

무정광산의 금-은 광화작용

김상중* · 이현구** · 유재형** · 전효택*

Gold-Silver Mineralization of the Mujeong Mine, Korea

Sang Jung Kim*, Hyun Koo Lee**, Jae-Hyung Yu** and Hyo-Taek Chon*

ABSTRACT: The Mujeong Au-Ag hydrothermal vein type deposits occur within the Tertiary igneous rocks of the Janggi basin. Ore minerals consist of pyrite, pyrrhotite, sphalerite, chalcopyrite, galena, cosalite, lillianite, argentite and electrum, and are associated with epidotization, sericitization and pyritization. Fluid inclusion studies reveal that ore fluids were low saline with a simple NaCl-H₂O system. Fluid inclusion data indicate that homogenization temperatures and salinities of fluids are 150 to 340 °C and 1.0 to 6.5 wt.% NaCl equivalent, respectively. Sulfur isotope compositions of sulfide minerals ($\delta^{34}\text{S}=6.2$ to 9.6%) indicate that the $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ value of ore fluids was about 10.4 ‰. This $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ value is likely consistent with an hydrothermal sulfur, whereas the fluids were highly influenced by mixing with meteoric water. Measured and calculated oxygen and hydrogen isotope values ($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}=-2.7$ to 3.4% , $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}=-83.6$ to -52.7%) of ore forming fluids suggest mixing with hydrothermal and meteoric water. Equilibrium thermodynamic interpretation by mineral assemblages and chemistry indicates that sulfur fugacities ($-\log f_{\text{S}_2}$) ore forming fluids range from 9.0 to 12.6 atm in stage II.

서 언

한반도의 동남부에 위치하는 경상분지내에는 백악기 말에서 제3기초의 화성활동과 관련된 동, 연, 아연, 금, 은, 창연 등의 금속광상과 견운모, 카올리나이트, 납석 등과 같은 비금속광상이 분포한다 (Sillitoe, 1980; Shimazaki *et al.*, 1981; 민경덕 등, 1982; 김상욱, 1986). 이 광상들은 지역 및 광상의 구조규제 요소에 따라 광화시기에 차이가 있음이 보고되어 있다 (김상중, 1997). 경상분지의 동남부에는 제3기의 퇴적분지가 발달되어 있다. 이 퇴적분지내에도 제3기의 화성활동과 관련된 금속 및 비금속 광상들이 배태되어 있음에도 불구하고 몇 개의 광상을 제외하고는 자세한 광상학적 연구가 이루어지고 있지 않다. 따라서 필자 등은 이 지역에 배태된 광상들의 물리화학적 특성 및 생성환경을 밝히는 연구를 수행하고 있는 바, 이번에는 무정광

산에 대한 연구결과를 보고하고자 한다.

무정 금-은광산은 경북 경주군 양북면 권이리에 위치한다. 이 광산은 열수형 맥상광산으로서, 제3기의 화강암 및 유문암을 모암으로 한다. 이 지역에 대하여는 김선익 등 (1984)에 의한 광역적인 광화작용 조사연구, 1/50,000 감포도폭 (Tateiwa, 1924) 및 1/25,000 어일도폭 (최위찬 등, 1988)과 같은 지질조사와 다수의 층서학적 및 구조지질학적 연구들이 수행되어 있다 (Yun, 1976; 1983; 1986; 1997). 광상학적 연구로는 무정 금-은광산의 서남쪽에 위치하는 금령-기구 동광상 (Sillitoe, 1980; 김형석, 김병자, 1980; 박희인, 설용구, 1992)과 상라 연-아연광상 (박희인 등, 1994)에 대한 연구가 있다. 이 연구에서는 무정 금-은광산에 대해 광석광물의 공생관계, 화학조성, 유체포유물 및 안정동위원소 연구를 통하여 금-은 광화작용과 관련된 물리화학적 환경을 규명하였다.

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 (School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

** 충남대학교 지질학과 (Department of Geology, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea), E-mail: kimsang@hanbat.chungnam.ac.kr

지질 및 광상

이 지역의 지질은 제3기 어일층군 하부에 해당하는 유문암질 응회암 및 응회질 퇴적암과 이를 관입한 화

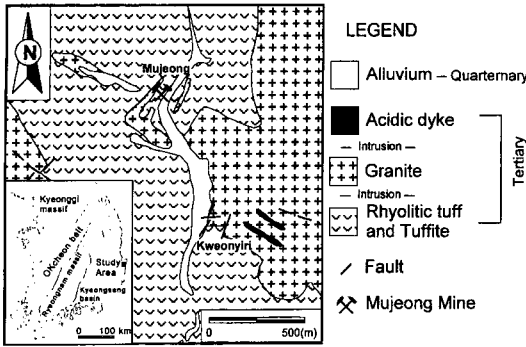


Fig. 1. Geologic map of the studied area (after Choi *et al.*, 1988).

강암류로 구성된다 (Fig. 1). 유문암질 응회암 및 응회질 퇴적암은 유문암질 용결응회암, 유문암질암편 결정질 응회암, 응회질 사암 및 역암으로 구성된다. 이는 연구지역의 남부에 분포하는 백악기의 세일 및 사암들을 부정합으로 피복하였고 화강암류에 의해 관입당하였다. 응회질 사암 및 역암의 역은 주로 유문암 및 응회암들로 이루어진다. 현미경하에서 석영, 정장석, 사장석, 흑운모가 주로 관찰된다. 흑운모는 녹니석으로 변질되어 있으며, 석기는 유리질로서 치밀 견고하다. 이 화산암류에 대한 쾨펜트랙연대는 49.6~58.3 Ma로 에오신에 해당된다 (진명식 등, 1988).

응회암류를 관입한 화강암은 조립질내지 중립질로서 부분적으로 석영반암의 암상을 띠기도 한다. 주구성광물은 석영, 정장석, 사장석 및 흑운모 등이고, 부구성광물은 자철석, 인회석, 녹니석 등이다. 이 화강암내에는 소량의 황철석 및 황동석이 산출된다. 이 지역에서 남서쪽으로 약 6 km 지점에 분포하는 화강암체에 대한 K-Ar 연대측정결과 54 Ma로서 (Jin *et al.*, 1984), 산출광물 및 조직 등의 동일성으로 볼 때 연구지역의 화강암도 이와 동일한 시기의 관입암체로 추정된다. 이 지역의 산성암맥은 규장암으로 N40°W의 방향성을 갖고 있다. 주로 석영을 반정을 갖고며, 기질은 석영, 정장석, 사장석으로 구성된다.

무정 금은 광상은 제3기 화강암류 및 유문암질 응회암내에 발달된 열극을 증진한 맥상광상이다. 광맥은 N20~40°E의 주향과 80°SE의 경사를 가지며, 맥폭은 20~60 cm 이다. 이 광상은 권이리 지역에서 몇 개의 갱도가 개설되어 개발하였으나, 지금은 매몰되어 갱내조사 어려운 실정이다. 갱도주변의 노두에는 연장 10 m 정도되는 광맥이 노출되어 있으며, 화강암체내에서는 석영과 방해석의 세맥이 관찰된다. 이 지역의 화강암

및 유문암은 녹염석화, 견운모화 및 황철석화작용을 받았다. 무정지역의 광맥에서 산출되는 광석광물은 황철석, 황동석, 섬아연석, 방연석, 휘은석, 코스라이트 (cosalite), 릴리아나이트 (lillianite) 및 에렉트럼 등으로 석영 및 방해석과 공생한다. 권이리지역의 세맥에서 산출되는 광석광물로는 자철석, 황철석, 황동석, 섬아연석 및 방연석 등으로 석영 및 방해석에 수반된다.

광물공생 및 화학조성

광물공생

광석광물의 공생관계 및 선후관계로 볼 때, 이 지역의 광화작용은 열수변질기 (I), 석영과 황화광물 정출기 (II) 및 천성광화기 (III)의 3시기로 구분된다 (Fig. 2). I기에는 녹염석, 견운모와 함께 소량의 황철석이 정출되었다. II기 초에는 투명 석영과 함께 황철석, 자류철석, 황동석, 섬아연석 및 방연석이 정출되었고 (Fig. 3. A, B), 중-후기에는 유백색 석영 및 방해석과 공생하면서 초기에 정출된 광물을 교대하여 섬아연석, 황동석, 방연석, 코스라이트, 릴리아나이트, 휘은석 및 에렉트럼 등이 산출된다 (Fig. 3. C, D).

II기 초기에 정출된 섬아연석은 황동석의 병변이 특징적으로 잘 관찰되며, 중기의 섬아연석은 황동석의 내포물을 함유하지 않는다. III기는 천성광화기로서 주광화에 정출한 황동석 및 섬아연석 등을 교대하며 휘동석, 코벨라이트, 침철석 및 공작석 등이 생성된 시기이다.

Mineral	Stage I	Stage II			Super-gene
		II-I	II-II	II-III	
Sericite					
Epidote					
Pyrite		■			
Pyrrhotite					
Sphalerite			■		
Chalcopyrite			■		
Galena			■		
Argentite				■	
Electrum				■	
Cosalite				■	
Lillianite				■	
Quartz		■			
Calcite					■
Chalcocite					■
Covellite					■
Goethite					■
Malanchite					■

Fig. 2. Paragenetic sequence of minerals from the Mujeong Au-Ag deposits.

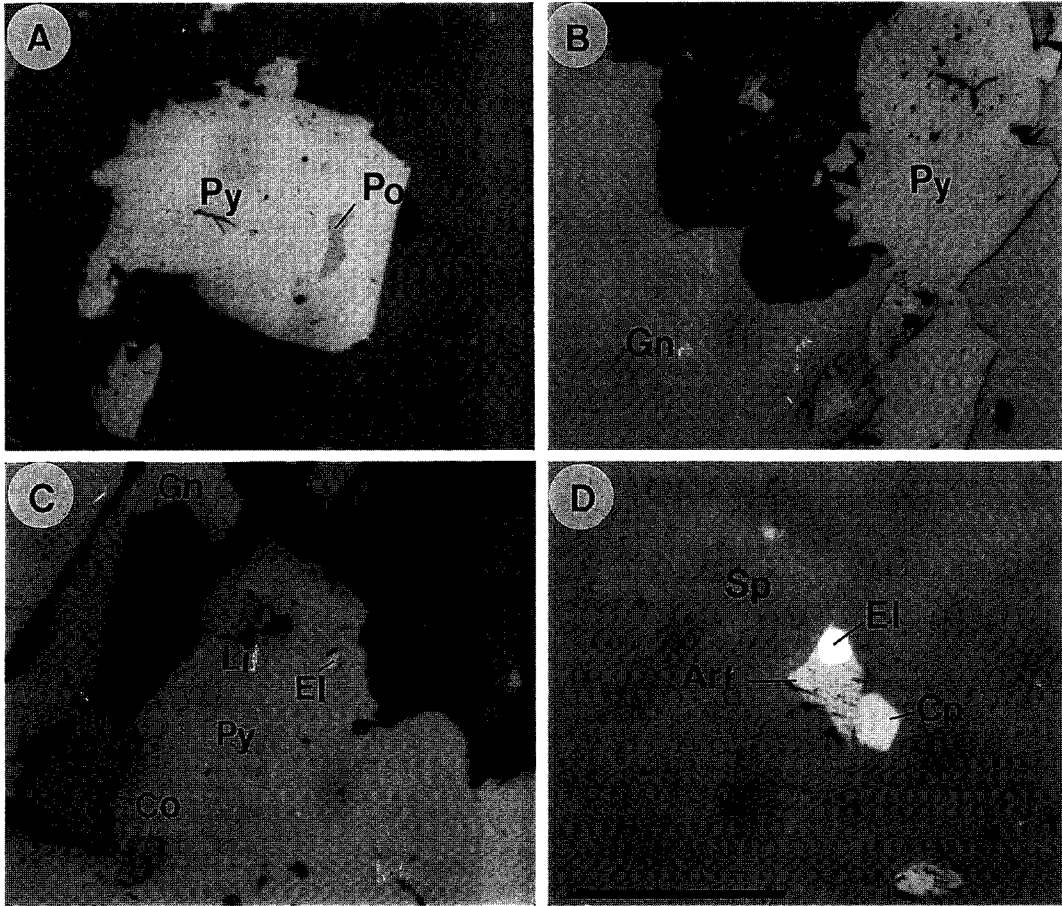


Fig. 3. Microphotographs showing the mineral assemblages from the Mujeong Au-Ag deposits. A; Pyrite (Py) replaced by sphalerite (Sp), B; Pyrite replaced by sphalerite and galena (Gn), C; Sphalerite coexist with cosalite (Co) and lillianite (Li), D; Argentite (Art) coexisting with electrum (El) in sphalerite.

광물화학

섬아연석은 II기 초기와 중기에 일반적으로 정출되는 광물이다. 초기에 정출된 섬아연석의 FeS 함량은 10.79 ~ 12.03 mole%의 범위를 보인다. 중-후기의 섬아연석은

휘은석 및 에렉트럼 등과 밀접한 공생관계를 가지며, 섬아연석내 FeS 함량은 0.76~3.80 mole%로서 초기의 섬아연석보다 상당히 낮은 함량을 갖는다 (Table 1).

휘은석은 II기 중-후기에 황동석, 섬아연석 및 방연석과 밀접한 공생관계를 갖는다. 화학조성은 Table 2에서

Table 1. Electron microprobe analysis of sphalerite from the Mujeong Au-Ag deposits.

Weight %							mole %		Stage
Zn	Fe	Cu	Cd	Mn	S	Total	FeS		
57.94	7.00	1.84	-	0.07	33.43	100.28	12.03	II-I	
58.42	6.31	1.75	0.39	0.07	32.94	99.88	10.87		
57.47	6.11	1.41	0.22	0.07	33.05	98.33	10.79		
62.23	1.78	1.04	0.44	0.12	33.32	98.93	3.17	II-II	
61.89	2.12	0.62	0.36	-	33.38	98.33	3.80		
66.74	0.44	0.30	0.73	-	33.18	101.39	0.76		
64.96	0.71	0.69	0.14	0.02	32.18	98.70	1.25		

Table 2. Electron microprobe analysis of argentite from the Mujeong Au-Ag deposits.

Weight %					Atomic %				Structural Formulae
Ag	Cu	Fe	S	Total	Ag	Cu	Fe	S	S=1
85.73	1.05	1.03	13.21	101.02	64.00	1.33	1.49	33.18	Ag _{1.93} Cu _{0.04} Fe _{0.04} S
85.20	1.20	1.00	12.60	100.00	64.76	1.33	1.47	32.22	Ag _{2.01} Cu _{0.05} Fe _{0.05} S
84.83	0.22	0.18	12.75	97.98	66.04	0.29	0.27	33.40	Ag _{1.98} Cu _{0.01} Fe _{0.01} S
85.12	0.26	0.11	12.52	98.01	66.55	0.34	0.17	32.94	Ag _{2.02} Cu _{0.01} Fe _{0.01} S
85.70	0.18	0.28	13.60	99.76	64.77	0.23	0.41	34.59	Ag _{1.87} Cu _{0.01} Fe _{0.01} S
84.98	1.12	0.90	13.10	100.10	64.04	1.43	1.31	33.22	Ag _{1.92} Cu _{0.04} Fe _{0.03} S

Table 3. Electron microprobe analysis of electrum from the Mujeong Au-Ag deposits.

Weight %			Atomic %	
Au	Ag	Total	Au	Ag
67.90	33.95	101.85	52.27	47.73
67.65	33.95	101.60	52.18	47.82
72.55	27.67	100.22	58.95	41.05
64.48	32.95	97.63	51.81	48.19
65.14	34.03	99.17	51.18	42.82
57.82	42.81	100.63	42.52	57.48
56.11	42.93	99.04	41.72	58.28

보여주는 바와 같이 이상적인 휘은석의 화학식에 잘 일치하고 있으나 Fe (0.11~1.03 wt.%) 및 Cu (0.18~1.20 wt.%)가 함유되어 있다. 에렉트럼은 II기 중 후기에 섬아연석 및 휘은석 등과 공생하며 소량으로 산출되며 이들의 화학조성은 Table 3과 같다. 에렉트럼내의 Au의 함량은 41.72~58.95 atomic %의 범위를 보여준다.

코사라이트는 II기 후기에 방연석 및 릴리아나이트와 밀접한 공생관계를 가지며 소량 산출된다. 이 화학조성을 S=5로 할 때, 전반적으로는 이상적인 화학식 (Pb₂Bi₂S₅)과 일치하는 Pb_{1.80~2.05}Cu_{0.10~0.43}Fe_{0.01~0.21}

Bi_{1.73~1.85}S₅를 보여주고 있다. 그러나 Pb와 Bi가 다소 결핍되어 있으며 Cu (0.63~2.81 wt.%)와 Fe (0.08~1.24 wt.%)가 소량 함유되어 있다 (Table 4).

릴리아나이트도 II기 후기에 섬아연석, 방연석, 코사라이트 등과 밀접한 공생관계를 가지며 소량 산출된다. 이들의 화학 분석치를 보면 이상적인 화학식 (Pb₃Bi₂S₆)과 유사한 구조식 (Pb_{2.79~2.80}Cu_{0.13~0.19}Fe_{0.05~0.09}Bi_{2.12~2.14}S₆)을 갖는다 (Table 4). 이 릴리아나이트는 Pb가 다소 결핍되어 있고 Bi가 다소 부화되었으며 코사라이트와 같이 소량의 Cu (0.13~0.19 wt.%)와 Fe (0.05~0.09 wt.%)가 함유되어 있다.

유체포유물

무정광상의 유체포유물연구는 주광화기 (II기)의 석영을 대상으로 염농도와 균일화온도를 측정하였다. 유체포유물의 종류는 액상과 기상의 충전정도에 따라 액상의 충전도가 60~80%로 가열시 액상으로 균일화 되고, 냉각실험시 액체 CO₂나 CO₂ 수화물의 생성이 없는 I형 포유물과 액상의 충전도가 30~50%에 가열시 기상으로 균일화 되며, 냉각실험시 액체 CO₂나 CO₂ 수화물의

Table 4. Electron microprobe analysis of Pb-Bi-S mineral from the Mujeong Au-Ag deposits.

Weight %						Atomic %					Structural Formulae
Pb	Bi	Cu	Fe	S	Total	Pb	Bi	Cu	Fe	S	
42.65	38.32	2.57	0.40	17.00	100.94	21.29	18.96	4.18	0.74	54.83	Pb _{2.0} Bi _{1.7} Cu _{0.4} Fe _{0.1} S _{5.0}
42.03	39.41	2.67	0.33	16.77	101.21	21.08	19.59	4.37	0.61	54.35	Pb _{1.9} Bi _{1.8} Cu _{0.4} Fe _{0.1} S _{5.0}
43.34	39.38	1.60	0.81	16.37	101.50	22.07	19.88	2.66	1.53	53.87	Pb _{2.1} Bi _{1.9} Cu _{0.3} Fe _{0.1} S _{5.0}
42.78	38.40	1.74	0.22	16.16	99.30	22.31	19.85	2.96	0.43	54.46	Pb _{2.1} Bi _{1.8} Cu _{0.2} S _{5.0}
41.77	39.26	1.48	0.63	17.03	100.17	21.11	16.67	2.44	1.18	55.61	Pb _{1.9} Bi _{1.8} Cu _{0.2} Fe _{0.1} S _{5.0}
42.16	38.02	0.89	0.73	15.88	97.68	22.42	20.04	1.54	1.43	54.56	Pb _{2.0} Bi _{1.8} Cu _{0.1} Fe _{0.1} S _{5.0}
39.72	40.23	1.08	0.82	17.10	98.95	20.20	20.28	1.79	1.55	56.18	Pb _{1.8} Bi _{1.8} Cu _{0.2} Fe _{0.1} S _{5.0}
42.71	38.76	1.45	1.11	17.04	101.07	21.34	19.20	2.36	2.06	55.03	Pb _{1.9} Bi _{1.7} Cu _{0.2} Fe _{0.2} S _{5.0}
40.60	39.15	1.21	1.07	16.32	98.35	21.06	20.13	2.05	2.06	54.71	Pb _{2.0} Bi _{1.9} Cu _{0.2} Fe _{0.2} S _{5.0}
46.28	35.77	0.68	0.22	15.37	98.32	25.14	19.26	1.20	0.44	53.95	Pb _{2.8} Bi _{2.1} Cu _{0.1} S _{6.0}
46.51	35.51	0.95	0.41	15.45	98.83	24.98	18.91	1.66	0.82	53.63	Pb _{2.8} Bi _{2.1} Cu _{0.2} Fe _{0.1} S _{6.0}
84.49	0.97	0.74	0.90	14.13	101.23	46.29	0.53	1.32	1.83	50.03	Pb _{0.9} S

생성이 없는 II형 포유물이 있다. I형 포유물내에는 운모류로 보이는 고상포유물이 포함되어 있는 경우도 있다. 이 광상에서는 I형 포유물이 대부분을 이루고, II형 포유물은 매우 드물게 산출된다. 일부 시료에서는 I형 포유물과 II형 포유물이 공존하고 있어 광화유체의 부분적인 비등도 있었음을 알 수 있다.

염농도

냉각실험에서 구해진 온도는 Roedder (1962, 1971)의 자료를 이용하여 염농도를 계산하였다. 무정광상의 주광화기인 II기 초기의 NaCl 상당염농도는 1.0~6.5 wt.%의 범위로 비교적 넓은 범위를 보여준다. I형과 공존하는 II형 포유물의 염농도는 2.4~2.7 wt.%의 범위이다. II기 중기의 I형 포유물에 대한 유체포유물의 NaCl 상당염농도는 0.5~4.0 wt.%의 범위로 초기보다 염농도의 변화폭이 적음을 보여주며, 0.5~2.0 wt.%의 범위에 70 %에 달하는 분포빈도를 보여준다 (Fig. 4).

균일화온도

무정광상의 II기 초기 유체포유물의 균일화온도는 185~340 °C의 범위를 보여주고 있고, 비등의 증거를 제시하는 II형 포유물의 균일화온도는 205~290 °C의 범위를 보인다. II기 중기의 유체포유물은 150~230 °C로 초기보다 다소 낮은 온도 범위를 보여준다. 균일화온도도 염농도와 마찬가지로 광화가 진행됨에 따라서 온도가 다소 저하하는 경향을 갖는다 (Fig. 5).

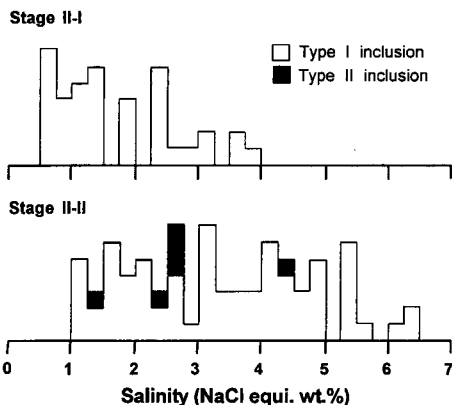


Fig. 4. Histograms showing salinities of fluid inclusions from the Mujeong Au-Ag deposits.

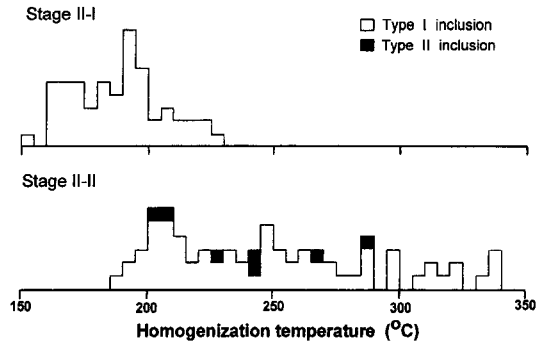


Fig. 5. Histograms showing homogenization temperatures of fluid inclusions from the Mujeong Au-Ag deposits.

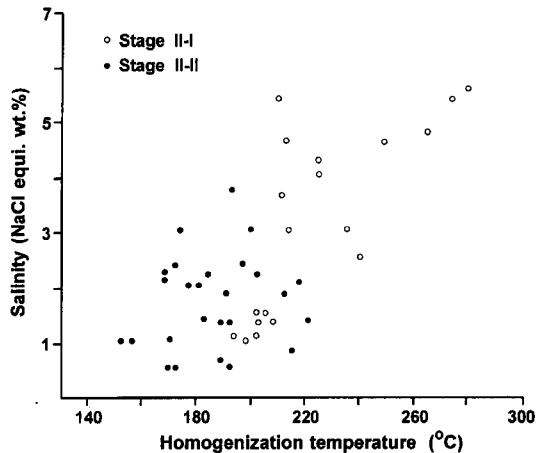


Fig. 6. Homogenization temperature versus salinity diagram for fluid inclusions from the Mujeong Au-Ag deposits.

염농도-균일화온도

Fig. 6에서 보여주는 바와 같이, II기 초기의 유체포유물은 전반적으로 온도가 저하됨에 따라 염농도가 낮아지는 경향을 보이나, 220 °C를 전후하여 염농도가 높아지는 경향과 낮아지는 두가지 형태가 나타난다 (Fig. 6). 이는 220 °C를 전후로 낮은 염농도와 온도의 비등 현상이 있었음을 암시한다. II기 중기의 유체포유물은 온도와 염농도의 분포가 다소 분산적이거나 대체적으로 온도가 낮아짐에 따라 염농도가 감소하는 경향을 보이는데, 이는 이시기의 광화유체가 비등, 희석 및 냉각과 같은 다양한 과정을 갖고 있었음을 시사한다. 특히 광화 후기로 가면서 염농도가 낮아지는데 이는 초기보다는 후기가 천수의 유입에 의한 냉각 및 희석작용이 컸음을 지시해준다.

안정동위원소

안정동위원소의 분석은 I기와 II기에 정출된 황철석 (2 시료), 섬아연석 (2 시료) 및 방연석 (2 시료)에 대한 황 안정동위원소와 견운모 (1 시료) 및 석영 (2 시료)에 대한 수소 및 산소 안정동위원소의 분석을 하였다. 분석은 중국지질대학 (무한)에서 실시하였다.

황

이 광상에서 산출되는 황화광물의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 6.2~9.6‰로 다소 좁은 범위를 갖는다 (Table 5). II기 초기의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 6.2~9.6‰, 중기의 황화광물은 7.6~8.4‰로 시기에 따른 값의 변화는 거의 관찰되지 않는데 이는 천수의 유입에 따른 희석의 효과로 생각된다. 이 황화광물과 공생관계에 있는 석영 및 섬아연석내 초생포유물의 균일화온도를 이용하여, Ohmoto와 Rye (1979)가 제시한 동위원소 분별식으로 계산한 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 값은 4.7~10.4‰의 범위를 갖는다.

일반적으로 마그마 기원의 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 값이 0‰ 부근의 좁은 영역에 해당되는 것으로 알려져 있으며 (Ohmoto, 1972), 퇴적기원의 것은 매우 광범위하고 무거운 경향을 보이는 것으로 알려져 있다. 무정 금-은광상의 황화광물에서 얻어진 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 값이 마그마기원의 값보다 다소 높다는 것은 광화작용이 진행되면서 광화유체에 함유된 마그마 기원의 황에 주변 모암으로부터 산화유황종의 유입이 있었던 것으로 생각된다. 또한 황철석-방연석 쌍의 분배계수 (Ohmoto, Rye, 1979)에 의한 동위원소 평형온도는 $301 \pm 21^\circ\text{C}$ 로서 유체포유물의 균일화온도의 범위내에 해당된다.

Table 5. Sulfur isotopic compositions (‰) of sulfide minerals from the Mujeong Au-Ag deposits

Mineral	$\delta^{34}\text{S}$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ ¹⁾	T(°C) ²⁾	T(°C) ³⁾	Stage
Pyrite	9.6	8.1	250	301 ± 21	II-I
Galena	6.5	8.8	250		
Sphalerite	7.9	7.6	250		
Pyrite	6.2	4.7	250		
Sphalerite	8.4	8.0	195		II-II
Galena	7.6	10.4	195		

¹⁾ Calculated sulfur isotope compositions of H_2S in ore fluids, using the isotope fractionation equation of Ohmoto and Rye (1979).

²⁾ Based on average fluid inclusion temperatures.

³⁾ The sulfur isotope temperature calculated using the fractionation equation of Ohmoto and Rye (1979).

Table 6. Oxygen and hydrogen isotopic compositions (‰) of quartz and sericite from the Mujeong Au-Ag deposits.

Mineral	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ ¹⁾	$\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ ²⁾	Th(°C) ³⁾	Stage
Sericite	5.8	-92.4	+3.4	-52.7	340	I
Quartz	8.7	-78.1	0.0		250	II-I
Quartz	9.2	-83.6	-2.8		195	II-II

¹⁾ Calculated water compositions based on oxygen isotope fractionation of Matsuhisa *et al.* (1979) and Friedman and O'Neil (1977).

²⁾ Calculated water compositions based on hydrogen isotope fractionation of Suzuoki and Epstein (1976).

³⁾ Based on average fluid inclusion temperatures.

수소 및 산소

무정광상에서 산출되는 석영 및 변질대의 견운모를 대상으로 한 산소 및 수소 동위원소와 석영내의 유체 포유물에 대한 수소동위원소 분석결과는 Table 6과 같다. 석영의 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 와 $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW)의 값은 -83.6~-78.1‰, 8.9~9.2‰로서 비교적 좁은 범위를 가지며, 견운모의 δD 와 $\delta^{18}\text{O}$ 의 값은 -92.4‰ 및 5.8‰를 보인다. 이 값에 대해 광화작용시 광화유체에서 석영과 물, 견운모와 물 사이에 동위원소가 평형을 유지하며 교환되었다고 가정할 때 석영-물, 견운모-물 사이의 평형관계식을 이용하여 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 와 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 의 값을 계산하였다 (Suzuoki, Epstein, 1976; Matsushisa *et al.*, 1979; Friedman, O'Neil, 1977). 이 관계식으로부터 계산된 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 의 값은 -83.6~-52.7‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 값은 -2.8~3.4‰의 범위를 가지며, 광화가 진행됨에 따라 다소 낮아지는 경향을 보인다.

각 광물의 생성온도에 따른 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 의 동위원소 분별식에 의해서 얻어진 마그마 기원의 δD 와 $\delta^{18}\text{O}$ 의 값은 각각 -85~-50‰, 5.5~10.0‰의 범위를 갖는 것으로 알려져 있다 (Taylor, 1979). 따라서 I기의 견운모에서 구한 수소 및 산소의 동위원소 값 ($\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} = -52.7\%$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 3.4\%$)이 마그마 기원의 영역근처에 해당하는 것으로 보아 변질기의 광화유체는 마그마 기원이었을 것으로 추정된다. 한편 II기로 가면서 천수의 혼입에 따른 동위원소의 경량화 ($\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} = -83.6\%$ ~-78.1‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = -2.8\%$ ~0.0‰)가 있었던 것으로 생각된다.

토 론

무정 금-은광상의 주요 광화기에 대한 생성온도와 황 분압 조건을 광물의 공생관계에 따른 상평형관계, 유체

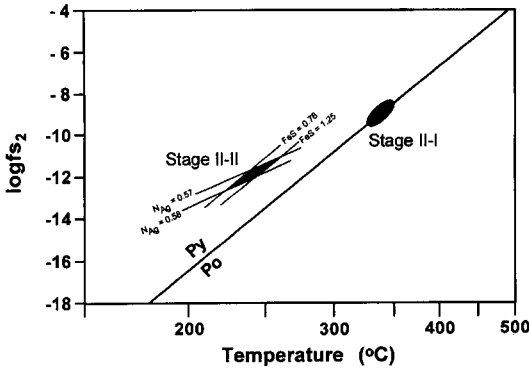


Fig. 7. Temperature- f_{S_2} diagram showing the possible range of depositional conditions by mineral assemblages from the Mujeong Au-Ag deposits. Data plotted on diagram given in Barton and Toulmin (1966), Scott and Barnes (1971), Shikazono (1985), FeS; FeS mole % of sphalerite, Na_g; atomic fraction of Ag in electrum, Py; pyrite, Po; pyrrhotite.

포유물의 균일화온도 및 안정동위원소 평형온도 등을 토대로 추정하였다. 광화 II기 초기에는 황철석-사류철석의 공생군이 관찰되고 있으며, 이 시기 유체포유물의 균일화온도는 최고 340°C이다. 이 시기의 광물정출 온도를 340°C로 가정하고 황철석-사류철석의 공존관계를 토대로 구해진 황분압은 $10^{-9.0}$ atm로 추정된다. 한편 황철석-방연석 쌍을 이용한 안정동위원소 평형온도는 301°C로서 석영에서 구한 균일화온도 (185~340°C)의 범위내에 있다.

광화 II기 중-후기에는 섭야연석-휘은석-에렉트럼의 공생이 관찰된다. 이 공생관계를 Barton과 Toulmin (1966), Shikazono (1985)의 열역학적 자료를 이용하여 구한 평형곡선의 온도는 220~260°C이고, 황분압은 $10^{-11.0} \sim 10^{-12.6}$ atm의 범위를 보이고 있다 (Fig. 7). 이는 동일시기 석영에서 구한 유체포유물의 균일화온도 (150~230°C)보다는 다소 높다. 따라서 광화가 진행됨에 따라서 황분압은 $10^{-9.0}$ atm에서 $10^{-11.0} \sim 10^{-12.6}$ atm으로 감소하였고, 온도도 초기의 340°C에서 후기의 150°C로 감소하고 있음을 지시한다.

II기 초기에는 드물게 I, II형 포유물이 동일 시료내에서 공존하는 비등의 증거가 있고 이때의 온도와 염농도는 240°C와 2.4 wt.% NaCl 상당염농도를 보인다. 이를 근거로 Sourirajan과 Kennedy (1962), Hass (1971)의 자료를 이용하여 구한 광화유체의 정수압은 약 33 bar이고, 이때 열수계의 생성심도는 약 370 m로 비교적 낮은 압력 및 심도에서 형성된 광상으로 추정된다.

광상에서 산출되는 황화광물의 $\delta^{34}S_{H_2S}$ 값은 4.7~

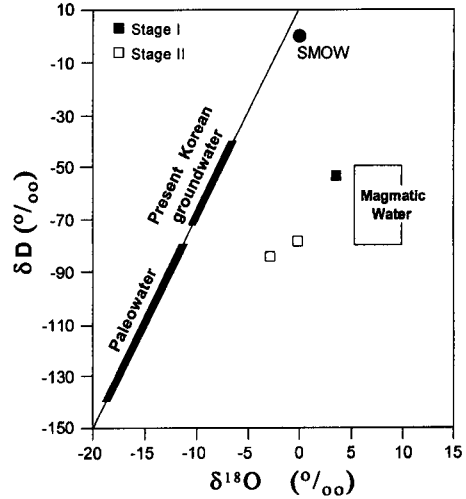


Fig. 8. Plot of hydrogen versus oxygen isotope compositions showing stable isotope systematics of hydrothermal fluid compositions in the Mujeong Au-Ag deposits. Meteoric water line is from Craig (1961), magmatic water box is from Taylor (1979). The range of the Korean paleometeoric water composition is from Shelton *et al.* (1988) and So *et al.* (1990). The compositional range of modern Korean groundwaters is from Kim, Nakai (1988).

10.4‰의 범위로 마그마 기원의 유체보다 무거운 값을 보인다. 이러한 원인은 광화유체가 열수계동안 주변모암과의 반응에 의한 결과로 추정된다. 석영 및 견운모에서 구한 δD_{H_2O} 값은 -83.6~-52.7‰, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 값은 -2.8~3.4‰의 범위로 초기의 광화유체는 마그마 기원의 특성을 갖고 있으나 광화가 진행되면서 천수와 반응에 의해 수소 및 산소 동위원소의 값이 변화된 것으로 생각된다 (Fig. 8).

또한 모암변질물인 견운모와 석영에서 구해진 수소 및 산소 동위원소 값에 차이를 보이고 있다. 이는 광화작용시 석영과 운모류의 형성이 시간적 차이에 의존되고, 석영에서 용탈된 물의 δD_{H_2O} 값은 화성암과 변성암에서 산출되는 운모, 자갈석 및 점토광물 같은 함수 규산염과 공존하는 광물에서 얻어진 값보다 보통 낮기 때문에 해석된다 (Kuroda, 1986). 따라서 모암 변질물에서 측정된 수소 및 산소의 동위원소 값은 마그마 기원의 유체와 유사한 값을 보일 것이다. 이 광상의 견운모에서 얻어진 결과도 마그마기원과 유사한 값 ($\delta D_{H_2O} = -52.7‰$, $\delta^{18}O_{H_2O} = 3.4‰$)을 갖는다. 한편 석영의 값 ($\delta D_{H_2O} = -83.6 \sim -78.1‰$, $\delta^{18}O_{H_2O} = -2.8 \sim 0.0‰$)은 다소 낮다. 이는 초기 광화유체가 말기로 가면서 천수의 유입에 의한 혼합의 결과로 추정된다.

지금까지의 자료를 종합해서 황화광물과 금-은광물의 침전과정을 고찰해 보면, 변질기 (I기)와 주정출기 (II기)의 초기에는 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}=0.0\sim 3.4\%$, $\delta^{34}\text{S}=8.8\%$ 의 조건의 마그마 기원의 유체하에서 base metal 황화광물이 정출을 시작하였다. II기 중후기의 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}=-2.8\%$, $\delta^{34}\text{S}=10.4\%$ 의 조건은 마그마성 유체가 천수와 희석되었음을 설명하고 있다. 또한 유체포유물의 염농도-균일화온도의 관계에서도 금-은의 정출기에는 천수의 희석에 의한 냉각의 효과가 인지되고 있어서 이 광상에서 산출되는 금-은 광물 및 Pb-Bi-S 광물은 이러한 과정에서 침전된 것으로 생각된다.

결 론

1. 이 광상은 제3기초의 화성성암류내에 발달된 N20~40°E의 주향과 80°SE의 경사의 열극을 축진한 열수성 맥상광상이다.
2. 유체포유물, 광물공생 및 안정동위원소 등으로 추정된 주광화기 (II기)의 생성온도 및 NaCl상당염농도는 초기; 185~340°C, 1.0~6.5 wt.% , 중기; 150~230°C, 0.5~4.0 wt.% 이다.
3. II기 초기의 황분압은 10^{-9} atm 이상의 조건이고, 중-후기에는 $10^{-11.0}\sim 10^{-12.6}$ atm으로서 광화작용이 진행됨에 따라 낮아졌다.
4. 석영 및 견운모로부터 얻은 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 값은 -2.8~3.4%, $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 값은 -83.6~-52.7%의 범위이고, 황화광물로부터 구해진 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 값은 4.7~10.4%이다.
5. 초기의 광화유체는 마그마기원이 주종을 이루고 있었으나 후기로 가며 천수의 혼입이 있었던 것으로 추정된다.

사 사

이 연구는 한국학술진흥재단의 1998년도 박사후과정 연수지원 연구비로 이루어졌으며 이에 깊이 감사한다. 연구의 일부는 1998년도 교육부 기초과학연구소 육성 지원사업 (BSRI-98-5419)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사한다. 논문 심사시에 대단히 유익한 조언과 지적을 하여주신 전남대학교 윤정환 교수님과 부경대학교 박맹언 교수님께 깊은 감사를 표한다.

참고문헌

김규환, 中井信之 (1988) 남한의 지하수 및 강수의 안정동

- 위원소 조성. 지질학회지, 24권, p. 37-46.
- 김상옥 (1986) 경상분지에서 후기 백악기 화성활동에 관한 연구. 이상만교수 송수기념 논문집, p. 167-194.
- 김상중 (1997) 북부 경상분지의 화성활동과 다금속 광화작용에 관한 지화학 및 지질연대학적 연구. 충남대학교 대학원 박사학위논문, 276p.
- 김선익, 황덕환, 김문수 (1984) 감포지역 광역광화대 조사 연구. 한국동력자원연구소, 금속광상조사연구.
- 김형석, 김병각 (1980) 한국 동남부 월성지역의 합동반암에 관한 연구. 지질학회지, 16권, p. 265-364.
- 민경덕, 김옥준, 윤석규, 이대성, 주승환 (1982) 한국남부의 백악기말 이후의 화성활동과 광화작용에 대한 판구조론의 적용성 연구(I). 광산지질, 15권, p. 123-154.
- 박희인, 문상호, 우영규 (1994) 상리광산의 연이연 광화작용. 지질학회지, 30권, p. 1-14.
- 박희인, 설용규 (1992) 금령 및 기구광상의 동광화작용. 광산지질, 25권, p. 283-296.
- 이상만, 김상옥, 진명식 (1987) 남한의 백악기-제3기 화성활동과 지구조적 의의. 지질학회지, 23권, p. 338-359.
- 진명식, 김성재, 신성천 (1988) K/Ar 및 플렉트랙법에 의한 포항-감포일대 화산암류의 암석연령 측정연구. 동위원소 지질연구, 한국동력자원연구소 KR-87-27, p. 51-88.
- 최위찬, 황재하, 윤옥, 김동학 (1988) 어릴지질도폭설명서 (1/25,000) 보고서. 한국동력자원연구소, p. 1-42.
- Barton, J.B. Jr. and Toulmin, P. III. (1966) Phase relations involving sphalerite in the Fe-Zn-S system. Econ. Geol., v. 61, p. 815-849.
- Craig, H. (1961) Isotopic variations in meteoric waters. Sciences, v. 133, p. 1702-1703.
- Friedman, I. and O'Neil, J.R. (1977) Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest; in Fleischer, M. (ed.), Data of Geochemistry, Sixth Ed. U.S. Geol. Surv., Prof. Paper, 440-KK, p. k1-kk12.
- Hass, R.W. (1971) The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. Econ. Geol., v. 66, p. 940-946.
- Jin, M.S., Gleadow, A.J.W. and Lovering, J.P. (1984) Fission track dating of apatite from the Jurassic and Cretaceous granites in south Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 20, p. 257-265.
- Kuroda, Y., Kida, Y., Watanabe, K., Oba, T. and Matsuo, S. (1986) D/H study on clay minerals from the Iwami Kuroko deposits, Shimane Prefecture, Japan. J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol., v. 81, p. 302-311.
- Matsushita, Y., Goldsmith, J.R. and Clayton, R.N. (1979) Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 43, p. 1131-1140.
- Ohmoto, H. (1972) Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. Econ. Geol., v. 67, p. 551-578.
- Ohmoto, H. and Rye, R.O. (1979) Isotopes of sulfur and carbon, Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 2nd ed. New York, John Wiley and Sons.
- Roedder, E. (1962) Studies of fluid inclusion I; Low temperature application of a dual-purpose freezing and heating stage. Econ. Geol., v. 57, p. 1045-1061.
- Roedder, E. (1971) Fluid inclusion studies on the porphyry copper type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana and Climax, Colorado. Econ. Geol., v.

- 66, p.98-120.
- Scott, S.D. and Barnes, H.L. (1971) Sphalerite geothermometry and geobarometry. *Econ. Geol.*, v. 66, p. 653-669.
- 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.
- Shimazaki, H., Sato, K. and Chon, H. T. (1981) Mineralization associated with Mesozoic felsic magmatism in Japan and Korea. *Mining Geol.*, v. 31, p. 297-310.
- Shikazono, N. (1985) A comparison of temperatures estimated from the electrum-sphalerite-pyrite-argentite assemblage and filling temperatures of fluid inclusions from epithermal Au-Ag vein type deposits in Japan. *Econ. Geol.*, v. 80, p. 1415-1424.
- Sillitoe, R.H. (1980) Evidence for porphyry-type mineralization in southern Korea. *Mining Geol. Spec. Issu. Japan*, No. 8, p. 205-214.
- So, C.S., Yun, S.T., Chi, S.J. and Choi, S.H. (1990) Geochemical studies of hydrothermal gold-silver deposits, Republic of Korea: Chilgok area. *Neus Jahrb. Mineralogie Abh.*, v. 161, p. 79-99.
- Sourirajan, S. and Kennedy, G.C. (1962) The system H₂O-NaCl at elevated temperature and pressure. *Am. Jour. Sci.*, v. 260, p. 115-141.
- Suzuoki, T. and Epstein, S. (1976) Hydrogen isotope fractionation between OH-bearing minerals and water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 40, p. 1229-1240.
- Tateiwa, I. (1924) Geological atlas of Chosen: no.2. Ennichi, Kyuryuho and Choyo sheet. Chosen Geol. Survey.
- Taylor, H.P. Jr. (1979) Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits. p. 236-277. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 2nd ed. John Wiley and Sons, New York, 798p.
- Yun, S. (1976) The geological and paleontological studies of the Tertiary Deposits of Janggi-Eoil district of Korea. *Stratigraphy and geologic age of the Songjeon formation. Univ. Jour. Busan Nat'l Univ.*, v.21, p. 11-19.
- Yun, S. (1983) Tertiary stratigraphy of the Eoil basin, Korea. *Jour. Geol. Korea*, v. 19, p. 173-180.
- Yun, S. (1986) Tectonic history of the Tertiary Pohang and Yangnam basin, Korea. *Essay in Geology Professor Kabu Kitamura Commemorative Volume*, p. 637-644.
- Yun, S. (1997) Miocene-Pleistocene volcanism and tectonics in southern Korea and their relationship to the opening of the Japan Sea. *Tectonophysics*, v. 281, p. 53-70.

1999년 3월 12일 원고접수, 1999년 4월 16일 게재승인.