

청송광산의 동-연-아연 광화작용

이현구* · 김상중*

Cu-Pb-Zn Mineralization of the Cheongsong Mine

Hyun Koo Lee* and Sang Jung Kim*

ABSTRACT : Rocks in the Cheongsong mine area consist of Precambrian gneiss, Cretaceous sedimentary rocks and late Cretaceous quartz porphyry. The Cheongsong deposit is composed of many hydrothermal quartz veins of strikes N30°~60°W, dips 60~85°E which fill WNW fault system. Pyrite and hematite occur within transparent quartz near margins of early stage II, and milky quartz of middle stage II coexists with sphalerite, chalcopyrite and galena coexisting with Cu-Pb-Bi minerals in center part of stage II quartz veins. Stage III calcite vein filled cracks or fractures of earlier quartz veins contains native copper and chalcopyrite. Supergene minerals are chalcocite, covellite, malachite and chrysocolla. Alteration minerals are sericite, chlorite, argillite, epidote and pyrite. Ranges of salinities and homogenization temperatures for fluid inclusions in the individual periods of stage II are: 3.7 to 7.8 wt.% eq. NaCl and 200 to 380°C in transparent quartz of early stage II; 0.7 to 6.4 wt.% eq. NaCl and 200 to 320°C in milky quartz of middle stage II; 0.0 to 0.9 wt.% eq. NaCl and 250 to 320°C in calcite of late stage II. Those of stage III calcite range about 0 wt.% eq. NaCl, and from 140 to 260°C, respectively. The relationship between salinities and temperatures shows decrease tendency with paragenetic time from stage II to III. The $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ value is 0.5‰ in stage I, range from 0.5 to -0.4‰ in stage II, and from -3.2 to -3.7‰ in stage III. Calcite in the stage II and stage III has $\delta^{13}\text{C}$ values of -5.0‰ and -4.5 to -4.9‰, respectively. There is a decrease in sulfur fugacity values with paragenetic time of stage II, from $10^{-6.3}$ atm for early mineralization, to $10^{-6.5}$ atm for middle stage, to $10^{-8.0}$ atm for late mineralization of stage II. The results of stable isotope and fluid inclusion indicate that ore fluids reacted with meteoric water and wall rock in the Cheongsong hydrothermal system.

서 언

한반도의 동남부에는 백악기-제3기의 태평양-클라판이 해양으로 삽입되면서 야기된 화성활동과 밀접한 관계를 갖는 맥상형의 W-Mo, Cu-Pb-Zn, Au-Ag 광상 및 반암동 광상 등의 분포가 잘 알려져 있다 (Kim, 1971; Lee, 1972; Fletcher, 1976; Jin *et al.*, 1981; Sillitoe, 1980; Shimazaki *et al.*, 1981; 민경덕 등, 1982; So *et al.*, 1985; 김상욱, 1986; 이상만 등, 1987). 연구대상인 청송광산 및 주변에 위치하는 다른 광상들도 백악기말-제3기초의 화성활동과 관련된 광화작용으로 생각되며, 광상들은 화산분출과 관련된 함몰구조대와 서북서 및 북동방향의 단층등에 의하여 구조적으로 규제되어 발달되어 있다. 지금까지 암

석학적 및 광상학적 연구의 대부분이 경상분지 남부지역을 대상으로 행하여 졌으며, 북부지역에 대해서는 그 연구가 활발하지 않았다. 최근 들어 연구자들에 의해서 암석학적 연구 (박기화, 1986a, b; 윤성효, 1987, 1993; 이재영, 이진국, 1992; 이현구 등, 1993b) 및 광상의 물리 화학적 생성환경을 규명하는 논문 (Chi *et al.*, 1989; 지세정 등, 1991; Choi *et al.*, 1992a, b; So, Choi, 1992; 이현구, 김상중, 1995; 이현구, 1993a, 1995, 1996)이 발표되고 있다.

연구지역 주변에 분포하는 대부분의 크고 작은 동-연-아연 광상이 70년대 초까지 개발되어 왔으나 지금은 폐광 또는 휴광상태로 광상의 조사에는 많은 어려움이 따른다. 광상을 개발하고 연구하는 과정에서 화성활동-열수계 사이의 관련성을 규명하는 것이 상당히 중요함에도 불구하고 아직 이러한 관련성에 대해 체계적 연구가 미흡한 실정이다. 최근, 이현구 등 (1993b)은 금성산주변의 동-연-아연 광화작용이 금성산 화산암 복합체와 시공간적으로

* 충남대학교 자연과학대학 지질학과 (Department of Geology, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea)

밀접한 관련성이 있음을 지적하였고, 또한 경북 의성군 옥산면 감계리에 위치하는 감계광상의 광화작용은 주변에 분포하는 화강암 또는 석영 반암과 시기적으로 관련성이 있음을 발표하였다 (이현구, 김상중, 1995). 그러나 경상분지내의 많은 광상과 화성암체들의 분포에도 불구하고 화성활동과 광화작용의 연관성에 관한 연구가 아직은 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구는 경상분지 북부에 배태되는 광상에 대한 광화작용과 그 관련 화성활동에 대한 연구의 일환으로써, 경북 청송군 안덕면 지소리에 위치하는 청송광산을 대상으로 산출광물의 기재와 화학조성, 유체포유물 및 안정동위원소 연구를 토대로 청송광산의 생성환경을 밝히고자 한다.

지질개요

청송광산의 주변지질은 이홍규, 홍승호 (1973), 권영일, 이인기 (1973) 및 김봉균 등 (1988)에 의해 자세히 보고되어 있어 여기서는 간단히 설명하고자 한다. 이 지역은 선캄브리아기의 편마암을 기반암으로 하고 이를 부정합으로 피복하는 백악기 퇴적암류와 이들을 관입한 백악기 말 석영 반암으로 구성되어 있다 (Fig. 1).

선캄브리아기의 편마암은 소규모로 분포하고, 간혹 염리조직을 보이고 있으며 석영, 사장석, 정장석, 흑운모 등으로 구성되어 있다. 백악기의 퇴적암류는 경상누층군중 하양층군에 속하는 일직층, 후평동층 및 사곡층등으로 분류되며, 암석은 주로 사암, 사질 세일, 흑색 세일 및 자색

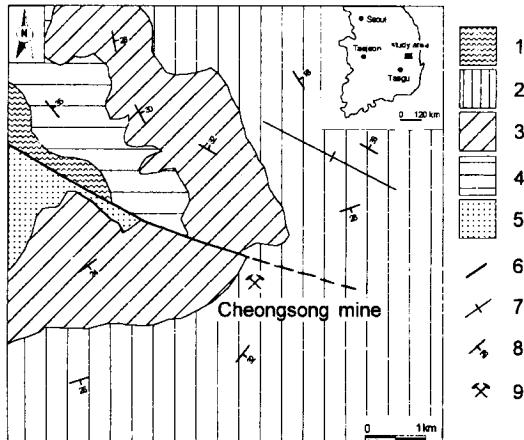


Fig. 1. Geological map of the Cheongsong mine area. 1; Gneiss, 2; Iljik Formation, 3; Hupyeong Formation, 4; Sagog Formation, 5; Quartz porphyry, 6; Fault, 7; Anticline, 8; strike and dip of bedding, 9; Mine.

세일등이 있다. 이들 퇴적암들은 백악기 말 화강암류의 관입에 의해 부분적으로 호른헬스화 되어 있다. 석영 반암은 광산의 북서측에 분포하며, 석영, 사장석 및 정장석을 반정으로 갖고 있으며, 기질은 주로 석영, 정장석 및 사장석과 소량의 흑운모로 구성된다.

광상개요

청송 동-연-아연 광상은 서북서방향의 단층과 관련된 파쇄대를 따라 발달된 맥상광상으로 구성된다. 이 광상에는 평행한 다수의 석영맥이 관찰되며 대부분의 간도에 대해 조사가 가능하다.

이 광상의 석영맥은 N30~60°W의 주향, 60~85°E의 경사를 갖는 다수의 평행맥이 발달되어 있고 이들은 짧게는 수십 m 길게는 300~500 m의 연장성을 보인다. 맥폭은 일반적으로 수 cm에서 100 cm정도이고, 부분적으로 150~200 cm정도로 팽창되어 있다. 주된 광석광물로는 초기 적철석과 황철석이 맥벽을 따라 관입한 투명석영내에 산출하며, 후기 섬아연석, 황동석 및 방연석등이 광맥의 중앙부 또는 초기 투명석영의 과쇄대 등을 채운 유백질 석영내에서 관찰된다. 최후기에 앞의 두 유형의 석영 과쇄대를

	Hypogene			Supergene
	Stage I	Stage II	Stage III	
Sericite	—	—	—	—
Chlorite	—	—	—	—
Epidote	—	—	—	—
Hematite	—	—	—	—
Pyrite	—	—	—	—
Sphalerite	—	—	—	—
Chalcopyrite	—	—	—	—
Bornite	—	—	—	—
Galena	—	—	—	—
Tennantite	—	—	—	—
Wittichenite	—	—	—	—
Cu-Bi-Pb-Sb-S mineral	—	—	—	—
Native copper	—	—	—	—
Covellite	—	—	—	—
Chalcocite	—	—	—	—
Chrysocolla	—	—	—	—
Malachite	—	—	—	—
Quartz	—	—	—	—
Calcite	—	—	—	—
Flourite	—	—	—	—

Fig. 2. Paragenetic sequence of minerals from the Cheongsong deposits.

총진하거나 절단하는 방해석 맥은 주로 자연동과 황동석을 수반하고 있다. 청송광산의 주 광맥인 N30~60°W 방향성의 석영맥들은 간혹 N40°E의 단층에 의해 절단되고 있으며, 이와 같은 N40°E의 단층대에서는 광화작용이 관찰되지 않는다. 그외 광석광물로는 반동석, 테난타이트(tennantite), 위티케나이트(wittichenite), 미화인 Cu-Bi-Pb-Sb-S계 광물, 자연동 등이 산출하며, 2차 산화물로 휘동석, 코밸라이트, 크리소콜라(chrysocolla) 등이 관찰된다. 모암변질은 주로 견운모화, 녹니석화 및 녹염석화 등이 관찰된다. 이 광상에서 품위는 Ag; 106.8 g/ton, Cu; 2.44

wt.%, Pb; 3.85 wt.%, Zn; 6.01 wt.% 이다.

광석광물의 공생관계

청송광상의 광화작용은 3개의 심성광화기와 1기의 천성광화기로 나뉜다 (Fig. 2). 심성광화 I기는 모암변질기로 견운모, 녹니석 및 녹염석과 함께 소량으로 섬아연석, 황동석, 반동석 및 방연석이 정출된 시기이다 (Fig. 3A, B). II기의 초기에는 투명 석영과 공생하는 황철석 및 적철석의 정출기로 황동석에 의해 교대되어 있고 (Fig. 3C),

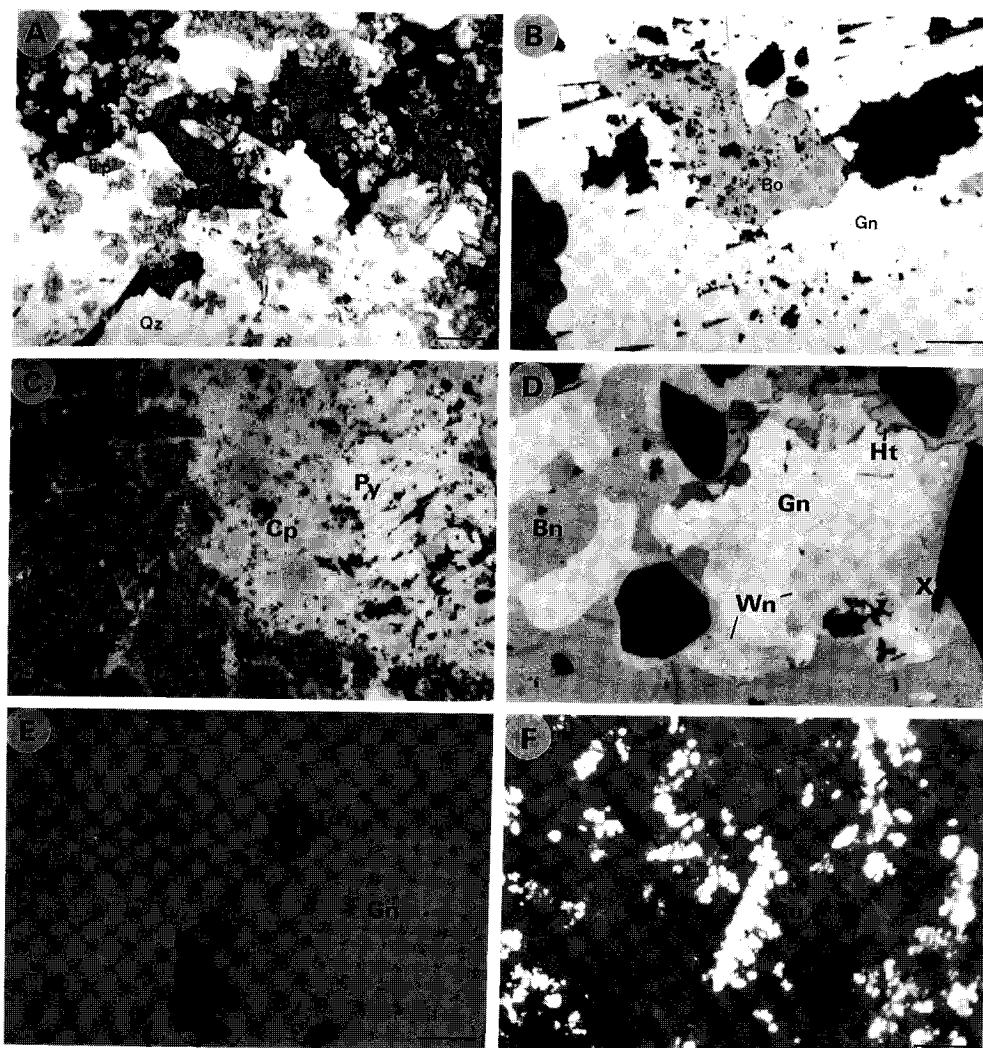


Fig. 3. Photomicrographs showing the mineral occurrences from the Cheongsong deposits. scale bars are each 50 μm. A) Quartz (Qz) coexisting with epidote (Ep) in stage I. B) Bornite (Bn) coexisting with galena in stage I. C) Pyrite (Py) replaced by chalcopyrite (Cp). D) Hematite (Ht) surrounded by wittichenite (Wn), galena, unidentified Cu-Bi-Pb-Sb-S mineral, bornite and chalcopyrite. E) Tetrahedrite (Td) coexisting with galena. F) Native copper (Cu) coexisting with calcite.

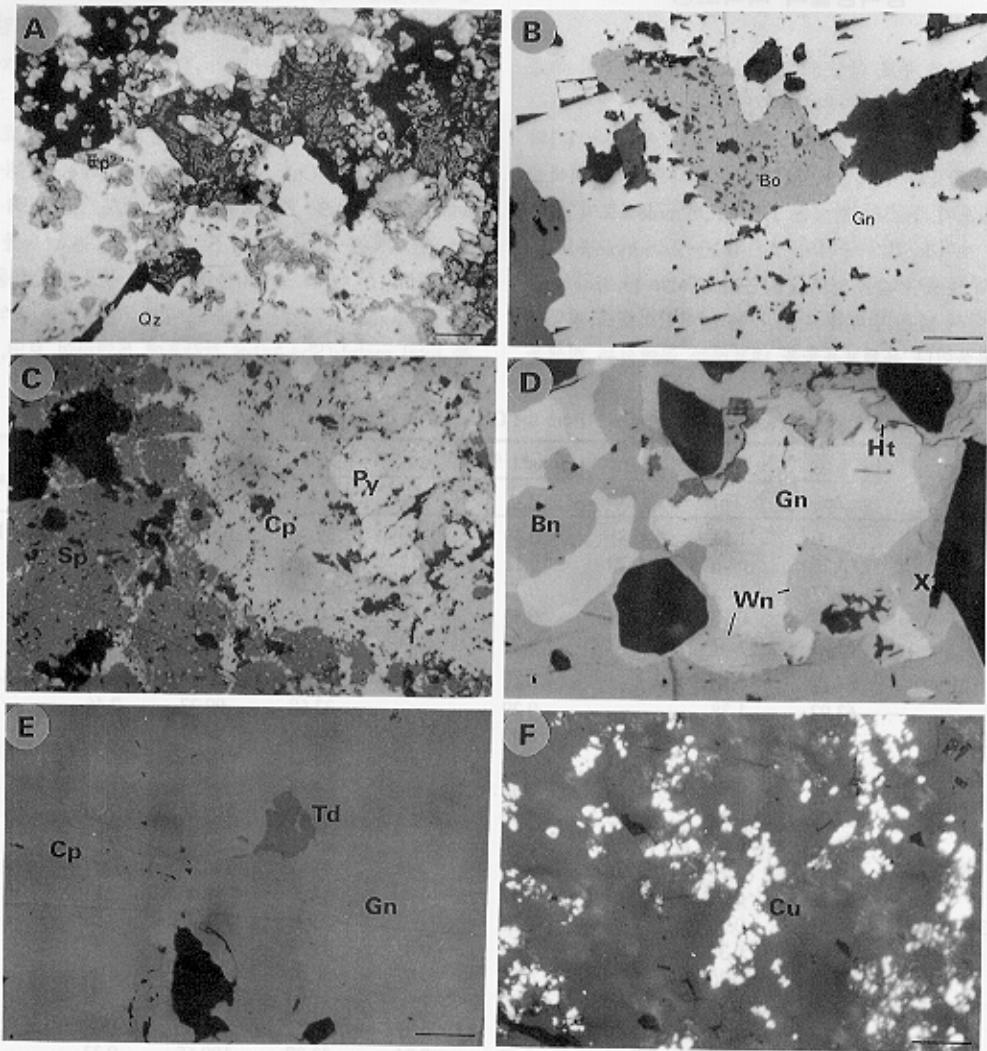


Fig. 3. Photomicrographs showing the mineral occurrences from the Cheongsong deposits. scale bars are each 50 μm . A) Quartz (Qz) coexisting with epidote (Ep) in stage I. B) Bornite (Bn) coexisting with galena in stage I. C) Pyrite (Py) replaced by chalcopyrite (Cp). D) Hematite (Ht) surrounded by wittichenite (Wn), galena, unidentified Cu-Bi-Pb-Sb-S mineral, bornite and chalcopyrite. E) Tetrahedrite (Td) coexisting with galena. F) Native copper (Cu) coexisting with calcite.

중기는 유백색 석영과 함께 섬아연석, 황동석, 방연석 (Fig. 3C) 및 소량의 위티케나이트, 미확인 Cu-Bi-Pb-Sb-S계 광물, 반동석등의 정출기로 이들 광물들은 초기의 황철석 및 적철석을 교대하거나 포획하고 있다 (Fig. 3D). 후기는 유백색 석영과 소량의 방해석이 공존하며 주로 방연석 및 테난타이트의 정출시기이다 (Fig. 3E). III기는 방해석맥에 수반되어 자연동과 황동석이 정출된 시기이며 (Fig. 3F), 천성광화기는 휘동석, 코벨라이트, 공작석 및 크리소콜라동과 같은 동광물의 2차 산화광물이 정출된 시기이다.

광석광물의 화학조성

섬아연석은 주로 심성광화기의 I기와 II기 중기에 주로 황동석 및 반동석과 공생관계를 갖고 산출되며 색에 따라 회색의 섬아연석과 담황색의 섬아연석으로 나뉜다. I기의 모암면질광물과 같이 산출되는 섬아연석은 주로 회색을 띠고 있으며, FeS의 함량은 1.70~1.95 mole%로써 좁은 범위를 보이고, II기 중기의 것은 0.16~2.46 mole%로 광화 I기의 것보다 넓은 영역을 갖는다 (Table 1). II기의 섬아연석에서 넓은 범위를 갖는 것은 섬아연석내에 황동석의 포유물이나 유체포유물을 내포하는 곳에서는 회색을

띄고 FeS의 함량도 다소 높은 경향을 보이고, 그렇지 않은 곳에서는 FeS 함량도 낮고 담황색 또는 흰색을 띠는 특징을 갖고 있다.

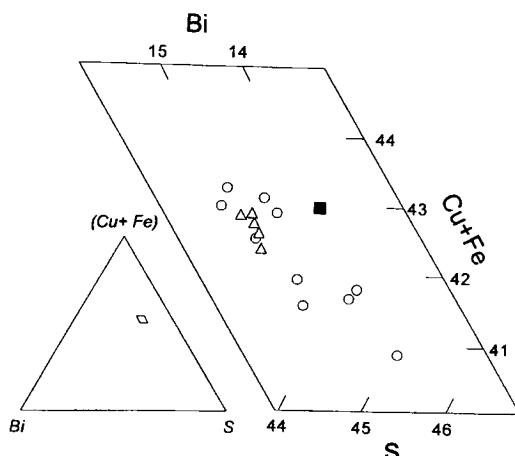
위티케나이트 (wittichenite)는 울산광산에서 보고가 되어 있으나 (Choi, 1983), 국내에서는 거의 보고가 되지 않은 광물이다. 이 광물은 광화 II기 중기 또는 후기에 반동석과 공생관계를 갖고 산출된다. 위티케나이트의 화학조성은 Cu: 37.39~38.77 wt.%, Fe: 0.85~1.36 wt.%, Bi: 40.38~41.81 wt.%와 S: 19.01~19.83 wt.%를 보인다 (Table 2). Fig. 4에서 보는 바와 같이 청송광산의 일부 위티케나이트는 이상적인 위티케나이트보다 Cu는 결핍되고, Bi는 부화된 경향성을 보인다. 테난타이트 (tennantite)는 사면동석과 고용체관계에 있는 광물로써 사면동석계 광물은 일반적으로 $(Cu+Ag)_{10+x} (Fe+Zn)_{1+y} (As+Sb)_{4+z} S_{10}$ ($0 < x < 1.7$, $0.2 < y < 1.2$, $0 < z < 0.7$)로 표기되고 있다 (Spiridonov, 1984; Hackbarth, Petersen, 1984). 청송광산의 테난타이트의 화학조성을 보면, Cu: 39.39~42.59 wt%, Fe: 0.98~1.74 wt%, Zn: 8.44%, Zn: 8.44~11.82 wt.%, Sb: 4.94~8.05 wt, As: 13.07~16.05 wt.%와 S: 25.09~26.36 wt.%를 보인다 (Table 3). 이들 조성치를 일반적인 구조식에 적용해보면 Sb+As를 다소 낮은 값을 보이고 있다. 이들 분석결과를 total metal-(Sb+As)-S 감각표에 투영하여 보면, 이상

Table 1. Electron microprobe analyses of sphalerite from the Cheongsong deposits.

Sample No.	Weight %						Mole %	Stage
	Zn	Fe	Cu	Cd	Mn	S		
CS93430-2	66.00	1.14	0.81	0.30	0.10	32.56	100.91	1.95
	64.75	0.96	0.79	0.11	0.12	32.65	99.38	1.68
	65.57	1.05	0.80	0.27	0.08	32.44	100.21	1.81
	64.49	0.97	0.76	0.33	0.16	32.88	99.59	1.70
	65.73	1.07	0.92	0.20	0.09	32.30	100.31	1.84
CS911212-21	64.11	1.10	—	0.42	—	34.55	100.18	1.96
	63.92	1.38	—	0.29	—	33.68	99.27	2.46
CS93501-2	63.92	0.73	0.70	0.40	—	34.56	100.31	1.30
	63.07	0.92	0.87	0.46	—	34.63	99.95	1.65
	63.44	0.74	0.28	0.38	—	34.44	99.28	1.34
	64.79	0.39	0.23	0.50	—	34.69	100.60	0.69
	63.96	0.23	0.20	0.62	—	34.19	99.20	0.42
	64.81	0.15	0.16	0.70	—	34.99	100.81	0.27
	64.26	0.09	0.13	0.47	—	34.50	99.45	0.16
CS935101-2	65.59	0.26	0.52	0.62	—	33.74	100.73	0.46
	65.09	0.37	0.15	0.33	0.01	33.51	99.46	0.66
	65.85	0.26	0.26	0.52	0.02	33.61	100.52	0.46
	64.98	0.56	0.89	0.27	—	33.75	100.45	0.8
	65.94	0.14	0.70	0.54	0.07	33.31	100.70	0.24
	65.41	0.19	0.95	0.69	0.04	33.37	100.65	0.33
CS93501-9	64.62	0.32	0.53	0.40	—	33.33	99.20	0.57
	64.74	0.85	0.06	0.41	0.07	33.49	99.62	1.50
	64.88	0.58	0.01	0.35	0.05	33.24	99.11	1.03

Table 2. Electron microprobe analyses of wittichenite from the Cheongsong deposits.

Sample No.	Weight %					Structural formulae S=3
	Cu	Fe	Bi	S	Total	
CS921014-1	38.44	1.02	41.39	19.83	59.29	$\text{Cu}_{2.91}\text{Fe}_{0.09}\text{Bi}_{0.96}\text{S}_3$
	38.73	0.91	41.81	19.50	59.14	$\text{Cu}_{3.01}\text{Fe}_{0.08}\text{Bi}_{0.98}\text{S}_3$
	38.77	0.82	41.33	19.72	59.31	$\text{Cu}_{2.98}\text{Fe}_{0.07}\text{Bi}_{0.96}\text{S}_3$
	38.22	0.95	41.23	19.58	58.75	$\text{Cu}_{2.95}\text{Fe}_{0.08}\text{Bi}_{0.96}\text{S}_3$
	38.44	1.04	40.88	19.37	58.85	$\text{Cu}_{3.00}\text{Fe}_{0.08}\text{Bi}_{0.97}\text{S}_3$
	38.01	0.85	40.38	19.01	57.87	$\text{Cu}_{3.05}\text{Fe}_{0.08}\text{Bi}_{0.97}\text{S}_3$
	37.84	1.36	40.78	19.50	58.70	$\text{Cu}_{2.94}\text{Fe}_{0.12}\text{Bi}_{0.96}\text{S}_3$
	37.59	1.33	40.43	19.51	58.43	$\text{Cu}_{2.92}\text{Fe}_{0.12}\text{Bi}_{0.95}\text{S}_3$
	37.71	1.16	40.78	19.34	58.21	$\text{Cu}_{2.95}\text{Fe}_{0.10}\text{Bi}_{0.97}\text{S}_3$
	37.39	1.36	40.43	19.26	58.01	$\text{Cu}_{2.94}\text{Fe}_{0.12}\text{Bi}_{0.98}\text{S}_3$
	38.26	1.23	41.00	19.46	58.95	$\text{Cu}_{2.98}\text{Fe}_{0.11}\text{Bi}_{0.97}\text{S}_3$
	38.50	1.36	41.09	19.60	59.46	$\text{Cu}_{2.97}\text{Fe}_{0.12}\text{Bi}_{0.96}\text{S}_3$

**Fig. 4.** Enlarged paralellogram in the triangle diagram for the system (Cu+Fe)-Bi-S, showing the chemical composition of wittichenite from the Cheongsong deposits. O; Cheongsong, △; Ulsan (Choi, 1983), ■; Stoichiometric composition of wittichenite

적인 사면동석보다 S가 결핍되어 있고, 주변의 감계광상에서 산출되는 사면동석에 비하여도 S가 다소 결핍된 상태이다 (Fig. 5).

미화인 Cu-Bi-Pb-Sb-S계 광물은 심성광화 II기에 방연석, 황동석, 위터케나이트등과 밀접한共生관계를 가지며 산출되고, 입자의 크기는 50~100 μm 정도이다. 이 광물에 대한 EPMA 분석결과는 Table 4와 같고, 화학조성은 Cu: 34.46~35.51 wt.%, Zn: 6.55~6.70 wt.%, Bi: 11.98~16.36 wt.%, Pb: 7.80~9.29 wt.%, Sb: 12.98~14.29 wt.%, As: 2.25~3.31 wt.%, S: 18.82~19.06 wt.%의 범위를 갖는다.

유체포유물 연구

유체포유물의 분류

유체포유물 실험은 심성광화 II 및 III기의 광화작용과

Table 3. Electron microprobe analyses of tennantite from the Cheongsong deposits.

Sample No.	Weight %						Structural formulae S=13
	Cu	Fe	Zn	As	Sb	S	
CS92501-10	39.94	1.34	8.65	16.05	7.53	25.09	98.60 $\text{Cu}_{10.44}(\text{Fe}_{0.40}\text{Zn}_{2.20})_{2.60}(\text{As}_{3.56}\text{Sb}_{1.03})_{4.59}\text{S}_{13}$
	41.74	1.11	9.08	14.27	7.95	26.19	100.34 $\text{Cu}_{10.45}(\text{Fe}_{0.32}\text{Zn}_{2.21})_{2.53}(\text{As}_{3.02}\text{Sb}_{1.04})_{4.07}\text{S}_{13}$
	41.55	1.06	8.46	15.70	8.05	26.25	101.07 $\text{Cu}_{10.38}(\text{Fe}_{0.30}\text{Zn}_{2.05})_{2.35}(\text{As}_{3.33}\text{Sb}_{1.05})_{4.38}\text{S}_{13}$
	40.41	0.98	8.44	15.25	8.05	25.58	98.71 $\text{Cu}_{10.36}(\text{Fe}_{0.29}\text{Zn}_{2.10})_{2.41}(\text{As}_{3.32}\text{Sb}_{1.08})_{4.40}\text{S}_{13}$
	39.39	1.72	8.81	15.38	7.30	25.66	98.26 $\text{Cu}_{10.07}(\text{Fe}_{0.50}\text{Zn}_{2.19})_{2.69}(\text{As}_{3.33}\text{Sb}_{0.97})_{4.30}\text{S}_{13}$
	41.06	1.74	9.55	15.39	7.59	25.98	101.31 $\text{Cu}_{10.37}(\text{Fe}_{0.50}\text{Zn}_{2.34})_{2.84}(\text{As}_{3.30}\text{Sb}_{1.00})_{4.30}\text{S}_{13}$
	42.59	1.76	10.86	15.05	4.94	25.30	101.50 $\text{Cu}_{10.62}(\text{Fe}_{0.50}\text{Zn}_{2.63})_{3.13}(\text{As}_{3.18}\text{Sb}_{0.64})_{3.82}\text{S}_{13}$
	41.67	1.73	11.82	13.39	6.40	25.74	100.75 $\text{Cu}_{10.62}(\text{Fe}_{0.50}\text{Zn}_{2.93})_{3.43}(\text{As}_{2.89}\text{Sb}_{0.85})_{3.74}\text{S}_{13}$
	40.15	1.64	10.57	15.54	5.15	25.43	98.48 $\text{Cu}_{10.36}(\text{Fe}_{0.48}\text{Zn}_{2.05})_{3.13}(\text{As}_{3.40}\text{Sb}_{0.69})_{4.09}\text{S}_{13}$
	40.63	1.66	11.69	14.46	5.05	25.34	98.83 $\text{Cu}_{10.52}(\text{Fe}_{0.49}\text{Zn}_{2.94})_{3.43}(\text{As}_{3.17}\text{Sb}_{0.68})_{3.85}\text{S}_{13}$
	40.82	1.68	11.75	13.07	6.07	25.16	98.55 $\text{Cu}_{10.64}(\text{Fe}_{0.50}\text{Zn}_{2.98})_{3.48}(\text{As}_{2.89}\text{Sb}_{0.83})_{3.72}\text{S}_{13}$

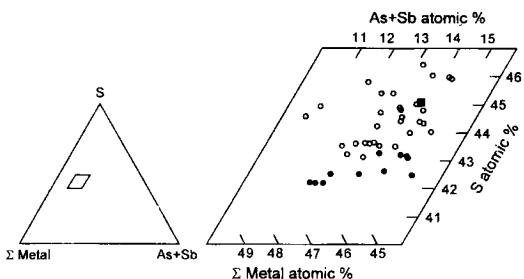


Fig. 5. Enlarged paralellogram in the triangle diagram showing the chemical composition of tetrahedrite-series minerals from the Cheongsong deposits. ○; Kamkye, ●; Cheongsong, ■; Stoichiometric composition of tetrahedrite.

관련된 석영, 방해석 및 섬아연석을 대상으로 하였다. 시료는 심성광화 II기 초의 투명석영, 중기의 유백질 석영과 섬아연석, 후기의 방해석과 심성광화 III기의 방해석을 대상으로 하였다.

유체포유물의 분류는 실온 (20°C)에서 관찰되는 상의 종류, 액상의 충진도와 가열 및 냉각실험시 상변화에 따라 세 종류로 분류하였다. I형 (액상포유물)은 심성광화 II, III기에 주로 산출된다. 유체포유물의 크기는 $50\sim150\ \mu\text{m}$ 로 실온에서 액상충진도가 $60\sim80\%$ 이며, 가열시 액상으로 균일화된다 (Fig. 6A). II형 (기상포유물)은 심성광화 II기 초의 투명석영내에 소량으로 산출된다. 유체포유물의 크기는 $30\sim80\ \mu\text{m}$ 로 액상의 충진도가 $20\sim40\%$ 이고 가열시 기상으로 균일화된다 (Fig. 6B). III형 (함고상 포유물)은 오직 심성광화 II기 초의 석영내에서만 산출되고 유체포유물의 크기는 $30\sim100\ \mu\text{m}$ 이다. 액상충진도가 $70\sim85\%$ 로써 가열시 액상으로 균일화된다. 고상의 종류에 따라 운모를 포함하는 것 (III-I형; Fig. 6C)과 암염을 포함하는 것 (III-II형; Fig. 6D)으로 구분된다.

염농도

염농도는 광화 II기 초의 투명석영의 경우 $3.7\sim7.8\ \text{wt.\% eq. NaCl}$, 중기의 유백질 석영은 $0.5\sim6.0\ \text{wt.\% eq. NaCl}$, 섬아연석은 $2.0\sim6.5\ \text{wt.\% eq. NaCl}$, 후기의 방해

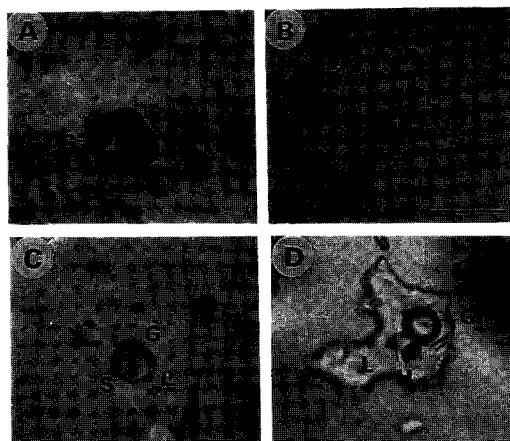


Fig. 6. Photomicrographs showing various types of fluid inclusions from the Cheongsong deposits. Scale bars are each $50\ \mu\text{m}$. A. type I inclusion. B. type II inclusion. C. type III-I inclusion. D. type III-II inclusion. G=gas, L=liquid, S=mica, H=halite.

석은 $1.0\ \text{wt.\% eq. NaCl}$ 이하를 각각 보여준다 (Fig. 7). 광화 III기는 방해석에 대해서 염농도를 측정한 결과는 그림에서 도시되지 않고 있으나 거의 $0\ \text{wt.\% eq. NaCl}$ 영역에 해당되는 순수한 물로서 구성된다. 이는 본광상 초기 열수계내에 광화작용의 진행과 함께 상대적으로 저염농도의 천수유입이 증가한 결과로 생각된다. 여기에서 염농도는 Roedder (1962, 1971)의 자료를 이용하였다.

균일화 온도

유체포유물의 균일화온도는 광화 II기 초의 투명석영이 $207\sim380^{\circ}\text{C}$, 중기의 경우 유백질 석영은 $200\sim280^{\circ}\text{C}$, 섬아연석은 $220\sim320^{\circ}\text{C}$, 후기의 방해석은 $250\sim320^{\circ}\text{C}$ 이다. III기 방해석내의 유체포유물은 $140\sim260^{\circ}\text{C}$ 의 균일화온도를 갖는다 (Fig. 8). 본광상 열수계는 광화작용이 진행됨에 따라서 온도의 저하를 보이고 있다. 이는 온도의 저하가 광물의 침전에 주요한 역할을 하였음을 시사하고 있다. II기의 주된 광화작용은 약 320°C 에서 시작되었음을 알 수 있다.

Table 4. Electron microprobe analyses of unidentified Cu-Bi-Pb-Sb-S mineral from the Cheongsong deposits.

Sample No.	Weight %							Atomic %							
	Cu	Zn	Bi	Pb	Sb	As	S	Total	Cu	Zn	Bi	Pb	Sb	As	S
CS1-921014	34.88	6.58	11.98	9.29	14.29	2.75	18.61	93.38	36.94	6.77	3.84	3.02	7.90	2.47	39.06
	34.46	6.57	16.36	7.80	12.98	2.25	18.99	99.41	36.46	6.76	5.24	2.53	2.02	2.02	39.83
	35.51	6.55	12.91	8.83	13.99	3.31	19.06	100.16	36.84	6.61	4.05	2.81	2.91	2.91	39.20
	34.99	6.70	14.29	8.82	13.49	3.17	18.82	100.28	36.61	6.82	4.53	2.83	2.81	2.81	38.03

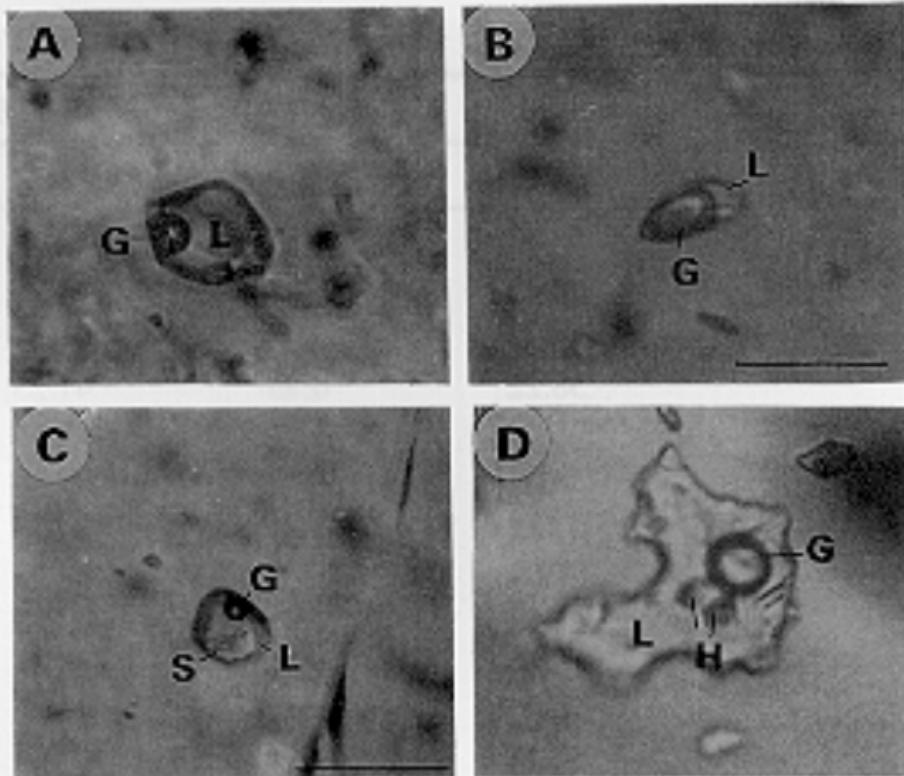


Fig. 6. Photomicrographs showing various types of fluid inclusions from the Cheongsong deposits. Scale bars are each 50 μm . A. type I inclusion. B. type II inclusion. C. type III-I inclusion. D. type III-II inclusion. G=gas, L=liquid, S=mica, H=halite.

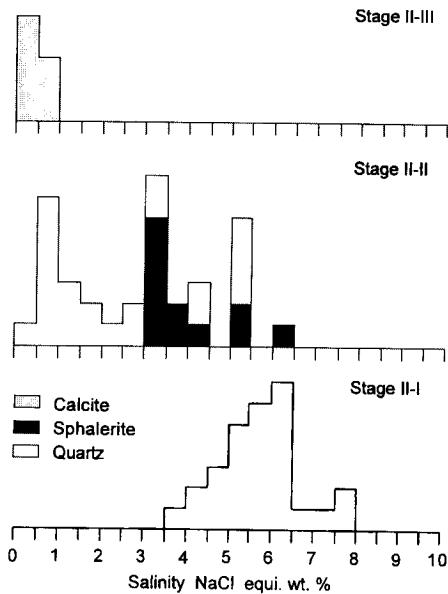


Fig. 7. Histograms of NaCl eq. wt. % of salinities of fluid inclusions in vein minerals from the Cheongsong deposits.

염농도와 균일화온도 관계

유체포유물의 NaCl 상당염농도와 균일화온도의 상관관계는 온도가 저하되면서 염농도도 감소하는 경향을 보이다가 280°C영역에서 다시 염농도가 상승하다가 감소하고 있다 (Fig. 9). 심성광화 II기 초기에 관찰에 II형 포유물이 드물게 관찰되는 것은 비등현상이 있었음을 암시한

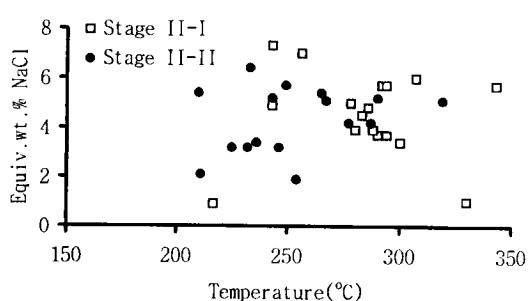


Fig. 9. Homogenization temperature versus salinity diagram for fluid inclusions in stage II vein minerals from the Cheongsong deposits.

다. 또한 균일화온도-염농도 관계에서 보여주는 바와 같이 심성광화 II기에는 비등 및 천수의 혼입에 의하여 광물의 침전이 진행되었다고 생각된다.

안정동위원소

안정동위원소의 연구를 위하여 섬아연석 3개, 방연석 2개 및 황동석 1개에 대해서 유황안정동위원소 분석을 실시하고, 방해석 4개에 대해서 탄소 및 산소안정동위원소를, 석영 4개에 대해서 산소안정동위원소를, 견운모 1개의 시료에 대해서 수소안정동위원소 분석을 실시하였다. 표준시료는 황에 대해서는 CDT, 탄소에 대해서는 PDB, 산소 및 수소에 대해서는 SMOW를 사용하였다. 황, 탄소, 산소 및 수소에 대한 분석오차는 각각 ± 0.2 , ± 0.1 , ± 0.2 및 $\pm 1\%$ 이다.

유황안정동위원소

심성광화 II기 중기 황화광물의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 섬아연석이 5.8~7.7%, 방연석이 3.6과 5.4%, 그리고 III기의 황동석이 4.9%를 보인다 (Table 5). 본 광상산 황화광물의 황동위원소 값은 3.6~7.7 %의 좁은 범위를 갖는다. 섬아연석-방연석 쌍의 분별계수를 이용해서 구한 동위원소의 평형온도는 $300 \pm 20^\circ\text{C}$ 를 보이고 있다 (Ohmoto and Rye, 1979). 이 온도는 이 시기에 해당하는 섬아연석내 유체포유물의 균일화온도 범위 ($220\sim 320^\circ\text{C}$)에 해당한다. 또한 Ohmoto and Rye (1979)의 분별식을 이용하여 계산된 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 값은 심성광화 II기 중기는 5.5~7.3%, III기는 5.1%로써 시기가 진행됨에 따라서 다소 감소한다.

청송광상의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 경상분지내에 분포하는 다른 금속광상과 비슷한 영역의 조성치에 해당되고 있다 (김규한

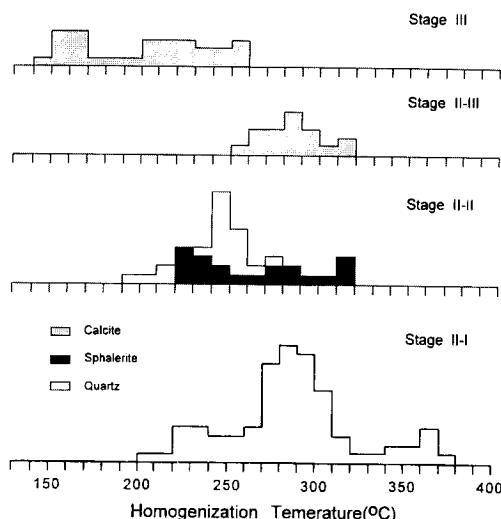


Fig. 8. Histograms of homogenization temperatures of fluid inclusions in vein minerals from the Cheongsong deposits.

Table 5. Sulfur isotopic composition (permil) of sulfide minerals from the Cheongsong deposits.

Stage	Sample No.	Mineral	$\delta^{34}\text{S}$	$T_h(\text{°C})^1$	$T(\text{°C})^2$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}^3$
II	CS911212-21	Sphalerite	5.8	280	300±20	5.5
	CS911212-21b	Galena	3.6			5.5
	CS930501-9	Sphalerite	7.7			7.4
	CS930501-9-1	Sphalerite	7.6	200	300±20	7.3
	CS930509-1-1b	Galena	5.4			7.3
III	CS920502-4	Chalcopyrite	4.9	200		5.1

¹ Homogenization temperature of fluid inclusion.² Isotopic temperature is calculated from fractionation factors of Ohmoto, Rye (1979).³ Calculated sulfur isotopic composition of H_2S in ore fluids, using the isotope fractionation equation of Ohmoto, Rey (1979).

과 中井信之, 1980; Sato *et al.*, 1981; Chi *et al.*, 1989; 지 세정 등, 1991; Choi *et al.*, 1992b; So, Choi, 1992; 이현구 등, 1993, 1995, 1996; 이현구, 김상중, 1995). 일반적으로 마그마기원의 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 값은 0‰ 부근의 좁은 범위로 알려져 있으며 (Ohmoto, 1972), 청송광상의 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 값이 경상분지내 일부 열수광상과 비슷한 영역의 값을 갖고, 이들 광상의 열수계내 유입된 황의 대부분이 마그마기원으로 해석되고 있으나, 본광상의 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 값이 최대 7.3‰을 보이는 것으로 보아 마그마기원의 유황과 함께 다소 주변 모암인 퇴적암으로부터의 산화유황종의 유입이 이루어진 것으로 생각된다.

탄소안정동위원소

심성광화 II기 후기와 III기에 산출되는 방해석을 대상으로 분석된 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 각각 -5.0‰, -4.9~ -4.5‰로서 상당히 좁은 범위를 갖고 있다 (Table 6). Friedman, O'Neil (1977)이 제시한 분별식을 이용하여 계산된 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 값은 광화 II기 후기는 -3.4‰, 광화 III기는 -4.5~ -4.1‰를 보인

다. 마그마기원의 광화유체는 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 (-) 값을 보이는 것으로 보고되고 있으나 광화작용의 환경에 따라서 많은 차이를 보이고 있다. 마그마기원의 $\delta^{13}\text{C}$ 에 대해 Hoefs (1973)는 -7‰, Deines and Gold (1973)는 -5±2‰로 보고하고 있어서 청송광상의 $\delta^{13}\text{C}$ 값도 이것과 유사한 값을 보이고 있다.

산소 및 수소안정동위원소

광화 I기의 석영, II기와 III기에 산출되는 석영과 방해석을 대상으로 산소안정동위원소를 분석하였고, 모암변질물인 I기의 견운모에 대해서 수소안정동위원소를 분석하였다. $\delta^{18}\text{O}$ 값은 I기 석영이 5.0‰, II기 초기 석영이 4.6~5.0‰, II기 중기 석영은 7.6‰, II기 후기 방해석의 경우 +6.7‰이고, III기 방해석의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 +5.8~+6.3‰이다 (Table 6). 견운모에 대한 δD 값은 -65‰이다 (Table 6). 열수용액에서 석영 및 방해석이 물과 평형상태에 있으면서 교환이 있었을 때 동위원소의 분별요소와 온도를 이용하여 측정된 $\delta^{18}\text{O}$ 값을 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 로 환산할 수 있다.

Table 6. Hydrogen, oxygen and carbon isotopic composition of quartz, calcite and sericite from the Cheongsong deposits.

Sample No.	Mineral	δD	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$	$T_h(\text{°C})^1$	$\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}^2$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}^3$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}^4$	Stage
CS911212-20	Sericite	-65			380	-32			
CS92502-6-1	Quartz		5.0		380		0.5		I
CS93430-10-1	Quartz		4.6		360		-0.4		II-I
CS93430-10-2	Quartz		4.8		360		-0.2		
CS92501-12-2	Quartz		7.6		280		0.0		II-II
CS93501-9	Calcite		6.7	-5.0	280		0.5	-3.4	II-III
CS93501-5	Calcite		5.8	-4.9	200		-3.7	-4.5	III
CS911212-7	Calcite		5.8	-4.9	200		-3.7	-4.5	
CS921014-8	Calcite		6.3	-4.5	200		-3.2	-4.1	

¹ Homogenization temperature of fluid inclusion.² Calculated using the isotopic fractionation equation of Suzuoki, Epstein (1976)^{3,4} Calculated using the isotopic fractionation equations of Matsushisa *et al.* (1979) and Friedman, O'Neil (1977)

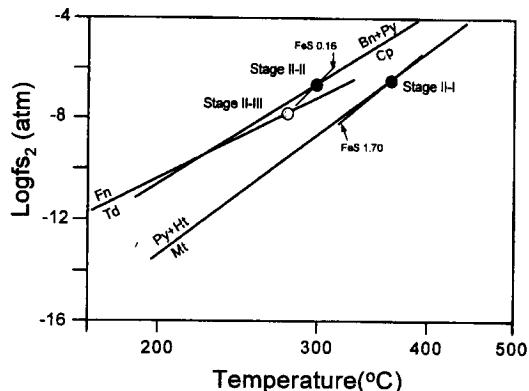


Fig. 10. Fugacity of S_2 -temperature diagram showing the possible depositional conditions by mineral assemblages from the Cheongsong deposits. Abbreviations : Py; pyrite, Mt; magnetite, Ht; hematite, Cp; chalcopyrite, Bn; bornite, Td; tetrahedrite, Fn; famatinitie.

Matsushisa *et al.* (1979)와 Friedman, O'neil (1977)이 제시한 분별식을 이용하여 구해진 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 값은 광화 I기가 0.5%이고, II기 초기는 0.2~0.40%, 중기는 1.4%, 후기는 0.5%이다. III기의 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 값은 -3.2~-3.7%이다. 일반적으로 마그마기원의 물이 갖는 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 값은 5.5~10.0%의 범위를 갖고 있다 (Taylor, 1979; Rye, 1966). 따라서 이 광상의 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 값 (1.4~3.7%)은 마그마기원보다는 상당히 낮은 값을 보이고 있다.

토 론

생성온도-황분압의 조건

본광상 주요광화시기의 생성온도와 황분압조건을 광물공생관계에 의한 공생군의 상평형관계, 유체포유물의 균일화온도 및 안정동위원소 평형온도 등을 토대로 추정하였다. 광화 II기 초기에는 황철석-적철석-섬아연석의 공생군이 관찰되고 있고, 이때의 섬아연석의 FeS 함량은 1.70 mole %를 보이고 있다. 황철석-적철석-자철석의 열역학적 자료 (Toulmin, Barton, 1964)를 이용하여 그려진 평형곡선과 섬아연석의 FeS mole %의 변화도 (Scott, Barnes, 1971)를 중첩하여 구한 온도는 약 360°C, 황분압은 $10^{-6.3}$ atm이고, 석영에서 구한 유체포유물의 균일화온도 (380~200°C)의 범위에 해당된다. II기 중기에는 반동석-황동석-섬아연석의 공생군이 관찰되고, 이때의 섬아연석의 FeS 함량은 0.16 mole%를 갖는다. Schneeberg (1973)가 제시한 열역학적 자료를 토대로 구해진 평형곡선에 섬아연석의 FeS mole%의 변화도를 중첩하여 구한

온도는 약 300°C이고 황분압은 $10^{-6.5}$ atm이다. 이 시기의 석영과 섬아연석에서 구한 균일화온도 (320~190°C)의 범위에 속하고 있고, 동시기의 섬아연석-방연석쌍을 이용한 안정동위원소 평형온도 (300°C)와는 잘 일치한다. II기 후기에는 사면동석이 산출되고 있고, 이시기의 방해석에서 구한 균일화온도는 320~250°로서 평균치인 280°C로 가정하여 구한 압력은 약 $10^{-8.0}$ atm 정도이다. 광화III기의 방해석에서 구한 균일화온도는 260~140°C를 보인다. 이처럼 광물공생, 유체포유물연구 및 안정동위원소 등을 토대로 고찰해본 결과, 광화가 진행됨에 따라서 생성온도 ($380^{\circ}\text{C} \rightarrow 140^{\circ}\text{C}$) 및 황분압 ($10^{-6.3} \text{ atm} \rightarrow 10^{-8.0} \text{ atm}$)은 감소하고 있음을 보여주고 있으나 황분압에서의 변화는 크지 않고 있어 광물의 침전에 온도가 주요한 역할을 하였음을 나타낸다.

광상의 생성심도

광화 II기 초기에는 I, II형 포유물이 공존하는 비등증거가 있고 이때의 온도와 염농도는 330°C, 1.0 wt.%와 280°C, 4.5 wt.%를 보인다. 이를 근거로 Sourirajan, Kennedy (1962)와 Hass (1971)의 자료를 이용하여 구한 압력은 166~74 bar의 범위를 갖고 열수계의 생성심도는 1700~750 m이다. II기의 중기에는 230°C, 6.4 wt.%의 온도와 염농도로 이를 근거로 구한 압력은 30 bar에 열수계 심도는 약 300 m이다. 따라서 이 광상의 압력은 166~30 bar 범위이고, 광화심도는 1700~300 m 사이인 것으로 추정된다.

광화유체의 기원

청송광상의 황화광물로 부터 구한 $\delta^{34}S_{H_2S}$ 값은 5.1~7.4%의 범위를 보이고 있고, 이는 경상분지내의 일부 맥상광상에서 얻어진 결과들과 유사한 값들을 보이고 있으나 마그마기원의 값 ($\delta^{34}S_{H_2S} \approx 0$)보다는 부화된 값이다. 방해석에서 얻어진 $\delta^{13}C$ 값은 -5.0~-4.5%로서 상당히 좁은 범위를 갖고 마그마기원의 광화유체에 대한 $\delta^{13}C$ 값 (-5±2%)과 유사한 값을 보이고 있다. 석영 및 방해석으로 부터 얻어진 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 값은 석영에서 0.5~0.4%, 방해석에서 0.5~3.7%를 보이고 있다. 이러한 값은 마그마기원의 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 값 (5.5~10.0%)보다는 상당히 낮은 값이다. 광화 II기 초기의 유체포유물에서 암염이 관찰되는 점으로 볼때에 광화초기에는 염농도가 높은 마그마기원의 광화유체이었을 가능성을 시사하고 있으나 안정동위원소의 결과들은 마그마기원과는 다소 차이를 보이고 있다. 이러

한 결과는 광화작용이 진행되면서 초기의 마그마기원인 광화유체가 천수나 주변의 모암과의 반응에 의한 것으로 추정되고, 이런 과정에서 동, 연, 아연 광물의 침전이 야기되었다고 생각된다.

결 론

1. 청송광상은 백악기 퇴적암류 중에 발달된 N30~60°W의 주향과 60~85°E의 경사를 갖는 파쇄대를 충진한 열극충진열수광상이다.

2. 광화작용은 크게 삼성광화기와 천성광화기로 나뉘며 연-아연-동광물은 삼성광화기의 II기에 정출되었다.

3. 유체포유물, 황안정동위원회 소 및 광물공생군을 갖고 추정한 광상생성온도는 광화 II기 초기가 200~380°C, 중기가 190~320°C, 후기가 250~320°C이고, 광화 III기가 140~260°C 범위를 보인다. 광화유체의 NaCl 상당염농도는 광화 II기 초기가 4~8 wt.%, 중기가 0~6.5 wt.%, 후기가 0~1 wt.%로 광화시기가 진행되면서 감소하는 경향을 보인다.

4. 광화 II기 초기의 황분압은 $10^{-6.3}$ atm, II기 중기는 $10^{-6.5}$ atm, II기 후기는 $10^{-8.0}$ atm으로 광화가 진행되면서 감소하는 경향을 보인다.

5. 청송광상의 유화광물로 부터 구한 $\delta^{34}\text{S}_{\text{HgS}}$ 값은 5.1~7.4%의 좁은 범위를 보이고 있고, 방해석으로 부터 구해진 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -4.5~-5.0%의 범위, 석영과 방해석으로 부터 구한 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 값은 0.5~-3.7%, 견운모의 δD 값은 -65% 이다. 이러한 결과는 이 광상의 광화유체가 열수계 동안 주변의 모암 또는 천수와 상당한 반응이 있었음을 시사한다.

사 사

논문을 심사하시며 좋은 의견과 건설적인 비평을 하여 주신 충북대학교의 최상훈 교수께 진심으로 감사한다. 시료채취 및 실내실험을 도와준 충남대학교의 김기윤 학사에게도 사의를 표한다. 이 연구는 교육부 기초과학연구소 육성지원사업 (BSRI-97-5419)의 연구비에 의하여 이루어졌으며, 일부는 한국과학재단 후원 전략광물자원연구센터의 지원을 받았으며 이에 감사드린다.

참고문헌

권영일, 이인기 (1973) 한국지질도 도평도록 및 설명서 (1: 50000). 국립지질광물연구소, p. 1~25.

- 김규한, 中井信之 (1980) 한국의 일부 금속광상의 유황동위 원소성분 및 동위원소지질온도에 관한 연구. 지질학회지, 16권, p. 124~134.
- 김봉균, 이하영, 김수진, 정지곤 (1988) 한국지질도 안동도록 및 설명서. 한국동력자원연구소, p. 1~20.
- 김상숙 (1986) 경상분지에서의 후기 백악기 화성활동에 관한 연구. 이상만교수 송수기념 논문집, p. 167~194.
- 민경덕, 김우준, 윤석규, 이대성, 주승환 (1982) 한국남부의 백악기 말 이후의 화성활동과 광화 작용에 대한 판구조론의 적용성 연구 (I). 광산지질, 16권, p. 123~154.
- 박기화 (1986a) 신령-기계 지역 광화대 조사: 신령 지역 칼데라 환상단층의 화산암을 중심으로. 동력자원연구소, KR-86-2-19, p. 291~302.
- 박기화 (1986b) 의성지역 금성산 칼데라에 관련된 광화작용. 동력자원연구소, KR-86-10, p. 319~337.
- 윤성효 (1987) 경상분지 북부의 백악기 함몰체구조. 이학박사학위논문, 부산대학교 대학원, 73p.
- 윤성효 (1993) 의성분지 중앙부 금성산 화산암체의 화산활동과 콜드론구조. 지질학회지, 29권, p. 309~323.
- 이상만, 김상숙, 전명식 (1987) 남한의 백악기-제3기 화성활동과 지구조적 의의. 지질학회지, 23권, p. 338~359.
- 이재영, 이진국 (1992) 평해지역 온정화강암 중 미량원소와 광화작용의 관계에 대한 지화학적 연구. 광산지질, 25권, p. 245~258.
- 이현구, 김상중, 윤혜수, 송영수, 김인수 (1993a) 경북 의성 동남부 오토산주변의 동광화시기, 광산지질, 26권, p. 311~325.
- 이현구, 김상중, 윤혜수, 최위찬, 송연수, 板谷徹丸 (1993b) 경북 의성 동남부에 분포하는 금성산 화산암류의 K-Ar연대와 그 주변의 광화시기. 광산지질, 26권, p. 445~454.
- 이현구, 김상중 (1995) 감계-동-연-아연-금-은광상의 광석 광물과 유체포유물 연구. 자원환경지질, 28권, p. 9~17.
- 이현구, 유봉철, 김상중 (1995) 영덕 금-은광상에서 산출되는 금-은 광물과 광상의 생성환경. 자원환경지질, 28권, p. 541~551.
- 이현구, 유봉철, 김상중 (1996) 유천 창연광상의 광석광물, 유체포유물 및 안정동위원회. 자원환경지질, 29권, p. 139~150.
- 이홍규, 홍승호 (1973) 한국지질도 청송도록 및 설명서 (1: 50000). 국립지질광물연구소, p. 1~23.
- 지세정, 최선규, 도성재, 고용권 (1991) 의성지역의 금-은 광화작용. 광산지질, 24권, p. 151~165.
- Chi, S.J., Doh, S.J., Choi, S.G. and Lee, J.H. (1989) Geochemistry of Cu-Pb-Zn-Ag eposits from the Euiseong Mineralized Area. Jour. Korean Inst. Mining Geol., v. 22, p. 253~266.
- Choi, S.G. (1983) Skarn evolution, and iron-tungsten mineralization and the associated polymetallic mineralization at the Ulsan mine, Republic of Korea. Waseda University, Graduated School, 271p.
- Choi, S.G., Choi, S.H., Yun, S.T., Lee, J.H. and So, C.S. (1992a) Genetic Environments 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. (1992b) Mineralogy and Geochemistry of the Jeonheung and Oksan Pb-Zn-Cu Deposits, Euiseong Area. Jour. Korean Inst. Mining Geol., v. 25, p. 417~433.
- Deines, P. and Gold, D.P. (1973) The isotopic composition of carbonatite and kimberlite carbonates and their bearing on the isotopic composition of deep-seated carbon.

- Geochim. Cosmochim. Acta., v. 37, p. 1709-1733.
- Fletcher, C.J.N. (1976) Mineralization within the Gyeongsang Basin, Republic of Korea; KIGAM, Anglo-Korea Min. Explor. Group.
- Friedman, I. and O'Neil, J.R. (1977) Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest; in Fleischer, M. (ed.), Data of Geochemistry, Sixth Ed. U. S. Geol. Surv., Prof. Paper, 440-KK, p. kk1-kk12.
- Hackbarth, C.J. and Peterson, U. (1984) Systematic compositional variations in argentian tetrahedrite. Econ. Geol., v. 79, p. 448-460.
- Hass, R.W. (1971) The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. Econ. Geol., v. 66, p. 940-946.
- Hoefs, J. (1973) Stable Isotope Geochemistry. New York: Springer-Verlag, 208p.
- 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.
- Kim, O.J. (1971) Metallogenic epochs and provinces of South Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 7, p. 37-59.
- Lee, S.M. (1972) Granites and Mineralization in Gyeongsang Basin. In Memorirs in Celebration of the 60th Birthday of Prof. C.M. Son. p. 195-219.
- Matsushisa, Y., Goldsmith, J.R. and Clayton, R.N. (1979) Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water. Geochim. et Cosmochim. Acta, v. 43, p. 1131-1140.
- Ohmoto, H. (1972) Systemic of sulfur and carbon isotope in hydrothermal ore deposits. Econ. Geol., v. 67, p. 551-578.
- Ohmoto, H. and Rye, R.O. (1979) Isotopes of sulfur and carbon, Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 2nd ed. New York, John Wiley and Sons.
- Roedder, E. (1962) Studies of fluid inclusion I; Low temperature application of a dual-purpose freezing and heating stage. Econ. Geol., v. 57, p. 1045-1061.
- Roedder, E. (1971) Fluid inclusion studies on the porphyry copper type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana and Climax, Colorado. Econ. Geol., v. 66, p. 98-120.
- Rye, R.O. (1966) The carbon, hydrogen, and oxygen isotopic composition of the hydrothermal fluids responsible for the lead-zinc deposits at Providencia, Záratecas, Mexico. Econ. Geol., v. 61, p. 1399-1427.
- Sato, K., Shimazaki, K. and Chon, H.T. (1981) Sulfur isotopes of the ore deposits related to felsic magmatism in the southern Korean peninsula. Mining Geol., v. 31, p. 321-326.
- Schneeberg, E.P. (1973) Sulfur fugacity measurements with the electrochemical cell Ag | Ag | Ag_{2+x}S, f_{S₂}. Econ. Geol., v. 68, p. 507-517.
- Scott, S.D. and Barnes, H.L. (1971) Sphalerite geothermometry and geobarometry. Econ. Geol., v. 66, p. 653-669.
- Shimazaki, H., Sato, K. and Chon, H.T. (1981) Mineralization associated with Mesozoic felsic magmatism in Japan and Korea. Mining Geol., v. 31, p. 297-310.
- Sillitoe, R.H. (1980) Evidence for porphyry-type mineralization in southern Korea. Mining Geol. Spec. Issu, Japan, n. 8, pp. 205-214.
- So, C.S., Chi, S.J. and Shelton, K.L. (1985) Cu-bearing hydrothermal vein deposits in the Gyeongsang Basin, Republic of Korea. Econ. Geol., v. 80, p. 43-56.
- So, C.S. and Choi, S.H. (1992) Genetic Environments of the Keumhak Copper Deposits, Korea. 1st International Symposium, Proceedings of Modern Research on Ore Grains, Center for Mineral Resources Research, p. 27-34.
- Sourirajan, S. and Kennedy, G.C. (1962) The system H₂O-NaCl at elevated temperature and pressure. Am. Jour. Sci., v. 260, p. 115-141.
- Spiridonov, E.M. (1984) Species and varieties of fahlore minerals and their rational nomenclature. Dokl. Akad. Nauk. SSR, v. 279, p. 166-172.
- Suzuoki, T. and Epstein, S. (1976) Hydrogen isotope fractionation between OH-bearing minerals and water. Geochim. et Cosmochim. Acta, v. 40, p. 1229-1240.
- Taylor, H.P. Jr. (1979) Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits, Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 2nd ed. New York, John Wiley and Sons.
- Toulmin, P. and Barton, P.B. Jr. (1964) The electrum tarnish method for the determination of the fugacity of sulfur in laboratory sulfide system. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 28, p. 619-640.