

## 金鑛山廢鑛尾로부터 有價資源 回收에 관한 研究

\*蔡永培 · 鄭洙福\* · 尹平亂\*

한국자원연구소, \*전북대학교

### A Study on the Recovery of Valuable Resources from Abandoned Gold Mine Tailings

\*Young-Bae Chae, Soo-Bok Jeong\* and Pyoung-Ran Yoon\*

Korea Institute of Geol. Min. & Materials, \*Chunbuk Univ. Resources Eng.

#### 요 약

오래 전에 가행되었던 일부 금 광산에서 폐기된 광미에는 미회수된 금 및 실리카 등의 유가광물을 함유하고 있는 것으로 알려져 있으므로, 이들의 유가자원을 회수하기 위한 분리특성을 검토하였다. 처리공정은 가능한 경제성 확보를 위하여 분급, 자력선별 및 비중선별 등 단순한 분리 공정을 적용하였으며, 본 공정에 의하여 분리 회수된 유가자원으로는 금 농축정광 0.87 wt% [금 함유량 307.7 g/ton(0.60 wt%), 97.7 g/ton(0.27 wt%)]와, SiO<sub>2</sub> 품위가 96.40 wt%인 고품위 실리카를 60.65 wt% 회수할 수 있었다. 본 연구의 결과는 광산 폐기물 중에서 유가자원을 회수하거나 광산폐기물의 무해화 및 감량화를 목적으로 하는 공정수립에 참고자료가 될 수 있을 것이다.

주제어 금, 실리카, 광미, 광산폐기물, 유가자원 회수

#### ABSTRACT

This study was carried out to recover gold and silica from abandoned gold mine tailings with about 4.5 g/tonAu and 84.88 wt% SiO<sub>2</sub>. The beneficiation processes including crushing, screening, magnetic and gravity (humprey spiral, shaking table) separation were employed. Results were feasible to recover the gold concentrates (307.7 g/ton Au, 0.60 wt%, 97.7 g/ton Au : 0.27 wt%, 15.3 g/ton Au, 5.23 wt%, 27.2 g/ton Au : 2.42 wt%) and silica (96.40 wt% SiO<sub>2</sub>, yield 60.65 wt%).

Key words: gold, silica, taling, mine tailings, recovery of valuable resource

#### 1. 서 론

우리 나라에는 '97년 현재, 금광의 등록 광구수는 1,929개소, 가행되는 광산은 221개소 및 생산량은 14톤으로 보고되고 있으나, 대부분의 광산이 매장품위저하 현상이 심화되어 생산을 중단하는 광산이 계속 증가하고 있으며, 단지 일부의 광산에서만 간헐적으로 조업하고는 있는 실정이다.<sup>1)</sup>

금(金)은 원광석 1톤당 그램(g)수 단위의 적은 양이 존재하고 있으므로, 금과 조암광물과의 엄밀한 분리·회수에 의한 경제성 확보가 어렵기 때문에, 오래 전부터 금광의 개발에서는 저가이면서 활용도가 낮은 규석 등의 조암광물을 활용하는 데에는 크게 관심을 기울이지 않았다. 따라서, 현재 가행되고 있는 광산은 물론 폐광된 대부분의 광산에서는 많은 양의 폐광미가 발생되고 있다.

금 광산의 광미에는 각종의 금속광물과 실리카 및 점토광물 등이 혼재되어 있는데, 이들을 재처리하지 않고 오랫동안 야적 혹은 그대로 방치되어 있는 경우에는 금

\* 1998년 10월 15일 접수, 1999년 5월 14일 수리

\* E-mail: cyb@rock25t.kigam.re.kr

**Table 1.** Chemical composition analysis of gold mine tailings

Chemical components (wt%)									
SiO <sub>2</sub> 84.88	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5.86	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2.42	CaO 0.90	MgO 1.44	K <sub>2</sub> O 1.46	Na <sub>2</sub> O 0.24	TiO <sub>2</sub> 0.12		
As 0.09	Cd 29 ppm	Pb 373 ppm	Zn 796 ppm	Cu 39 ppm	Fe 1.74	Cr 291 ppm	Mn 299 ppm	Ni 180 ppm	Au 4.5 ppm

속광물들은 산화되거나 기타의 착화합물을 형성하여, 우수(雨水)등에 의한 지표수 및 지하수 오염원으로 작용될 수 있으며, 주변 자연환경을 파괴하는 원인물질이 되고 있기도 하다.

본 연구에서는 이러한 금 광산의 광미를 다시 선광처리하여 금속 및 비금속광물 등의 유가광물을 회수하는 데에 따른 제반특성을 고찰하고자 하였다.

광산폐기물의 재활용은 부존자원의 효과적인 이용, 잠재된 환경저해물질의 저감화 효과는 물론 근본적으로 무해화 하는 유일한 방안이 될 것으로 판단된다.

## 2. 시료의 특성

본 실험에서 사용한 시료는 오래 전에 가행되었으나, 현재는 휴광상태인 충남 청양지역 금 광산의 선광장 광미를 대상으로 하였다. 폐광미는 선광장으로 사용된 주변의 계곡에 약 30~40만m<sup>3</sup> 정도가 매립되어져 있는 것으로 추산된다. 가능한 평균품위의 시료채취를 위하여 매립장을 5등분하여 표토를 제거한 후 약 1.5m의 깊이에서 각각의 시료를 채취, 혼합하여 시료로 사용하였다.

Table 1은 폐광미의 화학성분조성을 나타낸 것으로, SiO<sub>2</sub>의 함유량이 84.88 wt%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함유량이 5.86 wt%로서, 본 금 광산은 석영맥에 금이 함유된 광상이었던 것으로 보여지는데, As, Cd, Cu, Zn, Pb와 같은 중금속이 상당량 함유되어 있으므로, 주변토양이나 환경의 오염원으로 작용될 수 있을 것으로 보여진다.<sup>3)</sup> 또한 폐광미에 함유된 금은 4.5 g/ton이었으며, 은의 함유량은 거의 나타나지 않았다.

시료의 구성광물을 조사하기 위하여 XRD 분석, 현미경 감정 등을 실시하였는데, 비금속광물은 quartz를 주 구성광물로 하고, feldspar, calcite, sericite, muscovite, chlorite, biotite등을 미량 함유하고 있었으며, 금속광물은 arsenopyrite, sphalerite, pyrite등의 주 구성광물과 미량의 galena, pyrrotite, limonite, chalcopyrite등이 함유되어 있음을 확인할 수 있었다.

본 시료는 과거 광산조업시 원광을 파·분쇄하여 금

**Table 2.** Results of sieve analysis on gold mine tailings

Particle size (mesh)	Weight percent (wt%)	Cum. weight percent (wt%)	SiO <sub>2</sub> content (wt%)	Au (ppm)
+ 35	7.37	7.37	88.52	5.0
-35 + 48	16.30	23.67	88.04	10.3
-48 + 65	20.08	43.75	87.64	7.7
-65 + 100	14.61	58.36	87.20	2.3
-100 + 150	17.23	75.79	86.34	1.6
-150 + 200	8.02	83.61	85.42	1.4
-200 + 250	1.79	85.40	83.88	1.0
-250 + 325	1.65	87.05	82.80	1.3
-325	12.95	100.00	70.14	1.4
Heads	100.00	-	84.88	4.5

을 선광처리하는 과정에서 선광광미로서 입자크기는 대부분이 1mm 이하였다. 입도분포에 따른 시료의 특성을 조사하기 위하여 체가름에 의하여 입자크기별로 분리하고 각각의 분리된 산물에 대하여 화학성분조성을 조사하였다.

Table 2에서와 같이 폐광미의 입도 분포는 65메쉬 이상 산물이 43.75 wt%, 65메쉬 이하 200메쉬 이상 산물이 39.86 wt%, 200메쉬 이하 산물이 16.39 wt%의 분포를 보였다. SiO<sub>2</sub>의 품위는 35메쉬 이상의 조립산물은 88.52 wt%로 비교적 높은 품위를 나타내었으나 325 메쉬 이하의 미립산물은 70.14 wt%를 나타내므로 고품위 실리카를 회수하여 사용하고자 할 때 간단히 미립산물을 제거하여도 어느 정도의 SiO<sub>2</sub>의 품위향상 효과가 있을 것으로 보여진다.

또한 입도분포에 따른 금의 함유량은 35메쉬 보다 굵은 입자에서 5.0 g/ton, 35메쉬 이하 48메쉬 이상에서 10.3 g/ton, 48메쉬 이하 65메쉬 이상에서 7.7 g/ton으로, 65메쉬이상의 조립산물에서 높은 함유량을 보였으며, 시료의 입자크기가 적어질수록 금의 함유량도 감소되어 200메쉬 이하 250메쉬 이상의 입도범위에서는 1.0 g/ton, 325메쉬이하의 입도범위에서는 1.4 g/ton을 나타내었다. 이러한 결과는 선광공정에서 굵은 입자로 존재하는 함유광물이 효과적으로 회수되지 않았으나, 여타의

금속광물중에 함유되어 있기 때문으로 사료된다.

### 3. 실험방법 및 장치

본 연구의 대상시료인 폐광미는 Table 2의 입도분포별 특성에서 살펴본 바와 같이, 조립산물에는 금의 함유량과 SiO<sub>2</sub>의 품위가 높지만, 미립산물은 SiO<sub>2</sub>의 품위와 금의 함유량이 낮은 특성을 나타내므로, 이러한 특성을 이용하면 미립산물의 분리·제거만으로도, 어느 정도까지는 SiO<sub>2</sub> 및 금의 품위 향상이 가능할 것으로 보여진다.

Table 2에서와 같이 금의 함유는 65멧쉬 이상의 입도에 집중되어 분포되지만, 65멧쉬 이하 325멧쉬이상 산물의 경우 SiO<sub>2</sub>품위가 80 wt% 이상으로 비교적 실리

카 품위가 높기 때문에 325멧쉬를 기준으로 미립산물과 조립산물을 분리하여 325멧쉬 이상 산물에 대하여 자력선별, 비중선별등의 선별공정을 거쳐 금 농축 정광 및 고품위 실리카를 분리·회수하고자 하였다.

본 연구에서 대상지역의 폐광미는 매립지의 지리적 여건상 작업용수의 보급이 어렵고 폐수발생사 문제점등을 고려하여 폐수를 배출하지 않고 용수를 재활용 할 수 있는 공정을 선정·적용하였다.<sup>4)</sup>

Fig. 1은 실험공정도로서 매립되어져 있는 폐광미는 수분이 5~10 wt% 정도 함유되어 있고, 매립후 점토류 등의 혼입으로 덩어리진 산물을 포함하고 있으므로 회전식 건조기를 사용하여 건조시키고, 햄머밀(hammer mill)을 사용하여 덩어리진 산물을 해체한 후, 공기분급기(ATP 50 Model, Alpine Co. Germany)를 사용하여

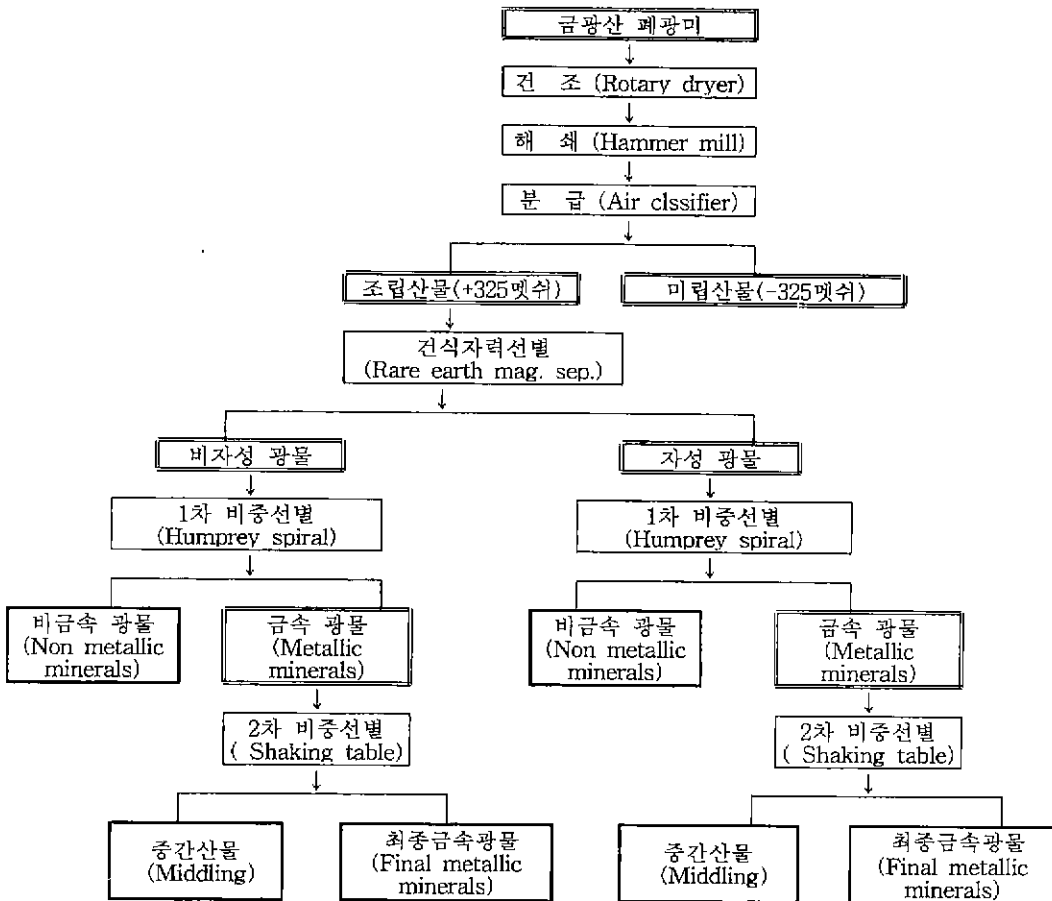


Fig. 1. Flowsheet of recovery process for valuable materials from gold mine tailings.

325멧쉬 기준으로 조립산물과 미립산물을 분리하였다.

325멧쉬 이상의 조립산물은 건식 자력선별을 통하여 비자성산물과 자성산물로 분리하였으며, 이때 자력선별기는 희트류(Nd-Fe-B) 합금으로 제조된 10,000가우스의 자속밀도를 갖는 영구자석이 장착된 코 자력선별기(International process system Co, USA)를 사용하였다.

자력선별에 의하여 분리된 비자성 산물에 함유되어 있는 금속광물과 비금속광물을 비중차이에 의하여 선별·분리하기 위하여 스파이럴 비중선별기(LG type, Mineral deposit Co. Australia)를 이용하여 1차 분리하고, 분리된 금속광물은 요동테이블(Wilfley No. 13, Humprey Co, USA)을 사용하여 2차 비중선별을 실시하였다. 1차 비중선별에 의하여 분리된 경광물인 비금속광물은 SiO<sub>2</sub>의 품위가 높으므로 고품위 실리카로 사용하고자 하였다.

자성산물의 경우에도 비자성 산물과 동일하게 1, 2차 비중선별을 실시하여 금을 함유한 중광물인 금속광물을 엄밀히 분리하여 회수하고자 하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1. 분급특성

폐광미는 Table 2에서와 같이 입도분포에 따라 조립산물의 SiO<sub>2</sub> 품위 및 금 함유량이 높고, 미립산물은 SiO<sub>2</sub> 품위 및 금 함유량 낮은 특성을 나타내었으므로, 325멧쉬 이하의 미립산물을 1차로 분리·제거하여 SiO<sub>2</sub> 및 금의 품위를 향상시키고자 하였다. 또한 미립산물이 제거된 폐광미는 자력선별과 비중선별공정에서의 작업성 및 분리효율이 향상될 것으로 보여진다.

Table 3은 이러한 1차 분급실험을 실시하였을 때, 분

리된 조립산물과 미립산물의 특성을 나타낸 것으로, 조립산물의 회수율은 89.99 wt%, SiO<sub>2</sub>의 품위는 86.30 wt%로 폐광미에 비하여 SiO<sub>2</sub> 품위가 1.42 wt%가 향상되었으며, 금의 함유량은 4.9 g/ton으로 폐광미 4.5 g/ton 보다 약간 높아짐을 알 수 있었다. 또한 미립산물로 10.01 wt%가 분리되었는데 이 산물의 SiO<sub>2</sub>의 품위는 72.08 wt%, 금 함유량은 1.3 g/ton으로 폐광미에 비하여 SiO<sub>2</sub>의 품위 및 금의 함유량이 매우 낮게 나타났다.

이러한 실험결과로 볼 때 폐광미에 대하여 단순히 분립 및 분급 조작만으로도 SiO<sub>2</sub> 및 금의 품위향상이 가능함을 알 수 있었다.

### 4.2. 자력선별특성

분급공정에 의하여 분리·회수된 325멧쉬 이상의 조립산물을 자력선별 하여 자성산물을 분리·제거함으로써 SiO<sub>2</sub>품위를 향상시키고자 하였다. 이때 사용한 자력선별기의 자속밀도는 10,000가우스의 드럼형의 건식 자력선별기로 직경이 100 mm. 폭이 300 mm인 자석을 200 r.p.m.의 속도로 회전시키면서 자석위에 거치된 벨트위에 조립산물을 단일층(mono layer)으로 급광시키면서 비자성산물과 자성산물을 분리하였다.

Table 4는 자력선별 실험을 통하여 분리된 자성산물과 비자성산물의 특성을 나타낸 것으로, 비자성산물은 원광대비 66.48 wt%가 분리·회수되었으며, 이 산물은 SiO<sub>2</sub>품위가 95.49 wt%로 조립산물의 실리카 품위 86.30 wt%보다 10.6 wt%가 향상됨을 나타내었다.

자성산물로는 원광대비 23.51 wt%가 분리되었으며 이 산물의 SiO<sub>2</sub>품위는 60.32 wt%로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>등의 기타 성분들이 상당량 자성산물로 분리됨을 알 수 있었다.

Table 3. Chemical composition of air separation products

Product	wt%	Chemical components (wt%)											Au (g/ton)
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Cu	Zn	Pb	
Coarse particles	89.99	86.30	4.58	2.29	0.84	1.40	1.36	0.24	0.08	21 ppm	947 ppm	363 ppm	4.9
Fine particles	10.01	72.08	17.37	3.61	1.46	1.84	2.37	0.26	0.51	24 ppm	1011 ppm	460 ppm	1.3
Heads	100.00	84.88	5.86	2.42	90	1.44	1.46	0.24	0.12	22 ppm	953 ppm	373 ppm	4.5

Table 4. Chemical composition of magnetic separation products

Product	wt%	Chemical components (wt%)											Au (g/ton)
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Cu	Zn	Pb	
Non-mag.	73.87	95.49	2.24	0.81	0.18	0.22	0.34	0.12	0.02	1.5 ppm	63 ppm	247 ppm	5.0
Mag.	26.13	60.32	12.65	6.47	2.71	4.74	4.24	0.58	0.25	80 ppm	3400 ppm	691 ppm	4.6
Coarse par.	100.00	86.30	4.58	2.29	0.84	1.40	1.36	0.24	0.08	22 ppm	947 ppm	363 ppm	4.9



산물에서 금 함유량 307.7 g/ton의 정광 0.60 wt%와 자성산물에서 금 함유량 97.7 g/ton의 정광 0.27 wt%가 분리·회수되었다.

- 본 연구에서는 가능한 경제성 확보를 위하여 분급, 자력선별 및 비중선별 등의 단순공정만을 적용하였는 바, 재활용 가능한 금속자원의 회수는 물론 비교적 고품위의 실리카를 회수할 수 있었으므로, 추가적인 연구를 통하여 경제성이 있는 공정의 확보에 따라 산업화가 가능할 것으로 판단되었다.

### 참고문헌

- 산업자원부 : '97 광산물수급현황', 응진문화사 (1998).
- 민정식, 정영욱, 이현주, 이동남 : '광산지역 광해조사 및 대책연구', 한국자원연구소 보고서(KR-97(C)-31), p. 38-91 (1997).
- 이부성, 전서령, 나춘기, 정제일 : '동진 금·은·동광산

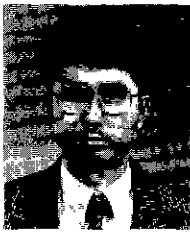
주변에 방치된 폐석의 환경적 영향', 대한자원환경지질학회지, vol. 29, p. 45-55 (1996).

- Taggart, A. F. Handbook of mineral dressing, section 11 (1950).
- 富田賢二 : 工業原料鑛物 選鑛便覽, 共立出版株式会社, pp. 89-92 (1966)
- 일본산업기술진흥협회, '자원고도리싸이클 이용기술', 무기계분야, p.209-234 (1996).



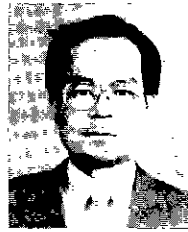
정수복

- 1987년 전북대학교 자원공학과 공학사
- 1996년 전북대학교 자원공학과 공학석사
- 1998년 전북대학교 자원공학과 박사수료
- 현재 한국자원연구소 활용연구부 근무



채영배

- 1978년 건국대학교 화학공학과 공학사
- 1982년 건국대학교 화학공학과 공학석사
- 1987년 건국대학교 화학공학과 공학박사
- 현재 한국자원연구소 활용연구부 근무



윤평란

- 1969년 전북대학교 광산학과 공학사
- 1973년 전북대학교 자원공학과 공학석사
- 1986년 전남대학교 자원공학과 공학박사
- 현재 전북대학교 자원공학과 교수