

울산 동부 마이오세 당사리화산암류에 대한 암석학적 연구

윤성효 · 고정선 · 박기호 · 이영애

부산대학교 사범대학 지구과학교육과

요약: 울산 동부지역 당사리 화산암류는 다량의 안산암질 화성쇄설암류내에 안산암 용암류가 협재되어 산출된다. 안산암은 유상구조와 판상절리가 특징적으로 나타나며, 일부 관입상에서는 소규모 주상절리가 나타나기도 하였다. 화성쇄설암류는 대부분 화성쇄설성 각력암이 우세하면서 응회질각력암, 라필리 응회암 등이 호층으로 반복되어 층상구조를 나타내면서 분포한다. 안산암은 사장석, 보통회석($Wo_{43.2}En_{41.0}Fs_{15.8}$), 엔스타타이트($Wo_{2.7}En_{65.8}Fs_{31.5}$)와 각섬석 반정이 특징적으로 나타난다. 본 역 안산암은 분류도에서 서브 알칼리 계열의 안산암 영역에 도시되며, SiO_2 에 대한 K_2O 의 성분도에 도시하면 중-K 칼크-알칼리암 계열에 해당한다. 미량 원소 조성과 REE 패턴에서 높은 LILE/HFSE 비를 나타내며, 경희토류 원소는 부화되어 있는 특징을 나타내는 데, 이는 본 역의 화산암류가 조산대 화산호에 기인한 암석이며, 섭입과 연관된 마그마로부터 생성되었음을 강하게 지시한다. 지구조판별도에서 지판이 침강 섭입하는 지판 경계부 영역의 칼크-알칼리 계열로 구분된다. 당사리화산암의 기원이 되는 칼크-알칼리 안산암질 마그마는 섭입대에서 상부맨틀 웨지를 구성하는 석류석 페리도타이트의 약 15%의 부분용융에 의해 생성된 현무암질 초생마그마에서 유래하였으며, 마그마의 상승 중 지각내의 챔버에 머무는 동안 분별정출작용과 지각과의 혼연을 받았음을 유추할 수 있다.

핵심어: 마이오세, 당사리화산암류, 칼크-알칼리계열, 안산암

서 론

우리나라 남부에는 제3기 분지들이 동해안을 따라 소규모로 산재되어 분포하고 있다(김봉균, 1970). 제3기 분지들은 동해의 열개와 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 왔으며(김인수, 1985, 1990; 한중환 외, 1987; 윤 선 외, 1991; Yoon, 1991; 이현구 외, 1992), 동북아시아 지역의 지구조운동이나 이와 관련된 신생대 화산활동에 대한 연구 등 지질학적으로 큰 관심의 대상이 되어 왔다. 제3기 분지는 북쪽으로부터 북평분지, 영해분지, 포항분지, 어일분지 및 울산분지로 불리고 있으며(김봉균, 1970), 울산분지와 어일분지를 합하여 양남분지라 부르고 있다(Yoon, 1986). 본 연구의 대상지역(이하 본 역)은 동해안을 따라 분포하는 제3기 분지들 중 최남단의 것으로 울산광역시 북구 강동동 일대(북위 $35^{\circ} 33' \sim 35^{\circ} 40'$, 동경 $129^{\circ} 23' \sim 129^{\circ} 29'$)이다. 김봉균(1970)은 이 일대의 퇴적분지를 어일분지의 남쪽 일부로 취급하였으며, Yoon(1976, 1979, 1980)은 동부 울산분지라고 불렀다. 손문과 김인수(1994)는 이 제3기 분지가 백악기의 울산층에 의하여 완전하게 둘러싸여 고립되어 있으므로 하나의 독립된 분지로 취급하여 정자분지라고 제안하였다.

본 역내의 제3기 퇴적층에 대해서는 층서 고생물학적인 연구가 활발하게 진행된 바 있고(박양대와 윤형대, 1968; 김봉균, 1968, 1970; Yoon, 1976, 1979, 1980), 화산암에 대한 절대연령 측정, 분지의 형성, 발달사 및 이에 관련된 지질구조, 그리고 고지자기 특성에 대한 연구(진명식 외, 1988; 손문과 김인수, 1994; 손 문 외, 1996)에 의해 화산활동의 시기에 대한 자료가 제공되었다. 본 역을 포함하는 구룡포, 장기지역 및 양남분지 지역의 제3기 화산암류에 대한 암석지구화학적 연구(Kim *et al.*, 1986; Shimazu *et al.*, 1990; 박선애, 1993; 이문원 외, 1986, 1988; 윤성효 외, 1994; 박주희, 1999; Song *et al.*, 1997)가 수행되었다.

본 역내에 분포하는 화산암류에 대한 미량 원소, 희토류 원소의 지구화학적 특성 및 화산암 성인에 대한 연구는 현재까지 미흡하며, 동해안지역 제3기 분지내의 화산암류의 생성관계 및 분화과정 등에 대한 정량적인 연구를 위해서는 더 많은 자료의 축적이 필요하다고 사료되어, 이에 본 연구에서는 울산 동부지역 정자·당사 일대의 화산암류에 대하여 암석학적 연구를 수행하고자 한다.

현미경 관찰과 화학 분석을 목적으로, 화산암류의 노두에서 40여개의 신선한 시료를 채취하였다.

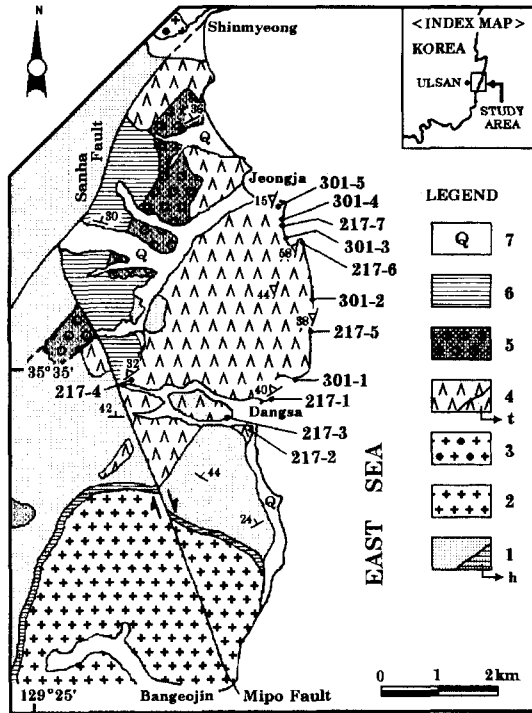


Fig. 1. Generalized geologic map of the study area (modified from Son and Kim, 1994). 1, Ulsan Formation; h, hornfels; 2, Bangeojin granite; 3, Granite porphyry; 4, Dangarsi Volcanics; t, fine tuff; 5, Kangdong Formation; 6, Shinhyeon Formation; 7, Dilluvium and Alluvium. Numbers show the sampling localities.

채취한 시료의 위치는 Fig. 1에 나타내었다.

지질개요

본 역의 지질은 백악기 퇴적암층인 울산층을 기반으로 하여, 이를 관입하여 분포하는 고제3기의 방어진화강암, 화강반암, 그리고 본 연구 대상인 마이오세의 당사리안산암, 이를 피복하여 분포하는 정자역암과 신현층 그리고 제4기 홍적층과 충적층으로 구성된다(Fig. 1).

마이오세의 당사리안산암과 퇴적층들은 약 5×5 km 넓이의 마름모꼴 분지내에 분포하며, 북서 경계와 남서 경계는 각각 N30° E, N20° W 방향의 산하단층과 미포단층에 의하여 구획되어지며, 동쪽은 동해에 접해 있다. 이 분지는 전형적인 반지구형(half graben) 당겨열림분지(pull-apart basin)의 특성을 갖추고 있는 구조분지이다(손 문과 김인수, 1994)

백악기 울산층은 주로 자색-녹회색 셰일, 사암, 응회질 사암, 역암으로 구성되어 있으며, 대부분은 불국사화강암류의 관입의 영향으로 접촉변성작용을 받아 호른펠스로 변성되어 있다. 울산도폭에서는 이 울산층이 대구층, 함안층에 대비된다고 한다.

본 역 남부에서 울산층을 관입하여 분포하는 방어진화강암은 담홍색, 담백색 또는 회색을 띠는 반상혹운모화강암으로 1.5 cm 이하의 사장석, 알칼리장석 및 석영의 반정을 가지며 북부로 감에 따라 점진적으로 세리에이트화강암으로 변화한다(Lee *et al.*, 1997). 경하에서는 석영, 정장석, 사장석, 흑운모로 구성되며, 소량의 저어콘, 불투명 광물들이 관찰된다. 본 암에 대한 흑운모 K-Ar연대는 53.5 ± 1.2 , 50.9 ± 1.1 Ma(Lee *et al.*, 1997)로 알려져 있다.

화강반암은 본 역 남부에서는 방어진화강암을 관입하는 것으로 보고되어 있으며 본 역 북부에서는 산하단층 북쪽에 분포한다. 야외에서는 대부분 수 mm 정도의 석영과 정장석 반정을 다수 포함하는 반상조질을 띠는 것이 특징이나, 부분적으로는 반정이 거의 없고 유백색의 세립질 내지 비현정질인 것도 있다.

울산층을 분출 또는 관입하고 있는 마이오세(22~16 Ma, 진명식 외, 1988; 이현구 외, 1992)의 당사리안산암은 유상구조가 잘 발달하고 반상조질을 나타내는 안산암용암과 이에 수반되어 있는 안산암질 화성쇄설암으로 구성된다. 박양대와 윤형대(1968)는 이들을 장기통으로 생각하고 각각 당시안산암과 당시안산암질 응회암으로 세분한 바 있다. 이들에 의하면 당시안산암은 관입과 분출의 모든 양상을 보여주며, 당시안산암질 응회암은 화산집괴암에 속하는 것들을 포함하고 있다고 한다. 윤 선(1988)은 본 화산암류들 소위 양남분지 화산암류 중 가장 넓은 분포면적을 가지며, 가장 후기의 것이라고 주장되는 어일현무암류(Yoon, 1992)에 포함시켰다. 그는 본 화산암류의 야외산출 상태로 보아, 용암류에 비해 관입암체가 절대적으로 우세하며 대부분의 화산활동은 수저(水底)에서 일어난 것으로 기재하였다. 손 문과 김인수(1994)는 본 화산암류의 야외 관찰을 통하여 화산활동의 대부분이 수저에서 일어났다는 견해에 전적으로 동의하기는 어려우나, 부분적으로는 이 안산암질 화산암이 분출시 수분과 접촉을 일으켰던 것임을 인정하였다. 또한 이들은 안산암질 화산암류와 그 상부의 제3기 퇴적층과는 부정합 관계를 가짐을 확인하였다. 부정합면의 직하부에는 풍화로 인하여 수 cm의 점토대가 생성되어 있는 것으로 보아 화산암류의 분출과 퇴적층의

피복 사이에는 다소간의 시간 간격이 있었음을 유추하였다.

강동층은 상기의 화산암류를 부정합으로 피복하는 하성역암으로 구성되며, 분급이 불량하고, 아각상~아원상의 역으로 구성되며, 사암층을 일부 협재한다. 역들은 울산층의 퇴적암이 90% 이상이며, 화강암과 안산암질 화산암류가 5~10% 정도 관찰된다. 그 상부는 내만성 사암층인 신현층이 정합적으로 덮고 있다(Yoon, 1976).

신현층은 주로 사암과 이암의 호층으로 이루어지며 부분적으로 역암이 렌즈상으로 협재된 양상을 보여주고, 온난 천해환경을 지시하는 early Middle Miocene의 Vicarya-Anadara 화석군집이 다량 산출된다(Yoon, 1976).

제3기 퇴적층의 상부에는 해안선을 따른 곳곳에 제4기 해안단구 및 홍적층이 피복하며, 하천과 계곡을 따라 하상층적층이 퇴적되고 있다.

당사리화산암의 암석 기재

울산 도폭에서는 본 역의 화산암류를 당사안산암과 당사안산암질 응회암으로 구분하였으나, 야외조사 결과 남부지역에서는 당사안산암질 응회암이 비교적 우세하게 분포하고, 대부분의 지역을 차지하는 당사안산암 지역내에서는 다량의 화성쇄설암류내에 안산암 용암류가 교호로 협재되거나 관입하여 분포한다. 교호로 산출되는 안산암 용암류와 화성쇄설암류는 그 경계가 점이적이며, 화성쇄설암류는 전체적으로 화성쇄설성 각력암(pyroclastic breccia), 응회질 각력암(tuff breccia) 또는 라필리 응회암(lapilli tuff)의 산상이 우세하므로 본 연구에서는 당사리화산암으로 통일하고 암석기재는 용암과 화성쇄설암류로 구분하여 기재하고자 한다.

안산암질 용암

본 역 일대에 분포하는 안산암용암은 육안으로 흑색이며, 약간의 사장석과 휘석 반정이 있는 것과 암청색의 치밀한 것이 있다. 구암 남쪽의 반정을 함유한 안산암은 1cm 이하의 사장석 반정을 다량 함유한다. 이들은 곳에 따라 소규모의 주상절리를 발달시키기도 하며, 정자리 해안에서는 N40°E, 15~40°NW 방향으로 발달한 유상구조를 잘 나타내며, 이 유상구조를 따라 발달한 판상절리가 현저하게 관찰된다.

당사리 남부 구암 일대에는 암흑색 유리질의 안산암에 다각형의 짧은 주상절 리가 발달하는데, 울산층의 퇴적암 사이를 관입한 암맥으로 판단된다. 우가 해안에서는 N40°E, 28°NW 방향의 유상구조가 발달하는 안산암 용암류가 발달하며, 육안상 사장석과 소량의 휘석 반정을 관찰할 수 있다. 지역적으로 N24°E, 10°NW, N18°E, 54°SE 수직 유상구조 등이 발달하기도 한다. 구유리 해안에서는 화성쇄설성 각력암내에 안산암이 N6°E, 86~90°의 경사로 관입하여 있으며, 안산암의 주변에는 유상구조가 N30°E, 44°NW, N26°E, 32°NW, N20°E, 58°NW 등으로 나타난다.

경하에서는 사장석(13~41%), 휘석(7%이하)의 반정을 갖는 반상조직을 보인다. 사장석은 누대구조가 우세하며, 알바이트-칼스바드 쌍정을 나타낸다. 누대구조의 중심부는 변질되어 나타나기도 하고, 기질부에 의해 응식되어 벌집구조(sieve texture)를 보이기도 한다. 자형 내지 반자형의 단사휘석과 사방휘석이 나타나며, 시료 217-2에서는 각섬석 반정을 가지는데, 그 외형은 불투명 광물로 교대된 암흑색의 반응환(opaque reaction rim)을 보여준다. 이는 저압에서의 불안정(low-pressure instability)의 결과

Table 1. Modal composition of the Dangsari andesite in the study area.

Sample	groundmass	Phenocryst							Texture
		pl	opx	cpx	ore	others	hb		
217-1	72.9	24.6	0.2	0.5	0.9	0.9	--	Po, Hy	
217-2	87.7	8.6	0.2	0.0	3.3	0.1	0.1	Po, Pt	
217-4	66.6	29.1	1.1	1.9	1.3	0.0	--	Po, Is	
217-5	60.7	30.9	3.7	4.1	0.6	0.0	--	Po, Ig	
217-6	58.6	32.6	3.7	3.9	1.2	0.0	--	Po, Is	
217-7	57.5	34.6	2.0	3.8	2.1	0.0	--	Po, Is	
301-1	60.0	32.7	3.9	2.2	1.2	0.0	--	Po, Ig, Hy	
301-2	53.7	41.2	2.0	1.6	1.5	0.0	--	Po, Is	
301-4	60.4	33.8	3.1	1.6	1.1	0.0	--	Po, Pt, Is	
301-5	59.6	35.3	2.8	0.8	0.9	0.6	--	Po	

Modes based on about 2000 counts per samples.

pl; plagioclase, opx; orthopyroxene, cpx; clinopyroxene, hb; hornblende, Hy; Hyalopilitic, Ig; Intergranular, Is; Intersertal, Pt; Pilotaxitic, Po; porphyritic.

Table 2. Representative microprobe analyses of plagioclase of the Dangarsi andesite in the study area.

Sample	#5	#6	#7	#8	#59	#60	#61	#64	#77	#78	#79	#80	#81	#82	#84	#58
	core	←——→		rim	core	←——→		rim	core	←——→						rim
SiO ₂	52.83	50.86	53.21	53.93	49.56	56.94	54.45	53.40	53.20	52.13	55.49	56.52	54.43	53.62	55.28	49.22
TiO ₂	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.05	0.02	0.08	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.02
Al ₂ O ₃	29.15	30.21	28.94	28.42	31.59	26.58	27.96	28.37	28.76	29.59	27.66	26.85	28.50	28.87	27.96	31.06
FeO	0.53	0.50	0.49	0.61	0.28	0.35	0.37	0.90	0.45	0.43	0.40	0.47	0.40	0.32	0.47	0.32
MnO	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.06	0.00	0.00	0.03	0.02	0.03	0.00	0.00	0.04	0.08	0.00
CaO	12.49	13.84	12.31	11.61	15.14	9.32	11.33	11.84	12.17	12.97	10.13	9.49	10.99	11.73	10.32	15.18
Na ₂ O	4.31	3.70	4.46	4.84	2.91	5.95	4.95	4.60	4.58	4.15	5.44	5.82	4.96	4.71	5.44	2.88
K ₂ O	0.18	0.13	0.20	0.27	0.09	0.32	0.23	0.28	0.19	0.17	0.26	0.35	0.25	0.22	0.34	0.11
P ₂ O ₅	0.16	0.19	0.14	0.10	0.14	0.11	0.13	0.18	0.16	0.14	0.12	0.14	0.14	0.18	0.12	0.20
Total	99.67	99.46	99.77	99.84	99.74	99.67	99.43	99.66	99.53	99.63	99.53	99.66	99.67	99.69	100.04	99.00
Cations based on 8 oxygens																
Si	2.41	2.33	2.42	2.45	2.27	2.57	2.47	2.43	2.42	2.38	2.51	2.55	2.47	2.43	2.49	2.27
Al	1.56	1.63	1.55	1.52	1.70	1.41	1.50	1.52	1.54	1.59	1.47	1.43	1.52	1.54	1.49	1.69
Fe ₂	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
Mn	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	0.00	0.00	0.00
Ca	0.61	0.68	0.60	0.57	0.74	0.45	0.55	0.58	0.59	0.63	0.49	0.46	0.53	0.57	0.50	0.75
Na	0.38	0.33	0.39	0.43	0.26	0.52	0.44	0.41	0.41	0.37	0.48	0.51	0.44	0.42	0.48	0.26
K	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01
Ab	38.10	32.40	39.10	42.30	25.60	52.60	43.60	40.60	40.10	36.30	48.50	51.50	44.40	41.60	47.80	25.40
An	60.90	66.90	59.70	56.10	73.90	45.50	55.10	57.80	58.80	62.70	49.90	46.50	54.20	57.10	50.20	74.00
Or	1.00	0.80	1.20	1.60	0.50	1.80	1.30	1.60	1.10	1.00	1.50	2.00	1.40	1.30	2.00	0.60

로 알려져 있다(Wilson, 1989). 일부 반정의 중심부에는 각섬석이 남아 있기도 한다. 일부 박편에서 유색광물과 사장석은 녹니석, 녹염석 등으로 변질되고 가상만을 남겨 둔 경우도 있다. 석기는 세립의 사장석과 휘석, 불투명 광물, 인회석 등으로 되어 있고, 얇은 도편상(lath)의 사장석 미정이 모여 필로택시틱(pilotaxitic) 또는 입간상(intergranular) 조직을 보여준다.

본 암의 모우드 분석 결과는 표 1과 같다.

화성쇄설암류

화성쇄설암류는 당시리화산암 분포지의 남부 석불사 주변에서 응회암이 우세하게 나타나는 것을 제외하면, 대부분은 화성쇄설성 각력암이 우세하면서 응회질 각력암, 라필리 응회암 등이 호층으로 반복되어 층상구조(layering)를 나타내면서 분포한다.

안산암질 응회암은 당시리 서부 금천 다리에서 석불사에 이르는 작은 능선을 따라 담황백색을 띠면서(신선한 면에서는 담회색을 띠) 부분적으로 라필리 크기 이하의 암편을 함유하고, 사장석 결정편을 가진다. 멀리에서 보면 층리가 나타나는 것처럼 보이나, 근접하여 보면 괴상(massive)의 사암과 유사한 응회암이다. 석불사 일대에서의 주향과 경사는 N80°W, 38°NE를 나타내며, 층리의 발달이 양호한 응회질 세일층(층의 두께는 1m 이하)을 협재한

다. 경하 관찰에 의하면, 대부분 사장석 결정편을 가지고, 부분적으로 소량의 암편을 가지며 기질부는 세립 화산회로 구성된다.

당시리 해안에서는 화성쇄설성 각력암, 응회질 각력암, 라필리 응회암, 응회암의 층상구조가 잘 발달하는데, 암편의 크기는 최대 90 cm×70 cm 이상에서부터 수 mm에 이른다. 주향과 경사는 N40~50° E, 40°NW로서, 경사는 화산암 분포지 및 정자분지의 중심을 향해 있다.

복성 해안가에서는 하부에 화성쇄설성 각력암상(각력의 크기는 93 cm×50 cm, 68 cm×38 cm 등)을 나타내고, 그 상부에 안산암 용암류가 협재되며, 그 상위에 화성쇄설성 각력암(각력의 크기는 70 cm×45 cm, 67 cm×57 cm 등), 안산암 용암류, 화성쇄설성 각력암, 용암류(수평의 판상질리와 층상구조가 발달하는), 그리고 다시 화성쇄설성 각력암이 놓이는 호층구조를 나타낸다.

광물화학

구성 광물의 정량 분석은 대덕연구단지내 기초과학 지원 연구소의 CAMECA SX-51 전자현미 분석기를 이용하여 실시하였다. 조사 전류는 20 nA, 가속 전압 15 kV, 빔직경 1 μm, 측정 시간은 피크인 경우 10초, 그리고 배경치인 경우 5초로 하였다. 기기 분석 오차는 ±1% 미만이고, 측정 오차는 ±3%

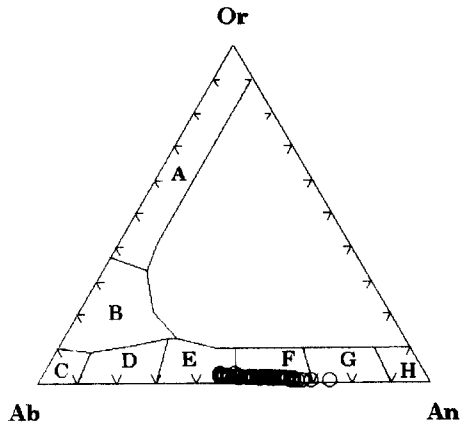


Fig. 2. Plagioclase compositions of the Dangsari andesite in the study area (after Deer et al., 1972). [A, sanidine; B, anorthoclase; C, albite; D, oligoclase; E, andesine; F, labradorite; G, bytownite; H, anorthite]

미만이다. 분석된 광물은 사장석, 휘석 그리고 소량의 자철석과 인회석이다.

사장석

사장석 반정은 $An_{45.1\sim74.0}$ 로 다소 넓은 범위를 보이며(Table 2), Or-Ab-An 단성분 분류도(Deer et al., 1972)에 도시한 결과, 대부분이 라브라도라이트(Labradorite)에 해당되고, 일부는 안데신(Andesine)과 비토우나이트(Bytownite)로 분류된다(Fig. 2). 누대구조를 나타내는 대부분의 사장석은 반정의 내부(core)에서 가장자리(rim)로 갈수록 An의 함량이 증가하다 감소하는($An_{60}\rightarrow An_{67}\rightarrow An_{60}\rightarrow An_{56}$) 또는 감소하다가 증가하고 또 다시 감소하고 증가하는($An_{73}\rightarrow An_{45}\rightarrow An_{55}\rightarrow An_{56}\rightarrow An_{58}$; $An_{59}\rightarrow An_{63}\rightarrow An_{50}\rightarrow An_{47}\rightarrow An_{54}\rightarrow An_{57}\rightarrow An_{51}\rightarrow An_{50}$) 등 감소와 증가를 반복하는 진동누대구조(oscillatory zonal structure)를 보인다.

단사휘석

단사휘석 반정의 평균 조성은 $Wo_{43.2}En_{41.0}Fs_{15.8}$ 으로 Wo-En-Fs 단성분 휘석 분류도(Morimoto, 1988)에서 보통휘석(augite)에 해당한다(Table 3, Fig. 3). 단사휘석의 Mg#는 57.34~62.68이고, CaO의 함량은 20.38~21.48 wt.%으로 매우 균질한 조성을 보인다. TiO_2 와 Na_2O 의 함량은 각각 0.33~0.85

Table 3. Representative microprobe analyses of clinopyroxene of the Dangsari andesite in the study area. (wt%)

Sample	#1	#2	#12	#13	#19	#20	#21	#22	#36	#50	#53	#68	#69	#85
SiO ₂	51.57	51.86	51.47	50.04	52.09	51.66	51.54	51.36	51.86	51.63	51.80	51.33	51.36	51.94
TiO ₂	0.49	0.36	0.50	0.85	0.39	0.45	0.61	0.52	0.47	0.54	0.47	0.37	0.36	0.54
Al ₂ O ₃	2.14	1.58	2.17	3.27	1.52	1.74	1.89	2.11	1.73	2.12	1.57	1.72	1.99	1.96
FeO	9.14	8.61	9.96	10.02	9.07	9.23	9.54	9.38	9.14	9.27	9.22	9.35	9.87	8.95
MnO	0.48	0.41	0.42	0.45	0.53	0.37	0.3	0.43	0.32	0.25	0.43	0.46	0.46	0.41
MgO	14.58	14.46	13.94	13.47	15.03	14.76	14.82	13.86	14.86	14.57	15.01	13.96	13.76	13.96
CaO	20.52	21.38	20.85	20.92	20.92	20.94	20.45	21.43	21.26	21.09	20.38	21.48	20.99	21.10
Na ₂ O	0.32	0.35	0.39	0.43	0.29	0.34	0.35	0.39	0.30	0.32	0.29	0.41	0.38	0.39
K ₂ O	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P ₂ O ₅	0.21	0.24	0.25	0.23	0.29	0.27	0.24	0.26	0.23	0.22	0.22	0.69	0.25	0.27
Total	99.47	99.26	99.97	99.67	100.12	99.74	99.83	99.72	100.20	100.01	99.37	99.77	99.42	99.51
Cations based on 6 oxygens														
TSi	1.93	1.94	1.93	1.88	1.94	1.93	1.92	1.92	1.93	1.92	1.94	1.93	1.93	1.95
TAl	0.07	0.06	0.08	0.12	0.06	0.07	0.08	0.08	0.07	0.08	0.06	0.07	0.07	0.05
M1Al	0.03	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03
M1Ti	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
M1Fe ³	0.04	0.05	0.06	0.08	0.06	0.07	0.06	0.06	0.07	0.06	0.05	0.08	0.06	0.02
M1Fe ²	0.11	0.12	0.13	0.12	0.09	0.10	0.09	0.14	0.09	0.11	0.09	0.13	0.14	0.16
M1Mg	0.81	0.81	0.78	0.75	0.83	0.82	0.82	0.77	0.82	0.81	0.84	0.78	0.77	0.78
M2Fe ²	0.14	0.10	0.12	0.11	0.13	0.13	0.15	0.10	0.12	0.13	0.15	0.09	0.11	0.11
M2Mn	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
M2Ca	0.82	0.86	0.84	0.84	0.83	0.84	0.82	0.86	0.85	0.84	0.82	0.87	0.85	0.85
M2Na	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03
Wo	42.47	44.04	43.12	43.73	42.41	42.76	41.88	44.30	43.10	43.22	41.76	44.23	43.55	44.11
En	41.98	41.45	40.1	39.18	42.39	41.93	42.23	39.86	41.92	41.55	42.80	40.00	39.72	40.61
Fs	15.55	14.51	16.77	17.09	15.20	15.31	15.88	15.84	14.98	15.23	15.44	15.78	16.74	15.28
Mg#	61.47	62.68	58.33	57.34	62.37	61.53	60.84	59.64	61.92	61.12	61.95	59.89	58.23	60.93

Mg# = 100*Mg/(Mg+Fe)

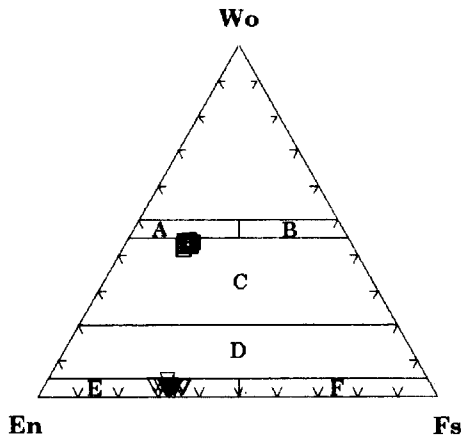


Fig. 3. Pyroxene compositions of the Dangsari andesite in the study area (after Morimoto, 1988). [A, diopside; B, hedenbergite; C, augite; D, pigeonite; E, clinoenstatite; F, clinoferrrosillite]

로, Wo-En-Fs 단성분 휘석 분류도(Morimoto, 1988)에서 엔스타타이트(enstatite)에 해당하고(Table 4, Fig. 3), 사방휘석을 Fs단성분의 함량으로 세분한 Poldervaart(1947)의 분류에 따르면 $Fs_{31.5}$ 로서 자소 휘석(hypersthene: Fs_{30-50})에 해당한다. 이 광물의 Mg#는 51.0~59.3이다.

부성분광물

본 역의 당사리안산암에서 나타나는 부성분 광물은 자철석(magnetite)과 인회석(apatite)이 관찰된다 (Table 5 and 6).

석기를 구성하는 자철석은 TiO_2 (9.7~12.4 wt.%) 함량이 높고 FeO 의 함량은 75.6~80.3 wt.%이다.

인회석은 휘석 반정내 포유물로 나타나며, 분석치는 표 6과 같다.

암석화학

wt.%, 0.29~0.43 wt.%이다.

사방휘석

사방휘석 반정의 평균 조성은 $Wo_{2.7}En_{65.8}Fs_{31.5}$ 으

7개의 시료에 대하여 주성분 원소 분석과 미량 원소 및 희토류 원소 분석을 하였다. 주성분 원소의 분석은 부산대학교내 기초과학지원연구소 부산 분소의 Philips PW 2400 X선 형광분석기를 이용하

Table 4. Representative microprobe analyses of orthopyroxenes of the Dangsari andesite in the study area. (wt%)

Sample	#3	#4	#9	#9-1	#11	#14	#15	#16	#18	#45	#48	#49	#51	#52
SiO ₂	53.53	53.13	53.94	53.08	53.72	53.43	52.91	52.83	53.04	53.00	54.14	52.85	53.16	53.32
TiO ₂	0.14	0.29	0.15	0.21	0.14	0.17	0.22	0.29	0.19	0.28	0.26	0.30	0.26	0.16
Al ₂ O ₃	0.71	1.12	0.73	0.86	0.63	0.97	1.06	1.29	0.79	1.39	0.87	1.29	0.97	0.67
FeO	18.83	19.42	18.53	19.97	19.06	19.46	19.62	19.84	19.37	19.89	17.57	18.49	19.59	19.31
MnO	0.79	0.63	0.56	0.94	0.92	0.84	0.72	0.85	1.01	0.68	0.66	0.55	0.91	0.89
MgO	23.96	23.92	24.74	23.31	23.93	23.79	23.78	23.82	23.71	23.54	25.63	23.49	23.63	23.75
CaO	1.16	1.50	1.58	1.43	1.18	1.24	1.19	1.24	1.19	1.28	1.61	2.38	1.16	1.30
Na ₂ O	0.02	0.0	0.01	0.05	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.05	0.03	0.01
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01
Total	99.14	100.02	100.24	99.85	99.59	99.91	99.55	100.20	99.32	100.13	100.76	99.44	99.72	99.43
Cations based on 6 oxygens														
TSi	1.99	1.96	1.97	1.96	1.99	1.97	1.96	1.94	1.97	1.95	1.96	1.95	1.97	1.98
TAl	0.02	0.05	0.03	0.04	0.02	0.03	0.04	0.06	0.03	0.05	0.04	0.05	0.03	0.02
M1Al	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
M1Ti	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
M1Fe ³	0.00	0.03	0.02	0.03	0.00	0.01	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01
M1Mg	0.98	0.96	0.97	0.97	0.98	0.97	0.96	0.95	0.97	0.96	0.97	0.96	0.97	0.98
M2Mg	0.34	0.35	0.37	0.32	0.34	0.33	0.35	0.36	0.34	0.34	0.42	0.34	0.33	0.33
M2Fe ²	0.58	0.57	0.55	0.59	0.59	0.59	0.58	0.57	0.58	0.59	0.50	0.55	0.59	0.59
M2Mn	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
M2Ca	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.09	0.05	0.05
Wo	2.33	2.97	3.10	2.85	2.36	2.47	2.37	2.45	2.38	2.56	3.13	4.77	2.32	2.59
En	66.92	65.99	67.62	64.62	66.49	65.95	65.96	65.58	65.85	65.38	69.24	65.46	65.69	65.93
Fs	30.76	31.04	29.28	32.54	31.16	31.58	31.67	31.97	31.77	32.06	27.64	29.78	31.99	31.48
Mg#	55.99	55.19	57.18	53.86	55.66	55.01	54.79	54.56	55.04	54.20	59.33	55.9	54.67	55.16

Mg# = 100*Mg/(Mg+Fe)

Table 5. Representative microprobe analyses of ore minerals of the Dangarsi andesite in the study area. (wt.%)

Sample	#37	#38	#39	#40
SiO ₂	0.06	0.11	0.08	0.16
TiO ₂	11.36	11.06	11.43	12.41
Al ₂ O ₃	2.95	2.69	3.13	2.70
FeO	78.70	79.57	76.85	76.52
MnO	0.55	0.43	0.35	0.48
MgO	2.12	1.94	2.51	1.81
CaO	0.04	0.01	0.09	0.04
Na ₂ O	0.01	0.00	0.01	0.03
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.01
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.03	0.00
Total	95.80	95.81	94.48	94.16
Sample	#47	#74	#75	#76
SiO ₂	0.09	0.34	0.09	0.11
TiO ₂	10.79	11.27	11.23	9.69
Al ₂ O ₃	2.93	3.05	2.84	2.44
FeO	78.45	75.62	77.92	80.25
MnO	0.41	0.55	0.46	0.37
MgO	1.99	2.06	2.11	1.65
CaO	0.01	0.06	0.00	0.04
Na ₂ O	0.01	0.01	0.00	0.04
K ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.00
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	94.67	92.97	94.66	94.60

였다. 노음 제산을 위하여 분석된 전체 Fe₂O₃에서 Fe₂O₃를 현무암질안산암은 0.3%, 안산암은 0.35%

Table 6. Representative microprobe analyses of apatite of the Dangarsi andesite in the study area. (wt.%)

Sample	#35	#88
SiO ₂	0.21	0.17
TiO ₂	0.02	0.01
Al ₂ O ₃	0.00	0.00
FeO	0.68	0.32
MnO	0.05	0.07
MgO	0.00	0.00
CaO	55.19	55.30
Na ₂ O	0.15	0.09
K ₂ O	0.01	0.00
P ₂ O ₅	42.58	42.50
Total	98.90	98.47
Cations based on 13 oxygens		
Fe ²⁺	0.05	0.02
Mn	0.00	0.01
Mg	0.00	0.00
Ca	4.72	4.74
Na	0.02	0.01
K	0.00	0.00
Si	0.02	0.01
P	2.88	2.88

로 가정(Le Bas *et al.*, 1986)하여 계산하였다. 미량 원소와 희토류 원소에 대한 분석은 대덕연구단지내 기초과학지원연구소의 PQ3(VG Elemental, U.K) 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS: Inductively

Table 7. Major element abundances (wt.%) and CIPW norm of the Dangarsi andesite in the study area.

Sample	217-2 (○)	217-3 (○)	217-4 (○)	217-5 (○)	217-6 (○)	217-7 (○)	301-1 (○)	911214-7 (◇)	911214-9 (◇)	JE-1 (◇)	JE-2 (◇)
SiO ₂	59.22	60.19	61.07	58.81	58.30	59.37	60.57	52.95	57.82	59.63	59.67
TiO ₂	0.67	0.68	0.74	0.82	0.82	0.79	0.71	0.96	0.59	0.67	0.68
Al ₂ O ₃	17.91	16.36	17.67	18.09	18.30	17.97	17.64	21.24	19.03	18.17	18.16
Fe ₂ O ₃ ^t	6.85	5.97	5.91	6.70	7.05	7.09	6.69	8.26	6.94	6.23	6.08
MnO	0.20	0.16	0.15	0.10	0.11	0.17	0.12	0.27	0.19	0.09	0.13
MgO	2.66	2.18	1.44	2.71	2.93	2.80	2.20	2.11	2.55	2.19	2.13
CaO	6.70	5.63	6.39	6.82	7.13	6.14	5.85	8.88	6.57	5.98	6.10
Na ₂ O	3.11	2.75	3.50	3.35	3.25	3.49	3.39	3.96	3.66	4.20	4.05
K ₂ O	1.20	2.34	1.97	1.83	1.48	1.55	1.96	0.60	1.25	1.73	1.77
P ₂ O ₅	0.27	0.15	0.17	0.16	0.14	0.22	0.16	0.26	0.31	0.21	0.20
L.O.I.	1.62	3.60	1.77	1.03	0.95	0.88	1.13	--	--	--	--
Total	100.40	100.00	100.78	100.43	100.46	100.46	100.43	99.50	98.90	99.09	98.97
CIPW norm											
Q	17.14	19.73	17.61	13.23	13.37	14.56	16.37	3.39	11.79	11.17	11.81
Or	7.21	14.40	11.87	10.92	8.82	9.23	11.74	3.60	7.56	10.40	10.63
Ab	26.76	24.23	30.12	28.63	27.75	29.73	29.01	33.01	31.47	36.04	34.85
An	31.82	26.38	27.10	29.17	31.22	29.01	27.38	38.89	31.09	26.02	26.56
Di	0.31	1.49	3.47	3.33	3.02	0.38	0.87	3.40	0.00	2.30	2.40
Hy	11.33	8.95	4.98	9.35	10.34	11.46	9.48	11.71	13.59	10.38	10.11
Mt	3.53	3.16	3.05	3.44	3.61	3.63	3.43	2.53	2.14	1.90	1.86
Il	1.29	1.35	1.43	1.58	1.58	1.52	1.36	1.87	1.14	1.29	1.31
Ap	0.60	0.33	0.37	0.35	0.30	0.48	0.34	0.61	0.75	0.49	0.47
Mg#	39.88	38.45	32.00	40.87	41.56	40.35	36.01	28.86	38.58	37.56	37.50
D.I.	51.11	58.36	59.60	52.78	49.94	53.52	57.12	40.00	50.82	57.61	57.29

D.I. (differentiation index) is expressed as normative Q+Or+Ab. Symbols are the same as those in Fig. 4.

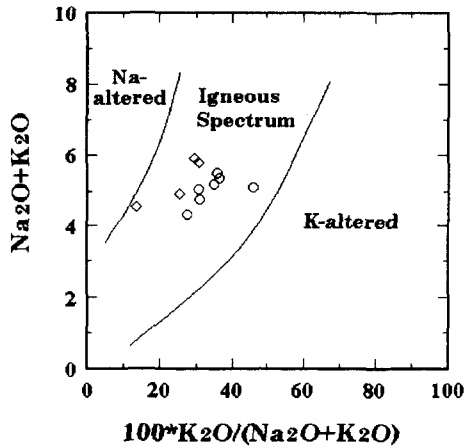


Fig. 4. Na_2O+K_2O vs. $100 \times K_2O / (Na_2O+K_2O)$ diagram for the Dangsari andesite in the study area. The field between solid line (Igneous spectrum) represents the range of variation of modern volcanic rocks (after Hughes, 1973). Symbols; \circ : this study, \diamond : from Song *et al.*(1997)

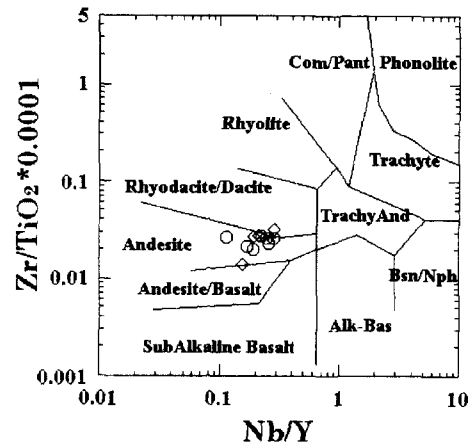


Fig. 5. Nb/Y vs. $Zr/TiO_2 * 0.0001$ diagram for the Dangsari andesite in the study area (after Winchester and Floyd, 1977). Symbols are the same as those in Fig. 4.

Coupled Plasma Mass Spectrometer)로 분석하였다.

주성분 원소

본 역에 분포하는 당사리화산암류의 주성분 원소 분석 결과와 CIPW 노움-광물조성은 Table 7과 같다.

암석 시료는 화학 성분 분석을 위해, 야외에서 신선한 시료를 선택하였고, 이를 실험실에서 박편으로 관찰하여 장석 등의 변질이 없는 신선한 시료를 대상으로 분석하였다. 분석 결과 자료는 암석의 변질에 따른 화학 조성 변화 유무를 알아 보기 위하여 Na_2O+K_2O vs. $100 \times K_2O / (K_2O+Na_2O)$ 다이어그램(Hughes, 1973)에 도시하여 보았다(Fig. 4). 변질이나 변성작용에 의한 원소의 이동이 없는 경우, Fig. 4의 'Igneous spectrum' 범위 내에 도시되었다.

본 역 화산암류의 화학적 분류 및 명명을 위해서 Total alkali vs. silica 분류도(Le Maitre *et al.*, 1989)에 도시하면 한 시료만이 현무암질안산암 영역에 도시되는 것을 제외하고 모두 안산암 영역에 도시된다.

또한, 2차적인 변질작용에 대하여 비교적 저항력이 큰 미량 원소를 이용한 $Zr/TiO_2 * 0.0001$ vs. Nb/Y 다이어그램(Winchester and Floyd, 1977)에 도시해 보면, 대부분의 시료들은 안산암 영역에 도시된

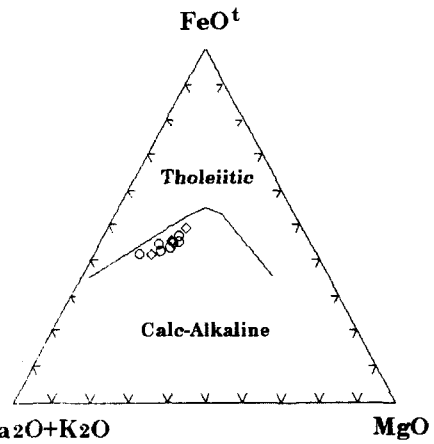


Fig. 6. AFM diagram for the Dangsari andesite in the study area (after Irvine and Baragar, 1971). Symbols are the same as those in Fig. 4.

다(Fig. 5).

한편, total alkali vs. silica 다이어그램에서, 본 역 화산암들은 모두 서브알칼리암 계열(Kuno, 1966; Irvine and Baragar, 1971)에 속한다. Fig. 5에서도 Nb/Y비가 0.65 이하로서 서브알칼리암 계열에 속함을 볼 수 있다. 서브알칼리암 계열은 다시 칼크-알칼리암 계열과 쉐레이아이트암 계열로 구분할 수 있는데, 본 역의 화산암류를 AFM 다이어그램(Fig. 6)에 도시해 본 결과, 분화가 진행됨에 따라 철분과 마그네슘은 고갈되고 점진적으로 알칼리가 증가하는 칼크-알칼리암 계열로 분류된다.

또한 K_2O vs. SiO_2 다이어그램(Fig. 7)에 도시하

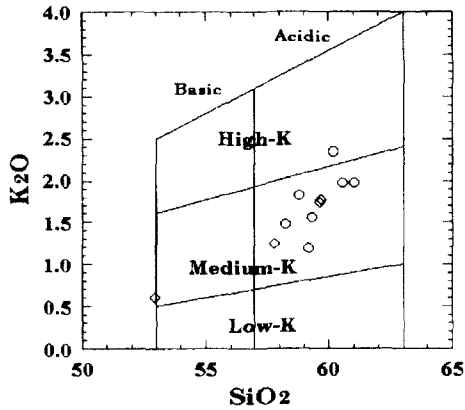


Fig. 7. K₂O vs. SiO₂ diagram for the Dangsari andesite in the study area. (after Gill, 1981) Symbols are the same as those in Fig. 4.

여 보면, 본 역의 화산암류는 medium-K 칼크 알칼리 계열로 분류되어진다. 그리고, FeO^t/MgO에 대한 FeO^t 및 TiO₂ 성분도(Fig. 8a and 8b)에서 분화가 진행됨(FeO^t/MgO비가 증가함)에 따라 FeOt 및 TiO₂ 함량이 점진적으로 감소하는 전형적인 조산대 지역의 칼크-알칼리암 계열의 특성을 지닌 안산암으로 이루어져 있다고 할 수 있다.

본 역의 화산암류는 SiO₂ 함량이 52.95~61.07 wt.% 범위를 가지며, CaO(5.63~8.88 wt.%)와 FeO^t(4.5~7.5 wt.%), MgO(1.44~2.93 wt.%)의 좁은 변화 폭을 가진다. 그리고 높은 Al₂O₃(16.36~21.24 wt.%)의 함량을 나타낸다. 본 역 화산암류들의 SiO₂에 대한 각 주성분 원소의 변화 정도는 Fig. 9와 같다.

SiO₂(wt.%)의 함량이 증가할수록 FeOt, MgO, CaO, Al₂O₃는 감소하는 경향, Na₂O는 다소 분산되거나 거의 변화없이 일정한 값을 나타낸다. P₂O₅와 TiO₂는 아주 약하게나마 감소하는 경향을 보여준다. 반면, SiO₂에 대한 K₂O의 함량은 SiO₂가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. CaO와 MgO 함량이 감소함에 따라 Al₂O₃ 함량이 같이 감소하는 것으로 보아, 휘석류와 사장석의 정출이 진행되었음을 나타내며, FeO^t와 TiO₂ 함량이 감소하는 것은 자철석의 분별 정출이 있었음을 의미한다.

미량 원소

연구 지역 화산암류에 대한 미량 원소의 분석 결과는 Table 8과 같다.

철마그네슘광물(감람석과 휘석)의 분별에 대하여

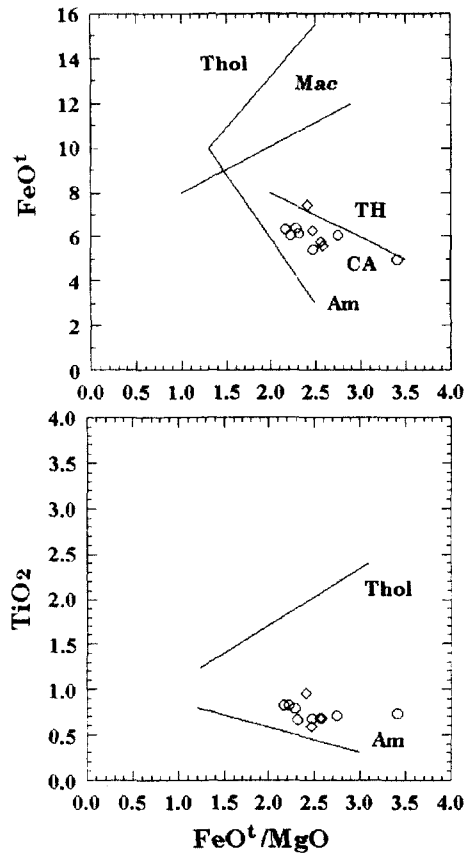


Fig. 8. (a) FeOt vs. FeOt/MgO diagram for the Dangsari andesite in the study area (after Miyashiro, 1974). [Thol, Skaergaard; Mac, Macauley; Am, Amagi; TH, tholeiitic; CA, calc-alkaline] (b) TiO₂ vs. FeOt/MgO diagram for the Dangsari andesite in the study area (after Miyashiro, 1974). [Thol, Skaergaard; Am, Amagi] Symbols are the same as those in Fig. 4.

호정성원소인 Ni, Cr, Co, Sc, V, 그리고 Cu 등은 본 역의 안산암류에서 그 함량이 각각 Sc는 11~20 ppm, Co는 26~58 ppm, V는 91~160 ppm, 그리고 Cu는 27~34 ppm의 범위를 보여주며, 특히, Ni과 Cr은 각각 2~13 ppm(평균 5.7 ppm), 2~19 ppm(평균 5.0 ppm)으로, 초생 마그마의 Ni, Cr 함량(250~350 ppm Ni and 500~600 ppm Cr; Perfit *et al.*, 1980)에 비해서 낮다. 불호정성 원소인 Rb은 28~48 ppm, Sr은 334~673 ppm, Ba은 280~464 ppm, Nb는 3.2~5.8 ppm, Hf는 3.3~4.1 ppm, Y는 20~28 ppm의 범위를 나타낸다.

SiO₂ 함량이 증가함에 따른 미량원소의 변화는 본 역 화산암류에서 분화가 진행됨에 따라 호정성 원소의 변화 경향은 대체로 감소하고, 불호정성원

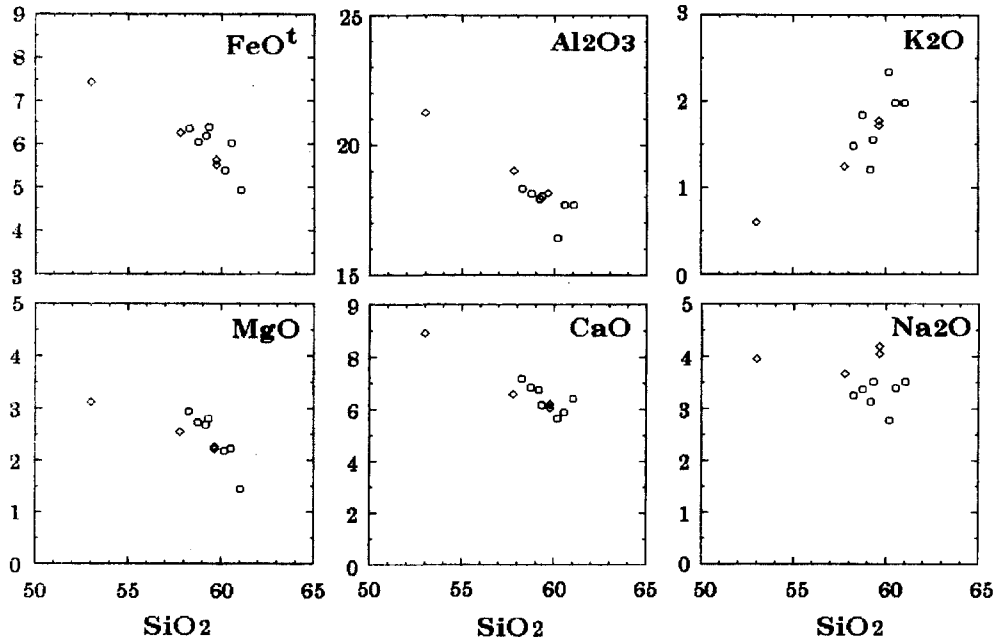


Fig. 9. Harker variation diagram for the Dangsari andesite in the study area. Symbols are the same as those in Fig. 4.

소들은 증가하는 경향을 보여준다(Fig. 10).

본 역의 화산암은 K와 Rb의 증가와 함께 정의 상관관계(Fig. 11)를 보인다. K/Rb비가 330~455(평균 375)로 조산대 대륙연변부의 칼크-알칼리암과 유사하다(Jakes and White, 1972). 또한 Th와 Rb의 관계도 정의 상관관계를 보이는데, 시료들이 대략 0.12의 기울기를 가지면서 정의 상관관계를 나타낸다(Fig. 12).

본 역 화산암류의 Ba/Th, Th/La 및 Ba/La비는 각각 63.6~107.9, 0.16~0.24, 15.3~18.2로 Gill (1981)의 조산대의 medium-K suite의 화산암류의 값에 해당한다.

본 역의 화산암류에 나타나는 미량 원소들의 변화 경향을 알아보기 위하여 평균 MORB(Mid-Ocean Ridge Basalt)값(Pearce, 1983)으로 표준화한 거미그림(spider diagram)을 나타내었다(Fig. 13). 이들 원소의 배열은 합수 유체(aqueous fluids)에 대한 유동성과 불호정성의 순서대로 배열되어 있다. Sr, K, Rb, 그리고 Ba는 유동 원소(mobile element)로, 왼쪽에서 오른쪽으로 불호정성이 증가하는 순으로 배열되어 있다. 그 외의 비유동 원소(immobile element)는 오른쪽에서 왼쪽으로 불호정성이 증가하는 순서로 배열되어 있다(Pearce, 1983).

그림 13에서 낮은 이온 전위를 갖는 Sr, K, Rb,

Ba, Th, Ta 등이 다른 원소에 비하여 상대적으로 높은 값을 가지는 반면, 높은 이온 전위를 갖는 Nb, Hf, Sm, Ti, Y, Yb 등의 함량은 상대적으로 낮은 값을 보여주며, MORB에 대하여 약간 부화되어 있거나 약간 결핍되어 있는데, 특히 Ti의 값이 낮다. 낮은 이온 전위를 갖는 원소들은 합수 유체에 녹기 쉬운 유동 원소이어서, 지판섭입시 탈수작용에 의해 생성된 합수 유체에 농집이 되어 해양지각 슬랩(slab)으로부터 맨틀에 유입되었기 때문이며, 그리고 높은 이온 전위를 갖는 원소들이 상대적으로 낮은 값을 보여주는 것은 이들이 합수 유체에 녹기 어려운 원소로써 탈수작용에 의해 고체상에서 빠져나가기 어렵기 때문인 것으로 생각된다. 전체적인 경향에서 Nb, P, Ti가 음의 이상치(negative anomaly)를 나타내는 데, 이는 이들 원소들이 섭입하는 해양지판내에 또는, 부분용해동안 맨틀을 구성하는 금홍석(rutile), 티탄철석, 티타나이트(titanite)와 같은 광물속에 잔류하게 되었기 때문으로 해석된다(Foley and Wheller, 1991).

그런데 이온 전위가 높은 원소 중에서 Ce, P 그리고 Sm이 MORB에 비해서 약간 부화되어 나타나는 것은 호상열도 암석 중에서 칼크-알칼리 계열의 암석에서만 나타나는 특징으로, 이는 이들 원소가 합수 유체에 의한 운반된 결과라기 보다는 해양지

Table 8. Trace element abundances (ppm) of the Dangsari andesite in the study area.

Sample	217-2 (○)	217-3 (○)	217-4 (○)	217-5 (○)	217-6 (○)	217-7 (○)	301-1 (○)	911214-7 (◇)	911214-9 (◇)	JE-1 (◇)	JE-2 (◇)
Rb	30.1	47.4	48.3	43.3	35.9	28.2	46.1	13.4	26.0	43.0	42.3
Sr	673	334	442	447	452	474	423	513.1	696.4	550.0	406.2
Ba	464	350	381	316	280	363	363	425	486	624	594
Ta	0.7	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	--	--	--	--
Hf	3.5	3.3	4.1	3.3	3.3	4.1	3.8	3.0	4.0	--	--
Th	4.3	4.5	5.3	4.3	4.4	3.5	5.0	2.0	3.0	8.0	7.0
Cs	35.2	12.7	7.4	4.5	3.6	1.3	6.0	--	--	--	--
Nb	5.8	4.3	3.2	5.2	4.1	5.5	5.4	--	--	--	--
Pb	11.6	9.6	10.0	7.1	7.8	12.1	7.3	--	--	--	--
Ni	6	2	4	13	7	5	3	1	7	--	--
Cr	3	2	2	19	5	2	2	--	--	--	--
Sc	11	14	16	20	21	15	14	29	12	--	--
Y	20.0	24.9	27.5	20.8	21.2	20.8	22.9	31.0	20.0	26.0	28.0
Cu	30	29	30	31	34	28	27	41	19	--	--
Zn	63	48	53	50	50	71	53	53	40	--	--
Co	58	26	50	56	54	44	43	25	15	--	--
V	104	91.4	131	155	160	131	123	157	76	--	--
Zr	179	145	192	185	161	204	191	129	209	184	183
Rb/Sr	0.04	0.14	0.11	0.10	0.08	0.06	0.11	0.03	0.04	0.08	0.10
Ba/Th	107.91	77.78	71.89	73.49	63.64	103.71	72.60	212.50	162.00	78.00	84.86
Th/La	0.17	0.20	0.24	0.23	0.25	0.16	0.24	0.17	0.13	0.43	0.38
Th/Rb	0.14	0.09	0.11	0.10	0.12	0.12	0.11	0.15	0.12	0.19	0.17
Ba/La	18.20	15.28	16.86	17.08	15.82	16.21	17.45	35.12	20.95	33.73	32.11
K/Rb	330	409	339	350	342	455	353	371.71	399.11	333.99	347.37

Symbols are the same as those in Fig. 4.

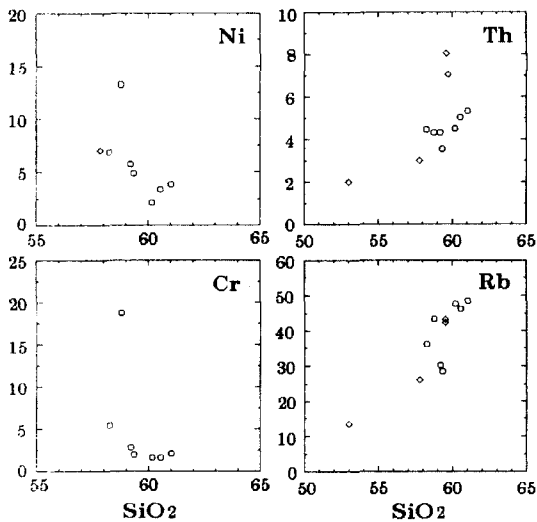


Fig. 10. Variation diagram of selected trace elements for the Dangsari andesite in the study area. Symbols are the same as those in Fig. 4.

각 슬랩(slab)의 부분용융에 의해 생긴 규산염 용액 (silicate melt)에 의해서 운반된 것이거나, Ce가 풍부한 해양퇴적물의 동화작용에 기인된 것으로 설명된다(Hawkesworth and Powell, 1980). 이는 지판

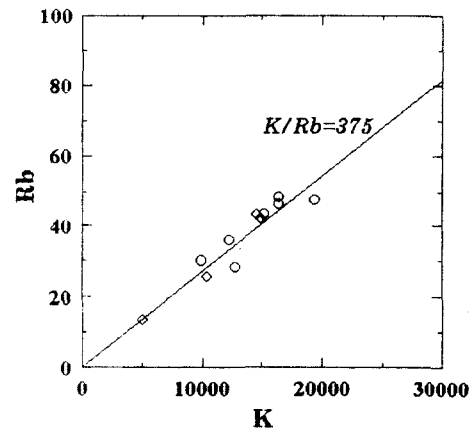


Fig. 11. Rb vs. K diagram for the Dangsari andesite in the study area. (after Jakes and White, 1972) Symbols are the same as those in Fig. 4.

의 침강 섭입에 관련된 대륙 연변부나 도호 등의 조구조와 연관된 암석들에서 나타나기 쉬운 특징이다(Pearce *et al.*, 1984).

Zr, Hf, Nb, Y 등에 대한 K와 Rb의 부화 정도는 중앙해령에서보다 조산대 화산호에서 더욱 크므로, 본 역의 화산암류는 조산대 화산호의 특징을 잘 나타낸다고 할 수 있다. 그리고, Ba, Sr, Rb의 함량

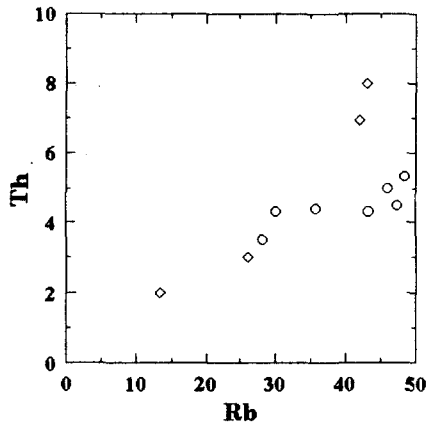


Fig. 12. Th vs. Rb diagram for the Dangsari andesite in the study area. Symbols are the same as those in Fig. 4.

변화 폭이 다소 넓게 나타나는데, 이를 통해서도 본 역의 화산암류가 조산대 화산호에 기인한 암석임을 알 수 있다(Pearce, 1983; Wilson, 1989). 또한, 원소 Nb에서 나타나는 음의 이상치는 이 지역 칼크-알칼리암 계열의 중성암류가 섭입과 연관된 마그마로부터 생성되었음을 강하게 지시한다(Wilson, 1989).

희토류 원소

연구 지역 화산암류에 대한 희토류 원소의 분석

결과는 Table 9와 같다.

본 역 화산암류의 희토류 원소를 콘드라이트값(Sun and McDonough, 1989)으로 표준화하여 Fig. 14에 나타내었다. 희토류 원소의 총량은 144.8~115.9 ppm으로 전체적으로 콘드라이트에 비해서 10배에서 100배 정도 부화되어 있다. REE 패턴에서 경희토류(LREE; light rare earth element) 원소는 부화되어 있고 중희토류(HREE; heavy rare earth element) 원소는 다소 결핍된 일반적인 경향을 나타낸다. 희토류 원소 중 Eu가 일부시료에서 미약한 음의 이상치($Eu/Eu^* = 0.86 \sim 0.98$)를 나타내는데, Eu의 거동은 주로 사장석에 의해 지배를 받으므로, 본 역의 당사리안산암은 마그마에서 사장석의 미약한 분별결정작용을 경험하였음을 시사하는 것이다. 그리고 본 역 화산암에 대한 REE 패턴의 유사성은 균질한 동일 기원의 마그마(cogenetic magma)에서 유래된 결과로 해석할 수 있다.

조구조적 위치

Wood(1980)는 비유동 HFS 원소로서 Th, Hf 및 Ta와 Th, Hf 및 Nb를 이용한 조구조적 판별도를 제시하였다(Fig. 15(a) and (b)). 특히 이 판별도에서 D 영역은 $Hf/Th = 3.0$ 을 기준으로 원시 호상열도 쏘레이아이트 계열($Hf/Th > 3.0$)과 성숙한 호상열도의 칼크-알칼리 계열($Hf/Th < 3.0$)로 구분된다. 본

Table 9. Rare earth element abundances (ppm) of the Dangsari andesite in the study area.

Sample	217-2 (○)	217-3 (○)	217-4 (○)	217-5 (○)	217-6 (○)	217-7 (○)	301-1 (○)	911214-7 (◇)	911214-9 (◇)	JE-1 (◇)	JE-2 (◇)
La	25.5	22.9	22.6	18.5	17.7	22.4	20.8	12.1	23.2	18.5	18.5
Ce	49.2	39.5	42.6	36.4	34.4	43.4	39.9	22.6	48.5	39.4	39.1
Pr	6.4	5.9	5.8	4.9	4.6	5.8	5.4	4.13	6.32	5.46	5.49
Nd	23.4	22.2	22.0	18.6	17.8	21.4	19.9	17.5	24.5	21.1	21.0
Sm	4.4	4.5	4.5	3.9	3.8	4.4	4.0	4.67	5.03	4.77	4.75
Eu	1.4	1.4	1.3	1.2	1.2	1.4	1.2	1.45	1.33	1.25	1.25
Tb	0.6	0.7	0.8	0.6	0.7	0.7	0.7	0.81	0.62	0.67	0.71
Gd	4.3	4.8	4.7	4.1	4.0	4.4	4.1	5.46	4.58	4.68	4.72
Dy	4.0	4.8	4.8	4.1	4.4	4.3	4.3	--	--	--	--
Ho	0.7	0.9	0.9	0.7	0.8	0.8	0.8	1.10	0.81	0.86	0.93
Er	2.2	2.7	2.7	2.3	2.4	2.5	2.5	3.27	2.40	2.61	2.86
Tm	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.41	0.31	0.35	0.41
Yb	2.1	2.4	2.5	2.1	2.3	2.2	2.4	2.89	2.23	2.38	2.86
Lu	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.41	0.30	0.32	0.43
ΣREE	124.8	113.5	116.0	98.0	94.7	114.3	106.8	76.8	120.1	102.4	103.0
ΣREE+Y	144.8	138.4	143.5	118.8	115.9	135.1	129.7	107.8	140.1	128.4	131.0
(La/Yb) _N	8.21	6.45	6.11	5.95	5.20	6.88	5.86	2.83	7.03	5.25	4.37
(La/Sm) _N	3.65	3.20	3.16	2.99	2.93	3.20	3.27	1.63	2.90	2.44	2.45
(Gd/Yb) _N	1.66	1.62	1.52	1.58	1.41	1.62	1.38	1.53	1.66	1.59	1.34
Eu/Eu [#]	0.98	0.92	0.86	0.92	0.94	0.97	0.91	0.88	0.85	0.81	0.81

Chondrite value used in normalizing REE from Sun and McDonough(1989). Symbols are the same as those in Fig. 4.

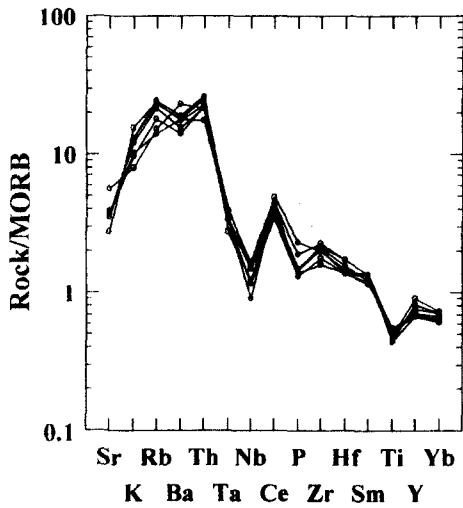


Fig. 13. MORB-normalized spider diagram for the Dang-sari andesite in the study area. Symbols are the same as those in Fig. 4.

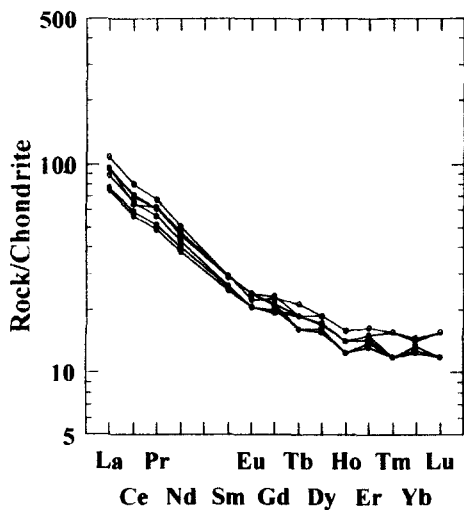


Fig. 14. Chondrite-normalized REE pattern of the Dang-sari andesite in the study area. Symbols are the same as those in Fig. 4.

역의 중성 화산암류의 성분을 이 판별도에 도시해 본 결과, 지판이 침강 섭입하는 지판 경계부 영역에 도시되며 특히, Hf/Th비가 3.0이하인 칼크-알칼리 계열로 구분된다. 이는 앞서 논의 되었던 불호정성 미량 원소의 변화 경향과 희토류 원소의 변화 경향에 따른 해석과도 일치한다.

본 역에 분포하는 당사리화산암의 마그마 기원을 알아보기 위한 Gill(1981)의 Cr vs. Y의 상관도(Fig.

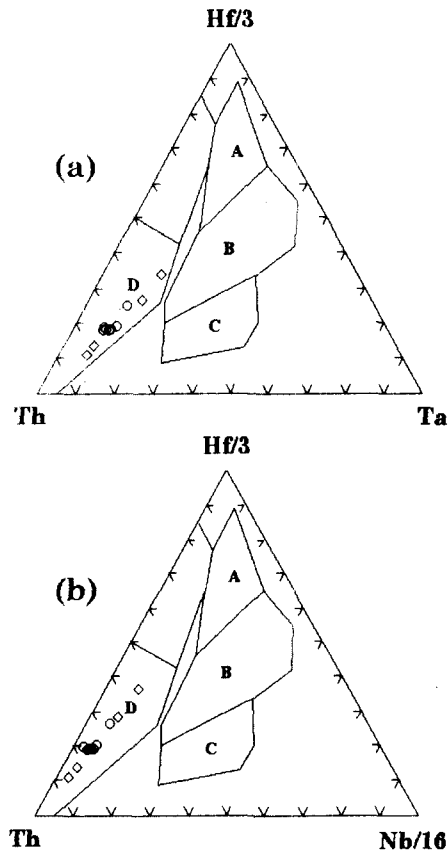


Fig. 15. Tectonomagmatic discrimination diagrams of the Dang-sari andesite in the study area. (a) Hf/3-Th-Ta diagrams. (b) Hf/3-Th-Nb/16 diagrams. [A, N-type MORB; B, E-type MORB and tholeiitic within-plate basalts; C, Alkaline within-plate basalts; D, Destructive plate margin basalt] Island-arc tholeiites plot in field D where Hf/Th>3.0 and calc-alkaline basalts plot where Hf/Th<3.0 (after Wood, 1980). Symbols are the same as those in Fig. 4.

16)에 따르면, 이 지역의 화산암류가 섭입대 해양지각에서 불호정성 원소가 상부의 맨틀에 공급되어 부화된 후에 약 15% 내외의 부분 용융으로 형성된 것으로 생각된다. 한편, 본 역에 분포하는 당사리화산암의 마그마 기원을 알아보기 위하여 Ce과 Yb을 콘드라이트로 표준화한 값을 가지고 Ce_N/Yb_N vs Ce_N 의 상관도(Fig. 17)에 Gill(1981)이 인용한 마그마 분화 경로 4가지를 나타내었다. ①번 선은 감람석과 휘석의 분별정출선, ②번 선은 맨틀웨지를 구성하는 석류석 페리도타이트의 부분용융선을, ③번 선은 해양지각의 잔유물로 추정되는 석류석 에클로자이트의 용융선을, ④번 선은 평균대륙지각물질로 추정되는 앰피블라이트의 부분용융선을 나타낸 것

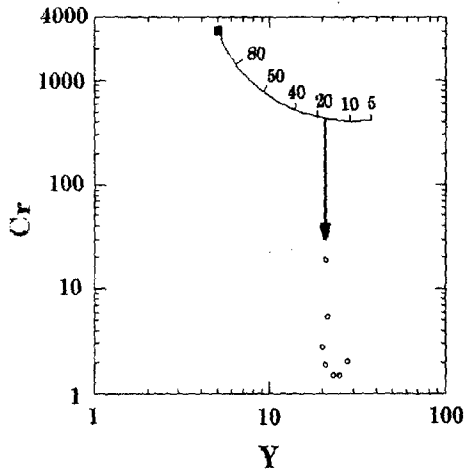


Fig. 16. Cr(ppm) vs. Y(ppm) discrimination diagram showing possible petrogenetic pathway for the Dangarsi andesite in the study area (after Gill, 1981). Symbols are the same as those in Fig. 4.

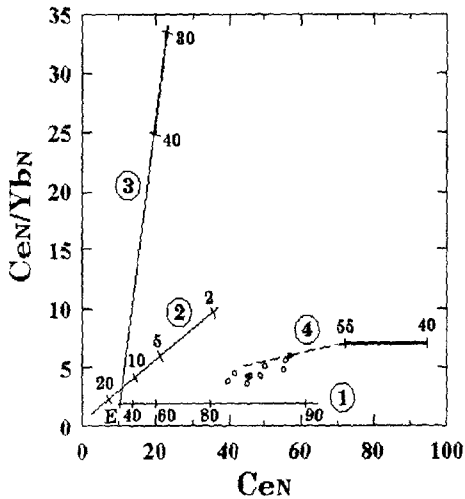


Fig. 17. Ce/YbN vs. CeN diagram for the Dangarsi andesite in the study area. Normalizing values of chondrite (after Gill, 1981).

(Ce = 0.865 ppm; Yb = 0.22 ppm)
 [Line ①, Fractional crystallization; Line ②, Peridotite fusion; Line ③, Eclogite fusion; Line ④, Amphibolite fusion]
 Symbols are the same as those in Fig. 4.

이다(Fig. 20). 그림에서 보여 주는 것과 같이 본 역의 화산암들은 맨틀웨지를 구성하고 있는 것으로 추측되는 석류석 페리도타이트(감람석 : 사방휘석 : 단사휘석 : 석류석 = 54 : 25 : 15 : 6)의 약 15%의 부분용융 후 생성된 현무암질 마그마로부터 감람석과 휘석의 분별정출작용에 따른 분별정출작용선(①번

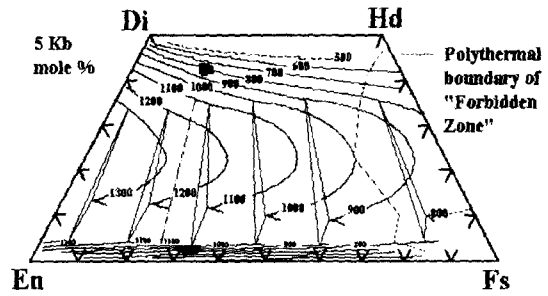


Fig. 18. Polythermal orthopyroxene+augite+pigeonite and augite+pigeonite, contoured at 100°C intervals for use in geothermometry (Lindsely, 1983). Symbols are the same as those in Fig. 4.

선)의 위를 따라 평행하게 배열되어 나타난다. 또한, MORB로 표준화한 패턴에서와 같이, Rb, Ba, Th이 다른 원소에 비해 상당히 부화되어 있으며, 이러한 경향은 섭입대에서 맨틀웨지로 공급되는 유체에 의해 농집됨으로서 나타난다(Green, 1984). 따라서, 당사리화산암(안산암)의 기원은 섭입에 따른 유체의 공급에 의한 상부맨틀 웨지를 구성하는 석류석 페리도타이트의 약 15%의 부분용융에 의해 생성된 현무암질 초생마그마에서 유래하였으며, 낮은 MgO, Ni, Cr 및 Co의 함량으로 미루어 볼 때, 분출되기 전에 일련의 감람석 및 휘석의 분별정출작용을 경험하였을 것으로 사료된다. 그리고, 분별정출선으로부터 위로 치우쳐 평균대륙지각물질로 추정되는 암피블라이트의 부분용융선에 근접하여 나타나는 것을 볼 때, 마그마의 상승 중 지각내의 챔버에 머무는 동안 분별정출작용과 지각과의 혼연을 받았음을 미루어 볼 수 있다. 다만, 이 지역 화산암류의 Sr동위원소의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비가 0.70424~0.70481 (Song *et al.*, 1997)로 지각물질에 비하여 매우 낮은 값을 가지므로 지각 혼연의 효과는 비교적 적었던 것으로 해석된다.

본 역 화산암류가 동일마그마의 분별정출작용에 의하여 형성된 마그마의 산물이라고 한다면, 암석의 반정을 이루는 광물들의 구성비를 통하여 생성 환경에 대한 접근이 가능하다. 많은 학자들은 실험을 통한 광물의 안정온도와 압력범위를 추정했을 뿐 아니라 조암광물의 성분 변화를 이용하여 추정하기도 하였다. Lindsely(1983)는 공존하는 두 성분의 휘석 즉 사방휘석과 단사휘석의 화학적 평형온도를 산출하고 그를 근거로 Di-Hd-En-Fs 4성분계도에서 열등온선을 작성하였다. Lindsely의 휘석에 의한 열등온선이 표시된 Di-Hd-En-Fs 4성분계도에

본 역 안산암의 휘석의 화학성분을 점시해 보면, 보통휘석(Augite: $Wo_{43.2}En_{41.0}Fs_{15.8}$) 반정과 하이퍼신($Wo_{2.7}En_{65.8}Fs_{31.5}$) 반정이 공존할 수 있는 경우는 5kb 이하인 경우 800°C전후가 안정온도임을 알 수 있었다(Fig. 18). 또 안산암 시료 217-6에서 서로 붙어 있는 사방휘석(#4)과 단사휘석(#85)에 대하여 Brey and Köhler(1990)의 양휘석지온계의 계산식에 의하면 평형온도는 895°C로 계산된다.

이상의 결과로, 본 역 중성 화산암류는 칼크-알칼리 계열인 동시에 공간적으로 섭입대 위에 형성된 대륙연변 화산호의 특성을 보여준다. 즉, 본 역 화산암류는 환태평양의 베니오프대 및 맨틀 췌기 등의 지체 구조 운동과 관련되어 형성된 마그마를 기원으로 하고 있음을 알 수 있다.

결 론

울산 동부지역 당시리 화산암류를 주 대상으로 암석기재, 그리고 광물조성, 주성분과 미량 원소를 분석하여 이들 화산암류를 형성한 조구적 위치와 마그마의 성인을 알아보았다.

마이오세의 당시리 화산암류는 다량의 화성쇄설암류내에 안산암질 용암류가 협재되어 교호로 산출된다. 안산암은 대부분의 지역에서 유상구조와 판상절리가 특징적으로 나타나며, 일부 관입상에서는 소규모 주상절리가 나타나기도 하였다. 화성쇄설암류는 대부분 화성쇄설성 각력암이 우세하면서 응회질각력암, 라필리 응회암 등이 호층으로 반복되어 층상구조를 나타내면서 분포한다.

현미경하에서 안산암은 사장석, 휘석과 각섬석 반정이 특징적으로 나타나는데, 사장석은 대부분 라브라도라이트이며, 진동누대구조와 알바이트-칼스바드 쌍정을 보여준다. 반정으로 나타나는 단사휘석은 평균조성 $Wo_{43.2}En_{41.0}Fs_{15.8}$ 으로 보통휘석에 해당되고, 사방휘석의 평균조성은 $Wo_{2.7}En_{65.8}Fs_{31.5}$ 으로 엔스타타이트로 분류되며 Fs 단성분 함량으로 세분할 경우에는 자소휘석에 해당한다. 각섬석 반정은 대부분 불투명 광물로 교대되어 암흑색의 반응환을 나타낸다. 부성분광물은 주로 TiO_2 가 풍부한 자철석이며, 일부는 인회석이다. 석기는 세립의 사장석과 휘석, 불투명광물, 인회석 등으로 되어 있고, 엷은 도편상의 사장석 미정이 모여 필로택시틱 또는 입간상 조직을 보여준다.

본 역 안산암은 분류도에서 서브 알칼리 계열의 안산암 영역에 도시되며, AFM 다이아그램과 SiO_2 에 대한 K_2O 의 성분도에 도시하면 중-K 칼크-알칼

리암 계열에 해당한다.

SiO_2 함량이 증가함에 따른 미량 원소의 변화는 본 역 화산암류에서 분화가 진행됨에 따라 호정성 원소의 변화 경향은 대체로 감소하고, 불호정성 원소들은 증가하는 경향을 보여준다. Ba/Th, Th/La 및 Ba/La비는 각각 63.6~107.9, 0.16~0.24, 15.3~18.2로 조산대의 중-K 화산대(suite)의 화산암류의 값에 해당한다.

미량 원소들의 변화 경향을 알아보기 위하여 평균 MORB으로 표준화한 거미그림에 나타내어 보면, 낮은 이온 전위를 갖는 Sr, K, Rb, Ba, Th, Ta 등이 다른 원소에 비하여 상대적으로 높은 값을 가지고, 높은 이온 전위를 갖는 Nb, Hf, Sm, Ti, Y, Yb 등의 함량은 상대적으로 낮은 값을 보여주며, MORB에 대하여 약간 부화되어 있거나 약간 결핍되어 있는데, 특히 Ti의 값이 낮다. 미량원소의 거동 및 함량특징으로부터 본 역의 화산암류가 조산대 화산호에 기인한 암석이며, 섭입과 연관된 마그마로부터 생성되었음을 강하게 지시한다.

본 역 화산암류의 희토류 원소를 콘드라이트값으로 표준화하였을 때, 희토류 원소의 총량은 144.8~115.9 ppm으로 전체적으로 콘드라이트에 비해서 10배에서 100배 정도 부화되어 있다. REE 패턴에서 경희토류 원소는 부화되어 있고 중희토류원소는 다소 결핍된 일반적인 경향을 나타낸다. 희토류 원소 중 Eu가 부 이상(0.86~0.98)을 나타내는데, 이는 마그마에서 분별결정작용에 의해 사장석이 정출되었음을 시사하는 것이다. 그리고 본 역 화산암에 대한 REE 패턴의 유사성은 균질한 동일 기원의 마그마에서 유래된 결과로 해석할 수 있다.

본 역의 중성 화산암류의 성분을 Hf/3-Th-Ta, Hf/3-Th-Nb/16 판별도에 도시해 본 결과, 지판이 침강 섭입하는 지판 경계부 영역에 도시되며 특히, Hf/Th비가 3.0이하인 칼크-알칼리 계열로 구분된다.

본 역에 분포하는 당시리화산암의 마그마 기원을 알아보기 위하여 Cr vs. Y의 상관도와 Ce과 Yb을 콘드라이트로 표준화한 값을 이용한 CeN/YbN vs. CeN의 상관도를 보면, 당시리화산암(안산암)의 기원은 섭입에 따른 유체의 공급에 의한 상부맨틀 웨지를 구성하는 석류석 페리도타이트의 약 15%의 부분용융에 의해 생성된 현무암질 초생마그마에서 유래하였으며, 낮은 MgO, Ni, Cr 및 Co의 함량으로 미루어 볼 때, 분출되기 전에 일련의 감람석 및 휘석의 분별정출작용을 경험하였을 것으로 사료된다. 그리고, 분별정출선으로부터 위로 치우쳐 평균대륙 지각 물질로 추정되는 앰피블라이트의 부분용융선

에 근접하여 나타나는 것을 볼 때, 마그마의 상승 중 지각내의 첩베에 머무는 동안 분별정출작용과 지각과의 혼염을 받았음을 유추할 수 있다.

감사의 글

본 논문을 읽고 유익한 조언을 주신 박계현 교수께 감사드립니다. 그리고, 이영애는 논문의 준비과정에서 많은 비평과 도움을 주신 이상원, 김진섭 교수에게 감사드립니다.

참고문헌

- 김봉균, 1968, 갑포, 울산부근에 발달하는 역암층의 지질시대에 관하여. 지질학 회지, 4, 44-45.
- 김봉균, 1970, 한국의 신제3기 퇴적층에 관한 연구. 지질학회지, 6, 77-96.
- 김인수, 1985, 한반도 및 동아시아의 지질구조 발달과 판구조이론(II): 한반도의 지체구조발달과 동해의 형성. 부산대학교 자연과학논문집, 40, 311-315.
- 김인수, 1990, 포항이남 제3기분지 암석의 자기 비등방성과 지구조적 응력장. 광산지질, 23, 59-71.
- 박선애, 1993, 경북 연일 지역에 분포하는 신생대 제3기 화산암류에 대한 암석학적 및 암석화학적 연구. 경북대학교 이학박사 학위논문, 108p.
- 박양대, 윤형대, 1968, 한국지질도 울산도폭(1:50,000) 및 설명서. 국립지질조사소. 12p.
- 박주희, 1999, 장기분지에 분포하는 중성-염기성 화산암에 관한 암석학적 연구. 부산대학교 이학석사 학위논문, 84p.
- 손 문, 김인수, 1994, 울산군 강동면 제3기 정자분지의 지질구조와 분지발달 자원환경지질, 27, 65-80.
- 손 문, 강희철, 김인수, 1996, 남한 제3기 분지지역에 대한 고자기 연구: 3. 정자-울산분지와 그일원. 자원환경지질, 29, 509-522.
- 윤 선, 1988, 한반도남부의 제3기 층서. 한국과학재단 연구보고서, 25p.
- 윤 선, 장기홍, 유환수, 이영길, 1991, 한반도 남부의 제3기 분지 발달사. 광 산지질, 24, 301-308.
- 윤성효, 김진섭, 옥수석, 홍현근, 김형식, 1994, 영일반도 일원의 화산암류에 대한 암석학적 연구. 한국지구과학회지, 15, 126-138.
- 이문원, 원종관, 노진환, 1986, 구룡포 지역의 지질 및 화산암류에 대한 연구. 지질학회지, 7, 11-18.
- 이문원, 원종관, 김광호, 노진환, 1988, 구룡포 지역에 분포하는 신생대 화산암 의 지질과 암석학적 연구. 지질학회지, 24, 1-15.
- 이현구, 문희수, 민경덕, 김인수, 윤혜수, 板谷徹丸, 1992, 포항 및 장기분지에 대한 고자기, 층서 및 구조 연구: 화산암류의 K-Ar 연대. 광산지질, 25, 337-349.
- 진명식, 김성재, 신성천, 1988, K-Ar 및 횡선트랩법에 의한 포항-갑포 일대 화 산암류의 암석연령 측정 연구. 한국자원연구소 연구보고서, KR-87-27, 51-88.
- 한중환, 박영훈, 손진담, 손병국, 1987, 한국동남부지역 제3기 퇴적분지의 지체 구조발달 및 퇴적환경연구. 동력자원연구소 연구보고서, KR-86-2-(B)-4, 109p.
- Brey, G. P. and Köhler, T., 1990, Geothermobarometry in four phase lherzolite II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. J. Petrol., 31, 1353-1378.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J., 1972, Rock forming minerals. Vol. 1, ortho- and ring silicates. Longmans, Group Ltd, London, England, 77-112.
- Foley, S. F. and Wheller, G. E., 1990, Parallels in the origin of the geochemical signatures of island arc volcanics and continental potassic igneous rocks: the role of residual titanites. Chem. Geol., 85, 1-18.
- Gill, J. B., 1981, Orogenic andesites and plate tectonics. Springer, Berlin Heidelberg, New York, 390p.
- Green, T. H., 1984, Anatexis of mafic crust and high pressure crystallization of andesite, In: Andesite Thorpe, R. S. (ed.), John wiley & Sons, 465-487.
- Hawkesworth, C.J. and Powell, M., 1980, Magma genesis in the Lesser Antilles island arc. Earth Planet. Sci. Lett. 51, 297-308.
- Hughes, C.J., 1973, Spilites, koratophyres and the Igneous spectrum. Geol. Magazine, 109, 513-527.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Can. J. Earth Sci., 8, 523-548.
- Jakes, P. and White, A.J.R., 1972, Major and trace element abundances in volcanic rocks of orogenic areas. Geol. Soc. Am. Bull., 83, 29-40.
- Kim, K. H., Won, J. K., Matsuda, J., Nagao, K. and Lee, M. W., 1986, Paleomagnetism and K-Ar age of volcanic rocks for Guryongpo area, J. Korea Inst. Mining Geol., 19, 231-239.
- Kuno, H., 1966, Lateral variation of basalt magma accross continental margins and island arcs, in Poole W. H., ed., continental margin and island arcs, "International upper mantle project, symposium". Geol. Surv. Can. paper, 1350, 55-73.
- Le Bas, M. J., R. W. Le Maitre, A. Streckeisen & B. Zanettin, 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. J. Petrol., 27, 745-750.
- Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre LeBas, 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.
- Lee, J. I., Lee, M. J., Doo, K. T., Lee, M. S., and Keisuke Nagao, 1997, K-Ar age determination of the granitic plutons in Ulsan-Kyeongju area; The mid-eastern Kyeongsang basin, Korea. Jour. Korean Earth Science Society, 18, 379-386.

- Lindsely, D. H., 1983, Pyroxene thermometry. *Am. Miner.*, 88, 477-493.
- Miyashiro, A., 1974, Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Am. J. Sci.* 274, 321-355.
- Morimoto, N., 1988, Nomenclature of pyroxenes. *Am. Miner.*, 73, 1123-1133.
- Pearce, J.A., 1983, The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins. In *Continental basalts and mantle xenoliths*. C.J. Hawkesworth and M.J. Norry (ed.), 230-49, Nantwich: Shiva.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W. and Tindle, A. G., 1984, Trace element discrimination diagram for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25, 956-983.
- Perfit, M. R., Gust, D. A., Bence, A. E., Arculus, R. J., and Taylor, S. R., 1980, chemical characteristics of island arc basalts: implications for mantle sources. *Chem. Geol.* 30, 277-56
- Poldervaart, A., 1947, The relationship of orthopyroxene to pigeonite. *Min. Mag.*, 28, 164p.
- Schilling, J.G., Zajac, M., Euaus, R., Johnston, T., White, W., Devine, J.D. and Kingsley, R., 1983, Petrologic and geochemical variations along the Mid-Atlantic ridge from 27° N to 73° N, *Am. Jour. Sci.*, 283, 510-586.
- Shimazu, M., Kawano, Y., and Kagami, H., 1990, Major and minor element compositions and Sr, Nd isotope ratios of basaltic rocks from the Pohang-Yangnam area, Korea: *J. Min. Petr. Econ. Geol.*, 85, 405-415.
- Song, S., Lee, H. K. and Yun, H., 1997, Petrogenesis of Tertiary volcanic rocks from the southeastern part of Korea. *Tectonic Evolution of Eastern Asian Continent: Short papers for the international symposium on the occasion of the 50th Anniversary of the Geological Society of Korea*. 219-224.
- Sun, S.-S. and McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In *Magma-tism in the Ocean Basins*(Saunders, A.D. and Norry, M.J. Eds.). *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 42, 313-345.
- Wilson, M., 1989, *Igneous petrogenesis*. Unwin Hyman, London, 466p.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A., 1977, Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile element. *Chem. Geol.*, 20, 325-343.
- Wood, D.A., 1980, The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 50, 11-30.
- Yoon, S., 1976, The Tertiary deposits of the Ulsan Basin, No. 1. Tertiary deposits in the eastern block. *J. Coll. Lib. Arts and Sci., Pusan Nat. Univ.*, 15, 67-71.
- Yoon, S., 1979, The Tertiary deposits of the Ulsan Basin, No. 2. Molluscan fossils. *J. Geol. Soc. Korea*, 15(1), 1-36.
- Yoon, S., 1980, Additional notes on Miocene molluscs of the Tertiary Ulsan Basin, Korea. *Prof. S. Kanno Mem. Vol.*, 71-77.
- Yoon, S., 1986, Tectonic history of the Tertiary Pohang and Yangnam basins, Korea. *Essays in Geology Professor Nobu Kitamura Commemorative Volume*, 637-644.
- Yoon, S., 1991, Geologic events of the Tertiary and Pohang basins, Korea with a remark on the origin of the Yamato basin of the Japan sea, *Saito Ho-on Kai Spec. Pub.*, 3, 303-309.
- Yoon, S., 1992, Paleoenvironmental change of the Tertiary Yangnam and Pohang basins of the southern Korean Peninsula. *Mem. Geol. Soc. Japan*, 37, 117-124.

(책임편집: 박계현)

(2000년 6월 3일 접수, 2000년 8월 10일 수리)

Petrological study on the Miocene Dangsari volcanic rocks, eastern part of Ulsan city, southeastern Korea

Sung-Hyo Yun, Jeong-Seon Koh, Gi-Ho Park and Young-Ae Lee

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

Abstract: The Miocene volcanic rocks in the Dangsari area, eastern part of Ulsan city, are mainly composed of andesite lava flows and pyroclastic rocks. The andesite lavas are identified as two-pyroxene andesite, comprising phenocrysts of augite ($Wo_{43.2}En_{41.0}Fs_{15.8}$) and hypersthene ($Wo_{2.7}En_{65.8}Fs_{31.5}$). The andesitic pyroclastic rocks are largely composed of pyroclastic breccias with alternating tuff-breccia and lapilli tuff, which showing planar layering, and minor amount of andesitic tuff with thin deposits of interlayered tuffaceous shale. According to the petrochemical data, andesitic rocks belong to medium-K calc-alkaline andesite. The position of bulk composition on the AFM diagram and the presence of normative quartz and hypersthene indicate that the volcanic rocks are calc-alkaline. The trace element composition and REE patterns of andesite, which are characterized by a high LILE/HFSE ratio and enrichment in LREE, suggest that they are typical of continental margin arc calc-alkalic volcanic rocks produced in the subduction environment. On the discrimination diagram, the Dangsari volcanic rocks fall into the fields of subduction related continental margin arc volcanic province. The primary mafic melts may be derived from about 15% partial melting of mantle wedge in the upper mantle under destructive plate margin. And the melt evolved to calc-alkaline andesite magma by fractional crystallization and the magma was a little contaminated with crustal materials.

Key words: Miocene Dangsari volcanics, calc-alkaline series, andesite