

## 남한의 중생대 금-은광화작용: 지구동력학적 관점에서 재검토된 금-은광상구

최선규<sup>1\*</sup> · 박상준<sup>1</sup> · 김성원<sup>2</sup> · 김창성<sup>1</sup> · 오창환<sup>2</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 지구환경과학과, <sup>2</sup>전북대학교 지구환경과학과

## Mesozoic Gold-Silver Mineralization in South Korea: Metallogenic Provinces Reestimated to the Geodynamic Setting

Seon-Gyu Choi<sup>1\*</sup>, Sang Joon Pak<sup>1</sup>, Sung Won Kim<sup>2</sup>, Chang Seong Kim<sup>1</sup> and Chang-Whan Oh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Earth & Environmental Sciences, Korea Univ, Seoul 136-713, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Earth & Environmental Sciences, Chonbuk National Univ, Cheonju 561-756, Korea

The Au-Ag lode deposits in South Korea are closely associated with the Mesozoic granitoids. Namely, the Jurassic deposits formed in mesozonal environments related to deep-seated granitoids, whereas the Cretaceous ones were developed in porphyry-related environments related to subvolcanic granitoids. The time-space relationships of the Au-Ag lode deposits in South Korea are closely related to the changing plate motions during the Mesozoic. Most of the Jurassic auriferous deposits (about 165~145 Ma) show fluid characteristics typical of an orogenic-type gold deposits, and were probably generated in a compressional to transpressional regime caused by an orthogonal to oblique convergence of the Izanagi Plate into the East Asian continental margin. On the other hand, strike-slip faults and caldera-related fractures together with subvolcanic activity are associated with major strike-slip faults reactivated by a northward (oblique) to northwestward (orthogonal) convergence, and probably have played an important role in the formation of the Cretaceous Au-Ag lode deposits (about 110~45 Ma) under a continental arc setting. The temporal and spatial distinctions between the two typical Mesozoic deposit styles in South Korea probably reflect a different thermal episodes (i.e., late orogenic and post-orogenic) and ore-forming fluids related to different depths of emplacement of magma due to regional changes in tectonic environment.

**Key words :** Mesozoic, gold-silver, mineralization, metallogenic province, geodynamics

남한의 중생대 금-은광상은 주로 쥐라기와 백악기 화성활동과 각각 밀접한 관계를 보이고 있으며, 고태평양 판의 섭입양태의 변화에 따라 다음과 같이 시·공간적으로 연계되어 있다. 쥐라기 금광상(약 165~145 Ma)은 심부 지질조건에서 유입된 광화유체로부터 형성된 전형적인 특징을 보이고 있으며, 대보조산운동 말기동안 이자나기판의 섭입방향이 동북아시아를 향하여 직각방향으로부터 사각복향으로 변환되는 동안 고응력장은 압축력 환경으로부터 전단력 환경으로 변화함으로써 이 단계에 쥐라기 금광화작용이 집중적으로 진행된 양상을 보이고 있다. 반면에 백악기 동안 섭입양태가 사각방향에서 직각방향으로 재차 변화됨으로써 전기 백악기 좌수향 주향이 동단층계의 발달과정에서 후기 백악기 반암형 화성활동과 관련된 천부 지질조건에서 유입된 다양한 기원의 유체로부터 점이성~원자성 금-은광상과 비철금속광상(약 110~45 Ma)이 배태되고 있다. 이러한 중생대 금-은광상의 유형은 대륙충돌 이후에 나타나는 지각진화 단계와 함께 고태평양판의 섭입양태 변화에 따라 서로 다른 관입심도를 갖는 화성암체가 관입됨으로써 심부 또는 천부 지질환경의 지열수계가 형성되고, 성인적으로 서로 다른 유형의 금-은광상이 배태된 것으로 추정된다.

**주요어 :** 중생대, 금-은, 광화작용, 광상구, 지구동력

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

## 1. 서 언

한국-일본-중국-러시아를 포함한 동북아시아 지역은 오랜 기간 동안 유라시아 판과 고태평양 판의 경계부에 위치하여 고생대 말부터 신생대까지 조구조 운동과 관련된 다양한 지질현상이 확인되었으며(Sengor and Natalin, 1996; Maruyama *et al.*, 1997), 이에 수반된 귀금속 광화작용은 지체구조의 진화단계에 따라 환태평양의 대륙 주변부의 조산대형 금광상(중국 산동; 러시아 북동부)과 호상열도의 천열수 금-은광상(일본 큐우슈우(Kyushu); 러시아 카마차카(Kamchatka))와 같이 서로 상이한 광상유형이 특정 지역에 배치되는 경향을 보이고 있다(Corbett and Leach, 1998; Goldfarb *et al.*, 2001; Groves *et al.*, 1998). 최근 열수광상의 성인 연구에서는 지구동력학 원리를 도입하여 열적 중심으로부터 에너지 공급에 따른 유체의 이동 및 순환과 함께 유용 금속의 농집-침전작용에 대한 각 인자간의 상호 연계성을 체계적으로 규명하고 있으며, 이를 위

하여 지체구조운동과 연계된 변성작용, 구조운동, 분지형성, 분지변형, 화성활동과 함께 광화작용의 시·공간적 관계를 종합적으로 검토하고 있다(Corbett and Leach, 1998; Kerrich *et al.*, 2000).

한반도는 조구조적 측면에서 고생대 말부터 신생대 까지 북중국(Sino-Korea)판과 남중국(Yangtze)판의 충돌 이후, 고태평양판인 팔라론(Farallon)판  $\Leftrightarrow$  이자나기(Izanagi)판  $\Leftrightarrow$  쿨라(Kula)판이 순차적으로 섭입되는 전형적인 대륙 주변부에 위치하여, 수차례에 걸친 지체구조운동의 변화와 관련된 복합적인 지질작용이 중첩됨으로써 지금까지도 미해결된 많은 지질학적 과제를 안고 있다. 앞으로 한반도의 광상 연구에서도 최근 보고된 다양한 지질자료를 종합 분석하고, 지체구조진화와 연관된 시·공간적 변화요인을 체계적으로 검토하여 광상 유형의 재분류와 함께 광상구의 재정립이 필요한 시점이다. 따라서 본 연구에서는 한반도 중부지역에서 남부지역에 분포하는 중생대 금-은 광상의 부존 특성과 함께 광상형성과 관련된 화성활동시기 및

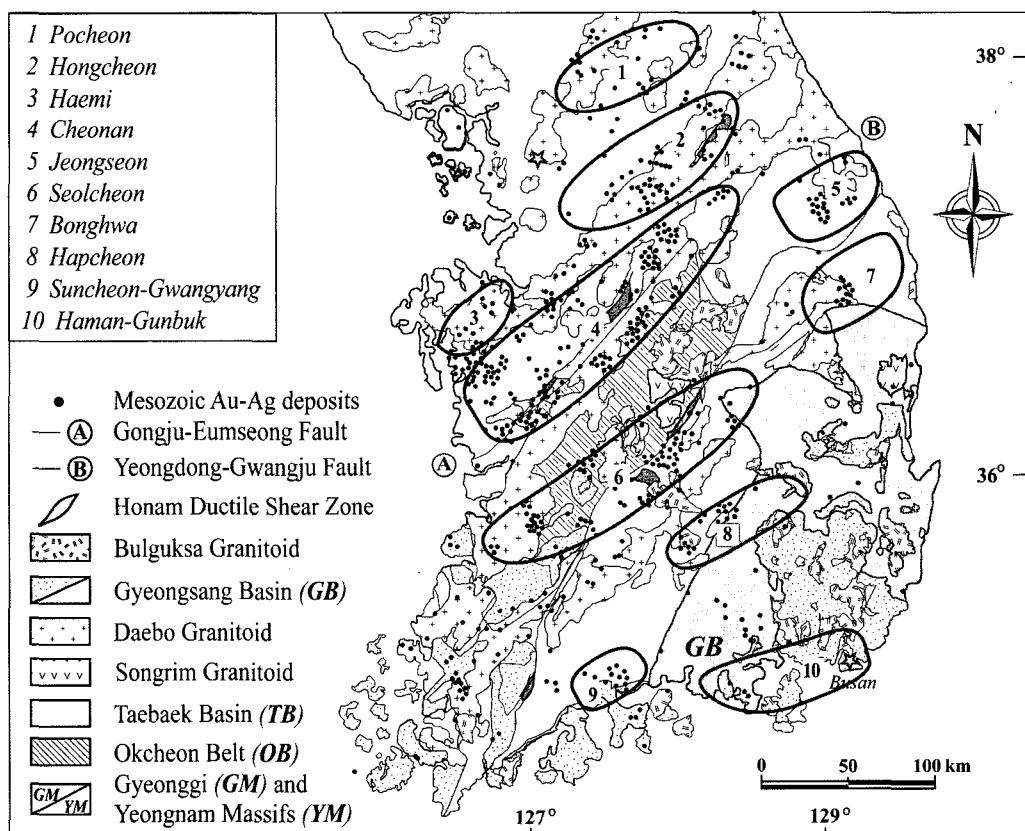


Fig. 1. Geologic map of South Korea and distribution of ten gold-silver metallogenic provinces (Kim, 1970).

광상생성연대를 전반적으로 재검토하고, 각 광화대별 안정동위원소 연구결과를 체계적으로 비교 분석하여, 각 광화대에서 나타나는 광상의 생성환경을 조구조적 측면에서 검토하고자 한다.

## 2. 중생대 화성활동 개요

한반도의 현생이언 화강암류는 생성연대에 따라 송림(약 250~210 Ma), 대보(약 200~155 Ma), 불국사(약 110~50 Ma) 화강암류로 구분되며(Fig. 1), 쥐라기 말부터 백악기 초까지 약 150~110 Ma 기간 동안은 화성활동이 매우 미약한 휴지기의 변화추이를 보이고 있다(Jin *et al.*, 2001; Oh *et al.*, 2004b; Choi *et al.*, 2005a; Sagong *et al.*, 2005). 송림변동과 관련된 화강암체는 주로 옥천변성대, 영남육괴 및 경상분지의 일부 지역을 중심으로 배태되며(Fig. 1), 비교적 심부조건인 2.3~3.9 kbar에서 정치되었고(홍세선과 조등룡, 2003) 금속광화작용과는 무관한 화성활동으로 보고된 바 있다(Jin *et al.*, 2001).

중생대 화강암류의 기 발표된 암석·지화학적 연구 자료를 종합적으로 비교한 결과, 각 지괴에 따라 마그마 기원이 서로 다른 조구조 환경에서 유래되었고, 이러한 화성활동의 시·공간적 특성은 다음과 같다. 경기육괴의 쥐라기 화강암체는 대륙 충돌형 화강암류에 해당하는 지화학적 특징을 보이는 반면, 영남지괴 및 옥천변성대에 분포하는 폐름기~쥐라기 화강암체는 공통적으로 대륙주변부에서 유래한 성인적 특징을 나타내고 있다(Jwa, 1998). 또한, 백악기 화강암류는 옥천변성대와 경상분지에서 공통적으로 후조산(post-orogenic)운동과 관련된 기원으로 해석하였다(김옥준, 1971; Cluzel *et al.*, 1991; Jwa, 2004).

쥐라기 대보 화강암류는 경상분지를 제외한 한반도 전 지역에 걸쳐서 NE-SW 방향을 따라 대규모 저반으로 산출되고, 각섬석 지질압력계로 추정된 정치압력은 3.4~7.9 kbar (조등룡과 권성택, 1994; 홍세선, 2001)로서 심부 환경에서 고결된 전형적인 산출 양상을 보이고 있는 반면, 후기 백악기 불국사 화강암류는 주로 경상분지 및 옥천변성대를 중심으로 한 반심성암 복합암체로 경기 육괴 및 영남 육괴에서는 인리형 소분지를 따라 소규모 암주 또는 암맥으로 산출되고, 전반적으로 2.8 kbar 미만(조등룡과 권성택, 1994; 홍세선과 조등룡, 2003)의 비교적 천부환경(epizone)에서 정치된 반상, 정동, 미문상 조직을 갖는 반심성암체의 전형적인 산상을 보인다. 중생대 화강암류는 쥐라기와 백악

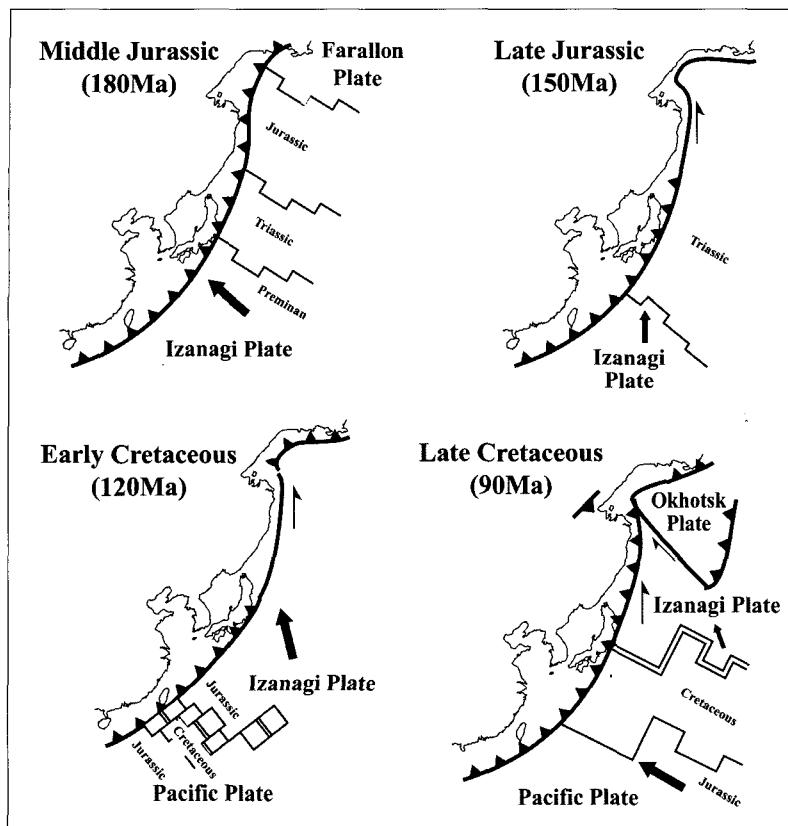
기 화성활동에서 관입 및 정치 심도의 명백한 차이를 보이고 있을 뿐만 아니라, 이러한 화강암체의 심도차이는 심부 또는 천부 환경으로부터 유입된 유체와 함께 광화유체의 진화과정에서 직·간접적으로 연계되어 있다(Choi *et al.*, 2005a).

## 3. 시·공간적 관점에서 재검토된 금-은광화작용

한반도 중부지역에서 남부지역에 분포하는 약 700여 개의 금-은광상은 전국에 걸쳐 광역적으로 분포하고 있으며, 선캠브리아이언 변성암류로부터 제3기 화산암류까지 다양한 지질시대의 암석을 모암으로 하여 배태되고 있다(Fig. 1). 모암 유형에 따른 분포 비율은 화강암에 38.4%, 선캠브리아이언 변성암류에 38.4%, 기타 암석에 23.2%로 보고된 바 있다(Kim, 1986). 이와 같은 모암과 관련된 산상에 기초하여 오래 전부터 중열수 광상으로 기재된 바 있으나, 80년대 후반부터 유체포유물 및 안정동위원소 자료 등 정량적 연구에 기초하여 중열수 광상(태창, 보령 광산 등), 한국형 광상(천보, 일보, 대홍, 여주 광산 등), 천열수 광상(양평, 원주, 금용, 통영 광산 등)으로 구분하여 물리-화학적 생성환경의 차이를 언급하였다(Shelton *et al.*, 1988).

중생대 금-은광화작용은 지체구조의 변화추이에 따라 다음과 같은 광상유형의 성인적 특성을 보이고 있다. 고생대 말부터 신생대 초기까지 환태평양의 동북아시아 지역은 고태평양판인 팔라른판  $\Leftrightarrow$  이자나기판  $\Leftrightarrow$  쿠리판의 섭입방향이 북?  $\Leftrightarrow$  북서  $\Leftrightarrow$  북  $\Leftrightarrow$  북북서  $\Leftrightarrow$  북서 방향으로 순차적 변화양상(Maruyama *et al.*, 1997)을 보이고 있으며(Fig. 2), 이러한 섭입방향의 변화는 한반도에 대하여 직각(orthogonal)?  $\Leftrightarrow$  직각  $\Leftrightarrow$  사각(oblique)  $\Leftrightarrow$  사각  $\Leftrightarrow$  직각 방향의 단계적 섭입양태의 변화와 함께 각 지질시대에 따라 서로 다른 지질환경이 유도되고 있다. 즉, 한반도에서 중생대 조구조적 환경변화는 앞에서 언급된 바와 같이 쥐라기와 백악기의 서로 다른 화성활동이 수반되었고, 지질시대에 따라 순차적으로 나타나는 지질작용에 따라 광상형성과 연계된 필수요건이 좌우되고 있다(Choi *et al.*, 2005b).

기 발표된 약 100여 개 금-은광상의 생성연대자료에 의하면(Shimazaki *et al.*, 1986; So and Shelton, 1987; 박희인 등, 1988a, 1988b, 1994; Shelton *et al.*, 1990; 이창신 등, 1993; So *et al.*, 1989a, 1989b, 1993, 1994, 1999; So and Yun, 1997; Yun *et al.*, 1993; 최범영 등, 2002; Choi *et al.*, 2005a), 쥐라기 금광상은 주로 경기육괴에서 대보 화강암체의



**Fig. 2.** Paleotectonic maps showing the mode of subduction during the Middle-Late Jurassic (A) and the Early-Late Cretaceous (B) (Maruyama *et al.*, 1997). Note that the setting of subduction between Northeast Asia and the Paleo-Pacific plate changes from orthogonal to oblique convergence during the Jurassic, and from oblique to orthogonal convergence during the Cretaceous.

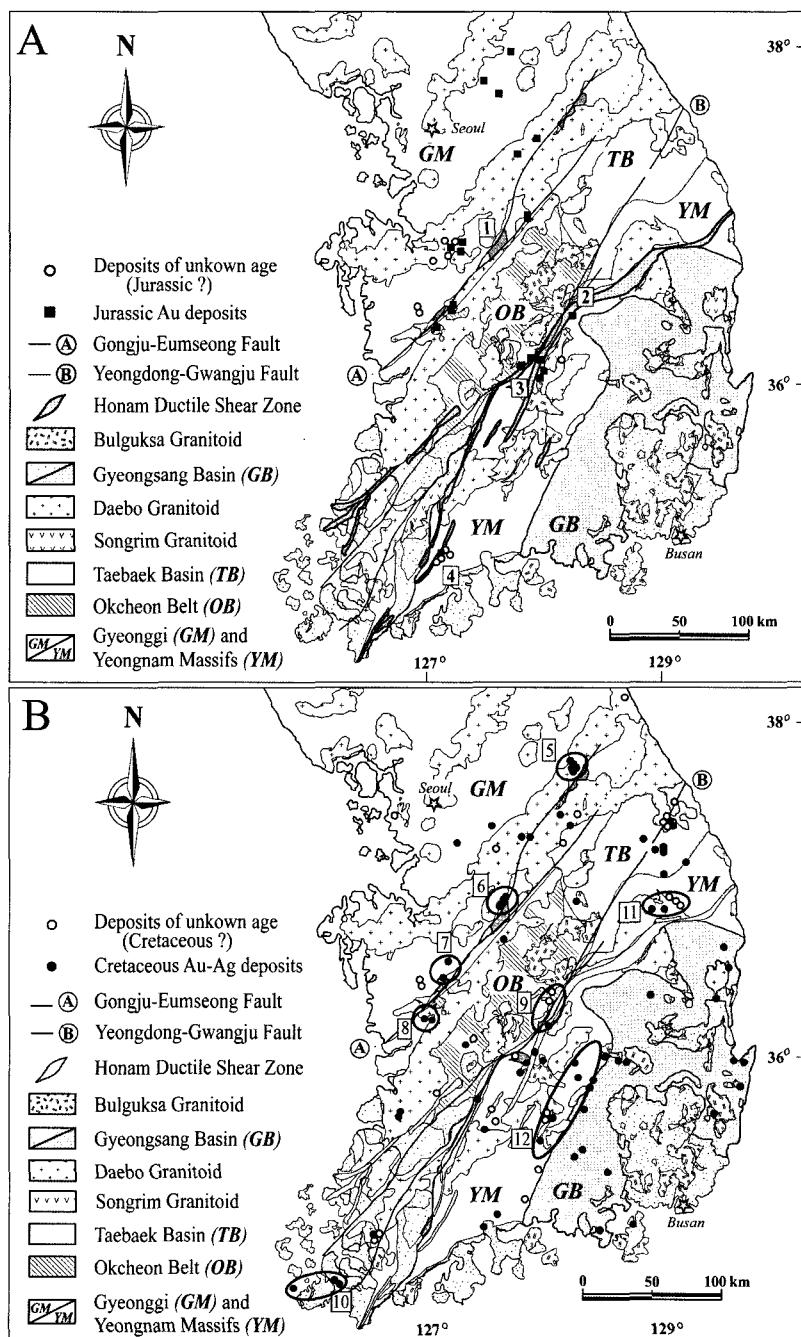
저반 주변부를 따라 분포하는 포천, 홍천, 천안 지역에 밀집되어 있으며, 영남육괴에서 NE 방향의 호남전단대에 위치한 상주, 영동, 보성 지역을 중심으로 배태되고 있다(Fig. 3A). 그러나 백악기 금은광상은 주로 백악기 퇴적암류가 분포하는 공주-음성 단층계와 영동-광주 단층계 및 경상분지 외각부를 따라 밀집 분포하고 있을 뿐만 아니라(Fig. 3B), 태백산분지 및 경상분지에서는 전 지역에 걸쳐서 광범위하게 배태되는 경향을 보인다(Fig. 1). 그리고, 쥐라기 금광상의 광화연기는 약 197~137 Ma로 보고된 바 있으나, 주 광화시기는 약 165~145 Ma로 경기육괴 및 영남육괴를 중심으로 집중된 양상을 보이고 있다(Fig. 4). 반면에 백악기 금-은 광상의 생성연대는 약 113~45 Ma로 보고된 바 있으나, 주 광화시기는 약 100~60 Ma에 걸쳐 다소 분산된 경향을 보이고 있다.

한반도에서 중생대 금-은광상은 시·공간적 측면에

서 다음과 같은 광상유형의 성인적 특성을 보이고 있다. 쥐라기 광상은 경기육괴를 중심으로 NE-SW 방향의 저반을 따라 분포하는 저반형 금광상과 영남육괴의 호남 연성전단대를 따라 배태되는 전단대형 금광상으로 분류되며, 후기 쥐라기에 집중된 양상을 보이고 있다. 그리고 백악기 광상은 공주-음성 단층계와 영동-광주 단층계를 따라 배태되는 금-은광상과 태백산분지 및 경상분지에서 비철금속 광상과 함께 분포하는 금-은광상으로 구분되며(이상렬 등, 2003; Pak *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2005a), 광화시기는 전기 백악기 퇴적작용이 우세한 기간보다 후기 백악기 화산활동이 활발하였던 기간에 편중되는 경향을 보이고 있다(Fig. 4).

#### 4. 중생대 금-은광화작용의 성인적 특성

고생대 말부터 중생대 초까지 동북아시아의 조구조



**Fig. 3.** Simplified geologic map of South Korea, showing the distribution of the major Jurassic gold deposits (A) and the Cretaceous gold-silver deposits (B) in Korea. The Jurassic deposits in the Gyeonggi massif are associated with Jurassic granitoid belt and its related pegmatite. In contrast, the gold deposits in the Yeongnam Massif are sited in subsidiary fractures associated with the Honam Shear Zone (A). The Cretaceous deposits tend to occur within or adjacent to Cretaceous pull-apart basins developed by left-lateral strike-slip shearing of NE-NNE-trending fault systems such as the Gongju-Eumseong and Yeongdong-Gwangju ones (B). 1=Cheonan-Jungwon, 2=Sangju, 3=Yeongdong, 4=Boseong, 5=Hongcheon, 6=Mugeuk, 7=Nonsan, 8=Buyeo, 9=Yeongdong, 10=Haenam, 11=Bonghwa and 12=Hapcheon metallogenic provinces.

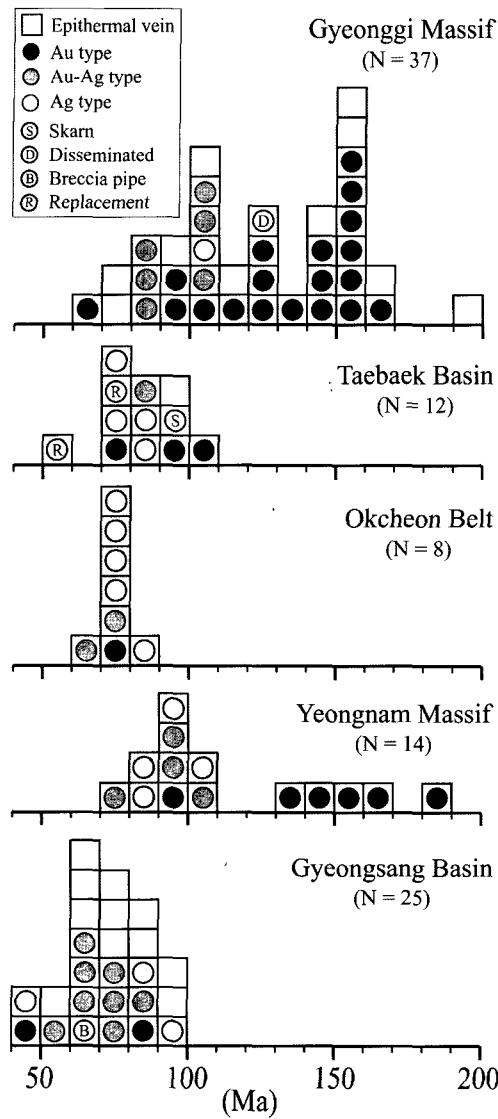
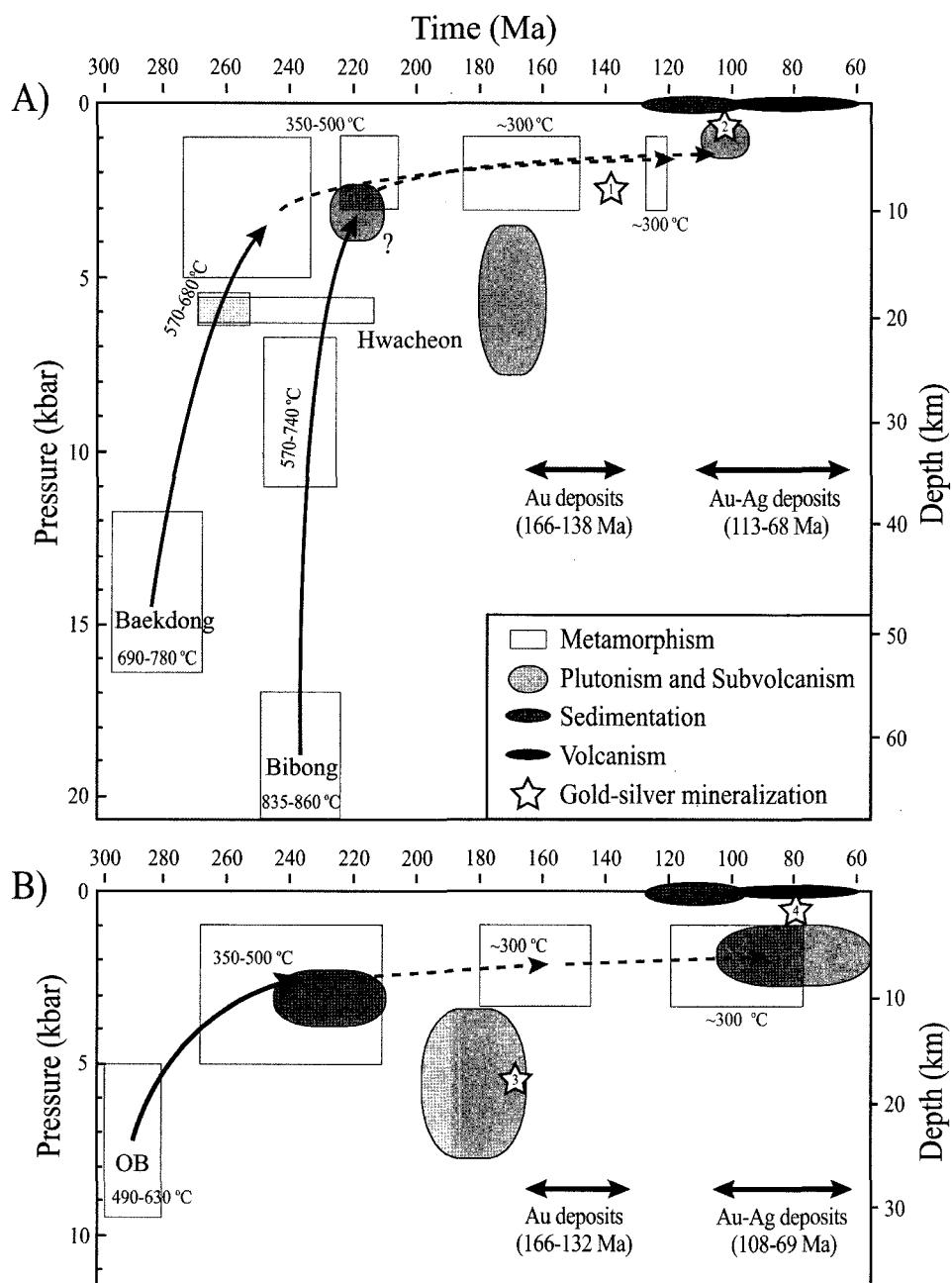


Fig. 4. Age frequency of gold-silver deposits for 5 tectonic provinces in South Korea.

적 환경은 북중국지괴에 대하여 남중국지괴가 북상하여 해양지각이 섭입·소멸되었으며(Sengor and Natal'in, 1996), 양 지괴의 충돌이후 형성된 봉합대가 중국 친링-다비-수루 지역에서 초고압 변성대와 함께 산동지역의 북측 연변부를 따라 대규모(>2,000t Au)의 조산대형 금광화대가 분포하고 있다(Zhou *et al.*, 2002). 또한, 최근 발표된 한반도의 홍성지역에서 변성 진화사에 대한 연구결과(Oh *et al.*, 2004a; Oh *et al.*, 2005)에 의하면 경기육괴 남서부인 홍성(백동-비봉)지역 변성염기성암류에서 약 300~230 Ma 기간 동안 약 17~21

kbar와 830°~860°C의 고압형 변성환경을 제시함으로써 중국 충돌대의 연장대로 추정하였다. 고생대 말부터 중생대 초까지 한반도에서 작용한 변성작용은 Fig. 5의 PT-t 관계도에 제시된 바와 같이 경기육괴의 홍성지역과 옥천변성대사이에 약 10 kbar 이상의 압력 차이를 보여주고 있다(Min and Cho, 1998; Kim and Cho, 1999; Oh *et al.*, 2004b; Kim *et al.*, 2005). 즉 전기 트라이아스기 동안 인접 지역간 초고압형 변성대와 중-저압형 변성대의 존재는 양 지역이 서로 다른 변성진화과정으로 진행되었고, 한반도 충돌봉합대의 지리적 위치가 경기육괴의 홍성지역에 존재함을 시사하고 있다. 또한 전기 쥐라기부터 경기육괴, 옥천변성대, 영남육괴가 전반적으로 후퇴 변성작용과 관련된 유사한 PT환경을 나타내고 있다. 이는 고생대 말부터 트라이아스기까지 변성작용으로 추정된 압력조건으로부터 홍성지역과 옥천변성대의 융기속도가 각각 약 1.2~0.5 mm/yr와 0.2 mm/yr로 계산되며, 대륙충돌 이후인 후기 트라이아스기 말기부터 하나로 합쳐진 한반도가 유사한 PT변성환경에서 진행된 지각진화과정을 시사하고 있다.

중생대 화성활동은 한반도 지각진화과정에서 다음과 같이 시·공간적 유사성을 보이고 있다. 트라이아스기 화성활동은 주로 경기육괴의 서남부(홍성)지역을 경계로 남부에 위치한 옥천변성대, 영남육괴 및 경상분지의 기반암 지역을 중심으로 2.3~3.9 kbar의 정치심도(Ree *et al.*, 2001; Cheong *et al.*, 2002; 홍세선과 조동룡, 2003)를 갖는 관입암체가 국부적으로 확인되고 있다. 이러한 화강암체는 대륙충돌당시의 섭입방향(Maruyama *et al.*, 1997)과 함께 기원물질에서 제시된 성인적 특성(Jwa, 1998) 및 화성암체의 정치조건(홍세선과 조동룡, 2003)을 종합적으로 고려할 경우, 홍성남측에 위치한 기반암에서 나타나는 화성암체는 대륙충돌과 연계된 화성활동으로 해석하기 보다는 고태평양판의 섭입과 관련된 지질현상으로 해석되며(송림변동?), 이는 트라이아스기 변성작용에서 추정된 PT조건과도 서로 일치하고 있다(Fig. 5). 그리고 전기 쥐라기 이후부터 관입한 화강암체는 남한 전역에 걸쳐 3.4~7.9 kbar에서 정치되었으며, 중부지역의 전체지괴가 유사한 중-저압형 변성작용과 함께 심부(mosozone-katazone) 화성활동과 연계된 일련의 지각진화단계(대보조산운동)로 해석되지만, 후기 백악기 불국사화강암류는 주로 경상분지 및 옥천변성대를 중심으로 <2.8 kbar(홍세선과 조동룡, 2003)의 천부(epizone) 화산암-반심성암 복합암체의 산상을 보이고 있다.



**Fig. 5.** Summary of the pressure-time paths estimated from main geologic events (i.e., metamorphism, magmatism, sedimentation and gold-silver mineralization) in South Korea during the Late Carboniferous to Cretaceous. Note that the differences of inferred metamorphic pressure condition between the Gyeonggi Massif (A) and Okcheon belt (B) during Late Paleozoic to Triassic time are about 10 kbar. The Jurassic gold deposits were formed under mesozonal conditions in association with shallow-level plutons, whereas the Cretaceous gold-silver deposits were formed under epizonal conditions associated with shallow-level plutons. Data compiled from Oh and Choi (1993), Cho and Kwon (1994), Cho *et al.* (1995), Ree *et al.* (1996), Kwon *et al.* (1997), Oh *et al.* (1998), Kim *et al.* (1999), Min and Cho (1999), Lee and Cho (2003), Cho and Kim (2002), Cheong *et al.* (2003), Oh *et al.* (2004a), Oh *et al.* (2004b), Choi *et al.* (2005b), Kim *et al.* (2005), Oh *et al.* (2005), Sagong *et al.* (2005) and Pak *et al.* (2006). Star 1=Yuryang, Star 2=Mugeuk, Star 3=Samhanghwak and Star 4=Eunsan.

#### 4.1. 쥐라기 조산대형 심부 금광화작용

한반도에서는 쥐라기 동안 대보조산운동과 관련된 심부 환경의 마그마 활동(약 200 Ma)으로부터 시작하여 화성활동이 미야해진 휴지기(약 150~110 Ma) 환경으로 접어들며(Sagong *et al.*, 2005), 동시에 조산운동 말기에는 융기작용과 연계된 지각 복원기의 진화 단계로 변화되고 있다. 즉, 중기 쥐라기에는 고태평양(이자나기)판의 섭입방향이 동북아시아를 향하여 NW 방향으로 섭입하는 압축력 지구조 환경에 위치하여 (Maruyama *et al.*, 1997), 화성활동의 최대 활동기(약 175±15 Ma)를 나타내고 있다. 또한, 영남육괴를 중심으로 중기 쥐라기(약 180~170 Ma)에는 우수향 주향이 동과 관련된 구조운동으로 인하여 NE-SW 방향의 호남 연성전단대가 발달하게 된다(권성택과 이진한, 1997).

쥐라기 광화작용은 전반적으로 심부 기원(약 2.5±1.0 kbar)의  $H_2O-CO_2-CH_4$ 계 고온~중온성( $T_h=350^\circ\text{C}$ ~ $100^\circ\text{C}$ ) 광화유체(마그마수)»진화된 심부순환수·변성수)가 집중적으로 유입되어 후기 쥐라기 동안(약 150±10 Ma) 집중적으로 금광화작용이 진행된 것으로 추정된다. 이는 심부 지질조건을 반영한 화성암체의 느린 냉각과정에 기인하며(최선규 등, 2001), 장기간 동안 높은 온도구배의 환경이 유지되고 천수 유입이 불가능한 극히 제한적인 조건으로 유도되었다고 사료된다(Table 1). 이러한 한국의 쥐라기 금광상은 맥의 산상, 금-은비, 광석광물의 유형 및 황화광물의 양적비, 변질대의 구성광물 및 분포특성; 광화유체의 생성온도, 염농도, 부화된  $^{18}\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  조성 등에서 매우 유사한 경향을 보이고 있으며, 이는 열수유체의  $\text{CO}_2$  비등현상 및 이에 따른 불흔화 용융현상에 기인하여 자연금 및 에렉트럼을 비롯한 단순한 비철금속 황화광물종이 주로 정출된 것으로 해석된다.

쥐라기 화산암의 부재, 심부 관입암체인 대보 화강암체 저반 노출과 함께 전기 백악기 중부지역에 형성된 인리형 퇴적분지(퐁암, 음성, 부여, 영동 분지 등)와 같은 지체구조의 진화과정에 대한 종합적 증거를 통하여 전기 백악기에는 상당히 융기된 지질환경을 시사하고 있다. 앞에서 언급된 중생대 조구조 환경을 통하여 북중국과 남중국의 충돌대가 한국의 경기육괴 남서부인 홍성지역에 위치할 경우, 대륙 충돌을 전후하여 섭입하고 있는 방향이 지속적으로 북쪽으로 향하고 있으므로 중국의 충돌대에서 나타나는 화성활동과 금광화작용은 주로 경기육괴에 분포하는 것이 타당하며, 기보고된 화강암체의 기원(Jwa, 1998) 및 광상성인의 연

구결과(Choi *et al.*, 2005a; Pak *et al.*, 2006)와도 일치하고 있다. 또한, 조산대형 금광상 모델(Groves *et al.*, 1998)과 비교하면, 남한의 쥐라기 금광상은 대보화강암의 관입 이후 융기에 따른 급격한 삭박작용에 기인하여 천부(epizone) 금-은광상은 모두 제거된 것으로 해석된다.

#### 4.2. 백악기 후조산대형 금-은광화작용

한반도에서 전기 백악기부터 시작된 공주-음성 단층계와 영동-광주 단층계는 북동-남서 방향으로 연장성을 보이며, 대체로 분지의 삼차원적 형태가 뚜렷한 경계 단층을 따라 비대칭으로 함몰되는 풍암, 음성, 공주, 부여, 영동 분지 등 소규모 인리형 분지의 전형적 산출 특징을 보이고 있다(Fig. 3). 반면에 해남 및 순천만 분지는 광주 단층계와 같은 방향성을 보이고는 있으나, 상기 분지와는 달리 경계단층이 뚜렷하게 확인되고 있지 않으며, 대칭적인 함몰구조나 거의 향심원에 가까운 함몰구조를 보이고 있다. 이러한 백악기 퇴적분지의 층서는 전반적으로 전기 백악기의 하성 및 호소성 퇴적암류로부터 후기 백악기의 화산암류로 변화하는 공통적인 특징을 보이고 있으며(Chang *et al.*, 1999), 불국사 화성활동과 관련된 반상화강암·석영반암·안산암이 분포하고 있어 전형적인 천부조건의 지질환경을 시사하고 있다. 이러한 퇴적분지는 전기 백악기 육성 퇴적작용과 관련된 인리형 분지형성기와 후기 백악기 천부 화성활동과 연계된 분지변형기로 구분된다.

백악기 금-은광상은 전기 백악기 퇴적작용이 우세한 분지형성단계(>100 Ma)보다 후기 백악기 화산활동이 활발하였던 분지변형단계(<100 Ma)에 집중되는 경향을 보이고 있다(Fig. 4). 중생대 화강암류에서도 확인된 바와 같이 백악기 금-은광상은 전형적인 열극충진형 복성맥의 산상과 함께 전반적으로 천부 지질환경(<1 kbar)을 반영하고 있다. 광화유체는 개방계 환경조건에서 형성된 지열수계의 전형적인 특징(마그마수<지표수·순환수)과 함께 지표수의 혼입-비등작용과 관련된 유체진화과정(산소 편이( $^{18}\text{O}$  shift))을 보인다(Table 1). 또한, 백악기 광상의 금-은은 금속비에 대한 다양성은 관계화성암의 압력-온도-산소·유형분압, 천수의 유입량, 주변 모암과의 반응특성에 따라 광화유체의 복합적인 진화과정과 함께 황화광물종의 다양성을 보이고 있다(Choi and Choi, 1995). 그리고, 백악기 금속광상은 천부 지질환경에 기인하여(Fig. 5), 근원암인 관계 화성암체의 공간적 근접성이 따라 금속종뿐만 아니라 광상 유형별 특성이 좌우된다(Pak *et al.*, 2004; 이상렬 등, 2003).

**Table 1.** Oxygen and hydrogen isotope composition of minerals and inclusion fluids from gold-silver deposits in Korea.

Tectonic province*	Metallogenic province*	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) in vein quartz			$\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ (‰) in fluid inclusion			Calculated $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ (‰)***			Remarks	
		Average	S.D.**	Range	N**	Average	S.D.**	Range	N**	Average S.D.**	Range	
<u>Jurassic deposit</u>												
GM	Cheonan-Jungwon	13.3	1.5	9.4~15.4	45	-79	23	-143~52	43	7.9	2.6	3.2~11.9
	Sangi	13.0	0.5	12.4~13.6	8	-65	5	-69~59	6	5.5	0.2	5.2~5.9
YM	Yeongdong	12.8	0.9	11.0~14.9	41	-71	6	-80~54	40	7.0	1.1	4.7~9.3
	Bossong	12.7	0.5	11.5~13.8	28	-77	6	-93~70	28	7.0	0.9	4.8~8.6
<u>Cretaceous deposit</u>												
GM	Pungam	9.4	3.2	2.2~13.8	23	-72	9	-87~53	19	0.9	4.5	-6.7~7.9
	Eumsseong	8.0	2.7	3.4~12.9	23	-75	10	-99~60	23	-0.9	2.7	-5.5~4.0
YM-OB	Yeongdong	6.1	2.9	1.5~13.2	22	-77	4	-83~70	17	-2.4	3.9	-6.6~7.3
	Haenam	5.4	1.7	1.6~10.2	24	-66	4	-76~61	17	-6.5	1.6	-10.1~1.5
GB	Gyeongsang	5.7	3.3	2.0~11.5	32	-72	21	-111~44	27	-4.1	4.8	-9.4~3.9
	TB	Taebaek	12.0	2.8	6.3~17.7	24	-75	12	-89~51	15	4.1	3.7

\*See Fig. 1 for abbreviations of tectonic provinces and Fig. 3 for locations of metallogenic provinces.

\*\*S.D. = standard deviation; N = number of analyses.

\*\*\* $\delta^{18}\text{O}$  calculated from homogenization temperature of fluid inclusion data.

이는 광화유체의 진화양상이 관계 화성암체로부터 공간적 위치와 관련된 지온구배의 차이에 따라 열수 중 마그마수와 지표수간 기여도 차이를 반영한 결과로 해석된다(Choi *et al.*, 2006). 백악기 동안 한반도에서는 좌수향 주향이동단층에 의한 인리형 분지의 발달단계에서 생성된 이차 약선대인 인장형 균열(tension fracture)이 발생되며(Choi *et al.*, 2005b), 인리형 분지를 중심으로 발생된 천부 화성암체로부터 열에너지 및 금속원소의 공급과 함께 광화유체의 이동-농집-침전이 유도된 것으로 추정된다.

## 5. 지체구조와 금-은 광상구의 재검토

남한의 기존 금-은 광상구(김옥준, 1970)는 대보 및 불국사 화성암체의 분포양상과 함께 광상 밀집도와 상관관계를 통하여 포천·홍천·해미·천안·정선(화암리)·영동·봉화·합천·순천·광양·함안 광상구로 구분되었으며(Fig. 1), 경상분지 이외 지역에 분포하는 금-은 광상은 쥐라기 화강암체 저반의 분포양상이 NE-SW방향과 일치하고 있어 대보조산운동과의 연계성을 언급하였다(김옥준, 1971). 최근까지 다수 연구자에 의해 보고된 광상의 K-Ar 생성연대자료는 경상분지 이외 지역에서도 백악기 금-은광화작용(Shimazaki *et al.*, 1986; So *et al.*, 1992; 박희인 등, 1988a, 1988b; Choi *et al.*, 2005a)으로 보고됨에 따라 남한 전역에 걸쳐 불국사 화성활동과 관련된 금-은광상의 부존 가능성이 제시되었고(Fig. 3), 기존 금-은 광상구의 재검토가 요구되고 있다. 이는 중생대 금-은광화작용이 단순히 쥐라기와 백악기의 생성연대의 차이뿐만 아니라, 상기 지질시대에 따라 광학심도의 차이로부터 서로 다른 유형의 지열수계가 유도됨으로써 광화유체의 진화과정 및 금-은정출 메커니즘의 상이함을 제시하고 있다(Fig. 5).

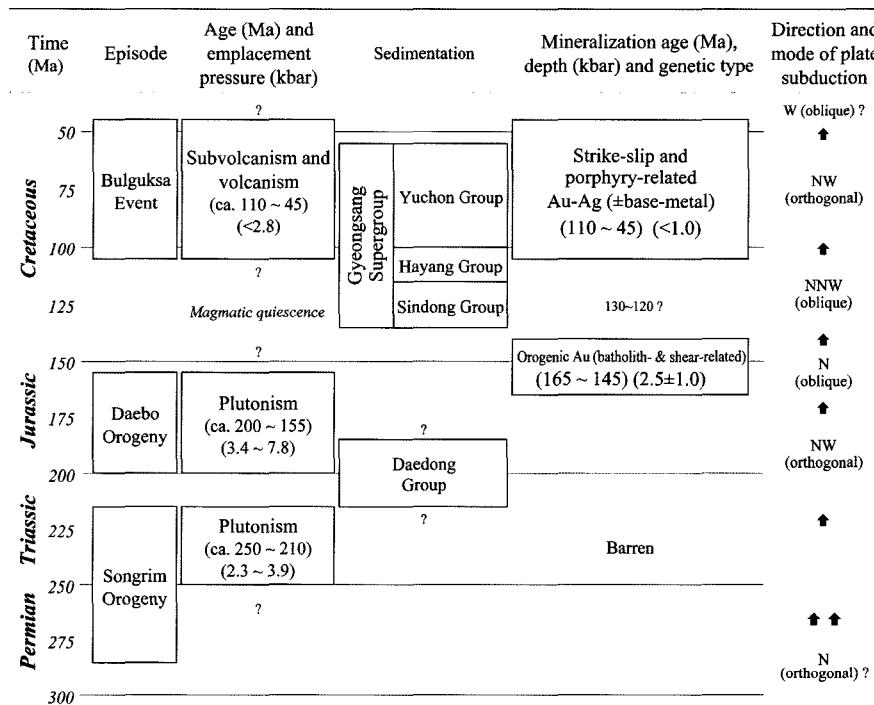
한반도 경기육괴의 홍성지역은 중국 대규모 조산대 형 금광화대가 분포하는 산동지역과 대비될 수 있다. 즉, 홍성지역에서는 트라이아스기 대륙충돌형 고압변성 작용이후 급격한 융기작용과 함께 S형-I형 혼합화강암체(Heo *et al.*, 2002; Pak *et al.*, 2006) 및 웨라이트 질 마그마의 관입(Seo *et al.*, 2006), 이와 관련된 광화유체로부터 조산대형 금광화작용이 유도된 것으로 사료된다. 이는 대륙충돌 이후 냉각된 해양지각이 맨틀하부로 소멸되는 동시에 맨틀물질의 유입과 관련된 열에너지와 함께 기원물질이 순차적으로 공급됨으로써 금광화작용이 유도된 것으로 해석할 수 있으며(Yang *et al.*,

2003), 중국 산동지역과 한국 홍성지역이 전반적으로 서로 유사한 지각진화과정을 보이는 것으로 추정된다.

쥐라기 한반도에서 나타나는 지각변동은 전기~중기 쥐라기 동안 심부 화성활동과 관련된 조산운동기의 지질환경 및 후기 쥐라기 동안 화성활동의 축소에 따른 휴지 단계의 융기작용과 연계된 지질환경으로 구분된다. 즉, 중기 쥐라기(약 180 Ma)에는 고태평양(이자나기)판의 섭입방향이 동북아시아를 향하여 NW 방향으로 섭입하는 조구조 환경으로 추정되며(Maruyama *et al.*, 1997), 한반도에 대한 섭입 양태는 직각 방향으로 위치하게 되어 횡압력이 최대로 증가됨으로써 대보조산운동이 유도되었고, 동시에 대륙지각 하부로부터 발생된 티탄철석계 또는 자철석계 칼크·알카리형 화강암질 마그마(약 190~160 Ma)가 한반도 전 지역에 걸쳐 광범위하게 관입하여 NE-SW 방향의 저반이 배태된다. 또한, 영남육괴를 중심으로 중기 쥐라기(약 180~170 Ma)에는 우수향 주향이동과 관련된 구조운동(권성택과 이진한, 1997)으로 인하여 NE 방향의 호남 연성전단대가 발달하게 된다. 이러한 전단대의 변형조건은 연성변형이 유도될 수 있는 비교적 심부지질 환경을 간접적으로 시사하고 있다.

후기 쥐라기인 약 150 Ma에 접어들어 이자나기판의 섭입방향은 NW 방향에서 N 방향으로 변화되었으며(Maruyama *et al.*, 1997), 이러한 섭입양태의 변화와 관련된 한반도의 고응력장은 직각 방향에서 사각 방향으로 위치하게 된다. 즉 고응력장의 변화에 따라 한반도는 전반적으로 압축력(compressional)환경에서 전단력(transpressional)환경으로 변화되었음을 시사하고 있다(Fig. 6). 또한 이 시기는 대보 화성활동이 종료되는 시점에 해당되며, 동시에 횡압력의 감소는 복원력에 의한 급격한 융기작용과 동시에 전단력 지질조건하에서 남부지역에 위치한 호남 전단대를 따라 재차 구조운동이 발생됨으로써 심부 기원(약  $2.5 \pm 1.0$  kbar)의 광화유체가 부분적으로 유입되어 영남육괴의 호남전단대를 중심으로 후기 쥐라기 동안(약  $150 \pm 10$  Ma) 금광화작용이 집중적으로 진행된 것으로 추정된다.

쥐라기 동안 이러한 지체구조의 변화에 따라 경기육괴를 중심으로 대보화강암체의 주변부를 따라 저반형 금광상과 영남육괴 호남전단대의 이차·삼차 구조선을 따라 전단대형 금광상이 배태된다(Fig. 3A). 그리고, 쥐라기 금속광상에서 천부 기원의 광상 부재는 후기 쥐라기부터 급격한 융기작용이 수반되었음을 간접적으로 시사하고 있다(Choi *et al.*, 2005a). 이는 대보 화성활동의 휴지단계와 전반적으로 일치하고 있으며(Fig. 6),



**Fig. 6.** Summary of the relationship among the magmatism, gold-silver mineralization, metamorphism and sedimentation in South Korea and the mode of the Paleo-Pacific Plate during the Late Paleozoic and Mesozoic. Data compiled from Maruyama *et al.* (1997), Choi *et al.* (2005a, 2005b) and Oh *et al.* (2005).

이 기간 동안 주로 용기작용과 동시에 삭박작용이 수반됨으로써 대보 화강암체의 최상부 화산암류는 대부분 제거되고 심부 관입암체인 대보 화강암체의 저반(주정치심도: 약  $5.5 \pm 1.5$  kbar)이 일부 노출된 것으로 추정된다. 그리고 전기 백악기부터 형성된 인리형 퇴적분지가 중부지역의 전 지역에 걸쳐 분포하는 사실은 이 시점에서 용기된 지질환경의 지각진화단계를 간접적으로 시사하고 있다.

백악기 분지발달단계와 관련된 지체구조운동의 특성은 전기 백악기(약 120 Ma) 이자나기판의 섭입방향이 N 방향에서 NNW 방향으로 미약하게 변화된다(Fig. 2). 한반도에 대한 이러한 섭입양태는 사각방향을 지속적으로 유지함으로서 NE~NNE 방향의 좌수향 주향이 동 단층계인 공주-음성 및 영동-광주 단층계가 생성되고, 변위가 지속적으로 확장됨으로써 디수의 인리형 분지가 광범위하게 발달하게 된다(Otoh and Yanai, 1996; Chough *et al.*, 2000). 이러한 지각의 변형과정은 호남전단대의 심부 연성변형과는 대조되는 천부(brittle)조건의 지질환경을 간접적으로 시사하고 있다. 그리고 분지형성 이후인 후기 백악기(약 90 Ma)로 접

어들어 이자나기 판의 섭입양태는 사각방향에서 재차 직각방향으로 변화됨에 따라 분지발달이 종료되는 단계로 접어들며, 마그마 발생을 용이하게 유도하여 후기 백악기동안 지속적인 천부 화성활동이 수반된다(Fig. 6). 이는 경상분지 및 인리형 분지의 충서대비에서 전기 백악기 신동충군과 하양충군의 하성 및 호소성 퇴적암이 우세한 지질환경(분지형성단계)과 후기 백악기 유천충군의 화산암이 지배적인 화산활동기(분지변형단계)로 구분되는 공통적 현상이다.

백악기 금-은광상은 주로 공주-음성 단층계, 영동-광주 단층계 및 경상분지 외각부를 따라 배태되고 있으며(Fig. 3B), 전기 백악기 퇴적작용이 우세한 기간 (>100 Ma)보다 후기 백악기 화성활동이 활발하였던 분지변형기(<100 Ma)에 집중되는 경향을 보이고 있다(Fig. 4). 전기 백악기 한반도에서는 인리형 분지를 중심으로 지각의 두께가 얕아지는 열개현상을 동반함으로써 분지발달과 함께 하성 및 호소성 퇴적작용이 우세한 지질환경이 유도되었고, 후기 백악기 인리형 분지에서는 암암의 감소에 따라 마그마의 발생과 함께 이동통로를 제공함으로써 국지적으로 나타나는 천부 화

성활동은 열에너지 및 금속원소의 공급을 통하여 광화유체의 이동에 따라 귀금속원소의 침전작용이 진행된 것으로 해석된다. 이러한 전기 백악기 주단층계는 N 또는 NNW 방향으로 작용한 고응력장에 기인하며(Fig. 6), 인리형분지의 발달단계에서 N-S 방향의 열개대의 생성과 함께 후기 백악기 마그마 관입·분출에 따라 유체이동이 용이한 지열수계가 형성되었다.

공주-음성 단층계에서는 풍암분지의 홍천 광화대, 음성분지의 무극 광화대, 공주분지의 논산 광화대 및 부여분지의 임천광산을 중심으로 한 부여 광화대와 같은 금-은 광화대가 분포하며, 영동-광주 단층계를 따라 영동분지의 영동 광화대 및 해남-목포분지의 해남 광화대, 경상분지의 외각부를 따라 봉화·합천 광화대가 분포하게 된다(Fig. 3B). 백악기 금속광상은 천부 지질환경에 기인하여 근원암인 관계 화성암체의 공간적 근접성에 따라 광증뿐만 아니라 광상 유형별 특성이 좌우되는 경향을 보이고 있으며(Pak *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2006), 이는 관계 화성암체로부터 광화유체의 진화양상이 화성암과의 거리와 관련된 지온구배의 차이에 따라 광화유체 중 지표수 기여정도의 차이를 반영한 결과로 추정된다. 백악기 동안 한반도에서는 좌수향 주향이동 단층에 의한 인리형 분지의 발달단계에서 생성된 이차 약선대가 형성된다(Choi *et al.*, 2005b). 인리형 분지를 중심으로 관입한 천부 화성암체로부터 열에너지 및 귀금속원소의 공급과 함께 광화유체의 이동·농집·침전현상이 유도되어 주향이동단층과 관련된 금-은광상이 형성된 것으로 해석되며(Choi *et al.*, 2005b), 이는 지구동력학적 관점에서 제시된 사각 섭입환경과 연계된 구조운동과 조화적인 관계를 보이고 있다(Fig. 2). 한반도 동부지역에서 남부지역에 걸쳐 후기 백악기 화성활동이 집중되었으며, 이에 수반된 금-은광상은 정선·상주·합천·순천·함안·광양 지역에 다소 밀집된 경향을 보인다(Fig. 1). 이러한 천부 지질환경에서 형성된 광상 유형별 공간적 분포와 진화양상은 근원암인 천부 화강암체와 지리적 근접성에 좌우되며, 근지성 동·철·금·몰리브덴·중석 광상, 점이성 다금속 광상, 원지성 금-은 광상군이 공간적 연계성을 보이고 있다.

중생대 한반도의 지각진화과정과 관련된 광화작용은 대륙충돌과 함께 후기 트라이아스기동안 경기육괴를 중심으로 나타나는 급격한 융기작용 이후(Fig. 5), 대보조 산운동 및 이에 수반된 마그마 활동에 기인하여 후기 쥐라기동안 재차 진행된 융기과정에서 조산대형 심부 금광화작용이 수반되는 반면, 전기 백악기 주향이동과 관련된 구조운동과 함께 후기 백악기에 접어들어 나타

나는 불국사 화성활동과 관련된 천부 금-은광화작용이 진행되었다(Fig. 6). 기존에 언급된 금-은광상구인 천안·영동·홍천 지역에서는 쥐라기 금광화작용과 백악기 금-은광화작용이 중첩되어 있다(Fig. 3). 이와 같이 영남육괴와 경기육괴에서는 쥐라기와 백악기 동안 심부와 천부의 서로 다른 지열수계로부터 금-은광화작용이 유도됨으로써 인접한 금-은광상 간에서도 광맥의 산출 특징뿐만 아니라 광물학적·지화학적 상이함을 보이고 있다.

## 6. 결 언

남한의 중생대 귀금속 광상유형은 지질시대에 따라 다음과 같은 조구조적 환경 변화와 밀접한 연관성을 보이고 있다. 고생대 말부터 백악기 말까지 고태평양판의 섭입양태와 관련된 한반도에서 지체구조운동의 변화양상은 대륙충돌(직각 또는 사각 ?)  $\Rightarrow$  융기작용  $\Rightarrow$  송림 화성활동  $\Rightarrow$  대보 화성활동(직각)  $\Rightarrow$  우수향 주향 이동과 관련된 구조운동(직각)  $\Rightarrow$  융기작용(사각)  $\Rightarrow$  좌수향 이동단층과 관련된 구조운동(사각)  $\Rightarrow$  인리형 분지 퇴적작용(사각)  $\Rightarrow$  불국사 화성활동(직각)  $\Rightarrow$  융기작용(사각)과 같은 순차적 지질작용이 수반되었으며, 이에 따른 지각진화과정의 P-T 환경변화와 함께 융기과정에 기인하여 후기 쥐라기와 후기 백악기에 각각 상이한 지열수계를 형성함으로써 서로 다른 유형의 금-은광상이 배태될 수 있는 적합한 지질요건이 유도되었다고 해석된다.

쥐라기 금광상은 주로 경기육괴에서 쥐라기 화강암체의 저반 주변부를 따라 분포하는 홍천, 포천, 해미, 천안 광화대와 영남육괴내 호남전단대의 이차 및 삼차 구조선을 따라 배태되는 상주, 영동, 보성 광화대를 중심으로 밀집되는 경향을 보이고 있으며, 경기육괴의 저반형 금광상과 영남육괴의 전단대형 금광상으로 구분될 수 있다. 이러한 광상유형은 섭입양태와 관련된 고응력장의 변화와 밀접한 연관성을 보이고 있으며, 중기 쥐라기 직각방향(NW 방향)의 입축력에 의한 화성활동과 후기 쥐라기 사각방향(N 방향)의 전단력과 관련된 구조운동이 복합적으로 작용하여 조산대형 금광상이 배태된 것으로 해석된다.

백악기 금-은광상은 주로 백악기 분지가 분포하는 공주-음성 및 영동-광주 단층대를 따라 홍천, 무극, 공주, 부여, 영동, 해남 광화대와 경상분지 외각부의 봉화·합천 광화대를 중심으로 밀집 분포하고 있을 뿐만 아니라, 태백산분지 및 경상분지 전 지역에 걸쳐서 광범

위하게 배태되고 있다. 금-은광화작용은 전기 백악기 신동층군과 하양층군의 분지형성단계(>100 Ma)보다 후기 백악기 유천층군의 화산암류가 지배적인 분지면 형단계(<100 Ma)에 집중되는 경향을 보이고 있다. 이러한 광화작용은 고태평양판의 고응력장이 전기 백악기 NNW 방향의 사각섭입에 따른 전단력 환경으로부터 후기 백악기 NW 방향의 직각섭입에 기인한 압축력 환경으로 변화됨에 따라 분지의 확장이 종료되며, 경상분지를 중심으로 마그마 발생에 의한 응력이 동시에 유도되고 있다. 이러한 사실은 경상분지 및 인리형 소분지 등의 경상누층군 층서에서 공통적인 현상이다. 인리형 분지환경에서는 조구조운동시 전반적으로 지각의 두께가 얕아지는 열개 현상을 동반하고 이에 따른 퇴적작용과 함께 암암의 감소에 따라 마그마의 발생을 용이하게 유도할 뿐만 아니라 이동통로를 제공함으로써 분지형성이 후 단속적인 화성활동을 동반하게 된다. 이러한 전부 화강암체는 열에너지, 광화유체 및 귀금속원소를 공급하여 천부 금-은광상이 배태된 것으로 추정된다.

중생대 광상유형은 서로 다른 관입심도를 갖는 좌우기와 백악기 화성활동이 중첩됨으로써 성인적으로 상이한 유형의 광상이 동일 지역에 배태된 것으로 해석 할 수 있다. 대보 조산운동 말기에는 심부 지질환경과 관련된 조산대형 금광상이 주로 형성된 반면, 대보 조산운동 이후인 백악기에는 좌수향 주향이동단층과 함께 천부 화성활동과 관련된 반암형 금-은광상과 비철금속광상이 주로 형성되었다. 한반도에서 중생대 지체 구조의 진화과정은 시·공간적 관점에서 다양한 지질 환경의 변화와 함께 특정원소의 기원, 이동 및 농집 과정을 좌우하였고, 지각 진화 산물인 광물자원을 최적 조건에서 형성하였다고 사료된다. 앞으로 이러한 지구동력학 관점에서 한반도의 기존 금속광상구에 대한 재검토가 요구되고 있다.

## 사    사

이 연구는 과학기술부 과학재단 특정기초연구사업(R01-2006-000-10553-0)의 지원과 고려대학교 연구년 과제 “조산대형 금광상의 성인연구”로 수행되었으며, 논문심사에 유익한 조언을 주신 이찬희 교수와 익명 심사위원에 깊은 사의를 드린다.

## 참고문헌

권성택, 이진한 (1997) 호남전단대의 운동시기에 관한 소

- 고, 지질학회지, 33권, p. 183-188.
- 권성택, 전은영, 이진한 (1997) 경기육괴 변성암의 흑운모 Rb-Sr 연대: 지구조적 의미. 지질학회지, 33권, p. 49-53.
- 김옥준 (1970) 남한의 금-은광상구. 광산지질, 3권, p. 163-167.
- 김옥준 (1971) 남한의 초기 화강암류의 관입시기와 지각 변동. 광산지질, 4권, p. 1-9.
- 박희인, 장호완, 진명식 (1988a) 태백산 지역내 광상의 생성연대. 광산지질, 21권, p. 57-67.
- 박희인, 장호완, 진명식 (1988b) 한반도 중부지역의 광상 생성기와 생생구: 경기육괴내의 광상생성연대. 광산지질, 21권, p. 349-358.
- 박희인, 장호완, 문희수 (1994) 경상분지 내 광상의 생성 시기와 광상구. 한국과학재단 연구보고서 KOSEF 91-06-00-03, pp. 29-75.
- 서지은, 최선규, 오창환, 송석환 (2006) 경기육괴내 신진지역의 초엽기성암(릴라이트)에 대한 예비연구. 자원환경 지질학회 춘계 학술발표회 논문집, p. 88-89.
- 오창환, 김성원, 이정후 (1998) 옥천변성대 남서부지역의 광역변성작용과 접촉변성작용에 관한 연구. 지질학회지, 34권, p. 311-332.
- 이상렬, 최선규, 소칠섭, 유인장, 위수민, 허철호 (2003) 한국 경상분지 백악기 비철금속 광화작용과 그 성인적 의의: 함안-군북-고성(-창원) 및 의성 광상구를 중심으로. 자원환경지질, 36권, p. 257-268.
- 이창신, 김용준, 박천영, 고진식 (1993) 광양-승주지역 금-은광상의 광화작용. 광산지질, 26권, p. 145-154.
- 조문섭, 권성택, 이진한, Nakamura E. (1995) 연천-천곡 지역에 분포하는 임진강대의 고압 각섬암. 암석학회지, 4권, p. 1-19.
- 조문섭, 김현철 (2002) 중부 옥천변성대의 변성진화: 최근의 연구결과와 논평 및 문제점. 암석학회지, 1권, p. 121-137.
- 조동룡, 권성택 (1994) 남한의 중생대 화강암에 대한 각섬석 지압계와 지각 두께의 진화. 지질학회지, 30권, p. 41-61.
- 최범영 외 27인 (2002) 경상분지 중생대 광화작용. 한반도 지구조 진화연구: 후기 중생대-신생대 지구조 진화사 (2). 한국지질자원연구원, KR-02-01, p. 201-230.
- 최선규, 박상준, 최상훈, 신흥자 (2001) 한국 중생대 화성 활동과 이에 수반된 금-은광화작용. 자원환경지질, 34권, p. 25-38.
- 홍세선 (2001) 각섬석 지압계를 이용한 영남육괴 내 화강암의 정치심도와 그 의미. 암석학회지, 10권, p. 36-55.
- 홍세선, 조동룡 (2003) 지각 상하운동 연구. 한반도 지구조 진화연구: 후기 중생대-신생대 지구조 진화사 (3). 한국지질자원연구원, KR-03(최종)-01, p. 455-526.
- Chang, K.H., Filatova, N.E. and Park, S.O. (1999) Upper Mesozoic stratigraphic synthesis of Korean Peninsula. Econ. Env. Geol., v. 32, p. 353-363.
- Cheong, C.S., Kwon, S.T. and Sagong, H. (2002) Geochemical and Sr-Nd-Y isotopic investigation of Triassic granitoids and basement rocks in the northern Gyeongsang basin, Korea: Implications for the young basement in the East Asian continental margin. Island Arc, v. 11, p. 25-44.
- Cheong, C.S., Cheong, K.Y., Kim, H., Choi, M.S., Lee, S. and Cho, M. (2003) Early Permian peak metamorphism recorded in U-Pb system of black slates from the Ogneon metamorphic belt, South Korea, and its tectonic implication. Chem. Geol., v. 193, p. 81-92.

- 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., Kwon, S.-T., Lee, J.-H., So, C.S. and Pak, S.J. (2005a) Origin of Mesozoic gold deposits in South Korea. *Island Arc.*, v. 14, p. 102-114.
- Choi, S.-G., Ryu, I.-C., Pak, S.J., Wee, S.M., Kim, C.S. and Park, M.E. (2005b) Cretaceous epithermal gold-silver mineralization and geodynamic environment, Korea. *Ore Geol. Rev.*, v. 26, p. 115-135.
- Choi, S.-G., Pak, S.J., Kim, C.S., Ryu, I.-C. and Wee, S.M. (2006) The origin and evolution of mineralizing fluids in the Cretaceous Gyeongsang Basin, southereastern Korea. *J. Geochem. Explor.*, v. 89, p. 61-64.
- Chough, S.K., Kwon, S.-T., Ree, J.-H. and Choi, D.K. (2000) Tectonic and sedimentary evolution of the Korean Peninsula: A review and new view. *Earth Sci. Rev.*, v. 52, p. 175-235.
- Corbett, G.J. and Leach, T.M. (1998) Southwest Pacific Rim gold-copper systems: Structure, alteration and mineralization. *Rev. in Econ. Geol.*, 6, 235 pp.
- Cruzel, D., Lee, B.J. and Cadet, J.P. (1991) Indosinian dextral ductile fault system and synkinematic plutonism in the south-west of the Ogneon belt (South Korea). *Tectonophysics*, v. 194, p. 131-151.
- Goldfarb, R.J., Groves, D.I. and Gardoll, S. (2001) Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. *Ore Geol. Rev.*, v. 18, p. 1-75.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G. and Robert, F. (1998) Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geol. Rev.*, v. 13, p. 7-27.
- Heo, C.H., So, C.S., Youm, S.J. and Kim, S.H. (1999) Oxygen and hydrogen isotope study of the gold-silver mines in the Boseong-Jangheung area, Chollanamdo province, Korea. *J. Korean Inst. Min. Energy Res. Eng.*, v. 36, p. 404-411.
- Heo, C.H., Yun, S.T., So, C.S. and Choi, S.-G. (2001) Mesothermal gold mineralization at Seolhwa mine, Asan district: Oxygen and hydrogen isotope studies. *J. Korean Inst. Min. Energy Res. Eng.*, v. 38, p. 405-415.
- Heo, C.H., Yun, S.T., So, C.S. and Choi, S.-G. (2002) Geochemistry of the granitoids hosting the Seolhwa Au mine, Asan district, Chungcheongnamdo province, Korea: Genetic implication on the mesothermal gold mineralization. *Geosystem Eng.*, v. 5, p. 54-56.
- Hwang, J. and Park, H.I. (1996) Stable isotope of the Nakcheon, Eunchi and Jungbong gold-silver deposits in the northern Taebaegsan mining district. *Econ. Env. Geol.*, v. 29, p. 159-170.
- Jin, M.S., Lee, Y.S. and Ishihara, S. (2001) Granitoids and their magnetic susceptibility in South Korea. *Resource Geol.*, v. 51, p. 189-204.
- Jwa, Y.J. (1998) Temporal, spatial and geochemical discriminations of granitoids in south Korea. *Resource Geol.*, v. 47, p. 273-284.
- Jwa, Y.J. (2004) Possible source rocks of Mesozoic granites in south Korea: Implications for crustal evolution in NE Asia. *Trans. Royal Soc. of Edinburgh*, v. 95, p. 181-198.
- Kerrick, R., Goldfarb, R., Groves, D. and Garwin, S. (2000) The geodynamics of world-class gold deposits: Characteristics, space-time distribution and origins. *Gold in 2000*, Rev. in *Econ. Geol.*, v. 13, p. 501-551.
- Kim, H. and Cho, M. (1999) Polymetamorphism of Ogneon Supergroup in the Miwon area, central Ogneon metamorphic belt, South Korea. *Geosci. J.*, v. 3, p. 151-162.
- Kim, S.H., Choi, Y.C. and Youm, S.J. (1999) Mineralogy and geochemistry of the Sanjeon Au-Ag deposit, Wonju area, Korea. *Econ. Env. Geol.*, v. 32, p. 445-454.
- Kim, S.W., Oh, C.W., Hyodo, H., Itaya, T. and Liou, J.G. (2005) Metamorphic Evolution of the Southwest Okcheon Metamorphic Belt in South Korea and Its Regional Tectonic Implications. *Inter. Geol. Rev.*, v. 47, p. 344-370.
- Kim, W.J. (1986) Metallogeny on gold-silver in south Korea. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 19, p. 243-264.
- Lee, C.H. and Park, H.I. (1994) Gold mineralization and depositional environment of the Samjo deposits, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 30, p. 395-409.
- Lee, C.H. and Park, H.I. (1996) Epithermal gold-silver mineralization and depositional environment of carbonate-hosted replacement type Baegjeon deposits, Korea. *Econ. Env. Geol.*, v. 29, p. 105-117.
- Lee, C.S., Kim, J. and Kim, H.N. (1996) Mineralization of the gold-silver ore deposits in Naju-Youngam area. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, v. 17, p. 166-173.
- Lee, S.R. and Cho, M. (2003) Metamorphic and tectonic evolution of the Hwacheon granulite complex, central Korea: Composite P-T path resulting from two distinct crustal-thickening events. *J. Petrol.*, v. 44, p. 197-225.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G. and Terabayashi, M. (1997) Paleo-geographic maps of the Japanese islands. plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc.*, v. 6, p. 121-142.
- Min, K. and Cho, M. (1998) Metamorphic evolution of the northwestern Ogneon metamorphic belt, South Korea. *Lithos*, v. 43, p. 31-51.
- Oh, C.W. and Choi, S.H. (1993) The application of computer program for determination of fluid properties and P-T condition from microthermometric data on fluid inclusions. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 26, p. 21-27.
- Oh, C.W., Choi, S.-G., Song, S.H. and Kim, S.W. (2004a) Metamorphic evolution of the Baekdong metabasite in the Hongseong area, South Korea and its relationship with the Sulu collision belt of China. *Gondwana Res.*, v. 7, p. 809-816.
- Oh, C.W., Kim, S.W., Ryu, I., Okada, T., Hyodo, H. and Itaya, T. (2004b) Tectono-metamorphic evolution of the Okcheon Metamorphic Belt, South Korea: Tectonic implications in East Asia. *Island Arc.*, v. 13, p. 387-402.
- Oh, C.W., Kim, S.W., Choi, S.-G., Zhai, M., Guo, J. and Sajeev, K. (2005) First finding of Eclogite facies metamorphic event in South Korea and its correlation with the Dabie-Sulu collision belt in China. *J. Geol.*, v. 113, p. 226-232.
- Otoh, S. and Yanai, S. (1996) Mesozoic inversive wrench tectonics in far east Asia: examples from Korea and

- Japan. In: Yin A. and Harrison T.M. (Eds.) *The Tectonic Evolution of Asia*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 401-419.
- Pak, S.J., Choi, S.-G. and Choi, S.H. (2004) Systematic mineralogy and chemistry of gold-silver vein deposits in the Taebaeksan district in Korea: Distal relatives of a porphyry system. *Min. Mag.*, v. 68, p. 467-487.
- Pak, S.J., Choi, S.-G., Oh, C.W., Heo, C.H., Choi, S.H. and Kim, S.W. (2006) Genetic environment of the intrusion-related Yuryang Au-Te deposit in the Cheonan metallogenic province, Korea. *Resource Geol.*, v. 56, p. 117-132.
- Ree, J.H., Cho, M., Kwon, S.T., Nakamura, E., (1996) Possible eastward extension of Chinese collision belt in South-Korea: the Imjingang belt. *Geology*, v. 24, p. 1071-1074.
- Ree, J. H., Kwon, S.H., Park, Y., Kwon, S.T. and Park, S.H. (2001) Pretectonic and posttectonic emplacements of the Granitoids in the south central Okcheon belt, South Korea: Implications for the timing of strike-slip shearing and thrusting. *Tectonics*, v. 20, p. 850-867.
- Sagong H., Kwon S.T. and Ree J.H. (2005) Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, v. 24, p. 1-18.
- Sengor, A.M.C. and Natal'in, B.A. (1996) Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis, In: Yin A. and Harrison, T.M., (Eds.), *The Tectonic Evolution of Asia*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 486-640.
- 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., 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., Choi, S.H., Kim, S.H. and Kim, M. Y. (1992) Cretaceous epithermal Au-Ag mineralization in the Muju-Yeongam district (Sulcheon mineralized area), Republic of Korea. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 25, p. 115-131.
- So, C.S., Yun, S.T. and Koh, Y.K. (1993) Mineralogy, fluid inclusion, and stable isotope evidence for the genesis of carbonate-hosted Pb-Zn(-Ag) ore bodies of the Taebaek deposit, Republic of Korea. *Econ. Geol.*, v. 88, p. 855-872.
- So, C.S., Yun, S.T., Youm, S.J. and Heo, C.H. (1994) Fluid inclusion and stable isotope studies of gold- and silver-bearing vein deposits, South Korea: Silver-rich epithermal mineralization of the Keumryeong mine. *N. Jb. Min. Abh.*, v. 167, p. 57-88.
- So, C.S., Yun, S.T. and Shelton, K.L. (1995) Mesothermal gold vein mineralization of the Samdong mine, Youngdong mining district, Republic of Korea: A geochemical and fluid inclusion study. *Miner. Deposita*, v. 30, p. 384-396.
- So, C.S., Yun, S.T. and Kwon, S.H. (1999a) Fluid inclusion and stable isotope studies of mesothermal gold vein deposits in metamorphic rocks of central Sobaegsan Massif, Korea: Youngdong area. *Econ. Env. Geol.*, v. 32, p. 561-573.
- So, C.S., Yun, S.T., Heo, C.H. and Youm, S.J. (1999b) Geochemistry and genesis of mesothermal gold deposits in Korea: Base metal-rich gold mineralization of the Byungjibang mine, Hweongsung area. *J. Min. Petro. Econ. Geol.*, v. 94, p. 69-82.
- So, C.S., Yun, S.T., Shelton, K.L. and Zhang D.Q. (2002) Geochemistry of the Youngbogari deposit, Republic of Korea: An unusual mesothermal gold-silver deposit of the Youngdong area. *Geochem. J.*, v. 36, p. 155-171.
- So, C.S. and Yun S.T. (1996) Geochemical evidence of progressive meteoric water interaction in epithermal Au-Ag mineralization, Jeongju-Buan district, Republic of Korea. *Econ. Geol.*, v. 91, p. 636-646.
- 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.
- Yang, J.H., Wu, F.Y. and Wilde, S.A. (2003) A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the north China craton: an association with lithospheric thinning. *Ore Geol. Rev.*, v. 23, p.125-152.
- Youn, S.T. and Park, H.I. (1991) Gold and silver mineralization in the Yonghwa mine. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 24, p. 107-129.
- 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. *Miner. Deposita*, v. 28, p. 107-121.
- Yun, S.T., Youm, S.J., So, C.S., Choi, S.-G., Zhang, D.Q. and Koh, Y.K. (2001) Genesis and age constrains on gold deposits of the Daerae mine, Sangju area, central-northern Sobaegsan Massif, Korea. *Resource Geol.*, v. 51, p. 1-11.
- Zhou, T., Goldfarb, R. and Phillips, G.N. (2002) Tectonics and distribution of gold deposits in China - An overview. *Miner. Deposita*, v. 37, p. 249-282.