자원환경지질, 제40권, 제5호, 517-535, 2007
Econ. Environ. Geol., 40(5), 517-535, 2007

남한의 중생대 광화유체의 기원과 진화특성: 광상 성인과의 관계

최선규* · 박상준
고려대학교 지구환경과학과

The Origin and Evolution of the Mesozoic Ore-forming Fluids in South Korea: Their Genetic Implications

Seon-Gyu Choi* and Sang Joon Pak
Dept. of Earth & Environmental Sciences, Korea Univ.

Two distinctive Mesozoic hydrothermal systems occurred in South Korea: the Jurassic/Early Cretaceous(ca. 200~130 Ma) deep-level ones during the Daebo orogeny and the Late Cretaceous/Tertiary(ca. 110~45 Ma) shallow hydrothermal ones during the Bulgugsa event. The Mesozoic hydrothermal system and the metallic mineralization in the Korean Peninsula document a close spatial and temporal relationship with syn- to post-tectonic magmatism. The calculated $\delta^{18}O_{H2O}$ values of the ore-forming fluids from the Mesozoic metallic mineral deposits show limited range for the Jurassic ones but variable range for the Late Cretaceous ones. The orogenic mineral deposits were formed at relatively high temperatures and deep-crustal levels. The mineralizing fluids that were responsible for the formation of theses deposits are characterized by the reasonably homogeneous and similar ranges of $\delta^{18}O_{H2O}$ values. This implies that the ore-forming fluids were principally derived from spatially associated Jurassic granitoids and related pegmatite. On the contrary, the Late Cretaceous ferroalloy, base-metal and precious-metal deposits in the Taebaeksan, Okcheon and Gyeongsang basins occurred as vein, replacement, breccia-pipe, porphyry-style and skarn deposits. Diverse mineralization styles represent a spatial and temporal distinction between the proximal environment of subvolcanic activity and the distal to transitional condition derived from volcanic environments. The Cu(-Au) or Fe-Mo-W deposits are proximal to a magmatic source, whereas the polymetallic or the precious-metal deposits are more distal to transitional. On the basis of the overall $\delta^{18}O_{H2O}$ values of various ore deposits in these areas, it can be briefed that the ore fluids show very extensive oxygen isotope exchange with country rocks, though the δD_{H2O} values are relatively homogeneous and similarly restricted.

Key words : Ore-forming fluid, Magmatic water, Meteoric water, Mineralization, Mesozoic

중생대부터 한반도에서 나타나는 열수계는 쥐라기/전기 백악기 (약 200~130 Ma) 심부지질환경과 관련된 조산대형 열수계와 후기 백악기/제3기 (약 110~45 Ma) 천부지질환경의 후조산대형 열수계로 구분된다. 이러한 열수계에 수반된 금속광화작용은 시·공간적 관점에서 조산대형 및 후조산대형 화성활동의 특성을 반영하고 있다. 그리고 각 유형 광화유체의 $\delta^{18}O_{H_2O}$는 쥐라기 조산대형 광상에 비하여 후기 백악기 후조산대형 광상에서 현저한 조성변화를 보이고 있다. 즉, 조산대형 광상은 경기·영남 육괴에 배태되며, 심부 지질조건에서 균질한 ^{18}O-부화된 고온성 광화유체로부터 진화된 열수충진형 금광상과 회유금속 광상으로 인접한 대보화강암체 또는 분화된 페그마타이트로부터 유입된 마그마수 또는 일부 변성수로부터 유도되었다. 반면에 후기 백악기 광상은 태백산분지, 옥천 지향사대 및 경상분지의 전 지역에 걸쳐 광범위하게 산출되며, 철합금, 비철금속 및 귀금속 광상의 열수충진형, 열수교대형, 각력 파이프형, 반암형, 스카른형 광상과 같은 다양한 광상유형으로 배태되고 있다. 이러한 다양한 유형의 광화유체는 물-암석 반응에 따라 산소 동위원소비($\delta^{18}O$)가 폭 넓게 변화하는 산소 편이의 전형적인 특징을 보이는 반면 수소 동위원소비(δD_{H2O})는 비교적 균질한 조성특징을 나타내고 있다. 또한 근지성 유형 광상의 산소 동위원소비는 부화된 경향을 보이지만, 점이성/원지성 유형 광상에서는 전반적으로 폭 넓게 변화하며 부분적으로 결핍된 특징을 보이고 있다. 즉 근지성 유형의 Cu(-Au) 또는 Fe-Mo-W 광상에서는 탈가스화작용 이후에 나타나는 마그마수의 전형적인 특징을 보이는 반면, 다금속 광상과 귀금속 광상은 점이성 또는 원지성 유형으로 지표수(또는 순환수)의 혼입이 우세한 경향을 보인다.

주요어 : 광화유체, 마그마수, 지표수, 광화작용, 중생대

*Corresponding author: seongyu@korea.ac.kr

1. 서 언

21세기의 시작과 함께 금속가격의 급격한 상승으로 인하여 세계광물자원의 부존현황에 대한 재평가와 함께 개발가능지역의 광체에 대한 기술적 검토가 실시되고 있다. 이러한 광물자원의 부존특성이 지체구조의 발달과정에서 나타나는 열적 진화와 광화유체의 시 · 공간적 이동과정에 따른 연계성이 입증됨으로서 특정 광상유형에 대한 통합 지질해석을 통하여 금속광상의 광역 · 정밀탐사에 적용하게 되었다(McConachie and Dunster, 1996; Goldfarb *et al.*, 1998). 최근 주요 광화대 탐사모델의 기술적 검토는 기존 광상에 대한 배태양상과 함께 잠두 광체의 부존 가능성을 예측하기 위한 열수계와 광상모델과의 관계적립을 통하여 심부 광체의 시추탐사에 활용되고 있다.

지각진화과정에서 수반되는 조구조적 환경변화는 지각내부의 구조적 약선대 발달과 함께 열적 불균형이 유도되어 마그마수 · 지표수 · 퇴적수 · 변성수와 같은 다양한 기원의 유체가 유입 · 혼합되고 최종적으로 유용원소의 농집과 침전과정을 통하여 다양한 유형의 열수광상이 형성되고 있으며, 광물자원의 분포는 이러한 지질작용의 시 · 공간적 변화과정과 밀접한 관계를 보이고 있다. 열수계는 일반적으로 화성암체의 유형 및 정치심도와 함께 분지 생성 · 소멸단계에 따라 서로 다른 인자가 개입될 수 있으며, 화강암체와의 공간적 근접성과 함께 각 단계별 진화특성에 따라 광상유형(스카른 광상, 열수교대 광상, 칼린 광상 및 천열수 광상)과 수반광종의 밀접한 연관성을 보이고 있다(Simmons and Graham, 2003). 그리고, 광화작용과 관련된 주요 인자인 유체의 공간적 이동이 지구동력학적 관점에서 화성활동 이외에도 분지 발달단계와 밀접하게 연관되고 있음이 입증됨에 따라 조구조 운동에 따른 광화유체의 이동시기 및 농집 공간에 대한 거시적인 해석이 시도되고 있다(Hart *et al.*, 2004; Williams *et al.*, 2005). 특히 금속광상의 형성과정에서 가장 중요한 필수인자인 유용원소와 광화유체는 특정한 지질환경에서 나타나는 P-T-X 변화조건에 좌우되고 있으며, 광화작용과 관련된 생성기작을 규명하는데 항상 제기되고 있는 기본적 문제로서 지체구조진화에 따른 유체 이동과 함께 금속원소의 최종 침전 단계까지 밀접한 연관성을 나타내고 있다.

국내 금속광상은 성인적 측면에서 퇴적기원의 철광상을 제외하고(Oh, 1999), 대부분 열수기원의 열수충진형 광상 및 스카른/열수교대형 광상과 일부 화성기원의 정마그마 광상 및 페그마타이트 광상으로 기재되어 있으며(Kim, 1971), 주로 중생대 쥐라기에서 백악기의 생성연대를 보이고 있다(Shimazaki *et al.*, 1986; So and Shelton 1987; Park *et al.*, 1988a; 1988b; Choi *et al.*, 2005). 특히 국내 열수기원의 광상은 지체구조상 선캠브리아이언 경기 및 영남 육괴, 시대미상 옥천 변성대의 변성암류, 고생대 태백산 퇴적분지의 퇴적암류, 쥐라기 대보 조산활동에 의한 심부 화강암체 그리고 백악기 퇴적암류, 불국사 화성활동과 관련된 화산암-반심성암 복합체와 같은 다양한 모암에 배태되어 있으며, 지질시대에 따라 서로 다른 지질조건이 언급된 바 있다(Shelton *et al.*, 1988; Choi *et al.*, 2005).

본 연구에서는 중생대 지질시대별 열수광상의 생성기작의 변화 특성을 규명하기 위하여 중생대 조구조운동과 관련된 화성활동, 변성작용 및 분지 진화과정과 함께 광화작용과 시 · 공간적 연계성을 종합적으로 검토하고, 국내 주요 광상에 대한 산소 · 수소 동위원소 자료를 종합적으로 비교 · 분석하여 한반도에서 나타나는 지체구조의 진화에 따른 광상유형별 광화유체의 기원 및 진화과정을 제시하고자 한다.

2. 지질 개요 및 화성활동

한반도의 중 · 남부지역은 지체구조상 경기(약 2,700~800 Ma) 및 영남(약 2,100~800 Ma) 육괴에 속하는 선캠브리아이언 변성암류를 기반암으로 하여 옥천지향대의 시대미상 변성암류와 태백산분지의 고생대 퇴적암류가 분포하고 있으며(Lee, 1987; Chough *et al.*, 2000), 경상분지 및 소분지를 중심으로 퇴적암/화산암류가 국부적으로 산출되고 있다. 백악기 퇴적분지의 전반적 층서는 전기 백악기 하성 및 호소성 퇴적암류로부터 후기 백악기 화산암류로 변화되는 특징을 보이고 있다(Chang *et al.*, 1999).

중생대 화성활동은 주로 트라이아스기 화강암류의 소규모 관입(약 250~210 Ma; 송림조산운동)이후, 쥐라기 동안 대보조산운동에 의한 NE-SW방향의 심성암체가 광역적으로 관입하였고, 백악기에서 경상분지와 함께 좌수향 주향이동단층인 공주-음성 및 영동-광주 단층계를 따라 발달한 인리형 분지(Chough *et al.*, 2000)인 풍암, 음성, 공주, 부여, 영동, 해남-진도 분지를 중심으로 불국사 화성활동과 관련된 화산암-반심성암의 천부 화강암체가 분포하고 있다. 중생대 화강암류의 기 발표된 암석 · 지화학적 연구자료를 종합적으

로 비교한 결과(Jin *et al.*, 2001; Jwa, 2004), 각 육괴들은 서로 다른 조구조 환경에서 발생된 마그마로부터 유래되었고, 이러한 화성활동의 시·공간적 특성은 다음과 같다. 경기육괴의 쥐라기 화강암체는 대륙 충돌형 화강암류에 해당하는 지화학적 특징을 보이는 반면, 영남육괴 및 옥천변성대에 분포하는 페름기~쥐라기 화강암체는 공통적으로 대륙주변부에서 유래한 특징을 나타내고 있다(Jwa, 1998). 또한, 백악기 화강암류는 옥천변성대, 경상분지 및 태백산분지를 중심으로 산출되며, 후조산운동(post-orogenic)과 관련된 기원으로 해석되고 있다(Kim, 1971; Cluzel *et al.*, 1991).

중생대 화강암체는 트라이아스기부터 백악기까지 지질시대에 따라 각각 서로 다른 깊이에서 고결된 것으로 언급된 바 있으며(Jin *et al.*, 2001). 각섬석 지질압력계로 제시된 화강암의 정치압력은 생성연대에 따라 다음과 같이 서로 다른 관입심도를 나타내고 있다(Cho and Kwon, 1994; Hong, 2001; Hong and Cho, 2003). 송림변동과 관련된 화강암체는 비교적 심부(mosozone) 환경인 약 2.3~3.9 kbar에서 정치된 것으로 보고된 바 있으며, 쥐라기 화강암체는 약 3.4~7.8 kbar로서 심부 환경(mosozone~katazone)에서 고결된 전형적인 산출 특징을 보이고 있는 반면, 불국사 화강암류는 약 <2.8 kbar로서 천부 지질환경(epizone)에서 정치된 반심성암 복합암체로 산출되고 있다(Cho and Kwon, 1994; Hong and Cho, 2003). 특히 중생대 화강암체 중 쥐라기와 후기 백악기 화강암은 금속광화작용과 밀접한 관계를 보이는 반면, 트라이아스기 화강암은 금속광화작용이 수반되지 않는 비생산성 화성활동으로 간주되고 있다(Jin *et al.*, 2001).

3. 중생대 금속광상

국내 금속광상은 선캠브리아이언의 일부 광상(철, 중석, 금, 우라늄)을 제외하고, 대부분 중생대 쥐라기부터 백악기에 걸친 광화작용으로 보고된 바 있다(Kim, 1971; Oh, 1999; Choi *et al.*, 2005). 특히 중생대 열수광맥형 금-은 광상은 유체포유물 및 안정동위원소 등의 생성환경 연구를 통하여 중열수 광상, 한국형 광상, 천열수 광상으로 분류되었으며(Shelton *et al.*, 1988), 서로 다른 조구조적 특성과 연계된 쥐라기와 백악기 화성활동에 따라 대보 화성활동과 관련된 조산대형 광상과 불국사 화성활동과 관련된 후조산대형 광상으로 언급된 바 있다(Choi *et al.*, 2006a).

조산대형 금속광상은 주로 경기육괴에서 대보 화강암체의 저반 및 주변부를 따라 포천, 홍천, 천안-중원 지역을 따라 광범위하게 배태되며, 영남육괴에서 호남 연성전단대의 이·삼차 구조선을 따라 상주, 영동, 무주, 보성 지역에 밀집된 분포양상을 보인다. 특히 쥐라

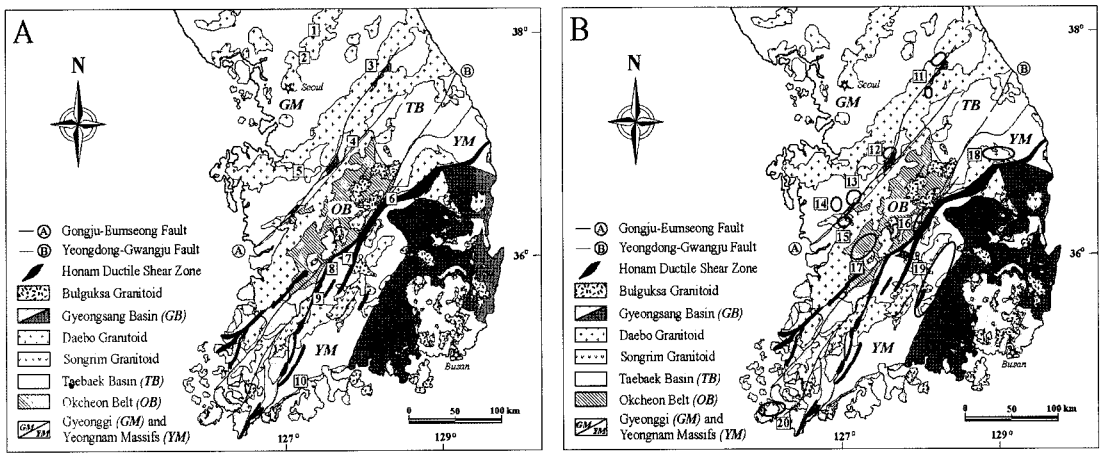

Fig. 1. Simplified geologic map of South Korea, showing the distribution of the major Jurassic metallogenic provinces (A) and the Cretaceous metallogenic ones (b) in South Korea. The Jurassic deposits in the Gyeonggi Massif are associated with Jurassic granitoid belt and its related pegmatite. Whereas, the gold deposits in the Yeongnam Massif are located in subsidiary fractures branched from the Honam Shear Zone (A). the Cretaceous precious-metal 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=Cheolweon, 2=Pocheon, 3=Hongcheon, 4=Jungweon, 5=Cheonan, 6=Sangju, 7=Yeongdong, 8=Muju, 9=Jangsu, 10=Boseong, 11=Hongcheon, 12=Mugeuk, 13=Nonsan, 14=Hongseong, 15=Buyeo, 16=Yeongdong, 17=Hwanggangri, 18=Bonghwa, 19=Hapcheon, 20=Haenam.

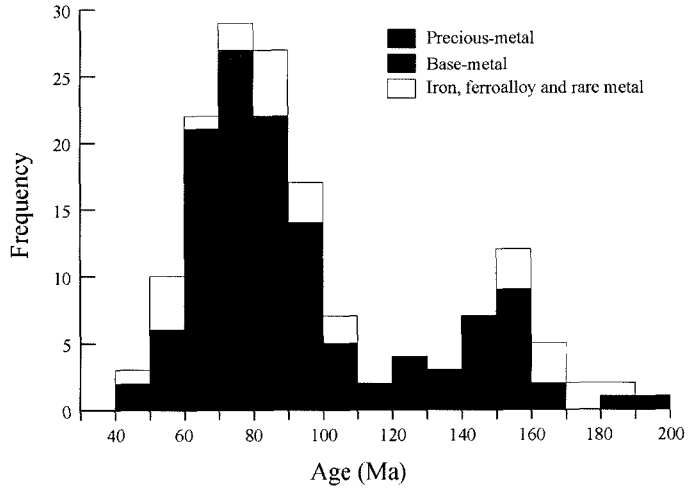

Fig. 2. Age relationship between the Mesozoic metallic deposits in South Korea.

기 광상유형은 경기 · 영남 육괴에 광범위하게 분포하는 저반형/전단대형 중열수성 맥상 금광상과 철원, 천안, 무주, 장수 지역을 중심으로 W-Mo-Ta-Nb-U 금속종이 수반되는 페그마타이트 광상으로 구분된다(Fig. 1). 기 발표된 쥐라기 광상의 광화연대는 약 200~130 Ma로 보고된 바 있으나, 주 광화시기는 약 165~145 Ma로 경기육괴 및 영남육괴에 집중 배태된 특징을 보이고 있다. 이러한 쥐라기 금속광상 중에서 희유금속을 수반하는 페그마타이트 광화작용은 약 185~145 Ma로서 대보조산운동의 중반 이후부터 산출되는 반면, 저반형/전단대형 금광상은 주로 대보조산운동 말기에 해당하는 쥐라기 말기부터 백악기 초기(약 165~135 Ma) 동안 집중적으로 배태되는 일련의 광화작용으로 간주된다(Fig. 2).

후조산대형 금속광상은 대부분 태백산분지, 옥천 지향사대 및 경상분지의 전 지역에 걸쳐 광범위하게 배태되고 있으나, 경기 및 영남 육괴에서는 공주-음성 단층계와 영동-광주 단층계 그리고 경상분지의 외각 경계부에 밀집된 분포 양상을 보인다(Fig. 1). 또한 천열수/중열수성 열수 충진형 금-은광상은 주로 공주-음성 단층계와 영동-광주 단층계 및 경상분지 외각을 따라 주로 배태되는 반면, 태백산분지, 옥천 지향사대 및 경상분지 내에서는 스카른형, 열수교대형, 열수충진형, 반암형, 각력 파이프형 광상과 같은 다양한 광상유형으로 산출되고 있다. 이러한 광상은 주로 천부 화성활동과 관련된 광상유형으로 귀금속, 비철금속 또는 철금속의 다양한 금속종이 수반되는 다금속 광화작용의 특징을 보인다. 금속광상의 생성연대는 약 110~45 Ma (주 광화시기: 약 100~60 Ma)에 걸쳐서 다소 분산된 경향을 보이고 있으나(Fig. 2), 전기 백악기 퇴적작용이 우세한 기간과 비교하여 후기 백악기 화산활동이 활발하였던 시기와 일치하고 있다(Choi *et al.*, 2005).

4. 중생대 열수계와 광화유체

금속광상에서 광화유체는 마그마수 · 지표수 · 지하수 · 순환수 · 퇴적수 · 변성수와 같은 다양한 기원의 유체가 언급되고 있으며, 광상유형에 따라 정출된 광석/맥석광물은 열수계의 특성 및 진화과정과도 밀접한 연계성을 보이고 있다(Corbett and Leach, 1998). 특히 마그마와 관련된 열수계(Magmatic hydrothermal system)는 화성암체의 정치심도 및 지리적 근접성에 따라 공급된 열적 에너지와 주변모암의 물성이 광화유체의 다양한 진화특징을 좌우하게 된다. 국내 금-은 광상에서도 쥐라기와 백악기의 지질환경의 특성을 반영하여 서로 다른 광화유체의 특성이 보고된 바 있다(Shelton *et al.*, 1988; Choi *et al.*, 2005). 국내 중생대 금속광상은 동, 연, 아연, 철, 텅스텐, 몰리브덴 광상이 특정지역에 밀집된 분포양상(Kim, 1971)을 보이고 있는 반면 금-은 광상은 남한 전체 지역에 걸쳐 광범위하게 산재된 분포특징을 보이고 있으며, 쥐라기 금광상과 일부 희유금속 광상을 제외하고 대부분 백악기 광상으로 보고된 바 있다(Fig. 2).

중생대 금속광화작용과 관련된 광화유체의 기원과 진화특성을 종합적으로 규명하기 위하여, 약 50여개 열수충진형 광상과 스카른/열수교대형 광상(기 보고된 분

Table 1. Oxygen and hydrogen isotope values from the Jurassic granitoids and pegmatites in the Gyeonggi Massif.

	Jurassic granitoids[1]				Jurassic pegmatite							
					Cheonan[2]				Cheolweon[3]			
	Ave[4]	Min[4]	Max[4]	N[4]	Ave[4]	Min[4]	Max[4]	N[4]	Ave[4]	Min[4]	Max[4]	N[4]
Minerals												
$\delta^{18}O_{WR}$	8.2	5.0	~ 10.0	19								
$\delta^{18}O_{qtz}$	9.8	8.2	~ 11.1	27	10.9	7.1	~ 13.0	8	9.6	8.4	~ 11.0	3
$\delta^{18}O_{fd}$	7.5	5.2	~ 9.1	22					11.2	9.7	~ 12.1	3
$\delta^{18}O_{bt}$	5.4	4.3	~ 6.6	7					10.1	8.4	~ 11.8	2
$\delta^{18}D_{mus}$					-82	-95	~ -58	5				
Fluids												
$\delta^{18}O_{H2O}$	8.2	6.9	~ 9.4	27	10.7	7.0	~ 12.6	8	7.5	6.8	~ 7.9	3
$\delta^{18}D_{H2O}$					-83	-99	~ -40	8	-61	-76	~ -37	3

[1] Data from Kim *et al.* (1992) and Park and Ko (2004), [2] Data from this study and Pak *et al.* (2006), [3] Data from this study, [4] Ave=Average, Max=Maximum, Min=Minimum, N=Number of samples
Abbreviation; bt=biotite, fd=feldspar, mus=muscovite, qtz=quartz, WR=whole rock

석치 포함)으로부터 산출된 석영의 산소동위원소와 유체포유물의 수소동위원소 분석결과를 검토하였고 쥐라기/백악기의 지질시대별, 주요광화대별, 금속종에 의한 광상유형별 특성을 체계적으로 비교하였다. 또한, 석영의 산소 동위원소의 분석결과는 유체포유물 또는 광상유형에서 제시된 온도자료를 근거로 동위원소 평형을 가정, Matsuhisa *et al.*(1979)와 Friedman and O'Neil (1977)의 분별식에 적용 광화유체에 대한 산소동위원소비로 계산하였다.

4.1. 조산대형 열수계와 관련된 광화유체 조성

남한 전역에 걸쳐 전기 쥐라기 이후부터 나타나는 지각진화과정은 대보조산운동과 함께 중압형 변성작용 그리고 약 3.4~7.8 kbar에서 정치된 심부 화강암체가 지배적인 지질환경으로 해석되고 있다(Cho and Kwon, 1994; Cluzel *et al.*, 1990; Choi *et al.*, 2006a). 쥐라기 화강암체는 대륙지각 하부에서 생성된 티탄철석계열 또는 자철석계열 칼크-알카리형 화강암질 마그마가 심부환경에서 고결된 전형적인 조직을 보이고 있다(Jin *et al.*, 2001). 이러한 지질작용과 관련된 열수계는 대규모 심성암체(약 200~150 Ma)로부터 공급된 열에너지와 마그마수, 그리고 중기 쥐라기(약 180~170 Ma) 우수향 호남 연성전단대를 중심으로 유입된 심부 유체의 이동으로부터 유도된 것으로 추정된다. 철원 및 천안 지역의 페그마타이트 광상은 약 185~145 Ma의 생성연대로 보고된 바 있으며, 철원지역의 백운모형(Nb>Ta) 페그마타이트는 바로비안형(Barrovian) 변성작용에 수반되는 페그마타이트와 유사한 광물조합을 보이고 있다(Cerny, 1993). 이러한 페그마타이트는 인접한 화성암체에서 추정된 정치심도와도 전반적으로 일치하고 있다.

쥐라기 화강암으로부터 추정된 마그마수의 산소 동위원소비는 6.9~9.4‰(평균; 8.2‰)로 보고된 바 있으며(Kim *et al.*, 1992; Park and Ko, 2004), 전반적으로 일정한 조성범위를 보이고 있다(Table 1). 또한, 철원과 천안지역 페그마타이트 열수의 수소(δD)·산소($\delta^{18}O$) 동위원소비는 각각 -76~-37‰, 6.8~7.9‰와 -99~-40‰, 7.0~12.6‰을 보인다(Table 1). 즉 페그마타이트로부터 추정된 유체의 산소동위원소비는 쥐라기 마그마수의 조성과 서로 일치하는 경향을 보이는 반면, 수소 동위원소비는 전형적인 마그마수로부터 전반적으로 결핍된 변화양상을 나타내고 있다(Fig. 3). 이러한 동위원소비는 주로 마그마의 탈가스화작용 이후에 분리된 마그마수의 조성과 유사한 양상을 보인다.

대보조산운동과 관련된 금광상은 경기·영남 육괴에 광범위하게 분포하는 중열수 금광상으로 H_2O-CO_2-CH_4계 유체의 조성특징을 나타내고 있다(Shelton *et al.*, 1988; So and Yun, 1997: Heo *et al.*, 1999; Pak *et al.*, 2006). 또한 경기육괴의 중원-천안 지역과 영남육괴의 상주-영동-보성 지역에 배태된 쥐라기 금광상의 석영으로부터 추정된 광화유체의 수소·산소 동위원소비는 각각 -66~-56‰, 8.6~11.3‰와 -93~-54‰와 4.7~9.3‰로서 전반적으로 거의 일정한 조성범위를 보이고 있다(Table 2). 이러한 광화유체의 조성은 쥐라기 화성활동과 광화심도를 종합적으로 검토한 결과, 광화작용이 진행되는 동안 마그마수가 지배적인 광화유체로서 광상에 따라 국지적으로 일부 변성수 기원의 유체가 혼합되었으나(Fig. 4), 전반적으로 천수의 유입이 거의 불가능한 지하 심부 조건의 지질환경을 지시하고 있다(McCoy *et al.*, 1997; Lang *et al.*, 2000;

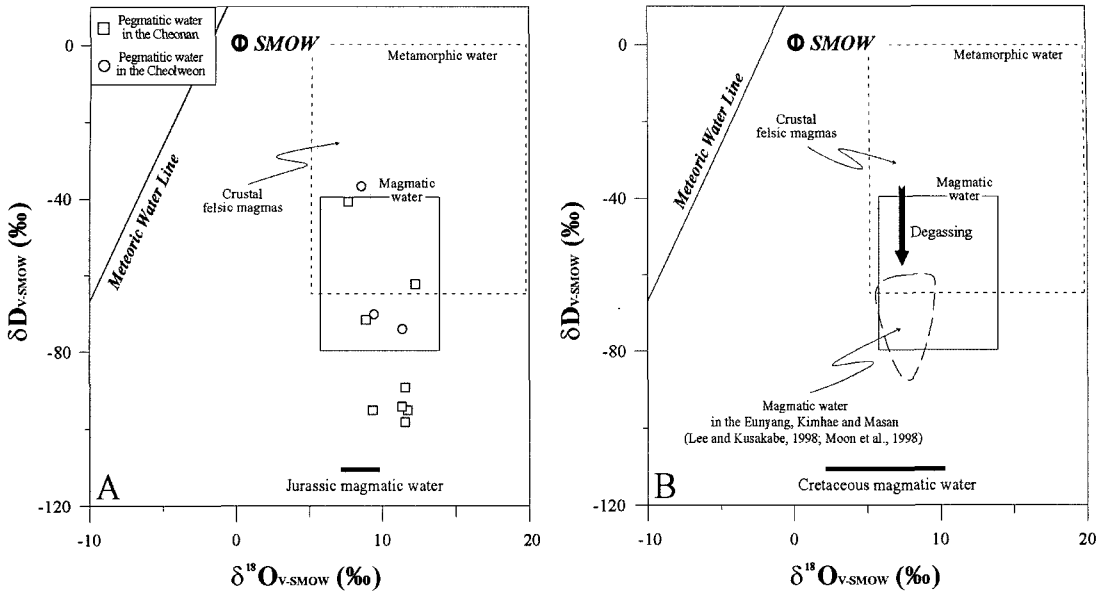

Fig. 3. $\delta D_{V\text{-}SMOW}$ and $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ values of the Jurassic magmatic and pegmatitic fluids (A) and the Cretaceous magmatic waters (B). The Cretaceous magmatic water values of granitoids in the Gyeongsang Basin are shown as hatched area (Lee and Kusakabe, 1998; Moon *et al.*, 1998). The isotopic compositions of 'crustal felsic magmas' are referred from Hedenquist and Lowenstern (1994).

Table 2. Oxygen and hydrogen isotope values of the Jurassic gold-silver deposits from the Jungweon-Cheonan area in the Gyeonggi Massif.

	Deposits	Sample No.	δO_{quartz}	δD_{H_2O}	δO_{H_2O} [1)]	δO_{H_2O} [2)]
Jungweon	Taechang	TC-1	14.3	-62	7.4	10.2
		T-B-1	14.6	-59	7.7	10.5
		TC-E	14.1	-64	7.2	10.0
		T-100	15.0	-59	8.1	10.9
	Boryeon	BR-1	12.2	-58	5.3	8.1
Cheonan	Cheonbo	C-M-6	14.4	-57	7.5	10.3
		C-M-4	15.3	-66	8.4	11.2
		C-M-2	15.4	-62	8.5	11.3
		C-1	14.9	-64	8.0	10.8
	Ilbo	U58010-B	14.7	-56	7.8	10.6

[1)] and [2)] Values are calculated at 300°C and 400°C, respectively

Lang and Baker, 2001). 이러한 유형의 금광상에서 전형적으로 나타나는 맥의 산상, 금-은비, 열수변질대 및 황화광물의 공생관계, 유체포유물의 조성, 부화된 ^{18}O의 특징은 조산대형 광상과 매우 유사한 경향을 보이고 있으며(Pak *et al.*, 2006), 대보조산운동과 관련된 일련의 금광화작용으로 저반형/전단대형 광상으로 언급된 바 있다(Choi *et al.*, 2006a).

4.2. 후조산대형 열수계와 관련된 광화유체 조성

한반도에서 백악기 지각진화과정은 대보조산운동 이후인 후조산기에 해당되는 기간으로 전기 백악기 동안 경상분지 및 좌수향 주향이동 단층(공주-음성과 영동-광주 단층계)에 의한 인리형 분지와 관련된 분지 형성 단계로부터 후기 백악기 불국사 화성활동(약 110~50 Ma)과 관련된 분지 변형단계로 유도된다(Ryu *et al.*, 2006).

백악기 금속광상들에 대한 광상의 공간적 분포특성, 성인유형 및 생성연대자료와 함께 화성암체의 정치시기 및 심도를 체계적으로 검토한 결과 다음과 같은 백악기 광화대로 구분할 수 있다. 공주-음성 단층대를 따라 형성된 풍암분지의 홍천 광화대, 음성분지의 무극 광화대, 공주분지의 논산 광화대 및 부여분지의 임천

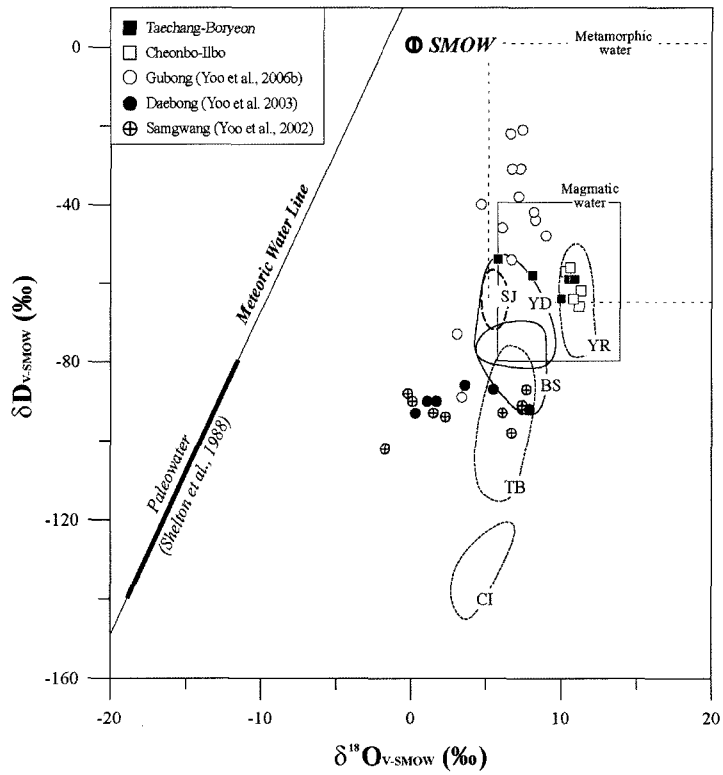

Fig. 4. $\delta D_{V\text{-}SMOW}$ and $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ values of fluids derived from analyses of fluid inclusion in the Jurassic gold-silver bearing quartz vein. Note there are the apparent hydrogen isotope value gaps between previous study (Shelton *et al.*, 1988) and this study in the Taechang and Boryeon mines. BS=Boseong metallogenic province, CI=Cheonbo and Ilbo mines, SJ=Sangju metallogenic province, TB=Taechang and Boryeon mines, YD=Yeongdong metallogenic province, YR=Yuryang mine.

광화대와 같은 금-은 광화대가 발달되며, 영동-광주 단층계를 따라 영동분지의 영동 광화대 및 해남-목포분지의 해남 광화대, 경상분지의 외각 주변부를 따라 합천-거창 및 봉화 광화대가 분포하고 있다. 또한 한반도 동부지역에서 남부지역에 걸쳐 집중된 후기 백악기 화성활동은 태백산 광화대, 황강리 광화대, 경상분지의 군북, 고성, 의성 광화대를 중심으로 비철금속 또는 철금속과 함께 귀금속이 수반되는 반심성암과 관련된 천부 열수계의 특징을 보이고 있다.

백악기 화강암으로부터 추정된 마그마수의 수소·산소 동위원소비(Table 3)는 각각 -85~-61‰(평균; -71 ‰)와 2.4~10.5‰ (평균; 7.0‰)로서 일부 암체에서 산소동위원소비가 폭 넓게 변화하며 마그마수와 비교하여 부분적으로 결핍된 특징을 보이는 반면, 수소동위원소비는 마그마수와 비교하여 전반적으로 결핍된 특징을 보인다(Fig. 3). 이러한 산소동위원소비의 현저한 결핍 양상은 천부 화성암체의 최후기 냉각과정에서 순환수(부분적으로 지표수)가 유입된 결과로 해석된다. 특히 수소동위원소비의 결핍 경향은 섭입대의 화산 분출과정에서 마그마로부터 이탈된 탈가스화작용에 기인하며, 이러한 마그마의 최후단계에 분리된 광화유체가 반암형 광화작용과 밀접한 관계를 보이고 있다(Hedenquist and Lowenstern, 1994).

백악기 금속광화작용과 관련된 열수계는 시·공간적 관점에서 천부 관입암체의 정치심도, 주변모암의 물성 및 지질구조의 특성에 따라 좌우되고 있다(Lee *et al.*, 2003; Pak *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2006a). 경상분지, 태백산 및 황강리 광화대에서 금속광상의 맥상 석영으로부터 추정된 열수의 수소·산소동위원소비는 -97~-41‰(평균; -70.0‰)과 -14.0~8.7‰(평균; -1.8 ‰)로서 쥐라기 금광상과 비교하여 전반적으로 폭넓게 변화하는 경향을 보여주고 있다(Table 4). 즉 상기 지역의 광화유체는 근원암인 관계 화성암체의 공간적 근접성에 따라 마그마수와 지표수간의 혼합정도 및 주변모암과의 반응도와 관련된 전형적인 산소 편이현상을 보여주고 있다. 군북-고성 지역 비철금속 광상에서 맥

Table 3. Oxygen and hydrogen isotope values of various minerals from the Cretaceous granitoids in Korea.

Location	$\delta^{18}O_{whole\ rock}$				$\delta^{18}O_{quartz}$				$\delta D_{hornblende(or\ biotite)}$				Calculated $\delta^{18}O_{H2O}$				Calculated δD_{H2O}			
	Ave[2)]	Min[2)]	Max[2)]	N[2)]	Ave[2)]	Min[2)]	Max[2)]	N[2)]	Ave[2)]	Min[2)]	Max[2)]	N[2)]	Ave[2)]	Min[2)]	Max[2)]	N[2)]	Ave[2)]	Min[2)]	Max[2)]	N[2)]
Gyeongsang Basin																				
Palgongsan	7.9			1	8.6			1					7.3			1				
Gyeongju	7.2	6.7	7.7	2	8.8	8.3	9.3	2					7.5	7.0	8.0	2				
Sangra	0.2	-2.3	5.5	10																
Yucheon	8.1			1	9.3			1					8.0			1				
Yangsan	4.4	-2.1	8.1	12	7.9	6.3	9.0	10					6.6	5.0	7.7	10				
Eonyang[1)]	7.5	7.3	7.7	5	8.3	8.1	8.5	7	-103	-107	-97	5	7.0	6.8	7.2	7	-72	-76	-66	5
Ulsan	7.8	7.3	8.3	2	8.6			1					7.3			1				
Busan	5.5	3.9	7.1	2	8.5	6.5	9.7	4					7.2	5.2	8.4	4				
Kimhae	5.4	2.9	6.3	5	8.2	6.7	9.3	5	-100	-109	-88	4	6.9	5.4	8.0	5	-76	-85	-64	4
Gijang					9.9	9.9	9.9	2					8.6	8.6	8.6	2				
Masan	5.2	4.3	8.0	6	8.9	7.9	9.6	7	-88	-92	-85	4	7.5	6.6	8.3	7	-64	-69	-61	4
Jinhae	8.0	7.9	8.0	2	6.3			1					5.0			1				
Geojae	2.4			1	3.7			1					2.4			1				
Namhae	7.1			1																
Taebaek Basin																				
Sangdong	10.6	10.1	10.9	3	10.7	10.3	10.9	4					10.1	9.6	10.5	3				
Okcheon Basin																				
Moongyeong	8.7	8.5	9.1	3	10.0	9.6	10.5	3												
Sokrisan	7.7			1	8.3			1												

[1)]δ Dmineral values are acquired from biotite. Rest of them are values from hornblende, Data from Kim *et al.* (1992), Lee and Kusakabe (1998) and Moon *et al.*(1998)
[2)]Ave=Average, Max=Maximum, Min=Minimum, N=Number of samples

Table 4. Oxygen and hydrogen isotope values from the Cretaceous metallic deposits in Korea

Metallogenic province	Deposit	$\delta^{18}O$ (‰) in vein quartz					δD_{H2O} (‰) in fluid inclusion					Calculated $\delta^{18}O_{H2O}$ (‰)				
		Commodities	Ave[1)]	Range		N[1)]	Ave[1)]	Range		N[1)]		Ave[1)]	Range		N[1)]	
Pungam Basin																
	Cheongil	Au-Ag	10.7	10.6	~ 10.8	2	-66	-69	~ -62	2		3.8	3.7	~ 3.9	2	
	Sanjeon	Au-Ag	7.8	3.6	~ 10.2	8	-68	-79	~ -53	6		-2.0	-5.1	~ 1.3	8	
	Gajok	Au-Ag	6.0	2.2	~ 8.3	5	-71	-75	~ -65	4		-3.5	-6.7	~ -0.6	5	
	Baeku	Au-Ag	7.1	6.1	~ 8.1	2	-55	-60	~ -49	2		-4.6	-5.6	~ -3.6	2	
Taebaek Basin																
	Okgye	Au-Ag	13.8	13.5	~ 14.0	2	-81	-82	~ -79	2		4.8	4.6	~ 5.1	2	
	Dongmyeong	Au-Ag	9.9	9.5	~ 10.3	2	-79	-82	~ -76	2		1.0	0.6	~ 1.4	2	
	Dongweon	Au-Ag	9.0	7.7	~ 10.3	2	-85					0.1	-1.2	~ 1.4	2	
	Sinrim		9.0				-75					-2.7				
Yeongdong																
	Manmyeong	Au-Ag	5.0	4.2	~ 5.6	4	-93	-97	~ -89	4		-4.0	-4.7	~ -3.3	4	
	Namseong	Au-Ag	5.8	4.2	~ 7.2	6	-73	-84	~ -64	6		-3.1	-4.7	~ -1.7	6	
Yeongnam Massif																
	Gahoe	Au-Ag	14.6	14.3	~ 14.9	2	-49	-56	~ -41	2		2.9	2.6	~ 3.2	2	
	Geochang	Au-Ag	12.8	11.5	~ 14.0	3	-62	-69	~ -56	3		3.9	2.6	~ 5.1	3	
Gyeongsang Basin																
	Samyulsobo	Mo-Cu	10.1	8.2	~ 12.8	7	-86	-94	~ -79	7		6.0	4.1	~ 8.7	7	
	Eunjeom-Cheondeuk	Au-Ag	8.8	5.5	~ 10.3	8	-70	-76	~ -60	8		-2.9	-6.2	~ -1.4	8	
	Dolsan	Au-Ag	4.5	2.4	~ 5.5	6	-48	-55	~ -44	6		-7.2	-9.3	~ -6.2	6	
	Yeongheung	Au-Ag	-2.1	-2.3	~ -1.8	2	-48	-50	~ -46	2		-13.7	-14.0	~ -13.5	2	
	Tongyoung	Au-Ag	4.0	1.4	~ 6.5	5	-61	-70	~ -47	5		-7.7	-10.3	~ -5.2	5	
Haenam-Hampyeong Basin																
	Sambo	Au-Ag	4.6	2.2	~ 6.4	15	-84	-107	~ -59	15		-4.5	-7.7	~ -2.5	15	
	Sonbul	Au-Ag	7.9	4.6	~ 11.1	20	-88	-110	~ -72	20		-3.8	-7.1	~ -0.6	20	
	Saneun	Au-Ag	7.7	4.7	~ 13.0	9	-73	-90	~ -44	9		-1.2	-4.2	~ 4.1	9	
	Eunjeok	Au-Ag	7.2	4.9	~ 8.4	12	-76	-91	~ -57	12		-1.8	-4.0	~ -0.5	12	

[1)]Ave=Average, N=Number of samples

Table 5. Oxygen and hydrogen isotope compositions from orogenic-type gold deposits (the Jurassic to early Cretaceous) in Korea

Tectonic province	Metallogenic province	Age of deposit (Ma)	Commo-dities	$\delta^{18}O$ (‰) in vein quartz					δD_{H2O} (‰) in fluid inclusion					Calculated $\delta^{18}O_{H2O}$ (‰)					References
				Ave[1]	S.D.[1]	Range			N[1]	Ave[1]	S.D.[1]	Range		N[1]	Ave[1]	S.D.[1]	Range		N[1]	
Gyeonggi Massif																			
	Taechang-Boryeon	156, 146	Au-Ag	14.0	1.1	12.2	~	15.0	5	-60	2.5	-64	~ -58	5	10.0	1.1	8.1	~ 10.9	5	8
	Taechang-Boryeon	156, 146	Au-Ag	13.1	1.4	10.8	~	15.1	9	-97	12.1	-113	~ -78	9	6.0	1.0	5.0	~ 7.7	9	3
	Yuryang	138	Au-Ag	14.1	0.5	13.3	~	15.0	10	-64	7.8	-77	~ -52	10	11.0	0.5	10.2	~ 11.9	10	2
	Cheonbo-Ilbo	152, 138	Au-Ag	14.9	0.4	14.4	~	15.4	5	-61	4.4	-66	~ -56	5	10.9	0.4	10.3	~ 11.3	5	8
	Cheonbo	152	Au-Ag	13.5	0.1	13.3	~	13.6	4	-132	9.2	-143	~ -122	4	4.7	1.5	3.2	~ 6.2	4	4
	Samgwang	127	Au-Ag	9.8	3.7	5.2	~	16.2	26	-93	5.0	-102	~ -87	12	2.9	5.0	-5.9	~ 10.9	26	5
	Gubong	Cretaceous ?	Au-Ag	12.1	1.9	8.4	~	14.3	13	-45	19.1	-89	~ -21	13	6.6	1.8	3.1	~ 9.0	13	7
	Daebong	Cretaceous ?	Au-Ag	10.3	3.1	6.4	~	14.8	11	-90	2.6	-93	~ -86	7	3.9	3.1	0.3	~ 9.0	11	6
Yeongnam Massif																			
	Sangju	189[2]	Au-Ag	13.0	0.5	12.4	~	13.6	8	-65	5.0	-69	~ -59	6	5.5	0.2	5.2	~ 5.9	8	1
	Yeongdong	166[3], 132[4]	Au-Ag	12.8	0.9	11.0	~	14.9	41	-71	6.0	-80	~ -54	40	7.0	1.1	4.7	~ 9.3	41	1
	Boseong	156[5]	Au-Ag	12.7	0.5	11.5	~	13.8	28	-77	6.0	-93	~ -70	28	7.0	0.9	4.8	~ 8.6	28	1

[1] Ave=Average, N=Number of samples, [2], [3], [4] and [5] Age of Daerae, Samhwanghak, Yeongbogari and Bodeok mines, respectively

1. Choi *et al.*, 2006b; 2. Pak *et al.*, 2006; 3. Shelton *et al.*, 1988; 4. So and Shelton, 1987; 5. Yoo *et al.*, 2002; 6. Yoo *et al.*, 2003; 7. Yoo *et al.*, 2006a; 8. this study

Table 6. Oxygen and hydrogen isotope compositions from post-orogenic metallic deposits (late Cretaceous) in Korea

Tectonic province	Metallogenic province	Commodities	$\delta^{18}O$ (‰) in vein quartz						δD_{H2O} (‰) in fluid inclusion						Calculated $\delta^{18}O_{H2O}$ (‰)						References
			Ave[1)]	S.D.[1)]	Range			N[1)]	Ave[1)]	S.D.[1)]	Range			N[1)]	Ave[1)]	S.D.[1)]	Range			N[1)]	
Gyeonggi Massif																					
	Cheongyang	W-Mo	11.0	2.0	7.5	~	13.6	9	-68	2.2	-71	~	-64	8	4.6	3.4	-1.4	~	7.8	9	19
	Daehwa	W-Mo							-76	3.5	-78	~	-73	2	6.2	0.2	6.0	~	6.3	2	10
	Sambo	Pb-Zn	7.5	1.6	5.7	~	12.5	22	-71	3.2	-79	~	-66	12	-3.3	2.0	-6.8	~	0.9	22	9
	Yangpyeong-Weonju	Au-Ag	0.4	2.4	-3.7	~	2.7	8	-85	23.9	-90	~	-81	7	-7.4	2.8	-13.1	~	-4.5	8	16
	Seolhwa	Au-Ag	12.1	1.4	9.4	~	14.4	12	-76	5.5	-84	~	-69	10	6.0	0.4	5.3	~	6.5	12	4
	Pungam	Au-Ag	9.0	3.1	2.2	~	13.8	29	-70	10.0	-87	~	-49	24	0.2	4.7	-7.2	~	7.9	29	3
	Eumseong	Au-Ag	7.6	2.3	2.1	~	12.9	56	-77	9.2	-99	~	-60	51	-1.8	3.1	-8.3	~	3.8	56	3
	Buyeo	Au-Ag	11.1	1.9	9.2	~	13.8	10	-76	11.2	-88	~	-50	9	4.6	3.7	-0.1	~	10.4	10	1
Yeongnam Massif																					
	Jinan	Polymetal	14.2	0.7	13.2	~	15.7	13	-86	12.3	-103	~	-70	12	5.9	1.4	4.3	~	8.8	13	15, 22
	Yeongdong	Au-Ag	6.0	2.5	1.5	~	13.2	31	-78	8.2	-97	~	-64	26	-2.7	3.3	-6.6	~	7.3	31	3
	Heanam-Hampyeong	Au-Ag	6.5	2.2	1.6	~	13.0	75	-80	12.8	-110	~	-59	73	-4.1	2.6	-10.1	~	4.1	73	3, 24
	Gaheo-Geochang	Au-Ag	13.5	1.3	11.5	~	14.9	5	-57	10.3	-69	~	-41	5	3.5	1.0	2.6	~	5.1	5	24
	Gwangyang	Au-Ag	9.7	1.5	6.7	~	11.9	18	-71	2.7	-74		-65	11	1.5	2.7	-2.3	~	6.0	18	5, 20
	Bonghwa	Au-Ag	10.5	1.1	8.9	~	11.9	8	-71	3.2	-77	~	-68	6	2.3	1.7	0.0	~	4.7	8	
Taebaek Basin																					
	Sangdong-Geumseong	W-Mo	11.2	2.3	8.9	~	19.6	19	-101	6.5	-112	~	-93	8	6.4	3.0	2.8	~	12.2	19	6, 24
	Ildong	Fe-Cu	13.1	5.9	6.3	~	16.5	3	-73	13.3	-88	~	-62	3	6.2	5.9	-0.6	~	9.6	3	24
	Shinyemi	Fe-Pb-Zn-Mo	10.7	0.5	10.1	~	11.3	5	-95	3.0	-98	~	-92	3	8.3	1.1	7.1	~	10.0	5	21, 24
	Imok	Pb-Zn	15.2	0.7	14.5	~	16.1	5	-84	8.5	-97	~	-77	5	8.3	0.7	7.6	~	9.2	5	24
	Taebaek	Pb-Zn-Au-Ag	15.3	0.1	15.2	~	15.4	2	-68	-				1	9.7	0.1	9.6	~	9.8	2	18
	Taebaeksan	Au-Ag	11.6	2.8	6.3	~	17.7	21	-77	11.6	-89	~	-51	13	3.3	3.8	-3.8	~	7.7	21	3, 24
Okcheon Belt																					
	Jecheon	W-Mo	9.6	2.6	4.3	~	13.0	13	-75	10.9	-95	~	-63	8	2.3	3.5	-5.6	~	8.0	13	12
	Guemsil	Pb-Zn-Au-Ag	16.0	2.2	13.4	~	19.6	8	-87	1.3	-88	~	-85	5	8.8	2.1	6.1	~	12.0	8	11
	Gyeokpo	Au-Ag	6.4	0.6	5.6	~	7.5	17	-75	9.2	-91	~	-65	17	-2.2	1.4	-4.8	~	0.3	17	13, 17
	Jeonjuil	Au-Ag	2.7	0.2	2.4	~	3.0	5	-112	9.0	-120	~	-100	4	-6.7	0.7	-7.5	~	-5.6	5	14
Gyeongsang Basin																					
	Milyang	Ferroalloy	9.8	0.8	8.9	~	12.3	27	-60	12.7	-83	~	-41	24	4.2	2.2	-2.2	~	6.7	27	2
	Samyulsobo	Mo-Cu	10.1	1.4	8.2	~	12.8	7	-86	4.9	-94	~	-79	7	6.0	1.4	4.1	~	8.7	7	24
	Haman-Gunbuk	Cu(-Au)	11.2	1.2	9.3	~	13.2	19	-74	10.6	-88	~	-49	19	5.2	2.2	-0.1	~	8.9	19	2
	Euseong	Polymetal	6.3	1.3	4.4	~	7.9	9	-75	10.1	-97	~	-62	9	-1.8	2.1	-4.5	~	1.1	9	2
	Goseong-Chanweon	Polymetal	6.3	2.3	-0.3	~	10.9	27	-77	7.3	-91	~	-59	27	-1.0	3.2	-9.9	~	5.0	27	2
	Namhae	Au-Ag	4.3	3.0	-2.3	~	10.3	36	-57	10.2	-76	~	-44	34	-7.3	3.0	-14.0	~	-1.4	36	2
	Seongju	Au-Ag	8.4	2.5	4.7	~	11.5	13	-90	13.1	-111	~	-65	10	-0.4	3.0	-4.2	~	3.9	13	9, 24
	Gampo	Au-Ag	4.6	4.6	-4.5	~	13.3	13	-70	8.0	-84	~	-61	8	-2.1	5.4	-13.9	~	5.7	13	7, 8, 23

[1)] Ave=Average, N=Number of samples

1. Choi *et al.*, 1996; 2. Choi *et al.*, 2006a; 3. Choi *et al.*, 2006b; 4. Heo *et al.*, 2001; 5 Kim and Kim 1995; 6. Kim *et al.*, 1988; 7. Kim *et al.*, 1999; 8. Lee *et al.*, 1995; 9. Shelton and So, 1992; 10. Shelton *et al.*, 1987; 11. So and Yun, 1992; 12.So and Yun, 1994; 13. So and Yun, 1996; 14. So *et al.*, 1987; 15. So *et al.*, 1988; 16. So *et al.*, 1989; 17. So *et al.*, 1991; 18. So *et al.*, 1993a; 19. So *et al.*, 1993b; 20. So *et al.*, 1999; 21. Yang, 1991; 22. Yoo *et al.*, 2006a; 23. Yun *et al.*, 2001; 24. this study

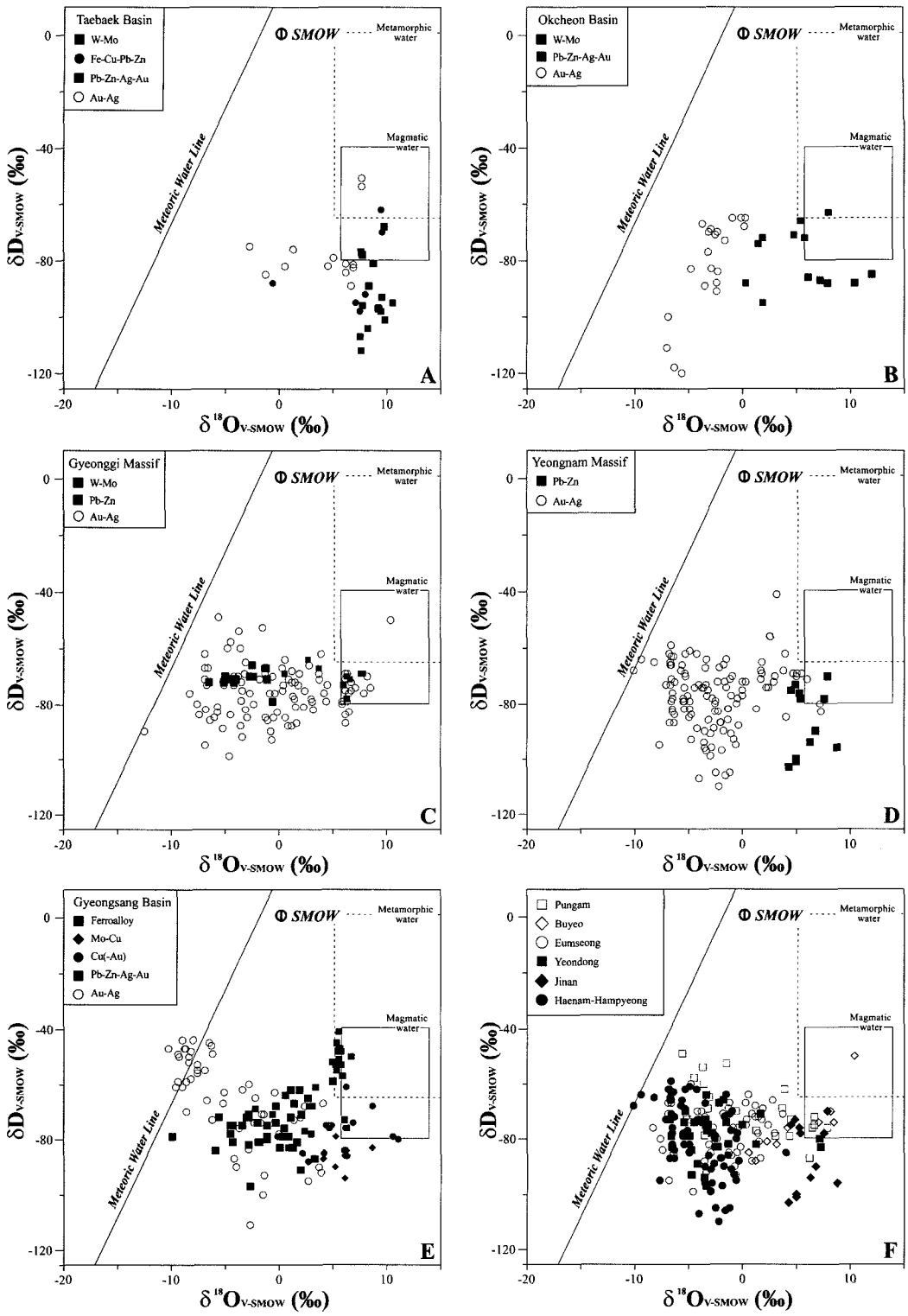

Fig. 5. Oxygen and hydrogen isotope compositions of ore-forming fluids from the various tectonic provinces associated with mineralization styles.

상 석영에 대한 산소동위원소비의 평균치는 군북지역 11.2‰(추정된 광화유체: 5.2‰)와 고성지역 6.3‰(추정된 광화유체: -1.0‰)로 보고된 바 있다(Lee *et al.*, 2003). 이러한 차이는 화성암체와 공간적으로 근접한 군북지역 동광상에서 광화 유체의 $\delta^{18}O_{H_2O}$가 마그마수와 유사한 경향을 보이는 반면, 화성암체와 원거리에 위치한 고성지역 동광상은 마그마수와 비교하여 광화유체의 $\delta^{18}O_{H_2O}$가 상대적으로 결핍된 특징을 보인다. 즉 광화유체의 기원이 군북지역 광상에서 마그마수의 기여도가 우세한 환경으로 추정되지만, 고성지역 광상에서 마그마수의 기여 정도가 상대적으로 미약함을 지시하고 있으며, 상기 지역 광상에 대한 유체포유물의 연구에서 동일한 결과가 보고된 바 있다(Park *et al.*, 1983; Park *et al.*, 1985).

후기 백악기/제3기 광화작용과 관련된 지질조건과 함께 열수계의 동위원소의 조성을 각 광화대 별로 종합적으로 비교·검토하였다. 천부 화강암체와 직접적으로 관련된 광상은 주로 태백산분지, 옥천지향사대 및 경상분지를 중심으로 스카른형, 열수교대형, 열수충진형, 반암형, 각력 파이프형 광상과 같은 다양한 광상유형으로 산출되고 있으며, 광화대에 따라 비철금속, 철금속과 함께 귀금속이 수반되는 다금속 광화작용의 특징을 보인다. 광화유체는 개방계 지질조건에서 관계 화강암체로부터 이탈된 마그마수와 지표로부터 유입된 지하수로 구성된 열수계로 구성되며, 열적 중심인 화강암체로부터 공급된 에너지에 따라 주변암석의 국부적 지온구배의 차이를 유도하고 마그마수와 지표수간의 혼합정도의 차이를 나타내는 열수 순환계를 시사하고 있다. 즉 근지성 유형의 Mo-Cu-Fe광상에서는 탈가스화 작용 이후에 나타나는 마그마수의 결핍된-D 동위원소적 특징을 보이는 반면, 점이성 유형의 비철금속 광상에서는 지표수(또는 진화가 미약한 순환수)의 혼입 정도와 함께 모암과의 반응도에 따라 산소 동위원소비가 폭 넓게 변화하는 산소 편이의 전형적인 특징을 보인다(Fig. 5).

홍천, 무극, 부여, 영동, 해남-목포 광화대의 금-은광상은 NNE방향 좌수향 주향이동단층의 진행과정에서 발생된 NNW방향의 이차 인장형 약선대를 중심으로 배태되고 있다. 상기 광상의 맥상 석영의 동위원소비를 종합적으로 비교한 결과, 유체포유물로부터 추정된 수소동위원소비는 상기 모든 분지의 광상에서 전반적으로 좁은 범위에서 변화되는 반면, 산소동위원소비는 비교적 폭 넓게 변화하는 경향을 보여주고 있다(Fig. 5F). 즉 인리형 분지와 관련된 국내 고지열수계는 전반적으로 미약한 산소편이를 보이고 있다. 즉 지표수의 유입량은 우세하지만 물-암석 반응이 미약한 열수계의 환경으로 저황형 천열수 금-은광상의 전형적인 특징을 지시하고 있다. 특히 무극 광화대 태극 광산은 지표수에 근접한 매우 낮은 산소동위원소비를 보이고 있는 반면, 무극·금왕 광산에서는 상대적으로 마그마수에 근접한 높은 산소동위원소비를 지시하고 있다(Choi *et al.*, 2005). 또한 무극광산에서 산소동위원소비는 금-은광물이 침전되는 주광화기의 석영에서 ^{18}O가 상대적으로 증가하는 경향을 보인다(Kim *et al.*, 1990).

5. 토 의

남한에서 중생대 지체구조의 주요 진화과정은 경기육괴의 홍성지역을 따라 나타나는 대륙충돌이후(Oh *et al.*, 2005), 후기 트라이아스기동안 경기육괴를 중심으로 지속적인 융기작용이 유도되었으며, 쥐라기 고태평양 판인 이자나기판의 직각방향 섭입(Maruyama *et al.*, 1997)과 관련된 대보조산운동 및 이에 수반된 심성암체의 관입 이후 후기 쥐라기동안 재차 융기작용이 진행되었다. 그리고, 전기 백악기 이자나기판의 사각방향 섭입(Maruyama *et al.*, 1997)과 관련된 좌수향 주향이동 구조운동과 함께 후기 백악기에 접어들어 직각방향 섭입은 재차 불국사 천부 화성활동으로 유도되었다(Choi *et al.*, 2006a). 이러한 중생대 지각진화과정과 관련된 열수계는 1) 쥐라기~전기 백악기(약 200~130 Ma) 심부 화강암체의 관입과 함께 중기 쥐라기(약 180~170 Ma)부터 영남육괴의 우수향 호남전단대에서 발생되는 지속적인 이동과 관련된 대보조산운동기의 열수계, 2) 전기 백악기(약 130~100 Ma) 동안 좌수향 주향이동 단층(공주-음성, 영동-광주 단층계)에 의한 인리형 소분지(풍암, 음성, 공주, 부여, 영동, 해남-진도) 및 경상분지와 같은 분지 형성단계와 후기 백악기 불국사 천부 화성활동(약 110~50 Ma)과 연계된 후조산대형 열수계로 구분된다. 즉 중생대 지질작용의 순차적 변화는 쥐라기와 백악기에 각각 서로 다른 심도에서 발생된 열수계를 형성하였으며, 서로 다른 기원의 유체가 순환-이동됨으로서 다음과 같은 상이한 유형의 금속광화작용이 진행되었다.

대보조산운동과 관련된 금속광상(약 200~130 Ma)은 주로 쥐라기 화성활동과 관련된 페그마타이트 광상 또는 열수충진 금광상으로 기재되어 있으며(So and Shelton, 1987; Park *et al.*, 1988b), 경기·영남 육괴의 선캠브리아이언 고·중압상 변성암류를 기반암으로

하여 배태되고 있다. 특히 경기육괴에서 페그마타이트 광상은 주로 후기 쥐라기부터 전기 백악기(철원 및 천안 지역)에 걸친 생성연대와 함께 3.8~5.6 kbar에서 정치된 일련의 화성활동과 연관성을 보이고 있다(Park *et al.*, 1988b; Cho and Kwon, 1994; Pak *et al.*, 2006). 또한 Shelton *et al.*(1988)은 후기 쥐라기 중열수 광상(태창, 보련 광산)과 전기 백악기 한국형 광상(천보, 일보, 대흥 광산)이 서로 다른 깊이(4.5 km과 0.8~1.3 km)에서 유도된 일련의 유체진화과정으로 언급하였고, 중열수/한국형 광상의 광화유체는 서로 연관된 열수계로 가정하였다. 이러한 유형의 광화유체의 진화는 부화된 $\delta^{18}O_{H_2O}$-결핍된 δD_{H2O}의 산소·수소 동위원소 특징을 근거로 진화된 심층 순환수(highly-evolved meteoric water)와 함께 지표수의 물-암석 반응에 따른 산소 편이로 해석되었으며, 고지표수(paleo-meteoric water)의 δD는 -140~-80‰로 추정되었다(Shelton *et al.*, 1988).

그러나, 중열수/한국형 광상에 대한 광화유체의 기원/진화과정 및 추정된 고지표수는 다음 광화연대 및 생성심도에 연계된 지질환경을 근본적으로 재검토할 필요가 있다. 경기육괴에서 천안광화대에 분포하고 있는 화강암체, 페그마타이트 및 금광화작용은 약 160~135 Ma의 서로 유사한 생성연대로 기재되어 있으나, 화강암체 및 페그마타이트의 정치심도(12~18 km)와 금광상의 생성 깊이(4.5 km과 0.8~1.3 km)는 서로 현격한 차이를 보이고 있을 뿐만 아니라(Shimazaki *et al.*, 1986; So and Shelton, 1987; Shelton *et al.*, 1988; Kim and Cheong, 1999; Pak *et al.*, 2006), 대보화성활동과 함께 나타나는 변성작용의 P-T조건과도 상당한 차이를 보이고 있다(Choi *et al.*, 2006a; Choi *et al.*, 2006b). 즉 대보조산운동 이후부터 융기작용과 동시에 삭박작용이 수반됨으로써 대보화강암체(주 정치심도: 약 3.4~7.8 kbar)의 저반이 노출된 개략적 시점은 후기 백악기로 추정하였다(Choi *et al.*, 2005).

중열수/한국형 광상(태창, 보련, 천보, 일보 광산)의 산소·수소 동위원소 재분석결과(Table 2), 산소동위원소비는 전반적으로 서로 일치하고 있으나, 수소동위원소비는 현저한 차이를 보이고 있다(Table 5). 즉 중열수/한국형 광상의 재분석된 동위원소 특성과 함께 후기 쥐라기/전기 백악기 동안 한반도의 지체구조 특성과 심부 지질환경(약 >2.5 kbar)을 고려할 경우, 지표수 기원의 심층 순환수라기보다는 마그마수 또는 변성수 기원으로 해석하는 것이 논리적이며(Fig. 4), 이러한 심부에서 유도된 H_2O-CO_2-CH_4계 고·중온성 광화유체는 조산대형(저반형/전단대형) 금광상과 서로 일치하고 있다(Pak *et al.*, 2006). 또한 경기육괴의 서측부인 홍성지역에 분포하고 있는 구봉, 대봉 및 삼광(127 Ma) 광산에서도 전반적으로 부화된 수소동위원소-결핍된 산소동위원소 특징을 보이고 있어 기존의 태창, 보련, 천보, 일보 광산의 동위원소자료(Shelton *et al.*, 1988)와 불일치하고 있으며, 이들 광상의 광화유체는 마그마수와 변성수 이외에 지표(순환)수의 유입 가능성을 시사하였다(Yoo *et al.*, 2002; Yoo *et al.*, 2003; Yoo *et al.*, 2006b).

후조산대형 금속광상(약 110~45 Ma)은 불국사 화성활동과 관련된 천부 화강암체와 연계된 광상(진동, 신예미, 일광 등)과 좌수향 주향이동 단층에 의한 이차 구조선을 따라 배태되는 광상(무극, 금왕, 임천, 가족 등)으로 구분할 수 있다. 화성암체와 광화유체의 관계는 열적 중심인 화성암체로부터 전달된 지온구배의 차이에 따라 지표수의 유입이 가능한 열수순환계가 유도됨으로서 광화유체 중 마그마수/지표(순환)수의 기여도에 영향을 미치게 된다. 이러한 백악기 광화작용은 천부 화강암체의 공간적 근접성에 따라 근지성 유형(고온성 맥상, 열수교대형, 반암형, 각력 파이프형, 스카른형)의 동-몰리브덴-철(-중석)광상⇨점이성 유형의 중열수 다금속 광상⇨원지성 유형의 천/중열수 금-은 광상으로 변화되며, 천부 화강암체로부터 유도된 열수계는 공간적 근접성에 따라 광화유체의 산소동위원소비는 근지성 유형 광상에서는 부화된 경향을 보이지만, 점이성/원지성 유형 광상에서는 전반적으로 폭 넓게 변화하며 부분적으로 결핍된 특징을 보이고 있다(Table 6).

남부지역의 후기 백악기 금속광상은 공간적 측면에서 동남부 지역과 서남부지역에서 각각 수반되는 광상 유형뿐만 아니라, 금속광종을 달리하고 있다. 또한 백악기 화강암체가 서남부지역에서 국부적으로 노출된 분포양상을 보이고 있는 반면, 동남부 지역에서 경상분지를 중심으로 광범위한 분포면적과 함께 전 지역에 산재된 분포특징을 보인다. 그리고, 서남부 지역에서는 전반적으로 관계 화성암체가 노출되지 않은 화산활동이 우세한 지질환경으로 원지성(부분적으로 점이성)유형에 속하는 천열수 Au-Ag(부분적으로 비철금속)광상이 배태되고 있는 반면, 동남부 지역에서는 반심성암체가 노출된 지질조건으로 화성암체와 공간적 근접성에 따라 반암형 Cu-Mo광상에서 나타나는 근지성 유형(고온성 맥상, 교대형, 반암형, 각력 파이프형, 스카른형)의 Cu-Mo-Fe-W 광상으로부터 점이성 유형에 속하는 다금속 광상 또는 원지성 중열수/천열수 Au-Ag광상까지

다양한 유형의 광상이 광범위하게 분포하게 된다. 이는 후기 백악기 이후 동·서 지역간 융기작용에 의한 삭박 또는 침강 정도의 차이에 따라 서로 다른 깊이에서 형성된 광상이 노출된 것으로 추정할 수 있다. 또한 이 지역의 금속 광상에서 추정된 광화유체의 동위원소 특성은 동남부 지역에서 마그마수와 함께 지표수(일부 순환수) 기원의 유체로부터 폭 넓게 변화하는 산소 편이($\delta^{18}O$; -14.0~11.1‰, 평균; -0.3‰)를 지시하는 반면, 서남부 지역에서는 지표수에 근접한 국부적 산소 편이($\delta^{18}O$; -10.1~7.3‰, 평균; -3.7‰)를 보이고 있다(Fig. 5). 한편 서남부 지역과 동남부 지역의 점토광상에서 추정된 열수의 수소·산소동위원소에서도 유사한 경향이 언급되었다(Koh *et al.*, 2000). 즉 서남부 지역과 동남부 지역에서 추정된 광화유체의 동위원소 조성 차이는 화강암체의 정치심도와 함께 분지의 생성-변형-소멸의 발전단계에 따른 상이한 지질환경 특성을 반영한 열수계를 시사하고 있다.

백악기 인리형(pull-apart) 소분지를 중심으로 배태된 금-은광상은 NNE방향 좌수향 주향이동단층의 지속적인 발달단계에서 발생된 이차 약선대인 NNW~NS계 열 인장형 균열이 이동통로로 제공됨으로서 광화유체의 국지적 순환계가 유지되며, 추정된 유체의 수소·산소 동위원소비는 각각 -110~-49‰(평균; -77.2‰)과 -10.1~10.4‰(평균; -2.2‰)로서 전반적으로 다양한 동위원소의 조성변화를 나타내고 있다(Fig. 6). 광화유체의 기원 및 진화과정은 잠두 화성암체로부터 공급된 열에너지가 동위원소 물-암석 반응을 유도하여 지표수가 상대적으로 진화된 순환수로 변화되며, 주광화기 동안 마그마수와 함께 ^{18}O-부화된 유체가 금-은광화작용을 유도하고, 광화 말기에는 마그마의 열에너지가 점차 감소하여 비교적 낮은 온도의 지온 구배가 형성됨에 따라 천수의 유입이 용이하게 유도됨으로써 광화유체에서 ^{18}O-결핍된 경향을 보여주고 있다(Fig. 5). 이러한 유체의 기원은 마그마수에 비하여 지표수 또는 진화가 미약한 순환수가 양적으로 우세한 조성비의 특징을 보이며, 저황형 천열수 금-은광상의 광화유체와 전반적으로 일치하고 있다.

한반도에서 후기 쥐라기부터 후기 백악기 광화작용과 관련된 유체로부터 추정된 고지표수의 수소동위원소비(δD)는 -140~-80‰로 추정되었으나(Shelton *et al.*, 1988), 이는 서로 다른 지질환경 및 생성 깊이에서 진행된 광화작용(Choi *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2006)을 동일 열수계로 가정하여 추정된 부적합한 결과로 사료된다. 진화된 심층 순환수는 일반적으로 부가체 퇴적분지 또는 저압형 변성암 지역에서 지표로부터 심층부로 이동된 순환계의 지질환경을 시사하고 있다. 이러한 지질환경은 중열수/한국형 광상이 배태된 경기육괴와는 광화유체의 유동성 측면에서 부적합하게 적용되었다고 판단된다. 또한 중열수/한국형 광상(태창, 보련광산/천보, 일보 광산)의 금광화작용은 약 3 kbar 정도의 광화심도를 보이며(Choi *et al.*, 2005), 이는 주변암상의 물성을 고려할 경우 천부로부터 유체의 유입이 거의 불가능한 지질환경으로 사료되며, 광화유체의 기원에서 지표수를 배제하는 것이 타당할 것으로 생각된다. 후기 백악기 광상과 관련된 광화유체는 천부 지질환경의 개방계 조건에서 유도된 국지적 열수계의 특성

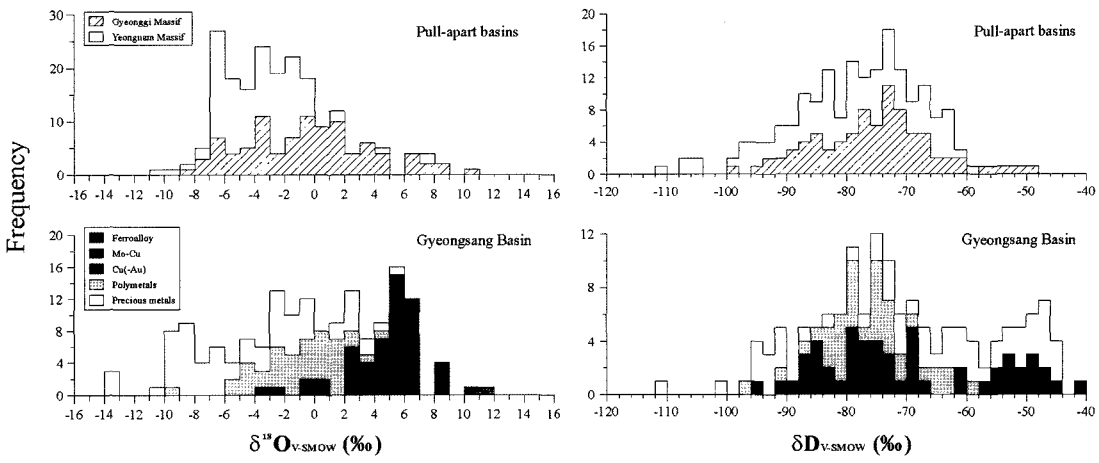

Fig. 6. Frequency diagram of $\delta D_{V\text{-}SMOW}$ and $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ values from the pull-apart basins in the Gyeonggi and Yeongnam Massif, and the Gyeongsang Basin.

을 보인다. 이들 열수계는 화성암체와의 공간적 근접성에 따른 지온구배의 차이에 따라 화성암체로부터 이탈된 마그마수와 지표수의 혼입 비율이 다양한 순환계를 형성하며, 광화유체 중 물-암석 반응에 의한 지표수 기여도에 따라 ^{18}O 산소편이를 보인다.

후기 쥐라기/전기 백악기 중열수/한국형 광상 배태된 지역의 모암들은 금광화작용 이전인 선캠브리아이언 동안 고압형 변성작용에 기인하여, 광화작용을 위한 유체의 공급원으로서의 가능성은 거의 희박하였을 것으로 생각된다. 또한 지표수 유입이 유도 될 수 있는 열수순환계의 가능성도 심부 열수계에 대한 해석으로 적용할 수 없다고 판단된다. 그러나 후기 백악기부터 남한 전 지역에 발달한 인리형 퇴적분지와 관련된 금-은 광상은 근본적으로 조산운동이후 융기된 천부 지질환경에서 진화가 미약한 순환수의 특징을 지시하고 있으며(Choi *et al.*, 2005), 이러한 유형의 광상에서 열수계는 전반적으로 -10.1~10.4‰(평균; -2.2‰)로서 지표수의 혼입정도 차이에 따른 순환계를 시사하고 있다(Fig. 6). 또한 후기 백악기(약 110 Ma)이후부터 각 광화대의 광화작용과 관련된 산소동위원소비가 수평적으로 변화하는 산소편이 현상은 지표수로부터 진화된 사실을 입증하고 있다. 즉 백악기 금속광상을 종합적으로 검토한 결과, 인리형 분지의 금-은 광상과 점이성 유형의 다금속 광상에서 지표수 기원의 전형적인 동위원소 특징을 보이고 있으며, 이러한 고지표수의 수소동위원소비는 -100~-60‰로 추정된다. 이는 현재 측정된 지표수(Kim and Nakai, 1988)와 온천수(Shin and Chi, 1996)의 δD는 각각 -70~-40‰, -70~-30‰로서 백악기 지표수에 비하여 상대적으로 부화된 특징을 보이고 있다. 쥐라기에서 후기백악기까지 한반도의 지각진화과정은 전반적으로 심부와 천부의 대비되는 지질환경의 특징에 따라 쥐라기와 후기백악기 광상은 각각 서로 다른 열수계 모델을 적용할 필요가 있다고 사료된다.

6. 결 언

한반도에서 중생대 금속광화작용은 쥐라기 대보조산운동기부터 후조산기인 백악기/제3기까지 조구조적 진화과정의 지질특성을 반영하여 광화유체의 기원뿐만 아니라 서로 다른 유체진화과정을 보여주고 있다. 쥐라기(일부 전기 백악기)광상과 관련된 광화유체는 대보조산운동과 관련된 심부 관입암체로부터 공급된 마그마수 및 일부 변성수로 전반적으로 심부 기원의 유체가 우세한 특징을 보인다. 이러한 심부 지질환경으로부터 화성암체의 느린 냉각과정에 따라 장기간 동안 높은 온도구배가 유지됨으로서 지표수 유입이 극히 제한적인 조건이 유도되어 조산대형 중열수성 금광상과 페그마타이트 광상이 형성되었다. 전기 백악기 광상은 대보조산운동의 최후기 단계에 홍성지역을 중심으로 배태되었으며, 광화유체는 급격한 융기작용에 기인하여 쥐라기 금광상과 비교하여 마그마수 및 변성수 이외에 진화된 순환수가 유입된 특징을 보인다.

후기 백악기 광상과 관련된 광화유체는 조산운동 이후인 전기 백악기부터 시작된 좌수향 주향이동단층의 발달단계에서 인장성 이차 약선대로 유입된 지표수 기원의 순환수 또는 퇴적수와 함께 후기 백악기 천부 화성활동과 관련된 마그마수가 혼합된 변화양상을 보인다. 이러한 천부 지질환경으로부터 화성암체의 빠른 냉각과정은 국지적으로 단기간 동안 높은 온도구배가 유지됨으로서 화성암체의 냉각동안 지표수 유입이 용이한 조건이 유도되며, 화성암체와의 지리적 근접성 및 열수계의 다양한 진화과정에 따라 근지성 유형, 점이성 유형 및 원지성 유형과 같은 상이한 광상유형이 배태되고 있다. 또한 후기 백악기~제3기 기간 동안(<110 Ma) 동남부 지역과 서남부 지역에서 광화작용은 공통적으로 천부화성활동과 관련되어 있으나, 광상유형과 함께 수반광종이 서로 대비되는 차이를 보이고 있다. 이러한 동남부와 서남부지역간 광화작용의 차이는 관계화강암의 분화정도 및 화강암체의 공간적 근접성을 반영한 결과로, 서남부 지역에서는 천부 화산활동과 관련된 원지성 저황형 천열수 금-은광상이 우세하게 배태되는 반면 동남부 지역에서는 반심성암체가 노출된 환경에서 근지성 유형(고온성 맥상, 교대형, 반암형, 각력파이프형, 스카른형)의 동-몰리브덴-철(-중석)광상으로부터 점이성 유형의 다금속 광상 또는 원지성 중열수(부분적으로 천열수) 금-은광상으로 산출되고 있다. 양 지역의 광화유체의 동위원소 특성은 전반적으로 서남부 지역의 광상과 비교하여 동남부 지역의 광상이 폭넓게 변화하는 산소 편이를 지시하며, 마그마수와 함께 지표수(일부 순환수)의 혼합된 광화유체의 변화양상을 보이고 있다.

사 사

이 연구는 과학기술부 과학재단 특정기초연구사업(R01-2006-000-10553-0)의 지원에 의하여 수행되었으며, 논문심사 시 유익한 조언을 주신 이현구 교수, 김규한 교수, 박맹언 교수에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

Cerny, P. (1993) Rare-element granitic pegmatites: Part II, Regional to global environments and petrogenesis, In Sheahan, P.A. and Cherry, P. (Eds.) Ore deposit models. Geological Association of Canada, Geoscience Canada Reprint Series, v. 6, p. 49-62.

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.

Cho, D. R. and Kwon, S. T. (1994) Hornblende geobarometry of the Mesozoic granitoids in South Korea and the evolution of the crustal thickness. J. Geol. Soc. Korea, v. 30, p. 41-61.

Choi, S.-G., Pak, S.J., Kim, C.S., Ryu, I.-C. and Wee, S.M. (2006a) The origin and evolution of mineralizing fluids in the Cretaceous Gyeongsang Basin, southeastern Korea. J. Geochem. Explor., v. 89, p. 61-64.

Choi, S.-G., Pak, S.J., Kim, S.W., Kim, C.S. and Oh, C.-W. (2006b) Mesozoic gold-silver mineralization in south Korea: Metallogenic provinces reestimated to the geodynamic setting. Econ. Env. Geol., v. 39, p. 567-581.

Choi, S.-G., Ryu, I.-C., Pak, S.J., Wee, S.M., Kim, C.S. and Park, M.E. (2005) Cretaceous epithermal gold-silver mineralization and geodynamic environment, Korea. Ore Geol. Review, v. 26, p. 115-135.

Choi, S.H., Yun, S.T., and So, C.S. (1996) Fluid inclusion and stable isotopes studies of gold- and silver-bearing vein deposits, South Korea: Geochemical of a Te-bearing Au-Ag-mineralization of the Imcheon mine. N. Jb. Miner. Abh., v. 1, p. 33-59.

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. Review, v. 52, p. 175-235.

Cluzel, D., Jolivet, L. and Cadet, J.-P. (1991) Early middle Paleozoic intraplate orogeny in the Ogcheon belt (South Korea): A new insight on the Paleozoic buildup of east Asia. Tectonics, v. 10, p. 1130-1151.

Corbett, G.J. and Leach, T.M. (1998) Geothermal environment for southwest Pacific Rim gold-copper systems. In Corbett, G.J., Leach, T.M., (Eds.) Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization. Econ. Geol. Special Pub., no 6, p. 11-30.

Friedman, I. and O`'Neil, J. R. (1977) Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest, In Fleischer, M. (ed.) Data of geochemistry: U.S. Geological Survey Professional Paper, 440-K, p. 1-12.

Goldfarb, R.J., Phillips, G.N. and Nokleberg, W.J. (1998) Tectonic setting of synorogenic gold deposits of the Pacific rim. Ore Geol. Review, v. 13, p. 185-218

Hart, C.J.R., Mair, J.L., Goldfarb, R.J. and Groves, D.I. (2004) Source and redox controls on metallogenic variations in intrusion-related ore systems, Tombstone-Tungsten Belt, Yukon Territory, Canada. Trans. of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences, v. 95, Part 1/2, p. 339-356.

Hedenquist, J.W. and Lowenstern, J.B. (1994) The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits, Nature, v. 370, p. 519-527.

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.

Hong, S.S. (2001) Implication for the emplacement depth of granites in the Yeongnam Massif, using the aluminum-in-hornblende barometry. J. Petro. Soc. Korea, v. 10, p. 36-55.

Hong, S.S. and Cho, D.R. (2003) Late mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of Korea (3). KIGAM, KR-03-01, p. 455-526.

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. of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences, v. 95, p. 181-195.

Kim, K.H. and Cheong, H.R. (1999) Gas and solute compositions in quartz from some base-metal ore deposits, South Korea. Econ. Env. Geol., v. 32, p. 421-439.

Kim, K.H. and Nakai, N.(1988) Isotopic compositions of precipitations and groundwaters in South Korea. J. Geol. Soc. Korea, v. 24, p. 37-46.

Kim, K.H., Kim, O.J. and Chang, W.S. (1990) Stable isotope and fluid inclusion studies of the Mugug Au-Ag mineral deposits. Econ. Env. Geol., v. 23, p. 1-9.

Kim, K.H., Kim, O.J., Nakai, N. and Lee, H.J. (1988) Stable isotope studies of the Sangdong tungsten ore deposits, South Korea. Mining Geol., v. 38, p. 473-487.

Kim, K.H., Satake, H. and Mizutani, Y. (1992) Oxygen isotopic compositions of Mesozoic granitic rocks in South Korea. Mining Geol., v. 42, p. 311-322.

Kim, O. J. (1971) Metallogenic epochs and provinces of South Korea. J. Geol. Soc. Korea, v. 7, p. 37-59.

Kim, S.J., Lee, H.K., Yu, J.-H. and Chon H.-T. (1999) Gold-silver mineralization of the Mujeong mine, Korea. Econ. Env. Geol., v. 32, p. 237-245.

Kim, S.S. and Kim, J.J. (1995) Fluid inclusion and stable isotope studies of the Kwangyang gold-silver mineral deposits, the southern part of the Korean peninsula. J. Geol. Soc. Korea, v. 31, p. 431-443.

Koh, S.M., Tagaki, T., Kim, M.Y., Naito, K., Hong, S.S. and Sudo, S. (2000) Geological and geochemical characteristics of the hydrothermal clay alteration in South Korea. Resource Geol., v. 50, p. 229-242.

Lang, J.R. and Baker, T. (2001) Intrusion-related-gold-systems: the present level of understanding, Min. Deposita, v. 36, p. 477-489.

Lang, J.R., Baker, T., Hart, C.J.R. and Mortensen, J.K. (2000) An exploration model for intrusion-related gold systems: Society of Econ. Geol. Newsletter, No. 40, p. 1-15.

Lee, D.S. (1987) Geology of Korea, Kyohaksa, Seoul, 514 p.

Lee, H.K., Yoo, B.C. and Kim, S.J. (1995) Au-Ag minerals and genetic environments from the Yeongdeog gold-silver deposits, Korea. Econ. Env. Geol., v. 28, p. 541-551.

Lee, J. I. and Kusakabe, M. (1998) Hydrogen and oxygen isotope compositions of the granitic rocks in the southern part of the Kyeongsang Basin, Korea, Geochem. J., v. 32, p. 253-256.

Lee, S.Y., Choi, S.-G., So, C.S., Ryu, I.-C., Wee, S.-M. and Heo, C.-H. (2003) Base-metal mineralization in the Cretaceous Gyeongsang Basin and its genetic implications, Korea: the Haman-Gunbug-Goseong(-Changwon) and the Euiseong metallogenic provinces. Econ. Env. Geol., v. 36, p. 257-268.

Matsuhisa, Y., Goldsmith, J.R. and Clayton, R.N. (1979) Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water. Geochem. Cosmochim. Acta., v. 43, p. 1131-1140.

McConachie, B.A. and Dunster, J.N. (1996) Sequence stratigraphy of the Bowthorn block in the northern Mount Isa basin, Australia: Implications for the base metal mineralization process. Geology, v. 24, p. 155-158.

McCoy, D., Newberry, R.J., Layer, P., DiMarchi, J.J., Bakke, A., Masterman, J.S., and Minehane, D.L. (1997) Plutonic-related gold deposits of interior Alaska, In Goldfarb, R.J., and Miller, L.D. (Eds.) Mineral deposits of Alaska: Econ. Geol. Mono., v. 9, p. 191-241.

Moon, S.H., Park, H., Ripley, E.M. and Hur, S.D. (1998) Petrochemistry and stable isotopes of granites around the Eonyang rock crystal deposits. J. Geol. Soc. Korea, v. 34, p. 211-227.

Oh, M.S. (1999) Mineralization in Korea. In Cheong, C.H. (Ed.) Geology of Korea. Sigma Press, Seoul. p. 523-605.

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.

Park, H.I., Chang, H.W. and Jin, M.S. (1988a) K-Ar ages of mineral deposits in the Taebaeg Mountain district. J. Korean Inst. Mining Geol., v. 21, p. 57-67.

Park, H.I., Chang, H.W. and Jin, M.S. (1988b) K-Ar ages of mineral deposits in the Gyeonggi massif. J. Korean Inst. Mining Geol., v. 21, p. 349-358.

Park, H.I., Choi, S.W., Chang, H.W. and Chae, D.H. (1985) Copper mineralization at Haman-Gunbuk mining district, Kyeongnam area. J. Korean Inst. Mining Geol., v. 18, p. 107-124.

Park, H.I., Choi, S.W., Chang, H.W. and Lee, M.S. (1983) Genesis of the copper deposits in Goseong district, Gyeongnam Area. J. Korean Inst. Mining Geol., v. 16, p. 135-147.

Park, Y.-R. and Ko, B. (2004) Oxygen and hydrogen isotopic compositions of the Hwacheon granite. J. Petro. Soc. Korea, v. 13, p. 214-223.

Ryu, I.-C., Choi, S.-G. and Wee, S.-M. (2006) An Inquiry into the formation and deformation of the Cretaceous Gyeongsang Basin, Southeastern Korea. Econ. Env. Geol., v. 39, p. 129-149.

Shelton, K.L. and So, C.S. (1992) A hydrogen and oxygen isotope study of the Sambo Pb-Zn-Barite mine, Republic of Korea. Mining Geol., v. 42, p. 353-359.

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., Taylor, R.P. and So, C.S. (1987) Stable isotope studies of the Dae Hwa Tungsten-Molybdenum mine, Republic of Korea: Evidence of progressive meteoric water interaction in a tungsten-bearing hydrothermal system. Econ. Geol., v. 82, p. 471-481.

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.

Shin, S.C. and Chi, S.J. (1996) Assessment of heat production potential of granitic rocks and development of geothermal exploration techniques using radioactive isotopes and fission track II. KIGAM, Daejeon, KR-95C-11, p. 86.

Simmons, S.F. and Graham, I. (2003) Volcanic, Geothermal, Ore-forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth. Econ. Geol. Special Pub., no. 10, 343 p.

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. and Yun, S.T. (1992) Geochemistry and genesis of hydorthermal Au-Ag-Pb-Zn deposits in the Hwanggangri mineralized district, Republic of Korea. Econ. Geol., v. 87, p. 2056-2084.

So, C.S. and Yun, S.T. (1994) Origin and evolutioin of W-Mo-Producing fluids in a granitic hydorthermal system: Geochemical studies of quartz vein deposits around the Susan granite, Hwanggangri distirct, Republic of Korea. Econ. Geol., v. 89, p. 246-267.

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.

So, C.S., Chi, S.J. and Choi, S.H. (1988) Geochemical studies on Au-Ag hydorthermal vein deposits, Republic of Korea: Jinan-Jeongeup mineralized area. J. Min. Pet. Econ. Geol., v. 83, p. 449-471.

So, C.S., Chi, S.J. and Shelton, K.L. (1987) Stable isotope and fluid inclusion studies of gold-silver bearing vein deposits, Cheonan-Cheongyang-Nonsan mining deistirict, Republic of Korea: Nonsan area. N. Jb. Miner. Abh., v. 158, p. 47-65.

So, C.S., Choi, S.H., Lee, K.-Y. and Shelton, K.L. (1989) Geochemical studies of hydrothermal gold deposits, Republic of Korea: Yangpyeong-Weonju area. J. Korean. Inst. Mining. Geol., v. 22, p. 1-16.

So, C.S., Yun, S.T. and Koh, Y.-K. (1993a) Mineralogic, fluid inclusion and stable isotope evidence for the genesis of carbonate-hosted Pb-Zn(-Ag) orebodies of the Taebaek deposit, Republic of Korea. Econ. Geol., v. 88, p. 855-872.

So, C.S., Yun, S.T. and Lee, J.-H. (1993b) Hydorhtemal W-Mo mineralziation of the Cheongyang mine, Republic of Korea: A fluid inclusion and stable isotope study. J. Min. Pet. Econ. Geol., v. 88, p. 63-82

So, C.S., Yun, S.T., Choi, S.G., Koh, Y.K. and Chi, S.J. (1991) Gretaceous epithermal Au-Ag mineralization in the Muju-Yeongam distirict(Jeongju mineralized area), Republic of Korea: Galena-Lead and stable isotope studies. J. Geol. Soc. Korea. v. 27, p. 569-586.

So, C.S., Yun, S.T., Kwon, S,H. (1999) Gold-silver mineralization of the Jungheung and Okdong mines, Kwangyang area, Korea: Mineralogical and geochemical change in a cooling hydrothermal system. N. Jb. Miner. Abh., v. 174, p. 223-248.

Williams, P.J. and Barton, M.D. and Johnson, D.A. (2005) Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution, and possible modes of origin. Economic Geology 100th Anniversary, p. 371-406.

Yang, D.Y. (1991) Mineralogy, petrology and geochemistry of the magnesian skarn-type magnetite deposits at the Shinyemi Mine, Republic of Korea. Ph.D thesis, Waseda Univ., Tokyo, Japan. 323 p.

Yoo, B.C., Lee, H.K. and Choi, S.G. (2002) Stable isotope, fluid inclusion and mineralogical studies of the Samkwang gold-silver deposits, Republic of Korea. Econ. Env. Geol., v. 35, p. 299-316.

Yoo, B.C., Lee, H.K. and Kim, S.J. (2003) Stable isotope and fluid inclusioin studies of the Daebong gold-silver deposit, Republic of Korea. Econ. Env. Geol., v. 36, p. 391-405.

Yoo, B.C., Lee, H.K. and Kim, K.J. (2006a) Ore minerals and genetic environments from the Baekun gold-silver deposit, Republic of Korea. Econ. Env. Geol., v. 39, p. 9-25.

Yoo, B.C., Lee, H.K. and White, N.C. (2006b) Gold-bearing mesothermal veins from the Gubong mine, Cheongyang gold distirict, Republic of Korea: Fluid inclusion and stable isotope studies. Econ. Geol., v. 101, p. 883-901.

Yun, S.T., So, C.S., Choi, S.H. and Heo, C.H. (2001) Hydrothermal bismuth mineralization of the Yucheon mine, South Korea: Oxygen and hydrogen isotope study. Geoscience J., v. 5, p. 243-250.

2007년 8월 18일 원고접수, 2007년 10월 16일 게재승인.