

## 경남 양산 및 밀양지역 납석광상의 지구화학적 연구

정 영 옥\* · 전 효 택\*\*

### Geochemistry of Pyrophyllite Deposits in Yangsan-Milyang Areas in Korea

Young-Wook Cheong\* and Hyo-Taek Chon\*

**Abstract:** Mineralogy and geochemistry of five pyrophyllite deposits in Yangsan-Milyang area such as Cheonbulsan, Dumyong, Dongrae, Youkwang, and Sungjin mines were investigated. Pyrophyllite ores consist mainly of pyrophyllite, sericite, and quartz with some amounts of kaolinite and pyrite. Polytype of pyrophyllite is 2M. Sericite has two polytypes of 1M and 2M. The  $\delta^{18}\text{O}$  values of pyrophyllite from the Cheonbulsan and the Dumyong mines were measured as 0.23–0.60‰ and 3.40‰, respectively, and those of montmorillonite and kaolinite from the Dumyong mine were in the range of 11.90–12.06‰. This low oxygen isotope composition provides conclusive evidence for hydrothermal activity in the studied area. Contents of major elements are more useful than those of trace elements to discriminate altered zones such as pyrophyllite, sericite, argillic, and andalusite zones from the surrounding rocks. Particularly, contents of  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  and  $\text{CaO}$  are helpful to identify alteration zones from the discriminant and the cluster analysis of multi-element data.

#### 서 론

국내의 납석광상은 경상남북도 밀양, 양산, 김해, 월성, 청송등지와 전남 서남부인 해남, 진도, 완도, 다도지역에 밀집 분포하고 있으며 이들 광상들은 대체로 안산암질 혹은 유문암질 화산암류의 변질대에 부존되고 있다. 국내에서 최근의 납석광상에 대한 연구로는 광물조성 및 광상학적 연구(신상은, 1988; 박홍봉등, 1988; 이장섭, 1986), 납석의 광물학적 연구(노열, 1989; 김영규, 1989; 이동진등, 1989) 그리고 광물조성과 내화도와의 상관성 연구(박홍봉등, 1982)등이 있다. 외국의 경우 납석의 광물합성 및 광물학적 연구(Eberl, 1979; Rosenberg, 1974; Rayner and Brown, 1965; Lee and Guggenheim, 1981), 납석광상의 구조규제 및 납석의 산업광물로서의 용도기준연구(Cornish, 1983) 그리고 납석광물의 산소, 수소동위원소 조성연구(Klein and Criss, 1988) 등이 있다. 국내의 납석광상에 대한 형성시기 및 형성기구의 연구와 변질대내의 지구화학적 원소분포, 특히 미량원소의 분포패턴 연구는 제안단계에 있는 실정이며, 납석 광상 해석에 적용한 수소, 산소동위원소 조성연구는 아직까지 보고된 바가 없다.

최근들어서 탐광지구화학 분야에서는 다변수 통계처리 방법인 Cluster analysis, Discriminant analysis, Factor analysis 등의 분석기법을 이용하여 원래의 자료들 (raw variables) 대신 자료를 변형 혹은 축소화시켜서 지구 화학적 이상대를 찾아내던지 지구화학적 자료해석에 효과적으로 응용하고 있다(Tripathi, 1979; Pirie and Nichol, 1981; Amor and Nichol, 1983; Clausen and Harpoth, 1983; Fedikow and Turek, 1983; Kalogeropoulos, 1985). 본 연구에서는 국내 주요 납석부존지역인 경남 양산-밀양지역과 전남 해남-다도지역중 우선 경남지역납석광상의 광물학적, 지구화학적 특징을 규명하고자 한다. 대상광상은 경남 양산 지역에서 천불산광산, 유광광산, 두명광산, 동래광산 그리고 밀양지역의 송진광산 등 5개 광산을 선정하여 변질광물에 대한 광물학적 연구와 함께 각광상별 지구화학적 특징을 규명하였고 지화학적 탐광지침을 도출하였다. 지구화학적 자료의 해석을 위하여 다변수 통계처리(SPSS 통계 package) 방법을 이용하였다.

#### 시료채취 및 화학분석

양산 및 밀양지역의 변질안산암내에 존재하는 천불산광산, 유광광산, 두명광산, 동래광산, 송진광산의 광체 및

\* 서울대학교 (Department of Mineral and Petroleum Engineering, Seoul National Univ., Kwanak-ku, Seoul, 151-742, Korea)

주변암에 대해서 총 41개의 시료를 채취하였다. 이러한 시료들은 jaw crusher에 의하여 파쇄한 후 4분법에 따라서 시료를 감소시켜 -200mesh로 분쇄하였다. 이 분말시료는 HNO<sub>3</sub>, HClO<sub>4</sub>, HF를 2 : 1 : 5로 섞은 혼합산을 사용하여 금속블록(metal block)에서 가열하여 완전분해가 이루어졌다. 총 19개의 원소에 대해 화학분석을 실시하였는데 K, Na의 분석은 Atomic Absorption Spectrometer(AAS)를 이용하였고 Al, Ti, Fe, Ca, Mg, Mn, Ce, Cr, Ga, Hf, La, Mo, Nd, V, Y, Yb, Zr등의 원소들은 Inductively Coupled Plasma(ICP)에 의해 이루어졌다. 시료의 처리와 화학분석 과정에서 필요한 품질관리(quality control)는 참고물질(reference)의 첨가와 동일시료의 2회 반복(duplication) 및 blank 등의 이용으로 수행하였다. X-선 회절분석은 Cu를 target 및 Ni filter조건으로 하였고, 가압전압 및 전류는 30Kv/15mA, receiving slit는 0.3mm로 분석하였다. 적외선 흡광 분석은 KBr pellet 방법으로 분석하였다. 시료의 표면구조

를 관찰하기 위해서 시편의 파쇄표면을 실온에서 충분히 건조시킨 후 금으로 코팅한 후 전자현미경으로 관찰하였다. 시료의 조직 및 변질정도를 인지하기 위해 편광현미경 관찰을 실시하였다. 산소 동위원소 조성은 변질대의 시료로부터 순수한 납석과 점토광물을 분리한 후 미국 Purdue 대학의 의뢰하여 Clayton and Mayeda(1963)가 제시한 bromine pentafluoride(BrF<sub>5</sub>)방법으로 Nuclide3-60 mass spectrometer에 의해 분석하였다. 백색도는 -200mesh분말시료를 이용하였고 백색도가 77.3인 standard를 이용하여 측정하였다. 사용된 측정기기는 일본 Nippon Denshoku Kogyo회사 기기를 이용하였다.

지질 및 광상개요

양산 및 밀양을 포함하는 지질은 적색세일을 주구성암으로 하는 육성퇴적층인 대양동층을 최하부로, 적갈색, 각력질 응회암은 팔용산층이 피복되어 있고 그후 안산암질 유

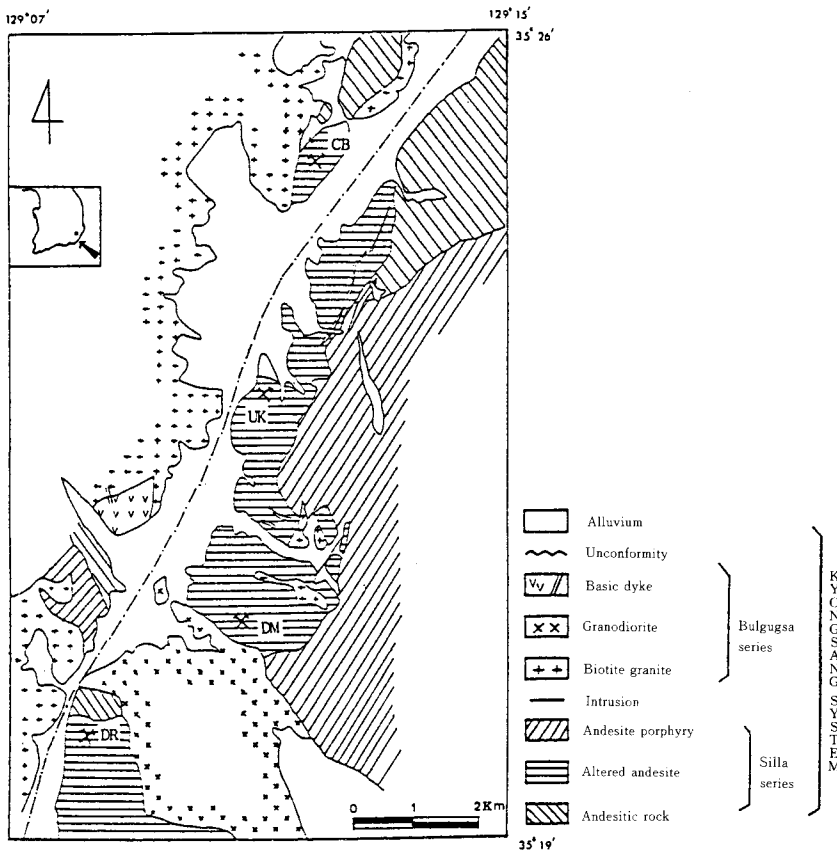


Fig. 1. Geological map of Yangsan area showing the sampling site. CB : Cheonbulsan mine, DM : Dumyong mine DR : Dongrae mine, UK : Youkwang mine

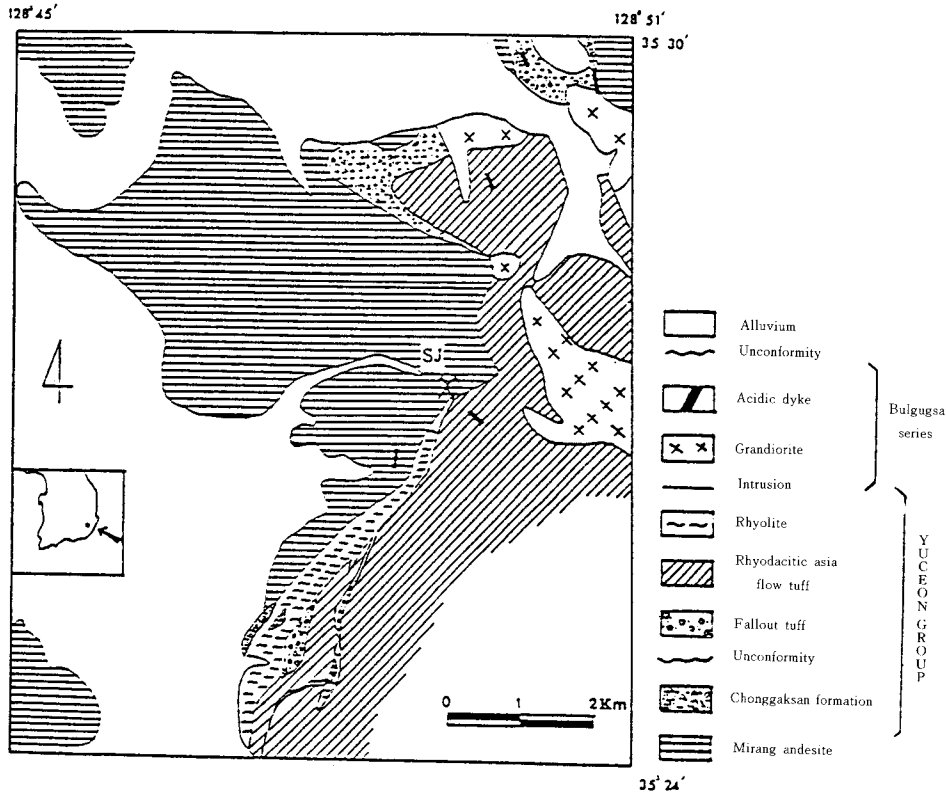


Fig. 2. Geological map of Milyang area showing the sampling site. SJ : Sungjin mine.

문암질 화산암이 이들 암석층을 천부관입 혹은 분출하여 피복하고 있다. 이민성. 강필중(1964)은 양산도폭에서 안산암을 주산안산암, 도대동 안산반암, 원효산 함각력 안산반암으로 세분하였고 그상위에 규장반암 및 장석반암이 분포된다고 하였다. 김규봉. 황상규(1988)는 밀양도폭에서 팔용산층, 주산안산암, 도대동 안산암류를 주산안산암류로, 규장반암등의 반암류를 운문산 유문암질암류로 기재하였다.

관입암류는 화강암질암과 산성암맥류로 구분되는데 화강암질암류(지질연대 120Ma-58Ma)들은 세립 화강섬록암으로부터 각섬석 흑운모화강암, 흑운모화강암 분화상을 보이는 암석들이며 양산 밀양지역에 광범위하게 분포한다. 김종환 등(1976)은 tectolineament와 광상과의 관계연구에서 경남지역의 납석광상은 양산단층과 일치하는 N15°-30°E trend의 tectolineament에 따라 분포하며 특히 거대한 구조선 주변에서 분포한다고 하였고, 구조선들이 백악기 후기에 생성되었으므로 광상생성시기를 백악기와 제 3기에 해당한다고 하였다.

양산지역의 천불산, 유광, 두명 및 동래광산은 남북으로 길게 분포한 변질암산암내에 위치한 광상들로서 천불산광산, 두명광산 그리고 동래광산부근에 화강암류가 관입되어 있다(Fig. 1). 이들 광산에서 산출되는 납석 및 견운모가 주구성광물인 변질암은 탈색화되어 있고 질리 혹은 맥들이 관찰된다. 특히 천불산 광산에서는 견운모 변질대에 공극이 발달하고 있으며 황철석이 충전되어 있다. 유광광산과 두명광산에서는 kaolinite와 smectite의 점토맥이 분포한다. 한편 동래광산에는 미세한 맥들에 미립의 광석광물이 수반되고 나머지 광산들과는 달리 홍주석 광물을 포함하는 각력암이 분포한다.

승진광산을 포함하는 밀양지역의 지질은 밀양 안산암과 유문석영안산암질 응회암이 넓게 분포되어 있고 양 암사이에 유문암이 관입되어 있으며 양산지역과 연결되는 화강암류들이 승진광산 동측부에 분포되어있다(Fig. 2). 승진광산은 밀양안산암에 배태된 광산으로 견운모 등으로 구성된 변질암들은 탈색화되어서 회백색이 보이고 반정의 흔적이 남아있는 경우도 있다. 또한 황철석이 변질암중에 판상으로

로 조밀하게 분포되어 있기도 하며 이는 변질작용시 절리 등에 의한 구조규체가 있었음을 암시한다.

### 광물조성과 특징

천불산광상, 유광광상, 두명광상, 동래광상 및 송진광상에서 산출되는 광체 및 주변암의 광물조성을 알아보기 위해서 X-선 회절분석(Fig. 3), IR(자외선 흡광분석) 및 편광현미경 관찰을 통해서 주구성광물 및 부구성광물을 기재하였다(Table 1).

천불산(CB)광상에서 산출되는 주구성광물은 석영, 견운모, 납석 등이고 전기석, diaspore, kaolinite등이 부구성광물

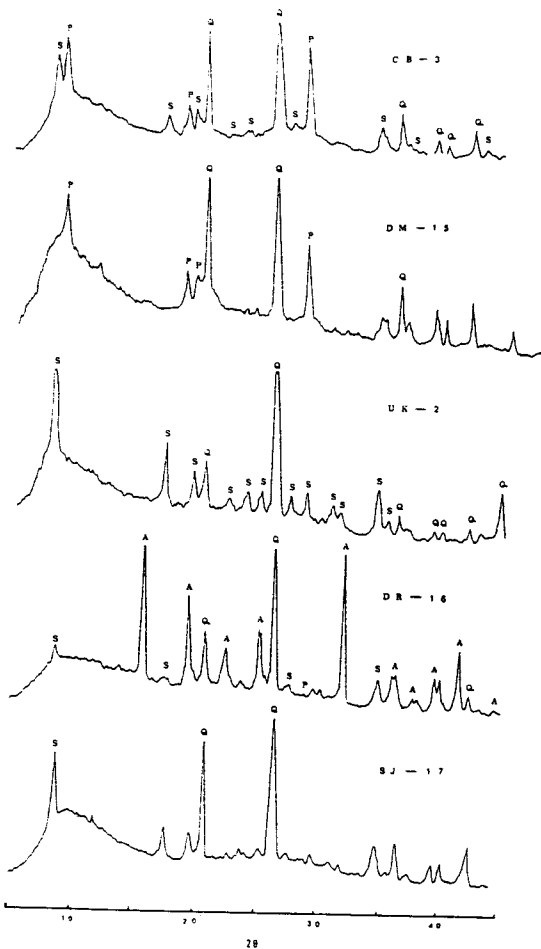


Fig. 3. X-ray diffraction pattern of ores  
 CB : Cheonbulsan mine, DM : Dumyong mine  
 UK : Youkwang mine, DR : Dongrae mine SJ : Sungjin mine  
 (Q : quartz, S : sericite, P : pyrophyllite K : kaolinite, A : andalusite)

로 존재한다, 또한 황철석과 석영이 변질대 공극에 자형 내지 반자형으로 산출되어 있다. 천불산 광상의 광화대 중심부는 납석광물대로서 견운모가 주변부에 발달되어 있으며 점토변질대는 미약하다.

두명(DM)광산 광체의 광물조성은 석영, 견운모, 납석 그리고 smectite, kaolinite가 주구성광물로서, 특히 smectite, kaolinite는 점토맥을 형성하면서 뚜렷한 점토변질대를 형성하고 황철석, 섬아연석, 황동석들의 광석광물을 포함하며 부구성광물로서 rutile등이 있다. 변질대는 납석대, 견운모대, 점토변질대로 구분된다.

동래(DR)광상의 경우 고온광물인 홍주석을 포함하며 석영, 견운모 그리고 kaolinite가 수반하며 미립의 황철석이 산출되고 있다.

유광(UK)광상은 석영과 견운모가 주구성광물로서 견운모화작용이 주를 이루며 황철석이 산출되며 변질대의 광물조성이 다른 광상들보다 단순하다.

송진(SJ) 광상의 경우, 광체의 주구성광물은 석영과 견운모이며 납석과 kaolinite가 부구성광물이고 황철석은 자형 내지 반자형으로 광체주변부에 밀집되어 있다.

상기 5개광상의 공통적인 산출광물로는 석영, 견운모, 황철석등이며, 주요한 변질작용은 견운모화작용이다. 두명광상을 제외하고는 천불산, 유광, 동래 및 송진광상의 변질대에는 점토변질대가 뚜렷이 발달되어 있지 않다.

양산지역에서 산출되는 납석의 저면간격은 9.2-9.3Å이며 납석의 Polytype은 1 Tc (1 layer triclinic) Poly type보다 2M (2 layer monoclinic) Poly type이 우세한 것으로 나타났다. 즉 1 Tc Polytype에서 (110)peak는 (002)peak보다 크며 2M Polytype에서 (004)peak가 1 Tc의 (002)peak보다 큰것으로 알려져 있는데 (Brindley and Wardle, 1970; Eberl, 1979)천불산광상과 두명광상의 경우 (004)peak가 (110)peak보다 크게 나타나 2M Poly type이 우세하다(Fig. 4). 또한 견운모의 polytype은 모든 광상에서 2.8Å과 2.58Å이 함께 나타나는 경우로 보다 1M과 2M이 혼재된 양상을 보인다.

변질광물에 대한 자외선 흡광분석의 결과(Fig. 5)를 요약하면 다음과 같다. 천불산광상의 시료(CB-1, CB-3)에서 3677, 1120, 1118, 1070, 1068, 950, 833, 830, 530, 476cm<sup>-1</sup>, 두명광산의 시료 (DM-15)에서 3676, 1124, 1072, 1052, 952, 854, 835, 696, 540, 518, 485, 420cm<sup>-1</sup>의 납석 band가 확인된다. 두명광산의 시료(DM-8)는 smectite의 3636, 1035, 918, 535, 475, 427cm<sup>-1</sup> band가 나타난다. 유광광산 시료 (UK-2)에서 3632, 1025, 991, 930, 752, 535, 477cm<sup>-1</sup>

Table. 1. Mineralogical compositions of pyrophyllite ores and associated rocks.

Mine	Sample No.	Mineralogical compositions	Rock type
Cheonbulsan (CB)	CB-01	sericite, quartz, pyrophyllite, kaolinite, pyrite	ser.
	CB-02	quartz, pyrophyllite, sericite, pyrite, diaspore	pyro.
	CB-03	quartz, pyrophyllite, sericite	//
	CB-04	quartz, pyrophyllite, kaolinite	//
	CB-05	quartz, sericite, pyrophyllite	ser.
	CB-06	quartz, sericite, pyrophyllite, kaolinite,	//
	CB-07	quartz, sericite, pyrite	//
	CB-08	quartz, feldspar, chlorite, biotite	gr.
	CB-09	quartz, feldspar, biotite, chlorite	//
	CB-10	pyrophyllite, quartz, sericite, pyrite	pyro.
	CB-11	quartz, sericite, pyrite	ser.
	CB-12	quartz, sericite, pyrophyllite	//
	CB-13	quartz, sericite	//
Dumyong (DM)	DM-07	smectite, quartz, sericite, kaolinite	clay
	DM-08	smectite, kaolinite, quartz, chlorite, pyrite, chalcopyrite, shalerite	//
	DM-09	quartz, sericite, pyrophyllite	ser.
	DM-10	quartz, pyrophyllite, sericite, kaolinite	pyro.
	DM-11	quartz, sericite, rutile	ser.
	DM-12	quartz, feldspar, olivine, hornblende, kalinite, opaque mineral	grd.
	DM-13	quartz, sericite	ser.
	DM-14 DM-15	quartz, sericite, pyrophyllite. quartz, pyrophyllite, kaolinite	// pyro.
Dongrae (DR)	DR-13	quartz, kaolinite, sericite, andalusite, pyrite, sphalerite	clay
	DR-14	quartz, feldspar, sericite, andalusite, pyrite	ser.
	DR-15	quartz, andalusite, sericite, kaolinite	and.
	DR-16	quartz, andalusite, sericite	//
Youkwang (UK)	UK-01	sericite, quartz.	ser.
	UK-02	quartz, sericite	//
	UK-03	quartz, sericite	//
	UK-04	quartz, sericite, pyrite	//
	UK-05	quartz, feldspar, sericite, chlorite	dyke.
	UK-06	quartz, feldspar, sericite, chlorite	//
Sungjin (SJ)	SJ-17	quartz, sericite, pyrophyllite, hematite	ser.
	SJ-18	quartz, sericite, pyrophyllite, kaolinite	//
	SJ-19	quartz, sericite,	//
	SJ-20	feldspar, quartz, chlorite	dyke
	SJ-21	feldspar, quartz, kaolinite	//
	SJ-22	quartz, sericite	ser.
	SJ-23	quartz, sericite	//
	SJ-24	quartz, sericite, pyrite,	//
	SJ-25	feldspar, quartz, chlorite, calcite.	dyke

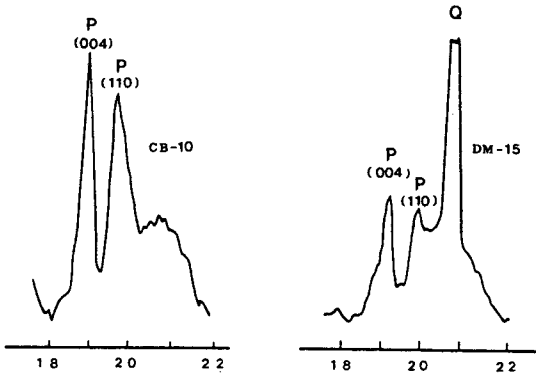
pyro. : pyrophyllite, ser : sericite, and : andalusite, grd. : granodiorite, gr. : biotite granite, dyke : basic dyke.

band며 모든 시료에서 700-1200cm<sup>-1</sup>구간에 석영 band가 나타난다.

변질광물의 형태적 특징을 규명하기 위하여 X-선 회절 패턴 peak가 뚜렷한 시료에 대해 전자현미경 관찰 결과 (Fig. 6) 천불산 광산 시료(CB-4)는 flake 형태의 곧 면을 갖는 납석 입자의 면(001)과 면이 중첩되어 집합체를 이루

며 비교적 잘 발달된 결정형을 갖는다. 두명광산 시료(DM-11)과 송진광산 시료(SJ-17)는 건운모 광물로서 결정이 warping되어 있고, 동래광산시료(DR-16)의 홍주석은 주상형결정이 잘 발달되어 있다.

변질정도와 수반광물들에 대한 암석현미경적 관찰 결과 천불산광산의 경우 규질화된 시료에서 자형의 석영결정과



29

Fig. 4. Characteristic X-ray dffraction pattern of pyrophyllite from Cheonbulsan mine(CB-10)and Dumyong mine(DM-15)

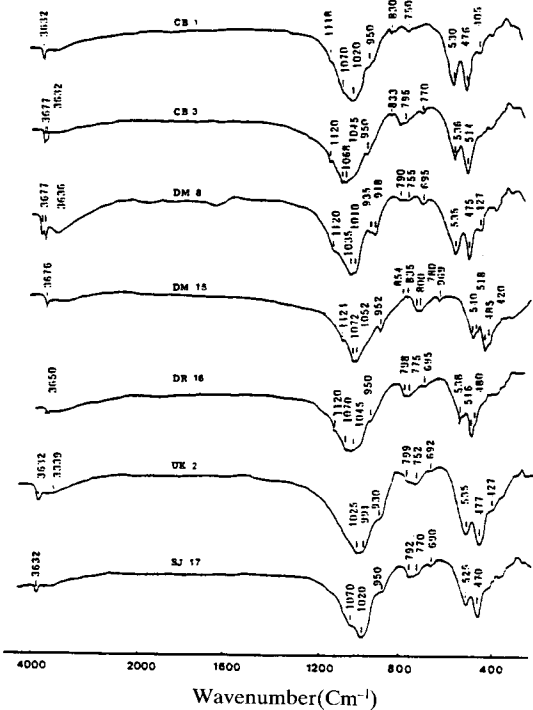


Fig. 5. Infrared absorption spectral patterns.

석영 경계부 및 주변에서 미립의 석영립들과 납석 및 견운모가 발달하고 있다.

한편 두명광산의 경우에는 천불산의 경우보다는 규질화 작용이 미약한 편으로 미세한 석영맥이 미립의 납석, 견운모 및 석영으로 구성된 matrix에서 관찰된다.

동래광산의 경우 미립의 석영립과 견운모로 구성된 mat-

rix내에 홍주석이 발달되어 있는데 이는 다른광상들과 광물 조성에 있어서 다르다.

송진광산의 경우 견운모화 작용이 우세하며 변질이전의 광물흔적(relict of host mineral)이 남아있기도 하며 또한 이들 relict내에 석영이 재결정되기도 한다.

### 지구화학적 특징

각 광상에서 채취한 시료의 주성분 및 미량 성분 분석결과가 Table 2에 수록되어 있다.

양산 및 밀양지역의 납석 및 견운모의 변질대는 지역적으로 근접되어 있을 뿐만 아니라 변질대의 모암이 안산암이므로 광상별 각론적 해석보다 변질대별해석방법이 이들 변질대의 지구화학적 특징을 도출하는데 유리할 것으로 판단되어서 변질광물에 따라 시료들을 납석대(Group 1), 견운모대(Group 2), 점토대(Group 3), 홍주석대(Group 5) 및 주변암(Group 4)으로 구분하고 각 변질대별로 원소의 함량 분포를 규명하였다(Table 3 참조).

### 변질대별 원소함량

각 변질대별로 각 원소들별 함량차이를 비교하기 위해 분산분석(analysis of variances)을 실시하였다. 분산분석은 표본의 분산(variance)을 분석하므로써 여러모집단(각 광상)의 평균들이 동일한지 아닌지 판단하도록 하는 통계적 분석방법이다. 분산분석에서 모집단 평균이 동일하다는 귀무가설(Ho)과 귀무가설에 대립되는 대립가설(Ha)을 설정하여 검정하게 된다.

Ho :  $\mu_{CB} = \mu_{UK} = \mu_{DM} = \mu_{DR} = \mu_{SJ}$  ( $\mu$  = 평균)

Ha : Ho는 틀림

집단내의 분산에 대한 집단간의 분산비를 F ratio라 하며 유의수준(0.05)과 자유도를 이용하여 F 분포표로부터 갖게 되는 F비의 임계치와 비교하여 모집단의 평균을 검정할 수 있다.

$$F \text{ ratio} = \frac{\text{Between estimate of variance}}{\text{Within estimate of variance}}$$

이때 집단간의 자유도는 집단수가 5개 이므로  $5-1=4$ 가 되며 집단내 자유도는 시료수(40)-집단수(5)=35가 된다 (정재교, 김호중, 1984; 김병주등, 1988). 따라서 지구화학적 자료해석시 종종사용되는 원소들의 상대적 함량차이(예

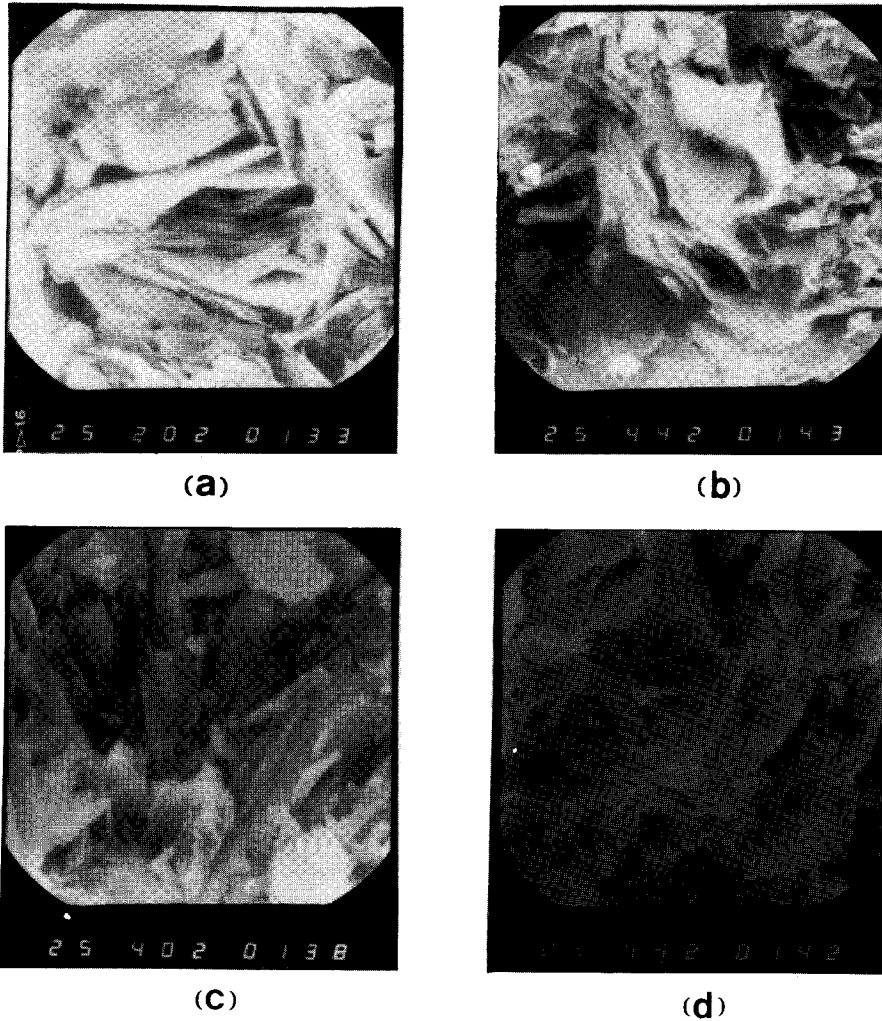


Fig. 6. Scanning electron micrographs of altered minerals. (a) flaky pyrophyllite(CB-4). (b), (d) sericite aggregate showing stacks (DM-11, SJ-17). (c) columnar andalusite aggregate (DR-16).

로 광상별 원소함량대비, 배경치와 이상치의 원소함량비교 등을 규명하는데 분산 분석이 적용될수 있다.

분산분석표(Table 4)에서 알수 있듯이 주성분원소의 경우  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$  및  $K_2O$ 의 원소들은 평균함량이 5개 집단에서 모두 같다고 할수 없다(Ha선택). 한편  $Al_2O_3$ 는 유의수준(0.05)보다 크므로 각 변질대들과 주변암사이에 평균함량이 다르다고 할수 없다. 특히  $Na_2O$ ,  $CaO$  등은 함량차이가 집단들 사이에서 통계적으로 상당히 차이가 있는 것으로 나타났다(Table 4).  $Na_2O$ 의 함량은 전반적으로 변질대에서 0.5%미만으로 나타나며 특히 점토대에서 고갈되어 있으며 주변암들과 비교해볼 때 매우

낮은 함량을 보인다(Table 3).  $CaO$ 의 경우 납석대, 건운모대, 점토대에서 낮은 함량을 보이며 홍주석대에서 약간 높은 함량을 보인다.

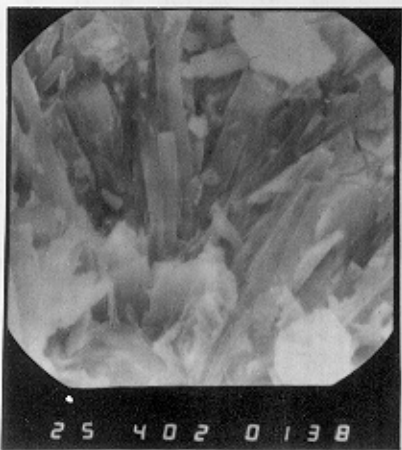
미량원소의 경우 Ce원소를 제외하고 Cr, Ga, Hf, La, Mo, Nd, V, Y, Yb및 Zr원소들은 집단간 원소함량의 차이가 있으며 특히 Nd, Mo, La, Cr은 평균함량 차이가 통계적으로 상당히 유의한것으로서 Cr은 납석대에서 가장 낮은 함량 (3 ppm)을 보이며 Mo는 변질대중 점토대에서 298ppm 그리고 납석대에서 13ppm을 보인다. La는 납석대에서 가장 낮은 28ppm을 그리고 홍주석대에서는 41ppm의 함량을 보였으며 Nb는 홍주석대에서는 70ppm으로 가장 높



(a)



(b)



(c)



(d)



**Table 2.** Chemical composition of the analysed samples.  
(units of major oxides and trace elements in wt % and ppm, respectively)

Sample	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ce	Cr	Ga	Hf	La	Mo	Nd	V	Y	Yb	Zr
CB-01	35.01	0.10	0.94	0.00	0.09	0.04	0.69	6.62	20	3	65	16	22	29	14	13	0.6	0.1	26
CB-02	10.52	0.06	0.80	0.00	0.01	0.08	0.30	2.31	15	1	15	4	12	15	7	4	3	0.3	16
CB-03	18.72	0.10	0.12	0.00	0.00	0.00	0.56	3.01	58	0	32	3	31	3	18	12	7	1.0	57
CB-04	3.52	0.06	0.10	0.00	0.01	0.00	0.08	0.34	12	0	8	2	7	2	5	4	2	0.2	37
CB-05	16.70	0.28	0.14	0.00	0.00	0.03	1.27	2.26	75	2	38	6	41	4	31	27	11	2.0	145
CB-06	17.42	0.09	2.58	0.00	0.01	0.02	0.60	2.65	61	5	22	6	32	23	18	9	3	0.7	59
CB-07	12.61	0.08	0.56	0.01	0.14	0.32	0.23	3.61	61	10	25	32	35	52	17	9	10	1.9	89
CB-08	14.72	1.21	3.14	0.11	0.26	1.21	2.42	4.49	55	14	45	54	86	98	51	99	10	1.6	22
CB-09	11.78	0.36	2.30	0.09	0.46	1.48	3.79	3.82	58	16	54	91	94	158	51	40	18	2.1	20
CB-10	31.90	0.15	0.63	0.00	0.01	0.05	0.78	3.86	94	9	58	8	69	9	32	27	11	2.0	106
CB-11	17.25	0.08	0.32	0.00	0.02	0.15	0.74	2.60	16	6	18	8	20	11	9	7	4	0.8	59
CB-12	14.63	0.09	1.02	0.00	0.08	0.06	0.11	4.27	63	7	20	19	38	30	16	7	15	2.0	70
CB-13	15.92	0.09	1.00	0.00	0.10	0.07	0.20	4.29	40	8	25	24	22	39	12	7	18	2.2	70
DM-07	17.51	0.26	0.76	0.10	1.25	0.14	0.04	1.44	106	26	83	202	43	542	31	25	30	3.5	128
DM-08	28.27	0.23	0.73	0.00	0.95	0.00	0.04	0.44	83	15	64	124	32	312	25	45	34	4.0	117
DM-09	11.53	0.12	1.24	0.00	0.33	0.00	0.08	3.61	18	5	29	47	12	121	8	11	9	1.2	76
DM-10	11.78	0.17	0.11	0.00	0.08	0.06	0.21	2.05	34	1	10	15	21	34	13	15	6	0.9	83
DM-11	11.80	0.17	0.14	0.00	0.26	0.03	0.16	3.31	49	3	25	37	23	92	15	14	13	1.4	74
DM-12	10.60	0.37	2.69	0.10	0.71	2.26	3.69	3.61	102	17	50	93	130	234	66	61	14	1.5	62
DM-13	13.53	0.19	0.17	0.00	0.33	0.05	0.18	3.93	44	13	39	65	28	109	14	18	18	1.9	84
DM-14	14.38	0.67	5.65	0.00	0.24	0.13	0.22	3.68	43	12	49	54	28	94	17	54	18	2.6	106
DM-15	13.73	0.24	0.69	0.00	0.01	0.08	0.11	3.93	41	7	12	7	28	18	13	25	8	1.3	93
DR-13	18.63	1.02	6.63	0.00	0.05	0.05	0.15	1.20	68	49	34	15	28	39	51	336	5	2.1	120
DR-14	4.81	1.00	4.85	0.00	0.06	0.42	0.19	1.64	86	31	21	14	42	36	55	217	9	1.7	68
DR-15	18.21	0.89	1.26	0.00	0.49	0.19	0.19	1.08	0	23	45	66	30	168	51	164	6	1.0	76
DR-16	31.70	0.05	0.86	0.01	0.37	0.30	0.31	1.81	99	20	44	48	51	123	89	78	3	0.2	16
SJ-17	16.39	0.37	1.22	0.01	0.57	0.15	0.10	5.34	21	9	50	75	18	190	17	32	13	1.8	140
SJ-18	11.47	0.21	0.20	0.00	0.04	0.07	0.07	3.30	57	0	16	8	28	17	20	17	7	0.6	77
SJ-19	11.97	0.19	0.85	0.00	0.08	0.09	0.08	3.32	47	1	18	13	25	31	19	16	5	0.6	66
SJ-20	13.12	0.79	6.11	0.38	3.48	1.31	5.04	2.19	73	92	219	525	102	908	70	165	17	1.0	103
SJ-21	12.76	0.76	5.27	0.10	2.61	2.90	4.04	3.29	79	74	178	411	142	707	92	177	13	1.7	92
SJ-22	12.68	0.21	0.08	0.00	0.03	0.21	0.08	3.46	39	6	7	9	33	13	14	17	4	0.5	78
SJ-23	14.54	0.28	2.81	0.02	0.18	0.20	0.12	4.43	109	10	32	39	63	68	39	25	46	4.2	101
SJ-24	14.20	0.27	2.22	0.00	0.07	0.02	0.12	4.15	9	7	19	18	10	32	5	22	4	0.6	85
SJ-25	15.06	0.97	8.58	0.45	4.13	5.57	2.16	2.86	81	78	236	559	175	956	103	217	18	2.4	95
UK-02	26.38	0.24	0.54	0.09	0.08	0.18	0.05	6.38	63	8	27	21	43	35	20	23	7	1.0	104
UK-03	27.30	0.25	0.53	0.09	0.08	0.12	0.05	6.60	75	7	28	21	50	36	23	24	8	1.1	111
UK-04	12.65	0.17	1.80	0.00	0.03	0.15	0.12	2.89	51	9	13	11	33	17	19	16	16	2.0	77
UK-05	11.61	0.15	1.26	0.02	0.16	0.21	4.24	4.49	48	12	24	33	39	55	22	12	18	2.0	67
UK-06	11.51	0.12	1.23	0.01	0.13	0.25	3.65	4.29	34	9	21	27	22	46	14	9	15	1.8	61

은 함량을 보이고 납석대에서 14ppm을 보인다.

#### 판별 분석(Discriminant analysis)

판별분석은 어떤대상(본 연구에서는 5개 변질대)이 어떤 범주 혹은 집단에 속하는지를 가장 잘 판별할 수 있도록 판별변수들(본 연구에서는 원소)의 선형결합식(linear combination)을 도출하는 것으로 집단간의 분산은 커지는 반면 집단내 분산은 작아지도록 선형결합을 만드는 다변수 통계 방법이다(김병주등, 1988; Kalogeropoulos, 1985;

Davis, 1986).

판별분석식은 (집단-1)개로 구해지며, 판별식의 도출은 F 통계량 및 Wilks Lambda를 이용하여 단계적으로 변수를 투입하는 stepwise방법 (Pirie and Nichol, 1981)을 이용하였다. 본 연구에서는 변질대군 4개그룹과 주변암을 포함 총 5개 그룹으로 나누고 이들 그룹간의 차이점을 밝히기 위해서 판별분석을 실시하였다.

주성분 원소(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, MnO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O)를 이용하여 변질대 및 주변암들간의 판별 분석을 하

Table. 3. Abundance of elements in classification groups in Yangsan-Milyang area(units of oxides and trace elements in wt. % and ppm. respectively)

element	Group	Mean	Standard Deviation	element	Group	Mean	Standard Deviation
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	grp 1	15.02	9.6259	Cr	grp 1	3	4.23
	grp 2	15.86	6.5191		grp 2	8	6.22
	grp 3	21.47	5.9155		grp 3	30	17.34
	grp 4	12.64	1.5886		grp 4	39	35.53
	grp 5	24.95	9.5389		grp 5	22	2.12
TiO <sub>2</sub>	grp 1	0.13	0.0704	Hf	grp 1	6	4.71
	grp 2	0.24	0.2182		grp 2	26	19.99
	grp 3	0.50	0.4477		grp 3	114	93.97
	grp 4	0.59	0.3988		grp 4	224	231.90
	grp 5	0.47	0.5940		grp 5	57	12.76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	grp 1	0.40	0.3314	La	grp 1	28	21.85
	grp 2	1.37	1.5212		grp 2	31	12.74
	grp 3	2.70	3.3977		grp 3	34	7.47
	grp 4	3.82	0.5999		grp 4	99	51.04
	grp 5	1.06	0.2828		grp 5	41	14.96
MnO	grp 1	0.0	0.0	Mo	grp 1	13	11.75
	grp 2	0.01	0.0269		grp 2	51	45.95
	grp 3	0.03	0.0577		grp 3	298	251.81
	grp 4	0.15	0.1644		grp 4	395	393.39
	grp 5	0.00	0.0071		grp 5	146	31.78
MgO	grp 1	0.02	0.0297	Nd	grp 1	14	9.71
	grp 2	0.13	0.1409		grp 2	19	10.97
	grp 3	0.75	0.6245		grp 3	36	13.17
	grp 4	1.49	1.6468		grp 4	59	30.93
	grp 5	0.43	1.0849		grp 5	70	26.77
CaO	grp 1	0.04	0.0367	V	grp 1	15	9.80
	grp 2	0.11	0.1054		grp 2	28	44.70
	grp 3	0.06	0.0709		grp 3	135	173.89
	grp 4	1.89	1.7394		grp 4	98	80.27
	grp 5	0.24	0.0778		grp 5	121	61.43
Na <sub>2</sub> O	grp 1	0.34	0.2760	Y	grp 1	6	3.38
	grp 2	0.26	0.3088		grp 2	11	9.55
	grp 3	0.07	0.0635		grp 3	23	15.75
	grp 4	0.62	0.9398		grp 4	15	2.95
	grp 5	0.25	0.0849		grp 5	4	2.12
K <sub>2</sub> O	grp 1	2.58	1.3429	Yb	grp 1	0.9	0.63
	grp 2	3.92	1.3613		grp 2	1.5	0.93
	grp 3	1.02	0.5220		grp 3	3.2	1.01
	grp 4	3.63	0.8223		grp 4	1.8	0.41
	grp 5	1.44	0.5162		grp 5	0.6	0.52
Ce	grp 1	42	30.61	Zr	grp 1	65	34.90
	grp 2	50	25.09		grp 2	84	27.02
	grp 3	85	19.10		grp 3	121	5.68
	grp 4	66	21.48		grp 4	65	31.37
	grp 5	49	70.00		grp 5	46	42.42
Ga	grp 1	22	19.54	Wh	grp 1	61	3.71
	grp 2	28	13.70		grp 2	57	9.06
	grp 3	60	24.74		grp 3	54	12.20
	grp 4	103	91.32		grp 4	39	5.43
	grp 5	44	0.70		grp 5	56	4.17

Wh : whiteness

grp 1(pyrophyllite zone), grp 2(sericitic zone), grp 3(argillic zone), grp 4(surrounding rock)and grp 5 (andalusite zone).

**Table 4.** Analysis of variance(ANOVA) for major and trace element content of altered rocks(group 1, 2, 3, 5) and surrounding rocks(group 4) in Yangsan-Milyang area.

elements	F ratio	F prob.	elements	F ratio	F prob.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.0305	0.1114	Ce	1.8165	0.1477
TiO <sub>2</sub>	3.2795	0.0220	Cr	6.1981	0.0007
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.8570	0.0107	Ga	4.9972	0.0027
MnO	5.8622	0.0010	Hf	5.6788	0.0012
MgO	5.2776	0.0020	La	10.6342	0.0000
CaO	8.4101	0.0001	Mo	5.9866	0.0009
Na <sub>2</sub> O	75.1588	0.0000	Nd	11.3717	0.0000
K <sub>2</sub> O	5.8338	0.0010	V	3.9543	0.0094
			Y	2.8501	0.0381
			Yb	4.7706	0.0035
			Zr	3.1895	0.0247

였다. Table 5에서 볼수 있듯이 판별식 4개 중 eigen value 가 1 이하의 식은 버리고 판별식 1과 2를 이용하였다. 집단 구분에 가장 영향을 미치는 효과를 알려주는 standardized canonical변수를 보면 판별식 1에서 CaO(1.589), Na<sub>2</sub>O (1.523), K<sub>2</sub>O(1.034) 그리고 판별식 2에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1.057) 및 K<sub>2</sub>O(-1.208)으로 나타나 있다. 판별식에 의해서 구해진 판별점수(discriminant score)를 각변질대별로 scatterplot하여 보면 주변암(group 4)과 변질대와의 차이가 확실히 구분되는 것을 알수 있다(Fig. 7). 즉 Fig. 7에서 가로 scale은 판별함수 1에 의한 판별점수로서 0을 중심으로 우측은 Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, CaO 성분군과 좌측은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>성분으로 구분된다. 따라서 주변암과 가장 뚜렷한 원소 함량 차이는 K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, CaO함량에서 나타나는데 왜냐하면 이들 원소들이 변질대

에서 감소되어 있기 때문이다(Table 3 참조). 한편 Fig. 7의 세로축은 함수 2에 의한 판별 점수로서 0을 중심으로 남석대(group 1)와 건운모(group 2) 그리고 점토대 (group 3)와 홍주석대(group 5)로 구분되는데 건운모대(group 2)의 영역에 K<sub>2</sub>O가 속하는 것은 건운모화 작용에 의한 K<sub>2</sub>O의 부화를 의미한다. 따라서 판별함수 1은 변질대와 주변암의 차이를 설명하는 식이며 판별식 2는 변질대내의 남석대, 건운모대 그리고 점토대와의 차이를 설명해주는 식이다.

주성분원소에 의한 각 변질대의 판별력은 90%로 나타났다(Table 5). 한편 남석대 및 건운모대에서 완벽하게 구분되지 않은 것은 이지역에서 남석과 건운모가 서로 혼재되어 산출되기 때문일 것이다.

미량 원소의 경우(Table 5, Fig. 7) 판별계수가 큰 원소는

**Table 5.** Discriminant function coefficients and related statistics for major and trace elements in Yangsan-Milyang area.

statistics	major elements		trace elements	
	discrim. func. 1	discrim. func. 2	discrim. func. 1	discrim. func. 2
eigenvalue	37.2660	2.0921	5.2968	3.7411
percentage of variation	94.08	5.28	47.65	33.65
coefficients				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.99710	1.05729	Ce	2.11160
TiO <sub>2</sub>	0.37559	0.66297	Cr	-1.79786
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.38079	-0.51098	Hf	1.70051
MgO	-0.59207	-0.09494	La	0.40203
CaO	1.58960	0.12317	Mo	0.38730
Na <sub>2</sub> O	1.52305	0.23290	Nd	-3.81325
K <sub>2</sub> O	1.03464	-1.20832	V	2.63962
			Yb	-0.16844
			Zr	-0.09569
classification	90%		65%	

group 1(pyrophyllite zone), group 2(sericitic zone), group 3(argillic zone) group 4(surrounding rock) and group 5 (andalusite zone)

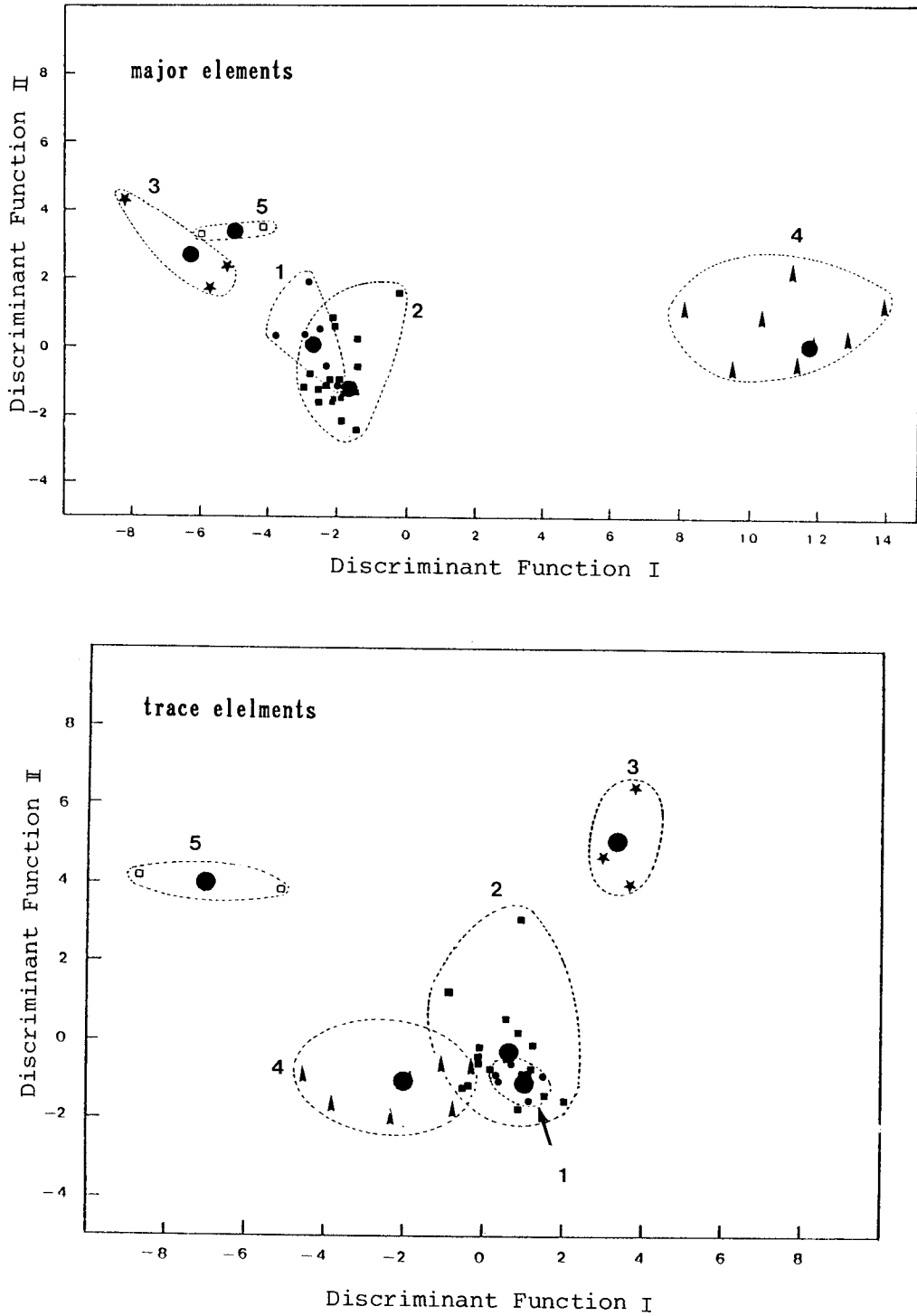


Fig. 7. Plot of scores on first and second discriminant functions. group 1, pyrophyllite zone(1); group 2, sericite zone(2) group 3, argillic zone(3): group 4, surrounding rock(4) group 5, andalusite zone(5). Large dots are group centroids.

판별함수 1에서 Ce(2.116), Hf(1.700), V(2.639), Cr(-1.797)와 Nd(-3.813)등으로 나타났고 판별함수 2에서 Hf(-5.996), La(-1.524), Mo(6.004), Nd(1.211)로 나타났다. 즉 납석대, 건운모대 그리고 점토대를 구별해주는 미량원소는 Ce, V 그리고 Nd로 나타났고 Mo, Hf은 홍주석 및 점토대와 납석 및 주변암과 구별해 주는 원소로 나타났다. 분석결과 미량원소에 의한 집단의 구별력은 65%로서(Table 5) 주성분 원소에 의한 방법보다 현저히 떨어진다.

군집분석(Cluster analysis)

군집 분석은 대상(object)을 변수들의 거리 혹은 상관관계를 이용하여 군집화(clustering)하는 다변수 통계처리 방법으로 복잡한 자료를 몇개의 군집으로 묶을 수 있어서 자료의 해석에 유익한 방법이다(Davis, 1986). 판별분석 및 군집분석은 분류를 목적으로 한다는 점에서는 유사하나 판별분석은 구별 하고자 하는 대상을 연구자가 사전에 설정해야 하고 군집분석은 투입된 변수에 의해서 목적 대상이 분류된다는 점에서 차이가 있으며 분류 목적에 따라 투입시켜야 할 변수를 정확히 알고 있어야 한다. 따라서 판별분석 결과 집단간의 차이를 보이는 K<sub>2</sub>O, CaO 및 Na<sub>2</sub>O 원소를 투입시켜 군집화하였다. 군집분석의 방법은 변수들(원소함량)의 거리를 이용하였는데(Q-mode 군집분석) 변질대군과 주변암이 군집분석시 투입된 K<sub>2</sub>O, CaO, Na<sub>2</sub>O에 의해서 완벽하게 구분되었다(Fig. 8 참조). 주변암에서 수개의 군집들이 나타나는데 이는 주변암이 화강암류와 염기성 암맥들이 혼재되어 있기 때문이며 rescaled distance가 큰 것은 이들의 원소 함량 차이가 심하기 때문이다. 그러나 변질대내의 clustering distance는 주변암보다 작으므로 대체로 큰 차이가 없다. 따라서 변질대를 광역적으로 탐광하기 위해서는 CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O의 지구화학적 이상대를 찾고 정밀탐사(detailed survey)를 위해서는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 K<sub>2</sub>O 함량을 이용하는 것이 바람직하다.

납석 및 건운모 변질대내에서 원소의 거동을 확인하기 위한 R-mode 군집분석 결과 CaO-Nd, Ce-Mo, K<sub>2</sub>O-Zr 및 Na<sub>2</sub>O-whiteness등이 유사한 거동을 보여주는 원소군으로 나타나고 있다.

산소안정동위원소 조성

경남 양산지역의 천불산 및 두명광산의 납석 및 점토광물에 대한 산소동위 원소 조성비는 Table 6에 수록되어 있다. 천불산납석(CB-10) 및 두명납석(DM-15)의 δ<sup>18</sup>O는 각각 0.23-0.6‰과 3.40‰로서 비교적 낮은 값을 보이는

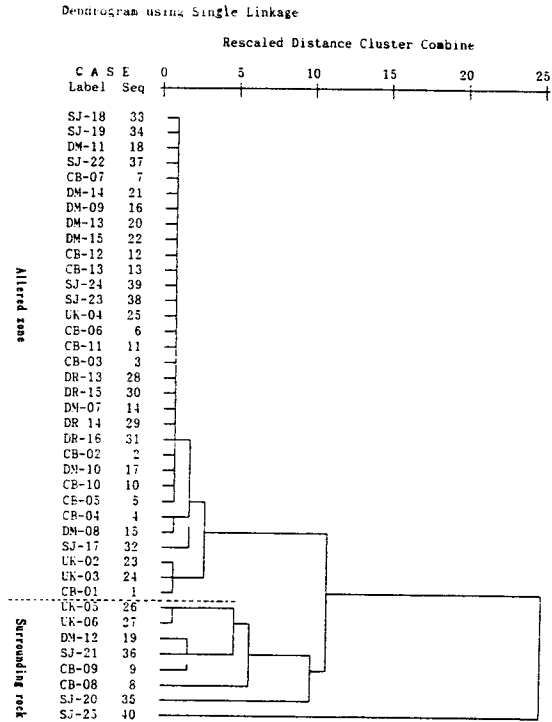


Fig. 8. Clustering samples using K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O and CaO contents (Q-mode cluster analysis)

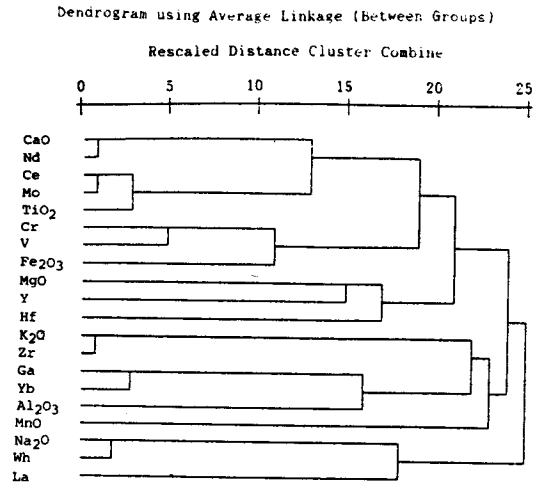


Fig. 9. Clustering elements using the absolute value of element's correlation coefficient in pyrophyllite and sericitic rocks(R-mode cluster analysis).

반면 전남 해남 및 다도지역의 납석광물에 대한 산소 동위 원소 조성비는 3.16-8.13‰ 범위를 보인다(전효택등,

Table 6. The  $\delta^{18}\text{O}$  values and mineralogical composition of some representative pyrophyllite and clay mineral.

sample	$\delta^{18}\text{O}$ (SMOW)	mineralogical composition
CB-10	0.23- 0.60‰	pyrophyllite, quartz
DM-08	11.90-12.06‰	montmorillonite, kalinite
DM-15	3.40‰	pyrophyllite, quartz.

1989). 따라서 이는 이들광상의 변질과정중 납석광물이 생성될 때  $\delta^{18}\text{O}$ 의 값이 작은 천수가 유입되어 산소 동위원소 교환반응이 일어났을 것으로 사료된다. 한편 속성작용의 산물로서 해석된바 있는 장기, 하서 및 갑포지역 montmorillonite의 산소 동위원소조성은 16.9-25.1‰범위(문희수, 1986)인데 반해 두명광산의 montmorillonite 및 kaolinite로 구성된 점토(DM-08)는  $\delta^{18}\text{O}$ 가 11.90-12.06‰의 범위를 보인다.

### 탐광을 위한 고찰

양산 및 밀양지역의 납석 및 견운모 광상은 변질안산암 내에 배대하며 이들광상들은 서로 인접해 있다. 따라서 광물조성별로 시료를 납석대, 견운모대, 점토대 및 홍주석대로 구분하여 원소분포패턴을 규명하고 또한 이들 변질대 부근에서 흔히 노출되는 주변암들과의 지구화학적 차이를 파악하여 광역적인 지구화학적 탐광지침을 도출할수 있다.

주성분원소 함량을 이용한 판별분석 결과, 변질대들 사이에서는  $\text{Na}_2\text{O}$  및  $\text{CaO}$ 가 상당히 leaching되어 있으며  $\text{K}_2\text{O}$ 는 견운모대에에서만 부화되어 있다. 이는 변질작용시 Ca, Na는 leaching되는 반면 견운모변질대에서 K는 이탈되지 않기 때문이다. 한편 이들 원소들에 의해서 변질대와 주변암들과 원소함량이 뚜렷한 차이가 있으므로 이들 원소를 이용하여 판별점수를 계산하여 광역탐사를 실시하면 유사한 변질대를 찾을 수 있을 것이다. 한편 미량원소에 의한 원소함량분포는 판별분석시 변질대 및 주변암이 65%정도로 구분되므로 주성분에 의한 방법보다 저조했다. 따라서 이들 지역에 대한 납석 및 견운모광체를 지구화학적자료로 탐광하기 위해서는 Table 5에서 제안된 판별식을 이용하여 납석 및 견운모 광상을 탐광할 수 있다. 즉 이 지역내에 광범위하게 분포된 안산암 분포지역에서 격자(grid)형태로 시료를 채취하여(혹은 카이스퀘어 검증을 통한 시료의 등분포 채취) 주성분원소만을 분석하여 이들 함량값을 Table 5의 공식에 대입, 판별점수를 계산하여 plotting하면 변질대

를 찾아낼 수 있을 것이다.

지구화학적 자료해석시 원소의 함량을 어떤 대상(본 연구에서는 변질대군 및 주변암석군)들과 서로 비교할 때 분산분석을 이용하면 통계적으로 그 평균함량의 값이 차이가 있는가를 확인할 수 있으므로 기존의 평면적 비교보다 좀 더 합리적방법인 것으로 사료된다.

### 결론

1) 양산 및 밀양지역의 변질안산암에서 우세한 변질현상은 견운모화 작용이며 납석, 홍주석, kaolinite, montmorillonite, pyrite 등을 수반한다. 따라서 advanced argillic, sericitic, argillic alteration의 변질대가 형성되어 있다.

2) 천불산 및 두명광산의 납석 polytype은 2M형이 우세하며 모든 광상에서 산출되는 견운모의 polytype은 1M과 2M1이 혼재되어 있다.

3) 변질대를 납석대, 견운모대, 점토대(argillic zone), 홍주석대 및 주변암으로 구분하여 판별분석한 결과 주성분원소의 경우  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ 가 이 지역의 변질대를 광역적으로 탐사할 수 있는 원소로 나타났고 광체의 정밀탐사에 이용될 수 있는 주성분원소로는  $\text{Al}_2\text{O}_3$  및  $\text{K}_2\text{O}$  원소이다. 미량원소의 경우 납석대, 견운모대 및 점토대를 구분해주는 원소는 Nb, Ce, V 이었고, Hf, Mo는 점토대와 홍주석을 탐광하는데 효과적인 것으로 나타났다. 주성분원소에 의한 변질대간의 구별력(90%)이 미량원소에 의한 구별방법(65%)보다 더 효과적이었다. 또한 실제 광역 탐사시 변질대와 주변암의 구분을 위해서는 판별분석에 의한 얻어진  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ 를 이용한 군집분석방법이 효과적 이었다.

4) 천불산납석 및 두명납석의 산소 동위원소조성비( $\delta^{18}\text{O}$ )는 각각 0.23-0.6‰과 3.40‰로서 해남-다도 지역 납석의  $\delta^{18}\text{O}$ (3.16-8.13‰)보다 비교적 작고 두명광산의 점토광물도  $\delta^{18}\text{O}$ 가 11.90-12.06‰로서 비교적 작는데 이는 납석이 생성될 당시에  $\delta^{18}\text{O}$ 가 작은 천수의 동위원소 교환반응이 있었을 것으로 사료된다.

### 사사

본 연구는 한국과학재단 '86 목격기초연구과제인 "비금속 광물자원의 탐사, 개발 및 활용에 대한 종합적 연구"의 일부이며 연구비를 지원해준 과학재단에 심심한 감사를 드린다.

## 참고문헌

- 김규봉, 황상규, 1988, 밀양도폭 지질보고서, 한국동력자원연구소.
- 김병주, 안윤기, 윤기중, 윤상운, 1988, SPSS를 이용한 통계자료분석, 박영사, p. 298-336.
- 김영규, 1989, 경남 양산지역의 납석광석에 대한 광물학적 연구, 서울대학교 석사논문.
- 김종환, 강필중, 임정웅, 1976, Landsat-1영상에 의한 영남지역 지질구조와 광상과의 관계, 지질학회지, V. 12, p.79-89.
- 노열, 1989, 구시납석 광상에 대한 광물. 광상학적 연구, 연세대학교 석사논문.
- 문희수, 1986, 3기층에 배태된 벤토나이트의 산소 및 수소동위원소 연구, 광산지질, V.19(특별호), p.131-138.
- 박홍봉, 권문숙, 박배영, 신상은, 1982, 고내화도 광석광물의 분포와 성인에 관한 연구(전남지역을 중심으로), 광산지질, V. 15, p.89-102.
- 박홍봉, 박배영, 신상은, 민허, 1988, 전남과 하동지역에서 산출하는 요업 및 점토광물자원과 성인에 관한 연구, 광산지질, V. 21, p.1-15.
- 신상은, 1988, 구시납석광산의 광물조성과 광상성인에 관한 연구, 대한 광산 학회지, V. 25, p.1-8.
- 이동진, 이성록, 김대엽, 1989, 비금속 광물 특성 연구(I), 한국 동력자원연구소.
- 이민성, 강필중, 1964, 한국 지질도(양산도폭), 국립지질조사소.
- 이장섭, 1986, 경남 양산, 유광납석광상의 성인의 관한연구, 부산대학교 석사논문.
- 정재교, 김호정, 1984, 통계학 개론, 명진문화사, p.355-377.
- 전효택, 서정희, 이희근, 손현준, 1989, 비금속 광물자원의 탐사, 개발 및 활용에 대한 종합적 연구, 한국과학재단, '86 목적기초 연구보고서, p.129-179.
- Amor, S. D. and Nichol, I., 1983, Identification of diagnostic geochemical alteration in the wallrocks of Archean volcanic-exhalative massive sulfide deposits, J. Geol. Explo. Vol. 19, p. 543-562.
- Brindley, G. W. and Wardle, R., 1970, Monoclinic and triclinic forms of pyrophyllite and pyrophyllite anhydride, The American mineralogist, Vol. 55, p.1259-1272.
- Clayton, R. N. and Mayeda, T. K., 1963, The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotope analysis, Geochim. Cosmochim. Acta, Vol. 27, p. 43-52.
- Clausen, F. L. and Harpoth, O., 1983, On the use of discriminant analysis techniques for classifying chemical data from panned heavy-mineral concentrated central east Greenland, J. Geochem. Explor. Vol. 18, p. 1-24.
- Cornish, B. E. 1983, Pyrophyllite in Industrial minerals and rocks(ed. S. J. Lefond), AIME, Vol. 2, p. 1085-1108.
- Davis, J. C., 1986, Statistics and data analysis in geology, John Wiley & Sons Inc., p. 602-607.
- Eberl, D., 1979, Synthesis of pyrophyllite polytypes and mixed layers, American mineralogist, Vol. 64, p. 1091-1096.
- Fedikow, M. A. F. and Turek, A., 1983, The application of stepwise discriminant analysis to geochemical data from the host rocks of the Sillurian Pb-Zn-Ag deposit, Kimberly, B. C., Canada, J. Geochem. Explor., Vol. 18, p. 213-244.
- Kalogeropoulous, S. I., 1985, Discriminant analysis for evaluating the use of litho-geochemistry along the Tetsusekiei Horizon as an exploration tool in search for Kuroko type deposits, Mineral Deposita, Vol. 20, p. 135-142.
- Klein, T. L. and Criss, R. E., 1988, An oxygen isotope and geochemical study of meteoric-hydrothermal systems at Pilot mountain and selected other localities, Carolina slate belt, Economic geology, Vol. 83, p. 801-821.
- Lee, J. H. and Guggenheim, 1981, Single crystal X-ray refinement of pyrophyllite-1Tc. Am. Miner., Vol. 66, p. 350-357.
- Pirie, I. D. and Nichol, I., 1981, Geochemical dispersion in wallrocks associated with The Norbec deposit, Noranda, Quebec, J. Geochem. Explor., Vol. 15, p. 159-180.
- Rayner, J. H. and Brown, G., 1965, Structure of pyrophyllite, Clays clay Miner., proceeding of the 13th National Clay Conference in Madison, WI, p. 73-84.
- Rosenberg, P. E., 1974, Pyrophyllite solid solutions in the system  $Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ , Am. Miner., Vol. 59, p. 254-260.
- Tripathi, V. S., 1979, Factor analysis in geochemical exploration, J. Geochem. Explor., Vol. 11, 263-275.