영양 용화광산의 광미 및 침출수의 광물학적 및 지화학적 특성 연구

강 한¹ · 김영훈² · 장윤득³ · 김정진^{4*}

¹아름다운환경건설(주), ²안동대학교 환경공학과, ³경북대학교 지질학과, ⁴안동대학교 지구환경과학과

Studies on Mineralogical and Geochemical Characterization of Tailings and Leachate Water in Yonghwa Mine, Yeongyang Area

Han-Kang¹, Young-Hun Kim², Yun-Deug Jang³ and Jeong-Jin Kim^{4*}

¹Beautiful Environment Construction Corporation

²Department of environmental Engineering, Andong National University

³Department of Geology, Kyungpook National University

⁴Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

Current study includes the analysis of mine tailings and leachate water and prediction of species originated from the tailings. The variation of contaminants were measured upon the distance from the tailings to the nearby stream. The ions concentration was highest at the tailings and pit mouth and it becomes lower as it goes far away from the origin. This is the reason that the leachate was diluted with the uncontaminated stream water. The tailings were mainly classified into reddish one and yellow one. The main mineral of reddish tailings were quartz, illite, plumbojarosite and a small amount of sphalerite. The main mineral of yellow tailings were muscovite, quartz, plumbojarosite, and a small amount of chalcopyrite and sphalerite. Pb and Zn were found in the leachate in high concentration and become the major contaminants. These come from the dissolution of plumbojarosite and sphalerite contained in the mine tailings.

Key words : mine tailings, leachate, mine water, plumbojarosite, sphalerite

용화광산의 광미와 침출수에 대한 분석을 실시하여 광미로부터 부과될 수 있는 성분을 예측하고, 침출수가 주변하천으로 유입될 때 오염물질의 거리에 따른 변화를 측정하였다. 하천수의 거리에 따른 변화는 갯내수와 침출수가 유출되는 지점에는 대체로 높게 나타나고 하류로 갈수록 이온의 농도는 급격히 낮아진다. 이는 침출수에 비해 훨씬 유량이 많은 비오염하천수에 의한 희석효과 때문이다. 광미는 붉은색과 노란색으로 구분되며 붉은색 광미의 주 구성광물은 석영, 일라이트, 플럼보자로사이트와 약간의 섬아연석이며 노란색 광미는 백운모, 석영, 플럼보자로사이트(Plumbojarosite) 그리고 소량의 황동석(Chalcopyrite)과 섬아연석(Sphalerite)을 포함하고 있다. 침출수에서 높은 값을 나타내는 Pb, Zn 등은 광미에 포함된 플럼보자로사이트와 섬아연석의 용해작용에 의한 것으로 하천수의 오염에 주원인으로 작용하고 있다.

주요어 : 광미, 침출수, 갯내수, 플럼보자로사이트, 섬아연석

1. 서 언

국내 광산은 1920-1930년대에 본격적으로 개발되기 시작하여 1960년대 및 70년대에 국가 산업 활동의 기초가 되는 원료자원을 확보하는 기간산업으로 개발되

었다. 하지만 90년대 이후 광량 고갈 및 국제자원가격 하락으로 인한 채산성 악화로 대부분의 광산이 폐광되었으며, 대다수의 폐광산들은 환경보호 조치와 같은 사후 처리를 하지 않은 상태로 방치되어 있다.

휴·폐광산에는 갯도 및 폐석과 광물찌꺼기와 같은

*Corresponding author: jikim@andong.ac.kr

광산폐기물 적치장이 존재하고 있다. 폐 갱도에서는 오염된 갱내수가 지표 환경으로 유출되기도 하며, 광산 폐기물이 유실되거나 혹은 침출수를 발생시켜 인근 수계 및 토양환경을 오염시킨다. 이러한 갱내수 및 침출수의 유출, 광산폐기물 유실에 의한 주변의 환경오염 정도는 폐광 시 사후 처리, 광산 개발 방식, 개발 정도, 지질, 광종 및 광산 주변환경에 좌우된다. 휴 · 폐광산의 갱내수 및 침출수와 광산폐기물에 의한 수질 및 토양 환경오염은 폐광지역의 자연환경 오염과 폐광산 주변의 거주민의 민원을 초래하여 사회적 문제를 일으킬 수 있다.

국내에서도 광산주변 수계의 산성광산 배수(AMD: Acid Mine Drainage)에 대한 연구와 이들에 대한 중금속 오염에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 산성광산배수와 관련된 연구에는 동해탄광의 하상퇴적물의 지화학적 특성(Oh, et al., 1995), 평창지역 일대 폐석탄광산의 산성광산배수에 대한 오염평가 (Jung, 2003), 산성광산배수 오염지역 투수성 반응벽체 반응매질 선정에 대한 실험(Ji and Cheong, 2005), 대성탄광 산성폐수에 의한 오염(Song, et al., 1997), 화순 폐탄광지역 광산배수와 침전 및 증발산류광물에 대한 지구화학적 및 광물학적 연구 (Park, et al., 2000), 광산오염 지역에서 2차광물의 생성이나 광산오염 방지와 대책에 관한 연구(Kang et al., 2006; Lee et al., 2010; Kim et al., 2006; Cheong, 2004; Kim and Kim, 2002) 등이 있다.

국외에서는 지난 30년 간 광산주변 환경에 미치는 광산폐기물 내 중금속 원소들의 잠재적이고 실제적인 영향을 평가하기 위한 적절한 방법을 찾기 위해 많은 기초적인 연구가 이루어져 왔다. 즉, 총함량분석, 광미-물 상호반응에 대한 실험실 규모의 simulation 연구 (Humez et al., 1997; Kedziorek et al., 1998), 중금속의 광물학적 형태에 관한 연구(Walder and Chavez, 1995; Davis et al., 1998), 산성광산배수의 산도를 예측하기 위한 연구(Jennings and Dollhopf, 1995; Jurjovec et al., 2002; Equeenuddin et al., 2010; Davies et al., 2011), 중금속의 존재 형태 규명을 위한 연속추출방법에 대한 연구(Clevenger, 1990), 중금속의 이동과 확산과 관련된 지화학/수리지질학적 모델링 연구(Appel and Reilly, 1994; Alpers and Nordstrom, 1994) 등 다양한 연구가 이루어져왔다.

본 연구는 영양 용화광산의 광물찌꺼기 적치장으로부터 유출되는 침출수의 수리화학적 특성을 연구하여

용화광산 침출수가 주변 수계에 미치는 환경오염 정도를 파악하는 것이다. 이를 위해 용화광산 광미의 광물 분석을 실시하였으며, 침출수와 주변 하천수의 중금속 오염 정도를 측정하였다. 폐광산에 대한 연구에 의하면 각 광산의 특성에 따라 갱내수나 침출수의 특성이 다르게 나타난다. 이미 광해 복구사업이 진행된 폐금속광산인 용화광산에서 나타나는 갱내수, 침출수, 하천수에 대한 수질 특성에 대한 결과는 향후 다른 폐금속광산의 복구사업에서 나타날 수 있는 수질특성을 예측하는 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 연구 지역의 개요

용화광산은 금, 은, 동, 연, 아연을 대상으로 개발된 광산으로 광산의 광업권은 1936년에 일본인에 의해 등록되어 채광이 시작되어 1994년에 광업권이 소멸되었다.

행정구역상 경상북도 영양군 일월면 용화리 소재 일월산 부근에 위치하고 있으며, 지리적으로 서측부인 일월산 계곡부 내에 있는 갭구에서부터 동측부의 선광장에 걸쳐 위치하고 있다. 지리좌표 상으로는 E129°07' - E129°08', N36°49' - N36°50'이다. 해발 1,150 m의 일월산 내 계곡부의 650 m 지점부터 하류방향인 북동방향으로 1.5 km에 걸쳐 갭구와 폐석장이 위치하고 있다. 폐석장으로 부터 남동방향으로 1 km 거리에 용화광산 선광장이 위치하고 있으며, 선광장 주변의 광물찌꺼기 적치장은 복토공사 후 자연환경 체험 교육장으로 활용하고 있다.

광산 주변의 소하천은 계곡에서부터 흘러나와 도로를 따라 남동방향으로 흐르는 너비 10-20 m의 하천과 합류한다. 소규모 경작지가 하천주변의 산사면과 평지에 분포하고 있으며 주변 하천수를 농업용수로 사용하고 있다.

연구지역의 지질은 북부에 선캄브리아기의 운모편마암, 편암, 규암, 석회암, 각섬암 등의 변성퇴적암류와 이를 관입한 화강암, 페그마타이트 등으로 구성된 평해통과 원암층이 서로 부정합으로 직접 맞닿아 있으며, 남부에는 중생대 하양층군의 퇴적암이 피복하고 있다. 영양소분지에 분포하는 하양층군은 독자적인 8개의 육성퇴적층으로 이루어져 있으며, 하부로 부터 울런산층, 동화치층, 가송동층, 청량산층, 오십봉층, 도계동층, 기사동층, 신양동층으로 분류한다. 이들의 구성암석은 알코즈 사암, 적색 혹은 흑색 셰일, 역질 사암, 역암 등이 서로 교호하고 있다.

Fig. 1. Sampling site of stream and leachate water in the study area.

3. 연구방법

3.1. 시료 채취

용화광산 주변 수계에서 2007년 7월부터 2008년 6월까지 1개월 간격으로 하천수와 침출수, 갯내수를 거리와 채수 조건을 고려하여 하천수 6, 갯내수 1, 침출수 1개 지점에서 채취하였으며, 동절기 때 하천이 결빙되거나 건천이 되어 시료채취가 불가능한 지점을 제외하고 매월 동일 지점에서 시료를 채수하였다. 갯내수는 갯구 앞 갯내수가 유출되는 지점에서 채수하였으며, 하천수는 하천을 따라 소하천 합류지점 등을 고려하여 200-300 m 간격으로 채수하였다(Fig. 1). 침출수는 선광장 하부에 광물찌꺼기 적치장으로 부터에서 유출되어 하천으로 유입되는 지점에서 채수하였다. 물 시료는 채취 시 현장에서 pH, 온도, 전기전도도(EC) 등을 측정하였다. 광물 분석을 위한 시료는 광미 적치장과 주변 폐석 더미에서 채광 당시 광석으로 추정되는 시료를 채취하였다.

3.2. 시료 처리 및 분석방법

물시료 채취 시 현장에서 pH, 온도, 전기전도도(EC)를 휴대용 HANNA HI9828를 이용하여 측정하였다. 채수한 시료는 현장에서 0.45 μm membrane filter를 이용하여 여과를 한 후 약 500 ml를 채수하였으며,

양이온 분석에 사용될 시료는 HNO_3 을 첨가하여 pH를 낮추었다. 채수한 시료는 아이스박스에 보관 운반하였으며 분석 시까지 4°C로 냉장 보관하였다. 침출수가 유출되는 지점 부근의 하천바닥에 침전되는 붉은색 침전물은 자갈에 피복된 것을 하천수와 같이 채취하여 원심분리 후 광물학적 특성을 연구하였다.

하천수, 갯내수, 침출수에 포함된 양이온은 Spectro Flame Modula S 유도쌍극자플라즈마분광분석기(ICP-AES), Elan DRC-e 유도쌍극자플라즈마질량분석기(ICP-MS), SpectrAA 220FS를 이용하였으며, 음이온은 Dionex DX-600 이온크로마토그래피를 이용하여 분석하였다.

용화광산 주변의 폐석, 광미에 대한 정확한 광물 조성을 연구하기 위하여 포항가속기연구소의 8C2 빔라인 고해상도분말회절분석($\lambda=1.5490\text{\AA}$)을 실시하였다. 광미의 미세구조와 형태, 구성광물의 정성 및 반정량적 분석을 위해 주사전자현미경(JSM-6300, SEM & EDS)관찰을 실시하였다.

4. 연구 결과

4.1. 수질 특성

4.1.1. 갯내수의 특성

용화광산은 채광 당시만 해도 다수의 갯구가 있었던

Fig. 2. Variations of pH, EC and major cations in mine water with months.

것으로 보고되지만 확인된 곳은 총 4개로 2개가 폐쇄되어 있으며 폐쇄된 갱구에서는 갱내수가 유출되지 않는 상태이다. 그러나 개방된 1개의 갱구에서는 연중 갱내수가 유출되어 주변 하천으로 유입되고 있다. Fig. 2는 갱내수의 pH, EC, SO_4 및 주요 양이온에 대한 월별 변화를 나타낸 것이다.

온도: 갱내수는 동절기(12, 1, 2월)에 8.1-9.5°C, 3월에 11.9°C, 7월과 8월에 14.9°C로 가장 높은 값을 나타내며 9월부터 차츰 낮아지는 경향을 나타내지만 기온 변화에 따라 큰 폭으로 변하지 않는 지하수와 유사한 특성을 나타낸다.

pH: 12월에 7.38로 가장 낮았고, 7월에 7.93로 가장 높은 값을 나타내었으며, 그 외 계절에 따른 특징적인 변화나 큰 차이 없이 꾸준히 이 범위내의 pH 값을 나타내는 것으로 보아 용화광산 갱내수는 산성광산배수의 특성을 나타내지 않는다.

전기전도도: 11월에 311 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 가장 높았으며 9월에 218 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 가장 낮게 나타났다. EC는 225-255 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 계절에 따른 큰 변화 없이 비슷한 값을 나타낸다. 주변 하천수의 EC값이 60-80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 나타내는데 비해 약 3-4배 높은 값을 보여준다.

음이온: F와 Cl은 각각 0.10 mg/L 이하, 1.62-1.67 mg/L로 연중 큰 변화를 나타내지 않는다. NO_3^- 는 1.33-2.29 mg/L로 주변의 하천수에 비해 낮은 값을 나타내며 계절에 따른 변화는 나타내지 않는다. 주변 하천수 보다 높은 값을 나타내는 SO_4^{2-} 는 23.6 mg/L-

54.1 mg/L의 범위로 여름철에 상대적으로 낮은 값을 나타내고 2월에 가장 높은 값을 나타낸다.

양이온: 갱내수 중 농도가 높게 나타나는 것은 Mg, Ca, Zn, Si 이다. Mg는 6월에 3.58 mg/L로 가장 낮고, 11월에 4.77 mg/L로 가장 높게 나타났으며, 상대적으로 여름철 보다 겨울철이 더 높은 값을 나타낸다. Ca는 30.0-35.0 mg/L로 연중 큰 차이가 나타내지 않는다. Zn은 0.58-0.68 mg/L로 6월에 가장 낮은 0.35 mg/L이며, 10월에 가장 높은 0.72 mg/L이다. Si는 4.71 mg/L-6.21 mg/L의 값을 나타내며 계절적인 변화는 보이지 않는다.

그 외 양이온의 농도는 Cu와 Na, K이 주변 하천수 보다 높게 나타나며 각각 0.003-0.77 mg/L, 2.77-3.78 mg/L, 0.31-0.84 mg/L의 범위를 갖는다. Al, Fe, Co, Ni, Cd는 1.00 mg/L 이하로 나타났으며, Mn과 Co는 검출되지 않았다.

4.1.2. 침출수의 특성

용화광산 선광장 하부에 매립된 광산 폐기물인 폐석과 광물찌꺼기 적치장으로부터 생성된 것으로 추정되는 침출수는 선광장 하부에서 흘러나와 주변 하천으로 직접 유입된다. 그 양은 갱내수에 비해 소량이며, 동절기나 건기에는 결빙되거나 유출되지 않아 채수가 불가능하다. Fig. 3은 침출수의 pH, EC, SO_4 및 주요 양이온에 대한 월별 변화를 나타낸 것이다.

온도: 선광장 하부의 매립된 광미로부터 유출되는 침출수는 동절기(12월, 1월, 2월)에는 결빙되어 온도를 측정할 수 없으며, 3월에 가장 낮은 9.1°C, 7월에 가장 높은 24.5°C이다. 침출수의 온도 변화는 기온의 영향을 많이 받기 때문에 계절적인 변화가 크며, 갱내수에 비해 2-3°C 가량 높은 것이 특징이다.

pH: 침출수의 pH는 11월에 가장 낮은 3.79이고, 5월에 가장 높은 4.47로 강한 산성을 나타낸다. 갱내수의 최저 pH값 7.36에 비해 산성을 나타내며 월별 변화의 폭이 크지 않지만 대체로 가을에 더 낮은 수치를 나타낸다.

전기전도도: 5월에 가장 낮은 440 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이고, 10월, 11월에 각각 724 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 719 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이다. 일반적으로 봄과 여름에 비해 가을에 전기전도도가 더 높게 나타났으며, 동절기에는 결빙되어 측정할 수 없다. 갱내수의 전기전도도 값이 218-311 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에 비해 2배 정도 높은 값을 나타낸다.

음이온: F와 Cl은 연중 큰 변화가 나타내지 않으며 각각 0.5 mg/L 이하, 2.52-3.17 mg/L의 값을 나타낸

Fig. 3. Variations of pH, EC, SO₄ and major cations in leachate water with months.

다. NO₃는 2.49-3.76 mg/L로 갯내수 보다 다소 높은 값을 나타내지만 하천수에 비해 상당히 낮은 값을 나타낸다. 갯내수 보다 훨씬 높은 값을 나타내는 SO₄는 여름에 357.68-389.13 mg/L의 범위로 다른 계절에 비해 상대적으로 낮은 편이고 시간이 지남에 따라 증가하여 10월에 528.37 mg/L로 가장 높은 값을 나타낸다.

양이온: 침출수는 Mg, Al, Ca, Mn, Cu, Zn, Na, K의 농도가 비교적 높게 나타난다. Mg는 12.14-17.91 mg/L의 범위로 6월에 특히 높은 값을 나타내지만 그 외에는 월별 변화는 크지 않다. Al은 1.11-3.25 mg/L, Ca는 42.63-48.15 mg/L의 범위로 갯내수와 같이 하천수보다 훨씬 높은 값을 나타낸다. Mn은 갯내수나 하천수 보다 상대적으로 높은 0.55-1.53 mg/L, Cu는 10월에 0.001 mg/L를 제외한 0.13-0.31 mg/L의 범위를 나타낸다. Zn은 8.04-13.32 mg/L 범위로 비교적 높은 값이지만, 상대적으로 봄, 가을이 더 여름과 겨울 보다 높은 값을 나타낸다. Si는 10월에 가장 낮은 5.49 mg/L이며, 9월에 가장 높은 9.45 mg/L로 월별 큰 변화가 없으며, 계절적인 변화도 나타나지 않는다. 그 외 양이온 값은 Na과 K이 각각 5.32-7.09 mg/L, 0.85-1.97 mg/L 범위로 갯내수 보다 높으며 Fe, Co, Ni, Cd는 1 mg/L이하로 낮은 값을 나타낸다 (Table 1).

4.1.3. 하천수의 특성

용화광산 주변 수계는 일월산 계곡으로부터 북동방향으로 흐르며, 하루 1.5 km 지점에서 남동방향으로 흐르는 하천에 합류된다. 하천수 시료는 광산에 전혀

Fig. 4. Variations of EC and SO₄ in stream water with distance from upper stream.

영향을 받지 않을 것으로 판단되는 시료 2개(SW-01, 02)와 갯내수와 침출수의 영향을 받을 것으로 판단되는 시료 4개를 포함하여 총 6개의 시료에 대한 분석데이터를 활용하였다 (Table 2).

온도: 하천수의 온도는 기온에 가장 큰 영향을 받지만 일반 하천인 하류지역에서는 계곡 사이에 음지가 많은 상류지역 보다 일조량이 많아 온도가 2-3°C 가량 높게 나타난다. 3월에는 약 4-7°C 내외 이며 4월, 5월, 6월, 7월로 갈수록 점차로 증가하여 7월에 하류지역에 22.7°C로 최고값을 나타낸 후 차츰 온도가 내려가 10월에는 5-9°C 내외의 값을 나타낸다.

pH: 하류로 내려갈수록 pH 값이 낮아지지만 월별 변화량은 거의 없다. 하천수의 pH 값은 7.0-7.9 범위이며, 침출수가 유출되는 지역 부근의 하천수는 침출수의 영향으로 pH 5.0-7.2 사이로 낮은 값을 나타내지만 하류 100 m지점부터는 pH 7.0이상의 값을 나타낸다.

전기전도도: 하천수 시료에 대한 전기전도도는 채취 지점에 따른 차이는 없으나 11월에 다른 시기에비해 10-70 μS/cm까지 높게 나타난다. 전기전도도의 거리에 따른 변화는 2월과 4월에 갯내수가 유출되는 부근에 높은 값을 나타내는 특이성이 있지만 침출수가 유출되는 부근의 EC값이 높게 나타나는 것을 제외하면 일반 하천수의 특성을 나타낸다. 갯내수와 침출수의 EC값이 하천수에 비해 상당히 높지만 하천수의 EC값이 크게 높지 않는 것은 유출되는 갯내수와 침출수의 수량이

Table 1. Chemical analysis data of mine and leachate water from Yonghwa mine

Month/ Year	ID	Temp. (°C)	pH	EC (μS/cm)	F ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Mg (mg/L)	Al (mg/L)	Ca (mg/L)	Mn (mg/L)	Fe (mg/L)	Co (mg/L)	Ni (mg/L)	Cu (mg/L)	Zn (mg/L)	Cd (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Si (mg/L)
07/ 2007	MW	14.9	7.93	235	0.08	1.67	1.33	28.24	3.70	0.23	33.61	0.01	0.04	ND	0.19	0.39	0.64	0.03	3.36	0.57	6.02
	LW	24.5	3.93	621	0.39	2.66	2.49	357.68	13.54	1.64	45.39	0.89	0.07	0.02	0.04	0.19	10.35	0.06	6.67	1.67	8.81
08/ 2007	MW	14.9	7.45	255	0.09	1.64	1.51	23.57	4.20	0.13	34.55	0.01	0.04	0.00	0.10	0.58	0.62	0.04	3.25	0.44	5.79
	LW	22.4	4.39	453	0.41	2.64	2.53	389.13	14.24	1.90	46.77	1.05	0.09	0.04	0.02	0.23	11.51	0.06	6.82	1.78	7.84
09/ 2007	MW	14.0	7.89	218	0.08	1.62	1.94	39.17	4.06	0.08	30.98	0.01	0.04	ND	0.04	0.52	0.67	0.03	3.74	0.42	6.18
	LW	21.3	4.27	558	0.39	2.86	3.26	498.58	14.43	2.28	43.44	1.47	0.10	0.02	0.09	0.21	12.89	0.05	7.03	1.94	9.45
10/ 2007	MW	12.0	7.92	247	0.09	1.65	1.62	41.85	4.36	0.08	32.47	0.01	0.06	ND	0.00	0.01	0.72	0.01	3.53	0.47	4.89
	LW	15.8	3.79	724	0.43	2.75	2.71	528.37	14.12	2.01	44.67	1.21	0.19	0.03	ND	0.00	9.01	ND	6.88	1.82	5.49
11/ 2007	MW	10.5	7.38	311	0.09	1.63	2.05	49.67	4.77	0.11	31.72	0.01	0.06	ND	0.04	0.69	0.68	0.05	3.58	0.84	5.65
	LW	10.4	3.79	719	0.44	2.52	3.44	502.64	12.14	1.11	42.63	0.55	0.02	0.03	0.09	0.13	8.04	0.04	6.38	1.46	8.12
12/ 2007	MW	9.5	7.36	225	0.09	1.64	1.59	38.66	4.24	0.17	32.66	0.01	0.05	ND	0.11	0.19	0.66	0.01	3.47	0.71	4.90
01/ 2008	MW	8.1	7.50	225	0.09	1.65	2.13	45.99	4.48	0.12	33.13	0.01	0.05	0.00	0.07	0.29	0.65	0.02	3.42	0.64	5.48
02/ 2008	MW	8.4	7.48	222	0.08	1.63	1.81	54.13	4.13	0.08	30.63	0.01	0.04	ND	0.03	0.45	0.68	0.03	3.78	0.47	4.71
03/ 2008	MW	11.9	7.38	234	0.09	1.63	2.29	49.65	3.99	0.09	31.34	0.01	0.03	ND	0.05	0.60	0.67	0.04	3.70	0.37	5.84
	LW	9.1	4.16	571	0.41	2.89	3.76	318.02	14.69	2.38	43.96	1.53	0.11	0.03	0.08	0.22	13.32	0.06	7.09	1.97	6.34
04/ 2008	MW	12.9	7.50	237	0.09	1.66	1.85	46.38	4.73	0.08	33.61	0.01	0.08	ND	0.00	0.00	0.58	0.00	3.36	0.57	6.21
	LW	10.7	3.87	577	0.37	2.63	3.11	428.93	13.54	1.64	45.39	0.89	0.28	0.02	0.01	0.23	11.37	0.07	6.67	1.67	8.66
05/ 2008	MW	13.2	7.57	240	0.08	1.63	1.68	44.76	4.69	0.04	35.50	0.01	0.05	ND	0.01	0.77	0.60	0.05	3.14	0.31	6.17
	LW	12.9	4.47	440	0.41	2.63	2.85	471.85	14.95	2.17	48.15	1.22	0.11	0.03	ND	0.26	12.66	0.07	6.96	1.88	8.57
06/ 2008	MW	13.3	7.63	226	0.08	1.64	1.86	43.94	3.58	0.02	34.28	0.01	0.05	ND	0.01	0.00	0.35	0.01	2.77	0.31	5.48
	LW	19.6	4.19	697	0.42	3.17	3.03	495.13	17.91	3.25	40.01	0.86	0.15	0.03	0.02	0.31	9.63	0.07	5.32	0.85	7.40

*MW: Mine Water, LW: leachate Water, ND: No Detection

Table 2. Chemical analysis data of stream water with distance from upper stream

Month/ Year	Dis. (km)	Temp. (°C)	pH	EC (μS/cm)	F ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Mg (mg/L)	Al (mg/L)	Ca (mg/L)	Mn (mg/L)	Fe (mg/L)	Ni (mg/L)	Cu (mg/L)	Zn (mg/L)	Cd (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Si (mg/L)
07/ 2007	2.5	21.4	6.85	71	0.09	2.06	9.24	8.55	1.48	0.11	8.37	0.01	0.03	0.06	0.01	0.20	0.00	2.07	1.07	3.31
	2.0	22.7	5.03	96	0.07	2.07	9.14	10.64	1.72	0.14	7.24	0.01	0.05	0.12	0.02	0.10	0.00	3.35	0.98	3.02
	1.8	20.4	7.83	77	0.07	2.06	9.28	6.65	1.63	0.19	9.58	0.00	0.01	0.09	0.01	0.05	0.01	2.99	0.90	3.09
	1.2	21.1	7.90	77	0.06	2.04	8.99	7.39	1.71	0.14	10.19	ND	ND	0.09	0.01	0.05	0.01	2.78	0.80	2.04
	0.9	18.7	7.31	91	0.06	1.73	8.77	6.25	2.34	0.15	14.71	0.03	0.02	0.05	0.02	0.64	0.01	2.76	0.82	3.81
08/ 2007	0.5	19.2	7.38	80	0.05	2.07	8.18	7.01	1.25	0.07	10.77	0.02	0.04	0.04	0.02	0.37	0.01	2.47	0.55	4.11
	2.5	20.6	7.04	86	0.08	2.04	9.48	7.63	1.19	0.10	7.05	0.01	0.01	0.03	0.01	0.11	0.00	2.93	1.02	3.28
	2.0	19.8	6.62	116	0.09	2.05	9.32	10.72	1.71	0.18	7.44	0.01	0.03	0.11	0.03	0.14	0.01	3.10	0.99	3.81
	1.8	20.4	7.64	104	0.07	2.03	9.41	5.73	1.59	0.13	8.75	0.01	0.02	0.06	0.02	0.06	0.01	2.91	0.93	2.18
	1.2	21.2	6.59	113	0.07	2.03	9.12	6.47	1.59	0.10	9.16	0.03	0.04	0.08	0.02	0.05	0.01	2.65	0.80	3.17
09/ 2007	0.9	18.4	7.39	96	0.06	1.69	9.01	5.33	2.64	0.12	16.07	0.04	0.03	0.03	0.03	0.94	0.01	2.70	0.79	2.48
	0.5	19.2	7.31	84	0.07	1.73	8.32	6.09	1.00	0.07	9.87	0.01	0.05	0.04	0.03	0.32	0.01	2.32	0.44	3.12
	2.5	22.0	7.83	94	0.08	2.09	9.81	8.72	1.15	0.10	6.88	0.01	0.01	0.03	0.01	0.10	0.00	3.04	1.01	3.19
	2.0	19.6	6.86	80	0.07	2.10	9.76	10.87	1.71	0.18	7.46	0.01	0.03	0.11	0.03	0.15	0.01	3.07	0.99	2.25
	1.8	18.2	7.84	78	0.06	2.10	9.94	6.63	1.59	0.13	8.64	0.01	0.02	0.06	0.02	0.06	0.01	2.91	0.93	2.18
10/ 2007	1.2	18.9	8.02	78	0.06	2.06	9.65	7.56	1.57	0.09	9.03	0.03	0.03	0.08	0.02	0.05	0.01	2.63	0.80	2.18
	0.9	16.6	7.71	97	0.06	1.65	9.34	6.63	2.68	0.11	16.23	0.04	0.03	0.02	0.03	0.98	0.01	2.69	0.78	3.88
	0.5	17.0	7.74	72	0.05	1.33	8.85	7.13	0.97	0.07	9.76	0.01	0.06	0.04	0.03	0.32	0.01	2.30	0.43	2.12
	2.5	15.6	7.11	69	0.08	2.08	9.56	8.82	1.26	0.10	7.38	0.01	0.02	ND	0.01	0.33	0.00	2.72	1.03	3.17
	2.0	15.5	6.53	73	0.08	2.09	9.43	11.51	1.71	0.17	7.39	0.01	0.05	0.03	0.03	11.51	0.02	3.16	0.99	2.68
11/ 2007	1.8	16.6	7.69	47	0.07	2.09	9.54	7.02	1.60	0.15	8.95	0.00	0.05	ND	0.00	0.05	ND	2.93	0.92	2.44
	1.2	15.7	7.88	55	0.07	2.05	9.25	6.96	1.62	0.11	9.41	0.02	0.06	0.04	0.01	0.05	0.00	2.68	0.80	1.89
	0.9	11.1	7.54	81	0.06	1.70	9.09	7.29	2.56	0.13	15.73	0.04	0.06	0.01	0.03	1.09	0.01	2.71	0.79	2.17
	0.5	11.6	7.37	74	0.06	1.79	8.45	7.39	1.06	0.07	10.10	0.02	0.07	0.02	0.02	0.29	0.01	2.36	0.47	3.19
	2.5	7.1	7.07	98	0.06	1.56	8.98	6.94	1.74	0.06	12.57	0.04	0.02	0.04	0.02	0.47	0.01	2.78	0.75	1.81
12/ 2007	2.0	9.0	6.68	105	0.08	2.06	9.89	8.60	2.07	0.13	11.01	0.03	0.06	0.12	0.01	0.38	0.00	3.43	1.17	3.18
	1.8	9.6	6.18	120	0.07	2.07	9.86	10.44	1.73	0.07	6.86	0.01	0.08	0.13	0.01	0.12	0.00	3.85	0.98	4.85
	1.2	8.3	7.83	110	0.07	2.06	10.08	6.35	1.70	0.30	11.25	0.00	0.00	0.14	0.00	0.04	ND	3.13	0.85	2.19
	0.9	9.0	7.12	113	0.06	2.04	9.79	6.36	1.94	0.22	12.26	0.01	0.01	0.10	0.01	0.05	ND	3.05	0.81	3.15
	0.5	7.3	7.26	103	0.05	1.66	8.46	6.60	1.60	0.20	8.61	0.00	0.01	0.08	0.02	0.00	0.00	2.89	0.82	3.18
2007	2.5	3.6	7.61	68	0.09	2.03	9.51	10.76	1.77	0.12	9.69	0.02	0.04	0.09	0.01	0.29	0.00	1.21	1.12	2.26
	2.0	3.5	7.15	98	0.08	2.04	9.41	13.19	1.73	0.10	7.05	0.01	0.06	0.13	0.01	0.06	0.00	3.60	0.98	3.18
	1.8	4.1	7.69	94	0.07	2.03	9.54	8.05	1.67	0.24	10.42	0.00	0.01	0.11	0.01	0.05	0.01	3.06	0.88	2.51
	1.2	3.1	6.61	105	0.07	2.02	9.25	10.08	1.82	0.18	11.23	0.01	0.02	0.09	0.01	0.05	0.00	2.91	0.81	3.09
	0.9	3.9	7.24	86	0.06	1.68	9.04	7.62	2.04	0.18	13.36	0.02	0.02	0.07	0.01	0.34	0.01	2.82	0.85	2.19
	0.5	2.7	7.10	78	0.06	1.61	8.45	8.72	1.50	0.07	11.67	0.03	0.03	0.04	0.02	0.42	0.01	2.63	0.65	2.48

Table 2. Continued

Month/ Year	Dis. (km)	Temp. (°C)	pH	EC (μS/cm)	F ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Mg (mg/L)	Al (mg/L)	Ca (mg/L)	Mn (mg/L)	Fe (mg/L)	Ni (mg/L)	Cu (mg/L)	Zn (mg/L)	Cd (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Si (mg/L)
01/ 2008	2.5	2.6	7.45	70	0.08	2.10	10.04	10.64	1.63	0.11	9.03	0.02	0.04	0.08	0.01	0.24	0.00	1.64	1.09	3.43
	2.0	2.5	7.15	82	0.07	2.11	9.94	14.13	1.72	0.12	7.15	0.01	0.05	0.12	0.02	0.08	0.00	3.48	0.98	4.97
	1.8	2.1	7.69	79	0.07	2.12	10.08	8.64	1.65	0.21	10.00	0.00	0.01	0.10	0.01	0.05	0.01	3.02	0.89	3.32
	1.2	1.1	6.97	78	0.06	2.06	9.79	10.18	1.77	0.16	10.71	0.01	0.02	0.09	0.01	0.05	0.00	2.85	0.80	2.49
	0.9	1.9	7.41	102	0.06	1.70	9.57	7.57	2.19	0.16	14.03	0.02	0.02	0.06	0.02	0.49	0.01	2.79	0.83	2.18
02/ 2008	0.5	0.7	7.37	73	0.06	1.84	8.98	8.99	1.37	0.07	11.22	0.03	0.04	0.04	0.02	0.40	0.01	2.55	0.60	2.12
	2.5	5.2	6.98	63	0.08	2.04	9.68	10.42	1.26	0.10	7.38	0.01	0.02	0.04	0.01	0.13	0.00	2.72	1.03	3.25
	2.0	5.1	7.21	60	0.07	2.06	9.62	13.06	1.71	0.17	7.39	0.01	0.03	0.11	0.03	0.13	0.01	3.16	0.99	4.11
	1.8	4.7	7.78	63	0.06	2.04	9.81	7.97	1.60	0.15	8.95	0.00	0.02	0.07	0.02	0.06	0.01	2.93	0.92	2.20
	1.2	3.7	7.11	46	0.06	2.03	9.52	9.58	1.62	0.11	9.41	0.02	0.03	0.08	0.02	0.05	0.01	2.68	0.80	3.11
03/ 2008	0.9	2.4	7.44	123	0.06	1.68	9.20	7.56	2.56	0.13	15.73	0.04	0.03	0.03	0.03	0.87	0.01	2.71	0.79	2.21
	0.5	3.2	7.28	65	0.05	1.56	8.71	8.54	1.06	0.07	10.10	0.02	0.05	0.04	0.03	0.34	0.01	2.36	0.47	2.20
	2.5	5.3	7.19	75	0.07	1.44	9.25	7.74	0.88	0.07	9.42	0.01	0.06	0.04	0.03	0.30	0.01	2.24	0.39	2.91
	2.0	7.3	6.83	79	0.09	2.00	10.11	9.51	1.04	0.09	6.39	0.00	0.01	0.02	0.01	0.06	0.00	3.36	0.99	3.79
	1.8	7.2	6.49	89	0.08	2.01	10.10	11.75	1.71	0.20	7.53	0.01	0.02	0.11	0.03	0.17	0.01	2.97	0.99	4.83
04/ 2008	1.2	6.8	7.60	83	0.07	1.98	10.34	7.16	1.58	0.11	8.33	0.01	0.02	0.05	0.02	0.06	0.01	2.88	0.94	4.41
	0.9	5.8	6.47	82	0.07	2.00	10.05	7.97	1.53	0.08	8.64	0.03	0.04	0.08	0.02	0.05	0.01	2.58	0.80	3.05
	0.5	4.8	7.36	78	0.05	1.65	8.72	7.20	1.56	0.09	8.33	ND	0.06	0.04	0.02	0.02	0.01	2.57	0.75	3.35
	2.5	8.1	7.14	72	0.09	2.07	9.73	9.85	1.48	0.11	8.37	0.01	0.03	0.06	0.01	0.20	0.00	2.07	1.07	3.25
	2.0	8.0	6.30	69	0.08	2.08	9.66	11.88	1.72	0.14	7.24	0.01	0.08	0.00	0.02	0.18	0.00	3.35	0.98	3.43
05/ 2008	1.8	7.9	7.92	68	0.07	2.07	9.83	7.24	1.63	0.19	9.58	0.00	0.08	ND	0.00	0.07	ND	2.99	0.90	2.10
	1.2	7.6	7.62	50	0.07	2.04	9.54	8.47	1.71	0.14	10.19	0.02	0.09	0.00	0.00	0.05	ND	2.78	0.80	3.25
	0.9	7.7	7.48	128	0.06	1.72	9.26	7.48	2.34	0.15	14.71	0.03	0.09	0.00	0.02	1.08	0.01	2.76	0.82	4.00
	0.5	6.6	7.25	68	0.06	1.96	8.73	7.92	1.25	0.07	10.77	0.02	0.08	0.00	0.00	0.27	0.00	2.47	0.55	3.17
	2.5	17.9	7.13	77	0.08	2.07	9.60	8.94	0.89	0.09	5.73	ND	0.05	ND	0.01	0.02	0.00	3.80	0.97	4.99
06/ 2008	2.0	16.0	6.74	107	0.07	2.08	9.50	10.57	1.70	0.22	7.63	0.01	0.01	0.10	0.03	0.19	0.01	2.85	0.99	5.52
	1.8	16.0	7.73	99	0.06	2.07	9.63	6.43	1.56	0.08	7.91	0.01	0.02	0.03	0.02	0.07	0.01	2.84	0.95	2.68
	1.2	13.2	7.09	109	0.06	2.04	9.34	6.86	1.47	0.06	8.12	ND	0.01	0.07	0.02	0.05	0.01	2.52	0.80	2.21
	0.9	12.1	7.59	91	0.06	1.67	9.13	7.33	2.94	0.09	17.42	0.05	0.04	ND	0.04	1.24	0.01	2.64	0.75	4.01
	0.5	11.8	7.49	81	0.04	1.50	8.54	7.12	0.76	0.07	8.97	0.01	0.07	0.04	0.03	0.27	0.01	2.17	0.34	3.23
06/ 2008	2.5	17.8	6.85	87	0.08	2.02	9.78	9.73	1.19	0.02	5.79	0.00	0.03	0.00	0.00	0.05	0.00	2.01	0.78	4.31
	2.0	16.4	6.74	90	0.07	2.03	9.67	12.82	1.69	0.03	6.99	0.01	0.03	0.00	0.02	0.11	0.00	2.86	0.80	5.02
	1.8	16.2	7.75	81	0.07	2.01	9.81	7.83	1.52	0.01	7.68	0.00	0.02	0.00	0.00	0.04	ND	2.82	0.71	3.02
	1.2	16.3	7.52	87	0.06	2.02	9.52	8.57	1.44	0.01	8.69	0.00	0.03	0.00	0.00	0.05	ND	2.52	0.60	3.15
	0.9	15.7	7.51	86	0.06	1.69	9.30	7.43	2.34	0.01	14.69	0.03	0.03	0.00	0.00	1.00	ND	2.62	0.69	2.98
06/ 2008	0.5	16.2	7.56	77	0.05	1.67	8.71	8.19	0.65	0.01	0.41	ND	0.02	0.00	0.01	0.10	0.00	0.62	0.19	3.15

*ND: No Detection, Dis.: Distance from upper stream(SW-01: 0.5 km, SW-02: 0.9 km, SW-03: 1.2 km, SW-04: 1.8 km, SW-05:2.0 km, SW-06:2.5 km)

하천수에 비해 아주 적기 때문에 희석효과에 의해 하천수의 EC값이 크게 높지않은 것으로 판단된다 (Fig. 4).

음이온: 하천수에서는 시료채취 지점별, 계절별 농도값이 큰 차이가 나지 않으며 갯내수와 침출수에 비해 NO_3 는 높게, SO_4 는 10 mg/L 이하로 낮은 값을 나타낸다. 거리에 따른 SO_4 의 변화는 갯내수가 유출되는 지점부근에서 약간 증가하고 침출수가 유출되는 부근에서 많이 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 침출수의 SO_4 값이 최고 528.37 mg/L에 비해 침출수가 유출되는 부근의 하천수의 SO_4 값은 11.51 mg/L로 큰 차이를 나타낸다.

양이온: 음이온과 마찬가지로 지점별, 계절별 농도값이 큰 차이가 나지 않지만 침출수가 유출되는 지점부근에서 약간 증가하는 경향을 보이지만 하천으로 유입되면서 희석되어 낮은 값을 나타낸다.

4.2. 폐석 및 광미의 광물학적 특성

폐석은 광산 주변 사면에 적치되어 있으며 폐석에 포함되어 있는 광물의 색깔, 형태 등을 고려하여 시료를 채취하였으며, 정확한 금속광물의 감정을 위해 고해상도분말회절분석(HRPD)을 이용하여 분석하였다. 폐석의 표면은 검은색이나 붉은색을 띠고 있으며 육안으로 구분 가능한 금속 광물을 함유하고 있는 폐광석도 다수 존재한다.

고해상도분말회절분석 결과 폐석에 포함된 광물은 규산염광물인 석영과 금속광물인 섬아연석(Sphalerite : ZnS)과 방연석(Galena : PbS)과 같은 황화물들을 다량으로 함유하고 있다 (Fig. 5).

선광장 주변에서 채취한 광미시료는 노란색과 붉은색으로 대표되며, 광물학적인 특성과 입자구조 및 화학조성을 알아보기 위하여 고해상도분말회절분석(HRPD)과 주사전자현미경(SEM&EDS)관찰을 실시하

Fig. 5. X-ray diffraction patterns of mine waste.

Fig. 6. X-ray diffraction patterns of yellow tailings.

였다. 고해상도분말회절분석 결과 노란색 광미는 주로 플럼보자로사이트(Plumbojarosite : $\text{PbFe}_6(\text{SO}_4)(\text{OH})_{12}$)로 구성되어 있고, 백운모와 석영 그리고 소량의 황동석(Chalcopyrite : CuFeS_2)과 섬아연석(Sphalerite: ZnS)을 포함하고 있다 (Fig. 6). 붉은색 광미는 규산염광물로는 석영과 일라이트를 포함하고 있으며, 플럼보자로사이트와 약간의 섬아연석을 함유하고 있다 (Fig. 7).

주사전자현미경 관찰결과 노란색 광미는 1 크기의 다각형의 입자로 구성되어 있으며 EDS 분석결과와 Pb, As, Fe를 함유하고 있어 광석의 잔류물이 포함된 것으로 판단된다 (Fig. 8). 붉은색 광미에는 증발잔류물로 추정되는 석고 결정을 관찰할 수 있으며 주 구성성분인 Fe, Si는 주로 석영이나 철산화물로 구성된 것으로 판단된다 (Fig. 9).

5. 토의 및 결론

연구지역의 모암은 선캄브리아기의 변성퇴적암류와 이를 관입한 화강암맥으로 구성되어 있고, 주 구성암

Fig. 7. X-ray diffraction patterns of red tailings.

Fig. 8. SEM microphotographs and EDS patterns of the yellow tailings.

Fig. 9. SEM microphotographs and EDS patterns of the red tailings.

석은 운모편마암, 편마암, 규암, 석회암, 각섬암, 역암 등으로 연구지역에 가장 넓게 분포하고 있는 것은 운모편마암이다.

광산주변 물시료는 갯내수, 침출수, 하천수로 구분하여 시료를 채수하였다. 갯내수는 주변 하천에 비해 전기전도도와 SO_4 , Mg, Ca, Zn, Si의 함량이 높게 나타나는 경향이 있어 일반하천과 구분되지만 극도의 산성 및 다량의 중금속을 포함하는 산성광산배수로의 특징은 나타내지 않는다. 소량으로 유출되는 침출수는 강

한 산성을 나타내고, 높은 전기전도도와 SO_4 , 중금속을 포함한 높은 양이온의 함량은 산성광산배수의 일반적인 특징을 나타낸다.

용화광산 주변 하천수에 대한 광산의 영향을 평가하기 위하여 하천수를 거리별로 측정하여 양이온과 음이온의 변화를 측정하였다. 하천수의 유량은 광산으로부터 배출되는 침출수나 갯내수에 비해 훨씬 많기 때문에 하천수에 의한 희석작용으로 농도가 현저히 감소하는 경향을 보여준다. 산성광산배수가 하천으로 유입될

때 오염물질의 농도가 낮아지는 원인은 오염되지 않은 주변 하천수에 의한 희석작용과 pH 변화에 의한 오염 물질의 침전작용에 기인한다 (Kim and Kim, 2004).

폐석의 광물 조성은 석영과 사장석이며 단사독니석과 같은 광물들을 소량 포함되어 있으나 특정 시료에는 섬아연석과 방연석과 같은 다량의 황화물들을 함유하고 있는 폐광석도 존재한다.

선광장 주변에서 채취한 노란색 광미는 주로 플럼보자로사이트로 구성되어 있고, 백운모와 석영 그리고 소량의 황동석과 섬아연석을 포함하고 있다. 붉은색 광미는 규산염광물로는 석영과 일라이트를 포함하고 있으며, 플럼보자로사이트와 약간의 섬아연석을 함유하고 있다. 특징적으로 높은 함량을 나타낸 플럼보자로사이트는 납광상 지역의 산화대에서 나타나는 2차광물로서 선광장 주변에 많은 산화작용이 일어났음을 나타낸다. 붉은색 광미는 대부분이 규산염광물로 구성되어 있으며, 플럼보자로사이트를 함유하고 있지만 노란색 광미보다 상대적으로 함량이 낮다. 이는 산화작용 정도의 차이를 나타내는 것으로 중금속의 용출에 영향을 미치는 요인으로 작용할 수 있다.

광미는 1 μm 크기의 다각형의 입자로 구성되어 있으며 붉은색 광미에서는 증발잔류물로 추정되는 석고 결정체를 관찰할 수 있다. 노란색 광미는 Pb, As, Fe를 함유하고 있어 광석의 잔류물이 포함된 것으로 생각되며, 붉은색 광미는 석영과 철산화물로 구성된 것으로 판단된다.

광산 주변에 적치된 광미의 광물화학적 특성이 침출수에 미치는 영향을 평가하기 위하여 광미의 광물학적 특성과 침출수의 화학적 특성의 연관성을 연구했다. 광미에 포함된 주요 금속광물은 플럼보자로사이트, 섬아연석, 황동석으로 침출수에 부가될 수 있는 금속이온은 주로 Pb, Zn, Fe, Cu이며, 음이온은 SO_4 로 추정할 수 있다. 일반적으로 황화광물은 산화될 경우 H^+ 이온을 방출하여 수용액을 산성으로 만들어 pH값을 낮추는 역할을 한다. 광미에 포함된 섬아연석은 용출되어 침출수에 Zn을 부가시킬 뿐만 아니라 pH값을 낮추는 역할을 한다. 또한, 플럼보자로사이트는 침출수에 Pb를 황동석은 Cu와 Fe의 농도를 증가시키는 역할을 한다 (Alpers *et al.*, 1989)

광미에 포함된 일라이트는 K의 농도를 증가시키는 역할을 하며 이때 생성된 캐올리나이트는 산성의 수용액과 반응할 시 Al의 농도를 증가시킨다 (Sear and Langmuir, 1982; Bottcher and Duynisveld, 1985; Schecher and Driscoll, 1987; Nordstrom and Ball, 1984).

침출수에서 높은 값을 나타내는 금속이온은 Mg, Al, Ca, Mn, Cu, Zn, Na, K 등으로 Zn과 Cu는 광미에 포함된 섬아연석과 황동석으로부터 유래되었을 것으로 추정할 수 있다. 그 외 Mg, Al, Ca, Na, K등은 대부분 규산염광물에 포함된 광물로 황화광물이 산화에 의해 생성되는 강한 산성 배수에 의해 생성된 것으로 판단된다. 침출수의 계절에 따른 pH값의 변화는 여름에 높고 가을에 낮은 것으로 보아 강우에 의한 빗물이 광미에 유입되는 양과 체류시간에 의해 결정되는 것으로 추정된다.

용화광산 광미 적치장은 현재 복토 후 자연학습장으로 조성되어 있기 때문에 오염되지 않은 토양으로 복토를 했을지라도 시간이 지나면서 하부의 오염된 광미로부터 오염물질이 이동할 가능성이 충분히 있을 것으로 판단된다. 따라서 표토의 지속적인 관리와 위해성 평가가 수행되어야 할 것이다. 용화광산 광미 적치장으로부터 유출되는 침출수는 광미에 포함된 플럼보자로사이트, 황동석, 섬아연석 등의 용해에 의해 Pb, Cu, Fe, Zn 등의 농도를 증가시키고 황화광물의 산화작용에 의한 산성배수의 형성에 의해 규산염광물의 용해에 의한 Mg, Al, Ca, Mn, Cu, Zn, Na, K를 지속적으로 부과하게 된다. 동절기를 제외하고 지속적으로 유출되는 침출수와 갭배수는 하천수에 의해 희석되어 농도가 낮아지지만 유출되는 침출수의 pH값이 낮고 중금속 함량이 높기 때문에 정화나 유출 방지를 위한 대책이 필요한 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 안동대학교 ACE사업 중 교육/학생지도

연계 우수교수 향상시스템 구축 사업의 일환으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Alpers, C.N. and Nordstrom, D.K. (1994) Seasonal variations of Zn/Cu ratios in acid mine water from Iron Mountain, California. In *Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation* (C.N. Alpers & D.W. Blowes, eds.), Am. Chem. Soc. Symp. Ser., v.550, p.324-344.
- Alpers, C.N., Nordstrom, D.K. and Ball, J.W. (1989) Solubility of jarosite solid solutions precipitated from acid mine water, Iron mountain, California, USA. *Sci. Geol. Bull.* v.42, p.281-289.
- Appel, C.A. and Reilly, T.E. (1994) Summary of selected computer programs produced by the U.S. Geological Survey for simulation of ground-water flow and quality. v.4, p.98.
- Bottcher, J.O.S. and Duynisveld, H.M. (1985) Verikale Stoffkonzentrations profile im Croundwasser eines Lockergesteins-Aquifers und deren Interpretation. *Z. dt. Geol. Ges.*, v.136, p.543-552.
- Cheong, Y.W. (2004) An Overview of Coal Mine Drainage Treatment. *Econ. Environ. Geol.*, v.37, p.107-111.
- Clevenger, A. (1990) Calorimetric Study of the Kinetics of Al_3Ni Nucleation and Growth During Reactions in Al/Ni Thin Films. v.26, p.203-208.
- Davies H., Weber, P., Lindsay, P., Crawa, D. and Pope, J. (2011) Characterisation of acid mine drainage in a high rainfall mountain environment, New Zealand. *Sci. Total Environ.* v.409, p.2971-2980.
- Davis, S.R., McMahon, R.J. and Cousins, R.J. (1998) Metallothionein knockout and transgenic mice exhibit altered intestinal processing of zinc with uniform zinc-dependent zinc transporter-1 expression. *Jour. Nutrition.* v.128, p.825-831.
- Eqeenuddin, S.M., Tripathy, S., Sahoo, P.K. and Panigrahi, M.K. (2010) Hydrogeochemical characteristics of acid mine drainage and water pollution at Makum Coalfield, India. *Jour. Geochem. Explor.*, v.105, p.75-82.
- Humez, A.L., Juste, C. and Prost, R. (1997) A new assessment of mobility of elements in sediments and wastes. *Chem. Speciation and Bioavailability*, v.9, p.57-65.
- Jennings, S.R. and Dollhopf, D.J. (1995) Acid-base account effectiveness for determination of mine waste potential acidity. *Jour. Hazardous Materials.* v.41, p.161-175.
- Ji, S.W. and Cheong, Y.W. (2005) Experiment of Reactive Media Selection for the Permeable Reactive Barrier Treating Groundwater contaminated by Acid Mine Drainage. *Econ. Environ. Geol.*, v.38, p.237-245.
- Jung, M.C. (2003) Environmental Assessment for Acid Mine Drainage by Past Coal Mining Activities in the Youngwol, Jungseon and Pyungchang areas, Korea. *Econ. Environ. Geol.*, v.36, p.111-121.
- Jurjovec, J., Ptacek, C.J. and Blowes, D.W. (2002) Acid neutralization mechanisms and metal release in mine tailings: a laboratory column experiment. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.66, p.1511-1523.
- Kang, M.J., Lee, P.K. and Youm, S.J. (2006) Characteristics of Geochemical Behaviors of Trace Metals in Drainage from Abandoned Sechang Mine. *Econ. Environ. Geol.*, v.39, p.213-227.
- Kedziorek, A.M., Alain, C.M. and Fabrice, C. (1998) Leaching of Cd and Pb from a Polluted Soil during the Percolation of EDTA: Laboratory Column Experiments Modeled with a Non-Equilibrium Solubilization Step. *Environ. Sci. Technol.*, v.32, p.1609-1614.
- Kim, J.J. and Kim, S.J. (2002) Variations in Geochemical characteristics of the Acid Mine Drainages due to Mineral-Water Interactions in Donghae Mine Area in Taebaek, Korea. *Econ. Environ. Geol.*, v.35, p.55-66.
- Kim, J.J. and Kim, S.J. (2004) Seasonal factors controlling mineral precipitation in the acidminedrainage at Donghae coal mine, Korea. *Sci. Total Environ.*, v.325, p.181-191.
- Kim, S.O., Jung, Y.I. and Cho, H.G. (2006) Evaluation of Heavy Metal Contamination in Streams within Sam-sanjeil and Sambong Cu Mining Area. *Jour. Miner. Soc. Korea*, v.19, p.171-187.
- Lee, W.C., Jeong, J.O., Kim, J.Y. and Kim, S.O. (2010) Characterization of Arsenic Immobilization in the Myungbong Mine Tailing. *Econ. Environ. Geol.*, v.43, p.137-148.
- Nordstrom, D.K. and Ball, J.W. (1984) Chemical models, computer programs and metal complexation in natural water. In *complexation of trace metals in natural water*. p.149-164.
- Oh, D.G., Kim, J.Y. and Cheon H.T. (1995) Geochemistry of Acid Mine Water and Stream Sediment around the Donghae Coal Mine. *Econ. Environ. Geol.* v.28, p.213-220.
- Park, C.Y., Jeong, Y.J. and Kang, J.S. (2000) Geochemistry and Mineralogy of Mine Drainage Water Precipitate and Evaporite Minerals In the Hwasoon Area. *Econ. Environ. Geol.*, v.33, p.391-404.
- Schecher, W.D. and Driscoll, C.T. (1987) An evaluation of uncertainty associated with aluminum equilibrium calculations. *Water Resources Research* v.23, p.525-534.
- Sear, S.O. and Langmuir, D. (1982) Sorption and clay-mineral equilibria controls on moisture chemistry in a C-horizon soil. *Jour. Hydrol.* v.56, p.287-308.
- Song, S.H., Min, E.S., Kim, M.H. and Lee, H.K. (1997) Pollution by Acid Mine Drainages from the Daeseong Coal Mine In Keumsan. *Econ. Environ. Geol.*, v.30, p.105-116.
- Walder, I.F. and Chavez, W.X. (1995) Mineralogical and geochemical behavior of mill tailing material produced from lead-zinc skarn mineralization, Hanover, Grant County, New Mexico, USA. *Environ. Geol.*, v.26, p.1-18.