

무안 지역, 삼보 광상의 금광화작용

박상준* · 최선규

고려대학교 지구환경과학과

Hydrothermal Gold Mineralization of the Sambo Deposit in the Muan Area, Korea

Sang Joon Pak* · Seon-Gyu Choi

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

The Sambo gold deposit located nearby the Cretaceous Hampyeong basin is composed of gold quartz fine vein(the Jija vein) within Cretaceous rhyolite showing N10~20W trends as well as N5~10E trending quartz veins(the Pungja, Gwangsan and Pungjaji veins) in Precambrian gneiss. The gold vein typically displays the intermittent and irregular fine veins within rhyolite. Electrum is disseminated in wallrock along the fine cracks as well as coexists with hematite replacing pyrite. Ore-forming fluids from the mineralized vein(H₂O/-NaCl system, Th; 340~200°C, Salinity <2.7 eq. wt.% NaCl) and NE-trending veins(H₂O-NaCl-CO₂ system, Th; 400~190°C, salinity <7.9 eq. wt.% NaCl) are featured by dissimilar physicochemical conditions but their fluid evolution trends(boiling and mixing) are similar with each other. Gold veins of the Sambo deposit filled along NNW-trending tension crack are related to pull-apart basin evolution. Selective gold mineralization of the deposit reflect to dissimilarity between two ore-forming fluid sources. Consequently, gold veining of the Sambo deposit formed at shallow-crustal level and could be categorized into epithermal-type gold deposit related to tensional fractures filling triggered by Cretaceous geodynamics.

Key word : Sambo deposit, gold mineralization, ore-forming fluids, hematite, epithermal

백악기 함평분지 서측에 위치하는 삼보광상은 유문암내에 배태되는 N10~20W 주향의 합금석영세맥(지자맥)과 선캠브리아기의 편마암 열극을 충전하는 NE 계열의 석영맥(풍자맥 · 광산맥 · 풍자지맥)으로 구성된다. 합금석영세맥은 주로 유문암의 미세 열극 따라 단속적인 불규칙상 세맥으로 배태되며, 에렉트럼은 미세 열극을 따라 모암내에서 산점 분포하거나, 세맥내 황철석의 용식 공간에서 정출하는 적철석과 밀접히 공생한다. 합금석영세맥의 광화유체(H₂O/-NaCl 계)는 340~200°C의 균일화온도 및 <2.7 eq. wt.% NaCl의 염농도를 보인다. 반면 NE 석영맥의 유체(H₂O-NaCl-CO₂계)는 400~190°C의 균일화온도 및 <7.9 eq. wt.% NaCl의 염농도를 보인다. 이 두 유체계는 서로 다른 물리·화학적 조건을 보이는 반면 공통적으로 초기 비등 이후 혼입의 유체 진화 과정을 보인다. 삼보광상은 백악기 인리형 분지와 관련된 NNW 방향의 인장성 열극 형성과 밀접한 관련을 보이며 각맥별 광화작용은 서로 다른 기원의 광화유체에 의해 진행되었다. 삼보광상에서 산출되는 석영맥, 광석광물, 광화유체에 대한 연구를 종합적으로 검토한 결과 삼보광상의 금광화작용은 성인적으로 백악기 지구조운동에 의한 인리형 분지 형성과 관련된 인장성 열극을 충전한 천열수 광상으로 해석된다.

주요어 : 삼보광상, 금광화작용, 광화 유체, 적철석, 천열수

1. 서 언

국내 금·은광상은 주로 열수충진형 맥상광상이며 일

부 스카른 광상, 열수교대 광상, 알라스카이트형 광상, 충적형 사금광상이 배태된다. 열수충진형 금·은광상은 경기 및 소백산 육괴의 선캠브리아기 변성암류, 고생대

*Corresponding author: electrum@korea.ac.kr

태백산 퇴적암류, 쥬라기 및 백악기 심성·반심성/화산암류, 퇴적암류 등의 다양한 시기와 모암에 배태되고 있으나, 백악기 금·은광상은 주로 동남부 경상분지 및 서남부 해남분지 및 남해안지역에 산출되며, 공주-음성 단층계와 광주-영동 단층계를 중심으로 한 풍암·음성·부여·해남·능주 등의 백악기 인리형 분지 주변에 분포하고 있다. 또한 백악기 천열수 금·은광상은 백악기 고태평양판의 사각섭입에 따른 인리형 분지에 형성과 함께 지각열개 및 천부 화성활동과 밀접한 관련을 보이는 천부 열수 유체계에 의해 형성된 것으로 해석하였다 (Choi *et al.*, 2005; Choi and Pak, 2007).

전라남도 무안지역의 삼보광상은 백악기 인리형 분지 중 하나인 함평 분지 서측에 위치하는 금광상으로, 금은 백악기 유문암류에서 단속적인 불규칙상 석영세맥 내 또는 세맥 주변 모암부에서 산점상으로 배태된다. 국내에서 보고된 인리형 분지 형성과 관련된 천열수 광상들은 주로 반심성암의 파쇄각력대를 충전하는 맥상광상으로, 일정한 연장과 맥폭을 보이며 산출되고 있어, 삼보금광상은 국내 인리형 분지 주변의 천열수 광상과 비교하여 맥의 형태 및 조직, 금의 산상, 공생광물군 등에 있어 상이한 차이를 보인다. 따라서 본 연구에서는 삼보광상에서 산출되는 함금석영세맥을 대상으로 맥의 산상 및 금의 산상, 광화유체 특성 등을 연구하고, 이를 국내의 기 보고된 백악기 인리형 분지 발달과 관련된 천열수 광상과 비교하여 무안지역의 백악기 천열수 광상의 금 광화작용의 특성을 고찰하였다.

2. 광상 지질

삼보광상이 위치하는 무안지역은 지체구조상 옥천대 남서부 연장선상에 해당하며 광상 동측에는 백악기 인리형 분지인 함평분지가 인접하여 위치한다(Fig. 1). 광상지역의 지질은 시대미상의 변성암퇴적암류를 기반암으로 하여 후기에 이를 관입하는 백악기 화산암류 및 암맥류들로 구성된다. 이들 변성퇴적암류 및 화산암류는 이 지역을 지나가는 북동-남서 방향의 전단대에 의해 강한 전단작용을 받아 변성암류의 입자가 파쇄 또는 신장되어 있는 압쇄화작용의 특징을 보인다.

삼보 광산 지역에 분포하는 기반암은 화강암질 편마암, 호상편마암, 백운모화강암질편마암 등의 선캠브리아기 편마암류들로 구성된다(Fig. 1). 광산 서측부에 분포하는 화강암질 편마암은 ~10cm 유·무색광물의 교호구조를 보이며 일부에서는 장석의 반상변정구조 또는 석영 내지 장석으로 구성되는 안구상구조가 관찰되

기도 한다. 이들 화강암질 편마암은 광산지역 중앙부에 있는 호상편마암과 점이적으로 접촉하는 특징을 보인다. 삼보광산에서 산출되는 주요 석영맥들이 배태되는 호상편마암은 광산지역 중앙부에 위치하며 화강암질 편마암에 비해 흑운모 엽리에 의한 호상구조가 잘 발달한다. 광산 동측 최외각부에 분포하는 백운모화강암질편마암은 다량의 중립질 운모편암의 암편이 포함되어 있으며 엽리구조는 상기한 편마암에 비해 미약하게 발달한다. 전반적으로 백운모가 우세하게 산출되나, 일부 노두에서는 흑운모가 소량 관찰되기도 하여 복운모화강암질편마암의 특징을 보이기도 한다. 광산 지역의 편마암류간 점이적 접촉 및 엽리 신장 구조 발달, 화강암질화 등은 전주전단대의 일부로써(Ahm, 2007), 압쇄화작용의 영향을 받은 것으로 판단된다.

유문암은 함금석영세맥인 지자맥의 모암으로 광산지역 남측에서 N10~20W 방향의 배열을 하며 폭 30여m, 연장 200여m을 보이며 분포한다(Fig. 1). 담회색 내지 담녹색을 보이는 이 유문암은 국부적으로 반상조직 및 호상구조가 관찰된다. 반상조직을 보이는 유문암은 현정질 석영과 장석 및 이들의 변질광물 등으로 구성되며 약 ~1cm의 석영 내지 장석의 반정을 수반한다. 일부 노두에서는 반정의 함량이 증가하면서 반암 조직을 보이기도 한다. 호상구조를 보이는 유문암은 석영으로 구성된 부분과 장석 및 이들의 변질광물로 구성된 부분이 교호하는 형태로 산출되며, 유동에 의한 습곡구조가 잘 관찰되기도 한다. 유문암 노두의 상부 시료 및 소규모 구조선을 따라 분포하는 시료에서는 적철석의 침전에 의한 적색의 불규칙 수지상 세맥구조(<1cm)가 발달한다.

광상지역의 주요 지구구조선은 확인되지 않으나 N5~10E의 주향과 2km 연장을 보이는 풍자맥과 광산맥이 약 1.5km의 간격을 두고 평행 발달하며, 이들 두 개조의 석영 평행맥 사이에는 유문암이 NNW 방향으로 분포하는 특징을 보인다(Fig. 1).

지자맥의 모암인 유문암에 발달하는 열수변질대는 전체적으로 견운모화 되어있어 일부는 도석광으로 개발되기도 하였다. 이들 유문암은 경하에서 유문암의 주 구성광물들이 거의 견운모화 되어 미사장석의 쌍정 또는 벽개가 불분명한 특징을 보인다. 일부 시료에 대한 단파장적외선분광 분석 결과 견운모·스멕타이트의 혼합층상 광물들이 산출되기도 한다. X-선회절 분석 결과에서도 견운모가 집중적으로 산출되는 견운모화작용이 우세한 특징을 보인다(Fig. 2). 풍자맥 및 광산맥의 접촉부에서 발달하는 열수변질대에는 녹니석, 견운모,

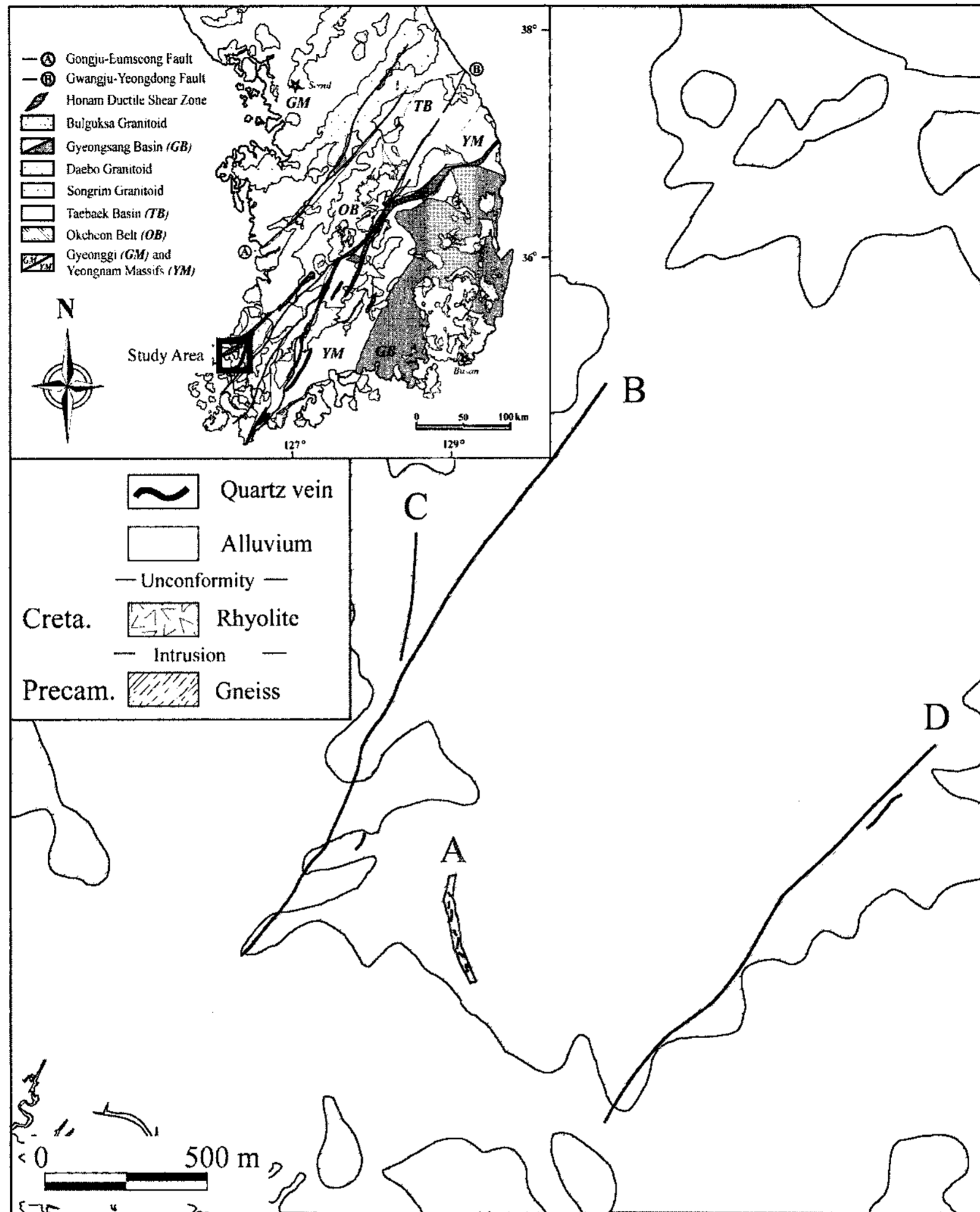


Fig. 1. General geological map of the Sambo gold deposit. A=Jija vein, B=Pungja vein, C=Pungjaji vein and D=Gwangsan vein. Abbreviation; GB=Gyeongsang Basin, GM=Gyeonggi Massif, OB=Okcheon Belt, YM=Yeongnam Massif, TB=Taebaek Basin.

녹염석 등이 산출되어 녹니석화 작용이 진행되었다. 석영맥과 모암의 접촉부로부터 먼 곳에서는 편마암류의 주 구성광물인 사장석, 미사장석 및 흑운모들이 비교적 신선하게 잘 관찰되는 반면 석영맥과 모암과의 접촉부에서는 모암의 주 구성광물들이 녹니석화 및 견운모화 되는 양상을 보인다(Fig. 2).

3. 석영맥의 특징 및 금의 산상

삼보광산에 산출되는 석영맥들은 NNW 방향성을 보이며 분포하는 유문암내에 발달하는 지자맥(A형)과 편마암류에서 NE 주향을 보이는 풍자맥·풍자지맥·광

산맥(B형) 등의 4개조의 석영맥이 발달한다. 유문암내에 불규칙상의 세맥으로 발달하는 지자맥은 0.05~550 g/t Au 및 0.05~369 g/t Ag의 비교적 높은 금·은 품위를 보이나, NE계열의 풍자맥, 풍자지맥, 광산맥 등의 금·은 품위는 검출 한계 이하를 보인다. 비교적 견실한 맥 폭(0.01~1 m)과 연장(1500~2200 m)을 보이는 NE계열의 석영맥과는 달리 지자맥은 <1cm정도의 망상 세맥으로 서로 단속적 연결을 보이며, 금은 이들 석영세맥 또는 유문암내에 산점상으로 배태된다.

3.1. A형 함유 석영세맥

금광화작용을 수반하는 지자맥은 불규칙적인 수지상

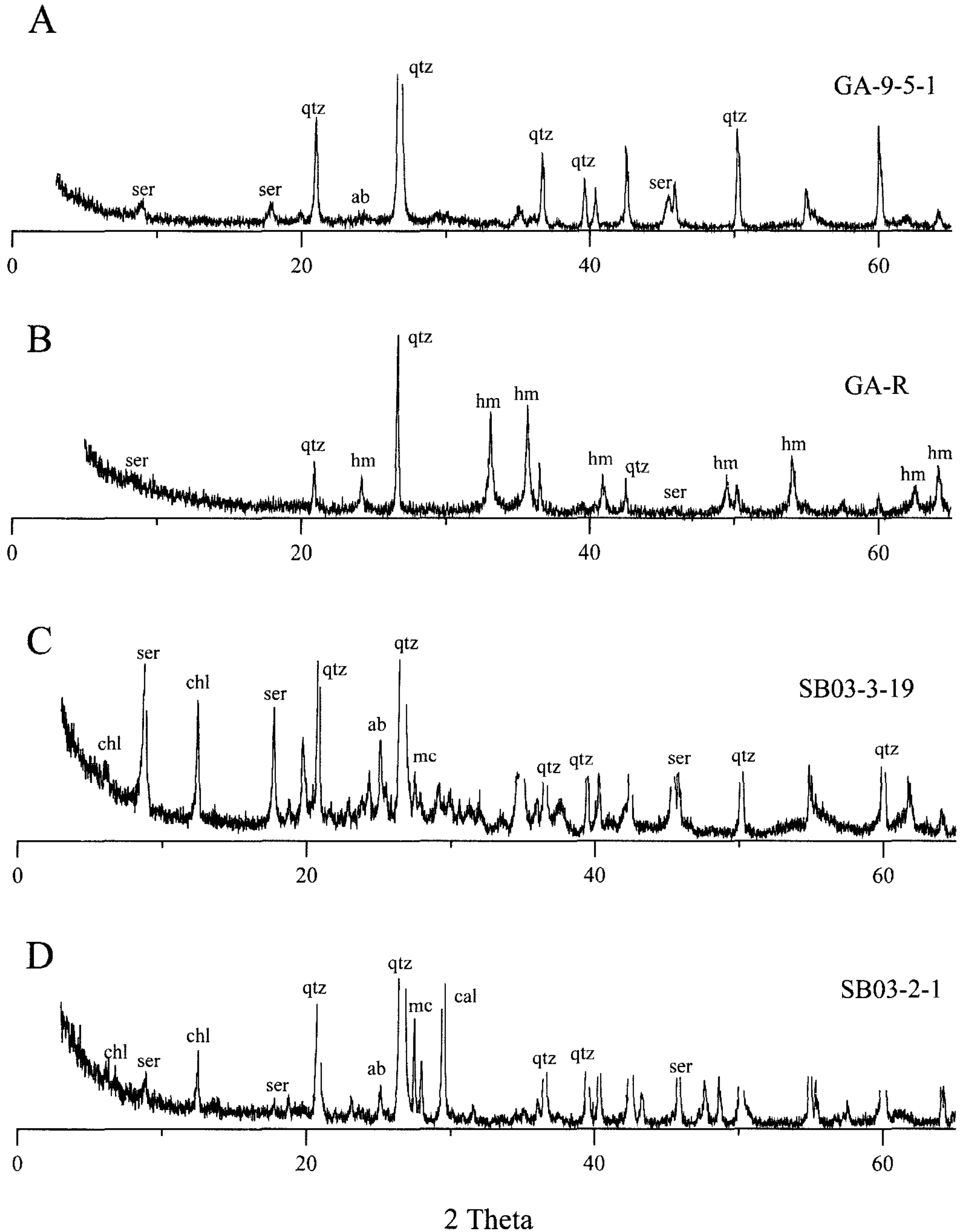


Fig. 2. XRD patterns of alteration samples from each veins. A and B: samples from A-type vein (the Jija vein). C and B: samples from B-type vein (the Pungja vein). Note sericite and hematite are dominant in alteration zone of A-type vein whereas chlorite is dominant in alteration zone of B-type vein. Abbreviation; ab=albite, chl=chlorite, hm=hematite, mc=microcline, qtz=quartz, ser=sericite.

의 석영 세맥으로 폭은 <1cm를 보이며, 서로의 맥은 단속적(<10cm)으로 연결돼 연결성이 극히 미약하다 (Fig. 2). 불규칙 수지상으로 발달하는 단속적인 열극은

자형의 투명 정동석영(<5 mm)에 의해 충전된다. 일부 정동에서는 블레이드형태를 보이는 후기 방해석이 침전하기도 한다. 경하에서 정동석영은 지표 가까운 곳

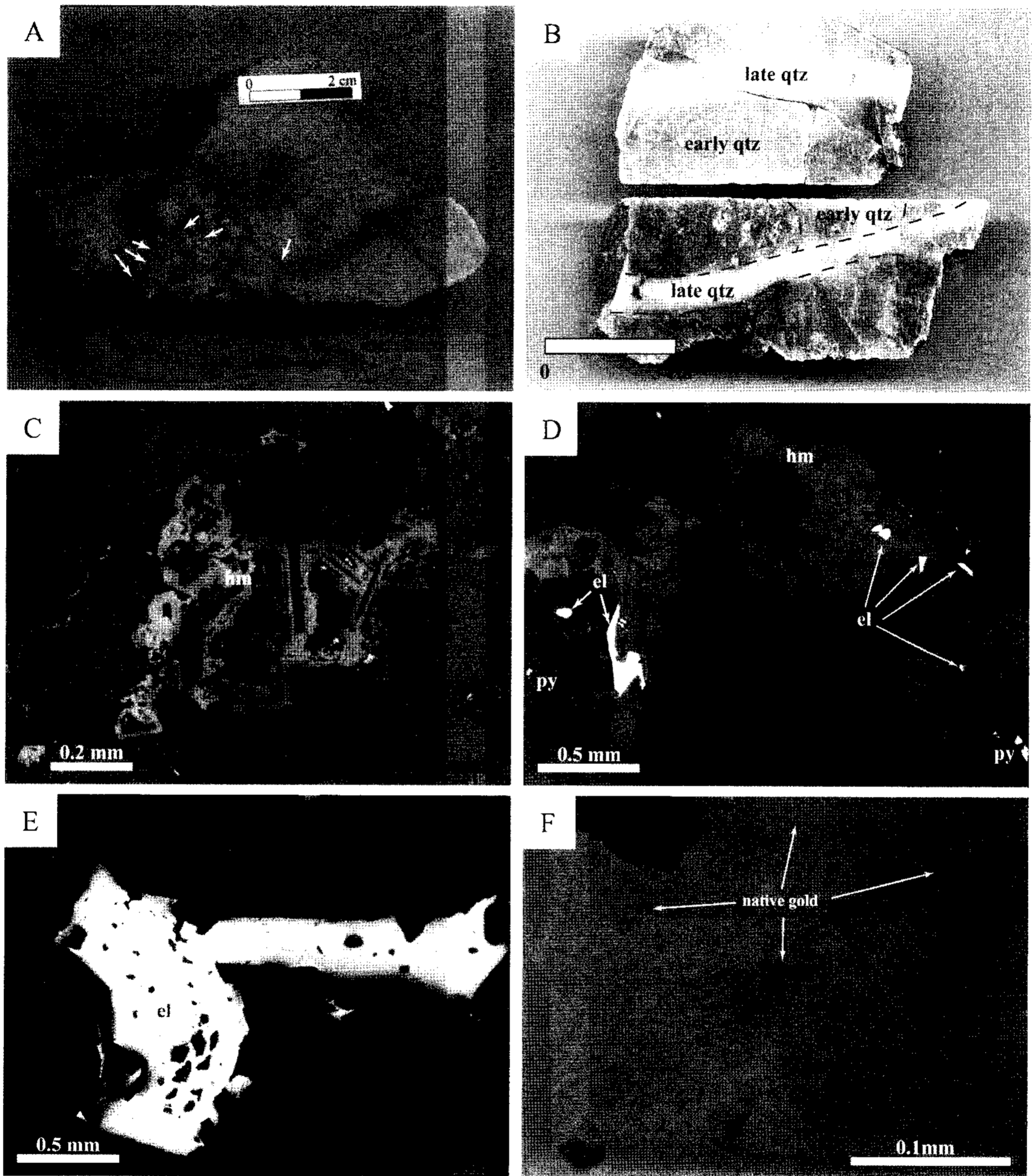


Fig. 3. Photographs showing specimen and ore minerals the Sambo deposit. A; intermittent and irregular fine vein textures from A-type vein (the Jija vein). Note gold occurs in irregular vein and/or is disseminated in rhyolite along the veins. White arrows indicate gold grain. B; B-type vein (the Pungja vein) displaying two stages of veining. C; hematite occurred in pyrite lattice shows ring textures from A-type vein. D; electrum grains within hematite showing ring textures from A-type vein. E; large electrum grains as free gold in A-type vein or their wallrock. F; late native gold filling fractures of earlier large electrum grains from A-type vein. Abbreviation; el=electrum, hm=hematite, py=pyrite, qtz=quartz.

에서 성장한 후 재결정화 된 조직인 깃털구조(feathery texture)가 잘 관찰된다.

금광화작용은 불규칙상 석영 세맥내의 정동 석영을 따라 집중되거나, 세맥 주변부 모암내에 산점상으로 수

반되기도 한다. 정동 석영에 수반되는 광석 광물은 황철석과 적철석 및 에렉트럼으로 매우 단순한 광물조합을 보인다.

황철석은 대체로 유문암 또는 석영세맥 내에서 반자

형으로 산점 분포하며 대체로 황철석은 용식구조를 보인다(Fig. 3). 석영 입자에 의해 포유되어 산출되는 세립질의 자형의 황철석은 용식구조가 관찰되지 않는다.

적철석은 정동 석영의 결정면을 따라 빈 공간에서 자형으로 성장하기도 하며, 황철석이 용식된 공간을 충전하기도 한다. 이들 적철석 중 일부는 석영 입자 사이에서 정출하기도 한다(Fig. 3).

에렉트럼은 산출상태 및 화학조성에 따라 크게 전기의 것과 후기의 것으로 구분된다. 전기에 정출하는 에

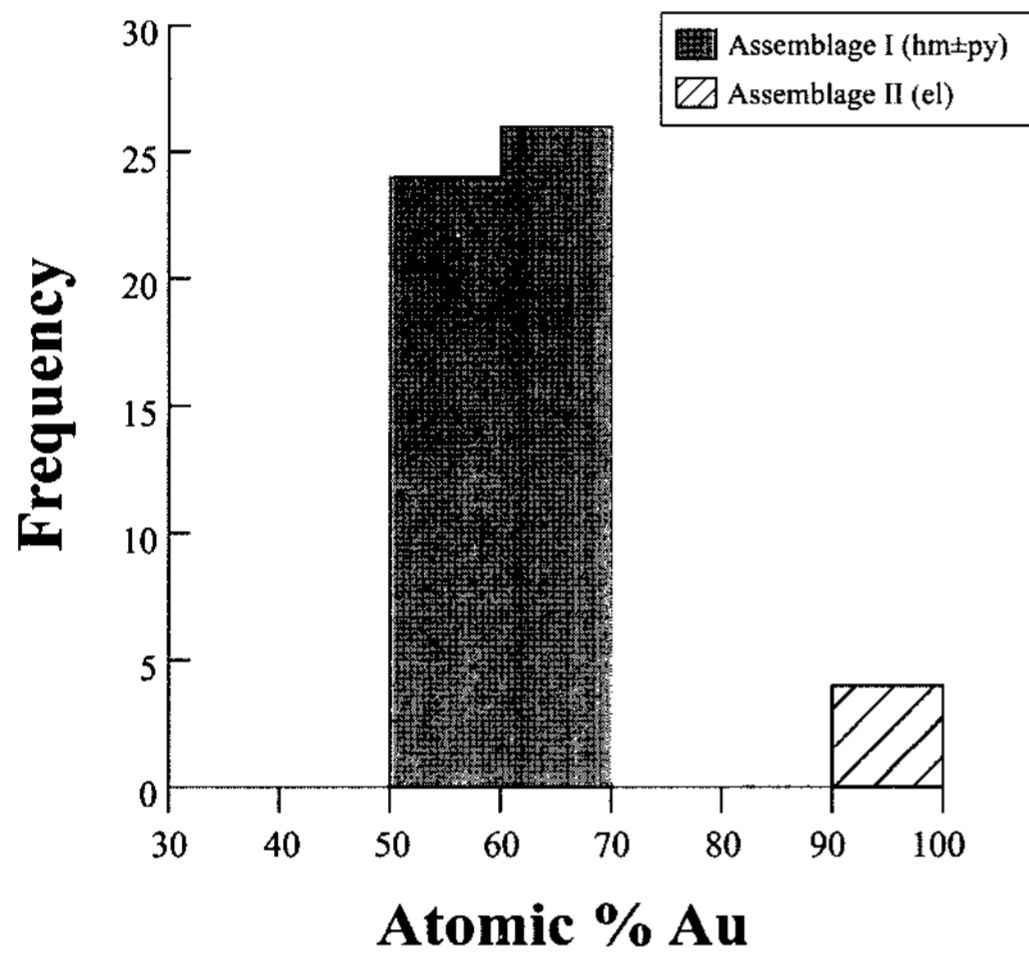


Fig. 4. Histogram showing Au contents in electrum from A-type vein. Abbreviations are same in fig. 3.

렉트럼의 산상은 크게 3가지로 구분된다. 유문암에 산점 분포하는 황철석입자의 파쇄대를 따라 정출거나 황철석내에서 점적의 형태로 산출하는 것(~5 μm)과, 모암 및 세맥내에서 정출하는 적철석과 공생하는 중립질 에렉트럼(<200 μm) 그리고 정동에서 단독으로 정출하는 조립질의 에렉트럼(~2 mm)이 있다(Fig. 3). 이들 전기 에렉트럼의 금함량은 60~50 atomic % Au로 비교적 일정한 함량을 보인다(Fig. 4). 후기 에렉트럼은 정동에서 정출한 전기의 거정 에렉트럼의 결정면 또는 이들의 파쇄대를 따라 소량 정출하며 이들의 함금량은 100~99 atomic % Au로 자연금의 함량을 보인다 (Table 1).

3.2. B형 석영맥

풍자맥은 화강암질 호상편마암을 모암으로 하여 발달하는 석영맥으로 견실한 맥폭(<1 m)과 연장성(~2000 m)을 보인다. 풍자맥은 석영맥의 절단 관계를 통해 전기의 회색 투명 석영과 말기의 유백색 결정질 석영으로 구분된다(Fig. 3). 석영맥의 조직은 대체로 정동구조 · 빗살구조 · 옥수질 석영 등이 관찰된다. 풍자맥에서 산출되는 광석광물은 황철석으로 매우 단순한 양상을 보인다. 전기 석영맥에서 산출되는 황철석은 세립질 자형 내지 반자형으로 석영맥 내에서 단독 정출하거나, 반자형의 집합체로 산출된다. 반면 말기 석영맥에서 산출되는 황철석은 주로 조립질 타형의 괴상으

Table 1. The chemical composition of electrum from A-type vein (the Jija vein) in the Sambo gold deposit.

Sample No.	Weight percent			Atomic percent		Assemblage
	Ag	Au	Total	Ag	Au	
GA-8-3-2-1	25.52	73.81	99.33	38.70	61.30	hm
GA-8-3-2-4	26.15	73.52	99.66	39.37	60.63	hm
GA-8-2-1-19	25.28	73.16	98.44	38.69	61.31	hm
GA-4-1-22	27.35	71.62	98.97	41.09	58.91	hm±py
GA-4-1-23	27.61	70.94	98.55	41.55	58.45	hm±py
GA-4-1-24	27.14	71.62	98.76	40.90	59.10	hm±py
GA-4-1-25	27.24	71.88	99.11	40.89	59.11	hm±py
SB2306-A-1-8	33.01	65.28	98.28	48.01	51.99	hm
SB2306-A-3-13	33.07	65.46	98.53	47.98	52.02	hm
SB2306-A-3-18	34.20	66.25	100.45	48.52	51.48	hm
SB2306-A-3-23	30.57	67.56	98.13	45.25	54.75	hm
SB2306-C-1-26	32.98	66.73	99.71	47.44	52.56	hm
SB2306-C-1-29	32.29	68.20	100.49	46.37	53.63	hm
SB2306-A-3-19-1 ¹⁾	0.00	99.56	99.56	0.00	100.00	el
SB2306-A-3-20-1 ¹⁾	0.61	99.13	99.74	1.12	98.88	el
SB2306-A-3-21 ¹⁾	0.55	98.89	99.44	1.00	99.00	el
SB2306-A-3-24 ¹⁾	0.00	99.26	99.26	0.00	100.00	el

Abbreviation; el=electrum, hm=hematite, py=pyrite, ¹⁾native gold

로 정출한다. 일부 말기 석영맥 시료에서는 괴상의 황철석 파쇄대를 따라 후기의 적철석이 정출되기도 한다. 풍자지맥은 풍자맥에서 분기하여 발달하는 석영맥으로 맥폭·연장성·광석광물 조합에 있어서 풍자맥과 유사한 양상을 보인다.

광산맥은 풍자맥의 남동측 1.5 km 지점에 위치하며, 풍자맥과 나란히 발달하는 평행맥의 분포를 보인다. 거정의 유백색 석영으로 구성되는 광산맥은 석영맥의 주향 및 연장, 맥폭 등의 산출상태와 광화 상황이 전반적으로 풍자맥과 유사하다. 일부 광산맥은 다량의 화강암질 편마암 각력을 포함하는 특징을 보인다.

4. 광화유체 특성

삼보광상의 금광화작용시 온도 및 염농도 등의 열수 유체 조건 및 진화 특성을 밝히고자 유체포유물 연구를 수행하였다. 유체포유물 연구는 A형 석영맥인 지자맥과 B형 석영맥인 풍자맥의 시료를 중심으로 수행하였다. 현미경적 가열, 냉각 실험은 Linkam scientific Instruments의 THMS 600 Heating/Freezing stage를 이용하여 수행되었다. 가열, 냉각 실험시에는 정확도를 높이기 위해서 Haynes(1985)의 반복 냉각 기술을 활용하였으며, 가열실험에서 측정되는 균일화온도의 측정 오차는 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 이다. 염농도는 일반 수용성 포유물의 경우, $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 계의 어는점 내림을 이용하여 구하였다(Potter *et al.*, 1978). 관찰되는 유체포유물은 상온(20°C)에서의 상(phase)관계를 기초로 하여 구분하였다.

A형 함금석영세맥(지자맥)의 정동 석영에서 관찰되는 유체포유물은 액상이 우세(약 60 vol. % 이상)하여 가열 실험 시 액상으로 균일화되는 Type I이 우세하게 관찰된다. 기상이 우세한 Type II의 유체포유물은 일부 시료에서 극히 제한적으로 확인되나 그 크기와 균일화 현상의 관찰제한 요인으로 인해 정확한 균일화 온도 측정 및 염농도 확인은 불가하였다.

B형 석영맥(풍자맥)에서 관찰되는 유체포유물은 액상이 우세한 Type I이 가장 우세하며, 특징적으로 CO_2 를 함유하는 Type III가 관찰된다. Type III에 대한 냉각실험 시 CO_2 균일화온도가 $-56.6\sim-57.3^{\circ}\text{C}$ 사이로 측정되어 CO_2 phase 내에 CH_4 나 N_2 등의 조성이 거의 없는 비교적 순수한 CO_2 임(Burruss, 1981)이 확인된다. 기상이 우세한 Type II는 지자맥에서와 같이 일부 시료에서 제한적으로 관찰되며 정확한 균일화 온도 측정 및 염농도 확인은 불가하였다.

A형 석영맥에서 산출되는 유체포유물 균일화온도는

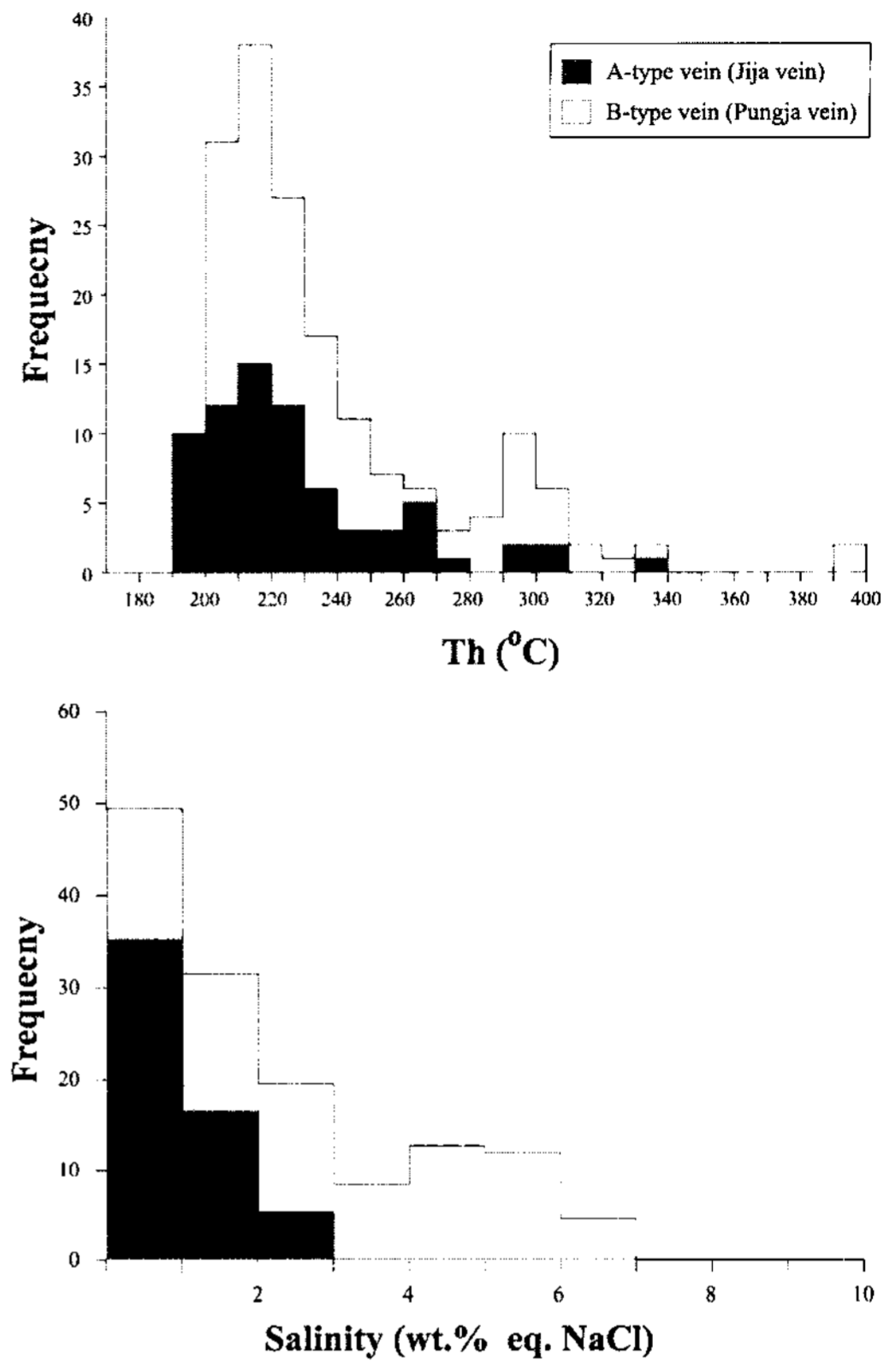


Fig. 5. Frequency diagrams of total homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions from the NNW-trending A-type vein and NE-trending B-type vein.

340~190°C의 온도 범위를 보인다(Fig. 5). 염농도는 <3.0 eq. wt.% NaCl로 비교적 낮은 염농도를 보여준다. A형 석영맥에서 추정된 염농도와 균일화 온도를 함께 비교해 보면 서로 다른 유체의 혼입에 의한 유체 진화 과정을 지시하며, 초기 국부적으로 비등(boiling)이 있었던 것으로 생각된다(Fig. 6).

반면 B형 석영맥에서 산출되는 유체포유물의 균일화 온도 및 염농도는 400~200°C 및 7.5~0.8 eq. wt.% NaCl로 A형 석영맥에 비해 높은 균일화온도 범위 및 염농도를 보인다(Fig. 5). B형 석영맥에서 추정된 염농도와 균일화온도를 함께 비교해 보면 초기 CO_2 비등에 의한 유체 진화가 특징적이며 이후 유체 혼입에 의한 온도 및 염농도 감소가 진행된 것으로 판단된다(Fig. 6).

A형 및 B형 석영맥의 광화유체의 물리·화학적 생성조건은 Table 2와 같다. A형 함금석영세맥의 광화유체는 B형 석영맥과 비교하여 CO_2 를 함유하지 않으며 균일화온도 및 염농도 등에서 상대적으로 낮은 범위를

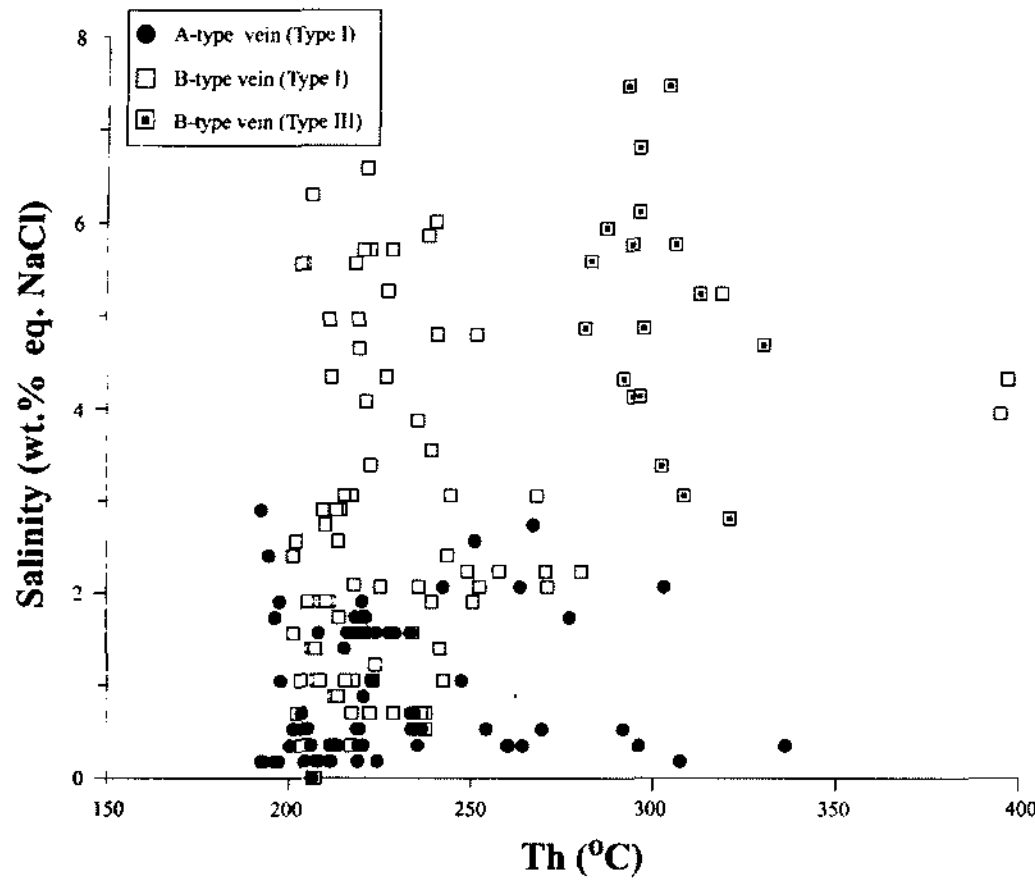


Fig. 6. Diagram showing homogenization temperature vs. salinity of fluid inclusions in quartz. Inclusions from A-type and B-type veins represent boiling and later incursion of more dilute water.

보인다. A형 합금석영맥에서는 국부적이거나 초기 비등의 흔적이 인지되고 있어, A형 석영맥 및 B형 석영맥 모두에서 광화유체의 진화는 비등에 이은 유체 혼입에 의해 이루어진 특징을 보인다(Table 2). 이는 두 주향 계열 석영맥의 광화작용 차이가 금 침전메카니즘 차이에 기인한 것이 아닌 서로 다른 합금농도를 가지는 광화유체로부터 기원하였을 가능성을 시사한다.

삼보 광상의 A형 석영세맥에서 산출되는 에렉트럼은 황철석이 용식된 공간을 따라 산출하는 적철석과 밀접히 공생하며 정출된다. 또한 이들 맥을 중심으로 형성된 열수변질대는 견운모와 스펙타이트가 우세하게 발달하는 저유황형 광상의 열수변질 광물조합을 보인다. A형 석영세맥의 균일화온도는 주로 300~200°C을 보이며 염농도는 <3.0 eq. wt.% NaCl로 저염농도의 유체 특성을 보인다. 따라서 열수변질광물조합, 저염농도 및 균일화온도 등을 종합적으로 고려하면 광화 유체내에서 안정한 합금 이온종은 황화수소를 착이온으로 갖는 $Au(HS)_2^-$ 이 우세하였을 것으로 판단된다(Cole and Drummond, 1986; Drummond and Ohmoto, 1985; Seward, 1973, 1982). 또한 에렉트럼의 공생관계를 고려하면 금침전은 금을 운반하는 광화 유체의 물리·화학적 조건이 황철석 안정영역으로부터 적철석 안정영역으로 이동하면서 진행된 것으로 판단된다(Fig. 7). 이러한 안정영역의 변화는 광화 유체계의 산소분압 및 pH 증가에 따른 것으로 판단되며, 광화 유체의 화학성의 변화가 금 용해도의 급격한 감소를 유발한 것으로 추정된다. 광화 유체에서 산소분압과 pH가 함께 증가하는 경우는 비등에 해당하며 산소분압만 증가하

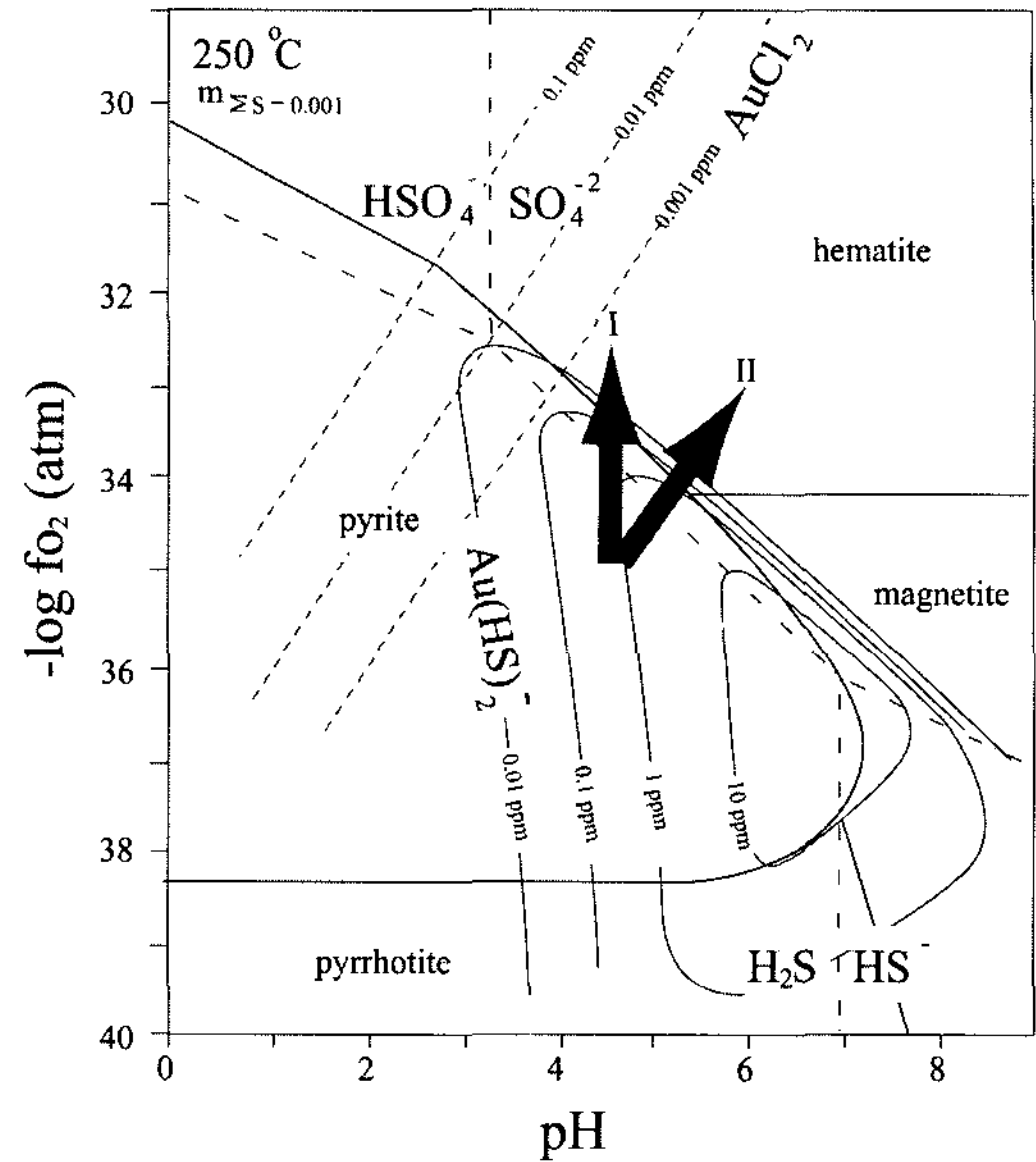


Fig. 7. Isothermal oxygen fugacity versus pH showing the gold solubility as HS- and Cl- complexes (modified from Seward, 1982; Brown, 1986) Hypothetical fluid paths of A-type vein (the Jija vein) I; mixing with oxidizing fluids and II; boiling.

는 경우는 다른 유체계와의 혼입 결과로 해석된다(Fig. 7). 유체포유물 연구 결과, A형 석영세맥 및 B형 석영맥의 광화유체는 정도의 차이는 있지만, 초기 비등 및 서로 다른 두 유체계의 지속적 혼입에 의해 유체가 진화한 양상을 보인다. 또한 삼보광상의 산소동위원소비는 산소 편이현상($\delta^{18}O$; -7.7~-2.5‰)을 보이고 있어(Choi and Pak, 2007), 광화작용이 진행됨에 따라 지표수가 점증하였음을 시사한다. 따라서 A형 석영세맥의 금광화작용은 초기 단속적인 비등 및 지속적인 지표수의 혼입에 기인하여 산소분압 및 pH가 복합적으로 증가하며 진행된 것으로 판단된다. B형 석영맥을 형성한 유체는 A형 광화 유체와 유사하게 초기 비등 이후 혼입에 의한 유체 진화과정을 보인다. A형 및 B형 유체의 서로 유사한 유체 진화과정에도 불구하고 B형 석영맥에서 금광화작용이 관찰되지 않는 것은 용존 금의 함량이 낮은 광화유체로부터 진화하였기 때문인 것으로 추측된다.

6. 토 의

함평분지 서측에 위치한 삼보광상은 국내 여타의 인리형 분지 주변에 분포하는 천열수광상과는 상이한 맥의 산상을 보인다(Table 2). 국내의 인리형 분지 주변

Table 2. Summary of general characteristics for the Sambo gold deposit and a comparison with the Mugeuk gold system related to pull-apart basin.

Deposit	Sambo gold deposit		Mugeuk mineralized district
	A-type vein(Jija vein)	B-type vein(Pungja vein)	Gold-silver mineralized veins (Mugeuk, Geumwang, Geumbong)
Host rock	late Cretaceous(?) rhyolite	Precambrian gneiss	Jurassic granitoids
Vein system	quartz veins within rhyolite (N10~20W)	quartz veins (N5~30E)	quartz veins (N10~20W)
Vein width and length	<1cm, intermittent(<10cm)	<1 m, <2000 m	<2000m
Style and texture	irregular single-stage veinlet(dendritic) vuggy	multiple vein(2 stages) vuggy, crustiform, chalcedony, breccia	multiple vein(5 or 6 stages) crustiform, breccia, chalcedony, bladed lattice
Mineralogy			
Precious minerals	electrum, native gold	-	electrum, Ag-phases
Associated Fe minerals	magnetite, pyrite	pyrite	pyrite, sphalerite, arsenopyrite
Alteration type	phyllic alteration	subphyllic-propylitic alterations	phyllic≫propylitic, and argillic alterations
Au(atomic %) in electrum	51.5~100.0	-	5.2 ~ 82.0
Fluid inclusion data ¹⁾			
Fluid system	H ₂ O/-NaCl	H ₂ O-NaCl/-CO ₂	H ₂ O-NaCl/-CO ₂
Type ²⁾	I≫III	I > III≫II	I≫III≫III
T _h (°C)	340~200	400~190	350~110
Salinity(eq. wt% NaCl)	<2.7	0.4~7.9	0.2 ~ 9.7
Oxygen Isotope data(‰) ³⁾			
quartz(calculated δ ¹⁸ O _{H₂O})		2.2~6.4(-7.7~-2.5)	3.4~12.9(-5.5~4.0)
Source of ore-forming fluid	meteoric≫magmatic water	meteoric≫magmatic water	meteoric≫magmatic water
Precipitation mechanism	mixing≫boiling	mixing, boiling	mixing≫boiling

¹⁾Data for Mugeuk area from Choi *et al.*(2005)

²⁾Type I=liquid-rich inclusion, Type II=gas-rich inclusion, and Type III=liquid CO₂-bearing inclusion

³⁾Data for Sambo deposit and Mugeuk area from Choi and Pak(2007) and Choi *et al.*(2005), respectively

에 분포하는 천열수 금·은광상은 ~수 백m의 연장과 수십m~수m의 맥폭을 보이는 석영맥으로 구성되는 반면, 삼보광상에서 금광화작용을 수반하는 지하맥은 일정한 맥 폭 및 연장을 보이지 않는 수mm의 세맥으로 불규칙적인 형태로 산출된다. 백악기 인리형 분지 발달과 관련된 무극광화대의 석영맥은 대체로 빗구조, 피각상, 옥수질 석영, 블레이드 구조, 각력 구조 등의 다양한 석영맥 조직이 관찰되는 복성맥의 형태를 보이나, 삼보광상의 불규칙상 합금석영세맥은 주로 미세한 균열을 채우는 정동 석영에 의한 단성맥 형태를 보인다. 반면, 빈광을 보이는 삼보광상의 풍자맥 및 광산맥은 2기 이상의 서로 다른 석영맥으로 구성되는 복성맥의 특징을 보이며, 정동, 빗구조, 옥수질 석영 등이 잘 발달되고 있어 인리형 분지 주변에 분포하는 천열수 광상의 석영맥들과 유사한 조직을 보인다(Fig. 3, Table 2).

삼보광상에서 산출되는 주요 금·은광물은 에렉트럼으로, 정동석영 및 유문암내에서 산점상으로 정출하거나, 또는 황철석의 용식 공간에서 정출하는 적철석과 밀접하게 공생하는 단순한 광물공생관계를 보인다(Fig. 3). 반면, 무극광화대에서 산출되는 합금·은광물은 에렉트럼, 자연은, 휘은석, 농휘은석, 폴리바사이트, 피어사이트, 다이크라사이트, 스테파나이트 등으로 다양한 광물조합을 보인다(Choi *et al.*, 2001; Pak *et al.*, 2003). 에렉트럼은 주로 황철석내 포유물의 형태로 산출되거나, 섬아연석 또는 방연석 등과 공존하며 다량의 황화광물들과 함께 산출되는 특징을 보인다.

이들 천열수 광상의 광화유체는 주로 황철석 및 자류철석의 안정영역에서 비등·희석과 같은 유체 진화를 통해 금·은광화작용이 진행되었으나(Choi *et al.*, 2005; Pak *et al.*, 2004), 삼보광상의 금광화작용은 비등·희석에 의해 광화유체의 안정영역이 황철석에서 적철석의 안정영역으로 전이되며 유도되는 특징을 보여 금·은광화작용의 특성이 무극광화대의 광상과 서로 차이가 있음을 시사한다.

삼보광상의 A형 합금석영세맥과 B형 석영맥을 배태한 광화유체는 유체시스템, 균일화온도, 염농도 등에서 다소 차이를 보이지만, 광화유체의 진화 경향은 공통적으로 초기 비등 이후 다른 유체계가 혼입되는 과정을 보여 서로 유사한 유체 진화 특성을 보인다(Table 2). A형 합금석영세맥과 B형 석영맥의 광화유체 모두가 금침전에 매우 효율적인 비등 및 희석을 경험하였음에도 불구하고 A형 석영세맥에서만 금광화작용이 관찰되는 것은 두 광화유체의 진화 특성(금침전 메커니즘의 차이)에 기인한 것이 아닌 두 광화유체의 합금농

도 차이에 기인한 것으로 추측되며, 서로 다른 기원의 광화 유체에 의해 형성된 것임을 시사한다.

삼보광상의 합금석영맥은 N10~20W의 방향성을 보이며 분포하는 유문암을 모암으로 하여 배태된다. 인접한 함평분지에 분포하는 후기 백악기 유문암과 삼보광상에서 산출되는 유문암은 서로 유사한 방향성(N10~20W)을 보이고 있어(Hong *et al.*, 2007), 삼보광상 지역에 분포하는 유문암은 함평분지와 유사한 지구구조적 환경에서 후기 백악기에 관입·분출한 것임을 시사한다. 또한 인근의 대해제, 함평손불, 은적, 상은광산에서 산출되는 합금·은석영맥은 N10~20W의 주향을 보이고 있어(Lee *et al.*, 1996; Kang *et al.*, 2005), NNW 구조선이 금·은광화작용과 관련된 주요 방향임을 시사한다. 금·은광화작용과 관련된 이러한 구조적 특징은 중부 지역 백악기 인리형 분지와 관련된 NNW 방향의 인장성 열극을 충전하는 금·은 광상들과 유사한 방향을 보인다(Pak *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2005; Pak and Choi, 2008). 따라서 삼보광상의 금광화작용 역시 인리형 분지형성과 관련된 NNW방향의 인장성 열극 충전과 밀접한 관련이 있음을 시사한다. 삼보광상의 석영맥중 풍자맥, 광산맥, 풍자지맥의 주향은 N5~30E을 보여 NNE 방향의 광주-영동 단층계의 방향과 유사한 방향을 보인다(Fig. 1). NNE 방향의 광주-영동 단층계는 이 지역에 분포하는 트라이스기의 NNE 방향의 전주연성전단대가 재활성화 된 것으로 해석된다(Lee and Paik, 1990; Chun and Chough, 1992; Choi *et al.*, 2005). 광상지역에서 NNE 방향을 보이는 빈광 석영맥 중 임수리 지역 해안가에 분포하는 석영맥은 각력암을 충전하며 산출되어, 연성전단대를 따라 백악기에 재활성화 된 취성전단대에 석영맥이 충전한 것으로 판단된다.

무극광화대가 위치하는 음성분지는 초기 백악기의 쇄설성 퇴적암류가 분지전체에 넓게 분포하며(충후; 700~2000 m), 후기 백악기 화산암류(87~73 Ma)는 분지 남서측에 소량 분포한다. 따라서 음성분지는 백악기 초기부터 분지가 형성 되기 시작하였으며 화산활동은 백악기 후기에 상대적으로 미약하게 진행되었던 것으로 생각된다(Table 3). 반면 함평분지는 화산암류가 광범위하게 분포하고 있으며 쇄설성 퇴적층은 극히 제한적으로 분포한다. 이런 쇄설성 퇴적층(충후; ~500 m)은 주로 산성 응회암류, 응회암질 역암을 포함하는 중성 응회암류 등으로 구성되어 함평분지를 구성하는 퇴적물은 주로 화산활동에 의해 공급되었음을 시사한다. 이는 백악기 고태평양판의 사각섭입에 기인한 인리형

Table 3. Comparison between the Sambo gold deposit and the Mugeuk gold system related to pull-apart basin.

Characteristic features	Sambo gold deposit		Mugeuk mineralized district
	A-type vein(Jija vein)	B-type(Pungja vein)	
Geological setting	pull-apart basin setting(Hampyeong Basin)		pull-apart basin setting(Eumseong Basin)
Major fault system	Gwangju-Yeongdong fault		Gongju-Eumseong fault
Dominant succession	volcanic ≫ sedimentary		sedimentary ≫ volcanic
Thickness of succession	ca. 500 m(mainly volcano-sedimentary)		ca. 700~2200 m(mainly sedimentary)
Age of succession			
sedimentary	~Late Cretaceous(Hong <i>et al.</i> , 2007)		Early Cretaceous(valanginian~Albian)(Choi, 1995)
sub/volcanic activity	Late Cretaceous(Hong <i>et al.</i> , 2007)		ca. 87-73 Ma(Choi, 1995)
Vein system	quartz veins within rhyolite(N10~20W)	quartz veins(N5~30E)	quartz veins(N10~20W)
	tension fracture?	NE-trending major strike-slip fault	tension fractures related to strike-slip fault
Age of gold-silver		Late Cretaceous(?)	105.7 Ma or 98.0 Ma
mineralization		Eunjeok(86 Ma) ²⁾	(Shimazaki <i>et al.</i> , 1986; Park <i>et al.</i> , 1988)
Genetic type		epithermal deposit	epi-to mesothermal deposit
Mineral-deposit model	NNW tension crack filling related to NNE-trending strike-slip movement	NNE-trending strike-slip reactivation	NNW tension crack filling related to NNE-trending strike-slip movement

¹⁾Data for Mugeuk area from Pak *et al.*(2003) and Choi *et al.*(2005)

²⁾Data from Lee *et al.*(1996)

분지 형성시 음성분지는 백악기 초부터 열개되기 시작해서 백악기 후기 미약한 화산활동이 수반된 반면 함평분지는 백악기 후기에 인리형 분지가 형성되며 집중적인 화산활동이 수반되었을 가능성을 시사한다. 또한 무극광화대의 광화시기는 105 Ma 및 98 Ma로 초기 백악기에 해당되는 반면, 삼보광상은 후기 백악기로 생각되는 유문암의 열극을 촉진하고 있으며, 삼보광상과 인접한 지역에 위치하는 은적광산의 광화시기는 86 Ma를 보여 두 지역에서의 광화시기의 차이가 있음을 시사한다(Table 3). 이는 두 인리형 분지 지역의 광화 작용 특성이 분지 형성 시기 및 분지 발달 정도와 밀접한 관련이 있음을 시사한다. 따라서 삼보광상의 금광화 작용은 성인적으로 백악기 지구조운동과 관련된 인장형 열극을 촉진한 천열수 광상으로 해석된다.

사 사

이 연구는 과학기술부 과학재단 특정기초연구 사업(R01-2006-000-10553-0)의 지원에 의하여 수행되었으며, 논문심사 시 유익한 조언을 주신 박성원 박사님과 최상훈 교수님 그리고 책임편집위원이신 염승준 박사님께 깊은 사의를 드립니다.

참고문헌

- Ahn, K.-S. (2007) Corrosion of calcareous rocks and ground subsidence in the Muan Area, Jeonnam, Korea. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v. 16, p. 47-58.
- Burruss, R.C. (1981) Analysis of phase equilibria in C-O-H-S fluid inclusions. In Hollister, L. S. and Crawford, M. L. (eds) *Fluid inclusions: Applications to petrology: Mineralogical Association of Canada Short Course 6*, p. 39-74.
- Choi, S.-G. and Pak, S.J. (2007) The origin and evolution of the Mesozoic ore-forming fluids, South Korea: Their genetic implications. *Econ. Env. Geol.*, v. 40, p. 517-535.
- Choi, S.-G., Lee, D.-E., Pak, S.J., Choi, S.-H. and Kang, H.-S. (2001) Genetic Model of Mineral Exploration for the Korean Au-Ag Deposits; Mugeug Mineralized Area. *Econ. Env. Geol.*, v. 34, p. 423-435.
- 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. Review*, v. 26, p. 115-135.
- Choi, Y.S. (1995) Structural evolution of the Cretaceous Eumseong Basin, Korea: Ph D thesis, Seoul National University, Seoul, 159p.
- Chun, S.S. and Chough, S.K. (1992) Tectonic history of Cretaceous sedimentary basins in the southwestern Korean Peninsula and Yellow Sea. In Chough, S.K. (ed.) *Sedimentary basins in the Korean Peninsula and adjacent seas*. Hanlim Pub., Seoul, p. 60-76.
- 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.*, v. 25, p. 45-79.
- Drummond, S.E. and Ohmoto, H. (1985) Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Econ. Geol.*, v. 80, p. 126-147.
- Haynes, F.M. (1985) Determination of fluid inclusion compositions by sequential freezing. *Econ. Geol.*, v. 80, p. 1-26.
- Hong, J.-P., Suk, D. and Doh, S.-J. (2007) Magnetic characterization of the Cretaceous rocks from the Buyeo and Hampyeong basins. *Econ. Env. Geol.*, v. 40, p. 191-207.
- Kang, H.-S., Pak, S.J., Choi, S.-G. and Choi, D.-H. (2005) The exploration of Hampyeong-Sonbul Au-Ag deposits Korea. *Society of Economic and Environmental Geology. Annual Symposium*, p. 71-73.
- Lee, C.-S., Kim, J. and Kim, H.-N. (1996) Mineralization of the gold-silver ore deposits in Naju-Youngam area. v. 17, p. 166-173.
- Lee, D.W. and Paik, K.H. (1990) Evolution of strike-slip fault controlled Cretaceous Yongdong Basin, South Korea: Signs of strike-slip tectonics during infilling. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 26, p. 257-276.
- Pak, S.J. and Choi, S.-C. (2008) Hydrothermal gold-silver mineralization of the Gajok deposit in the Hongcheon mining district, Korea. v. 21, p. 1-15.
- Pak, S.J. Choi, S.-G. and Choi, S.H. (2004) Systematic mineralogy and chemistry of gold-silver vein deposits in the Taebaeksan district in Korea: Distal relatives of a porphyry system. *Min. Mag.*, v. 68, p. 467-487.
- Pak, S.J., Choi, S.-C. and Lee, D.-L. (2003) The genetic implication of hydrothermal alteration of epithermal deposits from the Mugeuk area. v. 16, p. 265-280.
- Park, H.I., Chang, H.W. and Jin, M.S. (1988) K-Ar ages of mineral deposits in the Taebaeg Mountain district. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 21, p. 57-67.
- Potter, R.W., III, Clyne, M.A. and Brown, D.L. (1978) Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions. *Econ. Geol.*, v. 73, p. 284-285.
- Seward, T.M. (1973) Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal ore solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, v. 37, p. 337-399.
- Seward, T.M. (1982) The transport and deposition of gold in hydrothermal systems. In Foster, R.P. (ed.) *Gold '82: The Geology, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits*. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. p. 165-181.
- Shimazaki, H., Lee, M.S., Tsusue, A. and Kaneda, H. (1986) Three epochs of gold mineralization in South Korea: *Mining Geol.*, v. 36, p. 265-272.