

삼성 금-은광상의 생성환경: 광석광물, 유체포유물 및 안정동위원소 연구

유봉철^{1*} · 이길재¹ · 고상모¹ · 유병운²

¹한국지질자원연구원 해외광물자원연구실, ²충남대학교 지구환경과학과

Genetic Environment of the Samsung Gold-Silver Deposit, Republic of Korea: Ore Minerals, Fluid Inclusion and Stable Isotope Studies

Bong Chul Yoo^{1*}, Gill-Jae Lee¹, Sang-Mo Koh¹ and Byoung Woon You²

¹Overseas Mineral Resources Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 305-350, Korea

²Department of geology and environmental sciences, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea

The Samsung gold-silver deposit consists of quartz veins that fill along the fault zone within Cretaceous shale and sandstone. Mineralization is occurred within fault-breccia zones and can be divided into two stages. Stage I is main ore mineralization and stage II is barren. Stage I is associated with wall-rock alteration minerals (sericite, pyrite, chlorite, quartz), rutile, base-metal sulfides (pyrrhotite, pyrite, sphalerite, chalcopyrite, galena), and electrum. Stage II occur quartz, calcite and pyrite. Fluid inclusion data indicate that homogenization temperatures and salinities of stage I range from 145 to 309°C and from 0.4 to 12.4 wt.% NaCl, respectively. It suggests that hydrothermal fluids were cooled and diluted with the mixing of meteoric water. The main deposition of base-metal sulfides and electrum occurred as a result of cooling and dilution at temperature between 200°C and 300°C. Sulfur (9.3~10.8‰) isotope composition indicates that ore sulfur was mainly derived from a magmatic source as well as the host rocks. The calculated oxygen [-2.3~0.9‰ (quartz: 0.3‰, 0.9‰, calcite: -2.3‰)] and hydrogen [-86~76‰ (quartz: -86‰, -82‰, calcite: -76‰)] isotope compositions indicate that hydrothermal fluids may be meteoric origin with some degree of mixing of another meteoric water for paragenetic time.

Keywords : Samsung gold-silver deposit, mineralization, fluid inclusion, isotope

삼성 금-은광상은 백악기 셰일과 사암 내에 발달된 단층대를 충전한 석영맥광상이다. 이 광상의 광화작용은 단층-각력대에 수반되며 2시기로 구분된다. 광화I시기는 주된 광화시기이고 광화II시기는 광화작용이 관찰되지 않는다. 광화 I시기는 모암변질광물(견운모, 황철석, 녹니석, 석영), 금홍석, 천금속 황화광물(자류철석, 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석)과 에렉트럼 등이 관찰된다. 광화II시기는 석영, 방해석 및 황철석만 관찰된다. 유체포유물 자료에 의하면, 광화I시기의 균일화온도와 염농도는 각각 145~309°C, 0.4~12.4 wt.% NaCl로서 광화유체가 천수의 혼입에 의한 냉각과 희석이 있었음을 지시한다. 천금속 황화광물과 에렉트럼은 온도 200~300°C에서 냉각과 희석작용에 의해 침전되었다. 황(9.3~10.8‰) 기원은 화성기원과 모암내의 황에서 유래된 것으로 해석된다. 산소[-2.3~0.9‰(석영: 0.3‰과 0.9‰, 방해석: -2.3‰)] 및 수소[-86~76‰(석영: -86‰과 -82‰, 방해석: -76‰)] 동위원소값의 자료로 볼 때, 이 광상의 광화유체는 천수 기원의 유체가 주종을 이룬 것으로 보이며 광화작용이 진행됨에 따라 기원이 다른 천수의 혼입이 작용한 것으로 해석할 수 있다.

주요어 : 삼성 금-은광상, 광화작용, 유체포유물, 동위원소

1. 서 언

세계는 지금 자원 전쟁이라 해도 지나치지 않을 정

도로 자원 확보 경쟁이 치열하게 진행되고 있다. 이미 자원 안보, 자원 민족주의라는 단어가 낯설지 않은 시대에 접어들었다고 할 수 있다. 국내 산업계는 경제구

*Corresponding author: chbong@kigam.re.kr

모가 팽창되어 감과 동시에 날로 증가되고 있는 원료 자원의 수급에 많은 관심을 기울이고 있다. 하지만 국내의 자원확보는 전문탐사인력의 절대 부족과 적극적인 탐사 대책의 부재로 인해 아주 미미한 수준에 머물고 있는 것이 현실이다. 국내 자원확보는 가격경쟁에서 우위를 차지할 수 있는 정책임은 물론 국가성장동력으로써의 중요성을 아무리 강조하더라도 지나치지 않는다. 현재 국내에서는 몇몇 가행광산(연천 철광산, 순신 금-은광산, 가덕 연-아연광산 등)이 있을 뿐 대부분 원료자원을 해외에서 수입에 의존하고 있어 생산한 제품 경쟁력이 다른 선진국에 비해 매우 낮은 실정이다. 따라서, 적극적인 해외자원 개발 수입정책이 요구됨은 물론이고, 국내부존자원에 대한 탐사연구가 어느때보다도 절실하게 요구되고 있다. 최근들어, 금광상의 개발 및 탐사방향은 반암형 광상, 천열수광상, 조산형광상 및 Iron oxide copper-gold deposits 등의 부존 및 성인 모델에 의한 탐사가 주를 이루고 있다. 또한 일부 학자들은 지체구조적 사건과 관련해서 금광상의 성인모델을 연구하고 있다(Richards and Kerrich, 2007).

삼성 금-은광상은 경상북도 영천시 고경면 석계리와 오룡리(동경 126° 07', 북위 36° 08') 에 위치한다(Fig. 1). 이 광상은 백악기 경상누층군의 반아월층(대구층) 내에 NE방향으로 발달된 열극을 충진한 열수성맥상광상이며 이 광상일대에는 일부 동 및 금-은광상들이 분포하고 있다. 이 광상일대에 일부 금-은 광상에 대한

연구는 학자들(Lee *et al.*, 1995; 1996; Kim, 1997; Yun *et al.*, 2001; Koh *et al.*, 2003; Choi *et al.*, 2006; Yoo *et al.*, 2010)에 의해 보고되어 있다. 또한 삼성 금-은 광상에 대한 지금까지의 연구보고는 KMPC(1987)와 Oh and Jeong (1975)의 조사자료가 있을 뿐 광상 성인적 연구는 아직 보고되어 있지 않다.

따라서 이 연구에서는 삼성 금-은광상의 주변지질, 광상의 광석광물에 대한 공생관계 및 화학조성, 유체 포유물 및 안정동위원소 실험연구 등을 실시하여 광상의 생성환경을 고찰하고자 한다.

2. 주변지질

삼성 금-은광상일대의 주변지질은 백악기의 경상누층군의 반아월층(대구층)과 후기에 이를 관입한 각력질 응회암, 치밀안산암, 조립질안산암, 섬록암, 화강섬록반암, 흑운모화강암 및 석영맥으로 구성된다(Fig. 1).

반아월층(대구층)은 광상 일대에 넓게 분포하며 경주도폭과 영천도폭에서 채약산분암층을 기준으로 상하 위층을 각각 건천리층과 대구층으로 구분하였다(Oh and Jeong, 1975; Choi, 1986). 이 층은 암회색, 녹회색, 암흑색 및 적색의 세일 및 사질세일, 회색의 세립사암 및 이암과 화성암 접촉부에서 관찰되는 혼펠스 등으로 구성된다(Fig. 1). 이 층의 주향과 경사는 지역에 따라 변화가 크나 광상일대에서는 N50~60° E 및

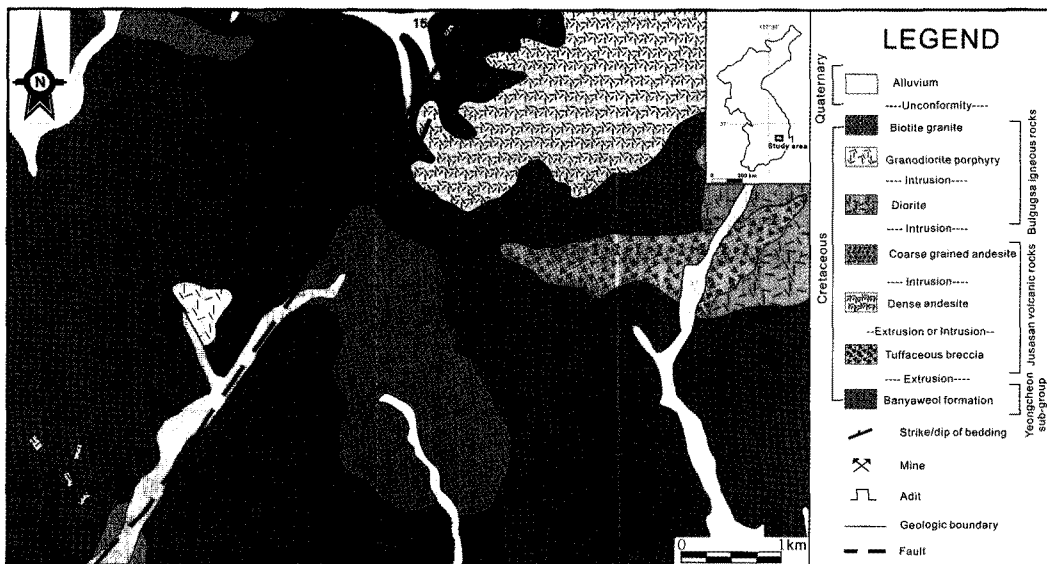


Fig. 1. Generalized geological map of the Samsung Au-Ag deposit, showing the orientation of the principal quartz veins(modified from Oh and Jeong, 1975).

75~85° SE이다(Fig. 1).

각력질응회암은 광상의 동측에 분포하며 녹회색 및 회백색을 띠며 다양한 크기의 암편을 함유한다. 암편은 응회암 및 유문암 등으로 구성된다(Oh and Jeong, 1975). 이 암석은 주로 석영, 장석의 결정이 현미경하에서 관찰되며 대부분 유리질로 구성되어 있다. 치밀안산암은 광상의 북동측에 넓게 분포하고 또한 광상의 남서측에 백상으로 소규모 분포한다. 이 암석은 암흑색, 암회색 및 암녹색을 띠며 육안상 매우 치밀하고 일부 석영 및 반정 결정이 관찰된다. 이 암석은 주로 사장석으로 구성되며 일부 휘석류와 불투명광물이 관찰된다. 조립질안산암은 광상의 북서측에 소규모로 분포한다. 이 암석은 암녹색, 암갈색 및 담녹색을 띠고 장석 결정이 대부분 직경 3~4 mm 정도로 관찰되나 일부 거정의 결정이 관찰되기도 한다. 또한 이 암석은 일부 노두에선 휘석 및 각섬석의 결정이 관찰되기도 한다. 이 암석은 주로 사장석으로 구성되나 일부 각섬석, 휘석류와 불투명광물 등으로 구성된다.

섬록암은 광상의 동측에서 넓게 분포하며 중립내지 조립질로 산출된다. 이 암석은 녹회색을 띠며 각섬석의 함량이 많다. 이 암석의 구성광물은 주로 사장석과 각섬석이고 일부 흑운모, 석영, 백운모, 녹니석, 견운모 및 불투명광물 등이다. 화강섬록반암은 광상의 북서측에 소규모로 분포하며 담녹회색을 띤다. 이 암석은 반정으로 장석과 각섬석이 관찰되며 직경은 2~5 mm 정도이다. 구성광물로는 사장석, 정장석, 석영, 각섬석 및 흑운모와 소량 인회석 및 불투명광물 등이다. 흑운

모화강암은 광상의 동측부에 NNE방향으로 분포하며 세립내지 중립질이다. 구성광물은 석영, 정장석, 사장석, 미사장석, 흑운모, 각섬석, 견운모 및 불투명광물 등이다. 석영맥은 북동방향으로 소규모 분포한다.

삼성 금-은광상일대의 주된 구조대는 NE-SE 방향의 단층(삼포단층)과 그에 수반된 NE-SE방향의 소단층들이 관찰된다. 삼성 금-은광상 및 베이터광상, 영덕광상 및 유천광상의 석영맥들은 모두 NE방향성을 갖고며 이는 NE 방향의 단층 및 그에 수반된 소단층의 형성 시기보다 후라는 것을 지시한다.

3. 광상 및 광석광물

삼성 금-은광상은 반야월층(대구층)내에 발달된 NE 방향의 열극대를 따라 충진한 열수성 맥상 석영맥광상이다. 이 광상에는 거의 평행한 10개조의 석영맥이 관찰되며 방향성은 N60° E/75~86° SE/NW이다. 석영맥의 맥폭은 0.05~1.0 m 정도이고 석영맥은 팽축이 심하고 지맥으로 분지되었다가 다시 병합되기도 하며 일부 구간에선 연장이 견실하게 발달하기도 하며 연장성은 대략 30~300 m 정도이다(KMPC, 1987). 과거 이 광상은 4개의 갱도(양1호갱, 양2호갱, 음1호갱, 음2호갱)를 개설하여 채굴하였다(Figs. 1 and 2). 양1호갱은 주향 N60° E, 경사 75~86° SE 방향의 석영맥을 탐광하기 위해 해발 430 m 지점에서 총 250 m 굴착되어 있다(Fig. 3A). 갱 입구에서 S80° E 방향으로 35 m 굴진하여 NE방향과 0.2 m의 맥폭을 갖는 석영과 방해석

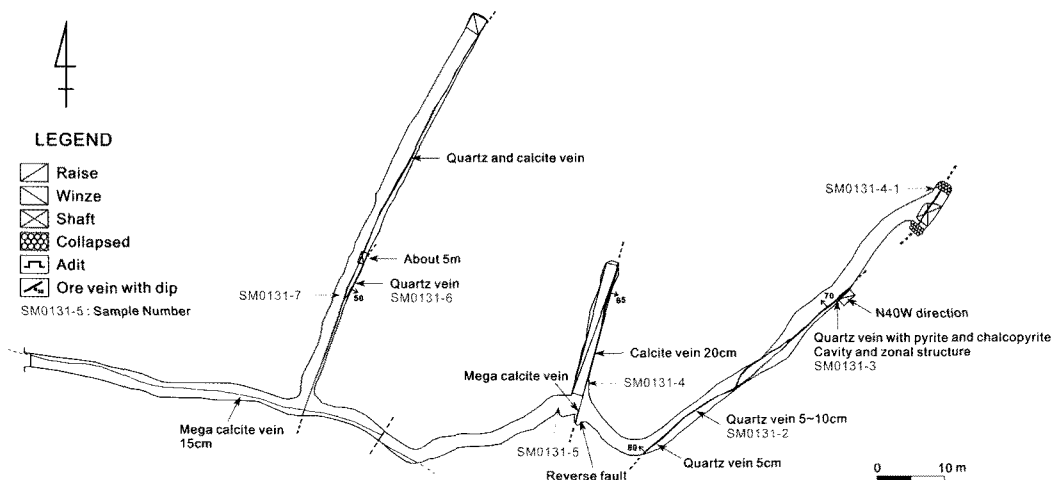


Fig. 2. Plan section of the Samsung Au-Ag deposit, showing the orientation and location of the principal quartz veins and sampling locations.

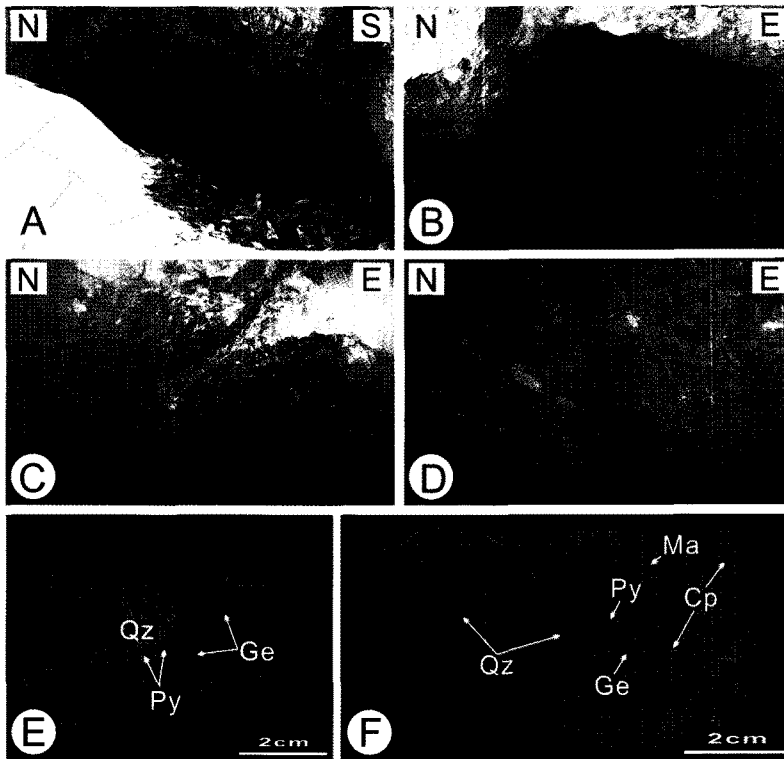


Fig. 3. Photographs of quartz veins from the Samsung Au-Ag deposit. (A) Close-up of Yang 1 adit and host rocks(shale and sandstone). (B) Main mined places of the Yang 1 adit. (C) and (D) Close-up of white and transparent quartz vein from the Yang 1 adit. (E) and (F) Quartz vein with pyrite and chalcopyrite in the Yang 1 adit. Abbreviations: Cp = chalcopyrite, Ge = goethite, Ma = malachite, Qz = quartz, Py = pyrite.

맥을 착맥하였다(Fig. 2). 이 지점에서 남동방향으로 50 m 크로스 굴진하여 NE 방향의 방해석맥을 착맥하였으며 그로부터 10 m 동측으로 크로스 굴진하여 NE 방향의 석영맥을 착맥하였으며 일부 부광대는 상향으로 연맥굴진되었다(Fig. 3B). 양1호갱의 석영맥의 평균 맥폭은 0.25 m 정도이고 연장성은 300 m 정도이며 평균품위는 35.8 g/t Au, 14.2 g/t Ag 이다(Fig. 3C, D). 양2호갱은 양1호갱에서 남서방향으로 330 m 떨어진 곳에서 양1호갱의 석영맥 하부를 탐광하기 위해 36 m 굴진한 갱도이다. 이 갱도는 N38° E 방향으로 13 m 굴진하여 석영맥을 착맥하였다. 양 2호갱에서의 석영맥의 평균 맥폭은 0.18 m 정도이고 연장성은 23 m 확인되었으며 평균품위는 36.2 g/t Au, 11.9 g/t Ag 이다. 음1호갱은 양1호갱에서 N60° E 방향으로 340 m 떨어진 지점에서 양1호갱에서 발견되는 석영맥의 하부 탐광을 목적으로 거의 S65° W 방향으로 8개 향도 총 160여 m가 개착된 갱도이다. 이 갱도는 갱 입구로부터 12 m 굴진하여 S25° E 방향으로 약 35 m 크로스 굴

진하여 3~5 m 간격으로 발달되어 있는 8개조의 평행한 석영맥을 착맥하였다. 이들 석영맥은 각각 6내지 41 m 거리로 연맥굴진되었으며 3개조의 석영맥을 제외한 다른 석영맥들은 대부분 빈약해지고 막장에선 열극만이 발달되어 있다. 음1호갱의 석영맥의 평균 맥폭은 0.15~0.60 m 정도이고 연장성은 300 m 정도이며 평균품위는 32.1 g/t Au, 12.1 g/t Ag 이다. 음2호갱은 음1호갱에서 N40° W 방향으로 약 140 m 떨어진 지점에서 S58° W 방향으로 4 m 간격을 둔 2개의 평행한 석영맥을 탐광하기 위해 갱도를 개설하여 30 m 정도 굴진하였다. 음2호갱의 평균 맥폭은 0.15 m이며 평균품위는 24.5 g/t Au, 8.0 g/t Ag 이다.

삼성 금은광상의 석영맥은 풍화가 많이 진행되어 황화광물을 관찰하기 어렵지만 일부 석영맥에서는 괴상 또는 자형의 황철석 및 황동석을 관찰할 수 있다(Fig. 3E, F). 모암변질로는 황철석화, 규화, 건운모화 및 녹니석화작용 등이 관찰된다(Fig. 3C, D). 이들 황화광물은 위치에 따라 산출빈도와 산출량이 다르게 산출된다.

| Mineral | Hypogene | | Supergene |
|----------------|----------|----------|-----------|
| | Stage I | Stage II | |
| Quartz | | | |
| Calcite | | | |
| Sericite | — | | |
| Chlorite | — | | |
| Rutile | — | | |
| Pyrite | — | — | |
| Pyrrhotite | — | | |
| Sphalerite | — | | |
| Chalcocopyrite | — | | |
| Galena | | — | |
| Electrum | | — | |
| Malachite | | | — |
| Goethite | | | — |

Fig. 4. Paragenetic sequence of ore, gangue and alteration minerals from the Samsung Au-Ag deposit.

방해석은 중립 내지 거정질의 방해석으로 관찰되며 일부 황철석이 수반된다. 광상의 야외조사와 광물의 산출 상태, 공생관계 및 조직을 기초로 한 광물의 정출순서

는 Hypogene과 Supergene시기로 구별되며 Hypogene 시기는 석영맥(광화I시기)과 석영+방해석맥(광화II시기)으로 구성된다(Fig. 4). Hypogene시기의 광화I시기에는 정동구조, 대상구조 및 각력상구조 등이 관찰된다. 이 시기에 산출되는 광물은 석영, 황철석 및 황동석 등이며, 소량의 금홍석, 자류철석, 섬아연석, 방연석 및 에렉트럼 등이 관찰된다. 광화II시기는 중립내지 거정의 방해석과 석영맥으로 구성되며 일부 자형의 황철석이 관찰된다. Supergene시기는 석영맥의 풍화에 의하여 형성된 침철석 및 공작석 등이 관찰된다.

광화I시기; 이 시기는 석영맥 시기로 황철석 및 황동석이 관찰되나 황철석이 산출빈도와 산출량이 많다.

황철석은 산출빈도와 산출량이 높은 광물로 석영내에 단독 산출되거나 황동석 또는 이차철산화물 또는 이차동산화물 등과 함께 자형 또는 괴상으로 산출된다(Fig. 3E, F). 현미경하에서 석영 내에 단독으로 산출되는 것(Fig. 5A), 자류철석과 함께 산출되는 것(Fig. 5B) 및 방연석 및 에렉트럼과 함께 산출되는 것 등이

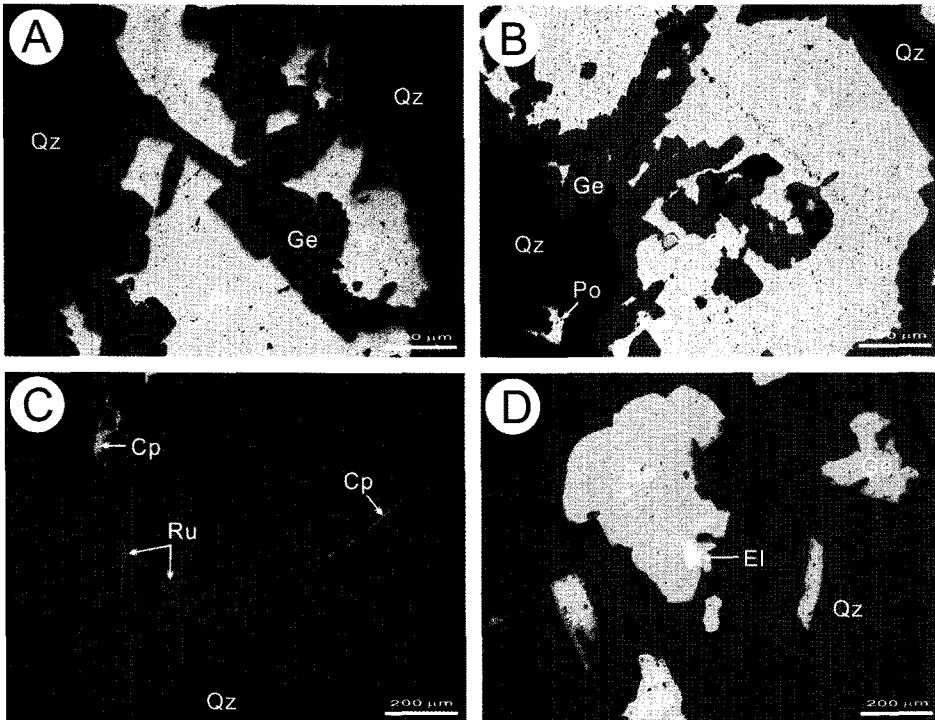


Fig. 5. Microphotographs of ore and gangue minerals from the Samsung Au-Ag deposit. (A) Pyrite of stage I partially replaced by goethite. (B) Pyrite coexisting with pyrrhotite of stage I and galena of stage I fills along microfractures of pyrite. (C) Chalcocopyrite and rutile of stage I occur as irregular shape in the oxides. (D) Electrum of stage I occur as irregular shape in the goethite. Abbreviations: Cp = chalcocopyrite, El = electrum, Ge = goethite, Gn = galena, Po = pyrrhotite, Py = pyrite, Qz = quartz, Ru = rutile.

있다(Fig. 5B, D). 황동석은 황철석 다음으로 산출빈도와 산출양이 많으며 황철석과 함께 자형 또는 괴상으로 산출된다(Fig. 3F). 현미경하에서 석영 내에 단독으로 산출되는 것, 침철석 및 이차동산화물과 함께 산출되는 것 등이 있다(Fig. 5C). 방연석은 육안으로 관찰되지 않고 현미경하에서 주로 황철석과 함께 산출된다(Fig. 5B). 에렉트럼은 현미경하에서 황철석 내에 산점상으로 산출된다(Fig. 5D).

광화II시기; 이 시기는 방해석, 석영 및 황철석만이 정출한 시기로 거정의 방해석이 맥상으로 산출되며, 황철석을 제외한 다른 황화광물은 관찰되지 않는다.

4. 유체포유물 연구

유체포유물 연구는 광화작용과 관련된 유체의 진화와 광물 침전시 온도 및 유체의 화학성분 등을 규명하는데 유용하게 이용된다. 삼성 금-은광상의 광화I시기에 산출되는 석영을 대상으로 연마박편을 제작하여 실험하였다. 유체포유물의 산출상태, 가열 및 냉각실험은 Nikon 현미경에 부착된 Linkam THMSG 600을 이용하여 측정하였다. 또한 좀더 정확한 측정을 위해 컴퓨터에 CCTV를 연결하여 이용하였다. 유체포유물 측정 이전에, Linkam THMSG 600은 U.S.G.S에서 제작한 표준시료(H_2O , H_2O+CO_2)를 이용하여 보정을 실시하였다. 측정오차는 냉각실험시 $\pm 0.1^\circ C$, 가열실험시 $\pm 0.5^\circ C$ 이다.

실온($25^\circ C$)에서 관찰되는 상의 종류, 성분 및 가열 실험시 균일화되는 상의 변화에 의거하여 삼성광상의 석영에서 산출되는 유체포유물은 액상포유물로 산출된다. 이 포유물들은 기상과 액상의 2상으로 구성되며 Bodnar(1983)가 제시한 방법에 의해 V_{H_2O} 의 몰체적을 계산하면 < 0.3 (오차범위: $\pm 5\%$)로써 모두 액상포유물이다. 이 포유물의 형태는 negative form, 인장형, 판상 및 불규칙형으로 산출되며, 크기는 $50 \mu m$ 이내이며 $10 \mu m$ 정도의 포유물들이 대부분을 차지한다(Fig. 6).

광화I시기의 석영에서 산출되는 액상포유물은 냉각시 V_{H_2O} 의 응축온도는 $-43.5 \sim -32.5^\circ C$ ($-36.9 \pm 2.4^\circ C$, $n=15$), 최초용융온도($T_{e,ice}$)는 $-24.7 \sim -22.1^\circ C$ ($-23.6 \pm 1.0^\circ C$, $n=7$)이다. 이 자료로부터 액상포유물 내 해리된 염은 Na^+ 이외에 K^+ 존재함을 지시한다. 액상포유물의 $T_{m,ice}$ 는 $-8.7 \sim -0.2^\circ C$ ($-4.8 \pm 1.8^\circ C$, $n=121$)이며 Bodnar and Vityk(1994)가 제시한 방정식을 이용하여 염농도로 환산하면 $0.4 \sim 12.4$ wt.% NaCl(7.4 ± 2.6 wt.% NaCl, $n=121$)이다(Fig. 7). 이 포유물은 가열시

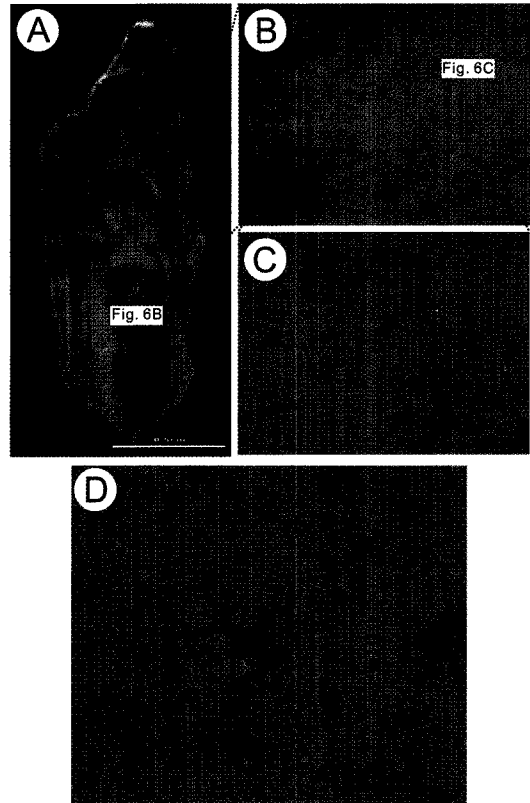


Fig. 6. Photomicrographs of representative fluid inclusion types in quartz from stage I vein of the Samsung Au-Ag deposit. (A), (B) and (C) Liquid-rich type inclusions in quartz. (D) Close-up liquid-rich type inclusions in quartz.

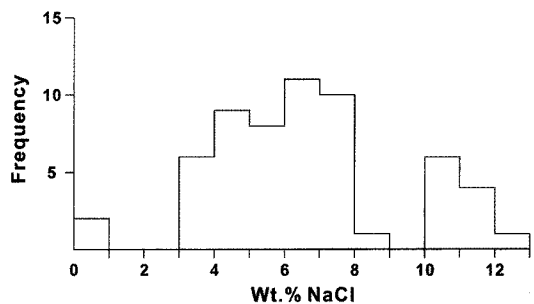


Fig. 7. Frequency diagram of salinities for fluid inclusions in quartz from the Samsung Au-Ag deposit.

모두 액상으로 균일화되며 균일화온도는 $145 \sim 309^\circ C$ ($279 \pm 36.6^\circ C$, $n=83$)이다(Fig. 8). 이들 광화I시기에서 산출되는 유체포유물의 염농도와 균일화온도의 관계를 도시하면 Fig. 9와 같다. 이 그림에서와 같이 균일화온도가 낮아짐에 따라 염농도도 함께 낮아짐을 알 수 있다.

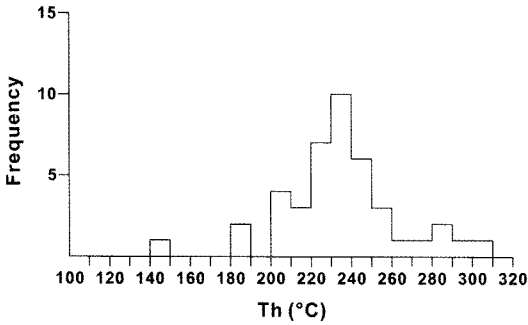


Fig. 8. Frequency diagram of homogenization temperatures for fluid inclusions in quartz from the Samsung Au-Ag deposit.

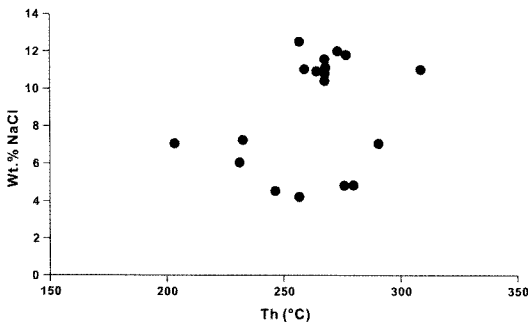


Fig. 9. Salinity versus homogenization temperature diagram for fluid inclusions in quartz from the Samsung Au-Ag deposit.

5. 안정동위원소 연구

안정동위원소 분석에 이용된 시료는 광화시기 및 광물공생관계를 고려하여 다음과 같이 선택하였다. 황안정동위원소 분석을 위한 시료는 갱내에서 채취한 광석광물의 산화에 의한 시료의 제한성 때문에 비교적 산출량이 많은 광화I시기의 황철석을 대상으로 하였다.

산소 및 수소안정동위원소 분석을 위한 시료는 광화I시기의 석영 및 광화II시기의 방해석을 대상으로 하였다.

안정동위원소 분석은 중국지질대학(무한)에서 실시하였다. 황동위원소분석은 황화광물과 CuO를 함께 1,000°C까지 올린 후 발생한 SO₂ 성분을 포집하여 분석하였다. 산소동위 원소분석은 F₂가스와 분석시료를 530°C에서 24시간 반응시킨 후 발생한 O₂를 CO₂화하여 포집 분석하였다. 수소동위원소분석은 LPG+O₂ 불꽃으로 방출한 H₂O를 Zn과 500°C에서 반응시켜 수소가스로 환원하여 분석하였다. 분석시 표준시료는 CDT(황) 및 SMOW(산소, 수소)를 사용하였으며 오차범위는 ±0.2‰(황, 산소) 및 ±2‰(수소)이다.

삼성 금-은광상의 광화I시기에 산출되는 황철석의 δ³⁴S값은 10.8~12.3‰이다(Table 1). 이 광상에서 산출되는 모암변질광물(견운모+녹니석)의 공생균은 광화유체의 pH가 약산성임을 지시해주고 있으며 본 광상에서 황산염광물의 부재는 광화작용이 환원환경하에서 진행되었음을 시사한다. 이러한 환경에서는 유체 내에 용존된 황이 H₂S상태로 가장 우세하게 존재한다. 즉 광화유체 내 H₂S의 δ³⁴S값은 전 황의 δ³⁴S값으로 간주될 수 있다. 그러므로 유체포유물 균일화온도로부터 구한 온도를 이용하여 광석광물과 평형상태에 있는 광화유체 내의 H₂S값은 Ohmoto and Rye(1979)가 제시한 평형식에 대입하여 구하였다. 이 광상의 광화I시기에 대한 광화유체 내 δ³⁴S_{H₂S}값은 9.3~10.8‰이다(Table 1).

이 광상의 광화I시기에 산출되는 석영의 δ¹⁸O값은 7.2‰과 7.8‰이다(Table 1). 광화I시기의 석영 침전시 평형상태에 있었던 물의 δ¹⁸O_{H₂O}(‰)값은 Matsushisa *et al.*(1979)의 분별식 1000 ln a_{Quartz-H₂O} = 3.34(10⁶/T²) - 3.31를 이용하여 계산하면 석영의 δ¹⁸O_{H₂O}값은 0.3‰과 0.9‰이다. 또한 삼성 금-은광상의 광화II시기에 산출되는 방해석의 δ¹⁸O값은 6.7‰이며 Friedman

Table 1. Sulfur, oxygen and hydrogen isotopic data of minerals from the Samsung gold-silver deposit.

| Stage | Sample No. | Mineral | δ ³⁴ S(‰) | δ ¹⁸ O(‰) | δ ³⁴ S _{H₂S} (‰) ¹⁾ | δ ¹⁸ O _{H₂O} (‰) ²⁾ | δD(‰) | Th(°C) ³⁾ |
|-------|------------|---------|----------------------|----------------------|---|---|-------|----------------------|
| I | SS(J)-1 | Pyrite | 12.0 | | 10.5 | | | 250 |
| I | SS(J)-2 | Pyrite | 10.8 | | 9.3 | | | 250 |
| I | SS-2 | Pyrite | 12.3 | | 10.8 | | | 250 |
| I | SS-2 | Quartz | | 7.8 | | 0.9 | -86 | 300 |
| I | SS-7 | Quartz | | 7.2 | | 0.3 | -82 | 300 |
| II | SS-6 | Calcite | | 6.7 | | -2.3 | -76 | 200 |

¹⁾δ³⁴S_{H₂S}(‰) is calculated from the equation by Ohmoto and Rye (1979).

²⁾δ¹⁸O_{H₂O}(‰) is calculated from the equation given by Matsushisa *et al.* (1979).

³⁾Th(°C) is homogenization temperature of fluid inclusion.

and O'Neil(1977)가 제시한 식을 이용하여 계산된 평형상태에 존재했던 물의 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 값은 -2.3%이다(Table 1). 이 광상의 광상생성시 물의 δD 값은 -86~-76%에 해당된다(Table 1).

6. 고찰

삼성 금-은광상과 일부 금-은 광상들은 NE 방향의 열극대를 따라 충진한 광상들로서 이 광상들을 포함한 일대에 분포하는 단층 및 소단층들은 대부분 NE-SE 방향성을 갖는다(Table 2). 특히 베이터 광상은 삼성광상과 불과 북동방향으로 3 km 떨어져 있으며 북동방향의 삼포단층과 평행하게 NE방향으로 수조의 석영맥들로 산출된다. Lee *et al.* (1995; 1996), Kim (1997) 및 Yun *et al.* (2001) 등이 보고한 이들 광상의 모암변질 산물인 견운모에 대한 연대측정 결과 46~49 Ma로서 이들 광상의 광화작용은 신생대 제3기에 생성된 것이다. 따라서 삼성광상의 광화작용은 신생대 제3기로 생각되며 또한 NE방향의 구조대는 최소 신생대 제3기 이전에 형성된 것으로 생각된다. Koh *et al.* (2003)은 경상누층군내 모든 단층들은 3가지 유형으로 분류하였다. 이들에 의하면 경상누층군내 NNW-SSE 인장 단층들은 100~80 Ma 동안에 NNW-SSE 방향의 압축응력에 의해 형성되었으며 NW-SE 및 WNW-ESE 인장 단층들은 80~60 Ma 동안에 NW-SE 및 WNW-ESE 방향의 압축응력에 의해 형성된 인장 단층들이라고 보고하였다. 또한 NE-SW 인장 단층들은 60~40 Ma 동안에 NE-SW 압축응력에 의해 형성된 단층들이라고 보고하였다. 또한 Kim (1997)은 이들 광상 주변의 화성암체에 대한 K-Ar 년대측정 결과에 의하면 석영반암(44~45 Ma) 또는 유문암질 화산암류(45~49 Ma)로서 이들 광상의 광화작용과 이들 암체의 관입 또는 분출시기가 잘 일치한다고 보고하였다. 따라서 이들 광상은 석영반암 및 유문암질 화산암류와 관련된 광화작용에 의해 형성된 것으로 추정하였다(Kim, 1997). 그러므로 삼성 금-은 광상의 석영맥 및 주변 석영맥들은 신생대 초기의 NS-NE 방향의 압축응력에 의해 형성된 인장 또는 우수향단층내에 신생대 제3기의 화성활동에 의해 만들어진 열수용액의 유입에 의해 형성된 것이다.

삼성 금-은광상의 광화시기에 황철석, 섭아연석 및 에렉트럼 등이 산출되거나 광화작용에 의한 직접적인 열역학적 자료로 활용할 수 있는 광물공생관계를 관찰하지 못해 광물공생관계를 균으로부터 추정할 수 있는 생성은

도나 황분압 등은 추정하지 못하였다. 그러나 광상의 유체포유물에서 측정된 균일화온도는 145~309°C이며, 염농도는 0.4~12.4 wt.% NaCl이다. 균일화온도와 염농도의 관계를 도시하여 보면, 균일화온도가 낮아짐에 따라 염농도의 값도 감소 되어진다. 이는 열수용액이 단층대를 따라 상승함에 따라 열수용액의 냉각과 온도와 염농도가 낮은 순환천수의 혼합에 의한 희석작용이 있었음을 지시한다. 광석광물들의 용해도는 온도, pH, f_{O_2} , aH_2S 및 aCl^- 등에 크게 좌우된다(Barrett and Anderson, 1988; Gammons and Williams-Jones, 1995). 따라서 삼성광상은 초기 열수용액(310°C, 12.4 wt.%) 으로부터 냉각과 희석작용에 의해 온도 및 aCl^- 의 감소에 의해 초기 황화광물들이 침전되었으며, 말기의 에렉트럼 및 황화광물들은 지속적인 온도 및 aCl^- 의 감소 및 황화광물의 침전으로 인한 aH_2S 및 황분압의 감소에 의하여 침전되었다고 생각된다. 유체포유물의 자료 중 최고 균일화온도를 갖는 포유물 자료(309°C, 11.1 wt.% NaCl, 0.75g/cm³)로부터 구한 최소 압력은 약 90 bar이며, 심도는 1,100 m 정도이다.

이 광상에서 산출되는 광석광물의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 10.8~12.3%이며 광화유체 내 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 값은 9.3~10.8%로서 황의 기원은 화성기원보다 다소 높은 값을 갖는데 이는 화성기원과 모암 내의 황에서 유래된 것으로 해석된다(Table 1). 또한 이 광상을 형성한 광화유체 중 물의 기원을 알아보기 위해서 분석된 석영과 방해석의 산소 및 수소 안정동위원소 값은 각각 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$; -2.3~0.9%(석영: 0.3~0.9%, 방해석: -2.3%), δD ; -86~-76%(석영: -86~-82%, 방해석: -76%). 이들 동위원소 값은 여러 현상(불혼합, 비등, 산화-환원, pH, 천수의 혼합, 모암과 반응정도) 등에 의해 변화될 수 있다. 그러므로 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 값, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 값 및 δD 값의 자료를 종합하여 볼때 광화유체는 천수 기원의 유체가 주종을 이룬 것으로 보이며 말기로 감에 따라 다른 천수의 혼합이 크게 작용한 것으로 보인다.

이상을 종합하면 삼성 금-은광상은 천수 기원의 열수용액으로부터 광화작용이 진행됨에 따라 광화유체는 단층대를 따라 모암과의 반응에 의해 냉각 및 기원이 다른 순환천수의 유입에 의한 혼합에 의한 희석작용이 있었음을 지시해 준다. 따라서 삼성 금-은광상은 석영맥의 구조, 산출광물, 유체포유물의 산상, 균일화온도 및 염농도 자료, 광화유체의 기원 및 진화 등을 고려할 때 천열수광상에 해당된다.

이 광상에서 북동방향에는 NE방향의 단층대를 따라 베이터 광상, 유천광상 및 영덕광상이 위치한다. 유천

Table 2. Characteristics of the Samsung and several Au-Ag deposits in the Youngcheon area.

| Deposits | Samsung | Beiter | Yücheon | Yeongdeog |
|---|---|---|---|--|
| Age | No data | Paleogene (48 Ma) | Paleogene (49 Ma) | Paleogene (46 Ma) |
| Vein direction | N60°E/75-86°SE/NW | N40°E/70-80°NW | N30-40°E/70-80°SE | N30-40°E/60-70°SE |
| Pressure of formation (bar) | | | 240-260 | 330 |
| Petrology of host units | Shale, sandstone | Shale, sandstone, andesite | Shale, sandstone | Shale, sandstone |
| Hydrothermal alteration | Silicification, sericitization, chloritization, pyritization, carbonitization | Silicification, sericitization, chloritization, pyritization | Sericitization, chloritization, silicification, serpentinization, epidotization, albitization, pyritization | Silicification, sericitization, chloritization, pyritization |
| Mineralized vein type | Fissure-filling quartz veins | Fissure-filling quartz veins | Fissure-filling quartz veins | Fissure-filling quartz veins |
| Vein mineralogy | | | | |
| Silicate, carbonate minerals | Qz-Cc | Qz-Cc | Qz-Fe-FI, | Qz-Cc |
| Ore minerals | Ru-Po-Py-Sp-Cp-Gn-El | Asp (30.6-33.0 atomic % As)-Py-Sp (9.6-15.7 mole % FeS)-Cp-Gn | Ha-Ru-Wo-Po-Asp (32.4-32.8 atomic % As)-Py-Sp (6.1-7.7 mole % FeS)-Cp-Gn-Bi-Bin-El (92.4-96.9 atomic % Au)-Im | Ha-Ru-Po-Asp (28.0-31.0 atomic % As)-Py-Sp(1.1-18.4 mole % FeS)-Cp-Gn-El(29.6-53.6 atomic % Au)-Tetra-Pyr-Um |
| Fluid inclusion | | | | |
| Fluid system | H ₂ O-NaCl | H ₂ O-NaCl | H ₂ O-NaCl | H ₂ O-NaCl |
| Type | Type Ia | Type Ia | Type Ia>Type Ib>Type Ic | Type Ia>Type Id |
| T _{h,calc} (°C) | 145-309 (Qz) | 145-309 (Qz) | 150-431 (Qz, Fl) | 225-343 (Qz, Sp) |
| Wt.% NaCl eqv. | 0.4-12.4 | 0.4-12.4 | 0.2-19.2. | 4.3-12.9 |
| Stable isotope data (‰) | | | | |
| Sulfur (calculated δ ³⁴ S _{H2S}) | 10.8-12.3 (9.3-10.8) | 3.8-4.7 (2.6-4.4) | 2.9-3.8 (2.5-3.9) | 4.7-6.7 (4.5-7.0) |
| Oxygen (calculated δ ¹⁸ O _{H2O}) | Qz: 7.2-7.8 (0.3-0.9), Cc: 6.7 (-2.3) | | Qz: -4.5 to 7.1 (-13.9 to 4.1), Se: 1.0-1.4 (-0.8 to -0.5) | Qz: 13.3-16.1 (5.7-10.8), Se: 11.5 (9.3) |
| Hydrogen (calculated δD _{H2O}) | Qz: -86 to -82, Cc: -76 | Se: -68 (-20) | Se: -81 to -64 (-47 to -30) Cc: -9.9 to -6.6 | Se: -66 (-28) |
| Carbon (calculated δ ¹³ C _{H2CO3}) | | | | |
| Physical-chemical condition | | | | |
| Sulfur fugacity (atm) | | | | |
| Equilibrium temperature (°C) | | | | |
| Isotopic thermometer (°C) | | | | |
| Source of ore-forming fluids | Meteoric water | | | |
| Ore deposition mechanism | Mixing | | | |
| Associated granitoids | Quartz porphyry (44-45 Ma)(?) | Quartz porphyry (44-45 Ma) | Quartz porphyry (44-45 Ma) | Rhyolitic tuff (45-49 Ma) |
| Reference | This study | Kim (1997) | Lee <i>et al.</i> (1996), Kim (1997), Yun <i>et al.</i> (2001) | Lee <i>et al.</i> (1995), Kim (1997) |

Type Ia: L_{H2O}-rich-V_{H2O} inclusion, Type Ib: L_{H2O}-V_{H2O}-rich inclusion, Type Ic: L_{H2O}-rich-V_{H2O}-solid inclusion, Type Id: L_{H2O}(or V_{H2O}) inclusion, Asp: arsenopyrite, Bin: bismuthinite, Bi: Bi-Cu-Pb-S minerals, Cc: calcite, Cp: chalcopyrite, El: electrum, Fl: fluorite, Gn: galena, Ha: hematite, Po: pyrrothite, Py: pyrite, Pyr: argyrite, Qz: quartz, Ru: rutile, Se: sericite, Sp: sphalerite, Tetra: argenian tetrahedrite-freibergite, Im: tetradymite, Um: unidentified mineral, Wo: wolframite.

및 영덕광상의 주광화시기 광화유체의 균일화온도는 150~431°C(유천), 225~343°C(영덕)이고 염농도는 0.2~19.2 wt.% NaCl(유천), 4.3~12.9 wt.% NaCl(영덕)를 갖는다(Lee *et al.*, 1995; 1996; Yun *et al.*, 2001). 또한 이들 광상의 안정동위원소 값($\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$: 2.6~4.4‰(베이터), 2.5~3.9‰(유천), 4.5~7.0‰(영덕), $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$: -13.9 ~4.1‰(유천), -5.7~10.8‰(영덕), δD : -20‰(베이터), -47~-30‰(유천), -28‰(영덕)을 갖는다(Lee *et al.*, 1995; 1996; Kim, 1997; Yun *et al.*, 2001). 삼성광상과 베이터광상의 석영맥은 모암변질광물과 산출광물은 유사하나 삼성광상의 황동위원소 값은 베이터광상의 값보다 다소 높다. 또한 삼성광상의 균일화온도와 염농도는 유천광상 및 영덕광상에 비해 다소 유사하거나 낮은 값을 갖는다. 또한 황동위원소 값은 삼성광상에서 높고 산소 및 수소 동위원소는 베이터광상, 유천광상 및 영덕광상에 비해 다소 낮은 값을 갖는다. 따라서 이들 광상들은 생성연대가 46~49 Ma로서 신생대 제3기의 화성활동에 의해 만들어진 열수용액에 의해 형성되었으며 이들 광상의 광화작용은 제3기의 관입암체와의 거리에 따른 서로 다른 광화환경에 의해 형성된 것으로 생각된다.

7. 결 언

1. 삼성 금-은광상은 반야월층(대구층)내에 발달된 NE 방향의 열극대를 따라 충진한 맥상 열수성 석영맥상 광상이다.

2. 삼성 금-은광상의 광물 정출순서는 석영맥(광화I시기)과 석영+방해석맥(광화II시기)으로 구성된다. 광화I시기는 황철석화작용, 규화작용, 견운모화작용, 녹니석화작용등과 같은 모암변질작용이 우세하였고 석영, 금홍석, 자류철석, 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석 및 에렉트럼 등이 정출하였다. 광화II시기는 석영, 방해석 및 황철석의 단순한 광물조합만이 정출하였다.

3. 광화I시기의 석영내 유체포유물의 균일화온도와 염농도는 각각 145~309°C, 0.4~12.4 wt.% NaCl로써 균일화온도가 낮아짐에 따라 염농도의 값도 함께 감소된다. 이는 열수용액이 단층대를 따라 상승함에 따라 모암과의 반응에 의한 냉각과 계속적인 기원이 다른 순환 천수의 혼합에 의한 희석작용이 있었음을 지시하며 이런 현상에 의한 광화유체의 물리-화학적 변화에 의해 황화광물 및 에렉트럼이 침전되었다.

4. 황화광물의 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 값은 9.3~10.8‰ 이며 석영과 방해석의 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$; -2.3~0.9‰(석영: 0.3‰과 0.9‰, 방

해석: -2.3‰), δD ; -86~-76‰(석영: -86‰과 -82‰, 방해석: -76‰)로써 열수유체는 천수 기원의 유체가 주종을 이룬 것으로 보이며 광화작용이 진행됨에 따라 기원이 다른 순환 천수의 혼합이 작용한 것으로 보인다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원(GP2010-021)의 지원에 의해 연구되었다. 이 기관에 사의를 표한다. 이 논문의 미비점을 지적, 수정하여 주신 익명의 심사위원님과 염승준 책임편집위원님께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- Barret, T.J. and Anderson, G.M. (1988) The solubility of sphalerite and galena in 1-5 m NaCl solutions to 300°C. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, v.52, p.813-820.
- Bodnar, R.J. (1983) A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P-V-T-X properties of inclusion fluids. *Econ. Geol.*, v.78, p.535-542.
- Bodnar, R.J. and Vityk, M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusion. In De Vivo, B. and Frezzotti, M.L. (eds.) *Fluid inclusions in minerals: Method and applications*, Short Course International Mineralogical Assoc., p.117-130.
- Choi, H.L. (1986) Sedimentation and evolution of the Cretaceous Gyeongsang basin, Southeastern Korea. *Jour. Geol. Soc.*, v.143, p.29-40.
- Choi, S.G., Pak, S.J., Kim, C.S., Ryu, I.C. and Wee, S.M. (2006) The origin and evolution of mineralizing fluids in the Cretaceous Gyeongsang basin, Southeastern Korea. *Jour. Geochem. Explo.*, v.89, p.61-64.
- Friedman, I. and O'Neil, J. R. (1977) Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest. In Fleisher, M., (ed.) *Data of geochemistry*, Sixth Edition, U. S. Geol. Survey Prof. Paper 440-KK, p. KK1-KK12.
- Gammons, C.H. and Williams-Jones, A.E. (1995) The solubility of Au-Ag alloy + AgCl in HCl/NaCl solutions at 300°C: New data on the stability of Au(I) chloride complexes in hydrothermal fluids. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, v.59, p.3453-3468.
- Kim, S.J. (1997) Geochronology and geochemistry of the igneous activity and polymetallic mineralization in the northern Gyeongsang basin, Korea. Unpub. Ph.D. thesis. Chungnam National Univ., 276p.
- Koh, S.M., Ryoo, C.R. and Song, M.S. (2003) Mineralization characteristics and structural controls of hydrothermal deposits in the Gyeongsang basin, South Korea. *Resour. Geol.*, v.53, p.175-192.
- Korea Mining Promotion Corporation (1987) *Deposits of the Korea*. p.815-817.
- Lee, H.K., Yoo, B.C. and Kim, S.J. (1995) Au-Ag minerals and genetic environments from the Yeongdeog gold-silver deposits, Korea. *Econ. Environ. Geol.*, v.28,

- p.541-551.
- Lee, H.K., Yoo, B.C. and Kim, S.J. (1996) Ore minerals, fluid inclusions and stable isotopes of the Yucheon bismuth deposits, Korea. *Econ. Environ. Geol.*, v.29, p.139-150.
- 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.
- Oh, I.S. and Jeong, G.S. (1975) Explanatory text of the geological map of Gigae sheet. *Geol. Min. Insti. Korea*, 26p.
- Ohmoto, H. and Rye, R.O. (1979) Isotopes of sulfur and carbon. In Barnes, H. L., (ed.) *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York, John Wiley and Sons, p.509-567.
- Richards, J. and Kerrich, R. (2007) Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Econ. Geol.*, v.102, p.537-576.
- Yoo, B.C., Yin, J.W., Lee, G.J. and Lee, H.K. (2010) Fluid inclusion characteristics of hematite-bearing quartz vein from the Daenam mine, Republic of Korea. *Jour. Asian Earth Sci.*, v.37, p.117-129.
- Yun, S.T., So, C.S., Choi, S.H. and Heo, C.H. (2001) Hydrothermal bismuth mineralization of the Yucheon mine, South Korea: Oxygen and hydrogen isotope study. *Geosci. Jour.*, v.5, p.243-250.

2010년 9월 19일 원고접수, 2010년 10월 20일 게재승인