

마이크로웨이브를 이용한 금정광 내 금 용출 효율 증가 기작

김봉주¹ · 권장순¹ · 고용권¹ · 박천영^{2*}

¹한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부, ²조선대학교 에너지·자원공학과

Improvement of Au Leaching from Gold Concentrates Using a Microwave and Thiourea-mixed Solvent

Bong-Ju Kim¹, Jang-Soon Kwon¹, Yong-Kwon Koh¹ and Cheon-Young Park^{2*}

¹Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea

²Dept. of Energy and Resource Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea

(Received: 15 March 2020 / Revised: 09 April 2020 / Accepted: 13 April 2020)

In this research, we investigate the effect of microwave pretreatment on the recovery of gold from the gold concentrates by thiourea leaching. The changes in mineral phases by decomposition of pyrites in the gold concentrates using microwave were observed, and the result of microwave irradiation showed that the temperature of the irradiated sample increases with increasing irradiation time. With the reaction of temperature increases, Sulfur (S) in pyrites was converted to sulfur dioxide (SO₂), and then the content of S in the sample was reduced. The analytical results of XRD and SEM-EDS showed that pyrites are converted to magnetite and hematite, and its surfaces are changed to a porous shape where micro-cracks are developed. The Au leaching efficiency from the irradiated gold concentrates using thiourea-mixed solvent increased with the increases of irradiation time and solvent concentration. The experimental results considering leaching parameters indicate that the mechanism of microwave irradiation increases the maximum leaching efficiency and leaching rate of the gold concentrates, and the solvent does a role for the increasing of leaching rate constant.

Key words : microwave, invisible gold, pyrite, leaching, thiourea

본 연구에서는 금정광내 금회수율을 증진하고자 마이크로웨이브 전처리방법을 이용하여 티오요소용출 실험을 수행하였다. 이에 본 연구에서는 먼저 마이크로웨이브를 이용하여 금정광 시료 내 황철석의 분해에 따른 광물상 변화를 관찰하였다. 마이크로웨이브의 조사시간이 증가함에 따라 시료의 온도는 증가하였고, 황철석 내 S가 SO₂로 변환되어 시료 내 S의 함량이 감소되었다. X-선 회절분석 및 주사전자현미경 에너지 분산 분광분석을 통해 황철석은 자류철석과 적철석으로 변환되었으며, 미세균열이 발달된 다공질의 형태로 변질되었음을 확인할 수 있었다. 다양한 조건의 티오요소 혼합 용매를 이용하여 시료의 광물상변화에 따른 금 용출효율을 측정하여, 마이크로웨이브 조사시간 증가 및 용출실험 조건 내 용매의 농도 증가에 따라 용출효율이 증가하였다. 결론적으로, 마이크로웨이브를 활용한 금정광 조사는 시료 내 금의 최대용출효율과 용출속도를 증가시켰으며, 티오요소 용매제는 용출속도상수를 증가시켜주는 역할을 하였다.

주요어 : 마이크로웨이브, 비가시성 금, 황철석, 용출, 티오요소

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 original work is properly cited.

*Corresponding author: cybpark@chosun.ac.kr

1. 서 론

대부분의 금정광은 천연수 광상에서 산출되기 때문에 황철석을 포함한 황화광물과 수반되어 나타나며, 상당량의 금이 황철석 내 비가시성 상태로 존재하여 금정광으로부터 금회수율을 증진시키기 위해서는 금정광 내 황철석의 분해가 중요하다.

일반적으로 황철석을 분해하기 위하여 전기로 등을 이용한 소성공정(roasting process)이 적용되고 있다. 하지만 소성공정을 운영하기 위해서는 많은 에너지와 경비가 소비됨에 따라 비경제적이고, 대기오염 등과 같은 2차적인 환경문제가 발생된다. 따라서 기존 소성 공정에 비하여 효과적이고, 친환경적인 제련공정개발이 요구된다.

마이크로웨이브 공정의 경우, 에너지 발생원으로부터 비접촉 방법으로 특정 물질에 선택적이고, 균일하고 신속하게 에너지를 전달할 수 있으며, 발생원의 조작이 용이한 장점을 가지고 있어 전기로에 비하여 경제적이고, 친환경적이다(Pickles, 2009; Uslu *et al.*, 2003).

마이크로웨이브를 이용한 황철석 분해 및 상변화와 관련된 연구로 Uslu *et al.*(2003)은 석탄 내 탈황 연구를 수행하였으며, Huang과 Rowson(2001)는 저항성 금정광 내 황철석 분해를 목적으로 중온(50°C)의 질산 용액 내 순수한 pyrite와 marcasite를 마이크로웨이브를 이용하여 분해하였고, Kim과 Batchelor(2009)는 마이크로웨이브를 이용하여 pyrite 합성에 관한 연구를 수행하였다. 이외에 Ma *et al.*(2010)는 마이크로웨이브를 이용하여 금정광 내 존재하는 S와 As를 제거하는 실험을 수행하였다. Amankwah와 Pickles(2009)은 마이크로웨이브와 청화법(시안법)을 이용하여 carbonaceous sulphidic gold concentrate 내 존재하는 금을 용출시킴으로써 금정광 내 금의 용출율과 탄소함량의 반비례 관계를 밝혀냈다. 하지만 마이크로웨이브를 이용하여 금정광 내 존재하는 황철석의 분해/상변화 기작 규명 및 이에 따른 금의 회수율 증진에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 금정광으로부터 금의 회수율 증진을 목적으로 마이크로웨이브를 이용하여 금정광 내 황철석의 광물상 변화를 파악하고, 변화된 황철석에 대하여 비시안 혼합용매를 이용하여 금의 용출 특성을 파

악함으로써 마이크로웨이브가 금정광의 회수율 증가에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 금정광

본 연구에 사용된 황철석이 포함된 금정광 시료(38-45 μ m)는 현재 가행중인 금광산(Haenam, Korea)에서 부선공정을 통하여 획득된 정광이다(Table 1). 시료의 광물 조성을 파악하기 위하여 XRF(ZSX PrimusII, Rigaku, Japan), XRD(X'Pert Pro MRD(MRD), PANalytical, Netherlands) 분석을 실시하였고, 화학조성은 왕수(HNO₃(V) : HCl(V) = 1 : 3) 분해를 통한 화학분석으로부터 획득하였다. 화학분석을 위해 AAS(AA-7000, Shimadzu, Japan)와 IC(883 Basic/Metrohm, Swiss)를 사용하였다. 또한, 황(sulfur)함량은 탄소-황분석기(CS-800, Eltra, Haan, Germany)을 통하여 분석을 실시하였다. 본 연구에서 사용된 금정광의 연마편에 대한 편광현미 및 전자현미 분석 결과, 금은 비가시성(invisible)으로 존재함을 확인하였고, 기존 연구에서도 비가시성 금에 대해 연구한 결과가 존재한다(Allan and Woodcock, 2001; Coetzee *et al.*, 2011).

2.2. 마이크로웨이브 조사 및 용출

마이크로웨이브 조사 시간에 따른 시료의 열적 반응 특성을 평가하기 위하여 마이크로웨이브 조사 후 thermocouple(K type) 스테인레스 센서(stainless sensor)를 시료에 직접 삽입하여 온도를 측정하였으며, 시료 내 황철석의 상변화에 대한 평가를 위하여 조사 시간별로 시료에 대한 무게 측정, 화학분석, XRD 및 SEM-EDS(Hitachi, S4800, Japan) 분석을 각각 수행하였다. 실험에 사용된 마이크로웨이브 발생장치는 2,450MHz(800W) 배치타입 기기를 활용하였다. 시료 내 존재하는 황철석 분해 및 상변화를 통한 금의 용출을 증진을 목적으로 3g의 시료에 대하여 300mL의 thiourea 혼합 용매(thiourea + sodium sulfate + ferric sulfate)를 이용한 다양한 실내실험조건(마이크로웨이브 조사 시간 및 용출 용매 농도)에서 금 용출실험을 60min 동안 수행하였고, 각 시험 조건을 Table 2에 요약하였다. 금 용출실험에서 금정광의 단위질량당 용

Table 1. The gold concentrate sample compositions were determined XRF analysis (unit: wt %)

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
34.69	2.45	55.20	0.03	0.26	2.14	0.66	1.35	0.16	0.03	3.11	100.08

Table 2. Experimental conditions of microwave exposure and leaching for gold concentrates

Exp.	Microwave exposure time (min)	Solvent conditions		
		Thiourea (mM)	Sodium sulfate (mM)	Ferric sulfate (mM)
ME - 0	-	34.7	0.6	3.5
ME - 1	10	34.7	0.6	3.5
ME - 2	30	34.7	0.6	3.5
ME - 3	50	34.7	0.6	3.5
ME - 4	70	34.7	0.6	3.5
TH - 0	-	34.7	0.6	3.5
TH - 1	70	34.7	0.6	3.5
TH - 2	70	43.4	0.6	3.5
TH - 3	70	52.0	0.6	3.5
SS - 0	-	52.0	0.6	3.5
SS - 1	70	52.0	0.6	3.5
SS - 2	70	52.0	0.9	3.5
SS - 3	70	52.0	1.2	3.5
FS - 0	-	52.0	1.2	1.7
FS - 1	70	52.0	1.2	3.5
FS - 2	70	52.0	1.2	5.3

출된 Au의 질량은 다음 식을 사용하여 결정되었다 (Mclaughlin and Agar, 1991):

$$E = E_1(1 - e^{-kt}) \tag{Eq. 1}$$

여기서 E(%) 시간 t에서의 용출속도이고, E₁(%) 최대용출속도이며, k(1/min) 용출속도 상수이다. 본 실험 조건에의 최적용출율은 마이크로웨이브 조사 온도 조건과 용매제 물비를 통하여, 100% 용출율을 최적용출율(%)로 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 마이크로웨이브에 의한 금정광 내 황철석의 물리화학적 특성 변화

일정한 입도(38-45 μ m)의 금정광 시료에 대하여 마이크로웨이브 조사시간에 따른 시료의 온도, 무게 및 황의 함량변화를 측정하여 그 결과를 Fig. 1에 도시하였다. 마이크로웨이브 조사시간이 증가함에 시료의 온도는 증가하였으며, 이와 반대로 시료의 무게 및 황의 함량은 감소하였다. 마이크로웨이브 조사시간 증가에 따른 시료의 온도증가는 정광시료 내 마이크로웨이브 에너지를 잘 흡수하는 황철석을 포함한 황화광물이 다수 존재하기 때문이다. McGill *et al.*(1995)에 의하면 황철석을 마이크로웨이브에 6.75분 동안 노출시킨 결과 온도가 1019°C로 증가하였으며, Haque(1999)은 2,450 MHz, 30W 조건에서 3~5분 동안 마이크로웨이브를 조사했을 때 황철석이 자류철석으로 변환되면서 황화가스(sulfur fume)을 방출한다고 하였다. 또한 Huang and Rowson(2001)은 63 μ m 크기의 황철석에 800W의 마이크로웨이브를 40초 동안 조사했을 때 황철석의 온도가 7.5°C/sec의 속도로 증가함을 보고하였다. 본 연구에서는 시료의 온도가 급격히 증가하는 초기 조사시간 10분 구간의 온도증가 속도가 1.12°C/sec이며, 기존 연구결과에 비하여 그 속도가 느린 이유는 시료 내 마이크로웨이브 에너지를 전혀 흡수하지 못하는 비금속원소 Si의 함량이 34.7%으로 높기 때문이다. 그리고 비금속원소의 함량은 최대 20 wt%를 초과하지 않아야 마이크로웨이브에서 에너지를 잘 흡수가 가

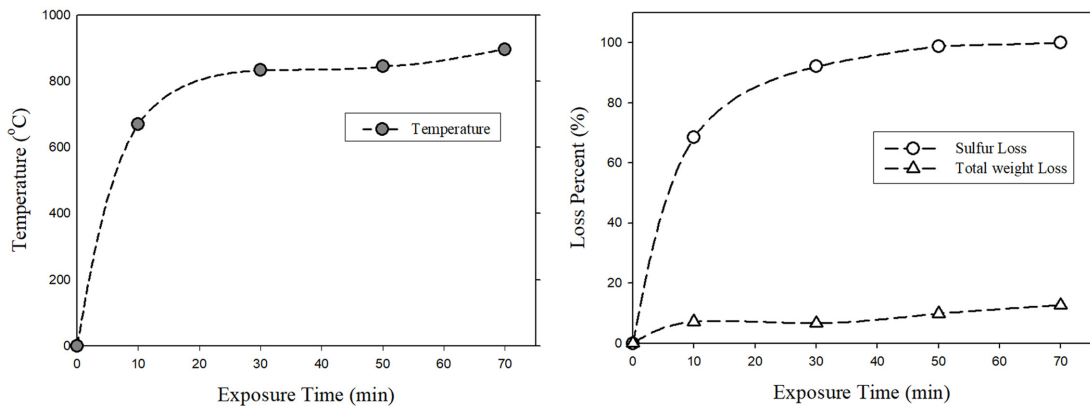


Fig. 1. (a) Temperature change and (b) Variations of sulfur and total weight of the gold concentrates during the microwave exposure.

능하다고 보고된 바 있다(McGill *et al.* 1995, Rowson, 2001).

마이크로웨이브 조사에 따른 시료의 무게 감소는 마이크로웨이브 에너지를 흡수한 황철석을 포함한 황화 광물이 열분해(thermal decomposition)되어 S가 SO₂로 휘발 및 제거되었기 때문이다(Uslu and Atalay, 2003; Amankwah *et al.*, 2005; Pickles, 2009).

이에 따라 마이크로웨이브 조사에 의한 시료 내 황(sulfur) 함량의 감소는 시료의 온도 증가 형태와 거의 일치하게 나타났다(Fig. 1). 그리고 본 연구의 실험조건에서 70분 동안 마이크로웨이브를 조사한 시료에서 약 94.43%의 황 함량이 감소함을 확인하였다.

3.2. 마이크로웨이브에 의한 황철석의 광물학적 변화

마이크로웨이브 조사에 의한 금정광 시료 내 황철석의 광물학적 특성 변화를 판단하기 위하여 조사시간별로 획득된 금정광 조사시료에 대해 XRD 분석을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 2에 도시하였다. 조사전의 시료에서는 황철석과 석영에 해당되는 회절선(diffraction lines)을 확인할 수 있다(Fig. 2(a)). 70분 동안 조사된 시료(Fig. 2(b)-(e))에서는 조사 이전 정광 시료에서 관찰된 석영, 황철석의 회절선 외에 추가적으로 적철석, 자류철석에 해당되는 회절선이 나타났다.

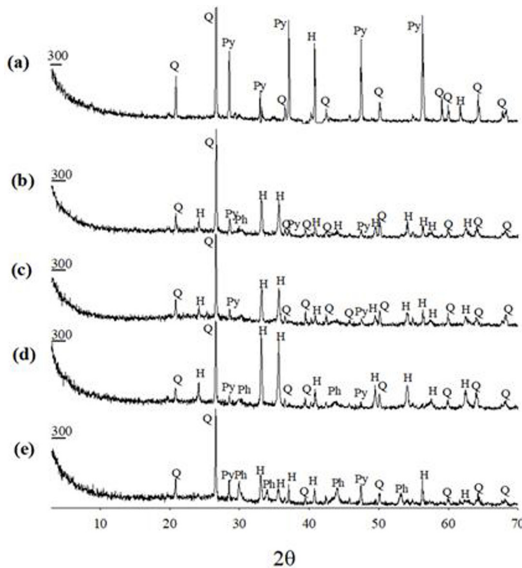


Fig. 2. XRD patterns of the gold concentrate samples during the microwave exposure of (a) 0 min, (b) 10 min, (c) 30 min, (d) 50 min, and (e) 70 min(H: hematite; Py: pyrite; Ph: pyrrhotite; Q: quartz).

특히 마이크로웨이브에 조사된 시료는 조사되지 않은 정광시료에 비하여 황철석의 회절선 강도(intensity of diffraction lines)가 현저하게 감소되었고 석영의 회절선 강도는 차이가 나타나지 않았다. 이는 황철석이 마이크로웨이브를 잘 흡수하는 반응성 광물(hyperactive mineral)이며, 석영은 마이크로웨이브를 잘 투과(transparent)시키는 광물로서 황철석만 마이크로웨이브에 반응하여 선택적으로 열분해(thermal decomposition)되었기 때문이다(Vorster *et al.*, 2001; Olubambi *et al.*, 2007).

또한 시료에서 나타나지 않았던 적철석과 자류철석의 회절선이 마이크로웨이브에 조사된 시료에서 나타나는 이유는 마이크로웨이브 조사에 의해서 황철석이 적철석과 자류철석으로 광물상이 변환되었기 때문이다(Uslu *et al.*, 2003).

마이크로웨이브 조사시간에 따른 금정광 내 황철석의 SEM-EDS 분석결과를 Fig. 3 및 Table 3에 제시하였다. 실험에 사용된 금정광 시료 내 황철석은 전형적인 입방체(cubic) 형태임을 확인할 수 있으며(Fig. 3(a)), 이 황철석 표면을 EDS 분석한 결과 Fe와 S의 비율(ratio)이 약 1: 2 (atomic %)로 나타났다(Table 3). 마이크로웨이브로 조사된 시료는 조사시간이 진행됨에 따라 황철석의 표면이 미세균열(micro-crack)로 발달되

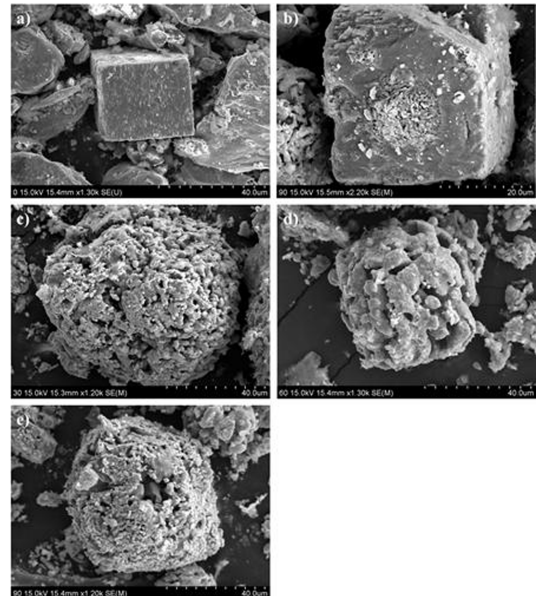


Fig. 3. SEM image for pyrites in the gold concentrate samples on during the microwave exposure time with (a) 0 min, (b) 10 min, (c) 30 min, (d) 50 min and (e) 70 min.

Table 3. The EDS analytical results of pyrites in the gold concentrate samples during the microwave exposure time

Elements	Microwave Exposure Time (min)				
	0	10	30	50	70
O	8.53	54.65	53.05	63.25	55.49
Si	-	-	3.37	-	2.57
S	59.19	-	-	-	-
Fe	32.28	45.35	42.44	35.12	41.40

며, 이로 인하여 황철석이 다공질(porous)상으로 변화되었다(Fig. 3(b)~3(e)). 이러한 변질된 황철석 시료 표면에 대하여 EDS 분석 결과, 모든 시료에서 Fe와 O가 검출되었으며, 마이크로웨이브가 조사됨에 따라 S의 함량이 감소함을 확인할 수 있다. 마이크로웨이브에 조사된 시료에서 S가 감소되고, O와 Fe 검출된 원인은 마이크로웨이브 가열에 의하여 황철석이 열응력(thermal stress), 열분해(thermal decomposition) 및 산화(oxidation)가 동시에 일어났기 때문이다(Olubambi *et al.*, 2007). XRD와 전자현미경에서 관찰 되듯 마이크로웨이브는 특정 황화광물에 대해서 선택적으로 반응을 발생시키고 있기 때문에 맥석광물(gangue)과 황화광물 경계(boundary) 사이에 열응력(thermal stress)이 발생되고(Vorster *et al.*, 2001), 이러한 열응력은 서로 다른 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)를 갖고 있는 광물 경계 사이에서 혹은 광물 내부에서 미세균열(micro-crack) 및 미세단열(micro-fault)을 생성시킨다(Olubambi *et al.*, 2007). 생성된 미세균열 및 미세단열은 결국 열파쇄작용(thermal fracturing)으로 나타나고, 열파쇄작용은 황화광물의 강도(strength)를 저하시켜 정광의 분쇄를 용이하게 하여 금정광으로부터 금의 단체분리(libération) 효율성을 증가시켜준다(Kingman *et al.*, 2000; Kingman *et al.*, 2004). 본 연구에서도 이러한 특징이 관찰되었으며, 이는 용출과 밀접한 상관관계가 있음을 확인하였다.

마이크로웨이브 조사 기작은 황철석 내 황(S)의 감소와 Fe-O 산화반응을 통하여 황철석이 적철석으로 변질될 수 있게 하였고, 본 연구 내 조사 후 시료에 대한 XRD 분석에서 적철석의 존재를 확인할 수 있었다(Fig. 2(b)~(e)).

또한, XRD 분석결과 70분 조건에서 적철석의 회절 강도 값이 크게 감소하는 원인은 전자현미경에서 보는 바와 같이 완전히 용융되어 적철석이 영가철로 산화되었거나 자철석으로 변환되었을 것으로 판단되며, 이는 본 연구에서는 관찰되지 못하였지만 850°C 이상에서는 적철석이 재용융이 일어나며, 영가철 및 자철석으로 상

Table 4. Chemical composition and its variation of the gold concentrate samples by microwave exposure

Elements	Microwave exposure		(B/A*100, %)
	Non exposure (A, mg/kg)	70min exposure (B, mg/kg)	
Fe	40,560	42,560	104.9
S	20,140	1,120	5.6
Au	121	159	131.4

변화 된다는 연구는 여러 연구에서 진행된바 있다(Olubambi *et al.*, 2007, Kim and Batchelor, 2009).

금정광의 마이크로웨이브 조사(70 min)에 따른 시료 내 화학조성 변화를 Table 4에 제시하여 비교하였다. 조사 후 시료 내 S의 함량은 조사 전보다 감소하였으며, 이와 반대로 Fe와 Au는 증가하였다. 이는 마이크로웨이브에 의하여 시료 내 황철석의 S가 SO₂로 제거(remove)되면서 생성된 다공질성의 적철석이 기존의 황철석 내 비가시성 금(invisible gold)으로 존재(exist) 하던 금 입자(gold particle)의 합체(coalescence)에 기여하면서 공극 표면으로 이동하는 소성의 효과를 보여 준다(Filmer, 1982; Robinson, 1988; Swash, 1988; Aylmore, 2001). 따라서 극미립자인 비가시성 금이 광물 표면에서 큰 입자로 성장(growth)하고 합체된 금 입자가 공극 표면으로 이동되기 때문에 이후 용매(solvent)를 이용한 비가시성 금의 화학적 용출 효율성을 증가시킬 수 있을 것이다.

3.3. 금정광의 Au 회수 용출

본 연구에서 금의 용매로 사용하는 티오요소는 시안보다 금을 더 빠르게 용해시키고, 독성이 낮기 때문에 시안 대체 용매로 최근 널리 활용되고 있다(Tanriver *et al.*, 2005 ; Li and Miller, 2006). 하지만 티오요소를 용매로 활용하고자 할 때 금정광 내 황(sulfur)이 존재시 금의 용출을 방해하기 때문에 SO₂, Na₂SO₃ 또는 Na₂S₂O₅등과 같은 첨가제와 H₂O₂ 또는 Fe₂(SO₄)₃등과 같은 산화제를 이용하여 금 용출율을 향상시키고 있다

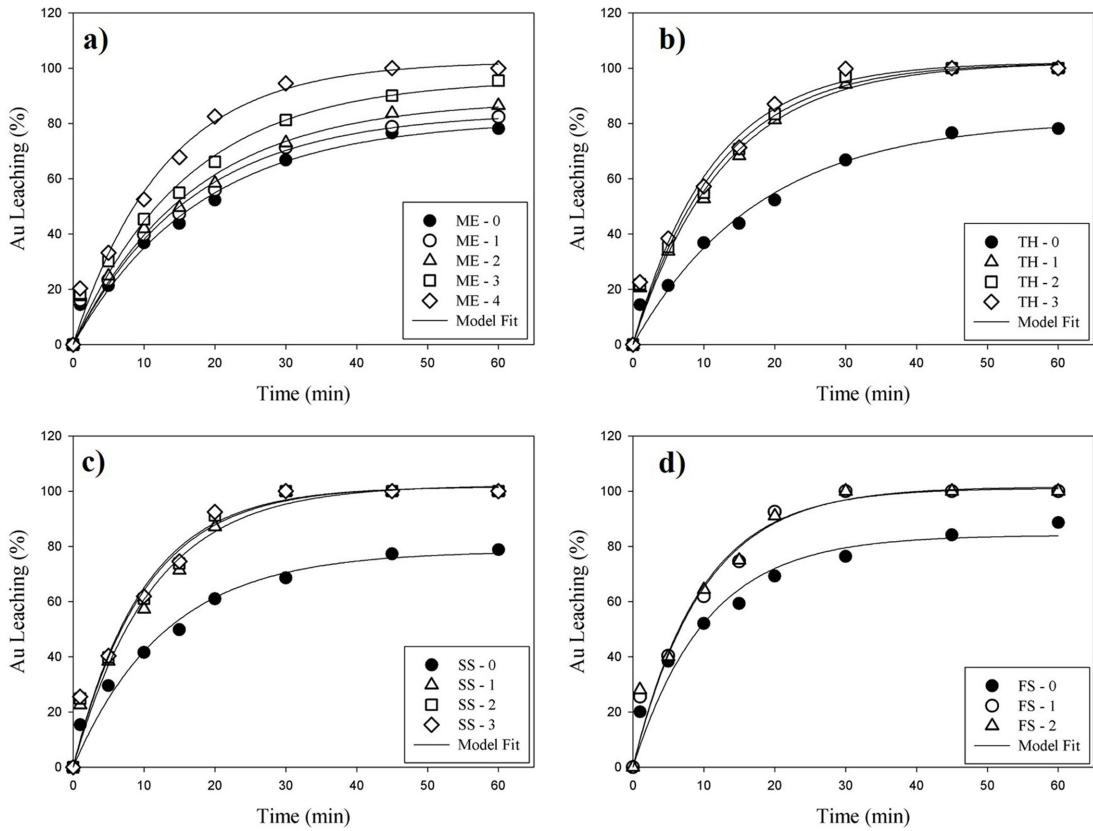


Fig. 4. The results of Au leaching on the various leaching experimental conditions ((a) Microwave exposure time, (b) Thiourea conc., (c) Sodium sulfate conc., (d) Ferric sulfate conc.).

(Almeida and Amarante, 1995 ; Deng *et al.*, 2001).

금정광 내 Au의 화학적 용출기법에 의한 회수를 위하여 Table 2에 제시한 조건에 따라 마이크로웨이브 조사시간 및 혼합 용매의 농도를 달리하여 용출 실험을 실시하였다. 이중 마이크로웨이브 조사시간에 따른 금정광의 티오요소 혼합 용매를 이용한 화학적 용출 실험 결과를 Fig. 4(a)에 도시하였다. 조사되지 않은 시료에 비하여 마이크로웨이브로 조사된 시료에서 금의 용출율이 높게 나타났고, 마이크로웨이브에 조사되지 않은 시료의 금 용출율은 용출실험 60분 경과후 약 78.1%이지만, 50분 조사된 시료의 경우 금 용출율이 약 95.5%에 달했다. 특히 70분 조사시간의 경우 100%의 금 용출을 도달시간은 45분이였다.

70분 동안 마이크로웨이브로 조사된 정광시료에 대한 티오요소 혼합 용매 내 티오요소의 농도별 금 용출율을 파악한 결과, 티오요소의 농도가 증가하여도 큰 변화는 보이지 않았다(Fig. 4(b)). 또한, 첨가제 역할을 하

는 Sodium sulfate와 산화제 역할을 하는 $Fe_2(SO_4)_3$ 의 농도도 마찬가지로 농도변화에 따라서 용출율은 큰 변화를 보이지 않았다(Fig. 4(c,d)). 따라서 티오요소 혼합용매에 의해 용출율은 크게 변화하지 않고, 마이크로웨이브 조사에 의한 용출율의 변화가 가장 큰 것으로 확인되었다.

용출실험결과를 토대로 Eq. (1)를 이용하여 추정한 용출실험 조건별 용출인자(leaching parameter)는 Table 5에 나타내었다.

마이크로웨이브 조사를 하지 않는 경우 티오요소 혼합 용매에 농도 증가에 따른 금의 최대용출율(maximum leaching rate)은 혼합 용매의 농도가 가장 높은 FS-0 조건에서 84.08%로 확인되었다. 하지만 마이크로웨이브를 70분 이상 조사한 모든 시료에서 금의 최대용출율은 100%에 도달하였다. 속도의 인자(parameter)인 용출율 상수는 마이크로웨이브 조사시간이 0 min에서 70 min으로 증가할수록 0.0561 1/min에서

Table 5. The summary of the leaching parameters for Au leaching using eq. (1)

	E_1 (%)	k (1/min)	r^2
ME-0	81.41	0.0561	0.9804
ME-1	84.06	0.0601	0.9780
ME-2	88.44	0.0612	0.9757
ME-3	96.01	0.0624	0.9768
ME-4	100.00	0.0777	0.9830
Th-0	81.41	0.0561	0.9804
Th-1	100.00	0.0783	0.9829
Th-2	100.00	0.0837	0.9805
Th-3	100.00	0.0901	0.9773
SS-0	78.2857	0.0768	0.9782
SS-1	100.00	0.0901	0.9773
SS-2	100.00	0.0994	0.9731
SS-3	100.00	0.1022	0.9714
FS-0	84.0767	0.0970	0.9643
FS-1	100.00	0.1022	0.9714
FS-2	100.00	0.1053	0.9652

0.0777 1/min 으로 증가하였다. 특히 약 시료의 온도가 850°C 이상인 조건(ME-4)에서 급격히 증가하였는데, 이는 마이크로웨이브 조사에 의한 황철석 내 기공형성과 황철석의 자류철석으로 상변화에 기인한 것으로 사료된다. 티오요소 혼합 용매에 각 조건별 농도증가에 따른 용출을 상수는 증가하며, FS-2의 조건에서 0.1053 1/min의 속도로 가장 높게 나타났다. 따라서 본 연구에서의 최적조건은 마이크로웨이브 조사 시간 30분이상과 용매제 몰비가 Thiourea : Sodium sulfate : Ferric sulfate = 34.7 : 0.6 : 3.5 인 조건에서 최적용출을 입을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 마이크로웨이브를 이용하여 전처리한 후 티오요소 혼합물로 금정광내 금용출 효율을 평가하고자 하였다. 금정광 내 마이크로웨이브 조사에 따라 시료의 온도는 증가하였으며, 시료 내 황철석은 열분해(thermal decomposition)되어 자류철석 또는 적철석으로 변환되고, 시료의 무게와 황의 함량은 감소하였다. 또한 마이크로웨이브로 조사된 금정광 시료 내 황철석 표면에는 미세균열이 발달되었으며, 이로 인하여 황철석이 다공질(porous)상으로 변화되었다. 다공질로 상변화 된 시료 내 비시안 용매인 thiourea 혼합 용매를 이용하여 금 용출실험을 수행하여 마이크로웨이브에 의하여 상변화된 시료에서 금 용출을 증가를 도모

하였다. 용출인자를 추정 한 결과, 용매제 몰비가 Thiourea : Sodium sulfate : Ferric sulfate = 34.7 : 0.6 : 3.5 인 조건에서 최대용출율이 100%와 용출속도 상수는 0.1053 1/min 으로 나타났다. 본 연구에서는 황철석 등 황화광물을 포함하고 있는 금정광에 대하여 마이크로웨이브 조사가 광물의 상변화, 공극을 증가, 열응력 및 열파쇄작용 등을 발생시켜 금 용출율(rate of leaching)을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부 재원 한국연구재단의 지원(2017M2A8A5014859) 및 산업통상자원부 재원 한국에너지기술평가원지원(20171510300670)을 받아 수행하였습니다.

References

Allan, G.C. and Woodcock, J.T. (2001) A review of the flotation of native gold and electrum, *Minerals Engineering*, v.14, p.931-962.

Almeida, M.F. and Amarante, M.A. (1995) Leaching of a silver bearing sulphide by-product with cyanide, thiourea and chloride solutions. *Minerals Engineering*, v.8, p.257-271.

Amankwah, R.K. and Pickles, C.A. (2009) Microwave roasting of a carbonaceous sulphidic gold concentrate, *Minerals Engineering*, v.22, p.1095-1101.

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)*, v.114, p.C30-C36.

Aylmore, M.G. (2001) Treatment of a refractory gold-copper sulfide concentrate by copper ammoniacal thiosulfate leaching *Minerals Engineering*, v.14, p.615-637.

Coetzee, L.L., Theron, S.J., Martin, G.J., Juan-David van der Merwe and Stanek, T.A. (2011) Morden gold deportments and its application to industry, *Minerals Engineering*, v.24, p.565-575.

Deng, T.L., Liao, M.X., Wang, M.H., Chen, Y.W. and Belzile, N. (2001) Enhancement of gold extraction from biooxidation residues using an acidic sodium sulphite-thiourea system, *Minerals Engineering*, v.14, p.263-268.

Filmer, A.O. (1982) The dissolution of gold from roasted pyrite concentrate, *Journal of the South African Institute of Mining and metallurgy*, March, p.90-94.

Haque, K.E. (1999) Microwave energy for mineral treatment processes-a brief review, *International Journal of Mineral Processing*, v.57, p.1-24.

Huang, J.H. and Rowson, N.A. (2001) Heating characteristics and decomposition of pyrite and marcasite in a

- microwave field, *Minerals Engineering*, v.14, p.1113-1117.
- Kim, E.J. and Batchelor, B. (2009) Macroscopic and X-ray Photoelectron Spectroscopic Investigation of Interactions of Arsenic with Synthesized Pyrite, *Environmental Science & Thchnology*, v.43, p.2899-2904.
- Kingman, S.W., Jackson, K., Bradshaw, S.M., Rowson, N.A. and Greenwood, R. (2004) An investigation into the influence of microwave treatment on mineral ore comminution, *Powder Technology*, v.146, p.176-184.
- Kingman, S.W., Vorster, W. and Rowson, N.A. (2000) The influence of mineralogy on microwave assisted grinding, *Minerals Engineering*, v.13, p.313-327.
- Li, J. and Miller, J.D. (2006) A review of gold leaching in acid thiourea solutions. *Mineral processing & Extractive Meattall. Rev.*, v.27, p.177-214.
- Ma, S.J., Luo, W.J., Mo, W., Su, X.J., Liu, P. and Yang, J.L. (2010) Removal of arsenic and sulfur from a refractory gold concentrate by microwave heating, *Minerals Engineering*, v.23, p.61-63.
- McGill, S.L., Walkiewicz, J.W. and Clark, A.E. (1995) Microwave heating of chemicals and minerals, United States Department of the Interior, Bureau of Mines, RI 9518, Report of Investigations/ 28p.
- McLaughlin, J. and Agar G. E. (1991) Development and application of a first order rate equation for modeling the dissolution of gold in cyanide solution, *Minerals Engineering*, v.4, p.1305-1314.
- Olubambi, P.A., Potgieter, J.H., Hwang, J.Y. and Ndlovu, S. (2007) Influence of microwave heating on the processing and dissolution behaviour of low-grade complex sulphide ores, *Hydrometallurgy*, v.89, p.127-135.
- Pickles, C.A. (2009) Microwave in extractive metallurgy: part2-a review of applications, *Minerals Engineering*, v.22, p.1112-1118.
- Robinson, J.J. (1988) The extraction of gold from sulphid concentrates by roasting and cyanidation, *J. S. Afr. Inst. Metall.*, v.88, p.117-130.
- Swash, P.M. (1988) A mineralogical investigation of refractory gold ores and their beneficiation, with special reference to arsenical ores, *J. S. Afr. Min. Metall.*, v.88, p.173-180.
- Uslu, T. and Atalay, U. (2003) Microwave heating of coal for enhanced magnetic removal of pyrite, *Fuel Processing Technology*, v.85, p.21-29.
- Uslu, T., Atalay, U. and Atol, A.I. (2003) Effect of microwave heating on magnetic separation of pyrite, *Colloids and Surface*, v.225, p.161-167.
- Vorster, W., Rowson, N.A. and Kingman (2001) The effect of microwave radiation upon the processing of Neves Corvo copper ore, *International Journal of Mineral Processing*, v.63, p.29-44.