

의성 옥동광산 광미에 대한 광물학적 연구

Mineralogical Characterization of Mine Tailings in Okdong Mine, Euseong, Korea

김 준 영(Jun Young Kim)¹ · 유 총 석(Chung Seok Ryu)¹ · 최 승 원(Seung Won Choi) ·
장 윤 득(Yun Deuk Jang)² · 김 정 진(Jeong Jin Kim)^{1,*}

¹안동대학교 지구환경과학과

(Department of Earth & Environmental Sciences, Andong National University)

²경북대학교 지질학과

(Department of Geology, Kyungpook National University)

요약 : 의성 옥동광산에 적치되어 있는 광미는 미세분말로 이루어져 있으며, 주 구성광물은 황철석, 섬아연석, 녹니석, 일라이트, 사장석, 스멕타이트, 석고 등이다. 점토광물 중 스멕타이트는 광미 적치장 상부에 집중되어 있고 하부로 갈수록 녹니석이 증가한다. 석고는 광미 적치장 표면에 주로 나타나는데 이는 광미와 반응한 침출수가 증발하면서 침출수에 포함된 Ca와 SO₄가 반응하여 침전된 증발잔류물로 추정된다. 전자현미경 관찰 결과 광미에 포함된 섬아연석은 표면뿐만 아니라 내부까지 풍화되어 있는 것으로 보아 오랜 시간동안 지하수와 반응하여 다량의 Zn과 SO₄를 침출수에 부가되었을 것으로 추정된다.

주요어 : 광미, 황철석, 섬아연석, 점토광물, 증발잔류물

ABSTRACT : Tailings piled up at Okdong mine in Euseong consists of fine powder, and are mainly composed of pyrite, sphalerite, chlorite, illite, plagioclase, smectite, gypsum, etc. Smectite is concentrated in the upper part of tailings and chlorite is downwardly increased. Gypsum is generally observed on the surface of the mine tailings, suggesting that it was formed by the reaction of Ca and SO₄ in leachate after evaporation. Through the electron microscope study of sphalerite within the tailings, it was observed that there is significant weathering both on surface and in the inner part of the sphalerite, suggesting that the reaction of the tailings with groundwater for long period of time contributed a significant addition of Zn and SO₄ into the leachate.

Key words : tailings, pyrite, sphalerite, clay mineral, evaporation

서 언

20세기로 접어들면서 산업화가 가속됨에 따라 자원 소모량의 증가와 함께 무분별하게 자원을 개발하였으며, 1980년대 후반기에 우리나라의 산업 구조의 변화와 에너지 소비형태의 변화, 광업

의 경제성 감소 등으로 인하여 채광 활동이 위축되고 광산경영의 비합리성으로 인하여 많은 광산들이 휴광 혹은 폐광을 하게 되었다(광해방지사업단, 2006). 국내의 광업현황은 1998년을 기준으로 전국에는 906개 금속광산이 산재되어 있으며, 이 중에서 전체의 98.7%에 해당되는 894개소

*교신저자: jjkim@andong.ac.kr

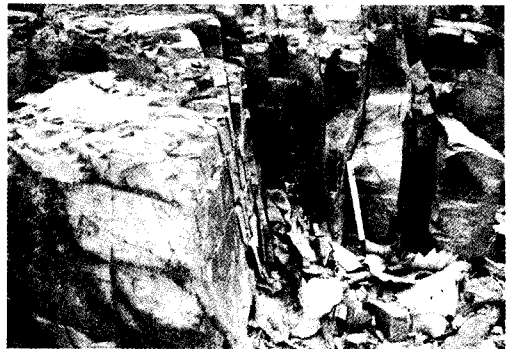
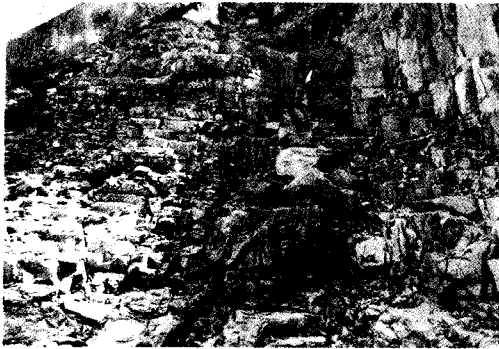


Fig. 1. Occurrence of outcrop around Okdong mine.

는 휴광 또는 폐광된 상태이다. 폐광된 광산 중 대부분은 갱내수나 침출수 유출, 광산폐기물에 의한 광해가 발생되고 있다. 광산의 휴·폐광시 폐광도, 광미, 폐석 등에 대한 적절한 조치를 취하지 않은 채 방치하여 주변 지역의 환경문제가 지속적으로 대두되고 있다.

폐광산에 대한 연구는 폐광산 주변의 토양 및 수계의 중금속오염 특성(Thompson and Turney, 1996; Dudka and Adriano, 1997; Bain *et al.*, 2001; 이재영 등, 1996; 이영엽 등, 2001; 이광춘 등, 2003; 이상훈과 정주연, 2004; 정명채 등, 2004; 김순오 등, 2006), 폐광산 복원 및 정화에 관한 연구(Freeman and Harris, 1995; Evanko and Dzombak, 1997; 박영석과 김진, 2000; 정명채, 2005; 이민희 등, 2008; 서상기 등, 2008), 폐광산 광미의 중금속 오염 및 용출 특성(정구복 등, 2005; 박창진 등, 2006; 최정찬, 2006) 광미의 활용연구(민경원 등, 1999; 전지혜 등, 2006) 등 다양하게 연구되었다. 안주성 등(2003)의 풍화광미 내 고상비소의 광물학적·화학적 특성 연구에서 밝혀진 광미의 구성 광물은 덕음, 동일 및 다덕 광산에서 공통적으로 자로사이트가 산출되었으며 비소광물로는 스코로다이트의 존재를 밝힌 바가 있지만 이는 비소의 용출 가능성 및 존재 가능한 화학종의 해석에 대한 연구에 초점을 맞추었으며 광미 자체에 대한 광물학적 특성 연구는 거의 없다.

본 연구에서는 옥동광산 주변 계곡에 적치해 놓은 광미를 대상으로 심도에 따른 수직적 광물상 변화양상과 입도분포를 밝히고, 광미 침출수에 부가될 수 있는 성분들에 대해 규명하고자 하였다. 이를 위해 광미에 대한 시추조사와 심도별 시료에 대한 X-선회절분석, 전자현미경관찰 등을 이용하여 광물감정을 실시하였다.

옥동광산 개요

경북 의성군 옥산면 감계리에 위치한 옥동광산은 2003년 석탄산업합리화사업단의 예산 지원을 받아 폐광 복원사업이 일부 진행된 상태이다. 갱입구를 시멘트로 폐쇄시키고 유출되는 갱내수는 수로를 설치하여 하류로 보내고 있다. 또한 광미를 계곡에 적치시킨 후 경사면에는 시멘트 블록으로 덮어 광미가 유실되는 것을 방지하도록 시공하였다. 광미를 적치해 놓은 댐 하부로 심각하게 오염된 침출수가 유출되고 있으며 침출수가 흐르는 하천 바닥에는 녹색, 흰색, 적색 등의 다양한 침전물이 생성되어 미관상 불쾌감을 주고 있다. 폐석은 갱도주변 산사면에 단순히 정지작업 후 식재를 실시하였지만 나무들의 성장상태는 매우 불량하다.

옥동광산 부근의 지질은 경상계 신라통의 퇴적암류인 회색 셰일, 담녹색 셰일, 담황색 내지 담회색 셰일, 담회색 사암, 적자색 셰일 등으로 구성되며 이들은 서로 호층을 이루고 있다. 옥동광산 주변의 사암은 괴상으로 나타나는 경우가 많지만 광미적치장 하부 노두에서 셰일은 층리와 fissility가 잘 발달하여 쉽게 부서진다(그림 1). 퇴적암류의 대체적인 주향과 경사는 NS~N15°E, 15~25°N이며, 습곡이나 특이할 만한 단층은 발견되지 않는다.

현재 광산에 존재하던 시설물은 선광장을 제외하고 정리가 되어 있으나 광미로 추정되는 막대한 적치물이 새곡지 입구에서부터 최상류까지 계곡을 완전히 충진되어있는 상태이다. 2002년까지 광미 적치물은 특별한 조치를 취하지 않은 채 계곡에 노출되었으나, 현재는 적치장 사면에 콘크리트블럭을 이용하여 광미가 유실되지 않도록 댐

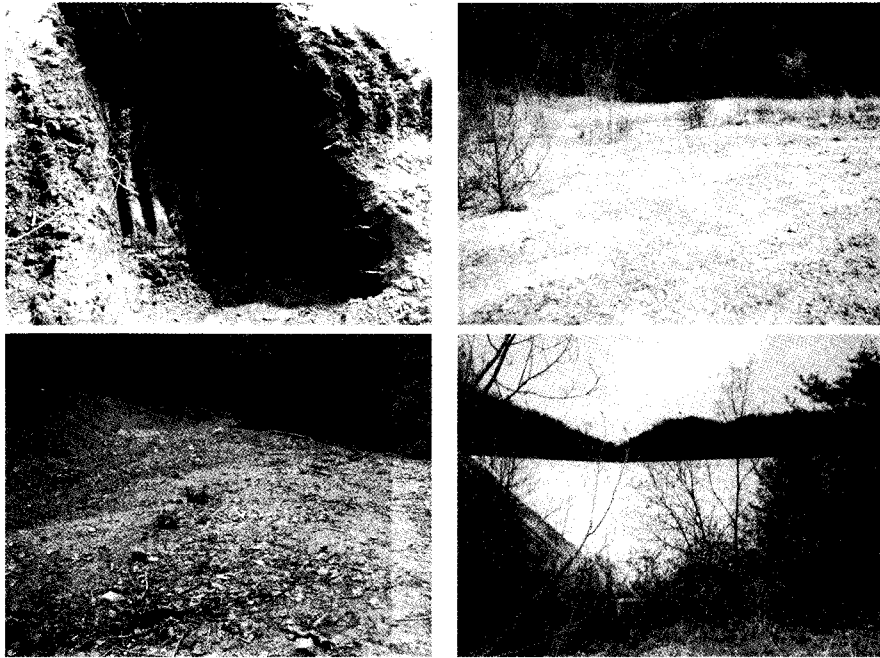


Fig. 2. Views of Okdong mine tailings.

을 설치해 놓았다.

광미 적치장은 사면에 광미유실 방지를 위한 콘크리트시설물을 설치하여 광미의 유실은 거의 없으나 시설물 자체가 측면 가장자리 부근이 부실하기 때문에 집중 강우시 부분적으로 유실될 가능성이 크다. 적치장 하부로 유출되는 침출수의 양은 아주 적은 편이나 강우시 그 양이 증가하며 광미와 오랜 시간 동안 반응한 후 배출된 침출수이기 때문에 계절에 따라 약간의 차이가 있지만 Ca, Zn, Mg, Mn, SO₄의 농도가 아주 높게 나타난다(광해방지사업단, 2006).

광미 적치장 상부는 노란색깔을 나타내는 점토로 약 20~30 cm 복토를 하였으나 적치장 상류쪽의 복토가 하류쪽으로 이동하여 적치장 입구에 퇴적되어있으며, 계곡으로부터 유입된 모래, 자갈 등의 퇴적물이 표면에 쌓여있다(그림 2). 선광 당시 적치한 광미는 미세입자로 구성되어 있으며 폐석은 적치시키지 않은 상태이다.

강수량이 많은 경우, 주변 수계로부터 유입된 빗물은 인공 수로를 따라 광미적치장을 거치지 않고 적치장 하류의 하천으로 유입되도록 수로를 설치하였으나 현재는 수로입구 부분이 유실되어 계곡물은 모두 새곡지 광미적치장을 통하여 하류로 흘러가거나 광미 적치장 내부로 유입되어 광미의

함수량을 증가시키고 있다. 광미 자체가 미세한 점토 입자로 구성되어 있기 때문에 지하수의 유동성은 적으나 그 만큼 광미와 지하수의 반응이 지속되어 오염도는 높아질 것으로 생각된다.

연구 방법

연구시료의 채취 및 준비

광미의 구성 광물의 종류와 입도의 수직적 분포를 알아보기 위하여 광미 적치장 하류 부근에서 시추를 실시하였다(그림 3). 광미 적치장 표면부터 기반암까지의 깊이는 14.5 m이며 광미장 하부 기반암은 심하게 풍화된 암회색의 사암으로 구성되어 있다. 시추공 상부에서 2~3 m 간격으로 시료를 채취하여 실온에서 건조하여 실험에 사용하였다. 적치된 광미에는 기반암까지 폐석이 혼합되어 있지 않으며 광미의 입자 크기 변화는 크지 않다.

분석방법

광미 시추시료에 대한 심도별 입도 분석은 광미를 실온에서 건조 시킨 후 표준채로 체질하여

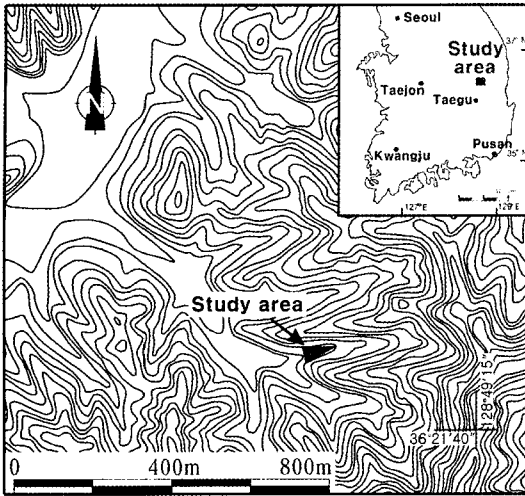


Fig. 3. Sampling site in the Okdong mine area.

각 구간의 잔류량과 잔류율 등을 계산하였다. 폐석과 광석에 대해 구성광물의 종류와 특징을 연구하기 위하여 실체현미경 관찰 및 X-선 회절 분석을 실시하였다. X-선 회절 분석 시 조건은 CuK α 선을 이용하여 3~70° 2 θ 구간, 1°/min로 분석하였다. 회절선의 강도가 간섭에 의해 약하거나 중첩되어 정확한 회절선의 위치를 알 수 없는 시료에 대해 포항가속기연구소(PAL)의 8C2빔라인(고해상도분말회절: HRPD)을 이용하여 분석하였다. 분석조건은 1초(scanning time), 0.05° (2 θ step)으로 5~130° 2 θ 구간의 회절분석을 실시하였다. 광미에 포함된 광물에 대한 정확한 형태와 표면 특성 및 풍화 양상을 연구하기 위하여 JEOL-JSM-6300 모델의 주사전자현미경 관찰을 실시하였다.

연구 결과

심도별 입도 분석

그림 4와 그림 5는 각각 광미 적치장 시추공 2 m와 8 m 깊이에서 채취한 광미시료에 대한 입도 분석 결과이다. 광미 적치장 2 m 깊이에서 채취한 시료는 No. 60 (0.250 mm)에 99%, No. 200 (0.075 mm)에 83% 이상 통과하였으며, No. 325 (0.045 mm)에 통과하는 비율이 70% 이상이다. 8 m 깊이에서 채취한 시추시료도 이와 유사한 No. 60에 98%, No. 200에 78% 이상 통과하였으며 No. 325에 통과하는 비율은 67% 이상으로 2 m에

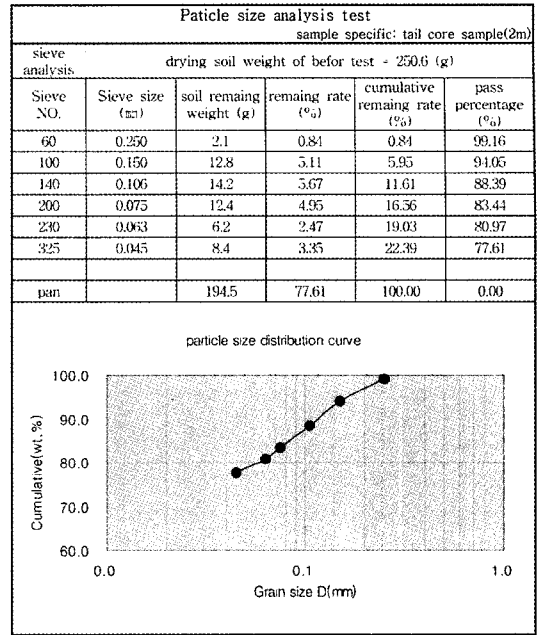


Fig. 4. Particle size analysis of core sample (2 m).

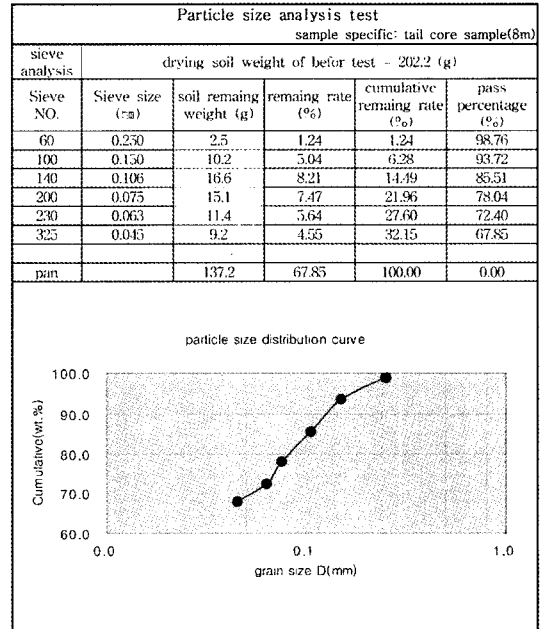


Fig. 5. Particle size analysis of core sample (8 m).

서 채취한 시료보다 입자 크기가 다소 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 옥동광산의 광미는 No. 325에 70% 가까운 통과율을 나타내기 때문에 극

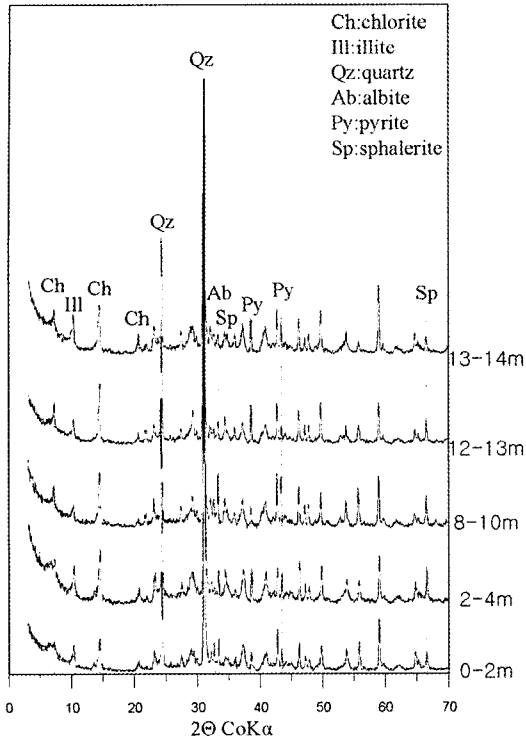


Fig. 7. Differential X-ray diffraction patterns for depth of mine tailings.

의 꽃모양 결정으로 산출되기도 한다. 광미 적치장 표면에 다량의 석고가 산출되는 것은 광미와 반응한 침출수가 증발하면서 침출수에 포함된 Ca와 SO₄가 침전되어 형성된 것으로 생각된다. 산성광산 배수의 증발잔류물 연구(김정진 등, 2003; 박천영 등, 2003; 박천영 등, 2005)에 의하면 산성광산 배수를 증발시킬 경우 생성되는 광물로는 석고(CaSO₄ · 2H₂O), 엉소마이트(MgSO₄ · 7H₂O), 헥사하이드라이트(MgSO₄ · 6H₂O), 알루노겐(Al₂(SO₄)₃ · 17H₂O) 등이 형성되며 증발잔류물의 종류는 산성광산 배수의 화학적 특성에 의해 결정된다. 의성옥동광산의 경우 침출수에 Ca, Zn, Mg, Mn, SO₄의 농도가 높기 때문에 증발잔류물에는 Ca, Zn, Mg, Mn-황산염 광물이 생성될 가능성이 아주 높다.

광미 적치장 깊이에 따른 시추시료의 X-선 회절분석 결과 광미의 주 구성광물은 황철석과 섬아연석이며 그 외 규산염광물로 석영과 녹니석, 일라이트, 사장석 등을 포함하고 있다(그림 7). 광해방지사업단 보고서(2006)에 의하면 의성옥동광산의 폐석과 광석에 포함된 광석광물에는

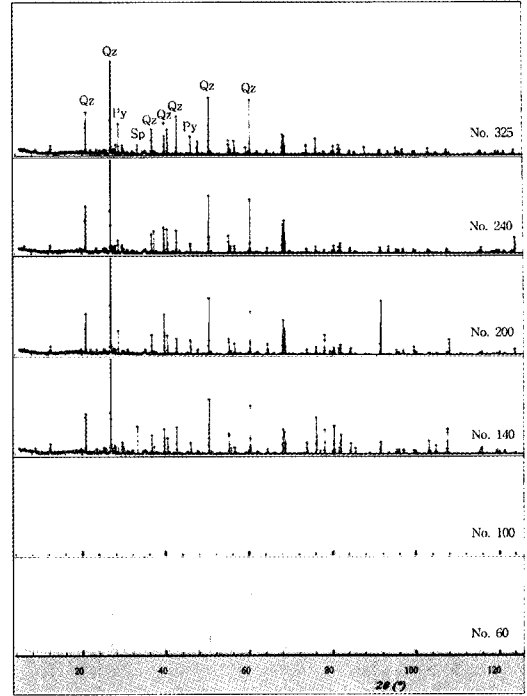


Fig. 8. HRPD patterns for grain size of mine tailing.

섬아연석(sphalerite: ZnS)과 방연석(galena: PbS), 브로칸타이트(brochantite: Cu₄(SO₄)(OH)₆), 세루사이트(cerussite: PbCO₃)와 리나라이트(linarite: CuPb(SO₄)(OH)₂) 등이다. 깊이에 따른 광물 조성 변화는 크지 않지만 적치장 하부로 갈수록 스�멕타이트의 함량이 감소하고 녹니석의 함량이 다소 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 광미에 포함된 대부분의 광물은 분포는 균일하지만 풍화에 의해 생성되는 점토광물의 종류와 함량의 변화가 나타나는 것으로 추정된다.

광미에 포함된 규산염광물의 경우 대부분 석영이며 사장석은 소량 포함되어 있다. 석영의 경우 풍화에 강해 그대로 남아 있을 수 있으나 사장석은 풍화에 약해 일라이트나 다른 점토광물로 변해 그 양이 현저히 감소한 것으로 추정된다.

고분해능분말회절분석(HRPD)

광미의 입자크기에 따른 광물 조성 변화를 자세히 연구하기 위하여 고분해능분말회절분석을 실시하였다. 분석결과 광미의 깊이에 따른 X-선 회절분석결과와 광물 조성은 유사하다. 광미를 구

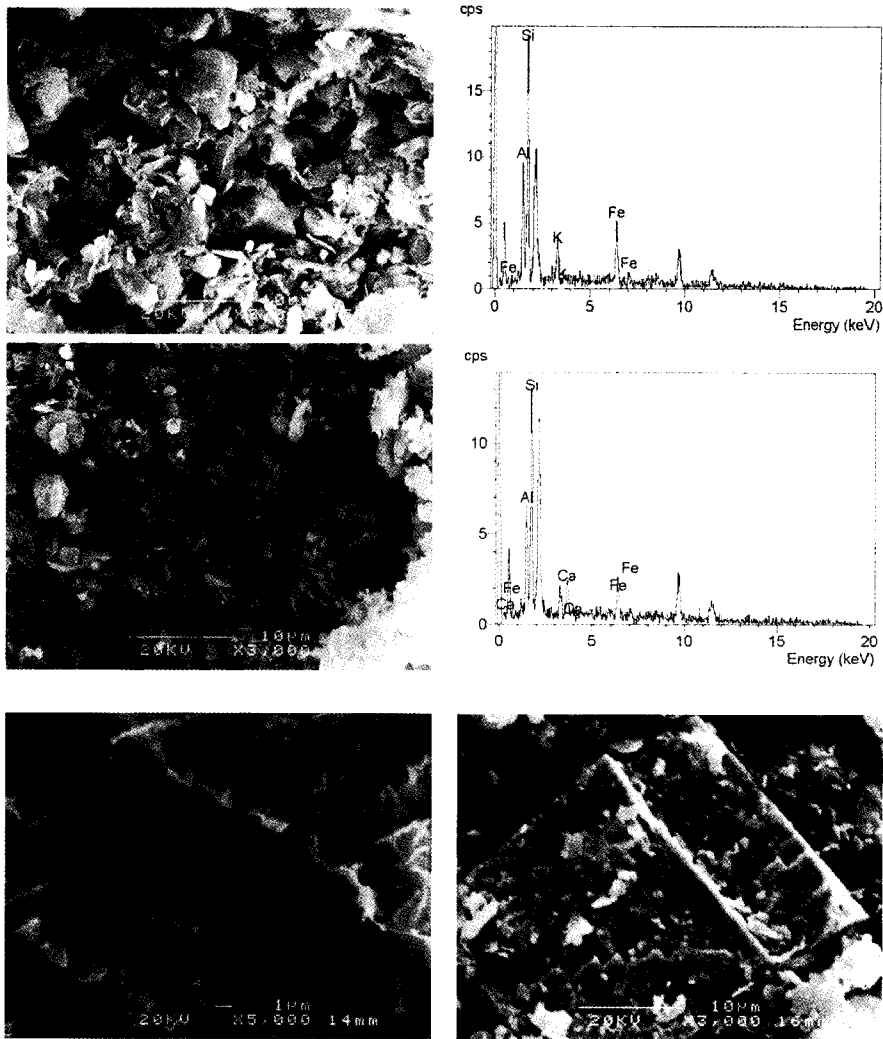


Fig. 9. SEM microphotographs and EDS patterns of mine tailing samples.

성하고 있는 광물은 석영, 황철석, 섬아연석, 녹니석 등으로 광미에 포함된 금속광물은 대부분 황철석이며 약간의 섬아연석을 포함하고 있다. 입도에 따른 광물의 분포는 표준체 No. 60에서부터 No. 325까지 광물 조성과 량에 큰 차이를 나타내지 않는 것을 알 수 있다(그림 8). 이는 광미의 입자 크기에 따른 각 광물의 함량비는 거의 변화가 없이 균일하게 분포되어 있다는 것을 의미한다.

주사전자현미경(SEM)

시추시료에 대한 SEM 분석결과 일라이트와 석영 등과 같은 규산염광물이 대부분이며, 금속

광물로는 섬아연석을 관찰할 수 있다. 섬아연석의 경우 표면부에는 2차광물이 생성되는 양상을 보여주며 내부까지 심하게 풍화되어 다공상의 조직을 나타낸다(그림 9). 광미에 포함된 섬아연석은 오랜 시간동안 지하수와 반응하여 표면뿐만 아니라 내부까지 풍화되어 다량의 Zn과 SO₄를 침출수에 부가했을 것으로 추정된다.

토 의

연구지역의 광미는 극히 미세한 분말로 구성되어 있으며, 복개토를 제외하고 흑회색을 나타내고 있으며 깊이에 따른 색깔변화는 거의 없다.

광미의 주 구성광물은 황철석과 섬아연석이며 그 외 규산염광물로 석영과 녹니석, 일라이트, 사장석 등을 포함하고 있다. 스펙타이트와 석고를 제외하고는 심도에 따른 구성광물의 큰 차이는 없다. SEM 분석결과에서 전체적인 시료에서 비슷한 양상의 광물을 관찰 할 수 있다. 따라서 연구지역 광미적지장의 수직광물분포는 거의 일정한 것을 알 수 있다. 입도분석결과 심도에 따른 입도차이가 크지 않아 광미적지장으로 외부에서 유입된 자갈이나 모래를 제외하고는 균질한 입도분포를 나타낸다.

광미 적지장 상부에는 스펙타이트가 우세한 것은 상부의 복개토의 영향 때문인 것으로 추정된다. 광미에 포함된 규산염광물은 주로 석영이고 장석이 소량 포함되어 있는데 이는 석영의 경우 풍화에 강하므로 존재하기 쉬우나 장석의 경우 풍화에 약해 일라이트나 다른 점토광물로 변해 그 양이 현저히 감소한 것으로 생각된다. 복개토 표면의 석고는 광미와 반응한 침출수가 증발하면서 침출수에 포함된 Ca와 SO₄가 침전되어 형성된 것으로 생각된다.

광미에 포함된 섬아연석은 표면부에는 2차광물이 생성되고 있으며 내부까지 풍화되어 다공상의 조직을 나타내는 것으로 보아 지하수와 반응하여 다량의 Zn과 SO₄를 침출수에 부가시킬 것으로 추정된다.

참고문헌

광해방지사업단 (2006) 옥동광산 광미 및 침출수 처리 방안 연구, 광해방지사업단, 232p.
 김순오, 정영일, 조현구 (2006) 삼산제일 · 삼봉 동광산 주변 수계의 중금속 오염도 평가. 한국광물학회지, 19, 171-187.
 김정진, 김수진, 김윤영 (2003) 동해탄광 일대 산성광산배수의 지화학적 특성 및 증발잔류물에 대한 광물학적 연구. 자원환경지질학회지, 36, 103-109.
 민경원, 이필호, 진호일, 연규석 (1999) 폴리머 시멘트 모르타용 골재로서 금속광산 폐광미의 활용 연구, 자원환경지질학회지, 32, 13-18.
 박영석, 김진 (2000) 덕음광산 선광광미와 주변토양의 중금속에 대한 수평 · 수직적인 분산에 관한 연구. 자원환경지질학회지, 33, 91-100.
 박창진, 김원일, 정구복, 이종식, 류중수, 양재의 (2006) 도곡광산 광미의 중금속 용출 특성. 25, 한국환경농학회, 316-322.
 박천영, 박신숙, 김성구, 조갑진, 김성수 (2003) 증발작용에 따른 광산배수의 수질변화와 증발잔류광물에 대한

지구화학. 한국지구시스템공학회지, 40, 329-344.
 박천영, 조갑진, 김성구 (2005) 산성 광산배수로부터 형성되는 증발잔류광물의 생성량과 지구화학. 한국지구과학학회지, 26, 524-540.
 서상기, 이상화, 손정호, 장운영 (2008) 폐광산 주변 오염토양 정화를 위한 실규모 토양세척공정 적용, 지하수토양환경학회지, 13, 70-75.
 안주성, 김주용, 전철민, 문희수 (2003) 풍화광미내 고상 비소의 광물학적 · 화학적 특성 및 용출 가능성 평가. 자원환경지질학회지, 36, 27-38.
 이광춘, 김세현, 이승호, 서용찬 (2003) 동명 금-은 광산 주변의 중금속 오염. 자원환경지질학회지, 36, 17-25.
 이민희, 이에선, 양민준, 김종성, 왕수근 (2008) 폐광산 주변 중금속 오염 농경지 토양 복원을 위한 석회 (CaO)와 석회암(CaCO₃)의 안정화 효율 규명. 자원환경지질학회지, 41, 201-210.
 이상훈, 정주연 (2004) 토양수의 지구화학특성에 따른 금속폐광산 광미야적장 주변 토양오염평가: 덕음광산. 자원환경지질학회지, 37, 61-72.
 이영엽, 정재일, 권영호 (2001) 팔봉광산 선광광미와 주변토양의 중금속 오염 특성. 자원환경지질학회지, 34, 271-281.
 이재영, 이인호, 이순영 (1996) 금속 폐광산 주변의 토양, 식물 및 하천의 중금속오염에 대한 지화학적 연구 - 달성 및 경산광산. 자원환경지질학회지, 29, 597-613.
 전지혜, 김인수, 이민희, 장운영 (2006) 금속 광미 처리를 위한 포틀랜드 시멘트와 MSG (micro silica grouting) 시멘트 고행화 실증 실험 연구. 자원환경지질학회지, 39, 699-710.
 정구복, 김원일, 이종식, 이재생, 박찬원, 고문환 (2005) 국내 폐금속광산 주변 잔류광미의 중금속 오염특성. 한국환경농학회지, 24, 222-231.
 정명채 (2005) 제강 슬래그, 우분 및 석회석을 활용한 폐 석탄광의 산성광산배수 처리. 지하수토양환경학회지, 10, 16-23.
 정명채, 정문영, 최연왕 (2004) 국내 휴/폐광 금속광산 주변의 중금속 환경오염 평가. 자원환경지질학회지, 37, 21-33.
 최정찬 (2006) 울산폐철광산 광미 안정화를 위한 인회석의 중금속 제거 실내실험. 한국지하수토양환경학회지, 11, 1-9.
 Bain, J.G., Mayer, K.U., Blowes, D.W., Frind, E.O., Molson, J.W.H., Kahnt, R., and Jenk, U. (2001) Modelling of closure-related geochemical evolution of groundwater at a former uranium mine. Journal of Contaminant Hydrology, 52, 109-135.
 Dudka, S. and Adriano, D.C. (1997) Environmental impacts of metal ore mining and processing: A review, J. Environ. Qual. 26, 590-602.
 Freeman, H.M. and Harris, E.F. (1995) In situ Soil

- Flushing, Hazardous Waste Remediation : Innovative Treatment Technologies, Technomic Publishing Company, Inc., 131-138. 542-546.
-
- Thomson, B.M. and Turney, W.R. (1996) Minerals and mine drainage. Water Environment Research 68, 접수일(2008년 7월 9일), 수정일(1차 : 2008년 8월 18일, 2차 : 2008년 9월 10일), 게재확정일(2008년 9월 10일)