

## 義城地域의 金-銀 鑛化作用

池世定\* · 崔善奎\*\* · 都城宰\*\* · 高龍權\*\*

### Gold-Silver Mineralization of the Euseong Area

Se-Jung Chi,\* Seon-Gyu Choi,\*\* Seong-Jae Doh\*\* and Yong-Kwon Koh\*\*

**ABSTRACT :** The Au-Ag deposits of the Euseong area occurred in quartz veins which filled fissures in Cretaceous sedimentary and volcanic rocks. These ore veins can be classified in two types of deposits based on metallic mineral assemblages as follow: a pyrite type gold-silver deposit (Hoedong mine), characterized by Cu sulfides with Au-Ag alloy, and a Sb-rich silver deposit (Keumdongdo mine), characterized by base metal with Ag-bearing sulfosalts.

Mineralogic and fluid inclusion evidences suggest that the ore minerals of these deposits was deposited from initial high temperatures (near 350 °C) to later lower temperatures (200 °C) with moderate salinity fluids ranging from 5.8 to 3.8 eq. wt.% NaCl. The gold-silver mineralization of the Hoedong mine occurred at temperatures between 300 and 200 °C from fluids with log  $f_{S_2}$  of -10 ~ -16 atm. The antimony - silver mineralization of the Keumdongdo mine were deposited at the higher temperatures (350 to 250 °C) and  $f_{S_2}$  (-10 ~ -13 atm) than gold mineralization of the Hoedong mine. The calculated log  $f_{O_2}$  of fluids at 250 °C in two deposits are -32 to -34 atm and -36.5 to -38.5 atm, respectively. Boiling evidences indicate that the ore mineralization of the Hoedong mine occurred at more shallow depth (0.5 km) than that (1 km) of the Keumdongdo mine. The above differences of depositional environments between two deposits caused the compositional changes of ore minerals such as electrum and sphalerite.

### 序 言

남한의 金-銀 鑛床은 중생대 화성활동과 연관되어 주로 NS 내지 N10°-30°W의 단층 파쇄대나 열극을 측진한 맥상 鑛床으로 보고되고 있다. 이러한 鑛床의 金-銀 鑛化作用은 심도, 광화시기 및 화성암체와의 시·공간적 관계등에 따라 다양한 특성을 보여준다 (박희인, 강성준, 1988; 최선규 등, 1988 a, b; 최선규 등, 1989; 이현구, 문희수, 1989; 이현구, 최진우, 1988; 장태영, 지정만, 1989; Choi et al., 1989 b; Shelton and So,

1988; So et al, 1987 a, b, c, d, 1988 a, b and 1980 a, b, c, d; Youn et al., 1988).

최선규 등 (1988a)은 충청도 일원의 金-銀 鑛床에 대하여 鑛脈의 산출상태, 광물공생 관계, Au/Ag 비, 에렉트럼 Ag 함량등을 근거로 하여 자류철석형 金 鑛床, 황철석형 金 鑛床, 휘은석형 金-銀鑛床, 안티몬형 金-銀 鑛床, 안티몬형 銀 鑛床의 5유형으로 분류하였다. 또한, Shelton and So (1988)는 流體 包有物, 안정 동위 원소 및 광물학적 연구를 통하여 경기도, 충청도 및 전라도 일대의 金-銀 鑛床을 심열수 鑛床, Korean-type 鑛床 및 천열수 鑛床으로 분류하였고, 천열수 鑛床일수록 천수의 유입의 양이 한층 더 증가되었음을 규명하였다. 이러한 분류기준에 의하면, 국내 金-銀 鑛床은 충청지역의 일부 鑛床을 제외하고 대부분 Korean-type 鑛床과 천열수 鑛床으로 분류될 수 있다.

\*한국동력자원연구소 지하화실 (Korea Institute of Energy and Resources, P.O. Box 5, Daedeog Science Town, Daejeon 305-343, Korea)

\*\*고려대학교 지질학과 (Dept. of Geology, Korea Univ. 5 Anamdong Sungbuku, Seoul 136-701, Korea)

慶北 義城 퇴적분지 내에는 금성산 칼데라를 중심으로 하여 북동부에는 銅-鉛-亞鉛-銀 鑛床과 동남부에는 金-銀 鑛床들이 분포하고 있다. 이들 鑛床중에서 銅-鉛-亞鉛-銀 鑛床은 Chi et al. (1989)에 의하여 동일 및 동척옥산 광산의 광물학적 및 流體包有物 연구가 시도된 바 있으나, 金-銀 鑛床에 관한 연구는 광산 일대 지질조사 (장기홍 등, 1977)를 제외하고는 전혀 수행된 바 없다.

본 연구는 義城분지내 화산활동과 금성산 칼데라에 수반된 지질구조 및 이와 관련된 금속 鑛床의 생성과정을 모델화하기 위한 연구의 일환으로 회동 및 금동도 金-銀 鑛床을 대상으로 金-銀광물의 생성환경 및 생성 기구를 규명하는데 그 목적이 있다.

地質 및 鑛床

地質

慶北 義城 퇴적분지 내에는 백악기 경상누층군의 퇴적암류 및 화산암류가 전 지역에 걸쳐 넓게 분포하고 있으며, 소규모 암주 또는 암맥상의 불국사 화성암류가 상기 암석들을 관입하고 있다 (Fig. 1). 하양층군에 속하는 사곡층, 춘산층 및 신양동층의 사암 및 셰일 등이

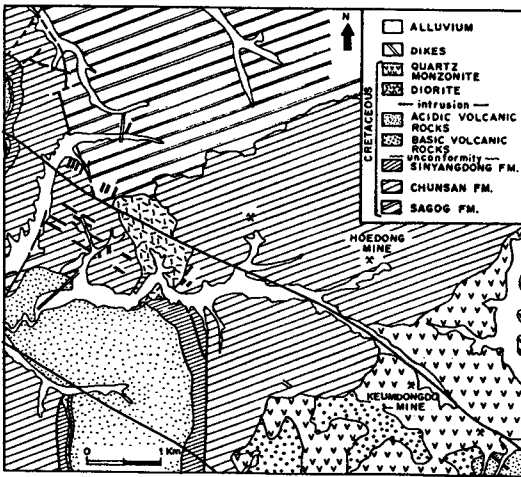


Fig. 1. Geologic map of the Hoedong and Keumdongdo mines in the Euseong mineralized area.

본역의 기저를 이루며, 그 상부에는 암회색 현무암층과 안산암층 및 유문암층으로 구성된 화산암류가 부정합으로 피복되어 있다. 현무암층은 상하부에 현무암질 각력과 집괴암이 협재되어 있다. 안산암층은 주로 안산암과 각력암으로 구성된다. 유문암층은 주로 유문암질응회암과 유문암으로 구성되어 있으며, 응회암층 하부의 래필리응회암은 상부로 갈수록 세립화한다. 지역에 따라 래필리 응회암 상부에 유문암이 피복하고 있으며, 간혹 응회암질사암과 교호하기도 한다. 유문암은 암상이 석영안산암까지 변화하며, 흔히 유상구조를 보인다.

섬록암은 소규모 단일 암주상으로 산출되며, 몬조섬록암에서 몬조나이트까지 조성 변화를 보인다. NW 주향이동 단층에 의하여 약 0.5 km 정도 변위되어 있는 암록색의 조립질 섬록암체는 공간적으로 조직의 변화를 보이는데, 암체의 주변부에서는 입도가 다소 세립화하고, 심한 곳에서는 거의 안산암질암으로 암상의 변화가 크다. 본암과 주변 퇴적암류나 화산암류의 접촉부에서는 섬록암체로부터 반경 2 km까지 광범위한 지역에 걸쳐 호온펠스화 되어 있다.

義城분지 내에 발달된 대소 규모의 암맥류와 단층들은 NW계가 우세하고, 함동 열수 석영맥이나 함 金-銀 석영맥도 대부분 NW의 방향성을 보이며, 특히 금성산 칼데라의 남동부 지역에는 회동, 금동도, 금천 및 대동아 광산들이 밀집 분포하는 金-銀 鑛化帶를 형성하고 있다.

鑛床

慶北 義城 퇴적분지 내에 배태된 함 金-銀석영맥들은 주로 N40°-60°W 혹은 NS 방향의 단층파쇄대 또는 열극을 따라 충진하고 있으며, 맥폭은 최대 0.5m이고 수평으로 약 200 m 이상 연장된다. 주 연구대상이 된 회동 및 금동도 광산의 金-銀석영맥의 산상은 다음과 같다.

회동광산은 셰일 내에 발달된 폭 1 m 정도인 N50°-60°W의 단층파쇄대를 따라 충진된 수 cm폭의 함 金-銀 석영세맥들로 구성되어 있다. 이들 鑛脈은 간혹 파쇄대의 불규칙한 균열부를 따라 세맥으로 분기되기도 한다. 주광석 광물은 황철석, 방연석, 섭아연석 등의 황화광물이며, 황화광물이 우세한 곳에서는 맥의 90%이상 차

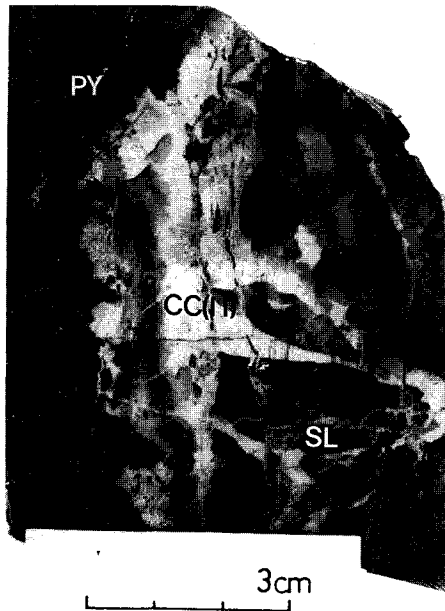


Fig. 2. Photograph showing ore veins and minerals from the Keumdongdo mine. Stage II calcite vein crosscutting and cementing early stage I vein breccias.

지하기도 한다. 시·공간에 따른 광물공생군의 변화는 특징적인 경향성을 보여주지 않지만, 국부적으로는 맥의 주변부에서 중심부를 향하여 방연석 + 황철석 → 석영의 순으로 정출의 순서를 보여주는 곳도 있다. 부광대는 맥의 팽창이 심한 부분이나 분기되는 곳에서 형성되며, 광석광물 중 황철석과 방연석이 가장 많이 산출되는 것이 특징이다.

금동도광산은 세일 및 화산암 내에 N10°W내지 NS의 단층 열극을 충진한 3~4개의 함은석영맥으로 구성되어 있다. 맥폭은 0.10~0.5 m로 팽창하나 평균 0.2

m 정도이며, 지표에서 확인된 鑛脈의 연장은 500 m 정도로 현재 약 150 m 정도 향내 굴진되어 있다. 탐광대상인 주 鑛脈은 타 鑛脈에 비하여 맥폭이 큰 편이며, 광석광물도 비교적 높은 함량 분포를 보인다. 광석광물로는 섬아연석이 양적으로 가장 많이 산출되며 황철석, 유비철석 등도 다량 수반된다. 광석광물은 전반적으로 균질하게 분포하지만, 석영맥이 굴곡된 곳에서 부광대가 특히 발달하는 경향을 보이고 있다. 섬아연석을 위시한 황화광물은 주로 맥의 주변부에 농집되며 중심부에서는 후기의 석영과 방해석이 주로 정출되어 있다. 금동도 광산의 주 鑛脈은 광석 광물의 시·공간에 따른 광물 정출순서를 비교적 잘 보여주는데, 초기에 정출된 황철석과 유비철석이 맥의 주변부에 대상으로 분포되어 있고, 간혹 맥의 중심부에서는 후기 석영과 방해석 세맥이 초기에 정출된 황철석과 섬아연석을 절단하고 있다 (Fig. 2).

鑛石과 鑛物 共生關係

鑛脈의 macrostructure를 검토한 결과에 의하면 회동광산의 함은-銀석영맥은 단일 광화 시기에 형성되었으며, 금동도 광산의 鑛脈은 구조적으로 2회에 걸쳐서 鑛化作用이 진행된 것으로 확인된다. 금동도 광산의 제1광화기는 Base Metal를 위시한 황화광물들이 주로 침전되었으며, 제2광화기는 맥석 광물인 방해석과 석영이 주로 정출되었다.

회동광산: 광석광물은 방연석, 황철석, 사면동석, 섬아연석, 황동석, 적철석, 금홍석, 자연동, 휘동석, 에렉트립, 휘은석, 자연은 등이며, 비교적 단순한 공생관계를 보여주고 있다. 이 연구에서 검토된 시료에 대한 광석광물의 상대적인 양비를 모식적으로 도시하면 Table 1과 같으며, 주요 광석광물의 산출상태, 공생관

Table 1. Ore minerals observed from Au-Ag deposits in the Euseong mineralized area.

| Name of mines | py  | gl  | sp  | cp | ap | cc | el | ag | ar | td | pl | br | pg | ru | hm | cu |
|---------------|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Hoedong       | **  | *** | *   | *  |    | *  | -  | -  | -  | *  |    |    |    |    |    |    |
| Keumdongdo    | *** | **  | *** | *  | ** |    |    |    |    | *  | *  | *  |    |    |    |    |

Abbreviation: \*\*\* = abundant, \*\* = moderate, \* = little, - = rare, ag = native silver, ap = arseonpyrite, ar = argentite, br = bourmonite, cc = chalcocite, cp = chalcopyrite, cu = native copper, el = electrum, gl = galena, hm = hematite, pg = pyrrargyrite, pl = polybasite, py = pyrite, ru = rutile, sp = sphalerite, and td = silver-bearing tetrahedrite.

Table 2. Electron microprobe analyses of electrums and native silvers from the Hoedong mine.

| Specimen No. | Analyzed point. | Weight percent |        |        | Atomic percent |       |         | Associated minerals** |
|--------------|-----------------|----------------|--------|--------|----------------|-------|---------|-----------------------|
|              |                 | Au             | Ag     | Total  | Au             | Ag    | Ag/Au   |                       |
| Hoedong-E    | 1*              | 0.16           | 98.89  | 99.05  | 0.09           | 99.91 | 1148.41 | cp                    |
| Hoedong-E    | 2*              | 0.17           | 101.46 | 101.63 | 0.09           | 99.91 | 1110.11 | cp                    |
| Hoedong-E    | 3*              | 0.17           | 100.10 | 100.10 | 0.10           | 99.90 | 1110.11 | cp                    |
| Hoedong-E    | 4*              | 0.16           | 97.95  | 98.11  | 0.09           | 99.91 | 1110.11 | cp                    |
| Hoedong-I-1  | 1               | 28.12          | 71.90  | 100.02 | 17.64          | 82.36 | 4.67    | cp, td, gl            |
| Hoedong-I-1  | 2               | 28.94          | 71.08  | 100.02 | 18.23          | 81.77 | 4.48    | cp, td, gl            |
| Hoedong-A    | 1               | 73.02          | 28.62  | 101.64 | 58.28          | 41.72 | 0.71    |                       |
| Hoedong-A    | 2               | 72.94          | 28.84  | 101.78 | 58.07          | 41.93 | 0.72    |                       |
| Hoedong-A    | 3               | 76.09          | 24.54  | 100.62 | 62.94          | 37.06 | 0.59    |                       |
| Hoedong-A    | 4               | 64.01          | 35.30  | 99.31  | 49.83          | 50.17 | 1.01    | py                    |
| Hoedong-A    | 5               | 65.39          | 34.53  | 99.92  | 50.91          | 49.09 | 0.96    | py                    |
| Hoedong-A    | 6               | 47.30          | 54.23  | 101.53 | 32.33          | 67.67 | 2.09    | td, gl                |
| Hoedong-A    | 7               | 47.25          | 54.05  | 101.30 | 32.37          | 67.63 | 2.09    | td, gl                |
| Hoedong-A    | 8               | 48.21          | 52.79  | 101.00 | 33.34          | 66.66 | 2.00    | td, gl                |
| Hoedong-A    | 9               | 50.33          | 52.60  | 102.93 | 34.38          | 65.62 | 1.91    | td, gl                |
| Hoedong-E-2  | 1               | 69.86          | 30.45  | 100.31 | 55.68          | 44.32 | 0.80    | py, cp                |
| Hoedong-E-2  | 2               | 73.31          | 26.36  | 99.67  | 60.37          | 39.63 | 0.66    | py, cp                |
| Hoedong-E-2  | 3               | 74.84          | 28.19  | 103.03 | 59.25          | 40.75 | 0.69    | py, cp                |
| Hoedong-E-2  | 4               | 66.08          | 35.15  | 101.23 | 50.73          | 49.27 | 0.97    | py, cp                |
| Hoedong-E-2  | 5               | 65.72          | 37.17  | 102.89 | 49.20          | 50.80 | 1.03    | py, gl                |
| Hoedong-E-2  | 6               | 63.19          | 34.75  | 97.94  | 49.90          | 50.10 | 1.00    | py, gl                |

\* native silver. \*\* See Table 1 for mineral abbreviations.

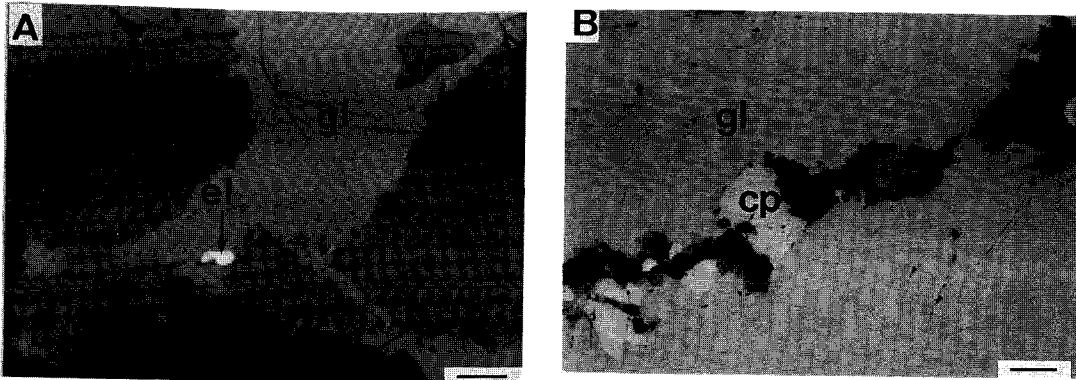


Fig. 3. Photomicrographs of some ore minerals from the Hoedong mine. A; Electrum closely associated with galena and Ag-bearing tetrahedrite and B; Fractures in galena filled by Ag-bearing tetrahedrite and chalcopyrite. Bar scale indicates 0.05mm in length. See Table 1 for mineral abbreviations.

계 및 화학조성은 다음과 같다.

에렉트럼은 (<0.01mm, 장경) 주로 황동석, 황철석, 방연석, 사면동석과 같은 황화광물과 밀접하게 공존하지만 (Fig. 3-A), 간혹 석영 입자 간극내에 독립적으로

산출된다. 에렉트럼의 EPMA 분석결과에 의하면 Au 함량의 분포는 28.12~76.09 wt. % (17.64~62.94 atomic %)이며, 주로 30~60 atomic %에 집중 분포되는 경향을 보인다 (Fig. 4). 동일 입자내의 조성변화는 최대 5

Table 3. Electron microprobe analyses of Ag-bearing tetrahedrite from the Keumdongdo and Hoedong mines.

| Specimen No. | Weight percent |       |      |      |       |      |       |        | Formulas on the basis of S = 13 |       |       |       |       |       |       |
|--------------|----------------|-------|------|------|-------|------|-------|--------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              | Cu             | Ag    | Zn   | Fe   | Sb    | As   | S     | Total  | Cu                              | Ag    | Fe    | Zn    | Sb    | As    | S     |
| Keumdongdo-K | 26.41          | 16.66 | 1.27 | 4.81 | 28.05 | 0.09 | 23.51 | 100.81 | 7.367                           | 2.738 | 1.526 | 0.343 | 4.083 | 0.022 | 13.00 |
| Keumdongdo-K | 26.51          | 17.36 | 1.17 | 5.09 | 28.05 | 0.11 | 23.14 | 101.41 | 7.512                           | 2.899 | 1.640 | 0.322 | 4.150 | 0.025 | 13.00 |
| Keumdongdo-K | 26.63          | 16.91 | 3.37 | 3.09 | 28.25 | 0.21 | 23.71 | 102.16 | 7.369                           | 2.756 | 0.971 | 0.907 | 4.080 | 0.046 | 13.00 |
| Keumdongdo-K | 26.08          | 15.18 | 3.95 | 2.49 | 27.23 | 0.33 | 22.97 | 98.23  | 7.446                           | 2.553 | 0.811 | 1.096 | 4.058 | 0.080 | 13.00 |
| Keumdongdo-K | 25.88          | 17.56 | 2.87 | 3.78 | 27.54 | 0.09 | 23.34 | 101.07 | 7.273                           | 2.906 | 1.209 | 0.784 | 4.038 | 0.023 | 13.00 |
| Keumdongdo-D | 30.83          | 7.55  | 2.26 | 4.01 | 28.57 | 0.53 | 24.15 | 97.90  | 8.371                           | 1.206 | 1.239 | 0.595 | 4.048 | 0.122 | 13.00 |
| Keumdongdo-D | 32.72          | 6.57  | 2.18 | 3.84 | 28.85 | 1.91 | 25.09 | 101.16 | 8.553                           | 1.011 | 1.140 | 0.554 | 3.936 | 0.424 | 13.00 |
| Hoedong-I    | 33.25          | 8.38  | 6.22 | 1.25 | 23.17 | 3.77 | 24.22 | 100.26 | 9.002                           | 1.336 | 0.385 | 1.637 | 3.274 | 0.866 | 13.00 |
| Hoedong-I    | 28.44          | 14.41 | 5.89 | 0.98 | 28.26 | 0.21 | 23.04 | 101.23 | 8.096                           | 2.415 | 0.318 | 1.629 | 4.197 | 0.051 | 13.00 |
| Hoedong-I    | 28.78          | 12.43 | 6.01 | 0.84 | 27.71 | 0.81 | 23.51 | 100.08 | 8.033                           | 2.044 | 0.266 | 1.627 | 4.036 | 0.192 | 13.00 |
| Hoedong-I    | 26.64          | 17.31 | 6.03 | 0.84 | 26.56 | 0.75 | 24.17 | 102.30 | 7.228                           | 2.766 | 0.259 | 1.590 | 3.762 | 0.172 | 13.00 |
| Hoedong-I    | 27.96          | 14.85 | 5.82 | 1.19 | 26.77 | 0.43 | 23.46 | 100.48 | 7.816                           | 2.446 | 0.377 | 1.582 | 3.906 | 0.102 | 13.00 |
| Hoedong-A    | 28.77          | 14.33 | 6.12 | 0.87 | 23.78 | 3.12 | 24.77 | 101.77 | 7.619                           | 2.235 | 0.260 | 1.575 | 3.286 | 0.701 | 13.00 |
| Hoedong-A    | 29.41          | 15.17 | 5.59 | 1.07 | 22.57 | 3.28 | 24.19 | 101.30 | 7.975                           | 2.423 | 0.329 | 1.476 | 3.194 | 0.755 | 13.00 |
| Hoedong-A    | 30.73          | 13.39 | 6.55 | 0.61 | 23.05 | 3.81 | 24.59 | 102.73 | 8.198                           | 2.104 | 0.185 | 1.698 | 3.209 | 0.862 | 13.00 |
| Hoedong-A    | 29.39          | 13.74 | 6.26 | 0.65 | 23.77 | 3.48 | 25.39 | 102.69 | 7.590                           | 2.091 | 0.191 | 1.572 | 3.204 | 0.761 | 13.00 |
| Hoedong-A    | 29.55          | 14.17 | 6.47 | 0.66 | 23.08 | 3.64 | 25.57 | 103.15 | 7.580                           | 2.140 | 0.193 | 1.613 | 3.089 | 0.792 | 13.00 |
| Hoedong-A    | 29.59          | 14.95 | 5.25 | 0.64 | 22.51 | 3.27 | 25.86 | 102.09 | 7.507                           | 2.233 | 0.184 | 1.292 | 2.979 | 0.703 | 13.00 |

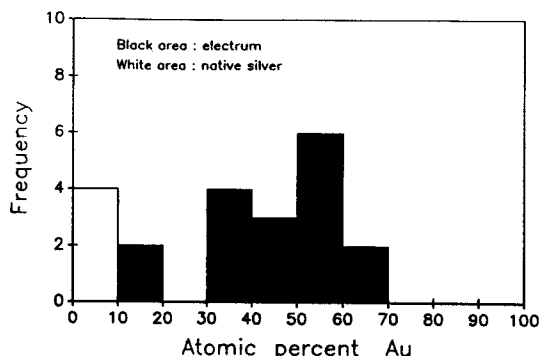


Fig. 4. Au content (atomic %) of electrums and native silvers from the Hoedong mine.

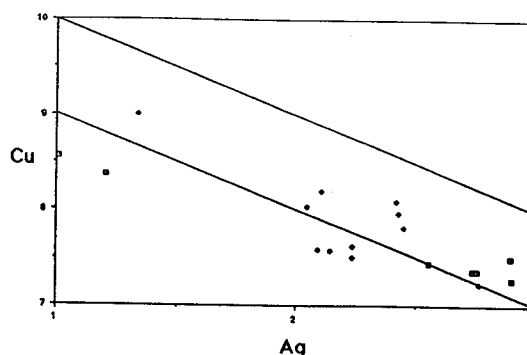


Fig. 5. The relation between Cu atoms and Ag atoms in Ag-bearing tetrahedrite from the Hoedong and Keumdongdo mines. Open square ; Keumdongdo mine and filled diamond ; Hoedong mine.

wt. % Au 이다. 회동광산의 에렉트럼은 충청지역 金-銀鑛床의 에렉트럼에 비교적 높은 값을 보여주며, 사면동석과 같은 함은광물과 공존하는 에렉트럼은 17.64~34.38 atomic %로 가장 낮은 Au 함량을 갖는다 (Table 2). 따라서, Au 함량의 조성변화는 주로 에렉트럼과 공생하는 광물종과 밀접한 관계가 있는 것으로 사료된다. 자연은은은 양적으로 에렉트럼에 비하여 극소량만 확인되

며, 주로 황동석의 틈사이를 충전하거나 황동석내에 包有物로서 산출된다. EPMA 분석결과에 의하면 자연은의 화학조성은 거의 순수한 자연은 상태로 최대 0.17 wt. % Au 를 함유하고 있다 (Table 2).

사면동석은 鑛脈 중에서 가장 많이 산출되는 함은광물로 0.5~2 mm 크기의 비교적 큰 입상 또는 다각형 결정으로 산출되며, 주로 방연석, 황동석과 밀접한 공생

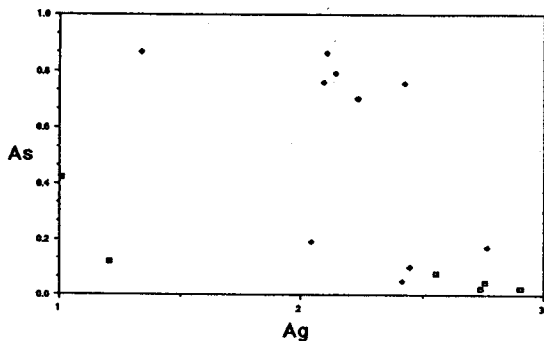


Fig. 6. The relation between As atoms and Ag atoms in Ag-bearing tetrahedrite from the Hoedong and Keumdongdo mines. Open square ; Keumdongdo mine and filled diamond ; Hoedong mine.

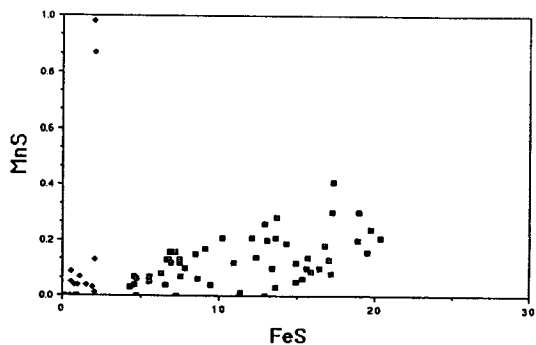


Fig. 8. The relation between MnS and FeS (mole %) in sphalerites from the Hoedong and Keumdongdo mines. Open square ; Kewmdong mine and solid square ; Hoedong mine.

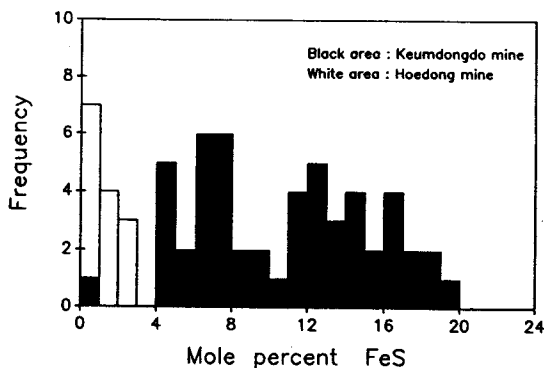


Fig. 7. Frequency distribution of FeS (mole %) in sphalerites from the Hoedong and Keumdongdo mines.

관계를 보여주지만 (Fig. 3-B), 간혹 황동석 내에 타형 결정으로 에렉트럼과 함께 포획되거나 방연석내에 dot 내지는 bleb상으로 용출되기도 한다. 사면동석의 화학 조성은 Table 3과 같고, 이상적인 구조식에서 제시된 Cu, Sb, S 이외에도 Ag 함량이 8.38~17.31 wt.%, Zn 함량이 5.25~6.55 wt.%, Fe 함량이 0.61~1.19 wt.%, As 함량이 0.21~3.81 wt.% 정도로 함유된다. 이러한 회동 광산의 사면동석은 국내 전형적인 천열수 金銀 鑛床으로 알려진 통영 광산의 사면동석에 비하여 낮은 함량을 보인다. 함은사면동석 중 Cu 와 Ag 함량 간에

는 역상관 관계를 보여주는데 (Fig. 5), 이는 Ag 가 Cu 를 주로 치환하고 있음을 시사하고 있다. 또한 Ag 와 As 함량간에는 미약하나마 역상관관계를 보이는데 (Fig. 6), 이는 Johnson et al, (1986)의 결과와도 잘 일치된다. 이러한 사실은 사면동석중의 Ag 함량은 As 보다는 Sb에 친화력이 있음을 보여준다. (Cu + Ag + Fe + Zn) : (Sb + As) : S의 원자비는 11.22~12.46: 3.68~4.25: 13으로 이상적 원자비인 12 : 4 : 13에 근접한다.

섬아연석은 소량 산출되며 주로 황동석 및 방연석 등과 수반된다. 섬아연석의 철 함량 (FeS)은 0.14~2.08 mole %로서 대체로 낮은 함량 분포를 보이며, 1 mole %에서 가장 높은 빈도를 보인다 (Fig. 7). 이는 경상분지의 대표적인 천열수 金銀 鑛床인 통영 광산산 섬아연석의 철 함량 분포와 유사하다 (김문영, 신흥자, 1989). 한편, 카드뮴 함량 (CdS)은 0.35~3.97 mole %로서 통영 광산의 섬아연석보다 비교적 높은 값을 보이고, 망간 함량 (MnS)은 최대 0.9 mole %로 아주 낮다. Figs. 8 과 9는 섬아연석내 FeS 함량과 MnS 및 CdS 함량간의 상관관계를 도시한 것으로 상기 성분들 간에 뚜렷한 경향성을 보이지 않는다.

금동도광산: 금동도광산의 제1광화 작용시 정출된 광물은 세립의 석영을 위시하여 다량의 Base Metal 황화광물과 제2광화기에 비교적 소량 침전된 방해석 등이다. 광석 광물은 섬아연석, 황철석, 유비철석, 방연석.

Table 4. Electron microprobe analyses of arsenopyrites from the Keumdongdo mine.

| Specimen No. | Analyzed point. | Weight |       | percent |        | Formulas on the basis of As + S= 2 |       |       | Atomic percent |       |       |
|--------------|-----------------|--------|-------|---------|--------|------------------------------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
|              |                 | Fe     | As    | S       | Total  | Fe                                 | As    | S     | Fe             | As    | S     |
| KD-N-1       | 1               | 34.79  | 43.28 | 21.57   | 99.64  | 0.996                              | 0.924 | 1.075 | 33.26          | 30.84 | 35.91 |
| KD-N-1       | 2               | 35.06  | 43.06 | 22.10   | 100.22 | 0.993                              | 0.909 | 1.090 | 33.18          | 30.38 | 36.44 |
| KD-N-1       | 3               | 34.98  | 43.63 | 21.65   | 100.25 | 0.996                              | 0.926 | 1.073 | 33.25          | 30.91 | 35.84 |
| KD-N-1       | 4               | 35.23  | 41.95 | 22.06   | 99.24  | 1.010                              | 0.897 | 1.102 | 33.57          | 29.80 | 36.63 |
| KD-N-1       | 5               | 35.14  | 42.21 | 22.00   | 99.35  | 1.007                              | 0.901 | 1.098 | 33.49          | 29.98 | 36.52 |
| KD-N-1       | 6               | 34.78  | 43.10 | 21.41   | 99.29  | 1.002                              | 0.925 | 1.074 | 33.38          | 30.83 | 35.79 |
| KD-N-2       | 1               | 35.16  | 42.67 | 22.73   | 100.56 | 0.984                              | 0.891 | 1.108 | 33.00          | 29.85 | 37.15 |
| KD-N-2       | 2               | 35.13  | 41.07 | 22.92   | 99.11  | 0.996                              | 0.868 | 1.131 | 33.25          | 28.97 | 37.78 |
| KD-N-2       | 3               | 34.60  | 42.90 | 22.07   | 99.57  | 0.982                              | 0.908 | 1.091 | 32.95          | 30.45 | 36.60 |
| KD-N-2       | 4               | 35.13  | 42.65 | 21.80   | 99.59  | 1.007                              | 0.911 | 1.088 | 33.49          | 30.31 | 36.20 |
| KD-N-2       | 5               | 34.59  | 42.58 | 21.72   | 98.89  | 0.994                              | 0.912 | 1.087 | 33.21          | 30.47 | 36.31 |
| KD-N-2       | 6               | 35.33  | 40.70 | 22.78   | 98.82  | 1.009                              | 0.866 | 1.133 | 33.54          | 28.79 | 37.67 |
| KD-N-2       | 7               | 35.46  | 42.41 | 21.60   | 99.47  | 1.024                              | 0.913 | 1.086 | 33.87          | 30.20 | 35.93 |
| KD-N-2       | 8               | 35.52  | 40.34 | 22.38   | 98.24  | 1.028                              | 0.871 | 1.128 | 33.97          | 28.76 | 37.27 |
| KD-N-2       | 9               | 35.20  | 40.95 | 22.06   | 98.20  | 1.021                              | 0.885 | 1.114 | 33.80          | 29.31 | 36.89 |
| KD-N-2       | 10              | 35.28  | 41.25 | 22.70   | 99.23  | 1.003                              | 0.874 | 1.125 | 33.42          | 29.13 | 37.46 |
| KD-N-2       | 11              | 35.59  | 41.34 | 22.58   | 99.51  | 1.014                              | 0.878 | 1.121 | 33.65          | 29.14 | 37.20 |
| KD-N-2       | 12              | 35.02  | 40.69 | 23.01   | 98.71  | 0.994                              | 0.861 | 1.138 | 33.22          | 28.77 | 38.01 |
| KD-M         | 1               | 35.23  | 42.44 | 22.12   | 99.78  | 1.004                              | 0.901 | 1.098 | 33.43          | 30.01 | 36.56 |
| KD-M         | 2               | 34.87  | 41.70 | 22.28   | 98.85  | 0.997                              | 0.889 | 1.110 | 33.29          | 29.67 | 37.04 |
| KD-M         | 3               | 35.02  | 41.98 | 22.31   | 99.31  | 0.998                              | 0.892 | 1.107 | 33.30          | 29.75 | 36.95 |
| KD-M         | 4               | 35.15  | 40.22 | 22.75   | 98.12  | 1.010                              | 0.861 | 1.138 | 33.56          | 28.62 | 37.82 |
| KD-M         | 5               | 34.60  | 42.37 | 22.52   | 99.49  | 0.977                              | 0.892 | 1.107 | 32.82          | 29.96 | 37.21 |

황동석 이외에도 함은광물인 사면동석, 폴리바사이트, 농홍은석, 보오노나이트 등이며, 상대적인 양비를 모식적으로 도시하면 Table 1과 같다.

사면동석은 양적으로 가장 많이 산출되는 함은광물로 황철석, 섬아연석, 유비철석의 간극 또는 불규칙하게 갈라진 틈을 따라 주로 방연석, 농홍은석, 폴리바사이트와 함께 충전하고 있다 (Fig. 10-A). 또한 사면동석은 방연석 내에 0.05mm 크기의 불규칙한 다각형으로 용리되거나, 간혹 보오노나이트 또는 폴리바사이트 같은 함은황염광물에 의해서 교대되고 있다. 사면동석 중 As 함량은 6.57~17.56 wt. %로 현저한 조성변화를 나타내고 있으며, Ag 함량은 0.09~1.91 wt. %로서 회동광산의 사면동석에 비하여 극소량 함유되어 있다 (Table 3). 본 광산의 사면동석은 함비소 광물인 유비철석이 확인되지 않는 회동 광산의 사면동석에 비하여 As 함량이 현저히 낮다. 이는 두 鑛床의 생성환경의 차이에 기인되는 것으로 추측된다. Fe 함량의 경우에는 회동 광산의 사면동석 (0.16~1.25 wt. % Fe)에 비하여

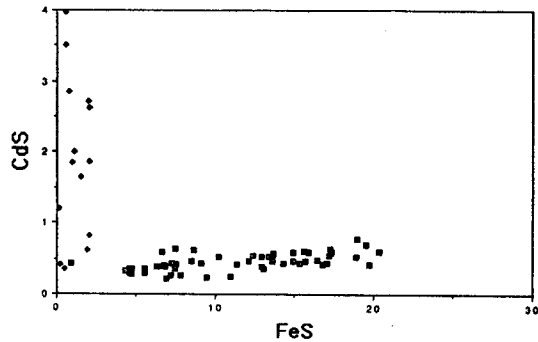


Fig. 9. The relation between CdS and FeS (mole %) in sphalerites from the Hoedong and Keumdongdo mines. Open square ; Keumdongdo mine and filled diamond ; Hoedong mine.

비교적 높은 2.49~5.09 wt. %값을 보여준다.

폴리바사이트는 방연석과 용리조직을 보여주며, 가끔 사면동석 입자주변부를 따라 교대하고 있다. 농홍은석은 극소량 산출되며, 주로 섬아연석, 황철석 입자 사

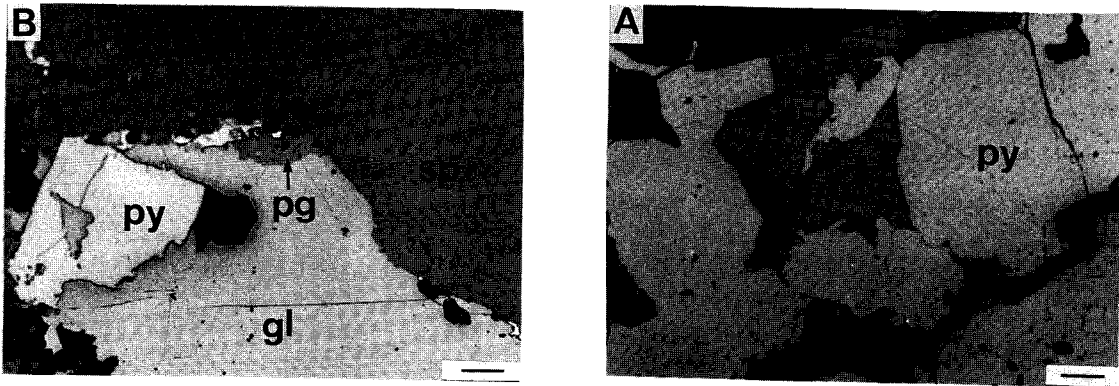


Fig. 10. Photomicrographs of some ore minerals from the Keumdongdo mine. A; Pyrite and sphalerite crystals surrounded by Ag-bearing tetrahedrite and galena and B; Sphalerite crystals surrounded by pyrrargyrite and galena. Bar scale indicates 0.05mm in length. See Table 1 for mineral abbreviations.

이 또는 주변부를 따라 방연석과 함께 충전하고 있다 (Fig. 10-B). 보노노나이트는 주로 방연석내에 함은사면 동석의 주변부를 따라 교대하고 있다.

섬아연석은 가장 많이 산출되는 황화광물로 비교적 전 광화에 걸쳐 산출되고 있다. 섬아연석은 전반적으로 흑적갈색에서 연한 적갈색으로 변화하는 누대구조를 보이며, 초기 정출된 섬아연석은 흑적갈색을 보여주고 있지만, 후기 정출된 섬아연석은 암록색등으로 변화하고 있다. 섬아연석의 Fe 함량은 0.88~20.36 mole %로서 회동 광산의 섬아연석에 비교하면 아주 심한 조성변화를 보이나, 초기 정출된 섬아연석은 약 11~16 mole

% FeS에 집중되는 경향을 보이고 있다 (Fig. 8). 이러한 섬아연석의 조성변화는 鑛化作用시 광화유체의 온도, 유황분압 등 제반물리·화학적 환경이 변화가 현저하였음을 지시해 준다. 또한 금동도 광산의 섬아연석은 회동 광산의 섬아연석 (최대 2.08 mole % FeS)보다 아주 높은 Fe 함량을 가지나, Cd와 Mn 함량은 0.29~0.84 wt. % (0.26~0.77 mole % FeS) 및 <0.23 wt. % (<0.41 mole % MnS)로서 아주 낮은 값을 보인다. 섬아연석의 FeS와 MnS 함량간에는 정상관계를 보여주지만 (Fig. 9), FeS와 CdS 함량 간에는 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는다 (Fig. 10).

유비철석은 광석광물 중에서 섬아연석, 황철석 다음으로 많이 산출되며, 주로 황철석과 함께 약 0.02mm 이하의 자형의 다결정 집합체를 이루거나 미립의 결정으로 섬아연석 및 황철석 내에 포획된다. 유비철석의 화학조성은 Table 4와 같고, As와 S가 서로 치환 관계에 있기 때문에  $As + S = 2$ 로 하여 구조식을 구하였다. 상기 鑛床에서는  $As/S < 1$ 인 과승 유황 (S-Excess)형 유비철석만이 존재함을 알수 있다. As의 조성범위는 40.22~43.63 wt. % (28.62~30.91 atomic %)의 함량변화를 나타내지만 (Fig. 11), Fe 함량은  $33.33 \pm 0.6$  atomic %로 거의 균질한 편이다.

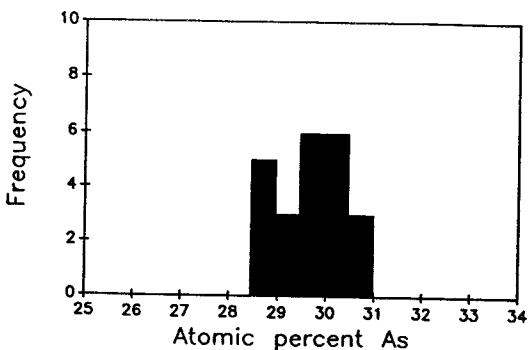


Fig. 11. The frequency distribution of As content (atomic %) in arsenopyrite from the Keumdongdo mine.



流體包有物

流體包有物 연구는 회동 및 금동도 광산의 석영, 섬아연석, 방해석을 대상으로 수행하였다. 流體包有物 연구를 위하여 U.S.G.S Gas Flow 가열 및 냉각장치를 이용하였으며, 측정오차는 가열 시험시 350℃에서 ±3.0℃이다. 냉각실험에 의한 염농도는 H<sub>2</sub>O - NaCl system (Potter et al., 1978)에 의하여 구하였다.

회동 및 금동도 광산의 광물 내에서 관찰되는 流體包有物은 Nash (1972)의 분류에 의하면 I 및 II형의 2가지 유형으로 구분된다. I형은 액상과 기상으로 구성되어 있으며 액상의 부피는 流體包有物 부피의 20~40%를 점유하고 가열시 액상으로 균일화된다. 또한 냉각 실험시 액체 CO<sub>2</sub>나 가스-수화물은 관찰되지 않는다. II형은 액상과 기상으로 구분되며 기상의 부피

가 流體包有物 부피의 60~80%를 차지하고 가열실험시 기상으로 균일화된다. II형의 包有物은 주로 negative나 타구 형태를 갖는다.

流體包有物の 均一化 溫度

회동광산: 流體包有物 연구의 주 대상광물은 석영과 섬아연석이다. 석영내 초생 流體包有物の 크기는 20μm 미만이며, 주로 10μm 크기의 包有物이 우세하게 관찰된다. 대부분 후생 流體包有物の 크기는 10~30μm이다. I형 초생 流體包有物の 산출빈도수는 후생 流體包有物보다 낮고, II형 流體包有物은 드물게 관찰된다. 섬아연석내의 流體包有物은 주로 I형이 우세하나 가끔 II형도 관찰된다. 流體包有物の 크기는 10~60μm로서 석영의 것보다 대체로 크다.

회동광산의 초생 및 후생 流體包有物の 균일화 온도는 Fig. 12와 같다. 석영의 균일화 온도는 205~313℃ (정동내 후기석영은 205~255℃)이며, II형 包有物은 297~256℃에서 균일화된다. 섬아연석의 I형 유체包有物의 균일화 온도는 220~273℃이며 II형은 247~255℃이다. 회동광산의 광화작용은 정출 작용이 진행되면서 온도가 점차 감소함을 보여주나 (Fig. 12), 주 광석광물을 위시한 석영이 230~280℃ 범위에서 주로 침전되었음을 알 수 있다.

금동도광산: 제1광화기에 침전된 열수광물 중 流體包有物 실험 대상광물은 석영, 섬아연석 및 방해석이다. 금동도 광산의 流體包有物の 특성은 회동광산과 유사하나 流體包有物の 크기 (20~50μm)가 회동광산의 流體包有物보다 비교적 큰 편이다. 특히 섬아연석 내에서 관찰되는 초생 流體包有物은 대체로 매우 불규칙한 형태를 갖고 그 크기도 보통 40~50μm 정도이다. 방해석 중 초생 流體包有物은 20~30μm의 크기를 보여주고 기상의 부피 (10~20 vol.%)는 타 광물의 것보다 작은 편이다. 금동도 광산의 초생 流體包有物の 균질화 온도는 Fig. 12에 제시된 바와 같이 석영은 초기 343℃에서 후기 240℃ (I형, 270~308℃)에 걸쳐서 침전되었고, 섬아연석은 271~311℃ (II형, 297℃) 그리고 후기 방해석은 206~233℃에서 각각 정출되었다.

제2광화기에 정출된 방해석의 流體包有物은 초생 및 후생의 I형만 관찰되는데 초생 流體包有物은 크기가

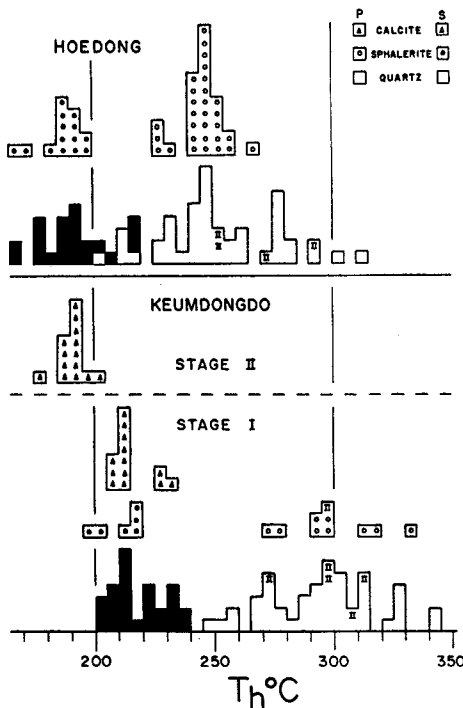


Fig. 12. Histograms of homogenization temperatures of fluid inclusions in vein minerals from the Hoedong and Kuemdongdo mines. P; primary fluid inclusion, S; secondary fluid inclusion, and II; vapor-rich fluid inclusion.

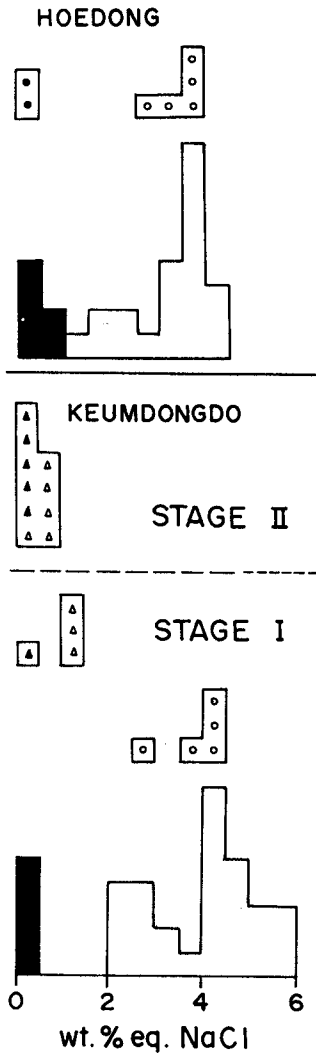


Fig. 13. Histograms of salinity data of fluid inclusions in vein mineral from the Hoedong and Keumdongdo mines. Symbols are same in Fig. 12.

30~40 $\mu$ m로서 드물게 산출된다. 제2광화기의 방해석은 초기 207 $^{\circ}$ C에서 후기 175 $^{\circ}$ C로 냉각되는 광화 유체로부터 정출되었음을 알수 있다 (Fig. 12).

流體包有物의 鹽濃度

流體包有物의 염농도 측정은 包有物의 크기가 매우

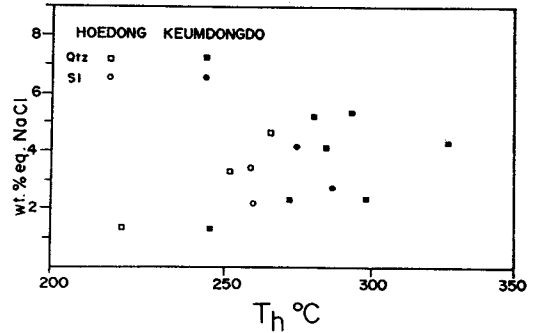


Fig. 14. Homogenization temperature vs. salinity diagram for fluid inclusion in vein minerals from the Au-Ag deposits in the Euseong mineralization area. Qtz; quartz and SI; sphalerite.

작아서 제한된 시료에서만 수행되었다. 회동광산의 석영 내 流體包有物의 염농도는 1.0~3.8 wt. % eq. NaCl이며 섬아연석의 염농도는 2.1~3.3 wt. % eq. NaCl의 값을 갖는다 (Fig. 13). 금동도 광산의 제1광화기 석영은 2.0~5.7 wt. % eq. NaCl인 광화 유체로부터 산출되었으며 섬아연석은 3.4~1.6 wt. % eq. NaCl인 광화 유체로부터 산출되었으며, 섬아연석은 3.4~1.6 wt. % eq. NaCl의 값을 갖는다. 제 2광화기는 주로 탄산염 광물인 방해석이 침전된 시기로 방해석 내 초생 流體包有物의 염농도는 1 wt. % eq. NaCl 미만으로서 천수가 갖는 염농도 값과 비슷하다. 이는 탄산염광물이 산출될 때 광화유체에 천수유입이 한층 더 증가되어, 염농도에 상당한 영향을 준것으로 사료된다.

균일화 온도와 염농도의 상관관계에서 제시된 바와 같이 온도가 감소함에 따라 염농도도 값이 전반적으로 감소하는 경향을 볼수 있다 (Fig. 14). 두 鑛床내에 석영 및 섬아연석의 流體包有物중 초생 II형 流體包有物이 드물게 관찰됨은 광화유체의 주기적인 비등현상이 있었음을 시사하나, 균일화온도-염농도 관계와 후기 방해석의 염농도 값은 義域 鑛化帶의 金-銀 鑛化作用이 천수유입에 의한 냉각 및 회석작용에 의하여 매우 큰 영향을 받았음을 지시해준다.

鑛化作用의 壓力

회동 및 금동도 광산의 석영 및 섬아연석에서 관찰

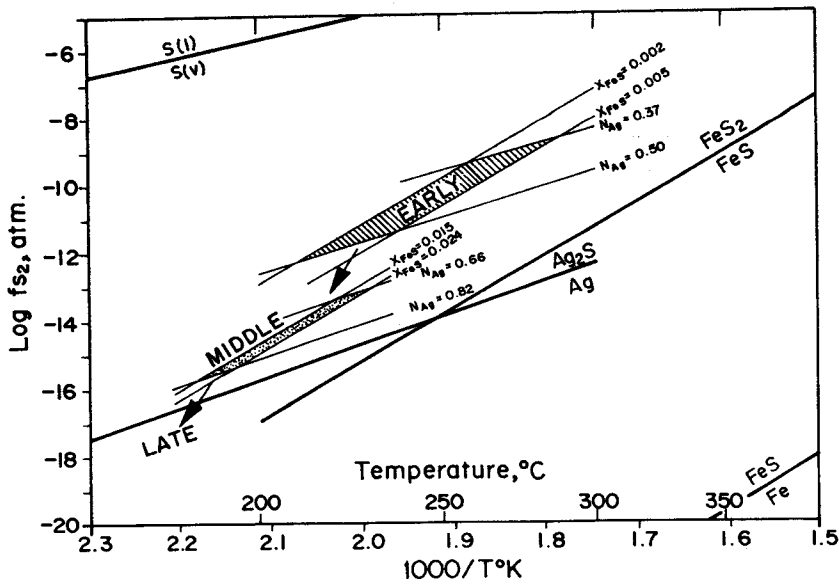


Fig. 15. T-f<sub>S<sub>2</sub></sub> diagram showing the stability areas of the ore fluids from the Hoedong mine. X<sub>FeS</sub> = FeS mole % in sphalerite. N<sub>Ag</sub> = atomic fraction of Ag in electrum.

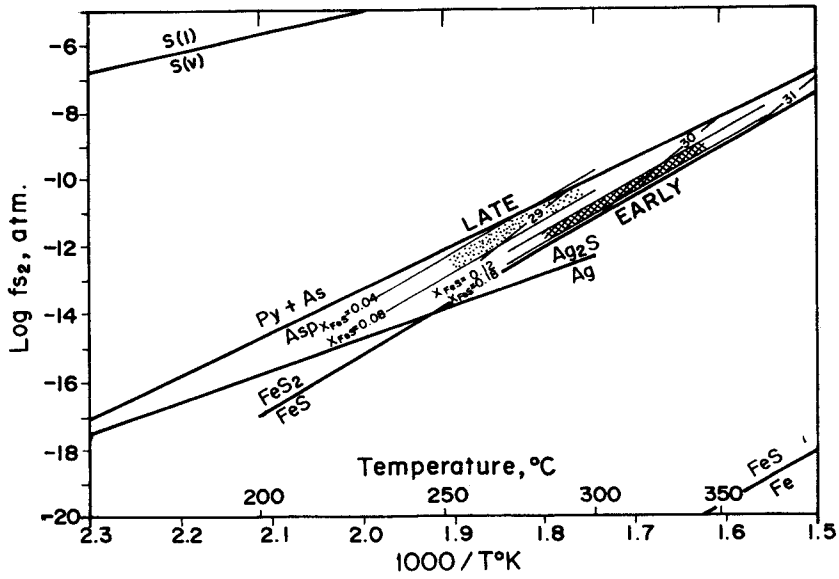


Fig. 16. T-f<sub>S<sub>2</sub></sub> diagram showing the stability area of the ore fluids from the Keumdongdo mine. Abbreviations are same in Fig. 15.

되는 流體包有物은 I 형과 II 형이 동일 시료안에서 유사한 온도범위에서 균일화된다. 이는 광석광물의 정출시 광화유체가 H<sub>2</sub>O - NaCl의 임계곡선 근처에 있음을 지시해 준다. 온도-염농도의 값을 H<sub>2</sub>O-NaCl 임계곡선 (Haas, 1971)에 적용하여 구한 광화유체의 압력은 광화유체내 CO<sub>2</sub>에 의하여 영향을 받는다고 보고된바 있다 (Potter et al., 1978). 그러나 두 鑛床내 流體包有物은 상온에서 LCO<sub>2</sub>가 관찰되지 않고, 냉각실험 중 가스-수산화물이 형성되지 않는것으로 보아 유체 내 CO<sub>2</sub>의 농도는 극미량인 0.05 mole % 이하라고 판단된다. 그러므로 본 연구 鑛化帶의 광화심도는 열수광물의 流體包有物로부터 H<sub>2</sub>O - NaCl 임계곡선에 의해 광화 압력을 구하였다. 회동광산의 섬아연석 내 流體包有物의 균일화 온도가 약 220~273℃이므로 이를 근거로 하여 금의 침전시 온도를 250℃, 염농도를 2~4 wt. % eq. NaCl로 각각 가정하여 H<sub>2</sub>O-NaCl 임계곡선 (Sourirajan and Kennedy, 1962)에 의하여 구한 광화유체의 압력은 약 40 bar (약 0.5 km 심도)이다. 금동도 광산의 경우는 석영과 섬아연석 내 II 형 流體包有物은 270~318℃에서 균일화된다. 합은황염광물의 침전온도를 약 300℃, 염농도는 2~6 wt. % eq. NaCl 하에서 구한 광화유체의 압력은 약 85 bar (약 1km 심도) 정도로 사료된다. 이러한 결과는 회동광산의 金銀 鑛化作用이 금동도 광산의 銀 鑛化作用보다 비교적 천부에서 진행되었음을 시사해 준다.

鑛床의 生成 環境

義域 鑛化帶 金銀鑛化作用의 특성을 규명하기 위하여 유비철석, 섬아연석, 에렉트럼의 화학조성 및 광물공생군을 이용하여 Fe-S (Toulmin and Barton, 1971), Fe-As-S와 Au-Ag-S (Barton and Toulmin, 1964)의 상평형도에서 광물생성시 온도와 유황분압, 그리고 鑛化作用이 진행되는 동안 광화유체의 환경변화를 유추하였다.

회동광산에서 초기에 정출되는 섬아연석과 에렉트럼은 각각 FeS와 Ag 함량이 0.2~0.5 mole %와 37~50 atomic %이며, 방연석, 황철석 및 적철석과 함께 산출된다. 후기로 갈수록 적철석은 산출되지 않고, 섬아연석의 FeS 함량은 1.5~2.5 mole %로 에렉트럼내 Ag 함

량은 66~82 atomic %로 증가하면서, 최후기에 자연은이 산출된다. 鑛化作用이 진행되면서 섬아연석 및 에렉트럼의 화학조성과 광물군의 변화를 T-f<sub>S<sub>2</sub></sub> 도표에 도시하면 Fig. 15와 같다. 회동광산의 광석광물의 金銀침전은 약 300℃에서 후기 200℃에 걸쳐 침전되었고, 광화유체의 유황분압은 10<sup>-10</sup>~10<sup>-16</sup> atm이다. 또한 최후기 銀침전의 온도와 유황분압은 약 200℃에서 180℃, 10<sup>-16</sup>~10<sup>-18</sup> atm이다.

금동도광산의 제1광화기 초기에는 황철석과 함께 유비철석이 주로 정출되었는데, 유비철석의 As 함량은 29.67~30.9 atomic %이고, 공생하는 섬아연석의 FeS의 함량은 12~18 mole %이다. 이값을 T-f<sub>S<sub>2</sub></sub> 도표 (Fig. 16)에 도시하면 유비철석 + 섬아연석의 정출 온도는 약 280~350℃에 해당된다. 제1광화기 후기는 주로 방연석과 함께 산출되는 합은 황염광물의 산출 시기로서, 환경을 지시해 주는 지시광물 및 광물공생이 확인되지는 않지만, 후기 광화기에 산출되는 섬아연석 (4~8 mole

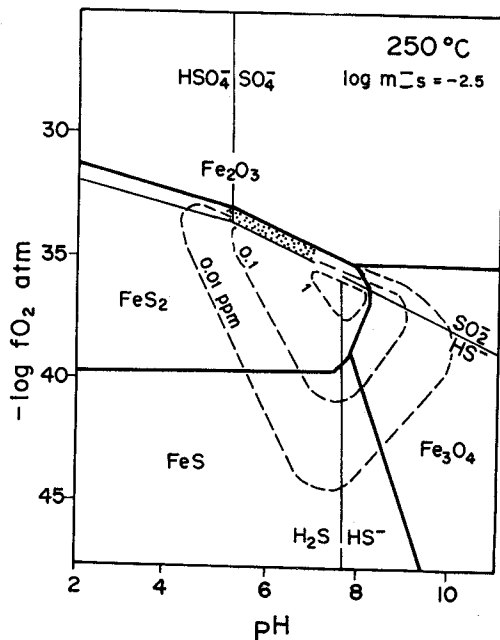


Fig. 17. pH-f<sub>O<sub>2</sub></sub> diagram showing the chemical conditions of Au-mineralization from the Hoedong mine at temperature of 250℃. Dashed line; solubility curve (ppm) of Au(HS)<sub>2</sub><sup>-</sup>.

% FeS)와 유비철석 (28.62~29.75 atomic % As)은 초기보다 FeS와 As 함량이 감소하고 있으므로, 이러한 화학조성을 근거로 하여 추정된 온도 및 유황분압은 250~300℃와  $10^{-13}$ ~ $10^{-11}$  atm이다. 즉 鑛化作用이 진행되면서 온도와 함께 광화유체내 유황분압이 점차 감소됨을 알 수 있다.

두 鑛床의 金-銀 광물과 함께 주 광석광물을 침전시킨 광화유체의 특성을 규명하기 위하여 상기 광물공생군에서 추정된  $f_{S_2}$  값을 이용하여 250℃인 조건하에서 광화유체의 환경을 유추하면 다음과 같다. 회동광산의 경우 황철석과 적철석이 공생하므로 유황분압이 약  $10^{-9.5}$ ~ $10^{-11}$  atm일때, 산소분압은 약  $10^{-32}$ ~ $10^{-34}$  atm이다. 금동도 광산에서는 유황분압이  $10^{-12.5}$ ~ $10^{-13.5}$  atm 일때, 황철석 안정 영역에서 최대 산소분압은 황철석 + 자철석, 최소 분압은 탄소 + 이산화탄소 반응식에 의해 구할 수 있다. 이때 구한 산소분압 값의 범위는  $10^{-36.5}$ ~ $10^{-38.5}$  atm이다. 두 鑛床의 광화유체의 특성을 250℃ 온도에서 비교하면, 회동광산의 金銀鑛化作用이 금동도 광산보다 비교적 높은 산소분압 하에서 광화작용이 이루어졌을 가능성이 있음을 추정할 수 있다.

천열수 金-銀鑛床을 형성하는 열수 광화유체에서 金은 주로  $AuCl^-$ 보다  $Au(HS)_2^-$  착이온으로 운반된다고 Seward (1984)에 의하여 보고된 바 있다. 250℃에서 구한 회동광산의 산소분압 ( $10^{-32}$ ~ $10^{-34}$  atm)의 값과 모암 변질대의 석영-운모-장석의 반응식에서 구한 pH 값 (2.9~4.9)의 환경을 전 유황농도가  $10^{-2.5}$  M인 용액에서 금착이온의 용해곡선과 비교하면, 金은 주로  $Au(HS)_2^-$ 로 운반됨을 알 수 있고, 金의 농도는 0.01~0.1 ppm에 해당된다. 이러한 환경은 황철석과 적철석이 공존하는 영역으로 산소분압의 값이 소량 증가함에 따라 金의 용해도를 급격히 감소시켜 金을 침전을 유도할 수 있다(Fig. 17). 이러한 환경하에서 金침전은 산소분압을 증가시키는 여러요인 중, 본 鑛床에서는 지각 내 잘 발달된 Fracture Pattern을 통한 산화지하수의 유입을 생각할 수 있다.

### 考 察

충청도 일원의 金-銀鑛床에 대하여 최선규 등 (1988)은 광물공생 관계, Au/Ag 비, 에렉트럼의 Ag 함

량등을 기준으로 하여 자류철석형 金鑛床, 황철석형 金鑛床, 휘은석형 金銀鑛床, 안티몬형 金銀鑛床, 안티몬형 銀鑛床의 5유형으로 분류하였고, So and Shelton (1988)은 국내 金-銀鑛床을 광화시기, 광화심도, 생성 온도, 공생광물 및 안정동위원소 특성에 의하여 심열수 鑛床, Korean-type 鑛床과 천열수 鑛床으로 분류하였다. 국내 심열수 金鑛床에서는 충북 중원 지역의 태창, 보련 鑛床이 해당되는데 이들 鑛床의 특성은 천열수 鑛床, Korean-type 鑛床과 비교하면 1) 생성온도가 높고 2) Au/Ag 비 및 에렉트럼의 Ag 함량이 높으며, 3) 광화심도가 깊으며, 그리고 4) 산소, 수소 안정동위원소 값을 근거로 천수유입의 영향이 거의 없었던 것으로 보고된 바 있다. 그러나 義域 鑛化帶 회동 및 금동도 광산을 이러한 기준으로 분류해 보면 회동광산은 천열수형 황철석형 金-銀鑛床의 특성을 보이며, 금동도광산은 천열수형 안티몬형 銀鑛床에 해당된다.

천열수 金-銀鑛床에서 광화유체의 비등작용은 광화유체의 pH, 산소 분압,  $H_2S$  및  $CO_2$  농도변화를 야기시키며 (Drummond and Ohmoto, 1985), 광화유체의 이러한 화학적 변화는 金의 착이온의 결합을 파괴시켜 金광물 침전을 유도한다 (Seward, 1984). 그러나 본 연구 鑛床의 각 열수광물에서 관찰되는 II형 流體包有物이 매우 드물게 관찰된다. 이것은 비등작용이 주기적으로 있었으나, 광석광물 침전에 크게 기여하지 않았음을 시사해 주고, Figs. 14~17과 같이 온도-염농도 관계는 천수의 유입이 있었음을 지시하며, 금동도 광산의 최후기 방해석 정출시기에는 염농도가 천수의 값에 근접할 정도로 천수의 유입이 한층 더 증가하였음을 보여준다. 상기의 결과를 종합하여 보면, 義域 鑛化帶의 광화 작용은 초기 350℃에서 Base Metal 황화광물이 정출하기 시작하여 金-銀鑛化作用은 鑛化作用이 진행되면서 광화유체내 산화 지하수의 유입으로 인한 주로 산화작용과 냉각 및 희석작용에 의해 金-銀 착이온의 용해도 감소로 인하여 야기된 것으로 사료된다. 이러한 현상은 경기도 지역의 금룡광상 (So et al., 1987)과 충북의 진의광상 (So et al., 1987c), 그리고 경기도 양평-원주 (So et al., 1989a), 양동 (So et al., 1989c) 및 여주 (So et al., 1987d) 鑛化帶, 경남의 거제 鑛化帶 (Choi et al., 1989b), 전북의 논산 鑛化帶 (So et al., 1987b)의 천열수 金-銀 鑛床에 대한 流體包有物의 결과와도 잘 일치

하고 있다.

## 結 言

1. 義域 鑛化帶 내 회동 및 금동도 광산은 백악기의 경상누층군의 퇴적암 및 화산암류와 단층 열극을 충전한 함 금-銀석영맥으로 구성되어 있으며, 회동광산은 천연수성 황철석형 금-銀鑛床이며, 금동도광산은 천연수성 안티몬형 銀鑛床이다.

2. 회동광산은 에렉트럼, 자연은, 자연동과 같은 원소광물과 황화광물이 수반되나, 금동도광산은 섬아연석, 유비철석, 황철석과 같은 Base Metal이 다량 산출되고 에렉트럼은 발견되지 않지만 고함량이 은광물인 폴리바사이트, 농홍은석과 같은 함은황염광물이 수반된다.

3. 섬아연석의 화학조성은 회동광산의 경우 철함량(FeS)은 최대 2.08 mole %인 반면, 금동도광산에서는 최대 20.36 mole %로 매우 높은 값을 보여주고 있다. 섬아연석 중에 함유된 CdS와 FeS 또는 MnS의 상관관계에서도 서로 상이한 결과를 나타내고 있다.

4. 鑛化作用은 염농도 약 2~6 wt. % eq. NaCl인 광화유체로부터, 회동광산은 약 300~200°C, 금동도광산은 350~250°C에 걸쳐 각각 우세하게 진행되었고, 회동광산의 金鑛化作用은 온도 300~200°C, 유향분압이  $10^{-8} \sim 10^{-12}$  atm, 금동도광산의 銀鑛化作用은 온도 350~250°C, 유향분압이  $10^{-10} \sim 10^{-13}$  atm인 광화유체로부터 침전되었다.

5. 회동과 금동도 광산의 鑛化作用은 250°C에서 비교하면 회동광상 ( $f_{O_2} = 10^{-32} \sim 10^{-34}$  atm)이 금동도광상 ( $f_{O_2} = 10^{-36.5} \sim 10^{-38.5}$  atm)보다 높은 산화환경하에서 진행되었다.

6. 金의 침전은 鑛化作用이 진행되면서 산화지하수 유입에 의한 산화작용과 냉각 및 희석작용에 의해  $Au(HS)_2^-$ 의 용해도 감소로 야기되었다.

## 謝 辭

본 연구는 한국과학재단의 목적기초 연구비 지원으로 수행되었음을 밝히고 이에 감사를 드립니다. 본 연구 수행시 EPMA 분석을 도와준 연세대학교 지질학과

이영석씨에게도 감사드립니다.

## 參考文獻

- 김문영, 신흥자(1989) 통영광산섬아연석의 화학조성. 광산지질, 22권, p. 103-115.
- 박희인, 강성준(1988) 무극광산 삼형제맥의 금·은 광화작용. 광산지질, 21권, p. 257-268.
- 박희인, 최석원, 이상선(1988) 다덕광산 풍정맥의 금·은 광화작용. 광산지질, 21권, p. 269-276.
- 이현구, 문희수(1989) 인성 금·은 광산에서 산출되는 광석 광물과 물리화학적 생성환경. 광산지질, 22권, p. 237-252.
- 이현구, 최진우(1988) 한국 일부 금은광상의 광물학적 및 성인적 연구(I). 광산지질, 21권, p. 287-307.
- 장기홍, 고인석, 이재영, 김상욱(1977) 구산동·지질도폭(1/5만). 자원개발연구소.
- 장태영, 지정만(1989) 청일 금광산의 流體包有物 연구. 광산지질, 22권, p. 193-205.
- 최선규, 박노영, 홍세선(1988a) 충청도 일원의 금은광상에 대한 광물학적 연구. 광산지질, 21권, p. 223-234.
- 최선규, 지세정, 박성원(1988b) 충청북도 영동지역 금은광상의 금은광화작용에 관한 연구. 광산지질, 21권, p. 367-380.
- 최선규, 지세정, 윤성택, 고용권, 유재신(1989) 거제지역 금은광상의 광화작용에 대한 연구. 광산지질, 22권, p. 303-314.
- Barton, P.B., Jr. and Skinner, B.J. (1979) Sulfide mineral stabilities. In *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (Barnes, H.L. Ed.), p. 798. Wiley and Sons Pub. Co., New York, p. 278-403.
- Barton, P.B., Jr. and Toulmin, p. III (1964) The electrometallurgical method for the determination of the fugacity of sulfur in laboratory sulfides system. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, v. 28, p. 619-640.
- Chi, S.J., Doh, S.J., Choi, S.G. and Lee, J.H. (1989) Geochemistry of Cu-Pb-Zn-Ag deposits from the Euseong mineralized area. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 22, p. 253-266.
- Drummond, S.E. and Ohmoto, H. (1985) Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Econ. Geol.*, v. 80, p. 126-147.
- Haas, J.L. Jr. (1971) The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressures. *Econ. Geol.*, v. 66, p. 940-946.
- Johnson, N.E. Jr., Craig, J.R. and Rimsditt, J.D. (1986) Compositional trends in tetrahedrite. *Can. Min.*, v. 24, p. 285-398.
- Nash, J.F. (1972) Fluid inclusion studies of some gold deposits in Nevada. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper* 800-C, p. 15-19.
- Potter, R.W. III, Clynne, M.A. and Brown, D.L. (1978) Freezing point depression of aqueous sodium chloride

- solutions. *Econ. Geol.*, v. 73, p. 284-285.
- Seward, T.M. (1984) The transport and deposition of gold in hydrothermal system. In gold deposits (Hoste, R.P., ed.), Rotterdam 753, p. 165-181.
- Shelton, K.L. and So, C.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.
- So, C.S., Chi, S.J. and Choi, S.H. (1988a) Geochemical studies on Au-Ag hydrothermal vein deposits, Republic of Korea: Jinan-Jeongeup mineralized area. *J. Min. Pet. Econ. Geol.*, v. 83, p. 449-471.
- So, C.S., Chi, S.J. and Shelton, K.L. (1987b) Stable isotope and fluid inclusion studies on gold-silver-bearing vein deposits, Cheonnan-Cheongyang-Nonsan mining district, Republic of Korea: Nonsan area. *Neues Jahrbuch Miner. Abh.*, v. 18, p. 47-65.
- So, C.S., Chi, S.J., Yu, J.S. and Shelton, K.L. (1987c) The Jeonui gold-silver mine, Republic of Korea: A geochemical study. *Mining Geol.*, v. 37, p. 313-322.
- So, C.S., Choi, S.H. and Chi, S.J. (1987a) Genetic environments of the Geumryong gold-silver deposit, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 23, p. 321-330.
- So, C.S., Choi, S.H., Chi, S.J. and Choi, S.G. (1989b), Geochemical studies on Au-Ag hydrothermal vein deposits, Republic of Korea: Goryeong-Waegwan mineralized area. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 22, p. 221-235.
- So, C.S., Choi, S.H., Lee, K.Y. and Shelton, K.L. (1989a) Geochemical studies of hydrothermal gold deposits, Republic of Korea: Yangpyeong-Weonju area. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 22, p. 1-16.
- So, C.S. and Shelton, K.L. (1987d) 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. (1988b) Stable isotope and fluid inclusion studies of the gold-silver-bearing hydrothermal vein deposits, Cheonnan-Cheongyang-Nonsan mining district, Republic of Korea: Cheongyang area. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 21, p. 149-164.
- So, C.S., Yun, S.T., Choi, S.H. and Shelton, K.L. (1989d) Geochemical studies of the hydrothermal gold-silver deposits, Republic of Korea: Youngdong mining district. *Mining Geol.*, v. 39, p. 9-19.
- So, C.S., Yun S.T. and Chi, S.J. (1989c) Geochemical studies of hydrothermal gold-silver deposits, Republic of Korea: Youngdong mining district. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 24, p. 16-29.
- Sourirajan, S. and Kennedy, G.C. (1962) The system  $H_2O - NaCl$  at elevated temperatures and pressures. *Amer. J. Sci.*, v. 260, p. 115-141
- Toulmin, P., III and Barton, P.B., Jr. (1964) A thermodynamic study of pyrite and pyrrhotite. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, v. 28, p. 641-671.
- Youn, J.S., Lee, K.Y., So, C.S. and Koh, Y.K. (1988) The Jinsan gold mine, Korea: A mineralogical and geochemical study. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 21, p. 17-27.

PY

CC(II)

SL

3cm





