

## 達成鑛山 周邊地域에서의 重金屬汚染과 이의 除去方案

金景雄\* · 洪永國\*\* · 金澤男\*\*\*

### Heavy Metal Contamination and Process for Its Removal in the Vicinity of the Dalsung Cu-W Mine

Kyoung-Woong Kim\*, Young-Kook Hong\*\* and Taik-Nam Kim\*\*\*

**ABSTRACT :** The Dalsung copper-tungsten mine in the Taegu area, Korea was closed in 1975 and may be the sources of the heavy metal contamination in the tributary system and soil-plant system due to the mine drainage derived from the mine wastes and tailings. To examine the degree and extent of heavy metal contamination in the vicinity of Dalsung mine area, stream water and soil samples were taken and analyzed for heavy metals by ICP-AES and AAS. Highly contaminated soils are found near the Lower Tunnel No.0 ranging up to 1760  $\mu\text{g/g}$  As, 2060  $\mu\text{g/g}$  Cu, 1120  $\mu\text{g/g}$  Pb and 346  $\mu\text{g/g}$  Zn. From the results of the sequential extraction methods for the metal speciation, the heavy metals in soils may be derived from soil parent materials and acid mine drainage. With the processes for the heavy metal removal, most of the heavy metal ions in the acid mine drainage are removed by being exchanged with Ca ions held by the bentonite, hydroxyapatite and calcium hydroxide.

#### 서 론

인류의 자연에 대한 과도한 개발로 인하여 생기는 환경 문제는 지하수, 강, 호수, 토양, 대기를 포함한 생태계에 유입되는 유해물질의 양이 자정능력을 초과할때 야기되는 것이다. 이러한 환경오염의 주원인중 하나인 광산활동은 가행당시로 부터 휴폐광이 된 후에도 구광도와 폐석 및 광미의 퇴적장으로부터 침출되는 폐수가 대기, 토양 및 수계를 통해 이동하여 지하수, 하천, 토양 및 농작물을 오염시키고 있다 (Davies, 1983).

경상분지내에는 철, 동, 연-아연 및 중석-휘수연석등의

금속광상이 한반도 동남단으로 부터 북서 내륙방향으로 대상분포하고 있고 (이상만, 1972; 이재영, 1981), 이들 광상의 수반광물중에 함유되어 있는 각종 유해한 중금속이 주변지역 하천, 토양과 낙동강 수계에까지 잠재적인 오염원이 될수 있다 (이재영 외, 1993). 달성광산은 약 40년간 금, 은, 동 및 중석을 생산하였던 광산으로 1975년 휴광된 이후 방치됨에 따라 유해성 광산폐수를 생성하여 유출하고 있다. 따라서 이 지역의 토양오염에 대한 연구 (이재영 외, 1993) 와 하천수오염 및 공해방지시설 설치방안에 대한 연구가 수행되었으나 (권광수 외, 1995), 아직까지 이러한 오염을 처리하기 위한 구체적인 대책을 제시하지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 달성 Cu-W 광산 주변지역의 토양의 오염수준과 분산 특징, 오염 토양내의 중금속원소의 존재형태를 알아보고 오염의 원인이 되고 있는 광산 산성폐수에 존재하는 중금속 원소의 제거를 위하여 점토질 암석, 벤토나이트, 제올라이트, 수산화아파타이트 및 공업용 소석회의 양이온교환능력을 이용한 폐수 정화 대책을 제시하고자 한다.

\* 배재대학교 자원환경공학과 (Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Paichai University, Taejon 302-735, Republic of Korea)

\*\* 한국자원연구소 환경지질연구부 (Environmental Geology Division, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Taejon 305-350, Republic of Korea)

\*\*\* 배재대학교 무기재료공학과 (Department of Inorganic Materials Engineering, Paichai University, Taejon 302-735, Republic of Korea)

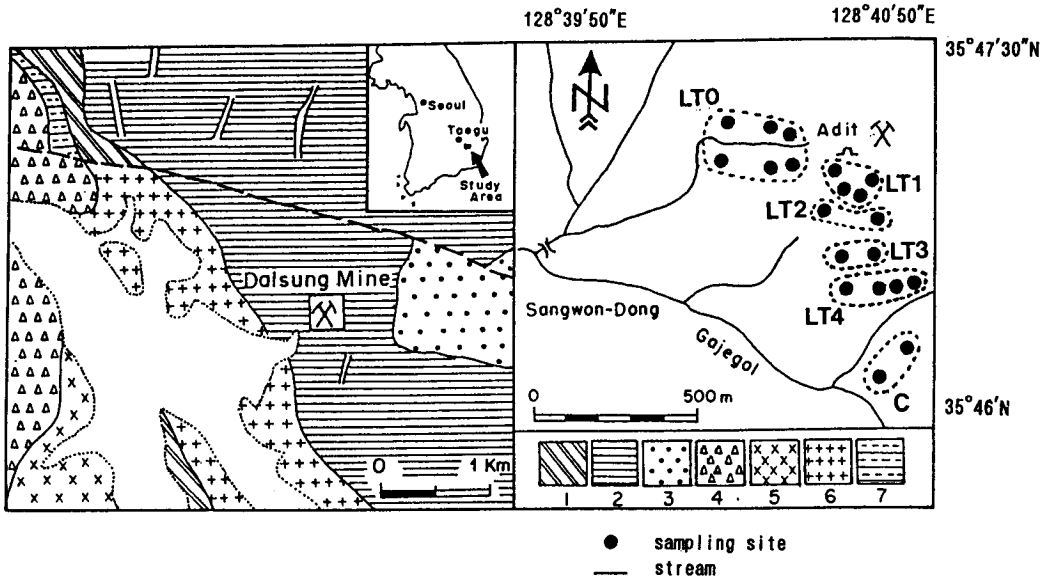


Fig. 1. General Geology and sampling site of the Dalsung mine area (Won and Kim, 1966).

- |                             |                            |
|-----------------------------|----------------------------|
| 1. Jain Formation           | LT 0 : Lower Tunnel 0 area |
| 2. Andesitic rocks          | LT 1 : Lower Tunnel 1 area |
| 3. Andesite porphyry        | LT 2 : Lower Tunnel 2 area |
| 4. Intrusive dacite breccia | LT 3 : Lower Tunnel 3 area |
| 5. Granite porphyry         | LT 4 : Lower Tunnel 4 area |
| 6. Quartz monzonite         | C : Control area           |
| 7. Felsites                 |                            |

## 지형 및 지질

달성광산 일대에는 주로 안산암질암, 안산반암 및 관입 석영안산암질 각력암이 넓게 분포하며, 이들 안산암질암류는 광산 서측에서 화강반암과 몬조나이트로 차례로 관입되어 있다 (Fig. 1). 광상은 몬조나이트의 관입으로 파쇄된 안산암질암의 각력간을 충전하고 있는 각력파이프형 열수광상이다. 주 광석광물은 흑중석, 황동석이나 이외에 미량의 섬아연석, 자류철석, 휘창연석, 휘수연석, 회중석이 수반된다 (원종관, 김기태, 1966). 따라서 본역의 수질은 몬조나이트와 안산암류에 의하여 중-알칼리성이 되어 중금속이 신천하류로 유입되는 것을 제한하는 효과를 가져오게 하나 (이재영 외, 1992), 황철석이 산점해 있는 안산암중에서는 이의 분해로 산성을 떨수 있다 (이재영 외, 1993).

## 시료채취 및 화학분석

대구근교 신천상류에 위치하는 달성광산으로 부터의 광산폐수 및 주변지역 토양시료의 채취는 1995년 5월에 실

시하였다 (Fig. 1). 토양시료는 표토 (0~15 cm 깊이) 와 심토 (15~30 cm 깊이)를 채취하였으며 대표성을 높이기 위하여 한 지점에서 1 m 간격으로 9곳의 부분시료를 취하여 하나의 시료를 만들었다. 토양은 체질을 거쳐 분리된 -80 mesh의 시료를 질산과 과염소산을 이용하여 용액을 만든 후 Cd, Cu, Pb, Zn은 원자흡광분석법 (Atomic Absorption Spectrometry)으로 측정하였으며, As, Ba, Cr, Mg, Sr, Ni, Y, Zr은 유도분극 플라즈마 분광법 (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry)으로 분석하였다. 모든 분석과정은 중복시료, 참고시료 및 blank를 첨가하여 data quality control과정을 거친 신뢰성 있는 분석결과를 얻는다 (Ramsey *et al.*, 1987). 토양내 중금속원소의 존재형태를 파악하기 위하여  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ,  $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  등을 이용한 연속추출법을 수행하였다 (Davidson *et al.*, 1994).

광산폐수는 Fig. 1의 갱구 (Adit)로 부터 유출되는 지점에서 수소이온농도 (pH)를 측정한 후 시료를 채취하여 냉장보관한 후 1주일 이내에 실험실에서 중금속 제거 실험을 수행하였다. 이를 위하여 일정조건에서 강한 이온교환능력을 가진 점토질 암석, 벤토나이트, 제올라이트, 공

Table 1. Average and standard deviation of trace element concentrations in surface and subsurface soils in the Dalsung mine area ( $\mu\text{g/g}$ ).

Soil type	LT* 0 area		LT* 1 area		LT* 2 area		LT* 3 area		LT* 4 area		Control area	
	Sur.	Sub.	Sur.	Sub.	Sur.	Sub.	Sur.	Sub.	Sur.	Sub.	Sur.	Sub.
N**	6	5	4	4	2	2	2	2	4	4	2	2
As	1760	3060	31	93	68	165	55	183	17	107	8.2	7.5
	$\pm 747$	$\pm 809$	$\pm 24$	$\pm 39$	$\pm 32$	$\pm 35$	$\pm 8$	$\pm 13$	$\pm 19$	$\pm 116$	$\pm 0.9$	$\pm 0.0$
Ba	581	593	324	453	626	663	634	731	284	348	422	476
	$\pm 111$	$\pm 51$	$\pm 150$	$\pm 84$	$\pm 84$	$\pm 107$	$\pm 52$	$\pm 79$	$\pm 263$	$\pm 357$	$\pm 71$	$\pm 31$
Cd	8.4	2.0	4.2	5.7	2.4	1.8	0.8	1.3	1.6	1.8	0.7	1.5
	$\pm 9.9$	$\pm 1.1$	$\pm 5.1$	$\pm 7.1$	$\pm 1.0$	$\pm 0.2$	$\pm 0.7$	$\pm 0.7$	$\pm 0.4$	$\pm 1.1$	$\pm 0.8$	$\pm 0.6$
Cr	1.1	1.0	5.1	6.7	2.7	4.8	4.8	6.0	3.3	6.4	15	16
	$\pm 0.4$	$\pm 0.0$	$\pm 4.8$	$\pm 4.9$	$\pm 2.3$	$\pm 5.4$	$\pm 5.4$	$\pm 6.3$	$\pm 2.7$	$\pm 7.0$	$\pm 6$	$\pm 0$
Cu	2060	1170	299	262	22	19	28	25	481	682	33	28
	$\pm 1620$	$\pm 442$	$\pm 275$	$\pm 405$	$\pm 0$	$\pm 1$	$\pm 11$	$\pm 11$	$\pm 522$	$\pm 767$	$\pm 10$	$\pm 4$
Mg	5170	5540	7080	8530	10150	11200	8600	10500	5080	6050	9500	10250
	$\pm 230$	$\pm 152$	$\pm 2622$	$\pm 574$	$\pm 495$	$\pm 566$	$\pm 1270$	$\pm 707$	$\pm 2820$	$\pm 4060$	$\pm 1980$	$\pm 778$
Ni	2.0	4.9	18	2.6	2.0	2.0	2.0	2.2	25	38	2.0	9.3
	$\pm 0.0$	$\pm 5.8$	$\pm 30$	$\pm 1.2$	$\pm 0.0$	$\pm 0.0$	$\pm 0.0$	$\pm 0.3$	$\pm 28$	$\pm 43$	$\pm 0.0$	$\pm 10.3$
Pb	1120	1620	49	56	57	60	57	53	51	47	41	43
	$\pm 635$	$\pm 982$	$\pm 17$	$\pm 4$	$\pm 29$	$\pm 36$	$\pm 23$	$\pm 17$	$\pm 26$	$\pm 13$	$\pm 8$	$\pm 2$
Sr	58	61	88	96	174	167	170	167	77	87	152	132
	$\pm 11$	$\pm 18$	$\pm 33$	$\pm 9$	$\pm 31$	$\pm 21$	$\pm 4$	$\pm 21$	$\pm 61$	$\pm 81$	$\pm 75$	$\pm 65$
Y	8.6	7.1	17	17	28	25	25	26	9.8	13	16	15
	$\pm 1.5$	$\pm 0.9$	$\pm 9$	$\pm 6$	$\pm 4$	$\pm 2$	$\pm 1$	$\pm 4$	$\pm 9.0$	$\pm 14$	$\pm 4$	$\pm 3$
Zn	346	143	166	183	175	135	193	188	98	104	80	80
	$\pm 292$	$\pm 54$	$\pm 112$	$\pm 126$	$\pm 77$	$\pm 53$	$\pm 35$	$\pm 13$	$\pm 58$	$\pm 66$	$\pm 6$	$\pm 12$
Zr	49	39	35	24	56	35	50	42	30	34	34	15
	$\pm 10$	$\pm 5$	$\pm 7$	$\pm 3$	$\pm 9$	$\pm 9$	$\pm 6$	$\pm 8$	$\pm 20$	$\pm 26$	$\pm 8$	$\pm 1$
pH	5.72	-	5.15	-	5.80	-	5.60	-	4.40	-	5.80	-
	$\pm 1.24$		$\pm 1.21$		$\pm 0.00$		$\pm 0.42$		$\pm 1.04$		$\pm 0.00$	

LT\* : Lower Tunnel

N\*\* : Number of samples

[Sur. : Surface soil (0~15 cm depth), Sub. : Subsurface soil (15~30 cm depth)]

업용 소석회 (Calcium hydroxide) 및 수산화아파타이트 (Hydroxyapatite)가 이용되었다 (Suzuki *et al.*, 1993). 점토질 암석 (PH-2), 벤토나이트 (DH-2) 및 제올라이트 (BI-2)는 포항지역에서 채취한 시료가 이용되었으며 (김경웅, 전효택, 1990), 석회는 시중에서 파는 공업용 소석회를 구입하여 사용하였고 수산화아파타이트는 실험실에서  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  와  $\text{H}_3\text{PO}_4$ 를 반응시켜 제조하였다 (Kim *et al.*, 1995). 중금속제거를 위한 실험방법은 위의 물질 각 1g과 광산폐수 10 ml를 시험관에 넣어 mechanical shaker로 6분, 12분, 30분, 1시간, 2시간, 5시간, 10시간과 24시간 동안 흔들어 반응시키며 폐수내 Cd, Cu 와 Zn 함량의 변화를 측정하였다.

### 결과 및 논의

#### 광산주변지역 토양에 존재하는 중금속원소의 함량

Table 1의 달성광산 주변지역의 토양에 존재하는 중금속원소의 함량은 여러 문헌상의 평균값 뿐만이 아니라 (Bowen, 1979), 국내 금속광산에 존재하는 토양중 평균 함량인  $0.549 \mu\text{g/g}$  Cd,  $11.3 \mu\text{g/g}$  Cu,  $18.7 \mu\text{g/g}$  Pb,  $20.6 \mu\text{g/g}$  Zn 보다도 높게 나타났다 (환경부, 1992). 특히 하 0번갱 지역 (LT 0 area)의 표토에 존재하는  $1760 \mu\text{g/g}$  As,  $2060 \mu\text{g/g}$  Cu,  $1120 \mu\text{g/g}$  Pb,  $346 \mu\text{g/g}$  Zn의 높은 함량은 환경부 (1992)가 제정한 생육피해 한계농도인  $15 \mu\text{g/g}$  As,  $125 \mu\text{g/g}$  Cu,  $450 \mu\text{g/g}$  Pb,  $325 \mu\text{g/g}$  Zn을 최고 100배 까지 초과하고 있어 이 지역의 농작물 및 주민에게 영향을 미칠수 있는 것으로 나타났다. Cd의 경우는 생육피해 한계농도인  $25 \mu\text{g/g}$  보다 낮게 나타나는데 이는 국내의 한계농도가 너무 높게 설정되어 있기 때문이다. 하 0번갱지역과 1번갱지역은 달성광산의 현장에서 확인되는 광산폐수가 유출되는 지점으로 하부 지질구조에 의한 영향이외에도 폐수에 의한 토양오염으로 예상할 수 있

**Table 2.** Cadmium concentrations obtained by sequential extraction and pseudo-total digestion ( $\mu\text{g/g}$ ).

Sample I. D.	Step 1	Step 2	Step 3	Residue	Sum	Digest	Recovery
Surface soil	LT 0-1	0.64	1.28	2.70	6.50	11.12	110%
	LT 0-3	1.12	0.28	0.75	1.05	3.20	114%
	LT 0-4	0.52	0.48	0.75	1.90	3.65	166%
	LT 1-2	14.32	3.00	0.00	1.15	18.47	119%
Subsurface soil	LT 0-3	0.64	0.00	0.60	2.30	3.54	144%
	LT 0-4	0.16	0.64	0.85	1.40	3.05	102%
	LT 1-2	17.56	1.84	2.65	0.55	22.60	131%

**Table 3.** Copper concentrations obtained by sequential extraction and pseudo-total digestion ( $\mu\text{g/g}$ ).

Sample I. D.	Step 1	Step 2	Step 3	Residue	Sum	Digest	Recovery
Surface soil	LT 0-1	149	161	1065	2640	4015	80%
	LT 0-3	266	192	595	735	1789	97%
	LT 0-4	56	54	93	520	723	93%
	LT 1-2	123	121	25	194	462	86%
Subsurface soil	LT 0-3	188	138	355	1145	1826	95%
	LT 0-4	51	50	90	675	865	94%
	LT 1-2	316	230	46	188	779	89%

**Table 4.** Lead concentrations obtained by sequential extraction and pseudo-total digestion ( $\mu\text{g/g}$ ).

Sample. I. D.	Step 1	Step 2	Step 3	Residue	Sum	Digest	Recovery
Surface soil	LT 0-1	40.0	266	7.5	1970	2283	82%
	LT 0-3	15.2	270	4.0	730	1019	89%
	LT 0-4	16.8	118	0.0	640	775	99%
	LT 1-2	7.2	16	11.0	11	44	100%
Subsurface soil	LT 0-3	12.8	359	4.5	2325	2702	85%
	LT 0-4	18.0	148	3.0	950	1119	93%
	LT 1-2	6.4	19	0.0	12	37	87%

**Table 5.** Zinc concentrations obtained by sequential extraction and pseudo-total digestion ( $\mu\text{g/g}$ ).

Sample. I. D.	Step 1	Step 2	Step 3	Residue	Sum	Digest	Recovery
Surface soil	LT 0-1	33.2	42.4	264	595	934	97%
	LT 0-3	29.2	48.0	110	160	347	111%
	LT 0-4	6.4	14.0	17	87	124	94%
	LT 1-2	174	34.8	22	103	333	99%
Subsurface soil	LT 0-3	22.8	13.2	48	86	170	122%
	LT 0-4	7.2	6.4	9.5	54	77	95%
	LT 1-2	228	40.0	29	112	408	91%

다 (권광수 외, 1995). 한편 하 2번갱 지역 (LT 2 area), 하 3번갱지역 (LT 3 area) 및 하 4번갱 지역 (LT 4 area) 토양중 원소함량을 비교지역 (control area)과 비교해 볼때, Cd, Cu, Pb, Zn의 함량은 높으나 Ba, Cr, Mg, Ni, Sr, Y, Zr 등은 별 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 달성 Cu-W 광산 주변의 토양이 하부 기반암의 영향을 받아 열수 황화광상에서 Cu와 수반되는 원소가 전체적으로 부화되어 있음을 보여준다 (Plant, Raiswell, 1983). 현장

에서 측정된 토양의 pH는 달성광산주변의 토양이 비교지역 토양 보다 약간 낮은 약산성의 값을 보여주며 우리나라 금속광산지역의 토양 pH범위인 4.5~7.4와 유사한 값을 보여준다 (Table 1).

#### 토양중 중금속원소의 존재형태

토양에서 경작되는 농작물내의 미량원소함량을 지배

하는 여러 인자들중 토양에 존재하는 총합량이 중요한 요소이기는 하나, 이보다는 식물에 쉽게 이동되어 질수 있는 형태로 존재하는 원소의 양이 더욱 유용한 토양오염의 정보가 될수 있다 (Alloway *et al.*, 1988). 또한 토양오염의 원인을 살펴보기 위하여 Davidson *et al.* (1994)이 제시한 연속추출법을 이용하여 토양중 Cd, Cu, Pb, Zn의 존재형태를 조사하였다. 실험결과의 신뢰성을 나타내는 회수율 (Recovery)을 살펴볼때 Cu, Pb, Zn의 경우 평균 91%, 91%, 101%의 양호한 결과가 나타났다 (Table 3~5). 그러나 Cd의 경우 회수율이 평균 127%의 비교적 높은 값을 보이는데 (Table 2), 이는 분석과정중 배경흡착 (background absorption)에 의해 야기된 평행 치우침 (translational bias)의 결과로 실제함량보다 높게 측정되었기 때문인 것으로 생각된다 (Thompson, 1983).

Table 2, 3, 4 와 5에 나타난 Step 1은 이온교환형태 (exchangeable, water & acid soluble phase)로 존재하는 함량을 의미하고, Step 2는 철/망간 산화물 형태 (reducible phase), Step 3은 유기물과 황화물형태 (oxidizable phase), 그리고 residue는 잔류형태 (residual phase)로 존재하는 것을 의미한다 (Davidson *et al.*, 1994). 절대적인 함량을 비교할때 하 1번갱 지역의 토양에 Cd와 Zn이 이온교환형태로 존재하는 양이 많아 두 원소사이의 상관관계 좋을뿐 아니라 유사한 형태로 존재하고 있음을 알 수 있다 (Table 2 & 5). 또한 Cu의 경우 하 0번갱 지역의 토양에 잔류형태로 존재하는 양이 많음을 알수 있으며 (Table 3), Pb의 경우는 대부분의 형태에서 하 0번갱 지역의 토양중 함량이 하 1번갱 지역보다 높다 (Table 4). 위의 Table 2~5에 나타난 값을 상대적인 비로 Fig. 2에 나타낼 때에 Cd 와 Zn의 경우 식물로 이동이 용

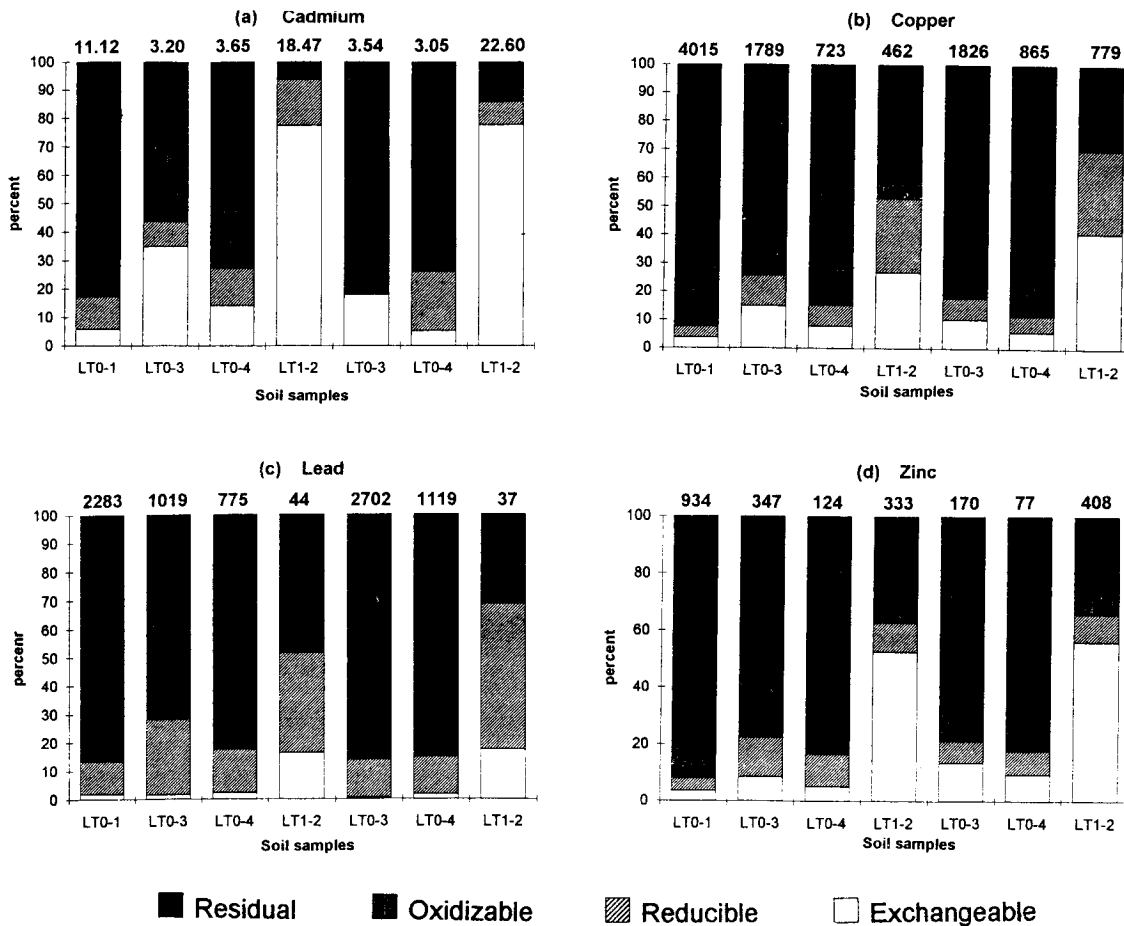


Fig. 2. Partitionings of sequential extracted metal concentrations of soils in the Dalsung mine area (Total metal concentrations are given in µg/g on top of each column).

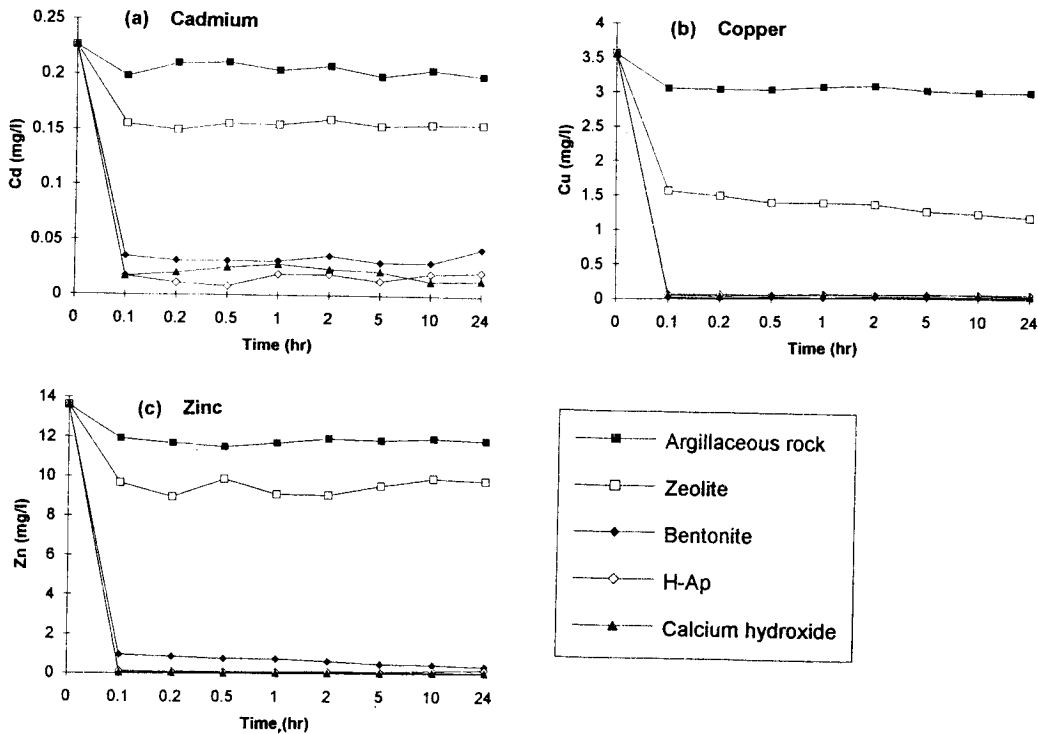


Fig. 3. Removal of Cd, Cu and Zn as a function of shaking times of argillaceous rock, bentonite, zeolite, hydroxyapatite and calcium hydroxide with acid mine drainage.

이한 이온교환형태나 산화물형태로 존재하는 양이 대부분 40%를 넘어 두 원소가 광산폐수에 의한 영향이 크며, 이러한 토양에서는 식물이 자랄수 없을것으로 예상된다. Cu와 Pb의 경우는 기반암으로 부터의 영향이라고 예상되는 잔류형태로 존재하는것이 압도적으로 우세하며 Cu는 유기물과 황화형태, Pb는 철/망간 산화물의 형태도 존재함을 보여준다 (Fig. 2). 위의 결과로 토양오염원으로서의 광산폐수를 고려할때 광산폐수내에 존재하는 중금속을 제거하는 방안에 대한 연구가 필요할 것이다.

#### 광산폐수내의 중금속원소의 함량과 이의 제거방안

1995년 7월에 Adit 지점에서 채취한 광산폐수를 분석한 결과 (Fig. 1), 0.287 mg/l Cd, 3.56 mg/l Cu, 0.15 mg/l Pb, 11.8 mg/l Zn을 포함하고 있는 것으로 나타났다. 이를 방류수 수질기준인 0.1 mg/l Cd, 5 mg/l Cu, 1 mg/l Pb, 5 mg/l Zn과 비교할때 (환경부, 1993), Cd와 Zn이 이 기준을 넘어 토양에서 존재하는 양상과 부합되며 광산폐수가 토양오염의 원인임을 뒷받침한다. 광산폐수에 존재하고 있는 중금속원소를 제거할수 있는 방안으

로 양이온 교환능력을 이용한 중금속이온의 제거를 위하여 (최우진, 1995), 포항지역의 점토광물, 수산화아파타이트 및 공업용 생석회가 이용될 수 있다 (김경웅, 전효택, 1990; Suzuki *et al.*, 1993). 수산화아파타이트의 제조 (Kim *et al.*, 1995) 및 침출수내에 존재하는 미량의 중금속 제거에 관한 연구 (이무성 외, 1995) 등을 응용한 폐수와 여러물질과의 반응실험 결과 포항지역의 벤토나이트, 수산화 아파타이트와 공업용 석회가 반응성이 좋은 중금속 제거물질로 나타났다 (Fig. 3). 함량이 측정 한계 이하인 Pb를 제외한 실험결과 Cd, Cu, Zn원소가 폐수와 물질을 섞어 혼든지 6분만에 제거 가능한 양이 거의 제거되었으며 포항지역 산성점토질 암석과 제올라이트는 다른 물질에 비해 반응성이 좋지 않은 것으로 나타났다. 특히 포항지역 벤토나이트는 주성분이 Ca계 몬토릴로나이트로 수산화아파타이트 및 공업용 소석회에 있는 Ca의 역할을 대신해 줄수 있는 물질로 폐수내 존재하는 Cu와 Zn의 95% 이상과 Cd의 85% 이상을 제거하는 것으로 나타났다 (Fig. 3). 위의 결과를 바탕으로 실제 폐광산 주위에서 응용할 수 있는 모델실험이 계속적으로 수행될 예정이다.

**결 론**

1. 달성광산지역 토양에 존재하는 중금속원소의 함량이 비교지역의 원소함량보다 높아 하부의 기반암에 기인한 것임을 보여주며, 특히 광산폐수가 유출되는 갱도 (Adit)의 주변지역 (LT 0 area)에서는 1760 µg/g As, 2060 µg/g Cu, 1120 µg/g Pb, 346 µg/g Zn에 이르러 생육피해 한계농도를 넘는 것으로 나타났다.

2. 연속 추출법에 의해서 토양내 중금속원소의 존재형태를 살펴본 결과 Cd와 Zn의 경우 식물로 이동이 용이한 이온교환형태나 산화물형태로 존재하는 양이 대부분 40%를 넘으며, Cu와 Pb의 경우는 잔류형태로 존재하는 것이 압도적으로 우세하며 Cu는 유기물과 황화형태, Pb는 철/망간 산화물의 형태도 존재함을 보여준다. 토양오염의 원인이 되는 광산폐수내 중금속의 양을 방류수 배출기준과 원소별로 비교할 때 Cd와 Zn이 다른 원소보다 상대적으로 높아 토양내 이온교환형태나 산화물 형태의 근원이 된 것으로 생각된다.

3. 폐수내에 존재하는 Cd, Cu, Zn 등은 폐수와 벤토나이트, 수산화아파타이트 및 공업용 석회와 섞여 6분가량 흔들어 반응시켰을때 제거 가능한 양의 대부분이 제거되었으며 포항지역 산성점토질 암석과 제올라이트는 다른 물질에 비해 반응성이 좋지 않은 것으로 나타났다. 특히 포항지역 벤토나이트는 주성분이 Ca계 몬토릴로나이트로 수산화아파타이트 및 공업용 석회에 있는 Ca의 역할을 대신해 줄 수 있는 물질로 폐수내 존재하는 Cu와 Zn의 95% 이상과 Cd의 85% 이상을 제거하는 것으로 나타났다.

**사 사**

본 논문은 1995년도 배재대학교 교내 학술 연구비 지원에 의하여 수행된 연구의 일부로 이에 감사를 드립니다. 또한 실험실 사용을 허락하여 주신 서울대학교 자원공학과 박의 전효택교수와 실험을 도와주신 응용지구화학 실험실의 김주용, 안주성, 김종신씨와 한국자원연구소의 민정식, 정영욱, 김승오 박사께도 감사드립니다.

**참고문헌**

김경웅, 전효택 (1990) 포항-연일 및 감포-하서지역 점토광물과 주변암의 물리적 특성 및 지구화학. 한국결정학회지, 제 1권, p. 35-49.  
 원종관, 김기태 (1966) 달성광산 부근의 지질과 광화작용에 대하여. 지질학회지, 제 2권, p. 52-68.

이부성, 나춘기, 이미숙, 김옥배, 김문영 (1995) 칠전반용법으로 합성한 수산화아파타이트 분말의 중금속 흡착 특성 및 폐수중의 유해 금속 제거로서의 응용성. 자원환경지질학회지, 제 28권, p. 231-241.  
 이상만 (1972) 경상분지내의 화강암류와 광화작용. 손치무교수 추수기념논문, p.195-219.  
 이재영 (1981) 경상분지내 유화광상의 지화학적 연구-화강암류와 광화작용. 경북대학교 논문집, 제 32권, p. 289-313.  
 이재영, 김영기, 이진국, 서정울 (1992) 대구시 지하수의 금속오염에 대한 지화학적 연구. 지질공학회지, 제 2권, p. 173-200.  
 이재영, 김종근, 이인호, 이진국 (1993) 경북지역 폐금속광산이 환경에 미치는 영향. 자원환경지질학회지, 제 26권, p. 465-472.  
 권광수, 민정식, 홍영국, 김성재, 이종립, 윤인주, 이재천, 정영욱 (1995) 달성광산 공해방지시설 설치방안 조사 연구. 대구광역시 달성군청, 한국자원연구소, 191p.  
 최우진 (1995) 광산폐수 처리기술의 개발현황. 자원공학회지, 제 32권, p. 204-208.  
 환경부 (1992) 토양 오염도 현황. 자연보전국 토양보전과 자료.  
 환경부 (1993) 수질환경보전법. 수질보전국.  
 Alloway, B. J., Thornton, I., Smart, G. A., Sherlock, J. C. and Quinn, M. J. (1988) Metal availability. special issue- the Shipham report : an investigation into cadmium contamination and its implications for human health. Sci. Tot. Environ., Vol. 75, p. 41-69.  
 Bowen, H. J. M. (1979) Environmental Chemistry of the Elements. Academic Press, London, 333p.  
 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.  
 Davidson, C. M., Thomas, R. P., McVey, S. E., Perala, R., Littlejohn, D. and Ure, A. M. (1994) Evaluation of a sequential extraction procedure for the speciation of heavy metals in sediments. Anal. Chim. Acta, Vol. 291, p. 277-286.  
 Kim, T. N., Kim, J. O. and Cho, S. J. (1995) The intermediate glass study in hydroxyapatite and alumina bonding. J. Nat. Sci. of Paichai Univ., Vol. 8, p. 47-51.  
 Plant, J. A. and Raiswell, R. (1983) Principles of environmental geochemistry. In Applied Environmental Geochemistry (Ed., I. Thornton), Academic Press, London, p. 1-39.  
 Ramsey, M. H., Thompson, M. and Banerjee, E. K. (1987) Realistic assessment of analytical data quality from inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. Anal. Proc., Vol. 24, p. 260-265.  
 Suzuki, S., Fuzita, T., Maruyama, T. and Takahashi, M. (1993) Cation-exchange characteristics of sintered hydroxyapatite in the strongly acidic region. J. Am. Ceram. Soc., Vol. 76, p. 1638-1670.  
 Thompson, M. (1983) Analytical methods in applied geochemistry. In Applied Environmental Geochemistry (Ed., I. Thornton), Academic Press, London, p. 75-101.