Econ. Environ. Geol.
Vol. 27, No. 4, p. 325-333, 1994.

한국 동남부지역 금·은 광상산 에렉트럼의 화학조성

최선규*, 박맹언**, 최상훈***

Chemical Variations of Electrum from Gold and/or Silver Deposits in the Southeast Korea

Seon-Gyu Choi*, Maeng-Eon Park** and Sang-Hoon Choi***

ABSTRACT: Gold and/or silver mineralization in the southeast province, Korea, occurred in hydrothermal quartz vein that fills fracture zones in Cretaceous volcanic and sedimentary rocks of the Gyeongsang basin or granites and Precambrian gneiss. Most of the gold-silver-bearing veins in the province occur in Hapcheon, Suncheon and Haman-Gunbuk area where they are associated with Cretaceous Bulgugsa granites. On the basis of the Ag/Au ratio on amounts produced and ore grades, mode of occurrence, and associated mineral assemblages, hydrothermal Au-Ag deposits in southeast province, Korea, can be classified as follows: pyrite-type gold deposit (Group IIB, Samjeong and Sangchon deposits), antimony-type gold-silver deposit (Group IV, Gisan and Geochang deposits), and antimony-type silver deposit (Group V, Sanggo, Seweon, Seongju and Gahoe deposits). All of the gold-silver deposits in the province are generally characteristics of the gold-silver or silver-dominant type deposit which contains more silver-bearing minerals than those deposits in central Korea. The gold-silver mineralization in the deposits consist of two generation; the early characterized by gold precipitation and the late represented by silver-rich (as silver-bearing sulfosalts minerals) mineralization. All but one deposit (Samjeong deposit) having relatively lower Au content in electrum values between ≈20 and ≈50 atomic %. The mineralogical data on electrum-sphalerite and/or arsenopyrite geothermometry and fluid inclusion data indicate that the gold and silver mineralizations were occurred at temperatures of 190~280℃ and 150~180℃, respectively. These suggest that the gold-silver mineralization in the province occurred in the lower temperature and pressure conditions as epithermal-type hydrothermal vein deposit.

서 론

한국의 열수광맥형 금·은광상은 한국 전지역에 걸쳐 광범위하게 분포하고 있으며, 일본의 천열수성 금·은광상과 비교하여 성인적으로 중열수성 내지는 심열수성 한국형 금광상(Korean-type deposits) 으로 보고된 바 있다(Tsuchida, 1944). 최근, 한국의 금·은광상은 물리화학적 생성환경의 차이에 따라 중열수광상(태창, 보련광산 등), 한국형광상(천보, 일보, 대흥광산 등), 천열수광상(전주일, 통영광산 등)으로 구분되었다(Shelton et al., 1988).

한국 동남부지역의 금·은광상은 합천지역·순천지역·함안-군북지역에 집중되어 분포하는 경향을 보이며(Kim, 1971), 중부지역의 중열수광상 또는 한국형광상에 비하여 상대적으로 은의 함량이 높은 특징을 나타내고 있다 (박희인, 1983; Choi *et al.*, 1989). 또한 동남부지역의 금·은광상들은 동일지역내 인접광산에서도 광석의 금·은함량비 및 공생광물의 특성과 유형이 서로 상이한 양상을 보여주며, 이러한 금·은광상들중에서 성원, 거창 및 통영광산은 성인적으로 불국사 화성활동과 밀접한 연관성을 갖는 것으로 보고되어 있다(Shimazaki *et al.*, 1986; So *et al.*, 1989; Shelton *et al.*, 1990). 한국동남부 지역에 분포하는 금·은광상에 관한 연구는 대부분 개별 광산 단위의 성인연구에만 치중되어, 광역적인 금·은광화작용 특성을 체계적으로 다룬 연구는 거의 없다. 따라서, 본 연구는 한국 동남부지역에 위치하는 8개 금·은광산을 대상으로 각 광산별 광석의 금·은함량비, 광맥의 산출상태, 광물학적 특징, 함은광물의 종류, 에렉트럼의 산상, 광물 공생관계 등을 종합적으로 비교검토하여, 금·은광상의 유형별 변화 특성과 Au-Ag계 광물의 물리화학적 침전환경을 정량적으로 밝히는데 그 목적을 두고 있다.

* 고려대학교 지질학과 (Dept. of Geology, Korea Univ., 1, Anam-dong, Seongbuk-ku, Seoul 136-701, Korea)
** 부산수산대학교 응용지질학과 (Dept. of Applied Geology, National Fisheries Univ. of Pusan, Korea)
*** 전략광물자원 연구센터 (Center for Mineral Resources Research, Korea Univ., 1, Anam-dong, Seongbuk-ku, Seoul 136-701, Korea)

지질 및 광상의 개요

한반도 동남부의 금·은 광상구는 크게 합천광상구, 순천광상구 및 함안-군북광상구로 구분되며(Kim, 1986), 금은광화작

용의 시기는 주로 백악기 중기~말기 화성활동과 밀접하게 관련된 것으로 보고되고 있다(Lee, 1981; Shimazaki *et al.*, 1986; So *et al.*, 1989). 연구대상 금·은광산의 위치를 불국사 화성암체의 분포지역과 대비하여 도시하면, 금·은 광상은 주로 경상계 퇴적분지의 서측 경계부에 분포하고 있다(Fig. 1). 본역의 금·은광상은 퇴적암·화산암·화강암·편마암 등 다양한 모암중에 발달한 열극 및 단층파쇄대를 충진한 열수석영맥상광체로 구성되며, 은의 함량이 상대적으로 높은 금·은광상으로 천부화성활동과 밀접한 연관성을 갖는다(So *et al.*, 1989; Shelton *et al.*, 1990).

순천광상구에 속하는 하동지역 상촌광산은 시대미상의 회장암질암 내에 발달된 단층파쇄대를 충진한 함금석영맥상광체로 구성되며, 석영맥에 연하여 비교적 넓은 열수변질대를 동반한다. 광화작용은 광맥구조, 광물공생관계, 각력화작용 등에 의해 제 I, II, III, IV 광화시기로 구분되며, 에렉트럼은 광화 제II시기에 황철석 또는 섬아연석과 밀접하게 공생하며 다량의 황화광물과 함께 산출된다. 주요 공생광물은 황철석, 방연석, 섬아연석, 황동석, 녹니석 및 견운모 등이다. 금침전은 산성열수와 회장암질 모암간의 수소이온교환반응에 의한 pH 상승, 황화광물 침전에 따른 탈황화작용 및 광화유체의 냉각에 의하여 야기되었다(박맹언, 1991).

함안-군북 광상구내에 분포하는 삼정광산과 용장광산은 부분적으로 혼펠스화된 경상계 함안층과 이를 관입한 안산암류내의 단층 파쇄대 및 열극면을 따라 발달된 10여개조의 함금·은석영맥상광체로 이뤄지며, 광맥의 주발달 방향에 따라 2개의 광맥군으로 분류된다. 광맥의 최대 연장은 수평적으로 1 km, 수직적으로 300 m에 달하며, 맥폭은 2~20 cm이다.

1) N60°W광맥군 : 본 광맥군은 세맥(2~5 cm)으로서 수평연장이 길며, 광맥간의 간격이 넓고 대체로 서로 평행하게 발달되며, 단층 점토를 포함하고 있지 않음이 특징이다.

2) N20°W 광맥군 : 20° 광맥군의 폭은 전기 광맥군에 비해 넓다 (평균 10cm). 일반적으로 맥의 수평연장이 짧고 광맥간 간격이 좁으며 세맥상으로 분기되는 양상을 띤다. 흔히 단층 점토가 산출된다.

광상은 광맥군별 및 모암종에 따른 특성의 변화(모암규제 부화대 특성)를 갖는다. 안산암류내에 발달하는 광맥은 상대적으로 다량의 황화광물(최대 20%)과 탄산염 광물을 수반하며 금의 산출은 미립의 산점상 결정으로 광맥 전반에서 비교적 균일한 품위(평균 Au 함량=10 g/ton)를 갖는데 비해 퇴적암을 모암으로 배태된 광맥은 심한 모암규제에 의한 부광대를 형성한다. 상기 퇴적암을 모암으로한 광맥은 일반적으로 안산암류내에 발달되는 광맥에 비해 적은 양의 황화광물이 산출되며 광맥내 금의 산출은

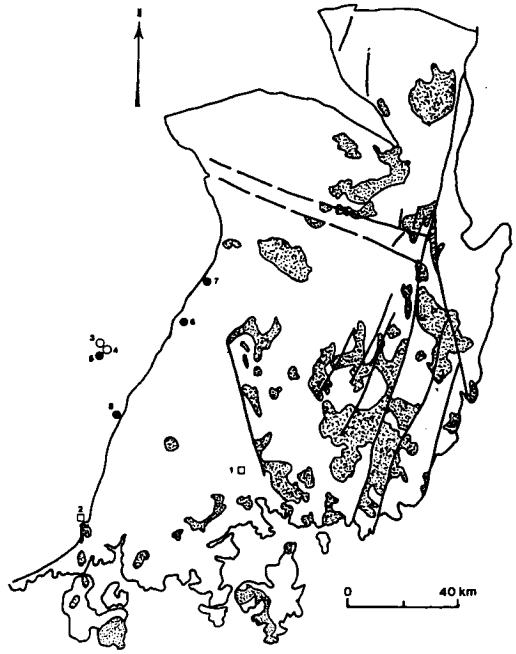

Fig. 1. The locations of gold and/or silver vein deposits in the southeast province, Korea, discussed in the text, showing distribution of Bulgugsa igneous rocks. The names of the ore deposits are listed in Table 1. Open square; Au-dominant deposit. Open circle; Au-Ag deposit. Solid circle; Ag-dominant deposit.

미립의 산점상으로 저품위(평균 금품위=2 g/ton)이다. 한편 모암중 유화광물이 포함된 암갈색의 알코스질 사암층(tuffaceous sandstone layer)과의 교차 지점에서는 강한 금광화작용이 수반되어 고품위 광화대를 형성한다.

광화작용은 모암종에 따라 큰 변화를 보이지 않으며 각각 3회의 광화시기로 구분된다. 주요광석 광물의 침전은 광화제I기 및 II기에 이루어졌으며, 광맥은 열수석영맥으로서 에렉트럼을 비롯하여 섬아연석, 방연석, 황동석, 유비철석 등으로 비교적 단순한 광물공생관계를 보여 준다. 맥석광물로서 석영, 녹니석, 방해석, 녹렴석 및 양기석 등이 산출된다.

금·은의 침전은 광화초기 모암과의 교대반응을 수반한 단순냉각과 후기 열수계에 유입된 온도가 낮은 천수에 의한 냉각 및 광화 유체의 희석에 의한 복합적인 양상으로 진행되었으며, 에렉트럼과 밀접하게 공생하는 석영내 유체포유물 균일화 온도는 초기가 294~305℃, 후기가 221~291℃이다(박맹언, 1992).

합천광상구에는 거창, 상고, 지산, 세원, 성주 및 가회광산이 분포하며 지질 및 광상 개요는 다음과 같다.

거창광산과 지산광산은 선캠브리아기 반상변정질화강편마암

Table 1. Summary of gold and/or silver deposits in the Gyeongsang area.

No.	Ore deposits	Commodities		Associated	Ag/Au ratio in ores*		Major Fe	Vein	Host rocks
		Major	Minor	metals	Average	Range	sulfides	occurrence**	
1	Samjeong(Yongjang)	Au	(Ag)	Sb	5.30	0.06 ~ 21.70	py	nonmassive	sandstone, shale, andesite
2	Sangchon	Au	(Ag)		8.59 1.77***	3.09 ~ 15.23	py	nonmassive	anorthosite
3	Gisan	Au, Ag			2.97***		py	nonmassive	gneiss, granite
4	Geochang	Au, Ag			10.67	0.73 ~ 47.78	py	nonmassive	gneiss, porphyry
5	Sanggo	Ag	Au	Sb	194.76	71.82 ~ 292.00	py	nonmassive	gneiss, porphyry
6	Seweon (Unsu)	Ag	Au	Sb	731.39***		py	nonmassive	shale, sandstone, granite
7	Seongju	Ag	Au	Sb	676.38 1178.72***	0.50 ~ 1781.04	py	nonmassive	shale, sandstone
8	Gahoe	Ag		Sb	3468.99	41.58 ~ 6970.00	py	nonmassive	shale, sandstone, syenite

* Compiled data from Korea Mining Promotion Corporation (1977-1990). ** Nonmassive vein in this study means relatively well-developed crustification, drusy cavity and comb structure. *** Ag/Au ratio for production.

및 조립화강암질편마암내에 발달된 편리방향의 열극들을 충진하여 형성된 함금·은열수석영맥들로 구성되며 맥폭은 10~70 cm로서 수개조가 발달된다. 수평연장은 1.0 km정도이다. 수반광석광물은 황철석이 대부분이며 섬아연석, 방연석, 황동석 등이 소량 수반된다. 에렉트럼은 미립의 입상(10 μm이하)으로 관찰되는 것도 있지만 일반적으로 불규칙한 형태로 주로 황철석과 섬아연석 결정내에서 방연석과 밀접한 공생관계를 보이며 산출한다.

상고광산은 화강편마암내에 발달된 수개조의 열극충진형 함금·은열수석영맥상광체로 구성되며 맥폭은 10~50 cm이다. 열수맥은 모암의 각력들을 함유하며 2~5 cm의 세맥상으로 흔히 분지되어 산출되고, 소량의 황철석, 방연석, 섬아연석, 함은광물, 자연은 등이 수반된다. 모암은 심하게 열수변질된 특징을 보이며, 능망간석이 수반된다.

세원광산은 중생대 백악기 낙동층의 퇴적암내에 발달된 열극을 충진한 수개조의 함금·은석영맥들로 이뤄져있다. 맥폭은 20~40 cm 내외로서, 수평적으로 200 m정도 연장 발달된다. 광맥은 모암종의 차이에 따라 각기 상이한 열수변질의 특성을 보여준다. 모암이 세일인 경우는 녹니석, 견운모로 심하게 변질되어 상대적으로 두꺼운 열수변질대를 형성한다. 또한 석영맥과 모암과의 경계부가 불규칙하고 다량의 모암 암편들이 포획되어 있는 것이 특징적이다. 한편, 모암이 사암인 경우 맥과 모암과의 경계는 뚜렷하나 모암변질작용의 범위는 좁다(수 cm). 주 구성광물로서 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석, 자연은, 함은광물 등이 산출된다. 황철석은 모암접촉부를 따라 초기 정출되거나 후기 섬아연석 결정을 포획하여 산출되며, 에렉트럼은 주로 불규칙한 형태를 갖거나 미립의 입상으로서 섬아연석 결정내에 방연석과 밀접하게 동시 정출의 관계를 나타낸다. 성주광산은 중생대 백악기 연하동층의 역질사암, 또는 선캠브리아기 화강편마암내의 단층 파쇄대를 따라 발달된 열극을 충진한 수개조의 함금·은석영맥들로 구성된다. 맥폭은 20~200 cm로서 수평적으로 300 m, 수직적으로 200 m 정도 연장 발달된다. 화강편마암에 배태된 경우 석영맥내에는 화강편마암의 각력(최대 3 cm)을 포획하여 주광맥을 형성하지만, 연하동층의 역질 사암에서는 맥폭이 협소하여 진다. 석영맥의 접촉부는 전반적으로 현저한 견운모화 작용 및 점토화 작용을 받았다. 변질작용은 역질 사암에서 전반적으로 우세한 경향을 보이지만, 견운모화 작용은 화강편마암에서 더욱 뚜렷한 양상을 띄며 미립의 자형 황철석이 수반된다. 광화작용은 광화용액의 도입시기에 따라 3단계로 구분된다. 제 I광화기는 다량의 석영과 황철석, 섬아연석, 방연석, 황동석 등이 주로 정출되고 소량의 녹니석 및 견운모가 수반된다. 제 II기는 주로 석영 및 미량의 황철석, 방연석, 섬아연석 등이 수반되며 광화 제 I시기와는 구조적인 절단 관계를 보여준다. 에렉트럼은 주로 후기의 방연석과 밀접한 공생관계를 보이며, 황철석, 섬아연석을 수반하는 경우도 있다. 에렉트럼은 입상 및 불규칙한 형태로 석영 또는 황철석 내에 단독으로 산출된다. 제 III기는 함은광물, 자연은 및 방연석 등이 산출된 세맥들로 구성된다. 가회광산 주변의 지질은 시대미상의 섬장암 및 중생대 백악기 퇴적암과 이를 관입한 불국사화강암으로 구성된다. 광상은 섬장암내에 발달되는 단층파쇄대와 열극을 충진한 맥상광체로 맥폭은 30 cm 정도로서 수평적으로 200 m 이상 연장되어 산출된다.

광물의 공생관계는 2회의 광화작용으로 구분된다. 광화초기에는 유체의 냉각에 의한 황화 광물(황동석, 황철석)과 함께 다

Table 2. Ore minerals observed from gold and/or silver deposits in the Gyeongsang area.

Ore deposit	po	py	mc	gl	cp	sp	ap	lo	hm	el	ag	ar	td	pl	pg
Samjeong	–	***	–	*	–	**	*	–		–		–	–		
Sangchon		***		*	–	**	**			–		–			
Gisan		***		*	–	**				–	–	–			
Geochang	–	***	–	*	–	**	–			–	–	–			
Sanggo		***		*	–	**				–	–	–	–		
Seweon		***		**	–	***	–			–	*	–	–		
Seongju	–	***	–	**	*	**	–		–	–	–	–	–	–	–
Gahoe		***		*	**	*					*	*	–	–	

Abbreviations; ***=abundant, **=moderate, *=little, –=rare. ag=native silver, ap=arsenopyrite, ar=argentite or acanthite, cp=chalcopyrite, el=electrum, gl=galena, hm=hematite, lo=loellingite, mc=marcasite, pg=pyrargyrite, pl=polybasite or pearceite, po=pyrrhotite, py=pyrite, sp=sphalerite, td=tetrahedrite.

량의 석영이 침전되었으며, 빗살구조와 많은 정동이 관찰된다. 후기는 정동내에 충진 또는 피복된 상태로 산출된 섬유상의 자연은과 섬아연석 및 소량의 방연석과 함은황염광물이 생성되었다. 주변모암에서는 견운모화 작용이 우세한 양상을 보인다. 상기 8개 금·은광상의 광석중 Ag/Au비, 수반된 특정지시원소, 석영맥의 산상 및 주변모암의 특성을 개괄적으로 요약하면 Table 1과 같다. 본지역의 금·은광상은 광맥의 산상, 광물의 공생관계, 모암과의 변질양상 및 Ag/Au비에 의해 비교적 천부에서 형성된 광상과 대비되며, 확인된 광석광물의 상대적 양비를 모식적으로 도시하면 Table 2와 같다.

광상의 특성

금·은광상에서 산출되는 광석중의 금·은함량비는 광상의 성인 또는 광물침전환경등의 다양한 요인에 따라 현저한 차이를 나타낸다(Boyle, 1979; Shikazono, 1986; Shikazono and Shimizu, 1986, 1987; Titley, 1987; Morrison *et al.*, 1991). 한국의 열수광맥형 금·은광상에서도 광상유형별로 금·은함량비의 차이를 보여주며, 이는 생성환경과도 밀접한 관련성이 있는 것으로 보고된 바 있다(최선규와 위수민, 1992). 한반도 동남부지역의 금·은광상에 대한 광산시추조사보고와 탐광굴진(광업진흥공사 발간) 등의 기보고된 자료에 의하면 광석중 금·은함량비가 각 광산별로 다양한 양상을 보이며, 동일광화대의 인접광산간에도 서로 상이한 특성을 나타낸다. 합천광상구의 지산, 거창 및 상고광산의 금·은함량비는 현저한 차이를 보이지만, 전반적으로 중부지역광상에 비해 함은광물이 다량 수반되는 경향을 나타낸다. 또한, 본 지역 광상은 공통적으로 광상 형성의 초기에 금광화작용이 우세하지만, 말기로 진행됨에 따라 은광화작용으로 진화되는 경향을 보인다.

금·은함량비, 광석광물의 종류 및 상대적 양비에 따라 연구대상 광산을 분류하면, 삼정 및 상촌광산은 금광단일형 광상, 지산 및 거창광산은 금·은혼합형 광상으로, 상고, 세원, 성주 및 가회광산은 은광단일형 광상으로 분류된다. 최선규와 위수민(1992)이 제시한 금·은광상의 분류기준을 상기 금·은광상에 적용할 경우, 황철석형 금광상(Group IIB), 안티몬형 금·은광상(Group IV) 및 안티몬형 은광상(Group V)의 세가지 유형으로 구분된다. 그러나 삼정광산은 금·은함량비만을 적용하여 분류하면 Group IIB에 속하지만, 성인적으로 Xenothermal형에 유사한 것으로 판단되어 Group IIB*로 구분하여 검토하였다. Fig. 2는 광상유형별 광석의 금·은함량(g/t)의 상관관계를 구분도시한 것으로, 이러한 분포양상은 각 광상 유형별로 현저한 차이를 나타내고 있다. Group IV 광상에서 광석의 금품위는 은품위에 비례하여 증가되는 정의 상관관계 특징을 보이지만, 기타유형의 광상에서는 전반적으로 분산된 양상을 보인다. 금광단일형광상인 Group IIB는 R의 값이 0.1~50.0의 좁은영역내에서 변화하고 있지만, 금·은혼합형광상과 은광단일형광상인 Groups IV, V는 1.0~9000.0의 범위에 걸쳐 분산된 경향을 보인다. 한국 동남부지역 금·은광상의 광석중 R(Ag/Au)비는 중부지역의 동일 유형간의 R비에 비하여 상대적 높은 분포양상을 나타낸다(Fig. 2). 중부지역 Group V의 R비는 10~2000이나, 동남부지역 Group V의 R비는 1~9000으로 상대적으로 분산된 양상을 보인다. 이러한 경향은 두 지역간의 함은광물의 종류 및 상대적 산출빈도의 차이에 기인된 것으로 사료된다. 이는 동남부지역의 금·은광상에서 공통적으로 광화말기에 은광화작용이 우세한 현상과도 잘 일치되고 있다.

에렉트럼 및 섬아연석의 화학조성

에렉트럼은 대부분의 광상에서 공통적으로 황철석, 섬아연석, 방연석, 황동석 및 휘은석과 밀접한 공생관계를 보이지만, 간혹 함은황염광물인 사면동석 또는 유비철석과 함께 산출되는 경우도 있다. 에렉트럼은 자연은, Ag-Sb-S계 광물 및 Cu-Ag-Sb-S계 광물과는 산출빈도가 극히 미약한 양상을 보이는데, 이는 에렉트럼이 함은황염광물 또는 자연은과 서로 상이한 정출환경에서 침전되었음을 시사하고 있다.

에렉트럼은 대부분의 광상에서 50 μm 이하의 크기로 산출되

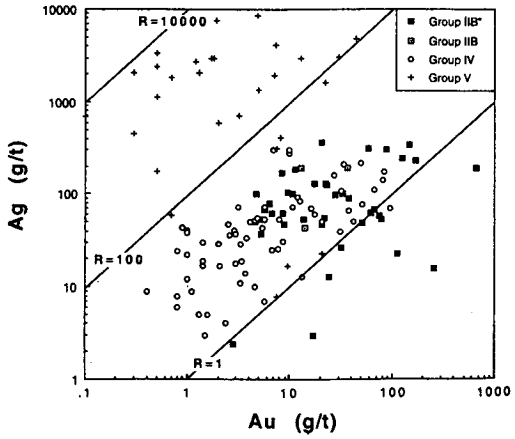

Fig. 2. Logarithmic plots of gold and silver (g/t) in ore grades from 8 gold and/or silver deposits.

Table 3. The Au content of electrum from gold and/or silver deposits.

Ore deposit	Atomic % Au in electrum			
	Average	N*	S.D.**	Range
Samjeong	73.87	37	8.66	42.7 ~ 81.1
Sangchon	31.60	42	7.91	19.2 ~ 56.0
Gisan	39.13	28	6.85	21.1 ~ 62.8
Geochang	36.94	21	2.88	32.8 ~ 42.2
Sanggo	38.23	32	3.46	33.7 ~ 47.4
Seweon	39.04	15	4.04	28.7 ~ 43.2
Seongju	37.92	38	4.11	28.6 ~ 44.0
Gahoe	not found			

* Number of spot analyses by electron microprobe. ** Standard deviation.

며, 가회광산을 제외한 7개 금·은광산에서 확인된 약 150여개 Au-Ag계 광물입자에 대한 정량분석을 실시하였다. 에렉트럼의 화학조성은 거의 순수한 Au-Ag계 중간고용체에 해당하는 화학조성을 보이며, Cu, Sb, Bi, Mg 및 Te 등의 원소는 검출한계 이하이다. 에렉트럼의 성분분석은 EPMA (JEOL Super-Probe JXA 8600 SX)에 의해서 수행되었고, 에렉트럼의 정량분석 조건은 가속전압 20 kV, 시료전류 3.0×10^{-9} A (PCD mode)하에서 실시되었다. 정량분석은 순금속의 Au, Ag 표준시료를 사용하고, Oxford eXLII EDS [Pentafet Si (Li) detector] 검출된 AuM 선과 AgL선을 이용하였다. 표준시료와 분석시료는 150초 동안 측정하고, 측정치는 전략광물자원 연구센터에서 구한 a-factor를 이용하여 보정되었다.

동남부지역 에렉트럼의 화학조성은 광산에 따라 다소 차이는 있지만 전반적으로 유사한 금함량을 보여주고 있다 (Table 3). Fig. 3은 상기 8개 금·은광상을 각 유형별로 구분하여 에렉트럼내 Au의 함량을 도시한 것으로 Group IIB*를 제외한 다른 유형의 광상에서는 유사한 금함량의 분포양상을 나타내고 있다. 한편, 대부분의 광상에서 약 20 atomic % 범위 이내의 조성변화를 보여주고 있는데 반하여, 삼정·상촌·지산광산산 에렉트럼은 Au의 함량변화가 약 40 atomic % 범위로 비교적 심한 조성변화를 보이는데 (Table 3), 이는 초기 정출된 에렉트럼과 후기 에렉트럼간의 조성차이에서 기인된 것이다. 또한, 삼정광산산 에렉트럼은 타광산에 비하여 상대적으로 높은 70~80 atomic %의 금함량분포를 보인다. 특히 초기 세립질 자형 유비철석 또는 석영입자 사이를 단독으로 충진하는 초기 에렉트럼은 11.19~17.37 wt. %의 은함유량을 나타내지만, 황철석, 사면동석, 섬아연석 및 방연석과 공생하는 후기 에렉트럼은 상대적으로 높은 28.75~41.90 wt. %의 은함량을 보인다.

섬아연석내의 철함량은 유황분압·온도·압력 등 정출환경의 변화에 민감하게 작용하는 것으로 알려져 있으며 (Scott and Barnes, 1971; Barton and Skinner, 1979), 이는 광물공생관계 및 화학조성 등을 통하여 생성심도, 온도 및 유황분압 등의 생성환경을 추정할 수 있다. 동남부지역 금·은광산산 섬아연석은 공통적으로 황철석과 밀접한 공생관계를 보이며, 철함량 (mole % FeS)은 대부분 광상에서 7 mole % 범위 이상의 조성변화를 보인다 (Table 4). 상고·거창·상촌·성주광산산 섬아연석의 철함량은 광화시기별로 현저한 조성차이를 나타내지만, 예외적으로 가회광산산 섬아연석은 주로 ≤2 mole % FeS로 극히적은 철함량의 분포경향을 보인다. 섬아연석의 철함량을 광상유형별로 비교하면 Groups IV, V의 섬아연석은 5 mole % FeS 이하의 섬아연석이 절대적으로 우세한 경향을 보이나, Groups IIB, IIB*는 전반적으로 분산된 양상을 나타낸다 (Fig. 4). 이는 중부지역 동일유형 (Groups IV, V)에서 산출된 섬아연석의 조성변화 (<5 mole % FeS)와도 서로 잘 일치되고 있다 (Choi, 1993). 동남부지역 Groups IV, V의 섬아연석은 중부지역의 동일유형의 광상에 비하여 철함량이 다소 분산된 양상을 보이는데, 이는 주로 섬아연석중에 발달한 누대구조에 따른 조성변화로 확인되었다. 이러한 사실은 중부지역 금·은 광상에 비하여 동남부지역 금·은광상의 광화작용시 유체의 온도 및 유황분압 등 물리화학적 환경변화가 더 크게 작용한 결과로 판단되며, 화성암체의 정체심도와 밀접한 관련이 있는것으로 사료된다 (조등룡과 권성택, 1994).

Fig. 5는 동일시료에서 분석된 에렉트럼과 섬아연석에 대한 평균값을 도시한 것이다. Group IIB* 삼정광산을 제외한 모든 유형의 광상에서 서로 유사한 분포양상을 나타낸다. Groups IIB, IV, V에서 산출된 에렉트럼은 공통적으로 55~75 atomic % Ag의 조성범위내에 존재하지만, 섬아연석의 철함량은 A) 10 mole %

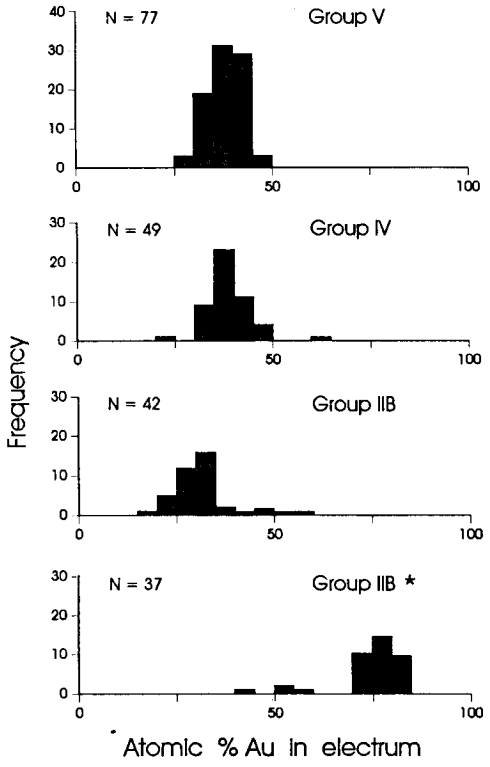

Fig. 3. Histograms showing Au content (atomic %) of electrum.

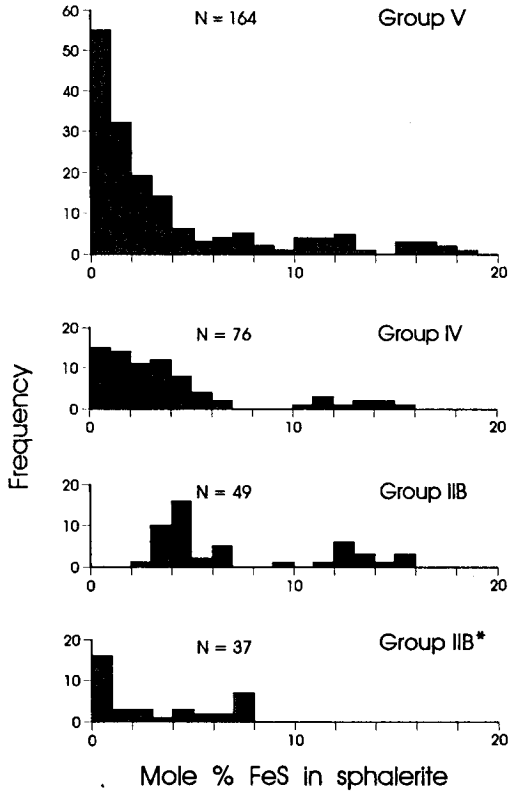

Fig. 4. Histograms showing FeS content (mole %) of sphalerite.

Table 4. The FeS content of sphalerite from gold and/or silver deposits.

Ore deposit	Mole % FeS			
	Average	S.D.*	Range	N**
Samjeong	2.98	2.90	0.04 ~ 7.81	37
Sangchon	7.08	4.14	2.85 ~ 15.62	49
Gisan	2.41	1.74	0.12 ~ 6.79	46
Geochang	6.29	4.92	0.94 ~ 15.70	30
Sanggo	3.82	3.79	0.48 ~ 13.27	57
Seweon	3.62	2.25	1.24 ~ 8.86	28
Seongju	7.59	6.32	0.34 ~ 18.11	36
Gahoe	0.44	0.46	0.00 ~ 2.12	43

* Standard deviation. ** Number of spot analyses by electron microprobe.

FeS와 B) 5 mole % FeS의 두 그룹으로 구분된다. 이는 주로 정출시기의 차이에 기인된 것으로 동일광산 내에서도 A그룹이 B그룹에 비하여 상대적으로 높은 온도 환경하에서 조기 정출된 것으로 사료된다.

금은광상의 생성환경

에렉트럼-휘은석-섬아연석-황철석이 공생하는 경우에는 평형공존광석의 생성온도와 유황분압을 유추할 수 있다(Barton and Toulmin, 1964; Scott and Barnes, 1971; Barton and Skinner, 1979). 동남부지역 금·은광화작용의 생성환경을 규명하기 위하여 8개 금·은광상에 대하여 동일시료에서 분석된 에렉트럼의 은함량(N_{Ag})과 섬아연석의 FeS 함량(mole %)을 각각의 평균값으로 에렉트럼-섬아연석 지질온도계에 적용하여 보면, 그 결과는 다음과 같다. 각 광산의 에렉트럼에 대한 정출온도 및 유황분압은 T-fs_2 관계도에 제시된 바와 같이 상이한 특징을 보여주고 있다 (Fig. 6). 즉, Group IIB*에 속하는 삼정광산은 전반적으로 다른 유형의 광상에 비하여 현저하게 높은 온도와 고유황분압 조건하에서 형성되었지만, 황철석형 금광상(Group IIB), 안티 몬형 금·은광상(Group IV), 안티몬형 은광상(Group V)은 상대적으로 비교적 낮은 온도 및 저유황분압 조건하에서 광화작용이 진행된 것으로 사료된다. 이러한 경향은 일본 천열수 광상에서도 유사한 결과가 보고된 바 있다(Shikazono, 1985). 또한, 상기 유형중 Groups IV, V에 속하는 광상에서 광화초기의 금광화작용에서 확인된 에렉트럼-휘은석-섬아연석-황철석 광물조합에서 광화말기 황철석-자연은-휘은석-함은황염광물조합의 은광화작용으로 진화되는 양상은 정출온도 및 유황분압의 감소에 기인된

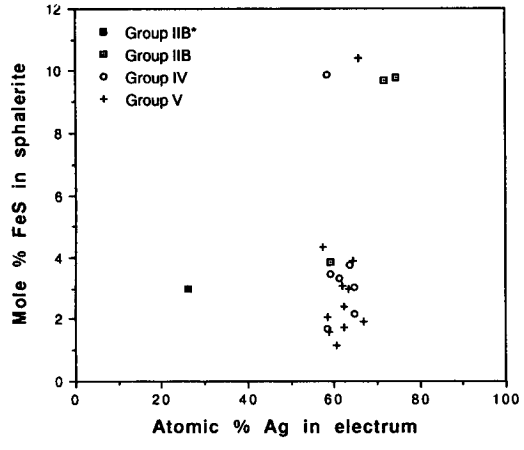

Fig 5. Ag content (atomic %) of electrum and FeS content (mole %) of sphalerite for 4 groups from 7 gold and/or silver deposits.

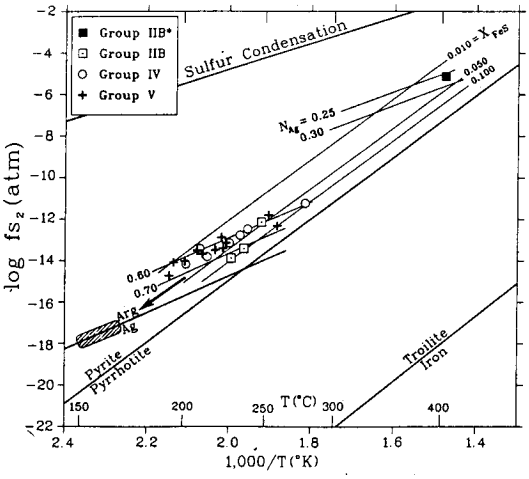

Fig. 6. Sulfur fugacity-Temperature diagram showing the possible sulfur fugacity and temprature ranges for 4 groups. Hatched area represents commonly mineral stabilities for late silver mineralization of Groups IV and V. N_{Ag} : atomic fraction Ag in electrum. X_{FeS} : mole fraction of FeS in sphalerite. Thermochemical data were taken from Barton and Toulmin (1964) and Barton and Skinner (1979).

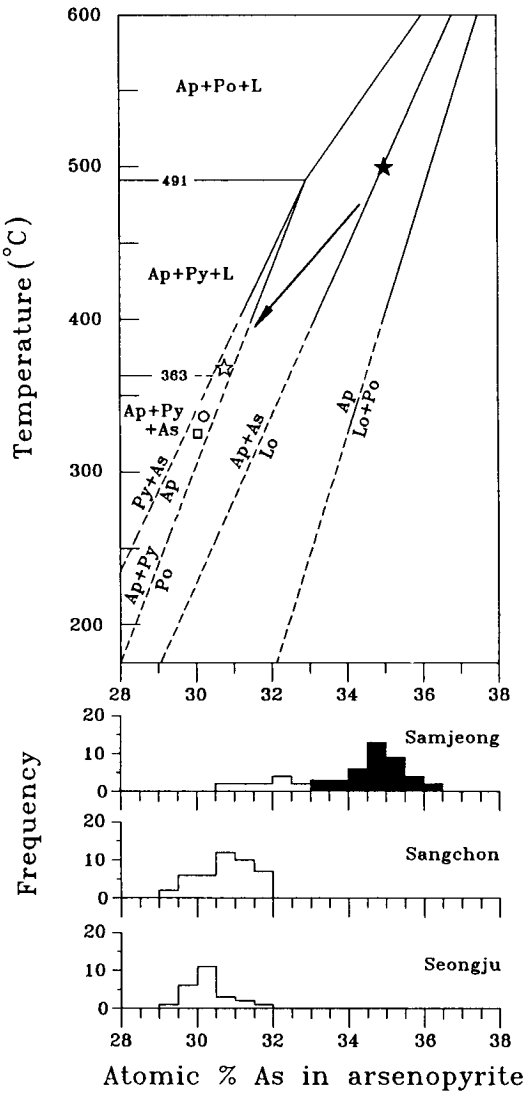

Fig. 7. Pseudo-binary condensed T-X section of the Fe-As-S system (Kretschmar and Scott, 1976). Black area associated with loellingite in Samjeong mine mean As content of early fine-grained arsenopyrites. Black star=early stage in Samjeong mine, white star=late stage in Samjeong mine, open circle=Sangchon mine, open square=Seongju mine. Abbreviations : Ap=arsenopyrite, As=native arsenic, Lo=loellingite, Po=pyrrhotite, Py=pyrite.

것이다(Fig. 6). 8개 금·은광산중 삼정·상촌·성주광산산 유비철석이 주로 에렉트럼-황철석과 함께 산출되고 있으며, 이러한 유비철석은 광화작용시 주로 초기에 정출된 광물로 관찰된다. Fig. 7은 유비철석의 비소함량(atomic %)과 온도와의 관계를 제시한 것이다. 삼정광산산 유비철석은 상촌·성주광산산 유비철석에 비하여 상대적으로 높은 비소함량을 보이며, 약 6 atomic % As의 현저한 조성변화를 나타내고 있다. 즉, 삼정광산에서 확인된 유비철석중 비독사석과 공생하는 세립질 유비철석은 500℃ 정도에서 초기 정출된 것으로 추정된다. 또한, 후기에 정출된 조립질 유비철석은 주로 황철석과 공존하며 As 함량도 현저하게 감소되는데, 이는 온도의 급격한 감소에 기인된 결과로 사료된다(Fig. 7). 한편 삼정 및 용장광상이 위치하는 함안-군북지역에는 함안, 군북 및 제일군북광산 동광상이 인접하여 위

Table 5. Data on electrum-sphalerite and arsenopyrite geothermometries, and fluid inclusion from gold and/or silver deposits.

Ore deposit	Stage	Electrum-sphalerite geothermometry (℃)	Arsenopyrite geothermometry (℃)	Fluid inclusion (Th ℃)* Range	peak	Group
Samjeong	Early	400	430 ~ 500	–	–	IIB*
	Late	–	350 ~ 380	–	–	
Sangchon		220 ~ 250	300 ~ 350	–	–	IIB
Gisan		200 ~ 250	–	–	–	IV
Geochang		200 ~ 280	–	–	–	IV
Sanggo		200 ~ 240	–	–	–	V
Seweon	I	190 ~ 260	–	234 ~ 342	275	V
Seongju	I	200 ~ 270	290 ~ 340	233 ~ 318	270	V
	II	–	–	210 ~ 299	270	

* So *et al.* (1989)

치하고, 이들광상에서 산출하는 맥상광물내 유체포유물 연구결과에 의하면, 광화초기 고온(≤500℃) 및 고염농도(≤54 wt. % NaCl equiv.)의 특성을 갖는 광화유체로부터 시작되어 광화후기에는 저온(≈200℃), 저염농도(≈1 wt. % NaCl equiv.)의 광화유체로 진화되는 경향을 보여준다(박희인 등, 1985). 이러한 광화작용의 특성은 동광상 뿐만아니라 금·은광상에서도 서로 유사한 광화유체의 진화과정을 시사하고 있으며, 이러한 사실을 통하여 삼정광상은 성인적으로 Xenothermal type에 속하는 광상으로 추정된다. 유비철석 지질온도계에서 구한 온도와 유체포유물의 균질화 온도는 전반적으로 유사한 온도범위를 나타내지만, 황철석-에렉트럼-휘은석-섬아연석의 지질온도계에서 구한 온도보다는 다소의 차이를 보이는데 이는 주로 금·은광화작용시 상대적 정출시기의 차이에 따른 온도변화로 사료된다. 에렉트럼-섬아연석, 유비철석 지질온도계에서 구한 온도와 기보고된 유체포유물의 균질화 온도를 비교하여 본 결과, 삼정광산을 제외한 대부분의 금·은광상이 유사한 생성환경 즉 천열수 광상에 해당하는 특성을 나타내고 있다.

고찰 및 결언

한국 동남부지역 합천·순천·함안·군북 광화대에 분포하고 있는 8개 금·은 광산에 대하여 광석의 Ag/Au비 및 광물학적 특성 등을 비교 검토한 결과, 본 지역 금·은광상은 중부지역 금·은광상에 비하여 공통적으로 함은광물을 다량 함유하고 있는 금·은혼합형 광상 또는 은광단일형 광상이 우세한 양상을 보인다. 그리고 본 광상들은 황철석형 금광상(Groups IIB, IIB*; 삼정, 상촌광산), 안티몬형 금·은광상(Group IV; 지산, 거창광산), 안티몬형 은광상(Group V; 상고, 세원, 성주, 가회광산)으로 분류되며, 성인적으로 불국사 화성활동과 밀접하게 관련된 것으로 사료된다.

동남부지역의 금·은광상은 공통적으로 광화초기에는 금광화작용이 주로 야기되었으나, 후기로 진화됨에 따라 은광화작용이 우세한 경향을 보인다. 이들 동남부지역 금·은광상의 에렉트럼은 전반적으로 황철석·섬아연석·방연석·휘은석과 밀접한 공생관계를 보이고 있으며, 간혹 유비철석·사면동석과 산출되는 경우도 있다. 에렉트럼의 화학조성은 삼정광산을 제외한 나머지 광산에서 대부분 50.0 atomic % 이하의 낮은 금함량의 분포양상을 보여준다.

에렉트럼 섬아연석 유비철석의 지질온도계 및 유체포유물 연구결과에 의하면 금광화 작용은 주로 190~280℃, 은광화작용은 150~180℃의 온도범위에서 진행되었다고 추정되며, 이는 결론적으로 동남부지역 대부분의 금·은 광상은 천부의 저온환경하에서 형성된 천열수광상임을 시사하고 있다. 한편, 동남부지역의 타 금·은광상에 비하여 삼정광산은 예외적으로 광화초기 약 500℃의 고온환경으로부터 광화후기에는 약 300℃ 이하의 온도로 급격히 광물정출온도가 하강하는 경향을 보이며, 이는 Xenothermal형 광상임을 시사하고 있다.

사 사

이 연구는 한국과학재단 후원 전략광물자원 연구센터의 지원과 고려대학교 특별연구비의 부분지원에 의해 수행되었으며, EPMA 분석 및 자료처리에 도움을 준 최인식연구원에게 감사를 드린다.

참고문헌

박맹언 (1991) 하동 상촌 금광상의 성인에 관한 연구. 광산지질, v. 23, p. 226.

박맹언 (1992) 경남 의창지역 모암규제 금은 광화작용의 지화학모델링. 70p, 학술진흥재단

박희인 (1983) 통영 금광산의 광석과 유체포유물. 광산지질, v. 16, p. 245-251.

박희인, 최석원, 장호완, 채동현 (1985) 경남 함안-군북지역의 동 광화작용에 관한 연구. 광산지질, v. 18, p. 107-124.

조등룡, 권성택 (1994) 남한의 중생대 화강암에 대한 각섬석 지압계와 지각두께의 진화. 지질학회지, v. 30, p. 41-61.

최선규, 위수민 (1992) 에렉트럼의 화학조성과 관련된 한국중부지역 금은광상의 성인적 특성. 지질학회지, v. 28, p. 196-217.

Barton, P.B., Jr. and Skinner, B.J. (1979) Sulfide mineral stabilities. In : Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits (H.L. Barnes, ed.), Wiley-Interscience. New York. p. 278-403.

Barton, P.B., Jr. and Toulmin, P., III. (1964) The electrum-tarnish method for the determination of the fugacity of sulfur in laboratory sulfide systems. Geochim. et Cosmochim. Acta, v. 28, p. 619-640.

Boyle, R.W. (1979) The Geochemistry of Gold and its Deposit. Geol. Surv. Can. Bull., no. 280, 584p.

Choi, S.G., Chi, S.J., Yun, S.T., Koh, Y.K. and Yu, J.S. (1989) Gold-Silver mineralization of the Geojae area. J. Korean Inst. Mining Geol. v. 22, p. 303-314.

Choi, S.G. (1993) Compositional variations of sphalerites and their genetic characteristics from gold and/or silver deposits in central Korea. J. Korean Inst. Mining Geol. v. 26, p. 135-144.

Kim, O.J. (1971) Metallogenic epochs and provinces of south Korea. J. Geol. Soc. Korea, v. 7, p. 37-59.

Kim, W.J. (1986) Metallogeny on gold-silver in south Korea. J. Korean Inst. Mining Geol., v. 19, p. 243-264.

Kretschmar, U. and Scott, S.D. (1976) Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application. Can. Mineral., v. 14, p. 364-386.

Lee, M.S. (1981) Geology and metallic mineralization associated with Mesozoic granitic magmatism in south Korea. Mining Geol., v. 31, p. 235-244.

Morrison, G.W., Rose, W.J. and Jaireth, S. (1991) Geological and geochemical controls on the silver content (fineness) of gold in gold-silver deposits. Ore Geology Reviews, v. 6, p. 333-364.

Scott, S.D. and Barnes, H.L. (1971) Sphalerite geothermometry and geobarometry. Econ. Geol., v. 66, p. 653-669.

Shelton, K.L., So, C.S. and Chang, J.S. (1988) Gold-rich mesothermal vein deposits of the Republic of Korea :Geochemical studies of the Jungwon gold area. Econ. Geol., v. 83, p. 1221-1237.

Shelton, K.L., So, C.S., Haeussler, C.T., Chi, S.J. and Lee, K. Y. (1990) Geochemical studies of the Tongyoung Gold-Silver deposits, Republic of Korea: Evidence of meteoric water dominance in a Te-Bearing epithermal system. Econ. Geol., v. 85, p. 1114-1132.

Shikazono, N. and Shimizu, M. (1986) Compositional variations in Au-Ag series mineral from some gold deposits in the Korean Peninsula. Mining Geol. v. 36, p. 545-554.

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

Shikazono, N. (1985) A comparison of temperatures estimated from electrum-sphalerite-pyrite-argentite assemblage and filling temperatures of fluid inclusions from epithermal Au-Ag vein deposits in Japan. Econ. Geol., v. 80, p. 1415-1424.

Shikazono, N. (1986) Ag/Au total production ratio and Au-Ag minerals from vein-type and disseminated-type deposits in Japan. Mining Geol., v. 36, p. 411-424.

Shimazaki, H., Lee, M.S., Tsusue, A. and Kaneda, H. (1986) Three epochs of gold mineralization in South Korea. Mining Geol. v. 36, p. 265-272.

So, C.S., Choi, S.H., Chi, S.J., Choi, S.G. and Shelton, K.L. (1989) Geochemical studies on Au-Ag hydrothermal vein deposits, Republic of Korea: Goryeong-Waegwan mineralized area. J. Korean Inst. Mining Geol., v. 22 p. 221-235.

Titley, S.R. (1987) The crustal heritage of silver and gold ratios in Arizona ores. Geol. Soc. Am. Bull., v. 99, p. 814-826.

Tsuchida, T. (1944) Ore Deposits in Korea. Kasumigaseki book Co. Tokyo. 329p (In Japanese).

1994년 7월 1일 원고접수