장군 연-아연-은 광상의 모암변질에 따른 원소분산

유 봉 철*

한국지질자원연구원 광물자원연구실

Element Dispersion by the Wallrock Alteration of Janggun Lead-Zinc-Silver Deposit

Bong Chul Yoo*

Mineral Resources Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

The Janggun lead-zinc-silver deposit is hydrothermal-metasomatic deposit. We have sampled wallrock, hydrothermally-altered rock and lead-zinc-silver ore vein to study the element dispersion during wallrock alteration. The hydrothermal alteration that is remarkably recognized at this deposit consists of rhodochrositization and dolomitization. Wallrock is dolomite and limestone that consist of calcite, dolomite, quartz, phlogopite and biotite. Rhodochrosite zone occurs near lead-zinc-silver ore vein and include mainly rhodochrosite with amounts of calcite, dolomite, kutnahorite, arsenopyrite, pyrite, chalcopyrite, sphalerite, galena and stannite. Dolomite zone occurs far from lead-zinc-silver ore vein and is composed of mainly dolomite and minor calcite, rhodochrosite, pyrite, sphalerite, chalcopyrite, galena and stannite. The correlation coefficients among major, trace and rare earth elements during wallrock alteration show high positive correlations(dolomite and limestone = $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})/\text{MnO}$, Ga/MnO and Rb/MnO), high negative correlations(dolomite = MgO/MnO , CaO/MnO , CO_2/MnO , Sr/MnO ; limestone = CaO/MnO , Sr/MnO). Remarkable gain elements during wallrock alteration are $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$, MnO , As , Au , Cd , Cu , Ga , Pb , Rb , Sb , Sc , Sn and Zn . Remarkable loss elements are CaO , CO_2 , MgO and Sr . Therefore, elements(CaO , CO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$, MgO , MnO , Ga , Pb , Rb , Sb , Sn , Sr and Zn) represent a potential tools for exploration in hydrothermal-metasomatic lead-zinc-silver deposits.

Key words : Janggun lead-zinc-silver deposit, wallrock alteration, element dispersion, gain/loss, pathfinder

장군 연-아연-은 광상은 열수교대형 광상이다. 모암변질시 원소 분산을 알아보기 위해 모암, 열수변질대 및 연-아연-은 광맥에서 시료를 채취하였다. 이 광상은 능망간석화작용과 돌로마이트화작용으로 구성된 열수작용이 현저히 인지된다. 모암은 돌로마이트와 석회암이며 구성광물은 방해석, 돌로마이트, 석영, 금운모 및 흑운모 이다. 연-아연-은 광맥과 접촉한 부분에서 관찰되는 능망간석대는 주로 능망간석이 산출되며 소량 방해석, 돌로마이트, 쿠티나호라이트, 유비철석, 황철석, 황동석, 섬아연석, 방연석 및 황석 등이 산출된다. 연-아연-은 광맥으로부터 멀어짐에 따라 관찰되는 돌로마이트대는 주로 돌로마이트가 산출되고 소량 방해석, 능망간석, 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석 및 황석 등이 산출된다. 모암변질시 주원소, 미량 및 희토류원소들간의 상관계수는 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})/\text{MnO}$, Ga/MnO 및 Rb/MnO (돌로마이트 및 석회암)가 정의 상관관계를 갖고 MgO/MnO , CaO/MnO , CO_2/MnO 및 Sr/MnO (돌로마이트)와 CaO/MnO 및 Sr/MnO (석회암)가 부의 상관관계를 갖는다. 모암변질시 이득원소들은 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$, MnO , As , Au , Cd , Cu , Ga , Pb , Rb , Sb , Sc , Sn 및 Zn 이고 손실원소들은 CaO , MgO , CO_2 및 Sr 이다. 따라서 CaO , CO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$, MgO , MnO , Ga , Pb , Rb , Sb , Sn , Sr 및 Zn 등의 원소들은 모암이 돌로마이트내지 석회암인 열수교대형 광상의 탐사에 지시원소로서 활용될 수 있을 것이다.

주요어 : 장군 연-아연-은 광상, 모암변질, 원소분산, 이득/손실, 지시원소

*Corresponding author: chbong@kigam.re.kr

1. 서 론

광상의 형성시 열수용액과 모암과의 반응에 의한 여러 물리·화학적 변화요소에 의해 모암변질광물, 광석광물 및 초생성 투명광물들이 형성된다. 모암변질대의 종류 및 규모는 모암의 물성(모암의 화학조성, 광물조합, 모암의 투수성, 간극률, 흡수율) 및 광화유체의 조성(광화유체의 화학조성, 온도, 압력) 등에 좌우된다. 한 예로 모암의 간극률과 흡수율을 비교하면, 유문암(1~7, 0.1~5.6) 및 석회암(0.8~27, 0.1~1.8)은 편마암(0.3~2.4, 0.1~0.8)보다 간극률과 흡수율이 높아 열수변질대의 규모가 크게 나타난다. 모암내에 열수 물질의 이동은 침투와 확산에 의해 일어난다(Yoo *et al.*, 2011c). 침투는 열수 물질이 한 방향으로 멀리 이동되는 증거가 관찰될 때 질량이동의 주된 요소가 된다. 확산은, 열수 물질이 양방향으로 이동되거나 고용체 광물이 분대 사이에 규칙적인 성분변화를 보일 때, 질량이동의 주된 요소가 된다(Hofmann, 1972). 실제로 대부분의 광상에서 침투와 확산이 동시에 일어나지만, 침투는 열수용액이 지나가는 열극에 한정되어 일어나고 확산은 비활성유체가 공극이 좋은 곳(암석의 공극률이 큰 것)에서 발생된다. 앞에서 설명한 조건들을 갖춘 암석은 화산기원의 암석과 탄산염암으로 이것을 모암으로 하는 후생성 열수광상이 비교적 넓은 범위의 모암변질대가 일반적으로 관찰된다.

최근들어 국내 일부 금·은 및 주석광상과 납석광상에 대한 모암변질 및 원소분산에 대한 연구(Chang and Lee, 1991; Oh and Chon, 1993; Yoon, 1993; Moon and Park, 1994; Hwang and Chon, 1994a; 1994b; Yoo *et al.*, 2007a; 2009b; 2011c)가 있으나 연·아연과 관련된 광상에 대한 미량원소 분산에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 이 연구의 대상인 장군 연·아연-은 광상은 한국에서 연화광상 및 울진광상과 더불어 연·아연 생산량이 높은 광상 중의 하나이다. 장군 연·아연-은 광상은 모암이 장군석회암층으로 주로 석회암층과 돌로마이트질암층으로 구성되며 이 층의 구성광물로는 재결정 방해석, 돌로마이트, 석영과 소량의 금운모 및 흑운모 등이다(Lee *et al.*, 1990). 이 연·아연-은 광상은 화성기원의 열수용액(황동위원소 값: 주로 화성기원이나 일부 모암에서 유래)에서 온도 245~315°C, 황분압 10.4~13.2 bar 및 산소분압 33.6~35.4 bar에서 형성되었다고 해석하였다(Lee *et al.*, 1998). 따라서 이 연구에서는 장군 연·아연-은 광상에서 채취한 시료들을 대상으로 열수작용에 의한 모암변

질 종류, 원소 분포 특성과 분산 원소의 종류, 분산유형 및 함량 등에 대한 연구를 수행함으로써 향후 이와 유사한 광상에 대한 탐광 및 탐사의 지침으로 활용할 수 있을 것이다.

2. 주변지질 및 광상

장군 연·아연-은 광상의 주변지질에 대해서는 많은 연구결과(Lee, 1967; Hwang, 1968; Kho, 1987; Lee *et al.*, 1990; Ahn *et al.*, 1993; Kim *et al.*, 1996; Kang *et al.*, 1997; 1998; Park and Chang, 2005)가 보고되어 있어 여기에서는 간략히 그 개요만을 기술하면 다음과 같다. 이 광상 주변을 구성하는 암층은 선캄브리아기의 원남층, 울리층군, 캄브로내지 오도비스기의 장산규암층, 두음리층, 장산석회암층, 석탄내지 이엽기의 동수곡층, 채산층, 쥐라기의 동화지층 및 이들을 관입한 중생대의 춘양화강암류로 구성되어 있다(Lee *et al.*, 1990; Fig. 1).

선캄브리아기의 원남층은 광상의 남부에 동서방향으로 대상분포하며 호상편마암, 안구상편마암, 운모편암, 결정질석회암 및 각섬편암으로 구성된다. 울리층군은 광상의 동북부에 분포되며 니질내지 사질천매암 및 결정질석회암으로 구성되어 있다. 장산규암층은 광상의 북부에 북서방향으로 분포하며 백색, 담황색, 담갈색의 백운모를 함유한 규질암으로 구성되어 있으며, 곳에 따라 편리가 잘 발달된 백운모-석영편암이 관찰된다. 두음리층은 광상의 북부에 북서방향으로 분포하며 니질편암과 사질편암으로 주로 구성되며 수조의 결정질석회암이 박층으로 협재된다. 장군석회암층은 광상 주변에 동서로 대상분포하며 동측으로 감에 따라 그 폭이 점점 줄어들어 울리층과는 단층에 의해 절단되고 서측으로 감에 따라 춘양화강암과 접한다. 이 층은 하부에서 상부로 감에 따라 규질석회암, 회색내지 백색석회암, 갈색내지 녹색의 반점을 함유한 석회암, 괴상결정질석회암, 충식상석회질니암, 호상돌로마이트암 및 돌로마이트질 석회암으로 구성된다. 동수곡층은 광상의 남부에 분포하며 니질편암으로 구성된다. 채산층은 광상의 남부에 분포하며 니질내지 사질의 편암으로 구성되며 2조의 함탄층이 내재한다. 쥐라기의 동화지층은 광상의 남부에 분포하며 사암, 역질사암, 셰일 및 니암으로 구성된다. 중생대의 춘양화강암류는 광상의 서부에 넓게 분포하며 조립내지 중립의 복운모화강암, 흑운모화강암, 우백질백운모화강암 및 조립의 각섬석화강암으로 구성된다(Lee *et al.*, 1990).

Fig. 1. Generalized geological map(A) and idealized N-S cross section(B) of the Janggun lead-zinc-silver deposit(modified from Lee *et al.*, 1990).

장군광상의 연혁 및 생성환경에 대해서는 많은 연구 결과(Lee, 1967; Kim, 1968a; 1968b; 1969; 1970; 1975; Hwang, 1968; Lee, 1985; Kim, 1986; Kho, 1987; Lee and Imai, 1986; Lee *et al.*, 1990; 1996a; 1996b; 1996c; 1998)가 보고되어 있어 여기에서는 간략히 그 개요만을 기술하면 다음과 같다. 장군광상은 망간광상, 연·아연-은 광상 및 철광상으로 구성된다(Lee *et al.*, 1990). 이 광상은 1936년 금-은광상으로 개발이 시작되었다고 하나, 1945년부터 1975년까지 매년 3,000톤의 망간(30~35% Mn)을 생산한 바 있다. 이 광상은 1976년에 망간광상 하부에서 연·아연-은 광상을 발견하였으며 품위는 5.5% Pb, 5.0% Zn, 0.2% Cu, 100 g/t Ag 및 1.0 g/t Au로 1978년 이후 매월

4,200톤의 원광석을 생산하였다(Lee *et al.*, 1990). 망간광상은 초생 탄산망간광체와 산화작용에 의해 부화된 산화망간광체로 구성된다. 이 망간광상은 화강암의 관입 접촉부나 장군석회암층 내에 배태되기도 한다(Kho, 1987). 연·아연-은 광상은 장군석회암층에 배태되는 전형적인 열수교대형 광상이다(Lee *et al.*, 1990). 이 광상의 형성을 규제하는 지질구조의 요소는 장군석회암층중에 발달하는 열극과 춘양화강암 및 이로부터 파생된 암맥의 불규칙한 관입 접촉면이다. 특히, 관입접촉면이 단조롭지 않고, 수평절단, 수직절단에 대해 만곡된 부분이 광체형성에 중요한 역할을 하는 경우가 많다. 또 일부 광체는 춘양화강암중의 석회암, 포획암과 소단층과의 교차부가 광화된 것도 있고,

또 각력상부가 광화된 것도 관찰된다(Lee *et al.*, 1990). 이 연-아연-은 광상은 크고 작은 8개의 광체로 쪼개 구성된다(Lee *et al.*, 1990). 여기에서 연구대상인 A광체에 대해 간략하게 소개하면 다음과 같다. 이 A광체는 장군광산에서 가장 먼저 발견되었으며 파이프상 형태(길이 110 m 이상, 폭 20내지 30 m 정도)를 취하고 있다(Lee *et al.*, 1990). 철광상은 장군석회암 중에 관입한 춘양화강암의 관입접촉면에 규제되어 N70°W, 50°NE의 주향과 경사를 갖는 평행한 2개조의 광체로 구성되며 모두 렌즈상의 형태로 산출된다(Lee *et al.*, 1990). 연-아연-은 광상 및 철광상에서 모암변질 시 형성된 견운모를 대상으로 K-Ar 연대측정을 실시한 결과 각각 69.99 ± 1.71 Ma 및 107.07 ± 2.57 Ma로써 연-아연-은 광화작용이 철 광화작용보다 후기에 있음을 알 수 있다(Lee *et al.*, 1996).

3. 모암변질 및 분석방법

장군 연-아연-은 광상의 모암인 장군석회암층은 대보변동에 의한 광역변성작용 및 춘양화강암의 관입에 의한 열변성작용을 받은 변성탄산염암으로 석회암, 괴

상결정질석회암, 층식상석회질니암, 호상돌로마이트암 및 돌로마이트질 석회암으로 구성된다(Lee *et al.*, 1990). 연-아연-은 광상 주변의 장군석회암층을 구성하는 탄산염암은 광범위하게 열수성 망간 및 마그네슘 교대작용을 받아 A광체 주변에는 변질대가 대상분포한다. 연-아연-은 광체에서 모암으로 감에 따라 연-아연-은 광체 → 능망간석대 → 돌로마이트대 → 돌로마이트질석회암대 → 석회암 및 돌로마이트 대리암 이다. 석회암 및 돌로마이트 대리암은 경미한 망간의 교대작용을 받고 있고, 돌로마이트질석회암은 돌로마이트 입자 주변부나 경계면을 따라 망간 및 철이 농집되고 함망간돌로마이트의 반응대가 발달한다. 돌로마이트대는 돌로마이트가 망간의 교대에 의해 돌로마이트-마그네슘 쿠티나호라이트(kutnahorite, $\text{CaMn}(\text{CO}_3)_2$)로 변하고 방해석 입자내에는 누대구조가 발달한다. 능망간석대는 망간 방해석-능망간석으로 구성되며 망간 방해석 중에는 누대구조가 보이며 중심부는 망간이 높고, 주변부에는 마그네슘 및 철이 높은 경향을 갖는다(Lee *et al.*, 1990).

모암변질에 따른 원소분산을 알아보기 위해 시료 채취는 장군 연-아연-은 광상의 파이프상 A광체에서 수

Fig. 2. Photographs of lead-zinc-silver ore vein, wallrock alteration and wallrock slab samples from the Janggun lead-zinc-silver deposit, showing the rhodochrosite and dolomite zones during wallrock alteration(A and B). Numbers of (1) and (7) mean points sampled for geochemical analysis. Circles of (A) and (M) mean points of PIMA analysis.

행되었다. 이 파이프상 A광체는 중심부에서 주변부로 감에 따라 자류철석, 황철석, 유비철석, 섬아연석, 방연석, 황동석 → 섬아연석, 황동석, 방연석, 유비철석, 황철석, 자류철석 → 황석석, 함은사면동석-프라이버자이트(freibergite)계 광물, 차콜석, 보울란저라이트, 방연석, 섬아연석, 황동석 → 변질대(열수성 망간 교대작용 및 열수성돌로마이트화작용: 능망간석, 마그네슘 쿠티나호라이트 및 망간방해석) → 모암(변성탄산염암)으로 변화된다. 모암변질대의 규모는 광체의 규모 또는 모암의 층리 방향성(석회암의 층리에 평행하게 발달되는 곳에선 10 m 이상 모암변질대 분포)에 따라 좌우되지만 이 A광체의 남쪽에는 광맥 및 변질대가 좁은 범위내에 산출되는 곳이 관찰된다. 여기에서 광맥, 모암변질

대 및 모암에 대해 시료를 채취하였다(Fig. 2). 육안상으로 채취한 시료는 황화광물로 구성되어 있는 광석대 → 능망간석대 → 돌로마이트대 → 돌로마이트질석회암을 관찰할 수 있으며 광석대에 평행하게 방연석과 섬아연석이 능망간석대 및 돌로마이트대에 산점상으로 산출된다(Fig. 2).

능망간석대는 1 cm에서 8 cm 정도이며 육안상 분홍색을 띠며 치밀하다. 이 대는 주로 능망간석이 산출되며 일부 방해석, 돌로마이트, 쿠티나호라이트 등이 산출되고 연아연-은 광체가 인접한 곳에서는 특히 황화광물(유비철석, 황철석, 황동석, 섬아연석, 방연석, 황석석)이 산출된다. 돌로마이트대는 5 cm 이내이며 백색을 띤다. 이 대는 주로 돌로마이트가 산출되고 일부 방해석 및 능망간석 등이 산출된다. 또한 황화광물로는 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석 및 황석석 등이 산출된다(Fig. 3).

따라서 A광체에서 채취한 모암(석회암 및 돌로마이트) 및 모암변질 시료에 대해 모암변질시 각 변질대에 대한 산출광물의 종류, 공생관계, 화학조성 및 원소분산 등을 규명하기 위하여 육안 관찰, 현미경 관찰, PIMA(Portable Infrared Mineral Analyzer) 분석, X-선 회절분석, EPMA 분석 및 캐나다 Actlabs에서 주원소, 미량원소, 희토류원소, S^{total} 및 CO_2 분석(ICP(Total Digestion or Fusion Inductively Coupled Plasma), INAA(Instrumental Neutron Activation Analysis), ICP-MS, XRF, Infrared technology 및 Coulometry)등을 실시하였다(Tables 1 and 2).

Mineral	Ore Vein	Rhodochrosite zone	Dolomite zone
Quartz			
Rhodochrosite			
Dolomite			
Kutnahorite			
Calcite			
Arsenopyrite			
Pyrite			
Sphalerite			
Stannite			
Chalcopyrite			
Galena			
Boulangerite			
Marcasite			
Tetrahedrite			

Fig. 3. Mineral assemblage of lead-zinc-silver ore vein and wallrock alteration from the Janggun lead-zinc-silver deposit. The bold lines indicate high abundance, the thin lines represent the minor amounts.

Table 1. Major elements (wt.%) of wallrock and altered rocks from the Janggun Pb-Zn-Ag deposit

Sample No.	JG5	JG6	JG2	JG1	JG3	JG4	JG7
SiO ₂	2.55	1.97	2.88	4.77	3.01	4.53	5.20
Al ₂ O ₃	0.60	0.28	1.10	1.06	1.56	2.08	2.27
Fe ₂ O ₃ (T)*	0.49	0.28	3.47	5.85	5.72	5.97	35.19
MnO	0.69	1.06	20.36	43.13	47.79	44.58	0.53
MgO	20.43	3.43	12.61	6.13	4.72	5.18	0.39
CaO	30.40	49.46	19.37	4.25	2.59	3.31	0.33
Na ₂ O	< 0.01	0.04	0.08	0.13	0.10	0.05	0.10
K ₂ O	< 0.01	0.01	0.21	0.22	0.35	0.42	0.46
TiO ₂	0.02	0.01	0.04	0.04	0.05	0.06	0.09
P ₂ O ₅	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
CO ₂	47.40	41.70	43.00	38.90	38.50	37.60	0.61
LOI	43.68	39.54	37.29	33.34	33.44	33.02	24.73
Total	98.85	96.06	97.42	98.93	99.35	99.23	69.33
Rock type	Dolomite	Limestone	Altered rock	Altered rock	Altered rock	Altered rock	Vein
Alteration zone			Dolomite	Rhodochrosite	Rhodochrosite	Rhodochrosite	

* Total Fe as Fe₂O₃

Table 2. Minor elements (ppm) of wallrock and altered rocks from the Janggun Pb-Zn-Ag deposit

Sample No.	JG5	JG6	JG2	JG1	JG3	JG4	JG7
S ^{total*}	0.07	0.10	0.14	0.04	0.07	0.09	30.40
S*	0.12	0.16	0.12	0.01	0.03	0.05	> 20.0
Ag	< 0.5	< 0.5	2.00	< 0.5	< 0.5	< 0.5	95.80
Au**	1.00	1.00	1.00	1.00	3.00	4.00	1260.00
As	4.00	4.00	9.00	10.00	18.00	49.00	71000.00
Ba	8.00	2.00	10.00	8.00	12.00	16.00	31.00
Be	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Bi	< 0.1	0.10	0.30	0.20	< 0.1	< 0.1	3.90
Br	1.10	1.20	1.40	1.20	0.90	1.20	< 0.5
Cd	0.70	< 0.5	4.60	1.10	0.60	< 0.5	280.00
Co	1.10	2.20	1.70	1.00	0.60	2.00	5.40
Cr	3.40	2.20	7.10	5.10	6.70	8.70	11.80
Cs	0.30	0.20	0.40	0.70	0.90	1.20	2.30
Cu	6.00	8.00	60.00	9.00	12.00	11.00	2740.00
Ga	< 1	< 1	8.00	12.00	14.00	11.00	10.00
Ge	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Hf	0.20	0.10	0.30	0.20	0.40	0.40	1.50
Hg	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
In	< 0.1	< 0.1	0.10	< 0.1	< 0.1	< 0.1	4.40
Ir**	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Nb	1.10	0.80	1.50	1.10	1.50	4.40	5.70
Ni	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	2.00
Pb	< 5	9.00	1600.00	114.00	249.00	230.00	> 5000
Rb	4.00	2.00	9.00	18.00	24.00	25.00	34.00
Sb	0.70	0.40	6.70	2.30	6.20	5.50	860.00
Sc	0.58	0.55	1.35	1.05	1.28	1.71	0.61
Se	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Sn	< 1	< 1	32.00	7.00	8.00	15.00	359.00
Sr	167.00	173.00	86.00	11.00	4.00	9.00	9.00
Ta	< 0.1	< 0.1	0.10	< 0.1	< 0.1	0.20	0.50
Th	0.57	0.57	1.17	0.72	1.26	1.94	2.76
U	0.77	0.77	0.63	0.47	0.77	0.82	2.37
V	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	21.00
W	< 1.00	2.00	3.00	3.00	5.00	5.00	56.00
Y	2.00	2.00	5.00	1.00	1.00	8.00	< 1.00
Zn	10.00	< 1	1160.00	158.00	143.00	53.00	53100.00
Zr	5.00	5.00	10.00	9.00	15.00	14.00	52.00
La	4.44	3.21	3.22	2.29	0.94	3.60	0.38
Ce	8.50	6.70	7.10	5.10	2.20	7.50	0.60
Pr	1.04	0.78	0.87	0.62	0.29	0.89	0.07
Nd	3.72	2.92	3.48	2.59	1.42	3.24	0.30
Sm	0.71	0.61	0.82	0.62	0.43	0.71	0.08
Eu	0.16	0.12	0.34	0.27	0.08	0.09	0.02
Gd	0.70	0.59	0.79	0.63	0.51	0.93	0.07
Tb	0.12	0.10	0.14	0.11	0.12	0.22	0.01
Dy	0.60	0.51	0.83	0.62	0.79	1.55	0.08
Ho	0.11	0.10	0.15	0.12	0.16	0.32	0.02
Er	0.31	0.28	0.42	0.32	0.47	0.99	0.09
Tl	0.31	< 0.05	0.27	0.26	0.55	0.89	2.26
Tm	0.06	0.04	0.06	0.04	0.07	0.16	0.02
Yb	0.34	0.27	0.36	0.26	0.44	0.95	0.14
Lu	0.04	0.03	0.05	0.03	0.06	0.12	0.02
Rock type	Dolomite	Limestone	Altered rock	Altered rock	Altered rock	Altered rock	Vein
Alteration zone			Dolomite	Rhodochrosite	Rhodochrosite	Rhodochrosite	

* wt.%, ** ppb

4. 화학조성 및 원소분산

연·아연-은 광상의 파이프상 A광체에서 채취한 모암인 석회암과 돌로마이트는 육안상 회백색을 띠고 층리가 관찰되며 방해석, 돌로마이트, 석영, 금운모 및 흑운모 등으로 구성된다. 이 모암에 대한 화학조성을 알아보기 위해 캐나다 Actlabs에 의뢰하여 분석한 결과는 표 1 및 2와 같다. 표 1에서 보는 것과 같이, 돌로마이트는 주로 CaO(30.40 wt.%)와 MgO(20.43 wt.%)로 구성되어 있으며 소량 SiO₂(2.55 wt.%), Fe₂O₃(T)(0.49 wt.%), MnO(0.69 wt.%), Al₂O₃(0.60 wt.%) 및 CO₂(47.4 wt.%) 등이 함유되어 있고 석회암은 주로 CaO(49.46 wt.%)로 구성되어 있으며 소량 SiO₂(1.97 wt.%), MnO(1.06 wt.%), MgO(3.43 wt.%), Fe₂O₃(T)(0.28 wt.%), Al₂O₃(0.28 wt.%) 및 CO₂(41.7 wt.%) 등이 함유되어 있다. 일반적으로 모암이 퇴적암인 경우, 모암의 주원소, 미량원소 및 희토류원소들의 지화학적 특징은 Haskin and Haskin(1966), Thompson *et al.*(1970), Barber(1974), Jarvis *et al.*(1975), Bellanca *et al.*(1981), Gromet *et al.*(1984), Taylor and McLennan(1985) 및 Condie *et al.*(1991)에 의해 표준값들과 비교하여 설명한다. 여기에서 Barber(1974)에 의해 보고된 돌로마이트 및 석회암내의 주원소 함량과 비교하면 CaO 함량(돌로마이트: 28.15 wt.%, 석회암: 29.55~53.64 wt.%)은 비슷하나 MgO 함량(돌로마이트: 16.08 wt.%, 석회암: 0.64~2.81 wt.%), MnO 함량(돌로마이트: 0.61 wt.%, 석회암: 0.02~0.15 wt.%)은 다소 높고 Fe₂O₃(T) 함량(돌로마이트: 4.14 wt.%, 석회암: 0.31~1.35 wt.%)보다 낮은 값을 갖는다.

모암(JG5 돌로마이트 시료, JG6 석회석 시료)내 미량원소들의 함량은 표 2와 같다. 이들 미량원소에 대한 Thompson *et al.*(1970)과 Barber(1974)에 의해 보고된 돌로마이트 및 석회암내 미량원소 함량과 비교할 때, Pb 원소의 함량은 높고 Ba, Co, Cr, Cu, Ga, Ni, Rb, Sn, Sr, V, Y, Zn 및 Zr 원소들의 함량은 낮다. 또한 Condie *et al.*(1991)에 의한 평균 Phanerozoic 석회암내 미량원소 함량과 비교할 때, Ba, Cr, Nb, Ni, Rb, Sr, Y 및 Zr 원소들의 함량은 낮다. 그리고 연·아연-은 광상의 모암내 미량원소 함량에 대해 Post-Archean Australian Shale(PAAS, Taylor and McLennan, 1985)와 North American Shale Composite(NASC, Gromet *et al.*, 1984)내 미량원소 함량과 비교해 보면, Cu, Zn 원소들의 함량은 높고 As, Ba, Co, Cr, Cs, Hf, Nb, Ni, Rb, Sb, Sc, Ta, Th, U, Y, V, Zr 원소

들의 함량은 낮고 Sr 함량은 NASC내 함량보다 높고 PAAS내 함량보다 낮다.

연·아연-은 광상의 모암내 희토류원소 총 함량은 21.2(돌로마이트)~16.3 ppm(석회암)이며 경희토류원소가 중희토류원소 보다 높은 함량을 갖는다. 이들 함량은 PAAS, NASC 및 European Shale(ES)(Haskin and Haskin, 1966)로 표준화한 값들을 살펴보면 모든 희토류원소들은 상대적으로 결핍된 특징을 보여준다. 그러나 Leadville 석회암과 Northwestern Sicily 석회암내 희토류원소 함량(Jarvis *et al.*, 1975; Bellanca *et al.*, 1981)과 비교할 때 이들 암석내 희토류원소들의 함량은 모두 높다.

변질암석내 주원소, 미량원소 및 희토류원소들의 함량을 살펴보기 위해 JG7 시료(연·아연 맥), JG4 시료, JG3 시료, JG1 시료(능망간석대) 및 JG2 시료(돌로마이트)에 대해 분석하였다(Tables 1 and 2; Fig. 2). 이들 표에서 보는 것과 같이, 연·아연-은 열수작용에 의한 모암변질에 의하여 시료에 따라 주원소 및 미량원소의 종류 및 함량 변화가 크다. 변질암석의 Fe₂O₃(T), MnO, MgO 및 CaO 함량은 모암(돌로마이트, 석회암)과 연·아연 맥내 이들 원소의 함량과 비교할 때 변화 폭이 크다(Table 1). 또한 변질암석의 SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O 및 TiO₂ 함량은 전반적으로 모암(돌로마이트, 석회암)내 이들 원소의 함량과 비교할 때 높은 값을 갖고 연·아연 맥의 이들 원소의 함량과 비교할 때 낮은 값을 갖는다(Table 1). 또한 변질암석내 CO₂ 함량은 37.60~43.00 wt.%와 총 S 함량은 0.04~0.14 wt.%로써 CO₂ 함량은 모암내 원소 함량보다 낮고 연·아연 맥내 원소 함량보다 높으며 총 S 함량은 모암내 원소 함량과 유사하나 연·아연 맥내 원소 함량보다 낮은 값을 갖는다(Tables 1 and 2). 능망간석대는 돌로마이트대에 비해 SiO₂, Fe₂O₃(T), MnO 및 K₂O 함량이 증가하고 MgO, CaO 및 CO₂ 함량은 감소한다.

친석원소들(lithophile elements) 중 불호정성 원소들(incompatible elements)과 함량은 모암과 연·아연 맥내 이들 원소의 함량을 비교할 때 변화 폭이 크다(Table 2). 모암변질에 의한 변질암석내 Zr, Th 및 Rb 원소들의 함량은 모암내 이들 원소들보다 높은 값을 갖고 Sr 원소의 함량은 낮은 값을 갖는다. Table 2에서 보는 것과 같이, 연·아연 열수작용에 의한 미량원소의 함량은 전반적으로 높은 값을 갖으나 특히 Ag, Au, As, Bi, Cd, Cu, Pb, Sb, Sn, V, W 및 Zn 함량이 높다. 이들 미량원소에 대해 모암내 미량원소 함량과 비교할 때, Ag, Au, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ga,

Pb, Sb, Sn 및 Zn 원소들의 함량 변화는 변질암석에 따라 큰 폭으로 존재한다(Table 2). 희토류원소들의 함량을 살펴보면, 모암변질에 의한 변질암석내 희토류원소 함량(8.5~22.2 ppm)은 연·아연 맥내 희토류원소 함량(4.2 ppm)보다 높고 모암내 희토류원소 함량(16.3~21.2 ppm)보다 상대적으로 낮게 산출된다(Table 2).

5. 토 론

장군 연·아연-은 광상의 파이프상 A광체의 모암인 석회암 및 돌로마이트에 대한 연·아연-은 광화작용에 의한 모암변질시 각각 모암변질 종류, 원소 분포 특성, 분산 원소의 종류, 분산유형 및 함량 등을 알아보기 위하여 장군 연·아연-은 광상의 파이프상 A광체에서 체계적으로 광맥, 모암변질대(능망간석대 및 돌로마이트대) 및 모암에 대해 시료를 채취하였다(Fig. 2). Lee *et al.* (1990)에 의하면 연·아연-은 광화작용시 모암인 탄산염암은 열수성 망간교대작용 및 돌로마이트화 작용에 의한 변질대가 대상분포를 보이며 모암에서 연·아연-은 광체로 감에 따라 4개의 변질대로 구분되며 모든 변질대에서 망간의 교대작용이 있었다고 보고하였다. 따라서 모암변질시 망간(MnO)의 부화에 따른 모암인 돌로마이트와 석회암에 대한 주원소 및 미량원소들간의 상관계수를 구한 결과, 모암이 돌로마이트에선 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$ 원소는 정의 상관관계를 갖으나 MgO , CaO 및 CO_2 원소들은 부의 상관관계를 갖으며 모암이 석회암에선 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$ 원소는 정의 상관관계를 갖으나 CaO 원소는 부의 상관관계를 갖는다. 또 다른 주원소들간의 상관계수를 살펴보면, 모암이 돌로마이트에선 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$ 원소는 MgO , CaO 및 CO_2 원소들과 부의 상관관계, MgO 원소는 CaO 및 CO_2 원소들과 정의 상관관계, Al_2O_3 원소는 K_2O 및 TiO_2 원소들과 정의 상관관계, CaO 원소는 CO_2 원소와 정의 상관관계, K_2O 원소는 TiO_2 원소와 정의 상관관계 및 CO_2 원소와 부의 상관관계를 갖는다. 모암이 석회암에선 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$ 원소는 TiO_2 원소와 정의 상관관계 및 CaO 원소와 부의 상관관계, Al_2O_3 원소는 K_2O 및 TiO_2 원소들과 정의 상관관계, CaO 원소는 TiO_2 원소와 부의 상관관계, K_2O 원소는 TiO_2 원소와 정의 상관관계를 갖는다. 여기에서 모암변질시 주원소들의 거동을 살펴보면 MnO 원소의 부화에 따른 MgO , CaO 및 CO_2 원소들의 감소 및 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$ 원소의 부화(돌로마이트)와 CaO 원소의 감소 및 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$ 원소의 부화(석회암)가 있었음을 알 수 있다.

MnO 원소에 따른 다른 미량원소들의 상관계수를 살펴보면, 모암이 돌로마이트와 석회암에선 Ga와 Rb 원소들은 정의 상관관계이고 Sr 원소는 부의 상관관계를 갖는다. 또한 연·아연-은 광맥에서 채취한 시료(JG7)에서 주원소 및 미량원소의 함량이 높은 원소들은 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$, 총 S, S, Ag, Au, As, Cd, Cu, Pb, Sb, Sn, W 및 Zn 등으로 이들 원소들은 열수용액에서 기원된 것들이다(Tables 1 and 2). 모암이 돌로마이트와 석회암에 대한 이들 원소들의 상관계수를 구한 결과는 표 3 및 4와 같다. 이들 표에서 보는 것과 같이, 이것은 연·아연-은 광화작용시 연과 아연 원소들은 돌로마이트와 석회암에서 주로 MgO , Bi, Cd, Cu 및 Sn 원소들과 밀접한 관계를 갖으나 모암변질대(능망간석대 및 돌로마이트대)에선 이들 원소들의 뚜렷한 분산이 관찰되지 않는다.

모암변질시 열수용액과 모암사이에는 성분의 이동에 의해 이득/손실이 존재한다. 일반적으로 열수용액과 모암사이의 열수변질시 부동(immobile)원소들은 Al_2O_3 , TiO_2 , Zr, Nb, Y 및 Yb 등이다(Maclean and Kranidiotis, 1987; Maclean and Barrett, 1993). 장군 연·아연-은 광상일대 열수작용에 의한 모암변질시 가장 좋은 부동원소를 선택하기 위해 몇몇 호정성(compatible)-불호정성(incompatible) 및 호정성-호정성 부동원소 쌍에 상관계수를 체크하였으며 석회암과 돌로마이트에 대한 TiO_2 -Zr의 회귀분석 결과 가장 높은 상관계수를 보여 TiO_2 를 부동원소로써 채택하였다. TiO_2 를 이용한 모암변질시 구성성분-부피의 상관관계를 기초로 변질과 비변질 광물 및 암석에 대한 화학분석치 및 비중으로 물질의 이득 및 손실을 계산하는 방정식으로 사용하여 열수작용 후의 변질 암석의 원소 이득 및 손실을 계산하면(Gresens, 1967; Grant, 1986) 표 5(돌로마이트) 및 6(석회암)과 같다. 이들 표에서 보는 것과 같이, 돌로마이트을 모암으로 갖는 변질암석시료에서 이득된 주원소는 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})(+1.25\sim+2.44\text{g})$, $\text{MnO}(+9.49\sim20.88\text{g})$, $\text{K}_2\text{O}(+0.10\sim+0.13\text{g})$, $\text{Na}_2\text{O}(+0.01\sim+0.06\text{g})$ 이며 이득과 손실을 한 주원소는 $\text{Al}_2\text{O}_3(-0.07\sim+0.09\text{g})$ 이고 손실된 주원소는 $\text{SiO}_2(-0.17\sim-1.35\text{g})$, $\text{MgO}(-14.13\sim-18.70\text{g})$, $\text{CaO}(-20.72\sim-29.36\text{g})$, $\text{CO}_2(-25.90\sim-34.87\text{g})$ 등이다. 반면 석회암을 모암으로 갖는 변질암석시료에서 이득된 주원소는 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})(+0.59\sim+1.18\text{g})$, $\text{MnO}(+4.03\sim9.72\text{g})$, $\text{K}_2\text{O}(+0.04\sim+0.06\text{g})$ 이며 이득과 손실을 한 주원소는 $\text{Al}_2\text{O}_3(-0.02\sim+0.07\text{g})$ 이고 손실된 주원소는 $\text{SiO}_2(-1.37\sim-0.78\text{g})$, $\text{MgO}(-2.57\sim-0.28\text{g})$, $\text{CaO}(-48.94\sim-44.62\text{g})$, $\text{CO}_2(-35.43\sim-30.95\text{g})$, $\text{Na}_2\text{O}(-0.03$

Table 3. Correlation coefficients among major and trace elements of dolomite and altered rocks from the Janggun Pb-Zn-Ag deposit

Elements	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	TiO ₂	CO ₂	S ^{total}	Au	As	Ba	Bi	Br	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Ga	Hf	Nb	Pb	Rb	
Fe ₂ O ₃ (T)	1.00																							
MnO	0.99	1.00																						
MgO	-1.00	-1.00	1.00																					
CaO	-0.99	-1.00	0.99	1.00																				
K ₂ O	0.61	0.64	-0.68	-0.63	1.00																			
TiO ₂	0.88	0.87	-0.89	-0.87	0.99	1.00																		
CO ₂	-0.99	-0.99	0.99	0.99	-0.92	-0.92	1.00																	
S ^{total}	-0.20	-0.29	0.21	0.31	0.09	0.05	0.21	1.00																
S	-0.86	-0.89	0.86	0.90	-0.61	-0.61	-0.67	1.00																
Au	0.59	0.63	-0.63	-0.64	0.84	0.87	-0.67	0.00	-0.40	1.00														
As	0.59	0.58	-0.59	-0.59	0.81	0.87	-0.66	0.09	-0.36	0.91	1.00													
Ba	0.55	0.55	-0.58	-0.55	0.85	0.88	-0.63	0.27	-0.23	0.95	0.95	1.00												
Bi	-0.01	-0.14	0.08	0.16	-0.15	-0.20	0.11	0.56	0.25	-0.59	-0.40	-0.37	1.00											
Br	-0.12	-0.28	0.21	0.27	-0.14	-0.12	0.18	0.61	0.38	-0.39	-0.03	-0.10	0.80	1.00										
Cd	-0.19	-0.30	0.23	0.33	-0.16	-0.22	0.26	0.81	0.53	-0.49	-0.35	-0.23	0.93	0.76	1.00									
Co	0.03	-0.09	0.03	0.07	0.25	0.30	-0.05	0.63	0.31	0.25	0.57	0.51	0.28	0.75	0.37	1.00								
Cr	0.68	0.64	-0.68	-0.62	0.90	0.90	-0.71	0.49	-0.24	0.74	0.80	0.88	0.10	0.21	0.18	0.58	1.00							
Cs	0.83	0.85	-0.85	-0.87	0.92	0.95	-0.89	-0.20	0.70	0.91	0.90	0.85	-0.46	-0.30	-0.50	0.21	0.74	1.00						
Cu	-0.11	-0.21	0.14	0.24	-0.02	-0.08	0.17	0.88	0.52	-0.32	-0.22	-0.06	0.86	0.71	0.98	0.42	0.33	-0.37	1.00					
Ga	0.97	0.97	-0.98	-0.96	0.85	0.81	-0.95	-0.18	-0.82	0.52	0.43	0.46	0.02	-0.23	-0.12	-0.16	0.63	0.74	0.00	1.00				
Hf	0.57	0.60	-0.62	-0.58	0.86	0.84	-0.62	0.34	-0.21	0.88	0.73	0.90	-0.28	-0.10	-0.22	0.85	0.75	0.09	0.59	1.00				
Nb	0.43	0.40	-0.43	-0.42	0.70	0.76	-0.51	0.22	-0.18	0.83	0.98	0.92	-0.33	0.12	-0.25	0.72	0.78	0.78	-0.12	0.26	0.66	1.00		
Pb	-0.07	-0.17	0.10	0.21	0.03	-0.03	0.13	0.89	0.49	-0.27	-0.17	-0.01	0.85	0.70	0.97	0.43	0.38	-0.33	1.00	0.14	-0.08	1.00		
Rb	0.93	0.96	-0.95	-0.96	0.93	0.94	-0.96	-0.27	-0.82	0.82	0.74	0.73	-0.36	-0.39	-0.45	-0.01	0.69	0.96	-0.33	0.89	0.73	0.58	-0.29	1.00
Sb	0.53	0.50	-0.55	-0.47	0.74	0.68	-0.53	0.65	-0.06	0.50	0.43	0.63	0.30	0.14	0.45	0.30	0.86	0.44	0.60	0.60	0.83	0.39	0.63	0.50
Sc	0.75	0.70	-0.75	-0.69	0.92	0.92	-0.77	0.41	-0.34	0.73	0.81	0.86	0.11	0.22	0.15	0.56	0.99	0.77	0.29	0.68	0.82	0.77	0.34	0.73
Sn	0.15	0.03	-0.11	-0.01	0.28	0.24	-0.10	0.89	0.33	-0.03	0.12	0.25	0.78	0.74	0.88	0.62	0.62	-0.05	0.94	0.16	0.31	0.21	0.95	-0.05
Sr	-1.00	-1.00	1.00	1.00	-0.89	-0.87	0.99	0.24	0.88	-0.60	-0.57	-0.54	0.07	0.20	0.23	0.04	-0.66	-0.84	0.15	-0.98	-0.58	-0.41	0.11	-0.94
Th	0.59	0.57	-0.60	-0.57	0.88	0.89	-0.65	0.39	-0.21	0.88	0.92	0.98	-0.17	0.07	-0.05	0.60	0.95	0.81	0.12	0.50	0.89	0.91	0.16	0.70
Ti	0.49	0.53	-0.53	-0.54	0.78	0.82	-0.59	0.04	-0.31	0.98	0.96	0.96	-0.59	-0.26	-0.48	0.41	0.73	0.88	-0.32	0.38	0.81	0.92	-0.28	0.73
U	-0.20	-0.12	0.13	0.12	0.22	0.25	0.09	0.23	0.32	0.67	0.51	0.63	-0.68	-0.42	-0.36	0.19	0.28	0.32	-0.22	-0.20	0.61	0.54	-0.20	0.16
W	0.87	0.89	-0.90	-0.88	0.99	0.97	-0.90	0.06	-0.60	0.85	0.75	0.82	-0.20	-0.26	-0.19	0.12	0.86	0.89	-0.03	0.87	0.90	0.61	0.02	0.94
Y	0.16	0.07	-0.13	-0.08	0.46	0.51	-0.21	0.61	0.22	0.52	0.76	0.74	0.07	0.53	0.22	0.95	0.74	0.42	0.32	-0.01	0.49	0.87	0.34	0.20
Zn	-0.10	-0.21	0.14	0.24	-0.06	-0.12	0.18	0.83	0.48	-0.40	-0.29	-0.15	0.91	0.71	0.99	0.35	0.27	-0.42	0.99	-0.03	0.01	-0.20	0.99	-0.35
Zr	0.82	0.85	-0.86	-0.83	0.96	0.93	-0.85	0.12	-0.53	0.83	0.69	0.81	-0.19	-0.30	-0.15	0.07	0.85	0.84	0.02	0.85	0.93	0.56	0.07	0.90
La	-0.69	-0.74	0.73	0.72	-0.52	-0.45	0.65	0.28	0.67	-0.24	0.02	-0.09	0.01	0.51	0.11	0.62	-0.24	-0.38	0.06	-0.84	-0.41	0.22	0.04	-0.63
Ce	-0.62	-0.70	0.67	0.68	-0.47	-0.40	0.60	0.35	0.66	-0.25	0.05	-0.06	0.12	0.62	0.21	0.70	-0.16	-0.37	0.16	-0.79	-0.39	0.25	0.14	-0.61
Pr	-0.66	-0.73	0.70	0.71	-0.50	-0.43	0.63	0.36	0.68	-0.28	0.01	-0.09	0.13	0.61	0.23	0.68	-0.19	-0.40	0.17	-0.81	-0.41	0.22	0.15	-0.64
Nd	-0.64	-0.73	0.70	0.71	-0.52	-0.46	0.63	0.42	0.70	-0.36	-0.06	-0.15	0.27	0.71	0.35	0.69	-0.18	-0.46	0.28	-0.79	-0.45	0.16	0.26	-0.68
Sm	-0.46	-0.58	0.53	0.57	-0.35	-0.31	0.47	0.63	0.65	-0.36	-0.03	-0.09	0.55	0.90	0.62	0.80	0.05	-0.42	0.57	-0.58	-0.33	0.18	0.55	-0.59
Eu	-0.20	-0.32	0.28	0.33	-0.41	-0.45	0.31	0.38	0.30	-0.79	-0.58	-0.60	0.95	0.79	0.83	0.18	-0.19	-0.64	0.72	-0.19	-0.57	-0.49	0.69	-0.55
Gd	-0.05	-0.15	0.10	0.13	0.19	0.26	0.01	0.52	0.32	0.28	0.60	0.51	0.13	0.67	0.22	0.98	0.50	0.21	0.27	-0.25	0.17	0.75	0.28	-0.04
Tb	0.32	0.27	-0.31	-0.29	0.62	0.68	-0.39	0.36	-0.02	0.75	0.92	0.88	-0.22	0.26	-0.11	0.82	0.77	0.67	0.01	0.14	0.61	0.98	0.05	0.45
Dy	0.46	0.43	-0.46	-0.44	0.74	0.80	-0.53	0.31	-0.15	0.84	0.97	0.95	-0.25	0.16	-0.15	0.74	0.84	0.78	-0.02	0.30	0.72	0.99	0.02	0.59
Ho	0.50	0.48	-0.50	-0.49	0.77	0.82	-0.58	0.24	-0.22	0.87	0.99	0.96	-0.31	0.09	-0.23	0.68	0.83	0.82	-0.09	0.35	0.73	0.99	-0.05	0.64
Er	0.48	0.46	-0.49	-0.48	0.76	0.82	-0.56	0.23	-0.21	0.88	0.99	0.96	-0.34	0.06	-0.25	0.67	0.82	0.82	-0.11	0.33	0.74	0.99	-0.07	0.64
Tm	0.39	0.38	-0.40	-0.40	0.69	0.75	-0.48	0.20	-0.15	0.88	0.97	0.94	-0.42	0.02	-0.31	0.66	0.75	0.78	-0.17	0.23	0.71	0.99	-0.13	0.58
Yb	0.39	0.38	-0.40	-0.40	0.70	0.75	-0.48	0.20	-0.15	0.88	0.97	0.95	-0.44	0.00	-0.31	0.65	0.75	0.79	-0.17	0.24	0.72	0.99	-0.13	0.59
Lu	0.43	0.42	-0.44	-0.43	0.73	0.78	-0.52	0.21	-0.17	0.90	0.98	0.96	-0.41	0.00	-0.29	0.64	0.78	0.81	-0.15	0.28	0.74	0.99	-0.11	0.62

Table 3. Continued

Elements	Sb	Sc	Sn	Sr	Th	Tl	U	W	Y	Zn	Zr	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Fe ₂ O ₃ (T)																									
MnO	1.00	1.00																							
MgO	0.74	0.59	1.00																						
CaO	-0.53	-0.72	-0.10	1.00																					
K ₂ O	0.73	0.93	0.43	-0.57	1.00																				
TiO ₂	0.41	0.71	-0.02	-0.50	0.89	1.00																			
CO ₂	0.21	0.20	-0.13	0.17	0.52	0.69	1.00																		
S _{total}	0.76	0.87	0.24	-0.88	0.83	0.75	0.27	1.00																	
S	0.46	0.71	0.57	-0.10	0.80	0.65	0.42	0.35	1.00																
Au	0.55	0.24	0.91	0.14	0.03	-0.41	-0.32	-0.07	0.23	1.00															
As																									
Ba																									
Bi																									
Br																									
Cd																									
Co																									
Cr																									
Cs																									
Cu																									
Ga																									
Hf																									
Nb																									
Pb																									
Rb																									
Sb	1.00																								
Sc	0.83	1.00																							
Sn	0.74	0.59	1.00																						
Sr	-0.53	-0.72	-0.10	1.00																					
Th	0.73	0.93	0.43	-0.57	1.00																				
Tl	0.41	0.71	-0.02	-0.50	0.89	1.00																			
U	0.21	0.20	-0.13	0.17	0.52	0.69	1.00																		
W	0.76	0.87	0.24	-0.88	0.83	0.75	0.27	1.00																	
Y	0.46	0.71	0.57	-0.10	0.80	0.65	0.42	0.35	1.00																
Zn	0.55	0.24	0.91	0.14	0.03	-0.41	-0.32	-0.07	0.23	1.00															
Zr	0.81	0.85	0.26	-0.83	0.82	0.72	0.32	0.99	0.32	-0.03	1.00														
La	-0.46	-0.28	0.04	0.73	-0.10	-0.03	0.23	-0.62	0.47	0.02	-0.65	1.00													
Ce	-0.38	-0.19	0.15	0.67	-0.05	-0.04	0.16	-0.58	0.54	0.12	-0.62	0.99	1.00												
Pr	-0.39	-0.22	0.15	0.71	-0.08	-0.07	0.16	-0.61	0.51	0.13	-0.64	0.99	1.00	1.00											
Nd	-0.34	-0.21	0.25	0.70	-0.11	-0.16	0.05	-0.63	0.50	0.25	-0.66	0.97	0.99	0.99	1.00										
Sm	-0.06	0.02	0.56	0.53	0.02	-0.19	-0.10	-0.47	0.60	0.54	-0.49	0.82	0.88	0.88	0.93	1.00									
Eu	-0.01	-0.16	0.57	0.25	-0.43	-0.76	-0.77	-0.47	-0.08	0.78	-0.47	0.16	0.25	0.26	0.39	0.59	1.00								
Gd	0.16	0.48	0.47	0.11	0.57	0.46	0.27	0.05	0.94	0.20	0.00	0.71	0.77	0.75	0.74	0.78	0.08	1.00							
Tb	0.40	0.75	0.32	-0.28	0.89	0.86	0.54	0.52	0.94	-0.08	0.47	0.34	0.38	0.35	0.30	0.34	-0.38	0.85	1.00						
Dy	0.50	0.83	0.31	-0.43	0.95	0.91	0.53	0.66	0.89	-0.10	0.62	0.17	0.21	0.18	0.13	0.19	-0.44	0.75	0.98	1.00					
Ho	0.48	0.83	0.24	-0.48	0.95	0.94	0.54	0.69	0.85	-0.17	0.65	0.12	0.16	0.12	0.07	0.11	-0.50	0.70	0.97	1.00	1.00				
Er	0.47	0.81	0.22	-0.46	0.94	0.95	0.56	0.69	0.84	-0.19	0.65	0.13	0.16	0.12	0.06	0.10	-0.52	0.69	0.97	0.99	1.00	1.00			
Tm	0.39	0.74	0.15	-0.37	0.91	0.96	0.64	0.62	0.84	-0.26	0.58	0.20	0.22	0.19	0.11	0.11	-0.58	0.70	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00		
Yb	0.39	0.73	0.14	-0.37	0.91	0.96	0.65	0.63	0.83	-0.26	0.59	0.19	0.21	0.18	0.10	0.09	-0.60	0.69	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	
Lu	0.44	0.77	0.17	-0.41	0.93	0.96	0.63	0.67	0.83	-0.24	0.63	0.15	0.17	0.14	0.07	0.08	-0.59	0.67	0.96	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Table 4. Correlation coefficients among major and trace elements of limestone and altered rocks from the Janggum Pb-Zn-Ag deposit

	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	TiO ₂	CO ₂	S ^{total}	S	Au	As	Ba	Bi	Br	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Ga	Hf	Nb	Pb	Rb
Fe ₂ O ₃ (T)	1.00																							
MnO	0.99	1.00																						
MgO	0.06	-0.09	1.00																					
CaO	-1.00	-0.98	-0.13	1.00																				
K ₂ O	0.89	0.89	0.04	-0.90	1.00																			
TiO ₂	0.91	0.90	0.07	-0.91	1.00	1.00																		
CO ₂	-0.76	-0.83	0.59	0.71	-0.73	-0.73	1.00																	
S ^{total}	-0.52	-0.59	0.62	0.46	-0.21	-0.23	0.74	1.00																
S	-0.94	-0.95	0.14	0.92	-0.72	-0.74	0.81	0.76	1.00															
Au	0.58	0.64	-0.35	-0.56	0.84	0.83	-0.76	-0.14	-0.43	1.00														
As	0.58	0.58	-0.19	-0.55	0.81	0.83	-0.70	-0.07	-0.41	0.91	1.00													
Ba	0.82	0.79	0.18	-0.84	0.98	0.98	-0.61	-0.03	-0.60	0.82	0.84	1.00												
Bi	0.00	-0.14	0.94	-0.06	-0.15	-0.13	0.62	0.42	0.10	-0.59	-0.40	-0.04	1.00											
Br	-0.34	-0.49	0.68	0.33	-0.35	-0.30	0.64	0.60	0.45	-0.49	-0.14	-0.17	0.72	1.00										
Cd	-0.12	-0.26	0.98	0.05	-0.12	-0.12	0.72	0.70	0.31	-0.46	-0.33	0.03	0.93	0.70	1.00									
Co	-0.63	-0.69	0.02	0.66	-0.39	-0.36	0.40	0.60	0.72	-0.08	0.16	-0.24	-0.04	0.64	0.09	1.00								
Cr	0.76	0.70	0.39	-0.79	0.92	0.92	-0.43	0.13	0.51	0.70	0.76	0.98	0.16	0.00	0.24	-0.19	1.00							
Cs	0.87	0.89	-0.23	-0.84	0.95	0.96	-0.89	-0.41	-0.77	0.89	0.88	0.90	-0.38	-0.43	-0.40	-0.32	0.78	1.00						
Cu	-0.13	-0.25	0.97	0.05	-0.05	-0.06	0.71	0.78	0.35	-0.34	-0.24	0.10	0.86	0.65	0.99	0.13	0.32	-0.34	1.00					
Ga	0.97	0.97	0.08	-0.98	0.85	0.85	-0.69	-0.50	-0.92	0.52	0.43	0.77	0.02	-0.46	-0.08	-0.79	0.71	0.79	-0.08	1.00				
Hf	0.75	0.75	0.18	-0.78	0.94	0.92	-0.52	0.04	-0.52	0.81	0.71	0.95	-0.09	-0.34	0.05	-0.37	0.92	0.81	0.15	0.76	1.00			
Nb	0.50	0.47	-0.07	-0.47	0.75	0.78	-0.57	0.08	-0.30	0.84	0.98	0.82	-0.29	0.03	-0.19	0.29	0.76	0.80	-0.10	0.33	0.67	1.00		
Pb	-0.06	-0.18	0.97	-0.03	0.03	0.02	0.65	0.76	0.29	-0.27	-0.18	0.85	0.62	0.98	0.09	0.39	0.39	-0.27	1.00	0.00	0.23	-0.05	1.00	
Rb	0.94	0.97	-0.19	-0.93	0.95	0.94	-0.89	-0.51	-0.87	0.80	0.73	0.86	-0.30	-0.54	-0.35	-0.55	0.75	0.96	-0.31	0.91	0.82	0.62	-0.24	1.00
Sb	0.57	0.52	0.57	-0.64	0.75	0.72	-0.12	0.35	-0.29	0.50	0.44	0.81	0.31	-0.05	0.47	-0.32	0.88	0.51	0.57	0.63	0.90	0.45	0.63	0.55
Se	0.77	0.71	0.35	-0.79	0.92	0.93	-0.47	0.11	-0.52	0.72	0.80	0.98	0.12	0.02	0.19	-0.14	1.00	0.81	0.27	0.69	0.91	0.81	0.34	0.76
Sn	0.17	0.03	0.94	-0.24	0.28	0.29	0.42	0.69	0.11	-0.03	0.12	0.44	0.78	0.62	0.90	0.12	0.63	0.01	0.93	0.16	0.43	0.25	0.95	0.00
Sr	-1.00	-1.00	0.00	0.99	-0.89	-0.90	0.79	0.55	0.95	-0.60	-0.57	-0.81	0.05	0.41	0.17	0.67	-0.74	-0.87	0.17	-0.98	-0.75	-0.47	0.10	-0.95
Th	0.59	0.57	0.11	-0.60	0.88	0.88	-0.51	0.18	-0.33	0.88	0.92	0.94	-0.17	-0.08	-0.02	0.07	0.91	0.82	0.09	0.50	0.88	0.93	0.16	0.71
Ti	0.73	0.74	-0.12	-0.72	0.94	0.94	-0.75	-0.12	-0.55	0.95	0.96	0.94	-0.35	-0.30	-0.27	-0.10	0.86	0.95	-0.17	0.64	0.88	0.91	-0.10	0.87
U	-0.20	-0.11	-0.41	0.20	0.22	0.18	-0.18	0.34	0.35	0.67	0.51	0.25	-0.68	-0.35	-0.37	0.38	0.17	0.26	-0.21	-0.20	0.36	0.49	-0.20	0.12
W	0.78	0.83	-0.15	-0.79	0.95	0.93	-0.76	-0.22	-0.63	0.92	0.78	0.91	-0.38	-0.56	-0.28	-0.41	0.81	0.92	-0.18	0.79	0.94	0.70	-0.11	0.92
Y	0.16	0.07	0.30	-0.16	0.46	0.49	-0.08	0.52	0.10	0.52	0.76	0.61	0.07	0.48	0.23	0.60	0.67	0.42	0.31	-0.01	0.47	0.86	0.34	0.21
Zn	-0.08	-0.20	0.98	-0.01	-0.05	-0.05	0.69	0.70	0.28	-0.39	-0.29	0.09	0.91	0.63	0.99	0.04	0.30	-0.34	0.99	-0.02	0.13	-0.16	0.99	-0.29
Zr	0.82	0.84	0.03	-0.84	0.96	0.93	-0.66	-0.16	-0.65	0.83	0.69	0.92	-0.19	-0.50	-0.10	-0.50	0.86	0.87	-0.01	0.85	0.98	0.62	0.06	0.91
La	-0.39	-0.50	0.24	0.42	-0.23	-0.18	0.34	0.54	0.51	-0.10	0.25	-0.07	0.20	0.82	0.26	0.93	0.02	-0.19	0.26	-0.59	-0.27	0.40	0.24	-0.42
Ce	-0.38	-0.50	0.31	0.40	-0.24	-0.18	0.38	0.56	0.50	-0.14	0.22	-0.07	0.28	0.86	0.32	0.91	0.03	-0.21	0.32	-0.57	-0.27	0.38	0.30	-0.43
Pr	-0.35	-0.47	0.36	0.37	-0.21	-0.16	0.39	0.58	0.48	-0.14	0.22	-0.04	0.33	0.88	0.37	0.88	0.07	-0.20	0.37	-0.54	-0.24	0.38	0.35	-0.41
Nd	-0.33	-0.47	0.49	0.33	-0.23	-0.18	0.47	0.61	0.47	-0.24	0.13	-0.05	0.47	0.94	0.50	0.82	0.09	-0.26	0.49	-0.50	-0.25	0.30	0.46	-0.44
Sm	-0.17	-0.33	0.72	0.15	-0.09	-0.05	0.50	0.65	0.35	-0.25	0.11	0.09	0.67	0.96	0.70	0.64	0.26	-0.20	0.68	-0.31	-0.08	0.28	0.67	-0.34
Eu	-0.05	-0.20	0.85	0.01	-0.28	-0.25	0.61	0.29	0.08	-0.71	-0.50	-0.19	0.98	0.74	0.85	-0.03	0.00	-0.46	0.74	-0.05	-0.27	-0.39	0.72	-0.38
Gd	0.22	0.11	0.39	-0.22	0.42	0.47	-0.07	0.42	0.01	0.38	0.69	0.57	0.23	0.61	0.30	0.37	0.64	0.39	0.34	0.03	0.36	0.81	0.37	0.19
Tb	0.46	0.41	0.09	-0.45	0.73	0.75	-0.45	0.21	-0.23	0.77	0.94	0.82	-0.14	0.17	-0.03	0.54	0.80	0.73	0.06	0.30	0.67	0.99	0.11	0.55
Dy	0.53	0.49	0.03	-0.51	0.79	0.81	-0.53	0.14	-0.30	0.84	0.97	0.86	-0.21	0.05	-0.09	0.25	0.83	0.80	0.00	0.38	0.74	0.99	0.06	0.64
Ho	0.53	0.51	-0.06	-0.51	0.80	0.81	-0.59	0.08	-0.32	0.88	0.99	0.85	-0.29	-0.02	-0.18	0.24	0.80	0.83	-0.09	0.38	0.73	1.00	-0.03	0.66
Er	0.52	0.49	-0.08	-0.49	0.79	0.80	-0.59	0.08	-0.31	0.87	0.99	0.84	-0.32	-0.04	-0.21	0.25	0.78	0.82	-0.11	0.37	0.72	1.00	-0.05	0.66
Tm	0.51	0.49	-0.11	-0.48	0.78	0.80	-0.60	0.07	-0.30	0.89	0.99	0.83	-0.35	-0.06	-0.23	0.25	0.77	0.82	-0.13	0.36	0.72	0.99	-0.07	0.65
Yb	0.47	0.46	-0.14	-0.45	0.76	0.77	-0.59	0.08	-0.27	0.90	0.99	0.81	-0.38	-0.07	-0.25	0.27	0.75	0.81	-0.15	0.33	0.70	0.99	-0.09	0.64
Lu	0.51	0.50	-0.11	-0.49	0.80	0.81	-0.60	0.08	-0.31	0.90	0.99	0.85	-0.35	-0.08	-0.23	0.23	0.78	0.83	-0.12	0.38	0.74	0.99	-0.06	0.67

Table 4. Continued

	Sb	Sc	Sn	Sr	Th	Tl	U	W	Y	Zn	Zr	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Fe ₂ O ₃ (T)																									
MnO	1.00																								
MgO	0.84	1.00																							
CaO	0.74	0.59	1.00																						
K ₂ O	-0.56	-0.74	-0.11	1.00																					
TiO ₂	0.73	0.93	0.43	-0.57	1.00																				
CO ₂	0.62	0.88	0.18	-0.73	0.95	1.00																			
S _{total}	0.19	0.18	-0.13	0.17	0.52	0.46	1.00																		
S	0.70	0.81	0.11	-0.80	0.84	0.93	0.44	1.00																	
Au	0.45	0.70	0.57	-0.11	0.80	0.63	0.42	0.35	1.00																
As	0.55	0.25	0.91	0.12	0.04	-0.21	-0.32	-0.20	0.23	1.00															
Ba	0.82	0.85	0.26	-0.84	0.82	0.88	0.32	0.98	0.32	-0.02	1.00														
Bi	-0.19	0.07	0.33	0.45	0.18	-0.01	0.12	-0.36	0.72	0.20	-0.42	1.00													
Br	-0.16	0.08	0.38	0.45	0.16	-0.03	0.07	-0.38	0.72	0.26	-0.42	1.00													
Cd	-0.11	0.12	0.44	0.42	0.18	-0.02	0.04	-0.37	0.73	0.32	-0.39	0.99	1.00												
Co	-0.06	0.12	0.53	0.40	0.13	-0.09	-0.08	-0.41	0.69	0.44	-0.41	0.96	0.98	1.00											
Cr	0.17	0.28	0.74	0.25	0.20	-0.04	-0.20	-0.32	0.69	0.66	-0.26	0.84	0.88	0.91	0.96	1.00									
Cs	0.11	-0.03	0.63	0.11	-0.33	-0.48	-0.79	-0.51	-0.04	0.80	-0.35	0.22	0.29	0.33	0.48	0.64	1.00								
Cu	0.38	0.68	0.60	-0.16	0.71	0.55	0.17	0.24	0.96	0.29	0.23	0.77	0.78	0.80	0.78	0.79	0.15	1.00							
Ga	0.52	0.84	0.40	-0.43	0.94	0.87	0.44	0.64	0.93	0.00	0.59	0.48	0.46	0.47	0.41	0.42	-0.25	0.88	1.00						
Hf	0.55	0.87	0.35	-0.50	0.96	0.92	0.48	0.73	0.88	-0.06	0.67	0.37	0.35	0.36	0.30	0.31	-0.33	0.82	0.99	1.00					
Nb	0.51	0.84	0.27	-0.51	0.96	0.94	0.51	0.75	0.85	-0.15	0.67	0.34	0.31	0.32	0.24	0.24	-0.40	0.78	0.98	1.00					
Pb	0.50	0.83	0.24	-0.49	0.95	0.94	0.54	0.75	0.84	-0.17	0.67	0.34	0.31	0.31	0.23	0.22	-0.43	0.77	0.98	0.99	1.00				
Tm	0.49	0.82	0.22	-0.49	0.95	0.94	0.56	0.75	0.83	-0.19	0.67	0.33	0.30	0.30	0.21	0.20	-0.46	0.75	0.97	0.99	1.00	1.00			
Yb	0.46	0.79	0.19	-0.46	0.94	0.93	0.59	0.74	0.83	-0.21	0.65	0.33	0.30	0.30	0.21	0.18	-0.49	0.74	0.97	0.98	1.00	1.00	1.00		
Lu	0.51	0.82	0.23	-0.50	0.96	0.95	0.57	0.77	0.82	-0.19	0.69	0.30	0.27	0.27	0.19	0.18	-0.47	0.74	0.97	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	

~0.01g) 등이다. 이것은 모암변질시 모암에 따른 주원소의 거동이 다소 차이가 있으나 모암의 주된 구성광물인 돌로마이트와 방해석의 해리에 의한 CaO, MgO 및 CO₂ 원소들의 손실과 Fe₂O₃(T) 및 MnO 원소들의 이득이 있었던 것으로 해석된다. 친석원소들 중 불호정성 원소들의 이득 및 손실을 살펴보면, 모암이 돌로마이트에선 Ba(-4.00~-2.67g), Sr(-165.40~-124.00g), Cs(-0.10~+0.10g), Rb(+0.50~+5.60g), Nb(-0.55~+0.37g), Zr(-0.50~+1.00g), Hf(-0.10~-0.04g), Ta(-0.05~-0.03g) 및 Th(-0.21~+0.08g)이고 모암이 석회암에선 Ba(0.00~+0.67g), Sr(-172.20~-151.50g), Cs(-0.10~-0.00g), Rb(+0.25~+2.80g), Nb(-0.53~-0.07g), Zr(-2.75~-2.00g), Hf(-0.05~-0.02g), Ta(-0.08~-0.00g) 및 Th(-0.39~-0.25g) 등이다. 이것은 모암변질시 모암에 따른 대부분의 불호정성 원소들의 이득/손실 거동이 다소 차이가 있으나 전반적으로 불호정성 원소들은 손실되었으며 특히 Sr 원소는 모암변질시 손실량이 크다(Tables 5 and 6). 변질암석시료에 따라 미량원소의 이득 및 손실은 다르지만 모암이 돌로마이트에선 총 S(-0.04~-0.00g), S(-0.12~-0.06g), Au(-0.50~+0.33g), As(+0.50~+12.33g), Br(-0.74~-0.40g), Cd(-0.46~+1.60g), Co(-0.86~-0.25g), Cr(-0.85~+0.15g), Cu(-2.33~+24.00g), Ga(+2.67~+5.00g), Pb(+52.00~+795.00g), Sb(+0.45~+2.65g), Sc(-0.07~+0.10g), Sn(+2.20~+15.00g), Ti(-0.18~-0.01g), U(-0.54~-0.46g), W(+0.50~+1.00g), Y(-1.60~+0.67g) 및 Zn(+7.67~+570.00g)이고 모암이 석회암에선 총 S(-0.09~-0.07g), S(-0.16~-0.13g), Au(-0.75~-0.33g), As(-1.75~+4.17g), Br(-1.02~-0.85g), Cd(-0.38~+0.65g), Co(-2.08~-1.78g), Cr(-0.93~-0.43g), Cu(-6.17~+7.00g), Ga(+0.83~+2.00g), Pb(+19.50~+391.00g), Sb(+0.18~+1.28g), Sc(-0.29~-0.21g), Sn(+0.75~+7.00g), Ti(+0.02~+0.10g), U(-0.65~-0.61g), W(-1.25~-1.00g), Y(-1.80~-0.67g) 및 Zn(+7.83~+289.00g)로써 Au, As, Cd, Cr, Cu 및 Sc 원소들은 모암변질대내 일부에서 이득이 관찰되나 Ga, Pb, Sb, Sn 및 Zn 원소들은 현저히 이득되었다(Tables 5 and 6). 이 변질암석시료내의 회토류원소의 이득 및 손실을 살펴보면, 모든 변질암석시료에서는 손실되었다(Tables 5 and 6).

장군 연·아연-은 광화작용시 Fe₂O₃(T), 총 S, S, Ag, Au, As, Cd, Cu, Pb, Sb, Sn, W 및 Zn 등의 원소들은 열수용액에서 기원되었으나 모암으로의 분산도는 Fe₂O₃(T), Pb 및 Zn 원소들을 제외한 다른 미량원소들은 분산도가 높지 않다(Tables 1 and 2). 따

라서 장군 연·아연-은 광상일대 모암(석회암 및 돌로마이트)과 열수용액(온도: 245~315°C, 황분압: 10.4~13.2 bar 및 산소분압: 33.6~35.4 bar)(Lee *et al.*, 1998)의 반응에 의해 형성된 변질작용(능망간석화작용 및 돌로마이트화작용)시 이득 및 손실된 주원소 및 미량원소의 종류 및 함량 그리고 이들 원소들간의 상관계수 등을 종합하면 CaO, MnO, MgO, Fe₂O₃(T), CO₂, Pb, Zn, Sb, Sn, Sr, Ga 및 Rb 등을 지시원소로서 활용하면 탄산염암을 모암으로 하는 열수교대광상 탐사시 유용하게 이용될 수 있다.

6. 결 론

1. 장군 연·아연-은 A광체에서 채취한 모암인 석회암과 돌로마이트는 방해석, 돌로마이트, 석영, 금운모 및 흑운모 등이 산출되며 돌로마이트의 화학조성은 CaO(30.40 wt.%)와 MgO(20.43 wt.%)가 대부분이며 소량 SiO₂(2.55 wt.%), Fe₂O₃(T)(0.49 wt.%), MnO(0.69 wt.%) 및 Al₂O₃(0.60 wt.%)로 구성되며 석회암의 화학조성은 주로 CaO(49.46 wt.%)이고 소량 SiO₂(1.97 wt.%), MnO(1.06 wt.%), MgO(3.43 wt.%), Fe₂O₃(T)(0.28 wt.%) 및 Al₂O₃(0.28 wt.%)으로 구성된다.

2. 모암변질대의 규모는 광체의 규모 또는 모암의 층리 방향성에 따라 좌우되며 능망간석화작용과 돌로마이트화 작용이 등이 관찰되며 능망간석대는 육안상 분홍색을 띠며 주로 능망간석이 산출되고 일부 방해석, 돌로마이트, 쿼츠나호라이트 등이 산출되며 돌로마이트대는 백색을 띠고 주로 돌로마이트가 산출되고 일부 방해석 및 능망간석 등이 산출된다.

3. 모암변질시 MnO 원소와의 상관계수를 살펴보면, MgO, CaO 및 CO₂ 원소들은 부의 상관관계 및 Fe₂O₃(T) 원소는 정의 상관관계(돌로마이트)와 CaO 원소는 부의 상관관계 및 Fe₂O₃(T) 원소는 정의 상관관계(석회암)를 갖는다. 또한 모암변질시 미량원소들에 대한 MnO 원소와의 상관계수를 살펴보면, 돌로마이트와 석회암에서 Ga와 Rb 원소들은 정의 상관관계 및 Sr 원소와는 부의 상관관계를 갖는다.

4. 연·아연-은 광화작용시, 연과 아연 원소들은 돌로마이트와 석회암에서 주로 MgO, Bi, Cd, Cu 및 Sn 원소들과 밀접한 관계를 갖으나 모암변질대(능망간석대 및 돌로마이트대)에선 이들 원소들의 뚜렷한 분산이 관찰되지 않는다.

5. 연·아연-은 광화작용시 Fe₂O₃(T), 총 S, S, Ag, Au, As, Cd, Cu, Pb, Sb, Sn, W 및 Zn 등의 원소

Table 5. Gains and losses of major (wt.%), trace and rare earth elements (ppm) of the altered zone from the Janggun Pb-Zn-Ag deposit

	JG5	JG2	JG2 gain and loss(g)	JG2 loss(%)	JG1	JG1 gain and loss(g)	JG1 loss(%)	JG3	JG3 gain and loss(g)	JG3 loss(%)	JG4	JG4 gain and loss(g)	JG4 loss(%)	JG7	JG7 gain and loss(g)	JG7 loss(%)
SiO ₂	2.55	2.88	-1.11	-43.53	4.77	-0.17	-6.47	3.01	-1.35	-52.78	4.53	-1.04	-40.78	5.20	-1.39	-54.68
TiO ₂	0.02	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.60	1.10	-0.05	-8.33	1.06	-0.07	-11.67	1.56	0.02	4.00	2.08	0.09	15.56	2.27	-0.10	-15.93
Fe ₂ O ₃ (T)*	0.49	3.47	1.25	254.08	5.85	2.44	496.94	5.72	1.80	366.94	5.97	1.50	306.12	35.19	7.33	1495.92
MnO	0.69	20.36	9.49	1375.36	43.13	20.88	3025.36	47.79	18.43	2670.43	44.58	14.17	2053.62	0.53	-0.57	-82.93
MgO	20.43	12.61	-14.13	-69.14	6.13	-17.37	-85.00	4.72	-18.54	-90.76	5.18	-18.70	-91.55	0.39	-20.34	-99.58
CaO	30.40	19.37	-20.72	-68.14	4.25	-28.28	-93.01	2.59	-29.36	-96.59	3.31	-29.30	-96.37	0.33	-30.33	-99.76
Na ₂ O	<0.01	0.08	0.03	300.00	0.13	0.06	550.00	0.10	0.03	300.00	0.05	0.01	66.67	0.10	0.01	122.22
K ₂ O	<0.01	0.21	0.10	950.00	0.22	0.10	1000.00	0.35	0.13	1300.00	0.42	0.13	1300.00	0.46	0.09	922.22
P ₂ O ₅	<0.01	<0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	-50.00	0.02	0.00	-20.00	0.02	0.00	-33.33	0.02	-0.01	-55.56
CO ₂	47.40	43.00	-25.90	-54.64	38.90	-27.95	-58.97	38.50	-32.00	-67.51	37.60	-34.87	-73.56	0.61	-47.26	-99.71
LOI	43.68	37.29	-25.04	-57.31	33.34	-27.01	-61.84	33.44	-30.30	-69.38	33.02	-32.67	-74.80	24.73	-38.18	-87.42
Total	98.85	97.42			98.93			99.35			99.23			69.33		
S ^{total**}	0.07	0.14	0.00	0.00	0.04	-0.05	-71.43	0.07	-0.04	-60.00	0.09	-0.04	-57.14	30.40	6.69	9550.79
S**	0.12	0.12	-0.06	-50.00	0.01	-0.12	-95.83	0.03	-0.11	-90.00	0.05	-0.10	-86.11	>20.0	4.32	3603.70
Ag	<0.5	2.00	0.50	100.00	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00	95.80	20.79	4157.78
Au***	1.00	1.00	-0.50	-50.00	1.00	-0.50	-50.00	3.00	0.20	20.00	4.00	0.33	33.33	1260.00	279.00	27900.00
As	4.00	9.00	0.50	12.50	10.00	1.00	25.00	18.00	3.20	80.00	49.00	12.33	308.33	71000.00	15773.78	394344.44
Ba	8.00	10.00	-3.00	-37.50	8.00	-4.00	-50.00	12.00	-3.20	-40.00	16.00	-2.67	-33.33	31.00	-1.11	-13.89
Be	<1.0	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00
Bi	<0.1	0.30	0.05	50.00	0.20	0.00	0.00	<0.1	0.00	0.00	<0.1	0.00	0.00	3.90	0.77	766.67
Br	1.10	1.40	-0.40	-36.36	1.20	-0.50	-45.45	0.90	-0.74	-67.27	1.20	-0.70	-63.64	<0.5	0.00	0.00
Cd	0.70	4.60	1.60	228.57	1.10	-0.15	-21.43	0.60	-0.46	-65.71	<0.5	0.00	0.00	280.00	61.52	8788.89
Co	1.10	1.70	-0.25	-22.73	1.00	-0.60	-54.55	0.60	-0.86	-78.18	2.00	-0.43	-39.39	5.40	0.10	9.09
Cr	3.40	7.10	0.15	4.41	5.10	-0.85	-25.00	6.70	-0.72	-21.18	8.70	-0.50	-14.71	11.80	-0.78	-22.88
Cs	0.30	0.40	-0.10	-33.33	0.70	0.05	16.67	0.90	0.06	20.00	1.20	0.10	33.33	2.30	0.21	70.37
Cu	6.00	60.00	24.00	400.00	9.00	-1.50	-25.00	12.00	-1.20	-20.00	11.00	-2.33	-38.89	2740.00	602.89	10048.15
Ga	<1.0	8.00	3.00	300.00	12.00	5.00	500.00	14.00	4.60	460.00	11.00	2.67	266.67	10.00	1.22	122.22
Ge	<0.5	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00
Hf	0.20	0.30	-0.05	-25.00	0.20	-0.10	-50.00	0.40	-0.04	-20.00	0.40	-0.07	-33.33	1.50	0.13	66.67

* Total Fe as Fe₂O₃, ** wt.%, *** ppb

Table 5. Continued

	JG5	JG2	JG2	JG1	JG3	JG4	JG7	JG7	JG7	JG7	JG7	JG7
		gain and loss(g)	gain and loss(%)	gain and loss(g)	gain and loss(%)	gain and loss(g)	gain and loss(%)	gain and loss(g)	gain and loss(%)	gain and loss(g)	gain and loss(%)	gain and loss(%)
Hg	<1.0	<1.0	0.00	<1.0	0.00	0.00	0.00	<1.0	0.00	<1.0	0.00	0.00
In	<0.1	0.10	-0.05	<0.1	0.00	0.00	0.00	<0.1	0.00	4.40	0.88	877.78
Ir***	<1.0	<1.0	0.00	<1.0	0.00	0.00	0.00	<1.0	0.00	<1.0	0.00	0.00
Nb	1.1	1.5	-0.35	1.1	-0.55	-50.00	1.5	-0.5	-45.45	5.7	0.17	15.15
Ni	<1.0	<1.0	0.00	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00	2.00	-0.56	-55.56
Pb	<5.0	1600.00	795.00	114.00	52.00	1040.00	249.00	94.60	1892.00	>5000	1106.11	22122.22
Rb	4.00	9.00	0.50	18.00	5.00	125.00	24.00	5.60	140.00	34.00	3.56	88.89
Sb	0.70	6.70	2.65	2.30	0.45	64.29	6.20	1.78	254.29	860.00	190.41	27201.59
Sc	0.58	1.35	0.10	1.05	-0.05	-9.48	1.28	-0.07	-11.72	0.61	-0.44	-76.63
Se	<0.5	<0.5	0.00	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00
Sn	<1.0	32.00	15.00	7.00	2.50	250.00	8.00	2.20	220.00	359.00	78.78	7877.78
Sr	167.00	86.00	-124.00	11.00	-161.50	-96.71	4.00	-165.40	-99.04	9.00	-165.00	-98.80
Ta	<0.1	0.10	-0.05	<0.1	0.00	0.00	<0.1	0.00	0.00	0.50	0.01	11.11
Th	0.57	1.17	0.02	0.72	-0.21	-36.84	1.26	-0.07	-11.58	2.76	0.04	7.60
Tl	0.31	0.27	-0.18	0.26	-0.18	-58.06	0.55	-0.09	-29.03	2.26	0.19	62.01
U	0.77	0.63	-0.46	0.47	-0.54	-69.48	0.77	-0.46	-60.00	2.37	-0.24	-31.60
V	<5.0	<5.0	0.00	<5.0	0.00	0.00	<5.0	0.00	0.00	21.00	-0.33	-6.67
W	<1.0	3.00	0.50	3.00	0.50	50.00	5.00	1.00	100.00	56.00	11.44	1144.44
Y	2.00	5.00	0.50	1.00	-1.50	-75.00	1.00	-1.60	-80.00	<1.0	0.00	0.00
Zn	10.00	1160.00	570.00	158.00	69.00	690.00	143.00	47.20	472.00	53100.00	117900.00	117900.00
Zr	5.00	10.00	0.00	9.00	-0.50	-10.00	15.00	1.00	20.00	52.00	6.56	131.11
La	4.44	3.22	-2.83	2.29	-3.30	-74.21	0.94	-4.06	-91.53	0.38	-4.36	-98.10
Ce	8.50	7.10	-4.95	5.10	-5.95	-70.00	2.20	-7.62	-89.65	0.60	-8.37	-98.43
Pr	1.04	0.87	-0.61	0.62	-0.73	-70.19	0.29	-0.92	-88.85	0.07	-1.02	-98.50
Nd	3.72	3.48	-1.98	2.59	-2.43	-65.19	1.42	-3.15	-84.73	0.30	-3.65	-98.21
Sm	0.71	0.82	-0.30	0.62	-0.40	-56.34	0.43	-0.54	-75.77	0.08	-0.69	-97.50
Eu	0.16	0.34	0.01	0.27	-0.03	-15.63	0.08	-0.13	-80.00	0.02	-0.16	-97.22
Gd	0.70	0.79	-0.31	0.63	-0.39	-55.00	0.51	-0.50	-70.86	0.07	-0.68	-97.78
Tb	0.12	0.14	-0.05	0.11	-0.07	-54.17	0.12	-0.07	-60.00	0.01	-0.12	-98.15
Dy	0.60	0.83	-0.19	0.62	-0.29	-48.33	0.79	-0.28	-47.33	0.08	-0.58	-97.04
Ho	0.11	0.15	-0.04	0.12	-0.05	-45.45	0.16	-0.05	-41.82	0.02	-0.11	-95.96
Er	0.31	0.42	-0.10	0.32	-0.15	-48.39	0.47	-0.12	-39.35	0.09	-0.29	-93.55
Tm	0.06	0.06	-0.03	0.04	-0.04	-66.67	0.07	-0.03	-53.33	0.02	-0.06	-92.59
Yb	0.34	0.36	-0.16	0.26	-0.21	-61.76	0.44	-0.16	-48.24	0.14	-0.31	-90.85
Lu	0.04	0.05	-0.02	0.03	-0.03	-62.50	0.06	-0.02	-40.00	0.02	-0.04	-88.89

*** ppb

Table 6. Gains and losses of major (wt.%), trace and rare earth elements (ppm) of the altered zone from the Janggung Pb-Zn-Ag deposit

	JG6	JG2	JG2	JG1	JG1	JG3	JG3	JG4	JG4	JG7	JG7	JG7				
		gain and loss(g)	loss(%)	gain and loss(g)	loss(%)	gain and loss(g)	loss(%)	gain and loss(g)	loss(%)	gain and loss(g)	loss(%)	gain and loss(%)				
SiO ₂	1.97	2.88	-1.25	-63.45	4.77	-0.78	-39.47	3.01	-1.37	-69.44	4.53	-1.22	-61.68	5.20	-1.39	-70.67
TiO ₂	0.01	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.28	1.10	-0.01	-1.79	1.06	-0.02	-5.36	1.56	0.03	11.43	2.08	0.07	23.81	2.27	-0.03	-9.92
Fe ₂ O ₃ (T)*	0.28	3.47	0.59	209.82	5.85	1.18	422.32	5.72	0.86	308.57	5.97	0.72	255.36	35.19	3.63	1296.43
MnO	1.06	20.36	4.03	380.19	43.13	9.72	917.22	47.79	8.50	801.70	44.58	6.37	600.94	0.53	-1.00	-94.44
MgO	3.43	12.61	-0.28	-8.09	6.13	-1.90	-55.32	4.72	-2.49	-72.48	5.18	-2.57	-74.83	0.39	-3.39	-98.74
CaO	49.46	19.37	-44.62	-90.21	4.25	-48.40	-97.85	2.59	-48.94	-98.95	3.31	-48.91	-98.88	0.33	-49.42	-99.93
Na ₂ O	0.04	0.08	-0.02	-50.00	0.13	-0.01	-18.75	0.10	-0.02	-50.00	0.05	-0.03	-79.17	0.10	-0.03	-72.22
K ₂ O	0.01	0.21	0.04	425.00	0.22	0.05	450.00	0.35	0.06	600.00	0.42	0.06	600.00	0.46	0.04	411.11
P ₂ O ₅	<0.01	<0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	-75.00	0.02	-0.01	-60.00	0.02	-0.01	-66.67	0.02	-0.01	-77.78
CO ₂	41.70	43.00	-30.95	-74.22	38.90	-31.98	-76.68	38.50	-34.00	-81.53	37.60	-35.43	-84.97	0.61	-41.63	-99.84
LOI	39.54	37.29	-30.22	-76.42	33.34	-31.21	-78.92	33.44	-32.85	-83.09	33.02	-34.04	-86.08	24.73	-36.79	-93.05
Total	96.06	97.42			98.93			99.35			99.23			69.33		
S ^{total**}	0.10	0.14	-0.07	-65.00	0.04	-0.09	-90.00	0.07	-0.08	-82.00	0.09	-0.09	-85.00	30.40	3.28	3277.78
S**	0.16	0.12	-0.13	-81.25	0.01	-0.16	-98.44	0.03	-0.15	-93.75	0.05	-0.15	-94.79	>20.0	2.06	1288.89
Ag	<0.5	2.00	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00	95.80	10.14	2028.89
Au***	1.00	1.00	-0.75	-75.00	1.00	-0.75	-75.00	3.00	-0.40	-40.00	4.00	-0.33	-33.33	1260.00	139.00	13900.00
As	4.00	9.00	-1.75	-43.75	10.00	-1.50	-37.50	18.00	-0.40	-10.00	49.00	4.17	104.17	71000.00	7884.89	197122.22
Ba	2.00	10.00	0.50	25.00	8.00	0.00	0.00	12.00	0.40	20.00	16.00	0.67	33.33	31.00	1.44	72.22
Be	<1.0	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00
Bi	0.10	0.30	-0.03	-25.00	0.20	-0.05	-50.00	<0.1	0.00	0.00	<0.1	0.00	0.00	3.90	0.33	333.33
Br	1.20	1.40	-0.85	-70.83	1.20	-0.90	-75.00	0.90	-1.02	-85.00	1.20	-1.00	-83.33	<0.5	0.00	0.00
Cd	<0.5	4.60	0.65	130.00	1.10	-0.23	-45.00	0.60	-0.38	-76.00	<0.5	0.00	0.00	280.00	30.61	6122.22
Co	2.20	1.70	-1.78	-80.68	1.00	-1.95	-88.64	0.60	-2.08	-94.55	2.00	-1.87	-84.85	5.40	-1.60	-72.73
Cr	2.20	7.10	-0.43	-19.32	5.10	-0.93	-42.05	6.70	-0.86	-39.09	8.70	-0.75	-34.09	11.80	-0.89	-40.40
Cs	0.20	0.40	-0.10	-50.00	0.70	-0.03	-12.50	0.90	-0.02	-10.00	1.20	0.00	0.00	2.30	0.06	27.78
Cu	8.00	60.00	7.00	87.50	9.00	-5.75	-71.88	12.00	-5.60	-70.00	11.00	-6.17	-77.08	2740.00	296.44	3705.56
Ga	<1.0	8.00	1.00	100.00	12.00	2.00	200.00	14.00	1.80	180.00	11.00	0.83	83.33	10.00	0.11	11.11
Ge	<0.5	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00
Hf	0.10	0.30	-0.03	-25.00	0.20	-0.05	-50.00	0.40	-0.02	-20.00	0.40	-0.03	-33.33	1.50	0.07	66.67

* Total Fe as Fe₂O₃, ** wt.%, *** ppb

Table 6. Continued

JG6	JG2	JG2	JG1	JG3	JG4	JG7	JG7	JG7
	gain and loss(g)	gain and loss(%)	gain and loss(g)	gain and loss(%)	gain and loss(g)	gain and loss(%)	gain and loss(g)	gain and loss(%)
Hg	<1.0	0.00	<1.0	0.00	<1.0	0.00	<1.0	0.00
In	<0.1	-0.08	<0.1	0.00	<0.1	0.00	4.40	388.89
Ir***	<1.0	0.00	<1.0	0.00	<1.0	0.00	<1.0	0.00
Nb	0.8	-0.43	1.1	-0.53	1.5	-0.5	5.7	-20.83
Ni	<1.0	0.00	<1.0	0.00	<1.0	0.00	2.00	-77.78
Pb	9.00	391.00	114.00	216.67	249.00	453.33	>5000	6072.84
Rb	2.00	0.25	18.00	125.00	24.00	140.00	34.00	88.89
Sb	0.40	1.28	2.30	43.75	6.20	210.00	860.00	23788.89
Sc	0.55	-0.21	1.05	-52.27	1.28	-0.29	0.61	-87.68
Se	<0.5	0.00	<0.5	0.00	<0.5	0.00	<0.5	0.00
Sn	<1.0	7.00	7.00	75.00	8.00	60.00	359.00	3888.89
Sr	173.00	-151.50	11.00	-170.25	4.00	-172.20	9.00	-99.42
Ta	<0.1	-0.08	<0.1	0.00	<0.1	0.00	0.50	-44.44
Th	0.57	-0.28	0.72	-0.39	1.26	-0.32	2.76	-46.20
Tl	<0.05	0.02	0.26	30.00	0.55	0.06	2.26	402.22
U	0.77	-0.61	0.47	-0.65	0.77	-0.62	2.37	-65.80
V	<5.0	0.00	<5.0	0.00	<5.0	0.00	21.00	-53.33
W	2.00	-1.25	3.00	-1.25	5.00	-1.00	56.00	211.11
Y	2.00	-0.75	1.00	-1.75	1.00	-1.80	<1.0	0.00
Zn	<1.0	289.00	158.00	385.00	143.00	276.00	53100.00	58990.00
Zr	5.00	-2.50	9.00	-2.75	15.00	-2.00	52.00	15.56
La	3.21	-2.41	2.29	-2.64	0.94	-3.02	0.38	-98.68
Ce	6.70	-4.93	5.10	-5.43	2.20	-6.26	0.60	-99.00
Pr	0.78	-0.56	0.62	-0.63	0.29	-0.72	0.07	-99.00
Nd	2.92	-2.05	2.59	-2.27	1.42	-2.64	0.30	-98.86
Sm	0.61	-0.41	0.62	-0.46	0.43	-0.52	0.08	-98.54
Eu	0.12	-0.04	0.27	-0.05	0.08	-0.10	0.02	-98.15
Gd	0.59	-0.39	0.63	-0.43	0.51	-0.49	0.07	-98.68
Tb	0.10	-0.07	0.11	-0.07	0.43	-0.08	0.01	-98.89
Dy	0.51	-0.30	0.62	-0.36	0.79	-0.35	0.08	-98.26
Ho	0.10	-0.06	0.12	-0.07	0.16	-0.07	0.02	-97.78
Er	0.28	-0.18	0.32	-0.20	0.47	-0.19	0.09	-96.43
Tm	0.04	-0.03	0.04	-0.03	0.07	-0.03	0.02	-94.44
Yb	0.27	-0.18	0.26	-0.21	0.44	-0.18	0.14	-94.24
Lu	0.03	-0.02	0.03	-0.02	0.06	-0.02	0.02	-92.59

*** ppb

들은 열수용액에서 기원되었으나 모암으로의 분산도는 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$, Pb 및 Zn 원소들을 제외한 다른 미량원소들은 분산도가 높지 않다. 따라서 장군 연-아연-은 광상일대 모암(석회암 및 돌로마이트)의 변질작용(능망간 석화작용 및 돌로마이트화작용)시 이득 및 손실된 주 원소 및 미량원소의 종류 및 함량 그리고 이들 원소들 간의 상관계수 등을 종합하면 CaO, MnO, MgO, $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$, CO_2 , Pb, Zn, Sb, Sn, Sr, Ga 및 Rb 등을 지시원소로서 활용하면 탄산염암을 모암으로 하는 열수교대광상 탐사시 유용하게 이용될 수 있다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 부처임무형사업인 “해의 광물자원 탐사 및 부존 잠재성 평가(12-1121, 11-1121)” 과제의 일부로 수행되었으며 이에 사의를 표합니다. 바쁘신 와중에도 이 논문의 미비점을 지적, 수정하여 주신 서정훈 교수님과 익명의 심사위원님께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- Ahn, K.S., Jeong, H.H. and Lee, H.K. (1993) Prograde reaction series in metapelites around the Janggun mine. *Mining Geology*, v.26, p.473-487.
- Barber, C. (1974) Major and trace element associations in limestones and dolomites. *Chemical Geology*, v.14, p.273-280.
- Bellanca, A., Disalvo, P., Moller, P., Neri, R. and Schley, F. (1981) Rare-earth and minor element distribution and petrographic features of fluorites and associated Mesozoic limestones of northwestern Sicily. *Chemical Geology*, v.32, p.255-269.
- Chang, H.W. and Lee, K.S. (1991) Behavior of elements in hydrothermal alteration zones of granitic rocks : Examples from the Mugeug granodiorite and the Naeduckri granite, South Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, v.27, p.156-170.
- Condie, K.C., Wilks, M., Rosen, D.M. and Zlobin, V.L. (1991) Geochemistry of metasediments from the Precambrian Hapschan series, eastern Anabar shield, Siberia. *Precambrian Research*, v.50, p.37-47.
- Grant, J.A. (1986) The isocon diagram-A simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, v.81, p.1976-1982.
- Gresens, R.L. (1967) Composition-volume relationships of metasomatism. *Chemical Geology*, v.2, p.47-65.
- Gromet, L.P., Dymek, R.F., Haskin, L.A. and Korotev, R.L. (1984) The 'North American Shale Composite': its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.48, p.2469-2482.
- Haskin, M.A. and Haskin, L.A. (1966) Rare earths in European shales: a redetermination. *Science*, v.154, p.507-509.
- Hofmann, A. (1972) Chromatographic theory of infiltration metasomatism and its application to feldspar. *American Journal of Sciences*, v.272, p.69-90.
- Hwang, I.C. (1968) Report on the Sam Han Chang Gun manganese deposits. *Mining Geology*, v.1, p.9-34.
- Hwang, I.H. and Chon, H.T. (1994a) Wallrock alteration and primary dispersion of elements in the vicinity of the Mugeug gold-bearing quartz veins. *Economic and Environmental Geology*, v.27, p.387-396.
- Hwang, I.H. and Chon, H.T. (1994b) Primary dispersion of elements in altered wallrocks around the gold-bearing quartz veins the Okgye mine. *Economic and Environmental Geology*, v.27, p.549-556.
- Jarvis, J.C., Wildeman, T.R. and Banks, N.G. (1975) Rare earths in the Leadville limestone and its marble derivatives. *Chemical Geology*, v.16, p.27-37.
- Kang, J.H., Kim, H.S. and Oh, S.B. (1997) Geological structure of Precambrian to Paleozoic metasedimentary rocks in the Janggunbong area, Korea: Crustal evolution and environmental geology of the central part of the north Sobaegsan massif, Korea. *Journal of Petrological Society of Korea*, v.6, p.244-259.
- Kang, J.H., Oh, S.B. and Kim, H.S. (1998) Time-relationship between deformation and metamorphism of the Paleozoic metasedimentary rocks of the north Sobaegsan massif in the Janggunbong area, Korea. *Journal of Petrological Society of Korea*, v.7, p.190-206.
- Kho, S.J. (1987) Exploration and development in the Janggun Pb-Zn mine. *Mining Geology*, v.20, p.289-303.
- Kim, K.H. (1986) Origin of manganese carbonates in the Janggun mine, South Korea. *Mining Geology*, v.19, p.109-122.
- Kim, K.Y., Kim, H.S., Oh, C.H., Park, C.S., Kang, J.H. and Ryu, Y.B. (1996) Poly-metamorphism of Pre-Cambrian to Paleozoic metasedimentary rocks in Janggunbong area, Korea: Crustal evolution and environmental geology of the central part of the north Sobaegsan massif, Korea. *Journal of Petrological Society of Korea*, v.5, p.168-187.
- Kim, S.J. (1968a) Manganese oxide minerals from Janggun manganese mine, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, v.4, p.57-76.
- Kim, S.J. (1968b) Formation of manganese carbonate minerals in Janggun manganese mine, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, v.4, p.167-188.
- Kim, S.J. (1969) Mineragraphic study on the sulfide minerals associated with manganese ores from Janggun mine, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, v.5, p.83-101.
- Kim, S.J. (1970) Mineralogy and genesis of the manganese ores from Janggun mine, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, v.6, p.135-186.
- Kim, S.J. (1975) Janggunite, a new mineral from the Janggun mine, Bonghwa, Korea. *Mining Geology*, v.8, p.117-124.
- Lee, C.H., Song, S.H. and Lee, H.K. (1996a) Mg-skarn minerals from magnetite deposits of the Janggun mine, Korea. *Economic and Environmental Geology*,

- v.29, p.11-19.
- Lee, H.K., Lee, C.H. and Kim, S.J. (1998) Geochemistry and mineralization age of magnesian skarn-type iron deposits of the Janggun mine, Republic of Korea. *Mineralium Deposita*, v.33, p.379-390.
- Lee, D.S. (1967) Geological study of Janggun manganese mine. *Journal of Geological Society of Korea*, v.3, p.51-59.
- Lee, H.K. and Imai, N. (1986) Stannite from the Janggun mine, Republic of Korea: Contributions to the knowledge of ore-forming minerals in the Janggun lead-zinc-silver (3). *Mining Geology*, v.19, p.121-130.
- Lee, H.K., Ko, S.J. and Imai, N. (1990) Genesis of the lead-zinc-silver and iron deposits of the Janggun mine, as related to their structural features: Structural control and wallrock alteration of ore formation. *Mining Geology*, v.23, p.161-181.
- Lee, H.K., Lee, C.H. and Kim, S.J. (1996b) Geochemistry of stable isotope and mineralization age of magnetite deposits in the Janggun mine, Korea. *Economic and Environmental Geology*, v.29, p.411-419.
- Lee, H.K., Lee, C.H. and Song, S.H. (1996c) Ore minerals and mineralization conditions of magnetite deposits in the Janggun mine, Korea. *Economic and Environmental Geology*, v.29, p.1-9.
- Lee, M.S. (1985) Sulfur and carbon isotope studies of principal metallic deposits in the metallogenic province of the Taebaeg Mt. region, Korea. *Mining Geology*, v.18, p.247-251.
- Maclean, W.H. and Barrett, T.J. (1993) Lithogeochemical techniques using immobile elements. *Journal of Geochemical Exploration*, v.48, p.109-133.
- Maclean, W.H. and Kranidiotis, P. (1987) Immobile elements as monitors of mass transfer in hydrothermal alteration: Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology*, v.82, p.951-962.
- Moon, S.H. and Park, H.I. (1994) Alterations of granite gneiss and their genetic relationship to tin mineralization in the Uljin area. *Journal of Geological Society of Korea*, v.30, p.125-139.
- Oh, D.G. and Chon, H.T. (1993) Geochemical dispersion of elements in volcanic wallrocks of pyrophyllite deposits in Milyang area, Kyeongnam province. *Mining Geology*, v.26, p.337-347.
- Park, K.H. and Chang, H.W. (2005) Pb isotopic composition of Yeonhwa and Janggun Pb-Zn ore deposits and origin of Pb: Role of Precambrian crustal basement and Mesozoic igneous rocks. *Journal of Petrological Society of Korea*, v.14, p.141-148.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M. (1985) The continental crust: Its composition and evolution. Blackwell, Oxford, 312p.
- Thompson, G., Bankston, D.C. and Pasley, S.M. (1970) Trace element data for reference carbonate rocks. *Chemical Geology*, v.6, p.165-170.
- Yoo, B.C., Chi, S.J., Lee, G.J., Lee, J.K. and Lee, H.K. (2007a) Element dispersion and wall-rock alteration from Daebong gold-silver deposit, Republic of Korea. *Economic and Environmental Geology*, v.40, p.713-726.
- Yoo, B.C., Choi, H.S. and Koh, S.M. (2011c) Element dispersion and wallrock alteration of TA26 seamount, Tonga arc. *Economic and Environmental Geology*, v.44, p.359-372.
- Yoo, B.C., Lee, G.J., Lee, J.K., Ji, E.K. and Lee, H.K. (2009b) Element dispersion and wallrock alteration from Samgwang deposit. *Economic and Environmental Geology*, v.42, p.177-193.
- Yoon, C.H. (1993) Gold abundance in acid-sulfate alteration zone of the Oghmaesan-Seongsan ore deposits in Haenam area, Korea. *Mining Geology*, v.26, p.155-166.

2012년 8월 6일 원고접수, 2012년 12월 7일 게재승인