자원환경지질, 제34권, 제2호, 157-166, 2001
Econ. Environ. Geol., 34(2), 157-166, 2001

中國 湖南省 塘官鋪 鑛山의 鉛-亞鉛-朱錫-銀 鑛化作用: 流體包有物 및 黃同位元素 硏究

許哲豪[1] · 尹聖澤[1]* · 蘇七燮[1]
高麗大學校 地球環境科學科

Lead-Zinc-Tin-Silver Mineralization of Tangguanpu Mine, Hunan Province, China: Fluid Inclusion and Sulfur Isotope Studies

Chul-Ho Heo[1], Seong-Taek Yun[1]* and Chil-Sup So[1]
[1]Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 136-701, Korea

Numerous base-metal bearing hydrothermal quartz vein deposits occur in the Hunan province of southern China. The Tangguanpu lead-zinc-tin-silver mine is the major producer among these deposits. Lead-zinc-tin-silver mineralization occurs in a single stage of massive quartz veins which filled fractures in fault zones within Paleozoic metasedimentary rocks. Sphalerite, chalcopyrite, galena, pyrite, arsenopyrite and pyrrhotite are the principal sulphide minerals in the Tangguanpu lead-zinc ores with minor amounts of tin- and antimony-bearing sulphides (stannite, teallite, boulangerite and tetrahedrite). Based on the iron and zinc partitioning between coexisting stannite and sphalerite, the formation temperature for this mineral assemblage range from 300° to 330°C, which relatively agree with the upper part of homogenization temperature of fluid inclusion in quartz (207°~358°C). Fluid inclusion data show that main lead-zinc-tin-silver mineralization occurred from H_2O-NaCl fluids with relatively low salinities (11.2~7.3 wt.% eq. NaCl) at temperatures between 207° and 358°C. The relationship between homogenization temperature and salinity suggests a history of cooling and dilution followed by initial boiling. Evidence of initial fluid boiling may indicate the fluid trapping pressures of 180 bars. The $\delta^{34}S_{\Sigma S}$ values of -5.0 to 1.1‰ indicate an igneous source of sulfur in the Tangguanpu lead-zinc-tin-silver hydrothermal fluids.

Key words : hydrothermal quartz vein, lead-zinc-tin-silver, fluid inclusion, sulfur isotope

중국 남부 호남성에는 수많은 천금속을 배태하고 있는 열수맥 광상이 산출하고 있다. 당관포 연-아연-주석-은 광산은 이들 중에서 대표적인 광산이다. 연-아연-주석-은 광화작용은 고생대 변성퇴적암의 단층열극을 충전하는 괴상 단성맥내에 배태되어 있다. 당관포 연-아연 광석에는 섬아연석, 황동석, 방연석, 황철석, 유비철석, 자류철석이 배태되어 있으며, 소량의 함주석- 및 안티모니 황화광물(황석석, 테알라이트, 보우란제라이트, 사면동석)도 산출된다. 황석석과 섬아연석의 철-아연 분배작용에 근거하여, 본 광물조합의 형성온도를 계산하면 300°~330°C이며, 석영내 유체포유물의 균질화 온도(207°~358°C)중 최상부와 일치하고 있음을 알수 있다. 유체포유물 자료에 의하면, 연-아연-주석-은 광화작용은 207°~358°C의 균질화 온도와 비교적 낮은 염농도(11.2~7.3 wt.% eq. NaCl)를 지닌 H_2O-NaCl계 유체로부터 형성되었음을 지시한다. 균질화 온도와 염농도 관계에 의하면, 초기 비등 후에 냉각 및 희석작용이 발생했음을 시사한다. 초기 비등의 증거는 180 bar정도의 유체 포획압력을 지시한다. -5.0~1.1‰의 $\delta^{34}S_{\Sigma S}$값은 당관포 함연-아연-주석-은 열수유체의 황이 화성기원임을 지시한다.

주요어 : 열수 석영맥, 연-아연-주석-은, 유체포유물, 황동위원소

*Corresponding author: styun@mail.korea.ac.kr

1. 서 론

중국 남부지역의 연, 아연, 주석, 은을 주로 생산하고 있는 당관포(Tangguanpu) 광산은 호남성내에 위치하고 있으며, 지리적으로는 북위 25° 28'~25° 30', 동경 112° 28'~112° 30'에 위치하고 있다(Fig. 1). 본 조사지역은 지체구조적으로 소위 'Jianxi-Hunan-Kwangxi Province'에 속한다. 본 지역은 선캠브리아기의 육괴 사이에 발달하는 소위 탁상지 지역으로서 중국 남부에서 가장 중요한 유색금속 광화대(소위 'Shuikoshan-Shanghwaring 광화대'또는 남북방향의 'Neiyang-Linwu대')를 이루고 있으며, 고생대 시기의 천해 및 육성 퇴적암이 소위 'Feming Graben'내에 넓게 분포하고 있다. 이들 퇴적암은 Caledonian 및 Indosinian-Yanshanian시기의 단층 및 습곡작용에 의하여 중복 변성되어 있으며, 이들 각 조산작용의 시기에는 독특한 지질구조 및 화성활동이 수반되었다. 따라서, 본 지역의 광화작용은 여러시기에 걸친 광화작용의 중첩으로 특징된다. 본 지역의 지질구조 및 광화작용은 근본적으로 고생대 시기의 태평양판의 섭입작용과 관련되어 형성된 것으로 해석되고 있다(중국유색금속공업총공사, 1997).

한 · 중 연합조사팀은 중국 호남성 당관포 지역에서 공동 광물탐사를 시행한 바 있다(대한광업진흥공사,

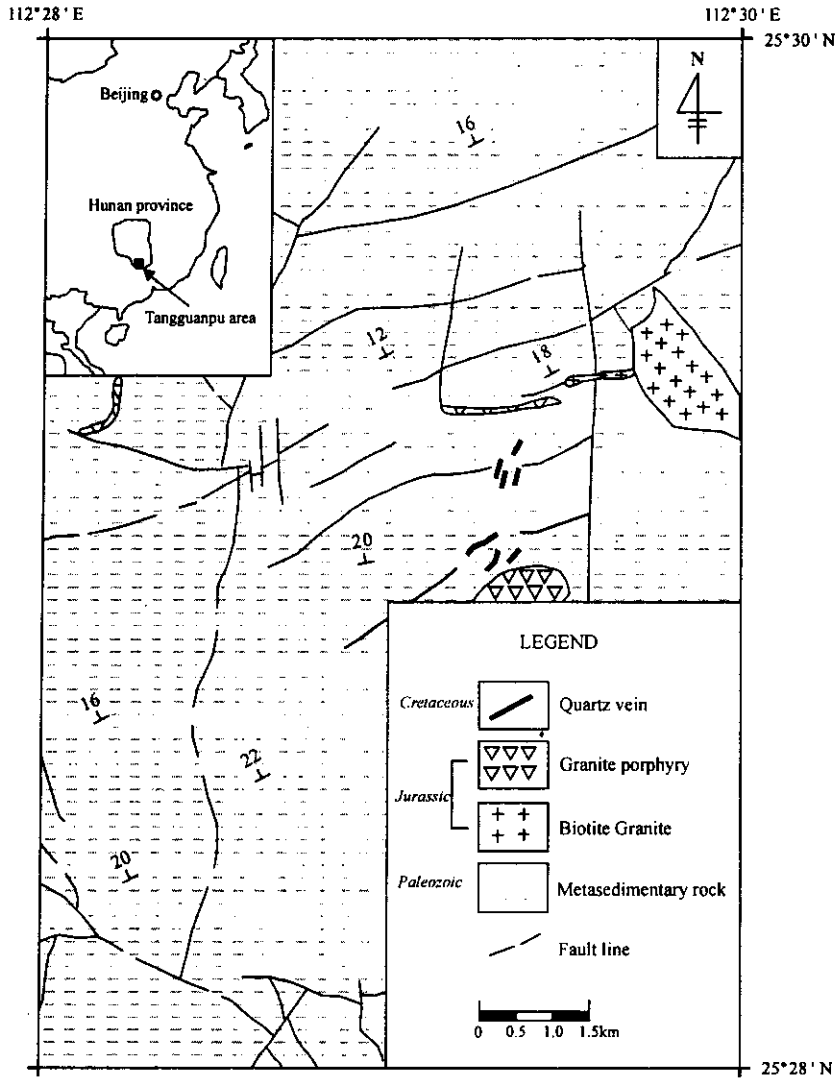

Fig. 1. Geologic map of the Tangguanpu Pb-Zn-Sn-Ag mine, Hunan province, China.

1999 및 2000). 현재까지의 예비 분석결과에 의하면, 당관포 광상의 평균 광석 품위는 2.13% 鉛, 2.87% 亞鉛, 1.15% 朱錫, 83.8 g/t 銀이다. 현재 가채매장량을 확보하기 위해서 유망지역에 대한 정밀 시추탐사와 예비 타당성 연구가 수행되고 있다. 본 논문에서는, 당관포 광상의 광화작용에 대하여 기재하고, 황화광물의 산출양식과 공생관계를 고려하여 유비철석, 섬아연석, 황석석의 화학조성을 규명하고자 한다. 그리고 유체 포유물에 대한 자료도 간략하게 언급하며, 광화유체의 기원을 해석하기 위해서 황화광물의 유황동위원소 조성도 규명했다.

2. 지질 및 광상개요

본 광산지역의 지질은 주로 고생대의 변성퇴적암으로 구성되어 있으며, 쥬라기의 화강암이 고생대의 변성퇴적암을 관입하고 있다(Fig. 1). 고생대 변성퇴적암은 대개 사암, 천매암질 사암, 점판암 및 소규모의 탄산염암으로 구성되어 있다. 당관포 광산지역의 화성암은 흑운모 화강암과 화강반암으로 세분된다. 흑운모 화강암은 석영, 정장석, 사장석, 흑운모와 소량의 황옥, 저어콘, 모나자이트, 금홍석, 자철석, 녹주석을 함유하고 있다. 화강반암은 석영과 정장석으로 구성되어 있으며 소량의 백운모, 흑운모, 인회석, 저어콘을 함유하고 있다.

당관포 광상은 연-아연-주석-은을 배태하고 있는 단층열극충전 광상으로서, 광맥의 주된 주향은 N60°~80°E, 경사는 35°~70°E이다. 광맥은 주향방향으로 약 200~500 m 연장되어 있으며, 맥폭은 0.24~0.83 m 이다. 당관포 광산에서 채취한 변질 견운모를 대상으로 하여 K-Ar 연대측정을 실시한 결과, 93.86±1.58 Ma(Table 1)로 판명되었다. 이는 당관포 광산의 광화연령이 백악기 후기임을 지시하고 있다. 본 광산 지역에서는 녹니석화작용, 방해석화작용, 규화작용등의 모암변질작용이 관찰된다.

3. 광물공생관계

당관포 광산 연-아연-주석-은광석의 주요 산출 광물은 섬아연석, 황동석, 방연석, 황철석, 유비철석, 자류철석이다. 또한, 미량의 주석 또는 안티모니를 함유하는 황화광물(황석석, 테일라이트(teallite), 보우란제라이트(boulangerite), 사면동석)도 관찰되었다. 맥석은 대개 석영과 방해석으로 구성되어 있다. 황화광물 산출상태에 근거하여, 황화광물들의 공생관계를 살펴보면 초기 자류철석→중기 괴상 연-아연→후기 연-아연-안티모니 광화작용의 양상을 보인다(Fig. 2). 광화작용 초기에는 자류철석이 산출되며, 주로 부정형의 입자로 산출되고, 황철석, 유비철석, 섬아연석과 관련되어 산출된다(Fig. 3A). 유비철석은 자형내지 반자형의 세립질 입자로 산출되며, 그 접촉부에 섬아연석을 수반하는 경우가 많다(Fig. 3A and 3B). 理想的인 유비철석은 33.3 atomic. %의 철을 함유하고 있으나, Klemm (1965)과 Kretschmar, Scott(1976)는 자연산 유비철석은 미약한 Fe 결핍(≤1 atomic. %)을 보인다고 보고한 바 있다. 당관포 광상의 유비철석은 32.66~33.39 atomic. %의 철을 함유하고 있으며(Table 2), 비소함량은 29.69~32.32 atomic. %의 변이를 갖는다. 연-아연 광화작용이 지배적인 중기 광화작용의 특징은 황철석은 산출되나 자류철석은 산출되지 않는다는 것이다. 이 시기에 생성된 황화광물은 주로 소량의 황동석을 지닌 섬아연

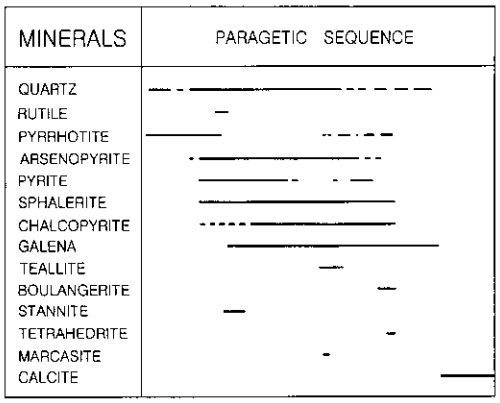

Fig. 2. Generalized paragenetic sequence of minerals from veins of the Tangguanpu Pb-Zn-Sn-Ag mine, Hunan province, China.

Table 1. K-Ar data of alteration sericite from the Tangguanpu Pb-Zn-Sn-Ag mine, Hunan province, China.

Sample No.	Description	K (%)	Radiogenic ^{40}Ar (moles/g) STP×10^{-10}	Radiogenic ^{40}Ar (%)	Date (Ma±1σ)
1600-1	Sericite from alteration zones	6.86	1.146	91.7	93.86±1.58

Table 2. Representative chemical composition of arsenopyrite from the Tangguanpu Pb-Zn-Sn-Ag mine.

Sample no.	Wt. %			Total	Atomic. %			Associated minerals
	Fe	As	S		Fe	As	S	
600-1	34.05	42.75	21.81	98.62	32.77	30.67	36.56	sp, cp
	34.95	43.03	22.18	100.16	33.07	36.36	36.57	sp, cp
	34.24	43.78	20.90	98.92	33.15	31.60	35.25	sp, cp
	34.12	43.80	20.45	98.37	33.12	31.79	34.68	sp, cp
	34.89	43.04	21.54	99.47	33.39	30.70	35.91	sp, cp
	34.29	43.41	21.22	98.92	33.09	31.23	35.68	sp, cp
	34.32	43.43	21.65	99.40	32.87	31.01	36.12	sp, cp
	34.40	42.97	21.84	99.20	32.78	30.52	36.25	sp, cp
600-2	34.19	42.57	21.49	98.24	33.08	30.71	36.22	sp, cp, py, td
600-3	34.77	42.58	22.53	99.88	32.77	29.92	37.00	po, py, sp, cp, bl
	34.84	43.72	22.24	100.81	32.77	30.65	36.44	po, py, sp, cp, bl
600-4	34.19	43.89	21.06	99.13	32.93	31.52	35.34	sp, cp, td
600-5	34.87	45.10	21.98	101.94	32.66	31.49	35.86	sp, cp, td
	35.10	43.32	21.96	100.37	33.18	30.52	36.16	sp, cp, td
600-6	34.51	45.28	20.77	100.56	33.04	32.32	34.64	sp, cp, td, gn
640-1	34.65	43.08	22.13	99.86	32.87	30.46	36.57	sp, cp
	34.83	42.42	22.78	100.03	32.70	29.69	37.26	sp, cp
640-3	34.74	43.45	21.46	99.66	33.24	30.99	35.77	sp, cp

Abbreviations: sp; sphalerite, cp; chalcopyrite, py; pyrite, td; tetrahedrite, po; pyrrhotite, bl; boulangerite, gn; galena

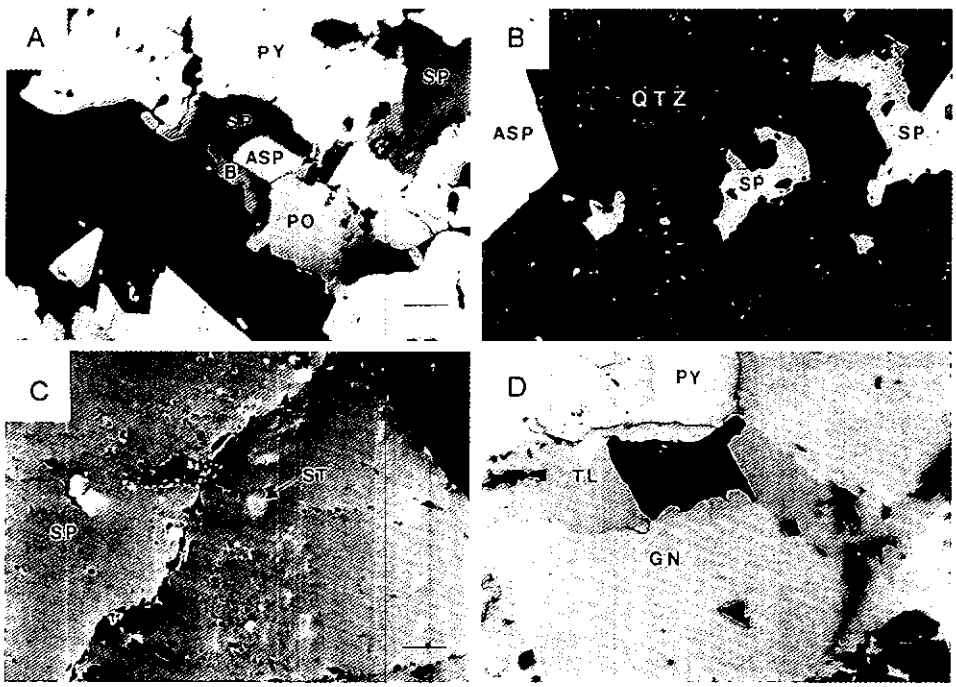

Fig. 3. Reflected light microphotographs of ores in the Tangguanpu Pb-Zn-Sn-Ag deposits. All scale bars are 0.1 mm. (A); boulangerite (B), arsenopyrite (ASP), pyrrhotite (PO) and sphalerite (SP) infilling the fracture of pyrite (PY), (B); arsenopyrite (ASP) and sphalerite (SP) in quartz (QTZ), (C) stannite (ST) intergrown with sphalerite (SP), (D) galena (GN) and teallite (TL) infilling the fractures of pyrite (PY).

Table 3. Representative chemical composition of sphalerite from the Tangguanpu Pb-Zn-Sn-Ag mine, Hunan province, China.

Sample no.	Wt. %						Total	Mole %					Associated minerals
	Zn	Fe	Mn	Cd	Cu	S		ZnS	FeS	MnS	CdS	CuS	
600-1	54.61	9.20	0.16	0.61	0.19	32.97	97.75	82.58	16.29	0.30	0.54	0.30	asp, cp
	54.44	9.80	0.20	0.81	0.37	32.62	98.23	81.25	17.12	0.35	0.70	0.57	asp, cp
	53.25	11.69	0.24	0.56	0.13	32.82	98.67	78.70	20.22	0.42	0.48	0.19	asp, cp
	53.31	11.15	0.39	0.63	0.00	33.03	98.51	79.34	19.43	0.68	0.54	0.00	asp, cp
	51.41	12.46	0.22	0.39	0.39	33.35	98.22	76.87	21.81	0.38	0.34	0.60	asp, cp
600-2	62.15	2.93	0.02	0.56	0.54	33.42	99.61	93.49	5.16	0.03	0.49	0.83	asp, cp, py, td
	62.74	2.65	0.12	0.61	0.28	33.18	99.57	94.17	4.66	0.21	0.53	0.43	asp, cp, py, td
	63.74	2.46	0.12	0.60	0.47	32.51	99.90	94.29	4.26	0.21	0.51	0.72	py, cp, gn, tl
600-3	55.54	9.93	0.05	0.43	0.48	33.77	100.20	81.70	17.11	0.09	0.37	0.73	po, py, asp, cp, bl
	48.93	11.22	0.03	0.21	4.94	33.81	99.14	72.70	19.51	0.06	0.18	7.55	po, py, asp, cp, bl
600-4	61.17	3.38	0.12	0.41	0.79	32.87	98.73	92.24	5.96	0.21	0.36	1.23	asp, cp, td
600-5	56.04	8.34	0.25	0.38	0.17	33.30	98.47	84.28	14.68	0.45	0.33	0.26	asp, py
600-6	54.76	10.15	0.25	0.38	0.22	32.98	98.75	81.27	17.62	0.44	0.33	0.33	asp, py, cp, gn
600-7	54.21	11.15	0.41	0.68	0.54	34.04	101.02	78.92	19.99	0.70	0.58	0.81	py, st
	52.27	10.96	0.36	0.51	0.8	33.33	98.53	78.51	19.17	0.65	0.44	1.23	py, st
	54.71	9.72	0.21	0.65	0.44	33.80	99.52	81.45	16.94	0.37	0.56	0.67	py, st, cp
	55.79	7.94	0.18	0.49	1.24	33.52	99.15	83.45	13.90	0.32	0.43	1.90	py, st, cp
640-1	55.09	9.55	0.46	0.64	0.33	33.60	98.66	81.59	16.55	0.81	0.55	0.50	asp
	55.75	8.69	0.44	0.76	0.06	32.82	98.52	83.27	15.20	0.77	0.66	0.10	asp
	52.79	11.81	0.54	0.44	0.31	33.11	98.99	77.84	20.38	0.94	0.37	0.47	po, cp
640-2	54.35	10.43	0.07	0.96	0.12	32.90	98.83	80.73	18.14	0.12	0.83	0.18	po
640-3	55.45	8.306	0.30	0.62	0.30	32.66	98.83	83.75	14.69	0.55	0.54	0.47	asp, cp

Abbreviations: asp; arsenopyrite, cp; chalcopyrite, py; pyrite, td; tetrahedrite, po; pyrrhotite, bl; boulangerite, gn; galena, st; stannite, tl; teallite

석, 황철석, 방연석, 유비철석이다. 섬아연석은 황철석 및 황석석과 연관되어 보통 조립의 타형입자로 산출된다(Fig. 3B and 3C). 당관포 광상에서 가장 풍부한 황화광물인 섬아연석은 다양한 철황화물과 공생관계를 보인다. 산출상태는 매우 다양하나 일반적으로 타형이 가장 우세하며 괴상의 형태로 나타난다. 산점상의 황동석, 자류철석, 황석석을 함유한 섬아연석의 철함량은 4.26~21.81 mole% FeS의 범위를 보인다(Table 3). 광석내 산점된 유비철석은 보통 황철석과 연관되어 있다. 후기 광화작용 동안에는, 황화광물들이 테알라이트, 보우란제라이트, 사면동석과 같은 함주석-안티모니 광물조합으로 산출되는 경향을 보인다(Fig. 3D).

4. 섬아연석- 황석석 지질온도계

공존하고 있는 황석석과 섬아연석의 화학조성이 Table 4에 제시되어 있다. 황석석의 Fe 및 Zn의 범위

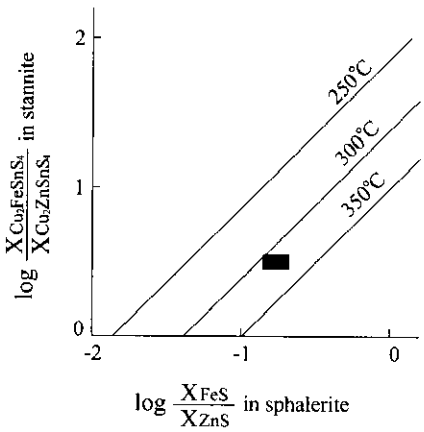

Fig. 4. A diagram showing partitioning of iron and zinc between stannite and sphalerite at various temperatures (after Shimizu, Shikazono, 1985). Shaded box indicates the formation temperature condition of sphalerite and stannite from Tangguanpu deposit (the compositional data are shown in Table 4).

Table 4. Representative chemical composition of stannite and sphalerite from the Tangguanpu Pb-Zn-Sn-Ag mine, Hunan province, China.

Sample no.	Wt. %							Total	$\log(X_{FeS}/X_{ZnS})$
	Mineral	Zn	Fe	Cu	Cd	Sn	Mn	S	
600-7	stannite	3.53	12.32	28.52	0.00	26.89	0.06	29.66	100.97	0.54
	stannite	3.88	12.50	28.40	0.00	26.30	0.01	29.49	100.58	0.51
	stannite	3.60	12.79	27.67	0.00	26.27	0.01	29.07	99.39	0.55
	stannite	4.30	12.45	27.35	0.00	26.65	0.00	29.76	100.51	0.46
	stannite	4.11	12.56	27.41	0.00	25.98	0.01	29.25	99.33	0.48
	sphalerite	54.21	11.15	0.54	0.68	0.00	0.41	34.04	101.02	-0.69
	sphalerite	52.57	10.96	0.80	0.51	0.41	0.36	33.33	98.93	-0.68
	sphalerite	54.71	9.72	0.44	0.65	0.00	0.21	33.80	99.52	-0.75
	sphalerite	55.79	7.94	1.24	0.49	0.12	0.18	33.52	99.27	-0.85

는 각각 12.32~12.79 wt.%와 3.53~4.3 wt.%이다. 섬아연석의 Fe 및 Zn의 범위는 각각 7.94~11.15 wt.%와 52.57~55.79 wt.%이다. 이들 자료를 log $(X_{FeS}/X_{ZnS})_{sphalerite}$-log$(X_{FeS}/X_{ZnS})_{stannite}$ 다이아그램에 도시해 보았다(Fig. 4). 공존하고 있는 황석석과 섬아연석 사이의 철과 아연 분별작용에 근거해서, 다음과 같은 교환 반응식으로부터 해당 광물조합에 대한 생성온도를 추정해 볼 수 있다(Shimizu, Shikazono, 1985): Cu_2FeSnS_4(in stannite)+ZnS(in sphalerite)=Cu_2ZnSnS_4(in stannite)+FeS(in sphalerite). 위 반응에 대한 분별계수 (Kd) 는 $Kd=(X_{FeS}/X_{ZnS})_{stannite}/(X_{FeS}/X_{ZnS})_{sphalerite}$ 로 표현되며, Nakamura, Shima(1982)는 위 반응에 대한 온도는 다음과 같다고 보고했다: $\log Kd=2.8\times10^3\times T^{-1}$ -3.5. 이를 이용하면, 황석석과 섬아연석의 공존온도는 300°~330°C로 계산될 수 있음을 알 수 있다.

5. 유체포유물 연구

연구지역 광상생성시의 광화유체의 성질과 광상생성 조건을 규명하기 위하여 유체포유물 연구를 실시하였다. 유체 포유물 연구는 당관포 광상의 광맥을 구성하고 있는 광물들 중 석영내의 유체포유물을 대상으로 실시하였다. 석영중에서 관찰되는 유체포유물은 대부분이 액상과 기상의 2상 포유물이며, 형태는 대부분 부정형이 많았으며 크기는 대부분 6~45 μm정도이다. 유체포유물의 균질화 온도 측정은 각각의 포유물에 대해 3회 이상의 반복측정을 하였으며 재현오차는 2%이내였다.

5.1. 유체포유물의 분류

본 광산에서 산출되는 석영중의 유체포유물의 종류는 실온에서 관찰되는 충전도, 가열 실험시 유체포유물의 상변화 거동에 따라 I, II형 포유물로 분류된다. I형 포유물은 시료중에서 가장 보편적으로 보여지는 유체포유물이며, 액상과 기상의 2상으로 구성되어 있으며 가열실험시 액상으로 균일화 된다. II형 포유물은 기상이 풍부한(≥80 vol.%) 포유물이며, 가열시험시 기상으로 균일화한다. 기상이 풍부한 포유물과 액상이 풍부한 포유물이 함께 산출되는 곳에서는, 두 포유물은 거의 같은 온도에서 균질화 한다. 이는 유체의 비등을 지시한다. 작은 크기의 기상이 풍부한 일부의 II형 포유물은 액상의 잔류부분을 인지하기 어려워 실험하기가 곤란하였다. 그래서, II형 포유물 측정자료는 최소값으로 고려하여야 한다. 왜냐하면, 위와 같은 육안측정은 300°C까지는 실제 균질화온도를 과소평가할 수도 있기 때문이다(Bodnar *et al.*, 1985). 그래서, 최적의 정밀도와 정확도를 지닌 몇 개의 자료만이 보고되었다.

액상이 풍부한 포유물내 얼음의 초기용융온도는 -20.7°~-21.5°C의 범위를 보이나 관찰하기가 매우 어려워서 몇 개만이 측정되었다. 이들 용융온도는 2가 양이온의 부재와 용존염중 NaCl이 지배적임을 지시하고 있다(Borisenko, 1977; Crawford, 1981). 액상 CO_2 또는 가스 수화물이 관찰되지 않는 것으로 보아 CO_2 함량은 0.85 molal이하 임을 추정할 수 있다(Hedenquist, Henley, 1985). 가상 2차 유체 포유물과 초생 유체 포유물을 구분 하는데 실제적인 어려움이 있어서, 본 연구에서는 초생 유체포유물과 2차 포유물로 구분하여 기재하였다.

5.2. 균질화 온도 및 염농도

가열실험에 의한 석영중의 초생 유체 포유물의 균질화 온도 범위는 358°~207°C이며, 냉각실험에 의한 석영중의 초생 유체 포유물의 염농도 범위는 11.2~7.3

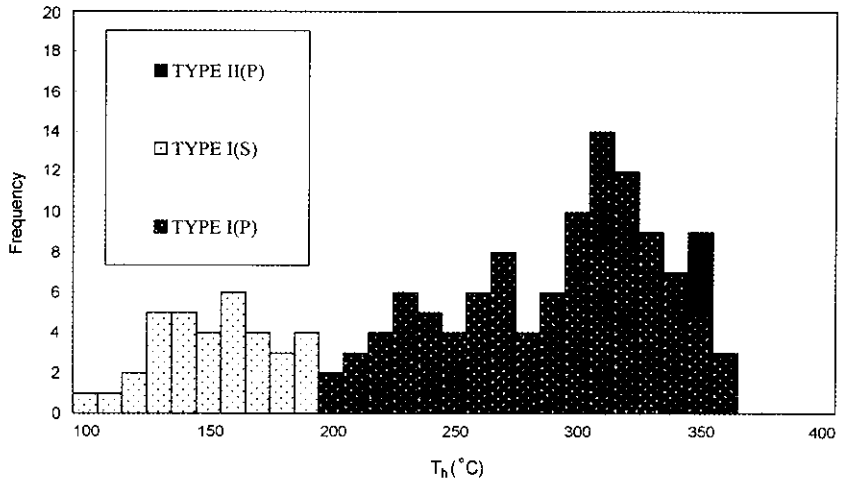

Fig. 5. Frequency diagrams of total homogenization temperature of fluid inclusions in quartz from the Tangguanpu deposit.

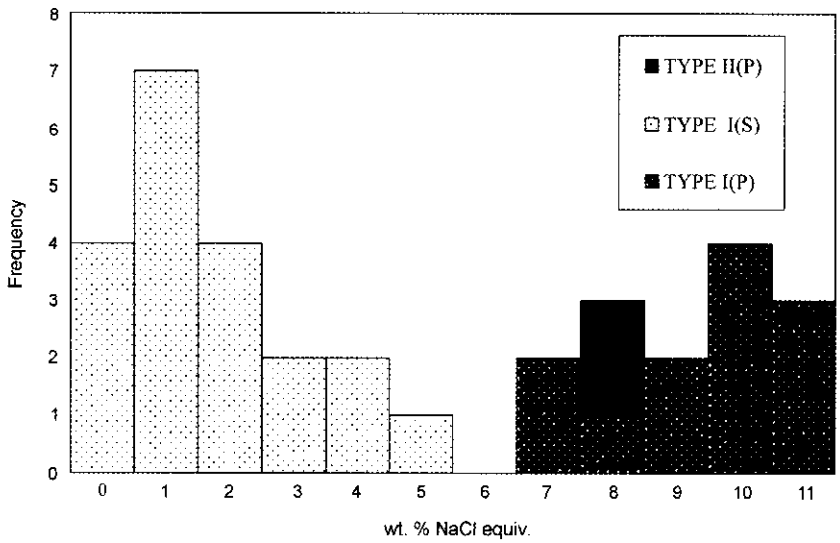

Fig. 6. Frequency diagrams of salinities of fluid inclusions in quartz from the Tangguanpu deposit.

wt.% eq. NaCl이다(Fig. 5 and 6). 가열실험에 의한 석영중의 2차 유체 포유물의 균질화 온도 범위는 199°~100°C이며, 냉각실험에 의한 석영중의 2차 유체 포유물의 염농도 범위는 5.7~0.0 wt.% eq. NaCl이다 (Fig. 5 and 6). 한편, 광화작용중에, 열수유체의 온도 및 조성의 변이는 유체포유물에 의해서 기록된다. 당관포 연-아연-주석-은 광산의 석영을 대상으로 한 유체 포유물 자료는 본 광화작용이 광범위한 균질화온도와 염농도사이에서 발생했음을 지시하고 있다. 균질화 온도와 염농도의 상관관계를 보면, 초기의 비등작용에 이어서 냉각 및 희석이 진행되었음을 유추할 수 있다 (Fig. 7).

5.3. 압력-심도 조건

본 광화작용중, 기상이 풍부한(II형) 유체포유물이 액상이 풍부한(I형) 유체포유물과 공존하고 있음이 관찰되었다. 유체비등의 증거를 이용하여(Haas, 1971), 유체포획시의 압력을 추정해 보았다. 초기 비등현상이 약 350°C의 균질화 온도, 8 wt.% eq. NaCl 조건에서 발생했다면, 약 180 bar정도의 유체포획압력을 추정해 볼 수 있다.

6. 황동위원소 연구

광석광물중에 공존하는 황화광물의 황 안정동위원소

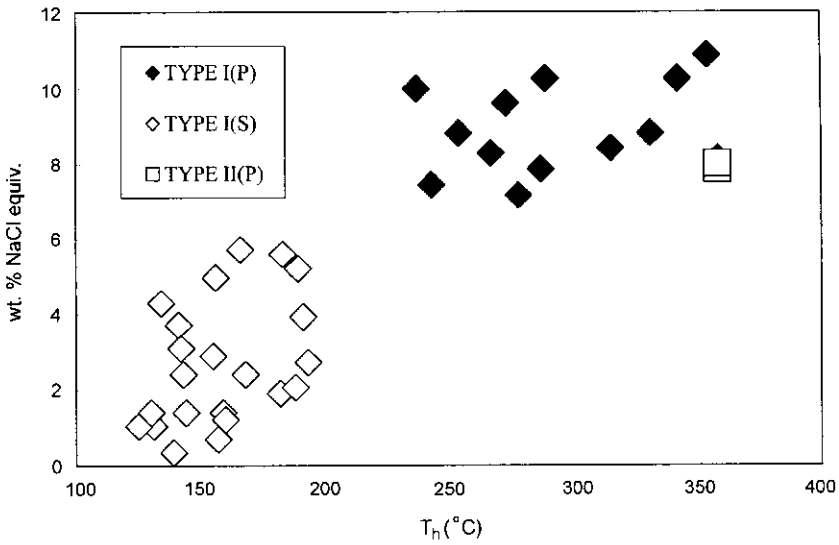

Fig. 7. Homogenization temperature versus salinity diagram for fluid inclusions in quartz from the Tangguanpu deposit.

Table 5. Sulfur isotope data of sulfides from the Tangguanpu Pb-Zn-Sn-Ag mine, Hunan province, China.

Sample no.	Mineral	δ^{34}(‰)	Δ^{34}S(‰)	T(°C)[1)]	T(°C)[2)]	$\Delta^{34}S_{H2S}$ (‰)[1)]
I600-2	PO	-4.6			164	
I640-1	SP	-4.7	SP-GN	204± 25	204	4.3
I640-1	GN	-1.5	-3.2		204	1.1
D640-2	PY	-0.7			143	0.1
D640-2	SP	1.5			143	0.9
Y2	PY	-3.8			230	-5.4
Y2	SP	-2.2			230	-2.6
Y2	GN	-2.9			230	-0.4

Abbreviations: PO; pyrrhotite, SP; sphalerite, GN; galena, PY; pyrite
[1)]Using isotopic fractionation in Ohmoto and Rye (1979)
[2)]Based on average homogenization temperature of fluid inclusion in associated mineral

비는 광화유체의 생성기원과 광상생성온도를 고찰하기 위한 중요한 도구로 사용되어 왔다. 본 연구에서는 광화용액의 기원과 생성온도를 추적하기 위해 자류철석, 섬아연석, 방연석, 황철석에 대해 황 동위원소비를 측정했다. 추출과 분석의 표준기법은 Grinenko (1962)의 방법을 인용했다. 황 동위원소비는 CDT (Canyon Diablo Troilite)를 표준시료로 가스 질량분석기 (Finnigan MAT Delta-E)를 이용하여 3회이상 반복측정하였다. Table 5에 나타난 바와 같이 자류철석의 δ^{34}S값은 -4.6‰, 섬아연석의 δ^{34}S값은 -4.7~1.5‰, 방연석의 δ^{34}S값은 -2.9~-1.5‰, 황철석의 δ^{34}S값은 -3.8~-0.7‰이다. 황 동위원소 지질온도계는 평형상태하의 광화유체로 부터 정출하여 공존하는 광물쌍 사이에 존재하는 황동위원소의 분배를 토대로 하여 얻을 수 있다(Ohmoto and Rye, 1979). 본 연구에서 얻어진 공존 유화광물쌍 간의 동위원소분배는 $\Delta^{34}S_{sp\text{-}gn}$값이 -3.2로 나타났으며, 이들 광물쌍을 정출시킨 광화유체가 평형상태에 있었으며 고결 후 동위체의 재분배가 일어나지 않았다고 하는 가정과 함께 광상의 생성온도를 계산한 결과는 204±25°C 이다. 각 시료에 대해 해당 시료와 관련된 석영내 초생 유체포유물의 균질화온도와 공생관계를 고려하여 평균 침전온도를 가정하면, 열수유체의 H_2S의 δ^{34}S값은 -5.0~1.1‰로 계산된다. 황화광물의 δ^{34}S값의 비교적 좁은 범위와 맥내 견운모+석영의 변질광물조합은 본 광산의 황이 환원성 황(H_2S)으로 존재했음을 지시하고 있다. 그래서, H_2S의 δ^{34}S값의 계산된 범위는 전체 유체의 황동위원소 조성($\delta^{34}S_{\Sigma S}$)으로 간주될 수 있다. -5.0~1.1‰의 $\delta^{34}S_{\Sigma S}$값

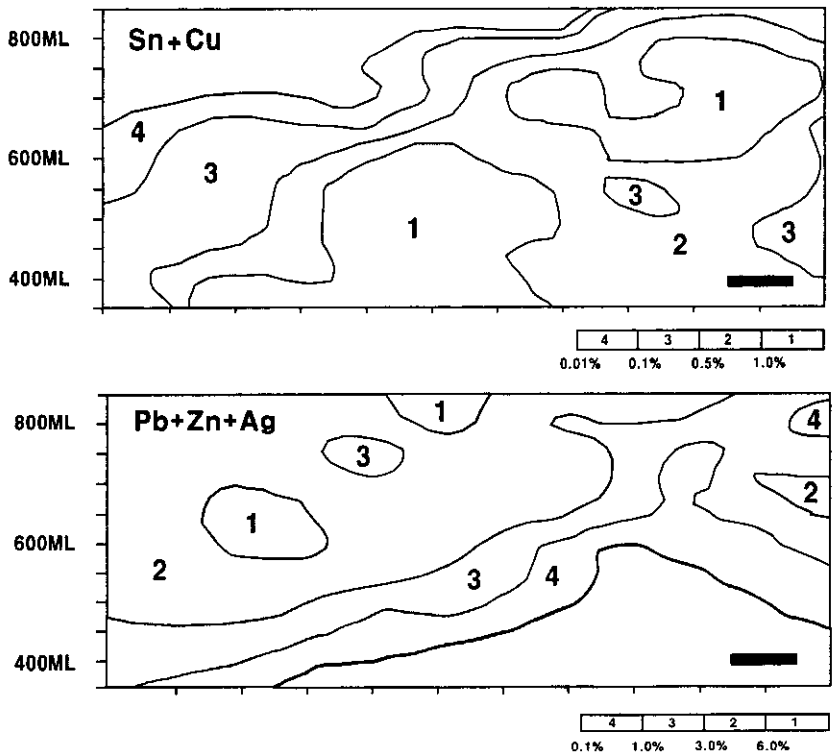

Fig. 8. Vertical distribution of ore grades (Sn+Cu and Pb+Zn+Ag) in the Tangguanpu deposit. Horizontal black scale bar is 200 m.

은 당관포 함연-아연-주석-은 열수유체의 황이 화성기원임을 지시한다(Ohmoto and Rye, 1979).

7. 광화작용에 대한 고찰

당관포 지역의 광상은 열수 광맥형 연-아연-주석-은 광상으로서 주로 북동-남서 주향의 단층을 충진하고 있다. 광화관련 열수변질 작용으로서는 녹니석화, 견운모화, 방해석화 및 규화작용이 있다. 본 지역에서는 하부로 감에 따라 주석의 양이 상대적으로 증가되고, 상부로 가면서는 연-아연과 은의 함량이 증가되는 경향을 보인다(Fig. 8). 본 지역에서의 산출광물은 다음과 같다. 맥석광물로서는 주로 석영이 산출된며, 광석광물로서는 방연석, 섬아연석, 황철석, 황동석, 황석석, 자류철석, 사면동석등이 육안으로 관찰된다. 수직적으로 보면, 황동석 및 자류철석과 황석석의 함량은 하부로 갈수록 증가하는 반면, 방연석과 사면동석의 함량은 상부로 가면서 증가되는 양상을 보인다. 본 광상에서의 주요 채광대상 광물은 연과 아연이지만 주석 및 은을 부산물로서 취득한다면 그 경제적 가치는 제고될 수 있을 것으로 생각된다.

8. 결 론

1. 당관포 연-아연-주석-은 광상은 고생대의 변성퇴적암류중에 발달하는 N60°~80°E계의 단층열극을 충전하여 배태된 열극충전 열수광상이며, 광화연령은 백악기 후기(93.86±1.58 Ma)로 판명되었다.

2. 본 광상에서 산출되는 광석광물로는 자류철석, 유비철석, 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석, 테알라이트, 보우란제라이트, 황석석, 사면동석, 백철석이 있다. 다양한 광물들의 조직적 관계와 철황화광물의 산출에 근거하여, 황화광물들의 공생관계를 살펴보면 초기 자류철석 → 증기 괴상 연-아연 → 후기 연-아연-안티모니 광화작용의 양상을 보인다.

3. 유체 포유물 연구는 석영내의 유체포유물을 대상으로 실시하였으며, 유체포유물의 유형은 액상과 기상으로 이루어진 I형이 대부분이며, 기상이 풍부한 II형 유체포유물이 소량산출된다.

4. 당관포 연-아연-주석-은 광상에서 산출되는 유화

광물 동위원소 자료로부터 추정된 광화유체의 $\delta^{34}S_{\Sigma S}$ 값은 -5.0~1.1‰로서 이들 황은 화성기원이다.

5. 섬아연석-황석석 지질온도계와 초생 유체포유물의 균질화 온도로 추정한 광상 생성온도는 300°~330°C와 358°~207°C이며, 초생 유체포유물의 NaCl 상당 염농도는 11.2~7.3 wt.%의 범위를 보인다. 유체포유물의 특성에 의해 추정한 광화기간중 유체포획압력은 약 180 bar이다.

사 사

본 연구는 고려대학교 전략광물자원 연구센터(CMR)의 재정적 지원을 받았으며, 분석시료 제공과 자료를 제공하여 주신 대한광업진흥공사(KORES)의 김남원 과장님과 이유진 과장님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

대한광업진흥공사 (1999) The geological exploration for lead, zinc and tin deposits in Hunan province, China. 171p.

대한광업진흥공사 (2000) The comprehensive geological exploration for lead, zinc and tin mineral resources development in Hunan province, China. 180p.

중국유색금속공업총공사(1997) 호남 향화령 유색희유금속 광상지질. 76p.

Bodnar, R.J., Burnham, C.W. and Sterner, S.M. (1985) Synthetic fluid inclusions in natural quartz: III. Determination of phase equilibrium properties in the system H_2O-NaCl to 1000°C and 1500bars. Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 49, p. 1861-1873.

Borisenko, A.S. (1977) Study of the salt composition of solutions in gas-liquid inclusions in minerals by the cryometric method. Soviet Geol.Geophysics, v. 18, p. 11-19.

Crawford, M.L. (1981) Phase equilibria in aqueous fluid inclusions. Miner. Assoc. Canada Short Course Handb., v. 6, p.75-100.

Grinenko, V.A. (1962) Preparation of sulfur dioxide for isotopic analysis. Zeitschr. Neorgan. Khimi., v. 7, p. 2478-2483.

Haas, F.M. (1971) Determination of fluid inclusion compositions by sequential freezing. Economic Geology, v. 80, p. 1436-1439.

Hedenquist, J.W. and Henley, R.W. (1985) The importance of CO_2 on freezing point measurements of fluid inclusions: Evidence from active geothermal and implications for epithermal ore deposition. Economic geology, v. 80, p. 1370-1406.

Klemm, D.D. (1965) Synthesen und analysen in den Dreiecksdiagrammen FeAsS-CoAsS-NiAsS und FeS_2-CoS_2-NiS_2. Neues Jahrbuch fur Mineralogie Abhandlungen, v. 103, p. 205-255.

Kretschmar, U. and Scott, S.D. (1976) Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application. Canadian Mineralogist, v. 14, p. 364-386.

Nakamura, Y. and Shima, H. (1982) Fe and Zn partitioning between sphalerite and stannite(abstr.). Joint Meeting of Soc. Mining Geol. Japan, Assoc. Miner. Petr. Econ. Geol., and Miner. Soc. Japan, A-8(in Japanese).

Ohmoto, H. and Rye, R.O. (1979) Isotopes of sulfur and carbon. In Barnes, H.L. (ed.) Geochemistry of hydrothermal ore deposits. New York, Wiley Intersci., p. 687-737.

Shimizu, M. and Shikazono, N. (1985) Iron and zinc partitioning between coexisting stannite and sphalerite: a possible indicator of temperature and sulfur fugacity. Mineralium Deposita, v. 20, p. 314-320.

2001년 2월 7일 원고접수, 2001년 3월 30일 게재승인.