

옥계 합금석영맥광상 주변모암에서의 원소들의 일차분산

황인호* · 전효택*

Primary Dispersion of Elements in Altered Wallrocks around the Gold-bearing Quartz Veins at the Okgye Mine

In Ho Hwang* and Hyo Taek Chon*

ABSTRACT: Geochemical studies on gold-bearing quartz veins and wallrocks from the Okgye mine were carried out in order to investigate the primary dispersion patterns of gold and associated elements and to quantify the dispersion width of elements with distance from the gold-bearing quartz veins. Gold-bearing quartz veins occur in basaltic trachyandesite of unknown age. Enrichment of K₂O, MnO, Au, As, Rb, Sb, Pb, Zn, Cu, Ag and Cd, and depletion of Na₂O and Sr are found in altered wallrocks. The ratio of K₂O/(K₂O+Na₂O), alteration index for trace elements, and Rb/Sr in altered wallrocks are increased, whereas Sr/CaO ratio is decreased with approach to the gold-bearing quartz veins. The widths of primary dispersion range from 17 cm to 155 cm. The relative dispersion width increases in order Au=Cu=Zn=Ag=Cd<MnO=Pb<As=Sb<K₂O=Rb and Ba<Na₂O<Sr. The best fitting model of dispersion patterns in altered wallrocks around the gold-bearing quartz veins is an exponential function for Na₂O, As, Sb, Sr, Pb, Au, Cu, Zn, Ag and Cd, and a quadratic function for K₂O, MnO, Rb and Ba.

서론

열수광상의 주변모암은 열수용액과의 반응에 의해 광물학적 변화와 화학적 변화를 받게 된다. 열수용액과의 반응에 의해 주변모암에 나타나는 원소들의 일차분산패턴은 모암의 광물학적 및 화학적 성질, 구성입자의 크기, 공극률과 투수율 등의 모암 특성과 열수용액의 상태, 화학 조성, 온도와 압력 등 열수용액의 특성에 따라 다양하게 나타난다. 따라서 열수광상 주변모암에 나타나는 원소들의 일차분산에 대해서 정확히 이해함으로써 광화용액의 화학 성분과 광물의 침전기구 등 광화작용과 관련된 정보를 얻을 수 있다. 또한 일차분산의 양상과 범위를 규명함으로써 광상의 암석지구화학탐사에도 응용할 수 있다.

본 연구에서는 강원도 명주군 옥계면 산계리에 위치한 옥계 합금석영맥 광산을 대상으로 원소들의 일차분산패턴을 규명하기 위해 갱내에서 합금석영맥과 주변변질모암 및 비변질모암을 채취해, Au, As, Na 등 29개 원소는 INAA를 이용하여, Ca, K, Sr 등 19개 원소는 ICP-AES를 이용하여 화학분석을 수행하였다. 화학분석 자료를 이용하여 합금석영맥으로부터의 거리에 따라 변질모암에서의 원소들의 일차분산 특성을 해석하고, 원소의 분산 범위를 정량화하였다. 또한 모암의 성분이나 입자의 크기가

원소의 분산양상과 범위에 영향을 미치는 지를 알아보기 위해 무극합금석영맥 광상에서의 원소들의 일차분산 연구 결과 (황인호·전효택, 1994 a, b)와 비교해 보았다.

지질 및 광상개요

옥계광상 부근의 지질은 조선계 대석회암통의 풍촌석회암층(캄브리아기), 원평층 및 석빙산 석회암층(오오도비스기), 평안계의 홍점통(석탄기), 시대 미상의 우백질화강암과 편상화강암으로 구성된다 (Fig. 1). 광상은 풍촌석회암층과 원평층내의 단층(?) 열극을 따라 관입한 암맥 내의 열극을 충진한 2개조의 합금석영맥으로 구성된다. 합금석영맥의 대부분은 암맥 내에 존재하며 암맥이 없으면 석영맥의 폭이 좁아지는 특징이 있다. 합금석영맥의 주향은 N35°~50°E이며 경사는 75°SE~85°NW로 거의 수직에 가깝고, 석영맥폭은 0.3~1.2 m 내외이다. 주요 광석광물로는 심아연석, 황비철석, 방연석, 황철석, 황동석 등으로, 이들 광석 광물은 육안으로 확인할 수 있을 정도로 다량 존재한다.

시료 채취와 화학분석

시료는 갱내에서 합금석영맥과 주변변질모암 및 비변질모암을

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

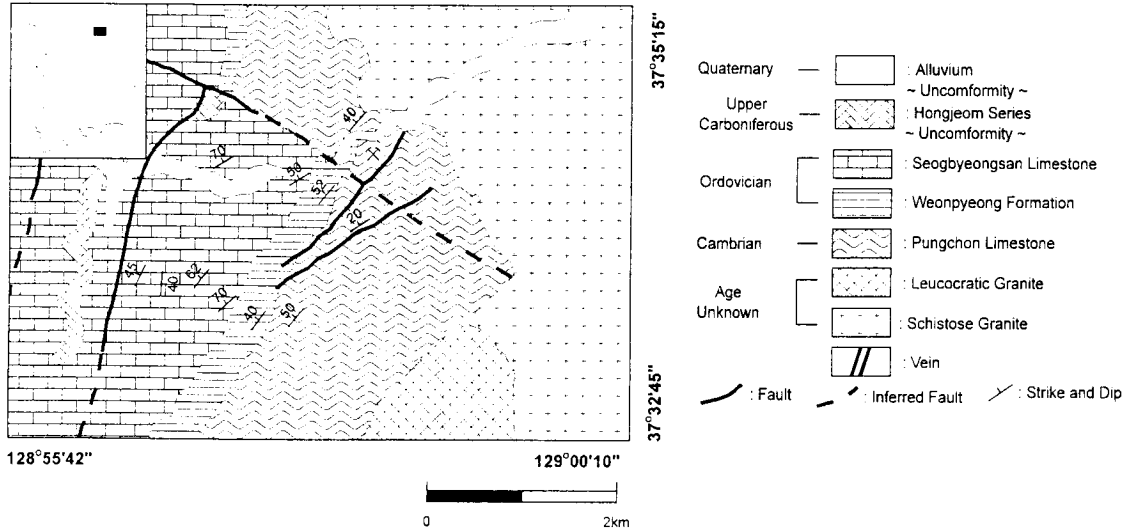


Fig. 1. Geological map in the vicinity of the Okgye gold mine.

대상으로 채취하였다. 하2갱 (해발 0 m)과 하3갱 (해발 - 40 m)에서 각각 2개 단면씩 총 4개 단면에 대하여 합금석영맥과 주변비질모암의 시료를 10~20 cm간격으로 채취하였으며, 비질모암도 채취하였다 (Fig. 2). 하2갱의 경우 수갱으로부터 114 m 떨어진 지점 (A 단면)과 71 m 떨어진 지점 (B 단면)에서 시료를 채취하였으며, 하3갱의 경우에는 수갱으로부터 95 m 떨어진 지점 (C 단면)과 50 m 떨어진 지점 (D 단면)에서 시료를 채취하였다. A 단면은 합금석영맥폭이 18 cm로 주향은 N42°E이고 경사는 90°이며, 합금석영맥 좌우에 각각 90 cm와 110 cm 폭의 암맥이 존재한다. B 단면은 합금석영맥폭이 51 cm로 주향은 N50°E이고 경사는 90°이며, 합금석영맥 좌우에 각각 100 cm와 60 cm 폭의 암맥이 존재한다. C 단면은 합금석영맥폭이 20 cm로 주향은 N 44°E이고 경사는 82°SE이며, 합금석영맥 좌우에 각각 54 cm와 22 cm 폭의 암맥이 존재한다. D 단면은 합금석영맥폭이 20 cm로 주향은 N50°E이고 경사는 80°SE이며, 합금석영맥 좌우에 각각 20 cm와 85 cm 폭의 암맥이 존재한다. 모든 암맥은 석회암과 접하고 있다.

채취한 시료는 실험실로 가져와 수돗물과 증류수를 이용하여 깨끗이 씻은 다음 상온에서 건조시킨 후에 일부는 박편 및 연마편 제작용으로 사용하고 일부는 -200 mesh로 분쇄하여 화학분석에 이용하였다. -200 mesh로 분쇄한 시료는 캐나다의 ACT-LABS에 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 중성자활성기 분석 (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 유도분극아르곤플라스마 분광분석 (ICP-AES)을 이용하여 분석하였다.

지구화학적 특징

광맥 및 비질모암의 화학조성

주요 광석광물은 섬아연석, 황비철석, 방연석, 황철석, 황동석 등으로 채취한 모든 광석시료에서 이들 광물이 다량 관찰된다. 5개 합금석영맥 시료에 대한 Au, Ag 및 Pb, Zn, Cu 등 주요 원소들의 화학분석 결과는 Table 1에 수록되어 있다. 5개의 합금석영맥 시료중의 Au함량은 7.45~70.10 ppm이고 Ag함량은 58.2~354.3 ppm으로 Au/Ag는 0.03~0.40이다. 또한 합금석영맥에서 관찰되는 주요광석광물의 영향으로 As, Pb, Zn, Cu가 각 시료에서 수%씩 분석되었다.

비질모암에 대한 화학분석 결과 원소 함량은 SiO₂ (55.15%), Fe₂O₃ (8.30%), MgO (9.49%), TiO₂ (0.52%), Al₂O₃ (14.45%), Na₂O (4.76%), CaO (5.86%), P₂O₅ (0.11%), K₂O (1.24%), MnO (1025 ppm), Au (2ppb), As (10ppm), Ba (670 ppm), Co (37 ppm), Cr (620 ppm), Cs (6ppm), Hf (4 ppm), Rb (67ppm), Sb (1.4ppm), Sc (26ppm), Th (3.9ppm), La (22 ppm), Ce (54 ppm), Nd (23 ppm), Sm (3.8ppm), Eu (1.1 ppm), Yb (1.9 ppm), Lu (0.12 ppm), Cu (43 ppm), Pb (4 ppm), Zn (60 ppm), Ag (0.32 ppm), Ni (155 ppm), Sr (402 ppm), Cd (0.6ppm), V (101 ppm), Y (12 ppm)이다. 비질모암에 대한 modal 분석을 수행할 수 없어 화학분석 자료를 사용하여 TAS (Total Alkali versus Silica, Le Maitre, 1989) 분류

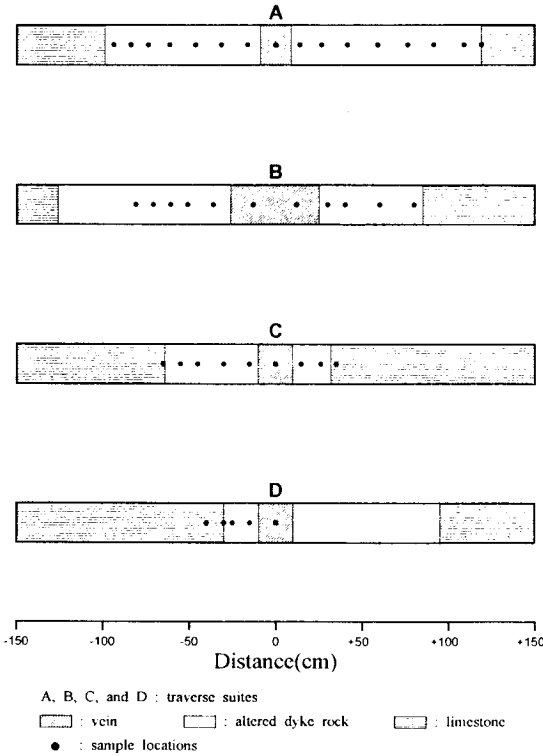


Fig. 2. Schematic representation of alteration zones (cross section) adjacent to the quartz vein.

범으로 분류한 결과 basaltic trachyandesite에 해당된다.

옥계 Au광산의 비변질모암과 변질모암 모두 현미경하에서 광물을 식별할 수 없을 정도로 작은 입자로 이루어져 있다. 따라서 현미경을 이용한 시료의 분류가 불가능하여 변질모암의 구분을 하지 않았으며, 화학분석 자료에 대한 광물학적 고찰도 수행하지 않았다. 시료를 채취한 4개 단면에 대한 합금석영맥 및 암맥의 규모와 시료 채취 위치는 Fig. 2에 표시하였다. 본 광산의 경우에는 합금석영맥이 거의 수직에 가까워 합금석영맥 경계면까지의 거리를 그 위치에서의 합금석영맥 경계면까지의 수직 거리로 간주하였다. Fig. 2에서 +기호는 채취한 위치에서 수갱을 향했을 때에 합금석영맥의 오른쪽을 나타내며, -기호는 왼쪽을 나타낸다.

원소 함량 및 원소비의 변화

옥계 금광상에서는 합금석영맥에 근접함에 따라 변질암맥중의 K₂O, MnO, Au, As, Rb, Sb, Cu, Pb, Zn, Ag, Cd 함량이 증가하고, Na₂O와 Sr 함량은 감소하며, Ba는 일부 시료에서는 증가하고, 일부 시료에서는 감소하는 불규칙적인 거동을 보여준다. 이들 원소 이외에는 변질에 의한 함량변화가 거의 일어나지 않는다.

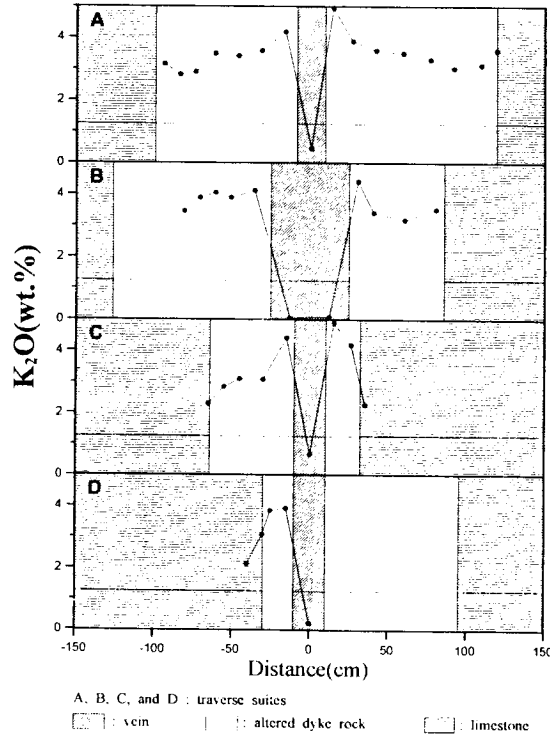


Fig. 3. Chemical variation of K₂O in alteration zones around the quartz veins.

Table 1. Content of Au, Ag, As, Sb, Cd, Pb, Zn and Cu in five representative vein materials.

elements samples	Au (ppm)	Ag (ppm)	As (%)	Sb (ppm)	Cd (ppm)	Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)
A section(1)	53.00	133.9	7.70	170	347.2	3.65	2.44	0.20
B section(2)	21.10	58.2	9.10	56	222.3	2.10	1.49	0.14
C section(1)	70.10	354.3	3.40	440	2028.1	3.67	10.04	0.23
D section(1)	22.40	130.6	1.90	83	215.6	4.03	1.58	0.13
D section(1)	7.45	213.2	4.10	240	128.1	3.60	0.80	0.08

*Number of samples in parenthesis.

K₂O(Fig. 3)는 2.81~4.94 wt.%로 모든 변질암맥에서 비변질 암맥중의 함량 1.24 wt.%에 비해 약 2배 내지 4배의 증가가 일어난다. MnO는 변질암맥에서 475~5086 ppm으로 비변질암맥중의 함량 1025 ppm에 비해 최대 5배의 증가가 일어난다. Au는 변질암맥에서 1.6~220 ppb로 비변질암맥중의 함량 2 ppb에 비해 최대 110배의 증가가 일어나는데, 함량의 증가는 합금석영맥인접부 시료에 국한된다. As는 변질암맥에서 6~3000 ppm으로 비변질암맥중의 함량 10 ppm에 비해 최대 300배의 증가가 일어나며, 증가는 거의 전 변질암맥에서 나타난다. Rb는 변질 암맥에서 83~290 ppm으로 비변질암맥중의 함량 67 ppm에 비

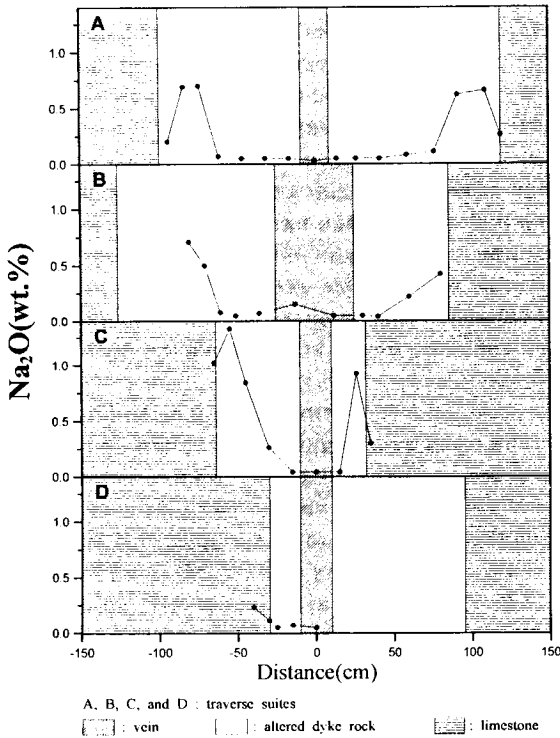


Fig. 4. Chemical variation of Na₂O in alteration zones around the quartz veins.

해 약간의 증가 또는 4배의 증가가 일어난다. Sb는 변질암맥에서 0.5~18 ppm으로 비변질암맥중의 함량 1.4 ppm에 비해 최대 약 10배의 증가가 일어나며, As와 마찬가지로 거의 전 변질암맥에서 증가한다. Cu는 변질암맥에서 16~296 ppm으로 비변질암맥중의 함량 43 ppm에 비해 최대 6배의 증가가 일어나며, 부화는 합금석영맥 인접부에 국한된다. Pb는 변질암맥에서 4~1521 ppm으로 비변질암맥중의 함량 4 ppm에 비해 최대 380배의 증가가 일어나며, 다른 비금속 (base metal)에 비해 분산범위가 약간 넓게 나타난다. Zn은 변질암맥에서 46~1705 ppm으로 비변질암맥중의 함량 60 ppm에 비해 최대 280배의 증가가 일어난다. Ag는 변질암맥에서 0.32~4.9 ppm으로 비변질암맥중의 함량 0.32 ppm에 비해 최대 15배의 증가가 일어난다. Cd는 변질암맥에서 0.4~20.8 ppm으로 비변질암맥중의 함량 0.6 ppm에 비해 최대 30배 이상의 증가가 일어난다.

고갈되는 원소의 경우 Na₂O (Fig. 4)는 변질암맥에서 0.04~1.33 wt.%로 비변질암맥중의 함량 4.76 wt.%와 비교해 볼 때 합금석영맥 주변 암맥내의 모든 시료에서 함량이 감소한다. Sr은 변질암맥에서 65~313 ppm으로 비변질암맥중의 함량 402 ppm에 비해 전체 시료에서 함량이 상당량 감소된다. Ba는 변질암맥에서 40~1200 ppm으로 비변질암맥중의 670 ppm에 비해 일

부 시료에서는 감소하고 일부 시료에서는 증가하는 불규칙적인 거동을 보여준다.

옥계 Au광산의 변질 암맥에서는 K₂O가 부화되고, Na₂O가 고갈되므로 K₂O/(K₂O+Na₂O)를 구하였다. K₂O/(K₂O+Na₂O)는 비변질암맥에서 0.207이나, 변질암맥에서 0.681~0.992로 변질암맥 전체에서 높은 비를 보여주며, 합금석영맥에 근접함에 따라 약간 증가하는 경향이 있다. 이와 같이 변질암맥 전체에서 높은 비를 보여주는 이유로는 암맥의 폭이 20~110 cm로 비교적 좁은 관계로 암맥의 거의 전부가 변질의 영향을 받았기 때문이다. 미량원소에 대한 변질지수는 (Au+As+Rb+Sb+Cu+Pb+Zn+Ag+Cd)/(Au+As+Rb+Sb+Cu+Pb+Zn+Ag+Cd+Sr+Ba)로 구했는데, 비변질암맥에서 0.149이고 변질암맥에서 0.134~0.919로 합금석영맥에 근접함에 따라 서서히 증가하다가 합금석영맥 인접부에서 급격한 증가가 일어난다. 이는 Au, Cu, Pb, Zn, Ag, Cd의 부화가 합금석영맥 인접부에 국한되어 있기 때문이다. Rb/Sr은 비변질암맥에서 0.167이고 변질암맥에서 0.265~4.308로 합금석영맥에 근접함에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 보여준다. (Sr/CaO)×10000은 비변질암맥에서 68.57이고 변질암맥에서 9.63~43.78로 합금석영맥에 근접함에 따라 점진적으로 감소하는 경향을 보여준다.

원소함량과 원소비의 분산양상 및 분산범위

합금석영맥 주변 변질암맥에서의 원소의 분산형태와 범위 및 원소비의 분산특성이 나타나는 범위를 알아보기 위하여 합금석영맥과의 경계면으로부터의 거리 (cm)를 x값으로 하고 원소함량을 y값으로 하여 회귀식을 구했다. 회귀식은 변질암맥에서 변화를 보이는 Na₂O, K₂O, MnO, Au, As, Rb, Sb, Cu, Pb, Zn, Ag, Cd, Ba, Sr 등의 원소와 K₂O/(K₂O+Na₂O), 미량원소에 대한 변질지수, Rb/Sr, Sr/CaO 등의 원소비를 대상으로 구했다. 회귀식을 구하기 위해 사용한 시료의 개수 (6~30)중 최소 개수 6을 고려하여 일차식, 이차식, 그리고 지수함수를 이용하여 회귀식을 구한 다음, 그 중에서 결정계수 R²이 큰 회귀식을 선택하였다. 동일한 원소나 원소비에 대해서는 같은 형태의 회귀식이 사용되도록 하기 위해 각 원소나 원소비에 대해 구한 회귀식중 가장 많은 수를 차지하고 결정계수가 큰 회귀식 형태를 각 원소나 원소비에 대한 회귀식 형태로 선택하였다. 각 원소나 원소비에 대해 구한 회귀식은 결정계수 R²과 시료 개수 N을 이용하여 $T = R\sqrt{N-2} / \sqrt{1-R^2}$ (여기서 T는 N-2의 자유도를 가지는 t 분포를 따른다, Hogg and Craig, 1970)을 구해 유의 수준 1%와 0.5%로 통계적 검증을 수행하였다. 옥계 Au광산은 합금석영맥이 거의 수직에 가까워 변질암맥을 상하반으로 분리하는 것이 불가능하므로 합금석영맥 좌우에 존재하는 변질암맥을 동일한 조건에서 형성된 것으로 간주하여 각 단면별로 회귀식을 구했다.

Table 2. The results of regression for the Okgye mine.

element			Na ₂ O			Regression model			exponential	
ID	a	b	c	R ²	N	T-value	t-test	distance		
A	3.38157E-02	2.53307E-02		0.7300	13	5.454	**	155		
B	5.38873E-02	2.58441E-02		0.7979	9	5.257	**	97		
C	8.33369E-02	4.76929E-02		0.7206	6	3.212		55		
TOT	3.04132E-02	4.99981E-02		0.4082	30	4.394	**	150		
element			K ₂ O			Regression model			polynomial (2nd)	
ID	a	b	c	R ²	N	T-value	t-test	distance		
A	2.61478E-04	-4.17847E-02	4.68879	0.8392	13	7.578	**	-		
B	3.28245E-04	-3.16789E-02	4.33614	0.3367	9	1.885		-		
C	1.24137E-03	-1.06566E-01	5.16774	0.8615	6	4.988	**	-		
TOT	2.2883E-04	-3.60168E-02	4.48811	0.6207	30	6.769	**	-		
element			As			Regression model			exponential	
ID	a	b	c	R ²	N	T-value	t-test	distance		
A	-4.96253E-02	8.25989E+02		0.7696	13	6.061	**	89		
B	-3.42966E-02	4.82133E+02		0.5413	9	2.874		113		
C	-7.16842E-02	3.53729E+02		0.8768	6	5.336	**	50		
TOT	-4.16046E-02	4.55564E+02		0.6247	30	6.828	**	92		
element			Sb			Regression model			exponential	
ID	a	b	c	R ²	N	T-value	t-test	distance		
A	-1.52973E-02	4.93406E+00		0.6039	13	4.095	**	82		
B	-4.87525E-02	1.20352E+01		0.5976	9	3.225	*	44		
C	-4.42029E-02	7.83312E+00		0.5841	6	2.370		39		
TOT	-2.46000E-02	6.93029E+00		0.4474	30	4.761	**	65		
ratio			K ₂ O/(K ₂ O+Na ₂ O)			Regression model			polynomial (2nd)	
ID	a	b	c	R ²	N	T-value	t-test	distance		
A	-2.06004E-05	-9.33051E-05	0.998753	0.6653	13	4.676	**	194		
B	-7.30176E-05	1.77840E-03	0.979193	0.8568	9	6.472	**	116		
C	4.17794E-06	-7.36896E-03	1.017660	0.8702	6	5.179	**	118		
TOT	7.84388E-06	-2.60492E-03	1.000540	0.3397	30	3.795	**	-		

ID : the ID of section. a, b, c : coefficients of regression equation; polynomial : $ax^2 + bx + c$, exponential : $e^{ax} \times b$. R² : coefficient of determination. N : sample count used for the regression analysis. T-value : $R\sqrt{N-2}/\sqrt{1-R^2}$. t-test : significance, * - 0.01, ** - 0.005. distance : the distance decayed to background level from the vein contact (unit in cm). - : absent.

D 단면의 경우에는 변질암맥에서 분석된 시료의 수가 2개에 불과하여 단면별 회귀식을 구하지 않고, 전체 단면에 대한 회귀식을 구할 때만 이용하였다.

함금석영맥 경계면으로부터의 거리에 따른 변질암맥중의 Na₂O, K₂O, As, Sb, K₂O/(K₂O+Na₂O)에 대한 회귀식 형태, 회귀식의 계수, 결정계수, T값, 유의 수준 1%와 0.5%로 통계적 검증을 수행한 결과와 분산범위는 Table 2에 나타나 있다. 원소의 분산범위는 비변질모암중의 원소 함량과 같아지는 석영맥으로부터의 거리로 구했으며, 원소비의 분산특징이 나타나는 범위는 비변질모암에서의 비값과 같아지는 거리로 구했다.

변질모암에서의 Na₂O (Fig. 5), As (Fig. 6), Sb, Sr, Pb, Au, Cu, Zn, Ag, Cd, 미량원소에 대한 변질지수, Rb/Sr, Sr/CaO의 분산은 지수함수형태의 회귀식을 따르며, K₂O (Fig. 7), MnO, Rb (Fig. 8), Ba, K₂O/(K₂O+Na₂O)의 분산은 이차함수 형태의 회귀식을 따른다. Au, Cu, Zn, Ag, Cd에 대한 회귀식의 대부분은

유의 수준 1%와 0.5%로 판단했을 때 통계적 유의성을 가지지 못하는데, 이는 이들 원소의 부화가 함금석영맥 인접부 시료에만 국한됨으로 지수함수나 이차함수의 회귀식이 이들 원소의 함량을 추정하는데 적합하지 않기 때문으로 해석된다. 유의수준 1%로 통계적 검증을 수행해 유의한 회귀식만을 이용한 변질암맥에서의 원소의 분산범위는 다음과 같다. MnO는 A 단면에서 43 cm, B 단면은 51 cm, C 단면은 17 cm, 전체로는 150 cm이다. As는 A 단면에서 89 cm, C 단면은 50 cm, 전체로는 92 cm이다. Sb는 A 단면에서 82 cm, B 단면은 44 cm, 전체로는 65 cm이다. Pb는 A 단면에서 94 cm, B 단면은 76 cm, C 단면은 40 cm, 전체로는 89 cm이다. Na₂O는 A 단면에서 155 cm, B 단면은 97 cm, 전체로는 150 cm이다. Sr은 B 단면에서 107 cm, C 단면은 51 cm, 전체로는 233 cm이다. Ba는 A 단면에서 57 cm, 전체로는 53 cm이다. K₂O와 Rb의 경우에는 함금석영맥 주위의 암맥의 폭이 20~110 cm로 비교적 좁은 관계로 대부분의 시료가 변질의 영

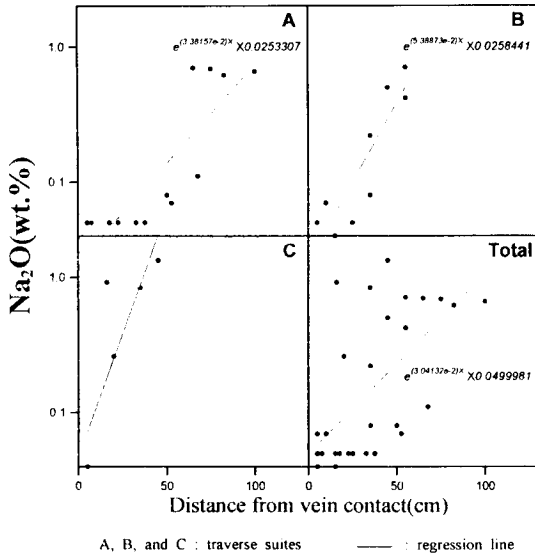


Fig. 5. Diagrams for Na₂O contents against distance from vein contact.

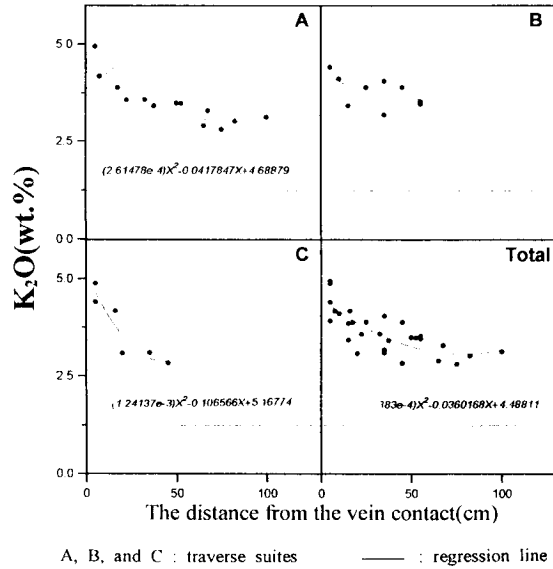


Fig. 7. Diagrams for K₂O contents against distance from vein contact.

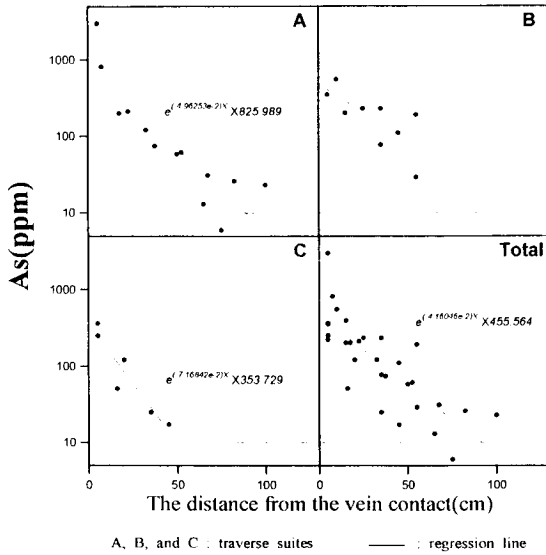


Fig. 6. Diagrams for As contents against distance from vein contact.

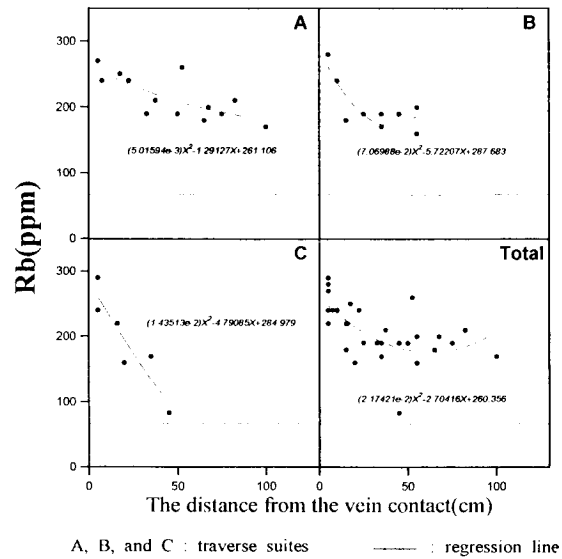


Fig. 8. Diagrams for Rb contents against distance from vein contact.

향을 받아 변질암맥중의 함량을 이용하여 비변질암맥중의 함량과 같아지는 거리를 구할 수가 없으나 변질암맥에서의 분산양상으로 볼 때 변질범위는 암맥폭 이상으로 추정된다.

변질암맥에서 원소비의 분산특성이 나타나는 범위는 K₂O/(K₂O+Na₂O)의 경우에 A 단면은 194 cm, B 단면은 116 cm, C 단면은 118 cm이었다. 미량원소에 대한 변질지수는 A 단면에서

113 cm, B 단면은 102 cm, C 단면은 40 cm, 전체로는 107 cm이었다. Rb/Sr은 A 단면에서 440 cm, B 단면은 134 cm, C 단면은 56 cm, 전체로는 269 cm이었다. Sr/CaO는 B 단면에서 127 cm, C 단면은 53 cm, 전체로는 221 cm이다.

함금석영맥폭은 A 단면은 18 cm이며, B 단면은 51 cm이고, C 단면과 D 단면은 20 cm이다. 함금석영맥폭 및 함금석영맥중의

Table 3. Geochemical characteristics and primary dispersion scale of the Mugeug and the Okgye gold mines.

Deposits		Mugeug Au mine	Okgye Au mine
Wallrocks		medium- to coarse-grained biotite granite	basaltic trachyandesite
Enrichment		SiO ₂ , K ₂ O, Rb, Cs, Au, As, Sb	K ₂ O, MnO, Rb, Au, As, Sb, Cu, Pb, Zn, Ag, Cd
Depletion		Na ₂ O, CaO, Sr, Ba	Na ₂ O, Sr, Ba
Regression model	quadratic function	CaO, K ₂ O, MnO, Rb, Cs, Ba	K ₂ O, MnO, Rb, Ba
	exponential function	Na ₂ O, Sr, Au, As, Sb	Na ₂ O, Sr, Au, As, Sb, Cu, Pb, Zn, Ag, Cd
Scale of primary dispersion (cm)	SiO ₂	15~66	-
	Na ₂ O	49~181	97~155
	CaO	67~119	-
	K ₂ O	40~201	-
	MnO	22~60	17~51
	Rb	40~167	-
	Cs	35~159	-
	Sr	65~111	51~107
	Ba	66~172	-
	Au	33~138	-
	As	38~170	50~89
	Sb	56~343	44~82
	Pb	-	40~94
	K ₂ O/(K ₂ O+Na ₂ O)	39~180	116~194
	A.I.(major)	40~101	-
A.I.(trace)	36~175	40~113	
Rb/Sr	52~86	56~440	
(Sr/CaO)	-	53~127	

A.I. : alteration index. - : absent.

원소함량과 각 단면에서의 분산범위를 비교해 보면 원소의 분산범위와 원소비의 분산특성이 나타나는 범위는 대부분 A 단면이 가장 넓어 옥계 Au광산에서는 석영맥폭 및 석영맥중의 원소함량과 분산범위 사이에는 상관성이 존재하지 않는다.

고찰

무극 Au광산과 옥계 Au광산 모암에서의 일차분산 특성 비교

모암의 성분이나 입자의 크기가 원소의 분산양상과 범위에 영향을 미치는지를 알아보기 위해 무극 Au광산의 연구 결과(황인호·전효택, 1994 a, b)와 비교해 보았다. 무극 Au광산의 모암은 중립 내지 조립질 흑운모화강암으로 옥계 Au광산의 모암인 basaltic trachyandesite와 성분과 입자크기가 다르다. 무극 Au광산과 옥계 Au광산의 합금석영맥 주변의 변질모암에서 변질작용에 의해 변화를 보여주는 원소와 원소비, 분산형태, 분산범위는 Table 3에 나타나 있다.

무극 Au광산의 경우에 합금석영맥에 근접함에 따라 변질모암중의 K₂O, Rb, Cs, Au, As, Sb 등의 함량은 증가하며, Na₂O,

CaO, Sr, Ba 등의 함량은 감소한다. 옥계 Au광산의 경우에는 변질암맥중의 K₂O, MnO, Rb, Au, As, Sb, Cu, Pb, Zn, Ag, Cd 등의 함량이 증가하고, Na₂O와 Sr 함량은 감소하며, Ba 함량은 불규칙적인 거동을 보여준다. 변질모암에서 변화를 보이는 원소중 두 광산 사이에 차이를 보이는 원소는 CaO, MnO, Cs, Cu, Pb, Zn, Ag, Cd이다. Cu, Pb, Zn, Ag, Cd의 경우에는 옥계 Au광산의 주변모암에서만 변화를 보여주는데 이는 옥계 Au광산의 합금석영맥중의 이들 원소함량을 고려할 때 당연한 결과로 열수용액의 성분에 따라 주변모암에서 함량변화를 보이는 원소가 달라짐을 알 수 있다. 따라서 변질모암에서 변화양상을 보이는 원소를 인지하므로서 열수용액의 성분을 추정할 수 있다.

변질모암에서의 원소의 분산양상은 동일 원소에 대해서는 형태가 같은 함수의 증감을 따른다. 즉, K₂O, MnO, Rb, Ba는 이차함수의 증감이 일어나며, Na₂O, Sr, Au, As, Sb는 지수함수의 증감이 일어난다. 변질모암에서의 Na₂O, MnO, Sr, As, Sb의 분산범위는 무극 Au광산은 22~343 cm이며 옥계 Au광산은 17~155 cm로 무극 Au광산에서의 분산범위가 대체로 넓게 나타나나, 무극 Au광산에서 석영맥폭이 80 cm인 단면을 제외할 경우에 두 광산의 합금석영맥폭은 무극 Au광산이 18~40 cm이고 옥계 Au

광산은 18~51 cm로 비슷하고 무극 Au광산의 분산범위는 35~173 cm로 되어 분산범위도 비슷하여 두 광산 사이에는 차이가 존재하지 않는다.

이상의 결과로 볼 때 무극 Au광산과 옥계 Au광산은 열수용액의 성분의 차이로 부화되거나 고갈되는 원소의 종류와 변화되는 함량차가 생기나, 원소의 분산양상과 범위가 비슷한 것으로 보아 모암의 성분이나 입자의 크기는 원소의 분산양상과 범위에 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

암석지구화학탐사에서의 응용 가능성

변질모암에서 부화나 감소되는 원소를 금광상의 탐사에 이용할 수 있는데, 본 연구 결과 이용 가능한 원소는 K_2O , Na_2O , MnO , Rb , Au , As , Sb , Cu , Pb , Zn , Ag , Cd , Sr , Ba 등이며, 원소비는 $K_2O/(K_2O+Na_2O)$, 미량원소에 대한 변질지수, Rb/Sr , Sr/CaO 이다.

변질모암에서 K_2O , MnO , Rb , Ba 의 분산은 이차함수, Na_2O , Sr , Au , As , Sb 의 분산은 지수함수 형태의 회귀식을 따른다. 따라서 2개 내지 3개 정도의 시료를 분석하면 원소의 부화나 감소가 일어나는 방향을 앞으로서 함금석영맥이 존재하는 위치를 추정할 수 있다.

변질모암에서의 원소의 분산범위와 원소비의 분산특성이 나타나는 범위는 함금석영맥 경계로부터 최소 15 cm에서 최대 440 cm까지 다양하게 나타나는데, 대체적으로 함금석영맥폭의 2배 이상까지 나타난다.

옥계 Au광산에서 함금석영맥의 탐사시에 이용할 수 있는 원소로는 분산범위가 비교적 넓고 분석이 용이한 K_2O , Na_2O , As , Sb , Rb , Sr 등이다. Rose 등 (1979)의 경험법칙을 따르면 개략탐사시 2개 이상의 시료에 의해서 지구화학적 이상값이 나타나도록 시료채취 간격을 정해야 하는데, 두 광산에서 이들 원소의 분산범위가 17~155 cm이고, 함금석영맥폭이 30~120 cm이므로 시료채취 간격을 0.3~2 m로 하면 함금석영맥이나 변질모암에서 적어도 2개 이상의 시료가 채취되므로 탐사에 유용하게 이용할 수 있다. 원소비의 경우에는 $K_2O/(K_2O+Na_2O)$, 미량원소에 대한 변질지수, Rb/Sr 등을 탐사에 이용할 수 있는데, 이들 비의 분산특성이 나타나는 범위가 40~440 cm이므로 시료채취 간격을 0.5~5 m로 하여 탐사에 응용할 수 있다.

결 론

and MacLachlan (1992) 는 사면체 A1과 팔면체 A1의 해리속도의

1. 옥계 함금석영맥광산에서는 함금석영맥에 근접함에 따라 변질암맥중의 K_2O , MnO , Au , As , Rb , Sb , Cu , Pb , Zn , Ag , Cd 등의 함량이 증가하고, Na_2O 와 Sr 함량은 감소한다.

2. 원소의 분산범위는 17~155 cm인데, 부화원소의 경우에 K_2O 와 Rb 의 분산범위가 가장 넓게 나타나고, 다음은 As 와 Sb 이며, 그 다음은 MnO 와 Pb 이고, Au , Cu , Zn , Ag , Cd 의 분산범위가 가장 좁다. 고갈 원소의 분산범위는 Ba , Na_2O , Sr 순으로 넓어진다.

3. 석영맥에 근접함에 따라 $K_2O/(K_2O+Na_2O)$, 미량원소에 대한 변질지수, Rb/Sr 이 증가하고, Sr/CaO 가 감소하며, 분산특성이 나타나는 범위는 40~440 cm이다.

4. 변질암맥중의 Na_2O , As , Sb , Sr , Pb , Au , Cu , Zn , Ag , Cd 등의 함량은 지수함수를 이용하여, K_2O , MnO , Rb , Ba 등의 함량은 이차함수를 이용하여 함금석영맥으로부터의 거리에 관한 함수로서 수식화할 수 있으며, 이를 이용하여 함금석영맥 주변 변질모암에서 원소들의 일차 분산범위를 정량화할 수 있다.

5. 무극 Au광산에 대한 연구 결과와 비교해 보았을 때 모암의 성분이나 입자의 크기는 원소의 분산양상과 범위에 영향을 미치지 않는 것으로 사료되며, 열수용액의 성분 따라 주변모암에서 함량변화를 보이는 원소의 종류에 차이가 생긴다.

사 사

이 연구는 과학재단 지정 전략광물자원연구센터의 연구비로 수행되었다.

참고문헌

- 황인호, 전효택 (1994 a) 무극 함금석영맥광산 주변모암에서의 모암 변질과 원소들의 일차분산. 자원환경지질, v. 27, p. 395-404.
 황인호, 전효택 (1994 b) 무극 함금석영맥광산 화강암질모암에서의 원소들의 분산형태와 분산범위. 자원환경지질, v. 27, p. 451-458.
 Hogg, R.V. and Craig, A.T. (1970) Introduction to mathematical statistics. 4th. ed., Collier Macmillan Publishers, London, 438p.
 Le Maitre, R.W. (1989) A classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell Scientific Publications, 193p.
 Rose, A.W., Hawkes, H.E. and Webb, J.S. (1979) Geochemistry in mineral exploration. 2nd Ed., Academic Press, 657p.

1994년 11월 15일 원고접수

면체판에서 기원하지 않고 일부는 교질물질 등 점토구조 밖에서