

金 鑛山 鑛尾로부터 有價資源 回收에 관한 研究[†]

吳 元 · [‡]趙熙燦 · 李珍水*

서울大學校, *韓國鑛害管理公團

Recovery of Valuable Materials from Gold Mine Tailings[†]

Won Oh, [‡]Hee-Chan Cho and Jin-Soo Lee*

Seoul National University, *Mine Reclamation Corporation (MIRECO)

요 약

가행중인 금(gold) 광산에서 발생하는 광미(tailing)로부터 금 및 실리카와 같은 유가자원을 회수하기 위해 선별특성을 검토하였다. 금 선별에는 고비중액(heavy liquid)을 이용한 비중선별(gravity separation)을 하였고, 실리카 선별에는 하이드로싸이클론을 이용한 분급/비중선별, 부유선별(froth-flotation) 그리고 마찰대전형 정전선별(triboelectrostatic separation)을 하였다. 실험결과 금은 비중액의 비중이 2.72일 때 품위가 최고 5.58 g/ton인 정광을 약 3 wt.% 회수하였으며, SiO₂의 함량이 약 94%인 고순도 실리카를 회수할 수 있었다. 따라서, 본 연구를 통하여 환경을 훼손하는 광미의 감량 및 무해화는 물론 유가자원 회수를 위한 공정을 수립 할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 광미, 유가자원 회수, 금, 실리카

Abstract

This study was carried out to develop a process flow sheet for recovering valuables (gold and high purity silica) from the gold mine tailings containing 1.7 g/ton of gold and 79.48 wt.% SiO₂. Float-sink tests using heavy liquids was conducted to explore the possibility of recovering gold by gravity separation. Hydrocyclone, froth flotation, and triboelectrostatic separation tests were conducted to recover high purity silica from the gold mine tailings. The results of float-sink tests showed that particles containing 5.58 g/ton of gold could be obtained at 2.72 specific gravity, but with very low yields around 3%. Meanwhile, all tests with hydrocyclone, froth flotation, and triboelectrostatic separation showed that high purity silica with SiO₂ content over 90% could be obtained. The purity could be improved further up to about 94% by employing several recleaning steps in the froth flotation and triboelectrostatic process.

Key words : mine tailings, recovery of valuables, gold, silica

1. 서 론

현재(2009년 기준) 국내에서 휴폐광된 금속 및 비금속광산은 약 1,400여 개소¹⁾에 이르고 있으며, 이러한 광산에는 과거 채광이나 선광제련과정 등의 광산 활동으로 인하여 발생한 광산폐기물(폐석, 광미, 광석광물, 광산폐수 등)이 광산주변에 그대로 방치되어 있다. 계

다가 가행중인 550여개소¹⁾의 금속 및 비금속광산에도 매일 선광과정에서 폐기되는 광미(tailing)가 대량으로 발생하고 있으며, 이러한 광미는 대부분 적치장이나 광미담(tailing pond)에 방치되어 처리가 안 되고 있는 실정이다. 이러한 광미의 방치가 문제가 되는 이유는 여기에 광물의 선광 및 제련과정에서 사용된 독성 시약이 잔류하고 있을 뿐만 아니라, 이 광미들이 우천 등으로 인해 물과 상호반응하면 중금속이 용출(침출수)되어 인접하천 및 토양을 오염시키고 산림을 훼손시키는 등의 광해를 발생시키며 나아가 인근 주민들의 건강에도 해

[†] 2010년 11월 3일 접수, 2010년 12월 2일 1차수정

2010년 12월 14일 수리

[‡] E-mail: hccho@snu.ac.kr

를 끼치기 때문이다. 따라서 이들의 효과적인 처리와 재활용을 위한 방안의 모색이 중요한 과제가 되고 있다.

외국의 경우 대부분의 국가에서 1970년대부터 이러한 광해에 대한 규제와 관리 체계를 운영하고 있으며, 특히 미국과 일본 등을 중심으로 휴폐 금속광산을 중심으로 한 유가자원의 회수 및 재활용에 관련된 기술 개발을 활발히 추진 중에 있다. 그러나 국내의 경우 광물 찌꺼기로부터 유가자원의 회수 연구보다는 환경에 미치는 영향성 검토 또는 환경오염 저감화 방향으로 연구가 대부분이었다. 일부 광물찌꺼기를 재활용하는 연구가 있었으나, 현재까지는 상업적으로 성공가능성이 적어 성공적으로 수행되지는 못하고 있는 실정이다.

한편, 금속 및 비금속광산의 광미에는 회수가 가능한 유가자원이 일부 남아 있는 것으로 확인되고 있는데, 특히 금 광산 광미의 경우 미 회수된 금과 실리카 등의 유가광물을 함유하고 있는 것으로 알려져 있다. 금의 경우 전 세계적으로 연일 최고가를 경신할 정도로 가격이 급상승하고 있으며, 실리카 또한 다양한 산업분야에서 사용되고 있는데다가 수요 또한 꾸준히 늘고 있는 광물이기 때문에 유가자원 회수기술 개발을 통해 광미를 재활용한다면 환경 훼손물질의 저감화 및 무해화는 물론 경제적 측면에서도 일조할 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 전라남도 해남에 위치한 금 광산인 모이산 광산에서 입수한 광미를 대상으로 유가자원의 회수 가능성을 검토하기 위해 다양한 선별 연구를 진행하였다. 모이산 광산은 연간 선광장의 처리량이 약 6만 여톤에 달하는 금 광산으로, 폐기되는 광미 또한 연간 5만 5천여톤에 달한다. 이렇게 발생하는 광미는 과거 일부 재활용업체에 납품하였으나, 운반비 문제로 인해 납품이 중단된 상태이며 현재는 거의 대부분이 광미담(tailing pond)에 적치되고 있는 실정이다. 따라서 향후 발생하는 광미의 처리를 위한 방안이 시급하다고 할 수 있겠다.

2. 실험 시료 및 방법

2.1. 시료의 특성

본 연구에서 사용된 시료는 전라남도 해남에서 가행중인 금 광산인 모이산 광산에서 나온 광미를 대상으로 하였다.

대상 시료의 광물학적 특성(mineralogical characteristics) 파악을 위해 입도분석 및 XRD, XRF 분석을 하였으며, 금 함량의 분석은 ICP-MS로 실시하였다. 시료의 입도 분석은 입도분석기(Malvern Mastersizer, 미국)를 이용하여 분석하였으며, Fig. 1에 입도분석결과를 도시하였다. 입도분석결과 대상 시료의 평균입도는 약 16 μm 이었으며, 400 mesh(37 μm) 이하 입도가 61%로 미분 함량이 많은 것으로 나타났다.

시료의 구성광물을 조사하기 위해 XRD 분석결과 quartz가 주요 구성광물이고 muscovite, feldspar 등을 미량 함유하고 있음을 알 수 있었다. Table 1은 XRF 분석을 통해 화학조성성분을 나타낸 것인데 SiO_2 가 약 79%, Al_2O_3 가 약 15%, K_2O 가 약 3%로 이들 광물이 97% 이상을 차지하고 있었다. ICP-MS를 이용하여 시료의 금 함량을 분석한 결과 약 1.7 g/ton이 함유되어 있었다.

3. 실험 방법

3.1. 금 선별

광미로부터 고비중광물인 금의 비중선별 가능성을 검토하기 위하여 부침선별(float-sink separation)을 실시하였다. 실험에는 고비중액인 tetrabromoethane(비중: 2.96)과 carbon tetrachloroethane(비중 : 1.6)을 사용하였으며, 이들을 혼합하여 실험에 필요한 비중으로 조절한 후

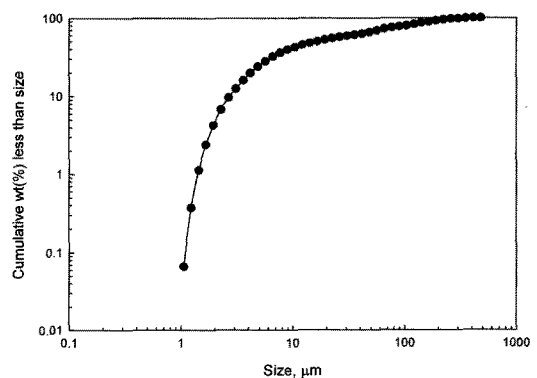


Fig. 1. Particle size distribution of the raw sample.

Table 1. Chemical composition of the raw sample

Formula	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Fe_2O_3	MgO	TiO_2	CaO	SO_3	Cr_2O_3	P_2O_5	Na_2O	Gold (g/ton)
Wt.%	79.48	14.97	3.361	0.925	0.273	0.234	0.22	0.18	0.095	0.090	0.057	1.5

실험을 실시하였다. 사용된 중액의 비중은 2.96, 2.8, 2.72로서 약 0.1단위로 조절하여 실험을 진행하였으며, 비중 2.71이하부터는 float 층과 sink 층 사이에 부유물이 발생하여 중액의 비중을 0.01단위로 더 세분화하여 2.71부터 2.65까지 실험을 실시하였다. 실험 절차는 원시료 약 5 g을 50 ml 용량의 원심분리용 플라스틱 튜브에 넣고 고비중액을 추가하여 교반하였으며, 이것을 원심분리용 싸이클론에 넣고 1,500 rpm에서 1시간 원심분리를 하였다. 이렇게 분리된 고비중 산물(sink product)과 저비중 산물(float product)을 아세톤 세척 및 필터링 후에 건조오븐에 넣고 90°C에서 12시간 건조하여 최종 분리 산물을 구하였다. 최종 산물은 왕수를 이용하여 105°C에서 2시간동안 전처리를 한 다음 ICP-MS를 이용하여 금 함량을 분석하였다.

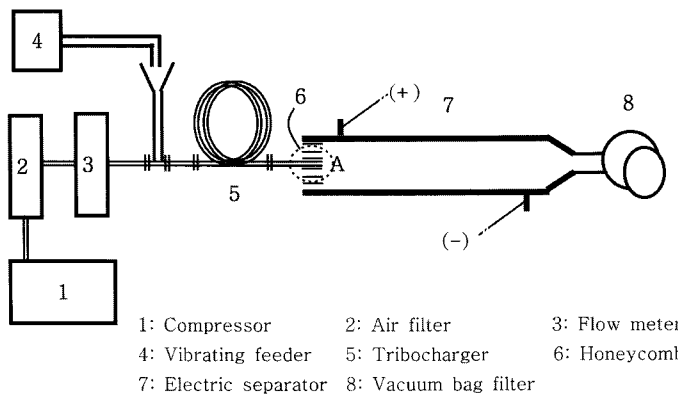
3.2. 고순도 실리카 선별

광미로부터 고순도 실리카의 회수가능성을 검토하기 위해 하이드로싸이클론을 이용한 분급/비중선별과 부유선별 그리고 마찰대전형 정전선별을 실시하였다. 분급을 위해 사용된 장비는 Axia Mozley사(미국)의 하이드로싸이클론이다. 실험 조건으로 광액 농도는 10%, 압력감쇠는 0.10 MPa로 조절하였으며, 하이드로싸이클론 상부의 유입부 및 배출부인 vortex finder(3.0, 5.5, 7.0 mm)와 하부 배출부의 크기를 조절하는 apex(1.5, 3.2 mm)는 서로 조합(combination)하여 실험을 실시하였다. 하이드로싸이클론으로 분리된 overflow와 underflow 산물은 수을 측정 후 입도분석장치(Malvern Mastersizer)를 이용하여 입도 분석을 하였으며 XRF를 이용하여 실리카의 함량을 분석하였다.

부유선별 실험은 하이드로싸이클론의 underflow 산물

을 분쇄한 시료를 대상으로 Denver D-12 부선기를 사용하여 실시하였다. 실험조건으로 광액농도 10%, pH는 HCl과 NaOH를 이용하여 조절하였으며 부선기의 모터 회전수는 1,200 rpm으로 고정하였다. 부선용 시약은 포수제로 dodecylamine과 dodecylamine·HCl,²⁾ 실리카 억제제로 sodium silicate을 사용하였다. 실험은 부선조(cell, 2,000 mL)에 시료와 물을 넣고 광액농도와 pH를 조절한 뒤 포수제, 억제제를 각각 첨가하여 5분씩 교반하였으며, 이후 기포를 주입하여 3분간 부유선별을 실시하였다. 이렇게 분리된 산물(concentrate, tailing)에 대해 XRF를 이용하여 실리카의 함량을 분석하였다. 또한 부유선별의 반복을 통한 recleaning 실험으로 실리카의 품위를 향상시킬 수 있는지를 확인하였다.

정전선별은 마찰대전(triboelectrostatic) 방식을 이용하여 실시하였으며 실험에 사용된 정전분리 장비는 Fig. 2와 같다. 공기압축기(1)에서 압축된 공기는 압축된 공기의 수분을 제거하기 위해 필터(2)를 지난 후, 유량계(3)에 의해 일정한 속도로 정전분리장치로 분사되게 하였으며, 시료는 진동주입기(4)를 통해 일정속도로 주입되게 하였다. 그리고 마찰대전장치인 투입관(5)을 지름 약 30 cm의 원형으로 2바퀴를 감아 투입관의 길이를 연장하여 시료와 마찰대전장치의 마찰시간이 길도록 하였다. 정전분리관은 너비가 30 cm, 길이가 100 cm인 2개의 동관을 간격 10 cm로 평행하게 설치하였다. 각 전극의 전압은 약 20 kv로 조절하였으며, 정전분리장치 끝에는 진공 백필터(8)를 이용해서 공기의 흐름을 원활히 하였다. 실험에는 하이드로싸이클론 underflow 산물을 분쇄한 시료와 부유선별 recleaning으로 분리된 tailing 시료를 사용하였으며, 시료의 완전한 수분 제거를 위해 실험 시작 전 2시간동안 90°C에서 충분히 건조하였다. 또



1: Compressor 2: Air filter 3: Flow meter
 4: Vibrating feeder 5: Tribocharger 6: Honeycomb
 7: Electric separator 8: Vacuum bag filter

Fig. 2. Triboelectrostatic separation unit.

한 실험의 일관성을 유지하기 위해 약 25의 일정한 온도에서 실험을 실시하였으며, 공기의 흐름은 약 180 l/min를 유지하였다.

정전선별산물의 극성은 각각의 물질이 가지고 있는 고유의 일함수와 마찰재질의 일함수에 의해 결정이 되는데, 분리하고자 하는 SiO₂의 일함수는 5.0 eV³)로 알려져 있으나 불순물인 점토광물의 일함수는 알려져 있지 않기 때문에 본 실험에서는 다양한 일함수를 가지는 PVC(5.13 eV), Stainless Steel(4.20 eV), Cu(4.38 eV) 마찰재질⁴⁾을 이용하여 실험을 실시하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 금 선별

Fig. 3에 실험 후 생성된 고비중산물인 sink 산물의 yield(wt.%)와 grade(g/ton)를 나타내었다. 실험결과 비중 2.96부터 2.72까지는 yield값이 약 2~3% 정도로 일정하다가 비중 2.67일 때는 최대 약 9%가 되었다. 그

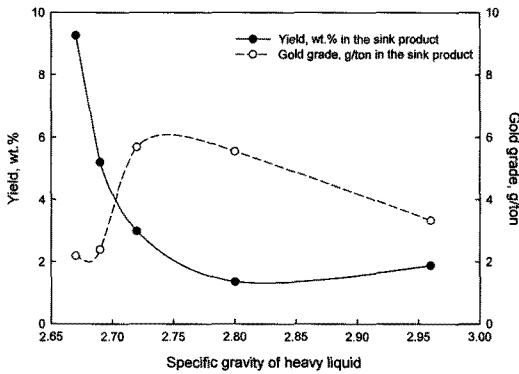


Fig. 3. Yield and gold grade in the sink product.

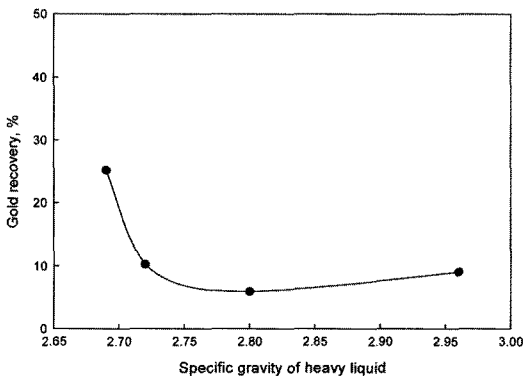


Fig. 4. Gold recovery in the sink product.

러나 비중 2.66에서는 시료와 비중액이 완전히 혼합되었고, 비중 2.65 이하에서 시료가 모두 침강되어 분리가 일어나지 않았다. 이것은 시료 구성광물의 대부분을 차지하는 quartz의 비중이 2.65이기 때문인 것으로 보인다. 분리된 산물을 ICP-MS를 이용하여 분석한 결과, 금은 중액의 비중이 2.72일 때 함량이 최대 5.58 g/ton인 정광이 약 3 wt.%가 산출되었다. Fig. 4는 sink 산물에서의 금 회수율(recovery)을 도시한 것인데, 중액의 비중이 2.69일 때 최고 약 25%의 금 회수율이 나타났다. 따라서 비중 선별시 금의 함량이 3배 이상 증가한 정광을 확보할 수 있으나 yield가 극히 낮아 실질적으로 금 회수를 위한 비중선별은 비경제적일 것으로 판단된다.

4.2. 고순도 실리카 선별

4.2.1 하이드로사이클론 선별

하이드로사이클론을 이용한 분급/비중선별 결과 vortex finder 및 apex의 크기에 따라 사이클론의 overflow 산물로 약 4~31%가, underflow 산물로 약 69~96%가 회수되었다. 사이클론의 분리 특성 중 입도에 따른 분급 효과를 알 수 있는 size selectivity 곡선을 도시하기 위해 사이클론으로 분리된 슬러리 상태의 산물을 입도 분석장치에 투입하여 입도분포를 도출하였다.

Fig. 5는 입도분석장치를 이용하여 분석한 결과인데, overflow 산물의 평균 입도는 약 3~4 μm, underflow 산물은 약 16~30 μm로 나타나서 feed의 평균입도인 약 16 μm와 비교했을 때 사이클론에 의한 입도 분급 효과가 많이 일어났음을 확인할 수 있었다.

Fig. 6은 이 실험의 size selectivity 곡선과 cut size, sharpness index를 구하기 위한 분급 곡선(classification

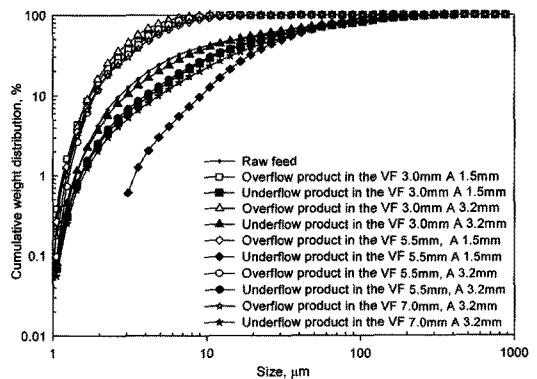


Fig. 5. Particle size distribution of products separated by the hydrocyclone.

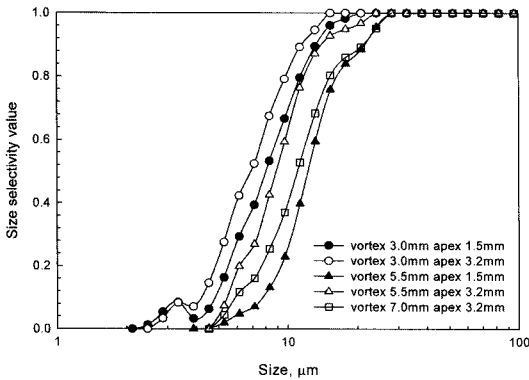


Fig. 6. Classification curves.

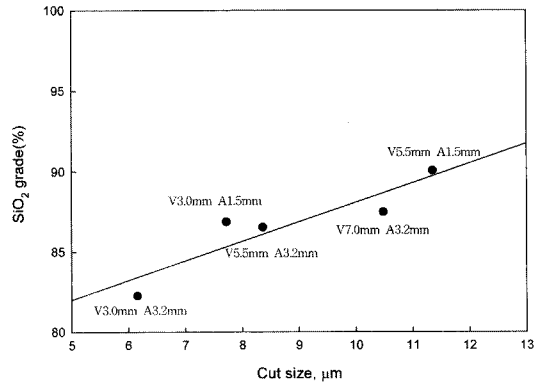


Fig. 7. Relation between cut size and silica grade of the underflow product.

curves)을 도식한 것이다. 분급 곡선을 통해 산출된 산물들의 cut size 범위는 약 6.16~11.35 μm 로 대략 apex가 작아질수록 또는 vortex finder의 크기가 커질수록 cut size가 커지는 경향을 나타내었다.

Table 2는 분리산물의 cut size, sharpness index, bypass 값을 나타낸 것이다. 분리된 산물의 실리카 함량 분석결과 vortex finder가 5.5 mm, apex가 1.5 mm 일 때 실리카 함량이 약 90%(실수율 69.2%)로 가장 높았으며, 이때의 cut size 또한 11.35 μm 로 가장 높게 나타나 Fig. 7과 같이 cut size가 높을수록 실리카 함량이 높아지는 경향을 보였다.

하이드로싸이클론의 underflow 산물에 대해 광물의 존재 형태를 확인하고자 SEM/EDS를 이용하여 원소 mapping한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 분석 결과 Si와 Al 입자들이 서로 부착된 형태로 있는 입자가 다소

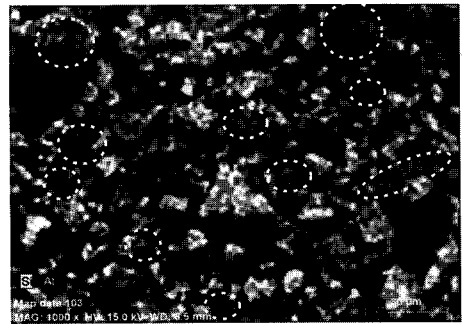


Fig. 8. Mapping image of Si, Al element in the underflow product of the hydrocyclone.

존재함을 확인할 수 있었다. 따라서 이러한 입자들의 단계분리(liberation)를 위해 교반밀을 사용하여 5분간 분

Table 2. Values of cut size, sharpness index, bypass in hydrocyclone experiment

Vortex finder, mm	Apex, mm	Materials	Cut Size, μm	Sharpness Index	Bypass
3.0	1.5	overflow	7.72	0.54	0.44
		underflow			
3.0	3.2	overflow	6.16	0.58	0.65
		underflow			
5.5	1.5	overflow	11.35	0.63	0.08
		underflow			
5.5	3.2	overflow	8.36	0.63	0.31
		underflow			
7.0	3.2	overflow	10.48	0.58	0.23
		underflow			

쇄를 실시하였으며, 그 결과 평균입도는 약 6 μm , 400 mesh(37 μm) 이하 입도는 약 87%로 나타났다.

4.2.2 부유선별(Froth Flotation)

부유선별은 불순물인 점토 광물 입자를 부유시키고 목적 광물인 실리카를 광액에 잔류시키는 역부선의 방법으로 진행하였으며, 대상시료로 하이드로싸이클론의 underflow의 분쇄산물을 사용하였다.

Fig. 9는 포수제 dodecylamine(117 g/ton)을 이용하여 pH에 따른 분리효율을 실험한 결과인데 산성조건일수록 concentrate의 Al_2O_3 분석치가 높아지는 경향을 보여 pH 2에서 Al_2O_3 가 최고 약 19%가 산출되었으며 tailing에 있는 실리카 함량 또한 최대 91.2%까지 증가하였다.

Fig. 10은 pH2 조건에서 포수제 추가(dodecylamine-HCl) 및 실리카 억제제(sodium silicate) 첨가에 따른 영향을 살펴본 결과이다. dodecylamine을 사용하였을 경우

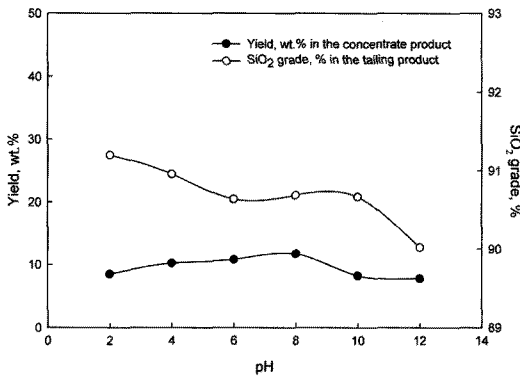


Fig. 9. Effect of various pH on the grade of SiO_2 and Al_2O_3 .

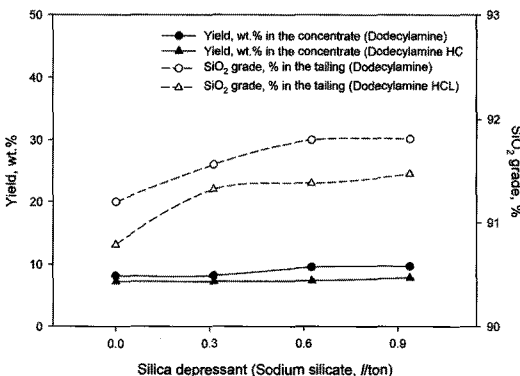


Fig. 10. Effect of two collector and silica depressant on the grade of SiO_2 .

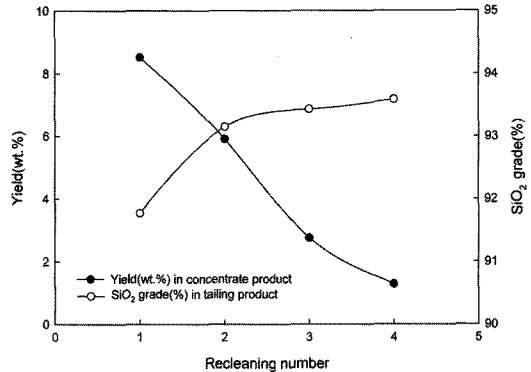


Fig. 11. Effect of recleaning number on the yield and grade of SiO_2 .

dodecylamine-HCl보다 실리카 분리효율이 좋게 나타났다. 그리고 억제제 첨가량이 늘어날수록 tailing산물의 실리카 함량이 조금씩 증가하는 경향을 보였으나, 그 효과는 미미한 것으로 나타났다.

Fig. 11은 pH2 조건에서 dodecylamine 포수제(117 g/ton)을 이용하여 부유선별을 반복한 recleaning 실험을 한 결과이다. Recleaning 2차까지 실리카 함량이 93.15%까지 증가하였으나 3차 이후부터 실리카 증가량이 미미하였으며 5차부터는 recleaning이 되지 않았다.

4.2.3 마찰대전형 정전선별(Triboelectrostatic separation)

마찰대전으로 인해 정전분리되어 (+)극과 (-)극의 전장판에 포집된 시료들의 양을 측정하여 회수율과 실리카 함량을 분석하였다. 상대습도는 마찰 대전에 가장 큰 영향을 미치는 요인들 중 하나인데, 일반적으로 상대습도가 증가함에 따라 하전 밀도는 급격히 감소하는 것으로 알려져 있다.⁴⁾

본 실험에서 상대습도는 39%로 조절하였으며, PVC, SS, Cu 마찰재질에 따른 실험결과를 Table 3에 나타내었다. 실험결과 일함수가 가장 큰 PVC를 사용하였을 경우에 (+) 전장판에서는 45.50%, (-) 전장판에서는 26.98%로 가장 좋은 회수율을 보였고, SS는 (-) 전장판에서 14.50%, Cu는 (+) 전장판에서 31.97%로 가장 낮은 회수율을 보였다. 포집한 시료의 XRF 분석 결과 (+) 전장판으로 Al_2O_3 가, (-) 전장판으로 SiO_2 가 분리되는 경향을 보였으며, PVC를 이용하여 정전분리한 산물에서 SiO_2 함량이 약 93%로 가장 높게 산출되었다.

앞선 실험결과를 바탕으로 가장 효율적인 실험 조건에서 시료의 정전 분리 특성을 알아보았다. 상대습도는 25%로 낮춰 조절하였고 실리카 분리 효율이 가장 좋은

PVC 재질의 마찰 대전을 이용하여 실험을 수행하였다. 그리고 전체 전장판을 3등분으로 나누어 시료 분사구로부터 근접영역(0-25 cm), 중간영역(25-50 cm), 원거리영역(50-100 cm)에서 시료를 포집하였으며, 실험결과를 Table 4에 나타내었다. 실험결과 (+), (-) 전장판에서의 회수율이 약 84%가 나타나 앞선 실험의 회수율 약 72%보다 12%가 증가함으로써 상대습도가 SiO₂ 회수율에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 각 영역별로 포집된 산물을 XRF 분석한 결과, 제거하고자 하는 Al₂O₃가 분사구의 근접영역에서 (-) 전장판에 가장 적게, (+) 전장판에는 가장 많이 산출되어 Al₂O₃ 함유 광물입자가 분리되고 있음을 나타내고 있다. 그러나 SiO₂ 분석치는 (-) 전장판 중간영역에 약 93% 정도의 가장 높은 값을 나타내고 있는데 이는 (-) 전장판에 SiO₂뿐만 아니라 Fe₂O₃와 SO₃도 농축되기 때문인 것으로 분석되었다. 즉,

분사구로부터 근접영역의 (-) 전장판에서는 Fe₂O₃와 SO₃가 각각 1.96%, 1.73%로 다른 영역에 비해 많이 포집됨으로서 상대적으로 실리카 함량이 낮아지는 현상이 발생하였다.

대상시료를 바꾸어 부유선별 recleaning으로 분리되어 실리카 함량이 약 93%인 tailing 산물을 가지고 Table 4와 같은 조건으로 실험한 결과를 Table 5에 나타내었다. Table 4의 결과와 동일하게 중간영역에서 실리카 함량이 약 94%가 산출되었다. 따라서 추가적으로 SiO₂의 함량을 높이기 위해서는 정전선별전 Fe₂O₃와 SO₃를 제거하기 위한 추가공정이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 가행중인 금 광산에서 발생하는 광미

Table 3. Yield and chemical composition of products separated by triboelectrostatic separation using various tribochargers

Tribo charger	Pole	Yield, wt.%	Chemical composition, %				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₃
PVC	(+)극	45.50	87.60	8.55	2.32	0.85	0.30
	(-)극	26.98	92.82	3.31	0.83	1.71	0.78
	합 계	72.48	-	-	-	-	-
S.S.	(+)극	36.29	87.64	13.00	2.16	1.15	0.37
	(-)극	14.50	90.82	5.28	1.38	1.50	0.41
	합 계	50.79	-	-	-	-	-
Cu	(+)극	31.97	88.97	7.11	1.87	0.93	0.37
	(-)극	17.97	89.68	5.91	1.58	1.28	0.47
	합 계	49.94	-	-	-	-	-

Table 4. Yield and chemical composition of products separated by triboelectrostatic separation by distance from the nozzle

Pole	분사구로부터 거리, cm	Yield, wt.%	Chemical composition, %				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₃
(+)극	0-25	34.06	85.45	10.04	2.76	0.65	0.28
	25-50	12.06	90.74	6.04	1.71	0.69	0.47
	50-100	3.11	88.26	7.79	2.03	0.89	0.51
	소 계	49.23	-	-	-	-	-
(-)극	0-25	22.33	92.41	2.59	0.61	1.96	1.73
	25-50	9.21	93.27	3.26	0.82	1.17	1.03
	50-100	3.45	91.13	5.38	1.48	0.92	0.57
	소 계	34.99	-	-	-	-	-
합 계		84.22	-	-	-	-	-

Table 5. Yield and chemical composition of products separated by triboelectrostatic separation by distance from the nozzle

Pole	분사구로부터 거리(cm)	Yield (wt.%)	Chemical composition(%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₃
(+)극	0-25	31.20	92.34	5.3	1.46	0.40	0.26
	25-50	7.59	93.44	3.53	0.96	0.59	0.52
	50-100	6.33	92.81	4.21	1.15	0.73	0.61
	소 계	45.12	-	-	-	-	-
(-)극	0-25	9.30	92.62	2.65	0.72	1.69	1.26
	25-50	6.40	94.15	3.30	0.93	0.91	0.73
	50-100	5.01	93.10	4.05	1.13	0.66	0.49
	소 계	20.71	-	-	-	-	-
합 계		65.83	-	-	-	-	-

(tailing)에서 금 및 고순도 실리카와 같은 유가자원을 회수하기 위한 분리특성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 광미로부터 고비중의 금을 선별하기 위해 고비중액을 이용한 비중선별을 실시한 결과 중액의 비중이 2.72일 때 금의 함량이 최고 5.58 g/ton인 정광이 약 3 wt.%가 회수되었다. 하지만 전 구간에서 산출된 금의 함량 및 회수율이 높지 않아 비중선별에 의한 금의 선별 가능성은 낮은 것으로 나타났다.

2. 광미로부터 고품위 실리카를 회수하기 위해 하이드로싸이클론, 부유선별, 마찰대전형 정전선별 실험을 실시한 결과, 점토광물 입자는 미립자(fine particle)에 그리고 실리카 입자는 조립자(coarse particle)에 주로 편재되어 있었기 때문에, 하이드로싸이클론을 이용한 미분체거공정을 통해 함량이 90%인 실리카 산물을 약 70 wt.% 회수 할 수 있었다.

3. 양이온 포수제인 dodecylamine을 사용한 부유선별에서는 실리카 억제제 첨가에 따른 분리효과는 미미하였으나 recleaning을 통해 실리카 함량이 약 93%까지 증가되었다. PVC 마찰재질을 이용하여 정전선별한 결과, (-) 전장판에서 약 93%의 실리카가 산출되었다. 그리고 부유선별 recleaning으로 분리된 tailing산물로 정전선별법을 실시한 결과 약 94%의 실리카를 회수 할 수 있었다.

4. 실리카는 품위가 91% 이상일때부터 산업용으로 사용이 가능한 것으로 알려져 있다.⁵⁾ 그러나 경제성을 확

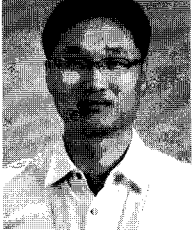
보하기 위해서는 실리카 품위가 95% 이상, 실수율이 50% 이상이 되어야 할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 싸이클론 underflow의 분쇄 산물을 이용하여 정전선별을 실시하여 품위가 94%인 실리카를 회수 할 수 있었으나 더 높은 품위를 얻기 위해서는 정전선별을 하기전에 Fe₂O₃와 SO₃를 제거하기 위한 추가공정의 연구가 필요할 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 한국광해관리공단에서 주관하는 광해방지 기술개발사업인 “광물찌꺼기 재활용기술 개발” 과제의 일환으로 연구가 수행되었다.

참고문헌

1. 한국광해관리공단, 2009: 광해 통계 연보.
2. Herbert H. Kellogg *et al.*, 1945: *Flotation of Kaolinite for Removal of Quartz*, American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Technical Publication No. 173.
3. Fomenko, V.S., 1972: *Emission properties of materials*, NTIS, US Department of Commerce report, No. JPRS. 56579.
4. 김도균, 2003: *마찰대전을 이용한 혼합플라스틱의 정전선별에 관한 연구*, 서울대학교 공학석사학위논문.
5. 유효신, 2003: *해사로부터 유용광물 회수 및 용도개발*, pp.166-168.



吳 元

- 2001년 해군사관학교 전기공학과 졸업
- 현재 서울대학교 대학원 석사과정중

趙 熙 燦

- 현재 서울대학교 에너지시스템공학부 교수
- 당 학회지 제10권 3호 참조



李 珍 水

- 1992년 이화여자대학교 과학교육과 교육학석사
- 1997년 서울대학교 자원공학과 공학박사
- 현재 한국광해관리공단 광해기술연구소 연구개발팀 파트장

學會誌 投稿 安內

種 類	內 容
論 說	提案, 意見, 批判, 時評
展望, 解説	現況과 將來의 견해, 研究 技術의 綜合解説, Review
技 術 報 告	實際의인 試驗, 調查의 報告
技術, 行政情報	價値있는 技術, 行政情報를 간결히 解説하고, comment를 붙인다.
見 聞 記	國際會義의 報告, 國內外的 研究 幾關의 見學記 등
書 評	
談 話 室	會員相互의 情報交換, 會員 自由스러운 말, 隨霜 등
Group 紹介	企業, 研究幾關, 大學 등의 紹介
研究論文	Original 研究論文으로 本 學會의 會誌에 掲載하는 것이 適當하다고 보여지는 것

수시로 원고를 접수하오니 많은 투고를 바랍니다.