

## 밀양지역 납석광상 화산암질 모암에서의 원소들의 지구화학적 분산

오대균\* · 전효택\*\*

### Geochemical Dispersion of Elements in Volcanic Wallrocks of Pyrophyllite Deposits in Milyang Area, Kyeongnam Province

Dae-Gyun Oh\* and Hyo-Taek Chon\*\*

**ABSTRACT:** Mineralogical and geochemical studies on some pyrophyllite deposits in Milyang area, Kyeongnam Province (Milyang and Sungjin mine) were carried out in order to investigate dispersion patterns of chemical elements in altered volcanic wallrocks, and to interpret genetic environments of the pyrophyllite deposits. Cretaceous andesitic and tuffaceous rocks, and pyrophyllite ore specimens were collected from the dumps and drilling cores. Andesitic wallrocks were grouped as unaltered and altered rocks in the order of pyrophyllitization. Vertical dispersion patterns and relative mobilities of chemical elements in volcanic wallrocks were discussed.

Geochemical environment in the Milyang area is characterized by the occurrence of boron minerals such as dumortierite coexisting with pyrophyllite ores, and tourmaline in granitic rocks. Unaltered andesitic rocks are mainly composed of plagioclase, pyroxene and hornblende, and were propylitized and saussuritized. Altered andesitic rocks are bleached and consist of quartz, sericite, pyrophyllite, kaolinite, chlorite and disseminated pyrite. Pyrophyllite ores are mainly composed of quartz, pyrophyllite, dumortierite, disseminated pyrite and some diaspore. Enrichment of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , LOI (loss on ignition), As and Cr, and depletion of  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , CaO, MgO and total Fe are characteristic during alteration process. The REE patterns show that the pyrophyllite deposits could be originated from the continental margin volcanics. The  $(\text{La}/\text{Lu})_n$  ratios of the pyrophyllite ores increase from 4.2~23.2 to 2.67~128.8 owing to strong acidic hydrothermal alteration.

Vertical dispersion patterns of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , CaO, MgO,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (total Fe), As, Au, Sb, Cr and Sr in the wallrocks show the location of orebodies. Particularly dispersion patterns of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and Cr indicate the extension of orebodies. Anomalous distribution of Au, As and Sb in wallrocks shows potential for gold occurrence below the pyrophyllite deposits. Judging from the relative mobilities of elements in wallrocks,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  could be added from hydrothermal solution, and the silicified zone be formed from the excess of  $\text{SiO}_2$ .

## 서 론

경상남도 밀양지역에는 백악기 화산암질암이 넓게 분포하고 이들은 주로 백악기 안산암질암 및 유문암질암으로 구성된다. 밀양지역 납석광상은 안산암질암 및 이들에 협재하고 있는 안산암질 응회암에 배태되며 주변에 인접하며 화산암류를 후기에 관입하고 있는 화강암질암에 의해 열수변질을 받아서 납석 등의 고품위 요업광물 자원 광상을 형성하고 있다 (오대균 등, 1992; Kim and Hwang, 1988; 상기남, 1986; 차문성 등, 1972).

그러나 납석 등 요업광물 광상과 관련한 변질대에서의 미량원소의 분포특징 및 분산패턴에 관한 연구는 제안단계이며 (상기남, 1986) 납석광상의 지구화학적 특성 및 탐광지침의 도출에 관해서는 정영욱 (1991), 정영욱, 전효택 (1989) 등의 연구가 있다.

본 연구에서는 경남 밀양 및 송진납석광상을 대상으로 광상을 배태하는 안산암질 화산암류 그리고 인근의 공간적으로 관련된 화강암류와 특히 밀양광산의 12개 시추공에서 화산암질 암석 및 광석 시료를 체계적으로 채취하였다. 화산암질 암석을 납석화 정도에 따라 프로필라이트화 변질되었으나 납석을 발견하기 어려운 비변질 안산암질암, 상당한 정도로 납석화가 진행된 변질 안산암질암으로 분류하고 현장에서 가행대상으로 하는 납석광석과 함께 화학분석을 실시하였다. 화학분석 자료들로부터 이 지역

\* 전라광물자원 연구센터 (Center for Mineral Resources Research, Korea Univ., Seoul 136-701, Korea)

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

변질대의 지구화학적 특징, 변질에 따른 원소들의 상대적 이동성 및 시추공을 따른 원소들의 수직적 분산양상을 고찰하였다.

## 지질 및 광상 개요

밀양남석광상 및 인근 지역은 밀양도폭 (Kim and Hwang, 1988), 유천도폭 (Hong and Choi, 1988), 청도도폭 (Kim and Park, 1964) 및 영산도폭 (Kim and Lee, 1964)에 해당되며 밀양지역은 크게 진동층, 비현정질 안산암, 밀양안산암, 정각산층 및 범도리 안산암으로 구성되는 주사산안산암질암이 하부에, 이에 정합적으로 석영안산암, 유문암질 응회암 및 유문암으로 구성되는 운문사유문암질암이 상부에 분포한다. 이들은 후에 화강섬록암에서 화강암에 이르는 분화상을 보이는 화강암류에 관입당한다. 안산암질암 및 화강암질암은 AFM도에서 calc-alkaline 계열임을 보여준다 (오대균 등, 1992).

밀양광산은 경남 밀양시에 위치하고 납석, 석영 및 다이아스포어 (diaspore) 등이 주구성 광물이며 함붕소광물인 듀머티에라이트 (dumortierite)가 산출되고 점토화대에서 카오리나이트 (kaolinite)가 산출된다. 시추코아 시료로부터 납석광화대 및 주변 화산암질 모암에서는 황철석이 세립의 산점상으로 나타난다.

밀양광산에서 연구대상인 12개의 시추공 (시추공 위치는 Fig. 6에 도시됨)에 대한 코아시료의 검층결과는 다음과 같다.

86-1호공은 표토 하부로 응회암이 나타나며 26.5 m~46 m에서 농집된 황철석을 수반하는 변질대 및 변질 안산암질암과 응회암질암으로 구성되며 46 m~54.5 m에서 광체 및 강변질대가 나타난다. 이하 89 m까지 응회암질암으로, 89~100 m까지 안산암으로 구성된다.

86-2호공은 100 m 전구간에 응회암이 분포하고 표토 하부로부터 32 m까지 광체에 변질암이 협재한다. 73.5~80.5 m 구간에서 안산암질 각력을 포함하는 응회암질암으로 구성되며 기타 구간은 응회암질 및 변질 응회암질암으로 구성된다.

86-3호공은 100 m 구간에 대해 표토층 하부로 13 m까지 안산암질암으로 구성되며 13~53 m에는 광체에 강변질암이 협재하고 67.5~80 m 구간에서 광체가 나타나며 85 m 이하의 변질 응회암으로 구성된다.

89-1호공은 100 m 구간에 대해 14 m까지 변질 반정질 안산암으로 구성되고 36.6 m까지 광체로 구성된다. 75 m까지 다양한 변질정도를 보이는 안산암질암 및 응회암질암이 교대로 나타나고 75~91 m 구간은 응회암질암이

변질을 받았다. 91~96 m는 변질 안산암질암, 그리고 100 m까지 안산암으로 구성된다.

89-2호공은 100 m 구간에 대해 12 m까지 안산암질암, 12~14.5 m에 응회암이 나타나며 45.6 m까지 광체 및 강변질대가 나타난다. 45.6~65 m 구간에서는 응회암질암이, 65~100 m 구간은 안산암질암이 다양한 변질정도를 보인다.

89-3호공은 표토 이하 50.2 m까지 안산암 및 변질 안산암으로 구성되고 117~124 m는 변질 안산암으로, 124~150 m 구간은 변질 응회암질암으로 구성된다. 광체는 50.2~91 m 구간에서 3매의 광체가 변질 응회암과 교대로 나타나며 하부에 1매가 나타난다.

89-4호공은 150 m 구간에서 표토 하부로부터 69.5 m까지 안산암 및 변질 안산암질암으로 구성되며 이하 150 m까지 다양한 변질을 보이는 응회암으로 구성된다. 광체는 73~92 m 구간에서 3매가 강변질암과 함께 부존한다.

90-1호공은 120 m 전구간에 걸쳐서 응회암이 분포하며 6개 구간에 걸쳐서 저급의 광체가 협재한다.

90-2호공에서는 100 m 구간에 걸쳐서 응회암이 분포하며 54~61 m 구간에서 광체와 변질암이 교대로 나타나고 61~77 m 구간은 광체로 구성되며 이하 응회암질암으로 구성된다.

90-3호공에서는 0~16 m에서 반정질 안산암, 이하 변질 반정질 안산암으로 구성되며 85.5~137 m까지 광체와 변질 응회암질암이 일부 나타나며 150 m까지 비현정질 안산암으로 구성된다.

90-4호공에서는 45 m까지 반정질 및 비현정질 안산암이 나타나고 45~57 m 구간은 비현정질 안산암으로 구성된다. 62 m부터 95 m까지 광체가 수반하며 95~106 m 구간은 비현정질 안산암으로 구성되고 이후 130 m까지 변질 응회암질암으로 구성된다.

90-5호공에서는 0~34 m 구간에서 반상 암산암이 분포하고 57.5 m까지 장식 반응을 보이는 회색 각력을 포함하는 응회암질암이 강한 변질을 받고 있다. 80 m까지는 비현정질 및 반정질 안산암이 교대로 나타나며 101 m까지는 심한 파쇄대에서 황철석이 급증하고 강한 변질을 받고 있다. 이후 129 m까지는 광화대로 구성되며 150 m까지 비현정질 안산암으로 구성된다.

송진광산에는 석영안산암질 응회암이 분포하고 시추공에서는 반정질 안산암이 확인된다. 주구성광물은 석영, 견운모 및 녹니석 등이며 채굴적에서는 열수활동의 흔적인 석영맥이 발견되고 변질암에서는 미립의 자형 황철석이 집합상으로 산출된다.

송진 89-3호공은 100 m 시추구간에서 반상안산암, 각력질 안산암, 중성 및 염기성 암맥으로 구성되며 규화 및

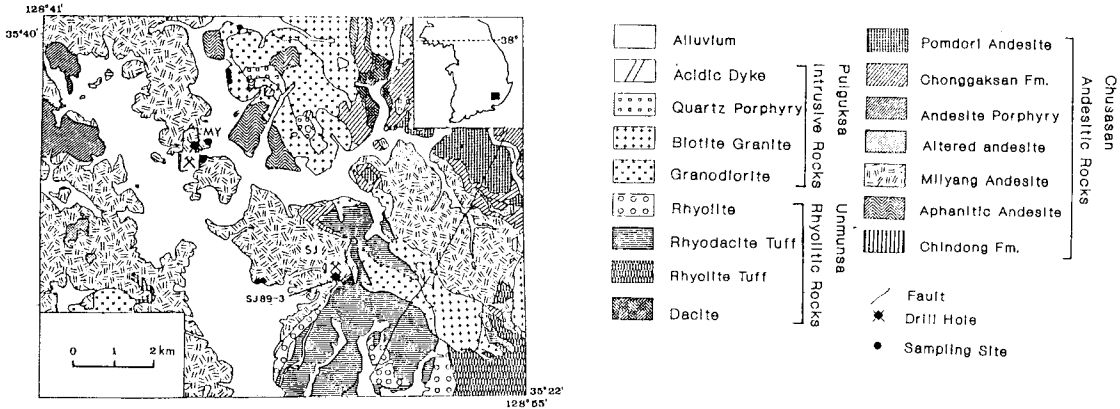


Fig. 1. Geologic map of Milyang area showing the location of Milyang mine (MY) and Sungjin mine (SJ) (modified from Kim and Hwang, 1988; Kim and Park, 1964; Kim and Lee, 1964; Hong and Choi, 1988).

황철석화 작용을 받았다. 광체는 69.5~74.5 m에 부존한다 (대한광업진흥공사, 1990).

**시료의 채취, 분류, 광물조성 및 화학분석**

**시료채취 및 화학분석**

밀양납석광산에서 원소들의 수직적 변질대와 지구화학적 특성을 규명하기 위하여 밀양 86-1, 86-2, 86-3, 89-1, 89-2, 90-1, 90-2, 90-3, 90-4, 90-5호공의 10개공 (시료 수=72)을 대상으로 심도별로 시료를 채취하였다.

시료들은 암종별로 암석박편을 제작하고 육안 및 현미경관찰을 통하여 비변질암류와 변질암류 및 납석광석으로 구분하여 -200 mesh로 화학분석용, X-선 회절분석용으로 사용하였다. 화학분석은 각 암종별로 29개 시료에 대해 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, MgO, MnO, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 등이 ICAP에 의해 분석되었다. 또한 캐나다 ACTLAB에 의뢰하여 Na<sub>2</sub>O, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (total Fe), Ag, As, Au, Ba, Br, Co, Cr, Cs, Hf, Hg, Ir, Mo, Ni, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Sn, Ta, Th, U, W, Zn 및 희토류원소인 La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu 등 35개 원소가 중성자활성분석 (INAA)에 의해 분석되었다. 그리고 Zr은 납석광석에서 7개, 비변질 안산암질암에서 16개, 비변질 안산암질암에서 30개의 시료에 대해 분석되었다.

분석결과는 밀양지역의 기존 자료 (오대균 등, 1992; 총 49개 성분 및 원소가 분석됨)와 함께 처리하여 Table 1에 요약하였다. 각 암종별로 주성분 및 미량원소의 경우 분석된 시료수가 달라서 납석광석의 경우 7~20개, 변질 안산암질암의 경우 24~49개, 비변질 안산암질암의 경우

36~40개의 시료가 포함되었다. 분석대상 원소 가운데 Be, Br, Cu, Hg, Ir, Mo, Nb, Pb, Se, Ta, V, W 등은 최저 측정한계 이하인 시료가 많아서 Table 1에 수록되지 않았다. 또한 Ag, Au, Ni 등은 일부 시료가 최저측정한계 이하를 나타내었다.

**비변질 안산암질암 및 응회암질암**

비변질 안산암질암은 비현정질 안산암과 반정질 안산암으로 구분된다. 비현정질 안산암은 암회색 내지 회색을 띠며 사장석의 미반정이 발견되고 프로필라이트화 (propylitization)의 영향으로 녹회색을 띠기도 한다. 현미경하에서는 사장석과 휘석의 반정 및 각섬석, 정장석, 석영 등이 나타나며 유리질 및 녹니석과 불투명광물들이 석기를 이룬다. 사장석을 교대하고 있는 방해석은 소쉬라이트화 (saussuritization)의 영향으로 판단된다. 간혹 석영이 충전하고 철산화물이 나타나는 미세열극도 나타난다.

반정질 안산암은 담녹색을 띠는 1~3 mm의 사장석 반정과 녹회색의 석기부분이 프로필라이트화 변질을 보여 준다. 때로 반정질 안산암의 각력을 포함하며 각력들의 변질정도는 낮다. 현미경하에서는 사장석, 휘석, 각섬석 등이 반정으로 나타나고 석기에는 사장석의 미정들이 포함되어 최종 충전물질은 유리질 및 녹니석과 철산화물 등의 비현정질 물질이다.

응회암질암은 안산암질 라필리응회암이며 대체로 비현정질 안산암과 반정질 안산암의 경계부에 협재하고 수 cm 정도의 안산암질 각력을 상당량 포함한다. 각력 중의 사장석은 방해석, 녹염석으로 변질되었고 경계부에는 철산화물이 나타나며 석기부분도 심하게 녹니석화 되었다.

Table 1. Chemical composition of pyrophyllite ores, altered andesitic rocks and unaltered andesitic rocks from Milyang area.

Type Element	Pyrophyllite ore		Altered andesitic rock		Unaltered andesitic rock	
	Median	Range	Median	Range	Median	Range
SiO <sub>2</sub> *	64.14	49.17~73.50	64.50	51.52~76.89	61.89	42.40~76.44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	22.89	11.72~30.08	17.30	10.83~34.48	16.86	10.89~25.16
K <sub>2</sub> O*	0.58	0.04~ 0.70	1.57	0.08~ 4.78	2.02	0.69~ 4.03
Na <sub>2</sub> O*	0.13	0.04~ 0.36	0.34	0.04~ 4.5	3.0	0.39~ 5.79
CaO*	0.38	<0.01~ 0.61	0.30	<0.03~ 7.0	3.09	<0.1~ 7.54
MgO*	0.04	0.01~ 0.17	0.75	0.08~ 1.91	1.16	0.05~ 2.85
MnO*	0.01	0.01~ 0.02	0.03	0.01~ 0.19	0.08	0.01~ 0.29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	3.29	0.14~ 7.9	8.57	0.64~30.72	5.96	2.86~19.01
TiO <sub>2</sub> *	0.88	0.02~ 1.61	1.09	0.4 ~1.96	0.83	0.67~ 1.91
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *	0.40	0.04~ 0.48	0.33	0.04~ 0.67	0.24	0.1~ 0.52
LOI*	5.87	4.18~11.54	3.05	0.91~ 9.68	3.32	1.07~11.52
Au**	<5	<5~ 31	<5	<5~ 14	<5	<5~ 9
Ag	<5.0	<5.0~ 0.2	<5.0	<5.0~ 6.0	<5.0	<5.0~ 0.8
As	39	10~ 290	24.5	4~ 1100	20	4~ 76
Ba	168	<100~ 1138	55	<100~ 2000	566	<100~ 834
Co	5	<5~ 79	29.5	<5~ 130	19	<5~ 120
Cr	150	65~ 390	105	8~ 260	70	40~ 120
Cs	0.5	<0.02~ 3.4	13.5	<0.02~470.0	11.0	1.4~ 99.0
Hf	7.0	3.0~ 13.0	6.0	2.0~ 10.0	5.0	3.6~ 8.0
Ni	<50	<50~ 140	88	<50~ 200	<50	<50~ 60
Rb	<30	<30~ 34	48.5	<30~ 250	74	<30~ 160
Sb	3.0	0.9~ 22.0	2.5	0.7~ 15.0	2.0	1.0~ 8.3
Sc	15.0	5.2~ 32.0	20.0	7.6~ 37.0	14.0	9.7~ 25.0
Sr*	0.2	<0.1~ 1.41	0.1	<0.1~ 0.41	0.1	0.024~ 0.16
Th	15.0	7.3~ 49.0	13.0	5.3~ 23.0	12.0	6.7~ 23.0
U	3.1	0.5~ 9.8	3.0	0.7~ 9.0	3.0	1.3~ 6.0
Y	8.0	<1.0~ 44.0	1.0	<1.0~ 51.0	16.0	<1.0~ 30.0
Zn	30	<50~ 100	75.5	<50~ 1100	70	<50~ 210
Zr	161	65~ 295	222	111~ 391	185	94~ 222
La	42	22~ 141	31.5	9~ 58	30	15~ 55
Ce	103	45~ 281	70.5	25~ 120	64	30~ 109
Nd	56	28~ 114	31.5	10~ 62	28	13~ 177
Sm	9.9	2.2~ 25.0	6.6	2.1~ 11.0	5.1	2.5~ 8.8
Eu	2.0	0.4~ 6.7	1.5	0.5~ 2.7	1.3	0.7~ 2.2
Tb	0.5	<0.5~ 2.8	0.8	<0.5~ 1.8	0.5	<0.5~ 1.3
Yb	0.8	0.3~ 9.5	2.2	0.4~ 4.9	1.6	0.9~ 2.3
Lu	0.1	0.06~ 1.39	0.38	0.07~ 0.75	0.3	0.19~ 0.4

Unit in ppm, \*, unit in wt%, and \*\*, unit in ppb.

### 변질 안산암질암 및 응회암질암

보통 회색을 띠며 프로필라이트화에 의해 녹색을 띠기도 한다. 다양한 정도의 납석화를 보이는 변질암들은 미립의 석영, 견운모, 납석, 녹니석 등으로 구성되고 기저에는 황철석, 카오리나이트 등이 포함된다 (Table 2, Fig. 2A and B). 미세 파쇄면을 많이 포함할수록 세립의 황철석이 산점상으로 잘 나타나고 황철석이 농집되기도 한다. 상당히 납석화된 시료는 납질감을 보이고 기공이 발달되었으며 듀머티에라이트가 수반하기도 하고 황철석의

풍화로 인하여 담황색을 띠기도 한다.

변질 응회암질암은 담녹색, 담갈색 등으로 심하게 탈색되었고 석영, 견운모, 납석, 녹니석 등으로 구성되며 카오리나이트를 포함하고 산점상의 황철석을 수반한다. 기공이 발달하고 철이 산화되어 황색을 띠기도 한다.

### 납석광석

납석광석은 좋은 납질감과 담회색 내지 담녹색을 띠며 황철석의 풍화로 담황색을 띠기도 한다. 주로 납석과 석

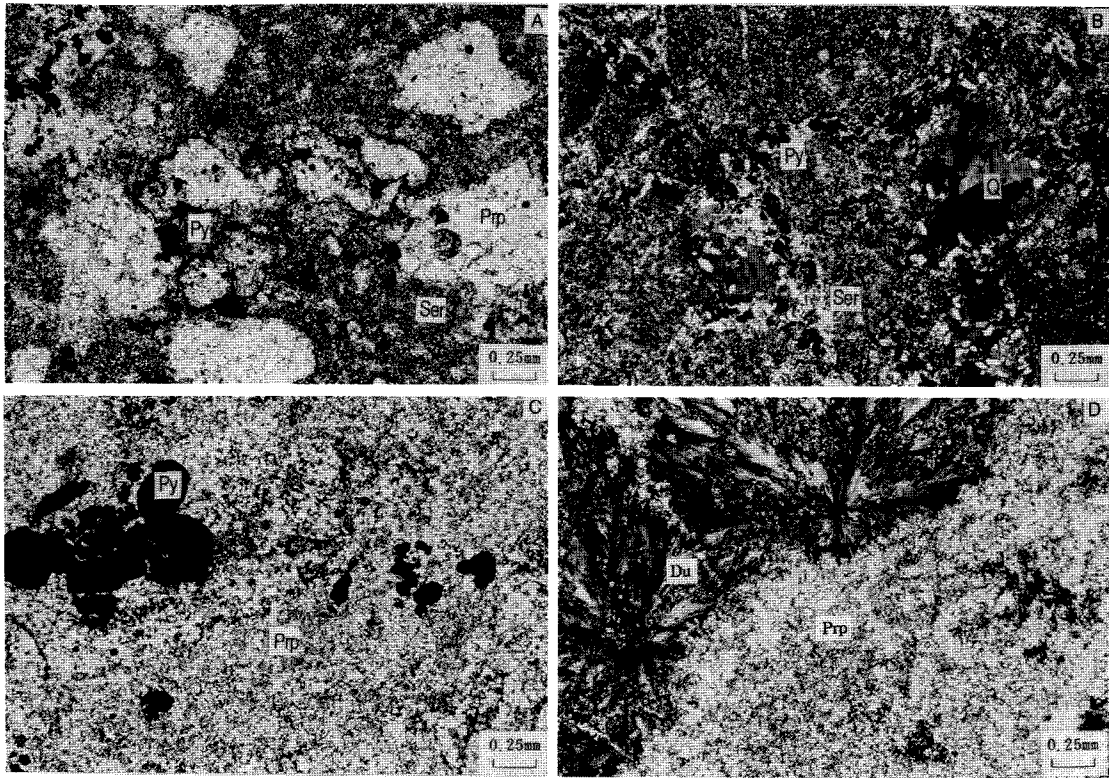


Fig. 2. Microphotographs of altered andesitic rocks showing sericitization and pyrophyllitization (A), silicification (B), pyrophyllite coexisting with pyrite (C), and dumortierite (D) from Milyang area (crossed nicols). Q; quartz, Ser; sericite, Prp; pyrophyllite, Py; pyrite, and Du; dumortierite

Table 2. Mineralogical composition of pyrophyllite ores (1), altered andesitic rocks (2), and unaltered andesitic rocks (3) from Milyang area.

Sample No.	Type	Mineralogical composition
89-3-30	3	Quartz, Sericite, Kaolinite, Chlorite, Feldspar
89-3-40	2	Quartz, Sericite, Kaolinite, Feldspar
89-3-59.5	1	Quartz, Pyrophyllite, Kaolinite
89-3-63	1	Pyrophyllite, Kaolinite, Quartz
89-3-72	1	Pyrophyllite, Quartz
89-4-19	3	Quartz, Sericite
89-4-73	1	Pyrophyllite, Quartz
90-1-107.5	2	Pyrophyllite, Quartz
90-2-69.5	1	Pyrophyllite, Chlorite, Kaolinite, Smectite
90-3-110	1	Pyrophyllite, Kaolinite, Smectite
90-4-67.5	1	Pyrophyllite, Quartz, Smectite
90-4-93	2	Pyrophyllite, Quartz, Chlorite, Kaolinite
90-5-120	1	Quartz, Pyrophyllite

영으로 구성되며 변질 이전 광물들의 반정이나 각력의 형태가 가상으로 잔존하기도 하고 심한 탈색과 기공을

동반한다. 대체로 미세한 파쇄면이 잘 발달되며, 세립의 황철석이 산점상으로 수반되거나 파쇄면을 따라 농집되어 있다 (Table 2, Fig. 2C).

광체에 수반하는 듀머티에라이트는 청색 및 담청색을 띠며 현미경하에서 방사상의 집합체로 청록색의 다색성을 보인다 (Fig. 2D). 밀양지역의 납석광석에는 듀머티에라이트가 수반하고 인근의 흑운모화강암에서는 전기석이 발견되고 있어서 (Hong and Choi, 1988) 밀양지역의 납석광상을 배태하는 안산암질 모암과 이들을 관입한 화강암 질암은 지구화학적으로 붕소(B)가 풍부한 환경에서 형성되었을 것이다. 다이아스포어는 보통 직경 5 cm 정도의 구형 및 타원체로 광체에 수반하며 벽개가 관찰되기도 한다.

### 안산암질암 및 납석광석의 지구화학적 특성

#### 주성분원소

납석이 형성되면서 증가하는 작열감량에 대해 주성분

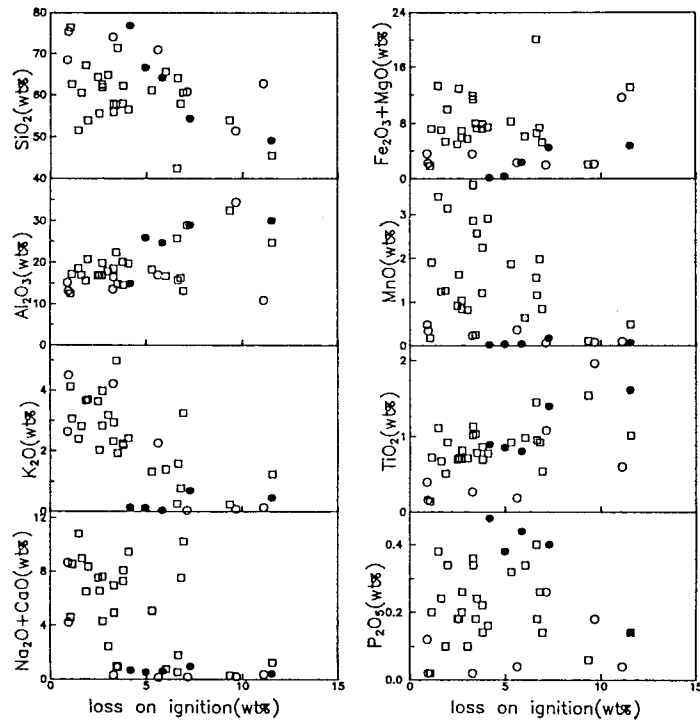


Fig. 3. Diagrams for major elements against LOI contents. Solid circle; pyrophyllite ores, open circle; altered andesitic rocks, and open rectangle; unaltered andesitic rocks.

원소를 도시하면,  $\text{SiO}_2$  함량은 규화작용의 영향으로 변질 안산암질암 및 납석광석에서 3% 정도 증가하였고  $\text{Al}_2\text{O}_3$  함량은 변질 안산암질암 및 납석광석이 되면서 6% 정도 현저하게 증가하였다 (Fig. 3).

$\text{K}_2\text{O}$  함량은 비변질 안산암질암의 2%에서 변질 안산암질암의 1.6% 및 납석광석에서는 0.58%로 납석광석에서 감소한 것은 변질 안산암질암에서 견운모등에 고정되었던 것으로 판단된다 (Fig. 3).

$\text{Na}_2\text{O}$  및  $\text{CaO}$  함량이 비변질 안산암질암의 3% 및 3.75% 정도에서 변질 안산암질암 및 납석광석에서는 대부분의 함량이 용탈된 것은 안산암의 주구성광물인 장석이 분해되면서 용탈된 때문으로 판단된다 (Fig. 3).

$\text{MgO}$  함량이 비변질 안산암질암의 1.16%로부터 대부분 감소하고 Fe 함량이 6% 정도에서 3% 정도로 감소하는 것은 휘석 등 유색광물의 변질에 따른 것으로 보인다. 이때 Fe는 황철석에 고정되어 변질암에서는 다른 원소들의 감소로 상대적으로 8.5%까지 약하게 증가하였다가 납석광석에서는 다시 3%로 감소한다. MnO 함량은 0.1% 이하로 매우 낮으며,  $\text{P}_2\text{O}_5$  함량은 비변질 안산암질암, 변질 안산암질암 및 납석광석에서 각각 0.24%, 0.33%, 0.4%로 매우 약하게 증가한다 (Fig. 3).

#### 미량원소

Au 함량은 비변질안산암질암의 5 ppb에 비해 납석광석에서는 최대 31 ppb까지 증가하며 Au의 지각평균함량을 넘는 시료수가 증가하여 납석 광상의 산성변질대 하부에 대한 Au 부화작용을 추정할 수 있게 한다.

As, Cr, Hf, Sr 등은 각각 비변질 안산암질암의 20 ppm, 70 ppm, 5 ppm 및 0.1%에서 납석광석에서는 39 ppm, 150 ppm, 7 ppm, 0.2%로 증가하였다. Ba와 V는 비변질암에서는 각각 566 ppm, 100 ppm에서 변질암에서는 55 ppm, 46 ppm으로 감소하였다가 납석광석에서는 168 ppm, 240 ppm으로 증가하였다. Rb은 비변질암의 74 ppm에서 납석광석에서는 30 ppm 이하로 감소하였다.

#### 희토류원소

밀양지역 비변질 안산암질암의 REE 분산경향은 LREE가 약하게 부화되고 약한 부의 Eu 이상을 나타내어 대륙연변부에서 생성된 안산암의 분산경향을 보인다. 화강암질암에서는 안산암질암에서와 비슷하고 약한 부의 Eu 이상과 거의 평탄한 REE의 분포양상을 보여준다. 안산

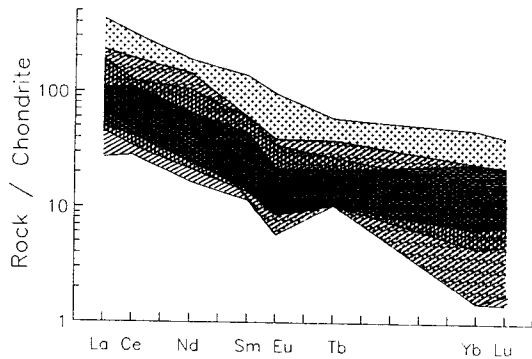


Fig. 4. REE patterns of unaltered andesitic rocks, altered andesitic rocks, pyrophyllite ores and granitic rocks from Milyang area (normalized by the data of askin et al., 1968). Vertical line; unaltered andesitic rocks (n=40), inclined line; altered andesitic rocks (n=49), cross; pyrophyllite ores (n=20), and horizontal line; granitic rocks (n=9).

암질암이 변질되고 납석광석이 되면서 분산폭은 넓어지고, HREE 함량은 감소한다 (Fig. 4).  $(La/Lu)_m$  값은 비변질 안산암질암의 4.2~23.2에서 변질 안산암질암의 2.2~85.3으로 증가하며 납석광석에서는 Lu의 감소로 인하여 분산은 2.67~128.79로 큰 폭으로 증가한다. 이는 LREE 함량의 증가와 HREE 함량의 감소에 기인한다.

변질 안산암질암은 주로 석영, 견운모, 녹니석 및 카올리나이트 등으로 주로 구성되고 있고, 변질 안산암질암내 REE 함량의 감소는 규화작용 및 장석의 변질에 따른 변질산물의 형성에 기인하는 것으로 판단된다 (Neiva et al., 1990; Bowers et al., 1985).

납석광석의 주구성 광물은 석영, 납석이며 산성 열수 환경의 변질산물인 광물들에서 주성분원소들이 용탈되어 REE는 상대적으로 부화되었으나 납석광체는 열수의 이동이 많은 부분에서 형성되었을 것이며 REE는 열수용액 내에서 음이온과 착이온을 형성하므로 HREE 함량이 낮은 것은 용액에 잔류하도록 하는 음이온의 유입 때문일 것으로 생각된다. 또한 열수변질시 화산유리질의 탈유리화 작용 (devitrification)이나 수화작용 (hydration)에 의해  $Cl^-$  이온이 발생할 수 있다고 보고된 바 있다 (Graf, 1977).

#### 원소들의 상대적 이동성

납석광석 및 안산암질암의 화학분석치는 중량백분율로 표시되어 성분원소들의 대체적인 경향만을 나타낼 수 있으므로 변질작용시 안정한 원소로 알려진 Zr에 대하여 주, 부성분원소 및 미량원소를 도시하였다 (Fig. 5).

$SiO_2$ 는 비변질암, 변질암 및 납석광석에서 다소 분산되지만 Zr 함량의 변화에도 비변질 및 변질 안산암질암에서 같은 함량수준을 유지하여 규화작용은 원암내 잉여의 Si가 농집되어 형성되었음을 보여준다.  $Al_2O_3$ 는 일반적으로 변질시 안정한 원소로 알려져 있으나 비변질 안산암질암 및 변질 안산암질암에서 다소 분산되나 유사한 수준을 유지하는 반면, 납석광석에서는 일정한 폭으로 증가하여 납석광물의 형성시 외부로부터의 공급에 의해 유입되었음을 보여준다. 반면  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $CaO$ ,  $MgO$  및  $MnO$  등의 함량은 절대적으로 감소하였다.  $Fe_2O_3$ 는 비교적 분산되나 감소하는 경향과 황철석 형태로 고정되어 잔류하고 있음을 보여준다. 반면  $TiO_2$ 는 변질시 비교적 안정하다.

미량원소 가운데, As, Cr, Sb 및 Sr 등은 외부로부터의 유입되었음을 보여주고 Co, Cs, Rb, Sc, Y 및 Zn 등은 절대량의 감소를 보여준다 (Fig. 5). Sc, Zn 등의 전이원소들은 열수변질시 고철질광물의 분해로 감소하고, Cs, Rb 등은 열수변질시 이동성이 높으며 견운모에 포함될 수 있는 것으로 알려지며 (Leshner et al., 1986) 변질암의 형성시 견운모에 포함되어 약간 증가하거나 초기 함량을 유지하다가 납석의 형성시에 감소한다.

#### 심도에 따른 원소들의 분산양상

밀양납석광산의 시추공으로부터 5개의 축선 a-a', b-b', c-c', d-d', e-e'를 선택하고 시료의 채취심도에 따른 원소 함량 가운데 특징적 변화를 도시하였다 (Fig. 6).

축선 a-a'는 대체로 북서-남동 방향이다. 광체는 광상의 남동부인 90-1, 90-2호공에서는 얇으며 북서부로 갈수록 양호하게 발달한 광체가 심부를 향하여 20~30°의 경사를 가진다. 이는 광상에 협재하는 응회암질암의 방향 (N50~60°E, 20~25°NW, 대한광업진흥공사, 1987)과 일치한다.

축선 b-b'는 축선 a-a'와 유사한 서북서-동남동 방향으로 광체의 주향 및 경사는 축선 a-a'와 유사하다.

축선 c-c'는 대체로 동서방향이며 광체는 비교적 천부에 부존하고 있어 현재 노천채굴이 진행되고 있다.

축선 d-d'와 e-e'는 N15~25°E의 방향을 가지고 50 m 정도의 간격으로 비교적 평행한 2개의 축선이다.

#### $SiO_2$

축선 a-a' 및 b-b'에서 광상 북서부의 심부로 연장되는 광체를 따르며, 광체내에 국지적으로 발달한 규화대에 집중되는 분산을 보이고 있다. 잉여의  $SiO_2$ 가 농집되어 형성된 규화대는 부광대에 수반하나 국지적이므로  $SiO_2$ 의

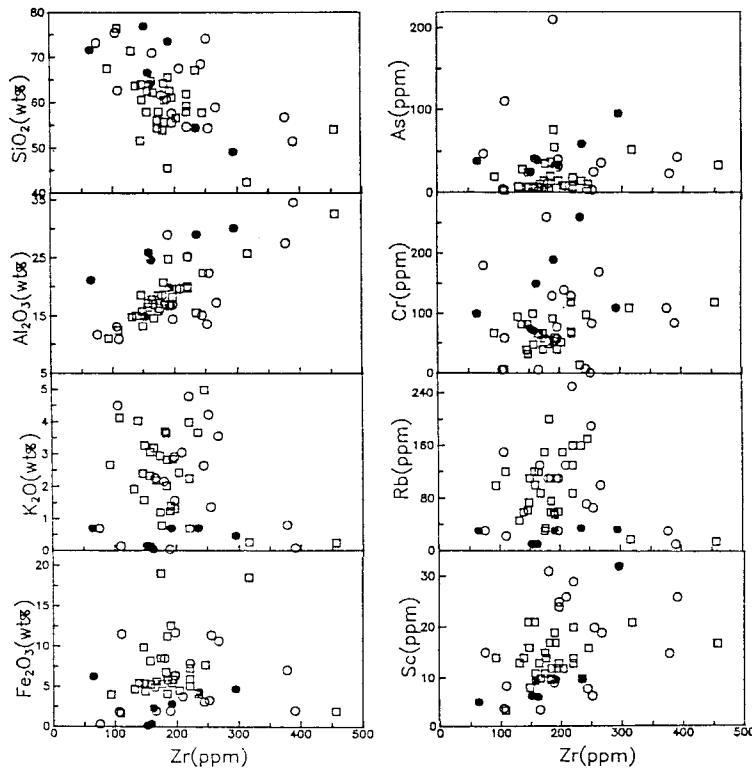


Fig. 5. Gains and losses of major and trace elements against Zr from Milyang area. Symbols are the same as those in Fig. 3.

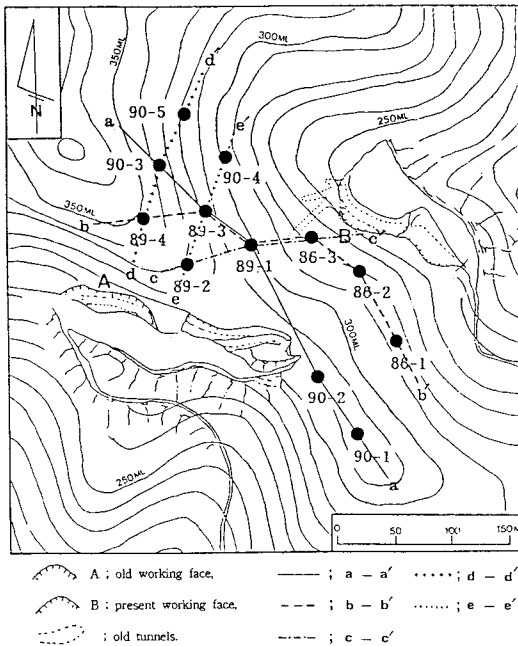


Fig. 6. Location map of drill holes in Milyang mine showing the line a-a', b-b', c-c', d-d', and e-e'.

분산으로부터 광체의 발달경향을 추적하기는 어려울 것이다 (Fig.7).

$Al_2O_3$

측선 a-a'에서 광상 남동부의 2개 시추공에서는 약하지만 하부로 부화하는 경향을 보이고 북서부에서는 응회암의 층리를 따라 20%가 넘는 함량으로 부화되고 경사방향에 따라서 광상 북서부의 심부로 분산하는 경향을 보여준다. 측선 b-b'에서는 함량 20%를 넘는 등함량곡선이 측선 a-a'에 비해 좀더 심부로 향하는 경향을 보이며, 이는 광상에 협재하는 응회암질암의 방향성 (N50~60°E, 20~25°NW)을 고려할 때 위경사를 갖는 측선 a-a'보다 경사가 심해아 하지만 함량분포는 경사도보다 심부를 향하고 있어서 광상의 북서부에 대한 하부로의 연장성에 관한 탐사작업이 요망된다 (Fig.7).

$K_2O$

측선 a-a'에서는 광상의 남서부 지표에서 2.5% 정도를



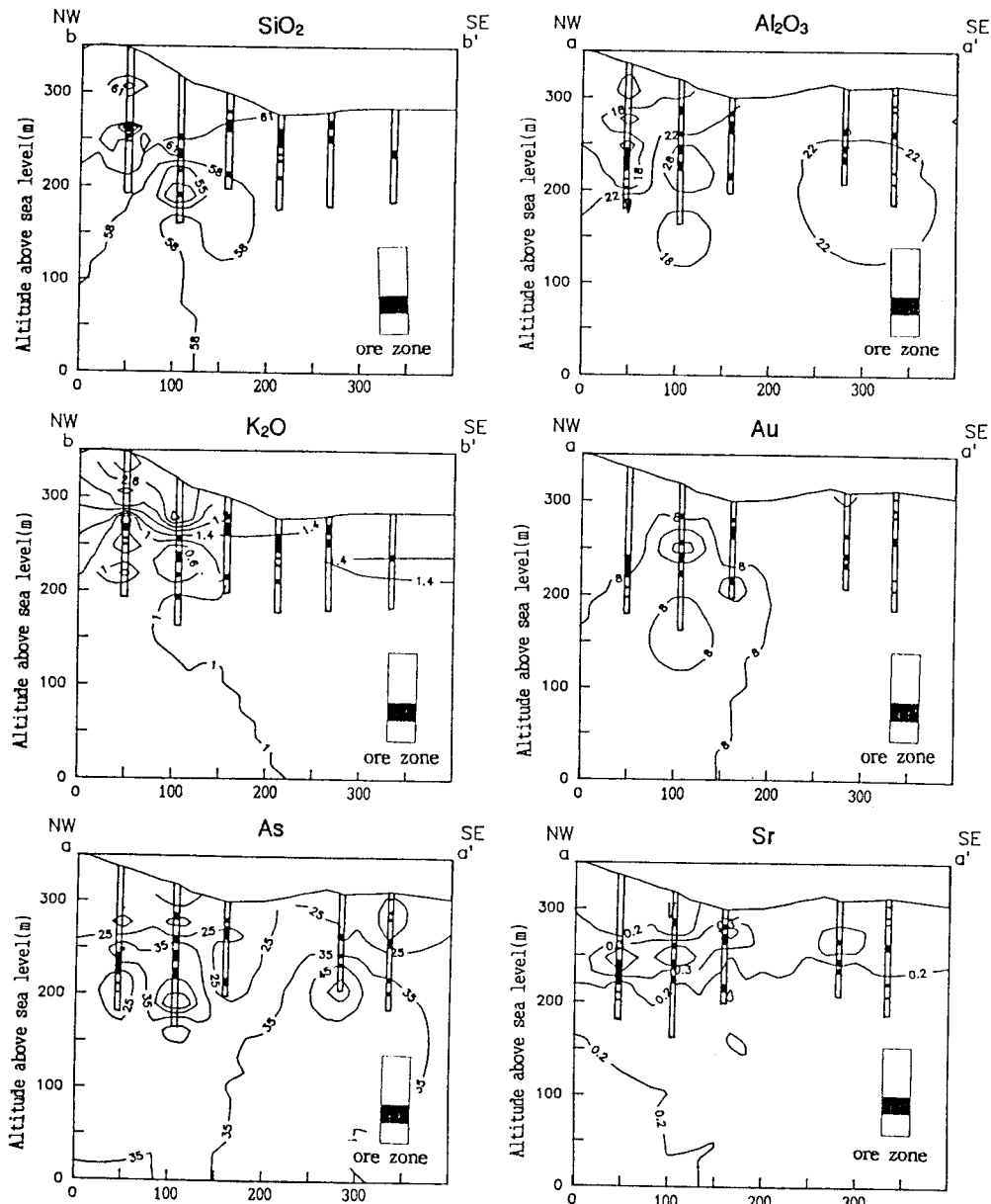


Fig. 7. Vertical distribution of  $\text{SiO}_2$  (unit in wt%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (unit in wt%),  $\text{K}_2\text{O}$  (unit in wt%), Au (unit in ppb), As (unit in ppm), and Sr (unit in ppm) from Milyang mine.

나타내나 광체부위에서는 1.5% 정도로 낮아지며 응회암의 연장방향을 따라 북서부 심부로 가면서 1% 정도로 감소해가는 경향을 보인다. 측선 b-b'에서는 1.4%, 1% 등함량곡선이 광체 및 변질암의 부존상태를 잘 보여주고 있고 북서부의 시추공 하부에서는 응회질 사암이 확인되나 비교적 강한 분산형태를 보여서 이 방향으로의 연장성을 고려할 수 있다 (Fig.7).

$\text{Na}_2\text{O}$

측선 a-a'에서는 1.2% 등함량곡선이 광체의 부존형태를 잘 나타내며 남동부의 지표로부터 북서부 심부로 향하는 경향을 보여준다. 측선 b-b'에서는 측선 a-a'와 비슷한 경향을 나타내며 1% 등함량곡선은 광체의 부존위치를 잘 보여준다. 측선 c-c'에서는 지표의 안산암질암 분포지역의

하부인 응회질암 및 광체의 부존지역에서 급격한 감소를 보이며 심부로 향하는 분산은 파악되지 않는데, 이는 측선이 광상의 중앙부를 가로지르고 있어서 측선 c-c'로부터 광체의 일반적인 연장방향인 광상의 북서부 심부에 대한 경향성을 파악하기는 어려울 것으로 판단된다. 측선 d-d'와 e-e'는 광체의 주향방향을 따르고 있으므로 대체로 수평 방향의 분산을 보여주며 지표 부근의 안산암질암으로부터 응회질암 및 광체와의 접촉부에서 1%로 감소하며 광체의 부존형태를 잘 보여준다.

### CaO

측선 a-a'에서는 광상의 남동부에서 여러 개의 광체를 포함하고 변질대가 폭넓게 분포하여 1% 이하를 나타내며 북서부에서는 심부로 연장되고 있다. 측선 b-b'에서는 측선 a-a'와 대체로 유사하며 광상의 남동부로부터 북서부에 이르기까지 광체의 부존 형태를 따라서 2% 이하의 등함량곡선 내에 광체가 부존하고 있음이 잘 나타나고 북서부로의 연장성도 기대된다.

### MgO

측선 a-a'에서는 0.4%를 나타내는 등함량곡선이 광상 북서부의 심부로 연장되는 광체의 존재형태를 잘 보여주고 상부 안산암질암 및 하부 응회질 사암에서는 1%에 이르는 함량을 보인다. 측선 b-b'에서는 광상의 남동부로부터 북서부에 이르면서 광체의 연장방향으로 0.6% 이하의 등함량곡선이 상부 안산암질암과 하부의 응회질 사암 사이에 부존하는 광체의 형태를 보여준다.

### Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 등함량곡선은 이러한 황철석의 산출상을 잘 보여주는 것으로 판단된다. 측선 a-a'에서는 광상의 남동부에서 7~10%로 함량이 높은 경향을 보여주며 광상의 북서부에서 5% 및 그 이하로 감소하는 경향을 보여서 광석에 수반하는 황철석의 양이 감소하고 있음을 보여준다. 측선 b-b'에서는 국지적으로 광체의 부존에 따라서 황철석이 수반하고 있는 특성을 잘 보여준다. 이러한 경향은 측선 c-c'에서도 동일하며 주향방향의 측선 d-d'에서는 광체의 연장방향을 따라 측선 e-e'에 비해 더욱 하부로 분산된 경향을 볼 수 있으며 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 부분적으로 변질대를 포함하는 지역에서 높은 경향을 보여서 황철석이 포함되고 있음을 잘 보여준다. 이러한 분산경향은 해발

200 m 정도에서 나타나고 있어서 광상의 북서부 지역은 해발고도 330~350 m 정도이므로 120~150 m로 유지되는 시추공의 심도를 좀 더 연장하는 것이 하부탐광에 유리할 것으로 보인다.

### Au, As, Sb

산성변질대의 하부에서 이상대를 보일 것으로 기대되는 Au는 측선 a-a'에서는 광체에서 31 ppb까지 증가하며 광체의 연장방향에 따라 심부로 갈수록 측정한계인 5 ppb로부터 증가해가는 경향을 보여서 납석광상 변질대의 하부에 대한 Au 부화대의 지속적인 탐사가가능성을 보여준다. 측선 b-b'에서는 a-a'와 마찬가지로 북서부의 심부로 향하여 7~9 ppb 수준으로 증가폭은 작으나 뚜렷한 경향을 보인다. 측선 c-c', d-d', e-e'에서는 함량도 낮고 부분적인 증감이 있지만 광상의 서부로 치우치며 특히 심부로 향하여 70° 정도의 급한 경사를 이루면서 함량이 증가하는 분산상을 보인다 (Fig.7).

Au와 지구화학적 관련성이 높은 As, Sb를 보면, As는 a-a'에서 Au와 같은 방향으로 최대 76 ppm을 나타내며 증가하고 b-b'에서는 분산경향을 따라 40 ppm을 넘는 경향성을 보여준다. 특히 측선 c-c', d-d', e-e'에서는 Au의 분산경향을 따라 북서부 및 서부로 강하게 분산하는 경향을 보이고 있다 (Fig.7). Sb는 측선 a-a'에서 국지적으로는 증가하나 전반적으로 As와 유사하게 광상의 북서부 및 서부를 향하여 부화하는 분산상을 갖는다.

### Cr, Sr

Cr은 대체로 광체의 부존형태 뿐만 아니라 주변의 변질대의 분산정도를 잘 보여주는 것으로 판단된다. a-a'와 b-b'에서는 광체의 부존특성을 잘 나타내며 c-c', d-d', e-e'에서는 광체의 하부로 100 ppm이 넘는 등함량곡선을 나타내어 하부로 분산하는 특성을 보여준다.

Sr은 광체에서 부화되는 경향을 나타내며 모든 측선에서 Sr의 분산폭은 협소하고 특히 광체의 부존지역을 정확하게 지적해 주고 있다. 각 측선에서 0.3% 등함량곡선은 광체의 부존상태를 파악하기에 매우 정확한 정보를 제공한다 (Fig.7).

## 결 론

1. 밀양납석 광상에서는 함불소 광물인 듀머티에라이트가 수반하고 공간적으로 인접한 흑운모화강암에서 전기

석이 확인되어 이 지역은 붕소가 풍부한 지구화학적 환경에서 납석광상의 생성기구에 화강암이 관련될 수 있음을 보여준다.

2. 밀양광산산 광석의 주구성광물은 납석과 석영이며 다이아스포어가 포함되고 황철석은 농집되거나 산점상으로 나타난다. 변질암은 석영, 견운모, 카오리나이트, 납석 등으로 구성된다.

3. 밀양지역에서 변질 안산암질암 형성시 SiO<sub>2</sub>는 3% 정도 증가하고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>은 납석광석에서 6% 정도 그리고 작열감량은 열수의 유입으로 함유광물이 형성되면서 현저하게 증가한다. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O 등은 변질 안산암질암 및 납석광석에서 변질과정 중 심하게 용탈된다. 밀양납석 광석에서 비변질 안산암질암에 비해 As, Cr 등은 증가하며 Co, Rb, Yb, Lu는 감소한다. 비변질 안산암질암의 희토류원소 분포로부터 밀양납석광상은 대륙연변부의 화산암류의 변질로부터 형성되었음을 보여준다. 밀양납석광상의 납석은 강한 산성 열수변질의 통로에서 형성되어 주성분원소들의 용탈에 대하여 상대적으로 LREE가 증가하고 음이온의 유입으로 HREE가 열수에 잔류하게 되어 (La/Lu)<sub>cn</sub> 값이 증가한 것으로 보인다.

4. 변질과정 중 원소들의 이동성을 검토한 결과, 규화작용은 변질시 잉여의 SiO<sub>2</sub>가 농집된 것이며 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분은 외부로부터 열수에 의해 공급되었음을 보여준다. 다른 주성분원소들은 변질작용시 심하게 용탈되었고 미량원소로는 As, Cr, Sb 등의 부화화 Cs, Rb, Zn 등의 용탈을 보여준다.

5. 시추공에 대한 원소들의 수직적 분산에서 SiO<sub>2</sub>는 규화대를 지시해 주고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 변질의 중심부인 응회질암석의 연장방향을 따라 증가하고 K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, CaO 및 MgO 등은 연장방향으로 감소하며, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 부분적인 황철석의 부화경향을 보여준다. Au, As, Sb 등은 산성변질의 하부에서 기대되는 Au 광화작용과 관련하여 광상의 북서부 심부를 향하는 분산경향을 보여준다. 또한 Cr과 Zn가 특징적으로 분산경향을 보이며 Sr은 분산범위가 협소하여 광체의 존재형태를 잘 지시해 준다.

사 사

본 연구는 한국과학재단의 1989년도 목적기초연구 '비

금속 및 고품위요업광물자원'의 일부이다. 또한 본 연구 수행을 적극 협조해 준 전략광물자원 연구센터에 감사드린다.

참고문헌

김종환, 고상모 (1989) 밀양-양산지역 납석광상의 광화작용에 관한 연구. 과학기술처 KR-89-(B)-21, 44p.  
 대한광업진흥공사 (1987) 광상시추조사보고. 제 10 호.  
 대한광업진흥공사 (1990) 광상시추조사보고. 제 13 호.  
 상기남 (1986) 한반도 남부지역 고령토-납석광상 생성기구. 광산지질, 19권, p. 43-52.  
 오대균, 전효택, 민경원 (1992) 경남 밀양지역 납석광상과 안산암질 모암의 지구화학적 연구. 광산지질, 25권, p. 27-39.  
 정영욱 (1991) 경남 및 전남지역에 분포하는 일부 납석광상의 지구화학적 연구. 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문, 94 p.  
 정영욱, 전효택 (1989) 경남 양산 및 밀양지역 납석광상의 지구화학적 연구. 광산지질, 24권, p. 341-354.  
 차문성, 김정진, 김 현 (1972) 부산시 일원 (부산-동래 지역)의 화성활동과 광화작용에 관한 연구. 광산지질, 5권, p. 151-162.  
 Bowers, T.S., Von Damm, K.L. and Edmond, J.M. (1985) Chemical evolution of mid-ocean ridge hot springs. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 49, p. 2239-2252.  
 Graf, J.L. (1977) Rare earth elements as hydrothermal tracers during the formation of massive sulfide deposits in volcanic rocks. Econ. Geol., v. 72, p. 527-548.  
 Haskin, L.A., Haskin, M.A., Frey, F.A. and Wildeman, T.R. (1968) Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths. In Origin and Distribution of the elements 1 (ed., Ahrens, L.H.). Pergamon, Oxford, 353p.  
 Hong, S.H. and Choi, P.Y. (1988) Geological Report of the Yuchon Sheet. Korea Institute of Energy and Resources.  
 Kim, K.B. and Hwang, S.K. (1988) Geological Report of the Miryang Sheet. Korea Institute of Energy and Resources.  
 Kim, K.W. and Park, Y.C. (1964) Geological Map of Chongdo Sheet. Geological Survey of Korea.  
 Kim, N.J. and Lee, H.K. (1964) Geological Map of Yongsan Sheet. Geological Survey of Korea.  
 Leshner, C.M., Gibson, H.L. and Campbell, I.H. (1986) Composition-volume changes during hydrothermal alteration of andesite at Buttercup Hill, Noranda District, Quebec. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 50, p. 2693-2705.  
 Neiva, A.M.R., Neiva, J.M.C. and Silva, M.M.V.G. (1990) Geochemistry of gold quartz vein walls from Jales (northern Portugal). Chem. Geol., v. 82, p. 217-251.

