

## 부산 백양산 지역의 백악기 화산-심성암류에 대한 암석학적 연구

김향수 · 고정선 · 윤성호\*

부산대학교 지구과학과, 부산광역시 금정구 장전동 산30번지

### Petrology of the Cretaceous Igneous Rocks in the Mt. Baegyung Area, Busan

Hyang Soo Kim, Jeong Seon Koh and Sung Hyo Yun\*

Department of Earth Sciences, Pusan National University, Busan 609-735 Korea

**요약:** 경상분지 내 유천소분지의 동남단에 위치하는 부산 백양산 일대에 분포하는 백악기 화산암류는 안산암질암류를 하위에 두고서 그 상부에 유문암질 화성쇄설암류가 놓이며, 이들은 화강반암, 규장암, 흑운모화강암에 의해 관입되어 있는 화산-심성암체이다. 이 지역 화산암류의  $\text{SiO}_2$  함량은 52.4~75.4 wt.%로, 대부분 medium-K 또는 high-K의 안산암에서 유문암에 이르는 암형을 보인다.  $\text{SiO}_2$  함량이 증가함에 따라  $\text{TiO}_2$ , CaO,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , MnO, MgO 등의 함량은 점진적으로 감소하며, K<sub>2</sub>O의 함량은 증가하고, Na<sub>2</sub>O는 다소 분산되나 미약하나마 증가하는 경향을 나타낸다. 미량원소와 희토류원소의 패턴, 조구조 판별도는 본 역의 화산암류가 해양판의 섭입과 관련되어 형성된 칼크-알칼리 계열의 화성암류를 시사해 주며, 공간적으로 대륙연변부를 통과한 대륙(화산)호에 속함을 보여준다. 본 역의 현무암질 안산암 마그마는 섭입과 관련하여 상부 맨틀의 맨틀 웨지로부터 생성된 현무암질 초생 마그마로부터 분별정출작용에 의해 만들어졌을 가능성이 크다. 또한 지화학적으로 현무암질 안산암과 안산암류에서 유문암질암류(화강반암)으로 갈수록 불활성 원소의 증가, 호정성 원소의 감소, 희토류 원소 패턴에서 보이는 Eu의 부(-) 이상 증가 등은 본 역의 유문암질(화강암질) 마그마가 안산암질 마그마로부터 분별정출작용에 의해 진화되었을 가능성이 크다는 것을 시사해 준다. 즉, 본 역을 이루는 암석들을 형성한 근원마그마의 기원은 동일하며, 주로 사장석, 휘석, 그리고 각섬석의 분별결정작용을 통하여 현무암질 안산암, 안산암, 유문암질암류(화강암질암류)로 분화되었다.

**핵심어:** 백양산지역, 후기 백악기, 화산-심성활동, 화산층서, 분별정출작용

**Abstract:** The Mt. Baegyung in Busan, composed of sedimentary basement rocks (Icheonri Formation), andesite (lava), andesitic pyroclastic rocks, fallout tuff and tuffaceous sedimentary rocks, rhyolitic pyroclastic rocks, intrusive rocks (granite-porphiry, felsite, and biotite-granite) of Cretaceous age in ascending order. The volcanic rocks show a section of composite volcano which comprised alternation of andesitic lava and pyroclastic rocks, rhyolitic pyroclastic rocks (tuff breccia, lapilli tuff, fine tuff) from the lower to the upper strata. From the major element chemical analysis, the volcanic and intrusive rocks belong to calc-alkaline rock series. The trace element composition and REE patterns of volcanic and plutonic rocks, which are characterized by a high LILE/HFSE ratio and enrichments in LREE, suggest that they are typical of continental margin arc calc-alkaline rocks produced in the subduction environment. Primary basaltic magma might have been derived from partial melting of mantle wedge in the upper mantle under destructive plate margin. Crystallization differentiation of the basaltic magma would have produced the calc-alkaline andesitic magma. And the felsic rhyolitic magma seems to have been evolved from andesitic magma with crystallization differentiation of plagioclase, pyroxene, and hornblende.

**Key words:** Mt. Baegyung area, Late Cretaceous, Volcano-plutonic activity, Volcanic stratigraphy, Fractional crystallization.

\*Corresponding author: Tel. 82-51-510-2723, E-mail. yunsh@pusan.ac.kr

## 서론

한반도 동남부 유천층군 내의 백악기 화산암류들은 대체로 경상분지 동남부에 활모양으로 분포되는 화산호(volcanic arc)를 형성하고 있는데, 이들은 백악기에 유라시아 대륙 동연변부에서 일어난 콜라판/태평양판의 섭입과 관련된 암석학적 성질을 나타낸다(이상만 외, 1987; 황상구와 김상욱, 1994; Hwang and Kim, 1994). 유천소분지를 중심으로 하여 대규모로 분포하는 후기 백악기의 화산암류에 대한 지질학적, 암석학적 연구는 여러 학자들에 의해 수행되어 왔다. 특히 1980년대에 들어와 다양한 화학분석의 기술이 발달함에 따라 화산암류에 대한 다량의 지구화학 자료가 구해져서 보다 자세한 기원마그마의 특성과 분화 양상을 알게 되어, 경상분지 내의 화산암류가 칼크-알칼리 계열의 동원마그마로부터 분화된 것으로 설명하고 있으며, 이 칼크-알칼리 계열의 화성활동과 판구조 운동과의 연관성에 대한 많은 논의가 이루어졌다(원종관, 1968; 차문성, 1976; 황상구, 1979; 차문성과 윤성호, 1982; 김상욱, 1982, 1986; 김상욱과 이영길, 1981; 이상만 외, 1987; 김진섭, 1990; 김상욱 외, 1991; 김진섭과 윤성호, 1993; 윤성호 외, 1994).

본 연구지역(이하 본 역)에 대하여 야외 조사를 실시한 결과, 동래·월래 도폭(손치무 외, 1978)에 기재되어 있는 암상 구분 및 분포 양상과의 상당한 차이점을 발견하였으며, 암상의 구분 및 그 분포 양상에 대한 많은 수정·보완의 필요성이 대두되었다. 또한, 암석화학적 분석 자료 또한 미비한 실정이며, 이를 통한 암석화학적 해석 역시 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 본 역에 산출되는 화산암류 및 심성암류의 야외산상에서의 특성, 암상 변화와 분포 양상, 그리고 화산층서를 규명하였다. 그리고 편광현미경 관찰을 통한 암석 기재적 특징과 암석화학적 특성을 고찰하였으며, 이러한 자료들을 바탕으로 하여 이들 화산-심성암류를 형성한 마그마의 성인, 그리고 조구조적 위치를 고찰하였다.

## 지질개요

경상분지 내 유천소분지의 동남단에 위치하는 부산 지역은 퇴적암류를 기반으로 하여, 이를 부정합으로 피복하는 유천층군의 하부층군에 해당하는 중성 화산암류들이 분포하고 있으며, 이들로 구성된 화산암체의 층서 단면이 비교적 잘 보존되어 나타난다. 연구 지역인 백양산 일대는 행정 구역상, 부산광역시 북구와 부산

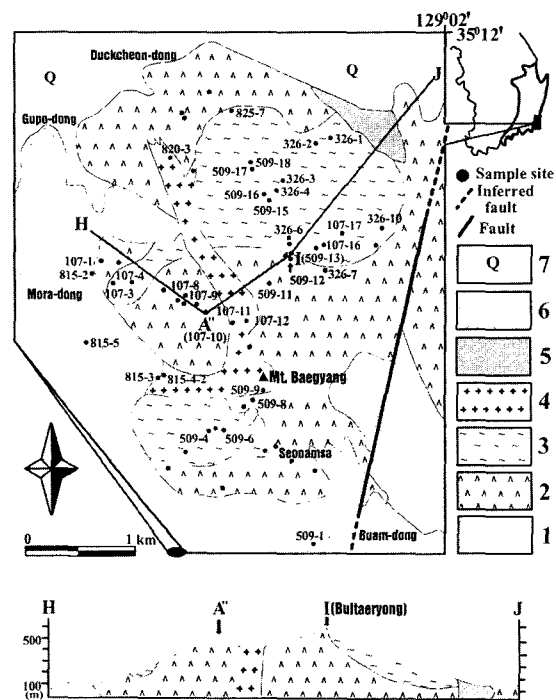


Fig. 1. Generalized geologic map of the Mt. Baegyang area in Busan. [1, sedimentary rock (Icheonri Formation); 2, andesitic rocks; 3, rhyolitic rocks; 4, granite-porphry; 5, felsite; 6, biotite granite; 7, alluvium]

진구(위도, 35° 10'~35° 12' 30" N; 경도, 129° 00' 00" ~129° 02' 30" E)에 걸쳐 위치하며, 이는 동래·월래 도폭(손치무 외, 1978)의 남서부 일대에 해당한다. 본 역의 지형은 백양산(고도 641.5 m)-불태령(고도 610.6 m)으로 연결되는 남북방향으로의 일련의 산계를 이루고 있는 것이 특징적이다. 본 역에서 화산암류는 주로 안산암질암류가 산출되며, 북동부와 남부에 유문암질 화성쇄설암류가 산출된다. 유문암질 화성쇄설암류가 산출되는 지역은 깊은 계곡을 형성하고 있으며 급경사면에는 테일러스가 나타난다.

본 역의 지질에서 기반암인 백악기 퇴적암류를 중성-산성 화산암류가 부정합으로 피복하고 있으며 마그마 활동 후, 마지막 단계에 화강반암, 규장암, 그리고 흑운모화강암이 관입하여 나타나는 일련의 화산-심성활동의 양상을 나타낸다(Fig. 1).

퇴적암류는 백악기 하양층군의 이천리층(차문성, 1966; 손치무 외, 1978)으로, 울산 지역에서 대양동층(박양대와 윤형대, 1968)과 울산층(박양대, 1969)으로 기재되어 있으며, 주향 N30~45°W와 경사 20~27°NE의 층리

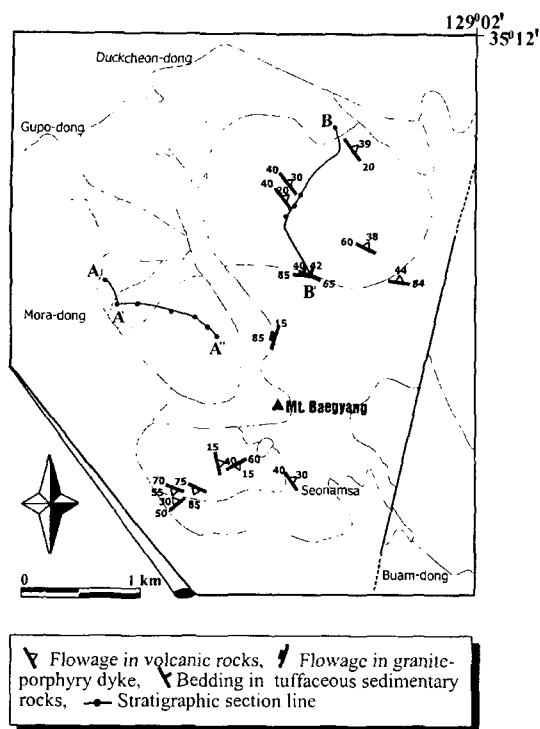


Fig. 2. Strikes and dips of volcanic strata in the study area.

를 잘 보여주고 있다. 대체로 흑색 또는 암회색의 세일로 구성되어 있으며, 이외에 암회색 세립질 사암이 극히 소량 포함되어 있다. 흑운모화강암에 의해 관입당한 결과, 접촉변성작용을 받아 심하게 혼펠스로 변성되어 산출된다.

본 연구의 주 대상이 되는 중성~산성 화산암류는 본 역의 전반에 걸쳐 광범위하게 분포한다. 손치무 외(1978)는 백양산 일대 대부분 지역이 안산암으로 이루어져 있다고 보고하고 있으나, 중성 화산암류는 횡적으로 암상의 변화가 매우 심하나, 거시적으로 볼 때, 안산암질 용암류와 안산암질 화성쇄설암류가 교호로 산출되어 서로 호층을 이루며 나타난다. 이는 본 역의 화산암체가 다운회 성층화산의 산물임을 지시하는 것이다. 한편, 산성 화산암류는 주로 데사이트질~유문암질 화성쇄설암류로 본 역 북부 불태령 일대, 백양산 남서부, 그리고 모라동 동쪽 산릉 일대에 분포하는데, 회류용회암, 세립용회암, 그리고 라필리용회암으로 산출되고 부분적으로 각력을 포함하는 것도 있다. 노두에서 주로 적갈색을 나타내며, 피아메에 의한 용결구조를 나타내어 방향성을 보여준다. Fig. 1에 제시된 단면

은 안산암질암류의 분출 후, 유문암질 화성쇄설암류가 계곡을 매우면서 분출된 양상을 잘 보여준다. 회류용회암 내 유상선 구조의 방향성(Fig. 2)은 대체로 북동향(N15~65°W, 30~38°NE)과 남서향(N70~75°W, 55~85°SW)의 흐름이 발달되어 있으므로, 본 화산체 화구의 정확한 위치 파악은 어려우나, 회류용회암의 방향성을 통하여 대략적으로 백양산 서측부에 화구가 존재할 것이라 추측된다.

화강반암은 백양산 정상부와 불태령 서부를 지나는 반원호상의 암맥으로 분포한다. 규장암은 본 역의 북단(만덕동 일대)에 소규모로 산출되고, 흑운모화강암은 본 역의 남서부 구포, 모라동과 남부 부암동 일대에서 화산암류를 관입하여 있으며, 비교적 낮은 저지대를 형성하고 있다. 흑운모화강암의 K-Ar 흑운모 절대연령 측정(Lee, 1991)에 의하면  $66.0 \pm 1.0$  Ma로서, 본 역에서의 화산-심성활동이 백악기 말에 해당함을 알 수 있다.

## 암상기재

본 역에 산출되는 화산암류에 대하여 각 암상별로 대표적인 시료를 선택하여 모우드 분석을 실시한 결과는 Table 1과 같다.

## 화산암류

본 역의 화산암 누층은 흑색 내지 암회색 세일층(이천리층) 위에 놓여 있다. 본 역에서 산출되는 백악기 중성~산성 화산암류의 화산층서를 살펴보면 다음과 같다(Fig. 3).

Fig. 3의 A~A'~A'' 층서 단면에서, 하부에 안산암질 용암류와 안산암질 화성쇄설암류가 교호로 산출되며(층후 35 m), 안산암질 화성쇄설암류는 암편질용회암(시료 107-1, Table 1)에 해당하며, 기질부에 본질 암편인 안산암과 소량의 외래 암편(퇴적암 기원)으로 구성된다. 암편의 함량 및 크기에 따라 안산암질 용회암, 라필리용회암, 용회각력암 및 화성쇄설각력암 등 다양한 양상을 나타낸다. 그 상부를 유문암질 화성쇄설암류(층후 125 m)가 피복한다. 고도 310 m 지점 부근에서부터 안산암질암류(층후 205 m)가 다시 산출되기 시작하는데, 하부에 산출되는 안산암질 용회암은 주로 결정질 용회암으로 이루어져 있다. 유문암질 화성쇄설암류(층후 125 m)는 주로 회류용회암으로, 부분적으로 반정들이 한 방향으로 배열되어 있고 미약한 용결구조를 보여준다. 고도가 높아질수록 유문암질 라필리용회암에서 세립질용회암이 산출된다. 고도 310 m 지점에서부터 산출되기 시작하여 고도 515 m 지점까지 지속되는

Table 1. Modal compositions of the igneous rocks in the study area.

Sample	Rock Type	Phenocryst (%)										Accessory (%)		Secondary (%)			Rf (%)	Gm (%)	Texture and Constituent of Gm
		Q	Pl	Kf	Bt	Amp	Py	Ore	Zir	Ap	Chl	Epi	Seri						
326-7	An	-	15.5	-	1.5	4.8	0.1	3.5	1.7	-	-	-	3.5	-	-	-	69.2	Po, Crt	
509-8A	An	-	37.2	-	tr	1.5	1.0	4.1	0.6	-	-	-	1.7	-	-	-	53.6	Po, Pl±(Bt+Amp+Seri)	
509-8C	An	-	40.3	-	0.6	1.7	-	1.9	0.3	-	-	-	0.3	tr	-	-	52.1	Po, Pl+Ore+Amp+Bt	
509-12	An	-	30.8	-	-	1.1	-	2.8	0.2	-	-	-	1.2	-	-	-	63.3	Po, Pl+Ore±Crt	
815-4-1	An	0.4	23.3	-	0.6	4.1	0.1	2.4	-	-	-	-	-	-	-	-	68.9	Po, Crt	
107-1	AnT	-	14.1	-	tr	2.0	-	4.5	tr	-	-	-	0.2	-	-	56.5	Po, Pl+Q±(Amp+Bt)		
326-2	Id	-	31.6	-	0.2	2.6	-	2.7	0.1	-	-	-	1.3	1.9	0.1	-	59.2	Po, Pl+Amp±Ore	
509-18	Id	-	32.4	-	1.3	3.2	-	1.2	tr	-	-	-	-	0.6	-	-	61.1	Hy, Po, Pl+mafic mineral	
107-3	RT	1.4	6.8	3.8	3.7	-	-	0.6	-	-	-	-	0.3	0.4	-	17.1	Po, Ash+Glass+Q		
107-4	RT	1.9	8.1	5.1	1.0	0.4	-	1.6	tr	-	-	-	1.1	0.7	-	7.7	Po, Bt+Q+Ore		
107-16	RT	3.1	7.0	2.8	0.1	-	-	3.7	0.1	-	-	-	0.7	1.1	-	25.9	Wei, Glass+Ore		
107-17	RT	1.8	4.2	4.4	0.1	-	-	3.4	0.2	0.3	-	-	4.2	0.9	-	-	80.3	Wei, Sph, Glass+Shard	
326-1	RT	3.3	4.7	5.8	0.1	-	-	2.6	-	-	-	-	0.6	9.0	-	28.0	Glass+Q		
326-3	RT	1.3	7.4	-	0.1	0.4	-	1.6	0.4	-	-	-	1.9	0.7	-	17.3	Po, Crt+Glass±Q		
326-4	RT	2.3	1.5	2.1	-	-	-	2.8	0.2	-	-	-	0.4	0.5	0.2	16.8	Vi, Ax, Glass+Shard		

Modes based on about 2000 counts per samples. Phenocrysts, > 0.1mm; groundmass, <0.1mm. An, andesite; AnT, andesitic tuff; Id, intermediate dike; RT, rhyolitic pyroclastic rock; GP, granite-porphyr; BGr, biotite granite; Rf, rock fragment; Gm, groundmass; Q, quartz; Pl, plagioclase; Kf, alkali feldspar; Bt, biotite; Amp, amphibole; Hb, hornblende; Py, pyroxene; Chl, chlorite; Epi, epidote; Zir, zircon; Ap, apatite; Seri, sericite; Aln, allanite; Ore, opaque mineral. (Po, porphyrite; Vi, vitroclastic; Sph, spherulitic; Hy, hyalopilitic; Wei, welded; Ax, axiollitic; Crt, cryptocrystalline)

Table 1. Continued

Sample	Rock Type	Phenocryst (%)										Accessory (%)				Secondary (%)			Rf (%)	Gm (%)	Texture and Constituent of Gm
		Q	Pl	Kf	Bt	Amp	Py	Ore	Zir	Ap	Chl	Epi	Seri	Chl	Epi	Seri					
326-6	RT	0.4	6.1	2.2	0.5	0.1	-	3.2	0.3	tr	0.7	0.9	0.3	15.6	69.5	Wef, Glass+Cr+Ash					
509-6	RT	1.4	9.0	2.1	0.2	1.0	-	4.9	-	0.7	0.4	0.6	-	-	79.4	Ore+Kf-felt					
509-4	RT	1.9	2.4	0.1	0.3	-	-	2.0	0.1	-	9.1	1.0	tr	0.0	81.2	Po, Ash ± mafic mineral					
509-16	RT	2.7	19.1	3.5	-	-	-	2.8	0.7	-	1.2	1.7	0.1	7.0	60.3	Vi, Glass+Shard					
815-7	RT	3.5	4.5	0.1	1.5	-	-	2.8	-	-	1.4	0.2	0.3	20.2	65.2	Po, Ash ± (Bt+Q+Ore)					
Granitic Rocks																					
Sample	Rock Type	Phenocryst (%)										Accessory (%)				Secondary (%)			Gm (%)	Texture and Constituent of Gm	
		Q	Pl	Kf	Bt	Hb	Ore	Zir	Ap	Aln	Chl	Epi	Seri	Chl	Epi	Seri					
107-11	GP	1.9	29.6	-	2.2	2.6	4.0	-	-	tr	2.4	-	-	56.7	Po, Pl+Cr+Ore ± mafic mineral						
107-12	GP	3.5	20.3	-	0.2	5.2	2.8	-	-	-	2.6	-	-	65.2	Po, Pl ± (Q+Bt+Amp+Ore)						
815-4-2	GP	1.6	37.6	-	0.8	1.6	1.3	tr	-	-	0.3	-	-	56.6	Po, Cr ± (Bt+Ore)						
820-3	GP	0.1	38.8	-	-	0.6	1.3	-	-	-	-	-	0.1	59.1	Po, Pl+Bt+Amp+Q ± Ore						
Sample	Rock Type	Q	Pl	Kf	Bt	Hb	Zir	Ap	Aln	Chl	Epi	Seri	Ore	Texture							
509-1	BGr	27.2	32.9	38.1	1.3	0.1	tr	-	0.2	-	-	-	-	Hypidiomorphic equigranular							
815-2	BGr	35.8	21.7	39.0	0.8	tr	0.3	-	1.3	-	-	-	-	Hypidiomorphic equigranular							
815-5	BGr	46.5	13.3	36.8	2.5	-	0.1	0.1	0.1	tr	-	-	-	Hypidiomorphic equigranular							

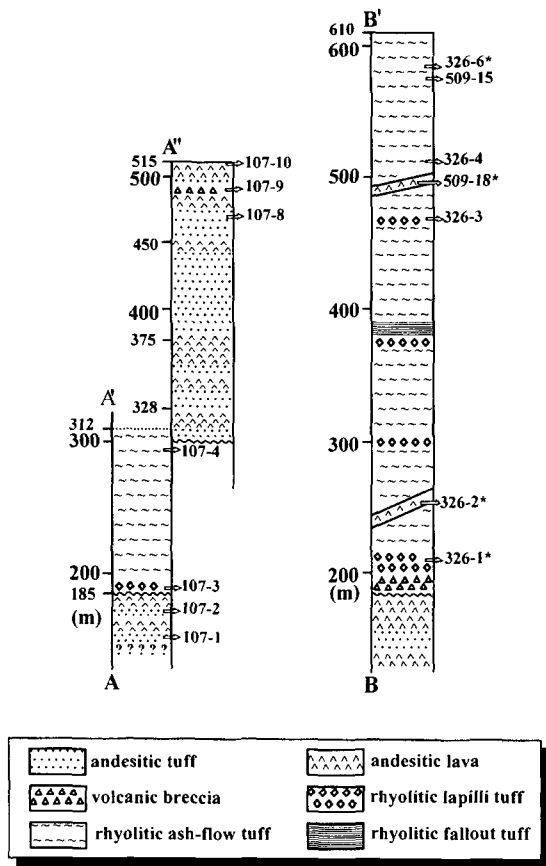


Fig. 3. Stratigraphic sequences of the volcanic rocks in the study area. [\* , sample of chemical analysis.] (A~A'-A'', B~B' lines are in Fig. 2.)

안산암질암류는 안산암질 응회암, 안산암질 응회각력암과 안산암질 용암이 교호로 산출된다.

Fig. 3의 B~B' 층서 단면의 하부에 안산암질 용암류와 화성쇄설암류가 교호 산출되며, 이를 고도 210 m 지점에서부터 불태령 정상(고도 610.6 m 지점)에 이르는 두꺼운 층후를 갖는 유문암질 화성쇄설암류가 피복하고 있다. 유문암질 화성쇄설암류층의 하부는 안산암질 암괴를 다량 함유한 각력암상을 나타내며, 상부로 갈수록 라필리응회암, 응회암으로 접이한다. 고도 300 m 지점에서부터 산출되는, 층후 100 m에 이르는 유문암질 화성쇄설암류는 주로 주향 N40° W, 경사 20~30° NE의 방향성을 보여주는 용결회류응회암으로 구성된다. 고도 300 m 지점에서는 라필리응회암층이 3 m 두께의 괴상 유동으로, 불태령 정상에 대하여 북쪽사면으로의 산 아래로 향하여 흐르는 방향성을 보여주며, 이에 주향 N40° E, 경사 약 90°의 절리가 발달해 있다.

본 역의 북부, 고도 380~385 m 지점에서 유문암질 화성쇄설암 내에 협재되어 나타나는 강하응회암은 층후가 약 1.75 m으로, 세립응회암과 조립응회암이 교호로 나타나며, 상부로 갈수록 이러한 양상이 현저하다. 부분적으로 저각도의 사층리가 발달해 있으며, 암편 역들에 의한 정점이층리가 나타난다. 이러한 양상으로 볼 때, 소규모의 작은 폭발이 있었음을 추측할 수 있다. 또한 국지적으로 암괴를 다량 포함하는 각력상을 나타내기도 한다. 고도 400 m 지점에서 불태령 정상에 이르는 층후에서는 유문암질 용결회류응회암이 산출된다. 전체적으로 본 암층의 상부로 갈수록 암편의 크기 (<1 cm)가 작아지고 그 함량은 감소되며, 반정의 함량은 상대적으로 증가한다. 한편, 고도 250 m 지점(시료 326-2)과 고도 500 m 지점(시료 509-18), 두 지점에서 이들 유문암질 화성쇄설암류를 중성 암맥이 관입하고 있는 양상이 관찰되어지는데, 고도 250 m 지점에서는 중성 암맥이 유문암질 화성쇄설암을 N72° E, 26° SE 방향으로 관입하고 있다. 응회암이 덜 고화된 상태에서 유체상태의 안산암질 성분의 마그마가 주입됨으로써, 경계부에서는 관입구조가 관찰된다. 고도 500 m 지점 부근에서도 중성 암맥이 나타난다. 또한, 응회질퇴적암은 고도 500 m 지점 부근에서 유문암질 화성쇄설암에 의해 피복되며, 불태령 정상(시료 509-13)에서는 안산암질암류를 피복하며 소규모로 산출된다. 측방의 연속성을 보이지 않는다. 불태령 정상에서 산출되는 응회질퇴적암은 하부에서부터 응회질 세일, 응회질 라필리스톤(lapillistone)이 호층을 이루면서 주향, 경사가 각각 N65° W, 42° NE으로, 층상구조가 잘 발달되어 있으며, 정점이층리를 형성하고 있다. 라필리스톤의 암편은 안산암질 용암이나 응회질 실트스톤으로, 크기는 0.5~1.5 cm이다. 한편, 북쪽사면에서 소규모로 산출되는 응회질 퇴적암은 유문암질 화성쇄설암류를 피복하고 있다. 백양산 남부 선암사 북서쪽에서는 안산암류와 그 상부의 유문암질 회류응회암 사이에 층리의 발달이 양호한 응회질퇴적암층이 발달한다. 주향과 경사는 N40° W, 30° NE 이다. 유문암질 화성쇄설암의 층간에 응회질퇴적암이 소규모로 협재되어 있는 양상을 통하여, 화산활동에 있어서 휴지기가 있었음을 알 수 있다. 이상에서 기술된 바에 의하면, 본 역에서는 최소 4회 이상의 마그마 펄스 큰 규모의 산성 화산활동이 있었음을 알 수 있다.

한편, Fig. 3의 A~A' 단면은 하부에서부터 중성-산성-중성으로의 화산 층서를 보여준다. 이러한 양상은 유천소분지 내 신불산-영취산 일대(김춘식 외, 1998)에서 나타나는 화산층서와 유사하다. 그러나 본 역에서의 이

러한 층서는 중성 화산암류를 피복하고 있는 유문암질 화성쇄설암류가 안산암질암류의 분출 후, 그로 인하여 형성된 계곡을 따라 유입된 것이라 추측되어진다(Walker, 1983). 유문암질 화성쇄설암류를 관입하고 있는 중성 암맥은 마그마 챔버내에 잔존해 있던 소량의 안산암질 마그마가 본 역의 중성~산성 화산활동 직후에 관입된 것이며, 이는 유문암질 화성쇄설암류와 관입하고 있는 중성 암맥의 경계부에서 응회암이 덜 고화된 상태에서 유체상태의 안산암질 성분의 마그마가 주입되어 나타나는 관입구조가 관찰됨으로써 뒷받침되어진다.

### 관입암류

기존의 연구(손치무 외, 1978)에서는 흑운모화강암, 규장암, 그리고 화강반암의 순서로 관입이 순차적으로 이루어졌다고 보고하고 있다. 그러나 본 연구 결과, 중성~산성 화산암류와 화강반암 간의 경계가 뚜렷하게 관찰되었고, 화강반암과 흑운모화강암과의 뚜렷한 경계를 찾을 수 없었다. 한편 현미경 관찰을 통하여 화강반암이 흑운모화강암보다 유색광물의 함량이 많음을 알 수 있었다. 이로써, 중성~산성 화산활동 후 화강반암의 관입이 이루어졌으며, 이후에 흑운모화강암의 관입이 이루어졌다고 추측된다. 화강반암은 백양산 정상 남쪽 사면으로 고도 550 m 지점(시료 509-9)과 백양산 정상의 북쪽 능선 고도 545 m 지점(시료 107-11, 107-12)에서 확실한 관입암맥상을 나타낸다. 관입의 방향은 주향 N20° E, 85° NW, 또는 수직 경사를 보여준다. 상부로 갈수록 반정의 크기가 작아지는 것이 관찰되어지며, 세리에이트 조직을 보여준다. 규장암은 본 역의 북부 만덕동 일대에서 관입상으로 분포하는 유문암으로, 일반적으로 유상구조가 잘 나타나지 않으며, 외래암편도 함유하지 않는다. 흑운모화강암은 본 역의 서부(구포, 모라동 일원)에서 남부(부암동 일원)에 걸쳐 낮은 지대에 넓게 분포한다. 서부에서 산출되는 시료(815-2, 815-5)와 남부에서 산출되는 시료(509-1)를 경하에서 비교해 보았을 때, 남부의 시료가 서부의 시료에 비하여 보다 결정 입자가 큰 화강암이다.

### 암석기재

#### 화산암류

**안산암질 용암:** 대부분의 안산암질 용암류는 육안상 사장석 반정이 뚜렷이 보이는 반상 용암이나, 본 역의 남부 선암사 일원에서는 비반상 용암이 산출되기도 한다.

비반상 용암은 흑색 내지 암청색을 띠며, 치밀한 조직을 보여준다. 부분적으로 용암류와 용암류 사이에서

각력암상은 나타내기도 한다. 비반상 용암은 노두의 풍화면이 평탄하고 매끄러우며 각이 저 있는 것이 특징적이며, 대체로 신선하다. 육안상 반정이 관찰되지는 않으나, 현미경하에서 사장석 반정은 대부분은 0.1×0.2 mm 크기의 알바이트, 알바이트-칼스바드 쌍정, 그리고 약한 누대구조를 보여주며, 자형 내지 반자형으로 나타난다. 부분적으로 녹염석으로 변질되어 있다. 중심부 역시 벽개면을 따라 변질되어, 녹니석화되어 있거나 불투명광물로 채워져 있다. 또한 크기 0.1 mm의 흑운모와 쌍정을 보여주는 각섬석이 소량 관찰되며, 이들 역시 부분적으로 녹염석, 녹니석으로 변질되어 있다. 반정광물의 함량은 34.4~36.9%이며, 기질부는 소량의 래쓰상의 사장석, 고철질광물, 그리고 은미정질 물질로 구성되어 있다. 반상 용암은 육안상 사장석 반정이 뚜렷이 관찰되며(Fig. 4a), 현미경 관찰 결과, 대부분 변질되어 있다. 반정광물의 조합은 비반상 용암과 같지만, 그 크기에 있어서 상대적으로 광물의 크기가 크다. 0.8×1.6~2.4×5.2 mm의 크기에 이르는 알바이트, 알바이트-칼스바드 쌍정, 그리고 약한 누대구조를 보이는 사장석이 반정광물의 대부분을 차지한다. 사장석 반정은 변질되어 부분적으로 점토화(argillization)되어 있거나 녹염석화되어 있다. 누대구조의 중심부는 변질되어 나타나기도 하고, 기질부에 의해 용식되어 골격조직을 보여주기도 한다. 각섬석 반정은 대부분 자형 내지 반자형으로 나타나며, 이들은 변질되어 녹니석화되어 있다. 크기는 1×1.4 mm의 것이 대부분이다. 극소량으로 관찰되는 휘석 반정은 주로 단사휘석으로, 0.1~1.0% 정도를 차지한다. 대부분 변질되어 부분적으로 또는 전체적으로 연녹색의 섬유상조직을 보이는 우랄라이트(uralite) 또는 녹니석, 녹염석 등으로 변질되어 있다. 그러나 일부(시료 326-7) 자형의 휘석 반정이 관찰되기도 하는데, 그 크기는 1.4×1~2×1.6 mm 범위를 갖는다. 그리고 불투명광물은 0.4×0.4~0.6×0.8 mm 크기의 반정상으로 관찰된다. 흑운모 반정이 소량 산출되는데, 반자형의 크기 0.4×0.6~1.2×1.4 mm를 갖는다. 기질부는 미정질의 래쓰상 사장석, 불투명광물, 유리, 그리고 소량의 유색광물로 이루어져 있다. 유리질 내지 은미정질 석기에 사장석 반정과 미정질이 불규칙하게 산재되어 하이알로필리틱 조직을 보여준다.

**안산암질 화성쇄설암:** 본 암은 크기 0.1 mm 이상의 알바이트, 칼스바드 쌍정을 보이는 사장석과 쌍정을 보이는 크기 0.05 mm 내외의 각섬석이 나타나며, 0.1 mm 이상의 불투명광물이 반정상으로 나타난다. 기질부는

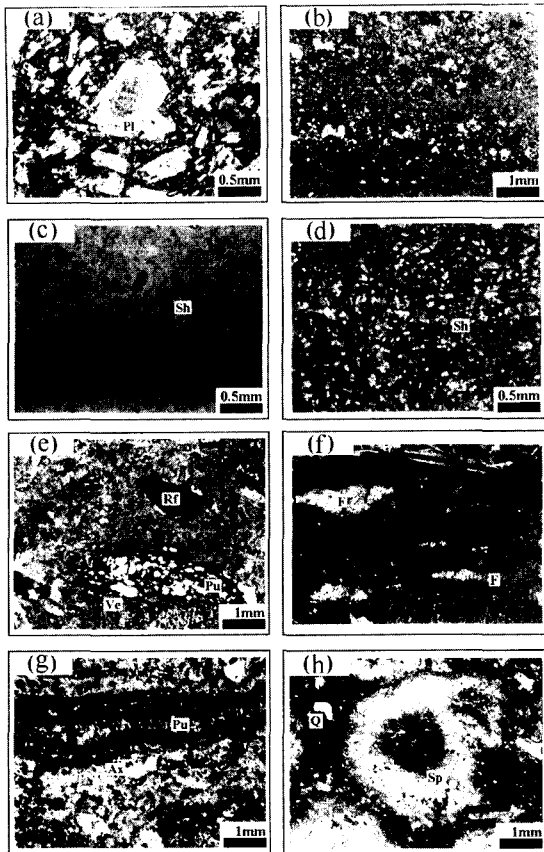


Fig. 4. (a), Photomicrograph of andesite, showing porphyritic texture with phenocrysts of plagioclase in hyalopilitic groundmass (opened polar). [Pl, plagioclase]; (b), Photomicrograph of tuffaceous sedimentary rock (crossed polar); (c), Photomicrograph of rhyolitic vitric tuff, showing vitroclastic texture with arcuate shards of glass in a matrix of almost impalpable glass dust. (opened polar). [Sh, shard]; (d), The same as (c) (crossed polar). [Sh, shard]; (e), Photomicrograph of rhyolitic welded ash-flow tuff, showing relict pumice clast in which the internal vesicular microstructure (opened polar). [Pu, pumice; Rf, rock fragment; Ve, vesicle]; (f), Outcrop of rhyolitic welded ash-flow tuff, showing compressed and elongated pumice fragment (fiamme). [F, fiamme]; (g), Photomicrograph of rhyolitic welded ash-flow tuff, showing fiamme being completely devitrified into feldspar and quartz. It develops axiolitic intergrowth along the boundary line (crossed polar). [Pu, pumice; Ax, axiolitic]; (h), Photomicrograph of the rhyolitic welded tuff showing spherulitic texture (crossed polar). [Sp, spherulitic texture; Q, quartz]

유리질 또는 은미정질의 물질로만 구성된 것도 있고, 레쓰상의 사장석과 유색광물, 불투명광물로 구성되어 있는 것도 있다. 기질부의 유리는 부분적으로 탈유리

화작용에 의해 미세한 석영 결정으로 재결정되어져 있다. 반정상의 유색광물은 대부분 변질되어 녹니석화되어 나타난다. 안산암질 암편은 본 암보다 훨씬 고철질인 것으로, 1 mm 내외의 각섬석 반정과 자형의 사장석이 풍부하다. 암편 내의 사장석 반정의 크기는 0.1~2 mm의 범위를 갖는다. 한편 안산암질 화성쇄설암류를 피복하고 있는 응회질 퇴적암은 사장석 결정편을 주로 함유하고 있으며, 기질부는 미립의 결정편과 은미정질 물질로 구성되어 있다(Fig. 4b).

**유문암질암:** 라필리응회암은 야외에서 부분적으로 용결된 흔적을 보이기는 하나, 용결된 흔적을 잘 나타내지 않으며 라필리 크기의 암편을 다량 함유한다. 현미경하에서 석영, 사장석, 알칼리장석을 반정으로 가지며, 그 함량은 평균 12.0%이다. 기질부는 유리, 흑운모, 미립, 불투명광물로 구성되어 있다. 미립의 흑운모는 집적되어 있거나 기질부에 흩어져 있다. 기질부의 유리는 대부분 탈유리화되어 미세한 석영으로 재결정화되어 있는데, 이는 유리질이 열역학적으로 불안정하기 때문이다(Lofgren, 1970, 1971b). 탈유리화작용은 일반적으로 실리카 광물과 알칼리장석이 샤아드 경계에서 내측으로 성장하거나 샤아드나 부석편에 아무런 조직적 관계없이 방사상-섬유상 연정을 형성하는 특징을 보이는데(Hibbard, 1995), 본 암의 유리도 역시 탈유리화되어 이러한 양상을 보여준다. 암편의 함량은 7.7~17.1%의 범위를 갖는데, 평균 함량은 12.4%이다.

응회암은 대부분 유리질 응회암이고, 대부분 반상조직을 보여주며 반정의 대부분은 사장석, 알칼리장석, 석영이다. 반정광물은 1~2 mm 크기로, 대체로 신선하고, 파열되거나 부서져 반자형 내지 타형이다. 기질부는 유리샤아드와 부석편 등의 유리가 다양한 압착 정도를 보여주며, 부석편들은 탈유리화된 경우가 많다. 유리질 응회암은 용결구조가 현저히 나타나는 전형적인 유리치밀용결응회암과 용결구조가 미약한 유리약용결응회암으로 나뉘어진다. 용결을 받지 않았거나 약하게 용결된 응회암은 반상조직을 나타낸다. 1~3 mm 정도의 암편이 포함되어 있으며, 안산암질 암편과 세일편으로 구성되는데 안산암질 암편이 우세하다. 반정은 대부분 사장석(8.1%)과 알칼리장석(5.1%)이며, 0.1 mm 내외의 소량의 흑운모와 각섬석, 석영이다. 흑운모는 변질되어 녹니석화되어 있다. 사장석은 알바이트, 알바이트-칼스바드 쌍정, 그리고 약한 누대구조를 보임으로써 식별되어지며, 일부 사장석 반정은 변질되어 불투명광물이나 건운모화 되었다. 알칼리장석은 칼스바드 쌍정을 보이며 크기는 0.2~1.6 mm이다. 일부 점토



광물로 변질되었다. 기질부는 은미정질로, 탈유리화되어 석영으로 재결정화된 작은 유리샤아드를 포함하기도 하며, 부분적으로 변질되어 녹니석화되어 있거나 유색광물의 미립이 집적되어 나타난다. 암편의 함량은 7.7%로, 안산암질 암편이 대부분이다. 반정이 선형 배열되어 있고 미약한 용결구조가 나타난다. 본 역의 북부 불태령 일대에 존재하는 본 암(시료 326-3)은 사장석과 소량의 흑운모, 각섬석을 반정으로 가지며, 은미정질의 기질부를 가진다. 기질부는 탈유리화된 작은 유리샤아드가 존재하는데, 직교 니콜 하에서 미세한 석영과 알칼리장석으로 채워져 있다. 기질부는 소량의 인회석과 흑운모 미립을 포함하면서 파리쇄설 조직(vitroclastic texture)을 보여준다(Fig. 4c & d). 암편의 함량은 17.3%로, 유리질용결응회암, 규장암으로 구성되어 있다. 일부(시료 107-16)에서는 부석편 내에 기공이 잔존하여 나타난다(Fig. 4e). 한편, 심하게 용결작용을 받은 응회암(시료 326-4, -6, -10, 107-16, -17)은 야외 산상에서 용결 엽리와 피아메에 의한 신장선구조를 보여준다(Fig. 4f). 기질부는 암갈색 또는 암흑색(Cas and Wright, 1987)을 띠며 치밀하게 나타난다. 현미경 하에서, 심하게 용결된 응회암의 기질부 내 부석편과 유리는 탈유리화되어 작은 장식 광물과 실리카 광물로 재결정화되어 있으며, 경계부에는 미세하게 축열상(axiolitic) 조직이 발달한다(Fig. 4g). 그리고 흑색의 유리질용결응회암 내에는 침상의 실리카 광물이 방사상으로 성장하여 구과상 조직을 나타낸다(Fig. 4h). 일부 유리샤아드, 부석, 유색광물은 변질되어 녹니석화되어 나타난다. 구과는 규질 유리(silicic glass)가 고온에서 탈유리화작용으로 인하여 생기는 산물로, 생성시 온도에 따라 다양한 형태로 나타난다(Lofgren, 1971a, 1974). 본 역에서 나타나는 구과는 대부분 700°C 이상의 온도에서 생성되는 전형적인 구형의 구과(Fig. 4h)이며, 부분적으로 축열상 조직을 보여준다. 또한 심한 용결작용 결과, 부석과 유리샤아드가 평행하게 배열되어 파라텍시틱 조직을 나타내고, 고상의 암편이나 반정광물 주위를 유리질 물질이 용결되어 휘감도는 유택시틱 조직이 뚜렷이 나타난다. 이는 신장된 피아메와 샤아드가 암편과 반정 주위를 평행하게 감쌀 만큼 유동적인 점성상태에 있었음을 나타내는 것이다(Riehle, 1973). 본 암의 유리샤아드는 600°C보다 비교적 높은 온도(Smith, 1960; Friedman *et al.*, 1963; Yagi, 1966; Fisher and Schmincke, 1984)와 용존 휘발성물질에 의해 쉽게 용결될 수 있었음을 예상할 수 있다.

## 관입암류

화강반암은 크기 0.1 mm 이상의 석영, 사장석, 흑운모, 각섬석을 반정으로 가지며, 기질부는 소량의 유색광물(흑운모, 각섬석의 미립)과 미정질의 장식류로 구성되어 있다. 석영 반정은 대부분 용식된 흔적을 보이는 타형으로, 0.4×0.6~1×1.6 mm의 크기 범위를 갖는다. 사장석 반정은 대부분 자형 내지 반자형으로, 일부 시료(815-4-2)에서는 용식된 형태로도 산출된다. 알바이트-칼스바드 쌍정과 누대구조를 보여주며, 크기는 0.6×1 mm의 작은 것에서부터 2.5×5.4 mm에 이르기까지 다양한 크기를 보이나, 1.2×3.2 mm 크기의 것이 대부분이다. 대부분 변질되어 견운모화되어 있다. 자형 내지 반자형의 각섬석 반정이 산출되며, 뚜렷한 두 방향의 벽개와 쌍정이 보인다. 불투명광물은 반정으로 나타난다. 모우드 분석 결과, 반정의 함량은 36.3~40.8%이며, 현미경하에서 알라나이트, 저어콘, 견운모가 보인다.

규장암은 미정질의 기질부에 장식, 석영 미반정, 소량의 유색광물, 그리고 불투명광물로 구성된다.

흑운모화강암은 중립질 내지 조립질로서, 주로 사장석, 알칼리장석, 석영, 흑운모, 소량의 각섬석으로 구성되며, 등립질의 반자형입상조직을 보여준다. 부수광물로 저어콘, 인회석, 알라나이트, 녹니석, 견운모, 불투명광물 등이 나타난다. 석영은 반자형 내지 타형으로, 용식 구조를 보여준다. 소량의 각섬석은 자형으로 산출되며, 부분적으로 녹니석화되어 있다. 알바이트 쌍정, 누대구조를 보여주는 사장석은 자형 내지 반자형으로 나타난다. 알칼리장석은 반자형 내지 타형이며 일반적으로 석영과 사장석의 간극을 충전하여 나타나거나 단독 결정으로 산출되기도 한다. 주로, 정장석이며 대부분 퍼다이트로 관찰된다. 흑운모는 갈색 내지 암갈색의 강한 다색성을 띠며, 반자형 내지 타형으로 나타나고, 흑운모 내에 소량의 저어콘, 인회석을 포함하고 있다.

## 암석화학

본 역에서 산출되는 여러 암상을 대표하는 시료에 대하여 주성분 원소 분석 및 미량 원소, 희토류 원소 분석을 실시하였다. 시료는 부산대학교 공동실험실습관 지구환경기기실의 암석분쇄기(tungsten carbide sample mill: TI-100 model)에서 5분여 동안 분쇄하여, 5~10여분간의 아게이트 사발을 이용하여 분말을 만들었다. 주성분 원소의 분석은 부산대학교 한국기초과학지원연구원 부산분소의 Philips PW 2400 X-선 형광분광분석기를 이용하였으며, 미량 원소 및 희토류 원소는 대덕연구단지 내 한국기초과학지원연구원의 PQ3(VG Elemental) 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)로 분

Table 2. Major element abundances (wt.%) and CIPW norm of the igneous rocks in the study area.

Sample	326-7	509-8A	509-8C	509-12	326-2	509-18	509-6	107-16	107-17	326-1	326-6	509-16	509-9	107-12
Rock Type	An(○)	BA(○)	BA(○)	BA(○)	BA(●)	BA(●)	RT(□)	RT(□)	RT(□)	RT(□)	RT(□)	RT(□)	GP(△)	GP(△)
SiO <sub>2</sub>	59.84	55.85	52.44	54.95	53.58	53.52	70.11	73.60	75.39	68.51	72.35	69.01	68.36	72.49
TiO <sub>2</sub>	0.77	0.82	0.83	0.86	0.81	0.92	0.42	0.36	0.18	0.45	0.25	0.43	0.41	0.26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.55	19.78	17.66	20.74	19.03	17.90	15.12	14.59	13.93	16.65	14.46	16.08	15.87	15.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>1</sup>	5.82	7.83	9.71	8.44	3.83	9.59	3.53	3.38	1.89	3.83	2.84	2.32	3.51	2.25
MnO	0.12	0.14	0.22	0.18	0.19	0.18	0.06	0.01	0.03	0.09	0.06	0.06	0.10	0.06
MgO	2.78	2.31	6.24	2.24	5.27	5.42	0.24	0.16	0.31	1.35	0.59	0.20	0.79	0.53
CaO	6.11	8.27	8.72	7.63	8.62	9.56	1.79	1.15	0.53	3.09	1.71	1.42	2.79	1.69
Na <sub>2</sub> O	3.75	2.85	1.67	3.20	3.54	1.89	3.44	5.83	4.45	3.48	4.57	4.06	3.82	4.56
K <sub>2</sub> O	2.01	1.44	0.95	0.25	0.73	0.43	4.02	0.88	3.26	2.46	3.13	4.38	2.91	3.09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.24	0.22	0.13	0.22	0.16	0.19	0.08	0.05	0.03	0.11	0.05	0.07	0.09	0.06
L.O.I.	0.41	0.50	1.44	1.19	0.45	0.40	0.22	1.08	0.77	0.75	0.40	0.42	0.56	0.54
Total	100.40	100.01	100.01	99.91	96.21	100.00	99.03	101.09	100.77	100.77	100.41	98.46	99.20	100.54
CIPW norm														
Q	12.41	11.18	9.03	13.52	5.09	11.05	30.74	33.48	35.33	29.69	29.05	25.86	27.73	29.67
Or	11.94	8.60	5.76	1.52	4.52	2.54	24.13	5.21	19.30	14.58	18.54	26.47	17.49	18.30
Ab	31.82	24.33	14.40	27.55	31.33	16.18	29.50	49.35	37.65	29.47	38.67	35.05	32.78	38.58
An	27.91	37.27	38.64	37.28	35.43	39.46	8.53	5.42	2.46	14.72	8.21	6.78	13.51	8.05
C	--	--	--	1.82	--	--	2.03	2.06	2.17	2.87	0.54	2.26	1.57	1.21
DiWo	0.47	1.22	2.01	--	3.50	3.09	--	--	--	--	--	--	--	--
DiEn	0.29	0.59	1.26	--	2.64	1.87	--	--	--	--	--	--	--	--
DiFs	0.15	0.61	0.63	--	0.50	1.04	--	--	--	--	--	--	--	--
HyEn	6.68	5.25	14.69	5.72	11.16	11.82	0.61	0.40	0.78	3.38	1.48	0.51	1.99	1.33
HyFs	3.38	5.46	7.38	6.69	2.11	6.56	0.88	0.82	0.54	1.96	0.87	0.36	1.86	0.61
Mt	2.97	3.44	4.31	3.74	1.74	4.22	2.60	2.45	1.37	2.23	2.06	1.72	2.07	1.63
Il	1.47	1.57	1.61	1.67	1.61	1.77	0.81	0.69	0.34	0.86	0.48	0.84	0.80	0.49
Ap	0.53	0.48	0.29	0.48	0.37	0.42	0.17	0.11	0.07	0.24	0.11	0.16	0.20	0.13

BA, basaltic andesite (○, lava; ●, intermediate dike); An, andesite; RT(□), rhyolitic rock; GP(△), granite-porphry. Fe2O3t is recalculated as FeO and Fe2O3 for CIPW norm. (Fe2O3/FeO ratios for CIPW norm calculation recommended by Middlemost, 1989).

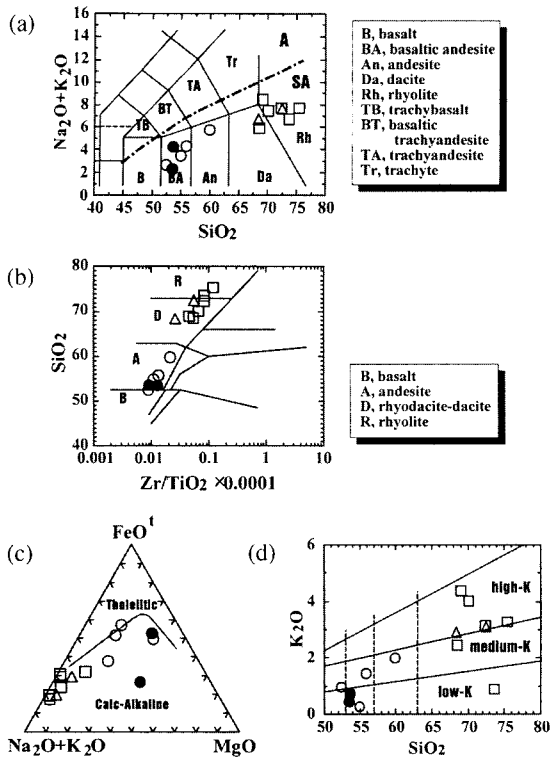


Fig. 5. (a) Total alkalis vs.  $\text{SiO}_2$  (wt.%) plotting for the igneous rocks in the study area (Le Maitre *et al.*, 1989). The dividing line between alkali (A) and sub-alkalic (SA) magma series is from Irvine and Baragar (1971); (b)  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001$  diagram for the igneous rocks in the study area (Winchester and Floyd, 1977); (c) AFM diagram for the igneous rocks in the study area (Kuno, 1968); (d)  $\text{K}_2\text{O}$  vs.  $\text{SiO}_2$  diagram for the igneous rocks in the study area (Gill, 1981). Symbols are shown in Table 2.

석하였다.

#### 주성분 원소

본 역의 각 화산암류와 관입암류로부터 계산한 CIPW 노움 값은 Table 2와 같다.

본 역의 안산암 용암의 화학성분은 현무암질 안산암과 안산암(시료 번호 326-7)에, 유문암질 화성쇄설암은 하나의 시료(시료 번호 326-1)를 제외하고 유문암 영역에, 유문암질 화성쇄설암 내에 관입상으로 나타나는 중성 암맥(시료 번호 326-2, 509-18)은 현무암질 안산암에 각각 해당한다(Fig. 5a). 한편, 풍화작용 및 2차적인 변질작용에 대하여 비교적 저항성이 큰 미량 원소인 Zr, Ti를 이용한 화산암류의 분류 다이어그램에서, 안산암 용암 및 유문암질 화성쇄설암을 관입하고 있는 중성 암맥은 모두 안산암에 해당하며 유문암질 화성쇄

설암은 유문테사이트암과 유문암에 해당한다(Fig. 5b)

본 역 화산암류의 암석 계열을 TAS 다이어그램에서 살펴보면, 본역 화산암류 및 관입암류는 모두 비알칼리암계열에 해당되며(Fig. 5a), AFM 삼각다이어그램(Fig. 5c)과 노움 광물로 재계산한 결과(Table 2)에서도, 본 역의 화산암류는 분화가 진행됨에 따라 철분과 마그네슘은 고갈되고 점진적으로 알칼리가 증가하는 칼크-알칼리 계열 분화경향을 나타낸다. 한편, 조산대 화산암류에 대한  $\text{K}_2\text{O}$  vs.  $\text{SiO}_2$  다이어그램에서 본 역의 안산암류는 low-K와 medium-K 영역에 속하며, 유문암질 화성쇄설암류는 high-K 영역에 속한다(Fig. 5d).

본 역 화산암류의  $\text{SiO}_2$  함량은 52.4~75.4wt.%의 넓은 조성 범위를 나타낸다. 안산암의  $\text{SiO}_2$  함량은 52.4~59.8wt.%이고, 유문암질 화성쇄설암류는 68.5~75.4 wt.%이며, 유문암질 화성쇄설암류 내에 관입상으로 나타나는 중성 암맥은 53.5~53.6wt.%이다. 한편, 관입암류인 화강반암의  $\text{SiO}_2$  함량은 68.4~72.5wt.%이다. 본 역 화산암류의  $\text{TiO}_2$  함량은 0.18~0.92wt.%으로, 비교적 낮게 나타나는데 이는 섭입대 화산암의 공통적인 특징으로, Ti이 지판의 침강·섭입에 관련된 대륙 연변부나 화산호에 분포하는 화산암들에서 흔히 고갈되기 쉬운 대표적인 HFSE 중의 하나이기 때문이다(Gill, 1981).

$\text{SiO}_2$ 에 대한 각 산화물의 변화 경향은 Fig. 6와 같다. 김상욱과 이영길(1981)에 의해 보고되어진 바에 의하면, 경상분지 내 백악기 화산암류는  $\text{SiO}_2$  함량이 증가함에 따라  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  등의 함량이 점진적으로 감소하며,  $\text{K}_2\text{O}$ 의 함량은  $\text{SiO}_2$  함량이 증가함에 따라서 함께 증가하고,  $\text{Na}_2\text{O}$ 는 다소 분산되나 미약하나마 증가하는 경향을 나타낸다. 본 역의 화산암류 역시 경상분지 내 백악기 화산암류의 일반적인 경향과 대체로 일치한다. 그런데, 본 역은 Fig. 6에서 보여지는 바와 같이  $\text{SiO}_2$  함량, 50~57wt.% 범위내에서  $\text{SiO}_2$  함량이 증가함에 따라  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ 의 함량은 함께 증가하다가 57wt.% 이상의 범위에서 점진적으로 감소하는 경향을 나타내는 것이 특징적이라 할 수 있다.  $\text{CaO}$ 와  $\text{MgO}$ 의 함량이 감소함에 따라  $\text{Al}_2\text{O}_3$  함량의 초기 증가는 감람석과 단사회석의 정출이 진행되었음을 의미하며, 후기의 감소 경향은 주로 사장석의 정출이 진행되었음을 나타낸다.  $\text{K}_2\text{O}$  함량의 증가는 흑운모와 장석류의 정출을 의미한다. 그리고  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 와  $\text{TiO}_2$ 의 함량이 감소하는 것은 Fe를 함유하는 모든 유색광물의 정출 및 자철석의 분별정출이 있었음을 지시한다.

한편, 본 역 화산암류의  $\text{SiO}_2$ 에 대한 각 산화물의 변화 경향에서  $\text{SiO}_2$  함량, 60~67.5wt% 범위에 해당하는

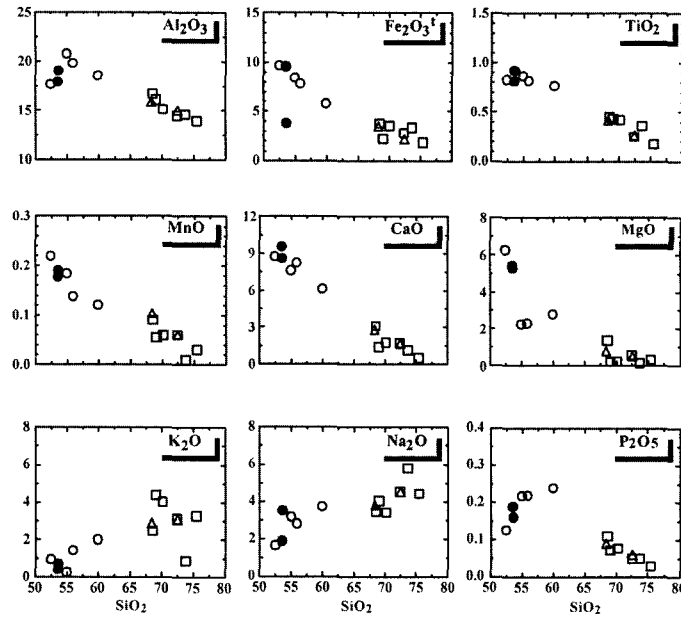


Fig. 6. Harker variation diagrams for the igneous rocks in the study area. Symbols are shown in Table 2.

암석의 불연속(Daly gap)이 나타난다(Fig. 6). 이러한 중간 조성을 갖는 암석이 결핍되는 현상은 충분하지 못한 시료 채취에 의한 것일 수도 있으나, 실질적으로 마그마 분화과정에 있어서의 변화 양상에 의한 결과로 나타나는 것일 수도 있다. 테일리 갭 전후의 주성분 원소의 변화를 통하여 마그마 진화과정에서 테일리 갭이 형성되는 동안에 일어난 분별정출 광물의 종류를 살펴보면 다음과 같다. 우선  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $CaO$  등은 테일리 갭 전후 변화 경향의 연장선이 일치하는 것으로 보이며, 이 동안에 일어난 광물의 분별 정출은 그 이전과 마찬가지로의 비율로 이 원소들을 감소시키는 작용을 하였음을 알 수 있다. 그러나  $Al_2O_3$ ,  $P_2O_5$ 의 변화 양상은 테일리 갭의 전후에 뚜렷한 차이를 보인다.  $Al_2O_3$ 와  $P_2O_5$ 는 테일리 갭의 이전에는  $SiO_2$  함량의 증가에 따라 급하게 증가하다가 테일리 갭 이후에는 감소하는 경향을 보여준다. 이는 Fe, Mg, Ca를 함유하는 광물(휘석, 자철석, 티탄철석)들은 비교적 일정한 비율로 계속적인 정출이 이루어졌으며, 주로 Al과 K 등을 함유하는 광물(장석류)의 정출은 테일리 갭 이전에는 거의 없다가 이러한 성분의 틈이 만들어지는 동안에 정출이 시작되어 잔류 마그마 내의 농도가 감소하였고, 인회석으로 여겨지는  $P_2O_5$ 를 함유하는 광물의 정출이 두드러져서 테일리 갭 직후의  $P_2O_5$  농도는 감소하게 되었음을 의미한다. 신불산-영취산 일대의 백악

기 화산암류(김춘식 외, 1998)와 대운산 일대의 후기 백악기 화산암류(김현숙, 2000; 윤성호 외, 2000)에서도 이러한 불연속성 특성이 잘 나타난다.

#### 미량 원소와 희토류 원소

본 역의 화산암류 및 관입암류에 대한 미량 원소와 희토류 원소의 분석 결과는 Table 3과 Table 4와 같으며, 본 역 화산암류 및 관입암류의 미량 원소와 희토류 원소 패턴은 지판의 섭입과 관련되어 형성된 화산암류의 특징을 잘 나타내고 있다.

**미량 원소:** 안산암의 경우, 맨틀 광물에 대해 호정성 미량 원소인 Ni과 Cr의 함량은 각각 4.6~35.4 ppm, 5.2~70.2 ppm으로, 초생마그마의 Ni, Cr 함량(Ni, 250~350 ppm; Cr, 500~600 ppm; Perfit *et al.*, 1980)에 비해서 아주 낮은 함량이다. 이는 맨틀 기원의 마그마에서 분화가 진전됨에 따라 철마그네슘 광물의 분별이 이루어지기 때문에 낮은 값을 나타낸다. Ni은 주로 감람석에 분배되어지며, Cr은 사방휘석으로 분배되어진다. Sc과 V의 함량은 각각 16.0~23.2 ppm, 138.4~221.0 ppm으로,  $SiO_2$ 가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보여준다. V의 변화 경향은 티탄철석의 분별에 기인한다.

Sr의 함량은 359.0~656.0 ppm의 비교적 넓은 성분 범

Table 3. Trace element abundances (ppm) of the igneous rocks in the study area.

Sample	326-7	509-8A	509-8C	509-12	326-2	509-18	509-6	107-16	107-17	326-1	326-6	509-16	509-9	107-12
Rock Type	An	BA	BA	BA	BA	BA	RT	RT	RT	RT	RT	RT	GP	GP
Cr	6.9	6.5	70.2	5.2	24.5	15.7	1.3	3.0	Tr	4.9	Tr	0.6	1.1	Tr
Ni	4.6	6.0	35.4	4.6	21.2	13.3	0.8	1.9	0.6	3.0	1.9	0.7	2.3	1.1
Co	40.9	48.5	57.4	46.8	60.9	65.7	78.2	78.2	74.5	50.4	115.0	72.2	106.0	84.3
Sc	16.0	19.6	23.2	19.6	24.5	26.5	11.1	13.5	8.3	12.2	9.7	6.1	11.3	8.6
V	138.4	141.0	221.0	175.0	223.3	207.0	14.3	12.5	7.5	82.5	20.4	15.2	24.1	14.6
Cu	39.8	21.4	40.2	17.5	15.4	24.4	9.2	3.7	2.7	10.3	7.6	10.2	27.0	4.3
Pb	14.2	4.8	2.5	11.2	21.9	4.3	16.7	12.3	12.3	16.1	21.7	19.7	9.4	13.3
Zn	77.7	68.5	69.3	71.6	123.6	105.0	55.9	20.6	18.8	63.6	60.4	30.1	81.4	44.3
Rb	51.1	57.8	48.8	5.6	20.7	15.1	111.0	31.8	79.8	76.4	87.8	96.4	92.6	91.0
Ba	449.3	269.0	152.0	132.0	281.9	135.0	687.0	197.2	676.6	642.0	574.4	695.0	593.0	694.4
Sr	462.4	535.0	359.0	656.0	569.0	442.0	213.0	149.7	117.4	175.8	132.5	195.0	256.0	154.7
Nb	7.1	4.9	15.7	4.7	3.6	18.1	9.3	11.0	9.1	10.4	9.1	12.0	10.4	9.9
Hf	4.6	2.3	1.6	2.2	2.4	1.9	5.5	8.2	6.3	6.8	6.2	3.9	2.5	4.6
Zr	163.1	109.0	73.8	95.3	73.3	116.0	279.0	300.2	212.8	239.8	206.6	193.0	107.0	141.8
Y	24.6	24.2	16.8	21.8	16.5	19.2	37.1	42.9	33.5	30.1	33.7	33.2	31.2	36.5
Th	6.3	3.1	2.5	2.9	2.9	2.7	10.6	12.8	11.9	10.1	11.4	10.3	7.8	11.6
U	1.4	0.8	0.6	0.7	0.7	0.6	2.6	3.2	3.5	2.6	2.9	2.7	1.8	2.5
Li	17.5	12.4	16.5	21.5	17.3	16.2	13.0	6.1	12.3	23.3	12.7	13.0	25.3	19.8
S	470.2	681.0	598.0	413.0	881.5	635.0	209.0	136.5	<50	248.2	183.9	135.0	1193.0	95.6
Mo	0.6	0.5	0.6	0.1	0.5	0.6	0.5	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	4.0	0.4
Cd	0.3	0.2	0.1	0.2	0.6	0.1	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2
Cs	1.0	14.7	24.2	0.9	7.9	5.5	5.0	1.4	0.7	5.5	0.5	2.1	5.0	3.2
La/Nb	3.2	3.6	0.6	3.7	3.1	0.9	3.5	3.3	2.7	2.2	2.9	2.7	2.8	3.3
Ba/Th	71.1	86.8	60.8	45.5	96.1	50.0	64.8	15.4	56.9	63.4	50.4	67.5	76.0	59.6
La/Th	3.6	5.7	4.0	6.1	3.8	5.9	3.1	2.8	2.1	2.2	2.3	3.1	3.7	2.8
Ba/La	19.6	15.1	15.4	7.5	25.1	8.4	21.1	5.5	27.3	28.4	21.7	21.5	20.4	21.1
K/Rb	326.5	206.5	162.1	375.1	293.3	233.7	300.9	229.5	339.2	267.3	296.1	377.4	261.0	281.9

MORB values used in normalizing trace elements are from Pearce(1983). Symbols are shown in Table 2

Table 4. Rare earth element abundances (ppm) of the igneous rocks in the study area.

Sample	326-7	509-8A	509-8C	509-12	326-2	509-18	509-6	107-16	107-17	326-1	326-6	509-16	509-9	107-12
Rock Type	An	BA	BA	BA	BA	BA	RT	RT	RT	RT	RT	RT	GP	GP
La	22.9	17.8	9.9	17.6	11.2	16.0	32.6	35.7	24.8	22.6	26.5	32.3	29.1	32.9
Ce	49.7	35.5	20.6	36.8	25.2	33.2	59.2	64.3	53.6	60.0	56.2	60.9	55.3	61.2
Pr	6.0	5.1	2.9	5.2	3.2	4.6	8.2	8.9	6.5	6.5	6.7	8.2	7.4	8.0
Nd	23.9	20.3	11.9	20.9	13.7	17.9	28.9	34.5	25.5	26.2	26.0	28.0	26.2	30.5
Sm	4.9	4.5	2.7	4.6	3.1	4.0	6.0	7.2	5.6	5.6	5.6	5.3	5.2	6.2
Eu	1.4	1.4	0.9	1.5	0.9	1.2	1.3	1.6	1.0	1.4	1.1	1.6	1.6	1.4
Tb	0.8	0.7	0.5	0.7	0.5	0.6	0.9	1.3	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	1.1
Gd	5.3	4.5	3.1	4.8	3.4	3.9	5.8	7.9	6.0	6.0	6.1	5.1	5.0	6.7
Dy	4.5	4.5	3.2	4.8	3.1	3.9	6.1	7.5	6.1	5.8	6.0	5.4	5.3	6.3
Ho	0.9	0.9	0.6	0.9	0.6	0.7	1.2	1.5	1.3	1.2	1.2	1.0	1.0	1.3
Er	2.8	2.5	1.8	2.5	1.9	2.1	3.5	4.7	3.9	3.8	3.9	3.2	2.8	4.1
Tm	0.4	0.4	0.2	0.3	0.3	0.3	0.5	0.7	0.6	0.5	0.6	0.5	0.4	0.6
Yb	2.7	2.1	1.6	2.1	1.7	1.8	3.3	4.5	4.0	3.7	3.9	3.2	2.7	3.8
Lu	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.5	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.6
ΣREE	126.5	100.5	60.1	103.0	69.4	90.5	158.0	180.8	140.4	144.9	145.3	156.0	143.2	164.5
ΣREE+Y	157.7	143.4	93.6	119.5	93.6	115.1	194.5	214.0	159.6	182.0	162.1	189.7	173.3	186.3
(La/Yb) <sub>N</sub>	5.7	5.7	4.2	5.7	4.3	6.0	6.7	5.4	4.2	4.1	4.6	6.8	7.3	5.8
(La/Sm) <sub>N</sub>	2.9	2.5	2.3	2.4	2.3	2.5	3.4	3.1	2.8	2.5	3.0	3.8	3.5	3.4
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.6	1.7	1.6	1.9	1.6	1.8	1.4	1.4	1.2	1.3	1.3	1.3	1.5	1.4
Eu/Eu*	0.8	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.7	0.6	0.5	0.7	0.6	0.9	1.0	0.6

Chondrite values used in normalizing REE are from Sun and McDonough(1989). Symbols are shown in Table 2.

위를 나타내는데, 이는 조산대 안산암의 성분 범위(Sr, 100~1000 ppm; Gill, 1981)에 포함되며, 다소 분산되기는 하나,  $\text{SiO}_2$ 가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. Rb, Ba의 함량은  $\text{SiO}_2$ 가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여준다. 이러한 불호정 원소인 Sr, Rb, Ba의 함량 변화는 알칼리장석이나 철마그네슘 광물, 사장석 그리고 스피넬 등의 분별의 영향에 기인하는 것이다.

Nb의 함량은 4.7~15.7 ppm으로, 평균 9.0 ppm이므로, 이 역시 Gill(1981)이 제시한 조산대 안산암의 성분 범위(5~11 ppm)에 속하며, Zr의 함량은 95.3~163.1 ppm으로, 조산대 안산암 조성(50~150 ppm)에 비하여 약간 높은 함량을 나타낸다. Zr/Nb 비는 4.7~23.1 ppm (평균 16.2 ppm)으로, 조산대 안산암의 10~20 ppm 범위(Gill, 1981)에서 다소 벗어나기는 하지만 평균 조성을 살펴볼 때, 조산대 안산암의 성분 범위에 속한다고 할 수 있다. Zr과 Nb의 함량은 암석단위 간의 분화 정도에 따라 비교적 규칙적인 변화를 보여준다.

Fig. 7은 본 역 화산암류와 관입암류의 미량 원소 중에서 맨틀 광물에 대하여 불호정성인 미량 원소 성분을 평균 MORB값(Pearce, 1983)으로 표준화하여 나타낸 거미다이어그램이다. 이온전위가 높은 원소(HFSE)인 Ce, P, Zr, Hf, Sm, Y, Ti, Yb 등의 함량은 상대적으로 낮으며, MORB 값과 거의 같거나 조금 결핍되어 있다. 이처럼 높은 이온전위를 갖는 원소들이 상대적으로 낮은 값을 가지는 것은, 이들 원소가 함유 유체에 녹기 어려운 원소로서 탈수작용에 의해서 고체상에서 빠져나가기 어렵기 때문이다. 본 역에서 산출되는 화산암류 및 관입암류에서 이러한 양상이 잘 나타난다. 한편, Sr, K, Ba이 부화되면 일반적으로 경희토류 원소(LREE)도 부화되어 나타나는데(Wilson, 1989), 이 역시 본 역 화산암류에서 잘 관찰된다. Fig. 7(A)에서 Ce, Sm, P는 HFS 원소이지만 MORB에 대하여 부화되어 있다. 이는 호상열도 암석 중, 칼크-알칼리암 계열에서만 관찰되는 현상으로, 이들 원소는 해양지각 슬랩의 부분용융에 의해서 생긴 규산염 용융체에 의해 운반된 것으로 설명된다(Hawkesworth and Powell, 1980). Fig. 7(D)에서 유문암질암과 관입암류는 Sr, Ti, P를 제외한 나머지 불호정성 미량 원소들이 대체로 안산암질 용암류보다 부화되어 있다. 그 중에서도 K, Rb, Ba, Th이 특히 많이 부화되어 있으며, Ti은 안산암류에 비하여 매우 심하게 결핍되어 나타난다. 이는 섭입대 화산암의 공통적인 특징으로, Ti이 지판의 침강·섭입에 관련된 대륙연변부나 도호에 분포하는 화산암들에서 흔히 고갈되기 쉬운 대표적인 HFSE 중의 하나이기 때문이다(Gill, 1981). 그리고 Sr의 값이 안산암

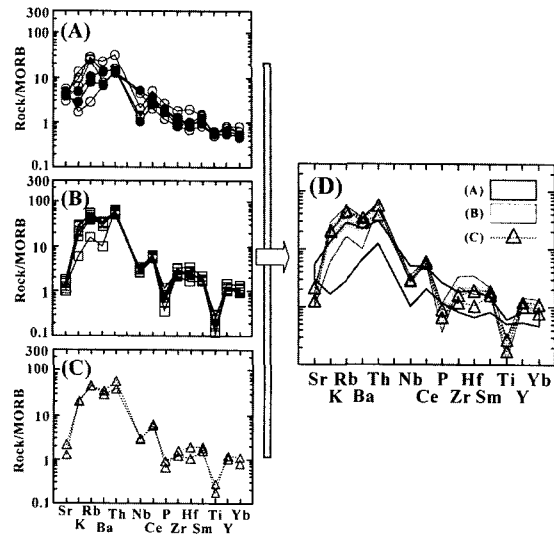


Fig. 7. MORB-normalized spider diagram for the igneous rocks in the study area. Symbols are shown in Table 2. (A), andesitic rocks; (B), rhyolitic rocks; (C), granite-porphyry; (D), overlap of andesitic rocks, rhyolitic pyroclastic rocks to granite-porphyry.

류에 비하여 다소 결핍되어 나타나는 것은 사장석의 분별 정출에 의한 것으로 여겨지며, P의 결핍 양상은 인회석의 정출에 의한 것이라 할 수 있다. 한편, 본 역의 화산암류 및 관입암류는 대체로 모든 시료들에 대하여 미량 원소들이 유사한 거동을 하나, 안산암에서 일부 시료에 대한 몇몇 원소들의 상이한 거동이 관찰된다. 안산암 시료 중, 시료 509-18과 509-12는 K 값이 다른 시료에 비하여 낮게 나타나며, 시료 509-18과 509-8C는 Nb 값이 다른 시료에 비하여 크게 나타난다. K 값이 낮게 나타나는 것은, K이 함유 유체에 대하여 유동성이 강하다는 것을 고려할 때, 풍화와 같은 2차적인 변질에 의한 암석으로부터 제거 요인을 생각해 볼 수 있다.

Sr, K, Rb, Ba, Th과 같은 원소들의 유동은 칼크-알칼리 마그마가 생성되는 과정에서 섭입하는 해양판의 탈수작용에 의해 가능하며(Pearce, 1983), Ce, P, Sm과 같은 원소들의 유동은 호상열도 암석(칼크-알칼리암 계열)의 생성시, 해양지각 슬랩의 부분용융에 의해 생긴 규산염 용융체에 운반 가능하다고 하였다(Hawkesworth and Powell, 1980). 즉, 이상에서 기술된 미량 원소의 MORB 값에 대하여 나타나는 부화·결핍 양상은 본 역의 화산암류 및 관입암류가 지판의 침강·섭입에 관련된 대륙연변부나 도호 등의 구조와 관련되어 산출

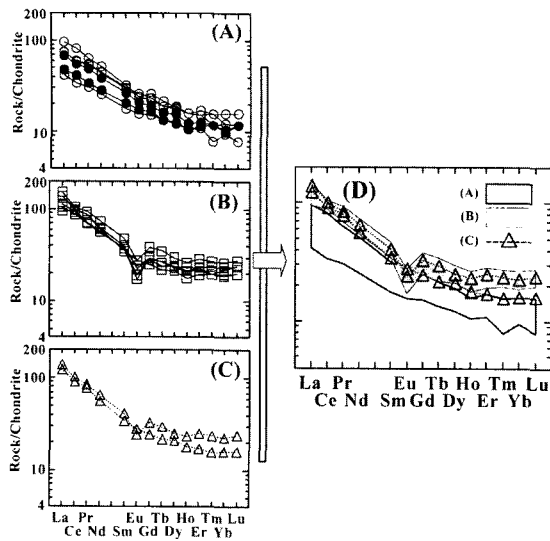


Fig. 8. Chondrite-normalized REE patterns of the igneous rocks in the study area. Symbols are shown in Table 2. (A), andesitic rocks; (B), rhyolitic rocks; (C), granite-porphry; (D), overlap of andesite, rhyolitic pyroclastic rocks to granite-porphry.

되었음을 시사하는 것이다(Pearce *et al.*, 1984).

**희토류 원소:** Fig. 8은 본 역의 안산암, 유문암질 화성쇄설암, 관입암류(화강반암)에 대한 희토류 원소 함량을 콘드라이트값(Sun and McDonough, 1989)으로 표준화하여 도시한 다이어그램이다. 안산암, 유문암질 화성쇄설암, 화강반암에 대한 희토류 원소의 총량(Table 4)은 각각 93.6~157.7 ppm(평균 128.6 ppm), 159.6~214.0 ppm(평균 183.7 ppm), 173.3~186.3 ppm(평균 179.8 ppm)으로, 본 역 화산암류 및 관입암류들은 평균 운석에 비하여 희토류 원소가 부화되어 있으며, 경희토류 원소는 전체 콘드라이트에 비해서 약 30~200배 정도 부화되어 있다. 전반적으로 REE 패턴에서 경희토류 원소(LREE)는 부화되어 있고, 중희토류 원소(HREE)는 다소 낮은 일반적인 경향을 나타낸다. 각 암상별로 비교해 보았을 때, 안산암, 유문암질 화성쇄설암, 그리고 화강반암의 (La/Yb)<sub>N</sub> 비는 각각 4.2~5.7, 4.3~6.0, 그리고 5.8~7.3이다. 화강반암에서의 기울기가 안산암과 유문암질 화성쇄설암에 비하여 다소 높기는 하나, 대체로 기울기가 거의 같으며, 평행한 배열을 보여준다. 유문암질 화성쇄설암과 화강암류는 Eu를 제외하고는 안산암에 비하여 대부분의 희토류 원소가 소량 부화되어 있다. 안산암은 유문암질 화성쇄설암과 화강반암에 비하여 Eu의 부(-) 이상이 현저하지 않으나, 유

문암질 화성쇄설암과 화강반암에서는 현저하게 나타난다(Fig. 8(D)). Eu/Eu\* vs. Sr과 Eu/Eu\* vs. Eu\* 다이어그램에서 Eu/Eu\*는 Sr에 대해서는 정(+)의 상관관계를 보이고, Eu\*에 대해서는 부(-)의 상관관계를 보인다. 이러한 경향은 분화가 진행됨에 따라 Eu/Eu\*가 감소함을 알 수 있다. 즉, 이는 분화가 진행됨에 따라 Eu 부(-) 이상이 현저해 짐을 의미하며, 이러한 Eu 부(-) 이상은 사장석 정출에 기인한다. Eu/Eu\*는 안산암, 유문암질 화성쇄설암, 그리고 화강반암에 대하여 각각 0.8~1.0(평균 0.9), 0.5~0.9(평균 0.7), 그리고 0.6~1.0(평균 0.8)이다.

이상에서 살펴 본 바와 같이 안산암과 유문암질암의 희토류 원소의 패턴이 거의 같고 나란하며, 전체 희토류 원소 함량이 안산암으로부터 유문암질암과 화강반암으로 증가하며, 유문암질암과 화강반암은 Eu 부(-) 이상을 보이는 사실로부터, 유문암질(화강암질) 마그마가 안산암질 마그마로부터 사장석을 포함하는 분별정출작용에 의해 형성되었음을 알 수 있다. 그리고 본 역의 화산암류 및 관입암류에 대한 REE 패턴의 유사성은 균질한 동원 마그마(cogenetic magma)에서 유래된 결과로 해석할 수 있다. 그리고 중희토류 원소의 함량이 콘드라이트값의 10배 정도로 나타나는데, 이로써 이들 화산암류를 형성시킨 마그마는 근원지가 석류석을 포함하지 않는 것으로부터 만들어졌음을 알 수 있다(Wilson, 1989).

### 조구조적 위치

Wood(1980)는 화산암류에 대하여 적용할 수 있는 비유동 HFS 원소, Th, Hf, 및 Nb와 Th, Zr, Nb을 이용한 조구조적 판별도(Fig. 9a & b)를 제시하였다. 대부분의 화산암류가 해양판이 침강·섭입하는 지판 경계부의 영역에 점시된다. 일부 시료(509-8C와 509-18)는 본 판별도에서 지판 내부 알칼리암 계열의 영역에 도시된다. 이는 미량 원소 Nb이 유동성이 낮은 불호정성 원소임을 고려해 볼 때, 본 시료들의 분석에 있어서의 오류에 기인하는 결과로 판단하는 것이 타당할 것이다. 한편, 본 역의 화산암류와 관입암류는 K의 증가와 함께 Rb가 증가하는 정의 상관관계를 보이는데, K/Rb 비가 162.1~377.4(평균 280)로서 조산대 대륙연부부 칼크-알칼리암의 영역(250~1000)에 속한다(Jakes and White, 1972). 그리고 본 역 화산암류에 대한 Ba/La 비, La/Th 비, 그리고 La/Nb 비는 각각 5.5~28.4, 2.1~6.1, 그리고 0.6~3.7으로, Gill(1981)이 제시한 조산대와 관련된 화산암류의 판단기준(Ba/La, 15~80; La/Th, 2~



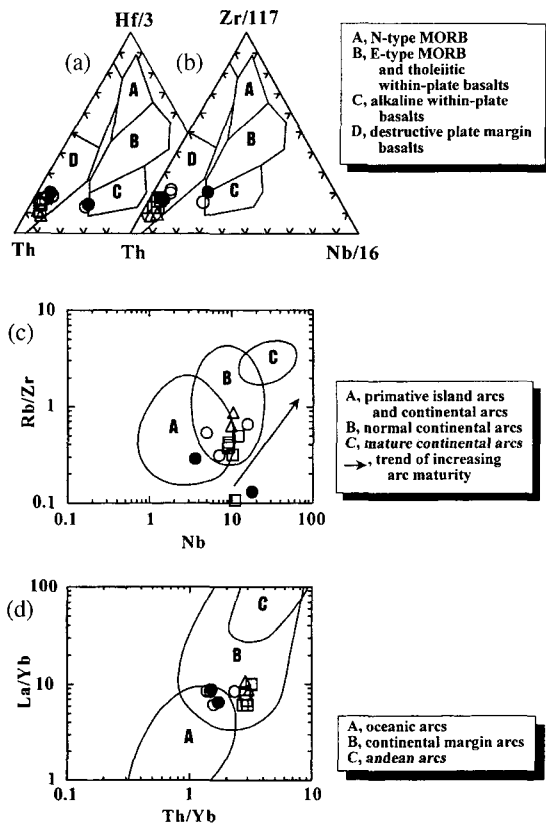


Fig. 9. (a) Hf/3-Th-Nb/16 diagrams; (b) Zr/117-Th-Nb/16 diagrams (after Wood, 1980). Island-arc tholeiitic basalts plot in field D where Hf/Th>3.0 and calc-alkaline basalts in the field D where Hf/Th<3.0; (c) Rb/Zr vs. Nb diagram showing arc maturity (Brown et al., 1984); (d) Petrogenetic pathway using relationship of log Cr vs. log Y for the igneous rocks in the study area (Gill, 1981). [ol, olivine; sp, spinel; cpx, clinopyroxene; pl, plagioclase]. Symbols are shown in Table 2.

7; La/Nb, 2~5)에 대하여 일부 시료가 이탈하기는 하지만 대부분의 시료가 이에 속하므로, 본 역 화산암류가 조산대의 화산암류에 해당함을 알 수 있다.

Fig. 9c는 Rb/Zr 비의 증가에 따른 Nb의 함량 증가에 의한 상관도이다. 이 다이어그램은 Nb의 함량과 Rb/Zr 비에 따라 원시적 도호 및 대륙호, 정상적 대륙호와 성숙된 대륙호로 구분되어지는데, 이 순서로 점점 그 성숙도가 커짐을 나타내는 것으로(Brown et al., 1984), 본 역의 화산암류가 정상적인 대륙호 영역에 도시되어진다. 이는 이들 화산암류가 일반적인 대륙호 환경에서 생성되었음을 지지해 준다. 또한, La/Yb 비의 증가에 따른 Th/Yb 비의 증가에 의한 상관도(Brown

et al., 1984)에서도 지판이 섭입하는 환경 중에서도 대륙 연변호 영역에 도시된다.

이상의 결과로, 본 역의 화산암류의 조구조적 위치는 백악기 말 유라시아 대륙판의 동변을 따라 있었던 환태평양 대륙연변호 칼크-알칼리 화산대 환경 중의 하나임을 알 수 있다.

## 마그마 성인과 분화 고찰

원시맨틀 성분과 본 역의 화산암류의 성분을 비교하여 마그마의 성인과 진화 양상을 살펴보기 위해 Gill (1981)이 조산대 화산암류에 대하여 제시한 Cr과 Y의 상관도에 본 역의 화산암류를 도시해 보았다(Fig. 9d). 본 역의 화산암류는 원시맨틀의 성분 영역과는 떨어져 도시되고, 이를 맨틀 물질의 부분용융 곡선과 연결시키면 약 20% 정도가 부분용융되어 만들어진 초생마그마가 형성되어 진화한 후, 본 역의 화산암류의 기원이 되는 현무암질 안산암 모마그마가 형성되었음을 알 수 있다. 그리고 본 역 현무암질 안산암의 낮은 MgO, Ni, Cr 함량은 현무암질 초생마그마로부터 감압석, 휘석의 분별정출을 의미하는 것으로, 이 사실을 뒷받침한다. 이 모마그마로부터 계속 분별정출작용이 진행되어 본 역에서와 같은 다양한 암석이 형성되었을 것이다.

## 안산암질암

대륙연변호 칼크-알칼리 화산대에서의 칼크-알칼리 안산암질 마그마를 생성시킨 기구로는 현무암질 마그마로부터의 단순한 분별정출작용(Ewart and Bryan, 1972), 지각 물질의 적절한 부분용융(partial melting; Turner and Verhoogen, 1960), 마그마 혼성화작용(hybridization; Nicholls and Ringwood, 1973; Sekine and Wylie, 1982a, 1982b), 산성 마그마와 염기성 마그마의 혼합작용(magma mixing; Eichelberger, 1975; Anderson, 1976; Kushiro and Sato, 1978), 지각 물질에 의한 현무암질 마그마의 혼염에 의한 안산암질 마그마의 생성 등을 들 수 있다.

본 역은 다량의 안산암류가 유문암질암류의 하부를 접하며 분포하고, 현무암은 산출되지 않는다. 지화학적으로 본 역에서 산출되는 안산암질암은 대륙연변호 칼크-알칼리 화산대의 조구적 환경에서 형성되었다. 이러한 조구적 환경에서 상부 맨틀의 부분용융에 의한 칼크-알칼리 마그마의 생성을 고려해 볼 수 있는데, 이는 본 역 안산암질암류의 생성 기작으로서 가장 적합한 것이다. 즉, 화산호가 발달되는 섭입대에서 해양판이 대륙 지각 하위의 맨틀 속으로 섭입되는 환경에서

섭입 슬랩 상부의 맨틀에 함유유체가 공급됨으로써 상부 맨틀이 부분용융되어 칼크-알칼리 마그마가 생성될 수 있다는 것이다(Ringwood, 1974; Mysen *et al.*, 1974; Nicholls, 1974; Kushiro and Sato, 1978; Green, 1980). 해양지각이 섭입됨에 따라 해양지각은 녹색암-앰피블라이트-에클로자이트로 변성되면서 탈수 작용에 의하여  $\text{SiO}_2$ 가 풍부한 함유유체가 생성되어 상부의 썩기형 상부 맨틀로 상승하여 맨틀 물질의 용융점을 낮추어 줌으로써 맨틀의 부분용융이 이루어진다. 이렇게 생성된 칼크-알칼리 마그마로부터 유래된 암석은 강한 불호정성의 원소 중에 Th, Ce이 부화되는 특성을 가지며, Nb, Hf, Y, Yb은 다소 적은 함량으로 남는데 이는 칼크-알칼리 마그마의 주요 기원이 섭입되는 해양지각보다 상부 맨틀일 것(Gill, 1974)이라는 것과 관계한다. 즉, 이는 본 역에서 칼크-알칼리 마그마가 베니오프대 위의 상부맨틀에서 일어나는 일련의 과정에 의해 생성되었음을 의미한다. 현무암질 칼크-알칼리 마그마가 상부맨틀 내의 저장고에 머물면서 분별결정작용이 일어나고 다시 지각 내의 지하공간에 머물면서 분별결정작용이 일어나고 이와 동시에 지각혼입과 하부지각 용융물과 혼합이 일어나 안산암질 마그마를 형성하는 것은 가능하다. 이러한 분별정출작용은 안산암질 마그마가 생성될 수 있는 가장 중요한 작용으로 여겨진다(Powell, 1978).

그러나 본 역에서 현무암질 안산암이 가장 염기성암에 속하고, 주성분조성이나 미량원소 함량에 있어서 MgO(2.31~6.24 wt.%)의 낮은 조성과 Ni, Cr, Co, Sc 등의 호정성 원소 함량이 비교적 고갈되어 있기 때문에, 현무암질 안산암을 형성시킨 마그마는 약간의 분별결정작용을 겪은 다소 진화된 현무암질 안산암 마그마이며, 이는 현무암질 내지 보다 염기성의 초생마그마로부터 분별작용에 의하여 진행되었음을 의미한다.

**유문암질암**

본 역의 유문암질 마그마는 안산암질 마그마로부터 분별 정출작용에 의해 진화되었을 가능성이 높다. 본 역 화산암의 불호정성 미량 원소의 거미다이어그램을 보면 유문암질암의 미량 원소 패턴과 안산암질암의 패턴이 유사하다. 또한 유문암질암은 안산암질암에 비해 Sr, P, Ti을 제외한 나머지 불호정성 원소들의 함량이 모두 높게 나타나며, Sr, Ti, P, Sc, Ca, Al, Fe, Mg과 같은 호정성 원소는 감소한다. 이것은 유문암질 마그마가 안산암질 마그마로부터 분별정출작용에 의해 진화되었을 가능성이 매우 높음을 시사하는 것이다. 그러나 다른 원소들에 비해 특히 K, Rb, Ba, Th이 부화

되어 있음은 미약하나마 대륙지각에 의해 혼입되었을 가능성을 보여주는 것이다. 또한, 희토류 원소 패턴에서도 유문암질암과 안산암질암의 패턴이 매우 유사하고, 유문암질암이 안산암질암에 비해 전체적으로 부화되어 있으며, 특히 Eu의 부(-) 이상이 나타난다. 이것은 미량 원소의 패턴과 마찬가지로, 유문암질 마그마가 안산암질 마그마로부터 분별정출작용에 의해 분화되었음을 나타내는 것이다.

본 역 화강반암은  $\text{SiO}_2$  함량이 68.4~72.5 wt.%으로, 본 역의 유문암질암류의 조성 범위(68.5~75.4 wt.%)와 유사하다. 그리고 주성분 원소, 미량 원소, 그리고 희토류 원소는 유문암질암류와 유사한 함량과 변화 경향을 나타낸다. 이는 본 역의 유문암질암류를 형성한 유문암질(화강암질) 마그마가 본 역의 지하 천저에서 냉각 고결되어 화강반암을 형성한 것으로 추정된다.

**결 론**

경상분지 내 유천소분지의 동남단에 위치하는 부산 백양산 일대에 분포하는 백악기 화산암류는 안산암질 암류를 하위에 두고서 그 상부에 유문암질화성쇄설암류가 놓이며, 이들은 화강반암, 규장암, 흑운모화강암에 의해 관입되어 있는 화산-심성활동의 양상을 잘 보여준다.

본 역의 화산암류는 주성분 원소에 의하면, 다소 분산되기는 하나 대부분 medium-K 또는 high-K의 안산암에서 유문암에 이르는 암형을 보이며, 데사이트 조성에 해당하는 암석의 불연속이 나타난다. 화산암류의  $\text{SiO}_2$  함량은 52.4~75.4 wt.%의 넓은 조성 범위를 나타내는데, 암상별로 안산암질 용암, 유문암질 화성쇄설암류, 유문암질 화성쇄설암류 내에 관입되어 있는 안산암질 암맥, 화강반암의  $\text{SiO}_2$  함량은 각각 52.4~59.8 wt.%, 68.5~75.4 wt.%, 53.5~53.6 wt.%, 68.5~72.5 wt.%이다. 안산암질 용암류는 현무암질 안산암, 안산암에 해당하며, 유문암질암류는 유문데사이트와 유문암에 해당한다.  $\text{SiO}_2$  함량이 증가함에 따라  $\text{TiO}_2$ , CaO,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , MnO, MgO 등의 함량은 점진적으로 감소하며,  $\text{K}_2\text{O}$ 의 함량은  $\text{SiO}_2$  함량이 증가함에 따라서 함께 증가하고,  $\text{Na}_2\text{O}$ 는 다소 분산되나 미약하나마 증가하는 경향을 나타낸다. 그리고  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ 의 함량은 전반적으로  $\text{SiO}_2$  함량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이는하나, 초기( $\text{SiO}_2$ , 50~57 wt.%)에 다소 증가하다가 후기( $\text{SiO}_2$ , 57 wt.% 이상)에 점진적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 미량원소와 희토류원소의 패턴, 조구조 판별도는 본 역의 화산암류가 지판의 섭입과 관련

되어 형성된 화성암류임을 시사해 주며, Rb/Zr vs. Nb 성분도와 La/Yb vs. Th/Yb 성분도는 본 역의 화산암류가 공간적으로 화산호에 위치하고 이 중에서도 대륙연변부를 통과한 대륙호에 속함을 보여준다. 이 대륙호 가운데에서도 칼크-알칼리 계열 암석을 나타낸다.

본 역에서 가장 고철질인 현무암질 안산암 마그마는 섭입과 관련하여 상부 맨틀의 맨틀 웨지로부터 생성된 현무암질 초생 마그마로부터 분별정출작용에 의해 만들어졌을 가능성이 크다. 또한 지화학적으로 현무암질 안산암과 안산암류에서 유문암질암류(화강반암)으로 갈수록 불호정 원소의 증가, Sr, Ti, P, Sc, Ca, Al, Fe, Mg과 같은 호정성 원소의 감소, 희토류 원소 패턴에서 보이는 Eu의 부(-) 이상 증가 등은 본 역의 유문암질(화강암질) 마그마가 안산암질 마그마로부터 분별정출작용에 의해 진화되었을 가능성이 크다는 것을 시사해 준다. 즉, 본 역을 이루는 암석들을 형성한 근원마그마의 기원은 동일하며, 주로 사장석, 휘석, 그리고 각섬석의 분별정출작용을 통하여 현무암질 안산암, 안산암, 유문암질암류(화강암질암류)로 분화되었다.

## 사 사

본 논문의 내용을 다듬어 주신 안동대학교 황상구 교수님과 한국해양연구소의 이종익 박사에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김상욱, 1982, 북부 유천분지내에 분포하는 후기 백악기 화산암의 암석학적 연구. 서울대학교 박사학위논문, 133p.
- 김상욱, 1986, 경상분지에서의 후기백악기 화성활동에 관한 연구. 이상만 교수송수기념 논문집, 167-194.
- 김상욱과 이영길, 1981, 유천분지 북동부 백악기 화산암류의 화산암석학 및 지질구조. 광산지질, 14, 35-49.
- 김상욱, 이재영, 김영기, 고인석, 1991, 남부 유천소분지에 분포하는 백악기화산암의 암석학적 특징. 지질학회지, 27, 24-39.
- 김진섭, 1990, 경상분지 동남부 일대에 분포하는 백악기 화산암류에 대한 암석학적 연구. 지질학회지, 26, 53-62.
- 김진섭과 윤성효, 1993, 부산일원에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 연구(I). 암석학회지, 2, 156-166.
- 김춘식, 윤성효, 정창식, 1998, 신불산-영취산 일대에 분포하는 백악기 화산암의 화산층서와 암석학적 연구. 지질학회지, 34, 136-153.
- 김현숙, 2000, 대운산 화산합물체에 대한 암석화학적 연구. 부산대학교 석사학위논문, 49p.
- 박양대, 1969, 울산지질도폭(1:50,000). 국립지질조사소, 20p.
- 박양대와 윤형대, 1968, 방어진지질도폭(1:50,000). 국립지질조사소, 14p.
- 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 동래·월래 지질도폭(1:50,000). 자원개발연구소, 27p.
- 원종관, 1968, 경상분지내에서의 백악기 화성활동에 관한 연구. 지질학회지, 4, 215-236.
- 윤성효, 고정선, 김영라, 김현숙, 2000, 유천화산암분포지 동남부 대운산 화산합물체의 화산-심성암류에 대한 암석학적 연구. 지질학회지, 36, 295-312.
- 윤성효, 김진섭, 김영라, 1994, 부산일원에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 연구(II)-조구조적 위치 및 성인. 한국지구과학회지, 15, 356-365.
- 이상만, 김상욱, 진명식, 1987, 남한의 백악기 제3기 화성활동과 지구조적 의의. 지질학회지, 23, 338-359.
- 정종욱과 좌용주, 2000, 의성분지 동부에 분포하는 백악기 화산암류의 화산층서와 암석학적 연구. 암석학회지, 9, 238-253.
- 차문성, 1966, 동래의 지질. 부산대학교 개교 20주년 기념 논문집, 79-88.
- 차문성, 1976, 부산지역의 불국사산성화산암류의 암석학적 연구. 광산지질, 9, 85-106.
- 차문성과 윤성효, 1982, 부산시 일원의 백악기 화산활동-특히, 장산 칼데라 잔존구조에 관하여-. 부산대학교 자연과학 논문집, 34, 377-390.
- 황상구, 1979, 천황산 일대 백악기 화산암류에 대한 암석학적 연구. 경북대학교 대학원 이학석사 학위논문, 94p.
- 황상구와 김상욱, 1994, 밀양-양산간의 백악기 화산암류의 암석학적 연구(I): 암석조구조적 위치. 지질학회지, 30, 229-241.
- Anderson, A.T., 1976, Magma mixing: Petrological process and volcanological tool. J. Volcanol. Geotherm. Res., 1, 3-33.
- Brown, G.M., Thorpe, R.S., and Webb, P.C., 1984, The geochemical characteristic of granitoids in contrasting arc and comments on magma sources. J. Geol. Soc. London, 141, 413-426.
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, Volcanic successions, modern and ancient. Chapman & Hall, 528p.
- Eichelberger, J.D., 1975, Origin of andesite and dacite: Evidence of mixing at Glass Mountain in California and at other circum-Pacific volcanoes. Geol. Soc. Am. Bull., 86, 1381-1391.
- Ewart, A. and Bryan, W.B., 1972, The petrology and geochemistry of igneous rocks from Eua, Tongan Islands. Geol. Soc. Am. Bull., 83, 3281-3298.
- Fisher, R.V. and Schmincke, H.U., 1984, Pyroclastic rocks. Springer-Verlag, 472p.
- Friedman, I., Long, W. and Smith, R.L., 1963, Viscosity and water content of rhyolite glass. J. Geophys. Res., 68, 6523-6535.
- Gill, J.B., 1974, Role of underthrust oceanic crust in the genesis of a Fijian calc-alkaline suite. Contrib. Mineral. Petrol., 43, 29-45.
- Gill, J.B., 1981, Orogenic andesites and plate tectonics.

- Springer, Berlin, 390p.
- Green, T.H., 1980, Island arc and continent-building magmatism: A review of petrogenetic models on experimental petrology and geochemistry. *Tectonophysics*, 63, 367-385.
- Hawkesworth, C.J. and Powell, M., 1980, Magma genesis in the Lesser Antilles island arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 51, 297-308.
- Hibbard, M.J., 1995, *Petrography to petrogenesis*. Prentice Hall, 608p.
- Hwang, S.K. and Kim, S.W., 1994, Petrochemistry of trace and rare earth elements as an indicator of tectonic setting for the Cretaceous volcanic rocks, Miryang-Yangsan area. *Econ. Environ. Geol. Abst.*, 27, 31.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, 8, 523-548.
- Jakes, P. and White, A.J.R., 1972, Major and trace element abundances in volcanic rocks of orogenic areas. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83, 29-40.
- Johnston, A.D. and Wylie, P.J., 1989, The system tonalite-peridotite-H<sub>2</sub>O at 30kbar, with applications to hybridization in subduction zone magmatism. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 102, 257-264.
- Kuno, H., 1968, Differentiation of basalt magmas. In: Hess H.H. and Poldervaart A. (eds.), *Basalts: The Poldervaart treatise on rocks of basaltic composition*. Vol. 2. Interscience, New York, 623-688.
- Kushiro, I. and Sato, H., 1978, Origin of calc-alkalic andesite in Japanese islands. *Bull. Volcanol.*, 41, 576-585.
- Lee, J.L., 1991, *Petrology, Mineralogy and Isotopic Study of the Shallow-depth Emplaced Granitic Rocks, Southern Part of the Kyongsang Basin, Korea-Origin of Micrographic Granite*. Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Science, Geological Institute Faculty of Science The University of Tokyo, 197p.
- Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre Le Bas, M. J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Wooldey, A.R. and Zanettin, B., 1989, *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Blackwell, Oxford.
- Lofgren, G., 1970, Experimental devitrification rates of rhyolitic glass. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81, 553-560.
- Lofgren, G., 1971a, Spherulitic textures in glassy and crystalline rocks. *J. Geophys. Res.*, 76, 5635-5648.
- Lofgren, G., 1971b, Experimentally produced devitrification textures in natural rhyolitic glass. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 82, 111-124.
- Lofgren, G., 1974, An experimental study of plagioclase crystal morphology: isothermal crystallization. *Am. J. Sci.*, 274, 243-273.
- Middlemost, E.A.K., 1989, Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chem. Geol.*, 77, 19-26.
- Mysen, B.O., Kushiro, L., Nicholls, I.A. and Ringwood, A.E., 1974, A possible mantle origin for andesitic magmas. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 21, 221-229.
- Nicholls, I.A., 1974, Liquids in equilibrium with peridotitic mineral assemblages at high water pressures. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 45, 289-316.
- Nicholls, I.A. and Ringwood, A.E., 1973, Effect of water on olivine stability in tholeiites and production of silica-saturated magmas in the island arc environment. *J. Geol.*, 81, 285-300.
- Pearce, J.A., 1983, The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins. In *Continental basalts and mantle xenoliths*. C.J. Hawkesworth and M.J. Norry (ed.), 230-49, Nantwich: Shiva.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagram for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25, 956-983.
- Perfit, M.R., Gust, D.A., Bence, A.E., Arculus, R.J., and Taylor, S.R., 1980, Chemical characteristics of island arc basalts: implications for mantle sources. *Chem. Geol.*, 30, 277-56.
- Powell, M., 1978, Crystallization conditions of low-pressure cumulate nodules from the Lesser Antilles island arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 39, 162-172.
- Riehle, J.R., 1973, Calculated compaction profiles of rhyolitic ash-flow tuffs. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 84, 2193-2216.
- Ringwood, A.E., 1974, The petrological evolution of island arc system. *J. Geol. Soc. London*, 130, 184-204.
- Sekine, T. and Wylie, P.J., 1982a, Phase relationships in the system  $KAlSiO_4$ - $Mg_2SiO_4$ - $SiO_2$ - $H_2O$  as a model for hybridization between hydrous siliceous melts and peridotite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 79, 368-374.
- Sekine, T. and Wylie, P.J., 1982b, The system granite-peridotite-H<sub>2</sub>O at 30kbar, with applications to hybridization in subduction zone magmatism. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 81, 190-202.
- Smith, R.H., 1960, Ash flow. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 71, 795-842.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In *Magmatism in the Ocean Basins* (Saunders, A.D. and Norry, M.J. Eds.). *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 42, 313-345.
- Turner, F.J. and Verhoogen, J., 1960, *Igneous and metamorphic petrology*. McGraw Hill Book, 285p.
- Walker, G.P.L., 1983, Ignimbrite types and ignimbrite problems. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 17, 65-88.
- Wilson, M., 1989, *Igneous petrogenesis*. Unwin Hyman, London, 466p.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A., 1977, Geochemical discrimination of different magma series and their differenti-

- ation products using immobile element. *Chem. Geol.*, 20, 325-343.
- Wood, D.A., 1980, The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 50, 11-30.
- Yagi, K., 1966, Experimental study on pumice and obsidian. *Bull. Volcanol.*, 29, 559-572.
- 
- (2002년 12월 23일 접수; 2003년 3월 11일 채택)