

## 무극 함금석영맥광상 화강암질모암에서의 원소들의 분산형태와 분산범위

황인호\* · 전효택\*

### Primary Dispersion Patterns and Widths of Elements in Altered Granitic Wallrock around the Gold-bearing Quartz Veins at the Mugeug Mine

In Ho Hwang\* and Hyo Taek Chon\*

**ABSTRACT:** Geochemical studies on gold-bearing quartz veins and granitic wallrocks from the Mugeug mine were carried out in order to investigate primary dispersion patterns of elements and to quantify primary dispersion widths of elements with distance from the gold-bearing quartz veins. The best fitting model of dispersion pattern in altered wallrock around the gold-bearing quartz veins is an exponential function for Au, As, Sb, Na<sub>2</sub>O and Sr, and a quadratic function for CaO, K<sub>2</sub>O, MnO, Ba, Rb and Cs. The primary dispersion widths are 15~343 cm in the hanging wall, and 33~173 cm in the footwall. The width of primary dispersion in the hanging wall is twice as thick as that in the footwall mainly due to the thermal effect and volatile components. The primary dispersion width is increased as the increase of gold-bearing quartz vein width and contents of As and Sb in gold-bearing quartz veins, but is not related to Au content in gold-bearing quartz veins.

#### 서 론

함금석영맥 주변 변질모암에 나타나는 열수변질에 의한 광물학적 변화와 화학적 변화는 함금석영맥보다 훨씬 광범위하고 뚜렷하게 나타나며, 이러한 열수변질작용은 광석 침전과 관련된 용액의 특성을 나타내 줄 뿐만 아니라 광상탐사의 지시자로서 널리 인식되어져 왔다 (Rose and Burt, 1979). 열수용액과의 반응에 의해 주변모암에 나타나는 일차분산은 모암 특성과 열수용액의 특성에 따라 다양하게 나타나므로 열수용액이 통과하는 통로의 주변모암에 나타나는 일차분산에 대해서 정확히 이해함으로써 함금석영맥에 대한 화학적 자료와 유체포유물 자료 등을 함께 이용하여 광화용액의 화학 성분과 광물의 침전기구 등 광화작용과 관련된 보다 많은 정보를 얻을 수 있다.

저자들은 충북 음성군 금왕읍 용계리에 위치한 무극 함금석영맥 광산을 대상으로 시추코아에서 함금석영맥과 주변변질모암 및 비변질모암을 채취해 현미경 관찰과 화학분석을 하였다. 현미경 관찰과 화학분석 자료를 이용하여 함금석영맥 주변의 화강암질모암에서의 원소의 분산형태를 조사하고 분산범위를 정량화 함으로써 변질모암에서의 원소들의 일차분산 특성과 암석 지구화학탐사의 응용 가능성을 규명하였다.

#### 일반지질 및 광상개요

무극 광산 부근의 지질은 선캄브리아기의 화강편마암을 부정합으로 덮고 있는 백악기 퇴적층인 백야리층과 이를 관입한 백악기의 흑운모화강암이 거의 직선적인 경계를 보이고 있으며, 소규모의 석영반암이 관입하고 있다 (Fig. 1). 광상은 백악기 흑운모화강암 내의 열극을 충진한 수십 개조의 석영맥으로 구성되어 있으며, 이중 십여 조가 가행대상으로 주요 석영맥들의 주향은 대체로 N15°~20°W이고, 경사는 70°~80°NE이며, 석영맥폭은 0.2~1.0 m 내외로 연장은 1.5 km에 이른다. 자세한 지질 및 광상개요는 황인호, 전효택(1994)에 기술하였다.

#### 시료채취와 처리 및 분석

시료는 광업진흥공사에서 수행한 4개의 시추공에서 5개 단면을 대상으로 함금석영맥과 주변 변질화강암 및 비변질화강암을 채취해 연마편 제작과 화학분석에 사용하였다. 채취한 시료는 실험실로 가져와 수돗물과 증류수를 이용하여 깨끗이 씻은 다음 상온에서 건조시켰다. 석영맥 부분은 각 석영맥을 하나의 시료로 하여 연마편 제작과 화학분석에 사용하였으며, 함금석영맥 주변 변질 모암 시료는 함금석영맥과의 경계로부터 8~20 cm (실제 길이는 5~12.5 cm에 해당) 크기로 자른 다음 다시 길이 방향으로 반으로 잘라 반은 박편 제작 및 보관용으로 사용하고

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

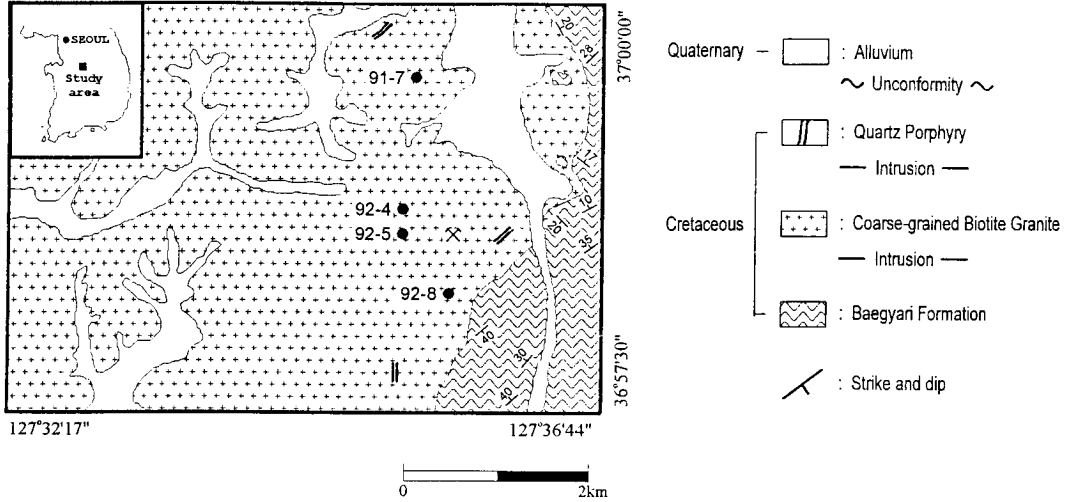


Fig. 1. Geological map in the vicinity of the Mugeug gold deposit showing locations of sampled drill holes.

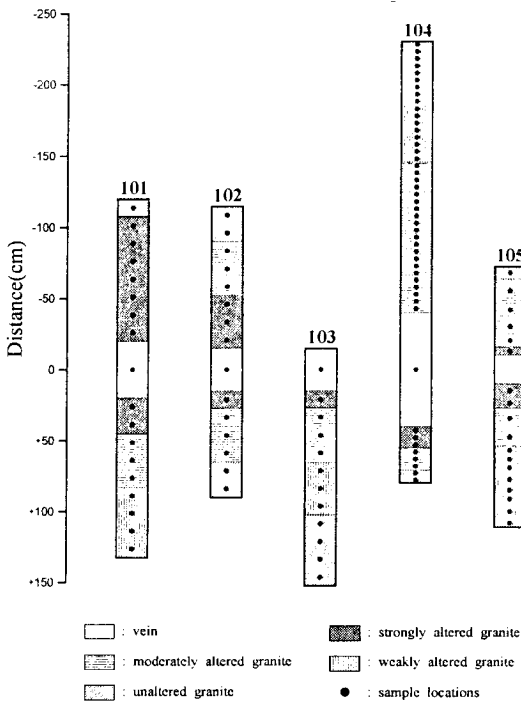


Fig. 2. Schematic representation of alteration zoning adjacent to quartz veins.

나머지 반은 -200 mesh로 분쇄하여 화학분석에 이용하였다.

함금석영맥 주변 모암시료를 광물의 변질정도와 화학성분을 이용하여 비변질모암, 약변질모암, 중간변질모암 및 강변질모암으로 구분하였는데, 각 단면의 함금석영맥 주변모암을 변질모

암별로 분류한 결과와 시료채취 위치는 Fig. 2에 표시하였다. Fig. 2에서 - 기호는 함금석영맥의 상반 쪽을 나타내며, + 기호는 함금석영맥의 하반 쪽을 나타낸다.

총 116개의 시료는 -200 mesh로 분쇄하여 캐나다의 ACT-LABS에 의뢰하여 중성자활성기기분석 (Instrumental Neutron Activation Analysis)과 유도분극아르곤플라스마분광분석 (ICP-AES)를 이용하여 분석하였다.

### 원소와 원소비의 분산형태와 분산범위

함금석영맥 주변 변질모암에서의 원소의 분산형태 및 변질작용에 의한 원소의 분산범위와 원소비의 분산특성이 나타나는 범위의 폭을 조사하고, 함금석영맥폭과 함금석영맥중의 원소함량에 따른 분산범위의 차이를 규명하기 위하여 함금석영맥과의 경계면으로부터의 거리 (cm)를  $x$ 값으로 하고 비변질모암중의 함량으로 표준화한 비를  $y$ 값으로 하여 회귀분석을 수행하였다. 또한 상반과 하반에서의 분산범위의 차이도 규명하였다. 회귀식은 함금석영맥 주변 변질모암에서 변화 형태를 보여주는 원소와 원소비를 대상으로 구하였다. 회귀식을 구하기 위해 사용한 시료의 개수 (6~110)중 최소개수 6을 고려하여 일차식 ( $y=ax+b$ ), 이차식 ( $y=ax^2+bx+c$ ), 그리고 지수함수 ( $y=e^{ax} \times b$ )를 이용하여 회귀식을 구했고, 결정계수 (coefficient of determination)  $R^2$ 이 큰 회귀식을 선택하였다. 동일 원소나 비에 대해서는 동일한 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  $R^2$ 과 시료개수

Table 1. The results of regression analysis for Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, As and Sr.

element	(Na <sub>2</sub> O)			Regression model				(exponential)
ID	a	b	c	R <sup>2</sup>	N	T-value	t-test	distance
H101	-8.37834E-04	0.058612		0.0293	8	0.426		-3385.9
F101	2.26101E-02	0.120726		0.8020	9	5.325	**	93.5
H102	4.16429E-02	0.010589		0.7353	8	4.083	**	109.2
F102	6.72433E-02	0.011039		0.8856	6	5.565	**	67.0
F103	2.79389E-02	0.051248		0.8495	11	7.128	**	106.3
H104	2.50371E-02	0.010898		0.8426	38	13.884	**	180.5
F104	9.13451E-02	0.011889		0.6608	8	3.419	*	48.5
H105	3.63041E-02	0.012818		0.7704	6	3.664		120.0
F105	3.11615E-02	0.024013		0.7960	12	6.246	**	119.7
HTOT	2.25697E-02	0.016591		0.7238	60	12.330	**	181.6
FTOT	2.90349E-02	0.045623		0.6885	46	9.862	**	106.3
TOT	2.17323E-02	0.032141		0.5087	106	10.376	**	158.2
element	(K <sub>2</sub> O)			Regression model				(polynomial(2nd))
ID	a	b	c	R <sup>2</sup>	N	T-value	t-test	distance
H101	-2.41525E-05	0.005345	1.73696	0.1723	8	1.118		317.4
F101	-1.22812E-04	0.008324	1.42216	0.4907	9	2.597		101.6
H102	-2.40495E-04	0.021161	1.32135	0.5892	8	2.934		101.2
F102	-3.70743E-04	0.017794	1.51170	0.5538	6	2.228		68.2
F103	-2.86508E-05	-0.004262	1.99720	0.8557	11	7.304	**	126.5
H104	-2.59997E-05	0.001554	1.74130	0.6708	38	8.565	**	201.4
F104	-2.37119E-03	0.081216	1.56540	0.8134	8	5.114	**	40.2
H105	-2.79875E-04	0.026929	1.54882	0.7371	6	3.349		113.5
F105	-1.02080E-04	0.015736	1.10864	0.2236	12	1.697		160.8
HTOT	-3.34053E-05	0.002684	1.74438	0.4760	60	7.258	**	194.8
FTOT	9.57067E-06	-0.006040	1.85717	0.2426	46	3.754	**	215.5
TOT	-1.25937E-05	-0.001312	1.79572	0.2462	106	5.829	**	204.6
element	(As)			Regression model				(exponential)
ID	a	b	c	R <sup>2</sup>	N	T-value	t-test	distance
H101	-2.79508E-02	48.5726		0.5083	9	2.690		138.9
F101	-4.97644E-02	48.7587		0.8778	10	7.582	**	78.1
H102	-7.04869E-02	264.8000		0.7770	9	4.938	**	79.1
F102	-1.02984E-01	362.4770		0.8503	7	5.330	**	57.2
F103	-2.60529E-02	4.9687		0.6350	12	4.171	**	61.5
H104	-1.57203E-02	14.5419		0.4471	39	5.470	**	170.3
F104	-2.00746E-01	1844.2400		0.8987	9	7.880	**	37.5
H105	-5.93336E-02	137.7520		0.7878	6	3.854	*	83.0
F105	-3.92750E-02	50.4895		0.7543	12	5.541	**	99.9
HTOT	-2.22234E-02	28.4242		0.4806	63	7.513	**	150.6
FTOT	-4.65834E-02	52.0511		0.6260	50	8.964	**	84.8
TOT	-2.69853E-02	26.6789		0.4456	110	9.316	**	121.7
element	(Sr)			Regression model				(exponential)
ID	a	b	c	R <sup>2</sup>	N	T-value	t-test	distance
H101	1.79041E-03	0.147237		0.0804	8	0.724		1070.0
F101	1.70935E-02	0.154904		0.7774	9	4.945	**	109.1
H102	2.16284E-02	0.117000		0.8337	8	5.485	**	99.2
F102	3.33439E-02	0.113997		0.9469	6	8.449	**	65.1
F103	1.48450E-02	0.192791		0.8775	11	8.030	**	110.9
HTOT	1.17094E-02	0.131251		0.2872	16	2.375		173.4
FTOT	1.64329E-02	0.177263		0.7728	26	9.034	**	105.3
TOT	1.59267E-02	0.148524		0.5368	42	6.809	**	119.7

ID; the ID of section. H; hanging wall. F; footwall. a, b and c; coefficients of regression equation. polynomial;  $ax^2+bx+c$ , exponential;  $e^x \times b$ . R<sup>2</sup>; 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.

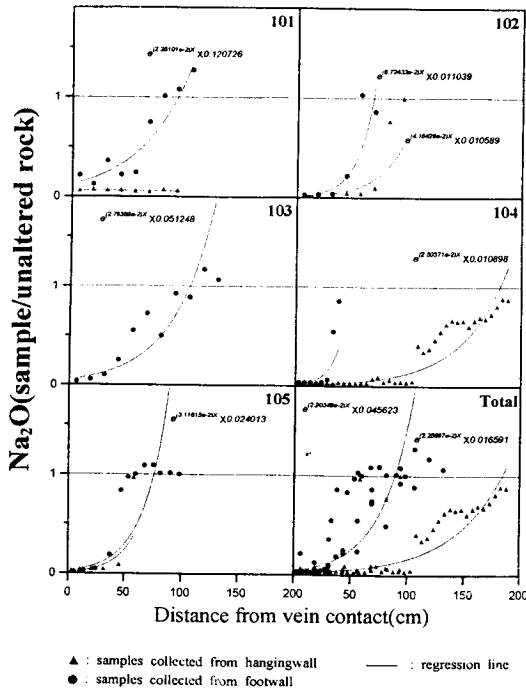


Fig. 3. Diagrams for the unaltered rock-normalized Na<sub>2</sub>O abundances against distance from vein contact.

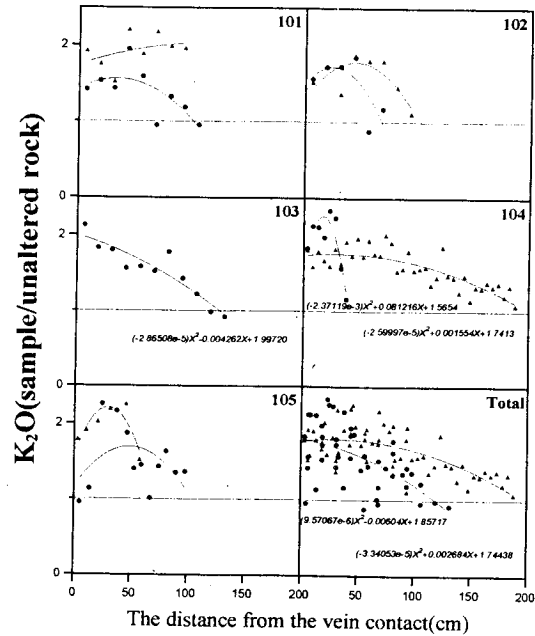


Fig. 4. Diagrams for the unaltered rock-normalized K<sub>2</sub>O abundances against distance from vein contact.

N을 이용하여  $T = R\sqrt{N-2} / \sqrt{1-R^2}$  (여기서 T는 N-2의 자유도를 가지는 t분포를 따른다, Hogg and Craig, 1970)를 구해 유의수준 1%와 0.5%로 통계적 검증을 수행하였다.

회귀식은 변질모양에서 함량변화를 보여주는 SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, CaO, K<sub>2</sub>O, MnO, Au, As, Cs, Rb, Sb, Ba, Sr 등의 원소와 건운모화지수, 변질지수, Rb/Ba, Rb/Sr, Rb/K<sub>2</sub>O, Cs/K<sub>2</sub>O, Sr/CaO 등을 대상으로 구했으며, 특히 Au, As, Sb의 경우에는 그 근원이 합금석영맥으로부터임이 확실하므로 합금석영맥에서의 함량도 같이 고려하여 회귀식을 구했다. 각각의 원소와 원소비에 대한 회귀식은 변질모양의 상반에서 분산범위의 차가 존재하는지 알아보기 위해 각 단면에 대해 상반과 하반을 분리하여 각각에 대한 회귀식을 구했으며, 모든 단면을 하나로 간주하여 상반과 하반을 분리하여 각각에 대한 회귀식도 구했다. 합금석영맥 주변 변질모양에서의 회귀식 형태는 Na<sub>2</sub>O, Au, As, Sb, Sr, Rb/Ba, Rb/Sr은 지수함수형태의 회귀식을 따르며, 나머지는 이차함수형태의 회귀식을 따른다. Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, As, Sr의 합금석영맥 주변모양에서의 분산 형태와 회귀선 및 회귀식은 Fig. 3~6에 나타내었으며, 회귀식 형태와 계수, 결정계수와 T값, 그리고 유의수준 1%와 0.5%로 통계적 검증을 수행한 결과, 원소의 분산범위의 폭은 Table 1에 나타내었다. 원소의 분산범위의 폭은 변질모양과 함량이 같아지는 (y=1) 거리 x cm로 구했으며, 원

소비의 분산특성이 나타나는 범위는 비변질모양중의 비 (황인호·전효택, 1994)를 고려하여 건운모화지수는 0.5, 주성분원소에 대한 변질지수는 0.35, 부성분원소에 대한 변질지수는 0.1, Rb/Sr의 경우에는 0.7이 되는 거리 x cm로 하였다.

유의수준 1%로 통계적 검증을 수행해 유의한 회귀식만을 이용한 원소와 원소비의 합금석영맥 인접부에서 합금석영맥 경계부로부터의 거리에 따른 분산형태와 분산범위는 다음과 같다.

SiO<sub>2</sub>는 합금석영맥 인접부에서 약간 상승하는 거의 직선에 가까운 이차함수형태의 회귀식을 따르며, 각 단면에서의 분산범위는 102 단면 하반에서 66 cm, 103 단면 하반은 57 cm, 104 단면 상반은 15 cm이며, 상반 전체로는 51 cm이다.

Na<sub>2</sub>O (Fig. 3)는 지수함수형태의 회귀식을 따르며, 분산범위는 101 단면 하반에서 94 cm, 102 단면 상반은 109 cm, 하반은 67 cm, 103 단면 하반은 106cm, 104 단면 상반은 181cm이며, 하반은 49cm, 105 단면 하반은 120 cm, 상반 전체로는 182 cm, 하반은 106 cm이다.

CaO는 지수함수형태의 회귀식을 따르며, 분산범위는 102 단면 상반에서 100 cm, 하반은 81 cm, 104 단면 상반은 67 cm이며, 105 단면 상반은 119 cm이다.

K<sub>2</sub>O (Fig. 4)는 이차함수형태의 회귀식을 따르며, 분산범위는 103 단면 하반에서 127 cm, 104 단면 상반은 201 cm이며, 하반은

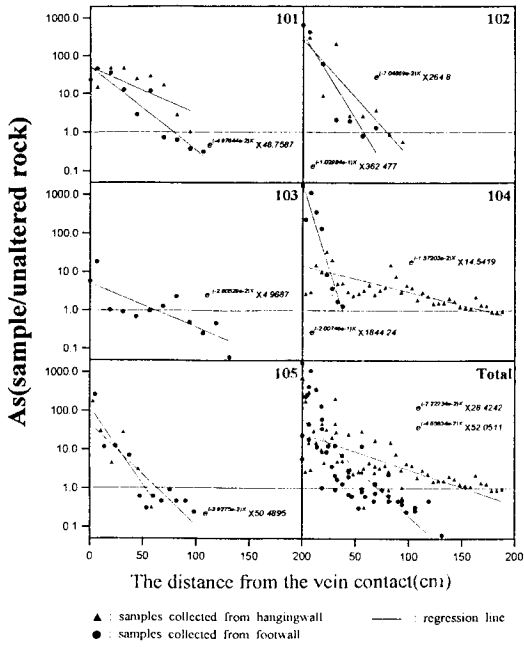


Fig. 5. Diagrams for the unaltered rock-normalized as abundances against distance from vein contact.

40 cm, 상반 전체로는 195 cm, 하반은 216 cm이다.

MnO는 중간변질모암에서 최고값을 보이는 이차함수형태의 회귀식을 따르며, 분산범위는 103 단면 하반에서 60 cm, 104 단면 상반은 22 cm이며, 하반은 37 cm, 105 단면 상반은 35 cm, 상반 전체로는 36 cm, 하반은 30 cm이다.

Au는 지수함수형태의 회귀식을 따른다. Au함량은 함금석영맥 인접부에서 바로 모암중의 함량과 같아져 As의 분산범위에 비해 좁으나 몇몇 회귀식의 결과는 As의 분산범위에 비해 넓게 나타나는 데 이는 Au에 대한 회귀식이 실제 상황과 잘 맞지 않은 결과로 해석된다. 분산범위는 101 단면 하반에서 93 cm, 102 단면 상반은 71 cm, 104 단면 하반은 33 cm, 105 단면 하반은 138 cm, 상반 전체로는 137 cm, 하반은 101 cm이다.

As (Fig. 5)는 지수함수형태의 회귀식을 따르며, 함금석영맥에 근접함에 따라 Au에 비해 약간 완만한 감소를 보여주며, 분산범위는 101 단면 하반에서 78 cm, 102 단면 상반은 79 cm, 하반은 57 cm, 103 단면 하반은 62 cm, 104 단면 상반은 170 cm이며, 하반은 38 cm, 105 단면 상반은 83 cm, 하반은 100 cm, 상반 전체로는 151 cm, 하반은 85 cm이다.

Ba는 이차함수형태의 회귀식을 따르며, 분산범위는 102 단면 상반에서 66 cm, 104 단면 상반은 172 cm이며, 하반 전체로는 48 cm이다.

Cs는 중간변질대 부근에서 최고값을 보이는 이차함수형태의 회귀식을 따르며, 분산범위는 101 단면 하반에서 48 cm, 102 단면

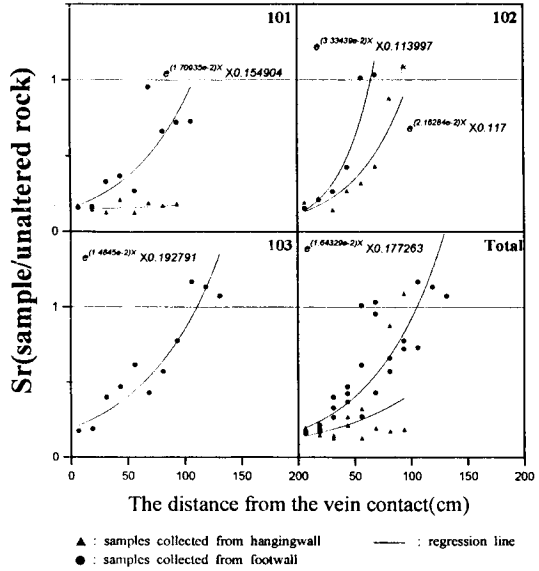


Fig. 6. Diagrams for the unaltered rock-normalized Sr abundances against distance from vein contact.

상반은 75 cm, 104 단면 상반은 159 cm이며, 하반은 35 cm, 105 단면 상반은 85 cm, 하반은 92 cm, 상반 전체로는 156 cm, 하반은 58 cm이다.

Rb는 점진적으로 감소하는 이차함수형태의 회귀식을 따르며, 분산범위는 101 단면 하반에서 96 cm, 102 단면 하반은 65 cm, 103 단면 하반은 124 cm, 104 단면 상반은 167 cm이며, 하반은 40 cm, 105 단면 상반은 89 cm, 하반은 95 cm, 상반 전체로는 165 cm, 하반은 111 cm이다.

Sb는 지수함수형태의 회귀식을 따르며, Au, As, Sb중 가장 완만한 감소 양상을 보여줘 분산범위가 제일 넓게 나타난다. 분산범위는 102 단면 하반에서 83 cm, 104 단면 상반은 343 cm이며, 하반은 56 cm, 105 단면 상반은 143 cm, 하반은 173 cm, 상반 전체로는 346 cm, 하반은 178 cm이다.

Sr (Fig. 6)은 지수함수형태의 회귀식을 따르며, 분산범위는 101 단면 하반에서 109 cm, 102 단면 상반은 99 cm, 하반은 65 cm, 103 단면 하반은 111 cm, 하반 전체로는 105 cm이다.

견운모화지수는 이차함수형태의 회귀식을 따르며, 분산특성이 나타나는 범위는 101 단면 하반에서 88 cm, 102 단면 상반은 92 cm, 하반은 64 cm, 103 단면 하반은 107 cm, 104 단면 상반은 180 cm이며, 하반은 39 cm, 105 단면 상반은 101 cm, 하반은 132 cm, 상반 전체로는 182 cm, 하반은 108 cm이다.

주성분원소에 대한 변질지수는 이차함수형태의 회귀식을 따르며, 분산특성이 나타나는 범위는 101 단면 하반에서 83 cm, 102 단면 상반은 89 cm, 하반은 61 cm, 103 단면 하반은 99 cm, 104 단면 하반은 40 cm, 105 단면 상반은 101 cm, 상반 전체로는

Table 2. Geochemical characteristics and primary dispersion scale(unit in cm) at the Mugeug mine.

Wallrocks	medium- to coarse-grained biotite granite		
Enrichment	Si <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, Rb, Cs, Au, As, Sb		
Depletion	Na <sub>2</sub> O, CaO, Sr, Ba		
Regression model	quadratic function	exponential function	
	CaO, K <sub>2</sub> O, MnO, Rb, Cs, Ba	Na <sub>2</sub> O, Sr, Au, As, Sb	
	hanging wall	footwall	
	SiO <sub>2</sub>	15	57~66
	Au	71	33~138
	As	79~170	38~100
	Cs	75~159	35~92
	Rb	89~167	40~124
	K <sub>2</sub> O	201	40~127
Scale of primary dispersion	Sb	143~343	56~173
	MnO	22~35	37~60
	Na <sub>2</sub> O	109~181	49~120
	CaO	67~119	81
	Ba	66~172	-
	Sr	99	65~111
	K <sub>2</sub> O/(K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O)	92~180	39~132
	Al(major)	89~101	40~99
	Al(trace)	87~175	36~93
	Rb/Sr	84	52~86

Al; alteration index. -; absent

175 cm, 하반은 98 cm이다.

부성분원소에 대한 변질지수는 이차함수형태의 회귀식을 따르며, 분산특성이 나타나는 범위는 101 단면 하반에서 88 cm, 102 단면 상반은 87 cm, 하반은 48 cm, 103 단면 하반은 93 cm, 104 단면 상반은 175 cm, 하반은 36 cm, 105 단면 상반은 99 cm, 하반은 85 cm, 하반 전체로는 70 cm이다.

Rb/Sr은 지수함수형태의 회귀식을 따르며, 분산특성이 나타나는 범위는 101 단면 하반에서 79 cm, 102 단면 상반은 84 cm, 하반은 52 cm, 103 단면 하반은 86 cm, 하반 전체로는 79 cm이다.

## 고찰

### 원소와 원소비의 분산형태와 분산범위

무극광산의 함금석영맥 주변변질모양에서 변질작용에 의해 변화를 보여주는 원소, 그리고 분산형태와 범위는 Table 2에 나타나 있다. 무극광산에서는 변질작용에 의해 함금석영맥에 근접함에 따라 SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, Au, As, Cs, Rb, Sb가 증가하고, Na<sub>2</sub>O, CaO, MnO, Ba, Sr이 감소하며, 견운모 등의 변질광물의 증가로 작열감량이 증가한다. 함금석영맥 주변 변질모양에서 원소의 분산양상은 Au, As, Sb, Na<sub>2</sub>O, Sr은 지수함수형태, CaO, K<sub>2</sub>O, MnO, Ba, Rb, Cs는 이차함수형태, SiO<sub>2</sub>는 거의 직선에 가까운 이차함수 형태의 분산양상을 보여준다.

지수함수형태의 증감을 보이는 Au, As, Sb, Na<sub>2</sub>O, Sr의 변질모양에서의 함량의 증감은 회귀식의 계수로 알 수 있다. 함금석영맥으로부터의 거리  $x$  앞의 계수의 부호는 함량의 증감을 나타내는데, +는 함금석영맥에 근접할수록 함량이 감소하는 것을 의미하고, -는 함금석영맥에 근접할수록 함량이 증가하는 것을 의미하며, 계수의 절대값은 함량변화의 정도를 나타내는 것으로 절대값이 클수록 함량의 급격한 변화가 일어남을 의미한다. 부화되는 원소인 Au, As, Sb의 함금석영맥 경계면으로부터의 거리  $x$  cm 앞의 계수는 Au는  $-0.132 \sim -0.019$ 이며, As는  $-0.103 \sim -0.016$ 이고, Sb는  $-0.086 \sim -0.010$ 로 함량 변화는 Au가 제일 급격하며 다음으로 As이고 Sb가 세 원소중 가장 함량의 변화가 적은, 즉 분산 범위가 가장 넓게 나타난다. 이는 Au의 부화가 주로 열수와 함께 열극을 통해 이동하다 침전함으로써 일어나는데 반해 As와 Sb는 이동성이 좋아 좀더 멀리 분산된 결과로 해석된다. 고갈되는 원소인 Na<sub>2</sub>O와 Sr의 계수는 Na<sub>2</sub>O는 0.091~0.023이고, Sr은 0.033~0.015로 함량 변화는 Na<sub>2</sub>O가 Sr에 비해 급격하며 분산범위는 Sr이 Na<sub>2</sub>O에 비해 넓다.

이차함수형태를 따르는 CaO, K<sub>2</sub>O, MnO, Ba, Rb, Cs는 회귀식의 계수만으로는 분산범위에 대해 추정할 수 없는데,  $y$  값이 1이 되는 함금석영맥 경계면으로부터의 거리  $x$  cm 값을 비교해 보면, 부화되는 원소의 분산범위는 K<sub>2</sub>O는 40~201 cm이고, Rb는 40~167 cm이며, Cs는 35~159 cm로 Cs, Rb, K<sub>2</sub>O 순으로 넓어지며, SiO<sub>2</sub>의 분산범위는 15~66 cm이다. 고갈되는 원소의 분산범위는 CaO는 67~119 cm이고, MnO는 22~60 cm이며, Ba는 66~172 cm로 MnO, Ba, CaO 순으로 넓어진다. 회귀식을 이용한 원소의 분산범위는 부화되는 원소의 경우에 SiO<sub>2</sub>, Au, Cs, Rb, As, K<sub>2</sub>O, Sb 순으로 넓어지며, 고갈되는 원소의 경우에는 MnO, Ba, CaO, Na<sub>2</sub>O, Sr 순으로 넓어진다.

변질모양에서의 원소비의 분산특성은 Rb/Sr과 Rb/Ba는 지수함수형태의 증감을 보이며, 견운모화지수, 변질지수, Rb/K<sub>2</sub>O, Cs/K<sub>2</sub>O, Sr/CaO는 이차함수형태의 증감을 보인다. 분산특성이 나타나는 범위는 견운모화지수는 39~180 cm이며, 주성분원소에 대한 변질지수는 40~101 cm이고, 미량원소에 대한 변질지수는 36~175 cm이며, Rb/Sr은 52~86 cm로 Rb/Sr, 주성분원소에 대한 변질지수, 미량원소에 대한 변질지수, 견운모화지수 순으로 분산특성이 넓게 나타난다.

### 상하반에서의 분산범위

무극광산 상하반에서의 주성분원소의 분산범위는 SiO<sub>2</sub>는 상반에서 15 cm, 하반에서 57~66 cm이며, Na<sub>2</sub>O는 상반에서 109~181 cm, 하반에서 49~120 cm이고, CaO는 상반에서 67~119 cm, 하반에서 81 cm이다. K<sub>2</sub>O는 상반에서 201 cm, 하반에서 40~127 cm이며, MnO는 상반에서 22~35 cm, 하반에서 37~60

cm이다. 미량원소의 경우에는 Au는 상반에서 71 cm, 하반에서 33~138 cm이며, As는 상반에서 79~170 cm, 하반에서 38~100 cm이다. Cs는 상반에서 75~159 cm, 하반에서 35~92 cm이며, Rb는 상반에서 89~167 cm, 하반에서 40~124 cm이고, Sb는 상반에서 143~343 cm, 하반에서 56~173 cm이며, Sr은 상반에서 99 cm, 하반에서 65~111 cm이다. 원소비의 분산특성이 나타나는 범위는 견운모화지수의 경우에 상반에서 92~180 cm, 하반에서 39~132 cm이고, 주성분원소에 대한 변질지수는 상반에서 89~101 cm, 하반에서 40~99 cm이며, 부성분원소에 대한 변질지수는 상반에서 87~175 cm, 하반에서 36~93 cm이며, Rb/Sr은 상반에서 84 cm, 하반에서 52~86 cm이다. 원소함량의 분산범위와 원소비의 분산특성이 나타나는 범위는 대체적으로 상반에서 하반에 비해 약 2배정도 넓게 나타난다. 이는 무극광산의 변질반응이 주로 열과 휘발성분에 의해 일어나므로 열과 휘발성분의 이동성에 관련된 결과로 해석된다.

**함금석영맥 맥폭과 맥종의 원소함량과 관련된 분산범위**

무극광산의 함금석영맥폭은 101 단면은 40 cm이며, 102 단면과 103 단면은 30 cm이고, 104 단면은 80 cm이며, 105 단면은 20 cm이다. 하반에서의 분산범위는 함금석영맥폭과 상관성이 없으며, 상반의 경우에는 함금석영맥폭이 클수록 대부분의 원소함량의 분산범위와 원소비의 분산특성이 나타나는 범위가 넓어진다. 4개 단면의 함금석영맥에 존재하는 주요 광석원소인 Au (ppb), As (ppm), Sb (ppm)의 함량은 각각 101 단면은 35, 150, 1.5이며, 102 단면은 264, 4200, 6.2이고, 103 단면은 3300, 37, 1.2이며, 104 단면은 730, 11000, 71이다. 그리고, 함금석영맥폭과 함금석영맥종의 함량을 고려하여 함량 (ppm)×맥폭 (cm)으로 가중함량 (weighted contents, ppm-cm)을 구해보면, 4개 단면에서의 Au, As, Sb의 가중함량은 각각 101 단면은 14, 6000, 60이며, 102 단면은 7.92, 126000, 186이고, 103 단면은 99, 1110, 36이며, 104 단면은 58.4, 880000, 5680이다. 함금석영맥종의 Au함량과 분산범위는 상관성이 존재하지 않으며, 함금석영맥종의 As와 Sb함량이 높을수록 일차분산범위가 넓으나 통계적인 신뢰성을 얻기 위해서는 좀 더 많은 분석이 수행되어야 한다.

**탐사에의 응용 가능성**

금광상의 암석지구화학탐사에는 일차분산 범위가 넓으며 이동도가 크고 분석이 용이한 SiO<sub>2</sub>, K, Na, CO<sub>2</sub>, S, H<sub>2</sub>O, Ag, As, Sb, Hg 등의 지시원소를 주로 사용하였으나 (Boyle, 1979), 최근에는 분석기기의 발달로 Au와 관련원소를 동시에 분석하여 탐사에 이용하고 있다. 따라서 함금석영맥 주변 모암에서 함량이

변화하는 원소를 규명하고 이들 원소의 부화나 감소양상과 분산범위를 규명하므로서 광상탐사에 응용할 수 있다. 본 연구 결과 금광상의 탐사에 이용할 수 있는 원소는 K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, CaO, MnO, Rb, Cs, Au, As, Sb, Ba, Sr 등이다. 원소비의 경우에는 K<sub>2</sub>O/(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O), 주성분 및 미량원소에 대한 변질지수, Rb/Sr이다.

변질모암에서의 분산형태는 K<sub>2</sub>O, MnO, Rb, Ba는 이차함수, Na<sub>2</sub>O, Sr, Au, As, Sb는 지수함수의 증감이 일어난다. 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 15cm에서 최대 343cm까지 다양하게 나타나는데, 대체적으로 함금석영맥폭의 2배 이상까지 나타난다.

이상의 결과로 볼 때 무극광산에서 함금석영맥의 탐사시에 이용할 수 있는 원소로는 분산범위가 비교적 넓고 분석이 용이한 K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, As, Sb, Rb, Sr 등이다. Rose 등(1979)의 경험법칙을 따르면 탐사시에 2개 이상의 시료에 의해서 지구화학적 이상값이 나타나도록 시료채취 간격을 정해야 하는데, 이들 원소의 분산범위가 38~343 cm이고, 함금석영맥폭이 20cm~100 cm이므로 시료채취 간격을 0.5~4 m로 하면 함금석영맥이나 변질모암의 이상대에서 적어도 2개 이상의 시료가 채취되므로 함금석영맥의 정확한 위치를 파악하는데 이용할 수 있다. 원소비의 경우에는 K<sub>2</sub>O/(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O), 주성분 및 미량원소에 대한 변질지수, Rb/Sr 등을 탐사에 이용할 수 있는데, 이들 비의 분산특성이 나타나는 범위가 36~180 cm이므로 시료채취 간격을 0.5~2.5 m로 하여 함금석영맥의 정확한 위치 파악을 위한 정밀탐사에 응용할 수 있다.

**결 론**

1. 무극광산 변질모암중의 Au, As, Sb, Na<sub>2</sub>O, Sr 등의 함량은 지수함수를 이용하여, CaO, K<sub>2</sub>O, MnO, Ba, Rb, Cs 등의 함량은 이차함수를 이용하여 함금석영맥으로부터의 거리에 관한 함수로서 수식화할 수 있으며, 이를 이용하여 함금석영맥 주변 변질모암에서 원소들의 일차 분산범위를 정량화할 수 있다.
2. 원소의 분산범위는 15~343 cm으로 원소에 따라 다양하게 나타난다.
3. 상반과 하반에서의 분산범위는 대체로 상반에서의 분산범위가 하반에서의 분산범위에 비해 약 2배정도 넓게 나타나는데, 이는 변질반응이 주로 열과 휘발성분에 의해 일어나므로 열과 휘발성분의 이동성에 관련된 결과로 해석된다.
4. 함금석영맥 폭에 따른 분산범위는 일부 원소에서 함금석영맥폭이 클수록 넓게 나타난다. 함금석영맥중의 As와 Sb함량과

분산범위 사이에는 상관성이 있는 것으로 판단되나 통계적 신뢰성을 얻기 위해서는 좀 더 많은 분석을 수행해야 하며, 합금석영맥중의 Au함량과 분산범위 사이에는 상관성이 없는데 이는 Au가 열수와 함께 이동하다가 침전되기 때문으로 해석된다.

5. 무극광산에서 지표 토양 탐사등으로 광화대를 인지한 후에 합금석영맥의 정확한 위치 파악을 위한 정밀탐사를 수행할 때 시료채취 간격은  $K_2O$ ,  $Na_2O$ , As, Sb, Rb, Sr 등의 원소를 이용할 경우에는 0.5~4 m이며,  $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ , 조성분 및 미량원소에 대한 변질지수, Rb/Sr 등의 원소비를 이용할 경우에는 0.5~2.5 m이다.

## 사 사

이 연구는 과학재단 지정 전략광물자원연구센터의 연구비로

수행되었다.

## 참고문헌

- 황인호, 전효택 (1994) 무극 합금석영맥광상 주변모암에서의 모암변질과 원소들의 일차분산. 자원환경지질, v. 27, p. 395-404.
- Boyle, R.W. (1979) The geochemistry of gold and its deposits. Geol. Surv. Can. Bull. 280, 584p.
- Hogg, R.V. and Craig, A.T. (1970) Introduction to mathematical statistics. 4th. ed., Collier Macmillan Publishers, London, 438p.
- Rose, A.W. and Burt, D.M. (1979) Hydrothermal alteration; in Barnes, H.L. (ed.), Geochemistry of hydrothermal ore deposits. 2nd Ed., John Wiley and Sons, New York, p. 173-235.

1994년 9월 3일 원고접수