

감계 銅·鉛·亞鉛·金·銀·鑛床의 鑛石鑛物과 流體包有物 研究

李鉉具* · 金尚中*

Ore Minerals and Fluid Inclusions Study of the Kamkye Cu-Pb-Zn-Au-Ag Deposits, Republic of Korea.

Hyun Koo Lee* and Sang Jung Kim*

ABSTRACT: The Kamkye Cu-Pb-Zn-Au-Ag deposits occur as quartz veins that filled fault-related fractures of NW system developed in the Cretaceous Gyeongsang basin. Three major stages of mineral deposition are recognized: (1) the stage I associated with wall rock alteration, such as sericite, chlorite, epidote and pyrite, (2) the early stage II of base-metal mineralization such as pyrite, hematite, and small amounts of sphalerite and chalcocopyrite, and the middle to late stage II of Cu-As-Sb-Au-Ag-S mineralization, such as sphalerite, chalcocopyrite, galena with tetrahedrite, tennantite, pearceite, Pb-Bi-Cu-S system, argentite and electrum. (3) the stage III of supergene mineralization, such as covellite, chalcocite and malachite. K-Ar dating of alteration sericite is a late Cretaceous (74.0 ± 1.6 Ma) and it may be associated with granitic activity of nearby biotite granite and quartz porphyry.

Fluid inclusion data suggest a complex history of boiling, cooling and dilution of ore fluids. Stage II mineralization occurred at temperatures between 370 to 220°C from fluids with salinities of 8.4 to 0.9 wt.% NaCl. Early stage II(320°C, 2.0 wt.% NaCl) may be boiled due to repeated fracturing which opened up the hydrothermal system to the land surface, and which resulted in a base-metal sulfide. Whilst the fractures were opened to the surface, mixing of middle-late stage II ore fluids with meteoric waters resulted in deposition of Cu-As-Sb-Au-Ag minerals from low temperature fluids($\leq 290^\circ\text{C}$). Boiling of ore fluids may be occurred at a pressure of 112 bar and a depth of 412 m.

Equilibrium thermodynamic interpretation of sphalerite-tetraherite assemblages in middle stage II indicates that the ore-forming fluid had log fugacities of S_2 of $-6.6 \sim -9.4$ atm.

서 언

慶北 義城盆地내의 많은 銅·鉛·亞鉛·金·銀鑛床들은 금성산 火山岩複合體나 청송지역에 발달하는 花崗岩 또는 石英斑岩 주변의 慶尚系 堆積層내에 胚胎되는 熱水性 脈脈鑛床들이다. 이들 鑛床들은 嶺南陸塊, 沃川系 및 京畿陸塊 등에서 보이는 鑛化作用의 특성과는 鑛物組合, 構造規制 및 鑛化時期 등이 큰 차이를 보이고 있어 이 지역의 鑛化作用의 특성을 규명하는 연구는 韓半島의 鑛化區나 鑛化期의 설정 및 지체구조 발달사를 규명함에 있어서 대단히 중요한 위치를 차지하고 있다. 따라서, 최근 이 지역의 금속鑛化作用에 대한 관심이 고조되어 이현구등(1993a,b,c), 김상중등(1993), So et al.(1992), Choi et al.(1992a,b) 등의 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 이현구등(1993a,b)은 오토와 토현 鑛床의 銅·鉛·亞鉛鑛化作用이 금성산 火山岩複合體의 火山활동에 수반된 구조와 시기가 밀접한 관련성이 있음을 지적한

바 있다.

그러나, 각 鑛床들의 生成機構, 生成時期 및 火山활동과의 상호연관성 등을 종합하여 이 지역 鑛化作用의 특성을 규정하기에는 아직 각 鑛床에 대한 기초자료가 미흡한 상태이다. 따라서, 금번 연구는 감계 銅·鉛·亞鉛·金·銀鑛床에 대하여 야외조사와 실내실험을 통하여 鑛物의 產出狀態, 鑛物組成, 鑛石鑛物의 化學組成 및 共生關係, 流體包有物, 母岩變質鑛物의 K-Ar 연대 등을 검토하여 本鑛床의 鑛化作用의 특징을 고찰하고자 하였다.

주변 지질

감계광산의 주변지질은 북동쪽에 소규모로 분포되는 선캠브리아기의 편암을 부정합으로 덮고 있는 백악기의 慶尚系 堆積岩類와 이들을 백악기말에 관입한 黑雲母花崗岩, 석영반암 및 규장암으로 구성된다(Fig. 1). 본 지역의 慶尚系 퇴적암류들은 하양층군에 속하는 일직층, 후평동층, 점곡층 및 사곡층으로 구성되며, 이들 퇴적암류들은 대부분 사암, 흑색, 회색 및 적색세

*忠南大學校 地質學科(Department of Geology, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Republic of Korea)

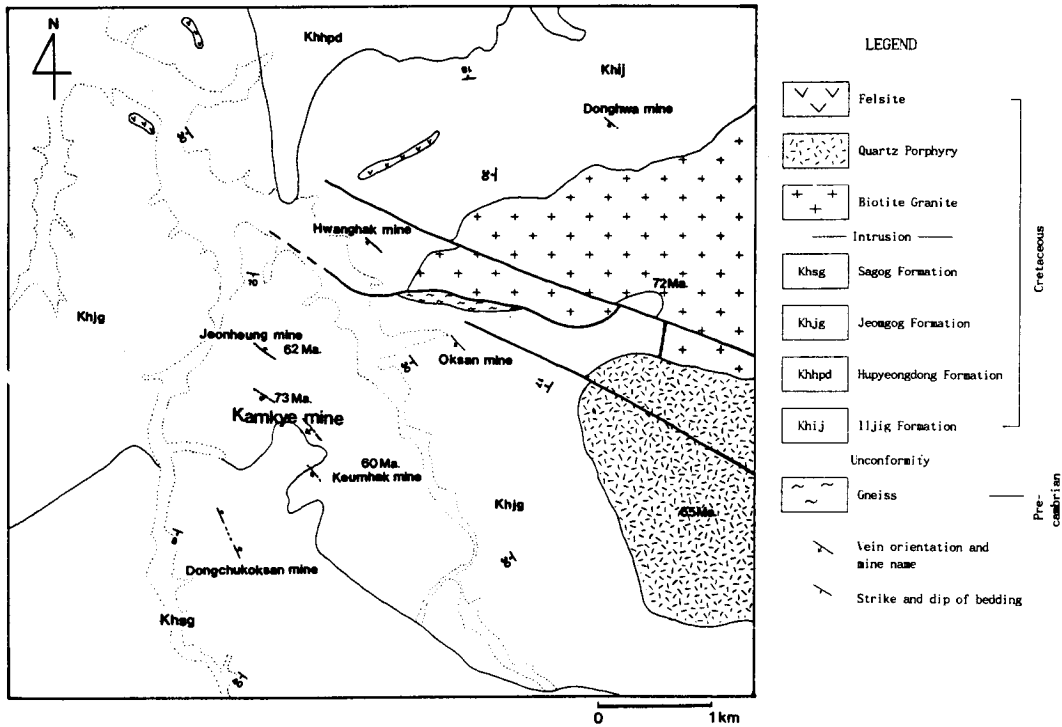


Fig. 1. Geologic map of the Kamkye mine area.

일이지만 부분적으로 혼펠스화되어 있는 부분도 있다. 黑雲母花崗岩류는 주로 石英, 사장석, 미사장석, 정장석, 黑雲母 등으로 구성되고 소량의 녹니석, 백운모, 인회석등이 함유된다. 석영반암과 규장암은 주로 石英과 정장석 및 사장석으로 구성되며 소량의 백운모, 黑雲母, 견운모등이 관찰된다.

광 상

감계광산은 백악기 慶尙系 하양층군의 점곡층내에 발달된 N 30~65°W의 주향과 80°SW의 경사를 갖는 구조대를 충진한 熱水性 銅-鉛-아연-은-석영맥 鑛床이다. 본 광상주변에는 금학, 전홍, 황학, 옥산 및 동화광산이 胚胎되고 있는데 이들 鑛床들은 대부분 義城盆地내에 발달된 NW계의 단층대를 충진하고 있으며, 맥폭은 대개 100 cm 이하이고 연장은 약 200 m 내외로서 비교적 소규모의 鑛床을 형성하고 있다. 감계광산은 사암과 셰일층내에 발달된 약 1m 정도의 폭을 갖는 파쇄대를 따라 충진된 80 cm 이하의 맥으로 구성되고 팽축이 심한 편이다. 본 鑛床에서 산출되는 鑛石鑛物은 黃鐵石, 閃亞鉛石, 黃銅石 및 方鉛石과 소량의 휘은석, 四面銅石, 테난타이트, 피어사이트, 미확인 鑛物 (Pb-Bi-Cu-S계 鑛物)과 같은 黃鹽鑛物 및 에렉트럼이 관찰된다. 母岩變質대의 주변부에서는 투명석영과 공생하는 黃鐵石, 赤鐵

Stage	Stage I	Stage II	Stage III
Sericite	—		
Chlorite	—		
Epidote	—		
Hematite		—	
Pyrite	—	—	
Sphalerite		—	
Chalcopyrite		—	
Galena		—	
Tetrahedrite		—	
Enargite		—	
Pearceite		—	
Lillianite		—	
Argentite		—	
Electrum		—	
Chalcocite			—
Covellite			—
Malachite			—
Quartz			—
Fluorite			—
Calcite			—
Rutile			—

Fig. 2. Paragenetic sequence of mineals from the Kamkye Cu-Pb-Zn-Au-Ag deposits.

石대가 관찰되고, 맥의 중앙부에서는 우백질 석영과 공생하는 閃亞鉛石, 黃銅石, 方鉛石 및 黃鹽鑛物대가 관찰된다. 母岩變質

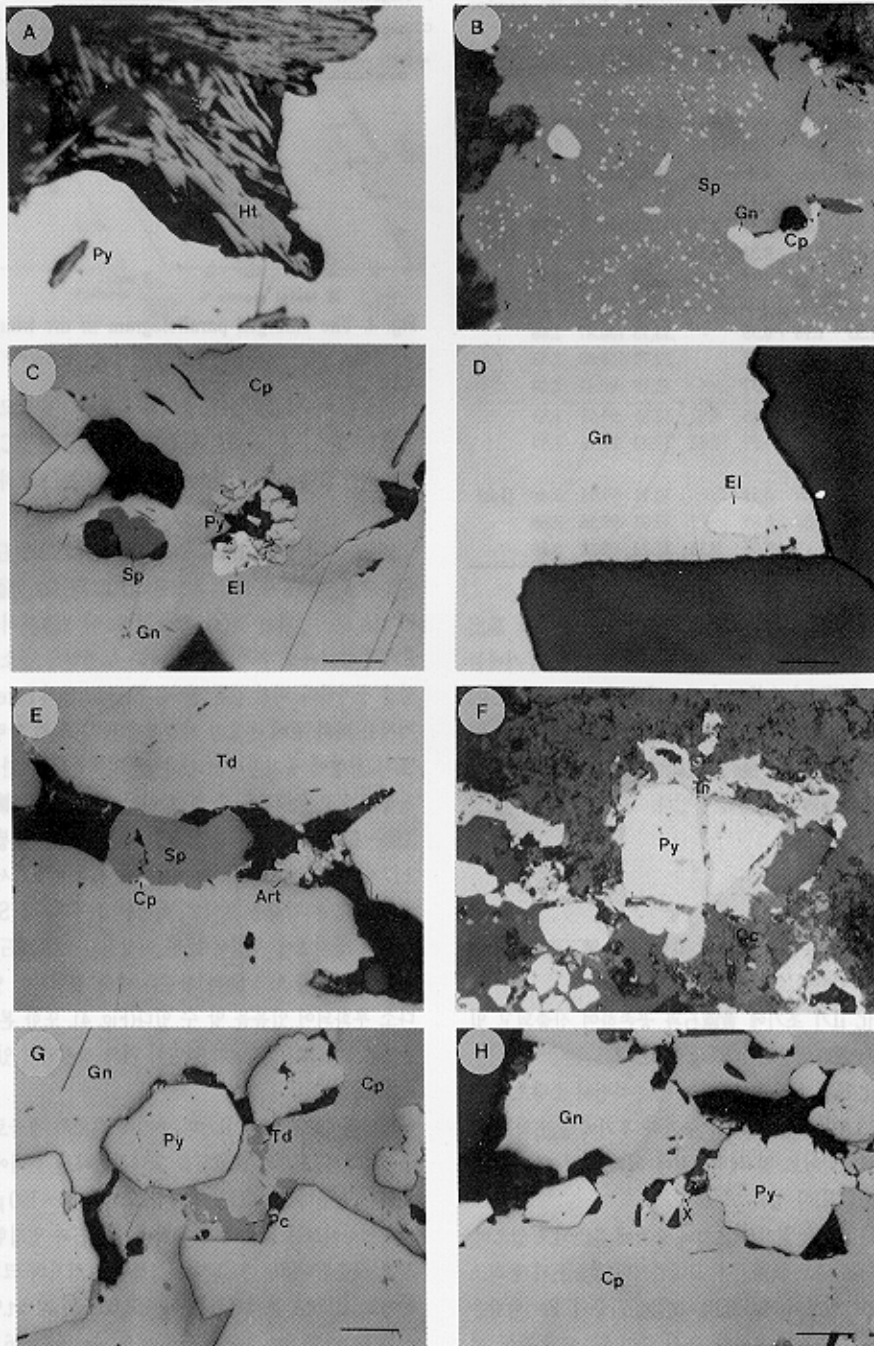


Fig. 3. Microphotographs showing the mineral paragenesis from the Kamkye Cu-Pb-Zn-Au-Ag deposits. A; Pyrite(Py) coexisting with hematite(Ht), B; Chalcopyrite(Cp) included in sphalerite(Sp), C; pyrite replaced by chalcopyrite, galena(Gn) and electrum(El), D; Electrum included in galena, E; Tetrahedrite(Td) coexisting with sphalerite, F; Pyrite replaced by tennantite(Tn), G; Pyrite replaced by chalcopyrite and galena, H; Unknown mineral(X) coexisting with galena. Scale bar is 50 μ m.

로는 견운모화, 녹니석화, 녹염석화 및 황철석화작용이 관찰된다.

鑛石鑛物의 共生關係

감계광상의 鑛化作用은 鑛내조사와 실내연구에 의하여 深成鑛化期와 淺成鑛化期로 나뉜다(Fig. 2). 深成鑛化期 초기에는 모암의 변질현상이 뚜렷하여 견운모, 녹니석, 녹염석 및 소량의

Fig. 3. Microphotographs showing the mineral paragenesis from the Kamkye Cu-Pb-Zn-Au-Ag deposits. A; Pyrite(Py) coexisting with hematite(Ht), B; Chalcopyrite(Cp) included in sphalerite(Sp), C; pyrite replaced by chalcopyrite, galena(Gn) and electrum(EI), D; Electrum included in galena, E; Tetrahedrite(Td) coexisting with sphalerite, F; Pyrite replaced by tennantite(Tn), G; Pyrite replaced by chalcopyrite and galena, H; Unknown mineral(X) coexisting with galena. Scale bar is 50 μ m.

로는 건운모화, 녹니석화, 녹염석화 및 黃鐵石화작용이 관찰된다.

감계광상의 鑛化作用은 갱내조사와 실내연구에 의하여 深成鑛化期와 淺成鑛化期로 나뉜다(Fig. 2). 深成鑛化期 초기에는 모암의 변질현상이 뚜렷하여 건운모, 녹니석, 녹염석 및 소량의

鑛石鑛物의 共生關係

Table 1. Chemical compositions of sphalerites from the Kamkye Cu-Pb-Zn-Au-Ag deposits.

Sample No.	Weight %						FeS Total mole %		Stage
	Zn	Fe	Cu	Cd	Mn	S	Total	mole %	
KK1	65.55	0.52	0.10	0.47	0.10	33.05	99.79	0.91	II-II
	66.17	1.24	-	0.35	0.09	33.08	100.93	2.14	
	64.92	0.85	0.03	0.39	0.01	33.84	100.04	1.50	
	65.29	0.92	0.84	0.41	-	33.30	100.99	1.60	
KK2	64.26	0.94	0.64	0.33	0.26	33.84	100.27	1.65	II-II
	62.87	1.55	0.39	0.31	0.32	33.97	99.41	2.76	
kk14-2(3)	64.06	1.04	0.18	0.33	0.33	33.17	99.11	1.84	II-II
	64.14	1.53	1.10	0.35	-	33.75	100.87	2.66	
	65.69	1.42	0.88	0.22	-	32.72	100.93	2.43	
	65.13	1.28	1.34	0.37	-	32.19	100.31	2.20	
KK7-1	65.56	0.76	-	0.45	0.02	32.69	99.63	1.33	II-II
	66.02	0.62	-	0.07	0.02	32.43	99.16	1.09	
KK14-2(6)	66.53	0.28	0.59	0.41	-	32.11	99.92	0.48	II-III
	65.86	0.38	0.88	0.39	-	32.05	99.56	0.66	
	65.28	0.16	1.19	0.06	0.35	32.24	99.28	0.28	

黃鐵石 등이 晶出되고, 중기에는 赤鐵石과 黃鐵石이 주로 晶出되어 있으며 소량의 閃亞鉛石과 黃銅石이 관찰된다. 후기에는 주로 閃亞鉛石, 黃銅石과 方鉛石이 晶出되며, 소량의 碲은석, 四面銅石, 테난타이트, 피어사이트, 미확인 鑛物(Pb-Bi-Cu-S계 鑛物) 및 에렉트럼이 수반된다. 淺成鑛化期에는 碲은석, 코벨라이트 및 공작석 등의 2차鑛物이 晶出되어 있다.

鑛石鑛物

본광산에서 산출되는 鑛石鑛物의 共生關係, 鑛石組織 및 化學組成은 다음과 같다.

赤鐵石은 鑛化 II기 초기에 黃鐵石과 공존하여 산출되고 있으며 입경은 50~300 m 정도이다(Fig. 3.A).

黃鐵石은 鑛化 II기 초기에 赤鐵石과 공존하면서 소량으로 晶出되는 것(Fig. 3.A)과 鑛化 II기의 중기와 후기에 晶出되는 黃銅石, 方鉛石, 테난타이트 및 에렉트럼에 의해 교대 또는 충전되는 것(Fig. 3.C,G,H)이 있다.

閃亞鉛石은 주로 鑛化 II기의 초기와 중기에 晶出되고 있으며, 초기의 閃亞鉛石은 주로 黃鐵石을 교대하거나 黃銅石과 용리조직으로 산출되고 있으며(Fig. 3.B), 閃亞鉛石중의 Fe 함량은 0.52~1.55 wt.%의 범위를 보인다. 또한 중기에는 四面銅石, 테난타이트 및 에렉트럼과 공존하면서 산출된다(Fig. 3.E). 이때의 閃亞鉛石중의 Fe의 함량은 0.16~0.76 wt.%의 범위를 보이고 있어 鑛化作用이 진행됨에 따라 Fe의 함량이 감소하는 경향을 보이고 있다(Table 1). 黃銅石은 鑛化 II기의 초기와 중기에 閃亞鉛石중의 bleb상의 용리조직을 보이는 것과 초기에 晶出된 赤鐵石과 黃鐵石을 교대하여 산출되는 것(Fig. 3.C,D)이 있다.

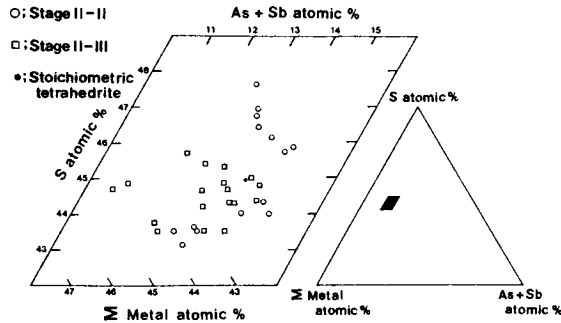


Fig. 4. The enlarged parallelogram in the triangle diagram showing the composition of tetrahedrite-series minerals.

方鉛石은 주로 鑛化 II기 중기와 후기에 산출되고 있다. 초기에 晶出된 黃鐵石을 교대하며 晶出되는 것(Fig. 3.C,H)과 중기에 晶出되는 閃亞鉛石과 黃銅石을 교대 또는 포획하는 것(Fig. 3.C,G)이 있다.

四面銅石은 鑛化 II기의 중기와 후기에 閃亞鉛石 및 方鉛石과 밀접한 共生關係를 갖고 晶出된다(Fig. 3.E,G). 四面銅石에 대한 EPMA 분석결과는 Table 2와 같다. 이 도표에서와 같이 鑛化 II기의 중기에서 후기로 감에 따라 As함량은 감소하고 Sb의 함량은 증가한다. 이와 같은 결과는 Hackbarth와 Peterson(1984)이 지정한 바와 같이 온도가 하강함에 따라 As의 함량이 감소하고 Sb의 함량이 증가한다는 것과 잘 일치한다. 또한 본 광산에서 산출되는 四面銅石은 Zn의 함량이 다른 金銀 鑛床(은치광산; 3.80~4.15 wt.%, 덕암광산; 2.31~4.77 wt.%, 중봉광산; 0.32~3.17 wt.%, 둔전광산; 3.26~4.37 wt.%)과 비교해서 7.04~14.35 wt.%로 높은 함량을 보이고, 이러한 분석결과를 $Sb+As-\sum metal-S$ 의 삼각표에 투영해 보면 이상적인 四面銅石의 주변에 투영되고 있으나 As+Sb의 함량은 다소 결핍되어 있고, metal이 다소 부화되어 있음을 알 수 있다(Fig. 4). 또한 본 鑛床에서 산출되는 四面銅石은 Ag의 함량이 거의 결핍되어 있는 舍亞鉛-四面銅石이다.

테난타이트는 鑛化 II기의 중기에 晶出된 광물로서 黃銅石과 공생하면서 초기의 黃鐵石을 교대하거나 石英내에 독립적으로 소량 산출된다(Fig. 3.F). 입자의 크기는 50~100 μm 정도이다.

피어사이트는 鑛化 II기 후기에 方鉛石과 밀접한 共生關係를 갖고 산출된다(Fig. 3.C). 현미경하에서 입자의 크기는 50 m 이하이고, EPMA 분석결과는 Ag; 54.06~57.42 wt.%, Cu; 15.27~18.11 wt.%, Fe; 1.05~2.06 wt.%, As; 5.15~6.30 wt.%, Sb; 2.71~4.47 wt.% 이다(Table 3). 이 분석결과는 Hall(1967)이 제시한 피어사이트-폴리바사이트계 다이어그램에 투영해 보면 전형적인 피어사이트의 영역에 도시된다(Fig. 5).

碲은석은 鑛化 II기 후기에 晶出되는 광물로서 주로 方鉛石과 밀접한 共生關係를 갖고 산출되며 입자의 크기는 50 μm 이하이다. 碲은석에 대한 EPMA 분석결과는 Ag; 77.06~82.73 wt.%,

Table 2. Chemical compositions of tetraherite series minerals from the Kamkye Cu-Pb-Zn-Au-Ag deposits.

Sample No.	Weight %							Total	Chemical formulae (S = 13)	Stage
	Cu	Ag	Fe	Zn	As	Sb	S			
KK7-1(2)	39.86	-	1.25	9.70	8.92	14.70	25.20	99.63	Cu _{10.37} (Fe,Zn) _{2.82} (As,Sb) _{3.97} S _{13.00}	II-II
	40.44	0.09	1.07	8.97	6.86	16.90	25.36	99.69	(Cu,Ag) _{10.47} (Fe,Zn) _{2.57} (As,Sb) _{3.79} S _{13.00}	
	40.22	0.01	1.08	8.79	7.68	16.13	25.29	99.20	(Cu,Ag) _{10.43} (Fe,Zn) _{2.53} (As,Sb) _{3.87} S _{13.00}	
	40.37	0.20	1.14	8.12	8.00	16.28	25.31	99.42	(Cu,Ag) _{10.49} (Fe,Zn) _{2.38} (As,Sb) _{3.96} S _{13.00}	
	41.14	0.04	1.16	8.66	9.49	14.30	25.87	100.66	(Cu,Ag) _{10.44} (Fe,Zn) _{2.47} (As,Sb) _{3.93} S _{13.00}	
KK7-2(5)	38.43	0.15	1.34	7.04	11.64	13.62	27.48	99.70	(Cu,Ag) _{9.19} (Fe,Zn) _{2.66} (As,Sb) _{4.05} S _{13.00}	
	38.15	0.04	1.61	7.08	10.18	14.48	27.22	98.76	(Cu,Ag) _{9.20} (Fe,Zn) _{2.18} (As,Sb) _{3.90} S _{13.00}	
	38.63	-	1.60	7.10	11.27	14.82	27.68	101.10	Cu _{9.15} (Fe,Zn) _{2.07} (As,Sb) _{4.16} S _{13.00}	
	38.16	-	1.68	7.26	7.21	18.38	27.41	100.10	Cu _{9.13} (Fe,Zn) _{2.15} (As,Sb) _{4.13} S _{13.00}	
KK14-2(6)	37.27	-	0.83	10.25	10.02	16.23	25.11	100.71	Cu _{9.36} (Fe,Zn) _{2.74} (As,Sb) _{4.26} S _{13.00}	
	37.01	-	0.58	10.69	10.38	16.32	25.94	100.92	Cu _{9.36} (Fe,Zn) _{2.70} (As,Sb) _{4.36} S _{13.00}	
	37.07	-	0.73	11.11	10.15	15.19	25.86	100.11	Cu _{9.40} (Fe,Zn) _{2.95} (As,Sb) _{4.19} S _{13.00}	
KK7-1(1)	38.39	0.06	1.06	7.97	7.60	17.70	25.58	98.86	(Cu,Ag) _{9.98} (Fe,Zn) _{2.30} (As,Sb) _{4.20} S _{13.00}	
	39.02	0.24	1.32	7.36	7.08	18.09	25.86	98.97	(Cu,Ag) _{9.93} (Fe,Zn) _{2.28} (As,Sb) _{4.32} S _{13.00}	
	39.82	0.33	1.26	7.73	6.59	18.18	25.59	99.50	(Cu,Ag) _{10.24} (Fe,Zn) _{2.29} (As,Sb) _{4.06} S _{13.00}	
	39.94	-	1.19	7.73	7.61	18.20	26.16	100.83	Cu _{10.01} (Fe,Zn) _{2.22} (As,Sb) _{4.06} S _{13.00}	
	39.41	0.04	1.08	7.67	7.32	17.80	26.14	99.46	(Cu,Ag) _{9.89} (Fe,Zn) _{2.18} (As,Sb) _{4.39} S _{13.00}	
KK7-2(3)	40.38	0.31	1.18	8.60	-	23.90	25.74	100.11	(Cu,Ag) _{10.34} (Fe,Zn) _{2.47} Sb _{3.18} S _{13.00}	
	39.99	0.44	1.05	9.30	-	23.36	25.46	99.50	(Cu,Ag) _{10.37} (Fe,Zn) _{2.64} Sb _{3.13} S _{13.00}	
KK14-2(7)	33.88	0.19	0.35	14.35	5.46	21.66	24.99	100.88	(Cu,Ag) _{8.92} (Fe,Zn) _{3.77} (As,Sb) _{4.18} S _{13.00}	
	33.84	-	0.16	13.21	5.79	21.65	25.41	100.06	Cu _{8.73} (Fe,Zn) _{3.34} (As,Sb) _{4.18} S _{13.00}	
KK14-3(2)	38.57	0.03	2.74	8.77	5.30	19.03	24.81	99.25	(Cu,Ag) _{10.20} (Fe,Zn) _{3.06} (As,Sb) _{3.81} S _{13.00}	
	37.51	0.55	2.38	8.87	6.15	19.44	25.09	99.99	(Cu,Ag) _{9.89} (Fe,Zn) _{2.96} (As,Sb) _{4.02} S _{13.00}	
	38.08	-	2.91	8.89	4.99	18.71	24.86	98.44	Cu _{10.05} (Fe,Zn) _{3.15} (As,Sb) _{3.69} S _{13.00}	
KK14-3(7)	38.14	-	1.05	8.73	7.41	19.66	26.32	100.31	Cu _{9.50} (Fe,Zn) _{2.41} (As,Sb) _{4.12} S _{13.00}	
	38.23	-	0.09	7.90	6.71	19.45	25.91	99.10	Cu _{9.68} (Fe,Zn) _{2.20} (As,Sb) _{4.01} S _{13.00}	
	38.68	-	1.08	8.63	5.03	17.96	26.37	97.75	Cu _{9.62} (Fe,Zn) _{2.39} (As,Sb) _{3.39} S _{13.00}	
	39.03	-	1.62	7.97	7.02	16.79	25.79	98.22	Cu _{9.92} (Fe,Zn) _{2.44} (As,Sb) _{3.74} S _{13.00}	
	38.99	-	0.80	8.58	4.90	19.73	26.29	99.29	Cu _{9.73} (Fe,Zn) _{2.31} (As,Sb) _{3.61} S _{13.00}	
	39.19	-	0.70	8.67	5.68	19.33	26.12	98.69	Cu _{9.59} (Fe,Zn) _{2.32} (As,Sb) _{3.74} S _{13.00}	

Table 3. Chemical composition of pearcite from the Kamkye Cu-Pb-Zn-Au-Ag deposits.

Sample No.	Weight %							Total	Structural formulae
	Ag	Cu	Fe	Zn	As	Sb	S		
KK7-2	57.42	15.96	1.36	-	5.47	3.20	17.54	100.95	(Ag _{10.62} Cu _{5.01}) _{15.63} Fe _{0.49} (As _{1.46} Sb _{0.52}) _{11.06} S _{10.91}
	56.98	16.51	2.06	-	5.20	3.20	17.53	101.48	(Ag _{10.44} Cu _{5.13}) _{15.58} Fe _{0.73} (As _{1.37} Sb _{0.52}) _{11.09} S _{10.81}
	55.53	15.74	1.36	-	5.89	3.60	17.16	99.28	(Ag _{10.61} Cu _{5.02}) _{15.46} Fe _{0.49} (As _{1.59} Sb _{0.60}) _{2.19} S _{10.95}
	56.05	15.27	1.06	-	4.44	4.47	17.36	98.65	(Ag _{10.64} Cu _{4.92}) _{15.56} Fe _{0.39} (As _{1.21} Sb _{0.75}) _{11.06} S _{11.09}
	56.11	16.72	1.05	-	6.30	2.71	17.74	100.63	(Ag _{10.32} Cu _{5.22}) _{15.54} Fe _{0.37} (As _{1.67} Sb _{0.44}) _{2.11} S _{10.98}
	54.06	18.11	1.26	-	5.74	2.96	18.00	100.13	(Ag _{9.88} Cu _{5.62}) _{15.50} Fe _{0.44} (As _{1.51} Sb _{0.48}) _{1.99} S _{11.07}
	54.68	17.94	1.23	-	5.15	4.27	17.82	101.09	(Ag _{9.99} Cu _{5.57}) _{15.56} Fe _{0.43} (As _{1.36} Sb _{0.69}) _{2.06} S _{10.96}
KK14-2(2)	56.76	18.13	1.09	2.32	7.24	0.90	17.74	98.86	(Ag _{9.90} Cu _{5.66}) _{15.56} (Fe _{0.39} Zn _{0.70}) _{11.09} (As _{1.92} Sb _{0.15}) _{2.07} S _{10.99}
	53.15	18.16	1.25	3.21	6.16	1.75	18.09	98.56	(Ag _{9.78} Cu _{5.67}) _{15.45} (Fe _{0.44} Zn _{0.97}) _{11.41} (As _{1.63} Sb _{0.29}) _{1.92} S _{11.19}
	51.68	19.49	1.30	3.51	6.18	1.43	18.04	98.12	(Ag _{9.48} Cu _{6.07}) _{15.55} (Fe _{0.46} Zn _{1.06}) _{11.52} (As _{1.63} Sb _{0.23}) _{1.86} S _{11.13}

Cu; 4.04~6.31 wt.%, Fe; 0.52~0.99 wt.% 이다. 특히 Cu의 함량은 국내 다른 지역의 광산에서 산출되는 휘은석중에 함유된 것보다 높으며, Cu의 함량이 3.3 wt.%까지 함유되는 일본의 Akenobe 鑛床(Furuno et al.,1992)과 비교된다. 미확인 鑛物(Pb-Bi-Cu-S계 鑛物)은 鑛化 II기 후기에 晶出되는 광물로서 입자의 크기는 20 μm이하이다(Fig. 3.H). 이 광물에 대한 2개입자

11점에 대한 EPMA 분석치의 평균조성은 Pb; 54.98 wt.%, Bi; 22.80 wt.%, Cu; 1.88 wt.%, Fe; 0.79 wt.%, Zn; 0.25 wt.%, Ag; 0.08 wt.%, S; 18.95 wt.% 이다.

에렉트럼은 주로 鑛化 II기 증기와 후기에 黃銅石, 方鉛石등과 밀접한 共生關係를 갖고 晶出되며(Fig. 3.C,D), 입자 크기는 대부분 30~50 μm이다. 이 에렉트럼에 대한 EPMA 분석결과 鑛化

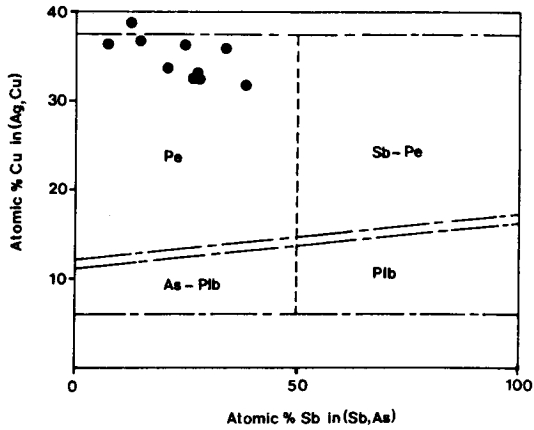


Fig. 5. Relation between $\text{Cu}/(\text{Ag} + \text{Cu})$ and $\text{Sb}/(\text{As} + \text{Sb})$ in chemical composition of polybasite(Plb)-arsenopolybasite (AS-Plb) and antimonpearceite(Sb-Pe)-pearceite(Pe) series.

II기 중기에는 Au; 70.36~80.00 wt.%, Ag; 18.05~29.05 wt.%이며, Cu의 함량은 3.67~4.68 wt.%로 높은 값을 갖는 것이 특징이다(Table 4). 그러나, 鑛化 II기 후기에는 Au; 40.87~55.06 wt.%, Ag; 43.62~58.90 wt.%로서 鑛化가 진행됨에 따라 금의

Table 4. Chemical compositions of electrum from the Kamkye Cu-Pb-Zn-Au-Ag deposits.

Sample No.	Weight %				Atomic %			Stage
	Au	Ag	Cu	Total	Au	Ag	Cu	
KK7-2(6)	71.23	28.29	-	99.53	57.96	42.04	-	
	70.36	28.64	-	99.00	57.37	42.64	-	
	71.35	29.05	-	100.43	57.33	42.67	-	
	71.48	27.52	-	99.00	58.72	41.28	-	
	70.78	28.03	-	98.81	58.03	41.97	-	
KK14-3(3)	75.13	21.90	4.21	101.24	58.63	31.20	10.17	II-II
	78.08	19.95	3.92	101.95	61.64	28.76	9.60	
	70.72	23.42	4.02	98.16	56.15	33.95	9.90	
	73.01	21.79	4.68	99.48	57.35	31.25	11.40	
	78.98	18.62	3.98	101.56	63.03	27.13	9.84	
	80.00	18.05	3.67	101.72	64.34	26.50	9.16	
KK7-3)	48.15	52.18	-	100.32	33.57	66.43	-	II-III
	45.22	56.37	-	101.59	30.52	69.48	-	
	40.87	58.90	-	99.77	27.53	72.47	-	
	43.96	56.05	-	100.01	30.04	69.96	-	
	53.76	44.57	-	98.33	39.78	60.22	-	
	55.06	43.62	-	98.67	40.87	40.87	59.13	

함량은 감소하고 은의 함량은 증가하는 경향을 보인다.

휘동석, 코벨라이트, 공작석은 淺成鑛化기에 銅의 이차적인

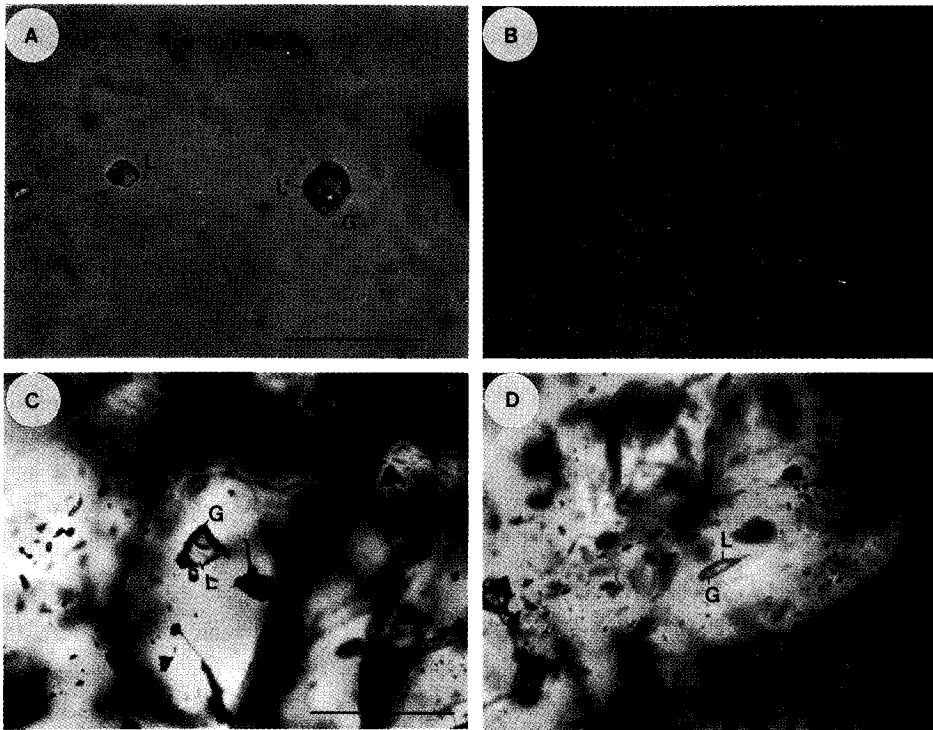


Fig. 6. Microphotographs showing fluid inclusions from the Kamkye Cu-Pb-Zn-Au-Ag deposits. A,B,C,D; fluid inclusion in quartz, E,F; fluid inclusion in sphalerite, G; Gas, V; vapor. Scale bars are 100 μm long.

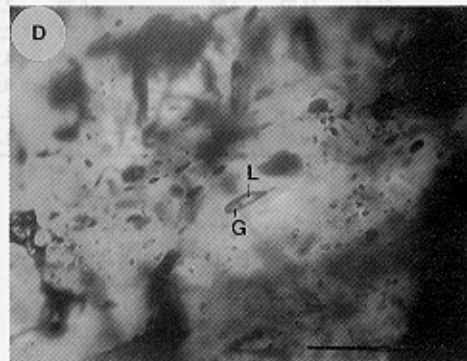
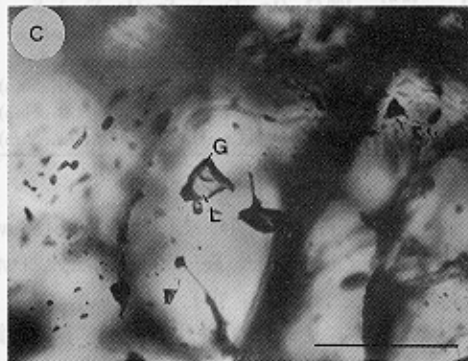
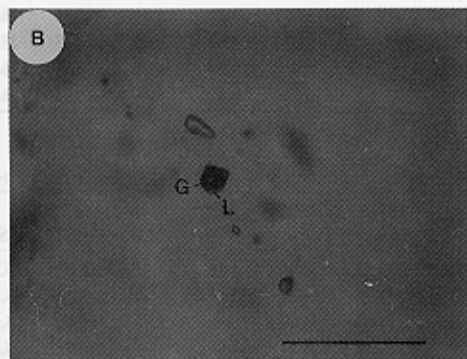
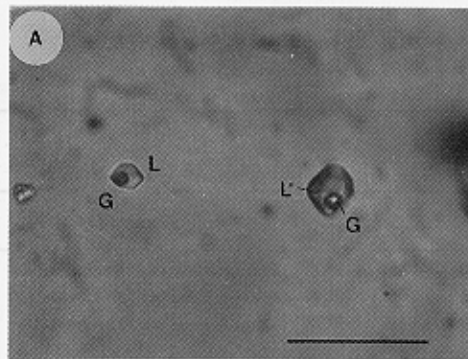


Fig. 6. Microphotographs showing fluid inclusions from the Kamkye Cu-Pb-Zn-Au-Ag deposits. A,B,C,D; fluid inclusion in quartz, E,F; fluid inclusion in sphalerite, G; Gas, V; vapor. Scale bars are 100 μ m long.

沈殿에 의해서 생성되었다.

流體包有物

流體包有物 연구는 주된 黃化鑛物과 黃鹽鑛物의 晶出시기인 鑛化 II기에 晶出되는 石英과 閃亞鉛石에 대해서 실시하였다. 流體包有物의 연구는 U.S.G.S gas flow 가열 및 냉각장치를 이용하였으며, 冷却實驗에 의한 鹽濃度는 H₂O-NaCl 계(Potter et al., 1978)에 의해서 구했다.

包有物의 크기는 10~30 μm가 우세하고 간혹 50 μm이상인 것도 관찰되는데, 상온에서 관찰되는 流體包有物의 종류는 크게 두 종류로 분류된다(Fig. 6). 즉, 1) A형은 액상과 기상으로 이루어지고 액상의 부피가 50% 이상으로서 가열시 액상으로 충전되는 것, 2) B형은 액상과 기상으로 이루어 지고 기상의 충전도가 60~80% 를 차지하며 기상으로 충전되는 것으로 분류되고, 冷却實驗時 액체 CO₂나 다른 水化合物들은 관찰되지 않는다. 그러나, A형 包有物이 우세하게 산출되며, 대부분 irregular, sub-round 및 negative 형태를 갖는다.

流體包有物의 均一化溫度

均一化溫도의 측정은 대부분 A형 包有物을 대상으로 하였다. 鑛化 II기 초기의 石英내에서 관찰되는 包有物의 均一化溫度는 220~370°C의 범위를 보이고 있으며, B형의 流體包有物의 크기가 매우 작아서 均一化溫도의 측정은 매우 힘들었지만 일반적으로 320°C 정도이다. 鑛化 II기 중기에 산출되는 閃亞鉛石에서 관찰되는 A형 流體包有物에 대한 均一化溫度는 240~290°C이다. 이들 결과들은 鑛化作用이 晶出작용의 진행과 더불어 점차 감소함을 보여 주고 있고, 주된 黃化鑛物 및 黃鹽鑛物과 金銀鑛物의 沈殿은 閃亞鉛石내에서 측정된 均一化溫度 범위내에서 沈殿되었음을 알 수 있다.

주 鑛化時期인 鑛化 I기의 流體包有物에는 액상으로 均一化되는 包有物과 기상으로 均一化되는 包有物이 공존하는 沸騰證據가 관찰되는데, 沸騰이 일어나는 동안의 증기압은 외부의 압력과 동일하기 때문에 이 시기에 포획된 流體包有物의 압력보정은 필요하지 않아 측정된 均一化溫度가 바로 鑛物의 沈殿溫度가 된다. 流體包有物의 鹽濃度는 包有物의 크기가 매우 작아서 제한된 시료에서만 실시되었다. 石英내의 流體包有物의 NaCl 상당 鹽濃度는 0.9~8.4 wt.% 값을 가지며, 閃亞鉛石의 鹽濃度는 0.9~7.2 wt.% 값을 나타낸다.

전체적으로 볼때 鑛化 II기 流體包有物의 NaCl 상당 鹽濃度는 均一化溫도와 상관관계에서 분산형을 보이고 있으며(Fig. 7), 이는 복잡한 流體의 변천사를 암시해 준다. 鑛化 II기의 石英과 流體包有物중 초생 B형 包有物이 드물게 관찰되는 것은 비등

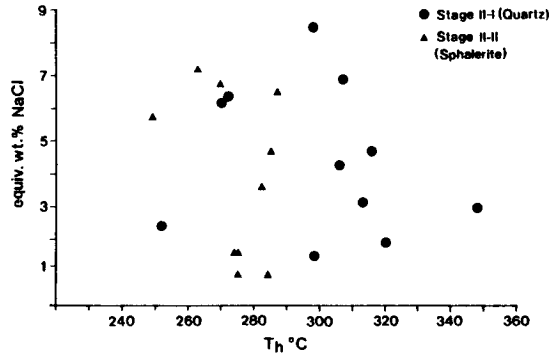


Fig. 7. Homogenization temperature vs. salinity diagram for fluid inclusion in vein minerals from the Kamkye Cu-Pb-Zn-Au-Ag deposits.

현상이 있었음을 암시한다. 또한, 均一化溫度-鹽濃度 관계에서 보여주는 바와 같이 鑛化 II기 초기에는 沸騰, 冷却, 淺水의 혼합에 의한 稀釋作用등 복잡한 流體의 변천사를 나타낸다. 閃亞鉛石을 대상으로한 중기에는 비등의 증거는 관찰할 수 없었고, 이 시기에는 온도의 하강과 더불어 천수의 유입에 의한 희석화 작용에 의하여 黃化鑛物과 다양한 黃鹽鑛物의 沈殿이 있었다고 생각된다.

고 찰

鑛床의 生成溫度

本鑛床의 生成溫度를 알기 위하여 鑛物共生關係에 의한 鑛物共生群의 上평형관계와 流體包有物의 均一化溫度를 토대로 生成溫度를 추정하였다. 鑛化 I기는 鑛化 II기 초기에 측정된 均一化溫도의 최상치인 370°C 이상의 온도에서 母岩變質鑛物의 형성을 야기시켰다.

鑛化 II기 초기는 鑛化流體의 비등증거가 관찰되어 流體包有物의 均一化 온도를 鑛床生成溫度로 간주할 수 있는데, 石英에서 측정된 均一化溫度는 220~370°C 범위를 갖는다. 鑛化 II기 중기에는 四面銅石과 閃亞鉛石의 鑛物공생군을 이용한 온도는 264~330°C이고, 閃亞鉛石에 대한 均一化溫度는 240~290°C의 범위를 보이고 있다. 鑛化 II기 중기의 閃亞鉛石에서는 비등의 증거가 관찰되지 않으므로 鑛化流體의 온도는 均一化 온도보다 다소 높을 것으로 생각되며 鑛物의 실질적 沈殿溫度는 四面銅石과 閃亞鉛石의 鑛物공생군을 가지고 구한 온도가 실제온도에 가까울 가능성이 있다. 鑛化 II기 후기에는 중기보다는 낮은 264°C 이하의 온도에서 黃鹽鑛物과 金銀鑛物이 晶出되었을 것이다.

鑛化期間중의 壓力條件 및 生成深度

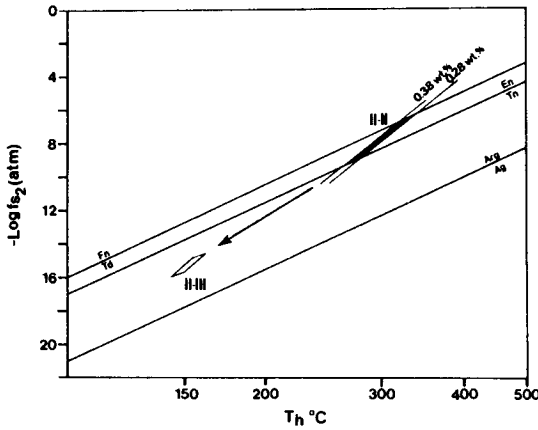


Fig. 8. Temperature and sulfur fugacity in stage II-I and II-II from the Kamkye Cu-Pb-Zn-Au-Ag deposits.

流體包有物중에 비등이 관찰되는 것에서 均一化溫도와 鹽濃度를 토대로 Hass(1971)와 Sourirajan and Kennedy (1962)의 자료를 이용하여 구해진 鑛化流體의 압력은 주 鑛化時期인 II기 초의 정수압(밀도=0.69 g/cm³, Th=320°C, salinity=2.0 wt.%)은 112 bar, 생성심도는 412 m이다.

鑛化流體의 硫黃分壓

유황분압과 온도를 추정하는 데 사용된 鑛物공존쌍에 대한 열역학자료는 Craig and Barton(1973), Kubaschewski et al. (1967) 등이 제시한 자료를 사용하였다.

鑛石鑛物의 共生鑛物쌍의 상평형관계를 가지고 유황분압을 계산해보면 鑛石鑛物의 주 晶出기인 鑛化 II기 초기는 10⁻⁶⁶ atm 이상의 조건에서, 중기는 四面銅石과 閃亞鉛石의 共生關係를 이용한 유황분압인 10⁻⁶⁶~10⁻⁹⁴ atm 조건에서, 후기의 유황분압은 후기에 晶出되는 에렉트럼의 화학조성과 중기에 晶出되는 閃亞鉛石중의 Fe의 함량을 가지고 검토해 볼 때, 黃鹽鑛物의 주 晶出기인 후기에는 유황분압이 상당히 낮은 10⁻¹⁶⁰ atm. 정도의 조건이었을 것으로 유추된다(Fig. 8).

鑛床의 生成時期

본광산에서 산출되는 母岩變質鑛物중 絹雲母를 대상으로 하였으며 측정방법은 K-Ar법을 이용하였고, 崩壞常數는 Steiger와 Jager(1977)가 제시한 값을 사용하였다. 사용된 장치는 Ar함량 측정을 위하여 日本 岡山理科大学 히루젠研究所에 설치된 질량 분석기를, K함량 측정을 위하여는 원자흡광분석기를 이용하였다. 이와 같은 방법으로 측정된 鑛床生成時期는 백악기 말(73.04 ± 1.60 Ma) 로서 本鑛床 동쪽에 분포되는 黑雲母花崗岩 (71.58

± 1.61 Ma)의 화성활동과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.

결론

本鑛床에 대한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 本鑛床은 주로 慶尙系 퇴적암류인 세일내에 발달된 N30~65°W계의 열극을 증진한 熱水性 鑛脈鑛床이다.
2. 流體包有物연구, 共生鑛物群의 상평형관계등으로 추정된 주 鑛化期(鑛化 II기)의 生成溫度는 초기는 220~370°C, 중기는 264~330°C이고 후기는 이 온도보다는 낮은 온도에서 晶出되었을 것으로 유추되고, 鑛化가 진행됨에 따라 온도가 점차로 낮아졌다.
3. 沸騰의 증거가 있는 鑛化 II기 초기의 流體包有物로 추정된 압력은 110 bar, 심도는 1400 m 였다.
4. 主鑛化期인 鑛化 II기에서의 유황분압은 초기; 10⁻⁶⁶ atm 이상의 조건에서, 중기는 10⁻⁶⁶~10⁻⁹⁴ atm, 후기는 10⁻¹⁶⁰ atm 으로서 鑛化 후기로 감에 따라서 낮아졌다.
5. 本鑛床의 生成時期는 백악기말(73.0 ± 1.6 Ma)로서 本鑛床 동쪽에 분포하는 黑雲母花崗岩(71.58 ± 1.61 Ma)의 화성활동에 수반된 鑛化作用으로 판단된다.

사사

본 연구는 韓國科學財團 後援 戰略鑛物資源 研究센터의 支援에 의해 이루어 졌다. 본 연구를 수행하는 동안 K-Ar 연대측정 시에는 장치의 대여와 기술적인 협력을 아끼지 않은 日本 岡山理科大学 自然科學 研究所 板谷徹丸 教授와 流體包有物 측정 장치를 대여해준 全北大學校 地質學科 鄭在一 教授에게 심심한 사의를 표한다. 또 본 원고에 대한 많은 조언을 준 송석환박사에게도 감사한다.

참고문헌

김상중,이현구 (1993) 慶北 청송광산의 銅-鉛-亞鉛 鑛化作用. 대한지질학회 제 48차 정기 총회 및 학술발표회 요약집, p. 54-55.
 박희인, 황 정 (1992) 은차 및 중봉 銀鑛床에서 산출되는 테트라헤드라이트계 鑛物들의 화학조성. 광산지질, 28권, p. 615-626.
 이찬희 (1993) 태백산 鑛化帶 북부 둔전-백전 지역 금,은,안티모니 鑛床의 지질, 鑛物, 流體包有物 및 安定同位元素 연구. 서울대학교 이학박사논문, 422p.
 이현구, 김상중, 윤혜수, 송영수, 김인수 (1993a) 慶北 義城 동남부 오토산 주변의 銅鑛化작용. 광산지질, 26권, p. 311-324.
 이현구, 김상중, 윤혜수, 최위찬, 송영수, 板谷 徹丸 (1993b) 慶北 義城 동남부에 분포 하는 금성산 화산암류의 K-Ar연대와 그 주변의 鑛化時期. 광산지질, 26권, p. 445-454.
 이현구, 김상중, 윤혜수 (1993c) 慶北 義城盆地내의 銅-鉛-亞鉛鑛床의 鑛化作用과 鑛化시기. 대한광산지질학회 제26차 정기총회 및 학술발표회 요약집, p. 19-20.

- Barnes, H.L. (1979) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 2nd edition. John Wiley and sons, p. 278-401.
- Choi, S.G., Choi, S.H., Yun, S.T., Lee, J.H. and So, C.S. (1992) Genetic Environment of hydrothermal copper deposits in Ogsan mineralized Area, Gyeongsangbukdo province. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 25, p. 233-243.
- Choi, S.G., Lee, J.H., Yun, S.T. and So, C.S. (1992) Mineralogy and Geochemistry of the Jeonheung and Oksan Pb-Zn-Cu deposits, Euseong Area. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 25, p. 417-433.
- Craig, J.R. and P.B. Barton, Jr. (1973) Thermochemical approximations for sulfosalts. *Econ. Geol.*, v. 68, p. 493-506.
- Furuno, M., Itoh, K. and Mariko, T. (1992) Polymetallic and gold-silver mineralizations in and around the Akenobe ore deposits, Southwest Japan. *Mining Geology*, v. 42, p. 33-46.
- 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.
- Hackbarth, C.J. and Petersen, U. (1984) Systematic compositional variations in argentian tetrahedrite. *Econ. Geol.*, v. 79, p. 448-460.
- Hall, H.T. (1967) The pearceite and polybasite series. *Am. Mineral.*, v. 52, p. 1311-1321.
- 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.
- So, C.S. and Choi, S.H. (1992) Genetic environments of the Keumhak copper deposits, Korea. Center for mineral resources research, 3rd symposium, p. 27-34.
- Sourirajan, S. and Kennedy, G. C. (1962) The system H₂O-NaCl at elevated temperatures and pressures. *Am. Jour. Sci.*, v. 260, p. 115-141.
- Steiger, R.H. and Jager, E. (1977) Subcommittee on geochronology : Convention on the use of the decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth plant. Sci. Lett.*, v. 36, p. 359-362.

1995년 1월 6일 원고접수