

동진광산의 지질과 금은광화작용

정재일 · 김선영

Geology and Gold-Silver Mineralization of Dongjin Mine

Jae-II Chung and Seon-Young Kim

ABSTRACT : The Dongjin deposits which is located in the Chinan Basin, are emplaced along N10~40°E trending fissure sets. So it is a sort of fissure-filling ore deposits. The results of paragenetic studies suggest two stages of hydrothermal mineralization; stage I: base-metal sulfides stage, stage II: late base-metal sulfides, electrum and silver-bearing sulfosalts stage. Au : Ag ratios of the electrums show that Ag atomic% are higher than that of Au. The temperature and salinity of the Dongjin deposits estimated from fluid inclusion and sulfur isotope geothermometry are as follows; stage I: 240~315°C, 2.4~7.1 NaCl eq. wt.%, stage II: 190~268°C, 4.6~8.4 NaCl eq. wt.%. The estimated oxygen and sulfur fugacity during first stage mineralization, based on phase relation of associated minerals, range from 10^{-35} ~ $10^{-39.7}$ atm. and 10^{-11} ~ $10^{-13.4}$ atm., respectively. All these evidences suggest that the Dongjin deposits are polymetallic meso-epithermal ore deposits.

서 언

전라북도 진안군 일대에는 백악기 진안층군을 관입하는 각섬석 흑운모 화강암이 분포하고 있다. 이 지역에 분포되어 있는 금·은·동광상은 마이산 역암층과 산수동층을 관입한 화성암체인 각섬석 흑운모 화강암에 열극층 전상으로 배대하는 석영맥으로 되어 있다. 이들 금·은·동광상에 위치하는 산수동층과 접하고 있는 마이산 역암층에 대해서 시마무라 (1925)는 역암을 주로 하고 산수동층과 부정합으로 엮혀있다고 하였고 손치무 (1969)는 마이산 역암층과 산수동층이 마이산 역암층을 기저로 하는 퇴적유희에 속하는 층이라고 하였다. 또 홍재모 (1981)는 만덕산층이 최하부이고 마이산 역암층이 산수동층을 부정합으로 덮고 있다고 하였고 Gwag (1990)는 진안분지의 Fan-delta형태의 퇴적상에 의거하여 퇴적되었다고 하였다. 이 연구는 전라북도 진안군 성수면 도토리 (동경 127° 21' 00"~127° 22' 30", 북위 35° 41' 00"~35° 42'

30") 부근에 위치하는 동진광상의 금·은·동광화작용과 주변지질에 대한 연구결과이다. 동진광산은 채광당시에는 내동산 남쪽사면 해발 약 600 m지점에서 NE방향으로 북동쪽 능선에서는 해발 약 500 m지점에서 SE방향으로 탐광, 굴진되었다.

연구지역의 지질과 광상에 대해서는 주변의 진안도폭 지질조사 보고서와 오수도폭지질조사 보고서가 있고 광상에 대해서는 Koo, Russell (1965)의 조사보고서가 있을 뿐 광상에 대한 자세한 연구보고는 아직 발표되지 않았다.

이 연구의 목적은 동진광상 주변의 지질, 광상 및 광석의 산출상태, 광석광물의 구성과 화학조성, 광물공생관계, 유체포유물 및 유황동위원소 등을 검토하여 이 지역 금·은·동광화작용의 성인과 특징을 고찰함에 있다.

일반지질

지질은 선캠브리아기 결정편암과 화강편암을 기저로 하여 진안분지를 채운 백악기 퇴적층과 후기에 이를 관입한 화산암류로 크게 분류된다. 이 분지퇴적층은 진안층군

* 전북대학교 자연과학대학 지질학과 (Department of Geology, College of Natural Science, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea)

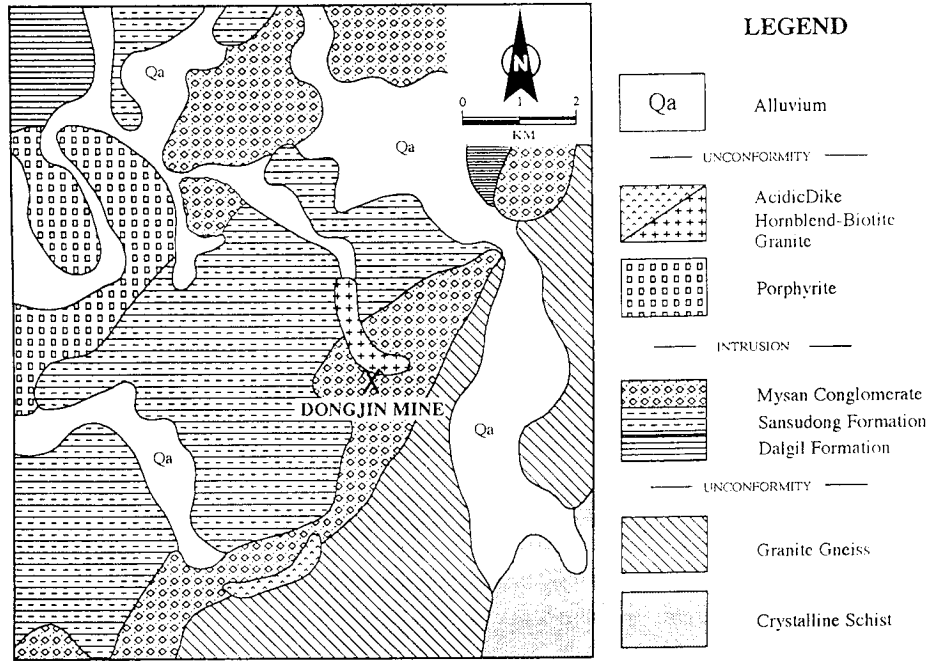


Fig. 1. Geologic map of the Dongjin mine area.

과 이를 덮은 마이산 역암으로 구분된다. 진안층군은 만덕산층, 달길층, 산수동층으로 나누어지며, 산수동층은 사암, 회색 및 흑색 세일로 구성된 층후 약 600 m, 달길층은 응회암, 흑색 세일 및 응회암질 세일로 구성된 층후 약 1,000 m, 만덕산층은 역암, 사암, 암회색에서 흑색 세일, 안산암, 응회암질 세일, 응회암 및 이회암 (marlstone)으로 구성되며 층후 약 800 m의 암층으로 이루어졌다 (시마무라, 1925; 이영엽, 1992; 홍만섭 등, 1966; Reedman *et al.*, 1975).

금·동 광상은 산수동층에 관입한 각섬석 흑운모 화강암에 열극층전상으로 배대하는 수개의 석영맥으로 되어있다 (Fig. 1).

화강편마암은 가장 오래된 층으로 페그마틱한 화강암질 편마암과 국부적으로 변성 사암이 내재된다. 남동쪽 부근에 나타나는 암석은 암색이 회색 및 녹회색을 띠는 세립의 편암이 소규모 분포한다. 편암은 육안으로 관찰시 결정이 구별되나 편마암보다 작은 결정들로 되어있다. 엽상 구조는 편마암보다 뚜렷하며 더 얇다. 편리에 따라 방향성을 가지고 잘 쪼개지나 그 면이 완전히 평탄하지 못하고 파상을 이루는 일이 많고 역암층에 역들도 많이 나타난다. 현미경하에서는 장석입자가 크고 전기석이 장석내에 들어 있기도 하다. 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암은 점이적인 변화를 보여주어 각각의 분별은 곤란하

나 반상변정질 편마암은 대체로 중립질로서는 2~5 mm 정도이다. K-장석을 많이 포함하여 분홍색을 띄기도 하고 호상 편마암과 안구상 편마암도 관찰된다. 이 화강편마암은 선캠브리아기 시대에 만들어진 것으로 마이산 봉우리의 역암층과 단층관계에 있을 가능성이 있으나 확실치는 않다. 육안 관찰시 편리구조와 안구상 구조가 보이며 안구는 주로 석영과 장석으로 이루어져 있고 흑운모가 포함되며 전형적인 편마구조와 shadow구조가 보인다.

진안층군은 하부로 부터 만덕산층, 달길층, 산수동층이 놓이고 그위에 부정합으로 마이산 역암층이 놓이는 것으로 되어있다. 전주 진안지역 일대에서 만덕산층은 완주군 소양면 신촌리 부근에 소규모로 발달되어 있으며, 대부분이 산수동층과 마이산 역암층이다. 특히 달길층은 존재하지 않으며 마이산 역암층과 산수동층만이 존재한다고 했으며, 마이산 역암층은 산수동층 위에 놓이는 것이 아니고 산수동층에 의해 정합적으로 피복되는 최하위층이라고 했다. 또한 시마무라 (1925)는 마이산 역암층을 산수동층의 상위층으로 보았으나 이것은 역전에 의한 것임이 밝혀져 마이산 역암층과 산수동층은 마이산 역암층을 거저로 하는 하나의 퇴적윤회에 속하는 층이라 했다. 만덕산층과 마이산 역암층의 역의 성분은 주로 편암과 편마암 등으로 되어 있으며 양자 모두 편마암과 접하고 있다는 사실에서 동일층으로 생각하고 손치무의 생각을 고려해

볼 수 있었으나 만덕산층이 최하위층이고 마이산 역암층이 최상위층으로서 그 사이에 엄연히 달길층 및 산수동층이 존재함이 확실하다. 왜냐하면 마이산 역암층이 빈암의 관입을 받아 변성된 부분이 보이기 때문이고 또 응회암 및 응회암질 사암이 상당히 많이 발견되기 때문에 하나의 층으로 생각해주어야 한다. 또한 마이산 역암층을 진안층군에 넣어야 할 것인가에 대해서는 아직 논란의 여지가 있다.

만덕산층은 역암이 우세하며 사암과 셰일이 협재된다. 역은 주로 편마암과 편암, 규암 및 변성사암으로 구성되어 있으며 역의 크기는 최대 20 cm이고 기질은 주로 조립질 사암으로 색은 주로 자색이 우세하다가 간간히 회색 및 녹색을 띠며 상위로 갈수록 암색이 회색 또는 자색을 띠는 극조립질 사암을 협재한다. 셰일이 협재되어 역암과 호층을 이루고 있는 부근의 암색은 주로 회색 내지 암회색이다. 비교적 충리를 잘 보여주며 역암의 분급작용은 불량하고 원마도는 다양하다. 역암의 역은 주로 우백질 화강암, 규암등이며 장석은 최대 약 4 cm로 주로 역암과 장석질 조립사암 및 셰일로 구성된다. 소규모의 단층면도 여러개 관찰된다. 암색은 황회색, 담회색, 회색, 암회색등 다양하다.

달길층은 주로 응회암, 응회암질 사암 및 셰일로 구성되며 그중 대부분은 응회암과 응회암질 사암층이다. 응회암은 주로 괴상이고 응회암질 사암층중에는 충리를 인지할 수 없는 경우가 많으며 사암과 셰일은 충리가 비교적 잘 발달되어 있다. 응회암의 암색은 암회색, 담록회색, 암록회색, 유백색, 녹색, 회색, 담녹색, 백색, 적갈색등으로 매우 다양하며, 응회암질 사암은 유백색, 암회색, 녹회색등이고 셰일과 호층을 이루는 경우가 많다. 사암은 유백색, 암회색등이며 중립 내지 세립질이다. 셰일은 흔히 응회암이나 응회암질 사암 및 사암과 호층을 이루며 발달하는데 암색은 자색과 흑색 및 담녹색을 띤다. 세립질 사암과 셰일은 열변성되어 hornfels화 된것이 많다. 산수동층과의 경계는 다소 모호하고 NW의 경사가 잘 나타나지 않는 것으로 보아서 소규모의 배사구조가 발달하여 있음을 알수 있다. 이들은 석영빈암의 관입에 기인하는 것 같다. 일부지역에서는 NW방향의 경사도 보이는 것이 있는 것으로 보아서 빈암의 관입으로 인하여 지층이 둘러진 것이 아닌가 한다. 현미경하에서 석영이 많고 세립질이며 장석보다 결정이 작고 흑운모와 방해석이 나타나기도 한다.

산수동층은 일반적으로 담갈색 및 담회색, 녹회색 사암과 회색 내지 흑색 셰일로 구성되며 달길층위에 정합으로 놓인다. 녹회색의 사암층 내에 얇은 층의 암회색 내지 흑색셰일이 협재하여 충리면을 따라 잘 갈라지고 엽층이 잘

발달하거나 (마령면 덕천리 판치저수지 동편) 흑색셰일과 역암이 호층을 이루기도 한다. 빈암의 관입을 받은 곳에서는 변성작용을 심하게 받은 흔적이 뚜렷이 나타난다. 주향은 NS~20°NE 이거나 N20~65°E, 경사는 30~35°SE 또는 SE로 나타나며 좌포리부근에서의 주향과 경사는 N70°E, 60°SE이다. 육안관찰시 사암내에 산화광물로 보이는 질은 갈색광물이 존재하고 그 외의 유색광물은 거의 없다. 주로 석영, 장석, 백운모등이며 회색, 흰색, 담갈색을 띤다. 흑색셰일은 변질을 많이 받았는데 현미경하에서는 석영이 세립질이고 80%정도이며 장석반정이 석영보다 입자가 크다. 흑운모와 방해석이 약간 나타나고 장석은 쌍정이 잘 나타난다. 흑운모가 방향성을 보이기도 하고 석영은 퇴적기원으로 주로 기질을 이룬다.

마이산 역암층은 산수동층의 침식면상에 부정합으로 놓이며 주로 cobble (64 mm이상)크기의 역암과 거력역암으로 구성되나 본 층은 얇은 운모회색 사암층이 협재된다. 본 층은 일반적으로 산수동층위에 부정합으로 놓여 있지만 편마암상에 부정합으로 놓여진다. 마이산 역암층의 역은 주로 편마암, 편암, 규암등이고 분급작용은 극히 불량하며 원마도도 다양하여 angular~rounded이다. 현미경 관찰시 주로 석영, 장석과 유색광물이며 역들 가운데 주상의 규암이 포함되기도 한다. 회색, 흑색, 흰색, 갈색등을 띠며 풍화를 많이 받았다. 현미경하에서는 장석과 방해석이 많고 석영이 작거나 중립의 석영입자들이 대부분이다. 극히 세립질인 운모류가 괴상으로 나타나는 경우와 장석이 거의 대부분인 경우도 있으며 백운모와 흑운모가 소량 나타난다.

각섬석 흑운모 화강암에서 각섬석은 0.5~1 cm 크기의 자형 내지 반자형의 비방향성이나 흑운모는 반자형이나 타형이 우세하고 장석 결정 주위를 둘러싸서 뚜렷한 엽리를 보인다. 주향과 경사는 약 N25~35°E, 50~70°SE이고 구성광물은 장석, 미사장석, 각섬석, 흑운모, 석영이 주리고 그 외에 녹염석, 녹니석, 저콘, 스피, myrmekite이다. 입자크기는 조립~중립이고 석영은 자형~타형으로 모양이 다양하다. 석영은 약 40%정도이고 입자가 크며 장석과 방해석이 소량 나타난다. 세립의 백운모가 석영을 둘러싸고 있고 방향성이 좋다. 장석이 거의 대부분인 경우도 있으며 흑운모와 전기석이 소량 보인다.

맥암류는 대부분이 산성암맥으로서 주로 규장질암맥과 석영반암맥이 분포하고 있으나 규모가 작다.

광상개요

동진광산은 진안층군중 산수동층과 마이산 역암층을 관입한 각섬석 흑운모 화강암 내에 발달한 열극을 충전한

	Stage I	Stage II
Quartz	_____	_____
Arsenopyrite	_____	_____
Chalcopyrite	_____	_____
Pyrite	_____	_____
Molybdenite	_____	_____
Sphalerite	_____	_____
Chalcocite	_____	_____
Pyrrhotite	_____	_____
Galena	_____	_____
Electrum	_____	_____
Freibergite	_____	_____
Magnetite	_____	_____
Hematite	_____	_____
Marcasite	_____	_____
Calcite	_____	_____
Fluorite	_____	_____

Fig. 2. Paragenetic sequence of minerals from the Dongjin mine. Width of lines corresponds to relative abundance.

맥상의 금은동 광상으로, 마이산 역암층이 현저하게 발달한 내동산의 정상부근에 위치한다. 내동산의 하부에서는 산수동층의 흑색, 회색의 세일층이 역암층과 호층을 이루고 나타나고 내동산의 정상부근에서는 화강암류인 각섬석 혹은 화강암이 놓여있다. 광상은 이 화강암류의 분출 이후 열수에 의한 금은광화작용에 의해서 형성된 것으로 생각된다.

본 광산은 금·은·동을 주 채광 대상으로 하는 광상으로 초기 개발 연대는 불확실하나, 해방전 내동산의 북쪽 사면이 활발하게 개발되었던 것으로 보이며, 남쪽사면은 1953년경부터 재개발이 시작되어 1965년경까지 개발한 이후로 현재는 폐광 상태이다.

주로 산출되는 1호 맥의 경우는 해방 전에 개발되었으며 그 후 휴광중인 것을 해방 후 재개발로 2, 3, 4호 맥이 개발되었다.

광맥들은 일반적으로 10~50 cm 정도의 석영세맥이 아래쪽을 향해 주향 N80°E 방향으로 경사를 이루어 상당히 좋은 연장을 보이는 것으로 보고되어있다 (Koo. et al. 1965). 과거 1965년경의 조사보고서에 의하면 4개 맥 8개 level에서 수직거리 약 250 m 구간이 착맥된 것으로 알려졌다. 당시 약 1,000 mt의 광석이 채광되었다고 기술하고 있다. 주로 산출되는 광석광물로는 황철석, 황동석, 섬아연석, 휘수연석, 유비철석 등이 주를 이루고 그의 소량의 방연석, 자류철석, 휘동석, 자철석, 적철석, 백철석 등과 합금·은광물로 소량의 electrum, freibergite 등이 산

출된다 (Fig. 2).

광석광물

이 광장에서 산출되는 광석광물로는 황동석, 유비철석, 황철석, 휘수연석, 섬아연석, 휘동석, 자류철석, 엘렉트럼, 프라이버자이트 등이 있으며 맥석광물로는 석영, 방해석, 견운모, 녹니석 등이 있다. 각 광물의 산출상태와 특성은 다음과 같다.

황동석

광산내에서 상당히 많은 양이 산출되는 광물중 하나로 대체로 불규칙한 형태로 주로 타형을 이루며 섬아연석과 밀접하게 관련되어 나타나며 산점상으로 산출되고 대부분 섬아연석에 포획된 타형의 미립자들이 특징적으로 나타난다. 주로 유비철석과 강한 접촉현상을 보여 유비철석의 공동안에 반자형의 형태로 존재하기도 하고 유비철석에 의해 교대되어 나타나기도 한다. 황철석내에 작은 입자로 포획되어 있는 경우로 보아 황철석보다 먼저 산출된 것으로 보이며, 섬아연석과는 동시생성으로 보이는 섬아연석내에 blebs 상태로 나타나는 것도 있으며, 유비철석의 결정경계를 따라 충전되거나 교호하여 나타난다. 간혹 미립의 자류철석이나 섬아연석 등이 포획되어 나타나며, 황동석의 파쇄된 입자 경계를 따라 휘동석이 교대하여 나타나기도 한다.

유비철석

유비철석은 자형 내지 반자형으로 광상 전반에 걸쳐 맥석광물에 산점상으로 분포하며, 입자의 크기는 0.1 mm에서 0.5 cm로 약간 파쇄되어 있고 광학적 이방성이 아주 강하다. 결정들이 괴상으로 산출되거나 초기 석영의 결정 경계를 충전하여 나타나기도 하며, 부분적으로 후기 석영 세맥이나 광석광물들에 의해 심하게 파쇄되거나 교대된 것을 볼 수 있다. 황동석의 공동안에 반자형의 형태로 포획되어 있는 형태와 유비철석 결정이 방연석과 황동석에 의해 교대되어 있는 경우도 있다. 또한 맥석사이에 공동이 존재하는데 그 둘레를 유비철석의 작은 반자형 결정들이 둘러싸고 있기도 하며 유비철석의 파쇄된 틈을 따라 맥석광물인 석영과 방해석이 충전하는 형태도 자주 관찰된다. 드물게 백철석과 함께 나타나기도 한다. 주로 황철석과 밀접히 교호하여 나타나며, 간혹 섬아연석이나 작은 입자의 자류철석, 황동석을 포획하여 있는 것으로 보아

Table 1. Electron microprobe analyses of molybdenites from the Dongjin mine.

Sample No.	Weight %							Total
	Mo	Cu	Fe	Zn	Sb	Au	S	
1	60.91	0.007	0.02	0.11	0.03	0.76	39.86	101.76
2	60.4	0.005	-	0.14	-	0.75	39.89	101.24
3	59.29	-	0.06	0.13	-	0.70	39.85	100.03
4	60.32	-	-	0.12	-	0.68	40.44	101.56
5	60.47	-	-	0.16	-	0.65	40.43	101.71
6	61.01	-	0.03	0.17	0.06	0.65	40.67	102.49
7	59.99	-	0.02	0.11	0.02	0.69	40.74	101.57
8	59.54	0.01	0.04	0.16	-	0.67	40.55	100.97
9	60.07	-	0.03	0.14	0.14	0.64	41.14	102.16
10	61.38	-	0.02	0.12	-	0.73	40.78	103.03

Sample No.	Atomic %							S
	Mo	Cu	Fe	Zn	Sb	Au		
1	33.68	0.06	0.01	0.09	0.01	0.20	65.95	
2	33.48	0.04	-	0.01	-	0.20	66.17	
3	33.09	-	0.05	-	-	0.19	66.55	
4	33.17	-	-	-	-	0.18	66.55	
5	33.23	-	-	-	-	0.17	66.47	
6	33.33	-	0.03	-	0.03	0.17	66.32	
7	32.88	-	0.01	-	-	0.18	66.83	
8	32.81	0.01	0.03	0.01	-	0.18	66.84	
9	32.68	-	0.02	-	0.06	0.17	66.96	
10	33.36	-	0.01	-	-	0.02	66.31	

이들 광물 보다는 좀더 후기에 산출된 경우로 전 후기의 두차례에 걸쳐 산출되었을 것으로 생각된다.

감싸여 있는 형태등이 나타난다.

황철석

황철석은 매우 다양한 산출상태를 보이며 대부분 광석 중에서 가장 우세하게 산출되는 광물이다. 황철석은 그 산출상으로 보아 적어도 2회 이상의 정출시기를 보인다. 황철석의 크기는 0.1~3 mm이며 대부분 세립질 타형이나 자형으로도 산출된다. 맥석중에 단독으로 정출되는 황철석은 반자형 내지 자형이 우세하다. 초기에 정출한 황철석은 대부분 파쇄구조를 보이며 그 파쇄된 틈 사이로 방연석, 섬아연석, 황동석, 함은광물등이 충전되어 있기도 하며 후기에 정출한 황동석이나 섬아연석에 의해 교대되어 있기도 한다. 흔히 유비철석과 함께 나타나며, 자형~반자형의 결정형태를 가지고 유비철석과 함께 섬아연석, 휘수연석, 방연석, 황동석등에 의해 부분적으로 교대되거나 파쇄되어 포획되어 있는 것을 볼 수 있다. 유비철석과 뚜렷한 경계를 가지고 접촉해 보이기도 하며 황철석의 틈을 타형의 자철석 또는 적철석이 맥석과 함께 선형으로 충전해 있기도 하며 휘수연석안에 자형으로된 황철석이

휘수연석

광산내에서 상당히 많은 양이 산출되는 광물로 초기 석영의 결정격자 사이를 충전하여 나타나거나 colloform textures를 보이는 경우도 있으며, 일반적으로 특징적인 rosette-shaped aggregates를 보인다. 가끔 평행하게 배열되어 있어 마치 twinning textures와 유사한 형태를 띤다. EPMA측정결과에 의하여 MoS₂를 만족시키는 순수한 휘수연석으로 생각되며 약간의 Zn성분이 함유되어 있다 (Table 1). 주로 불규칙한 형태의 타형, 반자형으로 나타나고 황철석과 맞물려서 또는 황철석 내부에 황철석 결정을 자르고 자라난 것도 있으며 맥석에 불규칙하게 나타나는 경우와 맥석내에 방사상의 침전으로 소용돌이 모양을 보이는 것도 있다.

섬아연석

광상 전반에 걸쳐 널리 산출되는 광물로 초기에서부터 후기까지 상당히 긴 기간동안 산출되었을 것으로 생각된다.

Table 2. Electron microprobe analyses of sphalerites from the Dongjin mine.

No.	Weight %							Atomic %					
	Zn	Fe	Cu	Cd	Mn	S	Total	Zn	Fe	Cu	Cd	Mn	S
1	63.53	2.88	0.64	0.49	0.21	33.53	101.28	46.55	2.47	0.49	0.21	0.18	50.10
2	62.56	2.82	0.83	0.32	0.39	34.15	101.07	45.67	2.41	0.62	0.14	0.34	50.83
3	61.59	2.92	2.42	0.30	0.65	32.66	100.54	45.61	2.53	1.85	0.13	0.57	29.32
4	62.96	2.54	0.54	0.39	0.41	34.26	101.10	45.94	2.17	0.40	0.17	0.35	50.97
5	63.06	2.69	0.77	0.24	0.25	34.00	101.01	46.11	2.30	0.58	0.10	0.21	50.70
6	62.31	2.84	2.38	0.22	0.66	33.19	101.60	45.59	2.44	1.79	0.09	0.58	49.52
7	63.33	3.55	2.08	0.13	0.31	33.36	102.76	45.86	3.01	1.55	0.05	0.27	49.26
8	61.49	3.37	2.02	0.25	0.21	32.93	100.27	45.53	2.92	1.54	0.11	0.18	49.72
10	62.11	2.96	0.48	0.41	0.34	34.25	100.55	45.49	2.54	0.36	0.18	0.30	51.14

Table 3. Electron microprobe analyses of chalcocites from the Dongjin mine.

Sample No.	Weight %					Total
	Cu	Fe	Ag	Sn	S	
1	77.49	1.76	0.15	-	22.75	102.15
2	78.49	0.78	0.14	0.02	22.31	101.74
3	79.83	0.50	0.10	0.03	22.94	103.40
4	79.88	0.59	0.19	0.01	22.88	103.45
5	79.64	0.73	0.09	-	22.18	102.74
6	64.61	9.88	0.20	-	25.98	100.67

Sample No.	Atomic %				
	Cu	Fe	Ag	Sn	S
1	62.01	1.76	0.15	-	36.07
2	62.96	0.78	0.14	0.02	36.11
3	63.17	0.59	0.10	0.03	36.11
4	63.07	0.59	0.09	0.01	36.25
5	63.07	0.73	0.19	-	35.23
6	50.04	9.88	0.20	-	39.88

대부분 타형이며 괴상의 형태로 되어 있고 섬아연석은 유비철석, 황철석, 황동석과 같이 산출되나 황철석과는 접촉되어 나타나는 경우가 드물다. 황동석이 세맥상으로 열극을 충전하고 있는 경우도 있다. 석영에 의해 부분적으로 파쇄되어 있는 경우도 있으며, 이미 정출된 석영의 결정 경계면을 따라 미립의 석영입자와 함께 충전되어 있기도 한다. crack내에 방연석이나 황동석이 충전되어 나타나기도 하지만, 황철석, 황동석, 자류철석등이 미립의 blebs형태로 포획되어 있기도 하며, 황동석과는 용리현상을 보이는 경우 결정 성장면을 따라 선상으로 황동석이 배열되어 있기도 한다. 섬아연석층의 FeS함량은 1.27~3.01 atomic % 범위를 보이며, 미량의 Mn, Cu, Cd를 함유하고 있다 (Table 2).

황동석

광화작용의 비교적 후기에 산출되었을 것으로 생각되

는 광물로서 불규칙한 형태로 극히 소량이 산출된다. 주로 유비철석의 crack을 따라 충전하여 나타나거나, 황동석의 결정경계에 rim을 이루며 교대된 것을 볼 수 있다. EPMA분석 결과에 의하면 이 광상에서 산출되는 황동석의 경우는 Cu에 비해 S의 함량이 많으며, 소량의 Ag, Fe가 함유되어 있다 (Table 3).

자류철석

자류철석은 수 μm 의 세립결정으로 대부분 황철석에 포획되어 나타나며, 드물게는 황동석 및 섬아연석에 포획되어 소량 산출된다. 경우에 따라서는 유비철석의 경계면을 따라 정출되는 것도 있다. 산출상태는 매우 다양하며 대부분 산점상으로 산출되나 결정입자가 집중되어 있는 경우도 있다. 드물게는 자형의 황철석, 유비철석을 교대하기도 하며, 부분적으로 백철석 또는 황철석으로 변질되어

Table 4. Electron microprobe analyses of freibergites from the Dongjin mine.

Sample No.	Weight %						Total
	Fe	Zn	Ag	Cu	Sb	S	
1	5.72	0.66	29.09	18.32	26.50	21.66	101.95
2	5.71	1.50	26.61	19.63	26.04	22.25	101.74
3	5.95	0.79	28.05	19.12	26.72	21.88	102.51
4	4.99	1.18	28.67	18.69	27.15	21.77	102.45
5	5.23	1.17	29.29	18.42	26.80	22.00	101.91
6	5.18	1.35	34.13	14.30	24.16	20.33	99.43
7	5.28	1.15	33.10	14.61	24.14	20.33	98.61
8	3.82	1.14	37.73	14.03	22.69	19.78	99.19
9	3.35	1.44	39.03	13.61	22.18	19.65	99.26
10	4.22	1.22	36.09	14.02	22.93	20.05	98.53

Sample No.	Atomic %					
	Fe	Zn	Ag	Cu	Sb	S
1	6.55	0.65	17.23	18.35	13.92	43.19
2	6.55	2.35	15.53	18.44	13.46	43.67
3	6.73	0.76	16.45	19.03	13.88	43.15
4	5.69	0.15	16.94	18.75	14.21	43.26
5	5.97	1.14	16.71	18.47	14.02	43.70
6	6.33	1.36	21.18	15.39	13.29	42.45
7	6.73	1.16	20.34	16.11	13.15	42.51
8	4.68	1.17	23.96	15.13	12.76	42/27
9	4.13	1.52	24.90	14.74	12.53	42.18
10	5.11	1.26	22.62	15.99	12.74	42.29

Table 5. Electron microprobe analyses of electrums from the Dongjin mine.

Sample No.	Au		Ag		Total	Au		Ag	
	Weight %		Atomic %			Atomic %		Atomic %	
1	65.34		35.01		100.35	49.78		48.70	
2	63.95		36.14		100.09	48.95		50.51	
3	39.68		59.25		98.93	26.41		72.01	
4	59.30		41.41		100.71	43.68		55.70	
5	56.37		43.74		100.11	40.97		58.04	
6	55.01		45.62		100.63	39.54		59.86	

있는 경우도 있다.

한다 (Table 4).

프라이버자이트

보통 함은광물 (프라이버자이트)은 방연석의 경계를 따라 가장 뚜렷하게 산출되는 특징을 보인다. 방연석 및 섬아연석내에 포획상으로 산출하는 함은광물은 입자의 크기가 3~6 μm이며 주로 둥근형의 입자가 산점상으로 흩어져 있는 반면 황철석, 황동석, 방연석 또는 맥석광물의 경계 및 틈을 충전하여 산출되는 것은 대체로 입자가 길쭉하며 폭 2~5 μm, 길이 10~60 μm로 큰편이다. 이 광상에서 산출되는 tetrahedrite계열 광물의 대부분 20wt%이상의 Ag함량을 보이는 광물로서 프라이버자이트 (freibergite)에 해당

에렉트럼

일반적인 산출상태는 불규칙한 형태로 방연석이나 섬아연석에 포획되어 있거나 황철석과 황동석 또는 방연석의 틈을 따라 가는 선상으로 충전되어 있으며 맥석광물에 수반되어 있는 경우도 있다. 그외에 황철석이나 섬아연석의 입자 경계를 따라 교대되어 있는 경우도 있으며, 이 경우는 불규칙한 형태로 상당히 넓은 범위에 걸쳐 경계를 따라 연속적으로 길게 나타난다. 또한 황동석이나 자류철석과 교대되어 산출되기도 하며, 이들은 불규칙한 미립상으로 입자 경계의 일부에서만 산출됨이 특징이다. 황철석

의 틈에 함은광물이 충전되어 있는 경우와 유비철석, 황동석과 서로 접촉하여 나타나는 경우가 대부분으로 입자의 크기는 3 μm~60 μm로 다양하다.

EPMA분석 결과 Ag의 함량이 48~72 atomic%로 비교적 높은 Ag함량을 보인다. (Table 5)

그 외 광석광물로는 초기생성으로 판단되는 자형의 자철석이 황철석이나 황동석과 같이 나타나고 맥석인 석영 내에 세맥상으로 들어가 있기도 하며 수 m의 크기로 황철석, 자류철석등과 공존하고 있으며 백철석이 2차상으로 초기광물인 자류철석, 황철석의 입자경계나 갈라진 틈을 따라 충전하거나 교대하면서 산출된다.

광물공생관계

동진광상에서 산출되는 광석광물들에 대한 야외조사및 현미경관찰 등을 통하여 검토해본 결과 광화작용은 크게 2기로 나누어지며 함금·은광물의 침전은 광화 I기와 광화 II기의 말기에 이루어 졌음을 알수 있다.

각 광물의 산출시기를 살펴보면, 휘수연석의 경우는 광화작용의 가장초기에 여러번의 열수광화작용에 의해 초기 정출되었던 광석광물의 crack을 충전하여 나타나 있는 것을 볼 수 있다. 자류철석, 유비철석은 휘수연석에 비해 비교적 초기에 정출되었으며, 섬아연석과 황철석은 거의 동일시기로 생각된다. 방연석은 I, II기 각각에서 비교적 후기에 정출되었을 것으로 생각되며, 백철석은 I기의 후기에 II기에는 잠시의 정출이 있었을 뿐 광상전반에 그 산출량이 많지 않은 광물이다. 프라이버자이트는 극히 소량이 관찰되는 광물로 광상에서 가장 후기에 산출된 저온성 광물로 생각된다. 에렉트럼의 경우는 II기의 말기에, 휘동석의 경우는 I기의 말기에 정출된 광물로 생각된다.

유체포유물

유체포유물 연구는 동진광상의 광맥을 구성하고 있는 광물들 중 광화 I기의 투명한 석영내의 유체포유물을 대상으로 실시하였다. 일반적으로 유체포유물은 크기, 형태, 산출상태에 근거하여 분류된 초생포유물과 2차 포유물이 동일시료에서 관찰되지만 유체포유물 연구는 초생포유물만을 대상으로 실시하였다.

석영 중에 관찰되는 유체포유물은 대부분이 액상과 기상의 2상 포유물이며 드물게 액상, 기상의 2상 포유물이며 드물게는 액상, 기상, 고상을 포함하는 다상의 포유물도 나타난다. 2상 및 다상포유물의 기상 충전도는 30~50% 정도이며 상온에서 CO₂를 함유한 포유물은 관찰되지 않았다.

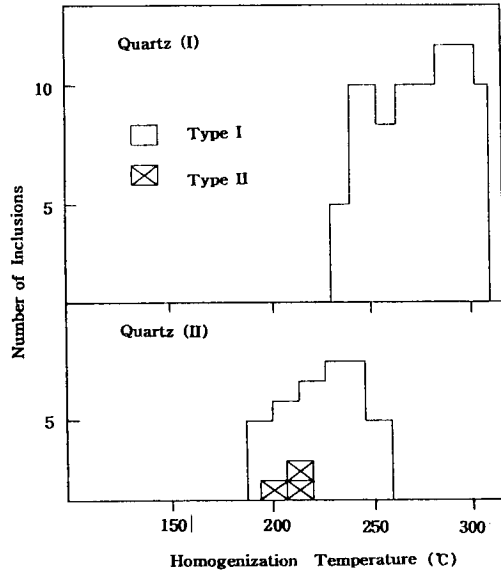


Fig. 3. Homogenization temperature of fluid inclusions in stage I, II quartz of the Dongjin mine.

유체포유물의 형태는 대부분 타원형 (oval shape)이나 시료에 따라 원형, 부정형도 관찰되며 크기는 대부분 5~50 μm정도이며 일반적으로 10~20 μm크기가 대부분이다. 유체포유물의 균일화온도 측정은 각각의 포유물에 대해 3회 이상 반복측정을 하였으며 재현오차는 ±2% 이내였다.

유체포유물의 분류

산상별 석영중의 유체포유물의 종류는 실온에서 관찰되는 상의 종류와 충전도, 가열 및 냉각실험시 유체포유물의 상변화 거동에 따라 I, II형 포유물로 분류된다.

I형 포유물은 시료중에서 가장 보편적으로 보여지는 유체포유물로서 I, II기의 석영에서 모두 관찰된다. I형 포유물은 액상과 기상의 2상으로 구성되어 있으며 가열실험시 액상으로 균일화된다. II형 포유물은 액상, 기상, 고상으로 구성되어 있는 다상포유물로서 그 숫자가 많지 않으며, 고상을 제외한 기상의 충전도는 I형 포유물과 거의 유사하다. 고상은 정방형의 암염 (halite)과 불투명광물로 되어 있다. II형 포유물 역시 가열실험시 액상과 기상이 액상으로 균일화되며 상온이나 냉각실험시 액체 CO₂나 CO₂수화물은 관찰되지 않았다.

균일화 온도 및 염농도

가열실험에 의한 석영중의 유체포유물의 균일화온도

Table 6. Sulfur isotopic compositions and calculated temperatures by isotopic geothermometry of sulfide minerals from the Dongjin mine.

Stage	Mineral	Mineral Assemblage	$\delta S^{34}(\%) \pm \sigma$	$\Delta \delta S^{34}_{x-y}$	Ti(°C)
I	x Sphalerite	Gn-Cp-Po	$+5.86 \pm 0.09$	2.20	291
	y Galena	Cp-Po-Gn	$+3.66 \pm 0.10$		
II	x Pyrite	Sp-Ms-Ag	$+6.43 \pm 0.11$	1.12	244
	y Sphalerite	Py-Ms-Ag	$+5.31 \pm 0.05$		

Py; Pyrite, Sp; Sphalerite, Cp; Chalcopyrite, Gn; Galena, Po; Pyrrhotite, Ms; Marcasite, Ag; Ag bearing minerals

범위는 광화작용의 시기에 따라 크게 두군으로 분류된다 (Fig. 3). 광화 I기의 석영 중에 포함된 유체포유물의 균일화온도는 240~315°C이다. 광화 II기에 정출된 석영중에 포함된 유체포유물의 균일화 온도는 I형 포유물이 190~268°C이고, 염류를 포함하는 II형 포유물은 염의 용해온도 (220~368°C) 보다 비교적 낮은 온도범위인 195~212°C에서 액상이 기상으로 충전되는 균일화 온도를 보여 광화 후기로 가면서 균일화 온도가 낮아지는 경향을 보인다. 이러한 현상은 각 시기를 대표하는 광석광물의 정출에 온도의 하강이 중요하게 작용하였음을 시사한다. 특징적인 것은 광화 I기 및 광화 II기의 석영중에 관찰되는 I, II형 포유물이 가열실험시 모두 액상으로 균일화 된다. 염농도는 염농도에 따른 빙점강하의 차이를 이용하여 구하였다. (Potter *et al.*, 1978). 동진광산의 광화 I, II기 석영내 유체포유물의 염농도는 각각 2.4~7.1 wt.%, 4.6~8.4 wt.%의 범위를 보여 거의 중복되는 범위를 보인다.

유황안정동위원소

공존하는 유화광물의 유황안정동위원소비는 광산의 성인과 온도를 아는 중요한 도구로 사용되어 왔다. 이 연구에서는 광화용액의 기원과 광산의 생성온도를 추적하기 위해 광화 I기의 정출광물인 섬아연석-방연석 광물쌍과 광화 II기의 황철석-섬아연석 광물쌍에 대해 유황동위원소비를 측정했다. 대상광물로 부터 S의 추출은 Sn (II) SPA (280±10°C)로 분석용의 가스정제는 유리제 진공라인을 이용하여 통상적인 방법에 따라 수행했다. (Sasaki *et al.*, 1979). 유황동위원소비는 CDT (Canyon Diablo Troilite)를 표준시료로 가스질량분석기 (Finnigan MAT DeltaE)를 이용하여 측정하였다. Table 6에 나타낸 바와 같이 광화 I기 섬아연석의 δS^{34} 값은 +5.86‰, 방연석의 δS^{34} 값은 +3.66‰ 이고, 조직상 광화 II기에 정출되었다고 판단되는 황철석의 δS^{34} 값은 +6.43‰ 이며 섬아연석의 δS^{34} 값은 +5.31‰ 이다. 동진광산에서 산출되

는 유화광물 시료의 δS^{34} 값은 +3.66~+6.43‰로서 비교적 좁은 범위를 보여 이들 유황의 기원이 산성화성암과 관계하고 있음을 추정할 수 있다.

유황동위원소 지질온도계는 평형상태하의 광화유체로부터 정출하여 공존하는 광물쌍 사이에 존재하는 유황동위원소의 분배를 토대로 하여 얻을 수 있다. (Sasaki, 1971; Kajiwaru, Korouse, 1971; Czamanske, Rye, 1974 Ohmoto, Rye, 1979). 이 연구에서 얻어진 공존유화광물 쌍간의 동위원소 분배는 광화 I기의 $\Delta S^{34}_{sp,gn}$ 값이 2.20, 광화 II기의 $\Delta S^{34}_{py,sp}$ 값이 1.12로 나타났다. 이들 광물 쌍을 정출시킨 광화유체가 평형상태하에 있었으며 고결후 동위원소의 재분배가 일어나지 않았다고 하는 가정과 함께 이들 값을 Czamanske and Rye (1974), Kajiwaru and Korouse (1971)의 식에 대입하여 광산의 생성온도를 계산한 결과, 광화 I기의 생성온도가 291°C, 광화 II기가 244°C로서 각 광화기 석영중에 함유되어 있는 유체포유물의 균일화 온도 영역과 비교적 잘 일치하고 있으나 고결 후 동위원소의 재분배 가능성을 전적으로 배제할 수 없음을 지적해두고자 한다 (Table 6).

광화작용에 대한 고찰

동진광산은 백악기 진안층군을 관입하는 각섬석 흑운모 화강암지역에 배태된 수개조의 평형광맥들로 구성된 열극충전광산이다. 광맥의 주향과 경사는 각각 N 20~30°E, 20~30°SE가 지배적이다.

이들 광맥의 발달을 규제한 열극계는 모암인 흑운모편마암 및 엽리상화강암류에 발달하고 있는 N10~40°E 주향의 엽리구조와 같은 계열의 것으로서 광화작용은 기존의 열극구조와 밀접하게 관련되었음을 시사한다. 광상 주변에 관입되어 있는 암맥류들도 대체적으로 같은 계열의 구조선을 따라 관입되어 있다.

동진광산의 생성온도는 광화 I기에 형성된 석영내 유체포유물의 균일화온도 범위가 240~315°C로 (Fig. 3) 광화 I기의 공생광물인 섬아연석-방연석 쌍을 이용한 유황안정

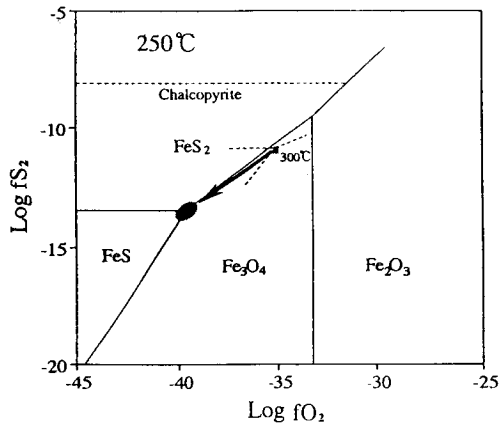


Fig. 4. Fugacity of sulfur vs. fugacity of oxygen at 250°C showing regions stability of pyrite+pyrrhotite+magnetite assemblage from the stage I mineralization of the Dongjin mine.

동위원소 지질온도계로 구한 291°C와 비교적 잘 일치한다. 또 광화 II기의 황철석과 섭아연석 쌍의 유황안정동위원소 분배로부터 구한 온도는 244°C로 유체포유물의 균일화 온도 영역에 포함된다. 이상의 결과에서 동진광상의 생성온도는 대체적으로 광화 I기에 240~315°C, 광화 II기에 190~270°C로 추정된다.

또한 Scott (1973), Hutchison and Scott (1981) 등에 의해 제시되어 광상의 생성온도 추정에 일반적으로 이용되는 섭아연석-황철석-유비철석의 광물공생군 상평형관계 역시 본 광상의 광화 I, II기에 걸쳐 정출된 섭아연석 중의 FeS mole %가 2.17~3.01로 매우 낮아 적용할 수 없는 조성적 특징을 보이고 있다. 이상의 특징으로 미루어 동진광상의 생성온도를 정확히 추정하기 위해서는 보다 더 자세한 검토가 필요하다고 사료된다.

광화 I기에 산출되는 황철석-자류철석-자철석의 광물공생관계와 광상생성온도를 근거로 작성된 Fe-S-O계의 f_{S_2} - f_{O_2} 관계도로 광화 I기의 산소 및 유황분압을 추정해 본 결과, 광화 I기 평균온도 300°C에서 산소와 유황분압은 각각 10^{-35} atm.와 10^{-11} atm.이며 유황동위원소로 구한 250°C에서는 각각 $10^{-39.7}$ atm.와 $10^{-13.4}$ atm.의 분압을 보인다 (Fig. 4). 광물의 정출순서를 고려해 볼 때, 광화작용이 진행되는 동안 광화유체의 온도하강과 함께 유황 및 산소분압도 점진적으로 감소하였을 것으로 추정된다.

이상의 결과를 종합해 볼 때, 동진광상의 금·은·동 광화작용은 meso-epithermal형의 환경에서 생성되었으며 일부 (혹은 전부) 변질작용을 받았을 것으로 추정된다.

결론

동진 금·은·동광상의 광화작용에 대한 연구결과 다음과 같은 특징으로 요약된다.

1. 동진광상은 백악기의 퇴적암류 중에 발달하는 N 10~40°E계의 기존 열극을 충진하여 배태된 열극충진열수광상으로 수개조의 평형맥으로 구성된다.
2. 광화작용은 대략 I기와 II기로 분류되며 합금·은·동 광물은 주로 I, II기말기에 정출되었다. 산출되는 주요 합금·은광물은 에렉트림, tetrahedrite계의 유염광물이다.
3. 유체포유물의 유형은 액상과 기상으로 이루어진 type I이 대부분으로 광화 I, II기에 공통적으로 포함되어 있으며 고상을 함유하는 type II가 후기 석영 중에서 소수 발견된다. 이들은 모두 액상으로 균일화되는 특징을 보인다.
4. 동진광상에서 산출되는 유화광물 시료의 δS^{34} 값은 +3.66~+6.43%로서 비교적 좁은 범위를 보여 이들 유황의 기원이 산성화성암과 관계하고 있음을 시사한다.
5. 유체포유물과 유황안정동위원소로 추정된 광상생성온도는 광화 I기가 315~240°C, 광화 II기는 268~190°C의 범위를 보인다. 광화유체의 NaCl 상당염농도는 광화 I기가 2.4~7.1 wt.%, 광화 II기가 4.6~8.4 wt.%로 대부분 중첩되나, 광화 후기로 가면서 약간 높아지는 경향을 보인다.
6. 광화 I기의 유황분압은 10^{-11} ~ $10^{-13.4}$ atm.이고 산소분압은 10^{-35} ~ $10^{-39.7}$ atm.이다. 유황분압과 산소분압은 광화작용이 진행됨에 따라 점차 감소하였을 것으로 추정된다.
7. 이상의 생성환경으로부터 동진광상은 meso-epithermal type의 광상일 것으로 추정된다.

사사

이 연구는 1996년 전략광물연구센터 연구비와 1994년도 한국학술진흥재단의 지방대 중점연구과제 (02D0275) 연구비에 의하여 연구된 것임을 밝히며 이에 감사한다.

참고문헌

- 손치무 (1969) 한국의 지각변동에 관하여. 지질학회지, v. 5, p. 167-210.
 시마무라 (1925) 조선지질도 (1대 5만), 진안·전주도폭 및 설명서. 조선총독부 지질.
 이영엽 (1992) 백악기 진안분지의 층서, 퇴적환경 및 진화에 관한 연구. 서울대학교 대학원 박사 학위논문.
 홍재모 (1981) 진안-마령-부귀-성수-소양면 일대의 백악계 층서 및 퇴적. 경북대학교 석사학위논문, 219p.

- 홍만섭, 윤석, 길영준 (1966) 한국지질도 (1:50,000), 갈담도
 폭 및 설명서, 국립지질조사소.
- Czamanske, G.K. and Rye, R.O. (1974) Experimentally
 determined sulfur isotope fractionations between
 sphalerite and galena in the temperature range 600°C
 to 275°C. *Econ. Geology*, v. 69, p. 17-25.
- Gwag, J.H., 1990, Depositional environment of the My-
 isan Conglomerate Formation (Cretaceous) in the
 southern part of the Chinan basin. A thesis for Mast-
 er of Degree of Seoul Nat. Univ., 99p.
- Hutchison, M.N. and Scott, S.D. (1981) Sphalerite geo-
 barometry in the Cu-Fe-Zn-S system *Econ. Geol.*, v.
 76, p. 143-153.
- Kajiwara, Y. and Korouse, H.R. (1971) Sulfur isotope
 partitioning in metallic sulfide systems, *Can. J. Earth
 Sci.*, v. 8, p. 1397-1408.
- Koo, M.O. and Bruce E. Russel. (1965) Report of in-
 vestigation Tongjin gold-silver-copper mine. 7p.
- 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.
- Potter, R.W., Clynne, M.A. and Brown, D.L. (1978)
 Freezing point depression of aqueous sodium chloride
 solutions, *Econ. Geol.*, p.284-285.
- Reedman, A.J. and Um, S.H. (1975) The geology of
 Korea. Korea Institute of Energy and Resources.
- Sasaki, A. (1971) Isotope geothermometer. *Mining geol-
 ogy (Japan)*, v. 21, p. 378-393.
- Sasaki, A., Arikawa, Y. and Folinsbee, R.E. (1979)
 Kiba reagent method of sulfur extraction applied to
 isotopic work. *Bull. Geol. Surv. Japan*, v. 30, p. 241-
 245.
- Scott, S.D. (1973) Experimental calibration of the sphaler-
 ite geobarometer. *Econ. Geol.*, v. 68, p. 466-474.

1996년 3월 20일 원고접수