

황동석의 중온 가압침출 중 염소이온과 계면활성제 첨가가 구리침출에 미치는 영향

임용훈* · 김영훈* · 김승현* · 이홍익* · 박현규* · §유경근**

*한국광해광업공단, **한국해양대학교

Effects of Chloride and Surfactant Addition on the Copper Leaching During Medium-temperature Pressure Leaching of Chalcopyrite

Yong Hoon Lim*, Young Hun Kim*, Seung Hyun Kim*, Hong Ik Lee*,
Hyunkyoo Park* and §Kyoungkeun Yoo**

*Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corporation

**Korea Maritime and Ocean University

요 약

황동석의 가압침출공정을 90°C~150°C의 저온 및 중온 범위에서 운영하면 황동석 중 황성분이 단체황으로 전환되며 구리의 침출을 억제한다. 본 연구에서는 150°C의 중온 가압침출공정 중 염소이온과 계면활성제를 첨가하여 구리침출율을 개선하고자 하였다. 티타늄 재질의 2L 반응기를 탑재한 가압침출기를 이용해 5g/L과 50g/L 황산용액에서 D₉₀ 입도가 10μm와 45μm인 황동석 정광분말 100g을 이용해 180분 동안 가압침출실험을 진행하였다. 50g/L 황산용액 및 염소이온과 계면활성제가 없는 조건에서 D₉₀ 입도가 45μm인 시료를 사용한 경우, 180분 침출 후 구리의 침출율은 48%로 나타났다. 염산, 염화구리, 염화나트륨 등 12g/L의 염소이온을 첨가하여 침출한 결과, 염산과 염화구리 첨가시 침출율이 각각 96%와 97%로 분석되었다. SLS(Sodium lignosulfonate)와 CLS(calcium lignosulfonate)의 계면활성제를 첨가하여 가압침출실험을 진행한 결과, 99% 이상의 침출율을 나타내었다. 결과적으로 50g/L 황산용액에서 염소이온과 계면활성제를 첨가한 경우 구리침출율은 상승하였다.

주제어 : 구리, 황동석, 단체황, 염소이온, 계면활성제

Abstract

When the pressure leaching process of chalcopyrite is operated in the low and medium temperature range of 90°C~150°C, the sulfur component in chalcopyrite is converted to elemental sulfur, which suppresses the leaching of copper. In the present study, the copper leaching rate was improved by adding chloride ions and surfactants during the medium-temperature pressure leaching process at 150°C. Using the autoclave equipped with a 2L reactor made of titanium, a pressure leach tests were conducted for 180 min using 100g of chalcopyrite concentrate with D₉₀ particle sizes of 10μm and 45μm in 5g/L and 50g/L sulfuric acid solutions. At 50g/L sulfuric acid solution without chloride ion and surfactant, when a sample with a D₉₀ particle size of 45μm was used, the copper leaching efficiency after 180 min was 48%. As a result of leaching by adding 12g/L of chloride ions such as HCl, CuCl₂, and NaCl, the leaching efficiencies increased to 96% and 97%, respectively, by adding HCl and CuCl₂. As a result of a pressure leaching tests by adding surfactants of SLS (Sodium lignosulfonate) and CLS (calcium

· Received : August 7, 2023 · Revised : August 19, 2023 · Accepted : August 22, 2023

§ Corresponding Author : Kyoungkeun Yoo (E-mail : kyoo@kmou.ac.kr)

Department of Energy and Resources Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Youngdo-gu, Busan 49112, 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.

lignosulfonate), the leaching efficiency was over 99%. Consequentially, copper leaching efficiency increased when chloride ions and surfactants were added in 50g/L sulfuric acid solution.

Key words : copper, chalcopyrite, elemental sulfur, chloride ion, surfactant

1. 서 론

구리는 전기특성이 우수하고 가공하기 용이하여 구리 사용량의 60%가 전선으로 사용되고 있으며¹⁾, 리튬이온 전지의 음극재를 고정하는 동박으로 최근 수요량이 증가하고 있다. 구리는 주로 황동석(Chalcopyrite, CuFeS_2)을 비롯한 구리 황화광의 정광을 건식제련공정으로 처리하여 전기동을 생산하며, 황동석은 세계 구리 매장량의 약 70%를 차지한다²⁻⁴⁾. 건식제련공정은 SO_2 의 배출과 고가의 건설 경비가 단점으로 지적되어 왔으며, 비소 등 불순물 함유량 상승으로 황동석의 저품질화가 심화되고 있다⁵⁾. 따라서 황동석을 함유하는 저품질 황화동광에 대한 습식 제련공정개발이 요구되어 왔다⁶⁾.

황화동광의 습식제련공정은 직접적인 침출공정(direct leaching processes)과 간접적인 침출공정(indirect leaching processes)로 대별되며, 다시 직접적인 침출공정은 침출액의 종류에 따라 황산염(sulfate)과 염화물(chloride)을 기반으로 분류 가능하다^{5,7)}. 황산을 사용하는 공정은 침출 후 용매추출과 전해채취에 의해 구리가 회수되며, 산화구리광을 대상으로 하는 기존 시설을 활용할 수 있는 장점이 있다⁸⁾. 그러나 상압 조건에서 황산용액으로 황동석을 침출하는 경우 광석 표면에 부동태층(passivating layer)을 형성시켜 침출속도를 늦추는 단점이 보고되었다⁸⁾. 따라서 침출 중 황동석 표면의 부동태층 형성을 방지하거나 제거하기 위한 다양한 연구가 수행되었다.

부동태층을 제거하여 황동광의 침출효율을 상승시키기 위한 방법으로 금속분말첨가, 산화환원전위(oxidation-reduction potential) 조절, SO_2 첨가, 미립분쇄, 가압침출법 등 다양한 습식제련공정이 보고되었다⁵⁾. 이 중 고온고압 조건에서 산소를 산화제로 활용하며 부동태 형성을 억제하는 산소가압(POX, Pressure Oxidation) 공정은 개발

된 후 미국 애리조나의 Bagdad 및 Morenci 광산, 브라질 카라하스의 Sossego 광산의 황동석 광석 침출에 적용되었다⁹⁾. 산소가압 침출공정은 온도에 따라 저온, 중온 및 고온공정으로 분류할 수 있다. 산소가압침출공정은 침출이 이루어지는 동안 황동석 표면의 부동태층 형성을 억제하지만 가압침출공정에서 황동석의 황 성분은 산화되며 단체황(elemental sulfur, S^0)으로 전환되어 구리 침출을 저하의 원인이 되기도 한다¹⁰⁾. 저온공정(90~110°C)에서는 80~90% 황화물(sulfide)의 단체황(elemental sulfur) 전환이 관찰되었으며¹⁰⁾, 중온공정(일반적으로 140~150°C)에서는 70~80%의 단체황 전환율이 관찰되었다¹¹⁾. 고온공정(200~230°C)에서는 모든 황화물이 황산염(SO_4^{2-})으로 전환되며 단체황에 의한 침출효율 저하는 관찰되지 않으나 과량 생산된 황산의 중화처리가 별도로 요구된다^{10,11)}.

본 연구는 국내에 수입되는 황동석 정광을 대상으로 한 국광해광업공단이 자체 제작한 가압침출기를 이용하여 중온범위의 가압침출실험을 수행하고 황동광으로부터 구리 침출에 대한 염소이온과 계면활성제 첨가의 영향을 조사하였다. 입도크기, 황산농도, 염소이온 및 계면활성제의 영향을 조사하였고, 침출잔사를 XRD(X-ray diffractometer)로 분석하여 실험결과를 고찰하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용한 황동석은 국내에 수입되고 있는 황동석 정광을 확보하여 사용하였고, 시료의 입도 분석 결과(Malvern사의 MS 2000 이용), 전체 입도분포에서 90%의 크기(D_{90})는 60 μm 이었다. 정광시료를 산용해 후, 성분분석을 실시하고 분석결과를 Table 1에 나타내었고(Si는 SiO_2 로 환산하여 표시), XRD(SmartLab X-ray diffractometer, Rigaku Co.) 분석결과를 Fig. 1에 나타내었다. 시

Table 1. Elemental composition of the samples

Composition	Cu	Fe	S	SiO_2	Al	Zn	Ca	Pb
Content (wt. %)	25.68	27.33	30.53	7.28	0.98	0.48	0.34	0.12

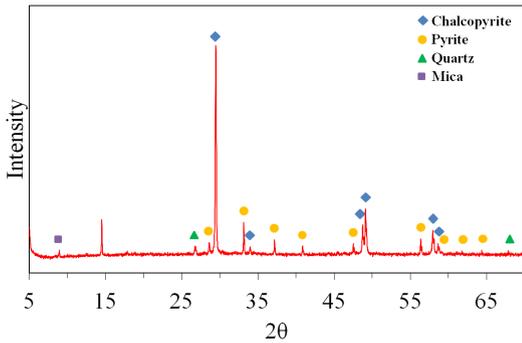


Fig. 1. XRD peaks of chalcopyrite sample used in this study.

료를 구성하고 있는 주요 광종은 황동석이며, 그 외에 황철석, 석영 등이 수반되고 있음을 확인하였다. 정광시료는 추가로 분쇄하여 D₉₀ 입도를 각각 10 μ m과 45 μ m로 조절하여 실험에 사용하였다.

모든 침출실험은 한국광해광업공단이 자체 설계 및 제작한 반응기 용량 2L 규모의 회분식(batch) 가압침출기 (autoclave)를 이용하여 수행하였다. 반응기 재질은 내식성, 내마모성 및 내열성 등을 고려하여 티타늄(Grade 2)으로 설계되었고, 최대 압력 및 온도는 각각 130atm, 350 $^{\circ}$ C이다. 교반기는 마그네틱 드라이브를 사용하며, 최대 교반속도는 1,750rpm으로 설계되었다. 온도 상승은 반응기 외부에 전기 히터(세라믹)를 사용하며, 침출반응 시 발열에 의한 온도 조절을 위해 냉각기를 이용하여 반응기 내부에 코일을 설치하고 냉각수를 공급하였다. 모든 침출실험은 다음과 같은 순서로 진행하였고, 침출조건은 Table 2에 나타내었다. 첨가제와 황산농도가 조절된 침출액과 시료 100g을 가압침출기에 투입한 후, 반응기에 약 7atm 산소의 주입과 배출을 3회 반복하여 반응기 잔존 내부 가스를 외부로 배출하였다. 외부히터의 온도를 450 $^{\circ}$ C로 설정해 내부온도가 150 $^{\circ}$ C까지 상승하고 유지하였다. 용액을 교반기로 800rpm으로 교반하며 냉각수를 순환시킨다. 용액의 온도가 목표온도에 도달하면 7atm의 압력에 이르도록 산소를 주입하고 실험 중 정해진 시간에 시료채취를 진행한다. 용액은 0.45 μ m 필터로 여과한 후, ICP-OES(inductively coupled plasma optical emission spectrometer, OPTIMA 8300, PerkinElmer, Inc.)를 이용하여 분석하였다.

Table 2. Leaching conditions performed in this study

Temp. ($^{\circ}$ C)	P ₉₀ (μ m)	O ₂ (kPa)	Solids (%w/w)	Time (min)	H ₂ SO ₄ (g/L)	Additive
150	45	700	10	180	5	-
						NaCl (12g/L Cl)
						CuCl ₂ (12g/L Cl)
					50	HCl (12g/L Cl)
						-
						NaCl (12g/L Cl)
150	10	700	10	180	5	CuCl ₂ (12g/L Cl)
						HCl (12g/L Cl)
						-
					50	Q (5kg/t)
						SLS (5kg/t)
						CLS (5kg/t)

Q: Quebracho, SLS: Sodium lignosulfonate, CLS: Calcium lignosulfonate

3. 실험결과 및 고찰

가압침출기에서 P₉₀ 10 μ m과 45 μ m의 황동석 정광시료를 5g/L와 50g/L 황산용액을 이용해 700kPa와 150 $^{\circ}$ C에서 3시간 침출한 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 침출 후 60분까지 모든 조건에서 구리의 침출율이 증가하지만 황산농도가 5g/L인 경우 구리 침출율이 지속적으로 증가하는 것에 비해, 황산농도가 50g/L인 경우 침출율의 증가가 멈추거나 상승속도가 매우 느려진다. 황산농도가 5g/L이고 P₉₀ 10 μ m 정광시료를 침출한 경우 침출율은 180분에 95%까지 증가하는 것을 관찰하였으나 50g/L이고 P₉₀ 45 μ m 정광을 침출하는 경우 180분에 침출율은 48%에 불과하다. 침출실험 중 단체황이 생성되며 입자의 응집되는 현상이 관찰되었으며, 실험 후 침출잔사에 대해 32 μ m 체를 사용하여 분리하고 결과를 Table 3에 나타내었다. 5g/L로 침출하는 경우보다 50g/L로 침출할 때 응집 효과가 뚜렷이 관찰되었으며, Fig. 4에 나타난 바와 같이 침출 후 입자가 응집된 것이 관찰되었다. 즉, 황산 농도가 높을수록 단체황이 발생하며 응집효과에 의해 60분 이후

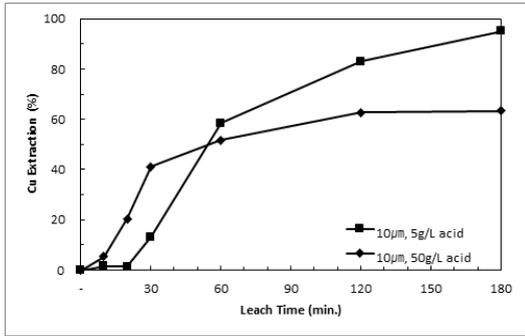


Fig. 2. Copper extraction in 5g/L and 50g/L H₂SO₄ solution with 10µm pulp density at 700kPa and 150°C using chalcopyrite concentrate with P₉₀ of 10µm.

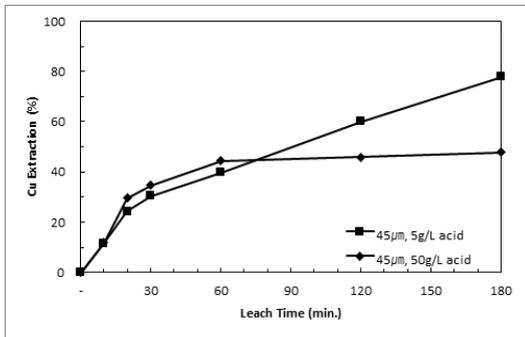


Fig. 3. Copper extraction in 5g/L and 50g/L H₂SO₄ solution with 10µm pulp density at 700kPa and 150°C using chalcopyrite concentrate with P₉₀ of 45µm.

Table 3. Size Distribution of leach residue particles

Conditions	Fraction	
	-32µm	+32µm
P ₉₀ 10µm, 5g/L acid	0.54	0.46
P ₉₀ 10µm, 50g/L acid	0.42	0.58
P ₉₀ 45µm, 5g/L acid	0.47	0.53
P ₉₀ 45µm, 50g/L acid	0.29	0.71

침출이 저하된 것으로 판단할 수 있다.

황동광의 가압침출 중 염소이온이 첨가될 경우 황동석의 침출률을 상승시키고 동시에 침출액의 철의 농도 제어가 가능한 것으로 알려져 있다⁸⁾. 이 연구에서는 염산, 염화구리, 염화나트륨을 첨가하여 구리 침출에 대한 효과를 조사하고자 하였다. Fig. 5에 각 화합물 첨가에 따른 구리 침출거동을 나타내었다. 염소이온을 첨가한 경우 초기 침출속도가 약간 상승하나 염산을 첨가할 경우 침출율이 상

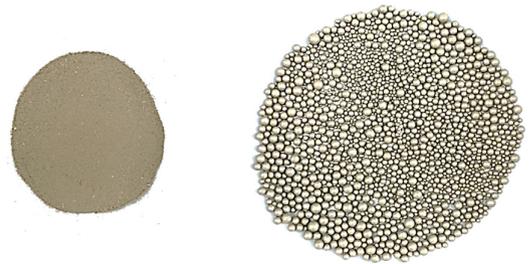


Fig. 4. Agglomerated particles after the autoclave leaching in 5g/L (left) and 50g/L (right) sulfuric acid solution with P₉₀ 45µm.

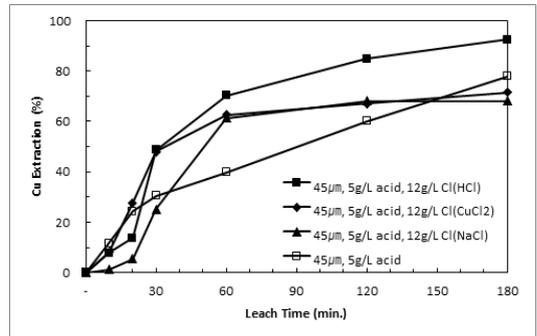


Fig. 5. Copper extraction in 5g/L H₂SO₄ solution with 10µm pulp density at 700kPa and 150°C using chalcopyrite concentrate with P₉₀ of 45µm and 12g/L chloride.

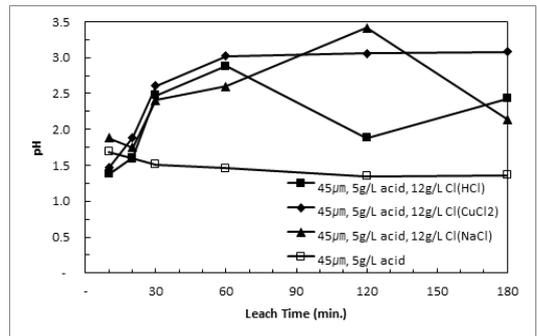


Fig. 6. pH of leach liquor in the copper extraction test in 5g/L H₂SO₄ solution with 10µm pulp density at 700kPa and 150°C using chalcopyrite concentrate with P₉₀ of 45µm and 12g/L chloride.

승하는 것에 비하여 염화구리와 염화나트륨을 첨가하는 경우는 큰 차이가 나타나지 않았다. Fig. 6과 Fig. 7에 Fig. 5에 수행한 침출실험 중 pH와 철농도변화를 각각 나타내었다. 염소이온을 첨가한 경우 pH는 다소 상승한 것을 알

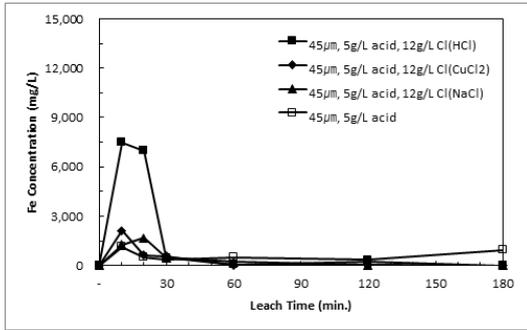


Fig. 7. Iron concentration pH of leach liquor in the copper extraction test in 5g/L H₂SO₄ solution with 10% pulp density at 700kPa and 150°C using chalcopyrite concentrate with P₉₀ of 45µm and 12g/L chloride.

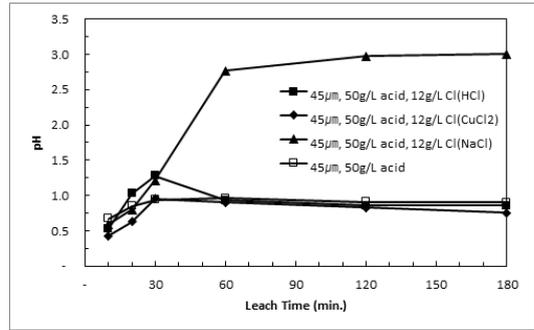


Fig. 9. pH of leach liquor in the copper extraction test in 50g/L H₂SO₄ solution with 10% pulp density at 700kPa and 150°C using chalcopyrite concentrate with P₉₀ of 45µm and 12g/L chloride.

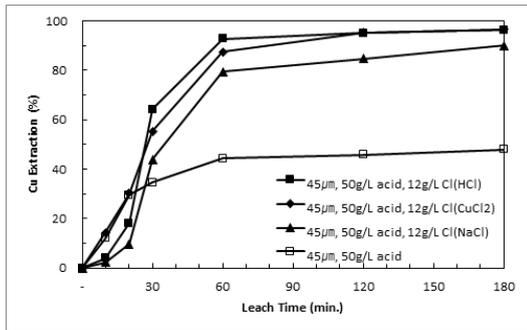


Fig. 8. Copper extraction in 50g/L H₂SO₄ solution with 10% pulp density at 700kPa and 150°C using chalcopyrite concentrate with P₉₀ of 45µm and 12g/L chloride.

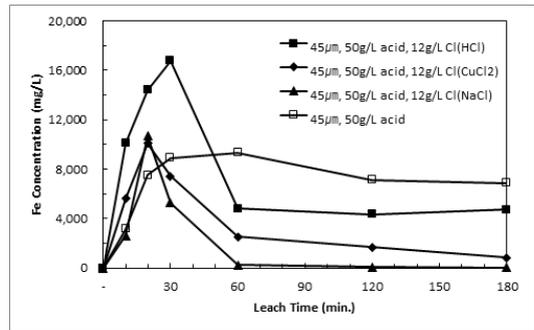
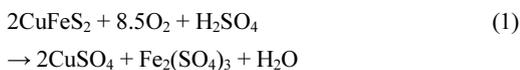


Fig. 10. Iron concentration pH of leach liquor in the copper extraction test in 50g/L H₂SO₄ solution with 10% pulp density at 700kPa and 150°C using chalcopyrite concentrate with P₉₀ of 45µm and 12g/L chloride.

수 있으며, 이는 침출이 진행되며 수소이온이 소모된 것이 원인으로 생각된다.

염소이온 첨가에 따른 침출개선효과를 검증하기 위해 50g/L 황산용액에서 가압침출실험을 진행하였다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 염소이온을 첨가할 경우 침출효율개선 효과가 뚜렷이 나타났으며, 염산과 염화구리를 첨가했을 때 180분에 침출율은 각각 96%와 97%로 나타났다. Fig. 9와 Fig. 10에 Fig. 8에서 수행한 실험 중 pH와 철농도 변화를 나타냈으며, 염화나트륨을 첨가한 경우 외에 pH의 거동은 유사하게 나타났다.



황동석의 가압침출반응은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있

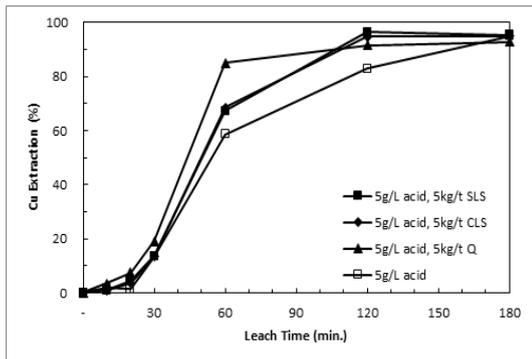
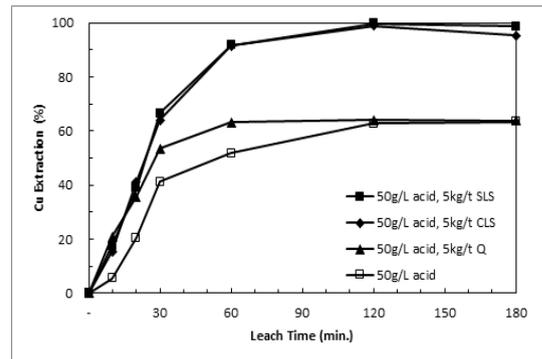
으며, 산이 소모되기 때문에 pH가 상승하게 된다¹²⁾. 그러나 침출반응이 진행됨에 따라 철이 수산화철이나 자로사이트로 침전되어 수산화이온이 소모되므로 pH가 감소하는 반응이 함께 발생한다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 철 농도는 침출 반응 중 감소경향을 나타내며, 결국 침출에 의한 산의 소모와 철 침전에 의한 수산화이온의 소모의 균형이 pH변화를 나타내는 것으로 생각된다. 회수된 미립잔사를 대상으로 Table 4에 QXRD(Quantitative XRD)분석을 통한 광물학적 분석결과를 나타내었다. 5g/L 황산용액을 이용해 침출한 경우 적철석(Hematite)가 주로 관찰되었으나 50g/L 황산용액으로 침출한 경우 자로사이트와 침철석(goethite)가 주요한 철 침전물인 것으로 나타났다.

염소이온이 황동석 침출의 촉매역할을 하기 위해 첨가된다면 계면활성제는 단체황을 분산시켜 침출억제효과를

Table 4. QXRD analyses of leach residues obtained from leaching tests with chloride ions

	Weight %						
	Chalcopyrite	Antlerite	Hematite	Jarosite	Goethite	Sulphur	Quartz
5g/L acid, 12g/L HCl	ND	5.7	83.0	ND	ND	7.9	3.4
5g/L acid, 12g/L CuCl ₂	ND	23.0	68.1	ND	ND	6.6	2.3
5g/L acid, 12g/L NaCl	2.2	33.6	64.2	ND	ND	ND	ND
5g/L acid, no Cl	20.8	ND	68.2	5.5	ND	ND	5.6
50g/L acid, 12g/L HCl	ND	ND	27.2	12.3	51.5	7.0	2.1
50g/L acid, 12g/L CuCl ₂	ND	ND	46.0	4.6	47.0	ND	2.4
50g/L acid, 12g/L NaCl	ND	6.6	ND	91.9	ND	ND	1.4
50g/L acid, no Cl	ND	ND	ND	95.9	ND	ND	4.1

ND: Not detected

**Fig. 11.** Copper extraction in 5g/L H₂SO₄ solution with 10% pulp density at 700kPa and 150°C using chalcopyrite concentrate with P₉₀ of 10µm and 5kg/t surfactants.**Fig. 12.** Copper extraction in 50g/L H₂SO₄ solution with 10% pulp density at 700kPa and 150°C using chalcopyrite concentrate with P₉₀ of 45µm and 5kg/t surfactants.**Table 5.** QXRD analyses of leach residues obtained from leaching tests with surfactants

	Weight %				
	Hematite	Jarosite	Goethite	Sulphur	Quartz
5g/L acid, 5kg/t SLS	64.1	8.4	22.8	ND	4.7
5g/L acid, 5kg/t CLS	62.5	7.6	26.2	ND	3.7
5g/L acid, 5kg/t Q	56.9	8.4	31.2	ND	3.6
5g/L acid, no surfactant	71.7	4.7	17.5	ND	6.1
50g/L acid, 5kg/t SLS	26.2	44.3	ND	29.5	ND
50g/L acid, 5kg/t CLS	58.8	18.4	ND	19.5	3.3
50g/L acid, 5kg/t Q	ND	96.3	ND	ND	3.7
50g/L acid, no surfactant	ND	95.3	ND	ND	4.7

ND: Not detected

해소하기 위해 투입된다⁸⁾. 본 연구에서는 Quebracho, SLS (Sodium lignosulfonate), CLS(calcium lignosulfonate)를 첨가하여 가압침출실험을 진행하였다. Fig. 11과 Fig. 12에 5g/L과 50g/L의 황산용액에서 구리침출에 대한 각각의 계면활성제 첨가효과에 대해 나타내었다. 5g/L의 황산용액을 사용했을 때 초기 구리 침출율 상승속도가 첨가하지 않은 경우에 비해 다소 빠르게 나타나지만 180분 침출을 진행한 경우 큰 차이가 관찰되지 않았다. 그러나 Fig. 12에서 알 수 있듯이 SLS나 CLS를 첨가한 경우 구리침출율은 크게 상승하여 99% 이상의 침출율을 나타냈으며, 이는 계면활성제에 의해 단체황이 분산되어 침출이 원만히 진행된 결과로 판단된다. 계면활성제를 첨가한 경우 침출 후 침전물을 회수하여 QXRD 분석을 진행하였고 Table 5에 결과를 나타내었다. Table 4의 결과와 마찬가지로 5g/L 황산용액을 사용한 경우 침전물 중 주요한 광물은 적철석이나, 50g/L 황산용액으로 침출을 진행했을 때 자로사이트의 양이 증가하며, 특히 침출율이 높았던 SLS와 CLS 첨가결과에서는 단체황이 29.5%와 19.5% 관찰되었다. 즉 분산된 단체황이 침전물 중에 온존되어 회수된 것으로 판단된다. 따라서 염소이온과 계면활성제 첨가에 의한 가압침출공정 중 구리침출율 개선효과가 존재하는 것으로 판단되었다.

4. 결 론

황동석의 150°C의 중온 가압침출공정 중 구리침출율에 대한 염소이온과 계면활성제 첨가의 영향을 5g/L과 50g/L 황산용액에서 조사하였다. 염소이온으로 염산, 염화구리, 염화나트륨을 사용하였고, 계면활성제로 Quebracho, SLS (Sodium lignosulfonate), CLS(calcium lignosulfonate)를 첨가하였다.

황동석 정광의 D_{90} 입도를 10 μ m와 45 μ m로 조절하여 가압침출실험을 진행했을 때 첨가제가 존재하지 않는 경우 황산농도를 5g/L에서 50g/L로 증가시켰을 때 응집잔사의 형성이 뚜렷이 관찰되어 침출율이 저하되었다. 염화이온의 경우 염산과 염화구리 첨가에 의한 구리침출율 상승효과가 뚜렷이 나타났으며, 180분 침출을 진행했을 때 염산과 염화구리 첨가시 침출율이 각각 96%와 97%로 분석되었다. 계면활성제 첨가의 경우 SLS와 CLS 첨가에 의한 구리침출율 상승효과가 뚜렷이 나타났으며, 180분 침

출을 진행했을 때 99% 이상의 침출율을 나타내었다. 즉, 황동석의 가압침출에서 황산농도를 증가시킨 경우 응집잔사의 형성과 함께 구리의 침출율이 저하되나, 염소이온을 첨가하여 황동석의 침출을 촉진시키거나 계면활성제를 첨가하여 단체황 분산을 통해 구리침출율을 상승시키는 것으로 판단되었다.

감사의 글

이 연구는 한국광물자원공사 자체연구사업인 ‘가압침출 및 오토클레이브 운영기술’로서 수행된 내용의 일부입니다. 연구를 지원해주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

1. Kang, L., An, H., Kang, H.Y., et al., 2019 : Analysis of commercial recycling technology and research trend for waste Cu scrap in Korea, Resources Recycling, 28(1), pp.3-14.
2. Barton, I.F., Hiskey, J.B. 2022 : Chalcopyrite leaching in novel lixivants, Hydrometallurgy, 207, 105775.
3. Kim, S., Kim, Y., Kim, S., et al., 2019 : Analyses of Physical Properties of Copper-contained Sludge Pelletized for Applied Pyro-metallurgical Process, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 28(2), pp.31-39.
4. Cordoba, E.M., Munoz, J.A., Blazquez, M.L., et al., 2008 : Leaching of chalcopyrite with ferric ion. Part I: General aspects, Hydrometallurgy, 93(3-4), pp.81-87.
5. Yoo, K., Lee, J.C., Jeong, J., et al., 2008 : Indirect Leaching Technologies of Chalcopyrite, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 45(2), pp. 202-207.
6. 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.
7. Dreisinger, D., 2006 : Copper leaching from primary sulfides: Options for biological and chemical extraction of copper, Hydrometallurgy, 83(1-4), pp.10-20.
8. Hackl, R.P., Dreisinger, D.B., Peters, E., et al., 1995 : Passivation of chalcopyrite during oxidative leaching in sulfate media, Hydrometallurgy, 39, pp.25-48.
9. Sahu, S.K., Asselin, E. 2011 : Characterization of residue generated during medium temperature leaching of chalcopyrite concentrate under CESL conditions, Hydrometallurgy, 110(1-4), pp.107-114.

10. McDonald, R.G. Muir, D.M., 2007 : Pressure oxidation leaching of chalcopyrite. Part I. Comparison of high and low temperature reaction kinetics and products, Hydro-metallurgy, 86, pp.191-205.
11. McDonald, R.G. and Muir, D.M., 2007 : Pressure oxidation leaching of chalcopyrite: Part II: comparison of medium

temperature kinetics and products and effect of chloride ion, Hydrometallurgy, 86, pp.206-220.

12. Lim, Y.H., Kim, S.H., Lee, H.I., et al., 2019 : Leaching of copper from chalcopyrite using 50 L pressure oxidation autoclave, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 56(4), pp.326-333.



임용훈

- 2013년 한국해양대학교 에너지자원공학과 공학사
- 2023년 한국해양대학교 에너지자원공학과 공학석사
- 현재 한국광해광업공단 불레오사업처 생산운영팀 과장



김영훈

- 1994년 동아대학교 에너지자원공학과 공학사
- 1996년 동아대학교 에너지자원공학과 공학석사
- 2000년 동아대학교 에너지자원공학과 공학박사
- 현재 한국광해광업공단 핵심광물대응처 재자원화사업팀 차장



김승현

- 2004년 조선대학교 자원공학과 공학사
- 2006년 조선대학교 자원공학과 공학석사
- 현재 한국광해광업공단 기획조정처 혁신성과팀 차장



이흥익

- 2009년 경북대학교 공과대학 기계공학과 공학사 취득
- 현재 한국광해광업공단 광해안전본부 광산안전센터 차장



박현규

- 2008년 중앙대학교 화학공학과 공학사
- 2010년 중앙대학교 화학공학과 공학석사
- 2014년 중앙대학교 화학공학과 공학박사
- 현재 한국광해광업공단 비축사업처 신산업비축팀 과장

유경근

- Hokkaido University 공학박사
- 현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 교수
- 당 학회지 제29권 4호 참조