

광양-승주지역 금은광상의 광화작용

이창신* · 김용준** · 박천영* · 고진석*

Gold-Silver Mineralization in the Kwangyang-Seungju Area

Chang Shin Lee*, Yong Jun Kim**, Cheon Yong Park* and Chin Surk Ko*

ABSTRACT: Gold-silver deposits in the Kwangyang-Seungju area are emplaced along $N4^{\circ}\sim 10^{\circ}W$ to $N40^{\circ}\sim 60^{\circ}W$ trending fissures and fault in Pre-cambrian Jirisan gneiss complex or Cretaceous diorite. Mineral constituents of the ore from above deposits are composed mainly of pyrite, arsenopyrite, pyrrhotite, magnetite, sphalerite, chalcopryrite, galena and minor amount of electrum, tetrahedrite, miargyrite, stannite, covellite and goethite. The gangue minerals are predominantly quartz and calcite. Gold minerals consist mostly of electrum with a 56.19~79.24 wt% Au and closely associated with pyrite, chalcopryrite, miargyrite and galena.

K-Ar analysis of the altered sericite from the Beonjeong mine yielded a date of 94.2 ± 2.4 Ma (Lee, 1992). This indicates a likely genetic tie between ore mineralization and intrusion of the middle Cretaceous diorite (108 ± 4 Ma).

The $\delta^{34}S$ values ranged from +1.0 to 8.3‰ with an average of +4.4‰ suggest that the sulfur in the sulfides may be magmatic origin. The temperatures of mineralization by the sulfur isotopic composition with coexisting pyrite-galena and pyrite-chalcopryrite from Beonjeong and Jeungheung mines were 343°C and 375°C respectively. This temperature is in reasonable agreement with the homogenization temperature of primary fluid inclusion quartz (330°C to 390°C; Park, 1989).

Four samples of quartz from ore veins have $\delta^{18}O$ values of +6.9~+10.6‰ (mean=8.9‰) and three whole rock samples have $\delta^{18}O$ values of +7.4~+10.2‰ with an average of 7.4‰. These values are similar with those of the Cretaceous Bulgugsa granite in South Korea (mean=8.3‰; Kim et al. 1991). The calculated $\delta^{18}O_{water}$ in the ore-forming fluid using fractionation factors of Bulgugsa et al. (1973) range from -1.3 to -2.3‰. These values suggest that the fluid was dominated by progressive meteoric water inundation through mineralization.

서 론

이 연구지역에는 광범위하게 분포하는 지리산편마암복합체와 불국사화강암류가 접하는 곳에 금은광상이 배태되어 있는 지역으로 김용준 (1971)은 이를 광양 금은광상구로 부르고 있다. 이번 연구에서는 광양지역에서 주로 편마암체와 섬록암류내에 배태한 4개의 금은광상과 승주지역에서 안산암중에 부존한 1개의 철광상을 대상으로 하였다. 이 지역에 대한 기초사된 자료를 보면 광양지질도폭 (박희인 외, 1989); 하동지질도폭 (남기상 외, 1989); 괴목지질도폭 (유환수 외, 1993 발간예정) 등이 발간되고 있고, 이들 지역에 대한 암석지화학적 및 광물학적 연구 (황덕환 외, 1980; 박영석 외, 1984; 김희남, 1987; 박천영

외, 1989; 윤정환, 1989; 이창신 외, 1992)에서 지질, 광상, 암석화학, 광석의 화학조성과 유체포유물 등에 대해 수행되었다.

본 연구의 목적은 이 지역의 금은광상광체를 대상으로 하여 광산주변의 지질, 광상의 산출상태, 광물공생관계, 에렉트럼의 산상과 조성, 황, 탄소와 산소동위원소 조성을 통하여 이 지역 금은광화작용의 특징을 고찰하는데 있다.

이 연구는 1990년도 한국과학재단 연구비에 의하여 이루어 졌으며 연구비를 지원해준 과학재단에 감사드린다.

지 질

연구지역의 지질은 선캠브리아기에 속하는 지리산편마암복합체를 기반으로 하여 이를 부정합의 관계로 덮는 경상누층군의 퇴적암류와 화산암류 그리고 이들을 관입하는 불국사 화성암류로 되어있다. 이 지역의 지질계통은 Table 1과 같다.

* 조선대학교 자원공학과 (Dept. of Min. and Petrol. Eng. Chosun Univ. Kwangju 501-759, Korea)

** 전남대학교 지질학과 (Dept. of Geol. Chonnam Nat. Univ. Kwangju 500-757, Korea)

Table 1. Geologic sequence of Kwangyang-Seungju area.

Quat.	Alluvium ~~unconformity~~ Granophyre and grandodiorite porphyry —intrusion— Quartz diorite —Shinsongri formation—
Cret.	Rhyolite Pyroxene andesite —intrusion or extrusion— Honblende diorite and diorite porphyry —intrusion— Two mica granite —intrusion— Hasandong formation ~~unconformity~~
Pre-camb.	Jirisan gneiss complex

지리산편마암복합체는 화강편마암, 반상변정질편마암과 우백질편마암으로된 정편마암류와 화강암질편마암으로 구성되어 있다.

경상주층군은 역질사암, 적색세일, 적색사암 및 응회질 역암과 사암으로 된 하산동층과 신성리층, 그리고 대부분 화산암류로 이루어진 유문암과 휘석안산암으로 구성되며 이들 암층은 이 지역의 기반암류인 지리산편마암복합체를 부정합적 관계로 덮는다.

화강암류는 복운모화강암, 각섬석섬록암, 석영섬록암 및 미문상화강암과 반암류로 구성되며 이들 중 각섬석섬록암, 석영섬록암 및 미문상화강암은 상기 모든 암층을 관입하나, 복운모화강암은 화산암류에 의해 덮인다 (Fig. 1).

연구 지역에는 백악기의 여러 종류의 화강암류가 분포하는데 이들 암류의 산출상태와 암질에 대하여 기술하면 아래와 같다: 연구지역에 분포하는 화강암류는 복운모화강암, 각섬석섬록암, 리문리석영석록암 및 미문상화강암으로 구성된다.

복운모화강암은 본정광상 향내에서만 소규모로 관찰되는 담회색 내지 담록색을 띤 중립 내지 조립질화강암으로서 구성광물은 석영, 사장석, 피다이트, 백운모를 주로 하고 소량의 각섬석, 흑운모, 스펀, 저어콘과 인회석이며 섬록암에 의하여 관입된 변질대에서는 심하게 녹리석화되어 있고, 또 광염상의 황철석을 소량 함유하고 있다. 이 암석의 변질대에 함유되어 있는 녹리석의 K-Ar 연령은 108 ± 4 Ma (이창신 외, 1992)로서 백악기 초에 해당하며 이 시기는 복운모화강암을 관입하는 각섬석섬록암의 관입시기와 일치함을 보여준다. 이 암석의 모오드분석결과를 Streckeisen (1967)의 QAP삼각도를 보면 화강섬록암과 화강암의 경계 가까이의 화강암 영역에 도시된다.

각섬석섬록암은 사곡리 점동 마을 부근에서 광양읍 북부 우산리 백운저수지 부근까지 소규모 암주상 관입체로 분포한다. 본 암은 녹회색을 띤 세립질 내지 중립질암으로서 지리산편마암복합체, 복운모화강암 및 경상주층군의 퇴적암류를 관입하고 있다.

각섬석섬록암은 본정과 옥동 금-은 광상을 배태하고 있으며 광체 주변에는 녹회색을 띤 심한 견운모화 작용을 받는다. 본 암의 K-Ar 각섬석연령은 108 ± 4 Ma (이창신 외, 1992)로서 백악기 초에 해당하며, 이 암석내에 배태되어 있는 광맥에서 분리한 견운모의 K-Ar 연령은 94.2 ± 2 Ma (이창신 외, 1992)로 백악기 중기를 나타낸다. 주요 구성광물은 사장석, 각섬석, 흑운모 및 석영과 소량의 녹염석, 스펀, 인회석과 불투명 광물이다.

사장석은 An_{35-45} 이며, 알바이트와 알바이트-칼스바트 쌍정을 보이고 흔히 누대구조를 보인다. 모오드 분석결과를 Streckeisen (1967)의 QAP삼각도에서 화강섬록암의 영역에 도시된다.

석영섬록암은 승주군 월등면 리문리 부근에서 장단경 2×1.2 km 정도의 작은 암주상 관입체로서 지리산편마암복합체와 휘석안산암을 관입하며 녹회색을 띤 중립질 내지 세립질 암상을 보인다. 본 암의 관입정치시기는 k-Ar 각섬석 연령이 86.8 ± 3.3 Ma (이창신 외, 1992)로서 백악기 말기에 해당하며 이는 전형적인 불국사 관입암류에 속하는 암상으로 사료된다. 주요 구성광물은 사장석, 석영, 흑운모, 각섬석 및 휘석과 소량의 녹리석, 견운모, 저어콘, 녹염석, 모나자이트 등이다. 사장석은 안데신 (An_{30-40})에 해당하며 누대구조가 발달되어 있고, 각섬석은 결정내부에 휘석의 잔존물이 남아 있는 unralite로 되어있다. 모오드 분석결과를 Streckeisen (1967)의 QAP삼각도에서 석영문조섬록암의 영역에 도시된다.

미문상화강암은 구서리 부근에서 장단경이 $2.3 \sim 1.2$ Km 정도의 소규모 암주상 관입체로서 지리산 편마암복합체를 관입한 세립질로서 담홍색을 띤 반정은 $1 \sim 2$ mm 정도의 석영과 장석이 소량 관찰된다. 주요 구성광물은 정장석, 석영, perthite 및 사장석과 소량의 흑운모와 견운모이다. 본암의 특징은 $1 \sim 3$ cm 정도의 석영백이 다량 존재하면서 망상 혹은 문상 조직을 나타내고 $1 \sim 5$ cm 정도의 miarolitic 정동이 잘 발달되어 있다. 이러한 정동의 발달은 천부에서 기상의 탈가스화작용에 의한 과냉각작용 (undercooling)의 증가 (이종익, 1992)때문이라 사료된다. 모오드 분석결과에 의하면 화강암, 화강섬록암 및 본조화강암 경계에 해당한다.

광 상

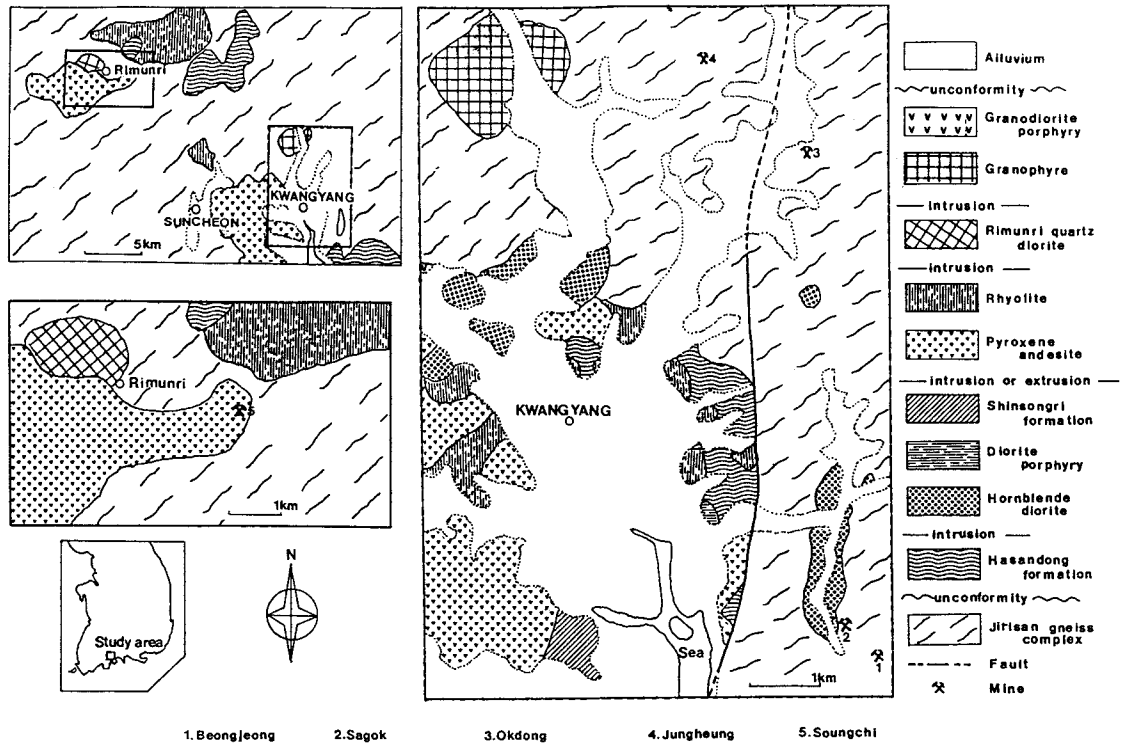


Fig. 1. Geologic map of Kwangyang and Seungju area.

개 요

연구대상 광상은 광양지역의 본정광산, 옥동광산, 사곡광산 및 증흥광산과 승주지역의 송치광산 등이다. 이들 광상중 광양지역의 광상들은 화강암질편마암과 각섬석섬록암 중에 발달한 열극을 충진한 맥상광상들이며 송치광산은 안산암질 암체에 발달한 단층대를 따라 광상이 형성되어 있다.

본정광산은 광양읍 사곡리 사곡저수지에서 동남쪽 약 300 m에 위치한다. 광산은 단층과 열극을 충진한 함금-은 황화물 석영맥 광상이다. 광맥의 주향과 경사는 N4°~10°E 및 70°~80°SE이며 맥폭은 5~25 cm로 다소 팽축현상을 보여주며 북쪽 막장지점으로 갈수록 좁아진다. 본 광산에는 1, 2, 3개의 향이 개설되어 있으며, 광맥을 구성하는 광석광물의 조성, 맥폭 및 모암변질에 차이가 있다. 즉 1, 2호 맥은 맥폭이 5~15 cm 정도이고 연장은 160 m에 이르고 광물의 조성도 비슷한 편이나 3호 맥은 12~25 cm 정도로 팽축하고 함금-은 광물은 본 맥에서 주로 산출되며 맥과 접하는 부위의 섬록암체는 열수변질에 의해 견운모 화작용이 현저하고 녹리석화작용, 황철석화작용도 인지된

다. 광맥에서 분리된 견운모의 K-Ar연령은 94.2±2.4 Ma (이창신 외, 1992)로 얻어져 금-은 광화작용은 각섬석섬록암 관입 (108±4 Ma) 후 백악기 중기에 화강암질마그마의 잔류용액에 의해 형성되어졌을 것으로 사료된다. 함금석영맥에 수반되는 광석광물로는 황철석, 유비철석을 주로하여 심아연석, 황동석, 방연석, 자류철석, 엘렉트럼, 사면동석, 휘안은석과 코베라이트 등이 산출된다.

사곡광산은 본정광산 서북쪽 약 700 m에 위치한다. 이 광산은 갱도봉락으로 입향이 불가능하나 채굴적으로 보아 광산은 화강암질편마암내의 단층대를 따라 발달된 광맥군으로 되어있다. 갱도봉괴로 광황의 상태를 자세히 알 수 없으나 폐석장에서 시료를 채취하여 조사한 결과 광석광물의 산출상태가 본정광산과 비슷함을 보여준다.

옥동광산 역시 광산이 있었던 흔적만 남아 있을 뿐이며, 채굴적으로 보아 모암은 화강암질편마암이다. 갱도가 완전히 매몰되어 있어 광맥이나 광석의 상태를 파악 할 수 없어 dump에서 시료채취하여 광황을 조사하였다. 석영맥에 수반되는 광석광물은 심아연석, 방연석을 주로하여 황철석, 황동석, 유비철석과 소량의 자류철석, 농홍은석, 사면동석, 침철석과 코베라이트 등이 산출된다.

중흥광산은 백운저수지 북동쪽 약 2.5 km에 위치한다. 광산은 반상변정질편마암에 발달한 단층과쇄대나 열극을 충전한 맥상광상으로서 광맥의 주향과 경사는 N40°~60°W와 60~70°NE이다. 갱도는 4개가 개설되어 있으나 3개는 매몰된 상태이고 본 향만 입향이 가능하며 주향연장 약 100 m 정도 굴진되었고 맥폭은 10~30 cm로 팽출한다. 광석광물로 가장 다량으로 산출되는 것은 자류철석이며 황철석, 섬아연석, 황동석, 유비철석과 방연석도 상당량 수반된다.

송치광산은 승주군 월등면 상동부락 뒷편에 분포한 안산암질암체에 발달한 단층대를 따라 광맥이 형성되어 있다. 광맥의 주향과 경사는 N6°~10°E와 81°NE이며 주향연장으로 약 20 m 굴진되어 있다. 맥폭은 대체로 1 m 내외이나 팽출이 심하다. 단층대는 산능선을 넘어 가면서 소멸되거나 N54°W의 절리면을 따라 세맥들이 충전되어 발달되어 있는데 이들 세맥에는 황철석, 자철석 및 적철석이 소량 함유되어 있고 veinlets 주위의 사장석은 검은 모화나 녹리석화 되어 있다. N6°~10°E 방향의 단층면을 따라서 안산암질암체에 1~2 m 폭의 반상암맥이 발달되어 있는데, 이 암맥에는 자철석, 적철석, 황철석, 유비철석, 황동석, 섬아연석, 방연석 등이 함유되어 있으며 자철석의 주 분포는 암맥의 중심에 폭 0.2~1 m로 형성되어 있다.

광석광물

본정, 옥동, 사곡, 중흥 및 송치광산에서 산출되는 광석광물의 종류와 각 광산별로 나타난 광석광물의 상대적 양비를 보면 Table. 2와 같다. Table. 2에 나타난 것처럼 엘렉트럼은 본정과 사곡광산에서 산출되고 자철석은 단지 송치광산에서 산출됨을 볼 수 있다.

황철석은 5개의 광산에서 다량으로 산출된 광물로서 색, 반사도, 조직, 형태등을 근거로 볼 때 4가지 형으로 분류할 수 있다. 제 1형은 광화 I기의 석영중에 0.3~1 cm 정도의 크기의 자형 및 반자형을 이루면서 주로 산점상으로 분포하고 반사도는 높은 편이고 담화색을 띤다. 형 2는 광화 II기의 황동석, 섬아연석과 방연석에 의해 교대되어 각력화된 것으로서 주로 옥동광산에서 산출된다. 형 3은 송치광산에서 산출된 것으로서 자철석의 입자 경계나 벽계면을 따라 형성하면서 자철석을 교대한 것과 막대상 내지 sub-graphic연정을 형성한 황철석과 형 4는 비교적 저온도 상태에서 산출된 것으로 보이는 (Ramdohr, 1980) 골격형 내지 새털구름형 황철석으로서 황동석에 의해 국부적으로 교대된 것이다.

유비철석은 광화 I기말 내지 II기초에 정출된 광물로서

Table 2. Table showing ore minerals and the relative abundance of constituent minerals in the ores from Beonjeong, Okdong, Sagok, Jungheung, and Soungchi mines.

Mine Minerals	Beonjeong	Okdong	Sagok	Jungheung	Soungchi
Pyrite	*****	*****	*****	*****	*****
Arsenopyrite	*****	***	*****	***	**
Pyrrhotite	***	**	***	*****	*****
Magnetite					*****
Hematite				*	*****
Sphalerite	*****	*****	*****	****	***
Chalcopyrite	*****	*****	*****	****	***
Galena	****	*****	***	****	***
Electrum	**		**	*	
Tetrahedrite	***	*	**	*	
Miargyrite	***	**	***	*	
Stannite				**	
Covellite	**	*	***	**	**
Goethite	***	**	***	***	*

*****; very abundant, *****; abundant, ****; modrate, ***; minor, **; rare, and *; trace.

0.02~1.5 mm 정도의 자형, 반자형으로 산출하고 극히 일부는 광화 II기말에 섬아연석 중의 균열을 충전하여 산출된 것도 관찰된다. 또한 이것은 광화 I기의 유비철석중의 裂開를 광화 II기의 황동석이 충전한 후 변형에 의해 각력화된 현상을 보인다. 본 광물은 주로 황동석에 의해 교대되고 있으며 어떤 결정은 각력화된 현상을 보인다. 중흥광산산 유비철석은 0.002~0.1 mm 크기의 rhomb형으로 다량 산출된다.

자류철석은 중흥, 송치, 본정광산에서 황철석 및 유비철석과 더불어 다량으로 산출되는 광물로서 변형쌍정이 확인되거나 kinkbanding조직이 나타나지 않을 것으로 보아 광화후후 변형을 받지 않은 것으로 사료된다. 본 광물은 정출시기, 조직등의 차이에 의해 3가지로 분류할 수 있다. 형 1은 광화 I기의 자류철석으로서 황철석, 유비철석과 공생하고 변질산물인 침철석에 의해 교대되기도 한다. 형 2는 자철석과의 unmixing에 의해 형성된 것으로 사료되는 망상구조로 산출된다. 형 3은 sub-skeleton 연정을 이루면서 생성된 것으로 분류된다.

자철석은 송치광산에서 다량으로 산출되는 가장 중요한 광석광물로서 phorphyric dyke에 괴상 내지 맥상체로 함유되어 있다. 본 광물은 조직과 형태에 따라 3가지 형으로 나눌 수 있다. 형 1은 lamella쌍정과 대상구조를 이루면서 황철석에 의해 교대된 것과 침상 내지 방사상의 적철석과 주로 공생한다. 형 2는 조립의 섬아연석 중의 포유물로 산출한다. 형 3은 모암의 균열 주위를 세립의 결정이 충전하여 mosaic조직을 보이면서 산출한 것 등이다.

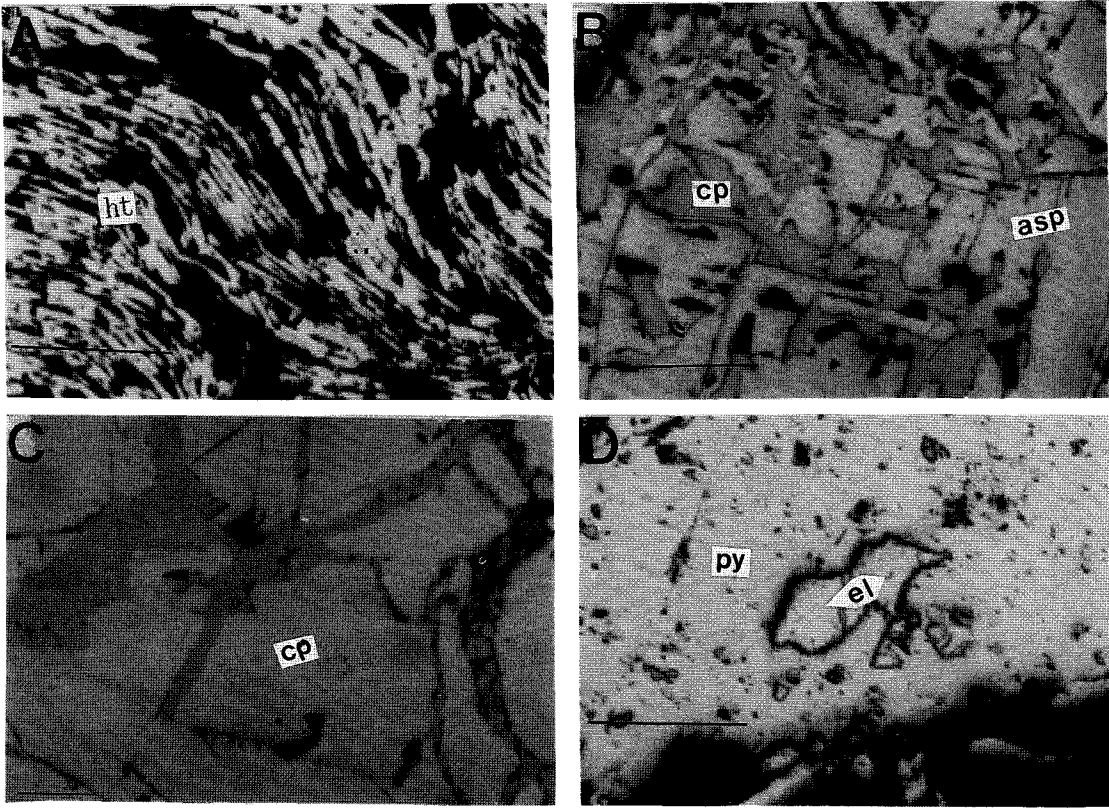


Fig. 2. Photomicrographs showing the mode of occurrence of ore minerals. A; Hematite (yellow white) with compressed and bent lamellae, B; Subgraphic texture or ramifying veinlets of chalcopyrite (yellow) replacing arsenopyrite (gray white) along grain boundaries and fractures, C; Tetrahedrite (greenish gray) occurring along fractures in chalcopyrite (yellow) and galena (grayish white), and D; pyrite (light yellow) containing electrum grains (yellow). Abbreviation: py; pyrite, asp; arsenopyrite, cp; chalcopyrite, ht; hematite, gn; galena, el; electrum, and td; tetrahedrite. Scale bar at the base each photograph represents 100 μ .

적철석은 자철석과의 unmixing에 의해 방사상 내지 침상조직을 보인것과 후기단계의 분별작용에 의해 생성된 것으로 사료되는 특징적인 막대상 또는 침상조직으로 산출된 것, 그리고 변형에 의한 lamella쌍정을 이루면서 산출된다 (Fig. 2, A).

섬아연석은 5개 광산에서 황동석, 방연석과 더불어 다량으로 산출된 광물이다. 이것은 보통 0.05~1 mm 크기의 반자형-타형의 입자로 나타나지만 본정광산과 옥동광산에서의 1~3 mm 정도의 큰 입자도 흔히 산출된다. 본 광물은 수포상이나 막대상의 황동석을 흔히 함유하고 국부적으로 조립의 황동석 입자중에 star형으로 산출된다. 그리고 송치광산 산 섬아연석은 자철석의 포유물을 함유하기도 한다.

황동석은 연구지역 전 광산에서 다량으로 산출되며 광화 I기 말에서 II기 말까지 정출하고 있다. 본 광물은 초기에 정출한 유비철석의 입자경계나 균열을 충전하여 문상조

직을 보여주며 (Fig. 2,B) 또한 후기에 정출한 방연석, 테트라헤드라이트, 코베라이트에 의해 교대되어 있는 것, 섬아연석, 황철석, 적철석중의 균열이나 세공을 충전한 세맥상, 막대상, dot상으로 산출하면서 상기 광물을 국부적으로 교대한 것, 다양한 형태의 에렉트럼의 포유물을 함유한 것, 황철석의 입자경계에서 분별작용에 의해 나타난 rim조직을 보여준것 등 여러가지 형태로 산출한다.

방연석은 연구 지역의 5개 광산에서 상당량 고르게 산출된 것으로 섬아연석, 황철석, 사면동석과 주로 공생한다. 이것은 황철석, 섬아연석, 유비철석을 교대하기도 하고 조립의 황동석 중에 에렉트럼과 공생하기도 한다. 그리고 중흥광산에서 산출된것은 전형적인 삼각 pits를 나타내기도 한다.

사면동석은 중흥과 본정광산에서만 산출된 것으로서 주로 황동석과 방연석중의 균열을 충전하여 산출되며 (Fig.

Table 3. Average chemical composition of metals of the Seungju-Kwangyang area.

Mine	Element No.	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe	S
		(g/t)	(g/t)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Beonjeong	1	1.6	3	0.03	0.09	20.3	20.3	21.3
	2	0.9	4	0.04	0.06	0.02	7.04	6.43
	3	0.3	19	0.09	0.17	0.18	5.03	3.12
	4	Tr	2	0.08	0.09	0.04	6.70	5.69
	5	0.4	12	0.03	0.17	0.02	19.4	18.7
	6	0.4	80	0.03	0.15	0.03	13.4	14.0
Sagok	1	8.6	64	0.50	0.21	0.14	15.3	14.7
	2	1.2	199	8.23	0.21	8.82	12.6	15.6
	3	77.8	186	1.58	0.13	1.06	20.6	19.2
Jung-	1	3.4	152	4.33	0.09	0.29	13.9	11.3
	2	0.3	32	6.53	0.04	0.20	5.19	2.94
Okdong	1	Tr	20	1.68	0.05	18.8	13.1	23.1
Soungchi	1	Tr	3	0.06	0.06	0.19	58.6	4.31

2, C) 때때로 황동석내에 포유물 상태로 나타난다. 황석석은 주로 중홍광산에서 산출되는데 큰 섬아연석 중에 포유물로 존재한다.

휘안은석은 주로 황동석의 입자주변에서 불규칙상으로 산출 그리고 이것은 상당량의 에렉트럼의 포유물을 함유하기도 한다.

코베라이트는 주로 황동석 중에 존재하는 裂開를 따라 산출하거나 황동석의 입자 주위를 교대하여 rim조직을 보이며, 어떤 황동석은 거의 대부분 코베라이트에 의해 교대되어 있는 것도 있다.

침철석은 자류철석, 황철석 중에 발달한 裂開를 따라 산출 하면서 상기 광물을 부분적으로 교대한다.

금 · 은 광석의 조성

연구지역의 본정, 사곡, 중홍, 옥동 및 송치광산에서 산출된 금과 은의 품위는 Table 3과 같다. 금과 은 이외의 화학조성으로는 Pb, Zn, Cu, Fe 및 S에 대해서만 분석하였다. 이들 원소의 화학분석은 광업진흥공사 광물시험소에 의뢰하여 행해졌다. 상기 5개광산 중 Au분석치가 Trace로 나타난 송치와 옥동광산을 제외한 본정, 사곡, 중홍광산에서 산출된 Au/Ag의 평균비는 각각 0.17, 0.19, 0.06로서 사곡광산에서 가장 높은 값을 보여준다. 또한 3개 광산의 Au:Ag에 대한 비는 Fig.4에 나타났다. Fig.4에는 보는바와 같이 3개 광산이 비슷한 함량관계를 보여 Au-Ag광화작용에 큰 차이가 없음을 시사해 주고 있으며 이와 같은 현상은 에렉트럼의 조성, 공생광물, 광화시기 및 열수용액의 성질등이 상호 비슷했다는 것을 암시해 준다.

Stage	I	II	III
Minerals			
Pyrite	-----		
Arsenopyrite	-----		
Pyrrhite	-----		
Magnetite	-----		
Hematite	-----		
Sphalerite		-----	
Chalcopyrite		-----	
Galena		-----	
Electrum		-----	
Tetrahedrite		-----	
Stannite		-----	
Miangyrite		-----	
Quartz			-----
Calcite			-----

Fig. 3. Paragenetic sequence of minerals in the Kwangyang and Seungju area.

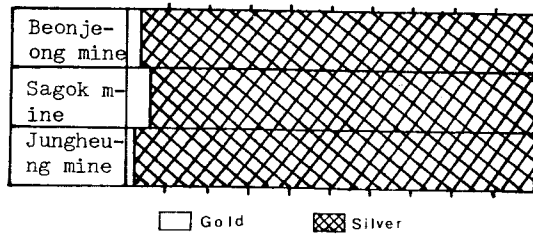


Fig. 4. Diagram showing the gold/silver ratios.

에렉트럼의 산상

에렉트럼은 연구지역 광산에서 채광 대상이 된 가장 중요한 광석광물로서 이번 연구에서는 본정, 사곡광산에서는 만이 확인되었다. 에렉트럼은 공생관계와 입자형태로 보아 5가지로 분류할 수 있다. 형 1은 반자형 내지 타형의 형태로 황철석입자중에 산출된 것으로서 다른 어떤 에렉트럼보다 진황색을 띠고 있다 (Fig. 2, D). 형 2는 황철석 중의 단구나 holes을 충전해서 산출된 것으로 대부분 불규칙한 타형을 이룬다. 형 3은 조립의 황동석 입자내에 원형내지 타원형의 포유물로 나타난 것으로서 주로 담황색을 띤다. 형 4는 휘안은석과 황동석 입자 경계를 따라 산출된 것으로 다양한 형태의 담황색을 띤다. 형 5는 유백색의 석영에 여러형의 에렉트럼이 단독으로 산출되나

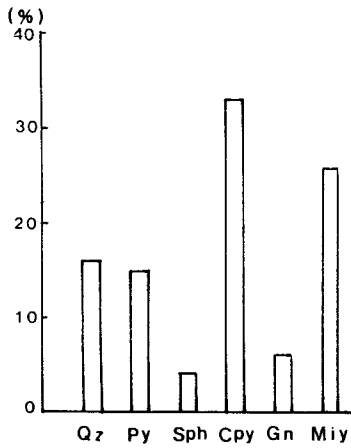


Fig. 5. Minerals associated with electrum from the Beonjeong and Sagok mines.

가끔 방연석, 황동석과 공생한 것 등으로 분류한다. 이상 5가지 형중에서 3형과 4형이 가장 많이 산출된다. Fig. 5는 에렉트럼과 공생하는 광물관계를 표시한 것으로 약 60%가 황동석 및 휘안은석(miargyrite)과 밀접히 공생하고 방연석 및 섭아연석과는 약 10%에 불과하다는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 6은 광물 중에 관찰된 에렉트럼의 입도 분포를 나타낸 것으로 약 94% 정도가 10 μm 이하로 나타난다.

Brink (1956), Fernandes (1961), Pasuali and Bisque (1975)은 함금 광상을 3가지 형태 즉, ① 자연금을 함유한 괴상 석영맥, ② 상당량의 황철석을 함유한 함금 석영맥, ③ 석영이 없는 암석 lava에서의 함금 황철석대로 분류했으며, Kalikina (1971)은 Au는 황철석이나 유비철석 중의 단구나 입자 주변을 따라 확산에 의해 이동한다고 했고, Narseev and Starova (1974)는 Kanakhstan의 Kalha 광상의 Au는 95% 정도가 황철석과 유비철석에 분포되어 산출된다고 했다. 본 연구지역의 광상에서도 반자형 내지 타형의 황철석을 함유한 함금석영맥으로 상당량의 에렉트럼이 황철석과 공생하고 있어 상기 연구결과와 부합됨을 보여준다.

에렉트럼의 조성

에렉트럼의 화학조성을 알아보기 위해 조선대학교 공과대학 공용실함실에 장치된 전자 현미경 (SEM TSM 840 A)의 EDS (Energy Dispersive X-ray microanalysis)를 이용하였으며 표준시료는 순수한 Au, Ag 금속을 이용하였다. 분석에 사용된 특수 X선은 Au, Ma, Ag, La선이며 먼저 광석형미경으로 에렉트럼을 확인하고, 확인된 위치에

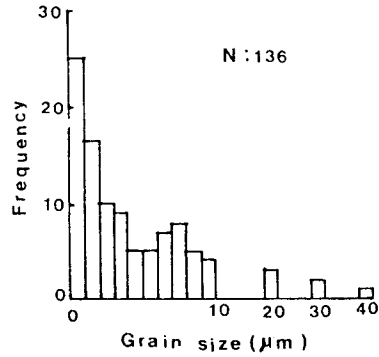


Fig. 6. Grain size of electrums from the Beonjeong and Sagok mines.

Table 4. Representative electron microprobe analyses of electrums from the Beongjeong and Sagok mines.

Mine	Sample No.	Stage	Weight percent			Atomic percent		
			Au	Ag	Total	Au	Ag	Au/Ag
Beon-jeong	B-109	I	75.75	24.25	100.00	63.11	36.89	1.71
			78.79	21.21	100.00	67.05	32.95	2.03
	B-112	I	79.24	20.76	100.00	67.63	32.37	2.09
			75.50	24.50	100.00	62.79	37.21	1.69
	B-115	II-I	71.68	28.32	100.00	58.08	41.92	1.39
			69.70	30.30	100.00	55.75	44.25	1.26
	B-116	II-I	71.33	28.67	100.00	57.68	42.32	1.36
			70.05	29.56	100.00	56.16	43.84	1.28
	B-117	II-II	67.31	32.69	100.00	53.00	47.00	1.13
			70.44	29.56	100.00	56.61	43.39	1.30
B-119	II-II	72.59	27.05	100.00	59.62	40.38	1.48	
		68.42	31.58	100.00	54.27	45.73	1.19	
		65.84	34.16	100.00	51.35	48.84	1.06	
		65.66	34.34	100.00	51.16	48.84	1.05	
B-120	II-I	74.09	25.91	100.00	61.02	38.98	1.57	
		72.23	27.77	100.00	58.75	41.25	1.42	
		71.58	28.42	100.00	57.97	42.03	1.38	
		71.36	28.64	100.00	57.71	42.29	1.39	
		68.71	31.29	100.00	54.60	45.40	1.20	
Segok	S-124	II-II	68.31	31.69	100.00	54.14	45.86	1.18
			65.98	34.02	100.00	51.50	48.50	1.06
	S-128	II-II	59.19	43.81	100.00	41.25	58.74	0.70
			64.87	35.13	100.00	50.28	49.72	1.01

면분석으로 에렉트럼을 분석하였다. 본정, 사곡광산산 에렉트럼에 대한 분석치는 Table 4와 같다.

본정광산에서 산출되는 에렉트럼은 66.55~79.24 wt.% Au (51.16~67.63 At.%Au)이다. 사곡광산에서 산출된 에렉트럼의 조성은 56.29~68.71 wt.%Au (41.20~54.60 At.%Au)로서 본정광산 에렉트럼이 사곡광산의 에렉트럼보다 9.47~10.53 wt.%Au (9.9~13.03 At.%Au)를 더 많이 함유한 것으로 나타났다. 또한 에렉트럼은 공생하는 광물과 광화

시기에 따라 조성의 차이가 있다. 즉 광화 I기의 황철석, 석영과 공생한 에렉트럼은 75.50~79.24 wt.%Au (62.79~67.05 At.%Au)인데 반해 황동석, 휘안은석, 방연석 및 섬아연석과 공생한 에렉트럼은 65.66~74.09 wt.%Au (51.16~61.02 At.%Au)로 나타나 광화 I기에 산출된 황철석 및 석영과 공생한 에렉트럼의 Au 함량이 높은 경향을 보여준다. 사곡광산산 에렉트럼이 본정광산산 에렉트럼보다 Au 함량이 적게 함유된 것도 사곡광산산 에렉트럼이 광화 II기의 황동석 및 휘안은석과 주로 공생하기 때문으로 사료된다.

광물공생 관계

상술한 각 광산에서 산출된 광석의 조직, 광물조성 및 광물 상호관계 등으로 보아 광화작용은 III기에 걸쳐 이루어졌음을 알 수 있다 (Fig. 3). 광화 I기에서 산출된 광석광물은 황철석, 유비철석, 자류철석, 자철석과 소량의 섬아연석, 황동석, 적철석, 방연석 및 극소량의 에렉트럼이 석영과 함께 침전한 시기이고, 광화 II기를 대표하는 광석광물은 섬아연석, 황동석, 방연석과 소량의 황철석, 유비철석, 자류철석, 자철석, 적철석, 에렉트럼, 사면동석, 황석, 휘안은석의 침전기이고, 광화 III기에서 증출된 것은 미량의 황철석, 황동석, 방연석, 에렉트럼, 휘안은석 등이 석영 및 방해석과 침전한 시기이다. 금은 광화작용은 주로 II기와 III기에 있었다. 광화 I, II, III기에는 포함시키지 않았지만 supergene mineral로서 소량의 침철석과 코베라이트가 산출된다.

안정동위원소

광화유체의 기원, 성질, 온도 등을 알아보기 위하여 황, 산소 및 탄소안정동위원소분석을 실시하였다. 사용된 시료는 본정, 중흥, 송치광산에서 채취하였으며 황안정동위체용으로는 황철석, 자류철석, 황동석, 방연석을 사용하였고, 산소안정동위체용으로는 석영, 자철석 및 화강암류를 택하였으며, 탄소동위체용으로는 방해석을 택했다. 분석된 원소비중에서 황은 CDT, 산소는 SMOW, 그리고 탄소는 PDB로 표시 하였다. 분석은 Kruger Enterprise에 의뢰하여 실시하였다.

황안정동위원소

광체에서 채취된 황화광물에 대한 분석결과는 Table 5와 같다. 상기 3개 광산 황화광물이 보이는 황의 동위

Table 5. Sulfur isotope data for mines of the Seungju-Kwangyang area.

Mine	Sample No.	Mineral	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$	$\Delta^{34}\text{S}(\text{‰})$	T(°C)
Beon-jeong	B-L-16	pyrite	3.9	py-gn	347 ± 47
		galena	1.0	2.9	
	B-L-17	pyrite	4.5		
Jung-heung	B-L-19	pyrite	4.9		357 ± 73
		pyrite	5.1		
	J-L-25	pyrite	4.5	py-gn	
		chalcopyrite	3.3	1.2	
	J-L-26	pyrrhotite	3.2		
Soung-chi	J-L-27	pyrrhotite	2.1		
	L-L-11	pyrite	8.3		
	L-L-15	pyrite	7.2		

Table 6. Carbon and oxygen isotope data of calcite, quartz, magnetite, and whole rocks from the Kwangyang-Seungju area.

Mine	Sample No.	Description	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	Remark
Beon-jeong	B-L-20	quartz		+10.6	
	B-L-21	quartz		+6.9	
	B-L-22	quartz		+9.0	
	B-L-23	diorite		+7.8	whole rock
	B-L-24	diorite		+7.4	whole rock
Jung-heung	B-L-31	granite		+10.2	whole rock
	J-L-28	calcite	-4.1	+7.5	
	J-L-29	quartz		+9.3	
Soungchi	S-L-12	calcite	-7.7	+0.2	
	S-L-14	magnetite		-4.9	
	S-L-30	diorite		+7.0	whole rock

원소 값은 +1.0에서 +8.3‰로 이 값은 우리나라 여러 금속광상의 황안정동위원소 값 (+2.0~+7.0‰: 김규한, 1980; 소철섭 외, 1988)과 유사하여 황화물의 합광유체는 대부분 화성기원임을 보여주고 있다. 각 광상별로 평균 $\delta^{34}\text{S}$ 값을 보면 광양지역의 본정광상이 3.9‰, 중흥광상이 3.3‰로 거의 비슷한 값을 보인 반면 송주지역의 송치광상은 7.8‰로서 약 4% 정도 차이가 나타나 광양-송주지역의 광상구에서 생성된 광상들은 서로 시기가 다른 화성활동에 수반되는 광상이라 사료되며 광화작용시 물리화학적 환경의 차이가 있음을 시사해 주고 있다. 본정광상의 황철석-방연석 광물쌍과 중흥광상의 황철석-황동석쌍이 갖는 $\Delta^{34}\text{S}$ 값은 각각 2.9‰과 1.2‰였으며 이로부터 Ohmoto and Rye (1979)의 fractionation factor를 이용하여 구한 온도는 각각 342°C와 375°C였다 (Table 5). 이 온도는 기 발표된 광화 I기의 유체포유물의 충전온도 294~313°C (윤정환, 1989)이나 330~390°C (박천영, 1989)와 비교적

잘 일치한다. 그리고 황철석-방연석쌍에서 구한 온도 (343°C ± 47)와 비교적 잘 일치한다. 그리고 황철석-방연석쌍에서 구한 온도 (375°C ± 73)와 대체로 비슷한 값을 보여 주고 있어 본 지역의 유화물이 동위원소적으로 균질한 유체로부터 침전된 것으로 사료된다.

산소, 탄소동위원소

산소 및 탄소안정동위원소비를 알아보기 위해 석영 4개, 방해석 2개, 자철석 1개, 섬록암 (전암) 3개, 그리고 화강암 (전암) 1개 등이며 안정동위원소비 분석결과는 Table 6과 같다. Table 6에서 보논바와 같이 석영의 δ¹⁸O 값은 6.9~10.6% (평균 8.9%), 광상부근의 섬록암이 7.0~7.8% (평균 7.4%), 화강암이 10.2%, 방해석이 0.2~7.5% (평균 3.9%), 그리고 자철석이 -4.9%이다. 이들 값을 각 광상별로 볼 때 본정이 8.7%, 중홍이 8.4%, 송치가 1.2%이다. 광양지역의 본정과 중홍광상은 1차 magma수의 산소동위원소 δ¹⁸O값인 이 5.5~9% (Taylor, 1974)와 일치하므로 본역의 산소동위원소는 magma기원으로 해석되며, 이는 분화 과정에서 모암광물과의 동위원소 교환작용이 거의 없었음을 의미한다. 그러나 승주지역의 송치광상은 δ¹⁸O값이 1.2%로서 광양지역과 7.4%정도 낮게 나타나는데 이는 광화과정시 열수용액이 동위원소적으로 순환수와 교환작용이 있었음을 보여 준다. 특히 자철석의 δ¹⁸O 값이 -4.9%로 낮은 값을 보이는 것은 δ¹⁸O가 결핍된 천수나 해수의 영향을 받은 것으로 생각된다. 광상주변의 심성암체에 대한 δ¹⁸O 값을 볼 때 광양지역이 8.5%이고 승주 지역이 7.0%로서 magma기원의 범위에 속하나 암체별로는 섬록암체가 평균 7.4%이고 화강암이 10.2%로서 δ¹⁸O값이 다른것은 시기를 달리하는 기원이라 생각한다.

John (1991) 등은 모암에 대한 δ¹⁸O치가 광맥에 접근할 수록 크게 감소하고 맥에서 멀리 존재할 수록 감소의 폭이 적다고 했다. 광양지역의 경우 본정광체에서 약 10 m 지점에서 채취한 시료번호 B-C-24의 δ¹⁸O값이 7.4%이고 광체에서 약 500 m 떨어진 위치에서 채취한 시료 B-C-23의 δ¹⁸O값이 7.8%로 0.4% 정도의 차이가 있어 상기 이론과 부합된 편이나 큰 차이가 나지 않은 것은 거리의 차가 적기 때문이라 사료된다.

연구지역 화강암류 (백악기)의 전암은 δ¹⁸O값이 7.0~10.2% (평균8.1%)로 백악기 불국사화강암류의 평균값 8.3% (Kim et al., 1991)와 잘 일치함을 보여주고 있다.

Bottinga (1973)와 O'neil (1969)의 fractionation equation을 이용하여 광양지역의 본정과 중홍광상에서 산출된 석영과 방해석의 동위원소비 값과 기존의 유체포유물 자료

Table 7. Calculated δ¹⁸O_{water} composition of quartz and calcite from Kwangyang area.

Mine	Sample No.	stage	mineral	δ ¹⁸ O (‰)	δ ¹³ C T(°C) ¹ (‰)	δ ¹⁸ O _{H₂O} (‰) ²	
Beon-Jeong	B-L-21	I	quartz	6.9	300	-1.9	
	B-L-20	II	quartz	10.6	240	-1.3	
	B-L-22	II	quartz	9.6	240	-2.3	
Jung-heung	J-L-28	III	calcite	7.5	-4.1	160	-4.3
	J-L-29	II	quartz	9.3	250	-2.0	

¹Based on fluid inclusion temperatures from Park, C. Y., Yun, C. H., Kim, H. N. and Park, Y. S.

²Calculated water compositions based on quartz-water and calcite-water oxygen isotope fractionation from Botttinga. et al. (1973) and O'Neil. et al. (1969).

(박천영 외, 1989; 김희남 외, 1987; 박영석 외, 1984)를 사용하여 물의 산소 동위원소비를 구해보면 δ¹⁸O_{water}는 광화 I기의 석영이 -1.9% (Table 7) II기는 -1.3~2.3%, 광화 III기의 방해석이 -4.3% (Table 7)로서 광화작용이 진행됨에 따라 열수용액중의 산소동위원소중의 값이 차차 감소하여 負 (-)의 값을 갖게 되어 광화기간 중에 천수의 역할이 중요했을 것으로 사료된다.

탄소동위원소의 분석은 중홍광상산 광화 III기의 방해석 1개와 송치광상에서 산출된 III기의 방해석 1개에 대해 실시하였다. 중홍광상산 방해석의 δ¹³C의 값은 -4.1%이고 송치광상의 방해석은 -7.7%로서 Deines (1973), Rye (1974) 등이 보고한 화성기원의 탄소에 해당한다.

결 언

광양지역의 사곡, 옥동, 중홍광상은 편암암체내에 그리고 본정광상은 섬록암체내에 발달한 단층이나 열하를 충진한 맥상광상이며, 승주지역의 송치광상은 안산암질 암체에 N4°~10°E 방향의 단층대를 따라 발달한 맥상광상으로 주 구성광물은 자철석이다.

두 지역 광상에서 광화작용은 3기에 걸쳐 이루어졌고 금은광화작용은 주로 광화 III기에 있었으며 금은광물은 에렉트럼과 소량의 휘안은석, 사면동석이다. 에렉트럼의 Au함량은 41~68 At.% 범위이다.

본정, 중홍, 송치광상의 황의 동위원소 값은 +1.0~+8.3%의 범위를 나타내고 평균 +4.4%로서 우리나라 여러 금속광상의 황안정동위원소 값과 유사하며, 황화물의 함광유체는 화성기원임을 보여 주고 있다. 유황동위체 지질온도계에 의한 생성온도는 본정 광상이 343°C 이고 중홍광상이 375°C 이다.

각 광상별 평균 δ³⁴S 값을 보면 광양지역의 본정광상이

3.9%, 중흥광상이 3.3%로 거의 비슷한 값을 보인 반면 승주지역의 송치광상이 7.8%로서 약 4% 정도 차이가 나타나 광양-승주 지역에서 생성된 광상은 서로 시기가 다른 화성활동에 수반된 광상이라 사료되며 광화작용시 물리 화학적 환경에 차이가 있음을 시사해 주고 있다.

산소안정동위원소의 연구결과 물의 산소동위원소성분을 구해보면 $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ 는 광화 I기의 석영이 -1.9%, II기는 -1.3~+2.3%, 광화 III기의 방해석이 -4.3%로서 광화 작용이 진행됨에 따라 열수용액 중의 산소동위원소 값이 감소하여 (-)의 값을 갖게 되어 광화기간중에 천수의 역할이 주요 했을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 김규환, 中井信之 (1980) 한국의 일부 금속광상의 유황동위원소 성분 및 동위원소 지질온도에 관한 연구. 지질학회지, 16권, p. 124-134.
- 김희남 (1987) 한반도 남서부지역에 분포한 화강암류에 대한 암석지구화학적 특징 및 금속광상에 관한 연구. 전남대학교, 박사학위 논문, p. 124.
- 박영석, 신병우 (1984) 광양금광상, 고흥동광상의 광상생성과 암석학적 연구. 광산 지질, 17권, p. 249-263.
- 박희인, 윤정환, 박영석 (1989) 광양 금은광상의 성인에 관한 연구. 자원공학회지, 26권, p. 249-263.
- 박희인, 박용안, 정지곤 (1989) 광양지질도폭. 한국동력자원연구소.
- 남기상, 유환수, 이종덕 (1989) 하동지질도폭. 한국동력자원연구소.
- 유환수, 김용준, 박배영 (1993) 괴목지질도폭. 한국자원연구소 (인쇄중).
- 윤정환 (1989) 열수성 금은광상의 지구화학적 연구. 서울대학교 박사학위논문, p. 128-138.
- 이종익 (1991) 경상분지 남부에 분포하는 천소관입화강암류에 대한 암석학적, 광물학적 및 동위원소암석학적 연구. 동경대학교 박사학위 논문, p. 1-190.
- 이창신, 김용준, 박천영, 이창주 (1992) 광양-승주 지역에 분포하는 화강암류의 암석화학. 광산지질, 25권, p. 51-60.
- 황덕환, 조진동 (1982) 돌산-광양지역 광역광화대 조사연구. 한국동력자원 연구소.
- Bottinga, Y. and Jaboy, M. (1973) Comments on oxygen isotope geothermometry. Earth Plant. Sci. Letters, v. 20, p. 250-265.
- Brinck, L.W. (1956) Gold deposits in Surinam Leidsche. Geol. Meded., v. 3, p. 345-369.
- Deines, P. and Gold, D.P. (1973) The isopyc composition of carbonatite and kimberlite carbonates and their bearing on the isotopic composition of deep-seated carbon. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 37, p. 1709-1733.
- Fernandes, L.L. (1961) The gold and diamond deposits of British Guiana. Proceed. Inter-Guiana, Geol. Cont 5th., p. 273-284.
- John, A.M. and Tommy, B.T. (1991) Sultan mountain mine, Western San Juan Mountains, Colorado: A fluid inclusion and stable isotope study. Econ. Geol., v. 86, p. 768-779.
- Kim, K.H., Lee, J.S. and Mizutani, Y. (1991) Petrogenetic studies of Mesozonic granites in South Korea. Abstracts of Geol. Soc. Korea Ann. Mtg., Seoul, 1991 (in Korean).
- Ohmoto, H. and Rye, R.O. (1979) Isotopes of sulfur and carbon. In Barnes, H.L., ed., Geochemistry of hydrothermal ore deposits. New York, Wiley Intersci., p. 509-567.
- O'Neil, J.R., Clayton, R.N. and Mayeda, T.K. (1969) Oxygen isotope fractionation in divalent metallic carbonates. Jour. Chem. Physics, v. 51, p. 5547-5558.
- Pasquali, Z.T. and Bisque, R.E. (1975) Interpretation of soil geochemical expression of mineralization within El Callao gold mining district, Venezuela. Colo. Sch-Mines, v. 70, p. 83-107.
- Ramdorhr, P. (1980) The ore minerals and their intergrowths. Pergamon press, p. 1207.
- Rye, R.O. and Ohmoto, H. (1974) Sulfur and carbon isotope and ore genesis. A Review. Econ. Geol., v. 69, p. 826-842.
- So, C.S. and Shelton, K.L. (1987) Stable isotope and fluid inclusion studies of Gold and Silver-bearing hydrothermal vein deposits, Cheonan-Cheongyang-Nonsan mining district, Republic of Korea; Cheonan area. Econ. Geol., v. 82, p. 987-1000.
- Streckeisen, A.L. (1967) Classification and nomenclature of igneous rock. In Barker Igneous Rocks, Prentice Hall Inc.
- Taylor, H.P. (1974) The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore depositions. Econ. Geol., v. 69, p. 843-883.

