

논 단

## 충남 청양일대 일부 중열수 금-은광상의 광화특성 연구

유 봉 철

충남대학교 자연과학대학 지질환경과학과

최근 세계 금광상의 탐사 및 개발방향은 조산형 금광상(Orogenic gold deposits), 스키른형 금광상(Skarn type gold deposits), 천열수형 금광상(Epithermal gold deposits), 칼린형 금광상(Carlin type gold deposits), 반암형 동-금광상(Copper-gold porphyry deposits) 및 철산화물형 동-금 광상(Iron oxide copper-gold deposits)등의 부존모델 및 성인이 많은 학회지를 통하여 알려지면서 세계 도처에서 굴지의 탐사 및 개발회사에 의해 집중탐사를 시행, 그 결과 상기 유형의 금광상이 다수 발견되어 개발이 진행되고 있다. 아시아와 미국 지역의 심부유체와 화성암에 의해 생성되는 광상에 많은 관심을 가지고 있다고 말하는 제임스 박사는 한국에서도 역시 가장 관심을 끄는 분야는 새로운 금광상을 찾는 일이며, 만약 새로운 조산형 금광상들이 발견된다면 한국의 무역수지에 큰 영향을 미치게 될 것이라고 말하였다. 미국의 경우에도 서부 지역의 이들 광상들의 운영이 미국이 무역수지에 엄청난 영향을 미치고 있다고 설명하였다.

현재 한반도에는 7,023개소의 금-은 광상이 분포하는 것으로 알려져 있으며 지금까지 금속 광물자원과 관련하여 보고된 논문이 270 여 편

에 달한다. 대부분의 금-은광상들은 열극충진광상이며 서로 상이한 광물학적, 지화학적 특성을 보여준다. 남한의 금-은광상은 성인적으로 화성광상과 퇴적광상이 있다. 그러나 대부분이 화성광상이며 이는 스키른형 광상, 알라스카이트형 광상, 열수교대형 광상, 열수충진맥상 광상으로 세분된다. 열수충진맥상 광상은 중열수광상, 한국형광상 및 천열수광상으로 분류된다. 중열수 및 한국형광상은 주로 경상분지를 제외한 곳에서 산출되며 천열수광상은 주로 경상분지내에서 산출된다. 중열수광상은 주로 변성퇴적암류가 모암으로 태창광산, 보련광산, 삼황학광산, 대일광산, 구봉광산, 대봉광산 등이 대표적이며 이들 광상은 단순한 광물조합, 단맥(괴상)의 맥산상, 높은 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 및  $\delta O^{18}$  함량, 낮은 염농도, 고온 및 고압형 등의 특성을 갖는다. 이런 특성을 갖는 광상들은 세계 도처에서 관찰되나 우리나라와 인접한 중국의 Jiaodong gold province, Northern China gold province 및 Ainlingand Xiao Qinling gold provinces에서 발견되는 금-은광상과 매우 유사하다. 중국의 경우, 여러 유형의 금-은광상이 산출되나 앞에서 설명한 바와 같이 높은 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 및  $\delta O^{18}$  함량과 관계화성암과 밀접한 관계를 갖는 광상에

서 금 생산량의 대부분을 차지한다. 중국의 금-은광상중 선캠브리아기내에 배태되는 합금 석영 맥광상은 중국지질학자들은 “Linglong-type” 광상으로 명명하였다. 그러나 최근의 연구에 의하면, 이들 광상들은 지체구조 및 화성활동과 관련하여 조산형 금광상이나 Intrusion-related gold deposits로 기재하였다.

경기육괴, 영남육괴 및 옥천계내에 배태되는 광상들은 여러 형의 광상들이 존재하나 조산형 금광상과 관련된 특성을 갖은 금-은광상들은 심부유체와 화성암에 의해 생성되는 광상들이다. 따라서 이런 특징을 갖은 광상들에 대해 새로운 이론의 도입에 따른 탐사를 실시해야 할 것이다. 그래서 자원 탐사 및 개발에 관련된 기업, 연구소 및 학교에서는 해외자원개발뿐만 아니라 과거 채굴했던 광산이나 부존 잠재가능성이 높은 광구에 대해 정밀조사와 시추탐광 등을 통해 적극적인 탐사활동을 전개함으로써 잠재성 있는 광상탐사에 성공사례를 높여가고 있다.

현재 광상학의 연구방향은 광상의 성인연구에 있어 단일 광상의 성인 연구도 중요하지만 단일 광종의 광상뿐만 아니라 여러 광종의 광상에 대한 성인, 탐사 및 개발방향은 지체구조, 화성활동 및 변성작용 등 여러 광상 형성 요소들과 관련하여 해석하고 있다. 많은 선진국에서는 금생산량이 높은 중-고온형 금광상을 찾는데 국가적인 연구 지원과 산학협동에 의해 이를 적극 후원하고 있다. 이 유형의 광상들은 한반도에서 포천, 홍천, 천안-중원, 상주, 영동, 무주, 보성 지역에 밀집 분포된다. 따라서 천안-중원지역내에 해당되는 청양일대 일부 중열수 광상(구봉 및 대봉광상)에 대한 모암변질광물 및 광석광물, 유체포유물, 안정동위원소 등을 수행함으로써 중열수 광상(조산형 금광상)에 대한 광화유체에 대한 특성을 고찰해 보고자 한다.

## 지질 및 광상개요

청양일대 구봉 및 대봉광상의 주변지질은 기존 연구(이현구 외, 1992; 유봉철 외, 2003; Yoo et al., 2006)에서 보고되어 있어 여기에서는 간략하게 그 개요만을 설명하고자 한다. 이들 광상은 선캠브리아기의 변성퇴적암류가 넓게 분포하고 있으며 이를 쥐라기 대동누층군의 퇴적암류가 부정합으로 피복하고 있다. 또한 상기의 암류들을 후기에 관입한 쥐라기 흑운모화강암과 백악기의 산성암류가 소규모로 분포한다(그림 1).

선캠브리아기 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 분류되나 상호 접이적인 관계이다. 각섬암질 편암은 대봉광상의 남서쪽 약 1 km 지점에 국부적으로 분포되며 질은 녹색을 띤다. 사문암은 호상편마암내 N40~60°E의 방향성을 갖는다. 결정질석회암과 석회규산염암은 대봉광산 북서쪽 300m 지점에 100~150m의 폭을 갖고 북동방향으로 대상 분포된다.

쥐라기 대동누층군 퇴적암류인 조계리층, 백운사층 및 성주리층은 광상의 동쪽에 북북동방향으로 분포한다. 조계리층은 선캠브리아기 호상편마암과 단층으로 접하고 있으며 함장석각력 사암대와 역암대로 분대된다. 백운사층은 조계리층을 정합으로 피복하고 사암대와 호층대로 분대된다. 성주리층은 크게 하부사암대, 호층대, 상부사암대로 분대된다.

쥐라기 흑운모화강암은 선캠브리아기의 변성퇴적암류를 관입하였으며 광상의 남서 및 북서 지역과 갱내에서 관찰된다. 광상 갱내에서 관찰되는 흑운모화강암은 선캠브리아기 변성퇴적암

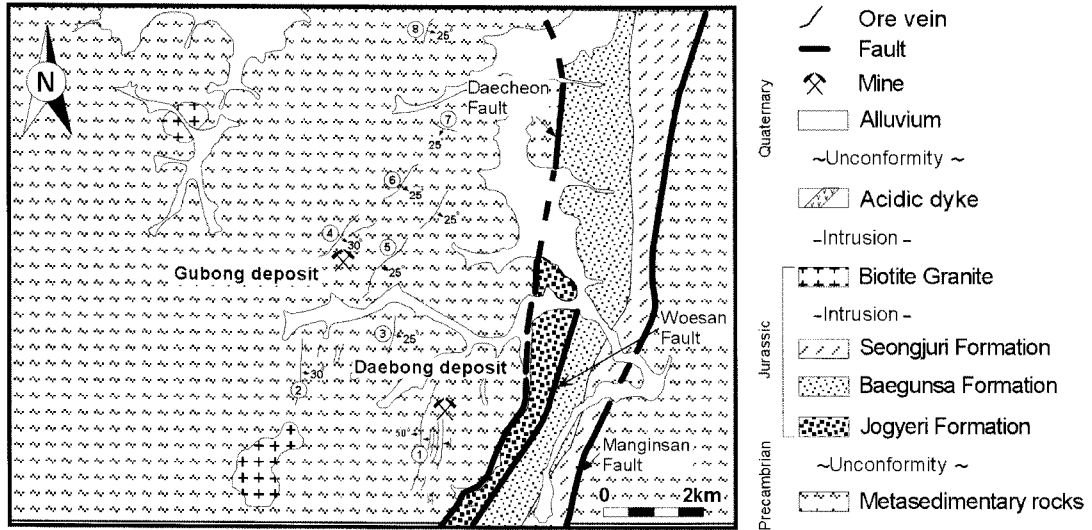


그림 1. 구봉 및 대봉광상의 석영맥의 방향성과 지질도 (1:단봉맥, 2:옹마맥, 3:간척맥, 4:6호맥, 5:1호맥, 6:봉암2맥, 7:봉암1맥, 8:군량맥).

류를 관입하였으며 합금-은 석영맥에 의해 관입을 당하였다. 흑운모 화강암의 산상은 조립질이며 유백색을 띤다. 산성암맥은 주로 석영맥으로 NE 방향을 갖으며, 간혹 NW의 방향성을 보이기도 한다.

구봉 및 대봉광상은 호상 및 화강편마암 내에 발달된 열극을 충진한 합금-은 석영맥광상이다. 구봉광상은 1908년 4월 부락민에 의해 최초로 노두가 발견된 후, 몇 개의 광구로 분할되어 수명의 일인에 의해 개발 이전되어 오다가 1943년 조선광업진흥(주)로 통합 이전되었으며, 1966년 10월 대명광업개발(주)에서 인수하여 개발하다가 1972년 휴광하였다. 현재 구봉광상은 광해방지 합리화 사업의 일환으로 폐석장 및 폐석이 정리된 상태이고, 모든 갱구는 봉락되어 입항이 불가능하다. 구봉광상의 주개발지역은 구룡리 지역으로 본산 지역과 그 주변지역이 해당된다. 구봉광상 일대에는 N20~45° E 방향으로 평행한 석영맥이 발달된다. 이 석영맥은 과거 노천 또는 갱도를 개설하여 개발되었으며 개발 갱도를 대사갱, 수갱, 간척갱, 봉암2갱, 봉암1갱, 군량갱 및

봉마갱으로 명명하였다. 또한 각 갱에서의 석영맥은 각각 6호맥, 1호맥, 간척맥, 봉암2맥, 봉암1맥, 군량맥 및 봉마맥으로 불리었다(이현구 외, 1992; 유봉철 외, 2003).

대사갱은 1972년 휴광될 때까지 우리나라 최고의 금 산지였던 곳이다. 이 대사갱은 1926년부터 1970년까지 금-은 생산실적은 13,446 kg Au, 3,411 kg Ag이다. 구봉광상 개항 이후 60여 년간 1호맥에서 9호맥까지 개발 및 채광하였으나 1970년에는 6호맥 및 그 분지맥을 주 행대상으로 하였다. 맥의 주향은 N20~60° E, 경사는 20~50° S 내지 25~35° SE, 평균맥폭은 0.6~1.5 m, 평균품위는 6~8 g/t Au, 5~6 g/t Ag이다. 이 6호맥은 통동갱(0m)에서 하부 -1,440 m까지 20~25°의 경사를 갖고 관찰되며, 연장은 -1,440m까지는 400m이나 -1,440m 하부에서는 200m 내외로 그 연장이 줄어든다. 1호맥은 6호맥에서 동측으로 400m 떨어진 곳에 위치한 맥으로서 맥폭은 0.6m, 연장은 400m 이상으로 추정된다.

봉암2갱은 봉암리의 저수지 옆에 위치하며 이

봉암2맥은 노두 1개소, 갱구적 3개소, 시굴적 1개소가 확인된다. 노두에서 맥폭은 1.5m이며 맥의 주향과 경사는 N45° E, 25° SE로서 6호맥의 연장부일 가능성이 높다. 과거 갱내도에 의하면 사갱으로 하 5~6번갱까지 개발되었고 수평굴진은 400m 되는 것으로 추정되며 구채굴적, 폐석장등에서 채취한 시료의 금 및 은의 품위는 15.5~59.6 g/t Au, 28~229 g/t Ag이다.

봉암1갱은 새지마을 입구에서 갱구가 관찰되나 입향이 불가능하다. 노두에서 폭이 0.5m 되는 석영맥이 관찰되나 황화광물은 관찰되지 않는다. 봉암1맥은 N50~70° W, 25° SW의 주향과 경사를 갖으며 연장은 300m 이상 될 것으로 추정된다.

군량갱은 중구동에 위치하며 이 갱의 상부갱구는 거의 흔적이 관찰되지 않고 폐석들만 관찰된다. 그러나 하부갱구는 갱입구가 남아 있으나 입향이 불가능하다. 군량맥의 주향과 경사는 N70° E, 25° SE, 맥폭은 0.6~1.5m, 품위는 ND~79.5 g/t Au, Tr~102 g/t Ag이다. 이 맥은 사갱으로 하3번갱까지 개발하였다.

간척갱과 용마갱은 갱구가 관찰되지 않으며 약간의 폐석들만 관찰된다. 이 폐석들에서 황화광물은 관찰되지 않는다.

단봉갱, 도룡갱, 양치기갱등이 있으며 과거 노두에서 채굴한 흔적이 여러곳에 남아 있다. 이 일대에는 연고지맥, 글치기맥, 단봉맥 등이 총 연장이 500~1,000m인 5개조의 석영맥으로 관찰된다. 대봉광상은 과거 단봉맥을 대상으로 일제시대에 소규모 개발하던 것을 1988년 영풍광업(주)에서 인수하여 새로이 개발한 후 1990년 11월 휴광신고를 내기까지 4개 level 총 1,400m 연맥굴진되었다. 대봉광상은 N80° W 방향으로 본갱을 개설, 약 150m 크로스 굴진 후, N10~20° E, 40~60° NW방향의 단봉맥을 착맥한 후 연맥굴진되어 있다(이현구 외, 1992; 유봉철 외, 2003).

1990년도 한국광물자원공사(구 대한광업진흥공사)에서 구봉광상의 6호맥 하부에 대한 시추 결과, 90-12호공에서 진폭 0.9~1.5m, 품위 1.1~27.9 g/t Au, 4~25 g/t Ag인 광맥으로 비교적 양호하였으나 인접한 곳에서 시추한 90-11호공(950m), 91-8호공(950m)에서는 진폭 <1.5m인 광맥을 확인하였으나 품위는 ND Au, ND~Tr Ag로 산출되었다. 그 후 2004년도에도 6호맥 하부 탐사를 위하여 850m 시추깊이에 2개공을 행하였다. 그러나 이 2개의 시추코어에선 광맥을 착맥하였으나 품위분석결과 <0.05 g/t Au, <0.05 g/t Ag으로 매우 낮게 산출되어 경제성이 없는 것으로 확인되었다(대한광업진흥공사, 2004).

## 모암변질 및 광석광물

구봉 및 대봉광상은 서로 다른 시기의 괴상백색석영맥(광화I시기)과 투명석영맥(광화II시기)으로 구성된다. 괴상백색석영맥에서는 단일작용 등에 의하여 형성된 리본-호상(ribbon-banded)구조와 각력상구조 등이, 투명석영맥의 경우 빗살구조, 망상구조 및 정동구조 등이 관찰된다. 현미경하에서 석영들은 재결정화된 봉합선구조가 관찰되며 광화작용후에도 계속적으로 구조운동과 변형작용이 있었다. 이들 광상의 모암변질은 회녹색을 띠며 석영맥으로부터 100cm 이내에 한정되어 산출된다. 모암인 흑운모 화강암과 호상 또는 화강편마암에서 관찰되는 모암변질은 큰 차이가 없으며 산출되는 변질작용은 건운모화, 녹니석화, 탄산염화, 황철석화, 규화 및 점토화작용 등이 관찰된다. 이들 모암이 석영맥과 접촉한 부분에서는 주로 건운모대가 관찰되며 석영맥으로부터 멀어짐에 따라 녹니석대가 관찰된다.

건운모대는 석영맥의 주변부를 따라, 그리고

맥의 규모에 따라 수 cm에서 30cm 이내에서 관찰되며 견운모, 석영, 탄산염광물, 일라이트, 녹니석 및 녹염석으로 구성된다. 녹니석대는 모암의 일부분(유색광물대)이 석영맥 내에 포획되어 산출되는 부분, 흑운모 화강암과 호상편마암의 유색광물대가 산출되는 부분에서 관찰되며 녹니석, 견운모, 석영, 탄산염광물 및 녹염석으로 구성된다. 이 광상의 견운모는 일반적으로 백운모에 비하여 K(1.05~1.15)의 함량이 낮고, Fe(0.33~0.49) 및 Mg(0.44~0.68)의 함량이 다소 높아 열수 운모의 조성범위와 비슷하며 백운모-펜자이트쪽에 해당된다. 이 광상에서 산출되는 녹니석은 Hey(1954)가 제시한 다이어그램에 도시하면 대부분 브룬스비자이트

(brunsvigite)에 해당되며 계산된 녹니석 단종의 활동도는  $a_1(\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_6)=1.314\text{E}-6 \sim 1.785\text{E}-5$ ,  $a_2(\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_6)=1.885\text{E}-6 \sim 1.868\text{E}-5$ ,  $a_3(\text{Fe}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_6)=0.01883 \sim 0.02728$ 로서 철이 풍부한 녹니석이 우세하다(유봉철 외, 2007).

이들 광상에서 산출되는 광석광물은 자철석, 티탄철석, 유비철석(27.2~33.7 atomic % As), 자류철석, 황철석, 백철석, 섬아연석(4.35~18.52 mole % FeS, 0.41~5.32 mole % CdS), 황동석, 방연석, 에렉트림(26.4~81.4 atomic % Au) 및 휘은석 등으로 광물조합이 비교적 단순하다(유봉철 외, 2003; Yoo et al., 2006) (그림 2). 광물조합의 단순함은 광산개

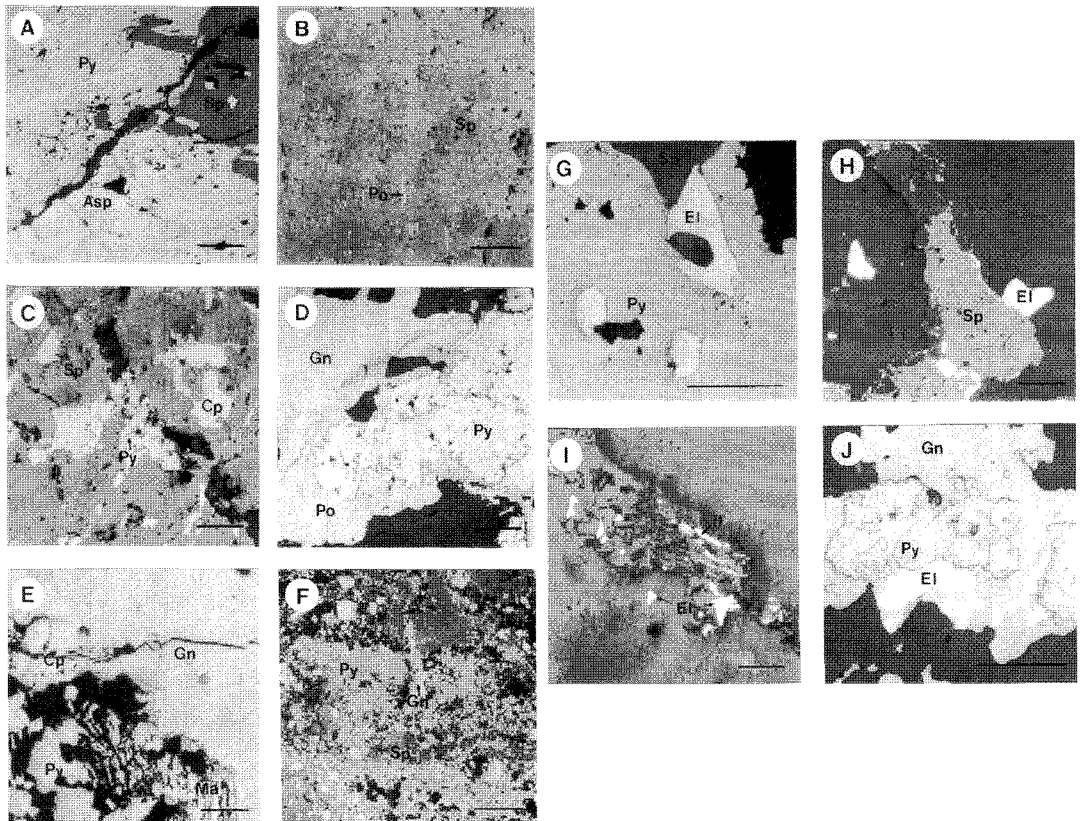


그림 2. 구봉 및 대봉광상의 광석광물과 에렉트림 (Asp; arsenopyrite, Cp; chalcopyrite, El; electrum, Gn; galena, Il; ilmenite, Ma; marcasite, Po; pyrrhotite, Py; pyrite, Sp; sphalerite).

발에 있어 장점으로 작용할 수 있는 요소이다.

특히, 광산개발에 있어서 원광품위가 높다 하더라도 유용광물의 회수율이 낮으면 광산개발은 성공할 수 없다. 따라서 금과 은 같은 유용광물을 선광 및 제련시 효과적으로 회수하려면 원광중에 함금-은광물의 종류, 공생광물, 수반형태, 맥석광물, 함금광물의 피복형태 및 어떤 크기로 분포되어 있는가를 규명하는 것이 중요하다(유봉철 외, 2002). 이런 배경에서 구봉 및 대봉광상에서 산출되는 에렉트럼에 대한 공생광물, 산출상태, 입도분포, 산출빈도 및 산출량을 계산하였다. 에렉트럼의 입경은 부유선광 및 제련에서 가장 중요한 요소중의 하나로서 일반적으로 많은 금-은광산에서 149  $\mu\text{m}$ (-100 mesh)의 부

선입도가 가장 적당한 것으로 보고하였다(김영관과 공봉성, 1984). 그러나 구봉 및 대봉광상에서 입도가 149  $\mu\text{m}$ (-100mesh) 이하인 에렉트럼의 산출빈도는 표 1, 2와 같다. 여기에 에렉트럼의 산출상태까지 고려한다면 149  $\mu\text{m}$ (-100 mesh) 이하인 에렉트럼의 산출빈도와 산출량은 더 높아질 것이다.

따라서 부유선광은 슬라임 현상에 의한 악영향을 주지 않는 입도까지 마광하여 부선했어야 할 것이다. 특히 입경이 작은 에렉트럼은 공생관계에 따라 회수율에 영향을 주기 때문에, 이들 광상에서 산출되는 30  $\mu\text{m}$ (-400mesh) 이하인 에렉트럼의 공생광물별 산출빈도는 표 1, 2와 같으며 각 맥마다 30  $\mu\text{m}$ (-400 mesh) 이하인 에

표 1. 구봉광상의 각 맥에서 산출되는 에렉트럼의 산출빈도

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

표 2. 대봉광상에서 산출되는 에렉트럼의 산출도

Grain size( $\mu\text{m}$ )	-30	-44	-53	-62.5	-74	-88	-105	-125	-149	-177	177<	Total	Total
Asso. Min. mesh	-400	-325	-270	-230	-200	-170	-140	-120	-100	-80	80<		(%)
Py(Qz)	18	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	20	3.80
Sp(Py)	29	3	2	3	3	1	0	0	0	0	1	42	7.97
Qz(Py,Gn)	196	26	26	20	16	23	6	15	5	6	7	346	65.65
Gn	90	6	4	2	2	3	3	3	2	1	3	119	22.58
Total	333	35	33	25	21	29	9	18	7	7	10	527	100.00
(%)	63.19	6.64	6.26	4.74	3.98	5.32	1.71	3.42	1.33	1.33	2.09	100.00	

Gn: galena, Py: pyrite, Qz: quartz, Sp: sphalerite.

렉트럼의 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. 구봉광상의 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(5.1%)>황동석(2.5%)순이다.

### 광화유체의 특성

구봉 및 대봉광상의 유체포유물은 CO<sub>2</sub>-rich 포유물(I형 포유물), H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> 포유물(II형 포유물)과 수용성 포유물(III형 포유물)로 분류된다. II형 포유물은 LH<sub>2</sub>O-LCO<sub>2</sub> 포유물(IIa형 포유물)과 LH<sub>2</sub>O-LCO<sub>2</sub>-VCO<sub>2</sub> 포유물(IIb형 포유물)로 세분하였으며 수용성 포유물은 LH<sub>2</sub>O 포유물(IIIa형 포유물), LH<sub>2</sub>O-VH<sub>2</sub>O 포유물(IIIb형 포유물), LH<sub>2</sub>O-VH<sub>2</sub>O-mica 포유물(IIIc형 포유물)로 세분할 수 있다(표 3).

I형 포유물의 T<sub>mCO<sub>2</sub></sub>는 -63.1~-57°C(구봉광상), -67.2~-56.2°C(대봉광상)이다. I형 포

유물의 ThCO<sub>2</sub>는 -9.9~28.4°C(구봉광상), -65.2~14.6°C(대봉광상)이며 액상으로 균일화되고 일부 I형 포유물은 -1.3~26.3°C(구봉광상)으로 기상으로 균일화된다. IIa형 포유물의 T<sub>mCO<sub>2</sub></sub>는 -63.7~-56.2°C(구봉광상), -62~-56.2°C(대봉광상)이다. IIa형 포유물의 ThCO<sub>2</sub>는 -16.4~24.9°C(구봉광상), -13.2~24.9°C(대봉광상)로 액상으로 균일화되고 일부 IIa형 포유물은 2.4~24.5°C(구봉광상)으로 기상으로 균일화된다. IIa형 포유물의 T<sub>mclathrate</sub>는 3.2~10.2°C(구봉광상), 1.9~12.1°C이다(표 3). II형 포유물은 가열시 decrepitation되는 유체포유물이 많으며 LCO<sub>2</sub>의 물체적에 의해 LCO<sub>2</sub> + LH<sub>2</sub>O ⇒ LH<sub>2</sub>O (T<sub>htotal</sub>(L))(< 0.5)와 LCO<sub>2</sub> + LH<sub>2</sub>O ⇒ LCO<sub>2</sub> (T<sub>htotal</sub>(V))(> 0.5)상으로 균일화된다. IIa형 포유물의 균일화온도는 244~432°C(구봉광상), 203~388°C로 액상으로 균일화되며 263~386°C(구봉광상), 288~322°C(대봉광상)로 기상으로 균일화된다. IIb형 포유물의 T<sub>mCO<sub>2</sub></sub>는 -57.4~-56.6°C(구봉광상), -57.8~-56.4°C(대봉광상)이다. IIb형 포유물의 ThCO<sub>2</sub>는 25.2~28.4°C(구봉광상), 25.3~27°C(대봉광상)로 액상으로 균일화되고 일부 IIb형 포유물은 25.8~28.4°C(구봉광상)으로 기상으로 균일화된다. IIb형 포유물의 T<sub>mclathrate</sub>는 4.2~8.9°C(구봉광상), 7.9

논단 (유봉철)

~9.4℃이다(표 3). IIb형 포유물의 균일화온도는 272~349℃(구봉광상)로 액상으로 균일화되며 305~336℃(구봉광상), 240~320℃(대봉광상)로 기상으로 균일화된다. IIIa형 포유물의 Tmice는 -2.2~-0.3℃(대봉광상)이다. IIIb형 포유물의 Tmice는 -13.7~0℃(구봉광상), -6.2~0℃(대봉광상=광화I시기 : -6.2~0℃, 광화II시기 : -2.5~0℃)이다. IIIb형 포유물의 균일화온도는 130~399℃(구봉광상), 149~379℃(대봉광상=광화I시기 : 149~361℃, 광화II시기 : 151~378℃)로 액상으로 균일화된다. 대봉광상의 광화II시기에 산출되는 IIIc형 포유물의 Tmice는 -0.8~-0.2℃이며 균일화온도는 157~323℃로 액상으로 균일화된다(표 3).

이들 광상의 염농도는 IIa형 포유물: 1.2~11.7 wt.%(구봉광상), 0.2~13.4 wt.%(대봉

광상); IIb형 포유물: 4.5~10.2 wt.%(구봉광상), 1.2~4.2 wt.%(대봉광상); IIIa형 포유물: 0.5~3.7 wt.%(대봉광상); IIIb형 포유물: 0.4~17.5 wt.%(구봉광상), 0.2~9.5 wt.%(대봉광상=광화I시기: 0.2~9.5 wt.%, 광화II시기: 0.4~4.2 wt.); IIIc형 포유물: 0.4~1.4 wt.%(대봉광상)이다(표 4). 이들 광상에서 산출되는 IIa, IIb형포유물의 XH<sub>2</sub>O, XNaCl, XCO<sub>2</sub>, XCH<sub>4</sub>는 각각 구봉광상: 0.45~0.98, <0.01~0.01, 0.01~0.51, <0.01~0.05(IIa형 포유물), 0.49~0.97, <0.01~0.01, 0.03~0.50, <0.01~0.02(IIb형 포유물), 대봉광상: 0.25~0.98, <0.01~0.01, 0.02~0.73, 0.00~0.05(IIa형 포유물), 0.27~0.95, <0.01, 0.05~0.73, 0.00~0.01(IIb형 포유물)이다(표 4). 이들 광상에서 산출되는 I, IIa, IIb, IIIb, IIIc형 포유물의 Vbulk와

표 3. 구봉과 대봉광상의 유체포유물에 대한 실험자료

Inclusion type	Type I		Type IIa		Type IIb	
	Gubong	Daebong	Gubong	Daebong	Gubong	Daebong
Deposit	Gubong	Daebong	Gubong	Daebong	Gubong	Daebong
Stage	I	I	I	I	I	I
Vol. % CO <sub>2</sub>	100	100	10~85	5~90	10~80	15~90
TmCO <sub>2</sub> (℃)	-63.1~-57	-67.2~-56.2	-63.7~-56.2	-62~-56.2	-57.4~-56.6	-57.8~-56.4
Tmclathrate(℃)			3.2~10.2	1.9~12.1	4.2~8.9	7.9~9.4
ThCO <sub>2</sub> (℃)	-9.9~28.4	-65.2~14.6	-16.4~24.9	-13.2~24.9	25.2~28.4	25.3~27
ThCO <sub>2</sub> (L)(℃)	-9.9~28.4	-65.2~14.6	-16.4~24.9	-13.2~24.9	25.2~28.4	25.3~27
ThCO <sub>2</sub> (V)(℃)	-1.3~26.3		2.4~24.5		25.8~28.4	
Thtotal(℃)			244~432	203~388	272~349	240~320
Thtotal(L)(℃)			244~432	203~388	272~349	
Thtotal(V)(℃)			263~386	288~322	305~336	240~320

Inclusion type	Type IIIa		Type IIIb		Type IIIc
	Daebong	Gubong	Daebong	Daebong	Daebong
Deposit	Daebong	Gubong	Daebong	Daebong	Daebong
Stage	I	I	I	II	II
Tmice(℃)	-2.2~-0.3	-13.7~0	-6.2~0	-2.5~0	-0.8~-0.2
Thtotal(℃)		130~399	149~361	151~378	157~323
Thtotal(L)(℃)		130~399	149~361	151~378	157~323



dbulk/dH<sub>2</sub>O는 구봉광상: 51.9~73.3cm<sup>3</sup>/mol, 0.48~0.78g/cm<sup>3</sup>(I형 포유물), 19.3~40.4cm<sup>3</sup>/mol, 0.55~1.00 g/cm<sup>3</sup>(IIa형 포유물), 19.6~49.4cm<sup>3</sup>/mol, 0.54~1.01g/cm<sup>3</sup>(IIb형 포유물), 19.3~33.7cm<sup>3</sup>/mol, 0.55~1.04g/cm<sup>3</sup>(IIIb형 포유물), 대봉광상: 41.2~68.9cm<sup>3</sup>/mol, 0.60~1.05g/cm<sup>3</sup>(I형 포유물), 18.8~42.7cm<sup>3</sup>/mol, 0.79~1.03g/cm<sup>3</sup>(IIa형 포유물), 20.3~31.4cm<sup>3</sup>/mol, 0.82~0.97g/cm<sup>3</sup>(IIb형 포유물), 19.5~23.5cm<sup>3</sup>/mol, 0.79~0.99g/cm<sup>3</sup>(IIIb형 포유물)로써 큰 차이가 관찰되지 않는다. 대봉

광상의 광화II시기에 산출되는 IIIb, IIIc형 포유물의 Vbulk와 dH<sub>2</sub>O는 19.6~30.5cm<sup>3</sup>/mol, 0.60~0.92g/cm<sup>3</sup>(IIIb형 포유물), 20.8~27.6cm<sup>3</sup>/mol, 0.65~0.87g/cm<sup>3</sup>(IIIc형 포유물)로서 광화I시기 IIIb형 포유물의 Vbulk, dH<sub>2</sub>O값과 차이가 없다(표 4).

구봉과 대봉광상의 포획압력은 943~1,954 bar(암압: 3.4~7.0km, 정수압: 9.4~19.5km)(구봉광상), 1,082~2,098bar(암압: 3.9~7.6km, 정수압: 10.8~20.9km)(대봉광상)이다. 이들 광상에서 산출되는 광석광물의

표 4. 구봉과 대봉광상의 유체포유물에 대한 구성성분 및 밀도

Deposit	Stage	Inclusion Type	Bulk inclusion composition				
			XH <sub>2</sub> O	XNaCl	XCO <sub>2</sub>	XCH <sub>4</sub>	XN <sub>2</sub>
Gubong	I	I			0.68~0.98	0.02~0.32	
Daebong	I	I			0.49~1.00	0.00~0.24	0.51~0.53
Gubong	I	IIa	0.45~0.98	<0.01~0.01	0.01~0.51	<0.01~0.05	
Daebong	I	IIa	0.25~0.98	<0.01~0.01	0.02~0.73	0.00~0.05	
Gubong	I	IIb	0.49~0.97	<0.01~0.01	0.03~0.50	<0.01~0.02	
Daebong	I	IIb	0.27~0.95	<0.01	0.05~0.73	0.00~0.01	

Deposit	Stage	Inclusion Type	Carbonaceous phase composition		Aqueous phase composition	Molar volume	Density
			XCO <sub>2</sub>	XCH <sub>4</sub>	Eq.wt.%NaCl	Vbulk	(g/cm <sup>3</sup> ) Dbulk
Gubong	I	I	0.68~0.98	0.02~0.32		51.9~73.3	0.48~0.78
Daebong	I	I	0.76~1.00	0.00~0.24		41.2~68.9	0.60~1.05
Gubong	I	IIa	0.74~0.98	0.02~0.26	1.2~11.7	19.3~40.4	0.55~1.00
Daebong	I	IIa	0.79~1.00	0.00~0.21	0.2~13.4	18.8~42.7	0.79~1.03
Gubong	I	IIb	0.95~0.99	0.01~0.05	4.5~10.2	19.6~49.4	0.54~1.01
Daebong	I	IIb	0.95~1.00	0.00~0.05	1.2~4.2	20.3~31.4	0.82~0.97
Daebong	I	IIIa			0.5~3.7		
Gubong	I	IIIb			0.4~17.5	19.3~33.7	0.55~1.04
Daebong	I	IIIb			0.2~9.5	19.5~23.5	0.79~0.99
Daebong	II	IIIb			0.4~4.2	19.6~30.5	0.60~0.92
Daebong	II	IIIc			0.4~1.4	20.8~27.6	0.65~0.87

광물조합을 토대로 형성온도와 황분압( $f_{S_2}$ )를 구하면, 구봉광상: 광화I시기 초기 =  $312 \sim 473^\circ\text{C}$ ,  $10^{-3.6} \sim 10^{-9.9}$  atm(유비철석-황철석-섬아연석-에렉트림),  $286 \sim 364^\circ\text{C}$ ,  $10^{-7.8} \sim 10^{-11.2}$  atm(황철석-섬아연석-에렉트림), 광화I시기 말기 =  $273 \sim 308^\circ\text{C}$ ,  $10^{-10} \sim 10^{-12.2}$  atm(황철석-섬아연석-황동석-방연석-에렉트림), 대봉광상: 광화I시기 초기 =  $319 \sim 368^\circ\text{C}$ ,  $10^{-8.1} \sim 10^{-10.2}$  atm(유비철석-황철석-섬아연석), 광화I시기 중기 =  $279 \sim 337^\circ\text{C}$ ,  $10^{-8.8} \sim 10^{-11.2}$  atm(황철석-섬아연석-에렉트림), 광화II시기 =  $333 \sim 403^\circ\text{C}$ ,  $10^{-6.1} \sim 10^{-8.4}$  atm(황철석-섬아연석-방연석-에렉트림)이다. 이들 광상에서 구한 산소분압( $f_{O_2}$ )는  $10^{-35.8} \sim 10^{-30.2}$  atm(구봉광상),  $10^{-35.1} \sim 10^{-27.2}$  atm(대봉광상)이다. 또한 모암변질 광물 조합으로부터 구한 열수용액의 초기 pH는 5.2~6.3, 5.0~5.4(구봉광상), 5.4~6.5, 5.1~5.5(대봉광상)으로 이들 광상의 광화초기 열수용액은 약산성이었음을 알 수 있다.

이들 광상의 에렉트림은  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4 \pm \text{N}_2$ 계 유체에서  $\text{CO}_2$  불혼합에 의한 황화 광물의 침전으로 야기된 황분압의 감소나  $\text{H}_2\text{S}$  손실에 의해 정출되었으며 광화I시기 말기의 에렉트림은 광화I시기 초기  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2 \pm \text{CH}_2 \pm \text{N}_2$ 계 유체에서 진화된  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 계 유체로부터 다른 유체의 혼입에 의한 온도의 급격한 냉각에 의해 정출되었다고 생각된다. 대봉광상의 광화II시기에 정출한 에렉트림은 재가열된  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 계 유체에서 서로 다른 유체의 혼입에 의한 온도의 급격한 하락과 회석작용에 의해 형성되었다.

구봉 및 대봉광상에서 산출되는 황화광물의  $\delta^{34}\text{S}$ 값은 각각 5.2~9.5%, 3.9~9.4%로서 황의 기원은 주로 화성기원이지만 일부 모암에서도 유래되었다고 생각된다.  $\delta^{18}\text{O}$ 값(구봉광상: 8.4~14.3%, 대봉광상: 6.4~14.8%) 및  $\delta\text{D}$ 값(구봉광상: -89~-21%, 대봉광상: -93~-

86%)로부터 이들 광상의 광화유체는 마그마수  $\pm$ 변성수에 의해 기원되었으며 광화작용이 진행됨에 따라  $\text{CO}_2$  불혼합,  $\text{CH}_4$  산화 및 계속적인 순환수의 혼입이 있었던 것으로 생각된다.

## 결 언

청양일대 중열수광상의 광화유체는  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4 \pm \text{N}_2$ ( $203 \sim 432^\circ\text{C}$ , 0.2~13.4 wt.%)계 유체에서 광화작용이 진행됨에 따라 불혼합에 의해  $\text{CO}_2$  상분리와 순환수의 혼입에 의해  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ ( $130 \sim 399^\circ\text{C}$ , 0.0~17.5 wt.%)계 유체로 진화되었다. 그런 다음, 광화II시기의  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ ( $151 \sim 378^\circ\text{C}$ , 0.4~4.2 wt.%)계 유체는 천수 기원이며 냉각 및 회석작용이 있었다. 이들 광상의 포화압력은 943~2,098 bar(암압: 3.4~7.6km, 정수압: 9.4~20.9km)이다. 열수용액의 pH는 5.2~6.5, 5.0~5.5로써, 모암변질시 열수용액은 약산성이었으며 산소분압은  $10^{-27.2} \sim 10^{-35.8}$  atm이다.

한국의 대부분의 중열수 광상들은 생성심도가 깊은 곳에서 형성되었으며 그후 많은 지구조운동과 오랜시간 동안 침식에 의해 상당부분 사라졌다. 구봉 및 대봉광상의 석영맥은 팽창이 심하고 석영맥에선 단층운동에 의해 형성된 인장파쇄대 등이 관찰된다. 따라서 석영맥의 형성 이후에도 지속적인 구조운동이 있었음을 시사한다. 최근 한국광물자원공사(과거 대한광업진흥공사)에서 행한 5개의 시추 결과, 4개의 시추에서는 금-은 품위가 거의 발견되지 않았지만 1개의 시추에서 1.1~27.9g/t Au, 4~25g/t Ag인 광맥이 발견되었다. 또한 금-은 품위가 발견되지 않는 일부 시료의 현미경 관찰시 에렉트림이 산출된다. 이것은 아직도 심부에 상당부분 광체가 존재할 가능성을 시사한다. 중열수 광상의 장점은 비교적 단순한 광물조합, 에렉트림내

Au 함량이 높음, 석영맥의 연장성 및 백폭 등이다. 아직도 구봉 및 대봉광상의 가채 매장량은 150,000MT, 130,830MT이며 품위는 6.4 g/t, 7.3 g/t로써 아직도 상당한 잠재력이 있는 광상으로 생각된다(산업자원부와 대한광업진흥공사, 2001).

구봉 및 대봉광상의 함금-은광물의 종류, 공생 광물, 수반형태, 맥석광물, 함금광물의 피복형태, 입자크기 및 단순한 광물조합은 부유선광 중 사용되는 포수제, 기포제, 조건제 및 pH 조절제의 종류와 사용량을 적절하게 결정함으로써 경제적 또는 환경적인 면에 유용하게 이용될 수 있다. 또한 청화제련시 유비철석, 황철석, 심아연석, 방연석 등이 쉽게 용해되지 않기 때문에 사용되는 시약, 배소의 조건, 발생하는 이산화황, 비소의 양 등을 고려해야 할 것이다. 에렉트럼내의 Ag는 청화제련시 은황화물을 형성하여 유용광물의 회수율을 저하시키기 때문에 황동석, 석영 및 황철석과 함께 산출되는 에렉트럼은 이러한 점을 고려해야 할 것이다.

## 참고문헌

- 김영관, 공봉성 (1984) 삼광광산 금,은광에 대한 부유선광 및 청화제련 시험보고, 대한광업진흥공사, 24p.
- 대한광업진흥공사 (2004) 구봉광산 시추결과 보고서, 5p.
- 산업자원부, 대한광업진흥공사 (2001) 광물자원 매장량 현황, 440p.
- 유봉철, 이현구, 김상중 (2003) 대봉 금-은광상에 대한 유체포유물 및 안정동위원소 연구, 자원환경지질, 36, 391-405.
- 유봉철, 지세정, 이길재, 이종길, 이현구 (2007) 대봉 금-은광상의 모암변질과 원소분산 특성 연구, 자원환경지질, 40, 713-726.
- 유봉철, 최선규, 이현구 (2002) 구봉 금-은광상에서 산출되는 에렉트럼의 산출상태와 화학조성, 자원환경지질, 35, 191-201.
- 이현구, 유봉철, 김상중 (1992) 충남 대봉 금-은광상에서 산출되는 광석광물과 광상의 생성환경, 광산지질, 25, 297-316.
- Hey, M.H. (1954) A new review of the chlorites, Mineralogical Magazine, 3, 87-102.
- Yoo, B.C., Lee, H.K. and White, N.C. (2006) Gold-bearing mesothermal veins from the Gubong mine, Cheongyang gold district, Republic of Korea: Fluid inclusion and stable isotope studies, Economic Geology, 101, 883-901.