

## 거풍구리광상: 산출광물, 유체포유물 및 안정동위원소 연구

유봉철<sup>1\*</sup> · 유병운<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 광물자원연구본부, <sup>2</sup>충남대학교 지질환경과학과

### Geopung Copper Deposit in Ogcheon, Chungcheongbuk-do: Mineralogy, Fluid Inclusion and Stable Isotope Studies

Bong Chul Yoo<sup>1\*</sup> and Byoung Woon You<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Overseas Mineral Resources Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 305-350, Korea

<sup>2</sup>Department of geology and environmental sciences, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea

The Geopung Cu deposit consists of two subparallel quartz veins that fill the NE-trending fissures in Triassic Cheongsan granite. The quartz veins occur mainly massive with partially cavity and breccia. They can be followed along strike for about 500 m and varies in thickness from 0.2 to 2.2 m. Based on the mineralogy and paragenesis of veins, mineralization of quartz veins can be divided into hypogene and supergene stages. Hypogene stage is associated with hydrothermal alteration minerals such as sericite, pyrite, quartz, chlorite, clay minerals and sulfides such as pyrite, arsenopyrite, pyrrhotite, marcasite, sphalerite, stannite, chalcopyrite and galena. Supergene stage is composed of goethite. Fluid inclusion data from quartz indicate that homogenization temperatures and salinity of hypogene stage range from 163 to 356°C and from 0.2 to 7.2 wt.% eq. NaCl, respectively. They suggest that ore forming fluids were progressively cooled and diluted from mixing with meteoric water. Sulfur ( $\delta^{34}\text{S}$ : 4.3~9.2‰) isotope composition indicates that ore sulfur was derived from mainly magmatic source although there is a partial derivation from the host rocks. The calculated oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ : 0.9~4.0‰) and hydrogen ( $\delta\text{D}$ : -86~-69‰) isotope compositions suggest that magmatic and meteoric ore fluids were equally important for the formation of the Geopung Cu deposit and then overlapped to some degree with another type of meteoric water during mineralization.

**Key words :** Geopung deposit, quartz vein, mineralization, fluid inclusion, stable isotope

거풍구리광상은 트라이아스기 청산화강암 내에 발달된 NE 계열의 열극대를 충전한 2개조의 석영맥으로 구성된 열수맥상광상이다. 본 광상의 석영맥은 주로 괴상으로 산출되며 일부 정동 및 각력상 조직이 관찰되고 연장성은 500 m, 맥폭은 0.2에서 2.2 m 정도이다. 이들 석영맥의 광화작용은 hypogene 시기와 supergene 시기로 구분된다. Hypogene 시기의 광물은 견운모, 황철석, 석영, 녹니석 및 점토광물로 구성된 열수변질광물과 황철석, 유비철석, 자류철석, 백철석, 섬아연석, 황석석, 황동석 및 방연석으로 구성된 황화광물이 관찰된다. Supergene 시기에는 침철석이 생성되었다. 유체포유물 자료에 의하면, 광화시기 광석광물의 침전과 관련된 균일화온도와 염농도는 각각 163~356°C, 0.2~7.2 wt.% NaCl로서 광화유체가 천수의 혼합에 의한 냉각과 회석작용이 있었음을 지시한다. 황( $\delta^{34}\text{S}$ : 4.3~9.3‰)의 기원은 주로 화성기원과 일부 모암내의 황에서 유래된 것으로 해석된다. 산소( $\delta^{18}\text{O}$ : 0.9~4.0‰)와 수소( $\delta\text{D}$ : -86~-69‰) 동위원소값의 자료로 볼 때, 이 광상의 광화유체는 마그마 기원 또는 천수 기원의 유체로 생각되며 광화작용이 진행됨에 따라 기원이 다른 천수의 혼합이 작용한 것으로 해석할 수 있다.

**주요어 :** 거풍광상, 석영맥, 광화작용, 유체포유물, 안정동위원소

\*Corresponding author: chbong@kigam.re.kr

## 1. 서 언

최근 들어 리비아 사태 및 일본 강진에 따른 자원의 소비 경향 및 종류가 변화되어 가고 있는 추세이다. 더불어 작년 중국과 일본간의 영토분쟁(다오위다오=센카쿠)으로 촉발됐던 희토류 분쟁을 생각하지 않을 수 없다. 또한 중국은 희토류와 더불어 10종 희유금속(텅스텐, 안티몬, 폴리브덴, 주석, 인듐, 게르마늄, 갈륨, 탄탈, 지르코늄)에 대한 전략적 비축안을 마련한 뒤 이를 검토하고 있는 실정이다. 이런 일련의 중국 행보는 이미 자원 안보, 자원 민족주의라는 단어가 낯설지 않은 시대에 접어들었다고 할 수 있다. 따라서 많은 선진국들은 이들 금속자원의 안정적인 확보를 위하여 고위급 회담 등을 통하여 협의기구를 설치하고 있는 실정이며 자국내 유망광구에 대한 재개발 및 공급 채널 다양화에 많은 노력을 경주하고 있다.

첨단산업의 발전과 더불어 국내 산업계는 경제규모가 팽창되어 갑과 동시에 날로 증가되고 있는 원료자원의 수급에 많은 관심을 기울이고 있다. 따라서 국내 자원확보는 가격경쟁에서 우위를 차지할 수 있는 정책 입은 물론 국가성장동력으로써의 중요성을 아무리 강조하더라도 지나치지 않는다. 현재 국내에서는 몇몇 가행광산(연천 철광산, 순신 금-은광산, 가덕 연·아연광산 등)이 있을 뿐 대부분 원료자원을 해외에서 수입에 의존하고 있어 생산한 제품 경쟁력이 다른 선진국에 비해 매우 낮은 실정이다. 따라서, 적극적인 해외자원 개발 수입정책이 요구됨은 물론이고, 국내부존자원에 대

한 탐사연구가 어느때보다도 절실하게 요구되고 있다.

연구지역은 충청북도 옥천군 청성면 거포리에 위치하고, 동경 126° 15' 30"~126° 19' 00" 북위 34° 40' 10"~34° 44' 00"에 위치한다(Fig. 1). 이 광상에 대한 지금까지의 연구보고는 KMPC(1971; 1972; 1973)의 조사자료와 이 광상일대의 토양 및 지표수의 중금속 오염에 대한 연구(Cheong *et al.*, 2008; Ahn *et al.*, 2009)등이 있으나 광상에 대한 성인 연구는 아직 보고되어 있지 않다. 따라서 이 연구에서는 거포광상의 주변지질, 광상의 산출광물에 대한 종류 및 공생관계, 유체포유물 및 안정동위원소 연구 등을 실시하여 광상의 생성환경을 고찰하고자 한다.

## 2. 주변지질

연구지역의 지질은 시대 미상의 변성퇴적암류, 대리암, 각섬석암 및 고생대 대리암 및 함 석탄 사암과 이를 관입한 중생대 트라이아스기 청산화강암, 쥐라기 보은화강섬록암 및 북운모화강암, 백악기 속리산화강암 및 백악기의 석영반암으로 구성된다(Fig. 1; Lee *et al.*, 2001).

시대미상의 변성퇴적암류는 광상의 서쪽에서 북북서 방향으로 분포하며 천매암과 슬레이트로 구성된다. 이 변성퇴적암류의 방향성은 N20~45°W, 30~60°SW의 주향과 경사를 갖으며 구성광물은 석영, 장석류, 흑운모 및 녹니석 등이다. 대리암은 광상의 서쪽에서 북북서 방향으로 분포한다. 각섬석암은 광상의 서쪽에서 북

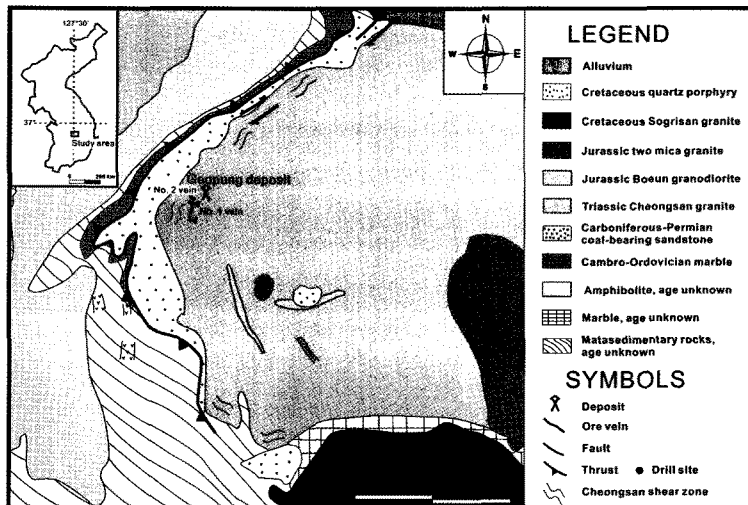


Fig. 1. General geological map of the Geopung deposit, showing the orientation of the principal quartz veins(modified from Lee *et al.*, 2001).

북서방향으로 분포하며 화성기원의 조직이 일부 관찰된다. Kwon and Lee (1992)는 각섬석암에 대한 지화학적 자료를 토대로 관내 용기대 환경에서 형성된 것으로 보고하였다. 고생대 대리암은 광상의 서쪽에 북북서방향으로 트리스트와 접하여 분포한다. 고생대 함석탄 사암은 광상의 서쪽에서 북북서방향으로 분포하며 일부 남서쪽에서 소규모 분포한다. 이 암석은 주로 사암으로 구성되며 일부 함 석탄 세일이 협재된다.

트라이아스기 청산화강암은 상기 암류들을 관입하여 광상일대에 넓게 분포된다. 이 암석은 광상일대에서 담홍색의 K-장석이 뚜렷한 반정조직을 보이는 반상 혹은 모 화강암이 우세하게 관찰된다. 또한 이 암석은 변성 퇴적암류와의 경계부에서 장경 5 cm 정도의 거정 장석의 발달이 뚜렷하여 무색광물과 유색광물(흑운모)이 선상 배열되어 관찰되며 이는 트리스트의 영향에 의한 것이다. 이 암석의 구성광물은 석영, K-장석, 사장석, 흑운모 및 불투명광물 등이다. 쥐라기 보은화강섬록암은 광상의 북서쪽에 분포하며 중립질이다. 이 암석의 구성광물은 석영, K-장석, 사장석, 흑운모 및 불투명광물 등이다. 쥐라기 북운모화강암은 광상의 남서쪽에 청산화강암을 관입 분포한다. 이 암석은 세립내지 중립질이며 구성광물은 석영, K-장석, 사장석, 흑운모, 백운모 및 불투명광물 등이다. 백악기 속리산화강암은 광상의 남쪽에 분포하며 등립질 흑운모화강암, 반상화강암 및 화강반암으로 구성된다. 이 암석의 구성광물은 석영, 정장석, 사장석, 흑운모 및 불투명광물 등이다. 백악기 석영반암은 광상의 남쪽에서 폭 1~20여 m의 규모로 청산화강암과 시대미상의 변성퇴적암류를 관입 분포한다. 이 암석의 구성광물은 석영, 장석류 및 흑운모 등이다.

### 3. 광상개요

거룡광상은 일제시대에 옥천광산으로 일본인에 의해 주로 구리를 대상으로 개발되었으나 해방 후 휴광상태를 지속하다가 1963년 심경희에 의해 광업권 설정을 하였고 김준찬 동기실업등 수인일 거처 1970년 하태호에 의해 광업권이 인수되어 삼보광산으로 명명하였다. 이때 상1번향, 상2번향 및 통동향에서 주로 고품위대를 중심으로 채광 및 굴진을 하였으며 1971년 40(톤/일) 부선장을 설치하여 생산하다가 100(톤/일) 증설하여 생산하기도 하였다. 그 후 이 광상은 휴광 중이었다가 1990년 3월 류진선에 의해 광업권 재설정되었고 등록광종은 금, 은, 동 및 연이다. 그 해 6월 이

광산은 진풍금속진흥(주)에 의해 광업권이 인수되었다가 다시 거룡광업(주)에 광업권이 인수되어 광산명을 거룡광산으로 명명하였다. 1990년 6월 재개발을 위한 물리탐사 및 시추작업을 하였으며 1992년 상3번향의 보수와 함께 통동향 하부에서의 탐광을 목적으로 본수항 개설을 계획하였으며 1998년 이후 폐광 중에 있는 광상이다. 이 광상은 폐광 이후 관리가 되지 않은 채 방치되어 있다가 2000년대 초반 폐석 유실방지를 위한 광해방지시설이 설치되었지만 주변의 폐광석, 과거 선광장 주변의 광미장에 대한 광해방지 시설이 없어 주변지역의 오염원으로 존재하여 많은 민원이 제기된 광상이다(KMPC, 1971; 1972; 1973). 그래서 거룡광상은 2008년 한국광해방지공단에서는 복원사업비 1억 5천만원을 들여 광미장 2개소에 복토식생을 위한 차단매립시설을 갖춘 매립장을 2009년에 완공한 상태이다.

거룡광상은 청산화강암내에 발달된 N5~40°E, 70~80°NW 방향의 열극대를 따라 충진한 열수성 석영맥 광상이다(Fig. 1). 이 광상은 평행한 2개조의 석영맥이 발달하며 맥폭은 0.2~2.2 m로서 팽축이 심한 편이다. 이 석영맥의 연장성은 맥에 따라 다양하나 최대 500 m 정도이다(Fig. 1). 1호맥은 수평경도(190 m level)를 개설하여 채광하였으며 맥폭은 0.5 m 정도이고 연장성은 30 m 정도이다. 2호맥은 이 광상의 주작업장이었으며 고도를 달리하여 하부로부터 통동향(130 m level), 상2번향(170 m level) 및 상1번향(225 m level)을 개설하여 채광하였다. 2호맥은 과거 총 연장 700 m 이상 연맥굴진되었으며 맥폭은 0.3~2.2 m 정도이고 이 석영맥과 평행하거나 또는 사교하는 지맥들이 간혹 발달한다. 통동향은 최소 230 m 굴진되어 있으며 이 향에서 관찰되는 2호맥의 맥폭은 0.2~0.4 m 정도이며 품위는 Ag 203 g/t, Cu 3.3%, Pb 0.6% 및 Zn 5.1%이다. 상2번향은 341 m 정도 연맥굴진되어 있으며 맥폭은 0.2~2.2 m 정도로 팽축이 심하나 일부 구간에서는 맥폭이 1 m 이상 유지되는 구간이 연장 130 m 정도 계속되기도 한다. 이 향에서의 2호맥의 품위는 Ag 80~267 g/t, Cu 2.0~3.7%, Pb+Zn 2.0~9.5%이다. 상1번향은 2호맥의 노두 직하부에서 119 m 정도 연맥 굴진되어 있으며 맥폭은 0.2~1.3 m 정도이며 막장으로 감에 따라 석영맥의 폭이 점점 폭아져 점멸되어진다. 이 향에서의 2호맥의 품위는 Ag 135~181 g/t, Cu 3.5~4.3%, Pb 0.15~0.18% 및 Zn 1.4~3.1%이다(KMPC, 1971; 1972; 1973). 과거 정광 생산량은 구리 195톤, 납 135톤, 아연 189톤 등이다(Ahn et al., 2009).

이 광상의 1호맥과 2호맥의 하부 연장성을 파악하기 위해 1971년 각각 2개공 총 660 m 시추하였다(KPMC, 1972). 그 결과, 1호맥의 하부를 확인하기 위해 110 m 시추하였으나 세맥만 착맥되었고 1호맥의 남부 연장성을 파악하기 위해 110 m 시추하여 69 m 부근에서 1 m의 함동 석영맥을 착맥하였으나 품위는 Au 0.0 g/t, Ag 385 g/t 및 Cu Tr로서 경제성이 없는 것으로 판정되었다(KPMC, 1972). 2호맥은 북부연장부에서 맥폭 7 m 정도로 하부 183 m지점에서 확인되었으나 2호맥의 부광대 하부 연장부에 대한 시추에선 1.3 m의 광맥을 착맥하였으나 은 135 g/t, 구리 Tr 및 아연 Tr로서 품위가 낮아 경제성이 없는 것으로 판정되었다(KPMC, 1972).

4. 광석과 산출광물

거룡광상의 시료는 항내 출입이 불가하여 광상 주변에 산재되어 있는 광석이나 폐석장에 있는 많은 광석들을 대상으로 연구하였다. 이 광상의 석영맥은 주로 괴상으로 산출되며 일부 정동내에 자형석영이 관찰된다. 이 석영맥에서는 괴상 또는 자형의 황철석, 섬아연석, 황동석, 유비철석 및 자류철석을 관찰할 수 있다(Fig. 2). 이들 황화광물은 시료에 따라 산출빈도와 산출량이 다르게 산출된다. 모암변질은 규화, 황철석화, 건운모화, 녹니석화 및 점토화작용 등이 관찰된다. 이들 광석의 산출상태, 산출광물의 종류, 공생관계 및 조직 등을 기초로 한 이 광상의 광물 정출순서는 hypogene

시기와 supergene 시기로 구성된다(Fig. 3). Hypogene 시기는 괴상구조, 각력상구조 및 정동구조 등이 관찰된다. 이 시기에 산출되는 광물은 석영, 금홍석, 황철석, 유비철석, 자류철석, 백철석, 섬아연석, 황동석, 황석석, 방연석 및 함은광물 등이 관찰된다.

황철석은 산출빈도가 높고 산출량이 많으며 석영맥과 모암변질에서 산출된다. 모암변질작용과 관련되어 산출된 황철석은 자형 또는 반자형으로 세립에서 조립까지 단독 또는 괴상으로 건운모 및 녹니석과 함께 산출된다. 석영맥에서의 황철석은 석영맥의 주변부와 중심부에서 세립에서 조립까지 자형에서 타형으로 단독 또는 괴상으로 모든 황화광물과 함께 산출된다(Fig. 2). 현미경하에서 황철석은 석영내 단독으로 자형으로 산출되는 것, 석영내 거정이 파쇄되어 산출되는 것, 유비철석 및 자류철석과 함께 산출되는 것, 황동석과 함께 산출되는 것, 백철석과 함께 산출되는 것, 섬아연석 및 황석석과 함께 산출되는 것, 방연석에 의해 충전되어 산출되는 것 등이 있다(Fig. 4A, D and E). 유비철석은 산출빈도와 산출량이 낮으나 일부 광석에선 산출량이 많다. 석영맥에서의 유비철석은 석영맥의 주변부와 중심부에서 세립에서 조립까지 자형에서 타형으로 단독 또는 괴상으로 황철석, 자류철석, 섬아연석 및 황동석과 함께 산출된다. 현미경하에서 유비철석은 황철석 및 자류철석과 함께 산출되는 것, 황동석 및 방연석에 의해 교대되어 산출되는 것 등이 있다(Fig. 4A).

자류철석은 일부 광석에서 산출빈도와 산출량이 높으며 석영맥의 주변부와 중심부에서 세립에서 조립까지 자형에서 타형으로 황철석, 섬아연석 및 황동석과 함께 괴상으로 산출된다. 현미경하에서 자류철석은 유

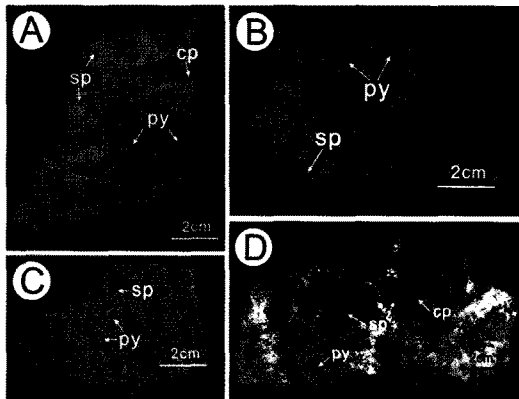
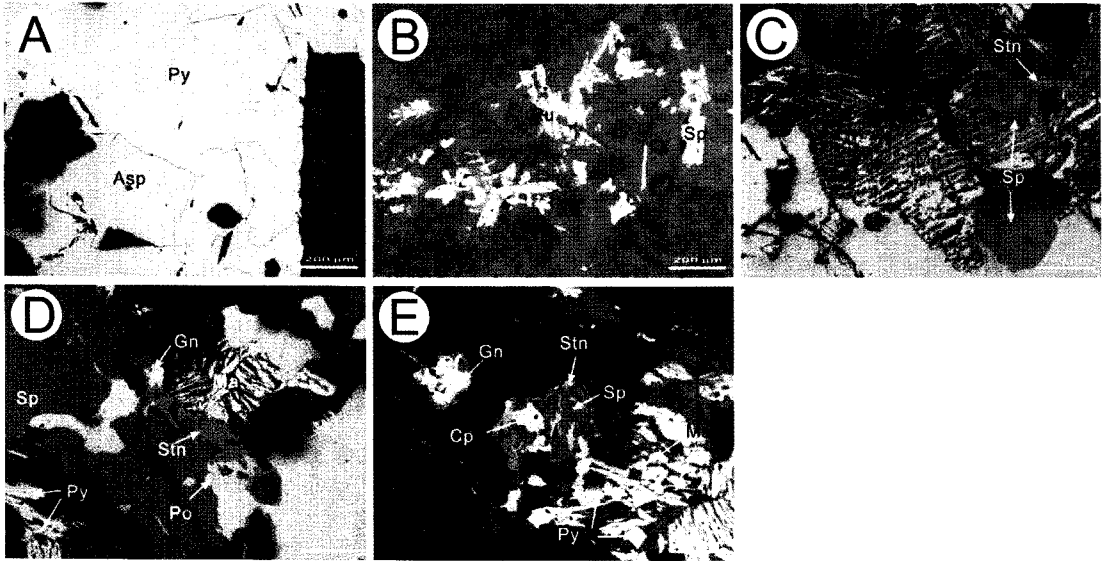


Fig. 2. Photographs of quartz vein slabs from the Geopung deoposit. (A), (B) and (C) Massive quartz vein with pyrite, sphalerite and chalcopyrite. (D) Wall-rock fragments and cavity with pyrite, sphalerite and chalcopyrite. Abbreviation: Cp = chalcopyrite, Py = pyrite, Sp = sphalerite.

Mineral	Hypogene	Supergene
Quartz	—	—
Sericite	—	—
Chlorite	—	—
Rutile	—	—
Pyrite	—	—
Arsenopyrite	—	—
Pyrrhotite	—	—
Marcasite	—	—
Sphalerite	—	—
Chalcopyrite	—	—
Stannite	—	—
Galena	—	—
Ag-mineral	—	—
Goethite	—	—

Fig. 3. Paragenetic sequence of minerals from the Geopung deposit.



**Fig. 4.** Photomicrographs of ore minerals from Geopung deposit. (A) Pyrite coexisting with arsenopyrite. (B) Rutile coexisting with sphalerite. (C) and (D) Sphalerite coexisting with pyrite, marcasite, chalcopyrite and stannite and chalcopyrite replaces the minerals. (E) Galena and chalcopyrite replace pyrite, marcasite, sphalerite and stannite. Abbreviations: Asp = arsenopyrite, Cp = chalcopyrite, Gn = galena, Ma = marcasite, Po = pyrrotite, Py = pyrite, Ru = rutile, Sp = sphalerite, Stn = stannite.

비철석, 황철석 및 섬아연석과 함께 산출되는 것, 황철석내 포획되어 산출되는 것, 황동석에 의해 교대되어 산출되는 것 등이 있다(Fig. 4D). 백철석은 육안으로 관찰되지 않고 현미경하에서 관찰된다. 현미경하에서 백철석은 황철석과 함께 산출되는 것, 섬아연석, 황석석 및 황동석과 함께 산출되는 것 등이 있다(Fig. 4C-E). 섬아연석은 황철석 및 황동석 다음으로 산출빈도와 산출량이 많으며 석영맥의 모든 부분에서 산출되며 일부 거정으로 산출되는 것도 관찰된다. 이 광물은 산출되는 모든 광물들과 함께 산출된다. 현미경하에서 섬아연석은 금홍석, 자유철석, 유비철석 및 황철석과 함께 산출되는 것, 자형의 황철석을 포획하여 산출되는 것, 황동석과 함께 산출되는 것, 황석석과 함께 산출되는 것, 황동석에 의해 교대되어 산출되는 것 등이 있다(Fig. 4B). 황동석은 황철석 다음으로 산출빈도와 산출량이 많으며 석영맥의 모든 부분에서 산출된다. 이 광물은 주로 황철석과 더불어 괴상으로 산출되며 일부 석영맥내에선 단결정으로 산출된다. 현미경하에서 황동석은 섬아연석과 함께 산출되는 것, 자유철석, 유비철석 및 황철석을 교대하여 산출되는 것, 방연석과 함께 산출되는 것 등이 있다(Fig. 4C-E). 황석석은 육안으로 관찰되지 않고 현미경하에서 관찰된다. 현미경하에서 황석석은 섬아연석 및 황동석과 함께 산출된다(Fig. 4C-E). 방연석은 산출빈도와 산출량이 낮으며 황철석,

섬아연석 및 황동석과 함께 산출된다. 현미경하에서 황동석은 황철석 및 황동석과 함께 산출되는 것, 섬아연석 및 자유철석을 교대하여 산출되는 것 등이 있다(Fig. 4E). 함은광물은 육안관찰되지 않고 현미경하에서만 관찰된다. 이 광물은 light blue를 띠며 일부 복반사 및 이방성이 약하게 관찰되며 주로 황철석, 섬아연석, 황동석, 황석석 및 방연석과 함께 산출된다.

### 5. 유체포유물 연구

거풍광상에서 산출되는 석영을 대상으로 연마박편을 제작하여 유체포유물 연구를 실시하였다. 유체포유물 연구는 광화작용과 관련된 유체의 구성성분, 진화상태 및 유체로부터 광물침전시 온도 및 압력과 같은 환경요소들을 규명하는데 유용하게 이용된다. 유체포유물의 산출상태, 가열 및 냉각실험은 Nikon 현미경에 부착된 Linkam THMSG 600을 이용하여 측정하였다. 또한 좀더 정확한 측정을 위해 컴퓨터에 CCTV를 연결하여 이용하였다. 유체포유물 측정 이전에, Linkam THMSG 600은 U.S.G.S에서 제작한 표준시료(H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O+CO<sub>2</sub>)를 이용하여 보정을 실시하였다. 측정오차는 냉각실험시 ±0.1°C, 가열실험시 ±0.5°C이다.

실온(25°C)에서 관찰되는 상의 종류, 성분 및 가열 실험시 균일화되는 상의 변화에 의거하여 거풍광상의

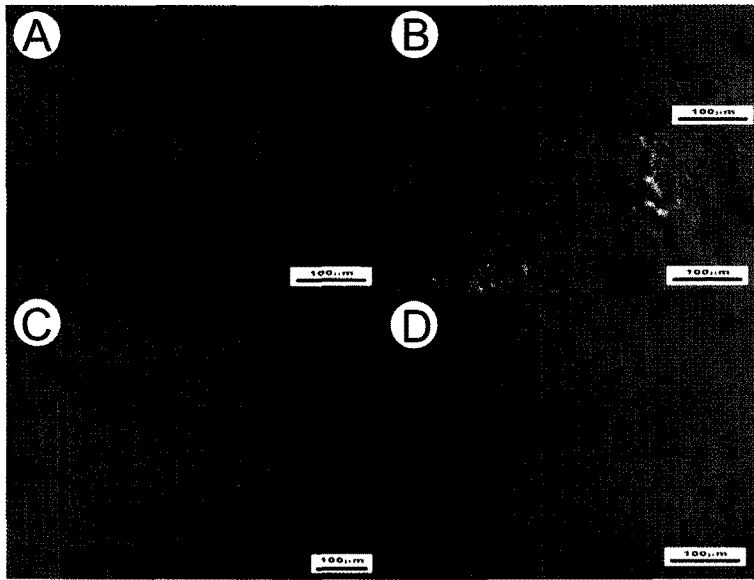


Fig. 5. Photomicrographs of representative fluid inclusion types in quartz from the Geopung deposit. (A), (B), (C) and (D) liquid-rich type inclusions in quartz.

석영에서 산출되는 유체포유물은 액상포유물로 산출된다. 이 포유물들은 기상과 액상의 2상으로 구성되며 Bodnar(1983)가 제시한 방법에 의해  $V_{H_2O}$ 의 몰체적을 계산하면  $<0.3$ 로서 액상포유물로 산출된다. 이 포유물들은 대부분 석영의 결정면 내에 면상 군집형, 선상 군집형 또는 봉합된 열극을 따라 면상, 선상 군집형 포유물로 산출된다. 유체포유물의 형태는 negative form, 타원형, 인장형 및 불규칙 형태이며 크기는 수 내지 60  $\mu\text{m}$  정도이며 20  $\mu\text{m}$ 미만의 포유물들이 대부분을 차지한다(Fig. 5).

거풍광상의 석영에서 산출되는 액상포유물은 냉각시  $V_{H_2O}$ 의 응축온도는  $-37.2 \sim -30.2^\circ\text{C}$ 이며 최초융융온도는  $-25.2 \sim -19.4^\circ\text{C}$ 이다. 이것은 수용성 용액 중에

해리된 염이 주로  $\text{Na}^+$ 이외에  $\text{K}^+$ 로 존재함을 의미한다. 액상포유물의  $T_{m\text{-ice}}$ 는  $-4.5 \sim -0.1^\circ\text{C}$ 로서 Bodnar and Vityk(1994)가 제시한 방정식을 이용하여 염농도

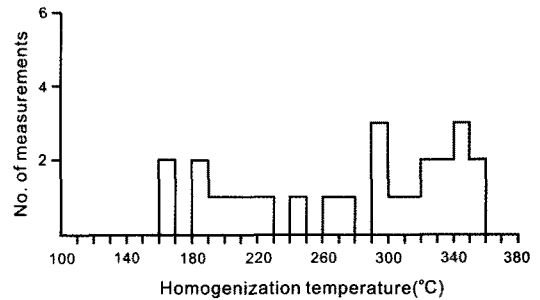


Fig. 7. Frequency diagram of homogenization temperatures for fluid inclusions in quartz from the Geopung deposit.

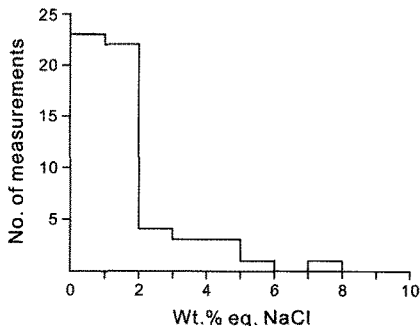


Fig. 6. Frequency diagram of salinities for fluid inclusions in quartz from the Geopung deposit.

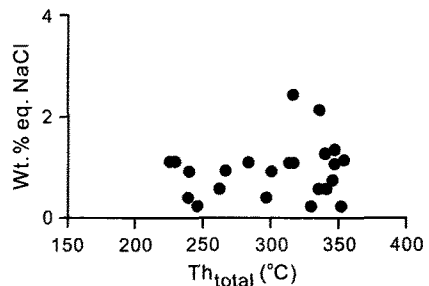


Fig. 8. Salinity versus homogenization temperature diagram for fluid inclusions in quartz from the Geopung deposit.

로 환산하면 0.2~7.2 wt.% eq. NaCl이다(Fig. 6). 이 포유물은 가열시 모두 액상으로 균일화되며 균일화온도는 163~356°C이다(Fig. 7). 유체포유물의 염농도와 균일화온도의 관계는 Fig. 8에서 보는 것과 같이 균일화온도가 감소됨에 따라 염농도도 함께 낮아짐을 알 수 있다.

### 6. 안정동위원소 연구

안정동위원소 분석에 이용된 시료는 현미경하에서 관찰되는 광물공생관계를 고려하여 다음과 같이 선택하였다. 황안정동위원소 분석을 위한 시료는 황철석, 자류철석, 섬아연석 및 황동석을 대상으로 하였다. 산소 및 수소안정동위원소 분석을 위한 시료는 황안정동위원소 분석에 이용된 시료에서 석영을 대상으로 하였다. 안정동위원소 분석은 중국지질대학(무한)에서 실시하였다. 황동위원소분석은 황화광물과 CuO를 함께 1,000°C까지 올린 후 발생한 SO<sub>2</sub>성분을 포집하여 분석

하였다. 산소동위 원소분석은 F<sub>2</sub>가스와 분석시료를 530°C에서 24시간 반응시킨 후 발생한 O<sub>2</sub>를 CO<sub>2</sub>화하여 포집 분석하였다. 수소동위원소분석은 LPG+O<sub>2</sub>불꽃으로 방출한 H<sub>2</sub>O를 Zn과 500°C에서 반응시켜 수소 가스로 환원하여 분석하였다. 분석시 표준시료는 CDT (황) 및 SMOW (산소, 수소)를 사용하였으며 오차범위는 ±0.2‰ (황, 산소) 및 ±2‰ (수소)이다.

거풍광상에서 산출되는 광석광물의 δ<sup>34</sup>S값은 4.3~9.2‰이나 대부분 4.3~6.4‰에 해당되며 각 광석광물의 δ<sup>34</sup>S값은 자류철석 : 4.3‰, 황철석 : 6.3~9.2‰, 섬아연석 : 5.7~5.9‰, 황동석 : 5.3‰이다(Table 1). 이 광상에서 산출되는 황철석-섬아연석, 섬아연석-황동석쌍에 대한 분석계수(Kajiwara and Krouse, 1971; Ohmoto and Rye, 1979)를 이용하여 구한 동위원소 평형온도는 339~437°C이다. 이 광상에서 산출되는 모암변질광물 (견운모+녹니석)의 공생균은 광화유체의 pH가 약산성임을 지시해주고 있으며 본 광상에서 황산염광물의 부재는 광화작용이 환원환경하에서 진행되

**Table 1.** Sulfur isotopic data of sulfide minerals from the Geopung deposit

Stage	Sample No.	Mineral	δ <sup>34</sup> S(‰)	δ <sup>34</sup> S <sub>H2S</sub> (‰) <sup>1</sup>	Δ <sup>34</sup> S	T(°C) <sup>2</sup>	T <sub>h</sub> (°C) <sup>3</sup>
I	GP 100	Sphalerite	5.9	5.6			350
I	GP 103	Pyrrhotite	4.3	4.0			350
I	GP 103	Chalcopyrite	5.3	5.4			350
I	GP 109	Pyrite	9.2	8.2			350
I	GP 109	Sphalerite	5.9	5.6			350
I	GP 116	Sphalerite	5.7	5.4	Sp-Cp		350
I	GP 116	Chalcopyrite	5.3	5.4	0.4	339	350
I	GP 120	Pyrite	6.3	5.3			350
I	GP 125	Pyrite	6.4	5.4	Py-Sp		350
I	GP 125	Sphalerite	5.8	5.5	0.6	437	350

Abbreviations: Cp = chalcopryrite; Py = pyrite; Sp = sphalerite.

<sup>1</sup>δ<sup>34</sup>S<sub>H2S</sub> (‰) calculated following the equation given by Ohmoto and Rye (1979).

<sup>2</sup>Isotopic temperature calculated from fractionation factors given by Kajiwara and Krouse (1971) and Ohmoto and Rye (1979).

<sup>3</sup>T<sub>h</sub>(°C) is homogenization temperature of fluid inclusion.

**Table 2.** Oxygen and hydrogen isotopic data of quartz from the Geopung deposit

Sample No.	Mineral	δ <sup>18</sup> O(‰)	δ <sup>18</sup> O <sub>H2O</sub> (‰) <sup>1</sup>	δD(‰)	T <sub>h</sub> (°C) <sup>2</sup>
GP100	Quartz	6.2	0.9	-86	350
GP109	Quartz	8.6	3.3	-88	350
GP116	Quartz	7.8	2.5	-84	350
GP120	Quartz	8.4	3.1	-83	350
GP120-1	Quartz	7.2	1.9	-83	350
GP122	Quartz	9.0	3.7	-83	350
GP125	Quartz	9.3	4.0	-69	350

1) δ<sup>18</sup>O<sub>H2O</sub> is calculated from the equation given by Matsushisa *et al.* (1979).

2) T<sub>h</sub> is homogenization temperature of fluid inclusion.

있음을 시사한다. 이러한 환경에서는 유체 내에 용존된 황이  $H_2S$  상태로 가장 우세하게 존재한다. 즉 광화 유체 내  $H_2S$ 의  $\delta^{34}S$ 값은 전 황의  $\delta^{34}S$ 값으로 간주될 수 있다. 그러므로 유체포유물 균일화온도 및 안정동위원소 지질온도계로부터 구한 온도를 이용하여 광석 광물과 평형상태에 있는 광화유체 내의  $H_2S$ 값은 Ohmoto and Rye(1979)가 제시한 평형식에 대입하여 구하면 Table 1과 같다. 여기서 보는 것과 같이 거봉 광상에 대한 광화유체 내  $\delta^{34}S_{H_2S}$ 값은 4.0~8.2%로서 황의 기원은 주로 화성기원이지만 그 중 일부는 모암 내의 황에서 유래된 것으로 해석된다. 또한 광석광물의  $\delta^{34}S_{H_2S}$ 값은 자류철석: 4.0%, 황철석: 5.3~8.2%, 섬아연석: 5.4~5.6%, 황동석: 5.4%이다.

거봉광상에서 산출되는 석영의  $\delta^{18}O$ 값은 6.2~9.3%이다(Table 2). 석영 침전시 평형상태에 있었던 물의  $\delta^{18}O_{H_2O}$ (‰)값은 Matsushita *et al.*(1979)의 분별식  $1000 \ln a_{Quartz-H_2O} = 3.34 (10^6/T^2) - 3.31$ 를 이용하여 계산하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다. 여기에서 보는 바와 같이 석영의  $\delta^{18}O_{H_2O}$ 값은 0.9~4.0%이다. 이 광상의 광상생성시 물의  $dD$ 값은 -88~-69%이다(Table 2).

## 7. 고찰

거봉광상은 트리아스기 청산화강암내에 발달된 NE 방향의 열극대를 따라 충진한 열수성 석영맥 광상이며 석영맥은 주로 괴상구조이나 일부분 각력상구조 및 정동구조가 관찰된다. 이 광상의 석영맥에서는 괴상 또는 자형의 황철석, 섬아연석, 황동석, 유비철석 및 자류철석이 육안으로 관찰할 수 있으며 이들 황화광물은 광석에 따라 산출빈도와 산출량이 다르게 산출된다. 이 광상에서 관찰되는 모암변질은 규화, 황철석화, 견운모화, 녹니석화 및 점토화작용 등이 관찰된다.

이 광상에서 유체포유물에서 측정된 균일화온도는 163~356°C이며 염농도(wt.% eq. NaCl)는 0.2~7.2이다. 그림 8에서 살펴본 바와 같이 균일화온도가 감소됨에 따라 염농도도 함께 떨어짐을 알 수 있다. 이는 열수용액이 열계를 따라 급격히 상승함에 따라 모암과의 반응과 기원이 다른 천수의 유입에 의한 혼합에 의해 냉각 및 희석작용이 있었음을 시사한다. 광물의 용해도는 온도,  $a_{H_2S}$ , pH,  $f_{O_2}$  및  $a_{Cl^-}$  등에 크게 좌우된다(Barrett and Anderson, 1988; Gammons and Williams-Jones, 1995). 따라서 거봉광상은 초기 열수 용액(360°C, 7.2 wt.%)으로부터 모암과의 반응 및 천

수 혼합에 의한 냉각과 희석작용에 의해 온도 및  $a_{Cl^-}$ 의 감소에 의해 초기 황화광물들이 침전되었으며, 말기의 황화광물들은 지속적인 온도 및  $a_{Cl^-}$ 의 감소 및 황화광물의 침전으로 인한  $a_{H_2S}$  및 황분압의 감소에 의하여 침전되었다. 일반적으로 유체포유물 자료로부터 압력을 유추하는 방법에는 4가지가 있다(Shepherd *et al.*, 1985). 이들 4가지 방법은 1)비등현상이 관찰되는 포유물로부터 압력 유추하는 방법, 2)서로 다른 구성성분을 갖는 포유물로부터 압력 유추하는 방법, 3)유체포유물 자료와 독립적인 지질온도계를 이용하여 압력 유추하는 방법 및 4)탈광물의 해리온도로부터 압력 유추하는 방법이다. 거봉광상에서 산출되는 유체포유물은 비등현상, 구성성분이 다른 유체포유물 및 탈광물을 함유한 유체포유물 등이 관찰되지 않고 단순히 액상포유물만 관찰된다. 따라서 유체포유물 자료(356°C, 7.2 wt.% NaCl, 0.70 g/cm<sup>3</sup>)와 동위원소 평형온도 자료(황철석-섬아연석상: 437°C)를 이용하여 계산한 압력은 약 850 bar이며 심도는 약 3,000 m에 해당된다.

거봉광상에서 산출되는 광석광물의  $\delta^{34}S$ 값은 4.3~9.2%이며 광화유체 내  $\delta^{34}S_{H_2S}$ 값은 4.0~8.2%로서 황의 기원은 화성기원보다 다소 높은 값을 갖고 좁은 범위를 갖는데 이는 화성기원과 일부 모암내의 황에서 유래된 것으로 해석된다(Table 1). 또한 이 광상을 형성한 광화유체 중 물의 기원을 알아보기 위해서 분석된 석영의 산소 및 수소 안정동위원소값은 각각  $\delta^{18}O_{H_2O}$ : 0.9~4.0‰,  $\delta D$ : -88~-69%이다(Table 2). 이들 동위원소 값은 불혼합, 비등, 산화-환원, pH, 천수의 혼입, 모암과의 반응정도 등 여러 현상에 의해 변화될 수 있다. 광화유체의 pH 및 산화-환원 상태는 이 광상에서 산출되는 광석광물 및 모암변질광물로부터 유추할 수 있다. 이 광상에서 산출되는 모암변질광물(견운모+녹니석)의 공생균은 광화유체의 pH가 약 산성임을 지시해주고 있으며 이 광상에서 황산염광물의 부재는 광화작용이 환원환경하에서 진행되었음을 시사한다. 이는 산소 및 수소 안정동위원소값의 변화에 큰 영향을 주지 않는 것으로 생각된다. 또한 이 광상의 유체포유물 자료에 의하면 불혼합 및 비등 현상은 관찰되지 않는다. 따라서 산소 및 수소 안정동위원소값의 변화는 천수의 혼입 및 모암과의 반응정도에 의해 일어난 것이다. 그러므로  $\delta^{34}S_{H_2S}$ 값,  $\delta^{18}O_{H_2O}$ 값 및  $\delta D$ 값의 자료를 종합하여 볼때(Tables 1 and 2) 광화유체는 마그마 또는 천수 기원의 유체가 주종을 이룬 것으로 보이며 광화작용이 진행됨에 따라 다른 천수의 혼입이 작용한 것으로 보인다. 이상을 종합하면 거봉



광상은 마그마 또는 천수 기원의 열수용액으로부터 광화작용이 진행됨에 따라 광화유체는 열극대를 따라 모암과의 반응에 의한 냉각 및 기원이 다른 순환천수의 유입에 의한 혼입에 의해 냉각 및 희석작용이 있었음을 지시해 준다.

## 8. 결 언

1) 거룡광상은 트라이아스기 청산화강암 내에 발달된 NE 계열의 열극대에 충진한 2개의 석영맥으로 구성된 열수성광상이다.

2) 거룡광상의 모암변질은 규화, 황철석화, 견운모화, 녹니석화 및 점토화작용 등이 관찰되며 광물 정출순서는 hypogene 시기와 supergene 시기로 구성된다. Hypogene시기는 괴상구조, 각력상구조 및 정동구조 등이 관찰되며 산출광물은 석영, 금홍석, 황철석, 유비철석, 자류철석, 백철석, 섬아연석, 황동석, 황석석 및 방연석 등이 정출하였다. Supergene 시기는 침철석이 정출하였다.

3) 이 광상의 hypogene시기에 산출되는 유체포유물의 균일화온도와 염농도는 각각 163~356°C, 0.2~7.2 wt.% eq. NaCl로써 균일화온도가 감소됨에 따라 염농도도 함께 감소된다. 이는 열수용액이 열개를 따라 급격히 상승함에 따라 모암과의 반응과 기원이 다른 천수의 유입에 의한 혼입에 의해 냉각 및 희석작용이 있었음을 지시하며 이런 현상에 의한 광화유체의 물리·화학적 변화에 의해 모암변질광물 및 황화광물이 침전되었다.

4) 거룡광상에서 산출되는 황화광물의  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$  값은 4.0~8.2‰이며 석영의  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ : 0.9~4.0‰와  $\delta\text{D}$ : -88~-69‰로써 광화유체는 마그마 또는 천수 기원의 유체가 주종을 이룬 것으로 보이며 광화작용이 진행됨에 따라 다른 천수의 혼입이 작용한 것으로 보인다.

## 사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 부처임무형사업인 “해의 광물자원 탐사 및 부존 잠재성 평가(10-1121, 11-1121)” 과제의 일부로 수행되었으며 이에 사의를 표한다. 이 논문의 미비점을 지적, 수정하여 주신 익명의 심사위원님들과 박상준 책임편집위원님께 깊이 감사드립니다.

## 참고문헌

- Ahn, J.S. Yim, D.J. and Cheong, Y.W. (2009) Seasonal variations of water quality within the waste impoundments of Geopung mine. *Econ. Environ. Geol.*, v.42, p.207-216.
- Barret, T.J. and Anderson, G.M. (1988) The solubility of sphalerite and galena in 1-5 m NaCl solutions to 300°C. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, v.52, p.813-820.
- Bodnar, R.J. (1983) A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P-V-T-X properties of inclusion fluids. *Econ. Geol.*, v.78, p.535-542.
- Bodnar, R.J. and Vityk, M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions: in De Vivo, B. and Frezzotti, M.L. eds., *Fluid inclusions in minerals: Method and applications: Short Course International Mineralogical Assoc.*, p.117-130.
- Cheong, Y.W., Yim, G.J., Ji, S.W., Park, H.Y., Min, D.S. and Park, I.W. (2008) Impact of the rain on the geochemical and hydrological characteristics within a mine waste impoundment at the Geopung mine, Korea. *Jour. Korean Soc. Geosys. Engin.*, v.45, p.495-504.
- Gammons, C.H. and Williams-Jones, A.E. (1995) The solubility of Au-Ag alloy + AgCl in HCl/NaCl solutions at 300°C: New data on the stability of Au(I) chloride complexes in hydrothermal fluids. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, v.59, p.3453-3468.
- Kajiwara, Y. and Krouse, H.R. (1971) Sulfur isotope partitioning in metallic sulfide systems. *Can. Jour. Earth Sci.*, v.8, p.1397-1408.
- Korea Mining Promotion Corporation (1971) Deposits of the Korea. p.179-180.
- Korea Mining Promotion Corporation (1972) Survey report of deposit's drilling. p.168-169.
- Korea Mining Promotion Corporation (1973) Survey report of exploration and mining. p.168-169.
- Kwon, S.T. and Lee, D.H. (1992) Petrology and geochemistry of the Ogcheon metabasites in Poun, Korea. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v.1, p.104-123.
- Lee, J.H. Kwon, S.H. Park, Y.D. Kwon, S.T. and Park, S.H. (2001) Pre-tectonic and post-tectonic emplacements of the granitoids in the south central Okcheon belt, South Korea: Implications for the timing of strike-slip shearing and thrusting. *Tectonics*, v.20, p.850-867.
- Matsuhisa, Y. Goldsmith, R. and Clayton, R.N. (1979) Oxygen isotope fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 43, p. 1131-1140.
- Ohmoto, H. and Rye, R.O. (1979) Isotopes of sulfur and carbon. H.L. Barnes. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 2nd ed, Wiley-Interscience. New York. p.509-567.
- Shepherd, T.J. Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M. (1985) *A practical guide to fluid inclusion studies*. Blackie, 239p.