

무극 합금석영맥광상 주변모암에서의 모암변질과 원소들의 일차분산

황인호* · 전효택*

Wallrock Alteration and Primary Dispersion of Elements in the Vicinity of the Mugeug Gold-bearing Quartz Veins

In Ho Hwang* and Hyo Taek Chon*

ABSTRACT: Mineralogical and geochemical studies on gold-bearing quartz veins and wallrock from the Mugeug mine were carried out in order to investigate the variation of mineralogical composition and the geochemical behavior of elements with distance from the gold-bearing quartz veins. Gold-bearing quartz veins occur in early Cretaceous medium- to coarse-grained biotite granite. The unaltered wallrock is composed mainly of quartz, plagioclase, orthoclase, microcline, biotite and hornblende with accessory minerals of sphene and apatite. Mineralogical changes in altered wallrock around the gold-bearing quartz veins were observed as follows; 1) biotite and hornblende altered into chlorite, and next to sericite, 2) plagioclase, orthoclase and microcline altered into sericite, and 3) calcite and quartz introduced into wallrock. Contents of K₂O, Rb, Cs, Au, As and Sb in altered wallrock increase, whereas those of Na₂O, CaO, Ba, and Sr decrease with proximity to the gold-bearing quartz veins. The loss on ignition also increases with the increase of alteration mineral. The width of primary dispersion increases in order Au=SiO₂<As=Cs=Rb<K₂O=Sb and MnO<Na₂O=CaO=Ba<Sr. The sericitization index, K₂O/(K₂O+Na₂O), is an important indicator to interpret the degree of alteration at the Mugeug mine, which is more than 0.8 in strongly and moderately altered granite, 0.5~0.8 in weakly altered granite, and less than 0.5 in unaltered granite. Alteration indices for major and trace elements, and the ratio of Rb/Sr are also useful to discriminate alteration zones.

서론

열수용액이 지각중의 열극을 따라 이동하는 동안 열수와 열수통로의 주변모암과의 상호작용으로 인해 주변암석은 광물학적 변화와 화학적 변화를 받게 되며, 열수용액 역시 금의 용해도등을 포함한 물리화학적 특성이 변한다. 열수용액과의 반응에 의해 주변모암에 나타나는 일차분산은 모암의 광물학적 및 화학적 성질, 구성입자의 크기, 공극률과 투수율 등의 모암 특성과 열수용액의 상태, 화학 조성, 온도와 압력 등의 열수용액의 특성에 따라 다양하게 나타난다. 따라서 열수용액이 통과하는 통로의 주변모암에 나타나는 일차분산에 대해서 정확히 이해함으로써 합금석영맥에 대한 화학적 자료와 유체포유물 자료 등을 함께 이용하여 광화용액의 화학 성분과 광물의 침전기구 등 광화작용과 관련된 보다 많은 정보를 얻을 수 있으며, 일차분산의 양상과 범위를 규명함으로써 광상의 암석지구화학탐사에도 이용할 수 있다.

국내에서 수행된 금광상에 관련된 연구는 광물 공생 관계와 유체포유물 연구 및 안정동위원소연구에 의한 광상의 성인에

관한 연구 (So *et al.*, 1988, 박희인·강성준, 1988), 광상의 생성 시기에 관한 연구 (Shimazaki *et al.*, 1986), 금광상의 지구화학 탐사를 위한 지시 원소 연구 (윤정환, 1989) 등 주로 합금석영맥이나 광석 시료에 국한하여 광물학적 및 지구화학적 연구가 수행되었다. 합금석영맥 주변 변질모암내에서의 광물학적 변화와 원소의 지구화학적 거동 및 분산양상과 범위에 관련된 정량적이고 체계적인 연구는 거의 전무한 실정으로 열수성 금광상 주변 변질모암 (화강암질암)을 대상으로 금 및 관련 원소들의 분산에 관한 연구 (전효택·안홍일, 1991)가 수행되었을 뿐이다. 금광상의 침전 기구 및 광상 생성환경에 대한 연구를 수행할 경우에 광화용액과 주변모암과의 상호작용을 배제하고 합금석영맥과 광석 광물만을 대상으로 할 경우에는 보다 정확한 해석을 할 수 있는 기회를 놓치게 되므로 합금석영맥 주변부의 변질모암에서의 원소 거동 및 변질반응에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구는 충북 음성군 금왕읍 용계리에 위치한 무극 합금석영맥 광산을 대상으로 시추코아에서 합금석영맥과 주변변질모암 및 비변질모암을 채취해 현미경 관찰과 화학분석을 하였다. 현미경 관찰과 화학분석 자료를 토대로 합금석영맥으로 부터의 거리에 따른 광물 조성의 변화와 원소의 지구화학적 거동을 규명해서 변질모암에서의 원소들의 일차분산 특성과 변질반응을

*서울대학교 공과대학 자원공학과 (Dept. of Mineral and Petroleum Eng., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea)

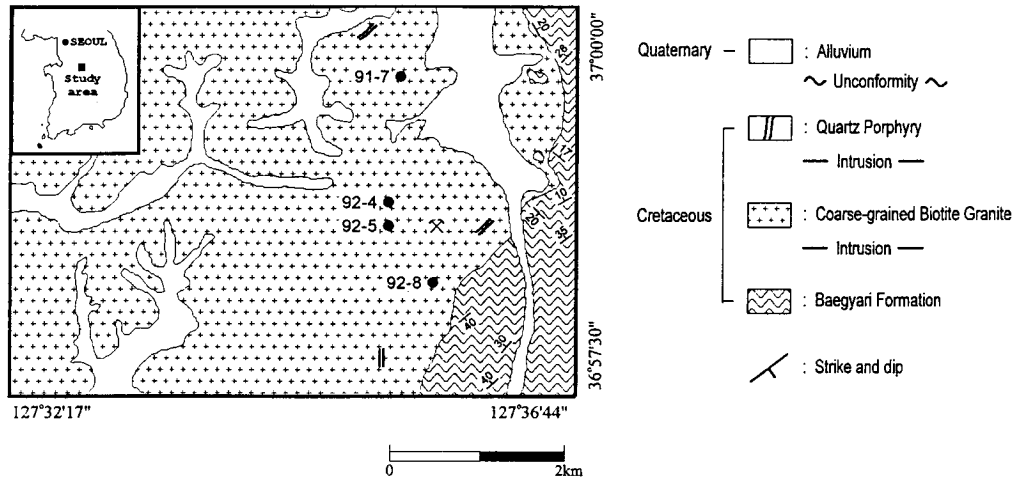


Fig. 1. Geological map in the vicinity of the Mugeug gold deposit showing the locations of sampled drill holes.

해석하였다.

일반지질

무극 광상 부근의 지질은 선캄브리아기의 화강편마암을 부정 함으로 덮고 있는 백악기 퇴적층인 백야리층과 이를 관입한 백 악기 흑운모화강암이 거의 직선적인 경계를 보이고 있으며, 소 규모의 석영반암이 관입하고 있다 (Fig. 1). 백야리층은 주향이 N15°~30°E이고 경사가 25°~35°SE인 사암, 장석질 사암, 셰일, 응회역암 등으로 구성된 퇴적층으로 광산 동쪽에 고지대를 이루고 있다. 광상 모양인 중립 내지 조립질의 흑운모화강암은 백 야리층의 서쪽에 N30°E 및 N10°W방향으로 접하고 있으며 광산 부근의 저지대에 넓게 분포한다. 주성분광물은 석영, 사장석, 정 장석, 흑운모 및 각섬석 등이며, 소량의 미사장석, 견운모, 녹니석, 스펀, 인회석, 휘석, 갈럼석 (allanite), 저어콘 등이 관찰된다. 김 옥준 (1971)은 화강암내에 존재하는 칼리장석의 K-Ar 연대 측 정결과 절대연령이 112 Ma임을 보고했다. 석영반암은 주로 8호 맥 서쪽에서 맥상으로 관입하고 있으며, 폭이 1~5 m로 광맥들과 거의 평행한 방향으로 발달해 있고 일부는 광맥에 의해 절단되어 있다.

광상개요

무극 광상은 백악기 흑운모화강암 내의 열극을 충전한 수십 개조의 석영맥으로 구성되어 있으며, 이중 십여 조가 가행대상 으로 주요 석영맥들의 주향은 대체로 N15°~20°W이고, 경사는 70°~80°NE이며, 석영맥폭은 0.2~1.0 m 내외로 연장은 1.5 km에 이른다.

금광물은 주로 일렉트럼으로 산출되는데, 석영, 황철석, 섬아 연석, 자유철석, 방연석 내에 산출되거나 각 광물의 결정경계면 에서 산출된다 (김규한등, 1990). 광석의 품위는 Au가 8~20 ppm이고 Ag는 48~60 ppm (연세대학교 지질학과 동문회, 1982) 이며, 일반적으로 황철석의 함량이 많아지거나 그 입도가 미세 해짐에 따라 금품위가 높아진다 (신양우 · 서규식, 1987). 수반 되는 광석광물은 주로 황철석이며 황비철석, 섬아연석, 방연석, 황동석, 방해석, 형석 등이다. 석영내 1차 유체포유물의 균일화 온도는 196~368°C (평균 240°C)로 주 광화 시기의 광석 광물의 침전은 250°C 내외에서 발생한 것으로 판단되며 (김규한등, 1990), 열수의 유입으로 인해 광맥 주위의 화강암질 모암은 견운모화 변질작용과 녹니석화 변질작용을 받았고, 함금석영맥 인접부 에서는 황철석화 변질작용이 관찰된다. 광상의 생성연대는 광맥 내에 존재하는 견운모를 이용한 K-Ar 연대 측정결과와 98 Ma로 백악기 중기로 추정된다 (Shimazaki *et al.*, 1986).

시료채취와 처리

시료 채취는 광업진흥공사에서 수행한 시추 (91-7, 92-4, 92-5, 92-8호공, 위치는 Fig. 1 지질도 참조)에서 회수된 코아를 대상 으로 실시하였는데, 코아의 대부분은 화강암으로 이루어져 있 으며, 소규모의 석영맥과 암맥이 존재한다. 시료는 4개의 시추 공에서 5개 단면을 대상으로 채취하였다. 91-7호공의 시추는 S80°W 방향으로 경사는 -70°로 350 m에 걸쳐 수행되었는데, 시료는 280 m에서 284 m (함금석영맥은 281.9~282.2 m로 실 체폭은 20 cm)에서 채취 (105 단면)하였으며, 92-4호공의 시추는 S85°W방향으로 경사는 -85°로 400 m에 걸쳐 수행되었는데, 시 료는 285 m에서 289 m (함금석영맥은 287.0~287.4 m로 실제

폭은 30 cm)에서 채취 (102 단면)하였다. 92-5호공의 시추는 S85°W 방향으로 경사는 -85°로 400 m에 걸쳐 수행되었는데, 시료는 61 m에서 67 m (함금석영맥은 64.2~65.4 m로 실제폭은 80 cm)에서 채취 (104 단면)하였으며, 92-8호공의 시추는 S85°W 방향으로 경사는 -85°로 750 m에 걸쳐 수행되었는데, 시료는 443 m에서 448 m (함금석영맥은 445.4~446.0 m로 실제폭은 40 cm)에서 채취 (101 단면)하였으며, 또한 453 m에서 457 m (함금석영맥은 452.9~453.5 m로 실제폭은 30 cm)에서 채취 (103 단면)하여 분석에 이용하였다. 각 공의 시추코아에서 변질되지 않은 모암도 함께 채취해 와 비변질모암 시료로 이용하였다.

최수한 시추코아는 실험실로 가져와 수돗물과 증류수를 이용하여 깨끗이 씻은 다음 상온에서 건조시켰다. 함금석영맥 부분은 각 함금석영맥을 하나의 시료로 하여 연마편 제작과 화학분석에 사용하였으며, 함금석영맥 주변 변질 모암의 코어는 함금석영맥과의 경계로부터 8~20 cm (실제 길이로는 5~12.5 cm에 해당) 크기로 자른 다음 다시 길이 방향으로 반으로 잘라 반은 박편 제작 및 보관용으로 사용하고 나머지 반은 -200 mesh로 분쇄하여 화학분석에 이용하였다.

화학분석

-200 mesh로 분쇄한 시료는 캐나다의 ACTLABS에 의뢰하여 화학분석을 하였는데, Au, As, Ba, Br, Co, Cr, Cs, Fe, Hf, Hg, Ir, Na, Rb, Sb, Sc, Se, Sn, Ta, Th, U, W, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu 등의 29개 원소는 중성자활성기기분석 (Instrumental Neutron Activation Analysis)을 이용하여 분석하고, Ag, Be, Bi, Cd, Cu, Mo, Ni, Pb, Sr, V, Y, Zn, Al, Ca, K, Mg, Mn, P, Ti 등의 19개 원소는 유도분극아르곤플라스마분광분석 (ICP-AES)를 이용하여 분석하였다. 일부 시료에 대해서는 X-선 형광분석 (XRF)을 이용하여 Al_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , P_2O_5 , K_2O 를 분석하였으며, SiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , Na_2O 는 적정법을 이용하여 분석하였고, 작열감량 (loss on ignition)도 측정하였다. 일부 시료의 SiO_2 의 함량은 100에서 주성분 원소들의 wt.% 합을 뺀 값으로 구했는데, 이렇게 구한 SiO_2 함량 (x)과 XRF로 구한 SiO_2 함량 (y) 사이에는 $y=0.91x+4.64$ ($r=0.954$)로 좋은 상관관계를 보여 XRF를 이용하여 SiO_2 를 분석하지 않은 시료의 SiO_2 함량은 이러한 방법으로 구하여 결과 해석에 이용하였다.

광물학적 특징 및 시료의 분류

함금석영맥

무극 함금석영맥은 6회의 광화기에 걸쳐 형성된 여러 종류의 석영과 소량의 방해석, 형석, 녹니석 및 점토광물, 그리고 이들

맥석광물에 수반되어 침전한 황철석, 황비철석, 자류철석, 황동석, 섬아연석, 방연석, 휘은석, 테트라헤드라이트, 자연은, 일렉트럼 등의 광석광물로 이루어진 복합맥 (신양우·서규식, 1987)이다. 5개 단면중 함금석영맥을 채취한 4개 단면에 대한 현미경관찰 결과 관찰되는 광석광물은 대부분 황철석이며, 화학분석 결과 Au (ppb), As (ppm), Sb (ppm) 함량이 각각 101 단면을 35, 150, 1.5이고, 102 단면은 264, 4200, 6.2이며, 103 단면은 3300, 37, 1.2이고, 104 단면은 730, 11000, 71이다.

비변질모암

무극 금광상의 모암은 중립 내지 조립질 흑운모화강암으로 석영, 사장석, 정장석, 흑운모 및 각섬석 등의 주성분광물과 소량의 미사장석, 견운모, 녹니석, 스펀, 인회석, 휘석, 갈럼석, 저어론 등으로 이루어져 있다. 비변질 흑운모화강암 시료 6개를 0.5 mm 간격으로 총 900 point씩 modal 분석을 수행해 본 결과 광물조성은 석영 (23~31.5%), 사장석 (25.55~46.22%), 정장석 (2~28.22%), 흑운모 (9.66~19.55%), 각섬석 (0.77~3.56%), 미사장석 (0~0.78%), 견운모 (2.55~12%), 녹니석 (0~1.44%), 스펀 (0~0.67%) 등이다. 비변질모암에 대한 modal 분석 결과를 QAP 삼각도에 도시해 보면 화강암 (monzogranite)이나 화강섬록암에 해당한다.

석영은 일부 입자에서 파동소광을 보여주는 주성분광물로 함금석영맥 인접부에서도 변질을 받지 않는다. 변질모암에는 다른 광물이 변질될 때 생성된 2차 석영이 존재하고, 함금석영맥과 인접된 변질모암에서는 세맥형태로 관입한 황철석이 존재하는 석영세맥을 관찰할 수 있다.

장석은 사장석, 정장석, 미사장석이 산출되는데, 사장석은 엽편상의 알바이트와 페리클라인 쌍정, 카알스베드 쌍정과 oscillatory 누대구조를 보이며, 석영과의 교대구조인 밀메카이트구조도 관찰된다. 사장석의 조성은 An_{9-10} (김규환 등, 1990)이며, 결정내부에는 작은 입자의 인회석이 다량 산재되어 있다. 비변질모암에서도 일부 사장석의 결정 내부가 견운모로 변질된 것이 관찰된다. 변질의 정도가 증가함 (함금석영맥에 근접함)에 따라 사장석은 외부 형체는 그대로 유지되면서 결정 내부로부터 견운모로 변질되며, 함금석영맥으로부터 일정거리 이내에서는 완전히 견운모로 변질되어 더 이상 사장석을 관찰할 수 없다. 정장석은 비교적 변질작용에 대한 저항성이 강해서 변질받지 않은 상태로 형체를 그대로 유지하며, 일부 시료는 함금석영맥 인접부에서만 견운모로 변질된다. Crosshatched or tartan twinning과 perthite 구조를 보여주는 미사장석은 정장석과 비슷하게 비교적 변질작용에 대한 저항성이 강해서 변질받지 않은 상태로 형체를 그대로 유지하며, 함금석영맥 인접부에서만 견운모로 변질된다.

흑운모는 옅은 갈색에서 어두운 갈색, 붉은색에서 갈색, 녹색을 띠는 갈색에서 갈색의 다색성을 보이는 전체의 10~20%를 차지하는 주성분광물로 결정내부에는 아주 작은 입자의 인회석과 저어콘이 산재되어 있다. 흑운모는 변질에 대한 저항성이 가장 약한 광물중 하나로 변질을 받아 남색의 녹니석으로 변질되며, 이 녹니석은 변질을 더 받아 무색의 열수성 백운모 또는 견운모로 변질되고, 이들 열수성 백운모와 견운모 주위에는 녹니석이 변질 받을 때 빠져나온 것으로 추정되는 불투명광물들이 함께 존재한다.

각섬석은 녹색에서 갈색을 띠며 흑운모와 연경을 이루거나 또는 자형의 zonal twinning 형태로 존재하며, 흑운모와 비슷하게 변질에 대한 저항성이 약해서 변질정도가 강한 곳에서는 관찰할 수 없다. 각섬석은 흑운모의 변질산물인 녹니석을 확인한 것과 다르게 변질을 받아 생성된 변질광물을 현미경상에서 뚜렷하게 구분할 수 없으나, 각섬석의 화학조성과 무극지역의 변질암에서의 변질반응을 고려할 때, 흑운모와 같이 녹니석과 불투명광물로 변질되는 것으로 추정된다. 마름모 형태의 자형의 스펀과 엽편상 구조를 보이는 휘석과 갈럼석은 단독의 입자형태로 소량 존재하며, 인회석과 저어콘은 아주 작은 입자 형태로 사장석과 흑운모내에 산재되어 있다. 합금석영맥 인접부 시료에는 열수의 유입에 의한 석영세맥이 존재하며, 열수 유입에 의해 형성된 황철석이 존재한다.

비변질모암 시료 6개에 대한 화학분석결과 평균함량은 SiO₂ (67.92%), Fe₂O₃ (4.40%), MgO (1.63%), TiO₂ (0.55%), Al₂O₃ (14.87%), Na₂O (3.44%), CaO (4.27%), P₂O₅ (0.16%), K₂O (2.71%), MnO (521 ppm), LOI** (0.86%), Au* (2.5 ppb), As (6.6 ppm), Ba (1050 ppm), Co (7 ppm), Cr (11 ppm), Cs (3 ppm), Hf (6 ppm), Rb (124 ppm), Sb* (0.08 ppm), Sc (7.5 ppm), Ta (0.48 ppm), Th (17 ppm), U* (5.8 ppm), W (0.8 ppm), La (58 ppm), Ce (111 ppm), Nd (38 ppm), Sm (7.3 ppm), Eu (1.5 ppm), Tb* (0.4 ppm), Yb (1.7 ppm), Lu (0.28 ppm), Cu* (10 ppm), Pb* (31 ppm), Zn (93 ppm), Ag* (0.32 ppm), Ni (7 ppm), Sr (378 ppm), Cd (0.4 ppm), V (42 ppm), Y (12 ppm)인데, 위 자료중 *는 median 값이며, **는 전효택과 안홍일 (1991)의 자료를 인용하였다. 비변질모암의 대자율은 평균 0.22×10^{-3} SI unit로 magnetite series로 분류되며, 일반적으로 열수변질을 받으면 감소하는 특징이 있다 (전효택 안홍일, 1991).

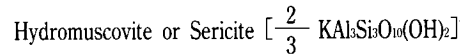
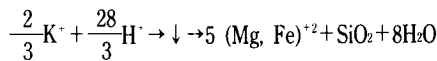
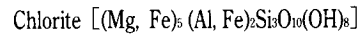
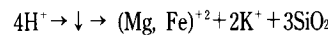
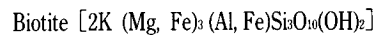
모암변질과 시료의 분류

합금석영맥 주변 모암시료를 광물의 변질정도와 화학성분을 이용하여 비변질모암, 약변질모암, 중간변질모암 및 강변질모암으로 구분하였는데, 각 변질모암의 육안 및 현미경관찰의 특징과 화학성분의 차이는 다음과 같다.

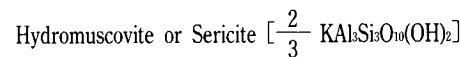
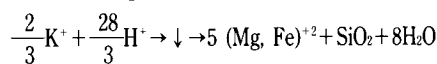
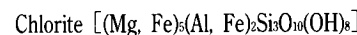
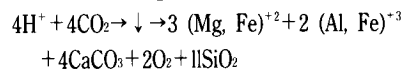
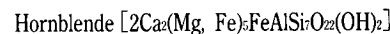
비변질모암의 경우 석영, 사장석, 정장석, 흑운모 및 각섬석의 주성분광물과 미사장석, 견운모, 녹니석, 스펀, 인회석, 휘석, 갈럼석, 저어콘 등의 부성분광물이 거의 변질되지 않은 상태로 관찰된다. 일부 시료에서는 사장석이 견운모로 변질된 것이 관찰되기도 한다. 육안관찰시 검은색 흑운모를 관찰할 수 있다.

약변질모암에서는 흑운모가 남색의 녹니석과 소량의 불투명광물로 변화하였으며, 사장석의 경우에는 결정내부로 부터 견운모로 변질되기 시작하고, 각섬석의 경우에는 흑운모와 같이 녹니석과 불투명광물로 변질된다. 육안관찰시 녹색을 띠며, 변질되지 않은 사장석을 관찰할 수 있다. 비변질모암에 비해 K₂O와 Sb가 증가하고, Sr은 감소한다.

중간변질모암은 사장석이 원래의 구조를 알아보기 못할 정도로 완전히 견운모로 변질되었으며, 흑운모와 각섬석이 변질되어 생성된 녹니석은 변질을 더 받아 열수성 백운모 또는 견운모와 불투명광물로 변화하였다. 육안관찰시 표백현상을 관찰할 수 있고, 원래의 외형을 그대로 유지하나 견운모로 변질된 사장석을 관찰할 수 있다. 약변질모암에 비해 K₂O, As, Cs, Rb, Sb가 증가하고, Na₂O, CaO, Ba, Sr은 감소한다. 특히 Na₂O 함량은 사장석이 견운모로 완전히 변질됨에 따라 급격히 감소된다. 강변질모암은 대부분 석영 및 견운모만으로 이루어져 있으며, 일부 시료에서 정장석을 관찰할 수 있다. 일부 합금석영맥에 인접한 변질모암에서는 석영세맥을 관찰할 수 있으며, 열수 유입에 의해 형성된 황철석이 존재한다. 중간변질모암에 비해 SiO₂, Au, As, Sb가 증가하고, MnO, CaO, Sr은 감소한다. 변질정도가 다른 시료의 현미경관찰 결과 나타난 광물의 변질과정과 화학분석 자료를 토대로 할 때 변질반응은 다음과 같이 추정할 수 있다.



opaque mineral



opaque mineral

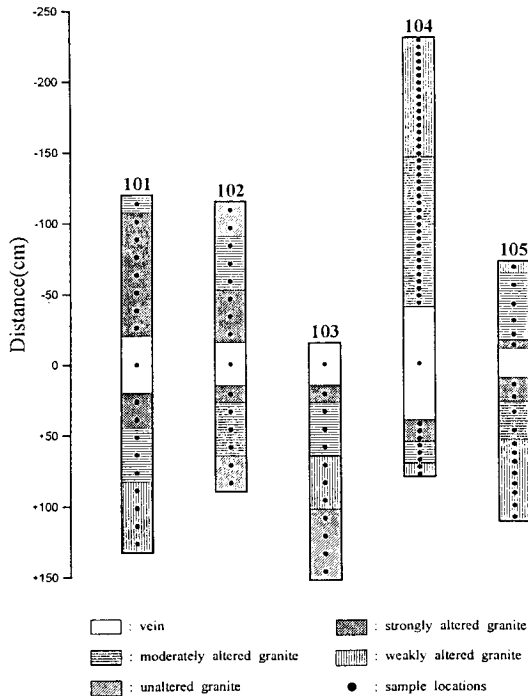
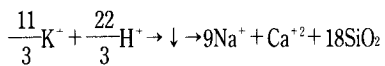


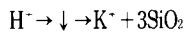
Fig. 2. Schematic representation of alteration zoning adjacent to quartz veins.

Plagioclase $[10Ca_{0.1}Na_{0.9}Al_{1.1}Si_{2.9}O_6]$ (김규환 등, 1990)



Sericite $[\frac{11}{3} KAl_2Si_3O_{10}(OH)_2]$

K-feldspar $[1.5KAISi_3O_8]$



Sericite $[0.5KAl_2Si_3O_{10}(OH)_2]$

광물의 변질과 화학성분의 변화와의 관계를 보면, 견운모로의 변질로 인해 K, Rb, Cs가 부화되며, 사장석의 변질로 Na와 Ca가 감소하고, 흑운모와 각섬석의 변질로 인해 유출된 Mg, Fe, Si는 원래 광물의 주위에 잔류한다. 육안 및 현미경관찰과 화학분석 자료를 이용하여 각 단면의 함금석영맥 주변모암을 변질모암별로 분류한 결과와 시료채취 위치는 Fig. 2에 표시하였으며, 이를 근거로 한 각 단면의 상하반에서의 각 변질모암의 범위는 Table 1에 나타났다. Fig. 2와 Table 1에 나타나 있는 거리는 시료채취 위치에서 함금석영맥의 경계면까지의 수직거리로 환산한 값이고, Fig. 2에서 + 기호는 함금석영맥의 하반쪽을 나타내며, - 기호는 함금석영맥의 상반쪽을 나타낸다. 101 단면 상반의 경우에는 다량의 석영세맥에 의해 심하게 교란되어 함금석영맥과의 경계면으로부터 약 87.5 cm 떨어진 지점의 모암까지 강변질모암으로

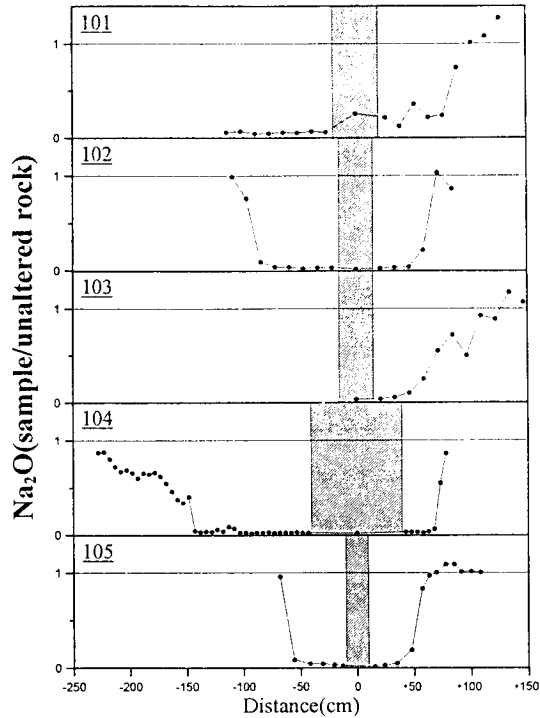


Fig. 3. Unaltered rock-normalized Na₂O abundances for the alteration zone and the quartz vein from the Mugeug mine. Upper left number in the box is the ID of section. Forward slashed area is the vein.

Table 1. The scale of each alteration zone from the vein contact of the Mugeug mine (unit in cm).

Section	Vein width	Strongly altered granite	Moderately altered granite	Weakly altered granite
101	hanging well	87.5	(100)	S.N.A.
	footwall	25	62.5	(112.5)
102	hanging wall	37.5	75	-
	footwall	12.5	50	-
103	hanging wall	S.N.A.	S.N.A.	S.N.A.
	footwall	12.5	50	87.5
104	hanging wall	-	105	(190)
	footwall	15	30	(40)
105	hanging wall	6.2	53.8	(62.5)
	footwall	17.5	43.8	(101.3)

S.N.A.; sample not available, -; absent.

분류되며, 시료를 분석한 범위내에서는 함금석영맥과의 경계면으로부터 거리에 따른 뚜렷한 함량 변화를 보여주지 않는다.

변질의 정도에 따른 광물함량의 변화양상을 고찰하기 위해 modal 분석을 실시해 본 결과 변질정도가 증가함에 따라 주성분 광물중 변질작용에 대한 저항성이 약한 사장석과 흑운모 및 각섬석 등의 양이 줄어들고 변질광물인 견운모의 양이 많아짐을

Table 2. The range of chemical composition (upper) and average content (lower) in vein, strongly altered, moderately altered, weakly altered, and unaltered granite from the Mugeug mine (unit in ppm, except Au (ppb) and oxides (wt.%)). Number of analyzed specimens in parenthesis.

Element	Type	Vein (4)	Strongly altered granite (20)	Moderately altered granite (43)	Weakly altered granite (35)	Unaltered granite (14)
SiO ₂		80.08–92.90	66.49–77.26	57.42–76.36	56.09–73.86	67.36–70.02
		85.13	73.13	67.63	67.55	68.10
Na ₂ O		0.07–0.88	0.05–0.74	0.07–1.24	1.17–4.38	2.63–4.03
		0.28	0.18	0.24	2.64	3.37
CaO		1.05–3.67	0.29–4.13	0.56–8.70	0.80–8.13	2.43–4.58
		2.10	1.12	2.61	3.45	3.62
K ₂ O		0.71–2.20	2.58–5.97	3.90–6.33	2.57–5.07	2.30–3.94
		1.55	4.69	4.97	3.74	2.93
MnO		0.02–0.05	0.01–0.17	0.02–0.18	0.04–0.15	0.05–0.06
		0.03	0.04	0.06	0.07	0.05
Au		35–3330	10–222	<2–28	<2–7	<2–16
		1090	87	6	3	4
As		37.0–11000.0	18.0–7200.0	4.5–870.0	1.6–17.0	750–1600
		3846.8	1082.7	73.6	7.5	5.1
Ba		90–460	80–1600	370–1400	610–1700	750–1600
		198	838	822	1028	1139
Cs		<1–5	2–7	2–8	<1–5	<1–5
		2	4	5	3	2
Rb		40–160	170–420	200–390	69–250	96–210
		110	291	270	141	133
Sb		1.2–71.0	0.4–13.0	0.4–3.1	<0.1–1.5	<0.1–0.5
		20.0	2.7	1.3	0.6	0.3
Sr		40–88	47–82	68–178	162–361	293–442
		72	63	120	253	382

*Number of analyzed specimens; vein (3), strongly altered (14), moderately altered (13), weakly altered (7), unaltered granite (14).

알 수 있다.

지구화학적 특징

무극 함금석영맥 주변모암에서 변질의 정도가 증가함에 따라 원소함량의 변화양상을 고찰하기 위해 시추코아를 대상으로 함금석영맥과 주변변질모암 및 비변질모암을 채취하여 분석하였다. 함금석영맥 주변 변질모암에서의 현미경관찰 결과 암석의 미세한 구조가 원래의 구조를 거의 유지하고 (constant volume), 변질모암들의 비중이 2.66~2.76으로 비변질모암의 2.71과 거의 유사한 점 (constant mass)을 고려할 때, 다른 성분의 부화나 고갈에 따른 잔류 원소의 상대적인 부화나 고갈이 일어나지 않았다고 볼 수 있으므로 비변질모암중의 함량과의 차이를 그 시료에서의 변질작용에 의한 함량의 증감으로 간주하였다. 변질작용에 의해 함금석영맥에 근접함에 따라 변질모암중의 SiO₂, K₂O, Au, As, Cs, Rb, Sb 함량이 증가하고, Na₂O, CaO, MnO, Ba, Sr 함량은 감소하며, 작열감량은 증가한다. 이들 원소 이외에는 변질에 의한 함량변화가 거의 일어나지 않는다. Na₂O (Fig. 3)는 모든 단면에서 동일하게 함금석영맥에서 상당 부분 떨어진

지점에서는 비변질모암중의 함량과 차이가 거의 없다가 약변질모암과 중간변질모암의 경계에 이르러서는 비변질모암중에 존재하는 함량의 10%이하 (비는 0.1 이하)로 줄어드는데, 이는 약변질모암에서 중간변질모암으로 넘어감에 따라 사장석이 견운모로 완전히 변질되는 현미경 관찰을 고려해 볼 때 사장석의 변질로 인해 사장석에서 용해되어 나온 Na가 열수에 의해 외부로 이동되어 제거되기 때문이다. 101 단면 상반의 경우에는 다른 단면과 달리 함금석영맥으로 부터 100 cm 이상 떨어진 지점에서도 Na₂O의 함량이 낮는데 이는 101 단면 상반이 석영세맥에 의해 교란된 결과이다. 무극광산의 경우에는 Na₂O함량이 변질의 정도를 비교적 잘 나타내는 성분이다.

무극 광산의 함금석영맥 주변모암 시료를 현미경관찰과 SiO₂, K₂O, Na₂O, CaO, MnO, Au, As, Cs, Rb, Sb, Ba, Sr 등 함금석영맥 주변 변질모암에서 변화를 보여주는 원소를 이용한 군집분석을 근거로 하여 강변질모암, 중간변질모암, 약변질모암, 비변질모암으로 구분하여 각 변질모암에서 원소함량과 원소비의 변화양상을 조사하였다. 각 변질모암에 대해 분석된 시료수와 원소함량의 범위 및 평균함량은 Table 2에 나타났다. 각 변질모암을 구분하는데 가장 좋은 원소가 무엇인지를 알아보기 위해 SiO₂,

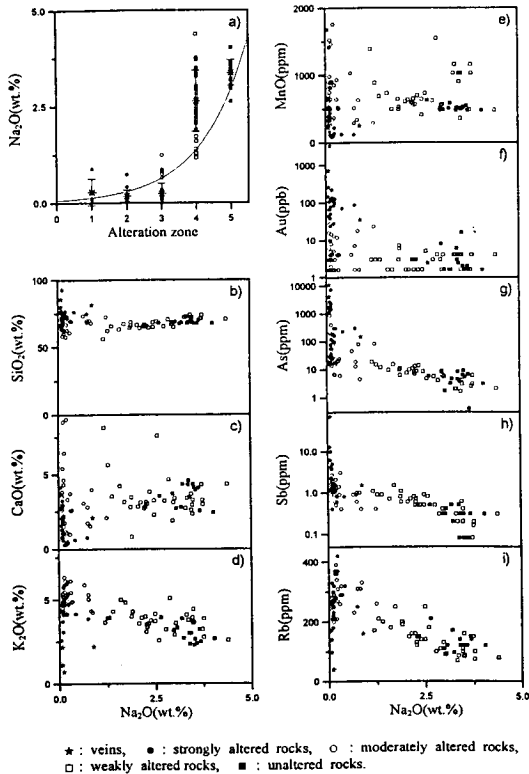


Fig. 4. Diagrams for Na₂O contents in alteration zones and elements contents against Na₂O contents.

K₂O, Na₂O, CaO, MnO, Au, As, Cs, Rb, Sb, Ba, Sr을 투입하여 판별분석을 수행하였다. 판별분석 결과 Sr, Na₂O, SiO₂를 이용하여 강변질모암 및 중간변질모암 집단과 약변질모암 및 비변질모암 집단으로 구분할 수 있었는데, 강변질모암 및 중간변질모암 집단은 Sr과 Na₂O가 낮고, SiO₂가 높다. 강변질모암 집단과 중간변질모암 집단 사이는 Sr과 Au를 이용하여 구분이 가능하며, 약변질모암 집단과 비변질모암 집단은 Sr에 의해 구분이 가능하다. 변질모암의 구분을 잘 해 주는 원소는 Sr이며, 그 다음으로는 Na₂O이다. 일원변량분산분석 (oneway ANOVA)을 실행해 유의수준 1%로 검증을 수행해 본 결과 각 변질모암간의 Sr 평균의 차이가 통계적으로 유의하다고 판명됐다. Na₂O는 강변질모암 및 중간변질모암 집단과 약변질모암 집단 그리고 비변질모암 집단 사이를 뚜렷이 구분해 주고, 비록 통계적으로 유의하지 못하나 강변질모암 집단과 중간변질모암 집단사이도 어느 정도 구분해 주며, Sr과 r=0.90의 좋은 상관관계를 보여주는 변질의 정도를 지시하는데 좋은 기준이 되는 원소이므로 시료를 석영맥, 강변질모암, 중간변질모암, 약변질모암, 비변질모암으로 분류하여 원소함량과 원소비를 Na₂O함량에 대해 도식해 보았다 (Fig. 4, 5). Na₂O함량은 변질의 정도가 증가함에 따라 감소 (Fig. 4a)

하는 경향이 있다.

SiO₂(Fig. 4b)는 비변질모암에서 68.10 wt.%, 약변질모암에서 67.55 wt.%, 중간변질모암에서 67.63 wt.%, 강변질모암에서 73.13 wt.%.로 강변질모암에서만 비변질모암에 비해 약 7%의 증가가 일어나는데, 이는 함금석영맥 주변부의 틈으로 열수가 유입되어 석영세맥이 형성됨으로서 일어난 것으로 실제로 현미경 하에서 함금석영맥 인접부 시료중에 존재하는 석영세맥을 관찰할 수 있다.

CaO (Fig. 4c)는 비변질모암에서 3.62 wt.%, 약변질모암에서 3.45 wt.%, 중간변질모암에서 2.61 wt.%, 강변질모암에서 1.12 wt.%.로 비변질모암에 비해 중간변질모암에서는 30%가 감소하며, 강변질모암에서는 70%의 감소가 일어나는데, 이는 무극광산에서 Ca는 주로 사장석내에 존재하므로 사장석이 견운모로 변질될 때 사장석내의 Ca가 용해되어 나와 제거되기 때문이다. 104 단면 상반의 경우는 광화후기에 방해석이 유입된 결과로 일부 시료에서 CaO 함량이 증가되는데, 실제 현미경 및 육안으로 방해석 세맥을 관찰할 수 있다.

K₂O (Fig. 4d)는 비변질모암에서 2.93 wt.%, 약변질모암에서 3.74 wt.%, 중간변질모암에서 4.97 wt.%, 강변질모암에서 4.69 wt.%.로 비변질모암에 비해 약변질모암에서는 28%의 증가가 일어나며, 중간변질모암에서는 70%의 함량 증가가 일어나는데, 이는 흑운모와 각섬석이 변질되어 생성된 녹니석과 사장석 및 정장석 등이 견운모로 변질될 때 필요한 K가 견운모내에 고착되기 때문이다. K₂O의 부화는 변질작용에 의해 형성되는 견운모의 양과 밀접한 관계가 있는데, 견운모로의 변질이 일어나기 시작하는 약변질모암에서 K₂O가 부화하기 시작하다 견운모로의 변질이 거의 완료되는 중간변질모암에서 최고조에 이른다. 견운모가 더 이상 생성되지 않는 강변질모암에서는 중간변질모암과의 차이가 미미해진다. 주변에 존재하는 비변질모암에서의 K 함유광물의 변질이 관찰되지 않으므로 K는 외부에서 유입된 것으로 생각된다.

MnO(Fig. 4e)는 비변질모암에서 518 ppm, 약변질모암에서 745 ppm, 중간변질모암에서 636 ppm, 강변질모암에서 375 ppm로 강변질모암에서만 비변질모암중 함량의 30%의 감소가 일어난다.

Au (Fig. 4f)는 비변질모암에서 4 ppb, 약변질모암에서 3 ppb, 중간변질모암에서 6 ppb, 강변질모암에서 87 ppb로 강변질모암에서만 비변질모암중에 존재하는 함량의 21배의 증가가 일어난다. 이러한 강변질모암에 국한된 Au의 부화는 Au의 분산이 주로 열수와 함께 열극을 통해 이동하다 침전 (leakage anomaly)되어 일어나기 때문이다. As (Fig. 4g)는 비변질모암에서 5.1 ppm, 약변질모암에서 7.5 ppm, 중간변질모암에서 73.6 ppm, 강변질모암에서 1082.7 ppm으로 비변질모암에 비해 중간변질모암에서 약 15배의 증가가 일어나며, 강변질모암에서 217배의 증가가 일어

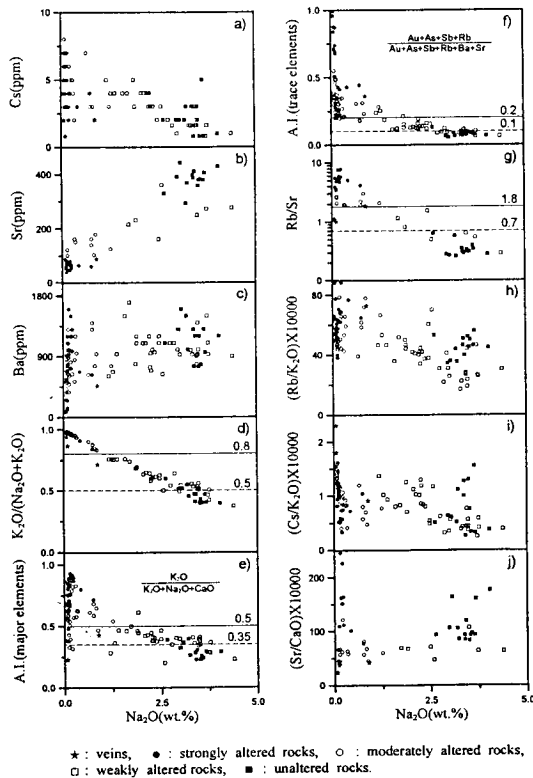


Fig. 5. Diagrams for elements contents and the ratio of elements against Na₂O contents.

난다. Sb (Fig. 4h)는 비변질모암에서 0.3 ppm, 약변질모암에서 0.6 ppm, 중간변질모암에서 1.3 ppm, 강변질모암에서 2.7 ppm 으로 비변질모암에 비해 약변질모암에서 2배, 중간변질모암에서 5배, 강변질모암에서 10배의 증가가 일어난다. Au, As, Sb 함량은 함금석영맥에 근접함에 따라 증가하는데, 비변질모암에서의 함량을 고려할 때 열수에 의해 변질모암으로 공급된 것으로 추정된다. 변질모암에서의 분산범위는 Au, As, Sb 순으로 넓어진다.

Rb (Fig. 4i)는 비변질모암에서 133 ppm, 약변질모암에서 141 ppm, 중간변질모암에서 270 ppm, 강변질모암에서 291 ppm으로 중간변질모암에서 비변질모암중의 함량의 2배의 증가가 일어난다. Cs (Fig. 5a)는 비변질모암에서 2 ppm, 약변질모암에서 3 ppm, 중간변질모암에서 5 ppm, 강변질모암에서 4 ppm으로 중간변질모암에서 비변질모암중의 함량의 2배의 증가가 일어난다. Rb와 Cs는 K와 지구화학적 거동이 비슷한 원소로 K를 치환하여 존재할 수 있으므로, K와 비슷하게 중간변질모암에서의 증가가 제일 뚜렷하다가 강변질모암과 중간변질모암중의 함량의 차는 미미해진다.

Sr (Fig. 5b)는 비변질모암에서 382 ppm, 약변질모암에서 253 ppm, 중간변질모암에서 120 ppm, 강변질모암에서 63 ppm으로

비변질모암에 비해 약변질모암에서 33%, 중간변질모암에서 70%, 강변질모암에서 85%의 감소가 일어난다. Ba (Fig. 5c)는 비변질모암에서 1139 ppm, 약변질모암에서 1028 ppm, 중간변질모암에서 822 ppm, 강변질모암에서 838 ppm으로 중간변질모암에서 비변질모암중의 함량의 28%의 감소가 일어난다. Sr과 Ba은 함금석영맥에 근접함에 따라 감소하는데, 이러한 감소는 사장석의 변질에 기인한다.

원소의 분산범위는 부화 원소의 경우에 Au와 SiO₂는 강변질모암까지 분산되며, As, Cs, Rb는 중간변질모암까지 분산되고, K₂O와 Sb는 약변질모암까지 분산된다. 고갈 원소의 경우는 MnO는 강변질모암까지 분산되며, Na₂O, CaO, Ba는 중간변질모암까지 분산되고, Sr은 약변질모암까지 분산된다.

본 지역의 모암변질은 견운모화 변질작용이 우세하고 견운모화의 정도는 변질유체에 의해 공급된 K와 사장석의 견운모로의 교대에 좌우되므로 견운모화 지수 (Sericitization Index = K₂O / (K₂O + Na₂O), MacLean and Hoy, 1991)는 변질의 정도를 지시하는 좋은 인자가 된다. 견운모화지수 (Fig. 5d)는 비변질모암에서 0.46 (0.40~0.60)이고, 약변질모암에서 0.59 (0.37~0.76)이며, 중간변질모암에서 0.95 (0.76~0.99), 강변질모암에서 0.96 (0.84~0.98)으로 각 변질모암을 잘 구분해주며, Na₂O와 r=0.99의 좋은 상관관계를 보여준다. 견운모화지수를 이용하여 변질모암을 구분해 보면 강변질모암과 중간변질모암은 0.8 이상이고, 약변질모암은 0.5~0.8이며, 비변질모암은 0.5 이하이다.

모암변질이 일어나는 동안에 원소의 부화 또는 고갈은 전체 변질모암에서 동일하게 나타나지 않고 국부적인 지구화학적 변화를 보여준다. 따라서 이러한 불규칙적인 지구화학적 변화의 영향을 줄이기 위해 열수변질동안 일어날 수 있는 모든 부화나 고갈을 고려하여 변질지수 (Alteration Index, Häussinger *et al.*, 1993)를 구했다. 변질지수는 함금석영맥 주변변질모암에서 부화를 보이는 원소함량의 합을 부화를 보이는 원소함량과 고갈을 보이는 원소함량의 합으로 나누어 구하는데, 본 광산의 경우에 주성분원소는 K₂O / (K₂O + Na₂O + CaO)로 구했으며, 미량원소는 (Au + As + Sb + Rb) / (Au + As + Sb + Rb + Ba + Sr)으로 구했다. 주성분원소에 대한 변질지수 (Fig. 5e)는 비변질모암에서 0.30 (0.23~0.39)이고, 약변질모암에서 0.39 (0.20~0.61)이며, 중간변질모암에서 0.66 (0.32~0.88), 강변질모암에서 0.79 (0.38~0.93)로 함금석영맥에 근접함에 따라 점진적인 증가가 일어나며 중간변질모암에서 두드러진 증가를 보여준다. 주성분원소에 대한 변질지수를 이용하여 변질모암을 구분해 보면 강변질모암과 중간변질모암은 0.5 이상이며, 약변질모암은 0.35~0.5이고, 비변질모암은 0.35 이하이다. 미량원소에 대한 변질지수 (Fig. 5f)는 비변질모암에서 0.09 (0.06~0.13)이고, 약변질모암에서 0.13 (0.07~0.25)이며, 중간변질모암에서 0.30 (0.18~0.55), 강변질모암에서 0.52 (0.22~0.96)로 함금석영맥에 근접함에 따라 점

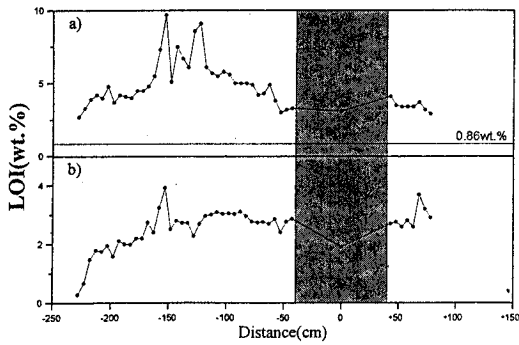


Fig. 6. The variation diagram of LOI (Loss On Ignition) for section 104 from the Mugeug mine. a) total LOI, b) LOI except CO₂ content. Forward slashed area is the vein.

진적인 증가가 일어난다. 미량원소에 대한 변질지수를 이용해 변질모암을 구분하면 강변질모암과 중간변질모암은 0.2 이상이고, 약변질모암은 0.1~0.2이며, 비변질모암은 0.1 이하이다.

Rb/Sr (Fig. 5g)은 비변질모암에서 0.36 (0.26~0.64)이고, 약변질모암에서 0.79 (0.29~1.54)이며, 중간변질모암에서 2.80(1.85~5.49), 강변질모암에서 5.24 (3.47~7.78)로 함금석영맥에 근접함에 따라 뚜렷한 증가가 일어난다. Rb/Sr을 이용하여 변질모암을 구분하면 강변질모암과 중간변질모암은 1.8 이상이고, 약변질모암은 0.7~1.8이며, 비변질모암은 0.7이하이다.

Rb/K₂O (Fig. 5h)와 Cs/K₂O (Fig. 5i)는 변질이 진행됨에 따라 더 많은 견운모가 형성되므로 Rb와 Cs가 K를 더 많이 치환할 수 있어 변질의 정도가 증가함에 따라 증가한다.

변질이 증가함에 따라 Sr/CaO (Fig. 5j)는 감소하는데, 이는 변질이 진행됨에 따라 사장석내의 Ca와 사장석중의 Ca를 치환하여 존재하던 Sr이 제거되는데 반해 인회석은 변질에 강하므로 인회석내의 Ca는 그대로 유지됨으로 해서 Sr/CaO가 감소한다. 견운모화지수, 주성분 및 미량원소에 대한 변질지수, Rb/Sr 등의 비를 이용하여 변질모암을 뚜렷하게 구분할 수 있다.

작열감량 (Fig. 6a, b)은 일부 시료에 대해서만 측정하였는데, 함금석영맥에 근접함에 따라 값이 증가한다. 작열감량은 수분을 비롯한 휘발성분의 손실에 의한 감량으로 본 지역에서는 CO₂가 휘발성분의 대부분임을 고려할 때 CO₂가 존재하는 방해석 세맥의 영향을 제외한 작열감량 (Fig. 6b)은 주로 조암광물 결정중의 수분 함량에 의해 좌우된다. 함금석영맥에 근접함에 따라 값이 보다 규칙적으로 증가하며 중간변질모암보다 변질이 심한 모암에서는 일정한 값을 보여준다. 이는 함금석영맥에 근접함에 따라 흑운모 및 각섬석과 사장석 등이 변질되어 생성된 견운모와 녹니석 함량이 점진적으로 증가하다가, 중간변질모암보다 변질이 심한 모암에서는 이들 광물의 변질이 거의 다 진행되어 변질광물이 더 이상 형성되지 않기 때문이다.

결론

1) 무극 금광상의 모암은 중립내지 조립질 흑운모화강암으로 변질을 받는 주요 광물은 사장석, 정장석과 미사장석, 흑운모와 각섬석 등이며, 주된 변질반응은 녹니석화작용과 견운모화작용이고 함금석영맥 인접부에서는 황철석화작용이 관찰된다. 흑운모와 각섬석은 변질을 받아 녹니석과 소량의 불투명광물로 변하며, 변질을 더 받아 열수성백운모 또는 견운모와 불투명광물로 변질된다. 사장석은 결정내부로 부터 선택적으로 변질을 받아 견운모로 변질되는데, 함금석영맥으로부터 일정거리에서는 견운모로 완전히 변질된다. 정장석과 미사장석은 변질작용에 대한 저항성이 비교적 강해 함금석영맥 인접부에서만 견운모로 변질된다. 견운모로의 변질로 인해 K, Rb, Cs가 부화되며, 사장석의 변질로 Na와 Ca가 감소하고, 흑운모와 각섬석의 변질로 인해 유출된 Mg, Fe, Si는 원래 광물의 주위에 잔류한다.

2) 함금석영맥에 근접함에 따라 변질모암중의 K₂O, Rb, Cs, Au, As, Sb 등의 함량은 증가하며, Na₂O, CaO, Ba, Sr 등의 함량은 감소하고, 견운모 양의 증가로 작열감량이 증가한다. 부화 원소의 분산범위는 Au와 SiO₂는 강변질모암까지 분산되며, As, Cs, Rb는 중간변질모암까지 분산되고, K₂O와 Sb는 약변질모암까지 분산된다. 고갈 원소의 분산은 MnO는 강변질모암까지 분산되며, Na₂O, CaO, Ba는 중간변질모암까지 분산되고, Sr은 약변질모암까지 분산된다.

3) 원소비가 원소함량에 비해 변질모암을 뚜렷하게 구분하여 주며, 일차분산 특성을 잘 나타낸다. 견운모화지수는 강변질모암과 중간변질모암은 0.8 이상이고, 약변질모암은 0.5~0.8이며, 비변질모암의 경우에는 0.5 이하이다. 주성분원소에 대한 변질지수는 강변질모암과 중간변질모암은 0.5 이상이고, 약변질모암은 0.35~0.5이며, 비변질모암의 경우에는 0.35 이하이다. 미량원소에 대한 변질지수는 강변질모암과 중간변질모암은 0.2 이상이고, 약변질모암은 0.1~0.2이며, 비변질모암의 경우에는 0.1 이하이다. Rb/Sr은 강변질모암과 중간변질모암은 1.8 이상이고, 약변질모암은 0.7~1.8이며, 비변질모암의 경우에는 0.7 이하이다.

사사

이 연구는 과학재단 지정 전략광물자원연구센터의 연구비로 수행되었다.

참고문헌

- 김규환, 김옥준, 장원선 (1990) 무극 금은광상에 대한 유체포유물 및 안정동위원소 분석 연구. 광산지질, v. 23, p. 1-9.
 김옥준 (1971) 남한의 신기화강암류의 관입시기와 지각변동. 광산지질,

- v. 4, p. 1-9.
- 박희인, 강성준 (1988) 무극광산 삼형제맥의 금은광화작용. 광산지질, v. 21, p. 257-268.
- 신양우, 서규식 (1987) 무극광산의 탐사와 개발현황. 광산지질, v. 20, p. 261-271.
- 연세대학교 지질학과 동문회 (1982) 한국의 지질과 광물자원. 대림문화정판사, 523p.
- 윤정환 (1989) 열수성 금은광상의 지구화학적 연구. 서울대학교 공과대학 공학박사학위논문, 191p.
- 전효택, 안홍일 (1991) 합금 석영맥 광상 화강암질 모암에서의 금 및 관련 원소들의 분산에 관한 연구. 한국자원공학회지, v. 28, p. 194-211.
- Häussinger, H., Okrusch, M., and Scheepers, D. (1993) Geochemistry of premetamorphic hydrothermal alteration of metasedimentary rocks associated with the Gorob massive sulfide prospect, Damara Orogen, Namibia. *Econ. Geol.*, v. 88, p. 72-90.
- MacLean, W.H. and Hoy, L.D. (1991) Geochemistry of hydrothermally altered rocks at the Horne Mine, Noranda, Quebec. *Econ. Geol.*, v. 86, p. 506-528.
- 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., Shelton, K.L., Chi S.J. and Choi S.H. (1988) Stable isotope and fluid inclusion studies of gold-silver bearing hydrothermal-vein deposits, Cheonan-Cheongyang-Nonsan mining district, Republic of Korea: Cheongyang area. *Jour. Korean Inst. Mining Geology*, v. 21, p. 149-164.

1994년 7월 27일 원고접수