

다덕광산 주변 토양에서의 금속 및 시안의 분포와 산성침출수 생성

정영욱, 민정식, 김인기, 김옥환, 이승길*, 우종한*, 최광호*

한국자원연구소 자원개발연구부
*코오롱엔지니어링 환경기술연구소

Distirbution of Metals and Cyanide in Soils and Acid leachate Occurrence around the Daduck mine

Cheong Young-Wook, Min Jeong-Sik, Kim In-Kee, Kim Ok-Whan,
Lee Seung-Kil* Woo Jong-Hwan* and Choi Kwang-Ho*

Resource Development Department, KIGAM

**Research & Development Center, KOLON ENG. & CONST., Co., Ltd*

ABSTRACT

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

Key Words: Daduck mine, Tailings, Acid leachate, Soil contamination

요 약 문

경북 봉화군에 소재한 폐광산인 다덕광산 광미장 및 인근 농경지를 대상으로 금속성분 및 시안의 분포특성과 광미장을 통과하여 방류하는 산성침출수의 생성원인을 파악하였다. 토양오염 공정 시험법에 의한 분석자료에 의하면 광미장 주변의 논 및 밭에서 As이 농경지 토양오염대책 기준인 15 mg/kg을 초과하여 광미의 유입에 의해 토양이 오염되는 것으로 나타났다. 광미중에는 As, Cd, Cu, Pb, Zn 및 S 등이 매우 높게 함유된 것으로 나타났고 특히 산화가 진행된 광미장 지표면 부근의 광미에는 이러한 성분들이 용탈되어 산성침출수가 농수로 방류되고 있다. 따라서 토양오염 및 농수로의 오염의 확산 방지를 위해서는 광산주변에 산재하고 있는 광미 및 광미장에 대한 환경오염방지 대책이 필요하다고 판단된다.

주제어 : 다덕광산, 광미, 산성침출수, 토양오염

1. 서 론

국내 금속광산 중 상당수의 광산들은 현재 휴·폐광된 상태로써 휴·폐광지역에는 광산 개발시 발생한 광산폐기물(폐석 및 광미사)과 폐갱구, 폐시설물, 폐공가 들이 그대로 방치된 경우가 흔하다. 특히 광미장 혹은 방치된 일부 광미들중에는 중금속 및 시안화합물이 함유되어 있다. 그러나 현재 일부 광미장은 복토 매립되어 농경지로 활용되고 있으며 광미사가 주변 농경지 및 농수로로 유실되기도 한다. 따라서 폐광된 금속광산 주변에 잔존하고 있는 광미적치장은 폐광산 주변의 건강한 토양보호에 매우 중요한 토양오염 유발시설물로 작용하게 된다¹⁾²⁾.

본 연구는 경북 봉화군에 소재한 폐광산인 다덕광산 광미장 및 인근 농경지를 대상으로 금속성분 및 시안의 분포특성과 산성침출수의 생성원인을 규명하고 안전한 농경지 및 수질관리에 기초자료를 제공함이 목적이다.

2. 연구방법

2.1 조사지역 개관

다덕광산은 경북 봉화군 봉성면 우곡리 566번지에 소재한 광산으로 1935년부터 1945년 까지 가행한 폐광산이다. 다덕광산 주변에는 선광장 구조물, 폐갱도 및 광미장 등 광산 시설물이 존재한다. 광미는 대부분 광미장에 적치되어 있으나 일부는 광미장 상부 및 선광장 터 등에 방치되어 주변 토양으로 유실되고 있다. 광미장의 면적은 약 22,440m²이며 광미장 상부에 존재하는 광미더미 면적은 약 4,280m²으로 추정된다. 현재 광미장 외부로부터 물이 유입되어 수로가 형성되어 있고 이물은 다시 광미담 하부의 배수 암거를 통해 농수로로 방류되고 있다. 광미장 하부지역은 주로 논토양 및 밭토양이, 상부지역은 밭토양이 분포하며 기타 지역은 임야다(Fig 1).

다덕광산 일대의 지질은 주로 각섬석 화강암 및 춘양 화강암으로 다덕광산은 각섬석 화강암,

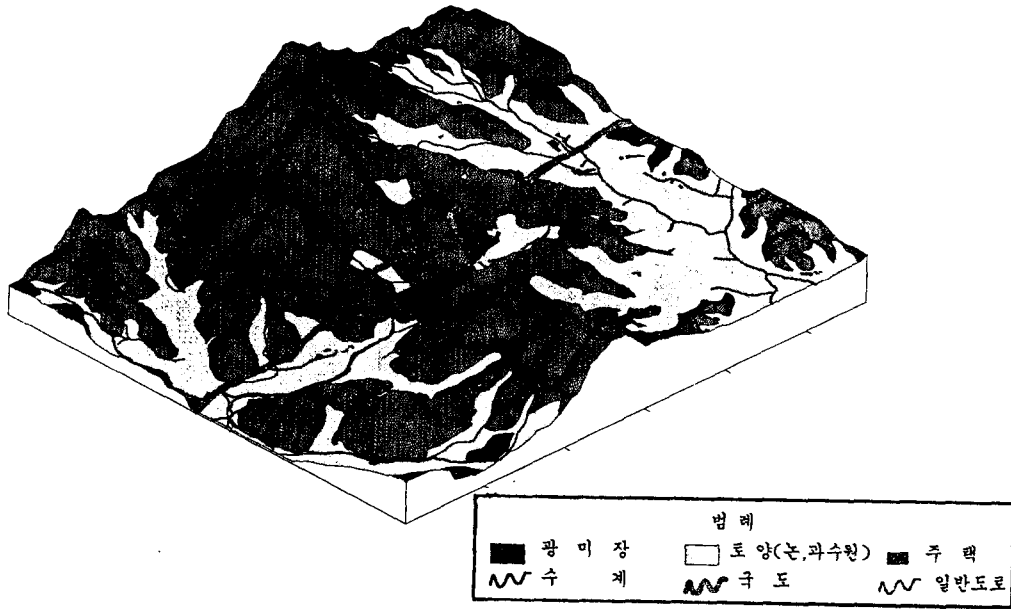


Fig. 1 Geography in the vicinity of the Daduck Mine

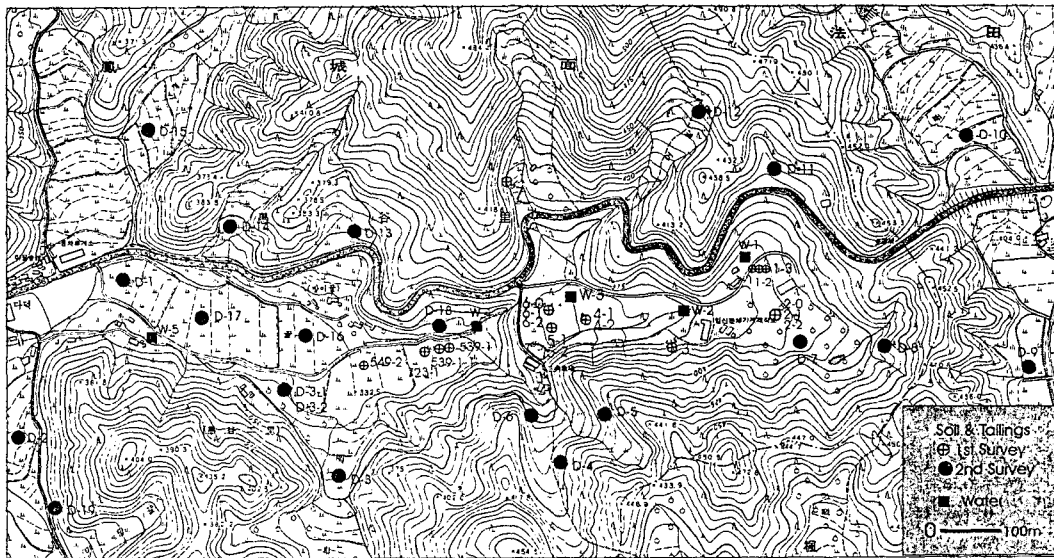


Fig. 2 Sampling Sites of Tailings, Soils and Waters

춘양화강암중의 열극을 충진한 석영맥으로서 수반광물로는 황철석, 황동석, 섬아연석, 방연석, 유비철석 등이 있다. 각섬석 화강암은 조립질이고 입상조직을 보이며 주로 석영, 사장석, 정장석, 미사장석, 각섬석, 흑운모, 녹니석 등으로 구성된다. 춘양화강암은 일반적으로 중립질 및 입상조직을 보여주며 주로 석영, 사장석, 미사장석, 정장석, 흑운모, 백운모 등으로 구성되어 있다³⁾.

봉화군 봉성면의 강수량은 8월달에 최고 415mm, 1월달에 최소 17mm를 기록하고 있다. 봉화지역의 기온은 최저 -20.4℃(1월) 그리고 31.2℃(7월)의 범위를 기록하였고 상대습도는 15~37%를 나타내고 있다⁴⁾.

2.2 현장 조사 및 시료채취

2.2.1 광미 및 토양

광미 및 토양에 대한 현장 조사 및 토양 시료 채취는 1차(1997년 3월 24일 ~ 1997년 3월 26) 및 2차(1997년 5월 7일 ~ 1997년 5월 9일)에 걸쳐 수행되었다. 1차 조사는 다덕광산 선광장 및 광미적치장 부근을 주요 범위로 하였고 2차 조사 시에는 1차 조사보다 넓은 지역을 대상으로 하였다(Fig. 2). 시료는 총 41개로 광미(11), 논토양(11) 밭토양(13), 산토양(4) 및 풍화 잔류토(2) 등으로 구분된다.

시료 채취는 한지점을 중심으로 반경 1m 범위 내에서 4~5개의 부시료를 채취한 후 이를 혼합하여 시료의 대표성을 높였다. 시료는 주로 오거 및 꽃삼 등으로 채취되었고 비닐 백에 넣어 실내로 이동하였다. 시료 채취 위치가 변경될 때 마다 토양 시료 채취기에 의해 이전 시료에 의해 오염되지 않도록 세심하게 주의 하였다. 채취된 시료는 실내에서 2개로 분할하여 1개는 풍건시켜 중금속 분석용 시료로, 나머지 1개는 수분이

증발하지 않도록 밀봉하여 시안 분석용 시료로 사용하였다. 시료 채취 심도는 대부분 15cm내의 표층 이었고 일부 시료에 한하여 30cm 이상에서도 행해졌다.

2.2.2 수질 조사 및 채수

1차(1997년 3월 24일 ~ 1997년 3월 26) 및 2차(1997년 5월 7일 ~ 1997년 5월 9일)에 걸쳐 현장 수질 측정(pH, 총용존고형물, 전기전도도)과 수질분석을 위한 채수를 하였다. 시료 채취점은 다덕기도원 부근, 광미장 내부, 광미장 배수암거 하부 등 3곳 등 이었다(Fig 2). 기타지점은 본고에서는 제외하였다.

채수시 물은 현장에서 0.45 μ m의 공극크기를 갖는 필터로 여과한 후 농질산을 첨가하여 중금속 분석시료로 하였다. 동일한 방법으로 여과한 후 물을 SO₄²⁻ 분석용, 시안분석용으로 별도의 용기에 담아 Ice Box에 보전하여 실험실로 운반하였고 시안분석 물에서는 5N NaOH 용액을 첨가하였다.

2.3 화학분석

2.3.1 광미 및 토양

(1) 토양오염공정시험법

광미 및 토양 등 고체시료를 토양오염 공정 시험방법에 준하여 전처리 및 화학 분석되었다⁵⁾. 화학분석된 성분은 Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr⁶⁺ 및 시안 등 총 7성분이었고 복수시료를 이용하여 분석치의 신뢰도를 검증하였다.

(2) 완전분해 및 황분석

광미장 내부에 존재하는 일부 광미에 대하여 완전분해 시켜 화학분석 하였다. 이용된 광미는

광미장 독 부근의 황갈색 광미와 광미장 30cm 하부의 암회색 광미였다. 완전분해방법은 시료를 0.5g 취하여 HCl 5ml, HNO₃ 5ml, HClO₄ 5ml 그리고 HF 10ml을 테프론 비이커에 넣고 가열시켜 완전히 용해를 시켜 건고 시켰다. 다음 HCl 5ml로 용출시켜 ICP(JY 38+)에 의해 분석되었다. 총황(Total sulfur)은 미국 Leco 사의 Sulfur analyzer(SC-432)로 분석되었다.

(3) 물성

황갈색 광미와 암회색 광미에 대하여 X-선 회절분석(Cu Target)을 실시하였다. 또한 투수율, 함수율 및 입도 분석을 수행하였다. 황갈색 및 암회색 광미 250g 및 증류수 250ml을 유리 비이커에 넣고 반죽상태로 만들어 24시간경과 후 pH, 산도(Acidity) 및 전기전도도를 측정하였다.

2.3.2 물

물 시료에 대해서 Cd, Cu, As, Mn, Pb, Cr, Fe, Zn 및 SO₄²⁻ 등이 분석 되었다. 상기 금속 원소들은 원자흡수 분광기(AAS; Atomic Absorption Spectrometer, Perkin Erlmer 5100) 등에 의해서, SO₄²⁻는 Ion Chromatography (DIONEX사)에 의해서 분석되었다.

3. 결과

3.1 광미 및 토양

3.1.1. 광미 및 토양중의 중금속 및 시안 분포

토양오염 공정시험법에 의한 화학분석 결과가 Table 1에 나와 있다.

Cd의 경우 광미장의 광미에서 평균 4.4mg/kg, 논토양에서 평균 0.5mg/kg 및 산토양에서 평균 0.4mg/kg의 함량을 나타냈다. 광미의 경우 최대 31mg/kg를 나타내어 공장산업지역의 토양오염대책기준치를 초과하였다.

Cu의 경우 광미에서 평균 28mg/kg, 논토양에서 14mg/kg, 산토양에서 12mg/kg, 밭토양에서 7mg/kg로 나타났으며 토양오염기준치 이하였다. Pb의 경우 광미, 논토양, 밭토양, 산토양에서 평균값이 각각 22mg/kg, 37mg/kg, 22mg/kg, 36mg/kg으로 나타났고 토양오염 기준치를 초과하는 시료들은 없었다. 광미 시료의 경우 As는 315mg/kg에서 4900mg/kg의 함량 범위를 나타 내었고 평균은 2138mg/kg이었다. 이러한 As 농도 범위는 토양환경보전법에 제시된 공장, 산업지역의 토양오염 대책 기준인 50mg/kg을 초과한다. 논토양 및 밭토양의 As함량은 각각 평균 8mg/kg 및 6mg/kg

Table 1. Contents of Metal and Cyanide in Tailings and Soils in the Vicinity of the Dalsung Mine(unit in mg/kg)

Landuse	N ^a	Cd	Cu	As	Pb	Cyanide
		Range(mean) ^b	Range(mean)	Range(mean)	Range(mean)	Range(mean)
Tailings	11	0.1-31(4.4)	4.9-73.5(28)	315-4900(2138)	1.8-83.5(22)	0-460(62)
Paddy soil	11	0.1-1.1(0.5)	3.8-41.7(14)	0.1-35.7(8)	1-98(37)	0-0(0)
Plowland	13	0-0.7(0.1)	1.5-21.1(7)	0-27(6)	2.2-73.7(22)	0-0.1(0.02)
Mountainous land	4	0.1-0.6(0.4)	4.6-24.4(12)	0-2.1(0.6)	5.7-90.4(36)	0-0(0)
Weathered soil	2	0-0(0)	0.5-6.9(4)	0-8.8(4)	2.4-10.6(7)	0-0(0)

a: numbers of sample, b: arithmetic mean

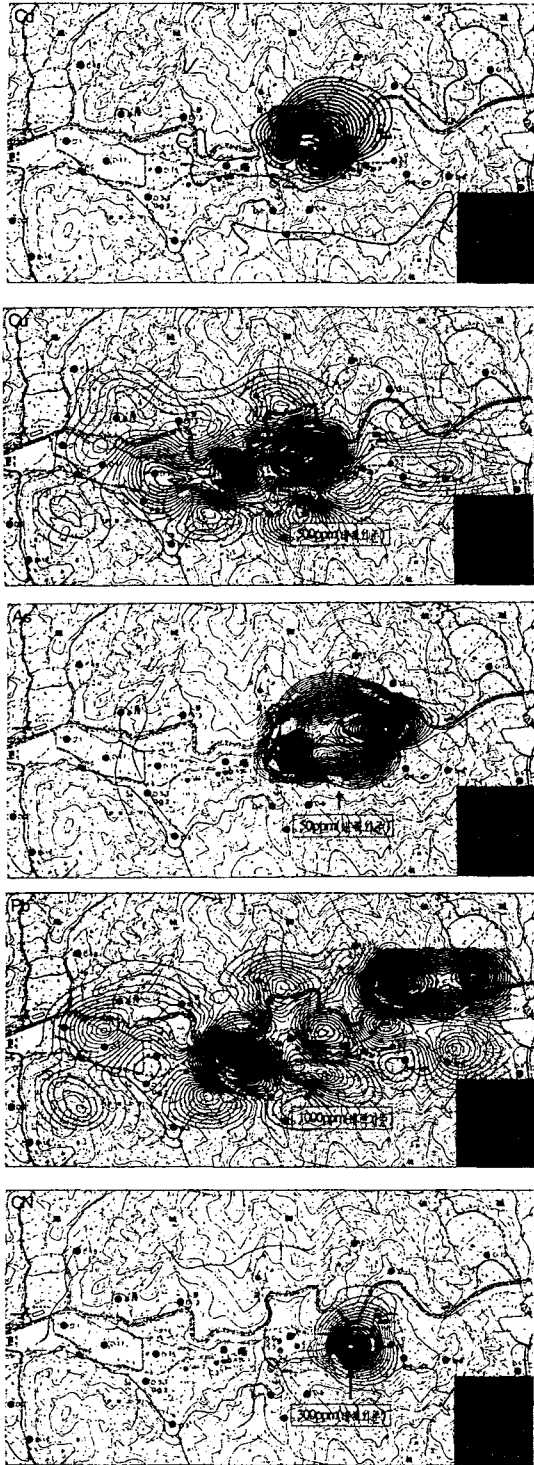


Fig. 3 Contour Map for Cd, Cu, As, Pb and Cyanide in Soils in the Vicinity of the Daduck Mine

으로 나타났으며 일부 논토양 및 밭토양에서는 토양농경지 토양오염 대책 기준인 15mg/kg 을 초과 하였다.

광미장 부근에서 관찰되는 청색 광미에서 시안이 최대 460mg/kg 을 나타내 토양오염대책기준인 300mg/kg 을 초과하였다. 일부 밭토양에서도 0.1mg/kg 수준의 함량을 보였다. Hg 및 Cr^{6+} 는 검출되지 않았다.

한편 광미장 내부에서 깊이별로 이들 성분의 함량차이가 나타났다. 광미장 지표 부근에서 Cd는 $0.2\sim 1.4\text{mg/kg}$ 함량범위를 보인 반면 30cm이하에서 최대 31mg/kg 의 함량을 나타냈다. 그러나 Cd, Cu 및 Pb는 하부에서 높은 함량을 보였으나 As 및 시안의 경우는 반대의 경향을 보였다. 한편 오거에 의해 광미장 단면을 관찰하면 산화대의 깊이가 다르며 또한 수평방향으로 입도가 다른 층이 존재하여 조사 위치에 따라서 깊이별 성분의 함량분포는 다를 것이다.

따라서 다덕광산 주변의 광미에는 As, Cd 및 시안등이 토양오염 우려 기준치 이상으로 존재하여 주변 토양에 대한 오염원으로 확인되었다. 특히 As은 주변 논토양 및 밭토양 등에서 농경지 대책 기준치를 초과한 것으로 나타났다. Cd, Cu, As, Pb 및 시안에 대한 함량분포를 Fig. 3에 도시하였다.

3.1.2 광미의 특성

광미장 상부에는 조립질에서 세립질의 지질물질이 존재하고 있다. 입도 분포(무게%)에 의하면 다덕광미장 중앙부는 조립에서 미립까지 다양한 입도분포를 나타내며 외견상으로 마사토 형태를 보인다. 반면 득 부근의 표층은 대부분 200메쉬 이하의 입도로 구성되어 광미장의 표층 입도는 지역에 따라서 다르다. 마사토 형상의 광미장 중앙부는 투수계수가 $7.84 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ 그리고 득 부

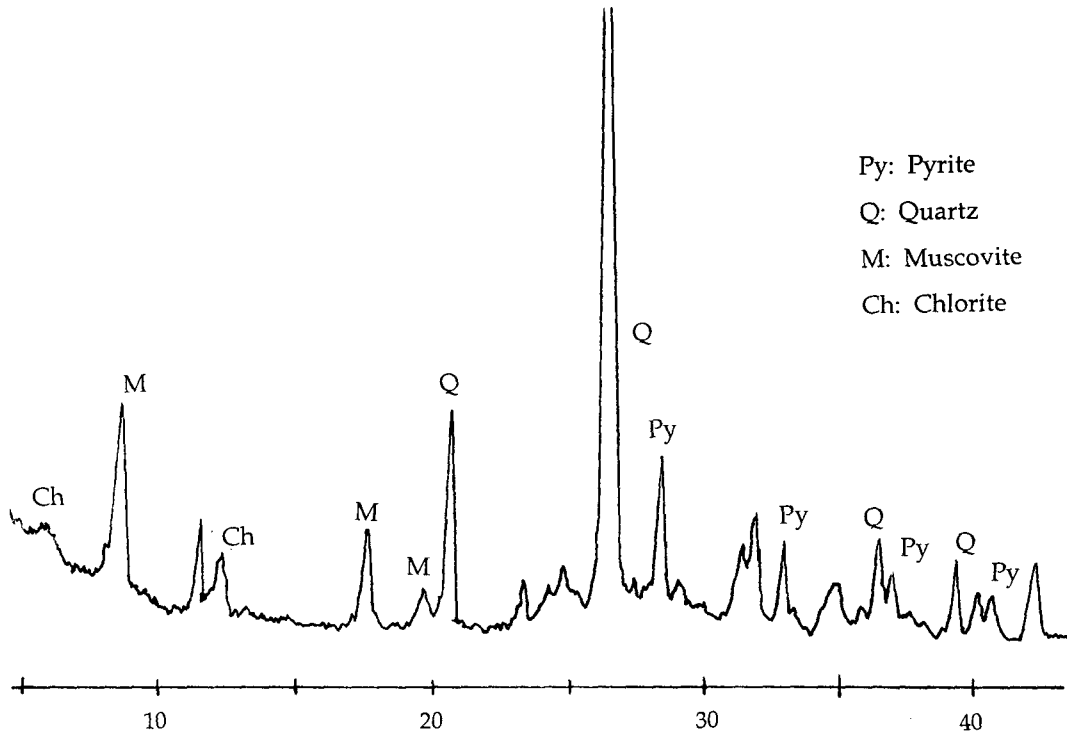


Fig. 4 X-ray Diffraction Pattern

근은 $1.33 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 로 광미댐 중앙부의 투수계수가 컸다. 중앙부 및 둑 부근의 표층물질의 비중은 2.67 및 2.68로 거의 동일하였다.

X선 회절분석 결과 산화가 진행된 광미장 지표면의 황갈색 광미는 석영, 운모 및 몬모릴로나이트(Montmorillonite)로, 산화가 진행되지 않은 광미장 30cm 하부의 암회색 광미는 주로 석영, 황철석, 운모, 녹니석 등으로 구성된 것으로 감정되었다(Fig. 4). 즉 광미장 하부의 산화가 진행되지 않은 암회색 광미에는 황철석이 X선 회절분석에 감정될 만큼 존재하고 있다. 이들 두시료에 대한 총 황(Total Sulfur) 함량을 비교해 보면 0.47% 및 4.97%로 나타났다. 비록 총 황은 황화물 형태 및 황산염 형태의 황 성분 등이 합쳐진 분석값이지만 산화가 진행되지 않은 30cm 하부

의 암회색 광미중의 황 성분은 X선 회절분석에서도 감정되는 황화물의 황으로 부터 유래되었을 것이다.

황갈색 및 암회색 광미들을 완전분해하여 얻은 중금속 함량에 따르면(Table 2), As, Cd, Cu, Pb, Zn 등이 매우 높게 함유되어 있음을 알 수 있다. 한편 산화가 일어나지 않은 암회색 광미가 산화가 일어난 황갈색 광미보다 중금속의 함량이 높다.

암회색 및 황갈색 광미 pH(1:1 광미: 증류수)는 24시간 경과 후 3~4의 범위를 나타내었다. 이때 총 산도(Total acidity)는 황갈색 광미에서 560mg/l CaCO_3 , 그리고 황갈색 광미에서 4110mg/l CaCO_3 를, 전기전도도는 황갈색 광미에서 2.2mS/cm 그리고 암회색 광미에서 7.

Table 2 Chemical Composition of Tailings in the Tailing Impoundment

Elements Tailings	As (%)	Cd (ppm)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Total S (%)	Depth of sampling
Brown tailings	0.62	7	0.01	0.35	0.06	0.47	surface(~15cm)
Gray tailings	1.02	162	0.08	0.37	1.91	4.97	~ 30cm

Table 3 Characteristics of the Tailings Paste

Type of Tailings	Paste pH (1:1)	Methyl Orange Acidity (mg/l CaCO ₃)	Phenolphthalein Acidity (mg/l CaCO ₃)	Conductivity (mS/cm)
Brown tailings	3.17	145	560	2.2
Gray tailings	4.23	0	4110	7.15

Table 4 Results of Water Analysis

Sample	Unit in mg/l except pH and Conductivity													stage of sampling
	pH	Cd	Cu	As	Mn	Pb	Cr ⁶⁺	Fe	Zn	Al	SO ₄ ²⁻	TDS	Cond	
	①5.8 ~8.6	0.1	3	0.5	10	1	2	10	5	-	-	-	-	
Influent	5.87	0.00	0.05	0.00	3.20	0.00	0.00	0.07	1.51	-	184	-	-	1st
	5.74	0.01	0.04	-	-	0.00	0.00	-	2.28	1.98	196	262	585	2nd
water in tailings	4.11	0.03	0.42	0.01	4.15	0.00	0.00	2.00	9.60	-	228	-	-	1st
	2.65	0.11	0.72	-	-	0.00	0.00	-	2.73	59	439	434	925	2nd
	2.59	0.72	1.10	-	-	0.93	0.00	-	2.76	59	506	449	1100	②2nd
effluent	4.53	0.02	0.27	0.01	5.87	0.00	0.00	2.11	7.40	-	185	-	-	1st
	3.70	0.07	0.89	-	-	0.00	0.00	-	2.64	46	242	304	683	2nd

①: 수질환경보전법 시행규칙 제 8조 별표 5 <배출허용기준: 가지역>

②: pore water

TDS = Total Dissolved Solid, Cond = Conductivity(unit in $\mu\text{S}/\text{cm}$)

1st sampling: 1997, 3(dry season), 2nd sampling: 1997, 5(rainy season)

15mS/cm를 나타냈다. 한편 황갈색 광미에서 Mineral acidity가 145mg/l CaCO₃를 나타내 광미장 내부 및 광미장 방류수의 산성 침출수의 수질과 관계가 있다(Table 3).

3.2 수질

수질자료를 배출허용기준과 비교해 볼 때 기준

치를 초과하는 주요 수질 항목은 pH, Cd 및 Zn 등을 들 수 있다(Table 4). 광미적치장으로 유입되는 물은 pH가 5.7~5.8로 184~196mg/l의 SO₄²⁻를 함유하며 Mn이 3.2mg/l 포함된 일반 자연수 보다는 오염된 수질이다. 그러나 광미장 내부에서 분석된 수질은 우선 pH가 최저 2.59로 측정되어 산성수로 변화한다. 또한 유입수는 Cd, Cu, As, Pb, Fe, Zn, Al 등 대부분의 금속성분으

로 농도가 증가한다. 즉 광미와 반응을 하여 금속성분이 포함된 산성침출수로 변화되어 방류되고 있다. 이 방류수는 광미장 하류 방향의 농수로 수질을 오염하는 오염원으로 작용하고 있다.

1차(건기) 및 2차(우기) 수질조사 결과를 비교하면 우기때 pH가 더 낮았고 Zn을 제외한 대부분의 성분도 상승했다. 우기때 pH가 낮아진 이유는 산화작용의 산물인 염들의 용해로 기인하는 것 같다. 한편 광미적치장 지표면을 흐르는 물과 광미장 하부 30cm내에 존재하는 공극수(침출수) 수질을 비교해 보면 (2차 시료) Cd, Cu, Pb, Zn, SO_4^{2-} 등 대부분의 성분이 공극수에서 높아 공극수 수질이 광미장 지표면을 흐르는 지표수보다 오염도가 큰 것을 알 수 있다(Table 4).

4. 고찰 및 결론

다덕광산 광미장 표층 및 심부에 존재하는 광미에는 As, Cd, Cu, Pb, Zn 등이 매우 높게 함유되어 있다. 산화가 일어나지 않은 암회색 광미에서 As가 최대 1%, Cu 0.08%, Pb 0.3%, Zn 1.9%로 분석되었고 총 황의 경우 최대 4.97%로 나타나 황화광물이 존재하는 광산폐기물로 나타났다.

토양오염 공정 시험법에 의한 분석자료에 따르면 광미장 주변의 논 및 밭에서 As이 농경지 토양오염대책 기준인 15 mg/kg을 초과하여 광미의 유입으로 오염된 것으로 판단되었다. As, Cd 및 시안 등이 광미장에서 토양환경보전법 공장 산업지역의 토양오염 우려기준치를 초과하고 있다.

다덕광산 광미장 내부로 지하수가 유입된 물이 광미중의 황화광물과 산화작용을 일으켜 산성침출수가 생성되고 있다. 산화대는 위치에 따라 다른데 광미장 중앙부는 30cm이내 그리고 광미장 독 부근은 1m 전후 까지 산화대가 형성되어 있다.

이러한 광미장 산화대에서 광미중에 존재하는 As, Cd, Cu, Zn 등의 성분이 용출되어 이들 성분에 의해 오염된 산성 침출수가 농수로로 방류되고 있다. 광미장내 물을 분석해 보면 이들성분은 유입수에 비해 상승해 있고 조암광물로 유래한 Al등이 최대 59mg/l의 함량치를 나타낸다. 광미장 방류수 암거부분에서 관찰되는 흰색의 침전물은 주로 Al로 구성된 침전물이다. 따라서 다덕광산 광미장은 광미장 주변 토양 및 수질에 대한 오염 유발시설로 확인되며 더 이상의 오염물질의 확산을 방지하기 위한 대책이 요구된다.

참 고 문 헌

1. 민정식, 정영욱, 이현주, 송덕영, 1995, 광산지역 광해 대책 연구, 자원연구소 연구보고서(KR-95(C)-37, p.5-156
2. 민정식, 정영욱, 이현주, 이동남, 1996, 광산지역 광해조사 및 대책 연구, 자원연구소 연구보고서(KR-96(C)-41, p.5-374
3. 손치무, 김수진, 1963, 춘양도폭 지질도 및 설명서, 국립지질조사소
4. 봉화군청, 1996, 봉화통계연보
5. 환경부, 1996, 토양환경보전업무 편람, p. 147-305