자원환경지질, 제35권, 제3호, 191-201, 2002
Econ. Environ. Geol., 35(3), 191-201, 2002

구봉 금-은광상에서 산출되는 에렉트럼의 산출상태와 화학조성

유봉철[1]* · 최선규[2] · 이현구[1]

[1]충남대학교 자연과학대학 지질학과, [2]고려대학교 이과대학 지구환경과학과

Mode of Occurrence and Chemical Composition of Electrums from the Gubong Gold-Silver Deposits, Republic of Korea

Bong Chul Yoo[1]*, Seon Gyu Choi[2] and Hyun Koo Lee[1]

[1]Department of geology, Chungnam National University
[2]Department of earth and environmental sciences, Korea University

The Gubong gold-silver deposits is gold-silver-bearing hydrothermal massive quartz veins which were filled the fractures along fault shear (NE, NW) zones within Precambrian banded or granitic gneiss of Gyeonggi massif. Ore mineralization of this deposits is contained within a single stage of quartz vein which was formed by multiple episodes of fracturing and healing. Ore minerals are composed mainly of arsenopyrite, pyrite, sphalerite, chalcopyrite, galena with minor amounts of pyrrhotite, marcasite and electrum. The frequency and volume percentages of electrums associated with ore minerals from this deposits are recognized as follows; 44.5% and 54.3% with arsenopyrite, 24.3% and 33.8% with quartz, 12.6% and 0.1% with pyrite, 11.0% and 4.8% with galena, 5.0% and 7.0% with sphalerite and 2.5% and 0.02% with chalcopyrite, respectively. They show irregular (41.6%), subround (34.7%), elongate (17.0%) and granular (6.6%) shapes, respectively. Their grain size ranges from 2 to 150 μm, but 90.9 percent of the grains are below 30 μm. The chemical composition of electrums ranges from 26.39 to 72.51 Au atomic %. These composition (Au atomic %) on the basis of associated minerals are from 44.97 to 71.75 with arsenopyrite, pyrite, sphalerite and quartz, from 44.37 to 72.51 with quartz, from 35.40 to 41.01 with sphalerite and chalcopyrite, from 26.39 to 54.84 with pyrite, chalcopyrite, quartz and galena, from 28.49 to 53.28 with galena, respectively. We suggest that optimum recovery of gold would be obtained with reference to these results.

Key words : Gubong gold-silver deposits, Electrum, Size, Composition

구봉 금-은광상은 선캠브리아기 경기육괴의 호상 또는 화강편마암내에 발달된 단열대(NE, NW)를 따라 충진한 함금-은괴상석영맥광상이다. 이 광상의 광화작용은 여러번의 단열작용에 의해 형성된 동일시기의 석영맥으로 구성되어 있다. 산출되는 광석광물은 주로 유비철석, 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석과 소량의 자류철석, 백철석, 에렉트럼 등이다. 에렉트럼의 공생광물에 따른 산출빈도와 산출량은 각각 유비철석(44.5%, 54.3%), 석영(24.3%, 33.8%), 황철석(12.6%, 0.1%), 방연석(11.0%, 4.8%), 섬아연석(5.0%, 7.0%), 황동석(2.5%, 0.02%)의 순이다. 에렉트럼의 산출형태는 불규칙형(41.6%), 반원형(34.7%), 신장형(17.0%) 및 입상형(6.6%)이다. 에렉트럼의 입자 크기는 2 μm에서 150 μm까지 다양하게 산출되나 30 μm 이하가 전체의 90.9%를 차지한다. 에렉트럼의 화학조성은 26.39~72.51 Au atomic % 이다. 공생광물에 따른 에렉트럼의 화학조성(Au atomic %)은 유비철석-황철석-섬아연석-석영(44.97~71.75), 석영(44.37~72.51), 섬아연석-황동석(35.40~41.01), 황철석-황동석-석영-방연석(26.39~54.84), 방연석(28.49~53.28) 이다. 그러므로 이들 결과를 부유선광시 고려한다면 금의 회수율을 향상시키는데 도움이 될 것이다.

주요어 : 구봉 금-은광상, 에렉트럼, 입도, 구성성분.

*Corresponding author: s_chbong@cnu.ac.kr

1. 서 론

국제통화기금(IMF) 체제 이후 우리나라 국민들은 하루 빨리 외환위기를 극복하기 위해 범국민적으로 행한 운동이 금모으기 운동이었으며 금을 수출하여 벌어들인 외화는 20억달러에 육박한다. 또한 대한광업진흥공사는 최근 전남 해남 일원에서 잠재가치 493억원에 이르는 새로운 부존형태의 대규모 금광을 발견하였다고 보고하였다. 이와같이 금은 오늘날 국제사회의 통화 및 대외 결재 준비 수단으로서 중요한 부분을 차지하고 있을 뿐만 아니라 반도체산업, 전기도금, 항공기산업, 장식용, 치과용, 도자기용 등의 원료 자원으로서 이용되고 있으나, 대부분 해외수입에 의존하고 있다. 우리나라에서도 금을 생산한 대규모의 광산이 많이 있었으나 최근에는 개발 및 생산이 거의 중단된 상태이다.

구봉광산은 과거 남한 제일의 금광산으로서 선캠브리아기의 호상 또는 화강편마암내에 발달된 단열대를 충진한 석영맥광상이다. 이 광산은 1908년 4월 부락민에 의해 최초로 노두가 발견된 후, 몇 개의 광구로 분할되어 수명의 일본인에 의해 개발 이전되어 오다가 1943년 조선광업진흥(주)로 통합 이전되었으며, 1966년 10월 대명광업개발(주)에서 인수하여 개발하다가 1972년 휴광되었다.

구봉광산 부근의 지질 및 금-은광상에 대하여는 청양도폭(島村新兵衛, 1931), 충남탄전정밀지질조사보고서(동아응용지질콘설탄트, 1974), 전찬규와 오민수(1970), 시추조사보고서(대한광업진흥공사, 1972, 1973, 1974), 한국의 광상 제 12호(대한광업진흥공사, 1990) 등이 보고되어 있다.

일반적으로 에렉트럼의 산출상태와 화학조성은 광상의 성인형에 따라 아주 다양하나 고온에서 산출되는 에렉트럼은 Au 함량이 높으며 비교적 단순한 공생광물관계를 갖는 것으로 알려져 있다(최선규와 위수민, 1992). 이 연구는 구봉광상에서 산출되는 에렉트럼의 산출상태, 공생관계 및 화학조성 등을 규명한 것이며, 이 결과는 선광 및 제련시 회수율을 향상시키기 위한 기초자료로 이용될 수 있을 것이다.

2. 지질 및 광상

2.1. 지질개요

구봉광산의 주변지질은 선캠브리아기의 변성퇴적암류, 중생대의 대동누층군 퇴적암류 및 소규모의 화성암이 분포된다(Fig. 1). 선캠브리아기의 변성퇴적암류는 호상편마암, 각섬암질 편암, 사문암, 화강편마암, 미그마타이트질 편마암, 결정질석회암 및 석회규산염암으로 구성된다. 호상편마암은 야외조사시 국부적으로 운모류가 부화되어 편리구조가 관찰되며 국부적으로 안구상 구조를 갖는 안구상 편마암 및 선구조가 관찰되지 않는 화강편마암 및 미그마타이트질 편마암으로 분류되

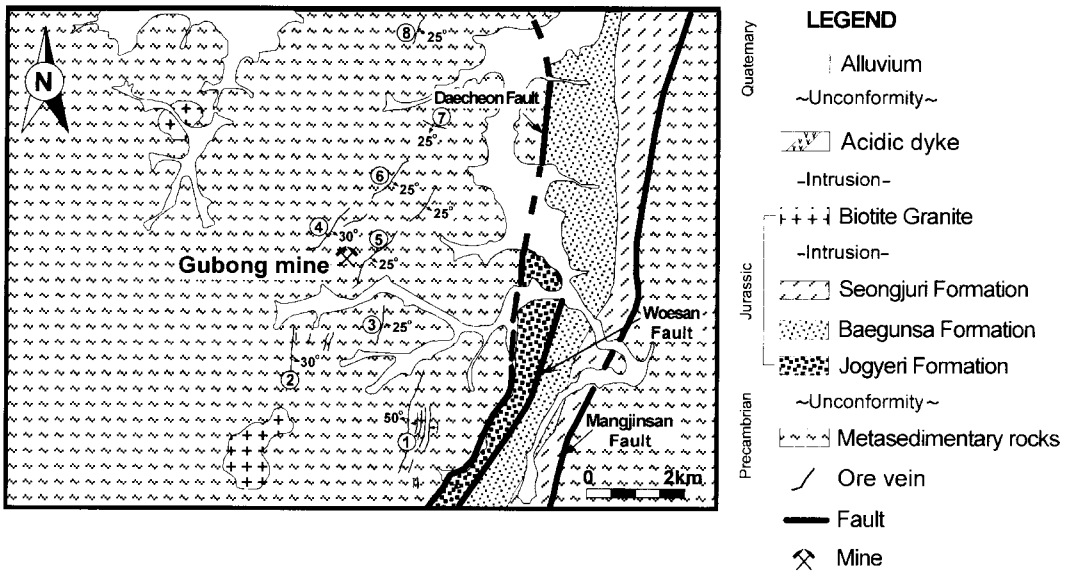

Fig. 1. Geological map of the Gubong mine area. 1; Danbong vein, 2; Yongma vein, 3; Ganjuk vein, 4; No.6 vein, 5; No.1 vein, 6; Bongam2 vein, 7; Bongam1 vein, 8; Gunryang vein.

나 상호 점이적인 관계이다. 호상편마암의 편리의 주향은 N20~80°E, 경사는 30~70°NW를 갖는다. 구성광물로는 석영, 흑운모, 백운모, 사장석, 미사장석, 견운모, 각섬석, 녹염석 및 불투명광물로서 각섬암상 정도의 광역변성을 받았다. 각섬암질 편암은 광산의 남서쪽에 국부적으로 분포되며 짙은 녹색을 띤다. 편리의 주향과 경사는 N48°E, 68°NW를 갖으나 변화가 심한 편이다. 구성광물로는 대부분이 청색 각섬석과 갈색 각섬석이고 소량의 석영, 정장석, 견운모, 흑운모, 백운모 및 불투명광물등이다. 사문암은 호상편마암내 N40~ 60°E의 방향성을 갖으며 구성광물로는 사문석, 안티고라이트(antigorite) 및 소량의 불투명광물이 관찰된다. 결정질석회암과 규산질석회암은 광산의 남서쪽에 100~150 m의 폭을 갖고 북동방향으로 대상 분포된다.

쥬라기 대동누층군 퇴적암류인 조계리층, 백운사층 및 성주리층은 광산의 동쪽에 북북동방향으로 분포된다. 조계리층은 아미산층을 부정합으로 피복하고 함장석각력사암대와 역암대로 분대되며 호상편마암과 단층으로 접한다. 함장석각력사암대는 주로 함장석각력사암으로 구성되며 흑색세일과 사암이 협재된다. 함장석각력사암은 분급이 매우 불량하고 기질은 세립에서 조립질까지 다양하게 혼재된다. 역은 주로 장석각력이며 흑색세일과 원마도가 좋은 규암이 간혹 함유되기도 한다. 역암대는 주로 역암으로 구성되며 사암과 세일이 협재된다. 역은 주로 원마도가 좋은 규암이며 간혹 암회색 세립사암이 관찰된다. 역의 크기는 다양하나 일반적으로 3~8 cm 정도이다. 백운사층은 조계리층을 정합으로 피복하고 사암대와 호층대로 분대된다. 사암대는 주로 세립질사암으로 구성되며 역암과 세일이 협재된다. 이 역암은 기질이 회색 또는 암회색 세립 혹은 중립사암이며 역의 크기는 1 cm 내외이다. 그리고 호층대는 주로 이암 및 세일로 구성되며 간혹 사암이 협재된다. 성주리층은 크게 하부사암대, 호층대, 상부사암대로 분대된다. 하부사암대는 상향 세립구조를 보여주는 사암으로 구성되며 사암의 입자크기는 변화가 다양하다. 호층대는 주로 세립질사암, 실트스톤, 세일로 구성되며 드물게 탄층이 포함된다. 그리고 상부사암대는 주로 사암으로 구성되며 역암과 세일이 협재된다. 이 층의 중심부분에는 N20~40°E 방향의 배사구조가 발달되어 있다.

쥬라기 흑운모 화강암은 선캠브리아기의 변성퇴적암류를 관입하였으며 광산의 남서 및 북동지역에서 발견된다. 이 화강암의 산상은 세립 또는 조립질이며 유백색을 띤다. 구성광물로는 석영, 정장석, 미사장석, 흑운모, 견운모, 방해석, 규선석 및 불투명광물 등이다.

산성암맥은 NE방향을 갖으며 간혹 NW의 방향성을 갖는 것도 있다.

2.2. 광 상

구봉광산의 주개발지역은 구룡리 지역으로 본산 지역과 그 주변지역이 해당된다(Fig. 1). 이 지역에는 구봉광산 개항이후 60여년간 1호맥에서 9호맥까지 개발 및 채광하였으나 1970년에는 6호맥 및 그 분지맥을 주 가행대상으로 하였다. 6호맥은 통동갱(0 m)에서 하부 -1,440 m 까지 20~25°의 경사를 갖고 관찰되며 연장은 -1,440 m 까지는 400 m 이나 -1,440 m 하부에서는 200 m 내외로 그 연장이 줄어든다(전찬규와 오민수, 1970). 1호맥은 6호맥에서 동측으로 400 m 떨어진 곳에 위치한 맥으로서 맥폭은 0.6 m, 연장은 400 m 이상으로 추정된다. 봉암2맥은 노두 1개소, 갱구적 3개소, 시굴적 1개소가 확인된다. 노두에서 맥폭은 1.5 m 이며 맥의 주향과 경사는 N45°E, 25°SE로서 6호맥의 연장부일 가능성이 높다. 과거 갱내도에 의하면 사갱으로 하 5~6번갱까지 개발되었고 수평굴진은 400 m되는 것으로 추정되며 구채굴적, 폐석장등에서 채취한 시료의 금 및 은의 품위는 15.5~59.6 g/ton Au, 28~229 g/ton Ag이다. 봉암1맥은 봉암2맥으로부터 북동방향으로 1 km 떨어진 곳에 위치한다. 이 맥은 N50~70°W, 25°SW의 주향과 경사를 갖으며 연장은 300 m 이상 될 것으로 추정된다. 군량맥은 본산지역에서 북동쪽으로 4 km 떨어진 곳에 위치하며 1930년 이전에는 청양금산의 주작업장으로 개발되었다. 이 맥의 주향과 경사는 N70°E, 25°SE, 맥폭은 0.6~1.5 m, 품위는 ND~79.5 g/ton Au, Tr~102 g/ton Ag이다. 이 맥은 사갱으로 하3번갱까지 개발하였다(대한광업진흥공사, 1990).

3. 광석광물과 공생관계

구봉광산의 6호맥, 봉암2맥, 봉암1맥 및 군량맥에서 관찰되는 석영맥은 갱내 붕괴로 인한 직접적인 갱내관찰을 하지 못하고 폐석에서 관찰되는 것을 기초로 하였다. 6호맥, 봉암2맥, 봉암1맥 및 군량맥의 석영맥은 공통적으로 괴상백색석영으로 구성되며 이 괴상백색석영은 동일시기의 회색석영과 백색석영 및 단열작용에 의해 형성된 투명석영으로 구성되어 있다. 괴상백색석영은 리본-호상구조, 각력상구조 및 정동구조등이 관찰된다. 이 광산의 각 맥에서 보이는 모암변질은 차이가

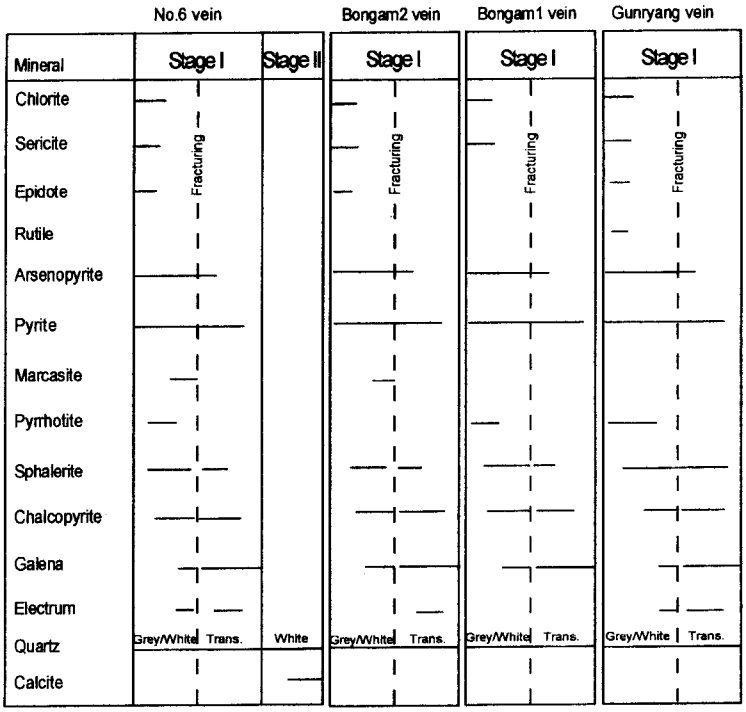

Fig. 2. Paragenetic sequences of minerals from No.6, Bongam2, Bongam1 and Gunryang veins of the Gubong mine.

없으며 견운모화, 녹니석화, 황철석화, 규화, 탄산염화, 프로필라이트화 및 점토화작용이 관찰된다.

광석광물과 맥석광물에 대하여 야외조사와 실내에서 다수의 연마박편, 연마편에 대한 육안 및 편반사 현미경관찰에 의하여 광석조직 및 광석광물의 공생관계를 기초로하여 생성순서를 결정하였다(Fig. 2).

구봉광산의 6호맥은 함-황화광물 괴상백색석영(광화I시기)와 정동 barren 백색석영(광화II시기)가 관찰되며 봉암2맥, 봉암1맥 및 군량맥은 단일시기(함-황화광물 괴상백색석영)만 관찰된다. Fig. 2에서 보는 것과 같이 구봉광산 6호맥의 광화I시기 조기에는 회색석영, 백색석영, 녹니석, 견운모, 녹염석, 유비철석, 황철석, 백철석, 자류철석, 섬아연석, 황동석, 방연석, 에렉트럼이 말기에는 단열작용에 의해 생긴 열극을 따라 충진한 투명석영, 유비철석, 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석 및 에렉트럼 등이 산출된다. 광화II시기는 황화광물의 침전없이 백색석영 및 방해석만이 산출된다. 봉암2맥, 봉암1맥 및 군량맥의 광화I시기 조기에는 회색석영, 백색석영, 녹니석, 견운모, 유비철석, 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석이 말기에는 단열작용에 의해 생긴 열극을 따라 충진한 투명석영, 유비철석, 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석 등이 산출된다. 녹염석은 봉암2맥과 군량맥에서만 조기에 산출되며 금홍석은 군량맥에서만 조기에 산출된다. 백철석은 봉암2맥에서만 산출되며 자류철석은 봉암1맥, 군량맥에서 산출된다. 에렉트럼은 봉암1맥을 제외한 봉암2맥, 군량맥에서 산출된다. 봉암2맥의 에렉트럼은 말기에 산출되며 군량맥은 조기와 말기에 산출된다.

자류철석은 봉암1맥에서 섬아연석과 함께 현미경하에서만 관찰된다. 유비철석은 모든 맥에서 산출되며 단독 또는 황철석, 섬아연석과 함께 중-조립으로 산출되나 간혹 거정으로 산출되기도 한다. 또한 투명석영과 함께 산출되는 유비철석은 주로 단독 또는 황철석, 섬아연석 및 황동석과 함께 세립에서 조립까지 산출된다. 황철석은 모암변질산물 뿐만 아니라 주광화시기에 정출한 광물로 산출량과 산출빈도가 높다. 모든 맥에서 산출되는 황철석은 모암변질 부분에서 세립 또는 조립질 집합체로서 산출되거나 괴상백색석영의 중심부에서 모암 포획체의 변질물과 함께 단결정 또는 대부분의 광석광물과 함께 산출된다.

섬아연석은 모든 맥에서 석영맥의 주변부 및 중심부에서 대부분의 광석광물과 공생하며 산출된다. 이 광물은 석영맥의 주변부에서 단독 또는 거정질로 산출되며 짙은 갈색을 띤다. 또한 섬아연석은 맥의 중심부로

감에 따라 산출빈도가 증가하며 단독 또는 유비철석, 황철석, 방연석 및 황동석과 함께 세립 또는 중립의 집합체 및 거정질로 산출된다. 또한 세맥상으로 산출되는 섬아연석은 황철석, 황동석, 방연석과 함께 산출된다. 황동석은 괴상백색석영의 주변부와 중심부에서 산점상으로 산출되거나 간혹 거정질로 산출되기도 한다. 방연석은 괴상백색석영의 주변부와 중심부에서 산출되나 주로 중심부에서 산출빈도와 산출량이 많다. 이 광물은 석영맥의 주변부에서 모암의 일부(유색광물대)에 따라 황철석, 유비철석과 함께 산점상으로 산출되며 중심부에선 입도가 커지며 단독 또는 섬아연석 및 황동석과 함께 대상구조를 갖고 산출된다.

4. 에렉트럼의 산출상태와 화학조성

4.1. 산출상태와 입도

구봉광산의 주 채굴대상인 에렉트럼의 산출상태 및 입도는 광산개발을 좌우하는 필수요소중의 하나이다. 우선 광물공생 관계를 밝히기 위하여 구봉광산의 6호맥(13개의 연마편, 146개 입자), 봉암2맥(6개의 연마편, 35개 입자), 군량맥(11개의 연마편, 136개 입자)에 대해 분류 기술하였다. 여기서 공생관계는 광물학적으로 평형상태에서 성장한 것, 단지 에렉트럼과 경계를 이루는 것 또는 에렉트럼에 의해 공간 충진된 것등을 포함하는 포괄적인 의미로 사용하였다.

구봉광산에서 산출되는 에렉트럼의 공생관계별 산출빈도와 산출량은 도표 1, 2와 같다. 이 도표에서 보는 것과 같이 각 맥에 대한 공생광물의 선택은 공생광물에 따라 부유선광 및 청화제련시 사용되는 시약의 종류 및 사용량 등에 영향을 주므로 두가지 이상의 광물과 함께 산출되는 에렉트럼은 주로 수반되는 광물 및 에렉트럼과의 표면적비를 고려하여 선택하였다. 각 맥에 대한 공생관계별 산출빈도와 산출량을 기술하면, 6호맥은 유비철석과 함께 산출되는 것이 21.9%, 41.6%, 황철석과 함께 산출되는 것이 6.9%, 0.1%, 섬아연석과 함께 산출되는 것이 5.5%, 6.5%(Fig. 3-A), 방연석과 함께 산출되는 것이 15.8%, 7.5%(Fig. 3-B), 석영과 함께 산출되는 것이 50.0%, 44.4%(Fig. 3-A)로서 주로 석영, 유비철석 및 방연석과 함께 산출된다. 봉암2맥은 황철석과 함께 산출되는 것이 48.6%, 3.2%, 섬아연석과 함께 산출되는 것이 8.6%, 45.9%, 황동석과 함께 산출되는 것이 22.9%, 22.8%(Fig. 3-

Table 1. Frequency distribution of electrums in associated minerals and grain size of electrums from each vein of the Gubong mine.

Grain size (μm) / Asso. Min. / mesh		-30 -400	-44 -325	-53 -270	-62.5 -230	-74 -200	-88 -170	-105 -140	-125 -120	-149 -100	-177 -80	177< 80<	Total	Total(%)
No.6 vein	Asp	31	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	32	21.92
	Py	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	6.85
	Sp	6	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	8	5.48
	Gn	19	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	23	15.75
	Qz	57	6	2	5	1	0	2	0	0	0	0	73	50.00
	Total	123	6	6	5	3	0	2	0	0	1	0	146	
	(%)	84.25	4.11	4.11	3.42	2.05	0.00	1.37	0.00	0.00	0.68	0.00		100.00
Bongam2 vein	Py	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	48.57
	Sp	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	8.57
	Cp	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	22.86
	Gn	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	20.00
	Total	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	
	(%)	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		100.00
Gunryang vein	Asp	107	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	109	80.15
	Py	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	9.56
	Sp	3	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	5	3.68
	Gn	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	3.68
	Qz	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	4	2.94
	Total	130	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	136	
	(%)	95.59	0.74	0.74	0.74	0.74	0.00	0.74	0.00	0.00	0.74	0.00		100.00

Asp; arsenopyrite, Py; pyrite, Sp; sphalerite, Cp; chalcopyrite, Gn; galena, Qz; quartz.

Table 2. Volume percent of electrums in associated minerals and grain size of electrums from each vein of the Gubong mine.

Grain size(μm)		-30	-44	-53	-62.5	-74	-88	-105	-125	-149	-177	177<	Total(%)
Asso. Min.	mesh	-400	-325	-270	-230	-200	-170	-140	-120	-100	-80	80<	
No.6 vein	Asp	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	41.09	0.00	41.58
	Py	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.06
	Sp	0.21	0.00	1.43	0.00	4.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.47
	Gn	0.69	0.00	3.78	0.00	3.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.54
	Qz	3.69	3.22	2.60	11.37	3.31	0.00	20.16	0.00	0.00	0.00	0.00	44.35
	(%)	5.14	3.22	7.81	11.37	11.21	0.00	20.13	0.00	0.00	41.09	0.00	100.00
Bongam2 vein	Py	3.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.16
	Sp	45.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45.87
	Cp	22.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.76
	Gn	28.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.21
	(%)	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
Gunryang vein	Asp	1.49	0.00	0.00	4.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	70.05	0.00	76.02
	Py	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18
	Sp	0.27	0.00	1.85	0.00	5.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.77
	Gn	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
	Qz	0.003	1.09	0.00	0.00	0.00	0.00	14.83	0.00	0.00	0.00	0.00	15.92
	(%)	2.04	1.09	1.85	4.48	5.65	0.00	14.83	0.00	0.00	70.05	0.00	100.00

Asp; arsenopyrite, Py; pyrite, Sp; sphalerite, Cp; chalcopyrite, Gn; galena, Qz; quartz.

C), 방연석과 함께 산출되는 것이 20.0%, 28.2%(Fig. 3-D)로서 주로 황철석, 황동석 및 방연석과 함께 산출되나 산출량은 섬아연석과 함께 산출되는 것이 높다. 군량맥은 유비철석과 함께 산출되는 것이 80.2%, 76.0%(Fig. 3-E), 황철석과 함께 산출되는 것이 9.6%, 0.2%, 섬아연석과 함께 산출되는 것이 3.7%, 7.8%, 방연석과 함께 산출되는 것이 3.7%, 0.1%(Fig. 3-F), 석영과 함께 산출되는 것이 2.9%, 15.9%로서 주로 유비철석과 함께 산출된다.

에렉트럼의 형태는 에렉트럼 입자의 장경, 중경, 단경비에 따라 형태를 결정하였다(Zingg, 1935; Groen *et al.*, 1990). 구봉광산의 각 맥에서 산출되는 에렉트럼의 산출형태는 입상형(granular), 불규칙형(irregular), 반원형(subround), 신장 또는 세맥형(elongate or veinlet)으로 분류할 수 있다. Fig. 4에서 보는 것와 같이 6호맥은 반원형이 38.4%, 신장형이 31.5%, 불규칙형이 19.9%, 입상형이 10.3%를 차지한다. 봉암2맥은 반원형이 74.3%, 신장형이 11.4%, 불규칙형이 8.6%, 입상형이 5.7%를 차지한다. 군량맥은 불규칙형이 73.5%, 반원형이 20.6%, 입상형이 2.9%, 신장형이 2.9%를 차지한다.

에렉트럼의 산출량 계산상의 오차는 1) 에렉트럼 입도의 장경(a)과 단경(b) 측정상의 오류, 2) 에렉트럼의 산출형태상의 오류, 3) 에렉트럼 입도의 높이(c) 측정치 못하는 오류에 의해 일어난다. 구봉광산에서 산출되는 에렉트럼의 산출형태는 주로 불규칙형 및 반원형으로 산출되지만 에렉트럼의 정계는 등방정계에 해당한다. 따라서 에렉트럼의 산출량 계산시 구봉광산에서 산출되는 다양한 형태의 에렉트럼에 대해 우선 현미경하에서 입도의 장경(a)과 단경(b)을 측정하여 그에 대한 평균 입경($d=(a \cdot b)^{1/2}$)을 구하였다. 그 평균 입경(d)을 이용하여 에렉트럼의 산출량은 체적 $V=(d)^3$으로 환산하여 계산하였다. 이 결과는 도표 2에서 보는 바와 같이, 149 μm(-100 mesh) 이하인 입자의 산출빈도와 산출량은 6호맥이 99.3%, 58.9%, 봉암2맥이 100.0%, 100.0%, 군량맥이 99.3%, 30.0%를 차지한다.

4.2. 에렉트럼의 화학조성

구봉광산에서 산출되는 에렉트럼의 화학조성을 알아보기 위하여, 구봉광산의 6호맥(5개 시료 26입자 57점), 봉암2맥(2개 시료 8입자 14점), 군량맥(5개 시료 15입자 47점)에서 산출되는 에렉트럼을 대상으로 화학분석한 결과는 도표 3과 같다. 이 도표에서의 에렉트럼 공생관계는 광화작용에 따라 광물학적으로 평형상태에서 성장한 것을 의미한다. 이 도표에서 보는 바와 같이 에렉트럼의 Au atomic %는 6호맥 : 44.37~72.51, 봉암2맥 : 35.40~43.78, 군량맥 : 26.39~71.75의 범위로서 6호맥이 봉암2맥 또는 군량맥보다 Au 함량이 높다

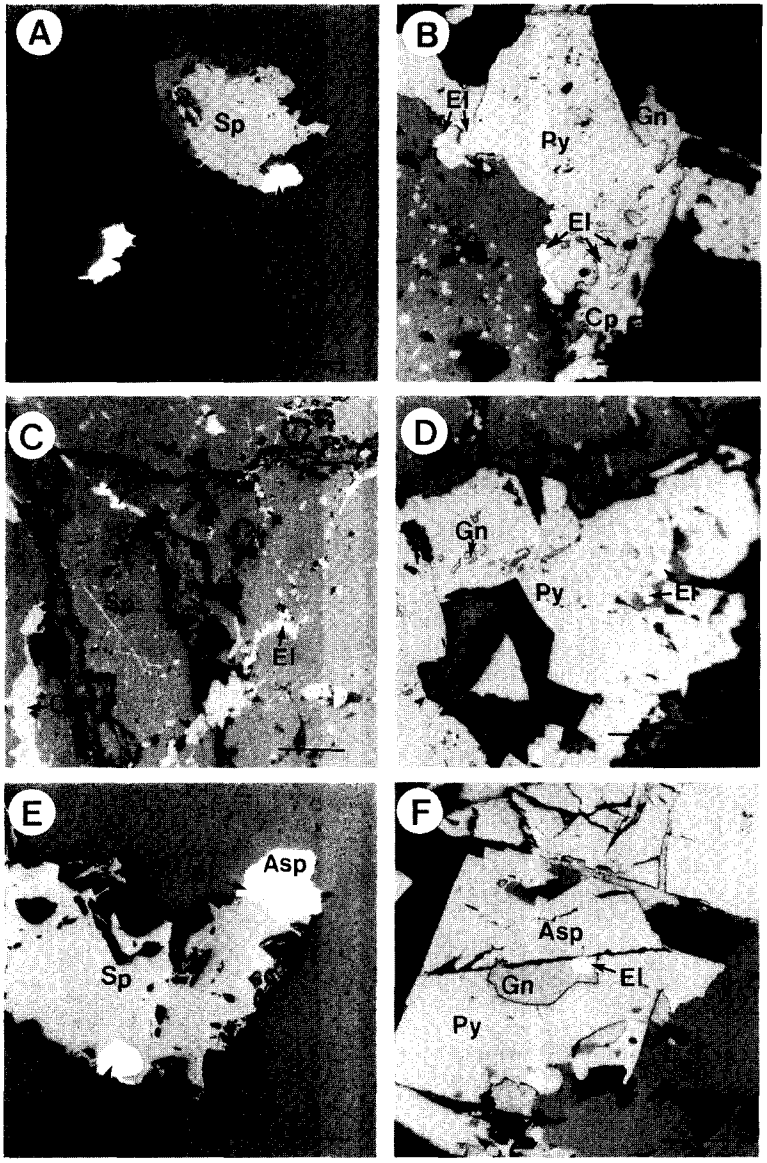

Fig. 3. Photomicrographs of ore minerals from the Gubong mine. A; Electrum coexisting with sphalerite and quartz from No.6 vein, B; Electrum coexisting with galena from No.6 vein, C; Electrum and chalcopyrite infilling fracture of sphalerite from Bongam2 vein, D; Electrum coexisting with galena from Bongam2 vein, E; Electrum coexisting with sphalerite and arsenopyrite from Gunryang vein, F; Electrum coexisting with galena from Gunryang vein. Abbreviation: Asp; arsenopyrite, Py; pyrite, Sp; sphalerite, Cp; chalcopyrite, Gn; galena, El; electrum. Scale bar indicated 50 micron in length.

(Fig. 5). 에렉트럼 동일 입자에 대한 Au atomic %는 석영과 함께 산출되는 에렉트럼에선 중심부(66.41)와 외각부(65.93, 66.62)이며 방연석과 함께 산출되는 에렉트럼에선 중심부(48.12)와 외각부(44.78, 45.81)로서 공생광물별 차이가 심하다. 구봉광산의 각 맥별 에렉트럼에 대한 공생광물별 화학조성(Au atomic %)을 살펴보면 다음과 같다. 6호맥 : 1) 유비철석, 황철석, 섬아연석 및 석영과 공존하는 에렉트럼은 55.86~70.75, 2) 석영과 공존하는 에렉트럼은 44.37~72.51, 3) 황철석, 석영 및 방연석과 공존하는 에렉트럼은 46.26~54.84, 4) 방연석과 공존하는 에렉트럼은 52.05~53.28, 봉암2맥 : 1) 섬아연석 및 황동석과 공존하는 에렉트

Table 3. Chemical composition of electrums from the Gubong mine.

Vein	Stage	Sample No.	Weight %			Atomic %			Associated mineral	
			Au	Ag	Total	Au	Ag	Ag/Au		
No.6	I	D.S.97126-2(3)	69.49	30.07	99.56	55.86	44.14	0.79	Sp,Qz	massive
ditto	I	D.S.97126-2(2)	67.48	32.06	99.54	53.55	46.45	0.87	Qz	white
ditto	I	D.S.97126-2	67.15	32.19	99.34	53.32	46.68	0.88	Qz	
ditto	I	D.S.97126-2(3)	62.55	36.89	99.44	48.15	51.85	1.08	QZ	
ditto	I	D.S.97126-2(2)	59.24	40.68	99.92	44.37	55.63	1.25	Qz	
ditto	I	D.S.97126-2(4)	61.74	38.42	100.16	46.81	53.19	1.14	Qz,Gn	
ditto	I	D.S.97126-2(3)	61.04	38.83	99.87	46.26	53.74	1.16	Qz,Gn	
ditto	I	D.S.97724-1-8(2)	73.27	26.64	99.91	60.10	39.90	0.66	Sp,Qz	
ditto	I	D.S.97724-1-8(2)	79.62	20.76	100.38	67.75	32.25	0.48	Qz	
ditto	I	D.S.97724-1-8(3)	71.75	27.52	99.27	58.81	41.19	0.70	Qz	
ditto	I	D.S.97724-1-8(2)	70.45	29.50	99.95	56.67	43.33	0.76	Qz	
ditto	I	D.S.97724-1-8(2)	70.65	29.71	100.36	56.57	43.43	0.77	Qz	
ditto	I	D.S.97724-1-8	68.90	31.07	99.97	54.84	45.16	0.82	Py,Gn	
ditto	I	D.S.97724-1-8(2)	67.34	32.34	99.68	53.28	46.72	0.88	Gn	
ditto	I	D.S.97724-1-8	66.59	33.59	100.18	52.05	47.95	0.92	Gn	
ditto	I	D.S.97724-2-5	80.35	19.52	99.87	69.27	30.73	0.44	Sp	
ditto	I	D.S.97724-2-5(2)	81.64	18.48	100.12	70.75	29.25	0.41	Sp,Qz	
ditto	I	D.S.97724-2-5(2)	82.64	17.16	99.80	72.51	27.49	0.38	Qz	
ditto	I	D.S.97724-2-5(2)	80.06	20.26	100.32	68.40	31.60	0.46	Qz	
ditto	I	D.S.97724-2-5	79.35	20.92	100.27	67.50	32.50	0.48	Qz	
ditto	I	D.S.97724-2-5(5)	78.63	21.78	100.41	66.41	33.59	0.51	Qz	
ditto	I	D.S.97724-2-5(2)	63.35	36.40	99.75	48.80	51.20	1.05	Qz,Gn	
ditto	I	D.S.97126-3(4)	78.29	21.87	100.16	66.22	33.78	0.51	Asp,Qz	
ditto	I	D.S.97126-14	80.27	19.93	100.20	68.81	31.19	0.45	Py	
ditto	I	D.S.97126-14(2)	78.93	21.00	99.93	67.30	32.70	0.49	Qz	
ditto	I	D.S.97126-14(2)	67.63	32.44	100.07	53.31	46.69	0.88	Qz,Gn	
Bongam2	I	B.A.97724-3-1(4)	55.42	44.61	100.03	40.49	59.51	1.47	Sp,Cp	Massive
ditto	I	B.A.97724-3-1	50.14	50.11	100.25	35.40	64.60	1.82	Sp,Cp	white
ditto	I	B.A.97724-3-1(2)	58.22	42.34	100.56	42.96	57.04	1.33	Py,Gn	
ditto	I	B.A.97724-3-1	56.97	43.57	100.54	41.73	58.27	1.40	Py,Gn	
ditto	I	B.A.97724-3-1	53.85	47.07	100.92	38.52	61.48	1.60	Py,Gn	
ditto	I	B.A.97724-3-1	54.95	44.53	99.48	40.33	59.67	1.48	Cp	
ditto	I	B.A.97724-3-1	56.10	44.19	100.29	41.01	58.99	1.44	Cp	
ditto	I	B.A.9827-11(3)	58.79	41.35	100.14	43.78	56.22	1.28	Gn	Grey
Gunryang	I	G.R.9827-8(5)	69.69	30.04	99.73	55.96	44.04	0.79	Sp	Massive
ditto	I	G.R.9827-8(4)	69.88	30.42	100.30	55.71	44.29	0.80	Sp	grey
ditto	I	G.R.9827-8(4)	63.82	36.21	100.02	49.12	50.88	1.04	Sp	
ditto	I	G.R.9827-8(3)	59.99	40.20	100.19	44.97	55.03	1.22	Sp	
ditto	I	G.R.9827-8(3)	66.70	32.61	99.31	52.83	47.17	0.89	Sp,Qz	
ditto	I	G.R.9827-8(2)	52.31	47.05	99.36	37.84	62.16	1.64	Gn	
ditto	I	G.R.97724-5-3(2)	81.86	17.66	99.52	71.75	28.25	0.39	Asp	Massive
ditto	I	G.R.97724-5-3(4)	64.67	35.83	100.51	49.71	50.29	1.01	Cp,Gn	white
ditto	I	G.R.97724-5-3(2)	58.60	41.54	100.14	43.59	56.41	1.29	Cp,Gn	
ditto	I	G.R.97724-5-3(2)	58.59	41.79	100.38	43.44	56.56	1.30	Cp,Gn	
ditto	I	G.R.97724-5-2(4)	65.42	34.38	99.80	51.03	48.97	0.96	Sp	
ditto	I	G.R.97724-5-5(4)	46.74	53.34	100.08	32.43	67.57	2.08	Py,Gn	
ditto	I	G.R.97724-5-5(2)	43.37	56.98	100.35	29.42	70.58	2.40	Py,Gn	
ditto	I	G.R.97724-5-5(2)	39.26	59.97	99.23	26.39	73.61	2.79	Py,Gn	
ditto	I	G.R.9827-10(4)	42.10	57.86	99.96	28.49	71.51	2.51	Gn	

Asp; arsenopyrite, Py; pyrite, Sp; sphalerite, Cp; chalcopyrite, Gn; galena, Qz; quartz, Values in parentheses are analyzed number.

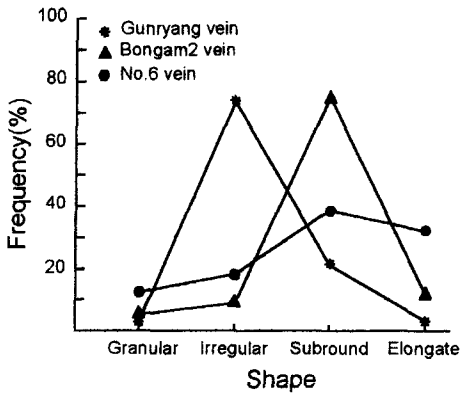

Fig. 4. Diagram showing the shape of electrums from the Gubong mine.

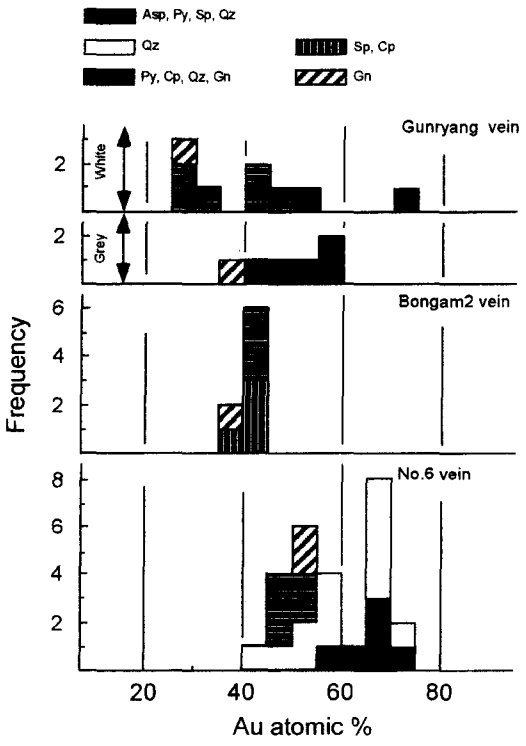

Fig. 5. Histogram showing variations in Au atomic % of electrums as a function of associated minerals from the Gubong mine.

럼은 35.40~41.01, 2) 황철석 및 방연석과 공존하는 에렉트럼은 38.52~42.96, 3) 방연석과 공존하는 에렉트럼은 43.78, 군량맥 : 1) 유비철석 및 섬아연석과 공존하는 에렉트럼은 51.03~71.75, 2) 섬아연석 및 석영과 공존하는 에렉트럼은 44.97~55.96, 3) 황철석, 황동석 및 방연석과 공존하는 에렉트럼은 26.39~49.71, 4) 방연석과 공존하는 에렉트럼은 28.49로서 각 맥에서 산출되는 에렉트럼의 Au atomic % 함량은 공생광물의 생성순서에 비례한다(Fig. 5). 또한 Fig. 5에서 보는 것과 같이 구봉광산의 6호맥에서 군량맥으로 감에 따라 동일한 공생관계를 갖는 에렉트럼의 Au atomic %는 뚜렷히 감소한다.

5. 토 론

광산개발은 원광품위가 높다 하더라도 유용광물의 회수율이 낮으면 성공할 수 없다. 따라서 금과 은같은 유용광물을 선광 및 제련시 효과적으로 회수하려면 원광중에 함금-은광물의 종류, 공생광물, 수반형태, 맥석광물, 함금광물의 피복형태 및 어떤 크기로 분포되어 있는가를 규명하는 것이 중요하다(Gasparrini, 1983; Huston *et al.*, 1992). 이런 배경에서 구봉광상에서 산출되는 에렉트럼에 대한 공생광물, 산출상태, 입도분포, 산출빈도 및 산출량을 계산하였다.

에렉트럼의 산출상태는 주로 불규칙형과 반원형으로 산출되므로 단체분리의 어려움이 있다. 여기서 계산된 에렉트럼의 입자크기(d)는 장경과 단경의 단순한 평균입경이므로 그 형태에 의한 분류를 시도한 결과, 17.0%를 차지하는 세맥상의 에렉트럼은 실제보다 작은 입경을 갖는다. 따라서 이중에 상당부분이 회수가 불가능한 입자로 분류된다. 에렉트럼의 입경은 부유선광 및 제련에서 가장 중요한 요소중의 하나로서 일반적으로 많은 금-은광산에서 149 μm(-100 mesh)의 부선입도가 가장 적당한 것으로 보고하였다(김영관과 공봉성, 1984). 그러나 이 광산에서 입도가 149 μm(-100 mesh) 이하인 에렉트럼의 산출빈도와 산출량은 각각 99.3%, 58.9%(6호맥), 100%, 100%(봉암2맥), 99.3%, 30.0%(군량맥)이다. 여기에 에렉트럼의 산출상태까지 고려한다면 149 μm(-100 mesh) 이하인 에렉트럼의 산출빈도와 산출량은 더 높아질 것이다. 따라서 부유선광은 슬라임 현상에 의한 악영향을 주지 않는 입도까지 마광하여 부선해야 할 것이다.

특히 입경이 작은 에렉트럼은 공생관계에 따라 회수율에 영향을 주기 때문에, 이 광상의 각 맥에서 산출되는 30 μm(-400 mesh) 이하인 에렉트럼의 공생광물별 산출빈도는 6호맥 : 석영(39.0%), 유비철석(21.2%), 방연석(13.0%), 황철석(6.8%), 섬아연석(4.1%), 봉암2맥 : 황철석(48.6%), 황동석(22.9%), 방연석(20.0%), 섬아연석(8.6%), 군량맥 : 유비철석(78.7%), 황철석(9.6%),

방연석(3.7%), 섬아연석(2.2%) 및 석영(1.5%)이다. 또한 각 맥마다 30 μm(-400 mesh) 이하인 에렉트럼의 공생광물이 현저히 다르며 석영과 함께 산출되는 에렉트럼은 부유선광시 일부가 회수되지 않아 회수율과 품위 저하의 원인이 될 수 있다. 그러므로 부유선광 및 청화제련시 이러한 점을 고려해야 할 것이다.

구봉광산의 각 맥에 따라 광석광물의 산출량은 다소 차이가 있지만 황철석, 섬아연석, 방연석 > 유비철석 > 황동석 > 자류철석 순으로 감소한다. 또한 에렉트럼의 공생광물은 유비철석(44.5%) > 석영(24.3%) > 황철석(12.6%) > 방연석(11.0%) > 섬아연석(5.0%) > 황동석(2.5%)순이다. 이 결과는 부유선광중 사용되는 포수제, 기포제, 조건제 및 pH 조절제의 종류와 사용량을 적절하게 결정함으로서 경제적 또는 환경적인 면에 유용하게 이용될 수 있다. 또한 청화제련시 유비철석, 황철석, 섬아연석, 방연석등이 쉽게 용해되지 않기 때문에 사용되는 시약, 배소의 조건, 발생하는 이산화황, 비소의 양 등을 고려해야 할 것이다.

구봉광산에서 산출되는 에렉트럼의 전체적인 조성범위는 26.39~72.51 Au atomic %를 갖으나, 광물의 공생관계로 볼 때 유비철석, 황철석 및 섬아연석과 함께 산출되는 것에서 Au 함량이 높다. 또한 광물의 정출순서로 볼 때 조기에 정출한 광석광물과 공생하는 것이 말기에 정출한 광석광물과 공생하는 것보다 Au 함량이 높게 산출된다. 각 맥에 따른 조성의 차이에서도 6호맥에서의 에렉트럼은 봉암2맥 및 군량맥에서 산출되는 것보다 Au 함량이 높으며 동일한 공생광물과 산출되는 에렉트럼은 6호맥에서 군량맥으로 감에 따라 Au함량이 감소한다. 에렉트럼내의 Ag는 청화제련시 은황화물을 형성하여 유용광물의 회수율을 저하시키기 때문에, 황동석, 석영 및 황철석과 함께 산출되는 에렉트럼과 봉암2맥에서 산출되는 에렉트럼은 이러한 점을 고려해야 할 것이다.

6. 결 론

1. 구봉광산의 각 맥별 에렉트럼의 공생광물별 산출빈도와 산출량은 6호맥 : 유비철석과 함께 산출되는 것이 21.9%, 41.6%, 석영과 함께 산출되는 것이 50.0%, 44.4%, 황철석과 함께 산출되는 것이 6.9%, 0.1%, 방연석과 함께 산출되는 것이 15.8%, 7.5%, 섬아연석과 함께 산출되는 것이 5.5%, 6.5%, 봉암2맥 : 황철석과 함께 산출되는 것이 48.6%, 3.2%, 섬아연석과 함께 산출되는 것이 8.6%, 45.9%, 황동석과 함께 산출되는 것이 22.9%, 22.8%, 방연석과 함께 산출되는 것이 20.0%, 28.2%, 군량맥 : 유비철석과 함께 산출되는 것이 80.2%, 76.0%, 황철석과 함께 산출되는 것이 9.6%, 0.2%, 섬아연석과 함께 산출되는 것이 3.7%, 7.8%, 방연석과 함께 산출되는 것이 3.7%, 0.1%, 석영과 함께 산출되는 것이 2.9%, 15.9%이다.

2. 구봉광산의 각 맥별 입자가 149 μm(-100 mesh) 이하인 에렉트럼의 산출빈도와 산출량은 6호맥 : 99.3%, 58.9%, 봉암2맥 : 100%, 100%, 군량맥 : 99.3%, 30.0%이다.

3. 구봉광산에서 산출되는 에렉트럼의 산출상태는 반원형이 44.4%, 불규칙형이 34.0%, 신장형이 15.3% 및 입상형이 6.3%를 차지하며 각 맥에 따른 산출형태는 6호맥과 봉암2맥에서 반원형, 신장형 및 불규칙형, 군량맥에서 불규칙형 및 반원형이 우세하게 산출된다.

4. 구봉광산의 각 맥별 에렉트럼의 Au atomic %는 6호맥 : 44.37~72.51, 봉암2맥 : 35.40~43.78, 군량맥 : 26.39~55.96의 범위이며 6호맥이 봉암2맥과 군량맥보다 Au 함량이 높다.

5. 구봉광산의 각 맥별 에렉트럼에 대한 공생광물별 화학조성(Au atomic %)은 6호맥 : 1) 유비철석, 황철석, 섬아연석 및 석영과 공존하는 에렉트럼은 55.86~70.75, 2) 석영과 공존하는 에렉트럼은 44.37~72.51, 3) 황철석, 석영 및 방연석과 공존하는 에렉트럼은 46.26~54.84, 4) 방연석과 공존하는 에렉트럼은 52.05~53.28, 봉암2맥 : 1) 섬아연석 및 황동석과 공존하는 에렉트럼은 35.40~41.01, 2) 황철석 및 방연석과 공존하는 에렉트럼은 38.52~42.96, 3) 방연석과 공존하는 에렉트럼은 43.78, 군량맥 : 1) 유비철석 및 섬아연석과 공존하는 에렉트럼은 51.03~71.75, 2) 섬아연석 및 석영과 공존하는 에렉트럼은 44.97~55.96, 3) 황철석, 황동석 및 방연석과 공존하는 에렉트럼은 26.39~49.71, 4) 방연석과 공존하는 에렉트럼은 28.49로서 각 맥에서 산출되는 에렉트럼은 공생광물의 정출순서에 Au 함량이 비례한다.

6. 상기 자료를 부유선광 및 청화제련에 반영한다면 금의 회수율 향상에 기여되리라 생각한다.

사 사

이 연구는 2000년도 한국학술진흥재단 연구비(KRF-2000-DA0024)에 의하여 연구되었다. 이 기관에 사의를 표한다. 아울러 심사과정에서 중요한 관점에 대하여 지적과 수정을 해주신 전북대학교 정재일 교수님과 대전

대학교 황정 교수님께 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌

김영관, 공봉성 (1984) 삼광광산 금,은광에 대한 부유선광 및 청화제련 시험 보고. 대한광업 진흥공사, 24p.

대한광업진흥공사 (1972) 광상시추조사보고. 2호.

대한광업진흥공사 (1973) 광상시추조사보고. 3호.

대한광업진흥공사 (1974) 광상시추조사보고. 4호.

대한광업진흥공사 (1990) 한국의 광상. 12호.

島村新兵衛 (1931) 조선지질도 청양도폭(1:50,000). 조선총독부 지질조사소.

동아응용지질콘설탄트 (1974) 충남탄전정밀지질조사보고서.

전찬규, 오민수 (1970) 구봉광산의 지질과 광상. 광산지질, 3권, p. 169-174.

최선규, 위수민 (1992) 에렉트럼의 화학조성과 관련된 한국 중부지역 금은광상의 성인적 특성. 지질학회지, 28권, p. 196-217.

Gasparrini, C. (1983) The mineralogy of gold and its significance in metal extraction. Canadian Mining Metallurgy Bull., v. 76, p. 144-153.

Groen, J.C., Craig, J.R. and Rimstidt, J.D. (1990) Gold-rich rim formation on electrum grains in placers. Can. Mineralogist, v. 28, p. 207-228.

Huston, D.L., Bottrill, R.S., Creelman, R.A., Zaw, K., Ramsden, T.R., Rand, S.W., Gemmell, J.B., Jablonski, W., Sie, S.H. and Large, R.R. (1992) Geologic and geochemical controls of the mineralogy and grain size of gold-bearing phases, eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits. Econ. Geol., v. 87, p. 542-563.

Zingg, Th. (1935) Beitrade zur schotteranalyse. Schweizerische Mineralogische Mitt., v. 15, p. 39-140.

2002년 3월 8일 접수, 2002년 6월 14일 게재승인.