

한국 중생대 화강암류와 이에 수반된 금-은광화작용

최선규^{1*} · 박삼준¹ · 최상훈² · 신홍자³

¹고려대학교 지구환경과학과, ²충북대학교 지구환경과학과, ³한국지질자원연구원

Mesozoic Granitoids and Associated Gold-Silver Mineralization in Korea

Seon-Gyu Choi^{1*}, Sang Joon Pak¹, Sang-Hoon Choi² and Hong Ja Shin³

¹Dept. of Earth and Env. Sci., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

²Dept. of Earth and Env. Sci., Chungbuk Nat. Univ., Cheongju 361-736, Korea

³Korea Institute of Geoscience and Mineral Resource, Daejeon 305-350, Korea

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 (about 200~130 Ma) coincident with orogenic time, gold mineralization took place between 197 and 127 Ma. The Jurassic 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, Au-rich electrum, pyrrhotite and/or pyrite. During the Bulgugsa igneous activities (120~60 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 abundance of ore minerals including base-metal sulfides, Ag sulfides, native silver, Ag sulfosalts and Ag tellurides. Vein morphology, mineralogical, fluid inclusion and stable isotope results indicate the diverse genetic natures of hydrothermal systems. The Jurassic Au-dominant deposits were formed at the relatively high temperature (about 300 to 450°C) and deep-crustal level (>3.0 kb) from the hydrothermal fluids containing more amounts of magmatic waters ($\delta^{18}\text{O}$; 5~10 ‰). It can be explained by the dominant ore-depositing mechanisms as CO_2 boiling and sulfidation, suggestive of hypo/mesothermal environments. In contrast, mineralization of the Cretaceous Au-Ag type (108~71 Ma) and Ag-dominant type (98~71 Ma) occurred at relatively low temperature (about 200 to 350°C) and shallow-crustal level (<1.0 kb) from the ore-forming fluids containing more amounts of less-evolved meteoric waters ($\delta^{18}\text{O}$; -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 epi/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 type.

Key words: gold-silver mineralization, Mesozoic granitoids, gold-dominant deposit, gold-silver deposit, silver-dominant deposit

한반도 금은광화작용은 중생대 대보화성활동(약 200~130 Ma)과 불국사화성활동(약 120~60 Ma)의 관입시기에 따라 다양한 지질환경에서 형성된 상이한 금속비의 광상이 배태되고 있으며, 각각 서로 다른 정치깊이를 반영하여 광상 성인적 유형뿐만 아니라 시 공간적 분포를 보이고 있다. 맥의 산상, 광물학적, 유체포유물 및 동위원소 연구결과에 의하면, 주라기 광상은 성인적으로 페그마타이트와 밀접한 연관성을 보이며, 낮은 금은비(Ag/Au ratio)의 금단일형 광상(197~127 Ma)으로 비교적 단순한 광물조합과 높은 금함량의 에렉트럼이 산출된다. 이러한 유형의 광상은 심부기원의 전형적인 괴상 단성맥의 구조를 보이며, 심부(>3.0 kb)의 환경조건에서 마그마 기원의 고온성 광화 유체(약 300~450°C, $\delta^{18}\text{O}$; 5~10‰)로부터 CO_2 비등현상과 황화작용의 침전 메커니즘에 의해서 형성되었다. 반면, 백악기 금

*Corresponding author: seongyu@korea.ac.kr

-은광상들은 주로 전형적인 복성맥의 구조를 보이고, 비철금속의 황화광물이외에도 다양한 함은·함은황염 광물 조합에 기인한 높은 금은비의 금은혼합형 광상(108~71 Ma) 또는 은단일형 광상(98~71 Ma)으로 산출된다. 이러한 유형의 광상들은 천부의 지질환경(<1.0 kb)에서 지표수의 혼입에 따른 순환수 기원의 비교적 낮은 온도 광화유체(약 200~350°C, $\delta^{18}\text{O}$; -10~5‰)로부터 비등 및 냉각작용에 의한 복합적인 침전 메카니즘으로 형성되었다. 즉, 쥬라기 금단일형 광상에 속하는 태창 보련 삼황화 대홍광산은 전형적인 심열수~중열수광상으로, 백악기 금은혼합형 광상에 속하는 무극 금왕 금봉 덕음광산과 백악기 은단일형 광상에 속하는 전주일 율유 은적광산은 중열수~천열수광상으로, 가사도광산은 전형적인 화산성 저유황형 천열수광상으로 각각 구분된다. 중생대 대보 화성암체와 불국사 화성암체의 지구조적 특성에 따른 정치심도의 차이는 광화유체의 온도, 압력, 조성 및 기원뿐만 아니라, 유체의 진화과정 및 금-은 광물의 침전 메카니즘을 좌우하며, 결과적으로 금-은광상의 금속비에 직접적인 영향을 준 것으로 해석된다.

주요어 : 금-은광화작용, 중생대 화강암류, 금단일형 광상, 금은혼합형 광상, 은단일형 광상

1. 서 언

국내의 금-은광상은 전국에 걸쳐 다양한 광물 및 지화학적 특성을 갖는 약 700 개의 광산이 분포하며 (Gallagher, 1963; 권병수 등, 1987), 1930년부터 1995년까지 순금 145 t 이 생산되어 중요한 광물자원으로 인식되고 있다. 이러한 금-은광상의 성인은 열수충진형 맥상광상, 알라스카이트 광상, 스키른 광상, 열수교대 광상, 충적형 사금광상으로 분류될 수 있으나, 대부분은 열수충진형 맥상광상과 충적형 사금광상이다. 또한, 타 유형의 광상 중 알라스카이트 기원의 금정 금광산을 제외하면 열수교대형 광상(연화 및 장군)과 스키른 광상(거도 및 상동)에서도 Zn, Pb, Cu, W, Mo 등의 비철금속과 함께 부산물로 금은광물이 소량 산출된다.

한국의 열수광맥형 금-은광상은 지체구조상 선캠브리아이언 경기 및 소백산 육괴, 고생대 태백산 퇴적분지와 옥천 변성대, 쥬라기 대보 조산활동에 의한 대규모 심성암체의 저반 그리고 백악기 퇴적암, 불국사 화성활동과 관련된 화산암-반심성암의 복합체 등 다양한 모암에 배태되어 광상에 따라 상이한 지질조건에서 형성되었으나, 광화시기는 모두 중생대 대보 및 불국사 화성활동과 매우 밀접하게 관련되어 있다. 이러한 열수광맥형 금-은광상은 일본의 화산성 천열수 금-은광상과 비교하여 성인적 특성의 차이에 따라 단순히 한국형 금광상(Korean-type deposits)으로 기재된 바 있으나(Tsuchida, 1944), 유체포유물 및 안정동위원소 등의 연구를 통하여 중열수 광상(태창, 보련 광산 등), 한국형 광상(천보, 일보, 대홍 광산 등), 천열수 광상(전주일, 통영 광산 등)으로 구분되었다(Shelton *et al.*, 1988). 한국 금-은광상의 유형은 금속비의 특성에 따라 금단일형 광상(gold-dominant deposit), 금은혼합형 광상(gold-silver deposit), 은단일형 광상(silver-dominant

deposit)으로 분류되며, 금-은광화작용 당시 금속비의 특성은 광물침전환경의 차이를 반영한 것으로 보고된 바 있다(최선규와 위수민, 1992). 또한, 중부지역과 동남부지역의 금-은광상은 각 지역에 따라 대보 및 불국사 화성암체의 정치깊이를 반영한 광상생성의 심도변화에 기인하여 성인적 차이를 보이는 것으로 해석하였다(Choi and Choi, 1995). 이와 같이 한반도에서 금-은광화작용은 중생대 대보 및 불국사 화성활동과 밀접하게 관련되어 있으나, 광상의 유형별 특성과 광화시기와의 관계는 체계적인 연구를 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 금-은 광화대별 특성을 종합적으로 비교하여, 중생대 조구조 진화와 이에 수반된 화성활동의 시공간적 특성에 따른 금-은광상의 성인적 규명과 함께 개발 잠재성을 규명하고자 한다.

2. 지질개요

한반도의 지질은 지체구조상 경기 및 소백산 육괴에 속하는 선캠브리아이언 변성암류(3000~800 Ma)를 기반으로 하여 옥천 지향사대의 변성암류와 태백산 분지의 고생대 퇴적암류가 분포하며, 쥬라기 초(205±15 Ma)에 들어서 대보 조산운동에 기인한 대규모 화성암체의 관입 이후(200~130 Ma), 경상분지를 중심으로 한 백악기 퇴적암류 및 불국사 화성활동과 관련된 화산-반심성암체(120~50 Ma)로 구성되어 있다.

쥬라기 대보 심성암체의 대규모 저반은 북동-남서방향을 따라 연장과 폭이 약 350 km와 수십 km에 걸쳐 배태되며, 이에 수반된 금-은광상도 중부지역을 중심으로 대보 화성암체 저반의 외각 주변부를 따라 밀집되는 경향이 있다(Fig. 1). 대보화성활동은 Rb-Sr, U-Pb, K-Ar 등 연령자료에 의하면 쥬라기 초기에서 말기에 걸쳐서 지속적으로 일어났으며, 각섬석 지질암

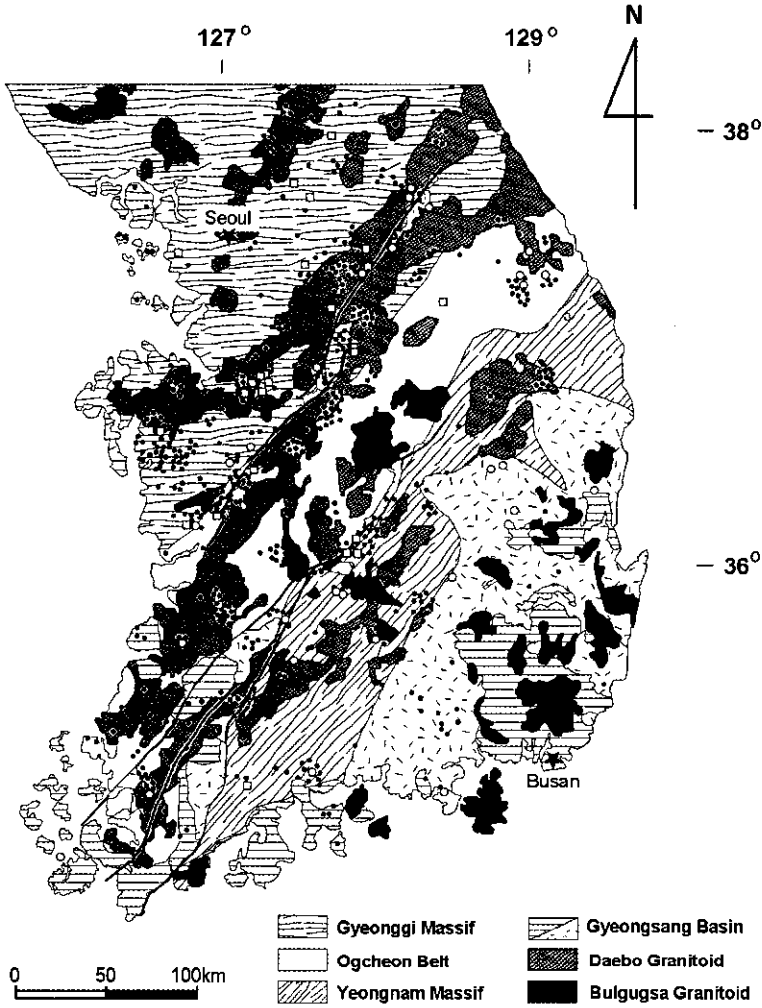


Fig. 1. General geological map of Korea showing the distribution of tectonic terranes and selected gold-silver deposits. Note the close spatial relationship between the Mesozoic granitoid and principal gold-silver deposits. □ : the precious-metal deposits related to Daebo igneous activity, ○ : the precious-metal deposits related to Bulgugsa igneous activity, ● : the precious-metal deposits of unknown age.

력계로 추정된 정치깊이는 3.4~7.8 kb로서 지하 심부 환경에서 결정분화된 양상을 보인다(조등룡, 권성택, 1994). 불국사 화성암체는 경상 퇴적 분지를 중심으로 백악기 중기 이후부터 단속적인 화산-심성활동에 의한 복합암체로 산출되지만, 간혹 경기육괴 및 옥천 지향사대에서도 소규모 암주 또는 암맥상으로 나타나며 <2.0 kb 미만의 천부조건에서 정치된 반상조직 및 정동조직을 갖는 반심성암체의 전형적인 산상을 보인다. 이러한 선캠브리아이언 이후의 화강암류(Phnerozoic granitoid)에 대한 절대연령자료는 대다수 K-Ar 연대를 근거로 하고 있기 때문에 관입시기로 간주하기보다는

냉각시기로 해석되고 있다.

최근 한반도 화성암체의 기 보고된 절대연령자료 중 Rb-Sr 전암연대를 종합한 결과, 각 지체구조에서 산출되는 화강암류의 연대는 경기육괴의 경우 주라기로, 옥천 지향사대에서는 석탄기~백악기로, 영남육괴에서는 석탄기~백악기로, 경상분지의 경우 백악기 화성활동으로 각각 구분하고 있지만(Jwa, 1998), 영남육괴 및 옥천 지향사대에서 페름기~트라이아스기에 속하는 화강암류는 극소수 암체에 불과하기 때문에 한반도에서 광역적으로 분포하는 금-은광상과 관련된 화성활동은 중생대 주라기 대보 화성활동과 백악기 불국사 화성활동

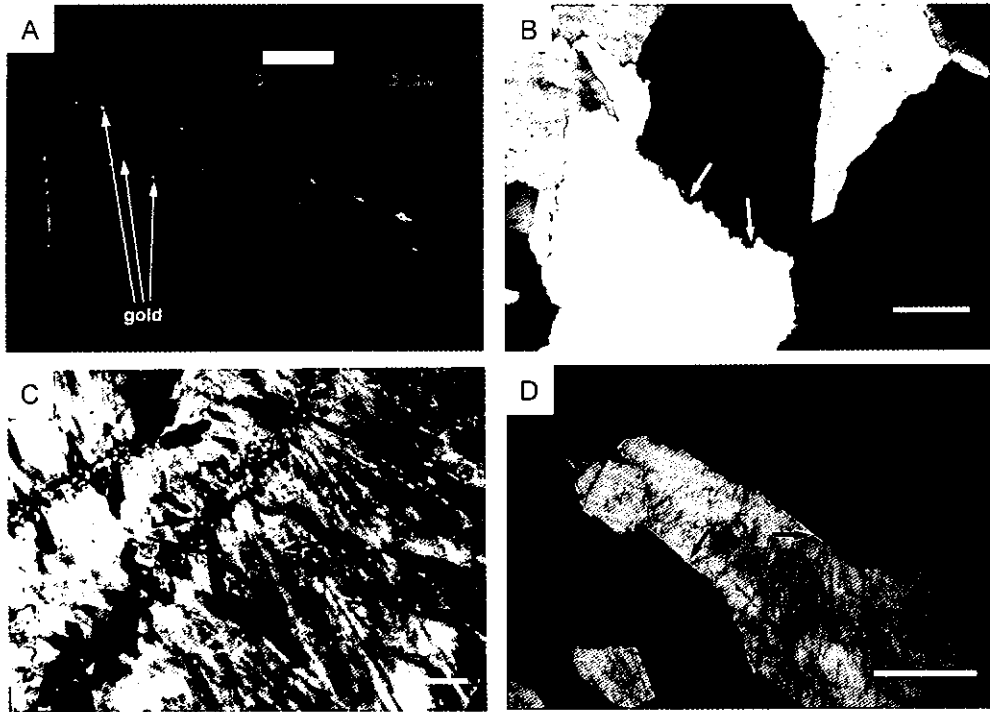


Fig. 2. Photograph and photomicrographs of different types in quartz veins. A: Massive quartz vein from the Taechang mine crosscut and healed by high-grade gold ores. Arrows show site of sulfide and gold aggregates. B: Quartz displaying undulose extinction, subgrain development and grain boundary migration recrystallization. C: Typical epithermal veins from the Taegyeung mine showing lattice bladed quartz (left arrow) and feathery texture (right arrow). D: Euhedral comb quartz showing the sharp interfacial boundary (Scale bars=0.5 mm).

으로 양분할 수 있다.

쥬라기 화강암류는 성인적 측면에서 여러 가지 견해가 제시되었으나, 최근에는 조산운동기 화성활동(synkinematic, syntectonic magmatism)과 대륙주변부 화성활동(continent-margin magmatism)으로 해석하였다(Cluzel *et al.*, 1991; Jwa *et al.*, 1994). 기 보고된 암석·지화학적 자료를 종합한 연구결과에 의하면, 각 지괴에 따라 시공간적 특성은 다음과 같이 서로 다른 조구조 환경에서 유래된 마그마의 기원을 갖는 것으로 보고된 바 있다. 즉, 경기육괴의 쥬라기 화강암류는 대륙 충돌형 특징을 갖고 있지만, 영남지괴 및 옥천 지향사대에 분포하는 페름기-쥬라기 화강암체는 모두 대륙 주변부형(continent-margin type)의 성인적 특징을 보인다. 그리고, 백악기 화강암류는 옥천 지향사대와 경상분지에서 공통적으로 후조산운동(post-orogenic, intra-continent)과 관련되는 것으로 해석된다(Jwa, 1998). 이와같이 각 지괴에서 산출되는 화강암류는 지질시대에 따라 조구조적 진화과정의 차이를 반영하고 있으며, 이들 화성활동에 수반된 금은광화작용도

각각 서로 다른 지질환경에서 유도되어 맥의 산상, 구성광물의 공생관계, 금은비 등 광물-지화학적 특징을 달리하는 상이한 유형의 광상이 배태되고 있다.

3. 금-은광상의 유형별 특성

한반도 열수광맥형 금-은광상은 중생대 대보 및 불국사 화성암체의 분포경향과 광산의 밀집분포도와 상관계에 따라 포천·홍천·천안·정선(화암리)·설천·봉화·해미·합천·순천·광양·함안-군북광상구로 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 정지된 특징과 함께 한반도 전역에 걸쳐 분포함으로써 지질환경에 중대한 영향을 주었을 뿐만 아니라 특히 경기-충청-전라 지역에 분포하는 금광상과는 광상학적 측면에서 매우 밀접한 연관성을 갖고 있다. 또한, 백악기 중기 이후부터 화성

활동은 지표 부근까지 관입-분출함으로써 이에 수반된 금-은광화작용도 천부조건의 지질환경으로 유도되었다. 이와 같이 두 시기의 화성활동은 동일지역에서 각기 서로 다른 지질환경 조건이 중첩됨으로써 특히 중부지역을 중심으로 인접한 금-은 광상 간에서도 광맥의 산출 특징뿐만 아니라 광물학적·지화학적 차이를 보이고 있다.

한반도 전역에 걸쳐 분포하는 금-은광상에서 석영맥이 배태되는 모암의 유형별 산출비는 화강암에 38.4%, 선캄브리아이언 변성암류에 38.4%, 기타 암석에 23.2%로 보고된 바 있으며(Kim, 1986), 이러한 함금-은석영맥의 산출양상은 대다수 금-은광상이 비교적 심부조건의 지질환경에서 형성되었음을 시사한다. 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, 석영맥은 주로 선캄브리아이언의 편마암 및 편암의 편리 방향을 따라 원경사맥 또는 쥘라기 화강암의 열극을 따라 페그마타이트 맥과 함께 산출된다. 태백산지역 정선·봉화 광화대의 금-은광상은 고생대 퇴적암 이외에도 변성암, 화강암 등 여러 지질시대의 암석을 모암으

로 하여 배태되지만, 이들 광상의 인접지역에서 백악기 화성활동과 관련된 반상화강암, 석영반암 등과 같은 반심성암체가 공통적으로 산출된다. 동남부지역의 합천·광양·함안-군북광화대 금-은광상은 주로 백악기 화강암·석영반암·퇴적암·화산암에 배태되어 중부지역의 금광상에 비하여 전반적으로 천부조건의 지질환경을 시사한다.

중생대 쥘라기 및 백악기 화성활동은 각각의 관입시기에 따라 정치심도에서 현저한 차이를 보이고 있으며, 이에 수반된 금-은광상도 생성심도와 연계되어 서로 상이한 특징을 보이는 괴상 단성 맥(massive, simple vein)과 복성 맥(multiple, complex vein)으로 산출되고 있다(Table 1). 천안 광화대의 대홍 일보 태창 광산과 설천광화대의 삼황학 대일 금모 광산과 같이 대보 화성활동과 관련된 광상에서 맥의 산상은 주로 괴상 단성 맥으로 균단일형 광상의 특징을 보이며, 페그마타이트질 맥에서 석영 맥으로 점이적인 변화양상을 나타내고 있다. 이러한 광상의 석영맥은 주로 단성 광화용액(mono-ascending solution)에 의해서 형성된 치밀한 조립질 석영으로 구성되며(Fig. 2A), 공통적으로 모자이크(mosaic)·벽(buck)·리본(ribbon)·각력 구조와 같은 특징적 산상을 보인다. 또한, 맥을 구

Table 1. Comparative production, grade and age data for selected gold-silver deposits in Korea.

Ore deposit	Ag/Au ratios in total production	Tonnage*	Ag/Au ratios in ore		Vein morphology	Age	
			Minimum	Maximum		Ma	Reference
Samchang	9.7	-	0.7	2.9	massive	166	Park <i>et al.</i> (1988b)
Samhwanghwag	0.3	C	0.5	1.8	massive	166	So and Yun (1997)
Daeheung	0.7	C	0.9	17.8	massive	158	Park <i>et al.</i> (1986)
Taechang, Boryeon	0.2	C	0.1	5.6	massive	156, 146	Park <i>et al.</i> (1985)
Hwanggeo	8.1	-	0.35	38.3	-	144	
Samgwang	<0.1	B	0.3	27.1	massive	127	So <i>et al.</i> (1988)
Dongyang Hongcheon	1.0	-	0.1	1.4	-	113	Park <i>et al.</i> (1988b)
Imcheon	0.5	B	0.4	28.9	complex	108	Shimazaki <i>et al.</i> (1986)
Seongju	64.6	C	1.1	1781.0	complex	98	So <i>et al.</i> (1989a)
Mugeug, Geumwang	5.8	A	0.5	850.8	complex	106, 98	Shimazaki <i>et al.</i> (1986)
Yonghwa	8.5	-	1.2	344.8	complex	96	Youn and Park (1991)
Gwangyang	5.6	B	0.2	68.8	complex	94	Lee <i>et al.</i> (1992)
Jeoneui	1.1	C	1.0	19.1	complex	94	So <i>et al.</i> (1987)
Dongweon	3.0	-	3.3	35.0	complex	86	Park <i>et al.</i> (1988a)
Eunjeog	26.0	-	0.9	123.6	complex	86	Kim <i>et al.</i> (1989)
Weolyu	51.6	A	39.1	561.3	complex	79	Yun <i>et al.</i> (1993)
Dunjeon	1.5	-	1.5	7.3	complex	76	Park <i>et al.</i> (1988a)
Tongyeong	11.0	C	-	-	complex	73	Shelton <i>et al.</i> (1990)
Jeonjuil	489.6	A	1.0	3085.0	complex	71	So <i>et al.</i> (1987b)
Gasado	-	-	<0.1	23310.0	complex	-	

*Tonnage means cumulative Au and Ag metal productions. A; >10 t, B; 1 t and C; <1 t.

성하는 석영 입자간의 접촉결정면은 서로 요철 상태로 접하고 있어 경계부 천이(grain boundary migration)에 의한 재결정조직으로 해석된다(Fig. 2B). 이러한 산상은 연성변형(ductile deformation)이 가능한 지하심부의 비교적 높은 압력 온도 조건에서 광화작용이 진행되었음을 지시하며, 심부기원의 시생대형 금광상(Archean gold deposit)의 산출특징과도 매우 유사하다(Vearncombe, 1993; Peters, 1993).

천안 광화대의 무극·금왕·금봉 광산과 설천광화대의 월유·전주일 광산과 같은 백악기 금-은광상에서 맥의 산상은 공통적으로 복성 맥으로 금은혼합형 광상과 은단일형 광상의 특징을 보인다. 이러한 광상의 맥에서는 복성 광화용액(poly-ascending solution)에 의해서 형성된 호상, 카케이드(cockade), 각력상 구조, 정동 석영이 우세하게 발달하여 열극충진형(open-space filling)의 생성환경에서 성장한 조직과 함께 옥수질 석영, 깃털상 석영(plumose quartz), 판상 석영(Fig. 2C)이 관찰되어 천열수 광상의 전형적인 산상을 보인다. 맥의 주 구성광물인 석영은 중립질~조립질로서 입자간의 결정면이 직선상으로 접하였으며(Fig. 2D), 이러한 조직은 공통적으로 비교적 낮은 암압이 작용하는 개방계의 환경을 시사하고 있다(Dowling, Morrison, 1989). 이러한 복성 맥은 천부의 저온·저압 환경을 반영하며 수 차례에 걸쳐 열개·충진·각력화 작용이 반복된 것으로서, 각 광화기의 급격한 온도·압력조건의 변화에 따라 광화유체의 진화와 함께 상이한 광물군의 침전을 유도한다.

금-은광상에서 괴상 단성 맥과 복성 맥간의 이러한 산상차이는 광상의 생성심도와 관련된 암압과 유체압간의 차이에 따른 상이한 환경조건을 반영된 결과로서 이는 열극의 생성-발달과정에 직·간접적으로 영향을 미치며, 이에 따른 유체압-온도-조성의 변화가 광물성장의 메카니즘뿐만 아니라 상이한 광물군의 복합적 정출을 좌우하게 된다. 이러한 지질환경은 금-은광화작용 시 열수용액의 기원뿐만 아니라 광화유체의 진화과정에서 금-은광물의 상이한 침전조건을 유도하여 결과적으로 광상의 금은비를 좌우할 수 있으며(Fig. 3), 각 광화대의 지질조건에 따라 특정한 금은광물조합과 함께 서로 다른 금속비의 지화학적 특성을 갖는 광상이 배태된다(Table 1).

금단일형 광상은 광석중 Ag/Au비가 대부분 0.1에서 10.0까지의 좁은 변화범위를 보이며, 각 광산의 연도별 금은생산량비도 규칙적으로 일정하다. 광석의 금은품위는 대부분 광산에서 현저하게 변화하여 부광대와 빈광

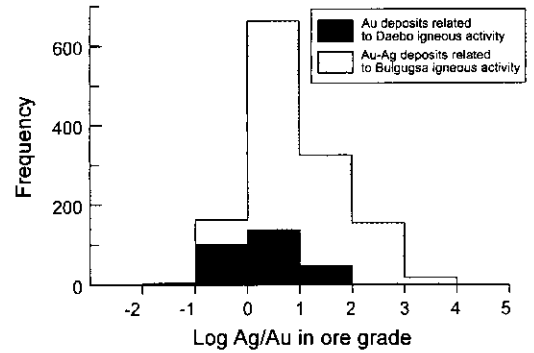


Fig. 3. Histogram of log Ag/Au ratios in ore grade from the Mesozoic gold-silver deposits. Note the clustering of lower values from the precious-metal deposits related to the Daebo igneous activity in contrast to the scattered, higher values from those associated with the Bulgugsa igneous activity.

대가 매우 불규칙적으로 분포하며, 간혹 특정부분에 수백~수천 g/t의 고品位대를 형성하고 있다. 이러한 광상에서는 광화작용 당시 광화유체의 온도·압력·조성조건이 비교적 일정하게 유도되는 심부환경을 반영하여 단순한 광물조합과 함께 유사한 광물군의 침전을 유도한 것으로 사료된다. 금단일형 광상은 매우 단순한 광물조합으로 비철금속의 황화광물이 주로 수반되고 황화광물의 양은 보통 1~3 vol.% 정도이다. 에렉트럼은 석영의 균열부 또는 정동석영 사이의 공간을 단독으로 충전하며, 주로 자류철석·황철석·섬아연석·방연석·황동석·유비철석과 밀접하게 공생한다. 상기 황화광물 이외에도 광산에 따라 차이는 있지만, 합Te계 광물인 페자이트(petzite), 조사이트(joseite), 헤사이트(hessite), 알타이트(altite), Cu-Ag-Sb-S계 광물인 사면동석, Ag-Sn-S계 광물인 캔필다이트(canfieldite), 휘은석, 자연창연이 소량 산출된다. 이러한 금단일형 광상은 에렉트럼과 밀접하게 공생하는 Fe-S계 광물에 따라 자류철석형 금광상과 황철석형 금광상으로 구분된다.

금은혼합형 광상은 광석의 Ag/Au비가 1.0~500.0의 현저한 변화 양상을 보이며(Fig. 3), 금은비 변화는 전반적으로 광맥 간의 금속비 차이뿐만 아니라, 광화초기에서 말기까지 정출시기의 차이를 반영한다. 따라서 광맥 간의 수평적인 변화와 함께 동일 맥의 수직적 대상분포(metal zoning)의 특징도 나타난다. 이러한 유형의 광상은 수 차례 반복 상승한 광화유체로부터 형성되며, 전반적으로 비철금속(base-metal)의 황화광물 이외에도 함은황염광물이 다량 수반되어 광화시기에 따라 상이한 광물군의 특징을 보인다.

금은혼합형 광상에서는 비철금속의 황화광물과 함께

함은광물의 종류에 따라 휘은석형 금-은광상과 안티몬형 금-은광상으로 구분된다. 휘은석형 금-은광상에서는 자연은 휘은석이 함은광물의 주종이며, Cu-Ag-Sb-S계 광물 또는 Ag-Sb-S계 광물의 산출빈도는 극히 미약하고 비교적 단순한 광물공생관계를 보인다. 안티몬형 금-은광상은 일반적으로 자연은·휘은석과 함께 다량의 함은황염광물이 산출되며, 이들 함은광물의 정출 시기는 전반적으로 에렉트럼에 비하여 후기 광화기에 산출되는 경향성을 보이고 있다. 함은황염광물은 Cu-Ag-Sb-As-S계 광물인 함은사면동석(Ag-tetrahedrite) 폴리바사이트(polybasite)·피어사이트(pearceite), Ag-Sb-S계 광물인 농홍은석(pyrrargyrite) 미라퀴라이트·(miargyrite)·스테파나이트(stephanite), Pb-Ag-Sb-S계 광물인 다이아포라이트(diaphorite), 합Te계 광물인 헤사이트(hessite), Ag-Fe-S계 광물인 스테른버자이트(sternbergite)로서 광상에 따라 다양한 공생관계를 갖는다.

은단일형 광상에서는 금이 단지 부산물로 산출되어 Ag/Au비가 10.0~1000.0 범위로 매우 높지만 연도별 금은생산량비는 비교적 규칙적이다. 은단일형 광상에서는 안티몬형 금-은광상과 전반적으로 유사한 광물공생관계를 보이며, 금은혼합형 광상에 비하여 에렉트럼의 산출빈도가 매우 미약하다. 본 유형의 광상에서는 비철금속의 황화광물과 함께 휘은석, 자연은이 함은광물의 주종을 이루고 있지만, 농홍은석 폴리바사이트 함은사면동석 스테른버자이트 아지로드아이트(argyrodite) 등 함은황염광물도 다양하게 산출된다. 금은혼합형 광상과 은단일형 광상에서는 공통적으로 수차에 걸쳐 반복상승한 광화유체로부터 형성되며 광화기에 따라 온도-압력-유체조성 등 급격한 환경변화의 요인에 따라 상이한 광물군의 침전을 유도한 것으로 천부의 환경조건을 시사하고 있다.

4. 금-은광상의 유형과 유체포유물

금-은광상에서 유체포유물 연구를 통한 온도-압력-조성(염농도-CO₂농도)특성의 규명은 광화유체의 초기에서 말기까지 진화환경을 반영한다. 따라서, 금-은광물의 침전기구 및 광상의 생성 메커니즘을 이해하는데 필수자료로 사용될 뿐만 아니라, 탐사 측면에서도 광상의 고품위대를 예측하는데 중요한 기본자료로 활용되고 있다.

국내 금-은광상에서 유체포유물의 균일화온도는 광상의 유형에 따라 비교적 폭 넓은 온도변화와 함께 염

농도, CO₂, CH₄ 등 광화유체의 조성 차이를 보여주며, 광화초기에서 광화말기까지 서로 다른 광화유체의 진화과정이 확인된다. 금은광산에서 관찰된 유체포유물의 유형은 상온(20°C)에서 관찰된 상(phase)관계를 통하여 Type I(aqueous, liquid-rich phase), Type II(aqueous, vapor-rich phase), Type III(solid-bearing phase), Type IV(liquid CO₂-bearing phase)로 분류된다. 모든 유형의 금-은광상에서 공통적으로 Type I 유체포유물이 우세하게 관찰되며, 일부 광산에서는 Type II, Type III, Type IV의 다양한 유체포유물이 확인된다. Type IV 유체포유물은 주로 금단일형 광상인 태창, 보련, 유량, 삼황학, 임천 광산의 석영시료에서 관찰되며, Type II의 유체포유물은 금은혼합형 광상과 은단일형 광상에서 광화시거나 공간적 위치에 따라 제한적으로 확인된다. 특히, Type III의 유체포유물은 특히 경남지역의 동광화대에 분포하는 금단일형 광상에서 간혹 관찰되며, 이는 반암형 동광상의 광화유체의 조성 과 매우 유사하다.

Fig. 4는 기 보고된 유체포유물의 연구결과를 종합적으로 비교하기 위하여 각 광상 유형에 따라 균일화온도와 염농도의 상관관계도에 모식적으로 도시한 결과이다. 금-은광상의 유형별 열수유체의 진화과정은 온도감소와 함께 광화유체의 불혼화용융, 비등작용, 서로 다른 유체의 혼입과 같은 특징적인 메커니즘을 통하여 열수유체의 환경변화를 야기하여 금-은광물의 정출이 유도되었음을 알 수 있다. 이러한 환경변화는 열수 중에 용해되어 있던 금, 은, 연, 아연, 동, 철 등 특정원소의 차이는 복합체 또는 염화화합물의 용해도 감소와 함께 불안정한 결합상태가 유도됨으로써 각 광화기에 따라 상이한 광물종의 침전을 야기시킨다.

태창·보련·삼황학·유량·임천 광산과 같은 금단일형 광상에서 광화유체의 진화는 광화초기 H₂O-CO₂-NaCl-(CH₄)계 고온성 열수유체(450°C)의 유입으로 광화작용이 시작되어 부분적인 비등현상과 함께 온도감소에 기인한 열수유체의 불혼화용융이 진행되었다(Fig. 4). 그러나 임천 광산에서는 열수유체의 불혼화용융 이후에도 천수의 유입에 따른 혼입에 의하여 야기되는 후기 광화작용이 지속되었음을 보여준다. 이 결과에 기인하여, 임천광산의 경우 태창 보련 광산에 비하여 복합적인 광물정출의 메커니즘이 작용하여 다양한 광석광물의 공생관계를 보여준다. 이러한 경향은 대보 화성활동과 관련된 금단일형 광상에서 확인된 광화유체의 조성 과 진화과정에서 특징적으로 관찰되며, 중생대 화강암류 유체포유물의 연구결과(김규한, 1996)에

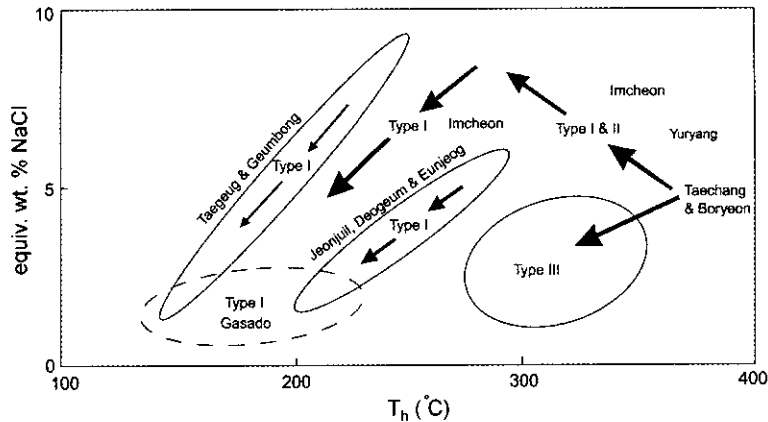


Fig. 4. Plot of homogenization temperature versus salinity for fluid inclusions in mineral showing an evolutionary trend of hydrothermal fluids from different types of the gold-silver deposits in Korea.

서 제시된 바와 같이 불국사 화강암류보다 대보 화강암류 내에 CH_4 이 우세하게 함유되는 경향성과도 서로 잘 일치하고 있다. 또한, 이러한 광화유체 중 CO_2 - CH_4 기원은 전반적으로 심부 환경에서 유래한 유체로서 주변 모암인 편암 편마암에 함유된 흑연과의 열수 반응에 따라 생성된 유체로 추정된다.

무극·태극·금봉·덕음 광산과 같은 금은혼합형 광산과 전주일·은적 광산과 같은 은단일형 광산은 초기 열수유체의 비등현상과 그 이후 천수의 혼입에 의하여 약 $<350^\circ C$ 에서 $180^\circ C$ 의 온도 범위에서 광화작용이 진행되었음을 알 수 있다. 광화유체의 특성은 광화초기 상대적으로 고온 열수유체($<350^\circ C$)가 유입되어 각 광화기에 따라 천수의 혼입비 차이에 따른 염농도 증감이 반복되지만, 광화유체의 진화과정은 광화후기로 진행됨에 따라 유체의 온도가 전반적으로 감소하며 함은광물종들이 우세하게 침전된다. 특히, 최남단에 위치한 가사도 광산의 유체포유물 실험결과에 의하면 국내의 금-은광산 중에서 가장 낮은 온도범위($150 \sim 250^\circ C$) 열수에 가장 근접하여 성인적으로 천수기원의 화산성 천열수 광산에 해당된다.

5. 산소 및 수소 동위원소

다양한 지질환경의 특성에 배태되고 있는 태창 보련 광산, 유량 일천 광산과 같은 금단일형 광산, 금봉·태극·무극광산과 같은 금은혼합형 광산, 전주일·가사도 광산과 같은 은단일형 광산을 대상으로 주 광화기의 석영, 방해석과 같은 맥석광물의 산소·수소 동위원소 자료를 종합적으로 비교검토한 결과에 의하면 각

광산에서 산소 수소 동위원소의 조성변화는 광화시기에 따라 광산의 유형별로 서로 다른 열수계 지질특성을 반영하고 있을 뿐만 아니라 생성환경과 관련된 열수의 기원 및 진화양상에서 상이함을 알 수 있다.

태창·보련·유량 광산의 광화유체는 중수소(D)가 상대적으로 적게 부화되었지만 무거운 산소 중인 ^{18}O

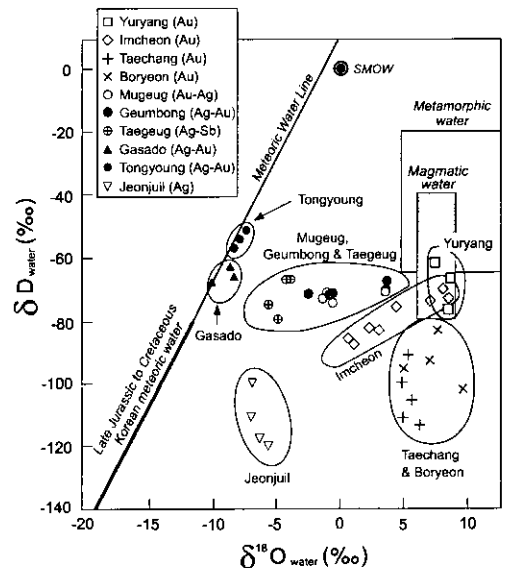


Fig. 5. D_{water} and $\delta^{18}O_{water}$ of fluids derived from analyses of fluid inclusions for different types of the gold-silver deposits in Korea. Composition field from Taechang, Boryeon, Yuryang, Imcheon, Mugeug, Geumbong, Taegeug, Jeonjuil, Gasado and Tongyoung mines. Note the lower $\delta^{18}O_{water}$ values and scattered ranges of ore fluids from the Au-Ag deposits in contrast to the higher $\delta^{18}O_{water}$ values and clustering trend in the Au-rich deposits.

은 크게 부화된 천수(highly-evolved meteoric water) 또는 마그마 기원의 열수로부터 금광화작용이 진행된 것으로 사료되며, 주변 모암인 편마암 중 함유된 흑연은 부분적으로 동위원소교환의 가능성을 시사하고 있다. 임천광산에서 초기 광화유체의 동위원소 값이 마그마 기원의 영역에 해당하여 초기 열수는 마그마에서 유래한 것으로 추정되며, 후기로 광화작용이 진행되면서 진화된 심층 순환수의 혼입에 따라 ^{18}O 결핍된 경향성을 보여준다(Fig. 5). 이러한 유형의 광상에서는 마그마 기원의 열수가 주열수계를 형성함과 함께 초기 비철금속 황화광물이 주로 침전되었고, 후기 광화작용시 마그마 기원의 열수가 약화되고 부분적으로 동위원소적 교환이 상대적으로 덜 이루어진 순환수의 유입에 의한 혼입작용이 이루어져 금과 Ag-Te계 광물의 침전을 야기시킨 것으로 해석된다. 이러한 열수계의 진화과정은 상기 광상의 복합적인 광물학적 특성과 관련하여 다양한 광물공생관계 및 광석광물침전에 영향을 준 것으로 해석된다. 따라서, 광화작용 당시 광화유체내 ^{18}O 의 부화, Type I, II, IV 등 유체포유물 유형과 함께 다양한 광석광물의 공생관계는 이들 광상이 전형적인 심-중열수 광상임을 지시한다.

음성지역의 무극, 금봉, 태극 광산의 동위원소값은 동일지역 내에서도 각 광산별로 현저한 산소동위원소의 변화를 보여주고 있는데, 이는 주로 열수용액과 순환수의 상이한 혼합비에 기인한 것으로 해석된다. 이러한 광화유체는 광화초기 마그마 기원의 열수가 유입됨으로써 열수계가 형성되었으며, 광화작용이 진행됨에 따라 동위원소의 교환반응이 상대적으로 적게 진행된 천수의 유입량이 점차 증가함으로써 광화유체의 조성이 변화된 것으로 추정된다. 무극·금봉·태극 광산을 종합적으로 비교검토했던 결과, 광화대 최남단의 외각에 위치한 태극광산은 $\delta^{18}\text{O}$ 는 -7~-4‰로 뚜렷한 결핍현상을 보이는데, 이는 천수의 유입량이 우세하게 증가함을 지시하고 있다. 천수의 유입량은 온도구배의 차이에 따라 열적 중심에서 먼 곳에서 증가하므로 태극광산이 열적 중심에서 가장 멀리 위치하는 것으로 추정된다. 전주일, 가사도, 통영 광산의 광화용액은 지표수와 아주 유사한 동위원소 값을 보여주는데(Fig. 5), 이는 광화작용과 관련된 열수가 마그마 기원의 열수라기 보다는 천수(less-evolved meteoric water) 기원으로 해석되며, 천수가 다량 유입된 혼입작용이 우세한 환경에서 광화작용이 진행된 것으로 사료된다. 가사도 광산의 산소·수소 동위원소 값은 국내의 금·은광상 중에서 가장 지표수에 근접한 값을 보이고 있어 가장

천부지질의 환경에서 형성된 화산성 열수계로서 천수의 유입량 변화에 따라 광석광물의 침전이 좌우된 것으로 사료된다.

6. 금-은광상의 시공간적 특성

한국의 금-은광화작용은 선캠브리아이던 화성활동과 연관된 알라스카이트 기원의 금정광산을 제외하고, 모두 중생대 지각진화 과정에 수반된 화성활동과 직접적으로 관련되어 있다. 이들 열수광맥형 금-은광상의 광화시기는 중생대 대보 및 백악기 불국사 화성활동의 두 시기로 양분되며, 각각 화성활동의 지질조건을 반영하여 서로 다른 광물조성과 함께 금은금속비의 상이한 특성을 보인다(Fig. 3). 한반도에서 대보 화강암류는 경상분지를 제외한 전지역에 광범위하게 분포하여 대다수 열수광맥형 금-은광상이 대보 조산운동에 수반된 심부기원의 화성활동과 관련된 것으로 인식되었으나, 최근 금-은광산의 열수변질광물에 대한 K-Ar 연령측정 자료에 의하면 중부지역 중 특히 홍천, 음성, 부여, 무주 지역에 배태된 금-은광상에서 상당수가 천부기원의 불국사 화성활동과 연관된 것으로 보고되고 있다(박노영 등, 1985, 1986; 박희인 등, 1988a, 1988b; 윤석태, 박희인, 1991; 이창신 등, 1992, 1993; 최신규, 위수민, 1992; Shimazaki *et al.*, 1986; Shelton *et al.*, 1990; So *et al.*, 1987a, 1987b, 1989a, 1989b, 1993, 1994, 1999; So and Shelton, 1987; So and Yun, 1992; Yun *et al.*, 1993).

화강암류 중 전암 및 운모의 Rb-Sr 연령 및 K-Ar 연령측정결과는 대보화성활동이 200~130 Ma로서 유라기 중기부터 말기까지 한반도 전지역에 걸쳐 광역적으로 일어났던 것으로 보고되었으나(김옥준, 1971), 최근 대보화강암체의 U-Pb 연령자료에 의하면 유라기 초부터 지속적인 화성활동이 시작된 것으로 추정하고 있다. 또한, 이러한 유라기 화성활동시기에 대한 견해차는 연령측정방법에 따른 관입시기와 정치이후 냉각시期间的 차이에 기인된 결과로 해석된다(진명식, 1998). 기 보고된 24개 광산에 대한 열수변질광물의 K-Ar 연령측정자료에 의하면 유라기 화성활동과 관련된 광상은 가평·삼창·삼황학·호미·대흥·대남·보덕·태창·제일·천보·대금산·금성·신흥(중앙)·금암·보련·대일·봉화·황거·일보·영보거리·남창·삼광 광산으로 단지 가평광산 만이 유일하게 197 Ma로 기재되었을 뿐이고, 나머지 모든 광상은 166~127 Ma의 광화시기를 보인다. 이러한 유라기 금광상의 주 광화

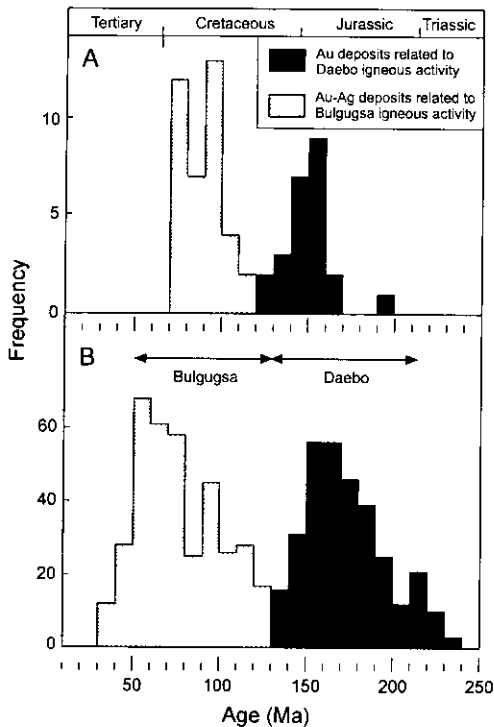


Fig. 6. Age relationship between the gold-silver deposits (A) and the Mesozoic igneous activities (B) in Korea. The age distribution of the Phanerozoic granitoids modified from Jwa (1998). Note that the ages of Au-Ag mineralization are well coincident with ages of the Mesozoic granitoids.

시기가 전반적으로 150 ± 10 Ma로서 대보화성활동의 주 정치시기인 $170 \sim 150$ Ma보다 약 <10 Ma 정도의 시간 차이만 갖는다(Fig. 6). 이러한 시간차이는 대보화강암류의 정치깊이인 3.4~7.8 kb 심부의 지질조건을 고려할 경우, 지하 심부에서 매우 느린 냉각과정과 함께 최후기 산물인 광화유체의 생성단계까지 비교적 오랜 기간이 소요될 것이다. 또한, 남창광산과 삼광광산의 광화시기인 129 ± 3 Ma 와 127 ± 3 Ma는 대보화성활동의 최후기 정치시기로 추정되는 130 ± 10 Ma보다 10 Ma미만의 시간차만을 보이고 있어, 이는 지하 심부에서 광상을 형성하는데 소요된 기간으로 해석될 수 있다. 이러한 유형의 광상은 대보 화강암류의 저반분포와 일치하여 포천·홍천(양평)·천안·설천(영동)·해미 지역을 중심으로 밀집되며, 경기육괴의 포천·홍천·천안 광상구에서 소백산육괴의 영동·보성 지역까지 유사한 광화시기로 보고되어 있다. 특히, 천안광화대 주변에 분포하는 유리기 금광상에서는 석영맥과 함께 페그마타이트가 광범위하게 산출되는데, 이는 대보화성암체의 저반이 형성된 이후에 잔류 마그마로부터 형성된

후기 분화산물로 간주되며(최선규 등, 1988), 페그마타이트의 연대측정 결과도 금광화작용의 생성연대와 거의 일치하고 있다(Fig. 7).

기 보고된 38개 금-은광산의 K-Ar 연대측정자료에 의하면 불국사 화성활동과 밀접하게 관련된 광상은 동양 홍천·공주대금·임천·거창·백우·세원(성주)·거도·무극·성원·청주·용화·동명·광양·봉정·전의·문현·금륜·삼창·은치·금령·옥봉·동원·은적·다덕·병지방·백운·월유·둔전·반용·문영·두승·감계·통영·낙천·전주일·석성 광산으로 광화시기는 $112 \sim 71$ Ma이다(박희인 등, 1985; 소철섭 등, 1988; 소철섭 등, 1991; 이현구와 김상중, 1995). 이들 광상의 공통적 특징은 동일 광화대 또는 동일 광맥에서 다양한 금은비의 변화양상과 함께 열극 충전형조건에서 형성된 복성 맥의 전형적인 산출특징을 보인다. 이와같이 백악기의 생성연대인 광상은 지역에 따라 상이한 금은비의 특성을 갖고 있지만, 전반적으로 금단일형 광상보다 금은혼합형 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, 천안광상구 중 무극-부여-논산 지역, 설천광상구 중 옥천-무주지역에 소재한 광상은 대부분 금은혼합형 광상 또는 은단일형 광상이 우세한 경향을 보인다. 이들 지역은 좌수향 주향이동 단층에 의해서 생성된 인리형 분지(pull-apart basin)인 풍암, 음성, 공주, 영동, 진안-무주, 능주, 해남-목포 퇴적분지에 속한다(최현일, 1998). 이들 퇴적 분지에서는 공통적으로 불국사화성활동과 관련된 반상 화강암·석영반암·안산암이 분포하고 있어 공통적으로 천부조건의 지질환경과 관련된 관입-분출작용을 인지할 수 있다.

금-은광화작용시 생성심도의 차이는 광화유체의 진화과정 및 금-은광물의 침전환경을 좌우할 수 있기 때문에 광화시기와 연계된 열수광맥형 금-은광상의 금은비에 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. 불국사 화성활동과 관련된 광화작용은 다양한 광물·지화학적 변화를 보이는 금단일형 광상, 금은혼합형 광상, 은단일형 광상이 배태되지만, 금은혼합형 광상과 은단일형 광상이 전반적으로 우세하다. 또한, 불국사화성활동과 관련된 금-은광상은

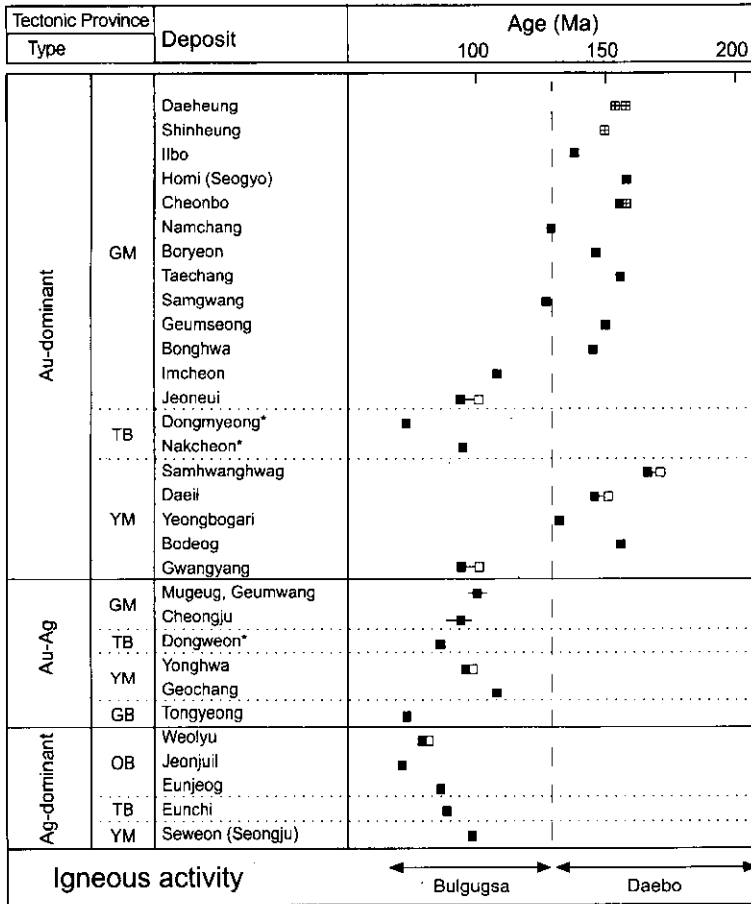


Fig. 7. Relationship between tectonic terranes and different styles of mineralization in Korea. Note the clustering of the Au-dominant deposits related to the Daebo igneous activity in contrast to the scattered trend of the precious-metal deposits associated with the Bulgugsa igneous activity. GB : Gyeongsang basin, GM : Gyeonggy massif, OB : Ogcheon belt, TB : Taebaeksan basin, YM : Yeongnam massif. ★ : Au-Ag deposits associated with base metal. □ : Age of granitoid, ▣ : Age of pegmatite, ■ : Age of ore deposit

백악기 중기에서 백악기 말기로 광화시기가 진행됨에 따라 광화작용의 특성도 점차적으로 금광단일형 광상에서 금은혼합형 광상과 은광단일형 광상으로 변화하는 경향을 보인다(Fig. 8). 불국사화성활동에 의한 광상과 비교할 경우, 대보 화성활동과 관련된 최후기 광상의 생성연대로 추정되는 127 ± 3 Ma와는 약 15 Ma의 시간 차이만을 보이지만, 이들 두 시기의 화성활동은 성인적 측면에서 상이한 특성을 보이고 있다. 이와같이 광화시기에 따른 금-은광화작용의 변화양상은 관계 화성암체의 정치심도에 따라 암압과 정수압 간의 상이한 압력조건이 유도되어 광화유체의 이동 및 순환과정 뿐만 아니라 광화용액의 진화과정 및 광물침전에 직접적 영향을 미친다. 특히, 광화심도의 차이에 따라 광화

용액에 용해된 금-은 착이온종의 차이를 고려할 수 있으며, 광화유체의 이동과정에서 지질조건의 변화에 따라 특정원소만을 특히 불안정한 상태로 유도하여 우세하게 정출되는 광물 종이 결정된다.

7. 토의 및 결론

한반도의 지각진화과정 중 선캄브리아이던 이후의 화강암류에 대한 연대는 최근 U-Pb 저어콘 및 Rb-Sr 전암의 연대자료에 의하면 일부 지역의 암체가 고생대 페름기의 연대로 보고됨에 따라 한반도에 광범위하게 분포하는 현생이던 화성활동의 전반적인 관입시기에 대해서 재정립의 필요성이 제기되고 있다. 특히, 중생대

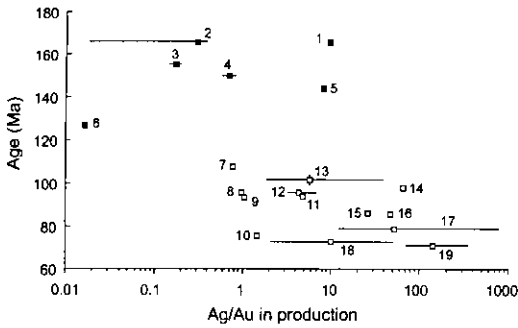


Fig. 8. Age distribution of the precious-metal deposits with Ag/Au ratios in annual and total productions. Solid square: Au-dominant deposits related to the Daebo igneous activity. Open square: precious-metal deposits associated with the Bulgugsa igneous activity. Bar means variation ranges in annual productions. 1; Samchang, 2; Samhwang-hwang, 3; Taechang, 4; Daehung, 5; Hwanggeo, 6; Sangwang, 7; Imcheon, 8; Dongyang Hongcheon, 9; Jeoneui, 10; Dunjeon, 11; Dongweon, 12; Gwangyang, 13; Yonghwa, 14; Mugeug-Geumwang, 15; Seongju, 16; Eunjeog, 17; Weolyu, 18; Tongyeong and 19; Jeonjuil.

에는 조산운동기에서 후조산기까지 조구조 운동의 변화로 대보 화성활동(200~130 Ma)과 불국사 화성활동(120~50 Ma)이 활발하게 진행되었으며, K-Ar 연대측정 결과에서 제시된 바와 같이 금-은광화작용도 시기적으로 중생대 화성활동과 직접적으로 관련되어 있다. 또한, 광화시기에 따라 각각의 서로 다른 지질환경 특성을 반영하여 광화유체의 기원뿐만 아니라 상이한 유체진화 및 다양한 금은광물의 정출 메커니즘을 보여주고 있다. 대보 화성암체는 전반적으로 3.4~7.8 kb에 해당하는 지하 심부의 환경조건에서 관입정지된 대규모 저반의 특징을 보이는 반면에, 불국사 화강암류는 주로 천부 환경조건(0.8~2.8 kb)에서 정지된 화산-심성활동에 의한 복합암체로 구성된다(조등룡과 권성택, 1994). 이와같이 중생대 유라기부터 백악기까지 화성활동은 조구조적 특성에 따른 정치깊이의 차이뿐만 아니라, 이에 수반된 금-은광화작용도 심부 환경과 천부 환경의 서로 다른 지질조건에서 형성된 다양한 기원의 광화유체와 직·간접적으로 연계되어 광맥의 산상, 광석광물의 종류 및 화학조성, 금은비 등 광물-지화학적 특징을 달리하고 있다.

중생대 금-은광화작용은 광화 시기뿐만 아니라 공간적 측면에서도 분포지역과 밀접한 상관성을 보이고 있다. 경기육괴 및 소백산 육괴에 위치한 충주, 천안, 영동 지역의 광상은 대보화성암체의 저반을 따라 광역적으로 산재하며, 광상의 생성연대는 유라기 화성활동과

밀접하게 관련되어 있다. 이들 광상은 성인적으로 페그마타이트로부터 과상 석영맥으로 점이적 변화양상을 보이며, 석영 맥의 산상은 관계화성암의 정치심도를 반영하여 지하 심부환경의 생성조건을 시사하고 있다. 또한, 이들 광상은 낮은 금은비(Ag/Au<10)를 갖는 금단 일형 광상으로 광화작용 전반에 걸쳐서 마그마 기원의 고온성 광화유체 또는 심부에서 진화된 심층순환수기원으로부터 H₂O-CO₂-CH₄계 열수가 생성되며, 심부의 지질조건을 반영한 화성암체의 느린 냉각과정에 따라 장기간 동안 높은 온도구배의 조건이 유지되어 천수의 유입이 거의 불가능한 조건이 유도된다. 즉, 이들 광상에서 광화유체의 진화과정은 초기 마그마 기원의 고온 열수(450°C, δ¹⁸O; 5~10%)가 주 열수계를 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°C~300°C)에서 열수유체의 비등 및 온도감소 그리고 이에 따른 불혼화 용융현상(H₂O-CO₂-NaCl계)을 유발시킴으로써 집중적으로 금침전이 진행된 것으로 추정된다. 이러한 유형에 속하는 대창·보련·삼황학·대흥·유량 광산은 대보 화성활동과 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 금은비(Ag/Au>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 좌수향 주향이동단층에 의해서 생성된 인리형 분지로 해석되며(최현일, 1998), 조구조운동시 전반적으로 지각의 두께가 얇아지는 열개 현상을 동반하고 이에 따른 퇴적작용과 함께 압입이 감소함에 따라 마그마 발생을 용이하게 유도할 뿐만 아니라 이동토를 제공함에 따라 후기 단속적인 화성활동을 수반한다. 이는 이들 퇴적분지에서 공통적으로 산출되는 백악기 반상화강암·석영반암·안산암의 존재를 통하여 입증되며, 천부조건에서의 지질환경과 관련된 관입-분출작용을 시사하고 있다. 이에 수반된 광화유체는 전반적으로 마그마수 이외에 지표수 및 순환수 등 다양한 기원에 기인하며, 광화유체의 특성도 마그마수라기 보다는 상당

량 진화가 미약한 순환수 기원($\delta^{18}O$; -10~5‰)으로 추정된다. 이러한 유형의 광상은 전형적으로 개방계의 천부 생성환경에 따라 형성된 열극조진형의 복성 맥 상상을 보이며, 금은금속비의 변화양상도 광상별 유체의 조성 및 진화과정에 따라 다양하게 좌우된다(Cole and Drummond, 1986). 이러한 백악기 금은혼합형 광상과 은단일형 광상은 전반적으로 지표수의 혼입작용이 우세한 천부조건의 지질환경에서 형성된 열수계로서, 금은비의 변화양상은 지질조건을 반영한 관계화성암의 압력-온도-산소·유황분압, 천수의 유입량, 주변모암과의 반응특성에 따라 광화유체의 복합적인 진화과정과 함께 상이한 광물종의 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 금은생산실적 측면에서 가장 중요한 광상의 유형으로 간주되는 무극·금왕·전주일·월유·덕읍 광산이 성인적으로 저유황형 중열수~천열수광상에 속하지만, 금은비에 따른 지화학적 특성은 서로 상이한 양상을 보인다.

결론적으로 국내의 열수광맥형 금-은광상은 중생대 화성활동의 시기와 직접 연계되어 있으며, 대보 및 불국사 화성활동시기에 따라 각각 관입심도의 차이를 반영하여 각각 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. 태창·보련·삼황학·대흥광산과 같은 금단일형 광상은 심열수~중열수광상으로, 무극·금왕·금봉·덕읍광산과 같은 금은혼합형 광상과 전주일·월유·은적 은단일형 광상은 중열수~천열수광상으로, 가사도광산은 전형적인 화산성 저유황형 천열수광상으로 각각 구분된다. 광화시기에 따른 화성암체의 관입심도 차이는 광화유체로부터 금-은광물의 침전 메커니즘을 조절하며, 금-은광상의 지화학적 특성에 직접적인 영향을 준 것으로 해석된다. 또한, 매장량·품위를 고려한 광상 규모는 류라기에 생성된 금단일형 광산인 태창·보련·삼황학·대흥광산보다는 백악기 금은혼합형 광산인 무극, 금왕광산 또는 백악기 은단일형 광산인 월유, 전주일광산에서 >10 t 이상의 금은생산실적이 보고된바 있어, 백악기 금은혼합형 광상 또

는 은단일형 광상이 광상 규모면에서 개발 잠재성이 유리한 것으로 추정된다.

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 이동은, 김창성에게 감사를 드린다.

참고문헌

- 권병수, 왕규택, 박명호, 황해걸, 김준호, 정영부, 정동화, 문영환, 강홍석, 강백규, 김성석 (1987) 한국의 광상, 대한광업진흥공사, 10권, 1012p.
- 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 지각 변동. 광산지질, 4권, p. 1-10.
- 박노영, 최선규, 박성원 (1985) 중원군 일원의 열수광상의 성인연구. 금속광상조사연구, 85-15, 한국동력자원연구소, p. 193-229.
- 박노영, 최선규, 박성원 (1986) 충청도 일원의 금은광상에 대한 성인연구. 금속광상조사연구, 86-10, 한국동력자원연구소, p. 387-435.
- 박희인, 최석원, 장호원, 채동현 (1985) 경남 함안-경북지역의 동광화작용에 관한연구. 광산지질, 18권, p. 107-124.
- 박희인, 장호원, 진명식 (1988a) 태백산지역내 광상의 생성연대. 광산지질, 21권, p. 57-67.
- 박희인, 장호원, 진명식 (1988b) 한반도중부지역의 광상생성과 생성구: 경기육괴내의 광상생성연대. 광산지질, 21권, p. 349-358.
- 소칠섭, Shelton, K.L., 지세정, 최상훈 (1988) 한반도 천안-청양-논산지역 광화대내 금-은 열수광상의 안정동위원소 및 유체포유물 연구: 청양지역. 광산지질, 21권, p. 149-164.
- 소칠섭, 윤성택, 지세정, 고용권, 최상훈 (1991) 한반도 무주-영암의 백악기 천열수 금-은 광 화작용 연구(공주 지역 광화대): 지질, 광물학적 유체포유물 연구. 지질학회지, 27권, p. 451-470.
- 이현구, 김상중 (1995) 감계 동-연-아연-금-은 광상의 광석광물과 유체포유물 연구. 자원환경지질, 28권, p. 9-17.
- 윤성택, 박희인 (1991) 용화광산의 금은광화작용. 광산지질, 24권, p. 107-129.
- 이창신, 김용준, 박천영, 이창주 (1992) 광양-승주지역에 분포하는 화강암류의 암석화학. 광산지질, 25권, p. 51-60.
- 이창신, 김용준, 박천영, 고진식 (1993) 광양-승주지역 금은광상의 광화작용. 광산지질, 26권, p. 145-154.
- 조동룡, 권성택 (1994) 남한의 중생대 화강암에 대한 각성

- 석 지압계와 지하두께의 진화. *지질학회지*, 30권, p. 41-61.
- 진명식 (1998) 한국의 지질; 화성활동. *대한지질학회*, 시그마프레스, p. 385-484.
- 최선규, 박노영, 홍세선 (1988) 충청도 일원의 금·은 광상에 대한 광물학적 연구. *광산지질*, 21권, p. 223-234.
- 최선규, 위수민 (1992) 에렉트럼의 화학조성과 관련된 한국중부지역 금은광상의 성인적 특성. *지질학회지*, 28권, p. 196-217.
- 최현일 (1998) 한국의 지질; 상부 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.
- 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.
- Cruzell, 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.
- Gallagher, D. (1963) Mineral resources of Korea. Issued by Mining Barch, Industry and Mining Div. USOM/Korea. In cooperation with Geol. Surv. Republic of Korea. 3(A and B). 124p. and 118p.
- Jwa, Y.J., Moutte, J. and Cho, W.H. (1994) Petrochemistry of mesozoic granites in the central Ogcheon belt and its tectonic 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, 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.
- Peters, S.G. (1993) Nomenclature, concepts and classification of oreshoots 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-Jeongup 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., Yun, S.T., Kim, S.H. and Lee, J.H. (1994) Cre-taceous epithermal Au-Ag mineralization in the Muju-Yeongam district, Republic of Korea: Muju mineralized area. *J. Min. Petr. Econ. Geol.*, v. 89, p. 56-74.
- 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., Yun, S.T., Heo, C.H. and Youm, S.J. (1999) Geochemistry and genesis of mesothermal gold deposits in Korea: Base metal-rich gold mineralization of the Byungjibang mine, Hwoingsung area. *J. Min. Petr. Econ. Geol.*, v. 94, p. 69-82.
- 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 (In Japanese).
- 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.