

휴/폐광 광산폐기물의 지구화학적 특성

Geochemical Characteristics of Mine Wastes in Abandoned Mines in Korea

점명채 · 정영옥* · 민정식*

세명대학교 자원환경공학과

*한국자원연구소 자원연구부

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate geochemical characteristics of mine wastes including tailings in various abandoned mines in Korea. Tailings and wastes were sampled in and around 39 metalliferous mines, and analysed heavy metal concentrations including Cd, Cu, Pb and Zn extracted by 0.1N HCl and aqua regia by Atomic Absorption Spectrometry. Measurements of paste pH and lime requirement were carried out to examine a general geochemical characteristics of the materials. Lots of mine wastes were characterized by very low pH values of 2 to 4 and high lime requirement to control neutralization of the wastes. In addition, elevated levels of heavy metals were found in various mine wastes extracted by both 0.1N HCl and aqua regia. Because the mine wastes can be dispersed into the downstream by clastic movement and wind-blow, it is necessary to control the materials with a proper method for their reclamation.

주제어 : 휴/폐광산, 광산폐기물, 중금속오염, 지구화학적 특성

I. 서론

국내에는 1,500여개 이상의 휴광 또는 폐광된 금속광산들이 산재되어 있으며, 이들 광산주변에는 채광활동에 의해 발생된 광미와 폐석더미와 같은 광산폐기물들이 적재되어 있다. 다량의 유해성 물질을 함유한 이들 광산폐기물은 비와 바람에 의해 용출 또는 비산되어 주변의 농경지와 수계의 오염이 가중되고 있으며 지역 주민들의 건강을 위협하기도 한다^{1)~3)}. 광산폐기물에 포함된 유독성물질 중에도 As, Cd, Cu, Pb, CN⁻ 등은 양적인 측면뿐만 아니라 질적인 측면에서도 매우 중요한 환경오염물질이므로 이들에 대한 지구화학적 현상, 분산 및 분포 특성 그리고 주변의 지구화학적 환경으로의 영향을 이해하는 것은 효과적인 처리방법을 선택하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

이 연구에서는 국내의 휴/폐광 광산 중에서 다량의 광산폐기물이 적재되어 있거나 환경오염이 발생될 우려가 있는 39개의 광산을 대상으로 광산폐기물의 지구화학적 특성을 규명하고자 하였다. 이러한 연구의 결과는 대표적인 토양오염지역인 휴/폐광산에 대한 오염물질의

특성을 이해하여 적절한 환경오염 처리 방법의 선정과 시설의 설비에 필요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 광산폐기물의 지구화학적 특성 결과를 이용하여 오염원과 오염물질의 분산형태를 규명하여 오염영역을 탐지하기 위한 자료로써 활용될 수 있을 것이다.

II. 연구방법

휴광 또는 폐광된 광산 중에서 비교적 광산폐기물에 의한 환경영향이 발생되고 있는 총 39개의 광산을 대상으로 광미장 또는 폐석더미의 상부에서 1~4개의 광산폐기물을 채취하였다. 채취된 시료는 실험실에서 자연 건조한 후, -10mesh (2mm 이하)로 체질을 하여 시료 10g에 탈이온순수 5ml를 넣고 1시간 동안 평형을 유지한 후 paste pH를 측정하고 Woodruff 완충용액 이용법으로 석회시용량(lime requirement)을 측정하였다⁴⁾. 체질한 시료 중에서 일부를 -60mesh로 다시 체질하여 동일한 시료를 각각 0.1N HCl과 왕수를 이용하여 추출한 후, 원자흡광광도계를 이용하여 Cd, Cu, Pb 및 Zn의 함량을 측정하였다. 모든 분석에서는 중복시료, 공시료 및 참고시료를 첨가하여 분석자료의 신뢰성을 검증하였으며, 통계적으로 유의한 분석결과를 얻었다.

III 연구결과 및 고찰

1. paste pH

채취한 광산폐기물들의 pH를 측정한 결과, pH값이 2~4 정도의 산성물질인 부류와 6~8 정도의 중성물질인 부류로 구분이 되었다. 특히 고령, 금정, 다덕, 다락, 달성, 덕곡, 병사, 쌍전, 울진, 임천, 조일광산의 광산폐기물은 3 이하의 낮은 pH값을 보이고 있다. 이들 광산폐기물에서 낮은 pH값을 갖는 이유는 폐기물내에 존재하는 황철석, 자류철석, 방연석, 섬아연석 등의 황화광물이 지표환경에서 산화되어 황산염이온으로 변화된 결과로 판단되며, 중성의 pH를 갖는 광산폐기물은 폐기물에 함유되어 있는 석회석, 방해석 등과 같은 탄산염이온에 의한 것으로 판단된다. 일부 광산들의 광산폐기물에 대한 paste pH의 변화는 Table 1에 제시되어 있다.

Table 1. The paste pH, lime requirement and concentrations of Cd, Cu, Pb and Zn in mine wastes extracted by a 0.1N HCl.

Mine Name	Paste pH	Lime requirement*	Cadmium (mg/kg)	Copper (mg/kg)	Lead (mg/kg)	Zinc (mg/kg)
Byungsa	2.00	1.82	2.52	420	2.6	870
Chungyang	4.33	0.54	47.3	52.0	103	1,520
Deogkok	2.98	0.65	7.2	6.9	520	57
Eunchi	4.23	0.75	58.0	239	126	10,400
Geodo	3.43	0.65	0.14	204	1.7	32
Keumjang	5.94	0.10	20.8	1,240	51	3,880
Komyung	2.28	1.08	4.65	14.4	5.0	2,570
Kubong	7.20	0.00	24.5	16.6	205	580
Samkwang	7.59	0.00	13.2	7.60	510	500
Wooljin	2.75	1.01	16.5	99.0	53.5	2,080

* Lime requirement = tons of pulverized limestone per 1,000 tons of wastes

2. 석회시용량(lime requirement)

일반적으로 광산폐기물에 함유된 유독성 중금속은 pH의 변화에 따라 용해도가 변화한다. 즉, 대부분의 금속은 낮은 pH환경에서 용해도가 증가되며 pH가 증가되면서 산화물, 황산염물, 수산화물 등으로 침전되며 일부는 철, 알루미늄, 망간산화물에 흡착되거나 토양내의 점토광물에 흡착된다⁵⁾. 그러므로 다량의 중금속을 함유하고 있는 광산폐기물에서 유해원소들의 용출을 줄이기 위하여 석회석을 사용하여 pH를 증가시켜 안정화하기도 한다⁴⁾. 이 연구에서는 강산성을 띠는 광산폐기물의 중화에 필요한 석회석의 양을 조사하였다. 석회시용량의 측정 방법은 연구자에 따라 다르지만 보통은 Ca(OH)₂ 적정법, Woodruff 완충용액 이용법, S.M.P. 완충용액 이용법 등이 이용되며, 이 연구에서는 Woodruff 완충용액법을 이용하여 측정하였다⁴⁾. 측정 결과에 의하면 비교적 pH가 낮은 광산폐기물의 중화에 다량의 석회석이 요구되었다(Table 1 참조). 연구대상광산의 광산폐기물 1,000톤을 중화하기 위해 1톤 이상의 분쇄된 석회석이 필요한 광산들은 고명, 금정, 달성, 병사, 송천, 울진, 임천, 조일광산 등이며, 다덕, 다락, 쌍진, 은치, 태창광산 등도 광산폐기물 1,000톤을 중화하기 위하여 0.5톤 이상의 석회석분말이 필요한 것으로 조사되었다.

3. 0.1N 염산으로 추출한 중금속 함량

0.1N 염산으로 추출한 광산폐기물의 Cd, Cu, Pb 및 Zn 함량분석 결과 중에서 비교적 그 함량이 높은 10개 광산폐기물에 대한 자료는 Table 1에 제시되어 있다. 표에서 보는 바와 같이 병사, 청양, 덕곡, 은치, 거도, 금장, 고명, 구봉, 삼광, 울진광산의 광산폐기물에는 다량의 중금속이 검출되었다. 특히 거도광산(Cu), 고명광산(Zn), 구봉광산(Cd), 금장광산(Cd, Cu, Zn), 덕곡광산(Pb), 병사광산(Cu), 삼광광산(Cd, Pb), 울진광산(Cd, Zn), 은치광산(Cd, Cu, Zn) 및 청양광산(Cd, Zn)의 광산폐기물에서 다량의 중금속이 검출되었다. 물론 조사대상 광산들 중에서 달성광산, 구봉광산과 같이 환경복구사업이 완료되었거나 진행중인 광산도 있지만 대부분의 광산들은 광산폐기물 및 폐수의 처리를 위한 적절한 시설이 없기 때문에 주변의 농경지와 수계로의 오염이 가중되고 있다. 그러므로 이들 지역에 대한 정밀조사와 광해복구가 이루어져야할 것이다. 또한 민정식 등(1997)의 연구에 의하면, 금은광산의 광산폐기물에는 선광을 위해 사용한 CN이 다량 함유되어 있으므로 이들에 대한 연구도 함께 진행되어야할 것이다.

Table 2. The list of mines with elevated levels of Cd, Cu, Pb and Zn in mine wastes extracted by an aqua regia.

Concentration in mine waste materials	Mine Name
Over 17.5 mg/kg of Cd	2nd Yeonhwa, Byungsa, Chungyang, Eunchi, Joil, Kahak, Keumjang, Komyung, Kubong, Samkwang, Subok, Wooljin
Over 1,500 mg/kg of Cu	Byungsa, Daduk, Dalsung, Keumjang
Over 1,750 mg/kg of Pb	2nd Yeonhwa, Chungyang, Daduk, Darak, Deogkok, Eunchi, Imcheon, Joil, Joil-Sangkok, Keumjang, Komyung, Kubong, Songchun, Wooljin
Over 4,500 mg/kg of Zn	Keumjang, Wooljin, Eunchi, 2nd Yeonhwa, Imcheon, Chungyang

4. 왕수로 분해하여 분석한 중금속함량

보통 왕수를 이용하여 분해한 원소의 함량은 전함량분석의 70~90%에 해당되며⁵⁾, 대부분의 국가에서는 이 방법을 이용하여 토양의 환경기준을 설정하고 있다. 일반적으로 비오염지역의 토양에서는 0.35mg/kg Cd, 30mg/kg Cu, 35mg/kg Pb, 90mg/kg Zn이 함유되어 있는 것으로 알려져 있지만⁶⁾, 왕수로 분해하여 검출된 광산폐기물의 중금속 함량은 매우 높은 수준이었다. Table 2에는 이들 결과 중에서 비오염토양내 중금속 함량의 50배 (17.5mg/kg Cd, 1,500mg/kg Cu, 1,750mg/kg Pb 및 4,500mg/kg Zn) 이상이 검출된 광산들의 목록이다. 표에서 보는 바와 같이 총 39개의 조사 광산들 중에서 18개 광산이 해당되며 이들 광산폐기물에 대한 특별한 처리 방안이 이루어져야 할 것이다.

IV. 결론

국내에 산재되어 있는 휴광 또는 폐광된 금속광산들의 광산폐기물의 지구화학적 특성을 조사한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 광산폐기물의 paste pH값이 2~4정도의 낮은 경우와 6~8정도의 중성으로 구분된다. 이는 광산폐기물을 구성하는 광물질의 지구화학적 특성에 의해 좌우되며, 황화물을 포함하는 경우는 낮은 pH를 보이고 탄산염 광물을 함유한 경우에는 중성의 pH를 보인다.
- 2) 광산폐기물의 중화를 위해 석회석을 사용할 경우, 예상되는 석회시용량을 조사한 결과, 낮은 pH를 보이는 광산폐기물 1,000톤을 중화하기 위해서는 1톤 이상의 미분쇄된 석회석이 필요하였다.
- 3) 0.1N HCl로 추출한 광산폐기물의 Cd, Cu, Pb 및 Zn의 함량을 조사한 결과, 거도광산, 구봉광산, 고명광산, 금장광산, 덕곡광산, 병사광산, 삼광광산, 울진광산, 은치광산 및 청양광산 등에서 토양오염 우려기준 또는 대책기준을 초과하는 정도의 중금속이 검출되었다.
- 4) 왕수로 추출한 광산폐기물에서 비오염토양에 비해 수십배 이상의 중금속이 검출되었다. 특히 총 39개 광산 중에서 18개 광산의 광산폐기물에서 비오염토양에 비해 50배 이상의 중금속이 검출되어 다량의 중금속을 함유한 광산폐기물임이 확인되었다.
- 5) 연구 결과를 종합하면, 광산폐기물에 대한 효과적인 오염방지시설이 요구되며, 특히 오염이 상당히 진행된 지역 또는 지구화학적 측면에서 유독성 물질들의 이동도 또는 용해도가 높은 환경에 있는 광산폐기물에 대해 우선 순위를 주어 처리방안이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) 민정식, 정영욱, 이현주, 이동남. 광산지역 광해조사와 대책연구, 한국자원연구소 연구보고서 KR-97(C)-32, 한국자원연구소, 479p (1997)
- 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 (1995)

- 3) Jung, M. C. and Thornton, I. "Environmental contamination and seasonal variation of metals in soils, plants and waters in the paddy fields around a Pb-Zn mine in Korea". *Sci. Tot. Environ.*, **198**, pp. 105-121 (1997)
- 4) Sobek, A., A., Schuller, W. A., Freeman, J. R. and Smith, R. M. Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils, EPA-600/2-78-054, US-EPA, pp. 1-98. (1978)
- 5) Alloway, B. J. Heavy Metals in Soils. Blackie and Son, Glasgow. 350p. (1990)
- 6) Bowen, H.J.M. Environmental Chemistry of the Elements, Academic Press, New York, 333p. (1979)