

## 국내 일부 금속광산 주변의 토양오염 조사와 광해방지시스템 연구

정명채 · 진효택\* · 안주성\*

세명대학교 자원환경공학과  
\*서울대학교 자원공학과

### Investigation on Soil Contamination and Its Remediation System in the Vicinity of Some Metalliferous Mines in Korea

Myung Chae Jung · Hyo-Taek Chon\* · Joo-Sung Ahn\*

Dept. of Earth Resources and Environmental Geotechnics Eng., Semyung University  
Dept. of Mineral and Petroleum Eng., Seoul National University

#### 요 약 문

이 연구에서는 국내에 산재되어 있는 금속광산들에 대한 토양환경오염을 조사하고 적절한 환경처리를 위한 기초자료를 제공하기 위하여 대표적인 연-아연광산, 동광산 및 금-은광산을 대상으로 As, Cd, Cu, Pb, Zn 등의 오염규모와 분산정도를 규명하고자 하였다. 연구대상지역으로 삼보 연-아연광산, 달성 동-텅스텐광산 그리고 구봉, 삼광, 금왕 금-은광산을 선정하여 이들 광산 주변에서 토양을 채취하여 화학분석을 실시하였다. 그리고 연속추출법을 이용하여 토양중에 존재하는 중금속의 존재형태를 규명하였으며 화학분해방법에 따른 중금속의 추출정도를 고찰하기 위하여 강산을 이용한 분해방법과 토양환경보전법에 제시된 방법을 비교하였다. 화학분석 결과, 삼보광산 주변의 상부토양 (0-15cm 심도)에서는 평균 11.8 µg/g Cd, 208 µg/g Cu, 2,700 µg/g Pb, 8,300 µg/g Zn이 검출되었으며 일부 농경지에서는 토양환경보전법의 우려기준을 초과하는 중금속이 검출되어 광산활동에 의한 토양오염이 심각함이 조사되었다. 달성광산 주변 토양에서도 다량의 중금속이 검출되었으며 (평균 4.4 µg/g Cd, 1,950 µg/g Cu, 1,030 µg/g Pb, 419 µg/g Zn) 특히 As (평균 2,500 µg/g)의 오염이 심각하였다. 그리고 대표적인 금은광산인 구봉, 삼광 및 금왕광산에서는 광미와 선광장 주변에서 다량의 중금속과 As가 검출되었다. 이 연구 결과, 이들 점오염원에 대한 오염정도가 심각하므로 이를 적절하게 처리할 수 있는 오염복구사업이 실시되어야 할 것으로 판단된다.

#### 1. 서론

국내에는 1,500 여개 이상의 크고 작은 금속광산들이 휴광 또는 폐광된 상태로 산재되어 있고 이들 대부분은 광산활동 이후 적절한 환경처리를 실시하지 않고 그대로 방치되어 있다. 특히 광미와 폐석은 여름철의 집중강우에 의해 중금속들이 용출되어 주변의 하천을 오염시키며, 겨울철은 광미입자들이 비산되어 주변의 거주지와 농경지를 오염시키고 있다. 그리고 광산주변의 토양은 지속적으로 오염물질을 수용하여 오염되지 않은 토양에 비해 수십에서 수백배 이상의 중금속을 함유한다. 그러므로 국내에 부존하고 있는 휴/폐광 광산들에 의한 토양오염을 조사하고 가장 효과적인 처리방법을 선정하는 것은 토양환경보전과 인간의 환경권을 획득하기 위해 필요 불가결한 연구일 것이다. 이러한 관점에서 그동안에 휴/폐광 지역에서의 토양오염조사는 간헐적으로 이루어져왔다<sup>1,2)</sup>. 그러나 아직도 많은 광산지역에서 환경오염물질이 존재하고 있으며 이들은 주변의 토양과 수계 및 식물을 오염시키고 있다. 또한 최근에는 피부암의 직접적인 원인이 되는 As에 대한 연구가 국제적인 관심을 일으키고 있으며, 특히 As의 주요한 오염원인 금은광산에 대한 연구

활발하게 진행되고 있다. 하지만 국내에서는 As를 포함한 유독성 물질의 주요한 오염원인 금은광산에 대한 환경연구는 거의 전무한 실정이다. 그러므로 이 연구에서는 국내에 산재되어 있는 휴광 또는 폐광된 금속광산 주변의 토양에서의 잠재적 독성원소들(As, Cd, Cu, Pb, Zn 등)의 분포와 분산 특성, 산출상태 및 오염수준을 평가하고, 오염방지기술, 오염된 토양의 복구기술 및 처리를 위한 적정기술을 선정하기 위한 기초자료를 획득하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

과거에 활발한 광산활동 이후 휴광 또는 폐광된 대표적인 금속광산으로 경기도 화성군 봉담면에 소재하는 삼보 연-아연광산, 대구광역시 달성군 가창면에 있는 달성 동-텅스텐광산, 충남 청양군 운곡면에 위치한 삼광 금-은광산과 남양면에 소재하는 구룡 금-은광산 및 충북 음성군 금왕면에 있는 금왕 금-은광산을 선정하였다. 이들 광산 주변의 폐석더미, 광미장, 선광장 및 주변 농경지에서 상부토양 (0-15cm 심도)을 채취하여 적절한 처리 이후 화학분석을 실시하였다. 각 시료를 질산과 과염소산 또는 왕수로 분해하였으며 일부 시료는 토양환경보전법에 제시된 0.1N 염산으로 용출시켜 AAS와 ICP-AES를 이용하여 분석하였다. 또한 As는  $Mg(NO_3)_2$ 로 포화시킨후 KI용액으로 용해하여 Hydride generator가 부착된 ICP-AES로 분석하였으며 금은광산의 토양시료는 1N 염산으로 용출시켜 AAS로 As를 측정하였다. 일부시료는 토양중에 존재하는 중금속의 화학적 형태를 규명하기 위하여 연속추출법을 이용하여 중금속의 존재양태를 조사하였다<sup>5)</sup>. 모든 분석에서는 국제적으로 공인된 표준시료 (SRM 2711, HRM1, HRM2), 공시료 및 중복시료를 첨가하여 정확도와 정밀도를 측정하였으며 신뢰할 수 있는 결과를 얻었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 삼보 연-아연광산의 토양오염

삼보광산의 광미와 광산직하부, 비경작지 (산토양), 농경지와 정원토양 그리고 비오염지역의 As, Cd, Cu, Pb 및 Zn 함량을 Table 1에 요약하였다. 동일한 지질구조를 갖지만 광산활동과 관련이 없는 비교지역에 비해 수십-수백배의 중금속을 함유하고 있으며 일부 광미 시료와 선광장 주변의 토양에서는 1% 이상의 Pb와 Zn이 검출되었으며 다량의 Cd도 함유하고 있다. 그러나 미약한 광화작용으로 인해 As와 Cu의 오염정도는 다소 낮은 결과를 보였다. 오염이 진행된 광산에서부터 영향을 받은 주변의 농경지에서도 다량의 중금속이 검출되었으며 특히 광미에서 용출된 중금속에 직접적으로 영향을 받은 논토양을 0.1N 염산으로 추출한 결과, 토양환경보전법에 제시된 토양오염 우려기준인 1.5  $\mu\text{g/g}$  Cd, 50  $\mu\text{g/g}$  Cu, 100  $\mu\text{g/g}$  Pb를 초과하였다.

### 3.2. 달성 동-텅스텐광산의 토양오염

달성광산의 광미와 광산직하부, 비경작지 (산토양), 농경지와 정원토양 그리고 비오염지역의 As, Cd, Cu, Pb 및 Zn 함량을 Table 1에 요약하였다. 이 지역은 삼보광산에 비해 As의 오염이 심각하며 이는 동과 텅스텐의 광화작용시기에 형성된 유비철석 ( $FeAsS$ )에 의한 것으로 판단된다. As뿐만 아니라 폐석더미에는 다량의 Cd, Cu, Pb, Zn등을 함유하고 있어 이들이 비에 의해 용출되어 하부 토양과 수계로 이동되어 환경오염을 유발하고 있다. 특히 이 지역 수계의 pH는 2.5-4.5 정도로 강산성을 보이고 있어<sup>6)</sup> 중금속의 용출이 용이함을 알 수 있다. 이러한 결과는 연속추출법에 의한 중금속의 화학형태 중에서 쉽게 용출될 수 있는 교환가능형 (exchangeable fraction) 중금속이 전체 함량의 5-15% 정도로 매우 높은 결과와도 일치하고 있다.

### 3.3. 삼광, 구룡 및 금왕금은광산의 토양오염

삼광광산, 구룡광산 및 금왕광산 주변의 광미장, 선광장, 산토양 및 농경지의 As, Cd, Cu, Pb

및 Zn함량을 Table 2에 제시하였다. 삼광광산과 구봉광산의 경우, 합금석영맥에 소량 함유된 황화물의 풍화에 의해 다량의 중금속이 검출되었으며, 특히 광미와 선광장에서 채취한 시료에서는 다량의 As와 중금속을 함유하고 있다. 또한 일부 논토양에서도 다량의 As와 중금속이 검출되어 광산활동에 의한 토양오염이 많이 진행된 것으로 판단된다. 특히 선광장에서 채취한 토양에서는 평균 820 µg/g (삼광광산)과 1,470 µg/g (구봉광산)의 As를 함유하고 있어 금은광산의 개발에 따른 As의 오염이 심각함을 시사해준다. 그러나 금왕광산 주변의 토양에서는 선광장을 제외한 대부분의 토양에서 비교적 낮은 원소의 함량을 보이고 있다. 이러한 결과는 삼광광산과 구봉광산에서는 합금석영맥과 모암에서 다량의 황화물이 존재하지만 금왕광산의 합금석영맥에는 소량의 황화물이 존재하기 때문으로 판단된다.

### 3.4. 추출방법에 따른 중금속의 함량차이

동일한 시료를 질산과 염산을 1 : 3으로 섞은 왕수로 처리한 결과와 토양환경보전법에 제시된 0.1N염산으로 부분추출한 결과를 비교한 결과 통계적으로 유의한 상관성을 얻었다. 선형회귀분석 결과 도출된 관계식은 다음과 같다.

$$\text{Cd} : Y = 0.301 X - 0.076 \quad (N = 73, r^2 = 0.75, p < 0.001)$$

$$\text{Cu} : Y = 0.228 X - 5.140 \quad (N = 75, r^2 = 0.71, p < 0.001)$$

$$\text{Pb} : Y = 0.164 X + 0.443 \quad (N = 73, r^2 = 0.73, p < 0.001)$$

$$\text{Zn} : Y = 0.172 X + 6.452 \quad (N = 75, r^2 = 0.64, p < 0.001)$$

여기서 Y는 0.1N 염산으로 추출한 원소의 함량, X는 왕수로 추출한 원소의 함량, N은 시료수,  $r^2$ 은 결정계수, p는 유의수준을 나타낸다. 이러한 연구결과는 기존의 연구결과를 비교하는 자료로서 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 추출율의 정도는 오염원으로부터 오염물질이 이동되는 정도를 예측할 수 있는 자료로 활용될 수 있을 것이다.

### 3.5. 광해방지시스템 연구

연구 결과들을 종합해보면 연구대상지역의 토양오염이 심각한 국면에 처해있다는 것을 알 수 있다. 그러므로 이들지역에 대한 광해방지 및 복구시설의 설치는 매우 필요한 것으로 판단된다. 삼보광산과 달성광산의 경우는 현재 광미장 표면을 10-50cm정도로 복토하였다. 그러나 이러한 복토는 장기적인 관리 없이는 적절한 환경처리가 될 수 없다. 그러므로 이들 지역에 대한 지속적인 복구사업이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한 삼광, 구봉 및 금왕 광산의 경우, 대단위 면적의 광미장이 광산지역에 그대로 방치되어 있어 이들에 의해 용출된 오염물질이 주변하천에 영향을 주고 있다. 특히 이들 지역의 하천수는 As와 같은 원소들이 쉽게 용출되는 비교적 pH가 높은 알칼리성으로 조사되어 As오염방지를 위한 적절한 처리시설이 필요하다.

## 4. 결론

국내의 대표적인 연-아연광산, 동광산 및 금은광산을 대상으로 토양오염을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 삼보광산주변의 토양에서는 다량의 중금속이 함유되어 있으며, 특히 Cd, Pb, Zn의 오염이 심화되어 있으며 연속추출 결과에 의하면 전함량의 10% 내외의 중금속이 쉽게 용출되는 교환가능한 형태로 존재하고 있다. 특히 일부 논토양에서는 토양환경보전법의 토양오염 우려기준을 초과하는 Cd, Cu, Pb를 함유하고 있어 이 지역에 대한 토양복원시설이 필요하다.

2. 달성광산 주변의 폐석더미에서도 다량의 As, Cd, Cu, Pb를 함유하고 있으며 이들에 의해 용출된 중금속은 주변 하천에 영향을 주고 있다. 특히 이 지역의 수계는 낮은 pH값을 보여 중금속이 쉽게 용출, 이동될 수 있는 환경이다. 또한 삼보광산과 같이 쉽게 용출될 수 있는 중금속의 비

율이 높아 토양과 수계의 오염을 가중시키고 있으므로 적절한 환경오염방지시설이 요구된다.

3. 금은광산의 연구 결과, 삼광과 구봉광산에서 다량의 As와 중금속이 검출되었으며, 특히 환경 처리없이 방치된 광미장과 선광장 주변에서는 비오염지역에 비해 수십-수백배의 오염물질이 확인되었다. 특히 금은광산의 주요한 오염물질인 As오염도 확인되어 이들 지역에 대한 토양오염방지 대책이 시급하다. 그러나 금왕광산의 경우, 선광장과 일부 광미 시료를 제외하고는 오염의 정도가 미약하였다.

4. 종합적으로 살펴보면 연구대상지역들의 토양오염이 심각한 수준에 도달하여 있으며, 일부 지역에서는 광미장을 복토하는 단순한 처리방법이 적용되었지만 아직은 그 처리시설이 미비하므로 지속적인 연구를 통하여 적절한 환경오염방지시설이 설치되어야 할 것으로 판단된다.

## 5. 참고문헌

1. 박용하, 유·폐광된 금속광산 지역의 오염 관리대책, 한국환경기술개발원, 588p. (1994).
2. Jung, M. C., "Heavy metal contamination of soils, plants, waters and sediments in the vicinity of metalliferous mines in Korea", PhD thesis, University of London, 455p., (1995).
3. Jung, M. C., Thornton, I., "Heavy metal contamination of soils and plants in the vicinity of a lead-zinc mine, Korea", *Applied Geochemistry*, 11(1-2), pp53-59 (1996).
4. 황호승, 전효택, "시흥 Cd-Pb-Zn 광산 주변에서의 중금속원소들의 분산 및 존재형태와 흡착처리", *자원환경지질* 28(5), pp455-467 (1995).
5. 정명채, "토양중의 중금속 연속추출방법과 사례연구", *자원환경지질* 27(5), pp469-477 (1994).
6. 정명채, "달성 Cu-W 광산 주변 수계의 하상퇴적물과 자연수의 Cd, Cu, Pb 및 Zn 오염", *자원환경지질*, 29(3), pp305-313 (1996).

Table 1. The range and mean concentrations of As and metals in soils from the Sambo Pb-Zn mine and the Dalsung Cu-W mine ( $\mu\text{g/g}$ ).

mine	element	mine dump soil		alluvial & high land soil		garden soil		control soil	
		mean	range	mean	range	mean	range	mean	range
Sambo mine	As	13.0	3.7-31.6	10.6	2.9-20.2	4.8	2.2-14.4	4.9	4.4-5.5
	Cd	11.8	0.9-38.7	1.1	0.1-3.3	0.6	0.2-2.7	0.4	0.3-0.6
	Cu	208	22-1,290	29	10-94	30	18-78	22	14-46
	Pb	2,700	41-29,900	77	11-717	64	15-639	25	16-33
	Zn	8,300	329-25,800	184	54-1,650	169	58-1,230	80	56-119
	N		22		59		55		17
Dalsung mine	As	2,500	539-9,380	96	59-127	133	58-71	14	5-25
	Cd	4.4	1.0-16.7	1.8	1.1-2.3	1.8	0.6-5	0.9	0.4-2.0
	Cu	1,950	111-7,910	183	68-278	269	78-1,180	29	19-49
	Pb	1,030	146-3,020	63	29-98	84	39-210	18	13-26
	Zn	419	55-2,370	136	96-175	175	100-410	97	75-132
	N		36		6		30		18

Table 2. Mean concentrations of As and metals in soils from some Au-Ag mines ( $\mu\text{g/g}$ ).

sampling site	Samkwang mine						Kubong mine						Keunwang mine					
	N	As	Cd	Cu	Pb	Zn	N	As	Cd	Cu	Pb	Zn	N	As	Cd	Cu	Pb	Zn
tailings	2	341	49.6	113	840	2,350	4	954	49.0	247	3,510	1,880	10	38	0.8	21	58	84
ore dressing	4	820	68.0	226	5,410	2,370	3	1,470	27.7	173	2,040	1,080	18	1,190	2.3	183	1,150	2,040
forest	3	21	1.5	40	59	93	2	6	0.9	14	74	52	15	15	0.8	9	20	60
farmland	2	779	5.2	71	361	274	2	125	2.1	60	169	135	53	4	0.7	11	19	58

N = sample numbers