

거제도 화산암의 암석학적 연구

윤성효 · 이준동¹ · 이상원 · 고정선 · 서윤지

부산대학교 사범대학 지구과학교육과, ¹부산대학교 자연과학대학 지질학과

요 약: 이 연구에서는 한반도 남해안 도서지역중 거제도 일대의 화산암류를 대상으로 암석 기재, 암석화학적 특성을 알아보고, 화산암류의 조구적 위치 및 성인에 대하여 고찰하고자 한다. 본 역의 화산암류는 백악기의 퇴적암층을 기반으로 피복하여 주로 안산암질 화성쇄설암과 용암류가 교호로 누적된 산상 즉, 최하부는 두터운 화산각력암, 응회각력암 및 라필리용회암 누층으로 구성되고, 상부로 감에 따라 상대적으로 안산암 용암류가 라필리용회암과 응회암을 협재하며 빈번하게 노출되고 최상부에는 데사이트-유문암질 용결회유응회암류가 분포한다. 본 역의 화산암류는 주성분 화학조성으로 볼 때, 현무암에서 현무암질안산암, 안산암, 데사이트 그리고 유문암에 이르는 넓은 성분 조성을 하며 전형적인 BAR조합을 나타낸다. 본 역의 화산암류는 칼크-알칼리암계열에 속하며, SiO₂에 대한 K₂O 성분도에서 medium-K의 조성을 나타내고, La, Th 및 Nb 상관도에서 조산대안산암(orogenic andesite)의 영역에 도시된다. 미량원소 함량을 MORB값으로 표준화한 spider diagram에서 Sr, K, Rb, Ba, Th 등이 다른 원소에 비하여 상대적으로 높은 값을 가지는 반면, Nb, P, Ti, Cr의 함량이 낮은, 지판의 침강 섭입에 관련된 대륙연변부/도호의 조구적환경에 관련된 암석들에 나타나는 특징을 잘 나타낸다. 희토류원소를 chondrite로 표준화한 그림에서는 전체적으로 LREEs가 HREEs에 비하여 부화되어 있으며, 현무암에서 현무암질안산암, 안산암, 데사이트 및 유문암으로 감에 따라 Eu의 '-이상이 점진적으로 커지며, 변화패턴이 대체로 평행한 배열을 보여주므로 본 역의 암석들은 동원마그마에서 유래하였음을 알 수 있다. 지구조위치 판별도에서 본 역의 화산암류는 지판이 침강 섭입하는 지판경계부에서 생성된 마그마로부터 유래한 화산암의 조구적 위치 즉 정상적인 대륙연변호(normal continental margin arc)의 영역에 해당한다. 거제도지역의 화산암류는 약 10% 정도의 맨틀물질의 부분용융으로 형성된 현무암질 시원마그마가 생성되어 지각으로 상승하는 과정에서 분별되어 칼크-알칼리 안산암질 마그마가 형성되었으며, 이 마그마로부터 계속 분별결정작용, 동화작용 및 마그마 혼합 등의 과정을 거치면서 다양한 화산암류를 형성한 것으로 해석된다.

핵심어: 거제도, 백악기 화산활동, 칼크-알칼리암, 조산대안산암, 대륙연변호

서 언

한반도에는 경상분지를 비롯하여 옥천습곡대의 통리분지, 영동-광주함몰대(순창함몰대), 해남-진도 화산암 분포지와 경기육괴의 갑천 함몰대, 음성 함몰대, 공주 함몰대 및 고창-법성포 함몰대 등에 백악기 말의 격렬했던 화산활동의 산물들이 분포하고 있다.

백악기 화산암류는 경상분지에 가장 넓게 분포하고 있어 주로 유천소분지와 의성소분지의 화산암류를 중심으로 암석학적, 암석화학적 연구 및 화산암복합체의 화산활동사와 콜드론구조, 그리고 조구적 위치에 대한 연구들이 수행되었다(원종관, 1968; 차문성, 1976; 황상구, 1991; 김상욱, 1982; 윤성효, 1988, 1993; 차문성과 윤성효, 1988; 김상욱 외, 1991,

1993; 윤성효 외, 1991, 1994, 1996; 김진섭과 윤성효, 1993; 황상구와 김상욱, 1994a, 1994b). 특히, 남한의 백악기 화산암류는 칼크-알칼리계열의 마그마로부터 분화된 것으로 설명되고 있으며, 이 칼크-알칼리계열의 화성활동과 판구조운동과의 연관성에 대한 많은 논의가 이루어졌다(민경덕 외, 1982; 이상만 외, 1987). 김상욱(1982)과 이상만 외(1987)는 한반도 동남부 경상분지의 화산암류에 Kuno (1966)의 K-h 관계에 관한 이론이 잘 적용될 수 있다는 것을 바탕으로 화산암 분포지에서 베니오프대에 이르는 심도는 170~230 km 범위에 있었고, 초생마그마의 생성심도와 관련된다고 논하였다.

이 연구의 대상지역인 거제도에는 백악기 화산활동의 산물인 안산암질 화성쇄설암과 용암류가 교호

하여 분포하고, 유문암질 응회암류를 수반하여 산출한다. 원종관 외(1980)는 거제·울포 도폭 조사에서 이 지역의 화산암류를 안산암질 각력암과 안산암으로 구분하고 서로 점이적인 관계를 가진다고 기재한 바 있다. 그러나 이 화산암류는 층서적으로 하위에서 상위로 가면서 다양한 암상을 나타내고 있으므로 새로운 화산층서의 정립과 암석기재가 필요하게 되었다. 또한, 백악기 화산암류의 구분포지인 유천화산암 분포지와는 기반암인 퇴적암류에 의하여 격리되어 있으며, 연구지역 주변의 남해안 도서지역에서도 화산암류가 비교적 넓게 분포를 나타내고 있다. 이들과 유천화산암분포지내의 화산암류와의 유사성 또는 차이점에 관한 대비 연구도 요구가 된다.

그러므로 이 연구에서는 거제도 지역의 화산암류에 대한 야외산상의 특성, 암상변화 그리고 암석화학적 특성을 고찰하여 화산암류의 성인과 화산활동의 조구적 환경을 규명하고자 한다. 주성분원소 분석은 기초과학지원연구소 서울분소에서 X-선형광분석장치(XRF)로 수행되었고, 미량원소 및 희토류원소에 대해서는 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP/MS)를 이용하여 분석하였다.

지질개요

거제도의 지질은 백악기 경상누층군의 일부분인 퇴적암류를 기반으로 하고, 이들을 분출 피복한 화산암류, 그리고 후기에 관입한 화강암류, 산성 내지 염기성 맥암류와 제4기의 충적층으로 구성되어 있다 (Fig. 1).

퇴적암류는 거제·울포도폭에서는 하부의 성포리층과 상부의 장목리층으로 구분하여 기재하고 있으나, 서로 접촉하는 부분이 없어 그 상하 구분이 모호하므로 여기에서는 퇴적암류로 통일하여 기재한다. 이 퇴적암들은 주로 사암과 셰일로 구성되어 있으며, 화강암의 관입접촉부에서 호온펠스로 변하였다.

화산암류는 안산암질암과 테사이트질~유문암질암으로 구분된다. 안산암질암은 대부분이 화성쇄설암으로 응회암층을 많이 협재하고, 유상구조들이 관찰된다. 이 암석은 호온펠스, 사암 등의 외래각력도 함유하나 대부분이 기질과 유사한 안산암질암의 각력을 함유한다. 각력을 함유하지 않는 안산암질암류

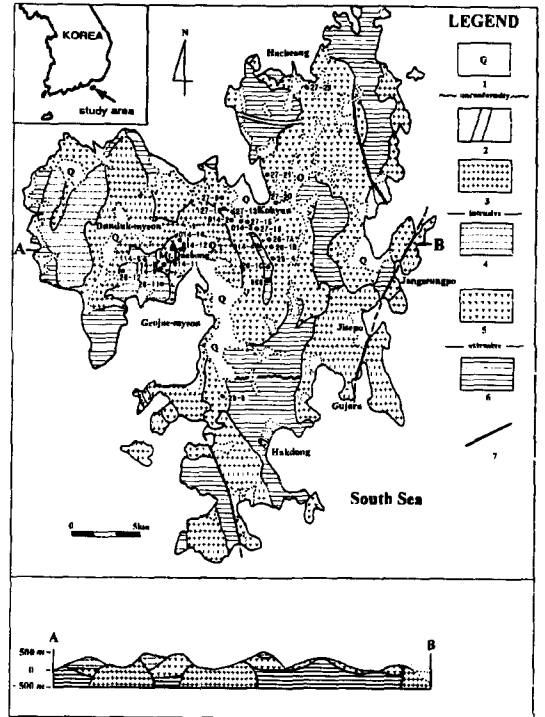


Fig. 1. Geologic map of the study area (modified from Won *et al.*, 1980).

1. Alluvium, 2. Dikes, 3. Granitic rocks, 4. Dacite ash-flow tuff and rhyolite, 5. Andesitic rocks (breccia, tuff, lava and basalt), 6. Sedimentary rocks, 7. Fault. Solid circle with numbers are samples of this study.

는 거제도폭 동남부에 있는 옥너봉 산릉과 중남부에 있는 계룡산 산릉에 따라 소규모로 분포한다. 옥너봉과 계룡산 부근에서는 지세포화강암과 거제화강암에 의해 관입 접촉관계를 이루고 있다. 거제·울포도폭에서 반암류로 기재되었던 암석은 주로 용결 또는 비용결의 유리질 석기에 장식 반정을 가지는 테사이트~유문암질 회류응회암의 산상을 나타내며, 주로 거제도 서부의 대봉산-산방산 일원과 계룡산 정상부에 분포하는데, 도로변의 노두에서 용결구조를 잘 보여주고 산 정상부에 유리질 용결응회암이 분포한다.

거제도 전역에 걸쳐 성포리층, 장목리층 및 화산암류를 관입한 화강암질암은 주로 거제도 동쪽 해안과 서쪽 해안에 분포한다. 이 화강암질암류는 광물 조성 및 암석 조직에 따라 섬록암, 화강섬록암, 반상 화강섬록암, 반상 화강암, 등립질 화강암, 미문상 화강암 및 알칼리장석 화강암으로 분류할 수 있다(김종선과

이준동, 1995). 맥암류가 퇴적암류, 성포리층, 화산암류, 화강암질암 등을 관입하여 도처에 산재하며 연초면 명동리 부근에서 규모가 크고 연속성이 양호한 암맥이 노출되어 있다.

화산암류의 암석기재

원종관 외(1980)는 연구지역의 화산암류를 안산암과 안산암질각력암으로 구분하였으나, 야외조사 결과 화산암류는 주로 중성 화산활동의 산물인 안산암질 화성쇄설암(응회암, 라필리응회암, 응회각력암)과 용암류가 교호로 누적된 산상을 보여주므로, 하나의 안산암질 성층화산체의 단면을 구성하는 것으로 해석된다. 이들은 백악기 퇴적암층을 기반암으로 피복하여 최하부는 두터운 화산각력암, 응회각력암 및 라필

리응회암 누층으로 구성되어 있으나, 상부로 감에 따라 상대적으로 안산암 용암류가 빈번하게 노출한다. 그 사이에 라필리응회암 및 응회암이 협재하고, 화산암층의 최하부에는 현무암질암이, 최상부에는 데사이트질 유리질용결응회암이 분포한다. 일부 산릉과 같은 고지대에 유상구조의 발달이 현저한 유문암이 소규모로 노출되기도 한다. 화산암류에 대한 모우드 분석치는 Table 1과 같다.

안산암질 화성쇄설암

안산암질 각력암 및 응회각력암은 암녹색 내지 녹회색, 암적갈색을 띠며, 안산암질암, 퇴적암류, 호운펠스의 각력을 함유한다. 기질은 비현정질인 것과 반정질인 것으로 구분할 수 있으며, 비현정질일수록 어

Table 1. Modal composition of the volcanic rocks in the study area.

sample No.	Phenocryst			secondary minerals			Rock fragment	Ground-mass	Texture	Rock type
	Pl	Px	Horn	Chl	Epi	Others				
26-1A	28.1	1.4	2.7	2.6	2.8	2.0	-	60.1	PO	An
26-1B	37.8	1.1	0.1	4.0	2.1	2.1	-	52.7	PO	An
26-1B	31.5	0.1	0.4	0.1	0.6	2.0	-	65.3	PO	An
26-1B	32.1	1.4	-	0.3	10.5	1.0	-	54.4	PO	An
26-1C	19.5	-	-	-	1.9	3.8	-	74.1	WD	Da
26-1C	25.1	-	-	-	2.7	3.1	4.2	64.9	WD	Da
26-2	18.2	-	0.1	-	5.9	1.1	-	74.5	HA	An
26-3	21.7	-	-	-	11.5	0.4	-	66.4	HA	An
27-1	32.2	0.1	3.7	-	4.9	0.5	-	58.5	HA	An
27-6	27.5	0.4	0.4	-	2.7	1.8	-	65.2	HA	An
27-6	35.0	0.4	0.1	-	1.2	1.5	0.4	61.2	HA	An
27-9	75.9	-	22.1	-	-	1.5	-	0.3	PL	An
27-10	33.1	-	4.1	-	-	0.6	-	61.9	PO	An
27-10	27.3	-	0.5	-	1.9	1.1	-	69.1	PO	An
27-13	49.9	8.2	-	-	-	-	-	41.7	IG	An
27-13	55.2	3.7	0.1	-	-	-	-	40.6	IG	An
27-15	30.7	-	-	-	0.6	1.1	-	67.4	PO	An
27-15	31.3	0.5	-	-	0.1	5.9	-	61.9	PO	An
27-16	15.7	2.5	3.5	-	0.3	1.6	0.1	76.1	PL	An
27-16	26.2	1.5	0.9	-	4.5	1.0	0.1	65.4	PO	An
27-20	40.6	0.8	0.2	4.9	-	2.1	-	51.1	PO	An
27-20	44.4	1.3	0.3	4.7	0.5	1.5	-	47.0	HA	An
27-21	41.2	-	-	0.1	2.3	3.7	-	53.5	HA	An
27-23	49.2	-	-	-	2.4	5.6	-	42.1	HA	An
27-26	38.6	-	-	4.8	0.3	2.5	-	53.7	HA	An

[Rock] An: Andesite, Da: Dacite

[Texture] PL: pilotaxitic, PO: porphyritic, IG: intergranular, HA: hyalopilitic, WD: welded

[Mineral] Pl: plagioclase, Px: pyroxene, Horn: hornblende, Chl: chlorite, Epi: epidote

두운 색을 보여준다. 각력의 대부분은 기질과 유사한 안산암이다. 각력암의 기질과 각력은 외견상 거의 동일하거나 반상조직이 뚜렷한 안산암으로 구성되는데, 이는 화산 폭발과정에서 일어난 파쇄작용에 의해 생긴 것으로 해석된다. 각력의 크기는 보통 3~5 cm 정도가 보통이나, 최대 30 cm 이상에 달하는 것도 있다. 큰 각력일수록 아각상 내지 원형을 이룬다. 안산암질 각력암은 부분적으로 응회암, 응회질 세일이 협재하며, 기질부에는 미약하나마 연속성을 가지는 유상구조가 발달하기도 한다. 국부적으로 산출하는 층리가 잘 발달된 안산암질 라펠리응회암과 응회암의 호층 중에 정점이층리, 미약한 사층리 등이 발달하는데, 이는 화산활동의 중간에 재운반·퇴적된 응회질 퇴적암으로 해석된다. 안산암질각력암은 풍화면에서는 대체로 기질과 각력의 경계는 뚜렷하지만, 신선한 노두에서는 경계의 구분이 뚜렷하지 않다. 경하 관찰에서 때때로 양자 사이에 점이적인 변화를 관찰할 수 있는데, 이는 먼저 고결되어 있던 각력의 외연부가 새로운 마그마의 공급이나 뜨거운 상태에서 마그마와의 반응에 기인하는 것으로 생각된다. 안산암질 각력의 반정 광물 중 사장석의 변질(saussuritization), 휘석의 변질(uralitization), 각섬석의 녹니석화작용 등은 후기에 공급된 고온의 마그마나 열수의 영향, 혹은 식는 과정에 유체의 공급 등에 기인된 것으로 해석할 수 있다.

안산암 용암

안산암 용암류는 그 조직 및 구성광물에 따라 치밀 안산암, 반상안산암(사장석 안산암과 휘석 및 각섬석 안산암) 등으로 구분할 수 있다.

치밀안산암은 암녹색 또는 암흑색의 치밀질이며, 현미경 관찰에서 미약한 반상조직을 나타내기도 한다. 세립의 자철석이 암석 전반에 산재되어 있어 다른 안산암질암보다 검게 보인다. 본 암은 주로 은미정질 석기에 소량의 사장석, 휘석, 각섬석, 흑운모, 녹니석 등을 함유한다.

반상안산암은 사장석 반정을 함유하는 것이 특징이며, 전체적으로 암녹색을 띠나 장석 반정이 많은 것은 보다 밝은 담색을 나타낸다. 현미경 관찰에서 주요 반정 광물은 사장석이며, 드물게 휘석, 각섬석

등을 함유한다. 사장석은 자형으로 알바이트쌍정, 누대구조를 가지며, 일부 암상에서는 사장석 반정이 기질부에 의해 응식되어 있는 양상도 잘 관찰된다. 휘석은 주로 보통휘석(augite)이며, 국부적으로 신선한 각섬석 반정을 가지는 각섬석안산암이 관찰된다.

유문암질 회류응회암

이 암석은 대부분이 유리질 용결응회암이며 둔덕면 일대의 도로변 노두에서 산정상까지 분포한다. 갈색의 유리질에 용결구조가 미약한 부분과 현저한 부분이 교호하는 대상구조를 보여준다. 육안으로 반상조직을 인지할 수 있고 암색의 유리질 암편(부석편)이 길게 압축 신장된 용결구조를 관찰할 수 있다. 경하에서 정장석, 석영 반정과 소규모의 각섬석, 흑운모 등이 관찰되며, 각섬석은 부분적으로 녹니석으로 변질되어 있다. 석기는 은미정질 내지 유리질이고 압축 신장된 샤아드가 방향성을 가지고 잘 발달되고, 반정이나 암편 주위로 굴곡되어 둘러싸는 형태의 유택시틱조직(eutaxitic texture)이 잘 관찰된다. 용결작용이 심한 부분은 원래의 샤아드 모양을 거의 잃어버려 유문암의 유상조직을 닮은 파라택시틱조직(parataxitic texture)을 보여준다.

암석화학

주성분원소

화산암류의 화학조성을 알아보기 위하여 주로 용암류를 연구 대상으로 시료를 채취하였으며, 안산암질 화성쇄설암류에는 외래광물립과 암설의 함량이 많아 마그마의 성분을 대표할 수 없는 것으로 판단되어 배제하였다. 시료의 위치는 Fig. 1에 나타나 있으며, 화산암류의 주성분원소 분석치 및 CIPW 노름계산 결과는 Table 2와 같다.

본 역의 화산암류 중 안산암 용암류는 그 성분조성이 현무암에서 현무암질안산암, 안산암의 영역에, 유문암질 회류응회암류는 데사이트에서 유문암의 조성을 나타내며, 전체적으로는 현무암에서 유문암까지의 넓은 성분 영역을 나타내며, 전형적인 BAR(현무암-안산암-유문암) 암석조합을 나타낸다(Fig. 2A).

Table 2. Major element chemical composition and CIPW normative mineral composition of the volcanic rocks in the study area.

Rock Type Sample	Basalt			Basaltic andesite								
	27-9	27-13	114-14	27-21	27-23	27-10	27-15	014-2	014-3	114-10	114-12	114-9
SiO ₂	46.94	50.67	50.61	56.70	56.00	55.40	56.41	54.29	54.14	55.50	54.23	54.24
TiO ₂	0.94	0.85	0.86	0.74	0.73	0.93	0.79	0.97	0.91	0.99	0.80	0.90
Al ₂ O ₃	19.53	18.68	18.21	16.46	17.03	18.87	17.68	17.06	19.86	17.64	16.29	19.03
Fe ₂ O ₃	2.53	1.97	2.19	2.42	2.80	2.75	2.55	3.11	2.82	2.81	2.63	2.69
FeO	9.11	7.10	7.90	5.10	4.70	5.77	5.35	6.53	5.93	5.89	5.51	5.64
MnO	0.19	0.17	0.36	0.10	0.11	0.14	0.13	0.15	0.07	0.16	0.13	0.13
MgO	5.35	5.06	4.50	3.49	1.56	2.20	3.41	4.20	1.78	3.10	4.83	2.54
CaO	10.94	10.38	10.10	5.17	4.55	8.76	7.68	8.69	9.93	8.42	7.43	7.21
Na ₂ O	1.86	2.50	2.27	3.93	4.87	3.22	2.77	2.63	3.00	3.01	2.38	3.04
K ₂ O	0.32	0.50	0.37	0.82	1.40	0.29	0.95	0.72	0.16	0.31	1.42	1.14
P ₂ O ₅	0.08	0.15	0.14	0.16	0.29	0.19	0.15	0.18	0.17	0.19	0.14	0.17
LOI	0.58	0.70	1.02	3.88	5.24	0.39	0.86	0.43	0.20	0.89	3.18	2.17
Total	98.37	98.73	98.60	98.97	99.28	98.91	98.73	98.96	98.97	98.91	98.97	98.90
CIPW norm												
Q	0.00	2.84	4.96	12.60	8.78	12.33	13.69	10.33	11.21	13.16	10.92	10.61
Or	1.94	3.02	2.24	5.10	8.81	1.74	5.74	4.32	0.69	1.87	8.77	6.97
Ab	16.08	21.55	19.66	34.94	43.79	27.62	23.92	22.56	25.67	25.96	21.00	26.56
An	44.94	38.99	39.31	26.01	21.75	36.68	33.67	33.06	40.70	34.35	30.82	35.97
C	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
Di	8.36	10.41	9.59	0.00	0.40	5.28	3.59	7.91	6.89	5.91	5.54	0.00
Hy	22.04	18.30	18.99	15.79	10.63	10.09	13.74	14.98	8.30	12.26	17.07	13.67
Ol	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mt	3.75	2.91	3.25	3.69	3.70	4.05	3.78	4.58	4.14	4.16	3.98	4.03
Il	1.83	1.65	1.67	1.48	1.48	1.79	1.53	1.87	1.75	1.92	1.59	1.77
Ap	0.18	0.33	0.31	0.37	0.67	0.42	0.33	0.40	0.38	0.42	0.32	0.38
Nat'l	163.7	164.5	158.9	165.3	167.7	164.2	164.7	163.2	163.7	158.7	158.6	158.7
Grid.	153.6	152.9	152.0	156.5	162.3	153.3	152.7	153.6	153.3	151.5	151.7	151.4

Table 2. Continued.

Rock Type Sample	Andesite						Dacite		Rhyolite				
	28-8	26-1B	26-7A	27-16	27-20	114-11	28-11	26-1C	28-12	888	26-4	014-4	114-6
SiO ₂	61.87	57.40	57.00	57.37	59.72	60.89	67.55	69.98	72.35	70.54	75.85	72.18	72.55
TiO ₂	0.76	0.79	0.98	0.82	0.61	0.93	0.44	0.34	0.24	0.33	0.11	0.28	0.25
Al ₂ O ₃	17.21	16.42	17.58	17.25	16.96	15.52	15.49	14.62	13.91	14.67	13.22	14.06	14.23
Fe ₂ O ₃	2.16	2.93	2.62	3.00	2.21	2.81	1.90	1.56	1.32	1.77	0.81	1.45	1.38
FeO	3.62	4.90	4.36	4.99	3.70	4.70	2.60	2.10	1.19	1.60	0.72	1.31	1.24
MnO	0.09	0.06	0.09	0.12	0.09	0.10	0.09	0.06	0.03	0.06	0.03	0.03	0.05
MgO	1.56	4.41	3.92	3.40	2.23	2.72	1.12	0.93	0.42	0.72	0.08	0.50	0.30
CaO	4.99	5.01	5.06	6.91	6.65	4.92	1.95	2.30	1.18	2.26	0.87	1.90	1.35
Na ₂ O	3.35	3.89	3.47	2.36	2.95	2.99	3.65	3.58	3.23	3.95	3.03	3.68	3.47
K ₂ O	2.02	1.59	2.17	1.30	1.55	2.24	3.36	3.38	4.34	3.20	4.55	3.41	3.74
P ₂ O ₅	0.24	0.14	0.27	0.16	0.15	0.21	0.08	0.07	0.05	0.07	0.01	0.06	0.05
LOI	1.54	1.38	1.36	1.29	2.71	0.93	1.46	0.81	1.11	0.62	0.49	0.67	1.03
Total	99.41	98.92	98.88	98.97	99.53	98.96	99.69	99.63	99.40	99.79	99.77	99.53	99.64
CIPW norm													
Q	20.99	9.84	10.34	17.23	18.97	19.19	27.16	29.64	34.16	29.40	38.91	33.11	34.98
Or	12.21	9.64	13.17	7.87	9.47	13.52	20.24	20.23	26.12	19.09	27.11	20.40	22.43
Ab	28.93	33.71	30.08	20.42	25.75	25.78	31.42	30.62	27.77	33.67	25.79	31.46	29.74
An	23.87	23.18	24.14	33.37	29.35	22.72	9.38	11.14	5.66	10.90	4.29	9.19	6.50
C	0.96	0.00	0.90	0.00	0.00	0.00	2.51	1.04	1.88	0.74	1.75	0.99	2.14
Di	0.00	1.20	0.00	0.64	3.14	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hy	7.83	16.23	15.52	14.07	8.47	11.61	5.46	4.24	1.89	2.83	0.73	2.05	1.59
Ol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mt	3.20	4.36	3.33	4.44	3.31	4.16	2.81	2.29	1.95	2.59	1.18	2.13	2.03
Il	1.48	1.54	1.91	1.60	1.20	1.80	0.85	0.65	0.46	0.63	0.21	0.54	0.48
Ap	0.54	0.31	0.60	0.36	0.34	0.47	0.18	0.15	0.11	0.15	0.02	0.13	0.11
Nat'l	163.4	166.3	165.2	164.9	166.0	158.7	158.7	165.2	156.6	165.0	165.5	164.1	158.5
Grid.	143.8	151.3	152.4	152.7	154.8	151.6	150.3	150.8	149.7	151.5	152.2	152.6	151.5

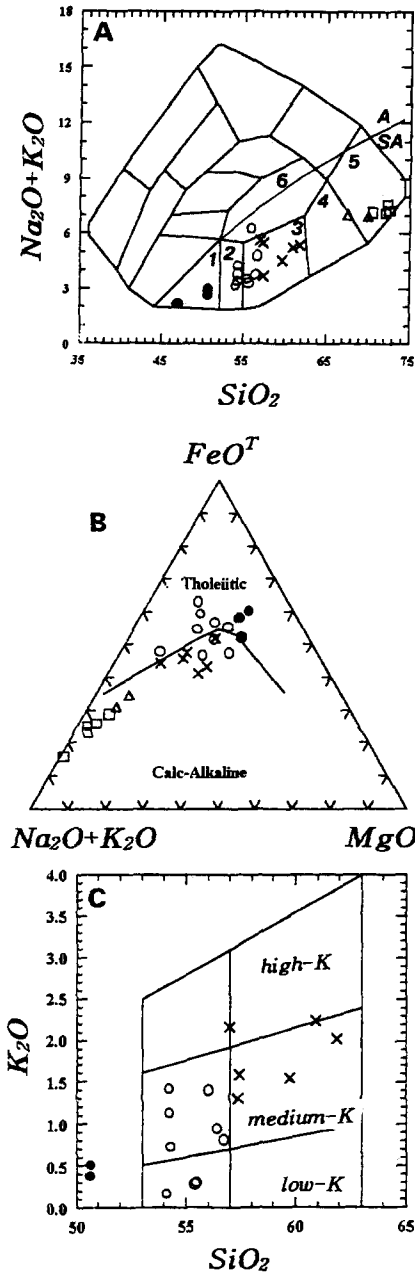


Fig. 2. A: $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ vs. SiO_2 diagram (Cox *et al.*, 1979) for the volcanic rocks. The line dividing between alkalic (A) and subalkalic (SA) magma series is derived from Irvine and Baragar (1971). [1. basalt, 2. basaltic andesite, 3. andesite, 4. dacite, 5. rhyolite, 6. trachyandesite]. B: FeO^T - $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ - MgO diagram (Irvine and Baragar, 1971) for the volcanic rocks. C: K_2O vs. SiO_2 diagram (Gill, 1981) for the andesitic rocks. [Filled circle (basalt), open circle (basaltic andesite), cross (andesite), triangle (dacite) and rectangle (rhyolite)]

본 역 화산암류의 암석계열을 분류하기 위하여 Irvine과 Baragar (1971)의 구분선을 적용하면, SiO_2 에 대한 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 의 비교 그림에서 비알칼리계열에 접시된다. 한편 AFM 삼각도(Fig. 2B)에서 현무암과 일부 현무암질안산암이 칼크-알칼리마그마 계열에서 약간 벗어나 도시된다. 이것은 이러한 암석에 세립 자철석이 상당량 함유되어 있는 점과 관련이 있는 것으로 해석된다. 그 외 암석은 전형적인 칼크-알칼리 마그마의 변화경향을 나타낸다.

SiO_2 에 대한 K_2O 의 성분도(Gill, 1981)에서 중성화산암류는 대부분 medium-K 암석 영역에 도시된다(Fig. 2C). 이는 거제도의 중성화산암류들이 칼크-알칼리마그마 기원의 medium-K 계열 암석임을 지지하는 것이다. 유천화산암분포지 서부 및 북부의 안산암질암류가 대부분 high-K 계열에 속하는 것(김상욱 외, 1991, 1993; 황상구와 김상욱, 1994a, 1994b)에 비하면, 거제도지역의 안산암질암류는 보다 낮은 K_2O 함량을 가지는 특징을 나타낸다. 그러나, 데사이트-유문암질 회류응회암류는 유천화산암분포지에서와 같이 높은 K_2O 의 함량(3.2~4.6wt%)을 나타내며, high-K 계열에 속한다.

SiO_2 에 대한 각 산화물의 변화경향을 나타내는 Harker 성분변화도(Fig. 3)에서 각 산화물은 SiO_2 함량이 증가함에 따라 증가 또는 감소하는 경향을 보인다. Al_2O_3 는 SiO_2 가 증가함에 따라 19.9wt%에서 13.2wt%까지, total FeO는 11.6wt%에서 1.5wt%까지 거의 일직선 형태로 감소한다. MgO는 SiO_2 함량의 55-58wt% 영역에서 급격히 감소하는 경향을 보여주며, 그 이상에서는 감소율이 약간 둔화되며 감소하는 경향을 보인다. 이는 감람석이나 휘석 결정이 결정화되어 분별되었음을 의미한다. CaO는 SiO_2 가 증가함에 따라 10.2wt%에서 0.9wt%까지 감소하지만 MgO와 비슷하게 현무암질안산암, 안산암에서 다소 급한 감소를 보여준다. 이것은 사장석이나 단사휘석의 분별 때문으로 해석된다. TiO_2 의 양은 1.0wt%~0.1wt%로 적은 양을 나타내며 감소한다. P_2O_5 의 양은 SiO_2 의 함량이 57wt% 이하에서 산재하며 증가하다가 57wt% 이상에서는 감소하는 경향을 갖는다. K_2O 는 SiO_2 의 증가에 따라 0.2wt%에서 4.6wt%까지 증가하는 경향을 나타낸다. SiO_2 가 증가함에 따라 total alkali도 증가하는데 67wt% 이하에서는 증가비

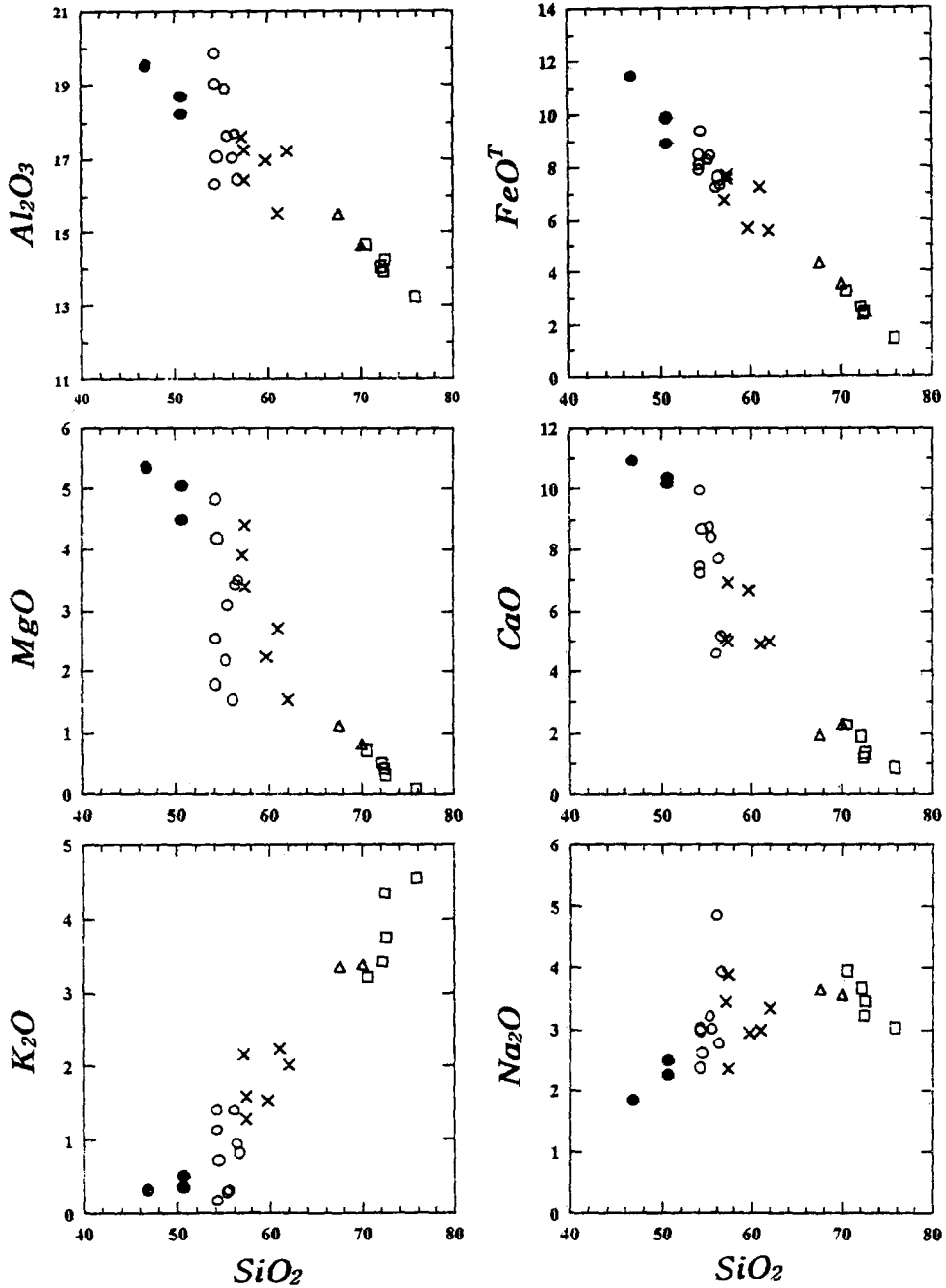


Fig. 3. Harker variation diagram of major oxides vs. silica for the volcanic rocks. Symbols are the same as in Fig. 2.

율이 다소 크며, 그 이상에서는 증가율이 둔화된다. Na_2O 는 현무암질암과 현무암질안산암에서는 증가하다가 안산암질암, 데사이트질암, 그리고 유문암질암에서 뚜렷한 변화없이 산재한다.

미량원소 및 희토류원소

본 역 화산암류에 대한 미량원소 조성과 희토류원소 조성을 Table 3에 나타내었다.

Sr 함량은 121~766 ppm의 비교적 넓은 성분범위를 나타내는데, 이는 Gill (1981)이 제시한 조산대안산암의 성분범위(100~1000 ppm)에 포함된다. TiO₂는 0.11~0.99wt%의 비교적 낮은 함량을 나타내며, Ti은 지판의 침강섭입에 관련된 대륙연변부나 도호에 분포하는 화산암들에서 흔히 고갈되기 쉬운 대표적인 HFS (high field strength) 원소 중의 하나이다(Gill, 1981). Nb 함량은 1.19~9.32 ppm 범위가

고, Y 함량은 14.4~35.3 ppm 범위로 비교적 낮은 함량을 나타내는데, 이는 조산대 안산암의 조성범위인 5~11 ppm (Nb), 20~25 ppm (Y)에 해당하거나 유사하다. Rb 함량은 7~195 ppm으로 조산대의 high-K 안산암의 함량범위(100 ppm 이하)보다 비교적 높으며, 비슷한 암상과 화산층서를 나타내는 부산 송도-다대포지역의 안산암질암(윤성효 외, 1994; 1996)보다도 높다. Ba의 함량은 73~881 ppm의 범

Table 3. Some trace element and rare earth element abundance of the volcanic rocks in the study area.

Rock type	Basalt					Basaltic andesite						
Sample	27-9	27-13	114-14	27-21	27-23	27-10	27-15	014-2	014-3	114-10	114-12	114-9
Ba	100	108	172	171	456	89	209	115	91	171	298	260
Rb	31	34	20	58	37	22	38	57	7	12	72	29
Sr	766	633	600	499	749	631	560	466	592	643	557	692
Y	14	24	26	22	23	28	27	26	28	35	28	29
Zr	12	66	14	99	174	86	128	76	83	86	74	140
Nb	1	3	tr	4	8	3	4	3	3	4	1	4
Th	tr	tr	1	2	6	1	3	2	1	1	4	1
Pb	11	5	10	5	18	22	8	7	12	15	8	8
Zn	300	187	422	260	200	180	189	147	153	360	272	328
Cu	50	28	41	19	16	35	31	16	25	30	91	85
Ni	20	33	48	15	8	9	15	17	9	11	58	11
Cr	40	131	105	49	17	19	46	34	10	22	16	16
Hf	tr	1	tr	2	3	2	3	1	1	1	tr	3
Cs	5	5	1	5	5	2	5	10	tr	1	1	2
Ta	tr	1	tr	1	1	tr	1	1	1	1	tr	tr
Co	321	227	191	64	138	115	145	81	176	352	78	95
REEs												
La	5.60	9.34	9.60	10.4	24.2	8.64	13.3	10.7	11.5	11.6	13.8	9.87
Ce	12.3	23.1	23.1	24.4	52.6	20.8	30.3	23.6	27.6	29.3	31.3	26.3
Pr	1.63	3.13	3.05	3.09	5.83	2.78	3.82	3.08	3.56	4.07	4.06	3.52
Nd	6.85	13.7	13.8	12.9	23.2	12.5	16.0	13.6	15.4	18.2	16.6	15.5
Sm	1.89	3.35	3.66	3.04	4.65	3.40	3.87	3.39	4.00	5.05	3.92	4.15
Eu	0.89	1.19	1.29	0.99	1.56	1.15	1.15	1.03	1.42	1.63	1.17	1.35
Gd	2.11	3.63	3.72	3.32	4.52	3.94	4.06	3.94	4.42	5.21	4.21	4.66
Tb	0.33	0.57	0.62	0.52	0.60	0.62	0.65	0.64	0.74	0.86	0.62	0.73
Dy	2.05	3.53	4.02	3.18	3.35	3.90	3.94	3.92	4.36	5.20	3.99	4.66
Ho	0.46	0.75	0.84	0.64	0.66	0.81	0.83	0.81	0.90	1.07	0.80	0.93
Er	1.35	2.16	2.45	1.96	1.91	2.52	2.45	2.48	2.79	3.17	2.51	2.91
Tm	0.21	0.29	0.36	0.30	0.25	0.36	0.34	0.36	0.41	0.45	0.33	0.40
Yb	1.42	2.09	2.41	1.92	1.80	2.41	2.34	2.23	2.57	2.87	2.34	2.61
Lu	0.22	0.30	0.38	0.30	0.30	0.40	0.33	0.35	0.37	0.41	0.36	0.42
∑REE	37.31	67.13	69.30	66.96	125.43	64.23	83.38	70.13	80.04	89.09	86.01	78.01
Ba/La	17.9	11.5	17.9	16.4	18.8	10.3	15.7	10.8	8.00	14.7	21.6	26.3
La/Th	6.50	4.05	3.53	6.00	4.00	5.30	6.20	6.60	3.10	5.30
Zr/Nb	10.4	21.3	17.6	24.3	20.9	26.9	26.8	20.7	23.8	19.2	53.1	31.8

Table 3. Continued.

Rock type Sample	Andesite						Dacite			Rhyolite			
	28-8	26-1B	26-7A	27-16	27-20	114-11	28-11	26-1C	28-12	888	26-4	014-4	114-6
Ba	618	73	23	194	389	375	638	669	740	582	881	629	702
Rb	62	140	187	95	27	92	156	139	195	116	186	73	156
Sr	490	393	498	579	538	380	388	246	183	229	121	181	201
Y	30	26	25	33	18	33	30	32	19	26	17	21	20
Zr	233	159	145	162	144	90	170	172	158	166	112	174	167
Nb	8	5	6	6	5	8	8	7	8	6	7	8	9
Th	6	5	4	4	3	7	9	11	9	9	6	9	12
Pb	20	18	8	18	9	18	38	22	16	11	33	26	20
Zn	274	205	169	225	200	308	266	129	146	99	94	106	218
Cu	36	10	47	36	27	27	23	21	13	6	6	8	9
Ni	4	31	15	15	13	23	8	5	2	6	5	6	5
Cr	12	93	45	45	34	53	20	13	10	12	8	12	10
Hf	5	3	3	3	3	2	4	4	4	4	3	4	4
Cs	3	9	22	4	1	15	4	3	2	3	3	2	2
Ta	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Co	80	60	128	93	67	113	231	94	80	339	271	105	103
REEs													
La	18.2	17.5	17.2	17.3	12.0	17.4	24.4	23.5	16.4	20.9	14.1	13.6	22.8
Ce	45.2	38.4	38.0	39.1	27.8	43.5	52.5	51.9	42.2	49.0	33.8	39.5	52.9
Pr	5.18	4.84	4.61	4.94	3.27	5.01	6.12	5.87	4.28	5.28	3.58	3.76	5.70
Nd	20.6	18.8	18.48	20.5	13.1	20.3	22.6	21.5	16.1	19.3	12.9	14.5	20.7
Sm	4.64	4.27	4.14	4.90	2.85	4.91	4.82	4.56	3.24	4.20	2.66	3.07	3.91
Eu	1.18	1.01	0.97	1.31	0.95	1.14	1.04	1.01	0.67	0.83	0.44	0.72	0.89
Gd	4.71	4.19	4.01	5.01	3.09	5.04	4.72	4.49	3.03	4.04	2.75	3.29	3.98
Tb	0.70	0.61	0.61	0.76	0.45	0.78	0.70	0.70	0.45	0.61	0.40	0.50	0.57
Dy	4.19	3.58	3.62	4.52	2.70	4.83	4.33	4.35	2.80	3.58	2.46	3.12	3.32
Ho	0.83	0.74	0.68	0.90	0.53	0.99	0.89	0.88	0.58	0.79	0.52	0.68	0.69
Er	2.66	2.22	2.23	2.69	1.73	3.10	2.88	2.77	1.78	2.51	1.77	2.08	2.12
Tm	0.38	0.31	0.32	0.39	0.27	0.44	0.41	0.45	0.30	0.38	0.27	0.32	0.33
Yb	2.61	2.23	2.22	2.67	1.89	3.09	2.96	3.05	2.08	2.65	1.91	2.19	2.20
Lu	0.41	0.34	0.32	0.41	0.30	0.45	0.45	0.47	0.31	0.42	0.31	0.37	0.36
ΣREE	111.49	99.04	97.41	105.4	70.93	110.98	128.82	125.50	94.22	114.49	77.87	87.70	120.47
Ba/La	34.0	4.19	17.3	11.2	32.4	21.6	26.2	28.5	45.1	27.9	62.5	46.3	30.8
La/Th	2.60	3.10	4.20	3.80	3.20	2.40	2.50	2.10	1.65	2.10	2.10	1.50	1.90
Zr/Nb	29.0	30.4	22.4	25.9	26.8	10.9	21.1	22.5	18.3	23.9	14.7	20.9	17.9

위이다. 고철질광물에 농집되는 호정성(compatible) 원소인 Ni, Cr 등은 감람석, 휘석 등의 광물이 분별결정작용을 할 때 분별되는데, 각각 2~58 ppm, 8~131 ppm 범위로 그 함량은 다소 낮은 편이다. MgO 함량이 0.08~5.35wt% 범위인 것에 비하면 Ni 함량은 높은 편인데, 이는 대부분 대륙에 분포하는 대륙연변부의 화산호에서 흔히 나타나는 특징의 하나로 알려져 있다(Gill, 1981).

Cu, Zn 등의 친동원소는 그 함량이 각각 6~91 ppm (평균 30 ppm)과 94~422 ppm 이며, 조산대 지역의 high-K 안산암의 10~150 ppm (평균 60 ppm)과, 50~100 ppm에 비하여 Cu는 다소 낮은 값의 범위를 가지나 Zn은 다소 높은 값을 보인다. 친동원소는 조산대의 안산암질 화산암 분포지에서 Cu-Pb-Zn-Mo-Ag-Au 광화대와 관련되어 비교적 높은 함량의 범위를 나타낸다. Pb는 5~38 ppm의 함량을

나타내며, Zr의 함량 12~233 ppm은 조산대안산암의 50~150 ppm에 비하여 약간 높은 함량 범위를 나타낸다. Hf 함량은 5 ppm 이하로 매우 낮은 조성범위를 보여주며, Th는 그 함량이 12 ppm 이하(평균 5.2 ppm)의 범위이다. La 함량은 6~24 ppm으로 조산대안산암의 조성범위에 속한다.

미량원소를 MORB값(Pearce, 1982)으로 규격화하여 도시한 거미그림은 Fig. 4와 같다. 거제도지역의 화산암류는 전체적으로, 호정성원소인 Nb~Cr이 고갈되어 있는 것에 비하여 Sr, K, Rb, Ba, Th 등은 상대적으로 높은 값을 가지며 부화가 뚜렷하게 나타난다. 이들은 낮은 이온전위를 가지며, 수용액에서 이동성이 큰 경향을 가지는데, 이들이 섭입하는 해양지각에서 나온 유체에 의하여 맨틀근원지를 부화시

킨 결과로 알려져 있다(Pearce, 1982). 이러한 유체는 알칼리, 알칼리토원소를 함유하며, 해저의 풍화작용동안 해양지각의 상층부에 첨가되며 그들이 모여 있는 2차광물의 탈수작용에 의해 생기는 수용상으로 방출된다. 한편 높은 이온전위를 가지고 있는 잔류원소는 상대적으로 수용액에서는 불용동성이므로 섭입하는 암편의 잔류상으로 남는다. Th은 이러한 관점에서 전이적이며, 압력, 온도, 용액의 성분에 따라 이동성 또는 불용동성으로 거동하는 것으로 알려져 있다(Wood *et al.*, 1979). 특히, 현무암에서 현무암질안산암, 안산암 그리고 데사이트 및 유문암질암으로 감에 따라 K, Rb, Ba, Th, Ce 등이 다른 원소들에 비해서 상대적으로 높은 값을 가지는 반면에, Sr, Nb, P, Ti 등이 점진적으로 낮아지고, Cr 등의 호정성원소가

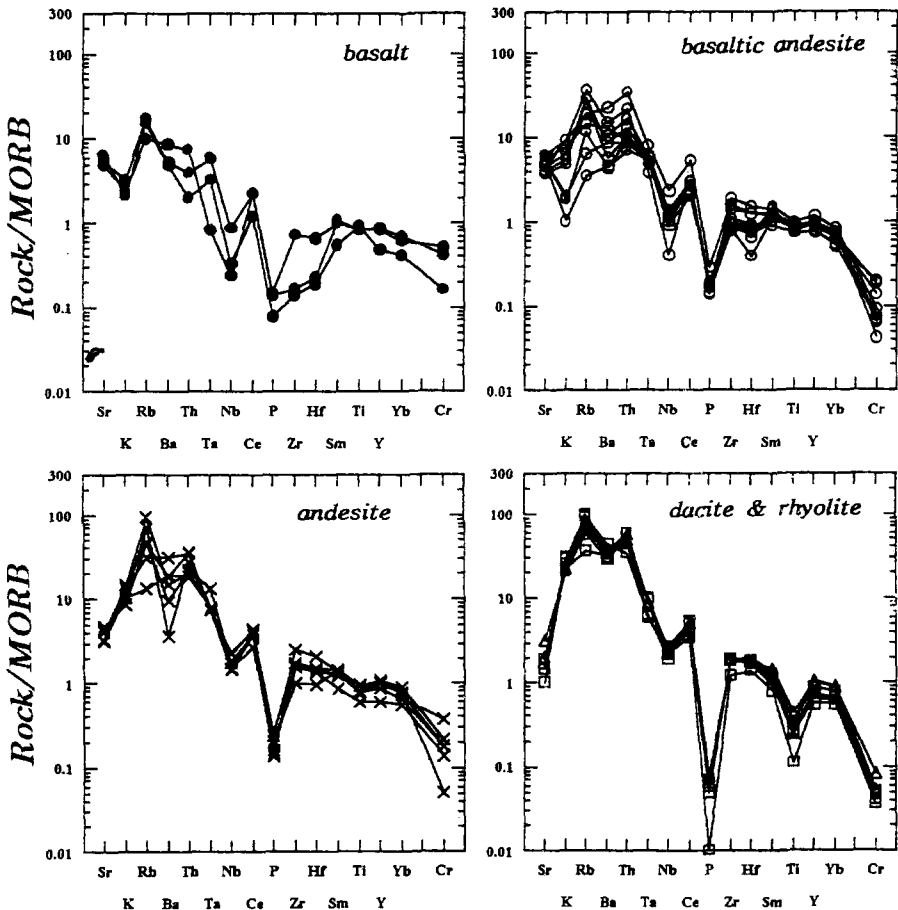


Fig. 4. Spider diagram of MORB-normalized trace element patterns for the volcanic rocks. Symbols are the same as in Fig. 2.

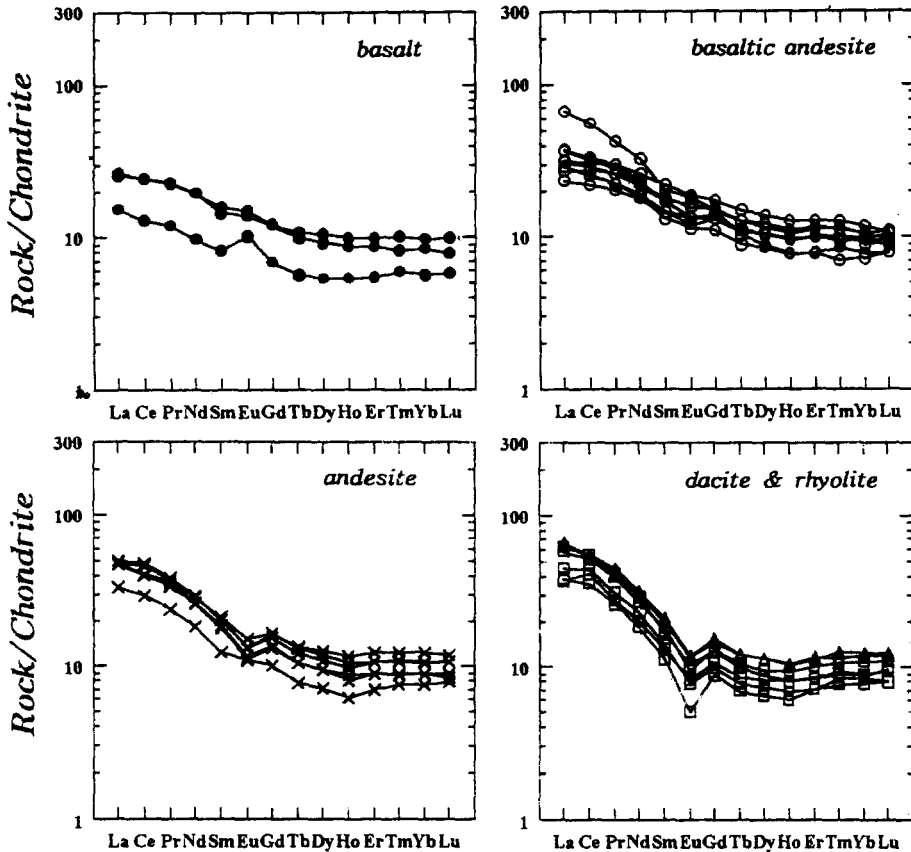


Fig. 5. Chondrite-normalized trace element patterns for the volcanic rocks. Symbols are the same as in Fig. 2.

고갈되는 특징을 가지는데, 이는 지판의 침강 섭입에 관련된 대륙 연변부나 도호 등의 구조조에 관련된 암석계열에 나타나는 특징이다(Pearce, 1982). 그리고, 현무암에서 유문암으로의 이들 원소들의 점진적인 부화 및 고갈은 본 역 암석들이 동원마그마에서 유래함을 시사한다.

거제도 화산암류의 희토류원소 함량을 콘드라이트의 조성에 대해 표준화한 값을 도시한 그림에서, 본 역의 화산암류는 전체적으로 경희토류원소(LREEs)가 중희토류원소(HREEs)에 비해 부화되어 있는 경향을 나타낸다(Fig. 5). 또한 이들 패턴은 대체로 평행한 배열을 보여주므로 본 암석들이 동원마그마에서 유래된 것임을 추정할 수 있다. Eu는 현무암에서 강한 정(+) 이상(positive anomaly)을 보여주지만 테사이트와 유문암에서 부(-) 이상(negative anomaly)을 나타낸다. 이는 현무암에 사장석이 많이 함

유되어 있는 암석기재 내용과 일치하는데, 이 현무암의 사장석이 집적광물(cumulate mineral)임을 지시하며, 마그마의 초기 결정화작용에서 사장석의 분별결정작용이 다소 강했음을 지시하는 것이다.

조구적 위치 및 성인 고찰

거제도의 화산암류는 조구적위치를 판별하는 Pearce 외(1977)의 $FeO^T \sim MgO \sim Al_2O_3$ 의 삼각도(Fig. 6A)에서 중성화산암류는 전형적인 조산대안산암(orogenic andesite)의 영역에 도시되고, Wood (1980)의 Hf~Th~Nb 성분도(Fig. 6B)에서도 지판이 침강 섭입하는 지판경계부에서 생성된 마그마로부터 유래한 화산암류의 조구적위치(destructive plate margin)에 점시된다. 즉 연구대상 암체는 대륙 연변부 환경에서 생성된 화산암류에 해당한다.

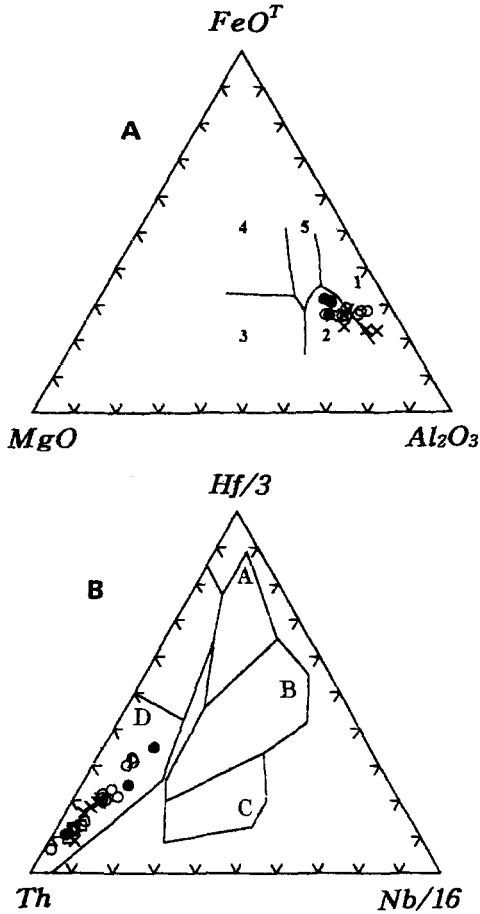


Fig. 6. Tectonomagmatic discrimination diagram for the volcanic rocks. A: $MgO-FeO^T-Al_2O_3$ (Pearce *et al.*, 1977) diagram. [1. spreading center, 2. orogenic, 3. oceanic ridge, 4. oceanic island, 5. continental]. B: Th-Hf-Nb (Wood, 1980) diagram. [A. N-type MORB, B. E-type MORB and tholeiitic WPB and differentiates, C. Alkaline WPB and differentiates, D. Destructive plate margin basalts and differentiates]. Symbols are the same as in Fig. 2.

거제도의 화산암류의 Ba, Nb 및 La 함량을 조산대 안산암과 비교하여 도시하였다. 불호정성(incompatible) 원소인 알칼리토원소 Ba과 Ti군의 La 관계 (Fig. 7A)에서 연구지역 화산암류의 Ba/La 비는 대체로 10~63의 범위에 있다. 이것은 Gill (1981)이 제시한 Ba/La 비 15~80 범위인 조산대, 즉 화산호의 안산암 범위에 일치하고 있으며, medium to high-K 암석 계열과 유사하고, La에 비하여 Ba 함량의 변화 범위가 넓게 나타난다. HFS 원소인 La와 Th의 성분 관계도(Fig. 7B)에서 본 역의 화산암류가 조산대의

안산암질 마그마에서 기원했음을 지시한다. 그리고 Th의 증가에 따른 La의 증가율로서 중앙해령 화산암류와 조산대 화산암류를 구분한 바 있는데, La/Th 비는 중앙해령 화산암류에서는 7~25이고, 조산대 화산암류에서는 2~7이다. 이 기준에 따르면 거제도의 화산암류는 1.5~6.6으로 조산대, 즉 화산호 화산암의 범위 안에 있다. 한편 La와 Nb의 관계도(Fig. 7C)에서 La/Nb 비가 2~4의 범위를 나타내는데, 이는 조산대와 관련된 화산암류를 판단하는 기준인 기술기(La/Nb 비) 2와 5 사이 영역에 집중되어 있다. Zr/Nb 비는 대체로 10.4~53.1 범위를 보여주며, 이는 도호(island arc) 및 대륙호(continent arc) 화산암류의 범위(Zr/Nb = 10~20)와 유사하다.

Rb/Zr비, Nb과 Y은 성숙된 화산호에서 증가하는 경향을 나타내며, 이는 주어진 Rb/Zr에서도 Nb 농도가 화산호 성숙도가 커짐에 따라 증가함을 보여준다. 따라서 Brown 등(1984)은 Nb의 함량과 Rb/Zr 비가 증가함에 따라 화산호의 구조조적 위치의 차이가 있음을 착안하여 원시적 도호 및 대륙호(primitive arc or continental arc), 정상적 대륙호(normal continental arc)와 성숙된 대륙호(mature continental arc)로 나누고, 이 순서로 점점 성숙도가 커진다고 하였다. 거제도 화산암류의 구조조적 위치를 도호 또는 대륙호의 단계를 파악하기 위해 이 판별도에 도시하면 정상적인 대륙호의 영역에 해당되어, 이들 화산암류가 일반적인 대륙호 환경에서 생성되었음을 지시해 준다(Fig. 7D).

이러한 정상적인 대륙호변호의 지체구조적인 환경에서의 기원마그마의 형성에 관여될 수 있는 물질은 맨틀, 섭입해양판 그리고 대륙지각이 될 것이며, 마그마의 성질을 결정짓는 요소는 이들의 부분용융, 혼연 및 다른 마그마와의 혼합 등이 될 것이다. 앞에서 살펴본 바와 같이 거제도 지역의 화산암류는 전형적인 조산대안산암류의 분포를 보이며, 희토류원소의 조성에서 Eu의 거동은 이들 화산암류가 동원마그마로부터의 분화산물일 가능성을 시사한다. 또한, 이 지역의 화산암류의 Ba/La비가 10~63로서 알칼리토원소인 Ba가 부화되어 있음을 나타내고, 반대로 Ti군의 Nb는 감소되어 La/Nb비가 2~4의 분포를 보인다. 이는 화산암류의 기원마그마의 형성과정을 통하여 섭입해양지각과 대륙지각물질이 정도를 달리하면서도 마그

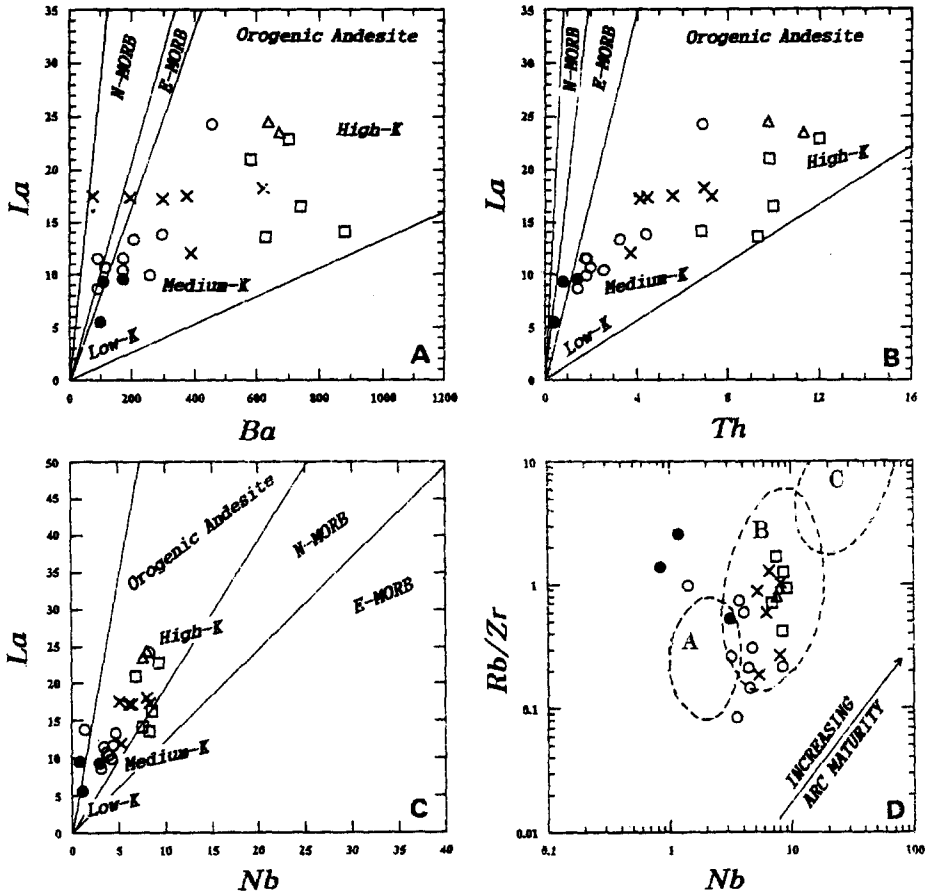


Fig. 7. Schematic diagram of incompatible trace element ratios in volcanic rocks from different tectonic settings [A: La vs. Ba, B: La vs. Th, C: La vs. Nb]. D. Rb/Zr vs. Nb relationship diagram (Brown, 1984) representing arc maturity for the volcanic rocks. [A: primitive island arc & continental arc, B: normal continental arc, C: mature continental arc]. Symbols are the same as in Fig. 2.

마의 성분 결정에 영향을 크게 미치게 된 데 기인하는 것으로 설명할 수 있으며, 또한 도호 마그마의 특성을 지니고 있음을 나타낸다.

거제도 지역에 화산활동을 야기시킨 칼크-알칼리 안산암질마그마의 생성기구는 무엇일까? 현재까지 제안된 안산암의 생성에 대한 암석성인적 모델은 대략 다음의 4가지 즉, 시원현무암질 마그마로부터의 분별결정작용(Osborn, 1959; Cawthorn and O'Hara, 1976; Eggler and Burnham, 1973; Allen and Beottcher, 1978; Gill, 1981), 지각물질의 적절한 부분용융과 마그마의 혼성화작용(Turner and Verhoogen, 1960), 유문암질 마그마와 현무암질 마그마의 혼합작용(Larsen *et al.*, 1938; Kuno, 1950;

Tilley, 1950; Waters, 1955; Bryan, 1968), 그리고 상부맨틀의 부분용융에 의한 안산암질 마그마의 생성(Green, 1976, 1980; Ringwood, 1974) 등으로 나누어진다. 이러한 안산암질마그마의 생성기구들을 근거로 하여 거제도의 화산암류의 생성기구를 고찰해 본다.

거제도에서 소량의 현무암질암이 가장 염기성암에 속하고, 안산암질암이 주된 화산암으로 분포하고 있으며, 주성분 조성이나 미량원소 함량에 있어서 알칼리 조성이 2.1~7.6%로 높고, MgO 조성이 0.1~5.6%로 낮으며, Ni, Cr 등의 호정성 원소 함량이 낮다. 이는 거제도 지역의 화산암류가 맨틀물질이 부분용융되어 생성된 현무암질 시원마그마로부터 직접

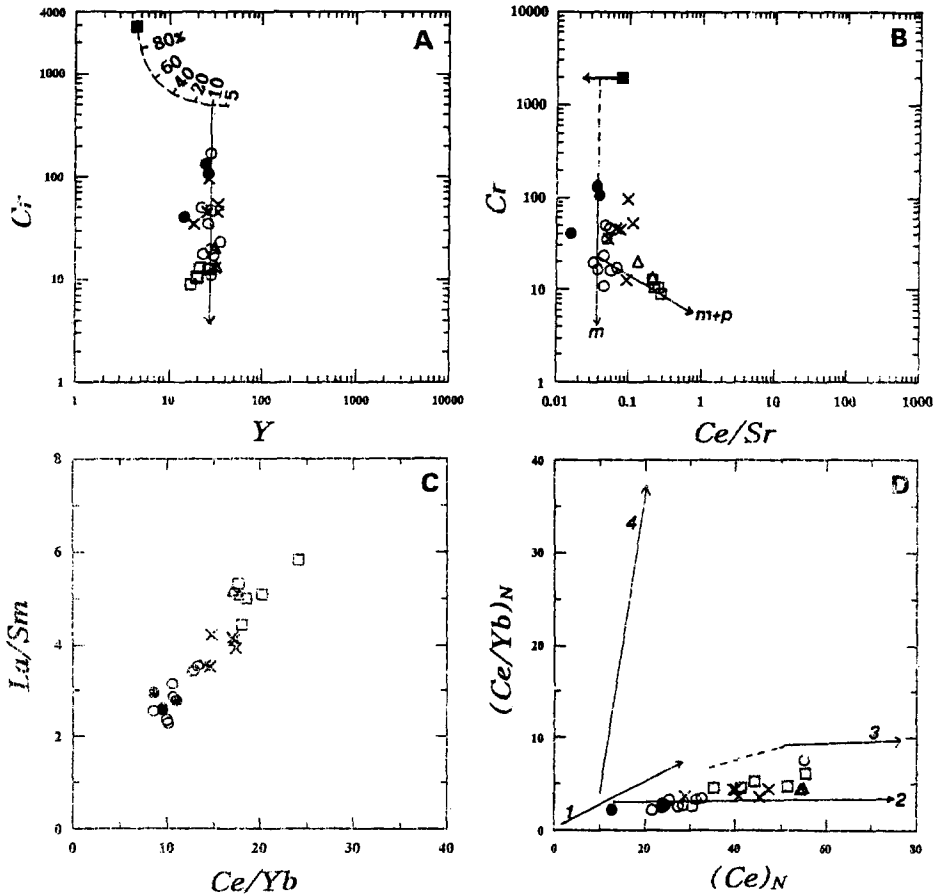


Fig. 8. A; Petrogenetic pathway using relationship of Cr vs. Y for the volcanic rocks. [■: primordial mantle, \perp : partial melting trend, \: fractional crystallization trend]. B; Ce/Sr vs. Cr diagram, [■: primordial mantle, \rightarrow : source enrichment above subduction zone, ---: partial melting trend, \:m: fractional crystallization trend ($ol \pm cpx \pm sp$), \:m+p: fractional crystallization trend ($ol \pm cpx \pm sp + pl$)]. C; Ce/Yb vs. La/Sm diagram, D; $(Ce/Yb)_N$ vs. $(Ce)_N$ diagram (Gill, 1981) distinguishing between various petrogenetic process. [1. compositions of partial melts of peridotite, 2. effects of fractional crystallization, 3. compositions of partial melts of average continental crust, 4. compositions of partial melts of eclogite].

형성되지는 않았다는 것을 시사한다.

원시맨틀의 성분과 거제도 화산암류의 성분을 비교하여 마그마의 성인과 진화 양상을 알아보기 위하여 Gill (1981)이 제시한 Cr과 Y의 상관도(Fig. 8A)에 도시해 보면, 거제도의 화산암류는 원시맨틀의 성분영역에서 벗어나 도시되고, 비교적 일정한 범위의 Y함량을 가지면서 Cr은 현무암에서 유문암으로 감에 따라 점진적으로 감소하며 Cr축에 나란한 변화경향을 나타낸다. 이 경향선을 맨틀물질의 부분용융 곡선과 연결시키면 약 10%의 부분용융 곡선과 연결된다. 이는 이 지역의 화산암류가, 섭입대 상부에서 해양지판으로부터 공급된 불호정성원소로 부화된 맨틀물질

의 직접적인 부분용융의 산물이라기보다는, 이 물질의 약 10% 정도가 부분용융되어 현무암질 시원마그마가 생성된 후, 지각으로 상승하는 과정에 분별되어 안산암질 마그마가 형성되었으며, 이 마그마로부터 계속 분별결정작용 및 혼염 등의 과정이 진행되어 다양한 화산암류가 형성되었음을 시사한다. Pearce (1982)가 제시한 화산암류의 Ce/Sr비와 Cr함량과의 관계도(Fig. 8B)에서 거제도 지역의 현무암 및 현무암질안산암 등이 원시맨틀물질의 Ce/Sr비보다 낮은 값을 가지는 것은 기원마그마가 섭입대 상부에서 해양지각판 물질로부터 부화된 맨틀의 낮은 정도의 부분용융으로 형성되었으며, 현무암질안산암과 안산

암에서는 Y축(Cr)에 거의 나란한 성분변화를 보이는데, 이는 주로 휘석과 감람석의 결정분화작용의 영향을 받았으며, 데사이트 및 유문암질암은 사장석의 결정분화작용의 영향을 많이 받았거나, 혹은 하부대륙 지각에 의한 보다 높은 혼염작용을 받았음을 의미한다. 그리고, 화산암류의 La/Sm비와 Ce/Yb비의 성분 변화도(Fig. 8C)에서, La/Sm비는 분화작용이 진행됨에 따라 점진적으로 증가하는 데(Hildreth and Moorebath, 1988), 본 역에서는 현무암에서 현무암질안산암, 안산암, 데사이트 및 유문암질암으로 감에 따라 증가하며, Ce/Yb비와 정의 상관도를 보이고, Ce/Yb비는 현무암 및 현무암질안산암에서 10 좌우, 안산암에서 15-20, 데사이트 및 유문암질암에서 18-25로 증가하며, 전체적으로 Ce/Yb비는 25 이하의 낮은 값을 보이는 데, 이들 화산암류가 맨틀웨지의 석류석 페리도타이트의 부분용융으로 형성된 시원마그마를 기원으로 감람석-휘석 분화과정을 거쳐서 모마그마가 만들어진 것임을 시사하며, 후기 분화물로 감에 따라 Ce/Yb비가 증가하는 것은 점차 대륙지각 물질의 영향을 많이 받은 마그마의 분화물로 변화하는 경향을 보여주는 것으로 해석된다.

본 역의 현무암질 시원마그마가 상부맨틀 물질의 부분용융에 의해 형성되었는지를 검증하기 위하여 Gill (1981)의 마그마 생성, 진화경향을 판별하는 그림에 적용해 본다. Gill (1981)은 마그마의 생성·진화경향을 나타내기 위해 회토류원소 중에서 Ce와 Yb를 콘드라이트로 규격화한 값으로 ①번 선은 맨틀웨지를 구성하고 있는 석류석 페리도타이트의 평형용융에 따른 성분선, ②번 선은 이 상부맨틀 페리도타이트가 약 10~20% 용융되어 형성된 현무암질마그마의 분별결정화작용 선, ③번 선은 평균 대륙지각 물질로 추정되는 앰피블라이트의 $P_{H_2O} = 5Kb$ 에서의 부분용융선 및 ④번 선은 해양지각의 잔류물로 생각되는 석류석 에클로자이트의 평형용융에 의한 초생마그마의 성분변화선 등을 판별해 주는 $(Ce/Yb)_N$ 비에 대한 $(Ce)_N$ 의 상관도(Fig. 8D)를 제안했다. 본 역의 화산암류를 도식해 보면 대체로 $(Ce/Yb)_N$ 비가 낮으나, $(Ce)_N$ 이 증가함에 따라 ②번 선에 나란하게 완만하게 증가하는 경향을 나타내며, 본 역의 화산암류들이 석류석 페리도타이트가 약 10-20% 용융되어 형성된 현무암질 시원마그마와 같은 연관성을 가지

는 것으로 나타난다. 다만 후기분화물로 감에 따라 $(Ce/Yb)_N$ 비가 다소 높아지나, 대륙지각 물질의 용융으로 생성된 초생마그마의 성분변화선보다는 비가 낮다. 이는 마그마의 분별결정화작용 과정에 지각물질의 도입 효과 즉, 지각물질의 혼염 또는 산성마그마의 혼합이 있었을 가능성을 제시하는 것으로 설명될 수 있다(Gill, 1981). 또한, 거제도 지역 화산암류의 암석조직적 특징 중 사장석 반정의 기질부에 의한 용식 등이 일부 관찰되며, 화산암에 수반되는 화강암류에서 마그마의 혼합(magma mingling)을 지시하는 특징들이 다수 관찰된다(김중선과 이준동, 1995). 또, 화산암류의 SiO_2 에 대한 각 산화물의 변화경향은 MgO 와 P_2O_5 를 제외한 Al_2O_3 , TiO_2 , total FeO, CaO 등은 거의 직선상으로 감소하는 경향을 나타내고, K_2O , total alkali는 거의 직선상으로 증가하는 경향을 보여준다(Fig. 3). 이러한 특성들은 마그마 혼합(Anderson, 1941, 1976; Kuno, 1936, 1950; Eichelberger, 1975, 1978; O'Hara, 1977; Kushiro and Sato, 1978; Mac-Birney, 1980)의 가능성을 시사한다.

거제도 지역의 화산암류는 해양지각판 물질로부터 부화된 맨틀물질이 약 10% 정도의 부분용융으로 형성된 현무암질 시원마그마를 기원으로 하여 이 시원마그마가 지각으로 상승하는 과정에서 분별되어 안산암질 마그마를 형성하였으며, 이 마그마로부터 계속 분별결정작용의 과정을 통하여, 약간의 동화작용 및 마그마 혼합 등을 겪으면서 다양한 화산암류를 형성한 것으로 해석할 수 있다.

결 론

경상분지 남단에 위치하는 거제도는 백악기의 안산암질 화성쇄설암과 용암류가 교호하여 누적된 성층화산의 패턴을 나타낸다. 안산암질 화성쇄설암은 응회각력암, 라필리응회암으로 구성되어 있고 소량의 응회암층을 협재한다. 안산암질 용암류는 조직 및 구성광물에 따라 치밀안산암, 반상안산암, 사장석안산암과 소량의 휘석 및 각섬석안산암 등으로 구분할 수 있다. 안산암질암은 현무암과 데사이트 및 유문암을 수반하고 있어, 화학조성으로 볼 때, 현무암에서 안산암, 유문암에 이르는 전형적인 칼크-알칼리계열 BAR association을 나타낸다.

거제도의 화산암류는 주성분원소의 변화경향이 SiO_2 의 증가에 따라 거의 직선상으로 증가 혹은 감소하며, 칼크-알칼리계열의 변화경향을 보여준다. 미량 원소를 MORB 값으로 표준화한 spider diagram에서 K, Rb, Ba, Th, Ce 등이 다른 원소들에 비해서 상대적으로 높은 값을 가지는 반면, Nb, P, Ti의 함량이 낮고, 지판의 침강 섭입에 관련된 대륙 연변부나 도호의 조구조환경에 관련된 암석들에 나타나는 특징과 일치한다. 희토류원소를 chondrite에 대해 표준화한 다이아그램에서 본 역의 화산암류는 전체적으로 LREEs가 HREEs에 비해 부화되어 있는 경향을 가지며, 대체적으로 평행한 배열을 보여줌으로 본 암석들은 동원마그마에서 유래한 것임을 나타낸다. 안산암질암은 medium-K 조산대안산암의 영역에 도시되며, 이들 화산암류는 조구조적으로 지판이 섭입하는 정상적인 대륙연변호 환경에서 생성된 칼크-알칼리 안산암질마그마의 화산활동으로 형성된 것이다. 거제도의 화산암류는 해양지각판 물질로부터 부화된 맨틀물질이 부분용융되어 형성된 시원현무암마그마가 지각으로 상승하는 과정에 분별된 안산암질 마그마가 분별정출작용을 거치면서 부분적으로 지각물질의 혼입 또는 마그마 혼합 등의 과정을 거치면서 다양한 화산암류를 형성하였을 것으로 해석된다.

감사의 글

원고에 대하여 건설적인 비평과 도움을 주신 권성택 교수, 그리고, 많은 조언을 주신 이문원 교수, 김진섭 교수에게 감사드린다. 야외조사 및 실내작업에서 많은 도움을 준 황병훈, 김종선 석사, 정남일 군에게도 감사드린다. 이 연구는 1995년도 한국과학재단연구비(과제번호: 951-0404-001-2, 연구책임자: 이준동) 지원에 의한 결과 중의 하나이다.

참고문헌

- 김상욱, 1982, 북부 유천분지내에 분포하는 후기 백악기 화산암류의 암석학적 연구. 서울 대학교 이학박사 학위논문, 133.
- 김상욱, 이재영, 김영기, 고인석, 1991, 남부 유천소분지에 분포하는 백악기 화산암의 암석학적 특징. 지질학회지, 27, 24-39.
- 김상욱, 이재영, 김영기, 1993, 대구-자인 지역에 분포하는 백악기 안산암질암류의 암석학적 연구. 지질학회지, 29, 324-337.
- 김종선, 이준동, 1995, 거제도 화강암체의 마그마 혼합 증거에 관하여, 한국암석학회 제4 차 학술발표회 요약(1995년 9월 22-23일, 부산대학교, 1-29), 10.
- 김진섭, 윤성효, 1993, 부산 일원에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 연구(I). 암석학회지, 2(2), 156-166.
- 민정덕, 김옥준, 윤석규, 이대성, 주승환, 1982, 한국 남부의 백악기말 이후의 화성활동과 광화작용에 대한 판구조론의 적용성 연구. 광산지질, 15(3), 123-154.
- 윤성효, 1988, 華山환상화성암복합체의 발달사 및 콜드론구조. 지질학회지, 24(3), 267-288.
- 윤성효, 1993, 의성분지 중앙부 금성산 화산암복합체의 화산활동과 콜드론구조. 지질학회지, 29, 309-323.
- 윤성효, 차문성, 김진섭, 1991, 부산시 일원의 백악기 화산-심성활동에 관한 연구. 대한지질학회 제46차 정기 학술발표회 발표논문요약, 지질학회지, 27(5), 523.
- 윤성효, 김진섭, 김영라, 1994, 부산 일원에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 연구(II). 한국지구과학학회지, 15(5), 356-365.
- 윤성효, 고정선, 김영라, 1996, 부산 남부일원의 백악기 안산암질암에 대한 암석학적 연구. -송도-다대포지역을 중심으로-, 한국지구과학학회지, 17(6), 472-488.
- 원종관, 1968, 경상분지에서 백악기 화성활동에 관한 연구. 지질학회지, 4, 215-236.
- 원종관, 지정만, 김수진, 윤선, 소철섭, 김형식, 1980, 1:5만 거제-울포지질도폭 및 설명서. 자원개발연구소.
- 이상만, 김상욱, 진명식, 1987, 남한의 백악기-제3기 화성활동과 지구조적 의미. 지질학회지, 23, 338-359.
- 차문성, 1976, 부산지역의 불국사 산성화성암류의 암석학적 연구. 광산지질, 9(2), 85-106.
- 차문성, 윤성효, 1988, 한반도의 화산암물구조 및 환상복합암체에 관한 연구. 지질학회지, 24(특별호), 67-86.
- 황상구, 1991, 유천소분지 중앙부의 백악기 화산암류에 대한 화산학적 및 암석학적 연구. 경북대학교 박사학위논문, 199.
- 황상구, 김상욱, 1994a, 밀양-양산지역 백악기 화산암류의 암석학적 연구(I): 암석조구조적 위치. 지질학회지, 30(3), 229-241.
- 황상구, 김상욱, 1994b, 밀양-양산지역 백악기 화산암류의 암석학적 연구(II): 암석성인. 지질학회지, 30(6), 563-577.
- Allen, J.C. and Boettcher, A.L. (1978) Amphiboles in andesite and basalt: II. Stability as function of P-T-fo. Am. Mineral., 63, 1074-1087.
- Anderson, A.T., 1976, Magma mixing: Petrological process and volcanological tool. J. Volcanol. Geotherm. Res., 1, 3-33.
- Anderson, C.A., 1941, Volcanoes of the Medicine Lake Highland, California. Univ. Calif. Dept. Geol. Sci. Bull., 25, 347-442.

- Brown, G.C., Thorpe, R.S. and Webb, P.C., 1984, The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arc and comments on magma sources. *J. Geol. Soc. London*, 141, 413-426.
- Bryan, W.B., 1969, Materials balance in igneous rock suite. *Carnegie Inst. Washington Yearb.* 67, 241-245.
- Cawthorn, R.G. and O'Hara, M.J., 1976, Amphibole fractionation in calc-alkaline magma genesis. *Am. J. Sci.*, 276, 309-329.
- Eggler, D.H. and Burnham, C.W., 1973, Crystallization and fractionation trends in the system Andesite-H₂O-CO₂-O₂ at pressures to 10 Kb. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 84, 2517-2532.
- Eichelberger, J.C., 1975, Origin of andesite and dacite: Evidence of mixing at Glass Mountain in California and at other circum-Pacific volcanoes. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 86, 1381-1382.
- Eichelberger, J.C., 1978, Andesite volcanism and crustal evolution. *Nature*, 275, 21-27.
- Gill, J.B., 1981, Orogenic andesites and plate tectonics. Springer-Verlag, 336p.
- Green, D.H., 1976, Experimental testing of "equilibrium" partial melting of peridotite under water-saturated, high-pressure conditions. *Can. Mineral.*, 14, 255-268.
- Green, T.H., 1980, Island arc and continental building magmatism: A review of petrogenetic models on experimental petrology and geochemistry. *Tectonophysics*, 63, 367-385
- Hildreth, W. and Moorebath, S., 1988, Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of central Chile. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 98, 455-489.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. Jour. Earth Sci.*, 8, 523-548.
- Kuno, H., 1936, Petrological notes on some pyroxene andesites from Hakone volcano, with special reference to some types with pigeonite phenocrysts. *Japan J. Geol. Geogr.*, 13, 107-140.
- Kuno, H., 1950, Petrology of Hakone volcano and the adjacent areas., *Japan. Geol. Soc. Am. Bull.*, 61, 957-1019.
- Kuno, H., 1966, Lateral variation of basaltic magma type across continental margins and island arcs. *Bull. Volcanol.*, 29, 195-222.
- Kushiro, I. and Sato, H., 1978, Origin of calc-alkaline andesite in Japanese islands. *Bull. Volcanol.*, 41, 576-585.
- Larsen, E.S., Irving, J and Bonyer, F.A., 1938, Petrologic results of a study of the minerals from the Tertiary volcanic rocks of the San Juan region, Colorado. *Am. Mineral.*, 23, 227-257.
- McBirney, A.R., 1980, Mixing and unmixing of magmas. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 7, 357-371.
- O'Hara, M.J., 1977, Geochemical evolution during fractional crystallization of a periodically refilled magma chamber. *Nature*, 266, 503-507.
- Osborn, E.F., 1959, Role of oxygen pressure in the crystallization and differentiation of basalt magma. *Am. J. Sci.*, 257, 609-647.
- Pearce, T.H., Gorman, B.E. and Birkett, T.G., 1977, The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks. *Earth Planet. Sci. Letters*, 36, 121-132.
- Pearce, J.A., 1984, Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. (in Andesites, ed. Thorpe, R.S., John Wiley & Sons. 1-724) 525-548.
- Ringwood, A.E., 1974, The petrologic evolution of island arc systems. *J. Geol. Soc. London*, 130, 184-204.
- Tilley, C.E., 1950, Some aspects of magmatic evolution. *J. Geol. Soc. London*, 106, 37-61.
- Turner, F.J., and Verhoongen, J., 1960, Igneous and metamorphic petrology. McGraw HillBook, 1-285.
- Waters, A.C., Volcanic rocks and the tectonic cycle. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 62, 703-722.
- 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. Letters*, 50, 11-30.

(1996년 11월 10일 접수)

(책임편집 : 진명식)

Petrology of the Volcanic Rocks in Geoje Island, South Korea

Sung Hyo Yun · Joon Dong Lee¹ · Sang Won Lee · Jeong Seon Koh · Yoon Jee Seo

Department of Earth Sciences, Pusan National University,

¹Department of Geology, Pusan National University

ABSTRACT : Andesitic pyroclastics and lava flows are deposited as a part of composite volcanoes by Cretaceous volcanic activity in Geoje Island, off the south coast of Korea. The andesitic pyroclastics are composed of tuff breccia and lapilli tuff with minor intercalated tuff. Lava flows are divided into dense and porphyritic andesite containing phenocrysts of plagioclase, pyroxene, and/or hornblende. The andesitic rocks represent characteristics of calc-alkaline BAR association with basalt, basaltic andesite, andesite, and dacite to rhyolite. Major element variations of the volcanic rocks show that Al_2O_3 , total FeO, CaO, MgO and TiO_2 decrease with increasing SiO_2 , but K₂O and total alkalis increase, and represent differentiation trend of calc-alkaline rock series. In spider diagram, contents of Sr, K, Rb, Ba, and Th are relatively high, but contents of Nb, P, Ti and Cr are low. These petrochemical characteristics are similar to those of rocks from island arc or continental margin related to plate subduction. Chondrite-normalized REE patterns of volcanic rocks are parallel to subparallel, with LREE enriched than HREE, and show gradual increase of negative Eu anomaly from basalt to dacite and rhyolite, suggesting comagmatic fractional crystallization. The magma is considered calc-alkaline andesite magma differentiated from the products of partial melting of enriched mantle material, and volcanics are mainly formed by fractional crystallization with minor effects of assimilation and magma mixing. Andesitic rocks are assumed medium-K orogenic andesites that formed in the tectonomagmatic environment of subduction zone under normal continental margin arc.