

## 삼광 금-은광상의 산출광물, 유체포유물 및 안정동위원소 연구

유봉철<sup>1\*</sup> · 이현구<sup>1</sup> · 최선규<sup>2</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 자연과학대학 지질학과, <sup>2</sup>고려대학교 이과대학 지구환경과학과

### Stable isotope, Fluid Inclusion and Mineralogical Studies of the Samkwang Gold-Silver Deposits, Republic of Korea

Bong Chul Yoo<sup>1\*</sup>, Hyun Koo Lee<sup>1</sup> and Seon Gyu Choi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of geology, Chungnam National University

<sup>2</sup>Department of earth and environmental sciences, Korea University

The Samkwang gold-silver deposits consist of gold-silver-bearing hydrothermal massive quartz veins which filled the fractures along fault shear (NE, NW) zones within Precambrian banded or granitic gneiss of Gyeonggi massif. Ore mineralization of this deposits occurred within a single stage of quartz vein which was formed by multiple episodes of fracturing and healing. Based on vein mineralogy and paragenesis, massive quartz veins are divided into two main paragenetic stages which are separated by a major faulting event. Main ore mineralization occurred at stage I. Wall-rock alteration from this deposits occur as mainly sericitization, chloritization, silicification and minor amounts of pyritization, carbonitization, propylitization and argillitization. Ore minerals are composed mainly of arsenopyrite (29.21~32.24 As atomic %), pyrite, sphalerite (6.45~13.82 FeS mole %), chalcopyrite, galena with minor amounts of pyrrotite, marcasite, electrum (39.98~66.82 Au atomic %) and argentite. Systematic studies of fluid inclusions in early quartz veins and microcracks indicate two contrasting physical-chemical conditions : 1). temperature (215~345°C) and pressure (1296~2022 bar) event with H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-NaCl fluids (0.8~6.3 wt. %) related to the early sulfide deposition, 2). temperature (203~441°C) and pressure (320 bar) event with H<sub>2</sub>O-NaCl ± CO<sub>2</sub> fluids (5.7~8.8 wt. %) related to the late sulfide and electrum assemblage. The H<sub>2</sub>O-NaCl ± CO<sub>2</sub> fluids represent fluids evolved through fluid unmixing of an H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-NaCl fluids due to decreases in fluid pressure and influenced of deep-circulated meteoric waters possibly related to uplift and unloading of the mineralizing suites. Calculated sulfur isotope compositions ( $\delta^{34}\text{S}_{\text{fluid}}$ ) of hydrothermal fluids (1.8~4.9‰) indicate that ore sulfur was derived from an igneous source. Measured and calculated oxygen and hydrogen isotope compositions ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $\delta\text{D}$ ) of ore fluids (-5.9~10.9‰, -102~-87‰) indicate that mesothermal auriferous fluids at Samkwang gold-silver deposits were likely mixtures of H<sub>2</sub>O-rich, isotopically less evolved meteoric water and magmatic fluids.

**Key words** : Samkwang gold-silver deposits, Ore mineralization, Fluid inclusion, Stable isotope.

삼광 금-은광상은 선캄브리아기 경기육괴의 호상 또는 화강편마암내에 발달된 단열대(NE, NW)를 따라 충진한 함금-은괴상석영맥광상이다. 이 광상의 광화작용은 여러번의 단열작용에 의해 형성된 동일시기의 석영맥으로 구성되어 있다. 광석조성과 광석광물의 공생관계를 기초로 하여, 이 광산의 괴상석영맥은 2기의 광화시기가 관찰되며 주 광화시기는 광화I시기이다. 모암변질은 견운모화작용, 녹니석화작용, 규화작용이 우세하며 황철석화작용, 탄산염화작용, 프로펠라이트화작용 및 점토화작용이 관찰된다. 광석광물은 주로 유비철석(29.21~32.24 As atomic %), 황철석, 첨아연석(6.45~13.82 FeS mole %), 황동석, 방연석과 소량의 자류철석, 백철석, 에렉트럼(39.98~66.82 Au atomic %) 및 휘은석이다. 유체포유물의 체계적 연구에 의하면, 물리-화학적 상태가 상반되는 2가지의 유체가 관찰된다 : 1). 광화I시기 초기 황화광물 정출과 관련된 H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-NaCl 유체(온도 : 215~345°C, 압력 : 1296~2022 bar, 염농도 : 0.8~6.3 wt. %), 2). 광화I시기 말기 황화광물 및 에렉트럼과 관련된 H<sub>2</sub>O-NaCl±CO<sub>2</sub> 유체(온도 : 203~441°C, 압력 : 320 bar, 염농도 : 5.7~8.8 wt. %). H<sub>2</sub>O-NaCl±CO<sub>2</sub> 유체는 광화작용이 진행됨에 따라 유체압력의 감소에 의하여

\*Corresponding author: s\_chbong@cnu.ac.kr

H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-NaCl 유체의 불혼화와 순환수의 혼합에 의하여 진화된 유체이다. 열수용액의 δ<sup>34</sup>S<sub>fluid</sub>값이 1.8~4.9‰로서 황의 기원은 화성기원을 지시한다. 산소(δ<sup>18</sup>O<sub>H<sub>2</sub>O</sub>)와 수소(δD)안정동위원소값이 각각 -5.9~10.9‰, -102~-87‰로서 삼광금-은광상의 광화유체는 마그마유체로부터 지속적인 고순환수의 혼입이 있었던 것으로 생각된다.

**주요어** : 삼광 금-은광상, 광화작용, 유체포유물, 안정동위원소.

## 1. 서 언

삼광광산은 청양읍으로부터 북동방향으로 8 km지점에 위치하며 1995년도까지 개발된 광상이나 경제적인 채산성 때문에 휴광된 광산이다. 국내의 대부분의 금속광산들은 경제성의 악화로 개발 및 생산이 거의 중단되었다. 그러나 최근들어 대한광업진흥공사는 전남 해남 일원에서 잠재가치 493억원에 이르는 새로운 부존형태의 대규모 금광(은산광산 및 모이산광산)을 발견 및 태백산광화대에서의 스카른형 금광상(skarn type gold deposits)발견으로 전량 수입에 의존해온 금을 올해부터 다시 생산할 수 있게 되었다.

그러나 미국, 영국, 프랑스 등 선진 각국은 오래전부터 세계 금, 은과 같은 금속광물 자원의 매장량 한계와 공급량 감소에 따른 국제 가격의 오름과 자원공급의 불균형에서 야기될 심각한 문제를 중시하여, 자국의 부존 금, 은과 같은 금속광산의 성인연구와 탐사에 전력을 기울이고 있으며 동시에 해외자원의 개발 및 자원비축에 많은 투자를 하고 있다.

1996년 휴광당시 삼광광산의 가채 매장량은 355,000 MT이며 품위는 8.4 Au g/t, 3.6 Ag g/t로서 아직도 상당한 잠재력이 있는 광상으로 생각된다. 또한 이 광산은 선캠브리아기의 변성퇴적암류내에 발달하며 높은 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> 함량을 갖는 고온, 고압형의 특성, 단순한 광물조성 및 매우 높은 금함량으로 인하여 상대적으로 경제성이 매우 높은 광산이다.

이 광산에 대한 연구는 문건주(1986), So *et al.* (1988), Lee *et al.*(1995), 이현구 등(1998)의 보고가 있다. 문건주(1986) 및 So *et al.*(1988)는 삼광광산의 본맥 및 국성맥을 대상으로 연구하였으며 유체포유물의 연구가 미비하다.

따라서 이 연구에서는 삼광광산의 주변지질, 광산을 형성하는 광맥의 산출상태, 모암변질, 광석광물의 특징(고용체광물의 산상 및 공생관계, 화학조성), 유체포유물 및 안정동위원소등을 수행함으로써 이 광산의 생성환경을 고찰함과 동시에 탐사, 개발을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 지질 · 광상 개요

삼광광산의 주변지질은 선캠브리아기의 변성퇴적암류가 넓게 분포되어 있으며 이를 주라기의 대동누층군인 백운사층이 부정합으로 피복하고 있다. 또한 백악기의 맥암류가 상기 암류들을 관입하였다(Fig. 1). 이 변성퇴적암류에 대해 몇몇 학자는 상부 주라기의 화강편마암으로 설정하여 유구화강편마암으로 보고하였으며(임상호와 이민성, 1963; So *et al.*, 1988) 또 다른 학자들은 선캠브리아기의 호상편마암으로 보고하였다(Lee *et al.*, 1973; 강필종과 임주환, 1974; 김서운 등, 1976; 우영균 등, 1991; 윤상필 등, 1994). 이 변성퇴적암류는 편리구조를 보이는 호상편마암, 안구상편마암 및 선구조가 관찰되지 않는 화강편마암으로 분류되나 상호 점이적이다. 이 편리의 일반적인 주향과 경사는 N50~80°E, 45~70°SE이고, 조암광물은 석영, 장석, 흑운모, 백운모, 견운모, 녹니석 및 소량의 각섬석으로서 각섬암상 정도의 광역변성을 받았다(이현구 등, 1998).

백운사층은 광산의 서쪽에 분포되며 탄층을 포함한 퇴적암류이다. 이 층은 화강편마암과 경계부분에서 화강편마암을 역으로 포함하는 역암과 사암, 흑색셰일로 구성된다. 이 층의 일반적인 주향은 N30~50°E 이며 경사는 27~30°NW, 34~48°SE 이다.

맥암류는 석영맥, 염기성암맥 및 산성암맥이 있으며 광상부근의 여러지역에 분포된다.

이 광산은 선캠브리아기의 화강편마암내에 발달된 단열대를 따라 충진한 합금-은 괴상석영맥상광상으로 총 8개의 평행한 맥으로 구성되어 있다. 이 광산은 1996년도 2월 휴광신고를 내기까지 상반맥을 중심으로 총 7,900 m 정도가 연맥 굴진되었다. 석영맥의 평균폭은 0.5~1.5 m이며 부분적으로는 2~12 m에 달하는 곳도 있으나 맥의 연장성은 불량하며 대체로 렌즈상을 이룬다.

이 광산일대의 석영맥은 광맥 방향에 따라 본맥, 상반맥, 국성맥, 대홍맥, 봉가리맥 및 신리맥으로 구성되나 본맥, 상반맥 및 국성맥을 주 채굴대상으로 하였다. 본맥은 갯도 입구로부터 동측으로 약 2 km이상 연장

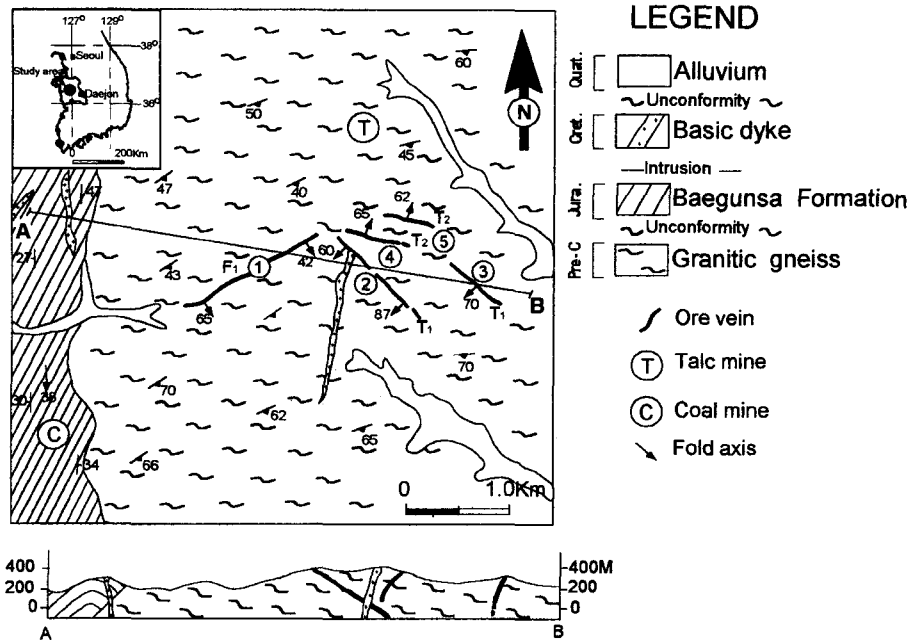


Fig. 1. Geological map of the Samkwang mine. 1; Main vein, 2; Gukseong vein, 3; Sinri vein, 4; Daeheung1 vein, 5; Daeheung2 vein.

되는 구조대내에 단속적으로 배태된 렌즈상 광체로서 N60~80°E의 주향과 40~75°SE의 경사를 갖으며, 부광대의 위치에 따라 동동광체, 본향광체, 국사봉광체로 구분하여 개발하였다. 상반맥은 본맥에서 역단층에 의해 분지된 것으로 EW의 주향과 30~40°S의 경사를 갖는다. 맥폭은 0.3 m에서 12 m 이내이고 연장은 320 m이다. 이 맥은 하부로 감에 따라 총연장 820 m의 광범위한 분포를 갖으며 지역에 따라 석영맥이 소멸되는 곳도 관찰된다. 국성맥은 N30°W의 주향과 65~70°SW의 경사를 갖는다. 맥폭은 0.5 m에서 1.5 m 이내이고 연장은 320 m이다. 이 맥은 수경 2 level까지 확인되나 그 하부에서는 구조대가 약화되고 석영맥이 분산되거나 발견되지 않는다. 또한 지표에서는 과거 채굴된 흔적만 남아있고 평균 맥폭은 1.1 m 정도이다(Lee *et al.*, 1995; 이현구 등, 1998).

3. 모암변질

삼광광산의 각 광체 및 맥에서 보이는 모암변질은 차이가 없으며 석영맥으로부터 1 m이내에 한정되어 산출된다. 모암변질작용은 건운모화, 녹니석화, 탄산염화, 황철석화, 규화, 프로필라이트화 및 점토화작용등이 관찰된다. 석영맥의 주향에 평행하게 유색광물대는 석영

맥내에 리본-호상(ribbon-banded)구조로 관찰되며 석영맥과 접하는 모암내 석영은 재용융 및 재결정화작용이 관찰된다. 리본-호상(ribbon-banded)구조가 관찰되는 곳에서의 석영은 회색석영으로 산출되며 석영맥 중심부로 감에 따라 점이적으로 백색석영으로 변화된다. 그러므로 회색석영은 모암(유색광물대)과 열수용액의 반응에 의하여 형성된 것으로 생각된다. 방해석은 석영맥주변에서 대상으로 산출되거나 석영맥내에서 산점상으로 산출된다. 대상으로 산출되는 방해석은 호상구조가 관찰되는 부분에서 석영맥의 주향과 평행하게 유색광물대와 함께 관찰된다. 산점상으로 산출되는 방해석은 석영맥내에 다양한 크기로 산출되며 특히 모암내에 석영의 재결정화작용이 관찰되는 곳에서도 산출된다. 이런 부분은 모암내 석영의 재결정화작용 및 이동에 의해 유색광물대가 부화되어 있다. 건운모화작용은 석영맥의 주변부를 따라 맥의 규모에 따라 수 cm에서 60 cm 이내로 칼리장석, 흑운모, 사장석등을 교대하여 산출된다. 녹니석화작용은 석영맥의 주변부나 모암의 일부(유색광물대)가 석영맥내에 포획되어 산출되는 곳에서 관찰되며 주로 흑운모를 교대하여 산출된다. 현미경하에서 관찰되는 모암변질광물은 석영맥의 주변부에서 건운모가 주로 산출되며 소량의 녹니석, 방해석, 녹염석이 관찰되며 석영맥으로부터 멀어짐에 흑운모가

많은 곳에선 녹니석이 흔하게 산출된다.

#### 4. 광석 및 광석광물의 산출상태

삼광광산의 석영맥은 서로 시기가 다른 괴상백색석영(광화I시기)과 방해석(광화II시기)으로 구성되며 괴상백색석영은 동일시기의 회색석영, 백색석영과 단열작용에 의하여 형성된 투명석영으로 구성된다(Fig. 2). 괴상백색석영의 구조는 괴상, 리본-호상(ribbon-banded), 각력상, 망상, 대상구조 및 곳에 따라 정동구조도 관찰된다. 회색석영은 폭이 2.5 cm 에서 3 cm 정도이며 백색석영과 점이적으로 모암의 일부분(유색광물대)과 함께 석영맥의 주향에 평행하게 발달한다. 백색석영은 괴상으로 산출되며 다양한 형태의 모암을 대상 또는 단독상으로 포획하고 있다. 투명석영은 모암부분에서 석영맥의 주향에 평행하게 리본-호상구조가 관찰되는 곳과 석영맥내 망상구조를 갖는 곳에서 산출된다. 광화I 시기 말기에 소량 산출되는 방해석은 정동구조내에 산출된다.

회색석영에서 관찰되는 황화광물은 유비철석이며 중

조립으로 단독 또는 모암의 일부분(유색광물대)과 평행하게 대상 분포한다. 백색석영에서 산출되는 황화광물은 주로 단층의 하반부에서 유비철석, 황철석, 섬아연석 및 황동석등이다. 황화광물의 입도는 맥의 주변부에서 중심부로 감에 따라 증가하지만 그렇지 않는 곳도 관찰된다. 이 황화광물은 곳에 따라 산출광물, 산출빈도 및 산출량이 다르며 괴상 또는 단독으로 산출된다. 투명석영은 리본-호상구조와 망상구조가 관찰되는 곳에서 유비철석, 섬아연석 및 방연석과 함께 산출된다. 리본-호상구조에서 산출되는 황화광물은 유비철석이며 세립으로 산출된다. 망상구조에서 관찰되는 황화광물은 유비철석, 섬아연석 및 방연석이며 괴상 또는 중-조립으로 산출된다.

이 광산에서 산출되는 광석광물과 맥석광물에 대하여 야외조사와 실내에서 150여개의 연마박편, 연마편에 대한 육안 및 편반사 현미경관찰에 의하여 광석조직 및 광석광물의 공생관계를 기초로하여 생성순서를 결정하였다(Fig. 2). 광화I(괴상백색석영)시기는 초기-중기에 회색석영, 백색석영, 견운모, 녹니석, 녹염석, 유비철석, 황철석, 자류철석, 섬아연석, 황동석, 백철석 및 방연석과 말기로 감에 따라 단열작용에 의해 형성된 열극을 따라 충전한 투명석영, 유비철석, 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석, 에렉트럼 및 휘은석으로 구성된다.

자류철석은 동통광체, 본항광체, 국사봉광체 및 상반맥에서 소량 산출되며 황동석, 섬아연석과 함께 괴상으로 산출된다. 현미경하에서 1) 황동석에 의해 충전 교대된 것(Fig. 3-C), 2) 섬아연석과 용리조직을 갖는 것, 3) 황철석에 의해 충전 교대된 것등이 관찰된다.

유비철석은 광화I시기의 초기부터 말기까지 계속적으로 산출되며 모든 광체 및 맥에서 산출빈도와 산출량이 가장 높으며 국성맥, 본항광체, 동통광체, 국사봉광체 및 상반맥순으로 산출빈도와 산출량이 감소한다. 일반적으로 유비철석은 괴상백색석영의 주변부에선 단결정 또는 괴상으로 산출되며 구조운동에 의해 모암과 괴상백색석영의 경계부분이 흑연으로 변화된 부분에선 세립내지 중립으로 단독 또는 모암의 일부분과 함께 산출된다. 괴상백색석영의 중심부로 감에 따라 유비철석은 단독 또는 황철석, 섬아연석, 황동석 및 방연석과 함께 괴상, 입상 또는 대상으로 산출된다. 그리고 모든 광체 및 맥에서 유비철석은 심하게 각력화되어 있는 것과 자형으로 산출되는 것이 관찰된다. 현미경하에서 모든 광체 및 맥에서 산출상태가 유사하다. 1) 거정의 유비철석이 심하게 각력화된 것, 2) 각력화된 유비철석을 황철석 또는 섬아연석이 포획 충전한 것, 3) 섬아

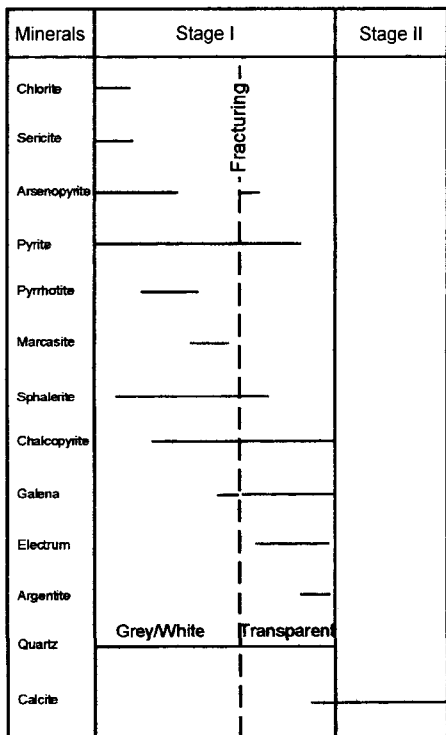
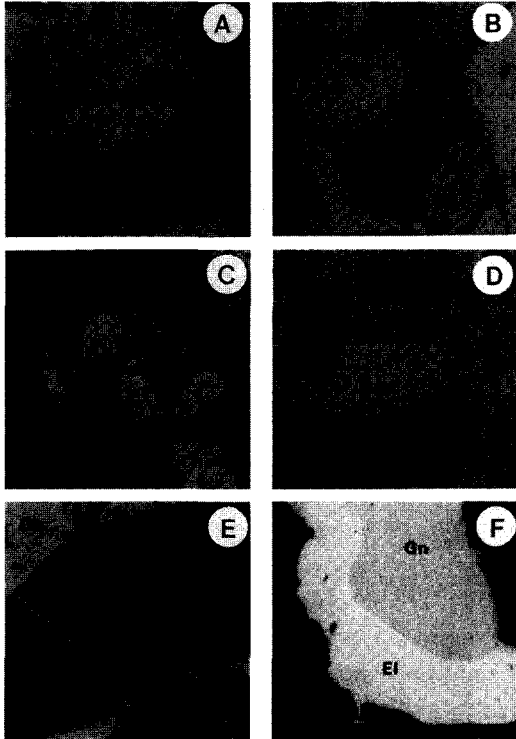


Fig. 2. Paragenetic sequence of minerals from the Samkwang mine.



**Fig. 3.** Photomicrographs of ore minerals from the Samkwang mine. A; Arsenopyrite coexisting with pyrite and sphalerite, B; Galena infilling fracture of arsenopyrite, C; Pyrrhotite partly replaced by chalcopyrite, D; Marcasite partly replaced by galena, E; Chalcopyrite and galena infilling fracture of sphalerite, F; Galena coexisting with electrum. Abbreviation: Asp; arsenopyrite, Py; pyrite, Po; pyrrhotite, Sp; sphalerite, Ma; marcasite, Cp; chalcopyrite, Gn; galena, El; electrum. Scale bar indicated 100 micron in length.

연석, 황철석과 함께 산출되는 것(Fig. 3-A, D), 4) 황철석, 황동석, 방연석 및 에렉트립에 의해 충전된 것(Fig. 3-B)등이 관찰된다. 이 광산에서 산출되는 유비철석의 화학조성을 알아보기 위하여 국사봉광체(3개 시료 8입자 20점), 상반맥(3개 시료 4입자 16점) 및 국성맥(2개 시료 3입자 7점)에서 산출되는 유비철석을 대상으로 화학분석한 결과 Table 1과 같다. 일반적으로 니켈과 코발트는 철을 치환하여 존재하지만 여기에서는 뚜렷한 상관관계가 관찰되지 않는다. Table 1에서 보는 것과 같이 As atomic % 함량은 29.21~32.24이며 각 광체 및 맥별 As atomic % 함량은 29.21~31.74(국사봉광체), 31.08~32.24(상반맥), 30.15~31.80(국성맥)로서 상반맥의 유비철석 As atomic %가 다소 높게 나타난다. 분석된 결과를 Fe-As-S atomic % 다이어그램에 도시하면, 이 광산에서 산출되는 유비철석은 유비철석

의 이상적인 식  $FeAs_{1-x}S_{1-x}$  ( $0.13 < x < 0.13$ )에 비해 S atomic %는 부화되어 있고 As atomic %는 결손되어 있다.

황철석은 광화[시]기 초기부터 말기까지 계속적으로 산출되며 본항광체, 통동광체, 국사봉광체, 상반맥 및 국성맥순으로 산출빈도와 산출량이 감소한다. 황철석은 맥의 주변부(회색석영)나 맥내에 포획된 모암에서 유비철석과 함께 산출되며 간혹 괴상으로 산출되기도 한다. 또한 이 광물은 백색석영부분에서 단독(세립 또는 중립) 또는 괴상으로서 유비철석, 섬아연석, 방연석 및 황동석과 함께 산출된다. 현미경하에서 1) 유비철석, 섬아연석, 자류철석과 함께 산출되는 것(Fig. 3-C), 2) 방연석 및 황동석에 의해 충전 교대된 것, 3) 방연석내 포획되어 산출된 것, 4) 황동석 및 방연석과 함께 산출되는 것등이 관찰된다.

백철석은 산출빈도와 산출량이 매우 적다. 현미경하에서 1) 황동석, 방연석에 의해 충전 교대된 것, 2) 황철석, 섬아연석과 함께 산출되는 것, 3) 자류철석의 간극을 따라 충전 교대한 것, 4) 황철석을 교대한 것(Fig. 3-D)등이 있다.

섬아연석은 광화[시]기 초기부터 말기까지 계속적으로 산출되며 모든 광체 및 맥에서 산출빈도와 산출량이 높다. 회색석영내의 섬아연석은 모암 인접부분에서 중-조립으로 단독 산출되거나 방해석, 유비철석, 황철석, 황동석 및 방연석과 함께 괴상으로 산출된다. 백색석영내의 섬아연석은 산점상으로 산출되거나 모암의 일부분(유색광물대)과 함께 괴상 또는 석영맥의 주향에 평행하게 유비철석, 황동석, 방연석과 함께 대상분포된다. 또한 이 광물은 백색석영내 모암의 일부분(유색광물대)사이에서 황동석과 함께 괴상 또는 넷트상으로 산출된다. 그리고 각 광체 및 맥에 관계없이 백색석영내의 부분적으로 각력화되어 있는 부분이나 단열작용에 의해 형성된 리본-호상구조내에 투명석영, 유비철석, 황동석 및 방연석과 함께 세립-중립 또는 괴상으로 산출된다. 현미경하에서 1) 유비철석, 황철석과 함께 산출되는 것, 2) 황동석 및 방연석에 의해 충전된 것(Fig. 3-E), 3) 황동석과 용리조직을 갖는 것, 4) 유비철석을 포획한 것등이 관찰된다. 이 광산에서 산출되는 섬아연석의 화학조성을 알아보기 위하여 국사봉광체(3개 시료 6입자 22점), 상반맥(5개 시료 7입자 19점) 및 국성맥(2개 시료 2입자 4점)에서 산출되는 섬아연석의 화학분석결과는 Table 2와 같다. Table에서 보는 것과 같이 카드뮴(Cd) 함량이 국내 어느 금속광상의 카드뮴 함량보다 높은 것이 특징이다. 이 섬아연석의 FeS와 CdS

**Table 1.** Chemical composition of arsenopyrites from the Samkwang mine.

Vein	Orebody	Sample No.	Weight %							Atomic %		Associated Mineral
			Fe	As	Co	Ni	Cd	S	Total	Fe	As	
		T22(4)	35.86	43.48	0.03	0.01	0.00	20.81	100.19	34.30	30.99	Py,Sp
		T22(2)	36.27	43.15	0.01	0.02	0.00	20.83	100.27	34.62	30.71	Py,Sp
		T22	35.99	43.33	0.05	0.01	0.00	20.78	100.16	34.43	30.89	Py,Sp
		T22	36.09	42.65	0.04	0.00	0.00	21.33	100.11	34.35	30.26	Py,Sp
		T22	36.13	42.34	0.04	0.00	0.00	21.21	99.72	34.52	30.15	Py,Sp
	Tongdong	T22(2)	36.48	42.22	0.05	0.01	0.00	21.80	100.54	34.42	29.70	Py,Sp
		T22(3)	36.02	43.24	0.05	0.00	0.00	20.97	100.28	34.36	30.75	Py,Sp
		T3R27(3)	35.82	42.69	0.04	0.00	0.00	21.45	100.00	34.10	30.29	Sp,Cp
		T3R27(2)	35.69	42.61	0.06	0.05	0.00	21.42	99.82	34.03	30.29	Sp,Cp
		T3R27	35.74	42.93	0.03	0.03	0.00	20.88	99.61	34.31	30.72	Sp,Cp
		T3R27	36.10	42.29	0.04	0.00	0.00	21.41	99.84	34.40	30.03	Sp,Cp
Main	Bonsahang	Bonsahang5(2)	35.38	43.69	0.04	0.02	0.01	20.65	99.78	34.03	31.32	Qz,El
		Bonsahang5(2)	35.27	43.61	0.06	0.01	0.01	20.85	99.79	33.86	31.21	Qz
	Bonhang	Bonsahang5(2)	35.69	43.16	0.03	0.01	0.01	21.24	100.13	34.02	30.67	Qz
		Bonsahang5	35.81	42.64	0.05	0.02	0.00	21.48	100.00	34.08	30.25	Qz
		Bonsahang5	35.45	43.01	0.12	0.15	0.00	21.43	100.16	33.73	30.51	Qz
		Bonsahang5	35.94	41.63	0.04	0.01	0.00	21.25	98.87	34.55	29.83	Qz
Guksabong	A2E-15(2)	35.12	44.67	0.42	0.17	-	20.62	101.00	33.48	31.74	Py,Sp,Cp	
	A3E125CH41(4)	36.18	41.57	0.29	0.11	0.04	22.12	100.31	34.10	29.21	Py,Sp	
	A3E125CH41	35.36	43.94	0.55	0.06	-	20.80	100.71	33.70	31.22	Py,Sp	
	A3W-19(11)	35.69	42.79	0.29	0.31	0.16	21.40	100.64	33.83	30.23	Sp,Cp,El	
	A3W-19	35.78	43.07	0.08	0.38	-	20.98	100.29	34.12	30.61	Sp,Cp	
	A3W-19(2)	35.49	43.24	0.27	0.12	-	21.08	100.20	33.86	30.75	Sp,Cp	
	A3W-19	35.95	42.53	0.20	0.30	-	20.75	99.73	34.48	30.40	Sp,Cp	
Sangban	A7E25CR(5)	35.07	44.03	0.33	0.16	0.04	20.76	100.39	33.55	31.40	Sp	
	A7E25CR(2)	34.79	44.65	0.22	0.20	0.23	20.46	100.55	33.38	31.93	Sp	
	A7E80CR(5)	34.39	44.65	0.28	0.08	0.07	20.19	99.66	33.32	32.24	Sp,Gn	
	A8E10CR(4)	34.72	43.84	0.25	0.22	-	21.42	100.45	33.02	31.08	Sp	
Gukseong	Gukseong(2)	34.82	44.42	0.13	0.20	-	20.59	100.16	33.45	31.80	Py,Sp,Cp	
	Gukseong(2)	35.14	42.22	0.11	0.48	0.01	21.35	99.31	33.67	30.15	Py,Sp,Cp	
	Gukseong	35.81	43.98	-	0.33	-	20.44	100.56	34.26	31.37	Sp,Cp	
	Gukseong(2)	35.79	42.65	0.20	0.22	0.07	21.03	99.96	34.20	30.38	Sp,Cp	

Py; pyrite, Sp; sphalerite, Cp; chalcopyrite, Gn; galena, El; electrum, Qz; quartz. Value in parentheses is the number of analysis.

mole %의 함량은 각각 6.45~13.82, 0.19~2.34이며 각 광체 및 맥벌에서 산출되는 섬아연석의 FeS와 CdS mole %의 함량은 국사봉광체 : 6.45~12.08, 1.04~1.92, 상반맥 : 8.15~13.82, 0.19~2.34, 국성맥 : 7.48~8.93, 1.69~1.82로서 큰 차이가 관찰되지 않는다.

황동석은 광화시기 초기부터 말기까지 계속적으로 산출되며 모든 광체 및 맥에서 산출되지만 국사봉광체와 상반맥에서 산출빈도와 산출량이 다른 광체 및 맥보다 높다. 회색석영과 백색석영내의 황동석은 유비철석, 황철석, 섬아연석 및 방연석과 함께 괴상 또는 단독상이 관찰된다. 현미경하에서 1) 섬아연석과 용리조

직을 갖는 것, 2) 유비철석, 섬아연석의 간극을 따라 충전 교대한 것, 3) 에렉트립과 함께 산출되는 것, 4) 황철석, 방연석과 함께 산출되는 것 등이 관찰된다.

방연석은 모든 광체 및 맥에서 유비철석 다음으로 산출빈도와 산출량이 높으며 광화시기 증가와 말기에 산출된다. 방연석은 회색석영, 백색석영 및 투명석영에서 괴상 또는 단독상으로 대부분의 광석광물과 함께 산출되거나 맥의 주변부에서 모암의 일부분(유색광물 대)과 함께 석영맥의 주향에 평행하게 세립의 집합체로 산출된다. 현미경하에서 1) 유비철석, 섬아연석 및 황철석의 간극을 따라 충전한 것, 2) 황동석과 함께

**Table 2.** Chemical composition of sphalerites from the Samkwang mine.

Vein	Orebody	Sample No.	Weight %							Mole %			Associated Mineral
			Zn	Fe	Cd	Mn	Cu	Sn	S	Total	FeS	CdS	
Main	Tongdong	T22(4)	59.16	6.76	0.47	0.01	0.01	0.00	32.82	99.22	11.74	0.41	Asp,Py
		T22(4)	59.95	6.67	0.45	0.00	0.00	0.00	32.91	99.98	11.47	0.39	Asp,Py
		T22(6)	60.25	6.59	0.44	0.01	0.01	0.00	32.85	100.15	11.30	0.38	Asp,Py
		T22(3)	59.36	7.26	0.46	0.00	0.27	0.00	32.89	100.25	12.42	0.39	Asp,Py
		T3R27(2)	59.14	4.35	0.44	0.00	2.82	0.00	32.94	99.68	7.55	0.38	Asp,Cp
		T3R27(2)	59.80	4.09	0.49	0.01	2.49	0.00	32.92	99.78	7.10	0.42	Asp,Cp
	T3R27	58.29	4.65	0.49	0.00	3.12	0.00	33.13	99.68	8.10	0.42	Asp,Cp	
	Guksabong	A2E-15(3)	56.96	6.47	2.14	0.02	-	-	34.17	99.76	11.51	1.89	Asp,Py,Cp
		A2E-15(2)	57.22	6.36	2.18	-	-	0.07	33.61	99.44	11.29	1.92	Asp,Py,Cp
		A3E125CH41(5)	57.65	6.77	1.55	0.01	-	0.05	34.10	100.13	11.92	1.36	Asp,Py
A3E125CH41(4)		57.88	6.90	1.50	0.03	-	0.04	33.81	100.16	12.08	1.30	Asp,Py	
Sangban	A3W-19(4)	60.76	3.97	1.19	0.02	-	0.02	34.23	100.19	7.03	1.05	Asp,Cp	
	A3W-19(4)	61.55	3.67	1.19	0.01	-	0.13	33.79	100.34	6.45	1.04	Asp,Cp	
	A5E210/2(4)	57.92	6.50	1.97	0.05	-	0.03	33.32	99.79	11.40	1.72	Py,Cp,Gn	
	A5W125-175(3)	58.45	6.99	2.11	0.02	-	0.06	32.69	100.32	12.05	1.81	Py,Cp,Gn	
	A7E25CR(3)	59.93	5.27	2.16	0.05	-	0.01	32.29	99.71	9.15	1.86	Asp	
	A7E25CR(2)	58.62	6.42	2.07	-	-	0.02	33.04	100.17	11.16	1.79	Asp	
	A7E80CR(2)	58.77	5.75	2.11	0.08	-	0.08	33.79	100.58	10.07	1.84	Asp,Gn	
	A7E80CR(2)	55.39	7.80	2.66	-	-	-	34.23	100.08	13.82	2.34	Asp,Gn	
	A8E10CR(3)	62.19	4.73	0.22	0.02	-	0.05	33.52	100.73	8.15	0.19	Asp	
	Gukseong	Gukseong(3)	59.42	5.08	1.94	0.09	-	0.03	32.74	99.30	8.93	1.69	Asp,Py,Cp
Gukseong		60.81	4.29	2.10	0.04	-	-	32.77	100.01	7.48	1.82	Asp,Py,Cp	

Asp; arsenopyrite, Py; pyrite, Cp; chalcopyrite, Gn; galena. Value in parentheses is the number of analysis.

산출되는 것, 3) 에렉트럼 및 황철석과 함께 산출되는 것(Fig. 3-F)등이 관찰된다.

에렉트럼은 광화I시기의 말기에 황동석과 방연석과 공생관계를 갖고 산출된다. 현미경하에서 1) 유비철석 및 섬아연석의 간극을 따라 충전한 것, 2) 황동석 및 방연석과 함께 산출되는 것등이 관찰된다. 에렉트럼의 화학조성을 검토하고자 17개 시료 58입자 80점에 대하여 화학분석을 실시한 결과, 에렉트럼의 Au atomic %는 39.98~66.82의 범위를 갖는다(이현구 등, 1998).

휘은석은 광화I시기 말기에 산출되며 산출빈도와 산출량이 매우 낮으며 주로 방연석과 공생관계를 갖고 산출된다.

광화II(방해석)시기는 황화광물이 관찰되지 않으며 방해석만이 괴상으로 산출된다.

## 5. 유체포유물

### 5.1. 산출상태

유체포유물 연구는 광화작용과 관련된 유체의 진화

와 광물 침전시 온도 및 유체의 화학성분등을 규명하는데 이용되어진다. 삼광광산의 광화I시기에 산출되는 백색석영과 투명석영에 대해 연마박편을 제작하여 실험하였다. 유체포유물의 산출상태, 기열 및 냉각실험은 Nikon 현미경에 부착된 Linkam THMSG 600 및 U.S.G.S. Fluid Inc. gas flow heating-freezing system을 이용하여 측정하였다. 또한 좀더 정확한 측정을 위해 컴퓨터에 CCTV를 연결하여 이용하였다. 유체포유물 측정 이전에, Linkam THMSG 600과 U.S.G.S. Fluid Inc. gas flow heating-freezing system은 U.S.G.S.에서 제작한 표준시료(H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O+CO<sub>2</sub>)를 이용하여 보정을 실시하였다. 측정오차는 냉각실험시 ±0.1°C, 가열실험시 ±0.5°C이다. 삼광광산의 광화I시기에 산출되는 백색석영 및 투명석영내의 유체포유물은 실온에서 관찰되는 상의 종류, 성분에 따라 I형 포유물, II형 포유물, III형 포유물 및 IV형 포유물로 분류하였다. I형 포유물은 탄소질(carbonaceous) 포유물, II형 및 III형 포유물은 탄소질(carbonaceous)+수질(aqueous) 포유물과 IV형 포유물은 수질(aqueous) 포유물이다. 또

한 이렇게 분류된 포유물은 40°C에서 관찰되는 탄소질 상(carbonaceous phase)과  $V_{H_2O}$ 의 몰체적비, Th-Carb.(L-V)(I, II, III형 포유물) 및 Th(L-V)(IV형 포유물)에 따라 세분하였다. 여기에 사용된 용어는 Belkin, H.E.(1994)와 Van Den kerkhof and Thiery (1994)가 제시한 것을 인용하였다.

이 광산의 I, II 및 III형 포유물은 백색석영과 투명석영의 결정면내에 면상 균집형 또는 단독으로 산출되며 IV형 포유물은 백색석영과 투명석영내에 단독 또는 봉합된 열극을 따라 면상, 선상 균집형 포유물로 산출된다. 그리고 Roedder(1984)가 제시한 방법에 의하여 I, II 및 III형 포유물은 일차포유물이며 IV형 포유물은 일차/이차포유물 또는 이차포유물로 산출된다.

I형 포유물은 단상(one phase)이며 탄소질(carbonaceous)으로 구성된 포유물이다. 이 포유물은 II형 포유물과 함께 산출되며 산출빈도와 산출량이 매우 낮다. I형 포유물의 형태는 주로 negative form이며 크기는 수  $\mu\text{m}$ 에서 24  $\mu\text{m}$  정도이다.

II형 포유물은 두상(two phase)이며 탄소질(carbonaceous)과 수질(aqueous)으로 구성된 포유물로 면상 균집형 또는 단독형으로 산출되며 산출빈도와 산출량이 높다. II형 포유물의 형태는 negative form 및 반원형으로 산출되며 크기는 수  $\mu\text{m}$ 에서 36  $\mu\text{m}$  정도이나 대부분이 20  $\mu\text{m}$ 미만이다. II형 포유물은 탄소질 상(carbonaceous phase)의 몰체적이 40°C에서 0.1~0.85로서  $X_{CO_2}$ 의 변화가 심한 포유물로 산출된다. 이 II형 포유물의 탄소질 상(carbonaceous phase)의 몰체적에 대한 Tm-Carb., Tm-Clath. 및 Th-Carb. 상관관계를 살펴보면 뚜렷한 상관관계가 관찰되지 않는다. II형 포유물은 탄소질 상(carbonaceous phase)의 몰체적과 Th-Carb.(L-V)에 따라 세분하면 II-a-a(탄소질 상(carbonaceous phase)의 몰체적 >0.5, Th-Carb(L)), II-b-a(탄소질 상(carbonaceous phase)의 몰체적 <0.5, Th-Carb(L)) 및 II-b-b(탄소질 상(carbonaceous phase)의 몰체적 <0.5, Th-Carb(V))형 포유물이나 대부분이 II-a-a형 포유물로 산출된다.

III형 포유물은 삼상(three phase)으로 탄소질(carbonaceous( $LCO_2+VCO_2$ ))과 수질(aqueous( $LH_2O$ ))으로 구성된 포유물로 산출빈도와 산출량이 매우 적다. III형 포유물은 II형 포유물과 함께 면상 균집형으로 산출되며 형태는 주로 negative form으로 산출된다. III형 포유물의 크기는 수  $\mu\text{m}$ 에서 36  $\mu\text{m}$ 정도이며 탄소질 상(carbonaceous phase)의 몰체적은 0.22이다. 실온상에  $LCO_2$ 내의  $VCO_2$ 의 몰체적은 0.3정도이며 III-

b-a(탄소질 상(carbonaceous phase)의 몰체적 <0.5, Th-Carb(L))형 포유물로 산출된다.

IV형 포유물은 두상(two phase)이며 수질(aqueous) 포유물로서 면상 또는 선상 균집형으로 산출된다. 이 IV형 포유물의 형태는 neative form, 반원형, 판형 및 불규칙형등으로 산출되며 크기는 수  $\mu\text{m}$ 에서 60  $\mu\text{m}$  정도이다. 이 포유물은 40°C에서  $VH_2O$  몰체적이 0.05~0.5이나 대부분이 0.05~0.2로서 액상(liquid-rich type) 포유물이다. 이 포유물은  $VH_2O$ 의 몰체적, Th(L-V)에 따라 세분하면 IV-a-a( $VH_2O$ 의 몰체적 <0.5, Th(L)), IV-a-b( $VH_2O$ 의 몰체적 <0.5, Th(V)) 및 IV-b-a( $VH_2O$ 의 몰체적 >0.5, Th(L))형으로 산출되거나 대부분이 IV-a-a형이다.

## 5.2. 냉각 및 가열실험 자료

I형 포유물은 냉각시  $VCO_2$ 의 형성온도( $T_n$ )가 19.7°C이며 -98.5°C에서  $VCO_2$ 가 응축된다. I형 포유물의 Tm-Carb.는 -57.4°C로서  $CH_4$ ,  $N_2$ 가 거의 포함되지 않는  $CO_2$ 로만 구성되어 있다(Fig. 4). I형 포유물의 Th-Carb.는 21.0°C이며 액상으로 균일화된다(Fig. 5).

II형 포유물의  $VCO_2$ 의 형성온도( $T_n$ )는 8.4~28.0°C,  $VCO_2$ 의 응축온도는 -96.7~-92°C 및 Ti-Carb.는 -68.5°C이다. II형 포유물의 Tm-Carb.는 -58.8~-55.7°C이며

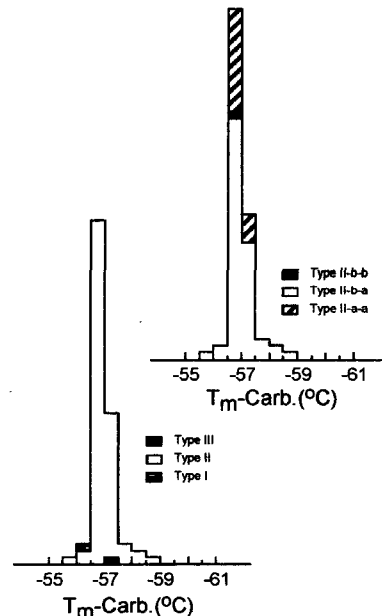


Fig. 4. Histogram showing the final melting temperature of carbonaceous phase ( $T_m\text{-Carb.}$ ) of type I, II and III fluid inclusions in stage I vein quartz from the Samkwang mine.



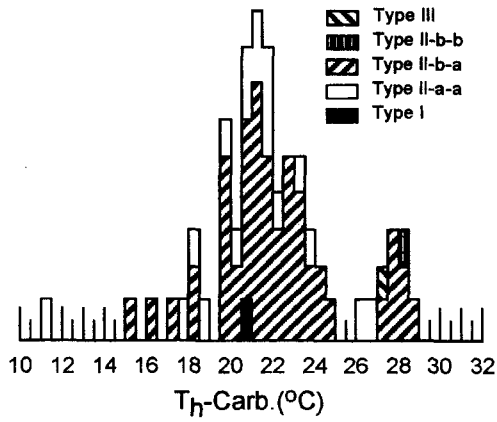


Fig. 5. Histogram showing carbonaceous phase homogenization temperature ( $T_h$ -Carb.) of type I, II and III fluid inclusions in stage I vein quartz from the Samkwang mine.

II-a-a형 포유물은  $-57.6 \sim -56.7^\circ\text{C}$ , II-b-a형 포유물은  $-58.8 \sim -55.7^\circ\text{C}$  및 II-b-b형 포유물은  $-56.7^\circ\text{C}$ 이다(Fig. 4). II형 포유물의  $T_h$ -Carb.는  $11.3 \sim 28.6^\circ\text{C}$ ( $T_h$ -Carb.(L) :  $11.3 \sim 28.6^\circ\text{C}$ ,  $T_h$ -Carb.(V) :  $28.1^\circ\text{C}$ )이며 II-a-a형 포유물은  $11.3 \sim 26.7^\circ\text{C}$ , II-b-a형 포유물은  $15.3 \sim 28.6^\circ\text{C}$ , II-b-b형 포유물은  $28.1^\circ\text{C}$ 이다(Fig. 5). 이것은 탄소질상(carbonaceous phase)내에 휘발성성분의 함량과 탄소질 상(carbonaceous phase)의 밀도변화가 탄소질 상(carbonaceous phase)의 물체적과 관계없음을 알 수 있다.  $T_m$ -Carb.와  $T_h$ -Carb.와 상관관계를 살펴보면 Fig. 6과 같이  $T_m$ -Carb.가 증가함에 따라  $T_h$ -Carb.도 증가한다. 이것은 탄소질 상(carbonaceous phase)가 거의 순수한  $\text{CO}_2$ 로 됨에 따라 탄소질 상(carbonaceous

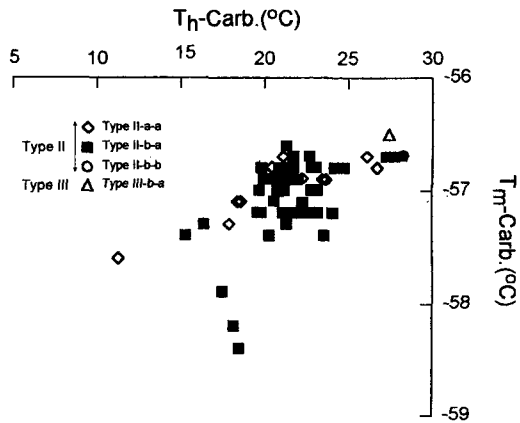


Fig. 6. Correlative variations of microthermometric data ( $T_h$ -Carb. vs.  $T_m$ -Carb.) of type II and III fluid inclusions in stage I vein quartz from the Samkwang mine.

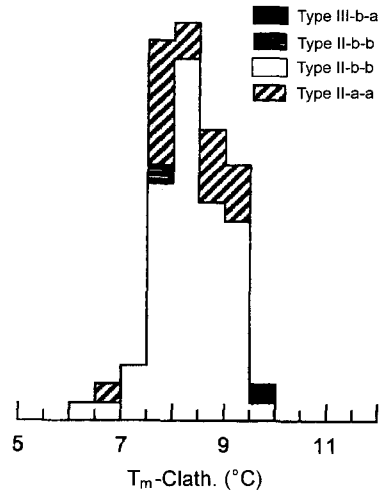


Fig. 7. Histogram showing the clathrate melting temperature ( $T_m$ -Clath.) of type II and III fluid inclusions in stage I vein quartz from the Samkwang mine.

phase)의 밀도는 감소된다. 그러므로 탄소질 상(carbonaceous phase)내에 존재하는 휘발성성분들이 탄소질 상(carbonaceous phase)의 밀도에 관계됨을 알 수 있다. II형 포유물의  $T_m$ -Clath.는  $6.4 \sim 9.6^\circ\text{C}$ 이며 II-a-a형 포유물은  $6.8 \sim 9.5^\circ\text{C}$ , II-b-a형 포유물은

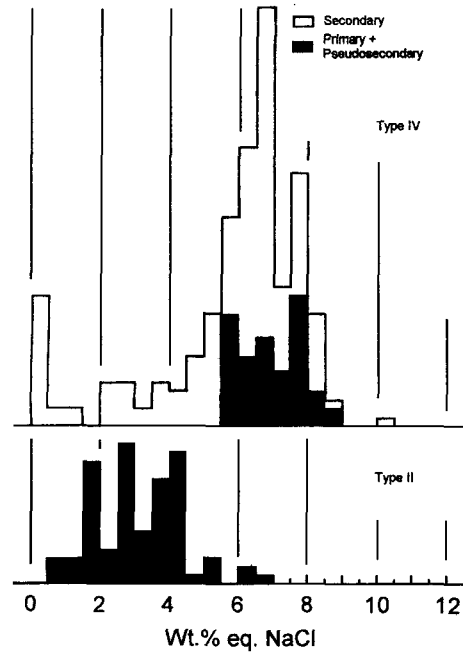


Fig. 8. Histogram of salinities of type II and IV fluid inclusions in stage I vein quartz from the Samkwang mine.

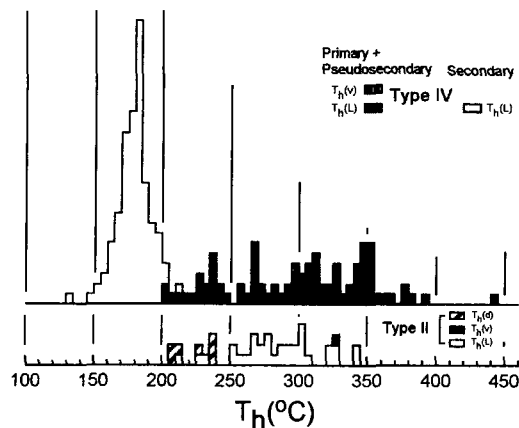


Fig. 9. Histogram of homogenization temperature ( $T_h$ ) of type II and IV fluid inclusions in stage I vein quartz from the Samkwang mine.

6.4~9.6°C, II-b-b형 포유물은 8.0°C이며(Fig. 7) 염농도(wt.% eq. NaCl)로 환산하면 0.8~6.3(II-a-a형 포유물: 1.0~6.1, II-b-a형 포유물: 0.8~6.8, II-b-b형 포유물: 4.0)로서 큰 차이가 관찰되지 않는다(Fig. 8). II형 포유물의 균일화온도는 215~345°C( $T_h(L)$ : 215~345°C,  $T_h(V)$ : 328°C,  $T_h(d)$ : 207~238°C)이며 II-a-a형 포유물은 302°C( $T_h(L)$ ), II-b-a형 포유물은 266~328°C( $T_h(L)$ : 266~328°C,  $T_h(V)$ : 328°C)이다(Fig. 9).

III형 포유물의  $T_m$ -Carb.는 -56.5°C,  $T_h$ -Carb.는 27.4°C( $T_h$ -Carb.(L)) 및  $T_m$ -Clath.는 10.0°C로서 거의 순수한  $CO_2$ - $H_2O$ 계로 존재하며 III-b-a형 포유물이다. 이 III형 포유물은 균일화되기 전에 200°C에서 decrepitation되어진다. 이 값을 Schwartz(1989)가 제시한 방법에 의해 균일화온도를 추정하여 보면 220°C에서 액상으로 균일화된다.

IV형 포유물은 냉각시  $VH_2O$ 의 응축이 -33.3~-34.2°C에서 일어나며 가열시  $Te$ -ice는 -22.4~-20.2°C로서 해리된 염들중에 주로 NaCl과 KCl로 구성되어 있다. IV형 포유물의  $T_m$ -ice는 -6.9~-0.1°C로서 염농도(wt.% eq. NaCl)로 환산하면 0.2~10.4이며(Fig. 8) 균일화온도는 134~441°C( $T_h(L)$ : 134~441°C,  $T_h(V)$ : 274~378°C)이다(Fig. 9). IV형 포유물은 가열시 초기 액상으로 균일화 되었다가 다시 새로운 상이 형성되어 최종적으로 액상으로 균일화되는 현상이 관찰된다. 이것은 200°C이상으로 가열시 액상(liquid phase)의 불혼화에 의해 < 10%의 새로운 불혼용 액상이 형성되어 균일화되는 것으로 해석할 수 있다.

## 6. 안정동위원소

안정동위원소 분석에 이용된 시료는 광화시기 및 광물공생관계를 고려하여 선택한 황화광물 및 석영이다. 황안정동위원소 분석을 위한 시료는 통동광체, 국사봉광체, 상반맥, 국성맥에서 산출되는 유비철석, 섬아연석, 황동석 및 방연석을 대상으로 하였다. 산소 및 수소안정동위원소 분석을 위한 시료는 각 광체 및 맥에서 산출되는 회색석영, 백색석영 및 투명석영을 대상으로 하였다. 분석시 표준시료는 CDT(황) 및 SMOW(산소, 수소)를 사용하였으며 오차범위는  $\pm 0.2$ (황, 산소) 및  $\pm 0.5$ (수소)이다.

### 6.1. 황

삼광광산의 광화I시기에 산출되는 황화광물의  $\delta^{34}S$ (‰)값은 -0.5~5.2이며 각 황화광물의  $\delta^{34}S$ (‰)값은 유비철석: 3.3~5.2, 섬아연석: 2.6~5.1, 황동석: 2.1~4.1, 방연석: -0.5~2.6이다(Table 3). 삼광광산의 각 광체 및 맥별  $\delta^{34}S$ (‰)값은 통동광체: 0.1~5.1, 본향광체: 1.1~5.2, 국사봉광체: 0.2~3.5, 상반맥: -0.5~5.1, 국성맥: 2.6~3.8로서 큰 차이가 없다. 각 광체 및 맥에서 산출되는 황화광물별  $\delta^{34}S$ (‰)값은 통동광체; 유비철석: 5.1, 섬아연석: 2.9~3.2, 황동석: 4.1, 방연석: 0.1~1.8, 본향광체; 유비철석: 5.0~5.2, 섬아연석: 5.0, 방연석: 1.1, 국사봉광체; 섬아연석: 3.2~3.5, 황동석: 2.1~2.9, 방연석: 0.2~0.6, 상반맥; 유비철석: 3.3~4.2, 섬아연석: 2.4~5.1, 황동석: 2.6, 방연석: -0.5~1.8로서 각 광체 및 맥에서 황화광물의  $\delta^{34}S$  부화는 유비철석 > 섬아연석 > 황동석 > 방연석 순이다. 또한 심도별  $\delta^{34}S$ 값은 큰 차이가 발견되지 않는다. 삼광광산의 광화I시기 말기에 산출되는 황동석-방연석쌍에 대한 분별계수(Ohmoto and Rye, 1979)를 이용하여 구한 동위원소 평형온도는 263~304°C이다.

삼광광산에서 측정된 유체포유물의 균일화온도, 안정동위원소 지질온도계 및 광물공생관계로부터 구한 온도를 종합하여 볼 때 450°C이하에서 황동위원소분별이 일어난 것으로 생각할 수 있다. 이 광산의 광화I시기에서 산출되는 모암변질광물, 황철석 및 자류철석과 황산염광물의 부재와 김규한과 정해란(1999)에 의한 남한의 주요 금속광상산 석영내의 유체포유물의 가스성분과 용존성분의 화학조성 연구에서 삼광광산의 유체포유물에서  $SO_4$ 성분이 검출되지 않았다고 보고한 것은 이 광산의 광화유체내의 황은 주로  $H_2S$ 상태로 존재했던 것으로 생각된다. 유체포유물의 균일화온도 및

**Table 3.** Sulfur isotope of sulfide minerals from the Samkwang mine.

Vein	Orebody	Sample No.	Min.	$\delta^{34}\text{S}(\%)$	$^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}(\%)^1$	$\Delta^{34}\text{S}$	T( $^{\circ}\text{C}$ ) <sup>2</sup>	T <sub>h</sub> ( $^{\circ}\text{C}$ ) <sup>3</sup>	
Main	Tongdong	2level 70	Sp	3.2	2.9			350	
		2level 70	Gn	0.1	2.4			250	
		*2-16	Sp	2.9					
		*2-16	Gn	1.5					
		*2-17	Asp	5.1					
		*2-17	Cp	4.1					
		*2-17	Gn	1.8					
	Bonhang	*4-21	Asp	5.0					
		*4-21	Sp	5.0					
		*4-21	Gn	1.1					
		*5-22	Asp	5.2					
		*5-22	Sp	5.0					
	Guksabong	A2E-1	Sp	3.5	3.2				350
		A2E-1	Cp	2.1	2.3	Cp-Gn			300
		A2E-1	Gn	0.2	2.1	2.0	304		300
		A3E160/20	Sp	3.2	3.0				350
		A3E160/20	Cp	2.9	3.1	Cp-Gn	263		263
		A3E160/20	Gn	0.6	2.8	2.3			263
Sangban	A3W200/9	Sp	2.6	2.3				350	
	A3W200/9	Cp	2.6	2.8				300	
	A3W200/9	Gn	1.3	3.2				300	
	A5E70	Asp	3.3						
	A5E70	Sp	2.8	2.6				350	
	A5E15010	Gn	1.8	3.8				284	
	A5W175/20	Sp	3.9	3.6				350	
	A5W175/20	Gn	2.3	4.3				284	
	A5W300/3	Sp	3.0	2.7				350	
	A5W300/3	Gn	0.6	2.6				284	
	A7E80CR	Asp	4.2						
	A7E80CR	Sp	5.1	4.8				350	
	A8E50CH	Sp	2.6	2.3				350	
	A8E50CH	Gn	1.4	3.4				284	
	A8W55CH	Sp	2.4	2.1				350	
A8W55CH	Gn	-0.5	1.5				284		
Gukseong	R7-27H	Asp	3.8						
	R7-27H	Sp	3.8	3.5				350	
	R7-27H	Gn	2.6	4.6				284	

\*Compiled data from So *et al.* (1988).

1)  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$  was calculated using the equation given in Ohmoto and Rye (1979).

2) Isotopic temperature was calculated from fractionation factors given in Ohmoto and Rye (1979).

3) T<sub>h</sub> is homogenization temperature of fluid inclusion.

Asp; arsenopyrite, Sp; sphalerite, Cp; chalcopyrite, Gn; galena.

광물공생관계로부터 구한 온도자료에 의거하여 각 황화광물과 평형상태에 있는 H<sub>2</sub>S의 값을 계산하면 Table 3과 같으며 광화유체내  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}(\%)$ 값은 1.5~4.8이며 각 황화광물의  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}(\%)$ 값은 섬아연석 : 2.1~4.8, 황동석 : 2.3~3.1, 방연석 : 1.5~4.6로서 큰 차이가 없다.

각 광체 및 맥별  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}(\%)$ 는 통동광체 : 2.4~2.9, 국사봉광체 : 2.1~3.2, 상반맥 : 1.5~4.8, 국성맥 : 3.5~4.6로서 큰 차이가 없다. 삼광광산의 각 광체 및 맥에서 산출되는 황화광물의  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}(\%)$ 값은 통동광체; 섬아연석 : 2.9, 방연석 : 2.4, 국사봉광체; 섬아연석 : 3.0

**Table 4.** Oxygen and hydrogen isotopic data of quartz from the Samkwang mine.

Vein	Orebody	Sample No.	Min.	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})^{1)}$	$\delta\text{D}(\text{‰})$	$T_h(\text{°C})^{2)}$	
Main	Tongdong	2level 70	Qz	11.4	6.1	-93	350	
		*2-17	Qz	7.7	-1.7	-102	250	
	Bonhang	*6-3	Qz	5.2	-0.6			
		*4-21	Qz	5.7	-5.9		210	
	Guksabong	A2E-1	Qz	7.6	2.3		350	
		A2Eend-377.12	Qz	15.1	8.2		300	
		*0-8-1	Qz(g)	7.6	0.1	-90	300	
		*0-18	Qz(g)	7.9	-1.5		250	
	Sangban		A3E135/TP17	Qz	7.6	2.3	-94	350
			A3E310H8	Qz(t)	14.2	7.3	-101	300
		A3W200/9	Qz	14.9	9.6		350	
		A5E70	Qz	12.7	7.4	-92	350	
		A5 alteration	Qz	13.6	6.7	-98	300	
		A5 alteration	Qz(g)	13.0	7.7	-87	350	
		A6E60H13	Qz	12.7	7.4	-91	350	
		A6E170H14	Qz	5.9	-1.0		300	
		A6W170H2	Qz	13.6	8.3		350	
		A7E25CR	Qz	16.2	10.9		350	
Gukseong		A8E50CH	Qz	14.9	9.6		350	
		A8W55CH	Qz	6.7	-0.2	-88	300	
		R7-27H	Qz	6.8	1.5	-93	350	

\*Compiled data from So *et al.*(1988).

<sup>1)</sup> $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  was calculated from the equation given by Matsushisa *et al.* (1979).

<sup>2)</sup> $T_h$  is homogenization temperature of fluid inclusion.

Qz; white quartz, Qz(g); grey quartz, Qz(t); transparent quartz.

~3.2, 황동석 : 2.3~3.1, 방연석 : 2.1~2.8, 상반맥; 섬아연석 : 2.1~4.8, 황동석 : 2.8, 방연석 : 1.5~4.3, 국성맥; 섬아연석 : 3.5, 방연석 : 4.6로서 큰 차이가 없으나 광화말기로 감에 따라  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 값이 감소한다. 이 광산의  $\delta^{34}\text{S}_{\text{fluid}}$  값은 Ohmoto and Rye(1979)가 제시한 식  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}(\text{‰}) = \delta^{34}\text{S}_{\text{fluid}} - \Delta\text{SO}_4^{2-}(\text{R}/(1+\text{R}))$ 에 이 광산에서  $\text{SO}_4$ 성분이 검출되지 않는다는 것과 열역학적 자료(온도, pH,  $f\text{O}_2$ ,  $\alpha\text{K}^+$ ,  $\alpha\text{Na}^+$ ,  $\alpha\text{Ca}^{2+}$ )를 대입하여 구할 수 있다. 우선  $\text{R}'(=\Sigma\text{SO}_4/\Sigma\text{H}_2\text{S})$ 값은 온도, pH,  $f\text{O}_2$ ,  $\alpha\text{K}^+$ ,  $\alpha\text{Na}^+$  및  $\alpha\text{Ca}^{2+}$ 의 함수로 표현된다. 여기에서 온도=350°C, pH=5.5,  $f\text{O}_2$ =-33.3,  $\alpha\text{K}^+$ =0.0231,  $\alpha\text{Na}^+$ =0.0863 및  $\alpha\text{Ca}^{2+}$ =7.0671E-10 값을 이용하여 R'값을 구할 수 있는데, 이 R'값은 -1.156E-11이며  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{fluid}}$ 값은 -1.1E-09 이다. 그러므로 삼광광산의  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 는  $\delta^{34}\text{S}_{\text{fluid}}(\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}})$ 로서 생각할 수 있다.

## 6.2. 산소 및 수소

삼광광산의 광화시기에 산출되는 회색석영, 백색석

영 및 투명석영의  $\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ 값은 5.2~16.2(회색석영 : 7.6~13.0, 백색석영 : 5.2~16.2, 투명석영 : 14.2)이며 큰 차이가 없다(Table 4). 이 광산의 광화시기 초기에 관찰되는 포유물은  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4-\text{NaCl}$ 계 유체이며 말기에 관찰되는 포유물은  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 계 유체지만 소량  $\text{CO}_2$ 가 함유된다. 이것은 광화시기에 광화작용이 진행됨에 따라  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4-\text{NaCl}$ 계 유체에서  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 계 유체로 변화되었음을 의미한다. 이런 유체의 변화 요인은  $\text{CO}_2$  상분리( $\text{CO}_2$  immiscible separation)와 기원이 다른 유체의 혼입으로 설명된다. 또한 백색석영 내에 산출되는 I, II, III형 포유물내의  $\text{XCH}_4$ 함량은 낮다. 이것은 광화유체내  $\text{CH}_4$ 가 산화되어  $\text{CH}_4$ 가 소실되었으며 그로인해 잔존 유체는  $\delta^{18}\text{O}$  값이 감소되어진다(So and Yun, 1997). 그러므로 삼광광산의 광화시기에 산출되는 석영의  $\delta^{18}\text{O}$  값의 변화는  $\text{CO}_2$  상분리( $\text{CO}_2$  immiscible separation),  $\text{CH}_4$  산화 및 기원이 다른 유체의 혼입으로 설명할 수 있다. 삼광광산의 각 광체 및 맥별  $\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ 값은 통동광체 : 7.7~11.4, 본향광체 : 5.2~5.7, 국사봉광체 : 7.6~15.1, 상반맥 : 5.9~

16.2로서 본항광체에서 산출되는 석영내의  $\delta^{18}\text{O}$  값이 다소 결핍되어 있다. 깊이와 수평에 따른  $\delta^{18}\text{O}$  값의 변화는 관찰되지 않는다. Matsushisa *et al.*(1979)의 평형분별식을 이용하여 석영내 물의  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  값을 계산하면 Table 4와 같다. 이 Table에서 보는 것과 같이  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$ 값은 -5.9~10.9(회색석영 : -1.5~7.7, 백색석영 : -5.9~10.9, 투명석영 : 7.3)이다. 또한 각 광체 및 맥별  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$ 값은 통동광체 : -1.7~6.1, 본항광체 : -5.9~-0.6, 국사봉광체 : -1.5~8.2, 상반맥 : -1.0~10.9이다. 삼광광산의 광상생성시 물의  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$ 값은 -102~-87(회색석영 : -90~-87, 백색석영 : -102~-88, 투명석영 : -101)이다. 각 광체 및 맥별  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$ 값은 통동광체 : -102~-93, 국사봉광체 : -90, 상반맥 : -101~-87로서 큰 차이가 없다.

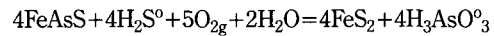
## 7. 토 의

### 7.1. 광화유체의 물리화학적 환경 및 성분

삼광광산에서 산출되는 광물조합을 토대(Barton and Toulmin, 1966; Scott and Barnes, 1971; Kretschmar and Scott, 1976; Barton and Skinner, 1979; Vaughan and Craig, 1978)로 광물조합의 형성온도와 황분압( $f_{\text{S}_2}$ )를 구하면, 형성온도와 황분압은 광화I시기 초기 = 262~491°C, -3.4~-12.8 atm(유비철석-황철석-섬아연석), 광화I시기 말기(에렉트럼의 형성시기) = 263~304°C, -7.8~-11.4 atm(황철석-황동석-방연석-에렉트럼)이다. 또한 각 광체 및 맥별 형성온도와 황분압( $f_{\text{S}_2}$ )은 국사봉광체 : 광화I시기 초기 = 262~479°C, -3.6~-12.8 atm, 상반맥 : 광화I시기 초기 = 403~491°C, -3.4~-6.6 atm, 국성맥 : 광화I시기 초기 = 340~457°C, -4.6~-8.6 atm로서 각 광체 및 맥별 동일 광물조합의 형성온도와 황분압은 큰 차이가 관찰되지 않는다.

산소분압( $f_{\text{O}_2}$ )은 유체포유물과 광물조합군으로부터 유추할 수 있다. 이 광산에서 관찰되는 I, II 및 III형 포유물은  $\text{CO}_2$ -rich 포유물로서  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ , 및 NaCl로 구성되어 있다.  $\text{CO}_2$ -rich 유체의 기원은 여러 가지 견해가 있다. Ellis(1970)는  $\text{CO}_2$ -rich 포유물은 그것이 형성되는 온도, 압력 및 성분상에 있어서 지열상에서 관찰되는 유체와 매우 유사하다고 보고하였다. 지열상에서 관찰되는 온도-성분 자료로부터  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  및  $\text{CH}_4$  성분들은 지열상태에서 거의 화학적 평형상태에 있으며(Giggenbach, 1980)  $\text{CO}_2+2\text{H}_2\text{O}=\text{CH}_4+2\text{O}_2$ ,  $3\text{C}+\text{O}_2+2\text{H}_2\text{O}=2\text{CO}_2+\text{CH}_4$ 의 화학평형식을 갖는다고 보고하였다(Ramboz *et al.*, 1985). 그래서

$\text{CO}_2$ -rich 유체의 P-T- $f_{\text{O}_2}$  관계는 Ramboz *et al.* (1985), Hall and Bodnar(1990) 및 Holloway(1981a) 등이 기술한 방법에 의해 구했으며  $\text{CO}_2+2\text{H}_2\text{O}=\text{CH}_4+2\text{O}_2^{(1)}$ ,  $3\text{C}+\text{O}_2+2\text{H}_2\text{O}=2\text{CO}_2+\text{CH}_4^{(2)}$  화학평형식의 평형상수는 Ohmoto and Kerrick(1977)의 것을 참조하였다. 그리고  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ 의 퓨저시티계수(fugacity coefficient)는 Kerrick and Jacobs(1981), Holloway(1981b) 및 Bowers and Helgeson(1983) 등이 제시한 방법에 의해 구하였다. 이 평형반응식에 대한 산소분압( $f_{\text{O}_2}$ )값은 유체포유물의 구성성분과 균일화 온도 자료를 기초로 하였으며 I형 포유물은 온도 350°C, 2 kb 상태에서 구하였다. 앞의 화학평형식으로부터 계산된 산소분압( $f_{\text{O}_2}$ ) 값은 -33.9 atm<sup>(1)</sup>, -32.8 atm<sup>(2)</sup>(I형 포유물), -34.1~-30.1 atm<sup>(1)</sup>, -33.8~-30.4 atm<sup>(2)</sup>(II형 포유물)이다. 또한 삼광광산에서 유비철석이 base metal로서 산출된다. Heinrich and Eadington(1986)에 의하면 유비철석의 용해도는 다른 광석광물에 비해 산소분압( $f_{\text{O}_2}$ )에 크게 의존하며 유비철석과 황철석이 함께 산출되는 광물조합군을 다음과 같은 화학평형식으로 표현하였다.



온도 350°C에서 구한 산소분압( $f_{\text{O}_2}$ )값은 -30.4 (logm $\text{H}_2\text{S}$ =0.1 moles/Kg ·  $\text{H}_2\text{O}$ , logr $\text{H}_2\text{S}$ =0.35) ~ -30.3 atm(logm $\text{H}_2\text{S}$ =0.001 moles/Kg ·  $\text{H}_2\text{O}$ , logr $\text{H}_2\text{S}$ =0.35)로서 삼광광산의 열수용액의 산소분압은 -34.1~-30.3 atm이다.

삼광광산에서 열수용액의 pH는 가수분해와 양이온 교환등을 갖는 광물의 공생관계로부터 유추할 수 있다. pH의 변화는 pH buffer 광물인 견운모의 침전에 따라 변화한다. 이 광산에서 관찰되는 견운모화작용은 석영맥의 주변부를 따라 맥의 규모에 의해 수 cm에서 30 cm 이내로 칼리장석, 흑운모, 사장석등을 교대하며 산출된다. 이상헌과 최기주(1994)에 의하면 삼광광산 모암인 화강편마암내에 산출되는 사장석은 주로 An1.6~46.2이나 대부분이 An31.1 이하의 성분을 갖는 것으로 보고하였다. 그래서 모암변질광물상 평형방정식에서 알바이트의 열역학적 자료를 이용하였다. 현미경하에서 모암변질광물상으로 초기에는 칼리장석, 사장석, 흑운모, 견운모, 녹니석, 녹염석 및 석영이 관찰되며 광화작용이 진행됨에 따라 녹니석의 함량이 증가함이 관찰된다.  $2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8+\text{KAlSi}_3\text{O}_8+2\text{H}^+=\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2+6\text{SiO}_2+2\text{Na}^+$ 의 반응식과 열수용액내 용질의 활동도 자료( $\alpha_{\text{Na}^+}=0.0476(400^\circ\text{C})$ ,  $0.0863(350^\circ\text{C})$ )를 이용하

여 열수용액의 초기 pH는 5.4~6.4(400°C), 5.3~5.7(350°C)으로 약산성이었음을 알 수 있다.

삼광광산의 광화I시기에 산출되는 백색석영과 투명석영내의 I, II, III형 포유물의 구성성분은 Van Den kerkhof and Thiery(1994), Van Den kerkhof(1990), Nicholls and Crawford(1985), Ramboz *et al.*(1985) 및 Herskowitz and Kisch(1984)가 제시한 방법에 의해 구하였다. 삼광광산의 I형 포유물에 대한 XCO<sub>2</sub> 및 XCH<sub>4</sub>값은 각각 0.97, 0.03이며 II, III형 포유물의 XH<sub>2</sub>O, XNaCl, XCO<sub>2</sub>, XCH<sub>4</sub>는 각각 0.36~0.97, <0.01, 0.03~0.62, 0.00~0.04(II형 포유물), 0.93, 0.07(III형 포유물)이다. 가열/냉각 실험으로부터 구한 자료(Tm-Carb., Tm-Clath., Tm-ice, Th-Carb., Th(L-V))로부터 삼광광산의 광화I시기에서 산출되는 유체포유물의 VCO<sub>2</sub>, Vbulk, dCO<sub>2</sub>, dH<sub>2</sub>O(daqu.) 및 dbulk를 Van Den kerkhof and Thiery(1994), Nicholls and Crawford(1985), Ramboz *et al.*(1985), Brown(1989) 및 Bakker(1997)가 제시한 방법에 의해 계산할 수 있다. 계산시 I, II, III형 포유물의 탄소질 상(carbonaceous phase)내에 소량 존재하는 CH<sub>4</sub>는 carbonic phase의 밀도에 영향을 준다. 삼광광산의 광화I시기에 산출되는 I, II, III 및 IV형 포유물의 Vbulk, dbulk(dH<sub>2</sub>O)는 59.7 cm<sup>3</sup>/mol, 0.72 g/cm<sup>3</sup>(I형 포유물), 19.5~40.7 cm<sup>3</sup>/mol, 0.79~0.99 g/cm<sup>3</sup>(II형 포유물), 21.4 cm<sup>3</sup>/mol, 0.92 g/cm<sup>3</sup>(III형 포유물), 19.2~28.4 cm<sup>3</sup>/mol, 0.66~0.97 g/cm<sup>3</sup>(IV형 포유물)로서 큰 차이가 관찰되지 않는다.

유체포유물의 트랩압력(trapping pressures)는 산출되는 유체포유물의 종류에 따라 여러 가지 열역학적 상태방정식(Bowers and Helgeson, 1983; Kerrick and Jacobs, 1981; Jacobs and Kerrick, 1981; Holloway, 1981a; Zhang and Frantz, 1987; Knight and Bodnar, 1989)으로부터 구해진다. Van Den kerkhof(1990)는 CO<sub>2</sub>-rich 포유물내에 많은량의 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>가 존재하면 해석상의 오류를 범할 수 있다고 보고하였다. 그러므로 삼광광산의 광화I시기에 산출되는 I, II, III형 포유물은 이들 방정식에 적용하여 트랩압력(trapping pressures)를 계산하였으며 I형 포유물은 350°C로 가정하여 구하였다. 삼광광산의 광화I시기에서 산출되는 I, II, III형 포유물의 trapping pressures는 1296~2022 bar(lithostatic pressure : 4.7~7.3 km, hydrostatic pressure : 12.9~20.2 km)이다. 삼광광산의 광화I시기에서 산출되는 백색석영, 투명석영내의 I,

II 및 III형 포유물은 Th-Carb.(°C) 변화폭이 넓다. 이는 유체압력의 변화를 시사한다(Sibson *et al.*, 1988; Wilkinson and Johnson, 1996; Cassidy and Bennett, 1993). 이런 유체압력(lithostatic pressure+tensile strength)의 변화는 삼광광산의 석영맥에서 관찰되는 안행상인장 맥(tensile hydraulic fractures)들을 형성하였다. 유체압력은 열극이 커짐에 따라 압력이 급격히 감소된다. 그때에 상분리가 일어난다. Diamond(1990, 1994)는 H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>계 포유물을 4가지 유형으로 구분하였으며 삼광광산의 I, II 및 III형 포유물은 Low XH<sub>2</sub>O(High XCO<sub>2</sub>) compositional type(0.002<XH<sub>2</sub>O<0.852, 0.148>XCO<sub>2</sub>>0.998)와 High XH<sub>2</sub>O(Low XCO<sub>2</sub>) compositional type(0.852<XH<sub>2</sub>O<0.985, 0.148>XCO<sub>2</sub>>0.015)에 해당한다. Diamond(1994)는 이러한 유형의 성분을 갖는 유체포유물은 상분리 또는 비등현상이 발생하는 광상(중열수 또는 심열수광상)에서 일반적으로 관찰되는 유체포유물이라 보고하였다. 이런 유형의 유체포유물은 높은 온도 및 압력상태에서 이슬점 곡선(dew curve)과 기포점곡선(bubble curve)에 의해 불혼화영역(immiscibility field)가 경계지어진다. 또한 Ramboz *et al.*(1982)에 의하면 XCO<sub>2</sub>의 변화가 심한 포유물은 불혼화(immiscibility)상태에서 형성된 것으로 보고하였다.

균일화온도와 염농도의 관계성을 살펴보면, 삼광광산은 광화I시기의 II 및 IV형 포유물이 균일화온도가 감소함에 따라 염농도는 증가한다. 이것은 유체의 불혼화가 있었음을 의미하며 그 결과 형성된 H<sub>2</sub>O-NaCl 계 유체는 재 가열되었으며 지속적인 유체와의 혼입에

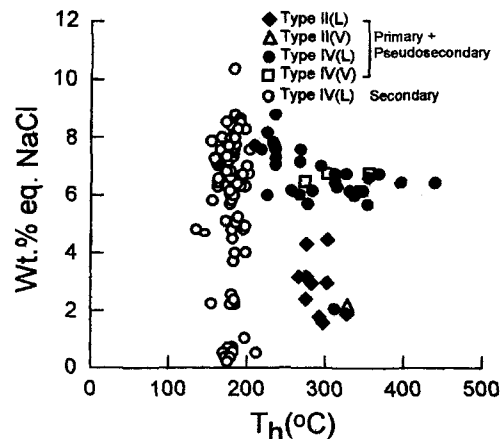


Fig. 10. Salinity vs. homogenization temperature diagram for fluid inclusions of stage I vein quartz from the Samkwang mine.

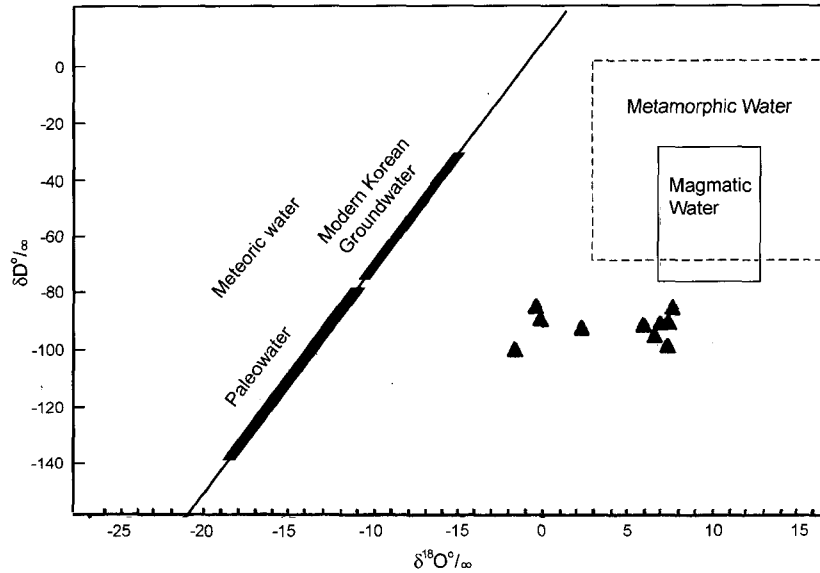


Fig. 11. Hydrogen vs. oxygen isotope diagram displaying stable isotope systematics of hydrothermal fluid compositions of the Samkwang mine. Paleowater data from So and Shelton (1987a, b) and So *et al.* (1987a, b), Modern Korean Groundwater data from Kim and Nakai (1981, 1988).

의해 냉각작용이 있었다(Fig. 10). 그러므로 삼광광산의 광화시기 초기 백색석영과 투명석영내에 관찰되는  $H_2O-CO_2-CH_4-NaCl$ 계 유체는 유체의 유입에 따른 유체압력의 차이에 의해  $CO_2$  상분리( $CO_2$  immiscible separation)가 일어났으며 광화작용이 진행됨에 따라  $H_2O-NaCl$ 계 유체로 진화되었다. 또한 여기에 기원이 다른 유체의 유입에 의해 온도 및 염농도의 감소 및 희석작용이 있었다고 생각된다. 삼광광산의 광화시기 말기에 산출되는 IV형 포유물의 균일화온도와 황동위원소 지질온도계간의 차이에서 트랩압력(trapping pressure)을 유추할 수 있으며 그 계산 결과( $288^\circ C$ , 6.8 wt.%)는 320 bar(lithostatic pressure : 1.2 km, hydrostatic pressure : 3.2 km)이다.

## 7.2. 광화유체의 기원

삼광광산의  $\delta^{34}S_{H_2S}$ 는  $\delta^{34}S_{fluid}(\delta^{34}S_{ES})$ 로서 생각할 수 있으며 산출되는 황화광물의  $\delta^{34}S_{fluid}$ 는 1.8~4.9 이다. 따라서 삼광광산의 황 기원은 화성기원에서 유래된 것으로 해석된다. So *et al.*(1988)는 삼광광산의  $\delta^{18}O(\text{‰})$ 가 5.2~7.9로서 보고하였으나 본 연구에 의하면 5.9~16.2로서 비교적 넓게 분포하며 산소편이현상이 관찰된다. 또한 삼광광산의 광상생성시 물의  $\delta D_{H_2O}(\text{‰})$ 값은 -102~-87이다. 이런  $\delta^{18}O$ 와  $\delta D$  값의 변화는 광화유체내  $CO_2$  상분리( $CO_2$  immiscible

separation),  $CH_4$  산화 및 기원이 다른 유체의 혼입으로 해석할 수 있다.  $\delta^{18}O_{H_2O}-\delta D$ 의 다이어그램에 도시하면 삼광광산은 어느 한곳에 해당하지 않고 넓은 영역에 해당된다(Fig. 11). 이들 광산의 모암변질, 산출광물, 유체포유물의 구성성분 및 안정동위원소등의 자료는 Archaean gold나 lode gold광산의 것과 매우 유사하다(Kerrich, 1993; Groves, 1993). 또한 이와 유사한 우리나라의 많은 중열수광산의 광화유체는 순환수(Shelton *et al.*, 1988)나 마그마수(So and Yun, 1997; So *et al.*, 1993)에서 유래되었다고 보고하였다. So *et al.*(1988)는 삼광광산의 광화유체가 순환수에서 유래된 것으로 보고하였다. 삼광광산의 광화작용시기에 있어 순환수의  $\delta D$ 값을 아는 것이 중요하다. So *et al.*(1988)는 삼광광산의 광화작용이 초기 백악기(127 Ma)라고 보고하였다. 그러므로 Shelton, *et al.*(1988)에 의하면 백악기(142~68 Ma) 천수의  $\delta D$ 값이 -143~-81‰로 보고하였다. 또한 Kim and Nakai(1981)와 김규한과 中井信之(1988)에 의하면 강수와 지하수의  $\delta D$ 값이 -141~2‰, -73~-42‰라고 보고하였다. 따라서 이들 자료를 기초로 하여 보면, 삼광광산의 광화유체는 초기 마그마수에서 유체압력의 차에 의해  $CO_2$  상분리( $CO_2$  immiscible separation),  $CH_4$  성분의 산화 및 지속적인 고순환수의 혼입이 있었던 것으로 해석할 수 있다.

## 8. 결 언

1. 삼광광산은 선캠브리아기의 화강편마암내에 발달된 단열대(NE, NW)를 따라 충진한 합금-은괴상석영맥 광상이다.

2. 삼광광산의 모암변질은 견운모화, 녹니석화, 규화, 황철석화, 탄산염화, 프로필라이트화 및 점토화작용이 관찰되며 광석광물은 유비철석(29.21~32.24 As atomic %), 황철석, 섬아연석(6.45~13.82 FeS mole %), 황동석, 방연석, 자류철석, 백철석, 에렉트럼(39.98~66.82 Au atomic %) 및 휘은석이 산출된다.

3. 유체포유물과 광물공생군으로 추정된 광화작용의 온도(°C), 압력(bar), 염농도(wt.% eq. NaCl) 및  $-\log f_{S_2}(\text{atm})$ 는 광화시기 초기( $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4-\text{NaCl}$  유체) = 215~491, 1296~2022, 0.8~6.3, -3.4~-12.8(유비철석-황철석-섬아연석), 광화시기 말기( $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl} \pm \text{CO}_2$ ) = 203~441, 320, 5.7~8.8, -7.8~-11.4(황철석-황동석-방연석-에렉트럼)이다. 여기에서  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl} \pm \text{CO}_2$  유체는 광화작용이 진행됨에 따라 유체압력의 감소에 의하여  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4-\text{NaCl}$  유체의 불혼화와 순환수의 혼합에 의하여 진화된 유체이다.

4. 안정동위원소 결과, 황화광물의  $^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 는 1.8~4.9로서 삼광광산의 황 기원은 화성기원이며  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 와  $\delta\text{D}$ 는 각각 -5.9~10.9‰, -102~-87‰로서 삼광금-은광상의 광화유체는 마그마유체로부터 계속적인 고순환수의 혼입이 있었던 것으로 생각된다.

## 사 사

이 연구는 2000년도 한국학술진흥재단 연구비(KRF-2000-DA0024)에 의하여 연구되었다. 이 기관에 사의를 표한다. 논문에 사용된 EPMA 분석자료는 충남대학교 공동실험실습관에 배치된 JEOL사 JXA-8800R로 부터 얻어졌다. 아울러 심사과정에서 중요한 관점에 대하여 지적과 수정을 해주신 상지대학교 김세현 교수님과 익명의 심사위원님께 심심한 사의를 표합니다.

## 참고문헌

강필중, 임주환 (1974) 광정 지질도폭설명서. 국립지질조사소.  
 김규환, 정해란 (1999) 남한의 주요 금속광상내 석영내의 유체포유물의 가스성분과 용존성분의 화학조성. 자원환경지질, 32권, p. 421-434.  
 김규환, 中井信之 (1988) 남한의 지하수 및 강수의 안정동위원소조성. 지질학회지, 24권, p. 37-46.

김서운, 유환수, 우영균 (1974) 공주 지질도폭설명서. 국립지질조사소.  
 문건주 (1986) 삼광 금 광상의 광화온도 및 근원에 관한 연구. 광산지질, 19권, p. 19-24.  
 엄상호, 이민성 (1963) 대흥 지질도폭설명서. 국립지질조사소.  
 우영균, 최석원, 박기화 (1991) 충남 예산지역 황석광상의 성인에 관한 연구. 광산지질, 24권, p. 363-378.  
 윤상필, 문희수, 송윤구 (1994) 초염기성암 기원의 평안 및 대흥황석광상의 성인과 광물화학. 자원환경지질, 27권, p. 131-145.  
 이상현, 최기주 (1994) 대흥황석광상 주위의 편마암류의 지화학적 특징과 공존광물의 화학적 평형. 암석학회지, 3권, p. 138-155.  
 이현구, 유봉철, 김경웅, 최선규 (1998) 삼광 금-은광상에서 산출되는 에렉트럼의 산출상태와 화학조성. 한국자원공학회지, 35권, p. 8-18.  
 Bakker, R.J. (1997) Clathrates: Computer programs to calculate fluid inclusion V-X properties using clathrate melting temperatures. Computers Geosci., v. 23, p. 1-18.  
 Barton, P.B.Jr. and Skinner, B.J. (1979) Sulfide mineral stabilities. H.L. Barnes. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. 2nd(ed.), Wiley-Interscience, New York, p. 278-390.  
 Barton, P.B. Jr. and Toulmin, P. (1966) Phase relation involving sphalerite in the Fe-Zn-S system. Econ. Geol., v. 61, p. 815-849.  
 Belkin, H.E. (1994) Microthermometric investigations: Th and Tm. practical and theoretical aspects. Short course of the working group "inclusion in minerals", p. 7-23.  
 Bowers, T.S. and Helgeson, H.C. (1983) Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of nonideal mixing in the system  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$  on phase relations in geologic systems: Equation of state for  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$  fluids at high pressures and temperatures. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 47, p. 1247-1275.  
 Brown, P.E. (1989) FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data. Am. Mineralogist, v. 74, p. 1390-1393.  
 Cassidy, K.F. and Bennett, J.M. (1993) Gold mineralisation at the Lady Bountiful mine, Western Australia: An example of a granitoid-hosted Archean I lode gold deposit. Mineralium Deposita, v. 28, p. 388-408.  
 Diamond, L.W. (1990) Fluid inclusion evidence for P-V-T-X evolution of hydrothermal solutions in late-Alpine gold-quartz veins at Brusson, Val D'ayas, Northwest Italian Alps. Am. Jour. Sci., v. 290, p. 912-958.  
 Diamond, L.W. (1994) Introduction to phase relations of  $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$  fluid inclusions. Short course of the working group "inclusion in minerals", p. 131-158.  
 Ellis, A.J. (1970) Quantitative interpretation of chemical characteristics of hydrothermal systems. Geothermics Spec. Issue 2, v. 1, p. 516-528.  
 Giggenbach, W.F. (1980) Geothermal gas equilibria. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 44, p. 2021-2032.  
 Groves, D.I. (1993) The crustal continuum model for late-Archean lode-gold deposits of the Yilgarn block, Western Australia. Mineralium Deposita, v. 28, p. 366-374.



- Hall, D.L. and Bodnar, R.J. (1990) Methane in fluid inclusions from granulites: A product of hydrogen diffusion? *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 54, p. 641-651.
- Heinrich, C.A. and Eadington, P.J. (1986) Thermodynamic predictions of the hydrothermal chemistry of arsenic and their significance for the paragenetic sequence of some cassiterite-arsenopyrite-base metal sulfide deposits. *Econ. Geol.*, v. 81, p. 511-529.
- Herskowitz, M. and Kisch, H.J. (1984) An algorithm for finding composition, molar volume and isochors of  $\text{CO}_2\text{-CH}_4$  fluid inclusions from Th and Tfm (for  $\text{Th} < \text{Tfm}$ ). *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 48, p. 1581-1587.
- Holloway, J.R. (1981a) Volatile interactions in magmas. In thermodynamics of minerals and melts. Newton, R.C., Navrotsky, A. and Wood, B.J., eds., *Adv. Physical Geochemistry*, v. 1, p. 273-293.
- Holloway, J.R. (1981b) Compositions and volumes of supercritical fluids in the earth's crust. In fluid inclusion: Applications to petrology. Hollister, L.S., and Crawford, M.L., *Mineralog. Assoc. Canada Short Course Handbook*, v. 6, p. 13-38.
- Jacobs, G.K. and Kerrick, D.M. (1981) Methane: an equation of state with application to the ternary system  $\text{H}_2\text{O-CO}_2\text{-CH}_4$ . *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 45, p. 607-614.
- Kerrick, R. (1993) Perspectives on genetic models for lode gold deposits. *Mineralium Deposita*, v. 28, p. 362-365.
- Kerrick, D.M. and Jacobs, G.K. (1981) A modified Redlich-Kwong equation for  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , and  $\text{H}_2\text{O-CO}_2$  mixtures at elevated pressures and temperatures. *Am. Jour. Sci.*, v. 281, p. 735-767.
- Kim, K.H. and Nakai, N. (1981) A study on hydrogen, oxygen and sulfur isotopic ratios of the hot spring waters in South Korea. *Geochemistry*, v. 15, p. 6-16.
- Knight, C.L. and Bodnar, R.J. (1989) Synthetic fluid inclusions: IX. Critical PVTX properties of  $\text{NaCl-H}_2\text{O}$  solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 53, p. 2-8.
- Kretschmar, U. and Scott, S.D. (1976) Phase relation involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application. *Can. Mineralogist*, v. 14, p. 364-386.
- Lee, J.H. Gaudette, and Hueley, P.M. (1973) U-Pb zircon age of the Precambrian basement gneisses of South Korea. *Geology and ore deposit No. 21*, Geological and mineral institute of Korea, p. 5-7.
- Lee, H.K. Yoo, B.C. Hong, D.P. and Kim, K.W. (1995) Structural constraints on gold-silver-bearing quartz mineralization in strike-slip fault system, Samkwang mine, Korea. *Econ. Environ. Geol.*, v. 28, p. 579-585.
- Matsuhisa, Y. Goldsmith, R. and Clayton, R.N. (1979) Oxygen isotope fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 43, p. 1131-1140.
- Nicholls, J. and Crawford, M.L. (1985) Fortran programs for calculation of fluid properties from microthermometric data on fluid inclusions. *Computers Geosci.*, v. 11, p. 619-645.
- Ohmoto, H. and Kerrick, D. (1977) Devolatilization equilibria in graphitic systems. *Am. Jour. Sci.*, v. 277, p. 1013-1044.
- Ohmoto, H. and Rye, R.O. (1979) Isotopes of sulfur and carbon. In Barnes, H.L.(ed.) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 2nd(ed.), Wiley-Interscience, New York. p. 509-567.
- Ramboz, C. Schnapper, D. and Dubessy, J. (1985) The P-V-T-X- $\text{fO}_2$  evolution of  $\text{H}_2\text{O-CO}_2\text{-CH}_4$ -bearing fluid in a wolframite vein: Reconstruction from fluid inclusion studies. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 49, p. 205-219.
- Roedder, E. (1984) Fluid inclusion. *Reviews in mineralogy*. Mineral. Soc. America, v. 12.
- Schwartz, M.O. (1989) Determining phase volumes of mixed  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  inclusions using microthermometric measurements. *Mineralium Deposita*, v. 24, p. 43-47.
- Scott, S.D. and Barnes, H.L. (1971) Sphalerite geothermometry and geobarometry. *Econ. Geol.*, v. 66, p. 653-669.
- Shelton, K.L. So, C.S. and Chang, J.S. (1988) Gold-rich mesothermal vein deposits of the Republic of Korea: Geochemical studies of the Jungwon gold area. *Econ. Geol.*, v. 83, p. 1221-1237.
- Sibson, R.H. Robert, F. and Poulsen, K.H. (1988) High angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology*, v. 16, p. 551-555.
- So, C.S. Chi, S.J. and Shelton, K.L. (1987a) Stable isotope and fluid inclusion studies of gold-silver-bearing vein deposits, Cheonan-Cheongyang-Nonsan mining district, Republic of Korea: Nonsan area. *Neues Jahrb. Mineralogie Abh.*, v. 158, p. 47-65.
- So, C.S. Chi, S.J. Yu, J.S. and Shelton, K.L. (1987b) The Jeonui gold-silver mine, Republic of Korea: A geochemical study. *Mining Geology*, v. 37, p. 313-322.
- So, C.S. and Shelton, K.L. (1987a) Stable isotope and fluid inclusion studies of gold and silver-bearing hydrothermal vein deposits, Cheonan-Cheongyang-Nonsan mining district, Republic of Korea: Cheonan area. *Econ. Geol.*, v. 82, p. 987-1000.
- So, C.S. and Shelton, K.L. (1987b) Fluid inclusion and stable isotope studies of gold-silver-bearing hydrothermal vein deposits, Yeosu mining district, Republic of Korea. *Econ. Geol.*, v. 82, p. 1309-1318.
- So, C.S. Shelton, K.L. Chi, S.J. and Choi, S.H. (1988) Stable isotope and fluid inclusion studies of gold-silver-bearing hydrothermal-vein deposits, Cheonan-Cheongyang-Nonsan mining district, Republic of Korea: Cheongyang area. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 21, p. 149-164.
- So, C.S. and Yun, S.T. (1997) Jurassic mesothermal gold mineralization of the Samhwanghak mine, Youngdong area, Republic of Korea: Constraints on hydrothermal fluid geochemistry. *Econ. Geol.*, v. 92, p. 60-80.
- So, C.S. Yun, S.T. Kim, S.H. Youm, S.J. Heo, C.H. and Choi, S.G. (1993) Mesothermal gold-silver mineralization at the Bodeok mine, Boseong area: A fluid inclusion and stable isotope study. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 26, p. 433-444.
- Van Den Kerkhof, A.M. (1990) Isochoric phase diagrams in the systems  $\text{CO}_2\text{-CH}_4$  and  $\text{CO}_2\text{-N}_2$ : Application to fluid inclusions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 54, p. 621-629.
- Van Den Kerkhof, A.M. and Thiery, R. (1994) Phase transitions and density calculation in the  $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$  system. Short course of the working group "inclusion

- in minerals", p. 171-190.
- Vaughan, D.J. and Craig, J.R. (1978) Mineral chemistry of metal sulfides. Cambridge University Press, 493p.
- Wilkinson, J.J. and Johnson, J.D. (1996) Pressure fluctuations, phase separation and gold precipitation during seismic fracture propagation. *Geology*, v. 24, p. 395-398.
- Zhang, Y-G. and Frantz, J.D. (1987) Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl-KCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O using synthetic fluid inclusions. *Chem. Geology*, v. 64, p. 335-350.
- 

2002년 3월 25일 원고접수, 2002년 8월 13일 게재승인.