

금성 몰리브데늄광상의 잠두 반암형 광체에 대한 부존가능성과 성인적 환경

최선규^{1*} · 박정우¹ · 서지은¹ · 김창성¹ · 신종기² · 김남혁² · 유인걸² · 이지윤¹ · 안용환¹

¹고려대학교 지구환경과학과, ²대한광업진흥공사

Hidden Porphyry-Related Ore Potential of the Geumseong Mo Deposit and Its Genetic Environment

Seon-Gyu Choi^{1*}, Jung Woo Park¹, Jieun Seo¹, Chang Seong Kim¹, Jong Ki Shin²,
Nam Hyuck Kim², In Kol Yoo², Ji Yun Lee¹ and Yong Hwan Ahn¹

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

²Korea Resources Corporation

The Geumseong mine is located near the southern margin of the Jurassic Jecheon granitoids collectively with the Cambro-Ordovician mixed dolostone-limestone series of the Yeongweol Group, Choseon Supergroup. Here, two spatially distinct types of skarn formation have been observed. The upper transitional skarn is the calcic Mo skarn which has the mineral assemblage of garnet+hedenbergite+epidote ± wollastonite ± magnetite ± hematite ± amphibole ± chlorite ± vesuvianite within the calcite marble. On the other hand, the lower proximal skarn occurs as a discordant magnesian Fe skarn at the contact of Mo-bearing aplitic cupolas with unidirectional solidification texture (UST) within the dolomitic marble. The magnesian Fe skarn has the mineral assemblage olivine+diopside+magnetite+tremolite+serpentine+talc+chlorite ± phlogopite. The formation of two different types of skarn and ore mineralization in Geumseong mine have been attributed to multistage and complex metasomatic replacements that ultimately resulted in silicate-oxide-sulfide sequence of metasomatism. An early prograde stage with anhydrous skarn minerals such as olivine, clinopyroxene and/or garnet with magnetite, formed from high temperature (about 500° to 400°C) at an environmental condition of low CO₂ fugacity (XCO₂<0.1) and 0.5 kbar. The later retrograde stage with hydrous silicates such as amphibole, serpentine, phlogopite, epidote and chlorite with molybdenite or hematite, formed from relatively lower temperature (about 400° to 300°C).

Key words : Calcic skarn, magnesian skarn, Geumseong, porphyry-style Mo mineralization, unidirectional solidification texture (UST)

금성광상은 캄브리아기-오르도비스기 조선누층군 중 영월층군의 탄산염암과 쥐라기 체천화강암체와의 남측 경계부를 따라 백운석질 석회암과 석회암의 조성차이를 반영하여 서로 다른 유형의 스카른대가 배태되고 있다. 금성광상에서 스카른화작용은 전반적으로 규산염광물-산화광물-황화광물이 순차적으로 교대·정출되는 특징을 보이고 있으며, 공간적으로 상부 스카른에 배태된 점이성 스카른형 Mo광상과 하부 스카른에 배태된 근지성 스카른과 함께 수반되는 단방향 결정성장조직의 쿠폴라형 Mo광상으로 양분된다. 금성광상의 상부 스카른대는 휘수연석 ± 자철석 ± 적철석과 함께 석회암이 교대된 Ca계열 스카른광물인 석류석 + 단사회석 + 녹렴석 + 양기석 + 녹니석 ± 규회석 ± 사장석 ± 베스비아나이트의 광물조합을 보이고 있는 반면, 하부 스카른대는 자철석과 함께 백운석질 석회암이 교대된 Mg계열 스카른광물인 감람석 + 투회석 + 투각섬석 + 금운모 + 사문석 ± 녹니석 ± 활석으로 구성되어 있다. Ca계열 및 Mg계열 스카른광물의 공생 관계 및 열역학적 자료를 종합적으로 검토한 결과, 전진 스카른 단계 스카른화 작용은 약 0.5 kbar, XCO₂<0.1의 조건의 약 500°~400°C 온도범위에서 진행되었으며, 후퇴 스카른 단계 함수규산염광물의 안정영역은 약 400°~300°C 온도범위로 추정된다.

주요어 : Ca계열 스카른, Mg계열 스카른, 금성, 반암형 Mo광화작용, 단방향 결정성장조직

*Corresponding author: seongyu@korea.ac.kr

1. 서 언

몰리브데늄 광상은 전반적으로 화강암의 성인적 특성에 따라 I형 화강암과 관련된 산화환경의 반암형 Cu-(Mo) 및 Mo-(Cu)광상, 그리고 S형 화강암과 관련된 환원환경의 반암형 W-(Mo±Sn)광상으로 구분된다. 이러한 화강암 유형은 대륙형 섭입대에서 내륙지역으로 갈수록 칼크-알칼리계열에서 알칼리계열 마그마활동으로 공간적 변화추이와 함께 반암형 Cu-(Mo)광상에서 반암형 Mo광상으로 금속종의 변화양상을 보이고 있다 (Carten *et al.*, 1993). 중생대 동안 한반도는 자원지질학적 관점에서 대륙형 섭입대의 전형적인 조구조 환경과 함께 다양한 화성활동이 수반되고 있으며(Choi *et al.*, 2006), 이와 연계된 광화작용으로 세계적 규모의 스키른 광상인 상동광산이 부존되어 있다. 또한, 상동광산에서는 기존에 개발되었던 스키른광체의 하부에서 몰리브데늄 광체가 확인되었을 뿐만 아니라(Moon, 1991), 최근에는 금성, 신예미, 삼울소보 광산에서 잠두광체의 부존 가능성이 검토되고 있다(Choi, 2006). 이러한 국내 몰리브데늄 광물자원의 부존 가능성은 관계 화성암의 암석화학적 특성 및 열수변질대, 광물공생관계, 생성환경에 대한 연구와 함께 지체구조와 관련된 광상 성인연구가 필수적으로 요구되고 있다.

금성광상의 Mo광체는 영월형 탄산염암이 교대된 괴

상 단사휘석-석류석 스키른대에 주로 배태되고 있으며 (Park, 1982), 80년대에는 제천화강암과 탄산염암의 접촉부를 중심으로 스키른광체에 대한 시추 탐사가 중점적으로 실시되었으나, 2006년 대한광업진흥공사에서 수행된 심부시추를 통하여 국내 처음으로 새로운 광상유형인 큐폴라형 Mo광체가 확인되었으며(KORES, 2006), 이러한 Mo광체는 반암형 광화작용과 밀접한 연관성을 보이는 것으로 추정되고 있다. 2006년 시추 탐사결과를 통하여 상부 스키른 광체뿐만 아니라 잠두광체인 반암형 Mo광체의 심부 부존 가능성이 확인된 것으로 Mo광화작용의 천부 지열수계 성인모델(Choi, 2006)을 적용한 체계적 탐사와 함께 국내 몰리브데늄 광물자원의 잠두광체에 대한 재평가가 요구되는 시점이다. 따라서 본 연구는 고려대학교 전략광물자원 연구센터와 대한광업진흥공사가 공동으로 수행하였고, 기존 발표자료(Park, 1982)와 함께 2006년 실시된 시추 시료를 체계적으로 비교분석하여 금성 스키른대의 분포특성과 함께 잠두광체에 대한 Mo광화작용과의 관계 및 광화시기를 종합적으로 정립하는데 목적이 있다.

2. 지질 및 광상 개요

금성광상의 광역 지질은 선캠브리아이던 경기변성복합체, 시대미상의 옥천계 변성퇴적암류와 고생대 조선

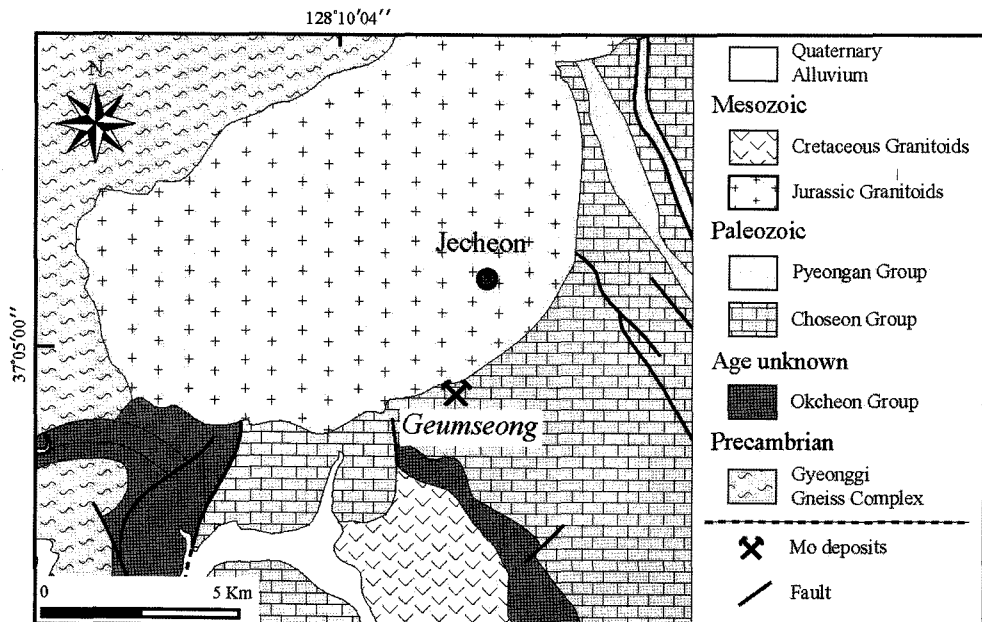


Fig. 1. Generalized geological map of the Geumseong Mo mine (modified from Kim *et al.*, 2001).

및 평안누층군의 퇴적암류 그리고 후기에 관입한 쥐라기 및 백악기 화강암류로 구성된다(Fig. 1). 선캠브리아이던 변성복합체는 경기육괴에 속하며, 주로 호상편마암 및 흑운모 편마암으로 구성되어 있다. 옥천계 서창리층은 주로 석영-운모 편암, 녹니석 편암 및 천매암으로 구성되고, 조선누층군과 정합적인 관계로 보고된 바 있다(Kim *et al.*, 1967). 금성광산 주변의 암상은 주로 조선누층군에 속하는 홍월리층과 삼태산층의 탄산염암 그리고 쥐라기 제천화강암체가 관입하고 있다. 홍월리층은 박층 석회암과 함께 회백색 괴상 백운석질 석회암으로 구성되며, 삼태산층은 하부로부터 석회암, 석회규산염암, 이질 판상석회암 및 혼펠스화된 이암으로 층서적 변화가 언급된 바 있다(Kim *et al.*, 1967). 평안누층군은 적색~녹회색 사암 및 세일로 구성된 만항층과 세립질 사암, 실트암, 세일로 구성된 금천층이 국부적으로 분포되고 있다. 백악기 화강암류에 속하는 무암사 화강암은 주로 중립질 흑운모화강암과 흑운모 반화강암질 반상화강암으로 구성된다.

쥐라기 제천화강암체(장경; 약 10 km)는 거정질 반상조적(반정크기; 5~15 cm)을 갖는 조립질 흑운모 화강암과 조립질 흑운모 화강섬록암으로 구성되며(Jin *et al.*, 1992), 전반적으로 자철석계열 I형 아다카이트질 암석화학적 특성이 보고된 바 있다(Ishihara *et al.*, 2005). 또한, 제천화강암류의 생성연대는 K-Ar연령의 179~169 Ma(Shibata *et al.*, 1983)와 Rb-Sr연령의 203 Ma(Jin *et al.*, 1992)로서 쥐라기 화성활동으로 해석되며, 각섬석 압력계로 추정된 정치심도는 3.8 kbar로 비교적 심부 지질환경에서 고결된 암체로 간주되고 있다(Cho and Kwon, 1994).

국내 중요 광화대로 보고된 황강리 광화대와 인접한 제천지역은 제천화강암과 석회암간의 접촉대를 따라 스카른형 광상과 열수교대형 광상이 다수 분포하고 있으며, 금성 Mo광상 이외에도 금성면 석동골, 중전리를 중심으로 연, 아연, 철, 동, 텅스텐과 같은 금속종이 배태되고 있다(Kim *et al.*, 1967; Reedman *et al.*, 1973). 제천화강암의 남측 경계부에 위치한 금성광산은 '78년부터 '87년까지 단사회석-석류석 스카른대에 배태된 Mo광체를 대상으로 개발되었으며, 대한광업진흥공사에서 발간된 광업요람에 의하면 총생산량이 MoS_2 (90%) 기준으로 약 1,507 t으로 국내 2위의 폴리브데늄 광산에 해당된다. 금성 Mo광상의 광화시기는 생성연대에 대한 절대연령은 보고된 바 없으나, 공간적으로 인접한 제천화강암체가 관계화성암으로 간주되어 대보화성활동과 관련된 쥐라기 광화작용으로 기재되어 있다(Shibata *et*

al., 1983; Jin *et al.*, 1992; Ishihara *et al.*, 2005).

최근 금성광상 주변의 스카른대를 중심으로 2006년도에 실시된 대한광업진흥공사의 시추시료에서 흑운모 화강암, 반화강암질 암맥(Fig. 2A)과 휘수연석을 함유하는 암주형 규폴라(Fig. 2B)와 같이 다양한 산상을 보이는 소규모 암체가 다수 확인되었다(KORES, 2006). 흑운모 화강암은 주로 세립질 석영, 알칼리 장석, 사장석, 연녹색 흑운모, 소량 백운모로 구성되며, 변질정도에 따라 장석류의 견운모화작용과 함께 흑운모의 녹니석화작용이 국부적으로 확인되는 반면, 반화강암은 석영 및 알칼리 장석과 함께 이차 변질광물로 백운모 및 견운모가 다량 관찰된다. 특히, 우백질 규폴라형 암체는 전반적으로 빗살 석영질 층(comb-layered quartz(CLQ))과 반화강암질 층(aplitic layer(AL))의 미세한 호층구조(Fig. 2C)를 보이는 반화강암으로 구성되고 있다(Choi, 2006). 이러한 암체는 국내에서 처음 발견된 규폴라형 Mo광체로서 혼합층상구조의 복합적인 산상과 함께 다량의 휘수연석이 수반되고 있어 반암형 Mo광체(Kirkham and Sinclair, 1988)의 부존가능성을 검토할 필요가 있다. 기존 생산실적과 함께 2006년 시추시료에서 확인된 결과(KORES, 2006)에 의하면 Mo-Cu 금속비는 전형적인 Mo형(부화된 Mo-결핍된 Cu) 광상유형으로 이러한 유형의 광상은 광상학적 측면에서 결정분화작용이 매우 진행된 I형 화강암의 최종 분화단계에서 유리된 광화유체가 직접 관여하는 것으로 보고되고 있다(Carten *et al.*, 1993).

3. 스카른대의 공간적 분포와 Mo광상

80년대 개발된 광체는 스카른대에 광염상으로 배태된 Mo광상으로 중심부로부터 괴상 단사회석-석류석대 → 괴상 규회석대 → 층상 규회석대 → 층상 단사회석대 → 석회암으로 스카른대의 변화후이가 언급된 바 있다(Park, 1982). 2006년도에 수행된 시추결과(KORES, 2006)에 의하면 기존 상부 스카른대(Fig. 2D, E)와 함께 심부 시추시료에서 하부 스카른대(Fig. 2F)가 확인되었다. 이러한 하부 스카른대는 상부 스카른대로부터 약 100 ± 30 m 하부에 배태되며, 반화강암질 암체와 백운암질 석회암의 접촉부를 따라 수 m 두께로 산출되고 있다(Choi, 2006). 또한 하부 스카른대는 전반적으로 균질한 스카른 공생광계를 보이고 있으며, 자철석과 스카른 광물간에 미세한 호층구조의 특징을 나타내고 있다(Fig. 2F). 상부 및 하부 스카른대의 유형은 관계화성암의 공간적 근접성에 따라 하부 스카른대의 근

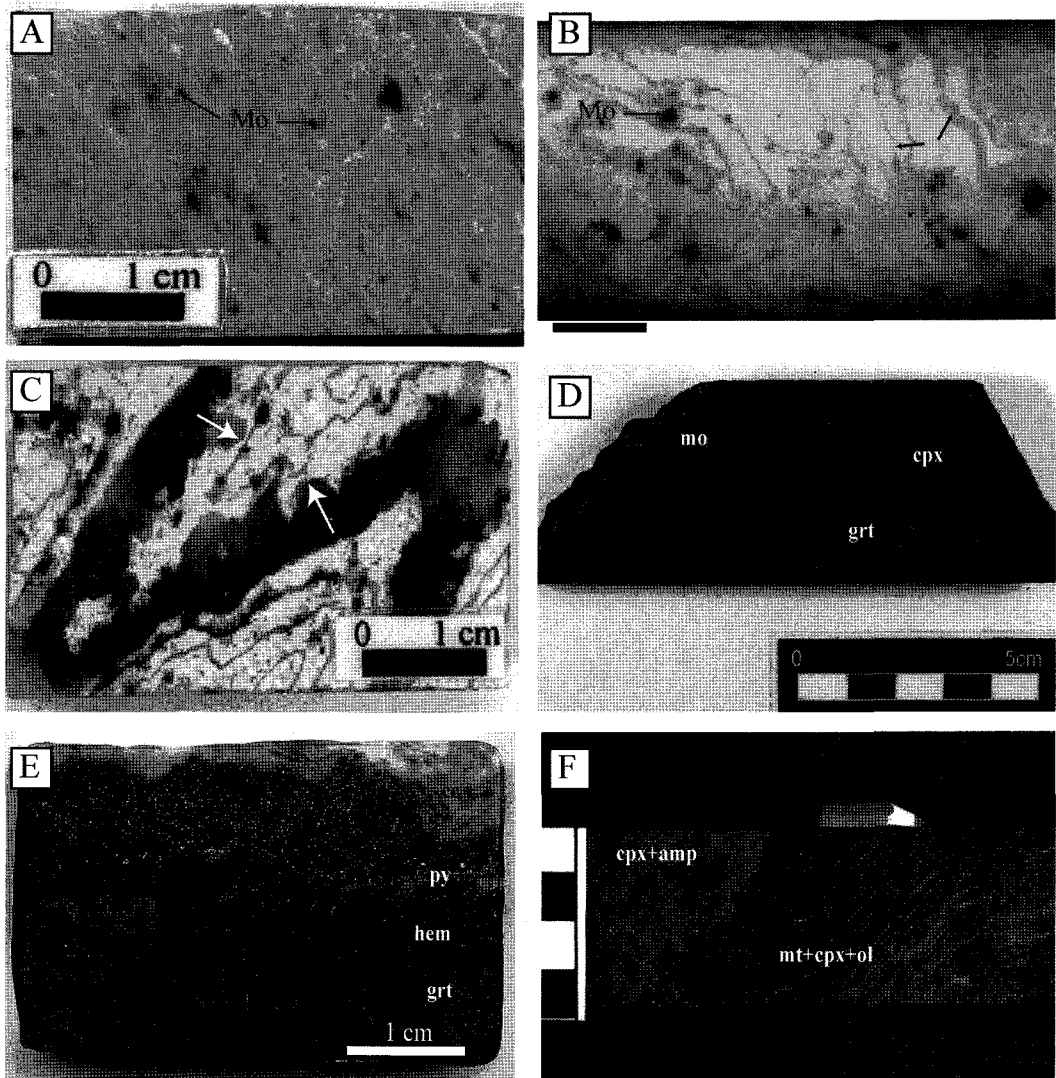


Fig. 2. Representative slab photographs in the Geumseong mine. (A) Mo-bearing aplitic dyke mainly composed of quartz and alkali feldspar. (B) Typical crenulate comb quartz layers and aplitic layers in cupola. Black arrows indicate abundant crenulate comb quartz layers. Note the molybdenite mineralization in quartz layer. (C) Comb quartz layer with planar bases and euhedral crystal terminations in aplite. White arrows show the growth direction of comb quartz. (D) Representative sample of upper skarn dominated by the garnet-clinopyroxene zone with molybdenite. (E) A specimen showing the garnet zone in upper skarn. Here note the development of garnet-hematite-pyrite sequence at the contact of marble. (F) Typical lower skarn primarily made up of clinopyroxene, olivine and interbedded magnetite. Abbreviations; amp=amphibole, cc=calcite, cpx=clinopyroxene, grt=garnet, hem=hematite, mo=molybdenite, mt=magnetite, ol=olivine, py=pyrite and qtz=quartz.

지성(I형) 스카른과 상부 스카른대의 점이성(II형) 스카른으로 구분되고, 탄산염암(백운석질 석회암 또는 석회암)의 조성차이에 따라 상이한 스카른 광물조합을 보이며 Mg계열 스카른과 Ca계열 스카른으로 분류된다.

2006년 시추시료를 중심으로 검토된 연구결과 상부 스카른대에서는 층상 스카른대의 부존이 전반적으로 미

약한 반면, 괴상 단사휘석·석류석대 또는 석류석대가 전반적으로 높은 산출빈도를 보이고 있으며, 하부 스카른대는 반화강암질 규플라형 암체를 중심으로 협소한 분포를 보이고 있다. 이는 주변모암인 삼태산층 및 홍월리층을 구성하는 층서 변화와 함께 탄산염암 조성 차이를 반영한 결과로 해석되며, 휘수연석은 전반적으

로 단사회석·석류석대와 쿼폴라형 암체를 중심으로 부존되고 있다. 주요 스카른광물에 대한 전자현미분석(EPMA)은 고려대학교 전략광물자원 연구센터의 JXA-8600SX(JEOL)에 부착된 Oxford사 INCA-6025 EDS를 사용하였고, 가속전압과 시료전류의 분석조건은 각각 15.0 kV, 5.0 nA이며, 분석 영역과 시간은 5 μ m, 100초이고, XPP보정법이 사용되었다.

3.1. 상부 스카른대

상부 스카른대는 전반적으로 괴상 석회암 또는 이질 판상 석회암을 교대한 Ca계열 스카른으로 구성되며, 스카른대의 중심부에서 주변부로 갈수록 스카른광물의 공생관계 및 산출빈도뿐만 아니라, 석류석, 단사회석 및 각섬석과 같은 스카른광물은 다양한 조성변화를 보이고 있다. 상부 스카른대는 수직적으로 상부의 호상 스카른과 하부의 괴상 스카른으로 세분된다. 특히 호상 스카른대의 층상구조는 이질 판상석회암이 교대된 것으로 추정되며, 스카른화작용 시 이질 층과 석회질 층

의 조성차이에 따라 서로 다른 스카른 광물이 생성된 것으로 사료된다. 또한 상부 스카른대는 중심부의 단사회석·석류석대로부터 석회암의 접촉 주변부에서 석류석대로 변화되는 점이적인 대상 분포의 특징을 보이고 있다. 스카른 및 광석광물의 공생관계는 중심부인 단사회석·석류석대를 따라 휘수연석이 주로 광염 상으로 산출되는 반면, 자철석, 적철석 및 황철석은 주변부인 석류석대를 중심으로 배태되는 특징을 보이고 있다.

단사회석·석류석대 상부 스카른의 중심부에 배태되는 단사회석·석류석대는 전반적으로 짙은 녹색색을 띠고 있으며(Fig. 2D), 주로 단사회석+석류석+녹렴석+석영+양기석+정장석±방해석±철석의 광물조합을 보이고 있다. 이러한 스카른광물의 양적관계는 전진 스카른단계에서 형성된 단사회석과 석류석이 후기 후퇴 스카른 단계에서 정출·교대된 녹렴석+석영+양기석에 비하여 우세한 경향을 보이고 있다. 단사회석·석류석대에서 단사회석:석류석 부피(vol. %)비는 약 5:1~2:1 정도로 단사회석의 산출빈도가 현저하게 높은 특징을 보이고

Table 1. Representative clinopyroxene, garnet and amphibole compositions of the upper skarn in the Geumseong deposit.

Calcic Skarn												
clinopyroxene					garnet				amphibole			
	cpx-grt zone		grt zone			cpx-grt zone		grt zone			grt zone	
SiO ₂	49.07	48.67	51.05	50.60	SiO ₂	37.49	36.53	36.15	34.97	SiO ₂	51.88	53.92
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	TiO ₂	0.90	0.00	0.52	0.00	Al ₂ O ₃	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.31	0.29	0.20	0.38	Al ₂ O ₃	14.49	7.11	8.55	0.41	FeO*	23.83	13.66
FeO*	21.82	22.31	14.24	14.89	Fe ₂ O ₃ **	13.12	23.51	20.43	31.26	MnO	2.26	4.39
MnO	2.57	2.64	2.06	2.07	MnO	1.70	1.26	1.01	2.57	MgO	7.30	12.84
MgO	3.34	3.26	8.35	7.64	MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	CaO	12.34	12.37
CaO	22.93	22.65	24.06	23.57	CaO	32.84	31.76	33.85	30.96	Na ₂ O	0.00	0.30
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	Total	100.54	100.17	100.51	100.17	K ₂ O	0.00	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	O	=24				Total	97.61	97.48
Total	100.04	99.82	99.96	99.15	Si	5.897	5.984	5.837	5.933	O	=23	
O	=6				AlIV	0.103	0.016	0.163	0.067	Si	7.963	7.959
Si	1.975	1.966	1.979	1.986	AlVI	2.581	1.356	1.463	0.015	AlIV	0.000	0.000
Al	0.015	0.014	0.009	0.018	Fe ³⁺	1.552	2.895	2.480	3.988	AlVI	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.734	0.754	0.462	0.489	Ti	0.106	0.000	0.063	0.000	Fe ³⁺	0.046	0.056
Mg	0.200	0.196	0.483	0.447	Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	Mg	1.670	2.826
Mn	0.088	0.090	0.068	0.069	Mn	0.226	0.175	0.138	0.369	Fe ²⁺	3.014	1.630
Ca	0.989	0.980	0.999	0.991	Ca	5.534	5.574	5.856	5.628	Mn	0.294	0.549
Cations	4.000	4.000	4.000	4.000	Cations	16.000	16.000	16.000	16.000	Ca	2.030	1.956
										Na	0.000	0.086
Jo	8.6	8.7	6.7	6.9	Ad	40.4	75.6	63.8	97.9	K	0.000	0.000
Di	19.6	18.8	47.7	44.5	Gr	55.6	21.3	33.8	0.0	Cations	15.016	15.063
Hd	71.8	72.5	45.6	48.7	Pyr	0.0	3.0	0.0	0.0	Mg#***	35.3	62.6

*Total Fe as FeO.

**Total Fe as Fe₂O₃.

***Mg#=(100×Mg/(Mg+Fe)).

Abbreviations; Ad=andradite, Di=diopside, Gr=grossular, Hd=hedenbergite, Jo=johannsenite, Pyr=pyrralspite.

있다. 석류석은 수 cm 크기의 복합결정으로 산출되며, 단사회석에 비하여 상대적으로 후기에 정출된다. 단사회석-석류석대의 광석광물은 주로 휘수연석과 황철석으로 구성되며, 휘수연석은 침상결정의 집합체로서 광염상으로 산출되는 특징을 보인다(Fig. 3A). 또한, 석영과 녹립석은 휘수연석과 함께 단사회석과 석류석 결정의 입자사이를 충전하고 있다.

단사회석은 자형 또는 반자형 결정으로 불규칙한 소광특성을 보이며, 전반적으로 높은 철 함량의 조성범위($Hd_{68.8-88.2}$)와 함께 MnO 가 1.5~2.7 wt. %정도로 미량 함유되어 있다(Table 1). 석류석은 전반적으로 등방성의 광학적 특징을 보이며, 간혹 미약한 누대구조를 나타내고 있다. 석류석의 화학성분은 정출시기에 따라 Fe-Al 간의 조성변화를 보이며, 전반적으로 중간 조성의 $Ad_{40.4-66.8}$ 부터 $Ad_{70.8-94.0}$ 으로 철 함량이 현저하게 증가되는 변화양상을 보이고 있다. 이러한 스카른광물의 정출과 관련된 광화유체는 스카른광물의 유형 및 화

학조성에 따른 양적관계를 통하여 Mg와 Fe^{+3} 성분에 대하여 Al와 Fe^{+2} 성분이 부화된 진화양상을 보이고 있다.

석류석대 상부 스카른의 주변부에 배태되는 석류석대는 전반적으로 짙은 적갈색, 괴상 스카른의 전형적인 산상을 보이고 있으며(Fig. 2E), 석류석+단사회석+녹립석+자철석±적철석±양기석±녹니석±방해석의 고온·중온성 광물조합을 보이고 있다. 석류석은 전반적으로 세립질, 자형 결정이 현저하게 높은 산출빈도를 보이고 있는 반면, 단사회석은 반자형 결정으로 극소량 확인되며 석류석 결정내에 극미립 포획물로 산출된다. 특히 석류석은 육안관찰시 석회암에 근접할수록 담갈색 석류석에서 담황(녹)색 석류석으로 색상변화가 관찰된다.

자철석은 전반적으로 석류석 결정의 균열부를 따라 세맥으로 절단 또는 석류석의 결정입자사이를 충전하고 있으며(Fig. 3B), 부분적으로 적철석화 되어 있다. 또한 적철석은 석회암과 접촉부에서 각섬석, 녹니석,

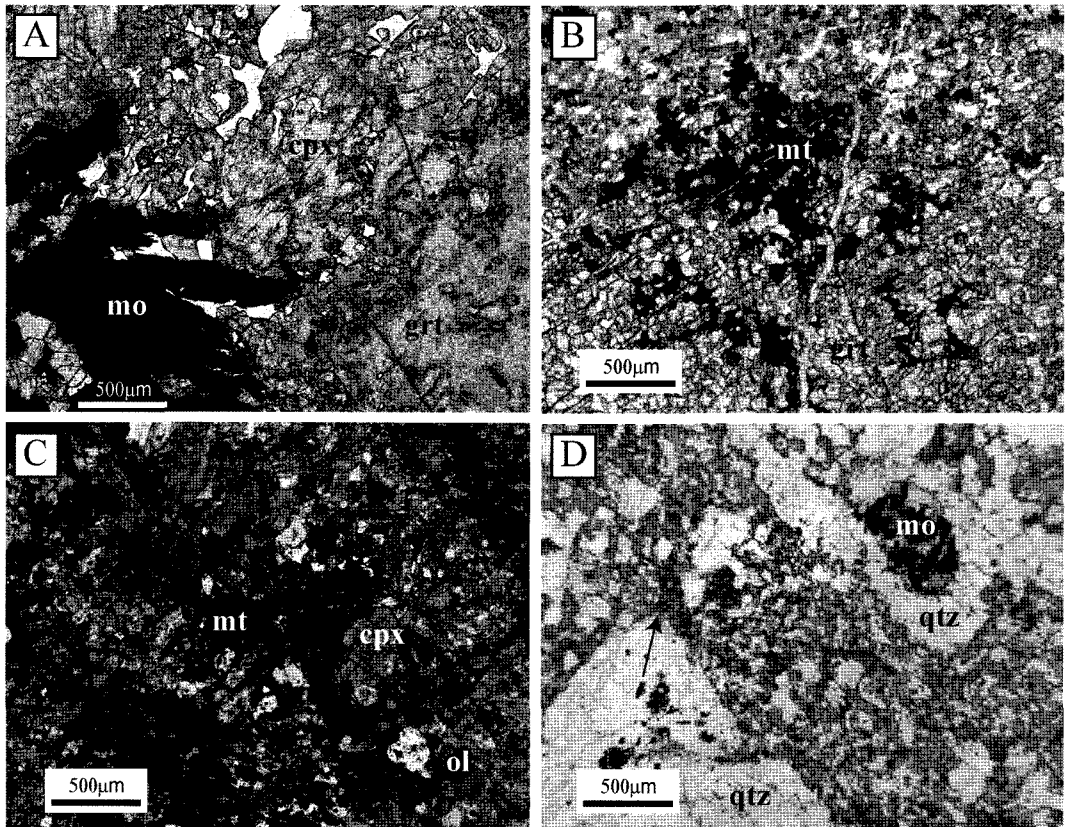


Fig. 3. Representative microphotographs of skarns in the Geumseong mine. (A) Clinopyroxene-garnet zone with Mo in upper skarn. (B) Garnet zone in upper skarn. Note some garnets are filled by magnetite. (C) Typical lower skarn with layers of magnetite and clinopyroxene±olivine. (D) Comb quartz layer in aplitic cupola containing molybdenite. Black arrow indicates the growth direction of comb quartz. See Fig. 2 for abbreviations.

녹렴석, 방해석, 석영과 함께 수 cm 폭으로 산출되지만, 석회암에서는 녹니석-방해석과 함께 자형의 황철석이 광염 상으로 산출된다. 즉, 석류석대로부터 석회암의 접촉대로 스카른 및 광석 광물조합은 석류석+자철석→자철석+적철석+각섬석±녹렴석±경철석→적철석+녹니석+방해석±경철석→황철석+녹니석+방해석→재결정화된 방해석으로 변화되고 있다.

석류석대에서 단사휘석은 단사휘석-석류석대에 대하여 Mg함량이 부화된 조성변화(Hd_{45.6-61.1})와 함께 1.8~2.2 wt. % MnO의 함유되어 있다(Table 1). 석류석은 수 mm크기의 결정이 균집상태로 산출되며, Fe⁺³ 함량이 현저하게 증가되어 Ad_{62.9-100.0}의 조성특징을 보인다. 특히 석류석대내에서도 담갈색 석류석은 전반적으로 Ad_{62.9-93.8}의 조성변화를 보이는 반면, 석회암과 접촉부에서 산출되는 담황(녹)색 석류석은 매우 높은 철 함량(Ad_{76.5-100.0})을 나타내고 있다. 이러한 스카른광물의 정출과 관련된 광화유체의 조성은 석류석-자철석±적철석 양적관계를 통하여 Fe⁺²성분에 대하여 Fe⁺³성분이 부화된 특징을 보이고 있다. 후퇴 스카른 단계에서 정출된 각섬석은 주로 양기석과 Fe-양기석에 해당하는 조성을 보이며, 일부는 Mg-각섬석 및 Fe-각섬석의 조성변화를 보여준다.

3.2. 하부 스카른대

하부 스카른대는 반화강암질 암체와 백운석질 석회암과의 접촉부를 따라 소규모로 배태되고 있으며, 내성 스카른과 외성 스카른으로 구분된다. 내성 스카른은 수 cm 미만의 폭으로 협소한 분포를 보이는 반면, 외성 스카른은 수 m 폭으로 비교적 넓게 산출되고 있다. 하부 스카른대의 광물조합은 상부 스카른대와 비교하여 균질한 스카른대로 배태되고, 감람석+투휘석+자철석+투각섬석+금운모+사문석+방해석과 같은 Mg 계열 스카른광물이 특징적으로 산출되지만, 상부 스카른대에서 산출빈도가 높은 석류석은 전혀 확인되지 않고 있다. 광석광물은 외성 스카른대를 중심으로 자철석이 약 1~2mm의 미세한 층으로 30~40 vol. % 를 점유하고 있는 반면, 휘수연석은 내성 스카른대를 따라 광염 상으로 극미량 함유되어 있다.

외성 스카른대 하부 스카른은 전반적으로 짙은 암록색을 띠며, 부분적으로 자철석과 스카른 광물간에 미세한 호층구조를 보이고 있다(Fig. 2F). 초기 전진(prograde) 스카른 단계에서 정출된 광물군은 세립질~등립질 투휘석, 감람석 및 자철석과 같은 고온성 광물 조합으로 구성되며, 자철석과 투휘석-감람석간에 서로

미세한 층상구조를 보이고 있다(Fig. 3C). 또한, 자철석은 간혹 타형의 감람석 입자를 포획하고 있으며, 감람석과 투휘석의 집합체를 충전 또는 부분적으로 절단하고 있다. 자철석은 상부 스카른대에 비교하여 매우 높은 산출빈도를 보이고 있으나, 적철석은 거의 확인되지 않고 있다. 후기 후퇴(retrograde) 스카른 단계에서 초기 스카른 광물인 감람석과 투휘석은 투각섬석, 금운모, 사문석, 활석, 녹니석과 같은 함수스카른광물로 교대-충진되는 전형적인 특징을 보이고 있으며, 부분적으로 초기 정출된 광물을 절단하고 있다. 사문석은 주로 감람석을 교대하거나, 탄산염암의 경계를 따라 자철석, 석영, 방해석과 함께 광염상으로 산출된다.

외성 스카른대에서 감람석의 Mg함량은 71.6~82.5 mole % Fo로서 부화된 Mg조성을 나타내고 있으며(Table 2), MnO는 1.66~2.72 wt. %로 미량 함유되어 있다. 하부 스카른대의 단사휘석은 전반적으로 Mg성분이 매우 증가된 조성 특징(Di_{82.3-98.4})을 보이며, 0.0~0.75 wt. % MnO의 함량을 보인다. 각섬석은 전반적으로 투각섬석 조성의 특징을 보이며(Table 2), 금운모의 Mg함량(Mg/(Mg+Fe))은 전반적으로 0.91~0.94의 조성비를 보이고 있다(Table 2).

내성 스카른대 내성 스카른대는 담록색의 색상을 띠며, 부분적인 스카른화작용으로 극미립의 스카른광물과 반화강암의 구성광물이 혼재되어 있다. 내성 스카른대는 주로 투휘석과 투각섬석, 금운모, 백운모, 방해석, 석영, 정장석 및 모나자이트로 구성되며, 정장석은 부분적으로 견운모화 되어 있고, Or_{86.5-97.5}Ab_{2.5-7.0}An_{0.0-10.2}의 조성을 보인다. 휘수연석은 극소량 산출되며 광염 상으로 운모류의 벽계면을 따라 치환되어 있다.

3.3. 스카른 광물의 광물화학적 특성

단사휘석 단사휘석은 생성환경에 따른 광화유체의 조성변화와 함께 모암인 탄산염암의 Ca 또는 Mg 조성을 반영하여 상부 스카른과 하부 스카른에서 각각 서로 상이한 조성을 나타내고 있다. 단사휘석의 Di-Hd-Jo 관계도에서 제시된 바와 같이(Fig. 4A), 상부 스카른에서 단사휘석의 조성은 Hd₄₆₋₈₂로서 철성분이 비교적 부화된 경향을 보이는 반면, 하부 스카른에서는 Di₈₂₋₉₈로서 전반적으로 투휘석에 근접한 조성변화를 보인다. 단사휘석의 조성변화를 통하여 상부 스카른에서는 스카른화작용 시 광화유체의 진화와 관련된 조성변화를 반영한 것으로 추정되며, 하부 스카른에서는 모암인 백운석질 석회암의 Mg조성과 함께 광화유체의 성분이 복합적으로 작용한 교대작용이 주요 변화요인

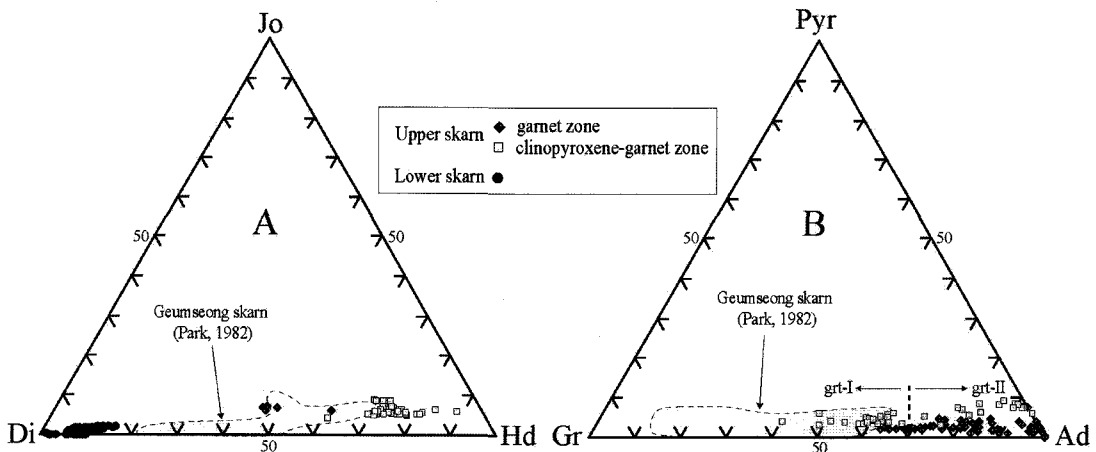
Table 2. Representative olivine, clinopyroxene, phlogopite and amphibole compositions of the lower skarn in the Geumseong deposit.

Magnesian Skarn														
olivine				clinopyroxene				phlogopite			amphibole			
SiO ₂	39.39	39.14	39.11	SiO ₂	54.11	54.13	54.08	SiO ₂	39.68	39.72	SiO ₂	57.61	54.60	
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	TiO ₂	0.00	0.00	0.00	TiO ₂	0.00	0.00	Al ₂ O ₃	0.29	1.68	
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	Al ₂ O ₃	0.41	0.45	0.00	Al ₂ O ₃	14.34	14.11	FeO*	2.23	9.23	
FeO*	15.49	15.79	15.85	FeO*	2.89	2.60	4.25	FeO*	3.85	4.62	MnO	0.33	0.49	
MnO	1.66	1.99	1.83	MnO	0.58	0.00	0.38	MnO	0.00	0.00	MgO	22.99	18.75	
MgO	43.81	42.93	43.34	MgO	16.30	17.07	16.03	MgO	27.81	26.43	CaO	13.35	12.11	
CaO	0.00	0.00	0.00	CaO	25.66	25.67	25.22	CaO	0.00	0.00	Na ₂ O	0.33	0.66	
Na ₂ O	0.00	0.44	0.44	Total	99.95	99.92	99.96	Na ₂ O	0.00	0.00	K ₂ O	0.00	0.18	
K ₂ O	0.00	0.00	0.00					K ₂ O	9.17	9.91	Total	97.13	97.70	
Total	100.35	100.29	100.57	O	= 6			Total	94.85	94.79	O	=23		
				Si	1.980	1.972	1.987	O	= 22			Si	7.944	7.706
O	= 4			Al	0.018	0.019	0.000	Si	5.623	5.675	AlIV	0.047	0.262	
Si	0.994	0.993	0.990	Fe ²⁺	0.088	0.079	0.131	Ti	0.000	0.000	AlVI	0.000	0.017	
Fe ²⁺	0.327	0.335	0.335	Cr	0.000	0.000	0.000	Al	2.393	2.374	Fe ³⁺	0.025	0.275	
Mn	0.035	0.043	0.039	Mg	0.889	0.927	0.878	Fe ²⁺	0.456	0.552	Mg	4.726	3.945	
Mg	1.649	1.624	1.635	Mn	0.018	0.000	0.012	Mn	0.000	0.000	Fe ²⁺	0.231	0.814	
Na	0.000	0.022	0.022	Ca	1.006	1.002	0.993	Mg	5.875	5.630	Mn	0.038	0.058	
Cations	3.005	3.017	3.021	Cations	4.000	4.000	4.000	Na	0.000	0.000	Ca	1.972	1.831	
								K	1.658	1.806	Na	0.088	0.181	
Te	1.7	2.1	1.9	Jo	1.8	0.0	1.2	Cations	16.005	16.037	K	0.000	0.032	
Fo	82.0	81.1	81.4	Di	89.3	92.1	86.0				Cations	15.073	15.123	
Fa	16.3	16.7	16.7	Hd	8.8	7.9	12.8	Mg ^{***}	0.93	0.91	Mg ^{***}	94.9	78.4	

*Total Fe as FeO.

**Mg#=(100×Mg/ (Mg+Fe)).

Abbreviations; Fa=fayalite, Fo=forsterite, Te=tephroite (see Table 1 for other abbreviations).

**Fig. 4.** Ternary diagrams illustrating the variations in chemistry of major minerals in upper and lower skarns. (A) Jo-Di-Hd plot (mol. %) of clinopyroxenes. (B) Pyr-Gr-Ad plot (mol. %) of garnets. See Table 1 for abbreviations.

으로 해석된다.

석류석 상부 스카른에서만 확인된 석류석은 중심부의 단사회석-석류석대로부터 석회암과의 접촉부에서 석류석대로 변화되는 점이적인 변화양상을 보이고 있으

며, Gr-Ad-Pyr 관계도에서 제시된 바와 같이 Ca계열 석류석(grandite garnet)의 전형적인 조성을 보인다(Fig. 4B). 석류석의 화학조성은 전반적으로 Gr-Ad 조성간의 치환관계를 보이고 있으나, Pyr 조성변화는 때

우 미약한 변화양상을 보이고 있다. 상부 스카른대의 중심부인 단사휘석-석류석대에서 나타나는 석류석(grt-I)은 중간 조성의 철 함량($Ad_{40.4-66.8}$)과 함께 $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$ 조성이 3.3~5.2 mole % 정도 함유되어 있으나, 상대적으로 후기에 고대-정출된 석류석(grt-II)은 철 함량($Ad_{70.8-94.0}$)이 현저하게 부화되는 동시에 $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$ 조성이 3.0~8.7 mole %로 미약하게 증가되는 경향을 보이고 있다. 상부 스카른대의 외각부인 석류석대에서는 화학적 누대구조(oscillatory zoning)의 특징과 함께 Fe^{+3} 조성이 현저하게 증가된 Ad_{63-100} 조성을 보인다. 이러한 석류석의 화학적 누대구조에 대한 조성변화를 통하여 후기 스카른화작용이 진행됨에 따라 광화유체는 점차 Fe^{+3} 이 증가되는 산화환경으로 변화되는 진화양상을 나타내고 있으며, 이는 주로 광화유체의 조성변화에 기인된 것으로 추정된다.

감람석 하부 스카른에서만 확인되는 감람석($Fo = Mg \times 100 / (Mg + Fe + Mn)$)은 Fo-Fa-Te관계도(Fig. 5)에서 제시된 바와 같이 71.6~82.5 mole % Fo로서 매우 부화된 Mg조성을 보이고 있다.

2006년 시추시료에 대한 스카른광물의 전자현미 분석결과와 함께 기존자료(Park, 1982)를 종합적으로 비교 검토한 결과, 금성광상의 스카른유형은 하부 스카른대의 근지성(I형) 스카른과 상부 스카른대의 점이성(II형) 스카른으로 구분되며, 상부 스카른대는 중심부로부터 주변부로 갈수록 대상분포를 보이고 있다. 단사휘석과 석류석의 화학조성은 기존 자료(Park, 1982)와 다소 차이를 보이고 있으나, 상부 스카른 중 단사휘석-석류석대에서 산출되는 스카른광물의 화학조성은 전반적으로 일치하고 있다. 이러한 스카른대의 유형과 관련된 단사휘석과 석류석의 화학조성은 모암 유형의 차이에 따른 전암의 조성뿐만 아니라, 생성환경과 관련된 광화유체의 진화과정을 반영하고 있다. 상부 스카른 중 이질 석회암이 교대된 층상 스카른대는 Al-부화된 석류석과 Mg-부화된 단사휘석, 규회석, 사장석의 공생관계를 보이고 있다. 상부 스카른 중 외각부의 석류석대는 Fe^{+3} -부화된 석류석과 Fe^{+2} -Mg 단사휘석의 중간조성을 나타내고 있는 반면, 중심부의 단사휘석-석류석대는 Fe^{+3} -Al 석류석과 Fe^{+2} -부화된 단사휘석의 조성변화를 보이고 있다(Fig. 4). 이러한 상부 스카른대의 화학조성은 중심부에서 단사휘석 \gg 석류석의 양적관계로부터 외각부의 석류석 \gg 단사휘석으로 변화되고 있으며, 이는 $Fe^{+2} \rightarrow Fe^{+3}$ 로 광화유체의 조성변화를 시사하고 있으며, 외각부에서 자철석+적철석의 산출양상과도 일치하고 있다. 그리고 백운석질 석회암이 교대된 하

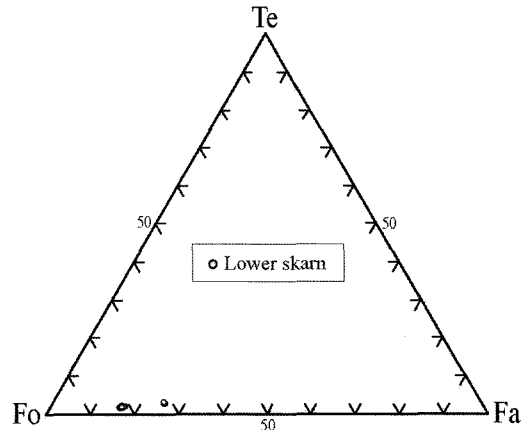


Fig. 5. Lower skarn olivine compositions plotted in Te-Fo-Fa diagram (mol. %). See Table 2 for abbreviations.

부 스카른은 Mg-부화된 감람석과 Mg-부화된 단사휘석의 공생관계를 보이고 있으며, 전형적인 Mg계열 스카른의 전형적인 특징을 나타내고 있다(Fig. 5).

4. 큐폴라형 Mo 광상

2006년도 대한광업진흥공사에서 실시된 3호 시추공(KORES, 2006)의 약 234-260 m 구간에서 확인된 큐폴라형 반화강암질 암체는 빗살 석영질 층(CLQ)과 반화강암질 층(AL)의 미세한 호층구조(Fig. 3D)와 함께 단방향 결정성장 조직(unidirectional solidification texture (UST))을 보이고 있으며(Choi, 2006), 이는 반암형 광상의 전형적인 조직과 일치하고 있다(Kirkham and Sinclair, 1988). 이러한 반화강암질 암체는 큐폴라 외부에 분포하는 반화강암 암맥과 큐폴라형 반화강암질 암체로 분류되며, 전반적으로 극미량(<1.0 vol. %)의 유색광물만이 수반되고 있다. 변질광물인 백운모 및 견운모 함량은 반화강암 암맥보다 큐폴라형 반화강암질 암체에서 증가하는 경향을 보인다. 두 암체는 공통적으로 SiO_2 함량이 약 73~76 wt. %로서 전반적으로 높은 함량을 보이며(Table 3), $FeO+MgO+MnO+TiO_2$ 함량이 약 <1.0 wt. %의 지화학적 특징을 보이고 있다. 미량성분은 변질정도에 따라 미약한 차이를 보이고 있으나, 제천화강암에 비하여 부화된 Rb-결핍된 Sr의 특징을 나타내고 있다. 이러한 암체는 유색광물의 산출빈도와 함께 주·미량성분 원소의 조성특징이 암석화학적 측면에서 마그마의 결정분화단계에서 말기 산물로 해석된다. 또한, 큐폴라 내부의 반화강암은 전반적으로 현저한 변질양상을 보이며, 반화강암 암맥에 비하여 상대적으로

Table 3. Major and trace element compositions of aplite in the Geumseong deposit.

Sample No.	Mo-bearing aplitic dyke		Mo-bearing aplitic layer in cupola	
	GSM26-3-24*	GSM26-4-5	GSM26-3-56*	GSM26-3-50
SiO ₂	73.82	73.67	75.34	73.26
Al ₂ O ₃	12.98	13.35	12.64	12.62
Fe ₂ O ₃ **	0.47	0.39	0.65	0.59
MnO	0.02	0.01	0.01	0.02
MgO	0.17	0.16	0.21	0.17
CaO	1.74	1.01	2.45	2.02
Na ₂ O	0.29	0.21	1.72	1.96
K ₂ O	8.71	8.95	3.85	5.40
TiO ₂	0.02	0.02	0.01	0.02
P ₂ O ₅	0.04	0.04	0.09	0.06
LOI	2.40	1.52	3.68	2.41
Total	100.67	99.33	100.66	98.53
Be	1.37	2.00	2.44	2.00
Ga	13.56	14.00	15.73	13.00
Ge	1.12	1.30	0.73	1.00
Rb	260	293	116	148
Sr	133	106	257	212
Y	11.52	13.80	7.00	9.60
Zr	39.0	40.0	41.5	53.0
Nb	10.2	9.2	1.3	3.6
Cs	1.48	1.70	2.00	1.60
Ba	886	1185	818	1671
Hf	2.01	1.90	2.24	2.10
Ta	1.27	1.41	0.28	0.75
W	1.65	1.10	0.72	7.20
Tl	2.71	2.46	0.59	1.62
Pb	67.9	20.0	6.4	28.0
Th	11.9	11.6	12.1	12.4
U	6.7	3.4	5.8	3.3

*KORES (2006).

**Total Fe as Fe₂O₃.

낮은 K₂O 함량과 높은 Na₂O를 보이고 있다.

UST 큐플라형 암체는 탄산염암과의 외각 접촉부를 따라 수 m 두께의 소규모 근지성 스카른대가 배태되고 있으며, 중심부로부터 CLQ-AL의 복합층상 반화강암→괴상 반화강암→정장석대→내성 스카른대→외성 스카른대(Mg계열 스카른대)→백운석질 석회암으로 변화되는 대칭적 특징을 보인다(Choi, 2006). 휘수연석은 주로 층상 큐플라를 따라 광염된 산상을 보이는 반면, 자철석은 외성 스카른대에서 수 mm 두께 층으로 스카른 광물과 호상구조를 나타내고 있다. 또한, 큐플라의 내측부에서는 휘수연석을 다량 함유하는 석영 층과 휘수연석을 미량 함유하는 반화강암질 층으로 세분된다(Fig. 2A). 이러한 복합층상 반화강암은 주로 백운모, 견운모, 석영, 모나자이트 및 인회석으로 구성되며(Fig.

3D), CLQ에서 석영과 휘수연석이 우세한 반면, AL에서 백운모 및 견운모가 주로 산출된다. 큐플라형 암체 내부에서 산출되는 광석광물은 주로 휘수연석과 황철석으로 구성되며, 휘수연석이 황화광물에서 매우 우세한 양적관계를 보이고 있다. 휘수연석은 CLQ 또는 CLQ-AL의 경계부에 집중되는 경향을 보이며, 석영, 백운모 또는 견운모와 밀접한 공생관계를 보이고 있다(Fig. 3D). 반화강암질 큐플라의 최외각부에 배태된 정장석대의 K-장석을 대상으로 실시된 K-Ar연대결과는 96.5 ± 2.1 Ma로 제천화강암과는 상이한 후기 백악기 화성활동과 관련된 광화시기를 보이고 있다(Table 4).

금성광상의 상부 스카른대는 전반적으로 수평적인 부존양상을 보이고 있으나, 하부 스카른대는 암주형 큐플라를 중심으로 외각부에 배태되고 있다. 이러한 광

Table 4. K-Ar age data of K-feldspar from aplitic cupola in the Geumseong deposit.

Sample	Mineral	Description	K (wt.%)	Rad. 40Ar (10 ⁻⁸ ccSTP/g)	Non-Rad. 40Ar (%)	Age (Ma)
GSM26-3-18	K-feldspar	K-feldspar in the outmost marginal part of Mo-bearing aplitic cupola	11.0±0.22	4231±41	3.9	96.5±2.1

Note: Decay constants used for age determination are after Steiger and Jager (1977).

체의 부존양상은 주로 관입암체의 정치심도에 따른 암압(lithostatic pressure; LP)과 마그마 분화단계에서 분리된 유체암(hydrostatic pressure; HP)간의 압력차이와 함께 주변모암인 탄산염암의 공극률-투수률과 같은 물리적 변수, 그리고 이차적 요인으로 주변모암에 발달된 구조적 약선대에 의해 좌우될 수 있다. 즉, 천부 관입암체가 상대적으로 심부에서 정치된 지질환경에서는 잔류마그마로부터 분리된 광화 유체암이 LP>HP 관계를 보이고 있어 암주형 큐폴라를 중심으로 광화유체가 농축되는 경향을 보이는 반면, 상대적으로 천부에서 정치된 지질환경에서는 HP>LP 관계에 따라 유체암이 상대적으로 증가됨으로써 열수에 의한 이차구조선(hydro-fracturing)의 생성과정을 통하여 광화유체가 외각부로 이동될 수 있다. 이러한 잔류마그마로부터 분리된 다량의 유체는 전자의 경우 암주형 큐폴라 상부에 농집되어 UST형 Mo광체가 형성되지만, 후자의 경우는 암주로부터 이탈된 광화유체의 압력 차이에 따라 각력화작용에 따른 파이프형 광체 또는 점이성 스카른광체가 배태된다. 금성 Mo광상에서 지금까지 확인된 광체의 산상은 큐폴라형 반화강암질 암체, 상부 스카른대의 수평적 배태양상과 함께 각력화작용의 부재현상을 통하여 광화유체와 암압간의 지질조건이 전반적으로 LP>HP(부분적으로 HP=LP)의 환경조건에서 Mo광화작용이 진행된 것으로 추정된다.

5. 스카른의 생성환경과 Mo광화작용

물리브데늄 광화작용은 지질·광상학적 관점에서 자철석계열, I형 천부 화성활동과 밀접한 연관성을 갖고 있으며, 특히 마그마의 결정분화작용이 상당히 진행된 조건에서 대부분 반암형 광화작용과 연계되는 것으로 보고되고 있다(Carten *et al.*, 1993). 그리고 2006년도 시추시료에서 확인된 바와 같이 금성광상의 스카른화작용 및 Mo-(Fe)광화작용은 전형적인 천부 관입암상인 반화강암과 밀접한 연관성을 보이며, 이러한 큐폴라 암체의 정치 압력은 전반적으로 낮은 암압 조건을 지시하고 있다. 반면에 제천화강암은 결정분화작용이 미약하게 진행된 암석화학적 특성(Ishihara *et al.*, 2005)과

함께 비교적 심부(3.8 kbar)에서 정치된 것으로 보고되어 있다(Cho and Kwon, 1994). 이러한 제천화강암의 고결심도 및 지화학적 특성은 광상학적 관점에서 Mo 광화작용과 관련된 화성활동과는 상당한 차이를 보이고 있다.

금성광상에 대한 휘수연석의 배태양상 및 스카른화작용을 종합적으로 검토한 결과, 광화 시기는 96.5±2.1 Ma로서 백악기 화성활동으로 확인되었다(Table 4). 또한, Mo광화작용은 공간적으로 인접한 심부에서 정치된 제천화강암보다는 천부에서 정치된 반화강암질 암주 및 큐폴라형 암체가 관계화성암으로 직접적인 연관성을 보이고 있다. 시추시료의 시편 및 현미경 관찰에 의한 광물공생관계에 의하면 상부와 하부에서 각각 서로 다른 유형의 스카른화작용이 확인되었으며, 하부 스카른대에서는 고온성 스카른광물이 전반적으로 함수스카른광물로 교대되어 중첩된 변화추이를 보이고 있는 반면, 상부 스카른대는 중앙부에서 고온성 스카른광물이 우세하지만 외각 주변부로 갈수록 함수스카른광물의 산출빈도가 증가되는 경향을 보인다. 전진 스카른 시기에 형성되는 초기 스카른은 하부 스카른대의 감람석+투회석+자철석(근지성 스카른)과 상부 스카른대의 단사회석+석류석±규회석±사장석±휘수연석±자철석(점이성 스카른)의 스카른 공생관계를 보이고 있으며, 백운석질 석회암이 교대된 하부 스카른대의 Mg계열 스카른과 석회암이 교대된 상부 스카른대의 Ca계열 스카른으로 구분된다. 후퇴 스카른 시기는 초기 스카른광물이 투각섬석+양기석+녹립석+사문석+녹니석과 같은 함수스카른광물로 교대된 특징을 보이고 있다.

금성광상의 스카른화작용은 앞에서 언급된 바와 같이 반화강암과 서로 밀접한 연계성을 보이고 있으며, 이러한 산상은 천부 반심성암의 지질환경을 시사하고 있어 약 0.5 kbar의 압력조건으로 가정할 수 있다. 초기 전진 스카른 단계에서 정출된 스카른 광물군은 하부 스카른대에서 자철석+감람석+단사회석과 상부 스카른대에서 단사회석+석류석±자철석의 전형적인 광물조합을 나타내고 있으며, 일부 상부 스카른대에서 단사회석+석류석±규회석±사장석의 공생관계를 보이고 있다. 또한, 스카른화작용과 관련된 생성환경 중 CO₂

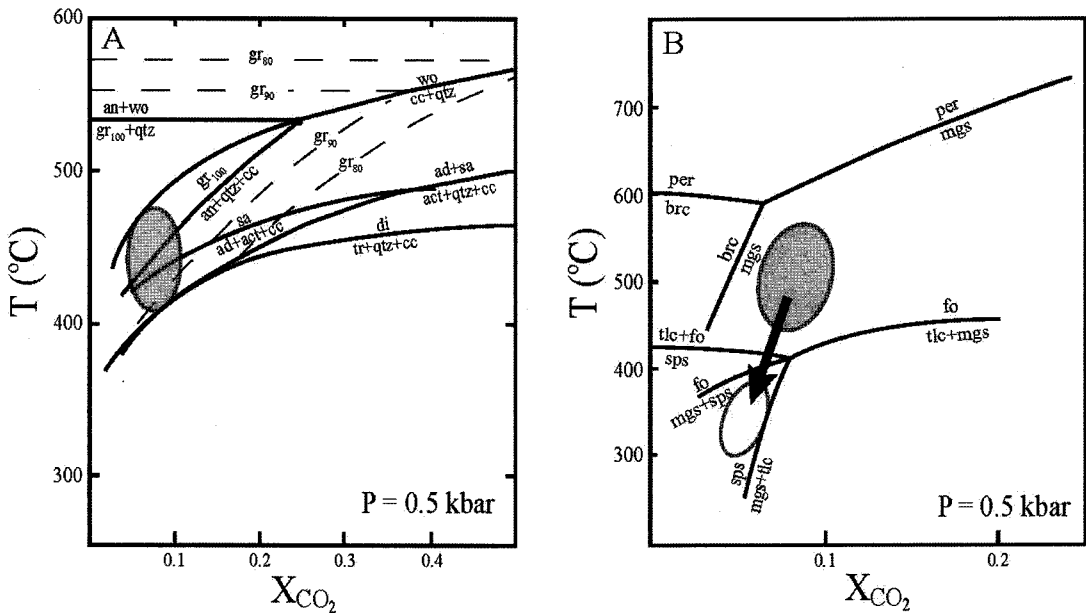


Fig. 6. The schematic evolutionary path of the ore bearing fluids during the various stage of mineralization in the Geumseong area as deduced from the X_{CO_2} versus temperature diagram (modified after Meinert, 1982; Harris and Einaudi, 1982). (A) General environment for calcic skarn formation (shaded area). (B) The arrow indicates the evolution of magnesian skarn from prograde skarn to retrograde skarn. Calc-silicate equilibria based on the experimental work of Gordon and Greenwood (1971), Greenwood (1967), Slaughter *et al.* (1975) and Newton (1966). Abbreviations; brc=brucite, mgs=magnesite, per=periclase, sps=serpentine and tlc=talc (See Tables 1 and 2 for other abbreviations).

분압은 전반적으로 매우 낮은 X_{CO_2} 분압(<0.1) 조건에서 진행된 것으로 추정되고 있다. 이러한 스카르화작용 시 전진 스카르 단계는 Ca계열 스카르에서 규회석과 함께 석류석-탄사회석이 공존하는 안정영역과 Mg계열 스카르에서 감람석-투회석이 공존하는 안정영역으로 약 $500^{\circ}\pm 50^{\circ}C$ 에서 약 $400^{\circ}C$ 의 온도범위를 지시하는 반면, 후퇴 스카르 단계는 투각섬석+양기석+녹렴석+사문석과 같은 함수규산염광물이 안정된 영역으로 약 $400^{\circ}\sim 300^{\circ}C$ 의 온도범위로 추정된다(Fig. 6). 석류석(Ad_{60-100})과 공존하는 자철석+적철석의 공생관계를 통하여 전반적으로 높은 산화환경에서 스카르화작용이 진행되었던 것으로 추정된다.

금성 Mo광화작용은 전형적인 천부 반심성암체에서 나타나는 광상의 부존 특성을 보이고 있으며, 상부 스카르대에 배태된 Mo광체 그리고 하부 스카르대와 접촉하고 있는 압주형 Mo광체로 구분할 수 있다. 이러한 Mo광체는 근지성 스카르의 형성과정과 함께 압주내 과상 반화강암의 외각 표피막이 생성됨에 따라 큐폴라내 광화유체의 이탈을 방지함으로써 빛갈 석영질 층과 반화강암질 층의 미세한 호층구조를 보이는 반암형 Mo광체가 배태되는 반면, 상부 스카르대에서 산출

되는 Mo광체는 큐폴라로부터 부분적으로 분리된 광화유체가 상부로 이동하여 점이성 스카르대에 형성된 것으로 추정된다.

6. 결 언

국내 몰리브데늄의 광물자원은 경제적 측면에서 텅스텐-금-연-아연과 함께 부존 가능성이 높은 금속으로 재인식되고 있으며, 특히 자원지질학적 관점에서 대륙형 섭입대의 구조조적 환경과 일치되어 잠재가치에 대한 경제성 평가가 재검토되고 있다. 기존에 보고된 금성광산의 생산실적은 Cu에 대하여 Mo이 부화된 전형적인 금속 생산량을 나타내고 있으며, 이러한 특성은 암석지화학적 특성에서 결정분화작용이 상당히 진행된 화성암체(>73 wt. % SiO_2)와 밀접한 성인적 특성을 나타내고 있다. 특히 기존에 발표된 연구결과에 의하면 제천화강암이 관계화성암으로 보고된 바 있으나, 제천화강암의 암석지화학적 특성 및 관심심도를 검토한 결과 Mo광화작용과 연계성은 극히 미약한 것으로 추정된다. 금성광산은 2006년 시추시료에서 확인된 바와 같이 분화된 백악기 천부 반화강암질 암체에서 유리된

광화유체(약 97 Ma)로부터 스카른화작용과 함께 Mo광화작용이 진행된 것으로 추정된다.

기존 Mo광체와 2006년도 시추자료를 종합적으로 검토한 결과, 금성 Mo광상은 공간적으로 상부 스카른대에 배태된 점이성 Mo광상과 하부 스카른대의 근지성 Mg계열 Fe스카른과 함께 산출되는 큐폴라형 Mo광상으로 구분된다. 특히 탄산염암의 조성에 따라 상부·하부 스카른대는 각각 서로 상이한 스카른광물의 공생관계를 보이고 있다. 상부 스카른대는 석회암이 교대된 Ca계열 스카른광물이 우세하게 산출되며, 석류석+단사회석±규회석±사장석±녹렴석+자철석±적철석±양기석±녹니석의 광물조합을 보이고 있다. 또한, 상부 스카른대의 중앙부에서 고온성 스카른광물이 우세하지만 외각부로 갈수록 함수스카른광물의 산출빈도가 증가되는 경향을 보이고 있다. 하부 스카른대는 백운석질 석회암이 교대된 Mg계열 스카른광물인 감람석+투회석+자철석+투각섬석+금운모+사문석의 광물조합을 보이며, 하부 스카른대에서는 고온성 스카른광물이 함수스카른광물로 교대된 변화추이를 보이고 있다. 전진 스카른 단계의 생성환경은 무수스카른광물의 공생관계 및 열역학적 자료를 근거로 약 500~400°C 온도범위에서 스카른화작용이 진행되었으며, 후퇴 스카른 단계에서는 함수규산염광물의 안정영역으로부터 유도된 생성온도는 약 400~300°C로 추정된다. 금성 Mo광상에서 기존에 개발되었던 스카른형 Mo광체뿐만 아니라 잠두광체인 큐폴라형 Mo광체의 부존 가능성이 확인됨으로써 천부 지열수계의 광상성인 모델에 적용한 체계적 탐사의 필요성과 함께 국내 폴리브데늄 광물자원에 대한 재평가가 요구되는 시점이다.

사 사

이 연구는 현장조사 및 시료채취에 도움을 주신 (주) 동원 금성광산의 관계자에게 감사와 함께 과학기술부 과학재단 특정기초연구사업(R01-2006-000-10553-0)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 논문심사에 유익한 조언을 주신 박맹언 교수, 허철호 박사, 유봉철 박사에게 깊은 사의를 드린다.

참고문헌

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. Asso. Canada Spec. Paper, v. 40, p. 521-554.
- Cho, D.L. and Kwon, S.T. (1994) Hornblende geobarometry of the Mesozoic granitoids in South Korea and the evolution of crustal thickness. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 30, p. 41-61.
- 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. Environ. Geol., v. 39, p. 567-581.
- Choi, S.-G. (2006) Genetic environment of the Cretaceous subvolcanic magmatism and Mo mineralization in Korea. Korea Resource Corporation, 119p.
- Gordon, T.M. and Greenwood, H.J. (1971) The stability of grossularite in H₂O-CO₂ mixtures. Am. Mineralogist, v. 56, p. 1674-1688.
- Greenwood, H.J. (1967) Wollastonite: Stability in H₂O-CO₂ mixtures and occurrence in a contact metamorphic aureole near Salmo, British Columbia, Canada. Am. Mineralogist, v. 52, p. 1669-1688.
- Harris, N.B. and Einaudi, M.T. (1982) Skarn deposits in the Yerington District, Nevada: Metasomatic skarn evolution near Ludwig. Econ. Geol., v. 77, p. 877-898.
- Ishihara, S., Jin, M. and Terashima, S. (2005) Mo-related adakitic granitoids from non-island-arc setting: Jecheon pluton of South Korea. Resource Geol., v. 55, p. 385-396.
- Jin, M., 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. Jour. Petrol. Soc. Korea, v. 1, p. 49-57.
- Kim, K.W., Park, B.S. and Lee, H.K. (1967) Explanatory text of the geological map of Jecheon sheet, Geological survey of Korea, 46p.
- Kim, J.C., Koh, H.J., Lee, S.R., Lee, C.B., Choi, S.J. and Park, K.H. (2001) Explanatory text of the geological map of Gangrueng-Sokcho sheet, Geological Survey of Korea, 76p.
- Kirkham, R.V. and Sinclair, W.D. (1988) Comb quartz layers in felsic intrusions and their relationship to porphyry deposits. In: Taylor, R.P. and Strong, D.F. (eds.) Recent advances in the geology of granite-related mineral deposits. Canadian Inst. Mining Metallurgy, v. 39, p. 50-71.
- KORES (2006) Detailed geological survey report (molybdenite: Jaechon area). Korea Resource Corporation, 100p.
- Meinert, L.D. (1982) Skarn, manto, and breccia pipe formation in sedimentary rocks of the Cananea mining district, Sonora, Mexico. Econ. Geol., v. 77, p. 919-949.
- Moon, K.J. (1991) Review of skarn ore deposits at the southern limb of the Baegunsan syncline in the Taebaeg Basin of South Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 27, p. 271-292.
- Newton, R.C. (1966) Some calc-silicate equilibrium relations. Am. Jour. Sci., v. 264, p. 204-222.
- Park, N.Y. (1982) Molybdenum mineralization, exploration and exploitation of the ore deposits at the Keumseong mine, Republic of Korea. Unpub. Ph.D. thesis.

- Japan, Waseda Univ., 188p.
- 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, 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.
- Slaughter, J., Kerrick, D.M. and Wall, W.J. (1975) Experimental and thermodynamic study of equilibria in the system CaO-MgO-SiO₂-O-CO₂. *Am. Jour. Sci.*, v. 275, p. 143-162.
- Steiger, R. and Jager, E. (1977) Subcommittee on geochronology convention on the use of decay constants in geo- and cosmo-chronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 36, p. 359-362.

2007년 1월 15일 원고접수, 2007년 2월 15일 게재승인.