

남한의 주요 몰리브덴 광화작용과 화성활동

최선규^{1*} · 구민호¹ · 강흥석² · 안용환¹

¹고려대학교 지구환경과학과, ²한국광물자원공사

Major Molybdenum Mineralization and Igneous Activity, South Korea

Seon-Gyu Choi^{1*}, Min-Ho Koo¹, Heung-Suk Kang² and Yong Hwan Ahn¹

¹Dept. of Earth & Environmental Sciences, Korea University, Seoul 136-713, Korea

²Korea Resources Corporation, Seoul 156-706, Korea

The major Mo deposits in South Korea were formed during the Jurassic Daebo orogeny, the Late Cretaceous and the Tertiary post-orogenic igneous activities, and are characterized by a variety of genetic types such as pegmatite, greisen, skarn, porphyry and vein types. The Jangsu mine is a pegmatite-style deposit which is genetically related to the Jurassic ilmenite-series two-mica granite with the Mo mineralization age of 159.6 ± 4.5 Ma. The Geumseong mine occurs as a skarn/porphyry-style deposit associated with highly fractionated granite. Its age of Mo mineralization within aplitic cupola is about 96.5~107.5 Ma. The Yeonil mine is a porphyry-style deposit, and the Geumseong mine is a veinlet-style deposit along the fracture zone with their mineralization ages of 58.4 ± 1.6 and 54.4 ± 1.2 Ma, respectively. The contrasts in the style of Mo mineralization in Korea reflect the different environment of the related magmatism. The Jurassic mineralization, being related to deep-seated granitoids, occurs as a pegmatite-style deposit, whereas the Cretaceous one, being related to subvolcanic granitoids, occurs as skarn/porphyry/vein-type ore deposits. The Tertiary Mo mineralization has a close relationship with the igneous activities associated with the Tertiary basin formation along the east coast, Korean peninsular.

Key words : molybdenum, mineralization age, igneous activity, porphyry-style deposit, skarn

국내 주요 몰리브덴 광상은 쥐라기 대보 조산운동기부터 후조산기인 백악기를 거쳐 제삼기까지 페그마이트형, 그라이센형, 스카른형, 반암형, 광맥형 광상과 같은 다양한 광상 유형으로 배태되고 있다. 장수 몰리브덴 광산은 쥐라기 티탄철석 계열 복운모 화강암과 관련된 페그마이트 광상으로 배태되며, 광화 시기는 159.6 ± 4.5 Ma이다. 금성 몰리브덴 광산은 분화가 매우 진행된 화강암과 관련된 스카른형/반암형 광상으로 규플라 광체의 광화시기는 96.5~107.5 Ma를 보이며, 황강리 광화대에 나타나는 후기 백악기 광화시기와 일치하고 있다. 연일 몰리브덴 광산은 반암형 광상으로 배태되고, 금음 몰리브덴 광산은 전단대를 따라 충전하는 석영 세맥으로 배태되며, 광화 시기는 각각 58.4 ± 1.6 Ma과 54.4 ± 1.2 Ma이다. 한국의 중생대 몰리브덴 광상은 조구조적 진화 특성에 따라 쥐라기에는 심부 화성활동을 반영한 페그마이트질 맥상 광상으로 산출되는 반면, 백악기에는 천부 화성활동과 관련된 스카른형/반암형/광맥형 광상으로 배태된다. 특히 제삼기 몰리브덴 광화작용은 한반도 동해안을 따라 배태되는 제삼기 분지형성과 연계된 화성활동과 밀접한 관계를 보이고 있다.

주요어 : 몰리브덴, 광화시기, 화성활동, 반암형 광상, 스카른

1. 서 언

한반도에서 현생대 화강암체는 트라이아스기부터 쥐라기를 거쳐서 백악기/제삼기까지 각각 서로 다른 깊

이에서 정치 고결된 압체로 광역적인 배태 양상을 보이고 있으며, 특히 쥐라기 조산대형 및 백악기/제삼기 후조산대형 화성활동으로 구분하여 서로 상이한 지질 조건에서 수반된 금속광화작용의 다양성이 언급되었다

*Corresponding author: seongyu@korea.ac.kr

(Shimazaki *et al.*, 1987; Choi *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2006). 이러한 화성활동은 중생대부터 유도되는 사각/직각 섭입의 반복된 조구조적 환경 변화에 따라 지구 동력학적 진화과정에서 순차적으로 나타나는 지질작용을 반영한 결과로 해석되고 있다 (Jin, 1995; Maruyama *et al.*, 1997; Choi *et al.*, 2005; Ernst, 2010).

한반도의 주요 금속광종인 몰리브덴-텅스텐 광상은 전국적인 분포를 보이며, 중생대 지질 환경의 다양성을 반영하여 쥐라기와 백악기 동안 각각 서로 다른 광화심도에서 유도된 다양한 기원의 광화유체로부터 서로 다른 광종이 수반되는 광상으로 배태되고 있다 (Choi and Pak, 2007). 특히, 국내 몰리브덴 광화작용은 주로 근지성 유형의 고온성 광맥형, 반암형, 스킨형 광상과 점이성 유형의 탄산염교대 다금속 광상으로 배태되는 경향을 보이고 있으며, 열적 중심인 화성암체로부터 전달된 마그마수의 기여도가 지대한 영향을 미치고 있어 관계 화성암체로 간주되는 암체와 공간적으로 근접된 배태양상을 보이고 있다 (Choi *et al.*, 2006). 한편, 국내 주요 광화대는 수차례에 걸친 지체구조의 변화에 따라 구조운동과 화성활동이 복합적으로 중첩됨으로서 동일 지역에 쥐라기와 백악기의 광화시기를 갖는 다양한 광화작용이 유도되고 있다 (Choi *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2006).

국내 몰리브덴 광상은 전반적으로 쥐라기와 백악기 동안 나타나는 화성활동과 직접적으로 밀접한 연관성을 보이고 있으나 (Shimazaki *et al.*, 1987; Park *et al.*, 1988a; Park *et al.*, 1988b; So *et al.*, 1991), 제천 지역의 금성 광산과 평해 지역의 금음광산은 쥐라기와 백악기의 화성활동 및 광화시기가 서로 상이한 연대로 보고되고 있어 아직까지 생성연대에 대한 미해결된 과제를 안고 있다 (Choi *et al.*, 2006; Ahn *et al.*, 2009). 본 연구에서는 쥐라기부터 제삼기까지 나타나는 대표적인 Mo-단일형 광상의 부존 특성과 함께 광상형성과 관련된 화성활동 시기 및 광상 생성연대를 전반적으로 재검토하여 광화작용의 성인적 특성을 재정립하는데 있다.

2. 중생대 몰리브덴 광상 유형

세계적으로 몰리브덴 광상은 주로 반암형/스카른형/페그마타이트형/그라이센형/광맥형/화산성 괴상 황화물형(VMS)/퇴적성 괴상 황화물형(SEDEX) 광상 등 다양한 배태 양상을 보이며 (Dill, 2010), 서로 다른 산화-환원 조건의 광화유체 특성에 따라 수반 광종의 다양성을

보이고 있다 (Meinert, 1993; Hart *et al.*, 2004). 한편 몰리브덴은 텅스텐과 함께 국내에서 가장 중요한 광물자원으로 인식되고 있으며, 성인적 측면에서 다양한 산화-환원 조건에서 형성된 쥐라기와 백악기의 화성활동과 밀접한 관계를 보이고 있다 (Jin *et al.*, 2001; Choi *et al.*, 2007b). 특히, 국내 몰리브덴 광상은 단지 휘수연석만을 수반하는 유형과 텅스텐에 부산물로 수반되는 유형 등 다양한 변화를 보이고 있으며, 이는 생성환경 및 관계화강암의 다양성을 시사하고 있다.

국내 몰리브덴-텅스텐 광상은 기존 생산 실적의 몰리브덴-텅스텐 상대적 양비, 광물유형의 존재 유무 및 그리고 수직-수평적 금속비 분포특성을 종합적으로 고려하여 Mo-단독형 광상, W-Mo-혼합형 광상 및 W-단독형 광상으로 구분하였다. 즉, 국내 몰리브덴-텅스텐 광상은 Mo-단독형 광상보다 W-Mo-혼합형 광상과 W-단독형 광상이 전반적으로 우세한 경향을 보이며, 일부 선캠브리아이인 W-단독형 광상인 옥방 광상을 제외하고 주로 쥐라기 및 백악기의 생성연대를 나타내고 있다 (Shimazaki *et al.*, 1987; Park *et al.*, 1988a; Park *et al.*, 1988b; So and Yun, 1994). 한편, 한반도에서 중생대 금속광화작용은 일정한 시간 차이를 두고 서로 상이한 금속종이 우세하게 유도되는 다음과 같은 배태양상이 보고되었다 (Shimazaki *et al.*, 1987). 쥐라기 동안에 배태되는 금속광상은 몰리브덴-텅스텐 광화작용이 금-은 광화작용보다 선행되어 유도되는 반면에, 백악기에는 금-은 광화작용이 몰리브덴-텅스텐 광화작용보다 선행되는 반대 경향성을 제시하였다 (Shimazaki *et al.*, 1987). 최근, 중생대 금-은 광화작용은 쥐라기와 백악기에 순차적으로 나타나는 고태평양 판의 섭입양태 (Maruyama *et al.*, 1997)와 직접적으로 연계된 고응력장의 변화에 따라 유도되는 조산운동 및 후조산운동에 기인된 결과로 보고되었다 (Choi *et al.*, 2006).

기 발표된 절대연령의 연구결과 (Shimazaki *et al.*, 1987; Park *et al.*, 1988a; Park *et al.*, 1988b; So and Yun, 1994)에 의하면 몰리브덴-텅스텐 광상은 경기·영남 육괴에서 대보 화강암체 저반 및 주변부를 따라 배태되는 쥐라기 조산대형 광상으로 가리산, 장수, 금성, 삼울소보 광산이 구분되고 있는 반면, 상동, 대화, 청양, 수산, 경창, 중보 광산 등 다수의 W-Mo-혼합형 광상은 후조산대형 광상으로 분류할 수 있다. 특히, 몰리브덴 광상은 화성암체와 공간적 측면에서 서로 밀접한 관계를 보이는 광상으로 인접 화성암체가 관계화성암으로 간주되고 있으나, 국내 주요 광화대는 쥐라기와 백악기 화성활동이 동일 지역에 중첩되어 배태됨으

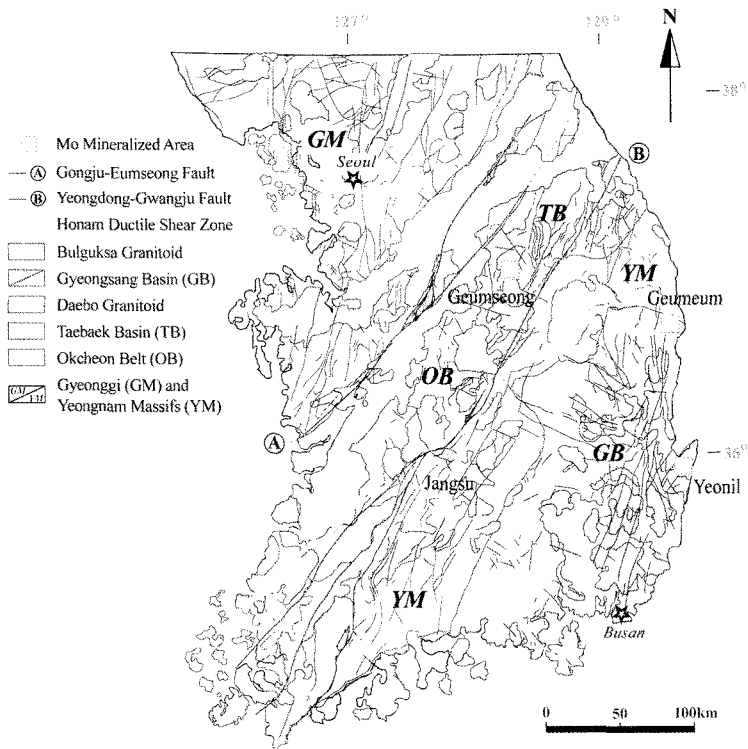


Fig. 1. Location and simplified geological map of the studied Mo mineralized areas, Korea.

로서 광화시기와 함께 관계화성암을 정립하는데 어려움이 인식되고 있다.

쥐라기 화강암체는 약 5.5±2.0 kbar로서 심부에서 정치 고결된 지질환경을 보이고 있는 반면, 백악기 화강암류는 전반적으로 약 1.5±1.0 kbar로서 천부에서 고결된 전형적인 반심성암 암체로 산출되고 있다 (Cho and Kwon, 1994; Hong, 2001; Hong and Cho, 2003). 이러한 중생대 화성암체의 정치심도를 반영하여 쥐라기와 백악기 광화작용은 생성시기에 따라 각각 서로 다른 심도 조건에서 유도되는 광화유체의 진화과정에 대한 차별성이 보고되고 있다 (So *et al.*, 1991; Choi and Pak, 2007). 연구 대상은 현재 탐사/개발이 진행되고 있는 몰리브덴 광산인 장수, 금성, 금음 (구 삼울소보), 연일 광산을 대상으로 광상학적 연구와 함께 연대 측정을 수행하였다 (Fig. 1). 상기 몰리브덴 광산의 주요 대상 광물/금속 중은 공통적으로 휘수연석으로 Mo-단독형 광상으로 분류될 수 있으나, 단지 금음광산에서만 황동석의 산출빈도가 비교적 높게 나타나는 경향성을 보인다. 연구대상인 몰리브덴 광산은 모두 열수기원의 광상유형으로 장수 광산은 페그마이트질 석영맥 광산으로, 금성 광산은 스키르겐/반암형 광산으로,

금음 광산은 구조규제형 (전단대 규제형) 석영 세맥 광상, 연일 광산은 반암형 광산으로 구분된다 (Fig. 2). K-Ar 및 Ar-Ar 연대 측정은 캐나다 Activation Laboratories Ltd.에서 수행되었고, Ar-Ar 분석 장비는 Micromass 5400 static vacuum mass spectrometer 이다.

3. 쥐라기 광화작용: 장수 지역

장수 지역의 지질은 선캠브리아기 지리산 편마암복합체를 기반으로 선캠브리아기 흑운모 화강편마암과 복운모 화강편마암 그리고 트리아스기~쥐라기 열리상 화강섬록암, 흑운모 화강암, 복운모 화강암과 섬록암으로 구성된다. 육십령 화강암체는 중립질 복운모 화강암으로 대자율값이 0.315×10⁻³SI로서 티탄철석 계열에 해당하며, 71.7~74.9 wt.% SiO₂의 매우 분화된 특징과 함께 알루미늄 포화지수가 1.15~1.20 고알루미나 계열 (Koh and Yun, 2003)로서 S형 (부분적으로 I형) 화강암의 조성 특징을 보이며, 장수 몰리브덴 광산은 육십령 화강암체 내에 배대되어 있다 (Fig. 3).

육십령 화강암에는 다수의 페그마타이트질/반화강암

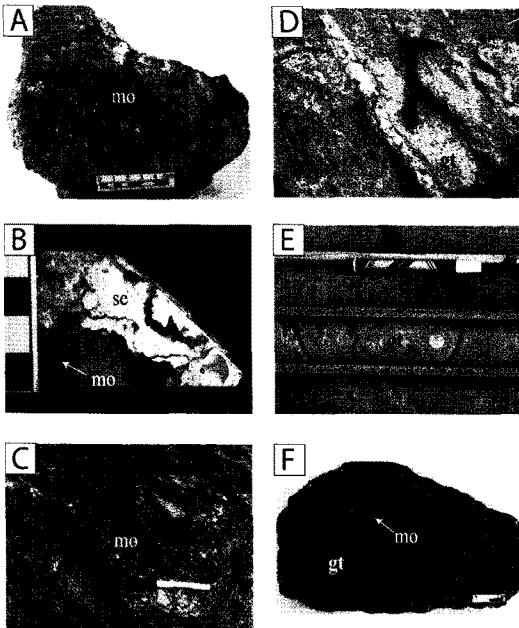


Fig. 2. Macro- and hand-specimen-scale textures characteristic for Mo deposit style. (A) Mineralized pegmatite from the Jangsu deposit, with an assemblage of orthoclase, muscovite, molybdenite, and quartz. (B) Typical crenulate Mo-bearing quartz layers (QL) and white altered aplitic layers (AL) in cupola at the Geumseong deposit (drill hole GSM2006-3; ca. 245m). (C) Clinopyroxene-garnet skarn replaced and cut by later molybdenite and amphibole at the Geumseong deposit. (D) Molybdenite-rich quartz vein surrounded by pink K-feldspar-rich selvages alteration in altered granite at the Geumeum deposit. (E) Altered and bleached granite at the Geumeum deposit, intruded and cut by thin molybdenite-bearing quartz vein. (F) Molybdenite-dominant altered granite from the Yeonil deposit. Abbreviations; gt=granite, mo=molybdenite, pg=pegmatite, qz=quartz, se=sericite and sk=skarn.

질 암맥이 발달하여 있으며, 페그마타이트 맥, 반화강 암 맥 및 페그마타이트질 석영맥간에 서로 점이적인

접촉관계를 보이고 있다. 장수 광상은 페그마타이트질 석영맥을 중심으로 휘수연석이 산점상 또는 집합체로 산출되며 (Fig. 2A), 암맥은 백운모, 정장석 (퍼사이트), 석영과 함께 소량의 흑운모, 형석, 진기석, 황동석 및 석류석이 함유되어 있다. 특히, 석류석은 피랄스파이트 계열 (pyralspite subgroup)의 알만딘-스페사틴 중간 조성을 나타내고 있어 Fe^{+2} 가 우세한 환원 조건의 정출환경을 지시하고 있으며, 이는 육십령 화강암체의 대자울에 의한 티탄철석 계열의 전반적인 환원 특성과 일치하고 있다.

기존 연대자료에 의하면, 육십령 화강암체 내 페그마타이트 맥의 백운모 K-Ar 연대는 170 ± 5 Ma이며 (Shimazaki *et al.*, 1987), 인접한 남원 화강암의 U-Pb 저어콘 연대는 176 ± 4 Ma로서 취라기 화성암으로 보고되고 있다 (Turek and Kim, 1994). 연대측정 시료 (JS09-01-8)는 한국광물자원공사 2009년 1호 시추공에서 채취한 육십령 복운모 화강암체에 배태되는 함휘수연석 페그마타이트질 석영맥에 수반된 백운모로서 (Table 1) K-Ar 연대결과는 159.6 ± 4.5 Ma로서 기존에 발표된 연대 자료와 다소 차이는 있지만, 후기 취라기 광화작용을 지시하는 생성연대를 보이고 있다.

4. 백악기 광화작용: 제천-단양 지역

국내 대표적인 주요 광화대로 알려져 있는 제천-단양 (황강리) 광화대는 제천 화강암체의 남부지역으로부터 무암사/수산 화강암 및 월악산 화강암의 북부지역까지 몰리브덴-텅스텐-동-연-아연-철 등과 같은 다금속 광상이 집중적으로 배태되고 있다.

제천 화강암체의 남측 경계부를 따라 남서부 광화대는 금성면을 중심으로 동막리, 양화리, 양지말, 구룡리, 월굴리를 따라 주로 스카른/탄산염교대 광상 유형으로

Table 1. K-Ar ages of minerals from Mo deposits

Mine	Sample no.	Mineral	Potassium	Rad. ⁴⁰ Ar	Age (Ma)	Non-Rad. ⁴⁰ Ar(%)
			(wt.%)	(10 ⁻⁸ ccSTP/g)		
Jangsu	JS09-01-8	muscovite from Mo-bearing pegmatitic vein	9.82	6250.6	159.6±4.5	2.3
	GSM26-3-18	K-feldspar from Mo-bearing cupola*	11.00	4231.0	96.5±2.1	3.9
Geumseong	GSM26-03-21	sericite from Mo-bearing aplitic cupola	1.82	884.1	123.1±3.3	14.1
	GSM26-3-24	K-feldspar from low-grade Mo cupola**	7.41	3183.0	107.5±2.3	3.7
Geumeum	SYB2606	muscovite from quartz-rich pegmatitic vein	8.49	6443.0	185.8±3.9	1.4
	SYB2606-7	sericite from Mo-bearing veinlet	3.12	668.0	54.4±1.2	17.1
Yeonil	YI-1	muscovite from Mo-bearing veinlet	9.02	2042.1	58.4±1.6	2.5

*Choi *et al.* (2007b)

**Choi *et al.* (2007a)

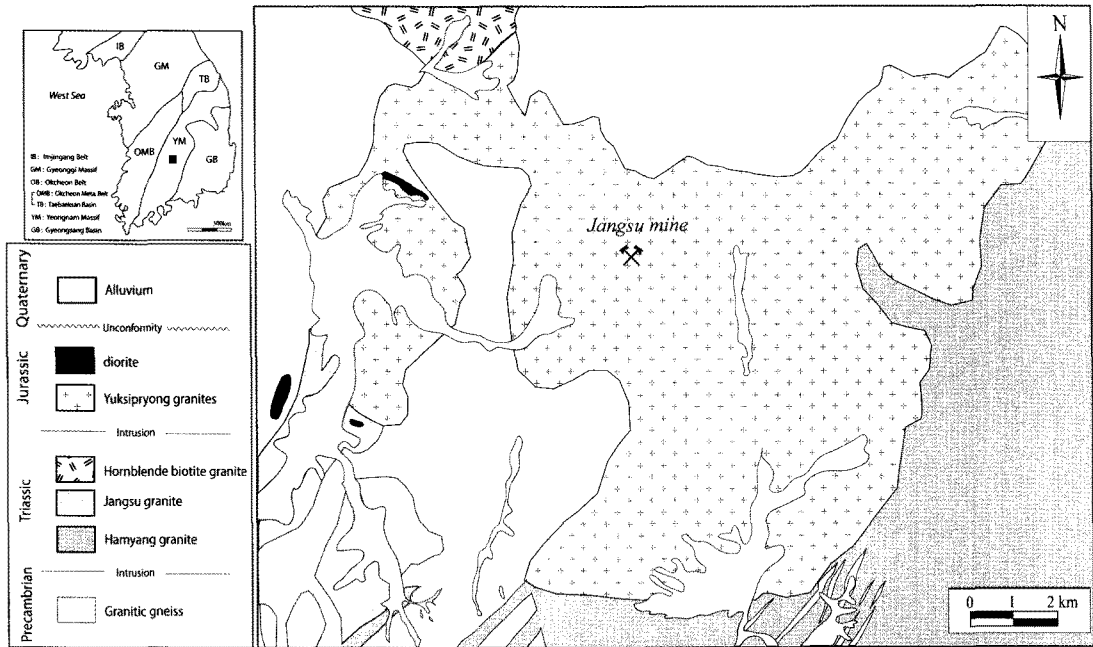


Fig. 3. Geological map of the Jangsu Mo deposit and adjacent regions.

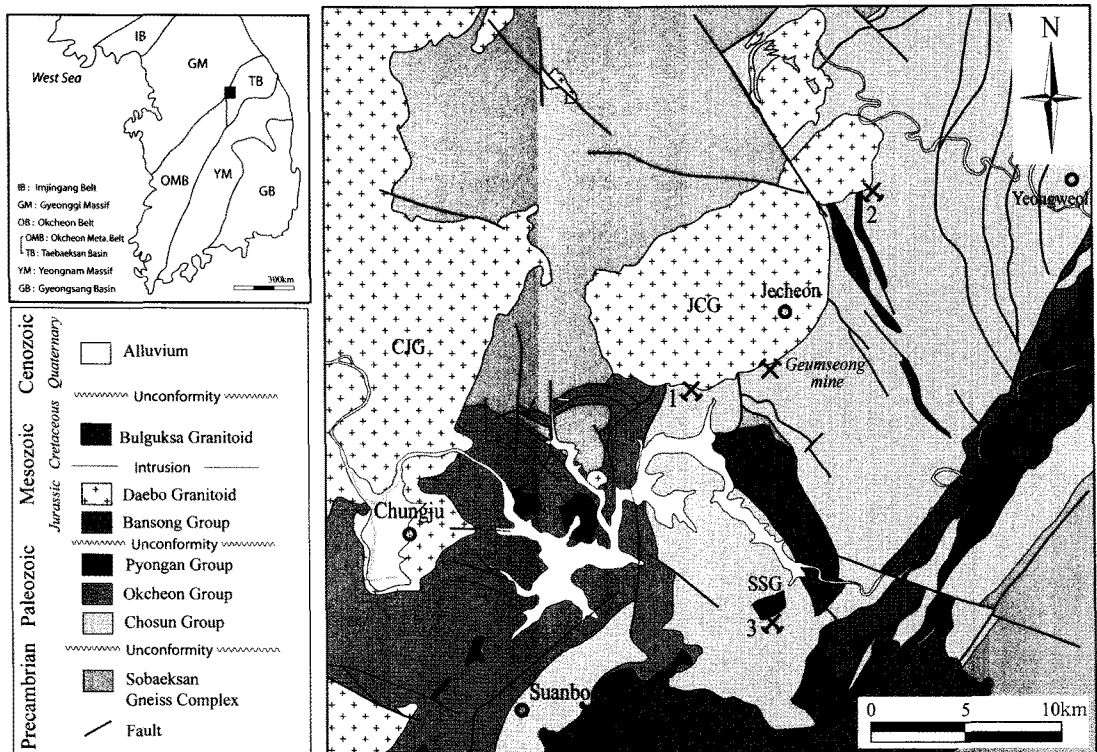


Fig. 4. Geological map of the Geumseong Mo deposit and adjacent Jecheon-Danyang regions. 1=Guryeongri Mo-Fe deposit, 2=Dongmeyong W deposit and 3=Jungbo W-Mo deposit. JCG=Jecheon granite, CJG=Chungju granite, MAG=Muamsa granite, SSG=Susan granite and WAG=Weolaksan granite.

몰리브덴(-철) 광상이 배태되며, 북동부 광화대는 송학면 포전리, 무도리를 중심으로 맥상/스카른 광상 유형으로 텅스텐-몰리브덴 광상이 수반되고 있다. 한편, 무암사/수산 화강암체와 월악산 화강암체의 인접 지역을 따라 다수의 금속광상이 밀집 분포하며, 상기 각 화성암체의 공간적 근접성에 따라 고온성/저온성 광상 유형으로 구분하였고 W-Mo-Cu-Zn-Pb-F-Ba광종별 공간적 분포 양상의 차이가 보고되고 있다 (Reedman *et al.*, 1973).

4.1. 관입암체의 생성연대

기 보고된 생성연대의 연구결과에서 금속광화작용과 성인적으로 밀접한 관계 화성암체는 쥐라기 제천 화강암체와 백악기 무암사/수산-월악산 화강암체로 양분된다 (Fig. 4). 제천 화강암체의 K-Ar 연령은 금성 광산과 인접한 흑운모 화강암과 반화강암에서 각각 179 ± 6 Ma과 159 ± 5 Ma (Ishihara *et al.*, 2002), 북동부 암체인 송학면 채석장의 세립질 화강암에서 169 ± 5 Ma (Shibata *et al.*, 1983)이고, Rb-Sr 전암 연령은 202.7 ± 1.9 Ma (Jin *et al.*, 1992)이다. 반면에, 무암사 화강암과 월악산 화강암은 최근 Rb-Sr 전암 연령이 각각 88.1 ± 1.7 Ma와 89.6 ± 2.2 Ma (Lee *et al.*, 2010)이고, 수산 화강암의 K-Ar 전암 연령이 89.0 ± 2.0 으로 황강리 광화대의 금속광상의 광화시기가 후기 백악기로 서로 일치하는 경향을 보이고 있다 (So and Yun, 1994).

제천 화강암체는 제천시 중심의 남서부 암체와 송학산의 북동부 암체가 서로 상이한 광물학적 특성을 보이고 있으며, 상기 두 암체는 당골 단층에 의한 접촉 관계를 보이고 있다 (Kim *et al.*, 2010). 북동부 암체(송학산)는 대자율값이 0.11×10^3 SI로서 티탄철석 계열, 중립질 흑운모 화강암으로 산출되는 반면에, 남서부 암체에서는 전반적으로 대자율이 5.03×10^3 SI로서 자철석 계열, 포획암을 다수 함유한 K-장석 거정 반상조직과 아다카이트질 I형 지화학적 특징을 보이는 조립질 각섬석-흑운모 화강섬록암으로 산출되고 있다 (Ishihara *et al.*, 2005). 월악산 화강암체는 동측에서 각섬석-흑운모 화강암과 서측에서는 흑운모 화강암으로 변화양상을 보이며, A형 화강암과 분화가 매우 진행된 화강암의 혼합된 지화학적 특징이 보고되고 있다 (Lee *et al.*, 2010). 한편, 제천 화강암체는 각섬석 압력계로 추정된 정치 심도가 3.8 kbar (Cho and Kwon, 1994)의 심부 환경에서 정치된 특징을 보이는 반면에, 무암사 화강암/월악산 화강암은 공통적으로 정동 석영이 암체 전반에 발달되고 있어 전형적인 천부 화성암체를

시사하고 있다.

4.2. 광상 개요 및 광화 시기

무암사 화강암체와 월악산 화강암체 사이에 광범위하게 분포하는 다양한 금속광상 중 중보 텅스텐(-몰리브덴) 광산이 88.6 ± 2.0 Ma (So and Yun, 1994)로서 인접한 무암사 및 월악산 화강암체의 정치시기가 광화시기와 잘 일치하고 있어 관계화성암으로 간주되는 (So *et al.*, 1983) 반면에, 금성 (현 NMC몰랜드)광산은 제천 화강암체 (남서부 암체)와 접하고 있어 지금까지 관계화성암으로 간주되었고 (Jin *et al.*, 1992), 쥐라기 광화작용으로 보고된바 있다 (Shibata *et al.*, 1983; Ishihara *et al.*, 2005). 몰리브덴-텅스텐 광산은 주로 제천 화강암체의 남측 경계부를 따라 영월형 조선누층군 (삼태산층)을 교대한 광상이 다수 배태되고 있다. 제천 화강암체 중 북동부 암체의 남측 경계부에서는 텅스텐(-몰리브덴) 스키르형/맥상 광상으로 (Choi *et al.*, 2007a), 남서부 암체에서는 몰리브덴(-철) 스키르형/탄산염교대 광상으로 배태되고 있어, 각 암체의 암석유형과 수반 광종에서 서로 상이한 특징이 확인된다.

금성 광산은 구조적으로 남측 경계부에서 금성 단층, 금실 단층과 같은 NNE방향의 구조선에 의하여 절단되고 있으며, 단층을 따라 제천 화강암과 삼태산층인 석회암-백운암이 변위되어 있다 (KORES, 2006). 특히 천부 관입암체인 반화강암/반암질 흑운모 화강암이 NNE방향 구조선을 따라 다수 관입하고 동시에 견운모화/점토화작용이 확인되며, 석회암을 교대한 접촉부에서 스키르화작용/탄산염교대작용과 함께 Mo-Fe 광화작용이 수반된다. 금성 광산은 NNE방향 구조선이 영월형 조선누층군 삼태산층을 교차하는 지역을 중심으로 배태되고 있으며, 광상 부근에서 확인된 반화강암 또는 흑운모 화강암은 제천 화강암과 상이한 지화학적 특징을 보이고 있다.

금성 광산의 몰리브덴 광화작용은 하부의 반화강암질 큐플라 (cupula) 광체 (Fig. 2B)와 상부의 칼슘계열 스키르 광체 (Fig. 2C)가 공간적으로 서로 분리된 광체로 배태된다 (Choi *et al.*, 2007b). 특히 하부 큐플라형 광체의 외각부를 따라 산출되는 하부 스키르대는 백운석질 석회암을 모암으로 마그네슘계열 스키르대가 소규모로 배태되고 자철석이 주로 수반되고 있다. 하부 큐플라형 광체는 최외각부에서 백운석질 석회암 → 마그네슘계열 자철석 외성 스키르대 → 내성 스키르대 → 정장석대 → 괴상 석영질 반화강암 → 함유수연석 큐플라형 반화강질 암체로 변화되는 대상 분포를 보이고 있다



Fig. 5. The Geumseong magnesian skarn(S)-cupola(C) contact aureole showing sampling site in K-feldspar zone (K) (drill hole GSM2006-3; ca. 260m). K-feldspar caps developed as a result of fractionation at the upper portions of a Mo-bearing cupola.

(Fig. 5). 하부에서 확인된 금성 규폴라형 암체는 석영 질 층 (comb quartz layer; CQL)/반화강암질 층 (aplitic layer; AL)이 수mm~수cm 크기의 미세한 호층 조직을 보이며, 간혹 빗살 석영질 층은 단방향 결정성장 조직 (unidirectional solidification texture; UST)을 나타내고 있다. 또한, CQL는 전반적으로 석영과 함께 미세한 휘수연석이 산재되어 있는 반면에, AL은 전반적으로 견운모와 석영으로 구성되어 있다. 이러한 함휘수연석 반화강질 규폴라형 암체는 반암형 몰리브덴 광상의 전형적인 조직을 지시하고 있다.

연대 측정시료는 한국광물자원공사 2006년 3호공 시추에서 확인된 하부 스키르네와 규폴라 광체사이의 접촉부에서 산출되는 정장석 (GSM26-3-18, GSM26-3-24)과 규폴라 암체 내부의 AL이 변질된 견운모 (GSM26-3-21)이다. 규폴라의 정장석대는 몰리브덴을 함유한 광화유체의 초기 단계에 정출된 정장석으로 추정되며, 규폴라 암체의 최외각부에 배태되는 정장석대는 234m (GSM26-3-18)와 260m (GSM26-3-24)에서 외각부 하

부 스키르네로 변화되는 서로 대칭적인 관계를 보이고 있다. K-Ar연대 측정결과에 의하면, 정장석은 각각 96.5 ± 2.1 Ma (Choi *et al.*, 2007a)와 107.5 ± 2.3 Ma이며, 규폴라 광체의 중앙부에서 채취한 시료 (245m)는 AL이 견운모화작용을 받은 변질 시료로서 123.1 ± 3.3 Ma이다. 즉, 이러한 규폴라 암체를 중심으로 대칭적으로 나타나는 최외각부 정장석대가 몰리브덴 광화작용과 직접적으로 연계되어 있다, 반면에 규폴라 암체 내부에 분포하는 견운모는 K함량이 1.82 wt.%로 미량 함유되어 절대연령의 신뢰도 측면에서 부정확한 시기로 추정된다.

5. 제삼기 광화작용: 평해-연일 지역

5.1. 평해 지역: 관입암체의 생성 연대

평해 지역의 주변 지질은 소백산 육괴에 속하는 선캄브리아기 변성암류를 기반암으로 하여 조선누층군의 석회암, 경상누층군 그리고 트라이아스기부터 제삼기까지 다양한 화강암체가 관입하고 있다 (Cheong *et al.*, 2002). 화강암류는 트라이아스기 그리고 쥐라기 화성암체가 관입하고 있으며, 백악기 암체인 온정리 화강암체가 암주상으로 배태되고 있다 (Cheong *et al.*, 1998). 퇴적암류는 후포리 일대에는 조선누층군에 대비되는 석회암, 규암, 셰일 등으로 구성된 후포리 석회암층이 소규모 분포하고 있으며 (Fig. 6), 역암, 역질사암, 사암 및 실트암으로 구성된 경상계 하양층군의 최하부인 울련산층과 역암 및 역질 사암으로 구성된 상위의 동화치층으로 구분된다 (Chang *et al.*, 1990).

평해 지역은 트라이아스기부터 쥐라기 및 백악기까지 다양한 화성활동의 연대가 보고되고 있으며 (Shin and Nishimura, 1993; Cheong *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 1999; Cheong *et al.*, 2002), 금음 (구 삼울소보) 몰리브덴 광상은 온정리 화강암체에 배태되고 있다. Rb-Sr 전암/광물 연대는 영덕 화강암체에서 241 ± 59 Ma (Cheong *et al.*, 2002)와 185.0 ± 2.8 Ma (Choo *et al.*, 1982), 영해 화강암체에서 238 ± 14 Ma 및 청송 화강암체에서 226 ± 20 Ma (Cheong *et al.*, 2002), 그리고 온정리 화강암체에서 96.0 ± 1.4 Ma와 84.0 ± 1.4 Ma (Choo *et al.*, 1982)가 보고되고 있다. 또한, 기존 K-Ar 연대 자료에 의하면, 영덕 화강암체에서 흑운모는 166.5 ± 8.3 Ma이며, 영해 화강암체에서 각섬석은 178.0 ± 4.3 Ma와 158.7 ± 4.9 Ma (Kim *et al.*, 1999)로서 Rb-Sr연대인 트라이아스기와 상당한 차이를 보이고 있다. 반면에, 온정리 화강암체의 K-Ar연대자료는 각섬석에서 87.1 ± 2.1 Ma (Shin and Nishimura, 1993), 흑운모에서 80.2 ± 0.8

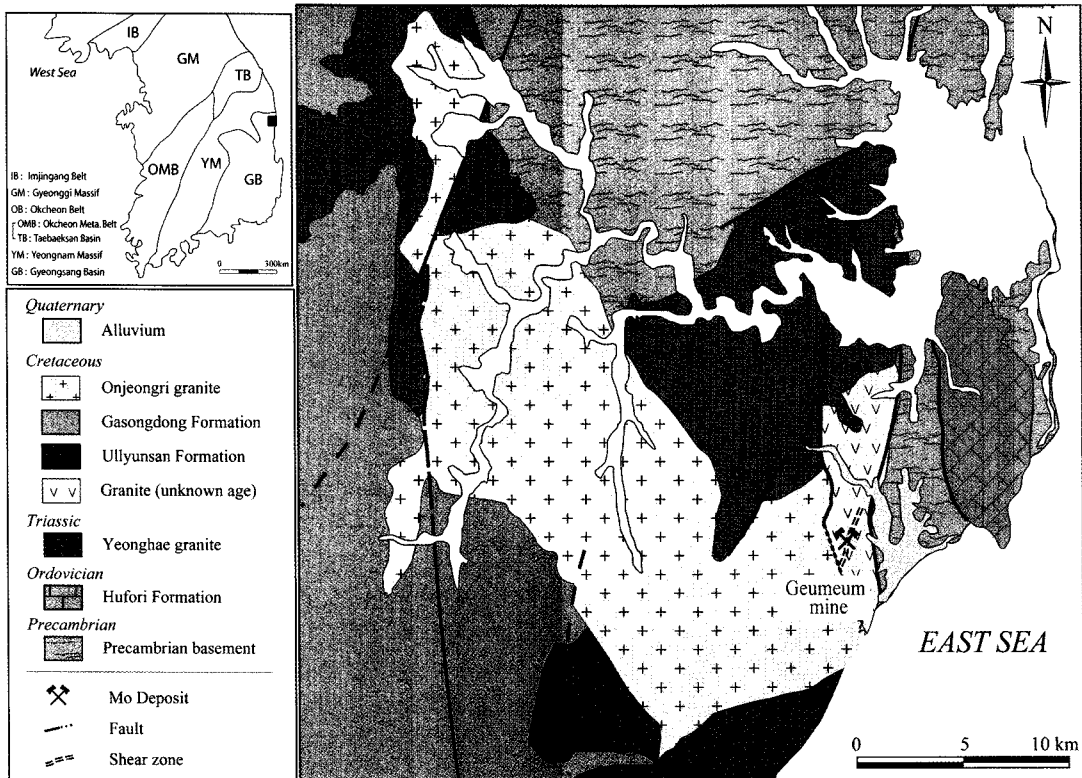


Fig. 6. Geological map of the Geumeum Mo deposit and adjacent Pyeonghae regions.

(Cheong *et al.*, 1998), 67.4 ± 1.6 Ma (Kim *et al.*, 1999)로서 Rb-Sr 연대자료와 비교적 일치하는 경향을 보이며, 전반적으로 후기 백악기 화성활동인 약 96~67 Ma을 지시하고 있다. 이와 같이 영덕-영해-온정리 일원의 화강암체는 서로 상이한 화성활동의 지질 연대를 시사하고 있어, 몰리브덴 광상의 광화시기를 정립 하는데 어려움이 있다.

한편, 평해리 지질도에 의하면 온정리 화강암은 단일 암체로 제시되어 있으나, 동측과 서측 암체에서 분화 정도에 따른 암석화학적 상이함이 보고된 바 있다 (Cheong *et al.*, 1998). 온정리 지역에서 백악기 경상 누층군의 하양층군은 온정리 화강암의 관입에 의한 혼펠스로 접촉변성작용이 인지된다. 또한, 온정리 화강암의 서측부는 전반적으로 중립질 각섬석-흑운모 화강섬록암 및 석영반암으로 다양한 중성/염기성 포획암이 함유되어 있으며, 야외/경하에서는 전반적으로 마그마 불균질한 혼합에 따른 조직이 관찰되고 있다. 온정리 화강암은 I형, 칼크-알칼리 계열의 특징을 보이며, 알루미늄 포화지수는 0.99~1.05로서 중/고알루미나질 경계부에 해당하는 조성을 보인다 (Lee and Lee, 1992;

Cheong *et al.*, 1998). 반면에, 동측부 암체는 서측부와 비교하여 염기성 포획암의 부재와 함께 매우 분화된 지화학적 특징을 보이고 있다. 온정리 화강암의 서측 암체를 중심으로 추정된 각섬석 지압계의 정치압력은 이론적으로 약 >2 kbar 조건에서 제한적인 적용이 가능하지만, 약 1.1~2.0 kbar로 추정되어 정성적으로 천부 관입암체를 시사하고 있다 (Cheong *et al.*, 1998).

5.2. 평해 지역: 광상 개요 및 광화 시기

현재 금음 광산은 온정리 화강암체와 접하는 시대 미상의 동측 암체에 배태되며 (Fig. 6), NE계 전단대 방향을 따라 화강암에 배태된 수cm 크기의 함휘수연석 세맥군의 (Fig. 2D) 고품위 전단대를 대상으로 개발되고 있다. 주구조선인 전단대의 주향과 경사는 약 N20E와 거의 수직으로 지표에서 확인된 광체의 폭과 연장은 약 80 m과 약 500 m이며, 시추 탐사에서 120-180 m까지 심부 연장이 확인되었다 (진폭 약 35 m) (KORES, 2005). 몰리브덴 광화작용은 불규칙적인 망상 석영 세맥을 중심으로 전단대의 주구조선을 따라 제한적인 배태 양상을 보이며 (Fig. 2D), 주변 화강암

Table 2. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analytical data for incremental heating experiments on muscovite concentrates (SYB2805-A) from Mo-free quartz vein at the Geumeum deposit

$T^\circ\text{C}$	t (min)	^{40}Ar (STP)	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	Ca/K	$\Sigma^{39}\text{Ar}$ (%)	Age (Ma)	$\pm 1\sigma$
500	10	4.16×10^{-9}	16.458	0.081	0.02315	0.00719	0.10942	0.03242	0.02268	0.0063	0.394	0.3	75.7	14.2
650	10	13.87×10^{-9}	12.842	0.018	0.02267	0.00132	0.50158	0.00347	0.01038	0.0011	1.806	1.8	75.9	2.6
800	10	130.59×10^{-9}	22.530	0.015	0.02045	0.00028	0.12062	0.00115	0.00377	0.0003	0.434	9.8	162.3	1.9
900	10	737.55×10^{-9}	24.727	0.013	0.01966	0.00005	0.00093	0.00013	0.00032	4E-05	0.003	50.8	185.4	2.0
950	10	296.35×10^{-9}	23.747	0.011	0.02005	0.00010	0.00166	0.00040	0.00038	0.0001	0.006	67.9	178.3	2.0
1050	10	240.95×10^{-9}	23.770	0.010	0.02063	0.00007	0.00316	0.00031	0.00110	0.0001	0.011	81.8	176.9	2.0
1130	10	327.80×10^{-9}	24.812	0.012	0.02022	0.00010	0.00174	0.00032	0.00053	0.00010	0.006	100.0	185.6	2.1

Total fusion age, TFA=179.3±2.0 Ma (including J); J=0.004395±0.000051
 Weighted Mean Plateau Age (900-1130°C)=181.4±2.0 Ma (including J)

은 석영 세맥을 중심으로 광범위하게 프로필릭 변질대, 견운모 변질대, 점토 변질대가 발달하여 있다 (Fig. 2E). 석영 세맥은 전반적으로 황화광물이 소량 수반되며, 구성광물 유형에 따라 함휘수연석 석영 세맥, 함황동석-휘수연석 석영 세맥 및 함황동석-섬아연석 석영 세맥으로 구분된다 (Ahn *et al.*, 2009). 화강암에 배태된 함휘수연석 광체는 주구조선의 방향을 따라 평행한 세맥군을 이루고 있으며, 폭 0.5-5 cm, 연장 5-20 m의 단속적인 배태 양상을 보인다.

금음 광장에서 산출되는 백운모의 K-Ar연대는 173.5 ± 2.5 Ma (Park *et al.*, 1988b)로 보고된 바 있으나, 온정리 화강암에 대한 K-Ar 및 Rb-Sr 연대자료는 전반적으로 후기 백악기를 지시하고 있다. 즉, 후기 백악기 암체에 쥐라기 광화시기를 갖는 광상이 배태되는 모순된 결과를 보이고 있다. 이러한 광화시기에서 제기된 문제점을 해결하기 위하여 함휘수연석 석영 세맥의 견운모 (SYB2606-7)와 휘수연석을 함유하지 않은 페그마타이트질 석영 맥의 백운모 (SYB2606, SYB2805-A)를 대상으로 실시하였다. 대상 시료 중 백운모는 시대 미상의 동측 암체 내 전단대를 따라 발달한 균열을 이차적으로 충전한 페그마타이트질 석영 세맥으로 몰리브덴 광화작용과 성인적 연계성을 보이지 않고 있다.

K-Ar 연대 결과에 의하면 (Table 1), SYB2606 백운모는 185.8 ± 3.9 Ma인 반면에, SYB2606-7 견운모는 54.4 ± 1.2 Ma로서 서로 상이한 연대를 보이고 있다. 한편, Ar-Ar 연대는 SYB2805-A 백운모 시료에서 4단계의 변화 (90.2% ^{39}Ar)를 보이고 있으며 (Table 2), 고온 영역의 초기 정출기 (weighted mean plateau age)는 181.4 ± 2.0 Ma, 저온 영역의 후기 정출기는 75.9 ± 2.5 Ma이며, 전체 용융 시기 (Total fusion age)는 179.3 ± 2.0 Ma이다 (Fig. 7). 이러한 연대 결과는 금음 광장에서

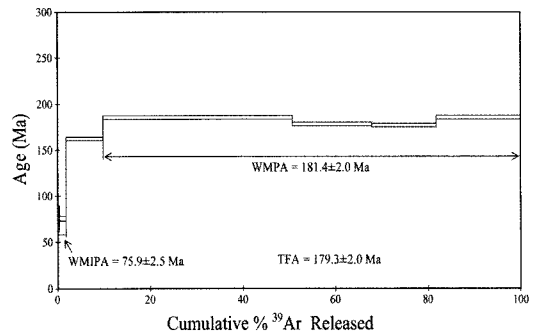


Fig. 7. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step heating age spectra for muscovite collected from Mo-free quartz vein at the Geumeum deposit.

페그마타이트질 맥 (휘수연석 부재)의 백운모는 대략 186~181 Ma를 전후한 쥐라기를 지시하고 있다. 또한, 백운모의 ^{39}Ar 최후 변화 단계는 약 76 Ma로서 온정리 화강암의 K-Ar 및 Rb-Sr 연대에서 제시된 정치시기인 96.0~67.4 Ma와 일치하고 있는 반면에, 몰리브덴 광화작용은 약 54 Ma로서 전혀 상이한 제삼기의 광화시기를 지시하고 있다.

5.3. 연일 지역

양남 분지 내에 위치한 연일 광산 (연일 28/29호 광구; 포함시 장기면 산서리/수성리)은 백악기 퇴적암과 고제삼기 응회암 및 응회질퇴적암으로 구성된 화산암류를 기반으로 하여 후기 흑운모 화강암과 함께 산성 암맥이 관입하고 있으며 (Fig. 8), 분지 전 지역에 고제삼기 중기~중후기에 대비되는 화산퇴적암류로 광범위하게 분포하고 있다 (Lee *et al.*, 1992). 양남분지의 몰리브덴 광상은 오투리 화강암과 호암리 화강암 사이에 위치하는 시대 미상의 화강암체 내에 배태되고 있다 (Fig. 8). 광상 부근은 소규모 암주상 화강암체가

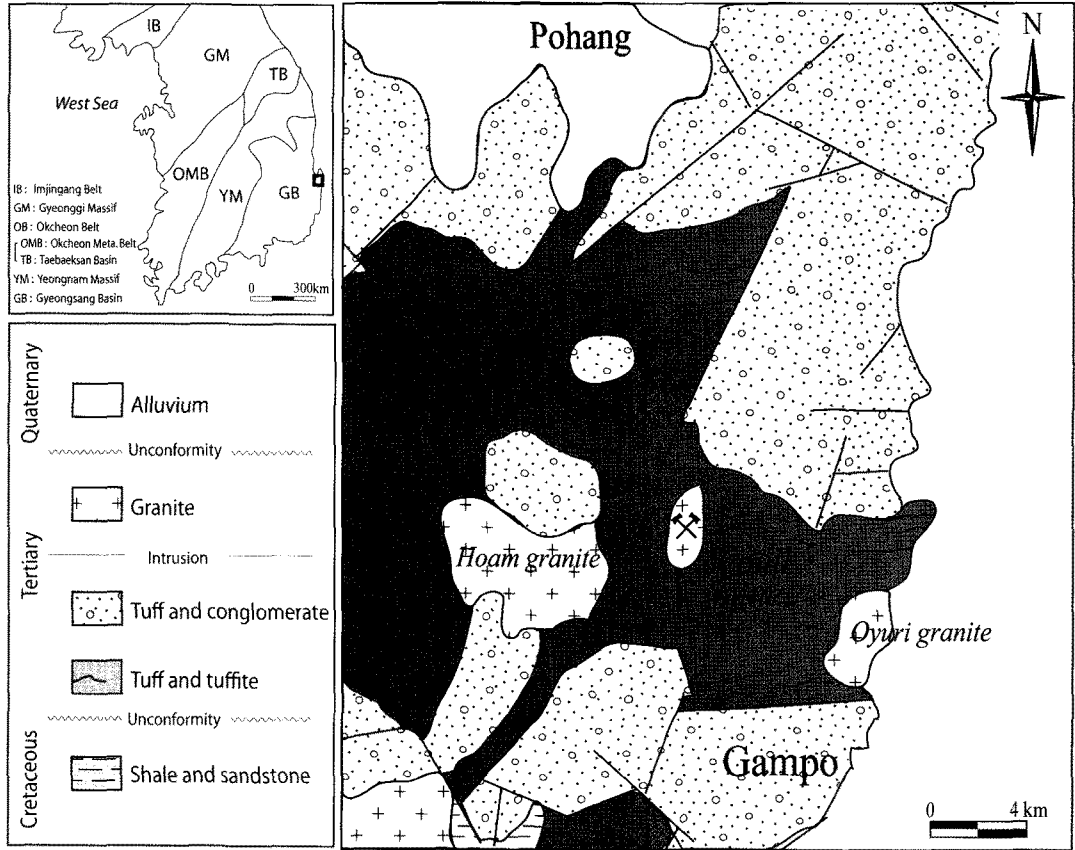


Fig. 8. Geological map of the Yeonil Mo deposit and adjacent regions.

다수 분포하고 있으며, Rb-Ar 연대자료 (Kim *et al.*, 1995)에 의하면 오류리 화강암은 59.5 ± 0.1 Ma과 호암리 화강암은 39.7 ± 0.1 Ma로서 제삼기 화성활동을 지시하고 있다 (Fig. 8).

광화작용은 전반적으로 흑운모 화강암 내에 국한되어 불규칙적인 배태 양상을 보이고 있으나, 약선대를 따라 국부적으로 석영 맥으로 산출되고 있다 (KORES, 2010). 특히, 휘수연석은 흑운모 화강암을 모암으로 하여 수cm~수mm 크기 집합체로 광염된 산점상의 산출 특징 (Fig. 2F)을 보이고 있어 전반적으로 반암형 몰리브덴 광상의 산상과 일치하고 있다. 트렌치 현장에서 확인된 몰리브덴은 주로 열수변질작용에 의한 백운모와 견운모가 광범위하게 나타나고 있으며, 트렌치 현장의 외각부에서는 부분적으로 녹니석과 스�멕타이트질 점토가 확인된다. 특히 흑운모 화강암내 고품위 광석은 K-장석, 백운모와 견운모가 우세한 광물공생관계를 보이며, 이는 전형적인 K-변질작용과 견운모 변질작용으로 해석된다. 트렌치 현장에서 채취한 휘수연석과 밀

집한 공생관계를 보이는 백운모 (YI-1)의 K-Ar 연대측정 결과는 58.4 ± 1.6 Ma로 인접한 오류리 화강암체의 정치시기인 59.5 Ma와 동일한 제삼기 생성연대를 보이고 있다.

6. 토의 및 결론

한반도에서 대보 조산운동과 관련된 몰리브덴-텅스텐 금속광상은 주로 경기·영남 육괴를 중심으로 쥐라기 화강암체의 저반을 따라 광범위하게 전국적인 분포를 보이며, 광맥형 금광상과 페그마타이트형/그라이센형/광맥형 광상으로 배태되고 있다 (Shimazaki *et al.*, 1987; Choi *et al.*, 2005; Choi and Pak, 2007; Ernst, 2010). 기존 자료에 의하면 장수, 금성 및 금음 광산은 공통적으로 쥐라기 광화작용으로 해석되었으나, K-Ar 연대측정 결과에 의하면 장수광산이 단지 약 160 Ma로서 텅스텐을 수반하지 않는 쥐라기 몰리브덴 광상에 해당되었다 (Fig. 9).

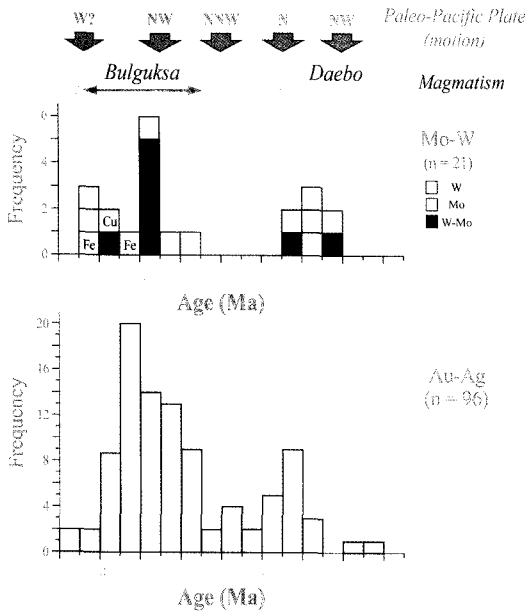


Fig. 9. Age frequency of Mo-W deposits in South Korea. Data compiled from Choi *et al.* (2006), Maruyama *et al.* (1997), Park *et al.* (1988a), Park *et al.* (1988b), Shimazaki *et al.* (1987), So *et al.* (1983), So *et al.*, (1991) and So and Yun (1994).

금성 광산의 암주형 쿼플라리는 국내에서 처음 발견된 광상유형으로 단지 몰리브덴만을 배태하는 광상유형으로, 하부 스키르네는 반화강암질 암주형 쿼플라와 탄산염암의 접촉부에 배태되는 근지성 유형의 스키르네로 백운석질 석회암을 교대한 마그네슘계열 스키르네가 발달하여 있다. 금성 광산은 반화강암의 암주 접촉부로부터 근거리에서 위치한 암주형 Mo-쿼플라 → 근지성 Fe 스키르네 → 점이성 Mo 스키르네 → Fe 산화대와 같은 수직적 변화양상을 보이고 있다. 특히 주석이 수반되지 않는 몰리브덴 광화작용은 성인 측면에서 자철석계열, I형 천부 화성활동과 밀접한 연관성을 갖고 있으며, 특히 마그마의 분화작용이 상당히 진행된 진화 단계로부터 이탈된 광화유체와 밀접한 관계를 보이고 있다(Carten *et al.*, 1993). 금성의 광화유체는 반암형 광산에서 나타나는 전형적인 천부 암체인 쿼플라 암체로부터 직접 유도되고 전반적으로 낮은 암압 조건을 지시하고 있다. 반면에 제천 화강암은 결정분화작용이 미약하게 진행된 암석화학적 특징과 심부 환경 (3.8 kbar)에서 정지된 산출 상태를 보이고 있다 (Cho and Kwon, 1994; Ishihara *et al.*, 2005). 이러한 제천 화강암체의 고결심도 및 암석학적 특징은 몰리브덴 광화작용과 관련된 화성활동과는 광상 성인 관점에서

상당한 차이를 보이고 있다. 금성 몰리브덴 광화작용은 쥐라기 제천 화강암체의 공간적으로 인접한다고 할 지라도 심부에서 정지된 제천화강암보다는 천부에서 정지된 반화강암질 쿼플라질 암체가 관계화성암으로 직접적인 연관성을 보이고 있으며, 잠두 몰리브덴 광체를 수반하는 시추에서 확인된 쿼플라 암체가 직접적으로 관계화성암을 지시하고 있다. 제천-단양 (황강리) 광화대에 분포하는 광상은 전반적으로 무암사/수산/월악산/속리산 화강암체를 형성한 일련의 후기 백악기 화성활동과 관련된 광화작용으로 추정된다 (Fig. 9). 이러한 후기 백악기 광상은 주로 천부 화성활동과 직접적으로 연계되어 있어 원지성 귀금속 광상, 점이성 비철금속 광상 그리고 근지성 철금속 광상은 공간적인 측면에서 동일시기의 화성활동으로부터 유도된 대상 분포양상을 보인다 (Reedman *et al.*, 1973; Choi *et al.*, 2007).

평해 지역의 K-Ar, Rb-Sr, Ar-Ar 연대자료를 종합적으로 비교한 결과, 후기 백악기 암체인 온정리 화강암체를 단일 암체로 간주한다면, 백악기 암석에 쥐라기 페그마타이트질 석영 맥이 배태되는 모순된 결과를 보이고 있다. 또한, 온정리 화강암체는 동측과 서측 암체에서 산상뿐만 아니라 분화도에 따른 암석화학적 상이함이 인지된다. 온정리 화강암의 서측부는 전반적으로 후기 백악기 화성활동을 지시하고 있으나, 동측부는 휘수연석이 수반되지 않는 페그마타이트질 석영 맥의 백운모는 대략 186~181 Ma를 전후한 쥐라기 생성 시기를 지시하고 있다. 반면에 몰리브덴 광화작용과 관련된 견운모는 54.4±1.2 Ma로서 서로 상이한 연대를 보이고 있다. 즉, 온정리의 동측부 암체는 전기 쥐라기 (>186 Ma) 이전에 관입한 암체로 전년대 형성 이후에 쥐라기 (186~181 Ma) 페그마타이트 맥이 관입하였고, 몰리브덴-동을 함유한 광화유체가 제삼기 (54 Ma)에 제차 유입되어 광화작용을 유도한 것으로 추정된다. 평해 지역의 광화작용은 금성 몰리브덴 광산에서 54.4±1.2 Ma, 인접한 영덕 금은광산에서 45.4±1.0 Ma (Lee *et al.*, 1995)이며, 양남 분지에서도 연일 몰리브덴 광산의 광화시기는 58.4±1.6 Ma이다. 즉, 영해 분지의 북측에 인접한 평해 지역과 양남분지의 연일 지역을 중심으로 나타나는 일련의 천부 관입암체와 밀접한 연관성을 보이고 있어 전형적인 근지성 광상 유형을 지시하며, 이는 동해안을 따라 제삼기 분지의 형성 과정과 관련된 화성활동과 함께 수반되는 몰리브덴 광화작용으로 추정된다.

후기 백악기 불국사 화성활동과 관련된 후조산대형

몰리브덴-텅스텐 광상은 주로 옥천 변성대, 태백산분지 그리고 경상분지에 걸쳐서 W-Mo-혼합형 광상이 백상으로 배태되며, 특히 내륙 지역에서는 약 85±5 Ma의 광화시기에 집중되는 경향을 보이고 있다 (Fig. 9). 국내 몰리브덴-텅스텐 광상은 생산실적 자료에 의하면 전반적으로 Mo-단일형 광상보다 W-단일형 광상이 우세한 분포 양상을 보인다. 한편, 경창 및 산내 광산과 같이 단일 광산에서는 상부에서 회중석-흑중석이 우세하지만, 하부에서 휘수연석의 산출빈도가 상대적으로 증가하는 수직적 변화양상을 보인다 (So *et al.*, 1991).

대보 조산운동과 관련된 몰리브덴-텅스텐 광화작용은 경기·영남 육괴를 중심으로 약 173~156 Ma로서 조산운동기 S형 화강암의 저반의 정치시기인 중기 쥐라기~후기 쥐라기 심부 화성활동과 전반적으로 일치하고 있으며, 대보 조산기 말기인 약 165~135 Ma 기간 동안 저반형/전단대형 금광화작용은 집중적으로 배태되고 있다. 후기 백악기부터 나타나는 후조산대형 몰리브덴-텅스텐 광상은 주로 옥천 변성대, 태백산분지 그리고 경상분지에 걸쳐서 집중적으로 배태되고 있으며, 영남·경기 육괴에서는 주로 영동·광주·공주-음성 단층계 그리고 경상분지의 외각 경계부에 밀집된 분포 양상을 보인다. 몰리브덴-텅스텐 광화시기는 약 102~50 Ma로서 전기 백악기 퇴적작용이 우세한 기간과 비교하여 전반적으로 후기 백악기 천부 I형 화성활동이 활발하였던 시기와 일치하고 있으며, Mo-단일형 광상은 전반적으로 광화유체가 환원 조건보다는 산화 환경에서 유리한 정출환경을 보이고 있어 천부 지질환경을 시사하는 백악기 광화작용과 밀접한 관계를 보이고 있다. 또한, 제삼기 몰리브덴 광화작용은 약 58~54 Ma로 양산 단층의 동측을 따라 집중적으로 배태되는 경향을 보이고 있다.

중생대 동안 한반도의 광상 유형은 특정 시기에 우세한 금속종이 유도되는 차별성이 보고되었으나, 몰리브덴-텅스텐 광화작용은 대보 및 불국사 화성활동시기와 각각 조화적으로 일치하고 있다. 반면에 금은광화작용은 전기 백악기 화성활동이 결여되어 있는 기간 동안에도 쥐라기 말기에서 전기 백악기를 거쳐 제삼기까지 지속적으로 유도되고 있다. 이러한 금속광화작용은 기본적으로 고생대 말 대륙 충돌 이후부터 백악기 말까지 고태평양 판의 섭입 양태와 관련된 지체구조의 변화를 반영하여 순차적으로 나타나는 심부와 천부 깊이에서 정치된 화성활동으로부터 유도되는 P-T환경 변화에 기인하여 쥐라기 말기와 후기 백악기에 각각 상이한 지열수계가 형성됨으로써 조산대형과 반암형 광

상으로 유도되었으며, 관입암체의 공간적 근접성에 따라 상대적으로 원거리에서 금은 광상 그리고 근거리에서 몰리브덴-텅스텐 광상이 배태되고 있다. 이는 한반도에서 쥐라기 대보 조산운동기의 화성활동과 후기 백악기 후조산기 불국사 화성활동의 근원물질에 대한 성인적 특성과 함께 정치심도를 반영한 결과이다.

사 사

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원 (KETEP)의 인력양성사업 지원 연구 과제 (No. 20094010100100-11-1-005)와 2008년도 에너지자원기술개발사업 연구 과제 (2008RRD11P020000)이며, 고려대학교 2008년 연구년 과제인 “Mo 광화작용과 화성활동”으로 수행되었으며, 논문 심사에 유익한 조언을 주신 익명 심사위원들께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- Ahn, Y.H., Choi, S.-G., Lee, J.Y., Kim, T.H. and Yoo, I.K. (2009) Genetic environmental of the Geumeum Mo(-Cu) mineralization in Korea. *J. Geochem. Exploration*, v.101, p.1.
- Carten R.B., White, W.H. and Stein, H.J. (1993) High grade granite-related molybdenum system: Classification and origin. In: Kirkham, R.V., Sinclair, W.D., Thorde, R.I. and Duke, J.M. (eds.) *Mineral deposit modeling*. Geol. Ass. Canada Spec. Paper, v.40, p.521-554.
- Chang, K.H., Woo B.G., Lee J.H., Park S.O. and Akira Y. (1990) Cretaceous and early Cenozoic stratigraphy and history of eastern Kyongsang Basin, south Korea. *J. Geol. Korea*, v.26, p.471-487.
- Cheong, C.S., Kwon, S.T., Kim, J.M., Chang, B.U. (1998) Geochemical and isotopic study of the Onjeongri granite in the northern Gyeongsang Basin, Korea: Comparison with Cretaceous to Tertiary granitic rock in the other part of the Gyeongsang Basin and the inner zone of southwest Japan. *J. Petro. Soc. Korea*, v.7, p.77-97.
- Cheong, C.S., Kwon, S.T. and Sagong, H. (2002) Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic investigation of Triassic gneiss 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.
- 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., Kwon, S.-T., Lee, J.-H., So, C.S. and Pak, S.J. (2005) Origin of Mesozoic gold deposits in South Korea. *Island Arc*, v.14, p.102-114.
- Choi, S.-G. and Pak, S.J. (2007) The origin and evolution

- of the Mesozoic ore-forming fluids in South Korea: Their genetic implications. *Econ. Env. Geol.*, v.40, p.517-535.
- Choi, S.-G., Pak, S.J., Kim, S.W., Kim, C.S. and Oh, C.-W. (2006) 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., Park, J.W., Seo, J., Kim, C.-S., Ahn, Y.-H., Shim, J.-K., Kim, N.H. and Yoo, I.K. (2007a) Vertical zoning patterns and magmatic-hydrothermal evolution of the Geumseong Mo deposit, South Korea, In *Digging Deeper*, v.2, p.1327-1330.
- Choi, S.-G., Park, J.W., Seo, J., Kim, C.S., Shin, J.-K., Kim, N.H., Yoo, I.K. Lee, J.Y. and Ahn, Y.-H., (2007b) Hidden porphyry-related ore potential of the Geumseong Mo deposit and its genetic environment. *Econ. Env. Geol.*, v.40, p.1-14.
- Choo, S.H., Jin, M.S., Yun, H.S. and Kim, D.H. (1982) Rb-Sr age determinations on granite gneiss and granite in Seosan, Onjeongri granite and Mesozoic granites along the east coast, Korean peninsula. *Korea Inst. Geosci. Min. Resource, Geosci. Min. Resorce*, v.13, p.193-208.
- Dill, H.G. (2010) The chessboard classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews*, v.100, p.1-420.
- Ernst, W.G. (2010) Late Mesozoic subduction-induced hydrothermal gold deposits along the eastern Asian and northern Californian margins: Oceanic versus continental lithospheric underflow. *Island Arc*, v.19, p.213-219.
- 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.
- 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.
- Ishihara, S., Jin, M.S. and Terashima, S. (2005) Molybdenite-related adakitic granitoids from non-island arc setting: Jecheon pluton of South Korea. *Resource Geol.*, v.55, p.385-396.
- Ishihara, S., Kajiwara, Y. and Jin, M.S. (2002) Possible carbonate origin of ore sulfur from Geumseong Mo deposits, South Korea. *Resource Geol.*, v.52, p.279-282.
- Jin, M.S. (1995) Geochronology and cooling history of the Mesozoic granite pluton in the central part of the Ogcheon fold belt, South Korea. *J. Petrol. Soc. Korea*, v.4, p.153-167.
- Jin, M.S., Kim, S.J., Shin, S.C., Choo, S.H. and Chi, S.J. (1992) Thermal history of the Jecheon granite pluton in the Ogcheon fold belt, south Korea. *J. Petrol. Soc. Korea*, v.1, p.49-57.
- Jin, M.S., Lee, Y.S. and Ishihara, S. (2001) Granitoids and their susceptibility in South Korea. *Resource Geol.*, v.51, p.189-203.
- Kim, G.-S., Kim, J.-Y., Jung, K.K., Hwang, J.-Y. and Lee, J.-D. (1995) Rb-Sr whole rock geochronology of the granitic rocks in the Kyeongju-Gampo area, Kyeongsangbugdo, Korea. *J. Korean Earth Science Society*, v.16, p.272-279.
- Kim, S.J., Lee, H.K., Lee, C.H. and Itaya, T. (1999) K-Ar age and geochemistry of granitic rocks in the north-eastern Gyeongsang Basin. *Econ. Env. Geol.*, v.32, p.141-150.
- Kim, Y.-H., Kee, W.S. and Jin, G.M. (2010) Geological structures of Jecheon area, contact area between Ogcheon belt and Gyeonggi massif. *Econ. Env. Geol.*, v.43, p.637-648.
- Koh, J.S. and Yun, S.H. (2003) The geochemistry of Yuk-sipryeong two mica leucogranite, Yeongnam Massif, Korea. *J. Petrol. Soc. Korea*, v.12, p.119-134.
- KORES (2005) Detailed Geological Survey Report (molybdenite: Pyeonghae area). Korea Resource Corporation, p.15-21.
- KORES (2006) Detailed geological survey report (molybdenite: Jaechon area). Korea Resource Corporation, 100p.
- KORES (2010) Detailed Geological Survey Report (molybdenite: Yeonil area). Korea Resource Corporation, 59p.
- 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, H.K., Moon, H.S., Min, K.D., Kim, I.S., Yun, H. and Itaya, T. (1992) Paleomagnetism, stratigraphy and geological structure of the Tertiary Pohang and Changgi; K-Ar ages for volcanic rocks. *Econ. Env. Geol.*, v.25, p.337-349.
- Lee, J. Y. and Lee, J. G. (1992) A geochemical study on trace elements of the Onjeong granite in relation to mineralization, Pyeonghae area. *J. Kor. Min. Geol.*, v.25, p.245-258.
- Lee, S.G., Shin, S.C., Kim, K.H., Lee, T.J., Koh, H.J., Song, Y.S. (2010) Petrogenesis of three Cretaceous granites in the Okcheon metamorphic belt, South Korea: Geochemical and Nd-Sr-Pb isotopic constraints. *Gondwana Research*, v.17, p.87-101.
- 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.
- Meinert, L. D. (1993) Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada Reprint Series*, v.6, p.117-134.
- 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.
- Reedman, A.J., Fletcher, C.J.N., Evans, R.B., Workman, D.R., Yoon, K.S., Rhyu, H.S., Jeong, S.H., and Park, J.N. (1973) The geology of the Hwanggangri mining district, Republic of Korea. Anglo-Korean Mineral Exploration Group, Geological and Mineral Institute

- Korea, 119p.
- Shibata, K., Park, N.Y., Uchiumi, S. and Ishihara, S. (1983) K-Ar ages of the Jecheon granitic complex and related molybdenite deposits, South Korea. *Mining Geol.*, v.33, p.193-197.
- Shimazaki, H., Shibata, K., Uchiumi, S., Lee, M.S. and Kaneda, H. (1987) K-Ar ages of some W-Mo deposits and their bearing on metallogeny of South Korea. *Mining Geol.*, v.37, p.395-401.
- Shin S. C. and Nishimura, C. (1993) Thermal and uplift histories of Mesozoic granites in southeast Korea: New fission track evidences. *J. Petrol. Soc. Korea*, v.2, p.104-121.
- So, C.S., Rye, D.M. and Shelton, K.L. (1983) Carbon, hydrogen, oxygen and sulfur isotope and fluid inclusion study of the Weolag tungsten-molybdenum deposit, Republic of Korea: Fluid histories of metamorphic and ore-forming events. *Econ. Geol.* v.78, p.1551-1573.
- So, C.S., Shelton, K.L., Chi, S.J. and Yun, S.T. (1991) Geochemical studies of the Gyeongchang W-Mo mine, Republic of Korea: Progressive meteoric water inundation of a magmatic hydrothermal system. *Econ. Geol.*, v.86, p.750-767.
- So, C.S. and Yun, S.T. (1994) Origin and evolution of W-Mo-producing fluids in a granitic hydrothermal system: Geochemical studies of quartz vein deposits around the Susan granite, Hwanggangri district, Republic of Korea. *Econ. Geol.*, v.89, p.246-267.
- Turek, A. and Kim, C.-B. (1995) U-Pb zircon ages of Mesozoic plutons in the Damyang-Geochang area, Ryeongnam massif, Korea. *Geochemical Journal*, v.29, p.243-258.

2011년 2월 1일 원고접수, 2011년 4월 18일 게재승인