

## 한국 금-은 광산의 효율적 탐사를 위한 성인모델; 무극 광화대를 중심으로

최선규<sup>1\*</sup> · 이동은<sup>1</sup> · 박상준<sup>1</sup> · 최상훈<sup>2</sup> · 강흥석<sup>3</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 지구환경과학과, <sup>2</sup>충북대학교 지구환경과학과, <sup>3</sup>대한광업진흥공사

### Genetic Model of Mineral Exploration for the Korean Au-Ag Deposits; Mugeug Mineralized Area

Seon-Gyu Choi<sup>1\*</sup>, Dong-Eun Lee<sup>1</sup>, Sang Joon Pak<sup>1</sup>, Sang-Hoon Choi<sup>2</sup> and Heung-Suk Kang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Earth and Env. Sci., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Earth and Env. Sci., Ghungbuk Nat. Univ., Gheongju 361-763, Korea

<sup>3</sup>Korea resources corporation, Seoul, 156-706, Korea

The gold-silver vein deposits in the Mugeug mineralized area are emplaced in late Cretaceous biotite granite associated with the pull-apart type Cretaceous Eumseong basin. Mugeug mine in northern part is composed of multiple veins showing relatively high gold fineness and is characterized by sericitization, chloritization and epidotization. The ore-forming fluids were evolved by dilution and cooling mechanisms at relatively high temperature and salinity ( $\approx 300^{\circ}\text{C}$ , 1~9 equiv. wt. % NaCl) and highly-evolved meteoric water ( $\delta^{18}\text{O}$ ; -1.2~3.7‰) and gold mineralization associated with sulfides formed at temperatures between 260 and 220°C and within sulfur fugacity range of  $10^{-11.5}$ ~ $10^{-13.5}$  atm. In contrast, Geumwang, Geumbong and Taegueg mines show the low fineness values, in southern part are characterized by increasing tendency of simple and/or stockwork veins and by kaolinitization, silicification, carbonatization and smectitization. These deposits formed at relatively low temperature and salinity ( $<230^{\circ}\text{C}$ ,  $<3$  equiv. wt. % NaCl) from ore-forming fluids containing greater amounts of less-evolved meteoric waters ( $\delta^{18}\text{O}$ ; -5.5~4.0‰), and silver mineralization representing various gold-and/or silver-bearing minerals formed at temperatures between 200 and 150°C and from sulfur fugacity range of  $10^{-15}$ ~ $10^{-18}$  atm. These results imply that mineralization in the Mugeug area formed at shallow-crustal level and categorize these deposits as low-sulfidation epithermal type. The genetic differences between the northern and southern parts reflect the evolution of the hydrothermal system due to a different physicochemical environment from heat source area (Mugeug mine) to marginal area (Taegueg mine) in a geothermal field.

**Key words:** mugeug mineralized area, gold-silver mineralization, ore-forming fluids, hydrothermal system, genetic model of mineral exploration

무극 광화대는 인리형 분지인 백악기 음성분지와 단층 접촉하는 백악기 흑운모 화강암을 모암으로 하여 배태된 광상들로 구성되며, 광화대 북측에서 남측으로 무극·금왕·금봉·태극 광산의 순서로 배태된다. 맥의 산상, 광물학적, 유체포유물 및 동위원소 연구결과에 의하면, 북측 광화대의 무극광산은 상대적으로 높은 금-은비를 나타내는 전형적 북성맥의 구조를 보이며, 대체로 건운모화작용·녹니석화작용·녹염석화작용이 우세하게 관찰된다. 무극광산의 광화유체는 비교적 고온·고염도( $\approx 300^{\circ}\text{C}$ , 1~9 equiv. wt. % NaCl)와 불-암석 상호반응이 진행된 광화유체( $\delta^{18}\text{O}$ ; -1.2~3.7‰)로부터 냉각 및 희석작용의 진화양상을 보이며, 에렉트럼과 황화광물의 광물조합을 보이는 금광화기의 유흥분압 및 정출온도는  $10^{-11.5}$ ~ $10^{-13.5}$  atm과  $260\sim 220^{\circ}\text{C}$ 를 보인다. 반면, 남측의 금왕·금봉·태극광산에서는 북측에 비해 낮은 금-은비를 보이는 단성맥 또는 망상세맥이 우세하게 산출되며, 캐올린화작용·규화작용·탄산염화작용·스멕타이트화작용이 광범위하게 분포하는 특징을 보인다. 이들 광산의 광화유체는 지표수의 다량 혼입에 의한 순환수 기원( $\delta^{18}\text{O}$ ; -5.5~4.0‰)의 저온·저염 광화유체( $<230^{\circ}\text{C}$ ,  $<3$  equiv. wt. % NaCl)로부터  $\text{CO}_2$  비등 및 냉각작용에 의한 진화양상을 보인다. 황화광물과 에렉트럼 이외에도 다양한 함은황염 광물이 우세하게 산출되는 이들 광산의 은광화기

\*Corresponding author: seongyu@korea.ac.kr

는  $10^{-15} \sim 10^{-18} \text{atm}$ 과  $200 \sim 150^\circ\text{C}$ 의 유황분압 및 정출온도를 보인다. 이들 연구결과는 무극광화대가 지표수의 다량 유입이 가능한 천부 지질환경임을 시사하며, 성인적으로는 저유황형 천열수 광상으로 해석된다. 또한 광화대 북측과 남측에서의 광석광물, 이차변질광물 및 열수변질대의 분포, 광화유체 특성에 따른 전반적인 차이는 광화대내의 열적 중심부(무극광산)으로부터 열수계 최외각부(태극광산)까지의 열수계의 진화과정을 반영한 광산들의 시·공간적 분포에 기인한 것으로, 이는 열수계 진화과정시 유체간 혼합과정 및 광화유체의 희석작용, 그리고 온도감소에 따른 금-은광물의 상이한 정출 환경에 기인한 것으로 해석된다.

**주요어 :** 무극 광화대, 금-은 광화작용, 광화유체, 열수계, 탐사 성인 모델

## 1. 서 언

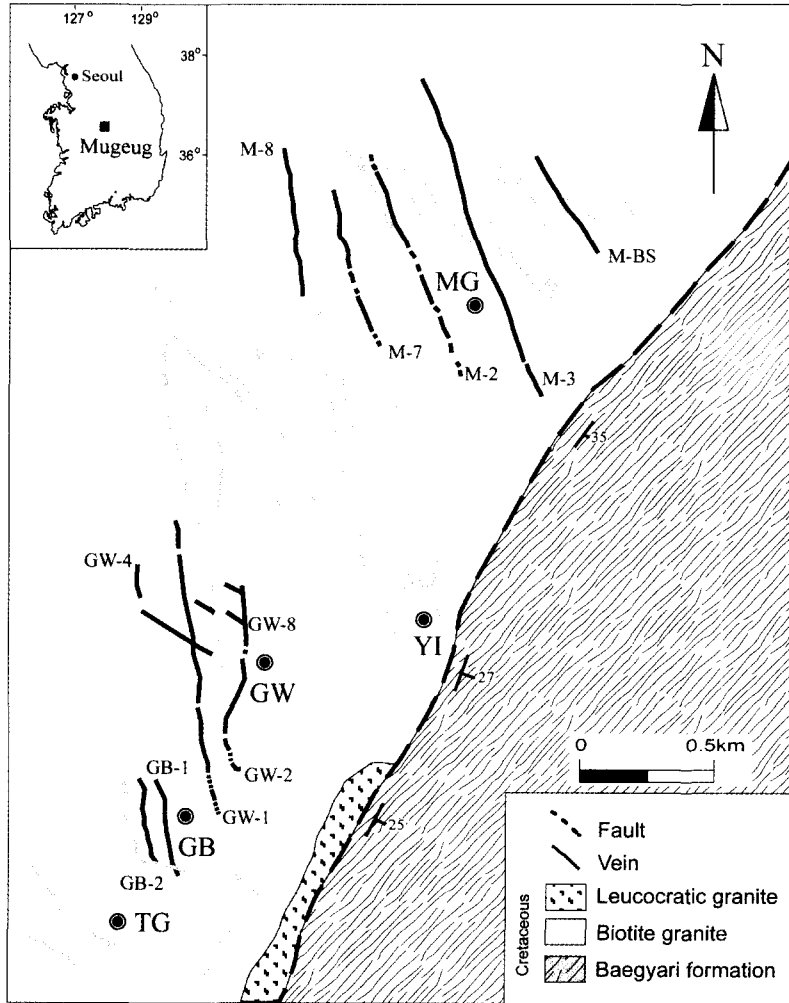
한국 열수광맥형 금-은광상은 지체구조상 북측의 선캠브리아이언 경기 지괴에서 남측의 선캠브리아이언 영남 지괴 및 백악기 경상 퇴적분지까지 다양한 성인적 특성을 갖는 광상이 배태되고 있으며(최선규 등, 2001), 이러한 광상은 유체포유물 및 안정동위원소 연구를 통하여 중열수광상, 한국형(Korean-type)광상, 천열수광상으로 구분되었다(Shelton *et al.*, 1988). 특히, 중부지역에 위치한 천안-충주 광상구의 금광상은 조산대형 심부기원의 전형적인 특징을 보이고 있으나(최선규 등, 2001; So *et al.*, 1987; Shelton *et al.*, 1988), 무극 광화대의 광상은 인리형 분지인 백악기 음성 퇴적분지의 발달에 기인한 불국사 화성활동과 밀접한 연관성을 갖고 있어 광상학적 측면에서 중요한 의미를 갖고 있다. 이 지역의 광상은 전형적인 금-은혼합형 광상으로 수 km에 걸쳐 약 30여 개 맥상 광체가 배태되며, 북측 무극광산에서 최남단 태극광산까지 다양한 금-은비의 변화를 보이고 있다. 또한, 최근 광화대 남측에 위치한 금봉·태극·유일광산에서 미개발된 광맥들을 대상으로 시추탐사 및 개발 중에 있다. 무극지역은 무극광산에서 순금 18.6 톤, 순은 57.3 톤과 금왕광산에서 순금 1.0 톤, 순은 16.0 톤의 생산실적이 각각 보고된 바 있는 국내 최대규모의 광화대이며, 지금까지는 무극광산과 금왕광산에 대하여 개별광산 단위의 생성환경에 관한 연구만이 수행되었을 뿐이고(신양우와 서규식, 1987; 박희인과 강성준, 1988; 김규환 등, 1990; 최선규 등, 1986; Sugaki *et al.*, 1986), 무극 광화대 전반에 걸친 광화작용의 성인적 특성은 검토된 바 없다. 본 연구에서는 무극 및 금왕 광산의 기존자료와 함께 금봉·태극 광산에 대하여 맥별 금은비(Au fineness=Au $\times$ 1000/(Au+Ag)), 광맥의 산출상태 및 열수변질대의 특성, 광석광물의 특징(금-은광물의 산상 및 공생관계, 화학조성 등), 유체포유물 및 안정동위원소의 연구결과 등을 종합적으로 검토하여, 광화대 전

반에 걸친 광상의 광역적 분포 특성과 광화유체의 진화과정을 시·공간적 측면에서 비교함으로써 미개발 광맥의 개발 잠재성을 검토하는데 그 목적을 두고 있다.

## 2. 지질·광상 개요

중부지역의 광역 지질은 선캠브리아이언의 경기 변성복합체에 속하는 고기 변성암류와 고생대 옥천 지층사대의 변성암류가 광범위하게 분포하고 있으며, 그리고 후기에 상기 암석군을 관입한 쥐라기 대보 화성암체와 백악기 경상누층군의 퇴적암류 및 불국사 화성암체로 구성되어 있다. 대보 화성암체의 저반은 북동 방향에서 남서 방향을 따라 약 300 km 연장과 약 40 km 폭으로 대강 분포하고 있으며, 백악기 불국사 화성암체가 대보 화성암체의 저반을 압주상 또는 암맥상으로 관입하고 있다. 중부지역의 금광상은 주로 경기변성암류와 쥐라기 화성암체의 접촉부를 따라 광범위하게 분포하고 있으며, 대부분 대보 조산운동과 관련된 심부기원의 금단일형 광상으로 보고된 바 있다(최선규 등, 2001; So *et al.*, 1987; Shelton *et al.*, 1988).

무극 광화대는 경기지괴내에 발달한 NNE방향의 좌수향 주향이동단층운동에 의해서 형성된 인리형 분지인 음성 퇴적분지를 따라 배태되며, 백악기 경상누층군중 신동층군에 대비되는 하부 초평층과 상부 백야리층과 백악기 후기 화성암체로 구성된다(Fig. 1). 백야리층은 역암, 사암, 역질 사암, 이암 등 호성 및 선상지 퇴적암으로 구성되며, 사암과 이암이 호층을 이루고 있다. 흑운모 반상화강암은 퇴적분지의 서측 지역에 광범위하게 분포하고 있으며, 후기에 관입한 우백질 화강암은 주로 단층 접촉대를 따라 소규모로 산출되고 광화대 남측의 시추시료에서도 암맥상으로 산출된다. 상기 두 암석은 모두 석영맥을 중심으로 다양한 이차변질 광물의 열수변질대가 광범위하게 분포하고 있다. 안산암질 암맥은 무극·태극광산의 항내에서 간혹 관



**Fig. 1.** General geological map of the Mugeug mineralized district. MG; Mugeug mine, YI; Yuil mine, GW; Geumwang mine and GB; Geumbong mine, TG; Taegu mine. Black colored line indicates productive gold-silver vein and their vein number.

찰되지만, 석영 맥에 의해서 절단된다. 무극광산 주변에 분포하는 흑운모 화강암은 칼리장석의 K-Ar 연대 측정결과 112 Ma로 기재된 바 있으며(김옥준, 1971), 함금은 석영맥 주변에 발달한 열수변질대의 건운모는 K-Ar 연대측정결과 106±5와 98±2 Ma로서 백악기 불국사 화성활동과 관련성을 시사하고 있다(Shimazaki *et al.*, 1986; 박희인 등, 1988).

무극 광화대의 금은광상은 지금까지 북측 무극광산에서 금왕광산까지 약 10여개조 함금-은석영맥을 중심으로 개발되었으며, 현재 남측 유일광산, 금봉광산, 태극광산이 탐사 개발 중에 있다. 석영맥은 흑운모 화강암과 우백질 화강암을 모암으로 하여 N10W~N20W계 고각도 열극(high-angle fissure)에 배태되는 경향을 보

이며(Fig. 2), 백야리층 내에서도 열극의 연장 방향을 따라 석영 세맥이 확인되지만, 맥 폭은 수 cm이하로 현저하게 감소하는 경향을 보인다. 그리고, 유일광산 부근에서 확인된 흑운모 화강암과 백야리층과의 단층 접촉부에서는 폭 10 m이상의 단층 파쇄대가 분포하며, 건운모-녹니석의 열수변질대가 광범위하게 발달되고 있다.

금봉광산의 금은광맥은 N15~20W방향의 열극을 충전한 3개조의 평행 맥과 동서방향의 맥들로 구성되며, 태극광산에서는 N20~40W계의 맥들이 우세하지만 금봉광산과 비교하여 맥 연장과 폭이 현저하게 감소하고 있다. 특히, 태극광산의 시추시료에서는 석영 세맥, 옥수질 망상 세맥(stockwork veinlet) 및 방해석 세맥의

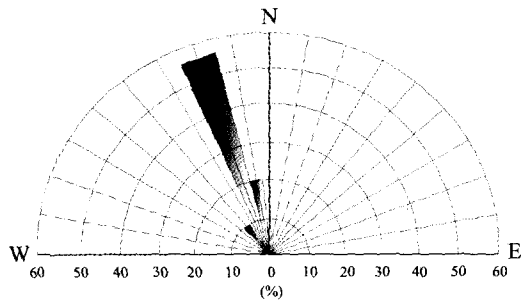


Fig. 2. Rose diagram of gold-silver vein direction in the Mugeug mineralized area. Note that most of gold-silver veins show north-west direction.

산출 빈도가 증가하는 경향을 보이는데, 이러한 일련의 현상은 광화대 남측에서 광화유체의 온도-압력이 상대적으로 약화된 결과로 사료된다. 합금-은석영맥의 조직은 광산들 간에 다소 차이는 있지만 공통적으로 호상, 빗살, 각력상 조직과 함께 정동석영 및 옥수질 석영이 우세하게 산출된다(Table 1). 특히, 광화대 남단의 태극광산 합금-은석영맥에서는 옥수질 석영의 재결정(ghost-sphere, flamboyant, feathery)조직과 함께 탄산염광물의 교대조직인 판상 석영이 특징적으로 관찰된다(Fig. 3). 이러한 조직은 천부 조건에 저온성 광화유체 (<200°C)의 CO<sub>2</sub>비등작용에 기인한다. 또한, 맥석광물로는 주로 회색~유백색 또는 투명 석영, 옥수질 석영과 함께 견운모·녹니석이 산출되며, 광화대 남측에서 방해석·케올리나이트·스멕타이트의 산출빈도가 증가하고 있다.

3. 금은광상의 공간적 분포 특성

무극 광화대의 금-은광상에 대한 체계적인 분포특성

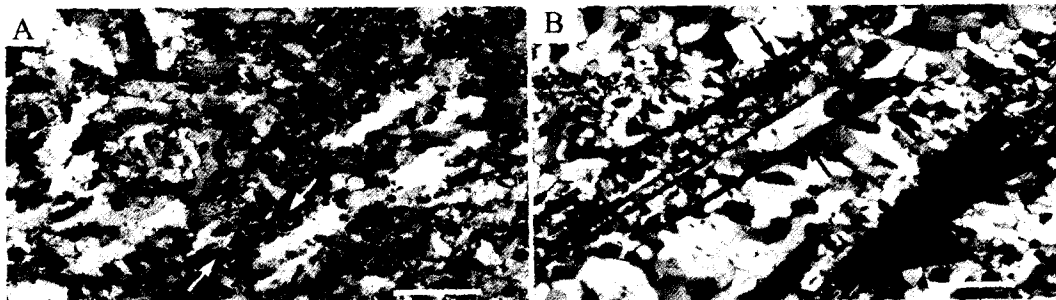


Fig. 3. Photomicrographs of various types in quartz veins from Mugeug district. A: Ghost-sphere texture from Taegeug mine. Arrows show microcrystalline quartz as cloudy spheres highlighted by the distribution of impurities. B: Bladed texture from Taegeug mine. Silica blades are parallel within each group but sometimes adjacent groups have different orientations. Scale bars=0.5 mm.

Table 1. Characteristic features of Geumbong and Taegeug mines in Mugeug mineralized area.

| Mine                            | Geumbong                   | Taegeug                    |
|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Vein type                       | quartz vein > calcite vein | quartz vein ≥ calcite vein |
| Vein morphology                 | multiple                   | multiple~simple            |
| Complex                         | ***                        | *                          |
| Veinlet                         | **                         | ***                        |
| Stockwork                       | *                          | ****                       |
| Vein texture                    |                            |                            |
| Comb                            | ****                       | *                          |
| Banded (crustiform, colloform)  | ***                        | ***                        |
| Breccia                         | ***                        | ****                       |
| Feathery, ghost-sphere          | ***                        | ****                       |
| Replacement (bladed, lattice)   | *                          | **                         |
| Moss                            | **                         | ***                        |
| Alteration                      | moderate                   | very weak                  |
| Phyllic alteration              | **                         | *                          |
| Propylitic alteration           | ****                       | ****                       |
| Argillic alteration             | **                         | ***                        |
| Characteristic mineral          | pyrite, arsenopyrite       | stibnite                   |
| Base-metal mineral (sp, cp, gl) | **                         | -                          |
| Ag-S (ag, ar)                   | ***                        | -                          |
| Cu-Ag-Sb-As-S (td, pl)          | **                         |                            |
| Ag-Sb-As-S (pg, mg, stp)        | **                         |                            |
| Ag-Fe-S (stb)                   | -                          |                            |
| Sb-S (sb)                       |                            | *                          |

Abbreviation; \*\*\*\*, abundant, \*\*\*, dominant, \*\*, moderate, \*, little, -, rare, ag, native silver, ar, argentite or acanthite, cp, chalcopyrite, gl; galena, mg; miragyrite, pg; pyrayrgyrite, pl; polybasite or pearceite, sb; stibnite, sp; sphalerite, stb; sternbergite, stp; stephanite, td; tetrahedrite

을 검토하기 위하여 기 개발된 광산의 연도별 생산량 자료를 종합 비교한 금-은비는 다음과 같다(단, 연도별 생산실적 중 금은생산량이 함께 보고된 자료만 계산에 포함하였음). 무극광산은 70년대 이전까지 주 개발 대상인 2호맥에서 금 8.2 t과 은 2.2 t을 생산하였고, 연도별 생산량에 대한 금-은비의 변화는 306~350(평균값: 328)이다. 삼형제맥은 86년 이후부터 지하 -550 m까지 개발되어 금 10.5 t과 은 55.1 t을 생산하였고, 연도별 금-은비 변화는 75~233(평균값: 160)이다. 그리고, 광화대 남측 금왕광산에서는 82년부터 94년까지 금 0.99 t과 은 15.97 t이 생산되어, 연도별 금-은비는 24~95(평균값: 59)로서 무극광산과 비교하여 현저하게 낮은 특징을 보인다. 또한, 최근 20여년 동안 광상시추조사보고(1977~1990), 탐광굴진(1974~1986) 및 한국의 광상(1973, 1987)에 보고된 광석의 품위자료를 종합한 각 광산의 맥별 금-은비 자료는 Table 2와 같다. 무극광산의 2호맥(개발심도: -625 m)과 삼형제맥에 대한 광석의 금-은비는 각각 118~197

(평균값: 167)과 77~407(평균값: 197)인 반면에, 남측 금왕광산에서 금-은비는 0.5~500(평균값: 122)이다. 또한 금봉·태극광산에서 상부광석시료의 평균 금-은비도 각각 76 과 73로서 무극광산에 비하여 전반적으로 현저하게 낮은 수치를 보이고 있다(Fig. 1, Table 2). 이러한 광화대 전반에 걸친 맥별 또는 생산량자료를 종합적으로 비교검토한 결과, 광화대 북측과 비교하여 남측에서 금-은비는 현저하게 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이는 금왕·금봉광산에서 함은황염광물의 산출빈도의 증가와도 서로 일치하고 있다. 또한, 금왕광산(개발심도: -500 m) 연도별 생산량의 금-은비는 개발 초기인 82년도 24.2에서 89년도 95.7로서 지속적인 증가추세를 보이고 있다. 이는 상부 광맥에서 연차적으로 하부 광맥이 개발됨에 따라 함은황염광물의 감소와 함께 에렉트럼 산출빈도의 증가에 기인한다. 광화대 전반에 걸친 이러한 변화양상은 금-은 광물간의 선택적 침전과 관련된 광화유체의 상이한 정출환경을 반영한 결과로서 금-은비의 수평·수직적 변화를 유도한 것으로 사료된다.

**Table 2.** Average and range of fineness in Mugeug district.

| Mine     | Name of vein  | Fineness variations |             | N*   |
|----------|---------------|---------------------|-------------|------|
|          |               | Average             | Range       |      |
| Mugeug   | No.1          | 137.6               | 89.9-181.0  | 33   |
|          | No.2          | 166.7               | 117.8-197.3 | 45   |
|          | No.7          | 144.8               | 93.7-270.8  | 121  |
|          | No.8          | 160.3               | 100.2-286.6 | 68   |
|          | No.10         | 189.3               | 2.2-585.8   | 18   |
|          | No.11         | 67.5                | 1.3-285.7   | 9    |
|          | Samhyungje    | 196.5               | 76.5-407.1  | 1407 |
|          | Baksan        | 268.1               | 254.2-281.9 | 30   |
|          | East-west     | 195.6               | 108.4-238.1 | 34   |
|          | Total average | 169.6               | 1.3-407.1   | 1765 |
| Geumwang | No.1          | 64.4                | 0.5-318.2   | 25   |
|          | No.2          | 179.7               | 1.6-500.0   | 7    |
|          | Total         | 122.1               | 0.5-500.0   | 32   |
| Geumbong | East-west     | 53.9                | 0.3-401.5   | 36   |
|          | No.1          | 64.6                | 0.0-411.0   | 30   |
|          | No.2          | 65.5                | 0.0-749.1   | 45   |
|          | No.3          | 121.1               | 0.0-750.0   | 28   |
|          | Total average | 76.3                | 0.0-750.0   | 139  |
| Taeyeug  | No.2          | 59.1                | 1.2-199.8   | 6    |
|          | No.3          | 94.3                | 0.5-857.1   | 86   |
|          | No.4          | 80.6                | 2.2-387.8   | 17   |
|          | No.5          | 96.3                | 0.1-847.3   | 105  |
|          | No.6          | 32.7                | 0.5-471.3   | 56   |
|          | Total average | 72.6                | 0.1-857.0   | 270  |

\*Number of analysis

**4. 열수변질대의 분포특성**

무극 지역에서의 열수변질대는 흑운모 화강암과 우백질 화강암을 모암으로 하여 석영맥의 주변부를 따라 10 m 범위까지 광범위하게 발달하여 있으며, 광화대 전반에 걸쳐 상이한 변질대의 분포양상을 보이고 있다. 북측 광화대에서는 건운모화작용·녹니석화작용·녹염석화작용이 우세하지만, 남측에서는 녹염석화작용·녹니석화작용·건운모화작용·캐올린화작용·규화작용·탄산염화작용·스멕타이트화작용이 확인된다. 특히, 금봉·태극 광산의 지표 및 상부 시추시료에서는 미세 균열을 따라 불규칙적으로 진행된 점토대가 확인되지만, 건운모화작용은 상대적으로 미약한 경향을 보이고 있다.

무극과 금왕 광산의 향내시료 및 금봉·태극 광산의 지표시료 및 1998~2000년도 대한광업진흥공사에서 실시한 시추시료를 대상으로 편광현미경, X-선회절 분석기 및 전자현미분석기를 이용하여 이차변질광물을 동정하였다. 열수변질대는 광물공생관계에 따라 아프로필리틱대(subpropylitic zone), 프로필리틱대(propylitic zone), 아건운모대(subphyllitic zone), 건운모대(phyllitic zone), 점토대(argillic zone)로 구분되며, 각 분대별 광물조합의 특징은 다음과 같다(Fig. 4). 아프로필리틱대는 변질대의 최외각부에 발달하며 녹니석·녹염석·합수

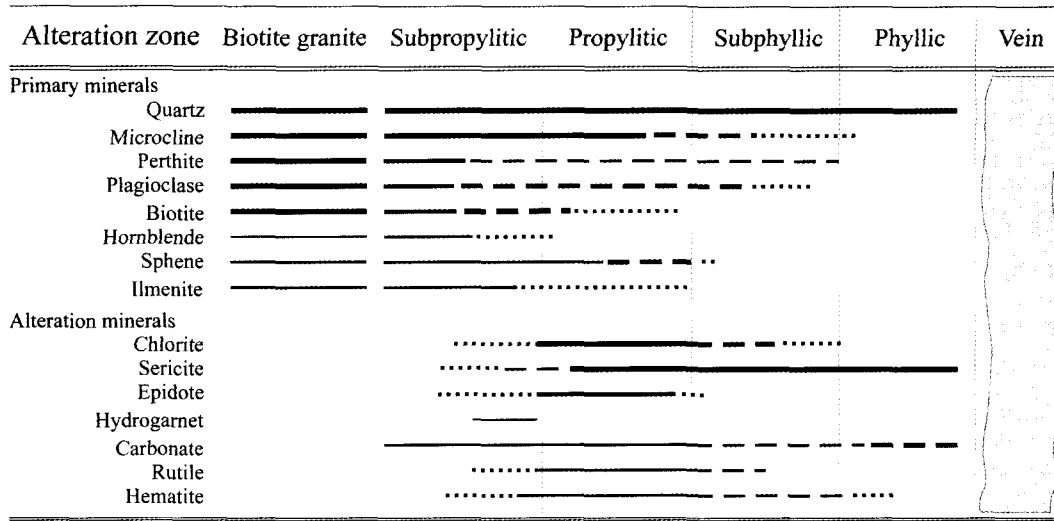
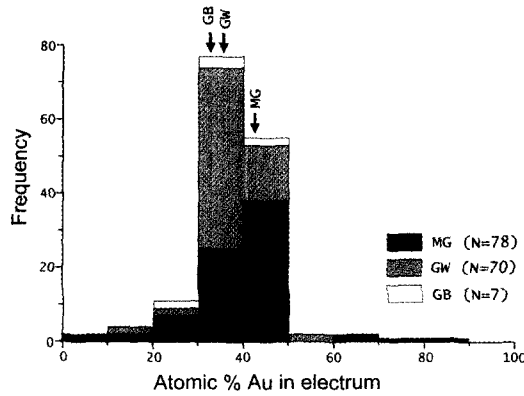


Fig. 4. Diagrams depicting a summary of alteration and mineralogical changes associated with quartz-calcite veins in Mugeug area. Note that all zones are not necessarily present around a given vein.

석류석(hydrogarnet)-탄산염광물-미사장석-사장석-혹운모-석영의 광물 조합으로 혹운모가 녹니석으로 일부 변질되는 것이 특징적이다. 프로필리틱대는 녹니석-녹염석-견운모-탄산염광물-미사장석-사장석-석영의 광물조합이 특징적이며, 혹운모가 완전히 소멸되어 녹니석으로 변질되고 사장석도 부분적으로 견운모로 변질된다. 아견운모대에서는 녹니석-견운모-탄산염광물-석영의 광물조합으로 녹니석이 일부 견운모로 변질되며, 미사장석도 견운모화되는 것이 특징적이다. 견운모대는 하부 광맥의 변질대에 발달하며, 견운모-탄산염광물-석영의 단순한 광물조합으로 사장석, 미사장석, 녹니석이 대부분 소멸되고 견운모가 우세하게 산출되는 것이 특징적이다. 점토대는 남측 광화대의 지표 또는 맥의 상부 변질대에서 국부적으로 산출되며, 캐올리나이트-녹니석-탄산염광물의 광물조합이 특징적이다. 이러한 이차변질광물의 분포양상은 유체의 온도 및 화학조성, 물/암석 반응비(W/R ratio) 등의 복합적 요인에 좌우되며, 광석광물의 침전과 관련된 광화유체의 진화과정을 직접적으로 반영하고 있다. 고품위의 함금-은석영맥 주변에 발달한 열수변질대의 분포양상은 석영맥→견운모대→아견운모대→프로필리틱대→아프로필리틱대의 순서로 배열되지만, 빈광대에서는 석영맥→아견운모대→프로필리틱대→아프로필리틱대로 산출되는 경향을 보인다. 즉, 이와같이 열수변질대의 분포양상은 맥의 금-은-품위와도 밀접한 상관관계를 갖고 있다.

### 5. 금은광화작용과 광물공생관계

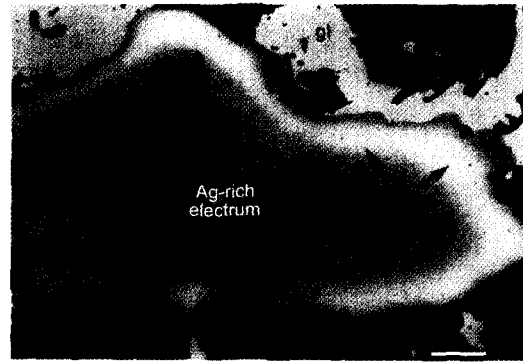
무극, 금왕, 금봉광산에서 금은광화작용은 5~6회에 걸쳐서 반복 상승한 광화용액에 의하여 형성된 복성맥의 공통적 특징을 보이며, 각 광화기는 광석광물의 공생관계차이에 따라 금-은비를 달리하고 있다. 신양우와 서규식(1987), 박희인과 강성준(1988)은 무극광산 삼형제맥의 상부광맥을 대상으로 하여 금광화작용과 관련된 주 광화기를 제3·4광화기로, 은광화작용과 관련된 광화기는 제4광화기로 보고한 바 있다. 최선규 등(1986), Sugaki *et al.*(1986)는 금왕광산 1, 2, 4, 8호맥을 대상으로 각 맥간의 상이한 광물조합과 함께 상부광맥에서 다양한 함은황염광물의 산출상태를 기재한 바 있다. 상기 광산들에서는 공통적으로 황철석, 섬아연석, 방연석, 유비철석, 황동석 등의 광석광물이 주로 산출되며, 특히 에렉트럼은 황철석, 섬아연석, 방연석, 휘은석과 밀접한 공생 관계를 보인다. 금왕·금봉광산에서 함은황염광물은 상부에 주로 배태되지만, 무극광산에서는 북측 광맥에서 일부 관찰되며, 휘은석, 자연은, 스텐버자이트(sternbergite)와 함께 안티몬계 황염광물인 Ag-Sb-S계(pyrargyrite, miargyrite, stephanite), Cu-Ag-Sb-S계(polybasite, pearceite, Ag-bearing tetrahedrite), Pb-Ag-Sb-S계(diaphorite)광물이 다량 수반되는 특징을 보인다. 각 광산에서 광석광물의 산출빈도는 광맥에 따라 다소 차이는 있지만, 무극광산에서 에렉트럼, 금왕·금봉광산에서도 함은황염광물이 각



**Fig. 5.** Histograms showing the Au contents (atomic %) of electrum. Note Au content of electrum show a decreasing tendency from Mugeug to Geumbong mine. MG; Mugeug, GW; Geumwang and GB; Geumbong

각 우세하게 산출되는 경향을 보이며, 특히 태극광산에서만 휘안석이 유일하게 산출되고 있다(Table 1).

기 보고된 분석 자료(최선규 등, 1986; 박희인과 강성준, 1988; Sugaki *et al.*, 1986)를 포함한 무극, 금왕, 금봉광산에 대한 각 광산별 에렉트럼의 금함유량과 빈돛수와의 관계를 도시하면 Fig. 5와 같고, 이들 광산에 대한 에렉트럼의 조성범위는 공통적으로 30~50 atomic % Au로서 대다수 에렉트럼은 동일입자에서 균질한 조성을 갖고 있다. 특히, 무극광산 에렉트럼은 상기 세 광산 중에서 가장 높은 금함유량과 함께 5.2~82.0 atomic % Au로 가장 현저한 조성변화를 나타내고 있다(Table 3). 이러한 에렉트럼의 조성은 광화시기에 따른 광물조합과도 밀접한 연관성을 보여주고 있다. 즉, 금광화작용과 관련된 주광화기의 에렉트럼은 황철석-섬아연석-방연석-유비철석-황동석-휘은석의 광물조합과 함께 비교적 높은 Au함유량을 보이며, 간혹 고품위 광석에서 에렉트럼은 중심부보다 외각부에서 Au함량이 현저하게 증가하는 누대구조를 보이고 있다(Fig. 6). 금-은광화작용과 관련된 후기광화기의 에



**Fig. 6.** Back-scattered electron image of Mugeug mine showing the the textural feature of Au-rich electrum overgrown by Ag-rich electrum. gl: galena, Scale bars; 20  $\mu$ m.

렉트럼은 황철석-섬아연석-방연석-휘은석-자연은과 함께 다양한 함은황염광물과 공생하며, 전기의 에렉트럼과 비교하여 낮은 Au함량이 특징적이다. 또한, 기 정출된 에렉트럼은 후기 광화유체 중 은농도의 증가에 기인하여 상대적으로 금함량이 낮은 에렉트럼으로 교대되는 현상도 관찰된다.

섬아연석은 광화 초기 주로 황철석-유비철석과 함께 산출되며, 광화 말기 함은황염광물-휘은석-자연은과도 밀접한 공생관계를 갖고 있다. 그리고, 섬아연석은 각 광산별로 미약한 조성차이만을 보여주고 있으며(Fig. 7), 전반적으로 <5.0 mole %의 낮은 철 함량분포를 보인다(Table 3). 또한, 광화 초기 섬아연석의 철함량은 대부분 광화 말기의 함은황염광물과 함께 산출되는 섬아연석에 비하여 상대적으로 다소 높은 경향을 나타낸다.

에렉트럼, 섬아연석, 유비철석 등은 광물생성환경의 변화에 따라 비교적 민감하게 영향을 받는 광물로 알려져 있으며(Barton and Toulmin, 1964; Shikazono, 1985; Shikazono, 1986; Shikazono and Shimizu, 1987), 이들 광물의 공생관계 및 에렉트럼의 은함량( $N_{Ag}$ )과 섬아연석의 FeS 함량(mole %)을 통하여 추정된 금-은광화작용시 함금-은광물의 정출환경은 Fig. 8

**Table 3.** The Au contents (atomic %) of electrum and FeS contents (mole %) of sphalerite from Mugeug, Geumwang and Geumbong mines.

| Mine     | Atomic % Au in electrum |       |           |     | Mole % FeS in sphalerite |       |           |     | Electrum-sphalerite geothermometry ( $^{\circ}$ C) |
|----------|-------------------------|-------|-----------|-----|--------------------------|-------|-----------|-----|--|
|          | Average                 | S.D.* | Range     | N** | Average                  | S.D.* | Range     | N** |  |
| Mugeug   | 40.9                    | 12.3  | 5.2-82.0  | 78  | 1.96                     | 1.7   | 0.03-7.42 | 67  | 254  |
| Geumwang | 36.0                    | 6.1   | 11.2-49.9 | 70  | 2.57                     | 1.3   | 0.29-5.88 | 57  | 243  |
| Geumbong | 35.7                    | 5.8   | 28.4-42.9 | 7   | 2.56                     | 1.2   | 0.67-4.75 | 46  | 242  |

\*S.D.=Standard deviation

\*\*Number of spot analyses by electron microprobe.

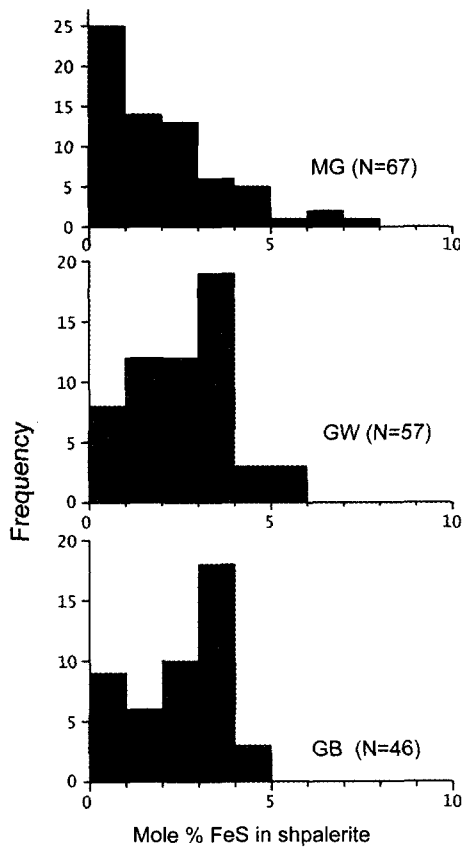


Fig. 7. Histograms showing the FeS contents (mole %) of sphalerite. MG; Mugeug, GW; Geumwang and GB; Geumbong

과 같다. T-fs<sub>2</sub> 관계도에 제시된 바와 같이 각 광산의 에렉트럼은 전반적으로 서로 유사한 정출환경에서 형성되었으나, 광화기에 따라 상이한 생성환경을 시사하고 있다. 즉, 금광화작용과 관련된 주 광화기의 정출온도 및 황분압은 260~220°C와 10<sup>-11.5</sup>~10<sup>-13.5</sup> atm 이고, 함은황염광물-자연은-취은석-황철석-섬아연석의 공생관계를 보이는 후기 은광화기의 정출온도 및 황분압은 200~150°C와 10<sup>-15</sup>~10<sup>-18</sup> atm 로서, 금광화기에 비하여 비교적 낮은 온도 및 황분압 조건에서 광화작용이 진행되었던 것으로 추정된다.

6. 유체포유물 연구

금봉·태극 광산 금-은광맥의 산상 및 광석광물의 공생관계를 고려하여 시료를 선정하였고, 석영과 방해석에 대한 유체포유물의 균일화온도와 염농도를 측정

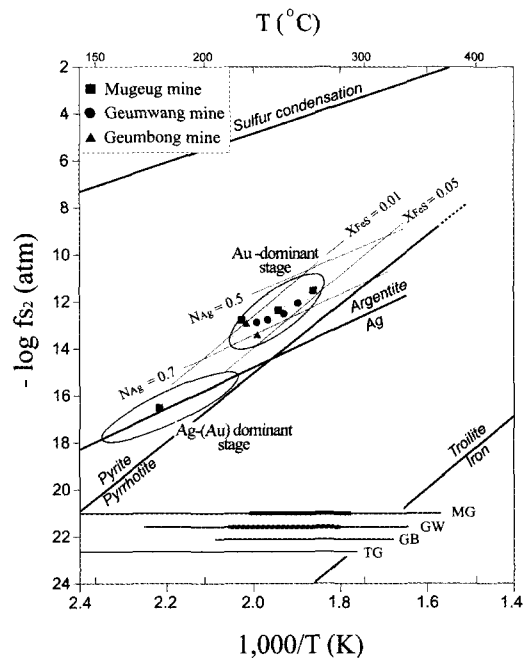


Fig. 8. Sulfur fugacity-temperature diagram showing the possible sulfur fugacity and temperature ranges. NAg: atomic fraction Ag in electrum, XFeS: mole fraction of FeS in sphalerite. Bars indicate ranges of homogenization temperatures from fluid inclusion and thicker bar represents homogenization temperatures from main mineralization in each mine. Thermochemical data were from Barton and Toulmin (1964) and Barton and Skinner (1979).

무극·금왕 광산의 기존 연구결과와 비교 검토하였다. 유체포유물에 대한 가열·냉각 실험은 Linkam Scientific Instruments의 THMS 600 Heating/Freezing stage와 Fluid Inc.의 gas-flow heating/freezing stage를 이용하였으며, 가열·냉각 실험시 정확도를 높이기 위해서 Haynes(1985)의 반복냉각실험법(repeated freezing technique)을 적용하였다. 가열실험에서 측정되는 균일화온도의 측정오차는 ±1.0°C이다. 유체포유물의 유형은 상온에서 관찰된 상관계와 가열실험시 상변화에 따라 구분되었다. 대부분의 유체포유물은 액상이 >60 vol. %으로 우세하여 가열실험시 액상으로 균일화된다. 정동의 일부 석영결정에서는 LCO<sub>2</sub>를 갖는 유체포유물도 간혹 관찰되지만, 크기가 <5 μm로 측정이 불가능하였다.

유체포유물의 균일화온도는 금봉광산에서 317~204°C와 태극광산에서 292~161°C로서 두 광산은 대부분 <300°C(주 온도범위: 240~170°C)의 비교적 낮은 온도분포를 보이며(Fig. 9), 염 농도는 금봉광산에서



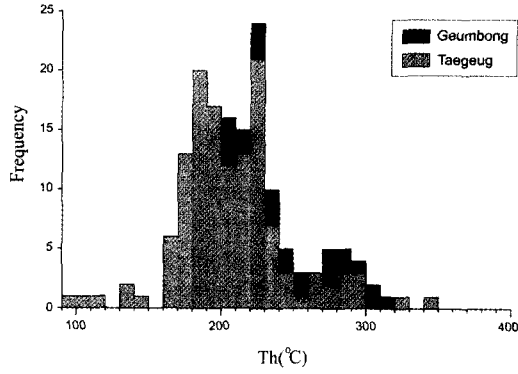


Fig. 9. Frequency histogram of total homogenization temperatures (Th) for fluid inclusions in quartz from Mugeug mineralized area.

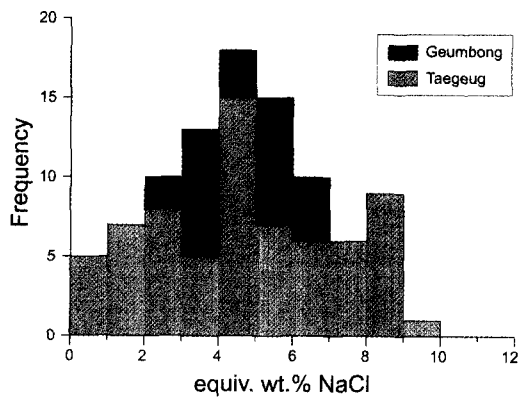


Fig. 10. Frequency histogram of salinity (equiv. wt. % NaCl) for fluid inclusions from Mugeug mineralized area.

7.6~3.2 equiv. wt. % NaCl과 태극광산에서 8.7~0.2 equiv. wt. % NaCl로서 역시 전반적으로 낮은 염농도의 수치를 보인다(Fig. 10). 이러한 유체포유물의 균일화 온도는 에렉트럼-섬아연석의 지질온도계에서 추정된 온도범위와 다소 높은 경향을 보이지만, 전반적으로 잘 일치하고 있다(Fig. 8). 또한, 무극광산 삼형제맥 석영 내 유체포유물의 균일화온도 범위를 각각 368°~137°C(주 온도범위: 260~220°C)로, 염농도는 0.8~7.9 equiv. wt. % NaCl로 보고하였으며(김규한 등, 1990; 박희인과 강성준, 1988), 에렉트럼이 주로 정출된 주 광화기의 염농도가 광화 후기보다 비교적 높은 경향을 보이고 있다. Sugaki *et al.*(1986)은 금왕광산 석영 내 유체포유물의 균일화온도 범위를 341~171°C(평균값: 243°C)로, 금-은광화작용과 관련된 석영의 균일화온도를 310~183°C(평균값: 240°C)으로 기재한 바 있다. 이와같이 무극 광화대의 모든 광산들이 전반적으로 서

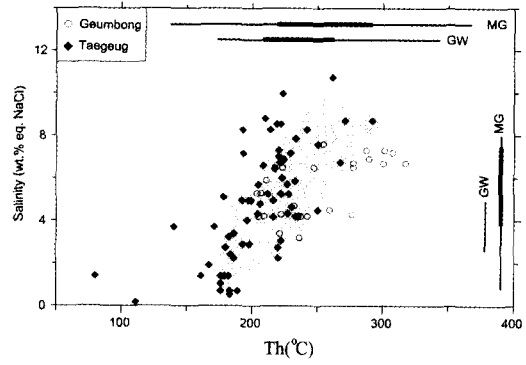


Fig. 11. Plot of homogenization temperature (Th) versus salinity (equiv. wt. % NaCl) for fluid inclusions from Mugeug area. Bars indicate ranges of homogenization temperatures and salinity from Mugeug and Geumbong mine and thicker bar indicates homogenization temperatures and salinity from main mineralization in each mine.

로 유사한 균일화온도 범위(300~200°C)를 보이지만, 특히 태극광산에서 상대적으로 낮은 온도 및 염농도의 특징을 나타내고 있다.

Fig. 11에 제시된 바와 같이 금봉·태극 광산에서 균일화온도와 염농도와의 상관관계를 통한 주요 광화용액의 진화과정은 광화 초기 옥수질 석영의 산출근거에 따라 저온성 유체로부터의 정출 가능성을 시사하고 있으며, 주 광화기의 열수는 고온·고염농도(300°~220°C, 1~9 equiv. wt. % NaCl)의 조성특징을 보이지만 광화 말기에 다시 상대적으로 저온·저염농도(<230°C, 2<3 equiv. wt. % NaCl)의 열수로 변화하는 경향을 보이고 있다. 이와 같이 염농도와 온도가 동시에 감소하는 광화유체의 진화경향은 서로 다른 조성의 두 가지 유체의 혼합작용에 기인하며, 특히 유체 압력이 약화된 광화 말기는 지표수의 혼입양이 현저하게 증가함으로써 상이한 조성의 열수(150°C, <1 equiv. wt. % NaCl)로 변화된다. 또한, 각 광산의 유체포유물 연구결과로 미루어 광화대 최남단에 위치한 태극광산이 열수계 중심부에서 가장 원거리에 위치할 경우, 마그마의 관입규모에 따라 지하 온도구배의 차이는 열수계의 순환범위를 한정하고 있으므로 외각부에서는 구조적 약선대를 통한 다량의 지표수의 혼입과 함께 상대적으로 낮은 온도범위에서 광화작용이 유도된다.

### 7. 산소·수소 동위원소 연구

무극 광화대에서 금-은광화작용을 야기한 열수유체의 기원과 진화과정을 규명하기 위하여, 북측 무극광

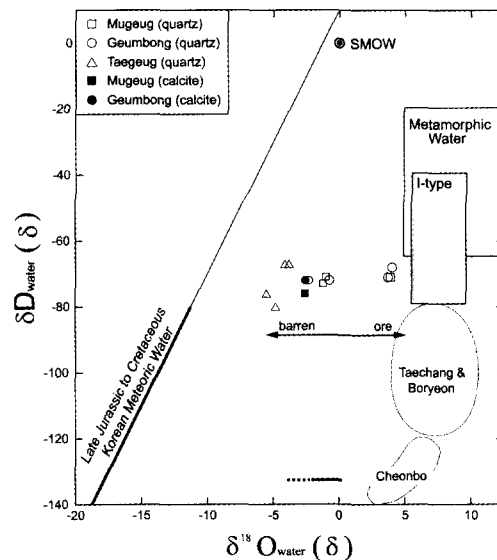
**Table 4.** Oxygen and hydrogen isotope data for various minerals and inclusion fluids from the Mugeug mineralized district.

| Mine     | Sample no. | Mineral  | $\delta^{18}\text{O}$<br>(‰) | $\delta^{18}\text{O}$ (‰)* |       |       | $\delta\text{D}$<br>(‰) | $\delta^{13}\text{C}$<br>(‰) | Remark   |
|----------|------------|----------|------------------------------|----------------------------|-------|-------|-------------------------|------------------------------|--|
|          |            |          |                              | 200°C                      | 250°C | 300°C |                         |                              |  |
| Mugeug   | M85012-5-A | quartz   | 7.7                          | -4.0                       | -1.2  | 0.8   | -73                     |                              | pyrite-rich sulfide band                             |
|          | M85012-5-B | quartz   | 7.9                          | -3.8                       | -1.0  | 1.0   | -71                     |                              | pyrite-rich sulfide band                             |
|          | M8607-5-X  | quartz   | 12.7                         | 1.0                        | 3.8   | 5.8   | -71                     |                              | electrum-rich sulfide band                           |
|          | M8607-2    | calcite* | 6.9                          | -2.6                       |       |       | -76                     | -4.7                         | calcite vein   |
| Geumbong | 99GP7      | quartz   | 8.2                          | -3.5                       | -0.7  | 1.3   | -72                     |                              | quartz vein, Au;13.0 g/t, Ag;11.0 g/t                |
|          | 99GP7-33   | quartz   | 12.9                         | 1.2                        | 4.0   | 6.0   | -68                     |                              | chalcedonic quartz veinlet, Au;11.0 g/t, Ag;89.0 g/t |
|          | E8509-2    | quartz   | 6.5                          | -5.2                       | -2.4  | -0.4  | -72                     |                              | barren quartz vein                                   |
|          | E8509-3    | quartz   | 12.6                         | 0.9                        | 3.7   | 5.7   | -71                     |                              | Ag sulfosalts-rich band                              |
|          | 99GP6-14-2 | calcite* | 6.9                          | -2.6                       |       |       | -72                     | -5.1                         | calcite vein   |
| Taeguug  | TG9810-7-1 | quartz   | 3.4                          | -8.3                       | -5.5  | -3.5  | -76                     |                              | massive quartz vein in outcrop                       |
|          | TG9810-7-2 | quartz   | 4.1                          | -7.6                       | -4.8  | -2.8  | -80                     |                              | vug quartz   |
|          | 98TG1      | quartz   | 5.1                          | -6.6                       | -3.8  | -1.8  | -67                     |                              | barren quartz vein                                   |
|          | 98TG5      | quartz   | 4.8                          | -6.9                       | -4.1  | -2.1  | -67                     |                              | quartz veinlet, Au; 0.3 g/t, Ag; 2.7 g/t             |

\*Calculated using oxygen isotope fractionation factors: for quartz-water at 200°C, 250°C, and 300°C, Matsuhisa *et al.* (1979) and for calcite-water at 200°C, Friedman and O'Neil (1977)

산과 남측 금붕광산, 최남단 태극광산의 합금-은 석영 맥에서 채취된 석영 및 방해석의 산소 동위원소분석과 유체포유물의 수소 동위원소분석을 실시하였다. 산소 및 수소 동위원소 분석시 사용된 표준시료는 Vienna SMOW이며, 분석오차의 범위는 산소  $\pm 0.1\%$ 이고 수소  $\pm 1\%$ 이다. 또한, 산소 동위원소의 분석결과는 유체 포유물에서 제시된 측정자료에 따라 석영은 300°C와 250°C, 방해석은 200°C 온도 조건에서 동위원소적 평형을 가정, Matsuhisa *et al.*(1979)와 Friedman and O'Neil(1977)의 분별식에 적용 광화유체에 대한 산소 동위원소비를 검토하였다.

무극 광화대에서 맥상 석영에 포획된 광화유체의 산소 동위원소비( $\delta^{18}\text{O}$ )는 12.9~3.4‰로 비교적 폭넓게 변화하는 경향을 보여주며(Table 4), 석영과 열수에 대한 평형상태의 온도를 250°C로 가정한 열수의 산소 동위원소비 계산값은 무극광산에서 3.8~-1.2‰, 금붕광산에서 4.0~-2.6‰, 태극광산에서 -3.8~-5.5‰로서 태극광산에서 특히 지표수에 근접한 낮은 동위원소비를 보이고 있다. 반면에 수소 동위원소비는 무극광산에서 -71~-76‰, 금붕광산에서 -68~-72‰, 태극광산에서 -67~-80‰로서 광화대 전반에 걸쳐서 일정한 동위원소비를 유지하고 있다. 이는 백악기 한반도 지역에서 추정된 천수(paleometeoric waters)의 수소 동위원소비와도 서로 일치하고 있다(Shelton *et al.*, 1988). 탄소의 동위원소비는 김규한 등의(1990) 연구결과와 일치하며 -4.7~-5.7‰로서 삼부기원의 탄소로 해석된다.



**Fig. 12.**  $\text{D}_{\text{water}}$  and  $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$  of fluids derived from analyses of fluid inclusions of Mugeug area. Note the  $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$  values is plotted outside the primary magmatic water box and show trend to approach the late Jurassic to Cretaceous Korean meteoric water line. Note the lower  $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$  values and scattered ranges of ore fluids from the Mugeug area in contrast to the higher  $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$  values and the lower  $\text{D}_{\text{water}}$  values and clustering trend in the Jurassic gold-silver deposits (Taechang, Boryeon, Cheonbo mine). The larger symbols means the isotope value associated with ore mineralization. The solid horizontal bar represents  $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$  values of gold-silver mineralization stage and the dashed bar indicates  $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$  values of barren stage in Mugeug mine from Kim *et al.* (1990).

무극 광화대의 무극·금봉·태극 광산에서 석영의 동위원소비를 종합적으로 비교한 결과 광화유체의 시·공간적 진화과정은 다음과 같다. 금-은광화작용과 관련된 광화유체는 주로 마그마 기원의 물이라기보다는 천수에서 유래한 순환수(less-evolved meteoric water)로 추정되며, 각 광산별 산소 동위원소비의 현저한 차이는 천수의 유입량과 흑운모 화강암간의 반응 정도에 따른 산소 편이현상(O-shift)으로 해석된다(Fig. 12). 무극 광산에서 추정된 금-은광화기의 광화유체에 대한 산소 동위원소비는 광화 초기 및 광화 말기에 비하여 천수 혼입량의 감소에 따라  $\delta^{18}\text{O}$ 가 증가하는 것으로 보고된 바 있다(김규한 등, 1990). 즉, 구조적 약선대를 통하여 유입된 천수는 지표부근까지 관입한 마그마의 열 에너지에 의해서 흑운모 화강암과의 동위원소 교환반응에 따라 마그마수와 함께 초기 열수(less-evolved meteoric water)를 형성하였고, 광화 증기는 장기간에 걸친 동위원소 교환반응의 지속적인 결과로 초기 유체에 비하여  $\delta^{18}\text{O}$ 의 증가와 함께 상대적으로 진화된 순환수(highly-evolved meteoric water)로 변화되며, 금-은광물의 정출과 밀접한 연관성을 보인다. 광화 말기에는 마그마의 열에너지가 점차 감소하여 비교적 낮은 온도의 지온 구배가 형성됨에 따라 천수의 유입이 용이하게 유도됨으로써 광화유체의 동위원소 특성은 다시  $^{18}\text{O}$ 의 결핍현상을 보여주고 있다.

## 8. 토의 및 결론

경기 지괴내에 위치한 무극 광화대는 국내 최대규모의 광화대로서 인리형 분지인 백악기 음성퇴적분지를 따라 흑운모 화강암을 모암으로 하여 후기 약선대인 N10°W~N20°W방향의 열극을 따라 배태된 전형적인 금-은혼합형 광상으로 삼십 여개 석영맥이 분포하며, 지금까지 무극·금왕 광산에서 순금 20 t과 순은 75t이 생산되었다. 이러한 생산량 및 광석품위자료에 근거한 광화대 전반에 걸친 금-은비의 분포특성은 북측 무극 광산으로부터 최남단의 태극광산으로 갈수록 금-은비의 감소경향과 함께 심도증가에 따라 하부 광체에서 금-은비가 증가하는 수직적 변화를 보이고 있으며, 이러한 분포양상은 광물-지화학적 대상분포로 해석할 수 있다.

무극 광화대에서 석영맥은 수 차에 걸쳐 반복상승한 광화유체로부터 형성된 복성 맥의 산상과 함께 호상·빛살·각력상 구조, 재결정(ghost-sphere, flamboyant, feathery)·정동조직, 옥수질 석영이 공통적으로 관찰

된다. 또한, 맥의 산상은 광화대 북측에서 주로 복성 맥으로 배태되지만, 광화대 남측에서는 전반적으로 복성 맥에서 단성 맥 또는 망상 세맥으로 변화하며 맥 폭은 현저하게 감소하는 경향과 함께 옥수질 석영 및 방해석 세맥의 산출 빈도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히, 태극광산에서는 격자조직인 판상 방해석(bladed calcite)이 미립의 석영으로 교대되며(Fig. 2B), 이러한 특징은 저온성 광화유체(<200°C)의 CO<sub>2</sub>비등작용과 천수의 다량 유입에 기인한 현상으로 설명된다. 수 차에 걸친 금-은광화작용에서 금광화기인 광화 증기는 에렉트립, 황철석, 삼아연석, 방연석, 휘은석, 유비철석, 황동석 등과 밀접한 공생관계를 보이고, 광화 말기는 은광화기로서 비철금속의 황화광물 이외에 다량의 인티몬황염광물인 Ag-Sb-S계 광물(pyrrargyrite, miargyrite, stephanite), Cu-Ag-Sb-S계 광물(polybasite, pearceite, Ag-bearing tetrahedrite), Pb-Ag-Sb-S계 광물(diaphorite), 휘은석, 자연은, 스텐버자이트와 함께 에렉트립이 소량 수반되는 특징을 보인다. 이러한 광석광물의 산출빈도는 각 광산에서 광맥에 따라 다소 차이는 있지만 무극 광산에서는 에렉트립이, 금왕·금봉 광산에서는 함은황염광물이 각각 우세하게 산출되는 경향을 보이며, 특히 태극광산에서만 휘은석이 유일하게 산출되고 있다(Table 1). 태극광산의 광화작용은 이러한 맥의 산상 및 광물공생관계를 통하여 북쪽에 위치한 타 광산과 비교하여 상대적으로 낮은 온도환경에서 진행된 것으로 추정된다. 즉, 무극 광화대의 금-은광화작용은 공간적 측면에서 현저한 금-은비(에렉트립과 함은황염광물간 상대적 양비)의 변화뿐만 아니라 정출시기에 따른 상이한 광석광물의 공생관계를 보이고 있으며, 이는 광화유체의 온도차이를 반영한 물리-화학적 생성환경의 변화로서 금-은광물의 선택적 침전작용에 기인한다.

금-은광화작용은 광화 초기에는 상대적으로 낮은 온도의 광화유체로부터 광화작용이 시작되었으나, 주 광화기에는 흑운모 화강암과의 지속적인 동위원소교환반응에 따라 산소 동위원소비는 점차 증가하며 상대적으로 고온-고염농도(320~220°C, 1~9 equiv. wt. % NaCl)의 진화된 순환수로 변화되며 주로 비철금속의 황화광물과 에렉트립이 260~220°C의 정출온도와 황분압 10<sup>-11.5</sup>~10<sup>-13.5</sup> atm의 환경조건에서 침전된 것으로 사료된다. 광화 말기에는 저온·저염농도를 갖는 지표수의 혼입량이 점차 증가함으로써 광화유체의 염농도와 온도가 동시에 감소하며, 200~150°C 정출온도와 황분압 10<sup>-15</sup>~10<sup>-18</sup> atm의 환경조건에서 함은광물이 정출

되고 열수는 약 150°C의 온도범위까지 진행된 것으로 사료된다.

태극·금봉·무극 광산의 종합적 연구결과를 통하여 광화유체의 각 광산별 동위원소는 지표수와 순환수의 혼합비와 물/암석 반응비에 따른 산소 편이현상으로 해석되며 광화유체의 시·공간적 변화과정은 다음과 같다. 태극광산에서  $^{18}\text{O}$ 결핍 현상이 가장 현저하며, 이는 공간적으로 본 광화대 최남단 외각에 위치한 태극광산이 초기 열수계의 열적 중심에서 가장 멀리 위치하여 상대적으로 천수의 유입량이 많았던 것으로 추정된다. 특히, 금봉·태극 광산의 노두 및 시추시료에서 확인된 카올린 광물과 판상 탄산염광물의 존재는 광범위한 지역에 걸쳐 천부환경에서 저온성 광화유체 (<200°C)의  $\text{CO}_2$  비동작용으로부터 야기된 산성 유체 (pH=4~5)로의 진화과정을 추정할 수 있다. 또한, 유체 포유물 연구결과에 의하면 균질화온도 범위는 320°C에서 160°C로서 주 광화기에는 미약하게 온도가 감소하는 경향을 보이지만, 말기에는 광화유체는 천수의 유입에 따라  $\text{CO}_2$  비동작용과 함께 온도 및 염농도가 동시에 감소하는 진화 경향을 보인다.

무극 광화대 태극·금봉·금왕·무극 광산의 금-은 광화작용은 광석광물, 이차변질광물 및 열수변질대의 산상, 유체포유물 및 동위원소 연구를 종합적으로 검토한 결과 지표수의 다량 유입이 가능한 천부 지질환경에서 진행되었음을 시사하며, 성인적으로 인리형 분지의 형성과 관련된 저유황형 천열수 광상(low-sulfidation epithermal deposit)으로 해석된다.

**성인 및 탐사 모델** : 중생대 금-은광화작용에서 중부지역의 금-은광상은 대다수 주라기 조산운동과 관련된 심부기원의 금단일형 광상으로 대보 심성암체가 관계 화성암으로 보고된 바 있으나, 무극 광화대의 생성시기는 K-Ar 연대측정결과  $106 \pm 5$ 와  $98 \pm 2$  Ma로서 백악기에 걸친 좌수향 주향이동 단층운동에 의해서 형성된 인리형 분지인 음성퇴적분지의 발달과 밀접한 연관성을 갖고 있다. 이러한 인리형 분지의 형성과정은 공간적 측면에서 유체의 이동이 가능한 구조적 약선대의 발달과 마그마의 관입이 용이한 지질학적 특성을 갖고 있어 열수계의 형성과 밀접한 연관성을 갖고 있다. 무극 열수계에서 광화대 전반에 걸친 금-은비의 분포양상은 금-은광물의 정출 메커니즘과 관련된 유체의 온도 및 조성, 물/암석 반응비, 압력 등의 변화에 좌우되며, 열수변질대는 이러한 광화유체의 시·공간적 진화과정을 직접 반영하고 있다. 무극 지역에서 열수변질대의 분포특성은 북측 광

화대에서 견운모화작용·녹니석화작용·녹염석화작용이 우세하게 발달하지만, 남측 광화대에서 진행된 견운모화작용·녹니석화작용·녹염석화작용 이외에 캐올린화작용·규화작용·탄산염화작용·스펙타이트화작용은 비교적 낮은 온도에서 형성된 열수변질작용으로 추정된다. 금-은광화작용과 밀접하게 관련된 부광대의 열수변질대에서 분대의 배열특징은 석영맥→견운모대→아견운모대→프로필리틱대→아프로필리틱대의 순서로 나타내지만, 빈광대에서는 석영맥→아견운모대→프로필리틱대→아프로필리틱대로 구성되며 아견운모대 및 견운모대의 존재가 극히 미약하게 배태된다.

무극 광화대에서 각 광산의 유체포유물 및 동위원소 연구결과에 근거한 광화유체의 시·공간적 진화과정은 금-은광화작용시 열적 중심으로부터 공간적 관계와 밀접한 연관성을 갖고 있다. 무극 열수계의 광화유체는 대부분 지표수 기원에서 유래한 순환수로서 각 광산별 산소 동위원소비의 차이는 지표수의 유입 이후 물/암석 반응비에 따른 산소 편이현상으로 해석된다. 무극광화대에서 초기 광화유체는 지표수의 유입으로부터 흑운모 화강암과의 동위원소적 교환반응의 정도에 따라 진화된 순환수로 변화됨으로써 열수계가 형성되었다. 즉, 무극광산은 열적 중심부에 위치하여 고온의 지온 구배가 형성되고 광화유체는 전반적으로 높은 물-암석 반응비에 기인한 견운모 변질작용과 함께  $^{18}\text{O}$ 부가현상이 우세하게 진행되지만, 태극광산은 광화대 최남단의 외각 지역으로 열적 중심에서 가장 먼 곳에 위치함으로써 상대적으로 낮은 지온 구배가 유지되고 지표수의 유입이 용이하여  $^{18}\text{O}$ 결핍 현상과 함께 저온·저염농도의 광화유체의 특징을 보이며 낮은 물-암석 반응비에 기인한 프로필릭 변질작용이 우세하게 진행된 것으로 추정된다. 이러한 사실은 마그마가 유입된 열적 중심을 무극광산 부근으로 추정할 수 있다. 또한, 함금-은광맥 간에서 금-은비의 차이는 광화작용의 열적 중심으로부터 수평·수직적 거리와 밀접한 연관성을 갖고 있으며, 이러한 분포양상은 열수계의 진화과정시 유체간 혼합과정(fluid mixing)에 따른 광화유체의 희석작용(dilution)과 온도 감소에 기인하여 금-은광물의 상이한 정출 환경이 유도된 것으로 설명될 수 있다. 즉, 광산의 생성기구와 분포특성간의 관계는 성인적 관점뿐만 아니라 탐사 측면에서도 매우 중요한 의미를 시사하고 있으며, 향후 광역·정밀탐사모델의 정립 및 지침설정에 필요한 자료로 활용될 수 있다.

## 사 사

이 연구는 산업자원부 에너지관리공단 자원탐사사업 중 “한국형 금-은광상의 효율적 탐사를 위한 성인 모델 연구(H0261500)”와 교육부 BK21사업의 부분지원에 의해 수행되어 이에 깊은 사의를 드리며, EPMA분석을 도와준 고려대학교 전략광물자원 연구센터의 최인식 석사와 김창성 석사에게 감사를 드린다.

## 참고문헌

- 권병수, 왕규택, 박명호, 황해걸, 김준호, 정영부, 정동화, 문영환, 강홍석, 강백규, 김성석, (1987) 한국의 광상, 대한광업진흥공사, 10호, 324 p.
- 김규한, 김옥준, 장원선 (1990) 무극 금은 광상에 대한 유체포유물 및 안정동위원소 분석연구. 자원환경지질, 23권, p. 1-9.
- 김옥준 (1971) 남한의 초기 화강암류의 관입시기와 지각 변동. 광산지질, 4권, p. 1-10.
- 김성수, 진정주 (1973) 한국의 광상, 대한광업진흥공사, 5호, 106 p.
- 박노영, 최선규, 박성원 (1986) 충청도 일원의 금은광상에 대한 성인연구. 금속광상조사연구, 86-10, 한국동력자원연구소, p. 387-435.
- 박희인, 강성준 (1988) 무극광산 삼형제맥의 금은광화작용. 광산지질, 21권, p. 257-268.
- 박희인, 장호완, 진명식 (1988) 한반도중부지역의 광상생성기와 생성구: 경기육괴내의 광상생성연대. 광산지질, 21권, p. 349-358.
- 신양우, 서규식 (1987) 무극광산의 탐사와 개발현황. 20권, p. 261-271.
- 최선규, 박노영, 박성원 (1986) 충청도 동북부 태창,보련,금왕 광산의 금은광화작용. 광산지질, 19권, p. 193-206.
- 최선규, 박상준, 최상훈, 신흥자 (2001) 한국 중생대 화강암류와 이에 수반된 금은광화작용. 자원환경지질 34권, p. 25-38.
- Barton P.B. Jr., Skinner B.J. (1979) Sulfide mineral stabilities. HL. Barnes. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. 2nd ed, Wiley-Interscience. New York. 278-403.
- Barton, P.B., Jr., and Toulmin, P. (1964) The electrom-tarnish method for the determination of the fugacity of sulfur in laboratory sulfide systems. Geochim. Cosmochim. Acta., v. 28, p. 619-640.
- 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: KK1-KK12.
- Haynes, F.M. (1985) Determination of fluid inclusion compositions by sequential freezing. Econ. Geol., v. 80, p. 1436-1439.
- 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.
- 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., v. 83, p. 1221-1237.
- Shelton, K.L., So, C.S., Haeussler, G.T., Chi, S.J. and Lee, K.Y. (1990) Geochemical studies of the Tongyoung gold-silver deposits, Republic of Korea: Evidence of meteoric water dominance in a Te-bearing Epithermal system. Econ. Geol., v. 85, p. 1114-1132.
- Shikazono, N. (1985) A comparison of temperatures estimated from electrum-sphalerite-pyrite-argentite-assembly and filling temperatures of fluid inclusions from epithermal Au-Ag vein deposits in Japan. Econ. Geol., v. 80, p. 1415-1424.
- Shikazono, N. (1986) Ag/Au total production ratio and Au-Ag minerals from vein-type and disseminated-type deposits in Japan. Mining Geol., v. 36, p. 411-424.
- Shikazono, N. and Shimizu, M. (1987) The Ag/Au ratio of native gold and electrum and geochemical environment of gold vein deposits in Japan. Mineralium Deposita, v. 22, p. 309-314.
- 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.
- So, C.S. and Shelton K.L. (1987) 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.
- Sugaki, A., Kim, O.J. and Kim, W.J. (1986) Gold and silver ores from Geumwang mine in South Korea and their mineralization. Mining Geol., v. 36, p. 555-572.

2001년 9월 14일 원고접수, 2001년 10월 23일 게재승인.