

정선 동명광업소 주변 지역의 중금속 오염 현황과 원인

이현창¹⁾ · 송영준^{1)*}

The Cause and Status of Heavy Metal Pollution at Dong-myung Mine Area

HyunChang Lee and Youngjun Song*

(Received 2 March 2015; Final version Received 21 December 2015; Accepted 21 December 2015)

Abstract : The paper presents an overview of the heavy metal pollution over Dong-myung Mine area in Jeongsun Kangwon-Do, formerly producing gold and silver, with a hope the data could be used for the determination of an efficient way of reclamation. To survey the heavy metal pollution, several hundreds of points including 325 surface, 142 under surface are sampled over 21 ha. The particle size distribution, the chemical composition and the heavy metal concentration of soil samples from polluted and unpolluted area are investigated to find the cause of pollution. Also the heavy metal distribution in ore and goaf are found by using of SEM-EDS. As a result, the polluted surface area is 71,952 m², and 32,736 m² of them exceed the action needed limit, and the main pollutants is arsenic contained in arsenopyrite.

Key words : Heavy metal, Pollution, Investigation, Dong-myung mine, Reclamation

요약 : 본 연구는 과거 금과 은을 생산하던 강원도 정선의 동명광산 주변 지역의 중금속 오염 실태를 조사하고 분석하여 보다 효율적인 광해복구 방법의 선정을 위한 자료를 제공하기 위하여 수행되었다. 총 21 ha의 면적에서 표토 325개, 심토 142개, 심도별 시료 100개 등을 채취하여 중금속 오염도를 조사하였으며, 중금속 원소별 오염 원인물질을 파악하기 위하여 오염토양과, 비오염토양의 입도분포와 입도별 화학조성과 중금속농도 등을 조사하였으며 아울러 광석과 폐석에 존재하는 중금속의 분포를 SEM-EDS로 조사하여 검토하였다. 조사 결과 표토오염 면적은 71,952 m²이었으며, 이 중 대책기준 초과면적은 32,736 m²이었고 대부분의 토양은 비소로 오염되어 있었으며 비소의 비소오염의 원인물질은 유비철석임을 알았다.

주요어 : 중금속, 오염, 조사, 동명광산, 광해복구

서 론

요즘 들어 광산폐기물(광미, 광산폐석 등), 광산폐수, 오염토양 등 광산 활동 결과에 의해 발생된 여러 종류의 오염물질이 지하수, 강, 토양을 포함한 자연 생태계에 유입되어 발생하는 광해에 의한 환경문제가 심각하게 대두되고 있다 (Sullivan, 1988; Kim *et al.*, 2003). 광산폐기물은 다른 폐기물과는 비교할 수 없을 정도의 엄청난 양으로 존재하는 경우가 많으며, 오염물질은 주로 유독성 중금속(As, Cd, Pb, Zn, Cu 등)을 포함하고, 오염 면적이 광범위하고 지속적으로 오염지역이 확산되는 특징을 갖는다. 방치된 광산

폐기물은 유실되어 하루로 확산되거나, 우수와의 접촉으로 광산산성배수(AMD)를 발생하여 유해 중금속을 보다 넓은 지역으로 확산시켜 피해범위가 넓어지고 복구에 많은 시간과 비용이 소요된다. 이러한 폐광산에 의한 환경오염을 방지하기 위해 휴폐광산에 대한 종합적이고 체계적인 환경평가와 광산특성을 고려한 광해방지 및 복구기술의 적용이 필요하다(Ahn *et al.*, 2007).

원주환경청이 1999년과 2000년 조사한 ‘폐금속광산 오염실태’와 ‘낙동광산 오염실태’ 분석자료에 따르면 정선군 임계면 동명광업소의 광산폐기물 적치량은 2만8천208 톤으로 나타났다(Wonju Regional Environmental Office, 1999). 금과 은, 납, 아연, 구리 등을 채광 했던 정선군 임계면 송계5리 동명광업소는 1996년 9월 광업권이 소멸됐으나 폐광에 따른 복구사업은 최근에야 이뤄졌다. 복구사업 이전 원주환경청이 조사한 자료에 따르면 동명광업소 인근은 광미 적치장을 중심으로 납과 비소 등 중금속 오염물이

1) 강원대학교 재료금속공학과

*Corresponding Author(송영준)

E-mail: yjsong64@kangwon.ac.kr

Address: Dept. of Materials and Metallurgical Engineering,
Kangwon National University, samcheok,
Kangwon, Korea(245-711)

그대로 방치된 것으로 보고되었다. 그 후 정선군에 의해 토양오염방지사업이 2001년 3월 기본 및 실시설계용역 착수되어 2002년 토양오염방지사업 공사가 준공되었다. 하지만 2005년도에 실시한 환경부 75개 폐금속광산에 대한 사후관리 실태조사에 의하면 복원사업 완료 후 동명광산의 경우 장창동 계곡의 상류 및 하류에 광미가 산재하고 있으며, 정선군에 의해 일부지역이 차단 매립방법에 의해 복원사업이 이루어 졌으나 그 상태가 매우 불량하여 갯내수 및 침출수가 계곡의 하천으로 유입되고 있는 실정으로, 미처리된 광미더미가 그대로 방치되어 광산 폐기물에 의한 오염이 확인되었다(Ministry of Environment, 2003; Ministry of Environment, 2005a). 특히 광미, 갯내수로 추정되는 침출수 및 폐석의 대부분이 강우 및 바람(2002년 태풍 루사 및 2003년 매미에 의한 피해가 일부지역에서 관찰됨)에 노출되어 침식에 의해 주변의 토양 및 하천으로 확산되거나 침출수에 의해 지하수 및 주변 농경지 다수의 지점에서 비스, 카드뮴, 구리, 납, 아연 등의 오염이 확인되고 있어 오염현황에 대한 정밀조사를 하고 오염원인 물질을 정확히 파악하여 보다 효율적인 광해방지 공법의 선정에 필요한 자료를 제공하고자 하였다.

광산 및 주변지역 기초자료

위치

Fig. 1에 나타난 바와 같이 동명광산은 행정구역상 강원도 정선군 임계면에 위치하고 있으며, 지리적 분포상 128°



Fig. 1. Location of Dong-myung Mine.

51' 53.9", 37° 28' 48"에 위치하며, 인근지역의 교통망은 42번 국도와 35번 국도가 인접하여 있다. 동명광산은 정선군 임계면 봉산리 및 송계리 지역에 비교적 넓게 분포하며, 인근 지역의 수계는 오목골과 석동거리에서 발원한 소지류가 북측방향으로 사행하여 임계천과 합류하는 수계를 보인다(Korea Resources Corporation, 1990).

지질 및 광상 특성

Fig. 2에 나타난 동명광산지역의 지질도와 같이 본 지역의 지질은 선캠브리아기의 태백산통에 해당하는 편암복합대와 화강암질암을 기반으로 하여 그 상부에 캠브리아기의 장산규암층, 묘봉층과 풍촌석회암층, 그리고 관입상의 각섬암이 분포하며 하천을 따라서 층적층이 넓게 분포하고 있다(Korea Resources Corporation, 1987).

광산이력

강원도 정선군 임계면 송계 5리에 위치한 동명광업소는 장창동 계곡의 상류에 산재하여 있으며, 하류 부근에는 선익광산이라 불리는 광산이 장창동 계곡을 따라 산재해 있다. 동명이라는 광업소 명은 광산 등록일 인 1982년에 명명되었다고 생각되나 이곳에서의 광산활동은 일제 시대 때부터 시작되었다고 한다(Korea Resources Corporation, 1986). 그 당시의 광산명은 선익광산이라고 불렸으며 현재 광산명은 선익광산 또는 동명광업소라고 불려진다. 이 중 동명광업소 지역의 일부만이 1982년 광산등록을 하여 채광을 실시하였다. 주요 채광금속은 금, 은(동, 아연, 연등)으로 약 14년간 후광과 광산활동을 반복하다가 1996년 9월 17

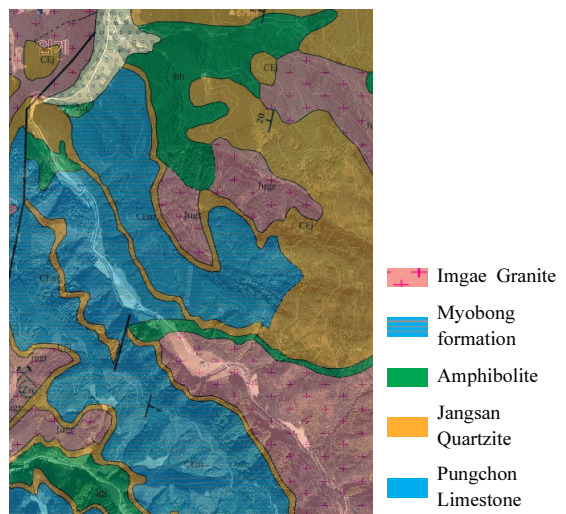


Fig. 2. Geological map of Dong-myung Mine.

Table 1. History of Dong-myoung mine

Content	History of Mine
Location	Kangwon-do Jeongseon-gun Imgae-myoun Songgae-5ri
Object Metal	gold, silver, Cu, Pb, Zn
Valid	1934. 4. 15 ~ 1996. 9. 17
Registered Number	56684, 56685
Geological Map Number	Imgae 72, 73
Mine Area	1.31 km ²
Nearby River	Imgae-cheon
Final Owner	Park 00, Choongbuk, Jecheon-shi

Table 2. Status of Land use around Dong-myoung mine (m², %, Jeongsun statistics book, 2006)

Administrative district	total	farm	rice paddy	forest	plot	pasture	road	etc
Jeongsun,	244,108,403	17,069,141	3,781,366	212,018,804	703,685	459,858	1,905,739	8,169,810
Imgae-myoun	100.0	7.0	1.5	86.9	0.3	0.2	0.8	3.3

일에 광업권이 소멸되었다. 폐광재의 경우 광재담 설치 등의 광재유실 방지시설 설치의 전무하여 광재유실이 발생되고 있으며 광재유실권내의 농경지의 대부분이 밭으로 되고 있으며 골짜기를 통하여 하천이 흐르고 하천의 폭은 약 25 m 유량은 약 500 m³/h로 영향권 내 유로 연장은 1,500 m에 이르고 있다. 이 하천에서 이용되는 농업용수 사용면적은 18,000 m²로 대부분이 밭 경작용수로 사용된다 (Wonju Regional Environmental Office, 1999; Korea Resources Corporation, 1986; Kim, 1986). Table 1에 동명광산의 이력을 나타내었다.

토지 이용 현황

동명광산 인근의 지목별 토지이용현황은 Table 2와 같으며, 2005년 임계면 전체의 작물재배 면적은 9,392 km²이며, 생산량은 15,571 톤이다. 이 중 식량작물인 미곡, 맥류, 잡곡, 두류 및 서류의 재배면적은 각각 2.08 km², 0.002 km², 1.14 km², 1.36 km² 및 4.79 km²이며, 생산량은 각각 1,025 톤, 0.4 톤, 623 톤, 242 톤, 13,678 톤이다. 2002년까지 감소하던 작물재배 면적이 2002년부터 점차 증가하는 것으로 나타나고 있으며 특히 잡곡과 두류의 생산량이 증가하였다. 반면 미곡과 서류의 재배면적과 생산량은 감소하였다.

실험 방법

토양시료채취

환경부의 토양오염공정시험방법(Ministry of Environment, 2007)과 토양오염실태조사지점(Ministry of Environment,

2006)에 제시되어 있는 “토양시료채취기록부”에 준하여 현장에서 토양시료를 채취하고 기록하였다. 특히 현장에서 지면도를 확인하였으며 GPS를 활용한 TM좌표도 획득하여 필지 내 정확한 채취지점을 기재하였다.

동명광산 지역의 기존 오염지역과 오염이 예상되는 지역에 대하여 시료채취는 표토(0 ~ 30 cm) 325개, 심토(30 cm ~ 60 cm) 142개, 주요지점의 심도별 시료채취(0.3 m, 0.6 m, 1 m, 2 m, 3 m) 100, TP시료 11개 및 시추조사 시료 3개를 채취하였다. 토양시료채취 시 채취밀도는 표토층에 대하여 900 m² 당 1개 시료를 채취하되 필지별 오염상황을 확인할 수 있도록 하였으며 심토는 표토시료채취 3개소당 1개소 간격으로 표토시료채취와 동일한 방법으로 채취하였다. 심도별 시료채취는 10개소당 1개소 간격으로 채취하되 0.3 m, 0.6 m, 1 m, 2 m, 3 m 심도에서 채취하였으며, 농경지 하부에 광미가 분포되었을 개연성이 높은 지역은 보다 세밀히 채취하였다.

토양시료 채취와 함께 농경지에 매립된 광미 및 폐석 적치장의 적치량을 산정하기 위해 정밀 측량을 실시했다. 토양시료는 동명광산 지역에서 대조구 토양을 포함하여 총 581점을 채취했다. 토양 시료는 동명광산의 최상 위치의 갱구를 기점으로 하여, 갱구 상류 부분을 주 오염지역 반경으로 설정하여 거리별로 채취하였고, 하류방향도 거리별로 채취했다. 동명광산의 경우 갱구를 기점으로 상류방향에는 농경지가 산재해 있었으나, 하류 약 1 km 방향이내에는 농경지가 없었고, 주로 폐갱구와 광폐재 매립장이 산재해 있었다.

시료운반 및 건조

토양시료 운반 시 특별한 주의 사항은 없으나 가능한 빠른 시간 내에 실험실로 옮겨 건조시켰다. 채취한 토양시료는 아이스박스에 넣어 보관 및 운반하였고, 운반된 시료는 폴리에틸렌 재질의 바트(Vat) 위에 균일한 두께로 상온(20~25°C)의 직사광선이 닿지 않는 장소에서 통풍이 잘되게 해쳐 놓고 10일정도 풍건을 통해 완전 건조시켰다.

토양시료 조제

건조된 시료는 분석용 시료 조제를 위해 막자사발을 이용하여 분쇄 후 표준체를 이용하여 체걸음을 실시하였다. 토양 pH 및 물리화학적 특성분석을 위해 눈금간격 2 mm 표준체(10메쉬)와, 화학분석 시료조제를 위해 눈금간격 150 μm 이하 표준체(100메쉬)를 이용하여 체질을 실시하여 분석용 시료를 제작하였다. 체질이 완료된 토양시료는 시료정보를 기록한 라벨을 붙인 후, 분석 전까지 500 ml 플라스틱 병에 넣어 보관하였다. 습기에 의한 시료의 영향을 최소화하기 위해 시료보관 장소는 서늘하고, 공기정화기를 통해 청정한 환경이 되도록 하였다.

토양시료 전처리 및 분석

토양의 중금속 농도를 측정하기 위한 시료의 전처리 및 분석은 토양오염공정시험방법(Ministry of Environment, 2007)에 준하여 실시하였으나 전환량 분석 시료는 불용 중금속에 의한 음의 오차를 방지하기 위하여 왕수에 용해하여 분석하였고, 가용성 함량 분석에는 비소의 용출 시험에 적합하다고 알려진 1N 염산을 사용 하였다. 시료의 전처리를 포함한 모든 시험은 바탕시험을 행하여 보정하였다. 중금속 농도 분석에는 ICP-OES(Vista-MPX, Varian사)와 AA(5100PC, Perkin Elmer사)를 주로 사용하였다.

결과 및 고찰

토양분석결과

표토 분석결과

광산지역의 표토시료 총 325개를 분석하였으며 그 결과 우려기준초과는 24개, 대책기준초과는 15개의 시료에서 나타났으며, 대부분은 복토가 이루어져 있으며, 복토가 이루어지지 않은 부분에서 국부적인 비소(As) 오염이 발견되었으며, 대책기준을 초과한 지역은 모두 비소(As) 오염 지역으로 분석결과 나타났다.



심토 분석결과

광산지역의 심토시료 총 142개를 분석하였으며, 그 결과 우려기준초과는 41개, 대책기준초과는 31개의 시료에서

나타났다. 조사된 토양의 대부분은 복토가 이루어져 있으며, 복토가 이루어진 하부 토양의 비소(As) 및 아연(Zn)이 주 오염원소였다. 비소(As)의 우려기준초과 범위는 6.13~14.9 mg/kg, 대책기준초과 범위는 15.37~1,055.2 mg/kg이며, 아연(Zn)의 우려기준초과 범위는 319.7~591.5 mg/kg, 대책우려기준초과 범위는 817.7~5,871.7 mg/kg으로 분포하였다.

심도별 분석결과

광산지역의 심도별 시료 분석을 총 100개를 수행하였으며, 그 결과 우려기준초과는 17개, 대책기준초과는 13개의 시료에서 나타났다. 조사된 토양의 대부분 복토가 이루어져 있으며, 복토가 이루어진 하부 토양은 카드뮴(Cd), 비소(As) 및 아연(Zn)으로 오염되었음을 확인하였다. 카드뮴의 오염정도는 우려기준초과 지역에서 1.5~3.0 mg/kg, 대책기준초과 지역에서 4.0~5.2 mg/kg, 을 나타내었고, 비소의 우려기준초과 지역의 농도는 6.2~13.4 mg/kg, 대책기준초과 지역의 농도는 16.4~110.8 mg/kg이며, 아연(Zn)의 우려기준초과 지역의 농도는 321.0~420.3 mg/kg를 나타내었다.

Fig. 3 은 심토의 오염 상태를 나타낸 오염등급도이다. 그림에서 대책기준 초과지역은 으로, 우려기준 초과지역은 으로 나타내었고, 오염 원소를 해당 부분에 기입하였다. 그림에서 상류부에는 2개의 대책기준 초과지역이 존재하며 이들은 갭구나 선광장등과 거리가 멀어 오염원은 기존의 광산활동과 관련성이 없어 보인다. 그림 중앙의 오염 지역은 As와 Pb로 오염되어 있으나 우하 부분의 오염지역은 Zn으로 오염되어 있으며 두 지역 모두 선상지의 특징을 보인다. 따라서 중앙의 오염 지역은 상부에서 운반되어온 광석(황철석, 유비철석, 섬아연석 등) 입자들로 구성된 퇴적층이 심토부에 존재하는 것으로 보이며 우하 부분의 오염지역은 화성활동에 기인하는 하는 것으로 보이는 점토층이 다량 존재하는 곳으로 이들 점토는 입자가 2 μm 이하로 매우 미세하고 점결성이 높은 특징을 보였으며 이들 점토에 아연 이온 등이 흡착되어 농도가 높게 나타난 것으로 생각된다.

중-상류부에는 대책기준 초과지역이 나타나지 않았으며 3개 지역에서 As 농도가 우려기준을 초과하였다. 이들 지역의 오염은 5번 갭구와 6번 갭구 입구에 적치되어 있는 폐석더미와 관련성이 높을 것으로 생각된다.

중-하류 부의 오염지역은 평평하고 넓은 개활지인 공통점을 가지며 주요 오염 성분인 비소와 함께 다른 중금속들에 의한 오염도 동시에 나타나는 특징들을 보인다. 우상부의 오염지역은 7번 갭구로 운반되어진 원광석을 적치하였던 영향으로 보이며, 중앙 부분의 오염 지역은 선광을 위한 광

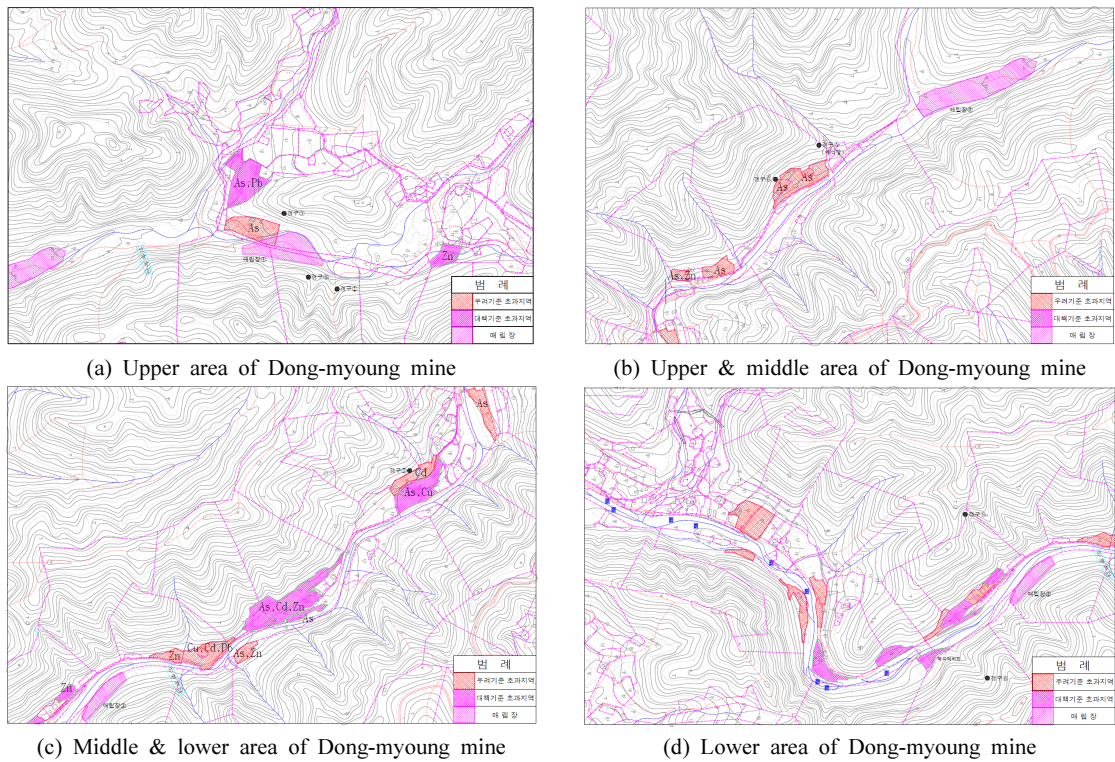


Fig. 3. Pollution grade map around Dong-myung mine.

석 적치장으로 사용되었던 것으로 생각된다.

하류부는 오염이 가장 심한 것으로 조사되었으며 오염지역과 수계가 거의 일치하는 것으로 보아 선광장2 부근에 존재하였을 것으로 추정되는 광미야적장에 쌓여 있던 광미나 광석 등이 폭우로 인한 하천 범람시 주변 농경지로 확산된 것으로 추정된다.

오염량 산정

토양오염우려기준 이상을 초과하는 오염분포지역에 대

한 각 원소의 심도별 오염분포 현황을 Table 3~6에 나타내었다. 전체 표토 오염부지의 면적은 71,952 m²이며 이중 대책기준을 초과하는 지역은 32,736 m²이다. 전체 오염토량을 계산한 결과 총 오염토량은 21,750.6 m³으로 조사되었다. 각 원소별 오염 면적을 조사한 결과, 비소(As), 아연(Zn), 납(Pb), 카드뮴(Cd), 구리(Cu) 등이 오염이 되었으며, 그 조사 결과는 다음과 같다.

가장 오염도가 심하고 그 면적도 넓은 원소는 비소이며, 우려기준 초과면적이 48,371 m²이고 대책기준 초과면적은

Table 3. Status of As pollution by depth in Dong-myung mine

	Ave. conc. (mg/kg)	Max. conc. (mg/kg)	Area of Excess Concentration (m ²)		Polluted Soil (m ²)	Marks
			concern needed	action needed		
Total pollution area	-	-	48,371	45,951	94,322	42,581.3
Surface (0~30 cm)	7.5	1,197.5	3,338.0	-	3,338.0	1001.4
Depth (30~60 cm)	54.2	957.5	28,232.0	31,979.0	60,211.0	18,063.3
Depth (60~100 cm)	8.8	122.0	6,396.0	5,698.0	12,094.0	4,837.6
Depth (100~200 cm)	6.9	110.0	8,822.0	7,074.0	15,896.0	15,896.0
Depth (200~300 cm)	4.0	26.7	1,583.0	1,200.0	2,783.0	2,783.0

Table 4. Status of Cd pollution by depth in Dong-myoung mine

	Ave. conc. (mg/kg)	Max. conc. (mg/kg)	Area of Excess Concentration (m ²)			Polluted Soil (m ²)	Marks
			concern needed	action needed	Total		
Total pollution area	-	-	7,174.0	1,200.0	8,374.0	4,192.2	
Surface (0~30 cm)	0.5	20.0	2,863.0	-	2,863.0	858.9	
Depth (30~60 cm)	0.8	18.2	3,111.0	-	3,111.0	933.3	
Depth (60~100 cm)	0.2	0.8	-	-	-	-	
Depth (100~200 cm)	0.3	5.2	-	1,200.0	1,200.0	1,200.0	
Depth (200~300 cm)	0.4	3.0	1,200.0	-	1,200.0	1,200.0	

Table 5. Status of Pb pollution by depth in Dong-myoung mine

	Ave. conc. (mg/kg)	Max. conc. (mg/kg)	Area of Excess Concentration (m ²)			Polluted Soil (m ²)	Marks
			concern needed	action needed	Total		
Total pollution area	-	-	1,372.0	-	1,372.0	411.6	
Surface (0~30 cm)	32.7	2,430.0	367.0	-	367.0	110.1	
Depth (30~60 cm)	33.7	610.6	1,005.0	-	1,005.0	301.5	
Depth (60~100 cm)	12.4	38.3	-	-	-	-	
Depth (100~200 cm)	11.2	21.7	-	-	-	-	
Depth (200~300 cm)	10.4	25.5	-	-	-	-	

Table 6. Status of Zn pollution by depth in Dong-myoung mine

	Ave. conc. (mg/kg)	Max. conc. (mg/kg)	Area of Excess Concentration (m ²)			Polluted Soil (m ²)	Marks
			concern needed	action needed	Total		
Total pollution area	-	-	32,072.0	2,274.0	34,346.0	12,479.8	
Surface (0~30 cm)	165.9	1,338.2	2,133.0	-	2,133.0	639.9	
Depth (30~60 cm)	371.0	5,871.7	25,399.0	2,274.0	27,673.0	8,301.9	
Depth (60~100 cm)	140.3	321.0	1,670.0	-	1,670.0	668.0	
Depth (100~200 cm)	124.6	420.3	1,670.0	-	1,670.0	1,670.0	
Depth (200~300 cm)	131.7	367.8	1,200.0	-	1,200.0	1,200.0	

45,951 m²으로 조사되었으며 이들 대부분은 심도 30~60 cm에 오염이 집중되어 있었다.

아연은 비소 다음으로 오염면적이 넓은 것으로 조사되었으며, 대책기준 초과 면적은 2,274 m²으로 매우 국부적인 데 반하여 우려기준 초과면적은 32,072 m²로 광범위한 오염 상태를 보였으며 30~60 cm에 오염이 집중되는 특징을 보였다.

카드뮴은 우려기준 초과면적이 7,174 m²이고 대책기준 초과면적이 1,200 m²로 오염 면적은 적은 편이었으며, 오염 지역은 복토가 이루어지지 않은 중-하류의 개활지에 집중됨을 보였다.

납은 대책기준 초과지역이 발견되지 않았으며 우려기준 초과 지역도 1,372 m²으로 협소한 편이며 중-하류 부에 집중되는 특징을 보였다.

구리는 중-하류 부의 지역에서 불연속적이고 국부적인 오염 상태를 나타내었다.

토양 오염의 원인물질

먼저 오염원인물질을 규명하기 위하여 오염토양과 비오염토양의 물성(입도분포, 입도별 화학조성, 입도별 광물조성, 조암광석별 중금속 함량 등)을 비교하였다.

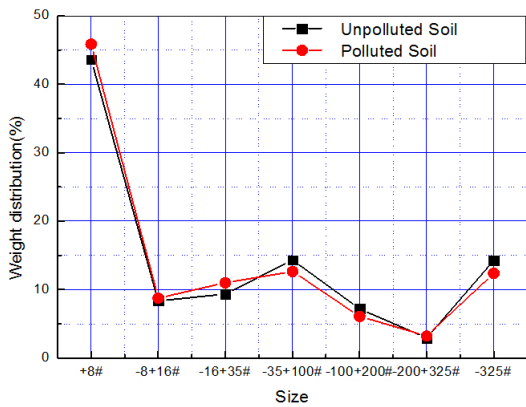


Fig. 4. Particle size distribution in polluted and unpolluted soil.

토양의 입도 분포

Fig. 4에 복토가 이루어지지 않은 비오염토와 하류지역의 오염토를 대상으로 습식사분을 행하여 입도 분포를 나타내었다. 오염토양과 비오염토양의 입도 분포는 비슷한 경향을 보였으며 8# 이상의 석력 함량이 44~46%, -8+325#의 모래가 39~42%, 325#이하의 실트와 점토가 12~15%로 나타났다. 이는 중금속 오염의 원인 물질이 전체 토양의 입도 분포에 영향을 미치지 않을 정도로 작

고 중금속 농도가 높은 광미나 중금속 이온과 같은 물질일 가능성을 시사한다.

입단별 화학조성

오염토와 비오염토를 습식사분하여 여러 입단으로 분리하고 각 입단의 화학조성을 조사하여 Table 7에 나타내었다. Table 7의 주성분원소 함량 분석결과는 XRF를 이용하여 측정되었으며 표의 결과에서 오염토와 비오염토의 주구성성분은 전 입단에서 공히 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O으로 나타났으며, 이는 이 지역에 분포하는 자갈들이 석영(SiO₂)을 주성분으로 하는 규석과 석영, 운모, 장석을 주성분으로 하는 화강암, 그리고 이들의 변질작용을 받아 생성한 각섬석 등으로 구성되어있기 때문으로 보인다. 광미의 화학조성은 이들과 달리 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O의 함량이 다소 낮아지고 SO₃의 함량이 매우 높게 나타난다. 이는 채광 대상인 금광석 내에 함유되었던 황철석(FeS₂)의 영향으로 보이며, 분석결과에서 SO₃로 나타난 것은 단지 표현의 일관성을 위하여 S함량에 일정 값을 곱한 것으로 S가 SO₃로 존재함을 의미하는 것은 아니다.

각 입단별 시료를 미분쇄 후 왕수에 용해하고 ICP로 중금속 함량을 측정하여 나타낸 Table 8의 결과에서 오염토, 비오염토, 광미 모두에서 주요 중금속이 Pb, As, Zn이며 비소를 제외한 나머지 중금속의 함량은 오염토와 비오염토 모

Table 7. Chemical composition of soil sample as a function of particle size

	particle size	weight distribution (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO ₂ (%)	MnO (%)	P ₂ O ₅ (%)
polluted soil	+8#	45.89	60.0	16.7	4.94	0.94	9.96	1.79	3.43	1.47	0.13	0.21
	-8+16#	8.76	63.1	18.2	4.98	1.15	6.44	1.63	2.69	0.90	0.11	0.17
	-16+35#	11.00	61.6	18.3	5.36	1.27	6.92	1.91	2.71	0.98	0.14	0.23
	-35+100#	12.65	60.1	17.6	5.15	1.36	8.25	2.47	3.13	1.16	0.17	0.24
	-100+200#	6.10	55.4	19.9	4.72	1.32	9.53	2.66	3.37	1.47	0.21	0.48
	-200+325#	3.22	54.9	20.3	4.34	1.26	9.73	2.80	3.60	1.59	0.21	0.50
	-325#	12.38	55.1	21.2	3.94	0.73	10.80	1.90	3.12	1.45	0.34	0.81
unpolluted soil	+8#	43.63	66.6	17.3	5.79	0.81	5.48	0.55	0.83	1.81	0.13	0.18
	-8+16#	8.34	64.4	16.3	5.35	0.69	7.16	1.79	1.93	1.32	0.20	0.33
	-16+35#	9.33	62.4	16.9	5.22	0.94	7.73	2.27	2.26	1.34	0.22	0.32
	-35+100#	14.33	58.8	18.6	5.23	1.21	8.42	2.86	2.55	1.33	0.20	0.41
	-100+200#	7.18	57.0	19.6	5.10	1.46	8.62	3.03	2.78	1.60	0.14	0.39
	-200+325#	2.94	55.5	19.7	4.62	1.22	9.17	3.44	3.21	1.82	0.18	0.42
-325#	14.23	55.9	21.2	3.92	0.71	9.68	2.58	2.70	1.52	0.25	0.74	
tailing		100.00	52.8	13.7	4.49	0.37	10.5	1.83	0.98	0.42	0.12	0.11

두에서 비슷한 값을 보임을 알 수 있다. 따라서 이 지역은 기반암석 자체에 함유되어 있는 중금속의 농도가 높고 이 암석들이 풍화작용을 받을 경우 자연적인 중금속 오염도 발생할 수 있는 지역으로 판단된다. 그러나 오염토의 비소 함량이 토양입도가 미세할수록 높아지는 경향으로 보아 광산 활동에 의한 오염이 주로 발생하였으며 그 오염원은 광미, 분진, 광산폐수 등과 같이 이동성이 높은 물질일 것으로 판

단된다. 광미의 경우는 중금속 함량이 매우 높고, Pb, As, Zn의 존재비가 Pb : As : Zn = 1 : 3 : 1.6으로 비소의 농도가 가장 높게 나타났다.

한편 입도별 중금속 함량 및 1N염산에 대한 용출도(1N 염산 용출 중금속 농도 × 100 / 중금속 함량)를 비교하여 작성한 Table 9의 결과를 보면, 오염토에서는 입도가 미세할수록 그 값이 커지는 경향이 뚜렷하고 동일 입도에서 비오

Table 8. Heavy metal content of soil sample as a function of particle size

	particle size	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	As (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)
polluted soil	+8#	57	2	33	158	43
	-8+16#	50	2	55	171	33
	-16+35#	65	3	76	165	29
	-35+100#	83	1	189	177	28
	-100+200#	130	2	173	224	47
	-200+325#	154	2	182	267	51
	-325#	216	4	225	338	74
unpolluted soil	+8#	18	1	84	63	4
	-8+16#	63	2	39	121	29
	-16+35#	84	2	62	149	34
	-35+100#	57	1	47	145	23
	-100+200#	109	3	61	225	44
	-200+325#	83	2	54	236	49
-325#	116	2	67	282	83	
tailing		5051	265	15833	7928	1142

Table 9. Comparisons of heavy metal eruption ratio and contents in 1N hydrochloric acid

	particle size	Pb (%)	Cd (%)	As (%)	Zn (%)	Cu (%)	Cr (%)	Ni(%)
polluted soil	+8#	12.1	9.0	7.3	9.1	3.6	0.3	1.0
	-8+16#	47.0	15.0	59.6	9.5	5.5	0.8	1.9
	-16+35#	59.9	14.3	31.8	14.8	11.0	1.2	2.6
	-35+100#	71.7	46.0	40.1	15.8	17.6	2.2	3.5
	-100+200#	63.3	41.0	54.7	17.8	25.0	3.0	5.7
	-325#	102.0	93.0	53.0	46.7	61.9	6.4	11.1
unpolluted soil	+8#	77.7	22.0	2.2	13.3	31.3	1.2	3.8
	-8+16#	68.2	12.5	6.5	13.0	8.8	4.8	6.5
	-16+35#	52.2	17.5	4.1	14.1	12.5	6.4	7.8
	-35+100#	61.1	36.0	6.6	13.4	27.8	5.2	11.2
	-100+200#	31.3	15.7	5.0	10.7	21.9	3.1	3.5
	-200+325#	50.6	42.5	7.1	11.7	30.0	4.7	9.2
-325#	55.5	63.5	8.4	10.9	39.4	3.0	8.2	

염토의 경우 보다 큰 값을 보인다. 특히 비소의 경우는 이러한 그 차이가 매우 크게 나타난다. 이는 오염토가 비오염토에 비하여 풍화도가 큼을 의미한다. 따라서 오염지역의 오염원인에는 풍화의 진행에 따른 중금속 용출량의 증가도 어느 정도 기여한다고 생각된다.

동명지역 석력의 광물학적 특성

외관

동명지역의 토양에 함유되어 있는 석력을 육안으로 조사한 결과 Fig. 5와 같이 오염토와 비오염토내 석력의 구성암은 거의 동일하게 감섬석류, 화강암류, 규석류로 구성되어 있었으며 이들의 대략적인 구성비는 화강암 : 규석 : 각섬석류 = 2 : 3 : 5의 비율을 보였다.

중금속의 오염원

동명 지역의 폐석 적치장 등에서 광석과 광미를 채취하여 연마편으로 만든 다음 이들에 대한 SEM-EDS 분석으로 원소들의 분포상태를 파악함으로써 중금속의 오염원을 유추하였다.

Fig. 6은 광석 내에 입상으로 존재하는 황철석 부분을 촬영한 것으로 석영맥 내에 황철석이 관입 쌍정으로 존재하는 형태를 보인다. Fig. 7은 폐석적치장에서 발견되는 황갈색 풍화암의 표면에 하얗게 자라난 입자 부분을 촬영한 것으로 하얀 입자부분에서는 Ca, S, Fe의 파장이 강하게 나타

나는 것으로 보아 이는 석영맥 내에 포획되어 있던 황철석이 산화되는 과정에서 생성한 SO_4^{2-} 와 Ca^{2+} 가 만나 생성한 석고 결정으로 판단된다. Fig. 8은 석영맥 내에 거정질로 존재하는 황동석 입자 부분을 촬영한 것으로 Cu, Fe, S, P의 파장이 동일한 입자에서 강하게 나오는 것으로 보아 인을 다량 함유한 황동석(CuFeS_2)으로 판단되며 따라서 구리 오염의 원인물질이라 할 수 있다. 또한 이 황동석 입자의 중앙부에 Ca와 Mg의 파장이 새 모양으로 강하게 나타나는 부분이 관찰되며 이는 돌로마이트라고 판단된다.

Fig. 9는 폐석더미에서 발견되는 광석들 중에서 황철석을 다량함유하고 있으며, 풍화가 진행되어 풍화에 의해 균열이 발생한 광석(Fig. 5-d 참조)에 초음파를 조사하여 황철석 입자들을 탈리시킨 다음 수지로 굳히고 연마하여 제조한 연마편에 대한 관찰사진으로 대부분의 입자에서 Fe와 S의 파장만이 강하게 나타나 주로 황철석으로 구성되어 있음을 확인 할 수 있으며 좌중앙의 삼각형 입자로부터는 Zn과 S의 파장이 강하게 나타나므로 이는 심아연석으로 판단되고 이것이 아연오염의 원인 물질일 것으로 생각된다.

Fig. 10은 황철석 입자 내부로부터 미약한 아연과 카드뮴의 파장이 관찰되는 부분을 촬영한 것으로 아연과 카드뮴이 황철석의 철을 치환하여 균일하고 광범위하게 존재함이 관찰된다. Fig. 11은 광미에 대한 EDS 사진으로 광미는 대부분 SiO_2 , Al_2O_3 등의 화강암 조암광물로 구성되어 있으나 S, Fe, As, Zn 등도 함유하고 있으며 그림 속에서 1로 표

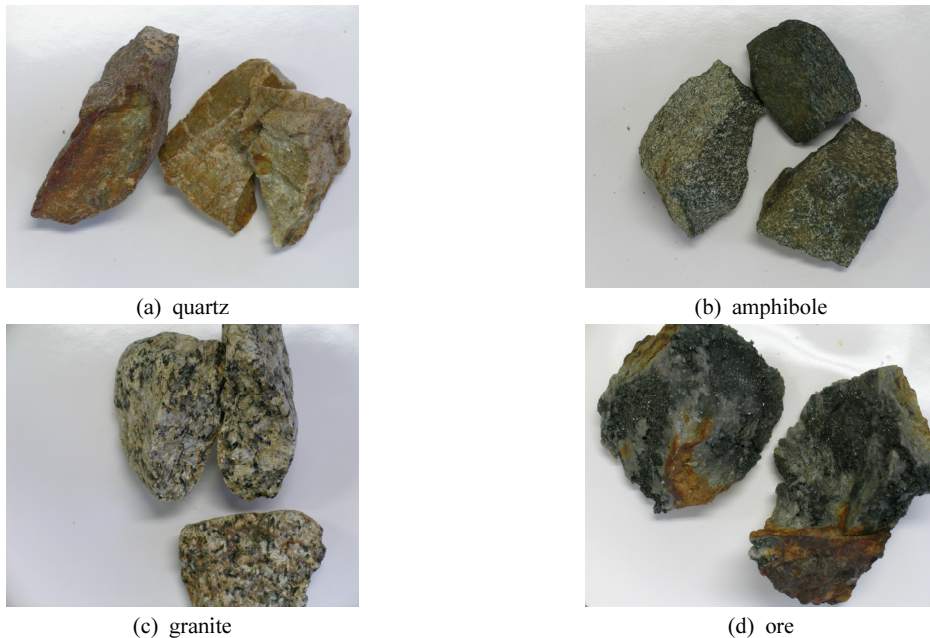


Fig. 5. Appearance of gravels in Dong-myung mine.

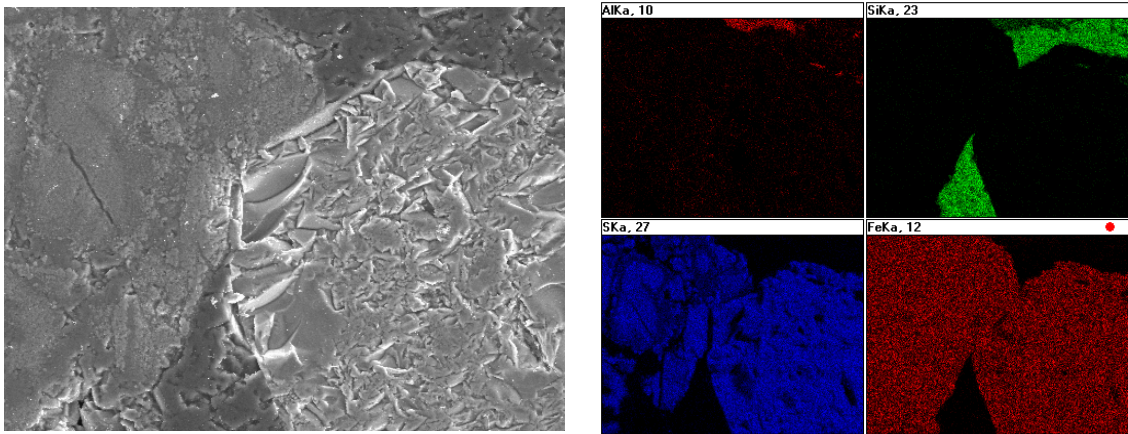


Fig. 6. The SEM-EDS image of pyrite.

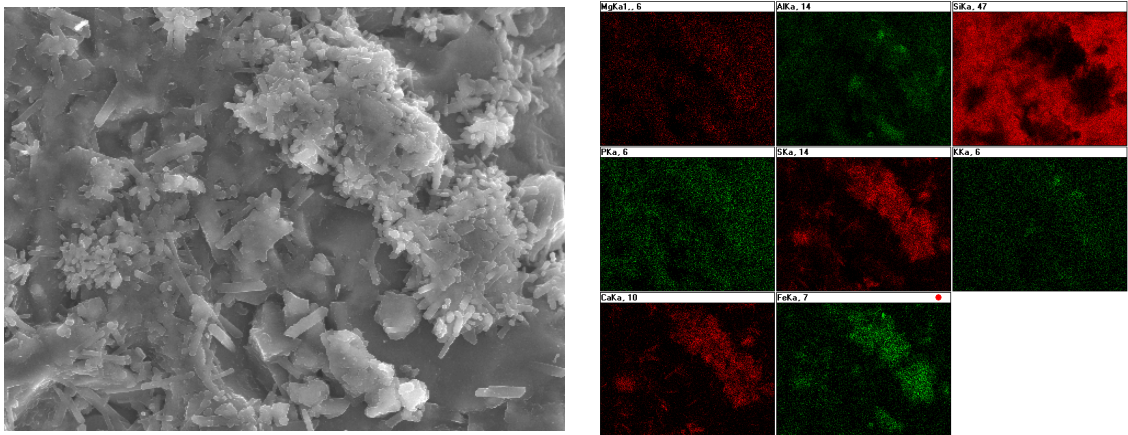


Fig. 7. The SEM-EDS image of gypsum.

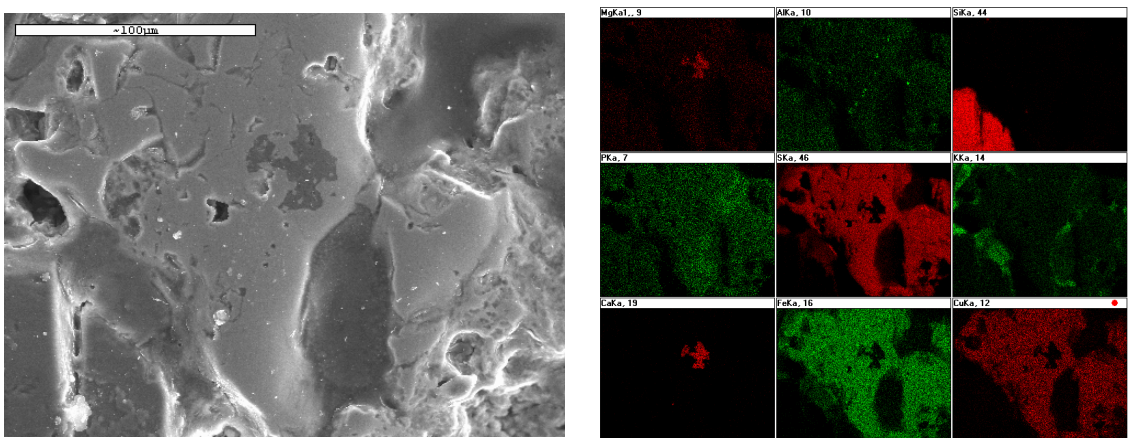


Fig. 8. The SEM-EDS image of chalcopyrite in quartz porphyry.

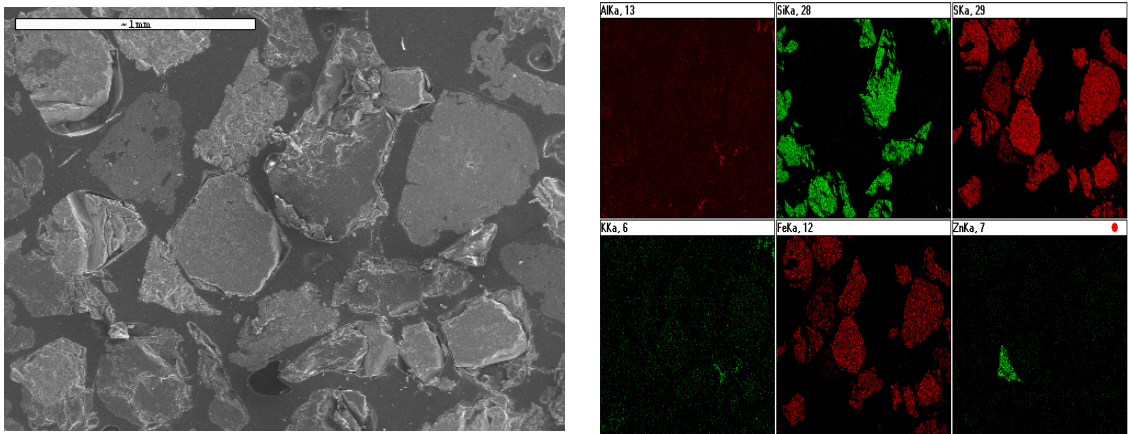


Fig. 9. The SEM- EDS image of ore particles prepared from weathered ore(fig. 5-d).

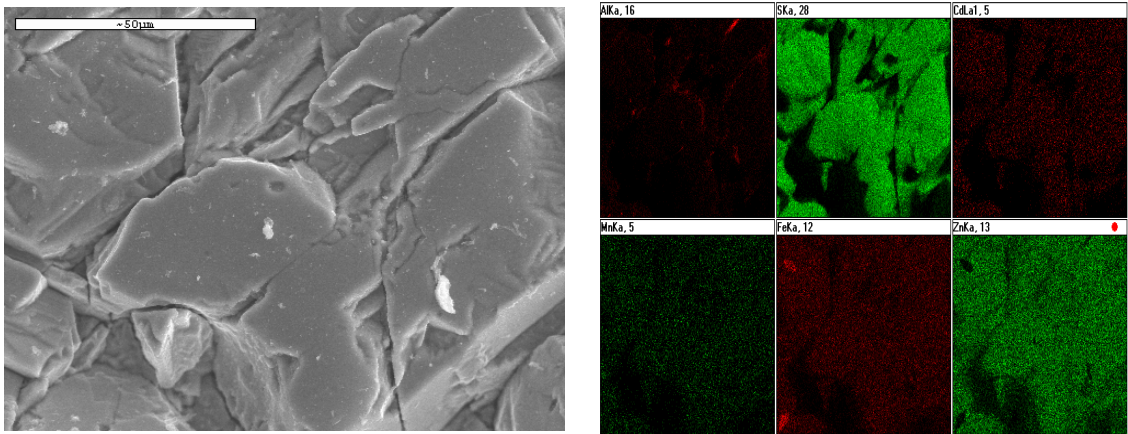


Fig. 10. The SEM-EDS image of pyrite which contains Zn and Cd.

시한 입자는 크기가 50 μm 정도인 유비철석 입자(마그네슘 함량도 높음)이며 비소의 오염원이다. 2로 표시한 부분은 약 50 μm의 거정질로 존재하는 섬아연석(불순물로 Fe를 함유하고 있음) 입자이며 아연의 오염원이다.

이상의 조사 결과에서 동명광산의 주 채광 대상인 함금 석영맥에는 금, 은 등의 목적광물과 함께 황철석, 유비철석, 황동석, 섬아연석 등이 공존하였으며, 비소오염의 원인물질은 유비철석이고, 아연의 오염 원인물질은 섬아연석이며, 구리는 황동석, 카드뮴은 황철석임을 알 수 있다.

한편, 대부분의 중금속 오염원인 물질들이 황화광물로 존재하는 것으로 보아 납(Pb)의 원인 물질도 방연석(PbS) 일 것으로 추정되나 금번 조사에서는 제한된 시료와 분석의 량 때문에 관찰할 수 없었다.

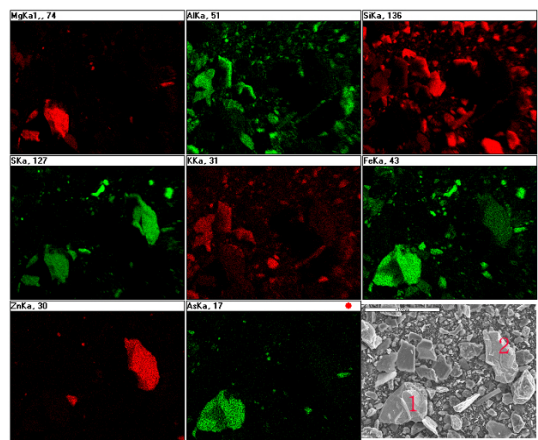


Fig. 11. The SEM-EDS image of tailing.

사 사

본 연구는 2014년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-220140046).

결 론

동명광산이 위치하였던 장찬골 계곡 일대의 토지와 임야에 대한 중금속 오염 상태 및 오염원에 대하여 조사하고 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

전체 표토 오염부지의 면적은 71,952 m²이며 이중 대책 기준을 초과하는 지역은 32,736 m²이다. 전체 오염토량을 계산한 결과 총 오염토량은 21,750.6 m³으로 조사되었다.

중금속 원소별 오염도는 As > Zn > Cd > Pb 순으로 높음을 보였으며, 비소의 우려기준 초과면적은 48,371 m²이고 대책기준 초과면적은 45,951 m²이며 이들 대부분은 심도 30~60 cm에 오염이 집중되는 특징을 보였다.

장찬골 상류부에 국부적으로 존재하는 오염은 광산활동과 관련성이 적어 보였으며, 중-하류의 오염은 광석적지장의 영향으로, 하류부의 오염은 하천 범람에 의한 광미와 광석의 확산에 기인한 것으로 추정 되었다.

동명광산의 주 채광 대상인 함금석영맥에는 금, 은 등의 목적광물과 함께 황철석, 유비철석, 황동석, 섬아연석 등이 공존하였으며, 비소오염의 원인물질은 유비철석이고, 아연의 오염 원인물질은 섬아연석이며, 구리는 황동석, 카드뮴은 황철석을 알 수 있었다.

References

Ahn, H.I., Kwon, Y.D., Kim, M.C., Seo, S.K. and Lee, S.H., 2007, "The environmental site assessments of Dalcheon Mine at Ulsan and the recommendation of

reclamation method," *Proceedings of the 2007 Seminar of the Korean Society of Engineering Geology, the Korean Society of Engineering Geology*, pp. 89-117.
 Kim, H.J., Yang, J. and Lee, J.-Y., 2003, "Fraction and Soil Pollution Assesment Index of heavy metals in cultivated land soils near the abandoned mine," *J. Soil & Ground water Env.*, Vol. 8, No. 4, pp. 53-63.
 Kim, K.B. and Hwang, J.H., 1986, *The Geological Map of Youngdong Area in Korea*, KIGAM, Korea.
 Korea Resources Corporation, 1986, *Prospecting and Digging*, No. 7, KORES, Korea.
 Korea Resources Corporation, 1987, *The Deposit of Korea*, No. 10, KORES, Korea.
 Korea Resources Corporation, 1990, *The Deposit of Korea*, No. 12, KORES, Korea.
 Ministry of Environment, 2003, *The fact-finding Investigation of soil contamination in the closed metal mine area of Kangwon-do, Gyeonggi-do, Cheonbuk, Cheonnam*, MOE, Korea.
 Ministry of Environment, 2005, *The fact-finding Investigation of soil contamination in the closed metal mine area(156 mine)*, 2005a, MOE, Korea.
 Ministry of Environment, 2006, *The Standard Methods for the examination of Water and Wastewater*, Notification No. 2006-52, MOE, Korea.
 Ministry of Environment, 2007, *The Standard Methods for the examination of soil contamination*, Notification No. 2007-26, MOE, Korea.
 Sullivan, P.J., 1988, "Iron sulfide oxidation and the chemistry of acid generation," *Env. Geol. Water Sci.*, vol. 11, pp. 289-295.
 Wonju Regional Environmental Office, 1999, *report of soil contamination fact-finding investigation in the closed metal mine area*, Wonju REO, Korea.



이 현 창

1981년 인하대학교 기계공학과 공학사
 1989년 Univ. of Maryland 공학석사
 1995년 Old Dominion Univ. 공학박사

현재 강원대학교 기계설계공학과 교수
 (E-mail; hyunlee@kangwon.ac.kr)



송 영 준

1986년 인하대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1988년 인하대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1997년 인하대학교 대학원 자원공학과 공학박사

현재 강원대학교 재료금속공학과 교수
 (E-mail; yjsong64@kangwon.ac.kr)