

## 폐광산 주변 토양 및 하천의 중금속 함량

전 관 수 · 이 철 희 · 원 양 수 · 정 진 옥 · 박 병 삼 · 신 덕 구\*  
영남대학교 환경공학과 · 안동정보대학 환경과  
(1998년 9월 12일 접수)

## Heavy Metal Concentrations in Soils and Stream around the Abandoned Mine Land

Kwan-Soo Jun, Chul-Hee Lee, Yang-Soo Won, Jin-Wook Jeung,  
Byeong-Sam Park, and Duck-Gu Shin\*

Dept. of Environ. Eng., Yeungnam Univ., Kyongsan 712-749, Korea

\*Dept. of Environ., Andong Inst. of Information Tech., Andong 760-830, Korea

(Manuscript received 12 September, 1998)

The extent of heavy metal pollution in agricultural soils near the abandoned mine land site was investigated using their concentrations from the 47 sampling sites in B mine. Samples were prepared using 0.1N HCl -Korean Standard Methods- and then analysed for Cd, Cu, Pb, As and Cr by Inductively Coupled Plasma Spectrometer. In addition, soil and mine tailing samples were sequentially extracted to investigate the chemical speciation of heavy metals in them. The soils in the vicinity of mining area are highly contaminated by heavy metals ranging up to 5.96 mg Cd/kg, 253.3 mg Cu/kg, 76.7 mg Pb/kg, and 15.45 mg As/kg, according to the analysis of Korean Standard Methods. The heavy metal levels by the sequential extraction are much higher than its level by Korean Standard Methods, and little correlated with each other. Based on the results, it is suggested that the As pollution in agricultural soils near the AMLS should be dealt as of prior significance in establishing reclamation strategies for the area.

Key words : Heavy metal, Abandoned mine, Contaminated soil, Tailings, Sequential extraction

### 1. 서 론

우리나라는 1900년대 이후 일제에 의하여 많은 금속광산들이 개발되어져 왔으나, 해방 이후 그 수가 점차 감소하여 1995년에는 등록된 금속광구 1,722개 중 가행 광산 수는 30개 미만으로 조사되었으며,<sup>1)</sup> 전국적으로 휴·폐광되어 존재하고 있는 금속광산의 수는 최소 2,000여개가 넘을 것으로 추정되고 있다.<sup>2)</sup> 이 중 상당수의 광산들이 적절한 광해방지 조치없이 방치되어 오고 있으며, 이로 인한 주변환경에 미치는 광해 실태는 파악조차 곤란한 실정이다.

폐광산 지역으로부터 주변 환경에 미치는 영향으로는 주로 중금속 오염이 고려되고 있으며, 오염원은 광산활동으로부터 발생하는 산성광산폐수와 주변 산이나 계곡에 투기 또는 매립하여 방치해 두고 있는 광산 폐석 및 광미 등을 들 수 있다. 그러나, 강우 또는 광미댐의 일부 붕괴 등으로 인하여 광산지역에 존재하는 많은 중금속과 유해물질이 침출되고 있으며, 대기오염 등의 심화로 인한 산성강우의 영향으로 폐광산 지역의 중금속 침출은 더욱 가속화되고 있는 실정이다.<sup>3)</sup>

폐광산의 영향으로 인한 토양오염의 경우, 토양은 스스로의 완충능력으로서 환경오염원을 정화할 수 있는 기능이 있다. 그러나, 토양의 허용한계 이상의 오염물질 누적은 토양의 기능을 상실케하며 토양의 구조를 파괴시킨다. 특히, 경작지 토양의 오염은 농작물로의 중금속 축적 및 생물독에 등을 야기하며, 그로 인해 사람의 건강에 직접적인 영향을 끼칠 수도 있다.

본 연구에서는 현재 폐광된 상태의 금속광산 중 조사된 사례가 전무한 B광산을 대상지역으로 하여 광미적치장 및 농경지 등의 인근 토양과 적치장 침출수 및 주변 하천 등의 중금속 오염 분포를 파악하고 주변토양의 오염 관리 및 수질관리에 기초자료를 제시하고자 하였다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1. 시료채취 지역 개황

대상지역인 B광산은 경상북도 봉화군에 위치하고 있으며(Fig. 1), 주요 광종은 금, 은 및 동이다. 본 B광산은 광업등록원부에 누락되어 가행시작년도를 정확히 확인할 수 없으나 일제시대 초기부터 채광이 시작되어 서쪽에 근접

한 갈방산(해발 약 700m)을 중심으로 대대적으로 개발되어 채광과 선광이 이루어졌고, 1935년부터 경영악화로 휴지상태로 있다가 1984년 폐광되었다.

광산 주변에는 가행 당시 선광 후 버려진 광재와 광미가 계곡을 따라 2개 지점에 적치되어 있으며, 그 중 제 1적치장은 상단부 평면적 350m<sup>2</sup>, 높이 8m 규모의 적치더미와 상단부 평면적 1,500m<sup>2</sup>, 높이 8m 규모의 적치더미가 연결되어 있다. 각각의 적치더미는 매우 급한 사면을 이루고 있으며, 북측의 적치더미 사면은 붕괴를 방지하기 위한 축조공사를 실시한 흔적이 있고, 남측더미의 사면은 약 60° 정도로, 적치시 sliding이 발생한 그대로 방치되어 있어 사면붕괴의 위험이 크지는 않으나 붕괴가능성은 존재하고 있다. 제 1적치장으로부터 동쪽 계곡 하부 350m지점에는 상단부 평면적 7,500m<sup>2</sup>, 높이 5.5m 규모의 제 2적치장이 위치하고 있다.

제 1적치장 상류로부터 소하천이 시작되며, 제 2적치장 하류 150m까지 평균 폭 0.8m, 깊이 10cm, 이후 600m까지 폭 1.5m, 깊이 20cm, 이후 3,500m까지 폭 2.5m, 깊이 35cm 정도로 넓어져서 인근 소하천과 합류하고 봉화군 명호면을 거쳐 낙동강의 상류로 합류된 뒤 안동호로 유입된다.

B광산 일대의 지질은 북부의 춘양 화강암과 남부의 각섬석 화강암으로 특징지어진다.<sup>4)</sup>

## 2.2. 시료채취 위치 및 방법

### 2.2.1. 토양 및 광미

계곡 끝에 위치하고 있는 제 1적치장을 기점으로 해발이 낮은 동쪽의 계곡과 하천을 따라 확산방향으로 4km 지역까지 토양시료 47개(BS1~BS47)를 채취하였다. 이

중 일부는 주 오염원인 제 1적치장과 제 2적치장내 토양을 채취하였으며(BS1~BS5, BS 20), 그 외 토양시료는 농경지 및 하천 주변토를 채취하였다. 토양시료 채취시 토양의 주기능을 고려하여 깊이에 따라 표토(0~10 cm), 중간토(30~60 cm), 심토(60~100 cm)로 채취하였으며, 오염의 우려가 없는 산너머 산림내 지역 6개소에서 대조군 시료 6개(BSC 1~6)를 채취하였다.

광미는 제 1적치장내 두개의 적치더미(BT-1, BT-2)와 소규모 광재 적치더미(BT-3)로부터 각각 채취하였고, 제 2적치장내(BT-4, BT-5)에서도 각각 채취하였다. 광미시료는 각 적치장 또는 더미마다 상부평면의 대각선 길이 방향으로 4등분하여 각 1/4지점마다 3개 지점을 선정하여 표층 1m 깊이에서 채취한 후 3지점의 시료를 균등 비율로 혼합하여 각 적치장의 대표성을 지니도록 하였다.

시료 채취시 표면의 잡초나 입자성 유기물 등의 이물질을 제거한 후 모종삽과 삽을 이용하여 채취하였으며, 채취된 시료는 즉시 폴리에틸렌 봉지에 밀봉 후 실험실로 이송하였다. Fig. 1은 적치장과 그 주변에서의 토양 채취 지점을 보여주고 있다.

### 2.2.2. 침출수 및 하천수

광미적치장으로부터 적치장별로 침출수를 채취하였다. 조사대상지역인 B광산에 적치된 광미·광재 등의 폐기물은 광산지역 내 총 2지점이나 각 적치장 중 계곡 끝에 있는 제 1적치장은 침출수가 적치장 최하부인 노반의 우수 배제수로 측면으로 스며 나오기 때문에 채취자체가 불가능하였고, 제 2적치장에서는 적치장 최하부의 광재더미에서 침출되는 침출수(BL 1)를 채취하였다. 한편, 제 1적치

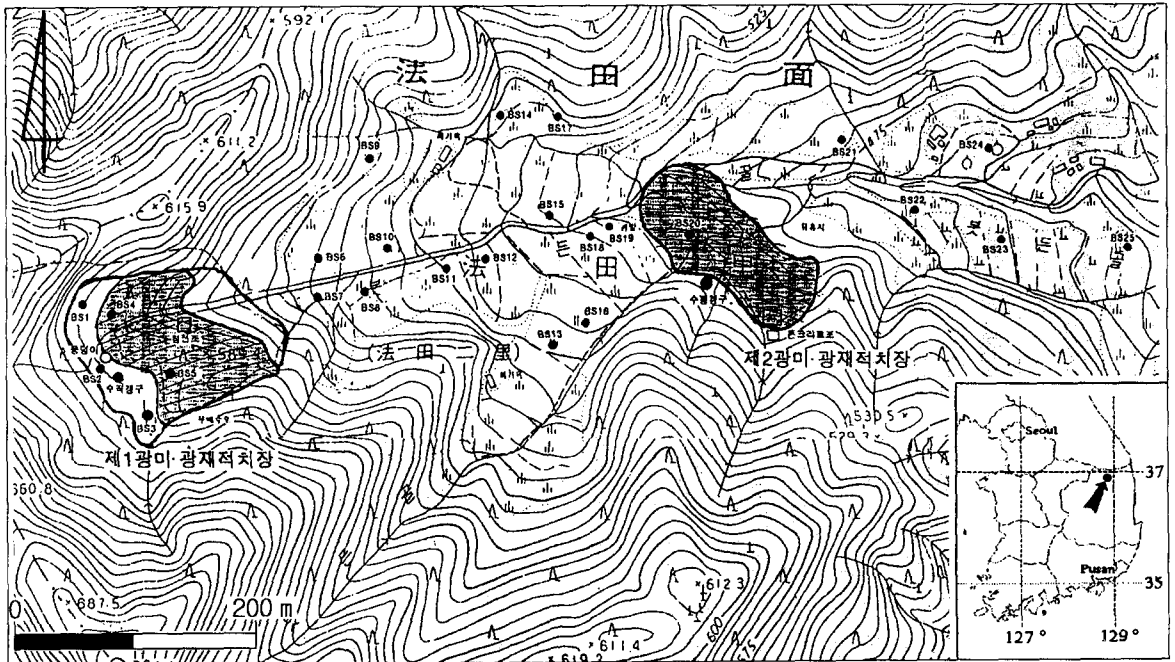


Fig. 1. Soil sampling points in the B Mine area.

폐광산 주변 토양 및 하천의 중금속 함량

장과 접해있는 야산에 형성된 웅덩이의 물을 침출수 시료 (BL 2)로 채취하였으며, 제 2적치장에 방치되어 있는 폐 시설로부터 역시 침출수 시료(BL 3)를 채취하였다.

하천수는 폐광산 지역 내 1지점(BW1, 40m), 제 1적치장을 기점으로 하여 하류방향 최초의 거주지역인 계곡 상류지역 1지점(BW2, 550m), 역시 주민들의 주요 거주지역인 계곡 하류 1지점(BW3, 850m), 최종 방류되기 전 지점인 마을회관 앞을 흐르는 하천에서 1지점(BW4, 2,400m), 방류수계 본류의 상류 1지점(BW5, 3,500m), 그리고 합류 후 완전히 혼합된 뒤의 하류 1지점(BW6) 등 총 6개 지점에 대한 하천수를 채취하였다. 채취된 하천수는 즉시 실험실로 운반되어 분석되었다.

2.3. 분석방법

2.3.1. 중금속 용출시험

채취된 토양 및 광미 시료는 균일한 두께로 하여 직사광선이 닿지 않는 장소에서 항량이 될 때까지 풍건시켰다. 풍건 후 2mm 표준체에 통과시켜 토양오염공정시험방법<sup>5)</sup>에 제시된 시료 전처리 방법에 따라 용출실험을 행하였고, 각 추출액에 대하여 Pb, Cu, Cd, As, Cr<sup>6</sup>, Hg를 측정 분석하였다. 측정결과 중금속류의 함량이 토양환경보전법상의 '토양오염 우려기준'을 초과하는 시료에 대해서는 존재형태별 연속추출시험(sequential extraction method)을 실시하였다. 중금속 분석은 유도결합플라즈마 발광광도법(ICP ; Jobin-Yvon 38 plus)을 이용하였다.

Table 1. Sampling points, distances and depths for AMLS soil samples[t = top-soil(0~10 cm), m = mid-soil(30~60 cm), s = sub-soil(60~100 cm)]

Sampling point	Distance <sup>a)</sup> (m)		Depth		
	x	y	t	m	s
BSC 1	-500,		●	●	●
BSC 2	-550,		●	●	●
BSC 3	-600,		●	●	●
BSC 4	-650,		●	●	●
BSC 5	-700,		●	●	●
BSC 6	-750,		●	●	●
< From the 1st tailing dump >					
BS 1	-10,	0	●	●	●
BS 2	-10,	0	●	●	●
BS 3	-10,	0	●	●	●
BS 4	0,	0	●	●	●
BS 5	0,	0	●	●	●
BS 6	50,	20	●	●	●
BS 7	50,	5	●	●	●
BS 8	70,	20	●	●	●
BS 9	70,	100	●	●	●
BS10	100,	20	●	●	●
BS11	150,	25	●	●	●
BS12	170,	30	●	●	●
BS13	200,	100	●	●	●
BS14	200,	100	●	●	●
BS15	250,	20	●	●	●
BS16	250,	150	●	●	●
BS17	250,	200	●	●	●
BS18	270,	20	●	●	●
BS19	300,	20	●	●	●
< From the 2nd tailing dump >					
BS20	0,	0	●		
BS21	150,	20	●	●	●
BS22	200,	20	●	●	●
BS23	300,	20	●	●	●
BS24	300,	70	●	●	●
BS25	400,	20	●	●	●
BS26	600,	20	●		
BS27	700,	20	●	●	
BS28	800,	50	●		
BS29	900,	30	●		
BS30	1000,	100	●	●	●
BS31	1000,	100	●	●	●
BS32	1100,	20	●		
BS33	1200,	20	●		
BS34	1300,	20	●		
BS35	1400,	20	●		
BS36	1500,	20	●	●	●
BS37	1600,	20	●		
BS38	1700,	20	●		
BS39	1800,	20	●		
BS40	1900,	20	●		
BS41	2000,	20	●	●	●
BS42	2200,	20	●		
BS43	2300,	20	●		
BS44	2500,	20	●		
BS45	2700,	20	●		
BS46	3000,	20	●		
BS47	3400,	20	●		

<sup>a)</sup> : Distance from the 1st tailing dump. <sup>b)</sup> : Distance from the 2nd tailing dump.

\* x , y = Down stream direction , Transverse direction.

\* BS1~BS19 points are located in the 1st tailing dump and BS20 point is located in the 2nd tailing dump.

\* 1st dump ↔ 2nd dump : 350m.

2.3.2. 존재형태별 연속추출

연속추출 시험은 토양 및 폐기물 중에 존재하는 중금속 물질의 존재형태별 분포를 파악하는데 있어서 단일추출시험보다 큰 의미를 가진다. 또한 토양에 존재하는 중금속원소의 총함량보다는 식물에 쉽게 이동되어질 수 있는 형태로 존재하는 원소의 함량이 그 토양에서 경작되는 농작물내의 원소함량을 지배하는 더욱 유용한 정보가 될 수 있다.<sup>6)</sup> 본 조사에서는 Fig. 2에 도시된 절차에 따라 연속추출을 시행하였으며, 토양 및 폐기물 중의 중금속 존재형태를 이온교환형태(exchangeable fraction), 흡착태(adsorbed fraction), 유기물 결합태(organically bound fraction), 탄산염태(carbonate fraction), 황화물태(sulfide fraction) 및 잔류태(residual fraction) 등으로 구분하였다.<sup>7)</sup> 잔류태(Residual fraction) 분석을 위한 시료는 마지막 단계의 연속추출 후 남은 토양시료에 대하여 3:1 HCl-HNO<sub>3</sub>의 왕수(Aqua Regia)를 이용한 digestion처리 후 증류수로 희석하여 여과하였다.<sup>8)</sup>

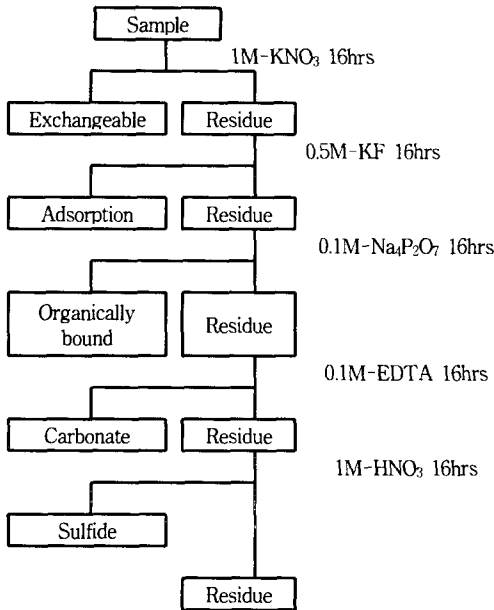


Fig. 2. Experimental procedure for the sequential extraction of metals in soils and mine tailings.<sup>7)</sup>

2.3.3. 수질분석

채취된 침출수 각각에 대하여 수질환경보전법 시행규칙의 특정수질유해물질 일부 항목과 아연, 망간 등에 대하여 분석을 실시하였다. 하천수의 분석은 환경정책기본법시행령에 설정된 중금속류 및 특정수질 유해물질 등에 대하여 분석을 실시하였다.

각 항목은 수질오염공정시험법에 의하여 시험하였으며, 항목 중 Cd, Hg, As, Pb, Cr<sup>6+</sup>, Cu 등의 금속 원소들은 유기물전처리를 거쳐 원자흡광광도계(Atomic Absorption Spectrometer, SHIMADZU AAS 6401)로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양 및 광미

3.1.1. 토양오염 공정시험법에 의한 중금속 용출농도

Table 2는 분석 결과 토양환경보전법상의 우려기준을 초과하는 지점을 보여주고 있으며, 우려기준을 초과하는 항목의 농도는 진하게 표시하였다. 적치장내 토양인 BS 1~BS 5(제 1적치장)와 BS 20(제 2적치장)은 공장·산업지역 기준을 적용하였으며, 그 외 농경지 및 하천 주변토는 농경지 기준을 적용하였다. 분석결과 대체적으로 As와 Cu 및 Pb의 함량이 우려기준을 초과하는 농도로 나타났다.

광산주변지역 토양오염의 원인은 광산폐수에 의한 것과 기반암의 영향에 의한 것으로 구분될 수 있으며,<sup>9)</sup> 심도에 비하여 표토내 중금속함량이 높을 경우 광산폐수 또는 광미·광재적치물의 비산에 의한 영향이라 볼 수 있다.<sup>10)</sup> 본 지역의 경우 Table 2에 제시된 바와 같이 토양오염 우려기준을 초과하는 대부분의 농경지역 표토 내 중금속 함량이 심토 내 함량보다 높은 것으로 나타나 광산폐수나 광미·광재의 비산에 의한 오염이 우세한 것으로 추측된다.

Table 2. Heavy metal concentration in soils exceeding the Korean critical criteria

Sampling point	Depth	pH	Extracted concentrations (mg/kg)					
			Pb	Cu	Cd	As	Cr <sup>6+</sup>	Hg
BS1	s	5.6	98.33	37.72	0.74	<b>69.50</b>	N.D.	N.D.
BS3	m	5.8	2.20	5.72	N.D.	<b>24.16</b>	N.D.	N.D.
	s	5.6	47.55	18.78	0.59	<b>57.10</b>	N.D.	N.D.
BS4	t	4.9	3.12	1.37	0.92	<b>88.50</b>	N.D.	N.D.
	m	3.5	16.33	57.84	0.57	<b>126.40</b>	N.D.	N.D.
BS5	s	3.8	145.27	180.50	0.24	<b>1720.00</b>	N.D.	N.D.
	t	3.8	1.14	3.38	0.06	<b>121.05</b>	N.D.	N.D.
BS6	m	3.5	1.19	4.10	0.11	<b>185.24</b>	N.D.	N.D.
	s	4.1	2.46	121.52	0.28	<b>1470.0</b>	N.D.	N.D.
BS7	t	4.2	53.73	<b>105.12</b>	<b>1.58</b>	11.1	N.D.	N.D.
BS8	t	4.7	9.97	<b>81.32</b>	<b>1.84</b>	<b>15.45</b>	N.D.	N.D.
BS9	s	5.6	9.97	2.27	<b>5.96</b>	1.48	N.D.	N.D.
BS12	t	4.7	10.07	<b>253.32</b>	<b>1.55</b>	<b>6.95</b>	N.D.	N.D.
	m	4.6	10.45	<b>155.87</b>	1.44	<b>6.42</b>	N.D.	N.D.
BS15	s	4.5	9.97	<b>159.52</b>	1.43	5.15	N.D.	N.D.
	t	5.5	58.68	32.67	<b>4.19</b>	<b>6.90</b>	N.D.	N.D.
BS16	t	5.3	62.45	12.70	1.26	<b>7.32</b>	N.D.	N.D.
BS17	t	5.0	76.68	8.50	0.41	<b>8.55</b>	N.D.	N.D.
BS18	s	4.5	31.84	<b>52.43</b>	1.47	3.76	N.D.	N.D.
BS19	t	2.7	62.79	<b>284.25</b>	6.37	<b>419</b>	0.01	N.D.
BS20	t	5.3	7.23	12.63	<b>1.98</b>	1.97	N.D.	N.D.
BS21	t	6.0	5.71	4.53	<b>1.73</b>	<b>6.05</b>	0.02	N.D.

\* t - top-soil, m - mid-soil, s - sub-soil.  
 \* BS1~BS5 & BS20 : applied criteria of factory·industrial site.  
 \* Concentrations exceeding the Korean criteria are written in bold.

각 적치장내의 오염도를 살펴보면, 적치장 배후의 산림 토(BS 1~3)를 포함하는 제 1적치장(BS 4~5) 지역에서는 As에 의한 오염이 심각한 것으로 조사되었다. As 농도가 표토에서 최고 121.05 mg/kg으로 대책기준을 초과하고 있으며(BS 5), 표층토에 비해 심층토의 오염도는 무려 1,470~1,720 mg/kg으로 매우 높게 나타났다. Cu의 경우 일부 심토에서 121.5~180.5 mg/kg으로 우려기준에 육박하는 것으로 나타났다. 제 2적치장(BS 20)의 주요 오염물질 역시 As와 Cu 등이며, 특히 Cd의 용출농도가 주목할 만하다. As의 경우 419 mg/kg으로 토양오염 대책기준을 훨씬 초과하고 있으며, Cu도 284.25 mg/kg으로 역시 토양오염 대책기준을 훨씬 초과하고 있다.

Table 3. Concentrations of heavy metal in mine tailings by Korean Standard Methods (unit : mg/kg)

Location	Dump I			Dump II	
	BT 1	BT 2	BT 3	BT 4	BT 5
pH	3.5	4.1	4.9	2.5	3.4
Cd	0.16	0.28	0.92	7.18	0.05
Cu	14.72	121.52	1.37	318.89	8.55
As	3,275	1,470	74.0	565.0	326.0
Hg	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Pb	8.72	2.46	3.12	82.63	15.94
Cr <sup>6+</sup>	N.D.	N.D.	N.D.	0.01	N.D.

농경지역 역시 As와 Cu 및 Cd에 의한 오염도가 높은 것으로 조사되었다. Fig. 3은 제 1적치장을 기점으로 농경지역에서의 거리에 따른 표토의 오염현황을 나타내고 있으며, 제 1적치장과 350m의 거리에 위치한 제 2적치장 사이의 농경지역 표토에서 높은 농도값을 보인다. 제 1적치장으로부터 50m지점의 유희지 2지점(BS 6~7)은 Cu가 각각 105.12 mg/kg, 81.32 mg/kg, Cd가 1.58 mg/kg, 1.84 mg/kg으로 검출되어 농경지 토양오염 우려기준을 초과하고 있으며, As 역시 11.1 mg/kg과 15.45 mg/kg으로 검출되어 우려기준과 대책기준을 초과하고 있다.

한편 제 1적치장으로부터 제 2적치장까지의 하천주변 하류방향의 농경지에서는 표토의 중금속 오염도가 Cu의 경우 2.79~253.32 mg/kg으로 검출되고 있으며, 특히 논토양(BS 12)의 경우 253.32 mg/kg으로 높게 나타나 중금속 축적에 의한 토양오염이 매우 심한 것으로 조사되었다. Cd의 경우 0.10~4.19 mg/kg으로 검출되었으며, 제 1적치장으로부터 250m지점 논토양(BS 15)에서 4.19 mg/kg으로 검출되어 토양오염 대책기준에 해당되는 것으로 밝혀졌다. As는 1.02~8.55 mg/kg으로 검출되어 일부 토양에서 토양오염 우려기준을 초과하는 것으로 조사되었다.

제 2적치장으로부터 하류방향으로는 제 1적치장의 경우보다 오염도가 크게 감소되어 제 2적치장으로부터 하류방향 300m지점(제 1적치장으로부터 650m)의 논토양(BS 23)에서 Cd의 용출농도가 1.98 mg/kg의 농도를 보인 것과

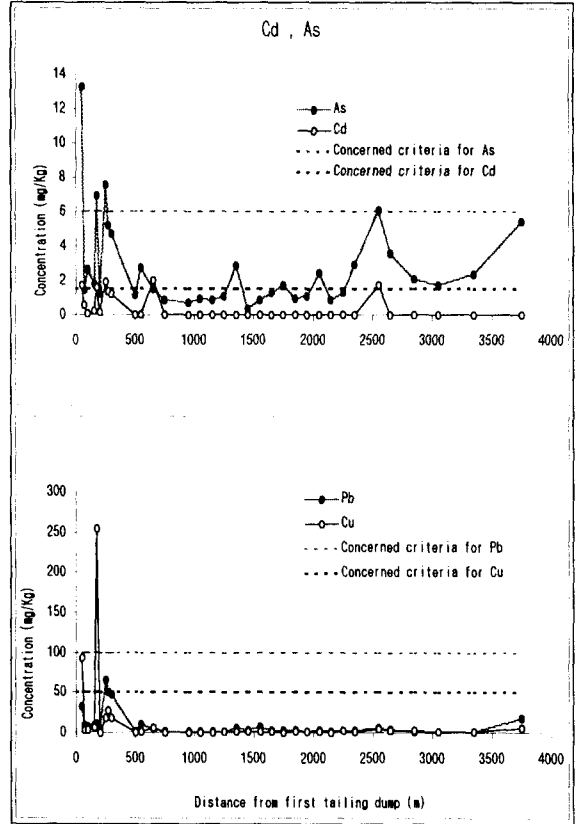


Fig. 3. The distribution of heavy metal concentration in the top-soils as distance from the first tailing dump at the B Mine(in the region of agriculture).

2.2km지점(제 1적치장으로부터 2.55km)의 밭토양(BS 42)에서 Cd 1.73 mg/kg, As 6.05 mg/kg으로 검출된 것을 제외하고는 모두 농경지 토양오염 우려기준을 하회하는 것으로 조사되었다.

Cr<sup>6+</sup>의 경우는 전 지역에서 검출되지 않았으며, 단지 제 1적치장에서 각각 100m 및 150m 지점의 밭토양(BS 10, BS 11)과 제 2적치장(BS 20) 및 하부 2.2km 지점의 밭토양(BS 42)에서만 우려기준보다 훨씬 낮은 0.01~0.13 mg/kg의 농도값을 보였다.

3.1.2. 존재형태별 함량분포

분석결과 토양 내 중금속들의 대부분은 황화물체와 잔류태로 존재하고 있으며, 토양오염 공정시험법에 의한 중금속의 오염도가 높은 경우는 중금속들의 많은 양이 이온 교환형태로 존재하고 있음을 알 수 있다. 전함량 분석결과에 의하면 특히 Cu와 Pb가 비교적 다양한 형태의 중금속들로 존재하고 있으며 As 및 Cd는 대체로 황화물체와 잔류태 그리고 산림토양(BS 1~3)의 경우 일부는 유기물 결합태와 탄산염태 등으로 존재하고 있음을 알 수 있다. 그러나 각 중금속들의 전함량은 토양오염공정시험법에 의

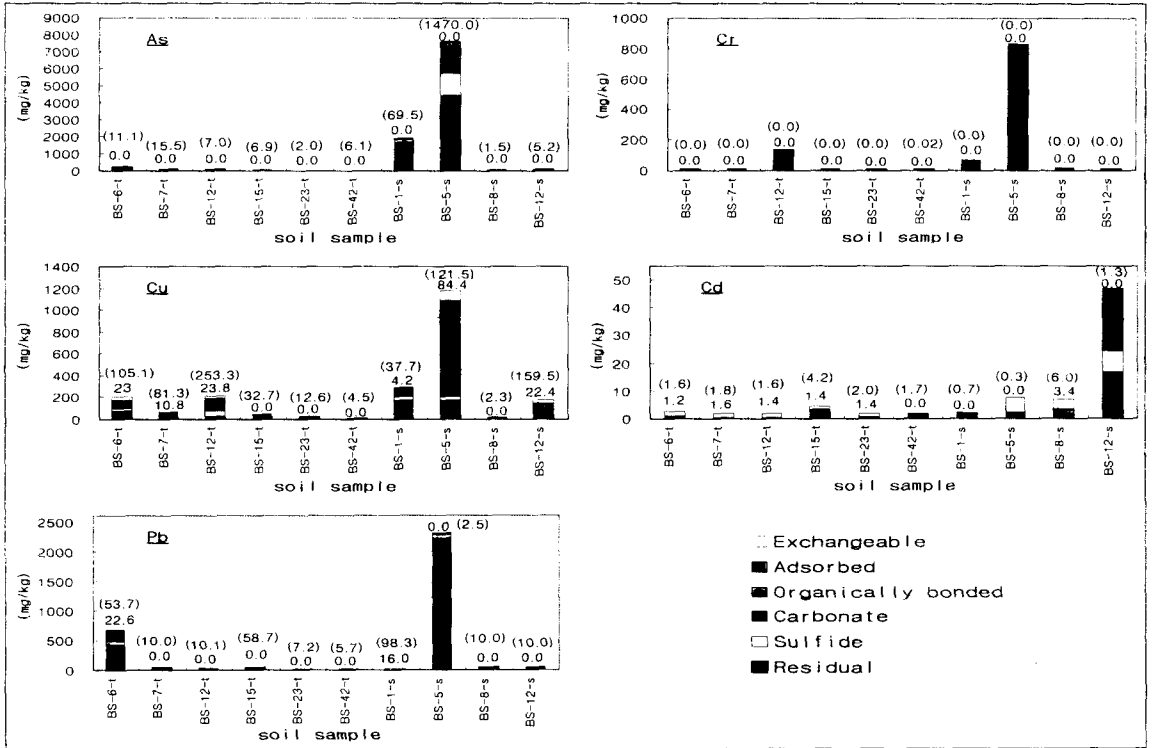


Fig. 4. Heavy metal concentrations in soils by sequential extraction method in the B mine area(Concentrations of the Korean Standard Methods in parentheses and exchangeable metal concentrations are given in mg/kg on top of each column).

한 용출농도와 뚜렷한 상관관계를 보이지 않아 용출시험 방법으로 토양내 전함량을 예측하기는 곤란하였다.

광미 내의 중금속 전함량 분석 결과 비소의 경우 2,387 mg/kg (BT 5) ~ 8,880 mg/kg(BT1)의 범위로 나타났으며, 구리는 302 mg/kg(BT 5) ~ 820 mg/kg(BT 4)의 범위로 나타났다. 또한 납의 경우 974 mg/kg(BT5) ~ 4,280 mg/kg(BT 1)의 범위를 갖는 것으로 나타났다. 이 같은 결과는 토양오염공정시험법에 의한 결과와 매우 큰 차이를 보여주며, 그 한 예로 비소의 경우 전함량의 약 17% 만이 용출된 것으로 나타났다. 한편, 각 중금속을 존재형태별로 분석한 결과 비소의 경우 대체로 잔류태>황화물태>유기물결합태>탄산염태>흡착태의 순으로 나타났으며, 납과 구리의 경우 잔류태와 황화물태, 탄산염태 등이 많고 비소와는 다르게 비교적 유기물결합태와 흡착태가 적은 반면 이온교환형태는 상당량 존재하고 있는 것으로 조사되었다.

한편, 광미·광재 및 선광 폐기물의 중금속 시험결과는 B광산의 토양오염현황을 잘 설명하여 주고 있다. 즉, 이 지역의 토양오염은 선광 폐기물의 오염현황과 유사하게 대체적으로 비소와 납, 구리의 오염도가 대단히 높은 것으로 조사되었다.

### 3.2. 수질시료

분석된 침출수에서는 특정수질유해물질인 비소 및 그

화합물이 0.040~0.097 mg/l로 검출되었고, 카드뮴 및 그 화합물이 N.D~0.062 mg/l, 구리 및 그 화합물이 0.018~0.674 mg/l로 검출되어 적치된 광미 광재의 중금속 함량에 비하여 크게 낮은 것으로 조사되었다(Table 4).

하천수 분석결과 광미침출수 등의 유출과 관련이 있는 것으로 생각되는 특정수질 유해물질은 상류지역인 광산지역내 하천(BW1)에서 카드뮴 및 그 화합물이 0.309mg/l, 구리 및 그 화합물이 2.794mg/l로서 비교적 높게 검출되었으며, 납 및 그 화합물도 0.05mg/l로 검출되었고, pH 3.4로 강한 산성을 나타내었다. 주거지역인 계곡 마을 앞을 흐르는 하천(BW2, BW3)도 역시 pH 4.5~5.4로서 산성을 나타내었고, 수질분석결과 카드뮴 및 그 화합물이 0.015~0.065mg/l, 구리 및 그 화합물이 0.042~0.349mg/l, 납 및 그 화합물이 0.076mg/l 이하로 검출되었다. 광미·광재적치장으로부터 약 2.4km 하류지역의 하천(BW4)에서는 pH 6.1로 약산성을 나타내었으나 특정수질 유해물질은 검출되지 않았다.

### 4. 결 론

B광산 인근지역의 토양은 주로 As, Cd, Cu 등에 의한 오염이 심각한 것으로 조사되었다. 토양오염공정시험법에 의한 실험결과 제 1적치장의 광산지역내 표토층에서는 Cd와 Cu의 농도는 비교적 낮으나, As가 평균 105 mg/kg

폐광산 주변 토양 및 하천의 중금속 함량

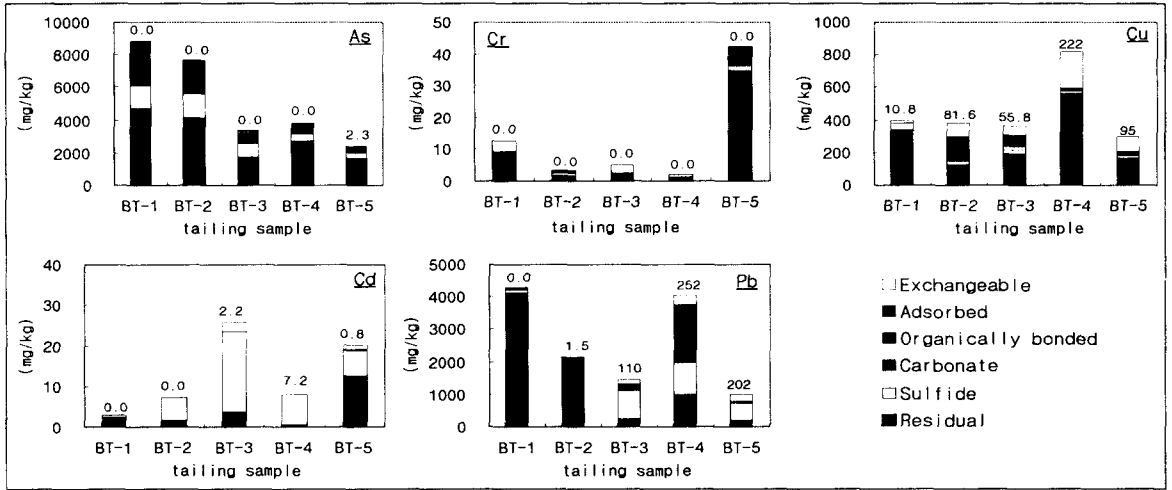


Fig. 5. Heavy metal concentrations in mine tailings by sequential extraction method(Exchangeable metal concentrations are given in mg/kg on top of each column).

Table 4. Results of Leachate and Stream water analysis (BL : leachate, BW : stream water)

Sample I.D	BL 1	BL 2	BL 3
pH	4.3	6.4	6.9
Cd(mg/ℓ)	0.062	N.D.	N.D.
Hg(mg/ℓ)	N.D.	N.D.	N.D.
As(mg/ℓ)	N.D.	0.097	0.040
Pb(mg/ℓ)	N.D.	N.D.	N.D.
Cr <sup>6</sup> (mg/ℓ)	N.D.	N.D.	N.D.
Cu(mg/ℓ)	0.674	0.031	0.018
Zn(mg/ℓ)	1.762	0.731	1.536
Mn(mg/ℓ)	1.043	0.119	0.866

Sample I.D.	BW1	BW2	BW3	BW4	BW5	BW6
pH	3.4	4.5	5.4	6.1	6.9	6.7
Cd(mg/ℓ)	0.309	0.065	0.015	N.D.	N.D.	N.D.
Hg(mg/ℓ)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
As(mg/ℓ)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Pb(mg/ℓ)	0.05	0.076	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cr <sup>6</sup> (mg/ℓ)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cu(mg/ℓ)	2.794	0.349	0.042	N.D.	N.D.	N.D.

의 높은 농도를 나타냈으며, 제 2적치장의 광산구역내에서는 As가 평균 419 mg/kg, Cd가 6.4 mg/kg, Cu가 284 mg/kg으로 조사되었다. 제 1적치장과 제 2적치장 사이의 농경지에서도 As, Cd 및 Cu 등이 우려기준을 초과하는 높은 농도를 보였으며, 제 2적치장 하부의 일부 농경지에서도 오염이 진행되었음이 조사되었다. 적치장 내에 적치된 광미·광재 등의 선풍폐기물의 경우는 제 1적치장에서 As가 최고 3,275 mg/kg, Cu 121.52 mg/kg의 농도로 조사되었

으며, 제 2적치장에서도 As가 최고 565 mg/kg, Cu 318.89 mg/kg의 고농도로 밝혀졌다.

존재형태별 분석결과, 토양내 중금속들의 대부분은 황화물태와 잔류태로 존재하고 있으며, 토양오염공정시험법에 의한 농도가 높은 경우 중금속의 많은 양이 이온교환형태로 존재하고 있음이 조사되었다. 그러나 토양오염공정시험법에 의한 용출농도와 전함량 사이에는 뚜렷한 상관관계를 찾을 수 없었다.

침출수 및 하천수의 수질 시료에서도 Cd, Pb 및 As가 일부 검출되었으며, 현장조사 결과 이들 2개의 광미·광재적치장 인근의 하천수에서 특히 Cd의 농도가 0.309~0.065 mg/kg으로 다른 광산에 비하여<sup>2,11)</sup> Cd에 의한 오염이 심각한 것으로 분석되었다. 또, Cu의 농도 역시 2.794~0.042 mg/ℓ까지의 상당히 높은 값을 나타내고 있다. 따라서 차후 광해방지를 위한 조치없이 방치될 경우 광미·광재 적치물의 강우시 침식작용과 대기 중 비산에 의한 주변하천과 토지로의 계속적인 오염확산이 우려되며, 광산구역과 토양오염 대책기준을 초과하는 제 1적치장에서 하류방향 약 50m까지와 제 2적치장으로부터 상방향 150m 이내의 일부 농경지에 대하여 토양개선사업 등의 시행이 필요하리라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 1997년 영남대학교 학술조성 연구비에 의하여 연구되었습니다. 시료분석을 도와주신 기초과학지원연구소 대구분소에도 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) 통상산업부, 1995, 광산물 수급현황.
- 2) 박용하, 1994, 휴·폐광된 금속광산 지역의 오염관리대책, 한국환경기술개발원, p.14 & p.35~54.
- 3) 임재명, 조영진, 한동준, 1995, 금속광산 광재의 물성 및 침출특성, 한국폐기물학회지, 12(5), p.534~543.

- 4) 국립지질조사소, 1963, 한국지질도 춘양도폭, sheet 6924-I.
- 5) 환경부, 1996, 토양오염 공정시험방법, 동화기술.
- 6) John, M. K., C. J. VanLaerhoven, and H. H. Chuah, 1972, Factors affecting plant uptake and phytotoxicity of cadmium added soils., *Environmental Science and Technology*, 6, p.1005~1009.
- 7) Stover, R. C., L. E. Sommers, and D. J. Silveira, 1976, Evaluation of metals in wastewater sludge, *J. Water Pollu. Control Fed.*, 48, p.2165~2175.
- 8) Davidson, C. M., R. P. Tomas, S. E. McVey, R. Perala, D. Littlejohn, and A. M. Ure, 1994, Evaluation of a sequential extraction procedure for the speciation of heavy metals in sediments, *Anal. Chim. Acta.*, 291, p.277~286.
- 9) Davies, B. E., 1983, Heavy metal contamination from base metal mining and smelting; implications for man and his environment. In *Applied Environmental Geochemistry* (Ed., I. Thornton), Academic Press, London, p.425~462.
- 10) 김경웅, 1997, 달성광산지역 토양의 중금속함량 분석 결과의 평가, *지하수환경*, 4, 1, p.20~26.
- 11) 한국자원연구소, 1996, 광산지역 광해조사 및 대책연구.