

한국 금-은광화작용과 천열수 광상의 성인모델: 탐사예의 적용

최 선 규* · 박 상 준 · 김 창 성
고려대학교 지구환경과학과 (seongyu@korea.ac.kr)

ABSTRACT

Contrasts in the style of the gold-silver mineralization in geologic and tectonic settings in Korea, together with radiometric age data, reflect the genetically different nature of hydrothermal activities, coinciding with the emplacement age and depth of Mesozoic magmatic activities. It represents a clear distinction between the plutonic settings of the Jurassic Daebo orogeny and the subvolcanic environments of the Cretaceous Bulgugsa igneous activities. During the Daebo igneous activities (c.a. 200~150 (?) Ma) coincident with orogenic time, gold mineralization took place between c.a. 195 and 135 (127 ?) Ma. The Jurassic Au deposits commonly show several characteristics; prominent association with pegmatites, low Ag/Au ratios in the ore-concentrating parts, massive vein morphology and a distinctively simple mineralogy including Fe-rich sphalerite, galena, chalcopyrite, arsenopyrite, Au-rich electrum, pyrrhotite and/or pyrite. During the Bulgugsa igneous activities (110~50 Ma), the precious-metal deposits are generally characterized by such features as complex vein morphology, medium to high Ag/Au ratios in the ore concentrates, and diversity of ore minerals including base-metal sulfides, pyrite, arsenopyrite, Ag-rich electrum and native silver with Ag sulfides, Ag-Sb-As sulfosalts and Ag tellurides. Vein morphology, mineralogical, fluid inclusion and stable isotope results indicate the diverse genetic natures of hydrothermal systems in Korea. The Jurassic Au-dominant deposits (orogenic type) were formed at the relatively high temperature (about 300° to 450°C) and deep-crustal level (4.0±1.5 kb) from the hydrothermal fluids containing more amounts of magmatic waters ($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$: 5~10‰). It can be explained by the dominant ore-depositing mechanisms as CO_2 boiling and sulfidation, suggestive of hypo- to mesothermal environments. In contrast, the Cretaceous Au-dominant (113~68 Ma), Au-Ag (108~47 Ma) and Ag-dominant (103~45 Ma) deposits, which correspond to volcanic-plutonic-related type, occurred at relatively low temperature (about 200° to 350°C) and shallow-crustal level (1.0±0.5 kb) from the ore-forming fluids containing more amounts of less-evolved meteoric waters ($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$: -10~5‰). These characteristics of the Cretaceous precious-metal deposits can be attributed to the complexities in the ore-precipitating mechanisms (mixing, boiling, cooling), suggestive of ep- to mesothermal environments. Therefore, the differences of the emplacement depth between the Daebo and the Bulgugsa igneous activities directly influence the unique temporal and spatial association of the deposit styles.

서 언

한국의 금-은광상은 다양한 광물 및 지화학적 특성을 갖는 약 700 개의 광산이 전국적으로 분포하며(권병수 등, 1987), 1930년부터 1995년까지 순금 145 t 이 생산되어 국내에서 중요한 광물 자원으로 인식되고 있다. 이러한 금-은광상의 성인적 유형은 열수충진형 맥상광상, 알라스카이트형 광상, 스카른형 광상, 열수교대형 광상, 충적형 사금광상으로 분류되며, 열수충진형 맥상광상과 충적형 사금광상이 대다수를 점유하고 있다. 또한, 비철금속 광상 중 열수교대형 광상 (연화 및 장군)과 스카른형 광상 (거도 및 상동)에서도 Zn, Pb, Cu, W, Mo 등과 함께 부산물로 다량의 금-은 생산실적이 보고된 바 있다. 한국 금-은광상의 유형은 금-은비의 특성(Au fineness)에 따라 금단일형(gold-dominant), 금-은혼합형(gold-silver), 은단일형(silver-dominant) 광상으로 분류되며, 각 광상 유형별 금-은비의 차이는 다양한 금-은광물의 침전 환경을 반영한 것으로 언급된 바 있다(최선규, 위수민, 1992). 또한, 한국 금-은광상은 조산대형과 후조산대형의 각각 서로 다른 지질환경 특성을 반영하여 광화유체의 기원뿐만 아니라 상이한 유체진화 및 금-은광물의 정출 메커니즘을 보여주고 있다(최선규 등, 2001). 이와 같이 한반도에서 금-은 광화작용은 중생대 대보 및 불국사 화성활동과 밀접하게 관련되어 있으나, 중생대 조구조적 특성에 따른 광상의 광역 성인모델에 대한 체계적 연구가 미진한 상태이다.

지질개요

한반도의 지질은 지체구조상 경기 및 소백산 육괴에 속하는 선캠브리아이언 변성암류 (3.1~0.7 Ga)를 기반암으로 하여 옥천 지향사대의 변성암류와 태백산 분지의 고생대 퇴적암류가 분포하며, 유라기 초(200±20 Ma)에 들어서 대보 조산운동에 기인한 대규모 화성암체의 관입 이후 (200~155(?) Ma), 경상분지 및 인리형 분지를 중심으로 한 백악기 퇴적암류 및 불국사 화성활동과 관련된 화산-반심성암(115~50 Ma)으로 구성되어 있다.

유라기 화강암류는 성인적 측면에서 조산운동기 화성활동(syntectonic magmatism)과 대륙주변부 화성활동(continental-margin magmatism)으로 최근 해석하고 있으며(Cluzel et al., 1991; Jwa et al., 1994), 기 보고된 암석·지화학적 자료에 의하면 마그마 기원은 각 지괴에 따라 시·공간적 특성은 상이한 조구조 환경에서 유래된 것으로 추정하고 있다. 즉, 경기육괴의 유라기 화강암류는 대륙 충돌형 특징을 보이지만, 영남지괴 및 옥천 지향사대에 분포하는 페름기~유라기 화강암체는 모두 대륙 주변부의 특징을 보이고 있다. 그리고, 백악기 화강암류는 옥천지향사대와 경상분지에서 공통적으로 후조산운동(post-orogenic, intracontinental-margin)과 관련되는 것으로 해석되고 있다(Jwa, 1998). 이와 같이 각 지괴에서 산출되는 화강암류는 지질시대에 따라 조구조적 진화과정의 차이를 반영하고 있으며, 이들 화성활동에 수반된 금-은광화작용도 각각 서로 다른 지질환경에서 유도되어 맥의 산상, 구성광물의 공생관계, 금-은비 등 광물·지화학적 특징을 달리하는 서로 다른 유형의 광산이 배태되고 있다.

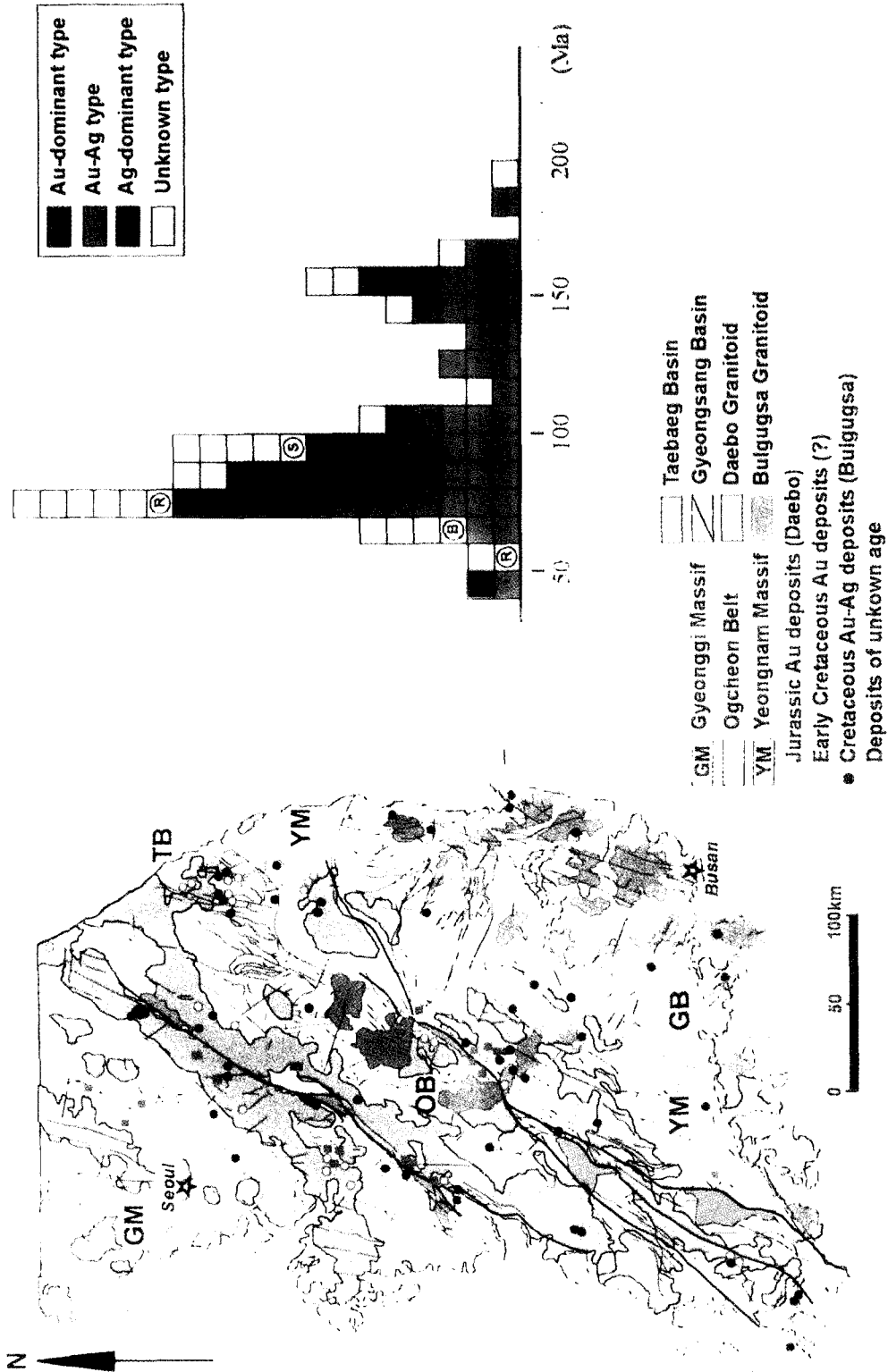


Fig. 1. General geological map of Korea showing the distribution of tectonic terranes and the selected gold-silver deposits. Mode for mineralization age and precious-metal deposit types.

금-은광상의 분포 특성

한국 열수광맥형 금-은광상은 일본의 화산성 천열수 금-은광상과 비교하여 단순히 한국형 금광상(Korean-type deposits)으로 기재된 바 있으나(Tsuchida, 1944), 이는 성인적 측면에서 명확히 구분되지 못하여 광상의 탐사모델을 정립하는데 부적절한 개념이다. 최근 유체포유물 및 안정동위원소 등의 연구를 통하여 중열수 광상(태창, 보련 광산 등), 한국형 광상(천보, 일보, 대흥 광산 등), 천열수 광상(전주일, 통영 광산 등)으로 구분하였다(Shelton et al., 1988). 또한, 중부지역과 동남부지역의 금-은광화작용에 대한 비교연구에서 이들 지역의 금-은광상의 성인적 차이는 대보 및 불국사 화성암체의 정치깊이를 반영한 광상의 생성심도에 기인한 것으로 해석하였다(Choi, Choi, 1995). 한국의 열수광맥형 금-은광상은 지체구조상 선캠브리아이언 경기 및 소백산 육괴, 고생대 태백 퇴적분지 및 옥천 변성대, 쥬라기 대보조산활동에 의한 대규모 심성암체의 저반 그리고 백악기 퇴적암, 불국사 화성활동과 관련된 화산암-반심성암의 복합체 등 다양한 모암에 배태되어 광화시기에 따라 상이한 지질조건에서 형성되었다(Fig. 1). 그리고, 한반도 전역에 걸쳐 분포하는 금-은광상에서 석영맥을 배태하는 모암의 유형별 산출비는 화강암에 38.4%, 선캠브리아이언 변성암류에 38.4%, 기타 암석에 23.2%로 보고된 바 있다(Kim, 1986). 최근 송림조산운동과 관련된 트라이아스기 화성암체가 기재되었으나(정창식, 장호완, 1996), 금속 광화작용과는 무관한 화성활동으로 보고하였으며(Jin et al., 2001), 금-은광화작용은 중생대 대보 및 불국사 화성활동에 국한된 것으로 해석하였다(Choi et al., 2001).

한반도 열수광맥형 금-은광상은 중생대 대보 및 불국사 화성암체의 분포경향과 광산의 밀집 분포도와의 상관관계에 따라 포천·홍천·천안·정선(화암리)·설천·봉화·해미·합천·순천·광양·함안-군북 광상구로 구분하였으나(김옥준, 1970), 이는 동일 광상구내에서도 광화시기뿐만 아니라 성인적으로 서로 다른 유형의 광상이 배태됨으로써 광상의 성인적 특성이 충분히 고려되지 못한 문제점이 있다. 쥬라기 대보 심성암체의 저반은 지하 심부에서 정치된 특징과 함께 한반도 전역에 걸쳐 분포함으로써 지질환경에 지대한 영향을 주었을 뿐만 아니라, 특히 경기-충청-전라남도 지역에 분포하는 금광상과는 광상학적 측면에서 매우 밀접한 연관성을 갖고 있다. 중부지역의 포천·홍천·천안·설천·해미 광화대와 남부지역의 보성-장흥 지역에 위치한 광상들은 전반적으로 대보 화강암류의 저반이나 경기·소백산지괴의 변성암과의 접촉부를 따라 분포하는 경향성을 보여주며(Fig. 1), 석영맥은 주로 선캠브리아이언의 편마암 및 편암의 편리방향에 따른 완경사맥 또는 쥬라기 화강암의 열극에 따른 페그마타이트 맥과 함께 산출된다.

또한, 백악기 중기 이후부터 화성활동은 북북동 방향의 주향이동단층과 관련된 구조운동에 따라 천부 관입-분출함으로써 이에 수반된 금-은 광화작용도 홍천·무극·공주·부여·영동-무주 광화대를 중심으로 지표 부근의 지질조건에 따른 천열수가 지배적인 환경으로 유도되었다(최선규 등, 2001). 이와 같이 두 시기의 화성활동은 동일지역에서 각기 서로 다른 지질환경 조건이 중첩됨으로써 특히 중부지역을 중심으로 인접한 금-은광상간에서도 광맥의 산출 특징뿐만 아니라 광물-지화학적 차이를 보이고 있다. 태백산지역 정선·봉화 광화대의 금-은광상은 고생대 퇴적암 이외에도 변성암, 화강암 등 여러 지질시대의 암석을 모암으로 하여 배태되지만, 이들 광상

의 인접지역에서 백악기 화성활동과 관련된 반상화강암, 석영반암 등과 같은 반심성암체가 공통적으로 산출된다. 동남부지역의 합천·광양·함안-군북 광화대 금-은광상은 주로 백악기 화강암·석영반암·퇴적암·화산암에 배태되어 중부지역의 금광상에 비하여 전반적으로 천부조건의 지질환경을 시사한다.

중생대 유라기 및 백악기 화성활동은 각각의 관입시기에 따라 정치심도에서 현저한 차이를 보이고 있으며, 이에 수반된 금-은광상도 생성심도와 연계되어 서로 상이한 특징을 보이는 괴상 단성맥과 복성맥으로 산출되고 있다. 천안 광화대의 대홍·일보·태창 광산과 같이 대보 화성활동과 관련된 광상과 설천광화대의 삼황학·대일·금포 광산과 같이 전단대 주변을 따라 분포하고 있는 광상의 맥은 주로 괴상 단성맥으로 금단일형 광상의 특징을 보이며, 페그마타이트질 맥에서 석영맥으로 점이적인 변화양상을 나타내고 있다. 이러한 광상의 석영맥은 주로 단성 광화용액에 의해서 형성된 치밀한 조립질 괴상 석영으로 구성되며, 공통적으로 경계부 천이(grain boundary migration)에 의한 재결정조직과 함께 모자이크·리본·호상·각력 구조와 같은 특징적 산상을 보인다. 이러한 함금-은석영맥의 산출양상은 연성변형이 가능한 지하심부의 비교적 높은 온도·압력 조건에서 광화작용이 진행되었음을 시사하며, 비교적 심부조건의 지질환경에서 형성된 조산대형 금광상에서 나타나는 조직과 일치하고 있다(Vearncombe, 1993; Peters, 1993).

천안 광화대의 무극·금왕·금봉광산과 설천광화대의 월유·전주일광산과 같은 백악기 금-은광상에서 맥의 산상은 공통적으로 복성맥으로 금-은혼합형 광상과 은단일형 광상의 특징을 보인다. 이러한 광상의 맥에서는 복성 광화용액에 의해서 형성된 각케이드·호상·빗살·각력 조직과 정동 석영이 우세하게 발달하여 열극 충전형(open-space filling)의 생성환경에서 성장한 조직과 함께 옥수질 석영, 깃털상(plumose) 석영, 판상 석영이 관찰되어 천열수 광상의 전형적인 산상을 보인다. 맥의 주 구성광물인 석영은 중립질~조립질로서 입자간의 결정면이 직선상으로 접하였으며, 이러한 조직은 공통적으로 비교적 낮은 암압이 작용하는 개방계의 환경을 시사하고 있다(Dowling, Morrison, 1989). 이러한 복성맥은 수 차례에 걸쳐 열개·충진·각력화 작용이 반복된 것으로서 천열수광상의 특징적인 조직과 일치하며(Vearncombe, 1993), 각 광화기의 급격한 온도-압력 등 환경조건의 변화를 유도하여 광화유체의 조성변화와 함께 다양한 광물군의 정출한 것으로 추정된다. 금-은광상에서 괴상 단성맥과 복성맥간의 산상차이는 광상의 생성심도와 관련된 암압과 유체압 간의 상이한 환경조건을 반영된 결과로서 열극의 생성-발달과정시 유체압-온도-조성의 변화가 광물성장뿐만 아니라 상이한 광물군의 침전메카니즘을 좌우하게 된다.

금-은광상의 시·공간적 특성

화강암류 중 전암 및 운모의 Rb-Sr, U-Pb 및 CHIME 절대연령자료는 대보화성활동이 20 (0~150(?) Ma로서 유라기 중기부터 백악기 초까지 한반도 전지역에 걸쳐 광역적으로 일어났던 것으로 보고된 바 있으나, 최근 발표된 연령측정자료에 의하면 유라기 말기부터 백악기 초까지 기간(160~110 Ma)은 화성활동이 전무(magmatic gap)하였던 시기로 추정하고 있다(Kwon, Sagong, 1998). 이러한 유라기 대보 화성활동기에 대한 견해차이는 연령측정방법에 따른 관입정

치 이후 냉각시기와의 차이에 기인한다. 류라기 화성활동과 관련된 광상은 가평·대래 광산만이 유일하게 197 과 188 Ma로 언급된 바 있으나(박노영 등, 1985, 1986; 박희인 등, 1988a, 1988b ; 윤석태, 박희인, 1991; 최선규, 위수민, 1992; Shimazaki et al., 1986; So et al., 1989b, 1993; So, Shelton, 1987), 대보조산운동과 관련된 금광화작용의 주광화기는 약 165~145 Ma이다. 이러한 유형의 광상은 대보화강암류의 저반과 일치하여 포천·홍천·천안·설천(영동)지역을 중심으로 밀집분포하고 있으며, 경기육괴의 포천·홍천·천안 광상구에서 소백산육괴의 상주·영동·보성 지역까지 유사한 광화시기로 보고되어 있다.

불국사 화성활동과 관련된 광상의 광화시기는 112~71 Ma이며(박희인 등, 1985; 소칠섭 등, 1988; 소칠섭 등, 1991; 최선규, 위수민, 1992; 이창신 등, 1993; 이현구, 김상중, 1995), 주광화기는 약 105~65 Ma이다. 이러한 백악기 광상은 동일 광화대 또는 동일 맥에서도 다양한 금-은비의 변화양상과 함께 열극충진형 조건에서 형성된 복성맥의 전형적인 산출특징을 보인다. 이와 같이 백악기 광상은 지역에 따라 상이한 금-은비의 특성을 갖고 있지만, 전반적으로 금단일형 광상보다 금-은혼합형 광상과 은단일형 광상이 우세하게 배태되는 경향을 보이고 있다. 특히, 정선·합천·순천·광양·함안·군북 광상구를 중심으로 하여 영암-나주광화대 뿐만 아니라 중부지역에 위치한 홍천광상구 중 횡성-홍천 지역, 천안 광상구 중 무극-부여-논산 지역, 설천 광상구 중 옥천-무주지역에 소재한 광상은 대부분 천부기원의 불국사 화성활동과 연관되어 금-은혼합형 광상 또는 은단일형 광상이 우세한 경향을 보인다. 이들 지역은 좌수향 주향이동 단층에 의해서 생성된 인리형 분지인 풍암·음성·공주·영동·진안·무주·능주·해남·목포 퇴적분지(최현일, 1998)에 위치하고 있으며, 이들 퇴적분지와 인접하여 불국사화성활동과 관련된 반상화강암·석영반암·안산암이 공통적으로 분포하고 있어 공통적으로 천부 지질환경을 시사하고 있다.

금-은 광화작용시 생성심도의 차이는 광화유체의 진화과정 및 금-은광물의 침전환경을 좌우할 수 있기 때문에 광화시기와 연계된 열수광맥형 금-은광상의 금-은비에 따른 상이한 광물·지화학적 특성은 다음과 같이 화성활동시기와 밀접한 관계를 보이고 있다. 대보화성활동과 관련된 광상의 지화학적 특성은 부평광산을 제외한 모든 광상이 매우 낮은 Ag/Au비를 갖는 금단일형 광상으로 산출된다. 불국사화성활동과 관련된 광화작용은 다양한 광물·지화학적 변화를 보이는 금단일형 광상, 금-은혼합형 광상, 은단일형 광상이 배태되지만, 금-은혼합형 광상과 은단일형 광상이 전반적으로 우세하다. 또한, 불국사화성활동과 관련된 금-은광상은 백악기 중기에서 백악기 말기로 광화시기가 진행됨에 따라 광화작용의 특성도 점차적으로 금광단일형 광상에서 금-은혼합형 광상과 은광단일형 광상으로 변화하는 경향을 보인다(Fig. 1).

대보 화성암체는 전반적으로 3.4~7.8 kb에 해당하는 지하 심부의 지질조건에서 관입정치된 대규모 저반의 특징을 보이는 반면에, 불국사 화강암류는 주로 천부 환경(0.8~2.8 kb)에서 정치된 화산-심성암의 복합암체로 해석하였다(조동룡, 권성택, 1994). 불국사화성활동에 의한 금-은 광화작용은 약 110 Ma부터 시작되고 있으며, 이는 대보화성활동과 관련된 최후기 광상의 생성 연대로 추정되는 140±5 Ma와는 약 30 Ma의 시간 차이를 보이지만, 생성환경 측면에서 판이하게 서로 다른 특성을 보이고 있다. 즉, 중생대 류라기부터 백악기까지 화성활동은 조구조적 특성을 반영하여 화성암체의 정치심도차이를 보여주고 있을 뿐만 아니라, 이에 수반된 금-은광화

작용도 각각 서로 다른 조구조환경에서 유래된 심부와 천부 지질조건에 의한 다양한 광화유체와 직·간접적으로 연계되어 있으며, 광맥의 산상, 광석광물의 종류 및 화학조성, 광물·지화학적 특징을 달리하고 있다.

광화시기와 생성환경

중생대 금-은광화작용은 광화 시기뿐만 아니라 공간적 측면에서도 분포지역과 밀접한 상관성을 보이고 있다. 경기육괴 및 소백산육괴에 위치한 충주·천안·영동 지역의 광상은 대보 화성암체의 저반을 따라 광역적으로 산재하며, 광상의 생성연대는 유라기 화성활동과 밀접하게 관련되어 있다. 이들 광상은 성인적으로 페그마타이트로부터 괴상 석영맥으로 점이적 변화양상을 보이며, 석영맥의 산상은 관계화성암의 정치심도를 반영하여 지하 심부환경의 생성조건을 시사하고 있다. 또한, 이들 광상은 낮은 Ag/Au비(<10)를 갖는 금단일형 광상으로 광화작용 전반에 걸쳐서 마그마 기원의 고온성 광화유체 또는 변성수~심부에서 진화된 심층순환수 기원의 광화유체로부터 H₂O-CO₂(-CH₄) 열수계가 형성되며, 심부의 지질조건을 반영한 화성암체의 느린 냉각과정에 따라 장기간에 걸쳐서 높은 지온구배가 유지됨으로써 천부의 유입이 불가능한 환경이 유도된다. 즉, 이들 광상에서 광화유체의 진화과정은 마그마기원의 고온성 열수(400°C, δ¹⁸O_{H₂O} = 5~10 ‰)가 초기 주열수계를 형성하여 Cu, Pb, Zn 황화광물이 주로 침전되었고, 후기 광화작용시 마그마 기원의 열수가 약화되며 부분적으로 동위원소 교환이 상대적으로 덜 이루어진 순환수의 유입에 의한 소규모 혼입작용에 기인하여 고온 상태(350~300°C)에서 열수유체의 비등 및 온·도감소 그리고 이에 따른 H₂O-CO₂(-CH₄)계의 불혼화 용융현상을 유발시킴으로써 집중적으로 증침전이 진행된 것으로 추정된다. 이러한 유형에 속하는 태창·보련·삼황학·천보·보덕·대흥·유령광산은 대보화성활동과 관련된 심부기원의 관입암체와 밀접한 연관성을 보이며, 성인적 관점에서 심열수~중열수 기원의 광상에 해당한다.

태백산지역의 정선 광화대와 남부지역의 영암-나주 광화대에 위치한 광상들은 전반적으로 백악기 화성활동과 관련되어 있으며, 유라기 광상에 비하여 높은 Ag/Au비(>10)를 보이고 있다. 또한, 경상누층군에 대비되는 퇴적암류가 단속적으로 분포하는 중부지역의 풍암·음성·공주·영동·진안-무주퇴적분지와 남부지역의 능주·해남-목포퇴적분지에 인접한 광산에서도 공통적으로 유사한 특징을 갖는다. 이러한 기원의 퇴적분지는 주향이동단층에 의해서 생성된 인리형 분지로 해석되며, 조구조운동시 전반적으로 지각의 두께가 얇아지는 열개 현상의 동반에 따른 퇴적작용과 함께 암압의 감소에 따라 마그마 발생을 유도하고 이동통로를 제공함으로써 단속적인 화성활동을 수반한다. 이는 이들 인리형 퇴적분지에 공통적으로 산출되는 백악기 반상화강암·석영반암·유문암·안산암·현무암의 존재를 통하여 입증되며, 천부조건에 의한 지질환경과 관련된 관입-분출작용을 시사하고 있다. 이에 수반된 광화유체는 전반적으로 마그마수 이외에 지표수 및 순환수 등 다양한 기원에 기인하며, 광화유체의 특성도 마그마수라기 보다는 지표수기원의 진화가 미약한 순환수(δ¹⁸O_{H₂O} = -10~5 ‰)로 추정된다(Fig. 2). 이러한 유형의 광상은 전형적으로 개방계의 천부 생성환경에 따라 형성된 열극충진형의 복성맥 산상을 보이며, 금-은비의 변화양상도 광

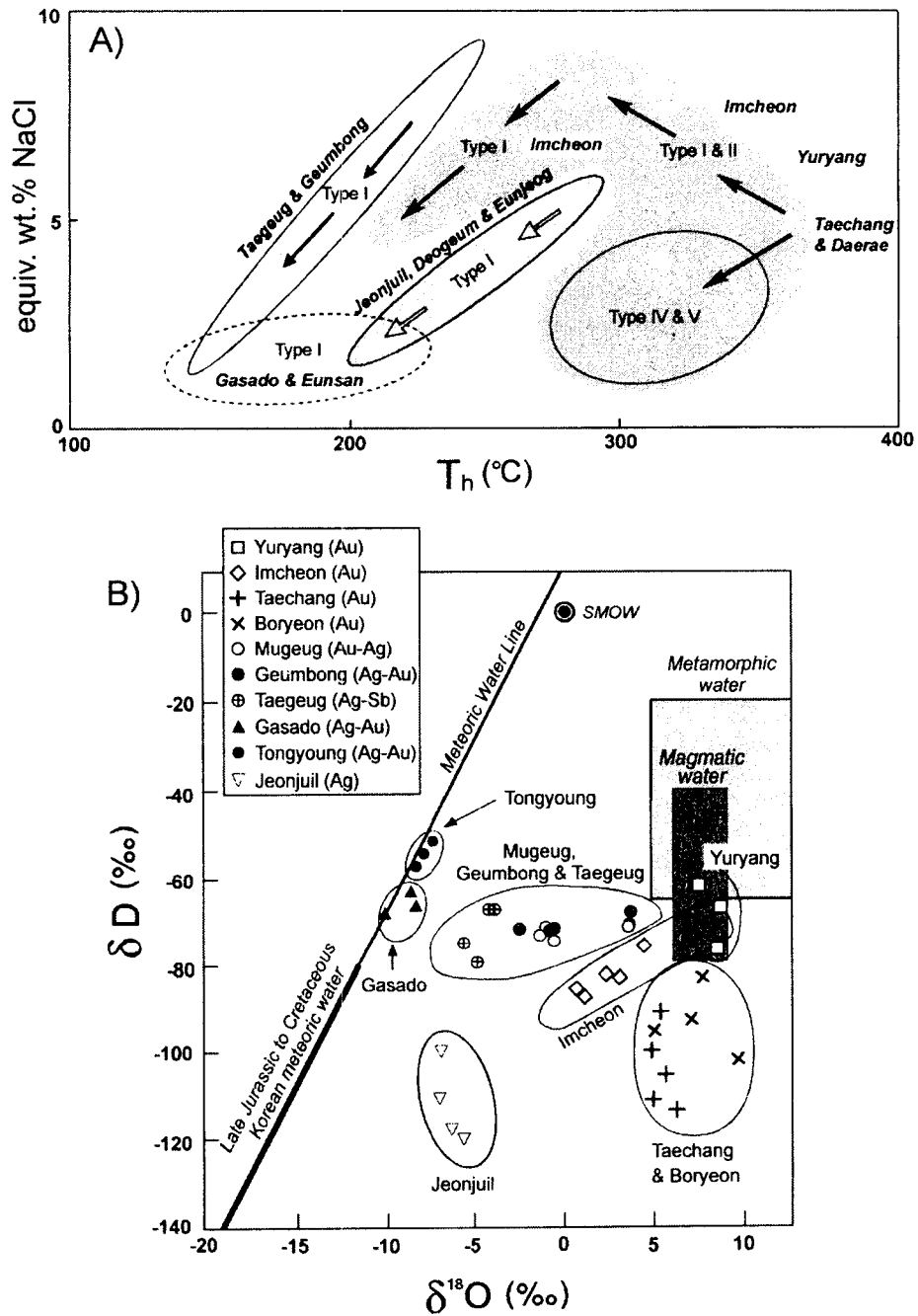


Fig. 2. Fluid inclusion and H-O isotope data for different types of the selected gold-silver deposits in Korea. A) Salinity vs. T_h diagram representing the inferred evolution path of ore-forming fluids through early stage to late stage. Type I = liquid-rich inclusion, Type II = gas-rich inclusion, Type IV = liquid CO_2 -bearing inclusion and Type V = liquid CO_2 - CH_4 -bearing inclusion. B) δD vs. $\delta^{18}\text{O}$ diagram for the calculated isotopic composition of water in equilibrium with quartz.

산별 유체의 조성 및 진화과정에 따라 다양하게 좌우된다. 이러한 백악기 금-은혼합형 광상과 은단일형 광상은 전반적으로 지표수의 혼입작용이 우세한 천부조건에서의 지질환경에서 형성된 열수계로서, 금-은비의 변화양상은 지질조건을 반영한 관계화성암의 압력-온도-산소·유황분압, 천수의 유입량, 주변모암과의 반응특성에 따라 광화유체의 복합적인 진화과정과 함께 상이한 광물 종의 정출환경을 유도하게 된다. 특히, 가사도·통영 광산의 화산성 열수계는 산소·수소 동위원소값이 국내의 금-은광상 중에서 가장 지표수에 근접한 값을 보이고 있어 가장 천부환경에서 형성된 화산성 저유황형 천열수광상으로 사료된다. 그리고, 국내 금-은 생산실적 측면에서 가장 중요한 광상의 유형으로 간주되는 무극·금왕·전주일·월유·덕음 광산이 성인적으로 저유황형 중열수~천열수광상에 속하지만, 금-은비에 따른 지화학적 특성은 서로 상이한 양상을 보인다. 이와 같이 광화시기에 따른 금-은 광화작용의 변화양상은 관계 화성암체의 정치심도에 따라 암압과 정수압간의 상이한 압력조건이 유도되어 광화유체의 이동 및 순환과정뿐만 아니라 광화용액의 진화과정 및 광물침전에 직접적 영향을 미친다. 특히, 광화심도의 차이에 따라 광화용액에 용해된 금-은 착이온 종의 차이를 고려할 수 있으며, 광화유체의 이동과정에서 지질조건에 따라 특정원소만을 특히 불안정한 상태로 유도하여 우세하게 정출되는 광물 종이 결정된다.

성인모델에 따른 탐사에의 적용

주향이동 단층과 관련된 금-은광화대에 위치한 천부기원의 무극·금왕·금봉·태극광산과 최근 탐사가 진행되고 있는 화산성 천열수 광상인 가사도광산을 대상으로 맥의 산상, 열수변질대, 광물·지화학적 특성, 유체포유물 및 동위원소 연구자료를 종합적으로 비교 검토하여, 향후 인리형 분지와 관련된 금-은광상의 모델정립 및 광역·정밀탐사의 지침설정에 필요한 자료를 제시하고자 한다.

무극 광화대 (금봉·태극광산을 중심으로)

무극 열수계에서 광화대 전반에 걸친 금-은비의 분포양상은 금-은광물의 정출 메카니즘과 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 광화대에서 건운모화작용·녹니석화작용·녹염석화작용이 우세하게 발달하지만, 남측 광화대에서 진행된 건운모화작용·녹니석화작용·녹염석화작용 이외에 캐올린화작용·규화작용·탄산염화작용·스멕타이트화작용은 비교적 낮은 온도에서 형성된 열수변질작용으로 추정된다.

금봉광산 99-7호 시추공을 대상으로 PIMA SP에서 확인된 열수변질광물의 공생군을 기존 광물학적 연구에 의해 분류된 열수변질대 및 대한광업진흥공사에서 분석된 위치별 금·은 품위자료와 비교한 결과 PIMA SP에서 인지되는 각 변질대에 대응하는 지시광물들이 전반적으로 기존의 방법에 의한 열수변질대 분포와 유사한 경향으로 나타나고 있으며, 부광대가 형성되는

50m, 160m, 260m 부근에서 석영맥을 중심으로 일라이트가 우세하게 나타나고 있다(김창성 등, 2002). 특히, 부광대의 열수변질대에서 분대의 배열특징은 석영맥 → 견운모대 → 아견운모대 → 프로필리틱대 → 아프로필리틱대의 순서로 나타내지만(Fig. 3), 빈광대에서는 석영맥 → 아견운모대 → 프로필리틱대 → 아프로필리틱대로 구성되며 아견운모대 및 견운모대의 존재가 극히 미약한 열수변질대의 분포특징을 보이고 있다(최선규 등, 2001).

무극·금붕·태극 광산의 산소동위원소비를 종합적으로 비교 검토한 결과 광화대 최남단의 외각에 위치한 태극광산은 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 는 -5.5~-4.1‰로 뚜렷한 결핍현상을 보이는데(Fig. 2), 이는 천수의 유입량이 우세하게 증가함을 지시하고 있다. 또한, 이러한 동일 광화대내에서 각 광산별 현저한 산소동위원소비의 차이는 주로 열수용액과 순환수의 상이한 혼합비에 기인한 것으로 해석된다. 이러한 광화유체는 광화초기~중기동안 마그마 기원의 열수가 유입됨으로써 열수계가 형성과 함께 금광화작용이 되었으며, 광화후기의 은광화작용은 동위원소의 교환반응이 상대적으로 적게 진행된 천수의 유입량의 증가와 함께 유도되어 점차 가벼운 동위원소조성으로 진화된 것으로 추정된다.

무극광산의 광화유체는 비교적 고온·고염도($\approx 300^\circ\text{C}$, 1~9 equiv. wt. % NaCl)와 물-암석 상호반응이 진행된 광화유체($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = -1.2 \sim 3.8\%$)로부터 냉각 및 희석작용의 진화양상을 보이며, 에렉트럼과 황화광물의 광물조합을 보이는 금광화기의 황분압 및 정출온도는 $10^{11.5} \sim 10^{13.5}$ atm과 $260^\circ \sim 220^\circ\text{C}$ 를 보인다. 반면, 남측의 금왕·금붕·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 혼입작용에 의한 저온·저염 광화유체($<230^\circ\text{C}$, <3 equiv. wt.% NaCl)의 순환수로부터 CO_2 비등 및 냉각작용에 의한 진화양상을 보인다(Fig. 2). 황화광물과 에렉트럼 이외에도 다양한 함은황염광물이 우세하게 산출되는 은광화기의 황분압 및 정출온도는 $10^{15} \sim 10^{18}$ atm과 $200^\circ \sim 150^\circ\text{C}$ 로서 금광화기와는 현저한 차이를 보인다.

무극광화대에서 맥의 산상, 열수변질대, 광물학적 특성, 유체포유물 및 동위원소 연구결과를 통하여, 무극열수계는 인리형 분지와 관련된 이차 구조선을 따라 다량의 지표수 유입이 가능한 천부 지질환경임을 시사하며, 성인적으로 전형적인 저유황형 천열수 광상에 해당된다. 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 지온구배가 형성되고 광화유체는 전반적으로 높은 물/암석 반응비에 기인한 견운모 변질작용과 함께 ^{18}O 부가현상이 우세하게 진행되지만, 태극광산은 광화대 최남단의 외각 지역으로 열적 중심에서 가장 먼 곳에 위치함으로써 상대적으로 낮은 지온구배가 유지되고 지표수의 유입이 용이하여 ^{18}O 결핍현상과 함께 저온·저염농도의 광화유체의 특징을 보이며 낮은 물/암석 반응비에 기인한 프로필리틱변질작용이 우세하게 진행된 것으로 추정된다.

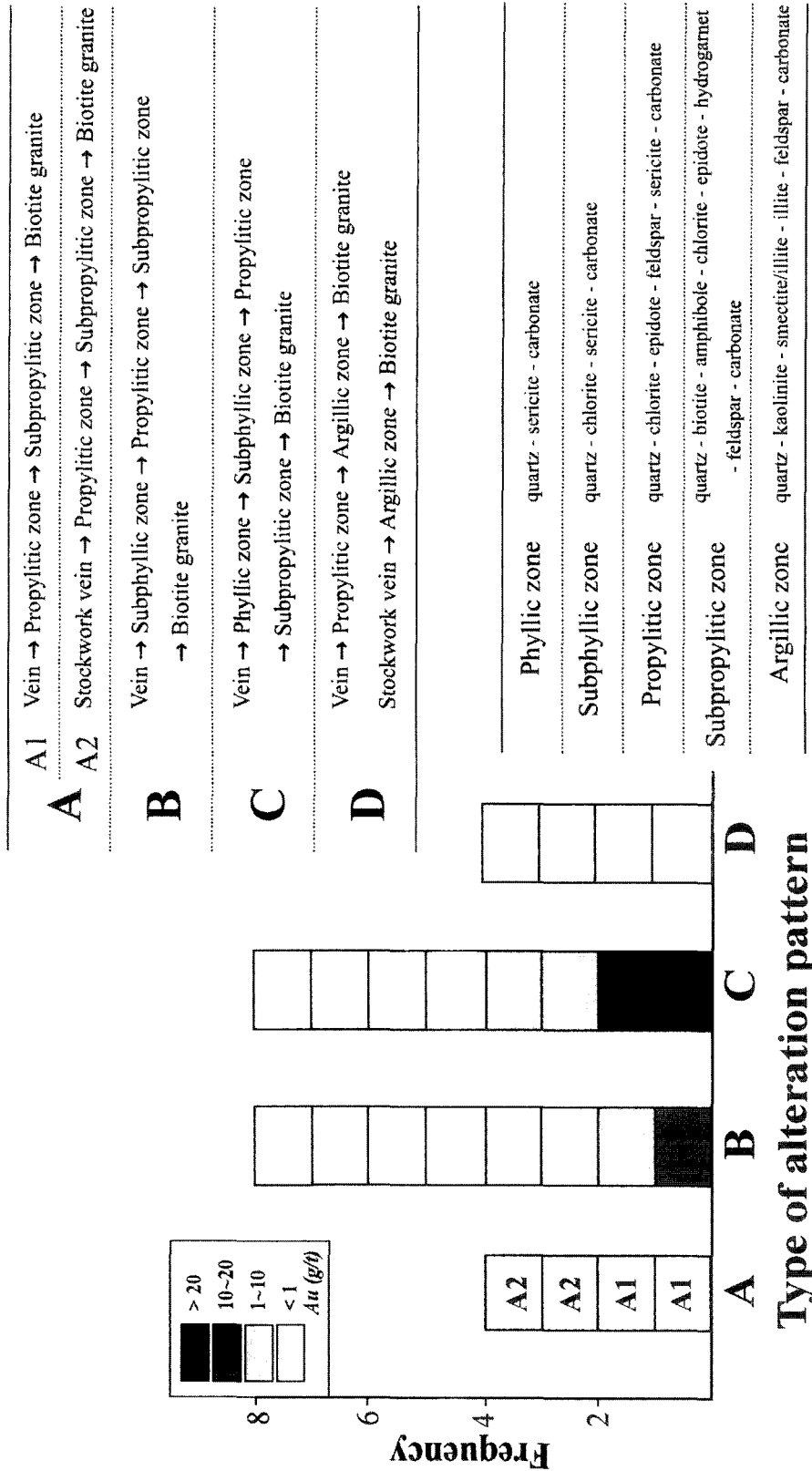


Fig. 3 Comparison of different alteration patterns related to the Au grade (g/t) in ores.

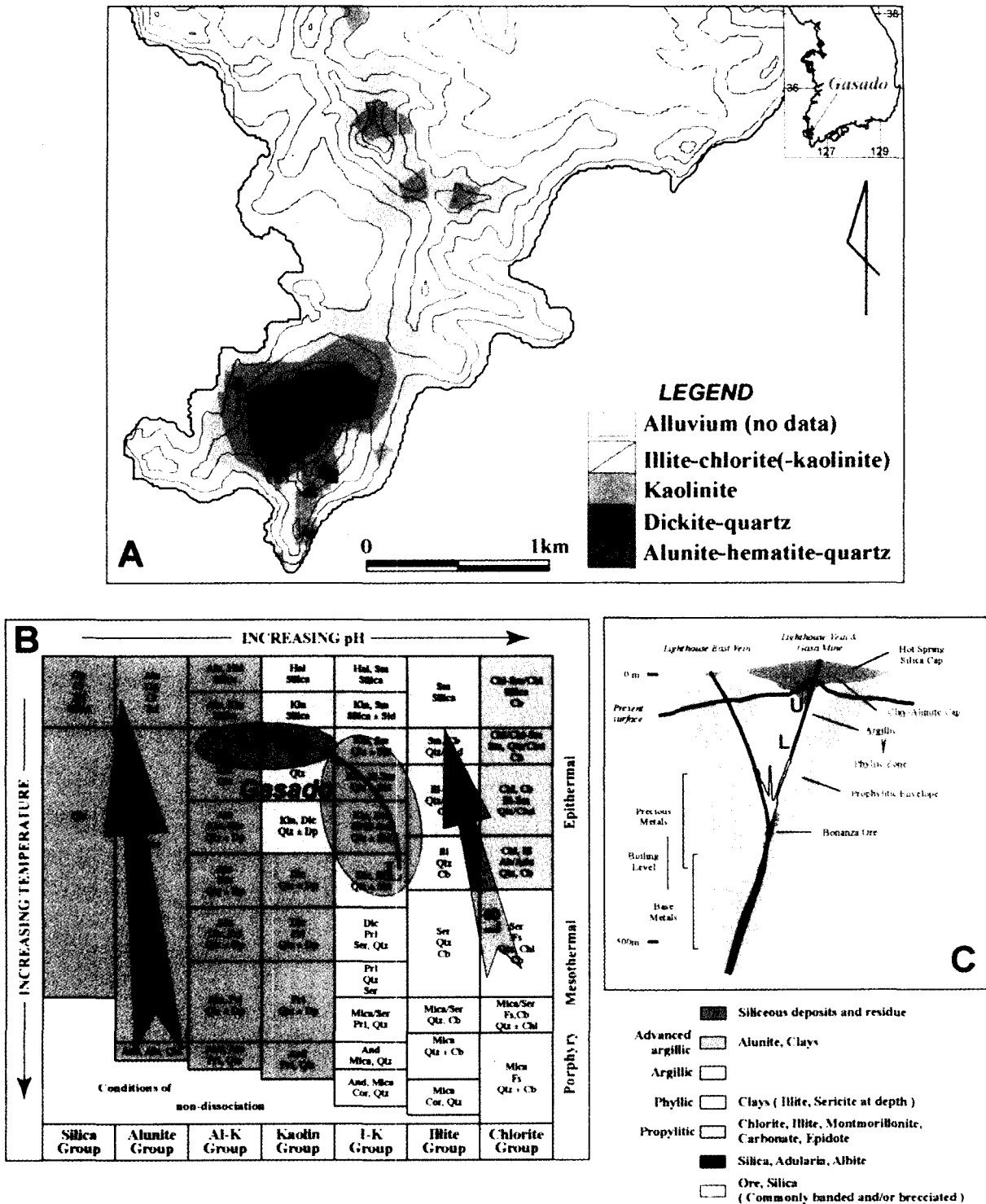


Fig. 4. Hydrothermal alteration pattern in the Gasado district. A) Alteration map in the Gasado, B) Showing the vertical change of alteration mineralogy between upper part (U) and lower (L) part in Gasado deposit. HS (high-sulfidation type) and LS (low-sulfidation type). C) Idealized model of the epithermal deposits (Buchanan, 1981).

다. 이러한 사실은 마그마가 유입된 열적 중심을 무극광산 부근으로 추정할 수 있다. 또한, 함금-은광맥 간에서 금-은비의 차이는 광화작용의 열적 중심으로부터 수평·수직적 거리과 밀접한 연관성을 갖고 있으며, 이러한 분포양상은 열수계의 진화과정시 유체간 혼합과정에 따른 광화유체의 희석작용과 온도감소에 기인하여 금-은광물의 상이한 정출환경이 유도된 것으로 해석된다.

가사도지역

가사도는 최근 국내 금·은 광상의 탐사 대상이 되고 있는 화산암 지역의 천열수 금-은광상으로 1995년부터 캐나다의 아이반호(Ivanhoe mines)와 대한광업진흥공사에서 지속적으로 탐사를 실시하고 있는 지역이다(대한광업진흥공사, 2000). 가사도 지역의 금-은광상은 불국사화산활동과 관련된 응회암, 석영안산암 및 유문암 등의 화산암류 및 퇴적암을 모암으로 하여 배태된 광상으로, 기 보고된 화산암류 및 견운모에 대한 절대연령은 각각 76~72 Ma와 70 Ma이다(Kim, Keisulce, 1992; Koh *et al.*, 2000). 가사도 지역 함금-은 석영맥은 판상(sheeted) 및 망상(stockwork)맥의 산상을 보이며, 빗살, 호상 및 깃털조직 등 천열수광상의 전형적인 조직을 나타내고 있다. 특히, 이 지역은 지표에서 부분적으로 명반석-딕카이트로 이루어진 변질대가 인지되어 고유황형 천열수 광상의 성인적 해석과 함께 시추탐사가 시작되었다.

가사도 지역의 열수변질대는 석영맥 부근에서는 강한 규화작용을 받아 고지대를 형성하고 있으며, 특히, 등대맥 인근지역 중 급경사지역과 고지대에서 명반석, 딕카이트, 적철석, 석영의 변질광물조합이 특징적으로 산출되지만, 저지대 및 완경사 지역에서 일라이트-녹니석의 저유황형의 광물조합이 나타나고 있다. 또한, 금-은광상 주변부는 견운모가 광범위하게 산출하며, 광맥의 외각 주변부에 방해석 세맥과 함께 녹니석 및 녹렴석이 주로 분포하고 있다.

PIMA 및 XRD에 의한 열수변질대의 종합 분석결과, 변질광물상의 변화에 따라 고점토대(딕카이트-명반석-석영), 점토대(딕카이트-석영), 견운모대(석영-견운모-황철석) 및 프로필리틱대(녹니석-탄산염광물-석영-장석-휘석)로 구분된다. 고점토대는 등대맥 최상부인 노인봉을 중심으로 분포하고 있으며, 그 외각부에서 견운모대 및 프로필리틱대가 산출되고 있다. 등대맥 변질광물의 수직적 분포양상은 하부 시추시료에서 일라이트-탄산염광물-녹니석-장석-석영의 전형적인 저유황형 변질대가 우세하게 분포하지만, 상부 시추시료 및 지표시료에서 저유황형 변질광물조합 이외에도 딕카이트-명반석-석영의 고유황형 변질광물조합이 광범위하게 발달하고 있다. 즉, 가사도 지역과 같이 저유황형 변질대의 상부에 고유황형 변질대가 분포하는 광상의 생성모델은 고유황형(HS)과 저유황형(LS) 천열수광상의 일반적 분포양상과는 상이한 결과로서, 중성 광화유체의 상승과정시 압력 감소로 인하여 H₂S의 비등작용에 따른 산성 유체로 변화에 기인한다(Fig. 4).

가사도 지역의 금-은 광화작용과 관련된 석영맥은 주로 옥수질 석영 및 탄산염광물과 함께 저유황형 광상의 지시광물인 아들라리아가 산출되며, 빗살·정동·각력상·호상·깃털 조직과 같은 천열수광상의 전형적인 조직을 보인다. 명반석은 고온(300° ~350°C)의 유체로부터 정출될 경우 상대적으로 조립의 판상 또는 주상의 형태로 산출하는 반면, 광상형성과 관련된 H₂S의 비등작

용시 지하수면 상부에서 산화과정으로 $H_2S + 2O_2 \Rightarrow H_2SO_4$ 에 따라 산성유체가 형성되며, 저온조건($100^\circ \sim 150^\circ C$)에서 정출될 경우 미립($<50\mu m$)의 가상정육면체로 산출되는 것으로 알려져 있다(Hedenquist et al., 2000). 그리고, 낮은 온도에서 정출할 경우 상대적으로 K함량이 Na함량에 비해 부화되는 특징이 있는 것으로 알려져 있다(Stoffregen et al., 1989). 가사도 지역 고점 토대의 명반석은 주로 가상정육면체의 결정으로 산출되며, $K/(Na+K)$ 는 0.88로서 산성유체가 지배적인 환경에서 생성된 것으로 추정된다.

저유황형 광상에서 산출되는 에렉트럼은 일반적으로 매우 높은 금함량을 보이는 반면, 저유황형 광상은 이에 비하여 현저하게 낮은 금함량의 특징을 보인다(Corbett, Leach, 1998). 가사도 등대맥에서 산출되는 에렉트럼의 금함량은 14.6~53.7 (평균치, 32.0) atomic% Au로서 전반적으로 낮은 금함량의 특징을 보이고 있으며, 저유황형 천열수광상의 에렉트럼 조성과 잘 일치하고 있다. 또한, 에렉트럼-섬아연석 지질온도계에서 추정된 $245^\circ \sim 285^\circ C$ 의 정출온도 및 유체포유물에서 측정된 균질화온도 및 염농도($158^\circ \sim 253^\circ C$ 및 0.9~3.4 equiv. wt.% NaCl)는 저유황형 천열수 광상에서 보고된 균질화온도 및 염농도의 범위인 $<300^\circ C$ 와 <3.5 equiv. wt.% NaCl과 잘 일치하고 있다(Cooke, Simmons, 2000). 에렉트럼-섬아연석 지질온도계의 정출온도가 석영을 대상으로 한 유체포유물의 균질화온도에 비해 약간 높은 값을 보이는 것은 일반적으로 광상 형성시 광석광물은 특정 시기에 한정되어 산출하는 반면, 석영은 광화기 전반에 걸쳐서 정출된 결과에 기인한다. 산소-수소 안정동위원소 연구결과 $\delta^{18}O_{H_2O} = -10.1 \sim -1.5\%$, $\delta D = -68 \sim -64\%$ 의 범위로 광화유체의 기원은 상대적으로 동위원소 교환이 적게 진행된 천수이며, 이러한 천수의 순환에 의해 광상이 형성된 것으로 추정할 수 있다.

옥수질 석영·아들라리아·판상 방해석 또는 판상 석영 등은 천부환경에서 수반되는 일반적인 광물들이며, 이들의 존재유무는 광화작용시 금의 침전과 연관된 비등현상의 간접적인 증거로 언급하였다(Hedenquist, 1991). 특히, 판상 방해석 및 판상 석영은 CO_2 비등작용과 관련하여 광체 상부에서 산출되며, 비등작용의 후기에 주로 정출되는 아들라리아는 상부보다는 하부에서 증가하는 것으로 보고된 바 있다. 즉, 가사도 지역의 등대맥에서 판상 방해석, 판상 석영 및 아들라리아의 산출빈도의 증가양상을 통하여 비등현상이 발생된 심도가 현재 확인된 맥의 위치보다 하부에서 일어난 것으로 추정될 수 있으며, 천열수광상 형성시 비등현상에 의하여 금침전보다 상부에 집적되는 휘발성 원소들 중 비소가 황철석 내에 치환(As-bearing pyrite)되어 이러한 사실을 입증하고 있다. 따라서, 가사도 지역의 이러한 열수변질대의 분포특성, 맥의 산상, 광석광물의 공생관계 및 화학조성, 유체포유물 및 동위원소의 분석자료, 광화유체의 기원 및 생성환경을 종합적으로 검토한 결과, 등대맥과 등대동맥의 현재 지표에 노출된 부분은 화산성 저유황형 천열수 금-은광상의 최상부로 온천형 광상(hot-spring type)에 해당하며, 현 위치보다 심부에서 비등작용과 관련된 부광대의 부존 가능성을 예견할 수 있다.

결 언

결론적으로 국내의 열수광맥형 금-은광상은 중생대 화성활동의 시기와 직접 연계되어 있으며,

대보 및 불국사화성활동시기에 따라 각각 관입심도의 차이를 반영하여 서로 다른 지질환경에서 형성된 다양한 기원의 광화유체로부터 상이한 유형의 광상이 배태되고 있다. 이와 같이 금-은광상은 지질시대에 따른 환경특성을 반영하여 열수유체의 기원뿐만 아니라 상이한 유체진화과정 및 생성환경의 차이를 나타내고 있으며, 광물학적, 유체포유물 및 동위원소 연구결과와도 잘 일치하고 있다. 유라기 광화작용과 관련된 조산대형 금광상(oro-genic Au type)으로 대비되는 태창·보련·삼황학·대홍광산과 같은 금단일형 광상은 심열수~중열수광상으로, 백악기 광화작용과 관련된 천부 환경(volcanic-plutonic-related type)에서 형성된 무극·금왕·금봉·덕음광산과 같은 금-은혼합형 광상과 전주일·월유·은적광산 등의 은단일형 광상은 중열수~천열수광상으로, 가사도 광산은 전형적인 화산성 저유황형 천열수광상으로 각각 구분된다. 이는 광화시기에 따른 화성암체의 관입심도 차이에 따라 광화유체로부터 금-은광물의 침전 메카니즘이 좌우되었으며, 금-은광상의 지화학적 특성에 직접적인 영향을 준 것으로 해석된다.

유라기형 금단일형 광상은 부분적으로 고품위의 특징을 보이지만 전반적으로 불규칙적인 분포양상을 보인다. 이러한 유형은 기 보고된 중국 산둥지역의 조산대형 금광상과 매우 유사한 경향을 보인다. 반면에 백악기형 금-은 혼합형은 금-은광물의 침전 메카니즘에 따라 광상 단위의 수평·수직적 변화양상(horizontal-vertical zoning)을 보이지만 전반적으로 일정한 품위를 보이고 있다. 기 보고된 생산량을 고려한 광상 규모는 유라기 금단일형 광상(태창·보련·삼황학·중앙·대홍 광산)보다 백악기 금-은혼합형 광상(무극·금왕 광산) 또는 백악기 은단일형 광상(월유·전주 일 광산)에서 >10 t 이상의 금-은 생산실적이 보고된바 있어, 백악기 금-은혼합형 광상이 광상 규모를 고려할 경우 개발잠재성 측면에서 유리한 것으로 추정된다. 또한, 앞으로 금-은광상의 탐사는 한반도의 지각진화와 관련된 광화시기별 또는 광화대별 시·공간적 특성을 체계적으로 정립하여 이에 따른 금-은광화작용의 성인적 모델과 개발 잠재성을 종합적으로 검토할 필요가 있다고 사료된다.

사 사

이 연구는 2002 과학기술부 과학재단 특정기초연구사업의 지원에 의해 수행되어 이에 깊은 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- 권병수, 왕규택, 박명호, 황해걸, 김준호, 정영부, 정동화, 문영환, 강홍석, 강백규, 김성석(1987) 한국의 광상, 대한광업진흥공사, 10권, 1012 p.
- 김규한 (1996) 남한의 중생대 화강암중의 가스성분과 유체포유물 연구. 자원환경지질, 29권, p. 455-470.
- 김옥준 (1970) 남한의 금-은광상구. 광산지질, 3권, p. 163-167.
- 김옥준 (1971) 남한의 초기 화강암류의 관입시기와 지각변동. 광산지질, 4권, p. 1-10.

- 김창성, 박상준, 최선규, 김유동, 지세정 (2002) 열수변질대탐사를 위한 단과장 적외선 분광법의 응용. 한국자원공학회지, 39권, p. 231-241.
- 박노영, 최선규, 박성원 (1985) 중원군 일원의 열수광상의 성인연구. 금속광상조사연구, 85-15, 한국동력자원연구소, p. 193-229.
- 박노영, 최선규, 박성원 (1986) 충청도 일원의 금-은광상에 대한 성인연구. 금속광상조사연구, 86-10, 한국동력자원연구소, p. 387-435.
- 박희인, 최석원, 장호원, 채동현 (1985) 경남 함안-경북지역의 동광화작용에 관한 연구. 광산지질, 18권, p. 107-124.
- 박희인, 장호원, 진명식 (1988a) 태백산지역내 광상의 생성연대. 광산지질, 21권, p. 57-67.
- 박희인, 장호원, 진명식 (1988b) 한반도중부지역의 광상생성기와 생성구: 경기육괴내의 광상생성연대. 광산지질, 21권, p. 349-358.
- 소철섭, Shelton, K.L., 지세정, 최상훈 (1988) 한반도 천안-청양-논산지역 광화대내 금-은열수광상의 안정동위원소 및 유체포유물연구: 청양지역. 광산지질, 21권, p. 149-164.
- 소철섭, 윤성택, 지세정, 고용권, 최상훈 (1991) 한반도 무주-영암의 백악기 천열수 금-은광화작용 연구(공주지역 광화대): 지질, 광물학적 유체포유물연구. 지질학회지, 27권, p. 451-470.
- 이현구, 김상중 (1995) 감계 동-연-아연-금-은광상의 광석광물과 유체포유물 연구. 자원환경지질, 28권, p. 9-17.
- 윤석태, 박희인 (1991) 용화광산의 금-은광화작용. 광산지질, 24권, p. 107-129.
- 이창신, 김용준, 박천영, 고진식 (1993) 광양-승주지역 금-은광상의 광화작용. 광산지질, 26권, p. 145-154.
- 조등룡, 권성택 (1994) 남한의 중생대 화강암에 대한 각섬석 지압계와 지각두께의 진화. 지질학회지, 30권, p. 41-61.
- 진명식 (1998) 한국의 지질; 화성활동. 대한지질학회, 시그마프레스, p. 385-484.
- 최선규, 박노영, 홍세선 (1988) 충청도 일원의 금-은광상에 대한 광물학적 연구. 광산지질, 21권, p. 223-234.
- 최선규, 위수민 (1992) 에렉트럼의 화학조성과 관련된 한국중부지역 금-은광상의 성인적 특성. 지질학회지, 28권, p. 196-217.
- 최현일 (1998) 한국의 지질; 중생대층. 대한지질학회, 시그마프레스, p. 233-273.
- Choi, S.G. and Choi, S.H. (1995) Contrasting styles of gold and silver mineralization in the central and southeastern Korea. Econ. Environ. Geol., v. 28, p. 587-597.
- 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. Economic and Environmental Geology, v.34, p. 423-435.
- Choi, S.G., Pak, S.J., Choi, S.H. and Shin, H.J. (2001) Mesozoic granitoids and associated gold-silver mineralization in Korea. Economic and Environmental Geology, v. 34, p. 25-38.

- Cole, D.R. and Drummond, S.E. (1986) The effect of transport and boiling on Ag/Au ratios in hydrothermal solutions: a preliminary assessment and implications for the formation of epithermal precious-metal ore deposits. *J. Geochem. Explor.*, v. 25, p. 45-80.
- Cruzet, D., Lee, B.J. and Cadet, J.P. (1991) Indosinian dextral ductile fault system and synkinematic plutonism in the south-west of the Ogcheon belt (South Korea). *Tectonophysics*, v. 194, p. 131-151.
- Dowling, K. and Morrison, G. (1989) Application of quartz textures to the classification of gold deposits using north Queensland examples. *Econ. Geol. Monograph* v. 6, p. 342-355.
- Jin, M.S., Lee, Y.S. and Ishihara, S. (2001) Granitoids and their magnetic susceptibility in south Korea. *Resource Geology*, v. 51, p.189-204.
- Jwa, Y.J., Moutte, J. and Cho, W.H. (1994) Petrochemistry of mesozoic granites in the central Ogcheon belt and its tectonics implication [abstr]. *Abstr. 4th Intern. Symp., IGCP 321*, p. 48-49.
- Jwa, Y.J. (1998) Temporal, spatial and geochemical discriminations of granitoids in south Korea. *Resource Geol.*, v. 47, p. 273-284.
- Kim, I.J. and Keisuke, N. (1992) K-Ar ages of the hydrothermal clay deposits and the surrounding igneous rocks in southwest Korea. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v. 1, p. 58-70.
- Kim, W.J. (1986) Metallogeny on gold-silver in south Korea. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 19, p. 243-264.
- Kim, S.Y. (1989) Mineralogical and geochemical studies of the Eunjeok volcanic-hosted silver-gold vein deposit, Youngam-Naju mining area, Korea. Unpub. M.D. thesis, Korea Univ., p. 1-65.
- Koh, S.M., Tetsuichi, T., Kim, M.Y., Kazuki, N., Hong, S.S., and Sadahisa, S. (2000) Geological and geochemical characteristics of the hydrothermal clay alteration in South Korea. *Resource Geology*, v. 50, p. 229-242.
- Kwon, S.T. and Sagong, H., 1998, Geochemical and Sr-Nd Isotopic Study of Phanerozoic Granites in South Korea: Temporal and Spatial differences. *Societies of Resource Geology*, (Abstr.) S-05.
- Peters, S.G. (1993) Nomenclature, concepts and classification of ore shoots in vein deposits. *Ore Geol. Rev.*, v. 8, p. 3-22.
- 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.

- 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-silver bearing hydrothermal vein deposits, Cheonan-Cheongyang-Nonsan mining district, Republic of Korea: Cheonan area. *Econ. Geol.*, v. 82, p. 987-1000.
- So, C.S., Chi, S.J. and Shelton, K.L. (1987a) Stable isotope and fluid inclusion studies of gold-silver-bearing vein deposits, Cheonan-Cheongyang-Nonsan mining district, Republic of Korea: Nonsan area. *Neues Jb. Min. Abh.*, v. 158, p. 47-65.
- So, C.S., Chi, S.J. and Shelton, K.L. (1987b) The Jeonui gold-silver mine, Republic of Korea: A geochemical study. *Mining Geol.*, v. 37, p. 313-322.
- So, C.S., Chi, S.J. and Choi, S.H. (1988) Geochemical studies on Au-Ag hydrothermal vein deposits, Republic of Korea : Jinan-Jeongeup mineralized area. *J. Min. Petr. Econ. Geol.*, v. 83 p. 449-471.
- So, C.S., Choi, S.H., Chi, S.J., Choi, S.G. and Shelton, K.L. (1989a) Geochemical studies on Au-Ag hydrothermal vein deposits, Republic of Korea: Geryeong-Waegwan mineralized area. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 22, p. 221-235.
- So, C.S., Yun, S.T., Choi, S.H. and Shelton, K.L. (1989b) Geochemical studies of hydrothermal gold-silver deposits, Republic of Korea: Youngdong mining district. *Mining Geol.*, v. 39, p. 9-19.
- So, C.S., Yun, S.T., Kim, S.H., Youm, S.J., Heo, C.H. and Choi, S.G. (1993) Mesothermal gold-silver mineralization at the Bodeok mine, Boseong area: A fluid inclusion and stable isotope study. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 26, p. 433-444.
- So, C.S. and Yun, S.T. (1997) Jurassic mesothermal gold mineralization of the Samhwanghak mine, Youngdong area, Republic of Korea: Geochemistry of magmatic-hydrothermal gold deposition. *Econ. Geol.*, v. 92, p. 60-80.
- So, C.S. and Yun, S.T. (1992) Geochemistry of hydrothermal Au-Ag-Pb-Zn deposits in the Hwanggangri mineralized district, Republic of Korea. *Econ. Geol.*, v. 87, p. 2056-2084.
- Tsuchida, T (1944) Ore deposits in Korea. Kasumigaseki book Co. Tokyo. 329 p.
- Vearncombe, J.R. (1993) Quartz vein morphology and implications for formation depth and classification of Archean gold-vein deposits. *Ore Geol. Rev.*, v. 8, p. 407-424.
- Yun, S.T., So, C.S., Choi, S.H. Shelton, K.L. and Koo, J.H.(1993) Genetic environment of germanium-bearing gold-silver vein ores from the Wolyu mine, Republic of Korea. *Mineral. Deposita*, v. 28, p. 107-121.