및 Co 함량은 사문암에서 매우 높았으며, Zn, Mo 및 Fe 함량은 변성암에서 높았다. 흑색셰일의 이들 원소는 사문암과 변성암보다 공히 낮았다. 사문암 토양의 Ni, Cr 및 Co 함량은 매우 높았으며, Zn과 Fe 함량은 사문암+변성암 혼합풍화토 및 흑색셰일 토양에서 높았다. 풍화토의 미량원소 함량은 암석의 함량보다 낮았으며, 그 패턴은 Mo를 제외하고는 모두 유사하였다. 사문암풍화토의 pH 범위는 7.73~9.55로 매우 높았다. 사문암지역 리기다소나무의 Cr 흡수량은 토양내 Cr 함량에 비하여 낮았으며, Zn은 토양내의 원소 함량에 비하여 리기다소나무에 의한 흡수량이 높았다. 리기다소나무에 의하여 흡수된 Ni, Fe 및 Co 함량에 대한 Fe/Ni, Co/Ni 비율은 사문암풍화토에서 가장 낮았다.

주요어 : 사문암, 변성암, 흑색셰일, 소나무, 미량원소 함량

ABSTRACT

This study is investigated for the trace element concentration in the soils derived from different parent rocks, which are serpentinites, metamorphic rocks and black shales, and the absorption of the trace element by *Pinus rigida* in Hongseong and Keumsan, Chungnam, respectively. The concentrations of nickel, chromium and cobalt are high in the serpentinites, whereas the concentrations of zinc, molybdenum and iron are high in the metamorphic rocks. These elements in black shale are lower than those in serpentinites and metamorphic rocks. The serpentine soils show high nickel, chromium and cobalt content, while zinc and iron content are high in the mixed soils (serpentinites + metamorphic rocks) and black shales. Comparing with

1 접수 2월 5일 Received on Feb. 5, 1998

2 중부대학교 산림자원학과 Dept. of Forest Resource Science, Joongbu Univ., Chungnam, 312-940, Korea

3 중부대학교 원예학과 Dept. of Horticultural Science, Joongbu Univ., Chungnam, 312-940, Korea

4 중부대학교 환경공학과 Dept. of Environmental Engineering, Joongbu Univ., Chungnam, 312-940, Korea

parent rocks, all of trace elements in their weathered soils are low. The pH of serpentine soil is high, 7.73~9.55 and that of black shale soil is 5.61. In serpentine area, the absorptions of chromium by *P. rigida* is lower than its in the soils. The absorption of zinc by *P. rigida* is high relative to zinc concentration in soils. The Co/Ni and Fe/Ni quotient in *P. rigida* over serpentine soils are considerably lower than those growing over other soils types.

KEY WORDS : SERPENTINE, METAMORPHIC ROCK, BLACK SHALE, Pinus rigida, HEAVY METAL

서 론

사문암은 사문석 광물인 리자르다이트, 크리스토아일, 안티고라이트와 부수적으로 자철석, 부루사이트, Mg, Ca-Al 규산염광물로 구성된 암석으로 페리도타이트, 반려암, 대리암, 규산질 돌로마이트의 화학적 변질, 즉 사문암화 과정을 통해 형성된다(O' Hanley, 1996).

우리나라의 사문암은 충남 서부지역과 경상도의 안동 및 울산지역에 분포하고 있는데, 충남지역의 사문암은 주변암과 단층으로 접하며 인접부의 지층과 암석의 구조방향을 따라 신장된 렌즈상으로 폭은 수십미터, 길이는 수백미터에서 수킬로미터까지 분포하고 있다(엄상호와 이민성, 1963; 지정만과 김규봉, 1977).

사문암 구성광물 중 철과 마그네슘은 전이원소인 니켈, 코발트, 크롬, 스칸디움에 의해 치환되기 때문에 사문암으로부터 풍화된 토양은 니켈, 크롬 및 코발트 등의 독성에 의하여 토양이 매우 척박한 불모지가 형성되며(Hunter and Vergnano, 1952; Kruckeberg, 1954; Aumento, 1970; Wither and Brooks, 1977; Reeves *et al.*, 1981; 1983; Baker *et al.*, 1991), 식생에 독성을 유발하고 적응이 안된 식생의 생존과 생육을 억제하여(Hunter, 1954; Whittaker, 1954; Crooke, 1956; Soane and Saunder, 1959; Peterson, 1975), 생물군이 매우 빈약하며(Sultan *et al.*, 1986) 독특한 생태계를 유지하고 있다(Brooks, 1987; Baker *et al.*, 1991).

Brooks 등(1976)은 단위 건중량당 1,000 ppm 이상의 Ni를 함유하는 종을 hyperaccumulators라 부르고, 이들 식물은 Ni mineralization과 연관 가능성이 있으며, 식물의 생리적 측면에서 고농도 Ni 독성작용을 일으킨다고 하였다. 북아메리카와 유럽의 사문암 토양에서는 Ni-내성 생태형이 출현하는데 Ni 내성은 사문암지역 고유종의 주요 특징이다(Proctor, 1971a; Proctor, 1971b; Proctor and

Woodwell, 1975; Jaffre *et al.*, 1976). Brooks (1987)는 사문암지역에는 소수의 종만이 출현하고 출현종은 매우 왜소하며, 증발을 지연시킬 수 있는 두껍고 리그닌화된 식물조직이 발달되며, 뿌리는 측면으로 넓게 분포한다고 지적하였다. 따라서 초엽기 성암에 함유되어 있는 미량원소는 식물에 흡수 이용되기 때문에, 사문암 토양의 식생 형태를 이해하는데 필수적이다.

본 연구는 충남 광천 일대의 사문암과 변성암 및 금산 흑색세일의 암석과 이들로부터 유래된 토양의 미량원소 함량과 이들 지역에 분포하는 리기다소나무 체내의 미량원소 함량을 측정하여 암석, 토양 및 식물체의 조성치를 비교하여 모암에 따른 식물체의 흡수관계를 규명하는데 목적이 있다.

조사 및 분석 방법

1. 조사지의 개황

본 조사를 위하여 충남 홍성군의 사문암과 변성암 지역(위도 36° 30' -36° 36', 경도 126° 36' -126° 39') 및 충남 금산군의 흑색세일 지역(위도 36° 09' -36° 10', 경도 127° 22' -127° 24')을 선정하였다. 사문암지역의 지질은 하부로부터 선캄브리아기의 변성암류인 흑운모 편마암 및 각섬석 편암을 기반암으로 하여 이를 관입하고 있는 중생대의 섬록암과 화강암류로 구성되어 있다(Figure 1)(엄상호와 이민성, 1963; 이종혁과 김성수, 1963; 민일식 등, 1997).

사문암의 모암은 페리도타이트로 주 구성광물은 감람석, 단사휘석, 사방휘석, 침정석으로 구성되어 있으나 사문암화가 진행될수록 사문석, 자철석, 각섬석의 함량이 증가하는 경향이 있다. 그 외의 부성분광물로 금운모, 적철석, 방해석, 녹리석 및 활석 등이 있다. 초엽기성암에 존재하는 침정석군은 Al, Mg가 풍부한 침정석이고, 이후의 사문암화 작용이

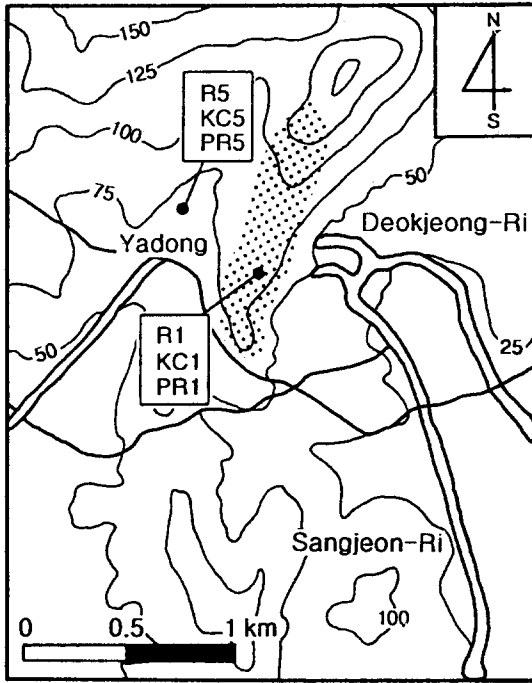


Figure 1. Sample locations of the rocks(R), top soils(KC) and *Pinus rigida*(PR) from the serpentinite and metamorphic rock area in Kwangcheon, Chungnam

일어난 후의 사문암에서는 Cr과 Fe이 증가한 크롬 철석으로 변화한다. 이 지역의 풍화된 사문암체 암반 위의 토양 및 광미 위에는 대나무, *Artimisia*, 참억새, 쑥 등이 제한적으로 생존하고 있으며 부근의 산림풍화토에는 소나무, 리기다소나무, 오리나무 등이 식재되어 있다.

한편 흑색셰일지역의 지질은 하부로부터 마전리층, 창리층, 대덕리층으로 구성되는 옥천누층군의 변성퇴적암류 및 쥐라기와 백악기의 화성암류로 구성되어 있다(이민성과 박봉순, 1964; 김옥준, 1968; 손치무, 1970; 이종혁과 김정환, 1972; 장기홍과 박봉순, 1977). 이 지역에는 참억새, 토끼풀 등의 초본류와 소나무, 리기다소나무, 낙엽송, 오리나무, 아카시나무 등이 식재되어 있다.

2. 시료채취 및 분석

암석시료는 본 연구 대상지의 주요 암석인 사문암

(R5), 변성암(R1)(Figure 1) 및 흑색셰일(R3)의 암편시료를 채취하였다(민일식 등, 1998). 토양시료는 채취된 암편시료별 풍화토로서 사문암 풍화토(KC5), 사문암과 변성암의 혼합 풍화토(KC1) 및 흑색셰일 풍화토(KS3)로 0~10cm의 표토층에서 1 kg 정도를 채취하여 polyethylene vinyl에 넣어 실험실로 운반하였다. 토양은 10일간 풍건시킨 후 2 mm 체에 쳐서 분석 시료를 준비하였다. 준비된 분석용 시료는 캐나다의 ACTLABS(Activation Laboratories Ltd.)에서 분석하였다. 분석 방법은 0.5g의 시료를 질산(0.6ml)과 염산(1.8ml)을 사용하여 95℃에서 반응이 멈출 때까지 약 2 시간 동안 용해시켜 액상(aqua regia)으로 만들어 냉각시킨 후 증류수 10ml를 첨가한 후 Thermo Jerrel Ash Enviro II ICP로 Co, Cr, Ni, Mo, Zn 및 Fe를 측정하였다.

리기다소나무 시료는 사문암에 매우 인접한 사문암 토양(PR5), 사문암과 변성암 혼합 풍화토(PR1) 및 흑색셰일 풍화토(PR8)에 식재되어 있는 리기다소나무를 크기가 80cm 안팎의 균일한 것을 골라 뿌리까지 채취하여 polyethylene vinyl에 넣어 실험실로 운반하여 증류수로 세척하여 표면의 이물질을 제거하고 공기가 잘 통하는 실험실에서 2주간 충분히 말린 다음 식생의 미량원소 함량을 측정하기 위하여, 근원부를 중심으로 지상부(잎과 줄기)와 지하부(뿌리)로 나누어 plastic bag에 밀봉하여 캐나다의 ACTLABS에서 분석하였다. 분석 방법은 식생시료를 90℃로 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) 방법으로 정량화시킨 값이다(Hoffman, 1997).

결과 및 고찰

1. 암석과 토양의 화학조성치

본 연구지역의 대표적 암석인 사문암과 변성암 및 흑색셰일의 화학 조성치를 보면(Figure 2) Ni, Cr 및 Co 함량은 사문암에서 매우 높았으며, Zn, Mo 및 Fe 함량은 변성암에서 가장 높았다.

Mo 함량은 세 암석 공히 낮았으나 특히 사문암의 조성치가 낮았다. Pendias와 Kabata-Pendias

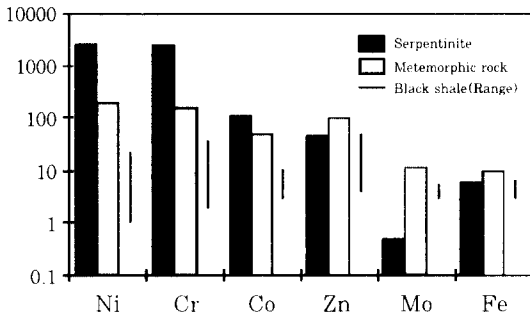


Figure 2. Trace element concentration of serpentinites and metamorphic rocks from Kwangcheon area, and black shales from Keumsan area(All elements are in ppm except Fe(wt %). Scale is logarithm.)

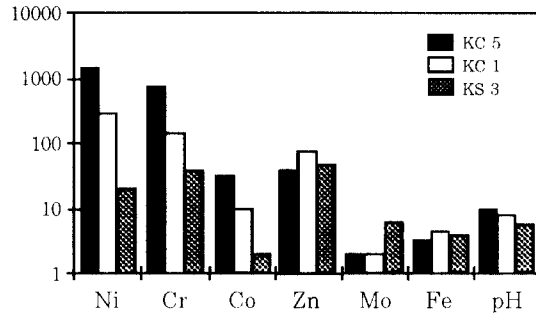


Figure 3. Trace elements for top soils of serpentinites(KC5) and metamorphic rocks(KC1) from Kwangcheon area, and black shales(KS3) from Keumsan area(All elements are in ppm except Fe(wt %). Scale is logarithm.)

(1984)는 세계적으로 Ni 함량이 초염기성암은 1,400~2,000ppm이고, 셰일은 50~70ppm이며, Co 함량은 초염기성암이 100~200ppm, 셰일이 11~20ppm, Fe는 초염기성암이 9.4~10.0%, 셰일이 4.3~4.8%, Zn은 초염기성암이 40~60ppm, 셰일에는 80~120ppm이라 하였는데 본 조사 결과 초염기성암의 Fe 함량이 낮은 것 외에는 이들 결과의 범위와 유사하였다.

본 조사권역의 각 암석으로부터 풍화된 토양내의 미량원소 함량은 Figure 3과 같다. KC5는 광천지역의 사문암으로부터 풍화된 토양이고, KC1은 광천 사문암지역에 인접한 사문암과 변성암의 혼합풍화토이며, KS3은 금산의 흑색셰일에서 풍화된 토양의 pH와 미량원소의 함량 및 토양산도이다.

사문암 토양(KC5)은 pH가 9.55이고, 사문암과 변성암의 혼합풍화토는 7.73으로 매우 높으며, 흑색셰일 토양은 5.61로 산성토양이었다. 사문암 토양의 Ni, Cr 및 Co 함량은 매우 높았으며, Zn과 Fe는 사문암 토양보다는 사문암과 변성암 혼합풍화토와 흑색셰일 토양에서 높았는데 이는 암석의 함량과 매우 비슷한 패턴을 갖는 조성치이다. 단 Mo 함량은 풍화토 종류간에 차이가 크지 않았으나, 흑색셰일토에서 가장 높았으며 변성암의 Mo 함량이 높은 것과는 다르게 사문암 풍화토와 사문암과 변성암 혼합풍화토간에는 차이가 나타나지 않았다. 초염기성 토양의 높은 Ni과 Co 함량은 2가 상태의 Ni과 Co의 이온 반경(Ni: 0.069nm, Co: 0.072nm)이 초염기성암에 풍부한 Mg²⁺의 이온반경과 유사하여 이온치환이

일어나기 때문이며, Cr 함량은 Cr³⁺(r=0.064nm)이 Fe³⁺(r=0.067nm) 광물에 쉽게 치환되기 때문이다(Brooks, 1987). Brooks(1987)는 pH 6.0 이상에서는 Mo의 용해도가 증가하여 토양으로부터 쉽게 용탈되며, Mo의 결핍은 사문암 자체의 낮은 함량 때문이라 하였다. Lounamaa(1956)가 핀란드의 사문암 풍화토와 화강암 풍화토의 원소 조성을 조사한 결과 Ni, Cr, Co 및 Mn 등은 사문암 풍화토에서 월등히 높았고, Cu와 Zn은 화강암 풍화토에서 높았으며 Mo 함량은 두 토양에서 비교적 소량(3.0~3.4ppm)이 함유되어 있었다고 하였다. 사문암 풍화토의 원소 함량은 Fe>Ni>Cr>Co>Zn>Mo의 순이고 변성암 풍화토는 Fe>Ni>Cr>Zn>Co>Mo의 순이며 흑색셰일 풍화토는 Fe>Zn>Cr>Ni>Co>Mo의 순으로 나타났다. Lyons(1973)는 오스트레일리아 동부의 Coolac 사문암 풍화토의 원소 함량이 Fe>Ni>Cr>Co>Zn>Mo의 순으로 나타났음을 보고 한 바 있는데 이는 본 결과와 잘 일치하고 있다.

2. 리기다소나무의 화학조성치

Figure 4는 리기다소나무의 지상부(잎+줄기)와 지하부(뿌리)에 대한 평균 미량원소 함량이다. 사문암지역에서 생육하는 리기다소나무(PR5, PR1)의 미량원소 함량은 Fe>Zn>Cr>Ni>Co>Mo의 순으로 나타났다. 이는 김병희 등(1997)이 사문암지역 대나무(*Gypsophilia oldhamiana*) 체내의 중금속 함량이 Fe>Cr>Ni>Zn>Co>Mo의 순이라고 한 것과 비교

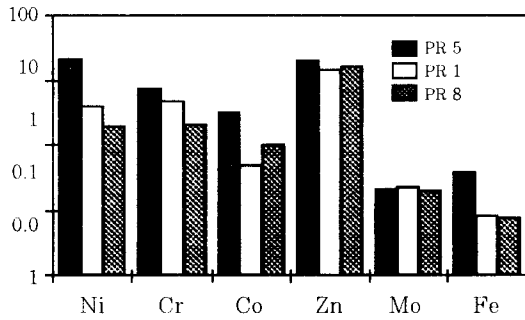


Figure 4. Average trace elements of the *Pinus rigida*(PR) on soils derived from different parent rocks, Chungnam(All elements are in ppm except Fe(wt %). Scale is logarithm.)

할 때, 리기다소나무의 Ni과 Cr의 흡수가 대나무보다는 낮음을 알 수 있다. 사문암 토양의 Fe 함량은 다른 암석의 풍화도에 비하여 적었으나 사문암지역 리기다소나무에 의한 Fe의 흡수는 높게 나타났다. 변성암지역 소나무의 원소 함량은 그 지역 대나무의 중금속 조성 연구(김명희 등, 1997)와 일치한다.

Figure 5는 리기다소나무의 지상부와 지하부의 원소 함량을 비교하기 위하여 지역별로 나타낸 것이다. 지상부는 줄기와 잎을 혼합한 시료이며, 지하부는 뿌리의 조성치이다. 지상부와 지하부의 각 원소 함량의 평균치를 지역별로 보면 사문암 풍화토 지역의 리기다소나무 PR5는 혼합풍화토의 PR1나 흑색세일지역 PR8에서 보다 Mo를 제외하고는 모두 높았으며, Ni과 Cr 함량은 사문암 풍화토, 사문암과 변성암 혼합풍화토, 흑색세일토에서 자라는 리기다소나무의 순으로 함유되어 있었다. Zn은 암석과 토양의 함량에 비교하여 리기다소나무의 함량이 높은 것으로 보아 리기다소나무에 의한 Zn의 흡수가 매우 뚜렷함을 알 수 있었다. 각 지역별로 지상부와 지하부 함량 패턴이 다르게 나타나는데, 사문암 풍화토의 리기다소나무는 Cr을 제외하고는 지상부보다는 지하부 함량이 높았으며, 사문암과 변성암 혼합풍화토의 리기다소나무의 원소 함량은 지하부보다는 지상부의 함량이 더 높았다. 또한 흑색세일 토양은 Mo를 제외하고는 지하부가 지상부보다 높거나 비슷하였다. 이는 식물체의 원소 흡수와 이동은 여러 가지 원소의 구성에 따라 차이가 있음을 의미한다. 위에 언급한 Ni, Cr 및 Co 중 Ni은 사문암 토양 요소 (serpentine soil factor)로서 가장 중요하다

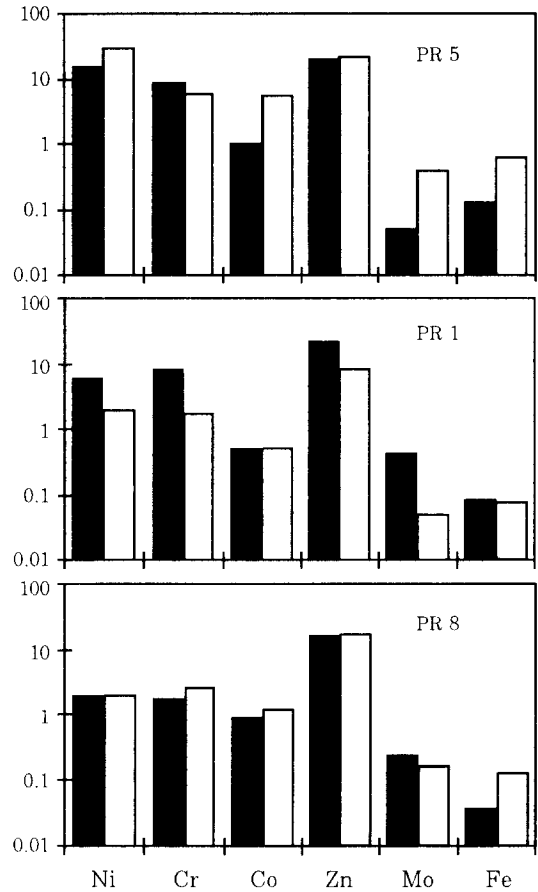


Figure 5. Trace elements of the *Pinus rigida*(PR) on soils derived from different parent rocks, Chungnam(All elements are in ppm except Fe(wt %). Scale is logarithm.)

(Brooks, 1987).

Soane과 Saunder(1959)는 사경재배를 통하여 옥수수과 담배의 Cr 독성 실험에서 일반적으로 잎에서는 Cr의 흡수가 매우 약한 반면 뿌리의 Cr 축적이 많았으며 피해가 크게 나타났다고 하였다. 이는 Cr이 뿌리 발달에 특별히 독성효과가 있음을 암시한다. 또한 그는 옥수수와 oat보다 담배에서 잎으로의 Cr 이동이 더 용이했다고 보고하였다. 대나무 체내의 중금속 함량은 Fe>Cr>Ni>Zn>Co>Sc>Mo 순으로 함유되어 있으며 특히 철의 함량이 높았다.

Lounamaa(1956)는 사문암과 화강암 풍화토의 관목과 초본류의 중금속 함량 연구에서 Co, Cr, Mo

Table 1. Nickel, iron and cobalt concentrations and its iron/nickel and cobalt/nickel ratios of *Pinus rigida* (PR)

Locality & Sample	Soil type	Vegetation part	Ni(ppm)	Fe(ppm)	Co(ppm)	Fe/Ni	Co/Ni
KC5, PR5	Serpentine	Above ground	15	0.133	1.0	88	0.066
		root	29	0.626	5.5	216	0.189
KC1, PR1	Serpentine + Metamorphic rock	Above ground	6	0.084	0.5	140	0.083
		root	2	0.079	0.5	395	0.250
KS3, PR8	Black shale	Above ground	2	0.037	0.9	185	0.450
		root	2	0.119	1.2	595	0.000

및 Ni 함량이 사문암 풍화토 식생에서 모두 높게 나타났으며, Cu와 Mn, Zn은 화강암 풍화토의 식생에서 높게 나타났고, 관목류의 Zn은 사문암과 화강암 풍화토간에 차이가 나타나지 않았다고 보고하였다.

본 조사지역 식물체 시료의 Fe : Ni의 함량 비율을 Table 1에 나타내었다. Fe : Ni의 비율은 Ni 독성작용에 대한 식물의 저항성을 나타내는 지표이다 (Mizuno, 1968). Table 1에서 보는 바와 같이 혼합풍화토의 리기다소나무의 Fe과 Ni의 비율은 지상부와 지하부가 각각 140과 395이고, 사문암지역은 88, 216, 흑색셰일 지역은 185, 595의 범위로 사문암지역과 혼합풍화토의 리기다소나무가 흑색셰일 토양의 리기다소나무보다 Ni 독성에 대하여 내성이 약하고 지하부보다는 지상부가 Ni에 대한 내성이 약할 것으로 사료된다. Mizuno(1968)는 사문암지역 분포 식물 중 일부는 토양내 치환성 Ni 함량이 높음에도 불구하고 독성징후가 나타나지 않았으며, 독성징후를 보이지 않는 건강한 식물들에서는 Fe : Ni, Cu : Ni의 비가 높았다고 보고하였다. 또한 그는 토양 pH가 감소하고, Fe : Ni 비가 감소할수록 Ni에 대한 식물의 저항성이 떨어진다고 하였으며, Ni 독성에 대한 저항성의 정도는 종들간에 매우 다양하다고 하였다. Crooke(1955)도 Ni 독성으로 괴사 징후를 나타내는 oat 식물에서 Fe의 함량이 높았으며, 따라서 식물에서 Ni 독성 정도는 Fe : Ni의 비에 의하여 영향을 받는다고 하였다.

Brooks와 Wither(1977)는 모암이 다른 풍화토 위의 식물체의 Co와 Ni 함량을 조사하여 초염기성암 풍화토의 식물체에서 Co/Ni 비율이 다른 암석 위의 식물체에서보다 상당히 낮음을 보고, 이는 초염기성의 발생의 기준이 된다고 하였다. 본 조사에서도 사문암지역 리기다소나무의 Co/Ni 비율이 가장 낮게 나타났다. 김명희 등(1998)은 사문암지역

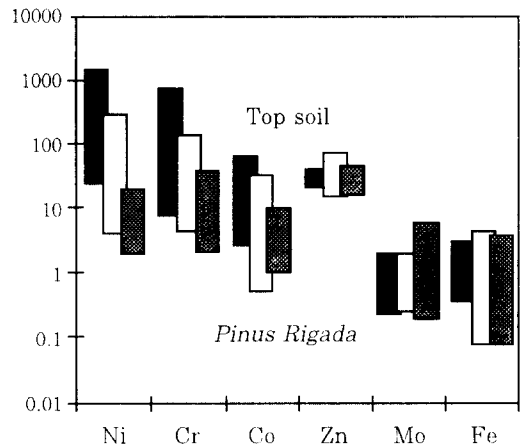


Figure 6. Comparisons of trace elements between top soils(KC, KS) and *Pinus rigida*(PR) from different parent rocks (All elements are in ppm except Fe(wt %)). Scale is logarithm. Upper and lower parts of rectangular symbols are compositions of the top soil and PR, respectively. ■ for KC5 and PR5, □ for KC1 and PR1, and ▨ for KS3 and PR8.)

참역새의 Co/Ni이 흑색셰일지역 참역새의 그것보다 낮음을 보고한 바 있다.

3. 암석과 리기다소나무의 미량원소 함량 비교

Figure 6은 사문암, 변성암 및 흑색셰일로부터 풍화된 토양과 리기다소나무의 미량원소 함량을 비

교한 것이다. 풍화토보다는 리기다소나무의 원소 함량이 모두 낮았으며, Ni, Cr 및 Co는 흑색세일 지역에 비하여 사문암지역에서 토양과 식물체의 함량 차이가 크게 나타났으며, Zn, Mo 및 Fe는 흑색세일 지역에서 토양과 식물체의 함량 차이가 뚜렷하였다. 또한 Zn은 토양 함량에 비하여 리기다소나무에 의한 흡수량이 뚜렷하게 많았다. 사문암지역의 리기다소나무의 Cr 흡수량은 토양내 Cr 함량에 비하여 적은 것으로 나타났는데 이는 Brooks(1987)가 식물체에 의한 Cr의 이용도가 낮다고 한 것과 일치하고 있다.

인용 문헌

- 김명희, 민일식, 송석환(1997) 사문암지역에 생육하는 대나무(*Gypsophila oldhamiana*)의 중금속 함량. 한국생태학회지 20(5): 385-391.
- 김명희, 민일식(1998) 모암이 다른 풍화토양에서 생육하는 참억새(*Miscanthus sinensis*)의 중금속 함량. 중부대학교 농업생명자원과학연구소 논문집 6: 6-16.
- 김옥준(1968) 충주 문경간의 옥천계 층서와 구조. 광산지질 1: 35-46.
- 민일식, 송석환, 김명희(1997) 충남 금산 폐탄광지역의 토양, 하상퇴적물 및 토양수의 이화학적 특성. 한국임학회지 86(3): 324-333.
- 손치무(1970) 옥천층군의 지질시대에 대한 토론. 광산지질 3: 3-4.
- 이민성, 박봉순(1964) 한국지질도 황강리 도폭설명서. 국립지질조사소, 4~11쪽.
- 이종혁, 김성수(1963) 한국지질도 홍성 지질도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 1~22쪽.
- 이종혁, 김정환(1972) 한국지질도 괴산 도폭설명서. 국립지질조사소, 1~19쪽.
- 엄상호, 이민성(1963) 한국지질도 대흥 지질도폭 및 설명서. 국립 지질조사소, 1~18쪽.
- 장기홍, 박봉순(1977) 옥천군 시대미상 암회색 저변성 이질암내에서의 혼적화석 콘드라이트의 산출과 의의. 지질학회지 13: 13-14.
- 지정만, 김규봉(1977) 사문석의 활석화 과정에 관한 연구. 광산지질 10(2): 75-92.
- Aumento, F.(1970) Serpentine mineralogy of ultrabasic intrusion in Canada and on the Mid-Atlantic Ridge. Geological Survey of Canada Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Ontario, pp. 69-53.
- Baker, A. J. M., J. Proctor, and R. D. Reeves (1991) The vegetation of ultramafic (serpentine) soils: Proceedings of the first International Conference on Serpentine Ecology, Univ. of California, Davis, 19-22 June, 195pp.
- Brooks, R. R., J. Lee, and R. D. Reeves(1976) *Sebertia acuminata*: A hyperaccumulator of nickel from New Caledonia, Science 193: 579-580.
- Brooks, R. R.(1987) Serpentine and its vegetation: A multidisciplinary approach. Dioscorides Press, Portland, Oregon, 454pp.
- Brooks, R. R. and E. D. Wither(1977) Nickel accumulation by *Rinorea bengalensis*(Wall.) O.K.J. Geochem. Explor. 7: 295-300.
- Crooke, W. M.(1956) Effect of soil reaction on uptake of nickel from a serpentine soil. Soil Sci. 81: 269-276.
- Hoffman, E. L.(1997) Instrumental neutron activation in geoanalysis. J. of Geochemical Exploration 44: 297-319.
- Hunter, J. G. and O. Vergnano(1952) Nickel toxicity in plants. Ann. Appl. Biol. 39: 279-284.
- Hunter, J. G.(1954) Nickel toxicity in a southern Rhodesian soil. S. Africa J. Sci. 51: 133-135.
- Jaffre, T., R. R. Brook, J. Lee, and R. D. Reeves(1976) *Sebertia acuminata*: A hyperaccumulator of Nickel from New Caledonia. Science 193: 579-780.
- Kruckeberg, A. R.(1954) The ecology of serpentine soils III. Plant species in relation to serpentine soil. Ecology 35: 267-274.
- 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, 157pp.
- Mizuno, N.(1968) Interaction between iron and nickel and copper and nickel in various plant species. Nature 219: 1271-1272.

- O' Hanley, D. S.(1996) *Serpentinities. Records of Tectonic and Petrological History*. Oxford University Press, 277pp.
- Pendias, A. K. and H. Pendias(1984) *Trace elements in soils and plants*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 315pp.
- Peterson, P. J.(1975) Element accumulation by plants and their tolerance of toxic mineral soil. In: T. C. Hutchinson(ed.), *Symposium processing, Vol. II. International Conference in the Heavy Metals in the Environment* Toronto, Canada, pp. 39-59.
- Proctor, J.(1971a) The plant ecology of serpentine. II Plant response to serpentine soils. *J. Ecol.* 59: 397-410.
- Proctor, J.(1971b) The plant ecology of serpentine. III The influence of a high magnesium/calcium ratios and high nickel and chromium levels in some British and Swedish serpentine soils. *J. Ecol.* 59: 827-842.
- Proctor, J. and S. R. J. Woodell(1975) The Ecology of serpentine soil. *Adv. Ecol. Res.* 9: 255-265.
- Reeves, R. D., R. R. Brook, and R. M. MacFarlane(1981) Nickel uptake by *Streptanthus* and *Caulanthus* with particular reference to the hyperaccumulator *S. polygaloides* Gray (Brassicaceae). *Am. J. Bot.* 68: 708-712.
- 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.
- Soane, B. O. and D. H. Saunder(1959) Nickel and Chromium toxicity of serpentine soils in Southern Rhodesia. *Soil Science* 88: 322-330.
- Sultan, M., R. E. Arvidson, and N. C. Strurshio (1986) Mapping of serpentinities in the eastern desert of Egypt by using landsat thematic mapper data. *Geology* 14: 995-999.
- Whittaker, R. H.(1954) The ecology of serpentine soils. IV. The vegetation response to serpentine soil. *Ecology* 35: 275-288.
- Wither, E. D. and R. R. Brooks(1977) Hyperaccumulation of Nickel by some plants of Southeast Asia. *J. Geochem. Explor.* 8: 579-583.