

남산 금-은광산의 유체포유물 및 안정동위원소 연구

김세현* · 최상훈**

Studies on Fluid Inclusion and Stable Isotope of the Namsan Gold-Silver Mine

Se-Hyun Kim* and Sang-Hoon Choi**

ABSTRACT : Electrum-sulfide minerals of the Namsan Au-Ag mine were deposited in two stages of quartz and calcite veins that fill fault planes in Mesozoic granitic rocks (230~155 Ma). The K/Ar radiometric dating of hydrothermal sericite indicates that mineralization is early Cretaceous age (127 ± 3.0 Ma). Mineralogic, fluid inclusion and sulfur isotopic data show that ore minerals were deposited at temperatures between 340°C and 200°C from fluid with salinities of 3 to 6 equiv. wt % NaCl. Evidence of fluid boiling (and CO₂ effervescence) indicates a maximum pressures of 100 bars. The formation temperature and f_{s_2} of Au-mineralization from the Namsan mines are mainly 280~230°C, and 10^{-11} ~ 10^{-13} atm, respectively. Au deposition was likely a result of boiling caused to chemical change (pH, f_{O_2} , $\Sigma_{H_2S^{n-}}$) of ore-fluids. Sulfur isotope composition of sulfide minerals ($\delta^{34}S=5.1$ to 8.2‰) are consistent with $\delta^{34}S_{H_2S}$ value of +6 to +7‰, suggesting an igneous source of sulfur partially mixed with wall-rock sulfur.

序 言

남산광산은 한반도 선캄브리아기의 경기변성대내 변성 암류를 관입 산출하는 북운모화강암내에 발달된 NW계의 열극을 충진한 합금은 열수맥상광상으로 충청남도 공주군 탄천면 남산리에 위치한다. 광상은 안경맥, 사당맥, 홍성맥, 팔매맥 등 4개의 주요맥과 주변에 발달된 소규모맥 등 수개조의 합금은 석영맥으로 구성된다. 과거 소규모로 개발되다가 1985년 광업권이 이전되어 1일 50톤 규모의 선광장이 가설되어 1990년까지 개발되어 왔으나 그 이후 현재까지 휴광중에 있다. 본 광상 속금銀石英脈의 平均品位는 金이 20.6 ppm, 銀의 경우는 79.6 ppm이다. 안경맥은 Au, Ag, As의 平均品位가 각각 35.0 ppm, 266 ppm, 2.5 wt %이며, 사당맥은 <0.4 ppm Au, <1.6 ppm Ag, <

0.7 wt % As이고 홍성맥은 <22.7 ppm Au, <25 ppm Ag, <0.05 wt % As이다. 그 외 팔매맥의 품위는 <0.6 ppm Au, <17 ppm Ag, <0.04 wt % As이다. (대한광업진흥공사, 1987). 남산 광상의 Au/Ag의 비는 약 0.13~1.0으로 한반도 금은 광상의 분류중 Korean-Type에 해당하는 Au/Ag비값을 보여준다 (소칠섭 등, 1988). 본 광상 주변지질에 대하여는 공주지질도폭 및 설명서 (김서운 등, 1976) 와 논산지질도폭 및 설명서 (장태우 등, 1989) 가 발간되어 있으며, 주변 타 열수 금은 광상에 대한 연구로는 최선규 (1988, 1989), 소칠섭 등 (1988), 김세현 등 (1993) 등에 의한 연구가 일부 보고 되어 있으나, 남산광상의 합금은광물의 산상과 화학조성 및 광화작용에 대한 지화학적 특징등은 아직까지 연구되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 남산광상의 금-은광물을 비롯한 조성광물에 대한 광물의 산출상태, 공생관계, 화학조성등 광물학적 연구와 함께 유체포유물 실험 연구, 모암의 변질 특성등을 검토함으로써 광상내 금은광화작용의 생성환경을 고찰하고자 한다.

* 상지대학교 자원공학과 (Department of mineral and mining engineering, Sangji University, Wonju, 220-702, Korea)

** 전략광물자원연구센터 (Center for Mineral Resources Research, Korea Univ., Seoul, 136-701)

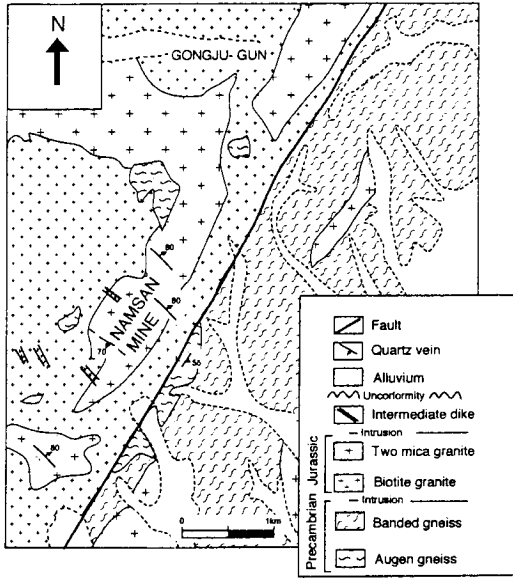


Fig. 1. Geological map of the Namsan Au-Ag mine.

地質概要

南山鑛山 주변 地質은 선캠브리아기의 片麻岩類와 후기에 이를 관입하거나 단층접촉하는 中生代 花崗岩類로 대별된다 (Fig. 1). 片麻岩類는 주로 眼球狀 片麻岩이며 광상 남동부 단층접촉부 주변에 소규모로 분포된 縞狀片麻岩으로 구성된다. NE방향으로 帶狀分布하는 眼球狀 片麻岩은 주로 石英, 長石, 黑雲母로 구성된 조립질 岩石이며, 眼球狀의 斜長石 變晶은 地域에 따라 크기가 다양하나 최대 2.5 cm의 장경을 갖는다. 縞狀片麻岩과의 접촉부는 漸移的인 곳도 있다. 縞狀片麻岩은 대체로 雲母片岩層을 挾在하고 있으나 Pelitic과 Psammitic부분이 호층으로 교호하고 있다. 특히 花崗岩類의 접촉부에서는 소규모 捕獲岩으로 산출되며, 흔히 roof-pendent狀으로 花崗岩類內에 分布되기도 한다 (Fig. 1). 片麻岩類들은 대체로 주향이 N20°~35°E, 경사는 30~60° SE이다.

火成貫入岩體는 底盤狀의 주라기 혹은 中 代 花 崗 岩 類 捕 獲 岩 을 含 有 하 는 復 合 中 代 花 崗 岩 이 다. 復 合 中 代 花 崗 岩 은 一 般 的 中 粒 的 粒 狀 組 織 을 갖 으 나, 地 域 에 따 라 거 정 질 사 장 석 반 정 (<2.5 cm)을 보이기도 한다. 片麻岩과의 접촉부로 갈수록 黑雲母의 定向 配列이 뚜렷하다. 副 成 分 광 물 로 는 白 雲 母, 綠 閃 石, 硬 水 雲 母 등 이 산 출 되 고 사 장 석 은 미 크 메 카 이 트 조 직 을 보 이 는 다. 담 회 색 의 複 雜 雲 母 花 崗 岩 은 中 粒 내 지 세 립 의 입 상 조 직 을 보 이 며, 有

色 鑛 物 은 거 의 黑 雲 母 이 나 含 量 은 2 vol.% 미 만 이 다. 본 암 은 復 合 中 代 花 崗 岩 과 片 麻 岩 類 를 암 주 상 으 로 도 처 에 관 입 하 고 있 으 며 復 合 中 代 花 崗 岩 과 비 교 하 여 더 많 은 片 麻 岩 의 捕 獲 岩 을 含 有 하 며, 斷 層 熱 隙 面 에 含 金 銀 熱 水 石 英 脈 진 이 충 진 되 어 있 다. 地 域 내 花 崗 岩 類 를 관 입 산 출 하 는 암 맥 들 은 주 로 中 性 岩 脈 으 로 N30~50° W 의 주 향 을 갖 으 며, 一 般 的 中 性 岩 脈 으 로 <500 m 의 연 장 성 이 확 인 된 다.

鑛 床

광상개요

南山鑛床은 中生代 花崗岩類의 단층열극을 충진한 수 개조의 含 金銀熱水石英脈 (안경맥, 사당맥, 흥성맥, 팔매 맥 등)으로 구성되어 있다. 含 金銀熱水石英脈은 주향이 N40~60°W, 경사 50~80°NE 또는 SW이며, 평균 맥폭은 30 cm (최대 맥폭은 70 cm)로 팽창이 심하여 특히 사교하는 斷層 破碎帶에 의해 수차 절단되어 주향, 경사 방향으로 수 m 이동되어 있다.

주요 鑛石鑛物은 金 銀 鑛物을 위시하여 硫砒鐵石, 黃鐵石 등의 硫化鑛物이며, 주로 石 英 脈 內에 副 成 分 또는 散 點 狀 으 로 濃 集 되 어 있 다. 또 한 脈 全 體 를 통 하 여 集 中 狀 으 로 散 點 되 어 있 다. 含 金 銀 石 英 脈 內 主 鑛 石 鑛 物 의 深 度 에 따 른 分 布 는 局 部 的 入 口 으 로 인 하 여 不 均 勻 이 어 려 우 나 鑛 物 共 生 群 의 變 化 를 비 교 적 잘 보 여 주 는 鑛 脈 試 料 의 경 우 脈 의 最 大 深 度 에 서 중 심 부 로 가 면 서 黃 鐵 石 + 硫 砒 鐵 石 → 黃 鐵 石 + 燧 石 + 燧 石 結 晶 + 方 解 石 → 方 解 石 + 含 銀 燧 石 순 으 로 帶 狀 產 出 關 係 를 보 여 주 는 다.

광맥과 접하는 모양은 熱水에 의하여 變質帶가 형성되었으며, 變質帶의 幅은 약 10 cm미만으로 부분적으로는 變質帶가 발달되지 않고 母岩과 뚜렷한 境界部를 보여주는 곳도 있다. 變質作用은 대체로 2유형으로 대별되는데, 즉 Sericitic alteration과 Argillic alteration이다. Sericitic alteration은 石 英 脈 과 母 岩 接 觸 部 에 서 最 小 深 度 (<1 cm)으로 발달되는데 XRD 분석결과 綠雲母, 석영, kaolinite 등이 확인되었다. Argillic alteration은 sericitic alteration zone 외부에서 약 5~10 cm폭을 갖고 발달되는데 연녹색의 beach zone으로 관찰된다. XRD 분석결과 고령토가 주로 산출되며 綠雲母와 미량의 녹니석 등의 산출이 확인된다.

鑛石鑛物의 共生關係

南山鑛床의 鑛化作用은 야외조사와 육안 및 현미경적 조직으로 미루어 2기로 구분되어 진행되었으며, 금은광물

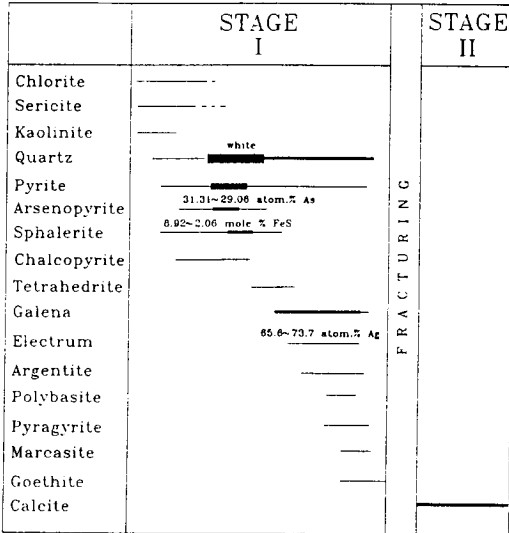


Fig. 2. Generalized paragenetic sequence of minerals from veins and alteration zones of the Namsan Au-Ag mine.

Table 1. Chemical compositions of arsenopyrite from the Namsan Au-Ag mine.

Sample No	Weight %				Atomic %		
	Fe	As	S	Total	Fe	As	S
NS-1	35.11	42.04	22.17	99.33	33.42	29.83	36.76
	34.35	43.70	21.32	99.37	33.01	31.31	35.68
NS-2	35.14	42.57	22.10	99.81	33.35	30.12	36.53
	35.28	42.98	22.47	100.72	33.14	30.10	36.76
NS-5	35.11	41.80	22.66	99.57	33.21	29.47	37.32
	35.14	41.39	23.06	99.59	33.10	29.06	37.83
	34.77	42.24	22.19	99.20	33.14	30.01	36.84
NS-16	34.28	43.38	21.60	99.26	32.89	31.02	36.09
	35.06	43.18	22.39	100.63	33.00	30.29	36.71
	35.17	42.68	21.51	99.36	33.67	30.45	35.87
NS-23	35.00	42.16	21.33	98.49	33.79	30.34	35.87
	34.49	41.93	22.50	98.92	32.87	29.79	37.35
	34.94	43.67	21.29	99.90	33.41	31.13	35.46

을 포함하는 주요 광석광물의 침전은 광화 I기에 석영맥의 형성과 함께 이루어졌으며, 광화 II기에는 鑛石鑛物을 배태되지 않은 방해석맥의 산출 시기이다 (Fig. 2). 第I期鑛化作用 初期에는 硫砷鐵石 + 黃鐵石, 후기에는 閃亞鉛石 + 에렉트럼 + 輝銀石의 共生群을 이루고 있음이 특징이다. 이와같이 鑛化作用이 진행하면서 鑛物共生群의 變化는 鑛物鑛石이 침전하면서 鑛化流體의 물리화학적 환경이 달라지고 있음을 암시하고 있다.

含金銀石英脈내 石英은 우백질로서 조립질 내지 중립질이며, 흔히 정동이 발달하기도 한다. 黃鐵石은 鑛石鑛物中

Table 2. Chemical compositions of sphalerite from the Namsan Au-Ag mine.

Sample No	Weight %			Mole %			Th (°C) ¹⁾
	Fe	Mn	Cd	FeS	MnS	CdS	
NS-1	4.15	0.20	0.20	7.25	0.37	0.26	284 to 330
	5.04	0.19	0.32	8.80	0.35	0.42	
	4.72	0.13	0.17	8.24	0.24	0.22	
NS-17	4.65	0.08	0.21	8.10	0.15	0.27	224 to 276
	3.45	0.07	0.10	6.02	0.13	0.13	
	5.11	0.15	0.21	8.92	0.28	0.27	
NS-36	2.45	0.04	0.17	4.27	0.07	0.22	
	1.90	0.06	0.12	3.31	0.11	0.16	221 to 280
	1.18	0.09	0.08	2.06	0.17	0.10	
NS-39	1.41	0.04	0.06	2.47	0.07	0.08	
	1.99	0.07	0.15	3.47	0.13	0.20	

1) Based on fluid inclusion temperatures

가장 많은량으로 산출되며 주로 自刑 내지 他刑의 結晶 또는 鑛皮상으로 산출된다. 가끔 脈의 주변부에 대상으로 산출되기도 한다. 초기에 정출된 黃鐵石은 거정질이며 대부분 破碎되어 후기의 石英이나 硫化鑛物들에 의하여 充鑛되어 있다. 드물게 黃銅石의 미립자를 함유하기도 한다. 괴상의 硫砷鐵石은 黃鐵石과 함께 脈의 양 가장자리에 帶狀分布하는데, 이들 硫砷鐵石은 EPMA 분석결과는 29.1~31.3 atomic %의 As 함량을 갖는다 (Table 1). 黃銅石은 주로 閃亞鉛石과 共生하며 硫砷鐵石內 불규칙한 破碎面을 따라 細脈으로 充鑛되어 있다. 암갈색의 閃亞鉛石은 조립질의 다결정질로 산출되며, 초기에 정출되는 閃亞鉛石은 주로 黃銅石, 硫砷鐵石과 수반되나 후기 정출된 결정들은 드물게 에렉트럼을 포획하기도 한다. 후기 閃亞鉛石은 黃鐵石의 결정들을 捕獲하고 있으며, 주변부를 따라 黃銅石의 bleb와 용리되어 있다. 특히 에렉트럼, 黃鐵石과 共生하고 있는 閃亞鉛石의 FeS 함량은 2.06~8.92 mole %이다 (Table 2). 斜面銅石은 閃亞鉛石, 黃銅石과 共生하며 드물게 方鉛石內에 둥근미립의 결정으로 용리되어 산출되기도 하며, 方鉛石에 의해 교대된다. 에렉트럼은 후기 정출 광물로서 주로 방해석 및 閃亞鉛石內 미립의 불규칙 또는 구형의 결정으로 함유된다. 특히 초기 정출 광물의 균열이 매우 발달된 곳에 充鑛된 方鉛石의 細脈內에 산출빈도가 높다. 閃亞鉛石과 共生하는 에렉트럼의 EPMA 分析結果 에렉트럼내 Ag 함량은 65.6~73.7 wt % 이다.

含銀 鑛物로는 輝銀石 및 濃紅銀石이 산출되며, 이들은 최후기 정출 광물로서 방연석내에서 주로 정출된다. 輝銀石은 가끔 정동 주변부 石英의 미세한 균열부를 充鑛한 方鉛石內에 黃鐵石과 함께 용리되어 정출된다. 濃紅銀石은 드물게 輝銀石과 共生하기도 하며 閃亞鉛石의 균열부를 充鑛한 방해석내에 반자형의 결정형으로 사면동석과

Table 3. CO₂ mole % and fluid densities of fluid inclusions in quartz from the Namsan Au-Ag mine.

Sample No.	Phase density (gms/cc)			Phase volume(%) at 25°C			Mole %			Fluid density (gms/cc)	
	T°C	LH ₂ O	LCO ₂	VCO ₂	LH ₂ O	LCO ₂	VCO ₂	NaCl	H ₂ O		CO ₂
NS-1	17.9	1.0	0.79	0.18	63	23	14	3	85	12	0.84
NS-5	17.9	1.0	0.79	0.18	55	9	36	4	86	10	0.65
NS-6	19.5	1.0	0.77	0.19	44	49	7	3	69	28	0.83
NS-14	17.9	1.0	0.79	0.18	32	35	32	4	38	58	0.66
NS-18	19.5	1.0	9.77	0.19	48	44	8	3	68	29	0.83
NS-56	19.5	1.0	0.79	0.18	44	27	29	7	47	45	0.56

함께 산출된다.

第 II 期 鑛化作用은 鑛石 鑛物을 배태하지 않은 脈石鑛物인 방해석의 산출시기이다. 우백색의 방해석 맥은 10 cm 미만의 脈幅을 가지며 주로 細脈 (< 2 cm)으로 母岩이나 母岩과 石英脈의 접촉부, 그리고 石英脈의 破碎帶를 따라 充鑛되어 있다.

鑛化作用의 時期

공주광화대 주변에 널리 분포되어 있는 花崗閃綠岩에 대한 Rb/Sr 전암법에 의한 同位元素 연령은 주승환 등 (1982)에 의하여 230±280 Ma로, 復雲母 花崗岩의 경우 K/Ar 법에 의하여 155±23.7 Ma (진명식 등, 1986)로 확인되었다.

鎔金 熱水石英脈은 이 두 花崗岩體의 단층열극에 충전되어 있는데 화강암 모암은 열수변질작용에 의해 장식질은 건운모화작용을 받았다. 남산광상에서 열수변질작용의 산물로 晶出된 세립의 絹雲母를 추출하여 K/Ar 법에 의해 同位元素 연령을 측정한 결과 127±3.0 Ma로 남산광상 鑛化作用의 시기는 초기 백악기에 해당된다.

流體包有物 研究

유체포유물 연구는 南山鑛床의 광화작용과 관련된 유체의 진화와 광물 침전시 온도 및 유체의 화학성 등을 규명하기 위하여 수행되었다. 연구대상 광물은 광상에서 산출되는 석영, 섬아연석, 방해석등 투명 반투명 광물들로서, 금은 광물등 주요 광석광물과 공생관계를 고려 46개의 양면연마박편을 제작 실험하였다. 유체포유물 가열 및 냉각 실험은 Leitz 현미경에 부착한 U.S.G.S Fluid Inc. gas-flow heating-freezing system을 이용하였으며 測定誤差는 加熱實驗時 ±2.0°C (350°C에서), 냉각실험시 ±0.2°C이다. 염농도는 冷却實驗결과를 이용 Potter 등 (1978)이 제시한 H₂O-NaCl 계의 연구 결과에 기초하여 구하였다.

본 광상산 광물내에서 관찰되는 유체포유물은 상온

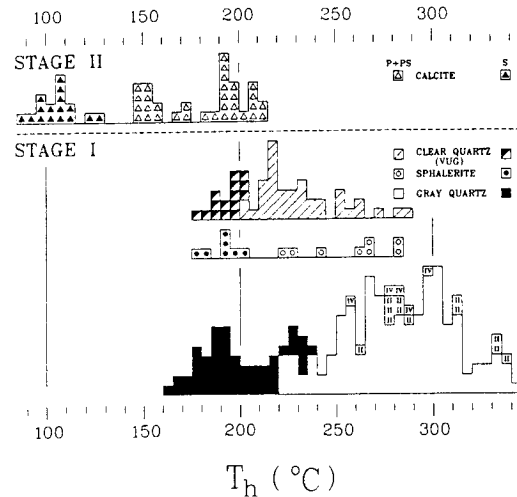


Fig. 3. Frequency diagram of total homogenization of fluid inclusions in vein minerals from the Namsan Au-Ag mine.

(25°C)에서 상의 종류와 충전도 및 가열 냉각실험시 포유물내 각상의 거동등에 의하여 Nash (1972)의 분류중 3가지 유형 (I, II, IV형)으로 분류할 수 있다.

I형: 液相과 氣相으로 구성되며, 液相의 부피는 流體包有物 전체부피의 20~40%로 加熱時 液相으로 均一化 된다. 冷却實驗時 LCO₂나 가스-수화물은 관찰되지 않는다.

II형: 液相과 氣相으로 구성되며 기상의 부피가 包有物 전체부피의 60~80% 차지하고, 加熱實驗時 氣相으로 均一化 된다. II형의 包有物은 일반적으로 negative crystal form이나 타구 형태를 갖는다.

IV형: 液相, 氣相, LCO₂상으로 구성되며 加熱實驗時 液相으로 均一化된다. IV형은 일정한 모양의 구나 타구의 형태를 갖는다.

광화 제 I기에 대한 유체포유물 실험 연구는 석영과 섬아연석을 대상으로 수행되었으며, 석영내에는 I, II, IV형 유체포유물 모두가 산출되나 섬아연석 내에는 I형 유체포

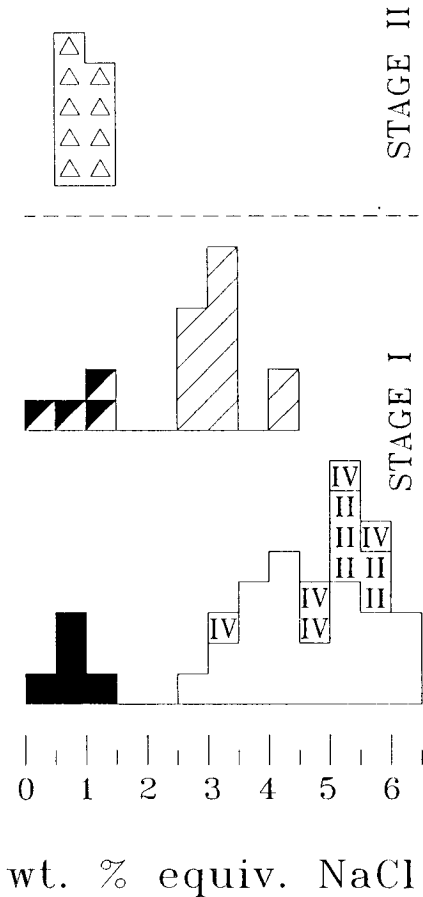


Fig. 4. Frequency diagram of estimated salinities of fluid inclusions in vein quartz from the Namsan Au-Ag mine.

유물만이 관찰된다. 이들 유체포유물의 크기는 최대 30 μm 이며 주로 $\leq 20 \mu\text{m}$ 의 장경을 갖는 것이 우세하게 산출된다.

IV형 流體包有物內 CO_2 含量은 Kelly & Rye (1979)法에 의해 구하였다 (Table 3). 대표적인 6개의 IV형 流體包有物內의 CO_2 含量은 12~58 mole %로 변화가 심하며, 전체 鑛化流體의 밀도는 0.56~0.84 g/cc이다. 대부분의 열수광화유체는 유체의 밀도가 0.5 g/cc보다 약간 높은 값을 갖는데 (Roedder, 1979), 南山鑛床의 鑛化流體는 이 결과와 잘 일치하고 있다.

南山鑛床의 제 I기 광물내 初生 流體包有物의 균일화온도는 341~201°C (석영, 220~341°C; 정동내 후기 석영, 285~201°C; 閃亞鉛石은 283~224°C)이다. 한편 석영내에 산출되는 II형 및 IV형包有物의 균일화온도는 각각 331~262°C, 298~257°C이다.

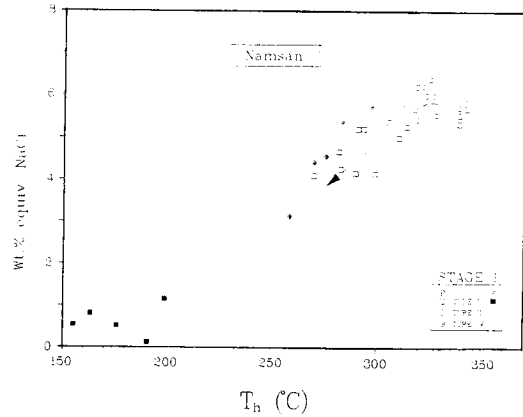


Fig. 5. Total homogenization temperature versus salinity diagram for fluid inclusions in vein quartz from the Namsan Au-Ag mine.

광화 제 II기에 정출된 방해석 내에는 I형 流體包有物만 관찰되며, 214°C에서 142°C의 균일화온도를 갖는다 (Fig. 3). 후생 流體包有物은 128°C 이하에서 균일화 된다.

流體包有物의 鹽濃度 測定은 包有物의 크기가 매우 작아서 제한된 시료에서만 수행되었다. 광화 제 I기 석영과 제II기 방해석을 대상으로 수행된 결과는 제 I기 석영내 初生流體 包有物의 경우 鹽濃度는 6.2~2.9 equiv. wt % NaCl, 제 II기 방해석내 초생유체포유물의 경우 제 I기 후생유체포유물의 염농도 범위값인 0.5~1.4 equiv. wt % NaCl의 값을 갖는다 (Fig. 4).

광화 I기 유체포유물에 대한 균일화온도와 염농도 사이의 상관관계는 초기 (270~350°C) 비등현상에 이은 온도 감소에 따라 염농도의 값이 감소하는 경향을 보여준다 (Fig. 5). 특히 270~290°C 부근에서 비등현상과 온도 감소에 기인된 CO_2 gas의 이탈현상은 급격한 온도 감소를 야기시켰다. 또한 200°C 부근에서 후생유체포유물 염농도 값의 감소가 현저한데 이는 금은광물의 침전등 광화 I기 광화작용을 주도한 남산광상 열수계대로 차갑고 저염농도의 순환천수 유입이 점증함에 따라 열수의 냉각 및 희석작용이 야기되었기 때문이다. 남산광산의 광화 I기 합금은 열수계는 초기 비등현상과 CO_2 gas의 이탈에 의한 냉각과 후기 점증하는 천수의 유입에 의한 냉각 및 희석에 의해 진화하였으며, 이에 수반하는 지화학적 요인의 변화에 의하여 광화작용이 진행되었다.

鑛化作用의 壓力條件

南山鑛床 광화 I기 石英에서 관찰되는 流體包有物중 등

Table 4. Sulfur isotope data of sulfide minerals from the Namsan Au-Ag mine.

Sample No.	Mineral	$\delta^{34}\text{S}(\%)$	$\Delta^{34}\text{S}(\%)$	T(°C) ¹⁾	T(°C) ²⁾	$\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}(\%)^{3)}$	comments
NS-1	pyrite	-6.8			284~330	+5.7	E
NS-6	sphalerite	+7.8	sp-gn			+7.5	
	galena	+5.5	2.2	282±20	254~310	+7.5	L
NS-9	pyrite	+7.3			289~309	+6.0	L
NS-18	pyrite	+6.9			201~243	+5.7	L
NS-22	pyrite	+7.2			312~320	+6.0	L
NS-23	arsenopyrite	+8.2					L
NS-36	sphalerite	+7.7	sp-gn			+7.3	L
	galena	+5.1	2.6	255±19	221~280	+7.3	

Abbreviation: E=Pre Au-(Ag) mineralization substage; L=Au-(Ag) mineralization substage

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

2) Based on fluid inclusion temperatures

3) Calculate H₂S isotope composition based on isotope fractionation of Ohmoto and Rye (1979)

일 시료에서 산출하는 I형과 II형 초생포유물이 상대적으로 높고 유사한 온도범위 (330~270°C)에서 균일화 되는 것은 광화작용 초기 鑛化流體의 비등현상 즉 H₂O-NaCl의 임계곡선 근처에 있음을 지시해 준다. 일반적으로 온도-염농도의 값을 H₂O-NaCl 임계곡선 (Hass, 1971)에 이용하여 鑛化流體의 壓力추정할 수 있으나, Potter, Clynne (1978)는 鑛化流體內 CO₂가 포함되어 있으면 H₂O-NaCl 임계곡선에 의하여 구한 流體의 壓力조건에 대한 문제점을 지적하였다. 따라서 12~58 mole %의 CO₂를 함유하는 남산광상의 광화유체특성상 광화작용시 壓力조건은 H₂O-CO₂의 임계곡선 (Takenouchi, Kennedy, 1964)에 의하여 추정하였다. 南山鑛床의 IV형 流體 包有物의 균일화 온도가 약 300~250°C이고 閃亞鉛石의 균일화 온도는 280~230°C이다. 두 온도범위의 공통온도인 280~250°C가 鑛石鑛物의 주 정출온도라고 가정하여, CO₂ 濃度 (평균 30 mole %)와 함께 H₂O-CO₂ 임계곡선에 적용하면 약 100 bar의 壓力조건에서 초기광화작용의 진행이 이루어졌음을 알 수 있다.

安定同位元素 研究

남산광산의 황화광물을 대상으로 황 동위원소 분석을 수행하였다. SO₂가스는 Grinenko (1962)법에 의해 포집하였고, 포집된 SO₂가스는 Nuclide 질량분석기 (6 inch-60 degree ratio)에 의하여 분석되었다. 표준시료는 Canyon Diablo Triolite (CDT)이며, 실험오차는 ±0.1%이다.

남산광산에서 분석된 9개 시료에 대한 황동위원소값은 황鐵石 6.8~7.3% ; 硫砒鐵石 8.2% ; 方鉛石, 5.1~5.5% ; 閃亞鉛石, 7.7~7.8%이다. 평형상태에서 동시에 정출된

것으로 확인된 섬아연석과 방연석의 황동위원소비값의 차 ($\Delta^{34}\text{S}$ values)는 2.2와 2.6%로서 Ohmoto, Rye (1979)가 제시한 섬아연석-방연석 동위원소 平衡式에 의해 구한 섬아연석-방연석 쌍의 동위원소 평형온도는 282±20°C와 255±19°C로서 이들과 공생관계에 있는 석영 및 섬아연석내 초생포유물의 균일화온도 범위와 잘 일치함을 보여준다.

同位元素 평형온도와 공생관계에 있는 석영 및 섬아연석내 初生流體包有物 균일화온도를 이용하여 각 황화광물과 平衡狀態에 있는 광화유체내 H₂S의 황동위원소 ($\delta^{34}\text{S}$) 값을 Ohmoto, Rye (1979) 평형식에 의하여 구한 값은 Table 4와 같으며 남산광상의 鑛化流體內 H₂S의 $\delta^{34}\text{S}$ 평균값은 +6.0%이다. 한편, 모암변질광물의 共生群은 광화유체의 pH가 약산성임을 지시해주고 있으며, 본 광상내 황산염광물의 부재는 광화작용이 還元 環境하에서 진행되었음을 알려준다. 이러한 환경에서는 유체내 용존된 黃種중 H₂S가 가장 우세하게 된다. 즉 광화유체내 H₂S의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 全黃種 (σS)의 $\delta^{34}\text{S}$ 값으로 간주될 수 있다. 그러므로 남산광상의 鑛化流體內 전 황종의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 +6%에 해당된다.

Schneider (1970)은 알칼리 감람석을 함유하는 玄武岩內 황화물의 평균 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 +1.3±0.5%이라 보고하였고, Kanehiro (1973)은 Mid-Atlantic Ridge의 tholeiitic rock 내 $\delta^{34}\text{S}$ 의 값이 0.3~1.6%임을 밝혔다. Ohmoto, Rye (1979)는 花崗岩質 마그마 (산소분압=-12 atm, 압력=1Kbar, 온도=800°C)에서 流出되는 마그마 수내 전 黃種의 $\delta^{34}\text{S}$ 값이 평균 +4%임을 합성실험에 의하여 규명하였다. 본 광산의 황동위원소 값을 이들 자료와 함께 검토하면 광상내 광화작용에 기여한 황이 주로 火成기원임을 알 수 있

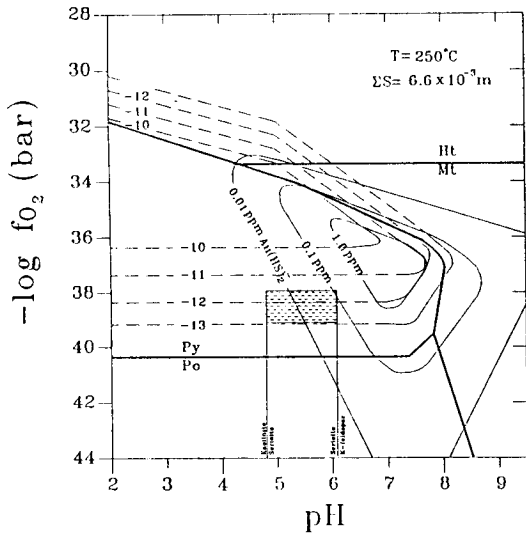


Fig. 8. Loge f_{O_2} -pH diagram showing the depositional environment of gold mineralization at 250°C and $\Delta S=6.6 \times 10^3$.

살펴보면 II형의 初生流體包有物의 균일화온도는 약 350~250°C이며, 따라서 이 온도범위에서 광화유체의 沸騰作用이 있었음을 알려준다. 鑛化流體의 비등작용은 pH, 산소분압, ΣH_2S , ΣCO_2 의 變化를 야기시키며, 이러한 광화유체내 화학적 환경변화는 금속 착이온의 결합을 파괴시켜 금속광물 침전을 야기시킨다 (Drummond, Ohmoto, 1985; Seward, 1984). 鑛化作用 후기로 갈수록 온도와 鹽濃度가 감소함은 광화작용이 진행되면서 천수의 유입이 있었음을 지지하며, 최후기 方解石 晶出時期에는 염농도가 천수의 값에 근접할 정도로 천수 유입의 양이 한층 더 증가하였음을 보여준다.

충청도 일원의 금-은 광상에 대하여 최선규등 (1988)은 광물공생, Au/Ag비, 에렉트럼의 Ag 함량 등을 기준으로 하여 자류철석형 금광상, 황철석형 금광상, 휘은석형 금-은 광상, 안티몬형 금-은광상등의 5유형으로 분류하였고, So & Shelton (1988)은 국내 금-은광상을 鑛化時期, 鑛化深度, 生成溫度, 共生鑛物 및 安定同位元素 특성에 의하여 中熱水鑛床, Korean-type 광상과 淺熱水鑛床으로 분류하였다. 국내 중열수 금광상에는 충북 중원지역의 대장, 보련 광상이 해당되는데 이들 광상의 특성은 천열수광상 및 Korean-type 광상과 비교하면 1) 생성온도가 높고, 2) Au/Ag비 및 에렉트럼의 Ag 함량이 높으며, 3) 鑛化深度가 깊다. 그리고 4) 산소, 수소 同位元素 값은 천수유입의 영향이 적다. 따라서 남산광상을 이러한 기준으로 분류해 보면 중열수광상이 아닌 전형적인 Korean-type 광상에 해당

한다.

結 論

1. 남산광상은 중생대 花崗岩類 (230~155 Ma)내 발달한 단층열극을 충전한 합금은 열수석영맥상 광체로 구성되어 있으며 광화작용 시기는 초기 백악기 (127±3.0 Ma)에 해당된다.
2. 광화작용은 구조운동에 수반되어 2회에 걸쳐 진행되었으며, 주 광화작용시기인 광화 제 I기 광화작용은 3~6 equiv. wt % NaCl의 염농도를 갖는 광화유체로부터 340°에서 200°C에 걸쳐 진행되었으며, 초기 비등현상과 H₂O-CO₂계의 임계현상을 활용하여 추정된 광화작용시 압력은 최대 100 bar 이다.
3. 금의 주된 침전은 온도 280~230°C, 황분압 10⁻¹¹~10⁻¹³ atm 환경에서 비등작용중에 수반된 광화유체의 화학성 (pH, f_{O_2} , Σ_{H_2S})변화에 의해 야기되었다.
4. 광화유체내 전 황종의 $\delta^{34}S$ 값은 +6‰로 광상내 광화작용에 기여한 황은 주로 화성기원이다.

謝 辭

본 연구는 1994년도 학술진흥재단 연구비 (과제번호 02-D-0528) 지원과 전라광물자원연구센터의 연구비 지원으로 수행되었으며 이들 기관에 사의를 표한다. 본 연구를 수행하는 동안 자료처리를 도와 주신 고려대학교 최선규 교수님과 권순학 석사께 감사를 드린다.

參考文獻

- 김서운, 유 수, 우영균 (1976) 공주지질도폭 (1/5萬), 자원개발연구소.
- 김세현, 권순학, 최광준 (1993) 금성 금광상의 광물학적 및 지화학적 연구, 한국자원공학회지 제 30권 4호 p. 300-307.
- 김영인, 이경환, 김동문, 최 찬, 김정원, 조용성 (1982) 정비금광산요람, 한국동력자원연구소, p. 227-228.
- 장태우, 황재하 (1980) 논산지질도폭 (1/5萬), 자원개발연구소.
- 주승환, 진명식, 윤현수 (1982) Rb-Sr 연대측정연구, 조사보고서, 13, 동력자원연구소, p.193-208.
- 진명식, 주승환, 김성재, 홍영국 (1986) 화강암의 emplacement와 광화작용과의 관련성 연구, KR-86-(B)-10, KIER.
- 최선규, 지세정, 박성원 (1988) 충청북도 영동지역 금-은광상의 금은 광화작용에 관한 연구, 광산지질 제 21권 4호, p.267-380.
- 최선규, 지세정, 윤성택, 고용권, 유재신 (1989) 거제지역 금-은광상의 광화작용, 광산지질 제 22권 4호, p.303-314.
- Barton, P. B., Jr., and Skinner, B. J. (1979) Sulfide mineral stabilities, In geochemistry of hydrothermal ore

- deposits (Barnes, H. L. Ed.), p.798. Wiley and Sons Pub. Co., New York, p.278-403.
- Barton, P. B. Jr., P. Toulmin, III (1964) The electrometric method for the determination of the fugacity of sulfur in laboratory sulfides system: *Geochim. Cosmochim. Acta.*, v.28, p.619-640.
- Drummond, S. E., and Ohmoto, H. (1985) Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems: *Econ. Geol.*, v.80, p.126-147.
- Grinenko, V. A. (1962) Preparation of sulfur dioxide for isotopic analysis: *Zeitschr. Neorgan. Khimii*, v.7, p. 2478-2483.
- Haas, 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.
- Kanehiro, K., Yui, S., Satai, H., and Sasaki, A. (1973) Sulphide globules and sulphur isotope ratios in the abyssal tholeiite from the Mid-Atlantic Ridge near 30°N latitude. *Geochem. Journal*, v.7, p.89-96.
- Kelly, W. C., and Rye, R. O. (1979) Geologic, fluid inclusion, and stable isotope studies of the tin-tungsten deposits of Panasqueira, Portugal: *Econ. Geol.*, v.74, p.1721-1822.
- Kretschmar, U., and Scott, S. D. (1976) Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application: *Am. Min.*, v.14, p.364-386.
- Nash, J. T., Fluid inclusion studies of some gold deposits in Nevada: U.S. Geol. Survey Prof. Paper 800-C, p.15-19.
- Ohmoto, H., and Rye, R. O. (1979) Isotopes of sulfur and carbon, in Barnes, H. L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 2nd ed., New York, John Wiley, p.509-567.
- 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.
- Roedder, E. (1979) Fluid inclusions as samples of ore fluids, In *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, H. L. Barnes, Ed., John Wiley & Sons, Inc., p.684-737.
- Scott, S. D. and H. L. Barnes (1971) Sphalerite geothermometry and geobarometry: *Econ. Geol.*, v.66, p. 653-669.
- Schneider, A. (1970) The sulfur isotope composition of basaltic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v.25, p.95-124.
- Seward, T. M. (1984) The transport and deposition of gold in hydrothermal system, in Foster, R. P., ed., *Gold '82: Rotterdam: A. A. Balkema Pub.*, p.165-182.
- So, C. S., and Shelton, K. L. (1988) Stable isotope and fluid inclusion studies of gold-silver-bearing hydrothermal vein deposits, Cheonan-Cheongyang-Non-san mining district, Republic of Korea: *Chonan area: Econ. Geol.*, v.82 p.987-1000.
- Takenouchi, S. and Kennedy, G. C. (1964) The binary system H_2O-CO_2 at high temperatures and pressures: *Am. Jour. Sic.*, v.262, p.1055-1074.