

암모니아 용출에 의한 산화대 금 광석으로부터 Fe 제거 효율에 관한 연구

The Efficiency of Fe Removal Rate from Gold Ore in the Oxidation Zone by Ammonia Leaching

김봉주(Bong-Ju Kim)¹ · 조강희(Kang-Hee Cho)² ·
최낙철(Nag-Choul Choi)² · 박천영(Cheon-Young Park)^{1,*}

¹조선대학교 에너지·자원공학과

(Dept. of Energy and Resource Engineering, Chosun University, Gwang-ju, Korea)

²서울대학교 지역시스템공학과

(Dept. of Rural Systems Engineering/Research Institute for Agriculture and Life Science,
Seoul National University, Seoul, Korea)

요약 : 산화대 금 광석에 존재하는 적철석을 암모니아 용액을 이용하여 제거하여 금과 은의 회수율을 향상시키고자 하였다. 산화대에는 석영, 적철석, 백운모가 존재하고 있으며, 적철석은 수성기원으로 형성되었다. 다양한 변수에 대하여 암모니아 용출실험을 수행한 결과, Fe 최대 용출 인자는 -45 μm 입도 크기, 1.0 M의 황산 농도, 5.0 g/l의 황산암모늄 농도 그리고 2.0 M의 과산화수소 농도일 때였다. 이 암모니아 용출용액으로부터 침철석이 침전·형성되는 것을 확인하였으며, 고체-잔류물에서 Fe-제거량이 증가할수록 Au와 Ag 회수율이 증가하였다.

주요어 : 산화대, 적철석, 암모니아용출, 침철석, 금회수율

ABSTRACT : This study aims to improve the recovery of gold and silver by removing hematite from gold ore of an oxidation zone with ammonia solution. Quartz, hematite and muscovite were present in the oxidation zone, while hematite was hydrogenous. As a result of performing an ammonia leaching test on variables, it is found that the maximum Fe leaching parameter was -45 μm particle size, 1.0 M sulfuric acid concentration, 5.0 g/l ammonium sulfate concentration and 2.0 M hydrogen peroxide concentration. It is also confirmed that goethite was precipitated and formed from that ammonia elution. As the amount of Fe-removal was increased in a solid-residue, the recovery of Au and Ag were increased, too.

Key words : Oxidation zone, Hematite, Ammonia leaching, Goethite, Gold recovery

*Corresponding author: +82-62-230-7878, E-mail: cybpark@chosun.ac.kr

Table 1. The results of XRF for ore minerals

Unit : wt%

Elements	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	SUM
Contents	74.99	2.56	13.54	0.03	0.05	0.19	0.12	0.43	2.33	0.29	5.48	100.01

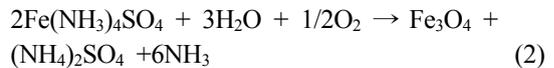
서 론

금을 함유하는 합금석영맥(gold-bearing quartz vein)이 지표에 노출되면 지표면 위에 고산(gossan)이 형성된다. 이 고산은 합금석영맥에 함유되었던 황화광물이 지표수와 반응하여 철수산화물로 변환된 것이다(Velasco *et al.*, 2013). 지표면에 노출된 황화광물이 지표수와 반응하여 산성수가 생성되고, 이 산성수는 합금석영맥을 따라 지하로 침투한다. 지하로 침투한 산성수는 합금석영맥의 황화광물을 산화-용해-이동-침전시킨다. 이 메카니즘에 의하여, 철수산화물이 형성되는 심도를 산화대, 유용금속이 지하수면 아래에서 환원-침전되는 심도를 환원대 혹은 부광대 그리고 그 부광대 하부에 1차 광화대가 존재한다(Webster and Mann, 1984; Belogub *et al.*, 2008).

산화대는 산성수에 의하여 용해성 금속과 황이 용탈되어 제거되기 때문에 금속 함량은 낮은 반면에 철수산화물의 형성으로 인하여 Fe 함량 및 금의 품위 또한 부화대나 광화대에 비하여 상대적으로 높게 나타난다(De oliveira and De oliveira, 2000; Hartley and Rice, 2005; Atapour and Atiabi, 2007; Belogub *et al.*, 2008; Velasco *et al.*, 2013). 그러나 산화대에 존재하는 gold는 철수산화물로 피복되어 있기 때문에 부유선별이 어렵다. 그러므로 황화광물과 맥석광물을 부유선별 하는 과정에서, 산화대 광석, 즉 철수산화물이 많은 광석이 부유선별에 공급되기 때문에 황화광물의 부선표효율이 떨어진다. 이는 산화대 광석광물에 포함된 고 함량의 Fe-성분 혹은 비정질의 철수산화물 때문이다(Clarke *et al.*, 1995; Peng *et al.*, 2002, 2003). 부선표효율이 감소하기 때문에 황화광물의 손실이 일어나고 황화광물의 손실은 결국 금 손실로 이어진다. 왜냐하면 대부분의 금은 황철석이나 황비철석과 같은 황화광물에 존재하기 때문이다. 그러므로 산화대의 금을 효과적으로 회수하기 위해서는 철수산화물 혹은 Fe성분을 제거하거나 감소시키는 연구가 반드시 필요하다.

암모니아(ammonia, NH₃)는 황동석과 섬아연석 등과 같은 황화광물에 적용하여 유용금속을 용출

시킬 수 있으며 또한 심해저 망간단괴와 같은 산화광물에 적용하여 환원적 용출방법으로 유용금속을 효과적으로 용출시킬 수 있다(Anand *et al.*, 1988; Ghosh *et al.*, 1990; Niinae *et al.*, 1996; Sabba and Akretche, 2006; Park *et al.*, 2007). 암모니아가 이와 같이 유용금속 용출의 용매제로 사용하는 이유는 비용이 저렴하고, 효율이 매우 뛰어나며, 낮은 독성과 부식성, 그리고 용해성의 금속 복합물을 형성하는 능력이 뛰어나기 때문이다. 그리고 무엇보다 암모니아는 Fe를 용출시켜 침철석이나 적철석으로 침전시키는 능력이 뛰어나기 때문이다(Beckstead and Miller, 1977; Ghosh *et al.*, 1990, 2002, 2003).



즉, 암모니아는 Fe와 반응하여 $\text{Fe}(\text{NH}_3)_4\text{SO}_4$ 와 같은 착물(complex)을 형성하고, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 혹은 Fe_2O_3 와 같은 철수산화물로 침전시키는 능력이 뛰어 나기 때문이다(Beckstead and Miller, 1977; Das and Anand, 1995).

따라서 본 연구 목적은 gold-bearing 산화대의 적철석을 암모니아 용액을 이용하여 최대 제거 인자를 결정하고자 하였으며, 이때 용출용액으로부터 침전되는 철수산화물에 대하여 광물학적으로 해석하고자 하였다. 또한 고체-잔류물에서, Fe-제거에 따른 금과 은의 품위 향상을 고찰하고자 하였다.

시료 및 암모니아용출실험

시 료

암모니아 용출실험에 사용할 금 광석 시료는 전남 해남군 모이산 금 광산으로부터 제공받았으며, 화학 분석 결과를 Table 1 나타내었다. 금 광석 시료는 심도 -20 m 산화대에서 채취하였으며, 이들 시료를

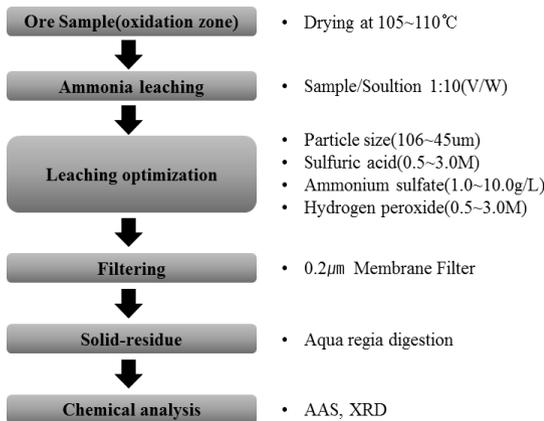


Fig. 1. Flowchart of leaching test method.

이용하여 연마편과 미분쇄 시료를 준비하였다. 연마편은 편광반사현미경(Nicon, ECLIPSE LV100DOL)으로 관찰하고, 미분쇄 시료는 XRD (X'Pert Pro MRD (MRD), PANalytical, Netherlands) 분석과 건식-체분석을 각각 수행하였다. 체분석은 4가지 입도 즉, 106, 106~75, 75~45, 45 µm로 분류하였다.

암모니아 용출실험

산화대 시료(7 g)와 황산-황산암모늄-과산화수소 수용액(70 mL)을 1 : 10 (V/W)의 고액비로 용출 실험을 실시하였으며, Fe가 최대 용출되는 변수를 파악하기 위하여 입도크기(106~45 µm) 그리고 황산암모늄(1.0~10.0 g/L), 황산(0.5~3.0 M), 과산화수소 농도(0.5~3.0 M)에 대하여 각각 용출 실험 하였다. 전체적인 실험 흐름도를 Fig. 1에 나타내었다. 용출 실험이 진행되는 동안, 시간 간격으로 용출용액 2.0 mL를 채취하여 Fe, Au, Ag 함량을 원자흡광분석기(AA-7000, Shimadzu, Japan)로 분석하였다. 용출 후 고액분리를 통해 고체 잔유물은 자연 건조 후, XRD분석과 왕수분해 하였다. 이 왕수분해 용액에 대한 Fe, Au 및 Ag 함량을 AAS로 측정하였다.

결과 및 고찰

산화대 광석광물

산화대 금 광석에 대하여 XRD분석한 결과 석영(quartz), 적철석(hematite), 백운모(muscovite)가 나

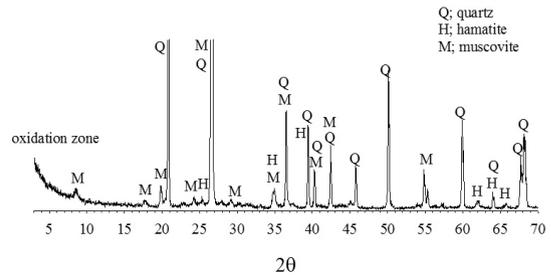


Fig. 2. XRD patterns of gold-ore mineral from oxidation zone. H; hematite (JCPDS card No 33-664), M; muscovite (JCPDS card No 21-993), Q; quartz (JCPDS card No 33-1161).

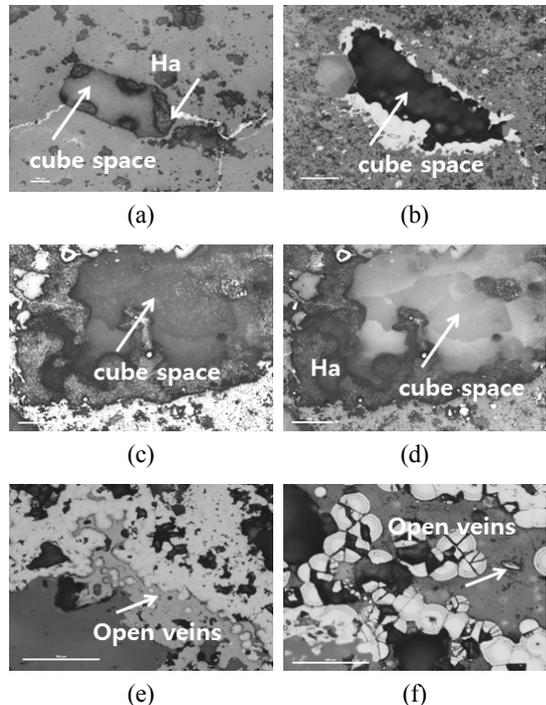


Fig. 3. Cross-polarized (a, c and f) and plane-polarized light (b, d and e) photomicrographs of gold-ore mineral from oxidation zone. Note that the pisolitic, concentric and colloform band of hematites are formed in the cube space (a, c and d), void(b) and open veins (e and f). Scale bar is 200 µm in length. magnification; 50 X (a), 200 X (b, c and d), 500 X (e and f). Ha; hematite, Q; quartz.

타났고(Fig. 2), 현미경에서는 석영과 적철석이 관찰되었다(Fig. 3). 적갈색의 구형 적철석이 입방체 공간 내부에 형성되어 있고(Fig. 3a, c and d), 과

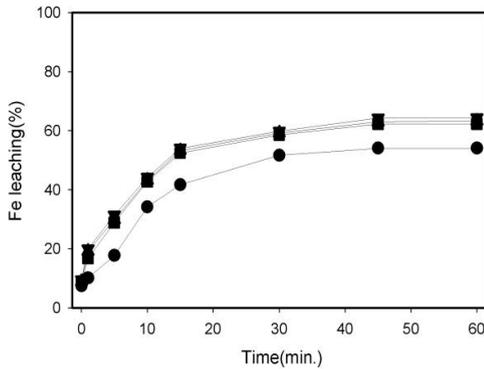


Fig. 4. Fe leaching rate with time. conditions; ammonium sulfate = 1.0 g/l, sulfuric acid = 0.5 M, hydrogen peroxide = 0.5 M, working volume = 70 ml, leaching temperature = room temperature, agitation speed = 100 rpm. Particle size ●; 106 μm, ■; 106~75 μm, ▲; 75~45 μm, ▼; -45 μm.

립상(pisolitic structure), 동심원적 성장 구조(concentric growth-banding structure), 수축성 교질상 성장 구조(shrinking colloform growth-banding structure)의 적철석은 역시 공동과 빈 공간 내부에 형성되어 있다(Fig. 3b, e and f). 또한 내부반사가 나타나는 석영도 입방체 공간 내부에 형성되어 있다(Fig. 3c and d). 흰색의 적철석은 복합적 세맥으로 산출되고 있으며, 입방체 공간과 연결되어 있다(Fig. 3a). 이 흰색으로 나타나는 적철석은 복반사와 이방성이 잘 나타나고 있다(Pracejus, 2008). 입방체 공간(Fig. 3a), 공동(Fig. 3b) 및 세맥은 황철석과 같은 황화광물이 산성수에 의하여 용해되어 제거된 공간일 것으로 추측된다. 즉, 산성수에 의해서 용해된 이들 공간 내부에, 상부에서 침투하는 산성수, 즉 Fe^{2+} 가 Fe^{3+} 로 산화 침전되면서 구형의 적철석을 형성하였거나, 혹은 공간으로 주입되는 Fe^{2+} 가 Fe^{3+} 로 산화되어 세맥의 적철석을 형성하였을 것으로 사료된다. 구형 형태의 적철석은 수용성 기원으로 흔히 산화대에서 열극충진으로 생성된다(Morris *et al.*, 2005; Brown *et al.*, 2008; Madden *et al.*, 2010; Velasco *et al.*, 2013). 산화대에서 자연금은 현미경으로 확인할 수 없었다. 이는 산화대 금이 비가시성(invisible gold)으로 존재하기 때문이다(Harris, 1990; Yang *et al.*, 1998).

산화대 광석광물에 대하여 화학분석한 결과 Fe가 132,545 mg/kg, Au가 5.46 mg/kg 그리고 Ag가 19.24 mg/kg이었다.

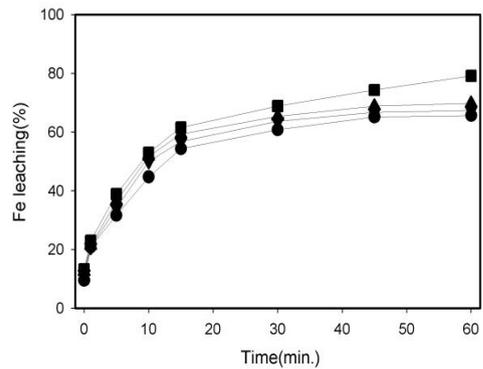


Fig. 5. Fe leaching rate with time. conditions; particle size = -45 μm, ammonium sulfate = 1.0 g/l, hydrogen peroxide = 0.5 M, working volume = 70 ml, leaching temperature = room temperature, agitation speed = 100 rpm. Sulfuric acid concentration ●; 0.5 M, ■; 1 M, ▲; 2.0 M, ▼; 3.0 M.

암모니아 용출실험

입도효과

입도크기에 따른 Fe 용출 효과를 알아보기 위하여 4가지 입도의 시료에 대하여 각각 용출실험을 수행하였다. 용출실험 결과, 106 μm에서 Fe 용출률이 53%, 106~75 μm에서 62%, 75~45 μm에서 63% 그리고 -45 μm에서 64%로 나타났다(Fig. 3). Fe 용출률은 입도 크기가 작아질수록 증가하였으며, 최대 용출률이 나타나는 입도는 -45 μm이었다.

황산농도 효과

입도효과에서 최대용출률(-45 μm)을 고정하고, 다양한 황산농도(0.5, 1.0, 2.0, 3.0 M)를 이용하여 최대 용출률을 파악하고자 하였다.

용출실험 결과, 황산 0.5 M일 때 Fe 용출률이 65%, 황산 1.0 M일 때 79%, 2.0 M일 때 69% 그리고 3.0 M일 때 67%이었다(Fig. 4). Fe 용출률이 최대로 나타나는 황산 농도는 1.0 M일 때이었다. 이러한 이유는 산농도가 0.5 M에서 1.0 M으로 증가할수록 용출속도를 증가시켜 일정 시간 내에 용출량의 증가를 보이지만, 1.0 M보다 높을수록 SO₄²⁻ 이온의 과포화로 용출반응 후 생성되는 생성물의 포화도가 낮아져 용출량을 감소시킨 것으로 판단된다.

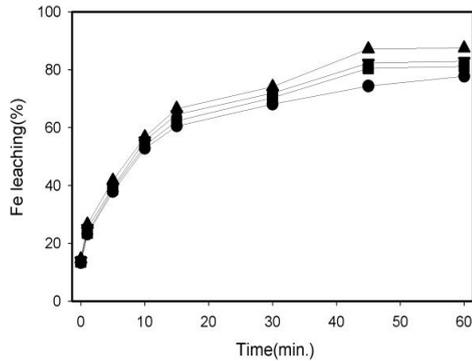


Fig. 6. Fe leaching rate with time. conditions; particle size = $-45 \mu\text{m}$, sulfuric acid = 1.0 M, hydrogen peroxide = 0.5 M, working volume = 70 mL, leaching temperature = room temperature, agitation speed = 100 rpm. Ammonium sulfate concentration ●; 1.0 g/l, ■; 3.0 g/l, ▲; 5.0 g/l, ▼; 10.0 g/l.

황산암모늄 농도 효과

Fe가 최대 용출되는 입도크기는 $-45 \mu\text{m}$, 황산 농도 1.0 M로 고정하고, 황산암모늄 농도의 효과를 확인하기 위해 1.0 g/l에서 10.0 g/l로 변화시켜 가면서 Fe 용출실험을 수행하였다. 용출실험 결과, 황산암모늄이 1.0 g/l일 때 Fe 용출률이 77%, 3.0 g/l일 때 81%, 5.0 g/l일 때 87% 그리고 10.0 g/l일 때 82%이었다(Fig. 5). 최대의 Fe 용출률이 나타나는 황산암모늄 농도는 5.0 g/l일 때였다.

과산화수소 농도 효과

Fe 용출률이 최대 나타는 입도는 $-45 \mu\text{m}$, 황산 농도는 1.0 M 그리고 황산암모늄 농도는 5.0 g/l로 고정하고 과산화수소 농도를 0.5 M에서 3.0 M으로 변화시켜서 Fe 용출실험을 수행하였다. 용출실험 결과, 과산화수소 농도가 0.5 M일 때 Fe 용출률이 87%, 1.0 M일 때 91%, 2.0 M일 때 98% 그리고 3.0 M일 때 94%이었다(Fig. 6). 과산화수소 농도가 2.0 M일 때 Fe 용출률이 최대 나타났으며, 3.0 M에서는 용출효율이 감소하였다. 이러한 이유는 과산화수소의 2.0 M 이상부터는 H^+ 이온의 소비가 너무 많아 과산화상태가 됨에 따라 침전물이 발생하여 용출효율이 떨어진 것으로 사료된다.

Fe 용출 반응생성물에 대한 광물학적 특성

Fe 용출률이 최대 나타나는 조건, 즉 $-45 \mu\text{m}$ 입도, 1.0 M 황산 농도, 5.0 g/l 황산암모늄 농도,

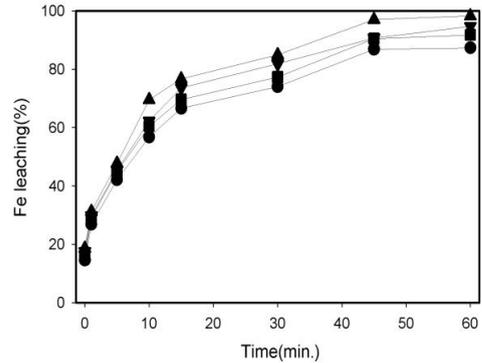


Fig. 7. Fe leaching rate with time. conditions; particle size = $-45 \mu\text{m}$, sulfuric acid = 1.0 M, ammonium sulfate = 5.0 M, working volume = 70 mL, leaching temperature = room temperature, agitation speed = 100 rpm. Hydrogen peroxide concentration ●; 0.5 M, ■; 1.0 M, ▲; 2.0 M, ▼; 3.0 M.

2.0 M 과산화수소 농도로부터 얻은 용출용액의 Fe 함량은 각각 85,226.4 mg/l (Fe 용출률 64%), 104,854.5 mg/l (Fe 용출률 79%), 115,874.3 mg/l (Fe 용출률 87%), 130,124.5 mg/l (Fe 용출률 98%)이었다. 이들 용출용액(68 mL)에 대하여, 용출실험 직후, 용액과 고체-잔류물을 각각 Whatman No 1 여과지를 이용하여 여과-분리하였다. 이 여과 용액은 다시 $0.45 \mu\text{m}$ 여과지로 여과하였으며, 어떤 고체 잔류물이나 부유물이 존재하지 않는 것을 확인하였다. 이 여과용액을 상온에서 6시간 방치하였으며, 용액 바닥에 형성된 침전물을 채취-자연 건조-XRD 분석하였다. XRD 분석 결과, 모두 침철석이 나타났다(Fig. 7). 암모니아 용출용액에서 Fe 함량이 서로 달라도 모두 침철석이 형성되는 것을 확인하였다. 이와 같이 침철석이 생성된 원인은 산화대의 적철석이 암모니아 용매에 의하여 용해-침전되었기 때문인 것으로 사료된다(Rao *et al.*, 1993). 암모니아 용출용액의 Fe가 $\text{Fe}(\text{NH}_3)_4\text{SO}_4$ 와 같은 착물을 형성하였을 것이고 이 착물은 물 및 산소와 반응하여 $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 혹은 Fe_2O_3 을 형성하였거나 또는 비정질의 페리하이드라이트(ferrihydrite, $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)를 형성하였을 것이다. $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 는 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 로 변환되고 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 가 탈수되면 Fe_2O_3 로 된다. 결국 비정질의 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 가 상변환되어 침철석을 형성하였을 것이다(Das and Anand, 1995). 또는 암모니아 용출용액의 Fe가 물

Table 2. Leaching results for different grades of ore sample

(unit : mg/kg)

Elements	Raw (A)	Leaching (B)	Solid-residues (C)	B/A	C/A
Fe	132,545.00	130,124.00	3145.45	0.09	0.02
Au	5.46	<0.1	7.45	0.01	1.36
Ag	19.24	<0.5	28.12	0.02	1.46

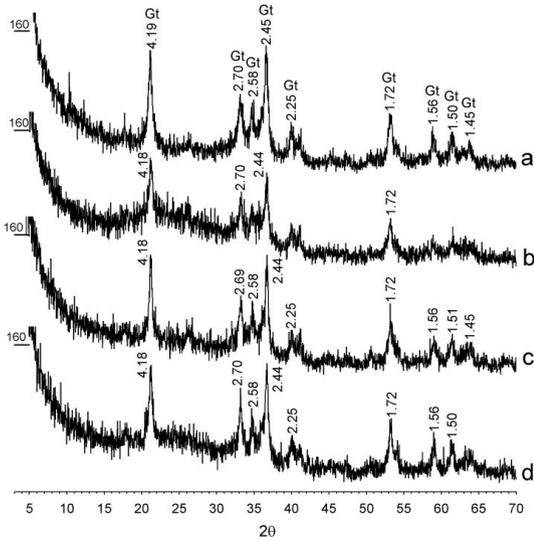


Fig. 8. XRD patterns for precipitation from the ammonia leaching solution. The highest Fe leaching conditions a; -45 μm , b; 1.0 M sulfuric acid, c; 5.0 g/l ammonium sulfate, d; 2.0 M hydrogen peroxide. Gt; goethite ($FeOOH$, JCPDS card No 29-713).

과 가수분해(hydrolysis)되어 비정질의 철수산화물인 $Fe(OH)_3$ 를 형성하고, 이는 페리하이드라이트(ferrihydrite) \rightarrow 레피도크로사이트(lepidocrocite) \rightarrow 침철석(goethite) 순서로 상변환 되었을 것으로 사료된다(Beckstead and Miller, 1977).

고체-잔류물에 대한 XRD 및 Fe-Au-Ag 함량 변화

고체-잔류물에 대한 XRD

암모니아 용출실험 후, 고체-잔류물을 여과-채취-자연건조 후, XRD분석과 왕수분해를 각각 수행하였다. XRD분석 결과, 석영과 소량의 백운모가 검출되었다(Fig. 8). 산화대 금 광석에 대한 XRD 분석에서 석영, 백운모 및 적철석이 나타났으나 (Fig. 1), 고체-잔류물에서는 석영과 소량의 백운모

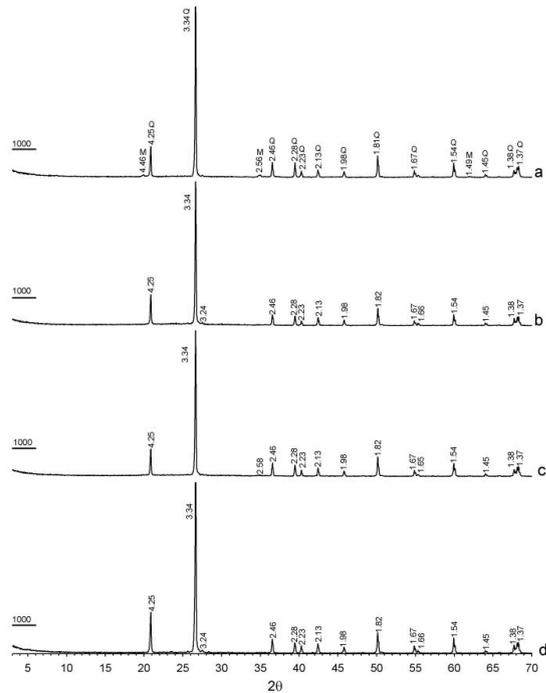


Fig. 9. XRD patterns for solid-residues from the ammonia leaching solution. The highest Fe leaching conditions a; -45 μm , b; 1.0 M sulfuric acid, c; 5.0 g/l ammonium sulfate, d; 2.0 M hydrogen peroxide. M; muscovite (JCPDS card No 21-993), Q; quartz (JCPDS card No 33-1161).

만 나타났다. 이와 같이 고체-잔류물에서 적철석이 전혀 나타나지 않는 것은 암모니아 용출에 의하여 적철석이 효과적으로 제거되었기 때문이다.

고체-잔류물에 대한 Fe-Au-Ag 함량 변화

고체-잔류물에 대한 왕수분해 용액에 대하여 Fe, Au 및 Ag 함량을 측정하였고 용출 전후 비교를 하였다(Table 2). 고체-잔류물은 암모니아 용출에 의하여 Fe가 최대 용출-제거되었기 때문에 그만큼 Fe가 감소될 것이고 반대로 Au, Ag 함량은

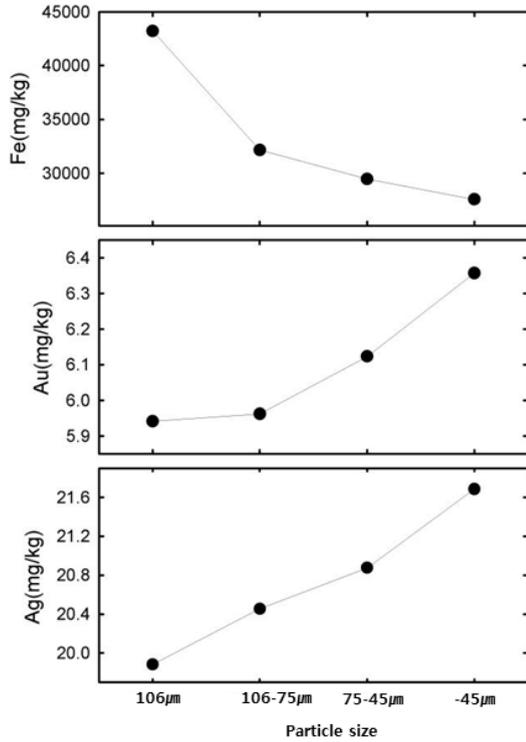


Fig. 10. Fe, Au and Ag content vs particle size in the C.

증가될 것으로 예상되었다. Fig. 9는 고체-잔류물에서, 입도 크기 변화에 대한 Fe, Au, Ag 함량을 나타낸 것이다. 입도크기가 감소할수록 Fe 함량은 감소하고 반대로 Au 및 Ag 함량은 증가하였다. 고체-잔류물의 입도크기가 -45 μm일 때 Fe 함량이 최소(27,544 mg/kg)로 나타났고 반대로 Au (6.35 mg/kg)와 Ag (21.68 mg/kg) 함량은 최대로 나타났다. 이와 같은 결과가 나타나는 원인은 암모니아 용출에 의해서 입도크기가 감소할수록 Fe 제거가 증가하였기 때문이다(Fig. 3). 예상하였던 것과 같이, Fe가 제거되었기 때문에 그만큼 Au와 Ag 함량이 증가한 것이다. Fig. 10은 고체-잔류물에서, 황산 농도 변화에 대한 Fe, Au, Ag 함량 변화를 나타낸 것이다. 황산 농도가 1.0 M일 때, Fe 함량이 최소(19,544 mg/kg)로 나타났고 반대로 Au (6.79 mg/kg)와 Ag (23.55 mg/kg) 함량은 최대로 나타났다. Fig. 11은 고체-잔류물에서, 황산암모늄 농도 변화에 대한 Fe, Au, Ag 함량 변화를 나타낸 것이다. 황산암모늄 농도가 5.0 M일 때, Fe 함량이 최소(8,754 mg/kg)로 나타났고 반대로 Au (7.15

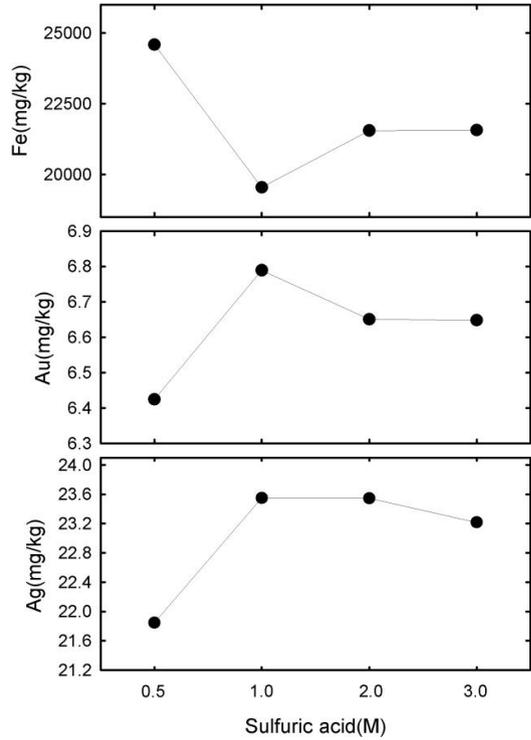


Fig. 11. Fe, Au and Ag contents of the solid-residues with sulfuric acid (-45 μm).

mg/kg)와 Ag (26.55 mg/kg) 함량이 최대로 나타났다. Fig. 12는 고체-잔류물에서, 과산화수소 농도 변화에 대한 Fe, Au, Ag 함량 변화를 나타낸 것이다. 과산화수소 농도가 2.0 M일 때, Fe 함량이 최소(3,545 mg/kg)로 나타났고 반대로 Au (7.46 mg/kg)와 Ag (28.13 mg/kg) 함량이 최대로 나타났다. 암모니아와 과산화수소, 즉 친환경적 용매를 이용하여 산화대의 Fe를 98% 이상 제거(용출)시킨 결과 금과 은의 회수율이 향상되는 것을 확인하였다. 고체-잔류물의 입도가 -45 μm일 때 Au 함량은 6.35 mg/kg, 황산 농도가 1.0 M일 때 6.79 mg/kg 그리고 과산화수소 농도가 2.0 M일 때 7.46 mg/kg으로 증가하였다. Ag 함량은 각각 21.68, 23.55 mg/kg 그리고 28.13 mg/kg으로 증가하였다. 이는 금 회수율이 약 7, 10%로 그리고 은 회수율은 9, 19%로 증가한 것이다. 그러나 고체-잔류물, 즉 석영 속에 존재하는 금은 회수하지 못하고 손실될 것으로 생각된다(Henley *et al.*, 2001). 왜냐하면 암모니아 용매는 석영을 분해하지 못하기 때문이다.

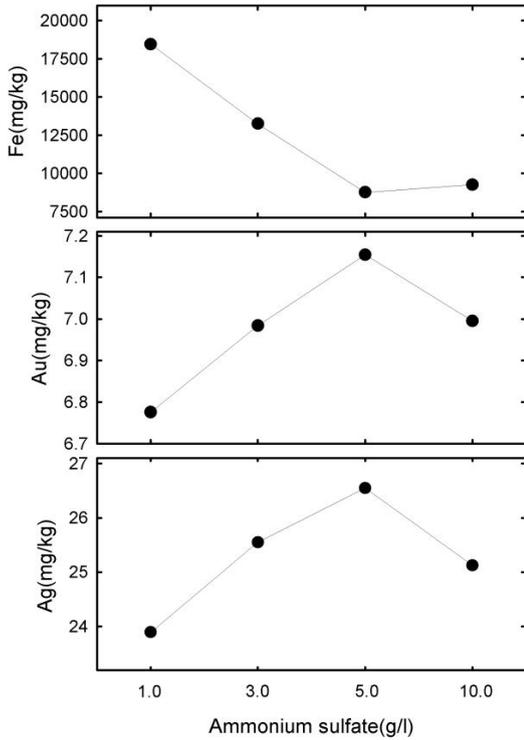


Fig. 12. Fe, Au and Ag contents of the solid-residue with ammonium sulfate (-45 μ m, 1.0 M sulfuric acid).

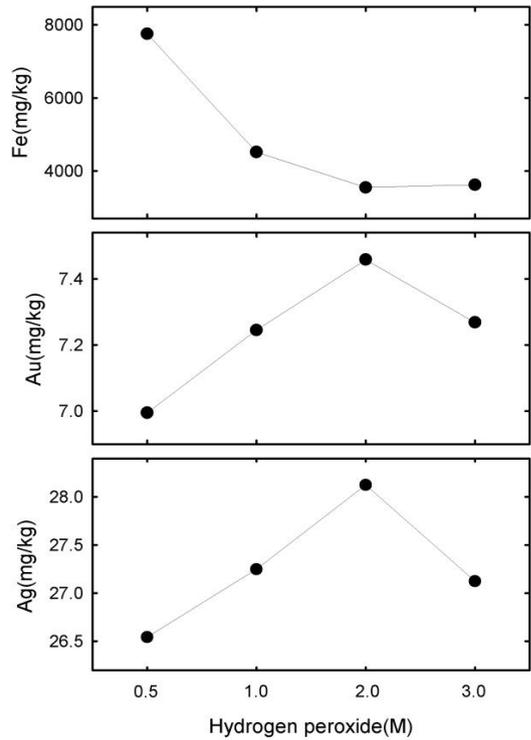


Fig. 13. Fe, Au and Ag contents of the solid-residue with hydrogen peroxide (-45 μ m, 1.0 M sulfuric acid, 5.0 g/l ammonium sulfate).

결 론

금을 함유하는 산화대에 석영, 적철석, 백운모가 존재하는 것을 XRD 분석으로 그리고 수성 기원을 지시해주는 구상, 동심원 및 수축성 교질상구조의 적철석을 현미경으로 확인하였다. 산화대의 적철석을 제거하기 위하여 다양한 조건으로 암모니아 용출실험을 수행하였다. Fe 용출률은 입도 크기가 작아질수록 증가하였으며, 최대 용출률이 나타는 입도는 -45 μ m이었다. 그리고 Fe 용출률이 98% 이상으로 나타나는 암모니아 용출조건은 1.0 M의 황산 농도, 5.0 g/l의 황산암모늄 농도 그리고 2.0 M의 과산화수소 농도일 때였다. 용출용액으로부터 침철석이 형성되었으며, 고체-잔류물에서 Fe 제거량이 증가할수록 Au 및 Ag 함량이 증가되었다. 친환경 용매인, 암모니아와 과산화수소가 산화대의 적철석을 효과적으로 제거할 수 있으며 그리고 이에 따라 금과 은의 회수율이 향상되는 것을 확인하였다.

사 사

본 연구는 환경부의 환경산업선진화기술개발사업에서 지원받았습니다(과제번호 : RE201604052).

REFERENCES

- Anand, S., Das, S.C., Das, R.P., and Jena, P.K. (1988) Leaching of manganese nodule in ammonical medium using ferrous sulfate as the reductant. *Metallurgical Transactions B*, 19B, 331-334.
- Atapour, H. and Atiabi, A. (2007) The geochemistry of gossan associated with Sarcheshmeh porphyry copper deposit. Kerman, Iran: implications for exploration and the environment, *Journal of Geochemical Exploration*, 93, 47-65.
- Beckstead, L.W. and Miller, J.D. (1977) Ammonia, oxidation leaching of chalcopyrite-reaction kinetics. *Metallurgical Transactions B*, 8B, 19-29.
- Belogub, E.V., Novoselov, K.A., Yakovleva, V.A., and Spiro, B. (2008) Supergene sulphides and related

- minerals in the supergene profiles of VHMS deposits from the south Urals. *Ore Geology Reviews*, 33, 239-254.
- Brown, B.B., Benison, K.C., Oboh-Ikuenobe, F.E., Story, S., and Mormile, M.R. (2008) Active hematite concretion formation in modern acid saline lake sediments, Lake Brown, western Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 268, 52-63.
- Clarke, P., Fornasiero, D., Ralston, J., and Smart, R.St. C. (1995) A study of the removal of oxidation products from sulfide mineral surface. *Minerals Engineering*, 8, 1347-1357.
- Das, R.P. and Anand, S. (1995) Precipitation of iron oxides from ammonia-ammonium sulphate solutions. *Hydrometallurgy*, 38, 161-173.
- De oliveira, S.M.B., and De oliveira, N.M. (2000) The morphology of gold grains associated with oxidation of sulphide-bearing quartz veins at Sao Bartolomeu, central Brazil. *South American Earth Sciences*, 13, 217-224.
- Ghosh, M.K., Anana, S., and Das, R.P. (1990) Oxidative ammonia leaching of pure zinc sulfide in the presence of lead compounds. *Metallurgical Transactions B*, 21B, 402-404.
- Ghosh, M.K., Das, R.P., and Biswas, A.K. (2002) Oxidative ammonia leaching of sphalerite part I: noncatalytic kinetics. *International Journal of Mineral Processing*, 66, 241-254.
- Ghosh, M.K., Das, R.P., and Biswas, A.K. (2003) Oxidative ammonia leaching of sphalerite part II: Cu(II)-catalyzed kinetics. *International Journal of Mineral Processing*, 70, 221-234.
- Harris, D.C. (1990) The mineralogy of gold and its relevance to gold recoveries. *Mineral Deposita*, 25, S3-S7.
- Henley, K.J., Clarke, N.C., and Sauter, P. (2001) Evaluation of a diagnostic leaching technique for gold in native gold and gold \pm silver tellurides. *Minerals Engineering*, 14, 1-12.
- Lawrance, L.M. and Griffin, B.J. (1994) Crystal features of supergene gold at hannan south, western Australia. *Mineralium Deposita*, 29, 391-398.
- Madden, A.S., Hamilton, V.E., Elwood Madden, M.E., Larson, P.R., and Miller, M.A. (2010) Low-temperature mechanism for formation of coarse crystalline hematite through nanoparticle aggregation. *Earth and Planetary Science letters*, 298, 377-384.
- Morris, R.V., Ming, D.W., Graff, T.G., Arvidson, R.E., Bell III, J.F., Squyres, S.W., Mertzman, S.A., Gruener, J.E., Golden, D.C. Le, L., and Robinson, G.A. (2005) Hematite spherules in basaltic tephra altered under aqueous, aic-sulfate conditions on Mauna kea volcano, Hawaii: possible clues for the occurrence of hematite-rich spherules in the Burns formation at Meridiani Planum, Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 240, 168-178.
- Niinae, M., Komatsu, N., Nakahiro, Y., Wakamatsu, T., and Shibata, J. (1996) Preferential leaching of cobalt, nickel and copper from cobalt-rich ferromanganese crusts with ammonical solutions using ammonium thiosulfate and ammonium sulfite as reducing agents. *Hydrometallurgy*, 40, 111-121.
- Park, K.H., Mohapatra, D., Reddy, B.R., and Nam, C.W. (2007) A study the oxidative ammonia/ammonium sulphate leaching of a complex(Cu-Ni-Co-Fe) matte. *Hydrometallurgy*, 86, 164-171.
- Peng, Y., Grano, S., Ralston, J., and Fornasiero, D. (2002) Towards prediction of oxidation during grinding I. galena flotation. *Minerals Engineering*, 15, 493-498.
- Peng, Y., Grabo, S., Fornasiero, D., and Ralston, J. (2003) Control of grinding conditions in the flotation of galena and its separation from pyrite. *International Journal of Mineral Processing*, 70, 67-82.
- Pracejus, B. (2008) The ore minerals under microscope, an optical guide. Elsevier, 875p.
- Rao, K.S., Das, R.P., Mukunda, P.G., and Ray, H.S. (1993) Use of X-ray diffraction in a study of ammonia leaching of multimetal studies. *Metallurgical Transactions B*, 24B, 937-945.
- Sabba, N. and Akretche, D.E. (2006) Selective leaching of a copper ore by an electromembrane process using ammonia solutions. *Mineral Engineering*, 19, 123-129.
- Veglio, F., Trifoni, M., Pagnanelli, F., and Toro, L. (2001) Shrinking core model with variable activation energy: a kinetic model of manganiferous ore leaching with sulphuric acid and lactose. *Hydrometallurgy*, 60, 167-179.
- Velasco, F., Herrero, J.M., Suarez, S., Yusta, I., Alvaro, A., and Tornos, F. (2013) Supergene features and evolution of gossan capping massive sulphide deposits in the Iberian pyrite belt. *Ore Geology Reviews*, 53, 181-203.
- Webster, J.G. and Mann, A.W. (1984) The influence of climate, geomorphology and primary geology on the supergene migration of gold and silver. *Journal of geochemical Exploration*, 22, 21-42.
- Wei, X., Viadero, Jr, R.C., and Buzby, K.M. (2005)

Recovery of iron and aluminum from acid mine drainage by selective precipitation. *Environmental Engineering Science*, 22, 745-755.

Wilson, A.F. (1984) Origin of quartz-free gold nuggets and supergene gold found in laterites and soils-a review and some new observations. *Australian Journal of Earth Sciences*, 31, 303-316.

Yang, S., Blum, N., Rahders, E., and Zhang, Z. (1998) The nature of invisible gold in sulfide from the

Xiangxi Au-Sb-W ore deposit in Northwestern Hunan, People's Republic of China. *The Canadian Mineralogist*, 36, 1361-1372.

Received August 29, 2016, Revised September 23, 2016, Accepted September 29, 2016, Associate Editor: Jeong Hun Seo