

납-시금법을 이용한 산성광산배수 철수산화물로부터 Gold 회수 가능성 연구

조강희¹ · 김봉주¹ · 김진형² · 최낙철³ · 박천영^{1*}

¹조선대학교 에너지자원공학과, ²골든썬(주), ³서울대학교 지역시스템공학과

The Possibility of Gold Recovery from the Iron-Hydroxide in the Acid Mine Drainage by Lead-Fire Assay

Kang-Hee Cho¹, Bong-Ju Kim¹, Jin-Hyung Kim², Nag-Choul Choi³ and Cheon-Young Park^{1*}

¹Department of Energy and Resource Engineering, Chosun University, Gwang-ju, Korea

²GOLDEN SUN, Jeollanam-do, Korea

³Department of Rural Systems Engineering/Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

In order to recover gold from iron-hydroxide in acid mine drainage, a lead-fire assay has been used. Acid mine drainage is generated from mining waste rocks, and iron-hydroxide precipitates from acid mine drainage, which severely contaminates the area surrounding the mine. Iron-hydroxide samples contain on average 520.29 mg/kg of Fe, 4,414.62 mg/kg sulfur, and 16.19 mg/kg Au. In an XRD analysis, quartz and goethite were observed along with the iron-hydroxide. Using a lead-fire assay, the recovery of pure gold was on average 0.174 g/ton from the iron-hydroxide, whereas the gold not recovered in the process was on average 1.37 mg/kg. This unrecovered gold was lost to the glass slag due to the galena and lead formation. The galena and lead in the glass slag was identified through XRD.

Key words : mining waste rocks, acid mine drainage, iron-hydroxide, lead-fire assay, gold recovery

산성광산배수로부터 형성되는 철수산화물로부터 납-시금법을 이용하여 금을 회수하고자하였다. 폐광석으로부터 산성광산배수가 생성되고 있으며 이로부터 철수산화물이 침전되어 주변지역이 심각하게 오염되고 있다. 철수산화물에는 Fe가 평균 520.29 mg/kg, 황이 평균 4,414.62 mg/kg 그리고 금이 평균 16.19 mg/kg이 각각 포함되어 있다. 철수산화물에 대하여 XRD분석을 수행한 결과 석영과 침철석이 나타났다. 철수산화물에 대하여 납-시금법을 수행한 결과 평균 0.174 g/ton의 순수한 금을 회수 하였고, 유리질 슬래그로 평균 1.37 mg/kg의 금이 손실되었다. 유리질 슬래그로 금이 손실되는 원인은 유리질 슬래그에 방연석과 납이 형성되었기 때문이다. 유리질 슬래그에 방연석과 납이 포함되어 있는 것을 XRD분석으로 확인하였다.

주요어 : 폐광석, 산성광산배수, 철수산화물, 납-시금법, 금 회수

1. 서 론

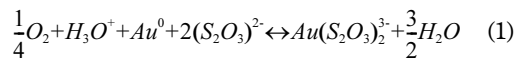
광산 활동으로 인해 생성된 폐광석(mining waste rock)들로부터 산성광산배수가 배출되고 있다(Machemer and Wildeman, 1992). 산성광산배수로 인하여 광산지역 수계가 중금속으로 오염될 뿐만 아니라 황갈색 철수산화물로 인하여 가시적으로 황폐화되고 있다. 이 철

수산화물은 주로 침철석으로 구성되어 있으며 금과 은은 물론 다양한 종류의 중금속이 포함되어 있다(Bowell and Bruce, 1995; Park *et al.*, 1999, 2001, 2002, 2009).

또한 금을 수반하는 폐광석, 즉 황화광물들이 무기적 및 생물학적 산화작용을 받으면 Fe²⁺와 S⁰가 방출된다. Fe²⁺가 산화되어 Fe³⁺가 형성되며, Fe³⁺는 물과

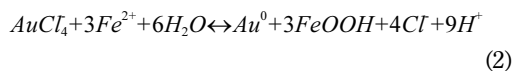
*Corresponding author: cybpark@chosun.ac.kr

반응하여 비정질의 철수산화물인 $Fe(OH)_3$ 를 형성한다. 비정질의 철수산화물은 일반적으로 표면적이 매우 크기 때문에 여러 종류의 중금속을 흡착한다(Schwertmann and Fischer, 1973; Henmi *et al.*, 1980). 폐광산 주변에서는 고농도의 중금속, 금과 은이 포함되어 있는 철수산화물이 방치되고 있다. 그리고 황화광물에 포함되어 있던 S는 산화되어 thiosulfate($S_2O_3^{2-}$), trithionate($S_3O_6^{2-}$), tetrathionate($S_4O_6^{2-}$)와 같은 중간 생성물을 형성하고, 이들이 다시 산화되어 최종적으로 황산염이 된다(Baker and Bafield, 2003). 폐석에 포함되어 있던 황화광물이 산화되어 산성광산배수로 될 때, 황화광물에 포함되어 있던 비가시성 금 혹은 황화광물과 고용체 상태로 존재하던 금이 산성광산배수로 방출된다. pH가 낮은 산성광산배수로 방출된 Au^0 는 thiosulfate와 결합하여 $(AuS_2O_3)_2^{3-}$ 를 형성하거나 혹은 염소이온과 결합하여 $AuCl_4^-$ 형태의 복합물(complex)을 형성한다(Hamilton *et al.*, 1983; Benedetti and Boulegue, 1991). 즉, Benedetti and Boulegue(1991)에 의하면 지표환경에서 금을 함유하는 황화광물이 산화되면 금(Au^0)이 물속으로 방출되고 다음과 같이 thiosulfate와 복합물(complex or ligand)을 형성한다(Benedetti and Boulegue, 1991).



이때 물속에서 박테리아가 thiosulfate를 산화시켜 황산염(sulfate)을 생성한다.

물속의 Fe^{2+} 가 Fe^{3+} 로 산화될 때 혹은 물속의 유기물이 산화될 때 thiosulfate와 복합물을 형성했던 Au^+ 이온이 Au^0 로 환원된다. 환원된 Au^0 는 표면적이 큰 철 혹은 망간 수산화물에 흡착된다. 한편, Hamilton *et al.*(1983)에 의하면 광산배수로 방출된 금은 염소와 결합하여 $AuCl_4^-$ 복합물을 형성하는 것으로 설명하였다. 광산배수의 pH가 증가하여 Fe^{2+} 가 Fe^{3+} 로 빠르게 산화되고 동시에 Au^{3+} 는 다음과 같이 Au^{1+} 로 그리고 Au^0 (native gold, metallic gold)로 환원된다.



산성광산배수는 하류로 가면서 지류와 혼합되어 pH가 증가하기 때문에 금의 안정도가 감소한다. 금-복합물들로부터 환원된 Au^0 는 1 μm 이하의 콜로이드 입자를 형성한다. 이때 금 입자의 표면전하는 음전하를

띠게 되고 양전하의 철산화물과 정전기적으로 강하게 결합한다(McHugh, 1988). 산성 및 중성영역의 pH 환경에서 금 입자는 음전하를 띠기 때문에(Greffie *et al.*, 1996), 양전하를 띠는 비정질의 철수산화물에 정전기적으로 흡착되거나(Berrodier *et al.*, 2004), 적철석 혹은 침철석에 흡착된다(Enzweiler and Joekes, 1991). 특히 침철석의 등전위(Juang and Wu, 2002)는 약 7.5이기 때문에 pH가 약 3.0인 산성광산배수에서 침철석의 표면전하는 양전하를 띠게 된다.

산성광산배수가 형성되는 것은 저항성 황화광물, 즉 금을 함유하고 있는 폐광석이 무기적 혹은 생물학적으로 산화되는 과정이다. 이와 같은 산화작용은 황화광물과 화학적으로 강하게 결합되어 있는 금을 단체분리시킨다. 그리고 분리된 금 입자는 표면적이 큰 철수산화물에 흡착된다(Southam and Beveridge, 1994; Widler and Seward, 2002). 따라서 자연계에서 일어나는 산화작용이 황화광물과 화학적으로 결합되어 있는 금을 자동적으로 단체분리 시키며 동시에 철수산화물에 금을 농축시켜준다. 그러므로 철수산화물 속에 포함되어 있는 금을 회수한다면 방치되는 자원을 회수하는 것이다. 산성광산배수는 폐석의 황화광물이 소진될 때까지 계속하여 금을 분리시켜 철수산화물에 농축시킬 것이다. 따라서 본 연구의 목적은 산성광산배수의 철수산화물에 포함되어 있는 금에 대해서 지구화학적으로 고찰하고, 납-시금법을 이용하여 철수산화물로부터 금 회수 가능성을 제시하고자하였다.

2. 시료채취, 실험 및 분석방법

2.1. 시료채취

산성광산배수와 황갈색 철수산화물은 전남 광양군 광양읍 사곡리 본정광산 배수로에서 각각 19개 지점에서 채취하였다. 산성광산배수는 콘크리트 구조물의 배출구로부터 유출되어 약 240 m구간의 콘크리트 배수로를 통과하면서 황갈색 철수산화물을 침전시킨다. 산성광산배수와 철수산화물은 하류에서부터 상류로 올라가면서 동일 지점에서 각각 채취하였다. 산성광산배수는 현장에서 0.45 μm 여과지로 여과하였으며, 진한 질산으로 산처리하여 4°C 이하로 보관하였다.

2.2. 실험방법

철수산화물은 105°C dry oven에서 48시간 건조시켰다. 철수산화물에 함유된 금은 납-시금법(lead-fire assay)로 회수하였다. 철수산화물(30 g), 산화납

(litharge, 30 g), 소다회(soda ash, 65 g), 붕사(borax, 10 g), 규사(silica, 10 g), 밀가루(flour, 5 g)를 혼합하였다(Hohnson and Maxwell, 1981). 이 혼합물을 fire clay crucible에 넣고 질산은(AgNO₃)용액 20 mg을 첨가하였다. 도가니는 머플(muffle)도가니에 넣고 공기를 공급하면서 940°C에서 40분간 가열하였다. 용융시키는 과정에서 용융물질이 넘치지 않도록 소금과 철 못을 첨가하였다. 이후, 공기를 차단한 상태로 1150°C로 1시간 동안 용융시켰다. 용융체를 철 거푸집(iron mold)에 붓고 자연 냉각시켰다. 유리질 슬래그와 납추(lead button)를 망치로 가격하여 분리하였으며, 납추를 큐펠 도가니에 넣고 940°C에서 40분간 가열하여 납을 큐펠레이션 하였다. 도가니 바닥에 남은 silver bead를 회수하여 무게를 재고, 히팅 블록(heating block)에서 20% 질산 15 ml를 가하여 150°C로 30분간 용해시켜 Ag를 제거하였다. 금 잔유물에 포함되어 있는 silver 및 불순물을 제거하기 위하여 다시 850°C에서 5분 동안 가열한 후, 순수한 금을 회수하여 품위를 계산하였다.

2.3. 분석방법

산성광산배수는 원자흡광분광기(atomic absorption spectrophotometer, model; AA-7000, Shimadzu)와 이온크로마토그래피(ion chromatograph, model: Metrohm 883 Basic IC plus)로 각각 측정하였다. 산성광산배수에 용해된 ferrous iron(Fe²⁺)함량은 O-페난트로린법으로 자외선흡광분광기(UV-Spectrometer, Model: aquamate plus, Thermo)를 이용하여 흡광도 510 nm에서 분석하였다. 그리고 ferric iron 함량은 AAS에서 분석한 total iron의 차이로 결정하였다(Ghosh *et al.*, 1967). 건조한 철수산화물과 fire assay 과정에서 생성된 유리질 슬래그를 -200 mesh이하로 미분쇄하여 각각 XRD(X-ray diffraction, Rigaku, Geigerflex D/max rA)와 화학분석을 수행하였다. XRD 분석 조건은 Cu-Kα 선을 이용하여 가속전압 40 kV, 전류 30 mA, 주사속도 2°/min.으로 3°~70°의 2θ 구간을 분석하였다. 화학분석은 철수산화물과 유리질 슬래그 0.75 g를 각각 heating block(model; DMB-2, 24 hole)에서 70°C로 1시간 동안 분해하였다. 0.45 μm 여과지로 여과한 후 원자흡광분광기로 Au, Ag, Fe함량을 측정하였다. 그리고 SO₄ 함량은 이온크로마토그래피로 측정하였다(Langhans *et al.*, 1995; Celep *et al.*, 2009). 납-시금 과정에서 얻은 silver bead 표면과 순수한 금(gold)표면을 EDS(energy dispersive analyzer, Japan, Hitachi, S4800)로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 산성광산배수

산성광산배수에 대하여 pH, 산화환원전위, 철(total iron)함량을 측정하였다. 광산배수의 pH는 3.19(상류, 0 m)에서 3.02(하류, 246 m)로 감소하고, Eh는 396 mV(상류, 0 m)에서 441 mV(하류, 246 m)로 증가하였다(Fig. 1). 하류로 가면서 pH 감소, Eh 증가는 각각 산성광산배수로 방출된 황화광물의 S의 산화 및 황화광물의 Fe²⁺가 산화되어 Fe³⁺를 형성됨에 따라 전자(e⁻)가 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 산성광산배수 중에 용해되어 있는 Fe이온은 상류(0 m)에서 18.61 mg/l로 높게 나타나지만 하류로 갈수록 감소하여 246 m 지점에서는 10.99 mg/l로 나타난다(Fig. 2). 이와 같이 Fe 함량이 감소하는 원인은 Fe 이온이 물과 가수분해되면서 철수산화물로 침전되어 제거되기 때문이다

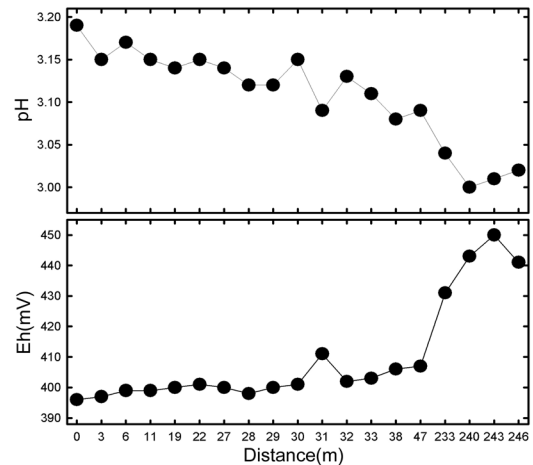


Fig. 1. Variation of pH and Eh values with distance in the acid mine drainage.

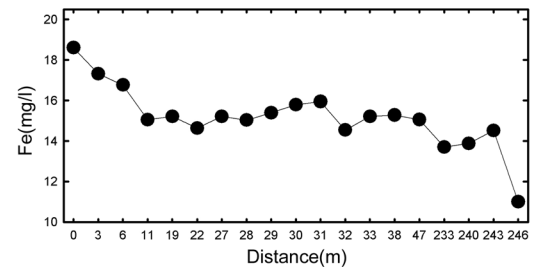


Fig. 2. Variation of Fe contents with distance in the acid mine drainage.

(Lottermoser, 2007). 따라서 산성광산배수로부터 철수산화물이 상류보다 하류로 갈수록 증가하여 형성될 것이다.

3.2. 철수산화물

산성광산배수로부터 형성된 철수산화물을 거리별로 채취하여 XRD분석, Fe, S 및 Au 함량을 분석하였다. 철수산화물에 대하여 XRD분석을 수행한 결과 침철석(goethite, FeOOH)과 석영의 회절선이 나타났다. 침철석과 석영의 회절선에 대한 변화는 상류 지점(K19, K18), 중간 지점(K11, K10) 그리고 하류 지점의 시료(K3, K2)에서 나타나지 않았다(Fig. 3). 황화광물로부터 방출된 Fe²⁺가 Fe³⁺로 산화되고 Fe³⁺는 물과 가수 분해되어 비정질의 철수산화물 Fe(OH)₃로 침전된다. 이 철수산화물은 ferrihydrite 혹은 lepidocrocite로 상변화되고 다시 침철석으로 그리고 적철석으로 전이된다. 철수산화물에 대하여 Fe 함량을 AAS로 측정하고 거리별로 나타낸 결과 상류에서 하류로 갈수록 Fe 함량이 증가하였다(Fig. 4). 상류(0 m)에서 Fe 함량은 478.74 mg/kg 이었으나 중간지점(31 m)에서 523.28 mg/kg으로 증가 그리고 하류(246 m)지점에서는 541.12 mg/kg으로 증

가하였다. 철수산화물에서 Fe 함량이 상류보다 하류에서 높게 나타나는 원인은 산성광산배수 중의 Fe 성분이 가수 분해되어 침전되기 때문이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 산성광산배수 중의 Fe 이온함량은 상류에서 높게 나타나지만 하류로 갈수록 감소한다. 하지만 Fig. 4의 Fe 함량, 즉 철수산화물 중의 Fe 함량은 상류에서는 낮게 나타나지만 하류에서 높게 나타난다. 철수산화물에 함유된 S를 측정하기 위하여 철수산화물을 왕수분해하고 황산염(SO₄²⁻)을 이온크로마토그래피(IC)로 분석하였다. 황산염을 S로 환산하여 거리별로 나타낸 결과 대체적으로 하류보다 상류에서 높게 나타난다(Fig. 5). S 함량은 상류지점(3m)에서 4,461.67 mg/kg, 중간지점(31m)에서 4,380.16 mg/kg 그리고 하류지점(246m)에서 3,394.01 mg/kg으로 나타났다. 철수산화물을 왕수 분해하여 Au 함량을 AAS로 측정하여 거리별로 나타낸 결과 상류보다는 하류에서 Au 함량이 높

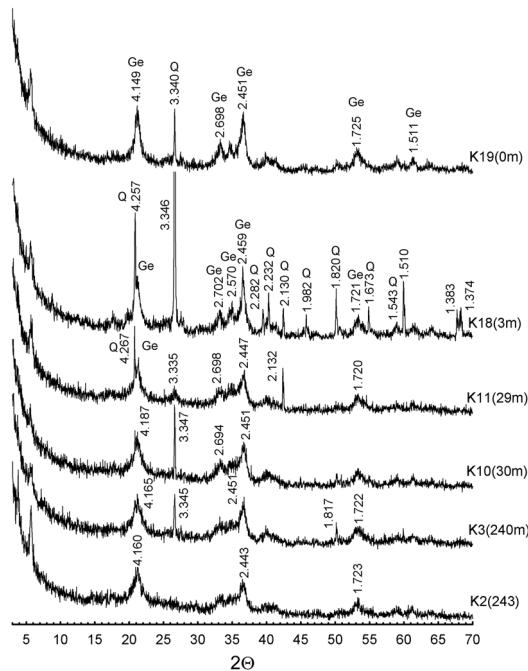


Fig. 3. XRD patterns of iron-hydroxide from the acid mine drainage(Ge; goethite, Q; quartz).

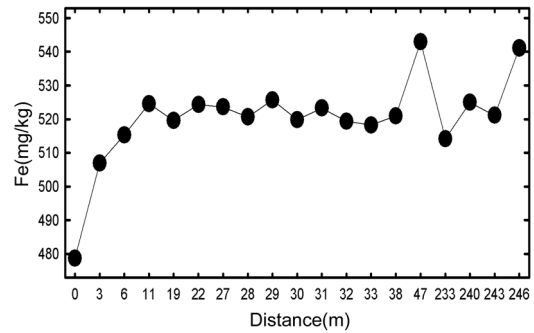


Fig. 4. Variation of Fe content with distance in the iron-hydroxide.

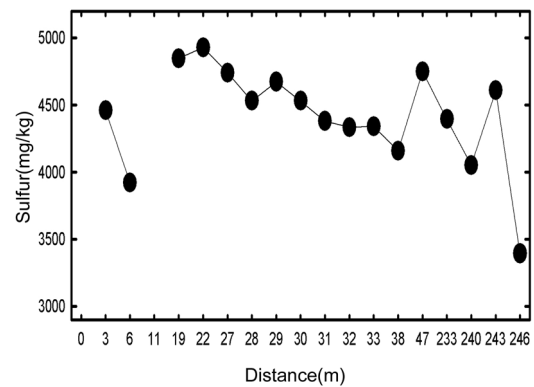


Fig. 5. Variation of S content with distance in the iron-hydroxide.

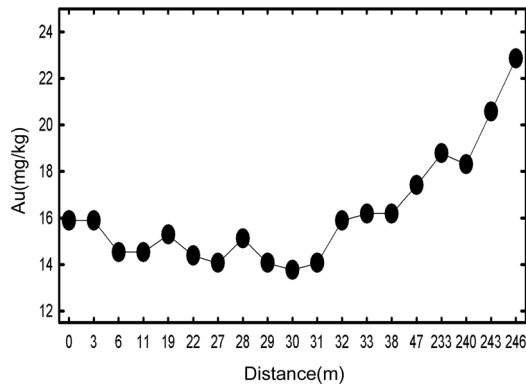


Fig. 6. Variation of Au content with distance in the iron-hydroxide by AAS.

게 나타났다(Fig. 6). 상류지점(0 m)에서 Au 함량은 15.88 mg/kg, 중간지점(31 m)은 14.06 mg/kg 그리고 하류지점(246 m)은 22.85 mg/kg으로 나타났다.

3.3. 금(gold)회수

철수산화물에 함유된 금을 납-시금법을 이용하여 직접 회수하였다. 철수산화물을 fire clay crucible 도가

니에 용융시킨 후 유리질슬래그와 납추(lead button)를 분리 후, 큐펠레이션 으로부터 얻은 silver bead를 SEM으로 관찰하였다(Fig. 7). Fig. 7은 상류지점(0 m와 3 m), 중간지점(29 m와 30 m) 그리고 하류지점(240 m와 243 m)에서 얻은 silver bead이다. 거리에 따른 silver bead의 상대적 크기는 잘 나타나지 않는다.

Silver bead를 heating block에서 20% 질산 15 ml를 첨가하고 150°C로 30분간 가열하여 Ag를 제거하였다. 이 잔류물을 850°C에서 5분 동안 가열 후, 불순물을 제거하여 순수한 금 입자를 얻었다. Fig. 8은 철수산화물로부터 얻은 순수한 금 입자이다.

순수한 금 입자의 함량을 거리별로 나타낸 결과 상류지역보다 대체적으로 하류지역의 철수산화물에서 상대적으로 약간 높게 나타났(Fig. 9). 금 함량은 최소 0.05 g/t에서 최대 0.47 g/t으로 그리고 평균 0.174 g/t이다. 하류지역의 철수산화물에서 금 함량이 상대적으로 약간 높게 나타나는 원인은 Fig. 4와 같이 철수산화물의 Fe 함량과 관계있는 것으로 사료된다.

납-시금법에서 유리질 슬래그가 생성된다. 시료를 fire clay crucible 도가니에서 용융시키면 금은 lead button으로 침전되고 중금속과 석영 등은 용융체 상부로 상승하여 유리질 슬래그를 형성한다. 이때 여러 가

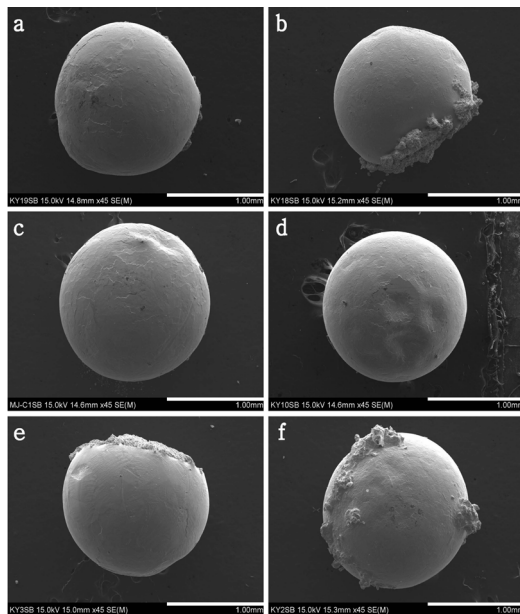


Fig. 7. SEM image of silver bead from lead-fire assay(a; K19(0 m), b; K18(3 m), c; K11(29 m), d; K10(30 m), e; K3(240 m), f; K2(243 m)). The scale bar is 1 mm in length.

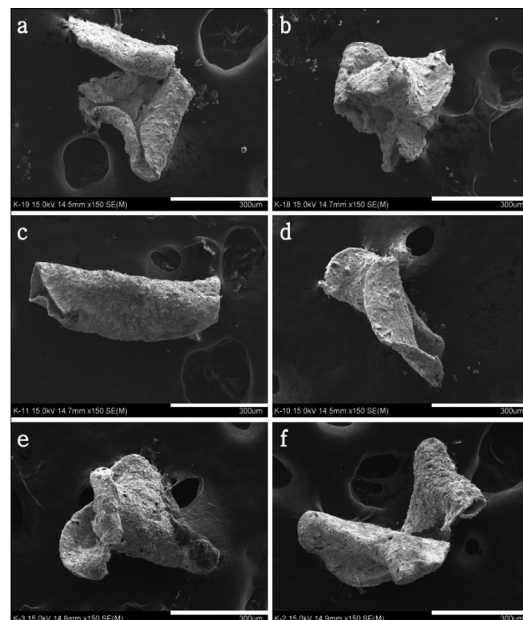


Fig. 8. SEM image of gold particles from lead-fire assay(a; K19(0 m), b; K18(3 m), c; K11(29 m), d; K10(30 m), e; K3(240 m), f; K2(243 m)).

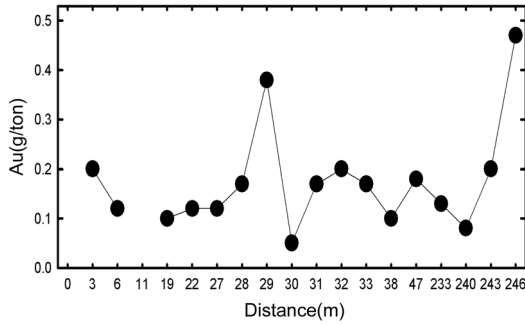


Fig. 9. Variation of Au content with distance in the iron-hydroxide by lead-fire assay.

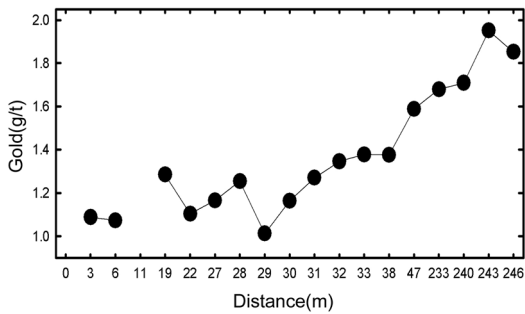


Fig. 10. Variation of Au content with distance in the glass slags by AAS.

지 요인에 의하여 금이 lead button으로 포집되지 못하고 유리질 슬래그로 손실된다. 유리질 슬래그에 함유된 금을 AAS로 분석하고 그 함량을 거리별로 나타냈다(Fig. 10). Fig. 10에서 상류지점(3 m)에서 금 함량은 1.09 g/ton, 중간지점(31 m)은 1.27 g/ton 그리고 하류지점(246 m)은 1.85 g/ton으로 나타났다. 유리질 슬래그로 손실되는 금은 상류 보다 하류지점에서 더 높게 나타났다. 금이 손실되고 있는 유리질 슬래그에 대하여 XRD분석을 수행하였다.

상류 지점(K19, K18), 중간 지점(K11, K10) 그리고 하류 지점(K3, K2)의 슬래그에 대하여 XRD분석을 수행한 결과 방연석(galena), 소금(halite), 납(lead)에 해당되는 회절선들이 나타났다(Fig. 11). 철수산화물에 대한 XRD분석(Fig. 3)에서 이들 회절선들은 나타나지 않았다. 그러나 유리질 슬래그에서 방연석과 납의 회절선이 나타나는 것은 납-시금법 과정에서 방연석과 납이 생성되었기 때문이다(Cho, 2012). 방연석이 생성되는 원인은 철수산화물에 함유된 고 함량의 S와 산화납(litharge, PbO)이 용융되는 과정에서 방연석이 형성되

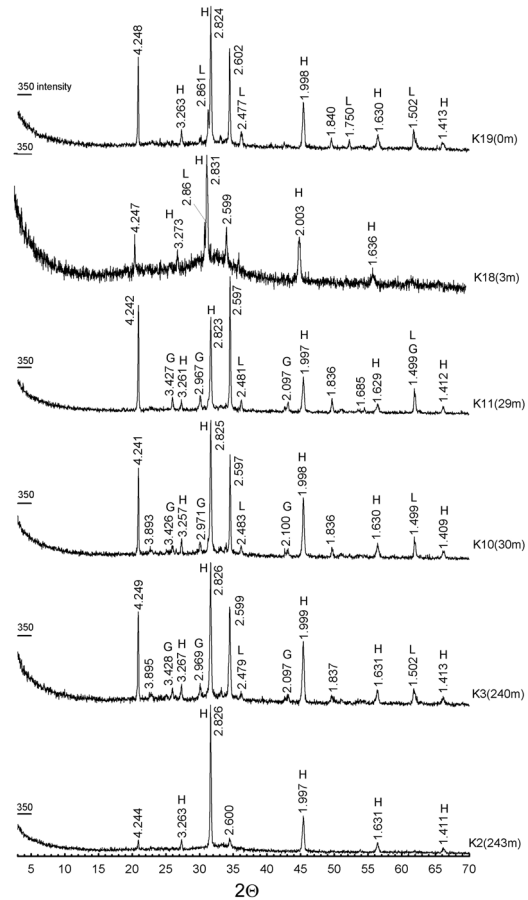


Fig. 11. XRD patterns of glass slag by fire assay(G; galen, H; halite, L; lead, Q; quartz).

었기 때문이다. Fig. 5에서 보는바와 같이 철수산화물에는 약 3,394 mg/kg에서 4,928.60 mg/kg 범위(평균, 4,414.62 mg/kg)의 S가 포함되어 있다. 납-시금법 과정에서, 환원제로 첨가한 밀가루가 CO₂로 산화되고 동시에 산화납이 납(lead, Pb)로 환원된다. 이때 환원된 납이 금을 포집하여 lead button으로 침전한다. 즉 납-시금법의 원리는 용융상태에서 비중 11.36인 납이 비중 19.3인 금을 포집하여 도가니 바닥으로 침전시키는 것이다(Potts, 1987). 그러므로 유리질 슬래그에서 방연석과 납의 회절선이 나타났다는 것은 비중이 11.36인 납이 lead button으로 침전하지 못했음을 의미한다. 즉 방연석과 납이 금을 포집하지 못하고 유리질 슬래그로 이동한 것이다. Fig. 10에서와 같이 상류보다 하류지점의 유리질 슬래그에서 금이 더 많이 손실되는 원인은 유리질 슬래그에 방연석과 납이 생성되는 것과 관련이 깊은 것으로 사료된다. 유리질 슬래그에서 소

금(halite)에 해당되는 회절선이 관찰되었다(Cho, 2012). 이는 납-시금법 과정에서 용융체의 비산 손실을 방지하기 위하여 시료 표면에 도포한 소금 때문이다. 첨가한 밀가루가 CO₂로 산화되어 가스로 탈출할 때 용융체가 비산 손실된다.

3.4. 고찰

폐광석 적치장으로부터 pH가 3.02에서 3.19 범위의 산성광산배수, 즉 Fe 이온 함량이 평균 15.16 mg/l 용해되어 있는 산성광산배수가 생성되고 있으며, 이 산성광산배수로부터 Fe 함량이 평균 520.29 mg/kg인 철수산화물이 침전되고 있다. 이 철수산화물에는 금이 평균 16.19 mg/kg 포함되어 있다. 폐광석에 소량 포함되어 있는 황화광물로부터 금을 분리시키는 것은 사실상 경제적으로 불가능하다. 그러나 폐광석으로부터 생성되는 산성광산배수는, 즉 방치되어 있는 황화광물로부터 금을 분리시켜 철수산화물에 농축시켜주는 역할을 수행하고 있다. 따라서 철수산화물에 흡착되어 있는 금을 회수한다면 폐광석을 파분쇄하고, 금이 함유된 황화광물과 맥석광물을 분리하는 부선과정과 같은 일련의 작업과정이 생략되므로, 많은 경비를 절약하는 셈이 된다.

평균 16.19 mg/kg의 금이 함유되어 있는 철수산화물에 대하여 납-시금법을 적용한 결과 평균 0.174 g/ton의 금이 회수되었다. 비록 많은 양의 금이 철수산화물에 포함되어 있지만 납-시금법을 적용하는 경우 많은 양의 금이 회수되지 못하였다. 금이 회수되지 못하고 손실되는 원인은 납-시금 과정에서 유리질 슬래그로 손실되기 때문에 그리고 큐펠레이션 과정에서 금이 규펠도가니에 흡수되기 때문인 것으로 사료된다(van Loon, 1977; Baker, 1985; Suominen *et al.*, 2004). 유리질 슬래그로 손실되는 금은 평균 1.37 mg/kg이다. 유리질 슬래그에 방연석과 납이 포함되어 있는 것을 XRD분석에서 확인한바와 같이, 유리질 슬래그로 금이 손실되는 원인은 금 포집제로 첨가한 산화납과 철수산화물에 포함된 황이 반응하여 방연석으로 되면서 금 포집에 참여하지 못하기 때문이다. 또한 금 포집제로 첨가한 산화납과 밀가루가 환원 반응하여 납으로 되면서 금 포집에 참여하지 못하기 때문이다. 즉 이들 방연석과 환원-납이 금을 포집하여 납추(lead button)로 침강되어야 하나 여러 요인에 의하여 유리질 슬래그로 상승되기 때문이다(Turan and Yucel, 2011).

유리질 슬래그로 손실되는 금이 최소가 되도록 시금 조건들을 조절한다면 철수산화물로부터 더 많은 금을

회수할 수 있을 것이다. 현재, 산성광산배수는 계속하여 폐광석으로부터 금을 분리하여 철수산화물에 농축시켜주고 있다. 하지만 금을 포함되어 있는 철수산화물이 방치되고 있기 때문에 주변 수계가 산성광산배수와 중금속으로 인하여 오염되고 있다(박천영 등, 2009). 낮은 pH, 중금속과 Fe가 고 농도로 용해되어 있는 산성광산배수를 효과적으로 처리하여 철수산화물로 침전시킨다면 많은 양의 중금속과 금이 포함될 것이다. 따라서 본 연구에서 철수산화물에 포함된 금을 납-시금법으로 회수 가능함을 확인하였다. 그러므로 철수산화물에 포함된 중금속을 회수하는 연구를 점차 수행한다면 철수산화물로부터 유용금속 회수는 물론 환경오염도 동시에 감소될 것으로 사료된다.

4. 결 론

폐광석으로부터 pH가 낮은 산성광산배수가 생성되며, Fe가 평균 520.29 mg/kg, 황이 평균 4414.62 mg/kg 그리고 금이 평균 16.19 mg/kg이 각각 포함된 철수산화물이 형성되고 있다. 철수산화물에 대하여 XRD분석을 수행한 결과 석영과 침철석이 나타났다. 철수산화물에 대하여 납-시금법을 수행한 결과 평균 0.174 g/ton의 금이 회수되었으며, 유리질 슬래그로 평균 1.37 mg/kg이 손실되었다. 유리질 슬래그로 금이 손실되는 원인은 유리질 슬래그에 방연석과 납이 포함되기 때문이며, 유리질 슬래그에 방연석과 납이 포함되어 있는 것을 XRD분석으로 확인하였다. 산성광산배수는 폐광석에 포함되어 있는 금을 분리시켜 철수산화물에 흡착시켜주고 있다. 따라서 산성광산배수와 철수산화물을 효과적으로 처리한다면 환경오염 감소는 물론 금과 중금속을 유용금속으로 회수할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 2013년도 조선대학교 학술연구비 지원을 받아 연구되었으며, 연구비를 지원해준 조선대학교에 감사한다.

참고문헌

Baker, B.J. and Bafield, J.F. (2003) Microbial communities in acid mine drainage. *FEMS. Microbiol. Ecol.*, v.44, p.139-152.
 Baker, W.E. (1985) Gold analysis. *URI*, v.49, p.1-49.
 Benedetti, M. and Boulegue, J. (1991) Mechanism of gold

- transfer and deposition in a supergene environment. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.55, p.1539-1547.
- Berrodier, I., Farges, F., Benedetti, M., Winterer, M., Brown Jr, G.E. and Deveughele, M. (2004) Adsorption mechanisms of trivalent gold on iron-and aluminum-(oxy)hydroxides. Part 1: x-ray absorption and Raman scatteringspectroscopic studies of Au(III) adsorbed on ferrihydrite, goethite, and boehmite. *Geochim Cosmochim Acta*, v.68, p.3019-3042.
- Bowell, R.J. and Bruce, I. (1995) Geochemistry of iron ochres and mine waters from Levant mine, Cornwall. *Appl. Geochem*, v.10, p. 237-250.
- Celep, O., Alp, I., Devenci, H. and Vicil, M. (2009) Characterization of refractory behaviour of complex gold/silver ore by diagnostic leaching. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, v.19, p.707-713.
- Cho, K.H., Kim, B.J., Wi, D.W., Oh, S.J., Choi, S.H., Sung, K.Y., Choi, N.C. and Park, C.Y. (2012) The Study on Au Losses in the Glassy Slag During the Lead-fire Assay. *J. KSMER*, v.49, p.654-662.
- Enzweiler, J. and Joekes, I. (1991) Adsorption of colloidal gold on colloidal iron oxides. *J. Geochem. Explor*, v.40, p.133-142.
- Ghosh, M.M., Connor, J.T.O. and Engelbrecht, R.S. (1967) Bathophenanthroline method for the determination of ferrous iron. *J. Am. Water Works. Assoc*, v.59, p.897-902.
- Greffie, C., Benedetti, M.F., Parron, C. and Amouric, M. (1996) Gold and iron oxide association under supergene condition: an experimental approach. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.60, p.1531-1542.
- Hamilton, T.W., Ellis, J., Florence, T.M. and Fardy, J.J. (1983) Analysis of gold in surface waters from Australian goldfields: an investigation into direct hydrogeochemical prospecting for gold. *Econ. Geol*, v.78, p.1335-1341.
- Henmi, T., Wells, N., Childs and Parfitt, R.L. (1980) Poorly-ordered iron-rich precipitates from springs and streams on andesitic volcanoes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.44, p.365-372.
- Juang, R.S. and Wu, W.L. (2002) Adsorption of sulfate and copper(II) on goethite in relation to the changes of zeta potentials. *J. Colloid. Interface. Sci*, v.249, p.22-29.
- Langhans, D., Lord, A., Lampshire, D., Burbank, A. and Baglin, E. (1995) Biooxidation of an arsenic-bearing refractory gold ore. *Miner. Eng*, v.8, p.147-158.
- Lottermoser, B.G. (2007) Mine wasters, characterizations, treatment, environmental impacts, Springer, p.394.
- Machemer, S.D. and Wildeman, T.R. (1992) Adsorption compared with sulfideprecipitation as metal removal process from acid mine drainage in a constructed wetland. *J. Contam. Hydrol*, v.9 p. 115-131.
- McHugh, J.B. (1988) Concentration of gold in natural waters. *J. Geochem Explor*, v.30, p.85-94.
- Park, C.Y., Han, O.H., Shin, D.Y. and Hong, Y.U. (2009) Seasonal Characteristics Variation of the Geochemical Componets of Acid Mine Drainage and Yellow-colored Iron hydroxide in the Abandoned GwangYang Gold Mine, South Korea. *J. KSMER*, v.46, p.190-206.
- Park, C.Y., Jeoung, Y.J. and Choi, N.C. (1999) Geochemistry of the Yellowboy. *J. KSMER*, v.36, p.299-312.
- Park, C.Y., Jeoung, Y.J. and Kim, S.K. (2001) Mineralogy and Geochemistry of Iron Hydroxides in the Stream of Abandoned Gold Mine in Kwangyang, Korea. *JKESS*, v.22, p.208-222.
- Park, C.Y., Jeoung, Y.J. and Kim, S.K. (2002) Geochemical Characteristics of Stream Water and Sediments in the Vicinity of Abandoned Hamback Coal Mine, Korea. *J. KSMER*, v.39, p.35-50.
- Potts, P.J. (1987) A handbook of silicate rock analysis, Blackie, p.662.
- Schwertmann, U. and Fischer, W.R. (1973) Natural "amorphous" ferric hydroxide. *Geoderma*, v.10, p.237-247.
- Southam, G. and Beveridge, T.J. (1994) The in vitro formation of placer gold by bacteria. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.58, p.4527-4530.
- Suominen, M., Kontas, E. and Niskavaara, H. (2004) Comparison of silver and gold inquarting in the fire assay determination of Palladium, Platinum and Rhodium in geological samples. *GEOSTAND. GEOANAL. RES*, v.28, p.131-136.
- Turan, A. and Yucel, O. (2011) The effect of iron and oxidizing flux addition on the fire assay of low grade pyritic refractory gold ores. *J. Min. Metall. Sect. B-Metall*, v.47, p.219-227.
- Van Loon, J. (1977) Analytical chemistry of the noble metals. *Pure Appl. Chem*, v.49, p.1495-1505.
- Widler, A.M. and Seward, T.M. (2002) The adsorption of gold(I) hydrosulphide complexes by iron sulphide surfaces. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.66, p.383-402.

2013년 7월 29일 원고접수, 2013년 10월 8일 1차수정, 2013년 12월 9일 게재승인