

경상남도 함안-군북지역의 동광화작용: 유체포유물 및 안정동위원소 연구

허철호^{1*} · 윤성택² · 최상훈³ · 최선규² · 소철섭²

¹국립공원관리공단 자연생태연구소, ²고려대학교 지구환경과학과, ³충북대학교 지구환경과학과

Copper Mineralization in the Haman-Gunbuk Area, Gyeongsangnamdo-Province: Fluid Inclusion and Stable Isotope Study

Chul-Ho Heo^{1*}, Seong-Taek Yun², Sang-Hoon Choi³, Seon-Gyu Choi² and Chil-Sup So²

¹Ecological Research Institute, National Parks Authority, Seoul 121-717, Korea

²Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 136-701, Korea

³Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

The Haman-Gunbuk mineralized area is located within the Cretaceous Gyeongsang Basin along the southeastern part of the Korean peninsula. Major ore minerals, magnetite, scheelite, molybdenite and chalcopyrite, together with base-metal sulfides and minor sulfosalts, occur in fissure-filling tourmaline, quartz and carbonates veins contained within Cretaceous sedimentary and volcanic rocks and/or granodiorite (118±3.0 Ma). The ore and gangue mineral paragenesis can be divided into three distinct stages: Stage I, tourmaline+quartz+Fe-Cu ore mineralization; Stage II, quartz+sulfides+sulfosalts+carbonates; Stage III, barren calcite. Earliest fluids are recorded in stage I and early portions of stage II veins as hypersaline (35~70 equiv. wt.% NaCl+KCl) and vapor-rich inclusions which homogenize from ~300°C to ≥500°C. The high-salinity fluids are complex chloride brines with significant concentrations of sodium, potassium, iron, copper, and sulfur, though sulfide minerals are not associated with the early mineral assemblage produced by this fluid. Later solutions circulated through newly formed fractures and reopened veins, and are recorded as lower-salinity(less than ~20 equiv. wt.% NaCl) fluid inclusions which homogenize primarily from ~200 to 400°C. The oxygen and hydrogen isotopic compositions of fluid in the Haman-Gunbuk hydrothermal system represents a progressive shift from magmatic-hydrothermal dominance during early mineralization stage toward meteoric-hydrothermal dominance during late mineralization stage. The earliest hydrothermal fluids to circulate within the granodiorite stock localizing the ore body at Haman-Gunbuk could have exsolved from the crystallizing magma and unmixed into hypersaline liquid and H₂O-NaCl vapor. As these magmatic fluids moved through fractures, tourmaline and early Fe, W, Mo, Cu ore mineralization occurred without concomitant deposition of other sulfides and sulfosalts. Later solutions of dominantly meteoric origin progressively formed hypogene copper and base-metal sulfides, and sulfosalt mineralization.

Key words : The Haman-Gunbuk area, copper mineralization, fluid inclusion, stable isotope

함안-군북 광화대는 한반도 남동부의 백악기 경상분지내에 위치해있다. 자철석, 회중석, 휘수연석, 황동석의 주광석 광물과 천금속 및 소량의 황염광물이 백악기 퇴적암, 화산암, 화강섬록암(118±3.0 Ma)내에 발달된 열극을 충전한 전기석, 석영 및 탄산염맥내에서 산출된다. 광석 및 맥석광물들은 세 개의 광화시기로 구분될 수 있다: 광화 1기, 전기석+석영+철-동광석; 광화 2기, 석영+황화광물+황염광물+탄산염광물; 광화 3기, barren한 방해석. 광화 1기 및 2기의 초기 유체는 고염농도(35~70 equiv. wt.% NaCl+KCl)이며, 기상이 풍부하고 약 300~500°C의 온도에서 균질화되었다. 비록 황화물 광물이 상기유체에 의해 생성된 초기광물조합과 연관성이 없을지라도, 고염농도의 유체는 상당량의 나트륨, 칼륨, 철, 동, 황을 함유하는 염화물복합체 염수로 사료된다. 후기 용액은 새롭게 생성된 열극 및 맥을 따라 순환되었으며, 낮은 염농도(≤20 equiv. wt.% NaCl)이며 약 200~400°C에서 균질화되었다. 함안-군북 열수계 유체의 산소-수소 동위원소조성은 광화초기에는 마그마성 열수의 특징을 보이다가 점차 광화후기로 가면서 순환수성

*Corresponding author: chheo@npa.or.kr

열수의 특징을 보여주고 있다. 함안-군북지역의 광체가 부존된 화강섬록암내에서 순환하고 있는 초기 열수성유체는 정출마그마에서 용리된후 고염농도의 액상을 함유한 유체와 H₂O-NaCl계의 기상을 함유한 유체로 불혼화되었다. 상기 마그마유체가 열극을 따라 이동하면서, 다른 황화광물과 황염광물의 침전없이 전기석 및 초기 철, 텅스텐, 몰리브덴, 동 광화작용을 유발시켰다. 순환수기원의 후기광화용액은 동과 천금속 황화물, 황염광화작용을 촉발시켰다.

주요어 : 함안-군북지역, 동광화작용, 유체포유물, 안정동위원소

1. 서 론

한반도의 대부분의 합동 맥상광상은 백악기 화강암질 마그마작용과 밀접하게 연관되어 있으며(Sillitoe, 1980; Sato *et al.*, 1981; Jin *et al.*, 1982; So *et al.*, 1985; Choi *et al.*, 1994), 경상분지 남동부의 경남광화대에 밀접하여 부존하고 있다. 함안-군북 동 광화대는 경상남도의 주요 동광화대중의 하나이다. 경상남도의 함안-군북지역 합동열수광상에 대한 정밀한 광물학적 연구, 유체조성 및 진화연구에서 공간적으로 차이를 보여주고 있음이 밝혀졌으며, 이는 함안-군북지역내 열수유체의 기원 및 진화양상이 모암 및 화강암질 마그마작용의 차이로 인해 시·공간적으로 변화했음을 지시한다. Sillitoe(1980)는 경상남도에서 반암동 유형의 광화작용을 보고한바 있다.

함안-군북 지역에는 철산화물, 천금속과 황염광물을 수반한 전기석, 석영 및 탄산염광물을 배태하는 열극충진형의 합동열수광상이 많이 분포되어있다. 대표적인 광상은 군북, 제일군북, 함안 광산들이 있으며, 본 연구의 주요목적은 유체포유물과 안정동위원소연구에 근거하여 함안-군북지역의 합동 광화작용의 특성과 동침전의 물리화학적 조건을 규명하는데 있다.

2. 지질개요

서울에서 남동쪽으로 약 390 km에 위치한 경상남도 함안-군북지역은 경상분지 남서연변부를 따라 위치해 있다(Fig. 1). 본 지역의 지질은 하부로부터 백악기 중기 하양층군 진동층의 퇴적암, 백악기 후기 유천층군의 안산암, 화강섬록암등으로 구성되어있다(Fig. 1).

경상누층군의 백악기 하양층군의 암석들은 소수의 협재된 화산암을 수반한 퇴적암으로 구성되어있다. 진동층은 하양층군의 상부에 해당되며 층후는 약 1,500 m이고 주로 암회색의 셰일, 이암, 사암으로 구성되어 있다. 진동층의 주향 및 경사는 N15°~45°E 및 5°~20°SE이며 본 광화대에 넓게 분포되어있다. 진동층은 진동 화강섬록암이 관입하고 있으며, 화강섬록암에 인

접해 있는 퇴적암은, 대개 셰일과 이암인데, 호온펠스로 심하게 변성되어있다.

유천층군은 2,000~3,000 m의 층후를 보이는 화산암 및 퇴적암으로 구성되어있으며, 하부의 하양층군과 비교할 때 화산암의 산출이 특징적이다. 안산암은 본 광화대에서 나타나는 유천층군의 유일한 화산암이며, 진동층의 퇴적암내에 소규모의 관입암(또는 분출암)으로 발견된다.

화강섬록암은 본 광화대에서 열수계와 성인적으로 관련되어 있는 것으로 추정되며, 진동화강암의 분화산물로 사료된다. 경상분지 남부의 진동화강암은 화강섬록암, 각섬석 화강암, 흑운모 화강암, 화강반암의 다양한 조성을 갖는 백악기 불국사 화강암의 가장 오래된 심성암으로 여겨지고 있다(Lee, 1972). 본 광화대에서 산출하고 있는 소규모의 암주는 주로 중립질 화강섬록암이다. Park *et al.*(1985)의 정밀한 광물조성연구결과, 상기 화강섬록암은 반려암, 석영 섬록암, 화강섬록암

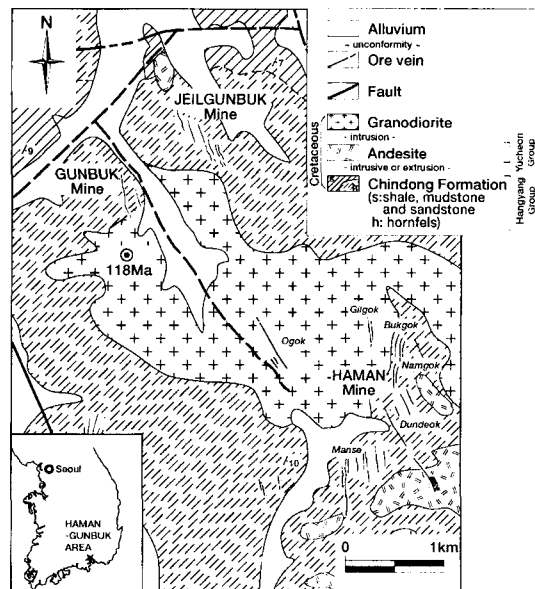


Fig. 1. Geological map of the Haman-Gunbuk area. Italic capitals represent the name of the deposits in the Haman mine.

Table 1. Rb-Sr data of specimen from the Haman-Gunbuk Cu area (see Fig. 1 for locality)

Rb-Sr data two-point isochrons								
Sample no.	Description	⁸⁶ Sr(ppm)	⁸⁷ Rb(ppm)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	Isochron slope(10 ⁻³)	Parameters intercept	Date (Ma±1σ)
GB-1	Granodiorite whole-rock	59.6	2.300	0.7137	0.0381	1.68(4)	0.7136(4)	118.0±3.0
	biotite	3.193	79.0	0.7547	24.43			

로 세분될 수 있다. 상기 화강섬록암은 소량의 휘석, 녹니석, 스피넬, 전기석, 인회석, 저어콘, 금홍석, 자철석, 황철석을 수반하며 주로 사장석, 정장석, 석영, 각섬석 및 흑운모로 구성되어있다. 상기 화강섬록암은 전암 루비듐-스트론튬 연령이 118±3.0 Ma이다(Table 1). 본 광화대의 북쪽에서 산출하는 퇴적암과 화강섬록암을 백악기의 엽기성 및 산성 암맥들이 관입하고 있다.

3. 광 맥

함안-군북지역에는 단층전단대의 열극을 충전한 수많은 함동 석영 및 방해석맥이 부존되어 있으며, 단층의 주향은 대략 N-S와 NW-SE이며 드물게 NE-SW방향도 관찰된다. 맥은 경사방향에 따라 두가지로 구분되는데, 하나는 경사가 50°~85°W(군북 및 제일군북광산, 함안광산의 오펜광상)이며 다른 하나는 경사가 70~85°E이다. 비록 일부 맥들이 화강섬록암내에서 산출되지만(오펜 및 길곡광상), 대부분의 맥들은 광화대 중심부의 화강섬록암 주변의 퇴적암내에 발달되어있다.

맥의 폭은 <1 cm~>150 cm로 변화하며, 주향 및 경사방향에 따라 반복된 팽윤구조를 보이면서 수백 m 연장되어있다. 맥은 주로 전기석, 회색내지 우유빛 석영으로 구성되어있으며 철산화물, 천금속 황화물, 황염 광물, 탄산염광물을 수반하고 있다. 맥내 광석은 괴상이며, 각력화되어있고 호상구조를 이루고 있다. 철산화물과 전기석은 주로 맥의 상반 또는 하반에서 괴상띠로 산출된다.

맥들은 대개 유사한 광물조성과 공생관계를 나타내나, 화강섬록암으로부터의 거리에 따라 대상분포를 보이는 경향이 있다. 전기석과 규산염광물을 수반한 철산화물은 화강섬록암 가까이에서 발달하는 맥내에 다량 산출된다. 화강섬록암으로부터 거리가 멀어지면서 전기석과 규산염광물을 수반한 철산화물은 감소하며 황화물과 탄산염광물은 증가하는 경향이 있다. Moon *et al.* (1970)은 본 광화대의 맥들을 네가지 유형으로 구분했는데, 제 1유형은 자류철석-유비철석-황동석맥, 제 2유형은 방해석-회중석-황동석맥, 제 3유형은 황철석-자

철석-황동석맥, 제 4유형은 전기석-황동석맥이다.

4. 광물공생관계

함안-군북지역내 모든 광체의 광물상은 복잡하다. 전기석, 석영, 탄산염광물, 철산화물, 황화물, 황염광물은 열극을 충전하면서 산출된다. 황동석이 황화광물중에서 가장 풍부하며 황철석, 유비철석, 자류철석, 백철석, 섬아연석, 방연석이 소량의 에렉트럼, 사면동석, 자연비스무스, 농홍은석, 휘동석, 침철석을 수반하며 산출되고 있다. 백철석과 침철석을 제외한 모든 광물들은 초생기원으로 사료된다. 본 지역 광화작용의 특징은 맥들이 괴상, 각력상, 호상조직을 보인다는 것이며, 이 조직들이 혼합되어 복잡한 구조를 보이기도 한다.

절단관계 및 각력화작용등의 맥의 조직적 특성을 바탕으로, 광물공생관계는 세 개의 광화시기로 구분될 수 있다: 광화 1기, 전기석-철산화물; 광화 2기, 주된 황화물 광화작용; 광화 3기, 貧(barren)한 방해석. 군북, 제일군북 광산, 그리고 함안광산의 오펜, 길곡, 남곡 광상에서 3개의 광화시기가 가장 잘 관찰된다. 맥상광물의 공생관계는 Fig. 2에 요약되어있다.

4.1. 광화 1기 광화작용

광화 1기는 소량의 황화광물을 수반한 규산염 광물과 철산화광물로 구성되어 있으며, 전기석과 대부분의 적철석 및 자철석이 침전한 “Fe 시기(광화 1기a)”와 소량의 회중석, 휘수연석, 유비철석, 휘코발트석을 수반한 석영, 자철석, 황철석, 황동석의 침전이 특징적인 “Fe-Cu 시기(광화 1기b)”로 세분할 수 있다(Fig. 2). 괴상의 전기석과 석영은 가끔 소량의 회중석을 수반한 호상 철산화광물과 황화광물을 함유하기도 한다. 연속적인 광물띠는 특징적인 광물공생관계를 보여주며, 다음과 같다: 전기석(±황철석); 자철석 광석띠; 전기석+자철석+황철석+황동석; 석영+황동석.

전기석은 일반적으로 괴상이나, 면밀히 관찰하면 맥연변부를 따라 세립질내지 중립질로 관찰되며, 맥중심부로 가면서 점차 조립질이고 자형으로 변한다. 전기

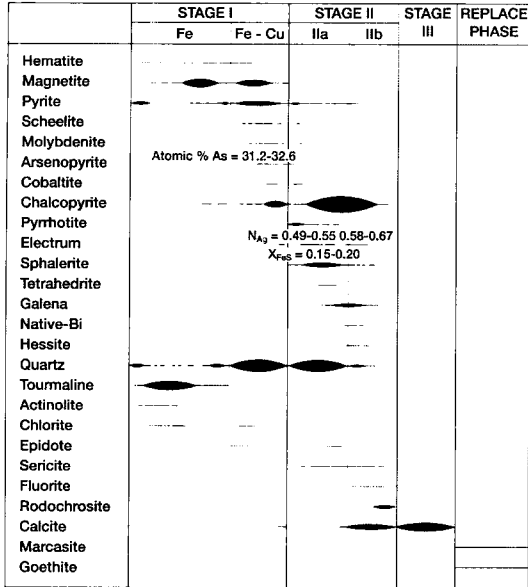


Fig. 2. Generalized paragenetic sequence of minerals from veins of the Haman-Gunbuk area. Width of lines corresponds to relative abundance.

석은 역시 자철석과 황동석과 상호성장상태로 산출되거나 고립된, 산점상의 반자형내지 자형의 입자로 산출된다.

초기 적철석은 자철석내 잔류물로 산출되며 판상 또는 방사상의 침상결정으로 드물게 관찰된다. 자철석은 광화 1기에서 가장 풍부한 광물이다. 초기 자철석은 맥연변부 가까이의 전기석과 상호성장한 과상의 집합체로 산출한다. 후기 자철석은 맥중심부에서 다결정질체로 관찰된다. 과상의 자철석만으로 된 광석미(평균 맥폭 약 2 cm)는 초기와 후기 자철석사이에서 산출한다. 후기 자철석은 맥연변부와 열극을 따라 후기 적철석에 의해서 드물게 치환된 것이 관찰된다. 적철석과 자철석의 연속적인 발달을 보여주는 동심원상의 성장 띠는 후기 자철석-적철석 광화작용에서 드물게 관찰된다.

초기 황철석 입자들은 보통 깨져있고 열극은 전기석 및 자철석에 의해서 드물게 치환되고 있다. 후기 황철석은 자철석의 입자사이의 틈을 충전하고 있으며 후기 자철석 및 다른 황화물과 밀접하게 관련되어있다.

황동석은 산출빈도가 높은 황화물이며 석영과 상호 성장한 과상의 다결정질 집합체로 주로 관찰된다. 황동석은 작은 타형의 집합체로서 중기 내지 후기 자철석내에 불규칙하게 분포하고 있으며 황철석의 열극내에 입자상 집합체로 산출되기도 한다.

회중석은 광화 1기 후기 광화작용동안 산점상으로 분포하며 가끔 전기석 또는 자철석의 열극을 따라 황동석 또는 석영과 상호성장하고 있다. 휘수연석은 광화 1기 후기 광화작용에서 조립질의 판상으로 산출되며, 황철석과 황동석의 열극사이를 충전하기도 한다.

4.2. 광화 2기 광화작용

광화 2기는 경제적으로 가장 중요한 광화작용시기이며 2개의 광화시기로 세분할 수 있다: 천금속(광화 2기 a)시기와 동황화광물+탄산염광물시기(광화 2기 b)(Fig. 2).

광화 2기 a: 이 시기는 황화물 광화작용중 가장 중요한 시기이다. 광화 2기 a의 백색이며 국부적으로 우유 빛의 석영은 드물게 광화 1기맥을 절단하며 초기에 형성된 맥광물의 각력편을 포함하고 있다. 일부 광화 2기 a 광물은 역시 광화 2기 b의 탄산염맥에 의해 절단된다. 황철석은 일반적으로 중립질이며 열극을 따라 황동석 및 섬아연석에 의해 치환되기도 하고 반자형내지 타형의 과상집합체로 산출되기도 한다. 황철석내의 다른 열극은 자유철석과 황동석에 의해서 충전된다. 조립질의 유비철석은 황철석내에서 산출된다. 자유철석은 광석에서 주요한 황화물이며 광화 2기 a의 황동석 및 다른 후기 광석광물을 함유하는 타형입자로 구성된 다결정질의 집합체로 산출된다. 자유철석은 가끔 백철석에 의해 치환되기도 한다. 일부 자유철석은 광화 2기 맥연변부 가까이에서 과상띠로 산출된다. 세립질의 에렉트럼(49~67 atom. % Ag)은 자유철석, 황동석, 섬아연석과 밀접하게 상호성장하여 산출하고 있다. 에렉트럼의 은함량은 광화후기로 가면서 증가하며, 자유철석과 에렉트럼이 공생하는 경우 은함량은 49~55 atom. %, 황동석, 섬아연석과 에렉트럼이 공생하는 경우 은함량은 58~67 atom. %이다. 섬아연석(14.8~20.4 mole% FeS)은 황동석, 방연석, 황철석과 상호성장하여 타형내지 반자형의 입자를 구성한다. 일부 섬아연석은 정향된 황동석 포유물을 함유하기도 한다. 후기 섬아연석은 방연석 및 황염광물과 상호성장하였으며, 황철석 또는 자유철석을 치환하고 있다. 타형의 방연석은 황철석, 자유철석, 황동석 및 섬아연석내에 발달한 열극을 충전하거나 입자경계를 따라 산출하기도 하며 드물게 사면동석을 함유하기도 한다. 자연 비스무스와 헤사이트는 주로 자유철석의 열극을 충전하거나 입자내에서 산출하며 드물게 황동석을 치환하기도 한다.

광화 2기 b: 이 시기는 백색의 방해석, 소량의 형석, 능만간석, 소량의 백색 석영의 산출이 특징적이다. 황동석, 소량의 황화물, 황염광물은 방해석맥에서 산출된

다. 광화 2기b의 방해석과 석영은 광화 2기a 석영의 과도성장상(overgrowth)으로 산출된다. 국지적으로, 광화 2기b의 방해석맥은 광화2기a맥을 절단한다.

4.3. 광화 3기 광화작용

광화 2기b 광화작용이 끝나갈무렵, 구조적인 운동이 재개되면서 더욱 많은 단층작용과 각력화작용이 수반된다. 새로운 열극들은 괴상의 맥석 방해석으로 충전되었다.

5. 유체포유물 연구

광화유체의 조성과 온도의 범위 및 변이를 규명하기 위하여, 함안-군북지역의 3개 광산에서 산출되는 석영 및 방해석의 양면연마박편을 대상으로 Fluid Inc. gas-flow heating/freezing system을 활용하여 가열 및 냉각실험을 수행하였다. 균질화온도 및 최후얼음용융온도의 표준오차는 각각 1.0 와 0.2 이다. 물이 풍부한 포유물에 대한 염농도자료는 H₂O-NaCl계의 냉각점하강에 근거하고 있으며(Potter *et al.*, 1978), 암염을 함유하고 있는 포유물에 대한 염농도자료는 암염용해온도에 근거하고 있다(Sourirajan and Kennedy, 1962; Potter and Clynne, 1978). 암염과 실바이트(sylvite)를 함유하는 포유물의 염농도와 대략적인 조성은 암염과 실바이트의 용해온도를 측정하고 NaCl-KCl-H₂O계 상평형도에 적용하여 도출하였다(Cloke and Kesler, 1979; Roedder, 1984). 가열 및 냉각실험의 결과는 Fig. 3에서 Fig. 6에 도시되어있다.

5.1. 유체포유물의 유형

세가지 유형의 유체포유물이 관찰되었으며, 다음과 같다: 액상이 풍부한 type I 포유물, 기상이 풍부한 type II 포유물 과 암염을 함유한 고염농도의 type III 포유물. 액상 CO₂를 함유한 포유물은 관찰되지 않았다.

Type I 포유물은 실온에서 수용성의 액상 및 기상(대부분 약 20%)으로 구성되어 있고, 가열시 액상으로 균질화한다. 가스수화물은 냉각실험시 형성되지 않는다. 이 유형의 포유물이 조사된 모든 광물중에서 가장 많다.

Type II 포유물은 기상 액상으로 구성되어 있으며, 60%이상이 기상이며 액상은 거의 보이지 않는다. 이들 포유물은 기상으로 균질화하며 광화 1기 및 2기 석영에서 드물게 산출하고, 대부분의 포유물은 너무 작아

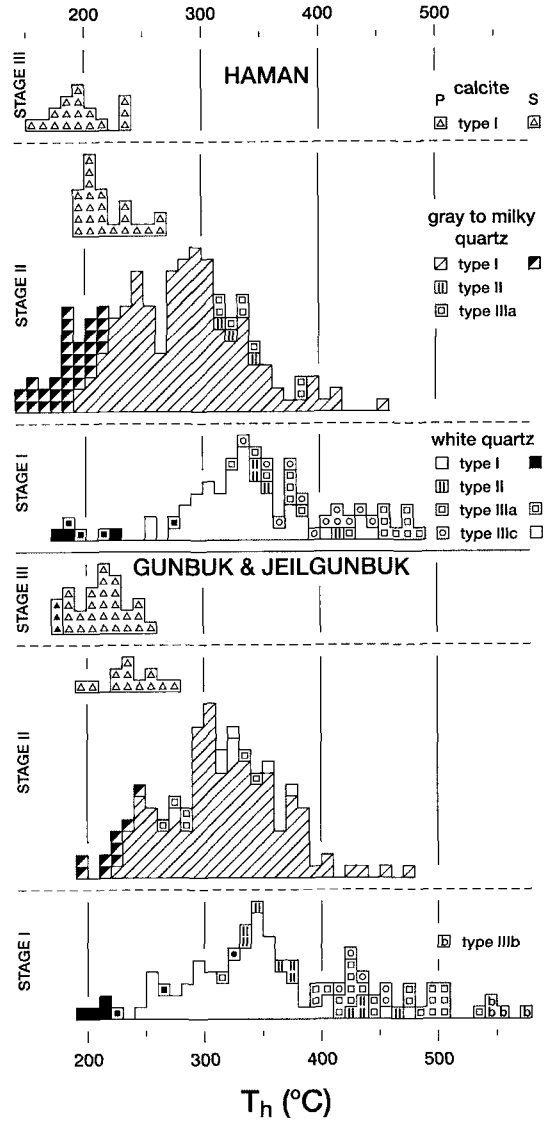


Fig. 3. Frequency diagram of homogenization temperatures of fluid inclusions in vein minerals of the Haman-Gunbuk area. Abbreviations: P=primary and S=secondary.

서 유체포유물연구가 쉽지 않았다.

Type III 포유물은 실온에서 액상+기상+암염+기타 딸광물로 구성되어있다. 이들 포유물은 고립된 포유물 또는 포유물의 군집으로 산출하며, 실바이트의 존재유무와 균질화거동에 근거하여 세가지 유형으로 세분한다. Type IIIa 포유물은 암염+기타 불투명하며 복굴절하는 딸광물을 함유하며, 액상-기상 균질화온도보다 높은 온도에서 암염용해로 균질화한다. Type IIIb 포유물은 type IIIa 포유물과 유사하나, 암염 용해후 기상의

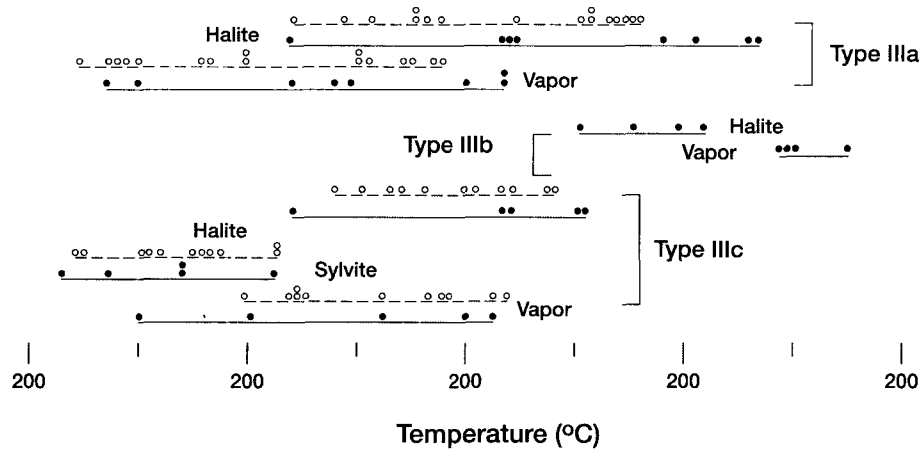


Fig. 4. Phase disappearance temperatures of type IIIa, IIIb and IIIc inclusions in vein minerals from the Haman-Gunbuk area.

소멸에 의해서 액상으로 균질화한다. Type IIIc 포유물은 암염 기타 말광물 이외에 실바이트를 함유한다. 이들 포유물은 실바이트나 기상이 소멸된 후 암염용해에 의해 액상으로 균질화하며, 드물게 기타 고상광물을 포함하고 있다. Type IIIc 포유물의 기상함량은 일반적으로 작다(<20 vol%). 대부분의 type IIIc 포유물은 고립된 포유물 또는 군집으로 산출하며 초생기원으로 사료된다.

5.2. 광화 1기맥의 유체포유물

함안-군북지역의 광화 1기맥은 광석광물과 연관된 백색석영으로 구성되어 있다. 광화 1기 백색석영에서 산출하는 유체포유물의 유형은 type I, type II 및 type III이다.

백색석영의 초생 포유물에 대한 각 유형별 균질화 온도(T_h)는 다음과 같다: type I, 477°~243°C; type II, 461°~332°C; type III, 576°~318°C(Fig. 3). 개별 광산에 대한 균질화온도의 범위도 유사하다: 군북 및 제일군북 광산, type I=477°~243°C, type II=461°~332°C, type III=576°~318°C; 함안광산, type I=443°~252°C, type II=417°~347°C, type III=480°~321°C(Fig. 3).

Type III 포유물은 상변이와 균질화거동에 근거하여 세가지 유형(type IIIa, type IIIb, type IIIc)으로 세분한다(유체포유물의 유형 참고). 암염용해온도(T_{mNaCl}): 군북 및 제일군북 광산, 530°~318°C; 함안광산, 480°~321°C)는 type IIIa 포유물의 균질화온도를 표현하며, 기상소멸온도(T_f): 군북 및 제일군북광산, 417°~234°C; 함안광산, 387°~220°C)보다 더 크다. Type

IIIb 포유물은 암염용해(510°~452°C)후 기상소멸(576°~543°C)에 의해서 액상으로 균질화한다. Type IIIc 포유물은 기상소멸(T_f : 419°~250°C) 또는 실바이트용해(T_{mKCl} =314°~214°C)후 455°~320°C에서 암염소멸(군북 및 제일군북광산, 455°~320°C; 함안광산, 441°~>339°C)에 의해서 균질화한다(Fig. 4).

광화 1기 석영의 초생 type I 포유물의 염농도는 23.1~11.8 wt.% NaCl이다(Fig. 5). 암염을 함유하고 있는 type IIIa 및 IIIb 포유물의 염농도는 각각 59.8~39.0 wt.% NaCl과 57.4~51.2 wt.% NaCl이다. 암염함유포유물에 실바이트가 없다는 것은 KCl의 농도를 12 wt.%까지 제한시킨다(Potter and Clyne, 1978). 암염이외에 실바이트를 함유한 type IIIc 포유물의 염농도는 68~58 wt.% NaCl+KCl로 추정된다(Fig. 5, 6). Type IIIc포유물의 계산된 K/Na비는 0.6~1.2이다. Type IIIc포유물에 대한 NaCl+KCl의 계산된 몰랄농도는 19~24 몰랄이다.

5.3. 광화 2기맥의 유체포유물

광화 2기의 대상광물은 괴상의 회색내지 우유빛 석영과 방해석이다. 광화 2기 석영의 초생포유물은 type I, II, IIIa 포유물을 함유하는 반면 광화 2기 방해석의 초생포유물은 단지 type I포유물뿐이다.

석영의 초생포유물에 대한 각 유형의 균질화온도는 다음과 같다: type I, 474°~197°C(군북 및 제일군북광산, 474°~226°C; 함안광산, 475°~197°C); type II, 370°~313°C(군북 및 제일군북광산, 370°~313°C; 함안광산, 349°~319°C); type IIIa, 385°~269°C(군북 및 제일군북광산, 349°~269°C; 함안광산, 349°~

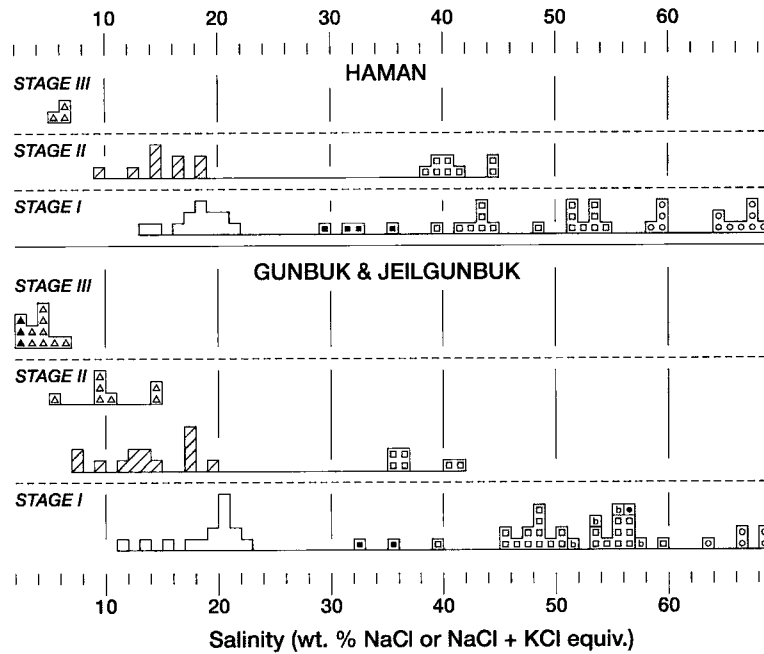


Fig. 5. Frequency diagram of salinities of fluid inclusions in vein minerals of the Haman-Gunbuk area. Symbols are the same as in Fig. 4.

312°C)(Fig. 3). 방해석의 초생포유물은 279~192°C (군북 및 제일군북광산, 279~194°C; 함안광산, 267~192°C).

광화 2기 석영의 초생포유물의 염농도는 다음과 같다: type I, 19.9~7.9 wt.% NaCl; type IIIa, 44.6~35.6 wt.% NaCl(Fig. 5). 광화 2기 방해석의 염농도는 14.2~5.6 wt.% NaCl 이다.

5.4. 광화 3기맥의 유체포유물

광화 3기 방해석은 단지 type I 포유물만을 함유한다. 초생포유물의 균질화온도는 250~159°C 이며(Fig. 3), 염농도는 6.6~3.2 wt.% NaCl이다(Fig. 5).

5.5. 압 력

광화 1기 및 2기 석영에서 기상이 풍부한 type II 유체포유물은 풍부하게 산출하며, 유체의 주기적 비등현상을 지시한다. 광화 1기 석영의 type II 유체포유물의 균질화온도는 461~332°C이다(Fig. 3). 최소 염농도(~15 wt.% NaCl)와 결부된 균질화온도는 약 350~140 bar의 압력을 지시한다(Haas, 1971). 광화 2기 석영의 type II 포유물은 약간 더 낮은 온도(370~313°C)에서 균질화하며 약 180~80 bar의 압력을 지시한다.

Type III 포유물에서 측정된 극히 높은 염농도는 역시 낮은 압력을 지시한다. 화강섬록암의 고상선(700~750°C)근처 온도에서 비등작용에 의해서 >70 wt.% NaCl의 염농도를 포함하는 유체가 생성되기 위해서는 <500 bar의 압력이 요구된다(Bodnar *et al.*, 1985; Chou, 1987). Type IIIc포유물은 실험자료와 잘 부합되지는 않지만, 높은 온도의 유체포유물은 약200~100 bar의 압력을 지시한다(Fig. 6).

유체포유물 자료는 맥형성시의 낮은 압력과 비교적 얇은 심도를 지시하고 있다. 맥형성시 비등현상의 증거는 측정된 균질화온도에 대한 압력보정이 최소화됨을 암시한다. Type I 포유물과 비교해 type III 포유물에서 지시된 약간 더 높은 압력은 초기의 정암압에 가까운 압력조건에서 후기의 정수압조건으로의 변이를 지시한다.

5.6. 온도-염농도에 관한 고찰

맥상광물의 유체포유물은 함안-군북 열수계에서 적어도 3개의 뚜렷한 유체가 존재함을 암시한다. 이들 유체는 고염농도의 염수, 저내지 중염농도의 유체, 저밀도의 기상이 풍부한 유체로 사료된다.

소수의 경우를 제외하고는, type III 포유물은 암염의 용해에 의해서 최종적으로 균질화하며, 대개 넓은

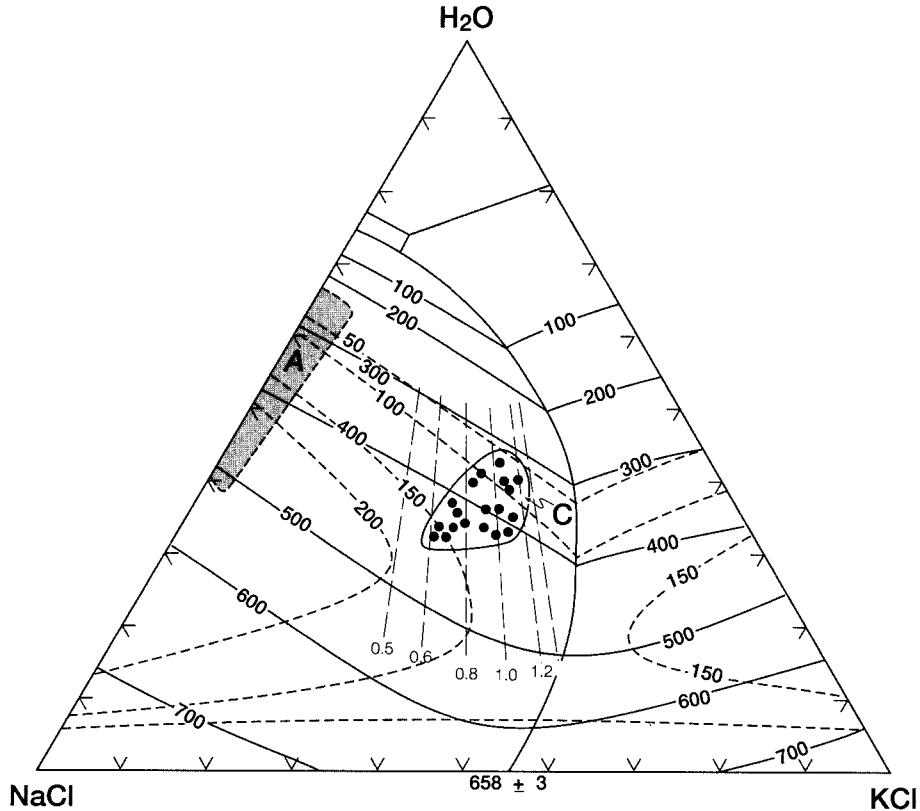


Fig. 6. H₂O-NaCl-KCl phase diagram (in wt.%) showing fields occupied by types IIIa, IIIb, and IIIc inclusion fluids (figure modified from Cloke and Kesler, 1979). Thin solid lines are isotherms and dashed lines are isobars. Dotdash lines projecting to H₂O are lines of constant K/Na (atomic ratio). Field A shows compositional range of type IIIa and IIIb (sylvite-free) inclusions. Field C shows compositional range of type IIIc inclusions.

범위의 온도(약 550°~<300°C)에 걸쳐 발생하고, 약 70~35 wt.% NaCl의 염농도를 지시한다(Fig. 7). 이들 압염으로 포화된 포유물들은 가끔 회석된 유체를 함유하는 type I 포유물과 가깝게 발견되기도 한다. 그리고, type II 포유물은 고염농도의 포유물과 가깝게 발견되지는 않았다. 고염농도 포유물의 압염 균질화온도의 범위가 넓은 것은 Eastoe(1982)가 제안한 것처럼 NaCl 과포화조건을 반영한다고 할수있다. 만일 이것이 사실이라면, 더욱 높은 균질화온도는 포화온도를 과대평가한 것일 수 있으며 실제 유체온도는 충전온도(T_f °C=기상-액상 균질화온도)에 더 가까울 수 있다.

조사된 시료중에는 회석된 수용성의 포유물들이 type III 포유물들보다 더 풍부하나, 이들 포유물들도 역시 약 400°~250°C의 균질화온도 범위를 보여준다. 고온의 기상이 풍부한 포유물이 국지적으로 발견되었다. 이들 포유물들은 전형적으로 type I 포유물과 공존하며 회석된 유체의 간헐적인 비등과 관련된 기상을 표현하

는 것처럼 보인다. 일부 포유물에서 2 wt.% NaCl까지 낮아진 매우 낮은 염농도가 관찰되는 것은 이들 유체들이 순환수기원인 것을 지시한다.

조사지역의 광화 1기 석영(+일부 광화 2기 석영)맥 내의 유체포유물은 고염농도의 유체와 가열된 순환수(때때로 비등작용)가 공존함을 지시한다.

고염농도의 유체에 대해서 가능한 기원은 다음과 같다: 1) 하부 마그마로부터의 용리작용; 2) 덜 짙 유체의 비등작용; 3) 순환수조건에서 증발암의 고온 용해작용. 증발암기원은 해당지역의 층서단면에서 증발암이 없기 때문에 배제하는 것이 타당하다. 덜 짙 유체의 비등작용도 역시 가능하지 않은데, 그 이유는 고염농도 포유물과 밀접하게 관련된 type II 포유물이 일반적으로 부족하고 type III 포유물(type IIIb제외)에서 보이는 균질화 거동때문이다. 대부분의 type IIIb 포유물은 액상-기상 균질화온도보다 약 10°~≥100°C 높은 온도에서 압염의 용해에 의해서 균질화하며, 직접 비등

하는 유체에서 포획되었을리는 없다. 그래서, 마그마로부터의 직접 기원되었다는 것이 가장 타당한 것으로 보인다.

유체포유물의 균질화온도, 포유물 유체의 K/Na비, 포유물을 함유하는 광화 1기 맥상 석영의 산소동위원소비(안정동위원소연구 참고)는 모두 고염농도 유체에 대한 마그마 기원을 지지한다. 실험적인 결과는 화강섬록암질 마그마로부터 용리된 수용성 유체의 K/Na비는 정출작용중 0.25~3.3까지 변한다(Burnham, 1979); 기초사시 계산된 type IIIc의 고온, 고염농도 염수의 비(0.6~1.0, Fig. 6)는 이 범위의 하단부에 놓인다. 350°~320°C (T_f °C=320°~225°C)에서 균질화한 더욱 차가운 고염농도의 포유물은 고온, 고염농도의 포유물에서 존재하는 것과 같은 종류의 탈광물을 포함하며, 두 종류의 유체에서 계산된 K/Na비(더욱 차가운 고염농도의 포유물, 0.8~1.3, Fig. 6)도 유사하다. 이것은 이들 더욱 낮은 온도의 고염농도 유체가 고온, 고염농도 유체가 더욱 차가워진 것으로 간주할 수 있다. 시간에 따라 유체의 K/Na비가 약간 증가하는 것은 마그마의 수용성상의 K/Na비가 마그마가 고화가 진행되면서 뚜렷하게 증가할 수 있다는 것을 지지하는 실험결과(Burnham, 1979)와도 일치한다.

연구지역의 불포화된 유체포유물과 포화된 유체포유

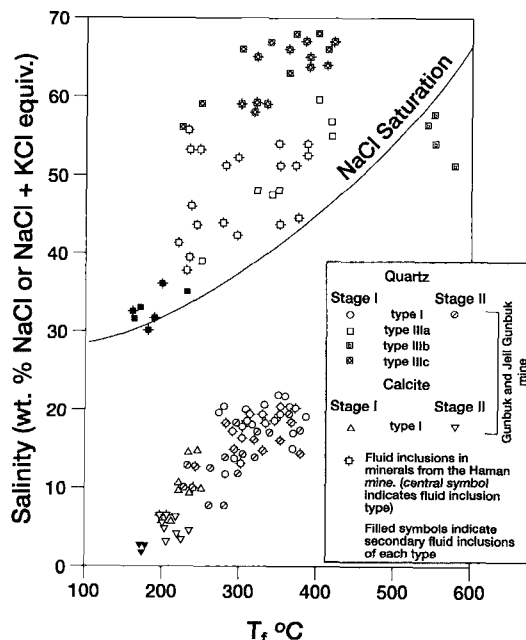


Fig. 7. Filling temperature (T_f) versus salinity diagram for primary and secondary inclusions from the Haman-Gunbuk area. Dashed lines are isobars.

물사이에서 염농도의 커다란 차이가 나타난다(Fig. 7). 유사한 차이가 Eastoe(1978, 1982), Ahmad and Rose(1980), John(1989), Richards and Spooner(1989)에 의해 기록되었으며, Eastoe(1978, 1982), Henley and McNabb(1978), Pitzer and Pabalan(1986)에 의해서 토론되었다. 많은 시료들에서 압염으로 포화된 포유물과 희석된 포유물이 공간적으로 매우 가깝게 산출되거나 유체의 혼합이 뚜렷하게 일어났다는 증거가 부족하다는 것은 두 유체가 점성과 밀도차이에 의해서 분리된 상으로 형성되었다는 것을 지지한다(Turner *et al.*, 1970).

6. 안정동위원소 연구

동광상에서 열수유체의 성분에 대한 기원과 진화를 규명하는데 안정동위원소의 유용성이 많은 연구들을 통해 증명되었다(Ohmoto and Rye, 1979; Sheppard *et al.*, 1971; Rye and Sawkins, 1974; Taylor, 1974; Shelton, 1983; Campbell *et al.*, 1984; So *et al.*, 2002). 본 연구에서는 황화광물의 황동위원소조성, 맥상 광물(석영 및 방해석)의 산소동위원소조성, 석영과 방해석광물에서 추출한 포유물 유체에 대한 수소동위원소조성, 맥상 탄산염광물의 탄소동위원소조성이 조사되었다. McCrea(1950), Grinenko(1950), Hall and Friedman(1963), Rye(1966)가 제시한 추출 및 분석의 표준 기법이 사용되었다. 동위원소자료는 황에 대해서는 Canyon Diablo Troilite(CDT), 산소 및 수소에 대해서는 V-SMOW, 탄소에 대해서는 Pee Dee Belemnite(PDB)를 표준물질로 하여 보고되었으며, 미국 미주리-콜롬비아대학의 안정동위원소 실험실에서 분석되었다. 분석의 표준오차는 탄소, 산소, 황에 대해서는 0.1이며, 수소에 대해서는 $\pm 2\%$ 이다.

6.1. 황동위원소연구

황동위원소 분석은 함안-군북 광화대의 함안, 군북 및 제일군북광산에서 채취한 26개의 황화광물에 대해서 시행되었다(9개 황철석, 8개 황동석, 5개 자류철석, 3개 석아연석, 1개 방연석)(Table 2). 본 지역의 황동위원소값이 2.4~15.7‰로 비교적 넓은 범위를 보이지만, 제일군북광산(8.0~15.7‰)을 제외한 황화물의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 2.4~6.9‰이다.

광화 1기 함안지역의 황철석-황동석쌍은 $\Delta^{34}\text{S}$ 값이 1.3‰로서(Ohmoto and Rye, 1979) 동위원소 분별식에서 $315 \pm 45^\circ\text{C}$ 의 온도가 얻어졌다. 광화 2기중 발달

Table 2. Sulfur isotope data of sulfide minerals from the Haman-Gunbuk mineralized area

Mine	Sample no.	Mineral	Stage	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	$\Delta^{34}\text{S}$ (‰)	T (°C) ¹	T (°C) ²	$\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ (‰) ³	
Haman	HM-1-1	Pyrite	I	6.5	1.3	315±45	315	5.3	
	HM-1-2	Chalcopyrite	I	5.2			315	5.3	
	HM-3	Pyrite	I	6.9			340	5.8	
	HM-21-1	Pyrite	IIa	5.7	1.5	274±45	274	4.4	
	HM-21-2	Chalcopyrite	IIa	4.2			274	4.4	
	HM-5-1	Pyrite	IIa	6.5	0.8	342±55	342	5.4	
	HM-5-2	Pyrrhotite	IIa	5.7			342	5.4	
	HM-33	Pyrrhotite	IIa	6.3			350	6.0	
	HM-23	Pyrrhotite	IIa	4.3			300	4.0	
	HM-31-1	Pyrite	IIb	6.6	1.6	257±45	257	5.2	
	HM-31-2	Chalcopyrite	IIb	5.0			257	5.2	
	HM-34	Pyrite	IIb	5.1			250	3.6	
	Gunbuk	GB-2	Pyrite	I	6.6			340	5.5
		GB-6	Pyrite	IIa	6.6			340	5.5
GB-7		Sphalerite	IIa	5.0			260	4.6	
GB-10		Sphalerite	IIb	5.0	2.6	254±30	254	4.6	
GB-11		Galena	IIb	2.4			254	4.6	
GB-5		Sphalerite	IIb	4.9			240	4.5	
Jeilgunbuk	JG-11-1	Pyrite	I	15.7			340	14.6	
	JG-11-2	Chalcopyrite	I	11.5			320	11.6	
	JG-6-1	Chalcopyrite	IIa	11.3			300	11.5	
	JG-6-2	Chalcopyrite	IIa	12.1			300	12.3	
	JG-1	Pyrrhotite	IIa	11.0			330	10.7	
	JG-21	Pyrrhotite	IIa	8.0			300	7.7	
	JG-14-3	Chalcopyrite	IIb	11.5			250	11.7	
	JG-14	Chalcopyrite	IIb	10.8			250	10.9	

¹Calculated sulfur isotope temperatures using compiled data of Ohmoto and Rye (1979)

²Based on fluid inclusion temperatures and paragenetic constraints and/or sulfur isotope temperatures

³Calculated from the sulfur isotope fractionation equations in Ohmoto and Rye (1979)

된 평형조직을 보이는 광화 2기a의 황철석-황동석, 황철석-자류철석과 광화 2기b의 황철석-황동석, 섬아연석-방연석쌍들의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 각각 1.5와 0.8, 1.6과 2.6‰이며, 342±55°C와 274±45°C, 257±45°C와 254±30°C의 평형동위원소 온도를 나타낸다.

유체포유물자료와 공생관계를 바탕으로 열수유체의 침전온도를 가정하면, H₂S의 계산된 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 3.6~14.6‰이며(Table 2), 제일군북광산의 값을 제외하면 4.0~6.0‰ 범위에 해당한다(Ohmoto and Rye, 1979). 황동위원소 조성의 범위는 함안-군북지역의 열수유체에 기여한 황이 두개의 근원으로부터 유래했음을 지시한다: 1) 6.0‰의 $\delta^{34}\text{S}$ 값을 지닌 것으로 사료되는 인접한 백악기의 화강섬록암(함안-군북광산); 2) ≥10.0‰의 $\delta^{34}\text{S}$ 값을 지닌 것으로 사료되는 퇴적암(제일군북광산).

6.2. 산소 및 탄소 동위원소연구

함안-군북지역의 석영 및 방해석 시료는 다음과 같

은 값을 보여준다: 광화 1기 석영, 10.9~12.4‰; 광화 2기 석영, 11.0‰; 광화 2기 방해석, 8.8~11.6‰; 광화 3기 방해석, 8.1~11.8‰(Table 3). Matsuhisa *et al.*(1979)과 Friedman and O'Neil(1977)의 석영-물과 방해석-물 산소동위원소 분별식과 유체포유물 균질화온도를 종합하면 광화 1기는 8.9~4.7‰, 광화 2기는 5.1~-0.5‰, 광화 3기는 1.1~4.5‰의 값을 나타낸다.

광화 2기와 3기 방해석의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -5.8~-2.6‰와 -8.0~-6.0‰이다. 이들 탄소동위원소값은 탄소의 기원이 화성기원 또는 잘 혼합된 지각기원이라는 것을 암시하고 있다.

6.3. 수소동위원소연구

파쇄법에 의해서 석영 및 방해석 시료에서 유체포유물의 물이 추출되었으며, 이를 대상으로 수소동위원소 조성이 분석되었다. 초생 유체포유물이 많이 포함된 시

Table 3. Carbon, oxygen and hydrogen isotope data for various minerals and inclusion fluids, Haman-Gunbuk mineralized area

Mine	Sample no.	Mineral	Stage	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	T(°C) ¹⁾	$\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}(\text{‰})$ ²⁾	$\delta\text{D}_{\text{water}}(\text{‰})$
Haman	HM-8	Quartz	I		12.4	430~360	8.9~ 7.4	-68
	HM-7	Quartz	I		10.9	370~320	6.1~ 4.7	-72
	HM-21	Quartz	II		11.0	330~260	5.1~ 2.6	-72
	HN	Calcite	II	-5.8	9.6	240~190	1.9~ -0.5	-74
	HM-6	Calcite	II	-6.0	8.8	180~150	-1.9~ -3.8	
	Hi	Calcite	III	-8.0	11.8	180~150	1.1~ -0.8	-78
	HM-31	Calcite	III	-6.4	8.1	170~150	-3.2~ -4.5	-90
Gunbuk	GB-31	Quartz	I		11.2	480~390	8.7~ 6.9	-68
	GB-8	Calcite	III	-7.4	8.8	200~170	-0.7~ -2.5	
Jeilgunbuk	JG-14	Calcite	II	-2.6	11.6	220~190	3.1~ 1.5	-78

¹⁾Based on fluid inclusion temperatures and paragenetic constraints

²⁾Calculated from the quartz-water oxygen isotope fractionation equations of Matsuhisa *et al.* (1979)

료를 대상으로 선택되었다. 포유물의 물에 대한 D값은 다음과 같다: 광화 1기, -68~-72‰; 광화 2기, -72~-78‰; 광화 3기, -78~-90‰(Table 3).

6.4. 수소 및 산소 동위원소 결과해석

광물공생관계 및 균질화온도와 계산된 $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ 값의 관계를 보면, 광화후기로 갈수록 체계적인 감소현상을 보인다: 광화 1기, ~6.8‰ → 광화 2기, ~2.3‰ → 광화 3기, -2.1‰(Table 3 및 Fig. 8). 광화후기로 가면서 $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ 값의 감소 현상은 함안-군북 열수계에서 순환수 유입량이 점진적으로 증가했음을 지시한다 (Shelton and Lofstrom, 1988).

Fig. 8의 전형적인 수소와 산소 동위원소 다이어그램에 함안-군북광화대를 대상으로 분석되고 계산된 열수 조성을 도시했다. 광화 1기 석영의 자료는 마그마수의 계산된 범위내에 도시되며, 이는 초생 마그마수 또는 마그마온도에서 상당량의 화성암과의 교환반응을 겪은 동위원소조성을 지닌 근원암에서 배출된 물임을 표현한다.

주광화시기인 광화 2기의 석영 및 방해석은 마그마수의 범위를 벗어나 더욱 음(-)의 $\delta^{18}\text{O}$ 와 δD 값을 보여 주고 있다. 이는 마그마수 또는 상당한 교환반응을 겪었던 물과 교환반응을 덜받은 순환수와 혼합에 의해서 야기되었거나, 또는 높은 온도와 낮은 수압비를 지닌 환경의 화성암과 순환수와 교환반응에 의해서 발생했으리라 사료된다. 광화 3기의 자료는 상당한 교환반응을 겪었던 순환수와 교환반응을 겪지 않았던 순환수와 혼합 또는 순환수와 높은 온도와 높은 수압비를 지닌 환경의 화성암과의 교환반응이 발생했음을 지시한다. 혼합 또는 교환모델을 사용한 결과, 함안-군북 열수계의 유체의 동위원소 조성은 광화 1기의 마그마

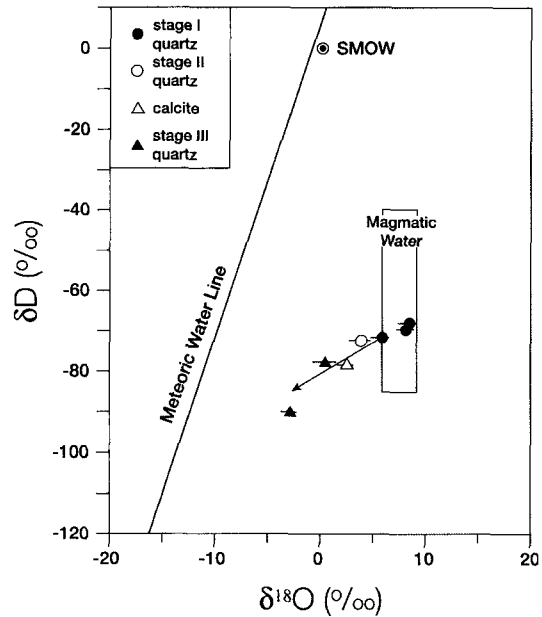


Fig. 8. Plot of hydrogen versus oxygen isotope compositions showing stable isotope systematics of hydrothermal fluid compositions in the Haman-Gumbuk area. Meteoric water line (MWL) from Craig (1961); magmatic water box from Taylor (1974). Line with symbol represents the range of $\delta^{18}\text{O}$ value combined with equilibrium temperature range.

수가 지배적인 열수환경에서 광화 2기 및 3기의 순환수가 지배적인 열수환경으로의 점진적인 변이를 겪었음을 알수있다.

사 사

이 연구는 고려대학교 선도기초과학연구실(천부지린

환경연구실), 고려대학교 전략광물자원연구센터, 한국 과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00407-0)의 재정적 지원에 의해서 수행되었으며, 이 논문에 대한 세심한 심사와 건설적인 조언을 해주신 이화여자대학교 김규환 교수님과 익명의 심사위원님께 감사드립니다.

참고문헌

- Ahmad, S.N. and Rose, A.W. (1980) Fluid inclusions in porphyry and skarn ore at Santa Rita, New Mexico. *Econ. Geol.* v. 75, p. 229-250.
- Bodnar, R.J., Burnham, C.W. and Sterner, S.M. (1985) Synthetic fluid inclusions in natural quartz. III. Determination of phase equilibrium properties in the system H₂O-NaCl to 1000 and 1500bars. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 49, p. 1861-1873.
- Burnham, C.W. (1979) Magmas and hydrothermal fluids. in Barnes, H.L. (ed.) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*: New York, Wiley Intersci., p. 71-136.
- Campbell A.R., Rye, D.M., and Petersen, U. (1984) A hydrogen and oxygen isotope study of the San Cristobal mine, Peru: Implications of the role of water to rock ratio for the genesis of wolframite deposits. *Econ. Geol.* v. 79, p. 1818-1832.
- Choi, S.H., So, C.S., Kweon, S.H., and Choi, K.J. (1994) The geochemistry of copper-bearing hydrothermal vein deposits in Goseong mining district (Samsan area), Gyeongsang basin Korea. *Econ. Environ. Geol.* v. 27, p. 147-160.
- Chou, I.M. (1987) Phase relations in the system NaCl-KCl-H₂O. III: Solubilities of halite in vapor-saturated liquids above 445 and redetermination of phase equilibrium properties in the system NaCl-H₂O to 1000 and 1500bars. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 51, p. 1965-1975.
- Cloke, P.L. and Kesler, S.E. (1979) The halite trend in hydrothermal solutions. *Econ. Geol.* v. 74, p. 1823-1831.
- Eastoe, C.J. (1982) Physics and chemistry of the hydrothermal system at the Panguna porphyry copper deposit, Bougainville, Papua New Guinea. *Economic Geol.* v. 77, p. 127-153.
- Eastoe, C.J. (1978) A fluid inclusion study of the Panguna porphyry copper deposit, Bougainville, Papua New Guinea. *Econ. Geol.* v. 73, p. 721-748.
- Fournier, R.O. and Truesdell, A.H. (1973) An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 73, p. 1255-1275.
- Friedman, I. and O'Neil, J.R. (1977) Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest. U. S. Geol. Sur. Prof. Paper v. 440KK, p. KK1-KK12.
- Grinenko, V.A. (1962) Preparation of sulfur dioxide for isotopic analysis. *Zeit. Neorgan. Khimii*, v. 7, p. 2478-2483.
- Hall, W.E., and Friedman, I. (1963) Composition of fluid inclusions, Cave-in-Rock fluorite district, Illinois and Upper Mississippi Valley zinc-lead district. *Econ. Geol.* v. 58, p. 886-911.
- Hass, J.L.Jr. (1971) The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Econ. Geol.* v. 66, p. 940-946.
- Henley R.W. and McNabb, A. (1978) Magmatic vapor plumes and ground-water interaction in porphyry copper emplacement. *Econ. Geol.* v. 73, p. 120.
- John, D.A. (1989) Evolution of hydrothermal fluids in the Park Premier Stock, Central Wasatch Mountains, Utah. *Econ. Geol.* v. 84, p. 386-409.
- Jin, M.S., Lee, S.M., Lee, J.S. and Kim, S.J. (1982) Lithochemistry of the Cretaceous granitoids with relation to the metallic ore deposits in Southern Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 18, p. 119-131.
- Lee, S.M. (1972) Granites and mineralization in Gyeongsang basin. *Memoirs in Celebration of 60th Birthday of Prof. C.M. Son*, Seoul Natl. Univ., p. 195-219.
- Matsuhisa, Y., Goldsmith, J.R. and Clayton, R.N. (1979) Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-anorthitewater. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 43, p. 1131-1140.
- McCrea, J.M. (1950) The isotope chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. *Jour. Chem. Phys.* v. 18, p. 849-857.
- Moon, C.U., Kim, M.W., Lee, J.H. and Choi, C.J. (1970) Geology and ore deposits in the Haman-Kunbuk copper district. *Jour. Kor. Inst. Min. Geol.* v. 3, p. 55-122.
- Ohmoto, H. and Rye, R.O. (1979) Isotopes of sulfur and carbon, in Barnes, H.L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York, Wiley Intersci., p. 509-567.
- Park, H.I., Choi, S.W., Jang, H.W. and Chae, D.H. (1985) Copper mineralization at Haman-Gunbuk mining district. *Jour. Kor. Inst. Min. Geol.* v. 18, p. 107-124.
- Pitzer, K.S. and Pabalan, R.T. (1986) Thermodynamics of NaCl in steam. *Geoch. Cosmochim. Acta*, v. 50, p. 1445-1454.
- Potter, R.W.III. and Clynne, M.A. (1978) Solubility of highly soluble salts in aqueous media Part 1. NaCl, KCl, CaCl₂, Na₂SO₄ and K₂SO₄ solubilities to 100C. *U. S. Geol. Sur. Jour. Res.* v. 6, p. 701-705.
- Potter, R.W.III., Clynne, M.A. and Brown, D.L. (1978) Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions. *Econ. Geol.* v. 73, p. 284-285.
- Richard, J.P. and Spooner, E.T.C. (1989) Evidence for Cu(Ag) mineralization by magmatic-meteoric fluid mixing in Keweenaw fissure veins, Mamainse Point, Ontario. *Econ. Geol.* v. 84, p. 360-385.
- Roedder, E. (1984) Fluid inclusions. *Rev. Mineral.* v. 12, 644p.
- Rye, R.O. (1966) The carbon, hydrogen, and oxygen isotopic compositions of the hydrothermal fluids responsible for the lead-zinc deposits at Providencia, Zacatecas, Mexico. *Econ. Geol.* v. 61, p. 1399-1427.
- Rye, R.O. and Sawkins, F.J. (1974) Fluid inclusion and stable isotope studies on the Casapalca AgPbZnCu deposit, central Andes, Peru. *Econ. Geol.* v. 69, p. 181-205.
- Sato, K., Shimazaki, H. and Chon, H.T. (1981) Sulfur isotopes of the ore deposits related to felsic magmatism in the southern Korean Peninsula. *Min. Geol.* v. 31, p. 321-326.
- Shelton, K.L. (1983) Composition and origin of ore-forming fluids in a carbonate-hosted porphyry copper and

- skarn deposit: A fluid inclusion and stable isotopic study of Mines Gaspé, Quebec. *Econ. Geol.* v. 73, p. 387-421.
- Shelton, K.L., and Lofstrom, D.M. (1988) Stable isotope and fluid inclusion studies of W-Sn-Ag deposits, Silver Mine district, southeastern Missouri: Tectonic control of water-rock interaction in a magmatic hydrothermal system. in Kisvarsanyi, G., and Grant, S.K., eds., North American conference on tectonic control of ore deposits and the vertical and horizontalexent of ore systems. Proceedings volume: Rolla, Univ. Missouri-Rolla Press, p. 368-377.
- Sheppard, S.M.F., Nielsen, R.L. and Taylor, H.P. (1971) Hydrogen and oxygen isotope ratios in minerals from porphyry copper deposits. *Econ. Geol.* v. 66, p. 515-542.
- Sillitoe, R.H. (1980) Evidence for porphyry-type mineralization in Southern Korea. *Min. Geol. Spec. Issue*, v. 8, p. 205-214.
- So, C.S., Bai-Lu Jin, Yun, S.T., Heo, C.H. and Youm, S.J. (2002) Alteration and mineralization in the Xiaoxinancha porphyry copper deposit, Yanbin, China: Fluid inclusion and sulfur isotope study. *Econ. Environ. Geol.* v. 35, p. 211-220.
- So, C.S., Chi, S.J. and Shelton, K.L. (1985) Cu-bearing hydrothermal vein deposits in the Gyeongsang Basin, Republic of Korea. *Econ. Geol.* v. 80, p. 43-56.
- Sourirajan, S. and Kennedy, G.C. (1962) The system H₂O-NaCl at elevated temperatures and pressures. *Ame. Jour. Sci.* v. 260, p. 115-141.
- Taylor, H.P., Jr. (1974) The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. *Econ. Geol.* v. 69, p. 843-883.
- Turner, J.S., Shirtcliffe, T.G.L. and Brewer, P.G. (1970) Elemental variations of transport coefficients across density interfaces in multiple-diffusive system. *Nature*, v. 228, p. 1083-1084.

2003년 3월 31일접수일자, 2003년 4월 23일 게재승인.