

## 스카른 잠두 광체 예측을 위한 아연-연 광상 성인의 재검토

최선규<sup>1\*</sup> · 최부갑<sup>2</sup> · 안용환<sup>1</sup> · 김태형<sup>2</sup>

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

## Re-evaluation of Genetic Environments of Zinc-lead Deposits to Predict Hidden Skarn Orebody

Seon-Gyu Choi<sup>1\*</sup>, Bu Kap Choi<sup>2</sup>, Yong Hwan Ahn<sup>1</sup> and Tae Hyeong Kim<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Korea Resources Corporation, Seoul 156-706, Korea

The Taebaeksan mineralized province, which is the most important one in South Korea, is rich in zinc-lead-tungsten-copper-molybdenum-silver-gold mineral resources and has a diversity of deposit styles. These deposits principally coexist in time and space with porphyry-related epigenetic deposit such as skarn, hydrothermal replacement, mesothermal vein, and Carlin-like deposits. The magmatic-hydrothermal systems in the Taebaek fold belt is genetically characterized by the Bulguksa subvolcanic rocks(ca. 110~50 Ma) related to northwestward subduction of the paleo-Pacific Plate. The most important zinc-lead deposits in the area are the Uljin, Yeonhwa II and Shinyemi skarn, the Janggum hydrothermal replacement, and the Yeonhwa I intermediate-mixed (skarn/hydrothermal replacement) ones. In the present study, we present a compilation of metal production and mineral assemblage of the zinc-lead deposits. The metal difference of deposit styles in the area indicates a cooling path from intermediate-sulfidation to low-sulfidation state in the polymetallic hydrothermal system, reflecting spatial proximity to a magmatic source.

**Key words :** Taebaeksan, zinc-lead, skarn, hydrothermal replacement, genetic environment

태백산 광화대는 Zn·Pb·W·Fe·Cu·Mo·Ag·Au와 같은 금속이 다량 수반되는 국내에서 가장 중요한 광화대로서 다양한 광상유형이 배태되고 있다. 이러한 광상 유형은 스카른 광상, 열수교대 광상, 중열수 맥상 광상, 칼린 광상으로 시·공간적 측면에서 반암형 광화작용과 밀접한 연관성을 보이고 있다. 태백산 광화대에서 천부 마그마-열수 시스템은 고태평양 판의 북서 방향의 섭입과 관련된 불국사 화성활동(약 110~50 Ma)과 연계되어 있다. 특히 국내에서 대표적인 아연-연 스카른 광상인 제2연화, 신에미, 울진 광상과 열수교대 광상인 장군 광상 그리고 중간 혼합형(스카른/열수교대 혼합형)에 속하는 제1연화 광상을 대상으로 금속비, 광물조합 및 생성환경을 비교하여, 광화유체의 진화에 따른 특성을 검토하였다. 이러한 광상 유형의 금속비는 관계 화강암체의 근원물질로부터 온도 하강에 따라 중간형 황 조건에서 저황 조건으로 변화하는 정출환경을 시사하고 있으며, 다금속 광화작용시 각 광상별 공간적 근접성에 기인한 유체의 진화단계 차이를 반영하고 있다.

**주요어 :** 태백산, 아연-연, 스카른, 열수교대, 생성환경

### 1. 서 론

최근 수년 전부터 나타나는 금속 가격의 급격한 변화는 글로벌 경제에서 광물자원의 장기적 수급불안정을 유도하고 있다. 이에 미국을 비롯한 선진공업국은

세계광물자원의 부존 현황에 대한 재평가를 실시하여 광물자원의 안정공급을 위한 국가 정책방향을 검토하고 있다. 특히 주요 자원선진국 기업과 다국적 메이저 기업은 부존 가능성이 높은 세계 주요 광화대를 대상으로 광상 유형별 예측 가능한 탐사모델 기법을 개발

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

하여 체계적인 기술적 검토를 실시하고 있다. 즉 광물 자원의 부존 가능지역에 대한 탐사 효율성을 극대화하기 위하여 기 개발 지역(brown field)에서 정립된 핵심 인자에 대한 분석기법을 미개발 지역(green field)의 광역/정밀 탐사기술로 확대 적용하고 있다. 동시에 탐사 프로젝트는 과거 천부 고품위 광체를 개발하였던 인접 지역과 심부 부존이 예상되는 대규모 잠두 광체를 예측하기 위한 광상의 성인모델 연구에 중점을 두고 있다.

국외에서 광물자원의 효율적 탐사를 위한 광상유형별 성인연구는 지체구조의 순차적 변화에서 나타나는 구조운동, 분지진화와 관련된 퇴적작용, 화성활동, 변성작용과의 상호 연계성을 체계적으로 도입하여 지질시대별 지구동력학적 모델과 통합 지질학 자료에서 유도된 광상유형별 모델을 제시하여 광역 탐사에 적용하고 있다(Corbett and Leach, 1998). 또한 정밀 탐사에서는 광상구 단위의 예측 가능한 광상모델을 설정, 광화유체/유용 원소의 기원으로부터 분지 발달에서 변형 단계까지 열적 진화에 따라 광화유체의 이동 및 축적 과정과 함께 유체 이동시기 및 농집 메커니즘에 대한 시·공간적 해석기법을 적용하고 있다(Sillitoe, 2008). 한편 중요 광화대에 대한 광물자원 탐사의 기술적 검토는 기존 광상에 대한 배태 양상과 함께 잠두 광체의

부존 가능성을 예측하기 위한 열수시스템의 통합지질 해석과 함께 특정 광상유형에 대한 모델링 연구에 주력하고 있다.

한반도는 고태평양 판이 지속적으로 섭입되는 전형적인 대륙 주변부에 위치하여 지체구조의 변화와 관련된 복합적인 지질작용이 중첩됨으로 쥐라기를 거쳐 백악기/제삼기까지 활발한 화성활동과 함께 지열수계가 다양한 심도에서 유도됨으로써 지질시대에 따라 서로 다른 유형의 금속광화작용이 수반되고 있다(Choi et al., 2005). 따라서 본 연구에서는 태백산지역 연·아연 광상을 대상으로 심부광체의 부존 가능성을 규명하기 위하여 기존에 개발되었던 국내 스키른/열수교대 광상을 대상으로 지질·광상학적 측면에서 열수시스템의 진화에 따른 광상유형간 연계성을 규명하고자 한다.

## 2. 태백산 지역 아연-연 광상의 지질

태백산 광화대는 귀금속, 비철금속 및 철합금 금속과 같은 금속종이 수반되는 다금속 광화작용의 특징을 보이고 있으며, 광상유형은 주변모암의 유형 및 생성환경에 따라 스키른 광상, 열수교대 광상, 칼린 광상, 중열수 맥상 광상으로 광범위한 지역에 걸쳐 배태되고 있다(Pak et al., 2004). 특히 상동, 제1연화, 제2연화, 신예미,

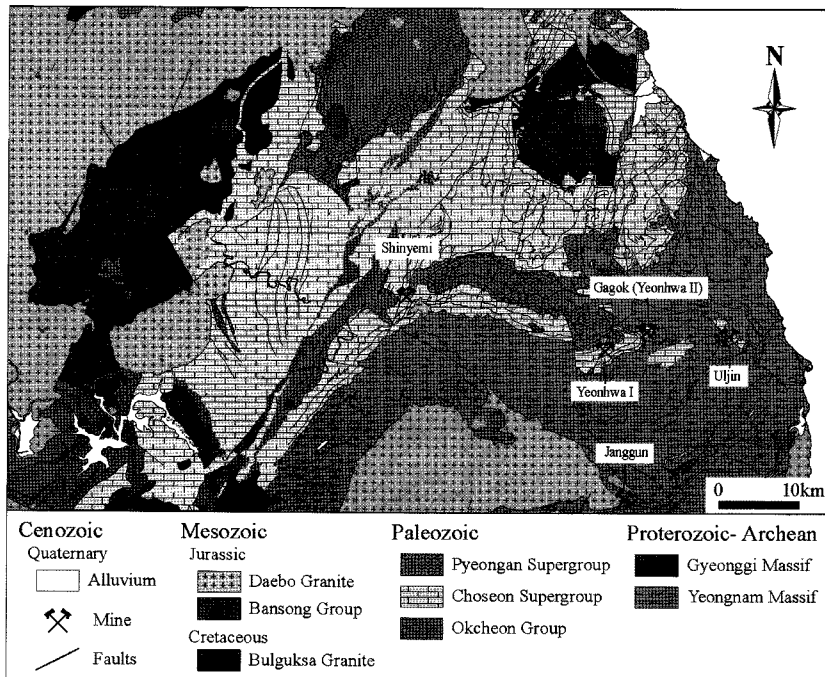


Fig. 1. Geologic map of the Taebaeksan mineralized province, showing the locations of zinc-lead skarn/hydrothermal replacement deposits.

거도, 장군, 일동, 울진 등 스카른/열수교대 광상에서 Zn·Pb·Cu·Fe·W와 함께 Ag·Au·Bi·Mo·Sb와 같은 다양한 금속 종이 부산물로 보고되고 있다(Fig. 1).

태백산 광화대의 광역 지질은 영남육괴에 속하는 선캠브리아이언 변성암류를 기반암으로 하여 고생대 조선누층군과 평안누층군으로 구성된 함백지향사의 남익부를 따라 주로 스카른/열수교대 광상이 배태되며, 후기에 관입한 화성암은 트리아스기 램프로파이어(lamprophyre), 쥐라기 화강암류 그리고 백악기 반심성암류로 구성된다. 또한 국내의 대표적인 연·아연 광상인 제1연화, 제2연화, 장군, 울진, 신예미 광산은 전반적으로 유사한 지질환경을 배경으로 형성되었고(Yun, 1978), 광상성인 관점에서 스카른/열수교대 광상간 서로 연계 가능성을 시사하고 있다(Table 1). 기존에 연구되었던 광물-지화학 자료로부터 광상의 성인 측면에서 생성환경에 따른 광화유체의 진화 특성을 비교하여 잠두 광체의 부존 가능성을 검토하고자 한다.

**제 1, 2 연화광산:** 광상 주변 지질은 조선누층군으로 대비되는 장산 규암층, 묘봉층, 풍촌층, 화절층, 동점층, 두무동층, 막동층과 부정합으로 덮고 있는 평안누층군, 후기에 관입한 트리아스기 램프로파이어와 백악기 반암류로 구성된다. 제1연화광산의 주변 화성암의 관입 시기는 램프로파이어에서 213 Ma(Yun and Silberman, 1979) 및 석영반암에서 75 Ma로서 보고된 바 있으며, 제2연화광산에서는 석영몬조반암이 기재되어 있다. 제1연화광산은 본 광체인 본산-동점 지역과 북측 연장부에서 확인된 태백지역으로 구분되며, 본산 지역은 1935년부터 Pb, Zn, Mn을 대상으로 소규모 개발이 시작되었고, 태백지역은 1987년부터 심부 광체를 대상으로 본격적인 개발이 유도되었다. 1970년부터 1993년까지 생산량은 아연 879,000 t (50% Zn), 연 326,000 t (50% Pb), 동 2,000 t (25% Cu), 순은 약 25 t (99.9% Ag)이다. 반면에 제2연화광산은 1971년부터 1987년까지 아연 621,000 t (50% Zn), 연 29,000 t (50% Pb), 동 5,900 t (25% Cu), 순은 약 4 t (99.9% Ag)의 생산실적이 보고된 바 있다. 제1연화와 제2연화 광상의 누적 생산 실적에 대한 금속비는 서로 다른 광석광물의 양적 관계와 함께 정출 환경의 차이를 시사하고 있다(Table 2).

광상 유형은 주로 묘봉층, 풍촌층에 협재된 석회암을 교대/절단하고 있는 열수교대 광상과 스카른 광상으로 광체에 따라 서로 다른 복합적인 부존양상을 보이고 있을 뿐만 아니라(Han, 1969), 광체는 각력상 파이프, 불규칙한 괴상, 맥상, 판상 광체로 다양한 산출

특징을 보이고 있다(Lee *et al.*, 1990). 제1연화 광상에서는 주로 각력상 파이프, 불규칙한 괴상, 판상 광체로 배태되며(Yun and Einaudi, 1982), 본산-동점 지역의 광체는 전반적으로 열수교대 광상과 스카른 광상의 특성이 모두 나타나는 양상을 보이지만, 태백 광체는 상대적으로 심부에 위치하고 있으나 단지 탄산염 광물만을 수반하고 있는 전형적인 열수교대 광상으로 배태된다(Je and Lee, 1987; Koh *et al.*, 1992).

반면 제2연화 광상에서는 각력상 파이프, 맥상 광체에 비하여 판상 광체가 우세하게 배태되고 있어, 슬레이트와 석회암간 층서 규제와 함께 인접한 화강암류의 구조 요소가 광화작용시 중요한 인자로 작용하고 있으며(Han, 1972), 광상은 전반적으로 Ca계열 규산염광물이 지배적인 스카른화작용을 나타내고 있다(Yun, 1979). 제1연화의 태백광체에서 보고된 연·아연 광화작용은 74 Ma, 75 Ma이고(Park *et al.*, 1988; So *et al.*, 1993), 제2연화에서 연·아연 광화작용은 73 Ma로 유사한 생성 연대를 보이며(Yun and Silberman, 1979), 제1연화의 석영반암의 생성연대와 일치하고 있다.

**장군 광산:** 광상 주변의 광역 지질은 영남육괴에 속하는 선캠브리아이언 변성암류를 기반암으로 하여 조선누층군으로 대비되는 장산 규암층, 두음리층, 장군석회암층과 부정합으로 덮고 있는 평안누층군으로 대비되는 동수곡층과 재산층으로 구성되며, 후기에 관입한 쥐라기와 백악기 화강암류로 구성된다(Lee *et al.*, 1990). 장군광산과 인접한 지역에 분포하고 있는 화강암체는 춘양 화강암복합체와 백악기 천부 반심성암체로 구분된다. 두 암체에 대한 기보고된 절대연령은 춘양 화강암복합체에서 149 및 133 Ma(Lee *et al.*, 1998; Kim, 1971) 그리고 반심성암체(granophyre)에서 78 Ma로서 두 암체는 생성연대뿐만 아니라 정치 심도에서도 현저한 차이를 나타내고 있다. 장군광산은 1941년부터 최상부에 노출된 망간을 대상으로 개발되었으나, 1977년부터 2001년까지 망간광체의 하부에 분포하고 있는 연·아연 광체를 대상으로 아연 251,759 t (50% Zn), 연 137,731 t (50% Pb), 순은 약 134 t (99.9% Ag)를 생산하였다. 이러한 생산량자료를 종합적으로 비교한 결과 Fe, Mn을 제외한 금속비는 Zn>Pb>>Ag와 같은 양적 관계를 보이고 있다.

광상 유형은 장군석회암의 상부 백운암을 교대한 Mg 계열 스카른형 철광상과 Ca계열 석회암을 교대한 열수교대형 연·아연-은광상으로 구분된다(Lee *et al.*, 1990). 연·아연-은 광체는 각력상 파이프, 불규칙한 괴상, 판상 광체의 다양한 형태로 산출되며(Kho, 1987), 전반적으

Table 1. Comparative geological features of various deposit styles of major Zn-Pb deposits in the Taebaeksan mineralized province

Mine	Morphology of orebodies	Host-rock lithology	Age (Ma)		Distance to pluton	Reference
			Mineralization	Igneous rock		
Janggun	chimney-shaped » stratiform	Paleozoic upper carbonate rocks	70, 71, 74	78 (granophyre)	ca. 2 km	Lee <i>et al.</i> (1998)
	stratiform » chimney-shaped		107		not found	
Shinyemi	chimney-shaped, vein	Paleozoic upper carbonate rocks	75	75 (granite)	within 300 m	Sato <i>et al.</i> (1981), Mariko and Yang (1993)
	chimney-shaped » stratiform		78, 77	77		Park <i>et al.</i> (1988), Mariko and Yang (1993)
Ujjin	chimney-shaped	Paleozoic carbonate rocks		49 (rhyodacite), 52 (granite)	within 300 m	Yun and Silberman (1979), Yun and Einaudi (1982)
Yeonhwa I	chimney-shaped, vein ≥ stratiform	Paleozoic lower carbonate rocks	74, 75	75	ca. 1.0 km (Taebaek) not found (Bonsan)	Park <i>et al.</i> (1988), So <i>et al.</i> (1993)
Yeonhwa II	stratiform » chimney-shaped	Paleozoic lower carbonate rocks	73	? (quartz monzonite porphyry)	within 300 m	Yun and Silberman (1979)

**Table 2.** Associated metal productions of major Zn-Pb-Cu deposits

Mine	Cumulative production						Zn index*	Working period	
	Cu (25%)	Pb (50%)	Zn (50%)	Fe (56%)	MoS <sub>2</sub> (90%)	Ag (99%)			
Janggum	100	137,731	251,759			133.9	646	1977	2001
Shinyemi	854	86	55,882	2,162,509	795		998	1982	operating
Uljin	13,074	41,168	118,159			4.5	742	1971	1986
Yeonhwa I	2,016	326,234	879,167			24.5	729	1970	1993
Yeonhwa II	5,384	29,028	620,978			4.0	955	1971	1987

\*Zn index=Znx1000/(Zn+Pb)

로 층리를 절단하고 있어 층서적 지배 요소보다는 춘양화강암의 동서 방향으로 발달한 수지상 암맥과 관입 이후에 형성된 남북방향의 약선대를 중심으로 지질구조적 요인에 따라 광체가 배태되는 특징을 보이고 있는 반면, 남측에 위치한 스카른형 철광상은 주로 화강암과 백운암의 접촉대에 집중된 양상을 보이고 있다 (Lee *et al.*, 1996). 또한, 철광체에서 생성연대는 철광화작용이 107 Ma, 연·아연-은 광화작용이 70 Ma로 서로 상이한 연대를 보이고 있는 반면, 북측에 위치한 기타 연·아연-은 광체의 생성연대는 각각 74, 71 Ma로 보고되고 있다 (Lee *et al.*, 1998). 즉 스카른 작용에 수반된 철광화작용과 열수교대작용과 관련된 연·아연-은 광화작용은 인접한 쥐라기 춘양 화강암과는 서로 상이한 연대를 지시하고 있으며, 연·아연-은 광화작용은 철광화작용이 종료된 이후 별개의 화성활동과 연계된 서로 다른 후기 백악기 광화작용으로 해석된다.

**신예미 광상:** 신예미지역의 지질은 조선누층군의 상부층인 두무동층, 막동층, 직운산층 및 두위봉층과 부정합으로 덮고 있는 평안누층군의 홍점층으로 구성되며, 백악기 화강암류가 관입하고 있다. 신예미 지역에서 확인된 화성암체는 두무동층을 관입하는 있는 이목중립질 흑운모 화강암체와 막동층을 관입하고 있는 신예미 세립질 화강암류로 구분된다. 두 암체의 기 발표된 생성연대는 이목화강암에서 89 및 97 Ma (Kim, 1971; Yang, 1991)와 신예미 화강반암에서 60, 75 및 77 Ma로 두 암체는 생성연대의 차이뿐만 아니라 서로 다른 심도에서 관입 정지된 양상을 보이고 있다 (Kim *et al.*, 1981; Yang, 1991; Mariko and Yang, 1993). 특히 광상주변에 분포하고 있는 화강암류는 화강반암/석영반암/반화강암/규장암/유문암질 각력암으로 기재되고 있으나 이는 전반적으로 천부 관입암체의 전형적인 산상을 보이고 있으며, 주로 파이프상, 다이아트랩상 및 맥상으로 관입하고 있다.

광상 유형은 주로 막동층의 백운암/석회암과 석영

반암과의 접촉부를 따라 발달하는 스카른(국부적 열수교대) 광상으로 배태되고 있으며, 전반적으로 각력상, 불규칙한 괴상, 맥상 광체의 부존양상과 함께 국부적으로 층상교대의 특징을 나타내고 있다 (Seo *et al.*, 2007). 동부광체 및 서부광체의 상부를 중심으로 스카른화작용과 함께 중온성 열수교대작용 (Kim *et al.*, 1981; Bae, 1992)에 따른 아연-동-연 광화작용이 우세한 반면, 서부광체는 고온성 스카른화작용 (Yang, 1991)과 관련된 전형적인 철광화작용의 특징을 나타내고 있다. 신예미광산은 1970년부터 1982년까지 동부광체와 서부광체의 상부에서 황화광물을 대상으로 아연 55,900 t (50% Zn), 몰리브덴 700 t (90% MoS<sub>2</sub>), 동 900 t (25% Cu), 연 90 t (50% Pb)를 생산하였고, 1982년부터 현재까지 서부광체의 하부에서 자철석을 대상으로 2,775,740 t (50% Fe)를 생산하였다. 최근 서부광체의 하부 철광체와 반화강암에 배태된 망상세맥의 몰리브데늄 광화작용이 확인되고 있다.

신예미 스카른광상의 생성연대는 동부광체에서 75 Ma, 78 Ma로, 서부광체에서 77 Ma로 동일한 광화시기를 보이고 있으며 (Sato *et al.*, 1981; Park *et al.*, 1988; Yang, 1991), 동부광체 주변의 신예미 화강암의 생성연대와 서부광체에서 확인된 반암의 생성연대와 전반적으로 일치하고 있어 신예미광상은 스카른 유형 중 관계화성암과 인접한 근지성 유형으로 해석된다.

**울진 광산:** 광상 주변의 광역 지질은 영남육괴에 속하는 선캄브리아이언 변성암류를 기반암으로 석탄기에 관입한 울진 화강암(297 Ma)에 포획된 조선누층군의 묘봉층과 풍촌석회암층을 모암으로 하여 광상이 배태되고 있으며, 제3기에 관입한 유문암질 테사이트(49 Ma)이 관계 화성암으로 간주되고 있다 (Yun and Silberman, 1979). 광체는 파이프상, 버섯모양의 산출 양상을 보이고 있다 (Yun and Einaudi, 1982). 1971년부터 1986년까지 생산량은 아연정광 118,000 t (50% Zn), 연정광 41,000 t (50% Pb), 동정광 13,000 t (25% Cu), 순은

약 4.5 t (99.9% Ag)이다.

### 3. 연-아연 광화작용의 광물학적 특성

태백산 지역의 대표적인 아연-연 광상유형은 탄산염을 모암으로 하여 교대된 광상으로 주로 맥석광물군의 특성인 스키르콘광물(calc-silicates)과 탄산염광물의 존재 유무 및 상대적 양비에 따라 광상성인 측면에서 스키르콘 광상, 열수교대 광상 그리고 스키르콘/열수교대 혼합형 광상으로 분류할 수 있으며, 장군광산의 연-아연 광체와 제1연화광산의 태백지역은 전형적인 열수교대 광상으로, 제2연화, 울진, 신에미 광산은 전형적인 스키르콘 광상으로, 제1연화광산의 본산지역은 스키르콘/열수교대 혼합형 광상으로 구분된다. 각 광산에서 인금된 맥석광물 및 광석광물에 대하여 광상 유형에 따라 광물 공생관계 및 산출 빈도를 검토한 결과(Tables 2, 3), 광산별 기존 누적 생산량과 전반적으로 일치하고 있다.

스키르콘형 아연-연 광상인 제2연화, 울진, 신에미 광산은 관계화성암체와 약 500 m 이내로 인접하게 위치하고 있으며, 화성암체와 탄산염암의 접촉부를 따라 내성 및 외성 스키르콘대가 발달하고 있다. 스키르콘 광물 유형은 백운암 또는 석회암의 조성차이를 반영하여 Mg계열 또는 Ca계열 스키르콘 광물조합을 보이고 있으며, 주로 사방휘석, 준휘석, 석류석 및 감람석의 무수 스키르콘광물과 함께 다양한 함수 스키르콘광물이 수반된다(Table 3). 광석광물로는 전반적으로 섬아연석, 방연석, 황동석, 자류철석, 황철석, 백철석, 유비철석의 단순한 황화광물의 공생관계를 보여주고 있으며, 국부적으로 자철석, 회중석, 휘수연석이 관찰된다. 예외적으로 신에미광산은 비철금속 황화광물 및 휘수연석과 함께 자철석이 다량 산출되는 다금속 광화작용의 광물학적 특징을 보이고 있다.

열수교대형 광상인 장군광산의 연-아연 광체와 제1연화광산의 태백광체에서는 관계화성암으로 간주되는 암체가 약 1 km이내에 확인된바 없으며, 맥석광물은 Ca계열 규산염광물 대신에 주로 탄산염광물과 함께 소량의 석영이 수반된다. 열수교대형 연-아연 광상은 스키르콘형 광상에 비하여 섬아연석, 방연석, 황동석, 자류철석, 황철석, 백철석, 유비철석 이외에 다양한 황염광물의 공생관계를 보이고 있으며, 특히 스키르콘형 광상과 비교하여 높은 함은광물의 산출빈도를 보이고 있다(Table 3). 이러한 광상 유형에서는 전반적으로 자연은·휘은석·Sb-에리트럼에 비하여 함은황염광물이 다량 산출되는 특징을 보이며, Cu-Ag-Sb-S계 광물인 함은사면동석, Cu-

Fe-Sn-S계 광물인 스타나이트, Ag-Sb-S계 광물인 농홍은석, 스테파나이트(stephanite), Pb-Sb-(Cu-Ag)-S계 황염광물이 수반된다. 장군광산의 연-아연 광체는 상부와 비교하여 하부에서 유비철석, 방연석, 함석-안티몬광물의 감소와 함께 자류철석이 증가하는 경향성을 시사하고 있다(Lee *et al.*, 1990). 반년에 장군광산의 철 스키르콘 광체에서는 다양한 Mg계열 및 Ca계열 스키르콘광물 및 자철석과 함께 연-아연 광체에서 함은광물을 제외한 비철금속 황화광물, 적철석, 자연창연, 휘창연석이 국부적으로 확인되고 있다(Lee *et al.*, 1996).

스키르콘/열수교대 혼합형 광상인 제1연화 광산의 본산광체는 층리를 절단하는 상부 수직광체에서 맥석광물로 탄산염광물이 우세한 반면, 하부 층상교대형 광체에서는 스키르콘광물의 산출빈도가 증가하는 양상을 보이고 있다(Yun and Einaudi, 1982). 광석광물은 전반적으로 섬아연석·방연석, 황동석, 자류철석, 황철석, 백철석, 유비철석의 단순한 황화광물의 공생관계를 보여주고 있으며, 열수교대형 광체에 비하여 비교적 단순한 광석광물의 공생관계를 보이고 있다. 함은광물 및 황염광물의 산출빈도는 열수교대광상에 비하여 극히 저조한 경향을 보인다.

### 4. 연-아연 광화작용의 지화학적 특성

국내 아연-연 생산량은 태백산지역 제1연화, 제2연화, 장군, 울진, 신에미 광산의 생산실적이 약 90%를 점유하고 있다. Cu-Zn-Pb 연간 생산량에 대한 상대적 금속비는 제2연화, 신에미 광산에서 전반적으로 아연이 농집된 양상을 보이고 있는 반면, 장군, 제1연화 광산에서는 Pb-Zn간 금속비가 연도별로 현저하게 변화하는 양상을 나타내고 있다(Fig. 2). 특히 비철금속 생산량 중 동 점유율은 울진광산에서만 약 4%를 차지하고 있으며, 제1연화, 제2연화, 장군, 신에미 광산에서는 전반적으로 약 1% 미만으로 아연과 연에 비하여 극소량 함유되는 양상을 보인다(Table 3). 즉 상기 대상 광산에서 동 생산량은 전반적으로 미비하여, 연-아연 금속 점유율을 중심으로 아연 지수(Zn index=Zn\*1000/(Zn+Pb))로 정의하여 정량적 비교를 수행하였다. 제2연화 및 신에미 광산의 누적 생산량에 대한 아연 지수는 전반적으로 955과 998로 높은 수치를 나타내고 있는 반면, 장군, 제1연화, 울진 광산에서는 각각 646, 730, 742로 상대적으로 현저하게 낮은 수치를 보이고 있다. 특히 장군광산에서 생산된 아연지수는 개발초기인 1978년 328에서 종료 단계인 2001년 843(누적 생

**Table 3.** Mineral abundance of major Zn-Pb deposits in the Taebaeksan mineralized province

Mineral	Janggung		Shinyemi		Uljin	Yeonhwa I		Yeonhwa II
	Pb-Zn	Fe	Pb-Zn-Fe	Fe-Mo		Taebaek	Bonsan	
galena	***	*	*		**	***	***	*
sphalerite	****	**	****	**	****	****	***	***
pyrrhotite	**	****	****		****	***	***	****
pyrite	****	****	**	**	*	***	***	**
arsenopyrite	****	**	—		*	*	**	*
chalcopyrite	*	*	**		**	*	**	*
marcasite	*	*	*			*	*	*
molybdenite			***	**			**	
argentite							**	
Ag-sulphosalt	*		—			—	*	
Pb-sulphosalt	*	—					*	
sulphosalt	**	*				*	**	
scheelite			*				**	—
cassiterite							*	
wolframite							*	—
ilminite							*	
magnetite		****	****	****	*		*	**
hematite		**		*	*		*	*
native bismuth		—				—	*	
Au-Ag-Sb alloy						*	*	
wollastonite		*	****				*	*
chondrodite		***						
bustamite							*	*
rhodonite	—	—			***		*	**
garnet		*	****	***	****		***	***
pyroxene		**	****	*	****		**	****
olivine		**	***	***				
epidote			****		****		*	*
chlorite		**	***	**			*	**
plagioclase				*			*	*
quartz		***	**		*	*	**	*
phlogopite		**	****	**	*		*	
muscovite							**	
sericite		*						**
amphibole		*		**			*	**
talc		*		**				
serpentine		**		**				*
fluorite					*		*	*
carbonates	****	***	***	**	*	****	***	*

TYPE	hydrothermal replacement	skarn	hydrothermal replacement	skarn	hydrothermal replacement	hydrothermal replacement	hydrothermal replacement +skarn	skarn
------	--------------------------	-------	--------------------------	-------	--------------------------	--------------------------	---------------------------------	-------

\*Mineral Abbreviations: Abundance \*\*\*\* > \*\*\* > \*\* > \* > —

산량의 아연지수; 646)으로 지속적인 증가 추세를 보이고 있다 (단, 초기 생산량 중 아연정광은 일부 광미로 폐기되어 통계치에 누락되어 있음). 또한 제1연화 광산

에서는 1970년부터 1986년까지 본산 광체를 대상으로 개발된 연간생산량의 아연지수는 485~861 (누적 생산량의 아연지수; 770), 1987년부터 1993년까지 태백광

Table 4. Comparative genetic features of major Zn-Pb deposits in the Taebaeksan mineralized province

Mine	Associated metals	Temperature		Fluid		Estimated pressure (kbar)	Reference
		Fluid inclusion geothermometer (other geothermometer) (°C)		Salinity (wt. % equiv. NaCl)			
Janggun	Zn-Pb-Ag-Mn	200~350 (340~420)		0.2~6.3		0.2~0.5	Lee <i>et al.</i> (1998), Kim (1986), Lee <i>et al.</i> (1985)
	Fe-Zn-Pb	(395~430)				0.5	Lee <i>et al.</i> (1998)
Shinyemi	Zn-Cu (-Mo-Pb)	315~350 (400~540)		6.4~10.4		0.3~0.4	Bae (1992), Kim and Nakai (1982), Mariko and Yang (1993)
	Fe-Mo	440~590 (400~610)		14.0~23.0		0.5	Mariko and Yang (1993), Seo <i>et al.</i> , (2007)
Uljin	Cu-Zn-Pb-Ag	300~410 (340)		12.2~13.4		shallow emplacement	Yun and Silberman (1979), Kim and Nakai (1982)
Yeonhwa I	Zn-Pb-Ag (-Cu-Mn)	Taebaek: 421~445 (250~342)  Bonsan: (273~690) (<400)		0.0~8.3		0.21~0.42	Park <i>et al.</i> (1988), So <i>et al.</i> (1993)  Lee (1985), Yun (1983), Yun and Einaudi (1982)
	Zn-Pb-Ag-Cu	218~480 (420)		11.1~13.4		shallow emplacement	Yun and Silberman (1979)



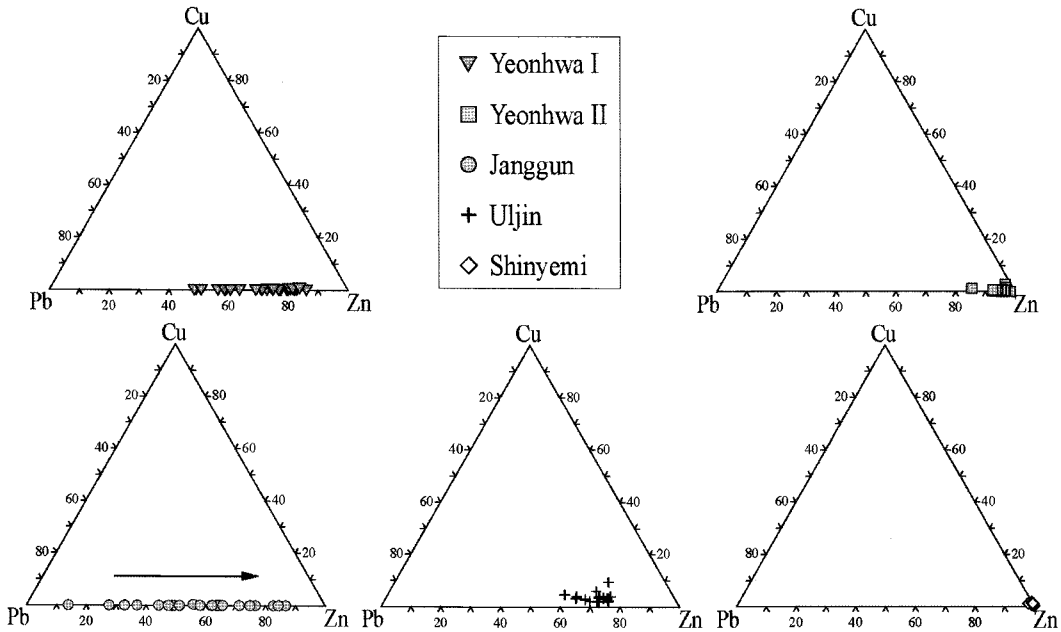


Fig. 2. Ternary diagrams illustrating the relative base metal (Cu-Zn-Pb) annual productions for the Yeonhwa I, Yeonhwa II, Janggung, Uljin and Shinyemi zinc-lead deposits in the Taebaeksan mineralized province. Arrow in the Janggung deposit illustrates the relatively changing production ratios through time.

체는 508~637 (누적 생산량의 아연지수; 583)로서 광체에 따라 현저한 변화를 나타내고 있다. 즉 열수교대 광상인 장군광산과 제1연화광산의 태백광체에서는 서로 유사한 금속비를 보이며, 전형적인 스카른 광상인 제2연화 및 신예미 광산에 비하여 전반적으로 Pb가 농집되는 양상을 나타내고 있다(Fig. 3). 또한 제1연화광산의 본산광체는 열수교대 광상과 스카른 광상의 중간 값을 보이고 있다.

광상 유형(화산성 괴상황화물(VMS), 퇴적성 괴상황화물(SEDEX), 반암형, 천열수 광상)에 따른 광석의 지화학적 특성(Poulsen *et al.*, 1995)을 비교하기 위하여 상기 5광산의 비철금속((Cu+Zn+Pb)(%))과 귀금속(Ag(ppm)+Au(ppm))의 누적 생산량을 검토한 결과, Ag는 광상에 따라 극부적 변화양상을 나타내고 있으나, Au는 거의 전무한 상태이다. 국내 열수교대 연-아연광상은 반암형 동광상과 인접한 영역에 도시되지만, 스카른 연-아연광상은 비철금속(Base-metal) 축에 근접하여 반암형 함금동광상과는 상이한 영역을 보인다(Fig. 4).

국내 스카른형/열수교대형 비철금속광상에서 금을 제외한 금속비를 반암형 광상과 비교하여 검토한 결과, Ag점유율은 Ag 생산실적이 없는 신예미광산을 제외하고 장군, 울진, 제1연화, 제2연화 광산에서 각각 87, 35, 29, 11%로 나타나고 있다. 제1연화 광산의 경우

1987년부터 개발된 열수교대형 신규광체인 태백광체는 생산실적이 정광 품위뿐만 제시되어 있고, 1987년 이후부터 순은 생산량이 누락되어 광상전체의 누적생산실적에서 다소 차이를 보이고 있다. 1987년부터 1989년까지 3년간 제1연화 광산의 평가조서에 제시된 정광생산량을 근거로 추정된 순은 생산량은 약 59.7t으로 (Cu+Zn+Pb)(%)+Ag(ppm)에 대한 금속비 중은점유율은 약 94%로 장군광산보다 높은 함유량을 보이고 있다. 이러한 사실은 태백산분지의 백악기 광화작용에서 나타나는 비철금속비는 전반적으로 Pb황화광물과 함께 함은황염광물의 침전이 동시에 유도되는 광화유체진화 환경을 시사하고 있다.

## 5. 토 의

한반도에서 백악기 금속광화작용은 고태평양 판의 사각(oblique)에서 직각(orthogonal)으로 섭입하는 순차적 변화(Maruyama *et al.*, 1997)에 따라 야기되는 퇴적작용 그리고 화성활동에서 유도된 열수시스템과 함께 다양한 금속종이 수반되는 경향을 보이고 있다(Choi *et al.*, 2004). 천열수 귀금속 광상유형은 전기 백악기 사각 방향으로의 지속적인 섭입 양태에 따른 중부지역 중심의 NNE 좌수향 주향이동 단층계 발달과 함께 인

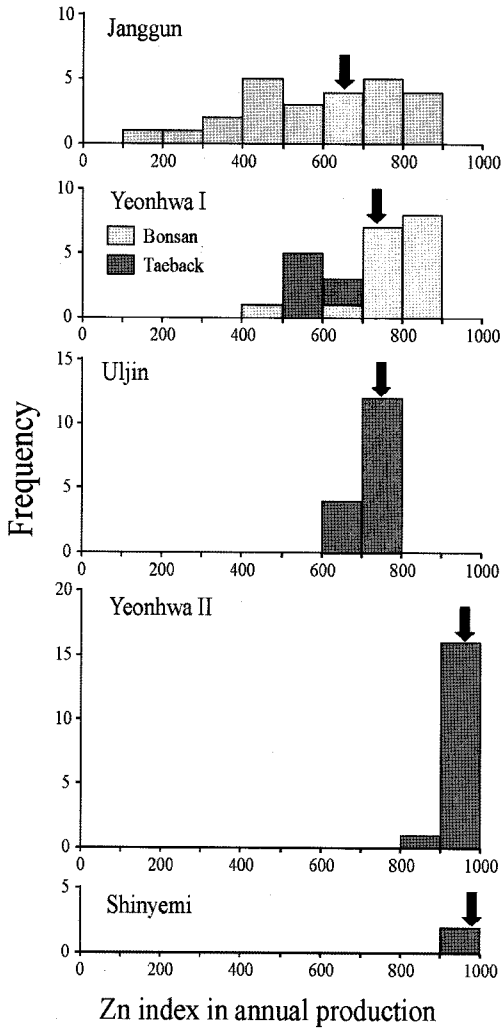


Fig. 3. Zn distribution (Zn index= $Zn \times 1000 / (Zn + Pb)$ ) of annual productions for individual deposits, showing relatively higher in typical skarn deposits than hydrothermal replacement deposits. Arrow means Zn index for totally cumulative production.

리형 분지의 형성 과정에서 원지성 광상으로 배태되는 경향을 보이고 있다(Choi *et al.*, 2005). 반면에 반암형 비철금속 광상유형의 경우 후기 백악기 직각 방향으로 섭입 양태가 변화되는 과정에서 남부와 동부 지역을 중심으로 마그마 활동이 활발하게 유도되며, 이때 천부에 관입한 암체를 중심으로한 공간적 관계와 복합적인 광화유체의 진화단계에서 차별화된 침전조건에 따라 근지성/점이성/원지성 광상으로 배태되고 있다(Choi *et al.*, 2007). 태백산 지역에서도 부분적으로 노출된 시기를 달리하고 있는 백악기 천부 화강암체인 암주를

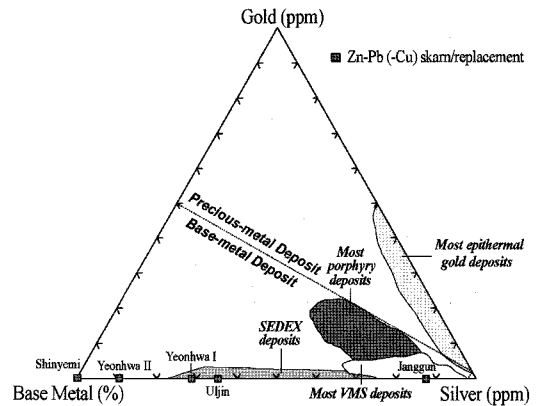


Fig. 4. Ternary representation of the relative productions of Au (ppm), Ag (ppm), and base metal (%) in zinc-lead deposits of the Taebaeksan mineralized province. The hatched areas show world-wide ore deposit types such as porphyry, VMS and SEDEX (Poulsen 1995).

중심으로 국지적인 지열수계가 형성되어 직접적인 금속광화작용이 유도되고 있다(Pak *et al.*, 2004). 특히 태백산 광화대에서는 전반적으로 귀금속, 비철금속 및 철합금 금속이 수반되는 다금속 광화작용의 특징을 보이며, 양적 관계에서 아연과 연이 우세한 스킨 광상 및 열수교대 광상으로 배태되고 있다.

태백산 광화대의 주요 금속광상들은 대부분 탄산염 암을 교대한 광상으로 약 110~50 Ma(주 광화시기: 약 90~70 Ma)의 광화시기를 보인다. 광화유체의 동위원소 특성을 비교한 결과에 의하면 천부 화성활동과 직·간접적으로 연계된 광상으로 해석되며(Choi *et al.*, 2007), 생성 연대에 따라 서로 다른 금속종이 수반되는 현저한 차이를 보이고 있다(Fig. 5). 즉 태백산 광화대에서 나타나는 주요 스킨/열수교대 광상은 약 107 Ma 철 광화작용(장군광산)으로부터 시작하여 98 Ma의 철-동(-금) 광화작용(거도광산), 그리고 84 Ma (85~81 Ma)의 텅스텐-몰리브덴(-창연-금) 광화작용(상동광산)으로 광화시기에 따라 상이한 금속종이 수반되고 있으며, 제 1연화, 제 2연화, 장군, 신예미 광산의 연·아연 광화작용은 주로 75±5 Ma(단, 울진광상은 약 50 Ma)에 걸쳐서 집중되는 경향을 보이고 있다(Fig. 5). 반면에 철 광화작용은 107, 98, 75 Ma에 걸쳐 고르게 나타나는 경향을 보이고 있다.

반암형 광화작용 시 주요 수반광종의 차이는 일차적으로 기원 물질인 관계 화성암의 지화학적 특성과도 밀접한 연관성을 보이는 것으로 보고된 바 있으며(Candela and Piccoli, 2005), 주로 지체구조 진화유형과 연계된 성인적 특성을 반영하고 있다(Meinert *et al.*,

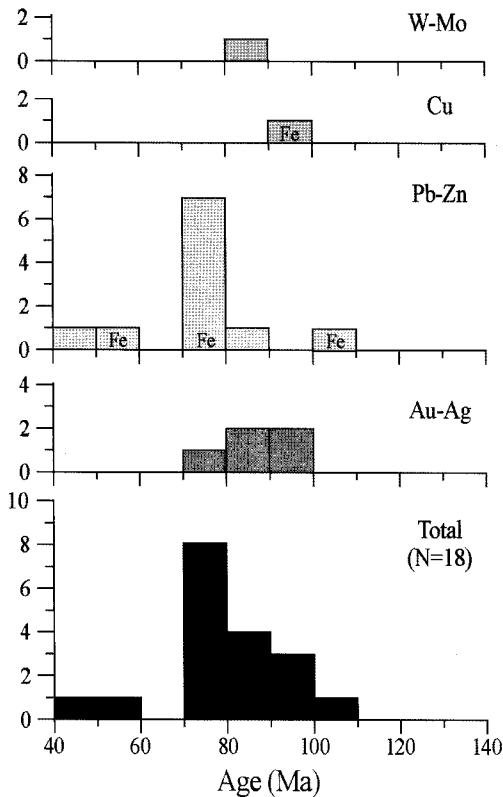


Fig. 5. Age relationship between W-Mo, Cu, Pb-Zn, and Au-Ag mineralization the Taebaeksan mineralized province. Note that metallic mineralization is constrained to a period of ca. 110 to 50 Ma, with a major Zn-Pb mineralization between 70 and 80 Ma.

2005). 또는 동일한 관계 화성암에서 유래한 경우라 할 지라도 광상의 생성환경, 주로 광석광물의 물리-화학적 정출환경의 변화에 기인하여(Einaudi *et al.*, 2003), 광화유체의 진화단계에서 시·공간적 측면으로 서로 다른 금속종이 농집된 분포양상을 보인다.

천부 화성활동과 관련된 금속광화작용은 화강암체로부터 공급된 열에너지와 연계된 국부적 지온구배의 변화에 따라 지열수 순환시스템이 유도됨으로서 열적 중심인 중심부에서 외각부까지 광화유체가 이동과정에서 서로 다른 금속종이 침전되는 양상을 보인다. 즉 경상 분지에서 백악기 금속광화작용은 천부 화강암체의 공간적 근접성에 따라 근지성 유형(반암형, 각력 파이프형, 스카른형 및 고온성 맥상 광상)의 동-몰리브덴-철(-중석)광상→점이성 유형(중열수성 맥상 광상)의 다금속 광상→원지성 유형(천/중열수성 맥상 광상)의 금-광상으로 변화하는 경향을 보이고 있다(Choi *et al.*, 2006).

태백산 광화대의 경우 탄산염암을 교대한 광상으로 는 관계 화강암체와 공간적 근접성에 따라 근지성 스카른 광상으로부터 점이성 열수교대 광상, 중열수성 맥상 광상 그리고 원지성 칼린형 광상이 언급되고 있다(Pak *et al.*, 2004). 또한 스카른 광상은 관계 화강암과의 공간적 근접성에 따라 인접 지역에 관계 화강암체의 노출 유무에 따라 대략 300 m 이내에서 존재할 경우 근지성(proximal) 스카른 광상으로, 300 m 외각부에서는 점이성(transitional) 스카른 광상으로 세분되고 있다(Kwak, 1987). 이러한 기준에 의하면 태백산 광화대의 주요 연-아연 광상은 근지성 스카른 광상인 제2연화, 울진, 신예미 광산과 점이성 광상(스카른/열수교대 혼합형 광상)인 제1연화, 열수교대 광상인 장군 광상으로 구분될 수 있다.

태백산 광화대에서 탄산염암을 교대한 아연-연 광상은 대륙호의 내륙지역에서 나타나는 전형적인 안산암 기원의 반암형 동광화작용이 아닌 전반적으로 동이 결여된 반암형 비철금속 광화작용을 시사하고 있다(Einaudi *et al.*, 2003). 특히 연-아연 광상의 광물조합은 근지성 스카른 광상에서 나타나는 황철석-자류철석-자철석 광물군으로부터 점이성 광상의 황철석-자류철석-자연은-회은석-사면동석 광물조합으로 변화하는 양상을 보이며, 이는 T-f<sub>S2</sub> 생성환경에서 전형적인 중간형 황 조건(intermediate-sulfidation state)~저황 조건(low-sulfidation state)에 따른 광화유체의 진화과정을 지시한다(Fig. 6).

한편, Yun(1983)은 태백산 광화대의 연화와 거도 광상에서 산출되는 스카른광물의 공생관계 및 조성특성을 통하여 유도된 스카른화 온도를 기준으로 Fe, Cu, Zn-Pb와 같은 금속종의 차이를 시사하고 있으나, 스카른 광상에서 수반되는 금속종의 차이는 주로 지체구조와 연계된 관계 화성암의 암석화학적 특성을 반영하고 있다(Meinert *et al.*, 2005). 즉 연-아연 광화작용과 관련된 관계화강암은 신예미, 제2연화, 울진 광상에서 언급된 바와 같이 산성암의 특징을 나타내는 반면, 동광화작용에서는 중성암의 조성 특징을 보이고 있다. 철 광화작용과 관련된 관계화강암은 거도 광상에서는 중성암, 신예미 광상에서는 산성암으로 다양한 분화 양상의 차이를 보이고 있다. 이러한 사실은 국외 스카른 광상의 사례에서도 유사한 특징을 보이고 있다(Meinert, 1993). 특히 국내에서 동광화작용과 관련된 화성활동은 전반적으로 산출빈도가 매우 미약한 양상을 보이지만, 태백산 지역의 거도 스카른광상과 함안-군북 지역의 함동열수충진 광상이 대표적인 광상으로 알려져 있다(Wee *et al.*, 2007a). 최근 상기 지역의 인접 화강암체에 대

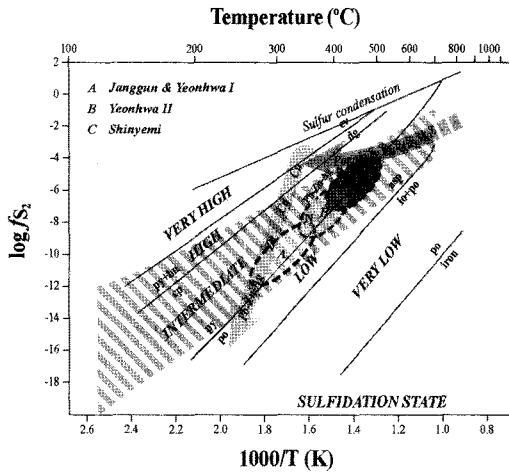


Fig. 6. Sulfur fugacity-temperature diagram, showing sulfidation state from hydrothermal systems plotted over a grid of mineral sulfidation reactions, illustrating fluid environments in porphyry copper-related base metal deposits in terms of a cooling path (Einaudi *et al.*, 2003). Note that the zinc-lead skarn/hydrothermal replacement deposits in the Taebaeksan mineralized province tend to decrease from intermediate sulfidation state of the Shinyemi skarn deposit through the Yeonhwa II and Uljin deposits to low sulfidation state of the Yeonhwa I and Janggun deposits at 500° to 250°C. Mineral abbreviation: cv=covellite, dg=digenite, py=pyrite, bn=bornite, cp=chalcopyrite, po=pyrrhotite, asp=arsenopyrite and lo=loellingite.

한 암석지화학 연구에서 저도 스키른 철-동(-금)광화작용과 관련된 어평 화강암과 함안-군북 지역의 관계화성암으로 간주되는 군북 화강암체는 공통적으로 아다카이트질 특성을 나타내고 있다(Park *et al.*, 2007; Wee *et al.*, 2007b). 특히 이러한 아다카이트질 유형의 마그마 활동은 암석화학적 특징에서 국내 대표적인 동광상과 밀접한 연관성을 보이고 있으며(Wee *et al.*, 2007a), 국외에서도 반암형 동광화작용과 관계를 보고하고 있다(Oyarzun *et al.*, 2001).

## 6. 결 언

재개발 광산의 기술적 검토는 기존 광산의 배태 양상에 대한 열수시스템의 지질자료와 함께 잠두 광체의 부존 가능성을 예측하기 위한 생성모델에 대한 통합적 지질 해석이 요구되고 있다. 한반도는 백악기 동안 고태평양 판이 사각 방향(120 Ma)에서 직각 방향(90 Ma)으로 섭입하는 대륙 주변부에 위치하여, 남부지역(일부 동부지역)을 중심으로 후기 백악기 동안 활발한 천부 화성활동(약 110~50 Ma)이 유도되었으며, 대륙호의 내

륙지역에서 나타나는 전형적인 반암형 비철금속 광화작용을 지시하고 있다. 태백산 지역에서는 부분적으로 노출된 백악기 천부 화강암체인 압주를 중심으로 극지역적인 지열수계가 형성되어 직접적인 금속광화작용이 수반되고 있다. 이러한 광상 유형은 동일한 기원물질로부터 유래한 광화작용일지라도 관계화성암의 공간적 근접성에 따라 시·공간적 관점에서 다양한 물리-화학적 정출환경을 반영하여 서로 다른 광석 또는 맥석 광물이 정출되고 있다.

태백산 광화대에서 분포하고 있는 탄산염암을 교대한 연-아연 광상은 주로 약 75±5 Ma에 집중되는 경향을 보이고 있으며, 광화유체는 전형적인 반암형 비철금속 광화작용으로 황철석-자류철석-자철석의 공생관계가 지배적인 중간형 황분압(intermediate-sulfidation state)의 진화과정을 보이고 있다. 근지성 광상은 주로 압주 또는 암맥과 같은 반심성암체가 노출된 지질 조건에서 유도되며, 반암형 비철금속 광상유형에서 수반되는 고온성 스키른 광상의 금속 종은 전반적으로 Fe-Mo에서 Zn-Cu으로 시·공간적인 변화 양상을 보이고 있다. 또한 점이성 광상유형에서는 인접지역에서 관계화성암체가 노출이 확인되지 않고 있으며, 이러한 중열수와 관련된 스키른/열수교대 혼합형 광상 또는 열수교대 광상에서는 Zn-Pb-Ag-Sb-As-Au 금속종이 수반되는 다금속 광화작용의 특징을 보이고 있다. 그러므로 태백산 광화대의 주요 아연-연 광상은 관계화성암의 근접성에 따라 고온성 열수와 관련된 근지성 스키른 광상인 제2연화, 울진, 신에미 광상 그리고 중열수 점이성 광상(스키른/열수교대 혼합형 광상)인 제1연화광상 및 열수교대 광상인 장군광상으로 구분되며, 각각의 광상은 중간형 황분압 유체의 진화 단계에 따라 서로 다른 금속이 침전 분화되는 양상을 보이고 있다.

## 사 사

본 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지자원기술 개발사업 (1 세부과제)의 자원에 의해 수행되었으며, 논문심사 시 유익한 조언을 주신 최상훈 교수, 한진균 박사과 익명 심사위원에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- Bae, Y.-B. (1992) A study on the Bug-ap orebody in the Shinyemi mine. *Jour. Korean Earth Sci. Soc.*, v. 13, p. 127-135.  
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.-G. and Pak, S.J. (2007) The Origin and Evolution of the Mesozoic Ore-forming Fluids in South Korea: Their genetic implications. *Econ. Environ. Geol.*, v. 40, p. 517-535.
- Choi, S.-G., Pak, S.J., Kim, C.S., Ryu, I.-C. and Wee, S.M. (2006) The origin and evolution of mineralizing fluids in the Cretaceous Gyeongsang Basin, southeastern Korea. *Jour. Geochem. Explor.*, v. 89, p. 61-64.
- Choi, S.-G., Pak, S.-J., Ryu, I.C., Oh, C.W. and Kim, S.W. (2004) Mesozoic precious-metal mineralization and geodynamic environments in Korea. In Khanchuk, A.I., Gonevchuk, G.A., Mitrokhin, A.N., Simanenko, L.F., Cook, N.J. and Seltmann, R. (eds.) *Metallogeny of the Pacific Northwest: Tectonics, magmatism and metallogeny of active continental margins*, Vladivostok Dalnauka, Russia, p. 89-92.
- 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.
- Candela, P.A. and Piccoli, P.M. (2005) Magmatic processes in the development of porphyry-type ore systems: *Econ. Geol.*, v. 100, p. 25-37.
- Einaudi, M.T., Hedenquist, J.W. and Inan, E.E. (2003) Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments: *Econ. Geol., Special Pub.*, no. 10, p. 285-313.
- Han, K.S. (1972) Geologic report of the second Yeonhwa mine, Kangwon province, Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 5, p. 211-220.
- Han, K.S. (1969) Geology and ore deposits of Yeonhwa mine. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 2, p. 47-57.
- Je, Y.-K. and Lee, E.-J. (1987) Exploration and development of the Taebaek orebody in the Yeonhwa Pb-Zn mine. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 20, p. 273-288.
- Kho, S.J. (1987) Exploration and development in the Janggun Pb-Zn mine. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 20, p. 289-303.
- Kim, O.J. (1971) Study on the intrusion epochs of younger granites and their bearing to orogenies in south Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.* v. 4, p. 1-8.
- Kim, K.H. (1986) Origin of manganese carbonate on the Janggun mine, south Korea. *Mining Geol.* v. 19, p. 109-122.
- Kim, K.H. and Nakai, N. (1982) Sulfur isotope composition and isotope temperature of the Shinyemi lead-zinc ore deposits, western Taebaeksan metallogenic belt, Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 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.*, v. 14, 167-182.
- Koh, Y. K., Choi, S.-G., So, C.S., Choi, S.H. and Uchida, E. (1992) Application of arsenopyrite geothermometry and shalerite geobarometry to the Taebaek Pb-Zn(-Ag) deposit at Yeonhwa I mine, Republic of Korea. *Mineralium Deposita*, v. 27, p. 58-65.
- Kwak, T.A.P. (1987) W-Sn skarn deposits and related metamorphic skarn and granitoids. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 451 p.
- Lee, C.H., Lee, H.K. and Kim, S.J. (1998) Geochemistry and mineralization age of magnesian skarn-type iron deposits of Janggun mine, Republic of Korea. *Mineralium Deposita*, v. 33, p. 379-390.
- Lee, C.H., Song, S. and Lee, H.K. (1996) Mg-skarn minerals from magnetite deposits of the Janggun mine, Korea. *Econ. Environ. Geol.*, v. 29, p. 11-19.
- Lee, H.K., Ko, S.J. and Naoya, I. (1990) Genesis of the lead-silver and iron deposits of Janggun mine, as related to their structural features structural control and wall rock alteration of ore formation. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 23, p. 161-181.
- Lee, M.S. (1985) Sulfur and carbon isotope studies of principal metallic deposits in the metaalogenic province of the Taebaek Mt. region, Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 18, 247-251.
- Mariko, T. and Yang, D.Y. (1993) Magnesian skarn-type magnetite deposits of the Shinyemi mine, Korea. In Maurice Y.N. (ed.) *Proceeding of the 8th IAGOD Symposium*, Ottawa, Canada, p. 255-269.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G. and Terabayashi, M. (1997) Paleogeographic maps of the Japanese Islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc*, v. 6, 121-142.
- Meinert, L.D. (1993) Skarns and skarn deposits. In Sheahan, P.A. and Cherry M.E., (eds.) *Ore deposit models volume II*, Geoscience Canada, reprint series 6, p. 117-134.
- Meinert, L.D., Dipple, G.M. and Nicolescu, S. (2005) World skarn deposits. In Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J. and Richards, J.P. (eds.) *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, *Econ. Geol.*, p. 299-336.
- Oyarzun, R., Marquez, A., Lillo, J., López, I. and Rivera, S. (2001) Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism. *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 794-798.
- Pak, S.J., Choi, S.-G. and Choi, S.H. (2004) Systematic mineralogy and chemistry of gold-silver vein deposits in the Taebaeksan district, Korea: Distal relatives of a porphyry system. *Mineralogical Magazine*, v. 68, p. 467-487.
- Park, H.I., Chang, H.W. and Jin, M.S. (1988) K-Ar ages of mineral deposits in the Taebaeg mountain district. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 21, p. 57-67.
- Park, J.W., Choi, S.-G., Ko, E.M. and Chi, S.J. (2007) Geochemical characteristics of barren and mineralized intrusive in the Geodo area, Taebaeksan Basin, south Korea: implications for adakite magmatism and Fe-Cu(-Au) mineralization. In Perez, J.L. (ed.) *The 23rd International Applied Geochemistry Symposium on exploring our environment*, Oviedo, Spain, p. 179.
- Poulsen, K.H. (1995) Lode gold. In Eckstrand, O.R., Sinclair, W.D. and Thorpe, R.I. (eds.) *Geology of Canadian mineral deposit types (P-1)*, no. 8, p. 323-328.

- 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. *Mineralogical Magazine*, v. 31, 333-336.
- Seo, J., Choi, S.-G., Kim, C.S., Park, J.W., Yoo, I.K. and Kim, N.H. (2007) The skarnification and Fe-Mo mineralization at lower part of western Shinyemi ore body in Taebaek area. *Jour. Miner. Soc. Korea*, v. 20, p. 35-46.
- Sillitoe, R.H. (2008) Major gold deposits and belts of the north and south American Cordillera: Distribution, tectono-magmatic settings, and metallogenic considerations. *Econ. Geol.*, v. 103, p. 663-687.
- So, C.S., Yun, S.T. and Koh, Y.-K. (1993) 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.
- Wee, S.M., Park, J.W., Choi, S.-G., Kim, Y., Ryu, I.C. and Rajesh, V.J. (2007a) Early Cretaceous productive and barren granitoid in Gunbuk-Jindong area in Gyeongsang basin, south Korea: Petrogenesis, geochronology and implications for Cu(-Au) mineralization. In Perez J.L. (ed.) *The 23rd International Applied Geochemistry Symposium on exploring our environment*, Oviedo, Spain, p. 167.
- Wee, S.M., Kim, Y., Choi, S.-G., Park, J.W. and Ryu, I.C. (2007b) Adakitic signatures of the Jindong granitoids. *Econ. Environ. Geol.*, v. 40, p. 223-236.
- 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.
- Yun, S. (1983) Skarn-ore associations and phase equilibria in the Yeonhwa-Keodo mines, Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 16, p. 1-10.
- Yun, S. and Einaudi, M.T. (1982) Zinc-lead skarn of the Yeonhwa-Ulchin district, south Korea. *Econ. Geol.*, v. 77, p. 1013-1032.
- Yun, S. (1979) Structural and compositional characteristics of skarn zinc-lead deposits in the Yeonhwa-Ulchin mining district, southeastern Taebaegsan region, Korea, part II: The Yeonhwa II mine. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 12, p. 147-176.
- Yun, S. and Silberman, M.L. (1979) K-Ar geochronology of igneous rocks in the Yeonhwa-Ulchin zinc-lead district and southern margin of the Taebaegsan basin, Korea. *Jour. Geol. So. Korea*, v. 15, p. 89-100.
- Yun, S. (1978) Petrography, chemical composition, and depositional environments of the Cambro-Ordovician sedimentary sequence in the Yeonhwa I mine area, southeastern Taebaegsan region, Korea. *Jour. Geol. So. Korea*, v. 14, p. 145-174.