

필리핀 만카얀 지역 금·은 광석의 비중선별 특성

Gravity Separation Characteristic for the Gold·Silver Ores on the Philippine Mankayan District

김 형 석(Hyung-Seok Kim) · 채 수 천(Soo-Chun Chae) · 김 정 윤(Jeong-Yun Kim) ·
손 정 수(Jeong-Soo Sohn) · 김 상 배(Sang-Bae Kim)*

한국지질자원연구원
(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

요약 : 필리핀 만카얀 지역의 빅토리아 광산에서 입수한 금·은 광석으로부터 금·은 성분의 회수율을 높이기 위해 지질 및 광물학적 특성, 금과 은의 수반상태, 파·분쇄에 따른 단체 분리도, 체 분리에 의한 분립 특성과 요동테이블에 의한 비중 선별 특성을 연구하였다. 필리핀산 금·은 광석은 황철석, 섬아연석, 방연석 등의 황화광물과 석영 및 점토 등의 맥석 광물로 구성되었다. 금·은 성분은 황철석, 섬아연석, 방연석 등의 황화광물에 주로 수반되어 있었다. 황화광물 결정의 크기는 100 μm 에서 1 μm 이하까지 광범위한 입도분포를 갖기 때문에 금·은이 수반된 황화광물의 단체분리도를 높이기 위해서는 금·은 광석을 최소한 100 μm 이하로 매우 작게 분쇄해야 하는 것으로 나타났다. 금·은 광석을 Jaw crusher \rightarrow cone crusher \rightarrow rod mill 등으로 단계적으로 파·분쇄하여 입도(d_{90})를 100 μm 이하로 조절하면 단체분리도가 92% 정도까지 높아졌다. 금·은 성분이 함유된 황화광물의 결정이 100 μm 이하의 입단에서 고르게 분포되어 있기 때문에 체질에 의한 분립 방법으로는 금·은을 수반한 황화광물을 선택적으로 분리하여 회수할 수 없었다. 파·분쇄한 금·은 광석을 체로 분립한 후 요동테이블로 비중 선별한 결과, 정광에는 황화광물이 주로 농축되어 금과 은의 품위가 각각 40 ppm 및 140 ppm 까지 높아졌다. 이때 정광의 금 실수율은 거의 100%에 이르지만, 은 실수율은 50% 수준에 불과하였다.

주요어 : 금·은광석, 황화광물, 비중선별, 단체분리, 요동테이블

ABSTRACT: To enhance the grade and recovery rate of the gold/silver ores which yield at Philippine Mankayan mine, we studied the characteristics which are the geologic and mineralogical features of gold and silver ore, the liberation by crushing and grinding, the separation by sieving and shaking table. Gold/silver ore is composed of the sulfide minerals like pyrite, sphalerite, galena; and the gangue minerals which is quartz, clay. Gold/silver element are mainly contained in a sulfide minerals like pyrite, sphalerite and galena. To increase the liberation rate of sulfide minerals containing gold/silver element, the gold/silver ore has to be grounded under 100 μm very finely because the crystal size of sulfide minerals is distributed from 1 μm to 100 μm . The liberation rate of gold/silver ore increases to 92% when the particle size (d_{90}) of ore is grounded below 100 μm by jaw crusher \rightarrow cone crusher \rightarrow rod mill by steps. The grade and recovery of sulfide minerals could not be enhanced by sieving separation because those crystal size is distributed homogeneously below 100 μm . But, when we separated the sieved ore using shaking table, the gold and silver grade increased to 40 ppm and 140 ppm, respectively. Then the recovery rate of gold reach almost 100% but that of silver is no more that 50%.

Key words : gold and silver ore, sulfide mineral, gravity separation, liberation, shaking table

*교신저자: sbkim@kigam.re.kr

서 론

우리나라에는 2,000여 개의 금 광산이 탐광 및 개발된 적이 있으며, 이 중에서 남한에는 사금광산 38개를 포함하여 총 1,841개의 금 광산이 북한에는 347개의 금 광산이 분포하는 금광상 보유 국가이다(한국지질자원연구원, 2003).

금 광상의 성인은 다음 4가지로 분류할 수 있다. 첫째는 천열수에 의해 형성된 천열수 금광상, 둘째는 열극을 증진한 관입암체의 광화용액에 의한 열수광상, 셋째는 접촉교대에 의한 스카른 광상, 그리고 넷째는 풍화잔류로 인한 2차적 광상인 사금광상 등이다.

우리나라에 분포하는 금광상의 약 97%는 천열수 금광, 열극을 증진한 열수광상 및 접촉교대에 의한 스카른 광상에 속하고 나머지 약 3% 정도가 사금광상이다.

현재 확인된 국내 금·은의 확정 및 추정광량이 각각 551만톤(평균 품위: 7.4 ppm) 및 712만톤(평균 품위: 225 ppm)인 것으로 볼 때, 대략 금 40톤, 은은 1,530톤으로 내수 기준으로 금·은 1~2년분, 은은 약 4~5년분에 불과하며, 2002년도에 생산실적을 보고한 광산 수는 금의 경우, 모두 13개소 은의 경우, 4개소로 과거에 비해 매우 적은 광산이 현재 생산하고 있다(한국지질자원연구원, 2003). 국내에서 얻어지는 대부분의 금·은은 고려아연의 연체련 과정과 LS니코의 동체련 과정에서 제련 부산물로 얻어지는 금·은으로 충당하고 있는 실정이다. 그러므로 장기적으로 볼 때 해외 금·은 광상의 해외자원의 확보 및 개발이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 해외 금·은 자원의 확보 및 선광기술을 개발할 목적으로 필리핀 만카얀 지역의 천열수 광상인 빅토리아 금·은 광석을 대상으로 구성 광물 종류 및 금·은의 수반상태, 금·은의 회수율을 높이기 위한 파·분쇄에 따른 단체 분리 특성 및 요동테이블에 의한 비중 선별 특성을 연구하였다.

지 질

본 연구 대상인 필리핀 만카얀(Mankayan) 광상 주변 암석군으로는 Lepanto Metavolcanics, Bagon Intrusive Complexes, Volcaniclastics 및 Dacite Complexes 등이 분포하고 있다(그림 1). Lepanto

Metavolcanics는 백악기 내지 팔레오진(Paleogene)의 Submarine volcanic pile로 andesitic-basaltic flows와 pillow lava (spilites와 cherts가 협재된)로 구성되며, Diabase, andesites 및 dacites 등의 세 맥에 의해 관입되어 있다. 부분적으로 greenschist facies에 해당되는 비교적 약한 변성작용을 받았다. Miocene 전기에 Lepanto Metavolcanics를 관입한 Bagon Intrusive Complex는 대단위 Philippine 단층으로부터 유래된 Abra River 단층을 따라 분포하고 있으며, 구성암석은 주로 토날라이트(tennantite)이지만 gabbroic 내지 dioritic 성분도 포함하고 있다. Volcaniclastic는 하부의 Apaoan Sequence와 부정합 관계인 상부의 Balili Sequence로 구성된다. 전자의 경우, 적색 및 녹색 사암, 혈암 및 화산성쇄설암으로 구성되며, 후자의 경우, 역암(안산암 암편과 매트릭스를 포함), 사암 그리고 혈암, 일부 andesite-dacite flow, andesitic breccias, tuffs 및 석회암 등으로 구성된다. Dacite Complex는 Imbanguila dacites와 Bato dacite로 구성되며, 구성암석은 dacitic breccias, lapilli and lithic tuffs 등의 화산성쇄설암로, 이들은 dacitic dikes와 domes에 의해 관입되어 있다(Claveria, 2001).

광 상

본 연구 대상인 필리핀 만카얀 광상은 이들 분류 중 천열수 광상에 속하며, 주요 구조선은 광상 주변의 북서방향의 Abra River 단층과 Lepanto 단층 그리고 북측 단층 등으로 구성되며, 이들 중 Lepanto 단층 주위로 광상들이 잘 발달되어 있다(그림 1a). 본 지역의 광상은 크게 반암동광상과 천열수광상을 형성하고 있는데, 전자의 경우에는 FSE (Far Southeast) 반암동금 광상 그리고 후자의 경우에는 Lepanto 에나자이트 광상과 빅토리아 광상으로 구분되며, 에나자이트 광상의 경우에는 유화작용을 심하게 받은 천열수 금광이며, 빅토리아 광상은 비교적 적은 유화작용을 받은 천열수 금광이다(그림 1b; Sajona *et al.*, 2002). 각 광상의 모양은 학자 간에 다소 차이가 있다. 즉 Claveria (2001)는 Imbanguila dacites가 Lepanto, Victoria (천열수 광상) 및 FSE 광화작용의 모양이라 한 반면, Sajona 등(2002)은 반암동 광상의 모양이 Bagon Intrusive Complex에 속하는 석영-섬록반암이며, 천열수 광상의 모양은 심한

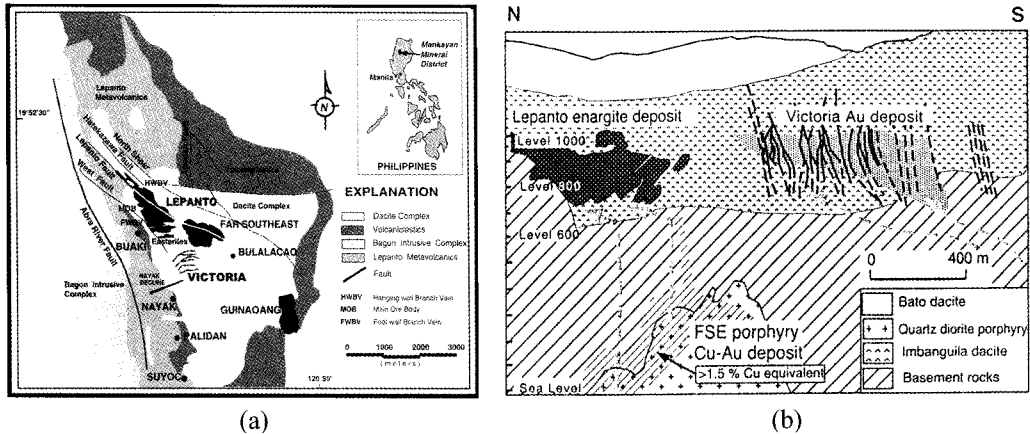


Fig. 1. (a) Geological map of the Mankayan mineral district, showing the location of the different porphyry copper deposits and prospects (Far Southeast, Guinaoang, Buaki, Palidan and Bulalacao) and epithermal copper and gold deposits and prospects (Lepanto, Victoria, Nayak and Suyoc) (Claveria, 2001). (b) Simplified N-S geologic cross-section of the Lepanto mining area showing the proposed regional hydrothermal fluid flow (Sajona *et al.*, 2002).

납석화를 받은 dacitic 암석이라 주장하였다. 반암동 광상의 광체는 해수준면을 기준으로 상부 400 m 레벨까지, 그리고 천열수 광상들은 약 700~1000 m인 범위에 분포하고 있다. 그밖에 반암동 금·은 광상은 본 지역의 Palidan, Buaki, Guinaoang에 그리고 열수광상은 Nayak, Suyoc 등에서 소규모로 배태되어 있다(그림 1a; Sajona *et al.*, 2002).

Lepanto 에나자이트 광상은 높은 유화 동-금 광상으로 필리핀의 북 Luzon 지역의 Bauo의 북동쪽으로 70 km 지점에 위치한 만카이 지방에 위치하고 있다(Mancano and Campbell, 1995). 만카이 지방의 주요 구조적 특징은 Luzon Cenral Cordillera의 필리핀 단층의 주요 branch인 북서-남동 Abra River 단층이다(Ringenbach *et al.*, 1990). Lepanto 단층을 포함한 평행한 북서측으로 향하는 일련의 정단층들은 Abra River 단층과 더불어 만카이 지방과 수반된다. Lepanto 단층은 폭 10~50 m, 높이 100 m 길이 2 km인 구조적인 파쇄대 내의 에나자이트-금 광석을 함유하고 있다(Garcia, 1991).

각 광상별 주요 광석광물은 다음과 같다. 반암동 광상의 경우, 황동석, 황철석, 반동석, tennantite, 자연금 및 적철석 등이며, Lepanto 에나자이트 광상의 경우에는 에나자이트, 루조나이트(luzonite), tennantite, tetrahedrite, 황동석, 코벨라이트(covellite), 자연금(은), 엘렉트럼 및 tellurides

가, 그리고 빅토리아 광상의 경우에는 섬아연석, 황동석, 방연석, 적철석, tetrahedrite, 반동석, chalcocite, 자연금, 엘렉트럼 및 은 등이다(Claveria, 2001).

실험방법

특성평가

필리핀 Lepanto 금·은 광상으로부터 채취된 원광에 대한 광물화학적 분석을 위하여 연마편을 통한 편광, 반사 및 실체 현미경을 이용하였다. 다양한 공정 및 단계를 거친 시료에 함유된 광물의 동정은 흑연 모노크로메터(monochrometer)가 부착된 Phillip사의 X-선 분말 회절기(Model명 : X'pert MPD powder diffractometer ; Cu-K α tube ; accelerate voltage : 40 kV, current : 30 mA)를 사용하였다. 또한 각 상들에 대한 분포양상 및 성분분석을 위해, SEM/EDS (JSM-5300/Oxford Link ISIS EDS)를 이용하였다. 이때의 가속전압은 25 kV, 빔의 크기는 10 μ m였다.

분리 및 선별

분리·선별을 위한 원광의 파·분쇄는 먼저 조크러셔(jaw crusher)로 1차 파쇄하여 20 mm 이하로 입도를 조절한 후, 콘 크러셔(cone crusher)

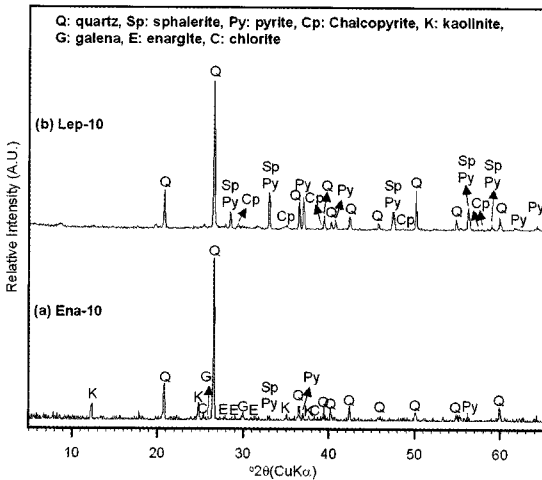


Fig. 2. XRD pattern of host rocks of Enargite (a) and Victoria ore body (b).

(Marcy Gy-Roll Crusher, Svedala Industries, U.S.A)로 2차 파쇄하여 3 mm 이하의 크기로 조절하였다. 그리고 파쇄 산물은 다시 비중선별에서 선별효율을 높이기 위해 실험용 로드 밀(rod mill)로 분쇄시간을 조절하여 일정한 입도의 선별용 시료를 조제하였다. 이때 원광의 분쇄에 사용한 로드 밀은 직경이 200 mm이고, 용적이 3,600 mL인 pot에 steel rod를 장입하여 사용하였다. 로드 밀에 의한 대상 시료의 분쇄 실험 조건은 예비 분쇄 실험을 통해 분쇄가 가장 효과적으로 이루어지는 다음과 같은 조건에서 실험하였다. 즉, rod는 7.6 kg (40 v/v%), 시료는 500 g을 pot에 장입하고 광액농도를 50 wt%로 조절한 후 회전수를 80 rpm (입계 회전수: 91 rpm)으로 일정하게 유지하면서 각각 10, 15, 20, 25, 30분 동안 습식으로 분쇄하였다. 그러므로 체로 분립한 후 각 입단에서의 존재하는 광물의 종류를 규명하기 위해 X-선회절분석을 실시하였다. 전체시료 및 입단별로 분립한 시료를 요동테이블(shaking table)을 사용하여 비중선별한 후 선별된 산물의 특성을 분석하였다.

결과 및 고찰

원광의 특성

금·은 원광 시료는 현재 금·은 광석을 채광 및 선광하는 필리핀 회사 자체에서 보내준 에나

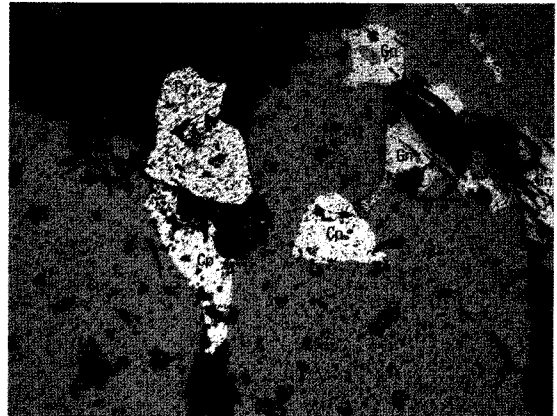


Fig. 3. Microphotograph of Victoria ore body (Py: pyrite, Gn: galena, Cp: chalcopyrite, Sp: sphalerite).

자이트 원광(Lepanto enargite deposit)과 빅토리아 원광(Victoria Au deposit)을 사용하였다. 특히 빅토리아 원광의 경우에는 심한 변질작용을 받아, 매우 연약한 상태로 쉽게 분쇄되는 특성을 보였다.

원광의 XRD 분석 결과, 에나자이트 원광인 경우 광석광물로, 황철석(pyrite), 섬아연석(sphalerite), 황동석(chalcopyrite), 방연석(galena) 및 에나자이트(enargite)가 관찰되며, 맥석광물로 석영(quartz) 및 카올리나이트(kaolinite)가 관찰되었다(그림 2a). 빅토리아 원광의 경우, 광석광물로 황철석, 섬아연석, 황동석 및 방연석이, 그리고 맥석광물로 석영이 관찰되다(그림 2b).

현미경 관찰결과, 에나자이트 광석은 반상조직이 발달하고 있으며, 반상을 이루는 부분은 높은 복굴절률을 보이는 납석화가, 그리고 기질부는 낮은 복굴절률을 보이는 카올리나이트화 및 녹리석화 작용을 받은 것으로 확인되었고, 광석광물로 황철석과 섬아연석 등이 관찰되었다. 빅토리아 원광의 경우, 대체로 황철석이 산재한 양상을 보이며, 그밖에 황동석, 방연석 및 섬아연석이 소량 관찰되었다(그림 3).

에나자이트 원광의 화학조성은 표 1에 제시하였으며, 빅토리아 원광의 조성과는 금과 은의 함량을 제외하고는 거의 유사하였으나 에나자이트에 의한 비소(As)의 함량이 다소 높았다. 빅토리아 원광의 화학조성은 현미경에서 관찰된 바와 같이 방연석과 섬아연석에 의한 납(Pb)과 아연(Zn)의 함량이 다소 높았고, 비소는 상대적으로 적은 반면, 금과 은의 함량은 에나자이트 원광에

Table 1. Chemical composition of host rocks from Victoria Au/Ag deposit (Victoria) and Lepanto Enargite deposit (Enargite)

Samples	Chemical composition (%)								
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O
Victoria	62.40	0.37	14.30	5.45	1.15	0.41	0.96	1.64	0.47
Enargite	64.90	0.21	12.60	6.45	0.09	0.06	0.32	0.97	0.35

Samples	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Pb	Zn	Cu	LOI	As (ppm)	Au (ppm)	Ag (ppm)
Victoria	3.06	0.10	4.37	0.10	0.32	0.16	5.40	36	12	25
Enargite	0.74	0.07	6.05	0.02	0.02	0.13	9.60	64	0	0

서 검출되지 않은 것과는 대조적으로 각각 12 및 25 ppm의 함량을 보였다.

따라서 본 연구에서는 회수를 목적으로 하는 대상 성분이 금·은이기 때문에 에나자이트 원광은 배제하고 빅토리아 원광을 대상으로 연구를 수행하였다.

광석 내의 금·은의 존재 상태

금·은 성분은 광석에서 자연금이나 자연은 상태로 존재하기도 하지만, 일반적으로 금·은 성분은 다른 광물에 미량으로 수반되어 존재하는 것이 대부분이다. 그러므로 금·은 성분이 광석에서 존재하는 상태를 파악해야만 금·은을 회수할 수 있는 분리/선별 조건을 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 금·은을 회수하기 위한 분리/선별 연구를 진행하기에 앞서 광석에서 금·은이 존재하는 상태를 알아보려 하였다.

빅토리아 광석에 함유된 황화광물들과 맥석 광물들의 산출 상태를 확인하고자 박편을 제작하여 반사현미경으로 관찰한 결과를 그림 4에 나타내었다. 황화광물의 결정의 최대 크기는 100 μm 정도이고, 작게는 1 μm 이하의 아주 미세한 결정까지 폭넓게 분포하였다.

이와 같이 금·은 광석에 함유된 황화광물은 100 μm 이하의 매우 작은 입도로 존재하기 때문에 각 황화광물을 선별적으로 수선(hand picking)하기 곤란하다. 따라서 금·은 광석에 존재하는 황화광물인 황철석(5.01), 섬아연석(4.05), 방연석(7.4), 황동석(4.19), 에너자이트(4.45) 등의 비중이 맥석 광물인 석영(2.65) 및 카올린사이트(2.6), 녹니석(2.55~3.2)의 비중보다 높은 차이를 이용하여 이들을 분리하고자 하였다. 먼저 입도(d₉₀)

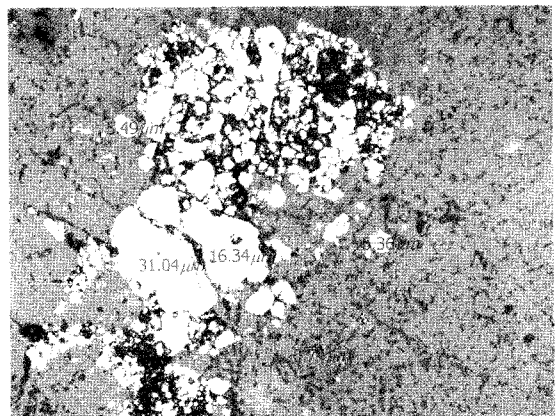


Fig. 4. Microphotograph of the ore.

가 100 μm로 분쇄한 시료를 황화광물들과 맥석 광물의 중간정도의 비중을 갖는 tetrabromoethane (비중: 2.964)으로 중액 선별하였다. 그리고 회수된 비중이 높은 광물을 X-선 회절분석기로 분석한 결과를 그림 5에 나타내었다. 중액선별로 회수된 비중이 높은 광물은 주로 황철석이었고, 그 밖에 섬아연석, 황동석 및 에나자이트 등이 존재하는 것으로 관찰되었다.

이들 광석광물과 금·은과의 수반관계를 측정하기 위하여, 정광 시료를 탄소로 코팅하여 SEM/EDS 분석을 통한 원소분포 분석을 실시한 결과를 그림 6에 나타내었다. 분석된 시료는 황철석과 섬아연석이 주된 광물이었고, 소량의 에나자이트가 관찰되었다. SEM/EDS로 분석한 결과, 금과 은은 대체로 이들 황화광물의 분포와 일치하여 존재하므로 금·은이 황화광물에 수반되는 것으로 해석하였다. 한편, 기존의 연구결과(Sajona et al., 2002)에 따르면 금과 은이 엘렉트럼(electrum)의 형태의 metal 상으로 존재하거나 방연석

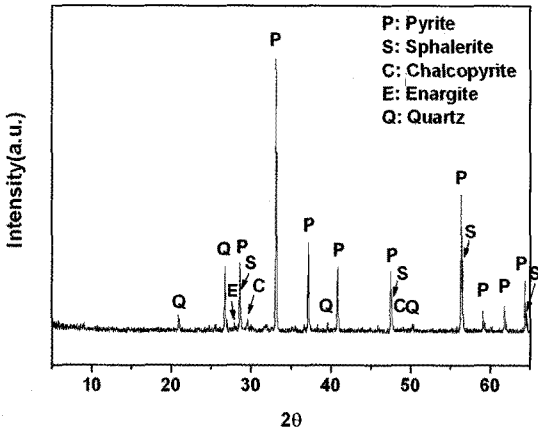


Fig. 5. XRD pattern of the heavy product separated by the heavy liquid (tetrabromoethane).

과 황동석에 belt 상으로도 존재한다고 하였으나, 실제로 이들 금과 은은 매우 소량으로 함유되어 있기 때문에 광석광물과 어떠한 상태로 공존하고 있는 지에 대한 명확한 증거를 확인하지 못하였다.

결과적으로 금·은의 품위 및 실수율을 높이기 위해서는 금·은이 수반된 황화광물을 선택적으로 회수할 수 있는 분리/선별 방법을 채택해야 함을 알 수 있다.

파분쇄에 의한 단체분리 특성

단체 분리도는 한 광석 속에 들어 있는 어느 광물이 단체로 분리되어 있는 백분율을 일컫는 용어이다. 회수하고자 하는 목적광물의 단체분리도가 높을수록 이들 광물의 물리화학적 성질을 이용하여 목적광물의 품위 및 실수율을 높일 수 있기 때문에 선별공정에서는 단체 분리도를 높이는 것이 매우 중요한 전처리 과정이라고 볼 수 있다.

일반적으로 유용광물(목적광물)과 무용광물(매석광물)이 같은 크기의 입방체로 교호(inter-locking)하여 1:1의 체적비로 존재할 경우, 광물 결정의 1/2의 크기로 분쇄하면, 단체분리도는 이론적으로 12.5% 밖에 안 된다. 그러나 미분쇄함에 따라 단체분리도가 높아져 광물 결정의 크기보다 1/64 이하의 크기로 분쇄하면 95.5% 이상으로 단체분리할 수 있다. 그러므로 적게 함유되어 있는 광물은 그 자체의 크기보다 잘게 분쇄하지 않으면 단체분리가 되지 않기 때문에 단체분리도를

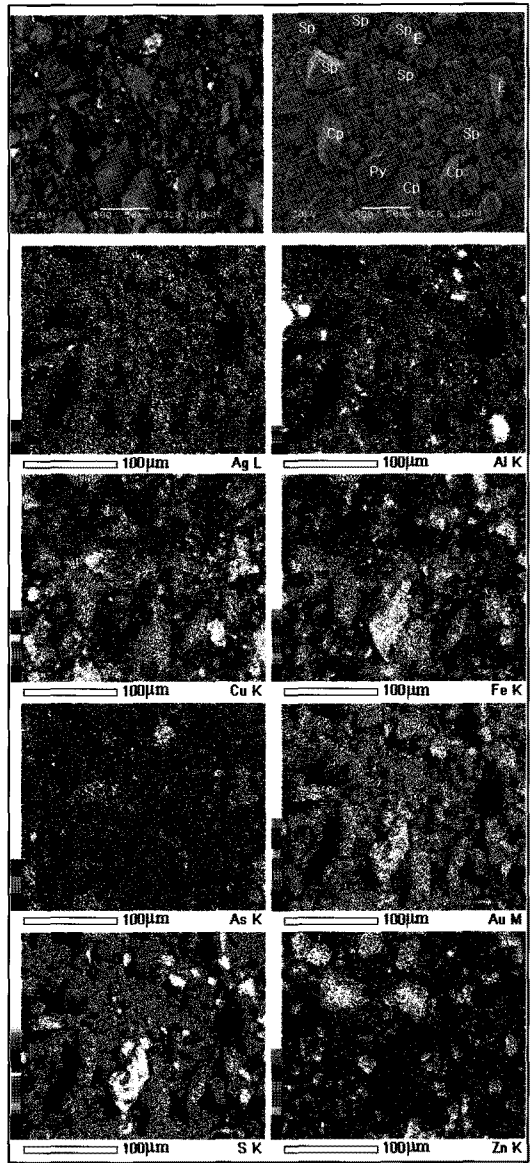


Fig. 6. SEM/EDS images of elemental distribution for the heavy products separated by the heavy liquid (tetrabromoethane).

높이기 위해서는 광물 결정 크기보다 상당히 미세하게 분쇄하지 않으면 안 된다. 그러나 반대로 많이 들어 있는 광물의 경우는 적게 들어 있는 광물의 크기보다 굵게 분쇄해도 단체분리가 상당히 용이하다(이강문, 1979).

표 2는 Jaw crusher와 cone crusher로 각각 파쇄한 후 rod mill로 분쇄시간을 변화시키면서 분

Table 2. Particle distribution analysis of Au/Ag ore milled by the laboratory rod mill

Milling time (min)	Particle size (μm)		
10	$d_{0.1}$	$d_{0.5}$	$d_{0.9}$
	3.622	132.595	485.220
15	$d_{0.1}$	$d_{0.5}$	$d_{0.9}$
	3.161	88.723	337.404
20	$d_{0.1}$	$d_{0.5}$	$d_{0.9}$
	2.596	47.146	214.168
25	$d_{0.1}$	$d_{0.5}$	$d_{0.9}$
	2.552	38.226	155.008
30	$d_{0.1}$	$d_{0.5}$	$d_{0.9}$
	2.324	29.525	118.194

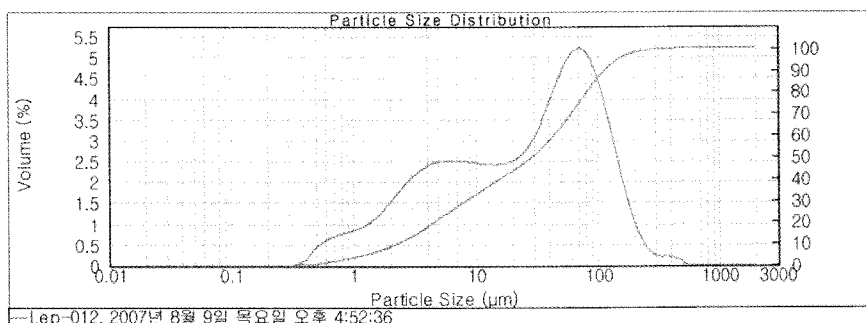


Fig. 7. Particle distribution of Au/Ag ore milled by the laboratory rod mill for 30 min.

쇄한 산물의 입도를 분석한 결과이다.

Rod mill에 의한 분쇄 시간이 길어짐에 따라 입도가 작아져 30분 정도 분쇄하였을 때 황화광물 최대 결정 크기(약 $100 \mu\text{m}$)와 유사한 입도 (d_{90} : $118 \mu\text{m}$)로 분쇄되었다. 그러나 분쇄 산물은 그림 7과 같이 정규분포로 분쇄되지 않고 특정한 입도 균을 갖는 것으로 나타났다. 이것은 원광석이 비교적 경도가 높은 황화광물과 석영 그리고 경도가 낮은 점토광물로 혼재되어 있기 때문에 굵은 입단에는 분쇄에 대한 저항성이 큰 석영이 많고, 중간입도 범위에는 석영보다 경도가 다소 낮은 황화광물이 많으며, 입도가 작은 범위에는 황화광물보다 경도가 작은 점토광물이 많아지는 것으로 보인다.

한편, rod mill로 25분 및 30분 동안 분쇄한 산물을 박편으로 만든 후 SEM 분석과 EDX 분석을 병행하여 단체분리도를 측정해 보았다. 이때 단체분리도는 분쇄된 산물을 약 200개의 입자가

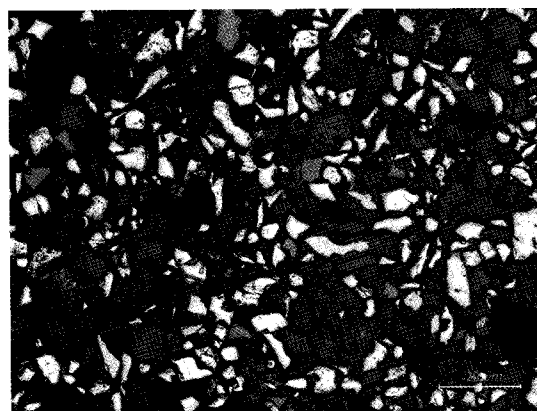


Fig. 8. SEM photograph of the ore pulverized by rod mill for 30 min.

고르게 분포하도록 조절하여 그림 8과 같이 박편을 만든 후 목적광물, 맥석광물, 목적광물과 맥석광물이 붙어 있는 입자의 전체 개수에서 단체로

Table 3. Chemical composition of host rocks (Victoria Au deposits) sorted by sieve

Samples		Chemical composition (%)							
Fracture (mesh)	Distribution (wt%)	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	T. Fe	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O
+100	9.5	73.0	0.30	11.3	2.73	0.31	1.14	1.08	0.06
-100+150	17.7	71.4	0.27	10.3	4.17	0.32	1.05	1.31	0.59
-150+200	13.2	71.0	0.26	9.45	5.95	0.35	0.94	1.19	0.53
-200+270	9.8	64.0	0.30	9.49	10.5	0.39	0.95	1.35	0.46
-270+325	9.8	56.8	0.39	11.7	12.3	0.44	1.16	1.14	0.45
-325	40.1	58.5	0.46	17.8	5.86	0.45	1.50	1.05	0.55

Samples		Chemical composition (%)							
mesh	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Pb	Zn	Cu	As (ppm)	Au (ppm)	Ag (ppm)
+100	2.83	0.051	0.98	0.013	0.11	0.031	35	2.0	3.0
-100+150	2.56	0.071	2.56	0.022	0.62	0.078	37	6.0	10.0
-150+200	2.39	0.074	3.87	0.038	0.31	0.12	40	5.3	10.0
-200+270	2.25	0.097	7.48	0.15	0.53	0.23	72	27.3	147.0
-270+325	2.84	0.094	8.36	0.31	0.58	0.30	147	16.0	29.0
-325	4.03	0.078	2.80	0.13	0.28	0.15	80	3.7	4.0

분리된 입자의 개수를 측정하여 계산하였다. 금·은과 수반관계가 우수한 것으로 판단되는 주요 광물은 황철석, 황동석, 섬아연석이고, 맥석 광물로 석영이 다수 존재하지만, 자연금과 자연은의 광물상은 육안으로 관찰할 수 없었다.

단체 분리도를 분석한 결과, 총 단일 광물 비율은 입자 개수 기준으로 25분 분쇄 산물이 91.2%, 30분 분쇄 산물이 91.4%로 나타나 황화광물 결정의 크기보다 매우 작게 분쇄하지 않아도 단체 분리도가 매우 높은 것으로 나타났다. 이때 단체로 분리되지 않은 것은 주로 석영 내에 다른 황화광물들이 미세하게 혼입된 경향을 보였다.

전술한 단체분리도에 관한 예시와 같이 금·은을 수반한 황화광물의 결정 크기(d_{50})가 100 μm 정도로 모두 동일하게 존재한다고 가정하면 이들 결정 크기를 최소한 1/64배인 약 1.6 μm 이하(d_{90})로 매우 미세하게 분쇄해야만 이론적으로 단체 분리도를 95.5%까지 달성이 가능한 것으로 계산된다. 그러나 본 연구 대상 광석의 경우는 입도($d_{0.9}$)를 약 155 μm 까지 분쇄하여도 단체분리도가 약 91%까지 높은 것으로 나타났다. 이와 같이 목적광물 결정의 크기보다 작게 분쇄하지 않아도 단체분리도가 향상된 것은 본 연구에 사용된 금·은 광석이 천연수 광상으로 맥석 모양

이 풍화작용을 많이 받았기 때문에 외력에 의해 쉽게 분화(粉化)되면서 황화광물과 맥석이 단체로 잘 분리되기 때문으로 생각한다.

체 분리에 의한 분리/선별 특성

체에 의한 분리로 금·은이 수반된 목적광물인 황화광물을 선택적으로 분리할 수 있는 가능성을 확인하고자 하였다. rod mill로 30분 동안 분쇄한 산물을 각각 50, 60, 100, 150, 200, 270, 325 mesh의 체로 분립한 산물을 X-선회절 분석한 결과를 그림 9에 그리고 체가름한 입단별 산물의 화학성분을 분석한 결과를 표 3에 각각 나타내었다.

65 mesh (208 μm)보다 굵은 입자는 주로 석영이 분포하고 있으며, 65 mesh 이하에서는 황화광물인 황철석 및 섬아연석과 맥석 광물인 석영이 혼재하는 것으로 나타났다. 또한, 표 3의 입단별 화학성분 분석결과에서 알 수 있는 바와 같이 입자가 100 mesh에서 325 mesh로 작아질수록 SiO₂의 함유량은 적어지고, 점토광물의 주요 성분인 K₂O, Na₂O, Al₂O₃의 함유량은 100~325 mesh에서 큰 차이를 보이지 않았지만, -325 mesh에서는 많아지는 것으로 나타났다. 황화광물의 경우는

Table 4. Free sedimentation ratio for the mineral couple of different kinds (이강문, 1979)

Mineral couple	Free sedimentation ratio			
	m = 1 D > 1,000 μm	m = 0.85 D \geq 300 μm	m = 0.65 D \pm 100 μm	m = 0.5 D < 50 μm
Native gold (17) - Quartz (2.65)	9.70	6.91	4.38	3.11
Galena (7.5) - Quartz (2.65)	3.94	3.20	2.44	1.98
Cassiterite (6.9) - Quartz (2.65)	3.57	2.95	2.29	1.89
Hematite (5.2) - Quartz (2.65)	2.55	2.22	1.84	1.60
Sphalerite (4.1) - Quartz (2.65)	1.88	1.71	1.51	1.37
Rhodochrosite (3.5) - Quartz (2.65)	1.51	1.42	1.30	1.23
Slate (2.7) - Anthracite (2.65)	2.43	2.13	1.78	1.56
Slate (1.7) - Bituminous coal (1.3)	5.00	3.94	2.85	2.24

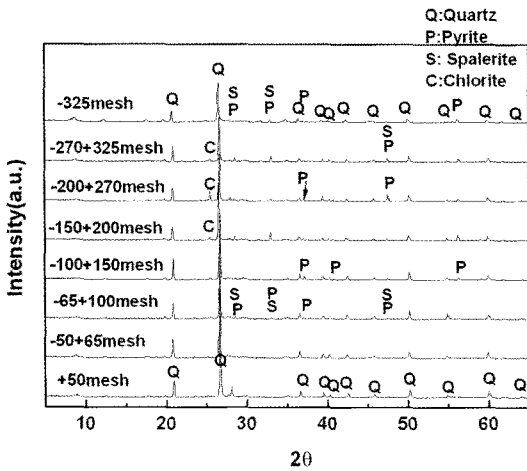


Fig. 9. XRD patterns of Au/Ag ore sorted according to size by sieve.

입자가 100 mesh에서 325 mesh까지 작아짐에 따라 함유량이 증가되는 경향을 보이지만, 325 mesh 이하의 입단에서는 오히려 적게 함유되는 것으로 나타났다. 이러한 현상을 보인 것은 금·은 광석이 황화광물들과 석영 및 점토광물로 구성되어 있기 때문에 큰 입단에는 분쇄에 저항성이 큰 경도가 높은 석영이 많고, 중간입도 범위에는 석영보다 경도가 작은 황화광물이 많으며, 입도가 작은 범위에는 황화광물보다 경도가 낮은 녹니석과 같은 점토광물이 많아져 나타난 현상으로 보인다. 그러나 금과 은의 경우 입단별 황화광물의 함유량에 비례하는 경향을 보여 전 입단에 걸쳐 고르게 함유된 것으로 나타났다. 이것은 금·은 성분이 수반한 황화광물 결정의 크기가 1~100 μm 의 넓은 입도 범위에서 균일하게 분포하여 존

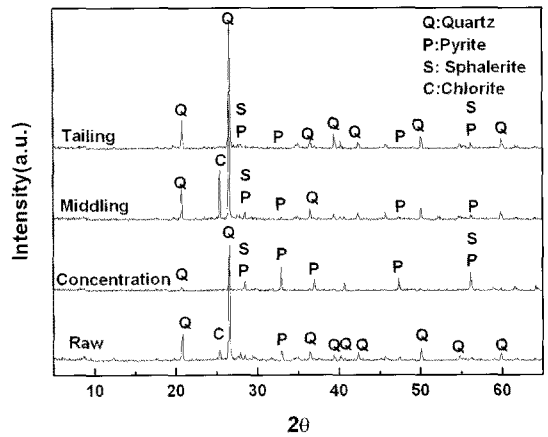


Fig. 10. XRD patterns of the products separated by shaking table.

재하기 때문이다.

따라서, 금·은이 전 입단에서 고르게 분포되어 있기 때문에 체질에 의한 분립 방법으로는 금·은을 수반한 황화광물을 선택적으로 분리하여 회수하기는 곤란할 것으로 판단된다.

요동 테이블에 의한 비중선별

두 개의 고체 입자가 있을 때 그 하나는 비중이 크고 입도가 작은 반면에 다른 하나는 비중이 작고 입도가 크다면 이 양자는 그들의 비중과 입도가 적합할 때 동일한 최대 속도를 가질 수 있을 것이다. 이러한 두 입자를 등속 침강 입자라 부르고, 이들의 입도의 비를 등속침강비(等速沈降比)라고 불러서 분급과 비중선별 공정에서 중요한 의의를 갖는다. 따라서 본 연구의 대상 물

Table 5. Chemical composition of the products separated by shaking table

Samples	Chemical composition(%)							Etc.
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Fe	
Raw Material	62.40	14.30	1.64	0.47	3.06	0.96	5.45	100%
Concentrate	22.0	5.23	0.78	0.18	0.72	0.28	29.2	4.8%
Middling	41.0	11.1	1.09	0.54	2.41	0.65	4.88	42.7%
Tailing	68.7	10.9	1.15	0.49	2.52	0.66	3.30	52.5%
	S	As	Pb	Zn	Cu	Au Ag (ppm)		
Raw Material	4.37	0.036	0.10	0.32	0.16	12.0	25.0	
Concentrate	31.8	0.11	0.69	1.48	0.71	23.8	82	4.8%
Middling	4.15	0.013	0.0071	0.31	0.13	12.5	22.2	42.7%
Tailing	2.36	0.0071	0.053	0.39	0.13	10.5	22.0	52.5%

질의 경우, 목적광물인 황화광물 결정의 최대 크기가 100 μm 정도이고, 방연석-석영, 황철석-석영, 섬아연석-석영의 등속 침강비가 각각 2.44, 1.84, 1.51 정도로 비중선별이 가능한 범위에 있기 때문에 본 연구에서는 유막선별의 원리를 이용한 대표적인 비중선별기인 요동테이블을 사용하여 금·은이 수반된 황화광물을 분리/선별하고자 하였다.

그림 10과 표 5는 rod mill로 분쇄한 후 체가름하지 않은 모든 분쇄산물을 요동테이블로 비중 선별하여 회수된 정광, 중광, 광미의 X-선 회절분석과 화학성분을 분석하여 각각 나타낸 것이다.

요동 테이블로 비중 선별한 결과, 정광(concentrate)으로 회수되는 양은 약 4.8%, 중광(middling)으로 회수되는 양은 42.7%, 광미(tailing)로 손실되는 양은 약 52.5%로 정도인 것으로 나타났다.

금 성분이 정광에는 23.8 ppm 정도, 중광과 광미에는 각각 12.5 ppm 및 10.5 ppm 정도 함유되어 있으며 정광, 중광, 광미에서 금 실수율도 각각 9.5%, 44.5%, 45.9%로 분리효율이 낮다. 은 성분의 경우도 정광, 중광, 광미에 각각 82 ppm, 15 ppm, 15 ppm 정도 함유되어 분리 효율이 낮은 것으로 나타났다. 실험결과에서 알 수 있는 것처럼 분쇄된 금·은 원광을 분립하지 않고 전체 분쇄산물을 비중선별하게 되면 금·은을 수반하고 있는 황화광물이 작은 입자에서 큰 입자까지 넓게 분포되기 때문에 분리/선별의 효과가 낮아지는 것으로 보인다. 왜냐하면, 일반적으로 요동테이블에 의한 비중 선별은 테이블 면의 가

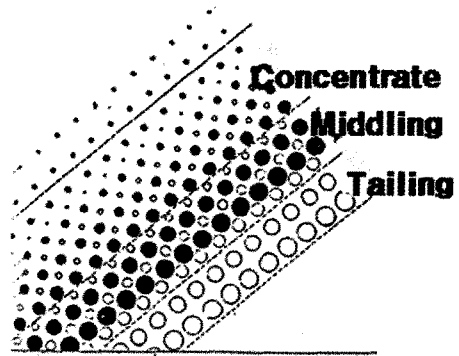


Fig. 11. Arrange of ore particles at table plate with different particle size and density (이강문, 1979).

로 경사와 세로 경사, 수류, 요동, 세척수 및 살들의 종합작용으로 요동 방향으로 진행되는 비중이 큰 광물과 수류(水流) 방향으로 유송(流送)되는 비중이 작은 광물을 나누는 것이다. 그러나 입도의 범위가 큰 다양한 입자들이 혼합되어 있으면 그림 11과 같은 비중과 입자의 크기에 따른 배열 상태를 보인다. 따라서 분쇄된 금·은 원광을 입도를 균일하게 하지 않고 요동 테이블로만 선별하게 되면, 비중이 큰 굵은 입자와 비중이 작은 작은 입자들이 혼합되어 존재할 수 있다. 그러므로 실험결과와 같이 비교적 입자가 크고 비중이 큰 황화광물과 비중은 낮지만 입자가 작은 맥석들이 혼합되어 존재하기 때문에 요동테이블에 의해 비중선별 효율이 낮은 것으로 판단된다.

Table 6. Chemical composition of the products separated by shaking table

Samples				Chemical composition (%)							
Fracture (mesh)	Yield (wt%)	Products	Weight (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
-100+150	27.2	Concentrate	1.39	1.75	0.36	62.2	0.53	0.28	0.04	0.84	0.72
		Middling	1.66	67.15	9.66	5.7	2.83	0.76	2.34	0.45	0.68
		Tailing	24.1	78.48	11.37	1.39	0.91	0.64	2.80	0.45	0.28
-150+270	23.0	Concentrate	4.05	1.87	0.45	59.8	0.55	0.07	0.08	0.23	0.36
		Middling	1.06	56.46	9.36	12.4	5.08	0.72	1.20	0.48	1.12
		Tailing	17.89	78.02	10.41	2.25	1.15	0.60	2.50	0.42	0.33
-270+325	9.8	Concentrate	0.84	3.05	2.64	52.9	1.44	0.28	0.22	0.52	0.88
		Middling	2.04	68.80	10.42	2.96	1.13	0.64	2.53	0.41	0.41
		Tailing	6.91	76.59	15.31	3.66	0.78	0.93	3.66	0.44	0.45
-325	40.0	Concentrate	1.52	25.36	3.12	41.9	1.92	0.42	0.72	0.06	0.96
		Middling	2.64	68.63	12.12	4.80	1.23	0.69	2.43	0.33	0.54
		Tailing	35.84	74.28	19.13	4.66	0.72	1.18	4.44	0.42	0.54

Samples			Chemical composition (%)						
mesh	products	MnO	P ₂ O ₅	Zn	Cu	Pb	As	Au (ppm)	Ag (ppm)
-100+150	Concentrate	0.84	0.05	5.16	1.99	0.28	0.33	42.8	160
	Middling	1.17	0.27	0.83	0.24	0.040	0.019	3.3	9.0
	Tailing	0.21	0.05	0.041	0.017	0.022	0.0056	ND.	7.0
-150+270	Concentrate	0.54	0.09	2.24	1.12	0.64	0.15	39.0	140
	Middling	2.16	0.72	2.14	0.76	0.062	0.084	ND	2.8
	Tailing	0.31	0.09	0.24	0.084	0.025	0.011	ND	0.3
-270+325	Concentrate	0.86	0.28	4.47	2.24	1.29	0.28	42.0	148
	Middling	0.38	0.12	0.26	0.11	0.033	0.010	ND	0.3
	Tailing	0.36	0.09	0.27	0.12	0.082	0.022	ND	12
-325	Concentrate	0.96	0.30	0.26	0.37	1.30	0.34	52.2	180
	Middling	0.39	0.12	0.26	0.14	0.10	0.044	ND	18.0
	Tailing	0.45	0.10	0.29	0.14	0.12	0.041	ND	17

따라서 등속 침강비의 원리를 이용하여 비중선별에서 선별효율을 향상시키기 위해서는 광물의 입자의 크기를 가급적 균일하게 만들어야 한다. 그러나 분쇄기만으로 균일한 입도를 만들기는 현실적으로 곤란하므로 분쇄된 입자를 체질하여 등속 침강비 범위 내의 입자 크기가 되도록 분쇄하여 비중선별을 하는 것이 실제적으로 바람직한 방법으로 볼 수 있다.

표 6은 rod mill로 분쇄한 산물을 균일한 입도

를 갖도록 각각 100, 150, 200, 270, 325 mesh의 체로 분립한 후 각각의 체가름 산물을 요동테이블로 비중 선별하여 회수된 정광, 중광, 광미의 화학성분을 분석하여 보인 것이다. 이때, 각 입단에서 비중선별로 회수된 정광, 중광, 광미의 구성 광물을 X-선 회절분석기로 분석한 결과를 그림 12에 나타내었다. 입단별로 회수된 정광의 금과 은의 품위는 각각 40 ppm 및 140 ppm 이상이었고, 특히 정광의 전 입단에 함유된 금의 실수율

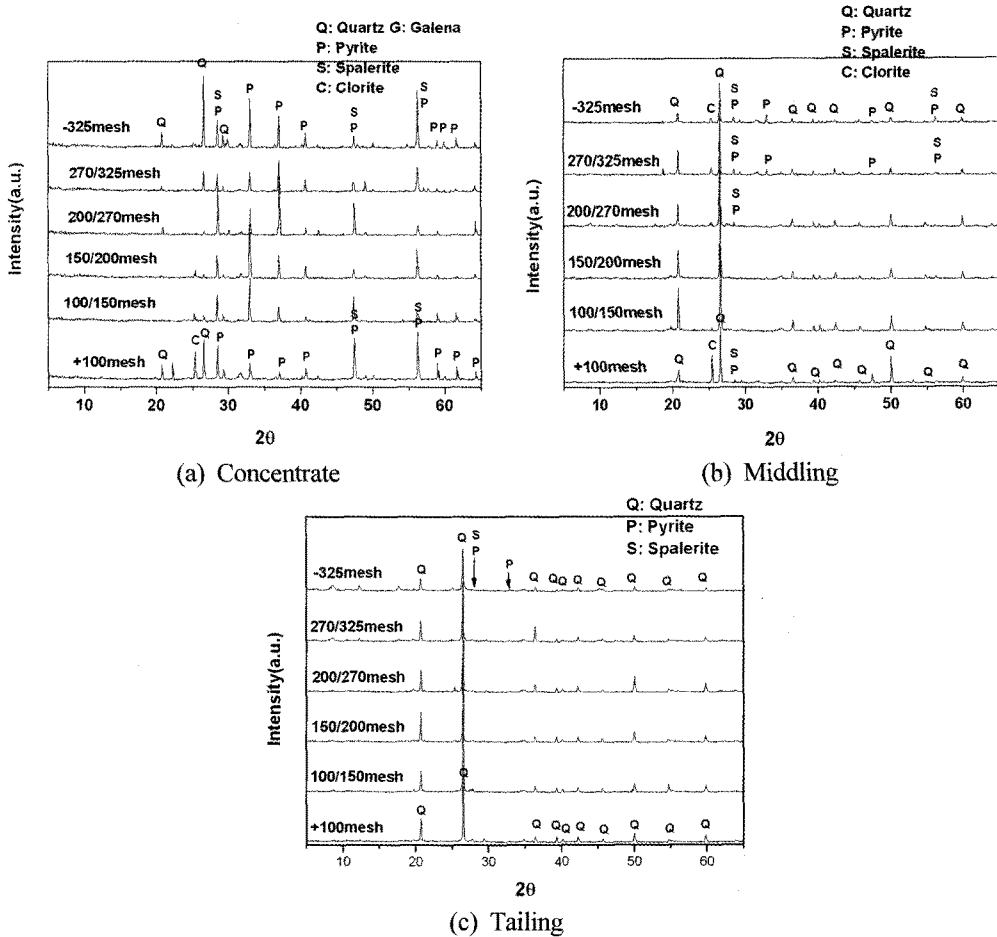


Fig. 12. XRD patterns of the concentrates and tailing separated by shaking table according to particle size.

은 100~150 mesh에 해당하는 것이 98% 정도인 것을 제외하고는 150 mesh 미만의 입단에서 거의 100%에 이르는 것으로 나타났다. 그러나 정광의 은 품위는 약 140 ppm 이상으로 중광과 광미에 비교하여 매우 높지만, 광미로 손실되는 양이 정광에 비하여 매우 많기 때문에 각 입단에서 은의 실수율은 50% 정도인 것으로 나타났다.

중광의 경우, 100~150 mesh의 입단에 속하는 금의 품위가 3.3 ppm인 것으로 제외하고는 150 mesh 미만의 입단에서는 금이 거의 함유되지 않고 은성분만이 함유된 것으로 나타났다.

광미의 경우는 입자가 작아짐에 따라 화학성분 분석과 XRD 분석으로 확인되는 바와 같이 황화광물이 다소 증가되는 경향을 보이지만, 전 입단에서 금 성분은 함유되지 않고 은 성분만이 함유

된 것으로 나타났다.

한편, 그림으로 보이지는 않았지만 화학성분값으로 황화광물 및 기타 성분과의 상관관계를 알아본 결과에 의하면, 그림 5의 SEM/EDX 분석에서 확인된 바와 같이 금과 은 성분은 서로 밀접한 상관관계를 가진다. 또한, 황화광물인 섬아연석을 제외하고는 황철석, 황동석, 방연석과 밀접한 상관관계를 갖는 것으로 나타났다.

따라서, 요동테이블로 비중선별한 산물인 광미에만 은 성분이 특별히 농집되는 이유를 추후 밝혀야만 이들 은성분의 회수율을 높이는데 중요한 것으로 생각한다.

결과적으로 비중선별에 의해 금·은의 품위와 실수율을 높이기 위해서는 황화광물과 맥석광물의 단체분리가 잘 이루어지도록 광석의 입도(d_{90})

를 100 mesh 이하로 되게끔 선택적으로 파분쇄해야 한다. 그리고 100~270 mesh 및 -270 mesh의 입단으로 분립하여 요동테이블에 의한 비중선별로 정광 및 중광을 회수하고, 나머지 광미에 함유된 은 성분을 다시 부유선별(flotation) 및 침출 등의 방법으로 회수해야만 할 것으로 판단된다.

결 론

필리핀 만카얀 지역의 빅토리아 광산에서 입수한 금·은 광석으로부터 금·은 성분의 회수율을 높이기 위해 구성 광물 및 금·은의 수반상태, 파분쇄에 따른 단체 분리도, 체 분급에 의한 분리/선별 특성 및 요동테이블(shaking table)에 의한 비중 선별 특성을 연구한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 금·은 광석을 XRD 분석한 결과, 황화광물로는 황철석, 섬아연석 및 방연석 등이 맥석광물로는 석영 및 점토류 광물 등으로 구성되었다. SEM/EDS 분석 결과, 금·은 성분은 황철석, 섬아연석, 방연석 등의 황화광물에 주로 수반되므로 이를 회수하기 위한 분리/선별 기술을 적용하여야 한다.

2) 금·은이 함유된 황화광물 결정의 크기는 1 μm 이하에서 100 μm까지 광범위한 입도분포를 갖고 있어 단체분리도를 높이기 위해서는 금·은 광석을 최소한 100 μm 이하로 분쇄해야 하는 것으로 나타났다.

3) 금·은 광석을 파분쇄하여 입도(d₉₀)를 100 μm 이하로 만들면 단체분리도가 92% 정도까지 향상되었지만, 이들 분쇄물을 분립하지 않고 요동테이블로 비중 선별한 결과, 입도가 크고 비중이 큰 황화광물과 비중이 작고 입도도 작은 맥석들이 혼합되어 비중선별로 금·은의 품위 및 실수율을 높이기 어려웠다.

4) 파분쇄한 금·은 광석을 체로 분립한 후 각 입도별로 요동테이블로 비중 선별한 결과 정광에는 금·은의 품위는 각각 40 ppm 및 140 ppm까지 높아졌다. 그러나 정광의 금 실수율은 거의 100%에 이르지만, 은 실수율은 50% 정도이었다.

따라서 광미로 유실되는 은 성분의 존재상태를 규명하여 광미에 함유된 은 성분을 선택적으로 회수하는 분리/선별 방법을 추후 연구해야 할 것이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 2008년도 기관고유사업인 “귀금속 광물의 고부가가치화 기술개발”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Claveria, R.J. (2001) Mineral Paragenesis of the Lepanto copper and gold and the Victoria gold deposit, Mankayan mineral district, Philippines. *Resource Geology*, 51, 2, 97-106.
- Garcia, J.S., Jr. (1991) Geology and mineralization characteristics of the Mankayan mineral district, Benguet, Philippines. *Rept. Geol. Surv. Japan*, 277, 21-30.
- Mancano, D.P. and Campbell, A.R. (1995) Microthermometry of enargite-hosted fluid inclusions from the Lepanto, Philippines, high-sulfidation Cu-Au deposit. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 19, 3909-3916.
- Ringebach, J.C., Stephan, J.F., Maletterre, P., and Beller, H. (1990) Structure and geological history of the Lepanto-Cervantes releasing bend on the Abra River Fault, Luzon Central Cordillera, Philippines. *Tectonophysics*, 183, 225-241.
- Sajona, F.G., Izawa, E., Motomura, Y., Imai, A., Sakakibara, H., and Watanabe, K. (2002) Victoria carbonate-base metal gold deposit and its significance in the Mankayan Mineral district, Luzon, Philippines. *Resource Geology*, 52, 4, 315-328.
- 이강문 (1979) 광물처리공학, 반도출판사, 75.
- 이태섭 (2003) 한국의 금광산 및 광산현황, 한국지질자원연구원, 7.

접수일(2008년 11월 27일), 수정일(1차 : 2008년 12월 15일), 게재확정일(2008년 12월 16일)