

천성산 백악기 화산암류의 암석학적 연구(1)

김진섭 · 성종규

부산대학교 지질학과

요 약 : 본역의 산성화산암류는 원효산용회암과 천성산용회암으로 구분되며 원효산용회암은 주로 라필리용회암, 유리질용회암이며 하부에는 용결구조가 현저하지 않고 상부의 층은 용결구조가 현저한 용결용회암이다. 천성산 용회암은 주로 결정질라필리용회암, 유리질용회암이며 하부에는 장석의 반정이 현저한 암색의 비용결용회암이며 상부의 담색의 용회암은 용결용회암이다.

주원소 산화물을 SiO_2 에 대해 투영해 보면 거의 대부분 연속적인 변화 경향을 보이므로 본역의 화산암의 생성은 분별결정작용과 밀접히 관련되어 있다. 본역의 화산암류의 주성분, 미량 원소 함량 조성 및 Ba/La 비, La/Th비 등은 조산대에서의 화산호의 판별비와 일치하며, 이 중에서도 high-K suite에 속한다. Zr-Th-Nb 지구조 판별도에서 본역의 화산암류들은 지판이 침강 섭입하는 지판 경계부(destructive plate margin)에서 생성된 마그마로부터 유래한 화산암류의 구조적 위치 영역에 도시가 된다. 본역의 화산암류를 형성한 마그마는 맨틀에서 기원하여 해구로부터 비교적 떨어진 거리의 대륙 연변부에서, 섭입 침강하는 해양판의 영향을 받은 것으로 보인다.

서 언

한반도의 동남부 경상분지는 중생대 말에 거대한 화산 활동의 장이었으며 그 결과로 중생 내지 산성화산암류가 넓게 분포되어 있다. 연구 지역인 경상남도 양산군의 천성산과 그 주변 일대에도 안산암질암, 데사이트질용회암 및 유문암질용회암이 넓게 분포되어 있다. 그러나 본역의 화산암류에 대해서 양산 도폭(이민성, 강필중, 1964)에서는 데사이트질용회암을 원효산합각력안산반암, 유문암질용회암을 장석반암으로 기재하고 있다. 뿐만 아니라 근래에는 화산암 및 화산 층서에 대한 연구가 많은 학자들에 의해 수행되어지고 있으며 본역의 화산암류에 대한 새로운 기재도 역시 필요하게 되었다.

본역의 서부에는 북북동 방향의 양산 단층이, 동부에는 동래 단층이 위치하며 그 사이에 원효산(902 m), 천성산(811 m), 정족산(720 m)이 위치하고 있다. 주로 유문암질용회암으로 이루어진 천성산 부근과 데사이트질용회암으로 이루어진 원효산 지역은 단애를 이루며 본역의 북동 및 남서 방향에 위치한 화강암류의 지형은 대체로 완만한 능선을 보이고 있다.

본역의 화산암류에 대한 연구는 층서의 기재와 대비에 대해 도폭지질조사시 수행된 바 있으며(이민성,

강필중, 1964), 한반도의 동남부의 유천소분지를 중심으로 하여 대규모로 분포하는 후기 백악기의 화산암류에 대한 지질학적, 암석학적 연구가 여러 학자들에 의해(원종관, 1968; 차문성, 1976; 김상옥, 1982, 1986; 차문성 외, 1984; 이상만 외, 1987; 김진섭, 1990, 황상구, 1991, 황상구, 김상옥, 1994) 수행되어 왔다. 그리고 본역 부근의 화산 구조에 대한 연구 및 암석학적 연구도 수행되었다(차문성, 윤성효, 1982; 차문성 외, 1984). 이들 연구에서는 화산암류에 대하여 해당 암상을 대표하는 시료를 채취하여 암석화학적 특성을 고찰하였는데, 이는 전체적인 화산암류의 화학 조성을 파악하는 데는 유리하나, 화산 층서에 따른 암석의 성분 변화 및 이를 형성한 마그마의 성분 변화를 고찰하기는 곤란하다고 사료된다.

따라서 본 연구에서는 본역 화산암의 새로운 기재 및 암석 계열, 화산 층서와 주위 암석과의 관계를 밝힐 필요성을 느끼고 야외에서의 관찰 및 기재로 층서를 설정하고, 주성분 및 미량 원소, 희토류 원소에 대한 화학 분석을 통하여 이들 암석들에 대한 암석 성인 및 구조적 위치를 고찰하였다.

본 연구는 야외 작업을 통하여 170 여 개의 표품을 채취하였고, 그 중 전형적인 것을 골라서 70 여 개의 박편을 제작하여 편광현미경 관찰을 하였다. 15개의

표본을 기초과학지원센터에서 X-선 형광분석기(XRF) 및 유도 결합 플라즈마 질량 분석기(ICP/MS)를 이용하여 화학 분석을 하였고, 암편을 다수 함유한 화산력(lapilli)응회암은 암편을 제거 분리한 기질부를 대상으로 화학 성분 분석을 하였다.

일반지질

본역의 지질은 최하위로부터 하양층군에 해당되는 퇴적암류의 호른펠스, 안산암질암, 데사이트질응회암, 데사이트질용결응회암, 유문암질응회암, 유문암질용결응회암, 화강섬록암, 각섬석흑운모화강암, 흑운모화강암, 맥암류의 순으로 구성되어 있다(Fig. 1).

안산암질암은 본역의 남동부인 주진 소류지 부근 및 본역의 북부인 산하동, 북서부 백록리 부근에 소규모로 분포하며, 산성화산암류에 의해 피복되어 있으며

화강암질암에 의해 관입당해 분포한다. 데사이트질응회암은 원효산을 중심으로 북북서에서 남남동으로 분포해 있는데 석계리, 홍룡사, 원효산 등지에 넓게 분포해 있다. 본암은 하부에 비용결응회암이 석계리나 홍룡사 등지의 산록에 분포하며, 홍룡사의 위쪽인 원효산 산록에는 용결응회암이 분포한다. 유문암질응회암은 천성산을 중심으로 북북서에서 남남동으로 분포해 있으며 용연 마을부터 내원사까지의 계곡, 그리고 내원사에서 천성산으로 올라가는 산록이 주 분포지이며 천성산의 동쪽 산록에서는 화강암에 관입당해 있다. 유문암질응회암의 하부는 암청 내지 암록색의 응회암, 결정질응회암, 화산력응회암 및 국부적인 응회각력암으로 구성되며 이는 용연에서 내원사로 이르는 계곡의 노두에서 잘 나타나고 있다. 유문암질응회암의 상부는 내원사에서 천성산 정상까지에서 잘 나타나는데, 담색의 화산력응회암과 용결응회암으로 구성되며, 피아메가 한 쪽 방향으로 길게 신장된 구조를 볼 수 있다. 화강암류는 본역의 북부와 남부에서 화산암류를 관입하고 있으며 이는 화강섬록암, 흑운모화강암, 각섬석흑운모화강암으로 구성되어 있다. 본역에 분포하는 맥암은 산성 암맥과 염기성 암맥으로 나뉘어진다. 산성 암맥은 석영, K-장석, 흑운모의 세립 입자들로 구성되어 있으며, 염기성 암맥은 산하동에서 북쪽으로 나 있는 계곡의 바닥에서는 북북서로 약 30 cm의 폭으로 관입하여 있다. 본역 주변의 화강암류의 Rb-Sr 년대는 70 ± 4.2 Ma, 흑운모의 K-Ar 년대는 $63.5 \pm 0.8 \sim 60.4 \pm 0.9$ Ma(Lee, 1991)로 백악기말에서 고제3기에 화산-심성 활동이 일어났음을 의미한다.

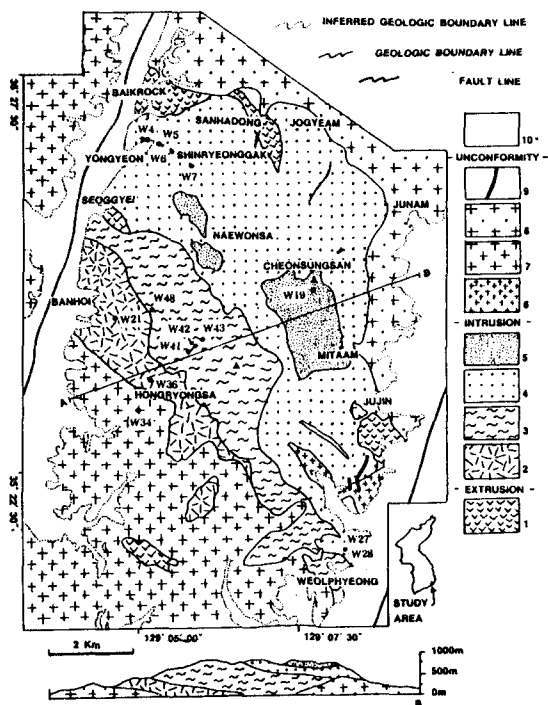


Fig. 1. Analysed sampling sites and Geological map of the Cheonsungsan area (modified from Hwang, 1980). (1:Andesitic rocks, 2:Dacite tuff, 3:Dacite welded tuff, 4:Rhyolite tuff, 5:Rhyolite welded tuff, 6:Granodiorite, 7:Hornblende biotite granite, 8:Biotite granite, 9:Dike 10:Alluvium)

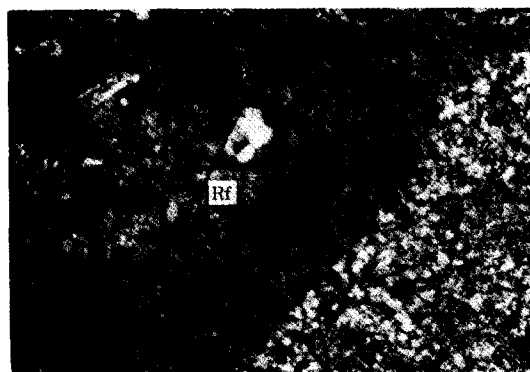


Plate 1. Photomicrograph of Wonhyosan tuff showing parataxitic texture (open nicols). Rf:Rock fragment. (The width of photo is about 3.2 mm, Plate 1-4).

유문암질응회암 및 데사이트질응회암을 본 연구에서는 그 주요 분포지를 따라 각각 천성산응회암과 원효산응회암으로 칭한다. 황수진(1980)의 연구에서는 천성산응회암보다 원효산응회암이 상부라고 하였으나, 야외 분포 산상 및 원효산응회암의 암편이 천성산응회암에서 발견되는 관계로(Plate 1) 원효산응회암보다 천성산응회암이 상부이다.

화산층서 및 암석기재

안산암질암류

안산암질암은 본역의 동남부 주진 소류지 부근과 중앙부의 산하동, 북서부의 백록리에 소규모로 분포되어 있다. 주진 소류지 부근의 본암은 암흑색이며 장석의 반정을 함유하고 유문암질응회암에 의해 피복되어 있다. 경하에서 사장석이 1~2 mm의 크기로 반정을 이루며, 드물게 각섬석의 반정도 나타난다. 녹염석이 사장석의 벽계면을 따라 발달되어 있으며 사장석의 내부는 일부가 견운모화 되어 있다. 사장석은 대부분 알바이트 쌍정이고, 반정을 이루는 사장석 중에는 누대구조를 나타내는 것도 있으며, 그 성분은 안데신이다. 기질은 0.1 mm 이하의 미세한 사장석의

미정으로 구성되고 조면암질 석리를 나타낸다.

산하동과 백록리 부근에 소규모로 분포하는 본암은 녹색 내지 흑록색을 띠며 안산암용암 및 안산암질 각력암으로 구성된다.

산성화산암류

산성화산암류는 크게 데사이트질응회암, 유문암질응회암으로 나누어진다. 데사이트질응회암은 홍릉사 부근에서 원효산 산록에, 유문암질응회암은 내원사 계곡 및 천성산 산록에 넓게 분포한다.

산성화산암류에 대한 모드의 분석치는 Table 1과 같다. 원효산응회암은 주로 천성산응회암에 비하여 암편의 양이 많은 화산력응회암이다.

원효산응회암은 흑색의 유리질 기질에 장석이 반정으로 들어 있고, 편광현미경에 의한 관찰에서 본암을 다시 돌로 구분할 수 있는데 용결 구조가 잘 나타나지 않는 하부의 데사이트질응회암과 용결 구조가 뚜렷한 상부의 데사이트질용결응회암(Plate 2)으로 나눌 수 있다.

원효산응회암의 하부인 데사이트질응회암은 주로 석질화산력응회암과 유리질응회암으로 구성된다. 홍릉사 입구에서 석질화산력응회암은 불국사화강암에

Table 1. Modal compositions of volcanic rocks in the Cheonsungsan area (%).

Sample No.	Rock type	Matrix (Glass)	Rock fragment	Phenocryst				Rock texture
				Qtz	K-fd	Pl	Etc	
W23	dacite tuff	63.1	16.3	1.7	15.1	0.8	3.0	cryptocrystalline
W41	dacite welded tuff	60.4	33.9	0.7	4.4	0.2	0.3	parataxitic
W48	dacite welded tuff	58.7	21.0	2.4	18.0	9.7	-	parataxitic
W7	rhyorite tuff	92.2	3.9	1.0	2.1	0.6	-	cryptocrystalline porphyritic
W8	rhyorite tuff	86.5	0.7	3.3	6.0	3.0	0.3	cryptocrystalline porphyritic
W12	rhyolite welded tuff	61.8	13.3	3.9	13.9	2.4	4.6	parataxitic
W19	rhyolite	88.6	0.3	3.2	7.1	0.1	-	cryptocrystalline
W6	rhyolite	99.4	-	-	-	0.5	-	spherulitic flow structure

의해 관입당해 있고, 유리질의 기질에 장석의 반정 및 화산력 크기의 암편을 많이 함유한다. 유리질 물질의 뚜렷한 유동 구조는 발견되지 않는다. 홍릉사 입구에 분포한 석질화산력응회암의 주향과 경사는 EW, 14 N으로 내원사쪽으로 향하는 방향을 취한다. 석질화산력응회암은 안산암의 암편을 많이 함유하고, 화산력응회암의 하부에는 박층의 세립질 강회응회암이 발견된다.

반회 지역에서 나타나는 유리질응회암은 유리질의 기질에 장석의 반정이 포함되어 있고 유동 구조가 뚜렷하게 발달한다. 유리질화산력응회암이 협재되며 이는 유리질응회암과 함께 흑색의 치밀한 기질을 가지며 피아메가 유동 구조의 방향과 평행하게 신장되어 보이는 것이 풍화면에서 잘 관찰된다.

원효산 응회암의 상부는 데사이트질용결응회암으로 용결화산력응회암이 대부분이다. 암청색 내지 흑색인 용결화산력응회암은 홍릉폭포의 윗부분에서부터 원효산의 서쪽 산록을 덮고 있으며 풍화면에서 화산력이 두드러져 보이고 백색의 장석 반정을 다량 포함한다. 경하에서 안산암질암의 암편 및 퇴적암의 암편이 발견되며 그 주위로 유리질물질이 용결되어 신장된 파라텍시틱 석리가 뚜렷이 관찰된다.

천성산응회암은 흑색 혹은 암청색의 유리질 기질에 장석의 반정이 들어 있는 하부 층과 담회색 내지 담황색의 기질에 길게 신장된 피아메가 발달한 상부 층으로 구분된다. 기존의 지질 도록(이민성, 강필중, 1964)에서 장석 반암으로 기재된 천성산응회암은 안산암질암의 위를 덮고 있다고 해석되었으나(황수진, 1980) 본 연구에서는 암상이 응회암질암이 우세하

로 이를 유문암질응회암(Le Maitre, 1984)으로 분류하였다. 천성산응회암은 데사이트질응회암인 원효산 응회암의 상부에 놓이며, 하부의 유문암질응회암과 상부는 유문암질용결응회암으로 나눌 수 있다.

하부의 유문암질응회암은 결정유리질응회암(crystal vitric tuff)이 대부분이며 장석 반정이 잘 발달하고 유리질 기질을 가진다. 경하에서는 은미정질의 기질에 K-장석 및 석영의 반정을 함유하며 퇴적암 및 안산암의 암편, 그리고 데사이트질응회암의 암편을 포함하고 있다. 천성산의 동쪽 산록에서 본암은 데사이트질용결응회암의 암편을 함유하고, 세립의 석영립과 유리질로 구성된 화산력응회암이다(Plate 1).

상부인 천성산 정상 부근의 암석은 하부의 것과 현저한 차이를 보이는 담황색 내지 담회록색의 응회암이다. 암편의 유동 구조가 현저하며, 경하에서 많은

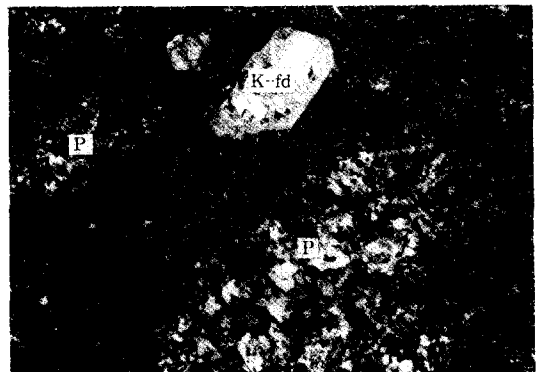


Plate 3. Photomicrograph of devitrified pumice in Cheonsungsan tuff (crossed nicols). P; Devitrified pumice.

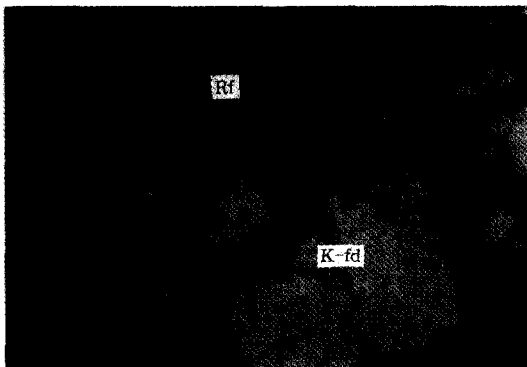


Plate 2. Photomicrograph of Wonhyosan tuff fragment in Cheonsungsan tuff (crossed nicols).

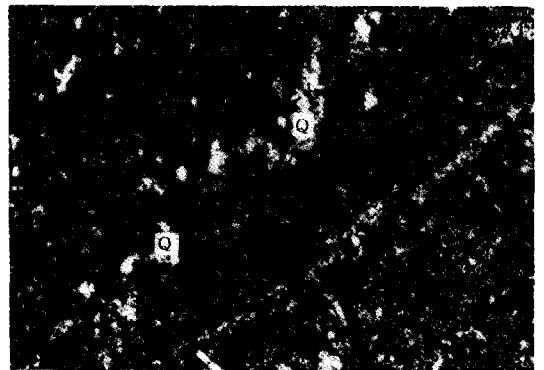


Plate 4. Photomicrograph of Cheonsungsan tuff. Quartz aggregates are arranged in the flow direction (crossed nicols). Q; Quartz.

석영립(quartz aggregates)이 한 방향으로 배열되어 나타난다. 이는 압축 신장된 부석편의 탈파리화작용에 의한 것으로 해석된다(Plate 3, 4). 본 응회암은 천성산의 서쪽 산록에서 유문암질응회암의 상부에 놓여 있고, 장식 반정 주위로 파라텍시틱 석리가 현저히 나타나는 유문암질용결응회암이다. 본암은 용연에서 유동 구조를 잘 보여주는 유리질 유문암에 의해 관입되어 있다.

지화학적 특징

본역에 분포하는 화산암류의 주성분 원소 및 CIPW 노옴은 Table 2와 같으며, 미량 원소의 조성은 표 3, 희토류 원소의 조성은 Table 4와 같다.

본역의 화산암을 변질에 저항력이 비교적 강한 Zr, TiO₂ 등을 사용한 Winchester와 Floyd (1977)의 분류 표에 도시한 결과(Fig. 3) 원효산응회암은 데사이트의 영역에, 천성산응회암은 유문암의 영역에 도시된다.

주성분 원소

Harker 변화도(Fig. 2)에서 각 산화물은 SiO₂ 성분 이 증가함에 따라 Na₂O와 K₂O 성분을 제외한 모든 성분은 급격하게 또는 완만하게 그 함량이 감소하는 경향이 있다. Al₂O₃는 안산암에서 산성 암맥까지 21.2 wt%에서 12.1 wt%까지 큰 폭으로 변화한다. FeO*와 MgO는 SiO₂가 증가됨에 따라 각각 9.3 wt%에서 1.4 wt%까지, 4.2 wt%에서 거의 0 wt%까지 감소된다. CaO와 P₂O₅, TiO₂는 SiO₂가 증가함에 따라 각각 8.3 wt%에서 0.1 wt%, 0.36 wt%에서 0.02 wt%, 1.3 wt%에서 0.1 wt%로 감소한다. Na₂O는 3.00~5.00 wt%의 범위 내에서 변화한다. K₂O는 1.31 wt%에서 5.0 wt%로 증가하는 경향을 나타낸다. 주원소 산화물들은 이상과 같이 연속적 변화를 나타낸다. 이는 본역의 화산암들과 관입암들이 안산암에서 데사이트, 유문암으로 분별결정작용에 의해 분화되었다는 것을 시사한다. 본역의 화산암류는 Irvine과 Baragar (1971)의 SiO₂에 대한 알칼리의 변화도에서 비알칼리암 계열에 해당된다(Fig. 4). FeO*(Na₂O+K₂O)-MgO의 변화도에서는 칼크알칼리암의 영역에 해당되며, 칼크알칼리암의 평균치에 유사하다(Fig. 5). 이 변

화도는 위의 Harker 변화도와 함께 본역의 화산암들이 분별결정작용에 의해 분화되었음을 제시한다. SiO₂에 대한 K₂O의 변화도에서 본역의 화산암류는 대부분 high-K 영역에 속한다(Fig. 6).

미량 원소와 희토류 원소

본역의 화산암류의 미량 성분을 MORB의 평균값(Sun *et al.*, 1979)으로 규정화하여 도시해 보면 Fig. 7과 같다. 도호의 화산암들은 다른 조구조적 위치의 화산암에 비하여 K, Ba, Sr, Rb, S, Pb 등이 부화되어 있으며, Ta, Nb, Ti, Zr, Hf 등이 결여되어 있는 특징을 나타낸다. 본역의 화산암류들은 K, Rb, Th, Zr 등이 다소 부화되어 있으나 Ba, Nb, Sr, Hf, Ti 등은 결여되어 나타난다.

본역 화산암류는 칼크알칼리 화산대와 비교하여 K와 Rb 함량이 높고 K/Rb가 낮다. LIL 원소인 K 및 Rb는 HFS 원소인 Zr, Nb, Hf, Y 등에 비하여 중앙 해령에서보다도 조산대의 화산호에서 부화하는 것이 일반적이며, 후기 분화물로 갈수록 결정분화작용에 의해 증가된다. 본역의 K/Rb 비는 131~418의 범위로서 high-K 칼크알칼리 화산호의 값과 일치된다.

본역의 화산암류의 Ba/La 비는 19~73의 범위에 있다. 이는 Gill(1981)에 의한 Ba/La = 15~80의 조산대, 즉 화산호의 범위에 일치하며, high-K암 계열에 속한다(Fig. 8). La에 비하여 Ba 함량의 변화 범위가 넓게 나타나는데 이는 이들 원소가 마그마의 분화 작용에 있어서나 또는 부분 용융을 통한 마그마의 생성에 있어 어떤 특징적인 변화를 보이지 않음을 고려할 때, 대륙 지각 물질이 마그마 형성에 미친 영향이 크다는 사실을 시사한다.

Zr/Nb 비는 대체로 9.38~15.53으로 도호(island arc) 및 대륙호(continent arc)에서 Zr/Nb = 10~20 범위에 집중된다는 것(Gill, 1981)과 일치하고 있다. 그리고 Gill(1981)은 La/Th 비, 즉 Th의 증가에 따른 La의 증가율로서 중앙 해령 화산암류와 조산대 화산암류를 구분한 바 있는데 중앙 해령에서 La/Th = 7~25, 조산대에서 La/Th = 2~7에 이르는 변화를 보인다고 했다. 이 기준에 의하면 본역의 화산암류는 La/Th 비가 1.58~2.80으로 조산대, 즉 화산호의 하한에 해당된다고 볼 수 있다.

Table 2. Chemical compositions and CIPW norms of the volcanic rocks in the Cheongsungsan area (%). (Ba:basaltic andesite, ad:adamellite, AD:acid dike, DT:dacite tuff, DW:dacite welded tuff, RT:rhyolite tuff, RF:rhyolite, An:andesite, Rd:rhyodacite, WT:welded tuff, Tu:tuff)

Sample Type	C6 Ba	W34 ad	W5 AD	W27 RT	W43 DW	W21 DT	W36 DT	W48 DW	W42 DW	W41 DW	W28 RT	W6 RF
SiO ₂	52.65	61.66	65.97	67.35	67.74	68.07	68.35	68.36	68.59	68.73	70.28	73.44
TiO ₂	1.03	0.61	0.55	0.61	0.40	0.47	0.42	0.43	0.44	0.42	0.61	0.16
Al ₂ O ₃	16.74	15.57	15.27	15.64	15.46	15.02	15.01	14.98	14.93	14.94	13.41	13.23
Fe ₂ O ₃	7.82	4.33	3.33	3.14	2.84	2.86	2.51	2.69	2.72	2.41	3.41	1.62
FeO	1.24	0.69	0.53	0.50	0.45	0.45	0.40	0.43	0.43	0.38	0.54	0.26
MnO	0.26	0.85	0.09	0.06	0.11	0.10	0.09	0.11	0.11	0.11	0.01	0.04
MgO	4.12	1.46	1.02	0.54	0.75	0.59	0.58	0.63	0.67	0.66	0.39	0.23
CaO	8.14	2.52	3.12	2.21	2.31	1.83	1.69	1.83	2.00	1.67	1.91	0.78
Na ₂ O	3.59	3.34	3.99	4.55	4.31	4.45	4.08	4.78	4.50	3.21	3.00	4.13
K ₂ O	2.20	4.04	3.00	3.63	3.61	3.33	3.62	3.40	3.52	5.38	2.84	3.87
P ₂ O ₅	0.36	0.28	0.14	0.12	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08	0.10	0.13	0.02
Total	98.15	95.34	97.01	98.34	98.08	97.26	96.84	97.72	97.99	98.01	97.62	97.77
K ₂ O/Na	0.61	1.21	0.75	0.79	0.84	0.75	0.89	0.71	0.78	1.68	0.71	0.94
Q	4.01	19.98	23.47	21.79	23.07	24.89	26.53	22.94	23.88	25.18	31.84	32.65
C	0.00	1.79	0.12	0.50	0.05	0.98	1.52	0.33	0.27	1.04	0.60	0.88
Or	13.00	23.88	17.73	21.46	21.34	19.68	21.40	20.10	20.80	31.80	16.79	22.87
Ab	30.37	28.26	33.76	38.50	36.47	37.65	34.52	40.44	38.07	27.16	33.84	34.94
An	23.07	10.67	14.56	10.18	10.81	8.49	7.80	8.49	9.40	7.63	8.63	3.74
Di	11.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hy	4.86	3.64	2.54	1.34	1.87	1.47	1.44	1.57	1.67	1.64	0.97	0.57
Hm	6.53	2.10	3.05	3.11	2.39	2.56	2.26	2.35	2.39	2.15	3.20	1.27
Mt	1.86	3.21	0.40	0.03	0.65	0.43	0.36	0.48	0.48	0.37	0.30	0.49
Il	1.95	1.15	1.04	1.16	0.76	0.89	0.80	0.83	0.83	0.80	1.16	0.30
Ap	0.85	0.66	0.33	0.28	0.24	0.21	0.21	0.19	0.19	0.24	0.31	0.05
Q	5.7	24.1	26.2	23.7	32.6	27.4	29.3	24.9	25.9	27.4	34.9	34.6
A	61.6	63.0	57.6	65.2	52.2	63.3	62.1	65.9	64.9	64.3	55.3	61.5
P	32.7	12.9	16.2	11.1	15.2	9.3	8.6	9.2	9.2	8.3	9.8	3.9
Sample Type	W7 RT	W19 RT	W4 AD	A1 An	A2 An	RD1 Rd	RD2 Rd	WT1 WT	WT2 WT	T1 Tu	T2 Tu	T4 Tu
SiO ₂	74.13	74.53	78.74	53.02	53.34	73.02	72.60	66.80	66.76	72.52	70.68	78.20
TiO ₂	0.16	0.13	0.13	1.27	1.24	0.25	0.22	0.55	0.50	0.15	0.25	0.24
Al ₂ O ₃	12.70	12.83	11.67	20.86	20.66	15.28	15.56	18.75	18.15	16.48	17.30	12.90
Fe ₂ O ₃	1.62	1.39	1.42	2.50	3.42	0.86	0.84	0.47	0.40	2.63	0.75	2.57
FeO	0.26	0.22	0.23	4.98	4.86	0.70	0.71	2.16	2.28	0.47	0.59	0.87
MnO	0.06	0.02	0.12	0.06	0.05	0.02	0.01	0.04	0.06	0.03	0.11	-
MgO	0.19	0.08	0.22	3.48	3.52	0.35	0.33	0.82	0.74	0.36	0.28	0.13
CaO	0.87	0.65	0.09	6.89	6.70	0.58	0.67	1.58	1.96	0.34	2.07	0.82
Na ₂ O	3.48	3.39	0.21	3.34	3.40	3.76	3.90	4.49	4.30	3.50	3.45	3.30
K ₂ O	4.28	4.53	3.61	1.28	1.30	4.48	4.52	3.36	3.47	1.20	3.20	0.27
P ₂ O ₅	0.03	0.02	0.02	0.30	0.28	0.01	0.01	0.10	0.12	0.04	0.06	-

Table 2. Continued.

Sample Type	W7 RT	W19 RT	W4 AD	A1 An	A2 An	RD1 Rd	RD2 Rd	WT1 WT	WT2 WT	T1 Tu	T2 Tu	T4 Tu
Total	97.77	97.79	96.45	97.98	98.77	99.31	99.37	99.39	98.74	97.72	98.74	99.30
K ₂ O/Na ₂ O	1.29	1.37	17.19	0.38	0.38	1.19	1.16	0.75	0.81	0.34	0.93	0.08
Q	35.44	36.02	63.24	7.27	7.89	32.17	30.59	21.67	22.07	46.42	33.56	56.02
C	0.83	1.22	7.30	2.17	2.15	3.22	3.06	4.60	4.06	8.90	4.54	5.69
Or	25.30	26.77	21.34	7.57	7.68	26.48	26.72	19.86	20.51	7.09	18.91	1.60
Ab	29.44	28.68	1.78	28.26	28.77	31.81	33.00	37.99	36.38	29.61	29.19	27.92
An	4.12	3.09	0.32	32.22	31.41	2.81	3.26	8.53	8.94	1.43	9.88	4.07
Di	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hy	0.47	0.20	0.55	13.76	12.91	1.07	1.09	4.79	4.98	0.90	0.95	0.32
Hm	1.23	1.11	0.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.82	0.0	1.12
Mt	0.56	0.40	0.74	3.62	4.96	1.25	1.22	0.68	0.58	1.18	1.09	2.11
Il	0.30	0.25	0.25	2.41	2.35	0.47	0.42	1.04	0.95	0.28	0.47	0.46
Ap	0.07	0.05	0.05	0.71	0.66	0.02	0.02	0.24	0.28	0.09	0.14	0.00
Q	37.6	38.1	72.9	9.6	10.4	34.5	32.7	21.8	22.4	47.9	34.0	56.4
A	58.0	58.6	26.7	47.6	48.1	62.5	63.8	69.6	68.5	50.6	56.0	39.5
P	4.4	3.3	0.4	42.8	41.5	3.0	3.5	8.6	9.1	1.5	10.0	4.1

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

Sample Type	C6 Ba	W34 ad	W5 AD	W27 RT	W43 DW	W21 DT	W36 DT	W48 DW	W42 DW	W41 DW	W28 RT	W6 RF	W7 RT	W19 RT	W4 AD
Co	44	12	25	11	16	16	8	13	16	12	7	11	13	8	5
Sc	24	7	12	6	6	7	4	6	4	7	13	6	2	3	6
V	327	77	91	84	75	59	69	49	59	74	59	45	40	33	38
Cu	19	29	34	134	29	36	14	24	26	20	31	18	22	14	12
Pb	16	3123	9	11	22	20	30	20	17	22	32	17	18	19	186
Zn	313	3749	67	61	95	98	119	96	84	195	86	53	54	37	820
Rb	234	161	190	72	148	161	136	143	98	195	117	130	149	164	135
Cs	16	3	5	3	5	7	2	6	5	5	2	3	2	3	8
Ba	787	683	546	611	617	659	558	612	549	551	632	591	531	584	765
Sr	566	296	421	94	201	249	183	216	133	219	193	103	31	41	13
Ga	20	16	14	18	17	18	16	15	16	16	11	17	14	14	16
Li	26	28	17	15	18	14	17	18	13	18	17	16	24	12	15
Ta	94	96	124	141	157	148	117	159	118	100	87	142	88	515	138
Nb	14	14	17	18	19	21	17	22	8	18	11	17	14	14	14
Hf	0.3	0.1	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.3	0.4	0.5
Zr	154	23	264	262	213	197	183	216	214	219	150	254	135	143	208
Y	27	20	37	19	27	37	25	33	18	31	38	25	9	14	31
Th	7	4	11	4	12	9	11	11	5	13	11	11	5	11	15
U	3		3	1	3	1	3	3	2	3	2	2	3	2	3
Zr/Hf	513.33	230	440	436.67	335	394	366	432	428	438	500	508	450	375.5	416
Nb/Ta	0.15	0.15	0.14	0.13	0.12	0.14	0.15	0.14	0.15	0.18	0.13	0.12	0.16	0.03	9.10
K/Rb	78.0	208.3	131.0	418.5	202.4	171.7	220.9	197.3	298.1	229.0	201.5	247.1	238.4	229.3	221.0
Rb/Sr	0.41	0.54	0.45	0.77	0.74	0.65	0.74	0.66	0.74	0.89	0.61	1.26	4.81	4.0	10.38

Table 4 REE abundances (ppm) of the volcanic rocks in the Cheongsungsan area.

Sample Type	Chon	C6 Ba	W34 ad	W5 AD	W27 RT	W43 DW	W21 DT	W36 DT	W48 DW	W42 DW	W41 DW	W28 RT	W6 RF	W7 RT	W19 RT	W4 AD
La	0.315	28.21	10.16	26.42	8.38	25.59	25.16	22.46	24.47	11.67	28.65	25.57	17.50	7.90	17.47	26.70
Ce	0.813	60.60	30.65	59.04	22.26	60.04	55.63	54.98	58.35	47.64	58.97	54.85	53.39	24.41	38.50	58.37
Pr	0.116	7.72	2.87	6.33	2.31	5.79	6.77	5.09	6.10	2.68	6.57	6.42	4.17	1.75	3.17	6.00
Bd	0.597	29.90	10.96	26.00	8.79	20.41	23.60	19.60	23.17	9.36	23.97	24.37	15.58	5.04	10.89	20.94
Sm	0.192	5.65	2.51	4.94	2.59	3.64	4.96	3.94	4.92	2.60	4.26	5.16	2.83	1.33	2.14	4.39
Eu	0.072	2.04	0.96	1.31	0.74	1.21	1.97	0.96	1.30	0.91	1.47	1.42	0.73	0.23	0.50	1.14
Gd	0.259	5.67	2.69	5.90	2.65	4.40	5.40	3.55	5.22	2.18	4.58	6.12	3.45	1.26	2.17	4.65
Tb	0.047	0.72	0.48	0.78	0.33	0.55	0.76	0.60	0.74	0.37	0.80	1.03	0.45	0.22	0.30	0.65
Dy	0.325	4.49	3.14	5.46	2.78	4.23	5.13	3.44	5.18	2.80	4.66	6.03	3.35	1.27	1.94	4.15
Ho	0.072	2.78	0.65	1.10	0.56	0.78	0.95	0.84	0.97	0.60	1.11	1.24	0.70	0.28	0.50	0.85
Er	0.213	2.48	1.78	3.18	1.83	2.69	3.02	2.26	3.18	1.72	3.32	3.65	2.04	0.89	1.36	3.07
Tm	0.030	0.32	0.30	0.51	0.30	0.43	0.50	0.42	0.62	0.29	0.48	0.69	0.33	0.17	0.26	0.51
Yb	0.208	2.05	1.98	3.52	2.25	2.64	3.64	2.03	3.45	1.91	3.27	3.86	2.68	1.04	1.64	3.17
Lu	0.032	0.30	0.27	0.54	0.38	0.47	0.49	0.35	0.50	0.31	0.51	0.63	0.37	0.16	0.26	0.50
Y	2.000	27.00	20.00	37.00	19.00	27.00	37.00	25.00	33.00	18.00	31.00	38.00	25.00	9.00	14.00	31.00
Total	5.29	177.93	89.40	182.03	75.15	159.87	173.13	145.52	171.17	103.04	173.62	179.04	132.57	55.01	95.1	166.09
La/Lu	9.7	94.03	37.63	48.93	22.05	54.45	51.35	64.17	48.94	37.65	56.18	40.59	47.30	49.38	67.19	53.40
Ba/La		27.9	67.21	20.7	72.9	24.1	26.2	24.8	25.0	47.2	19.2	24.7	33.8	67.2	33.4	28.7
La/Th		4.0	2.5	2.4	2.1	2.1	2.8	2.0	2.2	2.3	2.2	2.3	1.6	1.6	1.6	1.8
La/Nb		2.0	0.7	1.6	0.5	1.4	1.2	1.3	1.1	0.7	1.6	2.3	1.0	0.6	1.3	1.9

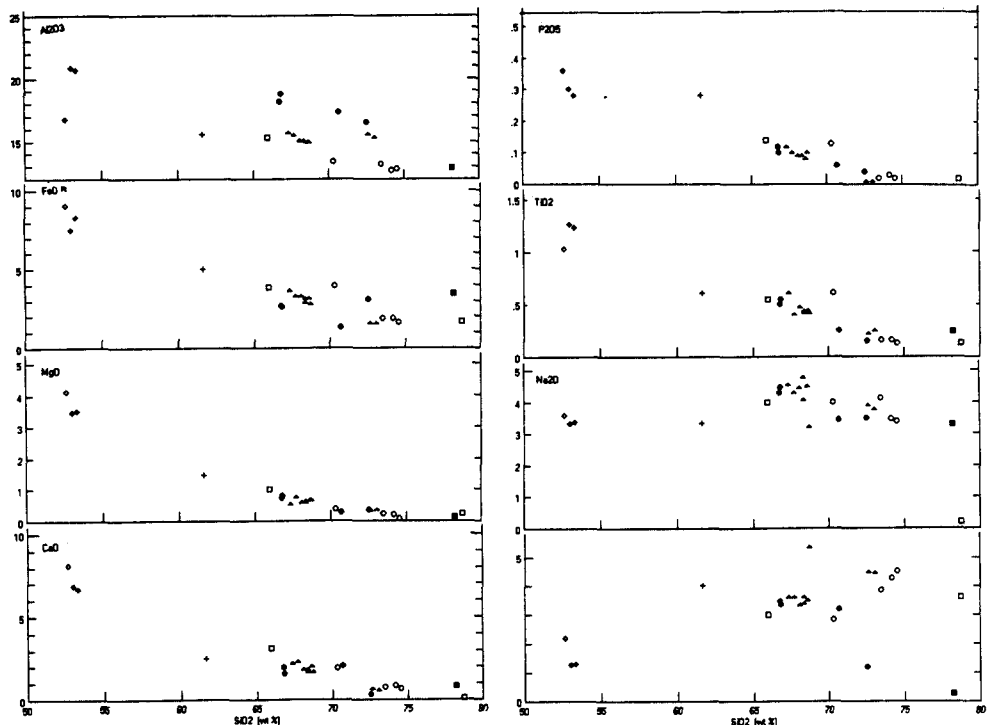


Fig. 2. Major oxides vs. silica diagram (Harker variation diagram) of the study area.
 (Plus;Adamellite, Diamond;Andesitic rocks, Triangle;Wonhyosan tuff, Circle;Cheongsungsan tuff, Rectangle;Acid dike)

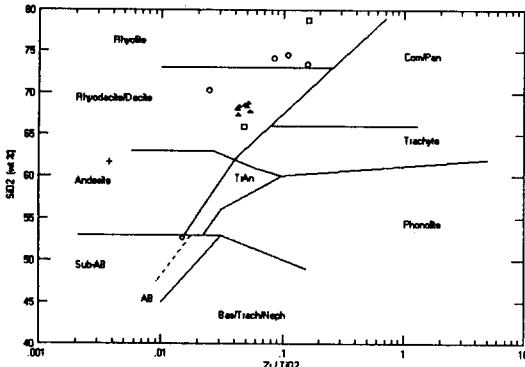


Fig. 3. SiO₂ vs. Zr/TiO₂ diagram of the study area. Symbols are the same as in Fig. 2. (After Winchester and Floyd, 1977).

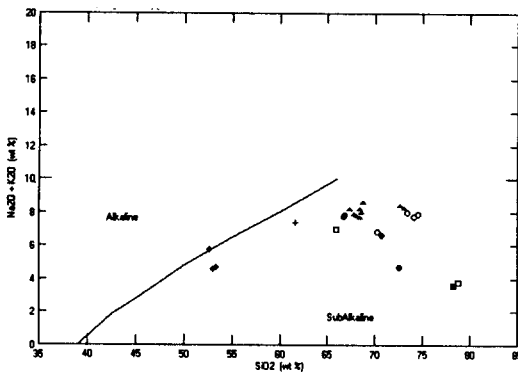


Fig. 4. Na₂O+K₂O vs. SiO₂ diagram of the study area. Symbols are the same as in Fig. 2. (After Irvine and Baragar, 1971).

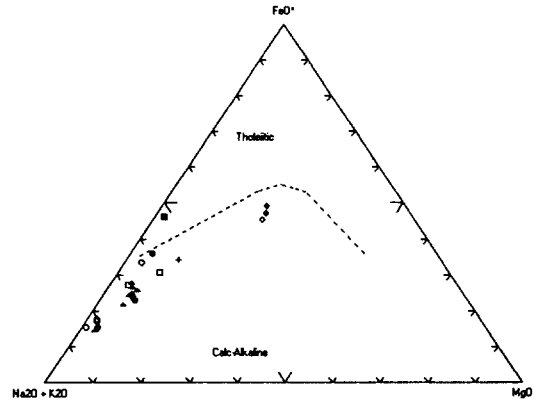
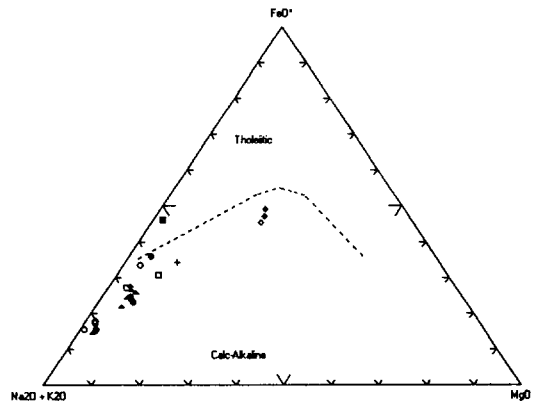


Fig. 5. FeO*-(Na₂O+K₂O)-MgO diagram of the study area. Symbols are the same as in Fig. 2. (After Gill, 1981).

희토류 원소의 패턴을 살펴보면 본역에서 산출되는 화산암류의 각 암석단위 모두는 LREE/HREE 분별작용이 심하며 환태평양 대륙연변부에서 나타나는 high-K 칼크알칼리 계열 화산호 지대와 일치되고 있다. 희토류 원소의 패턴은 전체적으로 sub-parallel한 양상을 보이는데, 이는 이들을 형성한 기원 마그마가 동일함을 암시한다(Fig. 9).

기타 다른 미량 원소에 의한 판별비로서 Rb/Zr 비는 0.27~1.15 범위로 화산호의 범위에 들어간다. 그러나 다른 화산호들에 비해 Sr 함량이 13~421 ppm 범위로서 낮은 편이고, Rb 함량이 72~195 ppm 범위로서 높은 편이며, Th 함량이 4~15 ppm 범위로 높은 편으로 대륙호 범주에 속함을 지시해 준다. 또한, Nb, Hf 등의 HFS 원소가 낮고, Co, Sc 등의 호정성 원소가 고갈되며, K, Rb, La 등의 불호정

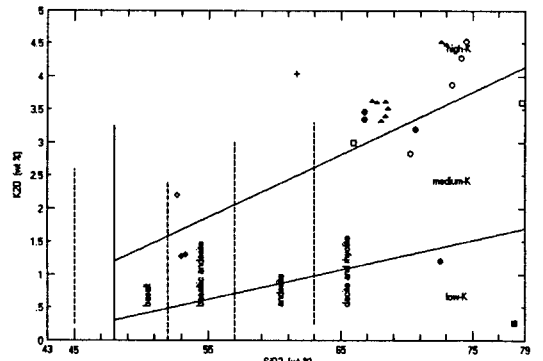


Fig. 6. K₂O vs. SiO₂ diagram of the study area. Symbols are the same as in Fig. 2. (After Le Maitre, 1989).

성 원소가 농집되고 LREE에 비하여 알칼리가 농집되어 있는 것이 큰 특징이다.

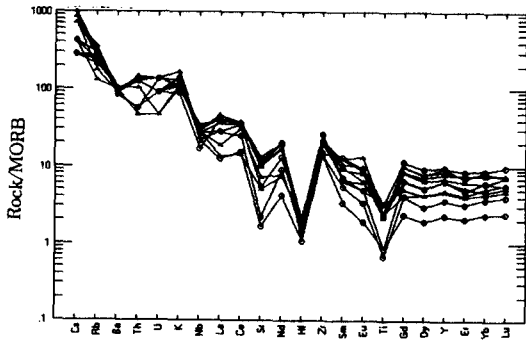


Fig. 7. Spider diagram of the study area. Symbols are the same as in Fig. 2.

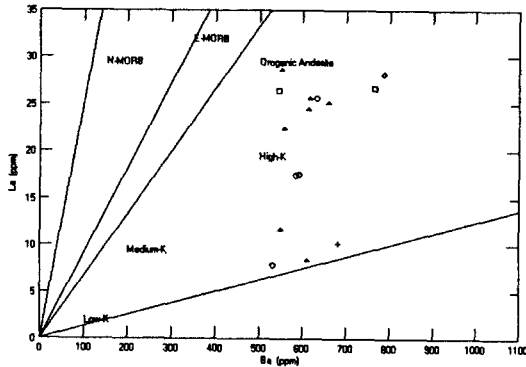


Fig. 8. Ba vs. La variation diagram of the study area. Symbols are the same as in Fig. 2. (After Gill, 1981).

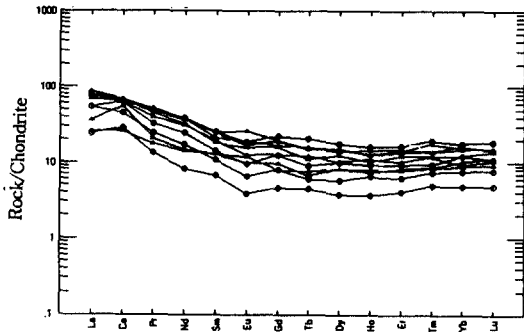


Fig. 9. Chondrite-normalized REE patterns of the study area. Symbols are the same as in Fig. 2.

지구조 환경

Pearce *et al.* (1984)의 판별도에 본역의 화산암류를 도시하면 화산호 영역에 속한다(Fig. 10). Rb은 72~195 ppm 범위로서 증가폭이 넓으면서도 왼쪽

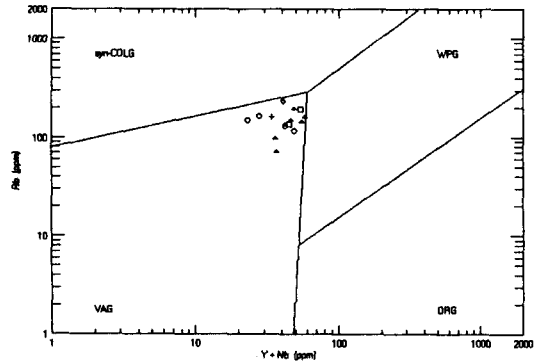


Fig. 10. Rb vs. Y+Nb variation diagram of the study area. Symbols are the same as in Fig. 2. (After Pearce *et al.*, 1984).

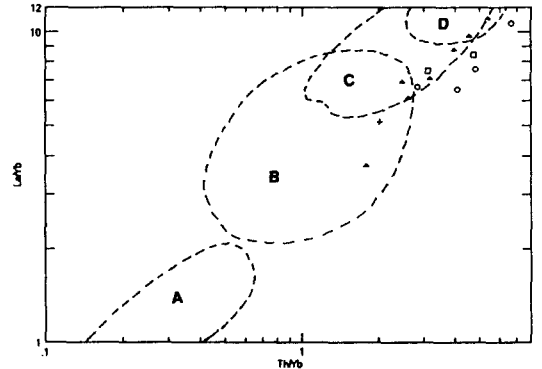


Fig. 11. Rb/Zr vs. Nb variation diagram of the study area. Symbols are the same as in Fig. 2. (A; Primitive oceanic arc & continental arcs, B; Normal continental arcs, C; Mature continental arcs, After Brown *et al.*, 1984).

에, 반면에 Y+Nb는 23~58 ppm 범위로서 거의 일정하면서도 WPG의 경계 부근에 투시된다. 이는 Rb과 Y+Nb가 동시에 증가하는 곳, 즉 WPG에 가까운 대륙 연변부에 해당하는 곳임을 암시한다.

미량 원소 및 희토류 원소의 함량에 의한 판별비, REE 패턴, 판별도 등에 따르면 본역 화산암류는 화산호에 해당되는 조구조적 위치에 놓이며, 대륙호에 해당되는 위치임이 Rb/(Y+Nb)비에 의한 판별도에서 밝혀진 바와 같다. 또한 Ba/La, La/Th와 La/Nb 등에 의한 판별비에서 high-K 조산대에 집중된 은 대륙 지각을 통과하여 분출된 화산암류라는 것을 지시한다.

Brown *et al.*(1984)의 판별도에 투시할 때 정상적

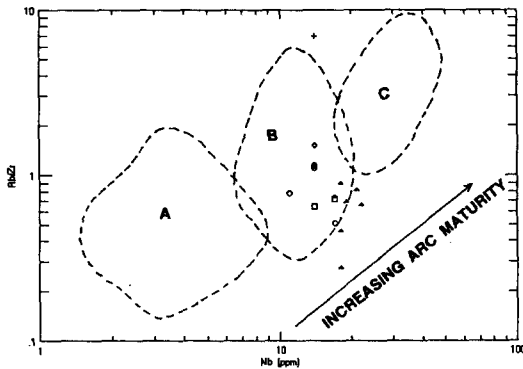


Fig. 12. La/Yb vs. Th/Yb variation diagram of the study area. Symbols are the same as in Fig. 2. (A; Primitive oceanic arc, B; Oceanic arc, C; Continental margin arcs, D; Andean arc, After Brown *et al.*, 1984).

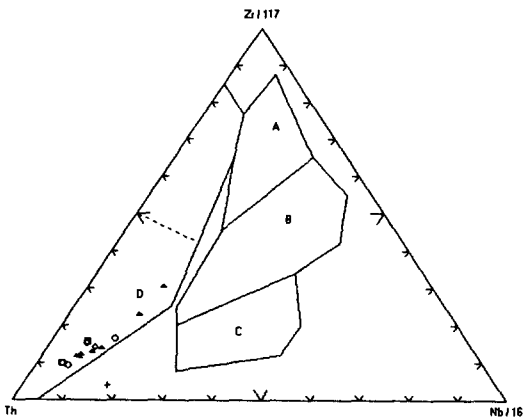


Fig. 13. Zr-Th-Nb variation diagram of the study area. Symbols are the same as in Fig. 2. (A; N-MORB, B; P-MORB, C; Within plate basalts and more differentiated rocks, D; Destructive plate margin basalts and more differentiated rocks, After Wood, 1980).

인 대륙호에 해당되는 영역에 도식되고(Fig. 11), La/Yb 비의 증가에 따른 Th/Yb 비의 증가율에 의한 상관도에 의하면 이의 조구조적 위치가 대륙연변호에 분포되며(Fig. 12), 대륙 연변호보다 더욱 성숙 진화된 안데스호 위치에도 일부 투시된다.

Wood(1980)에 의한 화산암류의 조구조적 위치를 잘 표시할 수 있는 Zr-Th-Nb 성분도(Fig. 13)에서 본역의 화산암류들은 지판이 침강 섭입하는 지판 경계부에서 생성된 마그마로부터 유래한 조구조적 위치 영역에 도시가 된다.

결론

본역의 산성화산암류는 원호산응회암과 천성산응회암으로 구분되며 원호산응회암은 주로 화산력응회암, 유리질응회암이며 하부에는 용결구조가 현저하지 않고 상부의 층은 용결구조가 현저한 용결응회암이다. 천성산 응회암은 주로 결정화산력응회암, 유리질응회암이며 하부에는 장석의 반정이 현저한 암색의 비용결응회암이며 상부의 담색의 응회암은 용결응회암이다.

주원소 산화물을 SiO₂에 대해 투영해 보면 거의 대부분 연속적인 변화 경향을 보이므로 본역의 화산암의 생성은 분별결정작용과 밀접히 관련되어 있다. 본역의 화산암류의 주성분, 미량 원소 함량 조성 및 Ba/La비, La/Th비 등은 조산대에서의 화산호의 판별비와 일치하며, 이 중에서도 high-K suite에 속한다. Zr-Th-Nb 지구조 판별도에서 본역의 화산암류들은 지판이 침강 섭입하는 지판 경계부에서 생성된 마그마로부터 유래한 화산암류의 조구조적 위치 영역에 도시가 된다. 본역의 화산암류를 형성한 마그마는 맨틀에서 기원하여 해구로부터 비교적 떨어진 거리의 대륙 연변부에서, 섭입 침강하는 해양판의 영향을 받은 것으로 보인다.

사사

이 논문은 1996년도 부산대학교 기성회 학술연구 조성비(RIBS-PNU-96-502) 지원에 의하여 부산대학교 기초과학연구소에서 연구 수행되었으며, 전략광물 자원 연구센터의 일부 지원을 받았다. 논문초고를 읽고 건설적인 비평을 제공해주신 황상구 교수와 권성택 교수, 그리고 많은 조언을 해 준 진명식 박사, 윤성효 교수와 이준동 교수에게 감사한다.

참고 문헌

김상욱, 1982, 북부 유천분지내에 분포하는 백악기 화산암의 암석학적 연구. 서울대학교 박사학위논문, 133p.
 김상욱, 1986, 경상분지에서의 후기 백악기 화성활동에 관한 연구. 이상만 교수 송수기념 논문집, 167-194.
 김진섭, 1990, 경상분지 동남부 일원에 분포하는 백악기 화산암류에 대한 암석학적 연구. 지질학회지, 16, 53-62.
 원종관, 1968, 경상분지 내에서의 백악기 화성활동에 관

- 한 연구(I). 지질학회지, 4, 215-236.
- 이민성, 강필중, 1964, 한국지질도(1:50,000) 양산도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 24p.
- 이상만 외, 1987, 남한의 백악기 제 3기 화성활동과 지구 조적 의의. 지질학회지, 25, 225-232.
- 차문성, 1976, 부산지역의 불국사화성암류의 암석학적 연구. 광산지질, 9, 85-109.
- 차문성, 윤성효, 1982, 부산시 일원의 백악기 화산활동, 특히 장산 칼데라 잔존구조에 관하여. 부산대학교 자연과학논문집, 34, 377-390.
- 차문성 외, 1984, 양산군 대운산 함몰체. 부산대학교 사범대학 논문집, 8, 265-284.
- 황상구, 1991, 유천소분지 중앙부의 백악기 화산암류에 대한 화산학적 및 암석학적 연구. 경북대학교 박사 학위논문, 199p.
- 황상구, 김상욱, 1994, 밀양-양산지역 백악기 화산암류의 암석학적 연구(2): 암석 성인. 지질학회지, 30, 563-577.
- 황수진, 1980, 경남, 양산군, 원효산지역의 산성 화성암류에 대한 암석학적 연구. 부산대학교 석사 학위논문, 39p.
- 山成不二磨, 1924, 조선지질도 제1집(밀양, 유천도폭). 조선총독부 지질조사소.
- Brown, G.C. et. al., 1984, The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arc and comments on magma sources. J. Geol. Soc. London, 141, 413-426.
- Gill, J.B., 1981, Orogenic andesites and plate tectonics. Springer-Verlag, 336p.
- 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.
- Lee, J.I., 1991, Petrology, mineralogy and isotopic study of the shallowdepth emplaced granitic rocks, southern part of the Kyoungsang Basin, Korea. - Origin of micrographic granite -. Dr. Sci. thesis, Geol. Institute, Univ. Tokyo, 197p.
- Le Maitre R.W., 1984, A proposal by the IUGS Sub-commission on the Systematics of Igneous Rocks for a chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica(TAS) diagram. Australian Jour. Earth Sci., 31, 243-255.
- Pearce, J.A. et. al., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. J. Petrol., 25, 956-204
- Sun, S.-S., et. al., 1979, Geochemical characteristics of mid-ocean ridge basalts. Earth Planet. Sci. Lett. 44, 119-138.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A., 1977, Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile element. Chemical. 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. Letters. 50, 11-30.

(책임편집 : 권성택)

Petrology of the Cretaceous Volcanic Rocks in Cheonsungsan Area, Korea.

Jin Seop Kim* · Jong Gyu Sung*

Dept. of Geology, Pusan Nat'l Univ., Pusan 609- 735, KOREA

ABSTRACT : This study reports petrography and geochemical characteristics of the Cretaceous volcanic rocks that are distributed in the vicinity of the Cheonsungsan area, Yangsan-Gun, Gyeongsangnam-Do. The Cretaceous volcanic rocks composed of andesitic rocks, Wonhyosan tuff, Cheonsungsan tuff in ascending order. Sedimentary rock is the basement in the study area covered with volcanic rocks. These volcanic rocks are Wonhyosan tuff and Cheonsungsan tuff that represented the early phase of the Bulgugsa igneous activity. Wonhyosan tuff are classified into dacite tuff and dacite welded tuff based on the rock texture and their mineral composition. They are covered with Cheonsungsan tuff. Dacite tuff composed of lithic lapilli ash-flow tuff and vitric ash-flow tuff. Most dacite welded tuff are lapilli ash-flow tuff. Cheonsungsan tuff overlying the Wonhyosan tuff consists of rhyolite tuff and rhyolite welded tuff. Rhyolite tuff are lithic crystal ash-flow tuff and crystal vitric ash-flow tuff with somewhat accidental fragments of andesitic and sedimentary rocks. Rhyolite welded tuff is distinguished from rhyolite tuff by its typical welded fabrics and its rock color. According to petrochemical data, the volcanic rocks in study area belong to high-K orogenic suites. On the discriminant diagrams such as La/Yb versus Th/Yb, these rocks falls into the discriminant fields for the normal continental margin arc.

Key words : lithic lapilli ash-flow tuff, rhyolite welded tuff, high-K orogenic suites, continental margin arc, dacite tuff