

## 백운 금-은광상에서 산출되는 광석광물과 생성환경

유봉철<sup>1</sup> · 이현구<sup>1\*</sup> · 김기중<sup>1</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 지구환경과학과

## Ore minerals and Genetic Environments from the Baekun Gold-silver Deposit, Republic of Korea.

Bong Chul Yoo<sup>1</sup>, Hyun Koo Lee<sup>1\*</sup> and Ki Jung Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of geology and environmental sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Baekun gold-silver deposit is an epithermal quartz vein that is filling the fault zone within Triassic or Jurassic foliated granodiorite. Mineralization is associated with fault-breccia zones and can be divided into two stages. Stage I which can be subdivided early and late depositional stages is main ore mineralization and stage II is barren. Early stage I is associated with wallrock alteration and the formation of sulfides such as arsenopyrite, pyrite, pyrrhotite, sphalerite, marcasite, chalcopyrite, stannite, galena. Late stage I is characterized by Au-Ag mineralization such as electrum, Ag-bearing tetrahedrite, stephanite, boulangerite, pyrargrite, argentite, schirmerite, native silver, Ag-Te-Sn-S system, Ag-Cu-S system, pyrite, chalcopyrite and galena. Fluid inclusion data indicate that homogenization temperatures and salinity of stage I range from 171.6°C to 360.8°C and from 0.5 to 10.2 wt.% eq. NaCl, respectively. It suggest that ore forming fluids were cooled and diluted with the mixing of meteoric water. Also, Temperature (early stage I: 236~>380°C, late stage I: <197~272°C) and sulfur fugacity (early stage I:  $>10^{-7.8}$  atm., late stage I:  $10^{-14.2} \sim 10^{-16}$  atm.) deduced mineral assemblages from stage I decrease with paragenetic sequence. Sulfur (2.4~6.1% (early stage I=3.4~5.3%, late stage I=2.4~6.1%)), oxygen (4.5~8.8% (quartz: early stage I=6.3~8.8%, late stage I=4.5~5.6%)), hydrogen (-96~-70% (quartz: early stage I=-96~-70%, late stage I=-78~-74%, calcite: late stage I=-87~-76%)) and carbon (-6.8~-4.6% (calcite: late stage I)) isotope compositions indicated that hydrothermal fluids may be magmatic origin with some degree of mixing of another meteoric water for paragenetic time.

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

백운 금-은광상은 트라이아스기 또는 쥐라기의 엽리상화강섬록암내에 발달된 단층대를 충전한 천열수성 석영맥광상이다. 이 광상의 광화작용은 단층-각력대에 수반되며 2시기로 구분된다. I시기는 다시 조기와 말기로 구분되며 주된 광화시기이다. II시기는 광화작용이 관찰되지 않는다. I시기 조기는 모암변질과 유비철석, 황철석, 자류철석, 섬아연석, 백철석, 황동석, 황석 및 방연석이 관찰된다. I시기 말기는 금-은광물정출시기로 일렉트럼, 함은사면동석, 스테파나이트, 보울란제라이트, 농홍은석, 휘은석, 시르메라이트, 자연은, Ag-Te-Sn-S계 광물, Ag-Cu-S계 광물, 황철석, 황동석 및 방연석이 관찰된다. 유체포유물 자료에 의하면, 광화I시기의 균일화온도와 염농도는 각각 171.6~360.8°C, 0.5~10.2 wt.% 로써 광화유체가 천수의 혼입에 의한 냉각과 희석이 있었음을 지시한다. 또한, 광화I시기에 관찰되는 광물공생군으로부터 구한 생성온도(조기: 236~>380°C, 말기: <197~272°C)와 황분압(조기:  $>10^{-7.8}$  atm., 말기:  $10^{-14.2} \sim 10^{-16}$  atm.)이 광화작용이 진행됨에 따라 감소되어진다. 황(2.4~6.1% (조기=3.4~5.3%, 말기=2.4~6.1%)), 산소(4.5~8.8% (석영: 조기=6.3~8.8%, 말기=4.5~5.6%)), 수소(-96~-70% (석영: 조기=-96~-70%, 말기=-78~-74%, 방해석: 말기=-87~-76%)) 및 탄소(-6.8~-4.6% (방해석: 말기)) 동위원소값의 자료로 볼때, 이 광상의 광화유체는 마그마 기원의 유체가 주종을 이룬 것으로 보이며 광화작용이 진행됨에 따라 기원이 다른 천수의 혼입이 작용한 것으로 해석할 수 있다.

**주요어 :** 백운 금-은광상, 광화작용, 유체포유물, 동위원소.

\*Corresponding author: phklee@cnu.ac.kr

## 1. 서 언

백운광상은 트라이아스기내지 쥐라기의 염리상화강 섬록암 내에 발달된 NS방향의 단층대를 따라 충진한 열수성맥상석영맥광상으로 전라북도 진안군 백운면 신암리, 동경 $127^{\circ}27'45''$ , 북위  $35^{\circ}37'35''$ 에 위치한다(Fig. 1). 이 광상은 1939년 일본인에 의해 개발되었으며 1975년 김호권에 의해 이전등록 되었다. 그 후 1981년 대창광업주식회사에 의해 인수되어 재개발하였으나 1984년 이후 휴광중에 있는 광상이다. 필자들이 현장 지질조사를 수행했던 1983년에서 1984년까지 이 광상에서 Au 6,546 g, Ag 1,540,632 g을 생산하였다.

최근들어 원자재의 수급이 원활하지 못하고 국제사회의 불안에 따라 철, 금과 같은 광물자원의 가격이 급등하고 있다. 현재 국내에서 가행되고 생산실적이 있는 금-은광산은 거의 없고, 다만 순신광상등 몇 개의 소규모 광상만이 가행 중에 있다. 그리고 대한광업진흥공사에서도 해마다 부존가치가 있다고 판단되는 광상에 대해 정밀조사를 실시하고 있으며 한 예로 영덕, 홍덕, 해남 및 황성지역에서 새로운 부존자원을 발견하였다고 보고한 바도 있다. 기 보고된 자료에 의하면, 백운광상의 품위는 Au 2.2~20 g/t, Ag 550~600 g/t, Cu 1.2~1.6%, Pb 5.2%로서 비교적 높은 Au 및 Ag 품

위를 갖는 광상이다.

광상부근의 광역지질에 대하여는 김규봉 등(1984), 김용준과 이창신(1988)에 의한 연구가 있고, 광상 및 광상오염에 대하여는 대한광업진흥공사(1982), 이창신 등(1988), 이창신(1989), 전서령 등(2002)이 있으나 주로 광상의 광석광물에 대해 연구했을 뿐 유체포유물, 안정동위원소에 대한 연구는 아직 보고되어 있지 않다.

따라서 이 연구는 광상의 광물에 대한 공생관계, 화학조성, 유체포유물 및 안정동위원소 등을 규명하여 광상의 생성환경을 고찰하고자 한다.

## 2. 주변지질

백운광상의 주변지질은 이창신(1989), 전서령 등(2002)에 의해 보고되어 있어 여기에서는 간략하게 설명하고자 한다. 이 광상의 주변지질은 선캄브리아기의 흑운모편마암, 고생대의 변성퇴적암류, 화강편마암 및 트라이아스기~쥐라기의 염리상화강섬록암, 각섬암, 섬록암과 이들을 관입한 백악기 화강반암과 중성암맥 등이 분포한다(Fig. 2). 선캄브리아기의 흑운모편마암은 광상의 남부에 넓게 분포하며 염리의 일반적인 주향과 경사는 각각  $N70\sim85^{\circ}W$ ,  $50\sim80^{\circ}NE$ 를 갖는다. 이 암석의 구성광물은 석영, 정장석, 사장석, 흑운모, 변질광

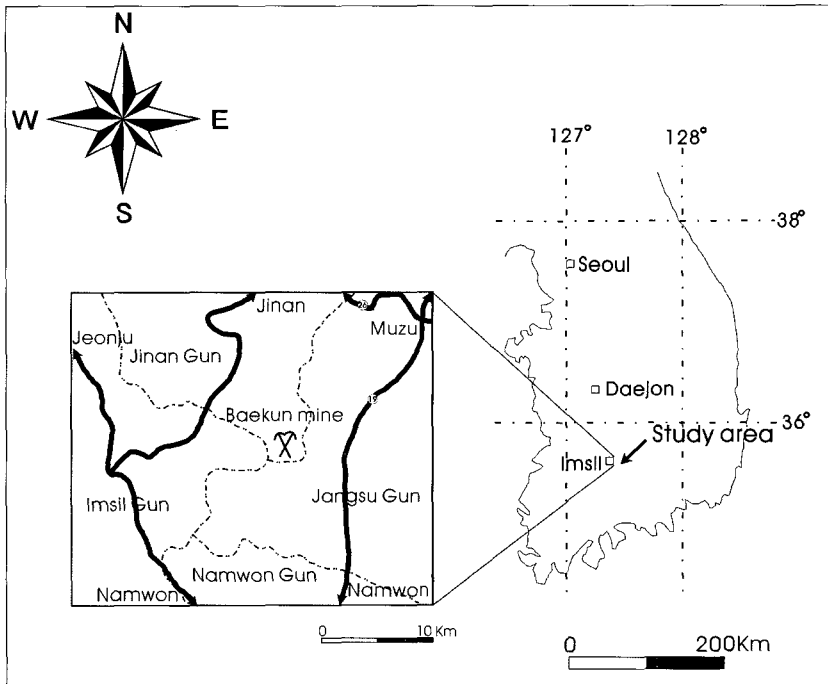


Fig. 1. Location map of the Baekun gold-silver deposit.

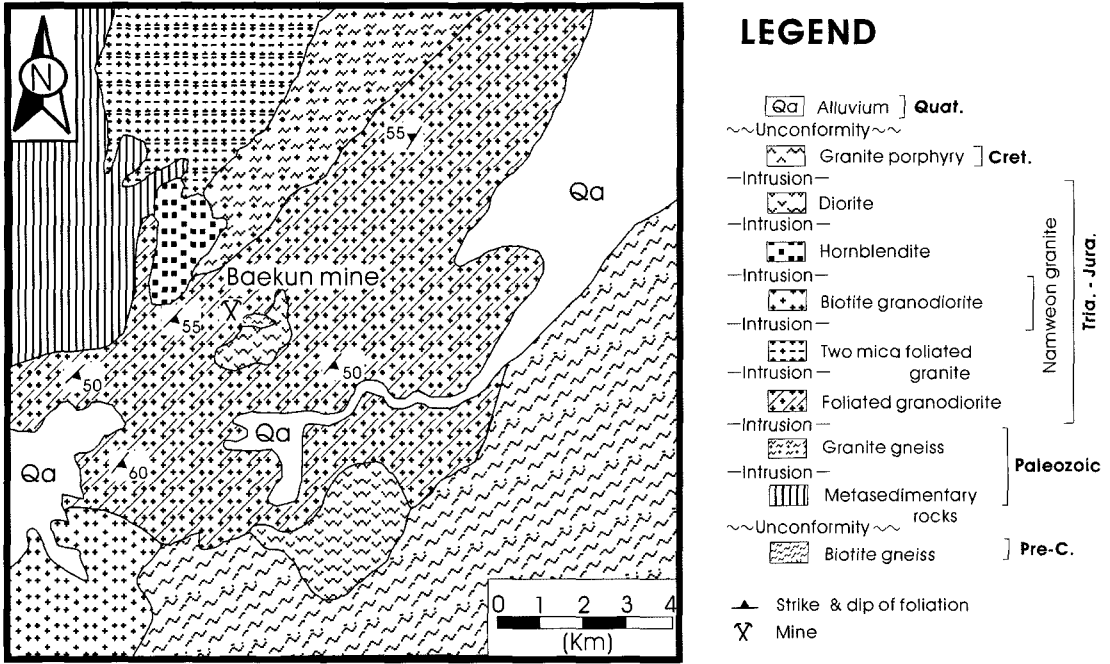


Fig. 2. Geological map of the Baekun gold-silver deposit (Modified from Lee, C.S., 1989).

물 및 불투명광물이다. 고생대의 변성퇴적암류는 광상의 북서부에 분포하며 주로 편암 및 천매암으로 구성된다. 엽리의 주향과 경사는 각각 N15~20°E, 80~85°SE이며 석영, 흑운모, 백운모, 녹니석, 미사장석, 사장석, 저어콘, 녹염석 및 견운모로 구성된다. 고생대의 화강편마암은 이 광상의 북서부에 남서-북동방향으로 분포된다. 이 암석은 중립내지 조립질이며 석영, 사장석, 흑운모, 미사장석, 백운모 및 견운모 등으로 구성되어 있다. 트라이아스기~쥐라기의 엽리상화강섬록암은 광상을 중심으로 넓게 분포하며 중립내지 조립질이며 구성광물은 석영, 사장석, 미사장석, 정장석, 흑운모, 견운모, 녹니석, 녹염석, 각섬석 및 불투명광물이다. 각섬암은 광상의 북서부에 압주상으로 분포하며 녹흑색을 띠고 중립질이다. 구성광물은 주로 각섬석이고 소량의 장석, 사장석, 휘석 및 감람석이 함유되어 있다. 섬록암은 광상의 남부에 압주상으로 엽리상화강섬록암을 관입하여 분포한다. 백악기의 화강반암은 광상의 남부에 엽리상화강섬록암과 섬록암을 관입하여 분포한다. 백악기 증성암맥은 광상을 형성하는 단층구조를 따라 N5~20°W방향으로 관입하였다. 구성광물은 주로 사장석이고 소량의 감섬석, 휘석, 견운모 및 녹니석이며 석영맥에 의해 절단된다

### 3. 광상

#### 3.1. 광상개요

광상은 엽리상화강섬록암내에 발달된 NS방향의 단층대를 따라 충진한 열수성 맥상석영맥광상이다. 석영맥의 주향은 NS내지 N5~20°W, 경사는 70~85°NE이며 맥폭은 0.05~0.8 m, 주향연장은 800 m, 심도는 120 m로 다소 심한 팽축을 보여지며 하부로 감에 따라 맥폭은 좁아진다. 또한 석영맥은 단층운동에 의해 절단되어 산출되기도 한다.

이 광상은 1939년 일본인에 의해 처음으로 개발되었으며 1975년 김호권에 의해 이전 등록되었다. 그후 1981년 태창광업(주)가 인수하여 재개발하다가 1984년 12월에 휴광한 광상이다. 광상은 휴광까지 상부로부터 상2갱, 상1갱, 본1갱, 하1갱 하2갱 및 하3갱을 개설하여 채굴하였으며 1983~1984년에 Au 6,546 g과 Ag 1,540,632 g을 생산하였다. 이들 갱중 1984년 휴광할때까지 주로 본1갱과 하1갱이 주 채광대상이 되었다. 상2갱과 상1갱은 일제시대에 주 채광대상이 된 갱들로 각각 약 140 m, 370 m 연맥굴진되었으며 지표까지 거의 채진된 상태이다. 본1갱은 180 m 크로스 굴진하여 본맥을 착맥한 후 450 m 연맥굴진하였다. 또한 이 갱은 상1갱방향으로 N향과 S향을 개설하여 채굴하였다.

이 갯에서 관찰되는 석영맥의 주향과 경사는 N15°W, 70°NE이나 갯막장에선 주향이 NS로 변화된다. 이 갯에서 관찰되는 석영은 수갱을 기준으로 북쪽 11.5 m 지점과 남쪽 13.5 m 지점에서 주맥에서 분지된 폭 0.2 m 정도의 석영맥이 관찰된다. 육안상 관찰되는 광석광물은 섬아연석, 유비철석, 자류철석, 황동석 및 방연석 등이며 위치에 따라 산출빈도와 산출량이 다르다. 하1갱은 본1갱 입구에서 240 m 지점에 설치되어 있는 수갱 하부 30 m 지점에서 남, 북으로 각각 400 m, 20 m가 연맥굴진 되어있다. 이 갯에서 관찰되는 석영맥의 주향

과 경사는 일반적으로 N15°W~NS, 70°NE이나 수갱 지점에서는 EW, 65°S의 석영맥도 관찰되며 맥폭은 0.1~0.3 m이다. 남쪽 막장으로 감에 따라 3~4조의 석영맥이 평행하게 산출되며, 여기에는 중성암맥이 평행하게 또는 교차하며 발달한다. 하2갱은 하1갱 하부 30 m 지점에 개설되어 수갱에서 북쪽으로 40 m 남쪽으로 170 m 연맥굴진하였다. 이 갯에서 관찰되는 석영맥의 주향과 경사는 N15~20°W, 65~85°NE이며 맥폭은 0.1~0.4 m이고 일부 구간에서 폭 0.3 m의 정동구조가 관찰되는 석영맥도 관찰된다. 하3갱은 하2갱 하부

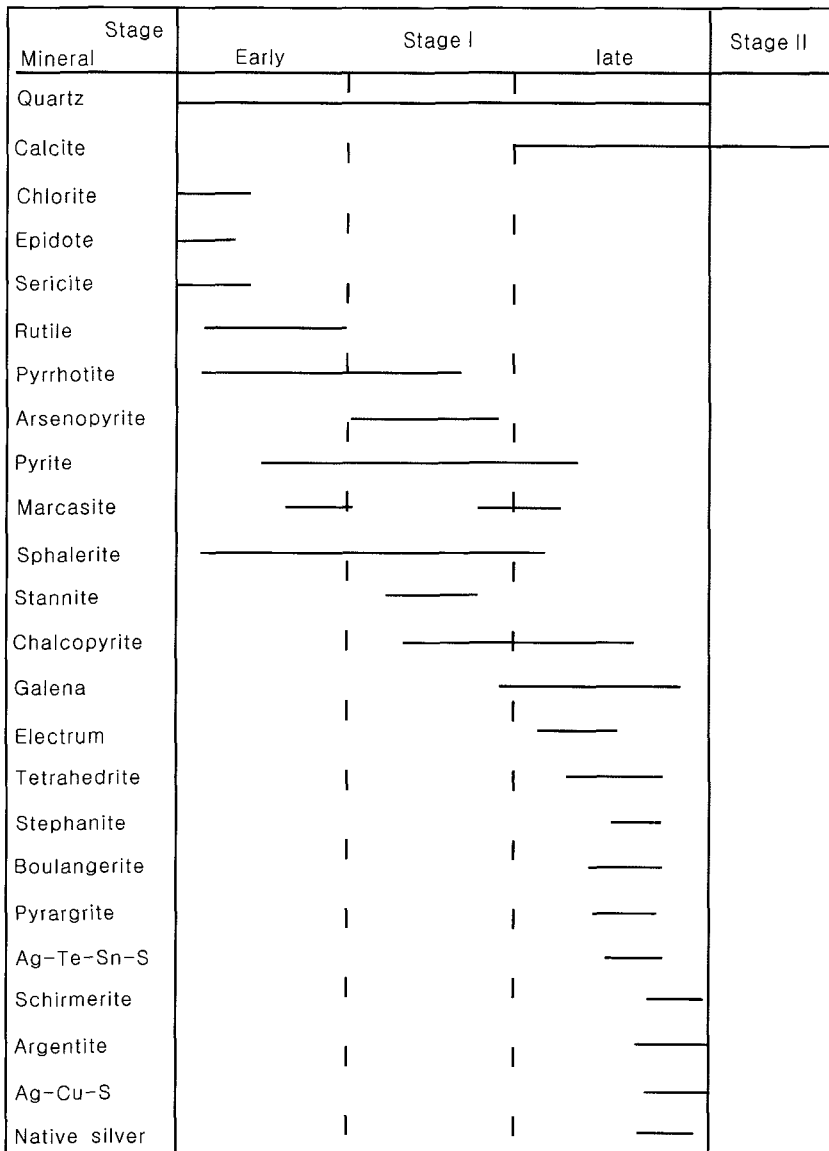


Fig. 3. Paragenetic sequence of mineralization at the Baekun gold-silver deposit.

30m지점에 개설되어 북쪽으로 50m 남쪽으로 70m 연 맥굴진되었으며 맥폭은 0.1~0.4m이다. 이 갱에서 관찰되는 석영맥의 주향과 경사는 NS~N15°W, 70~85°E, SE이며 북쪽 막장에선 맥이 침멸되거나 단층점으로 변화된다. 수갱 북쪽은 황동석의 산출량이 많고 남쪽은 자류철석의 산출량이 많다. 육안상 관찰되는 광석광물은

섬아연석, 유비철석, 자류철석, 황동석, 황철석, 방연석 등이다. 이 갱에선 수갱 남쪽 18m에서 중성암맥을 석영맥이 절단한다. 또한 방해석맥이 석영맥과 평행하게 산출되나 광석광물은 관찰되지 않는다.

이 광상의 품위는 Au 2.2~20 g/t, Ag 550~600 g/t, Cu 1.2~1.6% 및 Pb 5.2%이다.

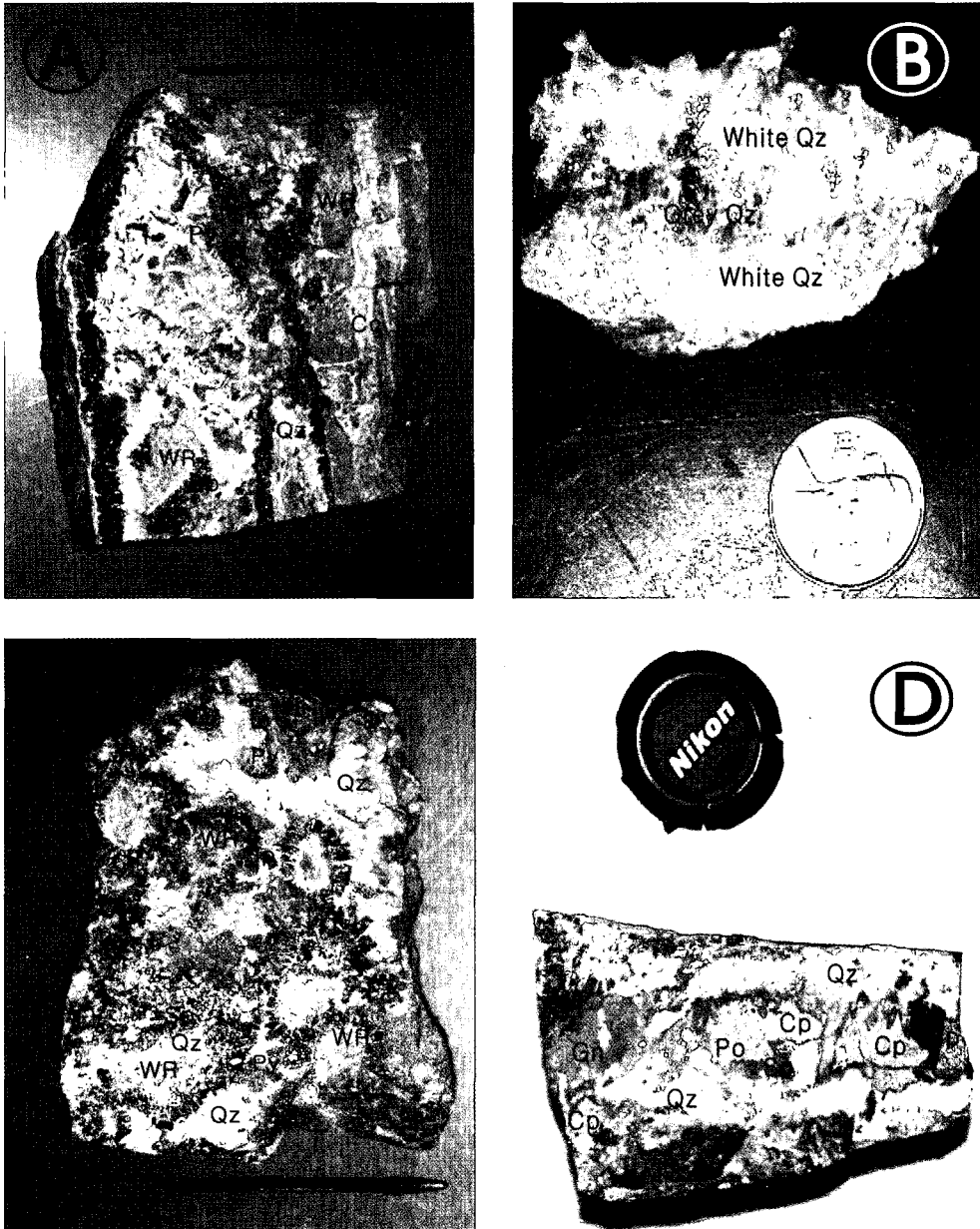


Fig. 4. Photographs of quartz and calcite vein samples from the Baekun gold-silver deposit. A and B; Multiphas breccia and crude banding around wallrock fragment, C; Quartz vein slab showing white quartz and ore, D; Quartz showing gradual variations in stage I. Abbreviation: WR; wallrock, Qz; quartz, Po; pyrrhotite, Py; pyrite, Sp; sphalerite, Cp; chalcopyrite, Gn; galena, Cc; calcite.

### 3.2. 광석과 광석광물

광상의 야외조사와 광석의 산출상태, 광물의 공생관계 및 조직을 기초로 한 백운광산의 광물 정출순서는 석영+방해석맥(I시기)과 방해석맥(II시기)으로 구성된다(Fig. 3). 석영+방해석맥은 하1갱이상에서 자형의 석영과 방해석이 관찰되며 하부로 감에 따라 이들은 괴상으로 산출된다. 방해석맥은 석영+방해석맥을 절단하거나 평행하게 발달하며 황화광물은 관찰되지 않는다. 석영+방해석맥은 모암으로부터 유백색 석영→회색 석영→유백색 석영+방해석으로 구성된다(Fig. 4-A, B). 석영맥은 빗살구조, 대상구조, 망상구조, 각력상구조 및 정동구조가 관찰된다(Fig. 4-C). 석영맥 내에 관찰되는 포획암은 각력나지 아각력의 다양한 크기로 산출된다. 광석광물은 모암의 각력사이를 뚫어 망상구조를 나타내거나 광맥상 광체를 형성한다. 석영매주변부에서 중심부로 감에 따라 유백색의 석영들이 성장하고(빗살구조)→섬아연석, 자류철석, 유비철석→황철석, 황동석, 방연석순으로 대상구조를 이루고 있다. 또한, 모암의 각력을 핵으로 하여 유백색의 석영결정들이 방사상으

로 성장하고 그 위를 섬아연석→황철석, 황동석, 방연석→황철석순으로 정출되어 있음이 관찰된다(Fig. 4-C, D). 이 광상에서 산출되는 광석광물의 상대적인 함량은 황철석 53.2%, 자류철석 18.8%, 유비철석 0.2%, 황동석 2.5%, 섬아연석 21.1% 및 방연석 4.3%이다. 이 광상에서 산출되는 광물은 석영, 방해석, 견운모, 녹니석, 녹염석, 금홍석, 자류철석, 유비철석, 황철석, 백철석, 섬아연석, 황석석, 황동석, 방연석, 일렉트럼, 함은사면동석, 농홍은석, 스테파나이트(stephanite), 보울란제라이트(boulangerite), 시르메라이트(schirmerite), Ag-Te-Sn-S계 광물, Ag-Cu-S계 광물, 휘은석 및 자연은 등이다. 일렉트럼은 주로 유비철석, 황동석, 방연석 및 석영과 함께 산출된다.

제 I시기; 이 시기는 모암변질 및 base metal 광석광물이 정출한 초기와 금-은 광석광물이 정출한 말기로 세분된다. 초기에는 견운모, 녹니석, 녹염석, 금홍석, 자류철석, 유비철석, 황철석, 섬아연석, 백철석, 황동석, 방연석이 산출된다. 모암변질대 내에 산출되는 광석광물은 자류철석, 섬아연석, 백철석 및 방연석이며 초기 석

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

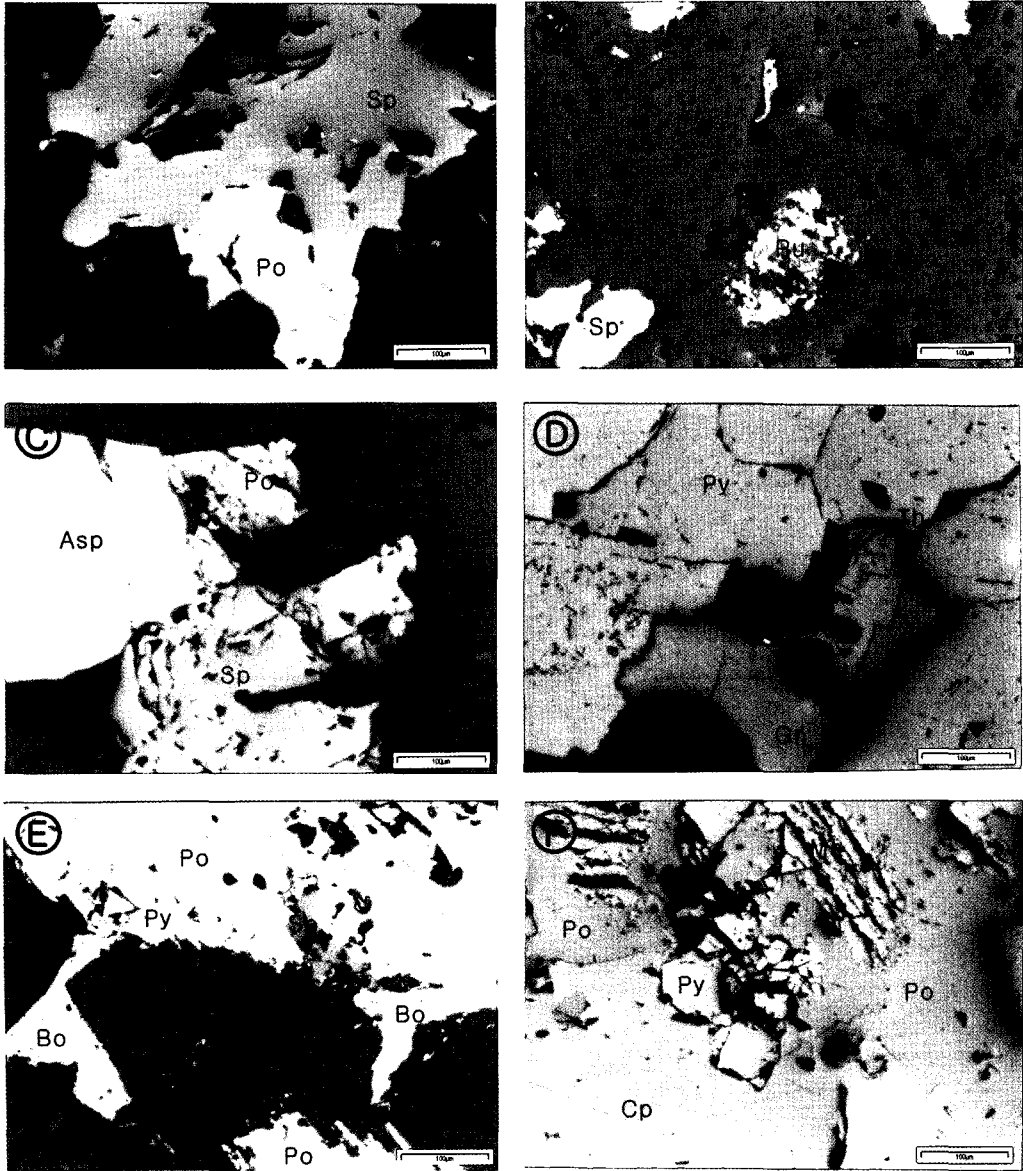
Stage	Sample No.	Weight %								Mole %		Associated minerals
		Zn	Fe	Mn	Cu	Cd	Sn	S	Total	FeS		
Early (wallrock alteration)	B.U.84720-4	53.78	11.88	0.50	0.04	0.53	0.00	33.67	100.38	20.26	Po, Ma, Gn	
	B.U.84720-4	54.16	11.78	0.27	0.01	0.59	0.00	33.13	99.93	20.09	Po, Ma, Gn	
	B.U.84720-4	54.32	11.72	0.64	0.02	0.53	0.00	33.58	100.80	19.84	Po, Ma, Gn	
	ditto	B.U.84720-4	53.98	11.53	0.64	0.00	0.51	0.00	33.76	100.41	19.69	Po, Ma, Gn
	ditto	B.U.722-A	54.99	10.77	0.23	0.10	0.50	0.00	33.41	100.01	18.47	Po, Py
Early	B.U.722-A	54.75	10.65	0.37	0.00	0.48	0.00	33.60	99.84	18.35	Po, Py	
	B.U.9A6	53.04	12.44	0.61	0.00	0.43	0.00	33.55	100.09	21.23	Asp	
	ditto	B.U.9A6(2)	53.41	11.74	0.70	0.02	0.45	0.00	33.13	99.44	20.13	Asp
	ditto	B.U.721-3(2)	53.35	11.65	0.39	0.01	0.61	0.00	33.77	99.78	20.11	Asp, Py
	ditto	B.U.721-3(2)	54.31	11.46	0.46	0.01	0.53	0.00	33.43	100.18	19.55	Po, Py, Ma
	ditto	B.U.721-3(2)	54.86	10.72	0.54	0.01	0.55	0.00	33.25	99.92	18.35	Asp
	ditto	B.U.721-3(3)	54.02	10.43	0.38	0.82	0.56	0.00	34.16	100.37	17.99	Py
	ditto	B.U.721-3	56.29	9.51	0.15	0.24	0.54	0.00	33.21	99.93	16.33	Py, St
	ditto	B.U.84709-1(2)	53.46	11.62	0.67	0.01	0.59	0.00	33.33	99.67	19.93	Asp, Py
	ditto	B.U.84721-2(2)	54.21	11.31	0.56	0.00	0.55	0.00	32.78	99.58	19.33	Po, Cp
	ditto	B.U.84721-2	56.12	10.17	0.24	0.08	0.49	0.00	33.73	100.83	17.33	Po, Py, Ma
	ditto	B.U.84720-3	54.95	10.85	0.49	0.19	0.51	0.00	33.43	100.41	18.47	Po, Cp
	ditto	B.U.84720-3	55.62	10.88	0.18	0.11	0.61	0.00	33.01	100.41	18.45	Po, Cp
	ditto	B.U.722-A(2)	55.96	10.01	0.27	0.06	0.51	0.00	33.76	100.56	17.14	Po
	ditto	B.U.84720-2(2)	54.89	10.67	0.30	0.11	0.48	0.00	32.82	99.26	18.33	Po, Py, Ma
ditto	B.U.84720-2	56.43	9.70	0.15	0.39	0.54	0.00	33.52	100.74	16.53	Cp	
ditto	B.U.84720-2	56.45	8.61	0.01	1.49	0.60	0.00	33.38	100.54	14.73	Po, Cp	
ditto	B.U.84720-2	57.70	7.80	0.05	0.83	0.68	0.00	32.66	99.71	13.40	Cp	
ditto	B.U.84720-5	56.53	7.98	0.00	1.40	0.64	0.00	32.92	99.47	13.80	Asp, Py, Cp	
ditto	B.U.84720-5	56.58	7.92	0.01	1.20	0.68	0.00	32.98	99.37	13.74	Asp, Py, Cp	
ditto	B.U.84720-5	57.91	7.76	0.01	0.34	0.68	0.00	32.98	99.68	13.41	Asp, Py, Cp	

Po; pyrrhotite, Asp; arsenopyrite, Py; pyrite, Ma; marcasite, Sp; sphalerite, St; stannite, Cp; chalcopyrite, Gn; galena. Values in parentheses are analyzed number.

영맥 내에 산출되는 광석광물은 유비철석, 황철석, 섬아연석 및 황동석이다.

자류철석은 심부로 감에 따라 산출량과 산출빈도가 높으며 석영맥 내에 괴상으로 섬아연석, 황철석과 함

께 산출된다. 이 광물은 현미경하에서 단독 또는 금홍석, 섬아연석 및 방연석과 함께 산점상으로 산출된다 (Fig. 5-A). 섬아연석은 산출빈도와 산출량이 가장 높으며 모암변질대 및 조기 석영맥 내에 산출된다. 이 광



**Fig. 5.** Photomicrographs of ore minerals from the Baekun gold-silver deposit. A; Pyrrhotite coexisting with sphalerite, B; Sphalerite coexisting with rutile, C; Arsenopyrite and sphalerite coexisting with pyrrhotite, D; Galena with tetrahedrite partly replacing and infilling fracture of sphalerite and pyrite, E; Boulangerite partly replacing pyrrhotite and sphalerite, F; Marcasite, pyrite and chalcocyanite partly replacing pyrrhotite, G; Stephanite coexisting with galena, H; Ag-Te-Sn-S mineral coexisting with galena, I; Argentite and Ag-Cu-S mineral infilling fracture of chalcocyanite, J; Stannite coexisting with sphalerite. Abbreviation: Asp; arsenopyrite, Po; pyrrhotite, Ru; rutile, Py; pyrite, Sp; sphalerite, Ma; marcasite, St; stannite, Cp; chalcocyanite, Gn; galena, Th; tetrahedrite, Bo; boulangerite, Sn; stephanite, Ag; argentite, Ag-Te-Sn-S; Ag-Te-Sn-S mineral, Ag-Cu-S; Ag-Cu-S mineral. Scale bar indicated 100 micron in length.

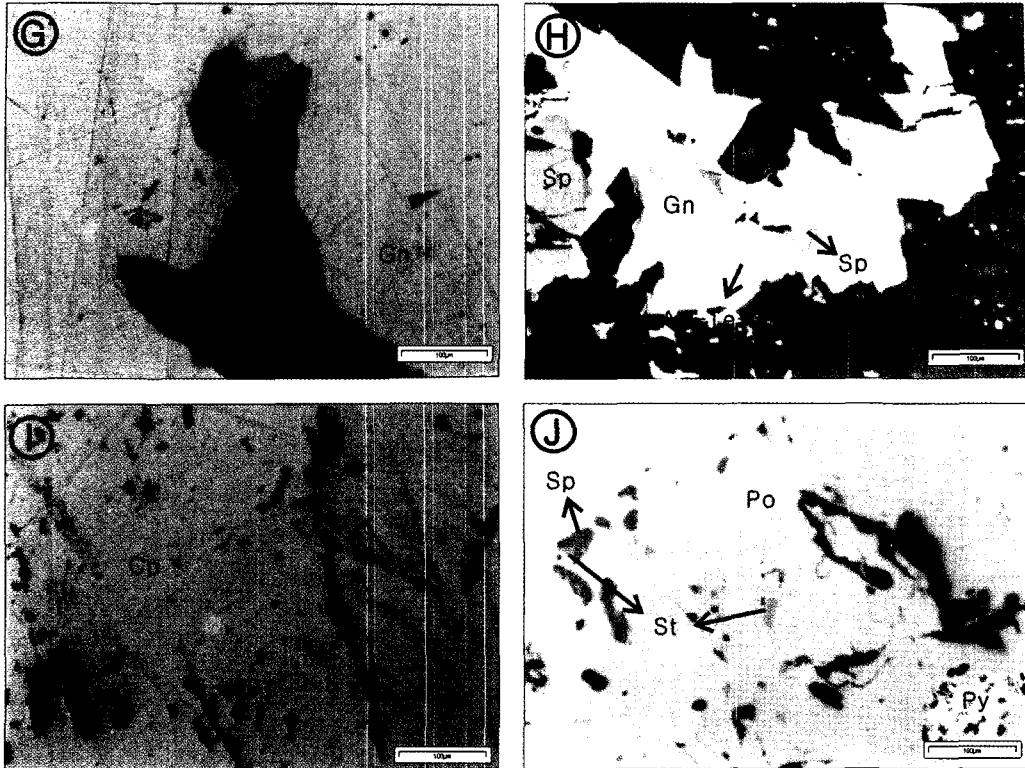


Fig. 5. Continued.

Table 2. Chemical composition of arsenopyrites from the Baekun gold-silver deposit.

Stage	Sample No.	Weight %								Atomic %		Associated minerals
		Fe	As	Co	Ni	Bi	Sb	S	Total	Fe	As	
Early	B.U.84709-1	34.71	44.83	0.13	0.00	0.08	0.09	19.96	99.80	33.67	32.42	Sp, Py, Cp
ditto	B.U.84709-1	34.76	44.55	0.04	0.00	0.10	0.09	19.92	99.46	33.82	32.31	Sp, Py, Cp
ditto	B.U.9A6(2)	34.28	44.45	0.17	0.00	0.08	0.06	20.52	99.55	33.17	32.06	Sp, Cp
ditto	B.U.721-3(2)	35.13	44.72	0.04	0.01	0.06	0.06	19.99	99.99	33.99	32.26	Sp, Py, Cp
ditto	B.U.721-3	35.27	44.69	0.12	0.02	0.05	0.07	20.35	100.58	33.85	31.96	Sp, Py, Cp
ditto	B.U.721-3(2)	35.25	43.41	0.08	0.01	0.07	0.10	21.11	100.03	33.74	30.97	Sp, Py, Cp
ditto	B.U.84720-5	34.90	43.88	0.06	0.02	0.09	0.02	20.51	99.46	33.74	31.62	Sp, Py, Cp
ditto	B.U.84720-5	35.36	43.59	0.01	0.01	0.08	0.00	20.58	99.64	34.08	31.32	Sp, Py, Cp

Py; pyrite, Sp; sphalerite, Cp; chalcopyrite. Values in parentheses are analyzed number.

물은 모암변질대 내에는 미량으로 산출되어 육안상 관찰은 어렵고 현미경하에서 단독 또는 자류철석, 금홍석등과 함께 산출된다(Fig. 5-B). 초기 석영맥에서 산출되는 섬아연석은 석영맥 주변부나 모암각력을 중심으로 단독 또는 황철석, 유비철석, 황동석 및 방연석과 함께 대상구조로 산출되거나 자류철석, 황동석, 방연석과 함께 괴상으로 산출되기도 한다. 현미경하에서 섬아연석은 유비철석, 황철석, 자류철석, 황동석, 백철석 및 황석석과 함께 산출된다. 모암변질대 및 초기에 산출된 섬

아연석은 황동석의 용리조직이 관찰되지 않지만 광화학용이 진행됨에 따라 용리조직이 잘 관찰된다. EPMA에 의한 모암변질대 및 초기 석영맥 내 섬아연석의 정량분석 결과, FeS mole %는 각각 18.4~20.3와 13.4~21.2까지 함유되어 있다(Table 1).

유비철석은 초기 석영맥 주변부에서 섬아연석 및 황철석과 함께 산점상 또는 단독으로 산출된다. 현미경하에서 섬아연석, 황철석 및 황동석과 함께 산출되는 것(Fig. 5-C), 또는 석영 내에 단독으로 산출되는 것



**Table 3.** Chemical composition of stannites from the Baekun gold-silver deposit.

Stage	Sample No.	Weight %								log (X <sub>FeS</sub> /X <sub>ZnS</sub> )	Mineral
		Cu	Fe	Sn	Zn	Mn	Cd	S	Total		
Early	B.U.84720-2	29.45	11.99	25.55	0.89	0.02	-	31.69	99.60	1.20	Stannite
ditto	B.U.721-3	28.76	13.28	25.56	1.69	0.00	0.00	29.92	99.21	0.96	Stannite
ditto	B.U.721-3	27.92	14.28	25.79	2.21	0.03	0.00	29.77	100.01	0.88	Stannite
ditto	B.U.84720-2(2)	0.11	10.67	0.00	54.89	0.30	0.48	32.82	99.26	-0.64	Sphalerite
ditto	B.U.84720-2	0.39	9.70	0.00	56.43	0.15	0.54	33.52	100.74	-0.70	Sphalerite
ditto	B.U.84720-2	1.49	8.61	0.00	56.45	0.01	0.60	33.38	100.54	-0.75	Sphalerite
ditto	B.U.84720-2	0.83	7.80	0.00	57.70	0.05	0.68	32.66	99.71	-0.80	Sphalerite
ditto	B.U.721-3(2)	0.01	11.65	0.00	53.35	0.39	0.61	33.77	99.78	-0.59	Sphalerite
ditto	B.U.721-3(2)	0.01	11.46	0.00	54.31	0.46	0.53	33.43	100.18	-0.61	Sphalerite
ditto	B.U.721-3(2)	0.01	10.72	0.00	54.86	0.54	0.55	33.25	99.92	-0.64	Sphalerite
ditto	B.U.721-3(3)	0.82	10.43	0.00	54.02	0.38	0.56	34.16	100.37	-0.65	Sphalerite
ditto	B.U.721-3	0.24	9.51	0.00	56.29	0.15	0.54	33.21	99.93	-0.70	Sphalerite

logKd=2.8×10<sup>3</sup>×T<sup>-1</sup>-3.5, Kd=(X<sub>FeS</sub>/X<sub>ZnS</sub>)stannite/(X<sub>FeS</sub>/X<sub>ZnS</sub>)sphalerite (Shimizu and Shikazono, 1985; Nakamura and Shima, 1982). Values in parentheses are analyzed number.

※Sphalerite-stannite geothermometry=236~290°C

**Table 4.** Chemical compositions of electrum from the Baekun gold-silver deposit.

Stage	Sample No.	Weight %			Atomic %			Associated minerals	
		Au	Ag	Total	Au	Ag	Ag/Au		
Late ditto	B.U-B-3-1	64.91	35.82	100.73	49.81	50.19	1.01	Asp, Gn, CP	
		58.45	42.23	100.68	43.12	56.88	1.32	Asp, Gn	
		56.03	44.81	100.81	40.64	59.36	1.46	Asp, Gn	
	ditto	53.91	47.02	100.93	38.57	61.43	1.59	Asp, Gn	
		B.U-B-3-4	68.02	31.53	99.93	54.16	45.84	0.85	Cp, Gn
		ditto	32.98	67.54	100.52	21.10	78.90	3.74	Cp, Gn
		B.U-B-3-2	58.37	40.98	99.35	43.82	56.18	1.28	Sp, Gn
		ditto	38.54	60.94	99.48	25.72	74.28	2.89	Gn, Cp
		B.U-B-3-5	43.17	56.12	99.29	29.64	70.36	2.37	Gn

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

등이 있다. EPMA에 의한 4개 시료 8개 입자 11점에 대한 정량분석 결과는 Table 2와 같으며 As atomic % 함량은 31.0~32.4이다. 황철석은 조기 석영맥주변부에서 자류철석, 유비철석 및 섬아연석과 함께 괴상 또는 반자형으로 산출되거나 석영맥내에 단독으로 산출된다. 현미경하에서 자류철석, 섬아연석, 유비철석 및 백철석과 함께 산출되는 것, 황동석 및 방연석에 의해 충전된 것(Fig. 5-D), 방연석과 황동석에 의해 포획되어 산출되는 것 등이 있다. 백철석과 방연석은 모암변질대에 소량 관찰되며 현미경하에서 단독 또는 자류철석, 금홍석 및 섬아연석과 함께 산출된다. 황석석은 육안상 관찰하기 어렵고 현미경하에서 섬아연석 및 자류철석과 함께 산출된다(Fig. 5-J). EPMA에 의한 2개 시료 3개 입자 3점에 대한 정량분석 결과는 Table 3과 같다.

말기는 금-은광화시기로 주요 광석광물로는 황철석,

백철석, 황동석, 방연석, 일렉트럼, 함은사면동석, 농홍은석, 스테파나이트, 보울란제라이트, 시르메라이트, Ag-Te-Sn-S계 광물, Ag-Cu-S계 광물, 휘은석 및 자연은과 맥석광물로 석영과 방해석이 산출된다.

황철석은 정동 내에 자형의 석영 결정과 함께 방연석 및 황동석과 함께 산출된다. 또한 자형의 방해석 결정상에 자형의 미립자로 유비철석, 자류철석과 함께 산출된다. 현미경하에서 백철석, 황동석 및 방연석과 함께 산출되는 것 등이 있다(Fig. 5-F). 백철석은 육안으로 관찰하기 어렵고 현미경하에서 황철석과 함께 산출된다. 황동석과 방연석은 섬아연석에 비해 산출빈도와 산출량이 적으나 석영맥의 정동 내에 황철석과 함께 자형 또는 반자형으로 산출된다. 이들 광물은 현미경하에서 금-은 광물과 밀접한 관계를 갖고 산출되며 조기에 정출한 광물들에 대해 교대 또는 충전한 형태로 산출된다.

Table 5. Chemical composition of some minerals from the Baekun gold-silver deposit.

Stage	Sample No.	Weight %										Total	Structural formulae	Mineral			
		Pb	Ag	Fe	Cu	Zn	As	Te	Sn	Sb	S						
Late	B.U.-B-3-16		68.05		0.01		0.24						16.35	15.07	99.73	Ag <sub>5.34</sub> (As <sub>0.03</sub> Sb <sub>1.14</sub> ) <sub>1.17</sub> S <sub>4</sub>	Stephanite
ditto	ditto		67.15		0.17		0.00						16.51	15.32	99.16	(Ag <sub>5.21</sub> Cu <sub>0.02</sub> S <sub>2.23</sub> Sb <sub>1.14</sub> )S <sub>4</sub>	
ditto	B.U.-84720-2		67.54			0.26							15.04	15.51	99.36	Ag <sub>5.18</sub> (As <sub>0.03</sub> Sb <sub>1.02</sub> ) <sub>1.05</sub> S <sub>4</sub>	
ditto	ditto		69.19			0.49							14.92	16.42	101.02	Ag <sub>5.01</sub> (As <sub>0.05</sub> Sb <sub>0.96</sub> ) <sub>1.01</sub> S <sub>4</sub>	
ditto	B.U.-B-3-2		68.75										15.70	15.67	100.12	Ag <sub>5.22</sub> Sb <sub>1.06</sub> S <sub>4</sub>	
ditto	ditto		60.25										22.40	19.13	101.77	Ag <sub>2.81</sub> Sb <sub>0.93</sub> S <sub>3</sub>	Pyrrangyrite
ditto	ditto	54.56											26.83	17.71	99.10	Pb <sub>2.38</sub> Sb <sub>1.99</sub> S <sub>5</sub>	Boulangerite
ditto	ditto	54.07											26.78	17.62	98.48	Pb <sub>2.37</sub> Sb <sub>2</sub> S <sub>5</sub>	
ditto	ditto	54.65											26.17	17.51	98.32	Pb <sub>2.41</sub> Sb <sub>1.97</sub> S <sub>5</sub>	
ditto	B.U.-84721-2	52.88			0.00			0.12					26.04	19.63	98.67	Pb <sub>2.08</sub> Sb <sub>1.75</sub> S <sub>5</sub>	
ditto	ditto	51.78			0.00	0.03		0.16					27.40	20.71	100.08	Pb <sub>1.93</sub> Sb <sub>1.74</sub> S <sub>5</sub>	
ditto	ditto	51.25			0.02	0.00		0.17					27.48	21.05	99.98	Pb <sub>1.88</sub> Sb <sub>1.71</sub> S <sub>5</sub>	
ditto	ditto	50.36			0.05	0.01		0.12					27.54	20.43	98.50	Pb <sub>1.91</sub> Sb <sub>1.77</sub> S <sub>5</sub>	
ditto	B.U.-84721-2	58.88					22.48	8.55					10.03	99.94	Ag <sub>6.98</sub> Te <sub>2.23</sub> Sn <sub>0.92</sub> S <sub>4</sub>		
ditto	B.U.-84720-2	63.18					15.22	9.00					11.53	98.92	Ag <sub>6.51</sub> Te <sub>1.33</sub> Sn <sub>0.84</sub> S <sub>4</sub>		
ditto	ditto	61.27					16.41	9.22					11.92	98.81	Ag <sub>6.11</sub> Te <sub>1.38</sub> Sn <sub>0.84</sub> S <sub>4</sub>		
ditto	B.U.-84720-3	62.72					17.02	8.99					11.43	100.16	Ag <sub>6.52</sub> Te <sub>1.5</sub> Sn <sub>0.85</sub> S <sub>4</sub>		
ditto	B.U.-721-3	31.10	5.67	14.74		0.81							25.92	22.00	100.22	(Ag <sub>5.46</sub> Fe <sub>1.92</sub> Cu <sub>4.39</sub> ) <sub>11.77</sub> (As <sub>0.2</sub> Sb <sub>4.03</sub> ) <sub>4.23</sub> S <sub>13</sub>	Ag-Te-Sn-S
ditto	ditto	31.97	5.77	13.94		0.47							25.84	21.91	99.88	(Ag <sub>5.64</sub> Fe <sub>1.97</sub> Cu <sub>4.17</sub> ) <sub>11.78</sub> (As <sub>0.12</sub> Sb <sub>4.04</sub> ) <sub>4.16</sub> S <sub>13</sub>	
ditto	ditto	33.73	5.06	12.68		0.86							26.68	21.77	100.78	(Ag <sub>5.99</sub> Fe <sub>1.73</sub> Cu <sub>3.82</sub> ) <sub>11.54</sub> (As <sub>0.22</sub> Sb <sub>4.20</sub> ) <sub>4.42</sub> S <sub>13</sub>	
ditto	ditto	30.36	6.24	15.33		0.06							25.46	22.26	99.71	(Ag <sub>5.27</sub> Fe <sub>2.09</sub> Cu <sub>4.52</sub> ) <sub>11.88</sub> (As <sub>0.02</sub> Sb <sub>3.92</sub> ) <sub>3.94</sub> S <sub>13</sub>	
ditto	ditto	29.22	6.57	16.05		0.00							25.17	22.26	99.27	(Ag <sub>5.07</sub> Fe <sub>2.2</sub> Cu <sub>4.73</sub> ) <sub>12</sub> Sb <sub>3.87</sub> S <sub>13</sub>	
ditto	ditto	25.18	6.60	17.63		0.02							26.53	22.72	98.67	(Ag <sub>4.28</sub> Fe <sub>2.17</sub> Cu <sub>5.09</sub> ) <sub>11.54</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub>	
ditto	B.U.-84720-2	30.64	5.16	14.48		1.13							26.13	21.94	99.47	(Ag <sub>5.4</sub> Fe <sub>1.76</sub> Cu <sub>4.33</sub> ) <sub>11.49</sub> (As <sub>0.29</sub> Sb <sub>4.08</sub> ) <sub>4.37</sub> S <sub>13</sub>	
ditto	ditto	30.43	6.37	15.06		0.70							25.41	22.46	100.44	(Ag <sub>5.23</sub> Fe <sub>2.12</sub> Cu <sub>4.4</sub> ) <sub>11.75</sub> (As <sub>0.17</sub> Sb <sub>3.87</sub> ) <sub>4.01</sub> S <sub>13</sub>	
ditto	ditto	31.12	6.31	12.16		0.06							25.51	21.73	99.88	(Ag <sub>5.53</sub> Fe <sub>2.17</sub> Cu <sub>3.67</sub> ) <sub>11.37</sub> (As <sub>0.05</sub> Sb <sub>4.02</sub> ) <sub>4.04</sub> S <sub>13</sub>	
ditto	ditto	31.37	6.08	15.10		0.06							25.91	22.02	100.54	(Ag <sub>5.3</sub> Fe <sub>2.06</sub> Cu <sub>4.5</sub> ) <sub>12.06</sub> (As <sub>0.02</sub> Sb <sub>4.03</sub> ) <sub>4.05</sub> S <sub>13</sub>	
ditto	ditto	30.71	5.88	15.64		0.11							25.83	22.49	100.67	(Ag <sub>5.28</sub> Fe <sub>1.95</sub> Cu <sub>4.56</sub> ) <sub>11.8</sub> (As <sub>0.03</sub> Sb <sub>3.93</sub> ) <sub>3.96</sub> S <sub>13</sub>	
ditto	ditto	30.81	5.40	15.22		0.05							26.57	22.09	100.14	(Ag <sub>5.39</sub> Fe <sub>1.82</sub> Cu <sub>4.52</sub> ) <sub>11.73</sub> (As <sub>0.01</sub> Sb <sub>4.12</sub> ) <sub>4.13</sub> S <sub>13</sub>	
ditto	ditto	29.63	6.30	15.81		0.23							25.21	22.39	99.58	(Ag <sub>5.11</sub> Fe <sub>2.1</sub> Cu <sub>4.63</sub> ) <sub>11.84</sub> (As <sub>0.06</sub> Sb <sub>3.85</sub> ) <sub>3.91</sub> S <sub>13</sub>	
ditto	B.U.-84720-3	30.61	6.45	15.96		0.01							25.51	22.45	100.98	(Ag <sub>5.27</sub> Fe <sub>2.14</sub> Cu <sub>4.66</sub> ) <sub>12.07</sub> Sb <sub>3.89</sub> S <sub>13</sub>	
ditto	B.U.-84720-2	85.07											14.09	99.16	Ag <sub>1.8</sub> S	Argentite	
ditto	B.U.-84720-2	35.85		39.61									25.60	101.06	(Ag <sub>0.42</sub> Cu <sub>0.78</sub> ) <sub>1.2</sub> S	Ag-Cu-S	

일렉트럼은 주로 방연석과 황동석등과 밀접한 공생 관계를 갖고 산출된다. EPMA에 의한 4개 시료 9개 입자 9점에 대한 정량분석 결과는 Table 4와 같다. 이 도표에서와 같이 백운광상의 일렉트럼은 21.1~54.2 atomic % Au의 조성을 갖는다. 함은사면동석은 함은광물들 중에 산출빈도와 산출량이 가장 많으며 주로 방연석, 황동석 및 황철석 등과 밀접한 공생관계를 가지고 산출된다(Fig 5-D). EPMA 분석에 의한 정량분석 결과는 Table 5와 같다. 이를 total metal-(As+Sb)-S계 삼각도에 도시하여 보면 stoichiometric 사면동석과 거의 유사하거나 As+Sb가 약간 부화되어 있음을 알 수 있다. Ag의 함량은 구리를 치환하여 25.2~33.7%까지 함유됨을 알 수 있다. 보울란제라이트는 방연석 및 방해석과 함께 또는 단독으로 산출되며(Fig. 5-E) EPMA 분석에 의한 정량분석 결과는 Table 5와 같다. 이 도표에서 보는 바와 같이 Pb에 소량 Cu와 Zn이 그리고 Sb에 소량 Sn이 치환되어 있음을 알 수 있다. 스테파나이트는 방연석 및 황동석 등과 밀접한 공생관계를 갖고 산출된다(Fig. 5-G). EPMA 분석에 의한 정량분석 결과 Ag를 Cu (0.01~0.17 wt.%)가, Sb를 As (0.00~0.49 wt.%)이 소량 치환하고 있음을 알 수 있다 (Table 5).

농홍은석은 방연석 등과 함께 산출되며 EPMA 분석에 의한 정량분석 결과는 Table 5와 같다. Ag-Te-Sn-S계 광물은 방연석 내에 단독으로 산출되며(Fig. 5-H) EPMA 분석에 의한 정량분석 결과는 Table 5와 같다. 이 도표에서 보는 바와 같이 Ag (58.9~63.2 wt.%), Te (15.2~22.5 wt.%), Sn (8.6~9.2 wt.%) 및 S (10.0~11.9 wt.%)의 함량을 갖는다. Ag-Cu-S계 광물은 황동석과 함께 산출되며(Fig. 5-I), EPMA 분석에 의한 정량분석 결과는 Table 5와 같다. 이 도표에서 보는 바와 같이 Ag (35.9 wt.%), Cu (39.6 wt.%) 및 S (25.6 wt.%)의 함량을 갖는다. 휘은석은 황동석과 함께 산출되며(Fig. 5-I) EPMA 분석에 의한 정량분석 결과는 Table 5와 같다.

제 II시기; 이 시기는 괴상의 방해석만 정출한 시기로 황화광물은 관찰되지 않는다.

## 4. 유체포유물

### 4.1. 연구방법

유체포유물 연구는 광화작용과 관련된 유체의 진화와 광물 침전시 온도 및 유체의 화학성분 등을 규명하는데 이용된다. 백운광상의 광화I시기에 산출되는 백색

석영 및 회색석영과 방해석에 대해 연마박편을 제작하여 실험하였다. 유체포유물의 산출상태, 가열 및 냉각 실험은 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<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O+CO<sub>2</sub>)를 이용하여 보정을 실시하였다. 측정오차는 냉각실험시 ±0.1°C, 가열실험시 ±0.5°C이다.

### 4.2. 산출상태

이 광상에서 산출되는 유체포유물의 형태는 negative form, subround, tabular 및 불규칙형으로 산출되며 크기는 수 μm에서 60 μm정도이다. 실온(25°C)에서 관찰되는 유체포유물의 상의 종류, 성분 및 가열시험시 균일화되는 상의 변화에 의거하여 백운광상의 광화I시기에 산출되는 백색석영 및 회색석영과 방해석 내의 유체포유물은 액상포유물로 산출된다. 액상포유물은 기상과 액상의 2상으로 충전도가 50%미만이며 가열시 대부분 액상으로 균일화된다. 또한 백색석영 및 회색석영에서 산출되는 포유물의 형태, 크기, 상의 종류, 성분 및 균일화온도에서 차이가 없어 유체포유물에 대한 기술에서 석영으로 일괄 기술하였다.

### 4.3. 냉각 및 가열 실험

이 광상에서 산출되는 석영과 방해석 내의 유체포유물에 대한 냉각 및 가열 실험 방법과 결과는 다음과 같다.

유체포유물은 40°C에서 VH<sub>2</sub>O의 물체적이 <0.2(석영)과 <0.5(방해석)로서 모두 액상포유물이다. VH<sub>2</sub>O의 물체적은 Bodnar (1983)가 제시한 방법에 의해 계산하였으며 오차 범위는 ±5%이다. 액상포유물은 냉각시 VH<sub>2</sub>O의 응축온도는 -35.4~-31.2°C이며 최초응응온도(Te-ice)는 -22.6°C이다. 이것은 aqueous 용액중에 해리된 염이 주로 NaCl로 존재함을 의미한다. 액상포유물의 Tm-ice (final melting temperature of ice)는 -6.8~-0.3°C이며 Bodnar and Vityk (1994)가 제시한 방정식을 이용하여 염농도(wt.% eq. NaCl)로 환산하면 0.5~10.2(석영: 0.5~10.2, 방해석 0.7~5.1)이다(Fig. 6). 이 포유물은 가열시 모두 액상으로 균일화되나 국부적으로 기상으로 균일화되는 것도 관찰되며 균일화온도는 171.6~360.8°C(석영: 178.7~360.8°C, 방해석: 171.6~272.3°C)이다(Fig. 7). 일부 액상포유물 내에 고상을 함유한 포유물이 관찰된다. 이 고상은 평행하게

쪼개짐이 발달하고 평행소광으로 보아 대부분이 운모이며 외부광물(foreign mineral)이다. 이 포유물의 물체적은 <0.3이며 액상 포유물이다. 이 포유물의 Tm-ice는 -5.1~-4.2°C로서 염농도(wt.% eq. NaCl)로 환산하면 6.7~8.0이며 균일화온도는 254.7~294.1°C이다.

이 광상에서 산출되는 유체포유물의 염농도와 균일화온도의 관계를 도시하면 Fig 8과 같다. 이 그림에서

와 같이 균일화온도와 염농도가 급격히 떨어짐을 알 수 있다. 그리고 일부 구간에서 균일화온도가 감소함에 따라 염농도가 증가한다.

### 5. 안정동위원소

#### 5.1. 연구방법

안정동위원소 분석에 이용된 시료는 광화시기 및 광물공생관계를 고려하여 다음과 같이 선택하였다. 황안정동위원소 분석을 위한 시료는 광화시기의 유비철석, 섭이연석, 황동석 및 방연석을 대상으로 하였다. 산소 및 수소안정동위원소 분석을 위한 시료는 광화시기의 석영 및 방해석을 대상으로 하였다.

안정동위원소 분석은 중국지질대학(武漢)에서 실시하였다. 황동위원소분석은 황화광물과 CuO를 함께 1000°C까지 올린 후 발생한 SO<sub>2</sub> 성분을 포집하여 분

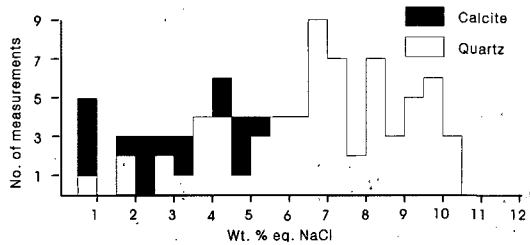


Fig. 6. Frequency diagram of salinities for fluid inclusions in quartz and calcite from the Baekun gold-silver deposit.

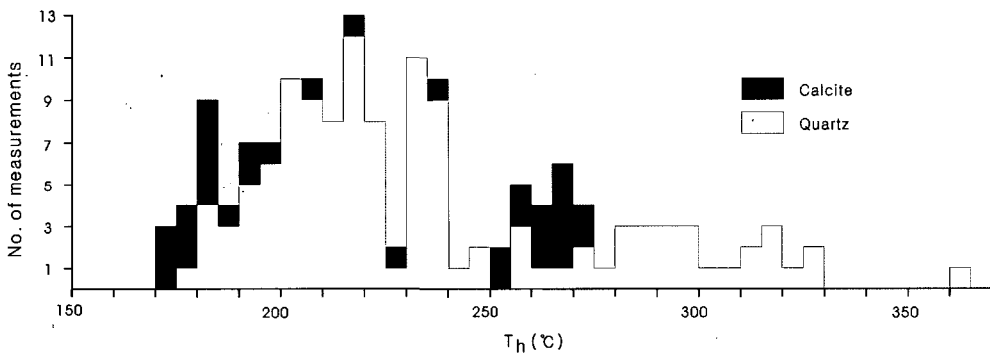


Fig. 7. Frequency diagram of homogenization temperatures for fluid inclusions in quartz and calcite from the Baekun gold-silver deposit.

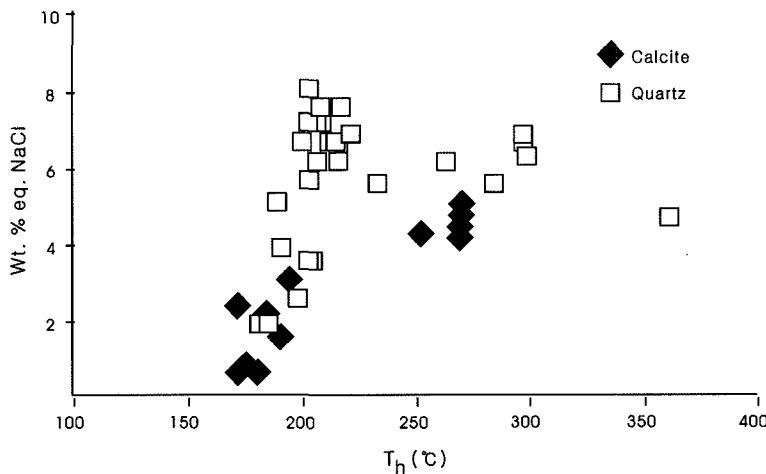


Fig. 8. Salinity vs. homogenization temperature diagram for fluid inclusions in quartz and calcite from the Baekun gold-silver deposit.

**Table 6.** Sulfur isotopic data of sulfide minerals from the Baekun gold-silver deposit.

Stage	Sample No.	Min.	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}(\text{‰})^1$	$T_h (\text{°C})^2$
Early	B.U.84720-1	Sp	5.5	5.2	300
ditto	B.U.84720-1	Py	4.6	3.4	300
Late	B.U.84720-1	Gn	3.7	6.1	240
Early	B.U.84720-2	Asp	3.9		300
ditto	B.U.84720-2	Sp	4.5	4.2	300
Late	B.U.84720-2	Cp	4.5	4.7	240
ditto	B.U.84720-2	Gn	3.0	5.4	240
ditto	B.U.84720-6	Py	3.9	2.4	240

1)  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}(\text{‰})$  is calculated from the equation by Ohmoto and Rye (1979). 2)  $T_h$  is homogenization temperature of fluid inclusion. Min; mineral, Asp; arsenopyrite, Py; pyrite, Sp; sphalerite, Cp; chalcopyrite, Gn; galena.

**Table 7.** Oxygen, carbon and hydrogen isotopic data of quartz and calcite from the Baekun gold-silver deposit.

Stage	Sample No.	Min.	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta^{12}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})^1$	$\delta^{12}\text{C}_{\text{CO}_2}(\text{‰})^2$	$\delta\text{D}(\text{‰})$	$T_h(\text{°C})^3$
Early	B.U.84515	Qz	13.7		6.8		-90	300
ditto	B.U.84515-1	Qz	14.5		7.6		-78	300
ditto	B.U.84730-6	Qz	15.7		8.8		-96	300
ditto	B.U.84719-1	Qz	13.2		6.3		-94	300
ditto	B.U.84721-3	Qz	14.8		7.9		-70	300
Late	B.U.84529-1	Qz	13.9		4.5		-75	240
ditto	B.U.84718-2	Qz	14.8		5.4		-78	240
ditto	B.U.84720-2	Qz	14.3		4.9		-73	240
ditto	B.U.84724-1	Qz	14.7		5.3		-76	240
ditto	B.U.84515	Cc		-7.0		-5.9	-78	240
ditto	B.U.722-1	Cc		-5.7		-4.6	-76	240
ditto	B.U.84518-2	Cc		-5.9		-4.8	-87	240
ditto	B.U.84730-6	Cc		-5.8		-4.7	-79	240
ditto	B.U.84920-6	Cc		-6.9		-6.8		190

1)  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  is calculated from the equation given by Matsushisa *et al.* (1979). 2)  $\delta^{12}\text{C}_{\text{CO}_2}(\text{‰})$  is calculated from the equation by Friedman and O'Neil (1977). 3)  $T_h$  is homogenization temperature of fluid inclusion. Min; mineral, Qz: white quartz, Cc; calcite.

석하였다. 산소동위원소분석은  $\text{F}_2$ 가스와 분석시료를 530°C에서 24시간 반응시킨 후 발생한  $\text{O}_2$ 를  $\text{CO}_2$ 화하여 포집 분석하였다. 수소동위원소분석은  $\text{LPG} + \text{O}_2$  불꽃으로 방출한  $\text{H}_2\text{O}$ 를 Zn과 500°C에서 반응시켜 수소가스로 환원하여 분석하였다. 분석시 표준시료는 CDT (황) 및 SMOW (산소, 수소)를 사용하였으며 오차범위는  $\pm 0.2\text{‰}$ (황, 산소) 및  $\pm 0.1\text{‰}$ (수소)이다.

### 5.2. 황의 분석결과

백운광산의 광화시기에 산출되는 광석광물의  $\delta^{34}\text{S}$  값은 3.0~5.5‰(조기=3.9~5.5‰, 말기=3.0~3.9‰)이며 각 광석광물의  $\delta^{34}\text{S}$  값은 유비철석: 3.9‰, 황철석: 3.9~4.6‰, 섬아연석: 4.5~5.5‰, 황동석: 4.5‰, 방연석: 3.0~3.7‰이다(Table 6). 백운광산에서 산출되는 모암변질광물(견운모+녹니석)의 공생균은 광화유체의 pH가 약산성임을 지시해주고 있으며 본 광산에서 자류철석의 산출과 황산염광물의 부재는 광화작용이 환원한

경하에서 진행되었음을 시사한다. 이러한 환경에서는 유체 내에 용존된 황이  $\text{H}_2\text{S}$ 상태로 가장 우세하게 존재한다. 즉 광화유체 내  $\text{H}_2\text{S}$ 의  $\delta^{34}\text{S}$  값은 전 황의  $\delta^{34}\text{S}$  값으로 간주될 수 있다. 그러므로 동위원소 평형온도, 유체 포유물 균일화온도와 광석광물 공생관계로부터 구한 온도를 이용하여 광석광물과 평형상태에 있는 광화유체 내  $\text{H}_2\text{S}$  값은 Ohmoto and Rye (1979)가 제시한 평형식에 대입하여 구하면 Table 6과 같다. 여기서 보는 것과 같이 백운광산의 광화시기에 대한 광화유체 내  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$  값은 2.4~6.1‰(조기=3.4~5.3‰, 말기=2.4~6.1‰)로서 황의 기원은 주로 화성기원이지만 그 중 일부는 모암 내의 황에서 유래된 것으로 해석된다. 또한 광석광물의  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$  값은 황철석: 2.3~3.3‰, 섬아연석: 4.2~5.2‰, 황동석: 4.7‰, 방연석: 5.5~6.2‰이다.

### 5.3. 산소 및 수소 분석결과

백운광산의 광화시기에 산출되는 석영의  $\delta^{18}\text{O}$  값은

13.2~15.7%이다(Table 7). 광화I시기의 석영 침전시 평형상태에 있었던 물의  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$ 값은 Matsushita *et al.* (1979)의 분별식  $1000 \ln a_{\text{Quartz-H}_2\text{O}}=3.34 (10^6/T^2) - 3.31$ 를 이용하여 계산하였으며, 그 결과는 Table 7과 같다. 여기에서 보는 바와 같이 석영의  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 값은 4.5~8.8% (석영: 조기=6.3~8.8%, 말기=4.5~5.6 %)이다. 백운광산의 광화I시기에 산출되는 방해석의  $\delta^{12}\text{C}$  값은 -7.0~-5.7%이며 Friedman and O'Neil (1977)가 제시한 식을 이용하여 계산하면  $\delta^{12}\text{C}_{\text{CO}_2}$  값은 -6.8~-4.6% (방해석: 말기)이다. 이 광산의 광상생성시 물의  $\delta\text{D}$  값은 -96~-70% (석영: 조기=-96~-70%, 말기=-78~-74%, 방해석: 말기=-87~-76%)이다.

## 6. 고 찰

백운광상은 트라이아스기 또는 쥐라기의 열리상화강 섬록암 내에 발달된 단층대를 충진한 열수성 금-은광상이며 석영맥은 빗살구조, 대상구조, 망상구조, 각력상구조 및 정동구조가 관찰된다. 광상의 야외조사와 광석의

산출상태, 광물의 공생관계 및 조성을 기초로하여 광화시기를 나누면 이 광상은 석영+방해석맥(I시기)과 방해석맥(II시기)으로 구성된다. I시기는 모암변질 및 base metal 광석광물이 정출한 조기와 금-은 광석광물이 정출한 말기로 세분된다. 초기에는 유비철석, 자류철석, 황철석, 섬아연석, 백철석, 황동석 등이 산출되며 황철석-섬아연석-유비철석이 공생관계를 갖는다. 이 공생군을 이용하여 생성온도와 황분압( $f_{\text{S}_2}$ )을 추정하여 보았다. 공생광물군 중 유비철석의 As atomic %는 30.9~32.4이고 섬아연석의 FeS mole%는 18.4~21.2이다. 이 자료를 Kretschmar and Scott (1976)가 제시한 상관도에 도시하면 이 공생군의 생성온도는  $>380^\circ\text{C}$  황분압( $f_{\text{S}_2}$ )은  $>10^{-7.8}\text{atm}$ . 범위를 보인다(Fig. 9). 이 온도는 석영내 유체포유물의 균일화온도와 비교할 때 다소 높은 값을 갖는다.

Nekrasov *et al.* (1979)과 Nakamura and Shima (1982)은 서로 공생하는 황석석과 섬아연석의 Fe, Zn mole fraction 자료를 가지고 생성온도를 추정하는 방법을 각각 제시한 바 있다. Shimizu and Shikazono

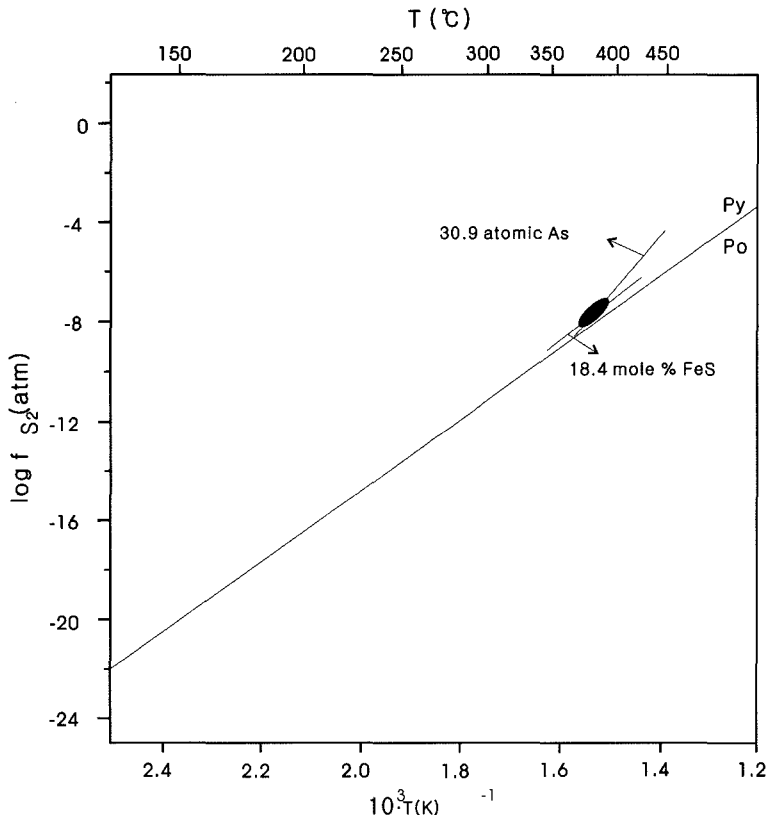


Fig. 9. Temperature- $f_{\text{S}_2}$  diagram showing the formation conditions of stage I early ore minerals from the Baekun gold-silver deposit. Abbreviation: Po; pyrrhotite, Py; pyrite.

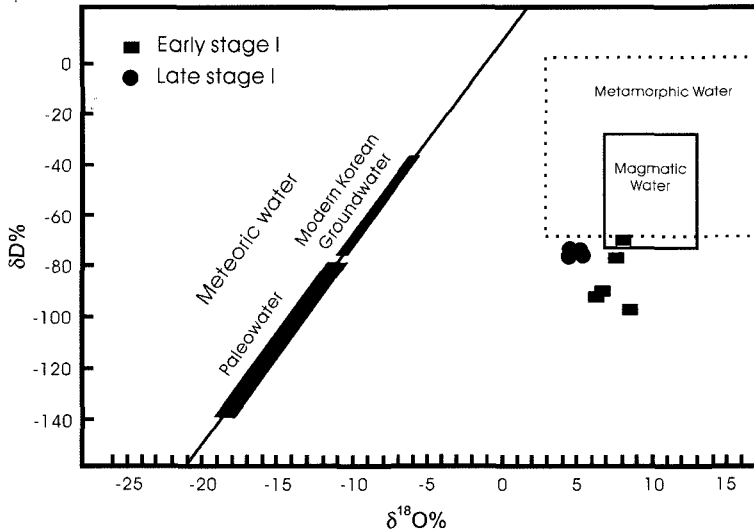


Fig. 10. Hydrogen vs. oxygen isotope diagram displaying stable isotope systematics of hydrothermal fluid composition of the Baekun gold-silver deposit. Paleowater data from So and Shelton (1987a, b) and So *et al.* (1987), Modern Korean Groundwater data from Kim and Nakai (1981, 1988).

(1985)은 위의 두 방법을 적용하여 일본의 여러 광상에서 산출되는 황석석과 섬아연석 광물조합의 생성온도를 추정하여 본 결과, Nakamura and Shima (1982)의 방법으로 구한 온도가 유체포유물과 동위원소연구에 의해 얻어진 온도와 비교적 잘 일치함을 보고한 바 있다. 백운광상에서 산출되는 황석석과 섬아연석의 화학조성은 Table 3과 같으며 이들 분석값을 Shimizu and Shikazono (1985)의 교환반응식과 Nakamura and Shima (1982)가 제시한 반응식에 적용해 보면, 황석석과 섬아연석의 생성온도는 236~290°C가 얻어진다. 이 온도는 석영 내 유체포유물의 균일화온도 범위와 일부 중첩되나 다소 높은 값을 갖는다.

말기에는 방해석 및 석영 내에 보우란제라이트와 방연석이 공생한다. 이 광물상에 Craig and Barton (1973)이 제시한 보우란제라이트-자연안티몬-방연석의 광물공생군에 대한 열역학적 자료와 이들 광물공생군과 공생하는 석영 및 방해석 중의 유체포유물의 균일화온도 240~272°C를 적용시키면 황분압은 10<sup>-14.2</sup>~10<sup>-16</sup> atm. 이 된다. 이 값은 박희인 등(1987)에 의하면 둔전금광산의 남광상에서 산출되는 보우란제라이트-방연석쌍에 대한 유체포유물의 균일화온도 280~305°C와 황분압 10<sup>-13</sup>~10<sup>-15</sup> atm. 보다 다소 낮다

Keighin and Honea (1969)는 스테파나이트를 197°C 이상으로 가열하면 농홍은석과 자연은으로 분해된다고 보고하였다. 따라서 스테파나이트, 농홍은석 및 자연은 광물의 산출은 생성온도와 황분압( $f_{S_2}$ )이 각각 197°C

및 10<sup>-16</sup> atm. 이하임을 암시한다.

백운광상의 광화작용시 생성온도와 황분압은 광화작용이 진행됨에 따라 점점 낮아졌음을 알 수 있다.

백운광상의 유체포유물에서 측정된 균일화온도는 171.6~360.8°C(석영: 178.7~360.8°C, 방해석: 171.6~272.3°C)이며 염농도(wt.% eq. NaCl)는 0.5~10.2(석영: 0.5~10.2, 방해석: 0.7~5.1)이다. 그림 8에서 살펴본 바와 같이 균일화온도가 감소됨에 따라 염농도는 일부 증가하며 채차 염농도가 급격히 떨어짐을 알 수 있다. 이는 열수가 단층대를 따라 급격히 상승함에 따라 압력의 감소에 의해 일부 비등과 기원이 다른 천수의 유입에 의한 혼합에 의한 냉각 및 희석작용이 있었음을 지시한다. 따라서 백운광상의 황화광물 및 금-은광물들은 광화작용이 진행됨에 따라 온도의 급격한 감소에 의하여 침전되었다고 생각된다. 또한 균일화온도가 감소함에 따라 염농도가 증가하는 포유물에 대한 자료(298°C, 6.3 wt.%, 0.78 g/cm<sup>3</sup>)를 Hass (1971)의 자료에 적용하면 압력은 약 80.2 bar이며 심도는 약 900 m 정도이다.

백운광상에서 산출되는 광석광물의 δ<sup>34</sup>S값은 3.0~5.5‰이며 광화유체내 δ<sup>34</sup>S<sub>H<sub>2</sub>S</sub>값은 2.4~6.1‰(조기=3.4~5.3‰, 말기=2.4~6.1‰)로서 비교적 좁은 범위를 보이고 있다. 또한 이 광상을 형성한 광화유체중 물의 기원을 알아보기 위해서 분석된 석영과 방해석의 산소, 수소 및 탄소 안정동위원소값은 각각 δ<sup>18</sup>O<sub>H<sub>2</sub>O</sub>; 4.5~8.8‰(석영: 조기=6.3~8.8‰, 말기=4.5~5.6‰), δD;

-96~-70%(석영: 조기=-96~-70%, 말기=-78~-74%, 방해석: 말기=-87~-76%) 및  $\delta^{12}\text{C}_{\text{CO}_2}$  값은 -6.8~-4.6‰(방해석: 말기)이다. 여기에서  $\delta^{12}\text{C}_{\text{CO}_2}$  값은 천수의 혼입 또는 광화유체의 온도가 저하됨에 따른  $\delta^{12}\text{C}_{\text{CO}_2}$  값의 증가가 있었음을 시사한다. 그러므로  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$  값,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  값,  $\delta\text{D}$  값 및  $\delta^{12}\text{C}_{\text{CO}_2}$  값의 자료를 종합하여 볼때 광화유체는 마그마 기원의 유체가 주종을 이룬 것으로 보이며 말기로 감에 따라 다른 천수의 혼입이 크게 작용한 것으로 보인다(Fig. 10).

따라서 이상을 종합하면 백운광상은 마그마 기원의 열수용액으로부터 광화작용이 진행됨에 따라 광화유체는 단층대를 따라 급격히 상승할 때 압력과 감소에 따라 일부 비등과 기원이 다른 천수의 유입에 의한 혼합에 의해 냉각 및 회석작용이 있었음을 지시해 주며 전형적인 천열수형광상이다.

## 7. 결 언

1. 백운광상은 염리상화강섬록암내에 발달된 NS내지 N5~20°W, 경사는 70~85°NE의 주향과 경사를 갖는 단층대를 따라 충진한 열수성 맥상석영맥광상이다.

2. 백운광상의 광물 정출순서는 석영+방해석맥(Ⅰ시기)과 방해석맥(Ⅱ시기)으로 구성되며, Ⅰ시기는 석영, 방해석, 견운도, 녹니석, 녹염석, 금홍석, 자류철석, 유비철석, 황철석, 백철석, 십아연석, 황석석, 황동석, 방연석, 일렉트럼, 함은사면동석, 농홍은석, 스테파나이트, 보올란제라이트, 시르메라이트, Ag-Te-Sn-S계 광물, Ag-Cu-S계 광물, 휘은석 및 자연은 등이 정출하였으며 Ⅱ시기는 괴상의 방해석만 정출하였다.

3. Ⅰ시기에서 산출되는 공생광물군으로 추정된 생성 온도와 황분압( $f_{\text{S}_2}$ )은 조기: 236~>380°C, >10<sup>-7.8</sup> atm., 말기 <197~272°C, 10<sup>-14.2</sup>~10<sup>-16</sup> atm. 로써 생성온도와 황분압이 광화작용이 진행됨에 따라 점점 낮아졌다.

4. 유체포유물에서 측정된 균일화온도와 염농도는 171.6~360.8°C와 0.5~10.2 wt.%로써 광화작용이 진행됨에 따라 균일화온도와 염농도가 감소되어지나 부분적으로 염농도가 증가하였다.

5. 황화광물의  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$  값은 2.4~6.1‰(조기=3.4~5.3‰, 말기=2.4~6.1‰)이며 석영과 방해석의  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ : 4.5~8.8‰(석영: 조기=6.3~8.8‰, 말기=4.5~5.6‰),  $\delta\text{D}$ : -96~-70‰(석영: 조기=-96~-70‰, 말기=-78~-74‰, 방해석: 말기=-87~-76‰) 및  $\delta^{12}\text{C}_{\text{CO}_2}$  값은 -6.8~-4.6‰(방해석: 말기)로써 열수유체는 마그마 기원의 유체가 주종을 이룬 것으로 보이며 말기로 감에 따라

다른 천수의 혼입이 크게 작용한 것으로 보인다.

## 사 사

이 연구는 2002년도 한국학술진흥재단 기초과학연구 지원사업(KRF-2002-CS0059)에 의하여 연구되었다. 이 기관에 사의를 표한다. 또한 논문에 사용된 정량분석 자료는 충남대학교 공동실험실습관에 설치된 JEOL사 JXA-8800R로부터 얻어졌다. 아울러 심사과정에서 논문의 미비점을 지적, 수정하여 주신 한국자원연구소 양동운박사님과 익명의 심사위원님께 깊이 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김규봉, 최위찬, 황재하, 김정환 (1984) 오수도폭지질보고서. 한국동력자원연구소, 30p.
- 김규환, 中井信之 (1988) 남한의 지하수 및 강수의 안정동위원소조성. 지질학회지, 24권, p. 37-46.
- 김용준, 이창신 (1988) 장수-운봉지역에 분포하는 화성암류와 화성활동에 대한 연구. 대한지질학회지, 24권, p. 111-131.
- 대한광업진흥공사 (1982) 한국의 광상, 제5호.
- 박희인, 우영균, 이찬희 (1987) 둔전금광산 남광상의 광석과 유체포유물. 광산지질, 20권, p. 107-118.
- 이창신 (1989) 진한-장수지역에 분포한 화강암류에 대한 암석지구화학과 금은광상의 성인에 관한 연구. 박사학위논문, 148p.
- 이창신, 박영석, 신방섭 (1988) 백운지역 금은광상의 광화작용에 관한 연구. 대한광산학회지, 25권, p. 10-20.
- 전서령, 정재일, 김대현 (2002) 백운폐광산의 방치된 폐석으로 인한 주변 수계의 환경적 영향. 자연환경지질, 35권, p. 325-337.
- 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 H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions: in De Vivo, B. and Frezzotti, M.L. eds., Fluid inclusions in minerals: Method and applications: Short Course International Mineralogical Assoc., p. 117-130.
- Craig, J. R. and Barton, P. B. (1973) Thermochemical approximations for sulfosalts. Econ. Geol., v. 68, p. 493-506.
- 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.
- Hass, J. L. (1971) The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. Econ. Geol., v. 66, p. 940-946.
- Keighin, C. W. and Honea, R. M. (1969) The system Ag-Sb-S from 600°C to 200°C. Mineralium Deposita, v. 4, p. 157-171.



- Kim, K. H. and Nakai, N. (1981) A study on hydrogen, oxygen and sulfur isotopic ratios of the hot water in South Korea. *Geochemistry*, v. 15, p. 6-16.
- Kretschmar, U. and Scott, S. D. (1976) Phase relation involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application. *Canadian Mineralogist*, v. 14, p. 364-386.
- 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.
- Nakamura, Y. and Shima, H. (1982) Fe and Zn partitioning between sphalerite and stannite(abstr.). Joint Meeting of Soc. Mining Geol. Japan, Assoc. Miner. Petr. Econ. Geol. and Miner. Soc. Japan, A-8.
- Nekrasov, I. J. Sorokin, V. I. and Osadchi, E. G. (1979) Fe and Zn partitioning between stannite and sphalerite and its application in geothermometry. In: Origin and distribution of the elements. L.H. Ahrens, Ed., phys. chem. Earth, v. 34, p. 739-749.
- Ohmoto, H. and Rye, R. O. (1979) *Isotopes of sulfur and carbon*. H.L. Barnes. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. 2nd ed, Wiley-Interscience. New York, p. 509-567.
- Shimizu, M. and Shikazono, N. (1985) Iron and zinc partitioning between coexisting stannite and sphalerite: A possible indicator of temperature and sulfur fugacity. *Mineralium Deposita*, v. 20, p. 314-320.
- So, C. S. Chi, S. J. Yu, J. S. and Shelton, K. L. (1987) The Jeonui gold-silver mine, Republic of Korea: A geochemical study. *Mining Geology*, v. 37, p. 313-322.
- So, C. S. and Shelton, K. L. (1987a) Stable isotope and fluid inclusion studies of gold and silver-bearing hydrothermal vein deposits, Cheonan-Cheongyang-Nonsan mining district, Republic of Korea: Cheonan area. *Econ. Geol.*, v. 82, p. 987-1000.
- So, C. S. and Shelton, K. L. (1987b) Fluid inclusion and stable isotope studies of gold-silver-bearing hydrothermal vein deposits, Yeosu mining district, Republic of Korea. *Econ. Geol.*, v. 82, p. 1309-1318.

---

2006년 1월 23일 원고접수, 2006년 2월 8일 게재승인.