

인도네시아 잠비산 동광석의 부유선별 특성 연구

Froth Flotation of Copper Ore from Jambi Deposit, Indonesia

김 학 순(Hak-Soon Kim)¹ · 전 호 석(Ho-Seok Jeon)^{2,*} · 김 병 곤(Byoung-Gon Kim)² ·
백 상 호(Sang-Ho Baek)¹

¹과학기술연합대학원대학교(UST) 자원순환공학
(Resource Recycling, University of Science & Technology (UST), 113 Gwahang-no, Yuseong-gu,
Daejeon 305-333, Korea)

²한국지질자원연구원

(Korea Institute of Geoscience and Mineral resources, Gwahang-no 92, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea)

요약 : 인도네시아 잠비산 복합 동광석을 대상으로 고품위 동 정광생산을 위한 부유선별 연구를 수행하였다. 본 연구에 사용된 시료는 대부분 탄산염인 공작석으로 이루어져 있으나, 일부 황화동이 존재하여 자연부유도가 높은 황화동을 먼저 부유선별에 의해 회수한 다음, 침강산물로부터 산화동 회수를 위한 공정을 적용하였다. 먼저 황화동 부유선별에서는 잔세이트(xanthate) 계열의 포수제인 AP-211과 AP-242를 1 : 1의 비율로 300 g/t 첨가하고, 광액 pH 6인 조건에서 Cu 품위와 회수율이 각각 57.7%와 9.5%인 동 정광을 얻었다. 그리고 침전된 산물을 대상으로 지방산 포수제인 올레인산을 300 g/t, 기포제 첨가량 50 g/t, 광액 pH 8.0, 그리고 정선희수 2회인 조건에서 Cu의 품위와 회수율이 각각 30.8%와 92.1%인 결과를 얻었다. 회수된 황화동 및 산화동 정광을 합산한 결과 최종적으로 Cu의 품위와 회수율이 36.1%와 92.7%인 결과를 얻었다.

주요어 : 황화동, 산화동, 동, 부유선별, 올레인산, 잔세이트

ABSTRACT : Froth flotation of complex copper ore from Indonesia Jambi mine has been carried out to produce high-grade Cu concentrate. Since the ore contained minor Cu sulfides in addition to major Cu carbonate (malachite), copper concentrate was recovered by two-stage process of flotation, which consisted of copper sulfide flotation using xanthate followed by copper oxide flotation using oleic acid. The copper sulfide concentrate of 57.5% Cu grade with 9.5% recovery was obtained by copper sulfide flotation under conditions of 300 g/t collector (1 : 1 mixture of xanthate series Aero Promoter 211 and Aero Promoter 242) and pH 6.0 pulp. In subsequent copper oxide flotation on sink products, the concentrate of 30.8% Cu grade with 92.1% recovery was obtained under the conditions of oleic acid 300 g/t, AF65 50 g/t, pH 8.0 and 2 times cleaning. The flotation techniques which can achieve a Cu grade of 36.1% and a recovery of 92.1% have been developed from the two-stage process of flotation.

Key words : Copper sulfide, copper oxide, Cu, froth flotation, xanthate, oleic acid

*교신저자: hsjeon@kigam.re.kr

서 론

동은 합금처리 및 가공이 용이할 뿐만 아니라 전기 전도성 및 열전도성이 우수하여 건축자재, 전기 및 전자제품 등 다양한 분야에 사용되고 있으나, 우리나라의 경우 연간 약 160만 톤의 동 정광을 전량 수입하고 있다(자원정보서비스, 2010). 따라서 국내외 동광 개발과 이를 확보하기 위한 우수한 선별기술 개발이 필요한 실정이다. 동광은 황동석(chalcopyrite), 휘동석(chalcocite), 반동석(bornite), 동람석(covellite) 등의 황화광물과 공작석(malachite), 남동석(azurite), 규공작석(chrysocolla), 적동석(cuprite)과 같은 산화광물의 상태로 산출되며, 비율은 70% 대 30%의 정도로 황화광물이 대부분을 차지한다(Lee, 2009). 황화광의 경우 선광 및 제련이 용이하나 개발에 의한 부존량 감소와 가격 상승의 부담을 안고 있어, 전체 동광의 30% 이상을 차지하고 있는 산화광의 개발이 필요한 실정이다.

산화동을 회수하는 부유선별 방법은 크게 두 가지가 있다. 첫째, 지방산(fatty acid), 아민류(fatty amine)나 오일 술폰산염(petroleum sulfonate)과 같은 비황화광물 포수제를 사용하는 방법과, 둘째 황화나트륨(Na_2S), 황화수소나트륨(NaSH), 황화암모늄($\text{NH}_4)_2\text{S}$ 등과 같은 황화제를 사용하여 산화동을 황화시킨 후, 잔세이트류의 포수제를 사용하는 방법이 있다(Gorlovskii *et al.*, 1969; Raghavan *et al.*, 1984; K. Lee *et al.*, 2009). 먼저 지방산, 아민류, 오일 술폰산염과 복합유기 시약에 대한 많은 연구가 진행되고 있다(Nagaraj, 1987; Deng and Chen, 1991; 김형석 외, 2010). 이들 시약들은 백운석 및 방해석과 같은 탄산염 맥석광과 산화동의 선택성이 떨어진다는 보고(Deng and Chen, 1991)가 있으나 올레인산의 경우 일찍이 칼슘, 바륨, 스트론튬 탄산염 광물들과 알칼리 금속 및 희토류 금속에의 수산화 음이온 포수제로 널리 이용되어 왔다(Wills, 1997). 김형석 외(2010)는 공작석에 대한 다양한 포수제의 평가에서 올레인산 나트륨 및 Aero Promoter 845가 pH 5~11에서 효과적임을 제시하였다. 회중석, 주석, 희토류광물의 포수제로 이용되고 있는 하이드로자믹산(hydroxamic acid)의 경우, Lee *et al.* (2009)는 황동석 및 공작석 복합광의 부선에서 hydroxamate 포수제를 사용시 동 회수율이 85.5%로 높아 효과적임을 보여준다.

황화제를 사용한 잔세이트계 부선에 있어, Raghavan *et al.* (1984)은 규공작석(chrysocolla)과 브로

칸타이트(brochantite)의 황화제로 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 를 사용할 때 황이온 농도, pH, 교반조건이 표면황화에 큰 영향을 미치고, Jones and Woodcock (1978)은 감홍전극(calomel electrode)을 이용한 산화동의 표면황화 연구에서 pH 10~11, 그리고 -500 mV에서 최적을 이룬다고 하였다. 한편, 황화제 혼합에 대한 연구도 시도되고 있는데, Kongolo *et al.* (2003)은 산화동-코발트광 부선에서 NaSH 및 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 비율 1대 1의 조건(6 kg/t)으로 황화시킨 후 P.A.X (potassium amyl xanthate)를 이용하여 부유선별한 결과, 구리와 코발트의 회수율을 80%까지 높이는 결과를 얻었다. 그러나 황화제 적용의 단점은 재연성이 낮으며, 황화제의 첨가량에 아주 민감하고, 특히 황이온들에 의해 상당량 황화광물이 억제되기 때문에 산화광 및 황동광의 동시 부유선별시 이와 같은 문제점들이 고려되어야 할 것이다(Lee *et al.*, 1998).

따라서 본 연구에서는 산화광(공작석)에 황화제를 사용하지 않고 비황화광물 포수제인 올레인산을 사용하여 인도네시아 잠비산 동광(Cu 22%)의 품위 향상을 위해, 미량으로 존재하는 황동광을 잔세이트로 우선부선하고 침전산물로부터 산화동을 회수하는 부유선별 연구를 수행하였다.

시료 및 실험방법

시료의 특성

본 연구에 사용된 동광석 시료는 인도네시아 잠비산으로, 그림 1은 시료의 XRD 분석결과를 나타낸 것이다. 대부분이 공작석(malachite, $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$)으로 이루어져 있으며, 주요 맥석 광물로는 석영(SiO_2) 외에 침철석($\text{FeO}(\text{OH})$), 적철석(Fe_2O_3) 그리고 티탄철석(FeTiO_3)과 같은 규산염 및 산화광들로 구성되어 있다. 따라서 공작석, 즉 탄산염 및 산화광물의 부유선별에 효과적인 지방산계 포수제의 선정과 규산염 광물을 선택적으로 억제할 수 있는 억제제의 선정 및 억제기술 개발이 필요함을 알 수 있다.

표 1은 잠비산 동광석 원광에 대한 ICP 화학분석 결과를 나타낸 것이다. Cu 함량이 22.2%로 비교적 높은 것을 알 수 있으며, 시료의 불순물 중 Fe 함량이 34.3%로 매우 높아 불순물 대부분이 Fe 근원광물로 이루어져 있음을 알 수 있다. 따라서 Fe 근원광물이 제거되면 동광의 품위가 높아질 것으로 생각되어, 미립자 습식자력선별 실험을 수행한 결

Table 1. Chemical composition of raw sample from Zamboni mine, Indonesia

Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	As (ppm)	Bi (%)	Sb (ppm)	Au (ppm)	Ag (ppm)	S (%)
1.14	22.2	4.3	34.3	0.013	0	<49	0	984	0.341
SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	CuO (%)	K ₂ O (%)	PbO (%)	MnO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Ag ₂ O (%)
10.90	0.58	0.20	0.02	31.91	0.01	0.91	1.73	28.23	0.18

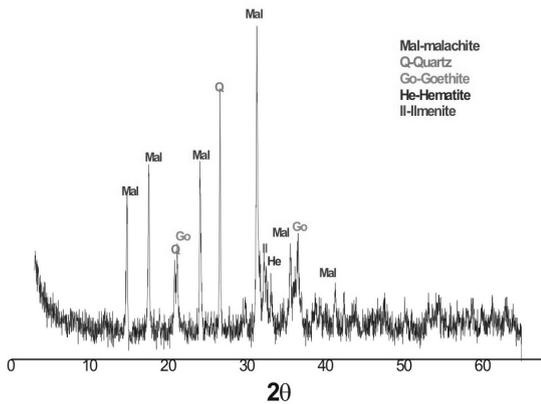


Fig. 1. XRD analysis of raw sample from Zamboni mine, Indonesia.

과, Cu 정광의 품위가 27.3%로 원광보다 5% 밖에 증가되지 않았다. 이는 Fe 구성광물의 대부분이 XRD 분석결과에서 확인되었듯이 대부분 자성이 매우 약한 적철석으로 이루어졌기 때문이다. 따라서 미립자 습식자력선별에 의해 철 근원광물을 제거하여 동광의 품위를 향상시키는 것은 효과적이지 못하기 때문에, 부유선별에 의한 품위향상 연구를 수행하였다.

실험 방법

그림 2는 고품위 동 정광을 회수하기 위한 부유선별 공정도를 나타낸 것이며, 본 연구에 사용된 부유선별기는 denver sub-A type의 실험실용 부유선별기이다. 먼저 동광 원시료를 조크러셔, 콘 크러셔, 펄버라이저, 로드밀을 이용하여 파분쇄한 후 체가름에 의해 150 mesh 이하로 입도를 조절하였다. 150 mesh 이하의 원광을 대상으로 황화물 상태로 존재하는 미량의 동을 회수하기 위한 1차 부유선별을 수행하였다. 이때 포수제로는 잔세이트계인

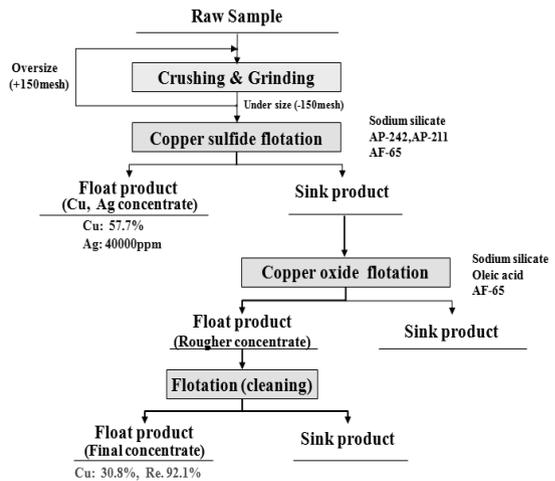


Fig. 2. Flowsheet for froth flotation of copper ores.

AP-242와 AP-211을 1 : 1의 비율로 혼합 사용하였다. 그리고 부유되지 않은 침강산물 중에 존재하는 산화동을 회수하기 위하여 지방산계 음이온 포수제인 올레인산을 이용하여 2차 부유선별을 수행하였다.

황화동을 회수하기 위한 1차 부유선별에서는 광액의 농도를 20%로 조절하여 1,500 rpm으로 교반한 후, 맥석광물인 규산염 광물의 부유를 억제시키기 위해 규산염소다(Na₂SiO₃)를 첨가하였고, 황화동의 활성을 위해 H₂SO₄로 pH를 조절하였다. 황화동 포수제인 AP-211과 AP-242 그리고 기포제인 AF-65를 사용하여 황화동을 부유시켜 회수하였다. 침강산물에 함유된 산화동 회수를 위한 2차 부유선별은 침강산물을 대상으로 pH 조절제(CaO)와 억제제(Na₂SiO₃)를 첨가한 후, 산화동에 효과적인 음이온포수제인 Oleic Acid (C₁₇H₃₃COOH)와 기포제(AF-65)를 차례로 첨가하여 산화동을 부유시켜 회수하였다.

실험결과 및 고찰

그림 3은 원광시료 중 미량 존재하는 황화동을 회수하기 위해 포수제로 AP-211와 AP-242를 1:1로 혼합하여 첨가량에 따른 황화동의 품위와 회수율을 나타낸 것이다. 이때의 실험조건은 광액농도 20%, 억제제(Na_2SiO_3) 1 kg/t, 기포제(AF-65) 50 g/t, 광액의 pH 6.0 그리고 교반속도 1,500 rpm로 하였다.

포수제 첨가량에 따른 부유선별 실험결과, 포수제의 첨가량이 100 g/t에서 400 g/t까지 증가하면 황화동의 품위는 60.3%에서 50.0%로 감소하나 회수율은 5.3%에서 10.0%까지 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 포수제의 첨가량 300 g/t을 기점으로 이보다 첨가량이 증가하면 더 이상의 뚜렷한 회수율의 증가 없이 품위만 감소되어 선별효율이 낮아짐을 알 수 있다. 즉 포수제 첨가량 100 g/t에서는 황화동의 품위가 60.3%로 높지만 회수율이 5.3%로 낮아, 상당량의 황화동의 부유되지 않았다. 이는 포수제의 첨가량이 부족하여 상대적으로 소수성이 약하거나 단체 분리되지 못한 황화동이 부유되지 않고 광액 내에 잔류하기 때문으로 판단된다. 포수제 첨가량이 300 g/t로 증가하면 품위는 다소 감소하나 회수율은 점차 증가하여 분리효율이 크게 증가된 것을 알 수 있다. 이는 포수제의 첨가량이 증가함에 따라 선택성이 강해짐으로 인해 부유도가 증가하지만, 이때 단체 분리되지 못한 입자들과 일부

맥석들이 비선택적으로 부유되기 때문으로 판단된다. 따라서 본 실험조건에서 포수제의 첨가량은 300 g/t이 가장 효과적임을 알 수 있었으며, 이때 Cu의 품위 57.5%와 회수율 9.5%를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 AP-211과 AP-242 포수제를 혼합하여 사용한 것은, 원광 시료 중 은의 함량이 높아 이들을 황화동으로 함께 회수하기 위해서이다. 즉, 같은 잔세이트계 포수제이지만 포수제 AP-242가 은의 포집에도 효과적인 것으로 알려져 있다.

그림 4는 AP-211과 AP-242를 포수제로 사용하였을 때, 광액의 pH에 따른 황화동의 품위와 회수율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 황화광물의 특성상 산성영역에서 황화광물이 활성화되어 포수제와의 흡착이 용이하기 때문에 pH 범위를 산성 영역(pH 5)에서 자연 pH (pH 8)까지 변화시켜 실험하였다. 본 연구에서는 pH 조절제로 10% H_2SO_4 를 사용하였으며, 포수제(AP-211 : AP-242 = 1 : 1) 300 g/t, 억제제(Na_2SiO_3) 1 kg/t, 기포제(AF-65) 50 g/t 그리고 교반속도를 1,500 rpm으로 하고, pH변화에 따른 선별효율을 관찰하였다.

pH 변화에 따른 부유선별 실험결과, 광액의 pH 5~6까지는 Cu의 품위와 회수율에 큰 영향을 미치지 않으나, 광액의 pH가 6보다 증가하면 Cu의 품위와 회수율이 모두 감소되는 것을 알 수 있다. 이는 산성영역에서 황화광물이 활성화되어 포수제와의 흡착이 용이하기 때문에 황화동의 부유도가 증

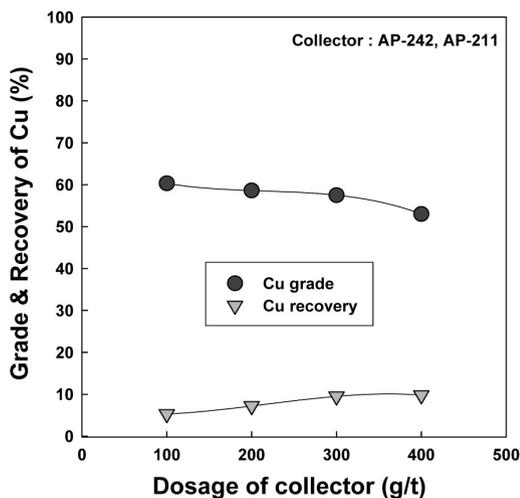


Fig. 3. Effect of dosage of collector on grade and recovery of copper in copper sulfide froth flotation.

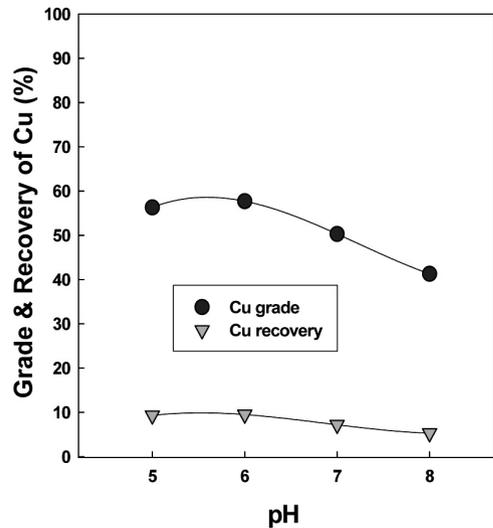


Fig. 4. Effect of pH on grade and recovery of copper in copper sulfide froth flotation.

가하기 때문으로 생각된다. 반면 염기성 영역에서는 가성소다(NaOH) 혹은 생석회(CaO)의 Na나 Ca 양이온이 황화광물 표면에 흡착되어 포수제와의 반응을 억제시키기 때문에, 황화광물이 쉽게 부유되지 못하고 광액 내에 잔류되어 선별효율이 저하되는 것으로 생각된다. 따라서 pH 6이 가장 효과적임을 알 수 있었으며, 이때 Cu 품위와 회수율은 각각 57.5%와 9.5%이었다.

그림 5는 황화동 회수 후, 침강산물의 산화동을 대상으로 한 부유선별에서 포수제의 첨가량이 산화동의 품위와 회수율에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 포수제(oleic acid, C₁₇H₃₃COOH)의 첨가량을 200 g/t에서 500 g/t까지 변화하며 실험한 결과이다. 실험조건은 억제제(Na₂SiO₃) 1 kg/t, 기포제(AF-65) 50 g/t, pH 8, 교반속도 1,500 rpm으로 하고 포수제의 첨가량에 따른 선별효율을 관찰하였다.

포수제 첨가량에 따른 부유선별 실험결과, 포수제의 첨가량이 증가할수록 Cu의 회수율은 꾸준히 증가하나 품위는 300 g/t이 가장 높고 이보다 포수제의 첨가량이 증가하면 다시 감소되는 것을 알 수 있다. 즉 포수제 첨가량 300 g/t을 기준으로 이보다 포수제의 첨가량이 적은 200 g/t에서는 Cu의 품위와 회수율이 28.6%와 90.0%로 낮아, 일부 동광이 포집력 부족으로 손실된 것을 알 수 있다. 그러나 포수제의 첨가량이 300 g/t보다 많아지면 단체분리가 안 된 입자들과 일부 미립자 맥석들이 정광으로 이동되어, 회수율은 증가하나 품위가 감소되어 선

별효율이 감소되는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 Cu 품위와 회수율을 고려할 경우, 최적 포수제 첨가량이 300 g/t임을 알 수 있으며, 이때 Cu의 품위와 회수율이 각각 30.7%와 92.1%인 결과를 얻었다.

그림 6은 산화동의 부유선별에서 광액의 pH가 품위와 회수율에 미치는 영향을 나타낸 것으로, 광액의 pH를 6에서 11까지 변화시켜 실험한 결과이다. 본 실험에 사용된 pH 조절제로는 산성 영역에 H₂SO₄ (10%)을 그리고 염기성 영역에 CaO (5%)를 사용하였다. 실험조건은 포수제(oleic acid) 300 g/t, 억제제(Na₂SiO₃) 1 kg/t 그리고 기포제(AF-65) 50 g/t, 교반속도 1,500 rpm으로 고정하여 실험하였다.

pH 변화에 따른 부유선별 실험결과, 광액의 pH 변화에 따라 Cu의 품위는 큰 변화가 없었으나 회수율의 경우 광액의 pH가 8보다 낮거나 높으면 감소되는 경향을 나타내었다. 이는 잠비산 동광이 복합 산화광들로 이루어져 있어 산성영역과 알칼리영역에서 산화동이 pH 조절제인 H₂SO₄와 CaO에 의해 선택적으로 활성화되지 못하고 맥석광물들과 함께 비선택적으로 억제되기 때문으로 생각된다. 반면 pH 조절제를 사용하지 않은 중성영역인 pH 8에서 산 및 알칼리영역보다 선별효율이 높은 것을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서 품위와 회수율을 고려한 최적의 광액 pH는 8이었으며, 이때 Cu 품위와 회수율은 각각 30.8%와 92.1%이었다.

부유선별의 경우 일반적으로 기포와 고체 입자

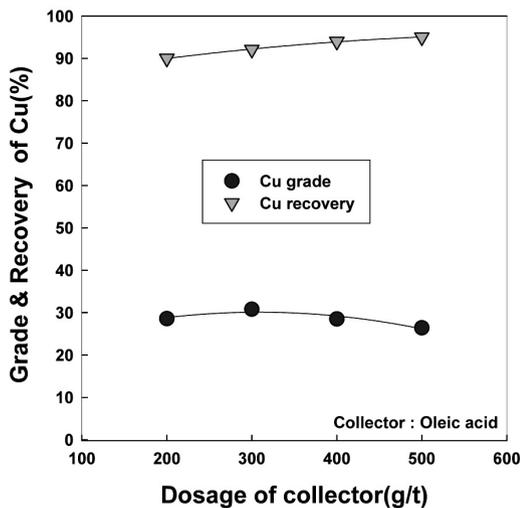


Fig. 5. Effect of dosage of collector on grade and recovery of copper in copper oxide froth flotation.

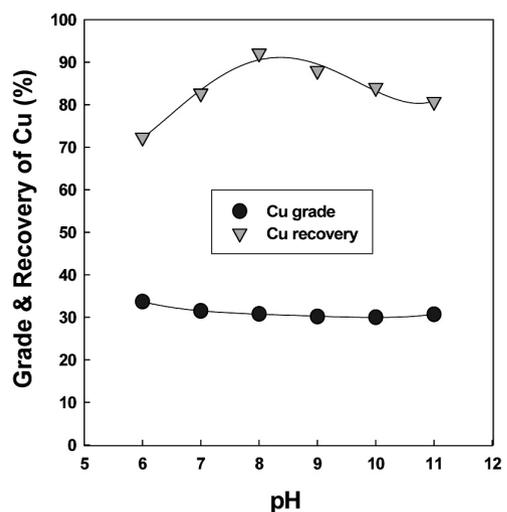


Fig. 6. Effect of pH on grade and recovery of copper in copper oxide froth flotation.

의 충돌 및 부착을 위해 기계적인 교반을 이용하는 데, 이로 인하여 정광 산물 중에는 다소 많은 양의 맥석 광물들을 함유하게 된다. 또한 기계적인 교반에 의한 광액의 혼탁과 비교적 큰 기포에 의해 부유선별 과정에서 수반되는 친수성 맥석 입자들의 혼입은 정선 과정을 거치지 않고서는 효과적으로 제거가 불가능하여 정광의 품위를 크게 떨어뜨리게 되므로, 부선 효율을 저하시킨다. 따라서 유가광물의 회수율이 크게 감소하지 않는 범위에서, 비선택적으로 정광중에 혼입된 맥석광물들을 제거하기 위하여 대부분 정선과정을 거치게 된다. 따라서 본 연구에서 정선횟수의 변화가 품위와 회수율에 미치는 영향을 판단하기 위해 정선횟수 변화실험을 수행하였다.

그림 7은 그림 6과 동일한 실험 조건하에 정광으로 회수된 부선산물 중 맥석광물을 효과적으로 제거하기 위하여 정선횟수를 3회까지 변화할 때, 품위와 회수율에 미치는 결과를 나타낸 것이다. 정선 횟수에 따른 부유선별 실험결과, 조선부선에서 회수된 Cu 정광의 품위와 회수율은 각각 27.2%와 95.8%이지만, 정선횟수 1회에서는 품위와 회수율이 각각 28.5%와 94.5%, 정선횟수 2회에서는 품위와 회수율이 각각 30.9%와 92.1%로 정선횟수 2회에서 분리효율이 크게 향상되는 것을 알 수 있다. 그러나 정선횟수 3회의 경우 품위는 31.5%로 증가하지만 회수율이 87.2%까지 감소되어 효과적이지 못함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Cu 정광의 품위와 회수율을 고려한 최적 정선횟수를 2회로

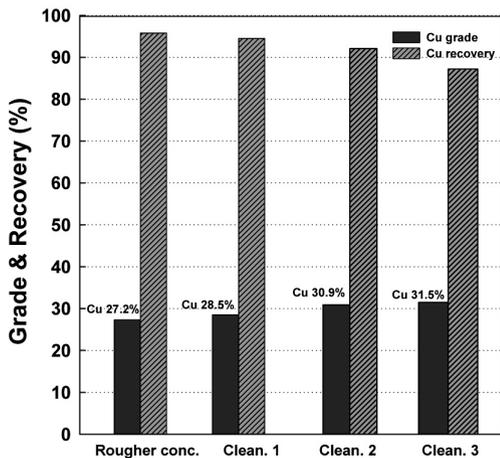


Fig. 7. Effect of cleaning time on grade and recovery of copper in copper oxide froth flotation.

결정하였으며, 이때 회수된 Cu 정광의 품위와 회수율은 각각 30.9%와 92.1%인 결과를 얻었다.

포말층의 안정화는 표면장력, 기포의 탄성 그리고 입자의 크기에 영향을 받는다. 특히 안정한 포말층을 형성하기 위해서는 표면장력이 낮아야 하고, 포말의 수명이 길고 잘 깨지지 않아야 한다. 이는 기포제의 농도와 큰 관련이 있다. 그림 8은 기포제(Aero float-65)의 첨가량이 산화동의 품위와 회수율에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 기포제(Aero float-65)의 첨가량을 25 g/t에서 100 g/t으로 변화시키며 실험한 결과이다. 이때 기타 실험조건은 포수제(oleic acid) 300 g/t, 억제제(Na_2SiO_3) 1 kg/t, 교반속도 1,500 rpm이었다.

기포제 첨가량에 따른 부유선별 실험결과, 기포제의 첨가량이 증가할수록 Cu의 회수율이 점차 증가하다가 일정해지고 품위는 다소 떨어지는 것을 알 수 있다. AF-65의 첨가량이 25 g/t일 경우 Cu의 품위는 31.2%이었으나 회수율은 86.8%로 비교적 낮은 분리효율을 나타내었다. 이는 25 g/t에서는 기포발생이 적어 소수성이 강한 입자들만이 기포에 부착되고 소수성이 약한 입자들은 광액에 잔류되기 때문이다. 이후 기포제 첨가량 50 g/t에서는 Cu 품위와 회수율이 각각 30.8%과 92.1%를 나타내어 선별효율이 증가하였다. 기포제의 첨가량 50 g/t의 조건에서 동광이 부착되어 부유할 수 있는 적합한 포말층과 기포크기를 형성한 것으로 판단된다. 반면 50 g/t 이상에서는 회수율은 일정해지고 품위만 감

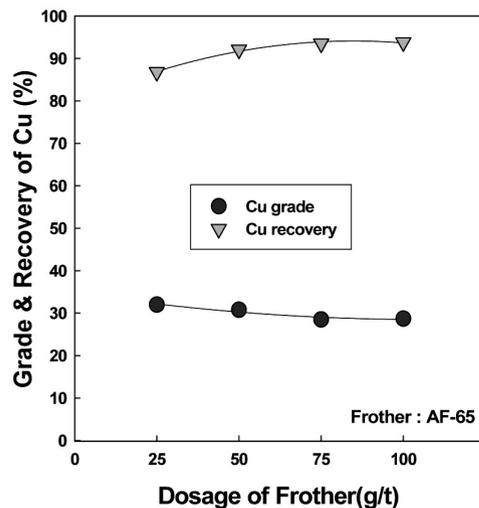


Fig. 8. Effect of dosage of frother on grade and recovery of copper in copper oxide froth flotation.

소하는 경향을 보이는 것은 기포제 첨가량이 증가할수록 액의 계면 장력이 저하되므로, 이에 따라 기포도 작아져 포집력이 부족하여 산화동이 부유하지 못하고 침강하여 산화동의 품위 또한 감소하는 것이다. 따라서 본 연구에서 최적 기포제 첨가량은 50 g/t이었으며, 이때 Cu 품위 30.8%와 회수율 92.1%의 결과를 얻었다.

그림 9는 인도네시아 잠비산 동광의 품위향상을 위한 부유선별로부터 얻은 최종 동정광과 부산물로 얻은 은의 선별효율 나타낸 것이다. 본 실험의 경우 우선 황화동 부유선별로부터 얻은 Cu의 품위와 회수율은 각각 57.5%와 9.5%이었으며 침강 산물인 산화동 부유선별로부터 얻은 Cu의 품위와 회수율은 각각 30.8%와 92.1%이었다. 두 공정으로부터 얻은 정광을 합산한 최종 Cu 정광의 품위와 회수율은 각각 36.1%와 92.7%이었다. 또한 황화동 부유선별에서 부산물로 얻은 Ag의 품위와 회수율은 각각 40,000 ppm와 80%인 결과를 얻었다.

결론

인도네시아 잠비산 복합 동광석을 대상으로 고품위 정광생산을 위한 부유선별 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 원광의 광물감정 결과, 목적광물은 대부분 공작석(malachite, $Cu_2CO_3(OH)_2$)이었으며, 주요 맥석

광물은 석영 외에 침철석, 적철석, 그리고 티탄철석과 같은 규산염 및 산화광들로 구성되어 있었다.

2) 화학분석 결과, Cu 함량은 22.2%이었으며 Fe 함량과 SiO_2 의 함량은 각각 34.3%와 10.8%로 높아 대부분의 불순물이 Fe 근원광물과 산화광임을 확인할 수 있었고 동광과 유사한 특성을 갖는 Pb와 Zn의 함량도 각각 1.14%와 4.3%를 나타내었다. 반면 황의 함량은 0.34% 이하로 매우 낮아 대부분의 동광이 황화광이 아닌 탄산염 또는 산화물 상태로 존재하고 있음을 확인할 수 있었다.

3) 황화동 부유선별 실험결과, 최적조건인 포수제(AP-211 : AP-242 = 1 : 1)의 첨가량 300 g/t, 억제제(Na_2SiO_3) 1 kg/t, 기포제(AF-65) 50 g/t, pH 6의 조건에서, Cu의 품위와 회수율이 각각 57.5%와 9.5%인 결과를 얻었다.

4) 산화동 부유선별 실험결과, 최적조건인 포수제(oleic acid) 300 g/t, 억제제(Na_2SiO_3) 1 kg/t, 기포제(AF-65) 50 g/t, 정선횟수 2회, pH 8의 조건에서 Cu의 품위와 회수율이 각각 30.8%와 92.1%인 결과를 얻었다.

5) 황화물 및 산화물 부유선별 공정의 정광을 합산한 결과, 인도네시아 잠비산 동광으로부터 Cu의 품위와 회수율이 각각 36.1%와 92.7%인 고품위 정광을 생산할 수 있는 부유선별 기술을 개발하였다. 또한 동광의 부산물로서 40,000 ppm 이상의 은을 얻을 수 있었다.

사사

본 연구는 지식경제부의 지원에 의해 한국지질자원연구원 기본사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김형석, 김완태, 한인규, 김상배 (2010) 포수제 변화에 따른 공작석의 부유선별 특성. 한국자원리싸이클링학회지, 19, 58-64.
 한국자원정보서비스 (2010) www.kores.net.
 Deng, T. and Chen, J. (1991) Treatment of oxidised copper ores with emphasis on refractory ores. J. Int. Miner. Process., 7, 175-207.
 Goncalves, K.L.C., Andrade, V.L.L., and Peres A.E.C. (2003) The effect of grinding conditions on the flotation of a sulfide copper ore. Miner. Eng, 16, 1213-1216.
 Gorlovskii, S.I., Eroпкиn, I., Kursakova, G.M., Koval, E.M., Stresin, V.G., Khabotova, N.P., and Shtchukina,

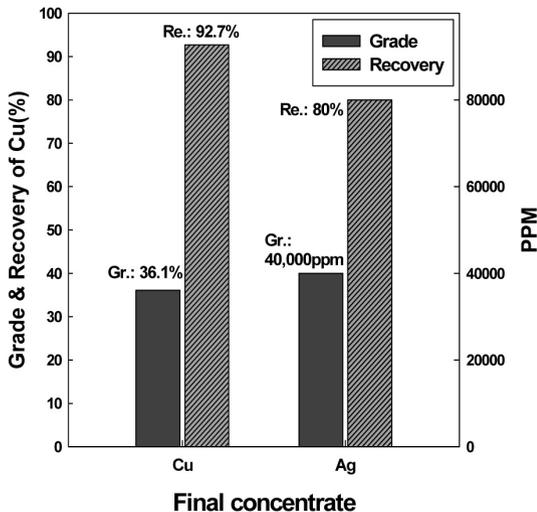


Fig. 9. Grade and recovery of final copper concentrates and by-products (Ag) separated from froth flotation.

- E.E. (1969) Improvement in concentration technology of some rare metal ores, based on taking advantage of complexing alkyl hydroxamic acids peculiarities of action. *Miner. Eng.*, 1, 298-413.
- Jones, M.H. and Woodcock, J.T. (1978) Optimization and control of laboratory sulphidisation of oxidized copper ores with an ion selective electrode. *Miner. Eng.*, 6, 11-19.
- Kongolo, K., Kipoka, M., Minanga, K., and Mpoyo, M. (2003) Improving the efficiency of oxide copper-cobalt ores flotation by combination of sulphidisers. *Miner. Eng.*, 16, 1023-1026.
- Lee, K., Archibald, D., McLean, J., and Reuter, M.A. (2009) Flotation of mixed copper oxide and sulphide minerals with xanthate and hydroxamate collectors. *Miner. Eng.*, 22, 395-401.
- Nagaraj, D.R. (1987) The chemistry and application of chelating or complexing agents in mineral separations. *Miner. Eng.*, 9, 257-334.
- Raghavan, S., Adamec, E., and Lee, L. (1984) Sulphidization and flotation of chrysocolla and brochantite. *Miner. Eng.*, 12, 173-191.
- Shen, W.Z., Fornasiero, D., and Ralston, J. (2001) Flotation of sphalerite and pyrite in the presence of sodium sulfite. *Miner. Eng.*, 63, 17-28.
- Wei, Y. and Sandenbergh, R.F. (2007) Effects of grinding environment on the flotation of Pinah complex Pb/Zn ore. *Miner. Eng.*, 20, 264-272.
- Wills, B.A. (1997) *Mineral Processing Technology* (6th ed). Butterworth, Heinemann.
-
- 접수일(2010년 9월 15일), 수정일(1차 : 2010년 9월 26일),
게재확정일(2010년 9월 27일)