

장풍 폐광산 주변 지질환경에서 중금속의 존재형태

이인경¹ · 이평구² · 최상훈^{1*} · 김지수¹ · 소철섭³

¹충북대학교 지구환경과학과, 기초과학연구소, ²한국지질자원연구원 지질환경재해연구부, ³고려대학교 지구환경과학과

Chemical Speciation of Heavy Metals in Geologic Environments on the Abandoned Jangpoong Cu Mine Area

In-Gyeong Lee¹, Pyeong-Koo Lee², Sang-Hoon Choi^{1*}, Ji-Soo Kim¹ and Chil-Sup So³

¹Dept. of Earth and Environmental Sciences, Institute for Basic Sciences, Chungbuk National Univ., Chungbuk 361-763, Korea

²Div. of Geological & Environmental Harzards, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

³Dept. of Earth and Environmental Sciences, Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

In order to identify the speciation of As and trace elements which are contained weathered waste rocks on the abandoned Jangpoong Cu mine area, five fraction sequential extraction was carried out. Concentrations of the extraction solutions which were acquired each fraction were measured by ICP-AES. Mineral characters of weathered waste rocks were determined by XRD. The weathered waste rocks could divide into two types (Type I and type II). Type I and type II weathered waste rocks are mainly composed of a quartz and a calcite, respectively. The most dominant speciation of As, Co and Fe is residual phase. Most of the speciation of Cd, Mn and Zn is residual phase for type I and Fe-Mn oxide phase for type II. In case of Cu, residual phase is predominant in type I and sulfide is predominant in type II. The most dominant speciation of Pb for type I and type II is associated with the residual phase and Fe-Mn oxide phase, respectively. At pH 4-7 range, the order of relative mobility considers Zn>Cu>Cd>Pb>Co>AS in type I, and Cd>Cu>Zn>Pb>As>Co in type II.

Key words: weathered waste rocks, Jangpoong Cu mine, sequential extraction, As and trace elements, speciation, mobility

폐광된 장풍광산의 풍화된 폐광석에 함유된 중금속의 존재형태를 규명하기 위해 5단계 연속추출법을 수행하였다. 각 단계에서 용출된 용액은 ICP-AES로 분석하였다. XRD로 풍화된 폐광석 시료들의 광물조성을 파악한 결과, 시료는 산성 환경에서 pH에 대한 완충작용을 할 수 있는 방해석의 유무에 따라 두 유형(type I and type II)으로 나눌 수 있었다. Type I 시료의 주 구성광물은 석영으로 방해석이 산출되지 않으며, type II 시료의 주 구성광물은 방해석이었다. 모든 시료에서 비소, 코발트, 철은 잔류형태로 존재하는 것이 가장 우세하였다. 카드뮴, 망간, 아연의 경우 type I 시료에서는 잔류형태가, type II 시료에서는 산화철망간형태가 우세하였다. 구리는 type I 시료의 경우 잔류형태가 가장 우세하였고, type II의 경우 황화광물형태가 우세하였다. 납은 type I 시료에서는 잔류형태가 가장 우세하였고, type II 시료에서 산화철망간 형태가 우세하였다. pH 4-7 사이에서 중금속의 상대적인 이동성은 type I 시료의 경우 아연>구리>카드뮴>납>코발트>비소의 순서였으며, type II 시료에서는 카드뮴>구리>아연>납>비소>코발트의 순서로 확인되었다.

주요어 : 폐광석, 장풍광산, 연속추출법, 중금속, 존재형태, 이동도

*Corresponding author: cshoon@chungbuk.ac.kr

1. 서 론

2004년 6월 경상남도 고성군에 위치한 삼산제일광산 부근의 주민들이 폐광산으로부터 기원되어진 카드뮴으로 인한 “이파이 이파이”병 의심 증상을 보인다는 보도가 있었다. 이를 계기로 전국의 크고, 작은 복원되지 않은 폐광산에 대한 국민적 관심이 집중되고 있는 실정이다. 아무런 조치 없이 방치되거나, 부적절한 방법으로 처리된 광산 폐기물(폐광석, 광미, 광산산성배수 등)은 지하수, 지표수 및 토양 등 주변 환경 물질에 대한 중금속 오염원 중 하나이다. 중금속으로 심하게 오염된 환경은 인간이나 동식물에게 직간접적으로 영향을 줄 것이다(안주성 등, 1999; 이민희 등, 2003; 이재영 등, 1996; 이진수 등, 2000).

중금속이 환경에 미치는 영향을 단순히 양적으로 평가하는 것은 불합리하다. 아무리 많은 함량이지만, 더 이상 확산이 일어나지 않고 고정화 되어졌거나, 식물 또는 동물의 체내에 흡수되지 않는다면 독성이 없다고 볼 수 있다. 이처럼 중금속의 독성은 이동도 및 생체흡수도 등과 연관되어지고, 이동도와 생체흡수도 등은 중금속의 존재형태, 결합형태, 구성물질과의 수반형태에 의해 결정된다(이평구 등, 2004b). 많은 양의 중금속을 함유하고 있는 광미와 폐광석에서 이 원소들은 지화학적 환경변화에 따라 흡착, 이온교환, 침전, 공침, 착화합물 등을 형성하는 반응을 한다. 이런 반응 과정 중 중금속은 자연적으로 안정화되거나, 재용출이 되어 오염확산의 원인이 되기도 한다. 따라서, 중금속이 어떤 형태로 존재하는지를 규명하는 것은 물리·화학적 환

경변화에 따른 중금속의 거동(잠재적 용출과 이동 및 변형)과 위해성을 예측하는 데 매우 유용한 평가방법이라고 할 수 있다(안주성 등, 2003; 이평구 등, 2004a).

이번 연구는 함동 장풍광산의 폐광석을 대상으로 Tessier *et al.* (1979)가 제시한 연속추출법을 이용하여 비소(As), 카드뮴(Cd), 코발트(Co), 구리(Cu), 철(Fe), 망간(Mn), 납(Pb), 아연(Zn) 등 8개 원소에 대한 존재 형태를 규명하여, 이 원소들의 거동 특성을 파악하고자 한다.

2. 지질 및 광산

장풍광산은 충북 괴산군에 위치하며, 등록광종은 동, 연, 아연, 금, 은이다. 광산 일대의 지질은 옥천대의 중앙부로서 변성퇴적암류와 이를 후기에 관입한 화강암류로 구성되어 있다(Fig. 1). 광산은 화강암류에 발달된 열극을 충전한 함동 석영 맥상 광상으로 석영맥의 주향은 주로 N15°E이며, 맥폭은 20~150cm로 팽창 변화가 심하다. 석영맥에서 관찰되는 황화광물은 주로 황철석, 유비철석, 황동석 등이며, 소량의 심아연석과 방연석이 산출된다. 맥석광물로는 석영과 형석이 산출된다.

이 광산은 연풍향과 만장향으로 개설하여 광산개발을 하여 왔으며, 현재는 폐쇄되어 주변에 대한 사방공사가 완료된 상태이다. 그러나 광산 본 갱도 하부, 계곡 하천에 인접한 곳에 운반갱 혹은 탐광하였던 갱도가 붕락된 상태로 있으며 이 붕락된 갱도로부터 산성배수(pH 3.0~5.0)가 배출되고 있다. 이곳에서 배출되는 산성배수는 갱으로부터 약 30m 정도 유출되어 나오며, 폭은

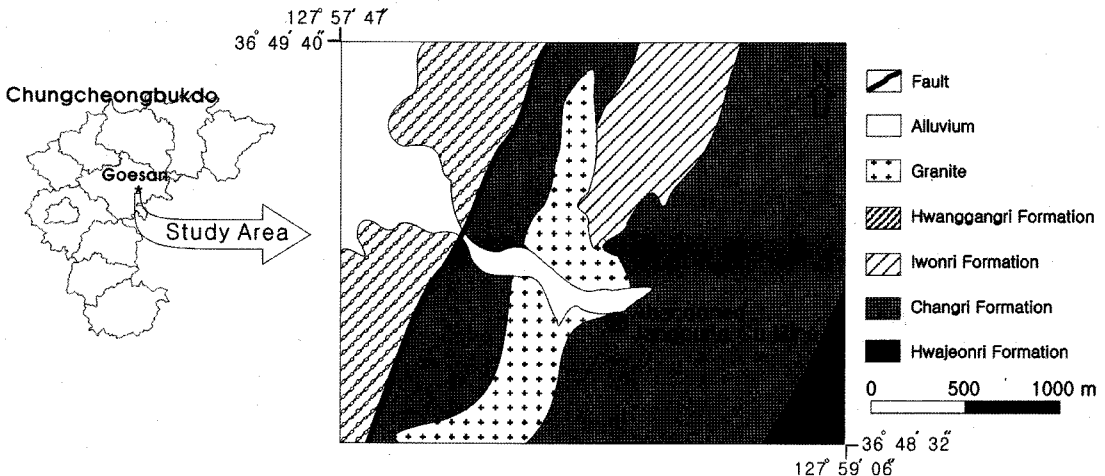


Fig. 1. Geologic map of the Jangpoong mine area(after Lee and Kim, 1972).

Table 1. The methodology of sequential chemical extraction (Tessier *et al.*, 1979).

Fractions	Chemical Extractant	Extraction Phase
I	1M MgCl ₂ , pH 7	exchangeable
II	1M CH ₃ COONa, HOAc, pH 5	carbonates
III	0.04M NH ₂ OH·HCl+25%HOAc, pH 2, 96°C, 6hours	amorphous Fe, Mn hydroxides
IV	30%(v/v) H ₂ O ₂ +0.02M HNO ₃ , 85°C, 5hours 3.2M NH ₄ OAc+20% HNO ₃ , 85°C, 3hours	sulfides
V	HNO ₃ , HNO ₃ +HClO ₄ , 6N HCl	residuals

1m 정도이고 강우량에 따라 유량의 변화가 심하다. 한편, 산성배수가 흐르는 수로를 따라 붉은색 또는 노란색의 풍화산물이 관찰된다. 무너진 갭도 하부에는 가로 50m, 세로 20m, 높이 5m 규모의 황화광물을 다량 포함하는 폐광석 적치장이 있는데, 이 적치장은 계속 하천과 접해 있어 장마나 홍수 때에는 폐광석이 하천으로 유실되거나 폐광석 더미와 반응한 산성배수 등이 하천을 오염시킬 가능성이 있다. 또한, 산성배수는 폐광석 더미를 통과하거나, 폐광석 적치장 위를 흘러 하천에 유입되어지고 있어 하천의 중금속 오염의 원인이 되고 있는 실정이다. 김지수 등(2002)은 갭도에서 흘러나온 산성배수에 대한 물리·화학적 특성과 지구물리 탐사를 통해 폐광석 적치장 내에서의 산성배수의 유동 경로를 밝히기도 하였다.

3. 연구방법

3.1. 시료채취

장풍광산에서 채광활동으로 인한 중금속 원소들의 분산특성과 오염수준을 조사하기 위해 폐광석(waste rock)의 풍화 잔류 시료를 채취하였다. 채취한 시료는 30분간 자동교란기로 교반시킨 후, 2mm 이하로 체질하여 50°C에서 건조하였다. 건조된 시료는 1/4법으로 축분하여 -100 mesh(<150 μm) 이하의 입도로 분쇄하였다.

3.2. 연속추출방법

토양과 퇴적물에 함유되어 있는 중금속의 존재 형태(chemical speciation)로는 광물 표면에 흡착, 광물형태로 침전, 탄산염광물, 산화광물 및 황화광물 등과 공침(co-precipitation), 퇴적물 중 유기물과 결합, 기타 규산염광물의 입자 격자 사이에 수반된 상태 등이 일반적이다. 연속추출법은 토양의 여러 구성광물과 수반되는 금속원소의 상대적인 결합세기와 물리화학적 환경의 변화에 따라 발생할 수 있는 잠재적인 화학반응에 관한 정보를 제공하기 위해 사용되기도 한다. 또한,

연속추출법은 산화/환원 환경의 변화 시 발생할 수 있는 중금속원소의 상대적인 이동도에 관한 정보를 제공한다. 퇴적물 내에 존재하는 중금속의 화학적 존재상태를 알아보기 위한 분석방법으로 많은 연속추출법이 제시되었다(Tessier *et al.*, 1979; Kersten and Forstner, 1986; 이평구 등, 2004a).

이번 연구에서는 장풍광산의 폐광석으로부터 유출된 중금속의 지화학적인 존재상태를 규명하기 위해 시료 1g을 취하여 Tessier *et al.* (1979) 이 제시한 연속추출법을 이용하였다(Table 1). 각 단계에서 회수된 시료는 다음 단계에서 분석하기에 앞서 탈이온수(deionized water)로 세척하여 각 단계에서의 오염을 최소화하였으며, 공시료(blank sample)로 분석의 정확성을 검증하였다.

중금속 함량의 분석은 ICP-AES (Perkins-Elmer Optima 3000XL) 를 이용하였으며, 분석조건은 RF Power 1300 watt, Plasma Flow 15 L/min, Coolant Flow 0.5 L/min, Nebulizer Flow 0.8 L/min이었다. 사용된 시약은 analytical grade (Prolabo 또는 Merck) 였고, ICP 분석 시 사용된 As, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn의 standard metal solution은 1,000 ppm stock solution (Merck) 을 희석하여 사용하였다. 전 분석과정에 이용된 탈이온수를 얻기 위해 Milli-Q Millipore system을 사용하였다.

4. 연구결과 및 토의

4.1. 지화학적 특성

장풍광산의 폐광석 시료를 주요 산출 광물에 따라 두 가지 형태로 구분하였다(Table 2). Type I의 주요 광물은 석영, 백운모이며, 소량의 단사녹니석, 미사장석, 조장석, rectorite로 구성되어 있고, 미량으로 자로사이트, 몬몰리노나이트, 적철석 등이 수반된다. Type II는 주로 방해석과 백운모 및 석영으로 구성되어 있으며, 소량의 단사녹니석과, 황철석을 수반한다. Type I과 type II의 가장 큰 차이는 산성환경에서 pH에 대한 완충작용을 할 수 있는 방해석의 유무이다.

토양의 산도(soil pH)는 구성광물에 따라 큰 차이를

Table 2. The mineral composition and soil pH of the waste rocks from the abandoned Jangpoong Cu mine.

Samples	Type	Primary minerals	Secondary minerals	Soil pH
JP2-3	I	quartz, microcline, albite, rectorite, clinochlore, muscovite	jarosite, montmorillonite	3.5
JP3-2	I	quartz, microcline, albite, rectorite, clinochlore, muscovite	jarosite	3.8
JP12-1	I	quartz, clinochlore, moscovite, microcline, albite	hematite, montmorillonite	3.4
JP12-2	I	quartz, clinochlore, muscovite, microcline, albite		4.1
JP4-2-1	II	calcite, clinochlore, quartz, muscovite		7.2
JP4-2-2	II	calcite, clinochlore, quartz, muscovite, pyrite		7.7

Table 3. Relative percentages of As and trace element concentrations within fraction F to F for waste rocks from the abandoned Jangpoong Cu mine.

		F I	F II	F III	F IV	F V
As	type I	0.0	0.1	8.9	0.9	90.0
	type II	0.1	0.3	14.9	4.6	80.2
Cd	type I	0.5	1.9	24.2	3.3	70.1
	type II	6.0	34.5	41.1	5.6	12.8
Co	type I	0.0	0.2	27.5	0.5	71.7
	type II	0.0	0.0	24.7	6.8	68.5
Cu	type I	1.2	3.5	15.3	26.4	53.6
	type II	0.1	27.4	16.5	48.9	7.2
Fe	type I	0.1	0.3	28.4	0.8	70.3
	type II	0.0	0.0	26.7	8.1	65.1
Mn	type I	5.0	3.0	25.4	2.0	64.6
	type II	3.2	32.4	59.9	1.0	3.5
Pb	type I	1.8	0.0	2.5	9.1	86.6
	type II	0.0	3.9	53.3	5.1	37.7
Zn	type I	0.3	8.0	23.1	18.3	50.3
	type II	0.0	23.2	65.7	7.9	3.2

보이고 있다. Type I의 토양산도는 3.38-4.11로 산성을 나타낸 반면, type II는 7.19-7.68로 약 염기성을 띠는 것으로 확인되었다(Table 2).

4.2. 중금속의 존재형태 비교

지구화학적 존재형태 결과는 각 단계별 용출함량을 합한 후 각 단계에서 용출된 함량을 나누어 단계별 백분율로 계산하였다. 두 유형의 비소 및 미량원소의 지구화학적 존재형태 분석결과와 평균값을 이용하여 정리하였다(Table 3).

비소 (As): Type I의 시료에서 비소는 잔류형태로 존재하는 비율이 평균 90%로 월등히 우세하였다(Table 3). Type II의 시료에 존재하는 비소 역시 잔류형태로 존재하는 함량이 전체 비소 함량의 평균 80%로 가장 우세하며, 산화철-망간의 형태로 존재하는 비소는 평균 15%로 확인되었다(Table 3). 본 폐광산지역에서 비소

는 산화환경에서 비교적 불안정한 존재형태인 이온교환, 탄산염광물 및 황화광물 형태로 존재하는 것은 매우 미약한 것으로 확인되었다(Fig. 2).

카드뮴 (Cd): Type I의 시료에서 잔류형태로 존재하는 카드뮴의 함량은 전체 카드뮴 함량의 평균 70%로 가장 우세하며, 산화철-망간의 형태로 존재하는 함량이 24%로 나타났다. 이온교환형태(0.5%), 탄산염광물형태(1.9%) 및 황화광물형태(3.3%)는 매우 미약한 것으로 나타났다(Table 3). Type II의 시료에서 카드뮴은 산화철망간 형태로 41%, 탄산염광물 형태로 35%, 그리고 잔류형태로 13% 존재하는 것으로 나타났다. 또한, 이온교환 형태, 황화광물 형태로 존재하는 카드뮴은 각각 6.0%, 5.6%로 확인되었다(Table 3).

코발트 (Co): Type I 시료에서 코발트의 가장 우세한 존재형태는 잔류형태로서 평균 72%이다. 산화철-망간

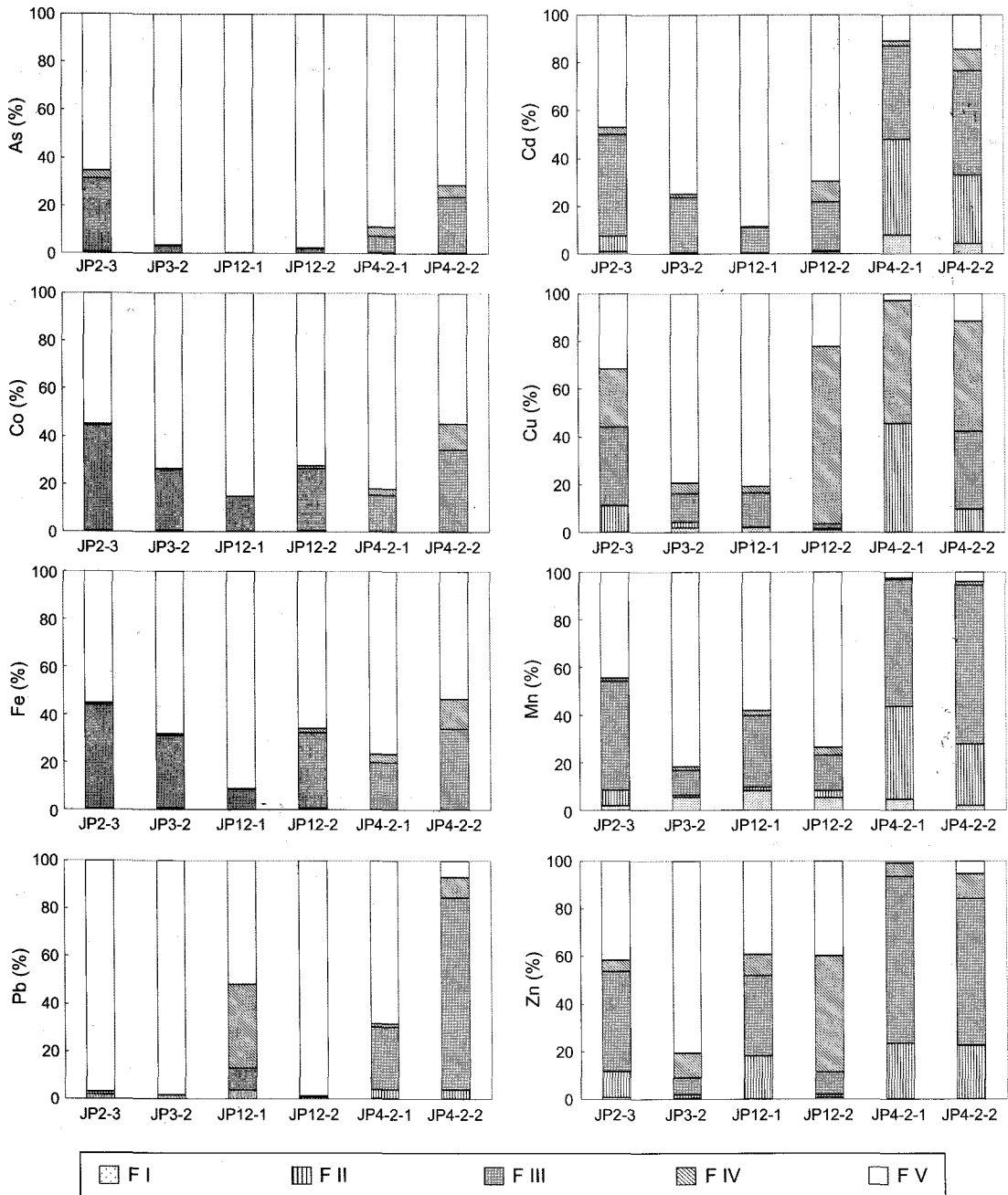


Fig. 2. The chemical partitioning of trace and major elements within the different frations(F I-F V) in waste rocks from the abandoned Jangpoong Cu mine.

의 형태로 존재하는 비율은 평균 28%이다. 이 밖의 이온교환, 탄산염광물 및 황화광물 형태로 존재하는 비율은 모두 1% 미만으로 검출되었다(Table 3). Type II 시료에서 코발트의 존재형태 역시, type I과 비슷한 것으로 확인되었다(Fig. 2). 가장 우세한 존재형태는 잔류

형태로, 전체 코발트 함량의 69%이며, 산화철-망간 형태로 존재하는 코발트의 함량은 25%로 검출되었다. Type II 시료의 경우, 황화광물의 형태로 존재하는 코발트가 6.8%로 상대적으로 많은 양 검출되어 type I과 차이를 보여준다. 이온교환 형태, 탄산염광물 형태

로 존재하는 코발트는 검출한계 이하이거나, 아주 미량 검출되었다(Table 3).

구리 (Cu): Type I 시료에서 구리는 54%가 잔류형태로, 26%가 황화광물 형태로, 그리고 15%가 산화철-망간 형태로 존재하는 것으로 확인되었으며, 이온교환 형태와 탄산염광물 형태는 각각 1.2%와 3.5% 나타났다(Table 3). Type II 시료에서는 황화광물 형태가 전체 구리함량의 49% 검출되었으며, 탄산염광물 및 산화철-망간의 형태가 각각 27%, 17%로 검출되었다. Type II 시료에서 잔류형태와 이온교환형태는 각각 7.2%, 0.1%로 매우 미약하다(Table 3).

철 (Fe): 철의 존재형태는 type I 과 type II 모두 코발트와 매우 유사하게 나타났다(Fig. 2). Type I 시료에서 잔류형태로 존재하는 비율은 70%이며, 산화철-망간의 형태로 존재하는 비율은 28%로 확인되었다. 그 밖의 이온교환 형태, 탄산염광물 형태 그리고 황화광물로 존재하는 철의 함량은 모두 1% 이하로 검출되었다(Table 3). Type II 시료의 경우 65%가 잔류형태로, 27%는 산화철-망간의 형태로 존재하는 것으로 나타났다. 황화광물의 형태로 존재하는 철은 8.1%로 검출되었다(Table 3). 이온교환 형태와 탄산염광물 형태는 검출한계 이하이거나 미약하였다(Fig. 2).

망간 (Mn): Type I 시료에서 망간의 존재형태는 잔류형태가 가장 우세하며(65%), 산화철-망간형태(25%)가 그 다음으로 우세한 것으로 나타났다(Fig. 2). 이온교환형태로 존재하는 망간의 함량은 평균 5% 정도로 적은 양이지만, type I 시료에서 이온교환형태로 존재하는 중금속이나 미량원소 중 가장 많은 함량이다. 탄산염광물 형태와 황화광물 형태로 존재하는 망간은 각각 3.0%, 2.0%로 나타났다(Table 3). Type II 시료의 망간은 산화철-망간의 형태로 존재하는 비율이 60%로 가장 높았고, 탄산염광물 형태로 존재하는 망간은 32%로 나타났다. 이온교환 형태로 존재하는 망간은 3.2%, 잔류형태는 3.5%, 황화광물 형태는 1.0%로 나타났다(Table 3).

납 (Pb): Type I에서 납의 존재형태는 잔류형태가 87%를 차지하여 가장 우세한 형태로 나타났다. 황화광물로 존재하는 납은 전체 납 함량의 9.1%, 산화철망간 형태로는 2.5%이다. 이온교환형태는 1.8%로 미약하며, 탄산염광물 형태로 존재하는 납은 검출 한계 이하로 나타났다(Table 3). Type II에서 납의 존재형태는 FIII에서 53% 검출되어 산화철망간의 형태로 존재하는 것이 우세한 것으로 확인되었다. 잔류형태로 존재하는 납의 비율은 38%로 산화철망간의 형태 다음으로 우세하다. 탄산염광물과 황화광물 형태로 존재하는 납은 각각 3.9%, 5.1%이며, 이온교환형태의 납 함량은 검출한계 이하이다(Table 3).

아연 (Zn): Type I의 시료에서 잔류형태로 존재하는 아연의 함량은 50%로 가장 우세하며, 산화철-망간의 형태로 존재하는 함량은 23%, 황화광물 형태로 존재하는 함량은 18%로 나타났다. 이온교환형태 0.3%, 탄산염광물형태 8.0%로 나타났다(Table 3). Type II의 시료에서 가장 우세한 아연의 존재형태는 산화철-망간형태(66%)이며, 탄산염광물로 존재하는 아연은 23%이고, 황화광물 형태는 7.9%로 존재하는 것으로 나타났다. 잔류형태로 존재하는 아연은 3.2%이며, 이온교환형태는 검출한계 이하였다(Table 3).

4.3. 중금속의 이동도

장풍광산 폐광석 내에 존재하는 중금속에 대한 본 지역에서의 잠재적인 이동성을 평가했다. 이 지역 빗물의 산도와 산성배수를 고려하였다. 장풍광산이 인접한 충주시의 1992년부터 2001년 사이의 빗물의 pH는 4.0~7.0으로 약산성에서 중성을 띠고 있었고 (환경부, 2002), 하부 갱도에서 배출되는 산성배수의 pH는 3.0~5.0이하였다. 이 두 조건의 pH 영역에서 비교적 쉽게 용해가 일어날 수 있는 형태는 이온교환과 탄산염광물형태이다. 이를 기준으로 한 장풍광산 지역에서 주요 중금속의 잠재적 이동도는 type I 시료의 경우 아연>구리>카드뮴>납>코발트>비소의 순이었으며, type II 시료의 경우는 카드뮴>구리>아연>>납>비소>코발트 순이었다(Table 4).

Table 4. Mean percentages of heavy metal concentrations within fraction FI+FII for waste rocks from the abandoned Jangpoong Cu mine.

	As	Cd	Co	Cu	Pb	Zn
type I	0.1	2.4	0.3	4.7	1.8	8.3
type II	0.3	40.5	0.0	27.5	3.9	23.2

5. 결 론

장풍광산의 폐광석에 함유된 비소, 철, 코발트는 대부분 잔류형태가 우세하였으며, 이는 이 원소들이 비교적 안정한 상태로 고정화되어지고 있음을 나타낸다. 망간, 아연, 카드뮴은 탄산염광물을 포함하지 않은 type I 시료에서는 잔류형태가 가장 우세하였으며, type II 시료에서 산화철망간형태가 우세한 것으로 나타났다. 구리의 경우, type I은 잔류형태가 type II는 황화광물형태가 우세한 것으로 밝혀졌고, 납은 type I은 잔류형태, type II는 산화철망간형태가 가장 우세한 것으로 나타났다. 산성 환경에서 비교적 불안정한 탄산염광물형태로 존재하는 중금속 중 오염 확산의 우려가 되는 것들은 카드뮴, 구리, 아연 등이며, 다른 원소들은 그 함량이 검출한계 이하이거나, 매우 적은 것으로 나타났다.

이번 폐광석에 함유된 중금속의 존재형태 연구를 토대로 산화/환원환경을 고려한, 용출실험이 뒷받침 된다면 장풍광산 주변의 지하수나 지표수에 대한 광산의 영향으로 인한 중금속 오염의 정도를 정량적으로 파악할 수 있을 것으로 예상된다.

사 사

본 논문은 2004년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 김지수, 한수형, 최상훈, 이경주, 이인경, 이평구 (2002) 장풍 폐광산의 산성광산폐수에 의한 침출수 유동에 대한 지구물리 및 지하확탐사 자료의 상관 해석. 지구물리, 5권, p. 19-27.
- 안주성, 전효택, 손아정, 김경웅 (1999) 구봉 금은광산 주변 지역의 비소 및 중금속에 의한 환경오염과 비작물의 흡수특성. 한국자원공학회지, 36권, p. 159-169a.
- 안주성, 김주용, 전철민, 문희수 (2003) 풍화광미네 고상 비소의 광물학적·화학적 특성 및 용출 가능성 평가. 자원환경지질 36권, p. 27-38.
- 이민희, 최정찬, 김진원 (2003) 고로폐광산 주변 농경지 토양 및 퇴적토의 중금속 오염 분포 및 복원 대책 설계. 자원환경지질, 36권, p. 89-101.
- 이재영, 이인호, 이순호 (1996) 금속 폐광산 주변의 토양, 식물 및 하천의 중금속 오염에 대한 지화학적 연구, 달성 및 경산광산. 자원환경지질, 29권, p. 597-613.
- 이종혁, 김정환 (1972) 괴산도폭(1:50,000) 및 설명서. Geological survey of Korea.
- 이진수, Klinck, B.A., Moore, Y, 전효택 (2000) 다덕광산 주변에서의 독성원소들의 환경오염 및 인체흡수도. 자원환경지질, 34권, p. 273-282.
- 이평구, 강민주, 최상훈, 신성천 (2004a) 광미 및 오염된 토양에서 중금속의 존재형태 및 잠재적인 이동도. 자원환경지질, 37권, p. 87-98.
- 이평구, 조호영, 엄승준 (2004b) 폐광산지역의 오염특성 조사와 평가를 위한 지구화학적 접근방법. 37권, p. 35-48.
- 환경부 (2002) 대기환경연보. 2001, 198p.
- Kersten, D and Forstner, U. (1986) Chemical fractionation of heavy metals in anoxic estuarine and coastal sediment. Water Sci. Techno., v 18, p. 121-130.
- Tessier, A., Campell, P.G.C. and Bisson, M. (19) Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metal. analytical chemistry, v. 51, p. 844-851.

2005년 10월 4일 원고접수, 2005년 12월 5일 게재승인.