

전라남도 보성-장흥지역의 중열수 금광화작용

허철호^{1*} · 윤성택¹ · 소철섭¹

¹고려대학교 지구환경과학과

Mesothermal Gold Mineralization in the Boseong-Jangheung area, Chollanamdo-province

Chul-Ho Heo^{1*}, Seong-Taek Yun¹ and Chil-Sup So¹

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 136-701, Korea

Within the Boseong-Jangheung area of Korea, five hydrothermal gold (-silver) quartz vein deposits occur. They have the characteristic features as follows: the relatively gold-rich nature of electrum; the absence of Ag-Sb(-As) sulfosal mineral; the massive and simple mineralogy of veins. They suggest that gold mineralization in this area is correlated with late Jurassic to Early Cretaceous, mesothermal-type gold deposits in Korea. Fluid inclusion data show that fluid inclusions in stage I quartz of the mine area homogenize over a wide temperature range of 200° to 460°C with salinities of 0.0 to 13.8 equiv. wt. % NaCl. The homogenization temperature of fluid inclusions in stage II calcite of the mine area ranges from 150° to 254°C with salinities of 1.2 to 7.9 equiv. wt. % NaCl. This indicates a cooling of the hydrothermal fluid with time towards the waning of hydrothermal activity. Evidence of fluid boiling including CO₂ effervescence indicates that pressures during entrapment of auriferous fluids in this area range up to 770 bars. Calculated sulfur isotope composition of auriferous fluids in this mine area ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}=0.2\sim 3.3\%$) indicates an igneous source of sulfur in auriferous hydrothermal fluids. Within the Sobaegsan Massif, two representative mesothermal-type gold mine areas (Youngdong and Boseong-Jangheung areas) occur. The $\delta^{34}\text{S}$ values of sulfide minerals from Youngdong area range from -6.6 to 2.3‰ (average=-1.4‰, N=66), and those from Boseong-Jangheung area range from -0.7 to 3.6‰ (average=1.6‰, N=39). These $\delta^{34}\text{S}$ values of both areas are comparatively lower than those of most Korean metallic ore deposits (3 to 7‰). And, within the Sobaegsan Massif, the $\delta^{34}\text{S}$ values of Youngdong area are lower than those of Boseong-Jangheung area. It is inferred that the difference of $\delta^{34}\text{S}$ values within the Sobaegsan Massif can be caused by either of the following mechanisms: (1) the presence of at least two distinct reservoirs (both igneous, with $\delta^{34}\text{S}$ values of $< -6\%$ and $2\pm 2\%$) for Jurassic mesothermal-type gold deposits in both areas; (2) different degrees of the mixing (assimilation) of ³²S-enriched sulfur (possibly sulfur in Precambrian pelitic basement rocks) during the generation and/or subsequent ascent of magma; and/or (3) different degrees of the oxidation of an H₂S-rich, magmatically derived sulfur source ($\delta^{34}\text{S}=2\pm 2\%$) during the ascent to mineralization sites. According to the observed differences in ore mineralogy (especially, iron-bearing ore minerals) and fluid inclusions of quartz from the mesothermal-type deposits in both areas, we conclude that pyrrhotite-rich, mesothermal-type deposits in the Youngdong area formed from higher temperatures and more reducing fluids than did pyrite(-arsenopyrite)-rich mesothermal-type deposits in the Boseong-Jangheung area. Therefore, we prefer the third mechanism than others because the $\delta^{34}\text{S}$ values of the Precambrian gneisses and Paleozoic sedimentary rocks occurring in both areas were not known to the present. In future, in order to elucidate the provenance of ore sulfur more systematically, we need to determine $\delta^{34}\text{S}$ values of the Precambrian metamorphic rocks and Paleozoic sedimentary rocks consisting the basement of the Korean Peninsula including the Sobaegsan Massif.

Key words : mesothermal-type gold, sulfur isotope, Boseong-Jangheung area, Youngdong area, Sobaegsan Massif

한반도의 보성-장흥지역에는, 5개의 열수 금(-은)광상이 부존하며, 다음과 같은 특징들을 보여준다: 에렉트럼의 비교적 금이 풍부한 특성; 은-안티모니(비소)황염광물의 부재; 괴상이며 단순한 광물조성을 지닌 석영맥. 이러한 성질들은

*Corresponding author: chheo@mail.korea.ac.kr

본 지역의 금광화작용이 한반도의 주라기내지 초기 백악기의 중열수형 금광상과 대비가 됨을 지시한다. 유체포유물 연구에 의하면, 본 지역의 광화 1기 석영내 포유물은 0.0~13.8 wt. % NaCl를 지니고 200°~460°C의 넓은 온도에서 균질화하며, 광화 2기 방해석내 유체포유물은 1.2~7.9 wt. % NaCl를 지니고 150°~254°C의 온도에서 균질화한다. 이는 시간이 지남에 따라 열수활동이 쇠퇴하면서 열수유체가 냉각되었음을 지시한다. CO₂불혼화를 포함한 비등증거는 본 지역의 합금유체의 포획시 압력이 최대 770 bar에 해당됨을 지시하고 있다. 본지역 합금유체의 계산된 황동위원소 조성($\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}=0.2\sim 3.3\%$)은 열수유체내 황의 화성기원을 지시하고 있다. 소백산육괴내에는 두 개의 대표적인 중열수형 광화대(영동지역 및 보성-장흥지역)가 부존한다. 영동지역의 황화물의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 -6.6~2.3‰(평균 -1.4‰, 분석수 66개)이며, 보성-장흥지역의 황화물의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 -0.7~3.6‰(평균 1.6‰, 분석수 39개)이다. 두 지역의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 대부분의 한반도 금속광상(3~7‰)의 $\delta^{34}\text{S}$ 값보다 낮다. 그리고, 소백산육괴내에서는 영동지역의 $\delta^{34}\text{S}$ 값이 보성-장흥지역의 $\delta^{34}\text{S}$ 값보다 낮다. 소백산 육괴내에서 $\delta^{34}\text{S}$ 값의 차이는 다음과 같은 반응기작에 의해 야기될 수 있다: 1) 두 지역의 주라기 중열수형 금광상에 대해 적어도 두 개의 근원지(두개 모두 화성기원이며, -6‰ 미만 및 $2\pm 2\%$ 의 $\delta^{34}\text{S}$ 값)가 존재; 2) 마그마의 생성 및 상승중 ³²S가 풍부한 황(선캠브리아기의 이토질 기저암내 황)의 혼합(동화)차이; (3) 광화지역까지 상승중 H₂S가 풍부한 마그마에서 유래된 황원($\delta^{34}\text{S}=2\pm 2\%$)의 산화차이. 두 지역 중열수형광상의 석영내 유체포유물과 광석광물(특히, 철을 함유한 광석광물)의 상이성을 고려하여, 영동지역의 자류철석이 풍부한 중열수형 광상이 보성-장흥지역의 황철석(유비철석)이 풍부한 중열수형 광상보다 더욱 높은 온도와 더욱 환원된 유체로부터 생성되었음을 알 수 있다. 현재, 두 지역에서 산출되는 선캠브리아 편마암과 고생대 퇴적암의 $\delta^{34}\text{S}$ 값을 알지 못하므로 두 지역 황동위원소 값의 차이에 대한 원인으로 세 번째 반응기작이 가장 가능성이 크다고 판단된다. 앞으로는, 광석황의 근원을 더욱 체계적으로 규명하기 위해서, 소백산육괴를 포함한 한반도의 기저부를 이루는 선캠브리아 변성암과 고생대 퇴적암의 $\delta^{34}\text{S}$ 값을 조사할 필요가 있다.

주요어 : 중열수형 금, 황동위원소, 보성-장흥지역, 영동지역, 소백산육괴

1. 서 론

한반도의 금-은 맥상광상은 주라기 및 백악기의 화강암질 심성활동의 주요시기와 밀접하게 관련되어있다(Shimazaki *et al.*, 1981, 1986). 백악기 화강암은 주라기 화강암(>5 km, Tsusue *et al.*, 1981; Watanabe, 1981; Cho and Kwon, 1994)보다 천부관입체입(<2~3 km)을 보여주며, 이는 화강암과 관련된 금광화 시스템의 후기마그마 진화에 영향을 미치는 마그마 정지심도를 연구할 기회를 제공한다. 생성심도, 수-암비(천수관령정도), 금/은비간의 일관된 관계를 보여주는 세가지 유형의 광상이 기술되었으며(Shelton *et al.*, 1988), 이들은 다음과 같다: (1) 금이 풍부한 중열수형 광상, (2) 한국형(~심부 천열수) 금-은광상, 및 (3) 은이 풍부한 천열수형 광상.

이들 중에서, 중열수형광상은 한국에서 비교적 드물며(Shelton *et al.*, 1988; So *et al.*, 1995b; So and Yun, 1997), 그래서 생성 및 유체특징에 대한 심화연구가 필요하다. 중열수형광상은 주라기(대보계) 화강암(Lee, 1981)과 밀접하게 관련이 있으며 높은 금/은비(5:1~8:1)가 특징이다. 중열수형광상에 대한 지화학적 연구에 의하면, 금침전은 4.5 km 이상의 심도에서 유체의 CO₂ 불혼화작용에 의해 300°~370°C의 온도에서 발생했음을 알 수 있다(Shelton *et al.*, 1988; So and

Yun, 1997).

현재까지, 한반도 소백산육괴내에는 두 개의 대표적인 중열수형 금광화대가 있다고 알려져 있으며, 영동지역 및 보성-장흥지역이 이에 해당된다. 영동지역에서는 비록 정확한 전체 생산량이 알려져 있지 않지만, 대한광업진흥공사의 자료(KORES, 1986)에 의하면 25개 광산에서 적어도 1.5톤의 순금이 생산되었으리라 추정된다. 영동광화대에서는 변성암을 모암으로 하는 금이 풍부한 광상, 화강암을 모암으로 하는 금-은 광상, 및 화산암을 모암으로 하는 은이 풍부한 광산등의 다양한 유형의 금(-은) 광상이 부존하고 있다(Choi *et al.*, 1988).

그리고, 전남 광주시에서 남동쪽으로 약 25 km에 위치한 보성-장흥 지역에는 5개의 금-은 광상(보덕, 문덕, 북내, 죽보 및 금산)이 부존한다(So *et al.*, 1993; So *et al.*, 1995a; Heo and So, 1995; Heo *et al.*, 1997, 1999a, 1999b, 2000). 영동지역의 다양한 금광상 유형과는 달리, 보성-장흥 지역의 금(-은)광상은 변성암을 모암으로 하는 금이 풍부한 광상만이 산출되는 것이 특징이다. Shelton *et al.*(1988) 및 Choi and Wee(1992)의 금광상 분류도식에 의거하면, 보성-장흥 지역의 금(-은) 광상들은 중열수형 금광상으로 분류할 수 있다.

이들 두 광화대내에서, 중열수형 금광상들은 특징적으로 변성암에서 산출하는 경향이 있다. 변성암을 모

암으로 하는 금이 풍부한 광상들은 다음과 같은 공통점을 가지고 있다: (1) 선캄브리아기 편마암의 단층전단대에서 산출; (2) 괴상이고 단성맥인 석영맥; (3) 미약하고 폭이 좁은 모암변질대; (4) 주로 철황화물 및 천금속 황화물로 구성된 양적으로 빈약하고 단순한 광물조합; (5) 철황화물중 자유철석이 풍부함; (6) 금이 풍부한 광석 및 에렉트럼 입자; (6) 고온이며(최대 480°C), 저염농도(<10 wt. % NaCl)이고 CO₂가 풍부한 유체포유물(So *et al.*, 1995b, 1999, 2002; So and Yun, 1997). 이들 특징들은 전세계의 시생대 금광상, 조산성 금광상의 특징들과 유사하다(Groves *et al.*, 1998; Goldfarb *et al.*, 2001).

본 연구의 주요목적은 유체포유물과 황동위원소연구에 근거하여 보성-장흥 지역의 합금 중열수 광화작용의 성질과 물리화학적 조건을 재고찰하고, 광석황의 기원을 규명하기 위해 소백산육괴내 영동지역 중열수형 금광상의 황동위원소와 비교고찰하는 것이다. 궁극적으로, 이들 자료는 한반도 남서부에 부존하는 중열수형 금광화작용의 성인을 이해하는데 도움을 줄 것이다.

2. 지질개요

보성-장흥 금은 광화대는 선캄브리아기 편마암복합

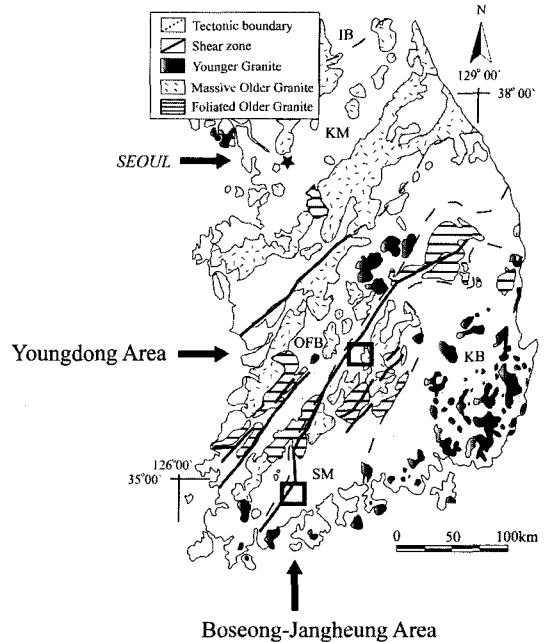


Fig. 1. Generalized geologic map of the Republic of Korea, showing the location of the Youngdong and Boseong-Jangheung areas within the Sobaegsan Massif. Abbreviations: IB=Imjingang Belt, KM=Kyonggi Massif, OFB=Okchon Fold Belt, SM=Sobaegsan Massif, KB=Kyongsang Basin. The Younger granite, Cretaceous to Early Tertiary; the Older granite, Permian to Jurassic.

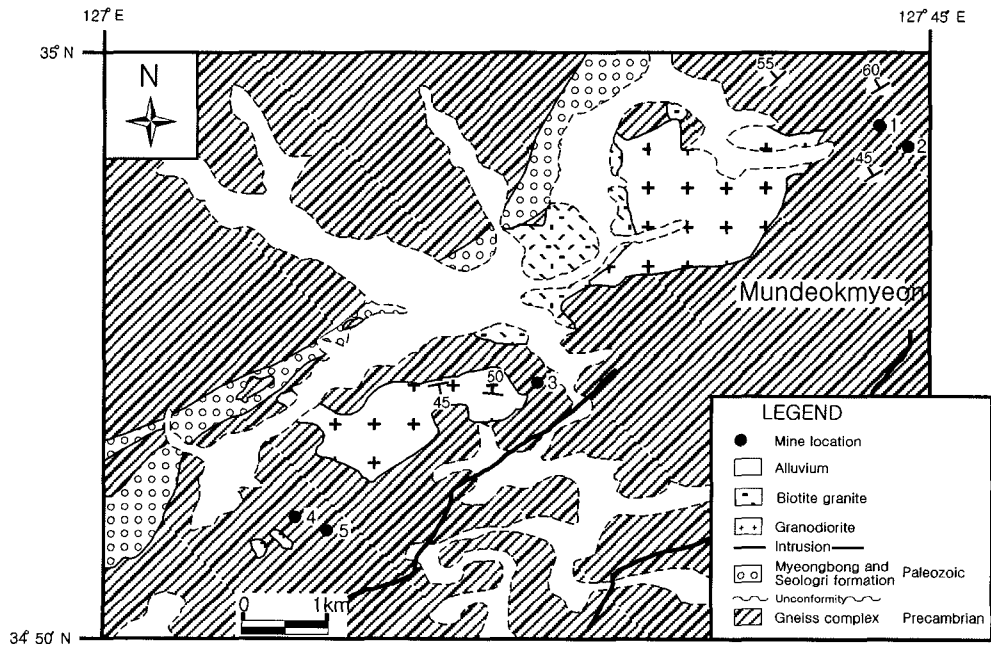


Fig. 2. Geological and location maps of the Boseong-Jangheung area. Mine location: 1=Bodeok, 2=Mundeok, 3=Boknae, 4=Keumsan, 5=Jukbo.

체로 주로 구성되어 있는 소백산육괴내에 부존되어 있다(Fig. 1). 소백산육괴의 기저암은 북중국판과 남중국판이 고생대 후기내지 중생대 초기중에 충돌하면서 각섬암내지 그레놀라이트 변성상의 변성작용을 받았으며 (Chough *et al.*, 2000), 페름기내지 주라기의 열리상 혹은 괴상 화강암의 관입을 받았다. 본 지역의 지질은 선캠브리아기 변성암, 고생대 변성퇴적암 및 시대미상의 화강암류로 구성되어 있다(Fig. 2).

선캠브리아기 변성암은 본 지역의 대부분을 차지하며, 반상변정질 편마암, 거정질 편마암 및 화강암질 편마암으로 구성되어 있다. 변성암의 열리는 N40°~60°E 이며 경사는 40°~60°NW이다. Lee(1986)는 소백산육괴의 변성암은 주로 부분적인 녹색편암상을 지닌 상부 각섬암내지 녹색섬-각섬암상에 해당하는 다변성작용에 의해 주로 세일 및 잠사암으로부터 생성되었다고 보고했다. 고생대 설옥리층 상부에는 고생대 명봉층이 부정합으로 덮고 있다. 시대미상의 화강암은 화강섬록암 및 흑운모 화강암으로 구성되며 암주상으로 산출된다. 이들 화강암은 흑운모 화강암 및 각섬석-흑운모 화강섬록암으로 구성된 광주시 근처의 광주화강암과 암석 기재면에서 매우 유사하다. 광주화강암은 전암 루비듐-스트론튬 연령이 210±3내지 225±5 Ma에 해당된다 (Choo and Chi, 1991). 이들 자료로 본 광화대내 화강섬록암의 연령을 삼척기로 추정할 수 있다.

3. 광맥 및 광물공생관계

보성-장흥지역의 금-은광상들은 선캠브리아기 편마암 내 단층전단대의 열극을 충진하면서 산출된다. 맥의 주향 및 경사는 N30°~40°E 및 50°NW이다. 맥폭은 0.1~1.0m이며, 주향방향으로 0.1 km 연장되어 있다. 비교적 금이 풍부한 에렉트럼, 은-안티모니(-비소) 황염 광물의 부재, 괴상이며 단순한 광물조성의 석영맥등은 본 광화대의 광화작용의 특징이다. 변질대 건운모의 K-Ar 연대측정 결과 155.9±2.3 Ma로, 본 지역의 금(-은) 광화작용은 주라기 후기에 발생했음을 알 수 있다 (Table 1).

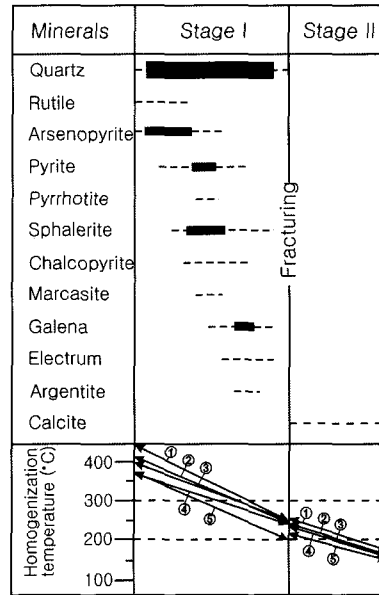


Fig. 3. Generalized paragenetic sequence of minerals from Au-Ag vein deposits of Boseong-Jangheung area (line width indicates relative abundance). Homogenization temperature scale at the foot of diagram is based on the range of homogenization temperatures of primary+ pseudosecondary fluid inclusions. Abbreviations: 1=Boknae, 2=Jukbo, 3=Keumsan, 4=Mundeok, 5=Bodeok.

절단관계 및 각력화작용등의 맥의 조직적 특징을 바탕으로, 광물공생관계는 두 개의 광화시기로 구분될 수 있다(Fig. 3): 석영 및 천연속 황화물을 수반한 금이 산출되는 시기(광화 1기)와 광화 후기의 백색 방해석이 침전한 시기(광화 2기). 광화 1기에서는 괴상의 백색 석영이 가장 풍부하게 침전한 광물이다. 유비철석 (29.7~33.8 atom. % As; Fig. 4)은 맥주변부에서 괴상의 입자와 맥전체에 작은 산점상의 입자로서 산출된다. 황철석은 크고 자형인 입자와 미세한 결정질체로 산출된다. 석아연석(6.1~14.7 mole % FeS; Fig. 5)은 맥전체에 작은 자형의 결정으로 산출되며, 가끔 황동석 미립자들이 정향되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 백철석은 보통 황철석과 함께 상호성장한 작은 반자형

Table 1. K-Ar data of alteration sericite from the Bodeok Au-Ag mine, Boseong-Jangheung area.

Sample no.	Description	K (%)	Radiogenic ⁴⁰ Ar(moles/g) STP×10 ⁻¹⁰	Radiogenic ⁴⁰ Ar	Date (Ma±1σ)
BD-1*	Sericite from alteration zones near stage I vein	5.57	1.573	76.4	155.9±2.3

*The prepared sample contains small amounts (<5 vol. %) of kaolinite

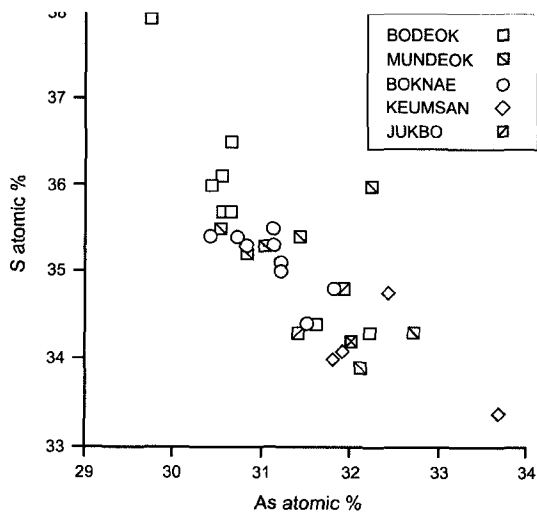


Fig. 4. Arsenic vs. sulfur diagram of arsenopyrite from the Boseong-Jangheung area. The diagonal array corresponds to the theoretical composition.

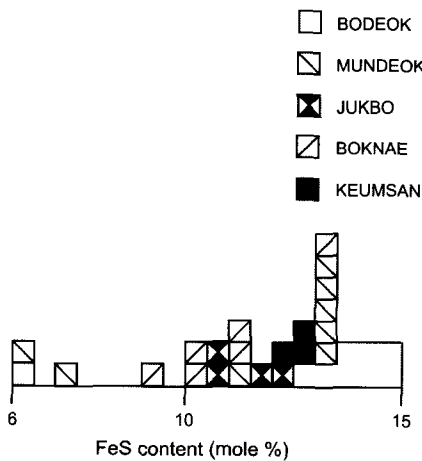


Fig. 5. Iron contents (mole % FeS) of sphalerites from the Boseong-Jangheung area.

의 결정으로 산출된다. 에렉트립(42.4~83.9 wt. % Au; Fig. 6)은 황철석을 치환하고 있는 방연석과 밀접하게 관련된 미세한 불규칙하고 타원형인 입자로 산출된다. 광화 1기 말기에는, 단층작용과 각력화작용을 야기한 구조적 활동이 재개되었으며, 그로 인한 열극은 백색 방해석에 의해 충전되었다. 광화 2기는 황화물을 포함하지 않았다.

4. 유체포유물연구

광화유체의 조성구와 온도의 범위 및 변이를 규명하기

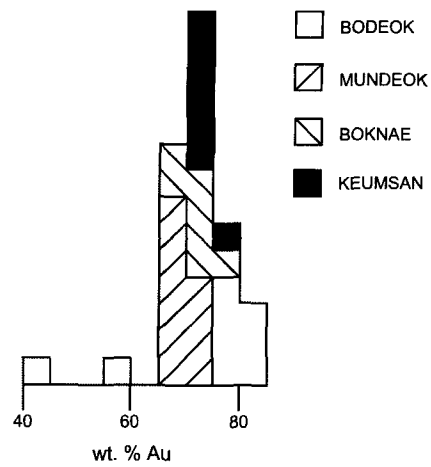


Fig. 6. Gold contents (wt. %) of electrum from the Boseong-Jangheung area.

위하여 약 50개의 석영, 섬아연석 및 방해석의 양면연마박편을 대상으로 Fluid Inc. gas-flow heating-freezing system을 활용하여 가열 및 냉각실험을 수행하였다. H₂O가 풍부한 포유물에 대해서는 H₂O-NaCl (Potter *et al.*, 1978)계의 freezing-point depression에 의거하여 염농도를 산출했고, CO₂를 배태한 포유물에 대해서는 clathrate의 용융온도를 측정하여 염농도를 산출했다(Bozzo *et al.*, 1975; Diamond, 1992).

4.1. 유체포유물의 유형

네가지 유형의 유체포유물이 관찰되었다: type Ia, Ib, II 및 III(Fig. 7). Roedder(1984)의 분류기준을 바탕으로 초생+가상이차(P+PS) 포유물 및 이차(S) 포유물을 구분했다. Type Ia포유물은 실온에서 수용성의

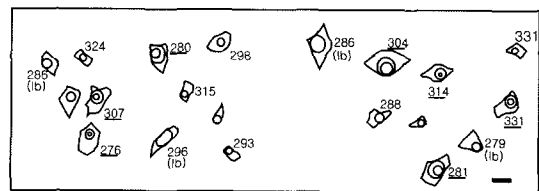


Fig. 7. Sketches of primary+pseudosecondary fluid inclusions observed in stage I vein quartz showing coeval nature of type Ia (aqueous, liquid-rich), type Ib (aqueous, CO₂ clathrate-forming) and type III (Liquid CO₂-bearing) inclusions from Bodeok mine, Boseong-Jangheung area. Type III inclusions show variable volumetric ratio of CO₂. Numbers next to each sketch are homogenization temperatures; inclusions indicated as follows: (Ib), type Ib; underline, type III; remainder are type Ia inclusions. Scale bars, 10 μm.

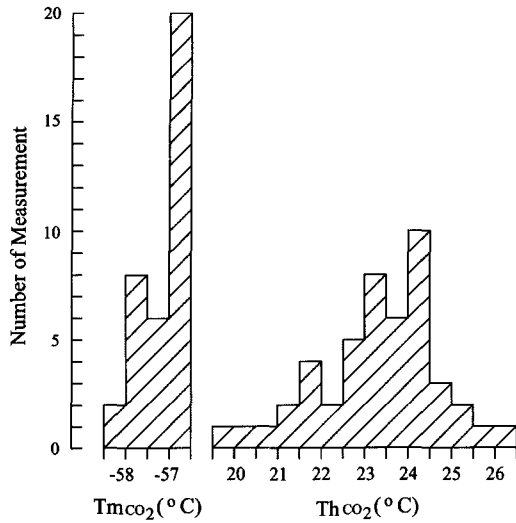


Fig. 8. Frequency diagrams of final melting temperature (T_{mCO_2}) and homogenization temperature of the carbonic phase in liquid CO_2 -bearing fluid inclusions (Th_{CO_2}) in stage I quartz from the Bodeok Au mine.

액상 및 기상(대부분 <30%)으로 구성되어 있고 가열 시 액상으로 균질화한다. 가스수화물은 냉각실험시 형성되지 않는다. 이 유형의 포유물이 조사된 모든 광물에서 가장 많다. Type Ib 포유물은 실온에서 수용성의 액상 및 기상(20~40%)으로 구성되어 있고, 가열시 액상으로 균질화한다. 액상 CO_2 는 관찰되지 않으나, 이들 포유물들은 냉각실험중 CO_2 수화물을 형성하며, 이는 소량의 CO_2 가 존재함을 지시한다(≤ 0.85 molal CO_2 ; Hedenquist and Henley, 1985). Type Ib 포유물은 광화 1기 석영에서 초생+가상이차(P+PS) 포유물로만 관찰되며, 전체 초생+가상이차(P+PS) 포유물의 약 15%를 차지한다. 또한, Type Ib 포유물은 type Ia 및 type III 포유물과도 밀접하게 관련되어 있다. Type II 포유물은 기상±액상으로 구성되어 있으며, 80% 이상이 기상이며 액상은 거의 보이지 않는다. 이들 포유물은 기상으로 균질화하며 광화 1기 석영에서 드물게 산출한다. Type III 포유물은 실온에서 세가지 상을 포함한다: 액상 CO_2 , 기상 CO_2 , 액상 H_2O . Type III 포유물의 CO_2 부피는 실온에서 15~80%로 다양하다. Type III 포유물의 CO_2 부피%의 넓은 범위는 이들 포유물들이 초기 균질한 유체에서 CO_2 불혼화작용의 결과로서 생겨났음을 지시한다. 광화 1기 석영내 type III 포유물의 고체 CO_2 의 최종용융온도(T_{mCO_2})는 $-56.5^\circ \sim -58.4^\circ C$ 이다(Fig. 8). 비록 가장 낮은 온도($-58.4^\circ C$)가 최대 5 mole %까지의 메탄함량을

지시하지만(Burruss, 1981), type III 포유물의 CO_2 가 풍부한 상은 거의 순수한 CO_2 로 구성되어 있음을 지시한다. Type III 포유물의 CO_2 상의 균질화 온도(Th_{CO_2})는 $19.8^\circ \sim 26.4^\circ C$ 이다(Fig. 8).

4.2. 유체포유물 실험자료

유체포유물에 대한 균질화온도와 염농도 자료는 Table 2에 기재되어 있다.

균질화온도 : Table 2에서, 본 지역의 광화 1기 광물(석영, 석야연석)의 초생+가상이차 포유물은 $202^\circ \sim 458^\circ C$ 의 넓은 온도범위에서 균질화한다. 광산별 광화 1기 백상광물내 포유물의 균질화온도는 다음과 같다: 보덕, $202^\circ \sim 397^\circ C$; 문덕, $240^\circ \sim 364^\circ C$; 복내, $252^\circ \sim 458^\circ C$; 금산, $253^\circ \sim 392^\circ C$; 죽보, $244^\circ \sim 407^\circ C$ (Table 2). 광화 2기 방해석내 초생+가상이차 유체포유물의 균질화온도는 다음과 같다: 보덕, $150^\circ \sim 210^\circ C$; 문덕, $161^\circ \sim 238^\circ C$; 복내, $171^\circ \sim 254^\circ C$; 금산, $161^\circ \sim 242^\circ C$, 이 온도범위는 광화 1기 석영내 2차포유물의 균질화온도와 근사한 값을 보인다(Table 2). 시간이 지나고 열수활동이 쇠퇴해 가면서, 유체포유물의 균질화온도는 Table 2에서 보여지는 것처럼 점차 감소한다. 이것은 시간이 지남에 따라 열수유체가 냉각됨을 지시한다.

염농도 : 광화 1기 광물의 초생+가상이차 포유물은 0.0~13.8 wt. % NaCl의 염농도를 가지고 있다(Table 2). 개별광산의 광화 1기 광물의 염농도는 다음과 같다: 보덕, 0.0~7.4 wt. %; 문덕, 0.2~6.9 wt. %; 복내, 0.2~13.8 wt.%; 금산, 0.5~10.1 wt. %; 죽보, 1.4~9.3 wt.%(Table 2).

Table 2에 의하면, 보덕광산의 광화1기 석영에서 전형적으로 산출하는 CO_2 수화물을 형성하는 포유물(type Ib)과 액상 CO_2 를 함유하고 있는 포유물(type III)은 액상이 풍부한, 수용성의 포유물(type Ia)보다 더욱 낮은 염농도(대부분 <4 wt. % NaCl)를 갖는다. Type III 포유물의 넓은 CO_2 부피범위와 type Ia와 type III 포유물의 밀접한 관계를 고려하면(Fig. 7), 이러한 염농도 변화는 보덕광산의 금광화작용동안 불균질하며, 비등했던 H_2O-CO_2 유체의 연속적인 포획을 지시한다. 염농도를 지닌 유체의 비등(CO_2 비등을 포함한)은 거의 모든 염이 CO_2 가 풍부한 기상보다 H_2O 가 풍부한 액상으로 선택적으로 분별함으로써 고염농도의 수용성 유체(type Ia 포유물로서 포획된)와 저염농도의 CO_2 를 배제한 유체(type Ib와 type III 포유물로서 포획된)를 형성한다(Bowers and Helgeson, 1983; Hedenquist and Henley, 1985). 복내광산에서는, type Ib 유체포유

Table 2. Fluid inclusion data from the mesothermal-type gold deposits of Boseong-Jangheung area (V: vein-filling ore, T1a, T1b, T2, T3: type Ia, type Ib, type II and type III inclusions, P+PS: primary+pseudosecondary, S: secondary, n: number of measurement).

Mineral (stage)	Fluid inclusion class	average volume of fill	n	Th (°C)	Salinity	Th-total (L, V)	pressure (bars)	Remarks
<i>Bodeok mine</i> ¹								
quartz(I)	P+PS	0.25	58	202-397	1.2-7.4	L	300-750	V, T1a
quartz(I)	S	0.15	29	154-216	0.0-0.8	L		V, T1a
quartz(I)	P+PS	0.20	34	292-331	1.7-3.2	L		V, T1b
quartz(I)	P+PS	0.60	26	255-340	0.2-3.6	L		V, T3
sphalerite(I)	P+PS	0.25	39	229-267	4.2-5.9	L		V, T1a
calcite(II)	P+PS	0.35	20	150-210	1.2-1.6	L		V, T1a
<i>Mundeok mine</i> ²								
quartz(I)	P+PS	0.35	73	240-364	1.6-6.9	L	460-770	V, T1a
quartz(I)	S	0.10	10	168-219	1.2-2.6	L		V, T1a
quartz(I)	P+PS	0.92	5	321-361	0.2-0.9	V		V, T2
calcite(II)	P+PS	0.10	17	161-238	1.2-3.4	L		V, T1a
<i>Boknae mine</i> ³								
quartz(I)	P+PS	0.35	67	252-458	1.2-13.8	L	90-420	V, T1a
quartz(I)	S	0.15	31	154-252	3.1-4.5	L		V, T1a
quartz(I)	P+PS	0.90	42	281-446	-	V		V, T2
quartz(I)	P+PS	0.75	27	284-408	0.2-6.8	L		V, T1b
calcite(II)	P+PS	0.15	71	171-254	3.4-4.8	L		V, T1a
<i>Keumsan mine</i> ⁴								
quartz(I)	P+PS	0.25	62	253-392	5.6-10.1	L	120-580	V, T1a
quartz(I)	S	0.15	16	162-233	2.1-6.8	L		V, T1a
quartz(I)	P+PS	0.87	5	303-361	0.5-5.2	V		V, T2
calcite(II)	P+PS	0.15	36	161-238	2.2-7.9	L		V, T1a
<i>Jukbo mine</i> ⁵								
quartz(I)	P+PS	0.42	68	244-407	4.1-9.3	L	460-740	V, T1a
quartz(I)	S	0.10	42	133-242	4.6-6.3	L		V, T1a
quartz(I)	P+PS	0.95	10	303-377	1.4-3.8	V		V, T2
calcite(II)	P+PS	0.15	34	161-242	2.1-6.3	L		V, T1a

Data from ¹So et al. (1993), ²Heo et al. (1997), ³So et al. (1995), ⁴Heo and So (1995), ⁵Heo et al. (1999a)

물은 type Ia 유체포유물보다 더욱 낮은 염농도를 가지는 경향이 있다. 그리고, 광화 1기 석영내 type Ib와 type II 유체포유물이 풍부하고 염농도 범위가 넓다는 것은 복내광산의 금침전이 비등현상의 결과라는 것을 제시한다. 금산, 문덕 및 죽보 광산에서는, 고온에서 유체의 비등이 염농도의 증가를 야기시키는데, 그 이유는 비등현상이 일어나면서 기상이 손실되고 염이 잔류 유체내에 농집되기 때문이다.

광화 2기 방해석의 초생+가상이차 포유물의 염농도는 1.2~7.9 wt. % NaCl이며, 광화 1기 2차 포유물의 염농도와 근사한 값을 보인다. 광화 1기에서 2기로 시간이 지나면서 열수유체의 온도와 염농도는 점차 감소하는데, 이는 천수의 유입으로 인한 유체의 점진적인

냉각 및 희석이 있었음을 지시한다.

압력 및 비등의 중요성 : H₂O-CO₂-NaCl계의 온도-압력-조성자료는 보덕광산의 유체포획의 압력조건과 CO₂가 풍부한 열수유체의 진화를 해석하는데 사용된다(Table 3). 계산된 전체밀도를 고려할 때, 비등의 증거(CO₂ 불혼화)는 300~750 bar의 유체압력을 지시한다(Bowers and Helgeson, 1983). 복내, 금산, 문덕 및 죽보광산의 광화 1기 석영에서는 액상이 풍부한 (type Ia) 포유물과 기상이 풍부한(type II) 포유물이 밀접하게 관련되어 있으며, 유사한 온도에서 균질화하는 경향이 있다. 이는 유체의 비등을 지시한다(Table 2). 유체가 H₂O-NaCl계의 두 개의 상 경계를 따라 포획되었다고 가정할 때(Sourirajan and Kennedy, 1962;

Table 3. Microthermometric data of type III inclusions in stage I quartz from the Bodeok Au mine, Boseong-Jangheung area, Korea.

T _{mCO₂} (°C)	T _{mclath} (°C)	T _{hCO₂} (°C)	T _{htotal} (°C)	Vol. % aq. ¹⁾	density (g/cc)			wt.% NaCl	X _{CO₂}	X _{H₂O}	X _{NaCl}
					CO ₂	aq.	total				
-56.7	9.9	24.1	255	85	0.72	0.79	0.73	0.2	0.06	0.94	0.00
-57.6	9.8	24.8	257	80	0.71	0.79	0.73	0.4	0.09	0.91	0.00
-56.6	9.7	25.8	260	80	0.70	0.78	0.72	0.6	0.08	0.92	0.00
-56.8	9.7	23.4	265	80	0.73	0.77	0.74	0.6	0.09	0.91	0.00
-57.1	9.9	23.9	270	65	0.73	0.76	0.74	0.2	0.17	0.83	0.00
-57.0	9.5	22.7	275	70	0.74	0.76	0.75	1.0	0.15	0.85	0.00
-57.0	9.7	26.4	275	15	0.69	0.76	0.75	0.6	0.68	0.32	0.00
-56.8	9.5	25.4	277	70	0.71	0.76	0.72	1.0	0.14	0.86	0.00
-56.9	9.6	23.0	280	80	0.74	0.75	0.74	0.8	0.09	0.91	0.00
-57.1	9.9	25.2	281	75	0.71	0.74	0.72	0.2	0.12	0.88	0.00
-57.6	9.2	22.6	281	75	0.74	0.76	0.75	1.6	0.12	0.88	0.00
-56.6	9.0	22.2	290	75	0.75	0.75	0.75	2.0	0.12	0.87	0.01
-56.7	9.3	24.8	290	80	0.71	0.74	0.72	1.4	0.09	0.91	0.00
-58.2	9.2	21.5	293	80	0.76	0.74	0.75	1.6	0.10	0.90	0.00
-58.0	9.3	21.9	295	20	0.75	0.73	0.73	1.4	0.63	0.37	0.00
-57.7	8.2	22.7	295	65	0.74	0.75	0.75	3.6	0.18	0.81	0.01
-56.6	8.7	24.7	300	80	0.72	0.73	0.72	2.6	0.09	0.90	0.01
-57.8	9.0	24.0	301	18	0.73	0.72	0.72	2.0	0.65	0.34	0.00
-56.8	8.6	21.9	307	30	0.75	0.72	0.73	2.8	0.50	0.49	0.00
-57.5	9.0	23.0	315	79	0.74	0.70	0.71	2.0	0.09	0.90	0.01
-56.7	8.5	24.5	320	20	0.72	0.70	0.70	3.0	0.63	0.36	0.00
-56.6	8.7	23.5	328	30	0.73	0.70	0.70	2.6	0.51	0.48	0.00
-57.5	8.9	23.2	329	70	0.74	0.67	0.72	2.2	0.16	0.83	0.01
-56.6	8.6	22.3	330	57	0.75	0.68	0.72	2.8	0.26	0.74	0.01
-56.7	8.5	22.3	335	60	0.75	0.67	0.72	3.0	0.24	0.76	0.01
-56.5	8.4	19.8	340	65	0.78	0.66	0.74	3.2	0.21	0.78	0.01

¹⁾Visual estimate at 15°C

Abbreviations: aq; aqueous phase, clath; CO₂ clathrate, Th; homogenization temperature, and Tm; melting temperature

Haas, 1971), 광화 1기 합금유체의 포획압력은 다음과 같다: 복내, 90~420 bar; 금산, 120~580 bar; 문덕, 460~770 bar; 죽보, 460~740 bar(Table 2).

합금열수유체에서 CO₂ 불혼화를 수반한 유체의 비등은 잔류유체의 급격한 화학변화(예, 산소분압, 황분압, pH, ΣH₂S 등)를 야기시킨다. 이들 변화는 금속복합체의 불안정을 유발시켜 귀금속의 침전을 야기시킨다(Seward, 1984; Drummond and Ohmoto, 1985). 보성-장흥 지역에서는, 고온유체로부터의 금침전이 CO₂ 불혼화를 포함한 H₂S의 손실과 황화물침전에 의한 황활동도의 감소에 의해서 발생했을 것으로 사료된다.

5. 황동위원소연구

이번 연구에서, 우리는 39개의 광화1기 황화물의 황

동위원소 조성을 사용했으며, 추출 및 분석에는 표준 기법이 적용되었다(Grinenko, 1962). 황동위원소자료는 Canyon Diablo Troilite(CDT)를 표준물질로 하여 보고되었으며, 황동위원소 조성은 중국 북경의 광화학연구소와 미국 미주리-콜럼비아의 안정동위원소 및 유체포유물 실험실에 의뢰해 분석되었다. 분석의 표준오차는 약 ±0.1%이다.

보성-장흥지역의 황화물의 δ³⁴S값은 -0.7~3.6%이다(Table 4 및 Fig. 9: 평균 1.6%, 분석수 39개: 보덕, -0.5~3.6%; 복내, 0.2~3.6%; 문덕, -0.6~2.1%; 금산, -0.7~1.6%; 죽보, -0.5~2.4%). 광화 1기 맥내 7개의 상호성장한 점아연석-방연석쌍은 1.8~2.6%의 δ³⁴S값을 나타내며, 254±30°~360±25°C의 평형동위원소온도를 지시한다(Ohmoto and Rye, 1979). 유체포유물자료와 공생관계를 바탕으로 광화1기의 침전온도를 가정

Table 4. Sulfur isotope data of sulfide minerals from the mesothermal-type gold deposits in the Boseong-Jangheung area.

Sample no.	Mineral	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$	$\Delta^{34}\text{S}(\text{‰})$	T($^{\circ}\text{C}$) ²⁾	$\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}(\text{‰})$ ³⁾
<i>Bodeok mine</i>					
BD-16-1	arsenopyrite	3.6		325	3.3
BD-17-1	pyrite	3.4		310	2.2
BD-20-3	sphalerite	3.2		330	2.9
BD-22-1	sphalerite	2.6		280	2.3
BD-25-1	pyrite	3.2		340	2.1
BD-25-2	chalcopyrite	2.0		340	2.1
BD-5-3	sphalerite	2.3		250	1.9
BD-7-3	galena	0.0		260	2.2
BD-12-1	galena	0.3		250	2.6
BD-33-1	sphalerite	2.1	sp-gn	244	1.7
BD-33-2	galena	-0.5	2.6(254±30) ¹⁾	244	1.7
<i>Boknae mine</i>					
PN-1	sphalerite	3.2	sp-gn		2.9
PN-1	galena	1.3	1.9(347±45) ¹⁾		2.9
PN-3	sphalerite	2.4		340	2.1
PN-4	sphalerite	2.7		320	2.4
PN-6	sphalerite	2.3	sp-gn		2.0
PN-6	galena	0.2	2.1(315±45) ¹⁾		2.0
PN-7	pyrite	3.5		350	2.5
PN-9	pyrite	3.3			
PN-10	arsenopyrite	3.6			
<i>Mundeok mine</i>					
MD-2	chalcopyrite	0.8		340	0.9
MD-6	sphalerite	1.1		320	0.8
MD-8	chalcopyrite	0.5		340	0.6
MD-10-1	sphalerite	1.4	sp-gn		
MD-10-2	galena	-0.6	2.0(328±50) ¹⁾		
MD-16	sphalerite	1.4		335	1.1
MD-20	sphalerite	2.1		330	1.8
<i>Keumsan mine</i>					
KS2	arsenopyrite	1.6		335	
KS3-1	pyrite	1.4			
KS5	pyrite	1.3		320	0.2
KS8	sphalerite	1.2	sp-gn		0.9
KS8	galena	-0.7	1.9(343±25)		0.9
KS10-1	sphalerite	1.3	sp-gn		1.0
KS10-1	galena	-0.5	1.8(360±25)		1.0
<i>Jukbo mine</i>					
JP1-2	arsenopyrite	1.6		332	
JP4-1	sphalerite	2.4		340	2.1
JP11-1	pyrite	1.3		320	0.2
JP15-1	sphalerite	1.3	sp-gn		1.0
JP15-2	galena	-0.5	1.8(338±25)		1.0

¹⁾Number in parenthesis is sulfur isotope temperature calculated using the equation in Ohmoto and Rye (1979)

²⁾Based on fluid inclusion and/or sulfur isotope temperatures and paragenetic constraints

³⁾Calculated sulfur isotope compositions of H₂S in ore fluids, using the isotope fractionation in Ohmoto and Rye (1979)

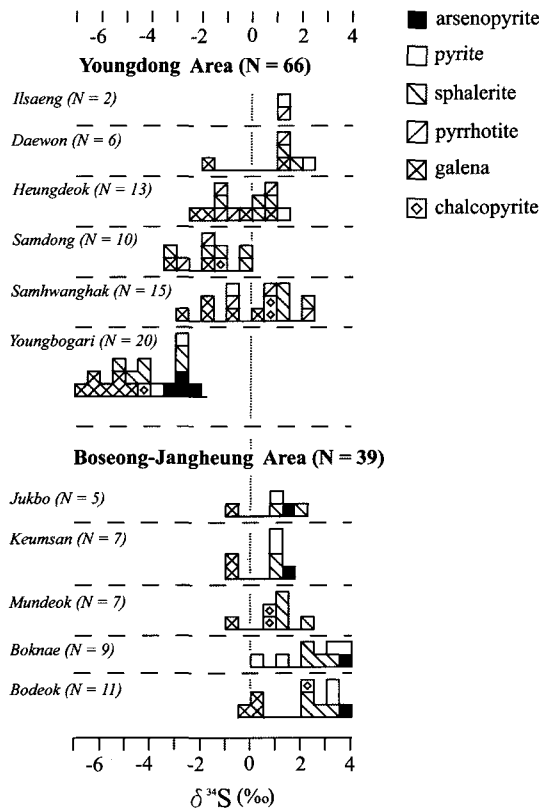


Fig. 9. Frequency diagrams of $\delta^{34}\text{S}$ values (CDT) of sulfide minerals from hydrothermal Au(-Ag) deposits in the Youngdong and Boseong-Jangheung area, Korea.

하면, H_2S 의 계산된 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 0.2~3.3‰이다(Ohmoto and Rye, 1979). 광화 1기 석영맥 주변의 견운모+석영 변질대와 황화광물의 $\delta^{34}\text{S}$ 값의 좁은 범위는 황이 주로 환원황(H_2S)으로 존재함을 지시한다. 그래서, H_2S 의 $\delta^{34}\text{S}$ 값의 계산된 범위는 전체 유체의 황동위원소 조성 ($\delta^{34}\text{S}_{\text{ES}}$)으로 간주할 수 있다. 0.2~3.3‰의 $\delta^{34}\text{S}_{\text{ES}}$ 값은 황의 화성기원을 제시하며, 주변 화성암으로부터 황이 용탈되었거나 또는 마그마의 탈휘발작용에 의해서 황이 기원했으리라 사료된다.

6. 소백산육괴내 영동 및 보성-장흥지역의 황 동위원소자료 비교

6.1. 영동지역 개관

영동지역은 서울에서 남남동쪽으로 170 km에 위치하며, 육천대(주로 선캄브리아 후기내지 고생대의 변성퇴적암으로 구성된 북동방향의 습곡 및 트러스트대)와 소백산육괴(주로 시생대 후기내지 초기 원생대의 편마암

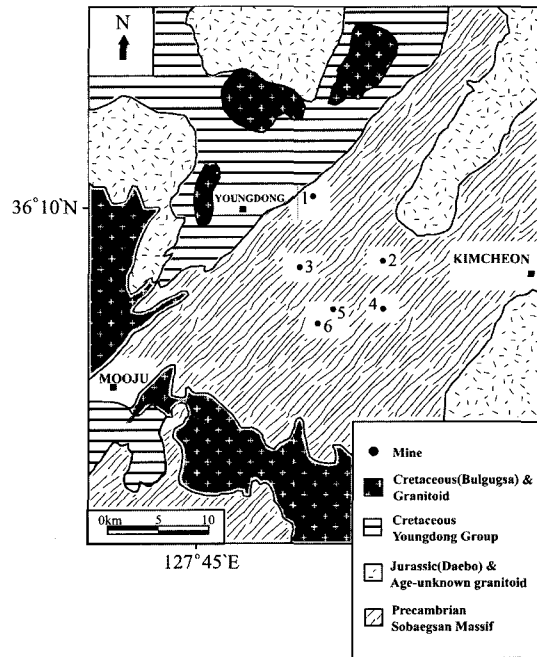


Fig. 10. Simplified geologic map of the Youngdong gold mine district, showing the location of the six representative gold mines in the present study. 1=Youngbogari, 2=Samhwanghak, 3=Samdong, 4=Heungdeok, 5=Ilseang, 6=Daewon.

및 편암으로 구성된 변성암대)사이에 놓여있다. 소백산 육괴의 기저암은 북중국판과 남중국판이 고생대 후기내지 중생대 초기중에 충돌하면서 각섬암내지 그라늘라이트 변성상의 변성작용을 받았으며(Chough *et al.*, 2000), 페름기내지 주라기의 열리상 혹은 괴상 화강암의 관입을 받았다. 영동지역의 수많은 열수 석영맥은 대부분이 선캄브리아기 기저암에 배태되어있다(Fig. 10).

영동지역의 중열수형 금광상은 흑연을 함유하고 있는 선캄브리아기 편마암내에 부존되어 있으며, 주라기 “대보” 티탄철석계열 화강암과 관련있는 $\text{CO}_2(\pm\text{CH}_4)$ 가 풍부한 유체로부터 고온이며(최대 480°C) 비교적 높은 압력(최대 2 kbar)에서 생성되었다(약 166 Ma: So *et al.*, 1995b, 1999, 2002; So and Yun, 1997). 이들 광상들은 보통 광석광물이 단순하며 다량의 자류철석을 함유하고 있는데, 이는 광화유체의 비교적 낮은 산소분압조건을 지시한다. So and Yun(1997)은 중열수 함유 유체가 흑연-유체 반응과 QFM buffer에 의해 정의된 환원조건하에서 진화되었음을 제안했다(Table 5).

6.2. 보성-장흥지역 개관

보성-장흥지역은 주로 선캄브리아기 편마암복합체로

Table 5. Summary of characteristics of mesothermal-type gold deposits in the Youngdong Area, Sobaegsan Massif, Korea.

No.*	Mine	Host rock	Vein texture	Wall-rock alteration	Average Au/Ag ratio	Ore Mineralogy	Iron Sulfide	N _{Ag}	Fluid chemistry		age****	References
									T(°C)	CH ₄ (mole%)		
1	YB	PG	Massive	weak**	2.6 : 1	Simple***	Apy>>P y>Po	0.6~0.9	420~160	<6	Late Jurassic	So <i>et al.</i> (2002)
2	SHH	PG	Massive	weak**	3 : 1	Simple***	Po>>Py	0.1~0.5	480~220	30~48	Middle to Late Jurassic	So and Yun (1997)
3	SD	PG	Massive	weak**	2.6 : 1	Simple***	Apy>>P y>Po	0.6~0.7	425~190	6~20	Late Jurassic	So <i>et al.</i> (1995b)
4	HD	PG	Massive	weak**	3.8 : 1	Simple***	Po>>Py	0.2~0.3	401~153	<6~20	Middle to Late Jurassic	So <i>et al.</i> (1999)
5	IL	PG	Massive	weak**	3.8 : 1	Simple***	Po>>Py	0.2~0.3	401~152	<6~20	Middle to Late Jurassic	So <i>et al.</i> (1999)
6	DW	PG	Massive	weak**	3.8 : 1	Simple***	Po>>Py	0.2~0.3	358~151	<6~20	Middle to Late Jurassic	So <i>et al.</i> (1999)

*Number of Fig. 10, **: 'weak' means 'sericitic, chloritic, argillic alteration'
 ***'Simple' means 'consisting largely of Fe and base metal sulfide'
 ****'age' means 'mineralization age'
 Abbreviations: Apy = arsenopyrite, Py = pyrite, Po = Pyrrhotite, N_{Ag} = silver content of electrum, YB = Youngbogari, SHH = Samhwanghak, SD = Samdong, HD = Heungdeok, IL = Ilsaeng, DW = Daewon, PG = Paragneiss

구성된 소백산육괴내 위치해 있다. 본 역의 지질은 선 캄브리아기 변성암, 고생대 변성퇴적암(명봉층과 설옥리층) 및 시대미상의 화강암으로 구성되어있다. 선캠브리아기 변성암은 본역의 대부분을 차지하고 있으며, 반상변정질 편마암, 거정질 편마암, 화강암질 편마암으로

구성되어 있다. 변성암의 엽리는 주향이 N40°E~60°E이며 경사는 40°~60°NW이다. Lee(1986)는 소백산육괴의 변성암은 주로 부분적인 녹색편암상을 지닌 상부 각섬암내지 녹염석-각섬암상에 해당하는 다변성작용에 의해 주로 세일 및 잡사암으로부터 생성되었다고 보고

Table 6. Summary of characteristics of mesothermal-type gold deposits in the Boseong-Jangheung Area, Sobaegsan Massif, Korea.

No.*	Mine	Host rock	Vein texture	Wall-rock alteration	Average Au/Ag ratio	Ore Mineralogy	Iron Sulfide	N _{Ag}	Fluid chemistry		age****	References
									T(°C)	CH ₄ (mole %)		
1	BD	PG	Massive	weak**	1 : 2	Simple***	Apy> py>> po	0.3~0.7	370~150	<5	Late Jurassic	So <i>et al.</i> (1993)
2	MD	PG	Massive	weak**	1 : 2.5	Simple***	Apy> py>> po	0.4~0.5	360~170	<5	Late Jurassic	Heo <i>et al.</i> (1997)
3	PN	PG	Massive	weak**	2.8 : 1	Simple***	Apy> py>> po	0.5~0.7	460~150	<5	Late Jurassic	So <i>et al.</i> (1995)
4	KS	PG	Massive	weak**	1.4 : 1	Simple***	Apy> py>> po	0.4	390~160	<5	Late Jurassic	Heo and So (1995)
5	JP	PG	Massive	weak**	1 : 1	Simple***	Apy> py>> po	0.4	410~130	<5	Late Jurassic	Heo <i>et al.</i> (1999a)

*Number of Fig. 2, **: 'weak' means 'sericitic, chloritic, argillic alteration'
 ****'Simple' means 'consisting largely of Fe and base metal sulfide'
 ****'age' means 'mineralization age'
 Abbreviations: Apy = arsenopyrite, Py = pyrite, Po = Pyrrhotite, N_{Ag} = silver content of electrum, BD = Bodeok, MD = Mundeok, PN = Boknae, KS = Keumsan, JP = Jukbo

했다. 고생대 설옥리층 상부에는 고생대 명봉층이 부정합으로 덮고 있다. 시대미상의 화강암은 화강섬록암 및 흑운모 화강암으로 구성된 압주상으로 산출된다.

보성-장흥지역의 중열수형 금광상은 선캠브리아기 편마암내의 단층전단대를 따라 형성된 열극을 충진하면서 부존되어 있으며, 주라기 후기의 광화작용과 관련 있는 $CO_2(\pm CH_4 \pm N_2)$ 를 함유하고 있는 유체로부터 온이며(최대 460°C), 최대 0.8 kbar의 압력에서 생성되었다(약 156 Ma: So *et al.*, 1993, 1995a; Heo and So, 1995; Heo *et al.*, 1997, 1999a, 1999b, 2000). 이들 광상들은 광석광물이 단순하며 다량의 유비철석과 황철석을 함유하고 있다. 그리고, 비교적 금이 풍부한 에렉트립, 은-안티모니-(비소)황염광물의 부재, 괴상의 석영맥의 산출은 보성-장흥지역 금광화작용의 특징들이다(Table 6).

6.3. 두 지역의 황동위원소 자료 비교에 대한 고찰

한반도 금속광상의 황화물 광물의 $\delta^{34}S$ 값은 주로 3~7‰이다(분석시료의 $\geq 80\%$: Sato *et al.*, 1981; Shimazaki *et al.*, 1985; Lee, 1985; Yoon and

Shimazaki, 1993; So *et al.*, 1995a, b, 1999, 2002; So and Yun, 1997; Ishihara *et al.*, 2000). 이것은 한반도에서 형성된 열수계에서 화성기원의 황이 지배적임을 지시한다.

한반도의 소백산육괴에는 두 개의 대표적인 중열수형 광화대가 부존한다. 이들은 각각 영동지역 및 보성-장흥지역이다. 이번 연구에서는, 우리는 소백산육괴내 영동지역 및 보성-장흥지역의 중열수형 광상에서 산출되는 105개의 황화물에 대한 황동위원소자료를 비교 고찰해보았다(영동지역, 분석수 66개: 유비철석 4개, 황철석 5개, 섬아연석 19개, 자류철석 14개, 방연석 20개, 황동석 4개; 보성-장흥지역, 분석수 39개: 유비철석 4개, 황철석 7개, 섬아연석 16개, 방연석 9개, 황동석 3개: Table 4 및 7, Fig. 9).

영동지역의 $\delta^{34}S$ 값은 -6.6~-2.3‰(평균 -1.4‰, 분석수 66개: 영보가리, -6.6~-2.4‰; 삼황학, -2.5~-2.3‰; 삼동, -3.1~-0.3‰; 흥덕, -2.1~-1.2‰; 대원, -1.5~-2.2‰; 일생, 1.0~-1.4‰: Table 7 및 Fig. 9)이며, 보성-장흥지역의 $\delta^{34}S$ 값은 -0.7~-3.6‰이다(Table 4 및 Fig. 9).

두 지역의 $\delta^{34}S$ 값은 대부분의 한국 금속광상의 $\delta^{34}S$

Table 7. Summary of sulfur isotope data of the mesothermal-type gold deposits in the Youngdong areas within the Sobaegsan Massif, Korea.

Mine	Mineral	$\delta^{34}S$ (‰)	number of analysis	References
Youngbogari	sphalerite	-5.4~-2.6	6	So <i>et al.</i> (2002)
	galena	-6.6~-4.9	7	
	arsenopyrite	-3.4~-2.4	4	
	pyrite	-3.6~-2.8	2	
	chalcopryrite	-4.4	1	
Samhwanghak	chalcopryrite	0.5~0.8	2	So and Yun (1997)
	pyrrhotite	-0.6~2.3	3	
	galena	-2.5~0.4	5	
	sphalerite	1.1~2.1	4	
	pyrite	-0.5	1	
Samdong	sphalerite	-3.1~0.3	5	So <i>et al.</i> (1995b)
	pyrrhotite	-2.8~-1.5	2	
	galena	-3.0~-1.8	2	
	chalcopryrite	-1.1	1	
Heungdeok	sphalerite	-1.0~0.5	4	So <i>et al.</i> (1999)
	galena	-2.1~0.9	4	
	pyrrhotite	-1.4~1.2	5	
Daewon	pyrrhotite	1.2~2.2	3	So <i>et al.</i> (1999)
	pyrite	1.6	1	
	galena	-1.5~1.0	2	
Ilsaeng	pyrrhotite	1.0	1	So <i>et al.</i> (1999)
	pyrite	1.4	1	

값(3~7‰)보다 낮다. 그리고, 소백산육괴내에서는, 영동지역의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 보성-장흥지역의 $\delta^{34}\text{S}$ 값보다 낮다 (Fig. 9). 소백산육괴내 두 지역의 황화물광물의 $\delta^{34}\text{S}$ 값의 차이는 다음 반응기작중 하나로 설명될 수 있다: (1) 두 지역의 주라기 중열수형 금광상에 대해 적어도 두 개의 근원지(두개 모두 화성기원이며, -6‰ 미만 및 $2\pm 2\%$ 의 $\delta^{34}\text{S}$ 값)가 존재; (2) 마그마의 생성 및 상승 중 ^{32}S 가 풍부한 황(선캠브리아기의 이토질 기저암내 황)의 혼합(동화)차이; (3) 광화지역까지 상승중 H_2S 가 풍부한 마그마에서 유래된 황원($\delta^{34}\text{S}=2\pm 2\%$)의 산화 차이 (Ishihara *et al.*, 1996).

만일 우리가 중열수형 광상에서 광석광물(특히, 철을 함유한 광석광물)의 관찰된 차이점에 주목하면, 삼동 및 영보거리 광상을 제외한 영동지역의 광석들은 소량의 황철석을 함유하며 주로 자류철석이 풍부한 반면 보성-장흥지역의 광석들은 특징적으로 자류철석이 빈약하다는 것을 알 수 있다. 중열수형 광상사이에서 그러한 광물학적 차이는 열수유체의 산소분압의 차이를 반영한다. 즉, 자류철석이 풍부한 광상들은 황철석이 풍부한 광상들보다 QFM buffer조건에 근접해서 진화했던 비교적 낮은 산소분압의 유체로부터 형성되었다 (So and Yun, 1997; So *et al.*, 1999). 상이한 산소분압조건은 편마암 모암내 흑연과의 반응에 의해 상승하는 마그마유체의 환원 정도의 차이로 해석된다 (So and Yun, 1997; So *et al.*, 1999). So and Yun(1997) 및 So *et al.*(1999)에 의하면, 영동지역의 자류철석이 풍부한, 중열수형 광상산 석영의 유체포유물은 다양하나 높은 함량의 CH_4 ($<6\sim 48$ mole %, 평균 ~ 15 mole %)를 함유한다. 한편, 보성-장흥지역의 황철석(-유비철석)이 풍부한, 중열수형광상산 석영의 유체포유물은 CH_4 함량이 더욱 낮다(최대 5 mole%; So *et al.*, 1993, 1995a; Heo and So, 1995; Heo *et al.*, 1997, 1999a, b, 2000). 포유물 유체내 CH_4 함량의 차이는 흑연-유체 반응의 정도와 그로 인한 광화작용중 열수유체의 환원 정도를 나타내는 척도로 간주될 수 있다.

그래서, 영동지역의 자류철석이 풍부한 중열수형광상이 보성-장흥지역의 황철석 및 유비철석이 풍부한 중열수형광상보다 더욱 고온이며 더욱 환원적인 유체로부터 형성되었음을 제안하며, 현재 두 지역에서 산출하는 선캠브리아기 편마암과 고생대 퇴적암의 $\delta^{34}\text{S}$ 값이 알려져 있지 않기 때문에 다른 반응기작보다 세 번째 반응기작을 두 지역 황동위원소값의 차이에 대한 원인으로 선택한다. 앞으로는, 광석상의 기원을 체계적으로 규명하기 위해서 한반도의 기저를 이루는 선캠브

리아기 변성암과 고생대 퇴적암의 $\delta^{34}\text{S}$ 값을 결정할 필요가 있다.

7. 결 론

한반도 소백산육괴의 보성-장흥지역에는, 여러개의 열수 금(은)광상이 부존하며, 다음과 같은 특징들을 보여준다: 에렉트럼중 금이 비교적 풍부한 특성; 은-안티모니(비소)황염광물의 부재; 괴상이며 단순한 광물조성을 지닌 석영맥. 이러한 성질들은 본 지역의 금광화작용이 한반도의 주라기내지 초기 백악기의 중열수형 금광상과 대비가 됨을 지시한다.

유체포유물 연구에 의하면, 본 지역의 광화 1기 석영내 포유물은 0.0~13.8 wt. %를 지니며 $200^\circ\sim 460^\circ\text{C}$ 의 넓은 온도에서 균질화되며, 광화 2기 방해석내 유체포유물은 1.2~7.9 wt. %를 지니며 $150^\circ\sim 254^\circ\text{C}$ 의 온도에서 균질화된다. 이는 시간이 지남에 따라 열수 활동이 쇠퇴하면서 열수유체가 냉각됨을 지시한다. CO_2 불혼화를 포함한 비등증거는 본 지역의 합금유체의 포획시 압력이 최대 770 bar에 해당됨을 지시하고 있다. 본 지역 합금유체의 계산된 황동위원소 조성($\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}=0.2\sim 3.3\%$)은 열수유체내 황의 화성기원을 지시하고 있다.

소백산육괴내에는 두 개의 대표적인 중열수형 광화대(영동지역 및 보성-장흥지역)가 부존한다. 영동지역의 황화물의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 $-6.6\sim 2.3\%$ (평균 -1.4% , 분석수 66개)이며, 보성-장흥지역의 황화물의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 $-0.7\sim 3.6\%$ (평균 1.6% , 분석수 39개)이다. 두 지역의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 대부분의 한반도 금속광상(3~7‰)의 $\delta^{34}\text{S}$ 값보다 낮다. 그리고, 소백산육괴내에서는 영동지역의 $\delta^{34}\text{S}$ 값이 보성-장흥지역의 $\delta^{34}\text{S}$ 값보다 낮다. 소백산 육괴내에서 두 지역의 황화물의 $\delta^{34}\text{S}$ 값의 차이는 다음과 같은 반응기작에 의해 야기될 수 있다: 1) 두 지역의 주라기 중열수형 금광상에 대해 적어도 두 개의 근원지(두개 모두 화성기원이며, -6‰ 미만 및 $2\pm 2\%$ 의 $\delta^{34}\text{S}$ 값)가 존재; 2) 마그마의 생성 및 상승중 ^{32}S 가 풍부한 황(선캠브리아기의 이토질 기저암내 황)의 혼합(동화)차이; (3) 광화지역까지 상승중 H_2S 가 풍부한 마그마에서 유래된 황원($\delta^{34}\text{S}=2\pm 2\%$)의 산화차이. 두 지역 중열수형광상의 석영내 유체포유물과 광석광물(특히, 철을 함유한 광석광물)의 상이성을 고려하여, 영동지역의 자류철석이 풍부한 중열수형 광상이 보성-장흥지역의 황철석(-유비철석)이 풍부한 중열수형 광상보다 더욱 높은 온도와 더욱 환원된 유체로부터 생성되었음을 알

수 있다. 현재, 두 지역에서 산출되는 선캠브리아 편마암과 고생대 퇴적암의 $\delta^{34}\text{S}$ 값을 알지 못하므로 세 번째 반응기체가 두 지역 황동위원소값의 차이에 대한 원인으로 더욱 타당하리라고 본다. 앞으로는, 광석황의 근원을 더욱 체계적으로 규명하기 위해서, 소백산육괴를 포함한 한반도의 기저부를 이루는 선캠브리아 변성암과 고생대 퇴적암의 $\delta^{34}\text{S}$ 값을 조사할 필요가 있다.

사 사

이 연구는 고려대학교의 전라광물자원연구센터의 재정적 지원에 의해서 수행되었다.

참고문헌

- Bozzo, A.T., Chen, H.S., Kaas, J.R. and Barduhn, A.J. (1975) The properties of hydrates of chlorine and carbon dioxide. *Desalination*, v. 16, p. 303-320.
- 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. *Geochimica Cosmochimica Acta*, v. 47, p. 1247-1275.
- Burruss, R.C. (1981) Analysis of fluid inclusions: Phase equilibria at constant volume. *American Journal of Science*, v. 281, p. 1104-1126.
- Cho, D.L. and Kwon, S.T. (1994) Hornblende geobarometry of the Mesozoic granitoid in South Korea and the evolution of crustal thickness. *Journal of Geological Society of Korea*, v. 30, p. 41-61.
- Choi, S.G., Chi, S.J. and Park, S.W. (1988) Gold-silver mineralization of the Au-Ag deposit at Youngdong district, Chungcheongbuk-Do. *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, v. 21, p. 367-380.
- Choi, S.G. and Wee, S.M. (1992) The genetic characteristics of gold and silver vein deposits related to chemical composition of electrum in central Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, v. 28, p. 196-217.
- Choo, S.H. and Chi, S.J. (1991) A study of Rb/Sr age determinations on the Kwangju granite in the Kwangju area. *Research on Isotope Geology*, KR-90-1B-2, p. 5-53.
- Chough, S.K., Kwon, S.T., Ree, J.H. and Choi, D.K. (2000) Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view. *Earth-Science Reviews*, v. 52, p. 175-235.
- Diamond, L.W. (1992) Stability of CO_2 clathrate hydrate+ CO_2 liquid+ CO_2 vapour+aqueous KCl-NaCl solutions: experimental determination and application to salinity estimations of fluid inclusions. *Geochimica Cosmochimica Acta*, v. 56, p. 273-280.
- Drummond, S.E. and Ohmoto, H. (1985) Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal system. *Economic Geology*, v. 80, p. 126-147.
- Goldfarb, R.J., Groves, D.I. and Gardoll, S. (2001) Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. *Ore Geology Reviews*, v. 18, p. 1-75.
- Grinenko, V.A. (1962) Preparation of sulfur dioxide for isotopic analysis. *Zeitschrift Neorganische Chemie*, v. 7, p. 2478-2483.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G. and Robert, F. (1998) Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal deformation and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, v. 13, p. 7-28.
- Haas, J.L., Jr. (1971) The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Economic Geology*, v. 66, p. 940-946.
- Hedenquist, J.W. and Henley, R.W. (1985) The importance of CO_2 on freezing point measurements of fluid inclusions: evidence from active geo-thermal systems and implications for epithermal ore deposition. *Economic Geology*, v. 80, p. 1379-1406.
- Heo, C.H. and So, C.S. (1995) Gold-silver mineralization at the Keumsan mine, Boseong-Jangheung area, Cheollanamdo Province: A fluid inclusion and stable isotope study. *Journal of Korean Earth Science Society*, v. 16, p. 489-499.
- Heo, C.H., So, C.S. and Shim, S.K. (1997) Meso-thermal gold mineralization of the Mundeok mine, Boseong-Jangheung area. *Journal of Korean Institute of Mineral Energy Resource Engineering*, v. 34, p. 270-277.
- Heo, C.H., So, C.S. and Youm, S.J. (1999a) Gold-silver mineralization of the Jukbo mine, Boseong-Jangheung area, Korea. *Journal of Korean Institute of Mineral Energy Resource Engineering*, v. 36, p. 10-17.
- Heo, C.H., So, C.S., Youm, S.J. and Kim, S.H. (1999b) Oxygen and hydrogen isotope study of the gold-silver mines in the Boseong-Jangheung area. Chollanamdo province, Korea. *Journal of Korean Institute of Mineral Energy Resource Engineering*, v. 36, p. 404-411.
- Heo, C.H., Yun, S.T., So, C.S. and Kim, S.H. (2000) Geochemical environments of gold mineralization in the Boseong-Jangheung area. Chollanamdo-province. *Journal of Korean Institute of Mineral Energy Resource Engineering*, v. 37, p. 204-212.
- Ishihara, S., Ivanov, V. and Ratkin, V. (1996) Gold deposits and their $\delta^{34}\text{S}$ ratios of the Sikhote-Alin, Russia-A comprehensive study with those of the Sanyo Belt of Japan. *Resource Geology*, v. 46, p. 267-277.
- Ishihara, S., Jin, M.S. and Sasaki, A. (2000) Source diversity of ore sulfur from Mesozoic-Cenozoic Mineral deposits in the Korean Peninsula region. *Resource Geology*, v. 50, p. 203-212.
- KORES (1986) Analysis of Exploration Results: Metallic Ore Deposits. (in Korean), Korea.
- Lee, M.S. (1981) Geology and metallic mineralization associated with Mesozoic granitic magmatism in South Korea. *Mining Geology*, v. 31, p. 235-244.
- Lee, M.S. (1985) Sulfur and carbon isotope studies of principal metallic deposits in the metallogenic province of the Taebaeg Mt. region, Korea. *Journal of*

- Korean Institute Mining Geology, v. 18, p. 247-251.
- Lee, S.W. (1986) Metamorphism of the gneiss complex in the southwestern region of the Sobaegsan Massif. Memoirs in celebration of the sixtieth birthday of Professor Sang-Man Lee, Seoul, Seoul National University, p. 133-153.
- Ohmoto, H. and Rye, R.O. (1979) Isotopes of sulfur and carbon. In Barnes, H.L.(ed.) Geochemistry of hydrothermal ore deposits, Wiley Interscience, New York, p. 509-567.
- Potter, R.W.III, Clyne, M.A. and Brown, D.L. (1978) Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions. *Economic Geology*, v. 73, p. 284-285.
- Roedder, E. (1984) Fluid Inclusions. *Review in Mineralogy*, v. 12, 644p.
- Sato, K., Shimazaki, H. and Chon, H.T. (1981) Sulfur isotopes of the ore deposits related to felsic magmatism in the southern Korean Peninsula. *Mineralogy*, v. 31, p. 321-326
- Seward, T.M. (1984) The transport and deposition of gold in hydrothermal system. In *Gold '82* (Foster, R.P. ed): Rotterdam, A.A. Balkema Pub., p. 165-181.
- 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. *Economic Geology*, v. 83, p. 1221-1237.
- Shimazaki, H., Sato, K. and Chon, H.T. (1981) Mineralization associated with Mesozoic felsic magmatism in Japan and Korea. *Mineralogy*, v. 31, p. 297-310.
- Shimazaki, H., Sakai, H., Kaneda, H. and Lee, M.S. (1985) Sulfur isotopic ratios of ore deposits associated with Mesozoic felsic magmatism in South Korea, with special reference to gold-silver deposits. *Geochemical Journal*, v. 19, p. 163-169.
- Shimazaki, H., Lee, M.S., Tsusue, A. and Kaneda, H. (1986) Three epochs of gold mineralization in South Korea. *Mineralogy*, v. 36, p. 265-272.
- 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. *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, v. 26, p. 433-444.
- So, C.S., Yun, S.T., Heo, C.H., Choi, S.H., Youm, S.J. and Choi, S.G. (1995a) Fluid inclusion and stable isotope studies of gold-and silver-bearing vein deposits, South Korea: Gold-rich mesothermal mineralization of the Boknae mine. *Journal of Korean Institute of Mineral Energy Resource Engineering*, v. 32, p. 54-65.
- So, C.S., Yun, S.T. and Shelton, K.L. (1995b) Mesothermal gold vein mineralization of the Samdong mine, Youngdong mining district, Republic of Korea. *Mineralium Deposita*, v. 30, p. 384-396.
- 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 chemistry. *Economic Geology*, v. 92, p. 60-80.
- So, C.S., Yun, S.T. and Kwon, S.H. (1999) Fluid inclusion and stable isotope studies of meso-thermal gold vein deposits in metamorphic rocks of central Sobaegsan Massif, Korea: Youngdong area. *Economic and Environmental Geology*, v. 32, p. 561-573.
- So, C.S., Yun, S.T., Shelton, K.L. and Zhang, D.Q. (2002) Geochemistry of the Youngbogari deposit, Republic of Korea: An unusual mesothermal gold-silver deposit of the Youngdong area. *Geochemical Journal*, v. 36, p. 155-171.
- Sourirajan, S. and Kennedy, G.C. (1962) The system H₂O-NaCl at elevated temperatures and pressures. *American Journal of Science*, v. 260, p. 115-141.
- Tsusue, A., Mizuta, T., Watanabe, M. and Min, K.G. (1981) Jurassic and Cretaceous granitic rocks in South Korea. *Mineralogy*, v. 31, p. 1261-1280.
- Watanabe, M. (1981) Reconnaissance study on the fluid inclusions in some Jurassic and Cretaceous granitic rocks in the Republic of Korea. Petro-graphic provinces of granitoids and associated metallic ore deposits in South Korean Peninsula (Tsusue, A., ed.). Unpublished Overseas Field Research Report, Kumamoto University, Kumamoto, Japan, p. 109-124.
- Yoon, C.H. and Shimazaki, H. (1993) Sulfur isotope study of gold-silver deposits in the Republic of Korea. *Resource Geology*, v. 43, p. 1-10.