

경남 밀양지역 납석광상과 안산암질 모암의 지구화학적 연구

오대균* · 전효택* · 민경원**

A Geochemical Study on Pyrophyllite Deposits and Andesitic Wall-Rocks in the Milyang Area, Kyeongnam Province

Dae-Gyun Oh*, Hyo-Taek Chon* and Kyoung-Won Min**

ABSTRACT : Several pyrophyllite deposits occur around the Milyang area where Cretaceous andesitic rocks and spatially related granitic rocks are widely distributed. Pyrophyllite ores consist mainly of pyrophyllite, and quartz with small amount of sericite, pyrite, dumortierite, and diaspore. The andesitic rocks and spatially related granitic rocks in this area suggest that they could be formed from the same series of a calc-alkaline magma series. The contents of SiO_2 , Al_2O_3 , LOI (loss on ignition) are enriched, and K_2O , Na_2O , CaO , MgO , Fe_2O_3 are depleted in altered andesitic rocks and ores. Enrichment of As, Cr, Sr, V, Sb and depletion of Ba, Cs, Ni, Rb, U, Y, Co, Sc, Zn are characteristic during mineralization. The pyrophyllite ores can be discriminated from the altered and unaltered wall-rocks by an increasing of $(\text{La/Lu})_{\text{cn}}$ from 4.18~22.13 to 8.98~55.05. In R-mode cluster analysis, Yb-Lu-Y, La-Ce-Hf-Th-U-Zr, TiO_2 -V- Al_2O_3 , Sm-Eu, $\text{CaO-Na}_2\text{O-MnO}$, Cu-Zn-Ag, $\text{K}_2\text{O-Rb}$ are closely correlated. In the discriminant analysis of multi-element data, P_2O_5 , As, Cr and Fe_2O_3 , Sr are helpful to identify the ores from the unaltered and altered wall-rocks. In the factor analysis, the factors of alteration of andesitic rocks and ore mineralization were extracted. In the change of ions per unit volume, SiO_2 , Al^{3+} , and LOI are enriched and Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} and Fe^{3+} are depleted during the alteration processes. The Milyang and the Sungjin pyrophyllite deposits could be mineralized by hydrothermal alteration in a geochemical condition of low activity ratio of alkaline ions to hydrogen ion with reference to spatially related granitic rocks.

서 언

국내의 고알루미나 광상은 경상남북도 일대 및 전라남도 서남부에 밀집되어 분포하며 특히 경상남도 밀양지역에는 백악기의 화산암류가 넓은 지역에 걸쳐서 분포하고 이들 화산암류의 일부가 열수 변질작용을 받아서 납석 등의 고알루미나 광상을 형성하고 있다.

밀양지역의 광상에 대해서는 대한광업진흥공사의 광상 시추 조사보고(1987) 및 비금속광물 특성 조사보고서(1987), 변질 광물에 대한 광물학적 연구(이동진 등, 1988; 김영규, 1989) 및 지질 조사보고서(홍승호, 최범영, 1988; 김규봉, 황상규, 1988) 등이 있고 최근에 정영욱, 전효택(1989), 전효택 등(1991) 등이 납석 및 점토광물에 대한 산소 동위원소 조성과 황화광물의 황 동위원소 조성을

연구한 바 있다. 이들 지역에 분포하는 화산암류의 연대는 64~75 Ma(Min et al., 1982)로 수회에 걸친 화산활동 시기를 가진다고 보고되었고, 공간적으로 인접한 유천 화강암류의 연대는 75.5 ± 1.2 Ma(Jin et al., 1981)로 보고된 바 있다. 납석광상의 성인은 모암으로 알려진 안산암류가 인접한 화강암류의 관입으로 열수 변질작용을 통하여 납석화한 것으로 알려지고 있다(상기남, 1986; 차문성 등, 1972; 김규봉, 황상규, 1988).

본 연구에서는 경남 밀양지역의 밀양 및 송진 납석광상 부근에서 광석, 변질 안산암질암, 비변질 안산암질암 및 공간적으로 인접한 화강암질암을 채취하여 안산암질암 및 화강암질암을 형성시킨 마그마 계열을 규정하고 다원소 분석 특성 및 변질대의 지구화학적 특징과 광상의 생성 환경을 연구하고자 하였다.

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

** 강원대학교 자원공학과 (Dept. Resources Eng., Kangwon National Univ., Chuncheon 200-701, Korea).

지질 및 광상 개요

본 지역의 지질에 대해서는 밀양 도폭, 유천 도폭, 청도

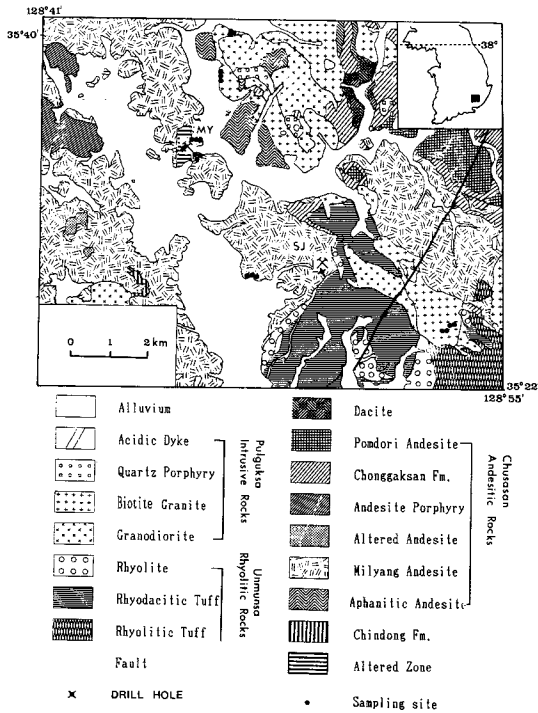


Fig. 1. Geological map of Milyang area showing the location of the Milyang mine (MY) and the Sungjin mine (SJ) (Kim and Hwang, 1988; Kim and Park, 1964; Kim and Lee, 1964; Hong and Choi, 1988).

도록 및 영산 도록이 발견되어 있으며, 김문영 등(1988), 김진섭(1990), 황상구, 김상욱(1990)에 의한 경상분지 동남부 지역에 분포하는 화산암류에 대한 암석학적 및 지구화학적 연구, 그리고 이재영 등(1990)에 의해 유천 화강암과 언양 화강암의 지구화학적 특징과 광화작용과의 관련성에 대한 연구결과가 발표된 바 있다.

밀양지역은 백악기 말에 분출된 진동층과 주사산 안산암질암으로 명명된 안산암질암류가 하부를 구성하고 그 상부에 운문사 유문암질암으로 불리는 유문암질 화산암류가 분포하며 후기에 이를 관입한 화강암질암류로 구성된다(Fig. 1).

진동층은 암회색 및 녹회색의 세일이 우세하고 사암층이 협재한다. 이들은 화강암류의 관입으로 쳐어트화 또는 호온펠스화 하였다.

주사산 안산암질암류는 비현정질 안산암, 밀양 안산암, 정각산층, 범도리 안산암으로 구성된다. 비현정질 안산암은 암흑색 치밀질로 부분적으로 안산암질 응회암이나 집괴암을 협재하고 밀양 광상에서는 중성 응회암을 협재하며

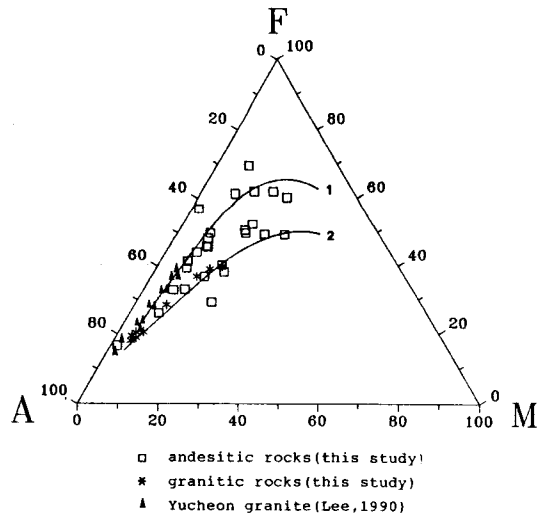


Fig. 2. AFM diagram of andesitic and granitic rocks from Milyang area. 1 : tholeiitic, 2 : calc-alkaline.

변질을 받아서 납석광화대를 형성하였다. 휘석, 사장석, 각섬석, 녹니석, 정장석, 석영, 불투명 광물 등으로 구성되며 반정은 1mm 내외의 사장석과 휘석이며 입자가 미세한 부분은 pilotaxitic 석리를 보인다. 밀양 안산암은 반상 안산암으로 3mm 이상의 사장석 반정을 특징적으로 보이며 휘석, 사장석, 각섬석, 녹니석, 견운모, 불투명 광물로 구성된다. 밀양 안산암은 사장석 반정을 함유하며 반정들은 방향성을 갖지 않는다. 이외에 응회질의 정각산층 및 범도리 화산암 등으로 구성되어 있다.

운문사 유문암질암류는 적색 내지 담홍색을 띠는 화산암류로 석영 안산암(부분적으로 집괴암을 포함), 유문암질 응결응회암, 유문암 등으로 구성되고 주사산 안산암류의 상위에 존재하며 후기에 화강암류로 관입당한다. 전반적으로 반상 석리를 가지며 반정은 1~2mm 내외이며 사장석, 석영, 정장석 등으로 구성된다.

주사산 안산암질암류 및 운문사 유문암질암류를 관입한 화강암류들은 화강섬록암에서 흑운모화강암에 이르는 분화상을 보이며 밀양 광상 및 승진 광상의 동측부에 광범위하게 분포되어 있다. 화강섬록암은 본 지역의 동북부에 분포하며 흑운모 화강암에 의하여 관입되고 고정리 채석장에서 그 관입 접촉 경계를 확인하였다. 구성 광물은 석영, 사장석, 정장석, 각섬석, 흑운모, 자철석 등이며 사장석은 변질을 받았다. 화강섬록암을 관입하고 있는 흑운모 화강암은 담색 조립의 흑운모 화강암으로 석영, 정장석, 사장석, 흑운모, 각섬석, 인회석 등으로 구성된다.

Table 1. Mineralogical compositions of some ores and wall-rocks in the Milyang area.

Type	Sample No.	Mineralogical composition
Ore	MY3-63	pyrophyllite, pyrite, dumortierite
	MY3-72	pyrophyllite, quartz, pyrite
	MY4-73	pyrophyllite, quartz, pyrite
Altered wall-rock	0505	plagioclase, quartz, sericite, kaolinite, chlorite, epidote, opaque
	0511	plagioclase, sericite, quartz, opaque
	MY3-40	plagioclase, sericite, quartz, chlorite, opaque
Unaltered wall-rock	0402	plagioclase, hornblende, sericite, chlorite, opaque
	0403	plagioclase, pyroxene, hornblende, opaque, chlorite, sericite
	0603	plagioclase, pyroxene, calcite, epidote, chlorite, opaque
	0607	plagioclase, pyroxene, hornblende, quartz, chlorite, opaque
	0611	plagioclase, pyroxene, hornblende, sericite, chlorite, opaque
	0612	plagioclase, pyroxene, hornblende, sericite, chlorite, opaque
	SJ3-80	plagioclase, quartz, hornblende, pyroxene, chlorite, sericite, opaque

이 화강암류는 I type, calc-alkaline 계열로서(Fig. 2, 이재영 등, 1990; Hong, 1985) 75.5 Ma의 연대를 갖는 것으로 알려져 있다(Jin et al., 1981). 유천지역의 화강암류는 현지에서의 대자율이 6.6×10^{-3} SI unit로서 자철석 계열의 화강암에 해당된다.

밀양 광상은 경남 밀양시 인근에 부존하고 주구성 광물은 납석, 석영 및 diaspore 등이며 함붕소광물인 dumortierite가 산출된다. 광체는 규화대, 황화대 그리고 외곽부로 kaolinite화대를 수반한다. 시추 코아 시료에서 납석광화대 하부의 비변질질 암석은 미립의 황철석이 농염화되어 있고 광산 주변부에서는 kaolinite 변질대가 발달되어 있다. 현재까지 밀양 광상의 북부에서는 납석변질대 및 광화대가 발견되지 않고 있으나, 현장에서는 채굴현장의 북부에서 광체의 연장성 확인을 위한 시추를 계획하고 있다.

승진 광상 주위에는 석영안산암질 응회암이 분포하고 광체의 하부에서는 시추 코아로부터 반정질안산암이 확인된다. 변질대는 안산암내에 발달하고 주구성 광물은 석영, 견운모 및 녹니석 등이며, 특히 채굴적에서는 열수 활동의 증거를 보이는 석영맥 등이 발견되고 변질암에서는 미립의 자형 황철석이 수 cm에 달하는 덩어리 상태로 산출된다.

시료채취 및 화학분석

밀양 광상과 승진 광상의 채굴현장 및 시추공을 대상으로 경제성있는 광석시료(5개), 광체와 인접하며 현지하게 변질된 양상이 관찰되는 변질안산암(9개), 광상을 배태하며 비교적 변질을 받지 않거나 광상 주변의 노두에서

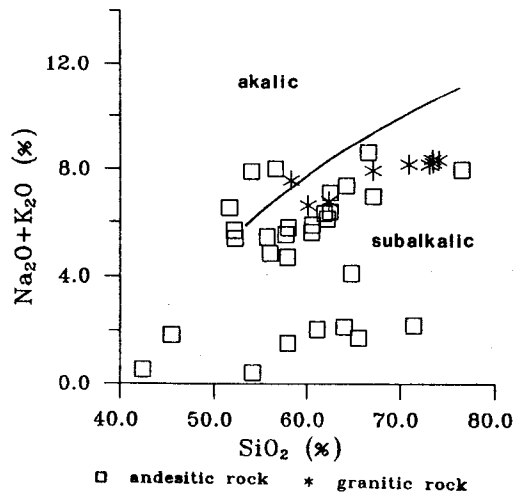


Fig. 3. Diagram for Na_2O+K_2O against SiO_2 content.

채취한 비변질 안산암질암(29개) 및 주변의 화강암질암(9개)과 1개의 diaspore 시료를 채취하였다.

채취한 시료들을 실험실에서 세척하고 상온에서 건조한 후 -200 mesh로 분쇄하여 화학분석을 실시하였다. 화학분석은 캐나다의 ACTLAB에 의뢰하여 SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , CaO , MgO , MnO , total Fe, TiO_2 , P_2O_5 , Ag, Ba, Be, Cu, Nb, Ni, Pb, Sr, V, Y, Zn, Zr 등은 ICP로 분석하였고, Au, As, Br, Co, Cr, Cs, Hf, Hg, Ir, Mo, Rb, Sb, Sc, Se, Ta, Th, V, W 및 희토류원소인 La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu 등은 INAA에 의해 분석하였다(총 53개 시료에 대하여 49개 성분 및 원소를 분석함). 암석 현미경 관찰을 위하여 각 암종별로 암석 박편을 제작하였다(Table 1). 분석대상 원소 49개 가운데 Be, Br, Hg, Ir, Mo, Nb, Se, Ta, W 등은 그 함량이 최저 측정 한계(detection limit)

Table 2. Median and range of chemical composition of pyrophyllite ores, and andesitic and granitic rocks (unit in ppm). * : unit in %, ** : unit in %, ** : unit in ppb. Number of analyzed specimens in parenthesis.

Type	Pyrophyllite ore (n=5)		Altered andesitic rock (n=9)		Unaltered andesitic rock (n=29)		Granitic rock (n=9)	
	Element	Median	Range	Median	Range	Median	Range	Median
SiO ₂ *	64.14	49.17-76.89	64.73	51.52-75.25	60.54	42.40-76.44	70.87	60.13-74.80
Al ₂ O ₃ *	25.92	14.94-30.08	17.02	10.94-34.48	17.18	12.52-32.51	13.96	13.66-17.84
K ₂ O*	0.14	0.04-0.70	2.64	0.04-7.14	2.48	0.24-4.98	4.10	1.44-4.66
Na ₂ O*	0.15	0.10-0.36	0.19	0.09-0.50	2.99	0.18-5.58	4.10	3.53-5.18
CaO*	0.51	0.23-0.61	0.19	0.03-4.13	3.75	0.10-7.54	1.89	1.32-5.59
MgO*	0.04	0.02-0.17	0.34	0.06-1.71	1.25	0.11-3.67	0.69	0.43-2.45
MnO*	0.01	0.01-0.01	0.01	0.01-0.24	0.08	0.01-0.33	0.06	0.04-0.18
Fe ₂ O ₃ *	2.30	0.14-4.68	2.29	1.84-11.50	5.66	1.63-18.55	2.30	1.92-6.26
TiO ₂ *	0.89	0.80-1.61	0.40	0.16-1.96	0.84	0.14-1.54	0.39	0.26-1.05
P ₂ O ₅ *	0.40	0.14-0.48	0.04	0.02-0.26	0.20	0.02-0.46	0.12	0.04-0.52
LOI*	5.87	4.18-11.54	3.05	0.91-9.68	3.32	1.07-11.57	0.65	0.28-1.25
Ag	0.1	<0.1-0.2	0.4	<0.1-1	0.3	<0.1-1.4	0.2	<0.1-1.2
Au**	11	<5-31	12	<5-17	<5	<5-71	<5	<5-6
As	41	25-95	5	3-210	14	<2-76	3	<2-9
Ba	335	111-1,138	473	75-823	642	245-1,340	687	457-873
Co	1	1-78	3	1-31	15	1-120	3	2-7
Cr	110	71-260	8	1-130	54	6-120	1	1-5
Cs	1.4	0.5-3.4	3.6	0.8-21	9.3	1.4-40	3.7	1.6-5.9
Cu	85	40-110	75	35-250	75	10-310	90	20-230
Hf	4.1	3.4-7.3	5.1	2.8-9.0	3.9	2.6-12.0	4.8	3.9-5.7
Ni	<10	<10-40	10	<10-50	30	<10-210	<10	<10-10
Pb	50	<50-50	50	<50-50	50	<50-200	50	<50-150
Rb	10	10-34	100	10-360	94.5	14-200	100	38-130
Sb	4.2	2.2-7.8	2.8	0.9-36	2.0	0.3-11	0.3	0.1-0.8
Sc	9.4	6.3-32	8.4	3.7-26	13.0	3.5-22	4.6	3.8-13
Sr	1,328	1,182-1,480	256	26-1,550	493	150-1,512	244	151-455
Th	11.0	7.3-15	14.0	5.3-29	9.8	2.8-30	13.0	4.9-18
U	1.3	0.5-3.1	2.5	1.2-5.3	2.3	1.0-4.5	2.3	1.6-4.3
V	240	74-270	46	4-280	100	<2-230	38	8-500
Y	9	4-44	24	8-51	20	16-38	28	14-60
Zn	60	30-100	75	15-210	140	20-410	120	75-200
Zr	162	153-296	167	111-391	182	57-457	198	171-246
La	36	22-39.2	41.4	19-76.2	26.9	18.9-63.4	30.5	16.3-36
Ce	79	45-103	78	40-135	56.5	36-110	57	37-600
Nd	48	29-88	26	17-57	25.5	13-63	22	15-39
Sm	7.0	2.2-9.9	4.5	2.5-11	4.5	3.2-11	4.0	2.6-8
Eu	1.1	0.4-2.2	1.2	0.4-2.3	1.1	0.6-2.4	0.9	0.6-1.5
Tb	0.5	0.5-1.6	0.7	0.5-1.2	0.5	0.5-1.3	0.5	0.5-1.0
Yb	0.5	0.3-3.12	2.07	0.35-2.9	1.5	0.9-3.2	2.5	1.29-4.92
Lu	0.08	0.05-0.45	0.38	0.05-0.48	0.25	0.15-0.53	0.42	0.24-0.59

< : detection limit, LOI : loss on ignition.

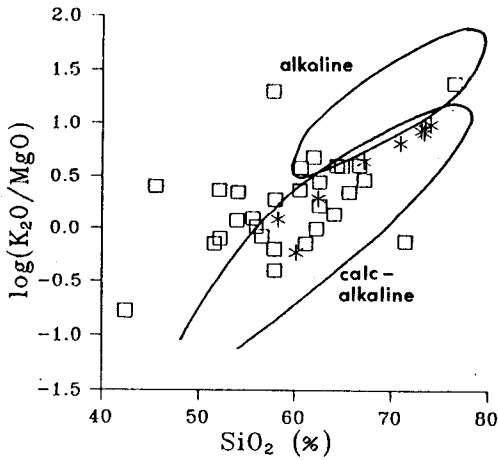


Fig. 4. Diagram for ratios of log (K₂O/MgO) and SiO₂ content (J.W. Rogers et al., 1981). Symbols are same as in Fig. 3.

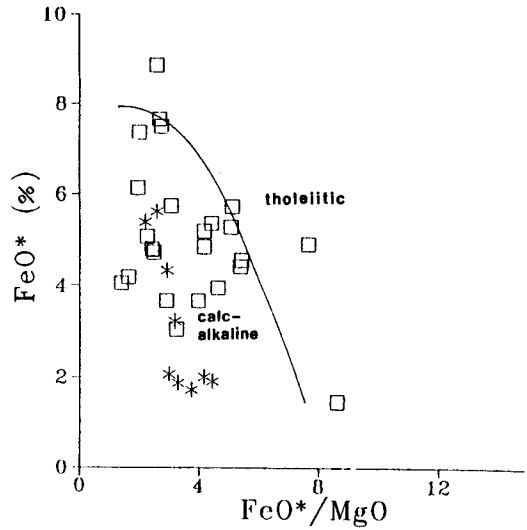


Fig. 6. Diagram for ratios of FeO*/MgO and FeO* (total Fe) content. Solid line is boundary of tholeiitic and calc-alkaline series of Miyashiro (1974). Symbols are same as in Fig. 3.

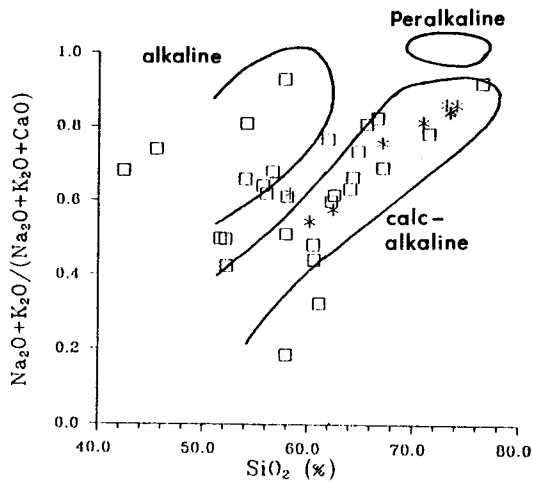


Fig. 5. Diagram for ratios of alkali to calcium and SiO₂ content. Symbols are same as in Fig. 3.

질암류는 대체로 alkali 영역에 가까운 calc-alkaline 영역에 분포하여 calc-alkaline 계열임을 시사한다(Fig. 4). SiO₂ 함량에 대한 K₂O+Na₂O/(K₂O+Na₂O+CaO)비 값의 변화에서는 비교적 폭넓은 분포를 보이지만 대체로 calc-alkaline 영역에 분포하는 양상을 보인다(Fig. 5).

한편 AFM도(Fig. 2)에서는 tholeiitic 계열의 분화경향에 근접하지만 대체로 calc-alkaline 계열의 분화경향과 유사한 양상을 보여준다. 또한 Miyashiro(1974)가 제시한 FeO* 대 FeO*/MgO비 값의 양상은 calc-alkaline 계열의 분화경향을 따른다(Fig. 6). 위의 각 산화물들 사이의 분포형태 및 분화경향으로 보아 이 지역의 안산암질암 및 화강암질암류가 동일한 calc-alkaline 계열임을 시사하고 있다.

이하에서 수록하지 않았고 또한 Ag, Au, Ni, Pb, V 등은 일부 시료가 최저 측정한계 이하를 나타내었다(Table 2).

안산암질암 및 화강암질암의 암석지구화학

본 지역을 형성시킨 마그마의 계열을 규정하기 위하여 성분 변화를 도시하였다. SiO₂ 함량에 대한 K₂O+Na₂O 함량의 변화를 보면 본 지역의 안산암질 및 화강암질암류는 subalkali 계열임을 알 수 있고(Fig. 3), SiO₂ 함량에 대한 log(K₂O/MgO)의 변화에서 안산암질암류와 화강암

주성분 및 부성분 원소

SiO₂ 함량은 변질 안산암과 광석 사이에는 별다른 차이가 없으나 규화작용의 영향으로 비변질 안산암질암에 비해 변질 안산암질암 및 광석시료에서 평균 4% 정도 증가하였다(Table 2). Al₂O₃ 함량은 변질 안산암질암에서는 비변질 안산암질암과 별다른 차이를 보이지 않으나 광석시료에서는 9% 정도 현저하게 증가하였다. K₂O 함량은 비변질 안산암질암과 변질 안산암질암에서는 2.5~2.6% 정도였으나 광석시료에서는 0.14%로 감소하며, Na₂O

함량은 비변질 안산암질암에서는 약 3%의 함량을 나타냈으나 변질 안산암질암 및 광석시료에서는 0.15~0.19%로 감소하였다. CaO 함량은 비변질 안산암질암에서는 3.75% 정도였으나 변질 안산암질암 및 안산암질암에 비해 Na₂O, CaO의 함량이 낮은 이유는 안산암의 주구성 광물인 장석의 변질에 의해 이들 원소들이 용탈되었기 때문이다. 그러나 변질 안산암의 K₂O 함량이 비변질 안산암질암과 비교하여 별다른 차이를 보이지 않는 것은 견운모 등에 K가 고정되었기 때문인 것으로 판단된다.

MgO 함량은 비변질 안산암질암에서 1.25%를 보이는 반면 변질 안산암질암 및 광석에서는 0.34% 및 0.04%로 감소한다. MnO 함량은 0.1% 이하로 매우 낮으며 변질 작용으로 인해 0.01% 정도로 감소한다. Total Fe(Fe₂O₃) 함량은 비변질 안산암질암에서 5.7% 정도, 광석 및 변질 안산암질암에서는 2.3% 정도로서 광화작용으로 인해 약 50%정도 감소한다. Fe 함량이 비변질 안산암질암에서 최대 18.5%에 이르는 것은 암석에 함유된 자철석에 기인한다. 또한 TiO₂ 함량은 0.4~0.9%의 값을 보이고 P₂O₅의 함량도 0.2%에서 0.04%로 감소하였다. Total Fe(Fe₂O₃)와 MgO의 함량이 변질 안산암질암에서 비변질 안산암질암에 비해 감소하는 이유는 유색 광물의 변질작용에 의한 Fe 및 Mg의 용탈에 기인한 것으로 보인다. LOI(loss on ignition)의 함량은 비변질 안산암질암 및 변질 안산암질암에 비하여 광석에서 매우 크게 증가하였는데, 이는 변질과정 중 열수가 유입되어 광화대 내에 견운모나 납석 등 흡수광물의 형성에 기인하는 것으로 판단된다(Table 2).

미량원소 및 희토류원소

As, Cr, Sr, V 등은 각각 비변질 안산암질암의 14, 54, 493, 100 ppm에서 변질 안산암질암의 5, 8, 256, 46 ppm으로 감소하였다가 광석에서는 41, 110, 1328, 240 ppm으로 증가하였다(Table 2).

Ba, Cs, Ni 등은 비변질 안산암질암에서 변질 안산암질암 그리고 광석으로 갈수록 함량이 감소하였다. Ba는 비변질 안산암질암의 642.5 ppm에서 광석에서는 335.5 ppm으로, Cs는 비변질 안산암질암의 9.3 ppm에서 광석에서는 1.4 ppm, Ni는 비변질 안산암질암의 30 ppm에서 광석에서는 10 ppm으로 감소하였다.

K₂O와 유사하게 거동하는 Rb과 U, Y 등은 비변질 안산암질암과 변질 안산암질암에서의 함량이 비슷하지만

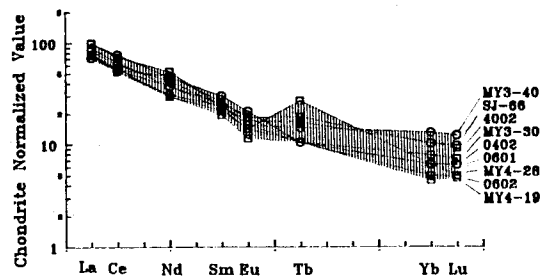


Fig. 7. REE patterns of some unaltered and altered andesitic rocks from Milyang area.

광석에서는 급격히 감소하여 Rb은 비변질 안산암질암의 94.5 ppm에서 변질 안산암질암에서는 100 ppm, 광석에서는 10 ppm으로 변화하였고, U는 비변질 안산암질암의 2.3 ppm에서 변질 안산암질암에서는 2.5 ppm 이었다가 광석에서는 1.3 ppm으로 감소하였다. Y은 HREE와 유사한 거동을 보이고 비변질 안산암질암의 20 ppm과 변질 안산암질암의 24 ppm으로부터 9 ppm으로 급격히 감소하였다.

Co, Sc, Zn 등은 비변질 안산암질암에 비해 변질 안산암질암에서는 감소하지만 변질 안산암질암과 광석에서의 함량은 유사하며, Co는 비변질 안산암질암의 15 ppm에서 변질 안산암질암 및 광석에서는 1~3 ppm으로, Sc은 비변질 안산암질암의 13 ppm에서 변질 안산암질암에서는 8.4 ppm 및 광석에서는 9.4 ppm으로, Zn은 비변질 안산암질암의 140 ppm에서 변질 안산암질암의 75 ppm 및 광석의 60 ppm으로 감소하였다.

Sb는 비변질 안산암질암에서 2 ppm, 변질 안산암질암에서 2.8 ppm, 광석에서는 4.2 ppm으로 함량이 증가하였다. 이외에 Cu, Hf, Th, Zr 등은 큰 변화가 없으며 Nb 함량은 측정한계 이하로 나타났다.

안산암질암의 REE 분포양상은 대륙 연변부에서 생성된 안산암의 특징적인 분포양상을 보이고 있다(Fig. 7). 대륙 연변부의 안산암에서 LREE/HREE 분화지표인(La/Lu)_{cn} 비 값의 범위가 1.5~21.5이며 Eu 이상은 거의 나타나지 않는 것으로 보고되었다(Cullers and Graf, 1984). 화강암질암에서는 안산암에서 보다 넓은 범위의 함량분포와 (La/Lu)_{cn}비 값이 낮으며 약한 부의 Eu 이상을 보이고 HREE는 거의 flat한 분포양상을 보인다(Fig. 8). 광석 시료에서는 안산암질 모암에 비해 LREE 함량은 거의 변화하지 않는 반면 HREE가 감소하여(La/Lu)_{cn}는 4.18~22.13에서 8.98~55.05로 증가한다(Fig. 9).

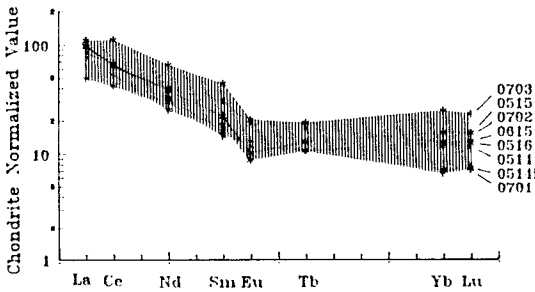


Fig. 8. REE patterns of some granitic rocks from Milyang area.

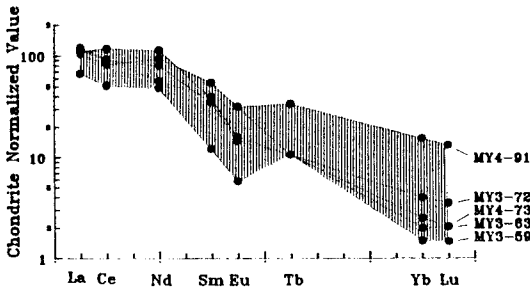


Fig. 9. REE patterns of pyrophyllite ores from Milyang mine.

SiO₂ 함량에 따른 원소들의 함량변화와 상관성

SiO₂ 함량변화에 대한 주, 부성분 원소의 변화를 Fig. 10에 도시하였고 양의 상관성이 양호한 Zr-Hf, Th-Hf, V-Cr, Cu-Zn, K₂O-Rb, 그리고 음의 상관성을 보이는 Rb-Sr, Sc-SiO₂, Sr-SiO₂ 관계를 Fig. 11에 도시하였다.

SiO₂ 함량에 대한 Al₂O₃ 함량은 비변질 안산암질암에 비해 변질 안산암질암에서 비교적 규칙적으로 낮아지는 부의 상관성을 보여주며 화강암질암에서도 같은 경향을 보인다(Fig. 10). K₂O 및 Na₂O 함량은 비변질 안산암질암, 변질 안산암질암 및 화강암질암에서 일반적으로 SiO₂ 함량이 증가함에 따라 증가한다. 그러나 CaO, MgO, MnO, Fe₂O₃(total Fe)는 비변질 안산암질암 및 화강암질암에서 비교적 규칙적으로 감소하나 변질 안산암질암에서는 대부분의 함량이 용탈되어 낮은 함량을 보인다. TiO₂는 SiO₂ 함량이 증가함에 따라 매우 규칙적으로 감소하며 변질 정도에 따른 경향성의 차이가 없고 화강암질암에서도 같은 경향을 보인다. P₂O₅ 함량은 비변질 안산암질암 및 변질 안산암질암에서는 SiO₂ 함량이 증가함에 따라 감소하는

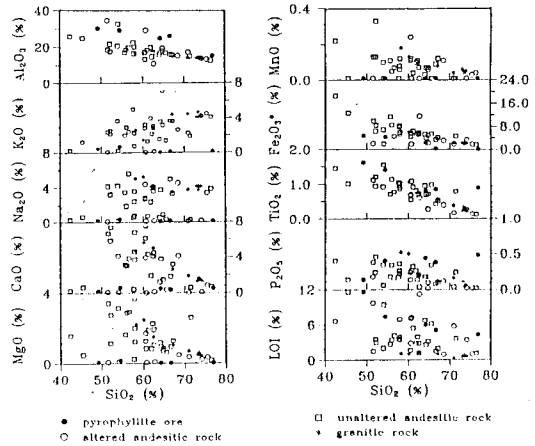


Fig. 10. Diagram for major elements against SiO₂ content.

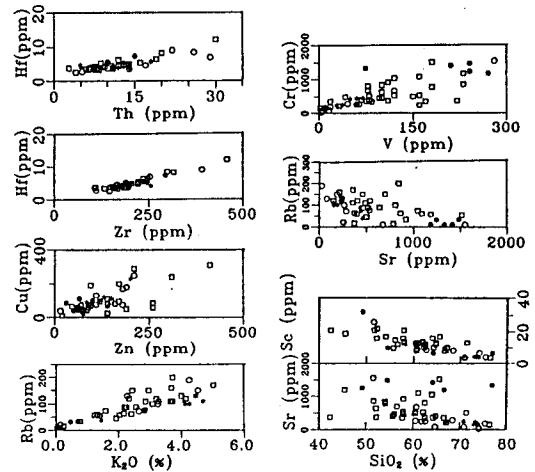


Fig. 11. Relationship between some trace elements, Rb, K₂O, and Sc, Sr against SiO₂ content. Symbols are same as in Fig. 10.

경향을 보인다. LOI(loss on ignition)은 SiO₂ 함량의 증가에 따라 감소하는 약한 부의 상관성을 보인다. SiO₂ 함량에 대한 각 산화물의 분포양상과 상기한 마그마 계열로 판단하면 이 지역의 안산암질암 및 화강암질암은 성인적으로 매우 밀접한 관련성을 나타내며 이들이 동일한 기원의 마그마에서 형성되었을 가능성을 시사한다.

Hf-Th, Hf-Zr 및 Cu-Zn 관계도는 비변질 안산암질암 변질 안산암질암, 광석 및 화강암질암에서 뚜렷한 양의 상관성을 보인다. Rb 함량은 K₂O 함량에 따라 증가하는 경향을 보이며 비변질 안산암질암, 변질 안산암질암과 화

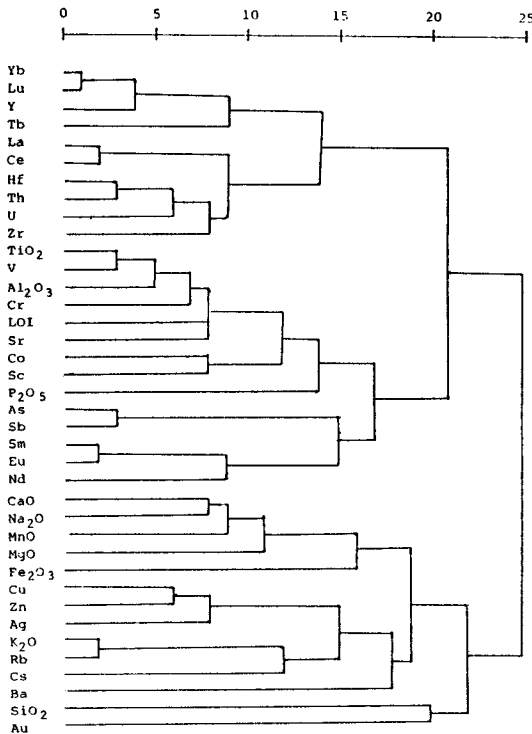


Fig. 12. Dendrogram plotted from the R-mode cluster analysis of multi-element data.

강암질암에서 서로 다른 양상을 보인다. V-Cr 관계도에서도 매우 강한 양의 상관성을 보이며 비변질 안산암질암, 변질 안산암질암과 광석을 구분해주며, 화강암질암은 변질 안산암질암과 중첩된다. Rb과 Sr은 부의 상관성을 보이며 비변질 안산암질암, 변질 안산암질암, 광석 및 화강암질암에서 Rb/Sr비는 뚜렷한 차이를 보여준다(Fig. 11).

Sc 함량은 SiO₂ 함량이 증가함에 감소하며 Sc/SiO₂ 값은 비변질 안산암질암에 비해 변질 안산암질암에서 감소하며, Sr 함량은 SiO₂ 함량이 증가함에 따라 광석, 비변질 안산암질암, 변질 안산암질암 및 화강암질암 순으로 감소하는 경향을 보인다.

통계적 해석에 의한 지구화학적 특징 대비

군집 분석

원소들 사이의 지구화학적 유사성(거동특성)을 규명하기 위하여 원소들 사이의 상관관계를 이용하여 R-mode

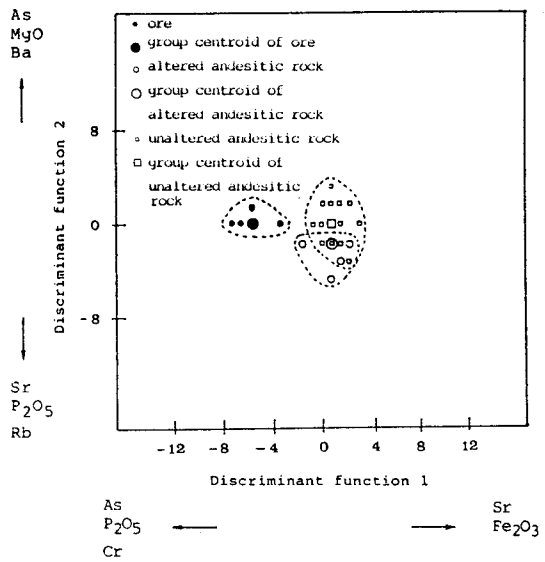


Fig. 13. Scatter plot of discriminant scores of pyrophyllite ore, altered and unaltered andesitic rocks from Milyang area.

군집 분석을 수행하였다(Fig. 12). 비변질 안산암질암, 변질 안산암질암 및 광석시료에서 유사성이 강한 원소군은 Yb-Lu-Y, La-Ce-Hf-Th-U-Zr, TiO₂-V-Al₂O₃, Sm-Eu, CaO-Na₂O-MnO, Cu-Zn-Ag, K₂O-Rb 등이었다. 이들 중 La, Ce 등의 LREE는 Hf, Th, U, Zr 등과 밀접한 상관성을 갖는 원소군을 형성하며 Sm, Eu는 별도의 원소군을 형성하고 Yb, Lu 등 HREE는 Y과 함께 광석의 형성시에 급격하게 감소하는 거동특성을 보이고 있다. Na₂O와 CaO는 변질과정 동안 안산암내 장석들의 변질에 의해 감소하는 원소이다. Cu-Zn-Ag는 친동원소들로서 변질작용 중에도 유사한 지구화학적 거동특성을 보여주며 이와 유사한 거동특성을 보이는 K₂O, Rb이 원소군을 이룬다.

판별 분석

밀양지역의 노두 및 시추공에서 채취한 시료들에 대하여 비변질 안산암질암, 변질 안산암질암 및 광석시료들 사이의 지구화학적 차이점을 구분하기 위하여 판별 분석을 실시하였다. 판별식은 F 통계량과 Wilk's Lambda를 이용하여 Stepwise법으로 수행하였다. 분석치가 측정한계 이하인 원소 그룹을 제외한 주, 부성분 및 미량원소 성분을 이용한 판별 분석결과가 Fig. 13 및 Table 3.4에 나타나 있다. 판별식 1은 eigenvalue가 약 5.0으로서 79.6%의 분

Table 3. Discriminant function coefficients and related statistics.

	FUNC. 1	FUNC. 2
Eigenvalue	5.0366	1.2912
Percent of variation	79.59	20.41
Coefficients		
Fe ₂ O ₃	.71350	-.34800
MgO	.54288	1.09424
P ₂ O ₅	-.76970	-.10352
As	-1.36506	1.12936
Ba	.35626	.76923
Cr	-.69560	.22733
Rb	-.44228	-.88974
Sb	2.14821	-1.37032

산을 설명하며 판별식 2는 eigenvalue가 1.3으로서 20.4%의 분산으로 설명한다(Table 3). 집단 구분에 가장 영향력을 미치는 효과를 알려주는 standard canonical 변수를 살펴보면 판별식 1에서 Sr(2.148), As(1.365), P₂O₅(-0.770), Fe₂O₃(0.714), Cr(-0.696) 등이며 판별식 2에서는 Sr(-1.370), As(1.129), MgO(1.094), Rb(-0.890), Ba(0.769) 등으로 나타났다. 판별식으로 구한 판별 점수를 도시하여 보면(Fig. 13), 판별 함수 1에 의해 가로축에서 0을 중심으로 좌측으로 P₂O₅, As, Cr 성분 등과 우측으로 Fe₂O₃, Sr 등에 의해 광석과 비변질 안산암질암 및 변질 안산암이 지구화학적으로 확실히 구분된다. 판별 함수 2에 의해서는 광석과 안산암질암이 명확히 구분되지는 않고 있으나 세로축에서 0을 중심으로 아래로 Sr, P₂O₅, Rb 성분 등과 위로 As, MgO, Ba 등에 의한 차이점이 발견된다.

요인 분석

Table 5는 주, 부성분 원소 및 미량원소를 이용한 varimax rotation 후의 요인 분석표로서 5개의 요인은 69.4%의 설명력을 가진다. 요인 1의 eigenvalue는 9.48로 24.9%의 설명력을 가지며 요인을 이루는 원소들은 규화작용이나 납석의 형성과 관련되어 증가하는 주성분 원소인 SiO₂, Al₂O₃, LOI(loss on ignition)와 비변질 안산암질암의 변질시 별다른 변화를 보이지 않다가 광석에서 급격히 감소하는 K₂O와 Rb, 그리고 비변질 안산암질암에 비해 변질안산암질암에서 감소하였다가 광석시료에서는 증가하는 TiO₂, P₂O₅, Cr, Sc, Sr, V 등이다. 요인 2는 La, Ce 등의 LREE와 Th, U, Hf, Zr 등의 친석 원소들로 구성된 원소군이다. 요인 3은 비변질 안산암질암의 변질작용시 별다른 변화를 보이지 않다가 광화작용시에 현저한 감소

Table 4. Discriminant classification results of the groups.

Actual group	No. of cases	Predicted group membership		
		1	2	3
Group 1 (ore)	5	5 (100.0%)	0 (.0%)	0 (.0%)
Group 2 (altered rock)	9	0 (.0%)	9 (100.0%)	0 (.0%)
Group 3 (unaltered rock)	29	0 (.0%)	4 (13.8%)	25 (86.2%)

Percent of "grouped" cases correctly classified : 90.70%

현상을 나타내는 Y과 HREE(Tb, Yb, Lu)로 구성되어 있다. 요인 4는 비변질 안산암질암의 변질과정시 사장석의 분해에 의해 감소하는 NaO, CaO 등과 유색 광물의 분해에 의해 감소하는 MgO 및 MnO로 구성된다. 요인 5는 Sm, Eu, Nd 등의 기타 LREE로 구성되어 있다. 이 때 요인 1~3이 58%의 설명력을 가지고 나머지 2개의 요인이 11%의 설명력을 가진다.

변질작용 및 변질대의 형성

열수 변질은 모암의 구성 광물과 열수의 반응으로 모암의 탈색이나 softening, 투수율의 증가, 비중의 감소 등 물리적 성질이 변화하고 화학 성분의 변화를 수반한다. 시료의 화학 분석치가 중량 백분율(wt. %)로 표시되어 있으므로 대체적인 화학 성분의 변화 경향은 나타낼 수 있다. 그러나 화학 성분의 변화량을 중량 백분율로 나타내면 변질작용에 큰 영향을 갖는 원소들(특히 H⁺)은 금속이온에 비하여 그 중량이 현저하게 작아서 그 역할이 무시될 수도 있다. 즉 argillic-sericitic 변질작용에서 가장 중요한 역할을 담당하는 수소 교대 작용(Hemley and Jones, 1964)의 역할이 무시될 수 있다. 따라서 변질작용에 관여하는 이온들의 증감 현상이나 역할을 보다 정량적으로 고려하기 위하여 화학 분석치와 함께 가비중을 이용하여 단위 체적당 이온의 양(g/l)을 계산하였다(Table 6). 비변질 안산암질에 가깝다고 여겨지는 6개의 시료와 변질 안산암질암 3개, 그리고 광석시료 4개를 선택하여 이온의 양을 비교하였다. 이들 특정시료는 비변질 안산암질암이 변질해온 일반적인 과정을 나타내지는 않으므로 비교를 위하여 평균 값을 이용하였다. 이온들의 변화 양상을 보면 비변질 안산암질암에 비해 변질 안산암질암 및 광석에서 SiO₂는 2.9, 3.2%, Al³⁺은 15.3, 51.6%, 그리고 LOI(loss

Table 5. Eigenvalue, percent of variation, cumulative percent and varimax rotated factor loadings in factor analysis for total elements in Milyang area.

	FACTOR 1	FACTOR 2	FACTOR 3	FACTOR 4	FACTOR 5
Eigenvalue	9.48	7.51	4.93	2.37	2.07
Pct of var	24.9	19.8	13.0	6.2	5.5
Cum Pct	24.9	44.7	57.7	63.9	69.4
Element					
V	.91084	-.07631	.04068	-.10757	.10999
TiO ₂	.90529	.13824	.13785	.06406	.16596
Sr	.79611	-.22009	-.08683	-.15066	.07603
Al ₂ O ₃	.78375	.41883	.08414	-.10477	.12543
Cr	.75648	.00912	-.29433	-.22945	.15837
SiO ₂	-.72157	-.13292	-.13662	-.33996	.13530
LOI	.69995	.19208	.13791	-.34204	-.01781
Sc	.68621	.05680	.47430	.23280	.14256
K ₂ O	-.66027	.22282	.15571	.24319	.13637
P ₂ O ₅	.61605	-.32405	-.44736	.10918	.20184
Rb	-.56927	.34852	.07610	.18278	.15542
Th	-.05865	.87767	.23525	-.25843	.11368
Hf	.27732	.81482	.37864	-.11959	.07882
Zr	.23276	.74144	.30043	.02949	.05431
La	-.13471	.72275	.03194	-.30656	.45361
Ce	-.05438	.69712	.03652	-.32117	.58680
U	-.23866	.68826	.48785	.02870	.01651
Yb	-.11003	.24230	.91313	-.02449	.02079
Y	.21364	.16364	.87441	.10869	-.09278
Lu	-.22812	.31707	.85228	-.08705	-.04600
Tb	.14812	.08062	.74572	.15193	-.35407
CaO	-.11452	-.16967	-.13101	.83760	-.16055
Na ₂ O	-.34503	-.20023	.10079	.72743	-.22965
MgO	.04460	-.25345	-.12280	.71237	-.03748
MnO	-.10393	-.05504	.11906	.67476	-.21460
Sm	.13272	.25400	.09373	-.16962	.84662
Eu	.26136	.22206	.25743	.06561	.79165
Nd	.11105	.00236	-.22323	-.30477	.76865

on ignition)는 60.0, 148.1% 증가하였다(Table 6). Al³⁺은 변성이나 변질작용시에 비교적 안정한 원소임에도 불구하고 변질 안산암질암에 비해 광석의 형성시에 현저하게 증가한 것을 보면 이는 광체의 형성시에 열수가 이동했음을 의미한다. Ti⁴⁺는 비변질 안산암질암에 비해 변질 안산암질암에서 15%, 광석에서 18.3% 증가한다. Ca²⁺, Mg²⁺은 비변질 안산암질암에 비해 변질 안산암질암에서 67.7, 90.8%로 더 크게 감소하고 Na⁺, Fe³⁺, Mn²⁺ 등은 광석에서 86.2, 60.2, 77.8%로 더 크게 감소하였다. K⁺는 변질 안산암질암 및 광석에서 각각 일정하게 감소하고, P⁵⁺는 변질 안산암질암에서는 감소하였다가 광석에서는 증가하

는 현상을 보인다(Table 6, Fig. 14).

K₂O/Na₂O-SiO₂-Al₂O₃-H₂O system에서 압력이 일정하고 석영이 과잉 존재하는 경우 알칼리 장석, 알칼리 운모, kaolinite의 안정 영역은, 장석은 알칼리이온 대 수소이온의 활동도비(Na⁺, K⁺/H⁺)가 높고 고온일 때, kaolinite는 알칼리이온 대 수소이온의 활동도비(Na⁺/H⁺, K⁺/H⁺)가 낮고 저온일 때 안정하며 알칼리 운모는 양자의 중간영역에서 안정하다(Hemley and Jones, 1964). 열수 용액 내의 알칼리이온 대 수소이온의 활동도비(Na⁺, K⁺/H⁺)는 장석의 안정 영역보다 낮아서 장석은 분해되면서 견운모가 형성되는 견운모 안정영역을 거치게 되며, 온도가

Table 6. Chemical composition per unit volume of samples in Milyang area.

(g/l)

	Ore				Altered				Unaltered				Average		Unaltered				
	my4-73	my3-59	my3-72	my3-63	my3-40	my3-90	my4-100	my3-10	my4-41	sj3-80	0402	0403	0602	0603	fresh altered	ore altered	ore		
SiO ₂	1957	1661	1744	1498	1711	1365	1808	1640	1487	1774	1506	1595	1687	1423	1583	1628	1634	+2.9	+3.2
Al ³⁺	201	338	359	422	200	483	167	243	238	225	263	241	245	270	246	284	373	+15.3	+51.6
K ⁺	3.0	0.9	2.6	16.0	54.8	1.8	3.3	63.4	44.8	81.8	65.6	53.1	68.6	54.9	59.1	20.0	6.5	-66.2	-89.0
Na ⁺	2.6	1.9	2.9	7.3	83.4	1.8	4.1	56.4	68.1	97.3	38.3	48.8	81.0	84.4	58.5	29.7	4.1	-49.2	-93.1
Ca ²⁺	9.6	9.4	7.1	12.0	73.7	2.1	3.9	118.6	58.9	35.2	57.8	89.9	86.1	130.7	82.3	26.6	9.5	-67.7	-88.4
Mg ²⁺	0.3	0.6	0.5	2.8	7.2	1.3	1.7	20.3	26.3	15.1	46.4	61.0	30.9	56.7	37.0	3.4	1.3	-90.8	-96.5
Mn ²⁺	0.2	0.2	0.2	0.2	2.1	0.2	0.2	2.3	2.3	1.9	1.0	1.7	1.5	2.8	1.8	0.9	0.2	-51.5	-88.3
Fe ³⁺	2	42	6	83	54	37	232	109	210	63	160	158	99	190	147	108	43	-26.9	-70.5
Ti ⁴⁺	13.6	12.4	13.3	23.1	6.0	31.1	10.4	10.9	11.4	6.9	18.2	16.7	11.6	18.3	13.7	15.8	16.3	+15.0	+18.3
P ⁵⁺	5.3	5.0	4.3	4.8	1.3	2.1	0.5	2.8	2.1	0.9	4.0	4.3	2.4	4.6	3.1	1.3	4.7	-58.4	+50.7
LOI*	106	152	130	201	23	257	32	44	69	38	89	91	31	41	65	104	161	+60.0	+148.1
S.G.	2.55	2.59	2.62	2.75	2.50	2.65	2.88	2.71	2.67	2.66	2.69	2.76	2.76	2.67					

Quantity of ion per unit volume=atomic weight/molecular weight X 1000 X specific gravity, *LOI: loss on ign.

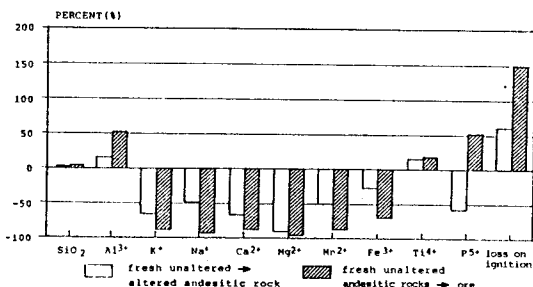
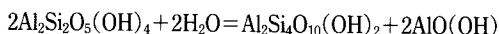


Fig. 14. Variation of chemical composition per unit volume in unaltered and altered andesitic rocks and ore zone.

낮아지고 반응이 계속 진행되면서 반응은 납석 안정영역으로 진행되고 용탈된 철성분은 황철석으로 안정해지며 광체의 외곽에 kaolinite 변질대가 형성된 것으로 추정된다.

밀양지역에서는 광체 중심부에 규화대와 납석대가 존재하고 diaspore를 포함하고 있으며(diaspore는 직경 5 cm 정도로 광체내에 포함) 외곽부에 kaolinite 변질대가 분포한다. 광체내의 규화대는 과잉의 SiO₂가 농집되었으며 치밀한 구조의 괴상으로 나타나며 주구성 광물은 석영이다.

Diaspore는



kaolinite pyrophyllite diaspore

의 평형 반응으로 형성될 수 있으며, 평형 온도는 300±10°C로 보고된 바 있다(Hemley et al., 1980).

밀양지역의 납석변질대는 알칼리이온/H⁺의 활동도비가 낮은 환경에서 형성되었고 온도가 낮아지면서 kaolinite가

안정한 영역으로 변질했을 것으로 추정된다.

결론

경남 밀양지역의 밀양 및 송진 납석광상 부근에서 광석 및 변질 안산암질암, 비변질 안산암질암 및 화강암질암을 채취하여 마그마 계열을 규정하고 다원소 분산 특성 및 변질대의 지구화학적 특성과 광상의 생성 환경을 연구한 결과는 다음과 같다.

1) 밀양지역의 밀양 납석광상에서 함붕소 광물인 dumortierite가 확인되며 인근의 공간적으로 관련된 흑운모 화강암에서도 전기석이 확인됨으로써 납석의 생성 환경은 B이 풍부한 환경이었음을 시사한다. 광석의 주구성 광물은 납석과 석영이며 황철석이 농집되거나 산집상으로 나타나며 diaspore가 포함된다. 변질대에서는 견운모가 산출되고 변질대의 외곽에서는 kaolinite 변질대가 나타난다.

2) 밀양지역의 안산암질암과 인근의 화강암질암은 calc-alkaline 계열에 해당되며 안산암질암 및 화강암질암의 주성분 원소는 분화 경향 및 각 성분 변화도에서 매우 밀접한 관련성을 나타내어 이들이 동일한 근원의 마그마로부터 형성되었을 가능성을 시사하고 있다.

3) 변질 안산암질암 및 광석시료에서 SiO₂는 4% 정도 증가하고 Al₂O₃은 9% 정도 그리고 LOI(loss on ignition)은 열수의 유입으로 함수 광물이 형성되면서 현저하게 증가한다. K₂O, Na₂O, CaO, MgO, Fe₂O₃ 등은 변질 안산암질암 및 광석에서 변질과정 중 심하게 용탈된다. As,

Cr, Sr, V 등은 비변질 안산암질암에 비해 변질 안산암질암에서 감소하나 광석에서는 증가하였고 Ba, Cs, Ni 등은 비변질 안산암질암에서 변질 안산암질암, 광석으로 갈수록 감소하였다. Rb, U, Y 함량은 광석에서 감소하며, Co, Sc, Zn 함량은 비변질 안산암질암에 비해 변질 안산암질암 및 광석에서 감소하고 Sb 함량은 증가하였다. REE 분석결과 광석시료에서 $(La/Lu)_{cn}$ 는 4.18~22.13에서 8.98~55.05로 증가하였다.

4) 화학 성분들의 상관계수를 이용하여 군집 분석을 실시한 결과 HREE와 Y, LREE와 Hf, Th, U, Zr이 각각 상관성 있는 원소군을 이루며 변질작용시 함량이 증가하는 TiO_2 -V- Al_2O_3 군과 함량이 감소하는 CaO-Na₂O-MnO군이 특징적으로 유사성이 강한 원소군으로 나타났다.

5) 비변질 안산암질암, 변질 안산암질암 및 광석으로 구분하여 편별 분석을 실시한 결과, 광석은 P_2O_5 , As, Cr 성분 등과 Fe_2O_3 , Sr 등의 원소에 의해 비변질 안산암질암이나 변질 안산암질암과 뚜렷한 지구화학적 차이를 보여준다. 요인 분석을 실시한 결과 SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , P_2O_5 , LOI(loss on ignition) 등과 전이원소 및 Rb, Sr 등은 변질작용 중 현저한 함량 변화를 보였으며 Al_2O_3 는 변질작용 중에 비교적 안정한 원소임에도 불구하고 함량이 크게 변화한 것은 열수가 이동했음을 시사한다.

6) 단위 체적당 이온들의 변화 양상을 보면, 변질 및 광석의 형성시에 Al^{3+} 과 LOI(loss on ignition)은 안산암질암의 변질 및 광석의 형성시에 두드러지게 증가한다. K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Ti^{4+} 은 비변질 안산암질암의 변질시 크게 감소하고 Fe^{3+} , Na^+ 는 광석의 형성시에 더 크게 감소하며 P^{5+} 는 변질시 감소하였다가 광석에서 증가하였다.

7) 밀양지역 납석광상은 현장 조사, 광물 특성, 원소 함량 및 다변수 통계처리 등의 자료를 통하여 안산암질암이 인근의 화강암류와 관련된 열수 용액에 의해 알칼리이온/ H^+ 의 활동도비의 낮은 환경에서 변질되어 납석광상을 형성한 것으로 추정할 수 있다.

사 사

본 연구는 한국과학재단의 1989년도 목적기초연구과제인 “비금속 및 고품위 요업원료 광물자원” 연구(책임자: 전효택) 중 세부과제인 “고알루미나 광상에 관한 지구화학적 연구”의 일부이며 또한 전략광물자원연구센터의 연구비 일부로 수행되었다. 본 연구수행 중 시료채취에

적극 협조해 주신 밀양 납석광산의 윤관호 총무에게 감사드린다.

참고문헌

- 김규봉, 황상구 (1988) 밀양도폭 지질보고서. 한국동력자원연구소.
- 김기완, 박용진 (1964) 한국지질도(청도도폭) 국립지질조사소.
- 김남갑, 이흥규 (1964) 한국지질도(영산도폭) 국립지질조사소.
- 김문영, 신흥자, 이평구, 장영남 (1988) 경남 양산지역에 분포하는 화산암류의 지구화학적 특성연구. 광산지질, 21권, p. 139-148.
- 김영규 (1989) 경남 양산지역의 납석광상에 대한 광물학적 연구. 서울대학교 석사논문.
- 김진섭 (1990) 경상분지 동남부 일대에 분포하는 백악기 화산암류에 대한 암석학적인 연구. 지질학회지, 26권, p. 53-62.
- 대한광업진흥공사 (1987) 광상시추조사보고. p. 496-499.
- 대한광업진흥공사 (1987) 비금속 광물특성 조사보고서(고령도, 납석 편)
- 상기남 (1986) 한반도 남부지역 고령도-납석광상 생성기구. 광산지질, 19권, p. 43-52.
- 이동진, 이성록 (1988) 천운산내 고알루미나 광석에 대한 광물학적 연구. 광물연구, 한국동력자원연구소. p. 3-39.
- 이재영, 김상욱, 김영기, 고인석, 장태우 (1990) 유천분지내 화강암류와 광상구의 관계에 대한 지화학적 연구. 광산지질, 23권 p. 143-159.
- 전효택, 정영욱, 김인준 (1991) 경남 및 전남 일부 납석광상의 산소-황 동위원소 조성과 광상성인. 광산지질, 24권, p. 97-105.
- 정영욱, 전효택 (1989) 경남 양산 및 밀양지역 납석광상의 지구화학적 연구. 광산지질, 4권, p. 341-354.
- 차문성, 김정진, 김 현 (1972) 부산시 일원(부산-동래지역)의 화성활동과 광화작용에 관한 연구. 광산지질, 5권, p. 151-162.
- 홍승호, 최범영 (1988) 유천도폭 지질보고서. 한국동력자원연구소.
- 황상구, 김상욱 (1990) 밀양-양산간의 칼데라를 동반한 규질 화류용회암. 지질학회지, 26권, p. 329-340.
- Cullers, R.L. and Graf, J.L. (1984) Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: Intermediate and silicic rocks-ore petrogenesis: in Rare Earth Element Geochemistry, ed., P. Henderson, Amsterdam, Elsevier, p. 275-316.
- Hemley, J.J. and Jones, W.R. (1964) Chemical aspects of hydrothermal alteration with emphasis on hydrogen metamorphism. Econ. Geol., v. 159, p. 538-569.
- Hemley, J.J., Montoya, J.W., Marinenko, J.K. and Luce, R.W. (1980) Mineral equilibria in the system Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O and some implications of alteration/mineralization processes. Econ. Geol., v. 75, p. 210-228.
- Hong, Y.K. (1985) Geochemistry of Cretaceous Eonyang and Yoocheon granites in granites in the Southeastern Korea. J. Geol. Soc. Korea., v. 21, p. 90-108.
- Jin, M.S., Kim, S.Y. and Lee, J.S. (1981) Granitic magmatism and associated mineralization in the Gyeongsang basin, Korea. Min. Geol., v. 31, p. 245-260.
- Min, K.D., Kim, O.J., Yun, S. and Choo, S.H. (1982) Applicability of plate tectonics to the post Late Cretaceous

igneous activities and mineralization in southern part of South Korea(I) Jour. Kor. Inst. Min. Geol., v. 15, p. 123-154.
Miyashiro, A. (1974) Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. Am. J. Science, v. 274, p. 321-355.

Rogers, J.W. and Greenberg, J.K. (1981) Trace elements in continental margin magmatism, Part III, Alkali granites and their relationship to cratonization : Summary, G.S.A. Bull., v. 92, p. 6-9.

1992년 1월 15일 원고접수