

## 가곡 스카른 광상 월곡-선곡 광체의 광물 · 지구화학적 특성: 성인적 의미

최부갑<sup>1,2</sup> · 최선규<sup>2\*</sup> · 서지은<sup>2</sup> · 유인걸<sup>3</sup> · 강흥석<sup>1</sup> · 구민호<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국광물자원공사, <sup>2</sup>고려대학교 지구환경과학과, <sup>3</sup>한국알루미나

### Mineralogical and Geochemical Characteristics of the Wolgok-Seongok Orebodies in the Gagok Skarn Deposit : Their Genetic Implications

Bu-Kap Choi<sup>1,2</sup>, Seon-Gyu Choi<sup>2\*</sup>, Jieun Seo<sup>2</sup>, In-Kol Yoo<sup>3</sup>, Heung-Suk Kang<sup>1</sup> and Min-Ho Koo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Korea Resources Corporation, Seoul 156-706, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Earth and Environmental Sciences, Korea Univ., Seoul 136-713, Korea

<sup>3</sup>KOREA Alumina Co. Ltd. Mokpo-si, Jeollanam-Do 526-703, Korea

The Gagok stratabound skarn deposit is the result of the intrusion of the Cretaceous granitic pluton into the Paleozoic calcareous rocks. The subvolcanic intrusion ranges in composition from quartz monzonite to granite porphyry with I-type, calc-alkaline and weakly peraluminous characteristics. Both endoskarn and exoskarn are developed at the Gagok Zn-(Pb) deposit, with more exoskarn than endoskarn. Geochemical and mineralogical characteristics in the Seongok and Wolgok orebodies can be treated in terms of self-organization. Sphalerites in the Gagok ore can also incorporate minor amounts of Mn, Cd, Cu and In. Trace element concentrations in different orebodies vary because fractionation of a given element into sphalerite is influenced by formation temperature and the amount of sphalerite in the ore. A group of high In/Zn and Cd/Zn ratios in ores, and low Mn/Fe ratios in sphalerites are correlated with proximal processes of a magmatic source. The pattern of minor/trace element variations in ores and sphalerites can be used for petrogenetic interpretation, e.g., orebody zonation related to crystallization temperature and fluid sources.

**Keywords :** Gagok, Wolgok-Seongok, skarnification, sphalerite, Taebaeksan

가곡 스카른 광상은 고생대 조선누층군 석회질암을 관입한 백악기 화강암체의 접촉부를 따라 층상으로 교대된 광상으로 구성되어 있다. 관계화성암인 반심성암체는 석영몬조암~화강반암 조성과 함께 I형, 칼크-알카리 계열, 고알루미나질 지화학적 특징을 보이며, 가곡 Zn-Pb 광상에서는 내성스카른과 비하여 외성스카른이 광범위하게 배태되어 있다. 선곡과 월곡 지역의 광체에서 지화학적/광물학적 특성은 관계화성암으로부터 근접성에 의하여 좌우되고 있다. 가곡 광산의 섬아연석에는 Mn, Cd, Cu, In 성분이 미량 함유되어 있고, 정출온도 차이 및 분화과정을 통하여 차별화된 농집 과정이 유도됨으로서 광체에 따라 미량원소의 차이를 보이고 있다. 광석 중 높은 In/Zn비와 Cd/Zn비 그리고 섬아연석 중 낮은 Mn/Zn비는 마그마로부터 공급된 근원물질의 근접성과 밀접한 연관성을 보이고 있다. 따라서, 광석과 섬아연석에 함유된 미량원소의 농집 양상은 정출온도와 광화유체의 근원물질과 관련된 광체의 지화학적/광물학적 차별성을 인지할 수 있는 중요한 지시자로 이용될 수 있다.

**주요어:** 가곡, 월곡-선곡, 스카른화작용, 섬아연석, 태백산

## 1. 서 언

최근 국제 금속가격의 상승에 따른 경제 환경이 변

화됨에 따라 광물자원의 개발 가능성을 검토하기 위하여 세계적인 기존 유명 광화대 또는 기존 광상에 대한 재조사가 실시되고 있다. 국내에서도 과거 생산실적/매

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

장량을 검토하여 부존 가능성이 높은 금속광상을 대상으로 탐사가 실시되고 있다. 제2연화광산은 (주)영풍이 1971년부터 1987년까지 아연 정광(50%) 620,000 t, 연 정광(50%) 29,000 t, 동 정광(25%) 5,000 t 및 순은(99%) 4,000 kg을 생산하여 제1연화광산 이어 국내 2위의 아연 광산 위치를 점유하였으며(Yun and Einaudi, 1982), 기존 잠재 매장량은 약 450만톤(Zn 4.1%, Pb 0.1%, Cu 0.1%)으로 보고된 바 있다. 현재 제2연화광산은 2007년도부터 가곡광산으로 개명되어, 물리탐사 및 시추탐사를 통한 기존 광체의 연장성 및 잠두 광체의 부존 가능성을 검토하고 있다.

국내에서 개발된 광산의 생산 실적을 고려하면, 대규모 부존 가능성이 기대되는 광상유형은 호상철광상과 스카른형 광상으로 평가되고 있다(Choi *et al.*, 2004). 특히, 스카른형 광상에 수반되는 주요 금속종은 관계화성암의 고유한 생산성/비생산성 인자와 함께 마그마 분화특성에 따라 좌우되고 있다(Meinert *et al.*, 2005). 이는 관계화성암의 공간적 근접성에서 야기되는 온도구배에 따라 광화유체의 진화과정이 유도됨으로서 스카른형 광상과 함께 탄산염고대형 광상으로 단계적인 배태 양상을 보인다(Meinert, 1992; Choi *et al.*, 2009). 이러한 광상유형에 있어서, 특정 지역에서 동일 기원의 광화유체로부터 유도된 광상에서는 광석에 함유된 금속비 특성이 광화유체의 진화특성을 반영하고 있어 근지성/점이성/원지성 광상의 판별 요소로 적용되고 있다(Einaudi *et al.*, 2003; Ciobanu and Cook, 2004).

태백산 광화대 아연-연 광상은 다수 연구자에 의하여 성인적 측면에서 열수고대작용 및 스카른화작용과 관련된 생성환경에 관한 연구가 수행되었으나(Kim *et al.*, 1981; Yun and Einaudi, 1982; Koh *et al.*, 1992; Choi *et al.*, 2009), 특히 동일 광상의 광체별 변화에 따른 지화학적-광물학적 특성에 관한 성인 연구는 미진한 편이다. 가곡(구 제2연화) 광상은 백악기 천부 화성활동에 의한 전형적인 스카른 광상으로 고생대 허부퇴적암 중 석회질암을 중심으로 화강반암으로부터 분리된 광화유체의 유입에 따라 스카른화작용과 함께 광화작용이 유도되고 있으며, 각 광체는 층서-구조적 규제 요인에 따라 주로 판상의 층상규제형 광체로 배태되어 있다(Han, 1972; Yun, 1979). 본 연구에서는 현재 조사 가능한 월곡 및 선곡 광체를 중심으로 광석광물/맥석광물의 특성과 주요 금속/미량 원소간 상관관계를 비교분석하여, 광체별 광물·지화학적 특성에 따른 광화유체의 변화과정을 성인적 측면에서 검토하고자 한다.

## 2. 광물학적 특성

가곡광상의 스카른 광체는 조선누층군의 풍춘층 및 묘봉층과 관입한 화강반암의 접촉부와 인접부를 따라 전반적으로 층상~판상 광체로 배태되고 일부가 국부적으로 파이프 광체로 산출되며(Fig. 1), 공통적으로 단사회석, 석류석, 장미회석, 규회석, 각섬석, 녹렴석, 금운모, 녹니석 등 다양한 스카른 광물과 함께 자류철석, 섬아연석, 황철석, 방연석, 황동석이 산출되고 있다. 특히 광화작용 시 정출된 광석광물과 무수-함수 스카른광물 유형과 양적관계는 물리화학적 환경변화와 밀접한 연관성을 보이고 있다(Einaudi *et al.*, 2003; Meinert *et al.*, 2005). 가곡광상에서도 광석광물 유형은 광체에 따라 산출빈도의 차이를 보이고 있으며(Table 1), 광석광물은 주로 전진 스카른 단계 말기 무수 스카른 광물과 후퇴 스카른 단계의 함수 스카른 광물과 밀접한 공생관계를 보이며 집중적으로 침전되는 경향을 보이고 있다(Fig. 2). 가곡광상 스카른화작용의 진화와 관련된 특성을 종합적으로 검토하기 위하여, 공간적 측면에서 관계화성암과 비교적 원거리에 위치한 월곡 남서부 및 월곡 북동부 그리고 관계화성암과 접촉하고 있는 선곡 남동부 광체에 대한 광석/스카른 광물의 유형과 산출 양상에 따른 정출시기를 비교하였다.

### 2.1. 월곡 북동부 광체

월곡 북동부 광체는 주로 풍춘층과 화강반암의 접촉부에 배태되며, 섬아연석, 자류철석, 방연석, 황동석과 석류석, 단사회석의 단순한 광물조합을 보이고 주로 외성스카른으로 구성된다. 향내 시추 08-12호공 화강반암의 접촉부에는 석영, 사장석, 흑운모 등의 1차 광물과 녹렴석, 녹니석 등 2차 광물로 구성된 내성 스카른이 미약하게 발달되어 있다. 동시에 화강반암에 인접한 풍춘층에서는 단사회석이 우세한 단사회석-석류석 스카른이 발달되어 있으며 방해석과 석영, 녹렴석과 함께 섬아연석과 방연석, 자류철석 등이 함께 산출된다. 풍춘층의 중심부는 석류석이 우세한 석류석 스카른으로 구성되며, 단사회석, 장미회석과 함께 섬아연석, 방연석 등의 광물조합을 보인다. 화강반암과 비교적 원거리에 위치한 묘봉층 접촉부에서는 단사회석-석류석 스카른대를 중심으로 섬아연석과 자류철석이 수반되며 전체적으로 대칭적 분대의 발달 양상을 보이며, 기존 연구결과와 비교적 잘 일치하고 있다(Yun, 1979).

월곡 북동부 광체의 스카른대는 석류석 스카른, 석

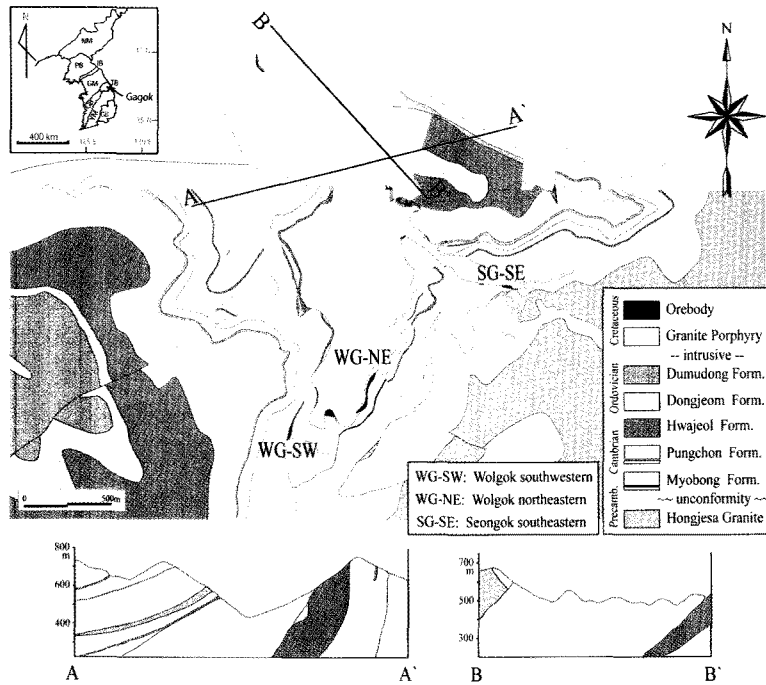


Fig. 1. Deposit geology and the Wolgok and Seongok (SG-SE) orebodies of the Gagok area. Cross sections showing the geological structure on lines A-A' and B-B'.

Table 1. Representative ore mineral associations of WG-NE, WG-SW and SG-SE orebodies in the Gagok deposit

Orebody	Sample No.	Host rock	Major ore minerals**							Minor ore minerals
			sph	gn	po	cp	py	mc	mt	
WG-NE*	GG0812	limestone	⊙		•					
	GG0812	limestone	⊙	•						
	GG0812	limestone	⊙		•					
	GG0813	limestone	⊙	•					mat	
	GG0815	slate	⊙			•	⊙		•	
WG-SW*	GG0804	slate	⊙		⊙	•		•		
	GG0804	slate				⊙			⊙	
	GG0804	slate	⊙	•	⊙	•	•		bm	
	WG460	limestone	⊙	⊙		⊙	⊙	•		
	WG520	limestone	⊙	⊙			•		bm	
SG-SE*	GG0876	granite porphyry	⊙	•	⊙	•				asp, bi
	GG0880	granite porphyry	⊙	⊙	•		⊙	⊙		
	GG0889	slate	⊙	•	⊙	•	•			
	GG0889	slate	⊙	•	⊙	•	•	•	mat	
	GG0889	slate	⊙	⊙	⊙	•	⊙	•	stn	

\*WG-NE (Wolgok northeastern), WG-SW (Wolgok southwestern) and SG-SE (Seongok southeastern) orebodies.

\*\*Frequency of occurrence (abundance): ⊙ > ⊙ > ⊙ > •

Abbreviation: asp = arsenopyrite, bi = native bismuth, bm = bismuthinite, cp = chalcopyrite, gn = galena, mat = matildite, mc = marcasite, mt = magnetite, po = pyrrhotite, py = pyrite, sph = sphalerite and stn = stannite.

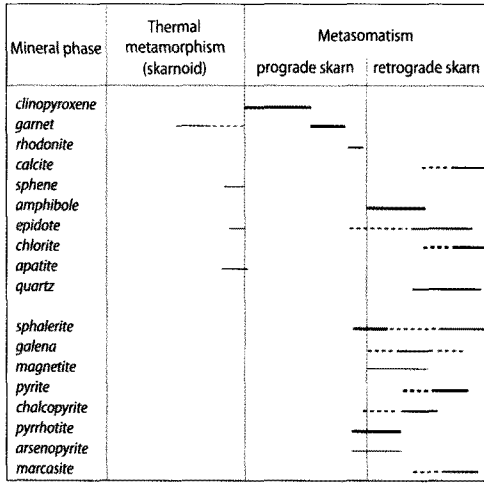


Fig. 2. Schematic diagram showing paragenetic relationships of skarn and ore assemblages at the Gagok deposit. Thickness of lines corresponds to relative abundance.

류석-단사회석 스킨이 대표적 스킨 유형으로 발달되어 있고, 준스카른(skarnoid)단계에 형성된 회석, 석류석, 호상 녹렴석-단사회석 스킨이 배태되며, 후기 스킨단계에 정출된 세맥상 석류석, 장미회석 스킨이 증첩되어 나타난다. 석류석 스킨은 주로 괴상 담황색 석류석으로 구성되어 있으며 방해석과 석영이 석류석 입자 사이를 충전하고 있고, 광석광물로는 주로 섬아연석과 방연석이 수반되고 있다. 석류석-단사회석 스킨은 석류석과 단사회석 외에 장미회석, 석영 등이 산출되며 자류철석, 섬아연석이 수반된다. 단사회석-석류석 스킨에는 녹렴석, 방해석, 석영이 관찰되며, 섬아연석, 자류철석, 방연석 등의 광석광물이 산출되는 반면, 녹렴석-단사회석 스킨에는 녹니석과 각섬석, 석영이 수반되어 있으나, 광석광물은 거의 산출되지 않는다.

월곡 북동부 광체의 광석광물은 섬아연석, 자류철석, 방연석, 황철석, 황동석, 백철석, 유비철석 순의 산출빈도를 보이며, Ag-Pb 황염광물인 슈머라이트(schürmerite)와 함께 자철석이 소량 수반된다 (Fig. 3 A, B). 본 광체 광석광물의 양적 관계는 자류철석에 대하여 섬아연석과 방연석의 산출빈도가 타 광체와 비교하여 높은 경향을 보인다. 섬아연석은 전반적으로 괴상으로 산출되며, 방연석은 주로 세립질로 산재된 산상을 보인다. 함창연 황염광물은 미립입자로 섬아연석 내부에 용리상으로 산출되며, 일부 시료에서는 괴상 자철석, 주상적철석이 산재되어 산출된다.

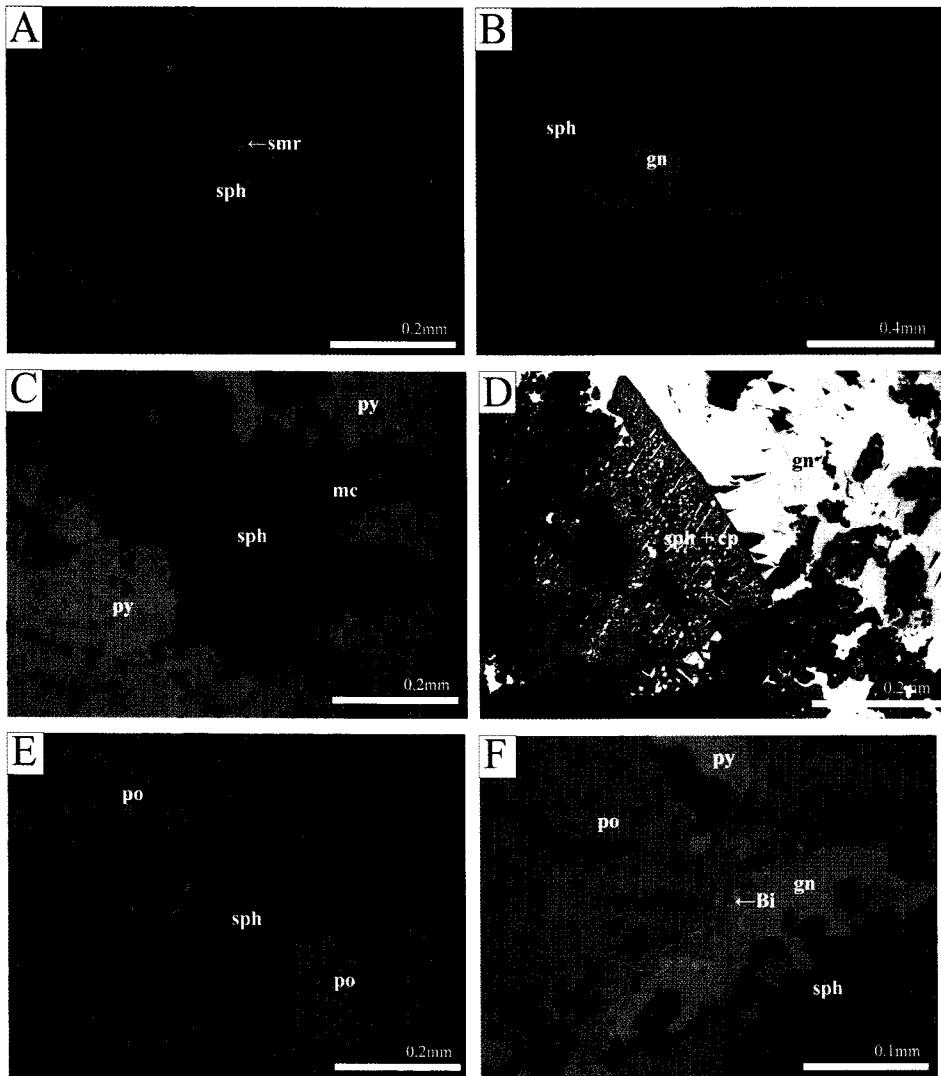
### 2.2. 월곡 남서부 광체

월곡 남서부 광체는 08-4호공과 월곡400항 남서부 시추시료를 중심으로 스킨 분대를 구분, 체계적으로 검토하였다. 내성스카른은 거의 확인되지 않는 반면, 전형적인 외성 스킨대는 묘봉층 및 풍촌층에 걸쳐서 광범위하게 발달되어 있다. 화강반암/반화강암 접촉부로부터 원거리에 발달하고 있는 외성 스킨대는 단사회석 스킨, 석류석-장미회석 스킨, 단사회석-석류석 스킨, 녹렴석 스킨, 녹렴석-단사회석 스킨, 석류석 스킨과 같이 다양한 스킨 유형으로 배태된다. 본 광체는 월곡 북동부 광체에 발달하는 스킨대와 전반적으로 유사한 스킨대인 단사회석 스킨대-석류석 스킨대 및 단사회석 스킨대가 대칭적으로 분포한다.

각 스킨대의 산출광물은 단사회석 스킨대에서는 장미회석, 녹렴석, 각섬석 등이 주로 산출하며, 석류석 스킨대에서는 장미회석 또는 각섬석, 방해석 세맥이 괴상스카른을 절단하고 있다. 장미회석이 전반적으로 월곡 북동부 광체와 비교하여 산출빈도가 높게 나타나고 있으며, 광체 전반에 걸쳐 높은 Mn함량을 보인다. 스킨대에서 공통적으로 후퇴 스킨 광물의 산출빈도가 높은 편이며, 녹니석, 녹렴석과 각섬석은 서로 밀접하게 공생한다. 또한, 석영이 방사상 또는 맥상 군집으로 산출되고 있다. 400항 묘봉층 광체의 광석광물은 주로 단사회석과 함께 수반되고 있으나, 산출빈도는 월곡 북동부 광체에 비하여 낮은 편으로 분포범위도 제한적이다. 섬아연석, 자류철석, 황철석, 방연석, 유비철석, 백철석, 황동석 순의 산출빈도를 보이며, 섬아연석과 자류철석의 공생관계가 두드러지고 황동석의 산출빈도가 낮은 편이다. 반면에 풍촌층에 배태된 460항, 520항 광체는 단사회석, 석류석 위주의 스킨이 발달하거나 또는 미약하게 변질된 석회암에 수반된다. 섬아연석, 황철석, 방연석, 황동석, 백철석, 유비철석 순의 산출빈도를 보이고, 특히 방연석이 타 광체에 비하여 다량 산출된다(Fig. 3 C, D). 460항 시료에는 섬아연석 내에 황동석이 다량 용리되어 있으며, 상부인 520항 시료에서는 용리조각이 거의 관찰되지 않는다.

### 2.3. 선곡 남동부 광체

선곡 남동부 광체는 월곡 구역의 북쪽에 동서 방향으로 관입한 화강반암 암맥과 접촉된 묘봉층 내에 발달되어 있으며, 대상 광석은 08-80호공 및 08-89호공 시추시료를 중심으로 수행되었다. 탐광시추 및 지표조사 결과, 광체는 모암 층준에 대하여 비조화적인 불규



**Fig. 3.** Reflected-light microphotographs of ore assemblages from skarn mineralization of the Gagok zinc-lead deposit. A) Sphalerites (sph) including blebs of Bi-sulposalt(smr). B) Coarse-grained massive sphalerites (sph) surrounded by later free grains of galena (gn). C) Coexisting sphalerite and pyrite (py) with marcasite (mc). Pyrrhotite altered to a mixture of magnetite and marcasite. D) Chalcopyrite(cp) inclusions in sphalerites with inclusions of fine-grained intergrowths of pyrrhotite (po) and galena. E) Coexisting early pyrrhotite and sphalerites crosscut by veinlets of later pyrrhotite. F) Pyrrhotite replaced by later sphalerite and galena. Native Bi (Bi) is rare mineral associated with galena.

착한 형태로 배태되어 있다. 스키른 광물로는 단사회석과 석류석의 산출빈도가 높고, 전반적으로 황화광물이 다량 배태되어 있으며, 황철석이 우세한 월곡 남서부 광체에 비하여 자류철석의 산출빈도가 높다. 광체는 자류철석, 섬아연석, 황철석, 방연석, 백철석, 황동석, 유비철석 순의 산출빈도를 보이며, 미량 광물로 황석석(stannite)과 마틸다이트(matildite), 쉬머라이트 및 Bi계 황염광물과 자연창연 등이 수반되고 있다(Fig. 3

E, F). 자류철석은 주로 괴상으로 산출되며 섬아연석 등 타 광물과의 경계부에서 황철석과 함께 부분적으로 백철석화 되어 있다. 섬아연석은 월곡 남서부 광체와 달리 입자 내에 주로 자류철석이 엽상 또는 점적상으로 용리되어 있으며, 황동석은 독립된 입자로 산출하는 경향을 보인다. 방연석은 Ag 성분이 소량 함유되고 있다. 황동석은 주로 자류철석과 공생하며 일부는 섬아연석 내에 용리되어 산출되는데, 선곡 남동부 광체

가 상대적으로 Cu 함량비가 높은 것은 황동석의 높은 산출빈도에 기인한다. 방연석 또는 섬아연석에 포획되어 있는 함은황염광물과 자연창연은 전반적으로 자류철석과 밀접한 공생관계를 보인다. 또한, 유비철석은 주로 규장암 또는 화강반암에서 자류철석 또는 황철석과 함께 세맥에 함유되고 있다.

### 3. 섬아연석의 화학조성

광상 성인에 따라 섬아연석은 Ag, As, Bi, Cd, Co, Cu, Fe, Ga, Ge, In, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, Tl 등과 같은 다양한 원소가 미량 함유되어 있으며, 특히 Fe, Mn, Cd, In, Sn, Hg 성분은 생성환경에 따라 수 wt.% 단위까지 다양하게 치환되고 있다(Mizuta *et al.*, 1984; Benedetto *et al.*, 2005; Cook *et al.*, 2009). 국내에서도 열수기원의 광상을 대상으로 광상유형별 섬아연석 중 Fe, Mn, Cd에 따른 조성변화가 보고된 바 있다(Chon *et al.*, 1981; Chon and Shimazaki 1986; Koh *et al.*, 1992; Choi, 1993; Pak *et al.*, 2004).

섬아연석은 광상형성 시 황분압 · 온도 · 압력과 같은 물리화학적 생성환경의 변화요인에 대한 정보를 제공하는 중요한 지시 광물로 인식되고 있으며, 철황화광물과 평형 상태를 유지하는 환경에서 섬아연석에 함유된 FeS 함량은 광상의 생성심도에 따라 체계적인 조성 변화를 보이고 있어 지질압력계로 적용되고 있다(Scott and Barnes, 1971; Barton and Skinner, 1979).

가곡광상에서는 관계화성암과 접촉하고 있는 근지성 유형으로부터 점이성 유형까지 다양한 광체가 배태되고 있다. 광체별 물리화학적 정출환경의 차이를 규명하기 위하여 현재 시료채취가 가능한 선곡 남동부, 월곡 남서부, 월곡 북동부 광체로 구분하여, 전자현미분석 시 섬아연석 중 Fe, Cd, Mn, Cu, In에 대한 성분 변화를 중점적으로 검토하였다. 정량분석은 고려대학교 전략광물자원연구소 JEOL JXA-8600SX에 Oxford INCA-6025 EDS를 이용하였고, 분석조건은 가속전압 20 kV, 빔 전류 2.0 nA, 전자빔 직경 5  $\mu$ m, 분석시간 100초이다.

가곡광상의 섬아연석은 광체에 따라 철황화광물과 공생관계에서 미묘한 차이를 보이고 있다. 선곡 남동부 광체에서 섬아연석은 주로 자류철석과 황철석이 모두 함께 공존하는 산상을 보이는 반면, 월곡 북동부 및 월곡 남서부 광체에서는 주로 자류철석(백철석) 또는 황철석과 단독으로 공존하는 산상이 비교적 우세하게 관찰된다. 또한, 가곡광상의 섬아연석은 예외 없이

약 >8.0 wt.% Fe의 높은 철함유량을 보이고 있으며, 특히 자류철석-황철석의 공생관계를 보이는 섬아연석에 함유된 FeS함량이 전반적으로 약 20.0 mole % FeS로 높은 철함유량을 보이고 있어 정출심도가 천부 조건임을 시사하며(Barton and Skinner, 1979), 이는 화강반암에서 지시하는 천부조건과 일치하고 있다.

가곡광상의 대상 광체 중 선곡 남동부 광체가 노출된 화강반암에 공간적 측면에서 가장 근접한 반면에, 월곡 북동부 및 월곡 남서부 광체는 화강반암으로부터 상대적으로 원거리에 배태되고 있다. 선곡 남동부 광체 섬아연석에 함유된 Zn의 평균 함량은 55.21 wt.%로 가장 높게 나타나는 반면에, 월곡 남서부 광체에서는 Fe, Cd, Mn의 평균 함량이 11.65 wt.% Fe, 0.59 wt.% Mn, 0.31 wt.% Cd로 비교적 높게 나타나는 경향을 보이고 있다(Table 2). 스카른형 광상에서 산출되는 섬아연석은 세계적으로 Fe 성분을 다량 함유하고 있으며(Benedetto *et al.*, 2005), 부성분으로 Mn, Cu, Cd, In 순서로 함유되는 양적관계를 보이고, Ag, Pb, Bi 성분은 매우 적게 함유되고 있다(Cook *et al.*, 2009). 가곡광상 섬아연석의 미량성분으로 Mn, Cd 성분은 대부분 시료에서 검출한계 이상으로 함유되어 있으나, Cu, In 성분은 일부 시료에서만 검출한계 이상으로 확인되고 있다. 즉, 가곡광상의 섬아연석은 전세계 스카른 광상에서 산출되는 섬아연석에 함유되는 조성과 전반적으로 일치하고 있다.

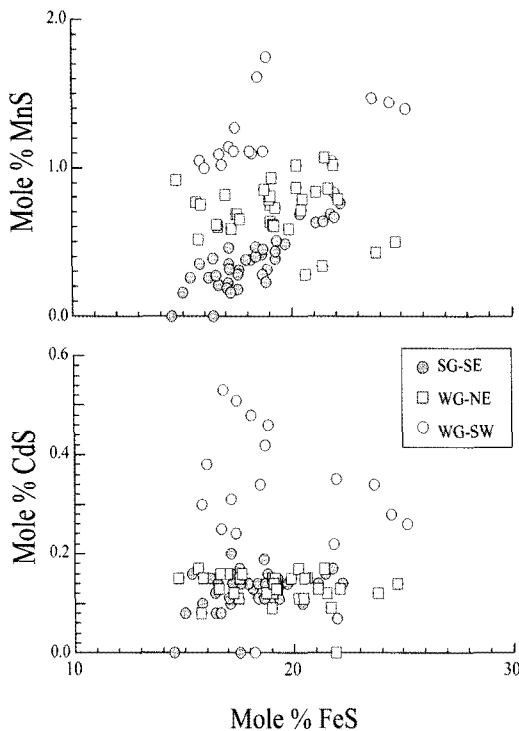
섬아연석의 열수합성 시 고상/액상에서 Zn, Fe, Cd, Mn 성분간 분배 정도를 측정할 실험결과에 의하면, Mn성분은 용액에 잔류하고 동시에 온도 감소에 따라 현저하게 Mn성분이 증가하는 경향이 보고된 바 있다(Kubo *et al.*, 1992). 이 결과를 가곡 광상에 적용하면, Mn성분이 가장 부화된 월곡 남서부 광체의 섬아연석이 스카른화작용 시 상대적으로 후기까지 잔류된 광화유체로부터 정출된 섬아연석으로 해석된다. 한편, 국내 제1연화 태백광체는 전형적인 탄산염교대형 광상으로 섬아연석에 함유된 Mn성분이 전반적으로 매우 높은 함량분포를 보이며, 특히 광화기 최후 단계에 정출된 섬아연석에서 Mn성분이 급격하게 증가하여 최대 12 mole% MnS까지 함유되고 있다(Koh *et al.*, 1992). 이러한 사실은 광화유체의 진화과정에서 섬아연석 중 Mn 성분이 후기 단계에 농집되어 상대적으로 낮은 온도 조건에서 정출된 환경을 지시하며, 공간적 측면에서 열적 중심으로부터 외각부에 위치한 분포양상과 일치되고 있다.

일본의 스카른형 광상에 대한 주요 광종과 섬아연석

**Table 2.** Minimum, maximum and average values for major and minor elements of sphalerites from WG-NE, WG-SW and SG-SE orebodies in the Gagok deposit

Orebody*	Range	Zn	Fe	Mn	Cd	S	ZnS	FeS	MnS	CdS
		weight percent					mole percent			
WG-NE (n=26)	minimum	51.67	8.49	0.30	0.10	32.60	77.0	14.7	0.5	0.1
	maximum	57.73	12.78	0.61	0.20	34.60	84.2	22.1	1.1	0.2
	standard deviation	1.69	1.16	0.08	0.03	0.44	2.1	2.0	0.1	0.0
	average	54.51	10.74	0.42	0.15	33.82	80.5	18.6	0.7	0.1
WG-SW (n=25)	minimum	50.30	9.19	0.16	0.00	33.22	73.1	15.8	0.3	0.0
	maximum	56.35	14.81	1.01	0.61	34.66	82.8	25.2	1.7	0.5
	standard deviation	1.71	1.76	0.21	0.17	0.36	2.8	2.9	0.4	0.1
	average	53.94	11.65	0.59	0.31	33.80	78.8	19.9	1.0	0.3
SG-SE (n=37)	minimum	52.21	8.28	0.00	0.00	33.11	76.8	14.5	0.0	0.0
	maximum	57.10	13.07	0.44	0.23	34.50	85.5	22.2	0.8	0.2
	standard deviation	1.38	1.16	0.10	0.05	0.31	2.1	1.9	0.2	0.0
	average	55.21	10.52	0.21	0.15	33.86	81.4	18.1	0.4	0.1

\*Abbreviations for orebody are same in Table 1.



**Fig. 4.** The relationship among FeS, MnS and CdS contents (mole %) of sphalerites from the Wolgok and Seongok orebodies. Note that MnS and CdS contents in sphalerites from the Wolgok southwestern orebody are higher than those from the others.

중 미량원소의 연계성에 대한 연구결과(Shimazaki and Shimizu, 1984)에 의하면 Pb-Zn형 광상에서 산출된

섬아연석은 MnS 함유량이 상대적으로 높게 나타나는 반면 W형 광상의 섬아연석에서는 CdS 함유량이 높은 경향을 보인다. 월곡 남서부 광체의 섬아연석은 MnS-CdS 함량비가 모두 높게 나타나고 있으며(Fig. 4), 이는 월곡 남서부 광체가 전반적으로 금속광물의 산출빈도가 낮게 나타나지만 W함유량은 비교적 높게 나타나고 있는 점에서 섬아연석 중 함유된 미량성분과 부합되고 있다. 단, 월곡 남서부 광체가 전반적으로 빈광대의 특성을 보이고 있어, 타 광체와 유사한 정도의 품위를 갖는 광석 시료와 비교할 필요가 있다고 사료된다.

#### 4. 광체별 지화학적 특성

가곡광상과 같은 단일 광상의 광체별 금속비에 있어서, 원암으로부터 공급된 금속종의 초기 조건은 동일하지만, 온도구배의 공간적 차이에서 나타나는 광화유체의 진화과정은 특정 금속종의 차별화된 분화 및 농집과정을 보이고 있다. 이는 광화유체의 물리화학적 생성환경을 반영하여, 특정 황화광물의 침전환경과 관련된 광물화학적 연계성을 나타내고 있다.

##### 4.1. 광체별 금속비

특정 광상에서 금속비는 동일한 광화유체로부터 나타나는 광상고유의 특성 인자로 간주되며, 동시에 물리화학적 환경변화에 따라 정출된 광석광물은 지화학적 연계성과 함께 진화양상을 추정하는 지시자로 적용될 수 있다. 따라서, 과거 시추시료의 품위자료와 2008년 시추시료의 분석결과를 광체별로 구분하여 조성분

**Table 3.** Zn index of various orebodies from the the Gagok skarn deposit

Zn index*	Wolgok	Seongok	Geumgok	Total
minimum	494	398	506	398
maximum	999	998	890	999
standard deviation	136	182	175	154
number	47	23	13	83
average	898	870	890	889

\*Zn index =  $1000Zn/(Zn+Pb)$

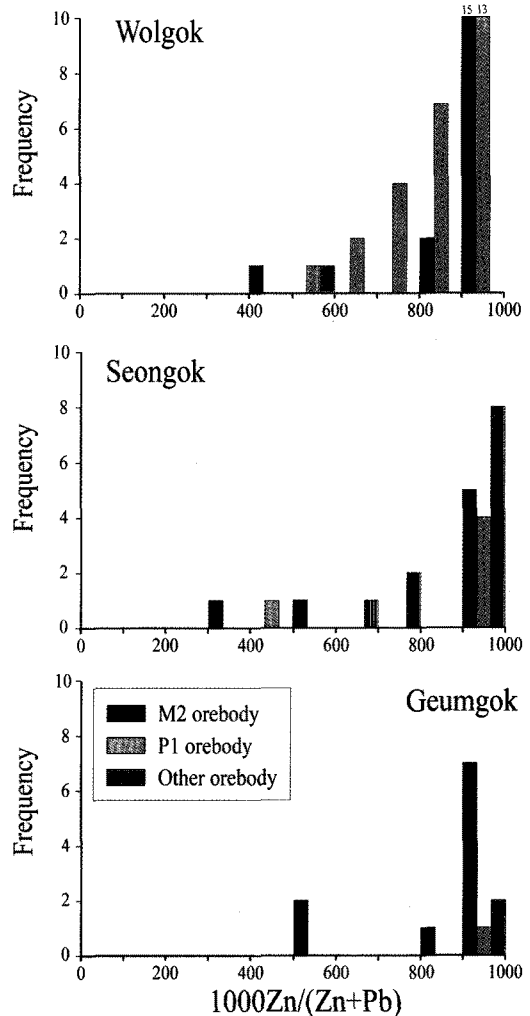
과 미량성분의 지화학적 특성을 검토하였다.

광체별로 주요 대상 광종인 아연-연 품위에 의한 아연 지수( $Zn\ index = 1000Zn/(Zn+Pb)$ )를 산출하였다. 또한 저품위 광석에서 제기될 수 있는 불균질성 문제를 최소화하기 위하여, 대상자료 중 Zn 함량이  $\geq 1.0\ wt.\%$ 인 83개 분석치를 이용하였고(Table 3), 개발 당시의 구분된 월곡, 선곡, 금곡 광체와 함께 층서적 규제를 고려한 층준인 풍촌층의 P1, 묘봉층의 M2 및 기타 광체로 세분하여 검토하였다(Fig. 5).

태백지역 제1연화광상의 생산량 금속비와 비교하면(Choi *et al.*, 2009), 가곡광산은 전반적으로  $>800$ 의 높은 아연지수를 나타내고 있으나, 광체별로 미약한 차이만을 보이고 있다(Table 3). 월곡, 선곡 및 금곡 광체에서 평균 아연지수는 889이며, 광체별 품위에 대한 아연지수는 월곡광체에서 898이고 선곡광체는 870로서 전반적으로 유사한 변화범위를 보이고 있다. 특히 월곡광체는 주로 배태되는 층서 기준에 따라 P1과 M2 광체로 구성되며, 아연 지수는 묘봉층 M2광체와 비교하여 풍촌층 P1광체에서 다양한 변화를 보인다. 즉, 풍촌층 P1광체가 상부에 위치하여 광화유체의 유동성과 함께 진화과정에서 층서적 측면을 고려할 경우, 광화시기의 후기 정출된 광석광물의 공생관계 및 산출빈도와 일치하고 있다.

2008년 시추시료 중 광석광물의 산출빈도가 높은 약 300여개 시료를 대상으로 Au, Ag, Zn, Pb, Cu에 대한 화학분석을 한국광물자원공사 기술연구소에서 실시하였다. Au, Ag 성분은 “KS E3051 광석의 금 및 은의 분석방법”에 따라 정량분석을 수행하였고, Zn, Pb, Cu는 불산-왕수 혼합산(HF, HNO<sub>3</sub>+HCl)으로 0.1~0.2 g의 시료를 증류수를 첨가 최종액량 200 ml를 제조하여 ICP-AES (Perkinelmer 5300DV)로 실시하였다.

비철금속 함량이 비교적 높게 나타나는 선곡 남동부 광체인 08-89호공 시료로서 Zn, Pb, Cu 등 비철금속과 함께 Au, Ag이 확인된 반면, 월곡 남서부 및 북동부 광체는 전반적으로 저품위 특징을 보인다(Table 4).



**Fig 5.** Histograms showing the Zn index(in ore grades) distribution of the Wolgok, Seongok and Geumgok orebodies. M2 means orebodies within limestone in Myobong Formation. P1 means orebodies within lower limestone in Pungcheon Formation.

이러한 광체별 광석에 함유된 귀금속(Ag+Au (g/t))과 비철금속(Cu+Zn+Pb (wt.%))성분을 검토한 결과, 광석 중 Ag과 Au성분은 극히 제한적으로 함유되어 있으며, 전반적으로 빈화된 경향을 보인다. 광석품위 자료로부터 Cu-Zn-Pb금속비는 Zn-Pb 축을 따라 Zn성분이 부화되어 있으며, 선곡 남동부 광체에서 광석 중 Cu/(Cu-Zn-Pb)비는 타 광체에 비하여 비교적 높은 수치를 보이고 있다(Fig. 6). 이러한 경향은 생산실적 및 과거 시추시료에 의한 광석 품위자료와도 일치하고 있다.

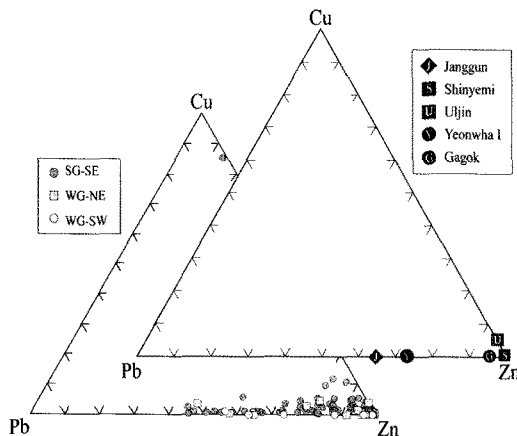
기 보고된 누적 생산자료에 의하면 전형적인 근지성



**Table 4.** Ore grades of major and minor metals from 2008 drilling core samples in the Gagok skarn deposit

Orebody	Value	Au (g/t)	Ag (g/t)	Zn (wt.%)	Pb (wt.%)	Cu (wt.%)
WG-NE N=82	minimum	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
	maximum	<0.05	54.90	8.13	3.08	0.18
	standard deviation	-	10.41	1.71	0.37	0.03
	average	<0.05	5.88	0.87	0.10	0.01
WG-SW N=102	minimum	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
	maximum	<0.05	27.60	3.50	1.05	0.00
	standard deviation	-	6.38	0.68	0.21	0.00
	average	<0.05	4.64	0.43	0.09	0.00
SG-SE N=126	minimum	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
	maximum	7.36	130.00	15.60	6.09	10.70
	standard deviation	-	20.87	3.57	1.26	0.96
	average	<0.05	17.90	3.81	0.66	0.17
Total N=310	minimum	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
	maximum	7.36	130.00	15.60	6.09	10.70
	standard deviation	-	11.42	1.01	0.22	0.03
	average	<0.05	7.97	0.52	0.11	0.02

\*Abbreviations for orebody are same in Table 1.



**Fig. 6.** Ternary diagrams illustrating the relative base metal (Cu-Zn-Pb) for ore grades of selected core samples for the Wolgok and Seongok orebodies, and for examples (cumulative base metal (Cu-Zn-Pb) productions) of individual skarn and carbonate replacement deposits. Abbreviations for orebody are same in Fig. 1.

스카른형 광상인 제2연화, 신에미 광상에서는 전반적으로 아연이 농집된 균질한 금속비의 분포양상을 보이고 있는 반면에, 탄산염교대/스카른형 광상인 장군, 제1연화 광상에서는 Pb-Zn간 금속비가 다양한 변화 양상으로 나타나고 있다(Choi *et al.*, 2009). 즉, 탄산염교대/스카른형 광상 또는 광체에 따라 Zn-Pb-Cu 금속비는 현저한 차이를 보이고 있으며, 이는 광화작용에 관여된 열수의 시공간적 진화 양상이 반영된 결과로 해

석될 수 있다. 특히 금속비 중 은점유비는 장군광산과 같은 탄산염교대형 광상에서 방연석과 함께 함은황염 광물의 높은 존재빈도에 따라 은함유량이 증가하는 경향을 보이고 있으며(Imai and Lee, 1980), 이는 Pb황 화광물과 함께 함은황염광물의 침전이 동시에 유도되는 광화유체의 진화 환경을 시사하고 있다(Einaudi *et al.*, 2003).

#### 4.2. 광체별 미량원소의 함량과 상관관계

비철금속 광상에서는 광상유형에 따라 주요 금속인 Zn, Pb, Cu 이외에도 Fe, Mn, In, Sn, Ga, Ge 등 다양한 원소가 수반되고 있다. 특히 미량 원소는 광상유형에 수반되는 광석광물 유형과 함께 각각 다른 함량과 거동양태를 보이고 있어 광상의 생성환경을 파악하는 중요한 지시자로 활용될 수 있다. 또한 일부 특정 원소는 경제적 측면에서 일정 함량을 초과할 경우 선광/제련 시 부산물로 주요 회수 대상이 되고 있다. 가곡광산의 광석시료를 대상으로 미량원소의 상관관계 및 수반되는 광석/맥석광물의 연계성을 비교하여 광체의 생성환경을 검토하였고, 광산 개발측면에 있어 경제성 있는 미량원소의 부존 가능성을 확인 선광 및 제련시 기초자료로 활용하고자 하였다.

한국광물자원공사에서 수행한 2008년 시추 시료 중 가곡광산의 광체별 지구화학적 특성이 전반적으로 섬아연석을 주성분으로 하는 단순한 광석 특성을 반영하고 있어 Zn 함량이  $\geq 1.0$  wt.%인 대표시료를 선별, 캐나

다 Activation Laboratory에서 미량원소 분석을 수행하였다. 가곡광산의 광석에서 확인된 Zn, Cu, Pb, Fe, Mn 주성분과 함께 미량원소인 In, Ga, Ge, Mn, Cd, Ag, Sn, Bi, Ce, W에 대한 분석 자료를 광체별로 구분하여 상관관계를 검토하였다. Fe성분은 황화광물이 외에 스카른광물에도 다량 함유되어 있어 지화학적/광물학적 특성에 대한 비교 대상에서 제외하였다. 가곡광산 광석의 주요금속인 Zn, Pb, Cu 성분은 전적으로 황화광물로 존재하며, 광체별 황화광물 유형에 대한 산출빈도를 반영하고 있다. 시편 및 광석현미경 관찰결과에 의하면, Pb황염광물의 산출빈도는 극히 미비하여, Pb/Zn비는 섬아연석과 방연석의 산출빈도에 의하여 전적으로 좌우되고 있다. 대상시료 중 Pb/Zn비는 월곡 남서부광체에서 0.217로 가장 높은 반면, 선곡 남동부광체는 0.089를 보인다. 이는 선곡 남동부 광체와 비하여 월곡 남서부 광체에서 방연석의 높은 산출빈도와 일치하고 있다.

선곡 남동부 광체에서 Zn함량과 비례하여 Cu, Pb, In, Ga, Cd, Ag, Bi의 평균함량이 전반적으로 높게 나타나는 반면, 반면 월곡 남서부 광체에서는 Sn, Mn 성분이 상대적으로 부화된 경향을 보이고 있다(Table 5). 특히 Mn성분은 월곡 남서부 광체에서 전반적으로 >1%로 가장 부화된 경향을 보인다. Bi성분은 선곡 남동부 광체에서 높은 평균 함량(103.1 ppm)을 보이며, Ce 및 W는 광체별로 서로 유사한 함량을 보이고 있다.

섬아연석 중 Zn성분과 In 및 Ga성분은 서로 밀접한 치환관계를 지시하고 있어, 가곡광석 중 Zn 품위와 In 및 Ga 성분간 상관성을 검토하였다. 특히, 선곡 남동부 광체에서 In성분은 106.3 ppm으로 월곡 북동부 및 월곡 남서부 광체와 비교하여 수십 배 이상 부화된 평균 함량비를 보이며, Ga성분에서도 약 15.4 ppm의 상대적으로 높은 함량을 나타낸다. 이러한 결과는 Zn 품위에 따른 상대적 존재비가 좌우되고 있어 금속비로 변환하여 검토하였다. 10000In/Zn비가 월곡 북동부 광체의 1.07 및 월곡 남서부 광체의 1.43과 비교하여 선곡 남동부 광체에서 14.8로 현저하게 높은 경향을 보이는 반면, 10000Ga/Zn비와 10000Cd/Zn비는 모든 광체에서 광체별 편차는 크지 않고 서로 유사한 수치를 보이고 있다.

광체별 광석시료에 함유된 주성분과 미량원소 간 지화학적 거동과 광석광물의 상관관계를 검토하였다. 특히 Fe-In, Fe-Bi, Cu-In, Cu-Bi, Pb-Ag, Zn-In, Zn-Cd, In-Cd, Ag-Bi 성분은 비교적 양호한 정( $\geq 0.5$ )의 상관관계를 나타나고 있다(Table 6). 반면에 Fe-Mn, Fe-Ce, Zn-Sn 성분은 음의 상관관계 ( $\leq -0.5$ )를 보이고 있다. Fe-Mn 성분은 자류철석, 황철석, 섬아연석, 황동석 등 다양한 황화광물로 존재하고 있을 뿐만 아니라, 스카른 광물을 구성하는 주원소로 단순한 광물간의 상관관계를 규정할 수 없다. 단, 선곡 광체와 비교하여 월곡 남서부 광체의 광석중 Mn 성분이 현저하게 부화

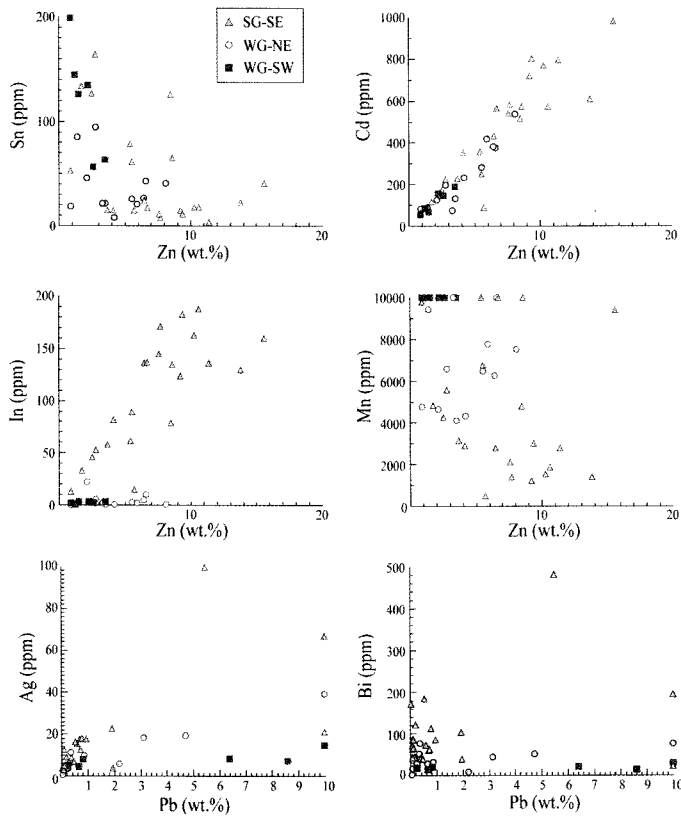
**Table 5.** Ore grades of major and trace metals from 2008 selected core samples in the Gagok skarn deposit

Orebody	Value	Fe	Cu	Pb	Zn	In	Ga	Ge	Mn	Cd	Ag	Sn	Bi	Ce	W
		(wt.%)					(ppm)								
WG-NE (n=12)	minimum	1.80	<0.01	0.01	0.94	0.4	1.7	0.3	4140	77	0.6	8.1	2.9	23.6	0.9
	maximum	27.40	0.18	3.08	8.13	22.1	17.5	2.1	>10000	539	39.5	94.4	76.7	51.4	68.5
	standard deviation	7.67	0.05	0.87	2.27	6.2	4.0	0.6	2156	155	11.0	26.8	23.7	9.2	18.8
	average	8.81	0.04	0.39	4.23	4.5	6.7	0.9	6833	245	10.4	37.8	39.1	39.3	12.2
WG-SW (n=6)	minimum	3.76	<0.01	0.02	0.87	1.4	1.6	0.7	>10000	54	4.2	57.0	13.8	22.4	2.3
	maximum	14.60	0.03	1.11	3.50	4.3	14.0	3.4	>10000	190	14.6	199.0	31.4	51.5	42.4
	standard deviation	3.89	0.01	0.44	0.99	1.3	4.7	1.0	-	55	3.6	53.3	6.3	10.8	16.9
	average	6.97	0.01	0.43	1.98	2.8	4.6	1.5	>10000	117	7.9	121.0	20.0	34.2	15.5
SG-SE (n=22)	minimum	21.60	0.03	0.01	0.94	12.6	3.4	0.4	525	65	2.8	3.5	23.1	1.2	0.6
	maximum	49.20	0.16	6.09	15.60	188.0	31.5	5.5	>10000	981	67.0	164.0	482.0	59.0	122.0
	standard deviation	7.72	0.04	1.66	3.83	55.1	8.6	1.3	3301	259	14.0	48.4	97.0	16.7	26.5
	average	33.82	0.09	0.64	7.19	106.3	15.4	1.3	4553	470	13.6	47.6	103.1	24.0	13.7
Total (n=40)	minimum	1.80	<0.01	0.01	0.87	0.4	1.6	0.3	525	54	0.6	3.5	2.9	1.2	0.6
	maximum	49.20	0.18	6.09	15.60	188.0	31.5	5.5	>10000	981	67.0	199.0	482.0	59.0	122.0
	standard deviation	14.76	0.05	1.32	3.67	65.6	8.4	1.1	3321	251	12.0	51.2	80.8	15.4	22.7
	average	22.29	0.06	0.54	5.52	60.2	11.2	1.2	6054	350	11.5	55.6	71.4	30.1	13.5

\*Abbreviations for orebody are same in Table 1.

**Table 6.** Minor-trace elements correlation matrix for the Gagok ores

	Fe	Cu	Pb	Zn	In	Ga	Ge	Mn	Cd	Ag	Sn	Bi	Ce	W
Fe	1.00													
Cu	0.71	1.00												
Pb	0.13	0.18	1.00											
Zn	0.45	0.37	0.04	1.00										
In	0.75	0.58	0.12	0.76	1.00									
Ga	0.41	0.25	0.00	0.02	0.34	1.00								
Ge	0.08	0.14	0.35	-0.17	-0.06	0.10	1.00							
Mn	-0.59	-0.39	-0.10	-0.39	-0.50	-0.15	0.15	1.00						
Cd	0.48	0.37	-0.08	0.93	0.83	0.07	-0.19	-0.36	1.00					
Ag	0.25	0.29	0.71	0.25	0.04	0.13	-0.02	-0.28	0.20	1.00				
Sn	-0.27	-0.42	-0.06	-0.50	-0.38	0.17	0.19	0.47	-0.46	-0.19	1.00			
Bi	0.50	0.52	0.10	0.17	0.28	0.17	-0.15	-0.21	0.16	0.53	-0.26	1.00		
Ce	-0.51	-0.44	-0.17	-0.41	-0.45	0.21	-0.06	0.07	-0.42	-0.15	0.26	-0.31	1.00	
W	-0.07	-0.19	-0.10	-0.06	-0.11	0.10	0.05	0.03	-0.07	0.02	0.42	-0.09	0.30	1.00



**Fig. 7.** Covariation of Zn with Sn, Cd, In and Mn, and Pb with Ag and Bi from the Wolgok and Seongok orebodies. Abbreviations for orebody are same in Fig. 1.

되어 있다(Fig. 7). 이는 항내 및 시편관찰 결과 Mn을 주성분으로 하는 스키르튼 광물인 장미휘석의 높은 산출 빈도와 함께 섬아연석에 함유된 높은 Mn 성분과 일치

하는 경향을 보인다(Fig. 4).

광석에 함유된 Zn-Cd 성분은 서로 양호한 정의 상관관계를 보이고 있으며(Fig. 7), 전적으로 섬아연석 품

위에 좌우되고 있다. 즉, Cd 성분이 다른 원소와 달리 광석/스카른 광물 중 섬아연석에 종속적으로 함유되는 미량 성분으로 ZnS-CdS 고용체로 치환되고 있으며 (Cook *et al.*, 2009), 광체에 따른 차별성보다는 섬아연석 내에서 전반적으로 균질한 농도분포를 보이고 있다. Zn-In 성분은 광체별 서로 다른 차별화된 상관관계를 보이고 있다. 월곡광체에서는 전반적으로 극미량 함유되어 상관관계를 보이지 않고 있는 반면에, 선곡 남동부 광체에서는 비교적 양호한 정도의 상관관계를 보이고 있으며, 이는 로케사이트(roquesite,  $\text{CuInS}_2$ )와 같은 단독 In광물상이 존재하기보다는 섬아연석에 함유된 In함유량 차이를 반영한 결과로 해석된다. In성분은 섬아연석과 사쿠라이트(sakuraiite,  $\text{CuZnInS}_4$ )의 고용체로서 ( $\text{Cu}^{+} + \text{In}^{3+}$ )과 ( $\text{Zn}^{2+} + \text{Fe}^{2+}$ )간의 쌍치환 관계를 통하여 유도되며(Shimiz *et al.*, 2007), Cu 함량이 상대적으로 높은 선곡 남동부 광체에서 In 함량이 높은 경향성과 일치하고 있다. 또한, In성분은 전적으로 마그마 기원으로부터 공급되고 있어 근지성 유형에 농집되는 경향성을 보이고 있다(Imai and Choi, 1984; Cook *et al.*, 2009).

Zn-Sn 성분은 전반적으로 음의 상관관계를 보이고 있다. 이는 섬아연석에 치환된 미량 성분보다는 황석석과 같은 독립광물의 산출빈도에 좌우되며(Table 1), 월곡 남서부 광체에서도 황석석이 높은 산출빈도에 기인된다. 한편, Ag-Pb과 Bi-Pb 성분은 원소간 뚜렷한 상관관계가 존재하지 않으며, 이는 다양한 황염광물상의 존재 형태에 기인한다(Ciobanue and Cook, 2000).

## 5. 토 의

재개발 광상에서는 기본적으로 기존에 개발된 광체의 배태 양상에 대한 열수시스템의 지질자료에 따라 수평·수직적 금속비에 대한 변화양상을 정립하고, 이에 기초한 잠두 광체의 부존 가능성을 예측하기 위한 광상유형의 생성모델에 대한 기술적 검토가 요구되고 있다(Einaudi *et al.*, 2003; Choi *et al.*, 2009). 스카른형 광상에 수반되는 주요 금속종은 관계화성암의 고유한 생산성/비생산성 인자와 함께 마그마 분화특성에 따라 좌우되고 있으며(Meinert *et al.*, 2005), 국내에서도 철 광화작용은 중성암(거도 광상)에서 산성암(신예미 광상)까지 다양한 화성암의 화학조성과 관련된 특징을 보이고 있다(Seo *et al.*, 2007). 연·아연 광화작용(제2연화 및 울진 광산)은 관계화강암이 산성암과 밀접한 연관성을 보이고 있는(Yun and Einaudi, 1982;

Choi *et al.*, 2010) 반면에, 동·철 광화작용(거도 광산)에서는 아다카이트질 중성암의 조성 특징을 나타내고 있다(Park *et al.*, 2007). 이는 특정 광상의 금속종과 관련된 성인적 특성이 관계 화성암의 화학조성과 비교적 일치되는 결과로 해석되고 있다(Meinert *et al.*, 2005).

특정 광화대에서 동일 지질시대 화성암으로부터 공급된 광화유체는 광화초기 전반적으로 동일한 금속비로부터 유도되며, 주변모암의 산화·환원 조건 또는 관계 화성암의 공간적 근접성에 따라 온도구배 및 지질 구조에서 나타나는 물리·화학적 정출환경의 변화에 기인하여, 특정 금속종의 차별화된 분화과정이 유도됨으로서 시·공간적 측면으로 서로 다른 금속종의 농집된 분포 양상을 보이고 있다. 한편, 국내 연·아연 광상은 근지성 유형인 스카른형 광상으로 분류되는 제2연화, 울진, 신예미 광산과 점이성 유형인 탄산염교대/스카른형 광상이 혼재된 제1연화 그리고 원지성 유형인 탄산염교대형 광상으로 장군 광상으로 구분되고 있다(Choi *et al.*, 2009). 그리고 제1연화, 제2연화, 장군, 울진, 신예미 광산에 대한 Zn-Pb 생산량의 아연 지수(Zn index)는 제2연화 및 신예미 광산에서 각각 955과 998로 높은 수치를 나타내고 있는 반면, 장군, 제1연화, 울진 광산에서는 각각 646, 730, 742로 비교적 낮은 수치를 보이고 있다. 이는 광상별로 근원암의 화학조성은 다소 차이는 있으나, 유사한 화성암으로부터 공급된 근원물질이 이동거리에 따라 차별화된 침전과정에서 나타나는 광화유체의 분화된 결과로 원거리에 위치한 광상에서 아연 지수가 전반적으로 감소하는 경향성을 보인다.

루마니아 스카른형 광상에서 동일한 관계화성암으로부터 유도된 근지성 광체에서는 Cu-Fe광화작용이 우세하지만, 점차 Fe 그리고 Zn-Pb 광화작용으로 변화되는 대상 분포가 보고되고 있으며, Zn-Pb광체는 주로 근원암으로 외각부 또는 주변부에 배태되고 있다(Ciobanu and Cook, 2004). 한편, 가곡광상은 공간적 측면에서 관계화성암과 접촉하고 있는 전형적인 근지성 유형의 스카른 광상으로 분류되지만(Choi *et al.*, 2009), 근지성 유형인 선곡 광체와 비교하여 월곡 광체에서는 상부에서 점이성 유형이 국부적으로 혼재된 광체의 부존 특성을 보인다. 또한, 최근 심부 시추결과에 의하면 동광화작용은 하부 스카른대에서 전반적으로 미약한 특징을 보이고 있는 반면, 자철석(회충석)이 우세한 스카른대로부터 점차 자류철석에서 섬아연석-지류철석으로 변화되는 광석광물의 대상 분포가 관찰되고

있다. 이는 가곡광상과 관련된 화성암이 산성암의 특징을 보이고 있어 광화초기 단계부터 전반적으로 Cu가 전반적으로 결핍된 광화유체 조성을 반영한 결과로 추정된다. 월곡 남서부 및 월곡 북동부 그리고 관계화성암과 접촉하고 있는 선곡 남동부 광체에 대한 금속비는 공통적으로 Zn 함량이 매우 높고 Pb 및 Cu 함량은 매우 낮은 양상을 보이며, 과거 시추품위 자료에서도 아연지수는 400~900범위에서 변화되고 있으나, 광체별 아연지수의 산출빈도는 전반적으로 >900이며 (Fig. 5), 누적 생산량에 대한 아연지수인 955와 유사한 수치를 보인다.

광상 유형에 따라 금속종의 상대적 함량비와 함께 수반되는 미량원소의 상관성은 근원암과 관련된 광상 고유의 특성 인자로 좌우되며, 동시에 광화유체의 진화특성을 추정하는 지시자로 중요성이 강조되고 있다 (Cook *et al.*, 2009). 가곡광상에서는 관계화성암과 접촉하고 있는 근지성 유형인 선곡 광체가 전반적으로 우세하게 배태되고 있는 반면 점이성 유형인 월곡 광체가 소규모로 산출되고 있다. 광체별 광물/지화학적 측면에서 비교한 결과에 의하면, 선곡 남동부 광체에서는 육방정계 자류철석과 황동석의 산출빈도가 우세하며, 광석 중 In 함유량이 현저하게 부화된 양상을 보인다. 반면에 월곡 남서부 광체에서는 방연석의 높은 산출빈도와 함께 광석 중 Mn, Sn, W 함유량이 상대적으로 높게 나타나며, 동시에 섬아연석 중 Mn과 Cd성분이 부화된 경향을 보이고 있다.

## 6. 결 언

동일 기원의 광상에서 광체별 금속비와 함께 특정 광물에 함유된 In, Cd, Mn 등의 미량원소는 근원암으로부터 공급된 광화유체가 근지성 또는 정출온도와 같은 생성환경을 반영하여, 특정 황화광물에 농집된 침전환경과 관련된 광물화학적 연계성을 나타내고 있다. 가곡광상에서는 광체의 공간적 분포가 관계화성암과 근접성에서 상대적 차이를 보이고 있으며, 동시에 지화학적/광물학적 차별성이 인지되고 있다. 즉, 선곡 남동부 광체는 관계화성암과 근접하여 접촉하고 있는 반면, 월곡 남서부 및 월곡 북동부 광체는 상대적으로 원거리에 위치하고 있다. 또한, 광석/스카른 광물의 유형별 특성은 선곡 남동부 광체에서는 전반적으로 무수 스카른광물과 함께 섬아연석-자류철석의 공생관계가 우세한 반면, 월곡 남서부 및 월곡 북동부 광체에서는 무수-함수 스카른광물과 함께 섬아연석-자류철석-황철석-

방연석이 산출되고 있다. 이는 관계화성암의 공간적 열적구배에 있어서 광화유체의 유입 및 이동 과정에서 나타나는 광체별 근지성~점이성 물리화학적 환경 특성을 반영하고 있다. 즉, 선곡 남동부 광체에서는 Cu 및 In 성분이 상대적으로 부화된 양상을 보이고 있으며, 상대적으로 열수유체의 유입 및 이동의 관계에서 열적 중심에 근접되어 있으며, 상대적으로 광화작용의 전기 단계에 정출된 지화학적 특징을 보인다. 반면에, 월곡 남서부 광체는 광물 조합뿐만 아니라 섬아연석 중 Mn, Sn 함유량이 상대적으로 높게 나타나고 있으며, 스카른광물에 비교하여 탄산염 광물의 높은 산출빈도에 따른 광화작용의 후기 단계에 나타나는 유체 진화와 함께 점이성 유형의 광체 특성을 지시하고 있다.

## 사 사

본 연구는 2008년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 2008RRD11P0230102009)

## 참고문헌

- Barton, P.B. Jr and Skinner, B.J. (1979) Sulfide mineral stabilities. In: Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits (H.L. Barnes, ed.), Wiley-Interscience, New York, p.278-403.
- Benedetto, F.D., Bernardini, G.P., Costagliola, P., Plant, D. and Vaughan, D.J. (2005) Compositional zoning in sphalerite crystals. *Amer. Min.*, v.90, p.1384-1392.
- Choi, S.-G. (1993) Compositional variations of sphalerites and their genetic characteristics from gold and/or silver deposits in central Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geology*, v.26, p.135-144.
- Choi, B.K., Choi, S.-G., Seo, J.E., Kim, T.H., Kang, H.S., Lee, S.B., Koo, M.H., Yoo, I.K. and Jung E.H. (2010) Formation and mineral chemistry of a Zn-Pb skarn from the Gageok mine, south Korea. The 20th International Mineralogical Association, IMA2010, Budapest/Hungary, August 21-27, CD-Proceeding, p.231.
- Choi, S.-G., Choi, B.K., Ahn, Y.H. and Kim, T.H. (2009) Re-evaluation of genetic environments of zinc-lead deposits to predict hidden skarn orebody. *Jour. Econ. Env. Geol.* v.42, p.301-314.
- Choi, S.-G., Pak, S.J., Lee, P.-K. and Kim, C.S. (2004) An overview of geoenvironmental implications of mineral deposits in Korea. *Jour. Econ. Env. Geol.* v.37, p.1-19.
- Chon, H.T., Shimazaki, H. and Sato, K. (1981) Compositional variation of sphalerites from some hydrothermal metallic ore deposits in the Republic of Korea. *Mining Geology*, v.31, p.337-343.
- Chon, H.T. and Shimazaki, H. (1986) Iron, manganese and cadmium contents of sphalerites and their genetic implications to hydrothermal metallic ore deposits

- in Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.* v.19, p.139-149.
- Ciobanue, C.L. and Cook, N.J. (2000) Intergrowths of bis-muth sulphosalts from the Ocna de Fier Fe-skarn deposit, Banat, Southwest Romania. *Eur. J. Mineral.* v.12, p.899-917.
- Ciobanue, C.L. and Cook, N.J. (2004) Skarn texture and a case study: the Ocna de Fier-Dognecea orefield, Banat, Romania. *Ore Geology Reviews*, v.24, p.315-370.
- Cook, N.J., Ciobanue, C.L., Pring, A., Skinner, W., Shimizu, M., Danyushevsky, L., Saini-Eidukat, B. and Melcher, F. (2009) Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICP-MS study. *Geochim. Cosmochim. Acta.* v.73, p.4761-4791.
- 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. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.* v.5, p.211-220.
- Imai, N. and Choi, S.-G. (1984) The first Korean occurrence of roquesite. *Mineralogical Journal*, v.12, p.162-172.
- Imai, N. and Lee, H.K. (1980) Complex sulphide and sulphosalts ores from the Janggun mine, Republic of Korea. In: *Complex Sulphide Ores, Proc. International Conference for Complex Sulphide Ores 1980*, Rome, Oct. 5-8, p.248-259.
- 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 sphalerite geobarometry to the Taebaek Pb-Zn-(Ag) deposit at Yeonhwa I mine, Republic of Korea. *Mineralium Deposita*, v.27, p.58-65.
- Kubo, T., Nakato, T. and Uchida, E. (1992) An experimental study on partitioning of Zn, Fe, Mn and Cd between sphalerite and aqueous chloride solution. *Mining. Geol.*, v.42, p.301-309.
- Meinert, L.D. (1992) Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada*, v.19, p.145-162.
- Meinert, L.D., Dipple, G.M. and Micolescu, S. (2005) World skarn deposits. *Econ. Geol.*, 100th anniversary Volume, p.299-336.
- Mizuta, T., Shimazaki, H., Kaneda, H. and Lee, M.S. (1984) Compositional variation of sphalerites from some Au-Ag ore deposits in South Korea. In: *Granitic Provinces and Associated Ore Deposits in South Korea* (A. Tsusue, ed.), p.127-152.
- 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, J.-W., Choi S.-G., Ko E.-M. and Chi S.J. (2007) Geochemical characteristics of barren and mineralized intrusives in the Geodo area Taebaeksan Basin, south Korea: Implications for adakite magmatism and Fe-Cu-(Au) mineralization. In: *Exploring Our Environment. Proceeding of the 23<sup>rd</sup> International Applied Geochemistry Symposium, Oviedo/Spain, June 14-19*, p.179.
- Scott, S.D. and Barnes, H.L. (1971) Sphalerite geothermometry and geobarometry. *Econ. Geol.*, v.66, p.466-474.
- 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 orebody in Taebaek area. *Jour. Miner. Soc. Korea*, v.20, p.35-46.
- Shimazaki H. and Shimizu M. (1984) Compositional variation of sphalerites from skarn deposits in Japan. *Jour. Fac. Sci., Univ. Tokyo, Sec., II*, v.21, p.1-37.
- Shimizu M., Matsubara S., Kyouno Y., Harada A. and Cook N.J. (2007) High-grade Ag-Cu-Sn-In mineralization in the Nishizawa-Ashio area, Tochigi prefecture, central Japan, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, v.71 (suppl. 1), A-930.
- Yun, S.K. (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 Einaudi, M.T. (1982) Zinc-lead skarn of the Yeonhwa-Ulchin district, south Korea. *Econ. Geol.*, v.77, p.1013-1032.