한국토양환경학회지 Vol.3, No.2 41~51, 1998
Journal of KoSES Vol.3, No.2 41~51, 1998

原著

충남 금산 폐탄광지역의 토양 및 식물체내 중금속 오염

민일식 · 송석환* · 김명희**

*중부대학교 산림자원학과 · *중부대학교 환경공학과 · **중부대학교 원예학과*

Heavy Metal Pollution in Soil and Vegetation near the Closed Daeseong Coal Mine in Keumsan, Chungnam[1]

Ell Sik Min · Suckhwan Song* · Myung Hee Kim**

Dept. of Forest resouece Science, Joongbu Univ.
**Dept. of Environmental Engineering, Joongbu Univ.*
***Dept. of Horticultural Science, Joongbu Univ.*

ABSTRACT

The research was conducted to measure the heavy metal pollution of soils and vegetations adjacent to the closed Daeseong coal mine in Keumsan, Chungnam. The studied area was divided into two sites ; the coal-bearing polluted and the non-polluted without coal. The samples of the weathered soils and vegetations(*Miscanthus sinensis*(MS) and *Pinus rigida*(PR)) were collected from both area. Cr, Mo, Ni, and Fe concentrations were high in the polluted soils, whereas Co, Sc, and Zn concentrations were high in the non-polluted soils. In the vegetations, Co, Cr, Sc, and Fe concentrations in the roots of MS and PR growing on the polluted sites were higher than the above-ground. However, on the non-polluted sites, Mo and Ni concentrations had an opposite trend. In the above-ground parts, high heavy metal concentrations (except Cr) were shown in MS of the non-polluted sites, whereas in the roots, heavy metal concentrations (except Zn) were high in the polluted sites. In the average heavy metal concentrations of two plants, most elements (except Zn) were lower in the plants than the soils. Comparing with vegetations and

adjacent forest soils, heavy metal concentrations of the MS were similar to those of soil concentraions relative to the PR, suggesting that absorptions of the elements were higher in the MS than the PR.

Key words : the closed coal mine, heavy metal concentration, soil, *Miscanthus sinensis*, *Pinus rigida*

요 약 문

충남 금산의 대성폐탄광 주변 토양 및 식생에 대한 중금속의 오염도를 파악하기 위해, 탄질물을 함유하는 오염지역과 그렇지 않은 비오염지지역으로 구분하여 양 지역에서 토양과 식물체(참억새와 리기다소나무에 대해 Co, Cr, Fe, Ni, Mo, Sc 및 Zn 등 7개 중금속의 농도를 조사하였다. 토양내 중금속 농도는 Cr, Mo, Ni, Fe의 경우 탄질물을 많이 함유하는 오염지역에서 높았으며, Co, Sc, Zn은 비오염지역의 토양에 더 많이 함유되어 있었다. 오염지에서 생육하는 참억새 및 리기다소나무의 Co, Cr, Sc, Fe 농도는 지상부 보다 뿌리내의 농도가 더 높았으며, 비오염지에서 Ni 및 Mo은 반대의 경향을 나타내었다. 참억새의 경우 지상부는 Cr을 제외한 Co, Mo, Ni, Sc, Zn, Fe 원소 모두 비오염지에서 농도가 높았고, 뿌리는 Zn을 제외한 모든 원소가 오염지에서 높게 나타났다. 리기다소나무의 경우에 지상부는 Cr과 Fe만 비오염지에서 높았고, 뿌리는 모든 원소가 오염지에서 높았다. 오염지 및 비오염지의 식생내 중금속 농도는 Zn을 제외하고 전원소가 토양의 농도 보다 낮았다. 토양과 식물체내 중금속 농도의 원소별 변화는 리기다소나무 보다 참억새가 토양의 함량치에 가까웠으며, 탄질물을 많이 함유한 지역일수록 참억새 보다 리기다소나무의 중금속 흡수가 더 높았다.

주제어 : 폐석탄광, 중금속 농도, 토양, 참억새, 리기다소나무

1. 서 론

석탄산업의 사양화로 그동안 개발되었던 국내 탄광들이 폐광후 충분한 보호 조치를 취하지 않고 방치되어 주변 경관을 해칠 뿐만 아니라 환경오염 문제로 인하여 사회적 관심이 크게 대두되고 있다[1]. 석탄으로 인한 중금속 오염문제는 지하 갱내에서 채탄될 때는 문제가 발생하지 않지만 노천광이나 선탄작업지 및 탄퇴적지와 같은 곳에서 공기 중에 노출되면 원소들이 가동화되어 탄의 표면에서 산화가 발생된다. 이때 폐탄지에서 산성광산폐수가 형성되어 원소들이 석탄이나 이들의 침전물로부터 용탈되는데 이러한 현상은 활성이 매우 높은 framboid 형태의 황철광의 산화과정에서 잘 나타난다[2]. 이 과정 중 황철광은 Fe^{2+}의 가수분해에 의하여 수산화철산화광물을 만들며 산성광산폐수에 갈색침전물을 형성한다.

이러한 폐탄광지역의 폐석더미는 수목이 자라기에는 토양피복량이 충분치 못하고 토양 자체가 박토이므로 수목의 생육조건이 불량하다[1]. 한편 식물체 주위 환경에 분포하고 있는 중금속의 함량에 따라 각종 원소들을 체내에 농축시키는 정도가 원소

의 종류뿐 아니라 식물의 종류에 따라 다양하다[3,4,5]. Kim[6]은 중금속에 대한 식물의 내성은 일반적으로 단자엽식물 보다 쌍자엽식물이 비교적 강하며 다육식물도 강한 편에 속한다고 하였다.

본 연구지역인 금산 대성탄광지역 주변에 대해 송석환 등[7]은 대성탄광 주변의 토양 및 하상퇴적물의 산성화가 탄광 및 창리층의 흑색세일과 매우 밀접한 관련이 있음을 시사하였고, Lee와 Chon[8]은 기반암인 창리층 흑색세일이 일부 중금속에 오염되어 있어 식생의 생육을 저해시키기도 하며, 민일식 등[9]은 폐광 후에 주변 지역에 분포하는 토양과 하상퇴적물 및 토양수의 이화학적 특성 연구에서 폐탄의 영향에 의한 토양산성화로 각종 양이온들이 용탈되고 있다고 하였다. 또한 김명희 등[10]은 폐광지역의 지표수의 중금속 오염과 산성화 정도가 매우 심각하다고 보고하였다. 한편 기존의 폐광지역에 대한 연구에서는 폐광지역의 복구를 위한 오염토양 복원기술과 그 이용기법[11], 폐광산 복원기술[12], 폐광지역에 대한 활용방안[13] 및 폐광에 따른 광산지역 환경개선에 대한 연구[1]들이 진행되고 있으나 폐광지역 식생의 부위별 오염 정도와 생육 상황에 관한 연구는 많지 않다.

본 연구는 충남 금산에 소재하는 대성폐탄광 주변의 폐탄석에 의하여 오염된 토양의 중금속 농도와 그 지역에서 생육하는 수목과 초본류의 흡수에 따른 중금속 오염정도를 기반암인 흑색세일 풍화토양과 비교하여 밝히고자 하는데 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

2-1. 조사지 개황

본 연구지역은 충남 금산군 복수면 수영리(북위 36° 09'-36° 10', 동경 127° 22'-127° 24')에 위치하며 대전 서부를 흐르는 유등천 상류에 해당하는 지역이다(그림 1). 대성탄광은 1960년대 중반부터 석탄개발이 시작되어 70년대 말에서 80년대 전반에 걸쳐 활발히 개발되었으나 80년대 후반 석탄산업 합리화 정책에 의하여 폐광되었다. 하지만 이후 충분한 보호처리가 되지 않아 산성폐수에 의하여 탄광 주변의 토양 및 하천이 크게 오염되어 있다. 이 지역은 주변 마을인 수영리 마을 중간에서 두 계류 줄기인 남쪽으로 뻗은 작은골과 남서쪽으로 뻗은 큰골로 나뉘어 지는데 현재는 큰골을 따라 기존에 산재해 있는 탄전들의 흔적이 다수 발견되고 있으며 최정상부에는 노천광으로 개발되었던 흔적이 발견되고 있다. 한편 지금도 큰골을 따라 갱으로 개발되던 지역 앞부분에서는 폐탄더미들이 쌓여 있으며 계곡을 따라 흘러 내려 계류지역에 흩어져 있다.

본역의 지질은 하부로부터 선캠브리아기에서 초기 고생대로 추측되는 옥천누층군을 기반암으로 이를 관입하는 쥬라기 및 백악기의 화성암류로 구성되어 있다[14,15]. 옥천누층군은 하부로부터 마전리층, 창리층, 대덕리층으로 구성되어 있고 대성탄광의 무연탄은 옥천층군중 창리층의 흑색세일내에 2매 내지 3매로 협재되어 있다. 이 창리층의 암석은 하부의 흑색, 암회색 또는 암갈색의 편암, 천매암, 사질 천매암으로 구성된 부분과 천매암질 점판암, 흑색세일, 탄층 및 석회암 박층으로 구성된 부분으로 나뉘며 상부는 녹색 내지 담록색의 천매암 및 편암으로 구성되며 결정질 석회암이 협재되어 있다. 이 암석들은 석영, 장석, 흑운모를 주로 포함하고 각섬석, 녹염석, 녹니석, 견운모, 탄질물, 방해석, 자철석, 황철석, 황동석 등의 광물을 포함하고 있다. 이 창리층 세일내의 탄층은 전체적으로 북동방향의 주향을 보이나 지역에 따라 팽화 및 박화가 심하여 정확한 주향 및 경사는 측정할 수 없다[16,17].

이곳은 탄광개발 이전에 산화나 전답의 개발로 인해 산림식생이 크게 훼손되었던 지역으로 탄광개발 이후 복구사업이 극히 일부분이 진행되어 1ha

미만의 면적에 사방조림용으로 아카시나무, 싸리나무, 오리나무 및 리기다소나무 등이 소량 식재되고 그외 나머지 폐탄석 노출지역은 방치되어 참억새, 토끼풀 등의 초본류가 생장하고 있다. 참억새의 경우 폐탄더미의 영향을 받은 지역에서도 생육이 양호한 편이었으나 조림된 리기다소나무의 생육은 매우 불량하였다. 주변 산림지역은 곳에 따라서는 수종갱신을 실시하였으며, 현재는 전체적으로 이 지역의 수종은 침 · 활혼효림으로 조성되어 있다.

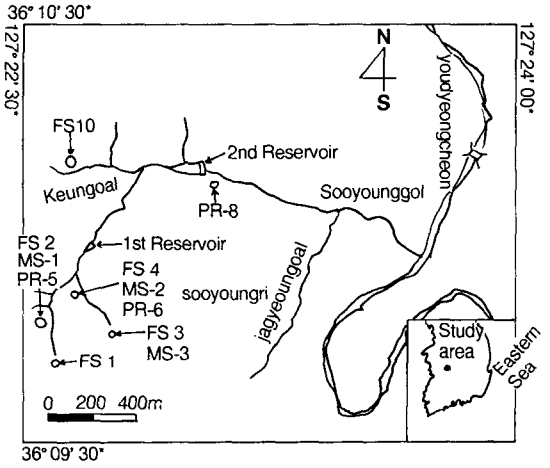

Fig. 1. Sample localities of forest soils(FS), *Miscanthus sinensis*(MS) and *Pinus rigida*(PR) from the closed Daeseong coal mine in Keumsan, Chungnam.

2-2. 토양 채취 및 분석

토양시료는 폐탄의 영향을 받은 오염지역(FS-2, 4)과 폐탄을 함유하지 않는 비오염지역(FS-1, 3, 10)으로 구분하여 채취하였다(그림 1). FS-4는 채광된 탄을 저장하던 폐탄더미에 의해 심하게 오염된 지역으로서 지하수계를 통해서 또는 강우시 지표면에서 산성폐수[10]가 계류에 직접 유입되는 지역이며 식생은 거의 없다. FS-2는 노천광으로 개발되던 곳으로 탄질물을 많이 함유하고 있는 오염지역이다. 폐광 후 이 지역은 일부 소규모로 복구사업을 실시하여 리기다소나무, 아카시아, 잣나무 등의 묘목이 소량 식재되어 있으며 참억새, 쑥, 방동산이 등의 초본류가 분포하고 있다.

비오염지역인 FS-1은 산정 부근의 노천광으로 채굴하던 지점(FS-2)의 위쪽에 해당되는 곳으로 임령이 10년 미만의 소나무와 졸참나무 및 초본류인 참억새 등 침활엽수가 혼효된 2차림으로 생육상태는 불량(평균수고 : 3m, 평균흉고직경 : 2cm)하며 임상이 노출되어 있는 지역이다. FS-3은 폐탄으로 오염된 산정상과는 다소 거리가 떨어진 다른 계곡에서 흘러 내려오는 계류에 인접된 산림지역으로 과거 식수로 사용했던 비오염지역에 해당되며 이곳에는 낙엽송(평균수고 : 14m/8-26, 평균흉고직경 : 18cm/8-26)이 식재되어 있다. FS-10은 폐탄의 오염이 없는 산림지역으로 낙엽송(평균수고 : 18m/10-24, 평균흉고직경 : 24cm/14-32)이 식재되어 있다(그림 1).

토양내 중금속 농도를 분석하기 위해 각 시험조사구내에서 전체를 대표하는 지점을 선정하여 약 1m 깊이의 토양단면을 조사한 후 상부토양(0-20cm)에서 1 kg의 토양을 채취하여 실험실로 운반하고 이를 풍건시킨 후 캐나다의 ACTLABS(Activation Labatories Ltd.)에서 분석하였다. 분석 방법은 0.5g의 토양시료를 0.6ml의 농질산과 1.8ml의 농염산을 사용해 95℃에서 반응이 멈출 때까지 약 2시간동안 용해시켜 액상으로 만들고 냉각시켜 증류수 10ml을 첨가한 후 ICP(Thermo Jerrel Ash Enviro II)로 Co, Cr, Fe, Ni, Mo, Sc 및 Zn를 분석하였다[18].

2-3. 식물체 채취 및 분석

식물체 시료는 폐탄의 영향을 받은 지역과 그렇지 않은 지역으로 구분하여 오염지인 FS-4에서는 참억새(MS-2)와 리기다소나무(PR-6 ; 5년생, 묘

고 : 50cm, 근원경 : 0.8cm)가, 또한 FS-2에서는 MS-1 및 PR-5(5년생, 묘고 : 50cm, 근원경 : 0.9cm)를 채취하였다. 한편 비오염지인 FS-3과 FS-1에서도 참억새(MS-3)와 리기다소나무(PR-8 ; 5년생, 묘고 : 55cm, 근원경 : 0.9cm)를 채취하였다(그림 1). 채취된 식물체는 분석을 위해 각각 근원부를 중심으로 지상부 및 뿌리부분으로 분리하였으며, 리기다소나무의 지상부는 참억새와의 비교를 위하여 근원부의 상부 전체를 혼합하여 분쇄한 시료를 사용하였다. 식생의 중금속 농도는 캐나다의 ACTLABS에서 분석을 하였다. 분석방법은 시료를 90℃로 건조시켜 분쇄한 후 15g의 시료를 약 30ton으로 압착시켜 제조한 고상탄에 15분간 7×10^{12}n $cm^{-2}s^{-1}$의 파장으로 빛을 조사하고 7일 후 부식된 시료에 대해 감마선분광에 의해 측정하는 INAA(Instrumental Neutron Activation Analysis) 방법으로 정량화시킨 값이다[18].

3. 결과 및 고찰

3-1. 토양의 분석 결과

본 조사지역에서 오염지역 및 비오염지역의 토양내 중금속 함량의 상대적 범위를 비교 평가하기 위하여 기발표된 석탄[19], 셰일[20] 및 토양[21]의 자료를 사용하여 비교하였다(표 1).

전체적으로 보면 중금속 농도는 셰일이 석탄에 비해 Cr, Mn 및 Ni 농도가 높았으며 본 연구지역의 함탄질 토양은 석탄에 비해 Mo 농도가 특히 높았다. 이는 모암의 종류에 따라 염기성암 1.4mg/kg, 산성암 1mg/kg, 퇴적암 2mg/kg, 흑색셰일 70mg/kg 이상이라는 Alloway[22]의 보고와 일치하고 있다. Swaine[2]은 이밖의 원소에 대해 석탄내에 B의 농도는 일부 지역에서 해수의 유입으로 인해 높았으며, As 농도는 석탄과 토양간의 큰 변화폭을 나타내었고, Fe는 많은 지역에서 석탄내의 함유량이 토양이나 셰일 보다 높았다고 보고하였다.

본 연구지역에서 오염에 따른 토양내 중금속 농도를 원소별로 보면 전체적으로 Cr, Ni, Mo 및 Fe 농도는 탄질을 많이 함유하는 오염지역의 토양에서 높았으며, 이에 비하여 Co, Sc 및 Zn은 비오염지역의 토양에 더 많이 함유되어 있었다. Co, Sc, Zn은 이 지역의 기반암인 흑색셰일의 조암광물인 흑운모와 각섬석들을 구성하고 있는 함철 및

Table 1. Comparisons of Heavy Metal Concentrations of the Closed Daesung Coal Mine in Keumsan, Chungnam with Other Coal, Shale and Soil Data

Locality	Characteristics	Ni (ppm)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Mo (ppm)	Sc (ppm)	Zn (ppm)	Fe (%)	Remark
FS-2	Polluted soil	127	12	86	121	4	57	4.76	
FS-4	Polluted soil	102	5	101	265	3	40	7.01	This
FS-1	Non-polluted soil	65	29	83	15	7	80	4.96	studied
FS-3	Non-polluted soil	20	10	39	6	2	46	3.89	area
FS-10	Non-polluted soil	31	18	32	3	3	55	3.56	
Coal	-	0.5-80	0.5-30	0.5-60	0.1-10	-	5-300	-	Swaine[19]
Shale	-	68	19	90	2.6	-	120	-	Turekian & Wedepohl[20]
Soil	-	2-500	1-40	5-1000	0.2-5	-	10-300	-	Swaine[21]

함마그네슘 성분과 쉽게 치환하는 성질을 갖는 원소인데, 석탄 성분 중에는 Fe의 함량이 높아 탄질 오염토양에서는 많이 치환[23]되는 것으로 사료된다. 특히 탄질함유량이 가장 많은 FS-4에서는 Cr, Mo, Fe의 농도가 가장 높았으며, 탄질을 많이 함유하고 있으나 일부 식생이 분포하고 있는 FS-2는 Ni의 농도가 가장 높았다. 또한 중금속 농도의 차이는 비오염지역 보다 오염지역이 Mo는 18-88배, Ni은 2-6배, Cr은 1.2-4배, Fe는 1.5-2배 정도 각각 높았다. Mo는 탄질물내 유기물과 결합하고 있는 형태로 존재하고[24], 탄질물의 Mo 농도는 유황함량이 증가함에 따라 증가된다[25]. 한편 탄질물내에서 Co는 진한 황산에 의해 용탈되어 Chelate를 형성하며 황화광물인 황철광의 결정격자내에서 쉽게 치환되어 풍화토양에 공급된다[2]. 이로 보아 Cr, Mo, Ni 및 Fe은 탄질에 의한 영향으로 토양내 함량이 증가되었다고 생각된다.

특히 본 조사지역은 기반암이 탄질물을 많이 함유하는 흑색세일[7]로서 이 변성퇴적암은 입자의 크기에 따라 이질암과 사질암으로 나뉘며 이 중 이질암은 점토광물을 많이 함유하고 있어 중금속들이 농집되어 있는 경우가 많아 상대적으로 부화되어 있다[20]. 이로부터 유래된 잔류토양에는 독성원소들이 점토, 유기물 및 함금속 유기화합물에 흡착되거나 침전되어 농후되므로 이러한 토양에서 생육하는 식생도 잠재적인 독성에 노출되어 있다[26]. 이진수 등[27]에 의하면 본 흑색세일지역의 토양내 원소들의 부화량이 Mo, Cr, Ni 등은 매우 높다고 보고하였는데 본 조사에서도 탄질을 많이 함유하는 토양내에 이들의 농도가 높게 나타났다.

3-2. 식물체의 분석 결과

토양에 함유되어 있는 중금속은 신장된 뿌리를 통하여 식물체로 흡수된다. 이는 원소의 농도구배에 따라 선택적으로 흡수되며 식물의 세포막을 통해 토양용액에서의 이온 확산 및 토양수의 이동작용에 진행되며, 일단 식물체내에 흡수된 중금속은 목부를 통하여 각 기관으로 이동되며 이 가동율은 금속 성분에 따라 다르나 일반적으로 뿌리에서 가장 빠르고 종자에서 가장 느리다[28,29].

본 조사지역에서 생육하는 참억새와 리기다소나무의 지상부 및 뿌리부분에 함유된 중금속 농도는 표 2와 같다.

참억새와 리기다소나무의 지상부 및 뿌리내 중금속 농도를 살펴보면 오염지와 비오염지의 참억새 및 리기다소나무 모두 대체적으로 지상부 보다 뿌리에서의 각종 중금속 농도가 높게 나타났으나, 오염지와 비오염지의 리기다소나무내 Mo 농도 및 오염지의 리기다소나무내 Zn 농도는 반대의 경향을 보였다.

이를 각 원소별로 살펴 보면 참억새의 Ni 농도는 오염지에서는 지상부 보다 뿌리에서 높았으나 비오염지에서는 뿌리에서 더 낮았다. 리기다소나무의 Ni 농도는 비교적 낮았고 지상부와 뿌리의 농도의 차이가 나타나지 않았다. 식물체내에 고농도의 중금속이 축적되는 것은 식물체가 유해물질에 대한 내성을 가져야 하는데 지하부 및 지상부 세포내에 존재하는 액포의 특정 원소에 대한 내성과 뿌리에서 지상부로의 원소의 이동에 따라 함량의 차이가 나타난다. 일반적으로 Ni, Cd, Zn의 농도는 지상부가 지상부 보다 높으나 중금속 축적종인 경우 지상부에서의 금속의 농도가 지하부 수준을 초과하였다는 보고[30]가 있으며, Kramer 등(1996)[31]은 비내성식물인 *Alyssum montanum*에 대해 histidined의 첨가가 Ni에 대한 내성의 증가와 뿌리에서 지상부로의 Ni의 이동속도가 증가되었다고 하였다. Co 농도는 참억새와 리기다소나무 모두 지상부 보다 뿌리에서 높았으며, 탄질함유량이 많은 FS-2에서 생육하는 참억새 뿌리의 Co 농도는 특히 높았고, 리기다소나무의 경우 지상부와 뿌리 모두 오염지가 높게 나타났는데 이는 토양에서의

Table 2. Heavy Metal Concentrations of *Miscanthus sinensis* and *Pinus rigida* near the Closed Daesung Coal Mine in Keumsan, Chungnam

Locality	Characteristics	Ni	Co	Cr	Mo	Sc	Zn	Fe
		(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(%)
MS-1(U)	Polluted	2	1.1	3.8	1.60	0.02	21	0.011
MS-1(L)		8	28.0	48.0	12.00	9.70	44	2.380
MS-2(U)	Polluted	2	0.5	1.5	0.88	0.04	12	0.022
MS-2(L)		4	9.3	19.0	13.00	2.30	18	0.947
MS-3(U)	Unpolluted	13	6.6	2.3	3.00	0.15	120	0.083
MS-3(L)		5	15.0	15.0	0.05	2.40	140	0.508
PR-5(U)	Polluted	2	1.7	0.9	0.67	0.05	28	0.014
PR-5(L)		2	2.4	2.6	0.05	0.25	14	0.066
PR-6(U)	Polluted	2	1.1	1.4	2.30	0.13	36	0.019
PR-6(L)		3	6.0	13.0	11.00	2.20	18	0.702
PR-8(U)	Unpolluted	2	0.9	1.7	0.24	0.10	15	0.037
PR-8(L)		2	1.2	2.6	0.16	0.53	17	0.119

Abbreviation ; MS : *Miscanthus sinensis*, PR : *Pinus rigida*, U : upper part of vegetation, L : root of vegetation

함량(표 1)과 반대였다. Co는 일반적으로 산성암(12-15ppm)이나 퇴적암(0.1-20ppm) 보다 염기성암(100-200ppm)에 풍부하며[23] 보통 조암광물을 형성시키지 못하고 대부분 함철 및 망간 수산화물에 치환되고[32], 산성상태일수록 흡착력이 감소하여 쉽게 용탈되는 특성을 가지고 있으며[33] 또한 Coppenet 등[34]은 Clover에 의한 흡수도 지상부보다 뿌리에서 더 높았다고 하였다. Cr은 참억새의 경우 지상부 및 뿌리 모두 오염지에서 높게 나타났으며 리기다소나무는 지상부에서는 차이가 별로 없었고 뿌리는 오염지가 매우 높았다. 이는 Cr의 토양내 농도(표 2)가 오염지에서 높은 것과 일치한다. Mo의 경우 토양내 농도(표 2)가 오염지가 매우 높게 나타났으나 식물체내 농도 변화는 뚜렷한 차이가 나타나지 않았으며, 리기다소나무의 농도는 오염지에서 높게 나타났다. 이 원소는 공중질소 고정작용에 필요한 양료이며[35], Fe 및 Cu와 길항관계가 있어 Mo가 풍부한 토양은 Fe 및 Cu의 흡수를 방해하여 성장을 저해시킨다[26]. Sc는 전체적으로 뿌리내 농도가 높았으며 특히 리기다소나무에서는 폐탄더미 위(FS-4)에서 생육하는 것 보다 노천광 채굴지점(FS-2)에서 생육하는 것이 낮았다. Fe은 두 식생 모두 지상부 보다 뿌리내 농도가 높았으며 오염지의 참억새 뿌리내 농도가 가장 높게 나타났고, 리기다소나무는 큰 차이를 보이지 않았다. Zn은 식물체내에서 Auxin의 대사작용, 탈수소효소의 조절, Cytochrom의 합성 등에 관여하는 미량원소로서[28], 토양내 농도가 비오염지에서 높았는데(표 2) 참억새에서도 같은 경향을 나타내고 있으며, 리기다소나무의 경우 오염지가 약간 높았지만 큰 차이는 나타나지 않았는데, 이는 전효택과 정명채[3]가 흑색셰일 분포지역의 소나무의 Zn 농도는 토양중의 함량과 뚜렷한 함량 차이를 보이지 않았다는 보고와 일치한다.

지상부 및 뿌리내에 함유되어 있는 중금속 농도의 평균치를 보면 참억새 및 리기다소나무의 각종 중금속 농도는 Zn을 제외하고 비오염지 보다 오염지가 모두 높았다. 특히 리기다소나무는 탄질물을 많이 함유하고 있는 FS-4에서 조사된 원소 농도가 모두 높았으며 이중 Mo의 차이가 가장 컸다.

그림 2는 참억새와 리기다소나무가 생육하고 있는 부근의 토양(표 1)과 식물체의 중금속 농도(표 2)를 나타낸 것이다. 오염지와 비오염지 모두 식생의 중금속 농도가 토양내 농도 보다 일반적으로 낮았으며, 리기다소나무에서는 참억새 보다 토양과 식생의 중금속 농도의 차이가 더 크게 나타났다. 참억새의 중금속 흡수도는 비오염지 보다 오염지에서 토양내 농도와의 차이가 더 크게 나타난 반면, 리기다소나무는 비오염지 보다 오염지에서 토양 농도의 차이가 더 적게 나타난 것으로 보아 폐탄오염지역에 조림된 리기다소나무의 생육불량은 토양에 함유되어 있는 각종 중금속들의 흡수에 의한 영향 때문으로 사료된다.

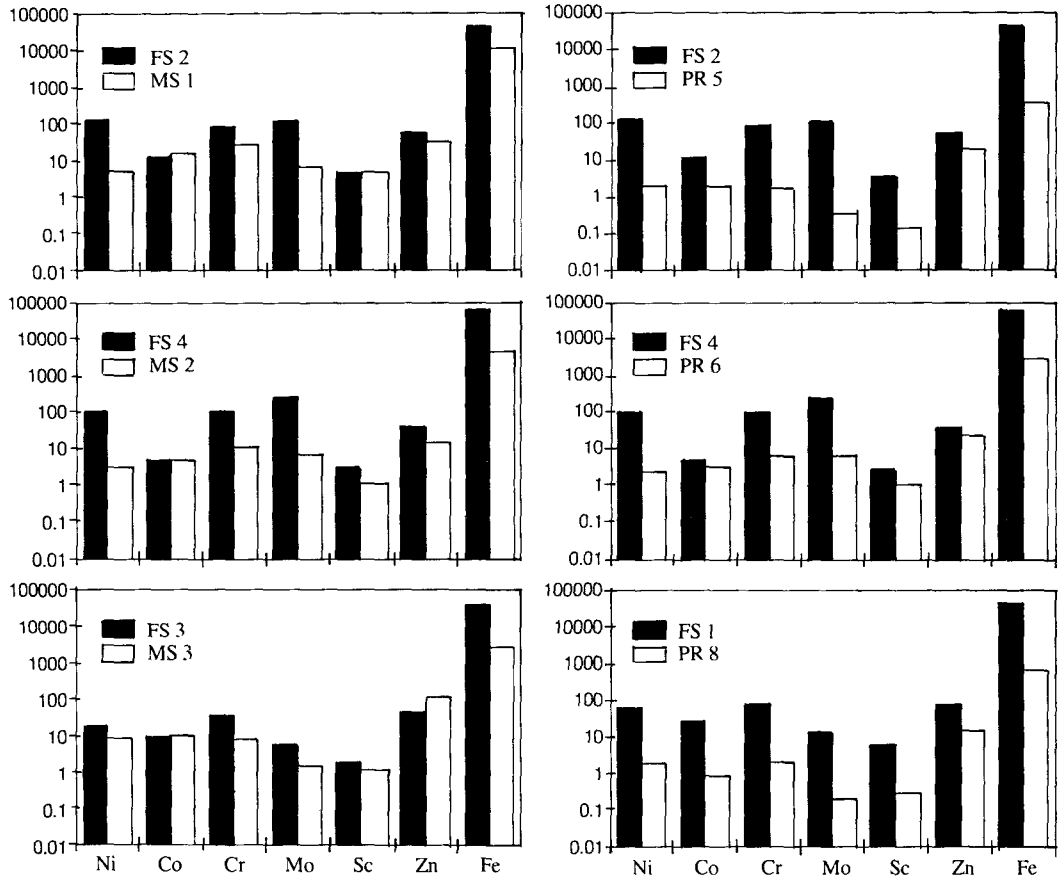

Fig. 2. Comparisons of heavy metal concentrations(Avg.) among *Miscanthus sinensis*(MS) and *Pinus rigida*(PR) and adjacent to forest soil(FS) from the closed Daeseong Coal Mine in Keumsan, Chungnam. All elements are in ppm except Fe(wt %). Scale is logarithm.

각 원소별로 보면 참억새의 경우 모든 지역에서 Co, Sc 및 Zn은 토양의 농도와 유사할 정도로 흡수되어 있으며, 폐탄더미 위에서 생육하는 리기다소나무의 Co, Sc 및 Zn 농도도 이와 유사하였다. 그러나 비오염지내 리기다소나무의 이들 원소들은 토양의 농도와 차이가 크게 나타났다. Cr, Ni, Mo 및 Fe는 모두 셰일내 농도(표 1) 및 토양 보다 식생내 농도가 크게 낮았으며, 특히 탄질물을 많이 함유하는 FS-2에서의 두 식물체간의 차이는 두드러지게 나타나고 있다.

4. 결 론

탄질층을 함유하고 있는 흑색셰일의 풍화토양과 폐탄석에 의해 오염된 충남 금산 대성탄광 주변 토양 및 식생에 함유되어 있는 중금속의 오염도를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 토양내 중금속 농도는 Cr, Mo, Ni, Fe는 탄질물을 많이 함유하는 오염지역의 토양에서 풍부하였으며, Co, Sc, Zn은 비오염지역의 토양에 더 많이 함유되어 있었다.
2. 오염지에서 생육하는 참억새 및 리기다소나무의 Co, Cr, Sc, Fe 농도는 지상부 보다 뿌리내 농도가 더 높았으며, 비오염지에서 Ni 및 Mo는 반대의 경향을 나타내었다.
3. 참억새는 지상부에서는 Cr을 제외하고 Co, Mo, Ni, Sc, Zn, Fe 원소 모두 비오염지의 농도가 높았고, 뿌리에서는 Zn을 제외하고 전원소가 모두 오염지가 높게 나타났다.
4. 리기다소나무는 지상부에서는 Cr과 Fe만 비오염지에서 높았고, 뿌리에서는 전원소 모두 오염지에서 높았다.
5. 오염지 및 비오염지의 식생내 중금속 농도는 Zn을 제외하고 토양의 농도 보다 전원소에서 낮았다.
6. 토양과 식생내 중금속 농도의 원소별 변화는 리기다소나무 보다 참억새가 토양의 함량치에 가까웠으며, 탄질물을 많이 함유한 지역일수록 참억새 보다 리기다소나무의 중금속 흡수가 더 높았다.

참 고 문 헌

1. 민정식, 권광수, 조원재, 홍영국, 홍성규, 정영욱 "폐광에 따른 광산지역 환경개선 연구", 석탄산업합리화사업단 (1995)
2. Swaine, D. J. and Goodarzi, F., Environmental Aspects of Trace Elements in Coal, 1st Edition, Kluwer Academic Publishers, London (1995)
3. 전효택, 정명채 "함우라늄 흑색셰일에서의 유독성원소들의 분산에 관한 지구화학적 연구", 광산지질. 24(3), pp245-260 (1991)
4. Manthey, J. A., Crowley, D. E. and Luster, D. G. Biochemistry of Metal Micronutrients in the Rhizospere, 1st Edition, Lewis Publishers, Boca Raton (1994)
5. Tarradellas, J., Bitton, G. and Rossel, D. Soil Ecotoxicology, 1st Edition, Lewis Publishers, Boca Raton (1997)
6. Kim, B. W. 1985. Studies on the Effect of Lead and Cadmium in Growth of Roadside Plants. Ph.D. Report (1985)
7. 송석환, 민일식, 김명희, 이현구 "금산 대성탄광 산성폐수에 의한 오염", 자원환경지질학회지 30(2), pp105-116 (1997)
8. Lee, J. S. and Chon, H. T. "Dispersion and Enrichment of Potentially Toxic Elements in Areas Underlain Black Shales and Slates in Korea", *Proceedings of the 30th korea Society of Economic and Environmental Geology, Kwangju,* pp54-55 (1997)
9. 민일식, 김명희, 송석환 "충남 금산 폐탄광지

역의 토양, 하상퇴적물 및 토양수의 이화학적 특성", 한국임학회지 86(3), pp324-333 (1997)

10. 김명희, 민일식, 송석환 "금산 폐광지역의 오염이 지표수에 미치는 영향", 한국임학회지 86(4), pp435-442 (1997)
11. 이민효 "오염토양 복원기술과 그 이용기법", 대한자원환경지질학회 및 ·대한지질학회 제12회 공동학술강연회 발표논문집, pp17-39 (1996)
12. 오종기, 이화영, 김성규. "폐광산 복원기술 - 중금속 제거방법을 중심으로", 대한자원환경지질학회 및 ·대한지질학회 제12회 공동학술강연회 발표논문집, pp41-67 (1996)
13. 배경조 "강원도 남부 폐광지역 활용방", 대한자원환경지질학회 및·대한지질학회 제12회 공동학술강연회 발표논문집, pp69-79 (1995)
14. 김옥준 "충주 문경간의 옥천계 층서와 구조", 광산지질 1, pp35-46 (1968)
15. 손치무 "옥천층군의 지질시대에 대한 토론", 광산지질 3, pp3-4 (1970)
16. 홍승호, 최위찬, 금산도폭, 자원개발연구소 서울, pp1-29 (1978)
17. 이상만, 김형식, 나기창, 대전도폭, 자원개발연구소 서울, pp1-26 (1980)
18. Hoffman, E. L. "Instrumental Neutron Activation in Geoanalysis". *J. of Geochemical Exploration*, 44, pp297-319 (1997)
19. Swaine, D. J., Trace Elements in Coal, Bureauworths Press, London (1990)
20. Turekian, K. K. and Wedepohl, K.H. "Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth' s Crust", Bull. Geol. Soc. *Amwer*. 72, pp175-191 (1961)
21. Swaine, D. J. The Trace Element Concentration of Soils. Commonwealth Bureau of Soil Science, Harpenden (1955)
22. Alloway, B. J. Heavy Metals in Soils, 2nd Edition, Blackie Academic & Professional, London (1995)
23. Kabata-Pendias, A. and Pendias. H., Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Inc., Boca Raton (1984)
24. Almassy, G. and Szalay, S. "Analytical Studies on Vanadium and Molybdenum Concentration of Hungarian Coal" *Mag. Tud. Akad. Kem. Tud. Oszt. Kozi.*, 8(1), pp39-45 (1956)
25. Niholls, G. D., The Geochemistry of Coal-bearing Strata, pp269-307 in Murchison, D. and Westoll, T. S. Edition "Coal and Coal-bearing Strata", Oliver and Boyd, Edinbergh (1968)
26. Thornton, I., Applied Environmental Geochemistry, Academic Press, London (1983)
27. 이진수, 전효택, 김경웅 "충주지역 흑색세일 분포지역에서의 잠재적 독성원소들의 분산과 부화", 자원환경지질 29(3), pp495-508. (1996)
28. Tisdale, S. L., Nelson, W. L. and Beaton, J. D. Soil Fertility and Fertilizers, Macmillian Publishing Co., New York (1985)
29. Fergusson, J. E., The Heavy Metal Elements. Chemistry, Environmental Impact and Health Effects, Pergamon Press, New York (1990)
30. Homer, F. A., Morrison, R. S., Brooks, R. R., Clemens, J. and Reeves, D. "Comparative studies of nickel, cobalt and copper uptake by some nickel hyperaccumulators of the genus Alyssum". *Plant and Soil*, 138, pp195-205 (1991)
31. Kramer, U., Cotter, H. J. D., Chamock, J. M., Baker, A. J. M. and Smith, J. A. C. "Free histidine as a metal chelator in plants that accumulate nickel", *Nature*, 379, pp635-638 (1996)
32. Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J., An Introduction to the Rock Forming Minerals,

Longman Scientific & Technical Press, UK (1992)
33. McKenzie, R. M., The Mineralogy and Chemistry of Soil Cobalt. Page 83 in Nicholas, D. J. D. and A. R. Egan, ed. Trace Elements in Soil-Plant-Animal Systens, Academic Press, New York (1975)
34. Coppenet, M., More, E., Le Covre, L. and Le Mao. M. "Variation de la teneur en cobalt de ray-grass edute de techniques d' enrichissement". *Ann. Agron.*, 23, pp165-173 (1972)
35. Ressell, E. W., Soil Conditions and Plant Growth, The English Language Book Society and Longman, London (1973)