

## 홍천 광화대, 가족 광상의 금·은 광화작용

### Hydrothermal Gold-silver Mineralization of the Gajok Deposit in the Hongcheon Mining District, Korea

박 상 준 (Sang Joon Pak)\* · 최 선 규 (Seon-Gyu Choi)

고려대학교 지구환경과학과  
(Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 136-701, Korea)

요약: 가족광상은 풍암분지 북측에 분포하는 백악기 반상화강암의 열극을 충전한 백악기 함금·은 석영맥 및 방해석맥들로 구성된다. 함금·은 석영맥은 전형적인 복성맥의 산상과 함께 빗구조, 피각상 구조, 정동조직, 옥수질 석영 등의 천부 맥상 조직이 우세하게 나타난다. 석영맥 및 방해석맥들은 광화 1기에서 5기까지 구분되며 광화 중기 및 후기에서 집중적으로 금·은광화작용이 수반된다. 광화 중기에는 상대적으로 높은 금함량(~50 atomic % Au) 및 철함량(~6 mole % FeS)을 보이는 에렉트럼과 섬아연석, 황철석, 방연석, 황동석 등이 산출된다. 광화 후기에는 황철석, 황동석, 방연석 및 휘은석 또는 자연은 등의 함은광물과 함께 비교적 낮은 금함량(10~30 atomic % Au)과 철함량(< 1 mole % FeS)을 갖는 에렉트럼 및 섬아연석이 산출된다. 광화 유체는 약 360~150°C의 온도와 < 7.0 wt% NaCl 상당 염농도를 보이며, 광화가 진행됨에 따라 온도와 염농도가 함께 감소하는 경향을 보인다. 광화 유체의 산소동위원소비 값( $\delta^{18}\text{O}$ ; -0.6~-6.7 ‰)은 광화작용의 진행과 함께 지표수(또는 순환수)의 유입이 점점증하였음을 시사한다. 이는 가족 금·은광상의 광화작용이 상대적으로 높은 온도와 염농도를 갖는 광화유체로부터 시작하여, 지표수 유입에 의한 희석 또는 혼입 작용에 의해 진행되었음을 시사한다. 따라서 가족 광상의 광석광물, 열수변질대의 산상, 유체포유물 및 동위원소 연구를 종합적으로 검토한 결과, 이 광상의 광화작용은 지표수의 다량 유입이 가능한 천부 지질환경에서 진행되었음을 시사하며, 성인적으로 백악기 화성활동과 관련된 저유황형 천열수 광상으로 해석된다.

주요어: 가족광상, 금·은광화작용, 광화 유체, 저유황형, 천열수

**ABSTRACT:** The Cretaceous Gajok gold-silver deposit within porphyry granite is located nearby the Cretaceous Pungam basin at the northeastern area in Republic of Korea. The Gajok gold-silver deposit is distinctively composed of a multiple-complex hydrothermal veins with comb, crustiform chalcedony quartz and vug textures, implying it was formed relatively shallower depth. The hypogene open-space filling veins could be divided into 5 paragenetic sequences, increasing tendency of Ag-rich electrum and Ag-phases with increasing paragenetic time. Electrum with high gold contents (~50 atomic % Au) as well as sphalerite with high FeS contents (~6 mole % FeS) are representative ore minerals in the middle stage. The late stage is characterized by silver-phase such like native silver and/or argentite, coexisting with Ag-rich electrum (10~30 atomic % Au) and Fe-poor sphalerite (< 1 mole % FeS). The ore-forming fluids evolution started at relatively high temperature and salinity (~360°C, ~7 wt.%

\*교신저자: [electrum@korea.ac.kr](mailto:electrum@korea.ac.kr)

eq. NaCl) and were evolved by dilution and mixing mechanisms on the basis of fluid inclusion study. The gold-silver mineralization proceeded from ore-forming fluids containing greater amounts of less-evolved meteoric waters ( $\delta^{18}\text{O}$ ; -0.6 ~ -6.7 ‰). These results imply that gold-silver mineralization of the Cretaceous Gajok deposit formed at shallow-crustal level and could be categorized into low-sulfidation epithermal type, related to Cretaceous igneous activity.

**Key words** : Gajok deposit, gold-silver mineralization, ore-forming fluid, low-sulfidation, epithermal

## 서 언

한국에 부존하는 열수맥상형 금·은광상은 지체구조상 선캠브리아기의 경기 및 영남육괴의 변성암류, 고생대 태백산분지의 퇴적암류, 쥐라기 대보 심성암류 그리고 백악기 퇴적암류 및 불국사 반심성암-화산암 복합체와 같은 다양한 지질시대 및 모암에 배태되나, 이들의 광화시기는 중생대 쥐라기와 백악기에 집중되는 특징을 보인다(최선규 외, 2006). 중생대 쥐라기와 백악기의 생성시기를 갖는 이들 열수맥상형 금·은광상은 유체포유물 및 안정동위원소 연구를 통하여 중열수광상, 한국형(Korean-type)광상, 천열수광상으로 구분되었으며(Shelton *et al.*, 1988), 최근에는 쥐라기와 백악기의 조구조 환경 및 화성활동의 차이를 반영한 조산대형 광상과 후조산대형 광상으로 해석된 바 있다(최선규 외, 2006).

한반도 중동부지역에 위치한 홍천 광화대는 중부지역에 위치한 천안 광화대와 더불어 가장 생산성이 높은 광화대로 분류되어 왔으며(김옥준, 1971), 과거 일제 시대부터 금·은에 대한 개발이 매우 활발하게 이루어져 왔다. 홍천 광화대에 분포하는 이들 금·은광상들은 과거 대보 화성활동과 관련된 쥐라기 심열수 내지 중열수 광상으로 인지되어 왔으나(김옥준, 1970; 김옥준, 1971), 최근 들어 이들 금·광상들은 불국사 화성활동과 관련된 천부기원의 특성이 보고되고 있어(So *et al.*, 1999), 홍천 광화대에 대한 광상학적 연구 및 재해석이 요구되고 있다.

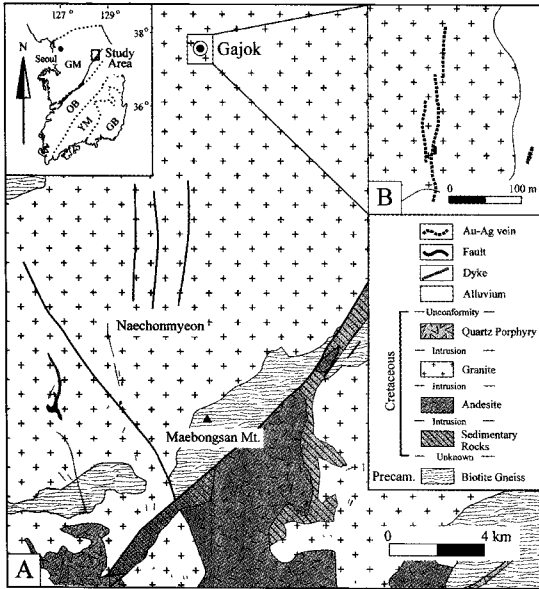
그러나 지금까지 홍천 광화대의 연구는 광화대 남측에 분포하는 풍암분지를 중심으로 분지 남측의 청일 및 병지방 광산 정도의 연구가 수행되었을 뿐이며(장태영과 지정만, 1989; So *et al.*, 1999), 풍암분지 북측에 분포하는 가족, 문현, 백우, 동양홍천 광산 등에 대한 구체적인 연

구는 수행된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 풍암분지 북측에 위치하는 대표적 금·은광상인 가족광상에 대한 광물 및 광물화학적 연구를 통해 가족광상의 금·은 광화작용 특성을 밝히고 향후 홍천 광화대 성인연구를 위한 기초자료를 제시하는데 그 목적이 있다.

## 지질 개요

홍천 광화대를 포함하는 중동부지역의 광역 지질은 선캠브리아기의 경기육괴에 속하는 고기 변성암류가 광범위하게 분포하고 있으며, 후기에 선캠브리아기의 변성암류를 관입하는 백악기 불국사 화성암체 및 퇴적암류로 구성된다. 홍천 광화대에 분포하는 백악기 불국사 화성암체는 북동 방향에서 남서 방향을 따라 넓게 분포하며, 풍암 분지의 퇴적암류와는 단층으로 접촉한다. 백악기 화성암체들은 주로 반상화강암으로 구성되나 국부적으로 흑운모 화강암으로 점변하는 특징을 보이기도 한다. 이들 반상화강암은 조립질의 등립상조직을 보이며 주로 석영, 장석, 흑운모 및 소량의 각섬석 등으로 구성된다. 일부 암체는 거정의 장석 반정(1~3 cm)이 특징적으로 발달한다.

백악기 퇴적암류와 화산암류들은 광화대 남측에서 북동방향의 금왕단층계를 따라 발달하는 좌수향 주향이동단층운동에 의해서 형성된 풍암분지에 국한되어 분포한다(그림 1). 이들 백악기 퇴적암류는 주로 역암, 사암, 역질 사암, 이암 등 호성 및 선상지 퇴적암으로 구성되며, 일부 역암들은 화산암류를 역으로 함유하기도 한다. 백악기 퇴적암류는 분지의 북동측과 남서측에서 퇴적분지와 기반암과의 경계선인 금왕단층계에 규제되어 소규모로 분포하는 특징을 보인다. 반면 안산암 및 석영안산암, 유문암, 현무암 및 현무암질 안산암, 응회암류, 그리고 응



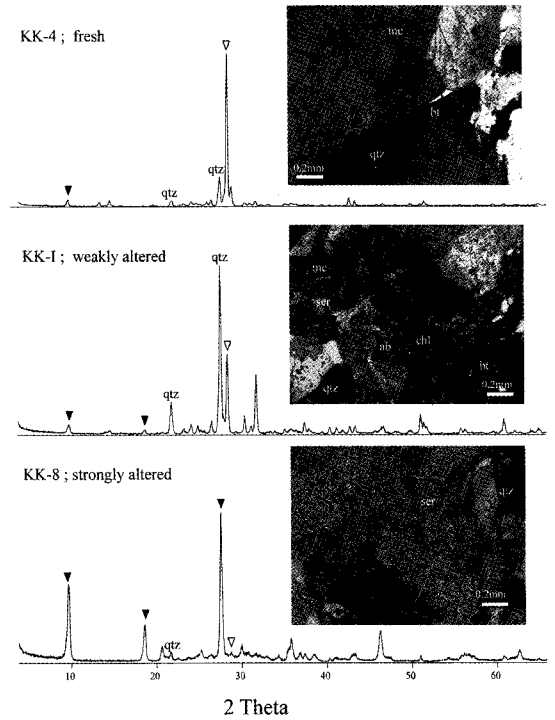
**Fig. 1.** General geological map of the Gajok gold-silver deposit. The location (A) and area map (B) of the Gajok deposit are shown insetted map. GM = Gyeonggi Massif, OB = Okcheon Belt, YM = Yeongnam Massif, GB = Gyeongsang Basin.

회질 세설성암류 등으로 구성되는 화산암류는 이들 퇴적암류에 비해 분지 중앙부에서 대규모로 분포하는 특징을 보인다.

주로 백악기 반상화강암을 관입하는 암맥류의 주향은 N10E~N10W으로 이 지역에서 산출되는 열수광맥의 주향과 일치하는 경향을 보인다. 이들 암맥류는 주로 산성 및 염기성 암맥으로 구성되며 국부적으로 페그마타이트가 관입 발달하기도 한다. 암맥 중 염기성 암맥은 대체로 암녹 내지 암녹회색의 황반암(Lamprophyre)으로 확인되며, 가족광산 갱 내에서도 석영맥과 함께 산출되며 약 120 m 정도의 연장성이 확인된다(정영부와 유영준, 2002).

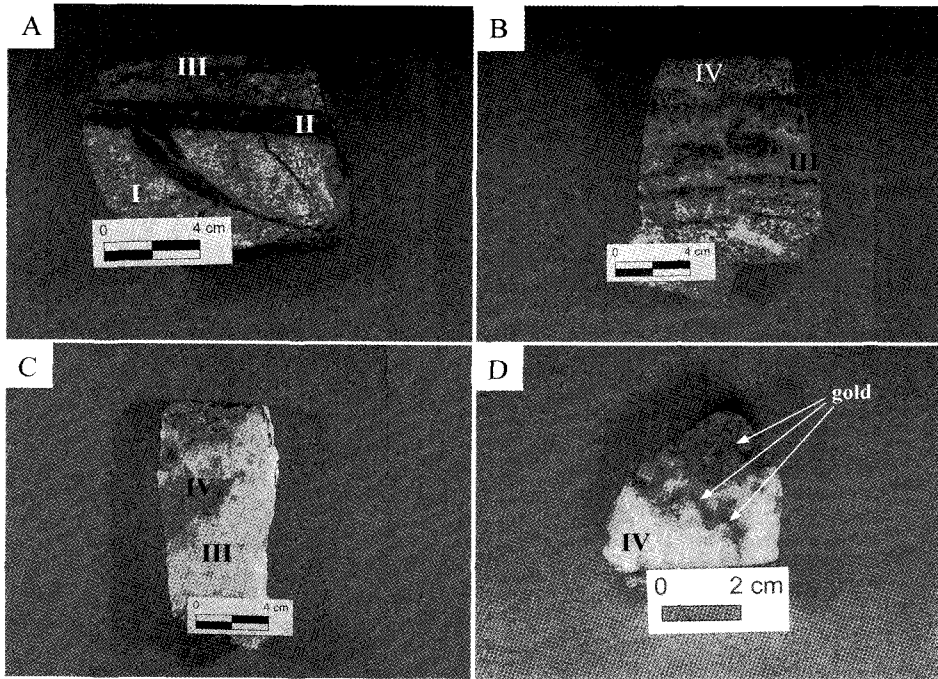
### 합금·은 석영맥 및 열수변질

홍천 광화대에 위치하는 가족 광산은 일제시대부터 가행되어 왔으며, '80년대에는 가행과 휴광을 반복해왔다. 최근 들어 탐광굴진 및 고품위대의 확인을 위해 본격적인 탐광 및 개발이 지속되었으나, 현재는 휴광 중이다. 가족광산은 백악기 반상화강암의 NSW~N15E 방향의



**Fig. 2.** XRD patterns and photomicrographs of each alteration part. Phyllic alteration extends into the wall rock laterally away from veins. XRD peak intensities of microcline (open triangle) as primary mineral decrease with increasing peaks of sericite (solid triangle) in strongly altered zone. Note that complete replacement of microcline phenocrysts by sericite, producing pseudomorphs with recognizable crystal shapes. Abbreviation; ab = albite, bt = biotite, chl = chlorite, mc = microcline, qtz = quartz, ser = sericite.

열극을 충전한 수개조의 합금·은 석영맥으로 구성된다. 주요 합금·은맥은 1, 2맥 및 노두맥으로 0.1~1 m 정도의 맥폭과 30~300 m 정도의 연장을 보인다(그림 1). 이들 광맥의 품위는 최대 3,356 g/t Au와 최대 2,733 g/t Ag까지 검출되기도 하였다(정영부와 유영준, 2002). 합금·은 석영맥들의 조직은 반복적으로 상승하는 광화용액에 의해 형성된 복성맥의 형태를 보인다. 이들 석영맥들에서 산출되는 석영은 대체로 유백색 또는 투명 결정질 석영 및 회색의 옥수질 석영으로 구성되며, 빗살, 피각상, 정동 등의 석영 조직이 우세하게 관찰된다. 방해석은 전기의 석영맥을 절단하며 맥상으로 산출되거나, 전기



**Fig. 3.** Photomicrographs showing the cross-cutting relationships among the various quartz veins. Note photographs D displaying quartz vein from stage IV bringing economic ores such like gold and silver.

석영맥 내의 정동 등을 충전하며 산출된다.

가속광상의 열수변질대는 반상화강암을 모암으로 하여 석영맥의 주변부를 따라 50 cm 범위까지 발달하며 주로 견운모, 녹니석 등의 열수변질 광물들이 산출된다. 현미경 관찰 및 X-선 회절 분석 결과 견운모의 정성적인 함량이 모암으로부터 석영맥과의 접촉부로 갈수록 높아지는 경향을 보여, 이들 열수변질대에서는 견운모화작용이 우세한 것으로 나타났다.

석영맥으로부터 거리가 먼 비교적 신선한 모암에서는 반상화강암의 주 구성광물인 사장석, 미사장석 및 흑운모들이 신선하게 잘 관찰된다(그림 2). 반면 모암으로부터 석영맥과의 접촉부로 갈수록 반상화강암의 주 구성광물들은 녹니석화 및 견운모화 되며 맥과의 접촉부에서는 거의 견운모화 되어 미사장석과 흑운모의 쌍정 또는 벽개가 불분명하다(그림 2). 반상화강암과 함금·은 석영맥의 접촉부에서 산출되는 이들 견운모에 대한 K-Ar 동위원소 연령측정 결과가속광산은 86.2 Ma의 광화시기를 보여 불국사화성활동과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다(Choi *et al.*, 2005).

### 광석광물 공생관계 및 광물화학

가속 광상에서 산출되는 석영맥들은 반복적으로 상승한 광화유체에 의해 형성된 복성맥의 특징을 보인다. 이들 함금·은 석영맥들은 맥의 조직 및 산상, 절단관계 및 각력화작용 등의 특징을 통해 네 개의 서로 다른 광화 시기를 보이는 석영맥으로 구분된다(그림 3). 광화 1기 및 광화 2기는 소량의 황철석, 섬아연석, 황동석만을 수반하는 반면 광화 3기와 4기의 석영맥은 황화광물과 함께 경제성 있는 양의 금·은광물을 수반한다. 광화 작용 최후기에는 전기의 석영맥들을 절단하거나, 석영맥의 정동 등을 충전하는 방해석맥이 산출되나, 광화작용은 수반되지 않는다.

### 광화 1기 및 2기의 광화작용

광화 1기의 석영맥(~1 cm)은 유백색의 결정질 석영으로 구성되며 황화광물로는 소량의 황철석만이 산출된다. 황철석은 석영의 입자 간극 사이에서 자형 및 반자형의 형태를 보이며 산

Mineral	Stage I	Stage II	Stage III	Stage IV	Stage V
Chlorite					
Sericite					
Quartz	white cryst.	white cryst.	clear cryst.	white cryst.	clear cryst.
Pyrite					grey chrl.
Sphalerite			0.2-6.4 mole % FeS	4.5-7.9 mole % FeS	
Chalcopyrite					
Galena					
Electrum			14-49 atomic % Au	15-50 atomic % Au	
Argentite					
Native silver					
Marcasite					
Dolomite					
Calcite					

Fig. 4. Generalized paragenetic sequence of minerals from the each veins of the Gajok gold-silver deposit.

출된다.

광화 2기의 석영맥(~4 cm) 역시 유백색의 결정질 석영으로 구성되며 일부 맥에서는 미립의 황철석 산출에 기인하여 석영맥이 회색 내지 검은색을 보이기도 한다(그림 4). 산출되는 황화광물은 황철석 및 소량의 섬아연석과 황동석으로 단순한 광물조합을 보인다. 황철석은 세립의 자형 또는 반자형의 집합체로 산출되며 후기에 백철석화 되어 산출되기도 한다. 이들 석영맥의 정동 또는 후기 파쇄대를 따라 방해석이 정출하기도 한다.

### 광화 3기 및 4기의 광화작용

광화 3기 및 4기의 석영맥은 빈광인 광화 1기 및 2기의 석영맥에 비하여 맥폭은 다소 증가하는 경향을 보이며(> 10 cm), 다양한 황화광물과 함께 금·은광화작용이 수반되는 특징을 보인다. 광화 3기의 석영맥은 광화 초기에는 세립의 투명 석영이 우세한 반면, 광화 후기로 가면서 다량의 유백색 석영이 정출하는 특징을 보인다. 황철석은 주로 중립질의 반자형 집합체로 석영의 입자 경계부 또는 입자 간극을 따라 정출한다. 에렉트럼은 광화 초기에서 중기에 정출하는 자형 또는 반자형의 황철석 집합체 내에 포유물로 산출되는 것과 광화 후기 방연석의 파쇄대를 따라 섬아연석과 공존하며 산출되는 것으로 구분된다(그림 5). 광화 중기의 에렉트럼의 금함량은 43.8~48.8 atomic % Au를 보이는 반면 광화 후기의 에렉트럼은 14.1~21.7 atomic % Au를 보여 광화 중기의 것에 비해 금

함량이 낮아지는 특징을 보인다(표 1; 그림 6). 섬아연석은 광화 초기 및 중기의 자형의 황철석 집합체와 공생하는 섬아연석과 광화 후기 반자형의 황철석 및 방연석, 에렉트럼과 공생하는 섬아연석으로 구분되며 이들 섬아연석 모두 황동석의 점적을 함유하지 않는 특징을 보인다.

광화 중기의 섬아연석의 철함량은 5.8~6.4 mole % FeS를 보이며 광화 후기 섬아연석은 0.2~0.4 mole % FeS로 철함량이 매우 낮아지는 특징을 보인다(표 2; 그림 6). 황동석은 광화 중기 및 후기에 소량 정출되며 주로 후기에 정출하는 황철석들과 공존하며 산출된다. 방연석은 주로 전기에 정출한 황화광물들의 파쇄대를 따라 정출하며 에렉트럼과 공존하는 특징을 보인다. 광화 최후기에는 석영 정동 또는 석영의 파쇄 부분을 따라 방해석이 증진하며 산출된다.

광화 4기는 가죽광상에서 가장 높은 경제성을 보이는 광맥으로서, 초기에는 주로 유백색의 석영이 다량으로 정출하나, 광화 후기로 갈수록 투명 석영이 우세하게 산출되다가, 광화 최후기에 들어서는 불투명 옥수질 석영이 산출되는 특징을 보인다. 황철석은 주로 광화 중기 및 후기에 집중적으로 산출된다. 광화 중기의 황철석은 주로 자형의 단독 정출의 형태를 보이나, 광화 후기로 가면서 반자형의 집합체 형태를 보인다. 광화 중기에 정출하는 에렉트럼은 황철석 내에서 점적의 포유물 형태로 산출되거나, 황철석과 공존하면서 석영의 입자 간극을 증진하는 형태로 산출된다(그림 5). 광화 후기의 에렉트럼은 주로 황철석 및 방연석의 파쇄대를 따라 정출되거나, 석영 입자의 간극에서 광화 중기에 정출한 에렉트럼을 교대하며 산출되는 특징을 보인다(그림 5).

광화 중기의 에렉트럼은 37.9~50.4 atomic % Au를 보이는 반면 광화 후기의 에렉트럼의 금함량은 12.6~28.3 atomic % Au를 보여 광화 후기로 갈수록 에렉트럼 내의 금함량이 낮아지는 경향을 보인다(표 1; 그림 6). 광화 중기에 소량 산출되는 섬아연석은 주로 자형 및 반자형의 황철석과 공존하는 특징을 보이며 광화 후기에 산출되는 섬아연석은 주로 황철석, 방연석, 황동석, 휘은석, 자연은 등과 공존하며 산출된다. 광화 중기에 산출되는 섬아연석의 철함량은 4.5~7.9 mole % FeS로 비교적 높은 철함량을 보이는 반면 광화 후기의 섬아연석은 0.1~

**Table 1.** Representative chemical compositions of electrum from the Gajok gold-silver deposit

Sample No.	Weight percent			Atomic percent		Assemblage	Stage
	Au	Ag	Total	Au	Ag		
kk202624-Z-B-1-33	62.01	36.09	98.10	48.48	51.52	py	III, middle
kk202624-Z-B-1-34	60.69	37.38	98.07	47.06	52.94	py	III, middle
kk202624-Z-B-1-45	61.50	37.98	99.48	47.00	53.00	py±gn	III, middle
kk202624-Z-B-1-46	60.37	38.90	99.27	45.94	54.06	py±gn	III, middle
kk202624-Z-B-1-47	61.48	38.35	99.83	46.75	53.25	py	III, middle
kk202624-Z-B-1-48	58.53	41.14	99.67	43.79	56.21	py	III, middle
kk202624-Z-B-3-49	61.28	37.95	99.23	46.93	53.07	py	III, middle
kk202624-Z-B-3-35	62.29	35.85	98.14	48.76	51.24	py	III, middle
kk202624-8-B-36	28.17	72.30	100.47	17.59	82.41	py+gn+sp	III, late
kk202624-8-B-37	33.70	66.72	100.42	21.67	78.33	py+gn+sp	III, late
kk202624-8-B-69	22.72	76.04	98.76	14.06	85.94	py+gn+sp	III, late
kk202624-34-1-1-1	58.58	42.24	100.82	43.17	56.83	py	IV, middle
kk202624-34-1-1-2	59.66	39.26	98.92	45.42	54.58	py	IV, middle
kk202624-34-1-1-9	63.32	36.83	100.15	48.50	51.50	±py	IV, middle
kk202624-34-1-1-17	60.62	38.40	99.02	46.37	53.63	±py	IV, middle
kk202624-34-1-1-18	56.92	41.66	98.58	42.80	57.20	py	IV, middle
kk202624-34-1-1-19	57.33	42.32	99.65	42.59	57.41	py	IV, middle
kk202624-34-1-1-20	57.61	43.00	100.61	42.32	57.68	py	IV, middle
kk202624-34-1-2-24	65.16	35.19	100.35	50.35	49.65	±py	IV, middle
kk20246-34-1-3-25	64.11	37.43	101.54	48.40	51.60	±py	IV, middle
kk202624-34-1-3-24	63.37	36.12	99.49	49.00	51.00	±py	IV, middle
kk202624-34-1-3-25	59.53	40.34	99.87	44.70	55.30	±py	IV, middle
kk202624-34-2-1-7	60.32	40.20	100.52	45.11	54.89	±py±cp	IV, middle
kk202624-34-2-1-10	63.67	36.03	99.70	49.18	50.82	±py±cp	IV, middle
kk202624-32-72	55.30	44.13	99.43	40.70	59.30	±py±cp	IV, middle
kk202624-32-74	51.98	46.65	98.63	37.90	62.11	±py±cp	IV, middle
kk202624-34-1-1-3	25.16	74.86	100.02	15.54	84.46	±py±ar±ag	IV, late
kk202624-34-1-1-16	20.77	78.83	99.60	12.61	87.39	±py±ar±ag	IV, late
kk202624-34-1-2-21	35.90	64.70	100.60	23.30	76.70	ar+ag	IV, late
kk202624-34-1-2-23	25.12	76.82	101.94	15.19	84.81	ar+ag	IV, late
kk20246-34-1-3-26	29.60	71.48	101.08	18.49	81.51	ar±ag	IV, late
kk202624-34-1-3-26	27.58	71.24	98.82	17.49	82.51	ar±ag	IV, late
kk202624-34-2-2-4	42.27	58.62	100.89	28.31	71.69	±py±ar±ag±cp	IV, late
kk202624-34-2-2-5	38.47	62.01	100.48	25.34	74.66	±py±ar±ag±cp	IV, late

Abbreviation; ag = native silver, ar = argentite, cp = chalcopyrite, gn = galena, py = pyrite, sp = sphalerite

1.0 mole % FeS의 철함량을 보여 광화 후기로 가면서 철함량이 감소한다(표 2; 그림 6). 휘은 석 및 자연은은 주로 광화 후기에 산출되는 금함량이 낮은 에렉트럼 및 방연석, 황동석과 공생하며 산출된다. 일부 휘은석과 자연은은 석영 입자 간극을 충전하며 기 정출한 에렉트럼 및 석영과의 경계부를 충전하며 산출되는 특징을

보이기도 한다(그림 5).

광화유체 특성

유체포유물

가족광상의 금·은 열수광화작용과 관련된

**Table 2.** Chemical composition of sphalerite from the Gajok gold-silver deposit

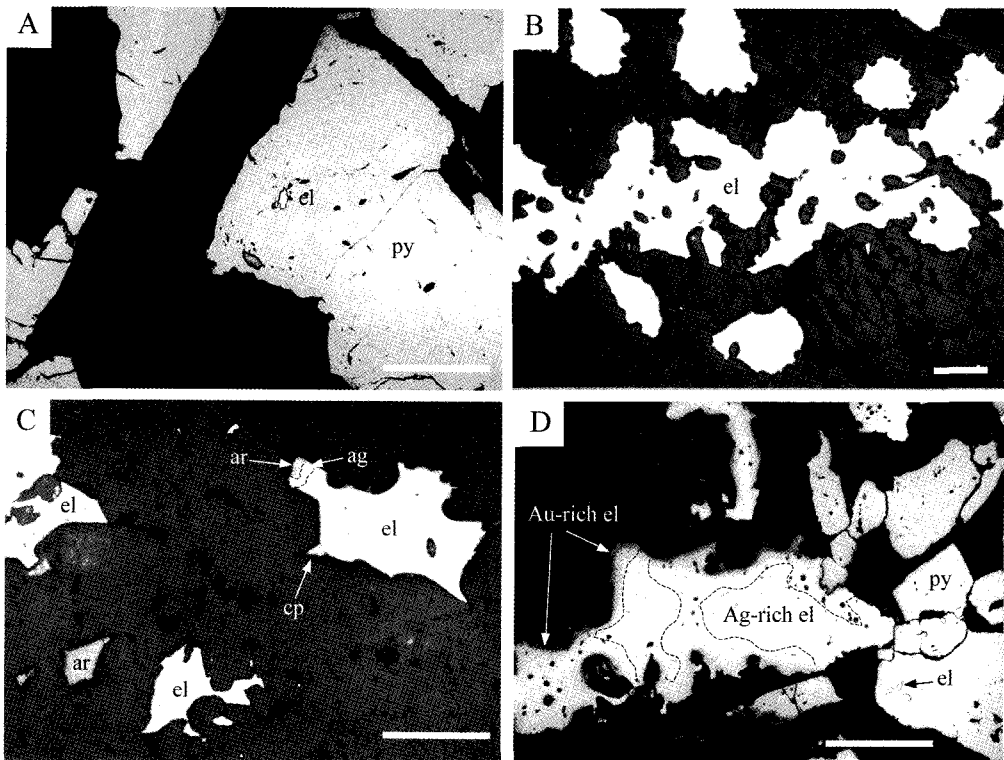
Sample No.	Weight percent							Mole percent	Assemblage	Stage
	Zn	Fe	Mn	Cd	Cu	S	Total	FeS		
kk-Z-A-1	61.35	3.36	0.02	0.19	2.28	32.19	99.39	5.80	py	III, middle
kk-Z-A-1	61.78	3.72	0.03	0.21	2.02	32.70	100.47	6.38	py	III, middle
kk20624-8-B	66.33	0.15	0.01	0.10	0.10	33.39	100.08	0.26	py+gn+el	III, late
kk20624-8-B	66.71	0.09	0.00	0.11	0.01	33.18	100.10	0.16	py+gn+el	III, late
kk20624-8-B	66.38	0.20	0.00	0.12	0.01	33.93	100.64	0.35	py+gn+el	III, late
kk20246-33-3	59.38	4.73	0.00	0.00	4.96	32.58	101.65	7.91	py	IV, middle
kk20624-33-3	62.04	2.61	0.01	0.22	2.08	34.02	100.98	4.54	py	IV, middle
kk20624-33-3	60.25	3.43	0.00	0.20	2.65	33.19	99.72	5.98	py	IV, middle
kk-30-2-1	67.02	0.08	0.00	0.13	0.00	32.55	99.78	0.13	py±cp	IV, late
kk-30-2-1	66.65	0.10	0.02	0.10	0.01	32.51	99.38	0.18	py±cp	IV, late
kk-30-2-1	66.63	0.09	0.00	0.11	0.11	32.38	99.31	0.15	py±cp	IV, late
kk-30-2-1	67.08	0.15	0.00	0.09	0.10	33.43	100.84	0.25	py±cp	IV, late
kk-30-2-1	66.51	0.12	0.03	0.10	0.00	32.58	99.33	0.21	py±cp	IV, late
kk-30-2-2	67.22	0.15	0.00	0.07	0.00	32.56	100.00	0.26	py±cp	IV, late
kk-30-2-2	67.19	0.14	0.01	0.19	0.00	32.70	100.23	0.24	py±cp	IV, late
kk-30-2-2	67.21	0.15	0.00	0.09	0.05	32.50	99.99	0.26	py±cp	IV, late
kk-30-2-2	66.58	0.19	0.00	0.16	0.00	32.38	99.31	0.33	py±cp	IV, late
kk-30-2-2	67.33	0.24	0.00	0.15	0.00	32.52	100.24	0.41	py±cp	IV, late
kk-30-1-1	66.82	0.26	0.00	0.09	0.13	32.19	99.48	0.44	gn=py	IV, late
kk-30-1-1	66.79	0.09	0.00	0.12	0.05	32.58	99.63	0.16	gn=py	IV, late
kk-30-1-1	67.48	0.08	0.02	0.11	0.03	31.86	99.58	0.15	gn=py	IV, late
kk-30-1-1	66.93	0.09	0.01	0.08	0.04	32.45	99.59	0.16	gn=py	IV, late
kk-30-1-1	67.41	0.08	0.00	0.13	0.04	32.70	100.36	0.15	gn=py	IV, late
kk-30-1-2	66.57	0.14	0.02	0.11	0.07	31.76	98.67	0.25	gn=py	IV, late
kk-30-1-2	67.00	0.17	0.01	0.12	0.11	32.29	99.71	0.30	gn=py	IV, late
kk-30-1-2	67.52	0.21	0.02	0.13	0.01	32.30	100.20	0.37	gn=py	IV, late
kk-30-1-2	66.96	0.11	0.02	0.06	0.06	32.23	99.44	0.18	gn=py	IV, late
kk-1-1	67.23	0.10	0.02	0.07	0.14	32.31	99.87	0.17	py	IV, late
kk-1-1	67.72	0.13	0.00	0.07	0.16	32.46	100.53	0.22	py	IV, late
kk-1-1	67.32	0.12	0.00	0.07	0.19	32.28	99.99	0.20	py	IV, late
kk-1-2	66.58	0.57	0.01	0.12	0.00	32.34	99.61	0.99	py	IV, late
kk-1-2	66.64	0.44	0.00	0.10	0.05	32.12	99.35	0.76	py	IV, late

Abbreviation; cp = chalcopyrite, el = electrum, gn = galena, py = pyrite

**Table 3.** Oxygen and hydrogen isotope data from the Gajok gold-silver veins

Sample No.	Mineral	$\delta^{18}O_{\text{mineral}}$ (‰)	$\delta^{18}O_{\text{H}_2\text{O}}$ (‰)*			$\delta D_{\text{H}_2\text{O}}$ (‰)	Stage
			150°C	200°C	250°C		
KK-E-2	quartz	5.5	-9.9	-6.2	-3.4	-75	III
KK-B-1	quartz	5.8	-9.6	-5.9	-3.1	-65	IV
KK-D	quartz	2.2	-13.2	-9.5	-6.7	-73	IV
KK-X	quartz	8.3	-7.1	-3.4	-0.6	-70	IV
KK-X-1	quartz	8.0	-7.4	-3.7	-0.9	-	IV
KK2064-A	calcite	8.0	-4.6	-1.5	-	-70	V
KK2064-30	calcite	7.6	-5.0	-1.9	-	-72	V

\*Calculated water compositions from quartz and calcite, using the isotope fractionations of Matsuhisa *et al.* (1979) and Freidman and O'Neil (1977), respectively

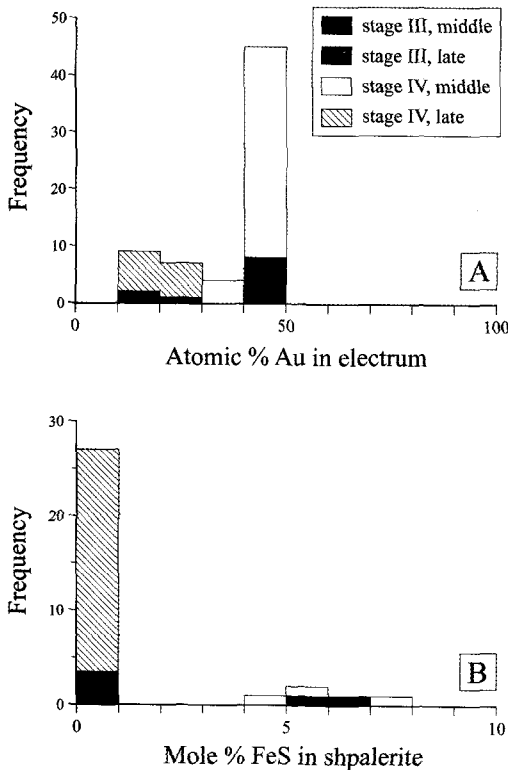


**Fig. 5.** Photographs showing ore minerals in both stage III and IV from the Gajok deposit. A; electrum in the middle assemblage as inclusion in pyrite from stage III, B; great amount of electrum in the middle assemblage as the free gold. C; electrum of late assemblage with argentite and native silver in stage IV, D; electrum showing the textural feature of Au-rich electrum overgrown by Ag-rich electrum in stage IV. Scale bars = 0.2 mm. ag = native silver, ar = argentite, el = electrum, py = pyrite.

광화작용 시의 온도 조건 및 열수유체의 진화 특성을 살피고자 갯 내 맥상시료를 대상으로 유체포유물 연구를 수행하였다. 현미경적 가열, 냉각 실험은 Linkam scientific Instruments의

THMS 600 Heating/Freezing stage를 이용하여 수행되었다. 가열, 냉각 실험 시에는 정확도를 높이기 위해서 Haynes (1985)의 반복 냉각 기술을 활용하였으며, 가열실험에서 측정되는 균

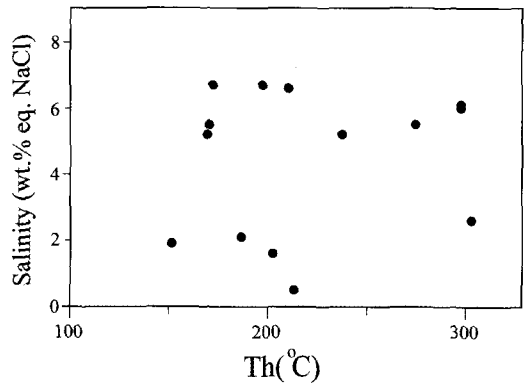




**Fig. 6.** Histogram showing Au contents in electrum (A) and FeS contents in sphalerite (B). Note Au and FeS contents in middle assemblage from each stages are relatively higher.

일화온도의 측정오차는  $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 이다. 염농도는  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 계의 어는점 내림(Potter *et al.*, 1978)을 이용하여 구하였다.

가족광상에서 산출되는 석영맥 중 유체포유물 실험에 이용된 석영시료는 가족광상의 주 광화시기의 것인 광화 3기와 4기 석영시료를 이용하였다. 석영시료에서 관찰되는 유체포유물은 상온( $20^{\circ}\text{C}$ )에서의 상관계 및 가열 실험시 균일화 특성을 근거로 대부분 액상이 풍부한 유형 I의 유체포유물에 속한다. 유형 I의 유체포유물은 상온에서 기상과 액상으로 구성되며, 액상이 우세(약 60 vol.% 이상)하여 가열 실험시 액상으로 균일화되는 특징을 갖는다. 기상이 풍부한 II형 유체포유물은 일부 제한된 시료 내에서만 극히 미량 관찰되며, 그 크기와 균일화 현상의 관찰제한 요인으로 인해 정확한 균일화 온도 측정 및 염농도 확인은 불가능했다. 유체포유물 가열 냉각실험 결과 균일화온도는 약  $366$



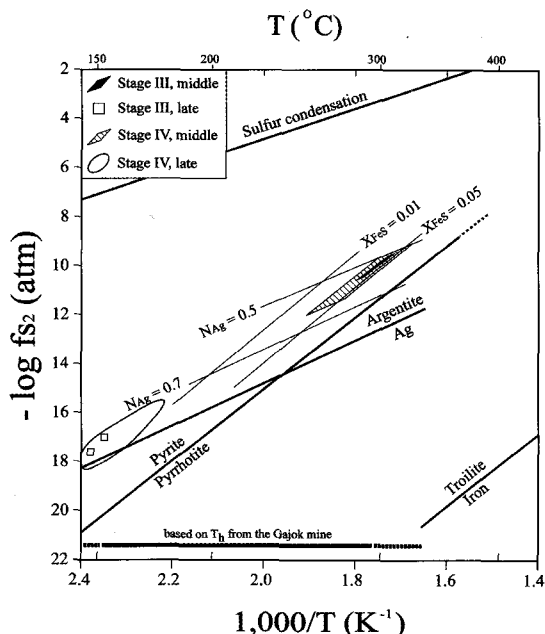
**Fig. 7.** Diagram showing homogenization temperature vs. salinity of fluid inclusions in quartz.

$\sim 139^{\circ}\text{C}$ 를 보이며, 0.5~6.7 wt.% NaCl 상당의 염농도를 보인다. 균일화온도변화와 염농도 변화를 함께 고려하여 보면, 균일화온도는  $300^{\circ}\text{C}$ 에서  $150^{\circ}\text{C}$  이하까지, 염농도는 7 wt.% NaCl에서 1 wt.% NaCl 상당 염농도 이하까지 비교적 넓은 범위에서 함께 감소하는 경향을 보인다(그림 7). 즉, 가족광상의 금·은광화작용은 초기에 상대적으로 높은 온도와 염농도를 보이는 광화 유체로부터 염농도와 온도가 감소하며 광화작용이 진행되었음을 시사한다.

#### 온도 및 황분압

다량의 합금·은광물이 수반되는 광화 3기 및 4기의 합금·은 석영맥에서 산출되는 에렉트럼과 섬아연석의 광물화학조성 및 자연은, 휘은석 등의 합은광물 등과의 공생관계를 근거로 금·은광화 작용시 광화 유체의 온도 및 황분압을 추정하였다.

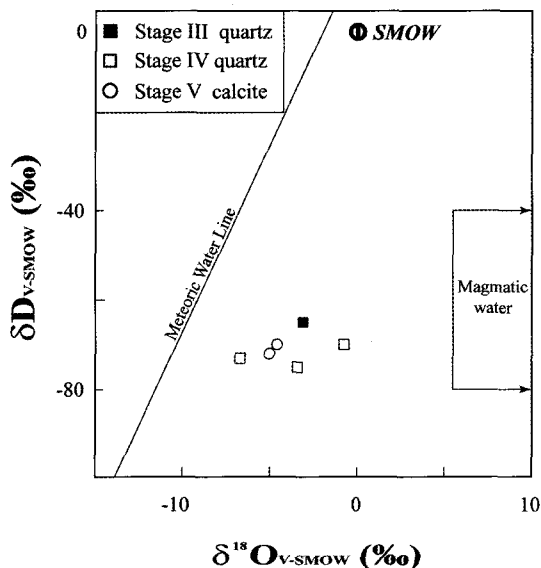
광화 3기에서 광화 중기 에렉트럼의 금함량(43.8~48.8 atomic % Au)과 광화 초기에서 중기에 걸쳐 산출되는 섬아연석의 철함량(6.4~5.8 mole % FeS)을 근거로 유도된 광화 중기의 황분압(-log  $f_{\text{S}_2}$ ) 및 온도는 각각 10~11 기압 및  $310\sim 240^{\circ}\text{C}$ 로 추정된다(그림 8). 반면 광화 후기 소량의 섬아연석과 함께 산출되는 에렉트럼 중 서로 공생관계에 있는 에렉트럼의 금함량(17.6~21.7 atomic % Au)과 섬아연석의 철함량(0.2~0.4 mole % FeS)으로부터 유도된 황분압(-log  $f_{\text{S}_2}$ ) 및 온도는 각각 17~18 기압 및  $150\sim 140^{\circ}\text{C}$ 을 보여 광화 후기로 가면서 황분압



**Fig. 8.** Schematic model showing the compositional variation of electrum, sphalerite and Ag-bearing minerals in relation to sulfur fugacity, temperature and the evolution of ore fluids during mineralization at the Gajok deposit. Hatched and gray areas show the middle assemblages and late assemblages, respectively. The thick line with broken line indicates the homogenization temperatures from the Gajok deposit.  $N_{Ag}$  = Atomic fraction of Ag in electrum.  $X_{FeS}$  = mole fraction of FeS in sphalerite. Thermochemical data were taken from Barton and Toulmin (1964) and Barton and Skinner (1979).

과 온도가 감소하는 특징을 보인다(그림 8).

광화 4기 중 광화 중기의 에렉트럼의 금함량 (37.9~50.4 atomic % Au)과 섬아연석의 철함량(4.5~7.9 mole % FeS)으로부터 유도된 광화 유체의 황분압(-log  $f_{S_2}$ ) 및 온도는 각각 9~13 기압 및 330~250°C을 보여 광화 3기보다 다소 넓은 황분압과 생성온도를 보인다(그림 8). 광화 후기에 휘은석 및 자연은 등의 함은광물과 공생하며 산출되는 에렉트럼의 금함량은 대체로 < 30 atomic % Au를 보이며, 같은 시기에 정출하는 섬아연석의 철함량은 < 1.0 mole % FeS를 보인다. 이들 에렉트럼과 섬아연석의 화학조성 및 휘은석과 자연은의 공생관계를 근거로 추정되는 광화 후기의 황분압(-log  $f_{S_2}$ ) 및 온도



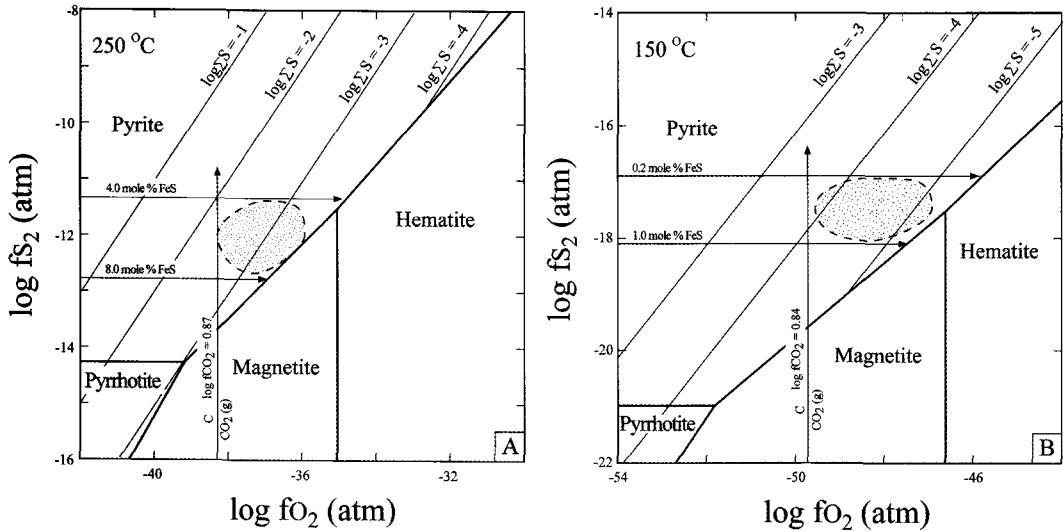
**Fig. 9.** Hydrogen versus oxygen isotope diagram displaying the stable isotope compositions of hydrothermal fluids from the Gajok deposit.

는 각각 16~18 기압 및 180~130°C를 보여 광화 후기 황분압과 온도가 낮아지면서 은광화작용이 집중적으로 진행된 것으로 판단된다(그림 8).

#### 안정동위원소

가족광상의 금·은광화작용을 야기한 광화유체의 기원 및 유체의 진화 과정을 추론하기 위하여 주 광화작용과 관련된 석영맥 및 일부 방해석맥을 대상으로 수소 및 산소동위원소 연구를 수행하였다. 가족광상의 맥상 석영 및 방해석에서 분석된 각 광물의 산소동위원소비는 각각 2.2~8.3 ‰ 및 7.6~8.0 ‰로 석영이 비교적 넓은 범위의 조성을 보인다. Matushisa *et al.* (1979)이 제시한 산소동위원소 분별식과 유체포유물에서 추정된 균일화온도 및 열역학적 추정 온도(≈250°C)에 근거해 계산된 석영과 동위원소적 평형상태에 있었던 광화유체의 산소 동위원소 비 값은 -6.7~-0.6 ‰로 비교적 넓은 범위를 보인다(표 3). 이들 석영에 포획된 유체의 수소 동위원소비 값은 -75~-65 ‰로 상대적으로 일정한 범위를 보인다(표 3).

Freidman and O'Neil (1977)에 의해 제시된 방해석의 산소동위원소 분별식과 열역학적 추



**Fig. 10.** Fugacity of sulfur versus fugacity of oxygen diagram at 250 °C (A) and 150 °C (B) relevant to gold-depositing fluids of the Gajok deposit (hatched area). Thick solid lines indicate stability fields of minerals in the system Fe-O-S; thin lines, total concentration of H<sub>2</sub>S (aq). Equilibrium constants used for constraining reactions are from SURCRT92 (Johnson *et al.*, 1992).

정 온도(≈150°C)를 이용해 계산된 광화 유체의 산소동위원소비의 값은 -5.0 ~ -4.6 ‰을 보이며 방해석에 포획된 유체의 수소 동위원소비 값은 -72 ~ -70 ‰을 보인다(표 3). 이들을 수소·산소 동위원소비 다이어그램에 도시한 결과 광화 유체는 상대적으로 지표수에 가까운 조성을 보이며 수소동위원소비 조성은 비교적 균일하나 산소동위원소비 조성이 상대적으로 넓게 변하는 특성을 보인다(그림 9). 이런 산소동위원소비의 변화는 지표수(또는 순환수)의 상이한 혼합비 또는 물/암석 비의 차이에 기인한 산소 편이현상으로 해석되며 가족 광상 열수계 형성 시 지표수 또는 순환수가 지배적인 역할을 하였음을 시사한다.

### 금·은광화작용 기구

가족광상에서 산출되는 합금·은광물은 각 광화시기 중 광화 중기 및 후기에 집중적으로 침전하는 양상을 보이며, 특히 광화 중기에는 주로 합금량이 상대적으로 높은 에렉트럼이 정출한다. 광화 후기로 가면서 합금량이 낮은 에렉트럼과 자연은, 휘은석 등의 합은광물이 함께 정출하는 특징을 보인다. 가족 금·은광상에서

산출되는 이러한 합금·은광물의 물리·화학적 정출 환경을 이해하기 위해 SURCRT92 (Johnson *et al.*, 1992)의 열역학 자료를 이용하여 합금광물의 침전 기구를 해석하여 보았다.

가족광상 광화 3기 및 4기의 광맥에서 산출되는 주요 황화 광물은 황철석과 섬아연석으로 대체로 광화 중기에서 광화 후기에 걸쳐 집중적으로 정출된다. 광석광물의 화학조성을 이용한 열역학적 연구 및 유체포유물 연구에서 추정된 광화 중기 유체의 평균 온도는 250°C로 가정할 수 있다. 환원성 합탄소 광물의 부재는 광화 중기 유체 내 탄소종이 산화 상태로 존재하였음을 시사한다. SURCRT92(Johnson *et al.*, 1992)의 상수를 이용한 탄소 산화·환원 반응으로부터 유도된 광화 중기의 유체 내 산소분압(log fO<sub>2</sub>)의 하한은 약 -38 기압으로 추정할 수 있다. 황철석 안정영역으로부터 유도된 광화 중기 산소분압(log fO<sub>2</sub>)의 상한은 약 -35 기압 정도를 보인다(그림 10). 유도된 산소 분압과 황 분압 범위를 함께 고려한 유체의 산소·황 분압의 안정한 영역은 그림 10과 같다. 이 영역에 SURCRT92의 상수를 이용하여 계산한 유체 내 유황종의 전체 몰농도(ΣS)를 함께 도시하면 평균 10<sup>-3</sup>몰에 해당 하는 전체 황농도를 보일

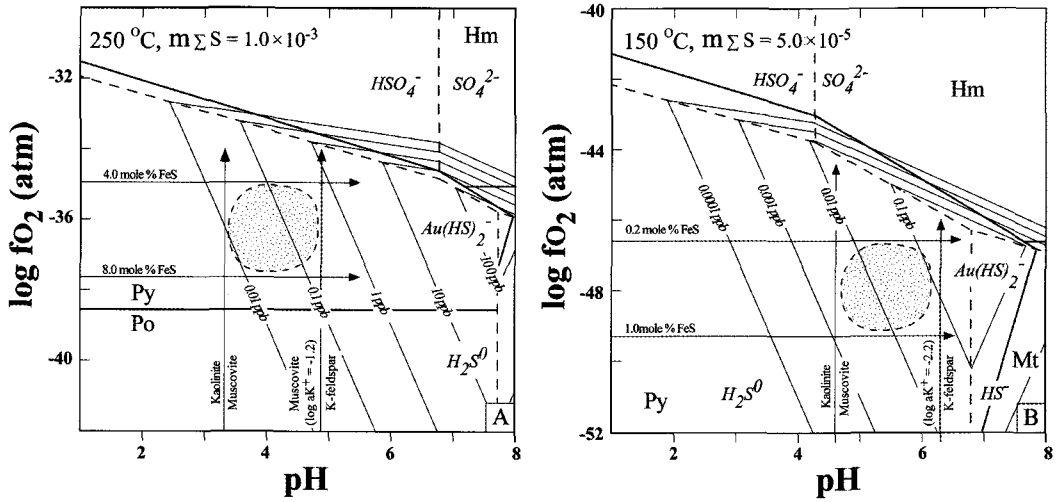


Fig. 11. Isothermal oxygen fugacity versus pH showing the solubility of  $Au(HS)_2^-$ . Hatched areas stand for isothermal fluid conditions at the Gajok deposit. The solubility of  $Au(HS)_2^-$  calculated from Seward (1973) and Seward (1984). Log  $aK^+$  calculated from Ellis and Mahon (1967) and Fournier and Truesdell (1973). Equilibrium constants used for constraining reactions are from SURCRT92 (Johnson *et al.*, 1992).

것으로 추정된다(그림 10).

반면 광화 후기의 광화 평균온도는 150°C로 가정할 수 있으며, 열역학적 연구에서 계산된 황분압을 근거로 추정된 광화 후기의 산소분압은 대체로 -49~-47기압 정도를 보여, 이를 통해 추론되는 광화 후기 유황종의 전체 몰농도( $\Sigma S$ )는 평균  $5 \times 10^{-5}$ 몰 정도를 가질 것으로 추정된다(그림 10). 따라서 가축광상의 광화작용은 광화 초기 상대적으로 높은 산소분압 및 황농도에서 광화가 진행됨에 따라 산소분압 및 황농도가 감소하는 경향을 보인다. 가축 광상의 열수변질대에서는 견운모가 우세하게 산출되는 특징을 보이며, 견운모의 산출 빈도는 장석류의 변질 정도와 석영맥으로부터의 거리에 의존하는 경향을 보인다(그림 2). 따라서 가축 광상을 형성시킨 열수의 수소이온농도(pH)는 주로 석영, 장석 및 견운모의 광물공생관계에 의해 조절되는 것으로 생각된다. 일반적으로 250°C 및 150°C의 온도와 < 10 wt.% NaCl 상당 염농도를 보이는 광화 유체의 칼륨 활동도(log  $aK^+$ )는 각각 1.2와 2.2 정도로 예상된다(Ellis and Mahon, 1967; Fournier and Truesdell, 1973). 따라서 변질광물 조합과 염농도 및 유도된 유체의 화학성을 근거로 제시된 광화 유체의 수소이온농도(pH)의 상한치는 광화 중기에

는 약 5를 보이며, 광화 후기에는 약 6을 보인다(그림 11). SURCRT92의 상수를 이용해 유도된 수소이온농도, 산소 분압 및 황 농도를 합쳐 광물의 공생관계와 함께 고려하면, 유체는 대체로 환원성 유황종( $H_2S^0$  또는  $HS^-$ )이 안정하였을 것으로 추정된다(그림 11). 이러한 광화 유체 내에서 안정한 합금 이온종은 그림 11에서와 같이 황화수소를 착이온으로 갖는  $Au(HS)_2^-$ 이 우세하였을 것으로 판단된다(Cole and Drummond, 1986; Drummond and Ohmoto, 1985; Seward, 1973, 1984). 이와 같은 합금착이온종의 용해도를 유도된 열역학적 자료와 함께 광화시기별로 고려하여 보면 광화 중기의 합금착이온[ $Au(HS)_2^-$ ]의 용해도는 평균 0.1 ppb 정도를 보이나 광화 후기의 동일 합금착이온의 용해도는 평균 0.01 ppb 정도로 감소하는 경향을 보인다(그림 11). 따라서 금광화 작용은 광화 중기에서 광화 후기로 가면서 광화 유체의 산소 및 황 분압, 온도, 염농도가 감소하는 반면, 수소이온농도는 다소 증가하면서 합금착이온종[ $Au(HS)_2^-$ ]의 용해도가 감소하여 금광화작용이 진행된 것으로 생각된다. 합금·은 석영맥에서 에렉트럼 정출 시 수반되는 황화광물의 양은 상대적으로 소량을 보인다. 이는 에렉트럼 정출 시 비등과 같은 광화 유체로부터 유황종의 집

중적인 이탈이 없었음을 시사한다. 또한 석영맥에서 산출되는 유체포유물은 액상이 우세한 I형이 매우 우세하게 관찰되므로, 광화 작용 시 유체의 비등은 미약했던 것으로 생각된다. 따라서 금광화작용은 비등과 같은 급격한 유체계의 변화가 아닌, 광화 유체의 점진적인 온도 감소 및 수소이온농도(pH)의 점진적인 증가에 의해 진행되었음을 시사한다.

한편, 광화 유체 중 은은 일반적으로 염화은 착이온(AgCl<sub>2</sub>)의 형태로 이동된다(Cole and Drummond, 1986; Drummond and Ohmoto, 1985; Seward, 1973, 1984). 가족광상 광화 후기에 에렉트럼과 함께 정출되는 자연은 및 휘은 석 등의 함은 광물들은 염화은착이온의 형태로 이동된 것으로 생각되며, 광화 후기 유체의 염농도 감소에 기인한 염화은착이온의 불안정성이 증가함에 따라 함은광물들이 정출하는 것으로 판단된다. 광화 유체 내에서 이동하는 금·은 착이온종이 다를 경우(금; Au(HS)<sub>2</sub><sup>-</sup>, 은; AgCl<sub>2</sub><sup>-</sup>), 광화 유체의 온도 또는 황분압이 감소하거나, 수소이온농도(pH)가 증가하면서 에렉트럼의 은함량이 증가하는 경향을 보인다(Gammons and Williams-Jones, 1995). 따라서 가족광상에서 광화 후기 에렉트럼의 은함량이 증가하는 것은 광화가 진행됨에 따라 유체계의 온도 및 황분압, 염농도의 감소와 수소이온농도 증가와 같은 복합적 요인에 기인한 것으로 판단된다.

## 토의 및 결론

가족광상에서 산출되는 백악기 함금·은 석영맥들은 수차에 걸쳐 반복적으로 상승하는 광화 유체에 의해 형성된 전형적인 복성맥의 산상을 보이며, 빗구조, 피각상구조, 정동조직, 옥수질 석영 등과 같은 천부에서 형성되는 맥상조직이 우세하게 관찰된다. 수 차에 걸친 금·은광화작용에서 금광화기인 광화 중기는 에렉트럼, 황철석, 섬아연석, 황동석 방연석 등이 산출되고, 광화 말기는 은광화기로서 비철금속의 황화광물 이외에 휘은석 및 자연은 등과 함께 에렉트럼이 수반되는 특징을 보인다. 광화 시기별 에렉트럼의 금함량과 섬아연석의 철함량은 광화 중기에 각각 ~50 atomic % Au 및 ~6 mole % FeS에서 광화 후기 각각 10~30 atomic % Au 및 < 1 mole % FeS로 낮아지는 특징

을 보이며, 금·은광화작용을 야기한 광화 유체의 산소분압 및 황 분압, 황 농도 역시 광화 중기에서 광화 후기로 가면서 감소하는 경향을 보인다(그림 10, 11).

금·은광화작용은 광화 초기에는 상대적으로 고온의 광화유체(~360℃, ~7 wt.% NaCl 상당 염농도)로부터 광화작용이 시작되었으나, 광화 중기에 지표수가 유입됨에 따라 동위원소교환 반응에 따른 산소 동위원소비가 점차 증가하고 광화 유체의 온도 및 염농도가 감소하면서 황화광물과 에렉트럼이 330~240℃의 정출온도와 황분압(-logf<sub>S2</sub>) -9~-13 기압의 환경조건에서 침전된 것으로 생각된다. 광화 말기에는 저온 및 저염농도를 갖는 지표수의 혼입량이 지속적으로 증가함으로써 광화유체의 염농도와 온도가 동시에 감소하며, 180~130℃ 정출온도와 황분압(-logf<sub>S2</sub>) -16~-18 기압의 환경조건에서 함은량이 높은 에렉트럼과 함은광물이 정출된 것으로 생각된다.

가족광상에서 얻어진 동위원소비 값( $\delta^{18}O$ ; -6.7~-0.6 ‰)은 산소 편이현상으로 해석되며, 광화작용이 진행됨에 따라 지표수 유입량이 점증하면서 광화 유체의 혼입 또는 희석이 진행되었음을 시사한다. 이러한 정출시기에 따른 광석광물의 공생관계 차이 및 화학조성의 차이는 광화유체의 온도 변화를 반영한 물리·화학적 생성환경의 변화로서 금·은광물의 선택적 침전작용에 기인한 것으로 생각된다.

후기 백악기(86Ma)의 생성연대를 보이는 가족광상의 함금·은 석영맥들은 약 N5~10W의 주향을 보인다. 이는 백악기 인리형 분지인 음성분지 형성과 밀접한 관련을 보이는 금·은광상들에서 산출되는 함·금은 석영맥들의 주향과도 일치하는 방향을 보인다(박상준 외, 2003; 최선규 외, 2001). 가족광상의 함금·은 석영맥의 이러한 주향방향은 풍암분지 주변에 분포하는 암맥류 및 석영맥들의 주향과 대체로 일치하는 경향을 보이고 있어, 반상화강암 내 열극을 형성하는 구조선들이 백악기 인리형 풍암분지의 형성과 밀접한 연관이 있음을 시사한다.

또한 광상 부근에 위치하는 풍암분지에는 중부지역의 기타 인리형 분지(부여, 공주, 음성분지)에 비하여 상대적으로 많은 화산암들이 노출 분포하고 있으며 이들 화산암류들의 분출 시기는 대체로 후기 백악기(94~72 Ma; 정대교 외,

2002)를 보인다. 따라서 가족광상의 열수 유체 계는 후기 백악기 천부 화성활동과 밀접한 연관이 있음을 시사한다. 따라서 가족광상에서 산출되는 광석광물, 열수변질대의 산상, 유체포유물 및 동위원소 연구를 종합적으로 검토한 결과 가족광상의 광화작용은 지표수의 다량 유입이 가능한 천부 지질환경에서 진행되었음을 시사하며, 성인적으로 백악기 화성활동과 관련된 저유황형 천열수 광상으로 해석된다.

## 사 사

이 연구는 과학기술부 과학재단 특정기초연구사업(R01-2006-000-10553-0)의 지원에 의하여 수행되었으며, 논문심사 시 유익한 조언을 주신 박맹언 교수님과 이찬희 교수님께 깊은 사의를 드립니다.

## 참고문헌

- 김옥준 (1970) 남한의 금은광 광상구. 광산지질, 3, 163-167.
- 김옥준 (1971) 남한의 초기 화강암류의 관입시기와 지각변동. 광산지질, 4, 1-10.
- 박상준, 최선규, 이동은 (2003) 무극지역 천열수 광상 열수변질대의 성인적 의미. 한국광물학회지, 16, 265-280.
- 장태영, 지정만 (1989) 청일 금광산이 유체포유물 연구. 광산지질, 22, 193-205.
- 정대교, 이희권, 이문원 (2002) 강원도 홍천 백악기 풍암분지의 지질. 대한지질학회 '02춘계 학술답사, 대한지질학회, 85p.
- 정영부, 유영준 (2002) 정밀조사보고서(금속광·해남·영덕·홍천·횡성지구). 대한광업진흥공사, 60p.
- 최선규, 이동은, 박상준, 최상훈, 강홍석 (2001) 한국 금-은 광상의 효율적 탐사를 위한 성인모델; 무극 광화대를 중심으로. 자원환경지질, 34, 423-435.
- 최선규, 박상준, 김성원, 오창환 (2006) 남한의 중생대 금-은광화작용: 지구동력학적 관점에서 재검토된 금-은광상구. 자원환경지질, 39, 567-581.
- Barton, P.B. Jr. and Skinner, B.J. (1979) Sulfide mineral stabilities. In: Barnes, H.L. (ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, (2nd Ed.), John Wiley and Sons, New York. 278-403.
- Barton, P.B. Jr. and Toulmin, P. (1964) The electrometallurgical method for the determination of the fugacity of sulfur in laboratory sulfide systems. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 28, 619-640.
- Choi, S.-G., Ryu, I.-C., Pak, S.J., Wee, S.-M., Kim, C.S. and Park M.-E. (2005) Cretaceous epithermal gold-silver mineralization and geodynamic environment, Korea. *Ore Geol. Rev.*, 26, 115-135.
- Cole, D.R. and Drummond, S.E. (1986) The effect of transport and boiling on Au/Ag ratios in hydrothermal solutions: A preliminary assessment and possible implications for the formation of epithermal precious-metal ore deposits. *Jour. Geochem. Explor.*, 25, 45-79.
- Drummond, S.E. and Ohmoto, H. (1985) Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Econ. Geol.*, 80, 126-147.
- Ellis, A.J. and Mahon, W.A.J. (1967) Neutral hydrothermal systems and experimental hot water/rock interactions (Pt. III). *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 31, 519-538.
- Fournier, R.O. and Truesdell, A.H. (1973) An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 37, 1255-1275.
- Friedman, I. and O'Neil, J.R. (1977) *Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest*. In: Fleisher, M., (ed.), *Data of geochemistry*, (6th Ed.), U.S. Geol. Survey Prof. Paper 440-KK, p. KK1-KK12.
- Gammons, C.H. and Williams-Jones, A.E. (1995) Hydrothermal geochemistry of electrum: thermodynamics constraints. *Econ. Geol.*, 90, 420-432.
- Haynes, F.M. (1985) Determination of fluid inclusion compositions by sequential freezing. *Econ. Geol.*, 80, 1-26.
- Johnson, J.W., Oelkers, E.H. and Helgeson, H.C. (1992) SUPCRT92: a software package for calculating the standard molal thermodynamic properties of minerals, gases, aqueous species, and reactions from 1-5000 bars and 0° ~ 1000°C. *Computers and Geosciences*, 18, 899-974.
- Matsuhisa, Y., Goldsmith, R. and Clayton, R.N. (1979) Oxygen isotope fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, 1131-1140.
- Potter, R.W., III, Clynne, M.A. and Brown, D.L. (1978) Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions. *Econ. Geol.*, 73, 284-285.
- Seward, T.M. (1973) Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal ore solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 37, 337-399.
- Seward, T.M. (1984) The transport and deposition of gold in hydrothermal systems. In: Foster, RP (eds.), *Gold '82*. Rotterdam, A.A. Balkema Pub. 165-182.
- Shelton, K.L., So, C.S. and Chang, J.S. (1988) Gold-rich mesothermal vein deposits of the Republic of

Korea: Geochemical studies of the Jungwon gold area. *Econ. Geol.*, 83, 1221-1237.

So, C.S., Yun, S.-T., Heo, C.-H. and Youm, S.-J. (1999) Geochemistry and genesis of mesothermal gold deposits in Korea; Base metal-rich gold min-

eralization of the Byungjibang mine, Hwoingsung area. *Jour. Min. Pet. Econ. Geol.*, 94, 65-82.

---

2007년 12월 18일 원고접수, 2008년 3월 5일 게재승인.