

금정광산 주변 토양의 중금속 오염현황 및 그 처리 방안

이기철, 이승길, 한인호, 최광호, 정덕영*

코오롱엔지니어링 환경기술연구소

*충남대학교 농화학과

ABSTRACT

Geochemical study was carried out to find out the distribution of metals and cyanide in soil in the vicinity of the abandoned Keum-Jung mine. Chemical analysis showed that content of As in soil around tailings exceeded 15mg/kg, Korean standard of soil contamination in the farm land. That means the contamination of soil by As is due to input of tailings. According to total decomposition of tailings, As was highly concentrated in tailings. However the water in tailings impoundment was changed to acidic and contaminated by metal and sulfate because the tailings in the top of the tailings impoundment had been oxidized. Acid mine drainage contaminated the water course in the vicinity of the paddy soils. The proper measures are required to prevent contamination of the soil and water in the vicinity of the Keum-Jung mine.

Key Words : Keum-Jung mine, Tailings, Acid leachate, Soil contamination

1. 서론

국내 금속광산 중 상당수의 광산들은 현재 휴·폐광된 상태로 광산 개발 당시 발생한 광산폐기물과 폐갱구, 폐시설물, 폐공가 등이 그대로 방치되어 있다. 특히 광미장 혹은 방치된 일부 광미들 중에는 중금속 및 시안화합물이 함유되어 있어 주변 환경 및 생태계가 파괴되고 있다. 이러한 환경문제는 폐광미 및 폐석을 자연상태에 방치하여 광미 및 폐석에 잔존하는 황화철의 산화에 따라 산성수가 발생하여 광물내에 존재하는 중금속 등을 용출시키기 때문이다. 폐광산 지역에서 발생할 수 있는 환경문제는 광미의 유실에 따른 주변 농경지의 황폐화와 산성광산 폐수의 주변 하천으로의 유실에 따른 하천 생태계 파괴 등이다.

본 연구는 폐광산인 금정광산 광미장 및 인근 농경지를 대상으로 금속성분 및 시안의 분포특성과 산성 침출수의 생성원인을 규명하고 안전한 농경지 및 수질관리를 위한 복원기술 및 복원방안을 제시하는데 목적이 있다.

II. 연구방법

1. 조사지역 개관

금정광산은 경북 봉화군 춘양면 우구치리 산 31번지에 소재한 광산으로 1923년부터 1943년 까지, 1972년부터 1988년까지 2차례에 걸쳐 가행되었으며 주요광종은 금, 은, 동이다. 금정광산 주변에는 선광장 구조물, 폐갱도 및 광미장 등 광산 시설물이 존재한다. 광산은 물이 흐르는 계곡을 따라 약 1km정도 길게 형성되어 있으며, 선광장으로부터 계곡 상방향과 하방향을 따라 양쪽 측면에 선광 후 발생된 광미, 광재가 300m가량 길게 적치되어 있다. 옹벽 등을 시설하고 덮개를 설치하여 우수침투를 배제하였으나 이들 모두 훼손된 상태였다.

2. 현장 조사 및 시료채취

광미 및 토양에 대한 현장 조사와 토양 및 수질시료 채취는 98년 5월 20~21일에 1차로 개황조사를 수행하였으며, 98년 7월 7~10일에 2차로 정밀조사를 수행하였다. 먼저 광산부근의 폐시설과 적치장의 폐석, 광미의 적치량 산정 등 현장조사를 수행한 후 시료를 채취하였다. 시료는 광미, 발토양, 산토양 및 풍화 잔류토 등으로 구분된다.

오염현황조사를 위한 시료는 광미장과 농경지 그리고 하천 침전물과 퇴적물로 나뉘어 오거 및 꽃삽 등으로 채취되었고, 비닐 백에 넣어 실내로 이동하였다. 채취된 시료는 실내에서 2개로 분할하여 1개는 풍건시켜 중금속 분석용 시료로, 나머지 1개는 수분이 증발하지 않도록 밀봉하여 시안 분석용 시료로 사용하였다.

3. 화학분석

가. 광미 및 토양

광미 및 토양 등 고체시료를 토양공정시험법에 준하여 전처리 후 AAS로 분석했다. 분석항목은 Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr⁶⁺ 및 시안 등 총 7성분이었다. 비교를 위해 광미장 내부의 광미 중 입도와 형상이 유사한 광미를 중심으로 완전분해하여 화학분석을 수행하였다. 이때 이용된 광미는 1차, 2차 및 3차 광미장내의 황갈색 광미와 깊이 30cm 하부의 암회색 광미를 시료로 하였다. 또한 강우시 발생하는 침출수와 용출특성의 관계를 알아보기 위하여 폐기물공정시험법에 준하여 폐기물 용출시험 방법에 의거하여 화학분석을 수행하였다.

나. 물

물 시료에 대해서 As, Cd, Pb, Cu, Hg, Cr⁶⁺은 AAS로 분석되었으며, 시안화합물 및 SO₄²⁻은 UV에 의해 분석되었다.

III. 조사 결과 및 고찰.

1. 광미 및 폐석장 주변토양의 물리화학적 특성

금정광산으로부터 발생된 광미에 의한 주변 환경의 영향을 조사하기 위해 광미와 주변 농경지 토양의 물리화학적 특성을 조사하였다. 광미 및 폐석장의 시료의 pH는 2.1~4.7로 산

성을 나타내는 반면 선광장, 폐석 및 광미장 주변의 토양은 5.2~8.5로 대부분 중성에 가까운 특성을 보였다. 이는 이 지역의 모암광물에 다량의 유황성분과 pyrite 계열의 황철광이 존재하여 장기간에 걸친 산화를 통해 광미 및 폐석의 산성화에 의한 것으로 판단된다.

광미의 경우 미사와 모래의 함량이 90%이상이었으므로 낮은 양이온 치환용량을 나타내었다. 미사와 모래의 높은 함량이 높은 반면 낮은 수리전도도값을 보였는데 이는 용적밀도가 1.5g/cm³ 이상으로 다져져 있기 때문인 것으로 판단된다.

금정광산 주변 폐석 및 광미에서 용출되는 중금속 농도를 조사한 결과 표 1과 같이 비소(As)의 농도는 높으나 다른 중금속의 농도는 대체로 낮게 나타났다. 비오염지역으로 예상되는 산토양과 경작과정에 의해 다소 중화 및 지력이 회복된 밭토양에 비하여 광미의 비소농도는 매우 높게 나타났으며, 폐석에서는 구성광물의 안정적인 구조에 의해 용출농도는 매우 낮게 나타났다. 반면 납성분의 농도는 밭토양에서 가장 높게 나타났다. 이는 경작시 사용한 비료 및 농약에 의한 토양내 납성분의 집적으로 판단된다.

금정광산내 폐석장, 광미장 및 주변토양의 중금속 오염현황에 대한 조사 결과를 요약 정리하여 표 2에 나타내었다. 표 2에서와 같이 광산개발 초기에 투여된 광미/폐석 적치장의 시료에서는 비소농도가 가장 높았으며, 폐기된 기간이 길면 길수록 비소의 용출농도가 높게 나타났다. 또한 폐석 및 광미의 중금속 용출농도를 비교해 보면, 입자크기 및 분쇄상태에 따라 농도가 다르게 나타나는 것을 알 수 있다.

광미 및 폐석의 강우에 의한 유실에 의한 오염확산과 산성우 및 침출수에 의한 오염확산에 따라 선광장, 광미장 및 폐석장 주변의 토양의 중금속 용출농도 또한 매우 높게 나타나 토양환경보전법의 대책기준을 초과하였다. 도로변 토양의 중금속 농도를 조사한 결과 과거 채광당시 광미를 이송·폐기시 유실된 광미가 쌓여 주변토양과 혼합으로 중금속의 농도가 높게 나타난 것으로 보인다. 밭토양의 경우 선광장으로 부터의 거리에 관계없이 중금속의 농도가 높게 나타나는 것으로부터 광미의 복토시 활용하였거나 광미의 강우 유실 및 개천의 범람에 의한 것으로 판단된다.

표 1. 금정광산 폐석 및 광미에서 용출되는 중금속 농도

구분	As	Cu	Pb	Cd	Cr ⁶⁺	Hg
폐석	2.97	0.43	0.74	0.05	0.17	ND
광미	694.28	2.34	7.80	0.20	0.65	ND
밭토양	5.85	0.72	17.03	0.20	0.02	ND
산토양(대조군)	0.03	0.45	1.58	0.02	ND	ND

* ND : Not Detected

표 2. 금정광산 폐석장, 광미장 및 주변 토양의 중금속 농도

Sample	농도 (ppm)					
	As	Cu	Pb	Cd	Cr ⁶⁺	Hg
TS 1(광미/폐석 적치장)	7500.00	2.87	2.08	ND	ND	ND
TS 2(제 1광미장)	4720.00	58.40	7.24	0.12	ND	ND
TS 3(제 2광미장)	1850.00	6.24	5.79	ND	ND	ND
TS 4(제 3광미장)	1215.00	6.16	24.51	ND	ND	ND
TS 5(폐석장)	437.00	12.46	5.27	ND	0.11	ND
TS 6(선광장 주변)	208.67	7.49	8.87	0.14	2.87	ND
TS 7(제 1광미장 주변)	205.67	7.42	8.67	ND	1.63	ND
TS 8(제 2광미장 주변)	205.27	5.92	0.30	ND	1.58	ND
TS 9(선광장 하부 암회색)	171.97	5.85	3.49	0.10	2.55	ND
TS10(선광장 하부 황갈색)	168.63	4.88	3.97	0.11	2.46	ND
TS11(선광장 하부 황색)	166.52	1.05	1.03	ND	0.87	ND
TS12(폐석장 주변)	105.00	8.71	3.91	0.14	0.09	ND
TS13(폐석장 상부)	99.00	3.38	2.42	ND	ND	ND
TS14(제 2광미장 하부)	71.50	3.72	2.67	ND	ND	ND
RS1(선광장 200m 하부)	207.58	8.40	7.76	ND	4.35	ND
RS2(선광장 230m 하부)	203.58	9.19	0.10	ND	2.35	ND
RS3(선광장 260m 하부)	196.81	13.17	4.67	0.10	1.61	ND
RS4(선광장 300m 하부)	195.47	6.42	2.83	ND	2.86	ND
PS1(선광장 300m 하부)	9.25	1.89	6.85	ND	0.04	ND
PS2(선광장 350m 하부)	7.70	1.62	4.52	ND	0.02	ND
PS3(선광장 400m 하부)	12.75	5.17	9.08	0.16	0.20	ND
PS4(선광장 600m 하부)	10.40	2.31	4.11	0.12	0.13	ND
PS5(선광장 800m 하부)	81.50	3.44	9.92	0.07	0.10	ND
PS6(선광장 1km 하부)	5.10	4.87	7.62	0.27	ND	ND
PS7(선광장 1.5km 하부)	4.69	3.76	5.96	0.16	ND	ND
PS8(선광장 2km 하부)	5.85	0.72	17.03	0.20	ND	ND
MS1(비오염예상지역)	0.1	0.35	1.27	ND	ND	ND
MS2(비오염예상지역)	0.07	0.23	1.63	ND	ND	ND
MS3(비오염예상지역)	0.03	0.45	1.58	ND	ND	ND

* TS : Tailing Soil , RS : Road Soil , PS : Plowland Soil , MS : Mountain Soil

2. 광산 주변 수질 및 하상 퇴적토의 중금속 함량

본 대상지역에서는 침출수의 발생이 없었으므로 하천 수계의 중금속은 검출되지 않았으며 비오염지역의 pH와 광산의 영향권으로 예상되는 지점의 pH는 6.0 이상이므로 침출수의 발생에 따른 영향은 없으며 광미의 유실에 의한 주변토양과 하천오염이 이루어진 것으로 판단되었다. 이러한 사실에 근거하여 광산 주변 수질 및 하상퇴적토 시료를 분석하여 광미 등의 오염원이 주변에 미치는 영향을 조사하였다.

광미장의 하부로 흐르는 하천의 오염 정도를 조사하기 위해 광미에 의한 비영향권으로 예상되는 지역과 갯내수, 광미의 침출수 및 하천수에 대한 수질분석을 수행한 결과 표 3과 같

았다. 표 3에서 알 수 있는 바와 같이 갯내수 및 광미장의 침출수에 의한 하천수의 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

표 3. 금정광산 주변 수질분석 결과

측정항목 시료	pH	As	Cd	Pb	Cu	Cr ⁶⁺	Hg	Al
W1(갯내수)	8.2	0.220	0.001	0.005	0.001	ND	ND	0.379
W2(침출수)	6.0	0.039	0.016	0.075	0.017	ND	ND	1.030
W3(하천수)	8.2	0.053	0.001	0.005	0.001	ND	ND	0.090

하천 저질토의 중금속 함량을 보면 표 4와 같이 비소의 농도가 높게 나타남을 알 수 있었다. 이는 광미와 비슷한 경향을 나타내는 것으로부터 광미가 집적된 퇴적토임을 알 수 있다. 다만 비소 등 중금속 농도가 낮은 것은 물에 의해 흡착태나 유기물 결합태가 용탈되었기 때문으로 판단된다. 제 2광미장 하부의 하상퇴적토에서 중금속의 함량이 높게 나타났는데, 이는 각 광미장으로부터 유실된 광미가 쌓여서 높게 나타났으며 제 3광미장 하부의 하상 퇴적토에서 중금속 함량이 낮은 것은 직선방향의 하천으로 인해 광미의 퇴적이 이루어지지 않았고 다른 계곡의 하천과 합류로 중화 및 혼합되었기 때문이다.

표 4. 금정광산 하부 하천수 저질토의 유해물질 함량

측정항목 측정지점	pH	As	Cd	Pb	Cu	Cr ⁶⁺	Hg	CN화합물
선광장 하부	7.3	52.3	0.08	8.16	5.09	ND	ND	0.10
제2광미장 하부	3.3	103.5	0.09	1.05	8.97	ND	ND	0.58
제3광미장 하부	7.0	43.5	0.18	3.01	6.64	0.02	ND	1.04

3. 복원기술 및 금정광산 복원방안

폐광산 복원기술로는 크게 오염확산방지기술과 분리 및 정화기술로 나눌 수 있다. 이중 기술의 난이도 및 적용성에 비추어 오염확산방지기술이 현재 가장 많이 이용되고 있다. 일반화된 기술로는 방수제와 같은 HDPE를 이용하는 방법과 불투수벽을 형성하는 고화기술이 있다. 방수제를 이용한 오염확산방지기술은 오염원을 굴착하여 이송 후 방수시설을 설치해야하므로 소요비용이 증가하고 현재 상용화된 방수재료는 고분자를 이용한 방수재가 대부분이며 기계적 강도나 내구성이 떨어져 지형변화에 대한 대책이 적다는 단점이 있는 반면 고화를 이용한 방수 및 오염확산방지기술은 본 지질과 격리가 없는 상태로 그 기능을 할 수 있어 방수제를 이용한 오염확산방지기술에 비해 안정하다고 볼 수 있다.

금정광산의 경우 표 5에 나타난 바와 같이 폐기물공정시험법에 의한 분석결과 중금속의 용출량이 거의 없는 것으로부터 일반 강우시 중금속 용출은 거의 없으므로 강우에 의한 유실방지와 산성우의 광미장내로의 침투를 방지하는 것이 적당하다. 또한 금정광산에서 폐석/광미의 적치 형태를 살펴보면 협소한 협곡을 사이에 두고 적치되어 있어 다량의 강우시 강우에 의한 유실의 우려가 있으며, 경사가 급하고 폐석과 광미가 혼재하여 고화제를 이용하거나 복토를 통해 복원사업을 수행하는 것이 바람직하다고 사려된다.

표 5. 분석법에 따른 금정광산 광미의 중금속 농도

구 분		As	Cu	Pb	Cd	Cr ⁶⁺	Hg
광미장 시료	완전분해법	1203.7	260.7	240.5	17.1	7.4	ND
	토양오염공정시험법	226.1	10.4	3.0	0.1	2.6	ND
	폐기물공정시험법	0.1	0.1	ND	ND	ND	ND
폐석장 시료	완전분해법	328.8	28.2	138.8	21.9	35.3	ND
	토양오염공정시험법	125.5	6.7	14.3	2.72	0.38	ND
	폐기물공정시험법	16	ND	0.1	0.02	ND	ND

IV. 결론

금정광산의 오염현황을 조사한 결과 As외에 다른 오염물질은 크게 문제가 되지 않는 것으로 나타났다. 선광장과 폐석/광미 적치장을 중심으로 As의 농도가 매우 높았고, 이로 인해 인근 토양으로 오염이 나타났다. 하천수를 포함한 주변 수질분석 결과로 볼 때 인근 지역으로의 오염 확산은 침출수에 의한 것이라기 보다는 우수에 의한 광미의 유실로 인한 것으로 추정된다. 폐석적치장에는 양측 사면형태로 폐석이 적치되어 있어 우수에 의한 붕괴의 위험이 예상되었다. 처리방안에 있어서 금정광산의 경우 확산방지 차원의 대책이 적당할 것으로 생각되며 폐석을 광미장 하부에 평탄화하고, 벽면은 고화처리, 그 상부를 복토 식재하여 광미의 유실로 인한 인근 오염을 방지하는 것이 적당할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 나춘기, 전서령. 1995. 모악 금·은광산에 방치된 폐석이 주변 수계 및 생태계에 미치는 환경적 영향. *Econ. Environ. Geol.*, 28(3):221-229.
2. 이승길, 정영욱, 민정식, 최광호, 최수일. 1997. 다덕광산 주변 환경오염 조사 사례 연구. 한국토양환경학회, 춘계학술발표회 논문집, pp. 65-69.
3. 민정식, 정영욱, 이현주, 송덕영. 1995. 광산지역 광해 대책 연구. 자원연구소 연구보고서, KR-95(C)-37, pp. 5-156.
4. 민정식, 정영욱, 이현주, 송덕영. 1995. 광산광산지역 광해조사 및 대책 연구. 자원연구소 연구보고서, KR-96(C)-41, pp. 5-374.
5. 전효택. 1996. 토양오염 조사 및 광해방지 시스템 연구. 대한광업진흥공사 보고서
6. 김경웅. 1996. 유구-광천 금·은 광화대 지역에서의 토양 및 농작물의 중금속 오염. 배재대학교, 석사학위 논문.