

봉상 금-은광상의 광석광물, 유체포유물 및 안정동위원소 연구

유봉철 · 이종길 · 이길재 · 이현구*

충남대학교 지구환경과학과

Ore Minerals, Fluid Inclusion and Stable Isotope Studies of the Bongsang Gold-silver Deposit, Republic of Korea

Bong Chul Yoo, Jong Kil Lee, Gil Jae Lee and Hyun Koo Lee*

Department of geology and environmental sciences, Chungnam National University

The Bongsang gold-silver deposit consists of quartz veins that fill along the fault zone within Cretaceous andesitic lapilli tuff. Mineralization is occurred within fault-breccia zones and can be divided into two stages. Stage I which can be subdivided into early and late depositional stages is main ore mineralization and stage II is barren. Stage I began with deposition of wall-rock alteration minerals and base-metal sulfides, and was deposited by later native silver, Ag-bearing tetrahedrite, polybasite and base-metal sulfides such like pyrite, sphalerite, chalcopyrite and galena. Fluid inclusion data indicate that homogenization temperatures and salinities of stage I range from 137 to 336°C and from 0.0 to 10.6 wt.% NaCl, respectively. It suggests that ore forming fluids were cooled and diluted with the mixing of meteoric water. Also, temperature and sulfur fugacity deduced mineral assemblages of late stage I are <210°C and <10^{-15.4} atm, respectively. Sulfur(3.4‰) isotope composition indicates that ore sulfur was mainly derived from a magmatic source as well as the host rocks. The calculated oxygen{2.9‰, 10.3‰(quartz: 7.9‰, 8.9‰, calcite: 2.9‰, 10.3‰)}, hydrogen(-75‰) and carbon(-7.0‰, -5.9‰) isotope compositions indicate that hydrothermal fluids may be meteoric origin with some degree of mixing of another meteoric water for paragenetic time.

Key words : Bongsang gold-silver deposit, Mineralization, Fluid inclusion, Isotope

봉상 금-은광상은 빼악기 안산암질 래필리옹회암 내에 빌달된 단층대를 충진한 석영맥광상이다. 이 광상의 광화작용은 단층-각력대에 수반되며 2시기로 구분된다. I시기는 다시 조기와 말기로 구분되며 주된 광화시기이다. II시기는 광화작용이 관찰되지 않는다. I시기 조기는 모암변질과 천금속 황화광물이 관찰된다. I시기 말기는 금-은광물 정출시기로 자연은, 핵은사면동석 및 화안동은석과 함께 황철석, 쇠아연석, 황동석 및 방연석 등의 황화광물이 관찰된다. 유체포유물 자료에 의하면, 광화I시기의 균일화온도와 염농도는 각각 137~336°C, 0.0~10.6 wt.% NaCl로서 광화유체가 천수의 혼입에 의한 냉각과 희석이 있었음을 지시한다. 또한, 광화시기 말기에 관찰되는 광물공생군으로부터 구한 생성온도와 황분입은 <210°C과 <10^{-15.4} atm를 갖는다. 황(3.4‰) 기원은 화성기원과 모암내의 황에서 유래된 것으로 해석된다. 산소{2.9‰과 10.3‰(석영: 7.9‰과 8.9‰, 방해석: 2.9‰과 10.3‰)}, 수소(-75‰) 및 탄소(-7.0‰과 -5.9‰)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 : 봉상 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 경제규

*Corresponding author: phklee@cnu.ac.kr

도가 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 사실이다. 국내 자원확보는 가격경쟁에서 우위를 차지할 수 있는 정책임은 물론 국가성장동력으로써의 중요성을 아무리 강조하더라도 지나치지 않는다. 현재 국내에서는 몇몇 가행광산(연천 철광산, 순신 금-은광산, 금실 금-은광산, 제일 금-은광산, 금성 몰리브덴광산, 신예미 철광산 등)이 있을 뿐 대부분 원료 자원을 해외에서 수입에 의존하고 있어 생산한 제품 경쟁력이 다른 선진국에 비해 매우 저조한 실정이다. 따라서, 적극적인 해외자원 개발 수입정책이 요구됨은 물론이고, 국내부존자원에 대한 탐사연구가 어느때보다도 절실히 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 있으며 일부 학자들은 아다카이트 및 이와 관련된 지체구조적 사건과 관련해서 연구하고 있다(Richards and Kerrich, 2007).

봉상 금-은광상은 경상남도 통영시 도산면 관덕리에

위치하며(Fig. 1) 백악기 안산암질 래필리옹회암 내에 발달된 열곡을 충진한 열수맥상광상이다. 이 광상일대에는 동 및 금-은광상들이 분포하고 있으며 이들 광상에 대한 연구는 여러 학자들(KMPC, 1975; 1977; Chang *et al.*, 1983; KMPC, 1987; Park *et al.*, 1983; Kim and Park, 1984; Lee, 1992; Choi *et al.*, 1993; Lee *et al.*, 2003)에 의해 보고되어 있으나 봉상 금-은 광상에 대한 자세한 광상 성인적 연구는 아직 보고되어 있지 않다.

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

2. 주변지질

봉상 금-은광상일대의 주변지질은 기존연구(Chang *et al.*, 1983; Jwa, 1998)에서 자세히 보고되어 있어 여기에서는 간략하게 그 개요만을 설명하고자 한다. 이 광상 일대의 주변지질은 백악기의 안산암질 래필리옹회암, 안산암류 및 후기에 이를 관입한 화강섬록암류 및 암맥류로 구성된다(Fig. 1).

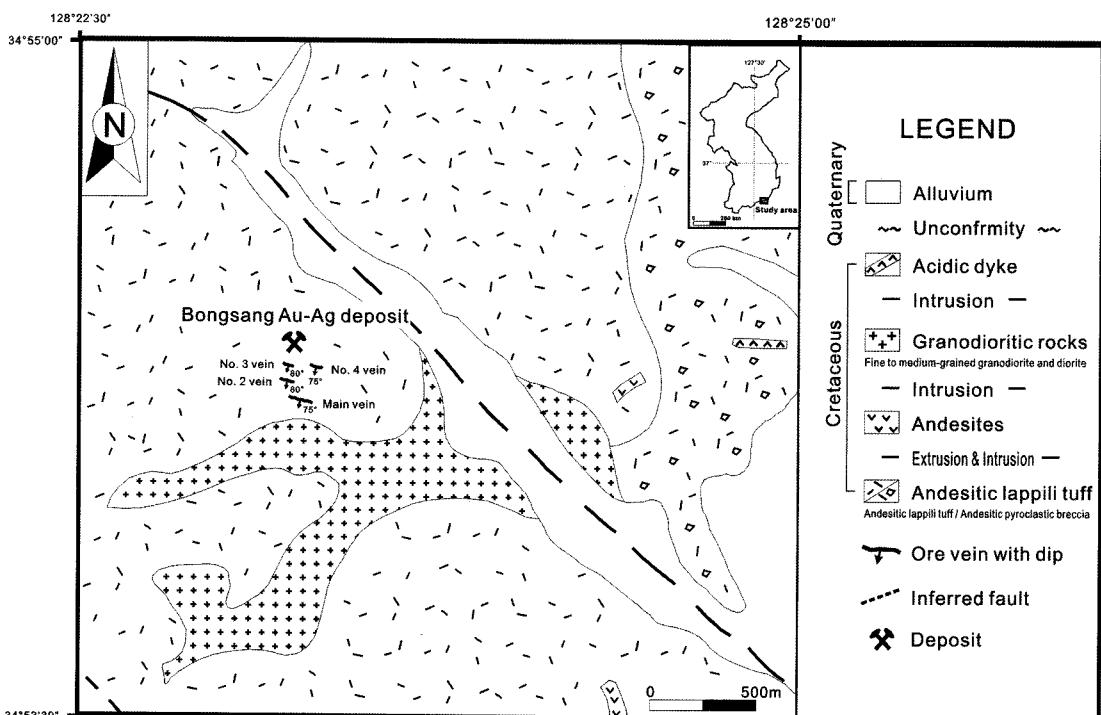


Fig. 1. Generalized geological map of the Bongsang Au-Ag deposit, showing the orientation of the principal quartz veins(modified from Chang *et al.*, 1983).

안산암질 래필리옹회암은 광상 일대에 넓게 분포하며 이 지역 화산암류들 중 최초로 분출된 암석으로, 안산암류와 화강섬록암류에 의해 관입 당하고 있다. 이 암석은 안산암질 쇄설성 각력암으로 구성되며 암회색 내지 녹회색을 띠며 기질에 반상 안산암, 비현정질 안산암, 응회암 등의 채광리들이 다량 함유되어 있다. 특징적으로 사장석 등의 광물편들이 나타난다(Jwa, 1998).

안산암류는 광상의 남측일대에서 소규모 맥상으로 관입 분포한다. 이 암류는 맥상 및 암주상으로 래필리 응회암을 관입하거나 일부 래필리 응회암이 분출되는 동안 용암류로서 분출하여 고성층의 최상부 및 래필리 응회암 중에 협재된다. 맥상으로 관입하고 있는 안산암류는 주로 치밀한 조직을 갖고 괴상으로 산출되지만, 암주상으로 관입한 안산암류는 때때로 반상조직을 갖는 것이 특징이다. 이 암류는 주로 암록색을 띠고 반정이

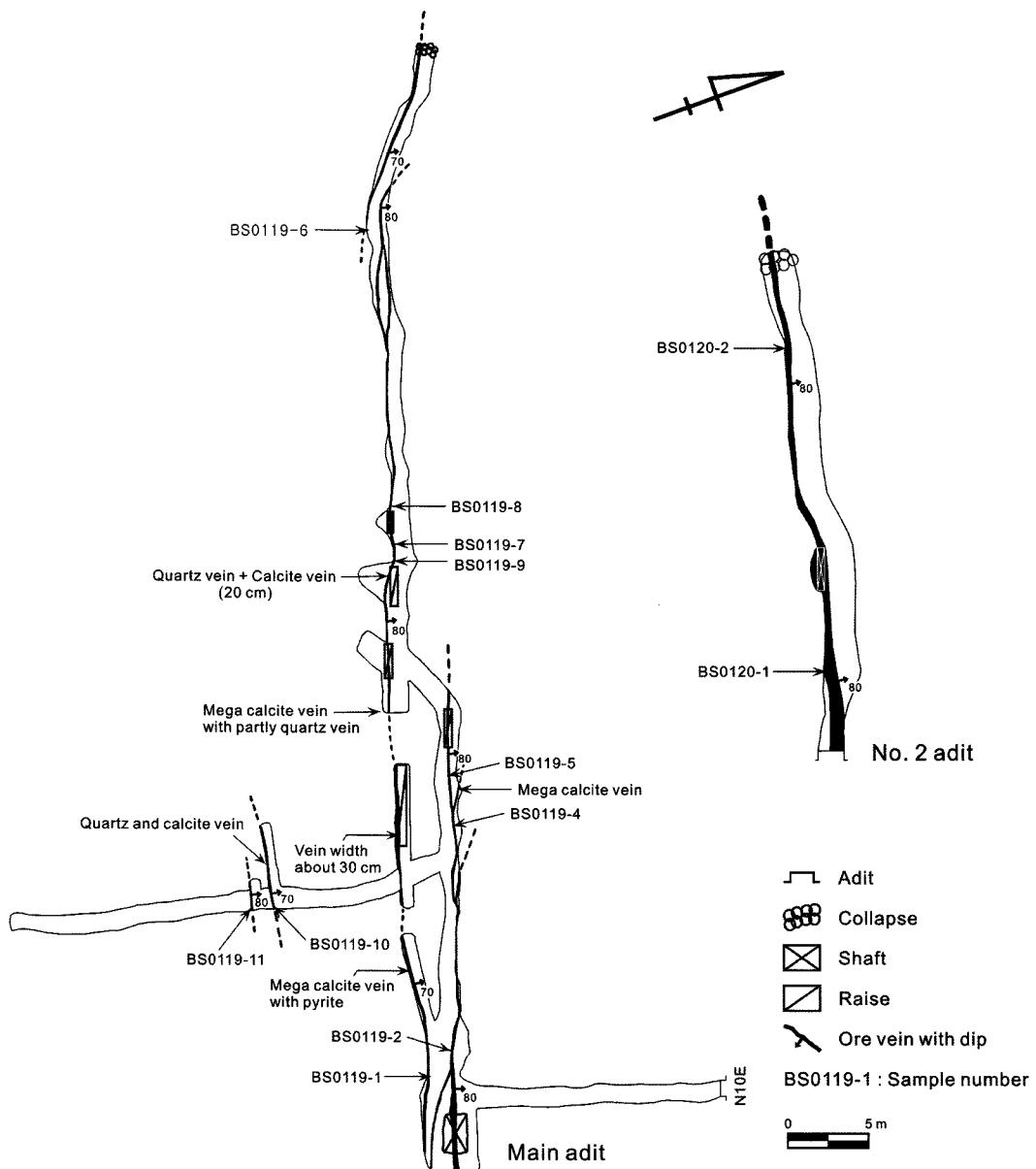


Fig. 2. Plan section of the Bongsang Au-Ag deposit, showing the orientation and location of the principal quartz veins and sampling locations.

관찰되는 경우와 그렇지 않는 경우가 있다. 이 안산암류의 반정은 주로 사장석 및 단사휘석으로 구성된다 (Jwa, 1998). 화강섬록암류는 이 광상의 남측 일대에 분포하며 세립 내지 중립질의 화강섬록암 또는 섬록암의 다양한 암상을 갖는다. 이 암류의 화강섬록암질 암상은 담회색 내지 회백색을 띠며 섬록암질 암상은 대부분 세립질로써 암회색 내지 암녹색을 띤다. 암맥류는 산성암맥으로 구성되며 광상일대의 여러지역에서 다양한 방향성 및 폭을 갖고 산출된다.

3. 광 상

3.1. 광상개요

봉상 금-은광상은 안산암질 래필리옹회암 내에 발달된 NW 방향의 단층대를 따라 충진한 열수성 맥상 석

영맥광상이다. 이 광상은 일제시대에 개발되었으나 1944년 산금령 실시로 휴광되었다. 그 후 희성산업(주)에 의해 인수되어 소규모로 개발하였으나 현재는 휴광 중에 있는 광상이다. 이 광상은 4개조의 평행한 석영 맥 및 방해석맥으로 구성되어 있으며, 남쪽에서 북쪽으로 김에 따라 동서방향으로 본맥, 2호맥, 3호맥 및 4호맥이 빌달하고 있다(Fig. 1).

본맥은 4개조의 맥 중 가장 탐광이 많이 된 맥으로 석영맥과 방해석맥으로 구성된다. 본맥의 주향과 경사는 N54~85°W-N84°E, 70~80°SW/SE(~수직)이며 맥 폭은 0.1~0.5 m정도이나 팽축이 심한 편이다(Fig. 2). 본맥의 연장성은 약 100 m정도이다. 방해석맥은 본갱 입구에서 약 20 m지점과 약 60 m지점에서 N54~80°W-N84°E의 방향으로 산출되며 맥폭은 0.2 m정도이며 자형의 횡철석만 관찰된다. 본맥은 본갱을 개설, N10~15°E

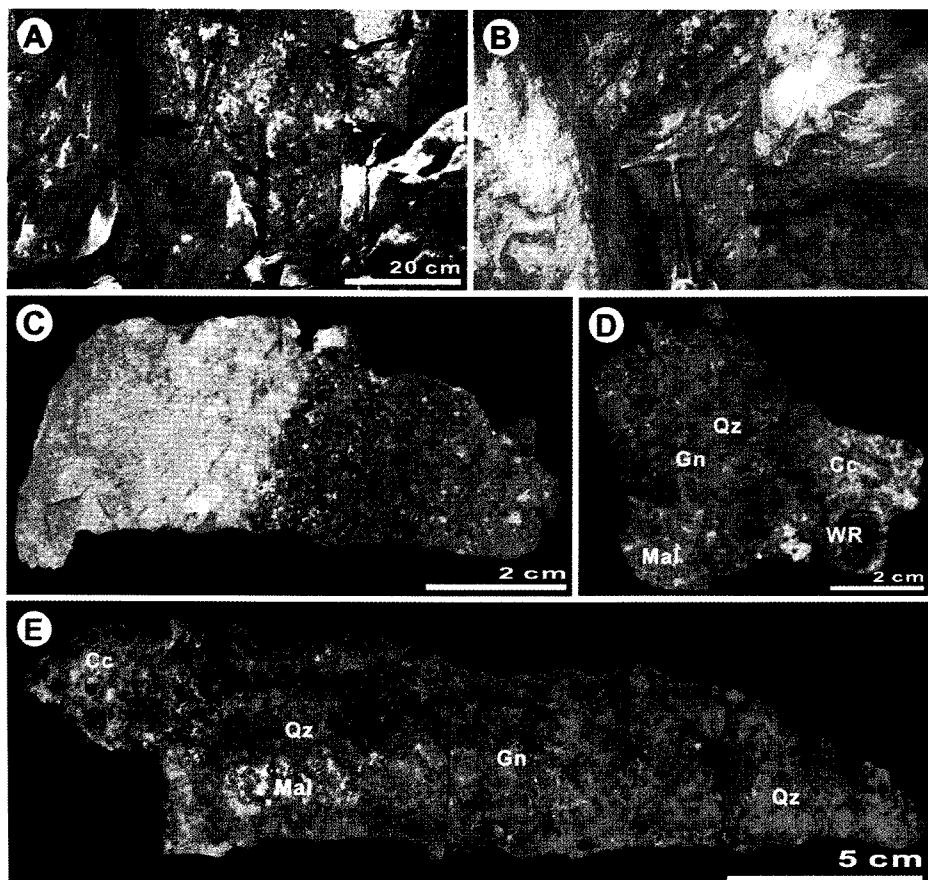


Fig. 3. Photographs of quartz veins samples from the Bongsang Au-Ag deposit. (A) Close-up of white and transparent quartz vein from the Main vein. (B) Close-up of white and transparent quartz vein from the No. 2 vein. (C) Host rock (andesitic rapilli tuff) and its alteration (sericitization) from the Main vein. (D) and (E) White and transparent quartz vein and ore minerals of stage I. Abbreviations: Ce=calcite, Gn=galena, Mal=malachite, Qz=quartz, WR=wallrock.

방향으로 약 24 m 크로스굴진하여 N80°W의 석영맥을 쟁취한 후 좌측은 수갱을 개설하여 채굴하였으며, 동측은 수평갱 및 사갱등을 개설하여 약 150 m 연맥 또는 크로스굴진 하였다. 본갱의 주 채굴적은 24 m, 40 m, 48 m, 64 m, 76 m 및 84 m 지점으로 하향 또는 상향 채굴하였다(Fig. 2). 본맥의 품위는 2.8~4.6 g/t Au, 45~95 g/t Ag 이다(KMPC, 1975; 1977; 1987).

2호맥은 N78°W/80°SW의 주향과 경사를 갖으며 맥폭은 0.1~0.6 m정도이다(Fig. 2). 이 맥의 연장성은 최소 25 m정도이다. 서갱과 동갱이 개설되었으나, 동갱은 봉락되어 입향이 불가능하고 서갱만 입향이 가능하다. 서갱은 입구로부터 10m지점에 수갱을 개설하여 채굴하였으며 25m지점에서는 갱구가 봉락되었다(Fig. 2). 모암인 안산암질 래필리 응회암에서 장석반정이 많이 관찰되며 부분적으로 견운모화작용을 받았다. 이 맥의 품위는 5.5 g/t Au, 7.5 g/t Ag이다(KMPC, 1975; 1977; 1987).

3호맥은 N85°W/80°SW의 주향과 경사를 갖고, 맥폭은 0.3 m정도이며 서쪽으로 26 m 탐광굴진 되었다. 이 맥의 품위는 0.0~6.2 g/t Au, 75~105 g/t Ag이다(KMPC, 1975, 1977, 1987).

4호맥은 과거 수갱으로 개발하였으며, 현재는 봉락되어 입향이 불가능하다.

3.2. 광석과 광석광물

봉상 금-은광상의 석영맥은 침수에 의한 풍화로 황화광물이 관찰되지 않지만 일부 석영맥에서는 괴상 또는 자형의 황철석, 황동석 및 방연석을 관찰할 수 있다(Fig. 3). 모암변질로는 황철석화, 규화, 견운모화 및 점토화작용 등이 관찰된다(Fig. 3). 이들 황화광물은 위치에 따라 산출빈도와 산출량이 다르게 산출된다. 방해석은 중립 내지 거정질의 방해석으로 관찰되며 일부 황화광물이 수반된다. 광상의 야외조사와 광물의 산출상태, 공생관계 및 조직을 기초로 한 광물의 정출순서는 hypogene과 supergene시기로 구별되며 hypogene 시기는 석영+방해석맥(광화I시기)과 방해석맥(광화II시기)으로 구성된다(Fig. 4). hypogene시기의 광화I시기는 정동구조, 대상구조 및 각력상구조 등이 관찰된다. 이 시기에 산출되는 광물은 석영, 방해석, 황철석 및 방연석 등이며, 소량의 섬아연석, 황동석, 함은사면동석, 휘안동은석 및 자연은 등이 관찰된다. 광화II시기는 중립내지 거정의 방해석으로 구성되며 일부 자형의 황철석이 관찰된다. supergene시기는 석영맥의 침수에 의한 풍화에 의하여 형성된 침철석, 공작석, Cu-Fe 산화물 및 Pb 산화물 등이 관찰된다. 이를 산출광물의 정

Mineral	Hypogene		Supergene
	Stage I	Stage II	
Quartz	—	—	
Calcite	—	—	
Sericite	—	—	
Chlorite	—	—	
Pyrite	—	---	
Sphalerite	—	—	
Chalcopyrite	—	—	
Galena	—	—	
Ag-tetrahedrite	—	—	
Polybasite	—	—	
Native silver	—	—	
Malachite	—	—	—
Goethite	—	—	—

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

성 및 정량분석은 충남대학교 공동실험실습관에 설치된 JEOL사 JXA-8800R에 의해 수행되었으며 분석조건은 다음과 같다. 가속전압 20 kV, 시료전류 10^{-8} A, 전자선의 크기는 약 1~5 μm, 표준시료는 Ag; 순금속, Cd; 합성 CdS, Cu, Fe 및 S; 자연산의 황동석, Zn; 자연산의 섬아연석, Mn; 앤러반다이트, Sb; 자연산 휘안석, Sn; 헤센버가이트를 사용하였다. 특성 X-선과 분광결정은 LiF; CuKα, FeKα, MnKα, ZnKα, PET; AgLα, CdLα, SKα, SbLα, SnLα를 사용하였다.

광화I시기; 이 시기는 석영+방해석맥 시기로 황철석, 황동석 및 방연석이 관찰되거나 방연석이 산출빈도와 산출량이 많다.

황철석은 육안으로 잘 관찰되지 않지만 일부 지점에서 방연석 및 공작석과 함께 산점상으로 산출된다. 현미경하에서 석영 내에 단독으로 산출되는 것, 방연석과 함께 산출되는 것, 침철석에 의해 교대된 것 등이 있다(Fig. 5A).

섬아연석은 방연석과 함께 산출되는 것, 방연석 및 자연은과 함께 산출되는 것, 황동석, 흡은사면동석 및 방연석과 함께 산출되는 것 등이 있다(Fig. 5B, C, F). EPMA에 의한 광물공생별 섬아연석의 정량분석 결과, 철함량은 0.07~4.27 mol % FeS까지 함유되어 있으며 특히 자연은과 공생관계를 갖는 섬아연석의 철함량(mol % FeS)이 황동석 및 흡은사면동석과 함께 산출되는 섬아연석의 철함량(mol % FeS)보다 높게 나타난다(Table 1). 또한 카드뮴 함량은 0.33~1.22 mol % CdS까지 함유되어 있다.

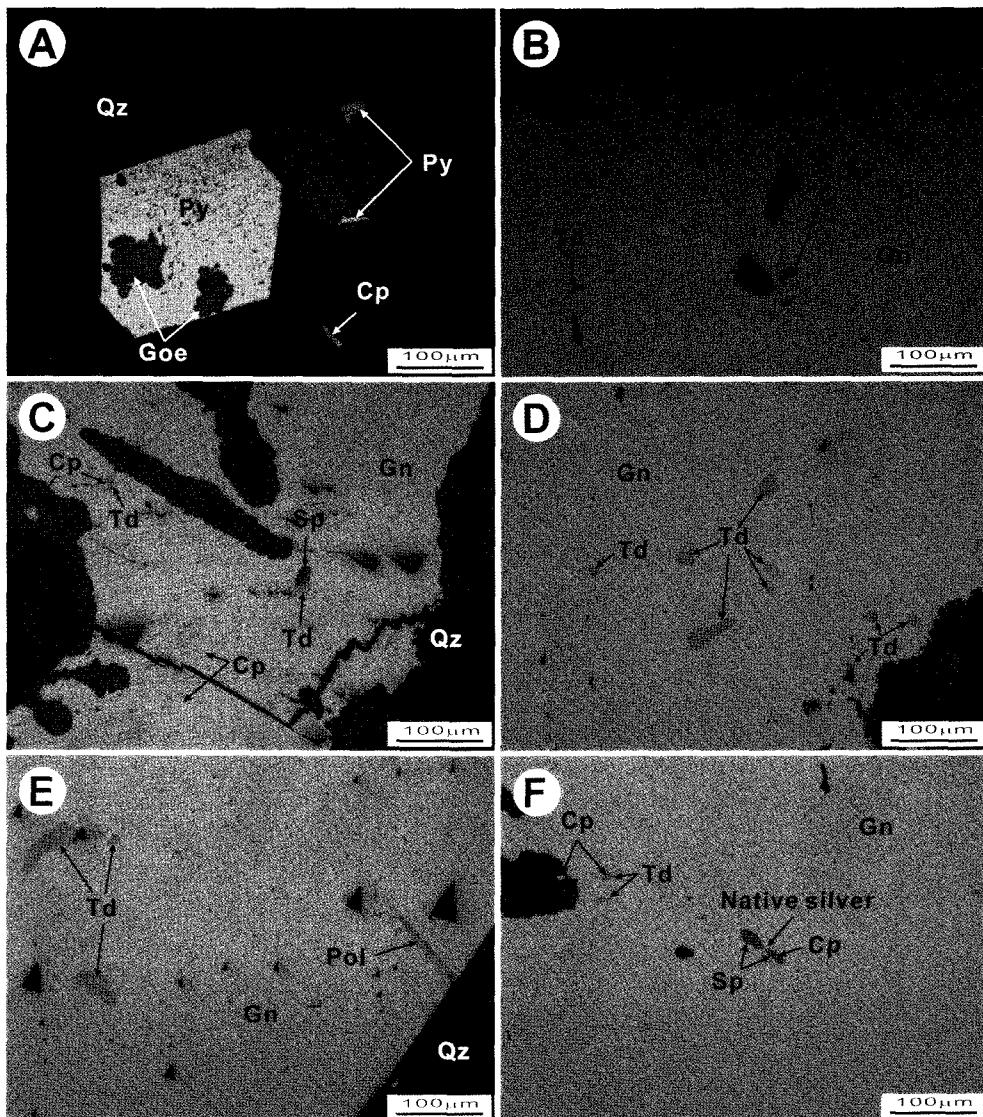


Fig. 5. Microphotographs of ore and gangue minerals representative for veins of the Bongsang Au-Ag deposit. (A) Pyrite partially replaced by goethite and chalcopyrite of stage I. (B) and (C) Sphalerite, chalcopyrite and tetrahedrite coexisting with galena of stage I. (D) Tetrahedrite blebs coexisting with galena of stage I. (E) Tetrahedrite and polybasite coexisting with galena of stage I. (F) Native silver, tetrahedrite, sphalerite and chalcopyrite coexisting with galena of stage I. Abbreviations: Cp=chalcopyrite, Gn=galena, Goe=goethite, Pol=polybasite, Py=pyrite, Qz=quartz, Sp=sphalerite, Td=tetrahedrite.

황동석은 육안으로 관찰되지 않고 현미경하에서만 관찰된다. 현미경하에서 석영 내에 단독으로 산출되는 것, 방연석 및 함은사면동석과 함께 산출되는 것 및 황동석과 용리조직을 갖고 산출되는 것 등이 있다.

방연석은 석영맥 내에 단독으로 산출되거나 황철석 또는 이차 동산화물 등과 함께 자형 또는 괴상으로 산출된다. 현미경하에서 섬아연석, 황동석, 함은사면동석,

회안동은석 및 자연은 등과 함께 산출되는 것 등이 있다(Fig. 5B-F).

함은사면동석은 함은 광물 중 산출빈도와 산출량이 가장 많으며 현미경하에서 방연석 내에 산집상으로 산출되거나(Fig. 5D-F) 섬아연석 및 황동석과 공생하며 산출되는 것 등이 있다(Fig. 5B, C, F). 이 광물에 대한 EPMA에 의한 분석결과는 Table 2와 같다. 이 자

Table 1. Chemical composition of sphalerites from the Bongsang gold-silver deposit.

Stage	Sample No.	Weight %						Mole %	Associated mineral
		Zn	Fe	Mn	Cu	Cd	Sn		
1	BS0119-5	63.71	0.38	0.03	0.39	0.69	0.00	33.27	98.47
1	ditto	64.50	0.31	0.02	0.28	1.27	0.00	33.31	99.68
1	ditto	64.23	0.33	0.04	0.52	0.62	0.00	33.81	99.55
1	ditto	64.13	0.58	0.04	1.40	0.37	0.00	33.44	99.97
1	ditto	63.94	0.04	0.00	0.32	1.03	0.00	33.11	98.44
1	ditto	64.48	0.31	0.04	0.31	0.45	0.01	33.33	98.94
1	ditto	63.21	2.47	0.05	1.17	0.45	0.00	33.56	100.91
1	ditto	62.31	1.26	0.01	1.15	0.57	0.00	32.80	98.09

Ag: native silver, Cp: chalcopyrite, Gn: galena, Td: tetrahedrite

Table 2. Chemical composition of some minerals from the Bongsang gold-silver deposit.

Stage	Sample No.	Weight %						Structural formulae	Associated mineral	Identified mineral	
		Cu	Ag	Zn	Cd	Sb	Total				
1	BS0119-4	32.92	7.15	4.85	3.20	28.16	24.08	(Cu _{8.97} Ag _{1.14}) _{10.12} (Zn _{1.28} Cd _{0.49}) _{7.88} Sb _{4.00} S _{1.13}	Gn		
1	ditto	31.80	8.50	4.63	3.45	28.12	24.12	(Cu _{8.65} Ag _{1.36}) _{10.01} (Zn _{1.22} Cd _{0.53}) _{7.55} Sb _{3.99} S _{1.13}	Gn		
1	ditto	26.71	14.43	0.22	9.41	26.84	22.54	(Cu _{7.77} Ag _{2.47}) _{10.25} (Zn _{0.06} Cd _{1.53}) _{6.1} Sb _{4.08} S _{1.13}	Gn		
1	ditto	26.46	14.43	0.21	9.43	26.86	22.88	(Cu _{7.94} Ag _{2.44}) _{10.02} (Zn _{0.06} Cd _{1.53}) _{5.9} Sb _{4.02} S _{1.13}	Gn		
1	ditto	26.78	13.78	0.56	9.12	26.90	22.89	(Cu _{7.67} Ag _{2.33}) _{10.00} (Zn _{0.15} Cd _{1.48}) _{6.3} Sb _{4.02} S _{1.13}	Gn		
1	ditto	26.75	14.07	0.41	9.35	26.73	22.66	(Cu _{7.75} Ag _{2.40}) _{10.15} (Zn _{0.11} Cd _{1.53}) _{6.4} Sb _{4.04} S _{1.13}	Gn		
1	ditto	33.96	5.81	4.81	3.37	28.50	24.22	(Cu _{9.40} Ag _{0.93}) _{10.13} (Zn _{1.27} Cd _{0.52}) _{7.7} Sb _{4.03} S _{1.13}	Gn		
1	ditto	33.29	6.35	4.73	3.44	28.34	24.21	(Cu _{9.02} Ag _{1.01}) _{10.04} (Zn _{1.25} Cd _{0.53}) _{7.8} Sb _{4.01} S _{1.13}	Gn		
1	ditto	34.14	5.72	4.99	2.99	28.22	24.25	(Cu _{9.24} Ag _{0.91}) _{10.15} (Zn _{1.31} Cd _{0.46}) _{7.7} Sb _{3.98} S _{1.13}	Gn		
1	ditto	33.18	6.31	5.67	1.95	28.44	24.25	(Cu _{9.89} Ag _{1.01}) _{9.98} (Zn _{1.49} Cd _{0.30}) _{1.79} Sb _{4.02} S _{1.13}	Gn		
1	ditto	34.02	4.67	5.54	2.30	28.02	24.27	(Cu _{9.20} Ag _{0.74}) _{9.94} (Zn _{1.46} Cd _{0.35}) _{1.81} Sb _{4.95} S _{1.13}	Gn		
1	BS0119-5	29.79	13.13	5.07	2.27	27.16	23.35	100.76	(Cu _{9.37} Ag _{2.17}) _{10.54} (Zn _{1.38} Cd _{0.36}) _{7.75} Sb _{3.98} S _{1.13}	Gn, Cp	
1	ditto	37.32	1.54	6.35	1.23	29.05	24.91	100.41	(Cu _{9.83} Ag _{2.24}) _{10.07} (Zn _{1.63} Cd _{0.18}) _{8.1} Sb _{3.99} S _{1.13}	Gn	
1	ditto	34.42	5.15	6.05	1.39	27.76	24.36	99.13	(Cu _{9.72} Ag _{0.82}) _{10.08} (Zn _{1.58} Cd _{0.21}) _{7.9} Sb _{3.90} S _{1.13}	Gn	
1	ditto	28.82	12.71	6.40	1.06	27.75	23.31	100.04	(Cu _{8.11} Ag _{2.11}) _{10.22} (Zn _{1.75} Cd _{0.17}) _{9.2} Sb _{4.08} S _{1.13}	Gn, Sp	
1	ditto	36.63	2.58	6.59	1.04	28.75	24.73	100.32	(Cu _{9.72} Ag _{0.40}) _{10.12} (Zn _{1.70} Cd _{0.16}) _{8.3} Sb _{3.98} S _{1.13}	Gn, Sp	
1	ditto	33.70	6.53	6.34	1.06	27.91	24.47	100.01	(Cu _{9.03} Ag _{1.03}) _{10.07} (Zn _{1.65} Cd _{0.16}) _{8.2} Sb _{3.90} S _{1.13}	Gn	
1	ditto	34.18	7.51	6.01	0.97	26.08	23.52	98.28	(Cu _{9.53} Ag _{1.23}) _{10.77} (Zn _{1.65} Cd _{0.15}) _{7.8} Sb _{3.80} S _{1.13}	Gn, Cp	
1	ditto	34.56	5.93	6.27	1.17	28.03	24.45	100.41	(Cu _{9.27} Ag _{0.94}) _{10.21} (Zn _{1.63} Cd _{0.18}) _{8.1} Sb _{3.93} S _{1.13}	Gn, Cp	
1	BS0119-4	4.75	67.38			11.07	15.49	98.67	(Ag _{14.22} Cu _{1.70}) _{15.92} Sb _{2.07} S _{1.11}	Gn	
1	ditto	4.57	68.74			10.52	15.42	99.25	(Ag _{14.58} Cu _{1.64}) _{6.22} Sb _{1.98} S _{1.11}	Gn	Polybasite
1	BS0119-5	4.57	69.95			9.76	15.47	99.75	(Ag _{14.79} Cu _{1.64}) _{16.43} Sb _{1.83} S _{1.11}	Gn	Native Silver
1	ditto	0.15	98.87			0.34	99.36				

Cp: chalcopyrite, Gn: galena, Sp: sphalerite.

료를 total metal-(Sb+As)-S계 삼각도에 도시하여 보면, 이 광상의 힘은사면동석은 화학량적 사면동석과 거의 유사하며 이 광물의 Ag 함량은 구리를 치환하여 2.58~14.43 wt.%까지 함유되어 있다. 또한 카드뮴의 함량은 아연을 치환하여 0.97~9.43 wt.%까지 함유되어 있는 것이 특징이다. 휘안동은석은 산출빈도와 산출량이 적고, 방연석 내에 단독으로 산출되며(Fig. 5E), EPMA 분석에 의한 분석결과 구조식은 $(\text{Ag}_{14.22-14.79} \text{Cu}_{1.64-1.70})_{15.92-16.43} \text{Sb}_{1.83-2.07}\text{S}_{11}$ 이다(Table 2). 자연은은 방연석 내에 섬아연석과 함께 산출되며 그 산출빈도와 산출양은 적다(Fig. 5).

광합II시기; 이 시기는 광상의 방해석과 황철석만이 정출한 시기로 거정의 방해석이 맥상으로 산출되며, 다른 황화광물은 관찰되지 않는다.

4. 유체포유물

4.1. 연구방법 및 산출상태

유체포유물 연구는 광화작용과 관련된 유체의 진화와 광물 침전시 온도 및 유체의 화학성분 등을 규명하는데 유용하게 이용된다. 봉상 금-은광상의 광화I시기

에 산출되는 백색석영, 자형의 투명석영 및 방해석을 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 측정이전에, Linkam THMSG 600은 U.S.G.S에서 제작한 표준시료(H_2O , $\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2$)를 이용하여 보정을 실시하였다. 측정오차는 냉각실험시 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 가열실험시 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이다.

실온(25°C)에서 관찰되는 상의 종류, 성분 및 가열실험시 균일화되는 상의 변화에 의거하여 봉상광상의 석영 및 방해석에서 산출되는 유체포유물은 액상포유물로 산출된다. 이 포유물들은 기상과 액상의 2상으로 구성되며 Bodnar(1983)가 제시한 방법에 의해 $V_{\text{H}_2\text{O}}$ 의 물체적률을 계산하면 <0.4(오차범위: $\pm 5\%$)로써 모두 액상포유물이다. 이 포유물의 형태는 negative form, 인장형, 판상 및 불규칙형으로 산출되며, 크기는 70 μm 이내이다(Fig. 6).

4.2. 냉각 및 가열 실험

광화I시기의 백색석영과 투명석영에서 산출되는 액

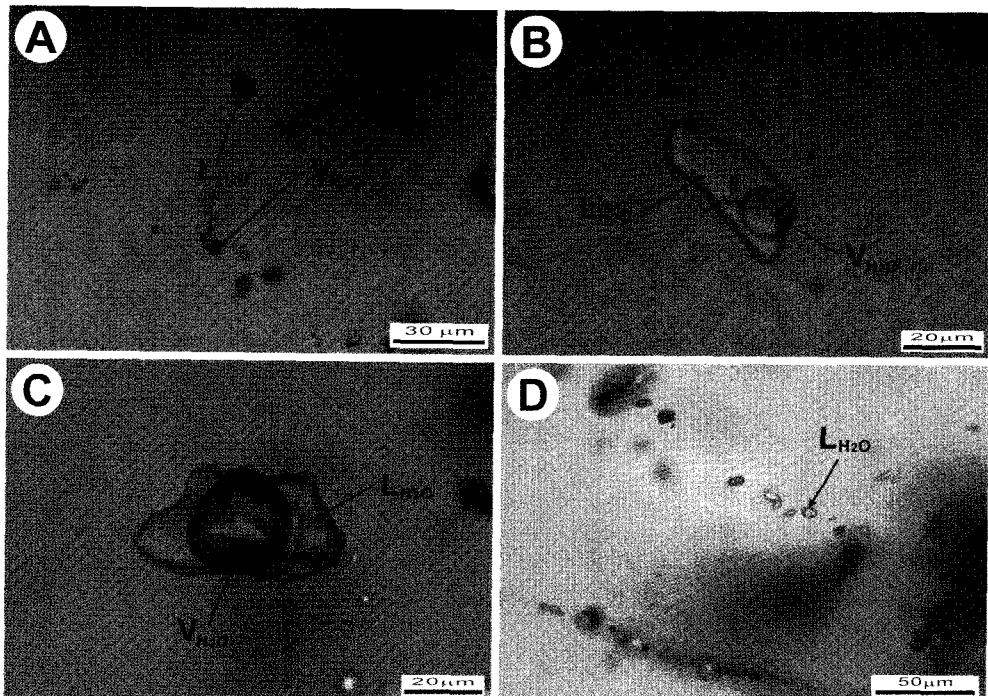


Fig. 6. Photomicrographs of representative fluid inclusion types in quartz from stage I vein of the Bongsang Au-Ag deposit. (A) Liquid-rich type inclusions in quartz and calcite. (B) and (C) Close-up liquid-rich type inclusions in quartz and calcite. (D) One phase(liquid) type inclusions in quartz.

상포유물은 냉각시 V_{H_2O} 의 응축온도는 $-40.5\sim-31.4^{\circ}\text{C}$ ($-36.9\pm2.4^{\circ}\text{C}$, $n=11$), 최초용융온도(T_{e-ice})는 $-25.2\sim-22.7^{\circ}\text{C}$ ($-24.2\pm1.0^{\circ}\text{C}$, $n=9$)이다(Fig. 7). 그림 7에서 보는 것과 같이 V_{H_2O} 의 응축온도는 T_{m-ice} 와 반비례한다. 이것은 V_{H_2O} 의 응축온도가 포유물내 염농도가 낮을수록 낮아짐을 의미하며 포유물의 밀도 보다는 충진 정도에 좌우됨을 지시한다. 또한 포유물내 V_{H_2O} 의 물체적은 V_{H_2O} 의 응축온도와 비례하는데 이것은 포유물 내 액상의 비율이 높을수록 V_{H_2O} 의 응축온도가 낮아짐을 지시한다. 또한 그림 8에서 보는 것과 같이, 액상포유물 내 해리된 염은 Na^+ 이외에 K^+ 존재함을 지시한다. 액상포유물의 T_{m-ice} 는 $-7.1\sim-0.1^{\circ}\text{C}$ ($-4.8\pm1.8^{\circ}\text{C}$,

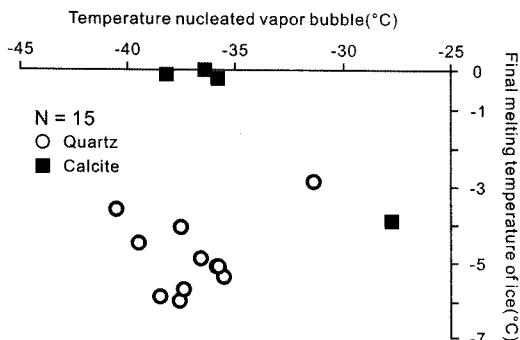


Fig. 7. Temperature nucleated vapour bubble versus final melting temperature of ice of liquid-rich type inclusions from quartz and calcite. N=number of analysis.

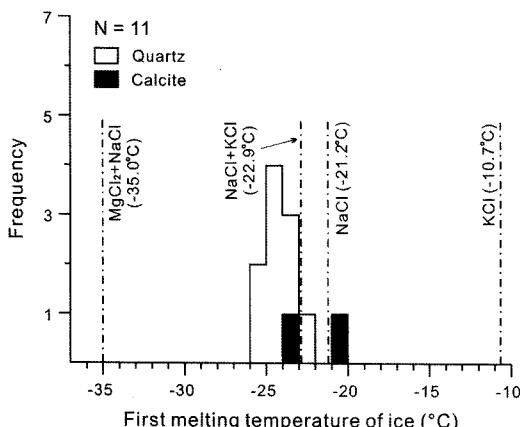


Fig. 8. Frequency-first melting temperature histogram from ice of liquid-rich type inclusions in quartz and calcite. The eutectic temperatures of the $\text{KCl}-\text{H}_2\text{O}$ (Linke, 1965) binary system, $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ (Hall *et al.*, 1988) binary system, $\text{KCl}-\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ (Sterner *et al.*, 1988) ternary system and $\text{MgCl}_2-\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ (Luzhnaya and Vereshtcheta, 1946) ternary system. N=number of analysis.

$n=121$)이며 Bodnar and Vityk(1994)가 제시한 방정식을 이용하여 염농도로 환산하면 $0.2\sim10.6$ wt.% NaCl (7.4 ± 2.6 wt.% NaCl , $n=121$)이다(Fig. 9). 이 포유물은 가열시 모두 액상으로 균일화되며 균일화온도는 $137\sim336^{\circ}\text{C}$ ($279\pm36.6^{\circ}\text{C}$, $n=83$)이다(Fig. 10).

광화I시기의 방해석에서 산출되는 액상포유물은 냉각시 V_{H_2O} 의 응축온도는 $-38.2\sim-27.7^{\circ}\text{C}$ ($-34.5\pm4.7^{\circ}\text{C}$, $n=4$), 최초용융온도(T_{e-ice})는 $-23.2\sim-20.4^{\circ}\text{C}$ ($-21.8\pm2.0^{\circ}\text{C}$, $n=2$)이다(Fig. 8). 액상포유물의 T_{m-ice} 는 $-5.9\sim-0.0^{\circ}\text{C}$ ($1.8\pm2.2^{\circ}\text{C}$, $n=49$)로서 염농도로 환산하면 $0.0\sim8.3$ wt.% NaCl (2.8 ± 3.4 wt.% NaCl , $n=49$)이다(Fig. 9). 이 포유물은 가열시 모두 액상으로 균일화되며 균일화온도는 $170\sim267^{\circ}\text{C}$ ($204\pm38.6^{\circ}\text{C}$, $n=23$)이다(Fig. 10).

이들 광화I시기에서 산출되는 유체포유물의 염농도와 균일화온도의 관계를 도시하면 Fig. 11과 같다. 이

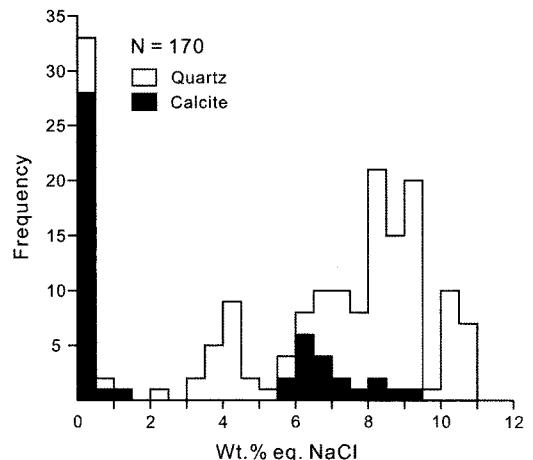


Fig. 9. Frequency diagram of salinities for fluid inclusions in quartz and calcite from the Bongsang Au-Ag deposit. N=number of analysis.

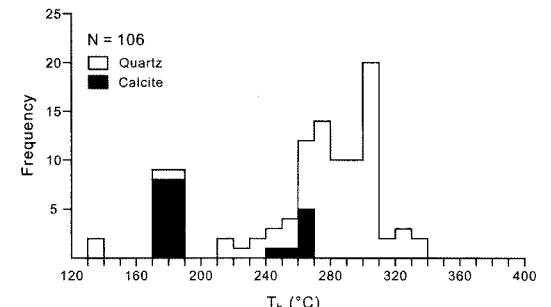


Fig. 10. Frequency diagram of homogenization temperatures for fluid inclusions in quartz and calcite from the Bongsang Au-Ag deposit. N=number of analysis.

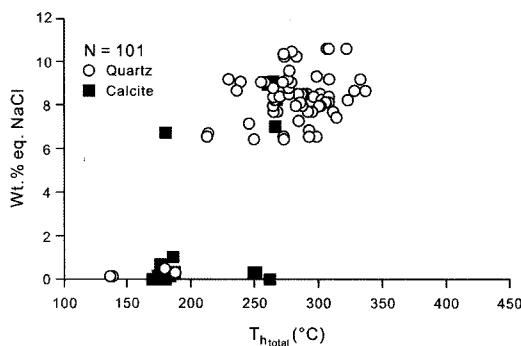


Fig. 11. Salinity versus homogenization temperature diagram for fluid inclusions in quartz and calcite from the Bongsang Au-Ag deposit. N=number of analysis.

그림에서와 같이 균일화온도가 낮아짐에 따라 염농도도 함께 낮아짐을 알 수 있다.

5. 안정동위원소

5.1. 연구방법

안정동위원소 분석에 이용된 시료는 광화I시기 및 광물공생관계를 고려하여 다음과 같이 선택하였다. 황안정동위원소 분석을 위한 시료는 쟁내에서 채취한 광석 광물의 산화에 의한 시료의 제한성 때문에 비교적 산출량이 많은 광화I시기의 방연석을 대상으로 하였다. 산소 및 수소안정동위원소 분석을 위한 시료는 광화I시기의 석영 및 방해석을 대상으로 하였다.

안정동위원소 분석은 중국지질대학(武漢)에서 실시하였다. 활동위원소분석은 황화광물과 CuO를 함께 1,000 °C까지 올린 후 발생한 SO₂ 성분을 포집하여 분석하였다. 산소동위원소분석은 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.

5.2. 분석결과

봉상 금-은광상의 광화I시기에 산출되는 방연석의 δ³⁴S값은 3.4‰이다(Table 3). 이 광상에서 산출되는 모암변질광물(견운모+녹나석)의 공생군은 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 동위원소 평형온도, 유체포유물 균일화온도와 광석광물 공생관계로부터 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 6.2‰이다(Table 3).

이 광상의 광화I시기에 산출되는 석영의 δ¹⁸O값은 7.9‰과 8.9‰이다(Table 3). 광화I시기의 석영 침전시 평형상태에 있었던 물의 δ¹⁸O_{H₂O}(‰)값은 Matsushisa et al.(1979)의 분별식 1000 ln_{Quartz-H₂O}=3.34(10/T)²-3.31를 이용하여 계산하면 석영의 δ¹⁸O_{H₂O}값은 0.3‰과 1.3‰이다. 봉상 금-은광상의 광화I시기에 산출되는 방해석의 δ¹⁸O값은 2.9‰과 10.3‰이며 Friedman and O'Neil(1977)가 제시한 식을 이용하여 계산된 평형상태에 존재했던 물의 δ¹⁸O_{H₂O}값은 -6.1‰과 1.3‰이다. δ¹²C값은 -7.0‰과 -5.9‰로서 Friedman and O'Neil(1977)가 제시한 식을 이용하여 계산하면 δ¹²C_{CO₂}값은 -6.7‰과 -5.6‰이다. 이 광상의 광상생성시 물의 δD값은 -75‰이다(Table 3).

Table 3. Sulfur, oxygen, carbon and hydrogen isotopic data of minerals from the Bongsang gold-silver deposit.

Stage	Sample No.	Min.	δ ³⁴ S (‰)	δ ¹⁸ O (‰)	δ ¹² C (‰)	δ ³⁴ S _{H₂S} ‰ ¹⁾	δ ¹⁸ O _{H₂O} (‰) ²⁾	δ ¹² C _{CO₂} (‰) ³⁾	δD (‰)	T _{htotal} (°C) ⁵⁾
I	BS119-7	Gn	3.4			6.2				200
I	BS119-3	Qz		7.9			0.3		-75	280
I	BS119-7	Qz(t)		8.9			1.3		-75	280
I	BS119-7	Cc		2.9	-5.9		-6.1 ⁴⁾	-5.6		200
I	BS119-9	Cc		10.3	-7.0		1.3 ⁴⁾	-6.7		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⁾δ¹²C_{CO₂}(‰) and ⁴⁾δ¹⁸O_{H₂O}(‰) are calculated from the equation by Friedman and O'Neil (1977). ⁵⁾T_{htotal} is homogenization temperature of fluid inclusion. Min; mineral, Qz: white quartz, Qz(t): transparent quartz, Cc: calcite

6. 고 찰

봉상 금-은광상의 광화I시기 말기에 산출되는 자연은은 섬아연석, 흑은사면동석 및 방연석과 함께 공생광물군으로 산출된다. 이 공생광물군과 화학조성을 이용하여 광화I시기 말기에 산출되는 광물들의 생성온도와 황분압을 추정하여 보았다. 이 공생광물들의 열역학적 자료와 섬아연석의 2.26와 4.28 mol % FeS값을 이용하여 구한 생성온도와 황분압(f_{S_2})은 각각 $<210^{\circ}\text{C}$, $<10^{-15.4}$ atm를 보인다(Fig. 12). 봉상 금-은광상에서 산출되는 흑은사면동석, 휘안동은석 및 자연은 등은 방연석 내에 방향성을 갖고 산점상으로 산출된다. 이런 산상은 방연석 고용체로부터 조기에 이를 산점상으로 산출되는 광물들이 방연석과 함께 형성되고 후에 방연석에 의해 표면연정 되었다고 보고하였다(Lueth *et al.*, 2000). 이 광상에서 산출되는 사면동석은 Cu(26.46~34.46 wt.%), Ag(4.67~14.43 wt.%), Sb(26.08~29.05 wt.%)이며 As는 검출되지 않는다(Table 2). Hackbarth and Petersen(1984)와 Park and Hwang(1992)에 의하면 조기 광화용액에서 사면동석계 광물이 정출되어 짐에 따라 Cu 및 As 원소들이 선택적으로 먼저 소모되고 Ag, Sb는 광화용액 내에 부화되어 조기에 형성된 사면동석계 광물들은 Cu, As 성분 함량이 높고 말기에 형성된 사면동석계 광물들은 Ag, Sb성분 함량이 높다고 보고하였다. 또한 Robinson and Norman(1984)와 Park and Hwang(1992)에 의하면 사면동석 내 구리를 치환한 은 함량은 광화용액의 염농도가 낮아지면서 Ag chloride complexes가 불안전하게 되어 증가된다고 보고하였다. 은치 및 중봉광상에서 산출되는 사면동석의 형성온도와 황분압은 각각 $210\sim235^{\circ}\text{C}$, $10^{-12.3}\sim10^{-13.6}$ atm(은치), 200°C 이하, 10^{-16} atm(중봉)로 추정하였으며 은치에서 중봉광상으로 가면서 온도, 광화용액의 염농도 및 유황분압 감소가 사면동석 내 은 함량을 증가시켰던 요인으로 보고하였다(Park *et al.*, 1988; Park and Hwang, 1992). 따라서 봉상광상의 자연은 및 흑은사면동석 형성온도 및 황분압은 은치광상보다 약간 낮지만 중봉광상과는 잘 일치한다. 또한 봉상 금-은광상에서 산출되는 사면동석 내 카드뮴 함량은 0.97~9.43 wt.%까지 함유되어 있는 것이 특징이다(Table 2). 최근들어 사람들이 환경적인 면에 많은 관심을 갖으면서 언론보도에서도 이 일대의 광상 주변 농경지 및 일부 주민에서 카드뮴 수치가 높다고 보도하였다. 이렇듯 카드뮴은 금속재료로서도 중요하지만 공해병을 일으키는 해독원소로서 잘 알려져 있는 원소

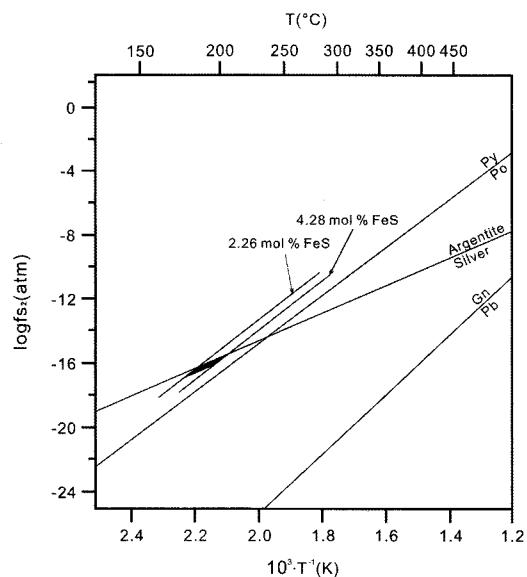


Fig. 12. Temperature versus sulfur fugacity diagram showing the ranges of silver depositional conditions indicated by mineral assemblages in stage I veins from the Bongsang Au-Ag deposit. mol % FeS=mole fraction of FeS in sphalerite, Gn=galena, Po=pyrrhotite, Py=pyrite.

로서 카드뮴 함량이 높은 원인이 어디에서 기원되었는지 밝히는 것은 자원의 확보라는 문제와 더불어 공해를 예방하는 차원에서도 중요한 문제이다. 국내의 많은 금-은 광상에서 사면동석이 보고되어 있으나(Park *et al.*, 1983; Lee *et al.*, 1994; 1995; Yoo *et al.*, 2006) EPMA화학분석에 의한 합 카드뮴 사면동석의 산출 광상은 은치(0.17~0.40 wt.%), 중봉(0.07~0.41 wt.%), 덕암(0.00~0.28 wt.%) 및 둔전남광상(0.07~0.20 wt.%) 등만 보고되어 있으며 카드뮴 함량이 낮은 편이다(Park and Hwang, 1992; Lee, 1993). 세계적으로 사면동석 내 카드뮴의 함량이 보고된 것은 스코틀랜드의 Tomnadarshan, Tyndrum 및 Clevedon 일대에서 최소 0.07 wt.%에서 최대 11.70 wt.% 까지 보고되어 있다(Patrick, 1978; 1984; 1985; Ixer *et al.*, 1993). 사면동석의 일반적인 구조식은 $\text{M}^{+}_{10}\text{M}^{2+}_{2}\text{M}^{3+}_{4}\text{S}^{2-}_{13}$ 이며 $\text{Cu}_{10}\text{Zn}_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ 으로 표현되며 이 구조식에 미량으로 치환되어 함유되는 원소들도 포함하면 $(\text{Cu}, \text{Ag})_{10}(\text{Zn}, \text{Fe}, \text{Cd}, \text{Cu}, \text{Mn}, \text{Hg})_2(\text{As}, \text{Sb}, \text{Bi})_4(\text{S}, \text{Se}, \text{Te})_{13}$ 이다(Patrick and Hall, 1983). 봉상 금-은광상의 사면동석 내 카드뮴의 함량은 아연의 함량과 반비례하여 아연을 치환하고 있음을 알 수 있다. Kubo *et al.*(1992)은 저온에서 정출한 섬아연석일수록 카드뮴과 망간의 함량이 높다고 보고하였다. 또한 Lee *et al.*(1992)에 의하

면 대봉광상은 섬아연석 내 카드뮴의 함량은 저온성광물과 공생관계를 갖는 섬아연석에서 높은 함량을 갖는다. 중봉광상의 사면동석 내 카드뮴 함량은 채굴 고도가 증가할수록 카드뮴의 함량이 증가한다(Park and Hwang, 1992). 따라서 사면동석 내 카드뮴의 함량은 온도에 의존하는 것으로 보이며 이에 대한 자세한 연구는 진행중에 있다(email communication with Patrick).

광상의 유체포유물에서 측정한 균일화온도는 137~336°C이며, 염농도는 0.0~10.6 wt.% NaCl이다. 균일화온도와 염농도의 관계를 도시하여 보면, 균일화온도가 낮아짐에 따라 염농도의 값도 감소 되어진다. 이는 열수용액이 단층대를 따라 상승함에 따라 냉각 및 온도와 염농도가 낮은 천수의 혼합에 의해 희석작용이 있었음을 지시한다. 광석광물들의 용해도는 온도, pH, f_{O_2} , a_{H_2S} 및 a_{Cl^-} 등에 크게 좌우된다(Barrett and Anderson, 1988; Gammons and Williams-Jones, 1995). 따라서 봉상광상은 조기 열수용액(>336°C, 10.6 wt.%)으로부터 냉각과 희석작용에 의해 온도 및 a_{Cl^-} 의 감소에 의해 조기 황화광물들이 침전되었으며, 말기의 힘은 광물들은 계속적인 온도 및 a_{Cl^-} 의 감소 및 황화광물의 침전으로 인한 황분입의 감소에 의하여 침전되었다고 생각된다. 유체포유물의 자료 중 최고 균일화온도를 갖는 포유물 자료(336°C, 8.7 wt.% NaCl, 0.75g/cm³)로부터 구한 최소 압력은 약 130 bar이며, 심도는 1,700 m 정도이다.

이 광상에서 산출되는 광석광물의 $\delta^{34}S$ 값은 3.4‰이며 광화유체 내 $\delta^{34}S_{H_2S}$ 값은 6.4‰로서 황의 기원은 화성기원보다 다소 높은 값을 갖으며 이는 화성기원과 모암 내의 황에서 유래된 것으로 해석된다(Table 3). 또한 이 광상을 형성한 광화유체 중 물의 기원을 알아보기 위해서 분석된 석영과 방해석의 산소, 수소 및 탄소 안정동위원소값은 각각 $\delta^{18}O_{H_2O}$: -6.1‰과 1.3‰(석영: 0.3‰과 1.3‰, 방해석: -6.1‰과 1.3‰), δD : -75‰ 및 $\delta^{12}C_{CO_2}$ 값은 -6.7‰과 -5.6‰이다. 이를 동위원소값은 여러 현상(불혼합, 비등, 산화-환원, pH, 천수의 혼입, 모암과 반응정도) 등에 의해 변화될 수 있다. 그러므로 $\delta^{34}S_{H_2S}$ 값, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 값, δD 값 및 $\delta^{12}C_{CO_2}$ 값의 자료를 종합하여 볼때 광화유체는 천수 기원의 유체가 주종을 이룬 것으로 보이며 말기로 감에 따라 다른 천수의 혼입이 크게 작용한 것으로 보인다(Fig. 13).

이상을 종합하면 봉상 금-은광상은 천수 기원의 열수용액으로부터 광화작용이 진행됨에 따라 광화유체는 단층대를 따라 모암과의 반응에 의해 냉각 및 기원이

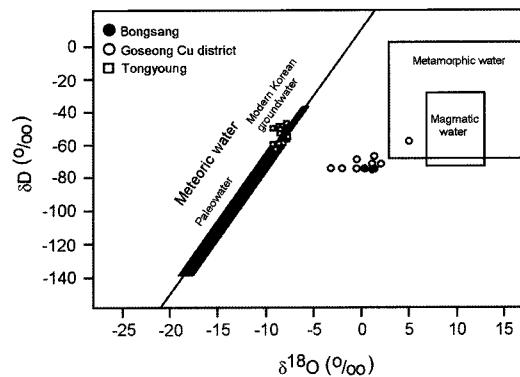


Fig. 13. Hydrogen versus oxygen isotope diagram showing the calculated stable isotope values of hydrothermal fluid compositions from the Bongsang Au-Ag deposit. Also shown are the isotopic fields for paleowater(Shelton *et al.*, 1990) and modern Korean groundwater(Kim and Nakai 1988). The magmatic and metamorphic water boxes are from Ohmoto(1986) and Sheppard(1986). Open circles and open squares indicate data by Choi *et al.*(1993) and Shelton *et al.*(1990), respectively.

다른 천수의 유입에 의한 혼합에 의한 희석작용이 있었음을 지시해 준다. 따라서 봉상 금-은광상은 유체포유물의 균일화온도가 다소 높지만 석영맥의 구조, 산출광물, 광화유체의 기원 및 진화 등을 고려할 때 천수광상에 해당된다.

이 광상에서 북서방향으로 약 10 km 떨어진 곳에 고성동광화대(삼봉, 삼산제일, 삼천광상 등) 및 남동방향으로 약 8 km 떨어진 곳에 통영광상이 위치한다. 삼봉, 삼산제일, 삼천 및 통영광상의 주광화시기 광화유체의 균일화온도는 211~393°C(삼봉), 247~387°C(삼산제일), 206~398°C(삼천), 134~282°C(통영)이고 염농도는 2.3~13.4 wt.% NaCl(삼봉, 삼산제일, 삼천), 1.2~6.1 wt.% NaCl(통영)를 갖는다(Park, 1983; Shelton *et al.*, 1990; Choi *et al.*, 1993). 또한 안정동위원소값($\delta^{34}S_{H_2S}$: 3.2~5.7‰(삼봉), 5.2~8.5‰(삼산제일), 4.3~5.1‰(삼천), 3.1~6.5‰(통영), $\delta^{18}O_{H_2O}$: -2.0~5.0‰(삼봉), -0.3~3.3‰(삼산제일), -3.4~2.1‰(삼천), -9.4~7.0‰(통영), δD : -75~59‰(삼봉), -68‰(삼산제일), -75~71‰(삼천), -61~44‰(통영)을 갖는다(Park, 1983; Shelton *et al.*, 1990; Choi *et al.*, 1993). Choi *et al.*(1993)은 고성동광화대의 광화유체는 천수기원이며 계속적으로 기원이 다른 천수의 혼입이 있었다고 보고하였다. 연구지역의 석영맥은 고성동광화대의 균일화온도와 염농도에 비해 다소 유사하거나 낮은 값을 갖으나 통영광상의 균일화온도와 염농도에 비해 높은

값을 갖는다. 또한 황동위원소 값은 봉상 금-은광상뿐만 아니라 고성동광화대의 광상들 및 통영광상의 값이 모두 유사하며 전반적으로 산소 및 수소 동위원소는 고성동광화대에서 통영광상으로 감에 따라 천수 값에 근접해진다. 고성동광화대(82Ma)와 통영광상(73Ma)의 생성연대는 다소 차이는 있지만 북서방향(고성동광화대)에서 남동방향(통영광상)으로 석영조직, 산출광물 및 미량원소 등이 변화되고 균일화온도, 염농도, 산소 및 수소안정동위원소 값도 낮아짐을 알 수 있다. 따라서 고성동광화대(Intrusion-related deposits)에서 통영광상(천열수형)으로 변화됨으로써 봉상 금-은광상을 포함한 이들 지역의 광화작용은 백악기 관입암체와의 거리에 따른 서로 다른 광화환경에 의해 형성된 모델을 고려하여 향후 이 지역에 대한 탐광이 필요하다고 생각된다.

7. 결  언

1. 봉상 금-은광상은 백악기 안산암질 래필리옹회암내에 발달된 NW방향의 단층대를 따라 충진한 열수성 석영맥상 광상이다.
2. 봉상 금-은광상의 광물 정출순서는 석영+방해석 맥(광합I시기)과 방해석맥(광합II시기)으로 구성된다. 광합I시기는 석영, 방해석, 견운모, 녹나석, 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석, 함은사면동석, 휘안동석 및 자연은 등이 정출하였으며, 광합II시기는 괴상의 방해석만 정출하였다.
3. 봉상 금-은광상의 광화I시기 말기에 산출되는 공생광물군으로 추정한 생성온도와 횡분압(f_{S_2})은 각각 $<210^{\circ}\text{C}$, $<10^{-15.4}$ atm를 갖는다.
4. 유체포유물에서 측정한 균일화온도와 염농도는 각각 $137\sim336^{\circ}\text{C}$, 0.0~10.6 wt.% NaCl이며 균일화온도가 낮아짐에 따라 염농도의 값도 감소 되어진다. 이는 열수용액이 단층대를 따라 상승함에 따라 모암과의 반응에 의한 냉각과 기원이 다른 천수의 혼합에 의한 회석작용이 있었음을 지시하며 이런 현상에 의해 황화광물들이 침전되었다.
5. 황화광물의 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 값은 6.4‰이며 석영과 방해석의 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$: -6.1‰과 1.3‰, 석영: 0.3‰과 1.3‰, 방해석: -6.1‰과 1.3‰, δD: -75‰ 및 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 값은 -6.7‰과 -5.6‰로써 열수유체는 천수 기원의 유체가 주종을 이룬 것으로 보이며 광화작용이 진행됨에 따라 기원이 다른 천수의 혼입이 작용한 것으로 보인다.

사  사

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구지원사업(R01-2006-000-10457-0)의 지원에 의해 연구되었다. 이 기관에 사의를 표한다. 심사과정에서 이 논문의 미비점을 지적, 보완하여 주신 충북대학교 최상훈 교수님, 고려대학교 박상준 박사님과 익명의 심사위원님께 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 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 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.
- Chang, T.W., Hwang, S.K., Lee, D.W., Oh, I.S., Kim, H.C. and Kim, E.H. (1983) Geological map of Chungmu sheet. Korea Inst. Energy and Resources, 18p.
- Choi, S.H., So, C.S. and Lee, J.H. (1993) Mineralogical, stable isotope and fluid inclusion studies of copper-bearing hydrothermal vein deposits in Goseong mining district, Gyeongsang basin, Korea, Min. Soc., v. 102, p. 123-133.
- 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.
- Gammoms, 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.
- Hackbarth, C.J. and Petersen, U. (1984) Systematic compositional variations in argentian tetrahedrite. *Econ. Geol.*, v. 79, p. 448-460.
- Hall, D.L., Sterner, S.M. and Bodnar, R.J. (1988) Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions. *Econ. Geol.*, v. 83, p. 197-202.
- Ixer, R.A., Patrick, R.A.D. and Starkey, R.E. (1993) Lead-zinc-copper-arsenic-baryte mineralization from Clevdon, near Bristol. *Jour. Russell Soc.*, v. 5, p. 23-30.
- Jaw, Y.J. (1998) Petrology of the igneous rocks in the Goseong area, Gyeongsang basin II. Trace element geochemistry and Rb-Sr radiometric age. *Econ. Environ. Geol.*, v. 31, p. 473-483.
- Kim, C.J. and Park, H.I. (1984) Mineral paragenesis and fluid inclusions of Geoje copper ore deposits. *J.*

- Korean Inst. Mining Geol., v. 17, p. 245-258.
- Kim, K.H. and Nakai, N. (1988) Isotopic compositions of precipitations and groundwaters in South Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 24, p. 37-46.
- Korea Mining Promotion Corporation (1975) Survey report of Bongsang mine. 14p.
- Korea Mining Promotion Corporation (1977) Drilling survey report of ore deposits. p. 738-739.
- Korea Mining Promotion Corporation (1987) Drilling survey report of ore deposits. p. 930-931.
- Kubo, T., Nakato, T. and Uchida, E. (1992) An experimental study on partitioning of Zn, Fe, Mn and Cd between sphalerite and aqueous chloride solution. Mining Geol., v. 42, p. 301-309.
- Lee, C.H. (1993) Geology, mineralogy, fluid inclusion and stable isotope of gold, silver and antimony ore deposits of the Dunjeon-Baegion area, northern Taebaegsan mining district, Korea. Unpub. Ph.D. thesis. Seoul Nat. Univ., 422p.
- Lee, J.H. (1992) Hydrothermal copper mineralization in the Goseong district, Korea. Unpub. Ph.D. thesis. Korea Univ., 117p.
- Lee, H.K., Yoo, B.C., Jeong, K.Y. and Kim, K.H. (1994) Au-Ag minerals and genuses of Weolyu gold-silver deposits, Chungcheongbukdo, Republic of Korea. Econ. Environ. Geol., v. 27, p. 537-548.
- Lee, H.K., Yoo, B.C. and Kim, S.J. (1992) Mineralogy and ore genuses of the Daebong gold-silver deposits, Chungnam, Korea. J. Korean Inst. Mining Geol., v. 25, p. 297-316.
- 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, S.Y., Choi, S.G., So, C.S., Ryu, I.C., Wee, S.M. and Heo, C.H. (2003) Base-metal mineralization in the Cretaceous Gyeongsang basin and its genetic implications, Korea: the Haman-Gunbug-Goseong(Changwon) and the Euiseong metallogenic provinces. Econ. Environ. Geol., v. 36, p. 257-268.
- Linke, W.F. (1965) Solubilities of inorganic and metallorganic compounds. 4th ed., Washington, D.C., Am. Chem. Soc., 1914p.
- Lueth, V.W., Megaw, P.K.M., Pingitore, N.E. and Goodell, R.C. (2000) Systematic variation in galena solid-solution compositions at Santa Eulalia, Chihuahua, Mexico. Econ. Geol., v. 95, p. 1673-1687.
- Luzhnaya, N.P. and Vereshtchetina, I.P. (1946) Sodium, calcium, magnesium chlorides in aqueous solutions at -57 to +25°C(polythermal solubility). Zhurnl. Prikl. Khimii, v. 19, p. 723-733.
- Matsuhsia, 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.
- Ohmoto, H. (1986) Stable isotope geochemistry of ore deposits. Reviews in Min., v. 16, p. 491-560.
- 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.
- Park, H.I. (1983) Ore and fluid inclusions of the Tongyeong gold-silver deposits. J. Korean Inst. Mining Geol., v. 16, p. 245-251.
- Park, H.I., Choi, S.W., Chang, H.W. and Lee, M.S. (1983) Genesis of the copper deposits in Goseong district, Gyeongnam area. J. Korean Inst. Mining Geol., v. 16, p. 135-147.
- Park, H.I., Woo, Y.K. and Hwang, J. (1988) Polymetallic mineralization in the Eunchi silver mine. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 24, p. 431-449.
- Park, H.I. and Hwang, J. (1992) Chemical compositions of tetrahedrite-series minerals from Eunchi and Jungbong silver deposits. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 28, p. 615-626.
- Patrick, R.A.D. (1978) Microprobe analyses of cadmium-rich tetrahedrites from Tyndrum, Perthshire, Scotland. Min. Mag., v. 42, p. 286-288.
- Patrick, R.A.D. (1984) Sulphide mineralogy of the Tomnadarshan copper deposit and the Corrie Buie lead veins, south Loch Tayside, Scotland. Min. Mag., v. 48, p. 85-91.
- Patrick, R.A.D. (1985) Pb-Zn and minor U mineralization at Tyndrum, Scotland. Min. Mag., v. 49, p. 671-681.
- Patrick, R.A.D. and Hall, A.J. (1983) Silver substitution into synthetic zinc, cadmium and iron tetrahedrites. Min. Mag., v. 47, p. 441-451.
- Richards, J. and Kerrich, R. (2007) Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallocgenesis. Econ. Geol., v. 102, p. 537-576.
- Robinson, R.W. and Norman, D.I. (1984) Mineralogy and fluid inclusion study of the southern amethyst vein system, Creede mining district, Colorado. Econ. Geol., v. 79, p. 439-447.
- Shelton, K.L., So, C.S., Haeussler, G.T., Chi, S.J. and Lee, K.Y. (1990) Geochemical studies of the Tongyoung gold-silver deposits, Republic of Korea; Evidence of meteoric water dominance in a Te-bearing epithermal system. Econ. Geol., v. 85, p. 1114-1132.
- Sheppard, S.M.F. (1986) Characterization and isotope variations in natural waters. Reviews in Min., v. 16, p. 165-183.
- Sterner, S.M., Hall, D.L. and Bodnar, R.J. (1988) Synthetic fluid inclusions. V. Solubility relations in the system NaCl-KCl-H₂O under vapor-saturated conditions. Geochim. Cosmochim. Acta., v. 52, p. 989-1005.
- Yoo, B.C., Lee, H.K. and Kim, K.J. (2006) Ore minerals and genetic environments from the Baekun gold-silver deposit, Republic of Korea. Econ. Environ. Geol., v. 39, p. 9-25.