

鑛山地域 鑛害 對策 研究

— 金屬鑛山の 環境汚染 實態調査 및 對策 研究 —

A Research for Environmental Problems in
the Vicinity of Mining Area

— Investigation into the Impact of Metallic Mining on the Environment and Solutions —

RECEIVED

AUG 06 1996

OSTI

MASTER

韓國資源研究所

Korea Institute of Geology, Mining & Materials

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED
FOREIGN SALES PROHIBITED RB

鑛山地域 鑛害 對策 研究

— 金屬鑛山の 環境汚染 實態調査 및 對策 研究 —

A Research for Environmental Problems in
the Vicinity of Mining Area

— Investigation into the Impact of Metallic Mining on the Environment and Solutions —

1995. 12

研究責任者：責任研究員 閔廷植

研究參與者：前任研究員 鄭永旭

研 究 員 李賢柱

責任研究員 宋憲永

韓 國 資 源 研 究 所

Korea Institute of Geology, Mining & Materials

DISCLAIMER

**Portions of this document may be illegible
in electronic image products. Images are
produced from the best available original
document.**

KR-95(C)-37

研究報告書(KIGAM Research Report)

鑛山地域 鑛害 對策 研究

－ 金屬鑛山の 環境汚染 實態調査 및 對策 研究 －

A Research for Environmental Problems in
the Vicinity of Mining Area

－ Investigation into the Impact of Metallic Mining on the Environment and Solutions －

韓 國 資 源 研 究 所

Korea Institute of Geology, Mining & Materials

目 次

第 1 章 序論

1-1 研究背景	6
1-2 研究目的	6
1-3 研究의 必要性	7
1-4 研究範圍 및 遂行方法	7

第 2 章 鑛害調査

2-1 調査範圍, 内容 및 目的	11
2-2 調査鑛山	13
2-3 現場調査	17
2-3-1 水質調査 및 試料採取	17
2-3-2 鑛山廢棄物 및 土壤調査	18
2-4 室内化學分析	18
2-4-1 물	18
2-4-2 鑛山廢棄物	19
2-4-3 土壤	19

第 3 章 金屬鑛山의 環境汚染 實態調査 結果 및 問題點

3-1 鑛山開發로 인한 環境汚染 誘發要因 및 現狀	21
3-1-1 鑛山開發로 인한 環境汚染 要因	24
3-1-2 鑛山開發로 인한 環境汚染 影響	26
3-2 鑛山開發로 인한 環境汚染 調査結果	28
3-2-1 물	28
3-2-2 鑛山廢棄物	49
3-2-3 土壤	65

第 4 章 金屬鑛山 周邊의 環境汚染 防止對策

4-1 水質汚染 防止對策	72
4-1-1 鑛山廢水(浸出水) 淨化 技術	72
4-1-2 沼澤地에 의한 鑛山廢水 處理	74

4-1-3 人工 沼澤地에 의한 水質汚染 防止對策	81
4-1-4 金屬鑛 鑛山廢水 處理 對策	106
4-2 鑛山廢棄物(鑛尾沙) 로 인한 環境汚染 防止 對策	109
4-2-1 鑛山廢棄物 特性	109
4-2-2 鑛山廢棄物 保管方法	114
4-2-3 金屬鑛 鑛山廢棄物 保管 對策	124
4-3 汚染土壤 復舊 對策	126
4-3-1 汚染土 中の 危害成分과 汚染土 復舊技術 概要	126
4-3-2 鑛山周邊 汚染土 汚染物質 除去 水準	126
4-3-3 汚染土 復舊技術	130
4-3-4 鑛山周邊 汚染土의 復舊對策(Soil Washing法 基準)	134

第 5 章 金屬鑛 鑛害 現況 要約 및 意見

5-1 現場調査 및 室內化學分析	136
5-1-1 水質調査 內容	136
5-1-2 鑛山廢棄物(鑛尾沙)	141
5-1-3 鑛山 周邊 土壤	142
5-2 鑛山廢水 및 浸出水에 의한 水質汚染 防止 對策	142
5-2-1 鑛山廢水 및 浸出水 水質 特性	142
5-2-2 沼澤地 室內試驗	143
5-2-3 水質汚染 防止對策	143
5-3 鑛山廢棄物 保管對策	148
5-3-1 鑛山廢棄物 積置場 問題點	148
5-3-2 鑛山廢棄物 保管對策	148
5-4 土壤汚染 防止 對策	148

第 6 章 結論

參考文獻

鑛山地域 鑛害對策 研究

- 金屬鑛山の 環境汚染 實態調査 및 對策 研究 -

閔廷植, 鄭永旭, 李賢柱, 宋惠永

A Research for Environmental Problems in the Vicinity of Mining Area.

-Investigation into the Impact of Metallic Mining on the Environment and Solutions-

Min Jeong-sik, Cheong Young-wook, Lee Hyun-joo, Song Duk-young

ABSTRACT

This study is focused on the impacts of metalliferous mines on the environment in the vicinity of the abandoned and active mines and establishment of abatements of mining environmental problems. Total number of metalliferous mines surveyed were 40 in which samples of waters, mine wastes and soil were taken.

Water parameters such as the pH, Eh, TDS, conductivity, turbidity, dissolved oxygen and temperature were measured in the field. Elements such as As, Cd, Pb, Zn, Cu, Al Mn, sulfate and cyanide were analyzed.

Significant concentrations of heavy metals, mainly Cd, Zn, Cu, Fe, Mn and Al, were found in mine waters from adit and in leachates extracted from mine wastes. The mine waters flowing out from the Dalsung and Ilgwang mines were the typical acid mine drainage(AMD) contaminated by the heavy metals.

Passive biological systems(Anoxic wetland) to treat acid mine drainage for metals were designed and monitored for effluents from the reactors with 4 types of composts , cow manure and limestones. Results showed that the mushroom compost with cow manure and limestone was the best substrates in metal removing efficiencies.

Results from leaching of mine wastes showed that As, Cd and Cu were extracted from some of mine wastes. Acid mine drainage from the mine waste dump of the Daduk mine was found. These mean that mine wastes can contaminate the soil, surface water and ground waters in vicinity of mines. Therefore cover systems or liner system for containments of mine wastes were suggested to preserve the environment.

Results of chemical analysis of soils showed that Cd concentrations ranged from <0.001 to 0.28mg/kg , Cu from <0.001 to 3mg/kg , As from 0.001 to 0.27mg/kg and Pb from 0.005 to 11mg/kg . Copper and As concentrations in soils surveyed were below the heavy metal concentrations in soils of Korean standard preventing plant of the crops. However, most of the acid mine waters are drained untreated, and mine wastes with heavy metals are distributed near soil environment. Therefore efforts to reduce possibilities of soil contamination in the vicinity of mining areas is required.

제 1 장 서론

제해자원을 개발함에 있어 광산보안성을 고려한 작업행위, 채굴적의 충전, 폐갱도의 밀폐, 광산폐기물의 안전적치 그리고 사방공사, 식재 및 육림 등 충분한 광산보안 조치나 환경조치가 이행되지 않으면 광산폐수, 광산폐기물(광미, 폐석 등), 제탄침하, 분진, 진동, 소음 등 다양한 광해가 발생하게 된다.

예와 같은 광해 현상은 개발방식, 개발정도, 광종, 그리고 광산주변의 지리적 환경 및 조업유무에 따라 달라지게 된다.

우리나라 일반광지역의 광해현상을 살펴보면, 금속광산에서는 주로 광산폐수의 유출과 광산폐기물 그리고 지반침하 등에 의한 광해가 발생되며, 비금속광산에서는 개발방식이 노천채광방식이 많아 분진, 진동, 소음 등에 의한 광해가 주로 발생하게 된다.

광해의 정도에 따라 각기 다른 문제점이 발생되고 있으나 민원의 원인이 되고 사회적, 환경적으로 많은 문제점을 일으키는 광산지역은 주로 금속광산지역에다.

광해의 대용은 광산폐수(갱내수)유출과 광산폐기물이 대부분을 차지하고 있으며 중금속오염으로 인한 광해 현상은 유의할만하다.

또한 가행여부에 따라 고찰하여보면 가행광산보다는 휴광(휴지)이나 폐광(소멸)지역에 광해로서 문제점이 더 많은 것으로 지적되고 있다.

광산폐수나 광산폐기물에 의한 광해현상은 장기간 지속적으로 발생하는 현상으로 특별한 환경적, 보안적 조치가 행해지지 않는다면 다수민원의 소지는 물론 해천오염, 토양오염, 농작물에 대한 피해, 지역주민들의 생활불편 등이 발생하게 되며 나아가 생태계의 변화도 우려하지 않을 수 없는 상태에 도달하게 될뿐 아니라 광해의 영역은 더욱 확대되어 갈것으로 판단된다.

따라서 이러한 광해 현상에 대한 정확한 원인과 현상을 조사 분석하여 이에 대한 과학적인 대책을 마련하여 시행함으로써 광해로부터 보호받게 되며 나아가 쾌적한 환경을 조성, 유지하게 될 것이다.

1-1 연구배경

광산폐수의 유출, 광산폐기물(광미, 폐석 등)등으로 인한 광해문제는 환경보전법상의 환경기준치를 초과하는 지역이 늘어나기 시작하였으며 수개소에서는 가시적 현상으로도 나타나고 있다.

이와 같은 광해문제는 지역주민들의 생활환경에 불편을 가져오게되며 다수 민원을 제기하게되는 원인으로 작용하고 있다.

특히 금속광산지역에서는 광산폐수 및 광산폐기물 중 중금속을 함유한 오염물질들은 수질오염과 토양오염, 그리고 농작물과 생태계에 직접적인 영향을 미치게되며 심각한 사회적,환경적문제로 대두되고있다.

더우기 관리자가 없는 소멸(폐광)된 광산에서의 광해발생은 속수무책으로 방치된채 계속되며 그 영역은 넓어만 가고 있는 것이 현실이다.

또한 근간에들어 국민소득의 향상과 환경문제를 중시 여기는 사회 분위기와 쾌적한 환경에서 삶을 영위하기 위한 권리 주장은 고조되고 있다.

관계당국에서는 생산위주의 산업활동을 점차 보안(안전)과 국민 보건 건강 그리고 환경을 중시하는 산업구조로 방향을 전환하고 있다.

따라서 관계 당국에서는 광해문제에 대한 기초 조사자료 및 민원사항, 그리고 정부정책에 대한 전반적인 사항을 검토한 결과 광해에 관한 정확한 조사분석과 대책마련의 필요성과 중요성을 판단하게 되어 국책연구사업으로 광해발생에 관한 원인규명,정도,영향 등을 조사연구하고 이에 대한 대책연구를 진행하게 되었다.

1-2 연구목적

지역별, 광산별 광해내용을 정확히 조사 분석하여 이에 대한 대책을 마련하는 것이다.

적절한 대책마련은 광산지역에서 광해를 방지할뿐 아니라 쾌적한 환경을 조성 유지 시키고져 하는 것이 본 연구의 궁극적인 목적이다.

이와 같은 목적 달성을 위하여는 광해의 내용 및 정도 그리고 영향에 대한

정확한 조사 분석과 과학적이고도 현실성 있는 대책이 마련되어야 할것이다.

1-3 연구의 필요성

광해가 발생되고있는 지역의 광해방지와 쾌적한 환경조성을 위하여는 광해의 내용과 정도를 정확히 조사분석하여야 이에 대한 대책이 연구되게 마련이다.

따라서 최종 연구목표를 달성하기 위하여 현장조사, 실내시험 및 분석, 대책 제시를 위한 조건별 방법별 Simulation시험, 그리고 현장 실용화시험 등 단계별 연구사업 수행은 향후 대책 수립에 따른 사업수행시 시행착오를 최소화하고 효과를 극대화 할 수 있음으로 광해발생지역에서 광해방지 및 쾌적한 환경조성과 유지를 위하여 절대 필요하다고 본다.

1-4 연구범위 및 수행방법

● 연구범위 및 내용

본 연구는 금속광산의 환경오염 실태조사 및 대책연구이다.

이는 일반광산 중 광해발생이 많은 광산은 대부분 금속광산인 점을 감안하였다.

○ 연구범위

* 광해발생 요인 조사

- 금속광산 : 휴광.폐광.가행광산.
- 광해다발지역 및 광산
- 광해로 인한 민원제기 광산지역
- 향후 광해유발이 예상되는 광산지역

* 광해의 내용 및 현황 현장조사

- 광해의 내용조사
- 광해의 정도 및 영향조사
- 광해로 인한 환경오염 현황 및 실태조사

* 조사내용 분석 및 실내시험

- 현장조사 내용 분석
- 실내 화학분석
- 대책 마련을 위한 조건별 Simulation시험

* 광해로 인한 광산지역에서의 문제점발굴 및 분석

* 광해방지를 위한 대책 연구

○ 연구내용

* 광해발생 내용 및 정도 조사(현장조사)

- 광해발생 내용(광해유형,유해내용 및 성분)
- 광해발생으로 인한 환경 오염 정도
- 광해발생으로 인한 환경 오염 영역
- 생활환경(주거지,농경지,수계 등)과 연관한 광해의 영향

* 현장조사 내용 분석 및 실내시험

- 조사내용분석(현장측정치, 개발현황, 개발당시 도면,
 민원제기 내용, 지역 주민들의 피해내용 등)

- 광산폐수 유출
- 광산폐기물(Slime, 폐석 등)
- 토양오염
- 지반침하
- 기타

- 실내시험

- 화학분석(양이온,음이온)
- 조건별 Simulation시험

* 문제점 검토 연구

- 문제점 발굴
- 문제점 분석 및 검토 연구

* 광해방지를 위한 대책연구

- 중금속을 함유한 광산폐수 정화시험 연구
 (소택지를 이용한 무동력 무인력 정화방법)

● 연구 수행 방법

* 국내외 기술자료 및 정보수집

- 기술자료 및 문헌 수집
- 광산별 개발 현황 및 광해관련 자료조사
- 기존 조사자료 수집
- 광해로 인한 민원제기 내용조사(관할 지방자치단체: 시,도,군,면)
- 기술정보 수집(해외 전문가 초청 활용)

* 현장조사

- 조사대상 광산 선정
 - 광해유발 광산
 - 광해로 인한 민원제기 광산
 - 어느 정도 개발실적과 규모를 가진 광산
 - 광해가 우려되거나 예상되는 광산
- 현장조사
 - 수질조사
 - pH
 - Temperature
 - Dissolved oxygen
 - Turbidity
 - Conductivity
 - Eh
 - TDS
 - Alkalinity
 - Acidity
 - 광산폐기물(Slime, 폐석 등)
 - 적치상태 및 안전성
 - 광산폐기물 적치지역 하류 광해 유무 정도
 - 토양 오염 정도 및 상태
 - 지반침하
 - 기타

* 실내시험 및 조사내용 분석

- 폐수,광산폐기물,토양 등 화학분석
- 현장 조사 내용 및 분석자료를 이용한 상관관계 분석
- 대책마련을 위한 조건별 Simulation시험

* 문제점 발굴 및 대책연구

제 2 장 광해조사

2-1 조사범위, 내용 및 목적

본 연구의 조사대상 광산의 선정기준, 조사영역 및 내용 그리고 목적 등이 표 2-1에 수록되어 있다.

표 2-1. 일반광 광해조사 연구 범위 및 내용

조사 대상 광산	대상 광산 선정 기준	조사영역 범위	조사범위 및 내용		조사 목적
			현장조사범위	실내실험내용	
-휴.폐.가행.금속광산 -광중.금.은.동.연.아연.중석. -40개 금속광	.개발이 상당히 진행된 광산 및 광해가 예상되는 광산 (휴·폐·가행광산) .민원유발 광산 .언론보도 자료 .선광장 설치 유무 .국민생활 환경과 밀접한 지역내 소재	(가)갱수 (나)광미장 침출수 (다)지표수·지하수	①수소이온농도 (pH) ②산화환원전위 (Eh) ③수온 ④총용존고형물 (TDS) ⑤알칼리도, (Alkalinity) ⑥산도 (Acidity), ⑦전기전도도 (Conductivity) ⑧용존산소량, (DO) ⑨탁도 (Turbidity) 등 총 9개 항목	※ 공해 공정 시험법을 기본으로 ※ 변호는 본 연구 수행시 조사된 성분임 -수질환경 보전법 제8조 오염물질의 배출허용 기준에 수록된 오염물질 ①pH, ②철, ③아연, ④구리, ⑤카드늄, ⑥시안, ⑦비소, ⑧납, ⑨망간, N-Hexan, 페놀, 크롬, 수은, ⑩은도, 유기인, 6가 크롬, 불소, PCB, 대장균수, 색도, 총 질소, 총인, 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌, BOD, COD 및 SS	-갱수, 광미장침출수의 수질특성 파악 -광산수(갱수 및 광미장침출수)가 지표수, 지하수 등 수질 환경에 미치는 잠재적 영향파악 -수질환경 보전법과 비교 -광해 유발성분 도출과 원인규명 -수질환경개선(정화) 및 보전대책
		(라)광미 (로)토양	입도, 색상, 규모, 지형조건, 수계발달, 적치장 및 주변 경작지 유무	물리적 특성 ①함수율, ②입도분석, ③점결성 등 화학적 특성 ①pH, ②철, ③아연, ④구리, ⑤카드늄, ⑥시안, ⑦비소, ⑧납, ⑨망간 ⑩토양 pH 등	-광미중 용출 성분 파악. -광미의 화학적 특성과 폐기물 법규와 비교 -광미에 의한 오염영향권(토양,수질환경) 규명. -유해 광미사 보관대책
		(리)폐석	입도, 폐석방치 특성, 규모, 식생, 유실잠재력, 침식형태 등	폐석의 물리적 특성 폐석 사면안정성	-폐석 안정성평가 -폐석의 안전적치

2-2 조사 광산

일반광 광해 조사가 수행된 광산은 다음 표 2-2와 같다. 조사된 광산은 대부분 휴광 혹은 폐광된 광산이었다.(그림 2-1)

표 2-2. 금속광산의 환경오염 실태 조사가 수행된 조사 대상

구분	조사광산	등록광종	광업 행위	등록번호	소재지
1차	거도	금,은,동,아연, 텅스텐,코발트	가행	24289	강원 태백시 혈동 74번지
	제 2 연화	연,아연	소멸	13879외 30개	강원 삼척군 가곡면 풍곡2리
	금왕	금,은	휴지	58664외 1개	충북 음성군 금왕읍 봉곡2리 산 42
	만정(충주)	철	소멸	3177	충북 충주시 이류면 만정리 103번지
	울진	동,연,아연	소멸	30329	경북 울진군 북면 덕구리
	조일상곡	금,은,동	소멸	50776	충북 단양군 적성면 상원곡리 168
2차	상동	금,은,동,텅스텐	휴지	2865외 15개	강원 영월군 상동읍 구래리
	성진신예미	금,은,동,연,철,아 연,모리브덴,니켈, 코발트	가행	2811 외 5개	강원 정선군 신동읍 조동리14
	다덕	금	휴지	8832	경북 봉화군 봉성면 우곡리 566번지
	금장	연,아연	소멸	7558외 3개	경북 울진군 은정면 내선미리
	금정	금,은	휴지	10106외 34개	경북 봉화군 춘양면 우구치리
3차	군북	금,은,동	소멸	1874	경남 함안군 군북면 오곡리
	함안	금,은,동	소멸	14186외 2개	경남 함안군 군북면 오곡리
	제일	금,은,동	소멸	11693외 1개	경남 함안군 군북면 사촌리
	달성	중석	소멸	10357외 2개	대구 달성군 가창면 상원리172
	다락	금,은,연,아연	소멸	9156외 2개	경북 성주군 수륜면 송계1리 산104
	전의(양덕)	금,은,동,연,아연	휴지	7933	충남 연기군 전의면 양곡리
	유천	금,은,동,연,아연	소멸	48089	충남 연기군 전의면 서정리
4차	덕읍	금,은,동	휴지	14406외 2개	전남 나주시 공산면 신곡리 24
	귀명	연,아연	소멸	15492외 1개	경남 밀양시 하남읍 귀명리
	양구동	금,은,동,철	휴지	17021외 1개	경남 밀양시 무안면 마흘리 276
	물금	금,은,철,동	휴지	24919외 1개	경남 양산군 원동면 화제리
	일광	금,은,동,중석	소멸	8152	부산광역시 기장군 장안읍 원리 104
	가학	금,은,동,아연	소멸	7933	경기 광명시 가학동 도고골
	삼보	연,아연	휴지	26437외 5개	경기 화성군 봉담면 상리 104
	부평	은	휴지	29917외 4개	인천광역시 북구 만수동 산4

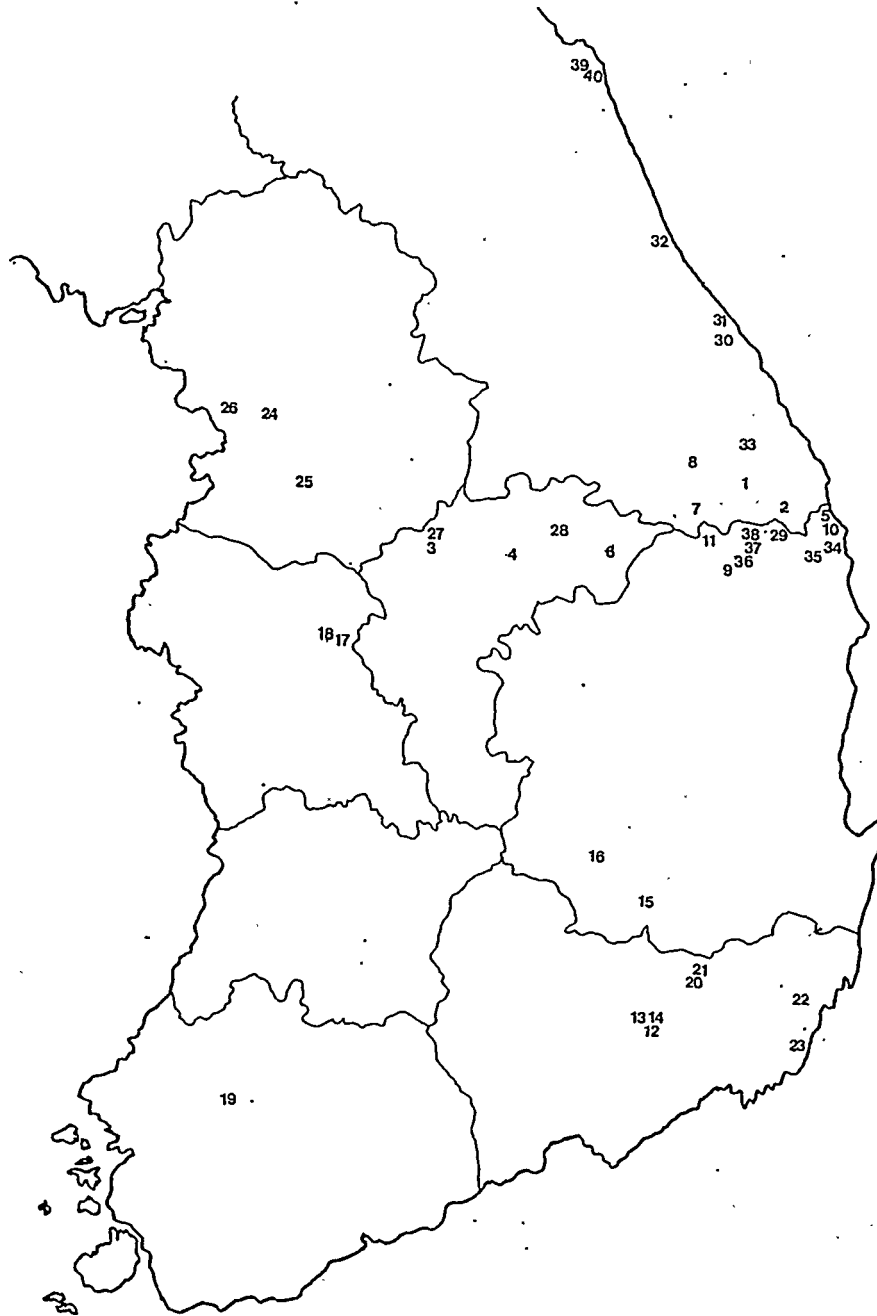


그림 2-1. 일반광 광해조사가 수행된 광산위치. 지도내의 번호는 조사대상 광산번호이며 표 5-1. 에 광산명(번호)이 나와있다.

표 2-2. 계속

구분	조사광산	등록광종	광업 행위	등록번호	소재지
5차	무극	금, 은	가행	00053의 67개	충북 음성군 금왕읍 용계리
	금성기린	모리브덴, 취수연	소멸	37612	충북 제원군 금성면 양화리 산23
	연화(제1)	연, 아연	휴지	4891의 34개	경북 봉화군 석포면 대현리 82
	우계	금, 은	휴지	7910의 7개	강원 명주군 옥계면 산계리
	송천(합태)	금, 은, 동	휴지	18794의 2개	강원 강릉시 연곡면 삼산 4리
6차	양양	철	휴지	14562의 8개	강원 양양군 서면 장송리 280
	은지	금, 은, 동, 아연	소멸	41650의 2개	강원 삼척군 하장면 토산리
	삼울소브 (한보)	모리브덴	휴지	6583, 10864	경북 울진군 후포면 금음리
	쌍전	중석	휴지	41087의 2개	경북 울진군 서면 쌍전 2리
	산막	금, 은, 연, 아연, 납	소멸	37493	경북 봉화군 재산면 갈산리 산582
6차	우방	중석	소멸	24710의 17개	경북 봉화군 소천면 불천 5리
	금호 (구·장군)	연, 아연	가행	21486의 16개	경북 봉화군 소천면 서천리 산21
	고령	금, 은	소멸	54087	강원 고성군 현내면 명파리
	동보	금, 은, 동, 연	소멸	46513	강원 고성군 현내면 명파리 146

일반광 광해조사시 채취된 시료는 크게 물, 광산폐기물, 토양으로 구분된다. 서술상의 통일성을 기하기 위하여 채취된 시료를 다음과 같이 정의 하기로 한다.

물은 ①광산경도 유출수 ②광산폐기물 보관장(광미사장) 유출수, 혹은 보관장 내부의 상동수 ③하천수 등으로 구분될 수 있다. 한국산업규격(KS) 갱수 및 폐수 시험방법(E 3901-1993)의 갱수 및 폐수 규정은 다음과 같다.

갱수란 광물을 채굴하기 위해 굴진된 지하에서 유출하는 물이고, 폐수란 선 광장 또는 제련장 등에서 사용한 폐기된 물, 폐석 또는 광재(본 연구에서는 광 산폐기물로 표현함)를 쌓아 둔 장소에서 유출되는 물, 갱수 및 폐수처리시설에 서 유출되는 물로 되어 있다. 따라서 ①은 갱수 ②는 폐수 혹은 광미장 침출수 등으로 표현하기로 한다. 여기서 ① 및 ②의 수질이 일반 자연수에 비해 저 급수인 경우는 광산폐수라 칭하기로 하며 특히 pH가 낮은 경우 광산 산성폐수 로 서술하기로 한다.

광산폐기물은 현장에서 매우 불균질하며 입도 또한 다양하다. 따라서 입도

가 작은 선광 후 물질 또는 채광으로 발생된 입도가 작은 물질(사질입도 이하)로 정의하기로 한다. 선광정광 혹은 선광후 광미사 등은 현장조사 결과 구별이 쉽지 않은 이유로 특별한 설명이 없으면 선광후 물질은 광미사로 그리고 채광시 발생된 쇄석은 폐석으로 서술기로 한다.

토양은 광산폐기물의 적치량의 규모가 클 경우에 한하여 광산폐기물 적치장 주변에서 채취되었다. 주로 광산폐기물의 침식, 강수에 의한 유실로 인하여 광산폐기물 유입이 관찰되었던지 혹은 우려되는 토양과, 광산폐기물을 매립한 후 조성된 토양(경작지)에 한하여 시료가 채취되었다.

2-3 현장 조사

2-3-1 수질조사 및 시료채취

현장에서 조사된 수질항목은 pH, 산화-환원전위(Eh), 용존산소량(Dissolved Oxygen), 수온, 전기전도도, 총 용존고형물(TDS: Total Dissolved Solid), 탁도, 알카리도(Alkalinity), 2가철(Fe^{2+})농도 등이었다.

pH, 용존산소량, 수온, 전기전도도, 탁도등은 일본 TOA electronics 社の Water Quality Checker (WQC-20A)에 의해 측정되었다.

Eh 및 TDS는 Hanna Instrument社 휴대용 기기를 이용하여 측정하였다. 알카리도는 CHEMetrics사 적정 Kit(K-9810)를 이용하여 측정되었다.

Fe^{2+} 농도는 CHEMetrics사 적정 Kit (K-6201)를 이용하여 측정되었으며 주로 일부광산폐수 조사시에 측정되었다. Fe^{2+} 농도측정은 약 20ml 시료를 채수하여 1,10-phenanthroline이 포함된 진공 앰플 속으로 혼입한 후, 약 1분 이상 시간이 경과된 다음 이 때 색상을 액체 표준 비색과 비교하여 Fe^{2+} 농도를 측정 하였다. Fe^{3+} 농도는 총 철(Total iron)에서 Fe^{2+} 를 뺀 값으로 구하였다.

물 중의 성분분석(주로 중금속)을 위해 현장에서 물 시료들을 채수하였다. 채수前 물 시료는 현장에서 여과지 및 여과도구에 의해서 부유고체가 제거되었으며 여과수는 음이온 및 양이온 분석용으로 분리되어 별도의 용기에(300ml 용기)에 담았다. 이때 사용된 여과지는 미국 Micro Filtration System(MFS)사의 공극크기가 $0.45\ \mu\text{m}$ (직경 47 mm)인 Cellulose Nitrate Membrane Filter를 사용하였다. 음이온 분석용 시료는 이동식 냉장 Box에 4°C 로 보관하여 실험실로 운반되었다. 양이온 분석용 시료는 용기 벽면의 이온흡착을 막기 위하여 농질산을 1-2 방울 첨가한 후 상온에서 실험실로 운반되었다.

CN(시안) 분석용 물 시료는 $0.45\ \mu\text{m}$ Cellulose Nitrate Membrane Filter로 여과한 후 5N NaOH 용액을 2~3방울 가하여 알카리 수질로 변화시키고, 시료 병에 완전히 물시료를 채운 후 이동식 냉장 Box에 보관하여 실험실로 운반되었다. 표 2-3에 현장 수질조사 방법 및 원리를 요약하였다.

표 2-3. 현장수질 조사 항목 및 분석 원리

구 분	현장 수질 조사 항목	분석방법 및 원리
현장 수질조사	pH, Eh, 용존산소량, 수온, 전기전도도, TDS, 탁도	전극법 " 투과광식
	총알칼리도(Alkalinity) 산도(Acidity)	적정법
	Fe ²⁺ 농도	적정법
	부유고체 제거/채수	여과법(0.45μm filter)

2-3-2 광산 폐기물 및 토양 조사

광산주변의 광미사장(적치장) 혹은 방치되어 있는 광산 폐기물중에서 입도가 미립질인 광산 폐기물(주로 광미사)을 주 대상으로 하여 시료가 채취되었다. 현장에서 광산폐기물은 광미사장 여러지점에서 채취한 후 혼합하여 비닐봉지에 넣은 후 실내로 옮겨 졌다. 토양시료는 광산주변 특히 광미사장 주변 농경지 혹은 광산 갯수 혹은 침출수의 유입이 관찰되는 농경지에서 주로 채취되었다. 토양시료 채취 및 취급은 광산폐기물(광미사) 채취방법과 동일한 방식으로 이루어졌다.

2-4 실내화학분석

2-4-1 물(갯수, 광미사장 침출수, 하천수 등)

화학분석된 양이온 성분은 As, Cd, Pb, Zn, Cu, Fe, Al 및 Mn 등 이었고 유도쌍 플라즈마 분광기(ICP: Inductively Coupled Plasma Spectrometer, Jobin-Yvon38사)에 의해서 분석되었다. 한편 비오염수 시료(주로 하천수)들은 600ml비이커에 250ml의 시료를 취하여 여기에 농질산 2.5ml를 넣고 가열하여 25ml로 농축하는 분석전 전처리 과정을 거쳤다.

실험실에서 분석된 음이온 성분은 SO₄²⁻ 및 CN⁻ 등 이었으며 SO₄²⁻는 이온 크로마토그래피(IC: Ion Chromatography, DIONEX사)에 의해서 분석되었다.

시안(CN)분석은 다음과 같은 절차를 통해서 수행되어졌다.

시료를 pH 2이하로 산성용액화시키고 에틸렌디아민테트라 초산나트륨을 넣고 가열증류하여 수산화 나트륨 용액에 포집한다. 포집된 시안이온을 중화하고 클로라민 T를 넣어 염화시안으로 하여 파라딘·피라졸론 혼액을 넣은 후 광전분광광도계(Bausch & Lomb사 Spectronic88)로 측정하였다.

2-4-2 광산폐기물(광미사)

광미사에 대한 화학분석은 폐기물관리법의 폐기물 용출시험 방법에 준하여 수행되었다.

시료의 조제는 다음과 같은 절차를 거쳤다. 시료를 균일하게 혼합하여 원추 4분법에 의한 축소법으로 시료량을 축소하였다. 염산으로 pH가 5.8~6.3으로 조절된 물에 시료를 혼합하였으며(시료 1:용매 10) 500ml 이상의 혼합액을 제조하였다. 그 다음 시료액을 분당 3,000회전으로 20분이상 원심분리하여 상등액을 분석용액으로 하였다. 상등액은 ICP에 의해서 As, Cd, Pb, Zn, Cu, Fe, Al 및 Mn 등의 성분이 분석되었다.

2-4-3 토양

토양에 대한 Cd 및 As원소의 화학분석법은 수질오염 공정시험법(토양편)의 규정에 의해 수행되었다.

즉, 채취된 시료를 균일하게 혼합한 후 약 100g을 취한 후 105℃로 조절된 전기건조로에서 4~5시간 건조 후 수분함량을 기재하였다. 건조시료를 표준체(2mm)에 통과시켰다. 이들 중 일부를 분취하여 유발에 의해 100메쉬이하로 미분쇄하고 다시 105℃에서 1시간 건조시켜 분말상태의 분석시료를 제조하였다.

분석용 분말시료를 10g 취하여 Cd의 경우 0.1N 염산용액 50ml를, As의 경우 1N 염산용액 50ml를 넣고 수평진탕기로 30분 진탕한 후 거름종이(Filter paper) 5종B로 여과하여 분석용 용액을 제조하였다. Pb, Zn, Cu, Fe, Al 및 Mn 등의 원소 분석방법은 수질오염공정시험법(토양편)에 정의가 안되어 있어서 As의 용액제조방식을 따라서 용액을 제조한 후 ICP에 의해 분석되었다.

광미장의 광산폐기물(광미사), 오염된 토양에서 염(Salt) 및 실내시험에서

회수된 침전물에 대한 형태 및 주 구성 성분을 규명하기 위해 일부 시료에 대해서 전자현미분석(SEM/EDS)을 하였으며 JEOL사 Scanning Microscope (JSM-6400)을 이용하였다.

이상의 실내화학분석 방법을 원소별로 요약하면 표 2-4와 같다.

표. 2-4 실내 화학분석 방법 요약

구분	분석 및 감정 항목		분석방법 및 원리
실내 화학분석	물, 광미, 토양	음이온 (SO_4^{2-} , CN^-)	IC법 광전분광광도법
		양이온 (As, Cd, Pb, Zn, Cu, Fe, Al, Mn)	ICP법
	침전물	정성분석, Salt 감정	SEM/EDS

제 3 장 금속광산의 환경오염 실태조사 결과 및 문제점

3-1 광산개발로 인한 환경오염 유발요인 및 현상

광업권자 혹은 조광권자가 지하자원 개발을 목적으로 토지의 굴착등 광업 행위로 인하여 발생되는 공해를 광해라고 한다. 일반적으로 광해는 장기간 지 속적으로 일어나며 자연환경 및 생활환경과 밀접한 관계가 있어 다수 민원의 소지가 항존한다.

광해의 대표적 형태는 다양하며 환경영향 또한 그 정도가 일률적이지 않다. 광해의 형태를 요약하면 표 3-1과 같으며 광업행위에 따라서 광해유형 및 문제 점도 달라진다(표 3-2).

표 3-1 대표적인 광해의 종류

광해의 유형	원인 및 현상
광산폐수의 유출 및 수질 오염	유화광물(황철석등)이 산화되어 형성된 광산폐수가 강도 또는 광산폐기물로부터 유출되 하천, 토양 등을 오염시킴
지반침하 (지표함몰·침하)	지하자원 개발로 인한 지하공동이 특히 휴·폐광시 면압권 발달로 침하가 발생되고 그 영향이 지표까지 미쳐 지표면이 함몰되는 현상
광산폐기물(폐석, 광미사)의 유실	적절한 폐석 및 광미의 관리 부재로 인하여 수로의 차단 및 변경, 철도, 도로, 농경지 피복, 토양오염, 가옥 파괴 및 산림의 황폐화 등을 유발시킴
분진의 비산	광산물 파쇄작업시 운반(벨트 콘베이어, 차량등) 및 저장장으로 부터 미립질 암분이 비산하여 생활환경을 악화
소음 및 진동	화약 발파시, 기계장비 가동시(파쇄 선풍등) 발생

표 3-2 휴·폐, 가행 광산별 광해유형과 문제점

광해유형	문제점	휴·폐광산	가행광산
수질오염 (폐수유출)	-산성폐수, 중금속을 함유한 폐수가 지표로 유출 (하천, 호소, 농경지 등 오염) -지하수 오염 -상수원 오염 -하천 생태계 파괴	· 유해농도 大 · 제어대책 곤란 · 유지관리인 無	· 유해농도 小 · 제어대책 가능 · 유지관리인 有
지반침하	-지상구조물 및 시설물 피해 (도로, 철도, 교량, 가옥등 붕괴) -농경지 손실 -농수손실	· 문제점 있음 · 대책이 어렵다	· 문제점 있음 · 대책 가능
광산폐기물 (폐석·광미사) 유실	-광산주변 자연경관 해침 -하상수로 변경 및 매립(하천범람) -농경지 위해 요소로 작용	· 지역별 광해 심각 · 유지관리인이 없어 문제	· 수시 복구공사 가능
분진	-호흡성 분진, 금속성 및 비금속성 분진 비산 -농작물의 성장 방해 및 저해 -생활환경의 악화	· 문제점 小	· 문제점 大
소음 및 진동	주거환경의 악화(청각장애, 불안한 생활 환경 조성)	· 문제점 無	· 문제점 有 · 대책요망

본 연구에서는 광해문제 중 광산폐수 및 광산폐기물에 의한 환경오염 영향을 중점적으로 다루기로 한다. 참고로 광산폐수 및 광산 폐기물중에 함유될 수 있는 유독성 원소(성분)들이 인체 및 자연환경에 미치는 영향을 표 3-3에 수록하였다.

표 3-3. 중금속이 인체, 자연환경 및 식물에 미치는 영향
(Manahan, 1979; 장부규 등, 1994)

구분 성분	인 체	자연환경, 식물 및 기타
카드뮴	(급성)구토, 설사, 위염, 호흡곤란 (만성)인후염, 비염, 골격변화(이파이이파이병), 신장장애, 단백뇨, 골연화	(작물)잎의 황백화, 뿌리신장저해, 벼가지치기억제
수 은	(급성)구공, 후두, 식도부식으로 심한통증, 구토, 사망, 복통, 뇨세관장애, 신장장애, 뇨독증, 단백뇨, 신염, 구내염 (만성)구내염, 치육의 색소침착, 하리, 신경장애, 피부염, 빈혈, 치내염, 기억력감퇴(미나마마병), 돌연변이, 기형 가능성	(작물)뿌리신장억제
비 소	(급성)구토, 설사, 탈수증, 혈관, 호흡중추마비, 사망 (만성)시각장애, 간경변, 피부궤양, 각화증, 손톱, 모 발의 위축, 독성, 암유발가능성	(작물)뿌리썩음, 뿌리발생억제, 잎의 황화고사
연	(급성)복통, 구토, 설사, 패노이상, 빈혈, 신경병, 뇌질환 (만성)식목부진, 변비, 복통, 치아착색, 빈혈, 시각장 해, 콩팥질병, 뇌신경계통장애, 정신장애, 야생서식 지 파괴	(작물) 잎의 황백화
동	(급성)점막자극, 구토, 설사, 간장장애 (만성)간장장애, 소화관자극 (중독)간세포의 괴사, 간경변, 당뇨병. 필수미량원소, 맛에 영향(1.0mg/l),	(작물) 뿌리신장저해, 철결핍유발, 잎의 황백화 식물및 조류에 독성(1ppm이하)
아 연	(급성)피부변질, 탈모, 구토, metalloenzyme에 필수원소, 상처회복에 도움, 맛에 영향(5mg/l) 부족-식욕감퇴, 발육억제 과잉-신경과민, 메스꺼움 (만성)발암성	백탁, 불결한 냄새 (작물)잎의 황백화, 잎의 적갈색 반점 고농도에서 식물에 독성, 오니의 토양매립가능여부
납	(급성)복통, 구토, 설사, 패노이상, 빈혈, 신경병, 뇌질환 (만성)식목부진, 변비, 복통, 치아착색, 빈혈, 시각장 해, 콩팥질병, 뇌신경계통장애, 정신장애, 야생서식 지 파괴	(작물) 잎의 황백화
망간	보행장애, 언어장애, 강박감, 뇌관련질환	동물에는 비교적 독성이 약함. 고농도에서 식물에 독성, 공설급수에 문제유발 (0.05mg/l 이상 맛냄), 수돗물 색도 증가, 배수급수관내에 산화물 축적 및 흡수 원인
시아나화물	신경계통장애, 호흡기관장애, 사망	미생물에 장애
철	헤모그로빈 성분, 육조, 타일 및 의복에 얼룩, 부족-빈혈 과잉-위염	물, 식기, 위생도기, 세탁물에 불결한 외관 (혼탁, 적수) 철박테리아 번식초래 공업용수로 사용시 제지, 펄프, 섬유염색, 사진필 름, 색소제조, 청량음료 등에 부적합 동물에 비교적 독성이 약함, 공설급수에 문제 유발, 저농도(0.3mg/l)에서 맛냄
알루미늄	위장계통 장애	용해성착물, 불용성염 생성, 인산염 제거시 명반 ($Al_2(SO_4)_3$) 사용

3-1-1 광산개발로 인한 환경오염 요인

황화물을 포함하고 있는 광산채굴적 혹은 광산폐기물은 광산산성폐수(Acid Mine Drainage)를 형성할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 석탄, 구리, 아연, 은, 금, 납 및 우라늄광석 등이 채굴되었던 장소에서 많은 광산산성폐수기록이 있다. 황화물이 산소에 노출되면 산화작용에 의해서 주변의 자연수의 pH를 낮추게 되며 이러한 산성수와 접하게되는 물질들로 부터 금속을 용출 시키게 된다. 따라서 광산산성폐수는 발생 주변환경 및 접촉하는 물질에 따라서 알루미늄, 망간, 아연, 카드뮴, 납등 각종 중금속을 함유하게 된다.

한편 황 혹은 철을 에너지원으로 이용할 수 있는 박테리아(*Thiobacillus ferrooxidans* 및 *T. thiooxidans*)가 촉매작용을 해서 산화작용의 속도를 백만배 이상 증가 시킬 수 있다.

광산 산성폐수 생성요인을 그림 3-1에 표현하였다. 광산 산성폐수의 생성 과정을 요약하면 아래와 같이 정리할 수 있다.

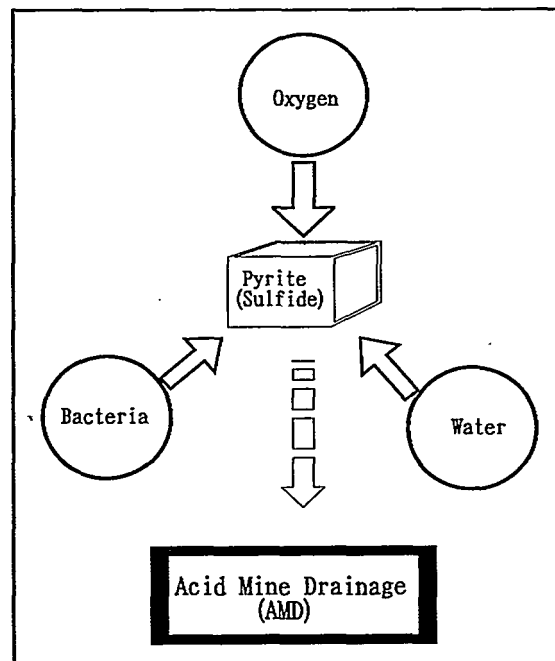
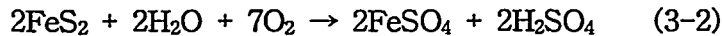


그림 3-1 광산 산성폐수 생성요인

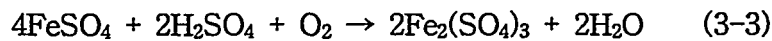
건조환경:



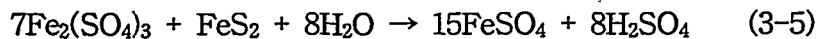
수성환경:



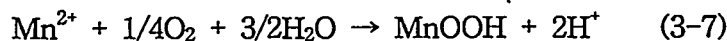
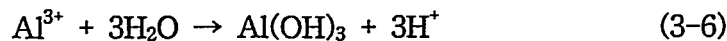
광산산성폐수는 물이 있는 환경에서 만들어 지므로 식(3-2)가 중요하다. 식(3-2)의 화학반응에 의해서 광산산성폐수가 발생하며 이때 2가철 및 산을 물속에 부과 된다.



용존된 2가철 이온은 다시 식(3-3)에 의하여 3가철로 산화되면서 철 수산화물로 침전되며 산도(Acidity)를 추가로 부과하게 된다(식 3-4). 이때 생성된 고상(부유)물질은 광산폐수의 유로에 노란색, 갈색 혹은 적색의 퇴적물 또는 피막상 물질로서 나타난다.



3가 철은 그 자체가 산화제이므로 식 (3-5)에 의해서 황철석이 산화될 수 있다. 식 (3-5) 에서 알 수 있듯이 일단 광산산성폐수가 발생하면 산소가 없더라도 황철석의 산화작용이 계속될 수 있다. 식(3-6) 및 식(3-7)에 의한 Al 및 Mn으로 산도가 발생될 수 있다.



이상의 황철석의 산화작용으로 부터 Fe 및 SO_4^{2-} 가 다량 함유한 pH가 낮은 산성폐수가 발생하게 된다.

3-1-2 광산개발로 인한 환경오염 영향

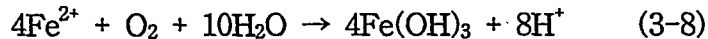
◎ 광산폐수 및 침출수가 수질에 미치는 영향

- 수자원에 대한 중금속 오염

용액의 pH가 양이온의 용해도에 미치는 영향을 보면(Snoeyink and Jenkins, 1980), 물 속의 중금속 거동은 pH에 의해 상당히 영향을 받는다. 즉 pH가 낮은 산성광산폐수를 고려해 보면(pH 3 부근 기준) Al, Cr, Cu, Zn, Pb, Fe^{2+} , Cd^{2+} , Mn^{2+} 등의 성분은 수중에서 고농도로 존재할 수 있다. 즉 광산폐수 중 중금속을 다량 함유한 산성폐수가 될 수 있다.

- 용존산소 감소

광산산성폐수에서 용존철의 산화과정은 산소를 소모하는 과정(식 3-8)이므로 용존산소의 감소를 야기할 수 있다.



인위적 폭기가 이루어진 물에서 용존 산소는 약 8mg/l (25°C) 정도로 녹아 있으며 수중 생명체가 이용하고 있다. 한편 7mg/l 의 2가철이 3가 철로 산화되면서 약 1mg/l 의 용존산소가 소모된다. 따라서 만약 광산폐수 중에 $50\sim 60\text{mg/l}$ 의 2가철이 용존해 있고 약 8mg/l 의 용존 산소는 자연 폭기가 없다면 혹은 정체수에서는 결국 무산소 환경이 만들어질 것이다. 달성광산폐수에서 약 3mg/l 정도로 낮게 용존 산소량이 측정되었는데 이는 식(3-8) 등의 화학적 반응결과로 기인했을 것이다.

- 탁도 유발 및 하상 퇴적물 생성

탁도는 무기성분 즉, 철 및 알루미늄 수산화물 등의 형성과 관련하여 발생하며 특히 하천수와 광산폐수와 희석되면서 주로 발생된다. 이들은 Yellow boy, 백색침전물 등으로 하상퇴적물을 생성시켜 하천 경관을 훼손한다.

- 저생(底生) 생물상 서식처 파괴

pH의 조건에 따라서 수중저생 생물체의 다양성이 왜곡될 수 있다(그림3-2).

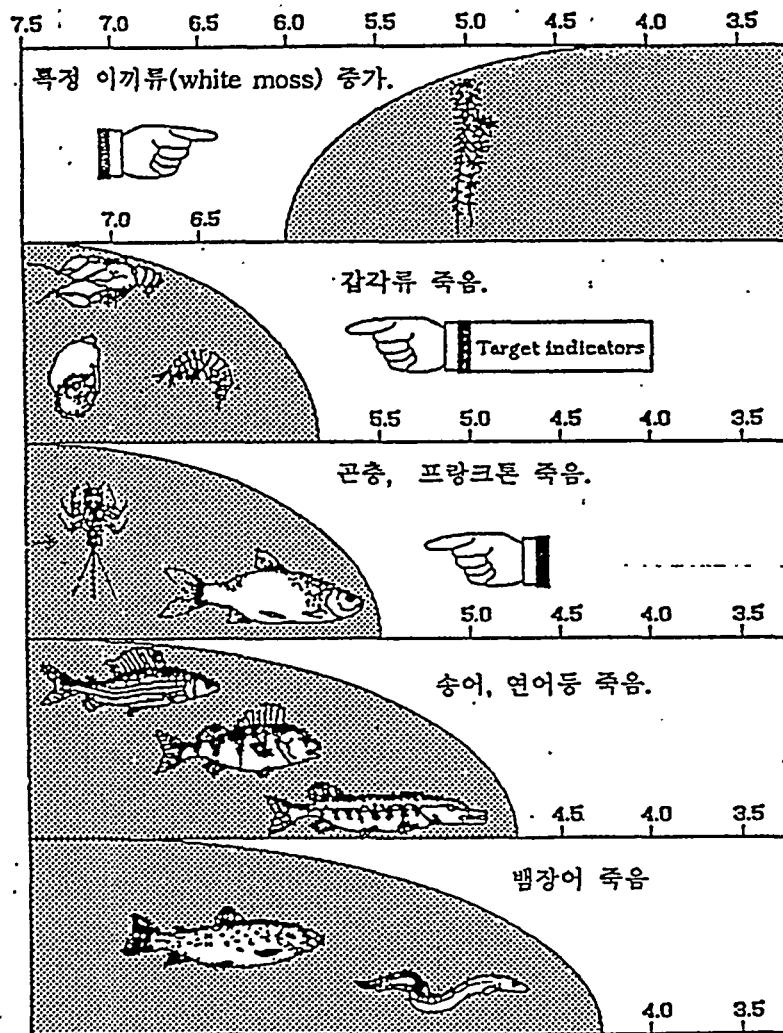


그림 3-2 pH가 수중 생물에 미치는 영향.

그림 내부에 pH영향에 대한 지시어종이 표시되어 있다.

3-2 광산개발로 인한 환경오염 조사결과

3-2-1 물

3-2-1-1 갯수 및 침출수

일부 광산에서 관찰되는 갯수 유출 모습을 사진 3-1, 3-2에 나타나있다.

갯수 및 침출수등에 대한 수질분석 결과가 표 3-4에 수록되어 있으며 그림 3-3부터 3-13에 도시화하였다.

표 3-4 갯수 및 침출수 등에 대한 수질측정 및 화학분석 결과

광산명	시료 (단위)	pH	Eh (mV)	DO (mg/l)	Turb (mg/l)	TDS (mg/l)	As (mg/l)	Cd (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	Al (mg/l)	Mn (mg/l)	SO42- (mg/l)	CN (mg/l)	비고
고명	갯수	6.87	-38.2	9.0	389	486	1.21	<0.001	0.079	0.26	<0.001	12	0.57	10.4	397		선광장 분근에서 유출
근북	갯수	7.2	279	7.0	236	100	0.020	<0.001	<0.005	0.020	<0.001	0.03	0.26	0.020	31	Nd	광미장 옆(갯수유입)하류
근북	갯수	7.6	244	8.2	243	68	0.300	<0.001	<0.005	0.110	0.010	0.05	0.71	0.580	85		갯구앞
금정	갯수	8.2	211	11.1	283	419	0.220	<0.001	<0.005	<0.001	<0.001	0.02	0.37	0.073	263		남2통동 갯수
금호 잠근	1수갯 갯수	7.57	181	9.6	380	575	0.072	<0.001	0.054	1.72	<0.001	0.016	0.58	6.84	535		현장사무소 옆
달성	갯수(하1번)	3.6	377	6.0	222	1412		0.300		20	7	182	16.00	76	2592		하1번 고도(무덤옆 유출수)
달성	갯수(하2번)	3.4	406	3.9	190	924		0.040		5	20	0.50	15.00	11	696		하2번 고도(배수암거)
달성	갯수(하3번)	5.1	194	3.6	281	1551		0.240		19	5	214	5.00	80	2778		하3번갯 좌측제곡
무극	갯수	7.82	227.2	4.9	217	292	0.089	0.001	<0.005	<0.001	<0.001	0.017	0.35	<0.001	137		갯수, holding basin
부평	갯수	6.9	84	6.8	399	43	0.050	<0.001	0.040	0.900	0.010	2.66	0.20	19	594		수갯유출수
상동	갯수	7.1	185	3.7	239	506	0.021	0.009	0.023	0.700	0.010	0.01	1.32	0.220	700		상동갯 갯수
상동	갯수	7.8		9.6	295	475	0.036	0.003	<0.005	0.063	0.010	<0.001	1.02	0.009	415		소백갯배수갯수
송천 함태	갯수	7.54	233	10.2	257	180	0.60	<0.001	<0.005	0.027	0.001	0.022	0.21	0.002	61	Nd	광산폐기물 적치장부근 가옥
양구동	갯수	4.9	276	8.1	386	60	0.050	0.100	3	23	1.040	0.52	4.22	1.630	156		갯구
일광	갯수	2.7	560	8.2	208	32	<0.001	0.190	0.190	15	19	177	27.50	4.740	955		5번갯구 아래
일광	갯수	4.3	309	7.1	221	187	<0.001	0.010	1	1.270	1.240	0.84	4.16	2.000	165		광산 하부 논 유입수
제1연화	갯수	8.36	200	9.7	219	152	0.013	<0.001	<0.005	0.004	<0.001	0.019	0.300	0.019	39.7		중앙갯 직하부
조일상곡	갯수	8.2	188	7.6	195	162	0.001	0.001	<0.005	0.120	<0.001	0.02	0.30	0.180	28		갯구앞 연못
함안	갯수	4.9	299	9.0	334	603	0.020	<0.001	<0.005	0.090	9	0.04	10.60	2.380	718	Nd	갯구앞
금왕	침출수	8.3	210	6.2	228	287	0.009	0.001	<0.005	<0.001	0.005	0.02	0.24	0.003	144	Nd	광미댐 상등수
금왕	침출수	7.4	109	5.7	175	256	0.007	<0.001	0.008	<0.001	<0.001	0.05	0.27	2.100	46	0.011	광미댐 하부 암거 배출수
다덕	침출수	3.6	388	5.2	474	307	0.029	0.022	0.720	11	0.380	0.82	4.16	6.760	248		광미장 배출수
다덕	침출수	4.0		4.3		244	0.060	0.046	0.240	9	0.440	2.51	3.40	4.400	225		광미장 배출수(2차 조사)
삼보	침출수	6.9	84	6.8	399	43	0.070	0.040	0.340	35	0.260	1.68	0.34	17	378		광미장하부
울진	침출수	6.7	146	7.4	236	180	0.013	<0.001	<0.005	0.610	<0.001	2.81	0.78	1.420	152		광미장 배수
무극	선광장배출수	8.74	174.4	5.0	237	278	0.061	<0.001	<0.005	<0.001	<0.001	0.02	0.31	<0.001	138		선광장 처리수 저장조
무극	폐수처리수	7.86	176.5	4.5	215	278	0.027	0.001	<0.005	<0.001	<0.001	0.017	0.46	0.005	148		폐수처리장 방류수

Nd: Not Determined



사진 3-1 달성광산 하3번갱 좌측계곡의 광산폐수 유출모습

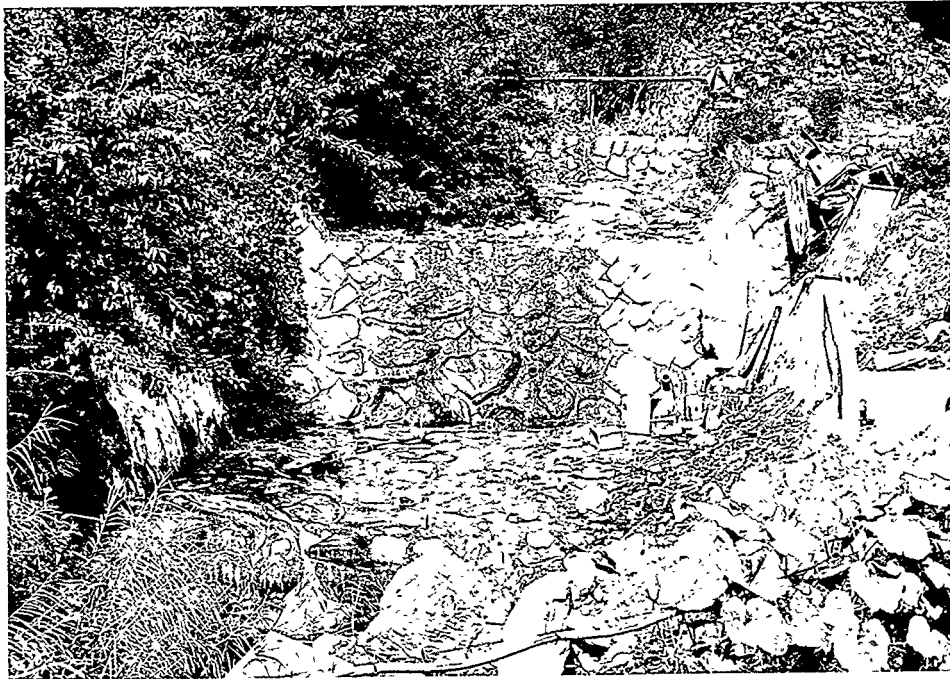


사진 3-2 일광광업소 갯수 유출 현장사진. 수로바닥에 yellow boy현상이 관찰되며 푸른이기도 서식하고 있음.

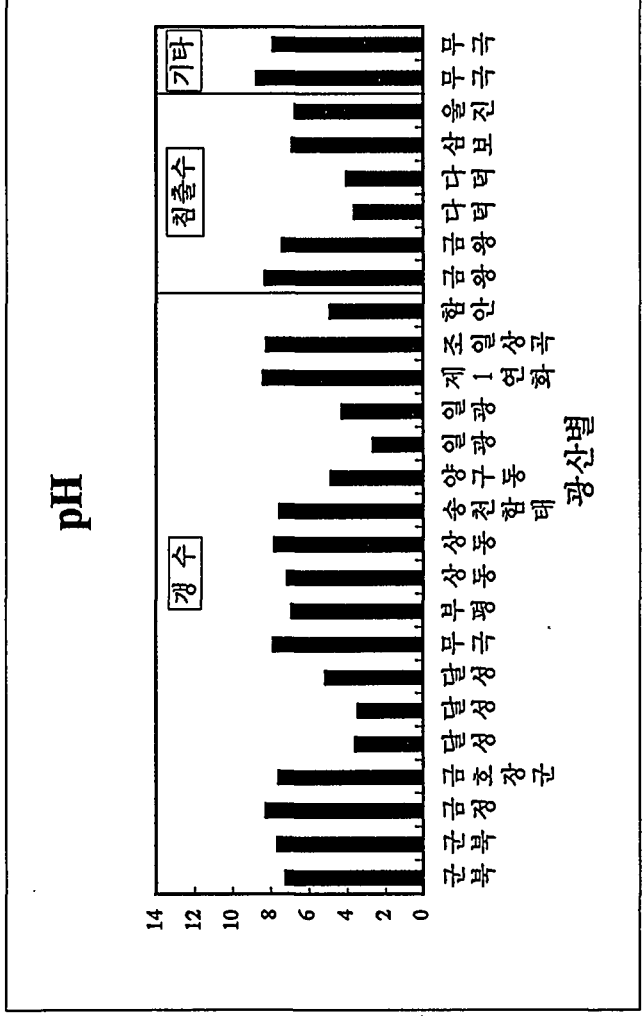


그림 3-3. 광산별 개수 및 침출수 등에 대한 pH 비교

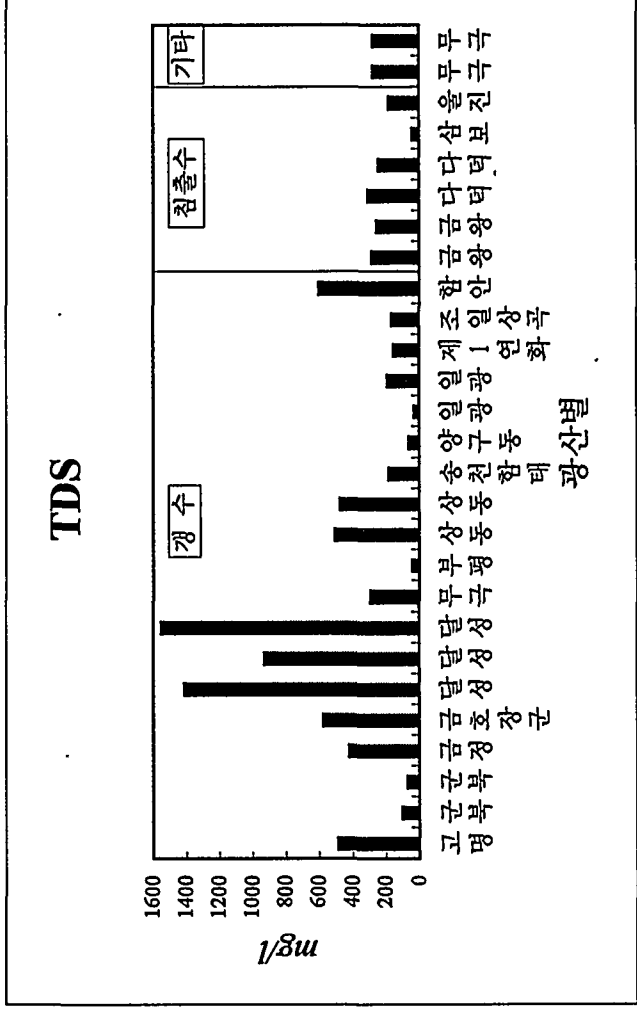


그림 3-4. 광산별 개수 및 침출수 등에 대한 TDS 비교

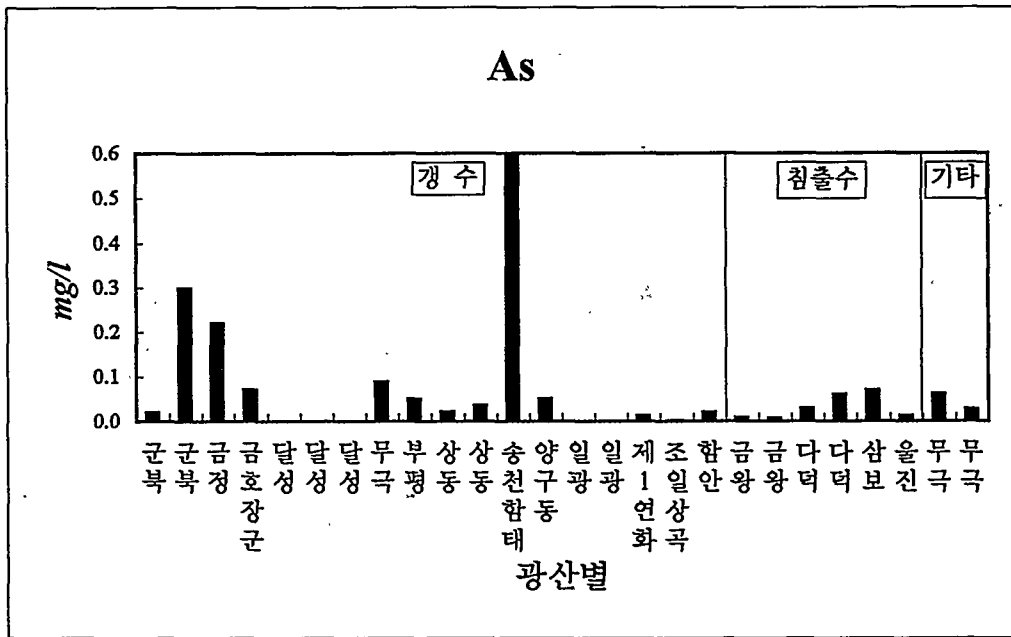


그림 3-5. 광산별 갯수 및 침출수 등에 대한 As 비교

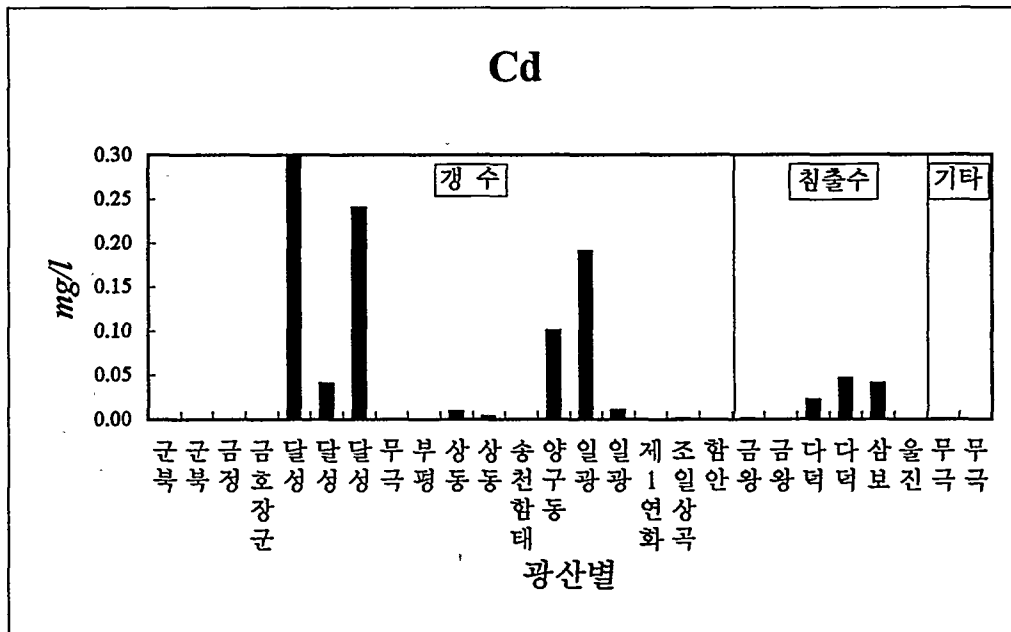


그림 3-6. 광산별 갯수 및 침출수 등에 대한 Cd 비교

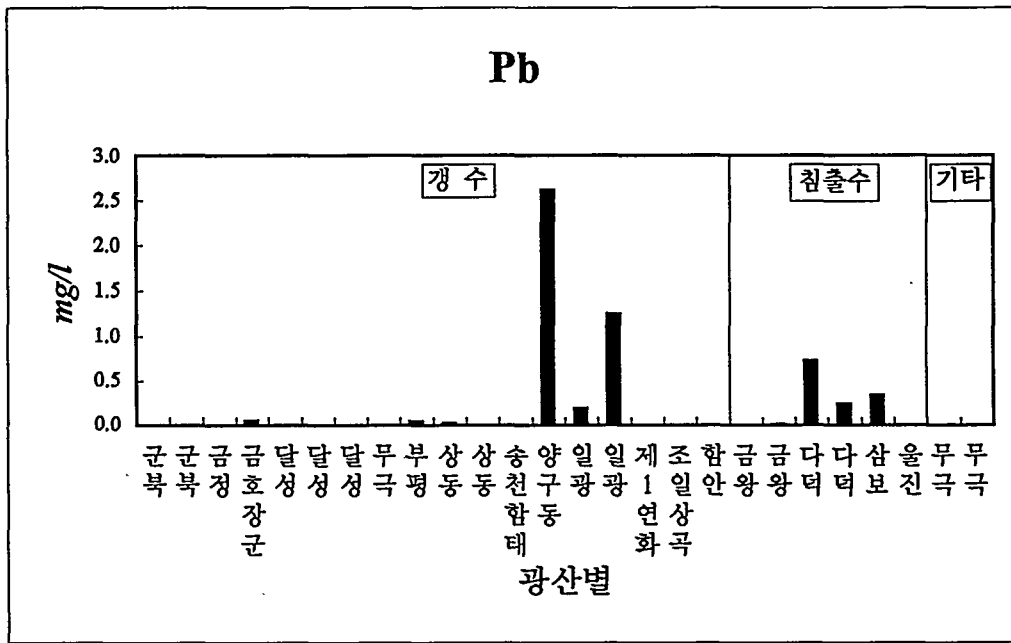


그림 3-7. 광산별 개수 및 침출수 등에 대한 Pb 비교

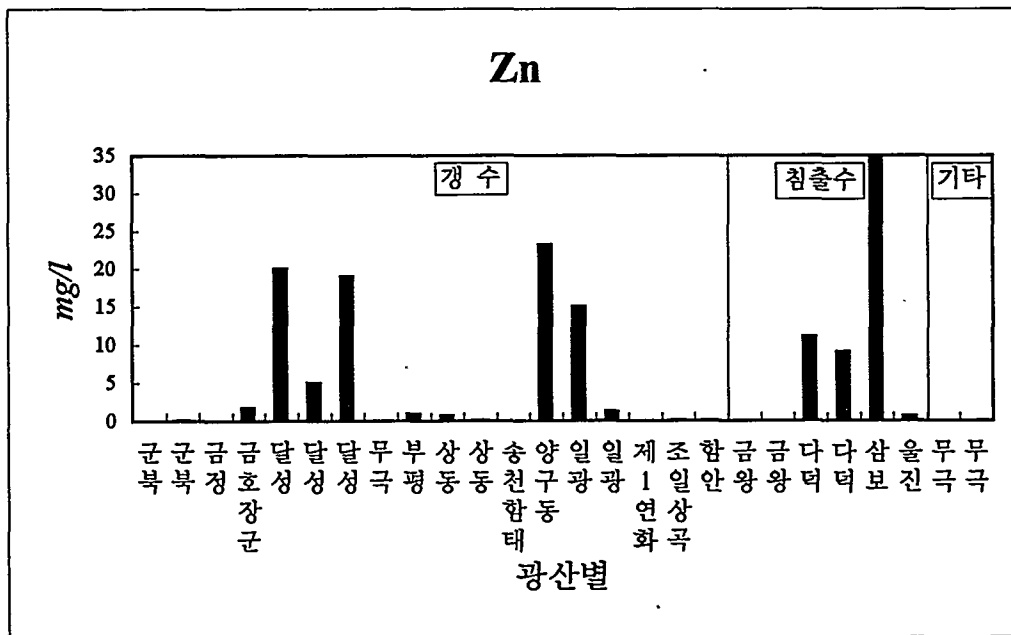


그림 3-8. 광산별 개수 및 침출수 등에 대한 Zn 비교

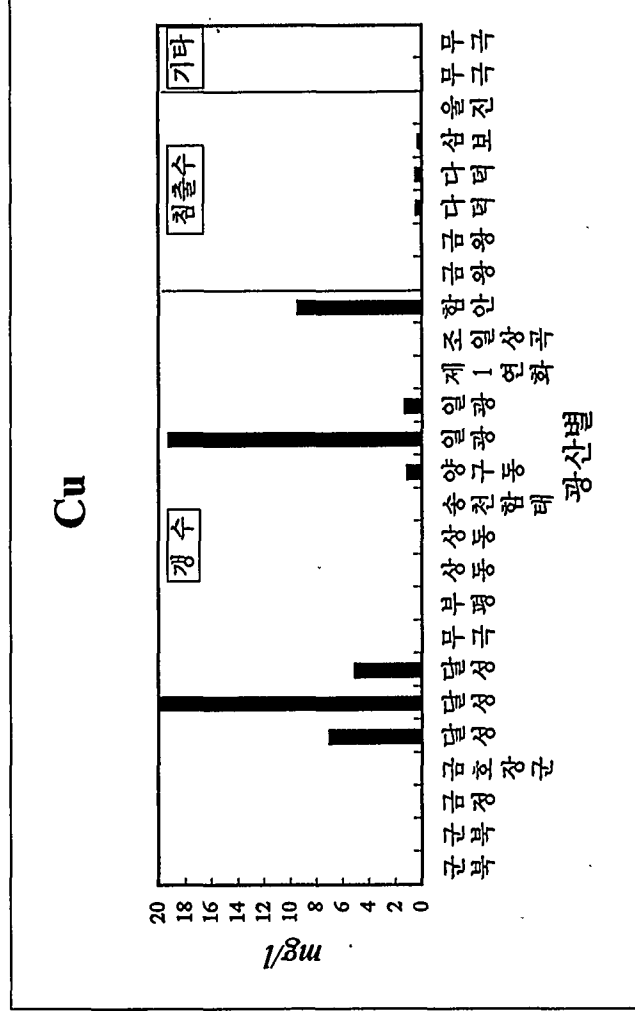


그림 3-9. 광산별 개수 및 침출수 등에 대한 Cu 비교

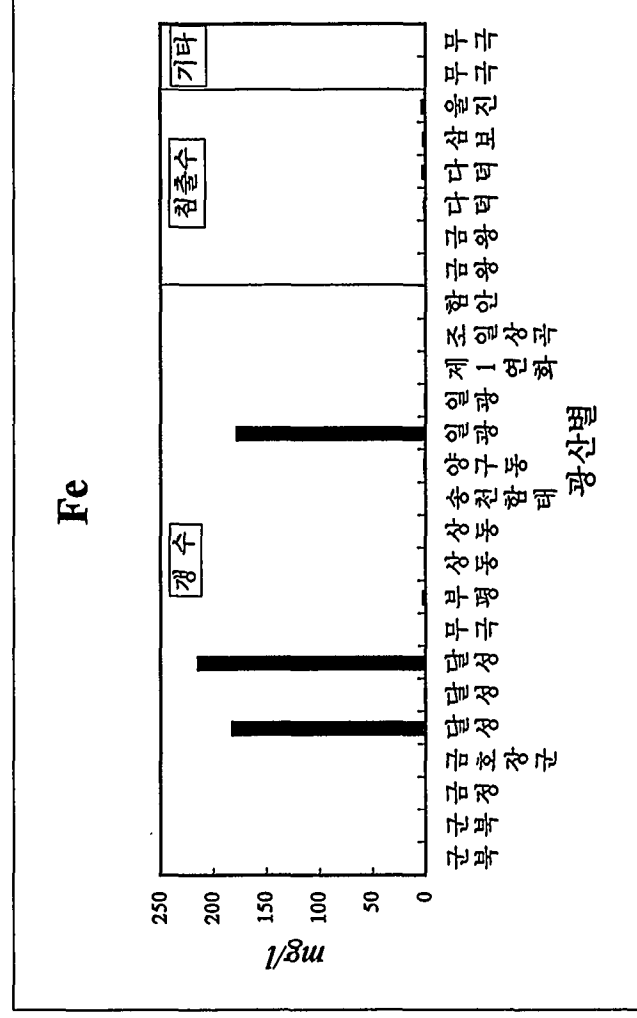


그림 3-10. 광산별 개수 및 침출수 등에 대한 Fe 비교

갱수의 pH가 5미만으로 기재된 광산은 달성(사진 3-1), 일광(사진 3-2), 양구동, 함안 광산 등의 갱수였다(그림 3-3). 이들 광산 갱수는 기타 pH가 중성이었던 광산 갱수들에 비해 중금속의 농도가 높았다. 즉, pH가 낮았던 일광광산 및 달성광산의 갱수가 대표적인 예로서 두 광산의 산성갱수중에는 Zn(그림 3-8), Cu(그림 3-9), Fe(그림 3-10), Al(그림 3-11) 및 Mn(그림 3-12) 등이 고농도로 함유되어 있다.

광미장으로 부터 발생되는 침출수의 현장 모습을 사진 3-3 및 3-4에 일부 수록 하였다.

광미장 침출수의 경우 다덕광산 침출수 pH가 1차 및 2차 조사결과 3.6 및 4.0으로 기재되어 광산폐기물(광미사)로 부터 산성폐수가 발생되고 있었다(그림 3-14). 다덕광산의 광미장(사진 3-3) 유입수 및 광미장 유출수의 수질을 비교해 보면(표 3-5) 조사된 대부분의 수질항목이 악화되고 있음을 알 수 있다. 특히 Cd, Pb, As, Zn 등 독성 중금속의 부화가 뚜렷하게 나타나고 있다.

한편 금왕광산 광미장 하부암거의 침출수에서 0.011mg/ℓ의 시안이 검출되었다.

광산갱수 및 침출수에 대한 수질자료를 환경보전법 수질환경 보전법 시행규칙 제 8조 별첨 5의 오염물질 배출허용 기준치("가지역")와 비교한 결과(표 3-6 참조), 갱수 및 침출수에서 유출되는 오염성분은 주로 pH, Fe, Zn, Cu, Mn 등이었고 Cd, Pb, As 등도 배출되고 있었다. 따라서 광산주변 수질 보전시 이들 성분에 대한 오염 방지 노력이 있어야 할 것이다.

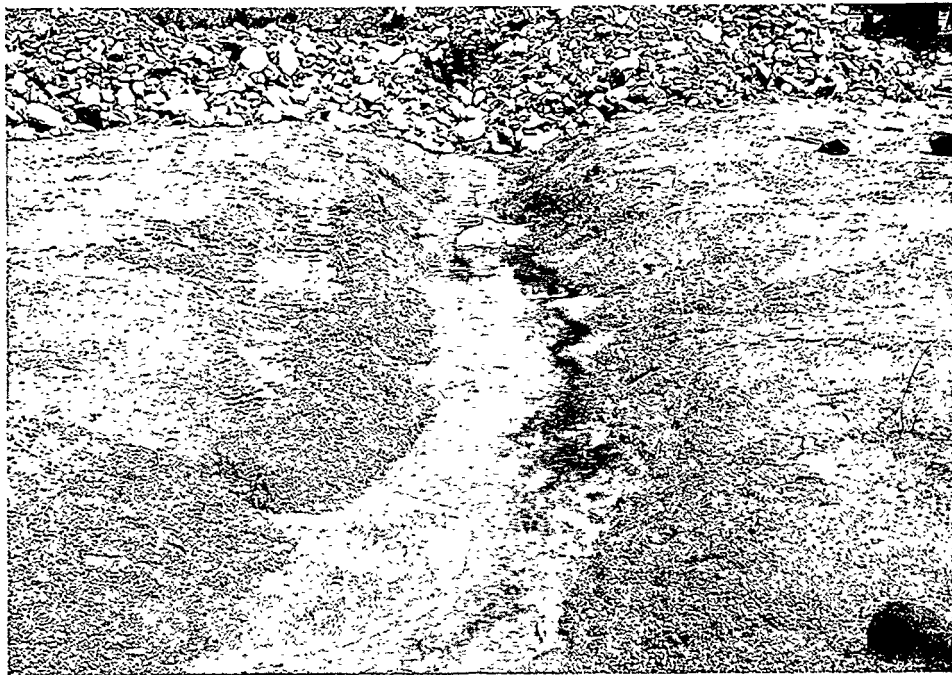


사진 3-3 다덕광산 광미사장 전경. 물은 광미사장 상부쪽 공터 밑에 매설된 암거를 통해 이곳(광미사장의 경계부)을 통해서 흐르다가(위) 광미사장 중앙부를 관통하여 광미사장 주변 도로 하부의 암거를 통해서 광미사장 득 하류로 방류된다.



사진 3-4 울진 광업소 광미사장 하부에서 관찰되는 침출수

표 3-5 다덕광산 광미장 유입수와 배출수(침출수)와의 수질항목 비교

수질항목	유입수	→ 다덕광산 광미장 통과후 →	배출수(침출수)	비고
pH	6.3		4.04(↓)	2.26감소
용존산소	5.2mg/ℓ		4.3mg/ℓ(↓)	0.9mg/ℓ 감소
TDS	206mg/ℓ		244mg/ℓ(↑)	38mg/ℓ 증가
As	0.004mg/ℓ		0.060mg/ℓ(↑)	0.0056mg/ℓ 증가
Cd	0.011mg/ℓ		0.046mg/ℓ(↑)	0.035mg/ℓ 증가
Pb	0.045mg/ℓ		0.24mg/ℓ(↑)	0.195mg/ℓ 증가
Zn	2.4mg/ℓ		9.1mg/ℓ(↑)	6.7mg/ℓ 증가
Cu	0.10mg/ℓ		0.44mg/ℓ(↑)	0.34mg/ℓ 증가
Fe	0.004mg/ℓ		2.51mg/ℓ(↑)	2.5mg/ℓ 증가
Al	0.30mg/ℓ		3.4mg/ℓ(↑)	3.1mg/ℓ 증가
Mn	2.6mg/ℓ		4.4mg/ℓ(↑)	1.8mg/ℓ 증가
SO ₄ ²⁻	152mg/ℓ		225mg/ℓ(↑)	73mg/ℓ 증가

참고: 본 자료는 1차 조사자료임

표 3-6 광산갱수 및 침출수별 수질과 오염물질 배출허용기준("가"지역)비교

항목 구분	pH	Fe (mg/l)	Zn (mg/l)	Cu (mg/l)	Cd (mg/l)	Pb (mg/l)	Cr ⁶⁺ (mg/l)	Mn (mg/l)	CN (mg/l)	As (mg/l)	F (mg/l)	온도 (°C)	Total N (mg/l)	총인 (mg/l)	비고
"가"지역 광산명	5.8~ 8.6	10 이하	5 이하	3 이하	0.1 이하	1 이하	0.5 이하	10 이하	1 이하	0.5 이하	15 이하	40 이하	60 이하	8 이하	기준치 (농도)
달성 (하 1번)	●		●	●				●							4개 성분 초과
달성 (하 2번)	●	●	●	●	●			●							6개 성분 초과
달성 (하 3번)	●	●	●	●	●			●							6개 성분 초과
일광 (5번 갱구)	●	●	●	●	●										5개 성분 초과
일광 (광산하부 는 유입수)	●	●				●									3개 성분 초과
양구동	●		●			●									3개 성분 초과
함안	●			●											2개 성분 초과
부평								●							1개 성분 초과
다덕	●		●												2개 성분 초과
삼보			●					●							2개 성분 초과
고명		●						●		●					3개 성분 초과
송천(합태)										●					1개 성분 초과

● 은 배출허용기준을 초과하는 성분을 의미함

* 환경보전법 수질환경 보전법 시행규칙 제 8조 별첨 5("가"지역)

* 시료구분은 표 3-4를 참조

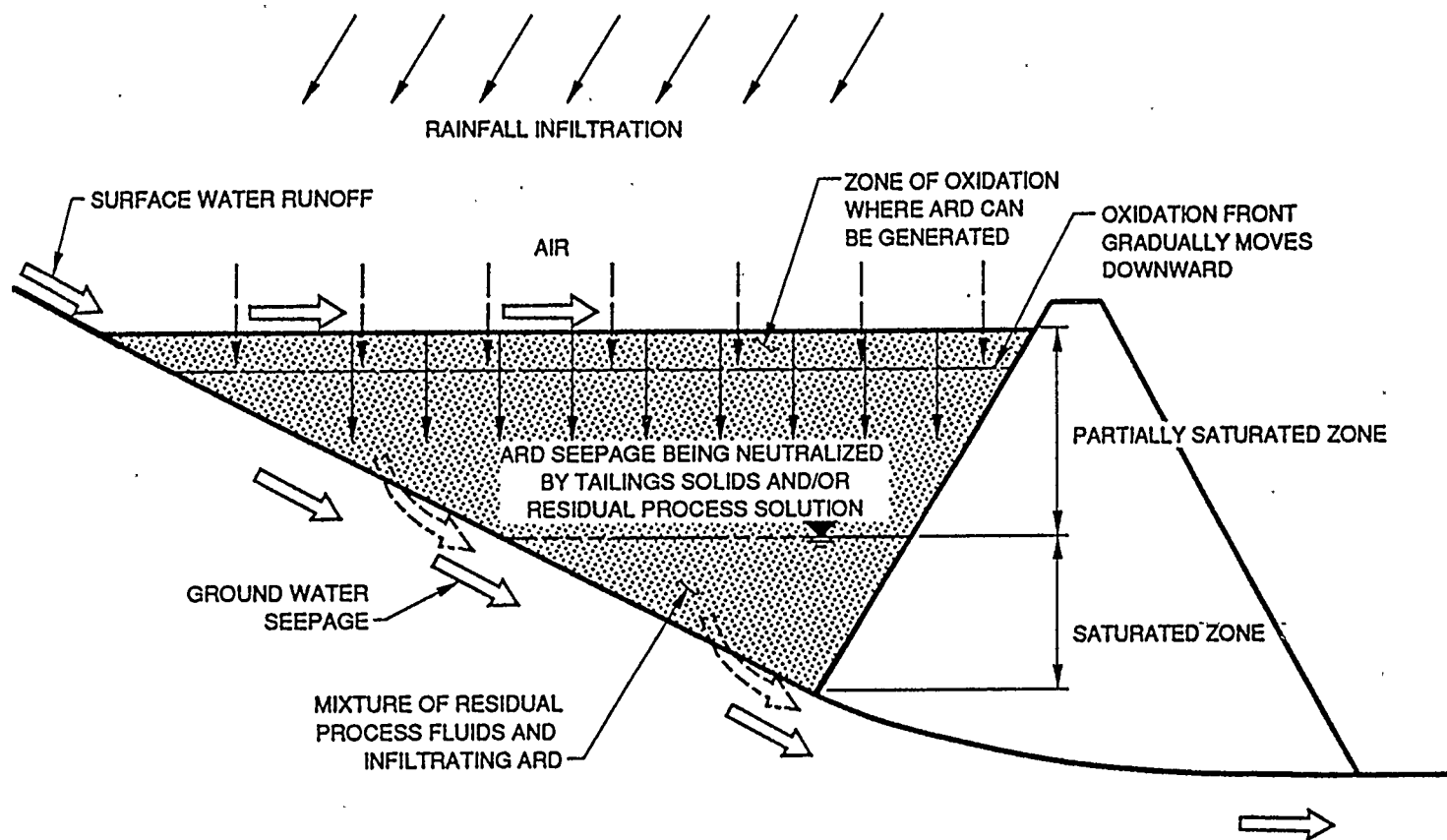


그림 3-14 다덕광산의 광산폐기물로 부터 산성폐수(침출수) 생성개념도.
다덕광산 광미장 상부에 pH가 6.3인 물이 유입되어 광미장의
광산폐기물을 지나면서 pH가 약4인 산성폐수(침출수)가 암거
를 통해 방류된다.

3-2-1-2 하천수

하천수 및 기타 지표수들에 대한 수질 분석 결과가 표 3-7에 수록되어 있다. 여기서 하천수는 주로 광산주변에 위치한 소하천들을 의미하며 나머지 물시료는 갯수 혹은 침출수로 구분하기 어려운 지하수, 계곡수, 암거 배출수, 저수지 물 등이었다.

광산주변 하천수 및 계곡수의 수질을, 국민의 건강을 보호하고 쾌적한 환경을 조성키 위해 설정된 환경정책기본법 제10조 환경기준의 하천 수질기준과 비교하여 표 3-8에 수록하였고, 일부 성분에 한하여 그림 3-15~그림 3-19에 도시하였다.

상동광산 윗쪽인 옥동천 지류의 pH는 4.6으로 기재되어 표 3-8의 하천에 대한 이용 목적별 적용대상과 비교해 보면 공업용수 2급수 이하의 수질로 나타났다. 본 하천수의 지류는 상동광산과는 별개인 폐탄광 지역을 배수하는 하천으로서 상동광산에 의한 영향은 아니다.

사람의 건강과 관련된 광산주변 하천수 중의 Cd, As, CN 및 Pb를 기준치와 비교하면 다음과 같다.

Cd의 경우, 다덕광산의 광미장 상류에 위치한 지하암거 배출수에서 Cd이 0.011mg/l로 분석되었으며 이 물은 지하로부터 지상으로 배출된다.

As의 경우, 금정국교 밑 하천수(0.053mg/l), 금호(장군)광업소 정문 하부 하천(0.056mg/l), 옥방광산 폐석더미 부근하천(0.08mg/l), 쌍전 광미장 아래하천(0.58mg/l)에서 검출되어 사람의 건강과 관련된 As성분이 검출되었다.

CN은 금정광산 하부 하천에서 0.013mg/l 이 검출되었다.

Pb의 경우, 상동광산 상류 옥동천에서 0.17mg/l, 그리고 상동광산 유역의 버스정류장 부근 옥동천에서 0.12mg/l로 Pb가 분석되어 탄광폐수에 의한 수질 오염현상이 확인된다.

따라서 광산개발로 인해서 성분(주로 Cd, As 및 CN 등) 이 광산주변 하천에 포함되어 국민의 건강 및 자연환경을 훼손시키고 있음을 알 수 있다.

표 3-7 하천수 및 기타 지표수에 대한 현장수질 및 화학분석 결과

광산명	시료 (단위)	pH	Eh (mV)	DO (mg/l)	Turb (mg/l)	TDS (mg/l)	As (mg/l)	Cd (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	Al (mg/l)	Mn (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	CN (mg/l)	비고
가학	계곡수	7.1	221	9.5	202	466	0.020	0.010	0.020	0.220	0.020	0.22	0.13	0.010	38		쟁구밀유출수
가학	계곡수	7.5	246	7.8	197	402	<0.001	<0.001	<0.005	0.030	<0.001	0.43	0.07	0.140	31		광미장하부(우)
가학	계곡수	7.6	239	7.4	385	123	<0.001	0.010	0.030	0.340	0.030	2.11	1.84	0.300	95		광미장하부(좌)
금호(장군)	침전지반류수	7.6	222	7.4	327	430	0.056	<0.001	0.009	0.40	<0.001	0.022	0.53	1.05	354		광업소 정문 하부하천
다덕	지하수	6.3		5.2		206	0.004	0.011	0.045	2.400	0.100	0.00	0.30	2.600	152		광미장 유입수(2차 조사)
양구동	저수지물	6.6	286	6.7	234	518	0.050	0.010	<0.005	15	0.030	0.35	0.80	0.060	19		마홀리저수지
가학	하천수	7.4	208	5.0	208	165	0.010	<0.001	0.010	0.360	0.010	0.63	0.22	0.240	70		광미장 하부 1km
가학	하천수	8.5	207	9.3	215	200	0.020	<0.001	<0.005	0.070	<0.001	1.06	0.14	0.140	40		하부하천 잔이댐
거도	하천수	8.4	225	15.6	179	86	<0.001	0.001	<0.005	<0.001	0.015	0.02	0.15	0.002	22		광미장 하부하천
금성(기린)	하천수	8.4	65.8	6.4	224	227	0.007	0.001	<0.005	<0.001	<0.001	0.017	0.40	0.032	82	Nd	광미장 하류하천
금정	하천수	8.2	224	8.7	178	72	0.053	0.001	<0.005	<0.001	<0.001	0.04	0.09	0.001	32	0.013	금정국교 밑 하천수
만정(충주)	하천수	7.9	185	7.0	191	221	0.002	0.001	<0.005	<0.001	<0.001	0.04	0.22	0.280	60		광산하부 하천
산막	하천수	7.9	199	7.0	178	220	0.024	<0.001	<0.005	<0.001	<0.001	0.018	0.36	0.054	158		괴산하류 극도변 인접하천
상동	하천수	4.6	270	7.5	330	279	0.012	0.003	0.170	0.200	0.041	0.41	9.36	1.220	277		상동광산 상류하천
상동	하천수	6.1	155	8.2	386	328	0.012	0.003	0.120	0.140	0.017	0.94	1.58	1.050	307		상동 버스정류소 부근
상동	하천수	7.3	206	8.3	382	148	0.034	0.002	0.014	0.031	0.013	0.07	0.31	0.086	90		신폐재방류수 및 계곡수합수
상동	하천수	8.0	195	8.9	357	514	0.016	0.002	0.061	0.025	0.012	0.01	1.12	0.620	422		선광장 부근 하천
성진 신에미	하천수	8.2	236	8.3	330	213	0.010	0.003	0.019	0.110	0.010	0.01	0.55	0.058	100		광산정문배수암거
쌍전	하천수	7.4	231	7.1	220	39	0.58	<0.001	0.003	<0.001	0.002	0.23	0.085	0.087	12		광미장 아태하천
옥방	하천수	8.0	209	5.7	164	47	0.08	<0.001	0.007	<0.001	0.001	0.032	0.12	0.004	9		광산폐기물(폐석)처리장부근 하천
울진	하천수	7.1	197	8.8	250	90	<0.01	<0.001	<0.005	0.250	0.003	0.08	0.31	0.330	51		광미장폐수가 유입된 하천
제 2 연화	하천수	8.2	214	8.5	181	499	0.004	0.001	0.034	0.039	0.001	0.04	0.59	3.400	459	Nd	진매골광미댐 하부
제 2 연화	하천수	8.2	221	8.7	175	178	0.008	0.002	<0.005	0.200	0.002	0.02	0.31	0.029	83		제 2 연화 정문 옆 하천
제 1 연화	하천수	8.2	180	7.8	209	38	0.003	0.001	<0.005	<0.001	<0.001	0.021	0.058	0.03	13		이정교 밑
제 1 연화	하천수	8.0	170	7.6	203	954	0.008	0.001	0.029	<0.001	<0.001	<0.001	0.91	4.0	1059	Nd	제 2 연 하류 계곡
조일상곡	하천수	8.1	197	7.1	193	206	<0.001	<0.001	<0.005	<0.001	<0.001	0.01	0.38	0.052	40	Nd	광미장 하류(150 M) 하천

Nd: Not Determined

표 3-8 환경정책기본법 제10조 환경기준중 하천에 대한 수질기준과 그 수질기준을 초과하는 것으로 조사된 하천명

구분	등급	이용목적별 적용대상	기 준		구분	등급	기 준			
			pH	용존산소 량 (mg/L)			Cd (0.01 ^① mg/L이하)	As (0.05mg/L이하)	CN (불검출)	Pb (0.1mg/L이하)
생활환경	I	상수원수1급 자연환경보전	6.5~8.5 ^①	7.5이상 ^①	사람의 건강보호	전수역	해당사항 없음	금정국교밀 하부하천(0.053)	금정 국교밀 하천수 (검출)	상동 옥동천 상류(0.17) 상동버스정류 소 부근하천 (0.12)
	II	상수원수2급 수산용수1급 수영용수	6.5~8.5	5이상						
	III	상수원수3급 수산용수2급 공업용수1급	6.5~8.5	5이상						
	IV	공업용수2급 농업용수	6.0~8.5 상동 옥동천 상류 (4.6)	2이상						
	V	공업용수3급 생활환경보전	6.0~8.5	2이상						

주석1: ①내부수치는 기준치임

주석2: 생활환경 기준 항목 중 pH, 용존산소량 이외에 BOD, SS, 대장균수와 사람의 건강보호와 관련된 기준중 수은, 유기인, 6가크롬, PCB, ABS(Alkyl Benzene Sulfonate: 합성세제) 등은 본 표에서 제외되었음.

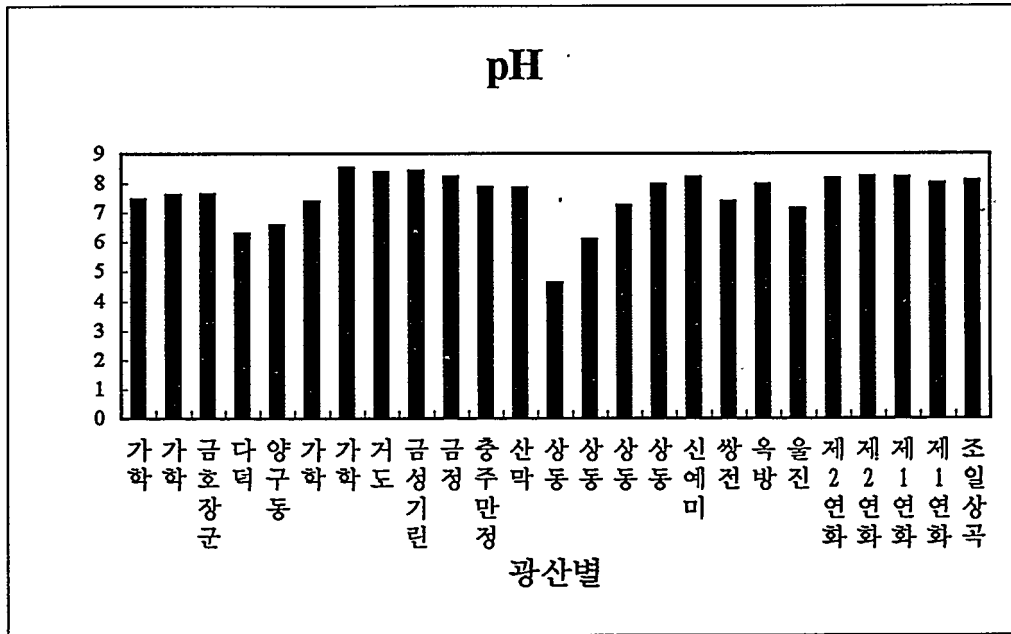


그림 3-15. 광산주변 지표수의 pH

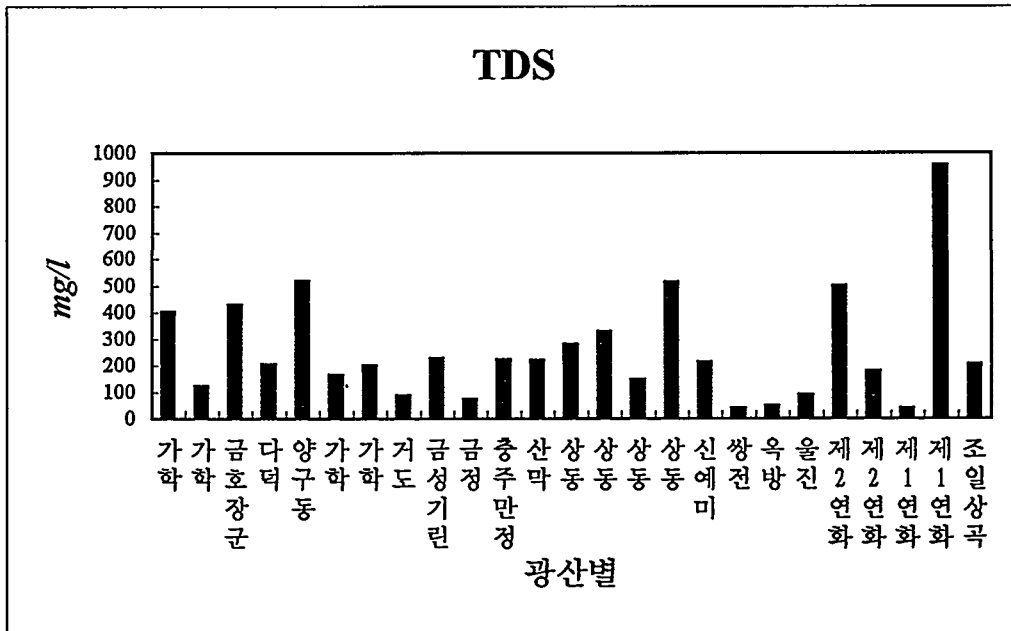


그림 3-16. 광산주변 지표수의 TDS

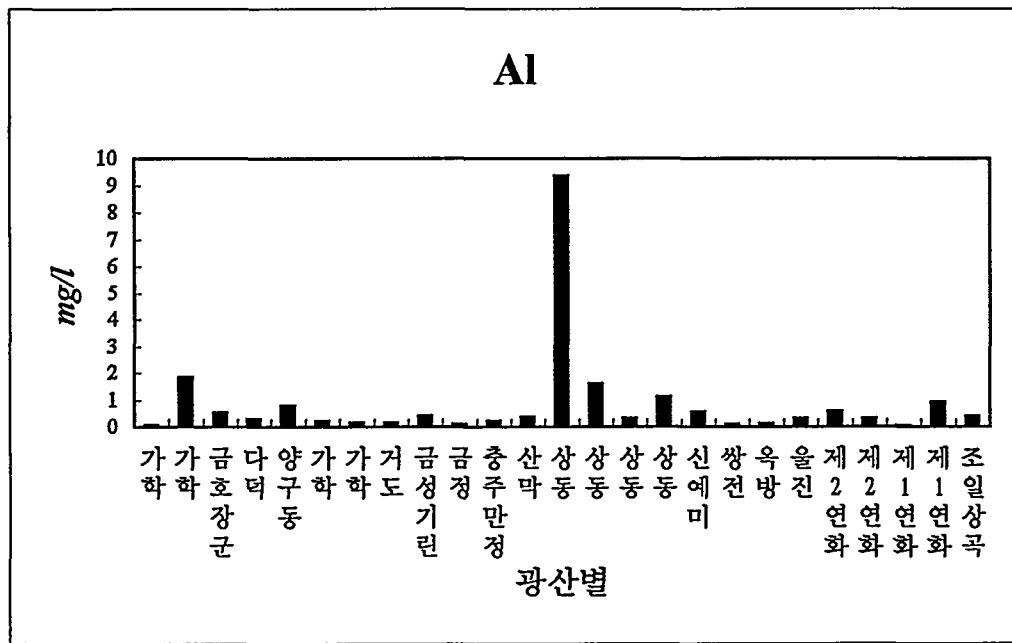


그림 3-17. 광산주변 지표수의 Al 농도

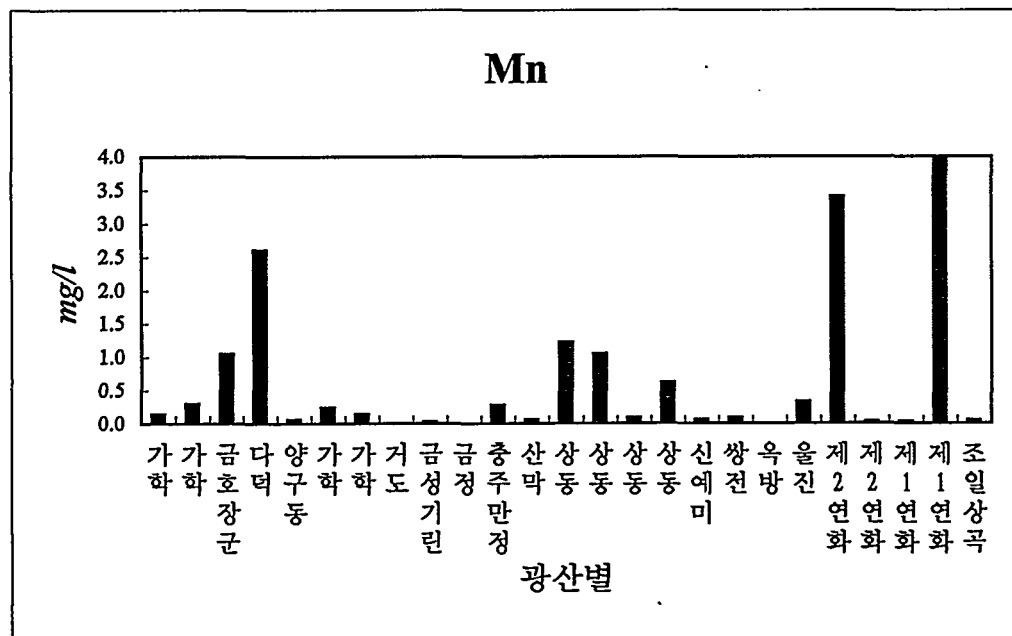


그림 3-18. 광산주변 지표수의 Mn 농도

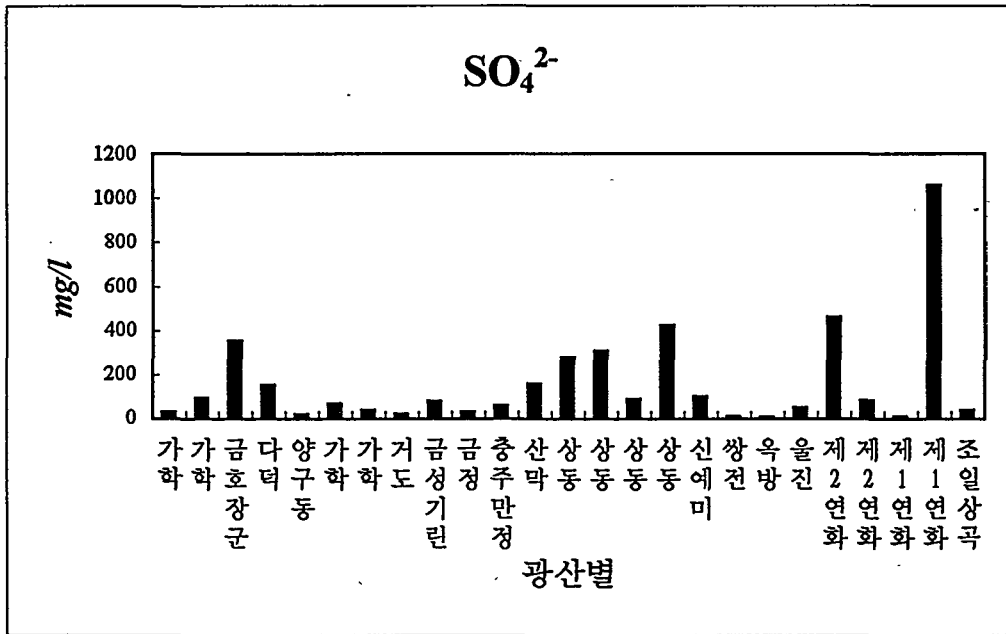


그림 3-19. 광산주변 지표수의 SO_4^{2-} 농도

3-2-2 광산폐기물

일부 광산의 광산 폐기물(광미사) 적치 및 침식모습이 사진 3-5~사진 3-9에 수록하였다.

광미사에 대한 유해물질 성분(As, Cd, Pb, Cu 및 CN) 용출시험 분석결과를 표 3-9에 수록하였다. 한편 Fe, Al, Mn 및 Zn 등은 광산폐기물의 대표적인 용출 가능 성분이므로 표 3-9에 포함시켰으며 이들 성분들을 그림 3-20~그림 3-27에 도시화하였다. 거도(Cu; 13mg/ℓ), 금정(As; 16mg/ℓ), 양구동(Cu; 4mg/ℓ, Pb; 6mg/ℓ), 쌍전(As; 47mg/ℓ, 1.79mg/ℓ), 송천(함태)(As; 6mg/ℓ), 은치(As; 3mg/ℓ, Cd; 1.73mg/ℓ), 고명(Cd; 0.4mg/ℓ) 등의 광산폐기물들이 유해물질(주로 Cu, Cd 및 As 등)을 함유한 것으로 나타났다.

즉, 위의 광산 폐기물은 용출시험결과 산업폐기물 중 유해물질을 함유한 특정 폐기물로 분류할 수 있으며 특정 폐기물로 관리되어야 할 것을 신중히 검토해야 될 것이다(표 3-10).

광산폐기물의 대표적 용출성분인 Fe, Al, Mn 및 Zn 등의 용출결과, 거도(Al; 24mg/ℓ), 금장(Pb; 2mg/ℓ, Zn; 55mg/ℓ), 금정(Zn; 8mg/ℓ, Fe; 292mg/ℓ, Al; 54mg/ℓ), 다락(Zn; 8mg/ℓ, Al; 12mg/ℓ), 양구동(Zn; 21mg/ℓ), 울진(Fe; 22mg/ℓ), 제2연화(Mn; 15mg/ℓ), 고명(Zn; 29mg/ℓ, Mn; 15mg/ℓ), 쌍전(As; 47mg/ℓ, Fe; 42mg/ℓ), 송천(함태)(Zn; 43mg/ℓ, Fe; 332mg/ℓ, Al; 14mg/ℓ), 은치(Zn; 37mg/ℓ, Fe; 26mg/ℓ, Al; 11mg/ℓ, Mn; 10mg/ℓ) 등에서 상당량의 중금속 원소들이 용출되어 광산폐기물중에 함유된 황화광물의 영향으로 판단되며 황화광물의 산화작용의 산물인 광산폐수의 주요 화학 특징을 반영하고 있다.



사진 3-5 삼보광미장의 침식에 의한 광미사 유실모습

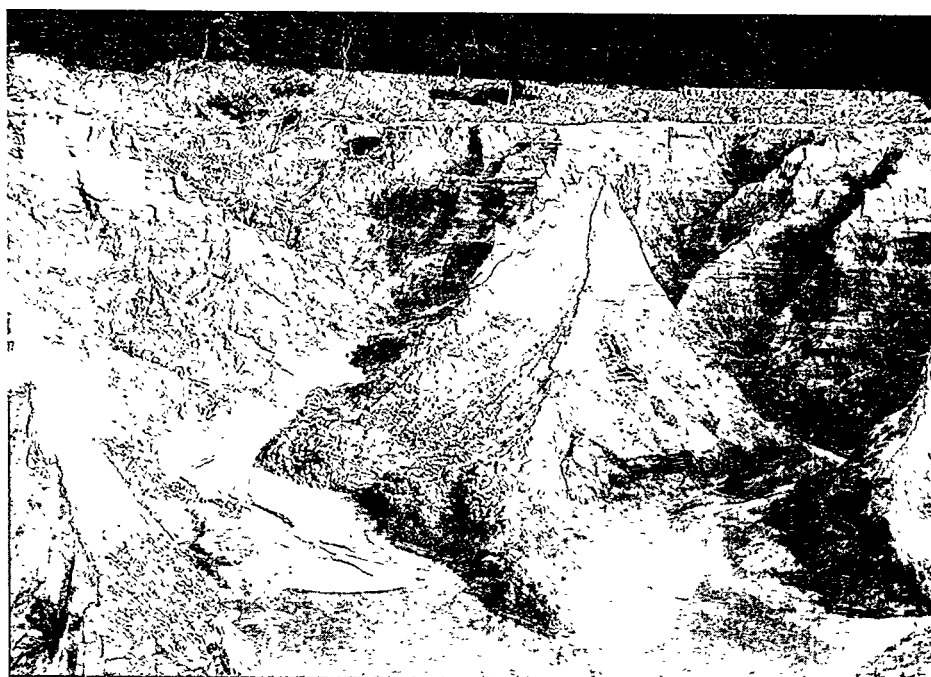


사진 3-6 삼보 광미장의 침식에 의한 광미사 유실모습(제1광미적치장)



사진 3-7 가학광미장 광산폐기물 (광미사) 침식모습

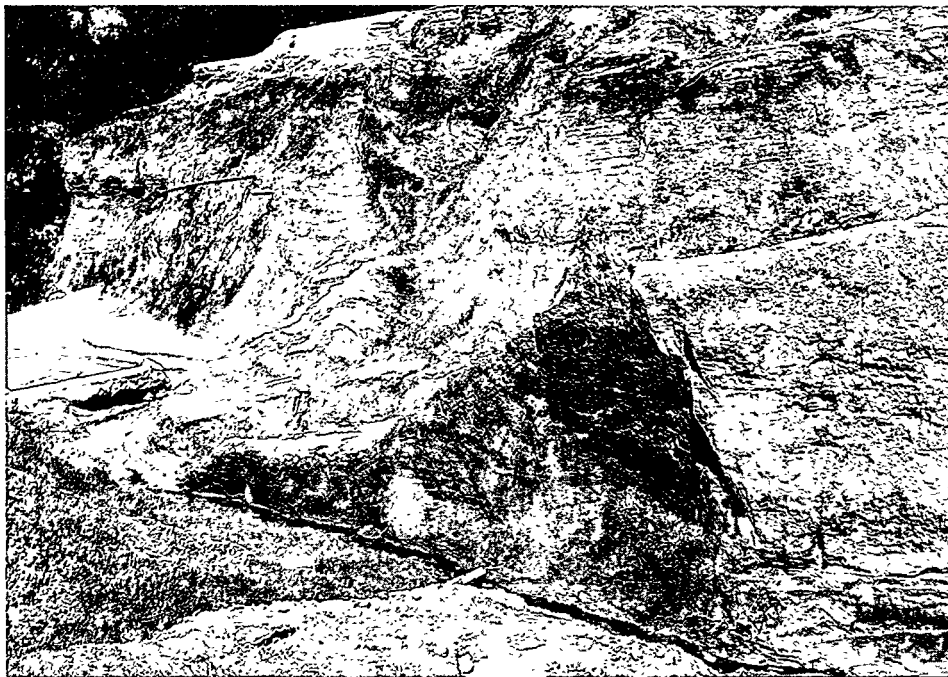


사진 3-8 가학광미장 광산폐기물(광미사) 침식모습

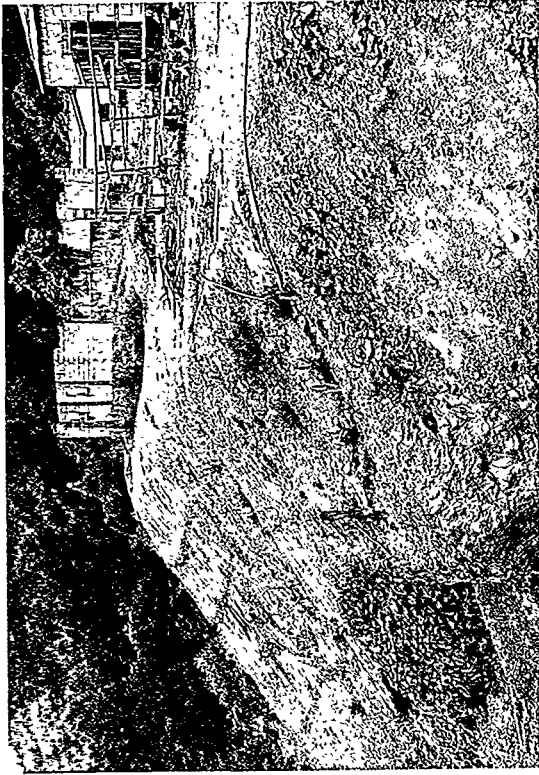


사진 3-9 양구동 광산 광산폐기물(폐석 및 광미사)의 침식현상
신광 및 제련시설이 보임

표 3-9 광미사에 대한 용출시험 분석 결과

광산명	시료 (단위)	As (mg/l)	Cd (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	Al (mg/l)	Mn (mg/l)	CN (mg/l)	비고
가학	광미사	<0.001	0.010	<0.005	0.040	<0.001	0.02	0.02	0.020		광미장
거도	광미사	0.090	0.010	0.140	1.700	13	3	24	3	Nd	선광장 광미
고명	광미사	0.32	0.40	1.51	29	0.021	0.14	1.04	15		선광장부근, 밭으로 개간 중(공작색)
군북	광미사	0.020	<0.001	0.050	0.030	0.010	0.04	2.31	0.430	Nd	광미장
금성 기린	광미사	0.04	<0.001	0.029	0.029	0.01	0.015	0.89	0.26		광미장(회색, 실트질 이하)
금왕	광미사	0.025	<0.001	0.051	0.014	0.013	<0.01	0.40	0.740	Nd	광미덤
금장	광미사	0.052	0.50	2	55	0.550	<0.01	0.87	0.250		구선광장 부근 도로밀 광미
금정	광미사	0.039	0.016	0.075	0.790	0.017	0.01	1.03	5	Nd	남2동동 앞 광미(사면적치)
금정	광미사	16	0.022	0.190	8	0.570	292	54	1.040		광미장(계곡적치)
다락	광미사	0.020	0.050	0.050	8	0.280	0.14	12	3	Nd	광미장
달성	광미사	0.047	<0.001	0.240	0.190	1.280	2.82	3	0.260		구광미장 하류둑 주변 광미
덕음	광미사	<0.001	0.020	<0.005	1.510	<0.001	0.02	0.03	1.160	Nd	광미장
등보	광미사	0.065	<0.001	0.045	0.23	0.009	0.01	0.89	1.26		광산폐기물 적치장(사질), 평지적치
삼보	광미사	<0.001	0.030	0.080	8	<0.001	0.02	0.05	7		광미장
상동	광미사	0.012	0.004	0.350	0.090	0.009	<0.001	1.21	3		신평재 광미
승천 함태	광미사	6	0.16	2.35	43	3	332	14	0.21	Nd	선광장 부근 광산폐기물 적치장
쌍전	광미사	47	<0.001	0.17	0.13	0.21	42	0.94	0.055		중앙갱하부 공터 (1t 정도)
쌍전	광미사	1.79	<0.001	0.065	0.05	0.19	5.24	1.06	0.034		광산점문 옆 하천변 광미장(사질)
양구동	광미사	<0.001	0.150	6	21	4	0.04	1.24	0.450		광미장
양양	광미사	0.036	<0.001	0.019	0.068	0.008	0.013	0.44	0.074		광미장(암회색 사질입도 이하)
율진	광미사	0.035	<0.001	2	0.760	0.084	22	5	1.450		광미장
은치	광미사	0.11	0.20	0.12	37	0.15	26	11	10		광미장(사질, 청색), 평지적치
은치	광미사	3	1.73	1.73	156	0.78	0.43	0.55	12		광미장(사질, 검점색), 평지적치
일광	광미사	0.010	<0.001	<0.005	0.110	0.320	0.04	0.69	0.100	Nd	광미장
전의 양덕	광미사	0.100	<0.001	0.010	0.230	0.010	0.03	1.46	0.350	Nd	광미장
제 2 연화	광미사	0.092	0.042	0.200	4.100	0.010	0.04	1.08	15		진매골 광미덤

Nd: Not Determined

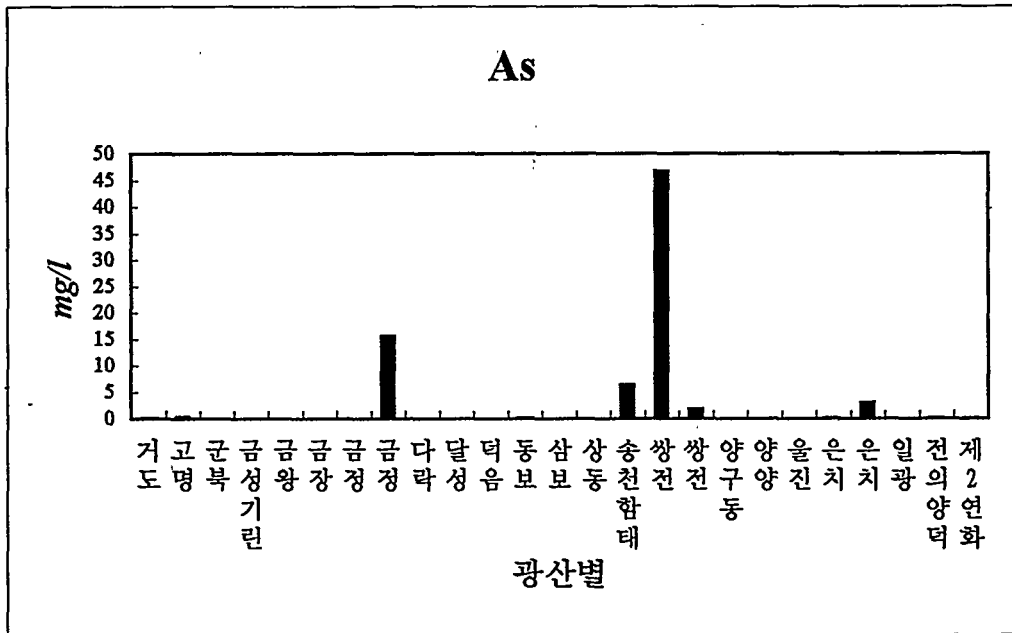


그림 3-20. 광산별 광산폐기물(광미사)의 As 함량비교

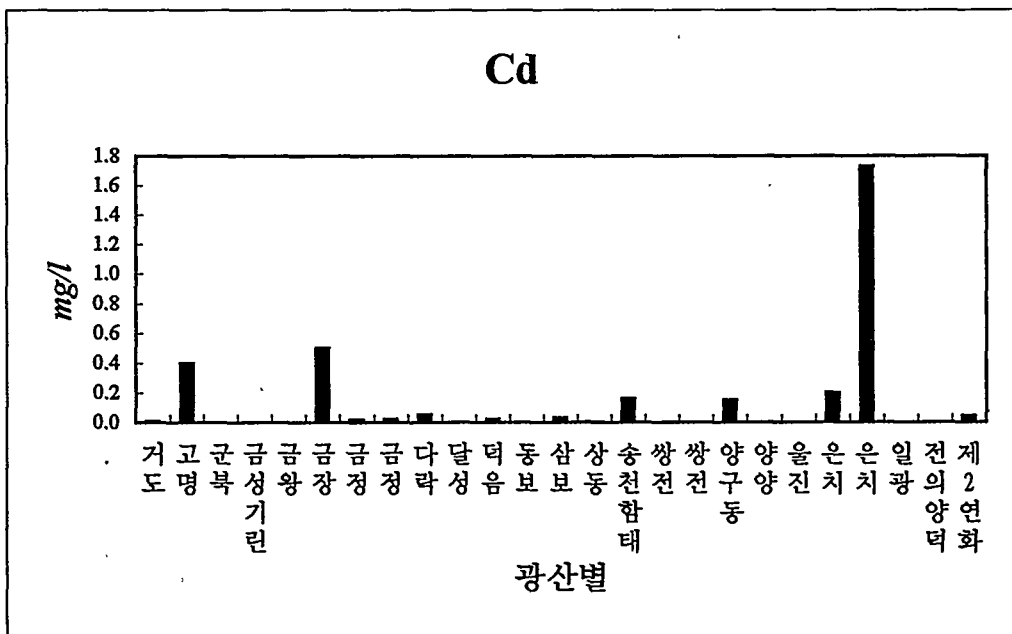


그림 3-21. 광산별 광산폐기물(광미사)의 Cd 함량비교

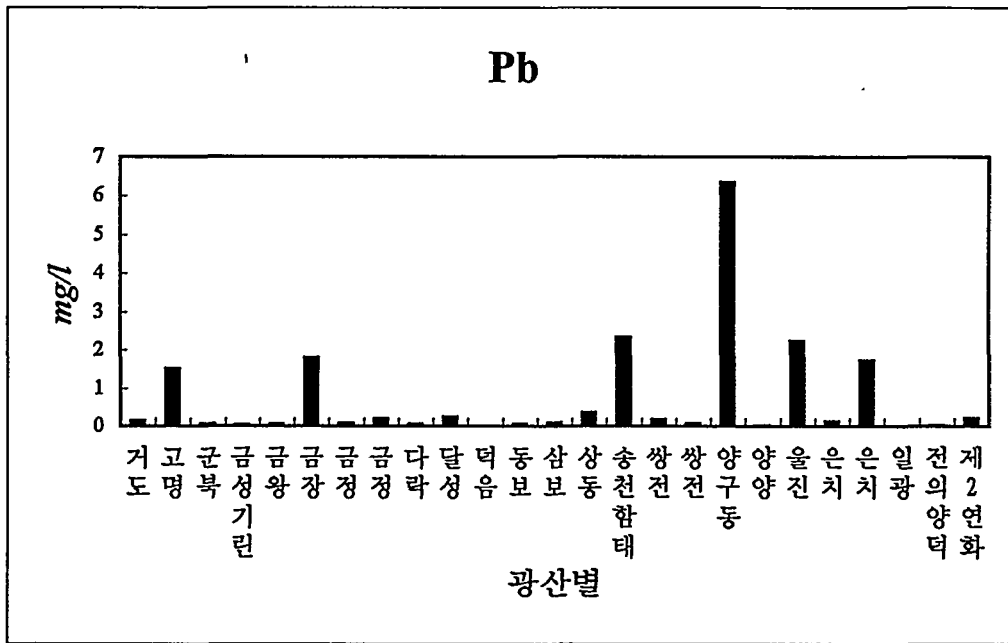


그림 3-22. 광산별 광산폐기물(광미사)의 Pb 함량비교

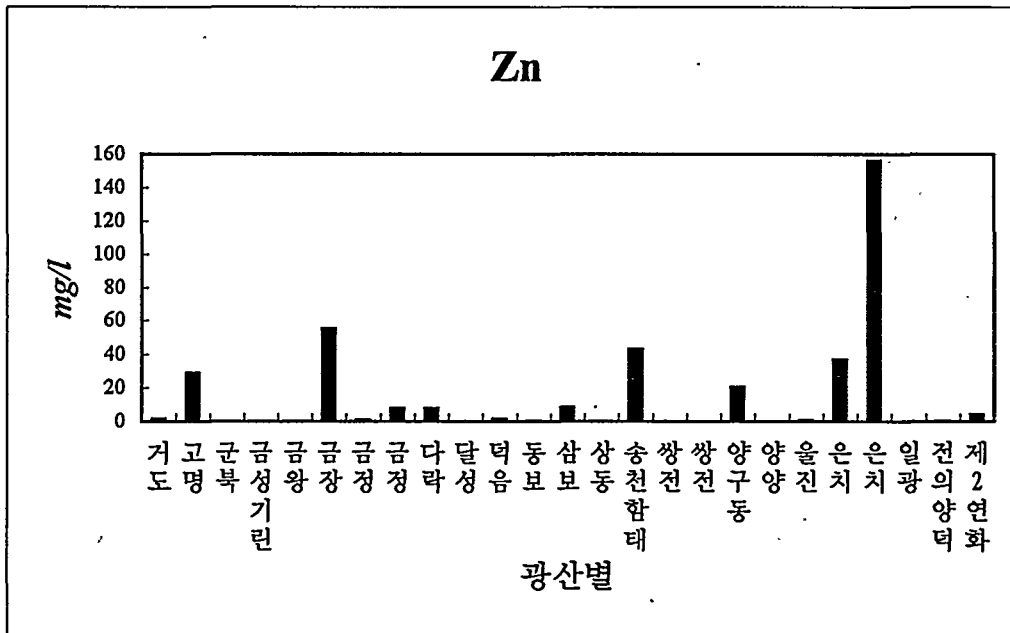


그림 3-23. 광산별 광산폐기물(광미사)의 Zn 함량비교

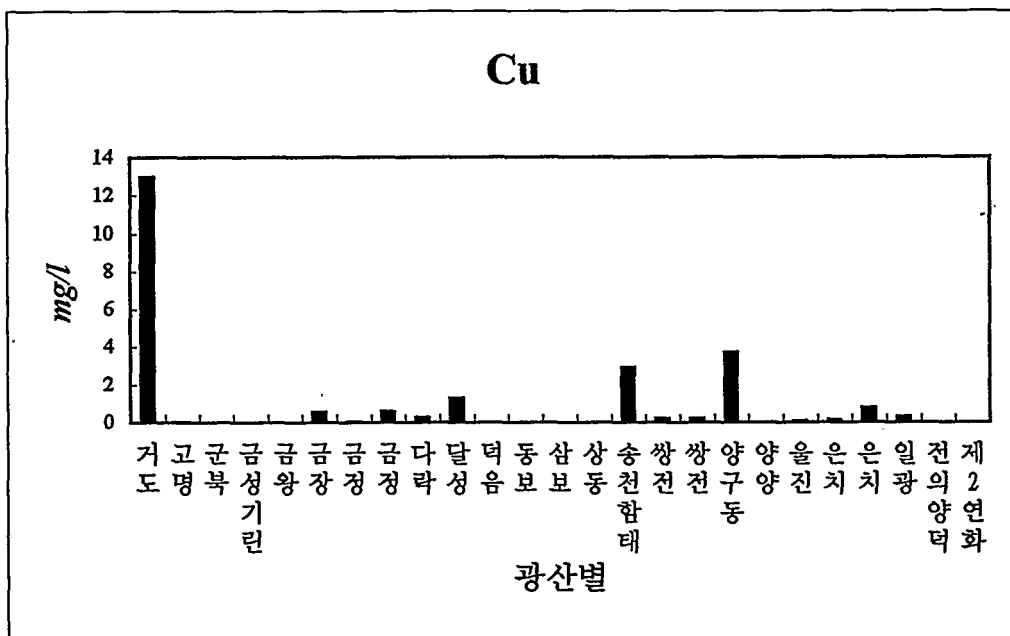


그림 3-24. 광산별 광산폐기물(광미사)의 Cu 함량비교

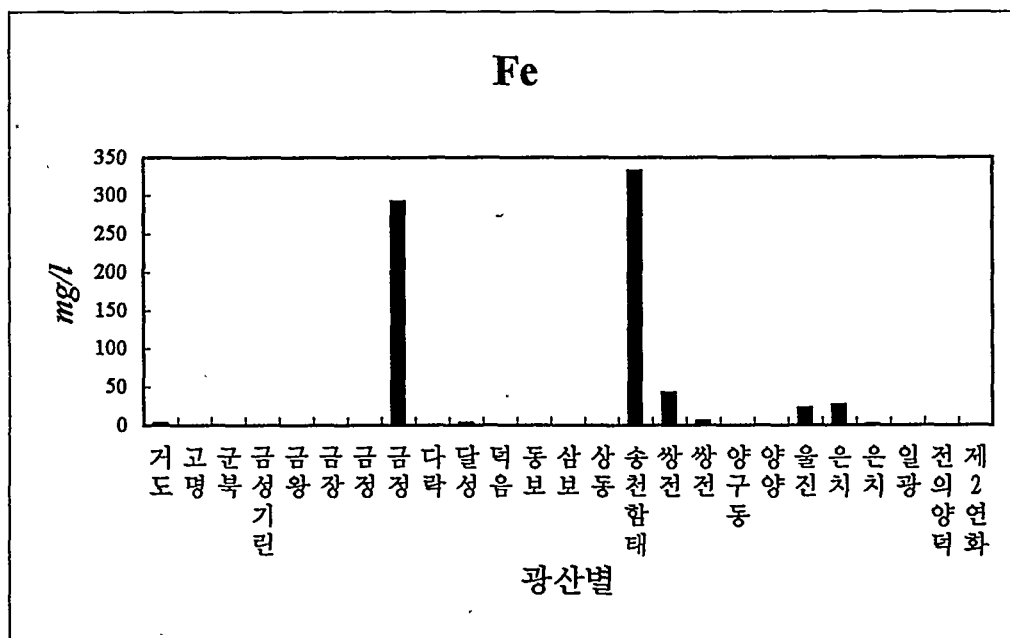


그림 3-25. 광산별 광산폐기물(광미사)의 Fe 함량비교

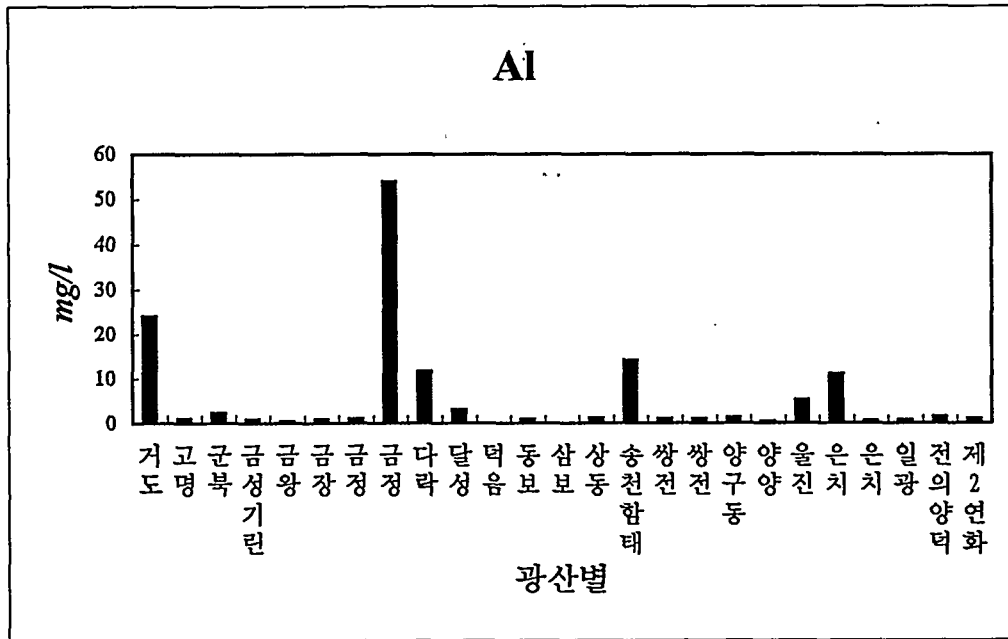


그림 3-26. 광산별 광산폐기물(광미사)의 Al 함량비교

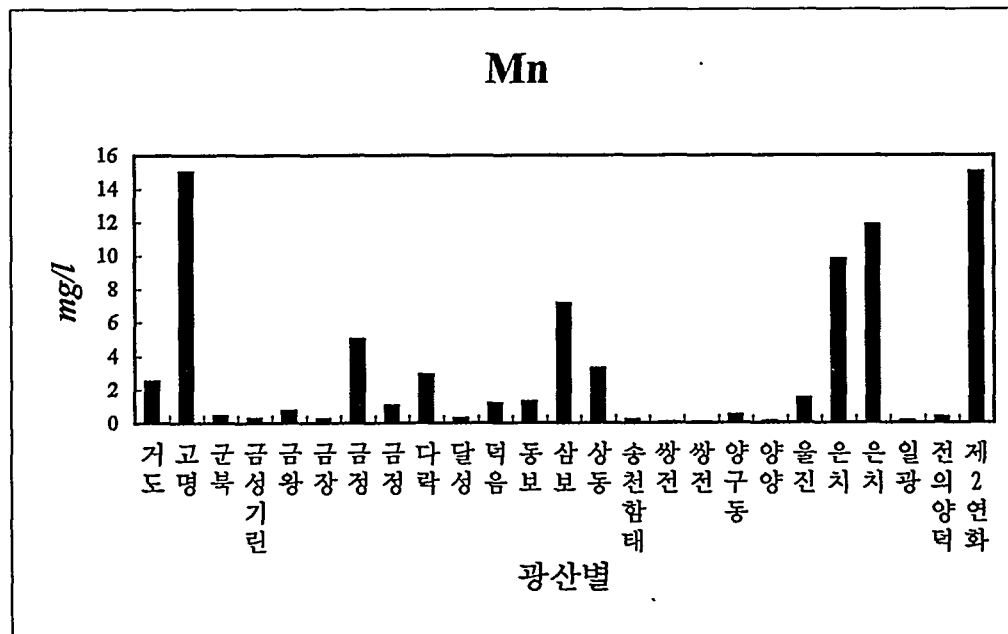


그림 3-27. 광산별 광산폐기물(광미사)의 Mn 함량비교

표 3-10 폐기물 관리법 특정폐기물의 유해 물질 함유기준과
이를 초과한 광산별 광미사 용출 결과

광산명	폐기물 관리법 유해물질 함유기준 (시행규칙 제2조 별표3)					
	As	Cu	Cd	Pb	CN	기준초과 성분수
	1.5mg/l	3.0mg/l	0.3mg/l	3mg/l	1mg/l	
거도		13				1
금장			0.5			1
금정	16					1
양구동		3.7		6		2
쌍전	47					1
쌍전	1.79					1
송천(함태)	6					1
은치	3		1.73			2
고명			0.4			1

금장 및 은치 광미사에 대한 전자현미경 촬영 및 EDS 분석결과가 사진3-10 및 사진 3-11과 그림 3-28~그림 3-33에 수록하였다. 10 μ m 미만의 세립질일수록 황화물 조성의 성분들이 분석되어 광석광물들은 주로 10 μ m이하의 세립질이 주종을 이룰 것으로 판단된다.



사진 3-10. 금장광산 광산폐기물(광미사)의 Back Scattering Image. 광미사는 $10\mu\text{m}$ 이하 에서 그이상까지 입도분포를 보여주며 중금속을 함유한 입자는 EDS 정성분석결과 주로 수 μm 정도의 미립자일 것으로 판단된다.

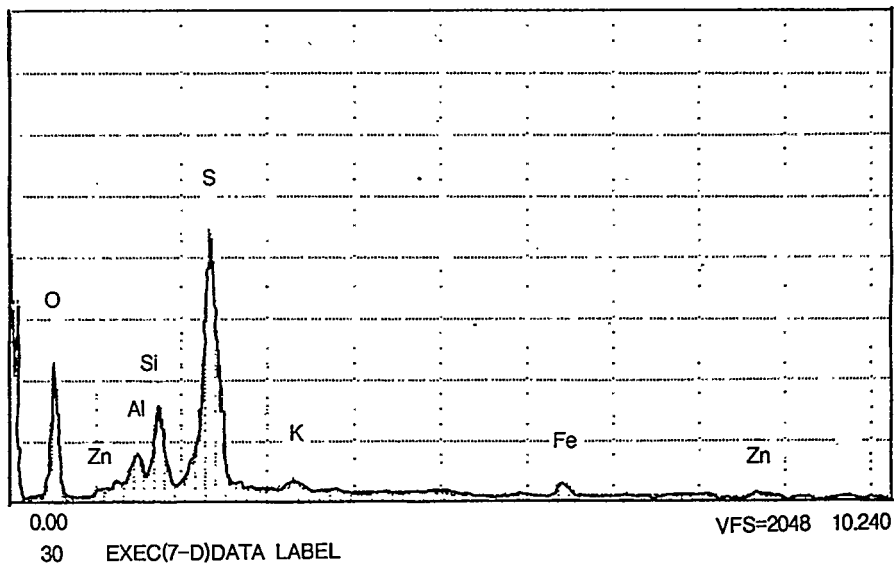


그림 3-28. 금장광산 미립자 (사진 3-10)의 1번지점에 대한 EDS 분석결과

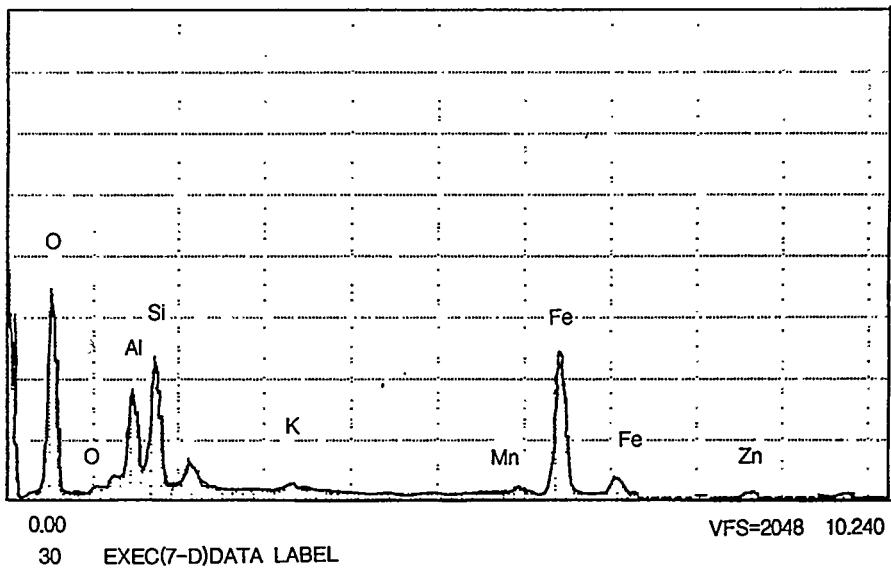


그림 3-29 금장광산 광미사(사진 3-10)의 2번 지점에 대한 EDS 분석

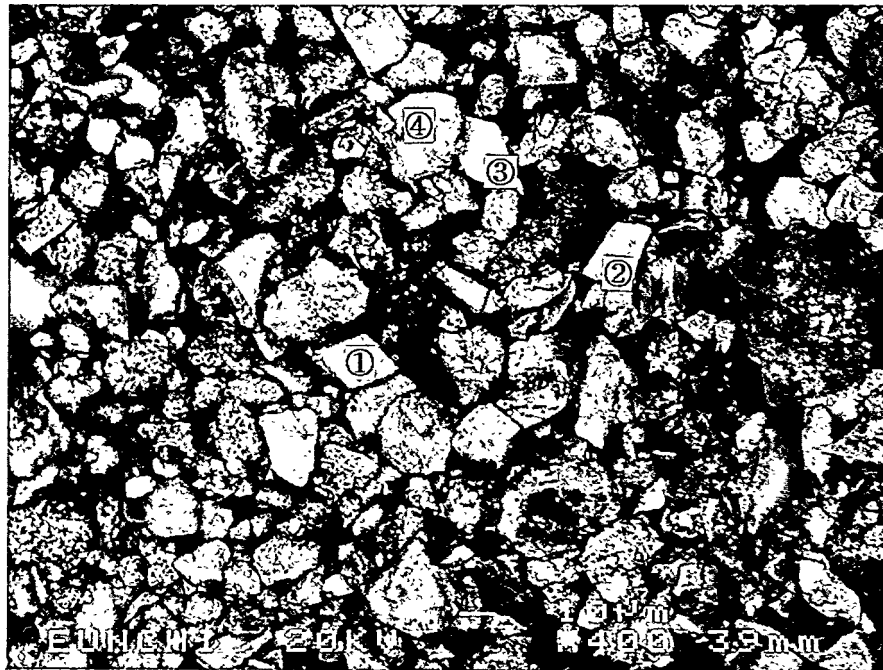


사진 3-11 은치광산 광산 폐기물(광미사)의 Back Scattering Image. 회계 보이는 입자들이 주로 중금속을 함유한 물질로서 입도는 $10\mu\text{m}$ 이하이다.

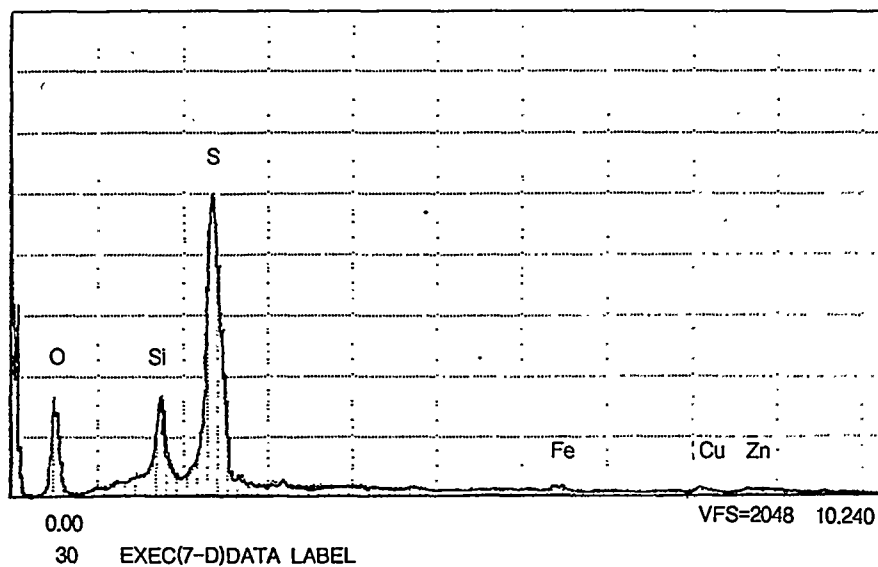


그림 3-30 은치광산 광미사.(사진 3-11의 1번 지점에 대한 EDS 분석결과)

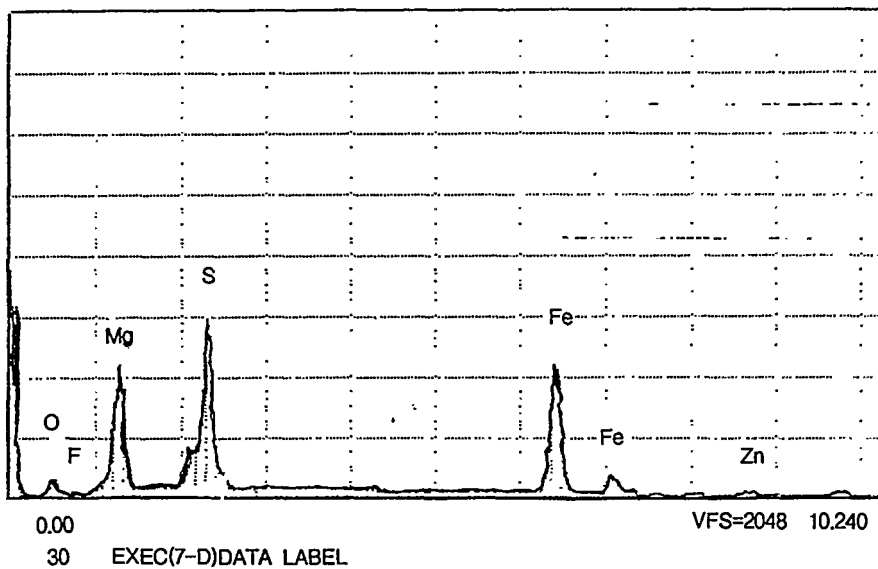


그림 3-31 은치광산 광미사 (진 3-11의 2번지점에 대한 EDS 분석결과)

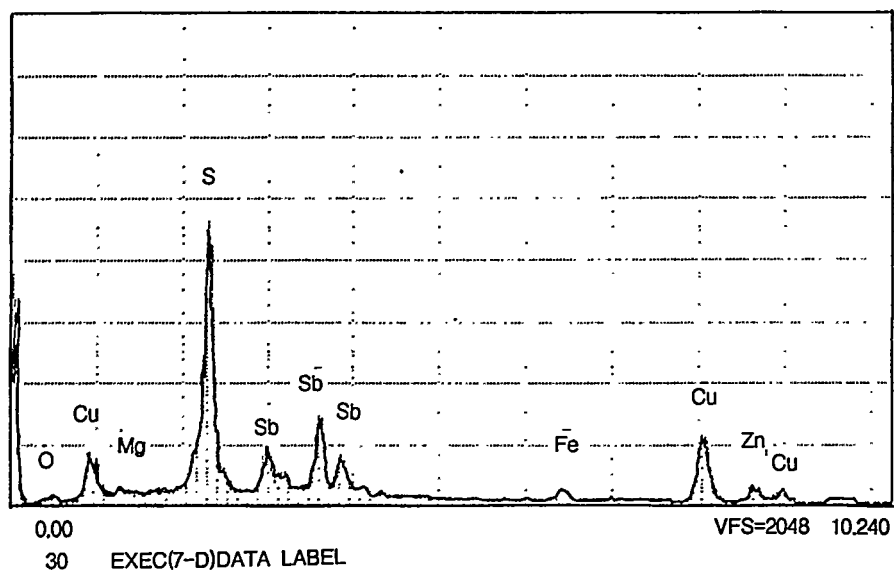


그림 3-32 은치광산 광미사(사진 3-11의 3번 지점에 대한 EDS 분석결과)

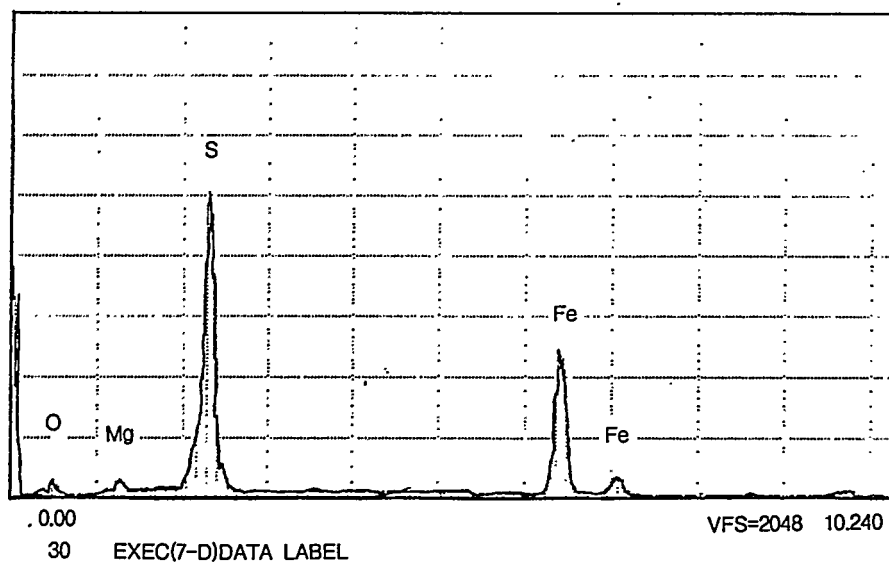


그림 3-33 은치광산 광미사(사진 3-11의 4번 지점에 대한 EDS 분석결과)

광산폐기물 적치 위치 및 광산폐기물 보관형태는 광산현장 지형에 크게 의존한다. 현장 조사결과 광산폐기물의 적치 위치는 크게 계곡, 산사면 및 평지로 구분되며 규모면으로 계곡적치가 가장 크다(상동, 연화광업소 등). 계곡 및 산사면 적치의 경우 댐 혹은 옹벽 구조물이 시설되어 있고 평지에 적치된 경우 광산폐기물보관 시설물(옹벽등)의 상태가 불량하다(은치광산, 거도광산 등).

광산폐기물 보관장의 구조물(시설물)로는 물관리 시설물(도수로 및 암거), 광산폐기물 유실 방지 및 안정성 구조물(흙댐, 콘크리트댐, 블록Covering 및 옹벽)등을 들 수 있다.

대부분의 광산폐기물적치장은 계곡수, 하천수등과 공간적으로 인접해 있으며 특히 댐식 광산폐기물장의 경우 계곡수(예: 상동광업소) 혹은 하천(예: 쌍전광업소)이 광산폐기물관리에 매우 중요 변수가 되고 있다.

또한 광산폐기물 적치장의 경우 관광지 인근에 존재(예: 다덕광산)하기도 하며 국립공원(오대산)안에 광산폐기물이 존재하기도 한다(예: 송천광산). 한편 광산폐기물 자체의 물리적 특성으로 인한 飛散性(조일상곡 광산)으로 인근 마을 주민들의 민원대상이 되기도 한다.

3-2-3 토양

토양에 대한 화학분석 결과가 표 3-11에 수록하였고 그림 3-34~그림 3-41에 도시하였다. 토양의 화학분석결과 Cd는 $<0.001\sim0.28\text{mg/kg}$, Cu는 $<0.001\sim3\text{mg/kg}$, As는 $<0.001\sim0.27\text{mg/kg}$, Pb는 $<0.005\sim11\text{mg/kg}$ 등의 농도범위를 나타내었다.

수질환경보전법(농산물 재배제한)의 논 토양중의 동 및 그 화합물(125mg/kg 이상), 비소 및 그 화합물(15mg/kg 이상)의 농도 규제치와 조사된 토양의 Cu 및 As함량을 비교하면, 대부분 광산주변 토양의 Cu 및 As 함량을 기준치보다도 낮은 함량이다(표 3-12). 한편 이들 농도는 토양환경보전법(96년 1월 6일 시행)의 토양오염 대책기준(규칙 제20조)과 비교하면(박송자, 1995) 기준치 미만값으로 나타나(표 3-13) 2성분의 화학분석값을 법규 농도 값과 비교하면 토양 오염 방지 대책이 필요치 않을 것으로 나타난다.

한편 황화물이 포함된 광산폐기물 혹은 광산폐수의 농경지 유입을 판단케 해주는 Fe, Al, Mn, Zn 등을 살펴보면, 금강광산 논토양에서 Cd(0.28mg/kg), Pb(11mg/kg), Zn(18mg/kg), Cu(3mg/kg), Fe(99mg/kg), Al(67mg/kg), Mn(6.4mg/kg)이 분석되었는데 현장 답사 결과 광산폐기물이 매립된 곳에 논을 개발한 관계로 상당량의 이러한 금속성분이 용출된 것으로 판단된다. 광미장 침출수의 유입이 확인된 금왕광산 논토양의 경우 Fe(83mg/kg), Al(37mg/kg), Mn(14mg/kg) 등의 성분이 분석되어 역시 광산활동에 의한 영향이 있는 것으로 판단된다.

표 3-11 광산주변 토양에 대한 화학분석결과

광산명	시료	As	Cd	Pb	Zn	Cu	Fe	Al	Mn	비고
	(단위)	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	
가학	논토양	0.050	<0.001	<0.005	0.150	<0.001	0.06	0.12	0.020	광미장하부 100-150m
가학	논토양	0.050	<0.001	<0.005	0.020	0.010	0.05	0.08	Nd	광미장하부 800-900m
가학	논토양	0.030	<0.001	<0.005	0.060	0.010	0.45	0.26	0.010	수문열 논
금왕	논토양	0.270	0.006	0.530	0.820	0.930	83	37	14	광미장하부 논토양
금장	논토양	0.180	0.28	11	18	3	99	67	6	구 선광장 인접 논토양
덕음	논토양	0.230	<0.001	<0.005	0.500	0.020	0.07	0.23	0.740	광미장 하부 논
삼보	논토양	0.020	<0.001	<0.005	0.200	<0.001	0.08	0.18	0.470	광미장하부 논
삼보	논토양	<0.001	0.010	0.040	2.520	0.020	0.04	0.48	1.100	선광장하부 논
양양	논토양	0.118	0.025	0.43	3.37	0.037	437	62	26	광산하부 논토양(실토질)
일광	논토양	0.090	<0.001	<0.005	0.140	0.020	0.04	0.01	0.200	광산하부 50m 논
금성 기린	밭토양	0.013	0.007	0.094	0.66	0.025	0.11	14	13	광미장 하류 주변 밭
양양	밭토양	0.047	0.008	0.23	1.99	0.26	28	27	25	광산하부 감자밭(사질, 암회색)
전의 양덕	산토양	0.020	<0.001	0.150	0.320	0.200	0.23	10	0.160	광미장열 산토양
조일 상곡	산토양	0.130	0.033	1	2.310	0.012	0.52	0.89	202	선광장 부근 산토양

Nd: Not Determined

As

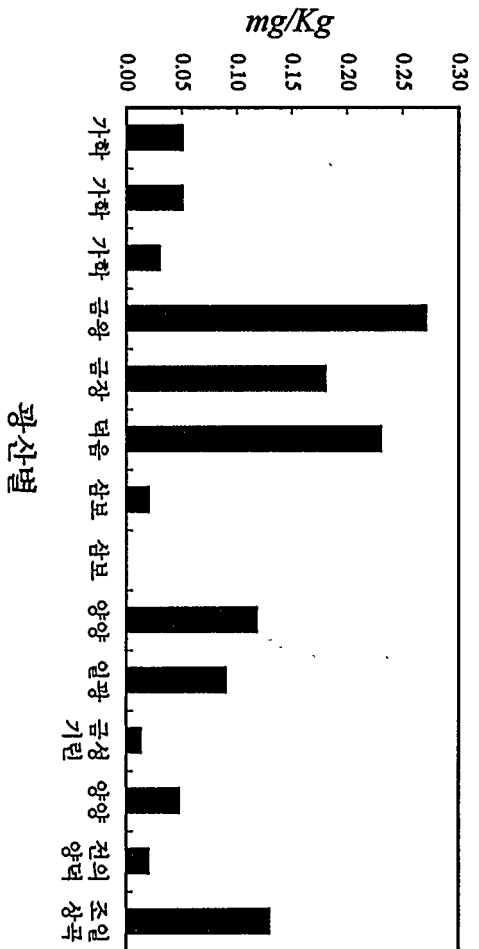


그림 3-34 광산주변 토양중의 As농도

Cd

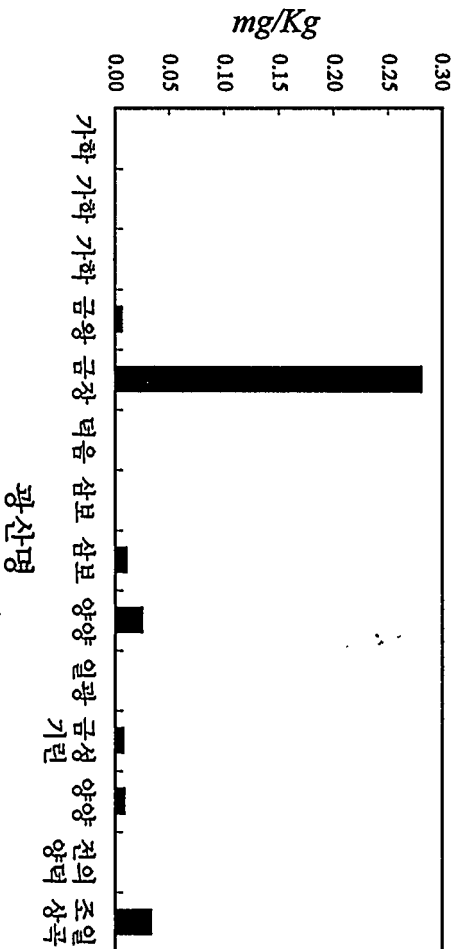


그림 3-35 광산주변 토양중의 Cd농도

Pb

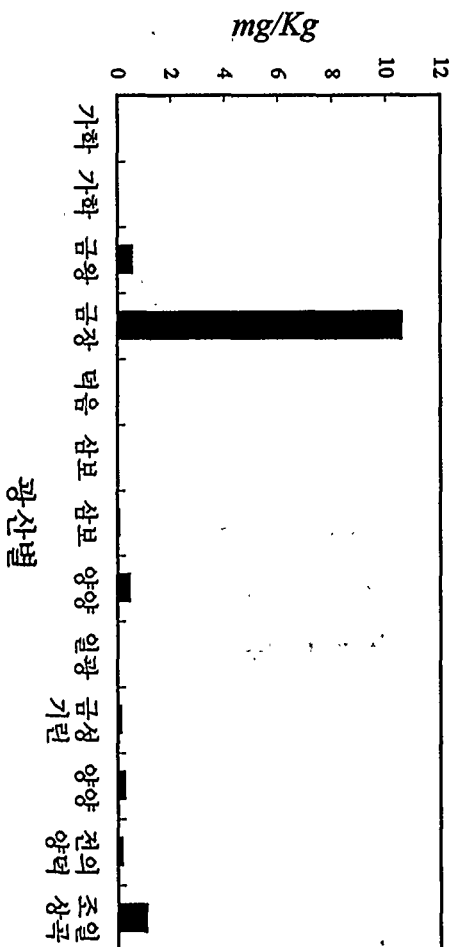


그림 3-36 광산주변 토양중의 Pb농도

Zn

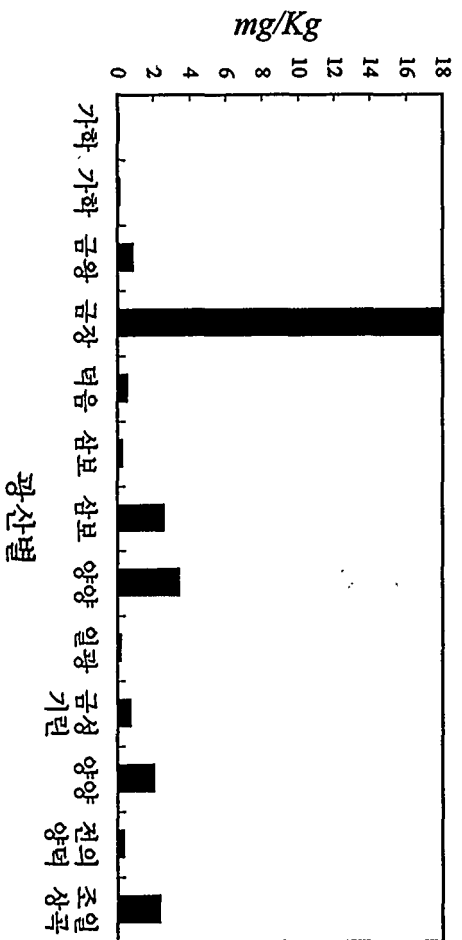


그림 3-37 광산주변 토양중의 Zn농도

Cu

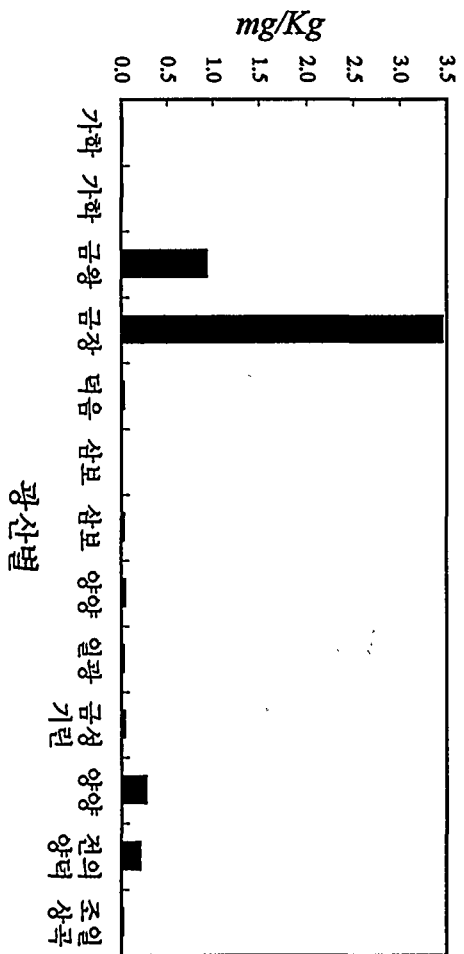


그림 3-38 광산주변 토양중의 Cu농도

Fe

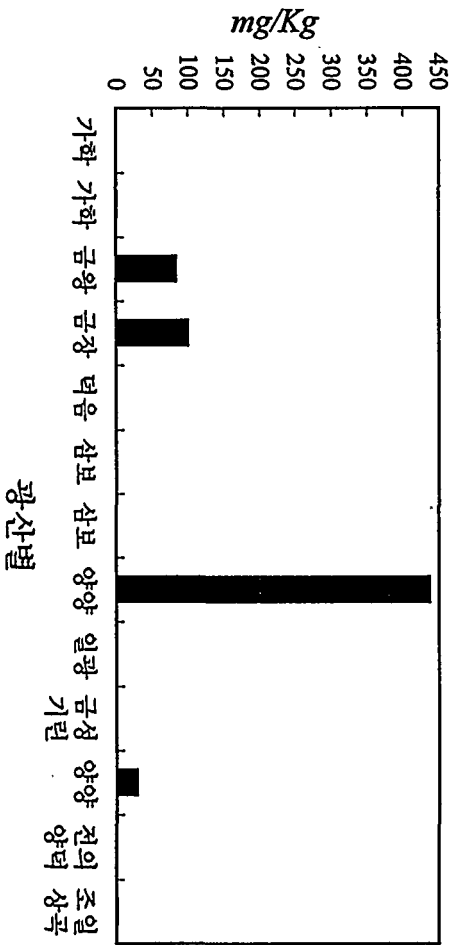


그림 3-39 광산주변 토양중의 Fe농도

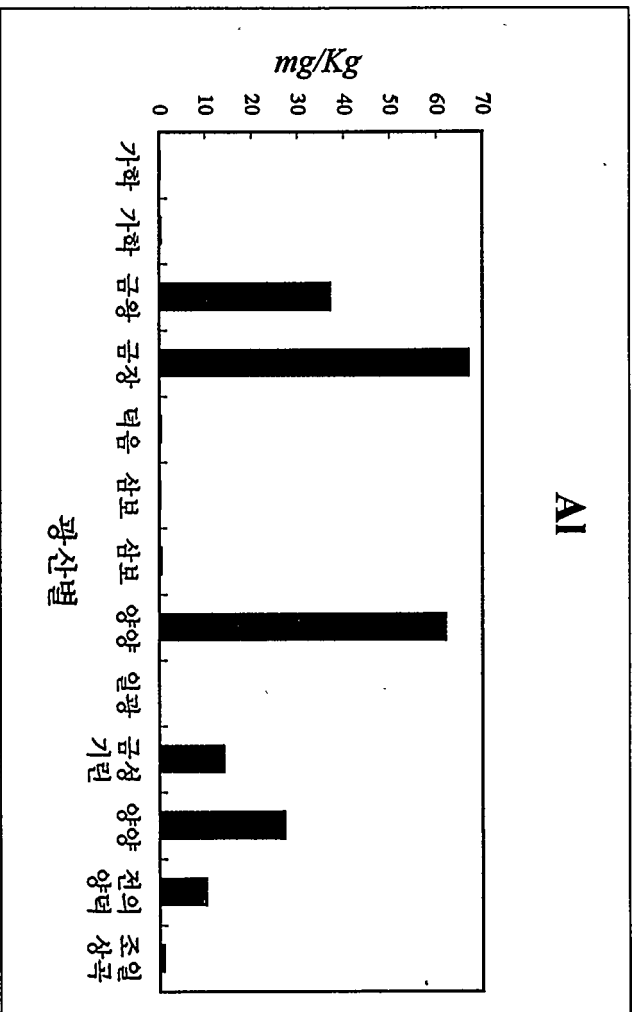


그림 3-40 광산주변 토양중의 Al농도

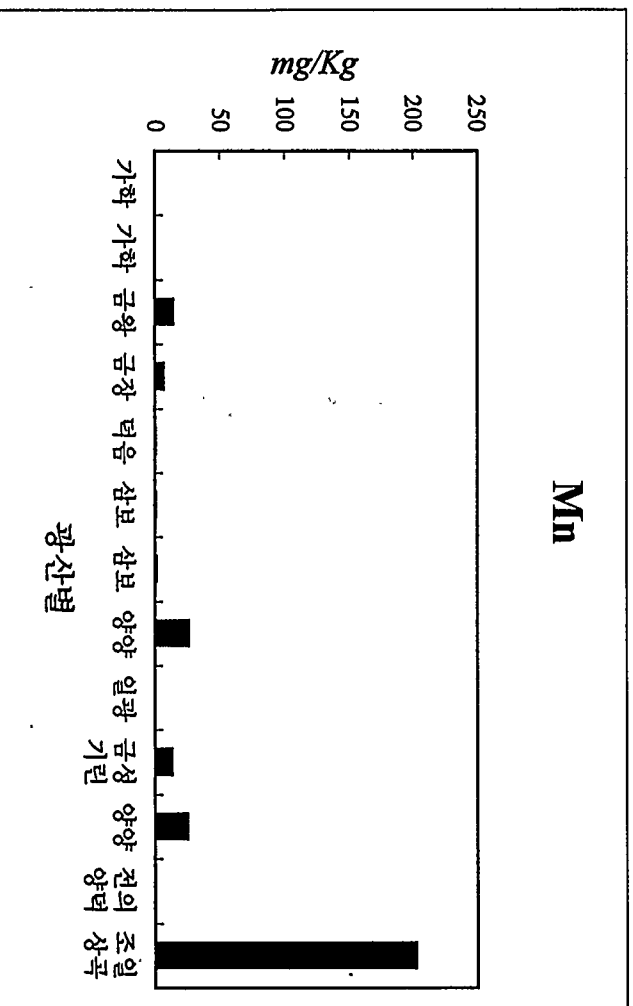


그림 3-41 광산주변 토양중의 Mn농도

표 3-12 환경보전법 수질환경 보전법 시행령 제 30조 별표 6의 농수산물
재배 등을 제한할 수 있는 오염기준
가. 농산물

구분	특정유해물질의 종류	오염기준
토양 (논의 경우에 한한다)	카드뮴 및 그 화합물 구리 및 그 화합물 비소 및 그 화합물	생산된 현미중의 카드뮴함량이 1mg/kg 이상 토양중의 구리함량 125mg/kg 이상 토양중의 비소함량 15mg/kg 이상

표 3-13 토양오염대책기준 (규칙 제20조 관련)과 논토양 조사결과
의 비교(박송자, 1995) (단위 : mg/kg)

오염물질	농경지	공장/산업지역	본조사 결과 (범위)
카드뮴	4	30	<0.001~0.28
구리	125	500	<0.001~3
비소	15	50	<0.001~0.27
수은	10	40	분석안됨
납	300	1,000	<0.005~11
6가크롬	10	30	분석안됨
시안	5	300	분석안됨

※ 지역구분

- 농경지 : 논 · 밭 · 과수원 · 목장용지, 체육용지
- 공장/산업지역 : 공장용지 · 폐금속광산 · 잡종지

제 4 장 금속광산 주변의 환경오염 방지대책

4-1. 수질오염 방지대책

광산폐수 혹은 침출수 유출에 따라서 주변 환경 특히 하천수(지표수)를 오염시키며 토양등에도 악영향을 미친다. 즉, 적절한 광해방지 대책이 취해지지 않으면 철, 망간, 알루미늄, 카드뮴, 비소, 납, 아연, 구리 및 황 등의 성분 등 중금속을 포함한 산성폐수가 주변 수질 및 토양환경을 지속적으로 오염시킨다. 따라서 수질보전을 위한 광해방지 기술 개발 및 운영이 필요시 된다.

4-1-1 광산폐수(침출수) 정화 기술

현재까지 선진국에서 개발된 광산폐수에 의한 수질오염 방지 대책(기술)은 크게 동력/인력이 소요되는 광산폐수 처리 방법(Active Treatment System)과 무동력/무인력 방법(Passive Treatment System)으로 나눌 수 있다. 현재 외국의 광산폐수 처리추세는 무동력/무인력 처리 방법이 각광받고 있으며 특히 폐광지대에 이러한 무동력/무인력 광산폐수 정화방법이 요구된다. 이러한 무동력/무인력 정화기술(개념)은 국내의 휴·폐광지대에서의 환경공해(광해) 억제 기술로서 요구되고 있는 실정이다.

현재까지 시도된 바 있는 광산산성폐수에 대한 억제 혹은 정화방법은 다양하게 시도되어 왔으며 동력 및 유지관리비 소요에 따라서 크게 분류해 보면 전통적인 물리화학적 방법과 생물학적 방법, 자연물질을 이용한 무동력/무인력 방법 등으로 구분 할 수 있다. 물리화학적 방법은 산성폐수를 배출하는 공장폐수에서 사용하는 폐수처리방법과 거의 동일한 폐수처리 공정으로 구성된다(Sengupta, 1993; Sawyer and McCarty, 1978). 본 방법은 정화 효율성이 우수하지만 유지 및 관리비가 지속적으로 발생하는 단점이 있다. 그러나 무동력/무인력 폐수처리 방법은 생물학적 기능혹은 광산폐수의 발생요인 등을 차단하는 예를 들면 공기차단, 물 관리 등으로 폐수처리를 시도한다. 이러한 방법은 유지비가 저렴하고 반영구적인 이점이 있는 반면 폐수의 특성 및 성분 그리고 제반

조건을 고려하여 과학적으로 설계 시행되지 않는다면 폐수처리 효율이 불투명하다는 단점이 있다. 무동력/무인력에 의한 광산산성폐수 처리 방법을 간단히 소개하면 다음과 같다.

● 인공 소택지

인공 소택지는 폐광산 산성폐수 처리 중 유지관리비를 최소화 할 수 있는 대표적 요소이다. 인공소택지의 종류는 화학적 환경에 따라서 산소가 풍부한 호기성 소택지와 산소가 희박한 혐기성 소택지로 구분된다. 호기성 환경에서는 주로 산화작용이라는 화학반응을 통해서 광산폐수중에 존재하던 금속성분(철, 알루미늄 및 망간 등)들이 금속 산화물 형태로 제거되고 혐기성 소택지에서는 환원작용이라는 화학적 반응을 통해서 카드뮴, 납, 아연, 구리, 철 등의 황화물 형태로 중금속 등이 제거된다. 이러한 소택지를 광산폐수 혹은 침출수 유출개소에 인공적으로 설치하여 주변환경에 미치는 영향을 줄이기 위한 실내 및 현장 연구가 활발히 이루어지고 있다(Hellier et al., 1994; Dietz et al., 1994; Eger et al., 1994; Stark et al., 1994; Phillips et al., 1994; Fyson et al., 1994; Hedin et al., 1994; Wildeman et al., 1993).

● 산소차단 기술

황화광물의 산화과정을 억제하기 위해 산소를 차단하여 광산폐수 발생을 억제시키는 기술이다. 이 범주에 속하는 기술들은 산소자체 유입을 차단하는 방법(Jones and Wong, 1994) 과 광산폐수가 발생하는 장소에 산소를 다량 소모하는 물질, 예를 들면 퇴비, 톱밥 등 유기물을 피복시키는 산소 소모물질 피복기술(Bell et al., 1994; Tremblay, 1994; Pierce et al., 1994) 그리고 채굴적 및 광미사장을 물로 침수시켜 산소의 전달을 최소화시키는 수몰기술(Fraser and Roberson, 1994; Lapakko, 1994; At-Arnaud, 1994; Davé and Vivyurka, 1994) 이 있다.

● 석회석 충전 방법

석회암은 산성폐수를 중화 시키는 천연 광물질로서 비용면에서 타 중화물

질보다 저렴하고 안전하다는 점에서 많이 활용되어 왔다. 광산산성폐수 유출 개소에 석회암층을 만들어 광산폐수를 중화시키고 동시에 오염성분을 제거 시키는 기술이다(Hedin and Watzlab, 1995).

한국 자원연구소에서는 1980년부터 1990년까지 가행광산 폐수 처리 기술의 개발 연구를 수행하여 가행탄광의 폐수처리 문제 및 광산용수 해결에 큰 공헌을 한 바 있다. 그러나 1990년 이후는 자원산업의 퇴조로 광산폐수 문제가 부각되면서 국내 광산폐수 정화 기술은 무동력/무인력 폐수처리 기술이 요구되어 그 대표적 기술인 소택지를 이용한 정화기술을 중점적으로 연구해 오고 있다(민정식외, 1991; 민정식외 1993; Cheong and Thornton, 1994). 다음의 내용은 수질오염 방지대책으로서 소택지 기본이론을 고찰하고 실내시험을 통해 정화효율성을 파악하였다.

4-1-2 소택지에 의한 광산폐수 처리

● 소택지 이론

소택지에서 광산폐수내 유해 중금속 원소들이 제거되는 과정은 1)퇴적작용, 2)산화 및 침전, 3)황산염의 환원과정, 4)유기물-금속 착화과정(Complexation), 5)양이온 교환반응 및 6)식물흡수 등에 의한다(그림 4-1; 표 4-1).

표 4-1 유해 중금속 원소들의 감쇄기구

원소	감 쇄 기 구
As	철 및 망간 수산화물에 흡착, 철과 함께 공침
Cd	점토에 흡착, CdCO_3 으로 침전
Cu	유기물, 철 및 망간 수산화물에 흡착
Zn	점토, 철 및 망간수산화물. 유기물에 의해 침전

광산폐수 처리를 위한 인공적인 소택지는 호기성 소택지와 혐기성 소택지로 구분되어 설계된다. 금속광산 광산폐수의 경우 중금속 제거용 소택지는 혐기성 환경으로 설계되며 본 조사대상 광산도 금속광산이므로 혐기성 소택지 이론을 고찰하기로 한다.

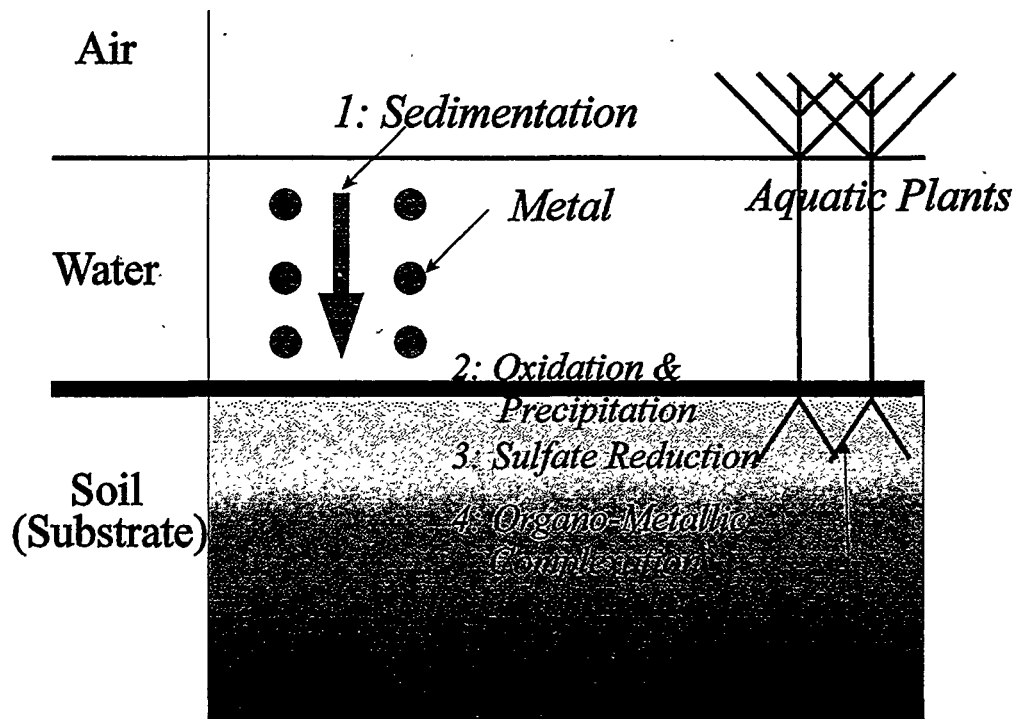
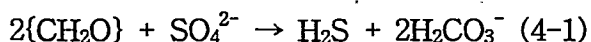


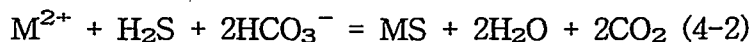
그림 4-1. 소택지내에서 중금속 성분의 제거원리

1) 혐기성 소택지에서 중금속 제거 원리

혐기성 환경이 강조되는 소택지에서 혐기성환경이란 공기와 접하지 않는 환경을 말하며 지표면 하부를 지칭한다. 소택지의 혐기환경은 소위 기질물질(Substrate)로 불리는 유기물질(간략히 표현하면; CH_2O)로 채워진다. 광산 폐수가 유기물질이 존재하는 혐기성 지역을 통과하게 되면 혐기성 환경하에서 용존 금속 성분의 거동 특성 때문에 물론 이때 박테리아에 의한 황산이온의 환원작용에 의해 황화물과 알카리도가 발생하게 된다(식 4-1).

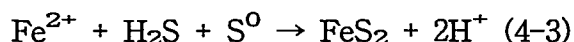


즉, 박테리아는 S^{+4} 를 S^{-2} 로 환원시키는 동안 pH가 낮은 광산수의 산도를 제거하게 되며 S^{-2} 의 일부는 H_2S 의 형태로 대기중으로 방출하게 된다. 또한 광산 폐수 속에 있던 용존 금속은 황화물로 침전되어 침전된 금속성분 만큼 폐수는 정화된다. 즉, 다음과 같은 화학적 반응식에 의해 요약 될 수 있다.



여기서 M^{2+} 는 폐수속의 금속 성분을 의미한다.

광산 폐수속의 오염 금속 성분중 가장 대표적인 성분인 2가철을 예를 들어 설명하면 다음과 같은 화학반응을 통해 제거된다.



이러한 용존 금속의 거동 (본 내용에서는 황화물 형태로 침전될때 금속의 정화)은 화학적 요소 특히 pH, 금속 황화물의 용해도적(Solubility Product) 및 반응물질의 농도 등에 좌우된다. 하나의 예로 금속 황화물의 용해도(표 4-2)를 이용해 폐수정화 관계를 기술하면 다음과 같다. 참고로 산화환경에서의 금속 성분 거동특성을 비교하기 위해서 표에 산화물의 용해도적을 첨부하였다.

표 4-2 금속 황화물 및 수산화물과 그 용해도적(K_{sp} , 25°C)
(Yong et al., 1992)

금속 황화물	용해도 적	금속수산화물	용해도적
MnS	5.6×10^{-16}	Mn(OH) ₂	2.0×10^{-13}
FeS	1.0×10^{-19}	Fe(OH) ₂	1.8×10^{-15}
NiS	3.0×10^{-21}	Ni(OH) ₂	1.6×10^{-16}
CdS	1.4×10^{-23}	Cd(OH) ₂	2.0×10^{-14}
ZnS	4.5×10^{-24}	Zn(OH) ₂	4.5×10^{-17}
PbS	1.0×10^{-29}	Pb(OH) ₂	4.2×10^{-15}
CuS	4.0×10^{-38}	Cu(OH) ₂	1.6×10^{-19}

황화수소를 주입시키며 광산 폐수를 혐기성 환경에 유지 시킨 실험 결과, 금속 성분의 제거 순서는 위에서 나타난 황화물의 용해도 적 순서와 일치되는 결과가 보고된 바 있다. 이론적으로 맨 처음 형성되는 금속 황화물은 CuS이며 다음으로 PbS, ZnS, CdS, FeS이고 최후로 MnS 순이다. 한편, Mn은 기타 황화물의 용해도적 보다 큰 값을 갖으므로(표 4-2) MnS의 금속 황화물과 평형 관계에 따라 농도가 규제 되므로 혐기성 소택지에서 이론적으로 정화효율이 가장 낮은 것으로 해석 된다.

광산폐수 중 주성분으로 존재하는 Al은 수환경에서 하나의 산화상태 즉, +3 가 만을 갖는다. 산화 및 환원과정은 용존된 Al의 농도에 직접적인 영향을 미치지 않고 평형 관계 및 pH등으로 이해되고 있다. 즉, 광산수 중에 존재하는 Al의 농도는 주로 Al(OH)₃에 영향 즉, 평형을 이룬다. pH가 5에서 8인 경우 Al(OH)₃는 상당히 불용성이어서 이때 약 1mg/l 이하의 농도를 나타낸다(그림 4-2). 그러나 pH가 4이하인 경우 Al(OH)₃는 상당히 용해성이 높아져 2mg/l 이상의 농도로 존재할 수 있다. 만약 pH가 변화하지 않으면, 상당히 산화된 지역이나 강한 환원 상태 환경을 광산수가 통과하더라도 위에서 언급한 원소들과는 달리 Al의 농도 변화에는 영향을 미치지 못한다. 따라서 광산 산성 폐수중의 Al 농도는 혐기성 소택지 환경을 통과 할 때 탄산염 광물의 용

해 또는 미생물의 활동에 의해 pH가 상승한 구역을 통과 하면서 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 로서 침전된다.

한편 혐기성 환경에서 화학적 반응을 거친 폐수는 결국 지표면으로 방류된다. 배수되는 철 혹은 망간등은 환원 상태를 유지하면서 지표면의 환경에 의해 즉 산화조건에 의해 거동한다. 산성 혹은 중성 환경에서 환원 상태의 Fe^{2+} 및 Mn^{2+} 는 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 및 $\text{Mn}(\text{OH})_2$ 의 용해도가 크기 때문에(표 4-2) 산화단계가 높은 $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Mn}(\text{OH})_4$ 의 형태 조건을 형성 해주는 것이 즉 호기성 소택지 혹은 호기성 침전설계가 요구된다.

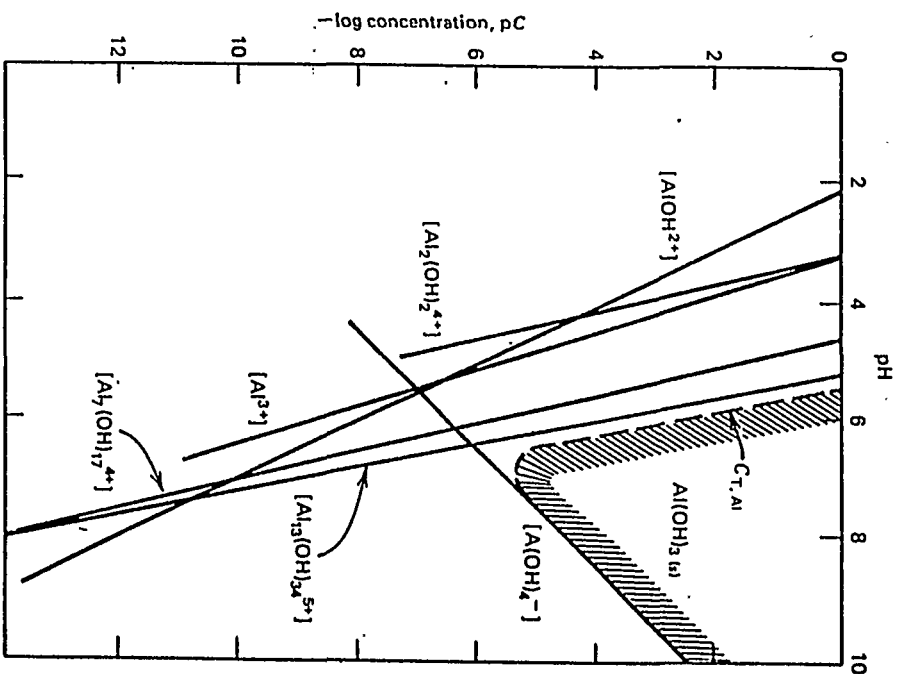


그림 4-2 $\text{Al}(\text{III})$ 와 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 간의 평형농도 다이어그램(25°C)
(Snoeyink 등, 1980).

한편 황의 종(species)들 중 HS^- 및 S^{2-} 는 물에 매우 용해성이 강하며 H_2S 와 평형관계를 형성한다. 따라서 H_2S 에 대한 고려로서 혐기성 소택지 건설시 부식성에 강한 시설재 사용과 악취도 고려해야 한다.

다음은 혐기성 소택지에서 광산폐수 정화 및 관계되는 실제 소택지 설계에 중요 변수인 박테리아 역할, 알카리도 생산을 소개하기로 한다.

2) 황산염 환원 박테리아

혐기성 소택지에서 황산염 환원은 황산염 환원 박테리아(Sulfate Reducing Bacteria: SRB)의 기능이 매우 중요한 것으로 알려져 있다. SRB는 생리학적으로 크게 두 집단으로 구분된다. 첫째(group 1) 황산염을 수소 황화물로 환원하면서 탄소 및 에너지원으로서 Lactate, Pyruvate, Ethanol 혹은 지방산등을 이용하는 박테리아들(Non-acetate oxidizers)로 *Desulfovibrio*, *Desulfomonas*, *Desulfotomaculum*, *Desulfobulbus*가 여기에 속한다. 둘째(group 2) 황산염을 황화물로 환원하면서 지방산 특히 acetate의 산화와 관계되는 박테리아 그룹들(acetate oxidizers)로 *Desulfobacter*, *Desulfococcus*, *Desulfosarcina*, *Desulfonema*등이 여기에 속한다. SRB는 모두 혐기성 미생물이며 완전한 혐기성 환경 조성이 중요하다.

자연상태에서 SRB는 혐기성 환경이 조성된 수성환경에서 분포하고 있는데 이러한 SRB중 대표적 종이 *Desulfovibrio* 및 *Desulfotomaculum* 이다. 이 SRB는 충분한 유기물과 황산염이 함유된 습윤지 등 수서 환경에서 흔히 발견된다.

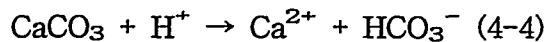
3) 광산폐수 정화를 위한 혐기성 소택지 환경 조건

유기물(CH_2O)을 포함하고 있는 혐기성 환경을 광산 폐수가 통과할 때 광산 폐수는 SRB의 황산염 환원작용에 의해서 폐수 수질이 정화 될 수 있다. SRB는 황산염, 충분한 저 분자량 탄소 화합물 유지, pH 4 이상, 산소, 3가 철 및 4가 망간등 산화제가 없는 환원 조건에서 적정조건으로 알려지고 있다. 이때 SRB의 에너지원인 lactate 혹은 acetate등은 혐기성 환경에서 발생하는 발효과정의 산물이기 때문에 이들의 발생이 계속될 수 있는 식재들이 자연적으

로 공급, 부패 및 유지가 요구된다. 또한 pH의 문제는 유기물 부패에 의한 것 이외에 탄산염 광물의 용해에 의해 발생된 알카리에 의해서 충족 될 수 있다.

4) 혐기성 소택지 환경의 기질물질(알카리 생성 기능)

광산폐수 정화 특히 산도제거(중화과정)는 혐기성 소택지에서 존재하는 기질물질이 중탄산 이온을 얼마나 생성할 수 있는냐와 밀접한 관련이 있다. 예를 들어서 석회암(방해석)의 용해작용의 예를 들면 다음과 같다.



따라서 소택지 기질물질에 석회암을 혼합 충전하다. 한편 Buffering capacity가 높은 유기물질, 예를 들면 버섯퇴비 등을 채운다.

한편, 혐기성 환경에서 유기물질의 분해과정($(\text{CH}_2\text{O}) + \text{O}_2 = \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$)과 산도의 중화작용($\text{H}^+ + \text{HCO}_3^- = \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$, $2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-} = \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$) 때문에 소택지내에 높은 CO_2 분압이 발생된다. 따라서 이렇게 생산된 CO_2 는 석회석의 용해를 촉진시킬 수 있다.

4-1-3. 인공 소택지에 의한 수질오염 방지대책

4-1-3-1 금속광 광산폐수 특성

조사된 금속광산 갱수 및 침출수의 화학분석 결과(표 3-4 참조) 및 오염물질 배출 허용기준(표 3-6 참조)을 이용하여 종합해 보면 pH, Fe, Zn, Cu, Cd, Pb, Mn 및 As 등의 수질성분이 문제점으로 지적되고 있다. 따라서 소택지에 의해 이들 성분이 제거 가능한 가를 실내 시험을 통해서 실증하였다.

4-1-3-2 실내시험

1) 실내시험 연구범위

본 시험에서는 주변에서 비교적 쉽게 구할 수 있는 기질물질(시험재료)을

선정하여 광산폐수정화에 대한 가능성을 평가하였다. 시험에서 얻고자 한 주요 내용은 다음과 같다.

- 기질물질별 폐수정화효율
- 우분(牛糞) 및 석회석 첨가가 폐수정화에 미치는 영향
- 반응시간에 따른 폐수정화효율 등

실내시험에 사용된 산성 광산폐수시료는 달성광산 폐수였다.

2) 실내시험 방법

● 기질물질

주변에서 흔히 구할 수 있는 버섯퇴비, 톱밥퇴비, 일반퇴비를 자원연구소 주변 농가에서 구하였고 부식토는 농자재상(農資材商)에서 구입하였다.

버섯퇴비는 느타리 버섯농가에서 버섯재배후 밭에서 완전히 퇴비화가 이루어진 상태였고 암흑색의 점결성이 강한 퇴비였다. 버섯퇴비의 원 물질은 볏짚이었다.

톱밥퇴비는 잘게 분쇄된 상태였고 색깔은 검정색이었다. 일반퇴비는 잡풀로 만들어진 것으로 대부분 식물형태가 육안으로 확인되어 엄밀한 의미에서는 퇴비화가 완전히 이루어지지 않은 상태였다. 부식토는 상품화된 농경산업 원조믹스상토(50ℓ) 제품이었다. 입도가 균일하였고 암갈색이었다. 석회석 조각은 대략 1cm~5cm내외의 쇄석이었고 치밀질 석회석이었다. 우분(牛糞)은 대구광역시 달성군 가창면 축산농가에서 채취되었으며 썩지않은 우분이었다.

● 기질물질로서 우분

우분은 SRB를 함유하는 물질로 알려져(Filipek: 개인통신) 소택지 개발을 위한 실내시험 및 설계시 기질물질로서 자주 활용된다(Dvorak et al, 1992; Cevaal and Whiting, 1994). 따라서 실내 시험에 앞서 우분을 이용, 간단한 시험을 실시하였다.

달성광산 폐수 100ml 및 광목천으로 감싼 우분(1수저 가량) 그리고 석회석 조각등을 250ml 유리 비이커에 넣었다. 한편 폐수가 우분에 의해 환원상태가 유지되면 폐수색은 황화물의 형성 및 침전으로 검정색으로 변화될 것을 고려

흰색의 골프공도 함께 집어 넣었다. 그다음 테이프로 안전하게 밀봉하여 공기의 유입은 물론 빛도 차단시켰다(사진 4-1, 4-2, 4-3).

7일 경과후 폐수는 검정색으로 변화되어 황화물 형성되었다. 따라서 우분이 혐기환경 조성과 황화물 형성에 관련됨을 확인하였다(사진 4-2 및 4-3). 사진 4-4 및 4-5는 SEM 촬영사진으로 침전물은 미립질물질이었고 주로 Fe, Pb, Mo, Cu 등의 성분으로 구성된다(그림 4-3, 4-4). 일부분은 S 및 Ca 등으로 구성된 황산염 결정 등이 관찰된다(그림 4-5). 따라서 기질물질 배합시 우분은 물론 석회석의 첨가를 고려하여 기질물질의 배합조성을 고려하였다. 또한 빛의 차단을 위해 실내시험에 이용된 반응조 설계시 이를 고려하였다.



사진 4-1 우분, 석회석 및 광산 산성폐수가 포함된 간이 시험용 비이커



사진 4-2 7일 경과후 비이커 내부모습



사진 4-3 광산산성폐수 및 석회석 조각의 색이 7일 경과된후 검정색으로 변화됨. 황화물 생성으로 피복된 석회석 주변의 검정색은 산화 상태에서 생성되는 암갈색 철수산화물과 대비됨

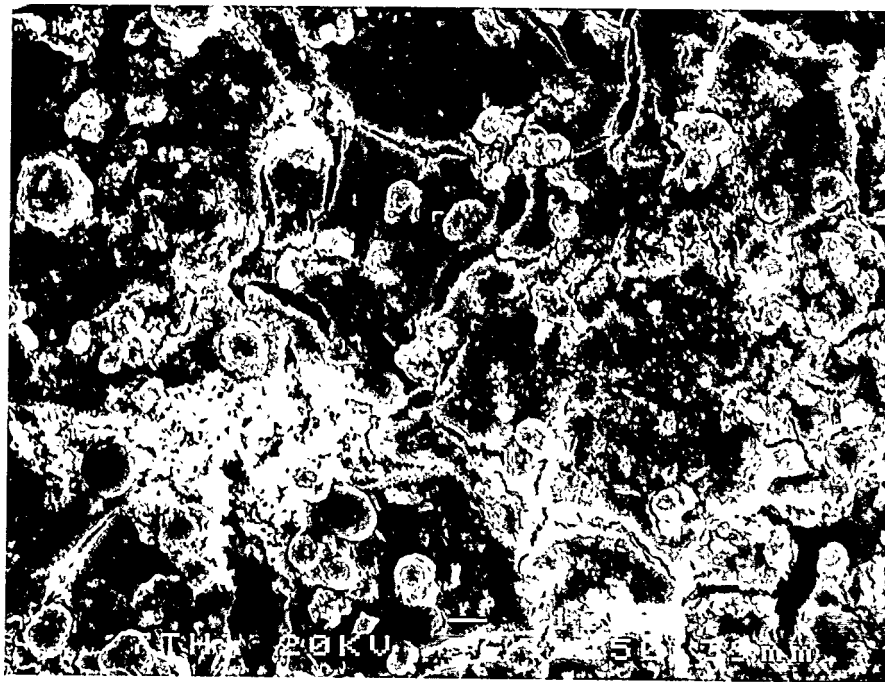


사진 4-4 침전물의 형태적 특성(미립질입자로 구성됨)

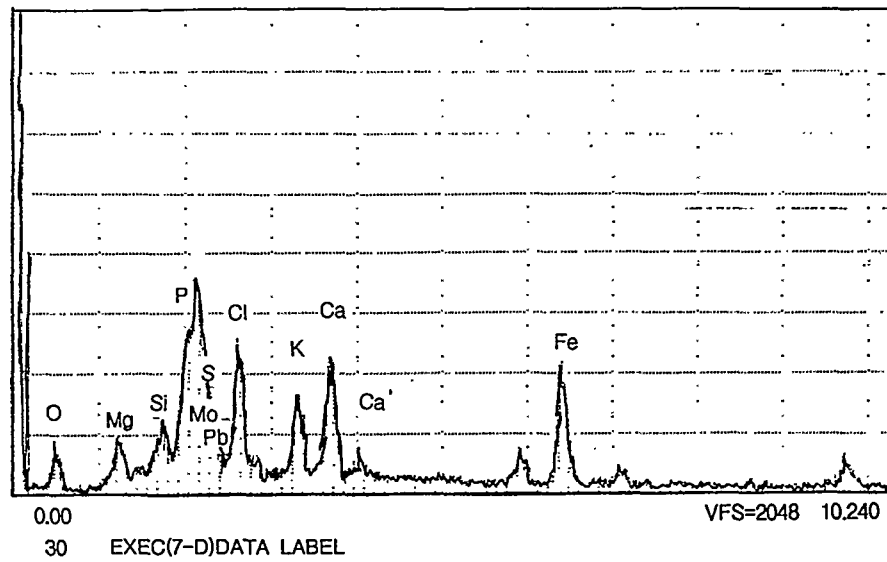


그림 4-3 침전물은 주로 위의 성분들로 구성됨

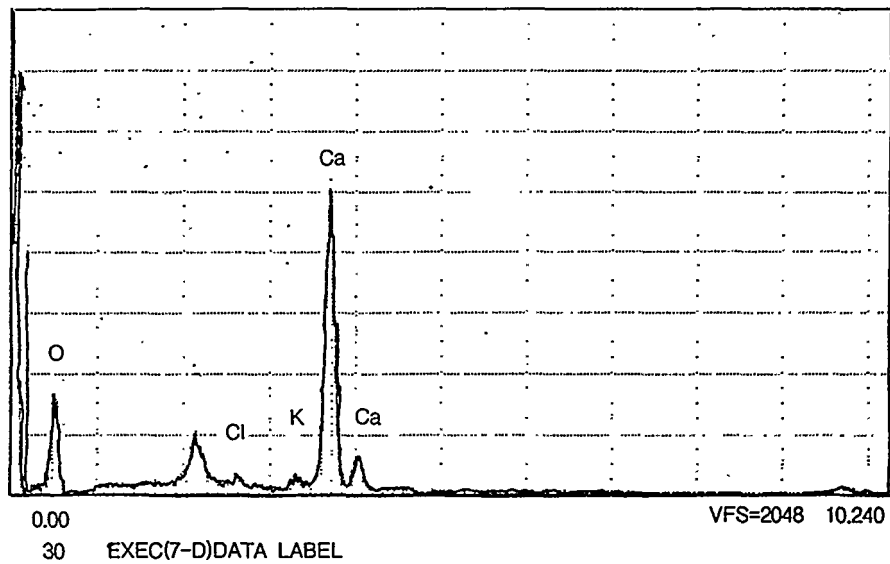


그림 4-4 사진 4-4중에 관찰되는 구상물질의 주 구성성분

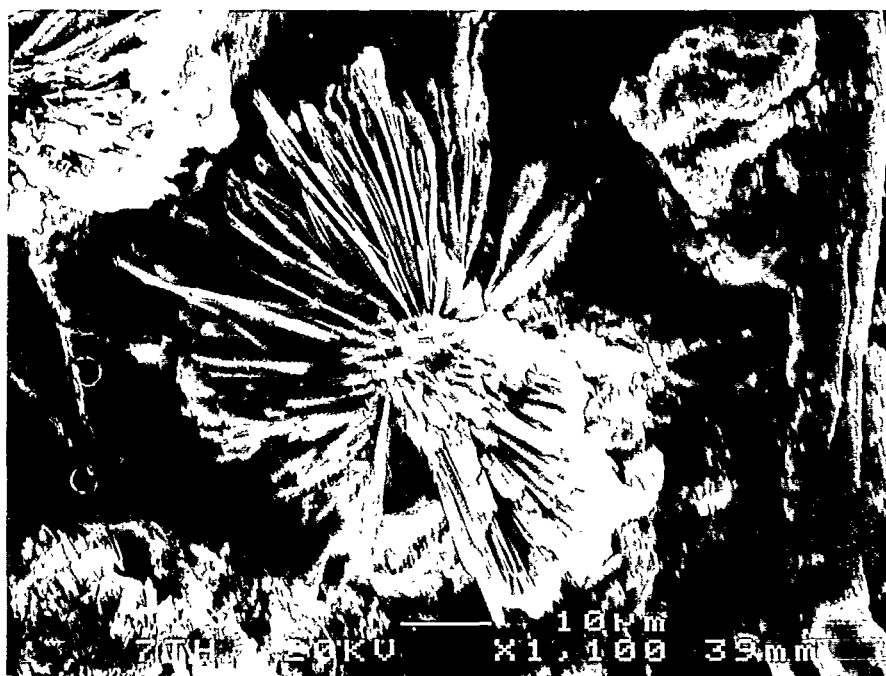


사진 4-5 침전물중 일부분에서 결정물질이 확인됨

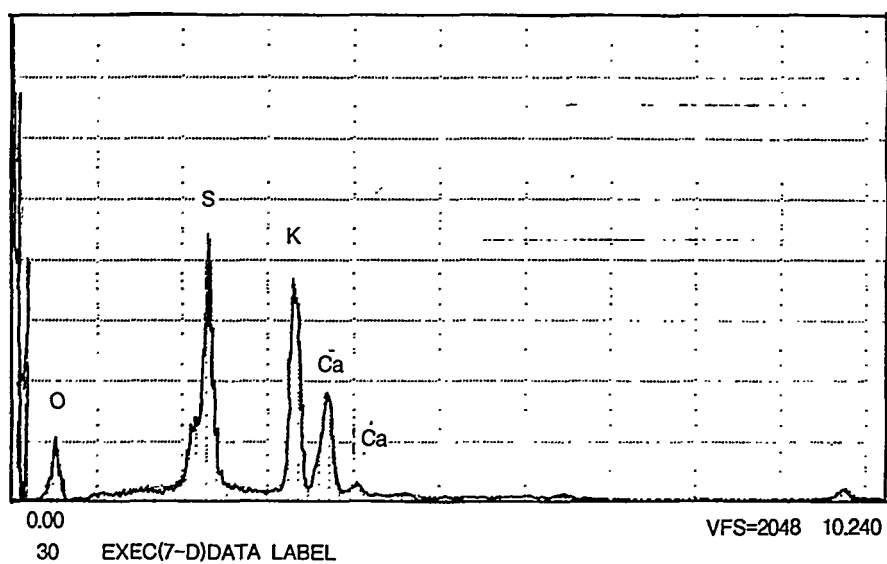


그림 4-5 사진 4-5에 촬영된 결정질 물질의 주성분

㉔ 반응조 규격 및 충전물 구성비

실험에 사용된 반응조는 20×45cm 원통형 플라스틱으로 용량이 약 20ℓ 규모였다. 반응조 하단부에 배수용 밸브가 설치되었다. 이러한 형태의 반응조가 12개 준비되었고, 각 용기마다 내용물(퇴비, 석회석, 우분(牛糞)) 구성비를 달리 하였다(표 4-3, 그림 4-6, 사진 4-6)

기질물질들은 폐수유입 4일전에 혼합하여 균일화시켰다. 폐수와 혼합기질물질의 부피비(vol.)는 (폐수 7 : 기질혼합물질 5)였으며 모든 재료 및 폐수가 유입된 후 반응조는 밀폐되었다(사진 4-7 및 4-8). 폐수유입전 수도물을 반응조로 흘려 혼합기질물질을 세척하였다.

㉕ 수질측정 및 화학분석

총 8일 동안에 걸쳐 수질변화 특성을 파악하였다. 배수된 물에 대해서 곧바로 pH, Eh, TDS, Alkalinity, Sulfide 등을 측정하였다. Sulfide(용존성 H_2S)는 CHEMetrics사 VACUETTES[®] Kit(K-9510D)에 의해 측정되었다. 희석컵(25 ml)에 적당량 물시료를 채운후 염화철 용액을 첨가한 후 시료를 NN-dimethyl-p-phenylenediamine 산성용액과 동시에 혼합시켜 표준 비색과 비교하여 용존성 황화물농도를 측정하였다.

화학분석용 시료는 약 200ml씩 채수하여 Filter paper 5A 및 5C(Toyo Poshi사)로 여과한 후 ICP에 의해 화학분석되었다.

유기산의 정량은 Chromatography(GC-14A)를 이용하였다. 컬럼은 Carbowax B-DA/4% Carbowax 20M으로 충전된 2m 유리관을 사용하였다. 분석온도는 175℃였고 고순도 N_2 gas를 Carrier로 사용하였다. 시료의 검출은 FID detector를 이용하였다. 실험결과 버섯퇴비 반응조가 정화능력이 우수하여 8일 배수된 물 중 반응조 3번 시료에 한하여 유기산의 화학분석이 수행되었다.

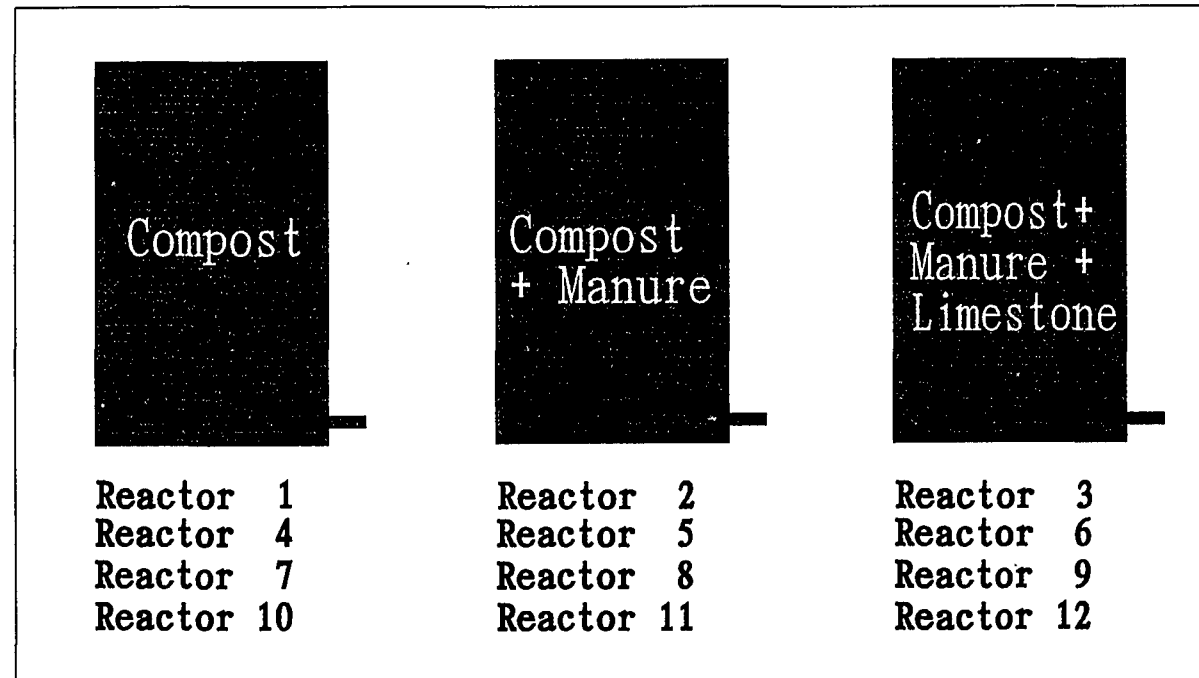
위에서 언급된 황화물 농도의 측정의 성분(항목) 측정은 2장의 수질조사 및 물 화학분석과 동일한 방법으로 수행되었다.

표 4-3 반응조 별 Substrate 혼합 비율 및 분석내용

반응조 번호	기질물질 (유기물 원)	우분	석회석	실험방법	분석항목 (방법)	채취 (기타)
1	버섯 퇴비	100%		①수질측정 및 채수 8일 동안 수행 ②반응조 하부에서 배출수 채수 ③모든 반응조는 밀폐됨	1. pH	충남체고 부근 느타리버섯 재배농가 (벚집)
2		90%	10%			
3		70%	10%			
4	툽밥 퇴비	100%			2. Eh	교육사 사택부근
5		90%	10%			
6		70%	10%			
7	일반 퇴비	100%			3. TDS	연구소 분석동 뒤 공터
8		90%	10%			
9		70%	10%			
10	부식토 (피트)	100%			4. Sulfide	유성 재래시장 농자재 상점매입
11		90%	10%			
12		70%	10%			
					5. Alkalinity	
					6. 중금속 농도	
					7. 유기산 농도	

■ 우분(牛糞): 달성광산 인접 축산 농가에서 채취

■ 광산폐수: 달성광산



Compost(4 tpyes), Cow Manure, Limestone,

그림 4-6. 반응조의 기질물질 종류. 반응조 1, 4, 7 및 10은 퇴비만 충전, 반응조 2, 5, 8 및 11은 퇴비와 우분 그리고 반응조 3, 6, 9 및 12는 퇴비, 우분 그리고 석회석이 충전된 반응조임.



사진 4-6 실험에 사용된 12개 플라스틱 반응조



사진 4-7 기질물질이 반응조 내부에 충전된 모습



사진 4-8 기질물질 및 폐수를 채운 후 밀봉된 상태의 반응조

3) 실내시험 결과

◎ 기질물질별 폐수수질 특성(환경) 변화

기질물질별 pH 변화 결과가 표 4-4에 수록되어 있다.

시간에 따른 반응조 처리수의 pH는 버섯퇴비를 포함한 3개의 반응조 모두에서 만 24시간 경과 후 산성(pH 3)에서 중성으로 중화되었다. 그러나 기타 반응조 처리수의 경우 pH값은 6미만으로 기재되어 중화효율이 버섯퇴비를 포함한 반응조에 비해 저조하였다. 총 8일간 시험결과 버섯퇴비를 거친 폐수의 pH는 평균 7.21로서 톱밥퇴비(평균 5.99), 일반퇴비(평균 5.81) 및 부식토 반응조(평균 5.83)에 비해 가장 중화능력이 우수하였다. 따라서 버섯퇴비가 포함된 반응조는 단시간 (24시간) 내에 산성폐수를 중화 시키며 지속적(8일)으로 중성을 유지하는 것으로 나타났다.

한편 톱밥퇴비 및 일반퇴비의 처리수 pH는 8일 경과 후 각각 평균 5.38 및 4.74으로 나타나 버섯퇴비 중화능력(pH 6.89)에 비해 저조하였다. 그러나 톱밥 및 일반퇴비에 우분 혹은 석회석 충전시(반응조 5, 6, 그리고 8, 9) 배출수의 pH값이 6이상으로 상승되어 우분 및 석회석이 산성 광산폐수의 중화에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

총 알카리도의 경우도 pH 경향과 같은 결과(표 4-5)가 나타났다. 즉, 버섯퇴비를 포함한 경우 1일 경과후 알카리도는 100mg/ℓ as CaCO₃ 로 측정되었다. 8일 경과 후 특히 반응조 2 및 3에서 생산된 총알카리도는 500mg/ℓ as CaCO₃ 이상으로 측정되어 기타 기질물질을 포함한 반응조의 알카리 생산능력을 초과하였다.

표 4-4 시간경과에 따른 반응조 배수의 pH변화

반응조	기질물질	원폐수	1일	2일	3일	4일	6일	8일	평균
반응조 1	버섯퇴비	3	7.23	6.66	6.84	6.81	6.84	6.97	6.89
반응조 2	버섯+우분	3	7.54	7.41	7.44	7.36	7.39	7.42	7.43
반응조 3	버섯+우분+석회석	3	7.30	7.41	7.33	7.31	7.29	7.30	7.32
평균			7.36	7.16	7.20	7.16	7.17	7.23	7.21
반응조 4	토밤퇴비	3	4.86	4.94	5.39	5.47	5.75	5.87	5.38
반응조 5	토밤+우분	3	5.95	6.17	6.14	7.15	6.25	6.38	6.34
반응조 6	토밤+우분+석회석	3	5.56	6.38	6.39	6.36	6.38	6.43	6.25
평균			5.46	5.83	5.97	6.33	6.13	6.23	5.99
반응조 7	일반퇴비	3	4.31	3.91	4.40	4.77	5.42	5.65	4.74
반응조 8	일반+우분	3	5.01	6.38	6.37	6.33	6.34	6.37	6.13
반응조 9	일반+우분+석회석	3	6.47	6.56	6.58	6.73	6.46	6.52	6.55
평균			5.26	5.62	5.78	5.94	6.07	6.18	5.81
반응조 10	부식토	3	5.26	5.15	5.22	5.40	5.46	5.53	5.34
반응조 11	부식토+우분	3	5.17	5.52	5.67	5.87	5.75	5.86	5.64
반응조 12	부식토+우분+석회석	3	6.61	6.47	6.58	6.63	6.39	6.44	6.52
평균			5.68	5.71	5.82	5.97	5.87	5.94	5.83

표 4-5. 시간경과에 따른 반응조 배수의 Total Alkalinity 변화
(단위: mg/l as CaCO₃)

반응조	기질물질	원폐수	1일	2일	3일	4일	6일	8일
반응조 1	버섯	0	>100	>100	175	>100	>100	300
반응조 2	버섯+우분	0	>100	>100	>100	>100	>100	>500
반응조 3	버섯+우분+석회석	0	>100	>100	>100	>100	>100	>500
반응조 4	토밤	0	0	<10	<10	<10	20	55
반응조 5	토밤+우분	0	70	100	>100	>100	>100	200
반응조 6	토밤+우분+석회석	0	>100	100	>100	>100	>100	350
반응조 7	일반퇴비	0	0	0	<10	<10	<10	35
반응조 8	일반+우분	0	>100	70	>100	>100	>100	240
반응조 9	일반+우분+석회석	0	>100	>100	>100	>100	>100	500
반응조 10	부식토	0	15	11	11	12	<10	19
반응조 11	부식토+우분	0	14	40	50	>100	>100	300
반응조 12	부식토+우분+석회석	0	>100	>100	>100	>100	>100	350

한편, 기질물질에서 용출되는 물질량을 TDS로 보면(표 4-6) 1일 경과 후 버섯퇴비가 포함된 반응조 1, 2 및 3 처리수의 TDS값이 평균 2.27g/l로 측정되었다. 특히 생우분이 포함된 반응조 2 및 반응조 3의 경우 8일 경과 후 평균 TDS 값이 2.43g/l로 나타나 원폐수의 TDS값 1.74g/l와 비교하면 약 0.6g/l가 높아져 폐수속에 용존성 물질은 생우분에 의해 기인되는 것으로 판단되었다. 이러한 경향은 기타 생 우분이 포함된 반응조 처리수(반응조 5, 6, 8, 9, 11 및 12)에서도 확인된다.

황산염 환원정도를 화학적으로 판단하기(식 4-1의 H_2S 생성) 위한 용존성 황화물(H_2S)의 측정 결과(표 4-7) 버섯퇴비의 경우 약 4일이 경과되면서 10mg/l 이하로 황화물이 측정되어 황산염 환원이 발생한 것으로 판단되었고 기타 톱밥퇴비+우분+석회석의 반응조 6, 및 일반퇴비+우분+석회석의 반응조 9에서도 6일 지난 후 황산염 환원반응이 발생한 것으로 확인되었다.

처리수에 대한 Eh 측정 결과(표 4-8) 우분 및 석회석이 포함된 2일이 경과된 반응조 2 및 3 처리수에서 Eh값이 -41mV 및 -86mV로 나타나기 시작 환원상태가 조성되고 있음을 알 수 있었다. 기타 반응조 8 및 9에서 3일 경과 후 그리고 반응조 6에서 4일 경과 후 음의 Eh값을 유지 하였다. 따라서 우분 및 석회석을 포함한 버섯퇴비 반응조가 가장 혐기적 환경을 조성하는데 가장 효과적인 물질로 확인 되었다.

유기산의 분석결과(표 4-9) 버섯 퇴비 반응조 3일 에서 8일 경과된 배수에서 Acetic acid(1.72mM), Propionic acid(0.62mM), n-butyric acid(0.09mM) 및 Iso-valeric acid(0.16mM) 등이 확인되었다. 즉, 버섯퇴비 반응조 3에서 혐기성 환경을 선호하는 박테리아들의 에너지원이 존재하는 것이 확인되어 버섯퇴비가 황산염 환원균에 좋은 유기물원으로 기능할 수 있음이 밝혀졌다.

표 4-6. 시간 경과에 따른 반응조 배수의 TDS(g/l) 변화

반응조	기질물질	원폐수	1일	2일	3일	4일	6일	8일	평균
반응조 1	버섯퇴비	1.74	2.24	1.85	1.83	1.84	1.76	1.84	1.89
반응조 2	버섯+우분	1.74	2.32	2.41	2.40	2.42	2.44	2.56	2.43
반응조 3	버섯+우분+석회석	1.74	2.26	2.29	2.37	2.36	2.44	2.50	2.37
평균			2.27	2.18	2.20	2.21	2.21	2.30	2.23
반응조 4	토밥퇴비	1.74	1.57	1.52	1.49	1.52	1.52	1.52	1.52
반응조 5	토밥+우분	1.74	1.59	1.69	1.70	1.72	1.72	1.82	1.71
반응조 6	토밥+우분+석회석	1.74	1.85	1.88	1.84	1.92	1.97	2.05	1.92
평균			1.67	1.70	1.68	1.72	1.74	1.80	1.72
반응조 7	일반퇴비	1.74	1.62	1.62	1.56	1.58	1.49	1.54	1.57
반응조 8	일반+우분	1.74	1.77	1.71	1.80	1.82	1.91	1.92	1.82
반응조 9	일반+우분+석회석	1.74	2.04	2.01	1.94	2.00	2.06	2.14	2.03
평균			1.81	1.78	1.77	1.80	1.82	1.87	1.81
반응조 10	부식토	1.74	1.49	1.55	1.58	1.58	1.64	1.67	1.59
반응조 11	부식토+우분	1.74	1.69	1.74	1.80	1.79	1.84	1.92	1.80
반응조 12	부식토+우분+석회석	1.74	1.62	1.76	1.87	1.89	2.02	2.08	1.87
평균			1.60	1.68	1.75	1.75	1.83	1.89	1.75

표 4-7. 시간 경과에 따른 반응조 배수의 H₂S(mg/l) 변화

반응조	기질물질	원폐수	1일	2일	3일	4일	6일	8일
반응조 1	버섯	0	0	0	<10	<10	<10	<10
반응조 2	버섯+우분	0	0	0	<10	<10	<10	<10
반응조 3	버섯+우분+석회석	0	0	0	0	<10	<10	<10
반응조 4	토밥	0	0	0	0	0	0	0
반응조 5	토밥+우분	0	0	0	0	0	0	0
반응조 6	토밥+우분+석회석	0	0	0	0	<10	<10	<10
반응조 7	일반퇴비	0	0	0	0	0	0	0
반응조 8	일반+우분	0	0	0	0	0	0	0
반응조 9	일반+우분+석회석	0	0	0	0	0	<10	<10
반응조 10	부식토	0	0	0	0	0	0	0
반응조 11	부식토+우분	0	0	0	0	0	0	0
반응조 12	부식토+우분+석회석	0	0	0	0	0	0	0

표 4-8 시간경과에 따른 반응조 배수의 Eh(mV) 변화

반응조	원폐수	1일	2일	3일	4일	6일	8일
반응조 1	416	26	28	116	104	142	171
반응조 2	416	17	-41	-207	-36	-69	-150
반응조 3	416	118	-86	-75	-111	-90	-177
반응조 4	416	157	189	53	106	81	81
반응조 5	416	97	79	20	17	23	-11
반응조 6	416	66	55	22	-16	-7	-78
반응조 7	416	45	167	10	141	59	-5
반응조 8	416	11	8	-4	-22	-51	-93
반응조 9	416	34	-7	-17	-12	-43	-156
반응조 10	416	124	127	-2	114	89	83
반응조 11	416	128	115	137	129	62	7
반응조 12	416	57	89	90	76	-50	-88

표 4-9 유기산 분석 결과

유기산	농도(mM)
Unknown(formate로 추정됨)	13.4*
acetic acid	1.72
propionic acid	0.62
n-butyric acid	0.09
iso-valeric acid	0.16

* : Unknown compound는 Formic acid로 추측됨

◎ 기질물질별 중금속 제거효율

시간 경과에 따른 중금속 제거 결과를 반응조별로 표 4-10에 요약하였다. 시간 경과에 따른 중금속 정화 경향을 그림 4-6~그림 4-14으로 도시화 하였고 환경보전법 수질환경보전법 시행규칙 제 40조 별표 11의 방류수 수질 기준과 비교하였다.

Zn 제거

원폐수의 Zn 농도는 약 16mg/ℓ 였고 이 농도는 방류수 수질기준(Zn: 5mg/ℓ)을 초과하였다. 일반퇴비 반응조 7 및 톱밥퇴비 반응조 4를 제외하고는 나머지 반응조 처리수는 1일 경과 후 방류수 수질 기준치 이하로 정화가 되었다.(그림 4-7)

Pb 제거

원폐수의 Pb 농도는 0.031mg/ℓ 였고 이 농도는 방류수 수질기준(Pb: 1mg/ℓ) 이하였다. 일반퇴비 반응조 7의 경우 처리수의 Pb 농도값이 불규칙하게 변동하고 있다. 이러한 경향은 기질물질의 영향, 혹은 시료전처리 과정 그리고 기기분석시 오차로 부터 발생된 현상으로 추측된다. 나머지 처리수의 Pb 농도는 원폐수 농도값 주변에서 걸쳐 있다(그림 4-8).

Cd 제거

원폐수의 Cd 농도는 0.237mg/ℓ 였고 이 농도는 방류수 수질기준(Cd: 0.1mg/ℓ)을 초과하였다. 일반퇴비 반응조 7을 제외한 모든 반응조에서 1일 경과 후 Cd 성분은 방류수 수질 기준치 이하로 정화 되었다(그림 4-9)

Cu 제거

원폐수의 Cu 농도는 3.516mg/ℓ 였고 이 농도는 방류수 수질기준(Cu: 3mg/ℓ)을 초과하였다. 1일 경과 후 처리수중의 Cu농도는 1mg/ℓ 이하로 정화되었다.(그림 4-10)

표 4-10. 시간경과에 따른 반응조 처리수 중금속 농도

일 자	반 응 조	시료	Zn	Pb	Cd	Cu	Al	Mn	Fe	Mg	Ca
		원폐수	15.915	0.031	0.237	3.516	4.675	7	90.41	153	419
		가공치	수질환경보전법 시행규칙 제 40조 별표 11.								
			<5	<1	<0.1	<3		<10	<10		
95-11-15	1	처리수	0.752	0.02	0.013	0.136	0.048	20	0.642	207	357
95-11-16			0.501	<0.005	0.006	0.112	<0.001	18	0.028	215	367
95-11-17			0.32	0.007	<0.001	0.107	<0.001	16	0.026	206	352
95-11-18			0.368	<0.005	<0.001	0.091	<0.001	15	0.186	218	365
95-11-20			0.212	<0.005	0.002	0.107	0.014	14	0.144	232	385
95-11-22			0.326	0.009	<0.001	0.086	<0.001	14	0.281	217	358
		원폐수	15.915	0.031	0.237	3.516	4.675	7	90.41	153	419
95-11-15	2	처리수	0.461	0.07	0.012	0.124	0.011	15	0.563	199	262
95-11-16			0.523	0.025	0.01	0.108	0.028	16	1.093	197	258
95-11-17			0.771	0.026	0.009	0.175	0.099	19	0.888	205	269
95-11-18			0.725	0.024	0.007	0.170	0.187	20	2.662	224	289
95-11-20			0.626	0.018	0.014	0.119	0.081	24	2.513	249	310
95-11-22			0.620	0.012	0.004	0.137	0.092	27	2.132	228	283
		원폐수	15.915	0.031	0.237	3.516	4.675	7	90.41	153	419
95-11-15	3	처리수	0.423	0.013	0.017	0.091	0.026	11	2.134	189	251
95-11-16			0.663	0.021	0.008	0.194	0.061	13	1.087	198	267
95-11-17			0.751	0.027	0.013	0.203	0.106	16	1.202	205	275
95-11-18			0.844	0.011	0.018	0.229	0.035	18	2.158	216	290
95-11-20			0.557	0.014	0.013	0.140	0.073	22	2.363	248	317
95-11-22			0.635	0.021	0.003	0.136	0.050	27	1.816	233	301
		원폐수	15.915	0.031	0.237	3.516	4.675	7	90.41	153	419
95-11-15	4	처리수	6.946	0.076	0.075	0.21	1.367	50	3.08	147	546
95-11-16			5.621	0.062	0.054	0.116	0.604	42	1.586	145	561
95-11-17			4.538	0.022	0.042	0.051	0.156	44	0.934	139	551
95-11-18			4.349	0.072	0.037	0.065	0.169	45	1.28	146	577
95-11-20			3.582	0.046	0.026	0.028	0.050	46	0.806	153	606
95-11-22			2.574	0.024	0.010	0.007	<0.001	41	0.843	142	573
		원폐수	15.915	0.031	0.237	3.516	4.675	7	90.41	153	419
95-11-15	5	처리수	2.819	0.02	0.039	0.151	0.072	35	0.762	165	457
95-11-16			0.411	<0.005	<0.001	0.043	<0.001	25	0.492	166	455
95-11-17			0.658	<0.005	0.01	0.220	<0.001	22	1.512	166	457
95-11-18			0.67	0.042	0.023	0.238	0.042	23	1.972	172	475
95-11-20			1.133	0.017	0.045	0.290	0.043	26	4.127	187	520
95-11-22			1.466	0.031	0.025	0.325	0.015	25	4.472	177	511
		원폐수	15.915	0.031	0.237	3.516	4.675	7	90.41	153	419
95-11-15	6	처리수	1.224	0.071	0.019	0.34	0.036	26	0.925	178	444
95-11-16			0.472	0.005	0.017	0.291	0.021	22	1.121	188	451
95-11-17			0.511	0.014	0.032	0.329	0.081	20	0.597	198	473
95-11-18			0.682	0.036	0.042	0.353	0.061	21	0.603	199	476
95-11-20			1.020	0.027	0.032	0.233	0.023	14	0.913	208	468
95-11-22			2.280	0.059	0.051	0.384	0.082	24	1.691	210	505

표 4-10. 계속

일자	반응조	시료	Zn	Pb	Cd	Cu	Al	Mn	Fe	Mg	Ca
		원폐수	15.915	0.031	0.237	3.516	4.675	7	90.41	153	419
		기준치	수질환경보전법 시행규칙 제 40조 별표 11								
			<5	<1	<0.1	<3		<10	<10		
95-11-15	7	처리수	12.082	0.255	0.156	0.75	3.334	6	34.42	162	499
95-11-16			10.627	0.031	0.142	0.423	2.85	6	28.37	152	486
95-11-17			9.669	0.079	0.102	0.244	1.929	6	26.714	161	514
95-11-18			9.156	0.027	0.102	0.188	1.419	6	19.1	167	531
95-11-20			5.489	0.013	0.055	0.154	0.214	7	10.763	163	517
95-11-22			2.703	0.007	0.011	0.156	0.072	46	15.564	152	488
		원폐수	15.915	0.031	0.237	3.516	4.675	7	90.41	153	419
95-11-15	8	처리수	1.171	0.042	0.025	0.363	0.031	31	1.643	174	439
95-11-16			0.67	0.007	0.021	0.273	0.03	27	1.266	167	417
95-11-17			0.617	0.012	0.014	0.249	0.030	26	3.961	180	438
95-11-18			0.687	0.028	0.017	0.321	0.095	25	3.693	172	418
95-11-20			1.166	0.034	0.056	0.500	0.108	31	9.277	199	484
95-11-22			1.332	0.036	0.046	0.444	0.042	29	9.725	183	453
		원폐수	15.915	0.031	0.237	3.516	4.675	7	90.41	153	419
95-11-15	9	처리수	1.746	0.095	0.054	0.636	0.199	28	4.174	202	429
95-11-16			0.737	0.016	0.039	0.354	0.101	24	2.226	198	408
95-11-17			0.758	<0.005	0.047	0.373	0.131	22	3.783	205	419
95-11-18			1.068	0.038	0.065	0.507	0.159	24	3.808	210	436
95-11-20			0.437	0.022	0.013	0.103	0.020	11	2.481	219	418
95-11-22			2.013	0.040	0.045	0.406	0.119	23	5.666	211	456
		원폐수	15.915	0.031	0.237	3.516	4.675	7	90.41	153	419
95-11-15	10	처리수	1.431	0.032	0.019	0.042	0.902	12	1.872	53	93
95-11-16			2.846	0.067	0.038	0.076	0.916	28	2.587	141	229
95-11-17			2.395	0.037	0.023	0.050	0.322	25	2.260	145	225
95-11-18			2.589	0.06	0.026	0.043	0.239	30	1.717	159	252
95-11-20			2.469	0.051	0.027	0.028	0.202	29	1.853	151	241
95-11-22			2.078	0.008	0.015	0.019	0.148	31	0.000	158	249
		원폐수	15.915	0.031	0.237	3.516	4.675	7	90.41	153	419
95-11-15	11	처리수	3.727	0.08	0.053	0.152	0.325	39	2.011	178	313
95-11-16			2.871	0.021	0.04	0.171	0.087	30	0.949	170	283
95-11-17			1.166	0.011	0.010	0.127	0.019	27	0.638	184	293
95-11-18			2.964	0.063	0.031	0.301	0.353	28	2.304	197	311
95-11-20			0.605	0.006	0.002	0.148	<0.001	17	2.551	181	273
95-11-22			1.041	0.021	0.009	0.218	0.034	28	8.171	201	319
		원폐수	15.915	0.031	0.237	3.516	4.675	7	90.41	153	419
95-11-15	12	처리수	0.179	0.005	<0.001	0.016	<0.001	11	0.161	169	269
95-11-16			0.263	0.005	0.004	0.035	<0.001	14	0.328	176	289
95-11-17			0.232	0.016	0.002	0.067	<0.001	18	0.232	193	317
95-11-18			0.364	0.018	0.001	0.065	0.035	22	0.283	213	350
95-11-20			0.229	0.023	0.006	0.013	<0.001	21	1.019	207	33
95-11-22			0.394	0.024	<0.001	0.044	<0.001	38	4.555	223	385

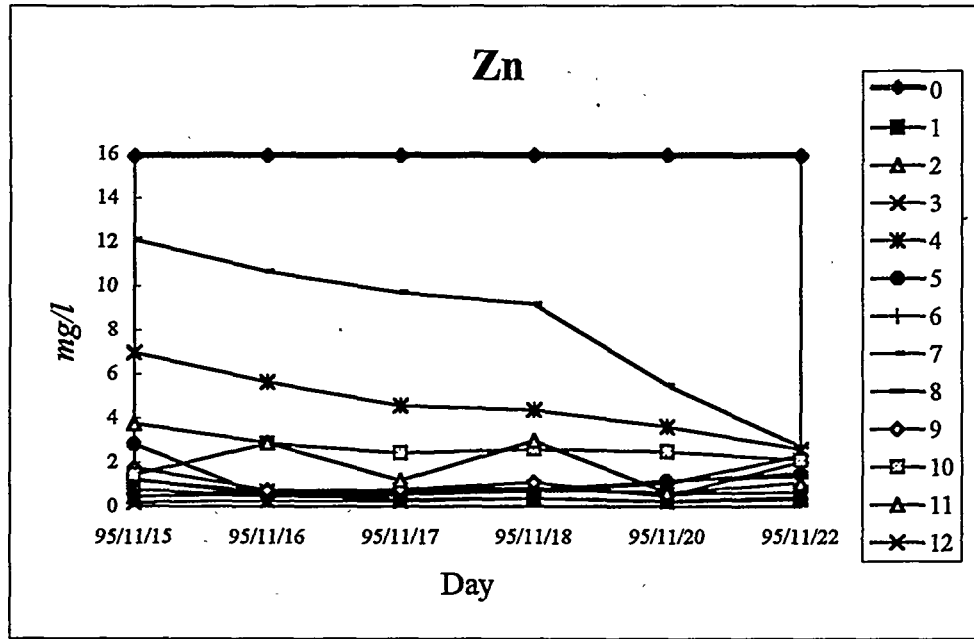


그림 4-7 시간경과에 따른 각반응조 처리수중의 Zn 농도(우측부 범례의 번호는 각반응조를 의미하며 0번은 원폐수 수질임).

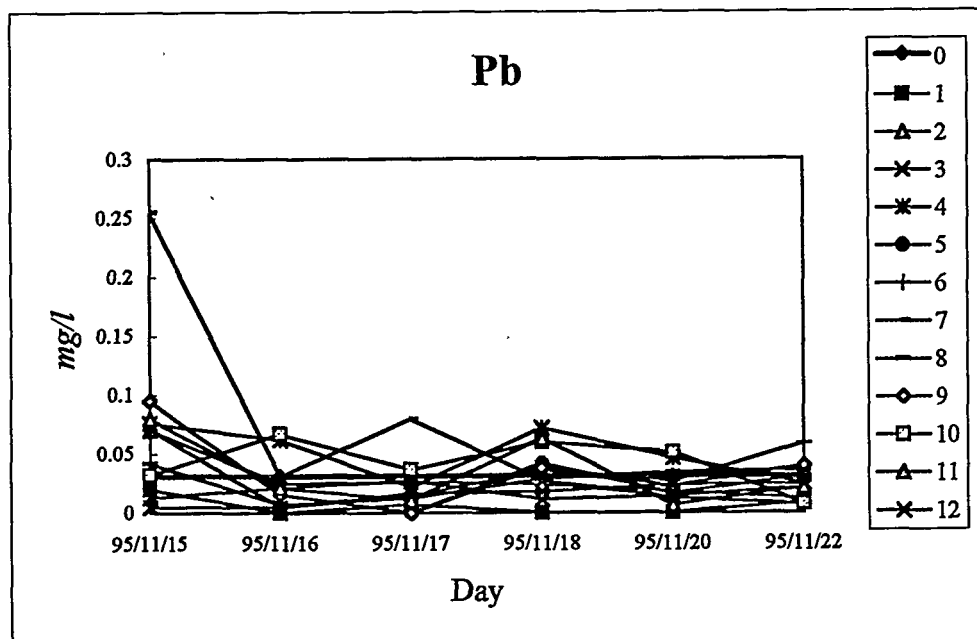


그림 4-8 시간경과에 따른 각 반응조 처리수중의 Pb농도

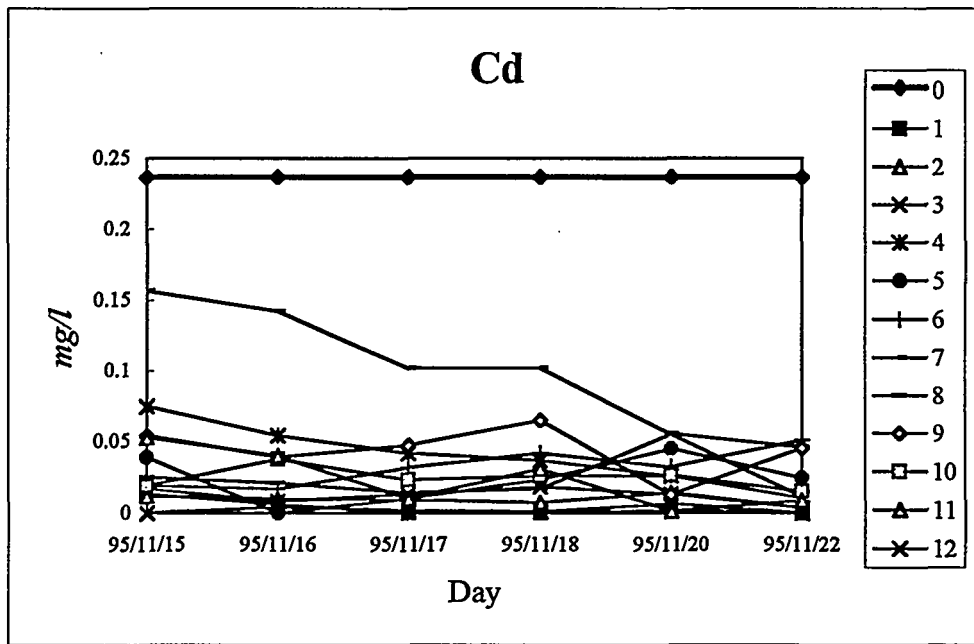


그림 4-9. 시간경과에 따른 각반응조 처리수중의 Cd 농도

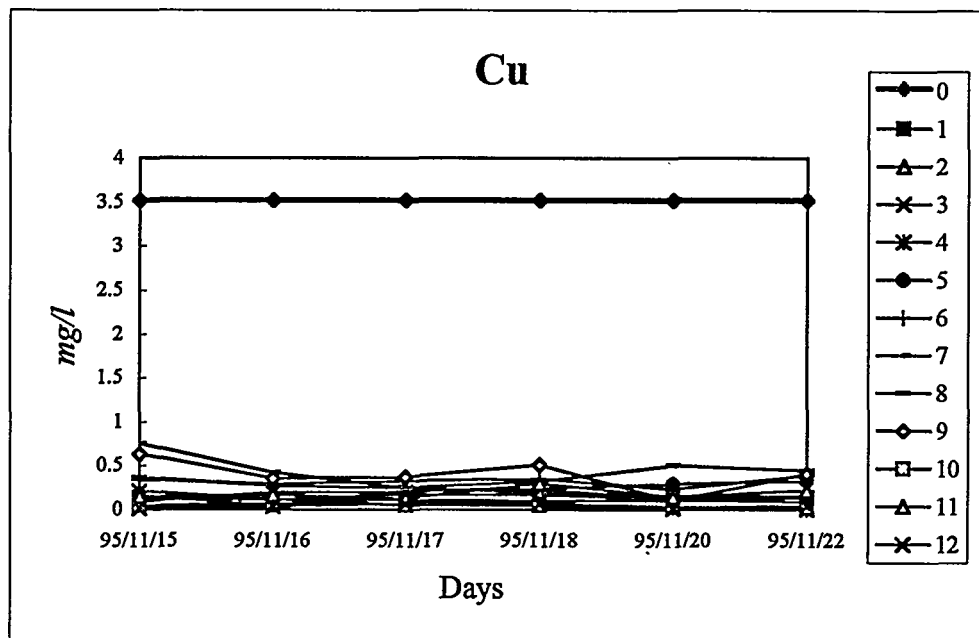


그림 4-10. 시간경과에 따른 각 반응조 처리수중의 Cu농도

Al 제거

원폐수의 Al 농도는 5mg/ℓ 였고 Al은 방류수 수질기준 항목에 없다. 그러나 광산폐수의 주성분으로 나타나므로 시험 결과를 기술한다. 일반퇴비 반응조 7, 톱밥퇴비 반응조 4, 부식토 반응조 10(이상은 pH 중화가 저조했던 반응조 임)을 제외하고는 나머지 처리수에서 Al의 정화는 우수하였다. (그림 4-11)

Mn 제거

원폐수의 Mn 농도는 약 7mg/ℓ 였고 이 농도는 방류수 수질기준(Mn: 10mg/ℓ) 이하의 수질 이었다. 시험결과 일반퇴비 반응조 7을 제외한 대부분의 반응조에서 Mn의 농도가 원폐수 Mn농도 이상으로 증가하여 시험 성적은 저조하였다. 이러한 현상은 시료준비 단계 혹은 기질물질로 부터 용출되었던가 혹은 기기 분석으로 부터 유래한 것으로 사료된다. 한편 소택지 정화이론(제 4장 참조)에서 Mn 성분은 혐기성 환경에서 정화 효율이 가장 저조한 성분으로 지적한 바 있다.(그림 4-12)

Fe 제거

원폐수의 Fe 농도는 약 90mg/ℓ 였고 이 농도는 방류수 수질기준(Fe: 10mg/ℓ)을 약 9배 초과하였다.

일반퇴비 반응조 7을 제외한 모든 반응조에서 Fe는 10mg/ℓ 이하로 정화 되었다.(그림 4-13)

Mg 및 Ca 제거

원폐수의 Mg 및 Ca 농도는 153 및 419mg/ℓ 였고 이들 성분들은 방류수 수질기준 항목에 없다. 그러나 광산폐수의 주성분으로 나타나며 황산염등(예: 석고등)으로 산화환경에서 침전되면서 제거된다. 처리수의 Mg 및 Ca 농도는 (그림 4-14 및 4-15)대부분 제거되지 않고 그대로 유출되고 있었다.

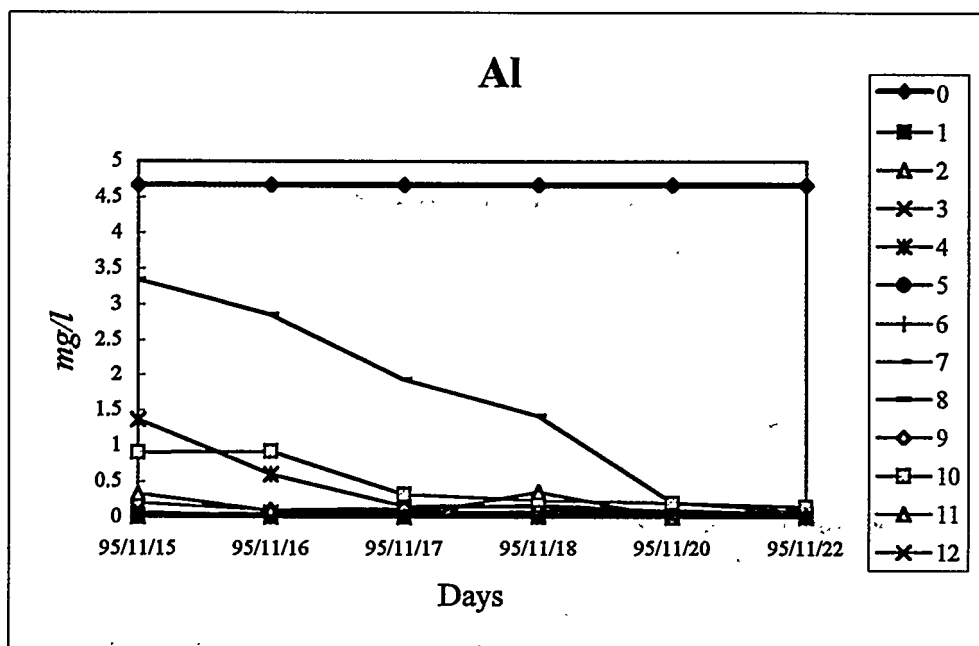


그림 4-11 시간경과에 따른 각반응조 처리수중의 Al 농도

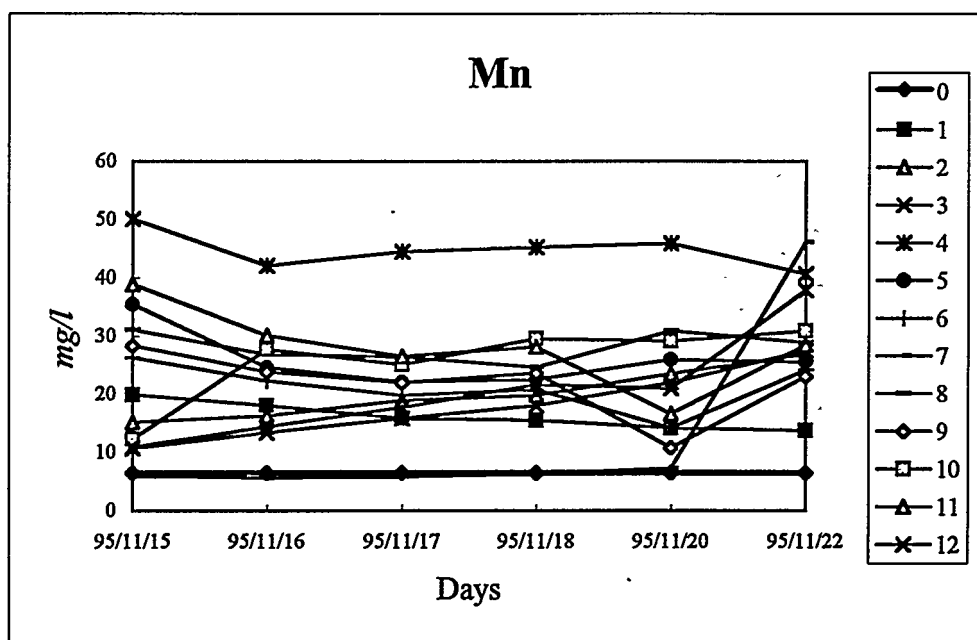


그림 4-12 시간경과에 따른 각 반응조 처리수중의 Mn농도

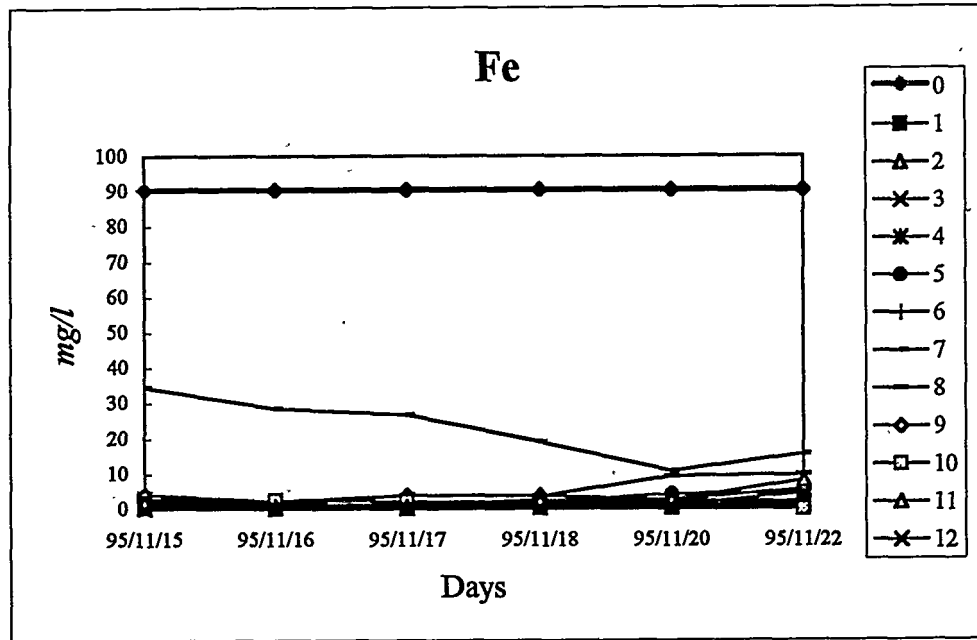


그림 4-13 시간경과에 따른 각반응조 처리수중의 Fe 농도

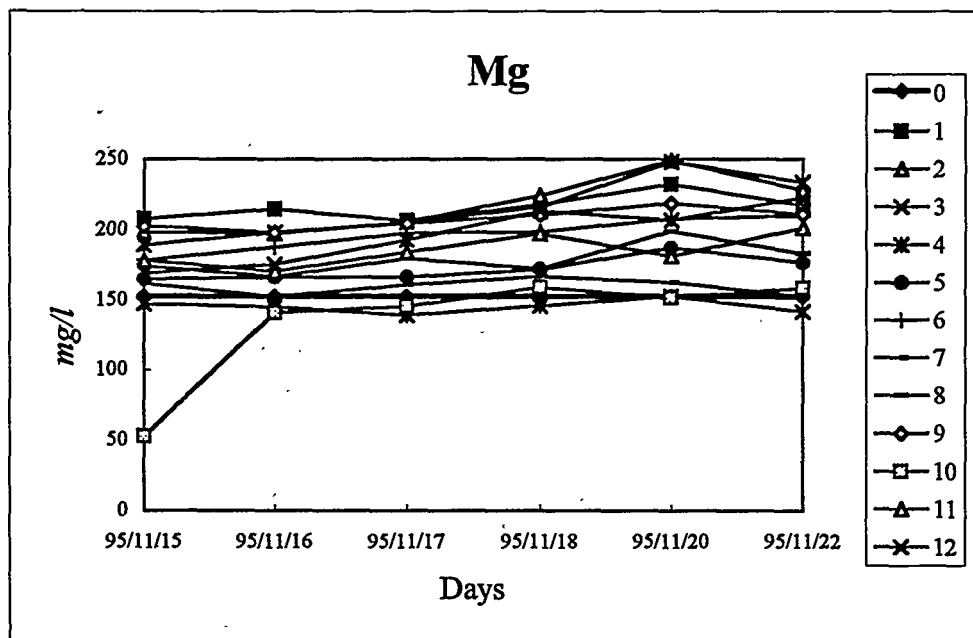


그림 4-14 시간경과에 따른 각 반응조 처리수중의 Mg농도

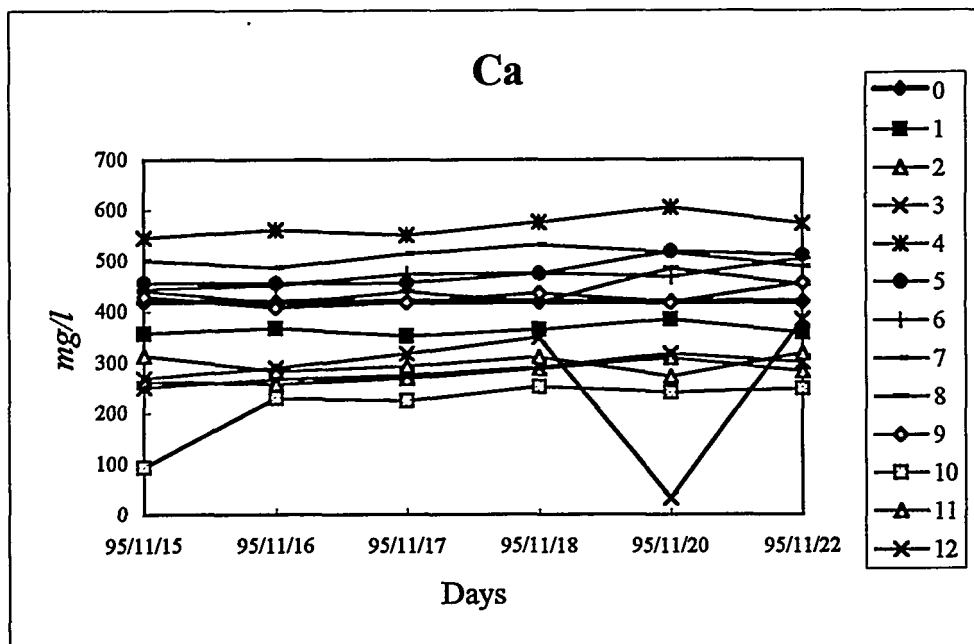


그림 4-15 시간경과에 따른 각반응조 처리수중의 Ca 농도

4) 실내시험 종합

중금속으로 오염된 달성광산 산성폐수를 선정하여 인공소택지에 의한 정화 가능성을 실험실 규모의 시험결과 버섯퇴비가 톱밥퇴비, 일반퇴비 및 부식토 등에 비해 산성폐수 중화 및 중금속 제거에 가장 효율이 좋은 기질물질로 밝혀졌다. 그러나 버섯퇴비의 경우 처리수에 용존물질이 상승하는 관계로 TDS 를 제거하는 것이 문제점으로 남는다.

4-1-4 금속광 광산폐수 처리 대책

소택지 설계는 유량, 폐수의 알카리도, 수질 및 폐수 유출장소의 군집특성과 지형적 조건 등에 따라서 좌우되며 다양한 설계 방법론이 제안되어 왔다. 또한 소택지 설계 인자로서 기질종류 이외에도 기질물질의 부피, 심도, 수리적 변수 등이 매우 중요하다. 또한 광산지역의 지형은 매우 다양하고 유량 기복이 심할 때 가용 토지의 한계등에 의해서 소택지 배열 형태가 좌우되게 된다. 따라서 소택지 주변환경에 따라서 수개의 처리단위로 분할시켜서 짧은 수리적 순환을 방지하거나, 수로에 계단을 설치하여 자연적 폭기 현상을 유도 하는 등 소택지의 생 지구화학적 효율을 극대화 시키도록 노력해야 한다. 그림 4-15 및 그림 4-16에 소택지에 의한 광산폐수 처리 시스템 개념도가 도시되어 있다.

소택지를 이용한 폐수처리 System 개념도 - 무동력 무인력에 의한 관산폐수 정화System -

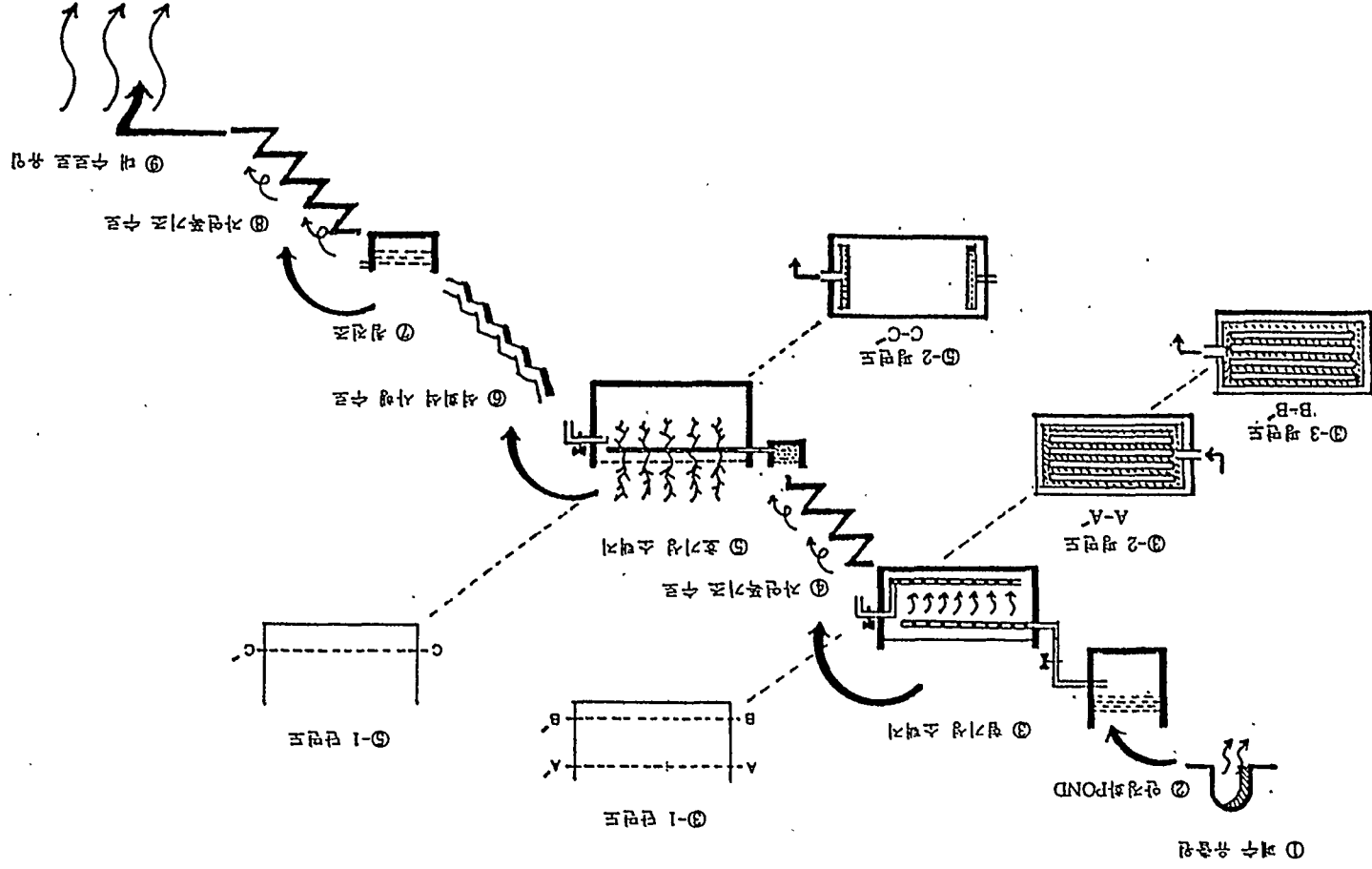


그림 4-16. 폐수처리 시스템 개념도

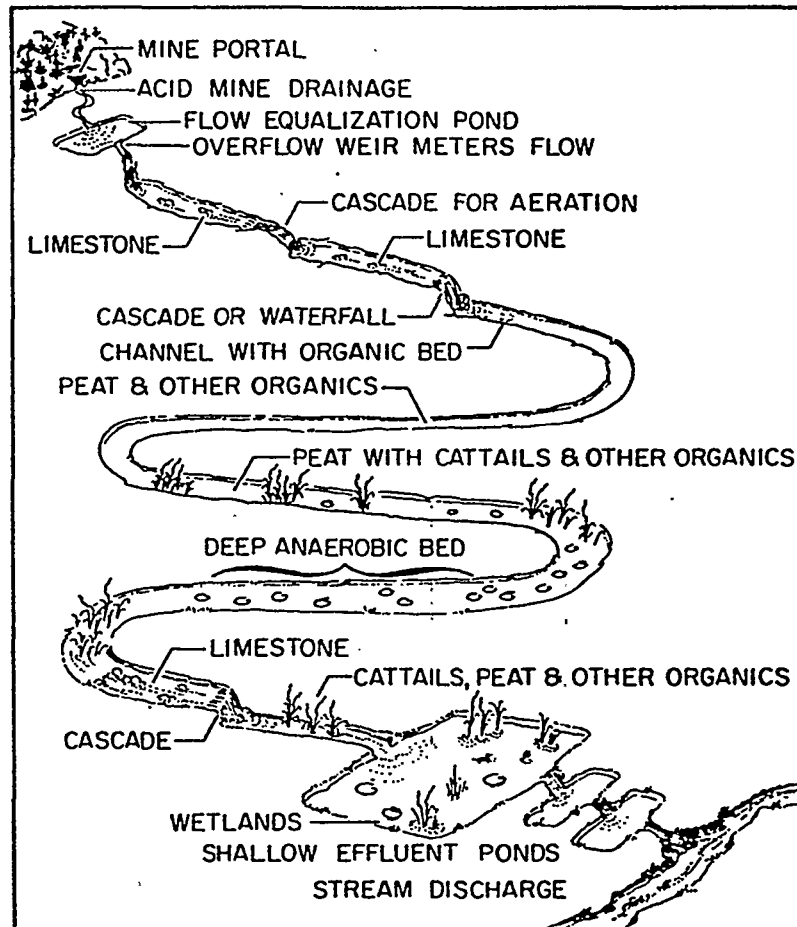


그림 4-17 현장성을 살린 광산폐수처리를 위한 소택지 시스템 개념도
(Sengupta, 1993).

4-2. 광산폐기물(광미사) 로 인한 환경오염 방지 대책

광산 폐기물의 종류에는 굴착 및 채광시 발생하는 폐석(암석) 및 토양, 선광 부산물인 광미, 갱내의 폐시설 및 장비 그리고 폐갱도에서 유출되는 폐수, 기타등으로 구분 할 수 있다. 또한 광산폐기물의 범주속에 퇴적물, 용해성 광물, 산, 중금속, 석면, 선광 및 광물처리 시약 및 발파시 생길 수 있는 질산염등이 포함된다.(Hutchison and Ellison, 1992)

광산폐기물의 화학적 특징으로서 매우 유해한 독성물질을 포함할 수도 있고 화학적으로 무해한 물질일 수도 있다. 일반적으로 독성의 유해물질은 광석 자체에도 포함하기도(예: 비소, 카드뮴등) 하지만 광석의 선광 및 제련과정에서 투입되는 시약으로 부터 유래할 수도 있다. 가장 대표적인 물질이 시안이다. 광산폐기물중에 독성물질의 함유 가능성 때문에 이에 대한 보관 및 관리를 어떻게 적절히 하느냐가 중요한 문제가 된다.

물리적 특성중 광산폐기물의 대표적 특성은 입도로서 괴석(塊石)으로 부터 점토질 등 다양한 입도분포를 보이며 각 광산마다 다르다. 이들의 적치 상태 및 침식에 의한 유실범위에 따라서 농경지, 하천수로 등 에 대한 재산손실의 위험성이 우려되므로 대규모 광산폐기물 보관장의 안정성 평가가 중요하다.

본 장에서는 광산폐기물로 분류되는 폐기물 종류 및 환경학적 의미를 간단히 기술하고 광미사의 보관에 대해 주로 기술하기로 한다. 광산폐기물 보관 기술은 위생매립장(Sanitary Landfill) 설계시 응용되는 Liner System 과 외국에서 활발히 연구되고 있는 광산폐기물 보관을 위한 Cover System을 소개하기로 한다.

4-2-1 광산폐기물 특성

4-2-1-1 광산폐기물 종류

광산폐기물의 종류 및 그 특성에 따라서 보관대책이 달라지므로 광산폐기물의 종류 및 특성을 약술하기로 한다.

1) 퇴적물

지표수에 부유할 수 있는 미립질의 지질물질을 의미하며 대부분 입도는 점토, 실트 등이 주를 이룬다. 광산지대에서 퇴적물의 생성은 1) 굴착 및 채광 현장, 2) 광석더미, 3) 기타 흙 혹은 암석이 교란된 지역에서 발생한다. 퇴적물이 수질에 미치는 영향은 다음에 의해 측정될 수 있다.

- Total Suspended Solids(mg/ℓ)
- Total Settleable Solids(mg/ℓ)
- 탁도(흔히 Nephelometric Turbidity Units(NTUs)로 측정)

2) 용해성 광물

용해성 광물에는 Borate, Chloride, Sulphate($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), Hydrous Carbonate, Nitrate Mineral등이 있다. 용해성 광물에 의해 수질에 미치는 영향은 TDS측정으로 알 수 있고 또한 이들 광물질의 성분은 매우 이온화 경향이 크기 때문에 음이온 혹은 양이온의 농도가 증가한다. 천연수에는 보통 낮은 TDS값을 나타내지만 용해성 광물에 의한 TDS 수준이 높아지면 용수로서의 가치가 떨어진다.

3) 침출수(Acid Rock Drainage: ARD)

광화광물이 폐기물속에 상당량 존재하는 경우 폐기물로부터 침출되는 산성 폐수가 발생하여 수질 혹은 토양을 오염 시킬 수 있다. 산성 침출수는 반응성 황화광물이 물이 존재하는 상태에서 산화작용을 받아서 발생하게 된다. 황화광물로 황철석, 백철석, Pyrrhotite(Fe_{1-x}S), Arsenopyrite(FeAsS)등을 들 수 있다.

침출수는 pH가 낮은 용출수, 침출수, 지표수 등으로 나타난다. 산성 침출수는 지하 채굴적, 노천 채굴적, 폐기물 더미 혹은 광산폐기물장으로 부터도 배출될 수 있으며 소위 Yellowboy라는 적갈색 퇴적물이 관찰된다. 이러한 침출수의 수질에 대한 영향은 pH를 낮추며, TDS, 음이온(주로 황산이온) 및 금속의 농도를 증가시키는 것이다. 본 광해조사시 광미사 보관장으로 부터 유래되는 침출수는 이 범주에 속한다.

4) 시약

시약은 목적성분에 따라서 다양하게 사용되며 화학시약은 여러가지 광물을 선광하는데 사용되는 강산부터 금 추출시에 사용되는 시안화나트륨과 같은 알칼리성 까지 다양하다.

부유선광 시약

부유선광시 유용광물과 시약은 정광에 보통 묻게 되지만 일부는 광산폐기물에 묻어 광산폐기물장으로 보내지게 된다.

Cyanide

금(Gold) 회수에 주로 사용되며 이외에 왕수 및 Thiourea도 사용되기도 한다. Cyanide은 인간 및 생물체에 매우 독성을 지닌 화학물질로 알려져 있다(표 3-3). 광산폐기물 현장에서 Cyanide은 자유 Cyanide로 (Free Cyanide: CN^-)로 존재할 수 있는데 이러한 형태가 가장 화학적으로 강력한 Toxic Form이며, 기타 금속-시안 착물, Cyanate (CNO^-), Thiocyanate (SCN^-)등의 화학적 형태도 있다. 금속-시안 착물의 독성은 결합강도에 반비례한다. 즉 가장 약하게 결합된 시안착물에 의해 그 독성의 잠재력이 가장 크다.

금속-시안 착물은 Fe 및 Co-시안 착물처럼 강한 결합형으로 부터 약하게 결합된 시안착물(Zn 및 Cd-시안착물)등을 형성할 수 있다. 강한 결합을 한 시안착물은 장기간 안정한 상태를 유지할 수 있지만 약한 시안 결합 착물은 쉽게 해리(解離, Dissociation)되어 다른 착이온과 결합하던가 혹은 자유 Cyanide를 형성한다.

Thiocyanate(SCN^-)는 금광 제련 폐기물에서 발견되는 분해 혹은 반응 산물로서 상기 시안화물에 비해 독성이 가장 작은 것으로 보고되고 있다.

기타

금 회수과정에서 수은이 금과 아말감을 형성하는 능력을 지녀 수은이 사용되기도 한다. 수은은 토양에서 비교적 이동성이 적으나 수은이 먹이사슬을 통해서 농집될 수 있는 원소로 알려져 있다. 산(황산) 및 알칼리시약(석회등)이

광물처리 과정 특히 pH 조절제로 사용된다. 선광과정중 광물회수 단계에서 유기용제(Organic Solvent)도 사용되기도 한다.

5) 영양염

영양염에는 질산 및 인산염이 포함 되는데 이들은 수계(水系)에서 산소를 소모하는 조류의 성장을 증진시킬 수 있다. 자원개발 분야에서 영양염의 배출은 밭파 혹은 선광장에서 질산이 사용되는 경우가 가장 대표적인 예로 알려져 있다.

광산 폐기물 및 보관장은 우선 광물자원이 채굴된 지역에 위치하며 광산폐기물 종류 및 특성에 따라서 지하수 혹은 지표수, 그리고 농경지 등 주변환경에 대한 오염 영향 및 정도가 다양해진다. 광산폐기물 관리시설의 규모(면적 및 용적)는 광산 규모 및 조업년수에 비례하며 대규모인 경우도 종종 있다.

4-2-1-2 관리 되어야 할 광산폐기물

광산폐기물의 위해성(Hazardous) 평가는 폐기물 관리법의 특정폐기물 판별기준 또는 California Department of Health Service(DHS)이 규정한 독성(Toxicity), 난분해성 및 생집적성(生集積性, Bioaccumulative) 독성물질, 인화성, 부식성 및 반응성 등으로 판별할 수 있다.

광산폐기물은 난분해성 및 생집적성 독성물질을 함유하기 쉬우며 이 범주에 포함된 원소는 Sb(Antimony), As, Ba, Be, Cd, Cr, Co, Cu, F, Pb, Hg, Mo, Ni, Se, Ag, Tl(Thallium), V 및 Zn등이다.

따라서 금속광의 광산폐기물로 부터 용출 가능한 특정 유해 물질은 As, Cu, Cd, Pb, CN등으로 이들 성분의 주변환경으로의 확산을 방지할 수 있는 광산폐기물 보관 기술이 요구된다(표 4-11).

표 4-11 광미사 용출 결과 특정폐기물의 유해 물질 함유기준을 초과한
광산 폐기물

광산명	폐기물 관리법 유해물질 함유기준 (시행규칙 제2조 별표3)					
	As	Cu	Cd	Pb	CN	기준초과 성분수
	1.5mg/l	3.0mg/l	0.3mg/l	3mg/l	1mg/l	
거도		●				1
금장			●			1
금정	●					1
양구동		●		●		2
쌍전	●					1
쌍전	●					1
송천(합태)	●					1
은치	●		●			2
고명			●			1

4-2-1-3 광산폐기물(광미사) 보관기술

광산폐기물의 환경공해 가능성 때문에 이에 대한 위해성 평가와 적절한 폐기물 관리가 이루어져야 할 것이며 광산폐기물의 관리는 주로 침출수 생성 방지, 수자원(지표·지하수) 보호 및 토양오염 방지를 목적으로 행해진다(그림 4-18). 본 장에서는 위해성 성분이 포함된 광산폐기물 침출수 생성 방지 및 누수 방지를 위한 광산폐기물 관리기술을 기술기로 한다.

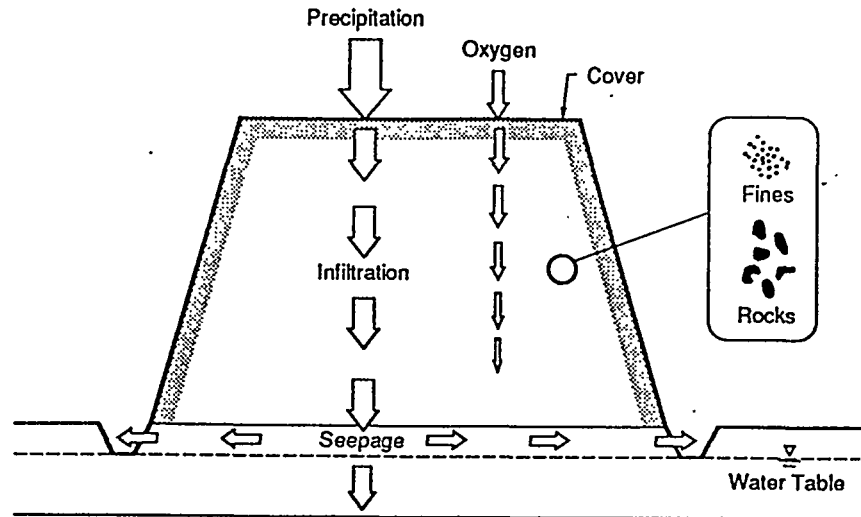


그림 4-17 광산폐기물에 의한 지하수오염 개념도

4-2-2. 광산폐기물 처분방법

4-2-2-1 Liner System

본 시스템은 광산 폐기물 자체내부로 물의 침투를 방지하는 덮개를 두어서 물과 접촉하는 지역을 줄이며 폐기물 바닥은 Lining을 하여 폐기물로 부터 생성될 수 있는 침출수의 누수를 차단하여 주변 토양 및 지하수로 이동하는 것을 방지코자 하는 개념이다. 기술의 목적은 ●특정 광산폐기물의 면적에 물이 접촉하는 시간을 감소시키는 기술 ●누수 혹은 침출수 발생을 최대한 억제 시키는 기술 ●폐기물 자체의 응집력을 이용하여 누수 잠재력을 감소 시키는데 있다.

또한 광산 폐기물 자체를 이용하여 Liner System을 만들 수 있는데 즉, 낮은 수리전도도를 만들기 위해 퇴적된 미립질 폐기물을 이용하던가 입상(粒狀)폐기물을 이용하여 자연 배수층을 만들 수 있다. 또한 석회석 등 알칼리성 암석을 이용하여 광산폐기물로 부터 발생하는 산성폐수 발생을 억제할 수 도 있다.

Liner System의 설계는 다음 사항들에 의해서 결정된다.

- 광산폐기물 특성

- 화학적 조성
- 입도분포
- 수리전도도

- 광산폐기물 관리 형태

- Liner의 경사
- Liner 위에 적치된 폐기물의 높이 및 경사
- 폐기물 적재 방법
- 수두(水頭)조절

- 위치특성

- 수자원까지의 거리(깊이 포함)
- 비포화지대 상태
- 기후조건

광산폐기물에 응용 가능한 Liner System의 형태들

광산 폐기물 관리를 위한 Liner System을 구분하여 보면 다음과 같다(표 4-12).

표 4-12 Liners System과 기능

Liners System으로서 가능한 재료 및 기능		
System 단위	종류(재료)	참조
A: 낮은 수리전도도 Liners	1. 자연토 혹은 암석	●Liner가 필요한 전체 지역에서 균질해야 함.
	2. 인공 Liner	●암필토 ●토양과 벤토나이트 혹은 시멘트 혼합물 ●Geomembrane ●Composite Liners (Geomembrane과 토양 혼합물)
	3. 폐기물	●침전광미
B: Liner 보호 재료 (Cushion)	1. Geotextile	●광미의 하중 및 시공과정에서 암석조각에 의해 Liner가 손상되는 것을 방지하기 위해 Geomembrane 상·하에 포설
	2. Geomembrane 보호용 미립토	“
	3. 점토 Liner 보호용 조립물질	●Liner가 바위등 과도한 하중을 받을 때 ●암필토를 보호하고자 할때 이용될 수 있음
C: 수두(水頭)조절 요소	1. 자연배수 자갈층	●수cm두께의 조립모래를 포함한 자갈층은 소량의 침출수를 빠르게 배수할 수 있다.
	2. 구멍난 파이프	●조밀하게 배열된 구멍난 파이프도 Liner위의 수두를 조절할 수 있다. 배열간격은 최대 희망 수두, 유량 및 파이프 사이의 수리전도도를 고려함으로써 계산가능.
	3. Geocomposite System	●넓은 범위의 배수를 위해 최근에 개발됨.
D: 침출수 집수 및 제거 시스템	1. Synthetic Geonet Materials	●고속으로 유량을 배수시키도록 설계된 고분자 화합물 망으로 두께는 0.16'~0.30' 정도임.
	2. 자연배수 자갈층	

- 단일 Liner System
- 수두(水頭)조절 시스템을 갖는 단일 Liner System
- 복합 Liner System
- 침출수 집수 및 배수 시스템을 갖춘 2층 Liner System
- 2층 Liner System위에 탈수 기능을 겸비한 시스템

광산폐기물 관리를 위해 설치된 Liner Syetm은 시공, 운영 및 폐쇄시 노출 되게 되는 다양한 물리 화학적 환경에서 기능할 수 있어야 한다.

1) 단일 Liner System

단일 Liner System은 침출수가 하부로 흐르는 것을 방지하기 위해 설계된다. 이 System에서 누수는 다음 사항에 의해 결정된다.

- Liner상부의 수두차 크기
- Liner의 두께 및 유효 수리전도도
- 수두가 Liner에 걸리는 시간

2) 수두조절단위를 갖는 단일 Liner System

단일 Liner Syetm과 다른점은 수두 생성이 liner상부에서 조절된다는 점이다. 이러한 수두조절이 효과적으로 달성되기 위해서는 Liner System으로 부터 침출수가 자연 배수 되어야 한다.

3) 복합 Liner System

토양 혹은 점토층 상부에 Geomembrane 을 설치하는 것이 본 시스템의 한 예이다. 본 시스템에서 두개층이 밀착되어 Geomembrane 으로 부터 침출수가 누수되어 토양속으로 침투되는 것이 방지되어야 한다. 만약 밀착되지 않으면 누수된 침출수는 넓은 면적의 토양속으로 침투하게 될 것이다. 따라서 누수되는 침출수의 양이 증가하게 된다.

4) 침출수 집수 및 배수 시스템을 갖춘 2층 Liner System

본 시스템의 특징은 침출수가 채집되어 제거되는 것이다. 집수부는 흔히 중력에 의한 배수로 설계된다. 침출수 집수 및 제거 시스템은 매립지 상부를 통과한 물을 감지하고 포집하는 것이 주된 기능이다. 침출수 집수 및 제거 시스템은 2개의 Liner System 사이에 위치하며 하부 Liner위에 발생한 수두로 제거될 수 있다.

침출수 집수 및 제거 시스템은 통상 다음의 요소로 구성된다.

- 배수층 자체
- 침출수 포집 Sump장
- 중력 혹은 기계적 침출수 제거 시스템

5) 2층 Liner System위에 탈수 시스템을 갖춘 시스템

본 시스템은 Liner System에 과도한 수두에 노출되지 않도록 하자는데 뜻이 있다.

Liner System 설계에서 가장 중요한 문제는 폐기물 관리에서 침출수의 누수 가능성이다. 만약 폐기물에서 생성된 침출수중 위해성분이 포함되지 않는다면 특별한 보관이 필요치 않으며 이 침출수가 지하수로 침투해도 문제가 없을 것이다. 그러나 침출수가 장기간 저장 되어야할 유해성분을 포함하고 있다면 폐기물 보관장소로 부터 침출수가 누수되는 가능성을 최소화할 필요가 있다.

Liner System으로 부터 이탈될 수 있는 침출수의 양은 다음 요인들에 달려 있다.

- Liner상부에서의 물 높이(수두)
- Liner재료의 수리전도도
- Liner하부 토양 혹은 암석내의 수리전도도, 공극률 및 자연적인 함수율

Liner 상부의 수두는 폐기물 관리 공정 설계, 운영, 관리시 조절될 수 있다. 만약 자유배수물질이 Liner 위에 만들어지면 수두차는 30cm이하로 유지될 수 있다. 침출수 집수 및 배수 시스템을 갖춘 2층 Liner System에서 Liner 상부에

서 평균 수두는 2cm정도가 되도록 유량이 조절될 수 있다.

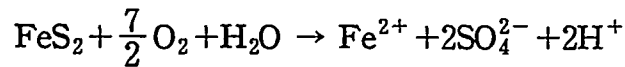
Liner System에서 누수의 잠재성을 평가하기 위해서는 수두범위에 대한 영향을 평가하는 것이 필요하다. 암밀된 점토 Liner의 수리전도도는 결함이 없는 경우 $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{cm/sec}$ 정도 범위를 갖으며 합성물질들도 이러한 수리전도도 값을 갖는다. 침출수의 누수를 예측하는 수리학적 누수 모델(공식)들이 개발되어 모델링에 의해서 Liner 하부의 누수속도와 이동시간을 예측할 수 있다. 본 Liner System은 휴·폐광산의 대규모 광산 폐기물의 보관 기술에 경제적으로 불리한 점이 단점으로 지적될 수 있다.

4-2-2-2 자연물질을 이용한 광산폐기물 보관기술(침출수 생성 방지 기술)
광산폐기물로 부터 광산 산성폐수의 발생을 줄이기 위한 기술은

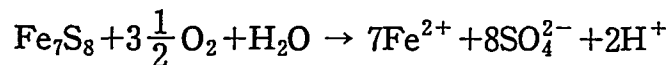
- Oxygen barriers(moisture remaining) 기술
- Oxygen consuming 기술
- Reaction inhibiting 기술 등이 있다(CANMET, 1994).

광미사장 혹은 광산폐기물 적치장에서 산성 침출수(폐수) 발생은 광미사장 혹은 폐기물 적치장중에 황철석, 자류철석 등 황화광물 등이 존재함으로서 가능하다. 즉,

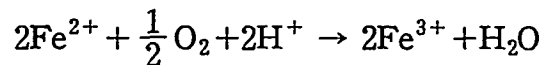
황철석의 산화작용



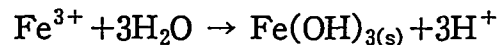
자류철석(pyrrhotite)의 산화작용



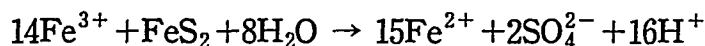
철의 산화작용



철의 침전



철의 산화작용



위의 화학반응식으로 부터 황화광물의 산화 및 광산산성폐수 발생의 주요 인자는 물 및 산소임을 알 수 있다. 따라서 둘 중 하나의 인자가 없다면 산화를 최소화 할 수 있다.

광미사장에서 공극을 통한 산소전달은 분자 상태의 확산에 의해 주로 발생하며 이러한 이동과정은 다음의 미분방정식으로 기술될 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D_e \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\nu}{K_H} \frac{\partial C}{\partial z} = \gamma R_s$$

여기서

C = 공극내 산소농도 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$)

D_e = 광미사를 통한 산소 분산 계수 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

z = 광미사 깊이 (m)

t = 시간 (s)

ν = 침투율($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

K_H = 수정 Henry's law 상수

(개스상 산소 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ 당 액체중의 산소 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$)

γ = 스토키오메트리 상수(황산염 생성과 관련된)

R_s = 황화물의 산화작용율($\text{mol kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)

Scharer et al.(1991)에 의하면 온도 및 pH가 일정하게 유지되면 황화물의 산화는 상당히 빨리 안정화 되며 바로 생성된(폐기된) 광미사의 경우 물의 침투율이 낮을때 황산염 유출량은 산소농도구배로 부터 추정될 수 있음이 제안되었다.

$$J = \left[\left(\frac{\nu K_{HC_0}}{\gamma} \right)^2 + \frac{\sigma D_e R_s C_0}{\gamma} \right]^{\frac{1}{2}}$$

여기서

J = 황산염 생성량 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

C_0 = 황화물이 존재하는 계면 상부에서 산소농도 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$)

σ = 광미사 밀도 (kg m^{-3})

윗 식으로 부터 황화물의 반응성(R_s), Effective diffusion(D_e), 鎭尾沙間의 산소농도(C_o)는 산성폐수발생에 미치는 영향이 동일하게 중요함을 알 수 있다. 따라서 광산 침출수 억제를 위한 광미사장의 효율적인 Cover를 디자인 할 때 이러한 요소들을 감소시키는데 주안을 두워야 한다. 산소가 황화물 표면이나 물의 침투를 억제하는 피복재에는 다음의 종류가 있다(표 4-13).

표 4-13 광산폐수 발생억제를 위한 피복재료의 종류 및 기능

피복재료 종류 구분	광산폐수 억제시 기능
산소전달 차단 물질	- 수분을 유지시켜 대기중의 산소가 확산되는 것을 낮춤
산소소모 물질	- 산소를 소모하여 황화물 표면에 산소량을 줄임
산화반응 억제 물질	- 산화작용을 금지시키며 pH를 중화시 킴

● 산소전달 차단 물질

대기중 산소가 황화물 표면에 전달되는 과정은 광미사 공극을 통한 분자형태의 확산에 의한다. 광미사를 통한 산소의 확산은 수분함량과 매우 밀접한 관계를 갖는데 포화도에 대한 유요 확산계수(D_e) 관계는 실험적으로 표현하면 다음과 같다(Elberling et al., 1993b).

$$D_e = D_a \tau (1-S)^{\alpha} + \frac{D_w \tau S}{H}$$

여기서

D_e = 피복물질의 유요확산계수 (m^2s^{-1})

D_a = 공기 중에서 산소의 확산계수 (m^2s^{-1})

D_w = 물 속에서 산소의 확산계수 (m^2s^{-1})

τ = 실험계수 (Turtuosity factor)

S = 포화도 (물용량/공극량)

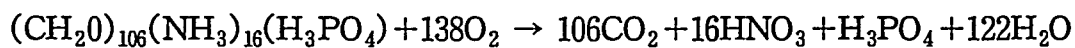
H = 수정 헨리상수

α = 실험계수

유효 확산계수는 포화도(0.2-0.86)에 따라서 $5.64 \times 10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 에서 $1.66 \times 10^{-8} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 로 변화한다. D_e 가 포화도에 크게 좌우되지만 포화도가 0.6이상 될 때 D_e 는 상당히 작아진다. 즉 이는 효율적인 피복재료는 거의 포화상태로 유지가 가능해서 확산에 의한 공기의 전달이 저하되도록 기능해야 한다. 일반적으로 수분의 유지능력은 미립질 재료가 효과적이며 입도가 커질수록 급격히 감소한다.

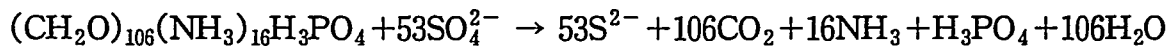
● 산소 소모 물질

유기물의 호기성 산화작용은 다음과 같이 산소를 소모할 수 있다.



상기 반응식은 미생물에 의해 수반되는데 일반적으로 두 가지의 생화학 현상으로 이해되고 있다. 첫째는 Lignocellulose가 용존성분으로 변화되는 Enzymatic hydrolysis 과정이다.

상당량의 유기물이 황산염의 산화환원 과정에서 상당량 소모될 수 있다. 즉



한편 생화학적 황산염 환원작용은 중성 내지 알칼리 pH상태에서 중요하다. 이러한 반응은 혐기적 Hydrolytic bacteria 및 *Desulphovibrio* 의 기능에 의해서 발생한다.

광산폐기물(폐수·광미) 보관장 피복(Cover) 물질종류에는 다음과 같다.

● 흙(점토), 하상퇴적물 등

● 산소 소모물질

톱밥, 톱트, 퇴비, 슬러지, 우분, 건초, 제지슬러지등

● 수분 침투 차단 물질

합성 Liner, 아스팔트, 콘크리트, 황화광물이 포함되어 있지 않은 광미사

● 화학반응물질 첨가

석회석, 인산염 광물, 알칼리 슬러지 혹은 알칼리 용액

이상의 내용을 요약하면 다음과 같다.

외국의 연구 결과 광미장에서 황화광물의 산화작용은 표면에서 부터 직하부(0.3~3m) 내외의 깊이에서 주로 발생된다. 이 부분은 산소 등이 채워져 있다. 그러나 깊이가 더할 수록 광미사는 포화되어 산소량은 격감하며 산소전달 계수가 작아지며 따라서 황화광물의 산화에 의한 침출수 생성이 억제될 수 있다. 따라서 이러한 개념을 이용하여 현장에서 수리학적 특성을 파악하여 산소 소모물질, 산소 차단물질 혹은 화학반응 첨가제등을 광미장 주변에 포설해야 할 것이다. 이러한 기술을 적용하기 위해서는 실내시험을 거친 후 현장 실증 시험을 통해서 기술을 개발하고 적용해야 할 것이다.

4-2-2-3 광산폐기물장의 구조적 안정성 평가

광산폐기물의 구조적 안정성 평가는 대규모 광산폐기물 보관장의 붕괴 유무를 예측하기 위해서 필요로 하며 가행광산의 경우 폐기물 관리를 안전하게 관리하는데 필요한 사항이다. 폐기물의 이동이 없도록 설계되어야 하며 폐기물 이동에 의한 구조물의 과도한 변형이나 붕괴가 발생하지 말아야 한다.

폐기물 보관(적치) 구조물 안정성 유형으로 ●사면안정성 ●축벽 및 옹벽의 안정성 ●댐안정성 등을 들 수 있으며 이미 개발된 전산 프로그램 (GARDS:Geotechnical Analysis for Review of Dike Stability)으로 안정성에 대한 평가가 수행될 수 있다.

광산폐기물 관리 혹은 처분 설계에 중요한 물리적 특성으로는 다음과 같다.

- Stackability
- 물과 바람의 침식에 대한 저항성
- 침투성
- 배수성 유체량
- 댐(독) 건설용 적합성
- Liner에의 응용가능성

광산폐기물의 물리적 특성이 중요한 이유는 다음과 같다. 즉, 폐기물들이 어떻게 잔치되는가, 바람이나 강수 침식에 대한 저항성, 폐기물로 부터 발생할 수 있는 침출수, 건설재료로서의 가능성 및 광산폐기물 보관시설에 대한 타당

성 평가시 물리적 특성이 매우 중요하다.

이상의 물리적 특성은 토질시험으로 부터 입도분포, 함수율, 강도, 내구력, 수리전도도 및 풍화도 등을 구함으로서 파악될 수 있다. 또한 폐석 더미의 안식각을 측정하고 폐석 경사를 계산하며 가행광산의 경우 광산폐기물에서 배출되는 유체량이나 광미사의 안식각(Beach angle: 광미사장에서 슬러리 상태로 퇴적될때 광미사 표면의 각도) 및 밀도 등을 구할 필요도 있다. 이러한 광산폐기물에 대한 물성조사는 광산폐기물의 효과적인 보관방법을 결정하는데 중요자료가 되며 광산폐기물장에 광산폐기물을 최대한 보관 할 수 있는 방안을 제공해 준다.

4-2-3 금속광 광산폐기물 보관 대책

광산 폐기물에 대한 효율적인 보전 및 관리가 이루어져야 지표수·지하수 등의 수질 및 토양환경에 대한 잠재적인 악영향을 방지할 수 있다. 광산폐기물 관리를 위한 체계적 접근은 오염영역의 파악, 광산폐기물의 물리·화학적 특성평가, 광산폐기물 적치 현장의 지형적 특성파악 그리고 수질 및 토양 등에 미치는 영향 평가를 통해서 이루어져야 할 것이다.

대부분의 광산폐기물 적치장은 계곡수, 하천수 등과 공간적으로 인접해 있으며 특히 댐식 광산폐기물장의 경우 계곡수(예: 상동광업소) 혹은 하천(예: 쌍전광업소)이 광산폐기물관리에 매우 중요 변수가 되고 있다.

광산폐기물 보관장의 관리시 공통적인 주안점은 물관리 시설물(도수로, 암거), 광산폐기물 유실 방지 및 안정성 구조물(흙댐, 콘크리트댐, 블록Covering 및 옹벽)등 관리에 있다. 광산폐기물 자체의 물리적 특성으로 인한 飛散性(조일상곡 광산) 문제 될 수 있으므로 비산 방지 대책도 경우에 따라서는 필요하게 된다.

광산폐기물 적치 위치 및 광산폐기물 보관형태는 광산현장 지형에 크게 의존한다. 현장 조사결과 광산폐기물의 적치 위치는 크게 계곡, 산사면 및 평지로 구분되며 규모면으로 계곡적치가 가장 크다.

- 계곡 및 산사면 적치 광산폐기물 보관

- 댐, 옹벽, 암거 구조물(예: 쌍전) 시설 보완 공사
- 산성 혹은 유해성 침출수 발생시 자연물질을 이용한 피복 재료 포설
(예: 울진)

- 평지에 적치된 광산폐기물 보관

- 옹벽 시설 보완(예: 은치광산, 거도광산), 독성원소 용출시 유로관리,
- Liner System 시공

4-3. 오염토양 복구 대책

4-3-1 오염토양의 위해성분과 오염토 복원기술 개요

토양오염물질이란 토양에 잔류하여 농작물의 생육을 저해하고 사람의 건강에 유해한 농약, 중금속, 유류, 화학물질, 유기합성물질 등을 말한다. 그리고 토양오염물질을 생산, 취급, 운반, 저장, 가공 또는 처리함으로써 토양오염을 유발시킬 수 있는 시설 건물을 토양오염 유발시설이라고 말한다.

광산과 관련된 오염유발 시설로서는 휴·폐·가행광산의 광산폐기물 적치(방치)장, 선광장, 그리고 광미 보관소등이 있으며 그 주변 환경의 토양이 오염유발지역으로 분류될 수 있다. 오염가능물질로서는 광석 및 광물처리 과정에서 발생한 무기 중금속 및 광물처리 시약등을 들 수 있다. 그 대표적인 오염 물질로서 카드뮴, 비소, 구리, 아연, 수은 및 시안등을 들 수 있다.

Powell(1994)에 의해 요약된 현장 오염토양 복구기술을 요약하면 아래와 같다.

- Solvent Extraction Treatment (용매추출법)
- Mobile/Transportable Incineration Treatment (소각법)
- Chemical Dehalogenation (탈 할로젠법)
- Slurry Biodegradation (생분해법)
- Soil Washing Treatment (토양세척법)
- In Situ Soil Vapor Extration (현장토양 증기추출법)
- Thermal Desorption Treatment (열처리법)
- Chemical Oxidation Treatment (산화법)
- Electro-osmosis, Electrophoresis, Electrolysis (전기법)
- Solidification/Stabilization of organics and Inorganics (고형화법) 등

상기 토양오염 복구기술들은 복구비용, 현장 적용성, 오염토 특성, 법규 등의 다양한 요인에 의해 오염토양 적용시 한계를 갖는다.

4-3-2 광산주변 오염토 오염물질 제거 수준

환경보전법 수질환경 보전법 시행령 제 30조 별표 6의 농수산물 재배 등을 제한할 수 있는 오염기준을 초과하거나 혹은 토양오염대책기준 (규칙 제20조 관련)을 초과하는 오염토양은 조사결과가 확인되지 않았다(표 3-11 참조).

한편, 정부는 오염의 사전예방 및 오염토양의 개선등의 종합적인 관리를 위

하여 1995년 1월 토양환경보존법을 제정하였고 그와 관련하여 토양오염방지조
치 및 오염토양개선 노력을 기울이고 있다(그림 4-19).

한편 오염토 복원과 관계되는 일본·독일 및 유럽연합의 토양기준을 표
4-14~ 표 4-16 (박송자, 1995)에 수록하여 대비되도록 하였다.

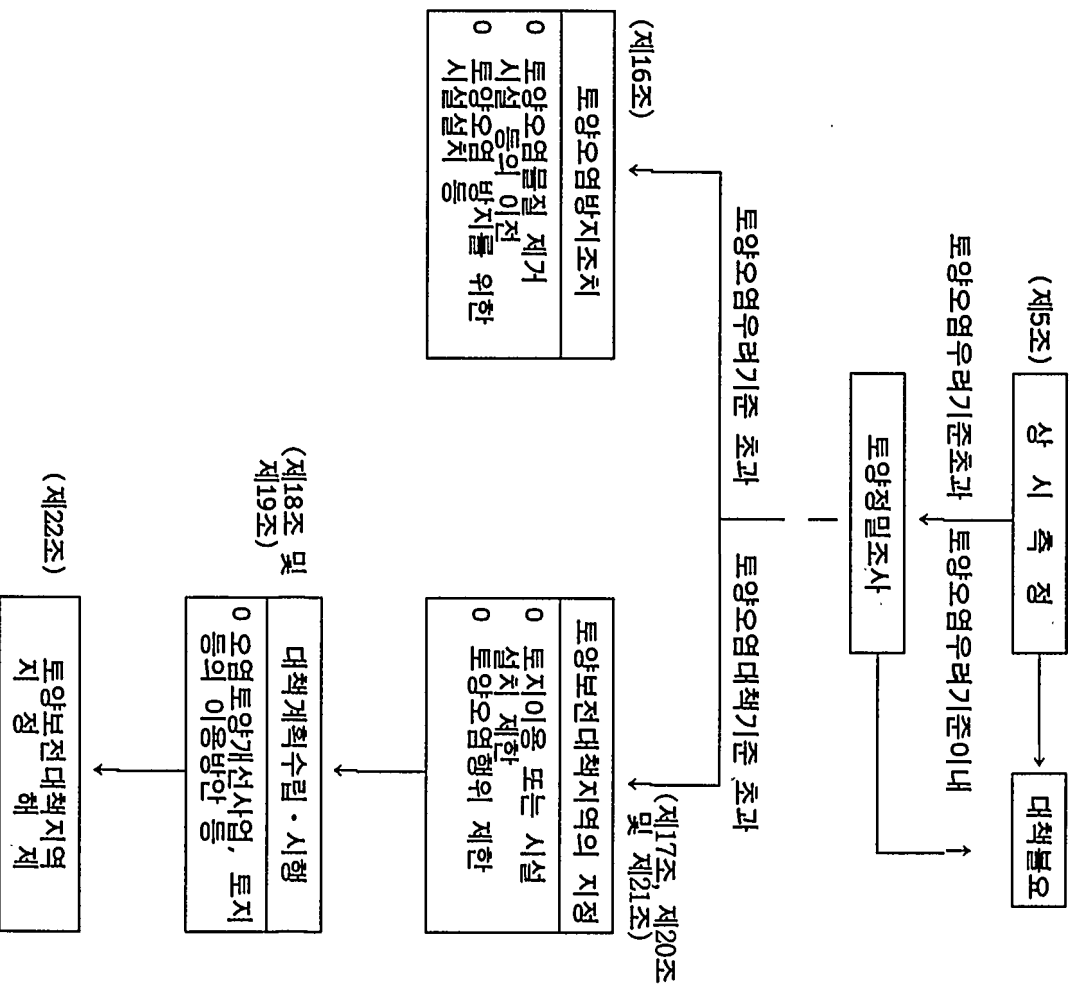


그림 4-19. 토양오염 방지조치 및 오염토양 개선 체계도

※ ()는 토양오염 환경보전법 시행규칙

표 4-14 일본 토양 기준(무기성분에 한함)

구 분	용 출 기 준	농 경 지 기 준
Cadmium	0.01mg/l 이하	현미 1mg/kg 이하
Cyanide	Not Detected	Not Detected
Lead	0.1mg/l 이하	-
Chromium (Cr ⁶⁺)	0.05mg/l 이하	-
Arsenic	0.05mg/l 이하	논 15mg/kg 이하
Mercury, total	0.0005mg/l 이하	-
Alkyl Mercury	Not Detected	Not Detected
Copper	-	논 125mg/kg 이하

표 4-15 독일 토양 기준

(단위 : mg/kg)

구 분	다기능성 기준	농 경 지 기 준
Arsenic	20	40
Cadmium	0.6	1.5
Chromium	-	100
Copper	40	60
Mercury	0.3	1.0
Nickel	-	50
Lead	50	100
Thallium	0.5	1.0
Zinc	120	200

표 4-16 유럽연합(EU) 토양 잠정 정화기준값

구 분	Agricultural	Residential/Park Land	Commercial/Industrial
· 일반항목			
pH	6-8	6-8	6-8
Conductivity	2	2	4
SAR	5	5	12
· 무기항목			
Antimony	20	20	40
Arsenic	20	30	50
Barium	750	500	2000
Beryllium	4	4	8
Boron(Hot Water)	2	-	-
Cadmium	3	5	20
Chromium(Cr ⁶⁺)	8	8	-
Chromium, total	750	250	800
Cobalt	40	50	300
Copper	150	100	500
Lead	375	500	1000
Mercury	0.8	2	10
Molybdenum	5	10	40
Nickel	150	100	500
Selenium	2	3	10
Silver	20	20	40
Thallium	1	-	-
Tin	5	50	300
Vanadium	200	200	-
Zinc	600	500	1500
Cyanide, free	0.5	10	100
Cyanide, total	5	50	500
Fluoride, free	200	400	2000
Sulphur, elemental	500	-	-

4-3-3 오염토복구기술

국내 토양오염 대책기준(규칙 제19조 및 제20조 관련)에 속하며 광산주변 토양을 오염시킬 성분은 광산폐기물 및 광산폐수 조사결과 주로 카드뮴, 구리, 비소, 납, 철, 아연, 망간 등을 들 수 있다. 따라서 이러한 성분들에 의해 주로 광산 주변 토양이 오염될 것이다. 이러한 무기성분을 제거할 수 있고 또한 수십년간의 기술이 축적되어온 광물처리기술의 원리를 이용한 오염토양을 복구 기술을 간단히 약속 하기로 한다(Trost, 1993).

폐기물 처리기술 중 위해성 폐기물이 적치된 현장에서 활용될 수 있는 Detoxification 및 위해성 폐기물량을 줄이는 Soil Washing 기술은 오염토의 용량을 줄이고 현장에서 독성물질을 제거하는 기술로서 굴착된 토양으로 부터 무기 및 유기성 오염물질을 제거하며 또 농축화 시키는 기술로 정의될 수 있다.

4-3-3-1 Soil Washing 기술

토양세척기술은 아래의 3가지 접근방법으로 개발되어 오고 있다 (Trost, 1993). 즉, ●입도 분별 ●오염물질을 추출하여 농축하는 물리 혹은 화학적 반응이 포함된 액상처리시스템 ●용제(solvent) 또는 착제(chelating agents) 등을 이용한 Counter Current Decantation(CCD)방식 등이다.

1) 입도 분별 기술

오염물질은 -200메쉬 이하의 미립질에 주로 분포한다는 전제에 기초한다. 이러한 입도는 점토 및 미립의 유기물들에 해당된다. 본 기술을 응용하기 위해서는 Tumbler, Trommels, Sonification, Hydrocyclone, 진동스크린 등의 설비로 미립질 부분을 세립질 토양으로 부터 분별해 낼 수 있으며, 따라서 오염 토양의 부피를 줄이는 동시에 농축을 할 수 있다.

2) 액상처리 시스템(Aqueous-based soil wash system)

액상처리 시스템은 입도분별이 어려운 경우 적용될 수 있는 기술로서 부유 선광의 광물처리 원리를 이용한다. 이때 오염물질은 기포제(계면활성제), 알카

리제, 용제 등을 슬러리화된 오염토양에 투입하여 농축시킨다. 액상처리 시스템은 분쇄된 오염토를 슬러리화하여 부유선광 공정으로 이동시켜 오염물질을 포탈(Froth)로 농축시킨후 복구된 토양은 탈수하여 원위치에 되돌리는 공정들로 구성된다(그림 4-19).

3) Counter Current Decantation(CCD)

CCD방법은 연속적으로 배열된 Thickener들을 이용하여 오염토를 다른 Thickener로 이동시키면서 용제를 이용하여 토양을 정화시키는 추출기술이다. 즉, 제1 Thickener에 토양을 넣고 침전시킨다. 그 다음 펌프를 이용하여 침전된 토양을 제2, 제3 Thickener로 이동시킨다. 한편, 용제, 산/염기, 착제는 최종 Thickener에 투입시켜 토양과 반응케 한다. 반응이 끝난 유통되는 오염물질과 용제는 거꾸로 낮은 번호의 Thickener로 이동시킨다(그림 4-20). 따라서 평형상수는 변화되어 결국 오염물질을 토양으로부터 추출시켜 액상으로 이동시키는 오염세척기술이다.

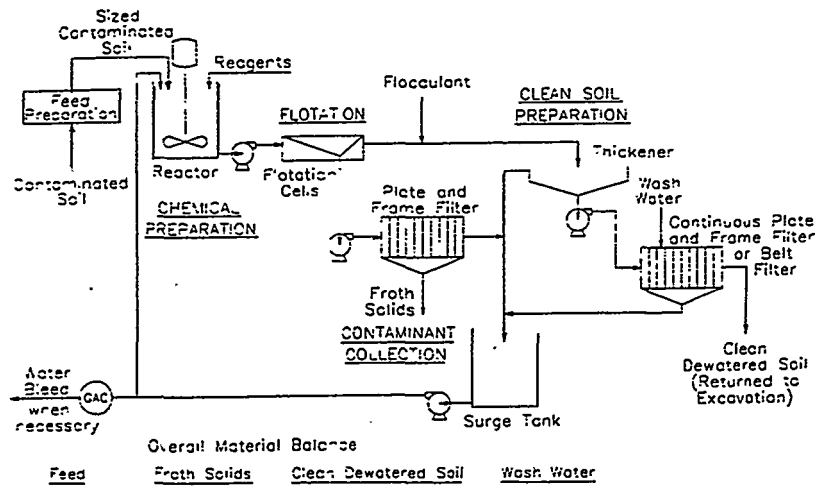


그림 4-19 액상처리 시스템의 공정단위를 포함한 개념도

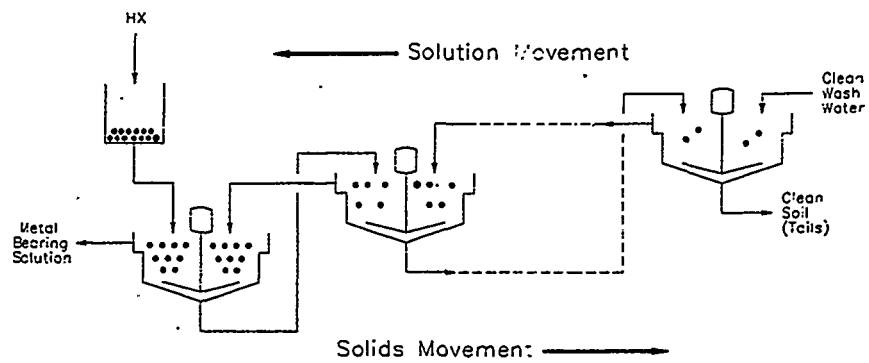


그림 4-20. Counter Current Decantation(CCD)에 의한 중금속 제거 개념도

4-3-3-2 오염토 복원 기술의 문제점

1) 오염물질의 다양성

토양오염으로 복구가 요구되는 오염물질은 다양하게 나타날 수 있다. 여러 종류의 화학적 특성이 다른 중금속들이 혼재할 수 있다. 따라서 토양 세척기술은 오염물질의 다양성 뿐만아니라 유기 및 무기물의 혼합으로 말미암아 적용성이 어려울 수 있다. 한 예로 유기 및 무기 오염토가 섞인 경우를 보면 유기오염물질은 부유선광 혹은 용매추출에 의해 제거될 수 있다. 그러나 무기오염성분은 금속을 용해하고 제거된 금속을 침전시키기 위해서 산/염기/착제를 포함한 CCD 혹은 용출공정이 요구된다.

2) 토양 특성의 다양성

본 조사 보고서에 조사된 광산주변 농경지 대부분은 사질이하였으며 미국 151개 지역 오염토 조사자료(Esposito, 1988) 보고에 따르면 대부분 점토질에서 사질~점토성 토양으로 나타났다(표 4-17).

표 4-17 미국 Sufirfund Site의 토양 특성(Esposito, 1988)

토양	빈도(%)
사질 점토	30
점토	10
사질	20
자료없음	40

따라서 토양세척시스템은 상당량의 미립질 토양을 처리할 수 있어야 한다. 표 4-18에 입도에 따른 중금속의 분포 특성이 수록되어 있다. 표에서 볼 수 있듯이 $-10\mu\text{m}$ 이하 토양이 제거되면 토양오염 세척설비에 투입된 토양(무게)의 31.2%에 오염토에 있었던 총 비소(As)중에 68.6%가 제거될 수 있다. 그러나 Pb는 As처럼 제거효과를 얻지 못하므로 다른 방법이 사용되어야 할 것이다.

따라서 토양특성(입도)이 토양오염제거기술에 매우 중요한 변수임을 알 수 있다.

Prost(1993)가 수집한 토양세척기술의 실내 및 현장 적용 사례의 예를 들면, USEPA mobile extration system(무기, 유기성분 적용), Heijmans Millieutchniek BV(시안, 중금속 등 적용), MTARRI process(As, Cr 및 Zn 등) 등과 같다. 위의 실내 및 현장 적용 사례는 광산폐기물에 의한 토양의 중금속 오염토에 대한 기초적 자료로 활용될 수 있을 것이다.

표 4-18 입도별 중금속 분포 예(Trost, 1993)

입도	wt% fraction	As	wt%	Cd	wt%	Fe	wt%	Pb	wt%
+30Mesh	8.9	800	6	60	7.2	27000	9.7	500	6.7
-30 to +325	41.5	340	11.7	33	17.8	8900	14.4	220	13.3
-325 to +20 μ	12.1	670	6.9	54	8.7	12000	5.8	680	12.3
-20 to +10	7.3	1100	6.8	110	10.7	18000	5.2	1300	14.1
-10 to +5	4.2	2000	7.1	160	9.0	34000	5.7	1500	9.4
-5	27.0	2700	61.5	130	46.7	55000	59.2	1100	44.2

4-3-4. 광산주변 오염토의 복구대책(Soil Washing법 기준)

환경보전법 수질환경 보전법 농수산물 재배 등을 제한 기준치 및 토양오염 대책기준을 초과하는 오염토양은 금번 조사시 확인되지 않았다. 그러나 조사된 토양 시료는 광산별 1개 내외로 채취되어 개략 조사에 불과 하였다. 그러나 정밀 조사에 의하면 상기 기준치를 초과하는 오염토가 확인 될 가능성은 있을 것으로 사료된다. 따라서 본 예비조사 결과에는 오염토가 확인 되지 않았지만 광산주변 토양을 오염시킬 수 있는 무기성분을 대상으로 한 오염토 복원 시나리오를 간략히 기술한다.

1. 실내 시험

- 소량(100~1000g) 오염토에서 중금속 제거 최적조건 규명
최대 오염물질 제거율과 토양오염 복구 수준의 적합성 평가
- 동일조건(광물학적 조건)의 오염토 처리를 위한 토양 종류별, 오염 내용
별, 공정효율 최적화 시험

2. 현장 실증 시험

- 광산주변현장에서 실내시험 결과를 실증하고 운영변수, 복구비용 및
생성된 농축오염물질 처리방법 등을 파악

3. 실제 규모의 오염복구 설비

- 광산주변 오염토에 대한 실제규모의 복구작업 실시

제 5 장 금속광 광해 현황 요약 및 의견

금속광 광해 조사 결과를 요약하면 다음과 같다.

5-1 현장조사 및 실내화학분석

5-1-1 수질조사 내용(표 5-1 참조)

- 조사 대상 - 광산갱도 유출수(갱수), 광산폐기물 적치장 유출수(침출수), 광산주변 지표수(주로 하천수)
- 현장수질 조사항목- pH(수소이온농도), Eh(산화환원전위), TDS(총용존고형물), 전기전도도, 탁도, 용존산소량 등
- 실내화학분석 성분- As, Cd, Pb, Zn, Cu, Fe, Al, Mn, SO_4^{2-} 및 CN 등
- 갯수 및 침출수 수질 특성-

갱수 및 침출수의 수질자료를 환경보전법 수질환경 보전법 시행규칙 제 40조 별표 11과 비교하면 일부 광산 갯수 및 침출수가 상기 법규 기준치를 초과함.

pH(기준치: 5~9) 초과 광산 : 다덕(3.6~4.0), 달성(3.4~3.6), 양구동(4.9), 일광(2.7~4.3)

As(기준치: 0.5mg/ℓ) 초과 광산 : 송천(함태)(0.6mg/ℓ), 동보(1.21mg/ℓ)

Cd(기준치: 0.1mg/ℓ) 초과 광산 : 달성(0.2~0.3mg/ℓ), 일광(0.19mg/ℓ)

Pb(기준치: 1mg/ℓ) 초과 광산 : 양구동(3mg/ℓ)

Zn(기준치: 5mg/ℓ) 초과 광산 : 다덕(11mg/ℓ), 달성(19~20mg/ℓ), 양구동(23mg/ℓ), 일광(15mg/ℓ), 삼보(35mg/ℓ)

Cu(기준치: 3mg/ℓ) 초과 광산 : 함안(9mg/ℓ), 달성(5~20mg/ℓ), 일광(19mg/ℓ),

표 5-1. 조사광산별 물(갱수, 침출수, 폐수 및 지표수), 광미, 토양 화학분석결과

구분	조사광산	광종	광업행위	시료	물(갱수, 폐수 및 지표수)																
					현장측정					실내시험											
										양이온										음이온	
					pH	Eh	DO	Turb	TDS	As	Cd	Pb	Zn	Cu	Fe	Al	Mn	SO ₄ ²⁻	CN		
회수	No.				(mV)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)						
					5-9	<0.5	<0.1	<1	<5	<3	<10	<10	<10	<1							
1차	1	거도	금, 은, 동, 아연, 텅스텐 등	가형	하천수	8.4	225	15.6	179	86	<0.001	0.001	<0.005	<0.001	0.015	0.02	0.15	0.002	22		
			금, 은, 동, 아연, 텅스텐 등	가형	광미																
	2	개 2 연화	연, 아연	소멸	광미																
			연, 아연	소멸	하천수	8.2	221	8.7	175	178	0.008	0.002	<0.005	0.200	0.002	0.02	0.31	0.029	83		
			연, 아연	소멸	하천수	8.2	214	8.5	181	499	0.004	0.001	0.034	0.039	0.001	0.04	0.59	3	459	Nd	
			연, 아연	소멸	광미																
	3	금광	금, 은	휴지	광미																
			금, 은	휴지	토양																
			금, 은	휴지	침출수	8.3	210	6.2	228	287	0.009	0.001	<0.005	<0.001	0.005	0.02	0.24	0.003	144	Nd	
			금, 은	휴지	침출수	7.4	109	5.7	175	256	0.007	<0.001	0.008	<0.001	<0.001	0.05	0.27	2.100	46	0.011	
				금, 은	휴지	침출수	8.3	210	6.2	228	287	0.009	0.001	<0.005	<0.001	0.005	0.02	0.24	0.003	144	Nd
	4	만점(중주)	침	소멸	하천수	7.9	185	7.0	191	221	0.002	0.001	<0.005	<0.001	<0.001	0.04	0.22	0.280	60		
	5	울진	동, 연, 아연	소멸	침출수	6.7	146	7.4	236	180	0.013	<0.001	<0.005	0.610	<0.001	2.81	0.78	1.420	152		
			동, 연, 아연	소멸	하천수	7.1	197	8.8	250	90	<0.001	<0.001	<0.005	0.250	0.003	0.08	0.31	0.330	51		
	6	조일상곡	금, 은, 동	소멸	갱수	8.2	188	7.6	195	162	0.001	0.001	<0.005	0.120	<0.001	0.02	0.30	0.180	28		
			금, 은, 동	소멸	토양																
2차	7	상동	금, 은, 동, 텅스텐	휴지	갱수	7.1	185	3.7	239	506	0.021	0.009	0.023	0.700	0.010	0.01	1.32	0.220	700		
			금, 은, 동, 텅스텐	휴지	갱수	7.8		9.6	295	475	0.036	0.003	<0.005	0.063	0.010	<0.001	1.02	0.009	415		
			금, 은, 동, 텅스텐	휴지	광미																
			금, 은, 동, 텅스텐	휴지	하천수	4.6	270	7.5	330	279	0.012	0.003	0.170	0.200	0.041	0.41	9.36	1.220	277		
			금, 은, 동, 텅스텐	휴지	하천수	6.1	155	8.2	386	328	0.012	0.003	0.120	0.140	0.017	0.94	1.58	1.050	307		
			금, 은, 동, 텅스텐	휴지	하천수	7.3	206	8.3	382	148	0.034	0.002	0.014	0.031	0.013	0.07	0.31	0.086	90		
	8	삼진 신예미	금, 은, 동, 텅스텐	휴지	하천수	8.0	195	8.9	357	514	0.016	0.002	0.061	0.025	0.012	0.01	1.12	0.620	422		
			금, 은, 동, 연, 철, 아연 등	가형	하천수	8.2	236	8.3	330	213	0.010	0.003	0.019	0.110	0.010	0.01	0.55	0.058	100		
	9	다덕	금	휴지	지하수	6.3		5.2		206	0.004	0.011	0.045	2.400	0.100	0.00	0.30	2.600	152		
			금	휴지	침출수	3.6	388	5.2	474	307	0.029	0.022	0.720	11	0.380	0.82	4.16	6.760	248		
			금	휴지	침출수	4.0		4.3		244	0.060	0.046	0.240	9	0.440	2.51	3.40	4.400	225		
	10	금장	연, 아연	소멸	광미																
			연, 아연	소멸	침출수																
	11	금정	금, 은	휴지	갱수	8.2	211	11.1	283	419	0.220	<0.001	<0.005	<0.001	<0.001	0.02	0.37	0.073	263		
			금, 은	휴지	광미																
			금, 은	휴지	광미																
금, 은			휴지	하천수	8.2	224	8.7	178	72	0.053	0.001	<0.005	<0.001	<0.001	0.04	0.09	0.001	32	0.013		
3차	12	군북	금, 은, 동	소멸	갱수	7.2	279	7.0	236	100	0.020	<0.001	<0.005	0.020	<0.001	0.03	0.26	0.020	31	Nd	
	13	함안	금, 은, 동	소멸	갱수	7.6	244	8.2	243	68	0.300	<0.001	<0.005	0.110	0.010	0.05	0.71	0.580	85		
	14	제일	금, 은, 동	소멸	갱수	4.9	299	9.0	334	603	0.020	<0.001	<0.005	0.090	9	0.04	10.60	2.380	718	Nd	
	15	달성	금석	소멸	갱수(하1번)	3.6	377	6.0	222	1412	0.300		20	7	182	16.00	76	2592			
			금석	소멸	갱수(하2번)	3.4	406	3.9	190	924	0.040		5	20	0.50	15.00	11	696			
			금석	소멸	갱수(하3번)	5.1	194	3.6	281	1551	0.240		19	5	214	5.00	80	2778			
			금석	소멸	광미																
	16	다락	금, 은, 연, 아연	소멸	광미																
	17	천의(양덕)	금, 은, 동, 연, 아연	휴지	광미																
			금, 은, 동, 연, 아연	휴지	토양																
18	유천	연, 아연	소멸																		

광미								토양								비고	
실내시험								실내시험									
양이온							음이온	양이온							음이온		
Cd (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	Al (mg/l)	Mn (mg/l)	CN (mg/l)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Al (mg/kg)	Mn (mg/kg)		CN (mg/kg)
0.3	<3		<3				<1	>15				>125					기준치
																	광미장 하부 하천
0.010	0.140	1.700	13	3.0	24	3	Nd										광미장 광미
0.042	0.200	4.1	0.010	0.04	1.08	15											진매골 광미댐
																	제 2 연화 정문 옆 하천
																	진매골광미댐 하부
0.042	1.053	1.7	0.012	0.04	0.79	210											진매골 광미댐
0.001	0.051	0.014	0.013	<0.01	0.40	0.740											광미댐
								0.270	0.006	0.530	0.820	0.930	83	37	14		광미장하부 논토양
																	광미댐 상등수
																	광미댐 하부 암거 배출수
																	광미댐 상등수
																	광산하부 하천
																	광미장 배수
																	광미장폐수가 유입된 하천
																	쟁구알 연못
								0.130	0.033	1	2.310	0.012	0.52	0.89	202		선광장 부근 산토양
																	상동쟁쟁수
																	소백쟁쟁수
0.004	0.350	0.090	0.009	<0.001	1.21	3											신폐재 광미
																	상동광산 상류하천
																	상동 버스정류소 부근
																	신폐재방류수 및 재곡수합수
																	선광장 부근 하천
																	광산정류배수암거
																	광미장 유입수(2차 조사)
																	광미장 배출수
																	광미장 배출수(2차 조사)
0.50	2	55	0.550	<0.01	0.87	0.250											구선광장 부근 도로밀 광미
								0.180	0.28	11	18	3	99	67	6		구 선광장 인접 논토양
																	남2룡동 쟁수
0.016	0.075	0.790	0.017	0.01	1.03	5											남2룡동 알 광미(사면적치)
0.022	0.190	8	0.570	292	54	1.040											광미장(계곡적치)
																	금정국교 밑 하천수
																	광미장 옆(쟁수유입)하류
																	쟁구알
																	쟁구알
																	광해요인 무(혼적분 입)
																	하1번 고도(무딤옆 유출수)
																	하2번 고도(배수암거)
																	하8번쟁 좌측계곡
<0.001	0.240	0.190	1.280	2.82	3	0.260											구광미장 하류측 주변 광미
0.050	0.050	8	0.280	0.14	12	3											광미장, 폐수유출 무
<0.001	0.010	0.230	0.010	0.03	1.46	0.350											광미장, 폐수유출 무
								0.020	<0.001	0.150	0.320	0.200	0.23	10	0.160		광미장옆 산토양
																	광해요인 무(혼적 분 입)

표 5-1. 계속

구분		조사광산	광종	광업행위	시료	물(갱수, 폐수 및 지표수)																	/
						현장측정					실내시험												
											양이온										음이온		
						pH	Eh	DO	Turb	TDS	As	Cd	Pb	Zn	Cu	Fe	Al	Mn	SO ₄ ²⁻	CN			
회수		No.																					
4차	19	덕음	금, 은, 동	휴지	광미															<0			
	20	귀명	금, 은, 동 연, 아연	휴지 소멸	토양																		
	21	양구동	금, 은, 동, 철	휴지	갱수	4.9	276	8.1	386	60	0.050	0.100	3	23	1.040	0.52	4.22	1.630	156				
	금, 은, 동, 철		휴지	광미															<0				
	22	물금	금, 은, 동, 철	휴지	저수지물	6.6	286	6.7	234	518	0.050	0.010	<0.005	15	0.030	0.35	0.80	0.060	19				
	23	일광	금, 은, 동, 중석	소멸	갱수	2.7	560	8.2	208	32	<0.001	0.190	0.190	15	19	177	27.50	5	955				
	금, 은, 동, 중석		소멸	갱수	4.3	309	7.1	221	187	<0.001	0.010	1	1.270	1.240	0.84	4.16	2.000	165					
	금, 은, 동, 중석		소멸	광미															0.1				
	금, 은, 동, 아연		소멸	토양																			
	24	가학	금, 은, 동, 아연	소멸	계곡수	7.1	221	9.5	202	466	0.020	0.010	0.020	0.220	0.020	0.22	0.13	0.010	38				
			금, 은, 동, 아연	소멸	계곡수	7.5	246	7.8	197	402	<0.001	<0.001	<0.005	0.030	Nd	0.43	0.07	0.140	31				
			금, 은, 동, 아연	소멸	계곡수	7.6	239	7.4	385	123	<0.001	0.010	0.030	0.340	0.030	2.11	1.84	0.300	95				
			금, 은, 동, 아연	소멸	하천수	7.4	208	5.0	208	165	0.010	<0.001	0.010	0.360	0.010	0.63	0.22	0.240	70				
	25	삼보	금, 은, 동, 아연	소멸	하천수	8.5	207	9.3	215	200	0.020	<0.001	<0.005	0.070	Nd	1.06	0.14	0.140	40				
연, 아연			휴지	광미														<0					
연, 아연			휴지	토양																			
연, 아연			휴지	토양																			
26	부평	은	휴지	침출수 갱수	6.9 84 6.8 399 43 6.9 84 6.8 399 43	0.070 0.040 0.340 35 0.260 1.68 0.34 17 378 0.050 <0.001 0.040 0.900 0.010 2.66 0.20 19 594																	
5차	27	무극	금, 은	가행	갱수	7.8 227 4.9 217 292	0.089 0.001 <0.005 <0.001 <0.001 0.017 0.35 <0.001 137																
	금, 은		가행	선광장배출수	8.7 174 5.0 237 278	0.061 <0.001 <0.005 <0.001 <0.001 0.02 0.31 <0.001 138																	
	금, 은		가행	폐수처리수	7.9 177 4.5 215 278	0.027 0.001 <0.005 <0.001 <0.001 0.017 0.46 0.005 148											0.1						
	28	금성(기림)	모리브덴, 황수연	소멸	광미																		
	모리브덴, 황수연		소멸	토양																			
	모리브덴, 황수연		소멸	하천수	8.4 66 6.4 224.0 227	0.007 0.001 <0.005 <0.001 <0.001 0.017 0.40 0.032 81.7 Nd																	
	29	제1연화	연, 아연	휴지	하천수	8.2 180 7.8 209 38	0.003 0.001 <0.005 <0.001 <0.001 0.021 0.058 0.03 12.8																
			연, 아연	휴지	갱수	8.4 200 9.7 219 152	0.013 <0.001 <0.005 0.004 <0.001 0.019 0.300 0.019 39.7																
			연, 아연	휴지	하천수	8.0 170 7.6 203 954	0.008 0.001 0.029 <0.001 <0.001 <0.001 0.91 4 1059 Nd																
	30	옥계	금, 은	휴지																			
31	충천(합태)	금, 은, 동	휴지	갱수	7.5 233 10.2 257 180	0.60 <0.001 <0.005 0.027 0.001 0.022 0.21 0.002 61 Nd																	
금, 은, 동		휴지	광미															0.1					
철		휴지	토양																				
32	양양	철	휴지	광미																			
		철	휴지	토양																			
		철	휴지	토양																			
33	은치	금, 은, 동, 아연	소멸	광미															0				
금, 은, 동, 아연		소멸	광미																				
6차	34	삼울소보(한보)	모리브덴, 황수연	휴지																			
	35	쌍전	중석	휴지	광미															4			
			중석	휴지	광미														1				
			중석	휴지	하천수	7.4 231 7.1 220 39	0.58 <0.001 0.003 <0.001 0.002 0.23 0.085 0.087 12.0																
	36	산막	금, 은, 연, 아연, 납	소멸	하천수	7.9 199 7.0 178 220	0.024 <0.001 <0.005 <0.001 <0.001 0.018 0.36 0.054 158.0																
	37	옥방	중석	소멸	하천수	8.0 209 5.7 164 47	0.08 <0.001 0.007 <0.001 0.001 0.032 0.12 0.004 9.0																
			중석	소멸	광미															0.1			
	38	금호(장군)	연, 아연	가행	1수갱 갱수	7.6 181 9.6 380 575	0.072 <0.001 0.054 1.72 <0.001 0.016 0.58 7 535																
연, 아연	가행		침전지방류수	7.6 222 7.4 327 430	0.056 <0.001 0.009 0.40 <0.001 0.022 0.53 1.05 354																		
39	고명	은	소멸	갱수	6.9 -38 9.0 389 486	1.21 <0.001 0.079 0.26 <0.001 12 0.57 10 397																	
40	동보	금, 은, 동, 연	소멸	광미																0.0			

1. 갱수 및 폐수항 기준치: 환경보전법 수질환경보전법 시행규칙 제 40조 별표 11
2. 광미項 기준치: 폐기물 관리법 유해물질 함유기준 시행규칙 제 2조 별표 3
3. 토양項 기준치: 환경보전법 수질환경보전법 시행령 제 30조 별표 6
(농산물 재배 등을 제한할 수 있는 오염기준)

pH: 수소이온농도, Eh(Oxidation Potential): 산화환원전위,
DO(Dissolved Oxygen): 용존산소량, Turb(Turbidity): 탁도,
TDS(Total Dissolved Solid): 총용존고형물

광미								토양								비고	
실내시험								실내시험									
양이온							음이온	양이온							음이온		
Cd (mg/l) <0.3	Pb (mg/l) <3	Zn (mg/l)	Cu (mg/l) <3	Fe (mg/l)	Al (mg/l)	Mn (mg/l)	CN (mg/l) <1	As (mg/kg) >15	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg) >125	Fe (mg/kg)	Al (mg/kg)	Mn (mg/kg)		CN (mg/kg)
0.020	<0.005	1.510	<0.001	0.02	0.03	1.160		0.230	<0.001	<0.005	0.500	0.020	0.07	0.23	0.740		기층지
																	광미장, 폐수 유출 무
																	광미장 하부 논
																	광해요인 무(혼적 불 입)
																	쟁구
0.150	6	21	4	0.04	1.24	0.450											광미장
																	마홀리저수지
																	현재 레미론 공장으로부터(쟁구, 폐기물 전무)
																	5번쟁구 아래
																	광산 하부 논 유입수
<0.001	<0.005	0.110	0.320	0.04	0.69	0.100		0.090	<0.001	<0.005	0.140	0.020	0.04	0.01	0.200		광미장
																	광산하부 50m 논
																	쟁구밑유출수
																	광미장하부(우)
																	광미장하부(좌)
																	광미장 하부 1km
																	하부하천 간이댐
0.030	0.080	8	<0.001	0.02	0.05	7		0.020	<0.001	<0.005	0.200	Nd	0.08	0.18	0.470		광미장
								<0.001	0.010	0.040	2.520	0.020	0.04	0.48	1.100		광미장하부 논
																	선광장하부 논
																	광미장하부
																	수정유출수
																	쟁구, holding basin
																	선광장 처리수 저장조
																	폐수처리장 방류수
<0.001	0.029	0.029	0.01	0.015	0.89	0.26		0.013	0.007	0.094	0.66	0.025	0.11	14	13		광미장(회색, 실트질 이하)
																	광미장 하류 주변 밭
																	광미장 하류하천
																	이천교 밑
																	중앙쟁 직하부
																	제2댐 하류 계곡
																	광해요인 미미(쟁구, 광미 무)
0.16	2.35	43	3	332	14	0.21											광산폐기물 적치장부근 과육
<0.001	0.019	0.068	0.008	0.013	0.44	0.074											선광장 부근 광산폐기물 적치장
								0.118	0.025	0.43	3.37	0.037	437	62	26		광미장(암회색 사질입도 이하), 폐수유출 무
								0.047	0.008	0.23	1.99	0.26	28	27	25		광산하부 논토양(실트질)
0.20	0.12	37	0.15	26	11	10											광산하부 갈자밭(사질, 암회색)
1.73	1.73	156	0.78	0.43	0.55	12											광산폐기물 적치장(사질), 평지적치
																	광산폐기물 적치장(사질), 평지적치
<0.001	0.17	0.130	0.21	42	0.94	0.055											광해요인 무(폐수, 폐석, 광미 무, 시방공사완료)
<0.001	0.065	0.050	0.19	5.24	1.06	0.034											중앙쟁하부 굴터 (1t 정도)
																	광산정문 옆 하천변 광미장(사질)
																	광미장 아래하천
																	과산하류 극도변 인접하천
<0.001	2	0.760	0.084	22	5	1.450											광산폐기물(폐석)적치장부근 하천
																	광미장
																	현장사무소 옆
																	광업소 정문 하부하천
																	선광장 문근에서 유출
<0.001	0.045	0.230	0.009	0.01	0.89	1.26											광산폐기물 적치장(사질), 평지적치

Fe(기준치: 10mg/ℓ) 초과 광산 : 달성(0.5~214mg/ℓ), 일광(177mg/ℓ),
고명(12mg/ℓ)

Mn(기준치: 10mg/ℓ) 초과광산 : 달성(11~80mg/ℓ), 삼보(17mg/ℓ),
부평(19mg/ℓ), 동보(10.4mg/ℓ)

기타 Al(기준치 없음) : 달성(5~16mg/ℓ), 일광(28mg/ℓ)

● 광산주변 지표수 수질 특성-

광산주변의 하천수 수질을 환경정책 기본법 제 10조 환경 기준 중 하천
에 대한 수질기준과 비교하면 일부광산 지역의 하천에서 광산개발로 인
한 하천등이 오염된 것으로 나타남.

● 금정광산 금정국교 하부 하천 : As(0.05 mg/ℓ) 및 시안(CN)성분이 검출

● 옥방광산 하부 하천 : As(0.08 mg/ℓ)

● 쌍전광산 광산폐기물 보관장 하부 하천 : As(0.58mg/ℓ)

● 상동광산 인접 옥동천- pH가 4.6으로 측정되어 공업용수 2급수 이하 수
질로 나타났고 Pb(0.17mg/ℓ)가 검출되었다. 상동광산 주변의 옥동천이
산성의 하천으로 오염된 주 원인은 옥동천 상류 지역에 위치한 휴.폐탄광
폐수의 유입에 의한 것으로 판단된다.

5-1-2 광산폐기물(광미사)

본 보고서에서 사용되는 광산폐기물이란 선광작업과정에서 생성된 사질 입
도의 고체물질로서 광산주변에 적치된 폐기물로서 편의상 정의함.

● 분석방법: 폐기물 관리법 폐기물 용출시험법 기준

● 분석결과: 폐기물 관리법 유해물질 함유기준 시행규칙 2조 별첨 3의
기준치와 비교

● 상기 기준치를 초과한 광산폐기물 적치 광산명

As(기준치: 1.5 mg/ℓ) : 금정(16 mg/ℓ), 쌍전(47mg/ℓ), 송천(6mg/ℓ),

은치($3\text{mg}/\ell$)

Cu(기준치: $3\text{mg}/\ell$) : 거도($13\text{mg}/\ell$), 양구동($3.7\text{mg}/\ell$)

Cd(기준치: $0.3\text{mg}/\ell$) : 금장($0.5\text{mg}/\ell$), 은치($1.73\text{mg}/\ell$), 고명($0.4\text{mg}/\ell$)

5-1-3 광산 주변 토양

- 분석방법: 수질오염 공정시험법(토양편) 기준
- 분석결과: 환경보전법 수질환경보전법 시행령 제 30 조 별표 6 (농산물 재배제한) 기준치와 비교
- 조사된 광산주변 토양중 As(재배제한 기준치: $15\text{mg}/\text{kg}$ 이상) 및 Cu(재배 제한 기준치: $125\text{mg}/\text{kg}$ 이상)의 함량은 기준치 이하로 나타났다. 광산주변 토양에 대한 분석결과 함량 범위는 다음과 같았다.

Cd($<0.001 \sim 0.28\text{mg}/\text{kg}$)

Cu($<0.001 \sim 3\text{mg}/\text{kg}$)

As($0.001 \sim 0.27\text{mg}/\text{kg}$)

Pb($0.005 \sim 11\text{mg}/\text{kg}$)

본 토양오염 조사는 개략조사로서 시료채취 위치 및 분석 前處理(특히 分解방법) 과정에 따라서 각 광산 주변의 중금속 함량은 차이가 날 것으로 사료됨.

5-2 광산폐수 및 침출수에 의한 수질오염 방지 대책

5-2-1 광산폐수 및 침출수 수질 특성

- 酸性水, As, Cd, Pb, Zn, Cu, Fe, Al 및 Mn 등 중금속으로 오염된 산성폐수

대표적 광산- 달성광산, 일광광산, 다덕광산 광산폐기물(광미사 보관장)

5-2-2 소택지 실내시험

- 기질물질(버섯퇴비, 톱밥퇴비, 일반퇴비 및 부식토), 우분 및 석회석을 이용한 소택지가 금속광 산성 광산폐수를 정화 할 수 있는 가능성 실증

- 정화가능성분(표 5-2)

pH 중화,

Zn, Cd, Cu, Fe 및 Al 등 중금속 성분은 1일 경과 후 방류수 수질기준치 이하로 정화됨

5-2-3 수질오염 방지대책

- 중금속을 함유한 산성광산폐수로 부터 수질 및 주변 토양오염을 방지하기 위한 무동력 무인력 정화 대책 :

- 광산폐수 유출 개소에 다음의 공정들을 설치하여 광산폐수를 자연적으로 중화 및 정화시켜 방류시킴(그림 5-1)

1. 집수지(산성폐수 집수, 석회석 충전, 안정화 및 균일화)
2. 혐기성 소택지(버섯퇴비+우분 소택지, pH 중화 및 As, Cd, Pb, Zn, Cu, Fe, Al 제거)
3. 호기성 소택지(망간등 제거, TDS 제거)
4. 침전지(부유물질 제거)
5. 방류

- 인공소택지 건설시 소택지내 광산폐수 유로방향은 소택지 정화능력 및 수명에 매우 중요한 설계변수이므로 소택지 설계시 이에대한 고려가 있어야 함. (그림 5-2 및 그림 5-3)

표 5-2 버섯퇴비 및 우분의 기질물질을 이용한 산성폐수 정화 성적표

시험 항목	원폐수 농도 (mg/ℓ)	정화후 농도(mg/ℓ)			정화효율 (%)	방류수수질 기준(mg/ℓ)	경과시간	기준치
pH	3	버섯퇴비+우분	7.54	평균 7.4	중성	5~9	1일	통과
		버섯퇴비+우분 +석회석	7.30					
Zn	16	버섯퇴비+우분	0.461	0.4	98	5	1일	통과
		버섯퇴비+우분 +석회석	0.423					
Cd	0.237	버섯퇴비+우분	0.012	0.01	96	0.1	1일	통과
		버섯퇴비+우분 +석회석	0.017					
Cu	3.516	버섯퇴비+우분	0.124	0.1	97	3	1일	통과
		버섯퇴비+우분 +석회석	0.091					
Fe	90	버섯퇴비+우분	0.563	1	99	10	1일	통과
		버섯퇴비+우분 +석회석	2.134					
Al	4.675	버섯퇴비+우분	0.011	0.02	99.5	없음	1일	-
		버섯퇴비+우분 +석회석	0.026					

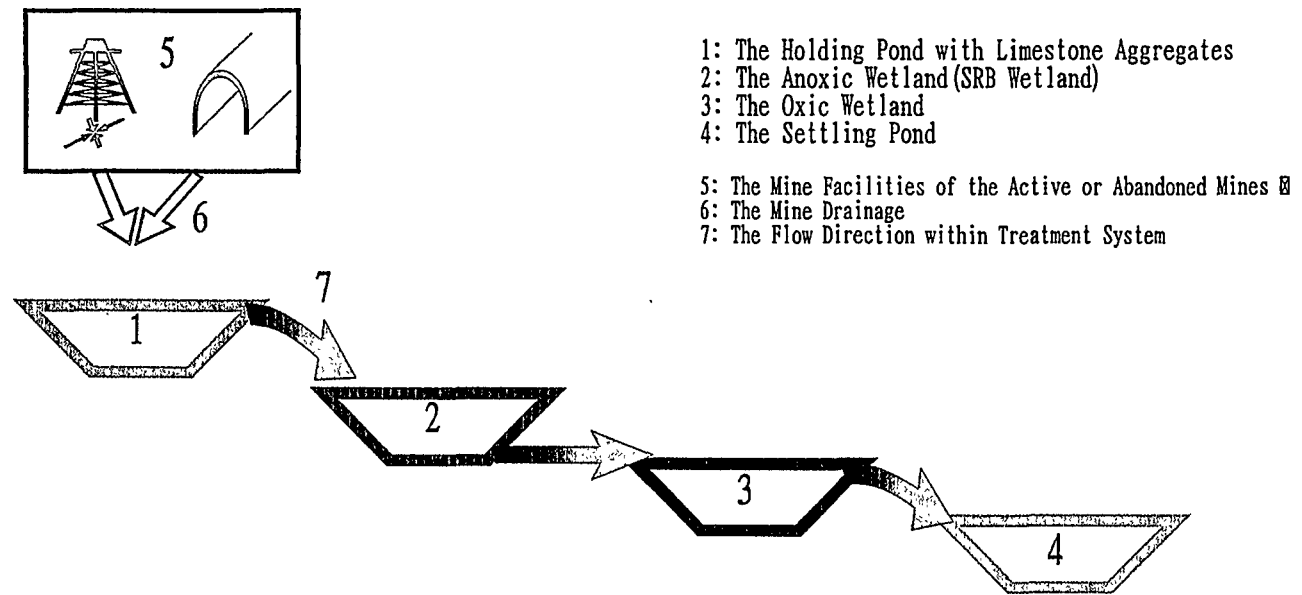


그림 5-1. 광산폐수 유출개소에 광산폐수 정화를 이용한 소택지 설계 개념
(집수지, 소택지, 침전지 등의 무동력 무인력 공정을 배열하여 광
산폐수의 산도 및 중금속을 정화함이 본 시스템의 목적임).

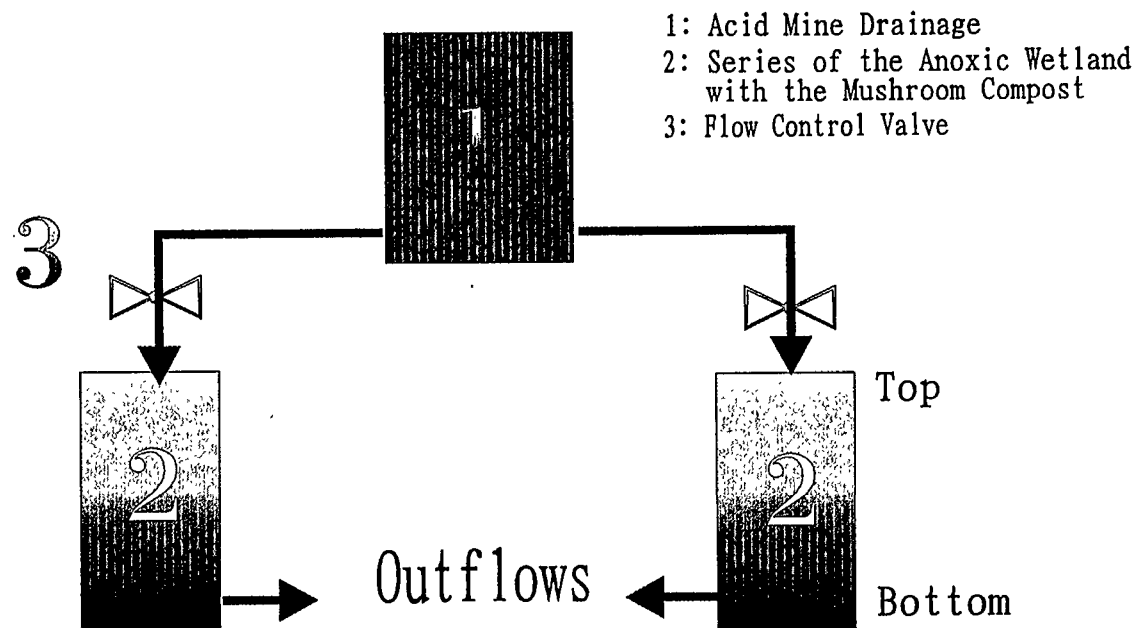


그림 5-2. 소택지내 폐수의 유로방향 (하향식)

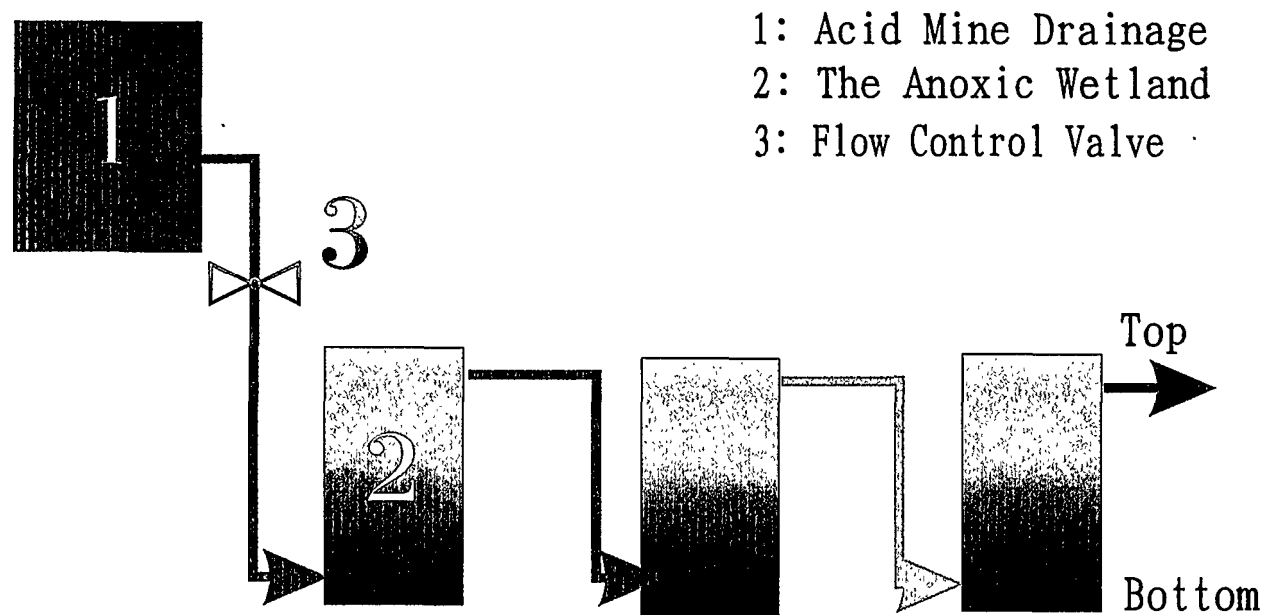


그림 5-3. 소택지내 폐수의 유로방향 (상향식)

5-3 광산폐기물 보관대책

5-3-1 광산폐기물 적치장 문제점

⊗ 광산폐기물 보관장

- 대규모 광미장 : 붕괴 위험성(상동광산 신평재 일부구간 광미 유실)
- 사면 적치 : 침식발생(금정광산)
- 평지적치 : 축벽붕괴, 비산유발(거도광산, 은치, 조일상곡등)
- 계곡적치 : 암거붕괴로 인한 광미장 내부로 하천수유입(쌍전광산)

⊗ 유해성분 함유 산성 침출수 발생 → 하천 유입(다덕광산)

⊗ 특정유해물질(As, Cu, Cd 및 Pb) 용출 → 지하수, 지표수 및 토양 오염 가능성

5-3-2 광산폐기물 보관대책

⊗ 유로관리, 산소 소모 물질 및 산소차단 물질 피복으로 황화물의 산화작용 억제 (다덕광산)

⊗ Liner System 설치

5-4 토양오염 방지 대책

⊗ 각 광산 주변의 토양에 대한 개략조사 및 화학분석 결과 농산물 재배를 제한 할 수 있는 농도 이상으로 오염된 토양은 확인 할 수 없었다.

⊗ 그러나 조사된 토양은 극히 일부지점에서 채취된 개략 탐사 수준이었고 시료채취 위치 및 분석방법(특히 酸處理 작업)에 따라서 토양 중의 중금 속 함량은 크게 달라질 수 있다.

⊗ 광산주변 토양오염을 막는 가장 기초적인 순서는 광산폐수의 농경지 유 입을 차단하고 특정 유해물질이 함유된 광산폐기물의 유실을 방지하는 것으로 판단되며 심각하게 오염된 토양이 확인될 경우 토양세척(Soil Washing)등 오염토 복원기술을 현장에 적용, 오염물질을 제거해야 할 것이다.

제 6 장 결론

1. 조사된 금속광산은 총 40개였으며 이들 조사대상광산들은 대부분 개발이 상당히 진행되었거나 광해가 예상되는 휴·폐·가행광산지역으로 민원이 발생한 바 있고 언론에 보도되었던가 국민 생활 환경과 밀접한 지역내에 소재한 광산들이었다. 따라서 이들 광산들의 광해실태를 파악하여 환경개선 및 보전을 위한 기본자료를 획득하고 또한 광해로부터 발생하는 환경오염을 줄일 수 있는 대책을 마련하고자 본 연구가 수행되었다.

본 연구의 환경오염 실태 조사 및 광해 대책 연구의 주요 대상은 물(갱수 및 침출수), 광산폐기물(광미사) 및 광산 주변의 일부 토양이었다.

2. 광산갱수, 광미장 유출수(침출수) 및 광산주변 지표수에 대해서
 - 현장에서 pH(수소이온농도), Eh(산화환원전위), TDS(총용존고형물), 전기전도도, 탁도, 용존산소량 및 수온 등을 측정하였다.
 - 실내에서 As, Cd, Pb, Zn, Cu, Fe, Al, Mn, SO_4^{2-} 및 CN 등 광산개발과 관련되는 성분들을 주로 하여 화학분석 되었다.
3. 갯수 및 침출수는 주로 Cd, Zn, Cu, Fe, Mn 및 Al등의 중금속으로 오염되어 있고 일부 광산폐수 및 침출수는 pH가 3~4 정도의 산성폐수였다. 환경보전법 수질환경 보전법 시행규칙 제 40조 별표 11의 기준치를 초과하는 주요 광산폐수는 다음과 같다.

달성광산 갯수에서 pH(3.4~3.6)는 산성 이었고 Cd($0.2\text{mg}/\ell \sim 0.3\text{mg}/\ell$), Zn($19\text{mg}/\ell \sim 20\text{mg}/\ell$), Cu($5\text{mg}/\ell \sim 20\text{mg}/\ell$), Fe($0.5\text{mg}/\ell \sim 214\text{mg}/\ell$), Mn($11 \sim 80\text{mg}/\ell$) 및 Al($5 \sim 16\text{mg}/\ell$)등의 성분에 의해 오염된 폐수였다.

일광광산 갯수의 수질 조성은 달성광산 폐수 수질과 유사한 특징을 갖는다. pH(2.7~4.3)가 낮은 산성 폐수로 Cd($0.19\text{mg}/\ell$), Zn($15\text{mg}/\ell$), Cu($19\text{mg}/\ell$), Fe($177\text{mg}/\ell$) 및 Al($28\text{mg}/\ell$)등으로 오염된 폐수였다.

양구동 광산 갯수 또한 산성 폐수로(pH: 4.9) Pb(3mg/ℓ) 및 Zn(23mg/ℓ)으로 오염되어 있다.

한편 광미 보관장 유출수인 다덕광산 침출수는 pH가 3.6~4.0의 산성 폐수로 Zn(11mg/ℓ)로 오염되었다.

기타 산성수는 아니지만 동보(Mn: 10.4mg/ℓ, As: 1.21mg/ℓ), 삼보(Zn: 35mg/ℓ, Mn: 17mg/ℓ), 함안(Cu: 9mg/ℓ), 고명(Fe: 12mg/ℓ), 송천(함태)(As: 0.6mg/ℓ) 및 부평(Mn: 19mg/ℓ)광산 등의 갯수들도 유해물질이 함유된 광산수를 유출 시키고 있었다.

4. 광산 주변 지표수의 수질조사 결과, 주로 하천수를 오염 시키는 유해물질 성분으로 As(옥방광산 하부 하천: 0.08 mg/ℓ, 쌍전광산 광산폐기물 보관장 하부 하천: 0.58mg/ℓ, 금정광산 금정국교 하부 하천: 0.05 mg/ℓ)이었고 금정광산 부근 하천에서 시안이 검출 되었다. 한편 상동광산 인접 옥동천은 pH가 4.6으로 공업용수 2급수 이하 수질로 나타났으며 Pb(0.17mg/ℓ)가 검출되었다. 상동지역 옥동천의 오염은 상동광산 상류에 위치한 휴·폐탄광 폐수의 유입에 의한다.

5. 광산폐기물은 선광과정 후 발생되어 광산주변에 적치(방치)된 폐기물로서 폐기물 관리법 폐기물 용출시험법 기준에 준하여 화학분석 되었다.

금정(As: 16 mg/ℓ), 쌍전(As: 47mg/ℓ), 송천(As: 6mg/ℓ), 은치(As: 3mg/ℓ, Cd: 1.73mg/ℓ), 거도(Cu: 13mg/ℓ), 양구동(Cu: 3.7mg/ℓ), 금장(Cd: 0.5 mg/ℓ) 및 고명(Cd: 0.4mg/ℓ)광산에 적치(방치)된 광산폐기물들이 폐기물 관리법 유해물질 함유기준 시행규칙 2조 별첨 3의 기준치를 초과 하는 것으로 분석되었다.

6. 광산 주변 토양은 광산폐기물이 방치되어 유실 가능성이 있고 또한 광산폐수가 유입되는 토양을 대상으로 수질오염 공정시험법(토양편) 기준으로 하

여 화학분석 되었다.

광산주변 토양에 대한 분석결과 함량 범위는 Cd(<0.001~0.28mg/kg), Cu(<0.001~3mg/kg), As(0.001~0.27mg/kg), Pb(0.005~11mg/kg)등이 있으며 환경보전법 수질환경보전법 시행령 제 30 조 별표 6 (농산물 재배 제한) 기준치인 As(15mg/kg이상) 및 Cu(125mg/kg이상)의 함량을 초과 하는 토양 시료는 확인되지 않았다.

한편 본 토양오염 현황 조사는 개략조사로서 동일광산에서 조차 시료채취 위치 및 분석전처리(특히 분해방법) 과정에 따라서 토양중 중금속 함량은 크게 달라 지므로 환경 토양 시료에 대한 자료들의 비교 및 평가시 이를 충분히 고려 해야 될 것이다.

7. 무동력 무인력에 의한 광산폐수 및 침출수 정화 기술(인공 소택지)을 개발하기 위해 실내시험을 하였다.

실험 결과 버섯퇴비, 우분(牛糞) 및 석회석을 충전한 반응조가 산성폐수를 24시간 내에 중화 시켰고 특히 Zn(정화효율: 98%), Cd(96%), Cu(97%), Fe(99%) 및 Al(99.5%)등의 광산폐수의 주 오염성분이 1일 이내에 방류수 수질 기준치 이하로 제거되었다. 따라서 본 조사 결과 확인된 달성광산, 일광광산 및 다덕광산등 광산 산성폐수를 인공 소택지 건설에 의한 정화 가능성을 확인 하였다.

광산주변 수질 및 토양오염 방지를 위해 광산폐수 유출 개소에 혐기성 소택지(버섯퇴비+우분+석회석 소택지) 공정단위를 설치하여 pH 중화 및 As, Cd, Pb, Zn, Cu, Fe, Al를 제거하고 호기성 소택지(망간등 제거, TDS 제거) 공정을 거쳐 침전지에서 부유물질 제거하고 방류 시키는 무동력 무인력 산성폐수 처리 시스템을 중금속을 함유한 광산산성폐수 정화방법으로 제안하고자 한다.

8. 광산폐기물 적치장 문제점으로 대규모 광미장의 경우 광미장의 안정성

(Slope Stability)(상동광산 신펜재 일부구간 붕괴)이 가장 문제점으로 판단되었다. 사면 적치의 경우, 침식현상이 가장 흔하여(예: 금정광산) 광산폐기물이 유실된다. 평지적치의 경우, 축벽붕괴, 비산유발(거도광산, 은치, 조일상곡등)로 하천등으로 유실되고 있다. 계곡적치의 경우, 계곡수 배수 암거가 파손되어 광미장 내부로 하천수 유입되기도 한다(쌍전광산). 따라서 유로관리, 옹벽 및 축대 설치등을 통해 광산폐기물의 이동을 막는 구조물의 보수 및 설치가 요망된다.

광산폐기물중에 황화광물의 함유로 인해 산성 침출수가 발생하며 (다덕광산) 특히 가행광산인 금호(구·장군)광산 광미댐 방류수에서 광산폐수의 전형인 Yellowboy현상이 관찰된다. 이러한 광산폐기물 관리장으로 부터 광산 침출수 생성(황화광물의 산화작용) 방지를 위한 유로관리와 함께 산소소모 물질 및 산소차단 물질을 이용한 광산 침출수 생성 방지를 위한 피복기술(Cover System)도 개발되어야 할 것이다

9. 일부 광산 주변의 토양에 대한 개략조사 및 화학분석 결과 농산물 재배를 제한 할 수 있는 농도 이상으로 오염된 토양은 확인 할 수 없었다. 그러나 조사된 토양은 극히 일부지점에서 채취된 개략 탐사 수준이었고 시료채취 위치 및 분석방법(특히 酸處理 작업)에 따라서 토양중의 중금속 함량은 크게 달라질 수 있다.

광산주변 토양오염을 막는 가장 기본적인 순서는 토양 오염유발시설(위치)인 광산폐기물 적치장과 광산폐수 유출개소로 부터 토양오염이 발생하므로 광산폐수의 농경지 유입을 차단하고 특정 유해물질이 함유된 광산폐기물의 유실을 방지해야 할 것이다. 차후에 심각하게 오염된 토양이 확인될 경우 오염토 복원기술(예 토양세척 기술등)을 개발하여 토양중의 오염물질을 제거해야 할 것이다.

< 참고문헌 >

1. 민정식, 권광수, 조원재, 이동찬, 이명호, 이현주, 1993, 폐광에 따른 광산지역의 환경개선연구(III), 한국자원연구소 KR-93-7C-3 연구보고서, p. 1-106
2. 민정식, 조원재, 이동찬, 황영남, 송원경, 최병희, 1991, 폐탄광의 폐광도에 대한 조치방안 연구, 한국자원연구소 KR-91-7E-1 연구보고서, p. 267-367
3. 박송자, 1995, 토양오염 측정기술, 한국과학기술원 환경복원 및 재생기술 Workshop, p. 27-45
4. 장부규, 전기일, 박출재, 1994, 수질오염관리, 지구문화사, p. 131-146
5. Bell, A. V., Riley, M. D. and Yanful, E. K., 1994, Evaluation of a Composite Soil Cover to Control Acid Waste Rock Pile Drainage, Proceedings of 1994 International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, April 24-29, 1994, Pittsburgh, PA, p. 113-121
6. CANMET, 1994, Evaluation of Alternate Dry covers for the Inhibition of Acid Mine Drainage from Tailings, SENES Consultants Limited, p. 1-1-6-10
7. Cevaal, J. N. and Whiting, D., 1994, Treatment of Mine Drainage Using Passive Biological System-design and Results from a full-scale system, The Mining Environmental Management Conference, Oct. 1994, Reno, Nevada, p. 1-16
8. Cheong, Y. W. and Thorton, I., 1994, Acid Mine Drainage and Heavy Metal Contamination of Stream Sediments in the Okdong-cheon Stream, Sandong Area, South Korea Econ. Environ. Geol., vol 27, p. 101-113
9. Darryl H. Dvorak, Robert S. Hedin, Harry M. Edenborn, and Pamela E. McIntire, 1992, Treatment of Metal-contaminated Water using Bacterial Sulfate Reduction: Results from Pilot-scale Reactors, Biotechnology and Bioengineering, vol. 40, p. 609-616
10. Davé, N. K. and Vivvyurka, A. J., 1994, Water Cover on Acid Generating Uranium Tailings- Laboratory and Field Studies, Proceedings of 1994 International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, April

11. Dietz, J. M., Watta, R. G., and Stidinger, D. M., 1994, Evaluation of Acidic Mine Drainage Treatment in Constructed Wetland Systems, Proceedings of 1994 International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, April 24-29, 1994, Pittsburgh, PA, p. 70-79
12. Eger, P., Wagner, J. R., Kassa, Z., and Melchert, G. D., 1994, Metal Removal in Wetland Treatment Systems, Proceedings of 1994 International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, April 24-29, 1994, Pittsburgh, PA, p. 80-88
13. Fraser, W. W., and Robertson, J. D., 1994, Subaqueous Disposal of Reactive Mine Waste: An Overview and Update of Case Studies-Mend/Canada, Proceedings of 1994 International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, April 24-29, 1994, Pittsburgh, PA, p. 250-259
14. Fyson, A., Kalin, M., and Adrian, L. W., 1994, Arsenic and Nickel Removal by Wetland Sediments, Proceedings of 1994 International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, April 24-29, 1994, Pittsburgh, PA, p. 109-118
15. Hedin, R. S., Narin, R. W. and Kleinmann, R. P., 1994, Passive Treatment of Coal Mine Drainage, USBM, IC-9389, p. 2-35
16. Hedin, R. S. and Watzlaf, G. R., 1994, The Effects of Anoxic Limestone Drains on Mine Water Chemistry, Proceedings of 1994 International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, April 24-29, 1994, Pittsburgh, PA, p. 185-194
17. Hellier, W. W., Giovannitti, E. F., and Slack P.T., Best Professional Judgement Analysis for Constructed Wetlands as a best available Technology for the Treatment of Post-mining Groundwater Seeps, Proceedings of 1994 International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic

Drainage, April 24-29, 1994, Pittsburgh, PA, p. 60-69

18. Hutchison, I. P. G. and Ellison, R. D., 1992, Mine Waste Management, Lewis Publishers, Michigan, p. 67-569
19. Jones, C. E. and Wong, J. Y., 1994, Shotcrete as a Cementitious Cover for Acid Generating Waste Rock Piles, Proceedings of 1994 International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, April 24-29, 1994, Pittsburgh, PA, p. 104-112
20. Lapakko, K. A., 1994, Subaqueous Disposal of Mine Waste: Laboratory Investigation, Proceedings of 1994 International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, April 24-29, 1994, Pittsburgh, PA, p. 270-278
21. Manahan, S.E., 1979, Environmental Chemistry, Willard Grant Press, Boston, p. 15-179
22. Phillips, P., Bendor, J., Simms, R., Rodriguez-Eaton, S., and Britt, C., 1994, Manganese and Iron Removal from Coal Mine Drainage by Use of a Green Algae-microbial Mat Consortium, Proceedings of 1994 International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, April 24-29, 1994, Pittsburgh, PA, p. 99-108
23. Pierce, W. G., Belzile, N., Wiseman, M. E. and Winterhalder, K., 1994, Composted Organic Wastes as Anaerobic Reducing Covers for Long Term Abandonment of Acid-generating Tailing, Proceedings of 1994 International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, April 24-29, 1994, Pittsburgh, PA, p. 148-156
24. Sawyer, C. N. and McCarty, P. L., 1978, Chemistry for Environmental Engineering, McGraw-Hill, Tokyo, p. 194
25. Scharer, J. M., Sarga, V., Smith, R and Halbert, B. E., 1991, Use of Steady State Models for Assessing Acid Generation in Pyrite Mine Tailings, Proceeding of the 2nd International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, Montreal, p. 211-230

26. Sengupta, M., 1993, Environmental Impacts of Mining, Lewis Publishers, London, p. 129-136
27. Snoeyink, V.L. and Jenkins, D., 1980, Water Chemistry, John Wiley & Sons, New York, p. 243-298
28. Stark, L. R., Williams, F. M., Stevens Jr., S. E., and Eddy, D. P., 1994, Iron Retention and Vegetative Cover at the Simco Constructed Wetland: An Appraisal through Year Eight of Operation, Proceedings of 1994 International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, April 24-29, 1994, Pittsburgh, PA, p. 89-98
29. St-Arnaud, L., 1994, Water Covers for the Decommissioning of Sulfidic Mine Tailings Impoundments, Proceedings of 1994 International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, April 24-29, 1994, Pittsburgh, PA, p. 279-287
30. Tremblay, R. L., 1994, Controlling Acid Mine Drainage Wastes Properties Used to Build Cover Systems, Proceedings of 1994 International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, April 24-29, 1994, Pittsburgh, PA, p. 122-127
31. Trost, P. B., 1993, Soil Washing *in* Geotechnical Practice for waste Disposal(edn: D. E. Daniel), p. 585-603
32. Wildeman, T. et al., 1993, Wetland Design for Mining Operations, Bitech Ltd. Richmond. B. C.
33. Young, R. N., Mohamed A. M. O. and Warkentin, B. P., 1992, Principles of Contaminant Transport in soils, Amsterdam, Elsevier, p. 71-72

研究報告 KR-95(C)-37

鑛山地域鑛害對策研究

1996년 2월 일 인쇄

1996년 2월 일 발행

발행소: 대전광역시 유성구 가정동 30

재단법인 한국자원연구소

발행인: 강 필 종

인쇄: 응진문화사