

무주 수왕광상의 금-은 광화작용

윤석태^{1,*} · 박희인²

¹전남대학교 과학교육학부, 500-757 광주광역시 북구 용봉동 300
²서울대학교 명예교수, 151-742 서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

Gold and Silver Mineralization of the Soowang Ore Deposits in Muju, Korea

Seok-Tai Youn^{1,*} and Hee-In Park²

¹Department of Science Education, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea
²Emeritus Professor, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

Abstract: The Soowang Au-Ag deposits occur as quartz veins which filled fissures in middle Cretaceous porphyritic granite and/or gneiss of the Precambrian Sobaegsan gneiss complex. The paragenetic studies suggest that vein filling can be divided into four identifiable stages (I to IV). Stage I is the main sulfide stage, characterized by the deposition of base-metal sulfide and minor electrum. Stage II is the electrum stage, whereas stage III represents a period of the deposition of silver-bearing sulfosalts and minor electrum. Stage IV is the post ore stage. Mineralogical and fluid inclusion evidences suggest that mineralization of the Soowang deposits were deposited by the cooling of the fluids from initial high temperatures 300°C to later low temperatures 150°C. The salinity of the fluids were moderate, ranging from 10.4wt.% equivalent NaCl in sphalerite to 3.1wt.% equivalent NaCl in barite. The gold-silver mineralization of the Soowang mine occurred at temperatures between 140 and 250°C from fluids with log f_{s_2} from -12 to -18 atm. A consideration of the pressure regime during ore deposition, based on the fluid inclusion evidence of boiling, suggests lithostatic pressure of less than 210 bars. This pressure condition indicates that vein system of the Soowang deposit formed at depth around 800 m below the surface at the time of gold-silver mineralization.

Keywords: gold mineralization, electrum, salinity, f_{s_2} , fluid inclusion.

요약: 수왕금은광상은 백악기 중기의 반상화강암이나 선캠브리아기의 소백산 편마암 복합체에 발달한 열극을 충진한 석영맥에서 산출된다. 광물공생군에 대한 연구결과 광화작용은 4시기에 걸쳐서 일어났다. 광화 I기는 주요황화광물과 소량의 에렉트럼, 광화 II기는 에렉트럼, 광화 III기는 합은황화염광물과 소량의 에렉트럼, 그리고 광화IV기는 광석광물 정출과 무관한 시기이다. 광물학적 연구 및 유체포유물 연구결과 수왕광상의 광석광물은 초기에는 고온(300°C)에서 정출하여 후기로 가면서 온도가 150°C까지 하강하는 경향을 보이고, 염농도는 섬아연석의 10.4wt.%에서 중정석의 3.1wt.%의 영역을 보여준다. 수왕광상의 금은 광화작용은 140~250°C의 온도와 황분압이 10^{-12} ~ 10^{-18} atm을 갖는 광화 유체에서 일어났다. 유체포유물의 비등증거로부터 광화작용이 진행되는 동안의 압력 조건은 정암압 환경에서 약 210 bars 정도로 추정되며, 이는 대략 약 800 m의 심도에서 광화작용이 일어났음을 시사한다.

주요어: 금 광화작용, 에렉트럼, 염농도, 황분압, 유체포유물

서 언

충청북도 영동군 용화면과 전라북도 무주군 설천면

경계 부근에는 반상화강암체가 동서로 길게 분포하고 이 반상화강암체와 그 주변에는 약 20여개의 금은광맥이 밀집부존하고 있어, 이 곳은 설천금광상구(Kim, 1971) 내에서도 금광상이 가장 밀집분포하는 곳이다(Lee, 1981). 윤석태와 박희인(1991, 1993, 1994)은 용화, 월전, 월성광상 등 이 지역의 반상화강암체 주변에 밀집분포하는 금은광상을 대상으로 광상학적 연

*Corresponding author: styoun@chonnam.ac.kr
Tel: 82-62-530-2514
Fax: 82-62-530-2519

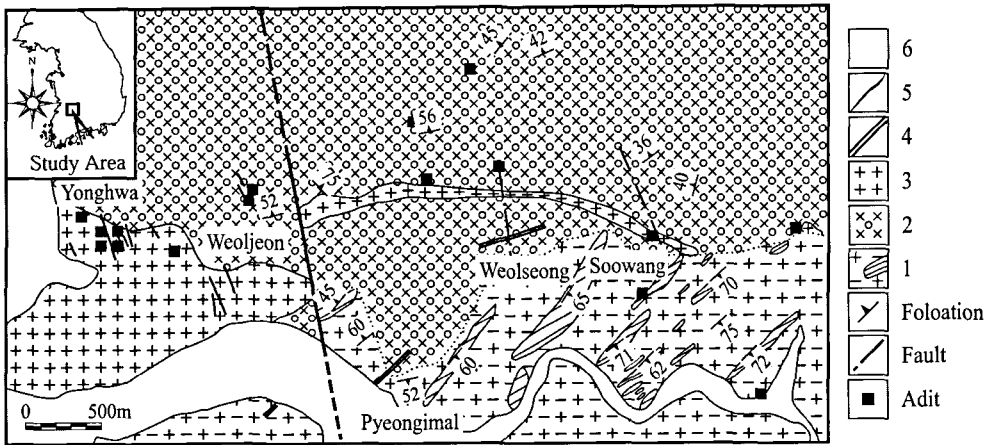


Fig. 1. Geologic map of the Yonghwa-Seolcheon mining district (1: Sobaeksan gneiss complex, 2: Amphibolite 3: porphyritic granite, 4: felsite, 5: Vein, 6: Alluvium).

구를 수행함으로써, 본 지역의 금은 광화작용이 반상화강암과 성인적으로 밀접한 관계를 갖음을 보고한 바 있다.

수왕광상은 구 나림광상으로서 금광상 밀집구역의 가장 동쪽에 있다. 행정구역으로는 전북 무주군 설천면 나림리에 위치한다. 이 광상은 1966년에 개발되기 시작한 이래 단속적으로 개발되어 현재 광맥 노두로부터 60 m 하부까지 개발되어 있다. 1990년에는 중앙산업(주)이 나림광산을 매입하고 인접하는 길영광산을 흡수 통합하여 광산명을 수왕광산으로 개명하고 1990년 12월부터 약 1년간 시추조사와 함께 이미 채광된 부광부의 30 m 하부를 갱도 탐광하였으나, 현재는 휴광중이다.

이 연구는 수왕광산의 광맥중 구 나림광산에서 개발한 주맥(이하 나림본맥이라 부르기로 함)을 대상으로 하여 수왕광산 주변의 지질, 반상화강암과 광석의 K-Ar 연령, 광상의 산출상태, 광석의 광물조성과 화학조성, 광물공생관계, 유체포유물 등을 검토하여 광상의 성인을 고찰한 것이다. 이 지역의 지질에 대하여는 1:50,000 설천지질도폭(윤석규와 박병권, 1968)과 무주지질도폭(홍승호 등, 1980)이 발간되어 있으며 충청도 일원의 금은광상에 대한 개략적인 연구는 최선규 등(1988a, 1988b)에 의하여 연구되었으나 수왕광상에 대하여 연구 보고된 것은 없다.

지 질

이 지역의 지질과 반상화강암의 암석화학에 대하여

는 윤석태와 박희인(1991)이 비교적 자세히 보고하여 여기서는 수왕광산 부근의 지질에 대하여 간단히 기술하기로 한다. 이 지역의 지질은 선캄브리아시대의 소백산 편마암복합체와 각섬암, 백악기의 반상화강암, 규장암 및 염기성 암맥으로 구성되어 있다(Fig. 1).

소백산 편마암복합체는 주로 흑운모 편마암, 미그마타이트질 편마암, 우백질 편마암, 주입편마암으로 구성되어 있다. 미그마타이트질 편마암내에는 운모편암, 규암 등이 협재된다. 각섬암은 편마암류를 관입하고 있으며 월성광산과 수왕광산 갱내에서 소규모로 산출된다.

반상화강암은 편마암류를 관입하고 있다. 이 암체는 용화리 서쪽의 용강리부근에서 EW방향으로 길쭉한 모양을 가지나 월전리 부락 부근에서 NS계 단층으로 절단되어 약 500 m 전이된 후 수왕광산 동쪽까지는 EW의 주향을 갖는 암맥을 이루고 있다(Fig. 1). 수왕광산 갱내에서 이 암맥의 폭은 약 20 m이다. 맥폭이 좁아진 암맥 중앙부의 암석은 용화리 부근에 넓게 분포하는 것과 같은 반상화강암으로 되어 있으나 암맥의 연변부로 가면서 석기가 세립 치밀한 화강반암으로 변하고 편마암류와의 접촉부에서는 유상구조가 뚜렷한 규장암으로 점변한다. 이와같이 암체 연변에 급냉대가 형성되어 있는 것은 이 화강암체가 지하 얕은 곳에 관입한 것임을 나타내는 것이다. 이 화강암 중의 흑운모의 K-Ar 연령은 98.7 ± 3 Ma이다(윤석태와 박희인, 1991). 규장암맥과 중성암맥은 전술한 모든 암석을 관입하고 있다.

본 연구지역의 평지말 부락 부근에서는 NE-SW방

향의 축을 가지며 SW로 플런지(plunge)하는 배사구조가 발달한다. 단층은 NS계와 EW계의 단층이 있다. NS계의 단층은 전술한 바와 같이 월전리 부락을 지나며 반상화강암체와 함께 편마암류를 절단 이동시키고 있다. 광산의 본갱 내에는 N10W계의 단층과 N65-75E와 N70-80W계의 단층이 발달하고 광맥은 이 단층에 의하여 전이 되어 있다. 반상화강암은 EW 방향의 주향을 갖는 암맥을 이루고 있으며 수왕광산 제2갱내에서만 반상화강암맥을 경계로 하여 변성암류의 암질이 편이한 것으로 보아 이 암맥은 EW계의 단층을 따라 관입한 것일 가능성이 크다. 이 지역에 발달하는 규장암맥들의 주향은 N5W~N25W, N20E~N35E계의 것이 있다. 이는 이 지역에 발달하는 절리의 방향과 대체로 일치한다.

광 상

수왕광산에는 구 나림광산과 길영광산에서 각각 개발된 나림본맥과 길영맥이 있다. 이 두 광맥은 미그마타이트질 편마암, 우백질편마암, 각섬암과 반상화강암내에 발달된 것으로 주향은 N35-40W에 80NE로 경사한다. 이 두맥이 안행(en echlon) 상의 평행맥인지는 현재로는 확인할 수 없다. 구 나림광산에는 이 밖에도 미그마타이트질 편마암 내에 배태된 주향이 N35E에 78NW로 경사하는 광맥과 N60E에 60NW로 경사하는 광맥이 있어 소규모로 탐광갱도가 개설되어 있다. 길영맥은 지표에서 1 km 이상 노두가 단속적으로 추적되나 갱도가 붕괴되어 광맥의 자세한 산출상태는 알 수 없다.

나림본맥은 편마암류, 각섬암과 반상화강암에 배태하며 때로는 이들 암석 중에 발달한 중성암맥의 맥벽을 따라 배태되기도 한다. 맥폭은 0.3~1.0 m이고 주향방향으로 약 100 m, 지표노두로부터 수직으로 약 60 m 깊이까지 개발되어 있다. 갱도는 제 1갱과 이보다 30 m 하부에 제 2갱이 개설되어 있고 제 1갱에서 부광부를 따라 상향 채광된 부분은 지표까지 관통되어 있다. 광맥은 우백질 편마암과 반상화강암내에서 특히 팽대하여 chambered vein의 형태를 갖는다.

나림본맥에는 cockade 구조, 빗구조(comb strature), 정동 등이 발달한다. 이 광맥은 생성시기, 광물조성, 구조와 조직을 달리하며 서로 끊고 끊기는 관계를 갖는 광맥들로 구성된 복성맥(複成脈)이다. 광맥과 접하는 편마암류, 각섬암 및 중성암맥은 심하게 탄산염

화, 백운모화 되어 있고 부분적으로 견운모, 녹리석 및 점토광물화되어 있다. 우백질 편마암과 반상화강암은 견운모화되어 있다. 이 견운모의 K-Ar 연령은 97.10 ± 3.60 Ma로서 이 광산 서쪽에 있는 용화광산의 모암변질물인 견운모의 K-Ar 연령(95.79 ± 1.20 Ma)과 대체로 같다.

광석과 광물공생관계

광맥의 산출상태, 광석의 구조, 조직, 광물조성 그리고 서로 끊고 끊기는 관계 등으로 보아 광화작용은 4기로 나누어 진다. 각기의 광맥은 광석광물과 맥석광물의 종류, 광석의 구조, 섬아연석의 색 등의 차이가 뚜렷하여 쉽게 구별할 수 있다. 이를 생성시기가 초기인 것부터 기술하면 아래와 같다.

I 기의 광석

I기의 광석은 나림본맥의 상반쪽에 발달한다. 맥석은 회색석영, 탄산염광물, 괴상의 황화광물과 산화광물로 구성되어 있다. II, III기 광석에서는 황화광물이 백색 석영 중에 산점상으로 포화되어 있는데 비하여 I기 광석에서는 괴상의 황화광물이 대상으로 산출한다. I기 광석은 맥석광물로서 소량의 석영 이외에 능철석이 산출되고 섬아연석의 색이 흑색임으로 II, III기의 광석과 쉽게 구별할 수 있다. I기의 광석은 후기의 광맥으로 절단되고 후기 광석 중에 강력으로 포함되기도 한다.

자철석과 적철석은 I기 광석에서 가장 초기에 정출한 광물들로서 엽편상 조직을 갖는 두 광물은 서로 interlocking하고 있으나 적철석은 자철석을 부분적으로 교대하기도 한다. 자류철석은 단사형의 것으로 황철석과 함께 산출되며 후기에 백철석화되어 있다. 유비철석은 황화광물 중에서는 비교적 초기에 침전한 광물로서 황철석과 interlocking하고 있다. 황철석은 섬아연석과 밀접히 공존하여 황동석, 자류철석립을 포유물로 갖기도 한다. 황철석은 부분적으로 심히 파쇄되고 파쇄된 틈은 후기의 에렉트럼이나 황화염광물로 충전되어 있다.

I기의 섬아연석은 황동석의 점적(blebs)을 다량 포함하고 있는 것이 특징이다. 에렉트럼은 휘은석과 함께 I기 섬아연석 중 특히 황동석 점적을 많이 포함하는 부위나 후기의 섬아연석에 의하여 교대되거나 세맥으로 끊기는 부위에서 주로 산출된다. 에렉트럼과

섬아연석의 산출상태에 대하여는 후에 상세히 언급하기로 한다. I기의 광석과 접하는 변질된 모암에서는 압쇄구조와 함께 kink band가 보이며 섬아연석이 쪼개져 있는 것으로 보아 I기 광맥 생성후 변형작용이 있었음을 알 수 있다.

II 기의 광석

II기의 광석은 I기의 광석을 절단하고 I기의 광석편을 포함한다. I기의 광맥이 발달하지 않는 부위에서는 II기 광맥이 모암과 직접 접한다. II기 광맥은 변질된 모암편을 많이 포함하고 빗구조, 정동 등이 발달한다. 섬아연석은 방연석, 황동석, 반투명 석영과 함께 모암이나 모암편과의 접촉부 가까에서 산출되는 것이 많다. II기의 섬아연석은 연한 적갈색이고 반투명하며 파쇄된 파편이 III기 석영 중에 산재하는 특징을 갖는다. II기 섬아연석은 소량의 점적상 황동석을 포함한다. 황철석은 초기에는 섬아연석, 방연석과 함께 intergrowth 하고 있으나 후기에는 방연석 결정 주위를 둘러 싸고 있는 것이 많다.

휘은석은 방연석 결정을 포위 또는 intergrowth 하기도 하고 섬아연석과 함께 I기 황철석의 파쇄된 틈을 채우기도 한다. Ag_2S 광물은 $179^{\circ}C$ (Ramdohr, 1980)에서 휘은석·아칸다이트(acanthite)간의 전이관계를 가지나 광학적으로 두 광물을 식별하기란 쉽지 않다. 후에 언급되는 것과 같이 여러 가지 지질온도계를 이용하여 얻은 I, II, III기 광석의 생성온도로 보아 I, II기의 Ag_2S 광물은 휘은석으로 침전되었고, III기의 것은 아칸다이트로 침전되었을 가능성이 크다.

부광부의 에렉트럼은 육안적인 크기의 입자나 사상(絲狀) 결정이 석영 중에 포함되어 있다. II기 광석이 파쇄되어 III기 광석중에 포함되어 있는 것으로 보아 II기와 III기 사이에는 파쇄작용이 있었던 것으로 보인다.

III 기의 광석

III기의 광석은 II기의 광석과는 섬아연석 등이 담황색을 가지며 육안적으로 황동석이 많이 관찰되는 것이 다른 광석의 구조는 II기 광석과 아주 유사하다. 광맥은 II기의 광석편이나 모암편을 다량 포함하며 빗구조와 정동이 발달한다. II기의 광석편을 다량 포함하는 부위에서는 적갈색 섬아연석과 담황색 섬아연석이 혼재한다. 맥석은 백색 석영 이외에 옥수질석영, 방해석, 중정석 등이 산출한다. 옥수질석영은 광

맥중앙부의 정동 가까이에 존재한다.

III기의 광석에서는 II기의 광석에서 산출되는 광물 이외에 자연은과 농홍은석, 보오노나이트(bourbonite) 등의 황화염광물이 산출한다. Base metal 황화광물은 초기에 침전한 것들이다. 섬아연석은 황동석의 점적을 포함하지 않는다. 방연석은 미립의 푸라이버자이트(freibergite)를 포함하기도 한다. III기 Ag_2S 광물은 전술한 바와 같이 생성온도로 보아 아칸다이트로서 자연은, 황동석, 농홍은석과 밀접히 공생한다. 에렉트럼은 아칸다이트, 보오노나이트 등과 동시 침전하고 푸라이버자이트, 농홍은석을 일부 교대하기도 한다. 자연은은 에렉트럼, 황화염광물 등과 함께 침전하였으며 황화염광물을 일부 교대하기도 한다.

보오노나이트는 III기의 섬아연석, 방연석내의 crack을 채우고 있다. 석영은 초기의 base metal 황화광물 침전기에서 황화염광물상의 정출기까지 계속 침전하다 말기에 옥수질 석영과 교호로 침전하였다.

IV 기의 광석

IV기는 백색석영과 함께 미량의 황철석, 중정석, 방해석, 돌로마이트, 앵커라이트(ankerite)의 정출기로서 그밖의 광석광물의 침전은 없었다. 석영은 I, II, III기의 광석 내의 균열대를 맥상으로 충전하고 있다. 탄산염광물도 전기 광석 내의 열극을 채우기도 하고 정동석영 위에 overgrowth 하기도 한다. 중정석, 황철석도 정동석영 결정표면에 성장한 광물들이다.

광물공생관계

I기는 다량의 괴상황화광물의 생성기로서 광석광물은 초기에 산화광물의 침전에 이어 base metal 황화광물, 금은광물(에렉트럼, 휘은석)의 순으로 침전하였다. II기와 III기는 base metal 황화광물의 침전으로 시작하여 금은광물과 황화염광물의 순으로 광석광물의 침전이 있었다. II기에는 다량의 에렉트럼의 침전이 있었고, III기에는 에렉트럼 이외에도 자연은과 여러 종류의 황화염광물의 생성기이다. IV기는 barren 석영과 탄산염광물 등의 생성기이다.

각 광화기의 광석에 변질된 모암편과 전기의 광석편이 다량 포함되어 있고 각기의 광석 간에 서로 끊고 끊기는 관계가 뚜렷한 것으로 보아 각기의 광화작용사이에는 fracturing이나 shattering episode가 있었다. 각 광화기의 광맥들의 특징을 종합하면 Table 1과 같고 I기에서 IV기에 걸친 광물공생관계를 모식

Table 1. Characteristics of each stage ores from the Soowang deposits.

stage	I	II	III	IV
Ore minerals	Mt, Hm, Rt, P, Sl, Gn, Asp, Po, El, Arg	Py, Sl, Gn, El, Arg, Fr	Py, Sl, Gn, Cp, El, Arg, Fr, Pyr, Bou, Ag	Py
Gangue mineral	Sid, Qt	Qt, Ank, Kut	Qt, Chal, Cal, Dol, Bar	Bar, Cal
Vein structure	massive, band	comb, vug	comb, vug	comb, vug
Color of sphalerite	dark black opaque Cp diseased	reddish brown transparent Cp diseased	honey colored transparent	-
Fragment in vein	wall rock	wall rock stage I ore	wall rock stage I, II	-
Characteristic features	massive, band Cp disease oxide mineral base-metal	comb, vug Cp disease Au-Ag, base-metal	comb, vug honey-colored Sl Au-Ag	comb, vug Cal, Dol, Bar

Abbreviations; Mt = magnetite, Hm = hematite, Rt = rutile, Py = pyrite, Po = pyrrhotite, Asp = arsenopyrite, Sl = sphalerite, Cp = chalcopyrite, El = electrum, Arg = argentite/acanthite, Fr = freibergite, Pyr = pyrrargyrite, Ag = native silver, Bou = bounonite, Qt = quartz, Chal = chalcedonic quartz, Sid = siderite, Bar = barite, Cal = calcite, Ank = ankerite, Diss = disseminated

Stage Mineral	Stage I	Stage II	Stage III	Stage IV
Magnetite	—			
Hematite	—			
Rutile	—			
Pyrite	—	—	—	—
Marcasite	—	—		
Arsenopyrite	—	—		
Sphalerite	—	—	—	
Galena	—	—	—	
Pyrrhotite	—	—		
Chalcopyrite	—	—	—	
Argentite	—	—	—	
Native silver	—	—	—	
Electrum	—	—	—	
Freibergite	—	—	—	
Pyrrargyrite	—	—	—	
Bournonite	—	—	—	
Barite				—
Quartz				—
Calcite				—
Siderite	—			
Ankerite				—

Fig. 2. Paragenetic sequence for vein minerals of the Soowang deposits.

적으로 표시하면 Fig. 2와 같다.

광석광물의 화학조성

나립분백 내 각 기의 유비철석, 섬아연석, 방연석, 에렉트럼, 푸라이버자이트, 농홍은석 및 보오노나이트의 광물정출기별 화학조성상의 특징을 검토하기 위하여 주성분 원소와 미량원소의 함량을 EPMA로 분석하였다. 그 결과를 총괄한 것이 Table 2와 Table 3이다.

섬아연석: 섬아연석은 I기(흑색), II기(적갈색), III기

(담황색)의 것을 대상으로 하여 Zn, Fe, Mn, Cd, Cu, In, S성분이 검토되었다(Table 2). 각 기의 섬아연석의 화학성분상의 차이가 뚜렷한 것은 Fe뿐이다. I기 섬아연석의(n=9)의 Fe 함량의 평균치는 18.29 mole% FeS, II기 섬아연석(n=4)의 FeS함량 평균치는 1.81 mole % FeS, III기(n=6)의 것은 0.11 mole% FeS로서 색이 연한 후기의 것일수록 Fe의 함량이 낮다(Fig. 3). Mn 함량은 I, II, III기의 것이 각각 0.17, 0.00, 0.01wt.%이고, Cd함량은 I, II, III기의 것이 각각 0.60, 0.39, 0.26wt.%로서 Fe함량과는 미약하게 정(+)의 상관관계를 보인다. 한편 In함량은 I, II, III기의 것이 모두 0.00-0.02wt.%로서 생성기별로 차이가 없다.

유비철석: 유비철석은 I기 광석에서만 산출된다. 분석된 11개 유비철석 입자는 모두가 황철석, 섬아연석과 공생하는 것으로서 As의 atom.%는 28.33-32.45이고 평균치는 30.68%이다. Co의 함량은 0.02-0.15wt.%이고 Ni는 거의 검출되지 않는다.

방연석: I, II, III기 방연석에 대하여 Pb, Ag, Cu, Sb, Bi, S를 분석한 결과 Bi만이 II, III기의 방연석(Bi = 0.03wt.%)에 비하여 I기 방연석(Bi = 0.47wt.%)에서 함량이 높은 특징을 보일 뿐 다른 원소에서는 생성기에 따른 함량차를 갖지 않는다. I, II, III기 방연석의 Ag함량은 모두 0.1wt.%이하로서 방연석의 Ag 품위예의 기여도의 낮은 것임을 알 수 있다.

에렉트럼: I, II, III기 에렉트럼의 Ag함량은 Fig. 4와 같다. I기 에렉트럼의 Ag함량은 44.84atom.%인데 대하여 II, III기의 것은 각각 54.45, 70.55atom.%로

Table 2. Electron microprobe analyses (wt.%) of Sphalerite from the Main Vein of the Soowang deposit

Sample No.	N.	Zn	Fe	Cu	Cd	Mn	S	Total	FeS mole (%)	Description
1	8	54.28	10.42	0.03	0.60	0.17	33.99	99.87	18.25	Cp inclusion free; stage I
2	4	65.47	1.03	0.00	0.39	0.00	32.45	99.34	1.81	Cp inclusion free; stage II
3	6	66.96	0.06	0.00	0.26	0.01	32.27	99.56	0.11	Cp inclusion free; stage III
4-A	1	54.40	10.65	0.00	0.40	0.17	34.02	99.64	18.65	Cp inclusion free & red colored; stage I
4-B	1	56.32	8.12	0.52	0.46	0.15	32.60	98.17	14.44	Orange colored, adjacent to Cp disease
4-C	4	54.55	6.02	5.17	0.53	0.12	33.11	99.50	11.44	Colorless, Cp diseased
5	4	65.14	0.63	0.05	0.82	0.00	33.67	100.31	1.12	
6	2	64.96	0.54	0.02	0.81	0.02	33.32	99.67	0.97	Bleached SI along Cp diseased

N.: Number of analyses, SI: Sphalerite, Cp: Chalcopyrite

Table 3. Summary of the chemical compositions (wt.%) of electrum, sulfides, and sulfosalt minerals from the Soowang deposits

Mineral	stage	N.	Au	Ag	Cu	Fe	Zn	Sb	As	Pb	Bi	Co	S	Total
Arsenopyrite	I	11	-	-	-	34.97	-	0.08	43.40	-	-	0.04	21.92	100.41
	I	3	0.03	0.00	-	-	-	0.00	-	85.58	0.47	-	13.84	99.48
Galena	II	3	0.00	0.00	-	-	-	0.03	-	86.28	0.03	-	13.85	100.19
	III	3	0.07	0.02	-	-	-	0.03	-	86.03	0.03	-	13.34	99.94
Electrum	I	76	58.43	41.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.78
	II	2	-	23.61	16.60	0.28	5.70	25.12	0.55	-	-	-	24.77	99.06
Freibergite	III	4	-	29.83	15.96	0.88	5.61	24.71	1.23	-	-	-	21.81	100.03
	III	3	-	59.92	0.01	0.20	0.32	21.16	0.85	0.00	0.00	-	16.87	100.92
Bounonite	III	3	-	0.03	13.36	0.00	0.01	24.05	0.12	44.08	0.98	-	19.40	102.03

N.: Number of analyses

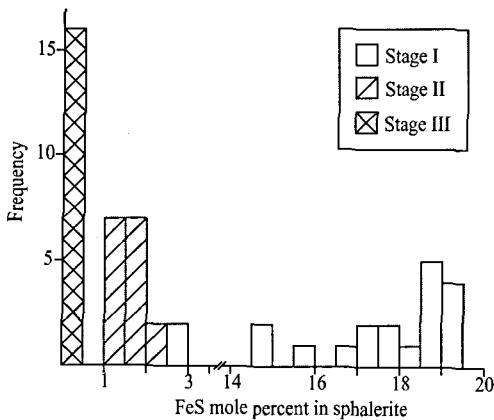


Fig. 3. Histograms for FeS content in sphalerite of the Soowang deposits.

서 광화초기에서 말기로 가며 Ag의 함량이 증가하는 경향이 뚜렷하다. 에렉트럼 중에서 큰 입자들은 중앙부에서 주변부로 가면 Ag함량이 증가하는 경향을 보인다. 이와 같은 경향은 석영 중에 독립입자로 존재하는 에렉트럼 중에서 뚜렷하다. 에렉트럼이 다른 광석광물과 공생균을 이루면서 정출될 때 에렉트럼 중

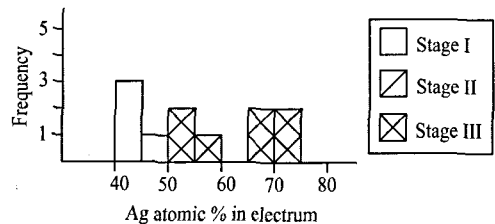


Fig. 4. Histograms showing Ag content in Au-Ag series mineral of the Soowang deposits.

의 Ag 함량을 보면 방연석이나 방연석-섬아연석과 공존하는 광물군에서 Ag함량이 높게 나타난다(Fig. 5). 양적으로 보아 에렉트럼의 주요 정출기는 II기 임으로 55±4 atom.% Ag의 조성을 갖는 에렉트럼이 양적으로 가장 많았을 것으로 생각된다.

푸라이버자이트: 푸라이버자이트는 II기와 III기 광석에서 소량 산출된다. II기 푸라이버자이트의 Ag함량의 평균치는 23.61wt.%인데 대하여 III기의 것은 29.38wt.%로서 III기 푸라이버자이트의 Ag함량이 높다. 이것은 그림에서 보여지는 바와 같이 III기의 광석에

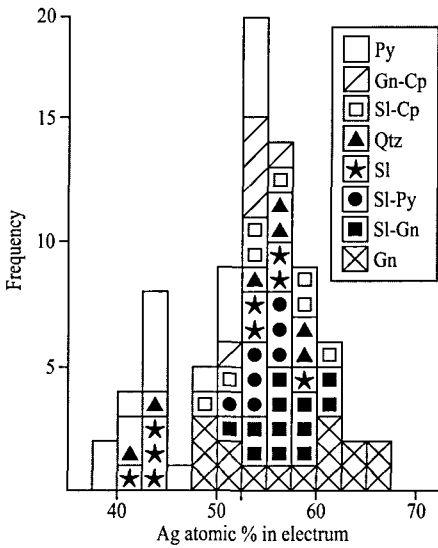


Fig. 5. Histograms showing Ag content in mineral assemblage from the Soowang deposits.

서 자연은과 농홍은석이 산출될 뿐 아니라 에렉트럼 중의 Ag함량이 높은 사실과 일치한다. II기와 III기 푸라이버자이트의 Ag/(Ag + Cu)는 각각 0.58, 0.65로서 차이가 뚜렷하다. Sb/(Sb + As)비는 II기의 것이 평균 0.98이고 III기의 것이 0.95로서 차이가 별로 없다.

농홍은석: 농홍은석은 III기 광석에서만 산출된다. EPMA 분석결과 Sb/(Sb + As)비는 0.96으로서 이는 농홍은석-프로스타이트 고용체 계열에서 농홍은석의 단성분에 가까운 조성을 갖고 있는 것을 알 수 있다.

보오노나이트: 이 광물은 푸라이버자이트, 농홍은석, 황동석과 밀접히 수반되며 EPMA 분석결과 stoichiometry 조성과 거의 일치한다.

이상으로 섬아연석은 I기에서 II, III기로 가며 Fe 함량이 현저하게 낮아지고 Mn, Cd함량도 미약하게 같은 경향을 보이는데 대하여 금은광물로서 Au-Ag 계 광물과 푸라이버자이트는 I기에서 II, III기로 가며 Ag의 함량이 점차 높아지는 것을 알 수 있다.

유체포유물

유체포유물 연구는 광물공생관계를 바탕으로 하여 I기의 석영, 능철석, II, III기의 석영, 섬아연석 IV기의 석영과 중정석을 대상으로 하였다. 유체포유물은

Roedder(1984)의 분류기준에 따라 초생, 의초생(pseudosecondary), 이차포유물로 나누고 이를 가열, 실험시 충전되는 상태에 따라 I형, II형 포유물로 나누었다.

I형 포유물: 액상과 기상으로 되어 있고 액상의 충전도가 큰 포유물(60-85%)로서 연구대상의 모든 광물에 포함되어 있다. I형 포유물군 내에는 이방성의 고상을 갖는 포유물이 있으나 균일화온도와 염농도가 인접하는 고상을 갖지 않는 I형 포유물과 차이가 없어 I형포유물에 포함시켰다.

II형 포유물: 액상과 기상으로 구성된 2상 포유물로서 액상의 충전도가 <50%이고 가열실험시 기상으로 충전된다. II형 포유물은 I기의 석영, 능철석, II, III기의 섬아연석 중에서 보여진다. I, II형 포유물은 상온에서나 냉각실험시에 액체 CO₂나 CO₂수화물의 생성을 볼 수 없다. I기 능철석과 II, III기 섬아연석 중의 II형 포유물은 I형 포유물과 공존한다. II형 포유물에 근접하여 액상만으로 된 포유물이 존재하지 않는 것으로 보아 이 II형 포유물은 necking process에 의하여 생긴 것이 아니라 vapor phase(증기상)이 포유된 것으로서 광화유체의 비등증거가 된다.

균일화온도(Th)

유체포유물의 균일화온도를 광화기별, 유체포유물을 포함하는 광물(host mineral)별, 포유물의 유형별로 표시하여 보면 Fig. 6과 같다. I기의 석영과 능철석 중에 포함된 I형 포유물의 Th는 217-329°C이고, II형 포유물의 Th는 301-329°C이다. II기 석영과 섬아연석에 포함된 I형 포유물의 Th는 152-219°C이다. III기 석영과 섬아연석에 포함된 I형 포유물의 Th는 139-191°C이고 II형 포유물의 Th는 170-180°C이다. IV기의 석영과 중정석 중의 I형 포유물의 Th는 117-209°C이다.

각기별 유체포유물의 균일화온도를 종합하면 I기; 217-329°C, II기; 152-220°C, III기; 139-191°C, IV기; 117-140°C로서 I기에서 IV기로 가며 점차 낮아지는 경향이 뚜렷하다. I, II, III기의 포유물에는 광화유체의 비등이 있었음을 나타내는 것이 있다.

염농도

NaCl 상당 염농도는 능철석의 경우 광화 I기는

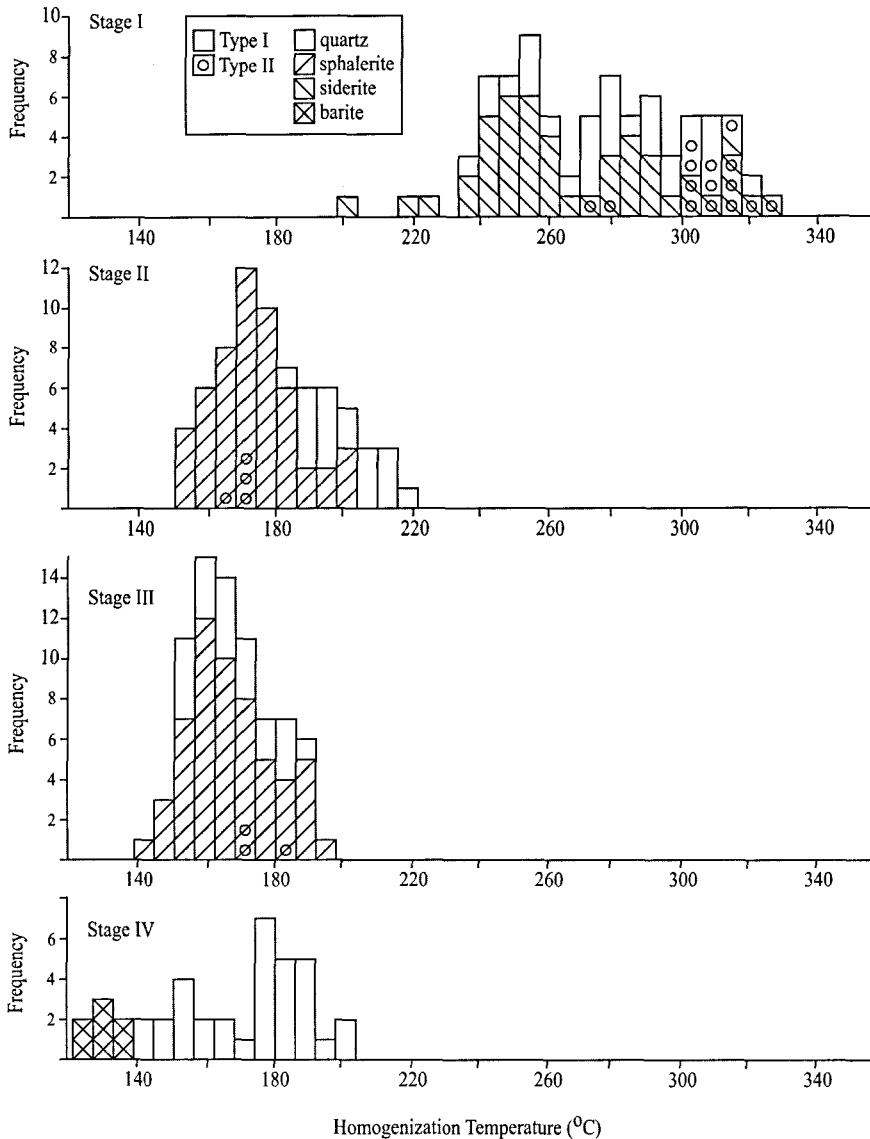


Fig. 6. Histograms temperature for fluid inclusions of the Soowang deposits.

4.8-9.8wt.%, 광화 II기는 4.7-8.4wt.%, 광화 II기 석영은 4.7-8.4wt.%, 광화 II기 섬아연석은 3.3-10.4 wt.%이다. 광화 III기에 해당하는 유체포유물의 NaCl 상당 염농도는 석영은 1.8-5.7wt.%, 섬아연석은 2.8-7.9wt.%이다. 광화 IV기의 중정석은 3.1-5.2wt.%를 나타낸다. 전반적으로 볼 때 각 광화기별 유체포유물의 NaCl 상당 염농도는 광화 초기에서 후기로 가면서 대체적으로 염농도가 감소하는 경향을 보인다(Fig. 7).

Hass(1971)가 제시한 온도-심도의 상관도에 광화 I기의 유체포유물중에서 비등증거를 보이는 포유물을

선정하여 생성심도와 생성당시의 압력을 구하면 정수압($\rho = 0.801 \text{ g/cm}^3$, 7.5wt.% NaCl, $T_h = 290^\circ\text{C}$)은 70 bars이며 압안은 210 bars로서 압력의 범위는 70~210 bars이고 생성심도는 800 m 정도이다.

광화작용에 대한 고찰

수왕광상을 형성한 광맥은 소백산 편마암복합체 내에 발달한 N45~25W 방향의 열극을 충진한 광맥으로서 4차레에 걸쳐서 형성된 북성맥이다. 열수변질광

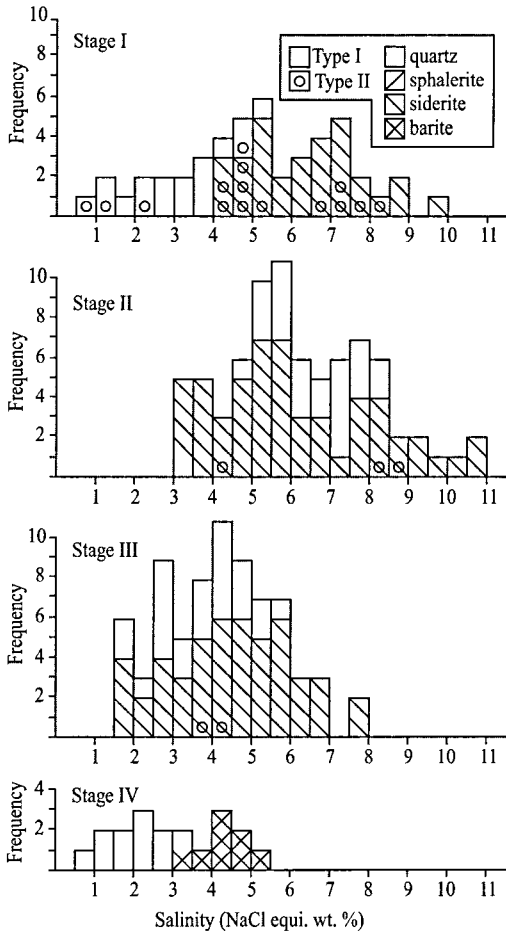


Fig. 7. Salinities for fluid inclusions of the Soowang deposits.

물인 견운모의 K-Ar 절대연령은 97.10 ± 3.60 Ma로서 반상화강암 중의 흑운모의 K-Ar 절대연령 98.70 ± 3.60 Ma와 좋은 일치치를 보인다. 따라서 금은광화작용과 반상화강암체는 시공간적으로 밀접한 관련이 있어 반상화강암이 관계화성암으로 생각된다.

광물공생군의 상평형관계, 유체포유물 연구를 통하여 광상의 생성온도를 추정하였다. 광화 I기에 동시 정출한 섬아연석-황철석-유비철석의 공생광물군을 이용하여 Scott & Barnes(1971), Scott(1973), Hutchison & Scott(1981) 등이 제시한 그림에 유비철석 중의 As의 atomic %와 섬아연석 중의 FeS의 mole %를 사용하여 구한 온도는 250~335°C이다. 황철석-섬아연석-에렉트럼-휘은석의 공생광물군(Shikazono, 1985; Barton & Toulmin, 1963)을 이용하여 구한 각 광화기의 온도는 광화 I기가 310~350°C, 광화 II기는

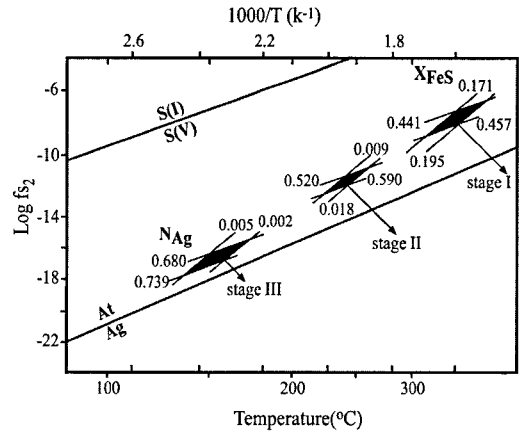


Fig. 8. Temperature and sulfur fugacity in stage I, II and III of the Soowang deposits.

225~260°C, 광화 III기는 140~175°C이다(Fig. 8). 광화 I기에는 비등증거가 관찰되어 유체포유물의 균일화 온도를 광상생성 온도로 간주할 수 있는데 균일화온도와 황철석-섬아연석-에렉트럼-휘은석 광물쌍을 이용하여 얻은 온도를 종합하면 광화 I기의 광화유체의 온도는 대체적으로 250~350°C 범위에 해당한다.

광화 II기에는 비등증거가 관찰되지 않아 압력보정을 필요로 하기 때문에 각 광상에서 균일화 온도보다는 광화유체의 실제온도가 높다. 황철석-섬아연석-에렉트럼-휘은석 광물쌍을 이용하여 구한 온도는 225~260°C로서 균일화온도 152~219°C를 고려하면 광화 II기의 대체적인 온도는 160~260°C에 해당한다.

광화 III기는 광물쌍을 이용하여 구한 온도가 140~175°C, 유체포유물 온도는 139~191°C로서 대체적인 온도는 140~170°C에 가까울 것으로 생각된다.

광화 IV기에는 유체포유물의 균일화온도는 117~140°C로서 다른 자료를 이용하여 구한 온도가 없고 비등증거도 발견되지 않아 광화유체의 온도는 균일화 온도보다 약간 높을 것으로 생각된다.

금은광물은 광화 I기말, 광화 II기 그리고 광화 III기에 정출하였는데 금광물의 주요정출시기는 광화 II기이며 은광물의 주요정출시기는 광화 III기이다. 광화 I기의 에렉트럼이 정출할 때의 대체적인 온도는 250~300°C 부근으로 생각되며, 이때 에렉트럼 침전의 원인은 광화유체의 비등에 의한 것으로 생각된다. 금광물의 주요 정출기인 광화 II기의 온도는 160~260°C 정도이며 은광물의 주요 정출기인 광화 III기의 온도는 140~170°C 정도로서 광화 II, 광화 III기

에 금은광물의 침전에는 유체포유물 연구결과를 종합하여 볼 때 천수의 혼입으로 인한 염농도의 감소와 pH의 변화 및 온도의 하강이 중요한 역할을 했을 것으로 생각된다.

공생광물군의 상평형관계로부터 황분압을 정량적으로 구한 결과(Fig. 8), 황철석-섬아연석-에렉트럼-휘은석의 공생광물군을 이용하여 구한 황분압은 광화 I기가 $10^{-8.8} \sim 10^{-6.5}$ atm, 광화 II기는 $10^{-12.5} \sim 10^{-10.8}$ atm, 광화 III기는 $10^{-18.0} \sim 10^{-15.4}$ atm이다. 광화 IV기의 황분압은 측정되지 않았지만 대체적으로 광화작용이 진행되는 동안 광화후기로 가면서 광화유체의 온도하강과 동시에 황분압이 점진적으로 감소하였음을 알 수 있다. 광물의 공생관계에서 알 수 있듯이 황분압이 비교적 높은 광화초기에 base metal 황화광물이 정출되고 점차 황분압이 감소되면서 다른 base metal 황화광물과 Ag-S계, Ag-Cu-S계, Ag-Cu-Pb-S계의 황화염광물이 정출하였으며 이보다 후기에 native 광물이 정출한 사실과 잘 일치한다.

연구지역 부근에는 서언에서 언급한대로 용화광상, 월전광상, 월성광상 등이 분포하고 있어 좁은 구역 내에 금광상이 밀집 분포되어 있다. 따라서 단일 광상의 성인연구를 토대로 소위 설천금광상구(Kim, 1971)에서의 광역적인 금 광상 성인에 대한 구체적인 연구를 실시하여야 할 것이다.

결 언

수왕광상의 금은광화작용에 대한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 금은광상은 반상화강암이나 반상화강암 주변부에 한하여 부존하고 있다. 반상화강암의 K-Ar 연령은 98.70 ± 3.60 Ma로서 수왕광상의 생성 연령 97.10 ± 3.60 Ma와 좋은 일치를 보여 반상화강암은 금은광상의 생성과는 시간적, 공간적으로 밀접한 관계를 갖는 관계화성암으로 생각된다.

2. 금은광상은 반상화강암 주변부의 편마암류 및 앰피블라이트 등에 발달한 N5-25W계의 열극을 충전한 맥상광상이다.

3. 금은광상의 광화작용은 4차례에 걸쳐 이루어졌다. 광화 I기에는 자철석, 적철석, 금홍석 등의 산화광물과 base metal 황화광물 및 소량의 에렉트럼, 휘은석이 정출하였고, II기에는 base metal 황화광물과 에렉트럼, 휘은석, 프라이버자이트가 정출하였으며,

III기에는 소량의 base metal 황화광물과 에렉트럼, 휘은석 외에 자연은과 함은황화염광물들이 정출하였고, IV기에는 소량의 황철석과 탄산염광물들이 정출하였다. 금광물의 주요 정출기는 II기, 은광물의 주요 정출기는 III기이다.

4. 유체포유 및 공생광물군의 상평형관계 등으로 추정된 I기의 온도는 $250 \sim 350^\circ\text{C}$, II기는 $160 \sim 260^\circ\text{C}$, III기는 $140 \sim 170^\circ\text{C}$, IV기는 $117 \sim 140^\circ\text{C}$ 정도로서 광화말기로 가면서 점차 온도가 낮아진다.

5. 유체포유물 증거에 의하면 에렉트럼, 방연석, 섬아연석은 $160 \sim 220^\circ\text{C}$ 의 온도와 4wt.%~9wt.%의 NaCl 상당 염농도를 갖는 유체에서 침전되었다.

6. 황철석-섬아연석-에렉트럼-휘은석을 이용하여 구한 황분압은 광화 I기는 $10^{-8.8} \sim 10^{-6.5}$ atm, 광화 II기는 $10^{-12.5} \sim 10^{-10.8}$ atm, 광화 III기는 $10^{-18.0} \sim 10^{-15.4}$ atm으로 광화 III기로 가면서 감소하는 경향을 보인다.

7. 비등에 대한 유체포유물의 증거를 통하여 광화 I기와 II가 진행되는 동안 압력범위는 70~210 bars 정도였다. 광화작용의 심도는 1 km 가까이에서 정수압과 정암압사이를 교호하는 조건이었을 것으로 추정된다.

사 사

이 논문은 1999년도 전남대학교 학술연구 조성비 지원에 의하여 연구되었으며, 연구비를 지원해 주신 전남대학교에 감사드린다. 또한, 이 논문을 심사해 주시고 내용의 미비점에 대하여 지적과 건설적인 비평을 해 주신 고려대학교 윤성택 교수, 공주대학교 이찬희 교수 그리고 익명의 심사자에게 깊이 감사한다.

참고 문헌

- 윤석규, 박병권, 1968, 설천지질도폭설명서. 국립지질조사소, 20 p.
- 윤석태, 박희인, 1991, 용화광상의 금은광화작용. 광산지질, 24, 107-129.
- 윤석태, 박희인, 1993, 월성광상의 금은광화작용. 한국지구과학회지, 14, 263-273.
- 윤석태, 박희인, 1994, 용화지역에 분포하는 백악기 화강암에 포함된 유체포유물에 관한 연구. 자원환경지질, 27, 231-236.
- 최선규, 박노영, 홍세선, 1988a, 충청도 일원의 금은광상에 대한 광물학적 연구. 광산지질, 21, 223-234.
- 최선규, 지세정, 박성원, 1988b, 충청북도 영동지역 금은광상의 금은광화작용에 관한 연구. 광산지질, 21, 367-380.

- 홍승호, 이병주, 김원영, 1980, 무주지질도폭설명서. 자원개발연구소, 40 p.
- Barton, P.B. Jr. and Toulmin, P., III, 1963, The electrom-tarnish method for the determination of the fugacity of sulfur in laboratory sulfide systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28, 619-640.
- Hass, J.L., 1971, The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Economic Geology*, 66, 940-946.
- Hutchison, M.N. and Scott, S.D., 1981, Sphalerite geobarometry in the Cu-Fe-Zn-S system. *Economic Geology*, 76, 143-153.
- Kim, O.J., 1971 Metallogenic epochs and provinces of south Korea. *Journal of the Geological Society Korea*, 7, 37-39.
- Lee, M.S., 1981, Geology and metallic mineralization associated with Mesozoic granitic magmatism in south Korea. *Mining Geology*, 31, 235-244.
- Ramdohr P, 1980, *The ore minerals and their intergrowths* (2nd ed.). Oxford, 1207 p.
- Roedder, E. 1984, Fluid inclusions. *Reviews in mineralogy*, 12, Mineralogical Society of America, 386-411.
- Scott, S.D. and Barnes, H.L., 1971, Sphalerite geothermometry and geobarometry. *Economic Geology*, 68, 466-474.
- Scott, S.D., 1973, Experimental calibration of the sphalerite geobarometer. *Economic Geology*, 68, 466-474.
- Shikazono, N., 1985, A comparison of the temperature estimated from the electrum-sphalerite-pyrite-argentite assemblage and filling temperatures of fluid inclusions from epithermal Au-Ag vein type deposits in Japan. *Economic Geology*, 80, 1415-1424.

2004년 7월 7일 원고 접수
2004년 7월 15일 수정원고 접수
2004년 7월 16일 원고 채택