

盈德 金-銀鑛床에서 産出되는 金-銀鑛物과 鑛床의 生成環境

李鉉具* · 庾鳳哲* · 金尚中*

Au-Ag Minerals and Genetic Environments from the Yeongdeog Gold-Silver Deposits, Korea

Hyun Koo Lee*, Bong-Cheal Yoo* and Sang Jung Kim*

ABSTRACT: The Yeongdeog gold-silver deposits at Jipum, Gyeongsangbugdo, is of a middle Paleogene (45.52 ± 1.02 Ma) vein type, and is hosted in shale and sandstone of Cretaceous age. Based on mineral paragenesis, vein structure and mineral assemblages, the ore mineralization can be divided into two distinct depositional stages. The early stage is associated with base-metals such as pyrite, arsenopyrite (27.99~30.99 at%), hematite, rutile, pyrrhotite, sphalerite (10.53~18.42 FeS mole%), chalcopyrite and galena with wallrock alteration such as chlorite, sericite and pyrite. The late stage is characterized by the Au-Ag mineralization such as electrum, Ag-bearing tetrahedrite, freibergite, pyrargyrite, unidentified mineral, pyrite, sphalerite (1.08~5.57 FeS mole%), chalcopyrite and galena. Fluid inclusion data indicate that fluid temperatures and salinities range from 343 to 227°C and from 8.3 to 5.7 wt.% eq. NaCl in early stage, respectively. Temperatures and salinities of NaCl eq. wt.% range from 299 to 225°C and from 12.9 to 4.3 in late stage, respectively. They suggest that complex cooling histories were occurred by the mixing of the fluids. Sulfur fugacity ($-\log f_{s_2}$) deduced by mineral assemblages and composition ranges from 8.3 to 14.7 atm. in early stage, and from 8.8 to 14.5 atm. in late stage. It suggests that the mineralization was related to decrease of temperature in early stage and fluctuations of f_{s_2} , with decrease of temperature in late stage. Sulfur and oxygen isotope compositions are 4.48~5.60‰ and 9.25~10.8‰ in early stage, and late stage is 4.84~7.00‰ and 5.7‰, respectively. It indicated that hydrothermal fluids may be magmatic origin with some degree of mixing of another water during paragenetic time.

序 言

盈德鑛床은 慶尙累層群의 堆積岩內에 발달된 NE계의 裂隙을 充填한 含金-銀鑛脈鑛床으로 慶尙北道 盈德郡 知品面 新陽里, 東經 $129^{\circ}18' \sim 129^{\circ}19'$, 北緯 $36^{\circ}24' \sim 36^{\circ}25'$ 부근에 위치한다(Fig. 1). 本 鑛山은 1930년경 發見된 후 1933년부터 1942년까지 2.5톤의 金을 生産한 바 있으나 그 이후 休鑛상태에 있는 鑛山이다.

鑛床부근의 廣域地質에 대하여는 Hatae(1937), Chang *et al.*(1990)에 의한 研究가 있고, 構造地質에 대하여는 閔庚德 등(1982, 1992), 金仁洙(1992), 이병주와 송교영(1995), 채병근과 장태우(1994)에 의한 研究가 있다. 鑛床에 대하여는 大韓鑛業振興公社(韓國의 鑛床, 제 5호, 1982)가 있으나 金-銀鑛床의 鑛物學的 및 鑛床學的 研究는 아직 報告되어 있지 않다.

이 研究는 鑛床의 生成時期, 鑛床의 産出狀態, 鑛石과 鑛物의 共生關係, 鑛物化學, 流體包有物, 母岩變質등을 체계적으로 밝혀 鑛床의 生成環境을 考察한 것이다.

地質概要

鑛床의 周邊地質은 Hatae(1937)와 Chang *et al.*(1990)에 의해 보고되어 있어, 여기서는 그 概要만을 說明하고자 한다.

研究地域은 白堊紀 以前의 花崗岩이 鑛山의 북서쪽에 넓게 分布되어 있으며 이를 백악기의 河陽層群이 不整合으로 피복하고 있다. 이들은 다시 楡川層群의 火山岩類에 의해 不整合으로 皮복되어 있으며 상기의 岩石들은 후기의 石英斑岩, 玢岩, 煌斑岩 및 石英脈에 의하여 貫入되어 있다(Fig. 1). 백악기 이전의 花崗岩은 角閃石-黑雲母 花崗岩으로서 K-長石은 주로 분홍색을 띠고 있으며 有色鑛物들은 미세한 罅리를 보여준다.

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

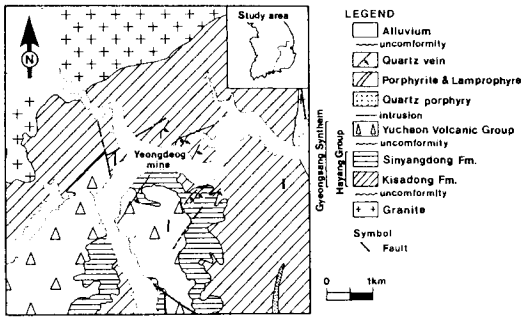


Fig. 1. Geological map of the Yeongdeog gold-silver mine area.

河陽層群은 기사동층, 신양동층이다. 기사동층은 본 鑛床의 모양을 이루고 있으며 숨쳐어트역 雜色礫岩, 礫質砂岩, 砂岩, 紅色실트암으로서 구성되어 있다. 礫은 대부분 적색 및 녹회색 처어트이고 부분적으로 珩岩, 火山岩, 砂岩 및 셰일로 구성되어 있다. 層의 走向과 傾斜는 N20°~70°E, 20-60°SE이며 斷層에 의하여 NW 方向을 보이는 곳도 있다. 신양동층은 鑛山의 남부에 분포하며 회회색-흑색 셰일, 砂岩 및 礫岩으로 구성된다. 層厚는 약 160 m 정도이다. 礫은 珩岩, 花崗岩, 砂岩 및 火山岩으로 구성되어 있다. 層의 走向과 傾斜는 N70°~80°E, 10~30°SE이다.

楡川層群의 火山岩類는 상기의 堆積岩類와 不整合 관계이며 鑛山의 남서쪽에 분포하며 주로 安山斑岩과 安山岩質 凝灰岩으로 구성되어 있다. 脈岩으로는 石英斑岩, 扮岩, 煌斑岩 및 石英脈이 있으며 이들은 鑛床부근의 여러 지역에서 貫入 분포된다.

鑛床概要

烈德 金-銀鑛床은 N30°~40°E, 60~70°SE의 走向과 傾斜를 갖는 裂隙充填型 脈狀鑛床으로서 鑛床의 母岩은 河陽層群의 셰일과 사암이다. 鑛床은 여러개의 峯도를 개설 탐광굴진하였으나 현재 入坑이 가능한 坑道는 통동峯 뿐이다. 이 통동峯은 N20°W 方向으로 향도를 개설, 약 95 m 지점에서 N30°E, 60°SE, 192 m 지점 N40°E, 60°SE 方向의 脈을 착매한 후 沿脈掘進되어 있으나 延長은

확인이 불가능하다.

脈은 팽축이 심하여 수 cm에서 30 cm 정도이나 곳에 따라 2 m에 달하는 렌즈상의 富鐵帶를 형성기도 한다. 富鐵帶에서는 角礫狀 岩脈이 발달되어 있으며 鑛石들은 各력 사이를 充填하여 망상세맥의 鑛脈狀 鑛體를 형성한다. 이 脈은 母岩에서 脈의 중심부를 향하여 自形의 石英이 單結晶成長을 보이고 있으며, 早期에는 黃鐵石, 不透明 閃亞鉛石이 정출하였고 末期에는 自形의 黃鐵石, 透明 閃亞鉛石과 方鉛石이 정동내에 自形으로 산출된다. 또한 이차 동산화물인 輝銅石이 관찰된다. 脈石鑛物로는 石英, 方解石등이 있으며 母岩은 硅酸鹽化作用, 黃鐵石化作用, 綠泥石化作用 및 絹雲母化作用을 받았다. 母岩變質 產物인 絹雲母에 대한 年代測定 결과 Table 1과 같이 45.42±1.02 Ma로서 이 鑛床의 鑛化作用은 신생대 제 3기에 生成된 것으로 보인다. 이는 이현구 등(1992), 진명식 등(1989)과 Shibata *et al.*(1979)에 의해 보고된 남정면일대 流紋岩의 生成年代와 거의 비슷한 값을 갖는다.

鑛石과 鑛物共生關係

烈德 金-銀鑛床에서 產出되는 鑛石鑛物은 黃鐵石, 閃亞鉛石, 方鉛石으로 구성되며, 少量의 金紅石, 赤鐵石, 硫砒鐵石, 磁硫鐵石, 黃銅石, 에렉트럼, 含銀四面銅石-프라이버 자이트系 鑛物, 濃紅銀石, 未確認鑛物과 輝銅石 등이 產出된다. 鑛床의 野外調査와 鑛石의 產出狀態, 鑛物의 共生關係 및 組織을 기초로 한 鑛物의 晶出順序는 早期와 末期로 나뉘어진다(Fig. 2).

早 期

이 時期는 母岩變質과 黃鐵石, 閃亞鉛石, 硫砒鐵石, 黃銅石, 少量의 磁硫鐵石, 金紅石, 赤鐵石 및 方鉛石이 정출된 時期이다. 赤鐵石은 미량으로 產出되며 현미경하에서 黃鐵石과 공존한다. 金紅石은 또한 石英내에서 單獨으로 미량 產出된다. 磁硫鐵石은 黃鐵石 및 硫砒鐵石내에 포획되어 產出된다. 硫砒鐵石은 대부분 黃鐵石 및 閃亞鉛石과 共生하며 石英내에 단독으로 產出되는 것과 黃鐵石의 주

Table 1. K-Ar data of specimens from Yeongdeog mine district.

Mine & Locality	Description	K (wt.%)	Rad. ⁴⁰ Ar (10 ⁻⁸ ccSTP/g)	Age (Ma)	Non-rad (%)	Reference
Yeongdeog	Sericite	6.45±0.13	1152.10±12.34	45.42±1.02	5.2	This study
Pohang basin	Rhyolite	4.84±0.10	933.64± 9.70	49.03±1.09	3.5	Lee <i>et al.</i> (1992)
Kokgangdong	Rhyolitic tuff			44.7 ± 1.1		Shibata <i>et al.</i> (1979)
Saamdong, Namjeong	Tuff			46.87±0.71		Jin <i>et al.</i> (1989)

Stage	Early	Late
Sericite	—	
Chlorite	—	
Hematite	—	
Rutile	—	
Pyrrhotite	—	
Arsenopyrite	—	
Pyrite	—	—
Sphalerite	—	—
Chalcopyrite	—	—
Galena	—	—
Electrum		—
Ag-tetrahedrite-freibergite		—
Pyrrargyrite		—
Unidentified mineral		—
Chalcocite		—
Quartz	—	—
Calcite		—

Fig. 2. Paragenetic sequence of minerals from the Yeongdeog gold-silver deposits.

Table 2. Chemical composition of arsenopyrite from the Yeongdeog gold-silver deposits.

Weight %					Atomic %		
As	Fe	Co	Ni	S	Total	As	Fe
41.34	35.40	0.10	0.04	23.29	100.17	28.82	33.11
40.48	35.68	0.05	0.05	24.03	100.29	27.99	33.10
42.00	34.80	—	—	21.60	99.01	30.18	33.55
42.72	34.54	0.69	0.1	22.31	100.18	30.04	32.59
42.96	35.03	0.04	0.1	22.18	100.31	30.26	33.10
40.55	35.03	0.08	0.03	23.43	99.12	28.47	32.99
44.37	33.07	0.13	—	23.26	100.79	30.99	30.98
43.47	32.88	0.08	—	23.04	99.41	30.73	31.18

변부를 따라 晶出한 것(Fig. 3A), 黃鐵石과 不透明 閃亞鉛石과 함께 産出된 것(Fig. 3B) 등이 있다. EPMA에 의한 2개 試料 8개 입자 18점에 대한 定量分析 결과는 Table 2와 같다. 硫砷鐵石의 As at.% 함량은 27.99~30.99이다. 이 硫砷鐵石은 stoichiometric 硫砷鐵石보다 As, Fe의 含量은 낮고 S의 含量은 약간 높다.

黃鐵石은 閃亞鉛石과 함께 産出되거나 石英脈내에 단독으로 産出된다. 현미경하에서는 硫砷鐵石에 의해 捕獲된 것, 不透明 閃亞鉛石과 硫砷鐵石과 함께 産出되는 것(Fig. 3

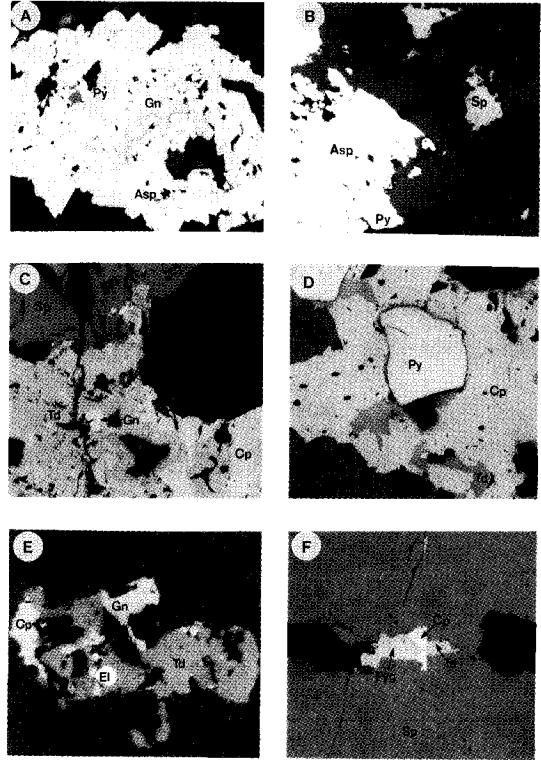


Fig. 3. Photomicrographs of ore minerals from the Yeongdeog gold-silver deposits. A; Pyrite and galena included in arsenopyrite. B; Arsenopyrite and pyrite coexisting with sphalerite. C; Tetrahedrite, galena and chalcopyrite coexisting with sphalerite. D; Pyrite and chalcopyrite coexisting with tetrahedrite. E; Electrum, tetrahedrite, chalcopyrite and galena included in sphalerite. F; Pyrrargyrite and tetrahedrite coexisting with chalcopyrite. Abbreviation: Py; Pyrite, Asp; Arsenopyrite, Sp; Sphalerite, Cp; Chalcopyrite, Gn; Galena, Td; Ag-bearing tetrahedrite-freibergite, El; Electrum, Pyg; Pyrrargyrite.

B), 또는 石英에 단독으로 産出되는 것 등이 있다.

閃亞鉛石은 石英내에 단독으로 産出되는 것과 黃銅石과 溶離組織을 갖는 것, 또는 黃鐵石과 硫砷鐵石과 함께 産出되는 것(Fig. 3B) 등이 있다. EPMA에 의한 2개 試料 14개 입자 22점에 대한 定量分析 결과는 Table 3과 같다. 鑛化作用의 早期에 정출한 閃亞鉛石의 FeS mole%는 10.53~18.42까지 含有되어 있다. 이를 ZnS-FeS-MnS계 三角圖에 도시하면 Fig. 4와 같이 MnS 含量이 2 mole% 미만이고 ZnS와 FeS mole%는 부의 相關關係를 갖는다.

黃銅石은 閃亞鉛石내에 bleb 상태로 産出되는 것과 단독으로 産出되는 것이 있다. 方鉛石은 소량 産出되며 현미경하에서 黃鐵石 및 硫砷鐵石내에 産出된다(Fig. 3A).

Table 3. Chemical composition of sphalerite from the Yeongdeog gold-silver deposits.

Sample No.	Weight %							Total	FeS mole%
	Zn	Fe	Mn	Cu	Cd	Sn	S		
Y.D.94127-3	55.70	9.34	0.47	0.11	0.41	0.21	33.16	99.08	16.16
	54.64	8.71	0.22	0.99	0.52		33.18	98.26	15.35
	59.13	6.00	0.19	0.01	0.54		32.91	98.58	10.53
	58.45	6.69	0.29	0.04	0.42	0.04	32.82	98.75	11.70
	53.77	10.52	0.35	0.23	0.23		33.32	98.42	18.42
	57.56	6.92	0.27	0.08	0.33	0.03	32.90	98.09	12.22
	55.99	9.04	0.37	0.19	0.43		32.87	98.89	15.69
	56.96	6.89	0.26	0.97	0.17		32.92	98.17	12.14
	56.54	8.38	0.29	0.02	0.19	0.14	33.18	98.74	14.66
	55.13	10.09	0.41	0.09	0.35		33.60	99.67	17.44
	58.62	7.25	0.33	0.03	0.38		33.51	100.12	12.53
	56.30	8.39	0.37	0.11	0.39	0.05	33.48	99.09	14.68
	54.24	10.29	0.34	0.40	0.40		33.42	98.69	18.00
	54.62	10.07	0.53	0.04	0.34	0.02	33.29	98.91	17.52
Y.D.94127-1	65.68	1.46	0.20	0.04	0.32		33.26	100.96	2.52
	64.11	2.15	0.08		0.56	0.01	32.81	99.72	3.75
	65.27	0.61			0.45	0.03	32.64	99.00	1.08
	62.54	2.76	0.27		0.38	0.17	33.39	99.51	4.87
	64.49	1.56	0.09	0.02	0.51	0.07	33.08	99.82	2.73
	62.69	2.69	0.17	0.12		0.22	33.87	99.76	4.75
	62.03	3.15	0.31	0.09		0.15	33.62	99.35	5.57
	63.88	1.07	0.03	0.07		0.08	33.44	98.57	1.92
	64.94	0.68	0.07	0.03			33.02	98.74	1.21

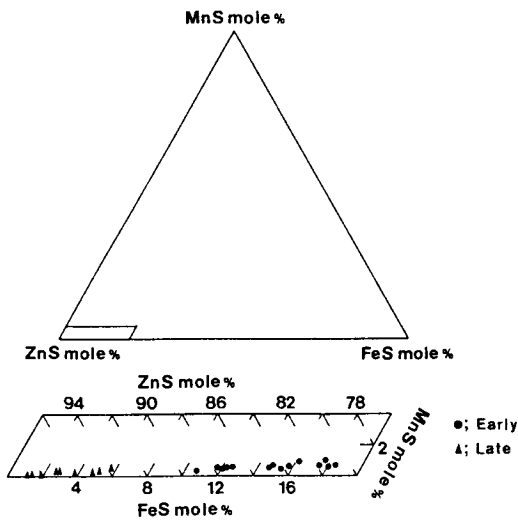


Fig. 4. Enlarged parallelogram in the triangle diagram of the system FeS-MnS-ZnS(ZnS+CuS+CdS) showing chemical composition of sphalerite from the Yeongdeog gold-silver deposits.

末 期

이 時期는 金-銀鑛化時期로 주요 鑛石鑛物로는 自形의

黃鐵石, 透明 閃亞鉛石, 方鉛石, 含銀四面銅石-프라이버자이트系 鑛物, 濃紅銀石, 에렉트럼, 未確認鑛物 등이 產出된다. 黃鐵石은 自形의 石英이 정출한 후 정동내에 閃亞鉛石 또는 方鉛石과 함께 自形의 형태로 產出된다. 현미경하에서는 閃亞鉛石, 黃銅石, 方鉛石, 含銀四面銅石-프라이버자이트系 鑛物과 함께 晶出한 것(Fig. 3D)과 方鉛石의 주변 부나 間隙을 따라 充填한 것 등이 관찰된다.

閃亞鉛石은 自形의 石英이 정출 후 정동내에 黃鐵石, 方鉛石과 함께 自形으로 產出되며 산출빈도가 가장 높다. 현미경하에서 濃紅銀石과 黃銅石에 의해 充填 交代된 것과 方鉛石에 의해 充填 交代된 것, 方鉛石, 黃銅石, 에렉트럼 및 含銀四面銅石-프라이버자이트系 鑛物과 함께 產出된 것(Fig. 3C, E) 등이 있다. EPMA에 의한 2개 시료 9개 粒子 18점에 대한 定量分析 결과는 Table 3과 같이 閃亞鉛石의 FeS mole%는 1.08~5.57이다. 이를 ZnS-FeS-MnS계 三角圖에 도시하면 Fig. 4와 같이 早期에 정출한 閃亞鉛石과 비교할 때 MnS mole%의 含量은 큰 變化를 보여주지 않지만 FeS mole%는 급격히 減少함을 알 수 있다.

黃銅石은 方鉛石을 交代 또는 充填하거나 閃亞鉛石의 間隙을 充填한 것, 濃紅銀石과 동시 晶出한 것(Fig. 3G) 등이 있다. 方鉛石은 국부적으로 부화된 곳도 있으며 등 方形態로서 產出된다. 이 時期의 方鉛石은 黃銅石내에 포

Table 4. Chemical composition of electrum from the Yeongdeog gold-silver deposits.

Sample No.	Weight %			Atomic %	
	Au	Ag	Total	Au	Ag
Y.D.94127-1	62.07	38.69	100.76	46.77	53.23
	56.43	42.64	99.07	42.02	57.98
	62.31	36.73	99.04	48.16	51.84
	59.40	41.26	100.66	44.09	55.91
	58.31	41.96	100.27	43.22	56.78
	48.79	50.78	99.57	34.48	65.52
	54.67	45.70	100.37	39.58	60.42
	45.51	55.19	100.70	31.11	68.89
	42.88	55.82	98.70	29.61	70.39
	64.79	33.91	98.70	51.13	48.87
	66.69	31.67	98.35	53.56	46.44

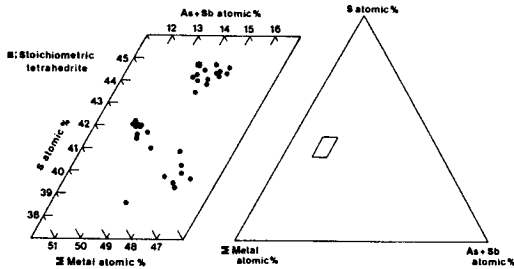


Fig. 5. Enlarged parallelogram in the triangle diagram of the system Metal-As+Sb-S showing chemical composition of tetrahedrite-series from the Yeongdeog gold-silver deposits.

획되어 産出된 것, 閃亞鉛石을 充填 또는 交代한 것, 黃銅石에 의해 充填 또는 交代된 것, 含銀四面銅石-프라이버자이트系 鑛物, 黃銅石, 에렉트럼과 함께 晶出한 것 등이 있다.

에렉트럼은 주로 含銀四面銅石-프라이버자이트系 鑛物, 方鉛石, 黃銅石, 閃亞鉛石 등과 밀접한 共生關係를 갖고 산출된다. EPMA 분석에 의한 定量分析 결과는 Table 4와 같이 Ag at.%는 46.44~70.39의 조성을 갖는다.

含銀四面銅石-프라이버자이트系 鑛物은 주로 濃紅銀石, 未確認鑛物, 黃銅石, 閃亞鉛石, 方鉛石과 밀접한 共生關係를 갖고 산출된다. EPMA 분석에 의한 定量分析 결과 Table 5와 같이 화학조성상 含銀四面銅石-테난타이트-프라이버자이트의 鑛物이 산출된다. 이를 total Metal-(As+Sb)-S계 三角圖에 도시하면 Fig.5와 같이 stoichiometric 테트라헤드라이트에 비해 S는 좀 낮은 값을 갖고, total metal은 부화되어 있음이 알 수 있다. Ag의 含量은 Cu를 置換하여 14.9~27.8까지 含有됨을 알 수 있다.

濃紅銀石은 주로 含銀四面銅石-프라이버자이트系 鑛物,

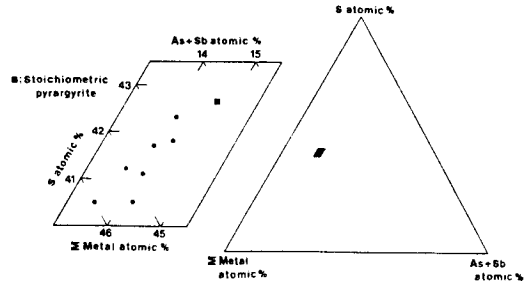


Fig. 6. Enlarged parallelogram in the triangle diagram of the system Metal-As+Sb-S showing chemical composition of pyrrargyrite from the Yeongdeog gold-silver deposits.

未確認鑛物, 黃銅石, 閃亞鉛石 등과 밀접한 共生關係를 갖고 産出된다. EPMA에 의한 定量分析 결과 Ag에 대해 Cu(0.15~0.57 wt.%), Fe(0.1~0.98 wt.%), Zn(0.0~1.83 wt.%) 등이 置換되어 있으며 Sb는 As에 의하여 0.0~1.07 wt.% 정도 置換되어 있다(Table 6). 이를 total Metal-(As+Sb)-S계 三角圖에 도시하여 stoichiometric 濃紅銀石과 비교하면 As+Sb은 낮으나 S와 total metal는 약간 높게 나타난다(Fig. 6).

未確認鑛物은 현미경하에서 푸른색을 띠고 주로 含銀四面銅石-프라이버자이트系 鑛物, 濃紅銀石, 閃亞鉛石, 黃銅石 등과 함께 産出된다. 化學分析資料는 Table 7과 같이 Ag(67.76~74.05 wt.%), Fe(0.13~0.62 wt.%), Cu(2.32~7.62 wt.%), Zn(0.00~3.54 wt.%), As(0.37~6.54 wt.%), Sb(0.00~11.99 wt.%)의 含量을 갖는다.

流體包有物

流體包有物의 연구는 鑛脈을 구성하고 있는 脈石鑛物들 중 鑛石鑛物과 공존하는 早期의 石英과 末期의 石英 및 閃亞鉛石을 대상으로 수행하였다. 이 鑛床에서 産出되는 流體包有物의 形態는 negative form, oval, tabular, irregular, rectangular, tabular 및 round 形態로 존재하며 包有物의 크기는 최저 수 μm에서 최고 80 μm 정도이다. 流體包有物은 실온에서 觀察되는 相의 종류, 충전도, 가열 시험시 均一化되는 상태의 變化에 따라 A형과 B형으로 분류하였다(Fig. 7).

A型包有物은 기상과 액상으로 구성되며 충전도가 50% 미만인 包有物로서 가열시험시 액상으로 均一化된다. 이 유형의 包有物은 早期와 末期 전반에 걸쳐 산출된다(Fig. 7 A, B, C).

B型包有物은 기상 또는 액상의 單相으로 구성되어 있는 包有物로서 末期의 閃亞鉛石내에 소량 산출된다(Fig. 7D).

Table 5. Microprobe analyses of tetrahedrite-series from the Yeongdeog gold-silver deposits.

Ag	Cu	Fe	Zn	Weight%			Total	Structural formulae (S=13)
				As	Sb	S		
20.98	25.63	1.52	7.05	2.45	20.72	21.73	100.06	((Ag _{3.73} Cu _{7.74}) _{11.47} (Fe _{0.52} Zn _{2.07}) _{2.59}) _{14.06} (As _{0.63} Sb _{3.26}) _{3.89} S ₁₃
19.35	25.91	1.87	7.26	1.38	22.96	21.80	100.53	((Ag _{3.43} Cu _{7.80}) _{11.23} (Fe _{0.64} Zn _{2.12}) _{2.76}) _{13.99} (As _{0.36} Sb _{3.61}) _{3.96} S ₁₃
20.07	25.49	2.01	7.35	1.03	23.43	21.93	101.30	((Ag _{3.54} Cu _{7.62}) _{11.02} (Fe _{0.68} Zn _{2.14}) _{2.82}) _{13.84} (As _{0.26} Sb _{3.66}) _{3.92} S ₁₃
21.10	26.00	5.86	2.67	3.08	20.43	22.34	101.48	((Ag _{3.65} Cu _{7.63}) _{11.28} (Fe _{1.96} Zn _{0.76}) _{2.72}) _{14.00} (As _{0.77} Sb _{3.13}) _{3.90} S ₁₃
19.72	24.16	0.61	6.87	4.36	22.48	23.44	101.65	((Ag _{3.25} Cu _{6.76}) _{10.01} (Fe _{0.19} Zn _{1.87}) _{2.06}) _{12.07} (As _{1.03} Sb _{3.28}) _{4.31} S ₁₃
20.06	22.92	2.77	3.87	1.05	26.63	22.67	99.97	((Ag _{3.42} Cu _{6.63}) _{10.05} (Fe _{0.91} Zn _{1.09}) _{2.00}) _{12.05} (As _{0.26} Sb _{4.02}) _{4.28} S ₁₃
20.46	22.70	1.70	4.35	1.19	26.05	22.39	98.83	((Ag _{3.53} Cu _{6.65}) _{10.18} (Fe _{0.57} Zn _{1.24}) _{1.81}) _{11.99} (As _{0.30} Sb _{3.98}) _{4.28} S ₁₃
18.69	24.34	1.28	5.87	0.63	27.48	23.40	101.79	((Ag _{3.09} Cu _{6.82}) _{09.91} (Fe _{0.41} Zn _{1.60}) _{2.01}) _{11.92} (As _{0.15} Sb _{4.02}) _{4.17} S ₁₃
18.98	24.52	1.63	5.36	0.16	26.87	22.61	100.41	((Ag _{3.24} Cu _{7.11}) _{10.35} (Fe _{0.54} Zn _{1.51}) _{2.05}) _{12.40} (As _{0.04} Sb _{4.07}) _{4.11} S ₁₃
17.96	26.20	3.46	5.07	11.98	9.41	24.34	98.42	((Ag _{2.85} Cu _{7.06}) _{09.91} (Fe _{1.06} Zn _{1.33}) _{2.39}) _{12.30} (As _{2.74} Sb _{1.32}) _{4.06} S ₁₃
14.97	28.04	5.60	2.89	13.63	7.64	24.94	98.74	((Ag _{2.32} Cu _{7.37}) _{09.69} (Fe _{1.68} Zn _{0.74}) _{2.52}) _{12.21} (As _{3.04} Sb _{1.05}) _{4.09} S ₁₃
21.41	22.04	1.83	6.86	1.80	25.66	19.05	98.65	((Ag _{4.34} Cu _{7.59}) _{11.93} (Fe _{0.72} Zn _{2.30}) _{3.02}) _{14.95} (As _{0.53} Sb _{4.61}) _{5.14} S ₁₃
27.80	20.15	1.62	6.74	1.38	23.14	18.44	99.27	((Ag _{5.83} Cu _{7.17}) _{13.00} (Fe _{0.66} Zn _{2.33}) _{2.99}) _{15.99} (As _{0.42} Sb _{4.30}) _{4.72} S ₁₃
21.63	21.08	1.34	7.83	0.33	27.21	20.02	99.44	((Ag _{4.17} Cu _{6.91}) _{11.08} (Fe _{0.50} Zn _{2.49}) _{2.99}) _{14.07} (As _{0.09} Sb _{4.65}) _{4.74} S ₁₃
20.98	25.63	1.52	7.05	2.45	20.72	21.73	100.06	((Ag _{3.73} Cu _{7.74}) _{11.47} (Fe _{0.52} Zn _{2.07}) _{2.59}) _{14.06} (As _{0.63} Sb _{3.26}) _{3.89} S ₁₃
21.55	24.16	1.93	7.53	1.50	22.10	21.79	100.56	((Ag _{3.82} Cu _{7.27}) _{11.09} (Fe _{0.66} Zn _{2.20}) _{2.86}) _{13.95} (As _{0.38} Sb _{3.47}) _{3.85} S ₁₃

Table 6. Microprobe analyses of pyrrargyrite from the Yeongdeog gold-silver deposits.

Ag	Cu	Fe	Zn	Weight%			Total	Structural formulae (Total atoms=7)
				As	Sb	S		
59.54	0.45	0.98	0.24	0.48	21.39	16.62	98.25	(Ag _{3.02} Cu _{0.04} Fe _{0.10} Zn _{0.02}) _{3.18} (As _{0.04} Sb _{0.96}) _{1.00} S _{2.83}
58.95	0.57	0.46	0.63	—	21.94	16.68	98.33	(Ag _{2.99} Cu _{0.05} Fe _{0.05} Zn _{0.05}) _{3.14} (As _{0.06} Sb _{0.99}) _{0.99} S _{2.88}
59.80	0.29	0.13	—	0.11	21.39	16.95	98.44	(Ag _{3.06} Cu _{0.03} Fe _{0.01} Zn _{0.00}) _{3.10} (As _{0.01} Sb _{0.97}) _{0.98} S _{2.92}
58.94	0.3	0.15	0.15	0.80	21.36	17.18	98.72	(Ag _{2.99} Cu _{0.03} Fe _{0.01} Zn _{0.01}) _{3.04} (As _{0.06} Sb _{0.96}) _{1.02} S _{2.93}
59.00	0.15	0.29	—	—	22.03	16.95	98.27	(Ag _{3.03} Cu _{0.01} Fe _{0.03} Zn _{0.00}) _{3.07} (As _{0.06} Sb _{1.00}) _{1.00} S _{2.93}
59.08	0.28	0.17	—	—	21.92	17.27	98.72	(Ag _{3.01} Cu _{0.02} Fe _{0.02} Zn _{0.00}) _{3.05} (As _{0.06} Sb _{0.99}) _{0.99} S _{2.96}
59.70	0.51	0.10	1.65	—	21.85	17.27	100.98	(Ag _{2.96} Cu _{0.04} Fe _{0.01} Zn _{0.14}) _{3.15} (As _{0.06} Sb _{0.96}) _{0.96} S _{2.89}
59.96	0.23	0.25	1.83	1.07	19.43	16.71	99.96	(Ag _{3.02} Cu _{0.02} Fe _{0.02} Zn _{0.15}) _{3.21} (As _{0.08} Sb _{0.87}) _{0.95} S _{2.83}

Table 7. Microprobe analyses of unidentified mineral from the Yeongdeog gold-silver deposits.

Ag	Cu	Fe	Zn	Weight%				Total	Atomic%						
				As	Sb	S	Ag		Cu	Fe	Zn	As	Sb	S	
71.54	6.51	0.13	1.31	4.87	2.28	14.72	101.23	49.83	7.70	0.17	1.51	4.88	1.41	34.50	
68.64	6.94	0.22	0.14	6.54	0.75	15.21	98.31	48.23	8.28	0.30	0.16	6.62	0.47	35.95	
67.76	7.62	0.31	—	6.34	0.72	15.00	98.57	47.88	9.14	0.42	0.00	6.45	0.45	35.66	
69.66	2.40	0.25	3.54	0.98	11.50	11.19	99.52	53.87	3.15	0.37	4.52	1.09	7.88	29.12	
69.38	2.32	0.17	3.25	0.69	11.99	11.88	99.69	53.13	3.02	0.25	4.11	0.76	8.13	30.61	
70.50	2.33	0.27	2.62	0.92	11.47	11.08	99.19	55.05	3.09	0.41	3.38	1.03	7.94	29.11	
71.51	4.85	0.57	2.06	0.96	8.31	11.54	99.80	54.25	6.25	0.84	2.58	1.05	5.59	29.46	
73.02	5.46	0.52	1.98	0.49	8.45	11.85	101.77	54.24	6.88	0.75	2.43	0.52	5.56	29.62	
73.57	5.28	0.41	1.87	0.74	8.49	11.52	101.88	55.00	6.70	0.59	2.31	0.80	5.62	28.98	
71.61	5.39	0.54	2.01	0.37	8.50	11.29	99.70	54.59	6.98	0.80	2.53	0.41	5.74	28.96	
70.66	5.30	0.48	1.36	0.81	8.16	11.62	98.40	54.22	6.90	0.71	1.72	0.89	5.55	30.00	
70.78	4.99	0.61	2.10	0.45	8.29	11.48	98.69	54.23	6.49	0.90	2.65	0.50	5.63	29.06	
70.07	4.99	0.62	1.96	0.89	8.21	11.46	98.21	53.86	6.51	0.92	2.49	0.99	5.59	29.64	
71.34	5.77	0.60	1.74	0.81	8.39	11.33	99.96	54.09	7.43	0.88	2.18	0.88	5.64	28.90	
71.17	6.74	0.55	1.81	2.91	3.43	12.50	99.11	52.35	8.42	0.78	2.20	3.08	2.24	30.94	
73.89	7.21	0.51	2.12	4.66	—	12.04	99.89	53.61	8.88	0.71	2.54	4.87	0.00	29.39	
74.05	7.54	0.62	2.05	5.04	0.20	11.98	101.47	53.21	9.20	0.86	2.43	5.21	0.13	28.96	
72.61	7.31	0.45	1.96	3.74	0.88	12.07	99.03	53.43	9.13	0.64	2.38	3.96	0.57	29.88	

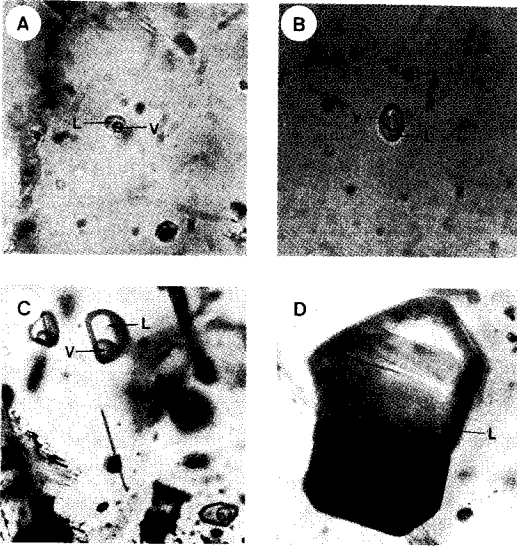


Fig. 7. Microphotographs of fluid inclusions in quartz and sphalerite from the Yeongdeog gold-silver deposits. A; Type A inclusion in quartz from early stage. B; Type A inclusion in quartz from late stage. C; Type A inclusion in sphalerite from late stage. D; Type B inclusion in sphalerite from late stage.

均一化 溫度와 鹽濃度

가열실험은 조기와 말기의 石英 및 閃亞鉛石을 대상으로 하였으며 연구대상 鑛物내 流體包有物의 均一化溫度를 살펴보면 다음과 같다(Fig. 8). 早期의 石英내에 산출되는 A型 包有物의 均一化溫度는 227~343°C, 末期의 石英내에 산출되는 A型 包有物의 均一化溫度는 250~277°C이고 閃亞鉛石내 A型 包有物의 均一化溫度는 225~299°C이다.

鑛化時期별 包有物의 NaCl 相當鹽濃度を 살펴보면 다음과 같이(Fig. 9), 早期에 산출되는 石英내에 산출되는 A型 包有物의 鹽濃도는 5.7~8.3 wt.%, 末期에 산출되는 石英내에 산출되는 A型 包有物은 5.8~8.7 wt.%, 閃亞鉛石내의 A型 包有物은 4.3~12.9 wt.%를 갖는다.

각 時期별 流體包有物의 鹽濃도와 均一化溫도의 關係를 도시하면 Fig. 10과 같다. 이 그림에서 均一化溫도와 鹽濃도간의 傾向성을 찾기는 어렵다. 다만 閃亞鉛石의 鹽濃도가 石英내의 鹽濃도보다 높다는 것을 알 수 있을 뿐이다.

安定同位元素

安定同位元素分析은 早期의 絹雲母, 石英, 黃鐵石, 閃亞鉛石과 末期의 石英, 黃鐵石, 閃亞鉛石, 方鉛石을 대상으로

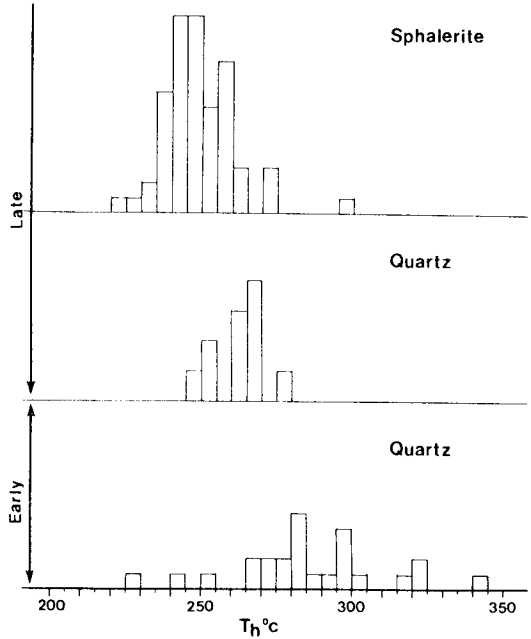


Fig. 8. Histogram of homogenization temperature of fluid inclusions from the Yeongdeog gold-silver deposits.

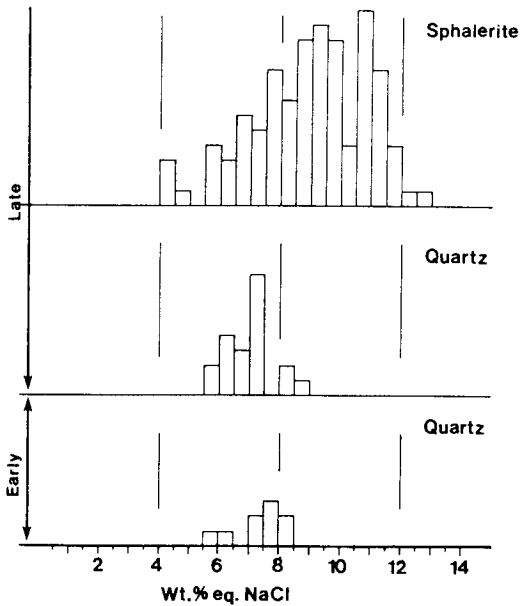


Fig. 9. Histogram of salinities of fluid inclusion from the Yeongdeog gold-silver deposits.

基礎科學支援研究所에서 分析하였다. $\delta^{34}\text{S}$ 값은 CDT, $\delta^{18}\text{O}$ 와 δD 는 SMOW 등의 標準試料을 사용하여 分析하였으며 이들의 오차 範圍는 $\delta^{34}\text{S}$; $\pm 0.2\%$, $\delta^{18}\text{O}$; $\pm 0.2\%$,

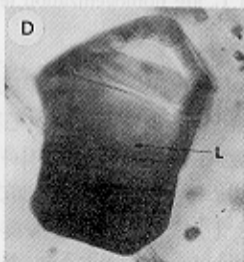
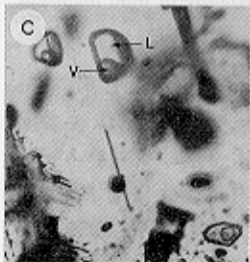
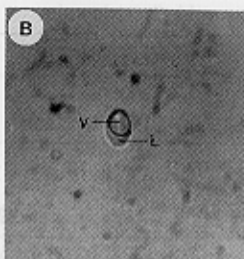
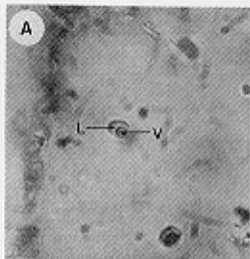


Table 8. Sulfur isotope data of sulfide minerals from Yeongdeog gold-silver deposits.

Sample No.	Stage	Mineral	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}(\text{‰})$	$T_{\text{Sp-Gn}}$	T_h
Y.D.941209-2	Early	Pyrite	5.7	4.48		227~343°C (300°C)
		Sphalerite	5.9	5.60		
Y.D.941209-10	Late	Pyrite	6.3	4.84	328 ± 21°C	225~299°C (250°C)
		Sphalerite	6.7	6.34		
		Galena	4.7	7.00		

1) $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}(\text{‰})$ are calculated following the equation given from Ohmoto and Rye (1979). 2) Isotopic temperature is calculated from fraction factors given Ohmoto and Rye (1979). 3) T_h are homogenization temperature of fluid inclusion.

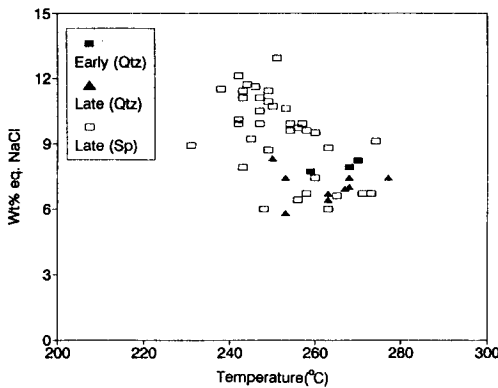


Fig. 10. Homogenizing temperature vs. salinity for fluid inclusions from the Yeongdeog gold-silver deposits.

δD ; $\pm 1\%$ 이다.

硫 黃

早期的 黃鐵石, 閃亞鉛石과 末期的 黃鐵石, 閃亞鉛石, 方鉛石의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 Table 8과 같이 早期的 黃鐵石과 閃亞鉛石은 5.7%, 5.9%이다. 末期的 黃鐵石, 閃亞鉛石 및 方鉛石의 $\delta^{34}\text{S}$ 값은 각각 6.3%, 6.7%과 4.7%이다. 이 鑛床에서는 母岩變質 產物로 絹雲母가 산출되며 鑛石鑛物의 종류로 보아 鑛化流體내 硫黃은 주로 H_2S 상태로 存在 하였을 가능성이 높다. 流體包有物의 均一化溫度 자료에 의거하여 早期와 末期的 黃化鑛物과 平衡상태에 있는 H_2S 의 값을 계산(Ohmoto and Rye, 1979)하면 早期的 $\delta^{34}\text{H}_2\text{S}$ 값은 4.48~5.60%이며 末期的 $\delta^{34}\text{H}_2\text{S}$ 값은 4.84~7.00%이다. 末期에서 산출되는 閃亞鉛石-方鉛石쌍에 대한 分別係數(Ohmoto and Rye, 1979)를 이용하여 구한 同位元素 平衡온도는 328°C로서 流體包有物의 均一化溫度에 비하여 약간 높다.

水素 및 酸素

이 鑛床에서 산출되는 早期的 母岩變質 產物인 絹雲母와 石英 및 末期에 산출되는 石英을 대상으로 水素 및 酸素 安定同位元素 분석을 실시하였다. 絹雲母에 대한 $\delta^{18}\text{O}$ 는 F_2 가스와 絹雲母鑛物을 530°C에서 하룻밤 동안 反應시킨 후 발생한 O_2 를 CO_2 로 變換시켜 분석하였다. δD 는 絹雲母를 $\text{LPG} + \text{O}_2$ 불꽃으로 추출한 H_2O 에 대해 Zn과 500°C에서 反應시켜 水素가스로 還元시킨 후 분석하였다(Table 9). 早期的 絹雲母와 石英의 $\delta^{18}\text{O}$ 와 δD 는 각각 11.5%, -66% 및 16.1%이고 末期的 石英에 대해 $\delta^{18}\text{O}$ 는 13.3%의 값을 갖는다. 鑛化作用시의 鑛化流體에서 絹雲母-물, 石英-물 사이에 酸素 및 水素同位元素가 平衡을 유지하며 交換이 있었다고 볼 때 Suzuoki and Epstein(1976), Friedman and O'Neil(1977), Matsushisa *et al.*(1979)가 제시한 각각의 分별식과 流體包有物의 均一化溫度 자료를 이용하여 계산된 絹雲母의 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 와 δD 는 9.25%, -28.2%이며, 石英의 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 는 10.8%(早期), 5.7%(末期)의 값을 갖는다.

考 察

盈德金-銀鑛床은 慶尚系 堆積岩類내에 발달된 裂隙을 充填한 熱水性金-銀 鑛床으로서 鑛床의 野外調査와 鑛石의 產出狀態, 鑛物의 共生關係 및 組織을 기초로 하여 早期와 末期로 나뉘어진다. 早期에는 黃鐵石, 閃亞鉛石, 硫砒鐵石, 黃銅石, 少量의 磁硫鐵石, 金紅石, 赤鐵石 및 方鉛石이 산출되며 硫砒鐵石과 閃亞鉛石의 化學 조성은 27.99~30.99 at.%, 10.53~18.42 FeS mole%을 갖는다. 末期에는 黃鐵石, 閃亞鉛石, 方鉛石 및 含金-銀鑛物인 電極銅, 含銀 四面銅石-프라이머자이트系 鑛物, 濃紅銀石, 未確認鑛物이 산출되며 閃亞鉛石의 化學 조성은 1.08~5.57 FeS mole%로서 早期와 末期에 산출되는 鑛石鑛物과 그 化學 조성은 큰 차이를 보인다. 이런 원인은 鑛化流體의 化學 조성과 생성조건에 크게 좌우된다.

早期에는 黃鐵石-閃亞鉛石-硫砒鐵石이 共生關係를 갖는

Table 9. Oxygen and hydrogen isotope data of sericite and quartz from Yeongdeog gold-silver deposits.

Sample No.	Stage	Mineral	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$	$\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$	T_h
Y.D.941209-1	Early	Sericite	11.5	-66.0	9.25	-28.2	350°C
Y.D.941209-2		Quartz	16.1		10.8		
Y.D.941209-10	Late	Quartz	13.3		5.74		280°C

1) $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$ are calculated following the equation given from Friedman and O'Neil (1977) and Matsushita *et al.* (1979). 2) $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$ are calculated following the equation given from Suzuoki and Epstein (1976). 3) T_h are homogenization temperature of fluid inclusion.

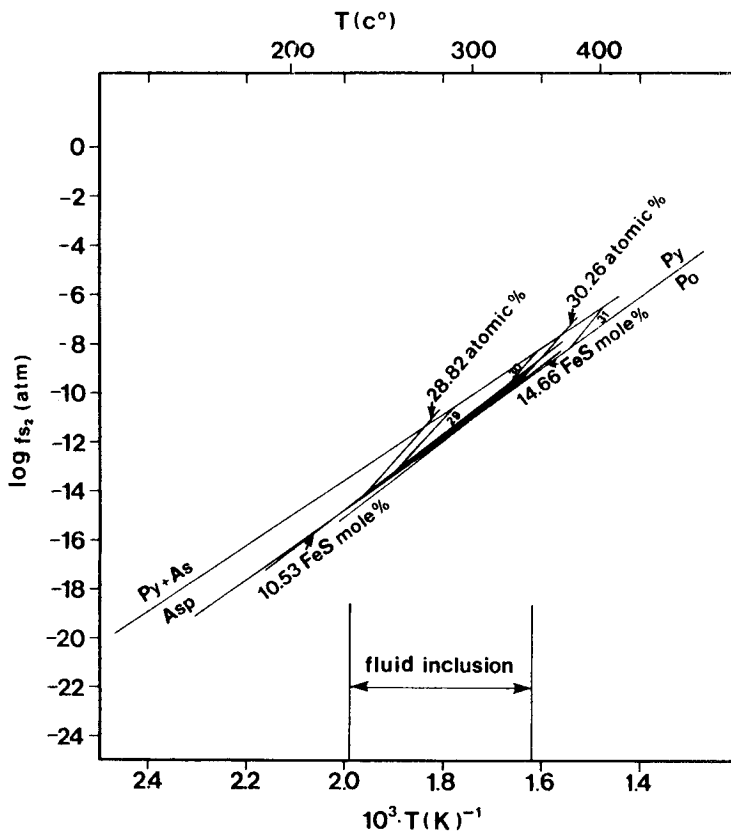


Fig. 11. f_{S_2} -temperature projection of the stability field of arsenopyrite contoured in atomic percent arsenic and sphalerite isopleths in mole proportion on the basis of 1 sulfur.

다. 이 共生群을 이용하여 生成溫度와 硫黃分壓(f_{S_2})을 추정하여 보았다. 共生鑛物群 중 硫砷鐵石의 As at.%는 28.82~30.26이고 閃亞鉛石의 FeS mole%는 10.53~14.66이다. 이 자료를 Kretschmar and Scott(1976)가 제시한 상관도에 圖示하면 이 共生群의 生成溫度는 235~348°C 범위를 보인다. 이때의 硫黃分壓(f_{S_2})는 $10^{-8.3}$ ~ $10^{-14.7}$ atm.에 해당한다(Fig. 11). 이는 早期에 산출되는 石英의 均一化溫度(227~343°C)와 비교적 잘 一致한다. 이들 자료와 閃亞鉛石 및 硫砷鐵石의 化學조성을 비교해 볼 때, 硫黃

分壓(f_{S_2})의 영향보다는 溫度의 감소에 의해 形成되었다고 생각된다. 그리고 계속적인 鑛化流體의 流入에 의해 早期의 鑛石鑛物들이 形成되었다. 末期 전반에 걸쳐 黃鐵石이 정출되는 것으로 보아 oxidation state가 黃鐵石 안정영역내에 있었음을 의미한다. 이 時期에는 黃鐵石-閃亞鉛石-에렉트럼의 共生關係를 갖으며 閃亞鉛石의 FeS mole%는 1.08~5.57이고 에렉트럼의 銀含量(N_{Ag})는 0.46~0.68을 가지고 Toulmin and Barton(1964)과 Shikazono(1985)가 제시한 상관도에 도시하여 生成溫度와 硫黃分壓(f_{S_2})을 추

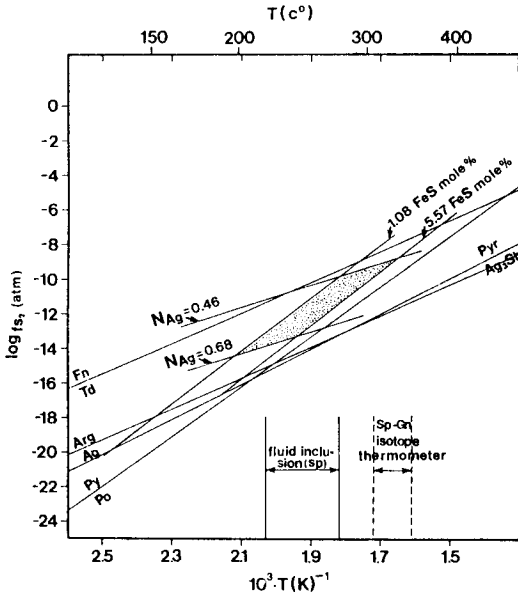


Fig. 12. f_{S_2} -temperature diagram showing the formation conditions of Au-Ag minerals from the Yeongdeog gold-silver deposits.

정하였다. 이때의 광물共生群의 생성溫度는 201~333°C에 해당되고 硫黃分壓(f_{S_2})는 $10^{-8.8} \sim 10^{-14.5}$ atm.이다(Fig. 12). 이 자료와 流體包有物 자료를 종합하여 보면 黃鐵石, 閃亞鉛石, 含銀四面銅石-프라이머자이트系 광물 및 에렉트럼들은 溫度의 감소와 더불어 硫黃分壓(f_{S_2})의 증가에 의해 形成되었으며 Fig. 12에서 末期 閃亞鉛石의 FeS mole%는 최저 1.08이며 黃鐵石-磁硫鐵石-濃紅銀石의 交點溫度과 硫黃分壓(f_{S_2})로 볼 때, 여기에서 推定된 값에 비하여 훨씬 낮아질 가능성이 많다. 그러므로 濃紅銀石, 未確認광물들은 溫度의 감소 및 硫黃分壓(f_{S_2})의 급격한 감소에 의해 形成되었다고 생각된다.

이 鑛床에서 산출되는 石英 및 閃亞鉛石내에 포함된 流體包有物에서는 沸騰證據를 확인할 수 없었기 때문에 流體包有物의 均一化溫度는 壓力補正이 필요하다. 그러나 末期에 壓力補正이 필요없는 黃安定同位元素 地質溫度계에서 얻은 溫度와 비교하여 生成壓力를 추정하였다. 이 壓力條件은 末期에서 산출되는 閃亞鉛石내 流體包有物의 均一化溫度(299°C) 및 鹽濃度(10 wt.%)의 값과 閃亞鉛石-方鉛石의 硫黃安定同位元素 地質溫度계로부터 구한 溫度 328°C를 Lemlein and Klestsov(1961)가 제시한 도표에 도시하면 약 330 bar의 값이 얻어진다. 따라서 鑛床生成 深度는 비교적 얇은 곳에서 生成되었을 것으로 推論된다.

이 鑛床에서 산출되는 黃化鑛物의 $\delta^{34}S_{H_2S}$ 는 早期 4.48~5.60%이고 末期는 4.84~7.00%로서 末期로 감에 따라

다소 무거워지며 $\delta^{34}S_{H_2S}$ 의 값도 비교적 좁은 범위를 보이고 있다. 또한 이 鑛床을 形成한 鑛化流體중 물의 기원을 알아보기 위해서 분석된 絹雲母와 石英의 酸素 및 水素 安定同位元素값은 각각 $\delta^{18}O_{H_2O}$: 5.7~10.8%, δD_{H_2O} : -28.2%이다. 이와 같이 $\delta^{34}S_{H_2S}$ 값과 $\delta^{18}O_{H_2O}$, δD_{H_2O} 의 자료로 볼 때 早期의 鑛化流體는 마그마 또는 深部起源의 流體가 주종을 이룬 것으로 보이나 末期로 감에 따라 起源이 다른 물의 混入이 있었던 것으로 보인다.

結 言

1. 盈德 金-銀鑛床은 慶尙系 堆積岩내에 발달하는 N30~40°E, 60~70°SE의 走向과 傾斜를 갖는 裂隙을 充填한 脈狀鑛床이다.

2. 鑛床의 生成時期는 新생대 제 3기(45.52 ± 1.02 Ma)로서 이 鑛床의 남동쪽에 分布하는 流紋岩(44.7 ± 1.1~49.03 ± 1.09 Ma)과 거의 類似한 값을 갖는다.

3. 鑛化作用은 早期와 末期의 2時期로 나눌 수 있으며, 早期는 母岩變質과 base metal 광물이 堆積하였고 末期는 金-銀鑛化時期로 base metal 광물, 에렉트럼, 含銀四面銅石-프라이머자이트系 광물, 濃紅銀石, 未確認광물 등이 晶出하였다.

4. 流體包有物 및 共生광물들의 상평형관계 등으로 推定한 生成溫度, 鹽濃度 및 硫黃分壓은 早期: 227~343°C, 5.7~8.3 wt.%, $10^{-8.3} \sim 10^{-14.7}$ atm., 末期: 225~299°C, 4.3~12.9 wt.%, $10^{-8.8} \sim 10^{-14.5}$ atm.이다.

5. 黃化鑛物의 $\delta^{34}S_{H_2S}$ 는 4.48~7.00%이며 石英과 絹雲母에서 구한 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 와 δD_{H_2O} 는 5.7~10.8%과 -28.2%로서 이 鑛床의 鑛化流體는 마그마 또는 深部起源의 것이 주류를 이루고 있으며 鑛化作用의 末期에는 起源이 다른 물의 混入이 있었던 것으로 보인다.

謝 辭

本 研究는 教育府 基礎科學研究所育成事業에 의한 學術研究組成費와 일부는 戰略鑛物資源研究센터의 支援으로 수행되었다. 이들 기관에 謝意를 표한다. 本 研究를 수행하는 동안에 流體包有物 測定裝置를 대여해 준 韓國資源研究所 吳敏秀博士, 朴重權博士 및 全北大學校 地質學科 鄭在一教授와 K-Ar 年代測定을 허락해 주신 日本 岡山理科大學 板谷徹九教授에게 感謝의 뜻을 표한다.

參考文獻

김인수 (1992) 새로운 동해의 성인 모델과 양산단층계의 주

- 항이동운동. 지질학회지, 제 28권, p. 84-109.
- 대한광업진흥공사 (1982) 한국의 광상. 제 5호.
- 민경덕, 김옥준, 윤석규, 이대성, 주승환 (1982) 한국 남부 백악기말 이후의 화성화동과 광화작용에 대한 판구조론의 작용성 연구(I). 광산지질, 제 15권, p. 123-154.
- 민경덕, 윤혜수, 문희수, 이현구, 김인수 (1992) 포항 및 장기분지에 대한 고지자기, 층서 및 구조 연구; 중력탐사에 의한 홍해 및 형산강지역의 지질구조. 광산지질, 제 25권, p. 351-358.
- 이병주, 송교영 (1995) 포항분지내의 지각변형 해석. 자원환경지질, 제 28권, p. 69-77.
- 이현구, 문희수, 민경덕, 김인수, 윤혜수, 판국철환 (1992) 포항 및 장기분지에 대한 고지자기, 층서 및 구조연구; 화산암류의 K-Ar년령. 광산지질, 제 25권, p. 337-349.
- 진명식, 김성재, 신성천 (1988) K-Ar 및 췌선택법에 의한 포항-감포일대 화산암류의 암석년령 측정연구. 한국동력자원연구소, 연구보고서, KR-86-27, p. 51-88.
- 채병곤, 장태우 (1994) 청하-영덕지역 양산단층의 운동사 및 관련단열 발달상태. 지질학회지, 제 30권, p. 379-394.
- Chang, K. H., Woo, B. G., Lee, J. H., Park, S. O. and Yae, A. (1990) Cretaceous and early Cenozoic stratigraphy and history of eastern Kyoungsang Basin, S. Korea. Geol. Soc. Korea, v. 26, p. 471-487.
- 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. k11-k12.
- Hatae, N. (1937) Geol. atlas Korea-Yeonghae and Yeongdeog. Geol. Surv. of Korea.
- Kretschmar, U. and Scott, S. D. (1976) Phase relation involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application. Canadian Mineralogist, v. 14, p. 364-386.
- Lemlein, G. G. and Klevtsov, P. V. (1961) Relations of the main thermodynamic parameters in the part of the system H₂O-NaCl. Geochimiya, No. 2, p. 133-142 (in Russian with English abstract).
- Matsushita, Y., Goldsmith, J. R. and Clayton, R. N. (1979) Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water. Geochim. Cosmochim. Acta., v. 43, p. 1131-1140.
- Ohmoto, H. and Rye, R. O. (1979) Isotopes of sulfur and carbon. In geochemistry of hydrothermal ore deposits, 2nd ed., Wiley-Interscience, p. 509-567.
- Shibata, K., Uchiumi, S. and Nakagawa, T. (1979) K-Ar age results-1. Bull. Geol. Surv. Japan, 30-12, p. 675-686.
- Shikazono, N. (1985) A comparison of temperatures 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.
- Suzuoki, T. and Epstein, S. (1976) Hydrogen isotope fractionation between OH-bearing minerals and water. Geochim. Cosmochim. Acta., v. 40, p. 1229-1240.
- 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.