

## 강원도 옥계 금광상에 관한 광물학적·지화학적 연구

최선규\* · 최상훈\*\* · 이현구\*\*\*

### Mineralogy and Geochemistry of the Ogkye Gold Deposits, Gangwondo Province

Seon-Gyu Choi\*, Sang-Hoon Choi\*\* and Hyun Koo Lee\*\*\*

**ABSTRACT** : Gold mineralization of the Ogkye gold mine was deposited mainly in quartz veins up to 150 cm wide which occupy fissures in Cambrian Pungchon limestone. Ore minerals are relatively simple as follows : pyrite, arsenopyrite, pyrrhotite, sphalerite, electrum and galena. On the basis of the Ag/Au ratio on ore grades, mode of occurrence and associated mineral assemblages, the Ogkye gold deposit can be classified as pyrite-type gold deposit (Group IIB). Fluid inclusion data indicate that ore minerals were deposited between 400° and 230°C from relatively dilute fluids (0.2 to 7.3 wt.% eq. NaCl) containing CO<sub>2</sub>. The ore mineralization resulted from a complex history of CO<sub>2</sub> effervescence and local concomitant boiling coupled with cooling and dilution of ore fluids. Gold deposition was likely a result of decrease of sulfur activity caused by sulfide deposition and/or H<sub>2</sub>S loss accompanying fluid unmixing. Sulfur isotope compositions of sulfide minerals ( $\delta^{34}\text{S}=3.5\sim 5.9\%$ ) are consistent with  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$  value of 4.8 to 6.1‰, suggesting mainly an igneous source of sulfur partially mixed with wall-rock sulfur.

## 서 언

태백산 지역의 금·은광상은 정선, 삼척, 원주를 중심으로 밀집분포하고 있으며, 김영인 등 (1982)은 태백산 지역에 분포하는 금·은광상이 80여개에 달하는 것으로 보고하고 있다. 옥계광산은 삼척지역의 대표적인 금광상으로 1936년~1942년 기간중 80.9 kg의 금을 생산한 것으로 보고된 바 있으며, 1983년부터 본맥을 대상으로 본갱·영미갱·반암갱·1갱·3갱·북중단갱 및 남중단갱을 개설하여 재개발하였으나 현재는 휴광중에 있으며 본갱의 품위는 Au의 경우 0.1~5.5 g/t이며, Ag는 약 44 g/t이다.

옥계 광산은 강원도 명주군 옥계면 산계리에 위치하며, 조선계 대석회암통의 풍촌 석회암층에 발달한 NE계 단

층과쇄대를 충전한 합금 열수맥상 광체들로 되어 있다. 이러한 광맥은 2개조의 본맥과 주변에 발달한 소규모 맥 등 수개조의 합금석영맥으로 구성된다. 본 광산의 주변 지질은 태백산지구 지하자원 조사단에 의하여 처음으로 조사되었으며 (1962), 한국의 광상 (권병수 등, 1987)에 광상개요가 개괄적으로 기재되어 있다. 본 광산에 대한 연구로는 열수 변질에 따른 주변 모암에서의 원소들의 일차분산 (황인호, 전효택, 1994)에 대한 연구가 보고된 바 있으나, 본 광산의 금광화작용에 관한 성인연구는 전혀 수행된바 없다. 그러므로, 본 연구에서는 옥계 광산의 광맥에 대한 특성과 합금·은광물을 비롯한 광석광물의 산출상태, 공생관계, 화학조성 등에 관한 광물학적·지화학적 연구를 통하여 금광화작용시의 생성환경 및 광화유체의 진화특성을 규명하는데 있다.

본 연구는 1995, 1996년도 교육부 기초과학육성 연구비 (BSRJ-95-5403)의 지원에 의하여 수행되었음.

\* 고려대학교 지구환경과학과 (Department of Earth and Environmental Science, Korea Univ., Seoul 136-701, Korea)

\*\* 충북대학교 지구환경과학과 (Department of Earth and Environmental Science, Chungbuk Univ., Cheongju 361-260, Korea)

\*\*\* 충남대학교 지질학과 (Department of Geology, Chungnam Univ., Taejeon 305-764, Korea)

## 지질 및 광상 개요

옥계 광산의 주변 지질은 캄브리아기 조선계 대석회암통의 풍촌석회암층과 오르도비스기 원평 및 석빙산 석회암층, 석탄기 평안계 홍점통 그리고 시대미상인 우백질 화강암 및 편상화강암으로 구성된다 (Fig. 1). 풍촌 석회

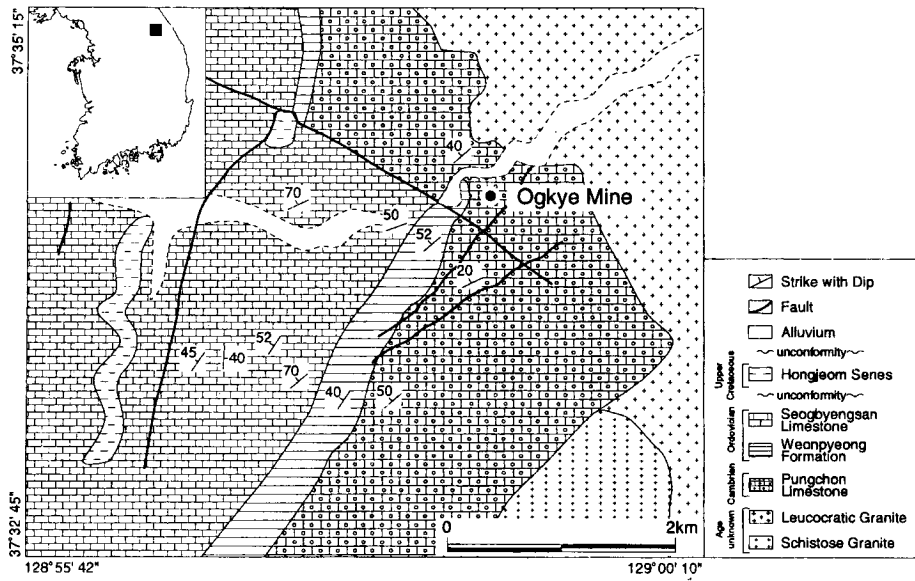


Fig. 1. Simplified geologic map of the Ogkye mine areas (after Geologic Atlas of Taebaegsan Region, 1962).

암층을 피복 산출하는 원평층은 상부 석병산 석회암층과 부정합 관계를 보여 준다. 광산 동남부에서 풍촌석회암을 관입 산출하는 우백질 화강암은 중립 내지 세립의 사장석, 미사장석, 석영, 흑운모 등의 광물과 함께 견운모, 석류석 등의 부성분 광물이 소량 경하에서 관찰된다.

본 광상은 캄브리아기 풍촌석회암층내에 발달된 열극을 충진 배대한 2개조의 함금(-은)석영맥으로 구성된 맥상 광상으로 안산암질 암맥이 석영맥과 거의 평행하게 발달되어 있다. 광맥들의 주향은 주로 N35~45°E, 경사는 80°NW~수직이다. 본 맥은 주향방향으로 1200 m 이상 연장성이 확인되며, 맥폭은 30~150 cm의 심한 팽축현상을 보여준다. 또한 광산주변에 분포하는 우백질 화강암내 발달한 석영세맥을 따라 녹렴석·석류석·녹니석·단사회석 등 스카른 광물이 확인된다. 광석광물로는 황철석, 유비철석, 섬아연석, 방연석 등의 비교적 단순한 황화광물들이 주로 산출되며, 석영맥내에 산점상 또는 괴상으로 배태된다. 석영맥은 빗살구조·각력상구조·정동석영 등이 비교적 양호하게 발달되어 있으며, 주변모암은 국부적인 녹니석화작용을 수반한 견운모화 작용을 받고 있다.

### 광석광물의 산출과 공생관계

옥계광상의 함금석영맥내에서 산출되는 광석광물로는 함금-은 광물인 에렉트럼을 비롯한 황철석, 유비철석, 자류철석, 섬아연석, 황동석, 방연석 등의 황화광물이 주로 산출되며, 테트라헤드라이트, 농홍은석 등의 황염광물도

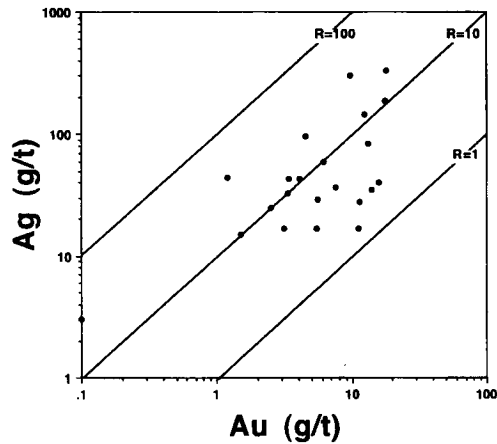


Fig. 2. Logarithmic plots of gold and silver in ore grades (g/t).

극소량 수반된다. 광석의 Ag/Au비는 광석에 따라 1.5~36.7 범위에 걸쳐 현저한 차이를 보이지만, 전반적으로 18.8 미만으로 나타나고 있다 (Fig. 2). 광석의 품위는 황화광물의 양에 비례하여 전반적으로 증가하는 경향을 보인다. 광화기 초기에는 주로 황철석+유비철석섬아연석(+자류철석)의 광물조합을 보이지만, 중기에는 황철석+섬아연석+황동석+에렉트럼, 그리고 말기에는 황철석+섬아연석+방연석+에렉트럼 (+함은황염광물)의 광석광물 공생군을 이루고 있음이 특징적이다. 본 광상에서는 산출되는 광물의 공생관계를 도시하면 Fig. 3과 같다.

광석광물중 양적 우위를 점하고 있는 황철석은 자형 내

지 반자형 결정이 산점상으로 산출되거나 타형의 세립 결정들이 주로 괴상으로 배태된다. 특히, 초기에 산출된 거정질 황철석은 자류철석·섬아연석을 포획하고 있으며, 대부분 파쇄되어 후기에 산출된 석영과 섬아연석, 방연석 등의 황화광물들에 의하여 충전되었다.

섬아연석은 광화 초기에서 후기까지 전범위에 걸쳐서 확인되며, FeS함량은 각 광화기별로 현저한 변화양상을 나타내고 있다 (Table 1, Fig. 4). 즉, 광화초기 섬아연석

은 자류철석과 밀접한 공생관계를 갖고 황철석내 bleb상으로 산출되며 24.2~25.4 mole %로 아주 높은 FeS함량을 갖는다. 주광화시기인 중기에는 섬아연석이 주로 정출된 시기로 황철석 유비철석과 함께 괴상으로 산출되는 양상을 보이며 용리된 황동석 bleb를 다량 포획하는 경향을 보인다. 광화기 중기의 섬아연석은 미립의 에렉트럼 또는 중립의 자형 황철석을 포획하고 있으며, 8.02~17.7 mole %의 FeS함량을 갖는다. 광화기 말기의 섬아연석은 미립의 결정으로 방연석과 밀접한 공생관계를 갖고 산출되며, 주로 황철석 또는 유비철석의 불규칙한 균열면을 따라 세맥상으로 충전한다. 또한, 후기섬아연석은 간혹 에렉트럼과 공생관계를 보이며, 4.6~9.68 mole % FeS함량을 갖는다.

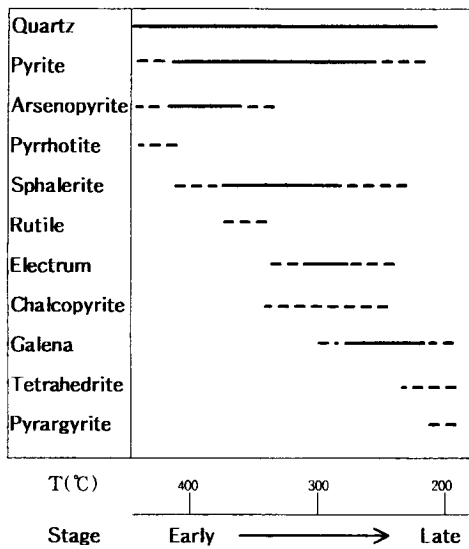


Fig. 3. Mineral paragenesis of the Ogkye deposit.

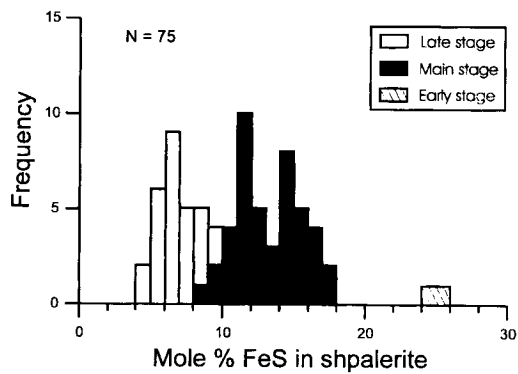


Fig. 4. Histogram showing FeS content (mole %) of sphalerite. Hatched area; early stage, black area; main stage, and white area; late stage.

Table 1. The Au content of electrum and FeS content of sphalerite from Ogkye mine.

Specimen	Electrum			Sphalerite			Stage
	Atomic% Au			Mole% FeS			
	Average	Range	N	Average	Range	N	
Ok3				9.99	8.02~11.01	3	main
Ok3	18.40	12.3~23.9	9				late
Ok8B	40.50	40.1~40.8	4	9.95	9.02~11.78	5	main
Ok11	41.75	35.3~48.2	2	12.48	10.06~14.76	9	main
Ok14A				24.77	24.18~25.36	2	early
Ok14A				14.59	11.95~17.73	4	main
Ok15A				5.85	4.63~6.28	5	late
Ok15B	33.40	30.6~35.9	3	6.71	4.62~8.20	4	late
Ok18A	26.10	23.7~28.9	4	5.86	5.25~6.49	6	late
Ok18B				12.79	12.69~12.89	2	main
Ok19	43.70	39.5~47.2	11	17.38	11.66~16.90	6	main
Ok-88-214-18A	27.85	27.1~28.6	2	10.59	9.87~11.31	2	main
Ok-88-214-18C	25.70	25.5~25.9	2	6.43	6.41~6.44	2	late
Ok-88-214-19A	41.30		2	8.94	8.19~9.68	2	late
Ok-88-214-19B	35.60	32.3~38.9	2	7.59	7.52~7.66	2	late
Ok-88-214-19C	48.30	47.1~49.6	3	12.94	11.29~14.60	2	main
Ok/A-33	57.70	56.6~58.4	3	15.28	12.83~16.31	6	main

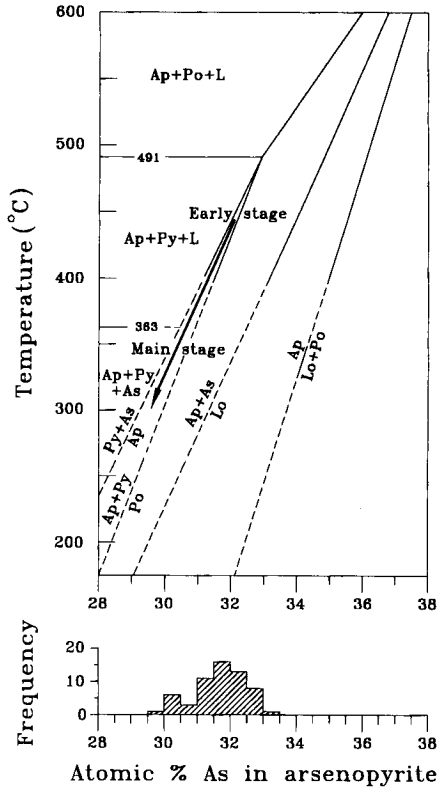
**Table 2.** The As content of arsenopyrite from the Ogkye mine.

Specimen	Arsenopyrite		
	Average	Atomic % As	
		Range	N
Ok3	31.38	31.33~31.42	2
Ok8B	30.51	29.14~32.07	3
Ok11	31.76	30.59~32.41	6
Ok14A	31.49	30.01~32.19	4
Ok15A	30.56	29.64~31.49	6
Ok15B	31.06	29.66~32.19	6
Ok18A	31.24	30.13~32.03	9
Ok19	32.29	31.99~32.86	3
Ok-88-214-18	30.18	29.52~30.84	2
Ok-88-214-18	31.64	31.54~31.74	2
Ok-88-214-19	31.63	31.14~31.93	3
Ok-88-214-19	31.62	30.99~32.20	3
Ok/A-33	31.04	30.62~31.52	5

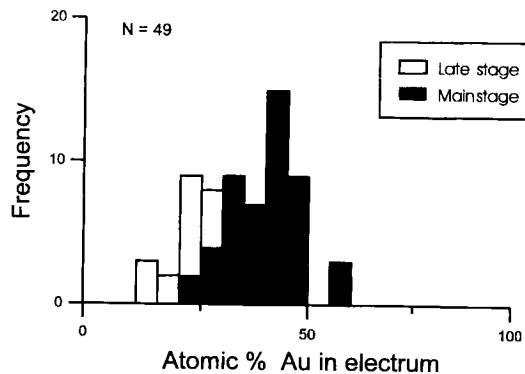
유비철석은 광화기 초기~중기에 걸쳐 정출되었으며 자형의 미립 내지는 중립 결정으로 석영중에 산점상 분포하며 주로 황철석과 함께 등립상의 모자이크 조직을 보이지만 간혹 섬아연석 또는 황철석내 포유물로 포획되어 산출되는 경우도 있다. 유비철석은 전반적으로 균등한 광화성을 보이며, As 함량은 29.4~32.9 atomic %를 갖는다 (Table 2, Fig. 5). 유비철석은 전반적으로 동일결정내에서 As 함량이 일정하지만, 간혹 세립질 자형결정에서 누대구조가 확인되며 중심부에서 As 함량이 높은 경향을 보인다.

Au-Ag계 광물인 에렉트럼은 주로 광화기 초기에 정출된 황철석, 유비철석 등의 파쇄면을 따라 세맥상으로 충전하는 방연석 및 섬아연석과 함께 공생관계를 보이며, 간혹 중기에 정출된 다결정질 황철석·유비철석·섬아연석내에 미립의 구형 또는 불규칙한 형태의 입자로 포획되어 산출된다. 광물공생관계를 근거로한 산출시기에 따른 에렉트럼의 금함량 변화는 주광화시기에는 58.4 atomic % Au인 에렉트럼이 정출되었으며 광화기 후기로 진행됨에 따라 12.3 atomic %로 금함량이 전반적으로 감소하는 경향성을 보여 준다 (Table 1, Fig. 6). 이러한 경향은 후기에 정출된 에렉트럼일수록 현저하여, 동일결정내에서도 >10 atomic % Au의 현저한 조성변화를 나타내고 있다 (Fig. 7). 본 광상의 광화최후기에 소량 산출하는 사면동석과 함 Ag-황염 광물인 농홍은석은 주로 방연석내에 벽개면을 따라 수  $\mu\text{m}$  크기로 용리되어 산출된다.

옥계광산산 에렉트럼과 섬아연석의 화학조성은 광화기별로 다소 변화하는 양상을 보여주고 있는데 광화기



**Fig. 5.** Pseudo-binary condensed T-XAS section of the Fe-As-S system (Kretschmar, Scott, 1976). Abbreviations: Ap=arsenopyrite, As=native arsenic, Lo=loellingite, Po=pyrrhotite, and Py=pyrite.



**Fig. 6.** Histogram showing Au content (atomic %) of electrum. Black area; main stage, white area; late stage.

중기 높은 FeS함량의 섬아연석과 낮은 Ag함량의 에렉트럼에서 말기로 갈수록 낮은 FeS함량의 섬아연석과 높은 Ag함량의 에렉트럼이 산출된다 (Fig. 8). 한편, 한국 중부지역 및 동남부지역에서 산출된 에렉트럼 (atomic % Ag) 및 섬아연석 (mole % FeS)과 비교하면, 옥계광

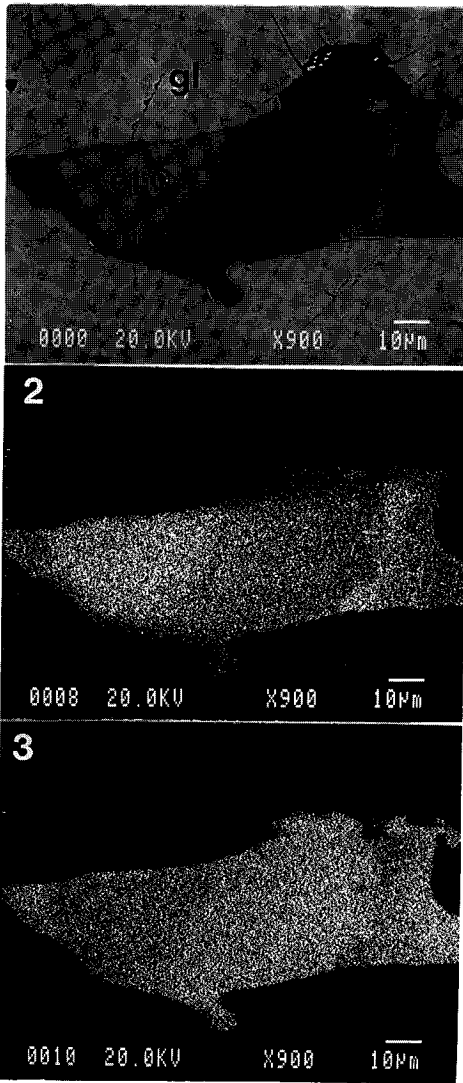


Fig. 7. Back-scattered electron image (1) and corresponding X-ray images (2 and 3) showing the textural feature of electrum (E1-C) overgrown by Ag-rich electrum (E1-R). 2. Au  $L\alpha$  X-ray emission image. 3. Ag  $L\alpha$  X-ray emission image.

산산 에렉트립과 섬아연석의 화학조성은 주로 황철석형 금광상 (Group II)과 잘 일치되고 있다 (Choi and Choi, 1995).

### 유체 포유물 연구

유체 포유물 연구는 주광화시기중 광석광물과 공존하고 있는 맥상 석영을 대상으로 하였으며, 광물 침전시 온도와 유체내 화학성의 변화 및 광화작용과 관련된 유체의

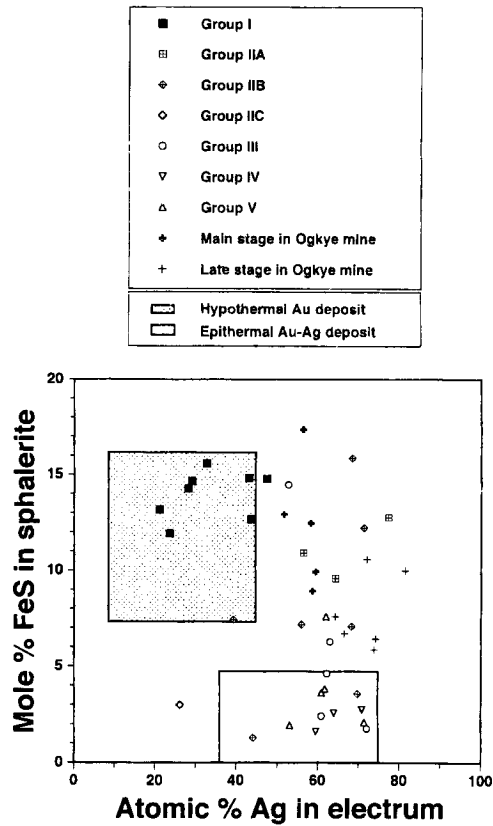


Fig. 8. Plot of Ag content (atomic %) in electrum versus FeS (mole %) in sphalerites.

진화과정 규명을 위하여 수행되었다. 유체포유물은 구형 또는 주상형태로 존재하며, 크기는 최저 수 $\mu$ m에서 최대 30  $\mu$ m정도이다. 유체포유물에 대한 가열 및 냉각실험은 Nikon 및 Leitz 현미경에 부착된 Fluid Inc. Gas-Flow Heating-Freezing System을 이용하였으며, 측정 오차 범위는 가열 실험시  $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ , 냉각 실험시  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이다. 염 농도는 냉각 실험결과를 이용하여 Potter 등 (1978)이 제시한  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 계와 Bozzo 등 (1973)이 제시한  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 계의 연구결과에 기초하여 계산하였다.

옥계 광상산 맥상석영내에 산출하는 유체포유물은 상온에서 관찰되는 상의 종류와 각상의 충전도 및 냉각·가열 실험시 각상의 거동 등에 의하여 4가지 유형 (I, II, III, IV형)으로 분류 된다.

I형 : 액상과 기상으로 구성되며, 가열 실험시 액상으로 균일화된다. 상온에서 고체상 또는 냉각 실험시 가스-수화물들이 관찰되지 않는다.

II형 : 액상과 함께 유체포유물 전체 부피의 60% 이상을 보이는 기상으로 구성되며, 가열실험시 기상으로 균일화

된다.

III형 : 상온에서는 I형과 동일하게 관찰되나 냉각 실험 시 가스-수화물 (clathrate)이 관찰된다.

IV형 : 상온에서 액상, 기상 및 액상의 CO<sub>2</sub>로 구성되며, 가열 실험시 22~27°C 사이에서 먼저 액상 CO<sub>2</sub>로 CO<sub>2</sub>상의 균일화가 이뤄지며, 그후 최종 액상으로 균일화 된다. 냉각 실험시 액상 CO<sub>2</sub>의 용융점 (~56.6°C)으로 미루어, 이들 액상 CO<sub>2</sub>는 CH<sub>4</sub> 등이 거의 포함되지 않은 순수한 CO<sub>2</sub> 상에 가까운 것으로 사료된다.

이상 4가지 유형의 유체포유물 중 I형을 제외한 모든 유형의 유체포유물은 주로 초생 유체 포유물로만 관찰된다. 이들 유체포유물의 크기는 일반적으로 12 μm의 장경을 갖는다.

옥계 광상 주광화시기 석영내 초생 유체포유물의 균일화온도 (T<sub>h</sub>)는 227~436°C (I형, 227~434°C; II형,

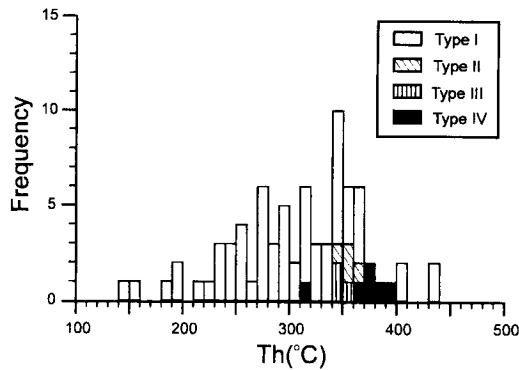


Fig. 9. Histogram of homogenization temperature data for types I, II, III and IV fluid inclusion from quartz for the Ogye mine.

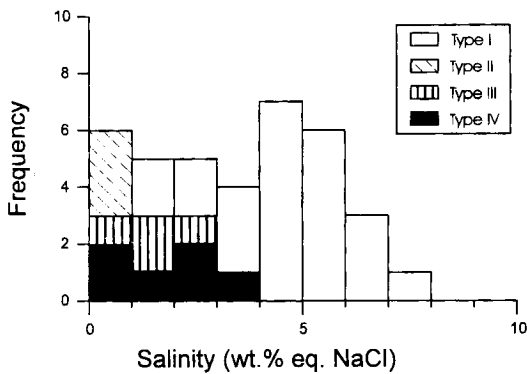


Fig. 10. Histogram of salinity data (wt. % eq. NaCl) for types I, II, III and IV fluid inclusion from quartz for the Ogye mine.

349~436°C; III형, 342~357°C; IV형, 314~402°C)이다 (Fig. 9). 후생 유체포유물은 일반적으로 215°C 미만의 균일화 온도를 보여준다.

이들 초생 유체포유물의 염농도는 0.2~7.3 eq. wt. % NaCl의 값을 보여 주며, 특히 II, III, IV형의 염농도 값은 I형에 비하여 상대적으로 낮은 값을 보여준다 (Fig. 10).

옥계광상의 금 부광대 석영시료내에서 주로 산출하는 함 CO<sub>2</sub> (IV형) 유체포유물은 주로 상대적 저염농도 (0~4 wt. % NaCl)를 보여 주며, 일반적으로 함 CO<sub>2</sub>량은 35~45 vol. %로 가열실험시 먼저 액상 CO<sub>2</sub>로 (at 27.7~30.5°C) 그후 CO<sub>2</sub>상의 소멸로 균일화되며, 드물게는 CO<sub>2</sub>상의 체적이 상대적으로 우세하고 (~65°C) CO<sub>2</sub> 상으로 최종 균일화되는 경우도 관찰된다. 후자의 경우 산출빈도와 크기에 의한 제한점으로 정확한 상 변화 온도 측정이 불가능하다. 이러한 함 CO<sub>2</sub> 유체포유물들의 산출은 이들 두 유체가 불혼화 용융 (CO<sub>2</sub> 비등)시 공존 포획되었음을 보여주는 것으로 사료된다. 이들 결과를 Bowers, Helgeson (1983)의 H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl계에 적용하여 계산된 초기 옥계 열수계내 CO<sub>2</sub> 함량 (X<sub>CO<sub>2</sub></sub>)은 약 0.2~0.6으로 추정된다.

옥계 광상의 주광화시기에 정출된 석영내 유체포유물의 균일화온도와 염농도 사이의 상관관계 (Fig. 11)는 초기 온도 감소 (부분적인 비등현상)에 수반된 CO<sub>2</sub> 불혼화 용융에 의하여 열수 유체의 진화가 주도 되었음을 보여 준다. I형과 IV형 유체포유물이 보여주는 온도 감소에 따른 각각의 염농도 변화 경향성은 함 CO<sub>2</sub> 유체의 불혼화 용융에 의한 유체내 염의 분별 작용에 의해 야기된 상대적으로 고 염농도의 H<sub>2</sub>O-rich 유체와 저염농도의 H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> 유체의 생성에 기인한 것으로 해석할 수 있다 (Bowers, Hel-

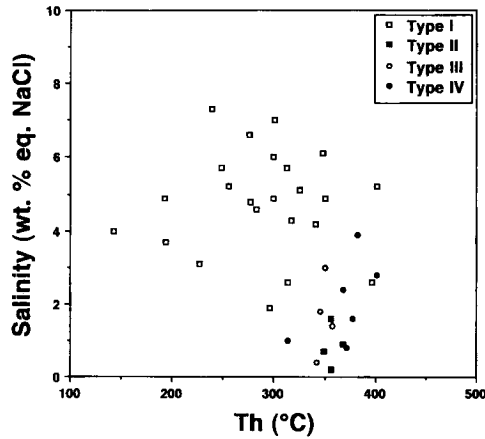


Fig. 11. Homogenization temperature and salinity diagram for types I, II, III and IV fluid inclusion from quartz for the Ogye mine.

geson, 1983). 한편, 상기 진화 기구에 의하여 형성된 상대적 고염농도 ( $\approx 8$  wt. % NaCl)의 H<sub>2</sub>O-rich 유체는 250°C를 전후하여 온도 감소와 함께 염농도 감소의 경향성을 보여 주는데 (Fig. 11), 이는 옥계 열수계내 주광화시기 말기에 저염농도의 차가운 순환 천수가 유입되었음을 지시한다. 옥계광상 함금열수계내 광화유체의 진화는 초기 온도 감소와 부분적인 비등현상에 수반된 CO<sub>2</sub> 불혼화 용융 및 이에 수반 야기된 CO<sub>2</sub> 가스의 이탈에 의한 냉각과 후기 천수유입에 의한 냉각 및 희석 작용에 의해 진행되었으며, 이에 수반된 지화학적 요인의 변화에 의하여 함금 광물의 침전을 비롯한 광화작용이 진행되었다.

### 유황 안정동위원소 연구

옥계광상 금광화작용시 침전된 황화광물 관련 유황종의 근원과 광화작용시

지화학적 환경규명 등을 위하여 주광화시기에 산출된 황화광물을 대상으로 유황안정동위원소 실험 연구를 수행하였다. 이들 실험을 위한 가스추출과 분석은 Grinenko (1962)에 의하여 제시된 표준 기법을 활용 수행하였으며, Canyon Diablo Troilite (CDT) 표준시료를 이용 Nuclide 질량분석기 (6 inch-60 degree ratio)에 의하여 분석되었다. 실험오차는  $\pm 0.1\%$ 이다.

옥계광상 황화 광물들의 유황동위원소비값은 3.5~5.9% (유비철석, 5.6~5.9%; 섬아연석, 5.1~5.4%; 방연석, 3.5~4.0%; Table 3)이다. 이들 각 황화광물들과 공생관계에 있는 석영시료내 초생유체포유물 균일화온도를 활용하여, 동위원소 평형식 (Ohmoto and Rye, 1979)들에 의하여 구한 이들 황화광물 산출시 광화유체내 H<sub>2</sub>S 유황종의 유황안정동위원소비값은 4.8~6.1%로 광물 공생관계와 관련한 동위원소비값의 체계적인 변화를 크게 보여주지 않는다. 그러나 후기 산출 방연석의  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 값 (6.1%)으로 미루어 광화 후기로 가면서 CO<sub>2</sub> 불혼화용융에 수반된 유황 동위원소 재평형에 의한  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 값의 증가 경향이 있음을 알

수 있다. 옥계광상의 광물공생관계에서 초기 자류철석의 산출과 CH<sub>4</sub>가 포함되지않은 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-NaCl계 광화유체의 특성 등에 의하면  $X_{\text{CO}_2}=0.2$  및  $f_{\text{O}_2}\approx 10^{-33}$ , 중성 내지 약산성의 광화유체 화학성들을 추론 할 수 있으며 (Shelton 등, 1988), 옥계 열수계 광화유체내 용존 유황종중 우세종은 환원 유황종인 H<sub>2</sub>S임을 알 수 있다. 결론적으로 상기 계산된 H<sub>2</sub>S 유황종의 유황안정동위원소비값 (4.8~6.1%)은 옥계 광상 광화유체내 전 유황종의 유황안정동위원소비값으로 확인된다. 이는 옥계광상내 금속광화작용과 관련된 유황이 주로 화성기원임을 알 수 있다.

### 광석광물의 생성환경

광상에서 산출되는 광석광물의 화학조성과 공생관계를 열역학적자료에 적용하면 광물 정출시의 물리 화학적 생성환경 및 변화과정을 추정할 수 있다. 그러므로, 옥계 광상의 금광화작용시 지화학적 환경요소의 규명을 위하여 유비철석·섬아연석·에렉트럼의 화학조성 (Tables 1, 2)과 공생관계를 Au-Ag (Barton, Toulmin, 1964), Fe-As-S (Kretschmar, Scott, 1976), Fe-Zn-S (Scott, Barnes, 1971), Fe-O-S (Helgeson, 1969)계에 적용하여 광물 생성시 제한환경요소를 검토하였다.

Fig. 5는 본 광화기 초기에서 중기에 걸쳐 정출된 유비철석의 As 함량 (atomic %)과 온도와의 관계를 제시한 것으로 광화초기 광물의 생성온도는 약 450°C에서 시작되어 광화중기에는 약 300°C까지 진행되었음을 알 수 있다.

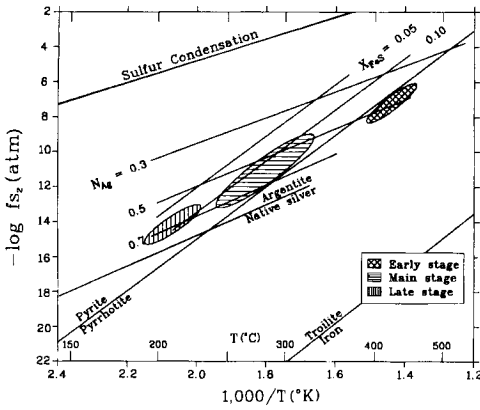
옥계광상의 금광화작용과 관련된 광화초기에서 말기까지 온도와 유황분압의 변화는 에렉트럼의 함량 ( $N_{\text{As}}$ )과 섬아연석의 FeS 함량 (mole %) 및 공생광물관계를 이용한 T-f<sub>S<sub>2</sub></sub> 상관계 도표 (Fig. 12)에 제시된 바와 같다. 금광화작용은 주로 광화중기에는 고온 고유황분압하에서 시작되어 광화후기로 갈수록 온도 감소와 함께 유황분압이 감소하는 환경에서 진행되었음을 알 수 있다. 특히, 에렉트럼은 주로 300°C를 전후한 온도와 약 10<sup>-11</sup> atm의 유황

**Table 3.** Sulfur isotope data of sulfide minerals from the Okgye mine

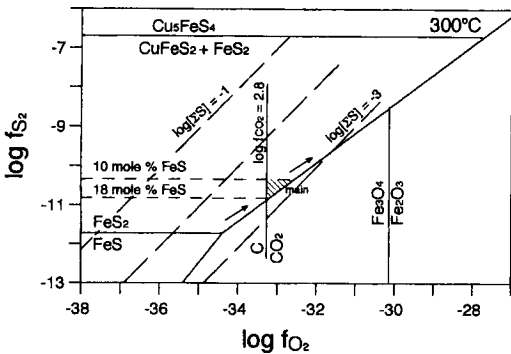
Sample No.	Mineral	$\delta^{34}\text{S}(\%)$	T(°C)*	$\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}^{**}$	Stage
Ok-11	arsenopyrite	5.9			early
Ok-18-1	sphalerite	5.1	300	4.8	main
Ok-18-2	galena	3.5	300	5.4	main
Ok-19-1	sphalerite	5.4	300	5.1	main
Ok-19-2	glena	4.0	280	6.1	late
Ok-19-3	arsenopyrite	5.6			early

\* Based on the fluid inclusion data and panagenetic constraints.

\*\* Calculated using the isotope fractionation equations compiled by Ohmoto, Rye (1979).



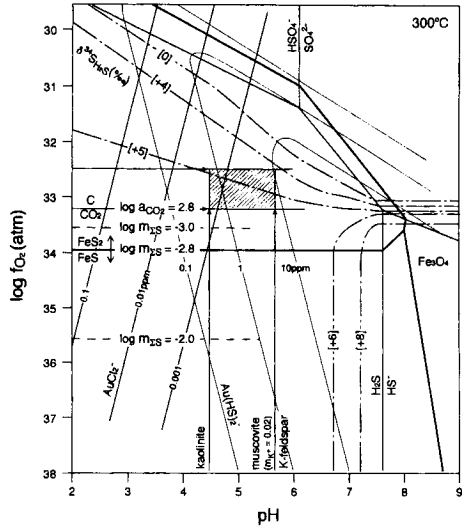
**Fig. 12.** Sulfur fugacity-temperature diagram showing the possible sulfur fugacity and temperature ranges. NAg: atomic fraction Ag in electrum. XFeS: mole fraction of FeS in sphalerite. Thermochemical data were taken from Barton, Toulmin (1964) and Barton, Skinner (1979).



**Fig. 13.** Plot of  $\log f_{O_2}$ - $f_{S_2}$  calculated at 300°C showing mineral stabilities for main-gold mineralization stages (shaded area). Ranges in  $f_{S_2}$  calculated from FeS content of sphalerite (Scott, Barnes, 1971).

분압 조건하에서 정출되었다.

옥계 광상내 금광화작용을 비롯한 주광화시기의 평균 온도인 300°C에서의 지화학 변화요소는  $f_{S_2}$ - $f_{O_2}$  (Fig. 13) 및  $f_{O_2}$ -pH (Fig. 14) 상관계 도표로부터 확인할 수 있다. 광물 공생관계와 섬아연석내 FeS함량 및 유체내 CO<sub>2</sub> 함량 등을 활용하여 산출된 주광화시기 산소분압 조건은 10<sup>-32.5</sup>~10<sup>-33.8</sup> atm이다. 한편 본 광상 주광화작용 관련변질작용은 주로 건운모화작용으로, kaolinite-sericite 및 sericite-quartz-K-feldspar 관계식과 유체포유물 실험결과를 활용 계산된 K<sup>+</sup> 활동도 ( $m_K^+ = 0.02$ )에 의하여 옥계 열수계 광화유체의 pH조건 범위의 (4.5~5.6; at 300°C)를 추정할 수 있다 (Fig. 14). 상기 지화학 요소들과 유황 안정동위원소비값을 적용하여 살펴본 옥계 열수계의 주광화시기 광화유체내 함유이온복합체의 용해도는 Au (HS)<sub>2</sub>의 경우



**Fig. 14.** Fugacity of oxygen versus pH diagrams showing ore mineralization environments at 300°C and the solubility of Au (HS)<sub>2</sub> and AuCl<sub>2</sub> (calculated from Seward, 1984). Thicker solid line represents stability fields for minerals in the system Fe-O-S for  $\log m_{S_2} = -2.8$ ; thinner solid line, stability boundaries for aqueous sulfur species; vertical line with arrow, muscovite-K-feldspar-qtz and kaolinite-muscovite boundaries ( $m_K^+ = 0.02$ ); dashed-dotted lines, isopleths of the sulfur isotope ratio (using the data in Ohmoto, 1972) for H<sub>2</sub>S in equilibrium with a fluid with a  $\delta^{34}S_{S_2} = 5.0$  per mil. Total sulfur = 0.05 m.

약 10~1 ppm, AuCl<sub>2</sub>의 경우 ≤0.001 ppm으로 확인된다. 옥계광상내 주된 금의 침전이 300±30°C 범위에서 야기된 것으로 미루어 열수계내 금의 이동은 주로 함유유복합체 상으로 이루어졌으며, 금의 침전은 온도감소와 함께 CO<sub>2</sub> 불혼화용융에 수반된 CO<sub>2</sub> 가스의 이탈에 의한 pH 증가와 부분적인 비등 현상에 의한 유황분압의 감소 등 지화학 요소의 변화에 기인된 것으로 사료된다.

### 고찰 및 결론

최선규와 위수민 (1992)은 국내 금-은 광상에 대하여 광석의 Ag/Au비, 광물공생관계, 에렉트럼내 Au 함량, 섬아연석의 화학조성 등을 기준으로하여, 자류철석형 금광상 (Group I) 황철석형 금광상 (Groups IIA와 IIB) 휘은석형 금-은 광상 (Group III) 안티몬형 금-은 광상 (Group IV) 안티몬형 은광상 (Group V) 등 6개 유형으로 분류하였다. 옥계광상은 광석의 Ag/Au비가 1.5~36.7 범위에 걸쳐 분포하며, 평균값이 11.7로 금광단일형 광상의 범주에 해당한다. 그리고 맥의 산출특성과 에렉트럼과 공생하는 Fe-S계 광물 등을 근거로 상기분류에 적용하면, 황철석형 금광



상에 해당된다. 또한, 옥계광산 광화기 중기~말기에 걸쳐 산출된 섬아연석 에렉트럼의 화학조성이 황철석형 금광상 (Group IIB)과 비교적 잘 일치하고 있다.

옥계 광상은 단층열극을 통한 발달된 합-금 열수 석영 맥상광체로, 주 광화시기 광화작용은 0.2~7.3 eq. wt. % NaCl 상당 염농도를 갖는 광화유체로부터 약 400°C에서 230°C에 걸쳐 진행되었다. 옥계 합금 열수계의 진화는 초기 온도 감소와 부분적인 비등현상에 수반된 CO<sub>2</sub> 불혼화 용융과 후기 천수 유입에 의한 냉각 및 회석작용에 의해 진화하였으며, 이들 진화 과정에 수반된 지화학적 요인의 변화에 기인 합금 광물을 비롯한 광석광물의 침전이 유도 되었음이 규명되었다. 이들 황화광물 침전에 기여한 열수 계내 우세 유형종은 환원유황종인 H<sub>2</sub>S로 화성기원임을 알 수 있다.

옥계광산산 에렉트럼과 섬아연석의 화학조성을 일본 천열수성 금은광상 및 심열수성 금광상과 비교하면, 서로 상이한 결과를 보여주고 있다 (Fig. 8). 따라서, 이러한 에렉트럼 및 섬아연석의 화학조성·유체포유물의 균질화 온도 유황동위원소에 의한 온도 등을 성인적 측면에서 비교검토하면, 옥계광상은 중열수성 금광상으로 추정 된다.

## 사 사

본 연구는 한국과학재단 후원 전략광물자원 연구센터의 지원에 의해서 수행되었으며, 옥계광산의 광석시료를 제공하여 주신 서울대학교 전효택 교수님과 EPMA분석 및 자료처리를 도와준 고려대학교 최인식 석사, 박상준군에게 감사를 드린다.

## 참고문헌

권병수, 왕규택, 박명호, 황해걸, 김준호, 정영부, 정동화, 문영환, 강홍석, 강백규, 김성식 (1987) 한국의 광상. 대한광업진흥공사, 10호, 1012p.  
김영인, 이경환, 김동문, 최걸, 김정완, 조용성 (1982) 정비 금광산 요약. 한국동력자원연구소, 606p.

- 최신규, 위수민 (1992) 에렉트럼의 화학 조성과 관련된 한국 중부지역 금은 광상의 성인적 특성. 지질학회지, 28권, p. 196-217.  
황인호, 전효택 (1994) 옥계 합금석영맥광상 주변모암에서의 원소들의 일차분산. 자원환경지질, 27권, p. 549-556.  
Barton, P.B. Jr. and Toulmin, P. III (1964) The electrometallurgical method for the determination of the fugacity of sulfur in laboratory sulfides system. Geochim Cosmochim. Acta, v. 28, p. 619-640.  
Bowers, T.S. and Helgeson, H.C. (1983) Calculation of thermodynamic and geochemical consequences of nonideal mixing in the system H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl on phase relations in geologic systems : Equation of state for H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl fluids at high pressures and temperatures. Geochim. Cosmochim. Acta. v. 47, p. 1247-1275.  
Bozzo, A.T., Chen, J.R. and Barduhn, A.J. (1973) The properties of hydrates of chlorine and carbon dioxide : Internat. Symposium Fresh Water Sea. 4th, Heidelberg, Germany. Sept 9-14. v. 3, p. 437-451.  
Choi, S.G and Choi, S.H. (1995) Contrasting styles of gold and silver mineralization in the central and southeastern Korea. Econ. Env. Geol., v. 28, p. 587-597.  
Grinenko, V.A. (1962) Preparation of sulfur dioxide for isotopic analysis. Zhurnal Neorgan. Cheskoj Khimii, v. 7, p. 2478-2483.  
Helgeson, H.C. (1969) Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures, Am. Jour. Sci., v. 267, p. 729-804.  
Kretschmar, U. and Scott, S.D. (1976) Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application. Can. Min., v. 14, p. 364-386.  
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. In Geochemistry of hydrothermal ore deposits (Barnes, H.L Ed.) 798p. Wiley and Sons Pub. Co., New York, p. 509-567.  
Potter, R.W., III. Clynne, M.A. and Brown, D.L. (1978) Freezing point depression of aqueous sodium chloride solution. Econ. Geol., v. 73, p. 284-285.  
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

1996년 12월 21일 원고접수