

무극 금은 광상에 대한 유체포유물 및 안정동위원소 분석연구

김규한* · 김옥준** · 장원선*

Stable Isotope and Fluid Inclusion Studies of the Mugug Au-Ag Mineral Deposits.

Kyu-Han Kim*, Ok-Joon Kim** and Weon-Sun Chang*

Abstract: A couple of Au-Ag-bearing epithermal quartz veins of Cretaceous(87.9Ma) in age are developed in the Cretaceous(112Ma) granodiorite batholith which was emplaced in Mesozoic Baegyari sedimentary formation. Au minerals consist mostly of electrum with a 54.2-61.9 wt% Au and are closely associated with sulfide minerals including pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite, galena and sphalerite. Homogenization temperatures of fluid inclusions in quartz, fluorite and calcite are 196-368°C (avg. 240°C), 74-176°C (avg. 115°C) and 75-200°C (avg. 119°C) respectively. Sulfur isotopic compositions (+5- +8‰) of ore sulfides indicate a deep-seated sulfur origin. Oxygen isotope compositions of different stages of quartz vary from +5.6 to +9.3‰ and calculated $\delta^{18}\text{O}$ values of ore fluid at 250°C range from -3.2 to +0.4‰, reflecting an isotopically evolved ore fluid mixed with a ^{18}O depleted meteoric water under the variable mixing ratios between hydrothermal and meteoric waters. Isotopic data of calcite minerals support the above conclusions.

서 언

남한중부의 천안 금—은 광상구에 해당하는 본 광상은 1931년부터 1972년까지 Au 30kg / 월, Ag 32kg / 월을 생산해 왔으며 1984년부터 삼형제맥을 중심으로 재개발 되어 오고 있는 천열수성 광맥형 금—은 광상의 대표적인 광상 중의 하나이다. 본 광상의 지질 및 광상에 대하여 대명광업주식회사의 무극광상조사보고서(1969), 정창희 외(1976), 김옥준(1971), Shimazaki (1986), 박노영 외(1985), 장원선(1986), 신양우 외(1987), 박희인, 강성준(1988) 등의 조사 연구가 된 바 있다. 본 연구는 무극 금—은 광상 부근의 지질, 광상모암인 화강암류의 암석화학, 함금—은 석영맥의 광물공생 그리고 금—은 광석광물 침전의 물리화학적 환경과 광화용액의 특성을 해석하기 위해 야외조사, 광석 및 암석화학 분석, 유체포유물 연구, 산소, 탄소 및 황 안정동위원소 분석을 실시하고 이를 검토하였다. 탄산염 광물 및 황화 광물의 탄소, 산소 및 황 안정동위원소비 분석은 일본 나고야대학 지구과학과에서, 규산염 광물의 산소 안

정동위원소비 분석은 일본 도야마대학 지구과학과에서 실시하였다. 분석시설을 제공하여 준 이들 기관과 규산염 광물의 산소 안정동위원소 분석에 도와준 도야마대학의 사다케히로시 교수 그리고 원고의 정리를 도와준 이화여자대학교 교육대학원 박재경양에게 감사한다. 본 연구는 한국과학재단 연구비에 의하여 이루어졌다.

지 질

광상부근의 지질은 선캠브리아기의 화강편마암을 부정합으로 덮고있는 사암, 역암, 세일 등의 퇴적암류로 된 중생대 백야리층과 상기 지층을 관입한 백악기 중기의 흑운모 화강암(112 Ma, 김옥준 1971) 및 석영반암 등으로 구성되어 있다(Fig. 1). 음성도폭 설명서(정창희 외, 1976), 장원선(1986) 및 박희인 강성준(1988)의 지질조사 자료를 참고하였으며, 본 조사에서는 중생대의 백야리층과 광상모암인 화강암과의 관계와 화강암내에 발달하는 함금—은 석영맥의 노두를 중점 조사하였다. 그 결과 백야리층과 화강암과의 관계는 단층접촉(박희인, 강성준; 1988)이 아니고 관입접촉으로 조사되었다. 그리고 광산서부의 화강암을 관입한 석영반암의 노두와 함금—은 석영맥의 노두가 조사되었

* 이화여자대학교 (Dept. of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750 Korea)

** 학술원(National Academy of Science, Banpo 94 Seoul, 137-180, Korea)

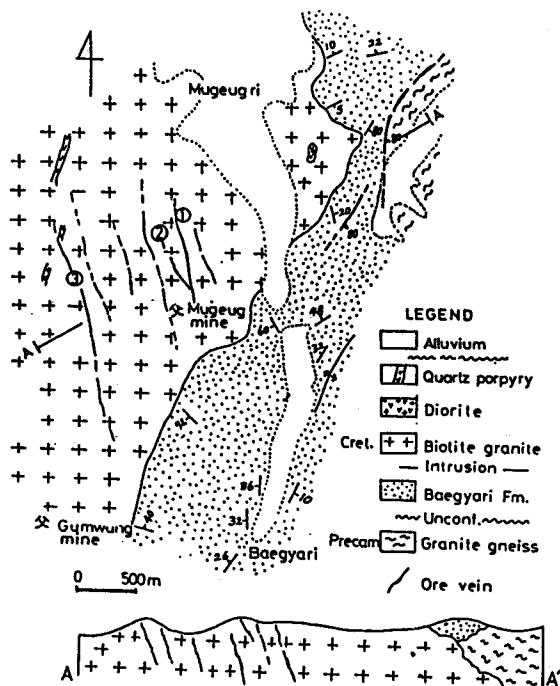


Fig. 1. Geological map of the Mugug mine.
1 ; Samhyongjae vein 2 ; No. 1 vein, 3 ; No. 8
vein.

다. 광상모암인 화강암류와 이와 인접한 백야리층에 대하여서만 좀더 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

백야리층 : 중생대의 사암, 알코스질 사암, 셰일, 응회 역암 등으로 구성되어 있으며 층후는 300 m 내외이다. 층내에 연흔, 사층리 등의 퇴적구조는 지층의 역전이 없었음을 가르킨다(정창희 외 1976). 본 층은 습곡 등으로 변형되어 있다.

무극광상의 광화작용은 상기 퇴적암층 하부의 화강암체 내에서 일어났으며, 광화시기는 98Ma로 1k bar 미만의 천소에서 광화작용이 일어났음을 추정했다(Shimazaki et al., 1987).

화강암류 : 광상모암인 화강암류는 삼형제맥과 8호맥 부근에서 중립질의 흑운모 각섬석 화강암, 중립질 내지 조립질의 홍색장석 흑운모 각섬석 화강암 등이 분포하고 있다. 비교적 변질을 적게 받은 화강암은 석영 31~32%, 사장석 10.5~22.2%, 칼리장석 19.3~30.3%, 미사장석 2.3~12.9%, 흑운모 1.5%~4.0%, 기타 스핀, 인회석 등으로 구성되어 있다. 화학분석 결과 주성분은 남한에 분포하는 쥐라기의 화강섬록암과 유사하며 SiO_2 (65.92%), Al_2O_3 (16.

38%), Fe_2O_3 (5.15%), MgO (1.78%), CaO (3.66%), Na_2O (2.95%), K_2O (3.17%), TiO_2 (0.74%), P_2O_5 (0.18%), MnO (0.07%)이고, Ba (942 ppm), Sr (469 ppm), Nd (32 ppm), Sm (0.3 ppm), Eu (1.0 ppm) 등이 얹어졌다.

변질받은 화강암류에서 사장석은 심하게 견운모화 되어 있고, 갈색 흑운모는 녹니석화 되어 녹니석, 견운모, 방해석 등이 다양 관찰된다. 사장석은 An^{9-10} 이며, 사장석의 누대구조와 밀마카이트 구조가 관찰되어 비교적 천부관입을 암시해 주고 있다. 특히, 함금—은 석영맥 주위의 화강암은 견운모화 작용, 녹니석화 작용, 황철석화 작용 등의 심한 변질작용을 받았다. 변질대 내에 녹색 녹니석과 자형의 황철석이 산재되어 있다. 흑운모의 벽계면을 따라 방해석이 충진되고, 소량의 형석 등이 이들 입자 간격에 충진되어 있다.

광상

광상은 백악기 흑운모 화강암내에 N15°W 및 남북방향으로 발달하는 열곡을 충진한 함금—은 황화물 석영광맥 광상이다. 본 광상지역에서 14~16여조 이상의 함금—은 석영맥이 발달하여 삼형제맥, 8호맥, 박산맥, 금용맥 등의 대표적인 광맥이 N15°W 및 NS 방향으로 발달하며 광맥의 경사는 70~80 °N이다. 맥폭은 0.2~1.0 m 내외이고 연장은 1.5 km에 이른다(Fig. 1). 광맥중 sericite의 K-Ar 연대가 98 Ma로 얻어져 금—은 광화작용은 모암인 흑운모 화강섬록암 관입후(112 Ma) 백악기 중엽에 화강암질 마그마의 잔류 열수용액에 의해 이루어졌음을 의미해 주고 있다. 함금—은 석영맥은 주로 우백색 석영으로 구성되어 있으며, 황철석, 황동석, 섬아연석, 방연석 등의 황화광물과 소량의 방해석과 형석을 수반한다. 광석의 품위는 Au 8~20 g/t, Ag 48~60 g/t(한국의 지질과 광상 1982, 광상 시추조사보고 1977)이며, 일반적인 세립인 황철석이 많은 곳에 금—은의 품위가 높은 경향이 있다. 석영맥 중의 금—은은 electrum으로 주로 석영과 황화광물 내에서 산출된다.

광맥주위의 화강암은 견운모화 작용, 녹니석화 작용, 황철석화 작용 등의 변질을 받고 있다. 본 연구는 주로 삼형제맥 및 8호맥 시료에 대하여 유체포유물, 광물화학 그리고 안정동위원소비 분석 등에 중점을 두어 실시했다.

주요 광맥의 특징

삼형제맥 광체

주향 N 20°W, 경사 80°NE 빌달하는 맥폭 0.5–1.0 m 내외의 우백색 함금—은 석영맥이다(그림 1). 석영맥내에는 comb structure, crustiform structure 등이 잘 발달하고 광맥과의 접촉부의 모암은 녹니석화 작용 및 황철석화 작용을 심하게 받았다. 석영맥에 근접한 모암중에는 연녹색의 녹니석, 자형의 황철석이 다량 관찰되며, 석영맥중의 공동내에는 방해석과 녹색의 형석이 빌달하고 있다. 3번항(–120 m)에서는 황동석, 황철석, 섬아연석, 방연석 등 황화광물이 다량 수반되는 석영맥이 빌달하며, 이들 황화광물내에도 electrum이 조사되었다. NS 방향 및 N15°W 방향 석영맥을 사교하는 소수의 석영세맥에는 금은 광화가 수반되지 않는다.

8호맥 광체

조사지역 서측에 주향 NS, 70°W로 경사하는 함금—은 석영맥(맥폭 0.5–1 m 내외)으로 삼형제맥과 거의 평행하게 발달하고 있다.

석영맥내에는 세립의 황철석이 산재하며 소량의 황동석도 수반된다. 황동석이 많이 수반되는 광석에 금—은의 품위가 일반적으로 높으며 황철석, 방연석, 조립의 섬아연석등이 공존하기도 한다. 석영맥중에 거정질 방해석과 자색 및 녹색의 형석이 맥석광물로 수반된다. 금—은 광화와는 무관한 것으로 보이는 페그마타이트질맥에 휘수연석이 산출되기도 한다.

석영맥 주위의 모암은 녹니석화 작용 및 황철석화 작용을 받고 있다.

1호맥 광체

삼형제맥에 인접한 소규모 광체로 파쇄대의 각력구조가 잘 관찰되며, 모암의 각력암편이 석영맥에 다수 포획되어 있다. 광맥내에는 세립질의 황철석과 점토광물이 주인 파쇄대가 빌달하며 이곳에 금—은 품위가 높은 경향이 있다.

광물공생 및 금—은 광물의 산출상태

함금—은 황화광물 석영맥에는 4–5조의 crustification 구조가 관찰되며, 6 stage의 석영맥이 복합적으로 나타나고 있다(사진 1). 석영맥의 상호구조에 의해 구별된 6 stage의 석영맥은 금—은 광화와 무관한 barren quartz vein에서 황화광물이 풍부한 석영맥에 이르기까지 다양하다. 박희인, 강성준(1988)에 의하면 1기의 석영맥은 2기의 석영맥내에 포함된 회색의 각력석영으로 소량의 황화광물이 수반되며, 2기의 석영맥은 황화광물, electrum을 수반하는 석영맥으

Mineral	Stage	Early quartz vein stage	Main quartz vein stage	Calcite vein stage
		—	—	—
Quartz		—	—	—
Pyrite		—	—	—
Sphalerite		—	—	—
Chalcopyrite		—	—	—
Galena		—	—	—
Electrum		—	—	—
Fluorite		—	—	—
Calcite		—	—	—

Fig. 2. Paragenetic sequences of ore minerals in the Mugug Au–Ag mineral deposits.

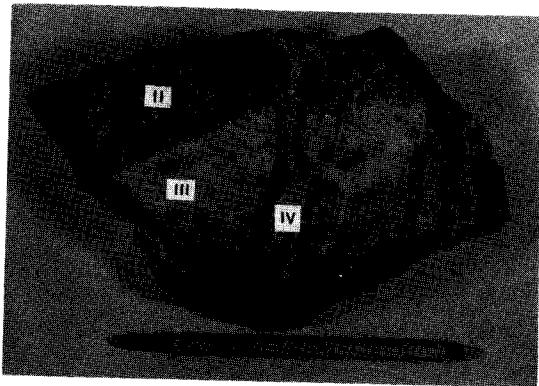


Photo 1. Photograph of the different stages of quartz veins from the Samhyongjae vein.

로 삼형제맥에 가장 우세하게 발달하고 담홍색을 띠는 유백색 석영맥이다. 석영맥중의 정동내에 방해석, 형석, 녹니석 등이 산출되고 있다. 3기의 석영세맥은 미립의 유비철석과 황철석을 수반하는 암회색 석영맥으로 황화광물과 electrum이 수반된다. 2, 3기 석영맥 가장자리에는 황철석띠가 발달한다. 4기 석영세맥은 전기의 석영맥을 절단하며, 황화광물과 electrum 및 은광물이 우세한 세맥이며, 5기 석영세맥은 황화광물이 소량 수반되는 석영세맥이다. 각 stage의 석영시료에 대하여 산소 안정동위원소비를 분석하였다. 광맥에서의 광물의 산출상태, 광석현미경에서의 광물의 상호조직에 의한 광물공생은 크게 초기 석영맥 형성단계, 주 석영맥 형성단계, 후기 형성 방해석 형성관계 등으로 대분할 수 있으며(Fig. 2). 금—은 광화는 주로 주석영맥 형성단계에 일어난 것으로 해석된다.

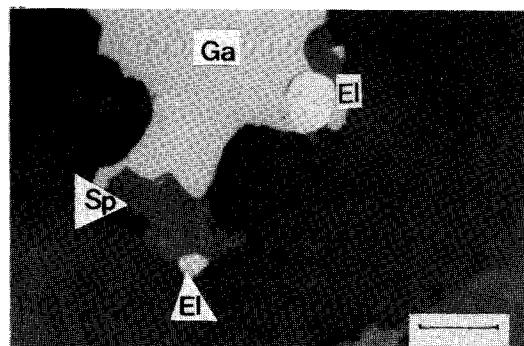
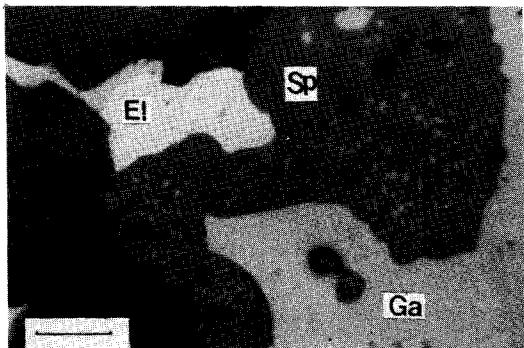


Photo 2, 3. Electrum associated with sphalerite and chalcopyrite (bar scale $50 \mu\text{m}$)

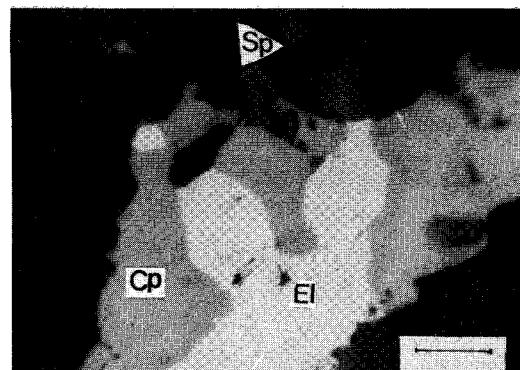


Photo 5. Electrum replacing the chalcopyrite (bar scale $50 \mu\text{m}$).

속적으로 침전되었으며, electrum은 주 석영맥 형성시기에 침전되었다. 모암 변질대내에 분포하는 자형의 황철석과 후기 형석, 방해석 형성단계의 공동내의 황철석에는 electrum이 산출되지 않는다. Electrum의 산출형태는 황철석의 입자내에 포획되었거나, 황철석내의 crack을 따라 황동

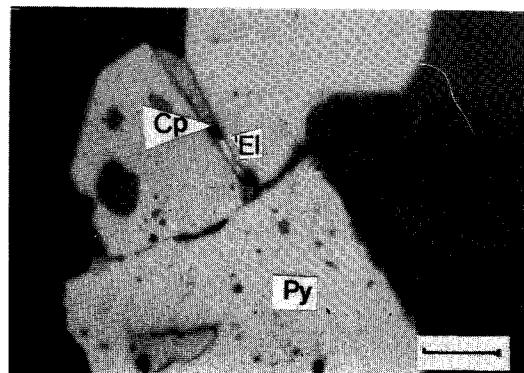
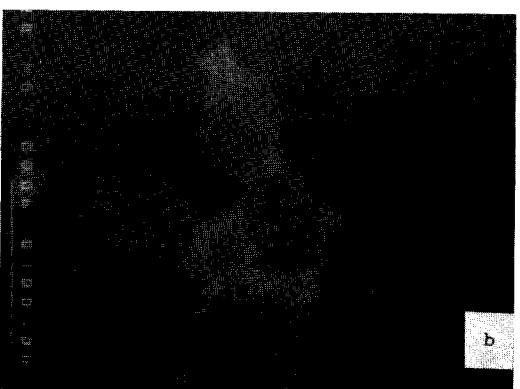
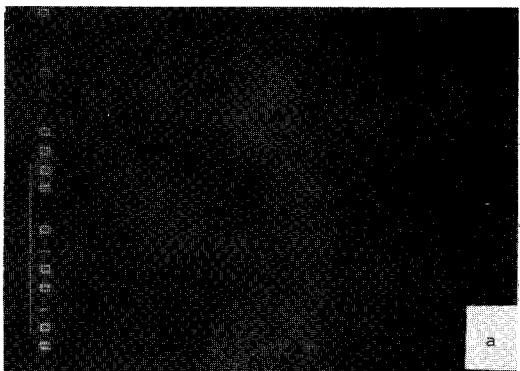


Photo 4. Electrum filling the crack of the pyrite. (bar scale $50 \mu\text{m}$)
El ; electrum, Py ; pyrite, Ga ; galena, Sp ; sphalerite Cp ; chalcopyrite.

Photo 6. Photographs of electron images of electrum shown in Photo 5.
Au L α X-ray image (a) and Ag L α X-ray image (b) (bar scale $100 \mu\text{m}$)

석, 방연석과 함께 충진되기도 한다(사진 4). 황동석과 수반되는 electrum은 황동석을 교대하여 나타난다(사진 5). 사진 5의 황동석내에 교대된 electrum의 Au L α 및 Ag L α X-ray image에서 electrum의 성분은 대단히 균질함이 밝혀졌다(사진 6). EPMA에 의한 electrum 분석에서 Au는 54.2–61.9 wt%이고, Ag는 38.1–45.8 wt%였다.

유체포유물 연구

본 광산에 대한 유체포유물 연구는 장원선(1986), Kaneda et al. (1987), 박희인, 강성준(1988) 등에 의해 이루어진 바 있다. 본 연구의 대상시료는 현재 주 개발대상이 되고 있는 삼형제맥에서 채취되었으며, 석영(10개), 형석(4개), 방해석(2개) 등 총 16개 시료에 대해서 실시했다. 포유물은 주로 1차 포유물을 이용했으며, 측정결과는 Table 1 및 Fig. 3과 같다.

석영내 1차 포유물의 균일화 온도는 196–368°C(평균 240°C)이며, 2차 포유물은 68–85°C이다. 형석은 74–176°C(평균 115°C), 방해석은 75–200°C(평균 119°C)로 측정되었다. 그러나, Kaneda et al. (1987)은 200°C 내외의 충진온도

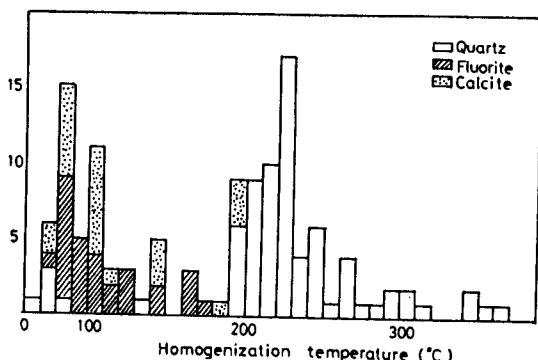


Fig. 3. Histogram of the homogenization temperatures for the Mugug Au-Ag mineral deposits.

Table 1. Summarized result of homogenization temperature and salinity measurements of fluid inclusions in quartz, fluorite and calcite from the Mugug mine.

Mineral	Salinity(NaCl equ. wt%)	Homogenization temperature(°C)
Quartz(72)	1–6.6 (avg. 2.5)	196–368 (avg. 240), (68–85)*
Fluorite(43)	1.9–4.4 (avg. 2.7)	74–176 (avg. 115)
Calcite(26)	2.4–2.6 (avg. 2.5)	75–200 (avg. 119)

Numerals in parenthesis indicates the number of inclusions.

* data of secondary inclusions.

를, 박희인, 강성준(1988)은 2기 석영에 대하여 240–250°C를 보고하였다. 초기 광화기의 광화유체압력 370 bar(박희인, 강성준 1988)에서의 압력보정을 고려하면 주 광화 시기의 광석 광물 침전은 250°C 내외에서 발생한 것으로 판단된다. 한편, 염농도는 석영(1.0–6.6 NaCl eq. wt%), 형석(1.9–4.4 NaCl eq. wt%), 방해석(2.4–2.6 NaCl eq. wt%)로 측정되었다. 염농도와 균일화 온도와의 관계를 보면 석영과 형석에서 충진온도 변화에 비해 염농도의 변화가 작게 나타나고 있다. 석영내의 유체포유물에서 추출된 1g의 유체 중의 gas 성분은 N₂(0.005–0.016 몰), CH₄(0.002–0.003 몰), CO₂(0.008–0.014 몰)로서 가스의 성분이 0.1몰 이하로 측정되었다(Kaneda et al., 1987).

안정동위원소 분석의 연구

함금—은 석영맥의 광화작용시의 광화용액의 기원과 특성을 규명하기 위하여 모암인 화강암과 삼형제맥, 8호맥, 1호맥에서 채취된 석영, 방해석 및 황화광물에 대하여 산소, 탄소 및 황 안정동위원소비를 분석하였다. 안정동위원소 분석을 위하여 20 mg 석영시료를 Ni 튜브내에서 BrF₅와 550°C에서 반응시켜 CO₂로 만들었고(Taylor and Epstein, 1962), 방해석은 25°C에서 100% 인산과 반응하여 CO₂를 얻었다(McCrea, 1950). 그리고, 황동위원소비 분석을 위하여 Ag₂S로 만든 시료를 1000°C에서 Cu₂O와 태워 SO₂를 만들어 질량분석기로 측정하였다. 측정된 동위원소비는 천분율로 표시했으며, 이때 δ은 각각 ¹⁸O / ¹⁶O, ¹³C / ¹²C, ³⁴S / ³²S이다. 표준시료는 산소는 SMOW, 탄소는 PDB, 황은 CDT를 사용했다.

분석결과 및 해석

규산염 광물의 산소 안정동위원소비

모암인 흑운모 화강암과 삼형제맥의 1–6 stage 간의 석영 시료(사진 1)에 대하여 실시한 산소 안정동위원소비 분석 결과는 Table 2와 같다. 모암인 화강암의 산소 동위원소

Table 2. Oxygen isotope compositions of the Samhyongjae quartz vein of the Mugug Au-Ag mineral deposits.

Sample No.	Description	Mineral	$\delta^{18}\text{O}(\text{\%})$	Remark
ST-1	Milky white quartz vein	qtz	+5.7(-3.2)	stage 1
STA-1	Grey quartz with pyrite	qtz	+7.0(-1.9)	stage 2
STA-2	Milky white quartz vein cutting in the stage 2 quartz vein	qtz	+7.7(-1.2)	stage 3
STA-3	White quartz vein cross cutting in the stage 3 quartz vein	qtz	+9.3(+0.36)	stage 4
ST-4	White barren quartz	qtz	+7.0(-1.9)	stage 5
ST-5	White quartz veinlets	qtz	+5.7(-3.2)	stage 6
M-1	Pink feldspar granite	WR qtz pl	+6.2 +10.4(+9.4) +6.8	weakly altered granite

Numerals in parenthesis indicate the isotopic compositions of ore fluids in equilibrium with quartz at 250°C and quartz of a granite(M-1) at 600°C. WR ; whole rock, pl ; plagioclase, qtz ; quartz.

비($\delta^{18}\text{O}$)는 전암; +6.2‰, 석영; +10.4‰, 사장석; 6.8‰로서 변질에 기인하여 전암의 ^{18}O 이 결핍된 것으로 해석된다. 각 stage의 석영은 +5.7 – +9.3‰까지 변화하며, stage 1 (+5.7‰), stage 2 (+7.0‰), stage 3 (+7.7‰), stage 4 (+9.3‰), stage 5 (+7.0‰), stage 6 (+5.7‰)로 stage 4를 경계로 ^{18}O 의 농축도가 변화하고 있다. Clayton et al. (1972)의 fractionation factor를 이용, 온도 250°C에서 석영과 동위원소 평형상태에 있었던 광화용액의 산소 동위원소비를 계산하면 -3.2 – +0.4‰까지 변화한다 (Table 2, Fig. 4). 600°C에서 모암내 석영과 동위원소 평형에 있었던 granite melt ($\delta^{18}\text{O} = +9.3\text{\%}$)와 광화용액의 산소 안정동위원소비를 비교해 보면, 열수 광화용액과 가벼운 산소 동위원소를 주로하는 순환수(meteoric water)의 혼합이 있었음이 명확하다.

더우기 동위원소비가 일정한 순환수와 열수 광화용액이 혼합되었다고 가정하면 stage별 광화용액의 산소 동위원소비 변화는 열수용액과 순환수의 혼합비율의 증감으로 해석될 수 있다. 즉 금–은의 주 광화기인 2, 3, 4 stage로 감에 따라 순환수의 mixing 비율이 감소하였으며, 그 후의 열수에 순환수 혼입이 증가함에 따라 금–은 광화는 약화된 것으로 생각된다.

박희인, 강성준(1988)의 분석 결과를 보면 electrum 중의 Au / Ag의 비는 stage 2 (0.68), stage 3 (0.50), stage 4 (0.20)로 감에 따라 감소하며, 섬아연석 중의 평균 FeS mole%도 감소하는 경향이 나타나고 있다.

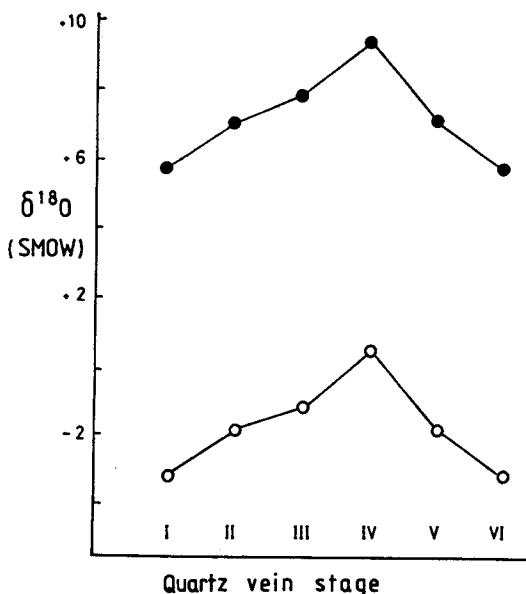


Fig. 4. Variation of oxygen isotope compositions of different stages of quartz. Filled circle; $\delta^{18}\text{O}$ value of quartz. Open circle; calculated $\delta^{18}\text{O}$ value of ore fluids in equilibrium with quartz at 250°C.

탄산염광물의 탄소 및 산소 안정동위원소비

방해석은 주로 금–은 광화의 말기에, 합금–은 석영맥 내에 세맥상으로 발달하고 있다. 금–은 광석에 수반되는 방해석의 탄소 및 산소 안정동위원소비 분석결과는 다음과 같다 (Table 3).

Table 3. Carbon and oxygen isotope data of calcites from the Mugug Au-Ag mine.

Sample No.	Description	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$	Remark
S-1	Vein calcite in quartz vein	-5.4	+3.8	
S-2	Quartz-fluorite-calcite-(pyrite) in vug of quartz vein	-4.8	+1.3	Samhyongjae vein
S-5	Calcite-(fluorite) in quartz vein	-3.9	+2.0	
S-6	Calcite-pyrite in quartz vein	-4.3	+2.3	
8-1	Coarse grained calcite	-3.6	+0.9	
8-2	ditto	-3.5	+5.3	No. vein
KR-543	Calcite	-5.1	+8.3	
KR-545	Calcite	-5.0	+2.2	Shimazaki et al.
KR-546	Calcite	4.9	+2.2	(1987)

Table 4. Sulfur isotope compositions of sulfide minerals from the Mugug Au-Ag mineral deposits.

Sample No.	Description	Mineral	$\delta^{34}\text{S}$	Remark
SM-1	Pyrrhotite in quartz vein	po	+6.8	
SM-2	Desseminated pyrite in quartz vein	py	+7.5	No. 1 vein
8-3	Chalcopyrite-(galena) in quartz vein	cp	+7.9	
8-4-1	Coarse grained sphalerite in quartz vein	sp	-2.2	No. 8 vein
8-4-2	ditto	sp	-2.2	
8-6	Pyrite in altered granite	py	+8.6	
8-8	Pyrite in granite	py	+9.2	
S-3	Galena-chalcopyrite-sphalerite in quartz vein	gn	+6.1	Samhyongjae vein

po : Pyrrhotite, py : Pyrite, cp : Chalcopyrite, sp : Sphalerite, gn : Galena

방해석의 탄소 안정동위원소비는 $\delta^{13}\text{C} = -3.5\text{--}-5.4\text{\%}$ 이고, 산소 안정동위원소비는 $\delta^{18}\text{O} = +0.9\text{--}+5.3\text{\%}$ 이다. $\delta^{13}\text{C}$ 값은 비교적 균일하나 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 변화는 크다 (Fig. 5). Bottinga (1969)과 O'Neil et al. (1969)의 frac-

tionation factor를 이용하여 계산하면 각각 $\delta^{13}\text{C} = -6.4\text{--}-8.3\text{\%}$, $\delta^{18}\text{O} = -6.4\text{--}-13.8\text{\%}$ 로 심부기원의 탄소로 해석된다. 산소 동위원소값의 큰 변화는 열수 광화용액에 순환수의 혼입으로 인해 ^{18}O 가 결핍된 결과로 생각된다.

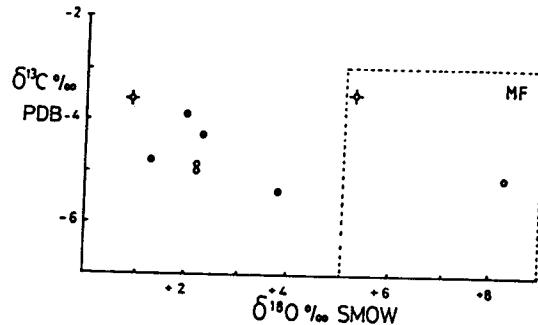


Fig. 5. Isotope composition of calcites from the Mugug mine. MF indicates the isotopic range of magmatic fluid.

황 안정동위원소비

1호맥, 8호맥 그리고 삼형제맥에서 채취한 황철석, 황동석, 섬아연석, 자류철석, 방연석의 시료에 대하여 황 안정동위원소비를 분석하였다 (Table 4). 황화광물의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 $-2.2\text{--}+9.2\text{\%}$ 의 넓은 범위를 나타내며, 황철석 ($\delta^{34}\text{S} = +75\text{--}92\text{\%}$), 섬아연석 (-2.2\%), 방연석 ($+6.1\text{\%}$), 황동석 ($+7.9\text{\%}$), 자류철석 ($+6.8\text{\%}$) 등이다. 8호맥의 석영맥에 수반되는 거정질의 섬아연석(시료 8-4-1, 8-4-2)은 $\delta^{34}\text{S} = -2.20\text{\%}$ 로 공존하는 기타 황화광물 ($+7.9\text{--}+9.2\text{\%}$)과는 동위원소값의 큰 차이를 보인다. 이는 침전환경의 차이 때문인 것으로 해석된다. 8호맥의 시료 8-

4-1, 8-4-2를 제외한 모든 황화광물에 대하여 250°C에서 평형에 있었던 H₂S의 동위원소비를 Ohmoto 와 Rye (1979)의 fractionation factor를 이용하여 계산하면 +5.0 - +8.4‰이 얻어진다. 이들은 대부분 화성기원의 황으로 해석되며, 국내의 기타 열수 광상기원의 황화광물의 황 동위원소비(김규한, 나까이노부유끼, 1980)와도 유사하다. 특히, 자류철석의 동위원소비가 기타 황화광물과 유사하며, 자류철석의 동위원소에서 전 유황의 황 동위원소값이 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}} = +6 - +7\text{‰}$ 내외인 것으로 추정할 수 있다.

결 론

무극 금-은 광상은 중생대의 백야리 퇴적암층을 관입한 백악기의 화강섬록암(112 Ma, 김옥준 1971)내에 발달하는 10여조의 천열수 함금-은 석영맥 맥상광상으로서 광화작용 시기는 97.86 Ma (Shimazaki et al., 1987)이다. 금-은 광화작용시의 광화환경과 광화용액의 기원을 해석하기 위하여 야외조사, 유체포유물 연구, 탄소, 산소 및 황 안정동위원소 분석을 실시했다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 백야리층과 광상모암인 화강섬록암은 단층접촉이 아니고 관입접촉으로 조사되었다.

(2) 금광물은 주로 에렉트럼으로 산출되며, 이는 황철석, 방연석, 섬아연석과 밀접히 수반되고 함금량은 54.2 - 61.9 wt% Au이다.

(3) 삼형제맥에서 채취된 석영, 형석, 방해석내 유체포유물의 균일화 온도는 각각 196-368°C(평균 240°C), 74-176°C(평균 115°C), 75-200°C(평균 119°C)이고, NaCl 상당염농도는 1.0-6.6 wt%이다.

(4) 모암인 화강섬록암의 산소 동위원소비는 전암(+6.15‰), 석영(+10.43‰)이고, 각 광화기 석영의 산소 동위원소비는 stage 1(+5.7‰), stage 2(+7.00‰), stage 3(+7.74‰), stage 4(+9.26‰), stage 5(+7.04‰), stage 6(+5.66‰)이며, 250°C에서 동위원소 평형에 있었던 열수 광화용액의 $\delta^{18}\text{O}$ 는 -3.2 - +0.4‰로서 모암인 화강암에서 추정된 magma melt의 값(+9.3‰)과 비교하여 보면 동위원소적으로 대단히 가벼운 산소의 혼입(meteoric water 기원)이 있었음이 추정된다. 이같은 각 stage 간 산소 동위원소비의 변화는 열수용액과 순환수의 상이한 mixing ratio에 기인한 것으로 해석되며, 순환수의 혼입에 따른 온도저하, H₂S의 감소, pH, Cl⁻ 농도변화가 금-은 광물의 침전에 기여한 것으로 해석된다.

(5) 석영맥에 수반되는 황화광물의 황 동위원소비는 +1.6 - +9.2‰이며, 250°C에서 평형에 있었던 H₂S의 황 동위원소비는 +5 - +8.4‰로 심부기원의 황으로 해석된다. 그러나 8호맥 조립결정으로 산출되는 섬아연석(-2.2‰)은 침전조건이 기타의 황화광물과 달랐음을 의미해 주고 있다.

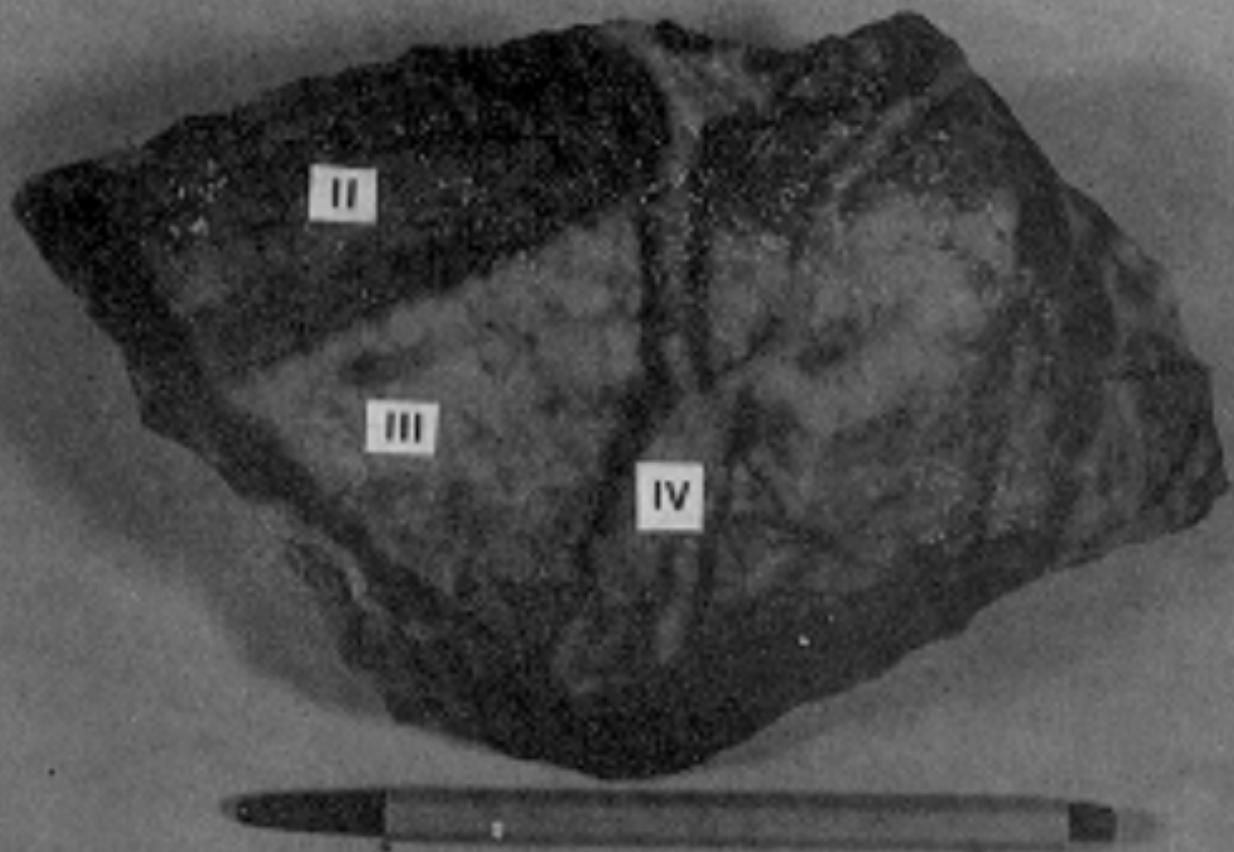
(6) 광화 후기의 방해석은 $\delta^{13}\text{C} = -3.5 - -5.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = +0.9 - +3.8\text{‰}$ 로 순환수(meteoric water)의 혼입에 따른 ^{18}O 결핍이 뚜렷하게 나타난다.

참 고 문 헌

- 김규한, 나까이노부유끼(1980) 한국의 일부 금속광상의 유황 동위원소 성분 및 동위원소 지질온도에 관한 연구; 지질학회지, 제 16 권 제 2 호, p. 124-134.
 김옥준(1971) 남한의 신기 화강암류의 관입시기와 지각변동; 광산지질, 제 4 권 제 1 호, p. 1-9.
 대한광업진흥공사(1977) 광산시추조사 보고서, 제 3 호.
 대명광업 주식회사(1968) 무극광산조사보고서.
 박노영, 최선규, 박기화(1985) 중원지역 열수광상의 성인; 지질광상, p. 193-229.
 박희인, 강성준(1988) 무극광산 삼형제맥의 금-은 광화작용; 광산지질, 제 2 권 제 3 호, p. 257-268.
 연세대학교 지질학과 동문회(1987) 한국의 지질과 광물자원, p. 269-271.
 장원선(1986) 무극 금-은 광상의 광화작용에 관한 연구; 이화여자대학교 교육대학원 석사논문.
 정창희, 박용안, 김항목(1976) 한국지질도 음성도록(1/50000); 자원개발연구소.
 Bottinga, Y.(1969) Calculation of fractionation factors for carbon and oxygen isotopic exchange in the system calcite-carbon dioxide water; J. Phys. Chem., 72 p. 800-808.
 Kaneda, H., Shimazaki, H. and M. S. Lee(1987) Fluid inclusion studies of ore deposits in South Korea. In Tsusue, A.(ed.); Granite provinces and associated ore deposits in South Korea(Overseas Field Research 2nd Report), p. 129-198.
 McCrea, J. M.(1950) On the isotopic chemistry of carbonate and paleotemperature scale; J. Phys. Chem., 18, p. 849-857.
 Ohmoto, H. and R. O. Rye(1979) Isotopes of sulfur and carbon, Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits; Barnes 2nd ed., p. 509-567.
 O'Neil, J. R., Claytons, R. N. and T. K. Mayeda(1969) Oxygen isotope fractionation in Divalent metal carbonates; J. Chem. Phys., 51(12), p. 5547-5558.
 Shimazaki, H., Lee, M. S., Tsusue, A. and Kaneda, H.(1986) Three epochs of gold mineralization in South Korea, Mining Geol., V. 36(4), p. 265-272.

Shimazaki, H., Kaneda, H. and M. S. Lee(1987) Mineral deposits associated with felsic magmatism in South Korea. In Tsusue, A.(ed.) Granite provinces and associated ore deposits in South Korea(Overseas Field Research 2nd Report), p. 89-128.

Taylor, H. P. and Epstein, S.(1962) Relationship between $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$ ratios in coexisting minerals of igneous and metamorphic rocks pt 2, Application to petrologic problems, Bull. Geol. Soc. Am., 73, p. 675-694.



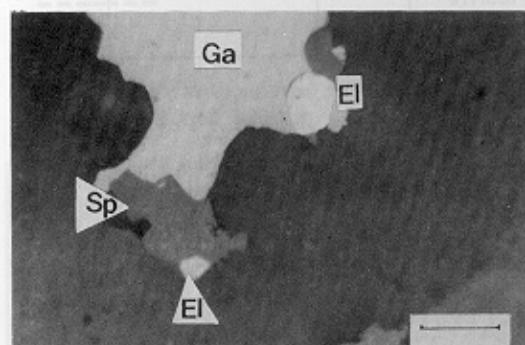
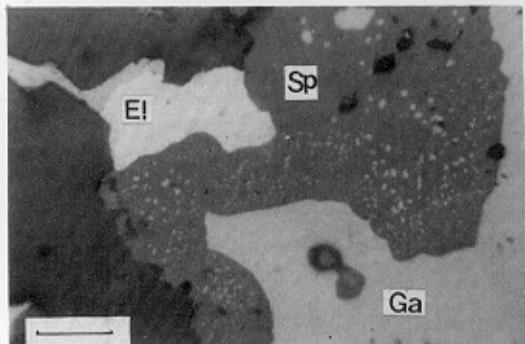


Photo 2, 3. Electrum associated with sphalerite and chalcopyrite (bar scale $50 \mu\text{m}$)

금—은 광물의 산출상태

금—은 광물은 주로 electrum으로 황화광물과 밀접히 수반 산출된다. Electrum은 석영, 황철석, 섬아연석, 자류철석, 방연석 내에서나 각 광물의 결정경계면에서 산출된다 (사진 2, 3). Electrum의 크기는 $1.5-32 \mu\text{m}$ 이다. 그림 4에서 같이 황철석은 초기 석영맥 형성에서 말기까지 연

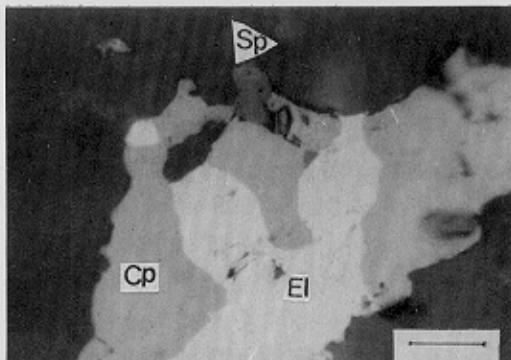


Photo 5. Electrum replacing the chalcopyrite (bar scale $50 \mu\text{m}$).

속적으로 침전되었으며, electrum은 주석영맥 형성시기에 침전되었다. 모암 변질대내에 분포하는 자형의 황철석과 후기 형석, 방해석 형성단계의 공동내의 황철석에는 electrum이 산출되지 않는다. Electrum의 산출형태는 황철석의 입자내에 포획되었거나, 황철석내의 crack을 따라 활동

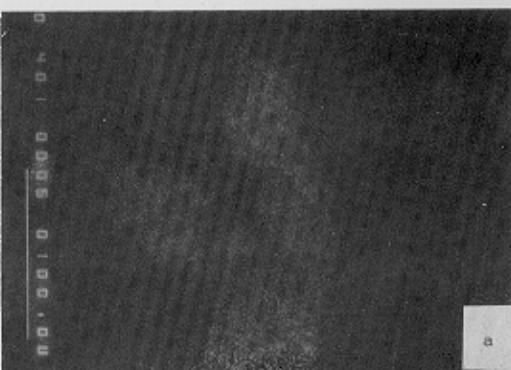


Photo 4. Electrum filling the crack of the pyrite.

Photo 6. Photographs of electron images of