

## 황산용액에 의한 황동광으로부터 구리 침출 시 첨가제(과산화수소와 에틸렌글리콜) 및 온도의 영향

김소현 · \*안종관 · 신선명\* · 정경우\*

중원대학교 자원순환환경공학과, \*한국지질자원연구원

### Effects of Additives (Hydrogen Peroxide and Ethylene Glycol) and Temperature on the Leaching of Copper from Chalcopyrite by Sulfuric Acid Solution

So-Hyun Kim, †Jong-Gwan Ahn, Shun-Myung Shin\* and Kyeong-Woo Chung\*

Department of Resource Recycling and Environmental Engineering, Jungwon University

\*Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

#### 요 약

본 연구는 황동광의 황산침출에 관한 연구로 황산 농도, 침출온도, 첨가제로 과산화수소 및 에틸렌글리콜 첨가에 따른 구리 침출 거동을 조사하였다. 침출용액에 과산화수소 및 황산의 농도가 증가할수록 구리 침출률이 증가하였다. 침출온도에 따른 구리 침출률은 30-60°C에서 상승하였으나, 70-80°C에서는 감소하였다. 침출된 구리의 양이 감소하는 결과는 70°C 이상의 온도에서 용액 중에 함유된 과산화수소의 분해에 의한 것이었다. 80°C에서 에틸렌글리콜을 첨가하였을 경우 과산화수소의 분해가 억제되어 구리 침출률이 증가하였다. 침출 잔사의 SEM 분석 결과, 에틸렌글리콜을 첨가할 경우 침출 잔사가 다공성의 형태로 변형되는 것을 확인하였으며, 에틸렌글리콜 첨가 시 60°C 이하에서도 구리 침출률이 증가하였다.

**주제어** : 황동광, 구리 침출, 황산용액, 과산화수소, 에틸렌글리콜

#### Abstract

The leaching behaviors of copper from chalcopyrite were investigated by sulfuric acid. The leaching of copper was examined according to concentration of sulfuric acid, leaching temperature and addition of hydrogen peroxide and ethylene glycol. The concentrations sulfuric acid and hydrogen peroxide in the leaching solution were increased, the leaching efficiencies of Cu were increased. At 30-60°C, the leaching efficiency of Cu was increased but it was decreased at 70-80°C. The results were due to the increasing of hydrogen peroxide decomposition in the solution above 70°C. In the case of ethylene glycol added at 80°C, the decomposition of hydrogen peroxide was decreased and the leaching efficiency was increased. As a result of SEM analysis of leaching residue after leaching, the residue was found to porous form in the case of the ethylene glycol added and then the leaching efficiency of Cu was increased by the increase of surface area under 60°C with ethylene glycol.

**Key words** : chalcopyrite, copper leaching, sulfuric acid solution, hydrogen peroxide, ethylene glycol

· Received : June 27, 2016 · Revised : July 27, 2016 · Accepted : October 4, 2016

†Corresponding Author : Jong-Gwan Ahn (E-mail : dran@jwu.ac.kr)

Department of Resource Recycling and Environmental Engineering, Jungwon University, 85 Munmu-ro, Goesan-eup, Goesan-gun, Chungbuk 28024, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서 론

동 광석의 지속적인 채굴로 인해 고품위광의 매장량이 감소하는 추세이며, 향후 저품위광의 비율이 더욱 증가할 것으로 예측된다.<sup>1,4)</sup> 현재 세계 동 생산의 80% 이상이 건식제련 공정을 통해 생산되고 있으나, SO<sub>2</sub> 가스 배출에 의한 대기오염의 문제가 있으며 저품위 동광석의 경우 과량의 맥석으로 인해 기존 건식제련법 적용 시 슬래그 양의 증가로 인해 처리가 어려우므로 개선방안으로써 미생물 침출법 및 습식제련법에 대한 다양한 연구가 진행되어왔다.<sup>1-6)</sup> 미생물 침출의 경우 에너지 사용량과 초기 투자비용이 적고 공정이 간단하며 SO<sub>2</sub> 가스의 배출되지 않으므로 환경문제를 유발하지 않는 장점이 있다. 황동광의 미생물 침출에 있어 티오바실루스(Thiobacillus) 균주를 이용한 연구들이 보고되었으나, 이 방법의 경우 황동광 이외의 광물에는 적용이 어려우며 침출 공정 중 유독성의 황산 및 다량의 철 성분이 생성되는 등의 문제점이 있다.<sup>7)</sup> 습식제련의 경우 소규모 건설이 가능함에 따라 초기 투자비용이 적고, 건식제련보다 낮은 온도에서 조업이 가능하여 연료 소모가 적고 맥석을 함유한 저품위광의 처리가 가능한 장점이 있어 이에 대한 많은 연구가 수행되어왔다.

황동광(CuFeS<sub>2</sub>)은 동광석 가운데 전 세계적으로 가장 풍부하게 분포되어있으나, 난용성의 광물로 침출이 어려우며 95°C 이하에서 습식제련공정 적용 시 침출공정 중 단체 황(Elemental sulfur)의 형성으로 입자의 표면이 코팅되어 침출 속도가 느려지므로 효과적인 침출이 어렵고 금속의 회수율이 낮은 단점이 있다.<sup>5,8-11)</sup> 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 150 - 220°C의 고온에서 산소를 산화제로 이용하는 산소가압침출에 대한 연구들이 보고되어왔으며, 이 방법의 경우 빠른 침출 속도로 인하여 높은 구리 회수율의 장점이 있으나, 침출 후 고액분리가 어려운 단점이 있다.<sup>12)</sup>

따라서 이러한 문제점들을 극복하는 방안으로 낮은 온도(<95°C)에서 2가 구리이온(Cu<sup>2+</sup>), 3가 철이온(Fe<sup>3+</sup>), 중크롬산염(Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>), 과망간산염(MnO<sub>4</sub><sup>-</sup>), 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), 오존(O<sub>3</sub>) 등의 산화제를 이용하여 수용액 중에서 황동광을 산화시켜 목적 금속인 구리를 회수

하고자 하는 습식제련에 관한 연구들이 보고되었다.<sup>4,13)</sup> 그중 과산화수소는 1.77 V의 높은 표준 환원전위를 가지며 황화광의 산화 반응 중 물 이외의 기타 반응 생성물을 생성하지 않으므로 환경 친화적인 산화제로 보고되었다.<sup>1,5,6,13-15)</sup>

그러나 과산화수소는 침출공정 중 60°C 이상에서 분해되는 경향이 있는 것으로 보고되었으며,<sup>1,5,13,14,16)</sup> 이를 개선하려는 방안으로 Mahagan 등은 1 M 황산, 0.26 M 과산화수소, 광액농도 0.13%, 교반속도 350 rpm의 조건으로 65°C에서 침출실험을 수행하였다. 에틸렌글리콜 투입 전 과산화수소는 2시간 침출 후 완전히 분해되었고 이때 구리 침출률은 약 15%를 보이지만, 8 mL/L의 에틸렌글리콜을 투입하였을 때 4시간 침출 후 25%의 과산화수소만 분해되었고 결과적으로 약 60%의 구리 침출률을 보였다. 그러나 Mahagan 등은 65°C 이상에서 에틸렌글리콜의 영향이 없는 것으로 보고하였다.<sup>6)</sup>

본 연구에서는 65°C보다 고온인 80°C에서 첨가제인 에틸렌글리콜의 과산화수소 안정화 영향과 SEM 분석을 통해 황동광의 침출반응에 기여하는 에틸렌글리콜의 영향을 조사하였다. 황동광 침출 시 침출용액으로는 1 M 황산, 2 M 과산화수소를 함유한 용액을 사용하였으며, 침출실험은 온도, 황산 및 과산화수소의 농도, 에틸렌글리콜의 첨가에 대한 영향을 위주로 수행하였다.

## 2. 시료 및 실험방법

### 2.1. 시료

본 연구에서 사용한 황동광 시료의 화학조성은 Table 1에 나타내었다. 황동광 시료 중의 Cu, Fe, S의 함유량은 각각 40.35%, 23.25%, 24.25%였으며, 그 외 SiO<sub>2</sub>, Al, K 및 Ca도 소량 존재하였다. 황동광 시료를 입도 분석기(Mastersizer 2000, Malvern사)로 분석한 결과 입자의 평균 크기는 약 50 μm인 것으로 확인하였다. 침출용매로는 황산(95.0 - 98.0 vol%, Sigma-Aldrich, Germany)을 사용하였고 산화제로는 과산화수소(30 vol%, Junsei, Japan)를 사용하였다. 과산화수소 안정화 및 침출 효율 향상의 영향을 위하여 에틸렌글리콜(99%, Junsei, Japan)을 사용하였다.

Table 1. Chemical composition of chalcopyrite

Component	Cu	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al	K	Ca
Weight(%)	40.35	23.25	24.25	8.75	1.16	0.61	0.36

## 2.2. 실험방법

침출실험은 500 mL의 4구 이중 재킷 반응조에서 수행하였으며 순환항온수조를 이용하여 온도를 일정하게 조절하였다. 반응기에는 산도 측정을 위한 pH 전극, Eh 측정을 위한 산화환원전극(Ag/AgCl), 증발 방지를 위한 응축기, 샘플 채취용 튜브를 장착하였다. 침출용액으로 2 M 과산화수소를 함유한 1 M 황산용액 400 mL를 주입하여, 침출용액을 목표 온도로 가열한 후 4 g의 황동광 시료를 투입하였으며, 교반 속도는 400 rpm으로 조절하였다. 일정한 시간 간격으로 시료를 채취한 후 syringe filter (0.45  $\mu$ m)를 사용하여 여과하였으며, 과산화수소 농도계(PR-50HO, Atago사)를 이용하여 침출용액 중에 함유된 과산화수소의 농도를 측정하였다. 여과된 용액은 염산을 이용하여 희석한 후 유도결합 플라즈마 발광분석기(ICP-OES, iCAP-6300 Duo, Thermo scientific사)로 구리의 농도를 분석하였다. 침출 종료 후 침출용액의 고액분리를 통해 고체 잔사 시료를 회수하였으며, 주사전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscope, JSM-6380LA, JEOL사)을 이용하여 입자 형상을 관찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 과산화수소의 영향

Fig. 1은 60°C에서 과산화수소 투입에 따른 구리 침출 변화이다. 침출용액으로는 1 M 황산 용액과 2 M 과산화수소를 함유한 1 M 황산 용액을 사용하였다. 1 M 황산 용액의 경우 20% 이하의 구리 침출률을 보이나, 2 M 과산화수소를 함유한 1 M 황산 용액의 경우

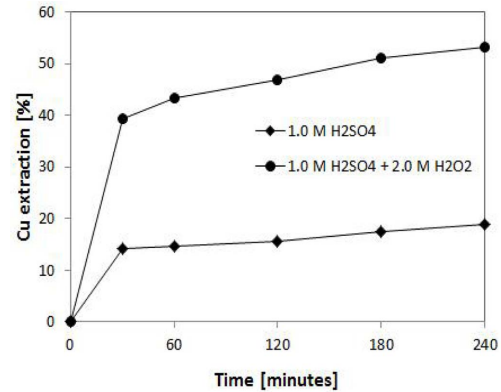


Fig. 1. Effect of hydrogen peroxide on the leaching of copper from chalcopyrite at 60°C. S/L = 1%, stirring speed = 400 rpm.

53.3%의 구리 침출률을 보였다. 이를 통해 과산화수소가 황동광의 황산 침출 시 적절한 산화제 역할을 하는 것을 확인할 수 있었다. Antonijevic 등에 의하면 과산화수소를 이용한 황동광의 황산 침출반응은 식 (1), (2)에 의한 것으로 보고되었으며, 황화물 이온은 황산염이온 또는 단체 황의 형태로 존재한다고 주장하였다.

Fig. 2는 과산화수소 농도에 따른 구리 침출의 변화이다. 침출용액은 2 M 황산 용액 중에 1-4 M의 농도로 과산화수소의 양을 조절한 용액을 사용하였으며, 침출실험은 40°C 및 60°C에서 수행하였다. 40°C에서 투입된 과산화수소의 농도가 2 M일 경우 57.3%의 구리 침출률을 보이나, 4 M의 경우 71.9%의 구리 침출률을 나타내었다. 60°C에서 투입된 과산화수소의 농도가 1 M일 경우 약 48.7%의 구리 침출률을 보이나, 3 M의 경

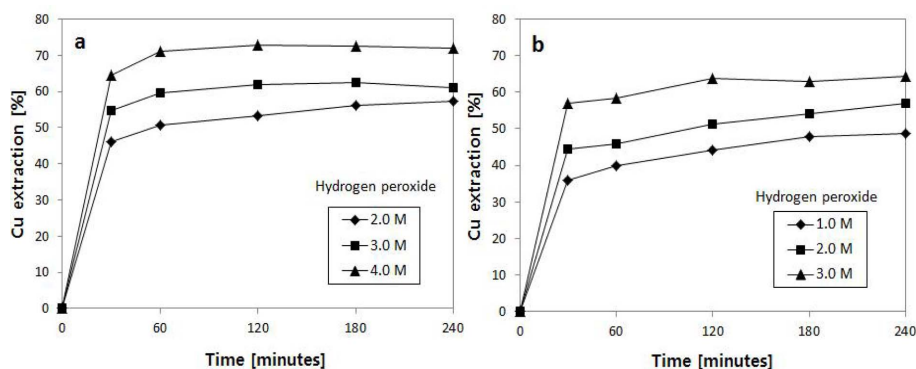
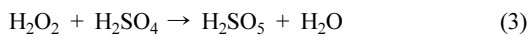
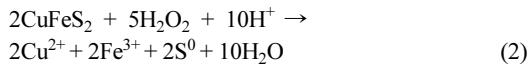
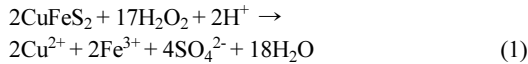


Fig. 2. Effect of hydrogen peroxide concentration on the leaching of copper from chalcopyrite at (a) 40°C, (b) 60°C. S/L = 1%, stirring speed = 400 rpm.

우 64.5%의 구리 침출률을 나타내었다. 결과적으로 40°C, 60°C의 다른 온도에서 같은 경향이 나타났으며, 용액 중의 과산화수소의 농도가 증가할수록 구리 침출률이 증가하는 것을 확인하였다. Olubambi 등은 과산화수소 농도가 증가함에 따라 황동광 용해가 가속화되는 것에 관해 카로산(Caro's acid, H<sub>2</sub>SO<sub>5</sub>)의 생성을 근거로 설명하였다. 황산 용액 중에 과산화수소가 존재할 경우 카로산이 생성되고, 용액 중 함유된 과산화수소의 농도가 증가할수록 생성되는 카로산의 양이 증가한다고 보고하였으며, 카로산의 생성 반응은 식(3)과 같다. 게다가 카로산은 황화물에 대하여 과산화수소 (E<sup>0</sup>=1.77V)보다 더 높은 표준 환원전위(E<sup>0</sup>=2.51V)를 가지며 산성의 특성을 나타내는 것으로 보고되었다.<sup>11,15)</sup>



### 3.2. 온도의 영향

Fig. 3은 침출온도에 따른 구리 침출의 변화이며, 침출실험은 30 - 80°C에서 수행하였다. 30-50°C에서 각각 46.3%, 44.4%, 47.7%로 구리 침출률은 유사한 경향을 보였으며, 60°C에서 53.3%로 가장 많은 양의 구리가 침출되었다. 그러나 70°C, 80°C에서 각각 49.7%, 42.2%의 구리가 침출되어 침출률이 감소하는 경향이 나

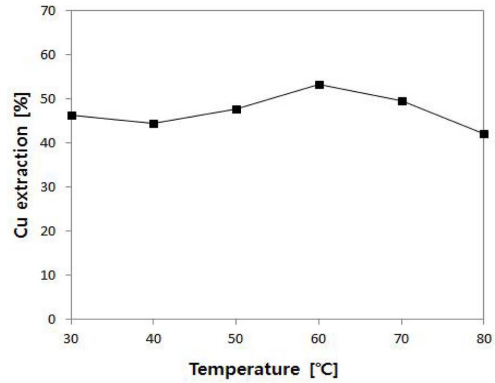


Fig. 3. Effect of temperature on the leaching of copper from chalcopyrite. [H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] = 1.0 M, [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] = 2.0 M, S/L = 1%, stirring speed = 400 rpm, leaching time = 4 hr.

타났다. 이러한 결과는 60°C 이상의 온도에서 과산화수소가 매우 빠르게 분해되어 황동광의 산화를 방해하기 때문으로 보고되었다.<sup>1,5,13,14,16)</sup>

Fig. 4는 40°C, 60°C, 80°C 조건에서 황동광을 투입하지 않은 침출용액 중에 함유된 과산화수소의 농도를 측정된 결과이다. 과산화수소 농도계를 이용하여 용액 중의 초기 과산화수소 농도를 측정된 결과 침출용액 중에 약 22.8 w/w%가 함유되어 있었다. 40°C에서 초기 과산화수소의 농도가 실험 종료 시점까지 유지되고, 60°C에서는 초기 농도의 약 2%가 감소하였으며, 80°C에서 초기의 약 15%가 감소하였다. 이 결과를 통해 60°C 이상의 온도에서 과산화수소의 분해가 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

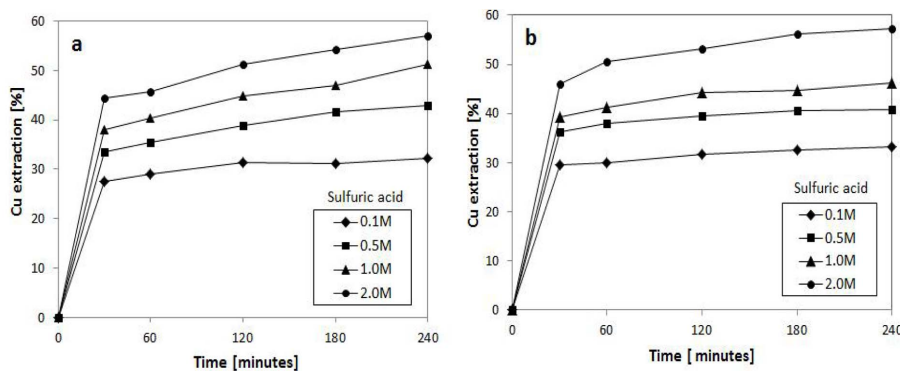


Fig. 4. Concentrations of hydrogen peroxide in the leaching solution at 40, 60, 80°C. No chalcopyrite, [H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] = 1.0 M, [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] = 2.0 M, stirring speed = 400 rpm.

### 3.3. 황산 농도의 영향

Fig. 5는 황산 농도에 따른 구리 침출의 변화이다. 침출용액은 0.1 - 2 M의 농도로 황산의 양을 조절한 용액 중에 2 M 과산화수소를 함유한 용액을 사용하였으며, 침출실험은 40°C 및 60°C에서 수행하였다. 40°C에서 황산의 농도가 0.1 M일 경우 33.2%의 구리 침출률을 보이나, 2 M의 경우 57.3%의 구리 침출률을 보였다. 60°C에서 황산의 농도가 0.1 M일 경우 약 32.2%의 구리 침출률을 보이나, 2 M의 경우 51.8%의 구리 침출률을 보였다. 40°C, 60°C의 다른 온도에서 같은 경향이 나타났으며, 용액 중의 황산의 농도가 증가할수록 구리 침출률이 증가하는 것을 확인하였다.

Adebayo 등에 의하면 용액 중의  $H^+$  이온의 농도가 증가할수록 과산화수소의 산화·환원 전위가 증가하며, 황동광의 용해가 더욱 가속화되는 것으로 보고되었다.

### 3.4. 에틸렌글리콜의 영향

Fig. 3, 4에 나타낸 바와 같이 70°C, 80°C의 침출실험에서 용액 중의 과산화수소의 분해로 인해 구리 침출률이 감소하였다.

그러나 본 연구에서 80°C에서 에틸렌글리콜을 첨가하여 과산화수소 분해 경향을 조사한 결과 Fig. 6과 같이 에틸렌글리콜을 첨가하지 않았을 경우 3시간 후 용액 중의 과산화수소가 분해되어 초기 농도의 85%만 존재하였으나, 용액 중에 5 mL/L 또는 10 mL/L의 에틸렌글리콜을 첨가함에 따라 과산화수소가 분해되지 않고 초기의 농도가 일정하게 유지되는 것을 확인하였다. 또한, 에틸렌글리콜을 첨가하지 않은 침출실험의 경우 황

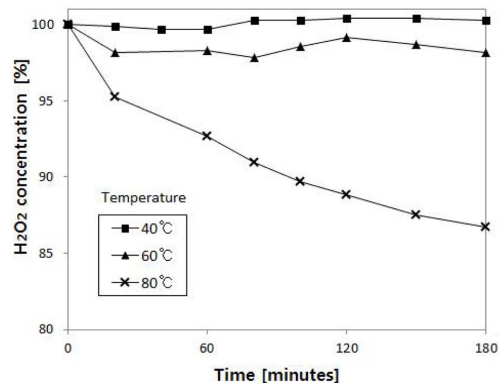


Fig. 5. Effect of sulfuric acid concentration on the leaching of copper from chalcopyrite at (a) 40°C, (b) 60°C. S/L = 1%, stirring speed = 400 rpm.

동광 시료 투입 후 10분 이내에 침출용액의 온도가 급격히 상승하는 경향이 나타났으나, 에틸렌글리콜을 첨가하였을 경우 이러한 현상이 나타나지 않았다. 이러한 결과는 Solis-Marcial, Lapidus에 의해 에틸렌글리콜이 침출용액의 끓는점을 상승하게 한다는 보고<sup>17)</sup>를 근거로 침출용액 중에 함유된 과산화수소의 분해점이 상승하여 안정화 경향을 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 80°C에서 에틸렌글리콜을 첨가하였을 경우 구리 침출의 변화이다. 에틸렌글리콜을 첨가하지 않았을 경우 42.2%의 구리 침출률을 보이나, 5 mL/L, 10 mL/L의 에틸렌글리콜을 첨가하였을 경우 각각 82.5%, 91.9%의

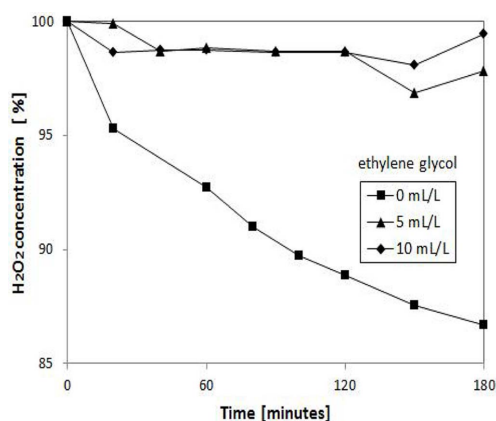


Fig. 6. Concentrations of hydrogen peroxide with or without ethylene glycol at 80°C. No chalcopyrite,  $[H_2SO_4] = 1.0 M$ ,  $[H_2O_2] = 2.0 M$ , stirring speed = 400 rpm.

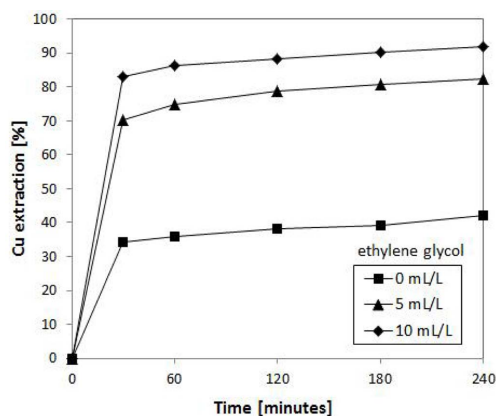


Fig. 7. Effect of ethylene glycol on the leaching of copper from chalcopyrite at 80°C.  $[H_2SO_4] = 1.0 M$ ,  $[H_2O_2] = 2.0 M$ , S/L = 1%, stirring speed = 400 rpm.

구리 침출률이 나타났다. Fig. 8은 40°C, 60°C, 80°C에서 10 mL/L의 에틸렌글리콜을 첨가하였을 경우 구리 침출률의 변화이다. 에틸렌글리콜을 첨가하지 않았을 경우 Fig. 3에 나타난 것과 같이 40°C, 60°C에서 각각 44.4%, 53.3%의 구리 침출률을 보였으나, 에틸렌글리콜을 첨가하였을 경우 각각 94.4%, 95.5%의 매우 높은 구리 침출률이 나타났다. 따라서 에틸렌글리콜이 60°C 이상에서 용액 중의 과산화수소의 분해를 지연시킬 뿐만 아니라 황동광의 용해를 증진하게 하여 구리 침출이 매우 효과적인 것으로 판단하였다. 침출용액의 산화환원전위를 측정 한 결과 에틸렌글리콜을 첨가하였을 경우 용액의 산화환원전위가 상승하는 것을 확인하였으며, 따라서 구리 침출률이 상승하는 결과가 나타난 것으로 판단된다.

### 3.5. 광액농도의 영향

Fig. 9는 40°C에서 광액농도 1%(10 g/L), 5%(50 g/L), 10% (100 g/L)의 조건에 따른 구리 침출률의 변화이다. 광액농도 1%의 조건에서 42.7%의 구리 침출률을 보이나, 5, 10%의 조건에서 각각 23.9%, 17.5%의 낮은 구리 침출률이 나타났다. 침출용액 중의 황산 및 과산화수소의 농도가 같은 조건일 경우 광액농도가 증가할수록 투입된 황동광 시료의 일부만 반응하여 결과적으로 낮은 구리 침출률이 나타난 것으로 판단된다. 광액농도 증가에 따라 구리 침출률을 증가시키려는 방법으로 용액 중에 10 mL/L의 에틸렌글리콜을 첨가하여 40°C에서 침출실험을 수행하였으며, 구리 침출의 결과

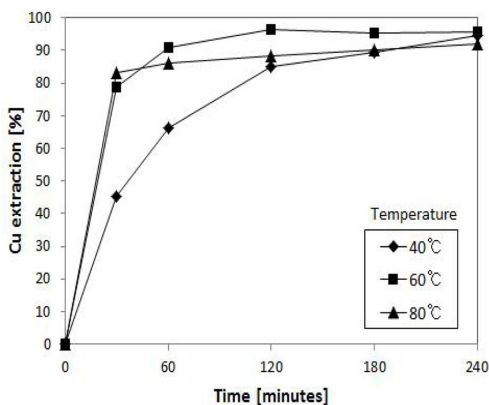


Fig. 8. Dissolution of chalcopyrite with the 10 mL/L of ethylene glycol at 40, 60, 80°C. S/L = 1%, stirring speed = 400 rpm.

를 Fig. 10에 나타내었다. 에틸렌글리콜을 첨가하지 않았을 경우 광액농도 1%, 5%, 10%의 조건에서 각각 42.7%, 23.9%, 17.5%의 구리 침출률을 보이나, 에틸렌글리콜을 첨가하였을 경우 각각 94.4%, 50.4%, 35.9%로 2배 증가한 구리 침출률이 나타났다.

### 3.6. SEM 분석

침출실험을 통해 침출용액 중에 에틸렌글리콜을 첨가하였을 경우 황동광으로부터 침출되는 구리의 양이 매우 증가하는 결과를 확인하였으며, 에틸렌글리콜을 첨가함으로써 황동광의 침출에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단하였다. 침출 종료 후 고액분리를 통해 회

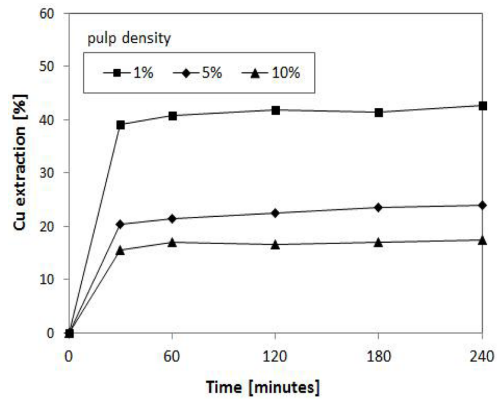


Fig. 9. Dissolution of chalcopyrite at 1%, 5%, 10% pulp density. Temp. = 40°C, [H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] = 1.0 M, [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] = 2.0 M, stirring speed = 400 rpm.

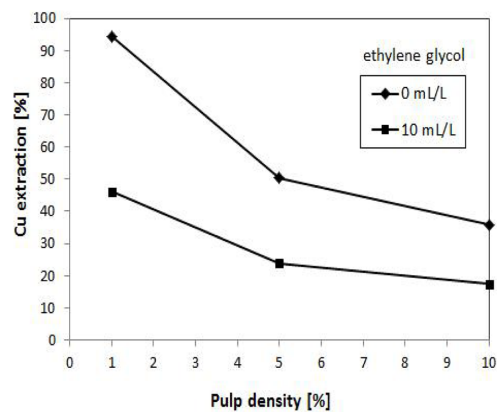
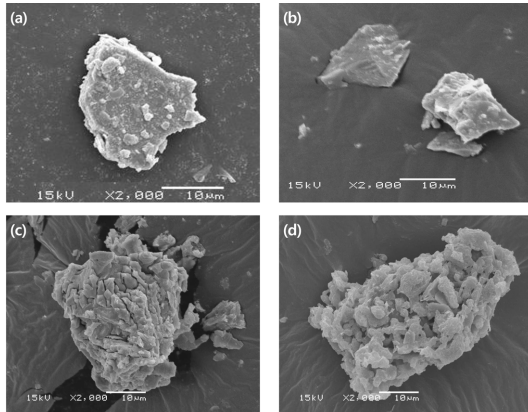


Fig. 10. Effect of ethylene glycol on the leaching of copper from chalcopyrite at 1, 5, 10% pulp density. Temp. = 40°C, [H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] = 1.0 M, [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] = 2.0 M, stirring speed = 400 rpm.



**Fig. 11.** SEM micrographs of leaching residues at 80°C. (a) chalcopyrite before leaching, (b) 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, (c) 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 2 M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, (d) 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 2 M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 10 mL/L ethylene glycol.

수된 고체 잔사의 입자 형상을 관찰하기 위하여 SEM 분석을 수행하였으며, SEM 분석 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 황산 용액만을 이용하여 침출실험을 수행하였을 경우, 침출 종료 후 황동광의 표면은 황동광 시료의 표면과 비교하였을 때 육안 상으로 형태학적 차이를 구별할 수 없었다. 그러나 과산화수소를 투입하였을 경우 침출 종료 후 황동광 표면이 갈라진 형태로 존재하였다. 이는 산화제 투입에 따른 황동광 산화 반응의 결과인 것으로 판단된다. 또한, 에틸렌글리콜을 첨가하였을 경우 침출 종료 후 황동광은 다공성의 형태로 존재하는 것을 확인하였다. 따라서 에틸렌글리콜의 첨가는 황동광이 형태학적으로 다공성의 결정을 이루게 하여 침출용매 및 산화제와의 반응을 증진하게 하는 역할을 하는 것으로 판단 할 수 있었다.

#### 4. 결 론

과산화수소를 산화제로 이용한 황동광의 황산 침출 시 구리를 회수하기 위한 목적으로 과산화수소 농도, 침출온도, 황산 농도, 에틸렌글리콜 첨가의 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 황산 용액에 과산화수소를 투입하였을 경우 구리 침출률이 증가하였고, 이를 통해 황동광의 황산 침출에 과산화수소가 적합한 산화제임을 확인하였다.
2. 침출온도 60°C에서 가장 높은 구리 침출률을 보였

으나, 그 이상의 온도에서 과산화수소의 분해로 인해 구리 침출률이 감소하였다. 용액 중의 황산 및 과산화수소의 농도가 증가함에 따라 구리 침출률이 증가하였다.

3. 80°C에서 에틸렌글리콜을 첨가하였을 경우 과산화수소의 분해가 저해됨에 따라 에틸렌글리콜이 과산화수소 안정화에 기여하는 것을 알 수 있었다. 또한, 동일 조건에서 침출실험을 수행한 결과 구리 침출률이 매우 증가하였으며, 40°C, 60°C에서도 구리 침출률이 매우 증가하였다.

4. 광액 농도가 증가함에 따라 낮은 구리 침출률을 보였으나, 에틸렌글리콜을 첨가하였을 경우 구리 침출률이 약 2배 상승하는 결과가 나타났다.

5. 침출잔사의 SEM 분석결과 황산 용액의 경우 표면 형태의 변화는 침출 전 황동광 시료와 차이가 미미하나, 과산화수소를 투입하였을 경우 표면이 갈라진 형태로 존재하였다. 에틸렌글리콜을 첨가하였을 경우 입자의 표면이 다공성의 형태를 이루는 것을 확인함으로써, 과산화수소를 이용한 황동광의 황산 침출 시 에틸렌글리콜을 첨가하는 것이 중요한 인자임을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “저품위 동광의 제련공정 연구” 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### References

1. Adebayo, A.O., Ipinmoroti, K.O. and Ajayi, O.O., 2003: Dissolution Kinetics of Chalcopyrite with Hydrogen Peroxide in Sulphuric acid Medium, Chem. Biochem. Eng. Q., 17(3), pp. 213-218.
2. Cordoba, E.M. et al., 2008: Leaching of chalcopyrite with ferric ion. Part II: Effect of redox potential, Hydrometallurgy, 93, pp. 88-96.
3. Watling, H.R., 2013: Chalcopyrite hydrometallurgy at atmospheric pressure: 1. Review of acidic sulfate, sulfate-chloride and sulfate-nitrate process options, Hydrometallurgy, 140, pp. 163-180.
4. Watling, H.R., 2014: Chalcopyrite hydrometallurgy at atmospheric pressure: 2. Review of acidic chloride process options, Hydrometallurgy, 146, pp. 96-110.
5. Antonijevic, M.M., Jankovic, Z.D. and Dimitrijevic M.D., 2004: Kinetics of chalcopyrite dissolution by hydrogen peroxide in sulphuric acid, Hydrometallurgy, 71, pp. 329-334.

6. Mahagan, V. et al., 2006: Enhanced leaching of copper from chalcopyrite in hydrogen peroxide-glycol system, Minerals engineering, 20, pp. 670-674.
7. Jae-Woo Ahn, Hyo-Jin Ahn, Meong-Woon Kim, 2011: Chemical leaching of Co, Cu, Ni, Al, Fe by organic acid from cobalt concentrate, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 20(6), pp. 63-70.
8. Harmer, S. L. et al., 2006: The evolution of surface layers formed during chalcopyrite leaching, Geochimica et Cosmochimica Acta, 70, pp. 4392-4402.
9. Kyoung-keun Yoo et al., 2008: The effect of redox potential on the leaching of chalcopyrite in chloride media, The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 45(1), pp. 1-7.
10. Olubambi, P.A., Potgieter, J.H., 2009: Investigations on the mechanisms of sulfuric acid leaching of chalcopyrite in the presence of hydrogen peroxide, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal, 30(4), pp. 327-345.
11. Abou-Yousef, H., El-Sakhawy, M. and Kamel, S., 2005: Multi-stage Bagasse pulping by using alkali/Caro's acid treatment, Industrial Crops and Products, 21, pp. 337-341.
12. Hyoung-Choon Eom et al., 2007: Behavior of the high temperature oxygen pressure leaching of chalcopyrite in sulfuric acid solution, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 16(3), pp. 44-49.
13. Agacayak, T. et al., 2014: Leaching of chalcopyrite concentrate in hydrogen peroxide solution, Physicochemical Problems of Mineral Processing, 50(2), pp. 657-666.
14. Adebayo, A.O., Ipinmoroti, K.O. and Ajayi, O.O., 2006: Dissolution of Chalcopyrite with Hydrogen Peroxide in Sulphuric Acid, Pak. J. Sci. Ind. Res., 49(2), pp. 65-71.
15. Olubambi, P.A., Borode, J.O. and Ndlovu, S., 2006: Sulphuric acid leaching of zinc and copper from Nigerian Complex Sulphide Ore in the presence of hydrogen peroxide, The Journal of the southern african institute of mining and metallurgy, 106, pp. 765-770.
16. Antonijevic, M.M., Dimitrijevic, M. and Jankovic, Z., 1997: Leaching of pyrite with hydrogen peroxide in sulphuric acid, Hydrometallurgy, 46, pp. 71-83.
17. Solis-Marcial, O. J., Lapidus G.T., 2013: Improvement of chalcopyrite dissolution in acid media using polar organic solvents, Hydrometallurgy, 131-132, pp. 120-126.

---

**김 소 현**

• 현재 중원대학교 자원순환환경공학과 석사과정

---

**안 종 관**

• 현재 중원대학교 자원순환환경공학과 교수  
• 당 학회지 제24권 5호 참조

---

**신 선 명**

• 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원

---

**정 경 우**

• 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원

---