

龍化鑛山の 金銀鑛化作用

尹 錫 台* · 朴 喜 寅**

Gold and Silver Mineralization in the Yonghwa Mine

Seok-Tai Youn* and Hee-In Park**

ABSTRACT : The Yonghwa gold-silver deposits are emplaced along N15°~25° W trending fissures in middle Cretaceous porphyritic granite or Precambrian Sobaegsan gneiss complex.

The results of paragenetic studies suggest that vein filling can be subdivided into four identifiable stages; stage I : the main sulfide stage, characterized by base-metal sulfide minerals, iron oxides and minor electrum, stage II : electrum stage, stage III : electrum and silver-bearing sulfosalts stage, stage IV : post ore stage of carbonates and quartz.

The ore mineralogy suggests that depositional temperature of the formation of the gold and silver minerals are estimated as 200 to 250 °C and 140 to 180 °C, respectively. Sulfur fugacity of the formation of the gold and silver minerals are estimated as $10^{-14.0}$ to $10^{-12.2}$ atm and $10^{-18.5}$ to $10^{-17.2}$ atm, respectively. A consideration of the pressure regime during ore deposition bases on the fluid inclusion evidence of boiling suggests lithostatic pressure of less than 180 bars. This range of pressure indicate that vein system lay at depth of 700m below the surface at the time during mineralization. Salinities of ore-bearing fluids range from 0.4 to 6.9 wt.% equivalent NaCl.

The sulfur and carbon isotopic data reveal that these elements were probably derived from a deep-seated source. The $\delta^{18}\text{O}$ of the hydrothermal fluid was determined from $\delta^{18}\text{O}$ values of quartz and calcite. Oxygen and hydrogen isotopic studies reveal that meteoric water dominate over ore-bearing fluid.

序 言

충청북도 영동군 용화면과 전라북도 무주군 설천면의 경계지역에는 좁은범위에 금은광상이 밀집되어 분포하고 있다. 이 지역에 분포하고 있는 금은광상은 선캄브리아기의 편마암류를 관입한 반상화강암체를 중심으로 하여 반상화강암체 내에는 용화광산과 월전광산의 각 광상이 있고 반상화강암체 주변부에는 월성광산, 나립광산 (현 수왕광산) 및 길영광산의 각 광상이 부존하

고 있다. 이 연구는 용화광산의 금은 광화작용에 대하여 연구한 결과이다.

용화광상에 대한 지금까지의 연구발표된 자료를 살펴보면 지질에 대하여는 설천도폭 (윤석규 등, 1968)이 발간되어 있고, 용화광산의 지질 및 광상에 대하여는 Gallagher (1963), 변정규 등 (1983)의 보고가 있으며, 금은광상의 광화작용에 대하여는 박노영 등 (1986), 최선규 등 (1988)의 연구가 있다. 그러나 이러한 연구는 설천금은광상구 (김옥준, 1971) 전체에 대한 개략적인 연구이며 이 지역 광상에 대한 체계적인 성인연구는 아직 수행되지 않았다.

이 연구는 현재 개발중인 용화광산 2번갱을 주대상으로 하여 연구지역에 대한 지질, 금은 광화작용의 관계화성암으로 생각되는 반상화강암의 산출상태, 광물·

*전남대학교 지구과학교육과 (Dept. of Earth Science Education, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea)

**서울대학교 지질과학과 (Dept. of Geological Science, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

암석화학적 특징, K-Ar 연령등을 검토하여 금은광화작용과 반상화강암과의 성인적 관계를 검토하였으며, 광상의 산출상태, 광석의 광물조성, 광석광물의 광물화학, 광석광물의 광물공생관계, 유체포유물, 모암변질광물의 K-Ar 연령, 유황, 산소, 탄소 및 수소안정동위원소등을 검토하여 이 지역의 금은광화작용의 특징을 고찰한 것이다.

이 연구는 1990년도 문교부 학술연구 조성비의 지원에 의하여 수행된 것이다.

地質

연구지역은 소백산육괴의 중앙부에 해당하는 지역으로서 이 지역의 지질은 선캠브리아기의 소백산 편마암 복합체와 앰피볼라이트, 백악기의 반상화강암, 염기성 및 규장암등의 산성 맥암류로 구성되어 있다 (Fig. 1).

소백산 편마암복합체는 이 지역에서 미그마타이트질 편마암으로 구성되어 있으며 이에 운모편암, 규암등이 소규모로 협재된다. 이를 기 발간된 지질도폭에는 호상

흑운모편마암 (홍승호 등, 1980), 주입편마암 (윤석규 등, 1968) 등으로 표시하였고, 송용선 (1987)은 사질암원 준편마암으로 표현하였는데, 이 연구에서는 이들을 총칭하여 소백산 편마암복합체로 기재하였다. 앰피볼라이트는 소백산 편마암복합체를 관입하였고 신장된 렌즈상으로 산출된다. 반상화강암은 소백산 편마암복합체와 앰피볼라이트를 관입하고 있다. 반상화강암체는 연구지역의 서측에서는 N10°E 방향으로 긴 모양을 가지나, 중앙부에서는 거의 EW 방향으로 길게 관입하고 있다. 최후기에 맥암류들이 전술한 모든 암석들을 소규모로 관입하였다. 이중 산성암맥인 규장암맥 중에는 편마암과 반상화강암의 경계를 따라 관입한 것도 있다.

반상화강암의 흑운모의 K-Ar 절대 연령은 98.7 ± 3.6 Ma로서 중생대 백악기 중기에 속한다.

이 지역의 편마암류와 편암류의 엽리는 오봉산 남쪽과 월전, 흘계부락 부근에서는 주향이 N30°~75°E에 50°~70°NW로 경사하나 나림리 부근에서는 주향이 N35°~60°E에 50°~70°SE로 경사한다. 이는 오봉산 동쪽에 NE의 축을 가지며 NE 쪽으로 plunge하는 배사구

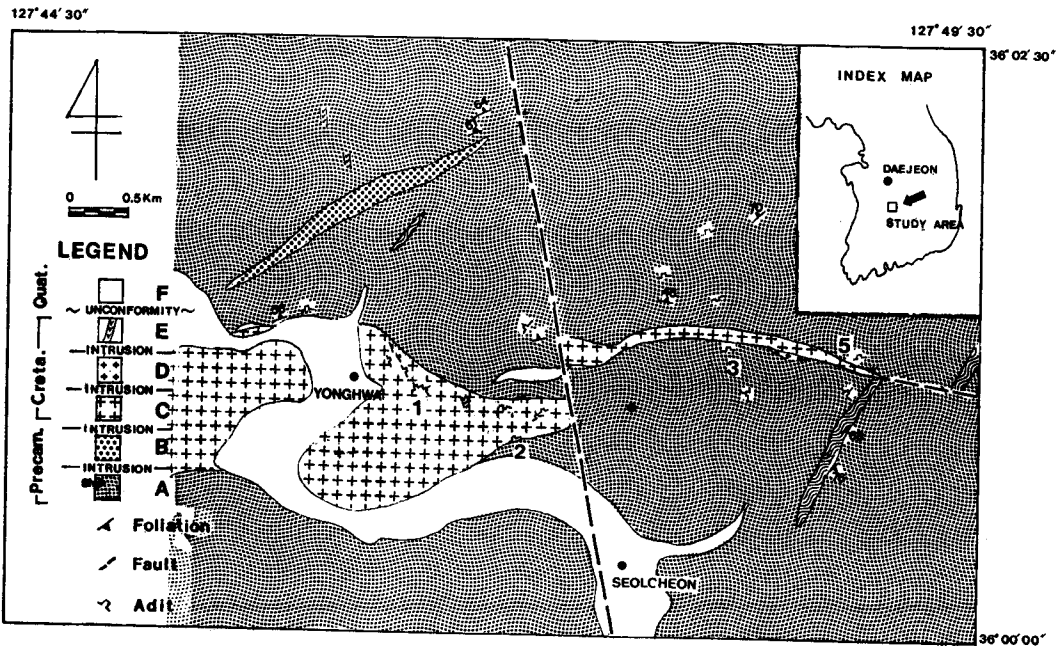


Fig. 1. Geologic map of the Yonghwa-Seolcheon mining district. A= Sobaegsan gneiss complex (Sh= Mica schist), B= Amphibolite, C= Porphyritic granite, D= Felsite, E= Dike rock, F= Alluvium, 1= Yonghwa mine, 2= Weoljeon mine, 3= Weolseong mine, 4= Narim mine, and 5= Kilyoung mine.

조에 기인하는 것으로 생각된다. 단층은 월전부락을 지나는 N15°W 주향의 것이 있어 반상화강암체는 이 단층으로 약 600m 절단 이동되어 있다. 월전부락 부근에서 동쪽으로 길게 발달하는 암맥상 반상화강암체가 차지하는 자리는 EW의 주향을 갖는 단층일 가능성이 있다. 절리는 N20°~40W° 계의 것이 우세하다. 용화광산의 광맥들의 주향은 대부분이 N15°~25°W계이므로 이 지역내의 단층과 절리의 방향과 같다.

斑狀花崗岩

김옥준 (1971), 이민성 (1981)에 의하면 이 지역에 분포하고 있는 금은광상은 설천금은광상구에 속하고 금은광상의 광화작용이 주라기 화강암과 성인적으로 관련이 있는 것으로 보고하였고 최선규 등 (1988)은 영동지역의 금은 광화작용에 관한 연구에서 김옥준, 이민성의 의견에 따르고 있을 뿐이다. 이 반상화강암을 백악기 화강암으로 추정 한 사람은 많다 (윤석규 등, 1968; 홍승호 등, 1980; 박노영 등, 1986; 송용선, 1987; 최선규 등, 1988). 그러나 이 반상화강암이 금은광상의 성인과 관계가 깊은 것으로 보고 검토된 연구는 없다. 따라서 이 연구에서는 반상화강암에 대한 산출상태, 암석기재, 암석 및 광물화학, 절대연령측정등의 연구를 실시하여 보았다.

岩石記載

연구지역에 분포하고 있는 반상화강암체는 서측에서는 동서방향으로 약 1.5km이고 남북방향으로 약 2km 정도되는 동그스름한 윤곽을 가지나, 중앙부를 지나 동측으로는 동서방향으로 길쭉한 모양을 가지며 나림광산 동쪽에서 소멸된다. 암체의 폭이 넓은 곳에서는 암체의 중심부와 연변부의 조직의 차이가 없어 석기가 중립질인 반상조직을 보이나 이 암체의 폭이 좁아진 동측부에서는 암체 연변에 급냉대 (chilled margin)를 갖는다. 급냉대 (chilled margin)의 암석은 장석반정 이외에 석영반정도 특징적으로 들어있고, 석기는 세립질이어서 일견 화강반암처럼 보인다. 전체적으로 반정광물의 크기는 정장석; 1.0cm, 사장석; 0.7cm, 비교적 투명한 석영; 0.5cm이다. 석기를 이루고 있는 광물들은 세립질의 석

Table 1. Modal compositions of the porphyritic granite from the Yonghwa mine area.

Mineral	1	2	3	4	5	6	Average
Quartz	25.8	34.9	23.6	24.9	27.2	31.1	27.9
K-feldspar	29.2	29.2	30.9	30.4	30.0	34.5	30.7
Plagioclase	42.5	33.0	41.5	41.2	39.4	30.6	38.0
Biotite	1.6	1.2	3.2	2.0	1.8	1.7	1.9
Hornblende	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1	0.1
Zircon	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1
Apatite	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1
Chlorite	0.4	0.2	0.0	0.6	0.5	0.1	0.3
Epidote	0.0	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1
Calcite	0.0	0.1	0.0	0.3	0.1	0.8	0.2
Sericite	0.4	0.6	0.2	0.4	0.2	0.3	0.3
Opaque minerals	0.1	0.4	0.3	0.2	0.2	0.5	0.3

영, 정장석 및 사장석이 대부분이고 소량의 흑운모, 저어콘, 인회석, 녹염석, 녹니석, 각섬석 및 불투명 광물들을 포함하고 있다.

암석 절단면에서 반정의 함량을 구하고, 동일시료의 석기가 많은 부분의 박편을 제작하여 현미경하에서 구한 화강암의 평균 모드조성은 Table 1와 같으며 이 모드조성을 가지고 Q-A-P 삼각도에 표시하면 화강암 영역에 해당한다 (Fig. 2).

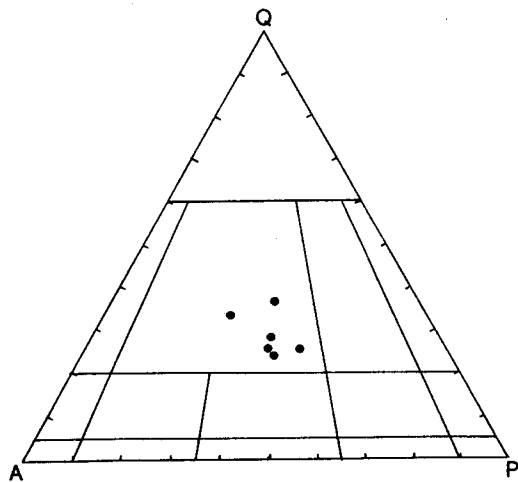


Fig. 2. O-A-P diagram of modal composition of the porphyritic granite based on IUGS classification.

Table 2. Chemical analyses (wt. %) and norms of the porphyritic granite in the Yonghwa mine area.

Oxides	1	2	11	4	7	8	10	Average	12
SiO ₂	71.35	71.89	72.36	71.58	71.60	71.85	71.90	71.79	77.42
Al ₂ O ₃	14.94	14.86	14.23	14.86	14.83	14.63	14.65	14.71	13.49
FeO	1.05	0.71	0.50	0.93	1.30	1.00	0.85	0.91	0.76
Fe ₂ O ₃	0.73	0.91	1.51	0.80	0.64	0.92	0.98	0.93	0.85
MgO	0.68	0.61	0.79	0.63	0.73	0.74	0.67	0.69	1.12
CaO	1.82	1.63	1.94	1.77	1.86	1.88	1.99	1.84	1.29
Na ₂ O	3.94	3.92	3.92	3.81	4.11	3.85	3.85	3.91	0.05
K ₂ O	4.50	4.48	3.66	5.53	3.97	4.30	4.22	4.38	3.91
TiO ₂	0.27	0.26	0.31	0.28	0.31	0.31	0.27	0.29	0.21
P ₂ O ₅	0.09	0.09	0.10	0.08	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08
MnO	0.05	0.05	0.07	0.04	0.08	0.08	0.07	0.06	0.07
H ₂ O(+)	0.05	0.18	0.26	1.21	0.16	0.14	0.19	0.31	0.35
H ₂ O(-)	0.23	0.29	0.32	0.27	0.31	0.25	0.20	0.27	0.17
Total	99.70	99.88	99.97	99.79	100.00	100.05	99.93	99.92	99.77
Al/Ca+K+Na	1.01	1.04	1.02	0.96	1.02	1.01	1.00	-	2.02
Q	25.56	28.14	30.66	28.14	27.36	29.22	30.36	28.49	58.02
Or	26.69	26.69	21.68	26.13	23.35	25.58	25.02	25.02	22.80
Ab	33.54	33.01	33.01	31.96	34.58	32.49	32.49	33.01	0.52
An	8.34	7.23	8.62	7.78	8.34	8.62	4.17	7.59	5.56
C	0.51	1.02	0.61	1.02	0.71	0.41	2.34	0.95	7.14
Fs	1.85	0.13	0.13	0.53	1.45	0.66	0.40	0.74	0.40
En	1.70	1.00	2.00	1.60	1.80	1.80	1.70	1.66	2.80
Mt	0.93	1.39	0.70	1.16	0.93	1.39	1.39	1.13	1.39
Il	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.46
Ap	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
Ht	0.00	0.00	0.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	100.00	99.56	99.99	99.99	99.99	100.00	99.99	99.95	99.99
Salic	94.98	96.43	94.92	95.37	94.68	96.66	94.92	95.40	94.38
Femic	5.09	3.13	4.40	3.90	4.79	4.46	3.11	4.14	5.05
D.I.	85.79	87.84	85.35	86.23	85.29	87.29	87.87	85.81	81.34
O.R.	38.48	53.55	58.09	43.63	30.69	45.29	50.91	-	50.15

12: Altered porphyritic granite.

岩石化學

主成分元素

반상화강암 시료에 대한 주성분원소의 분석치와 이를 바탕으로 구한 CIPW 노름치는 Table 2와 같다. 분석한 시료중 7개는 신선한 시료이며 시료번호 12는 광맥 부근의 열수변질을 심하게 받은 시료이다. 이 암석의 석영, 정장석, 사장석의 노름값을 가지고 Q-Or-Pl

삼각도에 도시하면 화강암 영역에 해당하며, 반상화강암에 대한 마그마의 type을 알아보기 위하여 Na₂O+K₂O의 함량과 SiO₂의 함량을 가지고 Irvine and Barager (1971)의 그림에 표시하여 보면 연구지역의 반상화강암은 비알칼리암계열에 속한다 (Fig. 3). 노름 Pl에 대한 Al₂O₃의 함량과의 관계를 도시하면 (Irvine and Barager, 1971) 연구지역의 반상화강암은 비알칼리암계열중에서 칼크알칼리암에 해당한다 (Fig. 4). Takahashi

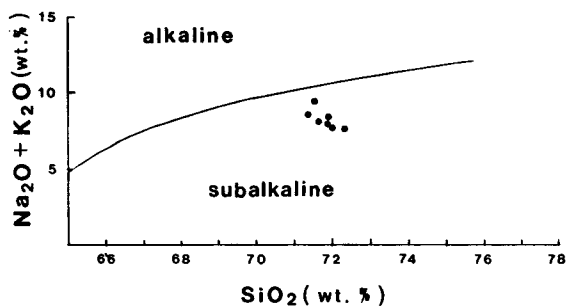


Fig. 3. Plots of $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs. SiO_2 in wt.% for the porphyritic granite from the Yonghwa mine area. The boundary line is based on Irvine and Barager (1971).

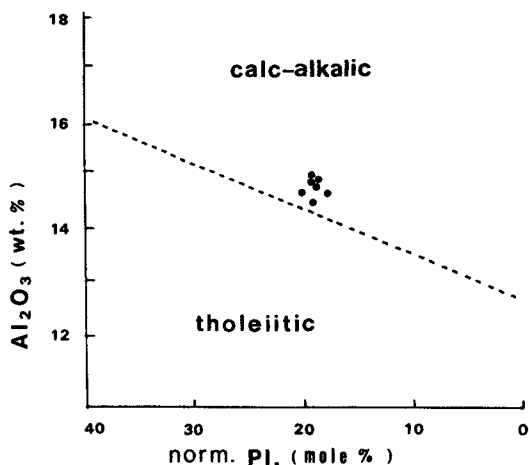


Fig. 4. Plots of Al_2O_3 (wt.%) vs. normative P1 of the porphyritic granite from the Yonghwa mine area. The boundary line is based on Irvine and Barager (1971).

등은 (1980) ACF 삼각도에서 I-type granitoid와 S-type granitoid를 구분하는 것이 효과적이라고 하였는데 연구 지역에 분포하는 화강암은 SiO_2 의 함량이 71.35~72.36 wt. %의 범위에 들고 Molal $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}$ 의 비가 1.1이하이며 normative Corundum 치가 1%이하로서 I-type granitoid에 해당한다 (Fig. 5). TiO_2 -FeO- Fe_2O_3 를 이용한 삼각도는 화강암의 산화정도를 알수있는 그림 (Tsusue and Ishihara, 1974)으로서 이 삼각도에 반상화강암의 값을 도시해보면 Fig. 6과 같이 자철석 계열에 해당한다.

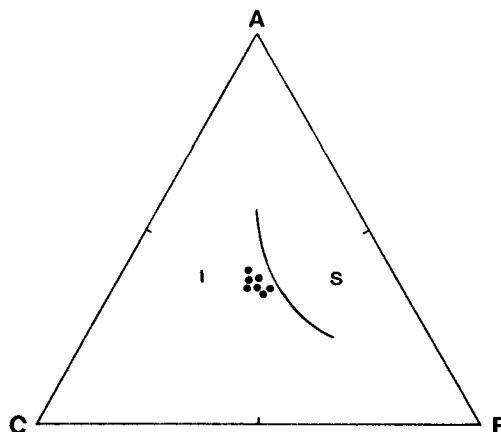


Fig. 5. ACF diagram of the porphyritic granite from the Yonghwa mine area. The boundary line is based on Hine et al (1978). A= Al_2O_3 - Na_2O - K_2O , C= CaO, and F= FeO+MgO.

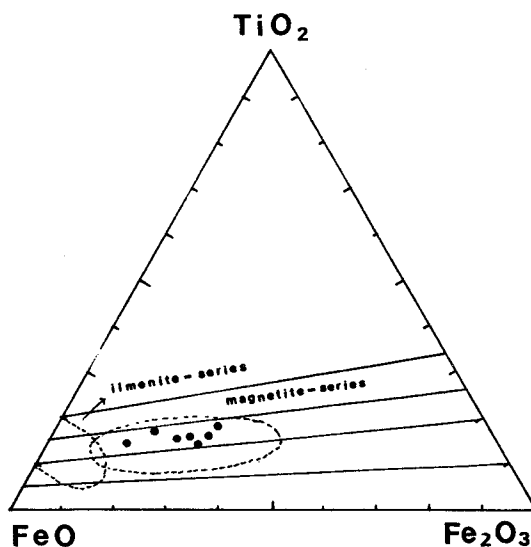


Fig. 6. TiO_2 -FeO- Fe_2O_3 (mole %) diagram of the porphyritic granite from the Yonghwa mine area. The boundary lines are based on Tsusue and Ishihara (1974).

微量元素

주성분원소를 분석한 동일 암석시료에 대하여 미량 원소를 분석한 결과는 Table 3과 같다. Table 3에 의하면 주연부에 해당하는 암석 (10번)이 중앙부에 분포하

Table 3. Trace elements analyses of the porphyritic granite in the Yonghwa mine area (in ppm).

Element	1	2	11	4	7	8	10	Average	12
Ba	828	954	681	921	760	735	927	829	202
Co	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cr	10	9	13	9	11	11	10	10	9
Cu	5	4	5	55	7	7	6	12	4
Li	6	10	19	3	9	2	6	8	32
Nb	14	13	14	14	15	15	12	14	11
Ni	9	9	11	10	11	10	10	10	10
Sc	2	2	4	2	3	3	2	3	2
Sr	340	361	354	365	366	341	359	355	72
V	23	21	27	22	25	25	24	24	21
Y	14	14	17	15	16	15	14	15	10
Zn	31	29	40	29	41	40	43	36	33
Zr	20	20	22	26	24	26	21	23	28
D.I.	85.79	87.84	85.35	86.23	85.29	87.29	87.87	-	81.34

12: Altered porphyritic granite.

Table 4. Comparison of trace elements analyses of granitoids from different locality (in ppm).

Element	Mine				Study area	
	Dunjeon	Dongweon	Haman	Imog	A	B
Ba	773	908	463	667	829	202
Co	-	-	6.6	-	1	1
Cr	85	67	320	9	10	9
Cu	5.5	95	183	6	12	4
Li	-	-	9	-	8	32
Nb	12	13	10	11	14	11
Ni	28	21	23	4	10	10
Sc	11	8	-	8	3	2
Sr	470	518	363	336	355	72
V	58	67	59	52	24	21
Y	16	15	20	21	15	10
Zn	37	40	1236	41	36	33
Zr	184	226	130	149	23	28

Dunjeon; Mean values of 2 granites in Dunjeon area (Park, 1990), Dongweon; Porphyritic granite in Dongweon area (Park, 1990), Haman; Mean values of 3 granodiorites in Haman area (Choi, 1986), Imog; Mean values of 11 granitoids in Imog area (Lee, 1990), A; Fresh porphyritic granite, and B;

고 있는 암석에 비해 Ba, Zn의 함량이 많이 농집되어 있고 Co, Cr, Cu, Li, Nb, Ni, Sc, Sr, V, Y, Zr 등은 거의 동일함을 보인다. 변질을 받은 시료 (12번)와 신선한 시료에 포함된 미량원소의 함량을 비교하면 변질을 받은 시료속에 Ba, Cu, Nb, Sr, V, Y, Zn 등의 함량이 적게 포함되어 있고, Li, Zr 등의 함량은 높다. 반

면에 중금속에 속하는 Cr, Co, Ni 등은 거의 차이가 없다. 이러한 사실은 광화작용이 진행되는 동안 모암변질 작용과정에서 금속원소중 Ba, Cu, Zn, Sr, Nb 등의 함량이 감소하고 Li, Zr 등의 함량이 증가한 것은 광상과 관련지어 생각할 때 중요한 특징이라 할수 있다.

Table 4는 연구지역과 둔전광산 근처의 역둔화강암 (박희인 등, 1990), 동원광산 근처에 분포하고 있는 물운화강암 (박희인 등, 1990), 함안지역에 분포하고 있는 화강암류 (박희인 등, 1985), 이목화강암 (이민성 등, 1990)과의 미량원소의 평균치를 비교한 표이다. Table 4에 의하면 연구지역에 분포하고 있는 반상화강암중에 들어 있는 미량원소중 Ba의 양은 둔전, 동원, 함안 및 이목지역에 분포하고 있는 화강암류에 들어있는 미량원소의 양보다 높은 값을 보인다. 그러나 다른 미량원소는 둔전 및 동원지역의 화강암보다 낮다. 이목 화강암과 비교하면 Ba, Cu, Nb, Ni, Sr 등의 함량이 높고 Sc, V, Y, Zn, Zr 등의 함량은 낮다. 함안지역과 비교하면 Ba, Nb의 함량이 높고 Co, Cr, Cu, Li, Ni, Sr, V, Zn, Zr의 함량은 낮다.

稀土類元素

주성분원소와 미량원소를 분석한 7개의 신선한 반상화강암 시료에 대하여 희토류원소를 분석한 결과는 Table 5와 같다. Table 5에서 보는바와 같이 연구지역의 반상화강암의 희토류원소의 함량과 지각속에 포함된 희

Table 5. Rare earth elements analyses of the porphyritic granite in the Yonghwa mine area (in ppm).

Element	1	2	11	4	7	8	10	Average	Taylor
La	36.90	33.90	50.90	41.80	39.70	41.90	39.00	40.6	30.0
Ce	66.15	61.75	90.17	77.19	72.43	76.87	71.63	73.7	60.0
Pr	6.41	6.02	8.48	7.52	6.95	7.12	6.91	7.1	8.2
Nd	22.10	21.20	28.20	26.10	23.70	24.80	24.20	24.3	28.0
Sm	3.63	3.37	4.43	4.38	3.95	3.76	4.03	3.9	6.0
Eu	0.73	0.74	0.78	0.80	0.80	0.72	0.75	0.8	1.2
Gd	2.78	2.66	3.33	3.31	3.05	2.66	3.14	3.0	5.4
Dy	2.67	2.54	3.02	3.09	2.76	2.50	2.91	2.8	3.0
Ho	0.49	0.46	0.56	0.57	0.51	0.45	0.54	0.5	1.2
Er	1.19	1.15	1.30	1.37	1.26	1.17	1.37	1.2	2.8
Yb	1.34	1.35	1.54	1.62	1.43	1.29	1.55	1.4	3.0
Lu	0.18	0.19	0.21	0.22	0.19	0.17	0.21	0.2	0.5
Σ REE	144.57	135.33	192.92	167.97	156.73	163.41	156.24	159.60	149.3
La/Yb	27.54	25.11	33.05	25.80	27.76	32.48	25.16	28.12	20.0
Ce/Yb	49.36	45.74	58.55	47.65	50.65	59.59	46.21	51.11	20.0
Eu/Sm	0.20	0.22	0.18	0.18	0.20	0.19	0.19	0.19	0.2
Eu/Eu*	0.68	0.73	0.59	0.62	0.68	0.67	0.62	0.65	-
(La/Sm)N	6.24	6.18	7.07	5.86	6.17	6.86	5.34	6.24	-
(Ce/Yb)N	12.54	11.70	14.88	12.05	12.87	15.07	11.83	12.99	-
(La/Yb)N	18.33	16.83	22.03	17.12	18.51	21.52	16.88	18.74	-
Σ Ce	135.92	126.98	182.96	157.79	147.53	155.17	146.52	150.41	133.4
Σ Y	8.65	8.35	9.96	10.18	9.20	8.24	9.72	9.18	15.9

Eu* : Eu value derived by interpolation between Sm and Gd., N; Chondrite-normalized value, Σ Ce; Sum of light REE (La to Eu), and Σ Y; Sum of heavy REE (Gd to Lu).

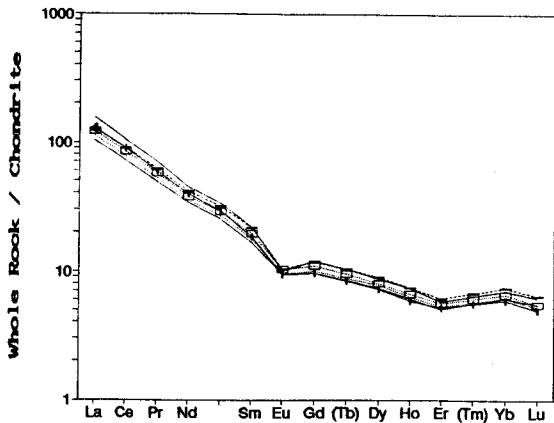


Fig. 7. Chondrite-normalized REE patterns of the porphyritic granite from the Yonghwa mine area.

토륨원소의 평균함량 (Taylor, 1964)을 비교하면, 연구 지역의 반상화강암에는 La, Ce 등의 가벼운 희토류원소가 많이 농집되어 있고 나머지 희토류원소들은 적게 농집되어 있다.

Fig. 7은 원자번호 56에서 71번의 원소 함량을 chondrite normalized 된 양을 로그척도로 도시하였다. 연구지역에 분포하고 있는 반상화강암의 희토류원소의 변화양상은 언양화강암과 유천화강암의 분화양상 (Hong, 1985)과 비슷한 경향을 보인다. 희토류원소의 변화경향을 보면 LREE가 HREE에 비하여 상당히 부화되어 있으며 Eu/Eu*가 0.59~0.73이고 Eu/Sm이 0.18~0.22에 해당하는 negative anomaly 를 나타내며 Er 도 negative anomaly 를 나타낸다. Σ REE 치는 135.33~192.92이고, Eu/Eu*는 0.59~0.73이므로 변화가 심하지 않다.

鑛床

鑛床의 產出狀態

용화-설천지구에는 EW 방향으로 좁고 긴모양을 갖는 반상화강암체내와 주변부에 20여개의 N5°~25°W계

Table 6. Gold-silver veins in the Yonghwa gold-silver deposits.

Mine	Vein	Number of vein	Strike	Dip	Width(m)	Length(m)	Wallrock	Remark
Yonghwa	Kumi - 1, 2.	2	N70° W	65° SW	0.3	50	Gn, Sch.	WJ-Main
	Main	1	N25° W	80° SW	0.3~1.5	250	Gr	
	1, 2, 3, 4.	4	N15° ~20° W	70° SW	0.2~1	300	Gr	
	Cheonshin - 1, 2.	2	N20° W	75° SW	0.1~1	250	Gr	
	Weoljeon	1	N18° W	80° SW	0.3~0.5	250	Gr	
	Samjeong	1	N20° W	85° SW	0.4~0.7	150	Gn	
	Others	4	N20° W	65° ~90° SE	0.1~0.2	50	Gr	

Gn= Gneiss, Sch= Mica schist, Gr= Porphyritic granite, and WJ= Weoljeon.

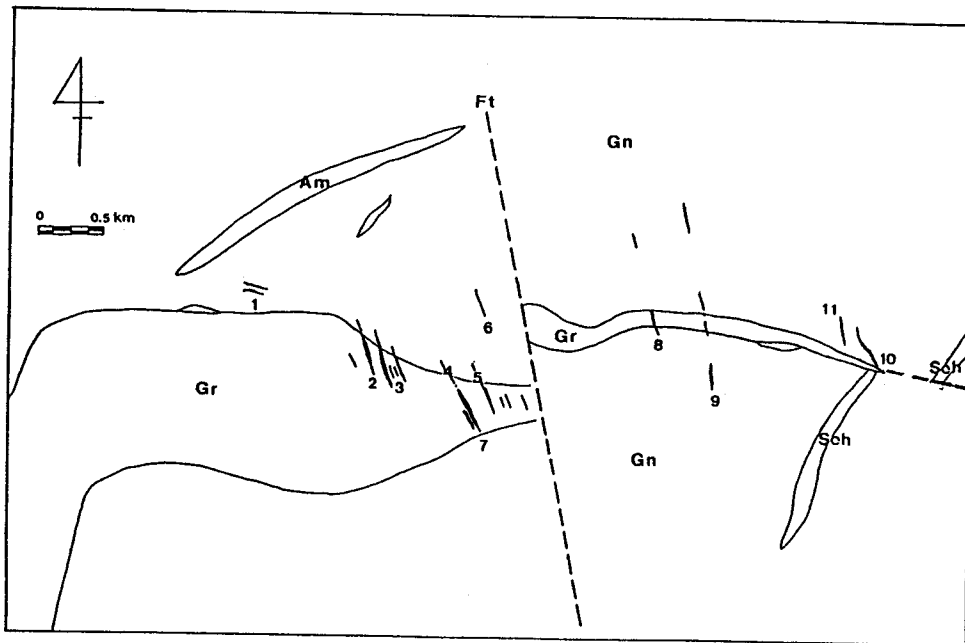


Fig. 8. Vein map of the Yonghwa gold-silver deposits. Gn= gneiss, Sch= Mica schist, Am= Amphibolite, Gr= Porphyritic granite, and Ft= Fault. Yonghwa mine: 1= Kumi vein, 2= Main vein, 3=1, 2, 3, 4, vein, 4= Cheonshin vein, 5= Weoljeon vein, and 6= Samjeong vein. Weoljeon mine: 7= Main vein. Weolseong mine: 8= North main vein, and 9= No. 3 vein. Narim mine: 10= Main vein. Kilyoung mine: 11= Main vein.

의 광맥이 평행 발달하고 있다. 이 중에서 용화광산의 광맥들은 EW 방향으로 긴 2.0×1.2km 구역내에 N15°~25°W의 주향을 갖는 13개의 광맥과 N70°W의 주향을 갖는 2종류의 광맥들로 구성되어 있다.

용화광산의 광맥의 부존지역은 구미지구, 용화지구, 월전지구, 삼정지구로 나누어 진다. 이들 광맥의 분포

는 Fig. 8 과 같으며 각 광맥의 주향, 경사, 맥폭, 주향 방향으로의 연장, 모암등을 요약하면 Table 6 과 같다.

용화지구에는 반상화강암체내에 주향이 N15°~25°W 에 70°~80°SW로 경사하는 5개맥이 평행 발달한다. 이 중에서 용화본맥은 맥폭이 0.3~1.5m이고 주향방향으로 약 250m 개발되어 있다. 이 맥은 과거에 상당히 많

이 개발된 주맥으로서 이를 개발하기 위하여 level을 달리하는 구 1, 2, 3개가 개설되어 있다. 용화 본맥의 동쪽에는 용화 본맥과 평행하는 4개의 광맥이 발달한다. 이를 용화 2개의 갱구 가까이에서 동쪽으로 가며 용화 1, 2, 3, 4맥이라 부르기로 한다. 4개조의 맥 중에는 제1맥의 발달이 제일 건설하며 맥폭은 0.2~1.0m까지 팽축이 심하나 약 200m 정도 개발되었다. 지금까지 제1맥이 주개발대상이었으나 현재는 제2맥에서 약 80m, 제 4맥에서 60m 정도 연맥 굴진되어 있다. 월전 지구에는 천신맥과 월전맥이 있는데 맥의 주향은 $N18^{\circ} \sim 20^{\circ} W$, $75^{\circ} \sim 80^{\circ} SW$ 방향의 경사를 가지며 맥폭은 0.1~1.0m에 약 250m 정도 연장이 확인된다. 천신맥은 월전광산 본맥과 동일맥으로서 북부연장은 용화광산에서 개발되고 남부연장은 월전광산에서 개발되어 있으나 갱도가 폐쇄되어 입향이 불가능하다. 삼정지구에 발달하는 삼정맥의 주향은 $N20^{\circ} W$ 에 $85^{\circ} SW$ 로 경사하고 맥폭은 약 0.4m 정도이며 150m 정도의 연장을 가지나 입구의 붕락으로 입향이 불가능하다. 구미지구에는 $N70^{\circ} W$ 주향에 $65^{\circ} SW$ 의 경사를 갖는 광맥이 2개조 발달하고 있으나 맥폭이나 연장이 건설하지 못한 편이다 이들 광맥의 부존을 규제한 지질구조는 EW 방향으로 긴 모양을 갖는 반상화강암체와 $N15^{\circ} \sim 25^{\circ} W$ 방향의 열극계이다. $N15^{\circ} \sim 25^{\circ} W$ 계의 열극은 반상화강암을 전단 이동시킨 월전부락을 지나는 $N15^{\circ} W$ 의 주향을 갖는 단층과 같은 계열의 열극으로서 이 지역의 반상화강암체 내에는 같은 방향의 주향을 갖는 절리가 우세하게 발달한다.

광맥에는 빗구조, 누피구조 등이 발달하고 각 광맥은 생성시기를 달리하는 광석들이 서로 끊고 끊기는 구조를 보이는 복성맥들이다.

화강암체내에 배태된 용화지구와 월전지구의 광맥과 접하는 화강암은 공통적으로 건운모화 및 녹니석화되어 있다.

용화광산에서 산출되는 건운모에 대하여 K-Ar 절대연령 측정결과 95.79 ± 1.20 Ma로서 반상화강암의 연령과 거의 비슷하다.

鑛石의 構造

용화광산에서 산출되는 광석들은 생성시기를 달리하는 것들이 서로 끊고 끊기는 구조를 보이며 시기를 달

리하는 광석들은 광물조성 및 조직에 차이가 있다. 광맥들은 거의 대부분이 복성맥들로서 광석의 구조와 광물조성 및 조직을 검토한 결과 그 광화시기는 크게 4기로 나눌 수 있다.

I기의 광석은 괴상의 회색석영과 같이 산출되는 광물들로서 자철석, 적철석, 금홍석 등의 유화광물과 소량의 휘은석, 에렉트럼 등이 산출된다. 황철석은 심하게 파쇄되어 있으며 황철석의 파쇄된 틈을 따라 II기의 백색석영이 틈을 채우고 있다 (Fig. 9-A). 용화광산에서는 황철석과 섬아연석이 광물쌍을 이루며 산출된다.

II기의 광석은 모암의 암편이나 I기의 광석을 포함하고 있으며 석영은 백색석영이고 III기의 석영에 의해 절단 당한다. II기의 광석은 일반적으로 빗구조, 누피구조를 보이며 황철석, 섬아연석, 방연석, 황동석, 휘은석, 에렉트럼 등으로 구성되어 있다.

III기의 광석은 육안적으로 확인되지 않으나 광석현미경 하에서 II기의 광석을 절단하는 III기의 광석을 볼 수 있다. III기의 광석광물은 황동석, 휘은석, 자연은, 미라지라이트, 농홍은석, 프라이버자이트, 폴리바사이트, 잘파이트 등이다.

IV기의 광석은 백색의 석영과 탄산염광물의 정출기이며 전기의 광석들을 세맥상으로 절단하거나 광물편을 포함하고 있다. 용화광산 제2개의 광맥에서는 방해석과 앵커라이트가 백색석영과 함께 산출된다. IV기의 광맥에는 황철석이 소량 산출되나 대부분이 석영맥과 방해석맥으로 되어있다 (Fig. 9-B).

鑛石鑛物

磁鐵石: 자철석은 광화 I기에 산출되는 광석광물로서 판상이나 엽편상으로 산출되나 가끔 광화 I기의 황철석 결정안에 포유물로 산출되기도 한다. 엽편상의 적철석결정과 intergrowth하기도 하고 적철석에 의하여 교대되기도 한다 (Fig. 9-C).

赤鐵石: 적철석은 자철석과 마찬가지로 I기의 광석에서 산출되는 광물로서 일부는 자철석을 교대하며 자철석의 잔류물을 함유하는 것도 있다. 현미경하에서 bluish tint를 띠는 회색을 나타내며 lamellar twinning을 보이고 특히 내부반사가 심홍색을 보이는 것이 특징적이다.

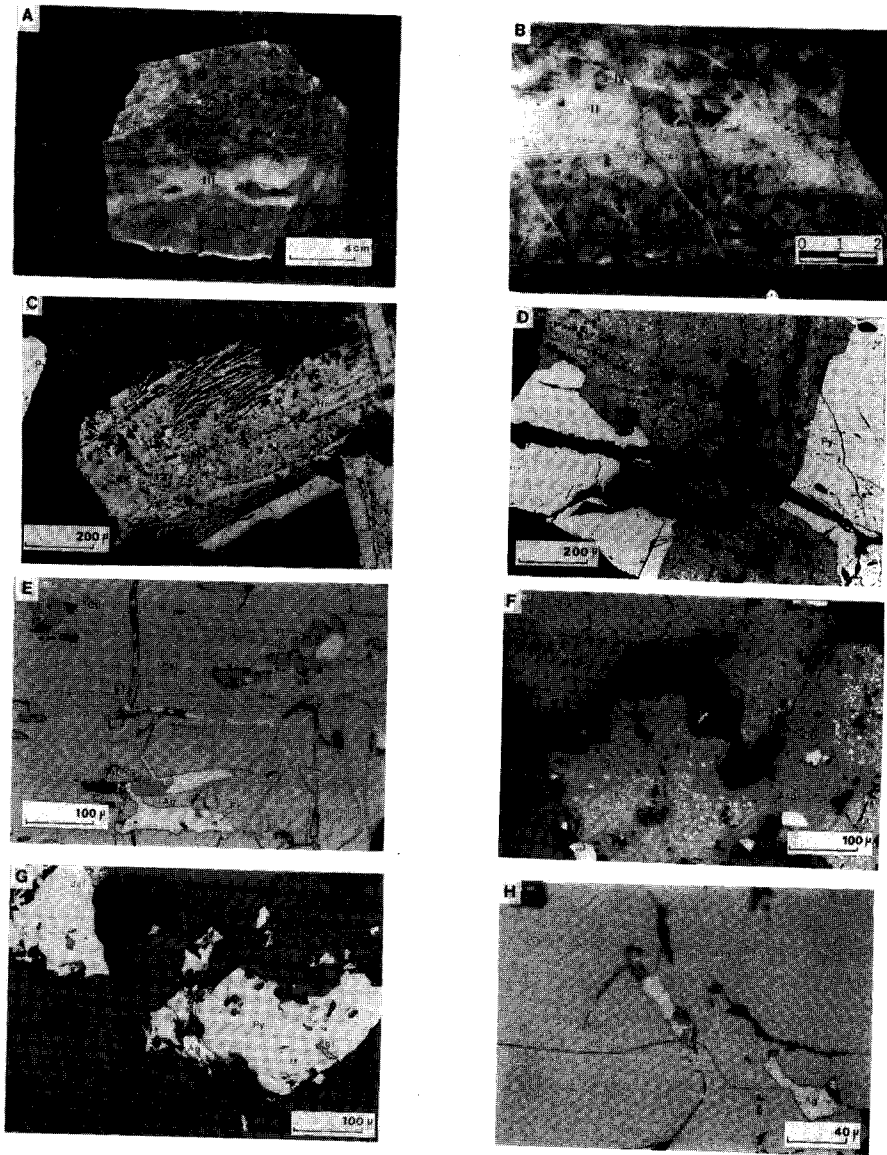


Fig. 9. Microphotographs showing the mineral paragenesis from the Yonghwa Au-Ag deposits. A; Base-metal sulfides of stage I (mainly pyrite) are cut by stage II vein and both are cut again by veins of stage III, B; Remnants of stage I ores and electrum-bearing quartz of stage II are cut by stage IV carbonate, C; Intergrowth of magnetite and hematite of earlier stage I, D; Sphalerite of stage I showing chalcopyrite disease is cut by pyrite of stage II, E; Pyrite of fractured stage II is filled with electrum, freibergite, chalcopyrite, native silver of stage III, F; Electrum and quartz of stage II fills interstices in ores of stage I, G; Pyrite of stage II is replaced by native silver, miargyrite, argentite and jalpaite of stage III, and H; Fractured pyrite of stage II is filled with veinlets of native silver, argentite and jalpaite of stage III. I, II, III, IV= mineralization stage, Hm= Hematite, Mt= Magnetite, Py= Pyrite, Cp= Chalcopyrite, Sl= Sphalerite, El= Electrum, Agt= Argentite, Fr= Freibergite, Ag= Native silver, Asp= Arsenopyrite, Jal= Jalpaite, and Mir= Miargyrite.

Table 7. Electron Microprobe analyses of arsenopyrites from the Yonghwa gold-silver deposits.

Mine	Associated Minerals	As	Fe	Co	Ni	Sb	S	Total	Fe	As
		(wt.%)						(atom.%)		
Yonghwa	Py-S1	42.56	34.51	0.10	0.45	0.05	23.01	100.68	32.46	29.84
		41.81	34.83	0.04	0.02	0.00	23.61	100.31	32.51	29.09
	S1-Gn	42.65	35.20	0.10	0.12	0.00	23.80	100.87	32.46	29.32
		42.92	35.08	0.04	0.10	0.00	22.08	100.12	33.24	30.32
		41.83	35.83	0.07	0.00	0.00	22.45	99.58	33.39	29.55
		42.50	35.34	0.08	0.03	0.19	22.24	100.38	33.41	29.96

Py= Pyrite, S1= Sphalerite, and Gn= Galena.

黃鐵石: 황철석은 가장 풍부하게 산출되는 광물로서 I, II, III, IV기를 통하여 산출된다. I기의 황철석은 섬아연석과 공생하거나 섬아연석을 절단하기도 하며 II기의 석영에 의해 절단된다. I기의 황철석은 파쇄작용에 의해 심하게 파쇄되어 있고 이러한 파쇄대를 따라 II기와 III기의 에렉트립과 함은유염광물이 산출된다 (Fig. 9-E). II기의 황철석은 황동석 dot를 갖고 있는 I기의 섬아연석의 fracture를 따라 발달하거나 방연석과 공존한다. III기의 황철석은 전기 광석의 파쇄된 틈을 따라 III기의 석영과 같이 산출되거나 Ag-Sb-S계 광물이나 Ag-Cu-S계 광물들과 공생하며 발달하고 때로는 정동석영의 결정표면에서 자형으로 Sb계 광물과 함께 산출되기도 한다. IV기의 황철석은 IV기의 석영, 탄산염광물등과 함께 산출된다. I, IV기의 황철석은 결정이 잘 발달하였으며 입자의 크기가 각각 0.3cm, 0.1cm 되는 것이 발견되나 II, III기의 것은 미립이다.

砒鐵石: 유비철석은 I기의 광석에서만 산출된다. I기의 황철석과 공존하며 황철석내에 10-30 μ 크기의 자형 또는 반자형결정으로 산출되기도 한다 (Fig. 9-F). Table 7은 I기 유비철석의 EPMA 분석결과이다. 유비철석의 Co 함량은 0.01~0.10 wt. %이고 Ni의 함량은 0.00~0.45 wt. %, Sb의 함량은 0.00~0.19 wt. %이다. 유비철석중의 As의 atomic %는 29.08~30.31이며 단일 결정내에서는 중앙부에서 S-rich하고 주변부로 가면서 As-rich해지는 경향을 보인다.

磁硫鐵石: 자류철석은 I기의 광석에 국한되어 산출되며 I기의 황철석과 같은 시기나 또는 약간 후기에 황동석, 방연석과 함께 소량 산출되거나 황철석안에서 포유물로서 bleb 상으로 산출된다. 크기는 보통 10-20μ

정도이며 자성을 갖는 단상정계에 속하는 자류철석이다.

白鐵石: 백철석은 I기의 광석에서 황철석의 주위에서 lameller twinning을 보이며 소량 산출된다. 결정이 미립이며 강한 이방성을 띠며 황철석보다 더 희게 보인다. 백철석은 I기의 자류철석이 변질되어 생성된 백철석으로 생각된다.

閃亞鉛石: 섬아연석은 I, II, III기의 광석에서 모두 산출된다. 용화광산에서 산출되는 섬아연석은 육안적으로는 I기에 해당하는 것만 관찰가능하나 광석현미경 관찰결과 끊고 끊기는 상호 관계에 따라 II, III기의 섬아연석이 관찰되며, II기와 III기에 해당하는 섬아연석은 황동석의 점적을 함유하지 않고 I기의 섬아연석보다 광학적으로 dull grey color를 띤다. I기에 해당하는 섬아연석은 방연석과 밀접하게 공존하며, 섬아연석내의 fracture를 따라 II기의 황동석이 발달하기도 한다. I기의 섬아연석은 II, III기에 비하여 황동석의 점적을 갖는것이 특징이다. I기의 섬아연석내의 점적은 섬아연석내에 고르게 분포하지 않고 하나의 섬아연석 결정내에 황동석의 점적이 밀집하는 부위와 전혀 포함되지 않는 부위가 있다 (Fig. 9-F). 섬아연석내의 점적의 생성기구에 대하여는 용리현상 (Burger, 1934; Nakano, 1937; Sugaki and Yamae, 1952; Sugaki and Tashiro, 1957), epitaxial growth 또는 교대현상 (Schwartz, 1931; Hutchison and Scott, 1979; Wiggins and Crig, 1980), Chalcopyrite disease (Barton, 1978; Eldridge et al, 1983; Barton et al, 1987), Mechanical mixing (Roberts, 1965) 등의 다양한 해석이 있다.

본 연구에서는 섬아연석의 동일 입자내에서 황동석

Table 8. Electron Microprobe analyses of sphalerites from the Yonghwa gold-silver deposits.

Mine	Stage	Associated Minerals	Zn	Fe	Cu	Cd (wt.%)	Mn	In	S	Total	FeS (mol.%)
Yonghwa	I	Py-Asp	53.57	10.79	0.00	0.40	0.15	0.02	35.62	100.55	19.67
		Py	53.92	11.06	0.29	0.17	0.11	0.00	35.34	100.89	19.36
		Py-Asp	54.51	10.96	0.00	0.10	0.13	0.11	33.86	99.67	19.05
	II	Py-Gn	54.42	11.04	0.04	0.24	0.18	0.11	33.65	99.68	19.19
		Py-El	53.56	11.03	0.00	0.24	0.15	0.00	33.53	99.41	20.68
		Py-El	63.43	1.99	0.10	0.29	0.00	0.09	34.70	100.60	3.54
	III	Py-El	62.14	1.95	0.25	0.42	0.01	0.00	35.65	100.42	3.54
		Cp-Py	64.08	1.84	0.04	0.14	0.04	0.08	33.63	99.85	3.25
		Py	64.56	1.53	0.01	0.01	0.03	0.19	34.26	100.59	2.70
		Cp-Ag	64.52	1.26	0.02	0.25	0.00	0.00	34.49	100.54	2.24
		Py	65.34	0.43	0.04	0.28	0.00	0.00	34.85	100.94	0.76
		Py	65.63	1.09	0.10	0.16	0.00	0.00	33.31	100.29	1.91
	III	Py	65.64	0.41	0.00	0.79	0.02	0.07	33.56	100.49	0.72
		Py	66.23	0.25	0.00	0.55	0.00	0.00	32.60	99.63	0.44
		Py	64.34	0.99	0.76	0.30	0.00	0.00	34.96	100.35	1.77
		Py	66.26	0.39	0.00	0.25	0.02	0.00	33.05	99.97	0.68
		Py	64.34	0.99	0.76	0.30	0.00	0.00	34.96	100.35	1.77

Py = Pyrite, Asp = Arsenopyrite, Gn = Galena, El = Electrum, Cp = Chalcopyrite, and Ag = Native silver.

의 점적을 갖지 않는 신선한 부위와 점적을 갖는 부위의 Cu와 Fe의 함량을 EPMA로 정량분석한 결과 I기의 섬아연석은 황동석 점적을 갖지 않는 부위의 섬아연석은 Cu를 거의 포함하지 않는데 대하여 황동석의 점적을 갖는 부위에서는 0.29wt. %의 Cu가 포함되어 있다. 이와같이 황동석의 점적을 포함하는 부위와 포함치 않는 부위의 섬아연석의 Cu와 Fe 함량에 차이가 나는 것은 섬아연석중의 황동석 점적이 후기의 "Chalcopyrite disease"에 의하여 생성되었을 가능성이 크다. I기의 섬아연석은 I기 황철석 포유물을 갖기도 하고, 에렉트럼과 공존하기도 한다. 섬아연석과 황철석이 심한 파쇄 작용을 받아 깨진틈을 따라 II기의 석영과 에렉트럼이 산출된다.

EPMA로 분석한 각 시기별 섬아연석의 화학조성은 Table 8과 같고 이 화학분석치를 가지고 FeS mole %를 구하여 도시한 것이 Fig. 10이다. Fig. 10에 의하면 각 시기별 섬아연석의 FeS mol. %가 뚜렷한 차이를 보이며 후기로 가면서 점점 적어지는 변화양상이 뚜렷하다.

方鉛石: 방연석은 I, II, III기 광석에서 산출된다. I기 광석에서는 섬아연석과 황철석의 경계나 황철석내의 틈을따라 발달한다. I기 방연석은 황동석의 점적을 갖는 섬아연석과 공생하나, II기 방연석은 에렉트럼,

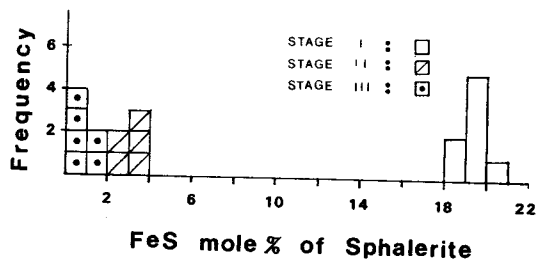


Fig. 10. Histograms of FeS content of sphalerites from the Yonghwa gold-silver deposits.

섬아연석, 황철석과 공존한다. III기의 방연석은 가끔 함은유염 광물을 함유하기도 한다. Table 9는 I기 방연석의 EPMA 분석결과로 Bi의 함량이 3.58~4.68wt. %로서 상당히 높게 나타나며, Ag의 함량은 1.26~1.93 wt. %로서 Ag의 함량도 높게 나타난다. I기의 방연석 중에는 AgBiS₂의 mole %가 7.07~9.45로서 bithmuthian 방연석에 해당하는 것이 있다.

黃銅石: 황동석은 I, II 및 III기 광석에서 산출된다. I기 광석중 황동석은 섬아연석을 교대하여 섬아연석안에 dot 상으로 산출되고, II기에는 I기 황철석내의 fracture를 따라 발달하며, III기의 황동석은 자연은

Table 9. Electron Microprobe analyses of galenas from the Yonghwa gold-silver deposits.

Mine	Stage	Associated Minerals	Pb	Cu	Sb	Bi	Ag	S	Total	AgBiS ₂ (mol.%)
Yonghwa	I	Py-Cp	79.94	0.00	0.14	4.68	1.93	14.12	100.81	9.45
			81.26	0.00	0.09	4.36	1.70	13.70	100.11	8.54
		Py-S1	81.04	0.00	0.00	3.78	1.26	13.29	99.37	7.07
		Py-Cp	81.28	0.01	0.16	3.58	1.59	13.62	100.24	7.51

Py = Pyrite, Cp = Chalcopyrite, and S1 = Sphalerite.

Table 10. Electron Microprobe analyses of electrum from the Yonghwa gold-silver deposits.

Mine	Stage	Associated minerals	Au (wt.%)	Ag (wt.%)	Total	Au (atom.%)	Ag (atom.%)	Ag/Au	
Yonghwa	I	Py	82.97	13.14	96.11	78.98	21.02	0.27	
			63.35	33.51	96.86	52.93	47.07	0.89	
	II	Py-Cp-S1	64.95	31.82	96.77	54.84	45.16	0.82	
			65.46	33.32	98.78	53.89	46.11	0.86	
			Py	36.80	63.28	100.08	25.70	74.30	2.89
			S1	45.81	54.87	100.69	33.19	66.81	2.01
				18.10	80.10	98.20	11.85	88.15	7.44
				24.39	74.73	99.12	0.26	83.74	5.15
			Py-Gn	24.09	75.61	99.70	15.93	84.07	5.28
				43.47	57.33	100.79	31.08	68.92	2.22
			Cp	40.47	59.22	99.69	28.90	71.10	2.46
				42.85	56.91	99.76	30.94	69.06	2.32
			Py	42.67	55.33	97.79	31.45	68.55	2.18
				42.22	55.51	97.73	31.15	68.85	2.21
			41.75	54.29	96.04	31.39	68.61	2.19	
		Py-Gn	35.40	63.00	98.40	25.05	74.95	2.99	
			34.07	64.39	98.46	23.94	76.06	3.18	
		Qtz	35.04	63.79	98.83	24.63	75.37	3.06	
			35.32	64.37	99.69	24.61	75.69	3.08	
			36.01	61.56	97.57	25.82	74.18	2.87	
			34.29	65.67	99.96	23.70	76.30	3.18	
		Cp-Gn	44.30	53.71	97.11	32.47	67.53	2.08	
			43.17	52.66	95.83	32.78	67.22	2.05	
			43.71	53.99	97.71	32.51	67.49	2.08	
			44.84	53.88	98.72	33.12	66.88	2.02	
			42.89	55.26	98.14	31.59	68.41	2.17	
			45.70	52.56	98.26	34.09	65.91	1.93	
			45.51	55.39	100.90	32.83	67.17	2.05	
		40.67	59.99	100.66	28.74	71.26	2.48		
		41.48	54.97	96.46	30.98	69.02	2.23		

Py = Pyrite, Cp = Chalcopyrite, S1 = Sphalerite, Gn = Galena, and Qtz = Quartz.

주위에서 잘파이트와 함께 산출되는데 연마 후 공기중에 노출되면 붉게 변색이 된다. 이것은 III기 황동석의 Ag 함량이 (평균 3.78 wt.%) 높기때문인 것으로 생각된다.

輝銀石-아칸다이트: 휘은석은 I, II 및 III기 광석에서 산출되는데 본 연구에서는 휘은석으로 기재한다. I기의 황철석안에 에렉트럼과 밀접히 수반되어 포유물로 산출되나, II기의 휘은석은 방연석 주위에 rim을 형

성하거나 에렉트럼과 공존하며 황철석의 파쇄된 틈을 따라 발달한다 (Fig. 9-G). III기 광석에서는 자연은, 황동석 및 농홍은석과 함께 산출되거나 간혹 잘파이트와 같이 산출되기도 한다.

에렉트럼: 에렉트럼은 I기, II기 및 III기 광석에서 산출된다. I기 광석에서 산출되는 에렉트럼은 I기의 황철석내의 포유물로서 존재하는데 크기는 10~15 μ 정도이다. II기의 에렉트럼은 I기에 정출한 황철석의 파쇄된 틈을 따라 세맥을 이루기도 하고 (Fig. 9-E), 10-15 μ 정도의 결정으로 섬아연석과 같이 산출되기도 한다. 황동석 점적을 갖지 않는 II기의 섬아연석과 공존하는 II기의 에렉트럼중에는 품위가 높고 입자의 크기가 50~70 μ 되는 결정도 관찰되는데, 큰 결정은 주로 석영중에서 발달한 것이다. III기의 에렉트럼은 프라이버자이트, 농홍은석 및 미라지라이트를 교대하거나, 휘은석, 폴리바사이트등과 같이 산출되고, 섬아연석, Ag를 함유한 황동석 그리고 잘파이트와 공존한다.

Table 10은 에렉트럼을 EPMA로 분석한 결과이며, Fig. 11은 에렉트럼중에 들어있는 Ag의 함량을 정출시기별로 표시한 그림이다. 용화광상산 에렉트럼의 각 시기별 Ag의 atomic%는 I기의 것이 21.02~47.07, II기의 것은 65.91~88.15이고, III기의 것은 95%이상으로서 자연은에 해당한다. III기에 산출되는 자연은은 함유유염광물을 밀접히 수반한다. 에렉트럼중에서 입자가 큰 결정들을 중심부에서 주변부로 가면서 EMPA로 정량분석한 결과, 주변부로 가면서 Ag의 함량이 증가하는 변화를 보인다. 이러한 현상은 다른 광석광물과 공생하지 않고 석영중에 단독으로 정출되는 에렉트럼중에서 뚜렷하게 나타난다. 각 시기별로 산출되는 에렉트럼의 양으

로 볼 때 에렉트럼의 주정출기는 II기에 해당하고 III기는 은의 주 정출기이다.

프라이버자이트: 프라이버자이트는 II기와 III기의 광석에서 소량 산출된다. 광석현미경하에서 섬아연석보다 약간 밝은 회색을 띠며, 내부반사도 관찰된다. 황철석이 파쇄된 틈을 따라 다른 함유유염광물들과 함께 공존하며 (Fig. 9-E), 간혹 자연은에 의해 교대당하기도 한다. 프라이버자이트에 대한 EPMA 분석결과 (Table 11) 용화광상산에서 산출되는 프라이버자이트의 Ag의 함량은 II기의 것이 25.79 wt.%, III기의 것은 30.13 wt.

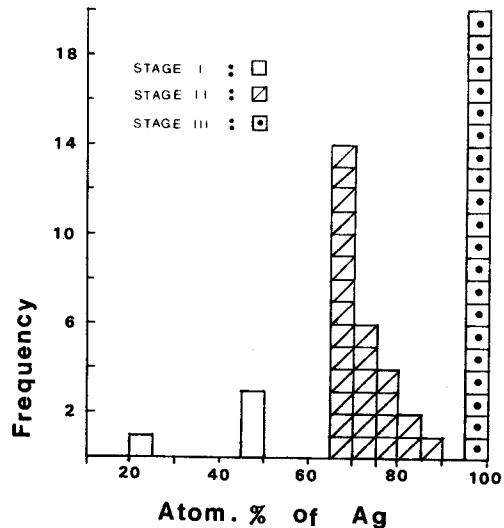


Fig. 11. Histograms showing Ag content in Au-Ag series mineral from the Yonghwa gold-silver deposits.

Table 11. Electron Microprobe analyses of freibergites from the Yonghwa gold-silver deposits.

Stage	Associated Minerals	Ag	Cu	Fe	Zn	Sb	As	S	Total
		wt.%(atom.%)							
II	E1-Cp	25.79	15.54	1.28	3.53	24.92	0.54	26.17	98.56 (1)
III	E1-Cp	(15.02)	(15.35)	(1.44)	(3.38)	(12.85)	(0.45)	(51.25)	
		30.13	12.86	1.38	4.55	24.33	0.08	25.11	99.22 (2)
		(17.87)	(12.93)	(1.58)	(4.45)	(12.78)	(0.07)	(50.07)	

E1 = Electrum and Cp = Chalcopyrite. Chemical formulae on basis of Sb = 4; (1) [(Ag_{5.59} Cu_{4.05}) (Fe_{0.49} Zn_{1.39})]_{11.52} Sb₄ S_{14.07}, (2) [(Ag_{4.67} Cu_{4.78}) (Fe_{0.45} Zn_{1.05})]_{10.95} Sb₄ S_{14.95}.

Table 12. Electron Microprobe analyses of polybasites from the Yonghwa gold-silver deposits.

Mine	Associated Minerals	Ag	Cu	Zn(wt.%)	Fe	Sb	As	S	Total
Yonghwa	Gn-EI	72.56	0.53	0.58	0.00	11.14	0.57	15.52	101.91
		70.30	2.35	0.46	0.00	10.25	0.40	15.14	98.89

Gn = Galena and EI = Electrum. Chemical formulae on basis of S = 11; (1) (Ag, Cu)_{15.48} (Sb, As)_{2.24}S₁₁, (2) (Ag, Cu)_{16.04} (Sb, As)_{2.08}S₁₁.

%로서 Ⅲ기의 것이 Ag의 함량이 높다.

폴리바사이트: 폴리바사이트는 Ⅲ기에 Ⅱ기의 황철석이 파쇄된 틈을 따라 세맥상으로 충전한 자연은과 함께 산출된다. 광석현미경하에서 폴리바사이트는 붉은색의 내부반사를 나타낸다. 화학성분중에서 Ag와 Cu, As와 Sb가 서로 치환가능하여 두성분의 상대적 양에 따라 광물의 종류가 다르다. Table 12는 폴리바사이트의 EPMA 분석결과이며, Ag의 함량에 비하여 Cu의 함량이 낮고, Sb와 As의 atomic%는 각각 평균 2.02와 0.15로서 Sb의 함량이 많은 폴리바사이트이다.

농홍은석: 농홍은석은 Ⅲ기의 광석에서 산출되는 광물로서 프라이버자이트와 공존하여 산출된다. EPMA 정량분석 결과 Ag의 함량은 50.95~60.10 wt.%, Sb의 함량은 21.58~21.91 wt.%, S의 함량은 16.89~17.96 wt.%로서 stoichiometric composition에 발 부합되며 Cu, Zn, As, Pb, Bi가 소량 검출되었다.

미라지라이트: 미라지라이트는 Ⅲ기의 광석중에서 황철석의 파쇄된 틈을 따라 자연은, 폴리바사이트와 함께 공존하여 산출된다 (Fig. 9-G). 크기는 5 μ 정도이며, 농홍은석보다 밝으나 방연석보다는 어둡다. 자연은과 거의 유사하나 내부반사가 붉은색으로 나타난다. 크기가 작아 EPMA의 정성은 가능하나 정량분석이 불가능하였다.

잘파이트: Ⅲ기의 함은유염광물에 수반되어 산출되는 광물로서, 주로 자연은과 Ⅲ기의 황동석과 공생한다 (Fig. 9-H). 자연은에 의해 교대당하며, 입자 크기는 5 μ 정도이다. 잘파이트는 크기가 작고 경도가 약하여 EPMA 분석시 파괴되어 주위광물의 영향을 받아 정성분석은 가능하였으나 정량분석이 불가능 하였다.

자연은: 자연은은 Ⅲ기의 광석에서만 소량 산출되며, Ⅲ기의 함은유염광물인 프라이버자이트, 폴리바

사이트, 미라지라이트, 농홍은석, 그리고 잘파이트등의 광물들과 공존하거나 이들 광물을 교대하기도 한다 (Fig. 9-G, H). 단일결정의 크기는 10 μ 정도에서 1cm 정도의 크기까지 다양하다. 자연은의 큰 결정을 중앙부에서 주변부로 가면서 정량분석해 보면 함량변화가 거의 없이 균질하다. 석영속에 큰 결정으로 정출한 자연은은 여러 종류의 유염광물과 공존하는 경향이 있다. Ⅲ기에 정출한 자연은을 EPMA 분석한 결과, Ag의 atomic %는 95% 이상이고 Au의 함량은 0.14 wt. % 이하이다. Sb의 함량은 검출되지 않았다.

鑛物共生關係

전술한 바와같이 용화광산에서 산출되는 광석을 검토한 결과 광석의 파쇄작용을 기준으로 하여 광화시기는 크게 4기로 나눌수 있다.

I기는 암회색 석영과 자철석, 금홍석 등의 산화광물 그리고 황철석, 백철석, 유비철석, 섬아연석, 방연석, 자류철석, 황동석 등의 유화광물 및 에렉트럼과 휘은석 등이 산출된 시기이다. II기는 massive 한 백색석영과 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석, 휘은석 등의 유화광물이 I기에 비해 소량 산출되며, 에렉트럼, 프라이버자이트등의 광물들이 정출하였다. II기의 특징은 금의 주요 정출시기이다. III기는 백색 석영과 소량의 유화광물, 에렉트럼, 자연은, 프라이버자이트, 폴리바사이트, 미라지라이트, 농홍은석 등의 Ag-Sb-Cu-S계 광물과 잘파이트등의 Ag-Cu-S계 광물의 정출시기이다. III기에는 에렉트럼이 자연은과 공존하여 산출되지만, 에렉트럼내의 Ag의 atomic %가 상당히 높고 자연은이 양적으로 우세하여 은의 주요 정출기에 해당한다. IV기는 백색석영과 함께 소량의 황철석 그리고 방해석, 양

Stage Mineral	Stage I	Stage II	Stage III	Stage IV
Magnetite	—			
Hematite	—			
Rutile	—			
Pyrite	—	—	—	—
Marcasite	—	—	—	—
Arsenopyrite	—	—	—	—
Sphalerite	—	—	—	—
Galena	—	—	—	—
Pyrrhotite	—	—	—	—
Chalcopyrite	—	—	—	—
Argentite	—	—	—	—
Native Silver	—	—	—	—
Electrum	—	—	—	—
Freibergite	—	—	—	—
Polybasite	—	—	—	—
Jalpaite	—	—	—	—
Miargyrite	—	—	—	—
Pyrrargyrite	—	—	—	—
Quartz	—	—	—	—
Calcite	—	—	—	—
Ankerite	—	—	—	—

Fig. 12. Paragenetic sequence of vein minerals from the Yonghwa gold-silver deposits.

커라이트 등의 탄산염광물이 산출되는 시기이다.

각 광화시기에 따른 광물의 정출순서를 종합하여 광물의 공생관계를 표시하면 Fig. 12와 같다.

流體包有物

流體包有物の分類

유체포유물 연구는 I, II기의 석영과 IV기의 방해석에 대하여 실시하였다. III기의 광석은 광석현미경에서는 식별되나 육안으로는 식별하기가 어려워 검토하지 못하였다. 유체포유물 중 1차 포유물 및 2차 포유물 중에서 실온에서 관찰되는 상의종류, 충전도, 가열실험시 균일화되는 양상 및 냉각실험시 포유물의 거동에 따라 I, II, III형 포유물로 분류하였다.

I형 포유물 : 액상과 기상의 2상으로 구성된 유체포유물로서 가열실험시 액상으로 충전된다. I, II기의 석영과 방해석에서 관찰된다. 상온에서 액체 CO₂가 관찰되지 않으며 냉각실험시에도 액체 CO₂와 CO₂ 수화물의 생성을 볼수 없다. I기의 석영은 액상의 충전도가

65~75% 정도이며 II기의 석영은 70~80%, IV기의 방해석은 70~85% 정도이다.

II형 포유물 : 액상과 기상으로 구성된 2상 포유물로서 가열실험시 기상으로 충전된다. II형 포유물은 I기의 광물인 석영에서 관찰된다. II형 포유물은 그 숫자가 많지 않으며 액상의 충전도는 30~40% 정도이다. 상온이나 냉각실험중에 액체 CO₂나 CO₂수화물이 관찰되지 않는다.

III형 포유물 : III형 포유물은 액상, 기상 및 액체 CO₂로 구성되어 있는 포유물로서 액체 CO₂를 포함한 액상의 충전도는 50~60% 정도이다. III형 포유물은 I기의 석영에서 보여진다.

均一化溫度

I기 석영중에 포함된 유체포유물의 균일화 온도는 용화광산의 1, 2, 3, 4맥들의 I형 포유물이 194~300℃, II형 포유물은 267~312℃, III형 포유물은 226~230℃, 월전맥의 I형 포유물이 181~250℃, 구미맥의 석영중에 포함된 유체포유물은 I형이 203~284℃, II형 포유물이 277~303℃이다 (Fig. 13). 특징적인 것은 용화광산 1, 2, 3, 4맥, 구미맥에서 산출되는 석영중에 포함된 II형 포유물은 I기의 I형 포유물과 공존하며 균일화온도가 비슷한 것으로 보아 I기에 단속적인 비등이 존재했던 것으로 생각된다. II기의 석영에는 I형 포유물만 존재하는데 균일화온도는 162~211℃이다. 용화지구내 광맥에서 산출되는 IV기 방해석에 포함된 I형 포유물의 균일화 온도는 132~173℃이다. 연구지역에 분포하는 금은광상의 균일화 온도를 종합하면 I기의 I형 포유물은 181~300℃, II형 포유물은 267~312℃이며 II기와 IV기의 I형 포유물은 각각 162~211℃와 132~173℃로서 광화초기에서 광화말기로 가면서 균일화 온도가 낮아지는 경향이 뚜렷하다. 이러한 현상은 각시기를 대표하는 광석광물의 침전에 온도의 하강이 중요하게 작용하였음을 뜻한다.

I기에는 액상으로 균일화되는 포유물과 기상으로 균일화되는 포유물이 공존하는 비등증거가 관찰되는데, 비등이 일어나는 동안 광화유체의 증기압은 주위 압력과 같기 때문에 이 시기에 trap된 유체포유물은 압력보정이 필요하지 않아 균일화 온도가 바로 trap된 열수용

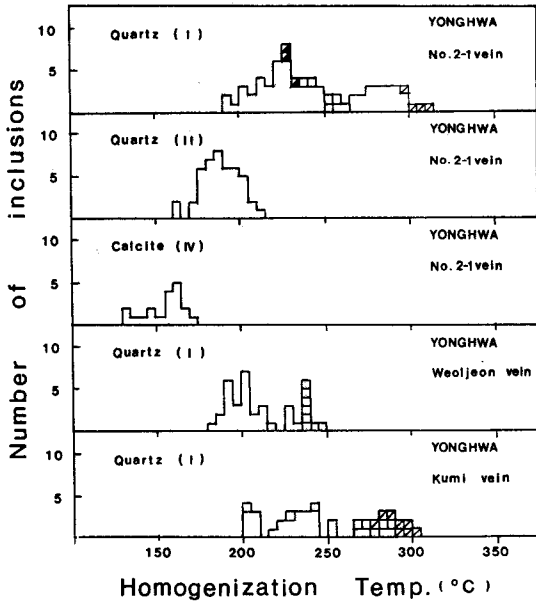


Fig. 13. Homogenization temperature of fluid inclusions from the Yonghwa gold-silver deposits.

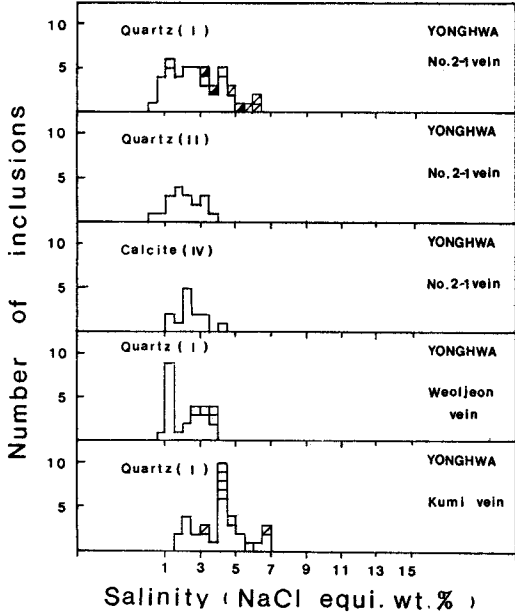


Fig. 14. Salinities of fluid inclusions from the Yonghwa gold-silver deposits.

액의 온도가 된다. 그러나 비등증거가 관찰되지 않는 II 및 IV기 유체포유물의 균일화온도는 압력보정이 필요하다.

鹽濃度

I기의 석영층에 포함된 유체포유물의 NaCl 상당 염농도는 용화광산 1, 2, 3, 4맥산 석영의 것이 0.4~6.5 wt. %, 월전맥산 석영의 것이 0.8~3.9 wt. %, 구미맥산 석영의 것이 1.8~6.9 wt. %이다. II기 석영층의 유체포유물의 NaCl 상당 염농도는 용화광산 1, 2, 3, 4맥의 것이 0.3~3.9 wt. %이며 IV기의 방해석층의 유체포유물의 NaCl 상당 염농도는 1.0~4.2 wt. %를 나타낸다.

전반적으로 볼때 연구지역에 분포하는 금은광상의 각 광화기별 유체포유물의 NaCl 상당 염농도 (Fig. 14)는 I기에서 IV기로 가면서 대체적으로 염농도가 감소하는 경향을 보인다.

Haas (1971)가 제시한 온도-심도의 상관도에 연구지역에 분포하는 광상에서 산출되는 I기의 유체포유물

중에서 비등증거를 보이는 포유물을 plot하여 생성심도 및 생성당시의 압력을 구하면 용화광상을 형성한 광화유체의 정수압 ($\sigma = 0.801g/cm^3$, 5wt. % NaCl, $T_h = 280^\circ C$)은 약 60 bar 정도이다. 이 정수압은 당시 압력의 최소치가 되며 만약 $P_{total} = P_{lithostatic}$ 이라면 이때의 암압은 암석의 밀도를 $2.7g/cm^3$ 로 하면 180 bar 이므로 압력의 범위는 60~180 bar에 해당한다.

安定同位元素

이 연구에서는 광화유체의 기원, 성질, 온도를 알기 위하여 유황, 탄소, 산소, 수소안정동위원소를 검토하였다.

유황안정동위원소, 탄소안정동위원소, 산소안정동위원소, 수소안정동위원소의 동위원소비는 각각 Fritz, Drimmie and Nowichi (1974), McCrea (1950), Clayton and Mayeda (1963), Hayes and Baker (1986)의 방법에 따라 각각 CDT (Canyon Diablo Troilite), PDB (Chicago Peedee Belemnite), SMOW (Standard Mean Ocean Water), SMOW (Standard Mean Ocean Water)를

표준시료로 사용하였다. 분석치의 정확도는 유황, 탄소, 산소안정동위원소는 $\pm 0.1\%$ 이고, 수소 안정동위원소는 $\pm 0.5\%$ 이다.

硫黃安定同位元素

유황안정동위원소의 분석은 용화광산 1호맥에서 산출된 I기광석중의 황철석-섬아연석 광물쌍 각각 1개시료에 대하여 실시하였다. 황철석의 $\delta^{34}\text{S}$ 의 값은 $+3.3\%$ 이다. 이번 분석된 용화광산의 시료는 2개뿐이나 용화광산에 인접하여 부존하는 월성금은광상과 나림금은광상의 유화광물시료 8개의 $\delta^{34}\text{S}$ 의 값은 모두 $1.0\sim+5.5\%$ 로서 비교적 좁은 조성범위를 갖는다 (박희인 등, 1991).

이같은 산성화성암과 같은 기원의 마그마에서 유래되었다고 보고된 남한의 23개금속광상의 $\delta^{34}\text{S}$ 의 값 ($+2.0\sim+7.0\%$, 김규환 등, 1980)의 범위내에 들고 이민성 (1985)이 보고한 태백산 지역내 6개 스킨형 연아연광상의 황철석, 섬아연석, 방연석의 평균 $\delta^{34}\text{S}$ 의 값 ($+3.9, +4.2, +3.5\%$)과 대체로 같다. 따라서 이광상에서 산출되는 광석중의 유황은 마그마 기원일 것으로 생각된다.

유황동위원소 지질온도계는 공존하는 광물쌍사이에서 평형상태하에서 유황동위원소의 분배를 토대로 하여 얻어진다. 따라서 연구지역에서 산출되는 유화광물쌍의 유황동위원소 분석치를 가지고 Ohmoto and Rye (1979)의 식을 이용하여 광상의 생성온도를 구한결과 265°C 로서 비등증거를 갖는 유체포유물의 균일화온도 영역과 비교적 잘 일치한다.

炭素安定同位元素

탄소안정동위원소의 분석은 용화광산 제2맥에서 산출되는 IV기의 방해석 및 앵커라이트와 월전맥에서 산출되는 IV기의 방해석에 대하여 실시하였다. 분석결과 용화광산 제2맥상 방해석의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 값은 -3.5% , 월전맥의 것은 -4.2% , 앵커라이트는 -4.4% 로서 대단히 좁은 범위를 나타낸다. 이 값은 대체적으로 Rye et al (1974), Landis et al (1974), Tayler (1965) 등이 보고한 마그마 기원 또는 심부 기원의 탄소에 해당한다.

Table 13. Oxygen isotopic compositions of silicate carbonate and altered minerals from the Yonghwa gold-silver deposits.

Mine	Vein	Stage	Mineral	Mineral- assemblage	$\delta^{18}\text{O}(\%)$
Yong -hwa	No.2 adit 1,2,3,4.	I	Qz	Py-Sl-Cp	+5.5
		II	Qz	Py-Gn	+5.5
		IV	Cc	Qz-Ak	+9.9
		?	Se		+3.9
		IV	Cc	Qz	+14.0
Weoljeon					

Qz = Quartz, Cc = Calcite, Py = Pyrite, Gn = Galena, Cp = Chalcopyrite, Sl = Sphalerite, and Se = Sericite.

酸素 및 水素安定同位元素

산소안정동위원소비를 분석한 시료는 I, II기석영과 IV기의 방해석 그리고 변질산물인 견운모등이며 분석결과를 나타내면 Table 13과 같다. Table 13에서 보는 바와같이 I기의 석영중의 $\delta^{18}\text{O}$ 의 값은 $+5.5\%$, II기석영은 $+5.5\%$, IV기의 방해석은 $+9.9\sim+14.0\%$ 이며 모암변질광물인 견운모의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 $+3.9\%$ 이다.

석영은 광맥을 구성하는 중요한 맥석광물로서 생성 당시의 온도와 압력조건의 영역이 넓기 때문에 산소안정동위원소 지화학에 있어서 대단히 중요한 광물이다. 이러한 사실로부터 열수용액내의 석영과 물사이에 산소안정동위원소 분별에 관한 연구가 진행되어 왔다 (O'Neil and Clayton, 1969; Clayton et al, 1972; Bottinga and Javoy, 1973; Karnilli and Ohmoto, 1977; Matsuhisa et al, 1979). 이 연구에서는 Clayton 등 (1972)의 식과 O'Neil 등 (1969)의 식에 석영과 방해석의 동위원소비 자료와 유체포유물의 균일화온도를 대입하여 계산한 광화작용시에 물의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 Table 14와 같다. 이와같이 계산된 물의 $\delta^{18}\text{O}$ 의 값은 I기에는 $-3.0\sim-5.0\%$, II기는 $-5.6\sim-9.1\%$, IV기는 $-3.8\sim+1.0\%$ 로서 I기에서 II기로 가면서 낮아지다가 IV기에는 약간 높아지는 경향이 있다.

용화광산의 금은광상을 형성한 광화유체의 물에 대한 안정동위원소 조성을 직접 측정된 자료는 없지만, 동위원소 분배를 이용하여 계산된 물의 $\delta^{18}\text{O}$ 의 값은 I, II기에는 음 (-)의 값을 갖다가 IV에는 0% 근처의 값을 갖는 것으로 보아 마그마 기원의 물과는 값의 차

Table 14. Calculated $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ composition of quartz and calcite from the Yonghwa gold-silver deposits.

Mine	Vein	Stage	Mineral	$\delta^{13}\text{C}_{\text{Cc}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{O}_2}(\text{‰})$	$T_{\text{h}}(\text{°C})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$
Yonghwa	No. 2-1	I	Qz		+5.5	220~260	-5.0~-3.0
		II	Qz		+5.5	160~210	-9.1~-5.6
	No. 2-1	IV	Cc	+9.9		130~170	-3.8~-0.9
	WJ	IV	Cc	+14.0		140	+1.0

Qz = Quartz and Cc = Calcite.

이가 크다. 따라서 광화 전시기를 통하여 천수가 중요한 역할을 했을 것으로 생각된다.

수소안정동위원소 분석을 실시한 시료는 주 광화작용시기에 변질작용에 의한 광물로서 용화광산 1맥에서 산출되는 견운모 1개시료에 대하여 실시하였으며 δD 값은 -93.1‰이다.

鑛化作用에 대한 考察

關係火成岩

이 지역내의 20여개 금은광맥이 모두 반상화강암체내와 그 주위에 한하여 배태하고 있다. 이 반상화강암체의 흑운모 K-Ar 연령과 용화1맥의 모암변질산물인 견운모의 K-Ar 연령이 각각 $98.7 \pm 3.6 \text{ Ma}$ 와 $95.8 \pm 1.2 \text{ Ma}$ 로서 양자는 측정오차 범위내의 값을 갖는 것으로 보아 광상은 백악기에 생성되었고 반상화강암은 시간적으로나 공간적으로 보아 금은광화작용과 밀접한 관계를 갖는 관계화성암임이 밝혀졌다.

이 반상화강암은 광물조성과 화학조성으로 보아 White and Chappel (1977)의 I형 화강암에 속하고 Ishihara (1977)의 자철석계열 화강암에 속한다. 이는 경상분지내와 태백산 지역의 금속광화작용과 밀접한 관계를 갖는 불국사화강암류와 같은 성질의 화강암이다 (Jin et al., 1981; Hong, 1985; Lee, 1984; 박희인 등 1985).

鑛床胚胎의 構造規制

용화광산의 광맥들은 EW 방향으로 긴 2.0×1.2

km 범위내에 $N15^\circ \sim 25^\circ W$ 의 주향을 갖는 13개의 평행 광맥계와 $N70^\circ W$ 의 주향을 갖는 2개의 광맥들로 되어 있다. 이들 광맥의 발달을 규제한 주요 지질구조는 EW 방향으로 길게 분포하는 반상화강암체와 $N15^\circ \sim 25^\circ W$ 의 열극계이다. $N15^\circ \sim 25^\circ W$ 의 열극계는 월전부락을 지나는 $N15^\circ W$ 의 주향을 갖는 단층과 같은 계열의 것으로서 화강암체내에 우세하게 발달하는 절리들도 모두 이 계열의 것이다.

반상화강암체의 관입과 모양을 규제한 구조는 EW 방향의 단층일 것으로 추정되나 확인을 위한 상세한 검토가 필요하다. 따라서 이 지역의 금은광화 작용을 규제한 지질구조의 발달순서는 EW 방향의 단층, 반상화강암의 관입, $N15^\circ \sim 25^\circ W$ 계의 단층 및 절리발달, 금은광화작용의 순이었을 것으로 생각된다.

鑛床의 生成溫度

용화광산의 생성온도를 알기 위하여 광물공생관계를 토대로 광물공생군의 상평형관계로 부터 광산의 생성온도를 추정하였고 아울러 유체포유물 지질온도계와 유황안정동위원소 지질온도계등을 이용하여 광산의 생성온도를 추정하였다.

I기에 동시 정출한 것으로 보이는 섬아연석-황철석-유비철석의 공생광물군을 이용하여 Scott와 Hutchison (1973) 등이 제시한 유비철석중의 As의 atomic%와 섬아연석중의 FeS의 mole%와 온도와의 관계도에서 구한 온도는 $260 \sim 315^\circ\text{C}$ 이다 (Fig. 15). 또 I기의 섬아연석-황철석-유비철석의 공생광물군을 가지고 Kretschmar 등 (1976)이 제시한 방법으로 온도를 구하면 I기의 대체적인 온도는 $290 \sim 330^\circ\text{C}$ 로서 두방법에

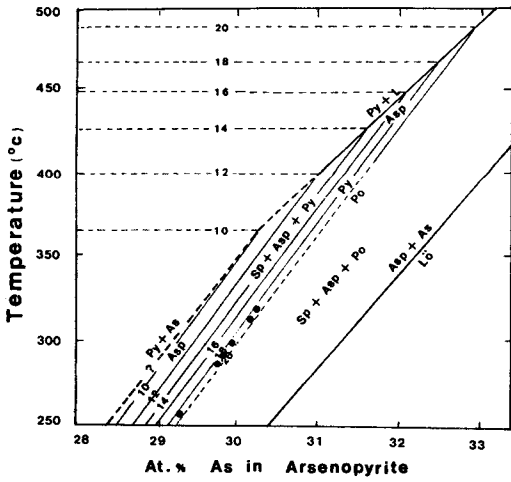


Fig. 15. Diagram of Temperature-As contents in arsenopyrite coexisting with pyrite and sphalerite at stage I from the Yonghwa gold-silver deposits. Contours are mole % FeS of sphalerite.

의한 온도가 대체적으로 일치한다. 황철석-섬아연석-에렉트럼-휘은석의 공생광물군을 이용하여 구한 각 기의 온도는 I기가 320~360℃, II기는 215~250℃, III기는 145~165℃가 된다 (Fig. 16).

I기에는 광화유체의 비등증거가 관찰되어 유체포유물의 균일화 온도를 광상생성온도로 간주할 수 있다. 이 비등하는 광화유체를 trap한 유체포유물의 균일화온도와 유황안정동위원소 지질온도계를 이용하여 구한 온도는 각각 267~312℃와 265℃로서 대체로 일치하며 섬아연석-황철석-유비철석을 이용하여 구한 온도는 260~315℃와 290~330℃로서 비등하는 광화유체를 trap한 포유물의 균일화온도 범위내에 드나 이 중 Scott and Hutchison (1973) 등의 방법으로 구한 온도와 유체포유물 지질온도계로서 구한 값이 보다 더 일치한다. 황철석-섬아연석-에렉트럼-휘은석 광물쌍을 이용하여 얻은 온도는 위의 균일화온도보다 높은 값을 갖는다. 이상을 종합하면 I기의 광화유체의 온도는 대체적으로 260~360℃ 범위를 갖는다.

II기의 유체포유물에는 비등증거가 관찰되지 않아 균일화온도에 압력보정을 필요로 하기 때문에 각 광상에의 광화유체의 실제온도는 균일화온도보다는 높았을 것이다. 황철석-섬아연석-에렉트럼-휘은석 광물쌍을 이

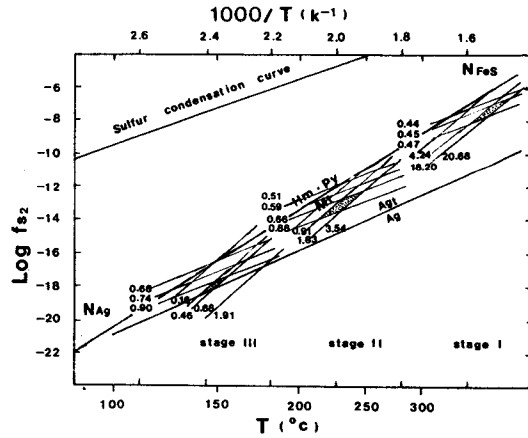


Fig. 16. Temperature and Sulfur fugacity in stage I, II and III from the Yonghwa gold-silver deposits.

용하여 구한 온도는 용화광상이 215~250℃로서 균일화온도 162~211℃보다 높아 광물쌍을 이용하여 구한 온도가 실제온도에 가까울 가능성이 있다.

III기는 광물쌍을 이용하여 구한 온도가 145~165℃로서 실제온도는 이 온도에 가까웠을 것으로 생각된다.

IV기의 유체포유물 균일화온도는 132~173℃로서 다른 자료를 이용하여 구한 온도가 없고 비등증거도 발견되지 않아 광화유체의 온도는 균일화온도보다 약간 높을 것으로 생각된다.

광물공생관계에서 금은광물은 I기말, II기 그리고 III기에 정출하였는데 이 중에서 금광물의 주요정출기는 II기이며 은광물의 주요정출기는 III기이다. 각 기별 광화작용의 온도가 초기에서 말기로 가면서 점차 낮아지고 있는 것으로 보아 I기의 에렉트럼이 정출할 때의 대체적인 온도는 260~290℃이었을 것으로 생각된다. 금광물의 주요 정출기인 II기의 온도는 약 215~250℃ 정도이고, 은광물의 주요 정출기인 III기의 온도는 145~165℃정도일 것으로 생각된다.

鑛化期間중의 壓力條件

광화유체의 압력조건은 유체포유물의 지질온도계 및 압력계, 공존하는 공생광물군을 이용한 상평형관계, 안정동위원소 지질온도계등을 이용하여 상의 생성온도와

광화유체의 염농도를 가지고 추정이 가능하다. 따라서 전술한 바대로 비등증거를 보이는 I기의 유체포유물의 온도와 염농도 자료를 가지고 Haas (1971)의 자료를 이용하여 압력을 구하면 용화광상을 형성한 I기의 광화유체의 정수압 ($\rho = 0.80\text{g/cm}^3$, $T_h = 280^\circ\text{C}$, salinity = 5.0 wt. %)은 60 bar이다. 이 정수압은 I기 광석의 생성압력의 최소치가 된다. 만약 $P_{\text{total}} = P_{\text{lithostatic}}$ 이라면 이때의 압압은 약 180 bar가 되어 용화광상의 I기 광화작용기간중의 압력은 60~180 bar 정도된다.

鑛化流體의 硫黃分壓과 酸素分壓

각 광화기에 정출한 공생광물군의 상평형관계로 부터 유황분압을 정량적으로 구한결과 I기의 황철석-섬아연석-유비철석의 공생광물군을 이용하여 구한 유황분압은 $10^{-8.7}\text{atm}$ 이하이고, 황철석-섬아연석-에렉트럼-휘은석의 공생 광물군을 이용하여 구한 유황분압은 I기가 $10^{-7.0} \sim 10^{-8.3}\text{atm}$, II기는 $10^{-12.2} \sim 10^{-14.0}\text{atm}$, III기는 $10^{-17.2} \sim 10^{-18.5}\text{atm}$ 이다. IV기의 유황분압은 측정되지 않았지만 대체적으로 광화작용이 진행되는 동안 광화후기로 가면서 광화유체의 온도하강과 동시에 유황분압이 점진적으로 감소하였음을 알 수 있다. 광물의 공생관계에서 알 수 있듯이 유황분압이 감소되면서 다른 base metal 유화광물과 Ag-S계, Ag-Cu-S계, Ag-Sb-S계, Ag-Cu-Pb-S계의 유염광물이 정출하였으며 이보다 후기에 native 광물이 정출한 사실과 잘 일치한다.

광화유체내의 산소분압은 I기초에 산출되는 황철석-자철석-적철석의 공생광물군으로 부터 구하였다. I기초의 대체적인 산소분압은 $10^{-30.2}\text{atm}$ 로서 광화유체내의 산소분압은 광화후기로 가면서 점점 낮아졌을 것으로 생각된다.

鑛化流體의 起源 및 變化

용화광상을 배태시킨 광화유체중의 물의 기원 및 변화를 알기 위하여 광석광물, 맥석광물 그리고 변질광물 중에 포함된 유황, 탄소, 산소 및 수소안정동위원소 분석을 실시하였다. I기중에 산출된 황철석과 섬아연석 중에 포함된 $\delta^{34}\text{S}$ 의 값은 각각 +4.5%, +3.3%로서 좁은 범위에 들고 마그마기원으로 보고된 타 광상의 것과 비

슷하여 광화유체중의 유황의 기원은 마그마기원으로 생각된다. 탄산염광물중에 포함된 $\delta^{13}\text{C}$ 의 값은 IV기의 방해석은 -4.2%~-3.5%이며 IV기의 앵커라이트는 -4.5%이다. 전체적으로 볼 때 좁은 범위에 들며 심부기원 탄소의 영역과 비슷하여 기원은 심부기원으로 생각된다.

석영과 동위원소적 평형상태에 있는 물의 $\delta^{18}\text{O}$ 의 값은 I기가 -5.0%~-3.0%, II기가 -9.1%~-5.6%이다. IV기 방해석과 동위원소적 평형상태에 있는 물의 $\delta^{18}\text{O}$ 의 값은 IV기의 방해석이 -3.8%~+1.0%의 영역을 갖는다. 전체적으로 볼 때 물의 $\delta^{18}\text{O}$ 의 값은 I기에서 II기까지는 점차 낮아지나 IV기에서 상당히 높아짐을 알 수 있다. $\delta^{18}\text{O}$ 의 값으로 보아 I기의 물은 마그마기원의 물 (+6%~+9%)과는 조성의 차이가 현저하며 전광화기를 통하여 마그마기원의 물보다 가볍다. 이러한 사실은 광화초기부터 광화유체의 물은 천수가 우세하였고 후기로 가면서 천수의 혼입이 더하여졌기 때문이다.

結 論

용화금은광상의 금은광화작용에 대한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 금은광상은 주로 반상화강암체내와 그 주변부의 편마암류등에 발달한 $N15^\circ \sim 25^\circ W$ 계의 열극을 충진한 맥상광상이다.
2. 반상화강암이 금은광상의 생성과는 시간적, 공간적으로 밀접한 관계를 갖는 관계화성암으로 생각된다.
3. 금은광상의 광화작용은 광화기간중의 fracturing이나 brecciation에 의하여 4기로 나누어진다. I기에는 자철석, 적철석, 금홍석 등의 산화광물과 base-metal 유화광물 및 소량의 에렉트럼, 휘은석이 정출하였고, II기에는 base-metal 유화광물과 에렉트럼, 휘은석, 프라이버자이트가 정출하였으며, III기에는 소량의 base-metal 유화광물과 에렉트럼, 휘은석외에 자연과 함은유염광물들이 정출하였고, IV기에는 소량의 황철석과 탄산염광물들이 정출하였다. 금광물의 주요 정출기는 II기, 은광물의 주요 정출기는 III기이다.
4. 광화유체의 NaCl 상당염농도는 I기: 0.4~6.9 wt. %, II기: 0.3~3.9 wt. %, IV기: 1.0~4.2 wt. %였고, I기에는 광화유체의 비등이 있었다.

5. 유체포유물 연구, 공생광물군의 상평형관계, 유황안정동위원소등으로 추정한 I기의 온도는 260~315℃, II기는 215~250℃, III기는 145~165℃, IV기는 132~173℃정도로서 광화말기로 가면서 점차 온도가 낮아졌다.

6. 비등증거를 갖는 I기의 유체포유물 자료로 추정된 압력조건은 60~180 bar이다.

7. 유황분압은 I기; $10^{-8.3} \sim 10^{-7.0}$ atm, II기; $10^{-14.0} \sim 10^{-12.2}$ atm, III기; $10^{-18.5} \sim 10^{-17.2}$ atm으로서 광화후기로 가며 점차 낮아졌다. 산소분압은 I기초에 $10^{-30.2}$ atm 부근이었으며 후기로가며 점차 낮아졌다.

8. 유화광물의 유황동위원소의 조성은 $\delta^{34}\text{S}$ 의 값이 3.3~4.5%로서 화성기원의 것으로 보인다.

9. 탄산염광물의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -3.5~4.5%로서 탄소의 기원은 마그마기원 또는 심부기원으로 보인다.

10. I, II기의 석영과 동위원소적 평형상태에 있는 물의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 각각 -5.0~3.0%, -9.1~-5.6%로서 광화유체의 물은 광화초기부터 천수가 우세하였던 것으로 추정된다.

參考文獻

- 金奎漢, 中井信之(1980) 한국의 일부 금속광상의 유황동위원소성분 및 동위원소 지질온도에 관한 연구. 지질학회지, 16권, p. 124-134.
- 朴喜寅, 朴泳祿(1990) 동원광산의 금은광화작용. 광산지질, 23권, p. 183-199.
- 朴喜寅, 崔錫源, 張浩完, 蔡東鉉(1985) 慶南 成安-郡北地域の銅鑛化作用에 관한 연구. 광산지질, 18권, p. 107-124.
- 朴喜寅, 장호완, 김정환, 지정만(1990) 태백산 광화대 연구. 한국과학재단, p. 291-297.
- 邊正圭(1983) 資源活用 研究. 韓國動力資源 研究所, p. 71-87.
- 尹碩奎, 朴炳權(1968) 雪川地質圖幅說明書. 國立地質調查所.
- 李政成(1985) 太白山地區의金屬鑛床에 대한 硫黃 및 炭素安定同位體에 관한 연구. 광산지질, 18권, p. 247-251.
- 李政成, 張浩完, 李龍峻(1990) 韓半島 地球의 進化 研究: 梨木花崗岩의 地球化學의 特徵. 地質學會誌, 26권, p. 82-90.
- 崔善奎, 朴魯榮, 洪世善(1988) 忠清道 一圓의 金·銀鑛床의 金銀鑛化作用에 관한 研究. 鑛山地質, 21권, p. 223-234.
- 崔善奎, 池世定, 朴性元(1988) 忠清北道 永同地域 金銀鑛床의 金銀鑛化作用에 관한 研究. 鑛山地質, 21권, p. 367-380.

- 홍승호, 이병주, 김원영(1980) 茂朱地質圖幅說明書. 資源開發研究所.
- Barton, P.B. Jr. and Toulmin, P., III(1963) The electrom-tranish method for the determination of the fugacity of sulfur in laboratory sulfide systems. Geochi. et Cosmochi. Acta. v. 28, p. 619-640.
- Barton, P.B. Jr. and Bethke, P. M.(1987) Chalcopyrite disease in sphalerite: Pathology and epidemiology. Amer. Mineral., v. 72, p. 451-467.
- Clayton, R.N., O'Neil, J.R. and Mayeda, T.K.(1972) Oxygen isotope exchange between quartz and water. Jour. Geoph. Resarch., v. 77, p. 3057-3067.
- Czamanske, G.K. and Rye, R.O.(1974) Experimentally determined sulfur isotope fractionation between sphalerite and galena in the temperature range 600℃ to 275℃. Econ. Geol., v. 69, p. 17-25.
- Gallagher, D.(1963) Mineral resources of Korea.
- Hass, J.L.(1971) The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. Econ. Geol., v. 66, p. 940-946.
- Hong, Y.K.(1985) Geochemistry of the Cretaceous Eonyang and Yoocheon granite in the southeastern Korea. J. Geol. Soc. Korea, v. 21, p. 90-108.
- Hutchison, M.N. and Scott, S.D.(1981) Sphalerite geobarometry in the Cu-Fe-Zn-S system. Econ. Geol., v. 76, p. 143-153.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A(1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Can. Jour. Earth Sci., v. 8, p. 523-548.
- Jin, M.S., Kim, S.Y. and Lee J.S.(1981) Granitic magmatism and associated mineralization in the Gyeongsang basin. Korea, Mining Geol., v. 31, p. 245-260.
- Kajiwara, Y. and Krouse, H.R.(1971) Sulfur isotope partitioning in metallic sulfide systems. Can. Jour. Earth Sci., v. 8, p. 1397-1408.
- Kamilli, R.J. and Ohmoto, H.(1977) Paragenesis, zoning, fluid inclusions and isotope studies of the finlandia vein, Cololqui district, Central Peru. Econ. Geol., v. 72, p. 950-982.
- Kim, O.J.(1971) Metallogenic epochs and provinces of south Korea. Jour. Geol. Soc. Korea., v. 7, p. 37-59.
- Kiyosu, Y.(1973) Sulfur isotopic fractionation among sphalerite, galena and sulfide ions. Geochem. J., v. 7, p. 191-199.
- Kretschmar, U. and Scott, S.D.(1976) Phase relation involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application. Can. Min., v. 14, p. 364-386.
- Landis, G.P. and Rye, R.O.(1974) Geologic, fluid inclusion and stable isotope studies of the Pasto Buena tungsten-base metal ore deposits, Northern Peru. Econ. Geol., v. 69, p. 1025-1059.
- Lee, J.Y.(1984) Geochemistry on major and trace elements in the granitic rocks from the Gyeongsang basin in

- relation to mineralization. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 20, p. 326-344.
- Lee, M.S. (1981) Geology and metallic mineralization associated with mesozoic granitic magmatism in south Korea, *Mining Geol.*, v. 31, p. 235-244.
- Ohmoto, H. and Rye, R.O. (1979) Isotopes of sulfur and carbon. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 2nd ed, new York, Joh Wiley and Sons.
- O'Neil, J.R. (1979) Stable isotope geochemistry of rocks and minerals in Jager and Hunziker. *Lectures isotope geology*, p. 235-263.
- O'Neil, J.R., Clayton, R.N. and Mayueda, T.K (1969) Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. *Jour. Chem. Physics*, v. 51, p. 5547-5558.
- Potter, R.W., II and Calif, M.P. (1977) Pressure corrections for fluid inclusion homogenization temperatures based on the volumetric properties of the system NaCl-H₂O. *Jour. Research U.S. Geol. Survey*, v. 5, p. 603-607.
- Rye, R.O. (1974) A comparison of sphalerite-galena sulfur isotope temperatures with filling temperatures of fluid inclusions. *Econ. Geol.*, v. 69, p. 26-32.
- Rye, R.O. and Ohmoto, H. (1974) Sulfur and carbon isotope and ore genesis: A Review. *Econ. Geol.*, v. 69, p. 826-842.
- Scott, S.D. and Barnes, H.L. (1971) Sphalerite geothermometry and geobarometry. *Econ. Geol.*, v. 66, p. 653-669.
- Scott, S.D. (1973) Experimental calibration of the sphalerite geobarometer. *Econ. Geol.*, v. 68, p. 466-474.
- Shikazono, N. (1985) A comparison of temperature 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.
- Shimazaki, H., Sakai, H., Kaneda, H. and Lee, M.S. (1985) Sulfur isotopic ratios of ore deposits associated with mesozoic felsic magmatism in South Korea, with special reference to gold-silver deposits. *Geochemical Jour.*, v. 19, p. 163-169.
- Takahashi, M., Aramaki, S. and Ishihara, S. (1980) Magnetite-series/Ilmenite-series vs. I-type/S type granitoids. *Mining Geol., Special Issue, No. 8*, p. 13-28.
- Taylor, S.R. (1964) Abundances of chemical elements in the continental crust. *Geochem. Cosmochim. Acta*, v. 28, p. 1280-1281.

1991년 3월 5일 원고접수

