

부산 금정산의 계명봉과 장군봉 일대 백악기 화산암류에 관한 암석학적 연구

김혜숙 · 김진섭* · 문기훈

부산대학교 지질환경과학과, 부산광역시 금정구 장전동 산30번지

Petrology of the Cretaceous Volcanic Rocks in the Gyemyeong peak and Janggun peak area, Mt. Geumjeung, Busan

Hye Sook Kim, Jin Seop Kim* and Ki Hoon Moon

Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 607-735, Korea

요약: 부산 금정산의 장군봉, 계명봉 일대에는 백악기 화산암류가 안산암질암을 하위에 두고서, 그 상부에 차례로 퇴적암과 유문암질암으로 구성되며, 이들은 각섬석화강암, 흑운모화강암에 의해 관입되어 있는 양상을 잘 보여 준다. 본 역의 화산암류는 다소 분산되기는 하나 medium-K에서 high-K에 이르는 칼크-알칼리 계열에 속하며, 현무암질 안산암과 안산암질암, 유문암질암으로의 분화경향을 나타낸다. 본 역의 화산암류는 SiO₂ 함량이 증가함에 따라 Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, CaO, MgO MnO, P₂O₅ 등의 함량이 점진적으로 감소하며, K₂O와 Na₂O의 함량은 증가한다. 거미도 패턴과 희토류원소의 패턴, 그리고 조구조 판별도에 도시해 본 결과, 본 역의 화산암류가 해양지판이 침강, 섭입한 결과 형성된 대륙 연변부의 칼크-알칼리 계열의 대륙화산호에 속함을 보여 준다. 본 역에서 현무암질 안산암과 안산암질암, 유문암질암에서 Nb의 이상값, Eu의 부(-)이상 그리고 희토류원소 패턴의 유사성 등은 본 역의 유문암질 마그마가 현무암질 안산암 마그마로부터 사장석, 휘석, 각섬석, 그리고 흑운모 등의 결정분화작용에 의해 진화되었을 가능성이 크다는 것을 시사해 준다.

핵심어: 계명봉, 장군봉, 분별결정작용, 조구조적 위치, 칼크-알칼리 계열

Abstract: This article carried studies of the petrographical and petrochemical characteristics on the Cretaceous volcanic rocks in the area of Janggun peak and Gyemyeong peak which is located at the north-eastern area of Mt. Geumjeung, Busan. The areas are composed of andesitic rock, sedimentary rock, rhyolitic rock, and intrusive hornblende, biotite granites, in ascending order. According to petrochemistry, the major elements show the calc-alkaline rock series ranged medium-K to high-K. With increasing SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, CaO, MgO MnO and P₂O₅ are decreased and K₂O and Na₂O are increased in the volcanic rocks. The trace element compositions show high LILE/HFSE ratios and negative anomaly of Nb, and REE patterns show enrichments in LREE and (-) anomaly values increase of Eu from the basaltic andesite to andesite facies, therefore the volcanic rocks have typical characteristics of continental margin arc calc-alkaline volcanic rocks, produced in the subduction environment. The volcanic rock show nearly the same patterns in spider and REE diagram. Fractional crystallization of the basaltic magma would have produced the calc-alkaline andesitic magma. And the rhyolitic magma seems to have been evolved from the basaltic andesitic magma with fractional crystallization of plagioclase, pyroxene, hornblende, biotite.

Key words: Janggun peak, Gyemyeong peak, fractional crystallization, calc-alkaline rock series

*Corresponding author

Tel: 82-51-510-2253; Fax: 82-51-517-6389

E-mail: jsekim@pusan.ac.kr

서론

연구 지역인 장군봉과 계명봉 일대(이하 연구지역)는 행정 구역상 부산광역시 금정구 청룡동노포동 일대와 경상남도 양산시 동면 일대(위도 35°15'40.22"~35°20'00"N, 경도 129°35'17"~129°05'33"E)에 해당된다. 본 역의 지형은 727 m고지-장군봉(737 m)-계명봉(601.7 m)으로 연결되는 북서-남동방향으로의 일련의 산계를 이루고 있다.

부산 금정산의 북동부 계명봉과 장군봉일대의 화산암류 분포지는 85 Ma ~백악기말 유라시아 동연변부의 해구에서 쿨라-태평양 판의 섭입에 의한 시코테-알린-한반도의 경상분지-일본-중국 동남부에 걸쳐 형성된 대륙화산호에 해당되며, 대규모의 화산활동과 심성활동을 동반하였다. 연구지역의 화산암류는 이와 관련된 암석학적 성질을 나타낸다. 본 연구지역이 속해 있는 경상분지 내 유천소분지에 분포하는 후기 백악기 칼크-알칼린 계열의 화산암류에 대한 암석학적, 조구조적 연구는 여러 학자들에 의해 수행되어 왔다.(황상구, 1979; 차문성과 윤성호, 1982; 김상욱, 1982; 김진섭, 1990; 김진섭과 윤성호, 1993; 윤성호 외, 1994; 황상구와 정창식, 1998; 김향수 외, 2003). 이들 연구 외에도 경남분지 혹은 영남육괴의 화산암에 대한 연구가 수행되었다(윤성호 외, 2000; 박성욱 외, 2006; 김영라 외, 2008). 이들 연구에서 미량원소와 희토류 원소의 변화 경향을 근거로 하여, 이 지역의 백악기 화산암은 대륙 연변부의 섭입대에서 형성되는 도호 칼크-알칼리화산암임을 지적하였다.

그러나 연구지역인 부산 금정산 북동부의 장군봉과 계명봉 일대 화산암에 관한 연구는 동래월래 도폭(손치무 외, 1979) 외에는 그 연구가 거의 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 동래월래 도폭을 기초로 하여 본 지역의 화산암에 대하여 암석기재적 연구와 주원소, 미량원소 및 희토류원소 분석을 통한 암석화학적 연구를 실시하고 이를 바탕으로 이 지역의 화산활동을 일으킨 마그마의 성인과 분화과정, 그리고 조구조적 위치를 고찰하고자 한다.

지질개요

본 연구 지역의 지질도(Fig. 1)는 동래월래 지질도폭을 기초로 하여 작성하였다. 이 지역의 지질은 하부에서부터 안산암질암, 퇴적암, 유문암질암, 각섬석

화강암, 흑운모 화강암, 아다멜라이트, 미문상화강암으로 구성되어져있다.

안산암질암은 연구 지역의 화산암류 중 가장 넓게 분포하며, 북동쪽으로 각섬석 화강암과, 남으로 흑운모 화강암 및 아다멜라이트와 직접 접하고 있다. 안산암질암은 본 지역에서 크게 용암과 화성쇄설암의 두 가지 산상을 가진다. 외관상 담회색~녹색을 띠며 조직상으로 비현정질, 반상조직, 화성쇄설조직을 나타낸다.

퇴적암은 하부의 안산암질암과 상부의 유문암질암의 사이에 놓인다. 이 층은 주로 흑색~암회색의 셰일로 구성되어, 소량의 암회색의 세립질 사암을 협재한다.

유문암질암은 장군봉의 정상부에 산출되며, 회류용회암과 라필리용회암, 강하용회암으로 구성된다. 회류용회암과 라필리용회암은 주로 괴상으로 나타난다.

연구지역의 남과 북동쪽으로 관입한 화강암류는 각섬석화강암, 흑운모화강암, 아다멜라이트 및 미문상화강암 등으로 이루어져있다. 본 역 주변의 화강암류의 전암 Rb-Sr년대는 70±4.2 Ma(Lee, 1991), 69.6±1.9 (윤성호 외, 2005), 흑운모의 K-Ar년대는 63.5±0.8~60.4±0.9 Ma(Lee, 1991)로 이 지역에서의 화산-심성 활동이 백악기말에 일어났음을 의미한다.

연구방법

암석기재적 연구를 위해 야외에서 암상의 특징과 층서관계, 그리고 특징적 구조와 조직 등을 절리와 층리, 관입 관계, 단층, 입자의 크기, 암편의 함유정도를 바탕으로 조사하였다. 70여개의 암석 표품을 채취하였으며, 암상별로 대표시료를 선택하여 현미경하에서 모우드 분석(Table 1)을 실시하였다. 시료로 채택한 암석 표품의 위치는 Fig. 1에 명시하였다.

암석화학적 특징을 살펴보기 위해서 비교적 신선하다고 생각되는 대표적인 시료 19개에 대하여 주원소, 미량원소 및 희토류원소 분석을 실시하였다. 주원소의 분석은 부경대학교 공동실험실습관의 Philips PW 2400 X선 형광분석기를 이용하였으며, 미량원소와 희토류원소는 대전 한국기초과학지원연구원의 PQ3 (VG Elemental, UK)인 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)로 분석하였다. 암편의 사장석과 각섬석의 정확한 성분 분석을 위해 부산대학교 공동실험실습관의 EPMA(Amphibole calculation sheet v1.2, Jeremy Prestn & John Still, 2002) 분석을 하였다. 분석은 에

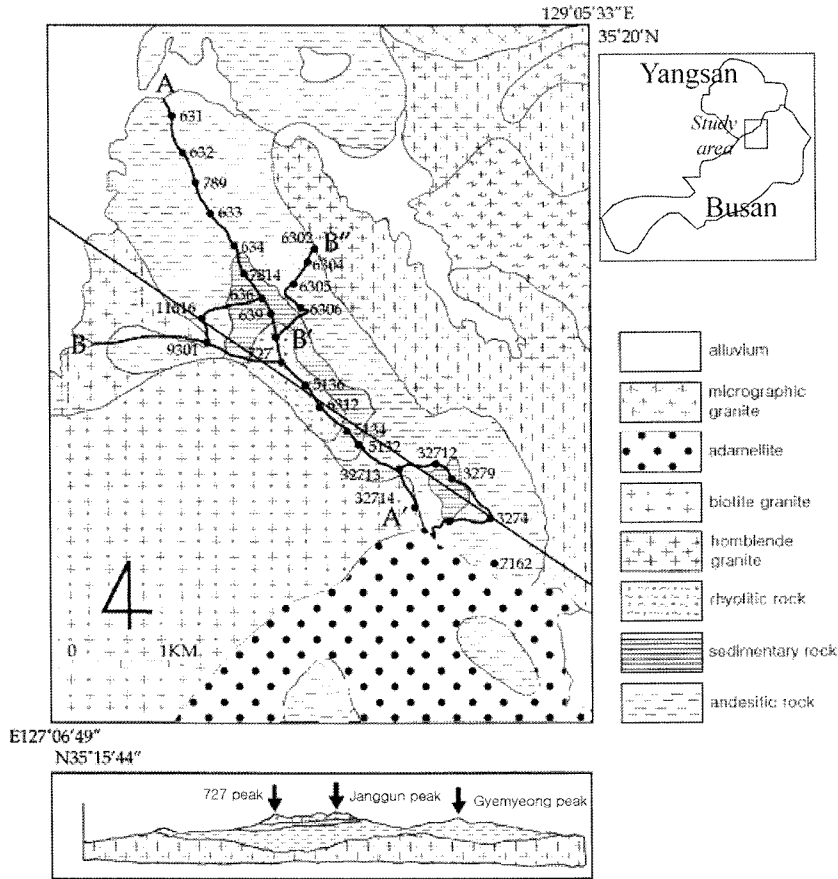


Fig. 1. Generalized geologic and sample site map of the Mt. Janggun.

너지분산 모드(EDS)로 JEOL SUPERPROBE JXA-8600의 three channel system을 사용하여, 가속 전압은 15 kV, 빔 크기(diameter)는 5~10 μm, 빔 전류는 10nA, 분석결정으로는 PET, TAP, LIF를 사용하였다.

암석기재

계명봉과 장군봉에서 산출되는 화산암류는 산상이나 조직적 특징 및 광물학적 특징에 의하면 안산암질암은 안산암질 용암, 안산암질 화성쇄설암으로 구분되고 유문암질암은 유문암질 회류응회암류 및 유문암질 강하응회암 등으로 구분되며 이에 대한 야외기재 및 편광현미경하 특징을 살펴보고자 한다.

안산암질암

안산암질 용암: 안산암질 용암류는 육안상 사장석

과 각섬석 등의 반정들이 뚜렷이 보이는 반상용암(porphyrific lava)과 반상 안산암(porphyrific andesite), 육안상으로 반정이 보이지 않는 미반상 안산암(aphyric andesite)과 용암의 유동으로 표면이 먼저 냉각되어 생긴 안산암 각력암(andesite breccia) 등으로 나누어진다.

계명봉 근처(N35°17'08" E129°04'36.4" 고도 561 m)의 미반상 안산암은 사장석(최대장경; 2.40.3 mm)이 대부분 미반정으로 산출되며 이들은 자형으로 알바이트, 알바이트-칼스바드 쌍정이 보이며 간혹 누대구조(zonal structure)도 관찰된다. 이 미반정의 성분은 EPMA 분석에서 래브라도라이트(labradorite)에 해당된다. 사장석은 부분적으로 변질되어 세립의 견운모화 된 것이 다수 있다. 자형의 각섬석은 장경이 0.90.65 mm와 1.70.7 mm이고 EPMA분석결과 ferro-pargasite로 판별되었다. 석기는 은미정질의 침상 혹은

Table 1. Modal compositions of the Volcanic rocks in the Peak Gyemyeong and Janggun area.

Sample	Rock Type	Phenocryst (%)										Accessory (%)			Secondary (%)			Rf (%)	Gm (%)	Texture and Constituents of Gm			
		Q	Pl	Kf	Bt	Amp	Py	Ore	Zir	Ap	Epi	Seri	Gl	Vi	Wel	Q+	Bt+				Ore		
7162	BAn		27.9					11.3	0.1	0.1									5.0			55.3	Po, Hy, Pl+Ore+Seri
3272	BAn		27.4					9.8	0.2										5.7	5.1		44.4	Po, Pl+Ore+Bt+Seri+Gl
32714	An		26.8					12.9		0.17										2.62		57.6	Po, Bt+Seri+Ore
3279	An	0.6	27.2	2.5				3.0	0.1										22.4	3.1		41.1	Po, Bt+Seri+Ore+Lith
32713	An		25.5					3.5											12.5	0.2		57.4	Po, Hy, Pl+Seri
32712	An		29.5		2.1	5.1	1.4	4.2	0.3										5.2	5.6		46.6	Po, Pl+Bt+Ore Seri
32772	An		28.9		2.2	2.5		15.2	0.1										0.1	2.7		60.5	Po, Hy, Pl+Bt+Seri+Ore
3277	AnT	0.7	27.2	2.8				1.5											8.4	3.6		23.3	Vi, Wel, Gl+Bt+Seri+Ore
631	An	0.3	28.0					11.0	1.0	0.2									6.5			53.0	Po, Hy, Pl+Bt+Ore
6310	AnT	0.3	20.3	1.1				4.2											0.2			9.3	Crt, Q+Bt+Ore
51312	An	2.8	1.4	4.3				14.0											4.3			73.2	Po, Hy, Kf+Bt+Ore
5136	RT	3.4	2.8	10.3				1.5											2.3	3.8		15.2	Crt, Q+Bt+Seri+Ore
6312	RWT	11.8	3.7	9.6				2.9											4.2			8.8	Wel, Q+Bt+Ore
5137	RWT	13.9	2.6	11.0				2.2											3.6			7.1	Wel, Q+Bt+Ore

Modes based on about 2000 counts per samples. Phenocrysts >0.1 mm; groundmass, <0.1 mm; An, andesite; AnT, andesitic tuff; Gl, glass; Rf, rock fragment; Gm, groundmass; Q, quartz; Pl, plagioclase; Kf, alkali feldspar; Bt, biotite; Amp, amphibole; Py, pyroxene; Epi, epidote; Zir, zircon; Ap, apatite; Seri, sericite; Ore, opaque mineral; Po, porphyritic; Vi, vitroclastic; Hy, hyalophilitic; Wel, welded; Crt, cryptocrystalline; Litho, lithoptysae.

래스상의 사장석이 있고, 유리질이 미립의 운모류 등의 유색광물, 점토광물 그리고 불투명 광물로 탈유리질화 된 조직을 보인다.

그리고 반상 안산암은 사장석이 세립의 녹립석, 양기석, 클리노조이사이트, 조이사이트, 알바이트, 방해석, 불석 등의 결정 집합체로 변질되어 쇼슈어라이트화(saussuritization)되어있다.

안산암질 화성쇄설암: 안산암질 화성쇄설암은 은동굴(N35°18'14.1" E129°0,3'28.0", 고도 498 m)을 형성하고 있는 안산암질 라펠리옹회암과 인근 계곡에서 나타나는 옹회각력암(tuff breccia)으로 분류된다.

안산암질 라펠리옹회암은 안산암편과 누대구조의 사장석 결정편, 래스상의 사장석, 휘석, 각섬석, 흑운모 등이 반정으로 나타나고 기질부는 유리질 혹은 은미정질 화산회로 구성되어있다. 기암 빈 정도가 미립의 백운모, 방해석으로 채워져 있으며 전체적으로 파편들은 분급이 불량하고 장경이 가장 큰 것이 5 mm이며, 날카로운 각상을 가지는 것들이 대부분이다.

유문암질암

유문암질 용암: 본 역의 유문암질 용암(N35°172.6" E129°35'1.9", 고도 596 m)은 장군봉의 남동쪽 아래에서 안산암질암의 상위에 대부분 괴상으로 나타나며 풍화 표면에서 유상구조를 보인다. 현미경 하에서 칼스바드 쌍정의 정장석과 석영, 사장석 반정들과, 유리질 석기가 변질된 미정질의 석영 혹은 알칼리 장석, 침상의 알칼리 장석과 함께 유상구조가 발달되어 관찰된다.

유문암질 회류응회암: 유문암질 회류응회암은 장군봉의 산 정부(N35°1748.6" E129°03'34.2", 고도 737 m)에서 산출되며 풍화표면에서 용결엽리를 나타내며 견고 치밀한 질은 암회색~흑색을 띤다. 현미경하에서 파편들은 분급이 불량하며, 각상 혹은 아각상의 모양을 가지며, 장경 0.3~3 mm의 쳐어트질 암편, 안산암질 암편, 유리질 부석 파편 등과 이들 암편과 유사한 크기의 사장석과 정장석, 석영 등의 반정으로 구성된다. 기질은 은미정질로 이루어져있다. 개방니콜 하에서는 유리질 암편이 대부분 석영이나 알칼리 장석으로 재결정된 뼈다귀, 초승달, Y자 모양 등의 사아드로 나타난다. 또 부석편은 기공들도 많아서 이를 미립의 석영, 장석, 은미정질의 운모류와 방해석 등으로

대부분 채워져 있으며, 특히 기질의 유리질 사아드가 심한 용결작용으로 평행하게 배열되어 파라택시틱 조직(parataxitic texture)을 보인다. 또 계명봉의 남쪽사면에서 채취한 시료에서, 사장석 반정이 견운모로 변질되어있고, 주황색~갈색의 유리질 물질에 의한 유택시틱 조직(eutaxitic texture)을 뚜렷이 볼 수 있는데, 이 불안정한 유리편의 경계 안쪽을 따라서 미립의 석영과 장석류가 축열상 조직(axiolitic texture)으로 탈유리질화 됨으로서 완배열상 조직의 유리편의 윤곽을 선명하게 드러나게 하는 것을 볼 수 있다. 또 장군봉에 연이어 있는 730 m 봉우리의 산정부에서 채취한 시료에서는 알칼리 장석 혹은 실리카가 섬유상 집합체로 방사상으로 결정화되어 지름이 0.1 mm이내의 완벽한 구과상 구조(spherulitic structure)을 볼 수 있다.

유문암질 라펠리옹회암: 장군봉 정상 직전의 산릉(N35°1737.8" E129°03'39.3", 고도 704)지역에 나타난다. 대부분의 결정편은 각상, 아각상이며 석영, 사장석, 알칼리 장석 등이 있고, 암편은 변질된 유리질편, 안산암편, 처트편을 가지며, 기질은 장석, 흑운모, 견운모와 불투명 광물들로 이루어져 있다.

유문암질 강하응회암: 유문암질 강하응회암은 계명봉의 남서쪽 끝자락에 있는 장군봉 정상 밑(N35°1731.5" E129°03'45.1", 684~705 m)에서 시료를 채취하였다. 현미경 하에서 반상조직을 보여주고 사장석 반정이 0.7 mm 크기로, 장경이 0.15~0.28 mm의 각상 혹은 아각상의 칼스바드 쌍정의 알칼리 장석의 반정과, 유리질 부석의 파편이 세립의 석영 혹은 장석류로 재결정화 되어 개방니콜하에서 치밀하거나 혹은 변형되지 않은 모양의 사아드가 발달되어 있으며, 석기나 부석의 파편에 있던 원래의 기공들을 매우 미세한 결정 입자들로 채우는 기체상 결정작용의 광물들도 보인다.

암석화학

본 역에서 산출되는 화산암류 중 안산암질암 시료 14개, 유문암질암 시료 4개 등 총 18개의 시료에 대하여 주원소 및 미량원소, 희토류원소를 분석하였다.

주원소

본 역의 각 화산암류의 주원소로부터 계산한



Fig. 2. Photomicrographs of andesite. Photomicrograph of andesite, showing porphyritic texture with phenocrysts of plagioclase in hyalopilitic groundmass (crossed polar).

CIPW 노움 값은 Table 2와 같다. 본 역의 화산암류를 TAS 다이어그램(Le Maitre *et al.*, 1989)에 도시한 결과, 현무암질 안산암에는 해당되는 시료가 없으며, 안산암에는 5개의 시료가 해당되며, 조면안산암에는 7개, 테사이트에는 2개, 유문암에는 1개의 시료가 각각 도시된다. 또한 어느 영역에도 도시되지 못하는 시료가 3개 있다. 안산암질암에서 조면안산암에 도시되는 것은 부분적으로 변질되어 알칼리 함량이 높게 나타난 것으로 사료된다. SiO_2 의 함량이 54.9~62.7 wt.%에 해당되는 안산암은 대체로 총알칼리 함량이 약 7% 정도로 나왔다(Fig. 3). 본 역의 화산암류는 암석계열을 분류하기 위하여 Irvine and Baragar(1971)의 분류도에 적용하면, 대부분 서브알칼리 계열에 도시된다(Fig. 3). 한편 풍화작용 및 이차적 변질작용에 대하여 비교적 저항성이 큰 미량원소인 Zr, Ti를 이용한 화산암류의 분류도(Winchester and Floyd, 1977)에 도시한 결과, 야외에서 관찰시 안산암질암과 유문암질암으로 구분했던 암석들은 SiO_2 의 함량에 따라 안산암질암은 모두 안산암 영역에 해당하며, 유문암질암은 유문암 영역과 유문테사이트 영역에 해당된다(Fig. 4).

AFM 삼각도(Kuno, 1968)에 도시하여 보면, 본 역의 화산암류는 칼크-알칼리 계열(calc-alkaline series) 분화경향을 나타낸다(Fig. 5).

한편, 조산대 화산암류에 대한 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 상관도(Gill, 1981)에 의하면, 본 역의 안산암류는 그 분산 정도가 다소 심하지만, high-K와 medium-K 영역에 속한다(Fig. 6).

한편, 본 역 화산암류의 SiO_2 함량은 54.8~75.2 wt.%의 넓은 조성 범위를 나타낸다(Fig. 7). SiO_2 함량에 따른 분류에 의하면, 현무암질 안산암은 54.8~55.9wt.%이며, 안산암은 58.4~62.7wt.%이고 유문테사이트는 64.0~66.8wt.%이며, 유문암은 70.8~73.6wt.% 범위이다. 본 역 화산암류의 TiO_2 함량은 0.24~0.91 wt.%로, 비교적 낮게 나타나는데 이는 Ti이 지판의 침강섭입에 관련된 대륙 연변부나 화산호에 분포하는 화산암들에서 흔히 고갈되기 쉬운 대표적인 고장력 원소 중의 하나이기 때문에 섭입대 화산암에서 공통적으로 나타나는 특징이다(Gill, 1981).

미량 원소와 희토류 원소

본 역의 화산암류에 대한 미량원소와 희토류원소의 분석 결과는 Table 3 & 4와 같다. 화산암류의 미량원소와 희토류원소 패턴은, 지판의 섭입과 관련되는 특징을 잘 나타내고 있다.

미량원소: 안산암의 경우, Ni과 Cr의 함량은 각각 0.75~176.81 ppm, 0.55~329.33 ppm으로, 초생마그마의 Ni, Cr 함량(Ni, 250~350 ppm; Cr, 500~600 ppm; Perfit *et al.*, 1980)에 비해서 매우 낮다. 이는 맨틀 기원의 마그마에서 분화가 진전됨에 따라 고철질 광물의 분별분화작용이 이루어지기 때문에 낮은 값을 나타낸다. Ni은 주로 감람석에 분배되어지며, Cr은 사방회석으로 분배되어진다. Sc과 V의 함량은 각각 5.2~22.9 ppm, 24.2~155.3 ppm으로, SiO_2 가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보여준다. V의 변화 경향은 아마도 티탄철석의 분별에 기인한다.

Sr의 함량은 102~539 ppm의 비교적 넓은 범위를 나타내는데, 이는 조산대 안산암의 범위(Sr, 100~1,000 ppm; Gill, 1981)에 포함된다. Sr 함량은 다소 분산되기는 하나, SiO_2 가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. Rb, Ba의 함량은 SiO_2 가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여준다. 이러한 낮은 이온 전위를 가지는 원소인 Sr, K, Rb, Ba, +Th의 함량 변화는 사장석, 알칼리장석, 고철질 광물, 그리고 스핀 등의 분별정출의 영향에 기인하는 것이다.

Fig. 8은 본 역 화산암류의 미량원소 중에서 불호정성 미량원소 함량을 N-type MORB값(Pearce, 1983)으로 표준화하여 나타낸 거미도(spider diagram)이다. 이 그림에서 Sr과 Y, Yb, 그리고 Ti은 각각 사장석, 석류석, 그리고 자철석에 호정적인 원소들이다. 원소

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

Sample	7162	1224	3272	32714	32719	32713	32712	631	32772	3277	6310	12261	51312	1212	5136	6312	727	5137	
Rock	BA(◆)	BA(◆)	BA(◆)	BA(◆)	BA(◆)	BA(◆)	BA(◆)	BA(◆)	BA(◆)	BA(◆)	BA(◆)	BA(◆)	BA(◆)	BA(◆)	RT(●)	RT(●)	RT(●)	RT(●)	
SiO	54.80	55.00	55.88	58.42	60.33	60.43	60.49	60.75	61.51	62.52	62.68	63.39	64.01	65.99	70.82	73.55	73.7	73.94	
TiO	0.89	0.81	0.84	0.78	0.75	0.79	0.75	0.91	0.73	0.68	0.68	0.68	0.70	0.56	0.26	0.24	0.37	0.24	
AlO	17.75	16.27	18.23	19.64	16.92	16.99	16.23	16.77	16.38	16.11	17.89	17.58	15.02	15.97	14.88	13.82	13.40	13.08	
FeO ¹	8.46	8.97	8.6	6.03	6.23	6.26	6.87	5.94	6.20	5.84	6.32	4.63	5.12	5.03	2.91	2.75	2.63	2.81	
MnO	0.21	0.27	0.09	0.15	0.11	0.11	0.11	0.15	0.08	0.09	0.06	0.12	0.15	0.09	0.05	0.03	0.05	0.07	
MgO	3.10	3.85	4.22	1.19	1.98	1.68	3.44	1.87	1.85	3.3	1.47	1.03	1.42	1.79	0.85	0.66	0.47	0.89	
CaO	8.44	8.07	3.62	4.99	5.52	5.28	6.06	5.32	5.77	5.92	2.93	3.41	3.33	4.49	2.21	1.48	1.98	1.45	
NaO	3.85	2.95	4.85	3.63	3.99	3.64	3.60	3.37	3.01	2.32	2.61	4.01	3.04	2.69	3.01	3.45	5.29	4.08	
KO	2.13	3.07	1.75	3.63	2.14	3.22	1.48	3.05	3.29	1.28	3.56	3.86	5.83	2.22	3.68	2.71	0.88	2.28	
PO	0.20	0.14	0.17	0.23	0.16	0.17	0.17	0.34	0.17	0.14	0.04	0.18	0.22	0.11	0.05	0.04	0.07	0.05	
LOI	0.33	0.44	1.39	0.58	1.58	0.94	0.74	1.06	0.82	1.82	1.27	0.58	0.86	0.55	0.97	0.91	1.28	0.90	
Total	100.16	99.84	99.64	99.27	99.72	99.53	99.93	99.53	99.82	100.03	99.52	99.47	99.72	99.48	99.69	99.65	100.12	99.78	
CIPW norm																			
Q	5.50	7.16	7.49	11.70	15.86	14.80	17.50	17.03	18.25	27.36	25.97	17.12	16.63	30.16	33.80	39.58	35.25	37.62	
C	0	0	2.16	1.15	0	0	0	0	0	0.43	4.56	0.98	0	1.21	2.04	2.63	0.29	1.38	
Or	12.62	18.27	10.54	21.76	12.90	19.32	8.82	18.32	19.66	7.71	21.43	23.09	34.89	13.27	22.05	16.24	5.27	13.64	
Ab	32.59	25.08	41.72	31.09	34.36	31.21	30.67	28.92	25.70	19.97	22.45	34.27	25.99	22.98	25.77	29.53	45.23	34.87	
An	24.86	22.17	17.27	23.73	22.31	20.76	23.91	21.91	21.64	29.09	14.57	16.05	10.18	21.88	10.82	7.20	9.53	6.98	
Di	12.38	13.45	0	0	3.62	3.75	4.21	2.24	4.89	0	0	0	4.07	0	0	0	0	0	
DiWo	6.65	7.22	0	0	1.94	2.01	2.26	1.20	2.63	0	0	0	2.18	0	0	0	0	0	
DiEn	5.73	6.23	0	0	1.67	1.73	1.95	1.04	2.26	0	0	0	1.88	0	0	0	0	0	
Hy	2.03	3.46	10.74	3.01	3.37	2.53	6.72	3.71	2.41	8.4	3.74	2.60	1.71	4.52	2.15	1.67	1.19	2.25	
HyEn	2.03	3.46	10.74	3.01	3.37	2.53	6.72	3.71	2.41	8.4	3.74	2.60	1.71	4.52	2.15	1.67	1.19	2.25	
Mt	0.69	0.89	0.30	0.50	0.37	0.36	0.36	0.50	0.26	0.3	0.2	0.40	0.50	0.30	0.17	0.10	0.17	0.23	
Hm	8	8.41	8.55	5.77	6.10	6.10	6.68	5.69	6.08	5.74	6.3	4.41	4.84	4.88	2.83	2.72	2.55	2.68	
Il	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Ap	0.44	0.31	0.38	0.51	0.36	0.38	0.37	0.75	0.37	0.31	0.09	0.40	0.49	0.24	0.11	0.09	0.15	0.11	

Fe₂O₃* is recalculated as FeO and Fe₂O₃ for CIPW norm.

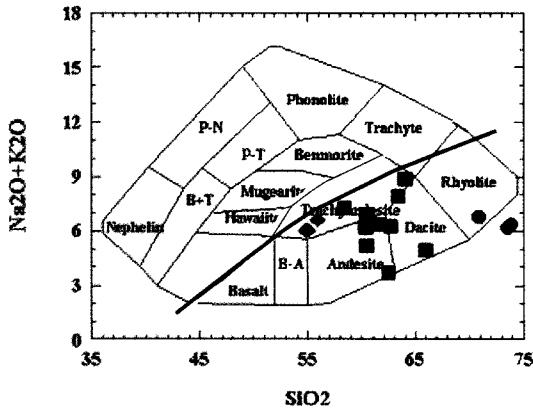


Fig. 3. Total alkalis vs. SiO_2 (wt.%) plotting for the volcanic rocks in the study area.

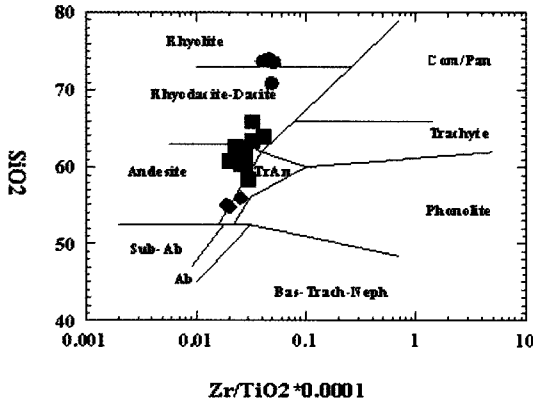


Fig. 4. SiO_2 vs. $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \cdot 0.0001$ diagram for the volcanic rocks in the study area (LeMaitre *et al.*, 1989). Symbols are shown in Table 2. The dividing line between alkali (A) and sub-alkalic (SA) magma series is from Irvine and Baragar (1971). Symbols are shown in Table 2.

의 배열은 함수 유체(aqueous fluids)에 대한 이동성과 불호정성의 순서대로 배열되어 있다. Sr, K, Rb, 그리고 Ba는 이동성 원소로, 왼쪽에서 오른쪽으로 불호정성이 증가하는 순으로 배열되어 있다. 그 외의 비이동성 원소는 오른쪽에서 왼쪽으로 불호정성이 증가하는 순서로 배열되어 있다(Pearce, 1983). Sr, K, Rb, Ba와 Th은 이온전위가 낮은 원소(LILE, large ion lithophile element)로, 함수 유체에 녹기 쉬운 이동성 원소이다. 이들 원소는 섭입된 슬랩(slab)의 탈수 작용으로 생긴 함수 유체에 농집되어 호상 화산암류의 근원이 되는 맨틀에 유입된다. 그 결과, 이들 원소들의 함량이 다른 원소들에 비해서 상대적으로 높

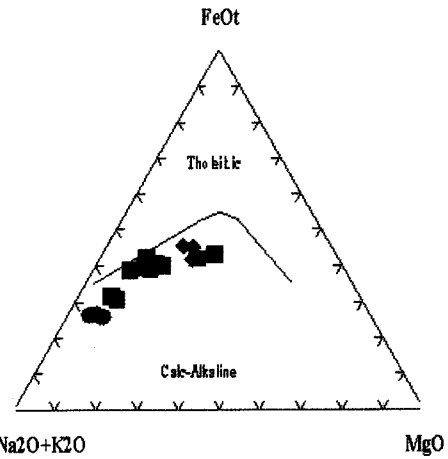


Fig. 5. AFM diagram for the volcanic rocks in the study area. FeO^* means total iron recalculated as FeO .

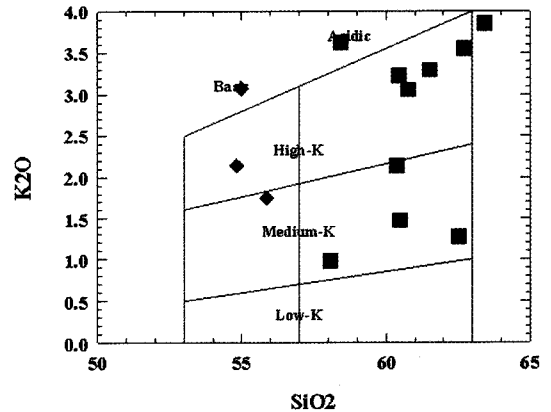


Fig. 6. K_2O vs. SiO_2 diagram for the volcanic rocks in the study area. Symbols are shown in Table 2.

은 값을 가지며 MORB값에 대하여 부화되어 있다. Fig. 8의 안산암질암에서 Ce, Sm, P는 HFS원소이지만 MORB에 대하여 부화되어 있다. 이는 호상열도 암석 중, 칼크-알칼리 계열에서만 관찰되는 현상으로, 이들 원소는 해양지각 슬랩의 부분용융에 의해서 생긴 규산염 용융체(silicate melt)에 의해 운반된 것으로 설명된다(Hawkesworth and Powell, 1980).

Sr, K, Rb, Ba, Th과 같은 원소들의 이동은 칼크-알칼리 마그마가 생성되는 과정에서 섭입 하는 해양 판의 탈수작용에 의해 가능하며(Pearce, 1983), Ce, P, Sm과 같은 원소들의 이동은 호상열도 암석(칼크-알칼리암 계열)의 생성시, 해양지각 슬랩의 부분용융

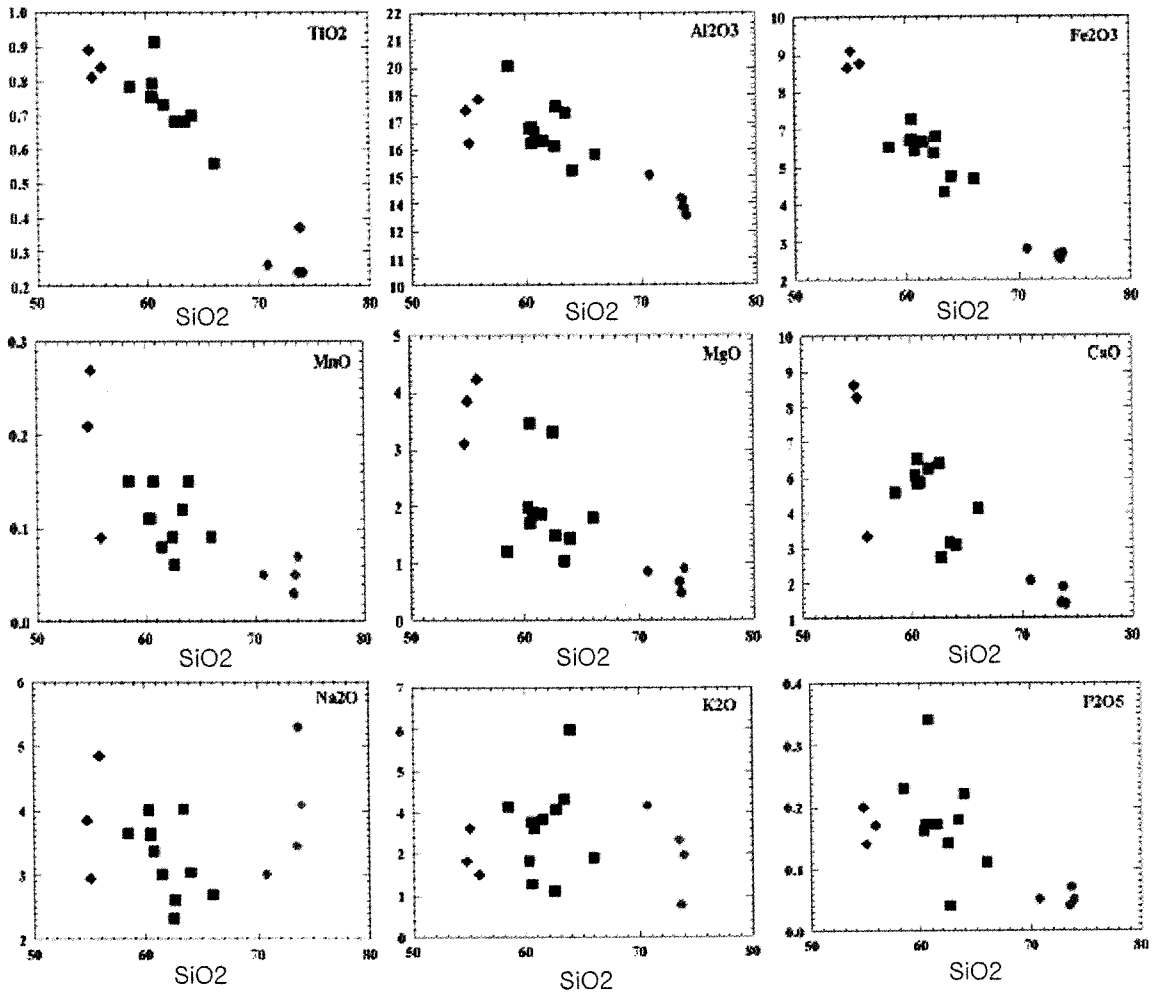


Fig. 7. Harker variation diagrams for the volcanic rocks in the study area. Symbols are shown in Table 2.

에 의해 생긴 규산염 용융체에 운반 가능하다고 하였다(Hawkesworth and Powell, 1980). 즉, 이상에서 기술된 미량원소의 MORB 값에 대하여 나타나는 부화 결핍 양상은 본 역의 화산암류가 지판의 침강섭입에 관련된 대륙연변부나 도호 등의 조구조와 관련되어 산출되었음을 시사하는 것이다(Pearce *et al.*, 1984).

희토류원소: Fig. 9는 본 역의 안산암질암, 유문암질암에 대한 희토류원소 함량을 콘드라이트값(Sun and McDonough, 1989)으로 표준화하여 도시한 그림이다. 안산암질암, 유문암질암에 대한 희토류원소의 총량(Table 4)은 각각 106.4~156.1 ppm(평균 126.9 ppm), 71.4~136.5 ppm(평균 94.4 ppm)으로, 본 역

화산암류들은 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.

안산암질에서 유문암질까지 하나의 마그마가 분화했다고 가정할 경우, 본 역의 암석들은 안산암질암에서 유문암질암으로 갈수록 경희토류 원소의 양적인 감소 양상을 보이는데, 이는 일반적으로 불호정성원소가 하나의 마그마에서 분화될수록 증가하는 경향과는 반대의 현상이다. 그러나 앞선 부산광역시 일원의 백악기 화산암에 관한 연구 결과 안산암질암과 유문

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

Sample	7162	1224	3272	32714	3279	32713	32712	631	32772	3277	6310	12261	51312	1212	5136	6312	727	5137
Rock	BA(◆)	BA(◆)	BA(◆)	An(■)	An(■)	An(■)	An(■)	An(■)	An(■)	An(■)	An(■)	An(■)	An(■)	An(■)	RT(●)	RT(●)	RT(●)	RT(●)
Ba	355.00	64.00	325.00	885.00	688.00	757.00	485.00	61.00	556.00	325.00	433.00	829.00	704.00	716.80	1223.0	1118.0	53.00	7.60
Rb	85.09	106.78	70.20	116.60	66.90	118.20	71.10	74.50	108.00	68.60	138.60	163.0	205.00	120.25	155.90	75.20	20.89	75.20
Sr	539.00	442.00	406.00	375.00	390.00	164.00	521.00	458.00	332.00	294.00	209.00	356.0	326.00	276.50	263.00	208.00	132.60	102.00
Y	29.06	22.10	28.50	25.30	24.30	28.70	27.10	29.40	29.00	23.60	19.30	23.44	43.40	28.56	19.90	12.00	13.89	11.50
Zr	180.00	152.56	212.00	224.00	205.00	204.00	194.00	182.00	201.00	182.00	154.00	221.0	283.00	181.0	126.00	123.00	150.29	112.00
Nb	5.81	5.72	4.74	1.49	1.14	1.85	4.17	2.72	5.99	4.04	5.36	10.60	7.88	11.48	0.03	2.89	7.71	2.30
Th	9.40	7.86	13.72	12.84	13.25	13.08	12.19	8.12	12.40	12.57	8.91	9.29	11.30	9.83	14.03	5.94	7.86	7.14
Pb	10.08	12.61	13.47	12.69	18.54	25.97	16.49	14.11	16.80	10.29	13.40	8.82	24.50	1.003	21.40	17.24	25.12	29.68
Ga	5.04	3.03	15.70	11.30	13.10	10.10	12.10	11.30	13.90	10.80	17.60	10.87	5.10	11.02	15.40	15.40	7.12	12.60
Zn	131.00	149.22	78.40	35.80	60.00	103.60	67.10	107.60	94.60	57.00	40.70	49.26	131.00	79.05	55.80	52.60	84.91	59.70
Cu	45.06	15.21	40.82	9.73	10.47	16.89	77.20	4.42	15.20	16.98	14.22	4.91	4.59	13.77	21.86	7.54	31.57	123.38
Ni	44.0	29.80	21.91	11.67	16.65	3.20	19.62	0.75	20.70	16.36	19.43	10.33	6.76	12.19	3.48	3.20	1.83	176.80
V	17.00	163.34	155.30	143.80	135.40	131.60	143.20	101.30	119.00	114.40	86.30	93.52	24.20	135.55	32.60	24.60	22.92	29.20
Cr	85.04	70.20	42.28	23.41	34.32	7.42	30.64	0.55	48.40	26.30	59.60	19.90	1.24	37.39	7.43	7.66	2.28	329.30
Hf	4.11	3.04	5.73	6.41	5.56	5.82	5.38	4.51	4.62	4.86	4.35	5.01	6.83	3.34	3.72	3.54	2.76	3.29
Cs	2.47	3.76	11.14	15.28	6.61	10.47	8.75	4.69	4.23	9.49	25.44	16.94	5.71	17.46	11.89	8.24	0.76	4.92
Sc	22.09	24.67	18.30	14.00	15.40	15.20	17.10	16.10	14.30	15.00	12.10	14.62	11.40	13.89	7.00	5.50	7.81	6.60
Ta	0.53	2.17	0.41	0.12	0.06	0.02	0.36	0.36	0.40	0.32	0.29	2.17	0.41	1.28	0.02	0.12	1.05	0.06
Co	109.00	76.16	66.26	112.91	60.81	89.03	65.74	78.65	83.40	60.26	53.09	74.69	147.00	62.99	84.60	70.49	99.47	54.56
Li	2.65	3.09	64.30	44.10	23.40	19.70	21.00	17.0	5.57	72.30	30.20	12.22	7.27	19.06	22.50	23	19.38	15.60
Be	21.30	*	17.50	36.30	21.40	32.20	14.80	30.50	32.90	12.80	35.60	*	58.30	*	36.80	27.10	*	22.80
La/Nb	3.06	3.61	5.33	15.58	20.32	14.06	5.76	10.86	3.56	5.24	4.01	2.20	3.36	2.14	982.00	4.55	2.30	7.33
Ba/Th	37.77	81.55	23.69	68.93	51.92	57.87	39.79	75.99	44.84	25.86	48.60	89.24	62.30	72.92	87.17	188.20	6.74	1.06
La/Th	1.89	2.63	1.84	1.81	1.75	1.99	1.97	3.64	1.72	1.68	2.41	2.51	2.35	2.50	2.10	2.21	2.26	2.36
Ba/La	19.94	31.01	12.86	38.11	29.71	29.09	20.18	20.89	26.10	15.37	20.17	35.61	26.57	29.16	41.51	85.08	2.98	0.45
K	8839.5	12741	7262.5	15065	8881	13363	6142	12658	13654	5312	14774	16019	24195	9213	15272	11247	3652	9462
Ti	4962.6	4516.6	4683.8	4349.3	4182	4405.0	4182	5074.2	4070.5	3791.7	3791.7	16019	3903.2	3122.6	1449.8	1338.2	2063.1	1338.2
P	12955	6109.8	11012	14898	10364	11012	11012	22024	11012	9068.8	2591.1	7855.5	14251	7125.5	3238.9	2591.1	4534.4	3238.9
Rb/K	97.16	83.80	96.64	77.39	75.32	88.44	115.70	58.85	79.90	129.10	93.80	101.2	84.71	130.5	102.10	66.85	57.19	79.46
Zr/Nb	30.98	26.67	44.73	150.34	179.82	110.27	46.52	66.91	33.56	45.05	28.73	20.85	35.91	15.77	4200	42.56	19.49	48.70

MORB values used in normalizing trace elements are from Pearce (1983).

Table 4. Rare earth element abundances (ppb) of the volcanic rocks in the study area.

Sample	7162	1224	3272	32714	32714	32719	32713	32712	631	32772	3277	6310	12261	51312	1212	5136	6312	727	5137
Rock	BA(◆)	BA(◆)	BA(◆)	An(■)	An(■)	An(■)	An(■)	An(■)	An(■)	An(■)	An(■)	An(■)	An(■)	An(■)	An(■)	RT(●)	RT(●)	RT(●)	RT(●)
La	17.80	20.67	25.28	23.22	23.16	26.02	24.03	29.53	21.30	21.15	21.47	23.28	26.5	24.58	29.46	13.14	17.76	16.87	
Ce	40.70	38.44	53.46	52.63	50.27	51.92	50.03	61.36	45.10	45.32	49.56	49.76	59.5	51.42	58.17	32.06	39.42	34.95	
Pr	5.23	5.14	6.47	6.20	5.97	6.13	6.12	7.47	5.71	5.48	5.21	5.77	7.49	6.18	6.45	3.08	3.99	3.61	
Nd	21.40	21.55	25.58	24.71	23.58	24.15	24.24	30.09	22.00	21.79	19.84	23.17	29.6	24.09	23.36	11.56	14.77	13.09	
Sm	4.79	4.57	5.49	5.12	5.11	5.08	5.20	6.19	4.59	4.72	4.05	4.74	6.37	5.06	4.41	2.32	2.83	2.44	
Eu	1.19	1.08	1.20	1.12	1.13	1.05	1.15	1.63	1.01	1.01	0.91	0.98	1.3	1.01	0.73	0.39	0.62	0.49	
Gd	4.60	4.32	5.23	4.69	4.69	4.98	4.98	5.67	4.33	4.44	3.7	4.32	6.12	4.71	3.85	2.17	2.55	2.09	
Tb	0.72	0.58	0.81	0.73	0.71	0.76	0.77	0.85	0.67	0.69	0.57	0.52	0.97	0.74	0.58	0.35	0.4	0.32	
Dy	4.47	4.07	5.12	4.52	4.39	4.8	4.84	5.20	4.26	4.34	3.61	4.08	6.09	4.8	3.62	2.3	2.5	2.15	
Ho	0.94	0.79	1.04	0.93	0.88	1.00	1.00	1.06	0.87	0.87	0.72	0.73	1.29	1.02	0.73	0.48	0.51	0.43	
Er	2.73	2.36	3.09	2.73	2.55	2.90	2.89	3.12	2.65	2.58	2.14	2.29	3.79	3.07	2.19	1.47	1.53	1.36	
Tm	0.39	0.32	0.44	0.41	0.37	0.41	0.42	0.44	0.38	0.38	0.32	0.27	0.56	0.47	0.33	0.23	0.24	0.21	
Yb	2.62	2.15	2.86	2.71	2.39	2.70	2.71	3.00	2.47	2.47	2.08	2.17	3.77	3.35	2.29	1.59	1.63	1.57	
Lu	0.39	0.32	0.42	0.41	0.36	0.41	0.41	0.45	0.37	0.37	0.32	0.3	0.57	0.49	0.35	0.25	0.24	0.24	
ΣREE	107.97	106.36	136.49	130.13	125.56	132.31	128.79	156.06	115.71	115.61	114.50	122.38	153.92	130.99	136.52	71.39	88.99	79.82	
(La/Yb) _n	4.57	6.49	5.97	5.79	6.53	6.51	5.99	6.5	5.82	5.78	6.97	7.25	4.75	4.96	8.69	5.58	7.36	7.26	
(La/Sm) _n	2.34	2.84	2.90	2.86	2.85	3.22	2.90	3.0	2.92	2.82	3.34	3.09	2.62	3.06	4.20	3.56	3.95	4.35	
(Gd/Yb) _n	1.43	1.63	1.48	1.40	1.59	1.49	1.49	1.53	1.428	1.459	1.44	1.61	1.31	1.43	1.36	1.10	1.26	1.08	

Chondrite values used in normalizing REE are from Sun and McDonough (1989).

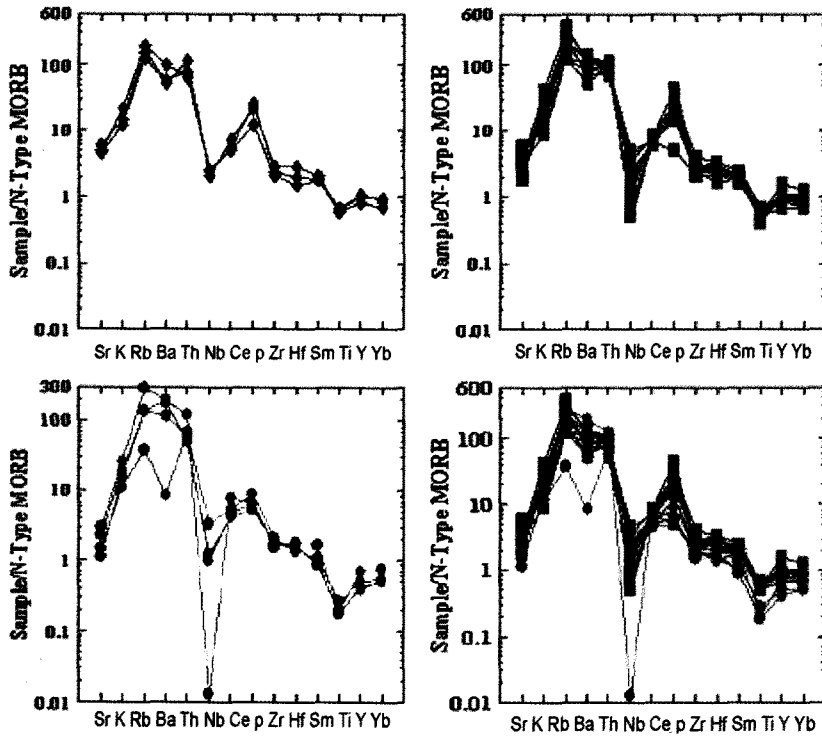


Fig. 8. N-type MORB-normalized spider diagram for the volcanic rocks in the study area. N-type MORB has depleted incompatible elements, $La/Sm_N < 1$.

암질암이 동일한 마그마에서 분화되었음(김진섭과 윤성호, 1993; 김향수 외, 2003)과 미량원소 패턴(Fig. 8) 및, REE 패턴의 유사성을 고려해 볼 때 두 암석은 동일한 마그마를 기원으로 하며, 안산암질암보다 유문암질암석의 불호정성 원소가 결핍되는 현상은 암석의 풍화에 따른 희토류원소의 거동이나, 외래 암편에 의한 오염 등의 다른 원인에 의한 것으로 생각되어지나 정확한 원인을 밝히지는 못하였다.

조구조적위치

Wood(1980)는 화산암류에 대하여 적용할 수 있는 비유동 고장력 원소, Th, Hf, 및 Nb와 Th, Zr, Nb를 이용한 조구조적 판별도(Fig. 10)를 제시하였다. Fig. 10에서는 본 역의 대부분 화산암류가 지판이 침강섭입 하는 지판 경계부의 영역에 점시된다. 이 영역은 다시 Hf/Th 비(3.0)를 기준으로 원시 호상열도의 쉘레이아이트 계열 ($Hf/Th > 3.0$)과 성숙한 호상열도의 칼크-알칼리암 계열 화산암으로 구분되는데 본

역의 화산암류는 $Hf/Th > 3.0$ 로서 성숙한 호상열도의 칼크-알칼리암 계열 영역에 해당한다.

Fig. 11의 La/Yb 비의 증가에 따른 Th/Yb 비의 증가율에 의한 상관도(Brown *et al.*, 1984)에 의하면, 화산암류는 대륙연변호 영역에 도시된다. 그러므로 본 역의 화산암류의 조구조적 위치는 백악기 말 유라시아 대륙판의 동변을 따라 있었던 대륙연변호 칼크-알칼리 화산대 환경 중의 하나임을 알 수 있다.

한편, 본 역의 화산암류는 K의 증가와 함께 Rb가 증가하는 정의 상관관계(Fig. 12)를 보이는데, K_2O/Rb 비가 185~434(평균 295)로서 조산대 대륙연변부 칼크-알칼리암의 영역(250~1,000)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 0.6~3.7로 Gill(1981)이 제시한 조산대와 관련된 화산암류의 판단기준(Ba/La , 15~80; La/Th , 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.

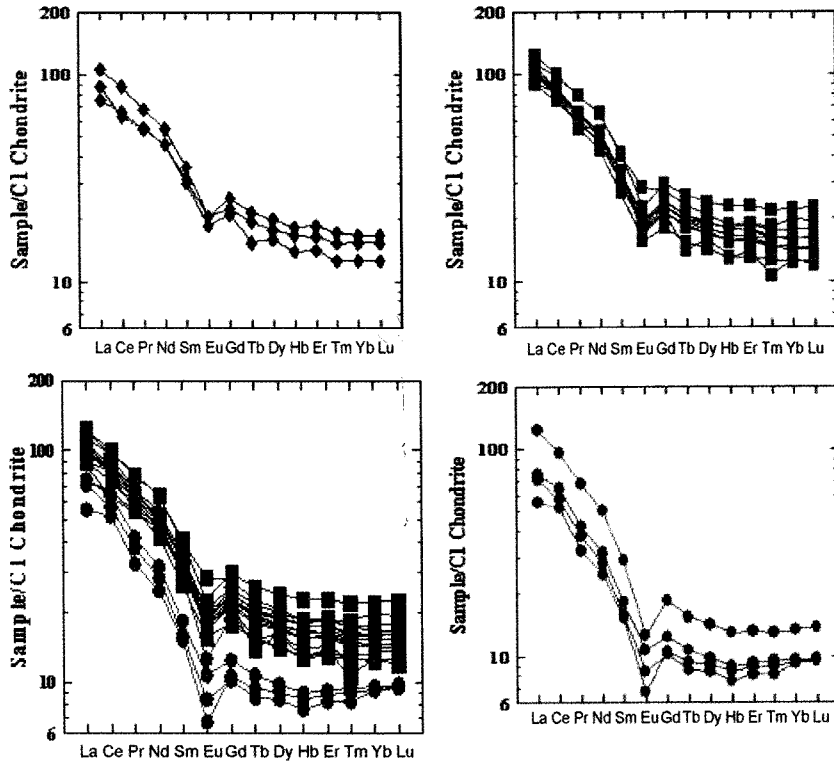


Fig. 9. C1Chondrite-normalized REE patterns of the volcanic rocks in the study area. C1Chondrite is used to acquire abundances of element in the solar system in terms of atoms per 10 atoms of Si derived from the analysis of carbonaceous chondrite meteorites.

마그마 성인 고찰

원시 맨틀 조성과 본 역의 화산암류의 조성을 비교하여 마그마의 성인과 진화양상을 살펴 보기위해 Gill(1981)이 조산대 화산암류에 대하여 제시한 Cr과 Y의 상관도에 본 역의 화산암류를 도시해 보았다(Fig. 13). 본 역의 화산암류는 원시맨틀의 영역과 떨어져 도시되고, 이를 맨틀물질의 부분용융곡선과 연결시키면 약 10%정도가 부분용융되어 만들어진 초생마그마가 형성되어 진화한 후, 본 역의 화산암류 기원이 되는 현무암질 안산암 모마그마가 형성되었음을 알 수 있다(Fig. 10). 그리고 본 역 현무암질 안산암에서의 낮은 MgO, Ni, Cr 함량은 현무암질 초생 마그마로부터 감람석, 휘석의 분별정출을 의미하는 것으로, 이 사실을 뒷받침한다. 이 모마그마로부터 계속 분별결정작용이 진행되어 본 역에서와 같은 다양한 암석이 형성 되었을 것이다.

본 역에 분포한 각 암석 군의 화학조성은 일정한 진

화경향을 보인다. 미량원소의 거미도 패턴과 희토류원소의 REE 패턴에 있어서 각 암석 군들의 패턴이 거의 같거나 유사성을 보이는 이 암석들이 동일한 마그마에서 유래됨을 의미한다. 그리고 지화학적으로 본 역에서 산출되는 안산암질암은 대륙연변호 칼크-알칼리 화산대의 조구조적 환경에서 형성되었다. 이러한 조구조적 환경에서 상부 맨틀의 부분용융에 의한 칼크-알칼리 마그마의 생성을 고려해 볼 수 있는데, 이는 본 역 안산암질류 생성기작으로서 가장 적합한 것이다. 즉, 화산호가 발달되는 섭입대에서 해양판이 대륙지각 하위의 맨틀 속으로 섭입되는 환경에서 섭입 슬랩 상부의 맨틀에 함유유체가 공급됨으로써 상부 맨틀이 부분 용융되어 칼크-알칼리 마그마가 생성될 수 있다는 것이다 (Ringwood, 1974; Mysen *et al.*, 1974; Kushiro and Sato, 1978; Nicholls 1974; Green, 1980).

해양지각이 섭입됨에 따라 해양지각은 녹색암-각섬암-에클로자이트로 변성고대 되면서 탈수작용에 의해 SiO₂가 풍부한 함유유체가 생성되어 상부의 췌기형

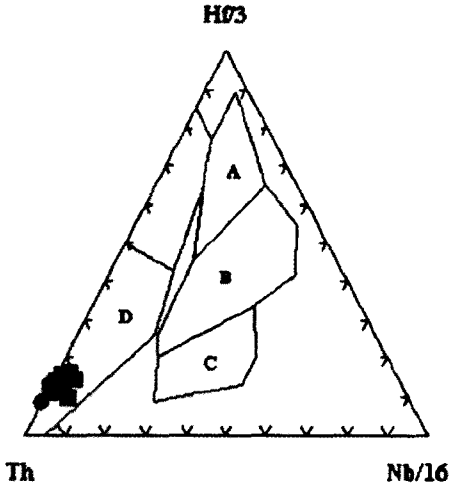


Fig. 10. Tectonomagnetic discrimination diagrams of the volcanic rocks in the study area (after Wood, 1980). Island-arc tholeiitic basalts plot in field D where $Hf/Th > 3.0$ and calc-alkaline basalts in the field C where $Hf/Th < 3.0$. Symbols are shown in Table 2.

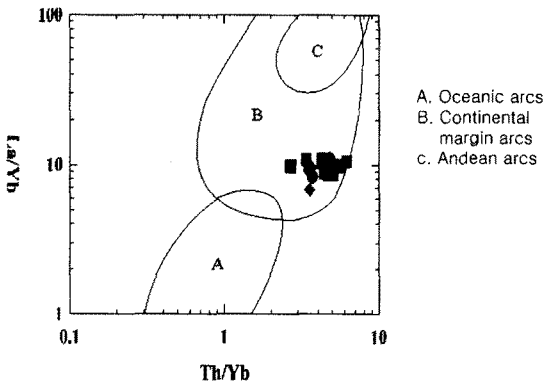


Fig. 11. La/Yb vs. Th/Yb diagram showing arc maturity for Volcanic rock in the study (Brown et al., 1984).

상부맨틀로 상승하여 맨틀물질의 용융점을 낮추어 줌으로써 이렇게 생성된 칼크-알칼리 마그마로부터 유래된 암석은 강한 불호정성 원소 중에 Th, Ce이 부화되는 특성을 가지며, Nb, Hf, Y, Yb은 다소 적은 함량으로 남는데 이는 칼크-알칼리 마그마의 주요 기원이 섭입되는 해양지각보다 상부 맨틀(Gill, 1974)이라는 것과 관계한다. 즉 이는 본 역에서 칼크-알칼리 마그마가 베니오프대 위의 쇄기형의 상부맨틀에서 일어나는 일련의 과정에 의해 생성되었음을 의미한다.

현무암질 칼크-알칼리 마그마가 상부맨틀 내의 저장고에 머물면서 분별결정작용이 일어나고 다시 지각

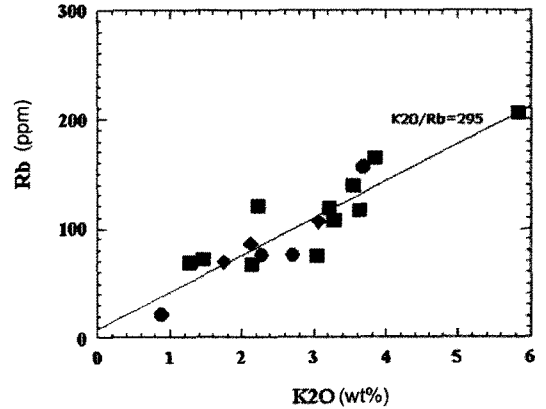


Fig. 12. Rb vs. K_2O diagram for the volcanic rocks in the study area (Jakes and White, 1972). Symbols are shown in Table 2.

내의 지하공간에 머물면서 분별결정작용이 일어나고 이와 동시에 마그마가 상승하면서 모암과의 접촉대에서 반응하여 이온교환, 확산, 분해, 용융 등으로 지각과의 혼연과 하부지각 용융물과 혼합이 일어나 대륙 화산호 안산암의 칼크-알칼리 파생마그마를 형성하는 것은 가능하다. 이러한 여러 가지 생성기작 중에서 분별정출작용은 대륙화산호 안산암질 마그마가 생성될 수 있는 가장 중요한 기작으로 여겨진다 (Powell, 1978).

맨틀에서 유래된 초생마그마가 맨틀로부터 지각으로 상승함에 따라 필연적으로 마그마의 성분변화가 있었으며 이는 화학조성상 나타나는 파생마그마의 특징인 Mg수 < 0.65 와 테사이트와 유문암에 나타나는 실리카 및 알칼리 농집으로 알 수 있다.

본 역의 현무암질 안산암은 SiO_2 함량이 54.80~55.88 wt.%, MgO 함량이 3.1~4.22 wt.%를 나타낸다. 본역의 MgO 함량은 세계 안산암 평균(3.3 wt%)과 비슷하거나 높으며, 이는 본 역의 현무암질 안산암이 다른 대륙화산호 안산암처럼 쇄기형의 상부 맨틀에서 유래된 초생마그마로부터 기인하였음을 시사한다. 또 맨틀에서는 거의 생성되지 않는 미량원소인 Sr의 함량이 현무암질 안산암에서 안산암, 유문암질암으로 갈수록 감소하는 것은 하부지각 용융물과의 혼합, 지각 성분과의 동화작용에 의한 혼연에 의한 것으로 사료된다. 그러나 Ni, Cr, Co, Sc 등의 호정성 원소의 함량이 비교적 고갈되어 있기 때문에, 본 역의 현무암질 안산암을 형성시킨 마그마는 약간의 분별작용을 더 겪어 진화된 것으로 생각된다.

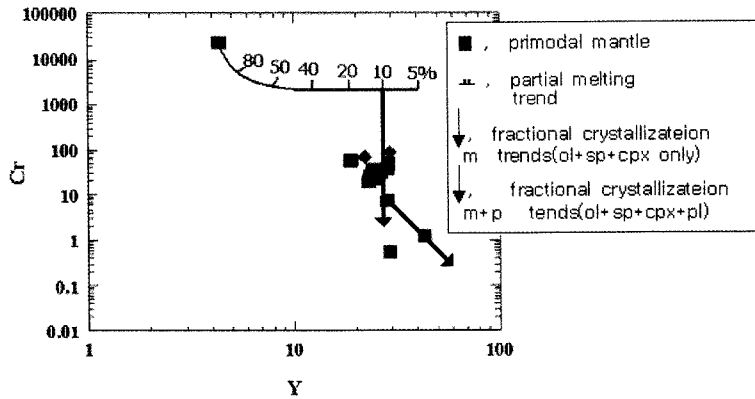


Fig. 13. Petrogenetic pathway using relationship of log Cr vs. log Y for the igneous rocks in the study area (Gill, 1981). ol; olivine, sp; spinel, cpx; clinopyroxene, pl; plagioclase.

유문암질 마그마의 기원과 진화도 아직 논쟁의 여지가 많다. 첫째, Stern *et al.*(1975)이 용융실험을 통하여 초생 유문암질 마그마는 맨틀 깊이에서 맨틀암석이나 섭입된 해양지각의 심용작용에 의해서 생성될 수 없다고 보고하였다. 따라서 맨틀 내에서 심용작용은 해당되지 않으며, 둘째, Bowen(1928)은 규질 마그마의 생성의 한 방법으로 결정-용액분별작용을 통한 현무암질 마그마의 분별정출작용을 연구하였는데 비록 모마그마가 모두 현무암질이 아니더라도 결정-용액분별작용을 통하여 유문암질암이 형성될 수 있음이 확실하다. 셋째, 현무암질 마그마가 지각의 기저나 하부지각에 관입함으로써 발생하는 지각암석의 심용작용과, 동화작용, 또는 마그마혼합에 수반되어, 뒤따른 분별정출작용에 의하여 유문암질 마그마가 생성될 수도 있다. 넷째, 액체상태의 열중력확산에 의한 고실리카 유문암($SiO_2 > 75$ wt.%)을 생성시킬 수 있는 마그마 챔버의 성분적 분대의 연구는 열과 대류작용에 의하여 유도되는 화학적 확산작용으로, 이로 인해 마그마 챔버의 천장부근에 휘발성물질이 많아지고 실리카 함량이 높은 유문암 성분의 재배치가 증진되며, 또 마그마 챔버와 주변암과의 접촉부를 따라서 성분교환도 이루어진다. 이는 화산활동시 윗부분부터 차례로 분출됨을 의미한다. 고실리카 유문암이 제일먼저 분출되고 유문데사이트, 데사이트에 이르기까지 연속되는 분출상을 형성할 것이다. 분대된 마그마 챔버 모형은 결정-용액분별작용의 모형과 일치한다.

본 역의 유문암질 마그마는 해양지각의 섭입으로 형성된 쇄기형의 상부 맨틀의 부분용융에 의해서 칼크-알칼리 계열의 현무암질 초생마그마가 생성되고 약

간의 분별결정작용을 거치면서 마그마가 지각의 기저나 하부지각에 상승, 관입함으로써 발생하는 지각암석의 심용 작용과, 동화작용, 또는 마그마혼합에 수반되어 뒤따른 결정-용액분별정출작용에 의하여, 또는 마그마의 열중력확산에 의한 마그마 챔버의 분대 형성에 의해 유문암질 마그마가 생성, 분출된 것으로 생각된다. 그러므로 본 역의 화산암류는 칼크-알칼리 계열의 현무암질 초생마그마로부터 현무암질 안산암, 안산암, 유문데사이트, 유문암으로 진화되었을 가능성이 높다. 본 역 화산암의 불호정성 미량원소의 거미 다이어그램을 보면 유문암질암의 미량원소 패턴과 안산암질암의 패턴이 유사하다.

결론

경상분지내 유천소분지의 동남단에 위치하는 부산 금정산의 장군봉, 계명봉 일대에 분포하는 백악기 화산암류는 안산암질암을 하위에 두고서, 그 상부에 퇴적암과 유문암질암이 놓이며, 이들은 각섬석화강암, 흑운모화강암에 의해 관입되어 있는 양상을 잘 보여 준다.

본 역의 화산암류는 주성분 원소의 분석에 의하면, 다소 분산되기는 하나 medium-K 에서 high-K에 이르는 칼크-알칼리 계열의 화산암에 속하며 그 암석학적 특징에 따라 현무암질 안산암과 안산암, 유문암질암으로의 분화경향을 나타낸다. 본 역의 화산암류의 SiO_2 함량은 54.8~75.2 wt.%의 넓은 조성 범위를 나타내는데, 각 암층별로 .8~55.9wt.%, 58.4~66.0 wt.%, 70.8~75.2 wt.%이다. SiO_2 의 함량이 증가함에

따라 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , MnO , P_2O_5 등의 함량은 점진적으로 감소하며, K_2O , Na_2O 의 함량은 다소 분산되기는 하나 점진적으로 증가하는 경향을 나타낸다.

거미도와 REE 패턴도와 Rb/Zr 대 Nb, La/Yb 대 Th/Yb, Rb 대 K, Hf/3-Th-Nb/16 등의 조구조 판별도에 도시해 본 결과, 본 역의 화산암류가 해양지권이 침강, 섭입한 결과 형성된 대륙 연변부의 칼크-알칼리 계열의 대륙화산호에 속함을 보여 준다. 섭입대 위의 쇄기형 맨틀에서 섭입판의 탈수작용으로 과생된 함유유체는 큰 이온 친석원소(LILE)를 맨틀 속에 부화시키며, $\log Cr$ - $\log Y$ 상관도에서 도시된 바와 같이 약 10%정도의 상부맨틀의 부분용융에 의한 칼크-알칼리 계열의 근원 마그마의 생성을 유발시킨다.

본 역에서 현무암질 안산암과 안산암암, 유문암질 암으로 갈수록, 맨틀광물에 대한 Sr, K, Rb, Ba, Nb, Ce, P, Zr, Hf, Sm, Ti, Y, Yb 등의 불호정성 원소(LILE)에서의 불호정성이 작아지는 원소(HFSE) 쪽으로의 원소 존재량 감소, 이와 더불어 경희토류 원소들의 원소 존재량의 감소와 중희토류 원소에서의 감소, 모든 암상에서 보이는, 미량원소 Nb의 이상값, 희토류 원소의 Eu의 부(-)이상 증가, 그리고 전반적으로 모든 암상에서 보이는 미량원소 패턴의 유사성 그리고 희토류원소의 패턴이 유사성을 유지하는 것 등은 본 역의 유문암질 마그마가 현무암질 안산암 마그마로부터 분화작용에 의해 진화되었을 가능성이 크다는 것을 시사해 준다. 즉 본 역을 이루는 화산암들을 형성한 근원 마그마의 기원은 같으며, 주로 사장석, 휘석, 그리고 각섬석, 흑운모 등으로의 일련의 결정분화작용을 겪으며 현무암질 안산암, 안산암질암, 유문암질암으로 분화되었음을 유추 할 수 있다.

감사의 글

본 논문을 읽고 유익한 비평과 조언을 주신 윤성호 교수님과 황상구 교수님께 감사를 드립니다. 또한 여러모로 도움을 주신 암석학회 편집간사 김동연에게 감사를 드리며, 본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

김상욱, 1982, 북부 유천분지내에 분포하는 후기 백악기 화

- 산암의 암석학적 연구. 서울대학교 박사학위논문, 133 p.
- 김영라, 고정선, 이정현, 윤성호, 2008, 영남육괴 남서부에 분포하는 백악기 화산암류에 대한 암석학적 연구:(I) 중주군 문유산 화산암복합체, 한국암석학회지, 17, 57-82.
- 김진섭, 1990, 경상분지 동남부 일대에 분포하는 백악기 화산암류에 대한 암석학적 연구. 지질학회지, 26, 53-62.
- 김진섭과 윤성호, 1993, 부산일원에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 연구(I). 암석학회지, 2, 156-166.
- 김형수, 고정선, 윤성호, 2003, 부산 백양산 지역의 백악기 화산-심성암류에 대한 암석학적 연구, 암석학회지, 12, 32-52.
- 박성욱, 장윤득, 황상구, 김정진, 2006, 경산칼데라 동부지역에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 특징, 한국암석학회지, 15, 90-105.
- 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 동래월래지 절도폭(1:50,000). 자원개발연구소, 27p.
- 윤성호, 김진섭, 김영라, 1994, 부산 일원에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 연구(II) -조구조적위치 및 성인-. 한국지구과학회지, 15, 356-365.
- 윤성호, 이문원, 고정선, 김영라, 한미경, 2000, 경상분지 동북부 보경사화산암체의 암석학적 연구, 한국지구과학회지, 21, 595-610.
- 윤성호, 고정선, 박광순, 안효찬, 김용일, 유성현, 이동한, 윤기영, 2005, 부산 금정산화강암체의 암석학 및 Rb-Sr 전암 등시선 연대, 암석학회지, 14, 61-72.
- 차문성과 윤성호, 1982, 부산시 일원의 백악기 화산활동-특히, 장산 칼데라 진주구조에 관하여-. 부산대학교 자연과학 논문집, 34, 377-390.
- 황상구, 1979, 천황산 일대 백악기 화산암류에 대한 암석학적 연구. 경북대학교 대학원 석사학위논문, 94p.
- 황상구, 정창식, 1998, 삼랑진 칼데라에 관한 화성암류의 마그마 진화, 암석학회지, 7, 161-176
- Bowen, N. L., 1928, The Evolution of the Igneous Rocks, Dover Pubns, 334.
- Brown, G.M, thorp, R.S., and Webb, P.C., 1984, The geochemical characteristic of granitoids in contrasting arc and comments on magma sources. Journal of the Geological Society, 141, 413-426.
- Gill, J.B., 1974, Role of underthrust oceanic crust in the genesis of a Fijian calc-alkaline suite. Contributions to Mineralogy and Petrology, 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 petrogenic 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 and Planetary Science Letters. 51, 297-308.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Sciences, 8, 523-548.
- Jakes, P. and Whithe, A.J.R., 1972, Major and trace element

- abundances in volcanic rocks of orogenic areas. Geological Society of America Bulletin, 83, 29-40.
- 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. Bulletin Volcanologique, 41, 579-585.
- Lee, J.I., 1991, Petrology, Mineralogy and Isotopic Study of the Shallow-depth Emplaced Granitic Rocks, Southern Part of the Kyoungsang 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., Dudáz, 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.
- Mysen, B.o., Kushiro, L., Nicholls, I.A. and Ringwood, a.e., 1974, a possible mantle origin for andesitic magmas. Earth and Planetary Science Letters, 21, 211-229.
- Nicholls, I.A., 1974, Liquids in equilibrium with peridotitic mineral assemblages at high water pressures. Contributions to Mineralogy and Petrology, 45, 289-316.
- 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.
- Powell, M., 1978, crystallization conditions of low-pressure cumulate nodules from the Lesser Antilles island arc. Earth and Planetary Science Letters, 39, 162-172.
- Ringwood, A.E., 1974, The petrological evolution of island arc system. Journal of the Geological Society, 130, 184-204.
- Sterna, C. R., Huanga, W. L., Wyllicia, P. J., 1975, Basalt-andesite-rhyolite-H₂O: Crystallization intervals with excess H₂O and H₂O-undersaturated liquidus surfaces to 35 kobaras, with implications for magma genesis, Earth and Planetary Science Letters, 28, 189-196.
- 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 cean Basins (Saunders, A.D. and Norry, M.J. Eds.). Geological Society of London Special Publication, 42, 313-345.
- Winchester, J.A and Floyd, P.A., 1977, Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile element. Chemical Geology, 20, 325-343.
- Wood, D.L., 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 and Planetary Science Letters, 50, 11-30.

2008년 8월 18일 접수

2008년 8월 21일 심사개시

2009년 1월 20일 채택