

대봉 금-은광상에 대한 유체포유물 및 안정동위원소 연구

유봉철* · 이현구 · 김상중

충남대학교 자연과학대학 지질환경과학과

Stable Isotope and Fluid Inclusion Studies of the Daebong Gold-silver Deposit, Republic of Korea

Bong Chul Yoo*, Hyun Koo Lee and Sang Jung Kim

Department of geology and environmental sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

The Daebong gold-silver deposit consists of mesothermal massive quartz veins that are filling the fractures along fault shear (NE, NW) zones within banded or granitic gneiss of Precambrian Gyeonggi massif. Based on vein mineralogy, ore textures and paragenesis, ore mineralization of this deposit is composed of massive white quartz vein (stage I) which was formed in the same stage by multiple episodes of fracturing and healing, and transparent quartz vein (stage II) which is separated by a major faulting event. Stage I is divided into the 3 substages. Ore minerals of each substage are as follows: 1) early stage I = magnetite, pyrrhotite, arsenopyrite, pyrite, sphalerite, chalcopyrite, 2) middle stage I = pyrrhotite, arsenopyrite, pyrite, marcasite, sphalerite, chalcopyrite, galena, electrum and 3) late stage I = pyrite, sphalerite, chalcopyrite, galena, electrum, argentite, respectively. Ore minerals of the stage II are composed of pyrite, sphalerite, chalcopyrite, galena and electrum. Systematic studies (petrography and microthermometry) of fluid inclusions in stage I and II quartz veins show fluids from contrasting physical-chemical conditions: 1) H₂O-CO₂-CH₄-NaCl±N₂ fluid (early stage I = homogenization temperature: 203~388°C, pressure: 1082~2092 bar, salinity: 0.6~13.4 wt.%, middle stage I = homogenization temperature: 215~280°C, salinity: 0.2~2.8 wt.%) related to the stage I sulfide deposition, 2) H₂O-NaCl±CO₂ fluid (late stage I = homogenization temperature: 205~288°C, pressure: 670 bar, salinity: 4.5~6.7 wt.%, stage II = homogenization temperature: 201~358°C, salinity: 0.4~4.2 wt.%) related to the late stage I and II sulfide deposition. H₂O-CO₂-CH₄-NaCl±N₂ fluid of early stage I is evolved to H₂O-NaCl±CO₂ fluid represented by the CO₂ unmixing due to decrease in fluid pressure and is diluted and cooled by the mixing of deep circulated meteoric waters (H₂O-NaCl fluid) possibly related to uplift and unloading of the mineralizing suites. H₂O-NaCl±CO₂ fluid of stage II was hotter than that of late stage I and occurred partly unmixing, mainly dilution and cooling for sulfide deposition. Calculated sulfur isotope compositions ($\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$) of hydrothermal fluids (3.5~7.9‰) indicate that ore sulfur was derived from mainly an igneous source and partly sulfur of host rock. Measured and calculated oxygen and hydrogen isotope compositions ($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$, δD) of ore fluids (stage I: 1.1~9.0‰, -92~-86‰, stage II: 0.3‰, -93‰) and ribbon-banded structure (graphitic lamination) indicate that mesothermal auriferous fluids of Daebong deposit were two different origin and their evolution. 1) Fluids of this deposit were likely mixtures of H₂O-rich, isotopically less evolved meteoric water and magmatic fluids and 2) were likely mixtures of H₂O-rich, isotopically heavier δD meteoric water and magmatic±metamorphic fluids.

Key words : Daebong gold-silver deposit, Ore mineralization, Fluid inclusion, Isotope

대봉 금-은광상은 선캄브리아기 경기육괴의 호상 또는 화강편마암내에 발달된 단열대(NE, NW)를 따라 충진한 중열수 괴상석영맥광상이다. 광석광물의 산출조직과 공생관계에 의하면, 이 광상의 광화작용은 여러번의 단열작용에 의해 형성된 괴상백색석영맥(광화I시기)과 투명석영시기(광화II시기)로 구성된다. 광화 I시기는 3회의 substages로 구분된다. 각 substage의 광석광물은 다음과 같다: 1) 광화I시기 초기 = 자철석, 자류철석, 유비철석, 황철석, 섬아연석, 황동석, 2) 광화I시기 중기 = 자류철석, 유비철석, 황철석, 백철석, 섬아연석, 황동석, 방연석, 에렉트럼과 3) 광화I시기 말기

*Corresponding author: chbong@cnu.ac.kr

=황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석, 에렉트립, 휘은석. 광화II시기의 광석광물로는 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석 및 에렉트립이 관찰된다. 유체포유물의 체계적 연구에 의하면, 물리-화학적 상태가 상반되는 유체가 관찰된다: 1) 광화 I시기 초기와 중기 광석광물 정출과 관련된 $H_2O-CO_2-CH_4-NaCl\pm N_2$ 유체(조기=균일화온도: 203~388°C, 압력: 1082~2092 bar, 염농도: 0.6~13.4 wt.%, 중기=균일화온도: 215~280°C, 염농도: 0.2~2.8 wt.%), 2) 광화I시기 말기와 광화II시기 광석광물과 관련된 $H_2O-NaCl\pm CO_2$ 유체(광화I시기 말기=균일화온도: 205~288°C, 압력: 670 bar, 염농도: 4.5~6.7 wt.%, 광화II시기=균일화온도: 201~358°C, 염농도: 0.4~4.2 wt.%)이다. 광화I시기 초기의 $H_2O-CO_2-CH_4-NaCl\pm N_2$ 계 유체는 유체압력의 차이에 의해 CO_2 상분리가 일어났으며 광화작용이 진행됨에 따라 $H_2O-NaCl\pm CO_2$ 계 유체로 진화되었다. 또한 여기에 기원이 다른 $H_2O-NaCl$ 계 유체의 유입에 의해 혼입 및 희석작용으로 염농도의 감소가 있었다고 생각된다. 광화II시기 좀더 가열된 $H_2O-NaCl\pm CO_2$ 계 유체는 불혼합, 희석 및 냉각작용이 있었던 것으로 생각된다. 열수용액의 $\delta^{34}S_{H_2S}$ 값은 3.5~7.9‰로서 황은 주로 화성기원이지만 부분적으로 모암내의 황에서도 기원되었다고 생각된다. 광화유체의 산소($\delta^{18}O_{H_2O}$)와 수소(δD)안정동위원소값이 광화I시기에는 각각 1.1~9.0‰, -92~-86‰, 광화 II시기에는 각각 0.3‰($\delta^{18}O_{H_2O}$), -93‰(δD)이며, 리본-호상구조를 보이는 것으로 보아 대봉광산의 광화유체에 대한 기원과 진화과정을 두가지로 생각할 수 있다. 1) 마그마유체로부터 광화작용이 진행됨에 따라 지속적인 순환수의 혼입이 있었으며 2) 초기 마그마±변성유체에서 유체압력의 차에 의해 CO_2 상분리와 더불어 지속적인 δD 가 높은 순환수의 혼입이 있었던 것으로 해석할 수 있다.

주요어 : 대봉 금-은광상, 광화작용, 유체포유물, 동위원소

1. 서 언

대봉광산은 행정구역상 충청남도 청양군 남양면 대봉리, 동경 126°46'10", 북경 36°22'30" 부근에 위치하며, 1988년 영풍광업(주)에서 구봉광산의 17개 광구의 광업권을 인수하여 본 광산을 중심으로 재개발한 이후 1990년도까지 개발된 후 경제적인 채산성 때문에 휴광된 광산이다(Fig. 1). 현재 국내에서 가행되고 생산실적이 있는 금-은 광산은 그리 많지 않아 금과 은의 대부분을 해외 수입에 의존하고 있는 실정이다. 최근들어 대한광업진흥공사의 정밀조사결과 영덕, 홍천, 해남 및 황성지구에서 잠재가치 150억원에 이르는 새로운 부존자원을 발견하였다고 보고하였으며 현재 해남지역일대에서 금-은광상(은산, 가사도광상)이 대규모로 가행 중에 있다.

최근들어 미국, 캐나다, 호주 등 선진각국에서는 중-고온형 금광상을 찾는데 대학 및 지질연구소를 중심으로 모든 과학적 지식을 총동원하고 있으며 국가적인 연구 지원과 산학협동에 의해 이를 적극 후원하고 있다. 이런 중-고온형 금광상은 단순한 광물조합과 CO_2 , CH_4 함량을 갖는 것이 특징이다. 대봉광산은 선캠브리아기의 변성퇴적암류내에 발달하며 높은 CO_2 , CH_4 , N_2 함량, 단순한 광물조성 및 매우 높은 금함량을 갖는 광산이다.

이현구 등(1992)에 의한 보고에선 주로 대봉광산의 주변지질, 광석광물 및 광석광물화학조성에 대해 기술하였지만 유체포유물과 안정동위원소의 연구는 미비한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 대봉광산의 유체포유물 및 안정동위원소등을 수행함으로써 이 광산을 형성한 열수 유체의 조성 및 기원에 대해 고찰하고자 한다.

2. 주변지질

대봉광산의 주변지질은 선캠브리아기의 변성퇴적암류가 넓게 분포하고 있으며 이를 주라기 대동능층군 퇴적암류가 부정합으로 피복하고 있다. 또한 상기의 암류들을 후기에 관입한 주라기 흑운모화강암과 산성암류가 소규모 분포된다(Fig. 1). 선캠브리아기 변성퇴적암류는 호상편마암, 각섬암질 편암, 사문암, 화강편마암, 미그마타이트질 편마암, 결정질석회암 및 석회규산염암으로 구성된다. 호상편마암은 야외조사시 국부적으로 안모류가 부화되어 편리구조가 관찰되며 국부적으로 안구상 구조를 갖는 안구상 편마암 및 선구조가 관찰되지 않는 화강편마암 및 미그마타이트질 편마암으로 분류되나 상호 접이적인 관계이다. 호상편마암의 편리의 주향은 N20~80°E, 경사는 30~70°SE, 30~70°NW를 갖는다. 구성광물은 석영, 흑운모, 백운모, 사장석, 정장석, 미사장석, 견운모, 각섬석, 녹염석 및 불투명광물등으로 각섬암상 정도의 광역변성을 받았다. 각섬암질 편암은 대봉광산의 남서쪽 약 1 km지점에 국부적으로 분포되며 질은 녹색을 띤다. 편리의 주향과 경사는 N48°E, 68°NW를 갖으나 변화가 심한 편이다. 구성광물로는 대부분이 청색 각섬석과 갈색 각섬석이고 소량의 석영, 정장석, 사장석, 견운모, 흑운모, 백운모 및 불

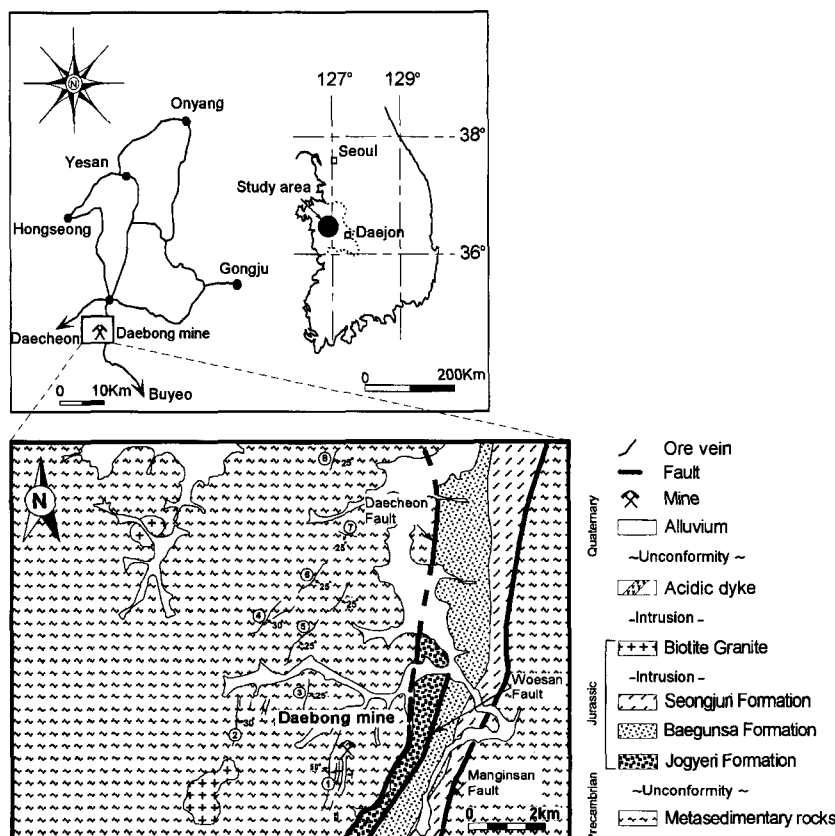


Fig. 1. Geological map of the Daebong mine. 1; Danbong vein, 2; Yongma vein, 3; Ganjuk vein, 4; No.6 vein, 5; No.1 vein, 6; Bongam2 vein, 7; Bongam1 vein, 8; Gunryang vein.

투명광물등이다. 사문암은 호상편마암내 N40~60°E의 방향성을 갖고며 특히 대봉광산을 중심으로 북동-남서 방향의 배사, 향사습곡축 주변부를 따라 분포된다. 구성광물로는 사문석, 안티고라이트(antigorite) 및 소량의 불투명광물이 관찰된다. 결정질석회암과 석회규산염암은 대봉광산 북서쪽 300 m지점에 100~150 m의 폭을 갖고 북동방향으로 대상 분포된다.

쥬라기 대동누층군 퇴적암류인 조계리층, 백운사층 및 성주리층은 광산의 동쪽에 북북동방향으로 분포한다. 조계리층은 선캄브리아기 호상편마암과 단층으로 접하고 있으며 합장석각력사암대와 역암대로 분대된다. 백운사층은 조계리층을 정합으로 피복하고 사암대와 호층대로 분대된다. 사암대는 주로 세립질사암으로 구성되며 역암과 셰일이 협재된다. 성주리층은 크게 하부사암대, 호층대, 상부사암대로 분대된다. 하부사암대는 상향 세립구조를 보여주는 사암으로 구성되며 사암의 입자크기는 변화가 다양하다. 호층대는 주로 세립질사암, 실트스톤, 셰일로 구성되며 드물게 탄층이 포함된다. 그리고 상부사

암대는 주로 사암으로 구성되며 역암과 셰일이 협재된다. 이 층의 중심부분에는 N20~40°E 방향의 배사구조가 발달되어 있다.

쥬라기 흑운모화강암은 선캄브리아기의 변성퇴적암류를 관입하였으며 대봉광산의 남서 및 북서지역과 갭내에서 관찰된다. 대봉광산 갭내에서 관찰되는 흑운모 화강암은 선캄브리아기 변성퇴적암류를 관입하였으며 함 금은 석영맥에 의해 관입을 당하였다. 흑운모 화강암의 산상은 조립질이며 유백색을 띤다. 구성광물은 석영, 정장석, 사장석, 미사장석, 흑운모, 견운모, 방해석, 규선석 및 불투명광물 등이다. 산성암맥은 주로 석영맥으로 NE 방향을 갖고며, 간혹 NW의 방향성을 보이기도 한다.

3. 광 상

3.1. 광상개요

대봉광산은 청양읍 남서부 약 8 km 지점에 위치하며

호상 또는 화강편마암내에 발달된 열극을 충진한 함금은 석영맥광상이다. 대봉광산 일대에는 연고지맥, 굴치기맥, 단봉맥 등이 총연장이 500~1000 m인 5개조의 석영맥으로 관찰된다. 대봉광산은 과거 단봉맥을 대상으로 일제시대에 소규모 개발하던 것을 1988년 영풍광업(주)에서 인수하여 새로이 개발한 후 1990년 11월 휴광신고를 내기까지 4개 level 총 1400 m 연맥굴진되었다. 대봉광산은 N80°W방향으로 본갱을 개설, 약 150 m 크로스 굴진후, N10~20°W, 40~60°SW방향의 단봉맥을 착막한 후 70 m level(해수면기준) 222 m, 100 m level 606 m, 130 m level 157 m 및 150 m level 418 m 연맥굴진되어 있다(이현구 등, 1992).

3.2. 광석 및 광석광물

대봉광산의 석영맥은 팽축이 심하며 시기가 서로 다른 괴상백색석영맥(광화I시기)과 투명석영맥(광화II시기)으로 구성된다(Fig. 2). 괴상백색석영맥에서는 단열작용 등에 의하여 형성된 리본-호상(ribbon-banded)구조(Fig. 3-A)와 각력상구조 등이, 투명석영맥의 경우 빗살구조, 망상구조 및 정동구조 등이 잘 관찰된다. 대봉광산의 괴상백색석영맥은 동일시기의 회색석영, 백색석영과 투명회색석영으로 구성되며 구조운동에 의하여 심하게 파쇄된 곳도 관찰된다(Fig. 3-B, C, D). 광화I시기의 맥에서는 부분적으로 자형의 석영이 관찰되는 정동구조가 발견된다. 이 정동내에 소량의 방해석이 관찰된다. 괴상백색석영맥의 각력상구조에는 모암변질부분과 회색, 백색 및

Minerals	Stage I		Stage II
	Grey/White	Transparent grey	Transparent
Quartz			
Chlorite	—	—	
Sericite	—	—	
Magnetite	—	—	
Ilmenite	—	—	
Arsenopyrite	—	—	
Pyrrhotite	—	—	
Pyrite	—	—	
Marcasite		—	
Sphalerite	—	—	
Chalcopyrite	—	—	
Galena		—	—
Electrum		—	—
Argentite		—	—
Calcite		—	—

Fig. 2. Paragenetic sequence of minerals from the Daebong mine.

투명회색석영의 일부분이 각력화된 것과 황화광물이 각력화한 것이 발견되며, 또한, 현미경하에서 회색, 백색 및 투명회색석영은 재결정화된 sutured구조가 관찰된다. 이는 광화작용후에 계속적으로 구조운동과 변형작용이 있었음을 의미한다.

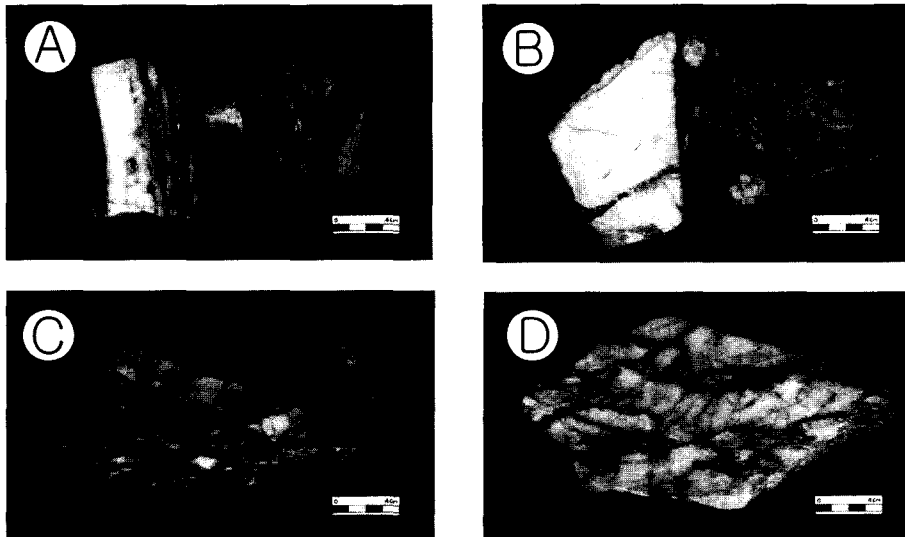


Fig. 3. Photographs of quartz vein samples from the Daebong mine. A; Laminations and elongate clasts of wall rock in quartz vein, B and C; Subgrain development that fractured the pre-existing ore minerals and quartz vein, D; Earlier massive quartz vein and fractures that composed of ore minerals.

광상에서 산출되는 광석광물로는 광화 I시기 조기에 자철석, 자류철석, 유비철석(30.20~33.69 As atomic %), 황철석, 섬아연석(14.11~18.52 FeS mole %, 0.65~2.23 CdS mole %), 황동석 등이, 중기에는 자류철석, 유비철석, 황철석, 백철석, 섬아연석(11.99~14.21 FeS mole %, 2.56~3.90 CdS mole %), 황동석, 방연석, 에렉트립(60.70~81.41 Au atomic %) 등과 말기에는 황철석, 섬아연석(5.23~11.45 FeS mole %, 2.94~5.32 CdS mole %), 황동석, 방연석, 에렉트립(36.60~62.39 Au atomic %), 휘은석 등이 관찰된다.

광화II시기에 관찰되는 투명석영은 자형으로 발달하며 함께 산출되는 방해석은 자형의 석영에 피복되어 자형 또는 괴상으로 산출된다. 광화II시기의 광석광물은 황철석, 섬아연석(5.81~8.49 FeS mole %, 2.62~3.09 CdS mole %), 황동석, 방연석 및 에렉트립(52.60~62.09 Au atomic %) 등이 투명석영의 중심부에서 관찰된다.

4. 유체포유물

4.1. 연구방법

유체포유물 연구는 광화작용과 관련된 유체의 진화와 광물 침전시 온도 및 유체의 화학성분등을 규명하는데 이용되어진다. 대봉광산의 광화I, II시기에 산출되는 백색석영, 투명석영 및 방해석에 대해 연마박편을 제작하여 실험하였다. 유체포유물의 산출상태, 가열 및 냉각실험은 Nikon 현미경에 부착된 Linkam THMSG 600 및 U.S.G.S. Fluid Inc. gas flow heating-freezing system을 이용하여 측정하였다. 또한 좀더 정확한 측정을 위해 컴퓨터에 CCTV를 연결하여 이용하였다. 유체포유물 측정 이전에, Linkam THMSG 600과 U.S.G.S. Fluid Inc. gas flow heating-freezing system은 U.S.G.S.에서 제작한 표준시료(H_2O , H_2O+CO_2)를 이용하여 보정을 실시하였다. 측정오차는 냉각실험시 $\pm 0.1^\circ C$, 가열실험시 $\pm 0.5^\circ C$ 이다.

4.2. 산출상태

대봉광산의 광화I, II시기에 산출되는 유체포유물은 실온에서 관찰되는 상의 종류, 성분에 따라 CO_2 -rich 포유물, CO_2 - H_2O 포유물과 aqueous 포유물로 분류된다. 여기에서 CO_2 -rich 포유물은 I형 포유물, CO_2 - H_2O 포유물은 II형 포유물 및 aqueous 포유물은 III형 포유물로 명명하였다. CO_2 -rich 포유물은 LCO_2 로만 구성되어 있으며 CO_2 - H_2O 포유물은 LCO_2 - LH_2O 와 LCO_2 -

VCO_2 - LH_2O 로 구성되어 있다. 또한 aqueous 포유물은 LH_2O , LH_2O - VH_2O 및 LH_2O - VH_2O -mica로 구성되어 있다. 그래서 CO_2 - H_2O 포유물 중 LCO_2 - LH_2O 포유물은 IIa 포유물로 LCO_2 - VCO_2 - LH_2O 포유물은 IIb 포유물로 세분하였으며 aqueous 포유물 중 LH_2O 포유물은 IIIa형 포유물, LH_2O - VH_2O 포유물은 IIIb 포유물로 LH_2O - VH_2O -mica 포유물은 IIIc 포유물로 각각 세분하였다.

광화I시기의 유체포유물은 I, IIa, IIb, IIIa 및 IIIb형 포유물이 산출되나 광화II시기의 유체포유물은 IIIa, IIIb 및 IIIc형 포유물만 산출된다. 광화I시기의 I, IIa 및 IIb형 포유물은 백색석영 결정면내에 산출되는 것과 봉합된 열극을 따라 산출된다. 또한 광화 I시기의 백색석영내에 관찰되는 IIIb형 포유물은 I, IIa 및 IIb형 포유물을 교차하여 계속된 단열작용에 의해 형성된 열극을 따라 산출된다. 그러므로 광화I시기의 백색석영내 유체포유물은 상대적인 시기에 따라 I, IIa, IIb형 포유물(광화I시기 초기)>I, IIa, IIb형 포유물(광화I시기 중기)>IIIb형 포유물(광화I시기 말기)로 구분된다. Roedder(1984)가 제시한 방법에 의하면 I, IIa 및 IIb형 포유물은 일차포유물로 산출되며 IIIa형 포유물은 이차포유물로 산출된다. 광화I, II시기의 IIIb형 포유물은 일차/가이차 또는 이차포유물 산출되며 광화II시기의 투명석영에서 관찰되는 IIIb형 포유물은 결정면을 따라 산출된다. 광화II시기의 투명석영과 방해석에서 관찰되는 IIIc형 포유물은 결정면을 따라 산출되는 것(일차포유물)과 봉합된 열극을 따라 VH_2O 의 물체적 변화가 심한 포유물(이차포유물)로 산출된다.

I형 포유물은 IIa 및 IIb형 포유물과 함께 산출되며 IIa와 IIb형 포유물에 비해 산출빈도가 많다(Fig. 4-A). I형 포유물의 형태는 negative form, 반원형, 인장형, 타원형이며 크기는 수 μm 에서 144 μm 정도이다.

IIa형 포유물은 I형 포유물과 함께 산출되며 산출빈도가 높다(Fig. 4-B). IIa형 포유물의 형태는 I형 포유물의 형태와 같으며 크기는 수 μm 에서 52 μm 정도이다. IIa형 포유물의 LCO_2 물체적은 0.05~0.9까지 분포한다.

IIb형 포유물은 산출빈도와 산출량이 매우 적으며 I 및 IIa형 포유물과 함께 산출된다(Fig. 4-C). IIb형 포유물의 형태는 negative form 및 인장형이며 크기는 수 μm 에서 43 μm 정도이다. 이 포유물의 LCO_2 물체적은 0.15에서 0.9까지이나 대부분이 0.15~0.25이다.

IIIa형 포유물은 광화I, II시기에 IIIb형 포유물과 함께 산출된다(Fig. 4-D). 이 포유물의 형태는 불규칙형

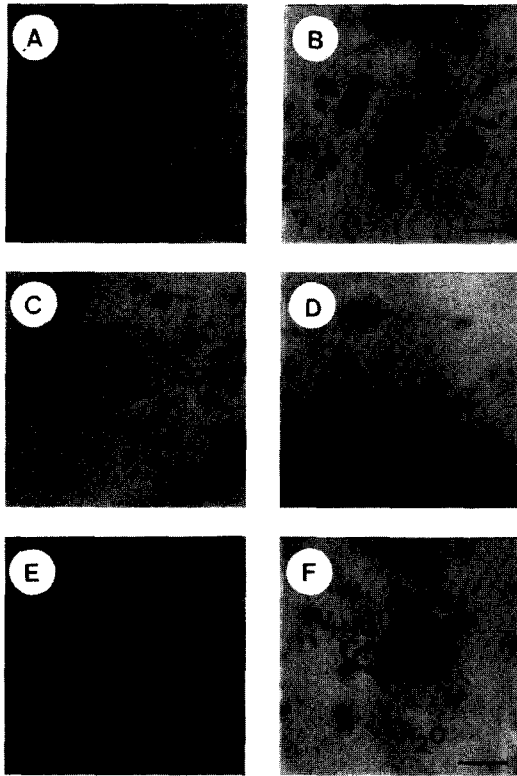


Fig. 4. Representative types and photomicrographs of fluid inclusions in stage I, II vein quartz and calcite from the Daebong mine. A; Type I inclusion in stage I white quartz, B; Type IIa inclusion in stage I white quartz, C; Type IIb inclusion in stage I white quartz, D; Type IIIa inclusion in stage I, II white and transparent quartz and calcite, E; Type IIIb inclusion in stage I, II white and transparent quartz and calcite, F; Type IIIc inclusion in stage II transparent quartz. Scale bar represents 20 micron in length.

및 반원형이며 크기는 수 μm 에서 25 μm 정도이다.

IIIb형 포유물은 광화I, II시기에 산출된다(Fig. 4-E). 광화I시기의 IIIb형 포유물은 서로 교차하는 봉합된 열극을 따라 형성된 상대적 생성시기가 다른 포유물이 관찰되며 그 중 봉합된 열극을 따라 방연석과 같은 방향으로 충전한 포유물로도 관찰된다. 그리고 봉합된 열극을 따라 VH_2O 의 물체적이 다양하게 관찰되는 포유물도 관찰된다. 이들 IIIb형 포유물의 형태는 주로 negative form, 반원형, 인장형, 판상 및 불규칙형으로 산출된다. IIIb형 포유물의 크기는 수 μm 에서 56 μm 정도이며 VH_2O 의 물체적은 0.05~0.2로서 액상(liquid-rich type) 포유물이다. 광화II시기의 투명석영과 방해석에서 산출되는 IIIb형 포유물은 negative form, 판상, 반원형 및 불규칙형으로 산출되며 크기는 수 μm 에서 97 μm 정도이다. VH_2O 의 물체적은 0.05~0.35로서 액

상 포유물이다.

IIIc형 포유물은 IIIb형 포유물과 함께 산출된다(Fig. 4-F). 이 포유물의 형태는 주로 negative form, 반원형 및 불규칙형으로 산출된다. 이 포유물의 크기는 수 μm 에서 123 μm 정도이며 VH_2O 의 물체적은 0.05~0.3로서 액상 포유물이다.

4.3. 냉각 및 가열 실험

대봉광산의 광화I, II시기에서 산출되는 백색석영, 투명석영 및 방해석내의 유체포유물의 냉각/가열 실험에 대한 자료는 Table 1과 같으며 각 포유물에 대해 설명하면 다음과 같다.

I형 포유물은 냉각실험시 VCO_2 의 형성온도는 $-67.7 \sim -22.5^\circ\text{C}$ 이며 $-127 \sim -92^\circ\text{C}$ 에서 VCO_2 가 응축된다. I형 포유물의 Tm-Carb.(first melting temperature of carbonic phase)는 $-100.6 \sim -86.0^\circ\text{C}$ 이다. I형 포유물의 Tm-Carb. (final melting temperature of carbonic phase)는 $-67.2 \sim -56.2^\circ\text{C}$ 이며 Th-Carb.(homogenization temperature of carbonic phase)는 $-65.2 \sim -14.6^\circ\text{C}$ 로서 폭넓게 분포한다(Fig. 5). 상대적인 시기에 따른 I형 포유물의 Tm-Carb., Th-Carb.를 비교하면, Tm-Carb.는 $-62.4 \sim -58.1^\circ\text{C}$ (광화I시기 초기), $-59.3 \sim -58.9^\circ\text{C}$ (광화I시기 중기)이며 Th-Carb.는 $-52.5 \sim -7.6^\circ\text{C}$ (광화I시기 초기), $13.1 \sim 14.6^\circ\text{C}$ (광화I시기 중기)로 광화I시기 초기의 포유물이 광화I시기 중기의 포유물보다 Tm-Carb.와 Th-Carb.가 낮다. Van Den kerkhof (1990)는 $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$ 계 포유물에서 관찰되는 상전이를 기초로 하여 관찰하면, 대봉광산의 광화I시기에서 산출되는 I형 포유물중에는 H4(SLG→Ths V: $-98.9^\circ\text{C} \rightarrow \text{SL} \rightarrow \text{Ti V: } -65.9^\circ\text{C} \rightarrow \text{SLG} \rightarrow \text{Tm: } -64.8^\circ\text{C} \rightarrow \text{LG} \rightarrow \text{Th L: } -58.5^\circ\text{C} \rightarrow \text{L}$)와 S2(SLG→Ths V: $-103.3^\circ\text{C} \rightarrow \text{SL} \rightarrow \text{Ts L: } -66.0^\circ\text{C} \rightarrow \text{L}$)형 포유물이 관찰된다. 그러므로 I형 포유물은 CO_2 이외에 CH_4 , N_2 성분이 존재함을 알 수 있다.

IIa형 포유물의 VCO_2 의 형성온도는 $-12.6 \sim -22.9^\circ\text{C}$, VCO_2 의 응축온도는 $-121 \sim -93^\circ\text{C}$ 및 Ti-Carb.는 $-96.7 \sim -79.0^\circ\text{C}$ 로서 I형 포유물의 것과 비슷하다. IIa형 포유물의 Tm-Carb.는 $-62.0 \sim -56.2^\circ\text{C}$ 이며 Th-Carb.는 $-13.2 \sim -24.9^\circ\text{C}$ 이다. IIa형 포유물의 LCO_2 물체적에 따른 Tm-Carb., Th-Carb.값의 변화가 관찰되지 않는다. 또한 Tm-Carb.와 Th-Carb.의 상관관계를 살펴보면 정의 상관관계가 관찰되는데, 이것은 Th-Carb.의 온도강하의 원인은 CO_2 이외에 다른 휘발성물질(CH_4 , N_2 , SO_4)에 의해 기인된다고 생각된다. IIa형 포유물의 Tm-Clath. (clathrate melting temperature)는 $1.9 \sim 12.1^\circ\text{C}$ 이며 영

Table 1. Microthermometric data of fluid inclusions from the Daebong mine.

Fluid inclusion	Type I	Type IIa	Type IIb	Type IIIa	Type IIIb	Type IIIc
Stage	I	I	I	I	I	II
System	CO ₂ -CH ₄ ±N ₂	H ₂ O-CO ₂ -CH ₄ -NaCl	H ₂ O-CO ₂ -CH ₄ -NaCl	H ₂ O-NaCl	H ₂ O-NaCl±CO ₂	H ₂ O-NaCl±CO ₂
Size(m)	<144	<52	<43	<25	<56	<97
Degree of filling(%)	100	5~90	15~90	100	5~20	5~35
Ti-Carb.(°C)	-100.6~-86.0	-96.7~-79.0				
Tm-Carb.(°C)	-67.2~-56.2	-62.0~-56.3	-57.8~-56.2			
Tm-Clath.(°C)		1.9~12.1	7.9~9.4			
Te-ice(°C)				-22.6	-25.7~-22.8	-24.3
Tm-ice(°C)				-2.2~-0.2	-6.2~0.0	-2.5~0.0
Th-Carb.(°C)	-65.2~14.6	-13.2~24.9	21.9~27.0			
Th-Carb.(L)(°C)	-65.2~14.6	-13.2~24.9	21.9~27.0			
Th-Carb.(V)(°C)						
Th(°C)		203.0~388.0	240.0~320.0		149.0~360.7	150.6~378.1
Th(L)(°C)		203.0~388.0			149.0~360.7	150.6~378.1
Th(V)(°C)		288.1~322.0	240.0~320.0			164.4~323.3
Th(d)(°C)						
Shape	Ne, Su, El, Ov	Ne, Su, Ov	Ne, El	Ir, Su	Ne, Su, El, Ta, Ir	Ne, Ta, Su, Ir

Abbreviations: Ti-Carb.=First melting temperature of carbonic phase, Tm-Carb.=Final melting temperature of carbonic phase, Tm-Clath.=Clathrate melting temperature, Te-ice=First melting temperature of ice, Tm-ice=Final melting temperature of ice, Th-Carb.=Homogenization temperature of carbonic phase, Th=Homogenization temperature, Ne=Negative form, Su=Subround, El=Elongate, Ir=Irregular, Ta=Tabular, Ov=Oval.

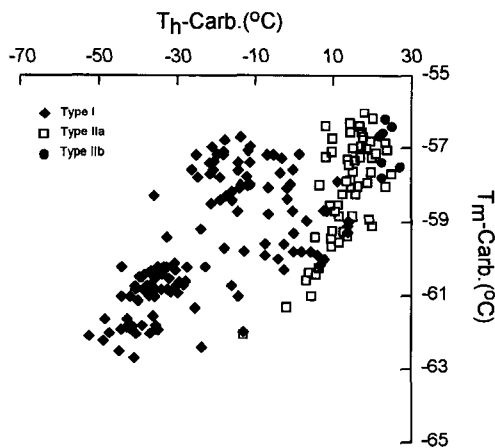


Fig. 5. Correlative variations of microthermometric data (Th-Carb. vs. Tm-Carb.) of types I, IIa and IIb fluid inclusions in stage I quartz vein from the Daebong mine.

농도(wt.% eq. NaCl)로 환산하면 0.0~13.4이다(Fig. 6). Collins(1979)와 Hollister and Burruss(1976)는 Tm-Clath.(>10°C)의 값을 갖는 유체포유물에서 CO₂이외에 CH₄와 같은 휘발성 성분들이 존재한다고 보고하였다. 그러므로 대봉광산의 광화I시기에서 산출되는 IIa형 포유물은 CO₂이외에 다른 휘발성물질이 있다는 것을 뒷받침해준다. IIa형 포유물은 가열시 decrepitation되어지는 유체포유물이 많으며 LCO₂의 물체적에 의해 LCO₂+LH₂O⇒LH₂O (Th(L))(<0.5)와 LCO₂+LH₂O⇒LCO₂

(Th(V))(>0.5)상으로 균일화된다. IIa형 포유물의 균일화 온도(Th)는 203.0~388.0°C(Th(L): 203.0~388.0°C, Th(V): 288.1~322.0°C)이다(Fig. 7). 상대적인 시기에 따른 광화I시기 초기와 중기의 Tm-Carb., Th-Carb., Tm-Clath., Th를 비교하여 보면, Tm-Carb.: -61.1~-57.3°C, -59.3~-57.7°C, Th-Carb.: -10.6~23.8°C, 12.8~24.9°C, Tm-Clath.: 8.2~10.2°C, 8.6~11.4°C, Th: 203.0~388.0°C, 214.6~280.0°C로서 광화작용이 진행됨에 따라 Tm-Carb., Th-Carb. Tm-Clath. 및 Th값이 감소함을 알 수 있다.

IIb형 포유물의 Tm-Carb.는 -57.8~-56.2°C이며 Th-Carb.는 21.9~27.0°C이다. 이것은 I, IIa형 포유물에 비해 IIb형 포유물이 휘발성물질의 함량과 밀도가 낮음을 의미한다. IIb형 포유물의 Tm-Clath.는 7.9~9.4°C이며 염농도(wt.% eq. NaCl)로 환산하면 1.2~4.2이다(Fig. 6). IIb형 포유물의 균일화온도는 240.0~320.0°C이며 기상으로 균일화된다(Fig. 7).

IIIa형 포유물은 냉각시 VH₂O의 응축온도는 -35.4~-31.2°C이며 first melting 온도(Te-ice)는 -22.6°C이다. 이것은 aqueous 용액중에 해리된 염이 주로 NaCl과 KCl로 존재함을 의미한다. IIIa형 포유물의 Tm-ice (final melting temperature of ice)는 -2.2~-0.2°C이다.

IIIb형 포유물의 광화시기별 40°C에서 VH₂O의 물체적은 <0.2(광화I시기 백색석영), <0.3(광화II시기 투명석영) 및 <0.5(광화II시기 방해석)로서 모두 액상

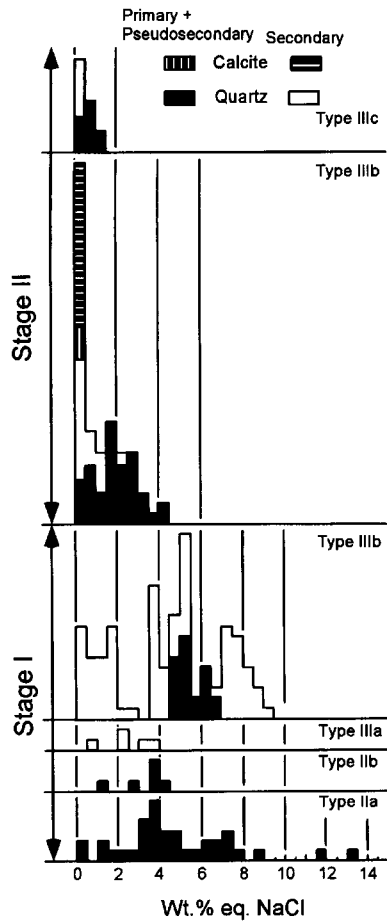


Fig. 6. Histogram of salinities(wt.% eq. NaCl) of type IIa, IIb, IIIa, IIIb and IIIc fluid inclusions in stage I(white quartz) and II(transparent quartz and calcite) from the Daebong mine.

(liquid-rich type)포유물이다. VH_2O 의 물체적은 Bodnar(1983)가 제시한 방법에 의해 계산하였으며 오차 범위는 $\pm 5\%$ 이다. IIIb형 포유물의 T_{m-ice} 는 $-6.2\sim-0.0^\circ C$ (광화I시기), $-2.5\sim-0.0^\circ C$ (광화II시기, 투명석영: $-2.5\sim-0.1^\circ C$, 방해석: $-0.2\sim-0.0^\circ C$)로서 염농도(wt.% eq. NaCl)로 환산하면 $0.0\sim9.5$ (광화I시기), $0.0\sim4.2$ (광화II시기, 투명석영: $0.1\sim3.5$, 방해석: $0.0\sim0.5$)이다(Fig. 6). 앞에서 설명한 바와 같이, 광화I시기의 백색석영내에 봉합된 열극을 따라 방연석과 같은 방향으로 충전한 IIIb형 포유물의 T_{m-ice} 는 $-5.0\sim-0.2^\circ C$ 이며 봉합된 열극을 따라 VH_2O 의 물체적 변화가 심한 IIIb형 포유물의 T_{m-ice} 는 $-4.2\sim-2.1^\circ C$ 이다. 광화I, II시기의 IIIb형 포유물은 가열시 모두 액상으로 균일화되나 국부적으로 기상으로 균일화되는 것도 관찰된다. 이 IIIb형 포유물의

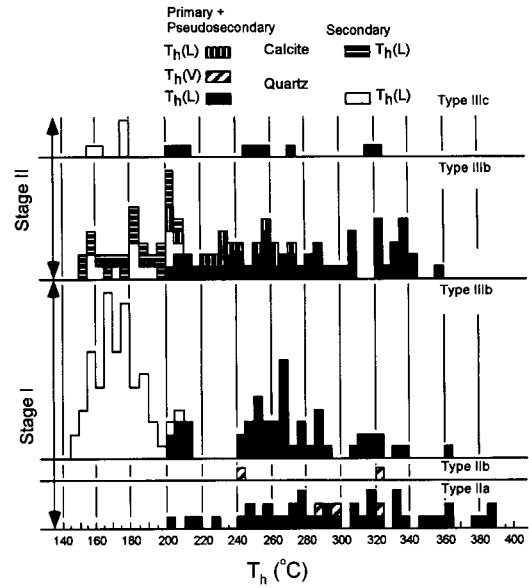


Fig. 7. Histogram of homogenization temperature(T_h) of type IIa, IIb, IIIb and IIIc fluid inclusions in stage I(white quartz) and II(transparent quartz and calcite) of the Daebong mine.

균일화온도는 $149.0\sim360.7^\circ C$ (광화I시기), $150.6\sim378.1^\circ C$ (광화II시기, 투명석영: $157.0\sim378.1^\circ C$, 방해석: $150.6\sim264.8^\circ C$)이다(Fig. 7). 또한 광화I시기의 백색석영내에 봉합된 열극을 따라 방연석과 같은 방향으로 충전한 IIIb형 포유물의 균일화온도는 $202.1\sim360.7^\circ C$ 이며 봉합된 열극을 따라 VH_2O 의 물체적 변화가 심한 IIIb형 포유물의 균일화온도는 $156.7\sim173.2^\circ C$ 이다. 부분적으로 광화I, II시기에 산출되는 IIIb형 포유물중에 가열시 액상으로 균일화 되었다가 다시 새로운 상이 형성되어 최종적으로 기상으로 균일화 되는 것이 관찰된다($195.5^\circ C(T_h(L))\Rightarrow 279.6^\circ C(T_h(V))$). 이것은 aqueous phase내에 소량의 CO_2 가 용해되어 있다가 가열시 aqueous phase의 불혼합(unmixing)에 의해 불혼용 액상의 형성으로 설명될 수 있다.

IIIc형 포유물내에 존재하는 고상은 평행하게 쪼개짐이 발달하며 평행소광으로 보아 대부분이 운모이며 외부광물(foreign mineral)이다. IIIc형 포유물의 물체적은 <0.3 이며 액상 포유물이다. 이 포유물의 T_{m-ice} 는 $-0.8\sim-0.0^\circ C$ 로서 염농도(wt.% eq. NaCl)로 환산하면 $0.0\sim1.4$ 이며 균일화온도는 $164.4\sim323.3^\circ C$ 이다(Fig. 6, 7). 이 포유물은 대부분 액상으로 균일화되나 부분적으로 IIIb형 포유물과 같이 가열시 새로운 상이 형성되어 최종적으로 기상으로 균일화되는 것도 관찰된다.

5. 안정동위원소

5.1. 연구방법

안정동위원소 분석에 이용된 시료는 광화시기 및 광물공생관계를 고려하여 선택한 황화광물과 석영이다. 황안정동위원소 분석을 위한 시료는 광화I, II시기의 황철석, 섬아연석, 자류철석, 황동석, 방연석 등을 대상으로 하였다. 산소 및 수소안정동위원소 분석을 위한 시료는 광화I, II시기의 백색석영 및 투명석영을 대상으로 하였다.

안정동위원소 분석은 기초과학지원연구소와 중국지질대학(武漢)에서 실시하였다. 황동위원소분석은 황화광물과 CuO를 함께 1000°C까지 올린 후 발생한 SO₂ 성분을 포집하여 분석하였다. 산소동위원소분석은 F₂ 가스와 분석시료를 530°C에서 24시간 반응시킨 후 발생한 O₂를 CO₂화하여 포집 분석하였다. 수소동위원소

분석은 LPG+O₂ 불꽃으로 방출한 H₂O를 Zn과 500°C에서 반응시켜 수소가스로 환원하여 분석하였다. 분석시 표준시료는 CDT(황) 및 SMOW(산소, 수소)를 사용하였으며 오차범위는 ±0.2‰(황, 산소) 및 ±0.1‰(수소)이다.

5.2. 황의 분석결과

대봉광산의 광화I시기에 산출되는 광석광물의 δ³⁴S값은 3.9~9.4‰이며 각 광석광물의 δ³⁴S값은 자류철석: 5.8‰, 황철석: 4.7~9.4‰, 섬아연석: 4.6~6.4‰, 방연석: 3.9~5.3‰이다(Table 2). 대봉광산에서 산출되는 모암변질광물의 공생군은 광화유체의 pH가 약산성임을 지지해주고 있으며 본 광산에서 자류철석의 산출과 황산염광물의 부재는 광화작용이 환원환경하에서 진행되었음을 시사한다. 이러한 환경에서는 유체내 용존된 황이 H₂S상태로 가장 우세하게 존재한다. 즉 광화유체내

Table 2. Sulfur isotope of sulfide minerals from the Daebong mine.

Stage	Sample No.	Sea level	Min.	δ ³⁴ S(‰)	δ ³⁴ S _{H2S} (‰) ¹⁾	Δ ³⁴ S	T(°C) ²⁾	T _h (°C) ³⁾
I	D.B.100-2	+100 m	Py	9.4	7.9			250
I	D.B.100-2	+100 m	Sp	5.8	5.4			250
I	D.B.100-2	+100 m	Gn	5.3	7.6			250
I	D.B.100-9	+100 m	Py	8.2	6.7			250
I	D.B.100-9	+100 m	Sp	6.1	5.7			250
I	D.B.100-9	+100 m	Gn	4.8	7.1			250
I	D.B.100-12	+100 m	Sp	6.0	5.7			300
I	D.B.100-12	+100 m	Gn	4.8	6.7			300
I	D.B.910121-6	+130 m	Sp	6.1	5.8			300
I	D.B.910121-6	+130 m	Gn	5.0	6.9			300
I	D.B.910121-10	+130 m	Po	5.8	5.5			350
I	D.B.910121-10	+130 m	Py	4.7	3.5			300
I	D.B.910121-10	+130 m	Gn	3.9	5.8			300
I	D.B.890427-4	+150 m	Py	5.9	4.9			350
I	D.B.890427-4	+150 m	Sp	4.6	4.3			350
I	D.B.890427-4	+150 m	Gn	5.1	7.0			300
I	D.B.910122-6	+150 m	Sp	6.4	6.1			300
I	D.B.910122-6	+150 m	Gn	5.2	7.1			300
I	D.B.910122-16	+150 m	Py	6.2	5.0			300
I	D.B.910122-16	+150 m	Sp	4.8	4.5			300
	*DB-03		Py	6.8				
	*DB-03		Sp	6.6		Sp-Gn		
	*DB-03		Gn	3.9		2.7	245	
	*DB-21		Cp	5.6				
	*DB-21		Sp	6.0		Sp-Gn		
	*DB-21		Gn	4.1		1.9	343	

*Compiled data from Yoon and Shimazaki (1993). 1) δ³⁴S_{H2S}(‰) are calculated following the equation given from Ohmoto and Rye (1979). 2) Isotopic temperature is calculated from fractionation factors given from Ohmoto and Rye (1979). 3) T_h is homogenization temperature of fluid inclusion.

Py: Pyrite, Po: Pyrrhotite, Sp: Sphalerite, Cp: Chalcopyrite, Gn: Galena.

H₂S의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 전황의 $\delta^{34}\text{S}$ 값으로 간주될 수 있다. 그러므로 동위원소 평형온도, 유체포유물 균일화온도와 광석광물 공생관계로부터 구한 온도를 이용하여 광석 광물과 평형상태에 있는 광화유체내 H₂S값은 Ohmoto and Rye(1979)가 제시한 평형식에 대입하여 구하면 Table 2와 같다. Table 2에서 보는 것과 같이 대봉광산의 광화I시기에 대한 광화유체내 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 값은 3.5~7.9‰로서 황의 기원은 주로 화성기원이지만 부분적으로 모암내 황에서도 유래된 것으로 해석된다. 또한 광석광물의 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 값은 황철석: 3.5~7.9‰, 자류철석: 5.5‰, 섭아연석: 4.3~6.1‰, 방연석: 3.9~5.3‰이다.

5.3. 산소 및 수소 분석결과

대봉광산의 광화I, II시기에 산출되는 백색석영과 투명석영의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 광화I시기: 6.4~14.8‰, 광화II시기: 9.2‰이다. 깊이별 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 +100 m level: 8.0~10.5‰, +130 m level: 7.0~14.8‰, +150 m level: 6.4~14.8‰로서 큰 차이가 없으나 +130 m level과 +150 m level에서 산출되는 백색석영내의 $\delta^{18}\text{O}$ (‰)값의 변화 폭이 +100 m level의 것보다 크다(Table 3). 광화I, II시기의 석영 침전시 평형상태에 있었던 물의 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ (‰)값은 Matsushisa *et al.*(1979)의 분별식 $1000 \ln a_{\text{Quartz-H}_2\text{O}} = 3.34(10^6/T^2) - 3.31$ 를 이용하여 계산하면 Table 3과 같다. Table 3에서 보는 것과 같이 광화시기에 따른 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 값은 광화I시기: 1.1~9.0‰, 광화II시기: 0.3‰이며 깊이에 따른 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 값은 +100 m level: 1.1~3.6‰, +130 m level: 1.7~9.0‰, +150 m level: 1.1~7.9‰이다. 대봉광산의 광상 생성시 물의 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 값은 광화I시기: -92~-86‰, 광화II

시기: -93‰로서 거의 차이가 없다. 깊이별 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 값은 +100 m level: -90~-86‰, +130 m level: -92~-90‰, +150 m level: -92~-87‰로서 큰 차이가 없다. 광화 I시기에서 광화 II시기로 감에 따라 $\delta^{18}\text{O}$ (‰)값과 δD (‰)값의 변화는 살펴보면, 광화 II시기의 열수용액($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$: 0.3‰, $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$: -93‰)은 광화 I시기의 열수용액($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$: 1.1~9.0‰, $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$: -97~-86‰)보다 좀더 순환수에 가깝다. 이것은 광화II시기의 광화작용이 진행됨에 따라 CO₂ 상분리에 의한 요인도 있었지만 주로 다른 유체의 혼입이 크게 작용한 것으로 생각된다.

6. 토 의

6.1. 광화유체의 조성

대부분의 지각 유체는 CO₂, CH₄, N₂와 같은 비수용성의 비전해질 물질을 갖는 C-O-H-N-salt 혼합물로 구성되어 있다. 또한 Holloway(1981)는 C-O-H-S계내에 존재하는 유체는 주로 H₂O와 CO₂로 되어 있지만 산소 분압(f_{O_2})이 낮은 상태에선 유체는 주로 H₂O+CH₄, H₂O+CO₂+CH₄ 또는 H₂O+CH₄+H₂S로 되어 있다고 보고하였다. 이들 유체의 화학적성질은 속성작용, 변성작용, 마그마생성 및 광상형성과 같은 작용에 크게 좌우된다. 유체포유물내에 존재하는 주원소 및 미량원소의 함량은 Laser Raman Microprobe, PIXE(Proton Induced X-ray Emission) Microanalysis 또는 파괴분석방법에 의해 알 수 있지만 microthermometry에 의해 분석된 자료와 기 보고된 자료를 비교 검토함으로써 반정량화 할 수도 있다. Fig. 5은 대봉광산에서 산출되는 광화I시기의 백색석영에서 관찰되는 유체포유물의 Tm-Carb.와 Th-Carb.의 상관관계를 도시한 것으로 정의 상

Table 3. Oxygen and hydrogen isotopic data of quartz from the Daebong mine.

Stage	Sample No.	Sea level	Min.	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ (‰) ¹⁾	δD (‰)	T_h (°C) ²⁾
I	D.B.100-2	+100 m	Qz	10.5	3.6	-86	300
I	D.B.100-6	+100 m	Qz	8.0	1.1	-90	300
I	D.B.100-9	+100 m	Qz	8.7	1.8		300
I	D.B.910121-6	+130 m	Qz	14.8	7.9	-92	300
I	D.B.910121-9	+130 m	Qz	7.0	1.7	-90	350
I	D.B.910121-10	+130 m	Qz	14.8	9.0		350
I	D.B.150-1	+150 m	Qz	6.4	1.1		350
I	D.B.89427-4	+150 m	Qz	14.8	7.9	-92	300
I	D.B.910122-5	+150 m	Qz	8.7	3.4		350
I	D.B.910122-6	+150 m	Qz	10.8	5.5	-87	250
II	D.B.100-6	+100 m	Qz(t)	9.2	0.3	-93	250

1) $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ is calculated from the equation given by Matsushisa *et al.* (1979). 2) T_h is homogenization temperature of fluid inclusion. Qz: White quartz, Qz(t): Transparent quartz.

관관계를 갖는다. 이것은 CO₂ phase내에 CO₂ 이외에 CH₄, N₂와 같은 성분의 추가로 인해 Th-Carb. 값의 하락을 의미한다. 또한 IIa, IIb형 포유물은 CO₂ phase의 물체적에 따른 Tm-Carb.와 Th-Carb.값의 변화가 없으며 I형 포유물에서 IIb형 포유물로 감에 따라 Tm-Carb.와 Th-Carb.값이 증가한다. 광화I시기 IIa, IIb형 포유물에 대한 Tm-Carb.와 Tm-Clath.의 상관관계를 살펴보면 부의 상관관계를 갖는다. 이것은 휘발성물질(CH₄, N₂)과 salt함량이 반비례 관계임을 의미한다. 광화I시기에 산출되는 백색석영내의 I, IIa, IIb형 포유물의 구성성분은 Van Den kerkhof and Thiery(1994), Van Den kerkhof(1990), Nicholls and Crawford(1985), Ramboz *et al.*(1985), Herskowitz and Kisch(1984)가 제시한 방법에 의해 구하였다(Table 4). Table 4에서 보는 것과 같이, 대봉광산의 I형 포유물에 대한 XCO₂, XCH₄ 및 XN₂값은 각각 0.49~1.00, 0.00~0.24, 0.51~0.53이다. IIa, IIb형 포유물의 XH₂O, XNaCl, XCO₂, XCH₄는 각각 0.25~0.98, <0.01~0.01, 0.02~0.73, 0.00~0.05(IIa형 포유물), 0.27~0.95, <0.01, 0.05~0.73, 0.00~0.01(IIb형 포유물)이다. 광화 I시기 초기와 중기에 관찰되는 I형 포유물의 XCO₂와 XCH₄는 각각 0.77~0.95, 0.05~0.23(광화I시기 초기), 0.89~0.91, 0.09~0.11(광화 I시기 중기)로서 광화작용이 진행됨에 따라 XCH₄ 함량이 감소됨을 알 수 있다.

기열/냉각 실험으로부터 구한 자료(Tm-Carb., Tm-Clath., Tm-ice, Th-Carb., Th)로부터 광화I, II시기에서 산출되는 유체포유물의 Vbulk(molar volume of bulk), dbulk(dH₂O)(density of bulk)를 Van Den kerkhof and Thiery(1994), Nicholls and Crawford (1985), Ramboz *et al.*(1985), Brown(1989), Bakker (1997)가 제시한 방법에 의해 계산할 수 있다(Table

4). 계산시 I, IIa IIb형 포유물의 CO₂ phase내에 소량 존재하는 CH₄, N₂는 CO₂ phase의 밀도에 영향을 준다. 그리고 Vbulk, dbulk 및 균일화온도는 유체포유물을 함유하고 있는 광물에 존재했던 많은 지질학적 mechanism(PVT)를 해석하는데 도움이 되며, 그 지질학적 과정이 시공간에 어떤 차이에서 발생했는가를 해석하는데 이용된다. Table 4에서 보는 것과 같이, 광화 I시기 초기와 중기의 I, IIa, IIb형 포유물의 Vbulk, dbulk는 초기: 41.2~56.7 cm³/mol, 0.70~1.05 g/cm³ (I형 포유물), 18.8~42.7 cm³/mol, 0.88~1.03 g/cm³ (IIa형 포유물), 20.3~31.4 cm³/mol, 0.84~0.97 g/cm³ (IIb형 포유물), 중기: 63.4~68.9 cm³/mol, 0.60~0.65 g/cm³(I형 포유물), 23.1~35.0 cm³/mol, 0.85~0.91 g/cm³(IIa형 포유물), 29.6 cm³/mol, 0.82 g/cm³(IIb형 포유물)로서 중기에 산출되는 I, IIa, IIb형 포유물이 초기의 I, IIa, IIb형 포유물보다 Vbulk값이 높게 나타난다. 광화I시기 말기에 산출되는 IIIb형 포유물의 Vbulk, dH₂O는 20.7~23.7 cm³/mol, 0.79~0.91 g/cm³이다. 또한 광화II시기에 산출되는 IIIb 및 IIIc형 포유물의 Vbulk, dH₂O는 20.7~30.5 cm³/mol, 0.60~0.88 g/cm³ (IIIb형 포유물), 20.8~27.6 cm³/mol, 0.65~0.87 g/cm³ (IIIc형 포유물)로서 광화 I시기 IIIb형 포유물의 Vbulk, dH₂O값과 큰 차이가 없다.

6.2. 광화유체의 포획압력(trapping pressure)과 진화

유체포유물의 포획압력은 관찰되는 포유물의 종류에 따라 여러 가지 열역학적 상태방정식(Bowers and Helgeson, 1983; Kerrick and Jacobs, 1981; Jacobs and Kerrick, 1981; Holloway, 1981; Zhang and Frantz, 1987; Knight and Bodnar, 1989)으로부터 구해진다. Van Den kerkhof(1990)는 CO₂-rich 포유물내에

Table 4. Summary of composition, molar volume and density for fluid inclusions in stage I, II quartz and calcite veins from the Daebong mine.

Stage	Incl. Type	Bulk inclusion composition					Carbonic phase composition		Aque. phase composition		Molar volume	Density (g/cm ³)
		XH ₂ O	XNaCl	XCO ₂	XCH ₄	XN ₂	XCO ₂	XCH ₄	eq. wt.%	NaCl		
I	early I			0.49~1.00	0.00~0.24	0.51~0.53	0.76~1.00	0.00~0.24			41.2~68.9	0.60~1.05
	early IIa	0.25~0.98	<0.01~0.01	0.02~0.73	0.00~0.05		0.89~1.00	0.00~0.11	0.2~13.4		18.8~42.7	0.79~1.03
	early IIb	0.27~0.95	<0.01	0.05~0.73	0.00~0.01		0.95~1.00	0.00~0.05	1.2~4.2		20.3~31.4	0.82~0.97
	mid-dle I			0.89~0.91	0.09~0.11		0.89~0.91	0.09~0.11			63.4~68.9	0.60~0.65
	mid-dle IIa	0.51~0.87	<0.01	0.11~0.44	0.01~0.05		0.90~0.95	0.05~0.10	0.2~2.8		23.1~35.0	0.98~1.01
	mid-dle IIb	0.76	<0.01	0.23	0.01		0.96	0.04	2.6		29.6	0.82
late I	IIIb							0.2~9.5		19.5~23.5	0.79~0.99	
II	IIIb							0.2~4.2		19.6~30.5	0.60~0.92	
	IIIc							0.4~1.4		20.8~27.6	0.65~0.87	

Abbreviations: Incl.=Inclusion, Aque. phase=Aqueous phase

많은량의 CH_4 와 N_2 가 존재하면 해석상의 오류를 범할 수 있다고 보고하였다. 이러한 점을 고려하여 대봉광산의 광화I시기에 산출되는 I, IIa, IIb형 포유물의 포획압력을 계산하였다. I형 포유물은 IIa 및 IIb형 포유물의 균일화온도 자료를 기초로 구했으며 계산된 I, IIa, IIb형 포유물의 포획압력은 1082~2098 bar(lithostatic pressure: 3.9~7.6 km, hydrostatic pressure: 10.8~20.9 km)이다. 또한 이 광산의 광화I시기 말기에 산출되는 IIIb형 포유물의 균일화온도와 황동위원소 지질온도계간의 차이에서 포획압력을 유추할 수 있다. 계산된 광화I시기 말기의 포획압력(259°C, 5.4 wt.%)는 670 bar(lithostatic pressure: 2.4 km, hydrostatic pressure: 6.7 km)이다. 앞에서 본 것과 같이, 대봉광산의 광화I시기에서 산출되는 I, IIa 및 IIb형 포유물은 Th-Carb.값의 변화 폭이 넓다. 이와같은 자료는 유체압력의 변화를 시사한다(Sibson *et al.*, 1988; Boullier and Robert, 1992; Wilkinson and Johnson, 1996; Cassidy and Bennett, 1993). 이런 유체압력(lithostatic pressure+tensile strength)의 변화는 대봉광산의 석영맥에서 관찰되는 안형상인장 맥(tensile hydraulic fractures)들을 형성하였다. 유체압력은 열극이 커짐에 따라 압력이 순간적으로 떨어진다. 그때에 상분리가 일어난다.

Diamond(1990, 1994)는 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 계 포유물을 1) High XH_2O (Low XCO_2)compositional type($0.852 < \text{XH}_2\text{O} < 0.985$, $0.148 > \text{XCO}_2 > 0.015$), 2) Very High XH_2O (Very Low XCO_2) compositional type($0.985 < \text{XH}_2\text{O} < 1$, $0.015 > \text{XCO}_2 > 0$), 3) Low XH_2O (High XCO_2) compositional type($0.002 < \text{XH}_2\text{O} < 0.852$, $0.148 > \text{XCO}_2 > 0.998$) 및 4) Very Low XH_2O (Very High XCO_2) compositional type($0 < \text{XH}_2\text{O} < 0.002$, $0.998 > \text{XCO}_2 > 1$)로 구분하였다. 대봉광산의 광화I시기에 관찰되는 IIa, IIb형 포유물은 Low XH_2O (High XCO_2) compositional type($0.002 < \text{XH}_2\text{O} < 0.852$, $0.148 > \text{XCO}_2 > 0.998$)와 High XH_2O (Low XCO_2) compositional type($0.852 < \text{XH}_2\text{O} < 0.985$, $0.148 > \text{XCO}_2 > 0.015$)에 해당한다. Diamond(1994)는 이러한 유형의 성분을 갖는 유체포유물은 상분리 또는 비등현상이 발생하는 광상(중열수 또는 심열수광상)에서 일반적으로 관찰되는 유체포유물이라 보고하였다. 이런 유형의 유체포유물은 높은 온도 및 압력상태에서 이슬점곡선(dew curve)과 기포점곡선(bubble curve)에 의해 불혼화영역(immiscibility field)이 경계지어진다. 또한 대봉광산의 광화I시기에 산출되는 IIa, IIb형 포유물은 XCO_2 의 변화가 큰 variable- XCO_2 포유물이다. Ramboz *et al.*

(1982)에 의하면 variable- XCO_2 포유물은 불혼화상태에서 형성된 것으로 보고하였다. 대봉광산에서 산출되는 유체포유물에 대한 균일화온도와 염농도의 관계성을 살펴보면, 광화I시기의 IIa, IIb 및 IIIb형 포유물은 균일화온도가 감소함에 따라 염농도는 증가한다. 이것은 유체의 불혼합이 있었음을 의미한다. 또한 광화II시기내 IIIb형 포유물의 균일화온도와 염농도는 광화I시기내 IIIb형 포유물에 비해 균일화온도는 증가하고 염농도는 감소되었음이 관찰된다. 이것은 광화I시기에서 광화II시기로 감에 따라 좀더 가열된 유체의 유입에 의한 희석 및 냉각작용이 있었음을 의미한다(Fig. 8). 그러므로 대봉광산의 광화I시기 초기와 중기 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4-\text{NaCl} \pm \text{N}_2$ (조기: 203.0~388.0°C(균일화온도), 0.6~13.4 wt.%(염농도), 중기: 214.6~280.0°C(균일화온도), 0.2~2.8 wt.%(염농도))계 유체는 유체압력의 차이에 의해 CO_2 상분리가 일어났으며 광화작용이 진행됨에 따라 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl} \pm \text{CO}_2$ (말기: 204.8~288.0°C(균일화온도), 4.5~6.7 wt.%(염농도))계 유체로 진화되었다. 또한 여기에 기원이 다른 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 계 유체의 유입에 의해 희석작용으로 염농도의 감소가 있었다고 생각된다. 광화 II시기에는 좀더 가열된 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl} \pm \text{CO}_2$ (201.3~358.0°C(균일화온도), 0.4~4.2 wt.%(염농도))계 유체가 불혼합, 희석 및 냉각작용이 있었던 것으로 생각된다.

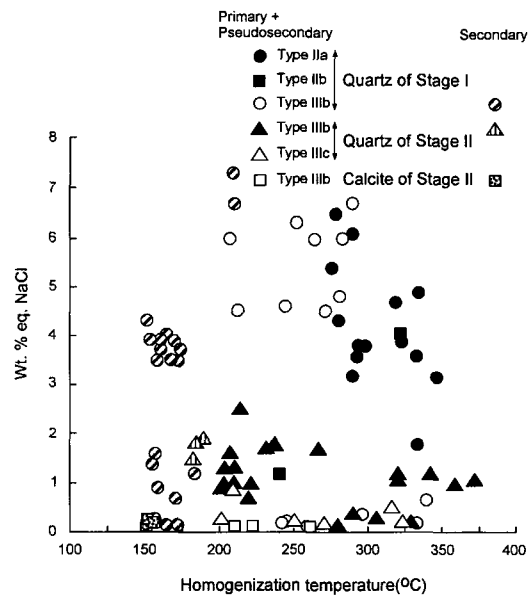


Fig. 8. Salinity vs. homogenization temperature diagram for fluid inclusions in stage I, II vein quartz and calcite from the Daebong mine.

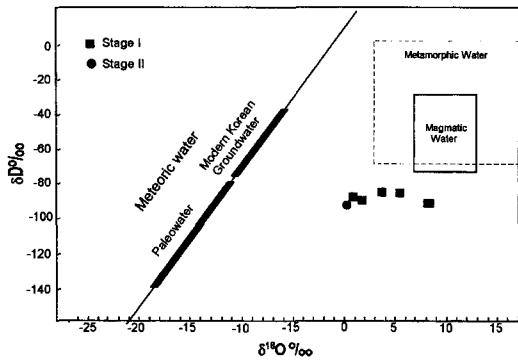


Fig. 9. Hydrogen vs. oxygen isotope diagram displaying stable isotope systematics of hydrothermal fluid compositions of the Daebong mine. Paleowater data are from So and Shelton(1987a, b) and So *et al.*(1987a, b), Modern Korean Groundwater data are from Kim and Nakai (1981, 1988).

6.3. 광화유체의 기원

$\delta^{18}O_{H_2O}-\delta D$ 의 다이어그램에 대봉광산의 자료를 도시하면 Fig. 9와 같다. 그리고 광석 및 광석광물에서 설명한 바와같이, 계속적인 전단운동이나 변형작용에 의해 무색광물과 유색광물이 재용용 및 재결정작용에 의해 형성된 리본-호상구조가 관찰된다(Fig. 3-A). 따라서 대봉광산의 광화유체에 대한 기원 및 진화과정을 두가지로 생각할 수 있다. 첫 번째로, 대봉광산의 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 및 $\delta D(\text{‰})$ 값과 유사한 많은 중열수광산의 광화유체는 순환수(Shelton *et al.*, 1988)나 마그마수(So *et al.*, 1993; So and Yun 1997)에서 유래되었다고 보고한 바 있다. 이런 경우, 우선 대봉광산의 광화작용시기에 있어 순환수의 $\delta D(\text{‰})$ 값을 아는 것이 중요하다. Shelton *et al.*(1988)에 의하면 백악기(142~ 68 Ma) 천수의 $\delta D(\text{‰})$ 값이 -143~-81로 보고하였다. 또한 Kim and Nakai(1981)와 김규한과 中井信之(1988)에 의하면 강수와 지하수의 δD 값이 각각 -141~2‰, -73~-42‰라고 보고하였다. 따라서 Fig. 9에서 보는 것과 같이, $\delta^{18}O_{H_2O}(\text{‰})$ 및 $\delta D(\text{‰})$ 값은 대봉광산의 광화유체는 초기 마그마수에서 유체압력의 차에 의해 CO₂ 상분리, CH₄ 성분의 산화와 더불어 계속적인 순환수 혼입에 의한 희석 및 냉각작용으로 해석할 수 있다. 두 번째로, 이 광산의 모암변질, 광맥구조, 산출광물, 유체포유물의 구성성분 및 안정동위원소($\delta^{34}S(\text{‰})$, $\delta^{18}O(\text{‰})$)등의 자료는 Archaean gold, 중열수 lode gold 광상(Intrusion-related gold 광상)의 것과 매우 유사하다. 단지 대봉광산의 $\delta D(\text{‰})$ 값이 Archaean gold과 중열수 lode gold 광상의 $\delta D(\text{‰})$ 값보다 낮은 값을 갖는다. McCuaig and Kerrich(1998), Godfarb

et al.(1991)에 의하면 1) decrepitation되는 유체포유물에서 낮은 $\delta D(\text{‰})$ 값을 갖을 수 있으며 2) 심부의 non-meteoric 광화유체가 $\delta D(\text{‰})$ 값이 소모된 유기물 질과 반응하여 천수와 유사한 유체(낮은 $\delta D(\text{‰})$ 값)를 형성할 수 있다고 보고하였다. 또한 Eugster and Skippen(1967)는 광화유체가 흑연, 석탄 및 석유와 같은 유기물질과 접할 때 큰 동위원소 변화가 일어날 수 있다고 보고하였다. 그러나 대봉광산에서는 이와같은 교환반응과 흑연등이 관찰되지만(Fig. 3-A) 앞에서 설명한 것과 같이 $\delta D(\text{‰})$ 의 증가는 관찰되지 않는다. 그러므로 대봉광산의 광화유체는 중열수 lode gold 광상(Intrusion-related gold 광상)과 같이 초기 마그마수 ±변성유체에서 유체압력의 차에 의해 CO₂ 상분리와 더불어 계속적인 $\delta D(\text{‰})$ 값 높은 순환수의 혼입이 있었던 것으로 해석할 수도 있다.

7. 결 언

1. 유체포유물의 자료로부터 산출한 광화시기 초기와 중기의 균일화온도(°C), 염농도(wt.% eq. NaCl), 구성성분(XH₂O, XCO₂, XCH₄, XN₂, XNaCl), Vbulk 및 dbulk는 광화시기 초기(H₂O-CO₂-CH₄-NaCl±N₂ 유체)=203~388, 0.6~13.4, 0.25~0.98, 0.02~1.00, <0.01~0.24, 0.51~0.53, <0.01~0.01, 18.8~57.3, 0.70~1.05, 광화시기 중기(H₂O-CO₂-CH₄-NaCl 유체)=214.6~280.0, 0.2~2.8, 0.51~0.87, 0.11~0.91, 0.01~0.11, none, <0.01, 23.1~68.9, 0.60~0.91이다. 또한 광화시기 말기와 광화II시기의 균일화온도(°C), 염농도(wt.% eq. NaCl), Vbulk 및 dH₂O는 광화시기 말기(H₂O-NaCl±CO₂ 유체)=204.8~288.0, 4.5~6.7, 20.7~23.7, 0.79~0.91, 광화II시기(H₂O-NaCl±CO₂ 유체)=201.3~358.0, 0.4~4.2, 20.7~30.5, 0.60~0.88이다.

2. 대봉광산의 광화I시기에 산출되는 I, IIa, IIb형 포유물의 포획압력은 1082~2098 bar(lithostatic pressure: 3.9~7.6 km, hydrostatic pressure: 10.8~ 20.9 km)이며 광화II시기 말기의 포획압력(259°C, 5.4 wt.%)는 670 bar(lithostatic pressure: 2.4 km, hydrostatic pressure: 6.7 km)이다.

3. 대봉광산의 광화I시기 초기와 중기 H₂O-CO₂-CH₄-NaCl±N₂(초기: 203.0~388.0°C(균일화온도), 0.6~13.4 wt.%(염농도), 중기: 214.6~280.0°C(균일화온도), 0.2~2.8 wt.%(염농도))계 유체는 광화작용이 진행됨에 따라 유체압력의 차이에 의해 CO₂ 상분리가 일어났으며 H₂O-NaCl±CO₂(말기: 204.8~288.0°C(균일화온도),

4.5~6.7 wt.%(염농도)계 유체로 진화되었다. 또한 $H_2O-NaCl \pm CO_2$ 유체에 기원이 다른 $H_2O-NaCl$ 계 유체의 유입에 의해 냉각 및 회석작용이 있었다. 그런다음, 광화II시기의 가열된 $H_2O-NaCl \pm CO_2$ (201.3~358.0°C (균일화온도), 0.4~4.2 wt.%(염농도)계 유체는 광화작용이 진행됨에 따라 주로 냉각 및 회석작용과 부분적인 불혼합이 있었던 것으로 생각된다.

4. 안정동위원소 결과, 대봉광산의 광화유체내 $\delta^{34}S_{H_2S}$ 값은 3.5~7.9‰로서 황은 주로 화성기원이지만 부분적으로 모암내의 황에서도 기원되었다. 또한 광화 I, II시기의 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 값은 각각 1.1~9.0‰, 0.3‰, δD 값도 각각 -92~-86‰, -93‰로서 대봉광산의 광화유체는 1) 초기 마그마수에서 유체압력의 차에 의해 CO_2 상분리, CH_4 성분의 산화와 더불어 계속적인 순환수 혼입에 의한 회석 및 냉각작용, 또는, 2) 초기 마그마수변성유체에서 유체압력의 차에 의해 CO_2 상분리와 더불어 계속적인 δD (‰)값 높은 순환수의 혼입이 있었던 것으로 해석할 수 있다.

사 사

이 연구는 2002년도 한국학술진흥재단 기초과학연구 지원사업(KRF-2002-CS0059)에 의하여 연구되었다. 이 기관에 사의를 표한다. 또한 논문에 사용된 정량분석 자료(EPMA)는 충남대학교 공동실험실습관에 설치된 JEOL사 JXA-8800R로부터 얻어졌다. 아울러 심사과정에서 논문의 미비점을 지적, 수정하여 수신 서울대학교 이인성교수님과 충북대학교 최상훈교수님께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- 김규한, 中井信之 (1988) 남한의 지하수 및 강수의 안정동위원소조성. 지질학회지, 24권, p. 37-46.
- 이현구, 유봉철, 김상중 (1992) 충남 대봉 금-은광상에서 산출되는 광석광물과 광상의 생성 환경. 광산지질, 25권, p. 297-316.
- Bakker, R.J. (1997) Clathrates: Computer programs to calculate fluid inclusion V-X properties using clathrate melting temperatures. Computers Geosci., v. 23, p. 1-18.
- Belkin, H.E. (1994) Microthermometric investigations: Th and Tm. practical and theoretical aspects. Short course of the working group "inclusion in minerals", p. 7-23.
- 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.
- Boullier, A.M.G., Michot, A., Pecher, and Barres, O. (1992) Paleoseismic events recorded in Archean gold-quartz vein networks, Val d'Or Abitibi, Quebec. Jour. Structural. Geology, v. 14, p. 161-179.
- Bowers, T.S. and Helgeson, H.C. (1983) Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of nonideal mixing in the system H_2O-CO_2-NaCl on phase relations in geologic systems: Equation of state for H_2O-CO_2-NaCl fluids at high pressures and temperatures. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 47, p. 1247-1275.
- Brown, P.E. (1989) FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data. Am. Mineralogist, v. 74, p. 1390-1393.
- Cassidy, K.F. and Bennett, J.M. (1993) Gold mineralization at the Lady Bountiful mine, western Australia: An example of a granitoid-hosted Archean lode gold deposit. Mineralium Deposita, v. 28, p. 388-408.
- Collins, P.L.F. (1979) Gas hydrates in CO_2 -bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity. Econ. Geol., v. 74, p. 1435-1444.
- Diamond, L.W. (1990) Fluid inclusion evidence for P-V-T-X evolution of hydrothermal solutions in late-Alpine gold-quartz veins at Brusson, Val d'ayas, Northwest Italian Alps. Am. Jour. Sci., v. 290, p. 912-958.
- Diamond, L.W. (1994) Introduction to phase relations of CO_2-H_2O fluid inclusions. Short course of the working group "inclusion in minerals", p. 131-158.
- Eugster, H.P., and Skippen, G.B., 1967, Igneous and metamorphic reactions involving gas equilibria: in Researches in Geochemistry, Abelson, P.H., ed., v. 2, New York: Wiley, 492-520
- Goldfarb, R.J. Newberry, R.J. Pickthorn, W.J. and Gent, C.A. (1991) Oxygen, hydrogen and sulphur isotope studies in the Juneau gold belt, southeastern Alaska: Constraints on the origin of hydrothermal fluids. Econ. Geol., v. 86, p. 66-80.
- Herskowitz, M. and Kisch, H.J. (1984) An algorithm for finding composition, molar volume and isochors of CO_2-CH_4 fluid inclusions from Th and Tfm(for $Th < Tfm$). Geochim. Cosmochim. Acta, v. 48, p. 1581-1587.
- Hollister, L.S. and Burruss, R.C. (1976) Phase equilibria in fluid inclusions from the Khtada Lake metamorphic complex. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 40, p. 163-175.
- Holloway, J.R. (1981) Volatile interactions in magmas. In thermodynamics of minerals and melts. Newton, R.C., Navrotsky, A. and Wood, B.J., eds., Adv. Physical Geochemistry, v. 1, p. 273-293.
- Jacobs, G.K. and Kerrick, D.M. (1981) Methane: an equation of state with application to the ternary system $H_2O-CO_2-CH_4$. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 45, p. 607-614.
- Kerrick, D.M. and Jacobs, G.K. (1981) A modified Redlich-Kwong equation for H_2O, CO_2 , and H_2O-CO_2 mixtures at elevated pressures and temperatures. Am. Jour. Sci., v. 281, p. 735-767.
- Kim, K.H. and Nakai, N. (1981) A study on hydrogen, oxygen and sulfur isotopic ratios of the hot spring waters in South Korea. Geochemistry, v. 15, p. 6-16.

- Knight, C.L. and Bodnar, R.J. (1989) Synthetic fluid inclusions: IX. Critical PVTX properties of NaCl-H₂O solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 53, p. 2-8.
- Matsuhisa, Y. Goldsmith, R. and Clayton, R.N. (1979) Oxygen isotope fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 43, p. 1131-1140.
- McCuaig, T.C. and Kerrich, R. (1998) P-T-t-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: Evidence from alteration systematics. *Ore geology Reviews*, v. 12, p. 381-453.
- Nicholls, J. and Crawford, M.L. (1985) Fortran programs for calculation of fluid properties from microthermometric data on fluid inclusions. *Computers Geosci.*, v. 11, p. 619-645.
- 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.
- Ramboz, C. Pichavant, M. and Weisbrod, A. (1982) Fluid immiscibility in natural processes: Use and misuse of fluid inclusion data II. Interpretation of fluid inclusion data in terms of immiscibility. *Chem. Geology*, v. 37, p. 29-48.
- Ramboz, C. Schnapper, D. and Dubessy, J. (1985) The P-V-T-X-f_{O₂} evolution of H₂O-CO₂-CH₄-bearing fluid in a wolframite vein: Reconstruction from fluid inclusion studies. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 49, p. 205-219.
- Roedder, E. (1984) Fluid inclusion. *Reviews in mineralogy*. Mineral. Soc. America, v. 12.
- Shelton, K.L. So, C.S. and Chang, J.S. (1988) Gold-rich mesothermal vein deposits of the Republic of Korea: Geochemical studies of the Jungwon gold area. *Econ. Geol.*, v. 83, p. 1221-1237.
- Sibson, R.H., Robert, F. and Poulsen, K.H. (1988) High angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology*, v. 16, p. 551-555.
- So, C.S. and Yun, S.T. (1997) Jurassic mesothermal gold mineralization of the Samhwanghak mine, Youngdong area, Republic of Korea: Constraints on hydrothermal fluid geochemistry. *Econ. Geol.*, v. 92, p. 60-80.
- So, C.S. Yun, S.T. Kim, S.H. Youm, S.J. Heo, C.H. and Choi, S.G. (1993) Mesothermal gold-silver mineralization at the Bodeok mine, Boseong area: A fluid inclusion and stable isotope study. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 26, p. 433-444.
- Van Den Kerkhof, A.M. (1990) Isochoric phase diagrams in the systems CO₂-CH₄ and CO₂-N₂: Application to fluid inclusions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 54, p. 621-629.
- Van Den Kerkhof, A.M. and Thiery, R. (1994) Phase transitions and density calculation in the CO₂-CH₄-N₂ system. Short course of the working group "inclusion in minerals", p. 171-190.
- Wilkinson, J.J. and Johnson, J.D. (1996) Pressure fluctuations, phase separation and gold precipitation during seismic fracture propagation. *Geology*, v. 24, p. 395-398.
- Zhang, Y-G. and Frantz, J.D. (1987) Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl-KCl-CaCl₂-H₂O using synthetic fluid inclusions. *Chem. Geology*, v. 64, p. 335-350.

2003년 7월 4일 게재승인, 2003년 11월 24일 원고접수.