

## 국내 휴/폐광 금속광산 주변의 중금속 환경오염 평가

정명채<sup>1\*</sup> · 정문영<sup>1</sup> · 최연왕<sup>2</sup>

<sup>1</sup>세명대학교 자원환경공학과, <sup>2</sup>세명대학교 토목공학과

## Environmental Assessment of Heavy Metals Around Abandoned Metalliferous Mine in Korea

Myung Chae Jung<sup>1\*</sup>, Moon Young Jung<sup>1</sup> and Yun Wang Choi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Earth Resources & Environmental Geotechnics Engineering, Semyung University, Jecheon 390-711, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon 390-711, Korea

The objective of this study is to review of environmental assessment of heavy metals derived from various metalliferous mines in Korea. As a results of national wide research for heavy metal contaminations in the vicinity of metalliferous mines, the main contaminants are mine waste materials including tailings. From the materials, toxic elements including As, Cd, Cu, Pb and Zn can be dispersed into downstream through wind and water. Thus, soils around the mines contain elevated levels of those elements, which are over the guide values for environmental regulation of soils in Korea. Arsenic is one of the most important elements contaminated by mining activities, to a less extent, Cd, Cu, Pb and Zn. In spite of remediation works for some metal mines by the government, there are still lots of abandoned mines which are necessary for reclamation of mining sites. This study also includes that metal concentrations in soils and tailings can be varied upon various decomposition methods including 0.1N HCl and aqua regia and sequential extraction scheme, with differences in each element, too. This may be due to geochemical characteristics of the elements, such as solubility, mobility and chemical forms in the geochemical environment. Finally, it is suggested that a certain organization should be runned by Korean government for management of abandoned mines.

**Key words :** Environmental assessment, Heavy metals, Metalliferous mines, Chemical speciations

이 연구의 목적은 국내의 휴폐광 금속광산의 중금속 오염을 종합적으로 평가하는 것이다. 그 동안 정부와 지방자치단체 및 개별 연구자에 의해 이루어진 휴폐광 금속광산의 중금속 오염도를 종합적으로 조사한 결과, 주요 오염물질은 광미를 포함한 광산폐기물이었다. 이들로부터 다양한 유독성 물질, 특히 As, Cd, Cu, Pb 및 Zn 등이 바람과 물에 의해 하부 수계로 이동되어 환경문제를 일으키고 있다. 그 결과 많은 광산들 주변에서 다량의 As 및 중금속이 검출되었으며, 일부는 토양환경보전법의 우려기준 및 대책기준을 초과하고 있다. 초과 항목 중에서는 비소의 초과 빈도가 가장 높았으며 그 다음으로 Cd, Cu, Pb, Zn 등의 오염 빈도도 높은 편이었다. 국가에서 지속적인 광해방지사업을 시행함에도 불구하고 아직도 많은 광산에서 오염물질이 배출되고 있는 실정이다. 특히, 다양한 추출법을 적용하여 오염물질의 추출량을 조사한 결과, 광미 및 토양은 지구화학적 특성을 잘 반영하고 있다. 종합적으로 볼 때, 정부주도로 휴폐광산의 관리를 위한 전담기구의 설치가 필요하다.

**주요어 :** 환경오염평가, 중금속, 금속광산, 화학적 존재형태

### 1. 서 론

20세기 들어오면서 산업화와 도시화의 속도가 빨라

지면서 인간 삶의 질적 수준은 높아졌다. 하지만 이러한 향상을 위해 인간은 과거에 비해 다양한 광물자원을 얻고자 부분별하게 금속자원을 개발하였으며, 그 결

\*Corresponding author: jmc65@semyung.ac.kr

과 국내외에서 광산개발에 의한 환경문제가 지속적으로 발생되고 있다. 물론 광산의 개발과 환경오염이 항상 양의 상관성을 갖는 것은 아니지만 대부분의 국가에서는 자원개발을 국가기간산업으로 육성하면서 개발 이후의 환경문제에 대해서는 많은 투자를 하지 않아 다양한 환경문제가 발생되고 있는 실정이다.

국내의 광업현황을 살펴보면, 국내 광업법상의 법정 광물 66개중 2000년말 현재 생산되고 있는 광종은 총 22개 광종이며, 이중 금속광이 6개, 비금속광이 16개이다. 특히, 국내 일반광 가행광산수는 2000년말 기준 541개로서 1991년 595개에 비해 54개가 감소하였고 광업종사자수는 2000년말 기준 4,325명으로 1991년의 8,985명에 비해 51.9% 감소하였다(www.mocie.go.kr). 국내 광업의 부진과 더불어 기존의 휴/폐광 주변 지역의 환경문제도 지속적으로 대두되고 있다.

국내의 경우, 1998년을 기준으로 전국에는 906개 금속광산이 산재되어 있으며, 이 중에서 전체의 98.7%에 해당되는 894개소는 휴광 또는 폐광되었다. 이들 광산 중에서 127개소(14%)는 휴/폐광 이후 적절한 환경 복원 및 안전 시설의 미비로 지반침하와 광미의 중금속 오염 및 갱내수 유출로 인한 광해가 발생하고 있으며, 특히 303개소의 휴/폐금속광산은 토양오염이 발생할 수 있는 것으로 조사 분석되었다(www.me.go.kr). 특히, 폐금속광산에서는 과거 채광이나 선광·제련과정 등의 광산활동으로 인하여 배출된 광산폐기물들(폐석, 광미, 광석광물, 광산폐수 등)이 광산주변에 그대로 방치되어 있어 집중 강우나 강풍에 의해 하부로 분산되어 광산 하부의 농경지와 수계의 환경오염을 지속적으로 일으키고 있다(Jung *et al.*, 2001). 이렇게 오염된 토양이나 하천수는 농작물의 성장에도 영향을 미쳐 궁극적으로는 이를 섭취하는 인간의 건강에 심각한 문제를 야기한다. 또한 광산환경오염은 여타의 환경오염원과는 달리 그 진행초기단계에서는 자각하기 어려우나, 오염이 장기적으로 진행되었을 때 그 정화 및 복원에는 지대한 노력과 막대한 경비가 소요된다. 협소한 토지를 다양하게 이용해야 하는 우리 나라의 경우, 토지의 청정성 확보와 국토의 효율적인 이용은 국가의 지속적인 발전에 필수적인 요소이다.

그 동안 국내에서 수행된 휴/폐광산에 대한 환경오염 관련 연구들은 대부분 단일광산에 대한 토양, 수계, 식물에 대한 일회성 환경오염 조사에 그치고 있으며(정명채, 1994; 민정식 등, 1997; 정영옥 등, 2001; 고일원 등, 2003), 환경오염지역의 복원에 대한 인식이 매우 부족한 실정이다. 다만 최근에 오염된 토양 및 산성광

산배수에 대한 선진국들의 처리 기술이 소개되면서 이에 대한 연구들이 진행중이거나 단편적으로 현장에 일부 적용되고 있는데, 이 또한 효과적인 복원기술이 미비하여 단순 복토에 의존하거나 극히 일부 광산지역을 대상으로 환경처리시설을 설치하는데 머무르고 있다. 따라서 이러한 유독성 오염물질의 발생에서 처리에 이르는 전과정을 효과적으로 운용·관리하는 기술이 요구되고 있다.

이 연구에서는 휴/폐광 금속광산을 대상으로 그동안 국내에서 이루어진 환경오염의 조사, 분석 및 평가 결과를 종합적으로 정리하여 현재 휴/폐광 금속광산이 갖고 있는 문제점을 도출하고 이를 해결하기 위한 방안을 중심으로 기술하고자 한다.

## 2. 금속광산 환경영향 조사, 분석 평가 기술의 국내외 동향

환경지구화학분야는 지질학적 물질의 탐사, 개발 및 활용에 의해 발생하는 지표의 환경오염을 다루는 학문으로서, 외국 선진국에서는 1980년대 이후 연구가 활발히 진행되었다. 이러한 분야에서 특히 광산환경에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 즉, 환경지구화학을 기반으로 위해성 금속 및 무기물질의 오염도 조사와 평가, 지표분산과 이동모델링 개발, 오염원특성 평가 및 환경오염처리에 이르는 각종 연구가 수행되었다. 특히, 국내의 금속광산에 대한 환경지구화학분야 연구는 1990년대부터 활발히 진행되어 휴/폐광 금속 및 석탄 광에서의 위해성 물질의 지구화학적 연구가 수행되었다. 그 동안 국내외에서 광산환경을 주제로 연구된 결과를 기술별로 살펴보면 다음과 같다.

### 2.1. 오염원 특성조사기술

오염물질 처리를 위한 기본적인 사항은 오염물질의 물리화학적 및 생물화학적 특징을 정확하게 평가하는 일이다. 이를 위하여 오염부지에 대한 지구화학적 조사가 선행되어야하며 이를 통해 획득한 자료를 기초로 적절한 환경처리가 이루어져야 한다.

미국에서는 1980년 종합환경문제 대책, 보상, 책임에 관한 법률(CERCLA)을 제정하고 1980년과 1984년에 자원보전과 자원재활용에 관한 법률(RCRA)을 제정하여 오염지역에 대한 복원사업을 추진하였으며, 특히 SITE(Superfund Innovative Technology Evaluation) 프로그램을 통해 복원 관련 신기술을 개발하고 있다. 이 과정에서 모든 기술은 오염원의 특성과 부지선정에

대한 기초자료를 확보하도록 규정하고 있다. 여기에서는 지구물리 및 지구화학조사를 통해 오염물질의 시간적 공간적 자료를 확보하고 있다. 특히 지구화학적 조사에서는 오염원의 물리화학적 특성을 규명하기 위하여 토양 및 지하수의 시료채취, 화학분석 및 자료 검정을 실시하고 있다. 유사한 프로그램은 캐나다, 호주, 영국, 일본에서도 운영되고 있으며, 특히 호주에서는 ACMER(Australian Centre for Mining Environment Research)에서 휴폐광산에 의해 오염된 환경을 복원하기 위한 기술적인 연구를 수행하고 있다. 영국에서는 지구화학분야를 응용한 오염원특성조사 프로그램이 영국지질조사소와 임페리얼대학에서 활발히 진행되고 있다(BGS, 2000).

국내에서도 오염원의 물리화학적 특성 규명을 위한 기술이 활발히 연구 개발되어 왔다. 대표적인 연구로는 지구물리, 지구화학적 오염영역 탐지 및 감시기술개발 연구(이태섭 등, 1995)이며, 특히 최근 10 여년간 휴폐광산에서 토양, 식물, 지표수/지하수 및 하상퇴적물에 대한 조사연구가 활발히 진행되었다(전효택 등, 1996). 그러나 이러한 연구의 대부분은 단일 오염원에 대한 지구화학적 특성규명에 국한된 연구가 대부분이며, 국가 전체 규모의 광상환경의 종합적 고찰은 환경부의 폐광지역에 대한 토양오염도 조사 프로젝트로서 1997년부터 2004년도까지 158개 중점관리대상 광산에 대한 조사가 이루어지고 있다. 이외에도 광산활동에 의한 전국적 규모의 오염특성연구로는 박용하(1994), 전효택 등(1996), 한국과학기술원(1997), 민정식 등(1997), 정영욱 등(2001), Jung *et al.*(2001) 등이 있다.

광산지역의 토양에 대한 오염원의 특성연구의 또 다른 주제중의 하나는 오염물질의 화학적 형태를 규명하는 기술로서 통상 연속추출법 또는 단계별추출법으로 알려진 sequential extraction scheme이다. 이는 오염물질의 화학적 형태를 결합형태에 따라 4~6가지 형태로 구분하는 기술로서 1979년 Tessier 등의 연구결과를 기초로 활발한 연구가 진행되고 있다(Tessier *et al.*, 1979). 이러한 기술은 국내에 소개되어(정명채, 1994) 현재 환경부의 광산지역 환경오염도 조사와 개별 연구에 적용되고 있다.

## 2.2. 오염물질이동/분산규명기술

광산활동에 의한 오염물질의 지구화학적 물질의 거동을 이해하는 연구 중에서 오염물질의 지표 분산도 연구가 필요하다. 이는 각 지구화학적 원소의 이동도는 지표환경, 화학적 결합 형태, 원소 고유의 성질 등에 따라

변화하므로 이에 대한 지구화학적 규명기술이 발전해 왔다. 이 주제는 상기한 오염물질특성규명기술과 병행하여 연구가 진행되어 왔으며, 지구화학기술뿐만 아니라 지구물리, 광물암석학 등의 기반기술이 공동으로 적용되었다(이태섭 등, 1995).

오염물질의 이동모델의 기초적인 단계는 미국과 영국의 지구화학자들에 의해 연구되었으며 (Rose *et al.*, 1979; Thornton, 1983), 1990년대에 들어와서 각국의 지구화학자들에 의해 조사대상지역을 중심으로 기술이 개발되었다. 대부분의 연구 결과는 산화환원전위(Eh) 및 수소이온농도(pH)에 따라 원소의 흡탈착이 지배를 받으며 이외에도 Fe, Mn, Al 등의 수화물 또는 산화물에 영향을 받는 것으로 조사되었다. 국내에서는 오염물질의 거동에 대한 지구화학적 연구를 종합적으로 조사한 연구는 미미하며 대부분 개별 오염지역에서의 분산거동 및 분포 패턴 연구가 진행되었다.

## 2.3. 환경오염 위해성 평가기술

환경위해성평가는 제반 환경문제의 조사에 필수적인 요소이다. 이 기술에서는 지구화학적 기술이외에도 화학공학, 환경공학 및 관련 기술 분야의 통합적 운영으로 이루어지는 것으로서 지구화학분야는 오염물질의 위해 정도를 분석하는 기술을 담당하고 있다. 위해성평가에서 지구화학적 기술이 주요 요소가 되는 대표적인 방법으로는 영국지질조사소가 개발한 SBET(Simple Bioavailability Extraction Test)로서 인체 온도와 유사한 환경에서 오염물질의 인체흡수도를 조사하는 기술로서 이를 기반으로 국내의 폐금속광산에서 토양, 수계, 식물체 등의 오염도를 분석하여 인체로의 영향을 조사한 바 있다(고일원 등, 2003; 이진수 등, 2003).

## 2.4. 오염환경복원/정화기술

광산지역에 대한 오염환경복원사업과 관련한 연구는 주로 광산지역에 대한 환경복원연구가 주종을 이루고 있다. 미국의 경우 전술한 SITE 프로그램에서 활발한 연구가 진행되고 있으며, 대표적인 연구로는 EPA의 지원으로 폐수처리를 위한 수동시스템인 소택지법의 적용(Lorion, 2001), 금속오염토양의 현장처리를 위한 최신키텐(US EPA, 1997), 금속오염 토양 및 지하수 처리(Evanko and Dzombak, 1997), 콜로라도의 Summitville지역 광산의 환경조사(King, 1995) 등이 있다. 호주에서도 전술한 ACMER을 중심으로 산성광산배수의 환경관리에 대한 연구(Lee, 1999)가 활발히 진행되고 있다. 국내에서도 환경오염복원사업과 관련된 연구는 비교

적 활발히 진행되어왔다. 이들 중에서 지구화학기술을 응용한 것은 주로 휴폐광산 복원 기술에 적용되었다. 대표적으로는 오염수계의 경우 소택지, SAPS(Successive Alkalinity Producing System) ALD(Anoxic Limestone Drainage) 등이 활용되었으며, 토양 또는 광산폐기물은 복토법(soil capping) 등이 적용되었다.

### 3. 국내 휴폐광 금속광의 현황과 환경오염 수준

#### 3.1. 금속광산 매장량

국내의 금속광의 개발 역사는 매우 길지만 대부분의 광산개발은 20세기에 이루어졌다. 그 동안 국내의 금속광에 대한 수급현황은 산업자원부를 중심으로 매년 수행되고 있다. 가장 최근의 자료인 2002년말을 기준으로 국내의 금속광물자원 매장량을 Table 1에 요약하였다. 표에서 보는 바와 같이 금속 광물자원의 총 매장량은 1.12억톤으로 추정하고 있으며, 이 중에서 연/아연, 철(티탄철 포함), 텅스텐 및 희토류의 비율이 높으며, 금과 은도 12% 정도로 높은 비율이다.

#### 3.2. 금속광산 환경오염도 조사 결과

그 동안 국내에서는 여러 연구자들에 의해 금속광산 주변의 환경오염 연구가 수행되었다. 아직 이들에 대한 종합적인 연구 결과의 DB화가 이루어지지 않아 각각의 연구 결과로만 여러 학회지, 보고서 및 연구 결과로 발표되고 있다. 향후 이들에 대한 종합적인 고찰과 환경영향 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 이 논문에서는 저자가 그 동안 국내의 광산에 대한 조사 결과와 환경부에서 1997년도부터 실시하고 있는 폐

금속광산 실태조사의 결과를 바탕으로 국내의 금속광에 대한 종합적인 오염도를 평가하고자 한다.

금속광산에 대한 종합적인 고찰은 주로 환경부의 폐 금속광산 실태조사로 이루어졌다(환경부, 1998; 1999; 2000; 2001; 2002; 2003). 즉, 각 지방자치단체에서 조사한 오염가능광산을 종합하여 총 158개 중점관리대상을 선정하여 이들에 대한 정밀조사가 연차적으로 수행되었다. 세부적으로는 1997년도부터 시작하여 2001까지 각 지방환경청을 중심으로 매년 10 여개 광산을 대상으로 1.64~1.80억원의 예산으로 총 42개 광산에 대한 세부적인 환경오염도를 조사, 분석하였다(이 과정에서 158개 중점관리대상 광산 중에서 경남 고성군의 성지광산 및 경남 거창군의 천세광산은 미확인으로 조사되지 못했으며 대신에 강원도 홍천의 방골광산을 추가로 조사함). 이를 기준으로 매년 2~3개의 우선 복원 대상 광산을 선정하여 복원사업이 이루어졌다. 한편, 2001년도부터는 미조사된 115개 광산을 지역별로 구분하여 '폐금속광산 토양오염실태 일제조사 사업'이 실시되었다. 2001년도에는 영남권역(경북, 경남, 대구, 부산)의 32개 광산(1개 광산 미확인), 2002년도에는 강원, 경기, 전북, 전남권역의 32개 광산에 대한 조사가 수행되었다. 2003년도에는 충북권 27개 광산에 대한 조사가 수행되고 있다. 여기에서도 158개 중점관리대상광산 중에서 옥천군의 추령(옥전)광산과 충주시의 대항광산이 미확인되어 단양군의 조일(상곡)광산과 제천시의 복수광산으로 대체하여 조사되고 있으며, 2004년도에는 충남권의 23개 광산에 대한 조사를 끝으로 종합적인 조사사업이 완료될 예정이다. 그 동안 수행된 폐금속광산 토양오염 정밀조사 실적은 Table 2에 요약하였다. 이들

Table 1. The ore reserves of metals in Korea(data based on 2002.12.31).

Metals	Mine No.	Grades	Ore reserves(×1,000tons)		
			proved	probable	total
Au	94	Au 7.4g/t	1,105	4,429	5,534
Ag	13	Ag 214.3g/t	2,391	4,761	7,152
Cu	26	Cu 2.5%	266	2,004	2,270
Pb & Zn	31	Pb 2.2%, Zn 3.2%	7,894	9,674	17,568
Fe(Ti)	31(2)	Fe 40.0%, TiO <sub>2</sub> 19.3%	11,905(7.1)	20,838(1,417)	32,743(1,424)
W	18	WO <sub>3</sub> 0.5%	6,901	9,638	16,539
Mo	4	MoS <sub>2</sub> 0.5%	373	2,174	2,547
Mn	2	Mn 19.6%	-	360	360
Sb	1	Sb 2.1%	10	12	22
Sn	2	Sn 2.0%	40	907	947
Au(placer)	9	Au 0.887g/m <sup>3</sup>	-	2,864 <sup>1)</sup>	2,864 <sup>1)</sup>
REE	1	R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2.13%	10,004	15,968	25,972
overall	232		40,889	70,769	111,658

<sup>1)</sup>unit in kg

**Table 2.** List of abandoned metalliferous mines having detailed survey for soil contamination.

Year	Number	Mine name (administrative area)
1997	11	Banggol(Hongcheon), Butdeun(Bonghwa), Enuchi(Samcheok), Geumjeong(Bonghwa), Ilwol(Yangyang), Indae(Jinan), Palbon(Jeongeup), Sama(Goseong), Sampung(Changwon), Samsan(Goseong), Seongan(Yeongwol)
1998	11	Chonam(Gwangyang), Dongjin(Jinan), Dongmyeong(Jeongseon), Gilgok(Hongcheon), Gwangyang(Gwangyang), Jeolgol(Haman), Pungjeong(Bonghwa), Pungwon(Geochang), Seoksan(Gunui), Sewoo(Jeongseon), Yanggok(Bonghwa)
1999	10	Cheongyang(Cheongyang), Deokon(Imsil), Geumjang(Uljin), Myeongbong(Boseong), Okbang(Bonghwa), Okgye(Gangneung), Pocheon(Pocheon), Tohyeon(Euseong), Yeongjun(Pocheon), Yongseok(Pocheon)
2000	10	Baekun(Jinan), Guryong(Changwon), Nakdong(Jeongseon), Samdong(Yeongdong), Samsanjeil(Goseong), Sanmak(Bonghwa), Sanyang(Boseong), Sucheol(Gunui), Suncheon(Suncheon), Wolru(Yeongdong)
2001	32	Bongmyeong(Seongju), Changbo(Yeongdeok), Changpo(Masan), Cheongsong(Cheongsong), Daejeong(Jinju), Daemin(Hapcheon), Dogok(Yeongdeok), Donga(Geje), Dongil(Uiseong), Dongil(Uiseong), Dongjeong(Yeongdeok), Dongjin(Geochang), Dupo(Goseong), Eunseong(Yeongcheon), Geomdongchilbo(Uiseong), Gorye(Bonghwa), Hwacheon(Yeongdeok), Hwanggeumsan(Yecheon), Hyeongje(Seongju), Jangwon(Cheongsong), Jeonheung(Uiseong), Joyadong(Daegu), Mandaesan(Hapcheon), Milyang(Milyang), Mulgeum(Gimhae), Okdong(Uiseong), Samyang(Milyang), Ssangjeon(Uljin), Sueo(Yecheon), Taeyang(Hapcheon), Yangseong(Yangsan), Yongho(Busan), Yugeum(Yeongdeok)
2002	32	Beonam(Jangsu), Boche(Anseong), Bogae(Anseong), Buguk(Goseong), Bugwang(Goseong), Cheolam(Taebaek), Cheontae(Jeongeup), Chudong(Samcheok), Daedeok(Damyang), Daehaeje(Muan), Deokeum(Naju), Deokheung(Chuncheon), Dongbo(Goseong), Dongsin(Hwasun), Dongyang(Hongcheon), Dunjeon(Samcheok), Gangwon(Jeongseon), Geumpung(Gimje), Geumwang(Yangpyeong), Gomyeong(Goseong), Haeseong(Muan), Jeonbo(Boseong), Jeonjuil(Wanju), Jucheon(Yeongweol), Palgong(Jangsu), Sambo(Hwaseong), Samhwa(Donghae), Samjo(Taebaek), Sangdong(Yeongweol), Songcheon(Gangneung), Wondong(Taebaek), Yangyang(Yangyang)
2003	27	Boksu(Jecheon), Boryung(Chungju), Changgeum(Gisan), Cheongju(Cheongju), Cheonheung(Yeongdong), Cheonsu(Gisan), Chilseong(Dangyang), Chungcheong(Cheongwon), Daehwa(Chungju), Eumseong(Eumseong), Eungok(Dangyang), Geumbo(Yeongdong), Geumseonggirin(Jecheon), Geumwang(Eumseong), Haksan(Yeongdong), Hongasusan(Jecheon), Hwagok(Chungju), Jangam(Gisan), Joilsanggok(Jecheon), Jeungjadon(Goisan), Munbaekyuchang(Jincheon), Namseong(Okcheon), Nangok(Yeongdong), Okjeon(Yeongdong), Samdeok(Chungju), Taechang(Chungju), Yeongbogari(Yeongdong)
2004	23	making a plan
Total	156	
Unknown mine		Cheonse(Geochang), Churyong(Yeongdong), Daehwang(Chungju), Eungok(Jinju), Seongji(Goseong)

조사 결과 중에서 2003년 및 2004에 수행예정인 충남 북권 및 미확인된 2개 광산을 제외한 106개 광산에 대한 조사 결과를 바탕으로 토양오염 대책기준을 초과하는 광산들의 리스트를 Table 3에 요약하였다. 표에서 보는 바와 같이 전체 조사광산의 90% 이상이 금은광산이며 일부 철, 연/아연광산들이다. 그리고 토양환경대책기준을 초과하는 광산들 중에서 가장 많은 비율을 차지하는 원소는 As로서 가지역의 대책기준인 15 mg/kg을 초과하였다. 특히 일부 광산의 경우는 1,000 mg/kg 이상의 As가 검출되기도 하였다. 이외에도 대책기준(가지역)인 4 mg/kg의 Cd를 초과한 광산도 많았으며, 일부 광산에서는 Cu, Pb, CN, Hg 등을 초과하기도 하였다. 이 조사에 Zn에 대한 토양오염 환경기준이 2002년도부터 적용되었기 때문에 조사항목에서 제외되어 자료에는 빠져 있지만 최근에 실시되고 있는 충북지역의 폐광산 조사에 대한 미발표 자료에 의하면 일부 광산에서는 다량의 Zn이 검출되기도 하였다.

환경부의 조사뿐만 아니라 국내의 대표적인 38개 폐금속광산의 광미에 함유된 중금속함량에 대해 조사 결과에 의하면(Jung *et al.*, 2001), 국내의 광미 대부분은 다량의 중금속을 함유한 것으로 조사되었다(Table 4).

특히 광화작용에 따른 광상의 분류를 통해, 1) 탄산염을 함유한 열수맥상광상형 금은광산, 2) 황화물을 포함한 열수맥상광상형 금은광산, 3) 열수교대형 광상, 4) 스키르형 광상 및 5) 기타로 구분하여 광미의 오염도를 조사한 결과, 황화물을 포함한 열수맥상형의 금은광산에서 다량의 중금속이 검출되었으며 2002년도부터 적용된 Zn의 경우 17개 광산 중에서 천보, 덕곡, 함안, 서교 및 태창광산을 제외한 12개 광산에서 모두 토양오염 우려기준을 초과하였으며, 이 중에서 대책기준인 700 mg/kg을 초과한 광산도 병사, 청양, 다덕, 은치, 금장, 고명, 구봉, 임천, 삼광 및 송천광산 등 9개 광산으로 조사되었다. 이러한 결과를 종합하면, 국내에 산재되어 있는 휴/폐광 금속광산이 토양 및 주변 수계의 중요한 중금속 오염원임을 알 수 있다.

### 3.3. 추출법에 따른 원소 함량 관계

국내의 토양환경보전법에 근거한 공정시험분석법에서 제시하고 있는 추출법은 산가용성 침출법과 전함량 분석법이 혼용되고 있다. Cd, Cu 및 Pb 등은 0.1N HCl을 이용한 산가용성 추출법을, As는 1M HCl을 이용한 산가용성 추출법을 적용하고 있다. 하지만 2002

Table 3. Major mine list and results for investigation of soil contamination.

Province	Mine name (location)	Ore minerals	Elements over the guideline*	Province	Mine name (location)	Ore minerals	Elements over the guideline
Gyeong Gi(7)	Boche(Anseong)	Au, Ag, Ta	-	Gyeong Buk (30)	Bongmyeong(Seongju)	Au, Ag, Cu, Pb, Zn	Cd, Pb
	Bogae(Anseong)	Au, Ag	-		Butdeun(Bonghwa)	Au, Ag, Cu	As, Cd, Cu
	Geumwang(Yangpyeong)	Au, Ag	As, Hg		Changbo(Yeongdeok)	Au, Ag, Cu, Pb, Zn	-
	Pocheon(Pocheon)	Fe	-		Cheongsong(Cheongsong)	Au, Ag, Cu, Pb, Zn	-
	Sambo(Hwaseong)	Pb, Zn	Pb		Dogok(Yeongdeok)	Au, Ag, Cu, Pb, Zn	Cd, Cu
	Yeongjung(Pocheon)	Au, Ag	Cu, Hg, Pb		Dongil(Uiseong)	Au, Ag, Cu, Zn	Cd, Cu, Pb
	Yongseok(Pocheon)	Au	As, Hg, CN		Dongjeong(Yeongdeok)	Au, Ag, Cu, Zn	-
Gang Won (25)	Banggol(Hongcheon)	Au, Ag	As, Cr <sup>+6</sup>		Eunseong(Yeongcheon)	Au, Ag	Cd
	Buguk(Goseong)	Au, Ag	-		Geomdongchilbo(Uiseong)	Au, Ag, Cu, Pb, Zn	-
	Bugwang(Goseong)	Au, Ag	-		Geumjang(Uljin)	Cu, Pb, Zn	As, Cd, Cu, Pb
	Cheolam(Taebaek)	Au, Ag	As		Geumjeong(Bonghwa)	Au, Ag	As
	Chudong(Samcheok)	Au, Ag	As		Gorye(Bonghwa)	Au, Ag	-
	Deokheung(Chuncheon)	Au, Ag	-		Hwacheon(Yeongdeok)	Au, Ag, Pb, Zn	Cd
	Dongbo(Goseong)	Au, Ag	-		Hwanggeumsan(Yecheon)	Au, Ag, Cu	As, Cd
	Dongmyeong(Jeongseon)	Au, Ag, Cu, Zn	As, Cd, Pb, CN		Hyeongje(Seongju)	Au, Ag, Cu, Pb, Zn	Cd, Pb
	Dongyang(Hongcheon)	Au, Ag	-		Ilweol(Yangyang)	Au, Ag, Cu	As, Cu, Pb
	Dunjeon(Samcheok)	Au, Ag	As		Jangwon(Cheongsong)	Au, Ag	-
	Eunchi(Samcheok)	Au, Ag, Cu	As, Cd		Jeonheung(Uiseong)	Au, Ag, Cu, Pb, Zn	Cd, Cu
	Gangwon(Jeongseon)	Au, Ag	As		Joyadong(Daegu)	Au, Ag, Cu	Cu
	Gilgok(Hongcheon)	Au, Ag	As, Cr <sup>+6</sup>		Okbang(Bonghwa)	W	As, Cd
	Gomyeong(Goseong)	Au, Ag	As		Okdong(Uiseong)	Au, Ag, Cu	Cd, Cu
	Jucheon(Yeongweol)	Au, Ag	As		Pungjeong(Bonghwa)	Au, Ag	As, Pb
	Nakdong(Jeongseon)	Au, Ag, As, Bi	As, Cd, Cu, CN		Sanmak(Bonghwa)	Au, Ag, As, Bi	Cd, Cu, Pb
	Okgye(Gangneung)	Au, Ag, Pb, Zn	As, Cd, Cu, Hg, Pb		Sangjeon(Uljin)	Au, Ag, Cu, Pb, Zn, W, Mo	-
	Samjo(Taebaek)	Au, Ag	-		Seoksan(Gunui)	Zn	As, Cd
	Samhwa(Donghae)	Fe	-		Sucheol(Gunui)	Au, Ag, Cu	Cu, Pb
	Sangdong(Yeongweol)	W	As		Sueo(Yecheon)	Au, Ag	As
	Seongan(Yeongweol)	Pb, Zn	As		Tohyeon(Euseong)	Au, Ag, Zn	As, Cd, Cu, Pb
	Sewoo(Jeongseon)	Au, Ag, Cu, Zn	As, Cd, Pb, Hg		Yanggok(Bonghwa)	Au, Ag	As, Cd
	Songcheon(Gangneung)	Au, Ag	As, CN		Yugeum(Yeongdeok)	Au, Ag, Cu, Pb, Zn	-
	Wondong(Taebaek)	Fe	As, Cd, Pb				
	Yangyang(Yangyang)	Fe	-				
Jeon Buk (10)	Baekun(Jinan)	Au, Ag	As	Gyeong Nam(20)	Changpo(Masan)	Au, Ag, Cu, Pb, Zn	-
	Beonam(Jangsu)	Au, Ag	As		Daemin(Hapcheon)	Au, Ag	-
	Cheontae(Jeongeup)	Pb, Zn	Pb		Daejeong(Jinju)	Au, Ag, Cu, Pb, Zn	As, Cd, Pb
	Deokon(Imsil)	Au, Ag	As, Cd, Cu, CN		Donga(Geojje)	Au, Ag, Cu	-
	Dongjin(Jinan)	Au, Ag, Cu	-		Dongjin(Geochang)	Au, Ag	-
	Geumpung(Gimje)	Au, Ag	-		Dupo(Goseong)	Au, Ag, Cu	-
	Indae(Jinan)	Cu	As, Cd, Cu		Guryong(Changwon)	Au, Ag, Cu, Pb, Zn	-
	Jeonjuil(Wanju)	Au, Ag, W	As		Jeolgol(Haman)	Au, Ag, Cu	As, Cu
	Palbong(Jeongeup)	Au, Ag	Cd		Mandaesan(Hapcheon)	Au, Ag	-
	Palgong(Jangsu)	Au, Ag, Pb	As		Milyang(Milyang)	Au, Ag, Cu	-
Jeon Nam (11)	Chonam(Gwangyang)	Au, Ag, Cu, Pb, Zn	As, Cu		Mulgeum(Gimhae)	Fe	As
	Daedeok(Damyang)	Cu, Pb, Zn	-		Pungwon(Geochang)	Au, Ag, Cu, Zn	Cd, Pb
	Daehaeje(Muan)	Au, Ag	-		Sama(Goseong)	Au, Ag, Cu	Cu
	Deokeum(Naju)	Au, Ag	Cd, CN		Sampung(Changwon)	Au, Ag, Cu	Cd, Pb
	Dongsin(Hwasun)	Au, Ag	As, Pb		Samsan(Goseong)	Au, Ag, Cu	Cd, Cu, Pb
	Gwangyang(Gwangyang)	Au, Ag, Cu, Pb, Zn	As		Samsanjeil(Goseong)	Cu	As, Cu
	Haeseong(Muan)	Au, Ag	-		Samyang(Milyang)	W, Mo	-
	Jeonbo(Boseong)	Au, Ag	As		Taeyang(Hapcheon)	Au, Ag, W	-
	Myeongbong(Boseong)	Au, Ag	As		Yangseong(Yangsan)	Fe	-
	Sanyang(Boseong)	Au, Ag	As, Cd, Hg		Yongho(Busan)	Au, Ag, Cu, Pb	-
	Suncheon(Suncheon)	Au, Ag	As, Cd, Hg, Pb				
				Chung Buk	Samdong(Yeongdong)	Au, Ag	Cd, Cu, Pb
					Wolru (Yeongdong)	Au, Ag	Cd, Cu
				Chung Nam	Cheongyang(Cheongyang)	Fe, Mn, W	As, Cd, Cu, Pb

\*Action level in the Korean Soil Environment Conservation Act.  
 Compiled data based on Ministry of Environment, 1998; 1999; 2000; 2001; 2002; 2003.

**Table 4.** The pH value, heavy metal concentrations and lime requirement of tailings and mine wastes from 38 mining sites in Korea.

Group	Type	Mine name	pH	Extracted by 0.1N HCl (mg/kg)				Extracted by aqua regia (mg/kg)			
				Cd	Cu	Pb	Zn	Cd	Cu	Pb	Zn
Au-Ag mine	Hydrothermal vein type with carbonates	Changkeum	7.56	0.11	9.0	1.7	9	0.5	34	16	30
		Dongbo	7.73	1.13	0.1	2.0	10	4.5	53	115	584
		Geumwang	8.11	0.08	3.2	21.5	20	0.1	6	24	100
		Haksan	7.45	0.06	5.4	25.0	62	1.4	7	34	74
		Manri	7.67	2.82	26.0	321	381	4.0	203	880	808
		Samdong	7.76	0.49	0.4	1.7	30	0.8	109	488	280
		Samdong	7.64	0.75	10.5	17.6	57	2.8	95	293	241
		Wolryu	7.73	0.32	0.3	1.3	28	1.6	18	47	80
	Hydrothermal vein type with sulfides	Byeongsa	2.00	2.52	420	2.6	870	36.8	5,280	932	1,060
		Cheonbo	8.10	0.75	3.3	83.5	147	1.0	8	177	227
		Cheongyang	4.33	47.3	52.0	103	1,520	986	2,130	35,200	29,000
			2.50	0.75	87.5	27.8	143	6.8	1,690	29,500	1,440
		Dadeok	2.55	0.86	103	252	162	7.9	2,000	38,300	1,700
			2.85	1.15	13.5	6.4	133	3.3	252	14,200	1,500
		Darak	3.50	1.34	24.4	73.5	187	2.9	83	13,100	394
		Deokgok	2.98	7.20	6.9	52.0	57	12.0	14	1,430	72
		Eunchi	4.23	58.0	239	126	10,400	142	876	18,100	24,300
			2.75	14.3	74.5	206	2,345	188	852	15,600	2,750
Base metal mine	Hydrothermal replacement type	Geumjang	5.94	20.8	1,240	51.0	3,880	58.4	4,220	10,000	14,900
		Gomyeong	2.28	4.65	14.4	5.0	2,570	36.4	132	28,400	4,084
		Gubong	7.20	24.5	16.6	205	580	114	222	5,640	2,850
		Haman	6.85	0.24	1.9	1.4	2	1.4	984	21	58
	Imcheon	1.73	5.53	31.8	60.5	655	73.6	249	11,200	11,600	
	Juneu	7.41	2.01	16.0	25.6	247	3.0	35	83	358	
	Samkwang	7.59	13.2	7.6	51.0	500	27.4	35	720	1,050	
	Songcheon	1.80	2.08	106	52.0	990	8.5	456	17,200	2,910	
	Sugyo	4.89	0.08	7.4	37.2	8	1.8	13	106	29	
	Taechang	3.28	0.24	7.7	1.4	49	1.0	65	4	169	
	Skarn type	Eungok	7.55	0.03	4.3	10.2	8	0.0	13	27	44
		Joil	4.93	5.85	15.0	32.6	675	10.7	144	2,070	2,270
		2.04	0.67	8.8	49.3	115	18.6	230	4,480	3,840	
Sambo		4.59	0.56	46.1	263	625	5.4	104	1,080	3,100	
Subok		7.48	6.25	0.4	2.1	72	44.3	946	1,010	3,480	
Geumseong		7.00	0.13	0.2	1.0	2	0.4	10	11	116	
Geodo		7.82	0.17	270	6.4	46	3.5	504	22	86	
		3.43	0.14	204	1.7	32	1.6	528	17	78	
Others	Pegmatite, alaskite vein and breccia pipe types	Kahag	7.53	2.08	0.7	6.8	19	20.1	39	1,140	2,220
		Sangdong	7.73	0.90	4.5	1.9	28	3.2	111	34	98
			2.75	16.5	99.0	53.5	2,080	26.1	988	13,900	4,650
		Wuljin	2.38	0.84	6.0	51.0	127	2.6	121	3,100	1,180
		Yangyang	7.72	0.13	0.2	1.2	10	0.8	48	18	228
		Yeonhwa	5.66	3.96	0.1	4.3	97	84.4	404	7,480	9,640
Environmental regulation for soils	warming action	Dalseong	2.48	1.19	2,200	1.3	108	1.2	3,270	2,270	181
			7.08	0.06	8.7	5.0	8	0.1	22	13	29
		Geumjeong	7.20	0.08	7.0	0.3	7	0.1	19	12	29
			2.12	0.35	13.0	2.5	331	0.5	740	225	500
			2.05	0.32	12.6	2.8	233	0.9	72	182	880
	Sangjeon	2.47	0.08	69.5	7.1	10	0.7	1,120	58	25	
	warming action	-	1.5	50	100	-	-	-	-	300	
	action	-	4	125	300	-	-	-	-	700	

년도에 개정된 법령에서는 Ni, Zn의 환경기준을 염산과 질산을 3:1의 비율로 혼합한 왕수 추출법에 근거한 전함량 분석법이 적용되고 있다. 이외에도 무기성 원소 또는 중금속으로 분류되는 F, Cr<sup>+6</sup>, Hg 등은 각기 적

절한 방법으로 전처리를 실시한 후 분석해야한다. 즉, 시료의 전처리에 대한 논의가 계속되고 있으며, 분석을 위한 전처리에 많은 시간과 노력이 필요하다. 향후, 이에 대한 통일된 방안이 추진될 것으로 판단된다.

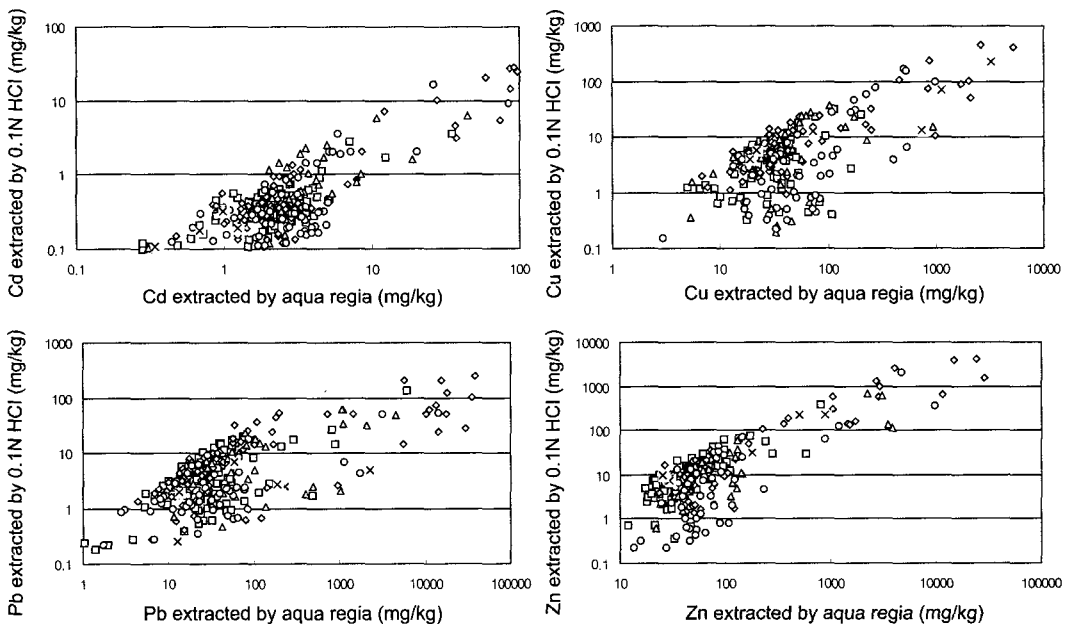
Alloway(1990)의 연구에 의하면, 질산·과염소산-불산을 활용한 완전분해에 의한 시료의 함량을 100%로 할 때, 통상 왕수로 분석하면 약 70~90%의 원소들이 추출된다고 보고한 바 있다. 왕수를 활용한 추출법은 규산염광물과 결합된 일부 원소를 제외한 대부분의 원소들을 분해할 수 있으므로 해외에서도 이 분해법을 많이 활용하고 있다. 한편, 0.1N 염산으로 추출하는 산가용성 침출법은 우리 나라, 일본 및 대만에서만 적용되는 방법으로서 약산에 의한 추출이므로 식물에의 영향과 용해성에 대한 정보를 주는 것으로 알려져 있지만, 동일한 목적으로 외국의 연구에서는 토양을 EDTA 또는 DTPA와 같은 유기용제로 추출하는 방법을 활용하고 있다.

아직도 추출법에 대한 논의는 계속 이루어지고 있으며, 어떤 방법이 더욱 효과적인가에 대해서는 논쟁이 있을 수 있으므로 이는 추후에 논의하기로 하며, 그

**Table 5.** The extraction ratio of metals extracted by 0.1 N HCl and aqua regia.

	Cd	Cu	Pb	Zn
minimum	0.04	0.00	0.00	0.01
maximum	0.63	0.48	0.56	0.66
mean	0.20	0.16	0.15	0.20
standard deviation	0.13	0.11	0.11	0.14

동안 휴/폐광산의 광미, 토양 등을 채취하여 0.1N HCl 과 왕수로 추출한 시료들의 상관성에 대해 논의하고자 한다. Table 5는 그 동안 국내의 대표적인 65개의 광산 주변에서 채취한 총 286개의 시료에 대한 산가용성 침출법과 왕수분해법으로 추출한 시료의 Cd, Cu, Pb 및 Zn의 함량비를 조사한 결과이다. 시료에 따라 다소 편차는 있지만 지구화학적 환경에서 상대적으로 이동도가 높은 Cd과 Zn의 추출율(0.1N 염산 추출 함량/왕수 추출 함량)이 이동도가 낮은 Pb 및 Cu에 비해 높은 것으로 조사되었으며, 평균적으로 Cd과 Zn은 약 20%, Cu와 Pb는 약 15% 전후로 조사되었다. 이러한 결과는 시료의 화학적 존재형태에 따라 다소 차이가 있지만 전체적인 경향은 충분히 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 이들 자료에 대한 전체적인 경향을 보기 위하여 총 286개의 시료들에 대한 각각의 추출 함량을 Fig. 1에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 통계적으로 유의한 수준의 양의 상관성을 보이고 있다. 다만 이 연구에서 통계적인 처리인 상관분석 및 회귀분석은 제외하였다. 이는 고함량의 일부 시료에 의해 선형회귀분석식이 지나치게 왜곡될 수 있으므로 회귀식의 도출은 실시하지 않았다. 그림에서 보는 바와 같이 왕수로 추출한 함량이 증가되면서 산가용성 침출법에 의한 원소함량도 선형적으로 증가되는 양상을 보



**Fig. 1.** Relationships between metal concentrations extracted by 0.1N HCl and aqua regia. (□=Au-Ag mine without sulfide minerals, ◇=Au-Ag mine with sulfide minerals, △=hydrothermal replacement type for metals, ○=skarn type for metals and ×=others)



이다. 다만 일부 시료에서는 왕수로 추출할 경우에는 다량의 중금속이 검출되지만 0.1N HCl로 추출한 경우에는 다른 결과와 비례하여 증가하지는 않는다. 이는 고함량에서는 산가용성으로 침출할 수 있는 중금속의 양이 제한적인 경우와 그 시료 자체의 화학적 결합에 기인하는 요인으로 해석된다.

광미 및 토양에 대한 추출법에 따른 다양한 결과를 더욱 정량적으로 조사하는 기법으로 단계적 추출법이 많이 적용되고 있다. 이 방법에 대해서는 정명채(1994) 및 Tessier *et al.*(1979) 등에서 자세히 소개된 바 있다. 이 방법을 적용한 대표적인 연구 결과에 의하면, 광미에 함유된 중금속의 많은 부분은 잔류결합형 또는 황화물과 유기물과의 결합형태로 보이고 있다. 다만 주변의 환경이 다량의 황화물을 포함하고 있는 경우에는 이동성이 높은 교환형(exchangeable fraction)으로 존재하고 있어 이들에 대한 지속적인 관리가 요구되기도 한다(Jung *et al.*, 2001).

**3.4. 광미에 함유된 중금속의 수직 분포도 조사**

광산개발과정에서 선광의 잔유물인 광미는 각 광산의 지질학적 특성에 따라 다양한 광물을 포함할 수 있다. 하지만 유사한 광종의 경우 그 성분이 비교적 비슷한 경향을 보이고 있다. 대표적으로 광미의 발생량이 많은 금은광산을 예로 들면, 우리 나라에서는 합금은석영맥이 주요 광상형태이므로 석영과 장석이 우세하며 이들의 풍화산물인 일부 점토광물과 탄산염암 등이 소량 함유되기도 한다. 국내에서 대표적인 광미적지장인 상동중석광산의 구폐재매의 경우, 그 양이 4백만톤에

이르고 있으며 댐의 높이도 약 40미터에 이른다. 이 광미적지장의 광미를 대상으로 21미터까지 시추하여 50cm 간격으로 시료를 채취하여 0.1N HCl과 왕수로 분해하여 화학분석한 결과 중에서 대표적인 시료의 Cd와 Cu에 대한 자료를 Fig. 2에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 0.1N HCl로 추출한 시료의 경우에는 심부로 갈수록 원소의 함량이 감소하고 있으며, 왕수로 분해한 시료는 심도에 따라 증가되는 양상을 보인다. 0.1N HCl로 추출한 원소의 함량이 감소되는 것은 심부로 가면서 환원환경이 조성되어 중금속이 황화물 등으로 침전되면서 이동도가 낮아지는 결과로 판단되며, 상부에서 하부로의 원소 이동과 침전 등에 의해 안정화된 금속의 농도가 높아지면서 왕수로 추출되는 금속의 양이 증가하는 것으로 판단된다. 그 결과 이들의 비율은 심부로 가면서 증가되는 양상을 보인다. 이러한 연구의 결과는 국내의 일부 광미적지장의 오염물질 처리를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

**3.5. 폐광산 복원 기술의 적용**

미국에서는 환경청(EPA) 주관으로 SITE(superfund innovative technology evaluation) program을 실시하여 무기물로 오염된 지역에 대한 지속적인 관리와 복원 기술을 적용하고 있다. 그 동안 이들 superfund site를 대상으로 이루어진 오염복원기술 적용빈도를 보면, 총 739개 site에서 이동처리기술이 425개(58%), 현장적용기술이 314개(42%)였으며, 이동기술에서는 고형화/안정화기술이, 현장처리기술에서는 토양증기추출법이 가장 널리 이용되었다(US EPA, 2001). 또한 US EPA의 비

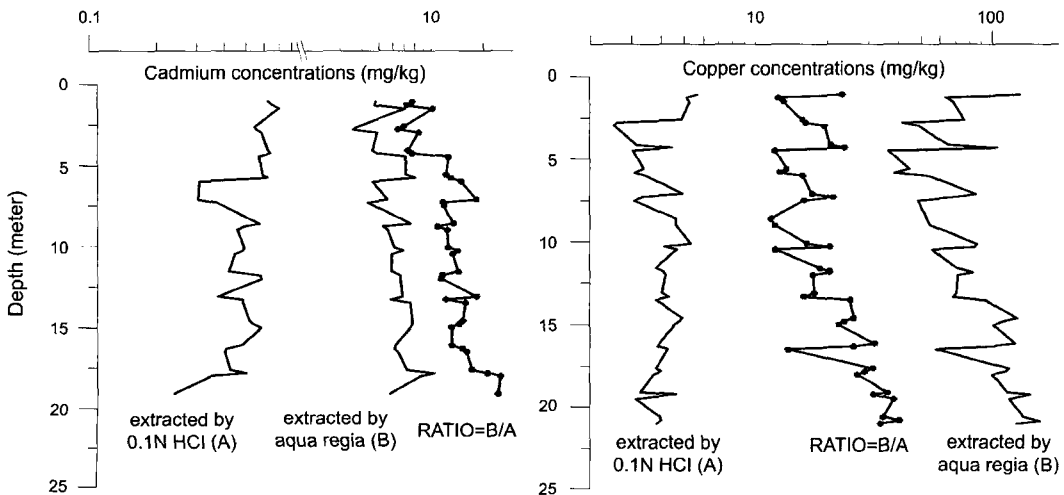


Fig. 2. Vertical variations of metal concentrations in tailings extracted by 0.1N HCl and aqua regia and their ratio.

**Table 6.** Remediation technologies for contaminated soils and ground waters.

media	location	method	type		
soil	In-situ	biological treatment	1. Biodegradation 2. Bioventing 3. White Rot Fungus		
		physical & chemical treatment	4. Pneumatic Fracturing 5. Soil Flushing 6. Soil Vapor Extraction 7. Solidification/Stabilization		
		thermal treatment	8. Thermally Enhanced SVE 9. Vitrification		
		others	10. Natural Attenuation		
	Ex-situ	biological treatment	11. Composting 12. Controlled Solid Phase Biological Treatment 13. Landfarming 14. Slurry Phase Biological Treatment		
		physical & chemical treatment	15. Chemical Reduction/Oxidation 16. Dehalogenation(BCD) 17. Dehalogenation(Glycolate) 18. Soil Washing 19. Soil Vapor Extraction 20. Solidification/Stabilization 21. Solvent Extraction(chemical extraction)		
		thermal treatment	22. High Temperature Thermal Desorption 23. Hot Gas Decontamination 24. Incineration 25. Low Temperature Thermal Desorption 26. Open Burn/Open Detonation 27. Pyrolysis 28. Vitrification		
		others	29. Excavation, Retrieval and off-site Disposal		
		ground water	In-situ	biological treatment	30. Co-metal Process 31. Nitrate Enhancement 32. Oxygen Enhancement with Air Sparging 33. Oxygen Enhancement with H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
				physical & chemical treatment	34. Air Sparging 35. Directional Wells 36. Dual Phase Extraction 37. Free Product Recovery 38. Hot Water or Steam Flushing/Stripping 39. Hydrofracturing 40. Passive Treatment Walls 41. Slurry Wall 42. Vacuum Vapor Extraction.
	others			43. Natural Attenuation	
	biological treatment			44. Bioreactors	
	Ex-situ		physical & chemical treatment	45. Air Stripping 46. Filtration 47. Ion Exchange 48. Liquid Phase Carbon Adsorption 49. Precipitation 50. Ultraviolet(UV) Oxidation	

용분석에 의하면, 오염물질 처리비용에서 열적처리기술(vitrification)이 400~870\$/ton으로 가장 고가이며, 저장기술이 10~80\$/ton으로 최소의 비용이 요구된다(US EPA, 2001). 또한 호주에서는 ACMRE(Australian Center for Mining Environmental Research)에서 광해방지를 위한 국가적 프로그램을 운영하고 있다. 영국에서도 지질조사소(BGS)를 주축으로 오염토양/지하수 복원 프로그램을

운영하고 있다(BGS, 2000). 그 동안 알려진 오염토양 및 지하수의 정화기술을 Table 6에 요약하였다. 이를 기초로 미국에서 현재 상용화 단계에 있는 토양 및 지하수에서의 Pb, Cr, As, Zn, Cd, Cu, Hg(참고로 이 순서는 미국 super-fund site 중에서 오염의 정도가 높음) 처리를 위한 적용기술도를 Table 7에 요약하였다(Evanko and Dzombak, 1997). 표에서 보는 바와 같이 다양한 종류의

**Table 7.** Assessment of remediation technologies for metal contamination in soils and ground waters.

Remediation technology	Metals treated	Cost	Long-term effectiveness permanence	Commercial availability	General acceptance	Application to high metals concentrations	Application to mixed waste (metals & organics)	Toxicity reduction	Mobility reduction	Volume reduction
Capping	1-3	A	C	A	A	C	A	C	A	C
Subsurface Barriers	1-3,5	A	C	A	A	C	A	C	A	C
Solidification/ Stabilization <i>ex situ</i>	1-3,5	B	B	A	A	A	A	C	A	C
Solidification/ Stabilization <i>in situ</i>	1,2,4,6	A	B	A	A	A	A	C	A	C
Vitrification <i>ex situ</i>	1-3,5	C	A	B	B	A	A	C	A	C
Vitrification <i>in situ</i>	1-3,7	C	A	B	B	A	A	C	A	C
Chemical Treatment	2	D	B	B	B	D	D	A	A	C
Permeable Treatment Walls	2	D	B	B	B	D	D	A	A	C
Biological Treatment	1-5	A	C	B	B	C	D	A	A	C
Physical Separation	1-6	B	A	A	A	A	C	C	C	A
Soil Washing	1-3,5-7	B	A	A	A	A	B	C	C	A
Pyrometallurgical Extraction	1-5,7	C	A	A	A	A	C	C	C	A
Soil Flushing <i>in situ</i>	1-2, 7	A	C	A	A	A	A	C	C	A
Electrokinetic Treatment	1-6	B	A	A	A	A	D	C	C	A

1=Pb, 2=Cr, 3=As, 4=Zn, 5=Cd, 6=Cu, 7=Hg; A=good, B=average, C=marginal, D=inadequate information

**Table 8.** List of mines having remediation works in mining sites and their budget.

Year	Mines for remediation	Budget for remediation (million won)
1995	Gahak mine	3,841
1996	Dalseong, Seojeom, Gooundong mines	3,940
1997	Joil, Gubong, Darak, Gunbuk mines	4,786
1998	Wuljin, Samsan mines	840
1999	Goro, Ilweol, Dadeok, Samwang mines	4,109
2000	Ilweol, Dadeok, Pungwon, Ilwang mines	4,498
2001	Dongmyeong, Yanggok, Sama mines	3,032
2002	Tohyeon, Pungjeong, Geumjang mines	5,424
total	22 mines	30,470

기술이 알려져 있으며, 이들을 적절히 활용한다면 국내에도 충분히 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

그 동안 국내에서도 광산지역에 대한 환경오염문제가 제기되면서 1995년 경기도 광명시의 가학광산을 대상으로 국고보조 19.2억원을 포함하여 총 38.4억원을 투자하여 정화작업이 시작된 이후, 1996년에는 달성광산, 서점광산, 구운동광산이 복원되었으며, 2002년까지 총 22개 광산을 대상으로 총 사업비 약305억원을 투자하여 광해복원사업을 추진한 바 있으며, 2003년도에서는 송천광산(강원 강릉), 낙동광산(강원 정선), 붓든광산(경북 봉화) 등 3개 광산에 대하여 총 사업비 5,140백만원(국고보조 50% 포함)을 투자하여 폐금속광산 주변 지역에 대한 토양오염 방지사업을 추진 중에 있다 (Table 8). 그러나 이들 복원 중에서 달성광산(소택지법)을 제외한 대부분 광산에서 단순복토법을 적용하여 근원적인 처리 기술이 되지 못한 실정이다. 한편, 석탄광의 경우, 1980년대 말에 설립된 석탄산업합리화사업단

에서 1매년 5~10억원을 투자하여 복원사업을 실시하고 있지만 비금속광산에 대한 환경연구는 매우 미미한 수준이다. 이러한 상황을 종합하면 국내에는 장기적 안목으로 우리 실정에 적합한 광산폐기물 및 폐수 처리 기술의 개발과 현장 적용이 거의 이루어지지 않고 있어 이에 대한 국가적 지원과 연구 개발이 절실히 요구되고 있다.

이러한 문제점을 인식하여 국가에서도 환경부, 산업자원부 및 농림부 등 광해의 복구와 직접 또는 간접적으로 관련이 있는 부처와 지방자치단체를 중심으로 광해방지사업을 추진하기 위한 법안이 입법 예고되어 있으며, 토양환경보전법과 시행령 및 시행규칙이 일부 개정될 예정으로 있다. 특히 광해방지를 위한 국가의 전담기관이 조직되면 그 동안 산발적으로 이루어진 광해의 조사, 분석, 평가, 복구 및 정화 등에 이르는 종합적인 역할을 수행함으로써 국내 광산환경 분야의 사업 발전에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대한다.

## 4. 결 론

이 연구에서는 국내의 폐금속광에 대한 종합적인 환경문제를 고찰하고자 하였다. 그 동안 이루어진 폐금속광산의 환경오염도에 대한 자료를 기초로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 국내에는 총 906개의 폐광산이 산재되어 있으며 이들 중에서 90% 이상이 휴광 또는 폐광상태로 적절한 복원 시설이 없이 방치되어 주변의 농경지 및 수계의 오염원으로 존재한다.

2. 폐광산을 대상으로 오염도를 조사한 연구 결과들을 종합하면, 국내에서는 금은광산의 비율이 가장 높으며, 토양오염 우려 또는 대책기준을 초과하는 광산들 중에서 가장 많은 빈도를 차지하는 초과 항목 원소는 As이며, 이외에 Cd, Cu 등의 오염도가 높은 것으로 조사되었다. 다만 2002년도 이전의 경우 Zn에 대한 환경기준이 설정되지 않아 자세히 파악할 수는 없지만 국내의 대표적인 폐금속광 광미를 분석한 결과, 대부분의 광산에서 Zn의 함량이 토양오염 우려 및 대책기준을 초과하였다.

3. 원소의 추출법에 따른 함량을 상호 비교하기 위하여 0.1N HCl로 추출한 시료의 원소함량을 양수로 분해한 시료의 원소함량으로 나누어 구한 추출율에서 Cd와 Zn이 Cu와 Pb에 비해 높은 추출율을 보여 지구화학적 특성을 잘 반영한 결과를 얻었다.

4. 그 동안 국가 및 지방자치단체를 중심으로 전국에 산재되어 대표적인 광산에 대한 복구사업은 이루어져다. 하지만 아직도 많은 휴/폐광 금속광산에서 환경오염 문제를 발생하고 있으므로 이를 해결하기 위한 노력이 필요하다. 즉, 국가 및 지방자치단체를 중심으로 광해방지사업을 위한 법령 제정을 통해 전담기관이 설치되고, 이 기관에서 광해의 조사, 분석, 평가, 복구 및 정화사업을 일원화하여 운영함으로써 그 효과를 극대화할 수 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

이 논문은 과학재단 특정기초연구(R01-2002-000-00357-0)의 지원에 의해 연구되었으며, 논문을 자세히 심사해 주시고 조언을 주신 강원대학교 민경원 교수님과 가톨릭대학교 이상훈 교수님께 깊은 감사를 드린다.

## 참고문헌

- 고일원, 이상우, 김주용, 김경웅, 이진수, 전효택, 정명채 (2003) 국내 금은 광산 주변 비소 및 중금속의 오염 가능성과 복원 순위. 한국지구시스템공학회지, 40권, p. 367-378.
- 민정식, 정영욱, 이현주, 이동남 (1997) 광산지역 광해조사와 대책연구. 자원연구소 연구보고서 KR-97 (C)-32, 자원연구소, 479p.
- 박용하 (1994) 휴·폐광된 금속광산지역의 오염 관리대책. 한국환경기술개발원, 연구보고서 RE-14, 588p.
- 산업자원부 홈페이지, <http://www.mocie.go.kr>
- 이진수, 전효택, 김경웅, 김주용 (2003) 폐금속광 지역에서 독성중금속에 대한 위해성 평가. 한국지구시스템공학회지, 40권, p. 264-273.
- 이태섭외 27명 (1995) 지구물리·지구화학적 오염영역 탐지 및 감시 기술개발연구(I). 한국자원연구소 연구보고서, KR-95(T)-3, 422p.
- 전효택, 김명균, 정명채, 김주용, 안주성, 제현국, 박종진 (1996) 토양오염조사 및 광해방지시스템 연구. 광진 96-4, 211p.
- 정명채 (1994) 토양중의 중금속 연속추출방법과 사례연구. 자원환경지질, 28권, p. 469-477.
- 정영욱외 27명 (2001) 폐금속광산 환경오염평가 및 정화 기술 연구. 한국지질자원연구원 연구보고서, KR-01(연차)-07, 198p.
- 한국과학기술원 (1997) 폐광산복원기술포럼, KIST
- 환경부 (1998) 1997 폐금속광산 오염실태 정밀조사결과. 환경부, 45p.
- 환경부 (1999) 1998 폐금속광산 오염실태 정밀조사결과. 환경부, 102p.
- 환경부 (2000) 1999 폐금속광산 오염실태 정밀조사결과. 환경부, 82p.
- 환경부 (2001) 2000 폐금속광산 오염실태 정밀조사결과. 환경부, 79p.
- 환경부 (2002) 폐금속광산 토양오염실태 일제조사(영남권역). 환경부, 153p.
- 환경부 (2003) 폐금속광산 토양오염실태 일제조사(강원, 경기, 전북, 전남권역). 환경부, 397p.
- 환경부 홈페이지, <http://www.me.go.kr>
- Alloway, B.J. (1990) Heavy Metals in Soils. Blackie and Son.
- BGS (2000) Annual report 1999-2000. British Geological Survey, 35p.
- Evanko, C.R. and Dzombak, D.A. (1997) Remediation of metals-contaminated soils and groundwater. GWRTAC technology evaluation report, TE-97-01, GWRTAC, 53p.
- Jung, M.C., Ahn, J.S. and Chon, H.T. (2001) Environmental contamination and sequential extraction of trace elements from mine wastes around various metalliferous mines in Korea. Geosystem Eng., v. 4, p. 50-60.
- King, T.V.V. (1995) Environmental considerations of active and abandoned mine lands; lessons from Summitville, Colorado. USGS Bulletin 2220, USGS, 38p.
- Lee, M. (1999) Management of sulfidic mine wastes and acid drainage. ACMER, 18p.
- Lorion, R. (2001) Constructed wetlands: Passive systems for wastewater treatment. USEPA, 24p.
- Rose, A.W., Hawkes, H.E. and Webb, J.S. (1979)

- Geochemistry in Mineral Exploration. 2nd ed. Academic Press Inc, London, 657p.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C. and Bisson, M. (1979) Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Anal. Chem., v. 51, 884-851.
- Thornton, I. (1983) Applied Environmental Geochemistry. ed. Thornton, I. Academic Press Inc, London, p. 231-266.
- US EPA (1997) Engineering Bulletin; Technology Alternatives for the Remediation of Soils Contaminated with As, Cd, Cr, Hg, and Pb. US EPA/540/S-97/500, 20p.
- US EPA (2001) US EPA Annual Report. EPA-542-R-01-004, US EPA, 38p.

---

2003년 11월 28일 원고접수, 2004년 1월 16일 게재승인.