

무극 지역 천열수 광상 열수변질대의 성인적 의미

The Genetic Implication of Hydrothermal Alteration of Epithermal Deposits from the Mugeuk Area

박 상 준 (Sang Joon Pak) · 최 선 규 (Seon-Gyu Choi)* · 이 동 은 (Dong-Eun Lee)

고려대학교 지구환경과학과

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

요약: 인리형 분지인 백악기 음성분지와 단층 접촉하는 무극 광화대는 백악기 흑운모 화강암을 모암으로 하여 배태된 금·은광상들로 구성된다. 무극 광화대내 금·은광상들은 북측의 무극광산으로부터 남측의 태극광산까지 서로 다른 금·은 품위비, 광석광물의 종류 및 산출 빈도 등을 보이며 열수변질대 분포 특성에 있어서도 상이한 공간적 분포특성을 보인다. 비교적 높은 금·은 품위비를 보이는 금봉광산은 복성맥의 구조를 보이며 석영맥으로부터 견운모대 → 아견운모대 → 프로필리틱대 → 아프로필리틱대의 열수변질대가 수평적으로 발달하는 특징을 보인다. 광화대 최남단에 위치하는 태극광산은 상대적으로 낮은 금·은비를 보이며 망상 세맥을 중심으로 프로필리틱대 → 아프로필리틱대의 순서로 열수변질대가 발달한다. 열수변질대의 수직적 변화는 대체로 변질대 하부에서 견운모대가 우세하나, 상부에서는 프로필리틱대가 광범위하게 분포하며, 점토대가 불연속적으로 중첩되는 특징을 보인다. 이러한 열수변질대의 상이한 수평·수직적 분포 특성은 각 광산의 열수계의 차이를 반영한 것으로, 금봉광산은 비교적 고온·고염도와 물-암석 상호반응이 진행된 광화 유체로부터 견운모대가 형성되었으며, 태극광산은 상대적으로 저온·저염도와 물-암석 상호반응이 미약한 광화 유체에 의하여 프로필리틱대가 형성된 것으로 해석된다. 이런 열수계의 차이는 각 광산이 열수계의 열적 중심(무극광산)에 위치하는지 또는 외각부(태극광산)에 위치하는지에 따라 열수변질대 분포 양상과 금·은비 분포 양상의 차이를 유도한다. 따라서 무극 지역 탐사시 열적 중심부에 해당하는 고온의 지온 구배가 형성되는 지역과 물-암석 상호반응에 의한 견운모 변질작용이 우세한 지역을 고품위대 탐사 지점으로 제시할 수 있다.

주요어: 무극 광화대, 열수변질대, 금·은광화작용, 광화 유체, 열수계

ABSTRACT: The Mugeuk mineralized area that associated with the pull-apart type Cretaceous Eumseong basin is composed of several gold-silver vein deposits that are emplaced in late Cretaceous biotite granite. The gold-silver deposits in the area show various hydrothermal alteration zones as well as Au/Ag ratios and ore mineralogy. The Geumbong mine showing relatively high gold fineness is composed of multiple veins and show alteration pattern; vein → phyllic → subphyllic → propylitic → subpropylitic zone. In contrast, The Taegeuk mines show the low fineness values, in far southern part

*교신저자: seongyu@korea.ac.kr

are characterized by increasing tendency of simple and/or stockwork veins. The deposit displays alteration pattern; vein → propylitic → subpropylitic zone. Variations of alteration zone with depth show that phyllic zone are dominant in deeper level and propylitic zone sporadically overlapped by argillic zone are dominant in shallow level. The differences of alteration pattern between the gold-silver deposits are reflect the evolution of the hydrothermal fluids; the ore-forming fluids of the Geumbong mine are at relatively high temperature and salinity and highly-evolved meteoric water, developing phyllic zone, the Taegeuk mine containing greater amounts of less-evolved meteoric waters shows relatively low temperature and salinity in ore-forming fluids, developing propylitic zone. The various physicochemical environment for gold-silver mineralization in the Mugeuk mineralized area is due to proximity from heat source area (Mugeuk mine) to marginal area (Taegeuk mine) in a geothermal field. Therefore, it is suggested that the criteria for project exploration in the area are to focus on the area proximal to heat source and phyllic zone.

Key words : Mugeuk mineralized area, hydrothermal alteration, gold-silver mineralization, ore-forming fluids, hydrothermal systems

서 언

한국 열수광맥형 금·은광상은 지체구조상 선캠브리아이언의 경기 및 영남 지괴, 고생대의 태백산 퇴적분지와 쥬라기 대보 심성암체 그리고 백악기 경상 퇴적암 및 불국사 반심성암-화산암에 이르기까지 다양한 모암에 배태되는 특징을 보인다(최선규 외, 2001A). 이러한 열수광맥형 금·은광상은 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 외, 2001A; So et al., 1987; Shelton et al., 1988), 무극 광화대의 금·은광상들은 인리형 분지인 백악기 음성 퇴적분지의 발달에 기인한 불국사 화성활동과 밀접한 연관성을 갖고 천부기원의 특성을 보여 광상학적 측면에서 중요한 의미를 갖는다. 무극 지역 광맥들은 다양한 금·은비를 갖는 금·은혼합형 광상으로 북측으로부터 남측으로 수 km에 걸쳐 약 30여 개 광상 광체가 평행하게 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. 무극 지역은 무극광산에서 순금 18.6톤, 순은 57.3톤과 금왕광산에서 순금 1.0톤, 순은 16.0톤의 생산실적이 각각 보고 된 바 있는 국내 최대규모의 금·은광화대이다. 지금까지 무극 광화대의 연구

는 무극광산과 금왕광산 등에 대한 개별광산 단위의 생성환경에 관한 연구가 주로 수행되었으며(신양우와 서규식, 1987; 박희인과 강성준, 1988; 김규한 외, 1990; 최선규 외, 1986; Sugaki et al., 1986). 무극 광화대 전반에 걸친 광화작용의 성인 연구는 최근에 수행되었다(최선규 외, 2001B). 본 연구에서는 무극 광화대 전반에 걸친 광상의 열수변질대 시·공간적 분포 특성과 금·은광화작용의 상관관계를 설정하고 이에 따른 미개발 광맥의 탐사 지침을 설정하는데 그 목적을 두고 있다.

지질 및 광상 개요

무극 광화대를 포함하는 중부지역의 광역 지질은 선캠브리아이언의 경기지괴에 속하는 고기 변성암류와 고생대 옥천대의 변성암류가 광범위하게 분포하고 있으며, 후기에 상기 암석군을 관입하는 쥬라기 대보 화성암체와 백악기 퇴적암류 및 화산암체로 구성되어 있다. 대보 화성암체의 저반은 북동 방향에서 남서 방향을 따라 약 300 km 연장과 약 40 km 폭으로 대상 분포하고 있으며, 저반인 편마암류를 관입하며, 백악기 퇴적암류와는 단층으로 접촉하고 있다. 중부지역의 금광상은 주로 경기지괴의 변성암류와 쥬라기 화성암체의 접촉부를 따라 광범위하게 분포하고 있으며, 대부분 대보 조산운동과 관련된 심부기원의 금단일형 광상으로 보고 된 바 있다(최선규 외, 2001A; So et al., 1987; Shelton et al., 1988).

무극 광화대는 경기지괴내에 발달한 NNE방향

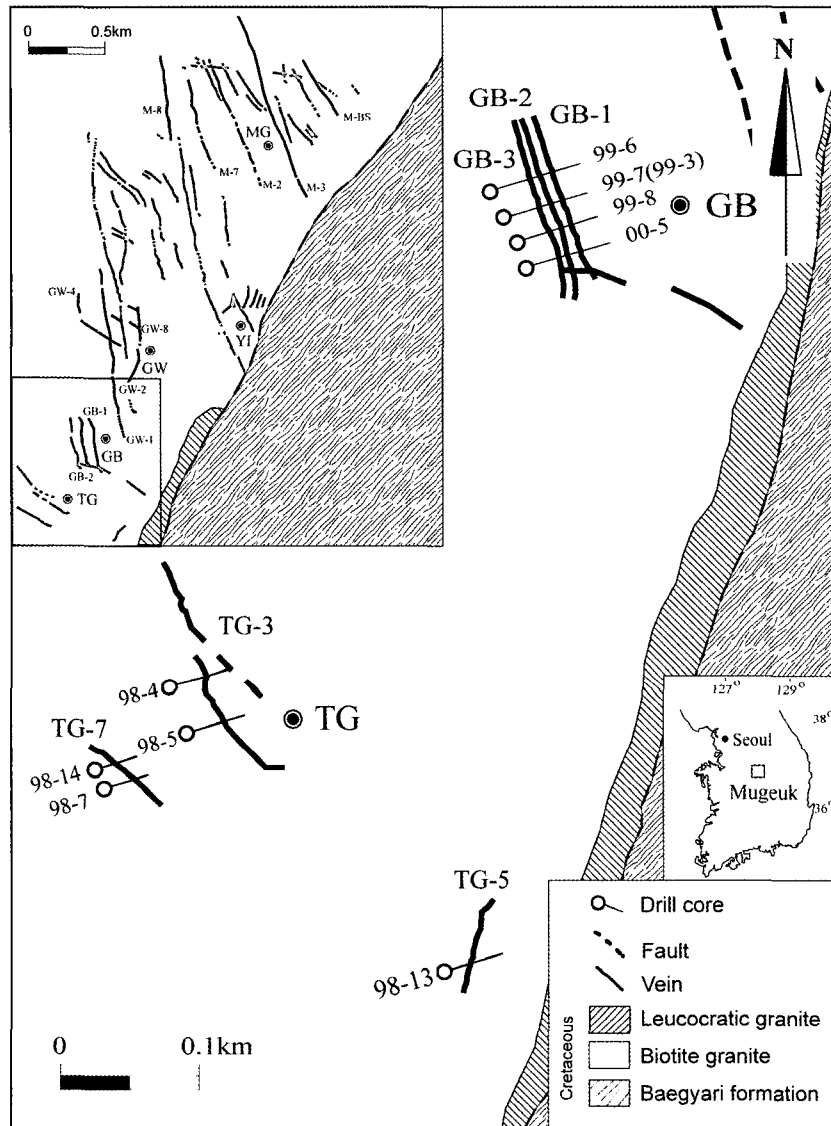


Fig. 1. General geological map of the Mugeuk mineralized district. MG = Mugeuk mine, YI = Yuil mine, GW = Geumwang mine, GB = Geumbong mine, TG = Taeguk mine. Black colored line indicates productive gold-silver vein and their vein number.

의 좌수향 주향이동단층운동에 의해서 형성된 인리형 분지인 음성 퇴적분지를 따라 배태되며, 백악기 경상누층군중 신동층군에 대비되는 하부 초평층과 상부 백야리층과 백악기 화산암체로 구성된다(Fig. 1). 백악기 화산암체는 퇴적분지와 기반암과의 경계선인 단층선을 따라 관입하고 있으며, 주로 분지의 남서측과 남동부에만 국한되어

분포한다. 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 시주시료에서도 암맥상으로 산출된다.

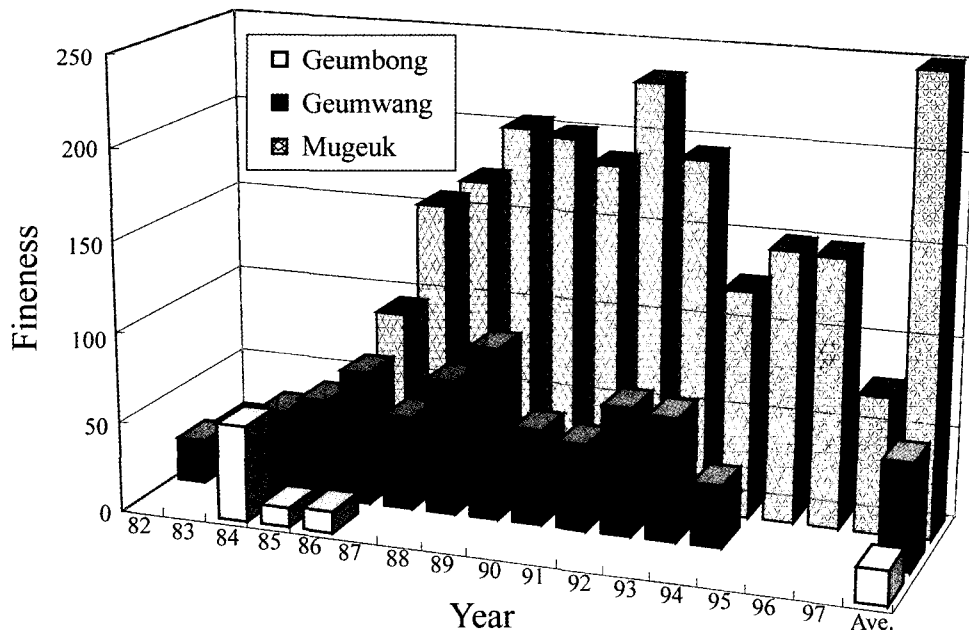


Fig. 2. Histograms of comparative annual production for individual gold-silver deposits from the Mugeuk mineralized area.

상기 두 암석은 모두 석영맥을 중심으로 다양한 이차 변질 광물의 열수변질대가 광범위하게 분포하고 있다. 안산암질 암맥은 무극·태극광산의 향내에서 간혹 관찰되지만, 석영맥에 의해서 절단된다. 무극광산 주변에 분포하는 흑운모 화강암은 칼리장석의 K-Ar 연대측정결과 112 Ma로 기재된 바 있으며(김옥준, 1971), 합금·은 석영맥 주변에 발달한 열수변질대의 견운모는 K-Ar 연대측정결과 106±5와 98±2 Ma로서 백악기 불국사 화성활동과 관련성을 시사하고 있다(Shimazaki *et al.*, 1986; 박희인 외, 1988).

무극 광화대의 금·은광상은 지금까지 북측 무극광산에서 금왕광산까지 약 10여 개조 합금·은석영맥을 중심으로 개발되었으며, 현재 남측 유일광산, 금봉광산, 태극광산이 탐사 개발 중에 있다. 무극 광화대내 금·은광상들의 연도별 생산량자료를 종합 비교하여 보면, 무극광산은 70년대 이전까지 주 개발대상인 2호맥에서 금 8.2톤과 은 2.2톤을 생산하였고, 연도별 생산량에 대한 금·은비[Au fineness = Au×1000/(Au+Ag)]의 변화는 306~350(평균값: 328)이다. 삼형제맥은 86년 이후부터 지하 -550 m까지 개발되어 금 10.5톤과 은 55.1톤을 생산하였고, 연도별 금·은

비 변화는 75~233(평균값: 160)이다. 반면, 광화대 남측 금왕광산에서는 82년부터 94년까지 금 1.0톤과 은 16.0톤이 생산되어, 연도별 금·은비는 24~95(평균값: 59)로서 무극광산과 비교하여 현저하게 낮은 특징을 보인다(Fig. 2). 또한, 최근 20여 년 동안 보고된 광석의 품위자료를 종합한 각 광산의 맥별 금·은비 자료를 보면, 무극광산의 2호맥(개발심도: -625 m)과 삼형제맥에 대한 광석의 금·은비와 남측 금왕광산에서 금·은비에 비교하여 금봉·태극광산에서 상부광석시료의 평균 금·은비가 전반적으로 현저하게 낮은 수치를 보이고 있는 것으로 보고되었다(최선규 외, 2001B). 이는 금왕·금봉광산에서 함은황염 광물의 산출빈도의 증가와도 서로 일치하고 있다. 또한, 금왕광산(개발심도: -500 m) 연도별 생산량의 금·은비는 개발초기인 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. 석영맥은 흑운모 화강암과 우백질 화강암을 모암으로 하여 N10~20W계 수직 열극(high-angle fissure)에 배태되는 경향을 보이며, 백야리층 내에서도 열극

의 연장 방향을 따라 석영 세맥이 확인되지만, 맥 폭은 수 cm 이하로 현저하게 감소하는 경향을 보인다. 또한 유일광산 부근에서 확인된 흑운모 화강암과 백야리층과의 단층 접촉부에서는 폭 10 m 이상의 단층 파쇄대가 분포하며, 견운모-녹니석의 열수변질대가 광범위하게 발달되고 있다. 금봉광산의 금·은광맥은 N15~20W방향의 열극을 충진한 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 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. 특히, 광화대 남단의 태극광산 합금·은석영맥에서는 옥수질 석영의 재결정 조직과 함께 탄산염광물의 교대조직인 관상 석영이 특징적으로 관찰된다. 또한, 맥석광물로는 주로 회색~유백색 또는 투명 석영, 옥수질 석영과 함께 견운모·녹니석이 산출되며, 광화대 남측에서 방해석·카올리나이트·스멕타이트의 산출빈도가 증가하고 있다.

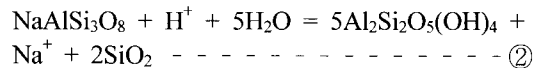
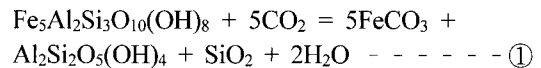
열수변질대의 특성

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 견운모화작용·녹니석화작용·녹염석화작용이 우세하지만, 남측에서는 녹염석화작용·녹니석화작용·견운모화작용·카올린화작용·규화작용·탄산염화작용·스멕타이트화작용이 확인된다. 특히, 금봉·태극 광산의 지표 및 상부 시추시료에서는 미세 균열을 따라 불규칙적으로 진행된 점토대가 확인되지만, 견운모화작용은 상대적으로 미약한 경향을 보이고 있다. 무극과 금왕 광산의 향내시료 및 금봉·태극 광산의 지표시료 및 1998~2000년도 대한광업진흥공사에서 실시한 시추시료를 대상으로 편광현미경, X-선회절분석기

및 전자현미분석기를 이용하여 열수변질광물을 동정하였다. X-선 회절분석은 고려대학교 전략광물자원 연구센터(CMR)의 MXP3A-HA(MAC SCIENCE사)기종을 사용하였다. 분석은 Cu target을 이용하여 발생하는 $K\alpha(1.54056 \text{ \AA})$ 의 X-선을 이용하였다. 가속전압 및 전류는 각각 40 kV와 30 mA이며, $4^\circ/\text{min}$ 의 주사속도로 $3\sim 65^\circ$ 의 범위에 대하여 분석하였다. 전자현미분석기(EPMA)를 이용한 정량분석은 고려대학교 전략광물자원 연구센터의 JXA-8600(JEOL Ltd.)을 사용하였으며, 가속전압 15 kV, 전류 10 nA, 빔의 직경은 $5 \mu\text{m}$ 의 조건으로 분석하였으며, Oxford eXII EDS를 이용하여 live time 100초간 측정 후 ZAF법으로 보정하였다. 열수변질대는 광물공생관계에 따라 아프로필리틱대(subpropylitic zone), 프로필리틱대(propylitic zone), 아견운모대(subphyllitic zone), 견운모대(phyllitic zone), 점토대(argillic zone)로 구분되며, 각 분대별 열수변질광물의 조합과 광물학적 특징은 다음과 같다.

점토대(argillic zone)

점토대는 무극 광화대 남측의 금봉 및 태극광산의 지표 및 상부 변질대에서 국부적으로 산출되며, 카올리나이트-녹니석-탄산염광물(-스멕타이트)의 광물조합을 보인다(Fig. 3A). 점토대는 식 ①과 같이 녹니석이 부분적으로 카올리나이트화되거나, 또는 장석류 중 식 ②와 같은 반응에 의해 주로 사장석만이 선택적으로 카올리나이트로 변질되는 특징을 보인다. 또한 일부 파쇄대에서는 스�멕타이트가 특징적으로 산출되기도 한다. XRD 분석결과 방해석과 카올리나이트가 주로 동정된다(Fig. 4A). 일부 파쇄대에서 산출되는 점토대의 스�멕타이트(Fig. 4B)의 경우 에틸렌글리콜 처리후 회절 분석에 의해 일라이트/스멕타이트 혼합층광물(I/S interlayered mineral)임을 알 수 있다(Fig. 4C).



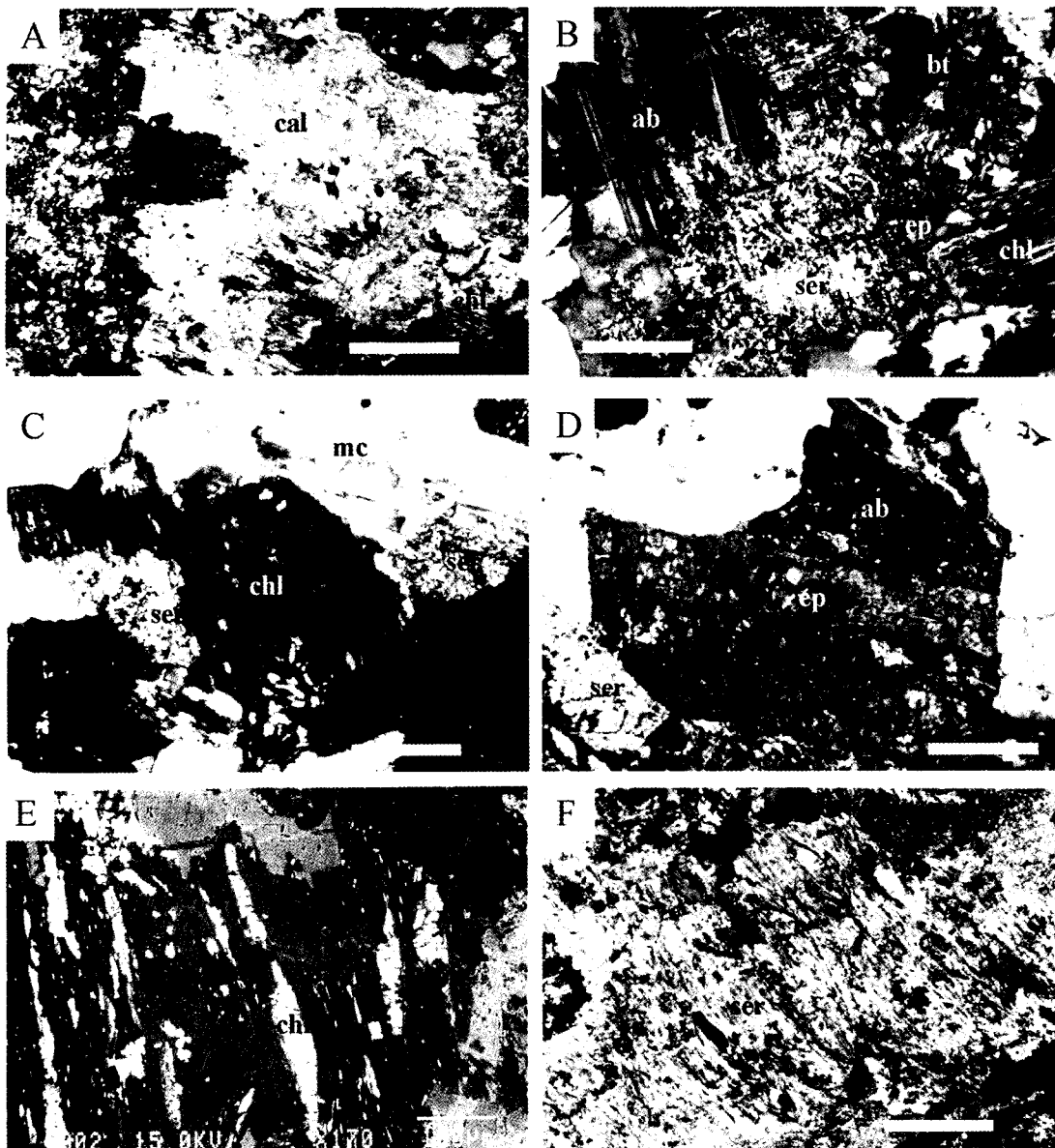


Fig. 3. Photomicrographs of each alteration zone showing mineral assemblages from the Mugeuk mineralized area. A: calcite, kaolinite and chlorite assemblages in argillic zone. B: biotite partly replaced by chlorite in subpropylitic zone. C: chlorite, illite and microcline assemblages in propylitic zone. D: albite replaced by epidote in propylitic zone. Note relics of albite twin. E: back-scattered electron image(BEI) of illite(sercite) in subphyllitic zone. Note chlorite relics exist in illite. F: illite in phyllic zone. Scale bars = 0.5 mm. Abbreviation: ab = albite, bt = biotite, cal = calcite, chl = chlorite, ep = epidote, kao = kaolinite, mc = microcline. qtz = quartz, ser = sericite, sm = smectite.

아프로필리틱대 (subpropylitic zone)

열수변질대 최외각부에 발달하는 아프로필리

틱대는 비교적 미약한 열수 변질작용으로 육안 관찰시 비교적 신선한 원암의 구성 광물을 보이나, 부분적으로 홍색의 미사장석이 우세하며, 흑

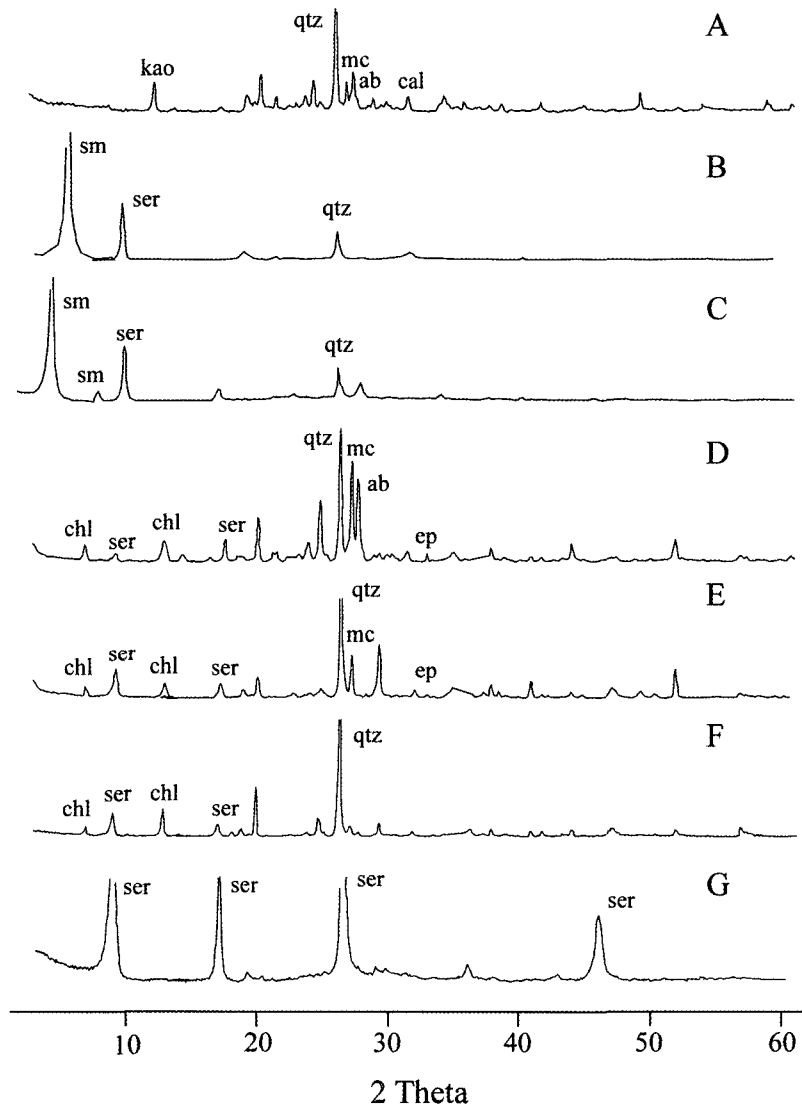


Fig. 4. XRD patterns of each alteration zones. A: sample from argillic zone. B: sample from argillic zone in fractured zone. C: same sample of B solvated by ethylene glycol. Note $\sim 12\text{\AA}$ peak moving into $\sim 14\text{\AA}$ peak. D: sample from subpropylitic zone. E: sample from propylitic zone. F: sample from subphyllitic zone. G: sample from phyllic zone. See Fig. 3 for abbreviations.

운모가 진녹색의 녹니석으로 변질되어 흑운모의 벽개면을 관찰할 수 없는 것이 특징이다(Fig. 3B). 녹렴석과 함수석류석(hydrogarnet)은 흑운모가 녹니석으로 변질되는 주변부에서 함께 관찰된다. 함수석류석은 아프로필리틱대에서만 나타나는 변질광물로 대체로 그로슬라와 안드라다이트

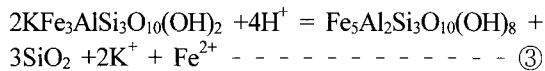
의 함량이 높게 나타난다(Table 1).

XRD 분석결과 녹니석(002), 견운모(001), 녹렴석(113)의 피크가 15.00 Å, 10.00 Å, 2.90 Å의 위치에서 확인되며 흑운모화강암의 주구성광물인 석영(101), 미사장석[(220), (002), (040)], 사장석(002)의 회절피크도 3.34 Å, 3.24 Å, 3.17 Å

의 위치에서 강하게 나타나고 있어 열수변질이 비교적 미약했음을 나타낸다(Fig. 4D).

프로필리틱대(propylitic zone)

프로필리틱대는 홍색 미사장석이 우세하게 산출되며, 흑운모 등의 유색광물이 전반적으로 녹색을 띠면서 녹니석화 되어있는 특징을 보인다. 편광 현미경하에서 흑운모는 식 ③과 같은 반응에 의해 완전히 소멸되어 녹니석으로 변질되는 특징을 보인다. 장석의 경우 미사장석에 비하여 사장석이 우세하게 견운모로 변질되나(Fig. 3C), 사장석 반정의 중심부에서는 쌍정이 명확히 관찰된다. 녹렴석은 아프로필리틱대와 프로필리틱대에서 나타나는 대표적인 열수변질광물로, 주로 각섬석과 장석의 주변부에서 녹니석, 견운모, 탄산염광물 등과 함께 산출된다(Fig. 3D). 녹렴석의 화학조성 중 피스타사이트(pistacite) 함량은 아프로필리틱대에서는 0.3~0.4, 프로필리틱대에서는 0.3으로 차이를 보이지 않는다(Table 1). XRD 분석결과 미사장석과 사장석의 (002)피크는 현저하게 감소하나, 견운모의 (001)면 피크가 증가하는 경향을 보이며 녹니석(002), 녹렴석(113)의 피크는 미약하게 관찰된다(Fig. 4E). 프로필리틱대와 아프로필리틱대는 녹니석-녹렴석-견운모-탄산염광물-미사장석-사장석-석영의 서로 유사한 광물조합을 보이지만, 현미경 관찰과 X-선 회절분석에 의한 변질정도는 아프로필리틱대에 비하여 상대적으로 상당히 진행된 양상을 보인다.



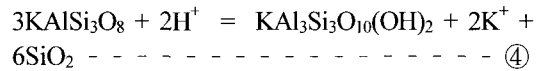
아견운모대(subphyllitic zone)

아견운모대에서는 장석류와 흑운모는 대부분 소멸되며, 녹니석-견운모-탄산염광물의 단순광물 조합을 보인다. 장석류는 전반적으로 견운모-녹니석으로 변질되며, 녹니석은 다시 변질되어 부분적으로 견운모화 되는 양상을 보인다(Fig. 3E). 아프로필리틱대에서 아견운모대에 걸쳐 산출되는 녹니석은 각 변질대별로 산출 빈도에 차이가 나타나며, 그 화학조성이 변하는 특징을 보인다. 녹니석의 Fe/(Fe+Mg) 값은 아프로필리틱대에서 0.52~0.59, 프로필리틱대에서 0.51~0.59, 아견

운모대에서 0.49~0.66을 보여 변질이 진행됨에 넓은 범위의 화학조성을 보이며(Table 2), 다이아반타이트(diabantite)의 조성에서 리피도라이트(Ripidolite)의 조성으로 변해간다. 사장석은 완전히 견운모로 변질되었으나, 견운모화된 미사장석은 간혹 쌍정의 흔적을 통하여 확인할 수 있다. XRD분석 결과 아견운모대의 장석류 피크는 현저히 감소하지만, 견운모(003)의 피크는 증가하는 특징을 보인다(Fig. 4F).

견운모대(phyllitic zone)

견운모대는 하부 광맥의 접촉부에서 주로 발달하는 변질대로 견운모-탄산염광물-석영의 가장 단순한 광물조합을 보인다. 대부분의 사장석, 미사장석, 녹니석이 소멸되고 식 ④와 같은 반응에 의해 견운모가 우세하게 산출되는 특징을 보인다(Fig. 3F). 견운모대에서 산출되는 견운모중 녹니석 변질에 의한 것과 장석류 변질에 의한 것의 화학조성이 서로 다른 특징을 보인다(Table 2). 장석류가 변질된 견운모는 Fe와 Mg가 각각 0.08~0.15, 0.00~0.26을 보이는데 비해 녹니석 변질에 의한 견운모는 Fe와 Mg가 각각 0.16~0.24, 0.22~0.36을 보여 상대적으로 높은 Fe, Mg 값을 갖는 특징을 보인다(Table 2). XRD 분석결과 견운모대에서는 견운모의 (001)면과 (003)면, 석영의 (101)면의 피크만이 우세하게 관찰된다(Fig. 4G).



열수변질대의 진화 특성

금붕광산 열수변질대는 반복적으로 상승하는 광화용액에 의해 형성된 석영맥(폭 < 1 m)을 중심으로 5~15 m 정도로 넓게 발달하는 특징을 보인다. 석영맥과 모암의 접촉부에서는 녹니석과 사장석, 미사장석 등이 모두 견운모로 변질되어 있는 견운모대가 넓게 발달하지만, 석영맥으로부터 멀어지면서 미사장석이 부분적으로 견운모화되며, 흑운모의 변질 산물인 녹니석-녹렴석이 우세하게 산출되는 프로필리틱대가 부분적으로 발달하는 특징을 보인다. 태극광산의 열수변질대는 망상형 세맥(stockwork vein)을 중심으로 대략 수

Table 1. Chemical compositions of hydrogarnets and epidotes in each alteration zone from the Mugeuk area

Sample#	TG98-14-1	TG98-14-1	TG98-4-1	TG98-4-1	TG98-4-1	TG98-14-1	TG4-1	TG4-1	TG98-5-17
Analysis#	11-16lde35	11-16lde38	lde11	lde16	lde20	11-16lde31	9-2lde21	9-2lde34	lde7
Location	s-pro	s-pro	s-pro	s-pro	s-pro	s-pro	s-pro	s-pro	pro
SiO ₂	34.37	34.65	34.30	35.12	35.29	37.58	37.96	37.48	37.83
TiO ₂	0.54	0.40	2.84	1.88	2.00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Al ₂ O ₃	8.50	8.84	9.51	9.55	9.38	19.00	22.72	23.59	23.19
Fe ₂ O ₃	20.71	20.99	15.41	16.80	16.77	18.67	14.18	12.74	13.69
MnO	-	-	-	-	-	n.d.	0.28	0.23	0.38
CaO	34.14	33.53	34.22	34.41	34.43	22.51	22.46	23.07	22.65
Na ₂ O	-	-	-	-	-	0.35	n.d.	n.d.	n.d.
Total	98.26	98.41	96.27	97.75	97.88	98.10	97.60	97.10	97.74
	Numbers of cations on the basis of 12 O					Numbers of cations on the basis of 12.5 O			
Si _T	2.84	2.86	2.86	2.89	2.90	3.04	3.03	3.00	3.02
Al _T	0.16	0.14	0.14	0.11	0.10	-	-	-	-
Sum T	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.04	3.03	3.00	3.02
Al _V	0.66	0.71	0.80	0.81	0.81	1.81	2.14	2.23	2.18
Fe ³⁺	1.29	1.30	-	1.04	1.04	1.14	0.85	0.77	0.82
Ti	0.03	0.03	0.18	0.12	0.12	-	-	-	-
Mn	-	-	-	-	-	-	0.02	0.02	0.03
Sum A	1.98	2.04	1.94	1.97	1.97	-	-	-	-
Ca	3.02	2.96	3.06	3.03	3.03	1.95	1.92	1.98	1.94
Na	-	-	-	-	-	0.05	-	-	-
Sum B	3.02	2.96	3.06	3.03	3.03	2.01	1.94	2.00	1.96
And%	64.86	63.77	49.81	52.78	52.64	-	-	-	-
Gross%	35.15	36.23	50.19	47.22	47.36	-	-	-	-
Ps*	-	-	-	-	-	0.40	0.30	0.30	0.30

* Ps = Fe³⁺/(Fe³⁺+Al_V)

십 cm 이내의 좁은 범위에서 발달하는 특징을 보인다. 석영세맥과 모암과의 접촉부에서는 흑운모의 변질 산물인 녹니석과 사장석의 변질 산물인 견운모와 카올리나이트가 산출되며, 미사장석은 부분적으로 견운모화되는 프로펠리틱대가 우세하여 금봉광산의 열수변질대와 차이를 보인다. 석영맥으로부터 멀어지면서 흑운모가 벽개를 따라 부분적으로 녹니석화 되어 있거나, 사장석이 부분적으로 견운모화 되어 쌍정을 관찰할 수 있는 아프로펠리틱대가 넓게 분포하는 특징을 보인다. 즉 금봉광산에서는 석영맥을 중심으로 견운모대 → 프로펠리틱대 →아프로펠리틱대 순으로 분포하는 양상을 보이는 반면, 태극광산에서는 망상형 세맥을 중심으로 프로펠리틱대 → 아프로펠리틱대가 분포하는 변질 양상을 보인다. 금봉광산과 태극광산에서 서로 다른 산상과 폭을 보

이는 석영맥을 중심으로 상이하게 분포하는 열수 변질대는 모암과 접촉하는 광화용액의 pH와 온도 및 모암과의 반응 정도(m_{KCl}/m_{HCl}, water/rock ratio 등) 차이에 기인한다(Shade, 1974; Montoya and Hemley, 1975). 석영맥을 중심으로 한 금봉광산의 열수변질대는 광화 초기 <250°C의 온도 조건에서 낮은 pH (또는 m_{KCl}/m_{HCl})의 광화용액에 의해 사장석과 미사장석, 녹니석이 모두 견운모화 된 후, 반복적으로 상승하는 후기 광화 유체에 의해 석영맥으로부터 견운모대가 확장되면서 아견운모대, 프로펠리틱대가 형성되었다(Fig. 5C and 5D). 태극광산의 경우 망상 세맥을 중심으로 견운모대의 발달은 매우 미약한 반면 녹니석이 산출되는 프로펠리틱대가 좁은 범위에서 우세하게 분포하는 특징을 보인다. 태극광산의 열수변질대를 형성시킨 망상 세맥은 단속적인 열수

Table 2. Chemical compositions of the representative chlorite and sericite in each alteration zone from the Mugeuk area

Sample #	TG98-14-1	TG98-14-1	TG98-4-1	TG98-13-9-1	TG98-5-1	TG98-5-1	TG98-13-9-1	TG98-13-9	TG98-13-9
Location	s-pro	s-pro	pro	s-phy	s-phy	chlorite	chlorite	feldspar	feldspar
SiO ₂	27.17	26.18	27.32	26.14	25.03	51.18	51.07	47.63	49.02
TiO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.27	n.d.	0.28	n.d.	n.d.
Al ₂ O ₃	17.00	16.34	16.73	20.90	18.78	31.08	30.91	33.89	31.23
FeO	27.84	30.41	27.30	29.92	32.29	1.64	1.59	0.70	1.34
MnO	0.43	0.70	0.37	n.d.	0.00	-	-	-	-
MgO	14.63	12.57	14.96	11.76	9.47	1.30	1.30	0.64	1.27
CaO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	-	-	-	-
Na ₂ O	0.37	0.35	0.51	0.38	0.43	-	-	-	-
K ₂ O	n.d.	n.d.	n.d.	0.13	0.14	8.19	9.63	10.54	10.13
Total	87.45	86.55	87.19	89.23	86.42	93.38	94.77	93.40	92.99
	Numbers of cations on the basis of 28 O					Numbers of cations on the basis of 22 O			
Si	5.84	5.80	5.88	5.54	5.59	6.79	6.74	6.41	6.63
Al _{IV}	2.16	2.20	2.12	2.47	2.41	1.21	1.26	1.59	1.37
Sum_T	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al _{VI}	2.15	2.07	2.12	2.75	2.54	3.65	3.55	3.78	3.60
Ti	-	-	-	-	0.05	-	0.03	-	-
Fe ²⁺	5.01	5.64	4.91	5.30	6.03	0.18	0.18	0.08	0.15
Mn	0.08	0.13	0.07	-	-	-	-	-	-
Mg	4.69	4.15	4.80	3.71	3.16	0.26	0.26	0.13	0.26
Ca	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na	0.16	0.15	0.21	0.16	0.19	-	-	-	-
K	-	-	-	0.04	0.04	1.39	1.62	1.81	1.75
Cations	20.08	20.14	20.11	19.95	20.00	13.47	13.63	13.80	13.75
Fe/(Fe+Mg)	0.52	0.58	0.51	0.59	0.66	0.42	0.41	0.38	0.37

의 공급과 함께, 열수와 모암과의 반응이 미약하였음을 시사한다(Fig. 5B).

열수변질대의 공간적 변화 특성

무극 지역의 열수변질대는 수직적으로 상이한 열수변질대 분포 특성을 보이며 이러한 열수변질대의 공간적 변화는 모암과 접촉하는 광화 유체의 물리·화학적 진화과정에 기인한다. 금봉광산 하부 시추시료에서는 석영맥을 중심으로 견운모대가 우세하게 발달하고 상부 시추시료에서는 아견운모대가 우세하게 발달하는 특징을 보이며 (Fig. 6), 이러한 현상은 열수유체가 상승하면서 온도 감소와 함께 pH 증가에 기인한 결과로 추

정된다. 무극 지역의 태극광산을 중심으로 산출되는 카올리나이트의 점토대는 공간적으로 석영맥의 산출과 관계없이 주로 열수변질대 상부에 집중되며 프로필리틱대와 중첩되어 나타나는 경향을 보인다. 태극광산 하부 시추시료의 열수변질대에서는 석영맥을 중심으로 프로필리틱대가 우세하고 중부에서 견운모대가, 지표부근에서는 다시 프로필리틱대가 우세한 양상을 보인다(Fig. 6). 열수변질대의 상부·하부에서 석영맥을 중심으로 공통적으로 프로필리틱대가 우세하고 중간 부분에서 아견운모대가 발달하는 양상은 석영맥 상·하부에서 광화 유체의 온도가 낮았음을 의미하며, 중간 부분의 석영맥에서는 상대적으로 상대적으로 고온의 광화 유체의 영향을 받은 것으로 해

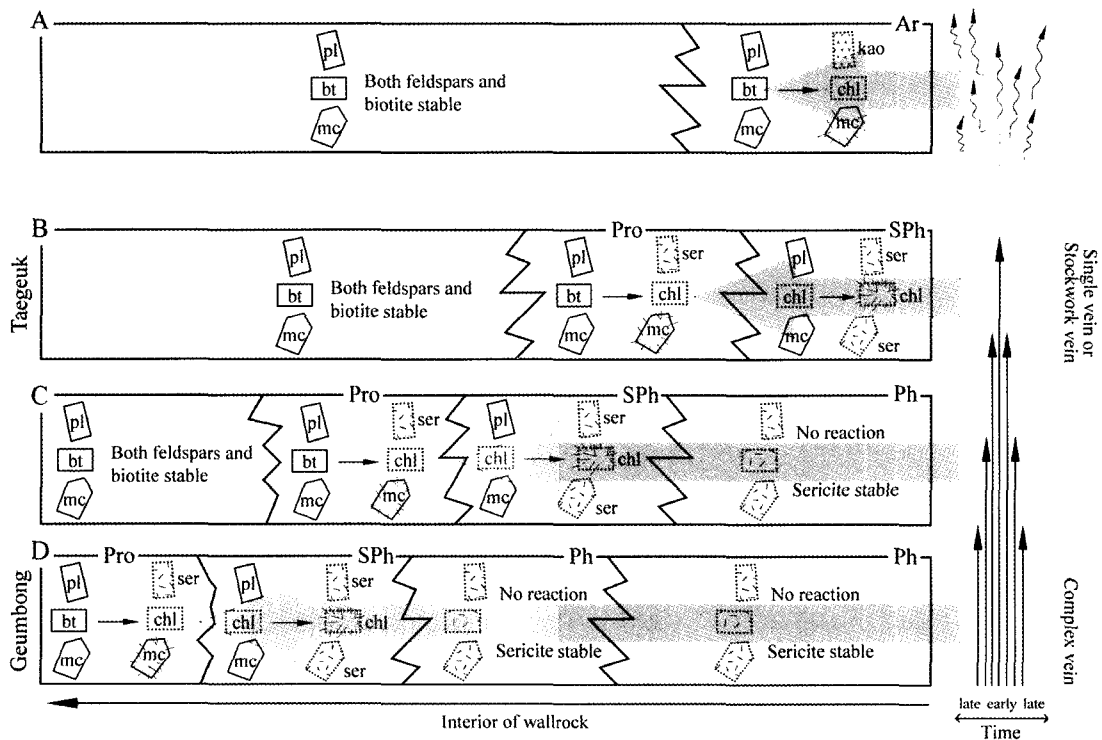


Fig. 5. Block diagram for changes of alteration mineral assemblages. Note the overprinting occurs with time as long as system is active and reactions occur. See Fig. 3 for abbreviations. Ar = argillic zone, Ph = phyllic zone, SPh = subphyllic zone, Pro = propylitic zone.

석된다. 이는 태극광산의 열수계가 무극광화대에서 최외각에 위치하여 천수의 유입과 관련된 열수계 온도구배의 역전 현상에 의한 것으로 추정된다. 또한 점토대가 우세하게 분포하는 지표근처에서는 저온의 유체로부터 CO₂ 비등에 의해 정출되는 광상 석영이 산출되는 특징을 보인다. 특히 점토대에서 산출되는 광물 중 사장석은 대부분 카올리나이트로 변질되었으나, 미사장석은 부분적으로 견운모화 되었을 뿐 카올리나이트화가 진행되지 않아 장석류의 선택적인 변질 작용이 있었음을 시사한다(Fig. 5A). 이러한 현상을 규명하기 위하여 SURCRT92(Johnson *et al.*, 1992)의 열역학 자료를 이용한 온도와 a_{KCl}/a_{HCl} 또는 a_{NaCl}/a_{HCl} 상평형 관계도를 통하여 검토하였다(Fig. 7). 이와 관련된 열수 유체는 광상 석영의 산출과 기 보고된 유체포유물의 온도와 염농도를 기준으로 대략 200~150°C의 온도와 3~1 equiv. wt.% NaCl의 염농도를 보인다. 사장석의 소멸과 함께 카올리나이트의 생성은 열수 유체의 log

$a(Na^+/H^+)$ 값이 대체로 3.5~4.5에서 가능한 반응 관계를 고려할 수 있으며(Fig. 7A), 유체포유물에서 구한 염농도를 a_{Na^+} 로 환산하여 식 ②의 평형상수 값에 적용할 경우, 이 유체는 4.5~5.5의 수소이온 농도를 보인다. 또한 미사장석이 부분적으로 견운모화되는 특징에 의해 열수 유체의 log $a(K^+/H^+)$ 값은 log $a(Na^+/H^+)$ 값과 유사한 범위로 한정할 수 있다(Fig. 7B). 따라서 동일한 변질대에서 선택적 변질작용에 의한 광물상의 변화 양상(사장석 → 카올리나이트, 미사장석 → 견운모)은 천부환경에서 저온성 광화유체(<200°C)의 CO₂ 비등에 의한 산성 유체(pH=4.5~5.5)의 진화과정을 반영한 결과임을 추정할 수 있다.

금·은광화작용과 열수변질대의 분포 특성

무극광화대내 금·은광산과 태극광산의 열수변질대의 수평·수직적인 분포양상은 전술한 바와 같이 열수변질을 야기하는 광화 유체의 물리·화

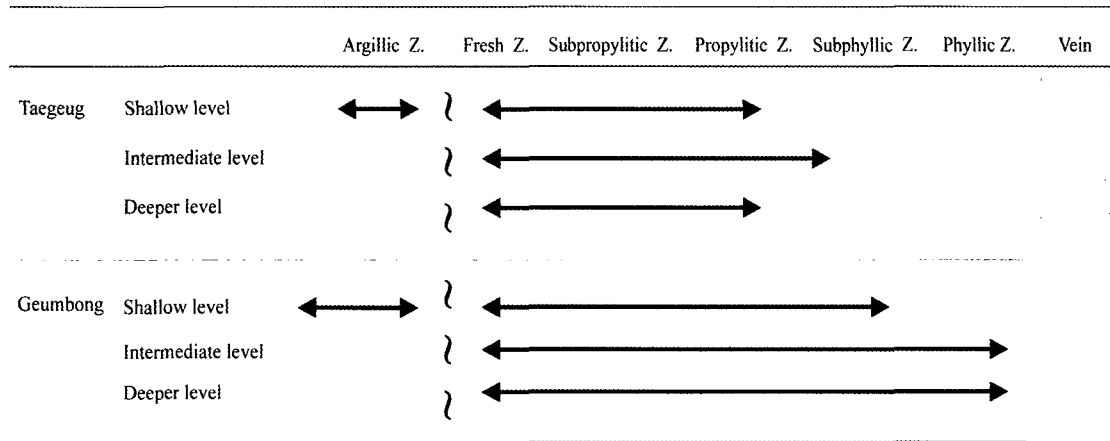


Fig. 6. Spatial distribution of alteration zone with depth and width from the Taegeug and Geumbong mines. See the argillic zone confined into upper level.

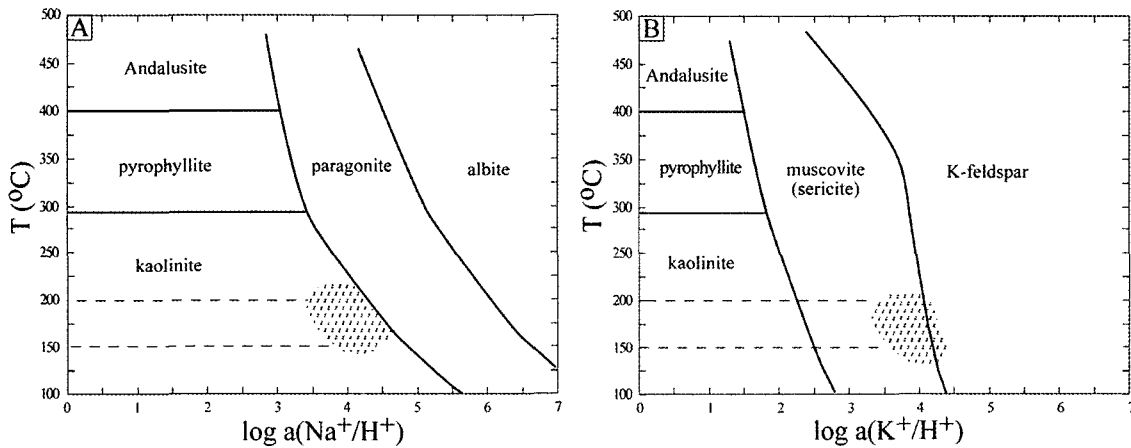


Fig. 7. Plots of $\log a(\text{Na}^+/\text{H}^+)$ vs. temperature and $\log a(\text{K}^+/\text{H}^+)$ vs. temperature for the system Na-Al-Si-O-H, K-Al-Si-O-H and quartz saturation.

학적 변화와 관련되어 있다. 이런 광화 유체의 물리·화학적 변화는 금·은 광물의 침전 환경의 변화를 의미하므로 열수변질의 분포 양상에 따라 금·은 광화작용의 차이를 보인다. 망상 세맥을 중심으로 프로필리틱대가 우세하게 발달하는 태극광산의 3호맥을 중심으로 한 열수변질대 분포양상과 품위의 상관관계를 살펴보면, 3호맥 상부에서는 아견운모대가 우세하게 분포하며, 금·은품위비(Fineness)는 약 100을 보인다. 하부에서는 망상형 맥(stockwork vein)이 넓게 분포하며, 열수변질 양상은 프로필리틱대와 아프로필리틱대가 우세하게 나타난다. 하부의 금·은품위비

는 68.0~103.6으로 다소 높아지는 경향을 보이거나, 품위에 있어서는 Au: 0.2~0.3 g/ton, Ag: 2.0~3.0 g/ton으로 다소 낮아지는 경향을 보인다. 태극 광산 7호맥 주변부에서는 아프로필리틱대와 프로필리틱대가 주로 분포하는 특성을 보이며, 5호맥에서는 견운모대, 아견운모대, 프로필리틱대, 아프로필리틱대가 주로 분포하지만, 금·은품위비는 매우 낮게 나타난다(Fig. 8A). 금봉광산 열수변질대는 1호맥 접촉부에서 견운모대가 우세하게 발달하며, 맥의 하부로 갈수록 견운모대의 분포 범위는 넓어지는 특징을 보인다(Fig. 8B). 1호맥의 품위는 Au: 0.1~53.6 g/ton, Ag :

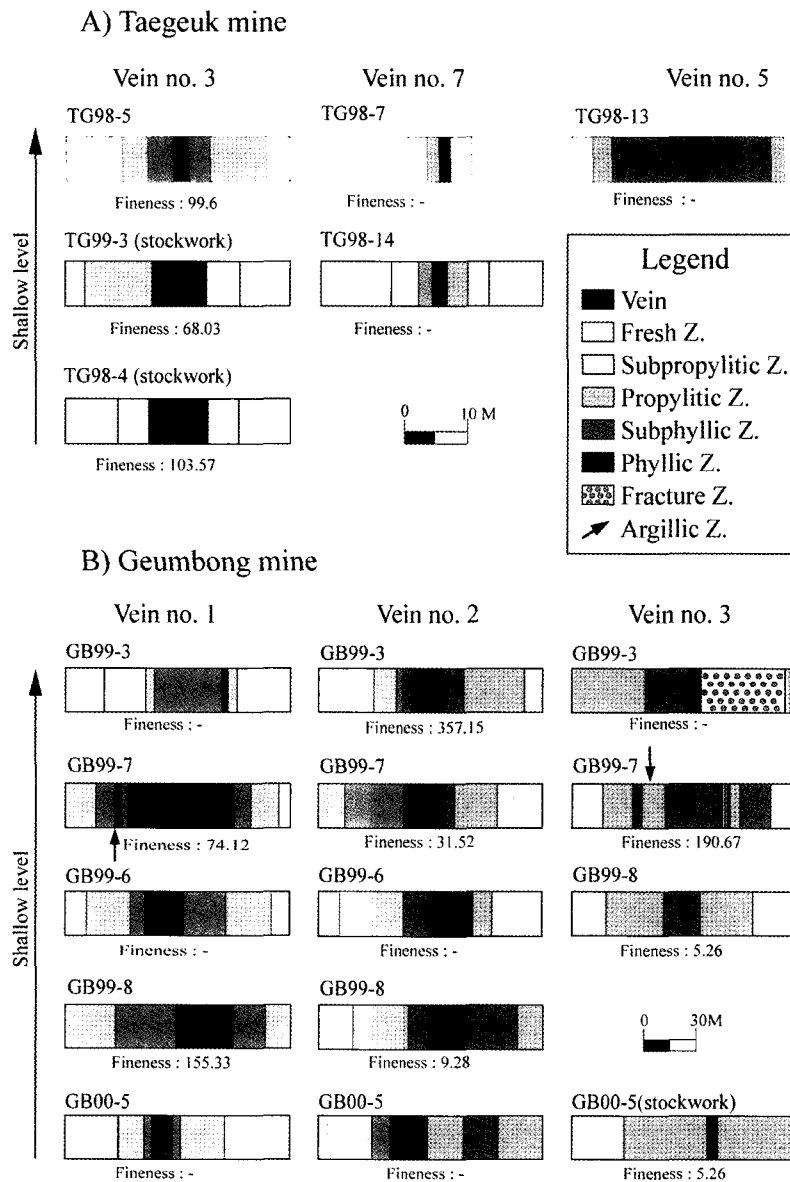


Fig. 8. The various patterns of alteration zones from the Taegeuk(A) and Geumbong(B) mines. Note the wide ranges of phyllic zone in the Geumbong mine compared with the Taegeuk mine.

1.0~307.0 g/ton이며 하부로 갈수록 금·은품위비가 증가하는 양상을 보인다. 2호맥은 아견운모대와 견운모대가 주로 관찰되며, 광석의 품위는 Au: 0.1~62.7 g/ton, Ag: 1.0~183.0 g/ton으로 하부 보다는 상부에서 더 높은 금·은품위비를 보이며 하부로 갈수록 Ag의 함량이 증가하는 특징

을 보인다. 3호맥은 아견운모대가 넓게 분포하며 품위는 Au: 0.1~12.9 g/ton, Ag: 1.0~19.0 g/ton을 보인다.

금·은광화작용과 열수변질대 분포 특성의 상관관계를 알아보기 위해 열수변질대의 분포 양상을 3가지 유형(A, B, C type)으로 도식화하여 보

Table 3. Types of alteration pattern

A Type	A1	Vein-Propylitic Z.-Subpropylitic Z.-Biotite granite
	A2	Stockwork Vein-Propylitic Z.-Subpropylitic Z.-Biotite granite
B type		Vein-Subphyllitic Z.-Propylitic Z.-Subpropylitic Z.-Biotite granite
C type		Vein-Phylitic Z.-Subphyllitic Z.-Propylitic Z.-Subpropylitic Z.-Biotite granite

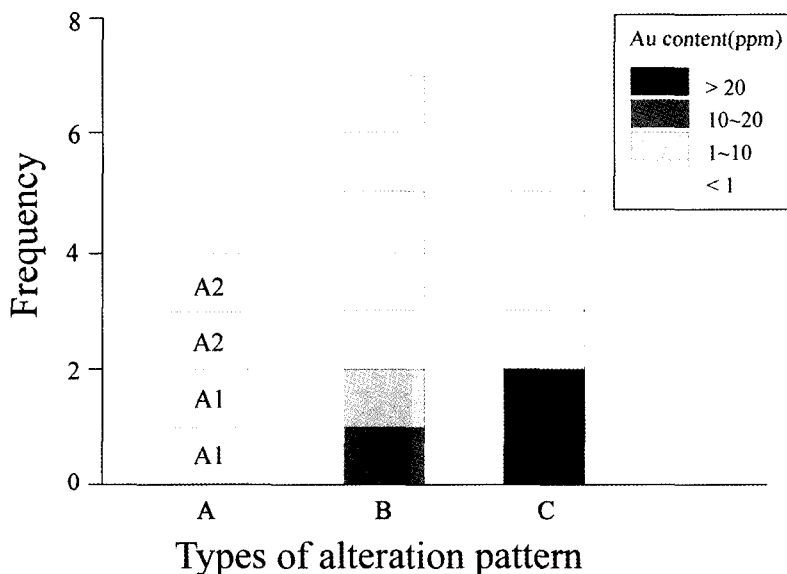


Fig. 9. Frequency of Au contents(ppm) in various types of alteration pattern from the Mugeuk mineralized area.

았다(Table 3). A type은 맥을 중심으로 석영맥 → 프로필리틱대 → 아프로필리틱대가 분포하는 변질 양상이다. A type은 다시 복성맥에 의해 형성된 변질대(A1 type)와 망상 세맥에 의해 형성된 변질대(A2 type)로 분류될 수 있다. B type은 맥을 중심으로 석영맥 → 건운모대 → 프로필리틱대 → 아프로필리틱대가 분포하는 변질 양상이다. C type의 변질대는 석영맥 → 건운모대 → 프로필리틱대 → 아프로필리틱대 순으로 분포하는 양상을 보인다. 변질대 분포의 3가지 유형과 각 유형에서 분석된 금품위를 함께 고려하여 보면, 석영맥을 중심으로 건운모대가 우세하게 발달하는 C type이 비교적 금품위가 높은 특징을 보여 금·은광화작용은 건운모대를 형성시킨 열수변질작용과 밀접한 연관성을 갖는 것으로 사료된다(Fig. 9).

토 의

국내 최대규모의 금·은 광화대인 무극 광화대는 인리형 분지인 백악기 음성퇴적분지의 북서측에 위치한다. 무극 광화대의 금·은광상들은 흑운모 화강암의 열극을 따라 N10W~N20W방향으로 분포하는 삼십 여개 석영맥들로 구성된다. 생산량 및 광석품위자료에 근거한 광화대 전반에 걸친 금·은비의 분포특성은 북측 무극광산으로부터 최남단의 태극광산으로 갈수록 금·은비의 감소경향과 함께 심도증가에 따라 하부 광체에서 금·은비가 증가하는 수직적 변화를 보이고 있다(Fig. 2). 맥의 산상에 있어 북측에서 주로 복성맥의 구조를 보이지만, 광화대 남측에서는 전반적으로 복성맥에서 단성 맥 또는 망상 세맥으로 변화하며 맥 폭 또한 현저하게 감소하는 경향을 보

이다. 이와 함께 옥수질 석영 및 방해석 세맥의 산출 빈도가 증가하는 경향을 보인다. 광석광물에 있어 북측의 무극광산에서는 에렉트럼이, 금왕·금봉광산에서는 함은황염광물이 각각 우세하게 산출되는 경향을 보인다(신양우와 서규식, 1987; 박희인과 강성준, 1988; 최선규 외, 1986; Sugaki *et al.*, 1986). 특히 태극광산에서는 저온성 광물인 휘안석이 유일하게 산출되고 있어(최선규 외, 2001B), 북측에 위치한 타 광산과 비교하여 광화작용이 상대적으로 낮은 온도 환경에서 진행된 것으로 사료된다. 이러한 광화대내 함금·은석영맥들의 산상 및 금·은비(에렉트럼 및 함은황염광물간의 상대적 양비)의 분포 양상은 서로 상이한 광화 조건을 반영하는 광물-지화학적 대상 분포로 해석되었다(최선규 외, 2001B).

금·은광화 환경과 관련된 열수변질대 분포 특성은 광화유체의 시·공간적 진화과정과 매우 밀접한 연관성을 갖는다. 금봉광산의 열수변질대는 반복적으로 상승하는 광화 유체로부터 형성된 견실한 북성맥을 중심으로 견운모대 → 아견운모대 → 프로필리틱대 → 아프로필리틱대의 순으로 분포하며 태극광산은 망상 세맥을 중심으로 프로필리틱대 → 아프로필리틱대의 순으로 분포하는 특징을 보인다. 또한 이런 열수변질대는 공간적으로 하부에서는 견운모대가 우세하게 발달하고 상부에서는 프로필리틱대와 점토대가 중첩되어 발달하는 특징을 보인다. 이런 열수변질대의 시·공간적 분포 특징은 태극광산보다는 금봉광산에서, 상부보다는 하부에서 비교적 고온의 광화 유체의 영향을 지속적으로 받은 것으로 해석될 수 있다. 무극 광화대 각 광산의 광화 유체 연구결과에 의하면 무극광산은 광화 유체는 비교적 고온·고염도($\approx 300^{\circ}\text{C}$, 1~9 equiv. wt.% NaCl)와 물-암석 상호반응이 진행된 유체($\delta^{18}\text{O}$; -1.2~3.7‰)의 특징을 보이는 반면, 남측의 금왕·금봉·태극광산에서는 북측의 무극광산에 비해 저온·저염도($< 250^{\circ}\text{C}$, < 3 equiv. wt.% NaCl)를 보이며, 물-암석 반응이 미약하게 진행된 지표수 혼입 특징을 보인다(김규한 외, 1990, 박희인과 강성준, 1988, Sugaki *et al.*, 1986, 최선규 외, 2001B). 이는 무극광산이 열적 중심부에 위치하여 고온의 지온 구배가 형성되었고, 광화 유체는 전반적으로 물-암석 상호 반응이 우세하여 견운모 변질작용을 유도한 것으로 판단된다. 반면 광화대 최남단에 위치한 태극광산은 열적 중심에서 가장

먼 곳에 위치함으로써 상대적으로 낮은 지온 구배가 유지되고 이로 인해 지표수의 유입이 용이해져 저온·저염농도의 광화유체가 형성되어 프로필리틱 변질 작용이 우세하게 진행된 것으로 사료된다. 특히 태극광산의 열수변질대에서는 상부와 하부에서 프로필리틱대가 우세하나 중부에서는 아견운모대가 우세한 특징을 보이는데 이는 광화대 최외각에 위치한 태극광산 열수계에 저온의 천수 유입에 따른 온도 구배 역전에 따른 것으로 생각된다. 또한 무극 광화대 전반에 걸쳐 지표 가까운 곳에서는 CO_2 비등에 의한 저온($< 200^{\circ}\text{C}$)의 산성 유체($\text{pH} = 4.5 \sim 5.5$)가 형성되어 점토대가 불연속적으로 분포하는 특징을 보인다. 따라서 무극 광화대 금·은광상들의 열수변질대 시·공간적 분포 특성을 광석광물의 공생관계, 유체포유물, 안정동위원소, 광화 환경 등과 종합적으로 고찰하면 무극광산이 열적 중심부의 열수계 특징을 보여 마그마가 유입된 열적 중심을 무극광산 부근으로 추정할 수 있다.

결 론

무극 광화대 전반에 걸친 금·은비의 분포양상은 금·은광물의 정출 메커니즘과 관련된 광화 유체의 온도 및 조성, 물/암석 반응비 등의 변화에 좌우되며, 열수변질대는 이러한 광화유체의 시·공간적 진화과정을 직접 반영하고 있다. 무극 광화대에서 각 광산 열수계의 공간적 분포는 그 광산이 열적 중심에 위치하는지 또는 외각부 위치하는지에 따라 서로 다른 물/암석 반응비와 물-암석 상호반응 정도를 보이며, 이것이 수평·수직적으로 서로 다른 열수변질대를 유도한 것으로 사료된다. 또한 각 광산 열수계의 공간적 분포 양상은 유체간 혼합과정(fluid mixing)과 희석작용(dilution)의 정도를 조절하여 금·은광물의 상이한 정출 환경을 유도하는 것으로 사료된다. 또한 광상의 생성기구와 열수변질분포특성간의 관계는 성인적 관점뿐만 아니라 탐사 측면에서도 매우 중요함을 의미한다. 따라서 무극 지역 탐사 시 열적 중심부에 해당하는 고온의 지온 구배가 형성되는 지역($300^{\circ} \sim 250^{\circ}\text{C}$)과 물-암석 상호반응이 많이 진행되어($\delta^{18}\text{O}$; 5~3‰) 견운모 변질작용이 우세한 지역(석영맥 → 견운모대 → 아견운모대 → 프로필리틱대 → 아프로필리틱대)을 고품위대 탐사 지점으로 제시할 수 있다.

사 사

본 연구는 한국 과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00407-0)와 2003년도 고려대학교 박사 수료후 연수과정 연구비의 재정적 지원에 의하여 수행되어 이에 깊은 사의를 드린다.

참 고 문 헌

김규한, 김옥준, 장원선 (1990) 무극 금은 광상에 대한 유체포유물 및 안정동위원소 분석연구. *자원환경지질*, 23, 1-9.

김옥준 (1971) 남한의 초기 화강암류의 관입시기와 지각변동. *광산지질*, 4, 1-10.

박희인, 강성준 (1988) 무극광산 삼형제맥의 금은광화작용. *광산지질*, 21, 257-268.

박희인, 장호완, 진명식 (1988) 한반도중부지역의 광상생성기와 생성구: 경기육괴내의 광상생성연대. *광산지질*, 21, 349-358.

신양우, 서규식 (1987) 무극광산의 탐사와 개발현황. *광산지질*, 20, 261-271.

최선규, 박노영, 박성원 (1986) 충청도 동북부 태창, 보련, 금왕 광산의 금은광화작용. *광산지질*, 19, 193-206.

최선규, 박상준, 최상훈, 신흥자 (2001A) 한국 중생대 화강암류와 이에 수반된 금-은광화작용. *자원환경지질*, 34, 25-38.

최선규, 이동은, 박상준, 최상훈, 강홍석 (2001B) 한국 금-은 광상의 효율적 탐사를 위한 성인모델; 무극광화대를 중심으로. *자원환경지질*, 34, 423-435.

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.

Montoya, J.W. and Hemley, J.J. (1975) Activity relations and stabilities in alkali feldspar and mica alteration reactions. *Econ. Geol.*, 70, 577-594.

Shade, J.W. (1974) Hydrolysis reactions in the SiO₂-excess portion of the system K₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O in chloride fluids at magmatic conditions. *Econ. Geol.*, 69, 218-228.

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.

Shimazaki, H., Lee, M.S., Tsusue A., and Kaneda, H. (1986) Three epochs of gold mineralization in South Korea. *Mining Geol.*, 36, 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.*, 82, 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.*, 36, 555-572.

2003년 8월 28일 원고접수, 2003년 9월 9일 게재승인.