

## 황화광물로부터 유용금속 침출을 위한 Acid Bake-water Leaching System 내 황산염 용매제의 적용성

### Application of Sulfate Solvent in Acid Bake-water Leaching System for Valuable Metal Leaching from Sulfide Mineral

고진석(Chin Surk Ko) · 토틸트흐마(B. Togtokhmaa) · 박천영(Cheon-Young Park)\*

조선대학교 에너지 · 자원공학과

(Department of Energy and Resource Engineering, Chosun University, Gwang-ju, Republic of Korea)

**요약** : 본 연구는 acid bake-water leaching system (AWS)를 이용하여 Au 정광으로부터 경제적이고 친환경적인 유용금속 용출을 위하여 황산염 용매제의 적용성을 파악하는 것이다. AWS 실험은 전기로를 이용하여 다양한 baking 온도(100°C ~ 500°C)와 황산염 용매제( $H_2SO_4$ ,  $K_2SO_4$ ,  $(NH_4)_2SO_4$ ,  $MgSO_4$ ,  $CaSO_4$ ) 조건에서 수행하였다. Baking 온도가 400°C 까지 증가할수록 유용금속의 용출률은 증가하였다. 용출시간에 따른 AWS 실험결과, 최대 용출률 조건은  $(NH_4)_2SO_4$  용매제이었다. 본 연구를 통하여  $(NH_4)_2SO_4$  용매제가 AWS를 이용한 유용금속 용출에 있어 효과적인 용매제로 사용가능함을 입증하였다.

**주요어** : 유용금속, acid bake, 수침출, 황산염용매제, 황산암모늄

**ABSTRACT** : The objective of this study was to investigate the application of sulfate solvents for the economic and eco-friendly leaching of valuable metals from Au concentrate using an acid bake-water leaching system (AWS). AWS experiments were performed using an electric furnace with various baking temperatures (100-500°C) and sulfate solvents ( $H_2SO_4$ ,  $K_2SO_4$ ,  $(NH_4)_2SO_4$ ,  $MgSO_4$ , and  $CaSO_4$ ). The efficiency of the valuable metal leaching increased as the baking temperature was increased to 400°C. Based on the AWS leaching time experiments, the maximum leaching rate occurred with the aqueous  $(NH_4)_2SO_4$  solvent. This study demonstrates that aqueous  $(NH_4)_2SO_4$  could be used as an effective solvent for valuable metal leaching using an AWS.

**Key words** : valuable metal, acid bake, water leaching, sulfate solvents,  $(NH_4)_2SO_4$

## 서 론

비-가시성 Au 정광은 Cu, Zn, Pb, Fe 등과 같은 유용금속들을 함유한 복합황화광물로 구성되어 있다. Au는 주로 황철석(Pyrite,  $FeS_2$ )과 황비철석(Arsenopyrite,  $FeAsS$ )에 포함되어 있지만 황철석과 황비철석은 황동석(Chalcopyrite,  $CuFeS_2$ ), 코벨

라이트(Covellite,  $CuS$ ), 휘동석(Chalcocite,  $Cu_2S$ ), 섬아연석(Sphalerite,  $ZnS$ ), 자류철석(Pyrrhotite,  $Fe_{1-x}S$ ), 방연석(Galena,  $PbS$ ), 사면동석(Tetrahedrite,  $Cu_{12}Sb_4S_{13}$ ) 등과 함께 산출된다. Au 정광 내 Au 품위 및 회수율 증대를 목적으로 적용되는 소성법(Roasting method)에 의하여 생성되는 소성광물에는 Fe, Cu, Zn 및 Pb 등과 같은 유용금속이

\*Corresponding author: +82-62-230-7119, E-mail: cybpark@chosun.ac.kr

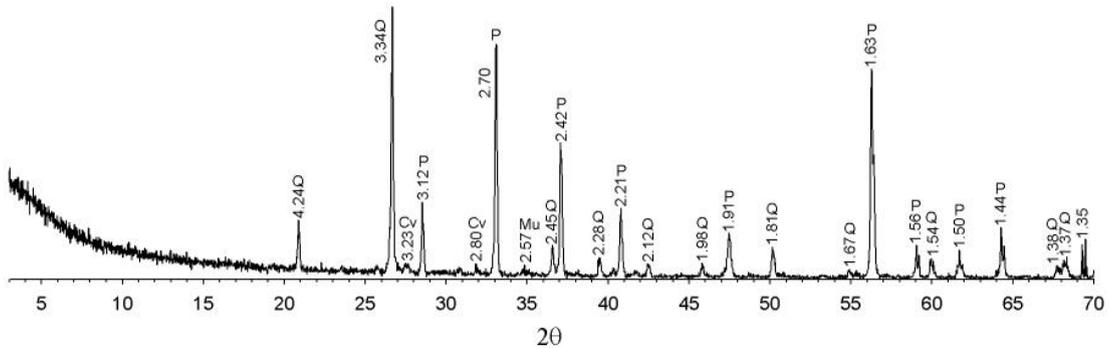


Fig. 1. XRD patten of Au concentrate (Cv; covellite, P; pyrite, Q; quartz, Mu; muscovite).

포함되어있으며, 이러한 광물들은 광미로 대부분 처분된다. 즉, Au 용출 및 회수 과정에서 Au를 제외한 유용금속들의 존재와 가치가 거의 무시되어 왔다. 그러므로 Au 정광에 포함된 이들 유용금속을 효과적으로 용출하면서 Au品位 및 회수율을 향상시키는 친환경적인 전처리 기술이 요구되고 있다.

최근 국외에서는 acid bake-water leaching system (AWS)을 이용하여 황비철석, 황비동광(Enargite,  $Cu_3AsS_4$ ), 비사면동광(Tennantite,  $Cu_{12}As_4S_{13}$ ), 휘수연석(Molybdenite,  $MoS_2$ ), 저品位 니켈광석, 폐촉매 및 니켈함유-laterite로부터 유용금속을 용출하는 연구가 진행되었다. AWS는 황산용액에 황화광물을 혼합하고 전기로를 이용하여 비교적 낮은 온도인 300~500℃에서 약 4시간 이상 baking하고, 이 baking 생성물을 70℃의 물로 용해하여 Cu, Fe, Zn, As, Co, Ni, Mn, Al, Mg 및 Cr 등의 유용금속을 용출하는 방법이다(Guo *et al.*, 2009; Safarzadeh *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2012; Safarzadeh *et al.*, 2014a, 2014b, 2014c; Parhi *et al.*, 2015). 황화광물을 700℃ 이상의 매우 높은 온도로 가열하여 황화광물을 모두 산화시키는 소성법에 비하여 에너지 소비가 적다. 또한 AWS에서는  $SO_2$ 가 sulfation로 작용하여 유용금속 용출에 기여하며,  $As_2O_3$ 는 water leaching에서 수용액상으로 용출-회수된다. 추가적으로 황동석, 황철석 및 황비철석에 함유된 Fe는 소성으로 인하여 적철석(Hematite,  $Fe_2O_3$ )과 자철석(Magnetite,  $Fe_3O_4$ )으로 변환되기 때문에 Fe 제거 및 회수가 어렵게 되지만 acid baking을 하게 되면  $FeSO_4$ 나  $Fe_2(SO_4)_3$ 가 변환되기 때문에 water leaching으로 쉽게 용해-회수할 수 있다(Spedden *et al.*, 1971).

AWS를 이용한 유용금속을 회수한 국내 연구는

전무하며, 이와 유사하게 Barik 등(2012)이 폐촉매인 hydrodesulphurization에서 몰리브덴과 코발트를 회수할 목적으로 50~80℃의 온도 조건에서  $H_2SO_4$ 를 이용하여 다양한 실험조건(교반속도, 온도, 농도 등)에서 최적의 회수조건을 파악하였다. 국외에서는 다양한 복합 황화광물이 포함되어 있는 정광으로부터 유용금속을 회수하기 위하여  $H_2SO_4$ 를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 연구결과, 최적의 acid bake 조건을 파악하기 위하여 고농도의  $H_2SO_4$  (1 M 이상)과 산화제를 이용한 연구가 진행됨에 따라 연구 수행자의 위험 노출과 대용량 처리시 추가적인 시설이 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 acid bake-water leaching system (AWS) 공정을 이용하여 Au 정광 내 존재하는 Au 외 기타유용광물을 친환경적이고, 효과적으로 회수하기 위하여 다양한 황산염 용매제의 이용 가능성을 파악하는 것이다.

## 실험재료 및 방법

### Au 정광

본 연구에 사용된 Au 정광 시료(75  $\mu m$  이하)는 현재 가행 중인 금광산(Haenam, Korea)에서 부유선별공정을 통하여 획득된 정광이다. 시료의 광물 조성을 파악하기 위하여 XRD (X'Pert Pro MRD, Panalytical, Netherlands) 분석을 실시한 결과, 석영, 황철석, 코벨라이트 및 백운모 등의 회절 peak가 관찰되었다(Fig. 1).

Kim 등(2013) 및 Kim 등(2014)은 본 연구에 사용된 Au 정광시료의 부유선별공정전 광석광물에 Au의 존재형태를 파악하기 위하여 현미경 관찰결

**Table 1.** Chemical composition of Au concentrate

Elements	Au	Ag	As	Cu	Fe	Zn	Bi
Content (mg/kg)	130.2	986.6	2456.1	1899.4	86793.1	2709.6	140.1

과 석영, 황철석, 황동석, 반동석, 휘동석, 방연석, 섬아연석 및 코벨라이트 등이 관찰되었다고 하였다. 광석광물 내 존재하는 Au의 형태는 자연금(Native gold) 또는 엘렉트럼(Electrum)이 아닌 황화광물 속에서 극미립자로 혹은 고용체로 존재한다고 하였다.

또한 본 연구지역의 산화대 광석광물에서 석영(quartz), 적철석(hematite), 백운모(muscovite) 등이 현미경으로 관찰되었다(Kim *et al.*, 2016).

시료의 화학분석은 왕수(HNO<sub>3</sub> (V) : HCl (V) = 1 : 3)분해를 통하여 원자흡광분광광도계(AAS, AA-7000, Shimadzu, Japan)를 사용하였다(Table 1).

#### Acid bake-water 용출 실험

5가지의 bake 온도(100°C~500°C)에 따른 황산염 용매제를 이용한 bake의 효과를 파악하기 위하여 10.0 g의 시료에 1 M의 5가지 황산염 용매제(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>, CaSO<sub>4</sub>) 5 mL를 각각 알루미늄 도가니(내경 = 4.4 cm, 높이 = 3.2 cm)에 넣고, 전기로(Ceber사, ceramic fiber SF-series)를 이용하여 3시간 동안 baking 하였다. 황산염 용매제 선정에 있어 기존의 선행연구, 인체 위해성 및 시료와의 상호영향을 고려하였다. 각 조건별로 baking된 시료의 수침출 효율을 알아보기 위하여 2%의 광액농도(M/W), 70°C 및 250 rpm의 교반조건에서 3차 증류수를 이용한 용출실험을 수행하였다. 수침출 반응 시간에 따른 As, Fe, Cu 및 Zn의 용출농도를 파악하기 위하여 채취된 용출시료는 원자흡광분광광도계(AA-7000, Shimadzu, Japan)를 이용하여 화학분석을 실시하였다.

#### 결과 및 고찰

##### Baking 온도의 영향

Fig. 2는 baking 온도에 따른 각 용매제 조건별 AWS 실험 결과를 나타낸 것이다.

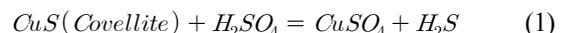
Cu의 경우, 100°C의 온도조건을 제외하고, 200~500°C의 온도조건에서 모든 용매제 조건에서 Raw에 비하여 용출률이 증가하였다. 모든 용매제는 400°C의 온도조건까지 용출률이 증가하였으나 500°C

에서는 감소하였다.

500°C의 온도조건에서 용출률이 감소한 이유는 황산염 용매제에 의하여 정광시료 내 Cu함유광물이 sulfation됨에 따라 copper sulfate로 변화되어 수침출이 용이해졌으나, 온도가 증가됨에 따라 산화광물로 변화되었기 때문이다. Guo *et al.* (2009)는 lateritic 광석으로부터 sulfation-roasting-leaching process를 이용하여 Ni과 Co를 회수연구를 수행한 결과, 100~700°C까지의 소성온도조건에서 온도가 증가됨에 따라 Ni, Co, Mn, Zn 등의 용출률이 증가하였으나 700°C 이상의 조건에서 용출률이 감소하였다. 이는 소성에 의하여 침철석(goethite, FeOOH)으로 이루어진 lateritic 광석이 100~700°C까지의 소성온도조건에서 sulfation반응으로 mikasaite (Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>)와 basic ferric sulfate (Fe(OH)SO<sub>4</sub>)로 상변화가 일어나 용출률이 증가하였으나 700°C 이상의 조건에서 적철석으로 변화되었기 때문이다.

용매제 조건별 용출률은 용매제 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>가 다른 용매제인 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub> 및 CaSO<sub>4</sub>보다 용출률이 높았다. 특히, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>는 400°C에서 83.6%의 용출률로 79.6%의 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 60.2%의 MgSO<sub>4</sub>, 52.0%의 CaSO<sub>4</sub> 및 48.9%의 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 보다 높게 나타났다(Fig 2(a)). Safarzadeh 등(2012)의 연구결과에 의하면 baking 온도가 100°C에서 400°C로 증가함에 따라 고체 시료의 무게는 약 14% 감소하는데, 그중 100°C에서 300°C 구간에서 약 13%, 300°C에서 400°C 구간에서 약 1% 감소가 일어났다. 또한 Cu의 용출률은 100°C에서 400°C 구간에서 62%에서 79%로 약 17% 증가하였다.

본 연구에 사용된 Au 정광에 대하여 광물학적, 화학적 특성분석 결과를 바탕으로 Au 정광 내 Cu, Fe, Zn 등의 유용금속이 함유되어있는 주요황화광물은 황철석, 황동석, 코벨라이트, 섬아연석 등이다. 이러한 황화광물로부터 유용금속을 효과적으로 회수하기 위하여 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용매제를 이용한 acid baking을 할 경우, 화학반응기작은 식 (1)~식 (4)과 같다(Prater *et al.*, 1970).



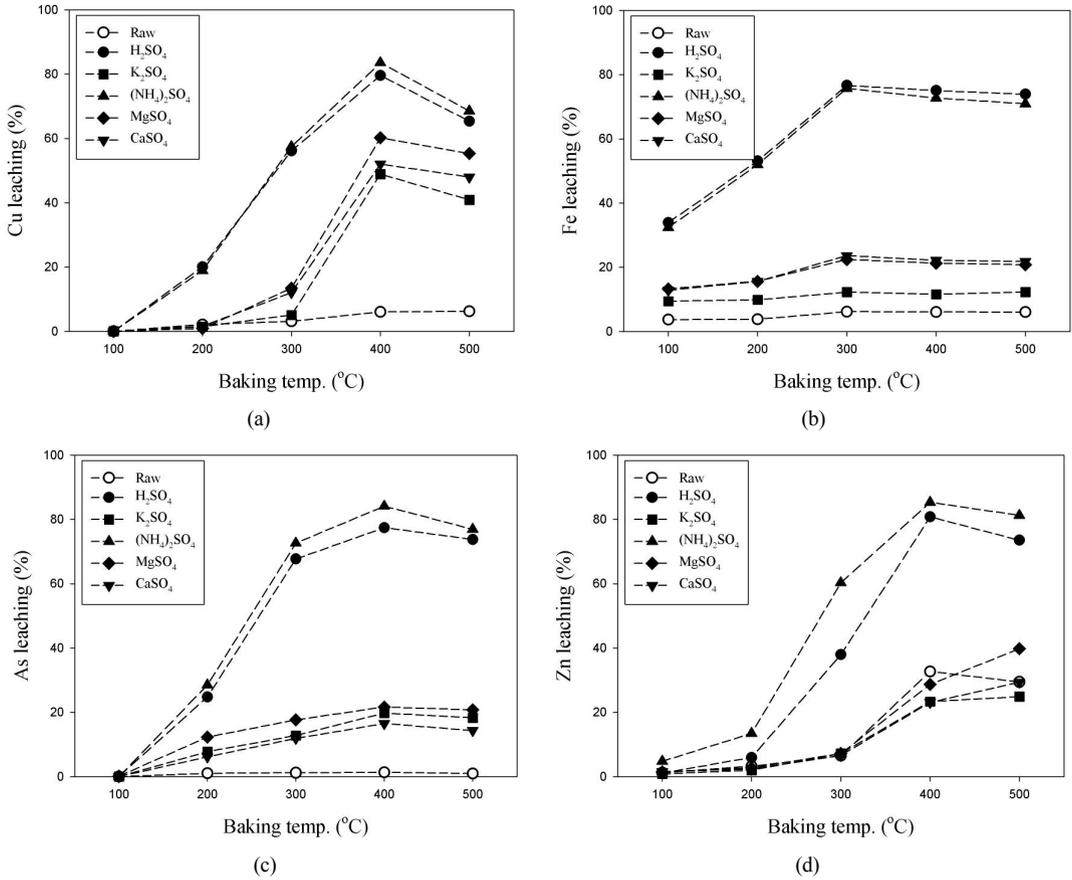
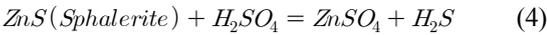
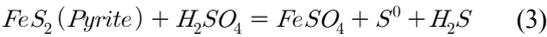
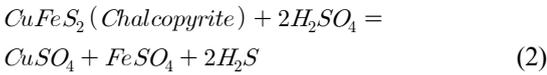
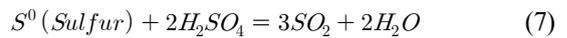
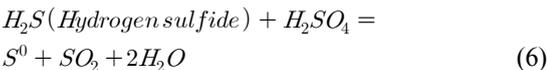
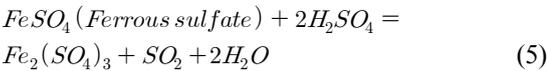


Fig. 2. The results of valuable metal leaching (%) on the baking temperature ((a) Cu; (b) Fe; (c) As; (d) Zn).

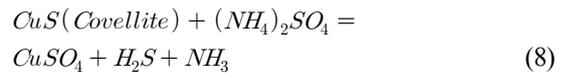


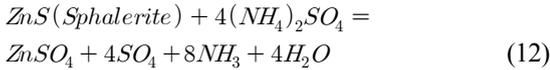
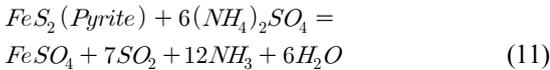
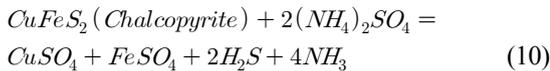
식 (5)~식 (7)은 식 (1)~식 (4)의 반응으로 생성될 수 있는 생성물과 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 화학반응기작이다.



H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 이용한 acid backing을 하게 되면 유용금속을 함유하고 있는 주요 황화광물은 식 (1)~식 (7)의 반응으로 친수성의 SO<sub>4</sub>와 결합되어 용출이 용이해지며, 가스형태의 SO<sub>2</sub>가 생성된다(Habashi, 2005).

가장 높은 용출률을 보인 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용매제의 경우, 본 연구에서 사용된 정광시료 내 Cu 함유광물인 코벨라이트와의 화학반응기작은 식 (8)와 같으며, 그 외 광물의 화학반응기작은 식 (10)~식 (12)이다.





Fe의 경우, 용매제별 용출률은 Cu 용출결과와 유사하게 용매제 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>에서 가장 높은 용출률을 보였으나, baking 온도는 300℃에서 가장 높은 용출률(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-76.7%, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-75.7%)을 나타냈다(Fig. 2(b)). Fe의 최대 용출 온도조건이 Cu보다 낮은 것은 시료 내 Fe 함유광물의 구조 내 As, Bi 등과 같은 녹는점이 낮은 원소가 포함되어있고, baking에 의한 시료 내 온도증가로 As와 Bi가 용해됨에 따라 Fe 용출에 영향을 준 것으로 생각되어진다. 또한 시료 내 황철석 등의 황화광물이 온도 증가와 황산염에 의한 용해도 증가로 인하여 열분해(thermal decomposition)되어 S가 SO<sub>2</sub>로 휘발 및 제거되었기 때문이라 사료되어진다(Uslu and Atalay, 2003; Amankwah *et al.*, 2005; Pickles, 2009). Fig 2(c)의 As 용출실험 결과에서 200~300℃의 온도조건에서 가장 용출률이 높게 증가하였고, Safarzadeh 등(2012)은 baking의 온도가 증가될수록 Fe의 용출은 증가되었지만 300℃ 이상에서는 큰 변화가 없는 이유는 Fe의 구조가 불용성의 황비철석으로 이루어져 있기 때문이라 하였다.

As의 경우, 400℃의 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 용매제 조건에서 각각 84.1%와 77.4% 용출률을 나타내었다. 황화광물을 소성하면 SO<sub>2</sub>와 As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 같은 대기 오염물질이 생성되지만 AWS에서는 SO<sub>2</sub>가 대기오염물질로 방출되지 않고 sulfation로 작용하여 용융금속 용출에 기여하며, As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 쉽게 용출-회수된다.

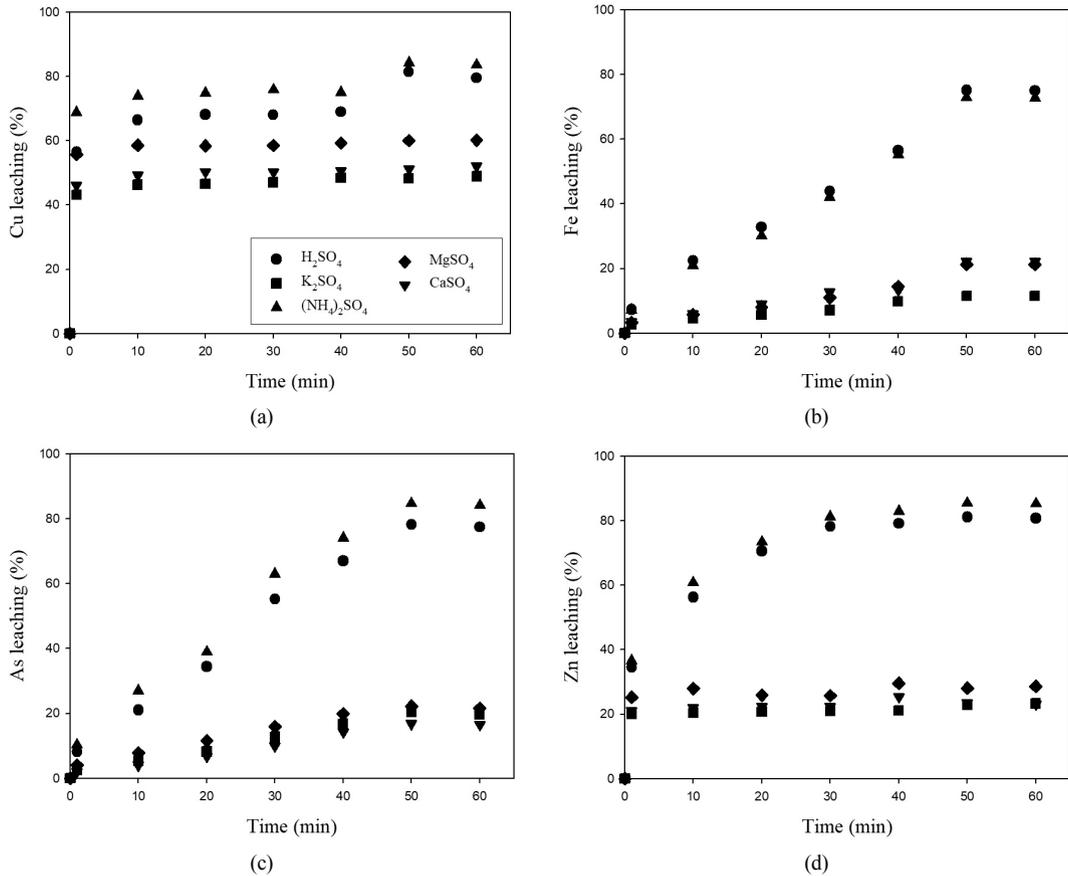
Zn의 경우, Cu 경우와 유사하게 400℃의 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 용매제 조건에서 각각 85.3%와 80.8%의 용출률을 나타내었다. 일반적으로 섬아연석을 소성시키면 불용성의 ZnO가 생성되어 Zn을 용출-회수하기 어렵지만, AWS를 적용하면 ZnSO<sub>4</sub>가 형성되어 쉽게 물로 용출-회수할 수 있다(Safarzadeh and Miller, 2014a).

## 시간에 따른 ASW 실험

다양한 황산염 용매제를 이용한 baking 온도별 ASW 실험결과에서 최적의 용출효율을 보인 400℃의 baking 온도 조건에 용출반응시간별 용출실험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 용출반응시간에 따른 유용금속 용출결과, Cu는 용출반응시간 모든 용매제 조건에서 10분만에 용출반응이 급격히 감소되었으며, 그 외 Fe와 As는 50분, Zn는 30분에 반응이 급격히 감소되었다. 금속별 용출반응이 급격히 감소되는 시간의 차이는 복합황화광물 내 존재하는 S가 baking에 의한 온도증가로 분해/제거되는 과정에서 시료 내 각 황화광물의 분해온도가 다르고, 이로 인하여 용출에 기여하는 sulfation의 공급 원인 분해/제거되는 S의 차이가 나기 때문이다. 또한 황화광물에 대한 온도증가는 광물의 상변환, 공극률 증가, 열응력 및 열파쇄작용 등을 발생시켜 용출률이 향상시킬 수 있지만 복합 황화광물 내에서 각 황화광물의 열적 특성의 영향을 받는다(Choi *et al.*, 2017). Cu의 최대 용출률은 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 용매제 조건에서 84.2%로 가장 높게 나타났으며, Fe와 As의 최대 용출률은 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용매에서 75.1%, 78.2% 나타났으며, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 조건에서는 72.8% 84.7%로 각각 나타났다. Zn의 최대 용출률은 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>에서 85.4%로 가장 높게 나타났다. (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용매제의 용출 효율이 높은 것은 황동석과 섬아연석 등과 같은 황화광물에 적용하여 유용금속을 용출시킬 수 있고, 비용이 저렴하고, 효율이 매우 뛰어나며, 낮은 독성과 부식성 그리고 용해성의 금속 복합물을 형성하는 능력이 뛰어나기 때문이다(Kim *et al.*, 2016).

## 결론

Au 정광 내 존재하는 Au 외 기타유용광물을 친환경적이고, 효과적으로 회수하기 위하여 다양한 황산염 용매제의 이용 가능성을 파악하기 위하여 다양한 황산염 용매제조건에서 실내 ASW 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 용매제별 baking 온도증가에 따라 유용금속을 함유하고 있는 주요 황화광물은 친수성의 SO<sub>4</sub>와 결합되어 용출이 용이해졌고, 용출률은 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 용매제 조건에서 Cu, As 및 Zn는 400℃에서 가장 높게 나타났으며, Fe는 300℃에서 가장 높았다. 400℃의 baking 온도조건에서 용출반응시간에 따른 용매제별 용출양상은 황화광물의 분해온도 차



**Fig. 3.** The results of valuable metal leaching on the time at baking temperature of 400°C ((a) Cu; (b) Fe; (c) As; (d) Zn).

이, sulfation의 공급원인 분해/제거되는 S의 차이 및 광물의 상변환, 공극률 증가, 열응력 및 열파쇄 작용 등의 열적 특성 차이로 인하여 유용금속별 차이 차이가 났다. 시간에 따른 각 용매제별 유용금속의 최대용출률을 추정한 결과, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용매제가 가장 높게 나타났다.

따라서, 기존의 AWS를 이용하여 친환경적이고, 경제적인 용출을 목적으로 사용되는 용매제인 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>보다 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>을 용매제를 사용한다면 저비용, 고효율 및 낮은 독성과 부식성의 효과를 볼 수 있을 것이다.

## 사 사

본 논문은 2017년도 조선대학교 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구이며, 연구비를 지원해준 조선대학교에 감사한다.

## REFERENCES

- Amankwah, R.K., Khan, A.U., Pickles, C.A., and Yen, W.T. (2005) Improved grindability and gold liberation by microwave pretreatment of a free-milling gold ore, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min. Metall. C)*, 114, C30-C36.
- Barik, S.P., Park K.H., Parhi, P.K., and Park, J.T. (2012) Direct leaching of molybdenum and cobalt from spent hydrodesulphurization catalyst with sulphuric acid, *Hydrometallurgy*, 111-112, 46-51.
- Choi, N.C., Kim, B.J., Cho, K., Lee, S., and Park, C.Y. (2017) Microwave pretreatment for Thiourea leaching for gold concentrate, *Metals*, 7(10), 404-413.
- Guo, X., Li, D., Park, K.H., Tian, Q., and Wu, Z.

- (2009) Leaching behavior of metals from a limonitic nickel laterite using a sulfation-roasting-leaching process, *Hydrometallurgy*, 99, 144-150.
- Habashi, F. (2005) Recent advances in the hydrometallurgy of copper, Elsevier, 43p.
- Kim, B.J., Cho, K., Choi, N.C., and Park, C.Y. (2016) The Efficiency of Fe Removal Rate from Gold Ore in the Oxidation Zone by Ammonia Leaching, *Journal of the mineralogical society of korea*, 29(3), 113-122.
- Kim, B.J., Cho, K., Jo, J.Y., Choi, N.C., and Park, C.Y. (2014) The Characteristic of Te Recovery in Gold Concentrate Using Electrolysis, *Economic and Environmental Geology*, 47(6), 645-655.
- Kim, B.J., Cho, K., Oh, S.J., On, H., Kim, B.J., Choi, N.C., and Park, C.Y. (2013) Application of Roasting Pretreatment for Gold Dissolution from the Invisible Gold Concentrate and Mineralogical Interpretation of their Digested Products, *Journal of the mineralogical society of korea*, 26(1), 45-54.
- Liu, X.W., Feng, Y.L., Li, H.R., Yang, Z.C., and Cai, Z.L. (2012) Recovery of valuable metals from a low-grade nickel ore using an ammonium sulfate roasting-leaching process, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 19, 377-383.
- McLaughlin, J. and Agar, G. (1991) Development and application of a first order rate equation for modelling the dissolution of gold in cyanide solution, *Minerals Engineering*, 4, 1305-1314.
- Parhi, P.K., Sethy, T.R., Rout, P.C., and Sarangi, K. (2015) Selective dissolution of copper from copper-chromium spent catalyst by baking-leaching process, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 604-609.
- Pickles, C.A. (2009) Microwave in extractive metallurgy: part2-a review of applications, *Minerals Engineering*, 22, 1112-1118.
- Prater, J.D., Queneau, P.B., and Hudson, T.J. (1970) The sulfation of copper-iron sulfides with concentrated sulfuric acid, *The Journal of The Minerals, Metals and Materials Society*, 22, 23-27.
- Safarzadeh, M.S. and Miller, J.D. (2014a) Reaction of enargite ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ) in hot concentrated sulfuric acid under an inert atmosphere. part I: Enargite concentrate, *International Journal of Mineral processing*, 128, 68-78.
- Safarzadeh, M.S. and Miller, J.D. (2014b) Reaction of enargite( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ) in hot concentrated sulfuric acid under an inert atmosphere. part II: high-quality enargite, *International Journal of Mineral Processing*, 128, 79-85.
- Safarzadeh, M.S. and Miller, J.D. (2014c) Reaction of enargite ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ) in hot concentrated sulfuric acid under an inert atmosphere. part III: Reaction stoichiometry and kinetics, *International Journal of Mineral processing*, 130, 56-65.
- Safarzadeh, M.S., Moats, M.S., and Miller, J.D. (2012) Acid bake-leach process for the treatment of enargite concentrates, *Hydrometallurgy*, 119, 30-39.
- Spedden, H.R., Prater, J.D., Queneau, P.B., Foster, G.G., and Pickles W.S. (1971) Acid bake-leach-flotation treatment of offgrade molybdenite, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2(11), 3115-3122.
- Uslu, T. and Atalay, U. (2003) Microwave heating of coal for enhanced magnetic removal of pyrite, *Fuel Processing Technology*, 85, 21-29.

---

Received March 2, 2018, Revised June 18, 2018, Accepted June 26, 2018, Associate Editor: Chul-Min Chon