

忠南 錦山 廢炭鑛地域의 土壤, 河床堆積物 및 土壤水의 理化學的 特性¹
閔一植² · 金明姬³ · 宋錫煥⁴

Physio-Chemical Characteristics of Soil, Stream Sediment
and Soil Water Contaminated by the Abandoned Coal Mine
in Keumsan, Chungnam¹

Ell Sik Min², Myung Hee Kim³ and Suckhwan Song⁴

要 約

忠南 錦山郡 福壽面 廢炭鑛地域 土壤의 理化學的 特性과 廢炭鑛 및 廢鑛石더미에서 유출되는 酸性 鑛山廢水의 유입으로 인한 河床堆積物 및 土壤水의 污染實態를 조사하였다. 廢炭으로 덮혀 있는 지역은 土壤層位가 발달하지 않았으며, 容積密度가 1.83g/cm³로 매우 높았다. 土壤酸度는 炭質에 의해 污染을 받은 地域이 pH 4.01-4.11로 酸性을 나타냈으며 非污染地域은 pH 5.03-5.13으로 나타났다. 土壤과 河床堆積物의 重金屬들중 As, Cr, Ni, Mo, Ba 등은 廢炭의 영향을 받은 污染地域이 廢炭의 영향을 받지 않은 非污染地域(落葉松 植栽地)에 비하여 公히 높은 含量을 나타냈으며 특히 As와 Mo가 높았다. 土壤 및 河床堆積物의 主元素 및 微量元素의 構成別 相對的인 比에서 K₂O/Na₂O는 炭質物을 많이 含有하고 있는 土壤 및 污染地域의 河床堆積物내에서 높았고, MgO+Fe₂O₃+TiO₂/CaO+K₂O는 污染地域에서 相對的인 比가 낮았다. 土壤水의 pH는 污染地域이 3.4-4.2로 强酸性이었으며, 土壤의 酸性化로 Na⁺, K⁺, Mg⁺² 등 陽이온의 溶脫이 촉진되어 土壤의 緩衝能力이 낮았다.

ABSTRACT

The research has been made for the effects of the pollution by the abandoned coal mine drainage on the physical and chemical properties of soil, stream sediment and soil water. The soils overspread by the abandoned coal don't develop solum and the bulk density is 1.83g/m³, compared with 1.14-1.38g/m³ in the other forest soils. The soil pH range in coal bearing region is from 4.01 to 4.11 and non-coal bearing soil range is from 5.03 to 5.13. Heavy metals such as As, Cr, Ni, Mo and Ba of coal bearing soils and polluted stream sediments have larger concentration than those of non-coal content and non-polluted. Especially As and Mo concentrations are largely high in coal bearing. The relative ratios K₂O/Na₂O of geochemical elements are higher in coal bearing soil and polluted stream sediments than those of non-coal bearing soils and non-polluted stream sediments as well as black shales of the Changri Formation. However, MgO+Fe₂O₃+TiO₂/CaO+K₂O are the opposite trends, so that the ratios are lower in the polluted regions. The soil water pHs in the polluted regions are the strong acid(pH3.4-4.2) and buffer capacity of the polluted soil is low because cations such as Na⁺, K⁺, Mg⁺² are leached by the acidification.

Key words : acid mine drainage, black shale, soil, stream sediment, soil water, heavy metal, relative ratio

¹ 接受 1997年 5月 20日 Received on May 20, 1997.

² 中部大學校 山林資源學科 Dept. of Forest Resource Science, Joong-Bu Univ., Chungnam 312-940, Korea.

³ 中部大學校 園藝學科 Dept. of Horti. Cult. Science, Joong-Bu Univ., Chungnam 312-940, Korea.

⁴ 高麗大學校 地球環境科學科 Dept. of Earth and Environmental Science, Korea Univ., Seoul 136-701

緒 論

우리나라 대부분의 炭鑛들은 1989년부터 1995년까지 정부의 石炭産業 合理化 事業 시행으로 廢鑛 또는 休鑛되었다. 가행광산은 물론이고 이들 休·廢鑛山에 의한 環境問題는 鑛山 주변 環境을 汚染 및 荒廢化시키기도 하며 주변의 農耕地 生態系와 住居環境 및 施設物 安全에 심각한 영향을 미치고 休·廢鑛 주변 住民의 民원 발생을 야기시키고 있다.

이들 廢鑛山은 砂防事業 실시 후 山林 復舊가 이루어진 곳도 있으나 대부분 그 치유가 불완전할 뿐만 아니라 거의 放置된 상태이다. 休廢鑛山 環境汚染 문제중 가장 대표적인 것은 廢坑口 및 鑛山廢棄物에서 유출되는 酸性鑛山廢水(Acid Mine Drainage : AMD)이다. 이러한 鑛山廢水는 地下水나 酸化鑛物의 酸化作用에 의해 발생하며, pyrite 및 pyrrhotite와 같은 물질이 충분히 존재하지 않는 경우에는 酸性을 띠게 되어 주변 水系의 酸性화와 주변 物質과의 反應으로 인한 重金屬의 溶出 및 溶存性 鹽의 增加로 인해 生態系의 破壞를 야기한다(류재근, 1996).

廢炭鑛의 汚染은 石炭 成分과 관련이 있는데, 石炭은 還元的 環境하에서 오랜 기간 밀폐되어 형성된 炭化水素化合物로 黃鐵鑛을 포함하고 있다. 채광활동에 의하여 黃鐵鑛이 空氣중에 노출되면 中性的 pH에서는 공기중 또는 수중의 酸素에 의해 자연적인 酸化反應이 일어나고, pH 4.5 이하에서는 鐵-黃酸化微生物의 酸化作用에 의해 많은 양의 黃酸이 생성된다. 이렇게 생성된 黃酸에 의해 鑛山廢水는 강한 酸性을 띠게 되며, 不溶性의 水酸化鐵化合物과의 褐色沈澱物(Yellow Boy)을 함유한다(Alexander, 1977 ; 유재영 등, 1994 ; 홍영국, 1996)

鑛山産業의 사양화로 방치된 廢鑛들에 대한 環境汚染 문제를 해결하기 위해서는 鑛山廢水의 특성을 파악하여 費用經濟的인 處理法을 선택하고 개발함으로써 産業化에 따른 문제를 해결하는 것이 필요하다.

본 研究는 忠南 錦山郡 福壽面에 위치한 大成炭鑛의 廢水流출에 의한 土壤, 河床堆積物, 土壤水의 汚染實態를 조사하여, 향후 山林復舊와 廢鑛山의 復舊 效率를 높이기 위한 基礎 資料를 제

공하는데 있다.

材料 및 方法

1. 研究對象地의 位置 및 概況

본 研究地域(그림 1)은 행정구역상으로는 忠南 錦山郡 福壽面 壽永里인 北緯 36° 09' -36° 10', 東經 127° 22' -127° 24'에 위치한 지역으로 1960년대 중반부터 石炭開發이 시작되어 70년대 말에서 80년대 전반에 걸쳐 활발히 개발되었으나 80년대 후반 石炭産業 合理化 政策에 의하여 廢鑛되었다. 그러나 그 후 충분한 保護處理가 되지 않아 酸性廢水에 의하여 炭鑛 주변의 土壤 및 河川이 크게 汚染되어 있다. 이 지역은 주변 마을인 壽永里 마을 중간에서 南쪽으로 뻗은 작은 골과 南西쪽으로 뻗은 큰 골로 나뉘어 지는데 현재 큰 골을 따라 산재해 있는 炭田들의 흔적이 다수 발견되고 있다. 큰 골 최정상부지역은 다른 炭田들이 坑에 의해 개발된 것과는 달리 露天鑛으로 개발되었다.

이 큰 골의 溪谷에는 2개의 地表水가 흘러내려 오는데 鑛山廢水가 흘러나오는 溪谷을 따라 上流에 소규모 沼澤池 하나와 2개의 地表水가 합쳐지는 溪谷 下部, 즉 마을 바로 윗 부분에 비교적 큰 沼澤池 하나가 위치하고 있다. 後者의 沼澤池는 해방전 日本人들에 의해 農業用水 公급을 위해 만들어졌던 것이었으나 80년대 초반 활발한 炭鑛의 개발로 河川水의 汚染에 따른 민원과 함께 다시 증축되었다. 이 沼澤池의 물은 여름철 洪水시나 그 외의 기간동안 滿水가 되면 독에서 넘쳐 마을 위쪽의 논과 밭 주변을 흘러 大田 西部地域을 관통해서 흐르는 柳等川과 합류한다. 마을의 住民數는 鑛山 稼行시 많을 때는 500여명이 되었지만 現在는 200여명 정도가 居住하며, 住民들의 食水源은 炭鑛의 개발시 작은 골에 설치한 60여m 깊이의 管井으로부터 얻고 있다.

廢水의 影響을 받지 않은 溪谷의 地表水에서는 淸淨水에서 棲息하는 가재(*Cambaroides similis*)나 중테기(*Sarcocheilichthys czerskii*)와 같은 물고기가 발견되나, 두개의 沼澤池 및 炭鑛廢水의 影響을 받은 溪谷에서는 藻類만이 주로 발견되었다. 한편 廢水의 流入에 의하여 鐵에 의한 褐色沈澱 現象 및 알루미늄에 의한 白色沈澱物의 生成으로 溪谷바닥과 周邊土壤은 赤色에서 白色으로 피복되어 있다.

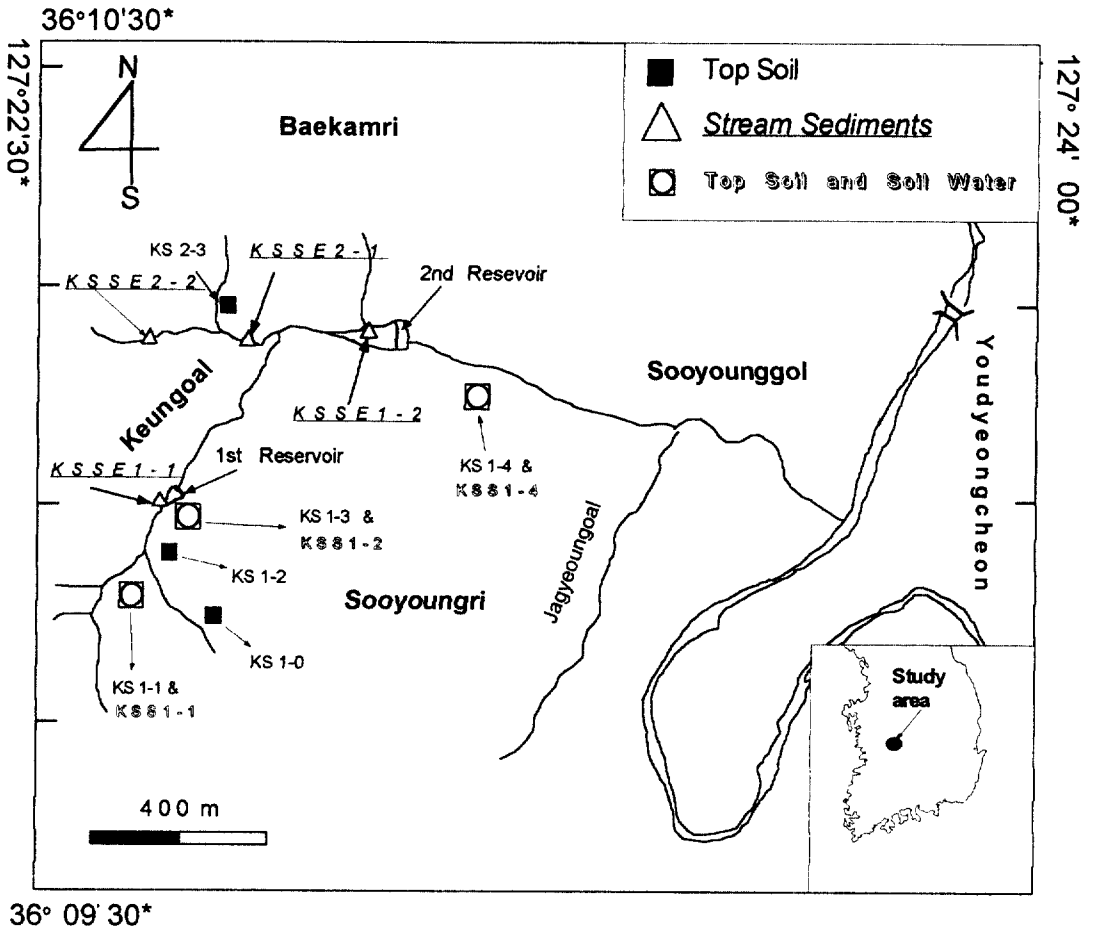


Fig. 1. Sample localities of top soil(KS), soil water(KSW) and stream sediment(KSSE).

이 地域은 炭鑛開發 이전에 山火나 田畝으로의 개발로 인해 山林植生이 크게 훼손되었던 지역으로 그 후 砂防造林을 하였고, 지역에 따라서는 樹種更新을 실시하였으며, 전체적으로 이 지역의 樹種은 針闊混生林으로 비교적 단순하게 구성되어 있다. 지금은 廢鑛 이후 炭質을 함유하는 廢炭石 및 부스러기가 지표상으로 露出되어 있으며 복구사업은 극히 일부분이 진행되어 1ha 미만의 면적에 砂防造林用으로 아카시나무, 싸리나무, 오리나무 등이 소량 植栽되고 그의 나머지 廢炭石 露出地域은 방치된 채 남아있다. 溪谷 근처의 田畝은 휴경된 채 방치되어 억새, 토끼풀 등의 草本類가 성장하고 있다.

2. 土壤斷面 調査 및 試料 採取

廢炭의 影響을 받은 地域과 직접적인 影響을

받지 않은 地域을 분류하여 土壤 試料를 채취하였다(그림 1). KS1-1과 KS1-2는 露天에 廢炭이 表土를 피복하고 있어 植生이 전혀 없는 地域이며, KS1-0은 炭鑛 위쪽에 위치하는 地域으로 落葉松이 식재(平均樹高: 10m/6-14, 平均胸高直徑: 14cm/8-22)되어 있는 山林地域내의 對照區地域이다. KS1-3은 採炭 鑛物을 운반하던 道路 위쪽의 落葉松 造林地域(平均樹高: 14m/6-16, 平均胸高直徑: 18cm/8-26)으로 廢炭에 의한 직접적인 영향은 받지 않은 곳이며, KS1-4는 炭을 채굴하지는 않았지만 炭質을 함유하는 母岩層이 風化된 土壤 위에 落葉松이 식재(平均樹高: 20m/10-24, 平均胸高直徑: 25cm/14-32)되어 있다.

각 實驗調查區別로 地形, 母岩, 標高, 方位, 排水狀態, 浸蝕狀態 등의 立地環境에 관한 사항들과 植生의 分布 및 構成狀態를 고려하기 위하여 上

層林相, 下層植生 및 地被植生 등의 被服狀態에 관한 사항들을 조사 분류하여 동질적인 요소들로 구성된 대표적인 立地내에 試驗調查區를 설정하였다. 土壤試料를 채취 분석하기 위하여 전체를 대표할 수 있는 지점에 1.0-1.2m 깊이의 試坑을 파고 土壤 層位別로 土壤斷面調查를 실시하였다.

土壤斷面調查는 각 層位別로 土深, 土色, 土壤構造, 水濕狀態, 浸蝕狀態, 風化程度 등을 現地에서 조사하고, 理化學的 特性을 분석하기 위해 土壤 層位別로 약 1kg의 土壤을 채취하여 實驗室로 운반하였다. 物理的 特性에 대해서는 石礫含量, 粒徑分析, 土性, 土壤硬度, 容積密度 등을 분석하였다. 粒徑分析 및 土性は Pippett法(조성진, 1996), 土壤硬度는 山中式 硬度計, 容積密度는 體積 100cm³의 金屬製 試料採土圓筒(진현오, 1996)을 사용하여 측정하였다. 化學的 特性 分析을 위한 시료는 A層과 B層의 土壤을 각각 500g씩 채취, 혼합하여 단일 시료로 조제한 후 土壤pH는 유리전극법(토양화학분석법 4-2)에 의해 측정하였으며, 主元素(K₂O, Na₂O, MgO, Fe₂O₃, CaO, TiO₂) 및 微量元素(Cu, As, Pb, Cr, Co, Ni, Zn, Mo, Ba)의 組成은 Canada의 ACTLABS (Activation Laboratories Ltd.)에서 INAA(Instrumental Neutron Activation Analysis)에 의해 분석하였다.

3. 河床堆積物 試料 採取 및 分析

炭鑛廢水의 影響을 받고 있는 溪流내에 두 지점(KSSE 1-1, 1-2)과 影響을 받지 않는 溪流의

두 지점(KSSE 2-1, 2-2)에서 각각 河床堆積物의 시료를 채취하여 實驗室로 운반하여 5일간 風乾시킨 후 2mm 체를 통과한 것을 分析用 試料로 사용하였다. 이 試料들의 主元素 및 微量元素의 組成은 Canada의 ACTLABS에서 INAA에 의해 분석하였다.

4. 土壤水 調查 및 分析

廢炭에 의한 土壤污染 程度와 雨水의 影響으로 土壤내 浸透되는 물의 置換性 陽이온의 動態를 파악하기 위하여 1996년 10월 하순에 降雨 후 表土로부터 15-20cm 깊이에서 土壤水 採取機(Model 1900, Soil Moisture Equipment Corp.)를 사용하여 集液세라믹컵을 매설하고 眞空減壓한 吸引狀態의 集液機에 降雨가 내린 후 土壤孔隙내 함유되어 있는 不飽和狀態의 土壤水를 채취하였다. 試料는 廢炭堆積物이 넓게 堆積되어 있는 地域(KSS 1-1)과 바로 아래쪽의 污染地域(KSS 1-2), 落葉松이 造林된 山林地域(KSS 1-3)과 炭質層 土壤위에 落葉松이 식재된 地域(KSS 1-4)에서 각각 채취한 후 土壤水의 酸도와 Na과 K는 분광광도계, Ca와 Mg는 原子吸光光度計를 이용하였다.

結果 및 考察

1. 土壤의 物理的 特性

각 調查區의 土壤의 機械的 組成, 土性, 土壤構造, 土色 및 容積密度 등의 物理的 特性은 表

Table 1. Physical properties of soils in the experimental sites.

Site	hori- zon	Soil depth(cm)	Mechanical analysis(%)			Soil texture	Soil structure	Soil color	Bulk density (g/cm ³)
			Sand	Silt	Clay				
KS1-0	A	0 - 15	32.85	43.04	24.16	loam	granular	dark brown	1.14
	B	15 - 30	33.74	30.88	35.38	clay loam	nutty	brown	
KS1-1	coal		65.84	15.57	18.57	sandy loam	non- structure	black	1.85
KS1-2	coal		59.87	17.34	22.79	sandy loam	non- structure	black	1.85
KS1-3	A	0 - 12	23.34	50.14	26.51	silt loam	granular	black	1.38
	B	12 - 35	27.63	32.60	39.77	clay loam	blocky	very dark grayish brown	
KS1-4	A	0 - 10	50.47	21.14	28.39	sandy clay loam	granular	black	1.53
	C	10 -						black	

1과 같다.

表 1에서 보는 바와 같이 廢炭으로 피복되어 있는 KS1-1과 KS1-2 조사구는 廢炭이 表土에 방치된 후 오랜 시간 동안 채탄용 車輛이나 사람들에 의한 踏壓과 雨水의 流去 및 排水作用으로 인하여 견딜하게 압착되어 成土層(Solum)이 조성되지 않았으며, 植生도 生育하지 않으므로 자연 상태하에서 土壤으로 風化되기까지는 많은 시간이 걸릴 것으로 사료된다. 이 지역의 土壤粒徑의 機械的 組成은 각각 모래가 65.84%, 59.87%, 容積密度는 모두 1.85g/cm³로써 전 調查地域중 가장 높았다. Pritchett(1979)는 山林土壤의 容積密度는 有機物層의 0.2g/cm³에서 組粒質 砂土의 1.9g/cm³에 이르기기도 하는데, 有機物의 含量이 많을수록 容積密度는 낮으며 과도한 放牧, 機械化作業, 休養林으로 인한 과도한 踏壓 등에 의해 容積密度는 增加한다고 하였다. 또한 土性에 따라 容積密度는 다른데 砂土에서는 1.55 이상, 粘土에서는 1.75 이상이면 뿌리의 浸透가 방해된다고 하였다(Taylor와 Gardner, 1963). 우리나라의 경우 砂質土壤에서는 1.0-1.8, 埴質土壤에서는 1.0-1.3의 범위(陳鉉五 등, 1994)에 비하면 이 지역은 일반적인 山林土壤의 容積密度보다 매우 높았다.

이에 비하여 廢炭에 의하여 영향을 받지 않은 KS1-0 地域은 落葉松이 優占種을 이루는 지역으로서 成土層이 약 30cm이고 土性은 壤土로서, 容積密度는 1.14g/cm³로 전체 조사지역중에서 가장 낮게 나타나고 있어 土壤孔隙量이 가장 풍부할 것으로 사료된다(閔一植 등, 1984).

KS1-3 地域은 落葉松이 성장하고 있는 廢炭의 영향을 받지 않은 道路面의 上部에 인접한 山林植生이 分布하고 있는 지역으로 風化土層의 발달은 成土層이 30cm 이상이고, 土性도 埴壤土로 비교적 粒徑이 작은 粒子로 구성되어 있으며, 容積密度는 1.38g/cm³을 나타내어 廢炭地域과 비교해 볼 때 상당히 낮음을 알 수 있고 土壤構造는 表土層이 粒狀構造이고 深土層은 塊狀構造로 이루어져 있다. 그러나 KS1-4 地域은 炭質을 함유하고 있는 風化土 위에 落葉松이 식재된 山林地域으로서 山林植生 分布地域중 모래의 含有比率이 50.47%로 가장 높았고 土壤의 層位發達도 A층만으로 빈약하며, 容積密度는 1.53g/cm³으로 다른 山林地域에 비해 높았다. 그럼에도 불구하고

落葉松의 生長은 비교적 양호하여 같은 樹種이 성장하는 山林土壤이라 사료되는 KS1-3 地域과 生長에 큰 差異가 나타나지 않았다. 이는 廢炭이 踏壓된 KS1-1과 KS1-2 地域과는 달리 表土에서 炭質層의 風化가 진행되어 微砂와 粘土含量이 비교적 높고 淺根性 樹種인 落葉松의 根系가 비교적 表土部位에 분포하고 있으며(Noboru, 1978) 또한 踏壓 등에 의한 직접적인 堅密化가 이루어지지 않은 때문으로 사료된다. 이상의 결과로써 石炭開發 후 露天에 방치하여 둔 廢鑛汚染地와 汚染의 영향이 없는 山林土壤간에 土壤의 物理的 特性의 有意的인 差異가 나타났다.

2. 土壤의 化學的 特性

채취된 土壤試料에 대한 土壤 pH를 그림 2에 나타내었다. 炭質을 많이 함유하고 있는 地域인 KS1-1 및 KS1-2가 각각 pH 4.01과 4.11로 가장 낮게 나타나고 있으며, 이와 비교하여 廢鑛에 의한 직접적인 영향이 없는 山林地域인 KS1-0 및 KS1-3은 각각 5.03-5.13으로 이는 우리나라의 일반적인 山林土壤의 酸度和 유사하였다(李天龍, 1996). 또한 炭質層 위에 落葉松이 조성된 지역인 KS1-4는 pH 4.97로서 KS1-0 및 KS1-3과 그다지 차이가 없었으며, 이는 炭質層 위의 落葉 등의 有機物에 의해 공급되는 陽이온에 의한 영향으로 사료되며, 같은 지역에서 浸出한 土壤水내의 pH가 높고 置換性陽이온의 溶脫이 크지 않았다는 것(表 5)과 일치한다. 이렇게 炭質을 많이 함유하는 土壤이 강한 酸度を 나타내는 것은 본 지역에 대해 宋錫煥 등(1997)이 조사한 바와 같이 母岩이 비교적 黃化鑛物을 많이 함유

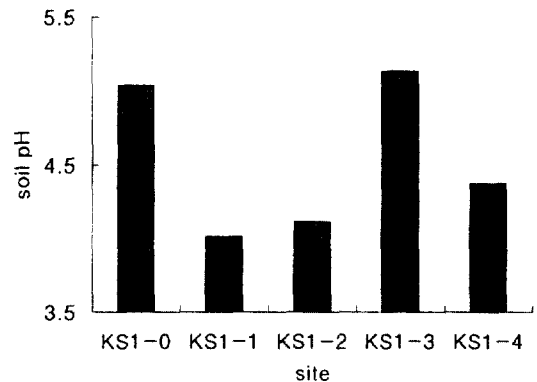


Fig. 2. soil pH in the experimental sites

하는 黑色세일로 구성되어 있으며 그 風化土壤내에서 黃酸이온의 稼動때문으로 생각된다.

土壤汚染 基準의 대상 重金屬은 우리나라의 경우 Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr 등으로 되어 있는데 Netherland의 경우는 우리나라가 지정한 汚染成分 외에 Co, Ni, Zn, Mo, Sn, Ba 등 6개의 重金屬이 더 지정되어 있다(오종기 등, 1996; 환경통계연감, 1996). 본 조사에서는 Cd, Hg 및 Sn 含量은 분석하지 않았고 나머지 9개의 元素중 7개의 元素, 즉 Cu, As, Pb, Cr, Ni, Ba 및 Mo 含量은 非汚染地域(KS1-0, KS1-3)에 비하여 汚染地域(KS1-1, KS1-2)이 높은 값을 나타내고 있다(表 2). 특히 As, Mo가 뚜렷한 差異를 나타내었다. 이는 본역에 분포하는 基盤岩인 舍里層 黑色세일(손치무, 1970; 홍승호와 최위찬, 1978)을 구성하고 있는 Pyrite와 Chalophyrite의 주요 構成元素인 As, Mo, 및 Cu의 風化와 관련이 있으며(Cullers 등, 1979; Murali 등, 1983; Gromet 등, 1984; Condie, 1991), Ba은 黑雲母의 주요 構成成分으로써 溶解도가 매우 높은 元素이다(Butler, 1953; Culler와 Turekian, 1988). 이중 Magnetite는 Ni, Cr이 置換에 의해 汚染地域의 土壤내 含有量이 높은 것으로 사료되며(Carr와 Turekian, 1961; Matzat와 Shirraki,

1970) 이는 炭質物을 많이 함유하는 地域의 土壤내 높은 黃酸이온의 含量에 따른 溶解도와 관련이 있기 때문에 본 調査地域에서 측정된 地表水의 黃酸이온 含量도 높게 나타났다고 생각된다. 한편 Co와 Zn의 含量은 汚染地와 非汚染地간에 뚜렷한 差異를 보이지 않았다.

또한 河床堆積物의 重金屬 含量중 Cu, As, Cr, Ni, Ba 및 Mo 含量은 土壤에서와 마찬가지로 汚染地域(KSSE1-1, KSSE1-2)이 非汚染地域(KSSE2-1, KSSE2-2)에 비하여 높게 나타났다. Pb, Zn, Co 含量은 汚染地와 非汚染地간에 差異가 나타나지 않았다(表 3). 宋錫煥 등(1997)도 본 研究地域의 河床堆積物과 周邊岩인 黑色세일과의 관계는 河床堆積物에 존재하는 풍부한 黑雲母 및 磁鐵石 含量과 관계가 있다고 하였다.

表 4는 炭質物을 많이 含有하고 있는 土壤(KS1-1, KS1-2)과 그렇지 않은 土壤(KS1-0, KS1-3) 및 炭鑛廢水에 의한 汚染의 영향이 있는 溪流의 河床堆積物KSSE1-1, KSSE1-2)과 그렇지 않은 非汚染 溪流의 河床堆積物(KSSE2-1, KSSE2-2)에 대하여 宋錫煥 등(1997)에 의해 측정된 主元素 및 微量元素들의 元素構成 含量에 따라 含有 元素들간의 平均 相對的인 比를 K_2O/Na_2O 및 $MgO+Fe_2O_3+TiO_2/CaO+K_2O$ 에 따라

Table 2. Major elements(Wt %) and heavy metal concentration(ppm) of soil from Daeseong Coal Mine area, Keumsan.

Element	Site	Non-coal bearing		Coal bearing	
		KS 1-0	KS 1-3	KS 1-1	KS 1-2
Major element					
K ₂ O		2.75	2.28	3.30	2.04
Na ₂ O		0.81	0.55	1.29	0.84
MgO		2.77	2.31	2.88	1.71
Fe ₂ O ₃		7.17	6.60	10.85	6.50
CaO		0.30	0.31	0.25	0.28
TiO ₂		1.08	0.95	0.97	0.95
Heavy metal					
Cu		21	41	50	32
As		21	15	225	132
Pb		28	39	61	38
Cr		109	99	239	89
Co		19	19	10	23
Ni		44	42	92	46
Zn		94	67	70	87
Mo		7	<5	160	11
Ba		595	356	1072	704

* Fe₂O₃ is total iron.

Table 3. Major elements(Wt %) and heavy metal concentration(ppm) of stream sediment from Daeseong Coal Mine area, Keumsan.

Element	Site	Non-coal bearing		Coal bearing	
		KSSE 2-1	KSSE 2-2	KSSE 1-1	KS 1-2
Major element					
K ₂ O		3.21	2.51	3.01	2.58
Na ₂ O		0.26	0.62	1.38	0.89
MgO		1.66	1.30	3.24	2.36
Fe ₂ O ₃		8.54	6.59	9.39	6.90
CaO		0.25	0.26	0.19	0.21
TiO ₂		0.66	0.97	0.78	0.84
Heavy metal					
Cu		46	57	55	157
As		60	29	234	63
Pb		47	40	41	45
Cr		93	78	202	108
Co		29	23	17	19
Ni		69	58	91	76
Zn		78	153	88	116
Mo		<5	<5	76	76
Ba		677	433	1074	523

* Fe₂O₃ is total iron.

Table 4. Relative comparisons of major elements in the black shale with the soils and stream sediments from Daeseong Coal Mine area, Keumsan.

Characteristics	Sampling matter	Site	K ₂ O/Na ₂ O	MgO+Fe ₂ O ₃ +TiO ₂ / CaO+K ₂ O
Non-coal bearing	Soil	KS 1-0	3.38	3.62
		KS 1-3	4.16	3.80
Coal bearing	Soil	KS 1-1	2.56	4.14
		KS 1-2	2.41	3.96
Non-polluted	Sediment	KSSE 2-1	12.29	3.13
		KSSE 2-2	4.08	3.20
Polluted	Sediment	KSSE 1-1	2.18	4.20
		KSSE 1-2	2.89	3.63
Changri Formation	Black shale		7.50	4.10

측정된 값과 沃川累層群 中の 倉里層 黑色세일내의 組成值들과의 比較를 나타낸 것이다. 본 조사지의 基盤岩인 倉里層 黑色세일에서의 元素 組成值의 相對的인 比는 K₂O/Na₂O는 7.50이었으나, 이와 비교하여 炭質物을 含有하지 않은 土壤에서는 3.38 이상이었고 炭質物을 많이 含有하는 土壤은 2.56 이하로 그 相對的인 比가 낮아졌다. 이는 親石元素인 Na₂O의 風化 보다 風化되지 쉬운 K₂O의 風化가 지속적으로 있었다는 것을 의미하며 炭質物에 의한 酸化의 영향으로 더 많은

溶脫이 일어났다는 것을 설명한다. 이러한 경향은 河床堆積物에서도 마찬가지로 일어나고 있는데 汚染地域이 非汚染地域 보다 相對的인 比가 매우 낮게 나타났는데 이러한 差異는 宋錫煥 등(1997)에 의해 鏡下에서 측정된 鑛物 組成值와 같이 黑雲母의 含量이 높고 長石의 낮은 含量에 기인한 K₂O의 낮은 含量 때문이다(趙成鎭 외, 1996). 이는 鑛物構成 元素別 含量의 相對的인 比에서 더 뚜렷하게 나타나는데 MgO+Fe₂O₃+TiO₂/CaO+K₂O의 相對的인 比가 炭質物을 많

이 含有하는 土壤과 炭鑛酸性廢水의 影響을 받는 溪流의 汚染으로 인한 影響이 那樣지 않은 地域보다 相對的인 比가 높게 나타나고 있다. 이 相對的인 比는 鑛物의 構成元素의 含有度에 따른 分類로서 MgO, Fe₂O₃, TiO₂은 黑雲母와 磁鐵石의 主要 構成원소이고 CaO+K₂O는 微斜長石 및 斜長石의 主要 構成원소이다. 이 結果에서 보듯이 炭質物을 많이 含有하는 土壤과 炭鑛酸性廢水의 影響을 받는 溪流의 汚染地域의 相對的인 比가 높은 것은 汚染으로 인한 酸性化의 結果 長石의 風化 促進作用이 일어났다는 것을 의미한다. (Deer와 Howie, 1963)

2. 土壤水 分析

조사지역내에 설치한 土壤水의 수집은 일부지역에서 수거장치의 작동 미비로 채취가 불가능하였다. 土壤水의 분석 결과는 表 5와 같다.

表 5에서 보는 바와 같이 KSS1-1과 KSS1-2 地域은 石炭層이 덮혀 있는 汚染地域의 土壤水인데 pH는 각각 4.2와 3.4로 强酸性이며, 廢炭鑛의 影響을 직접 받지 않은 KSS1-3과 KSS1-4 地域은 각각 pH 6.2와 6.0으로 나타났다. 그러나 土壤水의 陽이온 含量은 KSS1-1과 KSS1-2 地域이 KSS1-3과 KSS1-4 地域보다 K⁺, Na⁺, Mg⁺² 모두 더 높게 나타났다. KS1-1과 KS1-2 지역은 土壤의 pH가 낮은 것(그림 2)으로 볼 때 이 지역은 土壤의 酸性化가 진행되어 각종 陽이온들의 溶脫作用이 촉진되고 있는 것으로 생각된다(Foth, 1990). KSS1-4 地域은 炭質層이지만 地上部에서 生長하고 있는 落葉松에 의해 表土가 보호되고 있고 落葉 등에 의한 有機物의 공급으로 陽이온의 溶脫은 크지 않은 것으로 사료된다.

表土에 降雨가 내리면 土壤孔隙 사이로 排水가 이루어지면서 微細土壤粒子的 表面에 존재하는 擴散二重層내에서 각종 陽이온들의 置換作用이 발생하며(Foth, 1990), 이 置換作用은 植物이 생

장할 때 필요한 養料를 공급하며 表土에 주로 분포하는 細根이 擴散二重層으로부터 遊離된 養料를 흡수한다. 그러나 土壤이 汚染이나 기타 원인으로 酸性化가 진행되면 土壤중으로 투입된 水素이온에 의해 陽이온이 과도하게 置換되며 排水되어 뿌리가 사용할 수 없는 深土로 溶脫된다. 또한 酸性化가 더욱 심화되면 土壤의 結晶格子내에 존재하는 알루미늄이나 규산염 등도 水素이온과 置換하여 소비되어 결국 土壤내의 陽이온置換容量이 낮아져 土壤의 緩衝能力이 낮아지게 된다 (Ulrich, 1980 ; Ulrich 등, 1980).

본 研究地域에서도 汚染地域 土壤水의 pH가 낮고 置換性 陽이온 含量이 높게 나타나는 것으로 보아 土壤의 산성화 진행에 따라 土壤중에 陽이온이 과도하게 溶脫되어 土壤의 緩衝能力이 낮을 것으로 사료된다.

結 論

이상의 研究 내용으로부터 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 廢鑛후 廢炭과 廢鑛石으로 덮혀 있는 土壤은 成土層이 조성되지 않았으며, 容積密度는 1.83g/cm³로 주변 山林土壤의 1.14-1.38g/cm³에 비해 높았다.
2. 土壤과 河床堆積物의 重金屬含量은 廢炭의 影響을 받은 汚染地域이 廢炭의 影響을 받지 않은 汚染地域에 비하여 As, Cr, Ni, Ba 및 Mo含量이 높게 나타났다.
3. 土壤酸度は 汚染地域이 pH4.01-4.11로 酸性을 나타내었고, 非汚染地域은 pH5.03-5.13이었으며 炭質層 위에 조성된 落葉松 植栽地域은 pH4.97로 나타나 두 지역간에 뚜렷한 有意的 差異를 보였다.
4. 土壤 및 河床堆積物의 主元素 및 微量元素의 構成別 相對的인 比에서 K₂O/Na₂O는 炭質物을 많이 含有하고 있는 土壤 및 汚染地域의 河床堆積物내에서 높았고, MgO+Fe₂O₃+TiO₂/CaO+K₂O는 汚染地域에서 相對的인 比가 낮았다.
5. 土壤水의 pH는 非汚染地域이 6.0-6.2이고 汚染地域이 3.4-4.2로 强酸性이었으며, Na⁺, K⁺ 및 Mg⁺² 등 陽이온의 溶脫이 汚染地域에서 뚜렷하게 나타났다.

Table 5. Chemical analysis of soil water in 15-20cm depth.

Site	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺²
KSS 1-1	4.2	8.2	13.2	7.9
KSS 1-2	3.4	5.7	3.3	3.9
KSS 1-3	6.2	3.2	0.9	-
KSS 1-4	6.0	2.3	1.5	0.05

* Na⁺, K⁺, Mg⁺² concentrations are ppm.

引用 文 獻

1. 金座官. 1995. 水質汚染概論. 東和技術. 353pp.
2. 農村振興廳. 1988. 土壤化學分析法 - 土壤·植物體·土壤微生物. 450pp.
3. 류재근. 1996. 우리나라 광산폐수 처리기술의 현황과 전망. 제12회 공동학술강연회 발표논문집 대한자원환경지질학회·대한지질학회 p.57-67.
4. 関一植·李壽旭. 1984. 土壤의 物理的 條件이 은수원사시나무의 生長 및 根系發達에 미치는 影響 - 容積重을 중심으로. 韓國林學會誌 66 : 45-53.
5. 민정식 외 5인. 1995. 폐광에 따른 광산지역 환경개선 연구(폐수, 폐석)의 최종 보고서. 석탄산업합리화사업단 268pp.
6. 민정식. 1996. 휴·폐 광산지역에서 환경오염 실태 및 대책. 제12회 공동학술강연회 발표논문집 대한자원환경지질학회·대한지질학회 p.1-15.
7. 宋錫煥·関一植·金明姬·李鉉具. 1997. 錦山 大成炭鑛 酸性廢水에 의한 汚染. 대한자원환경지질학회지 30(2) : 105-116.
8. 손치무. 1970. 옥천층군의 지질시대에 대한 토론. 광산지질 3 : 3-4.
9. 오종기·이화영·김성규. 1996. 폐광산 복원 기술 - 중금속 제거 방법을 중심으로 - 제12회 공동학술강연회 발표논문집 대한자원환경지질학회·대한지질학회 p.41-56.
10. 유재영·최인규·김형수. 1994. 춘천지역의 기반암 종류에 따른 地表水의 地球化學的 특성. 대한지질학회지 30(3) : 307-324.
11. 李天龍. 1996. 山林環境土壤學. 普成文化社. 350pp.
12. 정명채. 1996. 달성 Cu-W 광산 주변 지구 화학적 환경의 중금속 오염. 대한자원환경지질학회 제29차 학술발표회 발표논문 p.54-55
13. 조경숙·류희옥·장용근. 1996. 폐탄광 배수에 의해 오염된 하천의 화학적 특성과 미생물 활성. 한국생태학회지 19(5) : 365-373.
14. 趙成鑛·朴天緒·嚴大翼. 1996. 土壤學. 우리나라 地質과 岩石의 風化作用. 396pp.
15. 陳鉉五·李明鐘·申榮五·金鼎濟·全尙根. 1994. 森林土壤學. 鄉文社. 325pp.
16. 홍승호·최위찬·1978. 금산도폭·자원개발 연구소.
17. 홍영국. 1996. 국내 광산 폐수의 환경 지구 화학적 특징 및 대책. 대한자원환경지질학회. 제29차 학술발표회 발표논문 요약집 p.61
18. 環境部. 1996. 環境統計年鑑. 649pp.
19. Alexander, M. 1977. Introduction to soil microbiology. John Wiley and Sons. 467pp.
20. Berners, E.K. and R.A. Berner, 1987. The global water cycle. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 397pp.
21. Buttler, J.R. 1953. The geochemistry and mineralogy of rock weathering. 1. The Lizard area, Cornewell. The Northmarkka area, Oslo. Geochim. Cosmochim. Acta 4 : 157-178
22. Carr, M.H. and M. Turekian. 1961. The geochemistry of cobalt. Geochim. Cosmochim. Acta 23 : 9-60
23. Condi, K.C. 1991. Another look at rare earth elements in shales. Geochim. Cosmochim. Acta 55 : 2527-2531
24. Culler, R.L., C. Sambhudas, N. Kilbane and R. Koch. 1979. REE in sizwe fractions and sedimentary rocks of Pennsylvanian Permian age from the midcontinent of U.S.A. Geochim. Cosmochim. Acta 43 : 1285-1301
25. Culler, R.L. 1988. Mineralogical and chemical changes of soil and stream sediment formed by intense weathering of the Danburg granites, Georgia, U.A.S. Lithos. 21 : 301-314
26. Deer, W.A. and R.A. Howie. 1963. Rock forming minerals. Lonhman. p.199, 300, 325 and 427
27. Dixon, J.B., S.B. Weed, J.A. Kittrick, M.H. Milford and J.R. White. 1977. Minerals in soil environments. Soil Science Society of America, USA. p.90-96
28. Foth, H.D. 1990. Fundamentals of soil science. John Wiley and Sons. 360pp.
29. Gromet, L.P., R.F. Dymek, L.A. Haskin and R.L. Korotev. 1984. The North American shale composite : its compilation, major

- and trace element characteristics. *Geochim. Cosmochim. Acta* 48 : 2469-2482
30. Livingstone, D.A. 1963. Chemical compositions of rivers and lakes. USGS Prof. Paper 440-G.
31. Matzat, E. and K. Shiraki. 1970. Chromium. In : K.H. Wedepohl(ed.) *Handbook of Geochemistry*. Springer, Berlin. pp.24-A-1-21-O-1
32. Meybeck, M. 1979. Concentrations des eaux fluviales en elements majeurs et apports en solution aux oceans. *Reviews in Geological Dynamics and Geographical Physics* 21 : 215-246.
33. Murali, A.V., R. Parthasarathy, T.M. Mahadevan and S.M. Das. 1983. Trace element characteristics, REE patterns and partition coefficients of zircons from different geological environments - A case study on Indian zircons. *Geochim. Cosmochim. Acta* 47 : 2047-2052
34. Noboru Karizumi. 1978. Illustrations of tree roots. 11221pp.
35. Pritchett, W.L. 1992. *Properties and Management of Forest Soils*. John Wiley & Sons. New York. 500pp.
36. Taylor, H.M. and H.R. Gardner. 1963. Penetration on cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. *Soil Science* 96(3) : 153-156
37. Ulrich, B. 1980. Production and consumption of hydrogen ions in the ecosphere. in T.C. Hutchinson and M. Havas(ed.) "Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems" Plenum press 255-282pp.
38. Ulrich, B., B. Mayer and P.K. Khanna. 1980. Chemical change due to acid precipitation in a loess-derived soil in Central Europe. *Soil Science*. 130(4) : 193-199