

진원 연-아연 광상의 광석광물과 생성환경

Ore Minerals and Geochemical Environments at the Jinwon Pb-Zn Deposit

조 영 기(Young-Ki Cho) · 이 인 경(In-Gyeong Lee) · 최 상 훈(Sang-Hoon Choi)*

충북대학교 지구환경과학과, 기초과학연구소

(Department of Earth and Environmental Sciences, Basic Sciences Research Institute, Chungbuk National University, Chungbuk, 361-763, Korea)

요약: 진원 연-아연 광상은 영남육괴의 북동부에 위치하며, 주변 지질은 선캠브리아기의 호산리층, 분천화강편마암, 흑운모화강편마암, 홍제사화강암, 우백질화강암과 이들을 관입한 백악기의 산성화산암류 및 시대미상의 암맥류로 구성되어 있다. 광상은 영남육괴의 고기 화강암류인 홍제사화강암 내의 열극을 충진하여 발달한 함 연-아연 열수 석영 맥상 광체들로 구성되어 있으며, 광화작용은 구조운동에 수반되어 총 2회에 걸쳐 진행되었다. 주 광화시기인 광화 I기는 광물들의 산출조직과 공생관계 등에 의하여 2개의 substage (Ia, Ib)로 구분되며, 석영맥 내에 주 광종인 섬아연석(13.1~19.0 mole% FeS)과 방연석에 수반하여 황철석, 유비철석(28.4~30.3 Atomic % As), 자류철석, 자철석, 황동석, 휘은석 등의 황화광물과 황염광물인 miargyrite가 광석광물로서 산출된다. 광화 II기는 광석광물을 수반하지 않은 석영맥의 발달 시기이다. 광석광물의 공생관계와 화학조성 특성 연구결과 등을 종합하여 확인된 광화작용 시의 지화학적 환경은 유황분압 $10^{-7} \sim 10^{-16}$ atm, 산소분압 $10^{-32.8} \sim 10^{-38.5}$ atm, 이산화탄소 분압 $<10^{-0.6}$ atm이었다.

주요어: 진원 연-아연 광상, 열수, 광석광물, 광화작용, 공생관계, 지화학적 환경

ABSTRACT: The Jinwon Pb-Zn deposit is located within the Precambrian Youngnam Massif. Ore mineralization at the Jinwon deposit occurred in quartz veins that filled fractures in the Hongjesa granite. Mineral paragenesis can be divided into two stages(stage I and II). Stage I, at which the precipitation of major ore minerals occurred, is further divided into two substages with paragenetic time based on minor fractures and discernible mineral assemblages: substage I_a is characterized by pyrite, arsenopyrite (28.4~30.3 atomic % As), pyrrhotite, magnetite, chalcopyrite, sphalerite (13.1~16.0 mole % FeS) assemblages; substage I_b is represented by main precipitation of Zn, Pb minerals and is characterized by sphalerite (15.1~19.0 mole % FeS), galena, miargyrite, argentite assemblages. Stage II is economically barren quartz veins. Thermodynamics study is used to estimate changes in chemical conditions of the hydrothermal fluids during stage I mineralization, the main ore deposition period at the Jinwon hydrothermal system. The range of estimated sulfur fugacity (f_{S_2}) was from 10^{-7} to 10^{-16} atm and oxygen fugacity (f_{O_2}) was in the range of $10^{-32.8} \sim 10^{-38.5}$ atm. Carbon dioxide fugacity (f_{CO_2}) was $<10^{-0.6}$ atm.

*교신저자: cshoon@chungbuk.ac.kr

Key words : Jinwon Pb-Zn deposit, hydrothermal fluids, ore mineralization, mineral paragenesis, geochemical conditions

서 론

진원 연-아연 광상은 영남육괴 북동부의 태백산 광화대 동남 익부에 위치한다(그림 1). 광상은 영남육괴 고기화강암류인 홍제사화강암 내에 배대된 거의 평행한 수개조의 함 연-아연 열수 석영맥상 광체들로 구성되어 있다. 영남육괴는 경기육괴와 더불어 남한 선캄브리아기의 기저를 이루며, 태백산 일대의 북동부와 지리산과 호남일대에 걸치는 남서부 및 김천-상주를 중심으로 하는 중앙부로 구분된다(송용선과 이상만, 1989). 광상 주변의 일반 지질에 대해서는 1 : 50,000 죽변-임원진도폭 지질보고서(이종혁 외, 1993), 대한광업진흥공사 보고서(한국의 광상 제8호, 1981; 한국의 광상 제10호, 1987) 등에 자세히 설명되어 있고, 최근 영남육괴 북동부 지역 기반암에 대한 암석학적·지구화학적 연구 등(김형수와 이종혁, 1995; 정창식 외, 2004; 강지훈 외, 2004)이 보고된 바 있으나, 본 광상에 대한 광상학적·지구화학적 연구는 진행된 바 없다.

진원 연-아연 광상은 Au, Ag, Pb, Zn, Cu를 대상으로 개발되었으며, 갱도는 본갱과 부갱을 비롯하여 수개조가 존재하였으나 현재 본갱을 제외한 대부분의 갱도는 붕락되어 흔적을 찾을 수가 없다. 광석광물의 품위는 본갱 Au; 8.4~

21.4 g/ton, Ag; 75~142 g/ton, Pb; 15.4 wt.%, Zn; 4.2 wt.%로 양호하며, 동1갱은 Au; 2.8~6.2g/ton, Ag; 118~248 g/ton, Pb; 3.46~9.42 wt.%, Zn; 0.5~3.06 wt.% (대한광업진흥공사; 한국의 광상 제8호, 1981), 부갱은 Au; Tr~2.7 g/ton, Ag; 73~252 g/ton이다(대한광업진흥공사; 탐광굴진, 제5호, 1980). 국내 연-아연 광상의 광화작용과 관련된 지구화학적·광상학적 연구로는 대장광산(Choi, 1998), 신정선 연-아연 광산(허순도, 박희인, 2000), 상라광산(박희인 외, 1994), 두서광산(박희인, 배영부, 1995), 청송광산(이현구, 김상중, 1997), 감계광산(이현구, 김상중, 1995), 광신 연-아연 광산(최광준 외, 1997) 등이 보고된 바 있다. 또한 진원 연-아연 광상은 현재 재개발을 준비 중에 있는 광상으로 대한광업진흥공사 보고서 등 조사지역에 대한 기존의 연구보고가 있으나 이들 보고서는 광상 주변 지질과 광상에 대한 개략적인 설명만 있을 뿐 광상학적 연구는 아직까지 수행되지 않았다. 이에 본 연구에서는 진원 연-아연 광장에서 산출되는 광석광물과 그들의 산출 특성 및 지화학적 조성 특성과 함께 공생관계 등을 규명하고, 이를 통해 진원 열수계 연-아연 광화작용과 관련된 광상생성의 지화학적인 환경을 규명하고자 하였다.

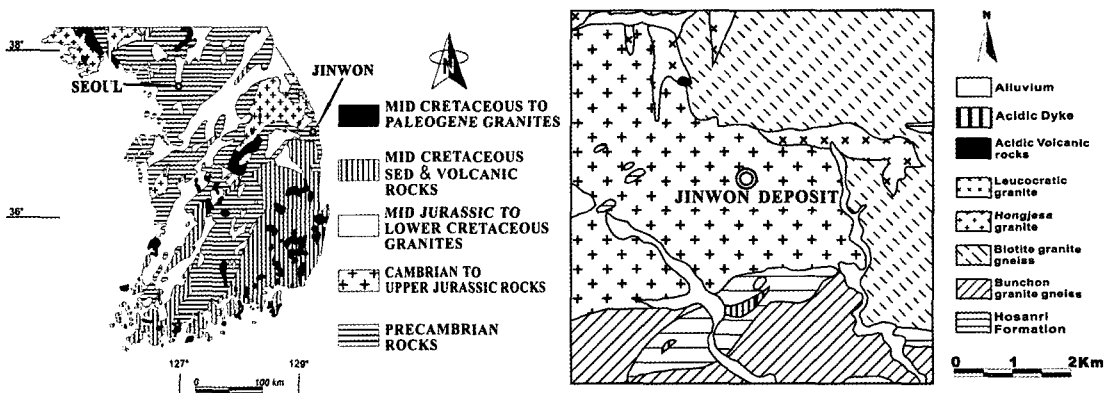


Fig. 1. Geologic map of the Jinwon deposit area. Simplified geologic map of the Republic of Korea shows the location of the Jinwon Pb-Zn deposit.

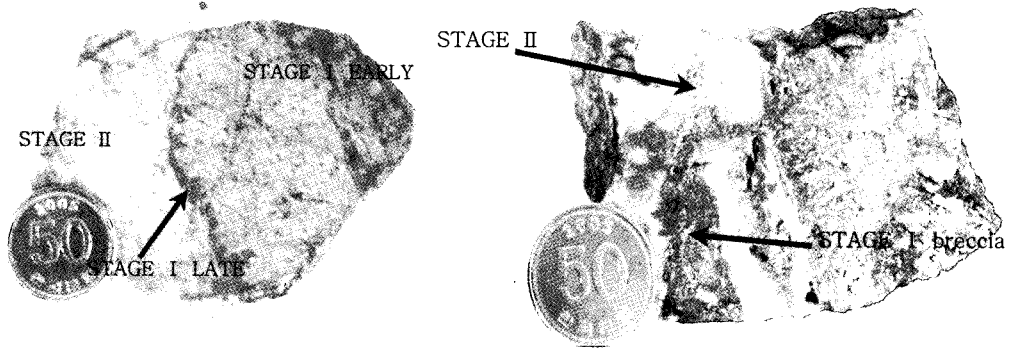


Fig. 2. Photographs of hand-specimen samples.

지질 및 광상

영남육괴는 경기육괴, 평북-개마육괴와 함께 한반도 선캄브리아기의 기저를 이루며 분포하고, 크게 태백산 일대의 북동부, 김천-상주를 중심으로 하는 중앙부, 지리산과 호남일대의 남서부로 구분된다. 조사지역은 영남육괴의 북동부에 해당하는 태백산 일대로서 광상 주변의 지질은 하부로부터 선캄브리아기의 편암류(호산리층) 및 화강편마암류(분천화강편마암, 혹은 운모화강편마암)와 이들을 관입한 고기 화강암류(홍제사화강암, 우백질화강암), 그리고 이전 암석들을 모두 관입하는 중생대 이후의 화성암류(산성화산암 및 암맥류)로 구성된다. 특히 화강편마암류 및 고기화강암류가 조사지역의 대부분을 차지하며 분포하고 있다(그림 1).

진원 연-아연 광상은 광상주변에 광범위하게 분포하는 고기화강암체 내에 발달한 열극을 충전한 함 연-아연 열수 석영맥상 광체들로 구성된다. 광석광물을 수반하는 석영맥은 본맥을 위시하여 이와 평행한 맥이 수 개조 발달한다. 이들 광맥의 주향 및 경사는 주로 N70°~80°E, 70°~80°NW이고 맥폭은 0.2~0.8 m로 심한 팽축을 보이며, 약 200 m까지 연장이 확인된다. 본맥은 S20°E 방향으로 125 m 크로스 굴진하여 연맥방향인 N70°~80°E 방향으로 100 m 굴진하였다. 석영맥의 주향 및 경사는 N70°~80°E, 70°~80°NW이고, 맥폭은 0.2~0.3 m로 본역 내의 다른 맥에 비해 좁은 편이다. 부맥은 제1호맥을 연맥굴진 하였으나, 맥폭이 0.1~0.2 m의 빈광대인 관계로 40 m 지점에서 크로스 컷하여 25 m를 굴진하여 제2호맥을 착

맥 하였다. 2호맥의 주향 및 경사는 N70°E, 45° NW, 맥폭은 0.2~0.5 m이다(대한광업진흥공사; 한국의 광상 10호, 1987). 동1갱은 본갱맥의 동측 연장부로 사료되는 맥으로 S70°W 방향으로 30 m 정도 크로스 굴진하여 연맥 방향으로 소규모 굴진하였다. 맥폭은 0.2~0.5 m 이고 방연석, 섬아연석의 함유량이 많은 편으로 일부 석영맥 중 방연석, 섬아연석 농집부는 전체 맥폭의 70%를 점하기도 한다. 대체로 이들 농집부는 대상분포를 보여준다(대한광업진흥공사; 한국의 광상 8호, 1981).

광석광물과 공생관계

진원광상의 맥상 광화작용은 괴상, 호상, 각력상, 정동구조 등이 부분적으로 잘 발달된 석영맥 내에 황화광물이 산출되는 전형적인 천연수광상의 특징을 보여 준다(그림 2). 맥상 광화작용은 구조운동에 수반되어 2회의 광화시기에 걸쳐 진행되었다(그림 2). 광화 I기는 주 광화시기로서 광물들의 산출조각과 공생관계 등에 의하여 2개의 substage (Ia, Ib)로 구분되며, 석영맥 내에 주 광종인 섬아연석과 방연석에 수반하여 천금속 황화광물, 철-산화광물 및 황염광물 등이 광석광물로서 산출된다. 광화 II기는 광석광물을 수반하지 않은 석영맥의 발달시기로 광화 제 I기의 맥상 각력들이 부분적으로 관찰된다(그림 2).

광화 제 I기

광화 제 I기 맥상 광체는 채광 대상인 연-아

Table 1. Chemical composition of arsenopyrite from the Jinwon Pb-Zn deposit

Sample No.	weight %			As	
	Fe	As	S	Total	Atomic %
4-2-1	34.51	39.74	22.77	97.03	28.54
4-2-2	35.60	41.00	23.37	99.97	28.60
4-2-3	35.52	42.03	22.84	100.38	29.38
4-2-4	35.17	42.20	22.58	99.94	29.69
33-3-4	35.75	41.77	23.04	100.55	29.10
33-3-5	35.52	41.37	22.74	99.63	29.10
33-3-6	35.98	41.13	23.43	100.55	28.53
36A-2-1	34.76	38.81	21.75	95.31	28.49
36A-2-2	35.40	38.92	21.59	95.91	28.44
36A-2-3	35.01	40.63	21.35	97.00	29.55
36A-2-4	35.15	41.67	20.97	97.80	30.23
36A-2-5	34.36	39.49	21.18	95.04	29.23
34-1-1	34.87	41.90	21.21	97.98	30.31
34-1-2	34.95	41.62	21.69	98.25	29.90
34-1-3	35.03	42.05	21.54	98.62	30.17
34-1-4	34.89	42.28	21.88	99.04	30.15
34-1-5	35.30	41.98	21.87	99.14	29.90
34-1-6	34.80	41.83	21.24	97.86	30.28

연 광체이다. 괴상 석영맥 내에 함 연, 아연 광물인 섬아연석과 방연석이 황철석, 유비철석, 자류철석, 황동석, 휘은석 등의 황화광물, 철-산화광물인 자철석 및 Ag-황염광물인 miargyrite 등과 수반되어 산출한다. 이들 황화광물들은 주로 괴상으로 산출되나 부분적으로 호상, 각력상 구조를 보이며 산출하기도 한다. 일부 석영맥에는 부분적인 정동이 관찰된다.

황철석은 자형 내지는 반자형으로 단독 정출되기도 하나, 주로 중립질 괴상의 산출양상을 보여준다. 이들 괴상의 황철석 중 초기 산출 황철석의 경우 유비철석이 밀접한 공생관계를 보이며 산출되기도 한다. 황철석 내에는 부분적으로 자류철석과 자철석이 포획되어 산출된다(그림 3).

유비철석은 주로 자형 또는 반자형으로 산출하며 황철석과 공생 집합체를 이루어 정출되기도 한다. 28.4~30.3 atomic % As의 조성을 보여 주는 이들 유비철석의 경우 동일 결정 내의 화학조성의 변화는 보여주지 않는다(표 1). 초기 산출된 황철석 또는 유비철석의 작은 입자

들은 후기에 산출하는 섬아연석 또는 방연석 입자 내에 부분적으로 포획되어 관찰되기도 한다(그림 3).

철 산화광물인 자철석은 세립의 타형으로 산출하며, 황철석 또는 유비철석의 입자 내에서만 관찰된다.

중립 내지 세립 타형으로 산출하는 자류철석의 경우 주로 유비철석 내에 포획상태로 관찰되며, 부분적으로 황철석 내에서도 포획되어 산출한다(그림 3). 이들 자류철석과 자철석은 초기 산출된 황철석, 유비철석 등과 밀접한 공생관계를 보이며 산출되어 광화 제 I기 초기 광화작용의 광석광물 조합을 이룬다.

황동석은 세립의 타형으로 미량 산출하며 섬아연석과 공생관계를 보여준다. 부분적으로 유비철석의 열극 내에 관입 산출되기도 한다(그림 3).

섬아연석은 주로 광화 제 I기 후기에 황철석·유비철석의 파쇄 열극을 증진 하여 산출되며, 황동석과 황철석·유비철석 등을 포획하기도 한다. 초기 섬아연석의 경우 타형의 세립 입자들이 황철석·유비철석 등의 광화 제 I기 초기 광석광물들을 교대하여 산출하며, 후기 섬아연석의 경우 주로 괴상으로 산출하며 부분적으로 방연석과 공생관계를 보이며 산출한다(그림 3). 섬아연석의 경우 입자 내의 조성 변화에 의한 누대구조는 보여주지 않으나 산출시기와 관련하여 FeS 함량 변화를 보여 준다(초기: 13.1~16.0 mole% FeS; 후기: 15.1~19.0 mole% FeS; 표 2).

방연석은 황철석과 유비철석의 파쇄대를 따라 증진 하여 산출되거나, 괴상으로 산출된다. 괴상의 방연석 내에는 부분적으로 황동석과 황철석·유비철석 등이 포획되어 관찰된다(그림 3).

휘은석과 황염광물인 miargyrite는 주로 광화 제 I기 후기에 산출된 방연석과 공생관계를 보이며 산출된다. 초기 정출 광물들의 미세 균열을 따라 증진하는 양상을 보이며 산출되기도 한다. 이들 휘은석과 황염광물인 miargyrite는 후기 산출 광물인 후기 섬아연석 및 방연석 등과 밀접한 공생관계를 보이며 산출되어 광화 제 I기 후기 광화작용의 광석광물 조합을 이룬다(그림 4).

Table 2. Chemical composition of sphalerite from the Jinwon Pb-Zn deposit

Sample No.	weight %							mole %	
	Zn	Fe	S	Cu	Cd	Mn	Total	ZnS	FeS
4-2-5	57.31	7.56	34.28	0.00	0.28	0.62	100.06	85.45	13.20
4-2-6	57.43	7.77	34.19	0.01	0.32	0.57	100.30	85.21	13.49
4-2-7	56.43	7.35	34.77	0.00	0.31	0.58	99.42	85.64	13.05
33-3-1	56.70	9.04	33.64	0.03	0.38	0.20	99.99	83.66	15.62
33-3-2	56.18	9.45	34.24	0.02	0.43	0.14	100.45	83.02	16.34
33-3-3	57.11	8.76	33.63	0.34	0.40	0.18	100.42	83.79	15.05
33-3-7	57.18	8.76	33.51	0.00	0.27	0.05	99.76	84.53	15.15
33-3-8	56.34	9.81	32.72	0.00	0.32	0.08	99.27	82.72	16.86
33-3-9	56.89	9.29	32.47	0.03	0.36	0.09	99.14	83.52	15.97
33-3-10	56.31	9.09	32.53	0.09	0.37	0.16	98.55	83.48	15.78
33-3-11	57.23	9.73	32.88	0.00	0.36	0.14	100.33	82.95	16.51
33-3-12	56.58	9.24	32.36	0.02	0.37	0.08	98.66	83.54	15.97
36A-2-6	55.82	8.93	32.26	0.00	0.27	0.44	97.72	83.38	15.61
36A-2-7	55.95	8.89	32.48	0.01	0.27	0.40	97.98	83.52	15.53
36A-2-8	55.70	8.89	32.47	0.51	0.26	0.37	98.20	82.86	15.48
14-1-1	53.03	9.16	31.76	0.00	0.36	1.13	95.45	81.20	16.41
14-1-2	52.43	10.35	32.69	0.00	0.42	1.34	97.21	78.99	18.25
14-1-3	52.74	10.61	32.68	0.00	0.45	1.41	97.89	78.60	18.52
35-2-1	54.24	8.32	32.61	0.66	0.18	0.69	96.70	82.71	14.84
35-2-2	55.34	7.84	32.42	0.12	0.21	0.69	96.60	84.40	13.99
35-2-3	52.99	8.89	31.76	0.61	0.27	0.76	95.28	81.41	15.99
1A-3-1	55.43	8.53	33.01	0.00	0.31	0.42	97.70	83.87	15.10
1A-3-2	53.00	9.62	32.81	0.00	0.29	0.51	96.24	81.48	17.32
1A-3-3	52.15	10.65	32.79	0.27	0.27	0.49	96.62	79.45	18.99

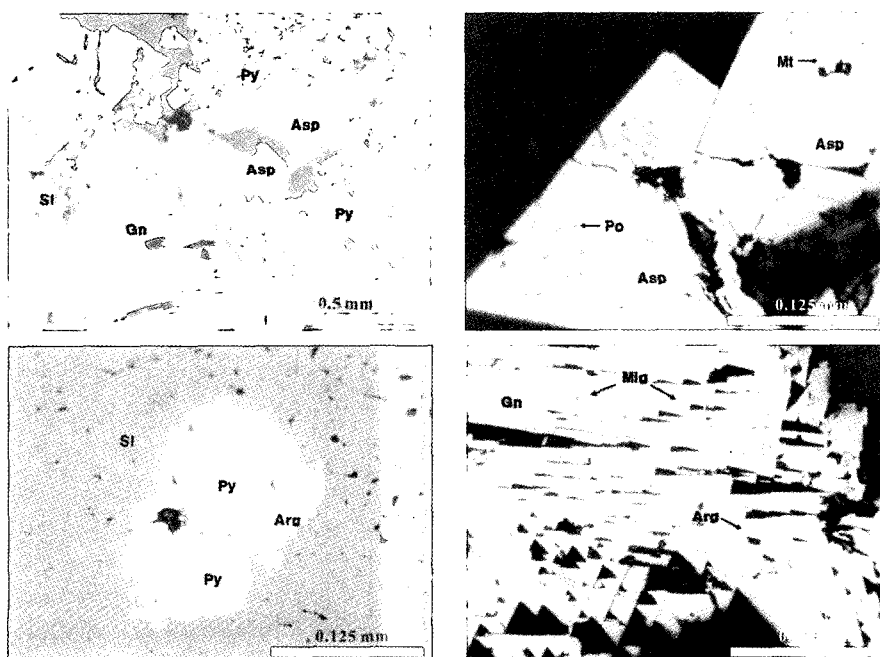


Fig. 3. Photomicrographs of polished sections showing the occurrence of ore minerals in reflected light.

	STAGE I		STAGE II
	Early	Late	
pyrite	—————		
arsenopyrite	28.4-30.3 atom % As		
magnetite	—————		
pyrrhotite	—————		
chalcopyrite	—————		
sphalerite	13.1-19.0 mole % FeS		
galena		—————	
miargyrite		—————	
argentite		—————	
quartz			—————

Fig. 4. Generalized paragenetic sequence of minerals from the Jinwon Pb-Zn deposit.

광화 제 II기

광화 제 II기는 광석광물의 배대가 이루어지지 않은 괴상의 석영 맥으로 부분적으로 정동구조가 관찰된다. 광화 제 II기 괴상의 석영 맥 가장자리에는 광화 제 I기의 맥상 각력들이 부분적으로 관찰되기도 한다(그림 2).

광석광물의 생성환경

열역학을 이용한 광물상의 상평형관계는 광석광물의 추전과 관련된 열수계의 온도조건과 지화학적 환경(f_{S_2} , f_{O_2} , CO_2 농도, pH 등) 조건을 규명할 수 있다. 또한 특정광물 내의 화학 조성 특성과 광물의 공생관계 등도 열수계의 광물 생성 관련 지화학적, 물리학적 환경 요인을 해석하는데 훌륭한 자료로 활용되고 있다. 특히, 유비철석, 섬아연석, 에렉트럼 등은 광상의 생성 시 온도, 황 분압, pH 등의 지화학적 요인 등에 의하여 그 화학조성에 규칙적인 변화가 일어나는 것으로 알려져 있어, 이들 광물의 화학조성 특성은 광상 생성과 관련된 환경을 해석하는데 활용성이 매우 크다(Barton and Toulmin, 1964; Shikazono, 1985; Shikazono and Shimizu, 1987; Scott and Barnes, 1971).

본 연구에서는 진원 함연-아연 열수계에서 광석광물의 생성환경 규명을 위하여 Fe-As-S

(Kretschmar and Scott, 1976), Fe-Zn-S (Barton and Toulmin, 1966; Scott and Barnes, 1971), Ag-S (Barton and Toulmin, 1964), Fe-O-S (Helgeson, 1969) 계를 활용하였으며, 이를 위하여 광상 내 맥상 광석광물 중 섬아연석과 유비철석에 대한 화학조성을 확인하였다.

섬아연석은 주로 철 함량의 차이에 따라 다양한 색상변화를 보이며, 철함량이 증가할수록 짙은 흑적갈색의 색을 띤다. 섬아연석은 일반적으로 산출빈도가 높고 양적으로 많이 산출되는 광석광물로서 정출된 이후 화학조성이 거의 변화하지 않기 때문에 광화작용시의 물리학적 생성환경을 그대로 반영하는 광물로 알려져 있다. 섬아연석 내 철의 함량은 광상의 생성 온도, 유허분압, 생성심도의 요인에 따라 현저한 조성 차이를 보이는 것으로 보고되고 있다(Scott and Barnes, 1971; Barton and Skinner, 1979). 특히, 섬아연석의 철함량은 공존하는 황철석 및 자류철석의 광물공생관계를 적용하여 섬아연석 지질온도계 또는 지질압력계로 이용되어 변성광상, 열수광상, 스키아론광상 등 다양한 기원의 광상생성환경을 규명하는데 자주 사용되고 있다. 또한, 섬아연석에 함유된 Fe, Mn, Cd 등은 일반적으로 광중, 광상분포지역, 지질환경, 열수 분화정도 등의 차이에 따라 조성변화를 보이는 것으로 보고되고 있다(이현구 등, 1992).

유비철석은 침전환경에 따라 서로 치환관계에 있는 As와 S의 조성이 변하는 것으로 알려져 있다(Kretschmar and Scott, 1976). 본 광산에서 산출되는 대부분의 유비철석들은 광화기 중-초기에 속하는 것으로 대체로 입자의 크기가 십 μm 정도의 크기를 가진다.

섬아연석 및 유비철석의 성분분석은 서울대학교 기초과학공동기원의 EPMA (Jeol Superprobe)에 의해서 수행되었고 정량분석의 조건은 가속전압 20 kv, 시료전류 2.50×10^{-9} A (PCD mode) 하에서 실시되었다. 정량분석의 표준시료는 합성 ZnS의 단성분 섬아연석과 합성 FeS_2 황철석을 이용하였으며, Cu는 황동석에서, Mn과 Cd는 각각 MnS, CdS의 합성광물을 이용하여 정량분석을 실시한 후 본 광산들의 섬아연석을 분석하였다. 분석에서 확인된 Zn, Fe, Cd, Mn, Cu, S의 겉보기 값은 ZAF 보정법을 통하여 보정하였다. 분석 시 사용된 검

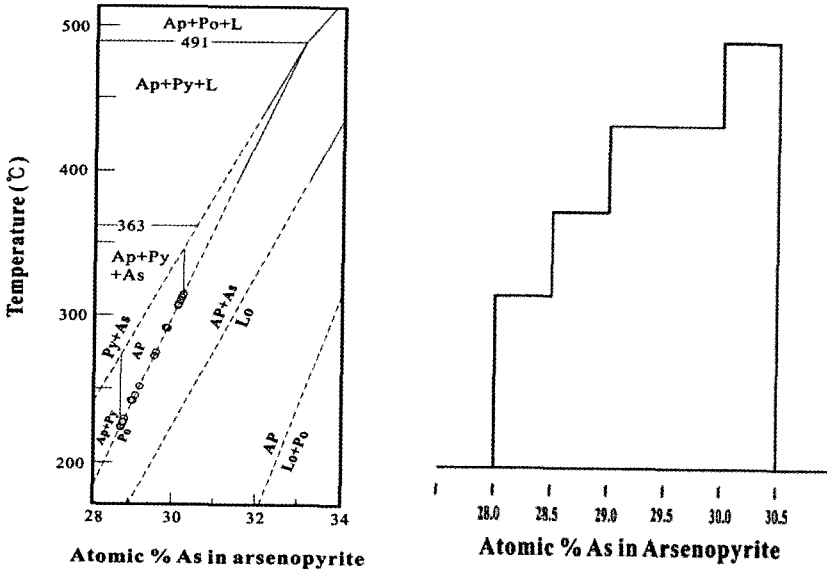


Fig. 5. Pseudo-binary condensed T- X_{As} section of the FeS-As-S system (Kretschmar, Scott, 1976).

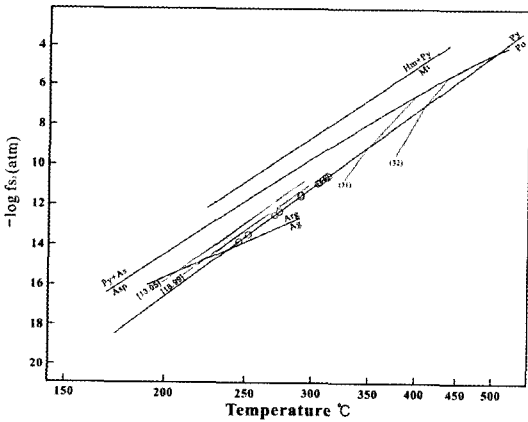


Fig. 6. Plot of temperature versus sulphur fugacity showing possible mineralization conditions for stage I in Jinwon Pb-Zn deposit. Abbreviations: Asp, arsenopyrite; As, native arsenic; Py, pyrite; Arg, argentite; Ag, native silver; Po, pyrrhotite; Mt, magnetite; Hm, hematite.

출기는 Oxford eXill을 이용하였으며, 100초 동안의 live time을 주어 점분석을 실시하였다. 진원 연-아연 광상에서 산출되는 섬아연석과 유비철석의 화학조성범위는 표 1~2와 같다.

유비철석은 진원광상 광화 I기 초기에서 중기에 이르는 시기에 황철석과 밀접한 공생 관

계를 보이며 산출하고 있으며, 특히 광화 I기 초기에는 자류철석 및 자철석과 공생관계를 보인다. 본 광상에서 산출되는 유비철석은 입자 내에서 화학조성 상의 누대구조는 보이지 않으며 28.4~30.3 atomic % As의 함량을 보여 준다. 이들 유비철석의 As 함량과 공생관계를 이용하여 Kretschmar and Scott (1976)이 제시한 Fe-As-S계 T- X_{As} diagram에 도시하여 생성온도 조건을 규명하였다(그림 5). 초기 광화작용과 관련된 유비철석의 경우 자류철석과의 공생관계로 미루어 침전은 약 320°C에서 시작되어 230°C까지 진행된 것으로 확인된다. 그러나 자류철석, 황철석, 자철석 등과의 공생조합을 이루는 초기 유비철석의 경우는 그림 5에 도시된 자류철석 공생 온도조건이 침전온도로 해석될 수 있으나, 후기 산출 유비철석의 경우 확인된 온도조건은 이 보다 높은 약 250°C 이상의 온도 조건에서 생성된 것으로 해석 된다. 따라서 초기 유비철석과 공생관계를 이루는 자류철석, 황철석, 자철석 등으로 대표되는 진원광상 광화 제 I기 초기의 광석광물의 침전은 약 320°C에서 시작되어 270°C까지 진행되었음을 알 수 있다.

그림 6은 Fe-As-S (Kretschmar and Scott, 1976), Fe-Zn-S (Scott and Barnes, 1971), Ag-S

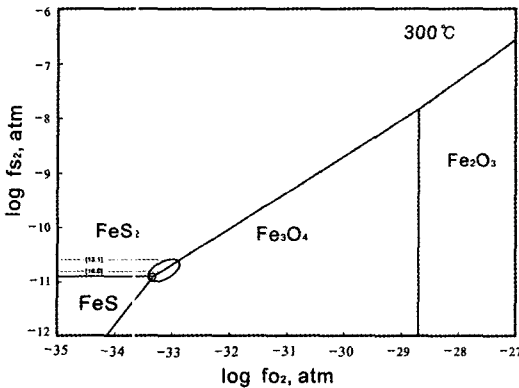


Fig. 7. Plot of $\log f_{O_2}$ - f_{S_2} calculated at 300°C showing mineral stabilities for substage Ia. Ranges in f_{S_2} calculated from FeS content of sphalerite and mineral assemblage.

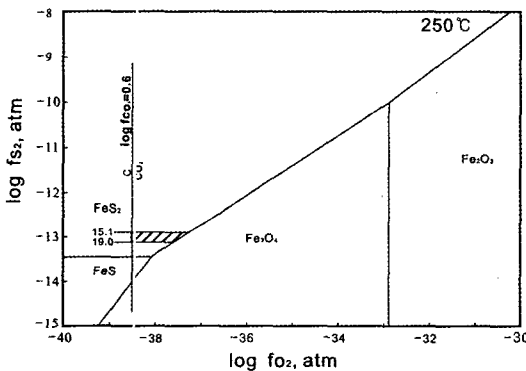


Fig. 8. Plot of $\log f_{O_2}$ - f_{S_2} calculated at 250°C showing mineral stabilities for substage Ib. Ranges in f_{S_2} calculated from FeS content of sphalerite.

(Barton and Toulmin, 1964), Fe-O-S (Helgeson, 1969) 계를 이용한 진원광상 광화 제 I기 광화 작용 시의 유향분압 및 온도조건을 제시한 것이다. 광화 제 I기 초기에 산출되는 황철석-유비철석-자류철석-자철석 공생관계와 유비철석 내 As함량에 의해 결정된 광화 제 I기 초기의 황분압 및 온도조건은 약 $10^{-10} \sim 10^{-13}$ atm, 320 ~ 250°C 이었다. 이어지는 진원 연-아연 광상의 광화 제 I기 후기 광화작용과 관련된 유향분압 및 온도조건은 Fe-Zn-S (Scott and Barnes, 1971), Ag-S (Barton and Toulmin, 1964) 계를 이용하여 해석 할 수 있다. 진원 연-아연 광상의 광화 제 I기 후기에 산출하는 섬아연석의

FeS 조성은 13.1~19.0 mole%이며, 광화 제 I기 최 후기에는 miargyrite와 함께 함은 광물로서 휘은석이 산출된다. 그러나 함은 광물인 휘은석은 산출되나 자연은은은 산출되지 않으므로 Ag-S계의 상평형에 의하여 광화 제 I기 후기의 황분압 및 온도조건 하한이 결정될 수 있다. 따라서 진원 연-아연 광상의 광화 제 I기 후기 광화작용과 관련된 유향분압 및 온도조건은 약 $10^{-12} \sim 10^{-16}$ atm, 270~200°C이다.

상기 확인된 온도와 황분압조건과 더불어 산소 분압조건 등의 지화학적 환경조건들의 변화와 광화작용과의 상관관계를 자세히 살펴보기 위하여 진원 연-아연 광상의 광화 제 I기 전기와 후기 광화작용과 관련된 주 온도조건인 300°C 및 250°C에서의 상평형을 이용한 산소분압 및 황분압 조건의 변화를 해석하였다(그림 7~8). 진원 연-아연 광상의 광화 제 I기 전기 광화 작용의 주 온도 조건인 300°C의 경우 Fe-O-S (Helgeson, 1969), Fe-Zn-S (Scott and Barnes, 1971) 계를 이용하여 해석 할 수 있다. 즉 초기의 FeS₂, FeS, Fe₃O₄ 공생관계에 의하여 황 및 산소의 분압조건은 각각 약 $10^{-10.9}$ atm 및 $10^{-33.3}$ atm이었다. 한편 진원 연-아연 광상의 광화 제 I기 전기의 후기에 이르면 황철석과의 공생관계를 보이면서 산출하는 섬아연석이 관찰된다. 이들 섬아연석은 13.1~16.0 mole % FeS의 함량 조성을 보이며, 이에 의하여 확인되는 황 및 산소의 분압조건은 각각 약 $10^{-10.6} \sim 10^{-10.8}$ atm 및 $10^{-32.8} \sim 10^{-33.2}$ atm이다. 따라서, 진원 연-아연 광상의 광화 제 I기 전기 열수계의 경우 초기 광석광물의 침전은 약 300°C를 전후하여 약 $10^{-10.9}$ atm 및 $10^{-33.3}$ atm 이하의 황 및 산소의 분압조건에서 시작되었으며, 그 후 초기 열수계에 유입된 열수에 비하여 상대적으로 높은 물/암석 비의 조건에서 진화된 천수 기원 열수의 혼입이 시작 되면서 온도 감소와 함께 황 및 산소의 분압조건 증가에 의하여 광석광물의 침전이 진행되었다. 그 후 온도 감소와 회석 작용에 의하여 진행된 진원 연-아연 광상의 광화 제 I기 열수계의 진화는 250°C를 전후하여 진원 연-아연 광상의 주 광석광물인 섬아연석과 방연석의 주된 침전이 일어났으며 이때의 진원 연-아연 광상 열수계의 황 및 산소의 분압조건은 각각 약 $10^{-12.9} \sim 10^{-13.2}$ atm 및 $10^{-37.1} \sim 10^{-38.5}$ atm이었다.

결 론

영남육괴 고기화강암류인 홍제사화강암 내에 배태된 함 연-아연 열수 석영맥상 광체들로 구성된 진원 연-아연 광상은 구조운동에 수반되어 2회(I, II)에 걸쳐 광화작용이 진행되었다. 주 광화시기인 광화 I기는 광물들의 산출조직과 공생관계 등에 의하여 2개의 substage (Ia, Ib) 로 구분되며, 석영맥 내에 주 광종인 섬아연석 (13.1~19.0 mole % FeS)과 방연석에 수반하여 황철석, 유비철석(28.4~30.3 Atomic % As), 자류철석, 자철석, 황동석, 휘은석 등의 황화광물과 황염광물인 miargyrite가 광석광물로서 산출된다. 섬아연석의 경우 산출시기와 관련하여 FeS 함량 변화를 보여준다(초기: 13.1~16.0 mole% FeS; 후기: 15.1~19.0 mole% FeS). 광화 II기는 광석광물을 수반하지 않은 석영맥의 발달 시기이다.

광석광물의 공생관계와 화학조성 특성 연구 결과 등을 종합하여 확인된 광화작용 시의 지화학적 환경은 유황분압 $10^{-7} \sim 10^{-16}$ atm, 산소분압 $10^{-32.8} \sim 10^{-38.5}$ atm, 이산화탄소 분압 $<10^{0.6}$ atm 이었다. 이러한 광화유체의 진화양상과 광상 내 산출하는 광물공생관계 및 화학조성에 의한 열역학적 고찰결과 광화유체 내 Zn과 Pb가 주로 chloride complex상으로 이동되었으며, 이들의 침전은 주로 차갑고 저염농도를 갖는 상대적으로 덜 진화된 천수의 혼입에 의한 온도감소와 fs₂, fo₂ 등의 지화학적 환경요소들의 변화에 의하여 지배되었음을 알 수 있다.

사 사

본 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

강지훈, 김남훈, 박계현, 송용선, 옥수석 (2004) 영남-울진지역 선캄브리아기 변성암류의 변형작용사. 암석학회지, 13, 179-190.
 김형수, 이종혁 (1995) 분천과 홍제사 화강암질 편마암체의 변성작용. 암석학회지, 4, 61-87.
 대한광업진흥공사 (1980) 탐광굴진 제 5호.

대한광업진흥공사 (1981) 한국의 광상 8호.
 대한광업진흥공사 (1986) 탐광굴진 제 7호.
 대한광업진흥공사 (1987) 한국의 광상 10호.
 박희인, 문상호, 우영근 (1994) 상라광산의 연-아연 광화작용. 지질학회지, 30, 1-14.
 박희인, 배영부 (1995) 두서광산의 연-아연-동 광화작용. 지질학회지, 31, 47-56.
 송용선, 이상만 (1989) 소백산육괴 중안부 선캄브리아 변성암류의 암석학적 연구. 지질학회지, 25, 451-467.
 이종혁, 김용준, 최병열 (1993) 죽변-임원진도폭 지질보고서 1:5만. 한국자원연구소.
 이현구, 김상중 (1995) 감계 동-연-아연-금-은 광상의 광석광물과 유체포유물 연구. 자원환경지질학회지, 28, 9-17.
 이현구, 김상중 (1997) 청송광산의 동-연-아연 광화작용. 자원환경지질학회지, 30, 197-207.
 이현구, 유봉철, 김상중 (1992) 충남 대봉 금,은 광상에서 산출되는 광석광물과 광상의 생성환경. 광산지질학회지, 25, 297-316.
 정창식, 길영우, 김정민, 정연중, 임창복 (2004) 영남육괴 북동부 죽변 지역 선캄브리아기 기반암류의 지구화학적 특징. 지질학회지, 40, 481-499.
 최광준, 윤성택, 소길섭 (1997) 광신 연-아연 광상의 유체포유물 및 안정동위원소 연구. 자원환경지질학회지, 30, 505-517.
 허순도, 박희인 (2000) 신정선 연-아연 광상의 광석광물과 유체포유물 연구. 지질학회지, 36, 93-112.
 Barton, P.B.Jr. and Skinner, B.J (1979), Sulfide mineral stabilities. In: Geochemistry of hydrothermal ore deposits (Barnes, H.L. Ed.). pp.798, Wiley and Sons Pub. Co., New York, 278-403.
 Barton, P.B.Jr. and Toulmin, P. III (1966) Phase relations involving sphalerite in the Fe-Zn-S system. Econ. Geol., 61, 815-849.
 Barton, P.B.Jr. and Toulmin, P. III (1964) The electron tarnishing method for determination of the fugacity of sulfur in laboratory sulfide systems. Geochim. Cosmochim., Acta, 28, 619-640.
 Helgeson, H.C. (1969) Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. Amer. J. Sci., 267, 729-804.
 Kretschmar, U. and Scott, S.D. (1976) Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application. Can. Miner., 14, 364-386.
 S.H. Choi (1998) Geochemical Evolution of Hydrothermal Fluids at the Daejang Cu-Zn-Pb Vein Deposit, Korea. RESOURCE GEOLOGY, 48, 171-182.
 Scott, S.D. and Barnes, H.L. (1971) Sphalerite geo-thermometry and geobarometry. Econ. Geol., 66, 653-669.

Shikazono, N. and Shimizu, M. (1987) Au/Ag ratio of native gold and electrum and the geochemical environment of gold vein deposits in Japan. *Mineralium. deposita*, 22, 309-314

Shikazono, N. (1985) A comparison of temperatures estimated from the electrum-sphalerite-pyritear-

gentite assemblage and filling temperatures of fluid inclusions from epithermal Au-Ag vein-type deposits in Japan. *Econ. Geol.*, 80, 1415-1424.

2006년 12월 11일 원고접수, 2006년 12월 18일 게재승인.