한국농림기상학회지, 제7권 제4호(2005)
Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 7, No. 4, (2005), pp. 265~273

문경지역 폐탄광지 주변 산림토양의 화학적 성질 및 중금속 함량

민재기[1] · 박은희[2] · 문현식[3] · 김종갑[4]
[1]상주대학교 산림환경자원학과, [2]국립공원관리공단,
[3]경상대학교 농업생명과학연구원, [4]경상대학교 산림과학부
(2005년 11월 1일 접수; 2005년 12월 6일 수락)

Chemical Properties and Heavy Metal Content of Forest Soils around Abandoned Coal Mine Lands in the Mungyeong Area

Jae-Gee Min[1], Eun-Hee Park[2], Hyun-Shik Moon[3] and Jong-Kab Kim[4]
[1]Department of Forest Resources and Environment, Sangju National University, Sangju 742-711, Korea
[2]Korea National Park Service, Tongyeong 650-140, Korea
[3]Institute of Agriculture and Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea
[4]Division of Forest Science, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea
(Received November 1, 2005; Accepted December 6, 2005)

ABSTRACT

Chemical properties and heavy metal concentrations of forest soils of four abandoned coal mine lands affected by coal mining activities in the Mungyeong area were investigated to provide basic information for revegetation of abandoned coal mine lands. Soil pH in abandoned coal mine lands ranged from 5.30 to 6.76 it in the control site was 5.23. Contents of organic matter and total N in abandoned coal mine lands were 4.46~7.19% and 0.07~0.15%, respectively. Available P contents were 6.54 for A (Samchang), 6.52 for B (Bongmyeong), 3.94 for C (Kabjung), 5.45 mg/kg for D (Danbong coal mine land) and 5.25 mg/kg for the control site, which had a positive correlation with soil pH. Contents of exchangeable Ca, Mg, K and Na in abandoned coal mile lands averaged 196.1, 88.7, 88.2 and 10.2 $cmol^+$/kg, with a range of 132.1~242.1, 24.2~138. 64.9~120.8 and 8~12.2 $cmol^+$/kg, respectively. Those of the control site were 192.8, 95.8, 104 and 21.2 $cmol^+$/kg, respectively. Heavy metals such as Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb and Zn of forest soil in abandoned coal mine lands have a larger content than those of the control site. Al, Mn and Pb content was especially high in abandoned coal mine lands. The Al content of forest soil in abandoned coal mine lands ranged from 397 to 917 ppm, which was considered to be high enough to inhibit tree growth. Therefore, it is suggested that soils of abandoned coal mine lands contaminated by mining activities need to be properly treated for remediation of environmental problems.

Key words **: Abandoned coal mine, Forest soil, Heavy metal, Soil chemical properties**

I. 서 론

산림토양은 산림생태계에 있어서 가장 중요한 임목의 지지체 역할을 하고 있지만, 급속한 산업화와 도시화로 인해 다양한 형태의 오염물이 생성 · 배출되었고, 이들 오염물질들은 여러 경로를 통해 수질, 대기, 토양을 포함한 지구환경을 오염시켜 왔다. 산림토양을 오염시키는 물질들은 다양하지만, 이들 중 가장 심각한 오염원은 석탄채굴 후 폐광된 광산이며, 이러한 광산들은 적절한 복구조치 없이 그대로 방치된 상태로 존재하여

Corresponding Author : H. S. Moon (hsmoon@gsnu.ac.kr)

광미, 폐석, 광산폐수 등에 의해 주변 산림토양을 오염시키고 있다. 이들 폐탄광 지역에서의 오염현황은 고농도의 중금속을 함유한 광산산성 폐수의 유출로 농경지 등의 토양, 지하수, 하천수를 오염시키고 있으며, 폐석 광미 등 광산 주위에 방치되고 있는 폐기물은 산림토양의 오염은 물론 지역주민의 생활환경과 자연환경의 오염 등 주변 지역으로 오염권이 확산되고 있다(Alloway, 1990).

현재 국내에는 900개 이상의 금속광산, 380개 이상의 석탄광산 및 1,200개 이상의 비금속광산을 포함하여 총 2,500 여개의 크고 작은 광산들이 있으며, 이들 중에서 약 80%가 휴광 또는 폐광된 광산이지만 대부분의 광산들이 휴/폐광 이후 적절한 환경복구사업이 추진되지 않아 주변 생태계에 영향을 미쳐 이들 지역을 중심으로 토양오염에 대한 처리가 요구되고 있다. 특히 폐금속광산에서는 과거 채광이나 선광·제련 과정 등의 광산활동으로 인하여 배출된 광산폐기물들(폐석, 광미, 광석광물, 광산폐수 등)이 광산주변에 그대로 방치되어 있어, 그 지역의 산림토양을 오염시킬 뿐 아니라 집중 강우나 강풍에 의해 하부로 분산되어 하천수나 광산하부의 농경지의 환경오염이 계속적으로 발생되고 있다. 그 결과 오염된 토양에서 재배되고 있는 농작물의 성장에도 영향을 미쳐 궁극적으로는 이를 섭취하는 인간의 건강에 심각한 문제를 야기한다(Jung, 1996; Kim and Chon, 1993; Park *et al.*, 1995). 하지만, 산림토양의 오염에 대한 이해가 부족하고 폐금속 광산지역의 복원기술이 확립되어 있지 못한 실정이다. Kelly(1988)는 광산주변에 방치되어 있는 폐석 및 광석광물이 화학적 풍화에 노출될 경우, 유해금속을 포함한 부화를 보이는 원소들이 확산될 수 있으며, 이들 원소는 인간에게까지 유해한 영향을 미칠 수 있다고 보고한 바 있다. 또한 폐석 내에 함유되어 있는 유화광물(황철석 등)의 화학적 풍화를 통하여 황산이나 중금속 원소들이 방출되어 주변의 하천수와 지하수, 토양 산성화 및 중금속 오염 등의 환경문제를 야기할 수도 있다(Cidu *et al.*, 1997; Jung and Thornton, 1997). 환경부에 의해 강원, 경기, 전북, 전남 지역에 산재하고 있는 32개의 폐금속광산을 대상으로 토양오염 실태를 조사하였으나, 주요 대상물질이 광미나 폐석 등이 방치되어 있는 산림을 제외한 전답이었고, 오염원으로부터 거리에 따른 오염현황, 토양기준치의 초과여부, 오염도지수 등에 초점을 두고 조사가 이루어졌다. 폐석이 그대로 방치되고 있는 폐탄광지 주변 산림토양의 특성에 대한 연구보고는 폐탄광지 주변 산림의 식생조사를 통한 식생복원에 관해서는 활발한 연구가 이루어지고 있지만(Kim *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2002; Min *et al.*, 2004), 과거 석탄채광이 활발하게 이루어졌던 폐탄광지에 대한 산림토양의 화학적 특성이나 중금속 농도 등에 대한 연구는 그다지 많지 않은 실정이다(Min *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 1998).

폐탄광지는 기존의 산림토양과 달리 폐석 등에 의한 토양오염의 영향으로 식물생육의 관점에서 볼 때 중금속이 고농도로 존재할 뿐만 아니라 토양의 유기물 함량이 낮고 질소와 인의 유효도가 떨어지는 등 불합리한 환경조건을 지니고 있으므로, 산림생태계의 하나의 구성인자인 산림토양의 특성을 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 폐탄광 주변 산림의 복원을 위한 기초자료를 제공하고자 경북 문경지역에 위치한 4개의 폐탄광지를 대상으로 산림토양의 화학적 특성과 중금속 오염현황을 조사한 결과를 보고한다.

II. 재료 및 방법

2.1. 조사지 개황

본 연구는 경상북도 문경시의 4개 폐탄광지(삼창, 봉명, 갑정, 단봉탄광)와 폐탄광의 직접적인 영향을 받지 않는 대조구를 대상으로 하였다(Fig. 1). 대조구는 조사대상지인 폐탄광지로부터 최소 3 km 이상 떨어져 있으며, 임상은 소나무가 우점종이며 그 외 신갈나무, 졸참나무, 굴참나무 등 참나무류가 혼효되어 있는 곳을 선정하였다. 그 동안 환경부, 산업자원부 및 농림수산부 등에서 휴/폐광산의 토양오염, 수질오염 및 주변 생태계에 대한 오염도의 조사, 분석 및 평가 사업이 실시되어 일부 광산에 대한 광해방지사업이 추진되고 있지만, 본 조사지의 산림토양에 대한 정보는 전무한 실정이다. 본 조사지는 동쪽의 태백산맥에서 서남쪽으로 뻗어 나온 소백산맥의 중앙부에 위치하고 있으며 동남부는 석회암 지역으로 카르스트 지형이 발달되어 있으며 지질은 화강암 및 편마암계가 대부분이다. 삼창탄광은 자작나무(*Betula platyphylla* var. *japonica*), 봉명탄광은 아까시나무(*Robinia pseudoacacia*), 산오리나무(*Alnus hirsuta*), 갑정탄광과 단봉탄광은 아까시나

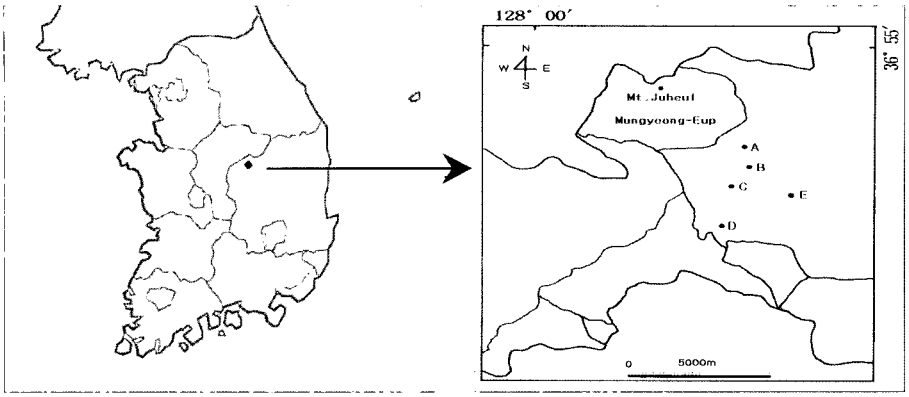

Fig. 1. Location map of the survey area in Mungyeong (A: Samchang, B: Bongmyeong, C: Kabjung, D: Danbong coal mine and E: Control).

Table 1. Site description of the investigated site

Site	Altitude(m)	Aspect	Topography	Slope (°)	Soil depth	Planted species	Planted year
Samchang(A)	210	SW	piedmont	25	shallow	*Betula platyphylla* var. *japonica*	1994
Bongmyeong(B)	250	SW	piedmont	29	shallow	*Robinia pseudoacacia, Alnus hirsuta*	1991
Kabjung(C)	320	WN	piedmont	27	medium	*R. pseudoacacia. A. hirsuta, Pinus rigida, P. koraiensis*	1992
Danbong(D)	280	WN	piedmont	31	medium	*R. pseudoacacia. A. hirsuta, Pinus rigida, P. koraiensis*	1991
Control(E)	220	SW	piedmont	26	medium	-	-

무, 산오리나무, 리기다소나무(*Pinus rigida*), 잣나무(*P. koraiensis*)가 복구수종으로 1991-94년에 걸쳐 식재되었다. 이들 수종은 산지개발에 따른 산지절개지 등 사방사업에 주로 이용되는 수종들이다. 문경시의 연평균 기온은 6.7°C, 연강수량은 1,401 mm로 나타났으며, 본 조사지의 개황은 Table 1과 같다.

2.2. 토양채취 및 분석

본 조사대상지인 경북 문경지역의 단봉탄광, 봉명탄광, 삼창탄광, 갑정탄광의 폐탄광지역과 대조구 지역에서 낙엽층을 제거한 후 0~10 cm 깊이의 표토를 대상으로 각 조사지에서 7개의 시료를 채취하여 풍건 후 20 mesh 체로 친 후 분석용 시료로 이용하였다. 토양의 화학적 성질분석 항목에 대해 토양 pH는 pH meter, 유기물 함량은 Tyurin법, 유효인산(available P_2O_5)은 Lancaster법, 전질소는 H_2SO_4로 완전분해 후 Kjeldahl 증류법으로 분석하였다. 치환성양이온(Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+)은 1N ammonium acetate(pH 7.0)로 침출하였다. 각 조사지별로 채취된 7개의 토양시료를 대상으로 한 토양 중 중금속 함량은 0.1N HCl로 침출하여 10개 원소(Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn)를 유도결합 플라즈마 분광계(Atomscan25, USA)로 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 폐탄광지역 산림토양의 화학적 성질

경북 문경지역 폐광산 중 삼창탄광, 갑정탄광, 단봉탄광, 봉명탄광과 대조구의 표토에서 채취한 산림토양의 화학적 성질에 대한 결과를 살펴보면(Fig. 2), 먼저 토양 pH의 경우, 삼창탄광(A) 6.76, 갑정탄광(B) 6.16, 단봉탄광(C) 5.30, 봉명탄광(D) 5.63 그리고 대조구(E) 5.23으로 나타났다. 폐광산 지역의 산림토양이 산성화되어 있을 것이라는 일반적인 예상과는 조금 다르게 나타났다. Kim *et al.*(1999)은 전국적으로 산재하는 16개의 휴·폐광산 지역을 대상으로 한 산림토양

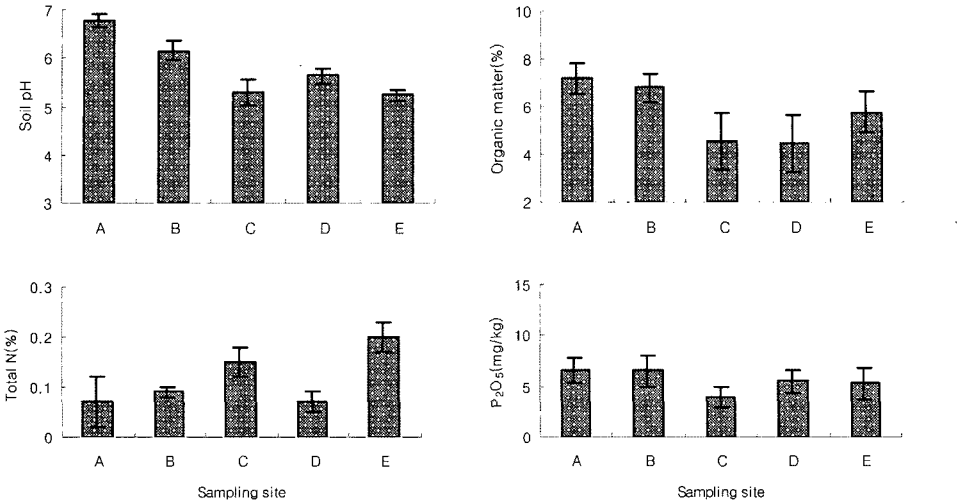

Fig. 2. Soil pH and contents of organic matter, total N and available P_2O_5 from the abandoned coal mine lands in Mungyeong.

의 이화학적 특성에서 pH가 중성 혹은 약알카리성을 나타내는 지역이 9개 지역이라고 보고한 바 있으며, Ok *et al.*(2003)은 경기도 광명시에 소재하고 있는 시흥광산에 대한 조사에서 산림토양 pH는 7.5~8.3의 범위를 나타내었다고 보고한 바 있다. 본 조사지인 폐광산 지역 산림토양의 pH가 대조구 지역 산림토양의 pH보다 높은 것으로 나타났으며, 이것은 토양산성화로 인한 식물생육 저해는 염려할 만한 수준은 아닌 것으로 판단되며, 이는 그 동안 중금속 토양오염에 대한 대책으로 석회 및 규산 등의 처리가 이루어졌기 때문으로 사료된다. 유기물함량은 A 지역 7.19, B 지역 6.81, C 지역 4.52, D 지역 4.46%, 그리고 D 지역이 5.77%의 유기물을 함유하고 있는 것으로 나타나 우리나라 산림토양의 평균 유기물함량 4.49%(Jeong *et al.*, 2002)보다 유사하거나 높은 것으로 조사되었다. Kim *et al.*(1999)은 19개 휴·폐광산지역의 산림토양 중 유기물함량은 0.29~11.51%로 지역에 따른 차이가 심하며, 그 중에서 8% 이상의 높은 유기물함량을 나타낸 지역은 석탄을 채굴하기 위한 광산이었다는 것을 보고한 바 있다. 특히 A와 B 지역처럼 산림토양 중 유기물함량이 높게 나타난 것은 본 조사지역들도 과거 주로 석탄 채굴이 활발하게 이루어졌던 것으로 보아 유기물함량 분석 시 폐석으로부터의 무기탄소가 방출되어 분석결과에 영향을 미쳤을 것으로 추정된다.

산림토양 중 전질소함량은 폐탄광지역이 대조구의 0.20%보다 낮은 0.07~0.15%의 범위를 나타내었다. 본 조사지인 문경지역의 폐탄광지는 우리나라 산림토양의 평균 전질소 함량 0.19%(Jeong *et al.*, 2002)보다 낮은 것으로 조사되었다. 또한 강원도 태백시의 보림, 성원, 협정, 대동탄광의 0.18~0.27%(Min *et al.*, 2004), 동해탄광 0.17%와 성원탄광 0.27%(Min, 2004)보다도 낮은 것으로 나타났다. 토양 중 질소 함량과 관련하여 Tilman(1987)은 토양 중 질소 함량의 증가는 그 지역의 식물종 다양성을 감소시켜 특정 종에 의한 우점도가 증가한다고 보고하였으며, Aber *et al.*(1989)은 토양 중 질소함량이 과잉상태가 되면 산림을 구성하고 있는 수목의 영양밸런스가 무너져 산림이 쇠퇴할 가능성이 있다고 보고한 바 있다. 본 조사지는 모든 지역에서 0.20% 이하의 전질소함량을 나타내어 산림토양 중 질소함량 과다로 인한 수목 피해는 없을 것으로 판단된다. 유효인산 함량은 C 지역(단봉탄광)이 3.94 mg/kg으로 가장 낮게 나타났으나 그 외 지역은 5.25~6.54 mg/kg으로 분석되었다. 산림토양의 유효인산 함량은 토양 pH와 밀접한 관계가 있으며 pH가 낮을 경우 인산의 불용화에 의해 유효인산의 함량이 낮은 것으로 알려지고 있다(진현오 등, 1994). 본 폐탄광지역도 토양 pH와 유효인산 간에는 r=0.83(p<0.01)의 상관관계를 나타내어 유효인산 함량은 토양 pH와 밀접한 관계가 있다는 일반적인 경향과 일치하는 것으로 나타났다. 석탄 채광 후 폐광된 지역의 산림토양 중 평균 유효인산 함량 1.19~20.83 mg/kg(Kim *et al.*, 1999)의 범위 내에 있는 것으로 나타났으나, Lee

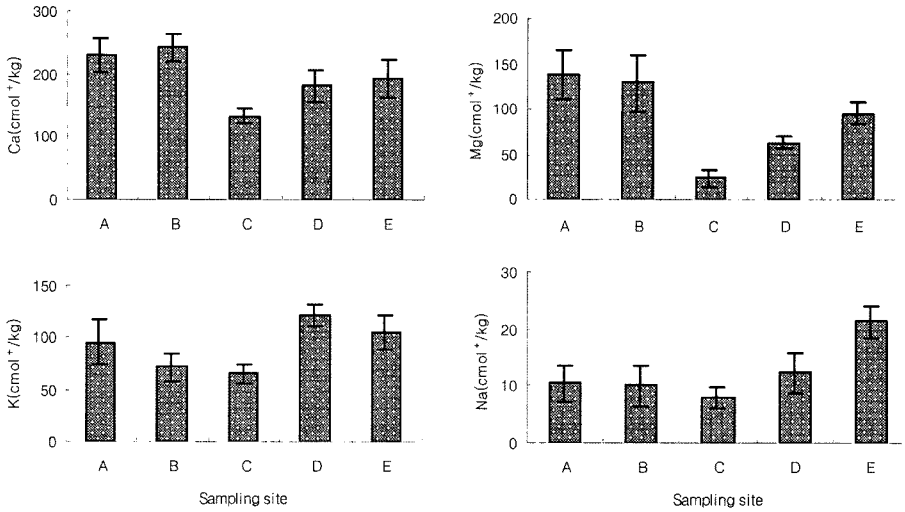

Fig. 3. Contents of exchangeable cation of soil from the abandoned coal mine lands in Mungyeong.

Table 2. Heavy metal contents of forest soil in investigated sites

Site*	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
	ppm									
A	612.4 (45.2)	2.20 (0.38)	0.19 (0.05)	0.11 (0.02)	7.9 (0.59)	49.12 (4.19)	90.52 (4.51)	0.96 (0.16)	7.16 (1.53)	9.92 (1.67)
B	397.3 (29.8)	2.28 (0.45)	0.19 (0.02)	0.14 (0.02)	18.4 (1.42)	43.16 (3.46)	97.66 (6.82)	2.01 (0.24)	7.84 (2.21)	4.69 (1.14)
C	916.5 (56.7)	1.25 (0.29)	0.16 (0.06)	0.18 (0.04)	16.6 (1.29)	39.24 (3.57)	99.94 (5.94)	0.41 (0.13)	4.68 (1.30)	1.98 (0.31)
D	546.1 (42.5)	1.83 (0.61)	0.14 (0.04)	0.25 (0.03)	19.6 (2.41)	43.13 (3.59)	29.07 (3.27)	0.39 (0.08)	6.84 (0.89)	2.93 (0.59)
E	344.4 (31.9)	1.25 (0.57)	0.10 (0.02)	0.10 (0.01)	6.3 (1.31)	23.85 (3.14)	22.53 (2.59)	0.24 (0.04)	2.82 (0.46)	1.50 (0.48)

*Refer to Table 1 for A, B, C, D and E of locations

(1981)의 동일한 산림지역에서도 유효인산의 함량은 변이가 아주 크다는 보고와는 일치하지 않는 것으로 나타났다. 또한 대조구와 폐탄광지의 산림토양 내 유효인산 함량이 조사지간에 큰 차이가 없는 것도 Finkelman (1981)의 석탄 속에는 P가 많이 함유되어 있어 일반 산림에 비해 폐탄광지의 인산함량이 높을 것이라는 보고와도 일치하지 않는 것으로 나타났다.

유효인산 함량과 마찬가지로 토양 pH와 밀접한 관계가 있는 것으로 알려지고 있는 치환성양이온(Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+})을 살펴보면(Fig. 3), Ca^{2+}의 경우 C 지역이 132.1 $cmol^{+}/kg$으로 가장 낮았으며, A 지역이 229 $cmol^{+}/kg$로 가장 높은 함량을 나타내었다. 본 조사지역의 산림토양 중 Ca^{2+} 함량은 강원도 태백시 폐탄광지역의 370.6~388.7 $cmol^{+}/kg$(Min *et al.*, 2004)에 비해 낮은 함량을 나타내었다. 토양 pH와 Ca^{2+} 함량 관계에서도 r=0.76(p<0.01)의 상관관계가 성립하는 것으로 나타났다. 치환성양이온 함량은 A와 B 지역이 Ca^{2+}>Mg^{2+}>K^{+} >Na^{+}로 나타나 산림토양의 치환성양이온 함량은 Ca^{2+}>Mg^{2+}>K^{+}>Na^{+} 순으로 감소한다는 보고(河田弘, 1989)와 일치하는 것으로 나타났으나, C, D, E 지역은 K^{+}이 Mg^{2+} 함량보다 높은 것으로 나타나 산림토양의 일반적인 경향과는 일치하지 않는 것으로 분석되었다.

3.2. 폐탄광지역 산림토양의 중금속 함량

경북 문경시 지역의 폐탄광 산림토양의 중금속 함량

을 Table 2에 나타내었다. 현재 우리나라에서 토양오염의 기준이 되는 중금속은 Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr으로 지정되어 있는데, 본 조사에서는 Hg 함량은 분석하지 않았고 Al, Fe, Mn, Ni, Zn을 추가적으로 분석하였다. 산림토양 Al의 경우 폐탄광지에서는 397.3~916.5 ppm로 조사지에 따라 차이가 큰 것으로 나타났으며, 대조구에서는 344.4 ppm으로 측정되었다. 다른 조사지에 비해 토양 pH가 다소 낮은 C(단봉탄광)와 E(대조구) 지역의 토양 중 Al 함량이 높은 것은 산림토양 내에 존재하는 Al의 용해도는 토양산성화가 진행될 때 증가한다는 보고(Lindsay, 1979)와도 일치하는 경향이었다. Ilvesniemi(1992)와 Thornton *et al.* (1989)은 식물에 대한 Al의 작용에 대해 토양 내 양분의 농도가 높으면 Al의 농도가 높아도 수목은 저항력을 가질 수 있으나, 양분이 충분하지 못하면 Al 농도가 낮아도 Al 독성이 나타난다고 보고한 바 있으며, 토양의 pH가 낮아지면서 가용성 Al의 함량이 증가하여 식물의 뿌리생장을 저해시켜 식물 뿌리의 수분 및 양분흡수가 제대로 이루어지지 않아 최종적으로 지상부의 생장에 악영향을 초래할 수도 있다(Hutchinson *et al.* 1986). 특히 Al은 자체의 독성뿐만 아니라 Ca과 Mg와 같은 양이온에 대한 식물 뿌리의 흡수기능을 경쟁적으로 저하시키며 양이온의 흡수를 저해시키는 정도가 가장 강한 것으로 알려지고 있어(Stienen and Bauch, 1988), 추후 토양 중 양분 농도와 Al의 관계에 대해서도 연구가 필요할 것으로 사료된다. Cd 함량은 대조구인 D 지역에서 0.10 ppm이었으나 폐탄광지에서는 이보다 높은 0.14~0.19 ppm으로 분석되었다. 본 조사지인 폐탄광지역의 Cd 함량은 산림토양에서의 Cd 함량은 0.35 ppm 정도라는 Bowen(1979)의 보고와 비오염지역 토양은 보통 1 ppm 이하의 Cd을 함유한다는 보고(Alloway, 1990)보다 낮은 것으로 나타나 본 조사지인 폐탄광지의 Cd 오염은 없는 것으로 판단된다. 또한 폐금속 광산의 Cd 함량 0.8 ppm(전효택 등, 1997)보다도 낮은 것으로 분석되었다.

Cu 함량은 전 조사지가 6.3~19.6 ppm 범위 내에 있는 것으로 분석되었다. 본 조사지의 Cu 함량은 Min *et al.*(1997)의 충남 금산지역 폐탄광지에 대한 토양 중금속 조사에서 Cu 함량이 21 ppm이었다는 보고보다 다소 낮은 수치를 나타내었다. 또한, 비오염토양의 Cu 함량 30 ppm(Bowen, 1979)과 금속광산의 주변 토양의 Cu 함량 26.4 ppm(Jung, 1999) 보다도 낮았으며, Cu는 지구화학적 측면에서 이동도가 비교적 낮은 원소에 속하기 때문에 본 조사지로부터의 주위 토양에 대한 오염의 염려는 아주 적은 것으로 판단된다. 본 조사지의 Fe 함량은 E 지역 23.9 ppm, 폐탄광지인 A~D 지역 39.2~49.1 ppm으로 폐탄광 지역이 대조구 지역의 산림토양 중 Fe 함량보다 높은 것으로 나타났다. 본 조사지의 Fe 함량은 Ok *et al.*(2003)의 폐아연 광산을 대상으로 한 중금속 함량 조사에서 Fe 함량은 최대 140 ppm, 최소 30.6 ppm으로 평균 91.5 ppm이었다는 보고보다도 다소 낮은 함량을 나타내었다. Mn 함량은 대조구인 E 지역 22. 5 ppm, 폐탄광지는 29.1~99.9 ppm으로 나타나 공단지역의 흑색셰일(shales)을 모암으로 하는 산림토양의 Mn 함량 7.97~45 ppm(Lee *et al.*, 2004) 보다 높은 경향이었으나 폐아연광산의 Mn 함량 56.1~95.1 ppm(Ok *et al.*, 2003)과는 유사한 것으로 나타났다. Mn은 Mg와 경쟁적으로 흡수되기 때문에 토양 내에 과다로 존재할 경우 식물체 뿌리의 Mg 흡수를 저해시키며(Duncan *et al.*, 1991), 양이온의 흡수를 저해시키는 정도가 강한 것으로 알려지고 있기 때문에(Alva and Edwards, 1990; Ohno *et al.*, 1988) Mn에 의한 식물체의 Mg 흡수 저해와의 관계도 밝혀져야 할 것이다. Ni과 Pb 함량은 전 조사지에서 각각 0.24(E)~2.01 ppm(B), 2.82(E)~7.84 ppm(B)으로 조사되었다. Ni 함량은 충남 금산지역 폐탄광지의 44 ppm(Min *et al.*, 1997)과 폐아연광산 1.80 ppm(Ok *et al.*, 2003) 보다도 낮은 것으로 조사되었다. Zn 함량은 대조구인 E 지역 1.50 ppm, 폐탄광지 1.98~9.92 ppm으로 지역에 따라 차이가 큰 것으로 나타났다. Kim *et al.*(1999)과 Min *et al.*(1997)의 폐탄광지 산림토양 중 Zn 함량이 각각 4.50~344.4 ppm, 81 ppm이었다는 보고와 비교하면 본 조사지 산림토양 중 Zn 함량은 아주 낮은 것으로 조사되었다.

식물체에 대한 중금속의 영향은 중금속의 총량보다도 형태에 의한 영향이 더 강하다고 알려지고 있다(Yoo *et al.*, 1985; Lim *et al.*, 1991). 또한 de Matos *et al.*(2000)은 산림토양 내 중금속의 이동성은 토양화학성에 의존하며 Cd와 Zn 함량은 토양 내 Ca 함량과 그리고 Cu와 Pb 함량은 CEC 및 유기물함량과 밀접한 관계가 있다고 보고한 바 있으며, Martinez and Motto(2000)는 토양 pH는 토양 내에 존재하는

중금속의 유효도 및 식물독성을 좌우하는 가장 큰 인자라고 보고한 바 있다. 그러므로 토양 pH가 다른 조사지에 비해 다소 낮은 것으로 조사된 C 지역의 산림토양 중 중금속 함량이 중금속 원소에 따라 약간의 차이는 있으나 다른 조사지에 비해 전체적으로 중금속 함량이 높지 않은 것으로 나타나 C 지역의 경우 중금속이 식물에 대한 유효도가 높은 형태로 존재하여 식물생육에 영향을 미칠 수 있을 것으로 추정된다. 산림토양 중 중금속의 형태별 분포는 주로 중금속 자체의 특성과 토양성질의 영향을 받으며, 이에 관여하는 토양의 성질로는 pH, 유기물함량, 산화환원전위 및 다른 공존이온 등으로 알려져 있다(Lim *et al.*, 1991). 현재 우리나라에서 토양오염의 기준이 되는 중금속 중에서 본 연구에서 분석된 As, Cd, Cu, Pb 함량은 토양환경보전법 상의 토양오염 우려기준 As 6, Cd 1.5, Cu 50, Pb 100 mg/kg을 초과하는 조사지는 없는 것으로 분석되었으며, 본 연구에서 분석된 모든 중금속 함량에 대해 원소별로 함량의 차이의 정도는 있으나 대조구 지역보다 폐탄광지의 산림토양 중 중금속 함량이 많은 것으로 나타났다.

본 연구결과는 산림토양 중 중금속 함량이 0.1N HCl 침출법으로 분석되었기 때문에 산림토양 중 중금속의 동태나 식물에 대한 유효도를 직접 나타내는 것은 아니다. 산림토양 중에 존재하는 중금속은 여러 종류의 화학적 형태로 존재하고 있으며 이들의 동태와 식물에 대한 작용도 각기 다르게 나타나므로 본 연구 대상지인 폐탄광지와 같이 중금속으로 오염된 토양을 식물을 활용하여 정화하고자 한다면 산림토양 중 중금속의 동태나 식물유효도와 관련된 추가적인 연구 및 그러한 토양환경에 대한 내성이 강한 식물종을 선발하는 등의 연구가 병행되어야 할 것으로 사료된다. 또한 폐탄광지에 인접해 있는 산림의 경우 지금까지는 주로 토양오염에 의한 수목의 피해에 대해서만 중요시되어 왔지만 토양용액의 화학적 특성악화도 산림쇠퇴의 주원인으로 작용할 수 있을 것으로 판단된다. 본 조사지인 경북 문경지역의 폐탄광지의 산림토양은 중금속에 의한 토양오염의 피해는 미약하여 직접적인 피해는 나타나지 않은 것으로 판단되나 대조구 지역에 비해 폐탄광지 산림토양 내 중금속 함량이 높게 나타난 것으로 보아 향후 중금속에 의한 토양오염이 식물에 미칠 수 있는 직접적인 피해에 대해서도 연구되어야 할 것으로 사료된다.

IV. 적 요

본 연구에서는 폐탄광 주변 산림의 복원을 위한 기초자료를 제공하고자 경북 문경지역에 위치한 폐탄광 중 4개의 광산을 대상으로 산림토양의 화학적 특성과 중금속 오염현황을 조사한 결과를 보고한다. 폐탄광지 산림토양의 pH는 5.30~6.76의 범위에 있었으며, 대조구 지역의 토양 pH는 5.23이었다. 폐탄광지역의 산림토양 중 유기물과 전질소 함량은 각각 4.46~7.19%, 0.07~0.15%의 범위에 있는 것으로 조사되었다. 평균 유효인산 함량은 삼창탄광 6.54, 봉명탄광 6.52, 갑정탄광 3.94, 단봉탄광 5.45 그리고 대조구 5.25 mg/kg으로 토양 pH와 정의 상관을 가지는 것으로 나타났다. 폐탄광지역의 치환성양이온 평균 함량은 Ca 196.1, Mg 88.7, K 88.2 그리고 Na 10.2 $cmol^+$/kg로 나타났으며, 그 범위는 Ca 132.1~242.1, Mg 24.2~138.6, K 64.9~120.8 그리고 Na 8~12.2 $cmol^+$/kg에 있는 것으로 조사되었다. 대조구 지역의 Ca, Mg, K, Na의 평균 함량은 각각 192.8, 95.8, 104 and 21.2 $cmol^+$/kg로 조사되었다. 폐탄광지 산림토양의 중금속(Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) 함량은 대조구 산림토양보다 높은 것으로 분석되었다. 특히, Al, Mn 그리고 Pb의 함량은 대조구에 비해 폐탄광지가 아주 높은 것으로 나타났다. 폐탄광지 산림토양의 Al 함량은 397~917 ppm으로 나타나 식물생육에 영향을 미칠 수 있을 것으로 추정된다. 그러므로 과거 석탄채굴이 활발하게 이루어졌던 폐탄광지에 대해서는 환경문제를 최소화하기 위하여 산림토양을 대상으로 한 적절한 관리가 필요할 것으로 추정된다.

인용문헌

진현오, 이명종, 신영오, 김정제, 전상근, 1994: 삼림토양학. 향문사, 325pp.

河田弘, 1989: 森林土壤學概論. 博友社, 399pp.

전효택, 안주성, 정명채, 1997: 국내 일부 함금석영맥광산주변에서의 잠재적 독성중금속들의 환경오염 특성. 박회인 교수 정년퇴임기념논문집, 182-188.

Aber, J. D., K. J. Nadelhoffer, P. Steudler, and J. M. Melillo, 1989: Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience* **39**. 378-386.

Alloway, B. J., 1990: *Heavy metals in soils.* Blackie and Son. Glasgow., 350pp.

Alva, A. K. and D. G. Edwards, 1990: Response of lupin cultivates to concentration of calcium and activity of aluminum in dilute nutrient solutions. *Journal of Plant Nutrition* **13**, 57-76.

Bowen, H. J. M., 1979: *Environmental chemistry of the elements.* Academic Press, New. York, 333pp.

Cidu, R., R. Caboi, L. Fanfani, and F. Frau, 1997: Acid drainage from sulfides hosting gold mineralization. *Environmental Geology* **30**, 231-237.

de Matos, A. T., M. P. F. Fontes, L. M. da Costa, and M. A. Martinez, 2000: Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils. *Environmental Pollution* **111**, 429-435.

Duncan, R. R., R. E, Wilkinson, L.M. Shuman, and E. L. Ramseur, 1991: *Acid soil tolerance mechanisms juvenile stage sorghum(Sorghum bicolor).* In Plant-soil interactions at low pH. Kluwer Academic, Netherlands., 1037-1045.

Finkelman, R. B., 1981: models of occurrence of trace elements in coal, US Geology Survey Open-file Rep. 81-99, 312pp.

Hutchinson, T. C., L. Bozic, and G. Munoz-Vega, 1986: Response of five species of conifer seedlings to aluminum stress. *Water, Air, and Soil Pollution* **31**, 283-294.

Ilvesniemi, H., 1992. The combined effect of mineral nutrition and soluble aluminum on *Pinus sylvestris* and *Picea abies* seedlings. *Forest Ecology and Management* **51**, 227-238.

Jeong, J. H., K. S. Koo, C. H. Lee, and C. S. Kim, 2002: Physico-chemical properties of Korean forest soils by regions. *Journal of Korean Forest Society* **91**, 694-700.

Jung, M. C., 1996: Cadmium, Cu, Pb and Zn contamination of stream sediments and waters in a stream around the Dalsung Cu-W mine, Korea. *Economic and Environmental Geology* **29**, 305-313.

Jung, M. C., 1999: Investigation on soil contamination and its remediation system in the vicinity of abandoned Au-Ag mine in Korea. *Economic and Environmental Geology* **32**(1), 73-82.

Jung, M. C., and J. Thornton, 1997: Environmental contamination and seasonal variation of metals in soils, plants and waters in the paddy fields around a Pb-Zn mine in Korea. *The Science of the Total Environment* **198**, 105-121.

Kelly, M. 1988. *Mining and the freshwater environment.* Elsevier Science Pub. London, 231pp.

Kim, B. H., K. H. Kim, H. J. Kim, and D. H. Kim, 2000: Plant community survey and analysis for restoration of vegetation in coal-mined spoil lands -A case study of Hamtae coal-mines spoil lands in Taebaek city, Kangwondo-. *Journal of the Korea Society for Environmental Restoration and Revegetation Technology* **3**, 33-42.

Kim, H. J., B. H. Kim, and D. H. Kim, 2000: Research for development of restoration and revegetation technology in the abandoned coal-mine lands. *Journal of the Korea Society for Environmental Restoration and Revegetation Technology* **3**, 43-51.

Kim, M. H., S. H. Song, E. S. Min, I. S. Jang. 1998: Alkali and metal element concentration in soil and plant from Daesung coal mine in Keumsan, Chungnam. *Korean Journal of Ecology* **21**(5), 457-463

Kim, S. H., and H. T. Chon, 1993: Contamination of heavy metals in soil in the vicinity of the Samboo Pb-Zn-Barite mine. *The Korean Society for Geosystem Engineering* **30**, 228-237

Kim, J. G., S. K. Lim, S. H. Lee, C. H. Lee, and C. Y. Jeong, 1999: Evaluation of heavy metal pollution and plant survey around inactive and abandoned mining areas for phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **18**(1):28-34.

Lee, J. C., S. H. Han, S. S. Jang, J. H. Lee, P. K. Kim, J. S. Hur, and K. J. Yum, 2002: Selection of indigenous tree species for the revegetation of the abandoned coal mine lands in Taebaek area. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**, 86-94.

Lee, S. W., 1981: Studies on forest soils in Korea(•±). *Journal of Korean Forest Society* **54**, 25-35.

Lee, W. Y., J. E. Yang, C. J. Park, Y. S. Zhang, and Y. S. Kim, 2004: Characteristics of soil solution extracted from forest soils adjacent to heavy industrial complexes. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **37**(3), 184-191.

Lim, S. K., Y. J. Lee and H. J. Choi, 1991: Effects of soil solution pH on adsorption and desorption of Cd, Cu and Zn by soils. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **10**(2), 119-127.

Lindsay, W. L., 1979: *Chemical equilibria in soils.* Wiley-Interscience, New York., 420pp.

Martinez, C. E. and H. L. Motto, 2002: Solubility of lead, zinc and copper added to mineral soils. *Environmental Pollution* **107**, 153-158.

Min E. S., M. H. Kim, and S. H. Song, 1997: Physio-chemical characteristics of soil, stream sediment and soil water contaminated by the abandoned coal mine in Keumsan, Chungnam. *Journal of Korean Forest Society* **86**(3), 324-333

Min, J. G., 2004: A study on changes of vegetation, soil and leachate in the abandoned coal mine areas. Ph. D. Dissertation, Gyeongsang National University, 91pp.

Min, J. G., J. H. Lee, S. Y. Woo, J. K. Kim, and H. S. Moon, 2004: Vegetation structure of some abandoned coal mine lands in Taebaek area, Gangwon Province. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**(4), 256-264.

Ohno, J., E. L, Sucoff, M. S, Erich, P. R, Bloom, C. A. Buschena, and R. K. Dixon, 1988: Growth and nutrient

content of red spruce seedlings in soil amended with aluminum. *Journal of Environmental Quality* **17**, 666-672.

Ok, Y. S., S. H. Kim, D. Y. Kim, H. N. Lee, S. K. Lee, and J. G. Kim, 2003: Feasibility of phytoremediation for metal-contaminated abandoned mining area. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **36**(5), 323-333.

Park, C. Y., Y. S. Park, and Y. J. Jeong, 1995: Contamination of heavy metals in soil in the Kwangyang mine area. *The Korean Society for Geosystem Engineering* **32**, 163-174.

Stienen, H., and J. Bauch, 1988: Element content in tissue of spruce seedlings from hydroponic cultures simulating acidification and deacidification. *Plant Soil* **106**, 231-238.

Thornton, F. E., M. Schaedle, and D. J. Raynal, 1989: Tolerance of red oak and American and European beech seedlings to aluminum. *Journal of Environmental Quality* **18**, 541-545.

Tilman, D., 1987: Secondary succession and the pattern of plant dominance along experi- mental nitrogen gradients. *Ecological Monographs* **57**, 189-214.

Yoo, S. H., K. H. Kim, H. N. Hyun, 1985: Sequential extraction of cadmium, zinc, copper and lead in soils near zinc-mining sites. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **3**(2), 71-77.