

태백지역 신예미 서부광체 하부의 스카른화작용 및 철-몰리브덴 광화작용

The Skarnification and Fe-Mo Mineralization at Lower Part of Western Shinyemi Ore Body in Taeback Area

서 지 은 (Jieun Seo)¹ · 최 선 규 (Seon-Gyu Choi)^{1,*} · 김 창 성 (Chang Seong Kim)¹ · 박 정 우 (Jung Woo Park)¹ · 유 인 곁 (In Kol Yoo)² · 김 남 혁 (Nam Hyuck Kim)²

¹고려대학교 지구환경과학과
(Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University)

²대한광업진흥공사
(Korea Resources Corporation)

요약: 신예미광상은 캄브리아기-오르도비스기 조선누층군(막골층)의 탄산염암과 백악기 신예미 화강암체의 접촉대를 따라 배태되는 스카른형 Fe-Mo광상 및 열수교대형 Pb-Zn-Cu광상은 반복적으로 유입된 광화유체에 의하여 다금속 광화작용이 수반되고 있다. 신예미광상의 서부광체 하부에서는 전기 스카른(stage I) 단계의 철 광화작용과 후기 스카른(stage II) 단계의 몰리브덴 광화작용이 중첩된 분포양상을 보인다. 전기 스카른 단계는 주로 자철석을 수반하는 Mg계열 스카른으로 감람석, 투휘석이 우세하게 산출되는 반면, 후기 스카른 단계는 휘수연석을 수반하는 Ca계열 스카른으로 회철휘석과 석류석이 우세하게 산출된다. 전기 및 후기 스카른 단계에서는 산상 및 구성광물에 의하여 전진 스카른과 후퇴 스카른으로 각각 세분될 수 있다. 특히, 서부광체 하부에서 산출하는 전진 스카른 단계는 Mg계열 무수 스카른광물의 공생관계 및 열역학자료를 근거로 약 400~550°C 온도범위, $X_{CO_2} < 0.1$ 환경조건에서 고온성 스카른화작용과 철 광화작용이 진행되었으며, 후퇴 스카른 단계는 함수 규산염광물의 안정영역으로부터 약 300~400°C 온도범위로 추정된다.

주요어: Mg계열 스카른, Ca계열 스카른, 신예미, 철 광화작용, 몰리브덴 광화작용

ABSTRACT: Shinyemi skarn deposits occur as Fe-Mo skarn type and Pb-Zn-Cu hydrothermal replacement type along the contact between Cretaceous Shinyemi granitoids and Cambro-Ordovician mixed limestone and dolostone sequence of the Choseon Supergroup. In the lower part of Western Shinyemi ore body two stages of skarn formation have been observed: the early, stage I (magnesian) skarn with Fe mineralization and the late, stage II (calcic) skarn with Mo mineralization. The stage I skarn spatially is overprinted by stage II skarn. The stage I skarn is predominantly composed of olivine, magnetite and diopside whereas, the stage II skarn is dominated by hedenbergite and garnet. The skarnification process occurred in two stages, both prograde and

*교신저자: seongyu@korea.ac.kr

retrograde for stage I and stage II skarns. In stage I, the prograde skarns, mainly composed of anhydrous silicate minerals, were formed at relatively higher temperatures (about 400 to 550°C) under low CO₂ fugacity ($X_{\text{CO}_2} < 0.1$) conditions. On the other hand, the retrograde skarns that consisted of hydrous minerals were formed at lower temperatures (about 300 to 400°C).

Key words : magnesian skarn, calcic skarn, Shinyemi, Fe mineralization, Mo mineralization

서 론

지질 및 광상 개요

태백산 광화대는 상동, 연화, 거도, 신예미광상 등 국내 대표적 스키르네광상이 집중적으로 분포되는 지역으로 W, Mo, Pb, Zn, Cu 및 Fe 등 다양한 금속 종이 산출되고 있으며, 부산물로 Au, Ag 및 Bi가 수반되고 있다. 최근 기존에 개발되었던 일부 스키르네형 광상에서 Mo, Au 등과 같은 고가 금속에 대한 부존 가능성이 확인되어, 시추 탐사가 진행되고 있다. 최근 신예미광상의 하부 철 광체에서 몰리브덴 광화작용이 확인되어 시추탐사가 수행되고 있으며, 몰리브덴 광체의 부존 가능성이 재검토되고 있다(최선규 외, 2006). 신예미광상은 기존 생산실적 자료에 의하면 광체에 따라 동부광체는 주로 아연-연-동이 산출되는 반면, 서부광체 상부에서 아연-몰리브덴 그리고, 서부광체 하부는 철을 대상으로 개발하였다. 신예미광상은 탄산염암의 화학조성에 따라 Mg계열과 Ca계열 스키르네 이외에 중간 계열(intermediate) 스키르네와 같이 다양한 유형이 산출되고 있으며(Yang, 1991), 이러한 다양한 스키르네화작용과 함께 광화작용이 수반되고 있어 다수 연구자에 의한 광물·광상 성인연구가 수행되었다(Yang, 1991; 배영부, 1992; Kim and Nakai, 1982).

최근 확인된 신예미 광상의 항내 조사 및 시추 결과에 의하면 몰리브덴 광화작용은 이미 개발 중인 철 광체의 하부에서 철 광화작용보다 후기에 중첩된 광화현상을 보이고 있으나, 이러한 하부 스키르네대에 대한 연구는 아직 수행된 바 없다. 본 연구는 신예미 서부광체 하부의 철 스키르네대(-325 m와 -350 m)를 중심으로 중첩하여 산출하는 몰리브덴 광화작용과 관련된 스키르네대의 광물학적 연구를 수행하였다. 또한, 신예미지역에서 이전에 보고된 광상 성인연구를 종합적으로 비교 검토하여 몰리브덴의 광화작용의 성인적 특성을 제시함으로써 향후 탐사를 위한 기초 자료를 제공하는데 목적이 있다.

신예미광상 일대의 지질은 전반적으로 조선누층군의 두무골층, 막골층, 직운산층 및 두위봉층과 부정합으로 덮고 있는 평안누층군의 홍점층으로 구성되며(Choi, 1998), 후기 백악기 화강암, 반화강암, 석영반암이 관입하고 있다(그림 1). 두무골층은 하부로부터 세립질 사암, 실트스톤, 충식석회암이 협재되며, 최상부에는 두꺼운 석회질 사암과 박층 이회암, 세일이 협재되어 나타난다(Yang, 1991). 막골층은 두무골층과 정합관계로 하부로부터 상부로 갈수록 층상 또는 괴상의 석회암에서 백운석질 석회암, 백운암, 석회암층으로 변하고(Yang, 1991), 직운산층은 막골층 위에 정합적으로 놓인 흑색 세일과 청회색 석회암으로 구성되는데 하부에서 상부로 갈수록 이질이 증가하며, 두위봉층은 태백층군 최상위 층으로 하위에 직운산층과 정합관계로 평안누층군과는 부정합관계로 이루어진 석회암으로 구성되어 있다(최덕근과 이동진, 2002). 홍점층은 녹색의 석회질 세일, 사질 세일, 사암으로 구성되어 있다(Yang, 1991).

신예미지역에서 확인된 화성암체는 두무골층을 관입하는 이목화강암과 막골층을 관입하는 신예미화강암류로 구분된다. 이전에 발표된 두암체의 생성연대는 이목화강암은 193 Ma와 89~97 Ma (Kim and Kim, 1978; Hong, 1986; 윤현수, 1986; Yang, 1991), 신예미화강암은 60.0, 74.7, 77.7 Ma (Kim and Kim, 1978; Yang, 1991)로 두 암체 간에는 상당한 연대차이를 보이고 있다. 이목화강암은 전반적으로 홍색 장석이 반상조직의 중립질 특징을 보이는 반면, 신예미화강암류는 화강암, 반화강암, 석영반암, 유문암질 각력암의 다양한 특징을 보이고 있다(그림 2). 신예미지역의 지질구조는 NNE방향의 단층이 광범위하게 분포하며, 이러한 구조선을 따라 후기에 관입한 화강암류는 전반적으로 막골층을 절단하는 구조선을 따라 암맥상 또는 원

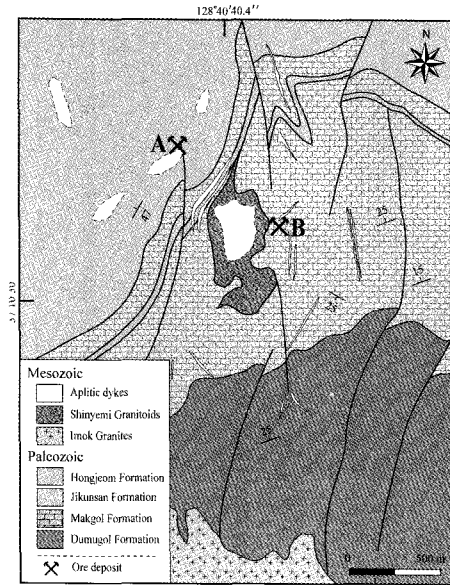


Fig. 1. Generalized geological map of the Shinyemi ore deposit. A; Fe deposit (Western ore body), B; Pb-Zn deposit (Eastern ore body).

추형 암체로 산출되고 있다.

신에미광상은 백운암-석회암과 석영반암(또는 반화강암)의 접촉부를 따라 발달하는 접촉교대(스카른)형~열수교대형 광상으로 변화양상을 보이며, 국부적으로 압쇄대 및 단층열극대를 따라 열극충진형 광상이 중첩되어 있다. 신에미화강암체는 동부광체를 중심으로 타원체와 불규칙적 암체 또는 암맥 상으로 분포하고 있는 반면에 서부광체는 주로 소규모 암맥군으로 산출되고 있으며, 천부 마그마활동의 전형적인 특징을 시사하고 있다(그림 2).

대한광업진흥공사에서 발간된 광업요람에 의하면 신에미광상은 70년대 상부광체에서 황화광물을 대상으로 아연(55,882 t; 50% Zn), 동(854 t; 25% Cu), 몰리브덴(693 t; 90% MoS₂), 납(86 t; 50% Pb)을 생산하였으며, 82년부터 서부광체의 자철석을 개발대상으로 현재까지 철(2,775,740 t; 50% Fe)을 생산하였다(최선규 외, 2006). 이러한 생산량 자료를 종합적으로 비교한 결과 Fe를 제외한 금속 비는 Zn > Mo > Cu

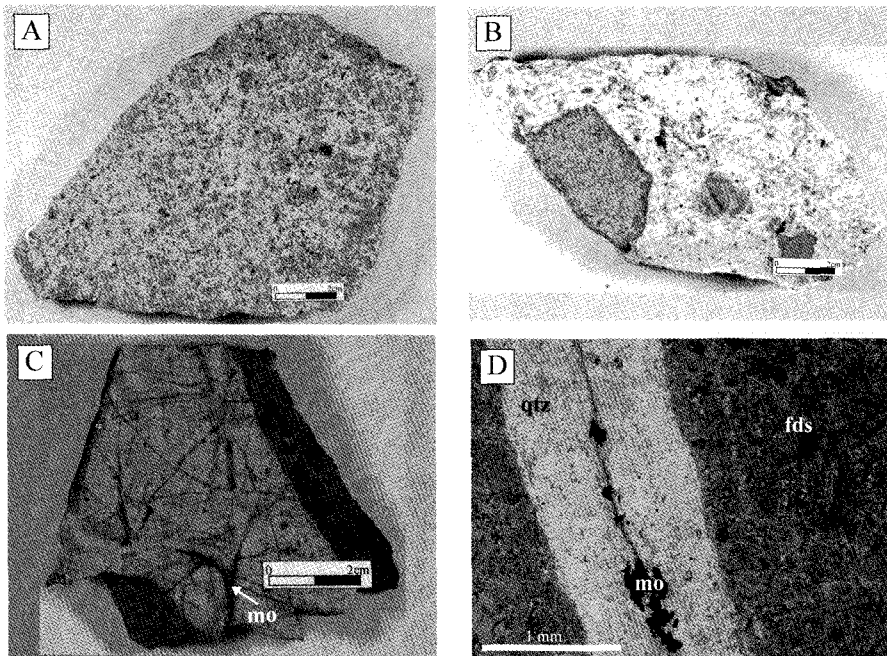


Fig. 2. Slab photos (A~C) and photomicrograph (D) of various igneous rock units in the Shinyemi ore body. (A) granite; (B) rhyolitic intrusive breccia; (C) aplite with abundant Mo mineralized quartz veins and (D) photomicrograph of aplitic rock showing molybdenite mineralization along the quartz veins. Abbreviations; fds = feldspar, mo = molybdenite, qtz = quartz.

> Pb와 같은 양적 관계를 보이고 있으며, 동부 광체 및 서부광체의 상부는 중온성 열수교대작용(Kim *et al.*, 1981; 배영부, 1992)과 관련된 아연-동-연 등의 황화광물이 우세한 광화작용이 진행된 반면, 서부광체 하부는 고온성 스카른화작용(Yang, 1991)과 관련된 전형적인 철 광화작용이 보고된바 있다. 또한 서부광체의 철 광화작용과 관련된 스카른화작용은 탄산염암의 화학조성에 따라 백운암을 교대한 Mg계열 스카른과 석회암을 교대한 Ca계열 스카른으로 구분되며, Mg계열 스카른과 Ca계열 스카른은 서로 상이한 스카른 광물조합을 보이고 있다(Yang, 1991).

신예미 스카른광상에서 산출하는 금운모의 K-Ar 연대는 동부광체에서 75.3~77.7 Ma 서부광체에서 76.7 Ma로 동일한 후기 백악기의 광화시기로 보고되었으며(Sato *et al.*, 1981; 박희인 외, 1988; Yang, 1991), 동부광체 주변의 신예미 화강암에 대한 흑운모 K-Ar 연대(74.7 Ma)와 서부광체에서 산출되는 반암의 K-장석에 대한 K-Ar 연대(77.2 Ma)와 서로 일치하고 있어(Yang, 1991) 신예미광상은 근지성 스카른광상으로 해석된다.

신예미광상 상부광체의 연도별 생산량에 대한 Mo/Cu 금속비는 70년도 0.75에서 82년도 1.78로 점차 증가하는 경향을 보이고 있으며, 누적 평균값은 1.13으로서 Cu에 비하여 Mo가 부화된 전형적인 Mo형 광상(Mo/Cu > 1.0)에 해당하는 금속 비를 나타내고 있다. 최근 서부광체 하부(-230 m~-350 m)에서 철 광체 외에도 반화강암에 배태된 함회수연석 망상 세맥의 몰리브덴 광화작용과 스카른화가 확인되었으며, 이는 철 광화작용 이후에 잔류 광화유체의 유입에 따른 몰리브덴 광화작용의 가능성을 시사하고 있다.

스카른화작용 및 산출상태

신예미 서부광체 하부에서 산출되는 스카른 광물은 반화강암이 일부 교대된 내성 스카른과 막동석회암층이 교대된 외성 스카른으로 구분되며, 내성 스카른은 극히 제한적인 범위에서 발달되고 있는 반면, 외성 스카른은 약 40~100 m의 범위에 걸쳐 광범위하게 분포하고 철광상이 배태되고 있다. 또한, 신예미 서부광체 하부

에서 확인된 스카른은 반복 유입된 광화유체에 의하여 형성된 특징을 보이며, 스카른대의 산상에 의한 선후관계 및 잔존된 모암조직을 근거로 검토한 상대적 시간차에 따라 전기 스카른(stage I) 및 후기 스카른(stage II)으로 구분된다. 이러한 전기 및 후기 스카른 유형은 정출환경에 따라 전진(prograde)과 후퇴(retrograde)스카른으로 구분되며, 후기 스카른(stage II) 단계는 모암에 따라 내성 스카른과 외성(맥상) 스카른으로 세분된다.

서부광체의 하부 스카른대는 주로 광화 전기에 형성된 Mg계열 스카른(stage I)으로 철 광화작용과 밀접한 연관성을 보이는 반면, 광화 후기에 형성된 Ca계열 스카른(stage II)은 유문암질 반화강암의 주변부를 따라 국부적으로 배태되고 몰리브덴 광화작용이 철 광체에 중첩되어 산출되며, 전진 스카른과 후퇴 스카른이 중첩된 특징을 보이고 있다.

전기 스카른 단계(Stage I): Mg계열 스카른

전기 스카른은 주로 서부광체를 중심으로 반화강암의 접촉부를 따라 괴상으로 배태되는 스카른으로 백운암이 교대된 Mg계열 스카른, 석회암이 교대된 Ca계열 스카른, 백운암질 석회암이 교대된 중간계열 스카른으로 구분되며(Yang, 1991), 하부 스카른은 주로 Mg계열 스카른으로 자철석, Mg스카른 광물과 함께 후기 정출된 자류철석이 광염상으로 산출된다(그림 3).

전진 스카른(Prograde Skarn)

Mg계열 스카른은 주로 감람석과 자철석의 광물조합을 보이며, 소량의 단사회석(cpx-I)이 특징적으로 산출된다. 감람석과 자철석의 상대적 양적관계는 전반적으로 1.2~0.8의 부피비(vol. %)로 산출되며, 주로 괴상 또는 층상조직을 보이고 있다. 감람석은 약 0.01~0.4 mm 미립 크기로 산출되며, 주로 자철석에 함유된 포유물로 산출되고 드물게 자철석과 감람석의 미세한 층상구조를 보인다(그림 3). 또한, 연녹색 투회석 세맥(<1 mm)이 자철석과 감람석을 절단하고 있다. 이러한 전기 스카른의 Mg계열 스카른대에서는 석류석은 확인되지 않고 있다.

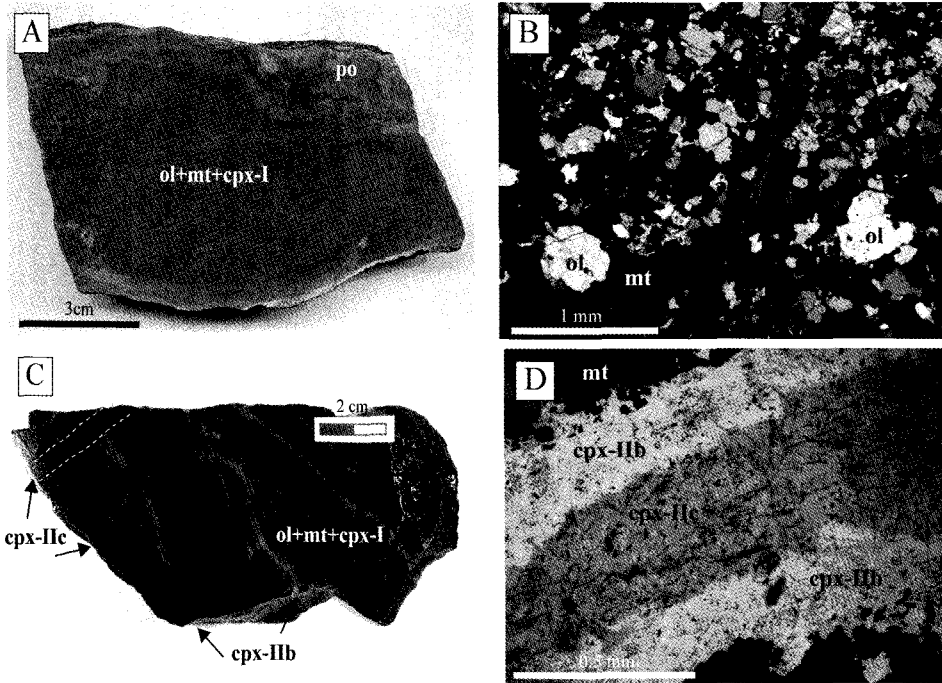


Fig. 3. Slab photos (A and C) and photomicrographs (B and D) illustrating various features of stage I (magnesian) skarn. (A) slab photo of the stage I skarn displaying the general texture with typical mineral assemblage of olivine + magnetite + clinopyroxene (cpx-I); (B) photomicrograph of A displaying the late magnetites surrounding the early olivine grains; (C) abundant stage II skarns (clinopyroxene veins) cross-cutting the stage I skarn and (D) photomicrograph of C displaying various clinopyroxene veins in stage II skarn. Clinopyroxenes (cpx-IIc) are re-injected along the clinopyroxene (cpx-IIb) veinlet. Abbreviations; cpx = clinopyroxene, mt = magnetite, ol = olivine, po = pyrrhotite.

후퇴 스키르네(Retrograde Skarn)

후퇴 스키르네는 전진 스키르네대를 절단 또는 교대하고 있으며, 주로 함수 스키르네광물과 황화광물로 구성된다. 각섬석 세맥은 전진 스키르네광물이 사문석으로 교대된 곳에서 녹니석, 금운모 및 활석과 함께 국부적으로 산출되며, 간혹 자류철석이 광염상으로 중첩되어 나타난다. 전진 스키르네 단계에서 기 정출된 감람석, 단사휘석과 같은 무수 스키르네 광물은 후퇴 스키르네 단계에서 사문석, 활석, 금운모 및 녹니석과 같은 함수광물들로 교대된 경향을 보이고 있다.

후기 스키르네 단계 (Stage II): Ca계열 스키르네

전진 스키르네(Prograde Skarn)

내성 스키르네(endoskarn): 반화강암이 교대된 내성 스키르네는 전반적으로 일부 변질된 장석과

함께 단사휘석과 석류석으로 구성되어 있다. 후기 스키르네 단계의 초기에 정출된 단사휘석(cpx-IIa), 석류석(grt-IIa) 및 사장석이 극미립의 집합체로 산출되며, 일부 사장석은 알바이트 쌍정 조직이 확인되고 정장석과 함께 산출한다. 석류석은 주로 타형의 입자로 담갈색-담홍색을 띠며 등방성의 특징을 보이고 있으며, 후기 외성 스키르네 단계에서 정출된 등방성 석류석(grt-IIb)에 의해 둘러싸여 있다(그림 4B).

외성 스키르네(exoskarn): 단사휘석-석류석 맥상 스키르네는 전기 스키르네에 정출된 감람석 또는 자철석을 절단하는 망상 세맥(약 <2 cm)으로 산출된다. 단사휘석은 짙은 녹색의 단사휘석(cpx-IIc) 세맥이 엷은 담녹색의 단사휘석(cpx-IIb) 세맥을 절단하는 선후관계가 관찰된다(그림 3C). 석류석(grt-IIb)은 0.05 mm 정도의 자형 결정으로 대부분 등방성이며, 결정의 외곽부에

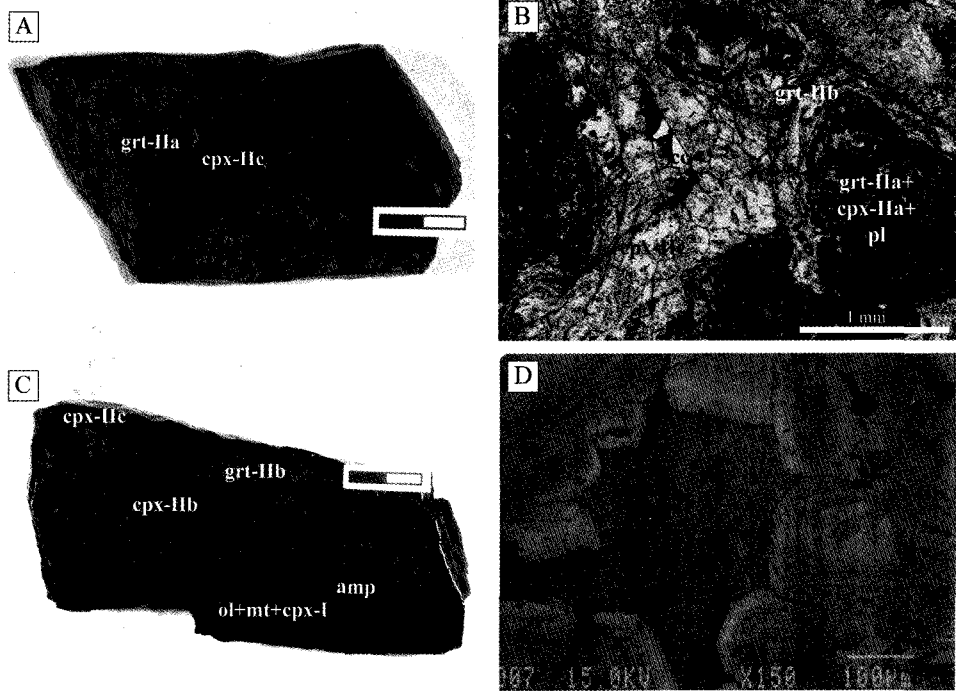


Fig. 4. Slab photos (A and C) and photomicrographs (B and D) depicting the features of stage II skarn in the lower part of Western Shinyemi ore body. (A) endoskarn; (B) photomicrograph of endoskarn with garnet and clinopyroxene. The early endoskarn, comprised of fine grained aggregate of garnet (grt-IIa) + clinopyroxene (cpx-IIa) + plagioclase, is surrounded by late exoskarn garnet (grt-IIb). The late stage clinopyroxene (cpx-IIc) occurs as an interstitial phase filling the space between the garnets; (C) slab photo showing numerous clinopyroxene-garnet veins in stage I skarn and (D) photomicrograph showing well developed oscillatory zoning in garnet (grt-IIb) with interstitial clinopyroxene (cpx-IIc) in the prograde skarn. Abbreviations; grt = garnet, pl = plagioclase. See Figure 3 for other abbreviations.

서 부분적으로 이방성의 누대구조가 관찰된다 (그림 4D). 단사회석은 석류석의 정출시기의 선 후관계를 기준으로 전기에 정출된 단사회석 (cpx-IIb)과 후기에 정출된 단사회석(cpx-IIc)으로 구분된다. 후기의 단사회석(cpx-IIc)이 단사회석(cpx-IIb)과 석류석(grt-IIb)입자 사이의 공간을 충전하고 있다.

후퇴 스카른(Retrograde Skarn)

각섬석-금운모 맥상 스카른: 각섬석-금운모의 맥상 스카른은 망상 세맥으로 단사회석 세맥을 따라 부분적으로 교대 또는 절단하고 있으며, 주로 각섬석과 함께 소량의 금운모, 녹니석, 방해석이 확인된다.

석영맥: 석영 세맥은 주로 반화강암 내에 망상으로 산출되며, Mg계열 또는 Ca계열 스카른을 절단하는 형태로 최후기에 형성된 것으로 몰리브덴을 수반한다.

스카른의 광물화학

스카른광물에 대한 전자현미분석(EPMA)은 고려대학교 전략광물자원 연구센터의 JXA-8600 SX (JEOL)에 부착된 Oxford의 INCA-6025 EDS를 사용하였고, 가속전압과 전류의 분석조건은 각각 15.0 kV, 5.0 nA, 분석영역 및 시간은 각각 5 µm와 100초이며, XPP법으로 보정되었다.

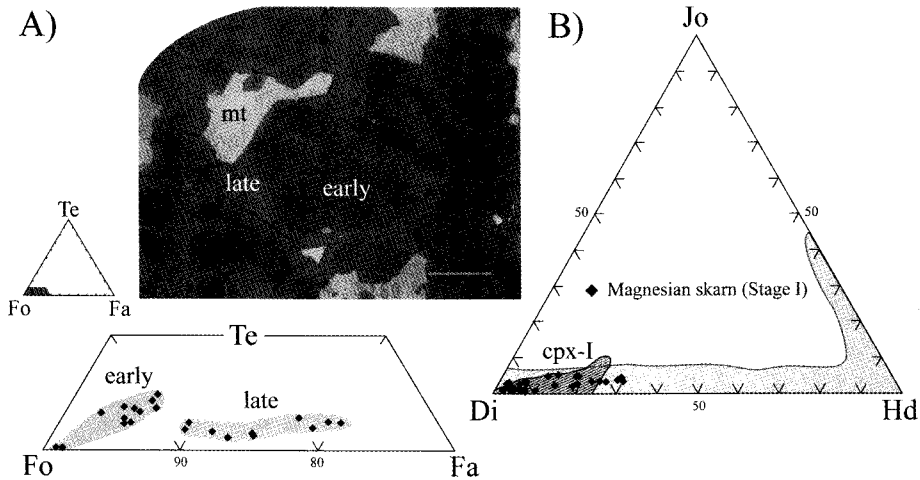


Fig. 5. (A) Back scattered image of stage I (magnesian) skarn together with the compositions of olivine plotted in a ternary Te-Fo-Fa diagram. Olivine shows visible chemical zonation in terms Mg (dark areas) and Fe (light areas) and (B) Clinopyroxene compositions of stage I skarn plotted in the Jo-Di-Hd ternary diagram. The present data is also compared with those of Yang (1991; dark gray field) and Meinert (1992; light gray field). See Table 1 and Fig. 3 for abbreviations.

감람석: 전기 스키르네(stage I) 단계에서만 정출된 감람석의 화학조성[Fo = $Mg \times 100 / (Mg + Fe + Mn)$]은 상대적 정출시기에 따라 다양한 조성변화를 보인다. 상대적으로 초기 정출된 감람석 조성은 Fo = 89.1~98.5 mole%로서 Mg가 부화된 특징을 나타내며, 초기 감람석 입자의 경계부와 외곽부를 따라 상대적으로 후기에 교대된 감람석 조성은 Fo = 77.1~88.7 mole%로 Fe성분이 부화된 변화양상을 보이고 있다(표 1). 전자현미분석의 조성상(BSI)에서도 중심부의 Mg가 부화된 감람석이 입자 경계부를 따라 불규칙적으로 교대되는 특징이 확인된다(그림 5A).

단사휘석: 전기 스키르네(stage I) 단계에서 정출된 단사휘석(cpx-I)은 Mg성분이 전반적으로 부화된 투휘석에 근접한 조성($Jo_{1.0-6.8}Di_{66.6-96.6}Hd_{2.4-29.3}$)을 보인다(표 1; 그림 5B). 후기 스키르네(stage II) 단계에서 정출된 내성 스키르네의 단사휘석(cpx-IIa)은 Mg성분이 전반적으로 부화된 $Jo_{5.1-6.8}Di_{78.6-84.2}Hd_{10.7-15.0}$ 로 특징을 보이는 반면, 맥상으로 산출하는 외성 스키르네의 단사휘석(cpx-IIb)은 $Jo_{4.3-10.8}Di_{19.8-57.9}Hd_{37.0-74.0}$ 로서 Di-Hd의 중간 조성을 보이며 단사휘석(cpx-IIc)은 $Jo_{6.4-12.5}Di_{0.4-2}Hd_{83.7-92.0}$ 의 범위로 철과 망간 함

량이 현저하게 증가되는 경향을 보인다(표 2; 그림 6A).

석류석: 석류석은 후기 스키르네(stage II) 단계에서 정출되며, 내성 스키르네의 석류석(grt-IIa)의 화학조성은 $Ad_{9.9-21.3}Gr_{73.0-83.8}Pyr_{5.4-6.8}$ 로 Al성분이 전반적으로 부화되며, 이는 스키르네화시 반화강암의 화학조성을 반영한 것으로 해석된다. 외성 스키르네의 석류석(grt-IIb)은 $Ad_{38.3-99.7}Gr_{0.0-57.7}Pyr_{1.4-5.4}$ 의 현저한 조성변화를 보이며, 전반적으로 진형적인 화학적 누대구조(Oscillatory zoning)의 반복되는 특징을 나타내며, 결정입자의 중심부에서 외곽부로 갈수록 Fe성분이 부화되는 경향을 보인다(표 2; 그림 6B). 이러한 화학적 누대구조는 연속적으로 공급되는 열수에 기인되며 온도의 변화보다는 열수의 성분변화에 기인한다고 보고된바 있다(Bjorn *et al.*, 1993).

각섬석, 금운모 및 장석: 후회 스키르네시 단사휘석이 교대된 각섬석의 화학조성은 헤이스팅 사이트질 각섬석~헤이스팅사이트 조성특징을 보이는 반면, 세맥으로 산출되는 각섬석의 화학조성은 양기석, 양기석질 각섬석, Fe 각섬석으로 다양한 Fe-Mg의 조성변화를 보인다(표 2). 금운모의 화학조성[$Mg \times 100 / (Mg + Fe)$]은 89.8~94.8로서 Mg성분이 전반적으로 부화된 조성특

Table 1. Representative EPMA analyses of olivine, clinopyroxene and phlogopite of stage I (magnesian) skarn in the lower part of Western Shinyemi ore body

	olivine				clinopyroxene				phlogopite			
	early	early	late	late	cpx-1	cpx-1	cpx-1	cpx-1				
SiO ₂	40.94	41.50	40.76	39.13	SiO ₂	54.62	53.58	53.30	54.96	SiO ₂	41.52	40.17
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	Al ₂ O ₃	0.38	0.87	0.82	0.00	Al ₂ O ₃	13.63	13.66
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	Cr ₂ O ₃	0.00	1.70
FeO*	6.30	3.98	9.12	16.23	FeO*	3.01	2.75	5.20	2.56	FeO*	2.60	2.66
MnO	3.60	3.65	1.77	2.54	MnO	0.42	0.91	1.67	0.94	MnO	0.00	0.26
MgO	49.59	51.14	48.16	42.13	MgO	16.62	16.21	14.21	17.23	MgO	26.35	25.42
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	Na ₂ O	0.00	0.47
CaO	0.00	0.20	0.00	0.00	CaO	25.60	25.42	25.36	25.11	K ₂ O	11.20	10.67
Total	100.43	100.47	99.81	100.03	Total	100.65	99.74	100.56	100.80	Total	95.30	95.01
O = 4					O = 6					O = 22		
Si	0.998	1.001	1.004	0.998	Si	1.984	1.965	1.967	1.990	Si	5.865	5.734
Al	0.000	0.000	0.000	0.000	Al	0.016	0.037	0.036	0.000	Al	2.267	2.296
Fe ²⁺	0.128	0.080	0.188	0.346	Fe ³⁺	0.016	0.033	0.030	0.020	Fe ²⁺	0.307	0.318
Mn	0.074	0.075	0.037	0.055	Fe ²⁺	0.075	0.052	0.130	0.057	Cr	0.000	0.192
Mg	1.802	1.838	1.768	1.602	Mn	0.013	0.028	0.052	0.029	Mn	0.000	0.031
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	Mg	0.900	0.886	0.782	0.930	Mg	5.549	5.410
Ca	0.000	0.005	0.000	0.000	Na	0.000	0.000	0.000	0.000	Na	0.000	0.130
Cations	3.002	2.999	2.997	3.001	Ca	0.996	0.999	1.003	0.974	K	2.018	1.943
					Cations	4.000	4.000	4.000	4.000	Cations	16.006	16.054
Fo	89.9	92.2	88.7	80.0	Jo	1.3	2.9	5.4	2.9			
Fa	6.4	4.0	9.4	17.3	Di	91.1	91.7	81.1	91.5			
Te	3.7	3.8	1.9	2.7	Hd	7.6	5.4	13.5	5.6	Mg#**	94.8	94.4

*Total Fe as FeO

**Mg# = (Mg x 100)/(Mg+Fe)

Abbreviations; Fo = forsterite, Fa = fayalite, Te = tephroite, Jo = johannsenite, Di = diopside, Hd = hedenbergite.

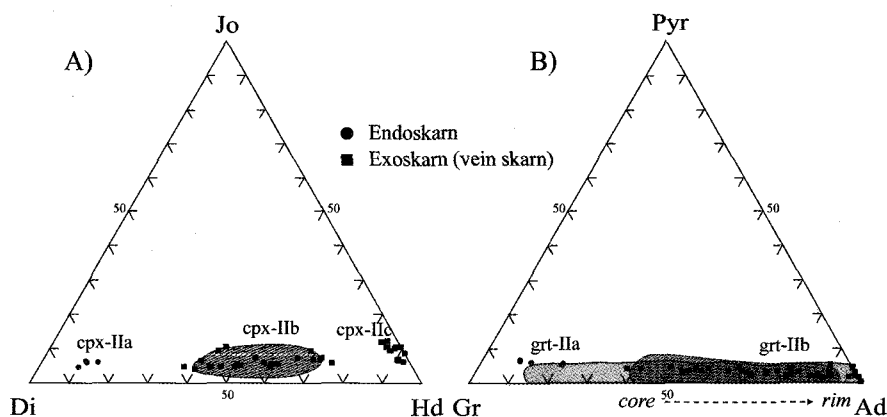


Fig. 6. Chemical compositions of clinopyroxene and garnet of stage II (calcic) skarn plotted in the Jo-Di-Hd (A) and Pyr-Gr-Ad (B) ternary diagrams respectively. Note the variations in chemistry among the early and late clinopyroxenes and garnets. The hatched areas in clinopyroxene and garnet diagrams represent the Mo skarn and the gray field in garnet diagram corresponds to the Fe skarn of Meinert (1992). See Table 2 and Figure 3 for abbreviations.

Table 2. Representative EPMA analyses of clinopyroxene, garnet and amphibole of stage II (calcic) skarn in the lower part of Western Shinyemi ore body

clinopyroxene				garnet				amphibole				
Endoskarn		Exoskarn (vein)		Endoskarn		Exoskarn (vein)		Exoskarn (vein)				
cpx-IIa	cpx-IIa	cpx-IIb	cpx-IIc	grt-IIa	grt-IIa	grt-IIb	grt-IIb					
SiO ₂	53.07	52.39	50.85	48.10	SiO ₂	38.73	39.45	36.98	35.47	SiO ₂	37.58	37.35
Al ₂ O ₃	0.80	0.92		0.54	Al ₂ O ₃	18.43	19.98	12.84	1.21	TiO ₂	0.19	0.22
FeO*	5.09	4.86	14.40	26.90	Fe ₂ O ₃ **	7.17	4.49	15.88	30.20	Al ₂ O ₃	8.77	9.44
MnO	1.94	1.51	3.17	1.94	MnO	2.45	2.26	2.05	0.66	FeO*	34.82	34.11
MgO	14.26	14.26	7.42	0.42	MgO	0.00	0.31	0.00	0.00	MnO	0.94	1.03
CaO	25.17	25.33	24.29	22.20	CaO	33.71	35.11	32.47	32.96	MgO	0.30	0.27
Total	100.33	99.27	100.13	100.10	Total	100.49	101.60	100.22	100.50	CaO	11.17	10.98
O = 6				O = 24				Na ₂ O 1.80 1.73				
Si	1.963	1.955	1.981	1.978	Si	5.958	5.935	5.884	5.945	K ₂ O 1.63 1.97		
Al	0.035	0.040	0.000	0.026	AlIV	0.042	0.065	0.116	0.055	Total 97.20 97.10		
Fe ³⁺	0.039	0.050	0.038	0.018	AlVI	3.296	3.475	2.290	0.183	O = 23		
Fe ²⁺	0.118	0.101	0.432	0.906	Fe ³⁺	0.829	0.508	1.899	3.805	Si	6.234	6.201
Mg	0.786	0.793	0.431	0.026	Mg	0.000	0.070	0.000	0.000	Al	1.713	1.846
Mn	0.061	0.048	0.105	0.068	Mn	0.319	0.288	0.276	0.094	Fe ³⁺	0.864	0.773
Ca	0.998	1.013	1.014	0.978	Ca	5.556	5.660	5.535	5.918	Ti	0.024	0.027
Cations	4.000	4.000	4.000	4.000	Cations	16.000	16.000	16.000	16.000	Mg	0.074	0.067
								Fe ²⁺ 3.966 3.963				
Jo	6.3	5.1	10.8	6.8	Ad	21.2	12.8	49.1	96.1	Mn	0.132	0.145
Di	81.5	84.2	44.5	2.6	Gr	73.4	81.1	46.2	2.3	Ca	1.985	1.953
Hd	12.2	160.7	44.6	90.6	Pyr	5.4	6.1	4.8	1.6	Na	0.008	0.025
								Cations 15.916 15.949				

*Total Fe as FeO

**Total Fe as Fe₂O₃

Abbreviations; Ad = andradite, Gr = grossular, Pyr = pyralspite (see Table 1 for other abbreviations).

징을 보인다(표 1). 또한, 내성 스키르네에서 확인된 정장석과 사장석의 화학조성은 각각 Ab_{8.0-9.4}An_{0.0}Or_{90.6-92.0}과 Ab_{87.4-98.0}An_{2.0-11.6}Or_{0.0-4.5}이며, 사장석은 주로 Na성분이 부화된 특징을 보인다.

스키르네의 생성환경

신에미 서부광체 하부의 스키르네화 작용은 주로 Mg계열 스키르네로 전진 스키르네 단계 광물인 자철석 + 감람석 + 단사회석 ± 사장석으로부터 후퇴 스키르네 광물인 사문석 + 녹니석 + 투각섬석 ± 금운모 ± 활석의 광물조합을 보이고 있다. 또한, 서부광체의 상부에서는 전반적으로 전기 스키르네 단계 광물은 휘수연석-섬아연석-황철석의 황화광물 또는 자철석-합수 스키르네

광물이 중첩된 양상을 보이고 있으며, 하부에서는 주로 Mg계열 스키르네광물인 자철석-감람석-투회석으로 이루어진 철 광체와 국부적으로 휘수연석 세맥군이 중첩되는 양상을 보이고 있다.

자류철석-황철석과 공존하는 섬아연석의 철 함량은 19.75~20.38 mole% FeS로서 섬아연석 지질압력계에서 추정된 압력(Yang, 1991)과 유체포유물에서 유도된 유체압(배영부, 1992)은 각각 0.5 ± 0.2 kbar와 0.39 ± 0.07 kbar로 보고된 바 있다. 또한 관계화성암으로 확인된 신에미화강암류는 석영반암, 반화강암, 유문암질 반화강암맥과 같은 전형적인 천부환경에서 정지된 산출상태를 보이고 있다(그림 2). 섬아연석 지질압력계, 유체포유물, 관계화성암의 산상을 종합적으로 고려하여 신에미광상의 스키르네화작

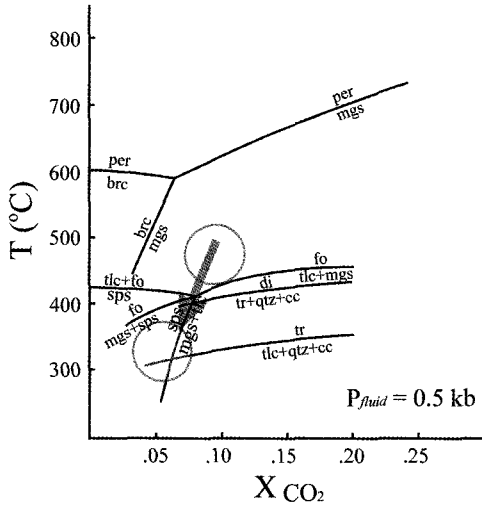


Fig. 7. The schematic evolutionary path of the ore bearing fluids during various stages of mineralization in the lower part of Western Shinyemi ore body as deduced from the X_{CO_2} versus Temperature diagram at 0.5 kbars fluid pressure and $X_{CO_2} < 1$ (Harris and Einaudi, 1982). Abbreviations; amp = amphibole, brc = brucite, cc = calcite, mgs = magnesite, per = periclase, sps = serpentine, tlc = talc. See Table 1 and Fig. 2 for other abbreviations.

용 및 광화작용시 광화유체의 압력과 X_{CO_2} 분압은 약 0.5 kbar와 $X_{CO_2} = < 0.1$ 의 개방계 환경으로 해석된다(최선규 외, 2006). 그리고 전기 스퀴르(stage I) 단계에서 정출된 스퀴르광물의 공생관계를 통하여 다음과 같이 스퀴르화작용이 유도된 온도 범위를 추정할 수 있다. 전진 스퀴르광물은 주로 백운암을 모암으로 교대한 Mg 계열 스퀴르암으로 자철석 + 감람석 + 투휘석의 광물조합을 보이며, 이러한 전진 스퀴르 광물군은 규회석 ± 사장석의 고온 안정영역과 사문석 + 녹니석 + 투각섬석 + 녹립석의 저온 안정영역 사이인 약 550°C에서 약 400°C의 온도 범위에 해당되며, X_{CO_2} 분압은 전반적으로 매우 낮은 환경에서 진행된 반면, 후퇴 스퀴르 광물군을 통하여 약 400°C에서 약 300°C의 온도 범위로 추정된다(그림 7). 서부광체는 약 500 m 이상의 수직 연장을 보이며, 상부에서 하부 스퀴르대로 갈수록 전진 스퀴르 광물이 우세하게 배태되는 양상을 보인다. 또한, 서부광체 하부 스퀴르대는 후기 스퀴르 단계에 재차 유입된 열수 공급에 기인하여 회철휘석 + 석류석 + 각섬석 + 석

영 ± 휘수연석의 망상 세맥(veinlet skarn)이 전기 스퀴르 단계의 괴상 자철석+감람석+투휘석을 절단하며 증첩된 양상을 보인다.

토 의

신예미 스퀴르광상에 배태되는 금속(광석광물) 유형은 주로 기원 물질인 관계 화성암의 성인적 특성과 함께 광화유체의 물리-화학적 환경변화에 따라 좌우되고 있다. 몰리브덴 스퀴르광상은 조구조적 관점에서 대륙성 섭입대의 자철석 계열 천부 화성활동과 밀접한 연관성을 보이고 있으며(Meinert et al., 2005), 결정분화작용이 매우 진행된 I형 화강암류의 최종 분화단계에서 유리된 광화유체가 직접 관여하여 공간적으로 근지성 광상으로 배태되고 있다(Carten et al., 1993).

관계 화성암인 신예미화강암류는 세립질 화강암, 석영반암, 반화강암, 유문암질 각력암과 같은 전형적인 천부환경에서 정지된 특징을 보이고 있으며(그림 2), 결정분화작용이 상당히 진행된 지화학적 특성(>70 wt% SiO_2)을 나타내고 있다(최선규 외, 2006). 신예미광상은 철, 아연, 몰리브덴, 동 및 연이 수반되는 다금속 광화작용의 특징을 보이고 있으며, 생산량 자료를 종합적으로 비교한 결과, Fe를 제외한 금속비는 $Zn > Mo > Cu > Pb$ 와 같은 양적 관계를 보이고 있다.

신예미광상은 스퀴르화작용과 관련된 전형적인 Mg계열 철 광화작용의 특징을 보이고 있으나, 기타 금속 생산량 중 Mo/Cu 누적평균비가 1.13으로서 Cu에 비하여 Mo가 부화된 전형적인 Mo형 광상(Mo/Cu > 1.0)에 해당하는 금속비를 나타내고 있다. 이는 관계화성암으로 간주되는 신예미화강암류의 지화학적 특성이 이전에 보고된 Mo/Cu 금속비와 서로 일치된 결과로서 철 이외에 몰리브덴을 수반하는 생산성 화강암체로 해석된다(최선규 외, 2006). 또한 서부광체의 하부에서 철 광체 또는 반화강암에 배태된 함휘수연석 망상 세맥의 몰리브덴 광화작용과 스퀴르화작용이 확인되었으며, 이는 철 스퀴르화작용 이후에 잔류 광화유체의 유입에 따른 몰리브덴 광화작용의 가능성을 시사하고 있다. 이러한 산상은 광화유체의 진화과정 중 전반적으로 후기 정출환경을 시사하고 있으며,

반암형 광상에서 후기 단계의 광화 유체 내 Mo/Cu비가 증가하는 경향과 서로 일치하고 있다.

결 언

신예미광상은 캄브리아기-오르도비스기 조선 누층군(막골층)의 탄산염암을 모암으로 하여 천부환경에서 정치된 신예미 화강암체(세립질 화강암, 반화강암, 석영반암, 유문암질 각력암)의 관입접촉부를 따라 배대된 스카른형 철-몰리브덴 광상 및 열수교대형 아연-연-동 광상의 다급속 광화작용의 특징을 보이고 있다. 신예미 서부광체 하부의 스카른화작용은 전기 스카른(stage I) 단계에 괴상의 철 스카른광상이 형성된 이후 후기 스카른(stage II) 단계에 망상의 몰리브덴 스카른광상이 중첩되어 배대되는 양상을 보이고 있다. 전기 스카른 단계에 형성된 스카른은 백운암이 교대된 Mg계열 스카른광물인 감람석, 투휘석과 자철석이 우세하게 관찰되는 반면, 후기 스카른 단계에 형성된 스카른대는 Ca계열 스카른 광물인 회철회석, 석류석, 각섬석의 광물조합으로 전기의 Mg계열 스카른에 중첩되고 있다. 전기와 후기 스카른 단계는 구성광물과 산출조직에 따라 전진과 후퇴 스카른이 구분된다. 또한 후기 스카른 단계의 전진 스카른은 모암 유형에 따라 내성과 외성 또는 맥상 스카른으로 세분되며, 철 광체의 하부에서 휘수연석을 수반한 망상 세맥이 산출되어 몰리브덴의 부존 가능성을 시사한다.

신예미 서부광체 하부의 스카른화작용 및 광화작용은 광화유체의 압력과 X_{CO_2} 분압이 약 0.5 kbar과 $X_{CO_2} = <0.1$ 의 개방계 환경에서 유도되었다. 감람석, 투휘석, 자철석과 같은 무수 스카른광물의 공생관계, 화학조성 및 열역학적 자료를 근거한 Mg계열 스카른대의 생성환경은 약 400~550°C 온도범위에서 전진 스카른과 철 광화작용이 진행되었으며, 후퇴 스카른 단계에서는 금운모, 각섬석, 사문석과 같은 함수 규산염 광물의 안정영역으로부터 약 300~400°C 온도 범위로 추정된다.

사 사

본 논문은 2006 과학기술부의 재원으로 과학재단 특정기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구(R01-2006-000-10553-0)로 고려대학교 전략광물자원 연구센터, 대한광업진흥공사와 공동으로 수행되었으며, 논문심사에 유익한 조언을 주신 박맹연 교수님, 최상훈 교수님께 깊은 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- 박희인, 장호완, 진명식 (1988) 태백산지역 내 광상의 생성연령. 광산지질, 21, 57-67.
- 배영부 (1992) 신예미광산 북암광체에 관한 연구. 지구과학회지, 13, 127-135.
- 윤현수 (1986) 함백분지 남부지역에 분포하는 백악기 화성암질 암체의 암석화학적 연구. 광산지질, 19, 175-191.
- 최덕근, 이동진 (2002) 강원도 태백지역 캄브리아-오르도비스계 태백층군의 층서와 화석상. 한국고생물학회 추계 학술답사안내서. 42p.
- 최선규, 김창성, 서지은, 박정우, 유인걸, 김량희, 신종기, 김남혁 (2006) 2006 벤처탐사 학술연구 용역 보고서(몰리브덴: 예미지구). 대한광업진흥공사, 85p.
- Bjorn J., Roy A.W. and Donal G.F. (1993) Zonation patterns of skarn garnets: Records of hydrothermal system evolution. Geology, 21, 113-116.
- 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., Thorpe, R.I., Duke, J.M., eds., Mineral Deposit Modeling: Geological Association of Canada, Special Paper 40, 521-554.
- Choi, D.K. (1998) The Yongwol Group (Cambrian-Ordovician) redefined: a proposal for the stratigraphic nomenclature of the Choson Supergroup. Geoscience Jour., 2, 220-234.
- Harris, N.B. and Einaudi, M.T. (1982) skarn deposits in the Yerington District, Nevada: Metasomatic skarn evolution near Ludwig. Econ. Geol., 77, 877-898.
- Hong, Y.K. (1986) Geochemistry and K-Ar age of the Imok granite at the southwestern part of the Hambaeg Basin, Korea. Jour. Korean Inst. Mining Geol., 19, 97-107.
- Kim, K.H. and Nakai, N. (1982) Sulfur isotope composition and isotopic temperatures of the Shinyemi lead and zinc ore deposit, western Taebaegsan Metallogenic Belt, Korea. Jour. Korean Inst.

- Mining Geol., 15, 155-166.
- Kim, K.H., Nakai, N. and Kim, O.J. (1981) A mineralogical study of the skarn minerals from the shinyemi Lead-Zinc ore deposits, Korea. Jour. Korean Inst. Mining Geol., 14, 167-182.
- Kim, O.J. and Kim, K.H. (1978) On the genesis of the ore deposits of Yemi district in the Taebaegsan metallogenic province. Jour. Natural Sci. Yonsei Univ., 2, 71-94.
- Meinert, L.D. (1992) Skarns and skarn deposits. Geoscience Canada, 19, 145-162.
- Meinert, L.D., Dipple, G.M. and Nicolescu, S. (2005) World skarn deposits. Economic Geology 100th Anniversary Volume, 299-336.
- Sato, K., Shibata, K., Uchiumi, S. and Shimazaki, H. (1981) Mineralization age of the Shinyemi Zn-Pb-Mo deposit in the Taebaegsan area, Southern Korea. Mining Geology, 31, 333-336.
- 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. 323p.
-
- 2006년 12월 27일 원고접수, 2007년 3월 23일 게재승인.