

장기 지역에 분포하는 중성~염기성 용암에 관한 암석학적 연구(1): 일반 지질 및 암석화학적 특징

박주희^{1,2} · 김춘식³ · 김진섭¹ · 성종규^{1,4} · 김인수¹ · 이준동¹ · 백인성⁵

¹부산대학교 지구환경시스템과학부, ²울산시 흥명고등학교, ³한국건설기술연구원,
⁴부산시 장전중학교, ⁵부경대학교 지구환경과학부

요약 : 장기지역의 화산암은 SiO₂ 함량이 48~61%로 TAS 도표에서 안산암, 현무암 질안산암, 현무암 영역에 도시되며 모두 비알칼리암에 해당된다. 19개의 분석치를 AFM 삼각도와 Harker 변화도에서 살펴보면 장기 분지의 중성 내지 염기성용암류는 칼크-알칼리 계열과 쉘레아이트 계열로 구분된다. 칼크-알칼리 현무암질안산암(CBA)은 단사회석과 사방회석을 포함하며, 쉘레아이트 현무암(TB)은 사장석, 단사회석, 감람석 등을 함유하고 있으며 조직상 크게 반정이 거의 없는 비반상현무암 (TAB)과 반정을 많이 포함한 반상현무암(TPB), 현무암으로부터 분화된 양상의 비반상현무암질안산암(TABA)으로 구분된다. 회토류 원소 및 불호정성 원소의 양상에서 본 역의 화산암은 LILE의 부화와 HFSE의 결핍이 관찰되며 조산대 화산호 환경과 밀접한 관련이 있으며, 쉘레아이트의 성분은 칼크-알칼리 계열의 현무암질안산암(CBA)에 비해 더욱 MORB에 가깝다. 섭입에 관련된 마그마로부터 진화한 암석에 나타나는 특징과 같이 불호정성원소와 회토류원소 양상에서 칼크-알칼리와 쉘레아이트 모두에서 LILE와 LREE가 부화하고 HFSE가 결핍된 양상을 보인다. 그러나, 칼크-알칼리 현무암질안산암(CBA)는 쉘레아이트에 비해 LILE 및 LREE가 다소 부화되고, HFSE와 HREE는 다소 결핍된 특징을 보인다. Ba/Th, La/Th 비와 같은 판별도에서 칼크-알칼리 현무암질안산암(CBA)은 중~고-K 암체에, 쉘레아이트는 중-K 암체와 MORB 영역에 도시된다. La/Yb 대 Th/Yb 도표에서 본역 화산암은 해양도호현무암의 영역에 도시되는데, 쉘레아이트가 칼크-알칼리 계열에 비해 더욱 원시 환경으로 판별된다.

핵심어 : 장기지역, 쉘레아이트, 칼크-알칼리, 현무암질안산암, 불호정성원소, 회토류원소, 도호

서 언

남한의 제3기층은 동해안을 따라 소규모로 분포한다. 제3기 퇴적분지는 분포 위치와 그 퇴적물의 특성에 따라 포항분지, 장기분지, 어일분지, 하서분지와 울산분지로 나누어지는데(손문, 1998), 이들은 각각 포항, 장기, 어일 또는 감포, 하서 그리고 울산을 중심으로 발달되어 있다.

장기분지는 남쪽의 어일분지와는 고 제3기 기반암류에 의해 분리되어 있으며, 기반암 위에 마이오세 퇴적암류와 화산암류가 분포한다. 장기분지의 화산암류는 주로 현무암과 현무암질용회암, 그리고 안산암으로 구성되어 있으며 산성용회암이 소규모로 산재한다.

장기분지의 화산암류에 대한 보다 체계적인 암석학적 연구는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 장기분지에 분포하는 제3기 현무암질암을 대상으로 정밀한 야외조사와 암석기재학적 연구를 실시하여, 화산암의 층서와 산상 그리고 암석기재학적 특징을

밝히고, 이들 암석의 주성분, 미량 및 회토류 원소 분석 등을 통하여 암석화학적 특징을 밝히는 데 그 목적이 있다.

이문원 등(1986, 1988)은 장기 지역과 인접한 곳인 구룡포 지역의 안산암에 대한 지화학적 연구를 하였으며, 박선애(1993)는 장기분지와 어일분지의 화산암류에 대한 암석화학적 연구를 하였는데, 이들 지역의 화산암은 모두 비알칼리암계열의 칼크-알칼리(calc-alkaline)계열의 암석화학적 특징을 보인다고 하였다. Pouclet *et al.*(1995)은 한반도, 동해 및 일본의 화산암류에 대한 암석화학적 연구를 수행하였는데, 장기 지역의 화산암을 경상분지의 화산암류와 같은 조구적 환경, 즉, 안데스 타입(Andean type)의 대륙 화산호에 관련되는 칼크-알칼리 계열의 화산암으로 취급하였다.

노진환(1989)은 장기 지역의 제3기층 응회질암에서 산출되는 불석의 성인에 관해서 연구하였으며, 김춘식 등(1993)은 장기 지역에 분포하는 현무암질 용회암의 산상과 암석기재학적 특징을 연구하였는

데, 현무암질응회암은 수저 분출에 따른 비폭발성 급랭 파쇄(quenching fragmentation)에 의해서 형성된 안산암질~현무암질 하이알로클라스타이트(hyaloclastite)라고 결론지었다.

제3기 분지에 나타나는 현무암질 화산암류에 대한 지화학적 연구 결과(이현구 등, 1995; Song *et al.*, 1997)에 의하면, 포항분지 이남에 분포하는 현무암질암은 K-Ar 연령이 16~22 Ma이며, 비알칼리암(subalkaline) 계열에 속하는 반면, 포항분지의 달전 부근에 소규모로 분포하고 있는 현무암질암은 K-Ar 연령이 13.6~15.2 Ma이고 알칼리 계열에 속한다. 제3기 현무암질암의 이러한 차이는 16 Ma를 전후로 해서 한반도 일원에서 지구조 환경이 급변하면서 마그마의 성인도 함께 바뀌었을 가능성을 보여주는 것이다(김인수, 1992; Song *et al.*, 1997).

일반지질

제3기 장기분지의 지질은 호岩(1924)에 의해 최초로 연구되었다. 호岩은 본 지역의 제3기층을 크게 하부의 장기층군과 상부의 범곡리층군으로 나누었으며, 이들을 제4기의 연일현무암이 부정합적으로 피복한다고 하였다. 장기층군은 하부로부터 장기역암, 늪대리조면암질응회암, 하부합탄층, 하부현무암질응회암, 상부합탄층, 금오리안산암질응회암, 상부현무암질응회암으로 구성되고, 상위의 범곡리층군과 부정합 관계로 해석하였다. 범곡리층군은 창암·방산리진주암과 망해산응회암으로 구성된다고 하였다. 또한 퇴적암층의 성질, 산상, 그리고 식물 화석 등에 근거하여 장기층군의 시대를 올리고세로 추정하였고, 육지에 가까운 천수 또는 소택지에서 퇴적되었으며, 천수의 성질은 담수 내지는 호수인 것 같다고 추측하였다. Huzioka(1972)는 대형 식물 화석에 근거하여, 김봉균 등(1975)은 포자 및 화분 화석에 근거하여 장기층군의 시대를 초기 마이오세로 추정하였다.

Yoon(1986, 1989, 1991)은 호岩과 달리 하부를 범곡리, 상부를 장기층군으로 층서를 재정의 하였다. 윤선 등(1991)과 박성준(1988)은 장기 지역에 나타나는 제3기 퇴적암류를 크게 하위의 오천층과 상위의 망해산층으로 구분하였으며, 양자의 관계를 부정합으로 보았다. 장기분지의 기반암을 이루고 있는 에오세 전기~중기의 화산암류는 왕산층이라고 총칭되며(Shimazu *et al.*, 1990; Yoon, 1989; 윤선 등, 1991), 석영안산암, 석영안산암질용결응회암 및 화산각력암으로 구성되어 있다.

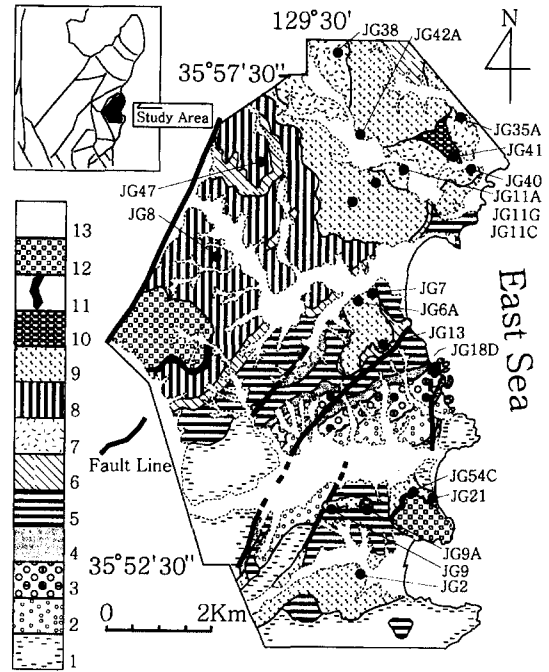


Fig. 1. Geologic map and analysed sampling sites of the study area. Modified from Tateiwa (1924) and Noh (1989). 1; Wangsan Formation, 2; Nuldaeri Tuff, 3; Lower Coal-bearing Formation, 4; Lower Basaltic Tuff, 5; Upper Coal-bearing Formation, 6; Keumori Tuff, 7; Calc-alkaline basaltic andesite, 8, 9, 10; Upper Basaltic Rocks (8; Basaltic Tuff, 9; Tholeiitic Basalt, 10; Tholeiitic Basaltic Andesite), 11; Bangsanri Perlite, 12; Manghaesan Tuff, 13; Alluvium.

이현구 등(1992)은 제4기 연일현무암(호岩, 1924)으로 기재된 현무암이 모두 K-Ar 연대가 초기 마이오세에 해당함을 밝히고, 산출 상태로 보아 이들은 장기층군의 퇴적과 거의 같은 시기의 화산활동에 의한 화산암류로 취급되어야 할 것이라고 주장하였다. 장기 지역의 지질은 고 제3기의 산성화산암류의 기반암 위에 부정합 관계로 퇴적된 신 제3기 마이오세의 퇴적암과 화산암류로 구성되어 있다. 기반암을 구성하는 산성화산암류(왕산층; Yoon, 1989)는 한반도 동남부의 제3기 화산암 중 최고기인 에오세(46~57Ma; 진명식 등, 1988, 1989)의 것이다.

기반암 위에 부정합 관계로 퇴적된 분지 충전물인 신 제3기 지층은 최대 총후가 약 1800 m에 달하며(노진환, 1989), 많은 단층의 영향으로 지층이 반복되거나 교란되어 분포한다. 신 제3기 지층은 하위로부터 늪대리응회암, 하부합탄층, 하부현무암질암, 상부합탄층, 금오리응회암, 양회석현무암질안산암, 상부현무암질암, 방산리진주암, 망해산응회암으로

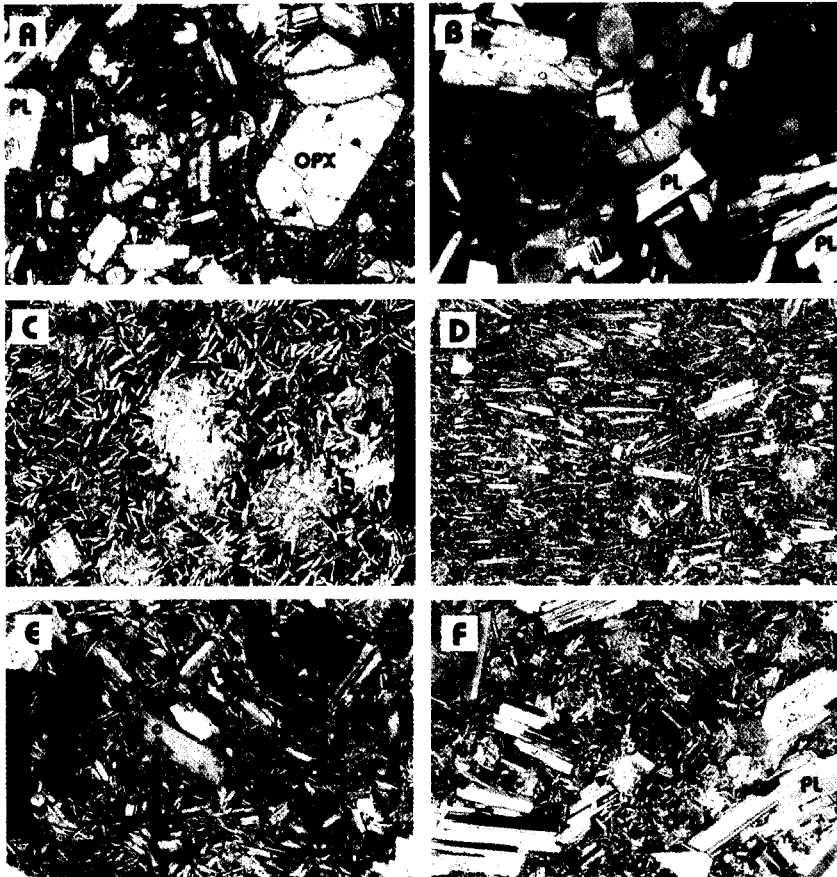


Fig. 2. A) Calc-alkaline basaltic andesite (CBA) with phenocrysts of plagioclase, orthopyroxene and clinopyroxene (under crossed polars, x40, black bar in plates = 5 mm length). B) CBA showing glomeroporphyritic texture. C) Tholeiitic aphyric basalt (TAB) showing ophitic texture (x20). D) TAB showing trachytic texture (x40). E) Tholeiitic porphyritic basalt (TPB) with olivine phenocryst altered to iddingsite (x40). F) TPB with plagioclase and clinopyroxene phenocrysts. Plagioclase phenocrysts occasionally show sieve texture (x20).

로 구성되어 있다. 본 연구의 주요 대상암체는 장기층군 중 양회석현무암질안산암, 상부현무암질암이다(Fig. 1).

신 제3기층의 퇴적암류는 미고결 상태의 역암, 사암, 이암과 응회질 퇴적암, 갈탄 등으로 구성되어 있으나 대부분 역암과 사암이 우세한 암상을 이룬다. 이들은 상부 및 하부함탄층에 분포한다. 상부 및 하부 함탄층에서 퇴적암들은 응회암층들과 부분적으로 호층을 이루거나 혼재하는 경향을 보여준다. 신 제3기 화산암류는 중성 내지 산성응회암과 현무암 및 현무암질응회암, 그리고 안산암으로 이루어져 있다.

눌대리응회암은 백색 내지 담회색을 띠고, 부석편과 기반암 암편, 그리고 사장석 및 흑운모를 함

유하고 있다. 금오리응회암은 백색 또는 담녹색의 부석편과 장경 1 cm 이하의 현무암편을 흔히 함유하며 미량의 각섬석을 포함하고 있다. 하부 및 상부현무암질암은 모두 현무암질응회암과 현무암용암류로 구성되어 있다. 현무암질응회암은 암갈색 내지 황갈색을 띠며, 현무암질 암괴나 암편을 다수 함유하는 라필리응회암(lapilli tuff)과 암편이 거의 없는 유리질 응회암(vitric tuff)으로 구성된다. 하부 및 상부현무암질암은 별개의 층을 이루지만 상부현무암질암층이 보다 두터운 층을 이루고 현무암질 암괴를 더 많이 함유한다는 것 이외에는 암상에 있어서 별다른 차이를 보이지 않는다. 상부현무암질용암류는 이전의 연구에서는 칼크-알칼리 계열로만 기재되었다. 그러나, 본 연구를 위한 화학 분석 결과,

Table 1. Major elements and CIPW normative mineral compositions of the volcanic rocks in Janggi area.

sample	JG2	JG6a	JG7	JG8	JG9	JG9a	JG11a	JG11g	JG11c	JG13
SiO ₂	49.14	47.39	48.75	50.78	49.99	50.34	55.84	49.86	51.98	49.31
TiO ₂	1.70	1.33	1.56	1.26	1.68	1.28	0.92	1.61	1.02	1.78
Al ₂ O ₃	15.81	19.05	18.09	10.97	10.65	16.82	17.9	18.29	19.01	16.77
Fe ₂ O ₃	12.45	10.23	10.49	9.92	12.09	10.24	7.98	10.67	8.82	12.37
MnO	0.19	0.17	0.16	0.17	0.18	0.19	0.16	0.18	0.18	0.20
MgO	4.30	4.71	3.94	4.61	4.32	5.18	3.22	3.56	4.01	3.56
CaO	8.29	10.42	9.67	10.13	8.37	9.17	7.20	9.54	9.14	8.84
Na ₂ O	3.47	3.28	2.95	3.22	3.40	3.34	3.46	3.34	3.68	3.94
K ₂ O	1.08	0.24	0.38	0.49	0.74	0.55	1.34	0.69	0.58	0.44
P ₂ O ₅	0.34	0.24	0.33	0.26	0.36	0.30	0.25	0.34	0.41	0.28
CO ₂	0.23	0.28	0.12	0.25	0.08	0.36	0.18	0.07	0.12	0.26
H ₂ O	3.21	2.75	3.54	1.10	3.32	2.30	1.55	1.82	1.00	2.43
Total	100.21	100.09	99.98	100.16	100.18	100.07	100	99.97	99.95	100.18
Q	0.00	1.66	2.09	0.87	1.43	5.47	8.34	5.71	5.92	0.00
Or	6.69	1.48	2.33	2.98	4.54	3.31	8.10	4.14	3.49	2.69
Ab	30.66	28.56	26.10	27.78	29.98	28.99	29.95	28.82	31.44	34.50
An	25.39	37.6	36.65	33.76	26.36	30.03	30.06	33.47	34.01	27.72
Di	12.91	11.06	9.65	13.19	12.32	11.55	4.22	9.93	7.38	13.44
Hy	13.51	7.00	16.60	15.92	18.07	7.95	14.99	4.48	6.73	10.75
Ol	3.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.56
Mt	3.22	0.59	2.75	2.48	3.13	0.65	1.98	0.59	0.59	3.19
He	0.00	10.13	0.00	0.00	0.00	10.06	0.00	10.47	8.51	0.00
Il	3.38	0.00	3.11	2.45	3.34	0.00	1.80	0.00	0.00	3.51
Ap	0.77	0.55	0.75	0.57	0.82	0.68	0.55	0.76	0.9	0.64

쉴레이이트(tholeiitic) 계열이 나타남으로 칼크-알칼리 계열의 현무암질안산암(일부 안산암)과 쉴레이이트 계열의 현무암(일부 현무암질안산암)으로 분류되어진다. 쉴레이이트는 이전의 연구들에서 칼크-알칼리 계열로 기재되어 왔으나 본 연구에서는 칼크-알칼리 계열의 현무암질안산암과 다른 층서 단위로 나누었다. 방산리진주암층은 흑색을 띠며 흑요암 또는 용결응회암(welded tuff)의 암상을 보이고 있다. 망해산응회암층은 회백색 또는 담홍색을 띠며 부석편과 암편을 다량으로 포함하는 라필리응회암과 부석편은 있으나 암편은 없는 응회암 또는 응회질사암으로 나타난다. 본 암은 특징적으로 단백석 결핵체(opal concretion)를 포함하고 있다.

연구 방법

1998년 9월부터 1999년 4월까지 총 15회에 걸쳐 야외 조사를 실시하였으며, 야외 조사시 1:25,000 축척의 구룡포, 용덕, 감포, 어일도폭 지형도를 사용하였다. 채취된 약 60여 개의 시료 중 40개를 선택하여 박편을 제작하였다. 현미경 관찰을 통하여

암석의 조직과 구성 광물을 기재하고, 암상을 대표하는 것을 골라 점샘법으로 모드 분석을 실시하였다. 주성분 원소 분석은 경북대학교 지질학과의 X-선형광분광분석기(XRF; Phillips 1404/10)를 이용하여 수행하였으며, 미량 및 희토류원소 분석은 기초과학지원연구소 대전 본소에서 유도결합플라즈마 원자방출분광분석기(ICP-AES)를 이용하여 실시하였다. 주성분원소는 휘발성 물질이 없는 상태를 100%로 재제산하였다. 전철의 양은 Fe₂O₃*로 나타내었으며, Fe₂O₃* = 0.9×FeO*로 total FeO를 계산하였다.

야외 산상 및 암석기재

칼크-알칼리 현무암질안산암

본 역의 칼크-알칼리 현무암질안산암은 단사휘석과 사방휘석을 모두 포함하고 있는 양휘석현무암질안산암으로, 대체로 암청색을 띠며 비교적 치밀하고 육안상 반정이 잘 관찰되지 않으며, 판상 절리를 보이기도 한다. 경하에서 사장석, 단사휘석(cpx), 사방휘석(opx)의 반정이 보이는 반상 조직을 나타

Table 1. Continued.

sample	JG18a	JG18d	JG21	JG35a	JG38	JG40	JG41	JG42a	JG47	JG52a	JG54c
SiO ₂	56.02	52.95	49.59	58.95	54.18	55.57	49.87	52.98	50.37	53.16	49.99
TiO ₂	1.52	1.66	1.25	0.90	0.83	0.89	1.34	1.56	1.78	1.25	1.63
Al ₂ O ₃	15.97	15.13	16.72	16.40	18.57	17.67	17.24	15.96	15.51	18.94	15.37
Fe ₂ O ₃	9.37	11.71	10.19	7.04	8.03	8.49	10.32	10.97	12.59	7.96	11.64
MnO	0.20	0.24	0.18	0.15	0.18	0.15	0.18	0.23	0.21	0.15	0.20
MgO	2.99	3.86	5.21	2.82	3.67	3.79	4.31	3.99	4.81	2.91	3.69
CaO	6.29	6.84	9.14	5.72	7.80	7.44	8.69	8.14	9.08	9.26	8.36
Na ₂ O	4.21	3.70	3.43	3.76	3.75	3.33	3.69	3.78	3.64	3.58	3.34
K ₂ O	1.26	1.15	0.56	1.44	1.26	1.14	0.82	0.89	0.77	0.93	1.03
P ₂ O ₅	0.44	0.36	0.27	0.20	0.30	0.26	0.32	0.43	0.36	0.29	0.34
CO ₂	0.01	0.00	0.35	0.13	0.23	0.00	0.41	0.00	0.02	0.08	0.19
H ₂ O	1.74	2.54	3.08	2.51	1.19	1.30	2.78	1.28	1.07	1.49	4.37
Total	100.02	100.14	99.97	100.02	100	100.03	99.97	100.21	100.22	99.99	100.16
Q	11.81	10.06	0.00	16.86	3.65	8.03	0.00	8.39	0.00	7.92	7.80
Or	7.57	6.98	3.46	8.75	7.62	6.85	5.07	5.32	4.66	5.56	6.39
Ab	36.18	32.03	30.27	32.62	32.34	28.69	32.49	32.29	31.35	30.76	29.49
An	21.31	21.76	29.83	24.21	30.74	30.5	29.21	24.17	24.15	33.34	24.98
Di	6.07	8.44	13.09	2.87	5.81	4.69	11.43	11.00	16.30	9.07	12.70
Hy	4.79	5.97	15.31	5.92	15.61	16.87	12.80	4.98	12.78	3.20	3.77
Ol	0.00	0.00	2.36	0.00	0.00	0.00	2.99	0.00	3.32	0.00	0.00
Mt	0.65	0.82	2.6	0.49	1.97	2.08	2.64	0.75	3.19	0.49	0.69
He	9.08	11.44	0.00	6.89	0.00	0.00	0.00	10.57	0.00	7.75	11.70
Il	0.00	0.00	2.47	0.00	1.61	1.72	2.65	0.00	3.46	0.00	0.00
Ap	0.98	0.81	0.62	0.46	0.66	0.57	0.73	0.94	0.79	0.63	0.79

낸다(Fig. 2A). 사장석 반정은 크기가 1 mm 정도로 누대 구조를 보이며 형태는 자형이다. 사장석 반정 내에 단사휘석이 포유되어 있는 경우도 있다. 사방휘석 반정은 자형으로 크기가 최대 2.3 mm, 평균 1 mm 이하이며, 단사휘석 반정은 약 5 mm 정도의 크기를 가지고 쌍정이 나타난다. 사방휘석은 개방니콜 하에서 X축에 평행할 때는 연녹색을 띠고 Y축에 평행할 때는 연분홍색을 띠며, 직교니콜 하에서는 평행 소광을 하므로 단사휘석과 쉽게 구별할 수 있다. 반정들은 취반상 조직을 나타내고 있으며, 기질은 사장석 및 휘석 미정, 불투명 광물, 은미정질 물질로 구성되어 있다(Fig. 2B).

솔레아이트 현무암 및 현무암질안산암

솔레아이트 현무암은 조직상 크게 비반상(aphyric) 현무암과 반상(porphyrictic)현무암으로 구분할 수 있으며, 비반상 현무암질안산암은 비반상현무암과 육안상 조직, 경하의 조직에서 거의 차이를 보이지 않는다.

비반상현무암은 구상풍화 현상을 보이기도 하며, 주상절리가 잘 발달된 곳도 있다. 하부는 암갈색을

띠며 괴상이고, 반정이 거의 없는 치밀한 조직을 나타내나, 그 상부는 표면이 거칠고 클링커(clinker)를 쌓아올린 것 같은 아아 용암(aa lava)의 형태로 나타나는 곳도 있다. 현무암의 피더 암맥(feeder dike)이 폭 1.2 m~5 m로 다수 하위층을 관입하는 곳도 있다. 비반상현무암은 경하에서 비반상 조직(aphyric texture)을 보이며, 사장석은 래스(lath)상으로 불규칙하게 배열되어 있으며, 크기는 평균 0.2 mm이다. 휘석과 사장석 래스, 불투명 광물, 유리질로 구성되어 있으며, 오피틱(ophitic), 서브오피틱(subophitic) 및 인터서털(intersertal) 조직을 보이기도 한다(Fig. 2C). 개방니콜 하에서 단사휘석은 옅은 녹색을, 유리질은 짙은 황갈색을 띠고, 직교니콜 하에서 휘석의 간섭색은 붉거나 푸른색으로 쌍정을 보여 준다. 사장석 래스의 크기가 0.1 mm~0.3 mm 정도이며 단사휘석과 사장석 래스들이 전형적인 조면암질 조직(trachytic texture)을 보여 주는 것도 있다(Fig. 2D). 일부 경하에서 반상 조직을 보이는 것이 있으나, 크기가 평균 1 mm 정도(최대 2 mm)인 사장석 반정은 극히 소량이고, 대부분이 사장석 미반정(microphenocryst)으로 구성되어 있다. 사장석 미

Table 2. Trace element abundances (ppm) of the volcanic rocks in Janggi area.

sample	JG2	JG6a	JG7	JG8	JG9	JG9a	JG11a	JG11g	JG11c	JG13
Ba	266	100	153	154	287	182	373	170	174	230
Rb	23.30	1.70	9.70	10.00	23.60	8.70	25.30	13.60	7.00	3.50
Sr	389	459	477	462	405	454	489	460	515	550
Cs	0.54	<0.10	<0.10	<0.10	0.59	0.29	0.50	<0.10	<0.10	<0.10
Li	9.25	23.40	10.10	5.19	15.00	9.69	10.90	7.44	8.54	8.71
Ga	37.90	25.50	30.50	29.70	38.00	32.60	42.80	32.10	30.20	35.80
Ta	0.36	0.86	5.59	1.25	0.44	0.66	0.44	0.44	0.25	0.50
Nb	5.22	3.97	4.60	4.26	5.44	5.27	4.39	4.85	3.53	4.79
Hf	3.98	2.80	3.67	2.76	4.28	3.19	4.02	4.01	2.63	3.67
Zr	153	108	147	120	167	127	164	151	111	143
Y	32.40	23.60	29.80	22.50	33.30	24.10	24.40	31.00	23.10	29.20
Th	2.30	1.14	1.44	1.25	2.49	1.56	3.43	1.51	1.33	1.70
U	0.51	0.30	0.38	0.36	0.55	0.35	0.88	0.37	0.35	0.44
Cr	35.40	50.20	31.40	65.60	31.50	72.90	13.80	30.10	20.70	3.70
Ni	15.40	27.20	15.90	14.30	13.50	29.80	9.40	17.20	22.70	4.18
Co	52.10	43.80	41.60	75.50	45.60	71.10	75.40	47.30	60.60	47.70
Sc	39.30	32.80	33.90	34.70	37.30	32.60	24.00	35.20	26.10	39.90
V	348	277	293	259	325	252	206	311	194	401
Cu	102	78.50	80.10	49.30	107	70.80	35.90	84.60	36.90	42.10
Pb	7.24	4.32	5.59	4.51	7.86	4.50	8.97	5.38	4.89	6.70
Zn	99.30	77.40	85.80	76.00	100.00	79.60	80.20	90.70	78.30	101.00
Cd	0.17	<0.10	<0.10	<0.10	0.23	0.18	0.15	0.18	0.18	0.25
S	511	610	611	481	504	684	1591	799	519	503
As	2.34	1.27	1.99	1.53	2.77	2.10	3.22	1.79	1.87	0.84
Se	0.67	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	0.87	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20
Sb	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	2.26	<0.10	<0.10	<0.10

반정은 크기가 평균 0.4 mm 정도이며 자형을 이루고 있다. 감람석 반정과 감람석이 변질된 이딩사이트가 소량 나타난다. 기질은 사장석과 휘석 미립(microgranules), 유리질 물질로 구성되어 있으며 입간충진(intergranular) 조직을 보여준다(Fig. 2E). 크기가 평균 5 mm 이상인 기공이 발달해 있고, 사장석 래스가 평행하게 배열된 유상 조직도 관찰된다. 비반상의 슐레아이트 현무암질안산암은 육안상 비반상 슐레아이트 현무암과 거의 구별이 되지 않으며, 기질은 조면암질 조직을 보인다.

반상현무암은 일부 장석이 풍화되어 노란색을 띠는 것도 있으나 암흑색을 띠며, 중립질의 장석 반정을 다량 함유하고 있다. 경하에서 반상현무암의 사장석 반정은 그 크기가 다양하여 세리에이트(seriate) 조직을 보인다. 사장석 반정은 그 크기가 평균 3.5 mm(최대 6.5 mm)이고 중립질이며 자형을 나타낸다. 기질은 사장석 래스와 휘석 미립, 유리질 물질 등이다. 사장석 래스와 휘석은 입간충진 조직, 유리질과 래스는 인터서털 조직을 보인다. 사장석 반정은 체(sieve) 조직을 보여주는데, 이것은 사

장석에 용융체가 포획되어 형성된 조직이다(Fig. 2F). 중립질(최장 5 mm)의 사장석 반정과 휘석 반정을 포함하고 있는 것에서 사장석 반정은 평균 2.5 mm 크기로 최대 4 mm이며, 체 조직을 보이고 있다. 휘석 반정은 단사휘석이며 크기가 0.8 mm 정도이다. 기질부는 사장석 미정, 휘석 미립, 유리질 물질로 구성되어 있다.

암석 화학적 특징

주성분 원소

본 역 화산암류의 주성분 원소 분석 결과 및 CIPW 노름 값은 Table 1과 같다. Irvine and Baragar(1971)에 의한 K_2O+Na_2O 대 SiO_2 도표에 점시한 결과, 비알칼리암(subalkaline) 계열에 해당된다(Fig. 3). $(Na_2O+K_2O)-FeO^*-MgO$ (AFM) 삼각도와 Miyashiro(1974)의 FeO^*/MgO 대 SiO_2 도표에 점시한 결과, 칼크-알칼리 계열과 슐레아이트(tholeiite)의 계열로 나뉘어진다(Fig. 4).

Le Bas *et al.*(1988)의 암석 분류에서 현무암에서

Table 2. Continued.

sample	JG18a	JG18d	JG21	JG35a	JG38	JG40	JG41	JG42a	JG47	JG52a	JG54c
Ba	401	270	172	427	411	346	207	246	177	201	209
Rb	42.10	21.20	15.80	87.00	20.90	38.90	22.70	15.10	10.20	20.70	21.10
Sr	448	391	447	389	655	479	444	412	396	459	479
Cs	2.48	<0.10	0.82	6.68	0.82	6.50	1.89	0.54	0.76	0.87	0.88
Li	6.33	8.62	14.30	10.20	8.33	10.10	10.10	8.88	5.95	6.06	10.90
Ga	47.60	38.60	30.10	38.20	37.50	33.70	28.40	30.70	27.70	28.80	32.20
Ta	0.79	0.37	0.43	0.63	0.54	0.44	0.99	0.98	0.89	0.53	0.38
Nb	8.01	4.90	5.00	6.36	4.10	4.29	5.07	5.80	5.10	4.77	4.92
Hf	5.07	4.18	3.37	5.49	3.04	3.65	3.20	3.64	3.79	3.61	3.59
Zr	209	153	130	247	136	160	149	163	169	163	151
Y	37.90	32.10	24.00	31.10	19.90	24.00	26.00	28.40	29.80	26.00	30.10
Th	3.85	2.39	1.66	8.34	3.46	3.16	1.64	2.61	1.56	1.87	2.03
U	1.05	0.60	0.42	2.08	0.79	0.79	0.39	0.66	0.37	0.51	0.49
Cr	3.63	4.01	65.30	4.08	10.00	8.73	35.90	29.30	60.40	39.90	37.20
Ni	3.27	6.52	26.30	3.35	9.96	7.35	16.70	6.69	14.80	13.00	13.10
Co	79.90	45.40	60.60	36.80	37.30	41.10	55.80	40.00	44.70	61.60	34.30
Sc	26.30	36.90	33.00	17.10	16.90	21.60	31.20	32.40	40.90	29.00	37.60
V	156	328	259	164	185	202	301	317	426	283	398
Cu	23.50	82.40	62.70	28.60	28.60	42.70	56.20	52.90	103.00	69.40	101.00
Pb	10.57	7.98	5.07	13.24	8.78	8.48	5.54	6.93	8.08	6.02	6.69
Zn	100.00	104.00	80.50	64.70	72.10	77.00	90.20	97.90	107.00	86.20	109.00
Cd	0.24	0.28	<0.10	0.39	0.25	0.23	0.27	0.27	0.34	0.28	0.29
S	378	485	531	359	486	509	552	790	563	607	552
As	2.51	2.43	1.51	4.93	2.05	3.33	2.79	1.10	1.28	1.73	1.69
Se	0.63	0.34	<0.20	0.27	0.91	0.40	0.65	0.78	0.69	0.65	0.92
Sb	<0.10	<0.10	<0.10	0.42	0.26	0.43	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10

안산암까지의 조성 범위를 나타내며(Fig. 3A), 칼크-알칼리 계열의 암석은 SiO₂ 함량이 54.97 wt.%에서 60.54 wt.%로 대부분 현무암질안산암의 영역에 도시된다. 56 wt.%를 현무암질안산암과 안산암의 경계로 했을 때(Cox *et al.*, 1979; Barsdell and Berry, 1990)는 대부분이 안산암이나 Le Bas *et al.* (1988)의 분류를 따랐다. 쏘레아이트 계열은 SiO₂ 함량이 48.83 wt.%에서 54.25 wt.%로 현무암과 현무암질안산암 영역에 해당된다. 그러나 대부분 현무암 영역에 도시된다. 쏘레아이트 계열은 CIPW 노움값에서 감람석이 나타나며(Table 1), 노움값으로 현무암질암을 분류한 Yoder and Tilley(1962)의 CIPW 노움 사면체(normative tetrahedron) 도표(Fig. 5)에서 감람석쏘레아이트와 쏘레아이트의 영역에 도시된다.

쏘레아이트 계열과 칼크-알칼리 계열로 뚜렷이 구분되기 때문에 암석 화학적 특징은 두 계열로 나누어 기재한다. 암석 기재적 특징과 함께 쏘레아이트 현무암은 다시 비반상현무암(TAB), 반상현무암(TPB) 및 비반상현무암질안산암(TABA)으로 나누어

질 수 있고, 칼크-알칼리의 현무암질안산암 및 안산암은 칼크-알칼리 현무암질안산암(CBA)으로 통일하여 기재하였다. 혼동을 피하기 위하여 쏘레아이트의 반상 및 비반상현무암, 현무암질안산암을 모두 지칭할 때는 쏘레아이트, 반상 및 비반상현무암을 함께 지칭할 때는 쏘레아이트 현무암(TB; tholeiitic basalt)이라고 기재하였다.

쏘레아이트는 SiO₂의 함량 변화 폭이 좁기 때문에 SiO₂에 대한 각 산화물의 도표는 그 변화 경향을 잘 알아 보기 어렵다. 따라서 각 산화물의 변화를 MgO에 대하여 나타내었다(Fig. 6). MgO 대 SiO₂ 도표에서 MgO 함량이 감소할 때 CBA는 급격한 증가를 보이고, TB는 SiO₂의 함량이 거의 일정하며, TABA는 TB의 경향과 유사하나 미약하게 증가한다. MgO 함량의 변화에 관계없이 TB의 K₂O와 Na₂O 함량은 뚜렷한 경향을 나타내지 않으며 넓게 분산되고, TABA와 CBA는 MgO 함량이 감소될수록 증가하는 양상을 나타낸다. P₂O₅는 쏘레아이트는 약간 증가하나 CBA는 감소한다. MgO 대 Fe₂O₃*, TiO₂ 도표에서 MgO 함량이 감소함에 따라

Table 3. REE abundances (ppm) of the volcanic rocks in Janggi area.

sample	JG2	JG6a	JG7	JG8	JG9	JG9a	JG11a	JG11g	JG11c	JG13
La	15.5	9.40	12.80	10.40	16.50	11.80	16.30	13.20	11.20	13.60
Ce	36.9	23.40	31.50	25.10	38.90	28.20	37.50	32.60	27.20	31.00
Pr	5.28	3.47	4.64	3.61	5.74	3.98	5.01	4.82	3.96	4.98
Nd	23.8	16.00	21.50	16.4	24.90	17.60	20.60	22.50	17.80	22.60
Sm	5.79	4.25	5.29	4.07	6.18	4.49	4.69	5.88	4.38	5.84
Eu	1.85	1.46	1.73	1.40	1.86	1.50	1.35	1.90	1.57	2.01
Gd	1.06	0.80	0.99	0.70	1.10	0.77	0.78	1.04	0.75	1.03
Tb	6.93	4.73	6.13	4.57	7.04	4.96	5.26	6.46	4.96	6.70
Dy	5.93	4.72	5.71	4.12	6.67	4.54	4.52	6.09	4.51	5.97
Ho	1.28	1.02	1.17	0.86	1.35	0.95	0.95	1.26	0.96	1.25
Er	3.60	2.82	3.36	2.53	3.88	2.73	2.70	3.52	2.60	3.40
Tm	0.50	0.40	0.49	0.33	0.55	0.38	0.39	0.49	0.36	0.49
Yb	3.32	2.72	3.21	2.28	3.61	2.42	2.55	3.14	2.33	3.07
Lu	0.50	0.40	0.48	0.35	0.52	0.37	0.40	0.49	0.37	0.43
Total	112.24	75.59	99.00	76.72	118.80	84.69	103.00	103.39	82.95	102.37
(Eu/Eu*) _N	0.89	1.00	0.93	0.99	0.86	0.97	0.83	0.94	1.03	0.98
La	21.40	14.80	12.20	22.10	18.50	15.80	12.50	14.60	14.10	12.50
Ce	49.4	36.20	28.60	49.40	41.10	36.00	30.00	35.20	32.80	31.00
Pr	7.13	5.27	4.17	6.59	5.56	5.05	4.40	5.27	4.89	4.52
Nd	30.80	23.70	18.30	24.50	21.10	19.80	18.40	21.80	21.50	18.87
Sm	7.40	6.05	4.51	5.53	4.48	4.50	4.70	5.34	5.48	4.70
Eu	2.22	1.98	1.55	1.34	1.43	1.33	1.50	1.70	1.78	1.51
Gd	1.19	1.09	0.81	5.12	4.23	4.48	4.87	5.62	5.88	4.81
Tb	8.04	6.90	5.18	0.86	0.68	0.76	0.81	0.94	1.00	0.83
Dy	6.75	6.36	4.73	5.37	3.86	4.60	4.98	5.79	5.97	5.00
Ho	1.44	1.27	0.96	1.08	0.80	0.93	1.01	1.18	1.22	1.02
Er	4.04	3.73	2.77	3.12	2.12	2.55	2.82	3.18	3.41	2.82
Tm	0.60	0.55	0.38	0.48	0.32	0.37	0.41	0.49	0.50	0.43
Yb	3.69	3.38	2.65	3.10	2.13	2.30	2.48	2.92	3.14	2.68
Lu	0.58	0.54	0.41	0.47	0.34	0.38	0.41	0.47	0.51	0.44
Total	144.68	111.82	87.22	129.06	106.65	98.85	82.29	104.50	102.18	91.13
(Eu/Eu*) _N	0.88	0.94	0.98	0.77	1.00	0.91	0.96	0.95	0.96	0.97
(La/Yb) _N	3.92	2.96	3.11	4.82	5.87	4.64	3.41	3.38	3.03	3.15

Fe₂O₃* 및 TiO₂의 함량 변화는 매우 유사한 경향을 갖는다. 즉, CBA는 Fe₂O₃*, TiO₂ 함량이 가장 낮으며 슐레아이트는 Fe₂O₃*과 TiO₂ 함량 변화가 MgO 함량이 감소함에 따라 약간 증가하는 경향을 가진다(Fig. 6).

MgO 함량이 감소함에 따라 TB는 CBA와 TABA에 비하여 CaO 함량 분포가 넓게 분산되는 반면, TABA와 CBA의 경우 뚜렷이 감소한다. MgO 대 Al₂O₃/CaO 도표에서 MgO가 감소함에 따라 Al₂O₃/CaO 함량은 CBA와 TABA는 증가하나 TB는 거의 일정하다. MgO 대 Al₂O₃ 도표에서 CBA는 MgO가 감소함에 따라 Al₂O₃ 함량이 전반적으로 미약하게 감소한다. TB 중 TPB는 Al₂O₃ 함량이 많으며,

TAB는 그 함량이 적은 특징을 보이며, TABA의 Al₂O₃ 함량은 TAB와 거의 일치한다. Al₂O₃ 대 CaO 도표에서도 본 역 암석의 Al₂O₃과 CaO 함량이 감소하는 경향을 나타내며, 특히 CBA에서 함량이 더욱 낮다(Fig. 7).

미량 원소

본 역 화산암류에 대한 미량 원소와 희토류 원소의 조성을 Table 2와 3에 나타내었다. TB의 Ba 함량은 100~287 ppm으로 TABA의 영역이 포함된다(177~270 ppm). 그러나 CBA는 346~427 ppm으로 그 함량이 매우 높게 나타난다. Rb 함량은 CBA는 20.987.0 ppm, TB는 1.7~23.6 ppm, TABA

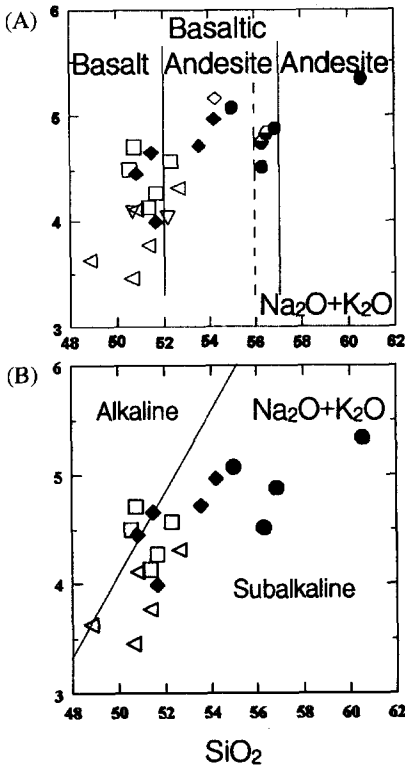


Fig. 3. A) $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs. SiO_2 discriminant diagram for basaltic and andesitic lavas in the study area (after Irvine and Baragar, 1971). B) Nomenclature for basaltic to andesitic lavas in the study area based on TAS-diagram (wt.%) (after Cox *et al.*, 1979). Major element compositions normalized to 100% volatile free. Symbols; filled circle; calc-alkaline basaltic andesite(CBA), open triangle; tholeiitic porphyritic basalt(TPB), open rectangle; tholeiitic ahyric basalt(TAB), filled diamond; tholeiitic ahyric basaltic andesite(TABA). For comparison, data of Park(1993) are also shown. half-filled circle(YA11, YA12), open diamond(YA14), and open triangle(YB11, YB12).

8.7~22.70 ppm으로 JG35a를 제외하면 모두 50 ppm 이하이며 모두 조산대의 high-K 안산암의 함량 범위(100 ppm)에 해당한다. Sr 함량은 CBA가 389~655 ppm, TB는 389~550 ppm, TABA는 391~454 ppm의 성분 범위를 나타내는데, CBA의 JG38을 제외하면 모두 550 ppm 이하이며 Gill (1981)이 제시한 조산대 안산암의 성분 범위 (100~1000 ppm)에 포함된다(Table 2). 전반적으로 LILE (Large Ion Lithophile Elements)의 함량은 TB와 TABA의 함량은 비슷한 경향이 보이며, CBA는 그에 비해 함량이 높게 나타난다(Fig. 8 and 12A).

TiO_2 는 CBA는 0.83~0.92 wt.%, TB는 1.02~

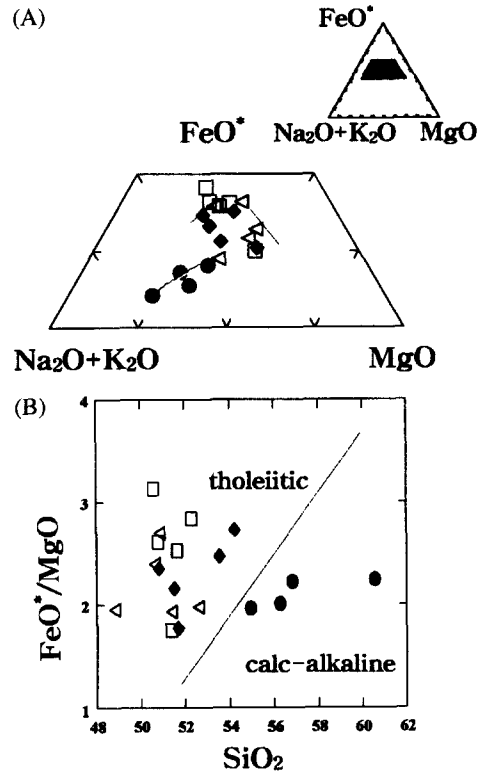


Fig. 4. A) $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})\text{-FeO}^*\text{-MgO}$ (AFM) diagram for basaltic and andesitic lavas in the study area. B) FeO^*/MgO vs. SiO_2 discriminant diagram (after Miyashiro, 1974). Symbols are the same as those in Fig. 3.

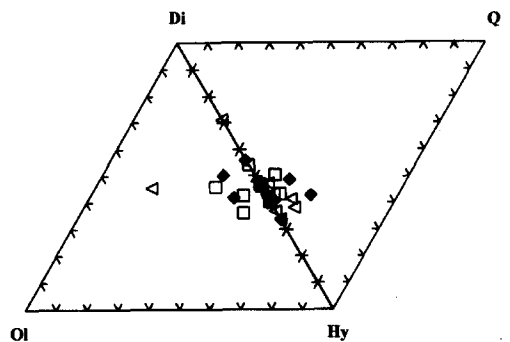


Fig. 5. The classification diagram of basalts according to CIPW normative composition for basaltic and andesitic lavas in the study area (after Thompson, 1984; Yoder and Tilley, 1962).

1.78 wt.%, TABA는 1.28~1.78 wt.%로 비교적 적은 함량을 나타내는데, TB와 TABA에 비하여 CBA의 TiO_2 함량이 더 적은 특징이 있다. Ti은 지판의 침강 섭입에 관련된 대륙연변부나 도호에 분포하는

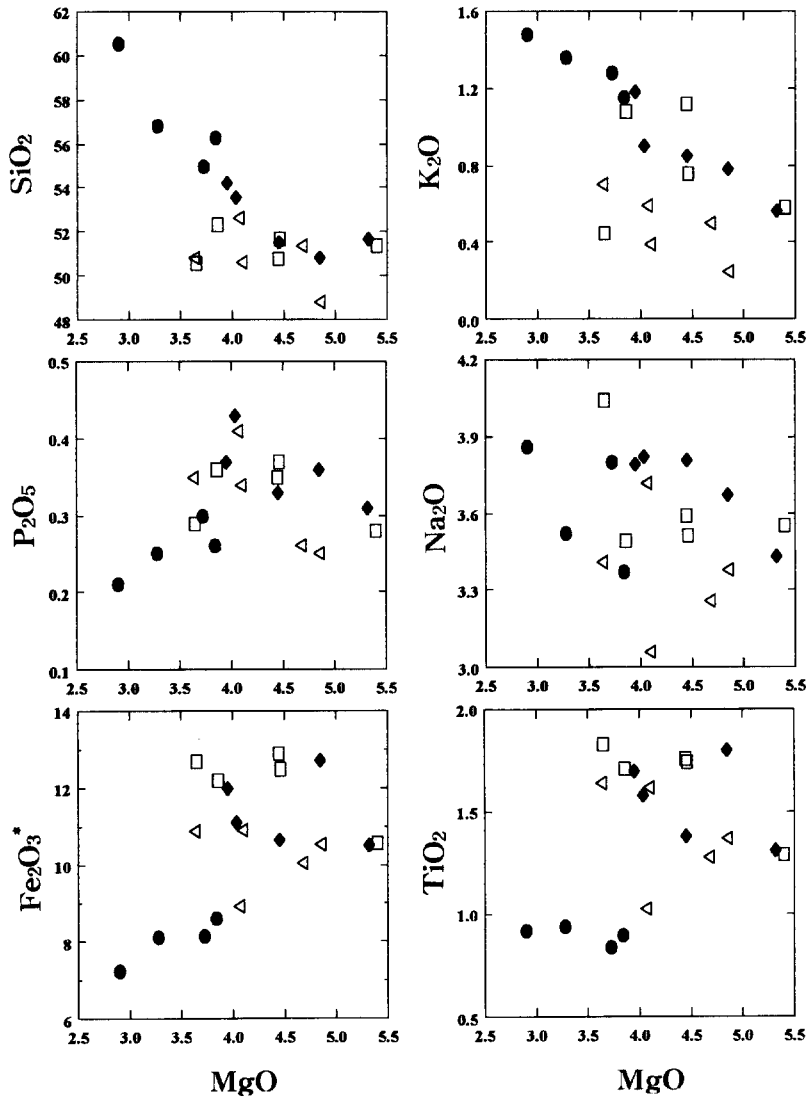


Fig. 6. Harker variation diagrams of MgO (wt.%) vs. major oxides (wt.%) for basaltic and andesitic lavas in the study area. Symbols are the same as those in Fig. 3.

화산암에서 흔히 고갈되기 쉬운 대표적 HFSE(high field strength elements) 중의 하나이다. CBA의 Nb 함량은 4.10~6.36 ppm, TB는 3.53~5.44 ppm, TABA는 4.90~5.80 ppm 범위이고, Y 함량은 CBA는 19.9~31.1 ppm, TB 22.5~33.3 ppm, TABA는 24.1~32.1 ppm 범위로 비교적 낮은 함량을 나타내는데, Nb 함량은 조산대 안산암의 조성 범위(Gill, 1981)인 5~11 ppm에 모두 포함되나 Y 함량은 조산대 안산암의 조성 범위인 20~25 ppm에 해당하거나 더 많다. Hf 함량은 CBA는 3.04~ 5.49 ppm, TB

는 2.63~4.28 ppm, TABA는 3.19~4.18 ppm으로 매우 낮은 조성 범위를 보여준다. Th 함량은 CBA 3.16~8.34 ppm, TB는 1.14~2.49 ppm, TABA는 1.56~2.61 ppm 범위이다. HFSE의 함량은 전반적으로 TB와 TABA가 비슷한 함량을 나타내며, 반정이 농집되었다고 생각되는 표품(JG35a)를 제외하면 CBA에 비하여 그 함량이 높은 편이며 분산된다.

고철질 광물에 농집되는 호정성(compatible) 원소인 Ni, Cr 등은 감람석, 휘석 등의 광물이 분별 정출되면서 제거되는데, Ni 함량은 CBA에서 3.35~

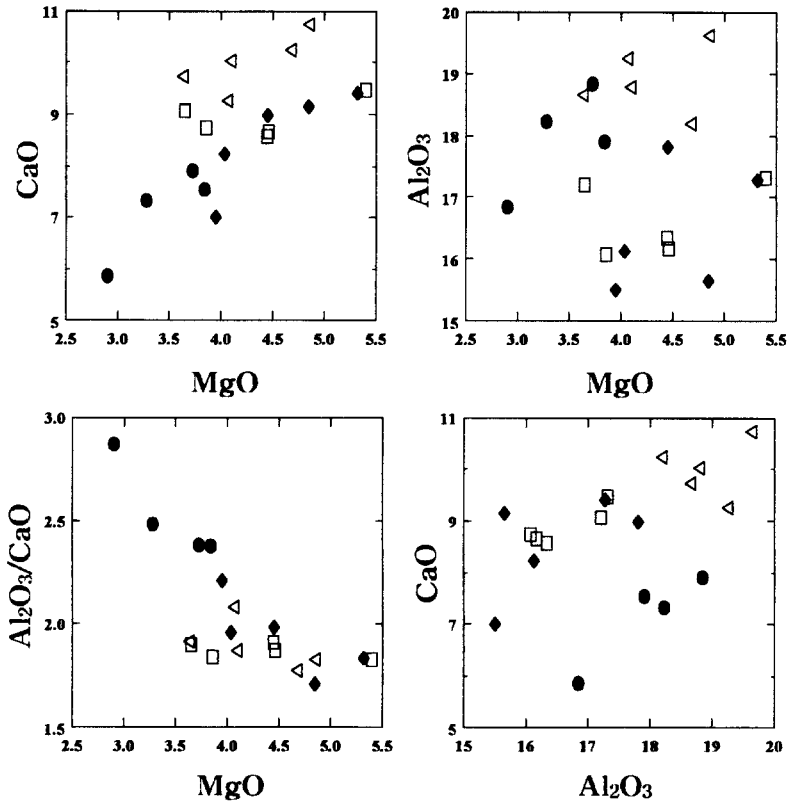


Fig. 7. Harker variation diagrams of major oxides (wt.%) and Al_2O_3/CaO vs. MgO (wt.%) (A, B and C), and CaO vs. Al_2O_3 (D) for the basaltic and andesitic lavas in the study area. Symbols are the same as those in Fig. 3.

9.96 ppm, TB에서 4.18~27.2 ppm, TABA에서 6.52~29.8 ppm 범위이며, Cr 함량은 CBA에서 4.08~13.80 ppm, TB에서 3.70~65.8 ppm, TABA에서 4.01~72.9 ppm 범위이다. 이는 초생마그마의 Ni, Cr 함량(250~350 ppm Ni, 500~600 ppm Cr; Perfit *et al.*, 1980)에 비해 아주 낮은 값이며, MgO 함량이 2.82~5.21 wt.% 범위인 것에 비교하면 Ni 함량은 비슷한 범위의 MgO 함량을 가진 조산대 안산암의 함량과 유사하다. Ni, Cr 함량 외에 Zn, V 함량을 함께 살펴보면 TB와 TABA는 CBA에 비하여 전이 원소의 함량이 많고 분산되는 특징을 보인다(Table 2).

희토류 원소

본 역 화산암의 전체 희토류 원소 함량은 CBA가 98.85~129.06 ppm, TB가 75.59~112.24 ppm, TABA가 82.29~111.82 ppm으로 TB와 TABA의 전체 희토류 원소 함량은 비슷하며 CBA에 비해 낮은 값이다(Table 3, Fig. 9, 12B). Eu 이상값은 CBA이

0.77~1.00, TB가 0.89~1.03, TABA가 0.94~0.97의 범위이다. MgO 대 Eu 이상값의 도표(Fig. 10C)에서 사장석 반정이 농집된 표품이라고 사료되는 Eu 이상값이 높은 JG38, JG11c를 제외하면 CBA와 TABA의 Eu 이상값은 각각 0.77~0.91, 0.94~0.99 범위이다.

(La/Yb)_N 값은 CBA이 4.32~5.87, TB이 2.34~3.15, TABA가 2.96~3.88의 범위이다(Table 5). 희토류 원소의 양상에서 전체적으로 나란하지만 CBA는 슐레이트에 비하여 경희토류 원소(LREE)가 부화하고 중희토류 원소(HREE)가 결핍된 양상을 나타낸다(Figs. 9, 12B). 비반상현무암(TAB)과 비반상현무암질안산암(TABA)의 희토류 원소 양상이 거의 비슷하며, TPB의 전체 희토류 원소 함량이 결핍된 것은 반정의 농집에 따른 것으로 사료된다.

분별결정작용

본 역에 분포하는 슐레이트는 AFM 삼각도에서 분별 초기에 철의 부화가 나타나는 슐레이트

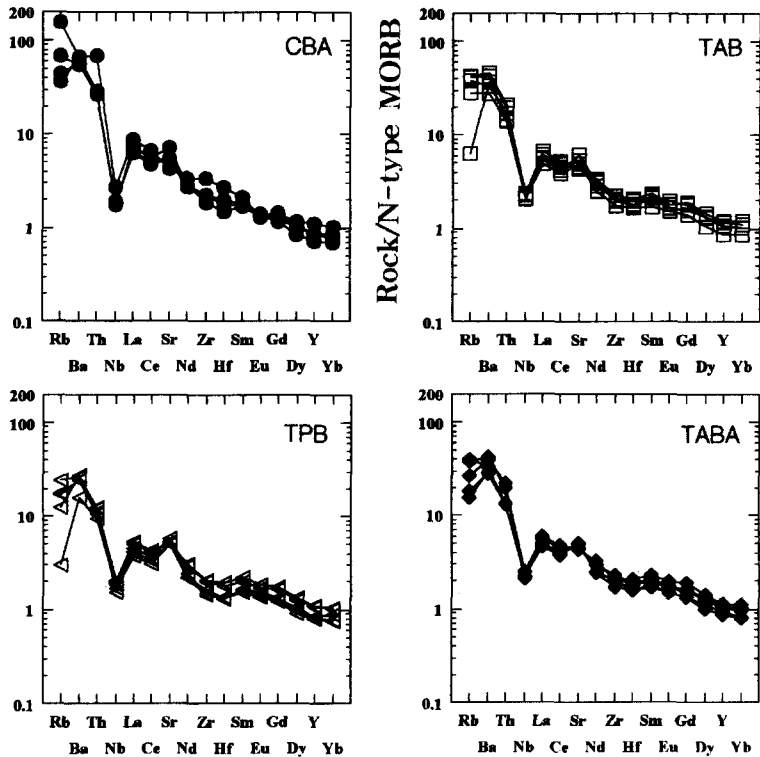


Fig. 8. N-type MORB normalized spider diagram for trace element.

계열의 특징을 잘 나타낸다(Fig. 4). MgO 대 $Fe_2O_3^*$, MgO 대 TiO_2 도표(Fig. 6)에서 MgO 함량이 높거나 SiO_2 함량이 낮은 분별 초기의 암석에서 MgO 함량이 감소함에 따라 $Fe_2O_3^*$ 함량과 TiO_2 함량이 증가하는 경향을 보여준다. 이는 분별의 초기에 자철석(magnetite), 티탄철석(ilmenite) 같은 광물의 생성이 억제되었고 상대적으로 MgO를 소모시키는 광물의 생성이 현저했던 것으로 사료된다. 솔레아이트의 석기에서 미정의 자철석과 티탄철석을 관찰할 수 있다. 이는 분별의 초기에 철 성분의 분별이 적었기 때문에 철 성분이 용융체에 농집되고 있다가 분출 후 용암이 급격히 냉각될 때 생성된 것으로 사료된다. 솔레아이트의 이와 같은 경향과는 달리 CBA는 MgO 함량이 감소함에 따라 $Fe_2O_3^*$ 과 TiO_2 의 함량이 모두 일정하게 감소하고 있는 칼크-알칼리의 전형적인 특징을 나타낸다.

MgO 대 SiO_2 도표에서 TB는 MgO 함량이 감소할 때 SiO_2 의 함량이 거의 일정하며, CBA와 TABA는 증가한다(Fig. 6). 이는 TB의 기원마그마에서 감람석의 분별이 현저했던 것으로 사료된다. 감람석의 분별은 Ni, Cr의 함량도 함께 감소시킨다(Wilson,

1989). 본 역의 화산암은 68~75의 Mg#을 갖는 초생마그마가 400 ppm 이상의 Ni 함량을 지닌 것(Hart and Davis, 1978)에 비교하면 낮은 Mg#, Ni 함량을 나타내므로 감람석 및 단사휘석의 분별작용을 현저히 받은 것으로 사료된다(Münker and Cooper, 1995). TB의 Ni 함량(4.18~27.2)과 Cr 함량(3.7~65.3)이 초기 산물에 비하여 매우 적은 것은 초기 산물과 평형을 이룬 상태가 아닌(e.g., 성종규 등, 1998; Perfit *et al.*, 1980) 즉, 분별정출작용에 의하여 분화된 암석이라는 것을 의미한다. CBA와 TABA 또한 Ni, Cr의 함량이 TB와 비슷하다. 이는 CBA와 TABA 또한 초기 산물로부터 감람석 혹은 단사휘석(또는 Cr-스피넬)의 상당한 분별작용으로 진화하여 Ni, Cr 함량이 결핍되어진 마그마로부터 분화된 것으로 사료된다(Fig. 11).

MgO 대 P_2O_5 함량 변화도(Fig. 6)에서 솔레아이트는 MgO 함량이 감소함에 따라 P_2O_5 함량이 증가하며, CBA는 감소하는 경향을 보인다. 이는 비록 CBA에서 인회석 반정이 관찰되지는 않지만 CBA의 분화에 인회석의 분별정출작용이 영향을 끼친 것으로 사료된다.

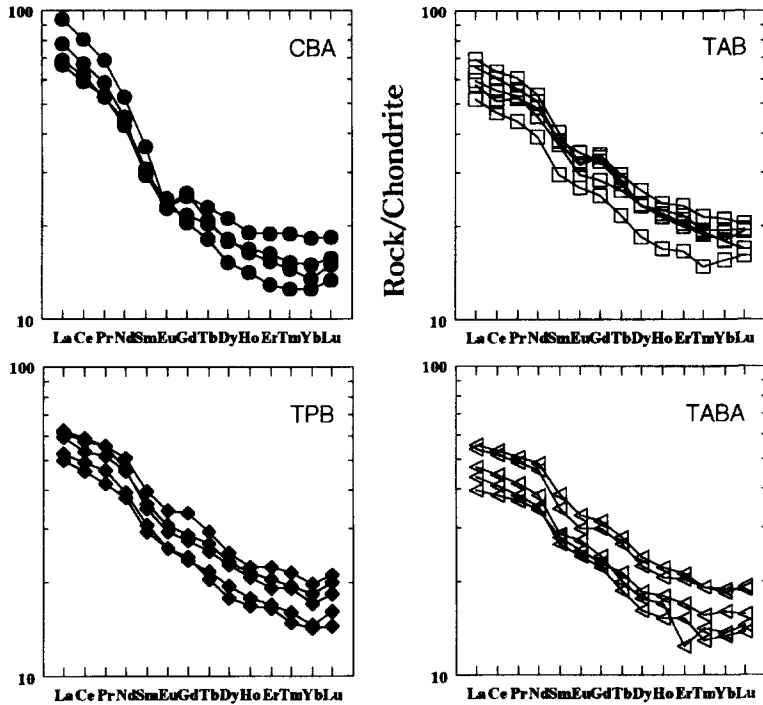


Fig. 9. Chondrite normalized REE patterns.

MgO 대 CaO 도표에서 모든 암석 계열에서 MgO 함량이 감소함에 따라 CaO의 함량이 감소하는 경향을 나타낸다. CBA와 TABA는 MgO 함량 감소에 따른 CaO 함량의 감소가 뚜렷이 관찰되며 이는 단사회석의 분별정출작용이 강했던 것으로 해석될 수 있다(Fig. 7A). TPB도 CaO 함량 변화가 넓게 분산되나 부분적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 감람석의 분별과 함께 휘석의 분별도 있었음을 의미한다(Scarrows and Cox, 1995). 변질 과정 중에 CaO의 유동이 가능하기 때문에 단사회석의 분별정출작용은 MgO에 대한 Sc의 함량, Cr과 Ni의 함량 변화를 고려하여야 한다. 솔레아이트에 비해 CBA는 MgO 함량이 감소함에 따라 Sc은 감소 경향을 나타낸다(Fig. 11). Sc과 Cr은 단사회석에 높은 분배계수(각각 1.4와 3.8; Hart and Dunn, 1993)를 가지며 안산암의 Sc과 Cr 함량이 낮은 것은 단사회석이 분별된 결과로 해석된다.

MgO 대 Al₂O₃ 도표(Fig. 7B)에서 CBA의 Al₂O₃ 함량은 MgO 함량이 감소함에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 CBA에서 사장석의 분별정출작용이 있었던 것으로 해석된다. MgO 대 Sr, MgO 대 Eu, La 대 Eu 도표에서(Fig. 10) 사장석의 분별정출작용으로 Sr, Eu 함량이 감소되었음을 확인할

수 있다. 또한 MgO에 대한 Eu 이상치(Fig. 10C)에서 솔레아이트는 MgO 함량이 감소할수록 Eu의 부(-) 이상이 미약하게 나타나지만 CBA는 현저하게 변화된다. TAB의 두 표본(JG2, JG9)에서 나타나는 Eu의 부(-) 이상은 사장석의 분별이 현저한 부분을 분석한 것으로 사료된다.

MgO 대 Al₂O₃/CaO 도표(Fig. 7C)에서 이와 같은 경향을 살펴볼 수 있다. CBA는 MgO의 함량 감소에 따라 뚜렷한 Al₂O₃/CaO 비가 증가한다. 이는 휘석의 강한 분별작용으로 CaO 함량이 급격히 감소하였기 때문으로 해석된다. TB는 MgO의 함량이 감소를 하더라도 Al₂O₃/CaO 비가 거의 일정하며 이것은 사장석의 분별정출작용이 CaO 함량을 감소시키지만 Al₂O₃ 함량도 함께 감소시킨 것으로 사료된다. Al₂O₃ 함량에 따른 CaO 함량의 변화도(Fig. 7D)에서 TPB는 Al₂O₃ 함량과 CaO 함량이 모두 많다. 이것은 단사회석과 사장석 반정이 농집된 결과로 해석된다.

앞에서 지적한 바와 같이 TB는 MgO 대 Al₂O₃ 도표에서 Al₂O₃ 함량이 낮은 계열과 높은 계열로 구분될 수 있다. 이와 같이 TB가 두 계열로 구분되는 것은; 1) CaO와 Al₂O₃ 함량이 높은 계열에서 사장석과 단사회석이 강하게 분별정출작용을 받아

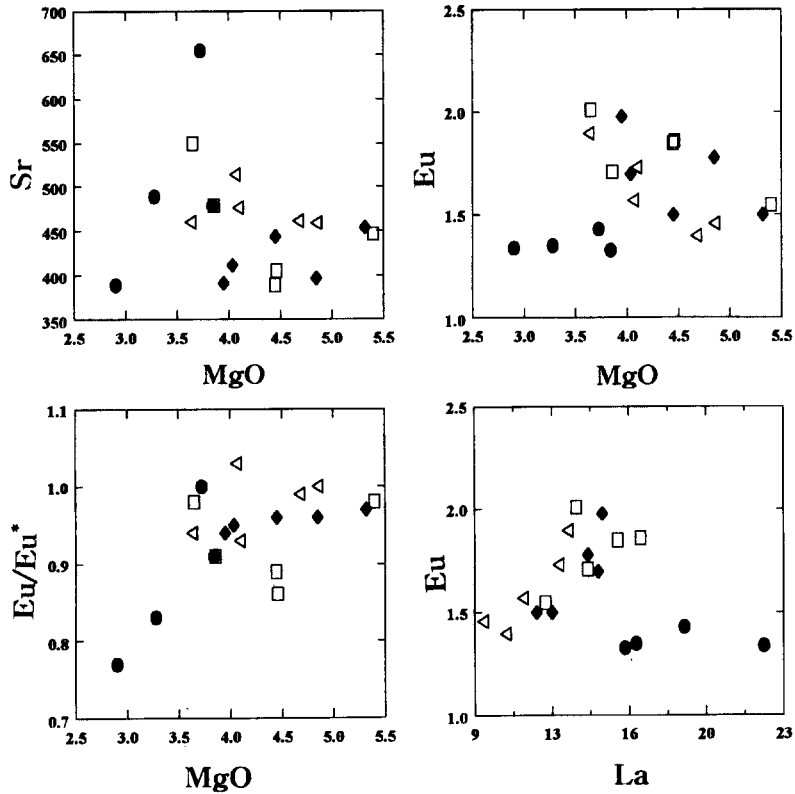


Fig. 10. Harker variation diagrams of trace element (ppm) and Eu anomaly vs. MgO (wt.%) (A, B and C), and Eu (ppm) vs. La (ppm) (D) for basaltic and andesitic lavas in the study area. Symbols are the same as those in Fig. 3.

CaO와 Al₂O₃ 함량이 거의 같은 비율로 분별되면서 제거되었을 때, 강한 분별이 이루어진 곳에서 CaO와 Al₂O₃의 함량이 적어졌거나, 2) CaO와 Al₂O₃ 함량이 원래 적었던 마그마에서 사장석과 단사휘석이 감람석과 함께 분별작용을 일으켰을 때 사장석이나 단사휘석과 같이 CaO와 Al₂O₃을 포함하는 광물이 농집된 부분이 생겼을 때 가능하다.

CaO와 Al₂O₃ 함량이 적은 표품들의 기재적 특징은 무반정질(비반상)로서 경하에서 거의 사장석의 미정으로 구성되어 있는 반면, CaO와 Al₂O₃ 함량이 높은 표품들에서는 사장석과 단사휘석의 반정이 다량 관찰되는 TPB로 기질부는 TAB와 유사한 조직을 갖는다. 이로 미루어 사장석과 단사휘석의 분별정출작용이 마그마 내에서 이루어지고 있던 도중 현무암이 분출한 것으로 사료된다. 특히, 휘석의 분별작용은 희토류 원소 양상(Fig. 9)에서 중희토류 원소의 결핍을 나타내는데 TB에서 이와 같은 경향이 나타나므로 휘석의 분별작용을 고려한다면 Al₂O₃/CaO 함량변화는 MgO의 감소와 더불어 증가하여야

만 한다. 그러나 Al₂O₃ 함량이 적은 표품에서 사장석의 분별작용을 지시하는 Eu의 부(-) 이상이 잘 나타나지 않으며(Fig. 10C), CaO 함량이 높은 표품에서 휘석의 분별작용이 강하였음에도 불구하고, MgO 함량이 감소할 때 Al₂O₃/CaO 함량이 거의 일정한 점으로 미루어 위의 1)의 경우는 지지되기 어렵다.

CaO와 Al₂O₃ 함량이 높은 표품은 감람석 반정과 더불어 사장석과 단사휘석 반정이 많이 발견된다. 희토류 원소의 양상에서 TAB와 TABA가 거의 구별이 되지 않는데 비하여 TPB는 희토류 원소가 결핍되는데 이것은 불호정적인 특성을 갖는 희토류 원소가 결정 내에 적게 농집된 결과라 볼 수 있다(Figs. 9, 12B). 그러므로 CaO와 Al₂O₃ 함량이 적은 표품은 모두 2)의 경우와 같이 반정의 효율적인 제거에 의한 것으로, CaO와 Al₂O₃ 함량이 많은 표품은 단사휘석과 사장석 반정의 농집의 결과로 해석될 수 있다.

TABA는 TB와 CBA의 중간적인 특성을 지닌다. 일견 CBA가 TABA와 같은 마그마 배취(magma

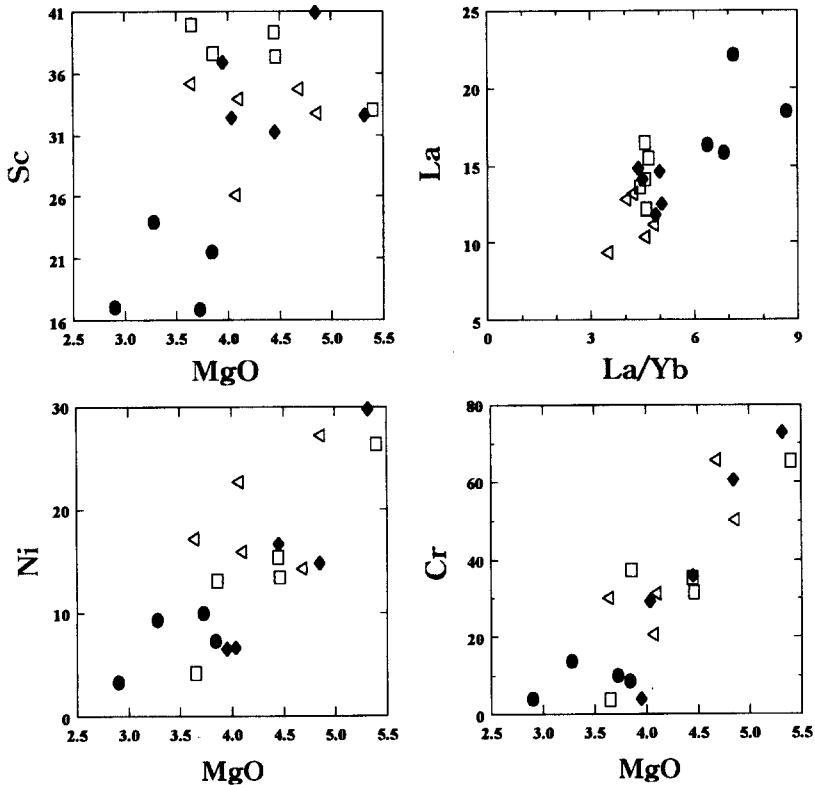


Fig. 11. Harker variation diagrams of trace element (ppm) vs. MgO (wt.%) and La vs. La/Yb for basaltic to andesitic lavas in the study area. Symbols are the same as those in Fig. 3.

batch)로부터 휘석의 분별작용이 주로 이루어져 진화한 경향을 나타낸다. 특히 MgO 대 Al_2O_3/CaO 도표(Fig. 7C)에서 Al_2O_3/CaO 비의 경향이 CBA와 TABA가 비슷한데 이것은 TABA의 모체마그마가 원래부터 Al_2O_3 함량이 낮았고 안산암과 거의 같은 정도로 휘석의 분별정출작용이 있었던 것으로 사료된다.

그러나 암석 계열을 나타내는 AFM 삼각도(Fig. 4)나 MgO 대 Al_2O_3 의 함량 변화도 및 여러 Harker 변화도(Fig. 6)에서 살펴보면 TABA와 CBA가 동원 마그마로부터의 분별정출작용에 의해 분화된 것으로 고찰하기는 어렵다. MgO 대 $Fe_2O_3^*$ 및 TiO_2 도표(Fig. 6)에서 쉘레아이트는 도시 영역이 동일하며, MgO 대 SiO_2 , AFM 도표에서는 TABA가 TB로부터 분화된 특징을 보인다. TABA는 TAB의 Eu 이상치와 비슷한 양상을 보이며, CaO, Eu, $Fe_2O_3^*$, TiO_2 , K_2O 함량의 변화도 일치하는 양상을 보인다. 이와 같은 양상은 TABA가 TAB으로부터 분화된 것이라는 해석을 가능케 한다.

La이 증가함에 따라 La/Yb가 증가하는 양상은 휘석, 사장석 및 소량의 저어콘의 분별작용과 일치한다(McMillan and Dungan, 1988). CBA는 La의 증가에 따른 La/Yb의 증가 경향이 잘 나타나며, CBA의 JG35a에서 나타나는 Sr의 결핍은 사장석의 분별정출에 기인한 탓으로 보이며, Hf의 부화는 저어콘의 농집과 관련된 것으로 사료된다(Fig. 8A; 김춘식 등, 1998). 비반상의 쉘레아이트에서 La/Yb 비의 증가 경향이 미약하나 TB 중 TPB는 증가하는 경향을 나타낸다(Fig. 11).

조구조적 환경

본 역의 화산암류를 N-type MORB 값으로 미량 원소를 표준화하여 도시한 거미 성분도(spider diagram)에서는 전체적으로 불호정적 원소인 Rb, Ba, Sr, Th 등이 부화되어 있고, Nb 함량이 매우 결핍되며 Zr과 Hf 함량이 미약하게 결핍된 특징을 나타낸다(Fig. 8). 이는 초기 LILE의 부화가 상당했던 것으로 해석된다. 이와 같이 LREE에 비하여 HFSE

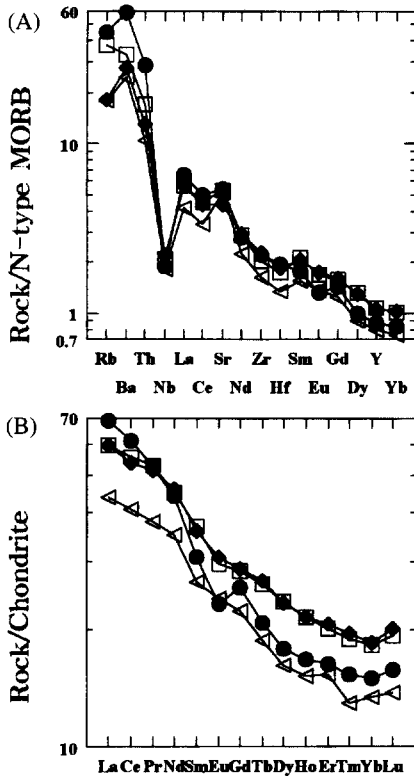


Fig. 12. N-type MORB normalized spidergram (A) and chondrite normalized REE pattern (B) for selected volcanic rocks in the study area. filled circle; JG11a, open triangle; JG8, open rectangle; JG54c, filled diamond; JG47.

가 결핍되고, 강한 LILE 부화를 보이는 특징은 해양 지판의 침강 섭입에 관련된 대륙연변부나 도호 등의 구조조 환경과 관련된 암석에서 나타나는 특징이다(Bacon, 1990; Ewart, 1982; Hawkesworth and Ellam, 1989; Hickey *et al.*, 1986; McCulloch and Gamble, 1991; McDermott *et al.*, 1993; M nker and Cooper, 1995; Pearce, 1982; Pearce *et al.*, 1984, 1995; Saunders *et al.*, 1991).

Ba, Nb, La 함량을 조산대 안산암과 비교하여 도시하면(Fig. 13), 불호정성(incompatible) 원소인 알칼리토원소 La 대 Ba 도표에서 Ba/La 비는 CBA가 19.32~22.89, TB가 10.63~18.74, TBAB가 6.03~18.24의 범위로 CBA는 medium-K 내지 high-K 영역에 도시되며, 쏘레이이트는 medium-K의 상한에 도시되고, 일부 E-MORB의 영역에 도시된다. CBA는 Ba/La 비가 15~80 범위로 Gill(1981)에 따르면 조산대 즉 화산 도호의 값과 일치하나, 쏘레이이트는 화산 도호의 하한값과 거의 같거나 그 이하이

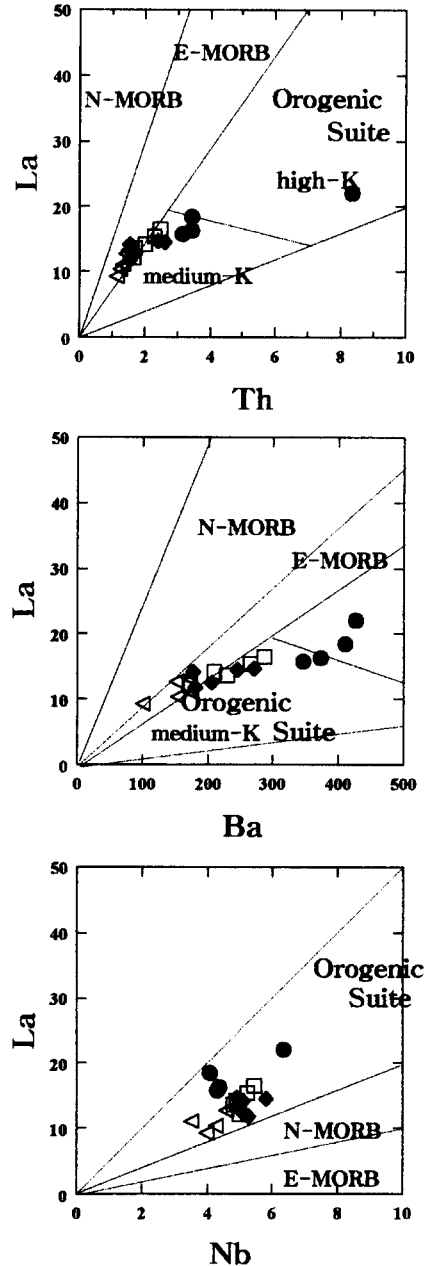


Fig. 13. Discriminant tectonic setting diagrams of the study area (after Gill, 1981). Symbols are the same as those in Fig. 3.

다. La에 비하여 Ba 함량의 범위가 넓게 나타난다.

La 대 Th 도표에서 La/Th 비는 CBA가 2.65~5.35, TB 및 TABA가 각각 5.56~9.04, 5.60~8.42의 범위로 CBA는 조산대의 medium-K 영역에 도

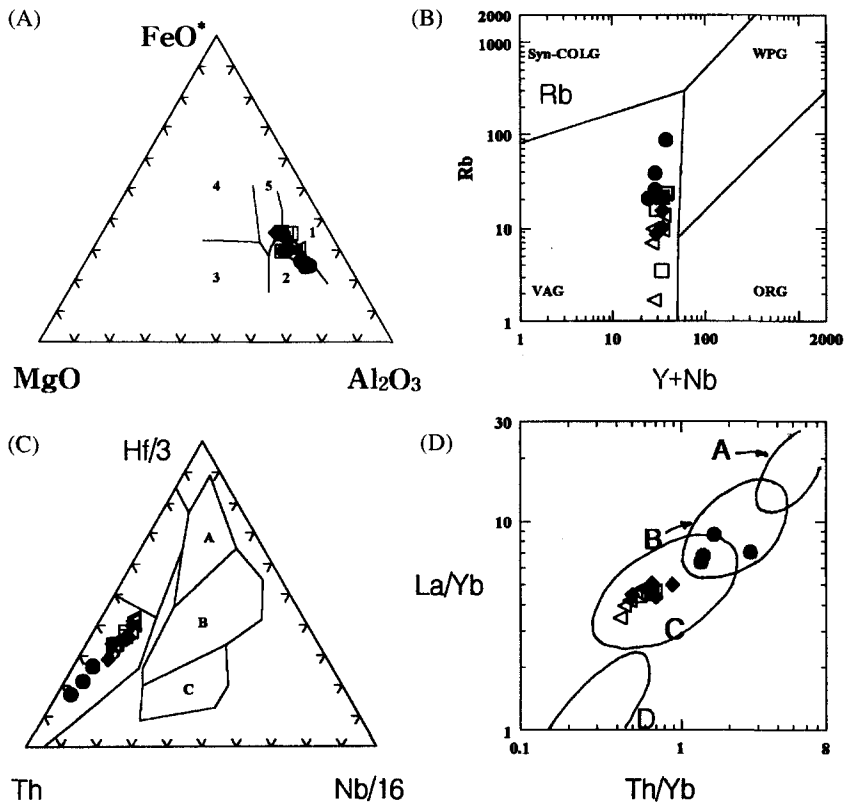


Fig. 14. Tectonic discriminant diagrams for basaltic and andesitic lavas in the study area. A) MgO-FeO*-Al₂O₃ diagram (after Pearce *et al.*, 1977). 1; Spreading center, 2; Orogenic suite, 3; Ocean ridge, 4; Ocean island, 5; Continental. B) Rb vs. Y+Nb diagram (after Pearce *et al.*, 1984) C) Th-Hf-Nb diagram (after Wood, 1980). A; N-type MORB, B; E-type MORB and tholeiitic WPB, C; Alkaline WPB, D; Destructive plate margin. D) La/Yb vs. Th/Yb diagram. A; Andean arc, B; Continental margin arc, C; Oceanic arc, D; Primitive arc. Symbols are the same as those in Fig. 3.

시되며 쏘레이이트는 medium-K 혹은 E-MORB의 영역에 도시된다. Gill(1981)에 따르면 La/Th 비가 중앙해령 화산암류에서는 7~15이고 조산대 화산암류에서는 2~7이다. 이 기준에 따르면 CBA는 조산대, 즉 화산 도호 화산암의 범위이며, 쏘레이이트는 중앙해령 화산암의 영역 범위이다.

한편 La 대 Nb 도표에서 La/Nb 비가 CBA가 3.48~4.51, 쏘레이이트가 2.37~3.03, TABA가 2.24~3.17의 범위로 high-K와 medium-K 영역에 걸쳐 도시되는데, 조산대와 관련된 화산암류를 판단하는 기준 기울기인 La/Nb 비가 2와 5 사이의 영역에 집중되어 있다. 하지만, 쏘레이이트의 영역은 MORB에 더욱 가까운 영역이다. 또한 TiO₂ 함량에 따른 Y/Nb 비의 변화를 이용한 Floyd and Winchester (1975)의 판별도에서 쏘레이이트는 MORB의 영역에 점시된다(Fig. 15C).

Pearce *et al.*(1977, 1984)의 FeO*-MgO-Al₂O₃

삼각도와 Rb 대 Y+Nb 도표에서 모두 전형적인 조산대안산암(orogenic andesite) 영역과 화산호 영역에 속하지만, 쏘레이이트는 CBA에 비하여 해양 열곡에서 형성된 화산암 쪽에 가까운 곳에 도시된다(Fig. 14A, B). La/Yb 대 Th/Yb 도표에서 (Fig. 14D) 해양 도호의 위치에 도시되며, CBA는 대륙연변호 쪽에 가깝게 도시된다. Wood(1980)의 Hf/3-Th-Nb 조구조 판별도에서 지판이 침강 설립하는 지판 경계부(destructive plate margin)의 영역에 도시된다(Fig. 14C). 이 영역은 다시 Hf/Th 비를 기준으로 원시 호상 열도의 쏘레이이트 계열(Hf/Th>3.0)과 성숙한 호상 열도의 칼크-알칼리 계열(Hf/Th<3.0) 화산암으로 구분되는데, 본 역의 화산암류는 칼크-알칼리 계열의 영역에 해당한다. 그렇지만, CBA에 비하여 쏘레이이트는 쏘레이이트 계열 영역에 더욱 접근한 양상을 나타낸다. 본 역의 쏘레이이트가 칼크-알칼리 계열의 영역에 도시되는 것은 본 역 화

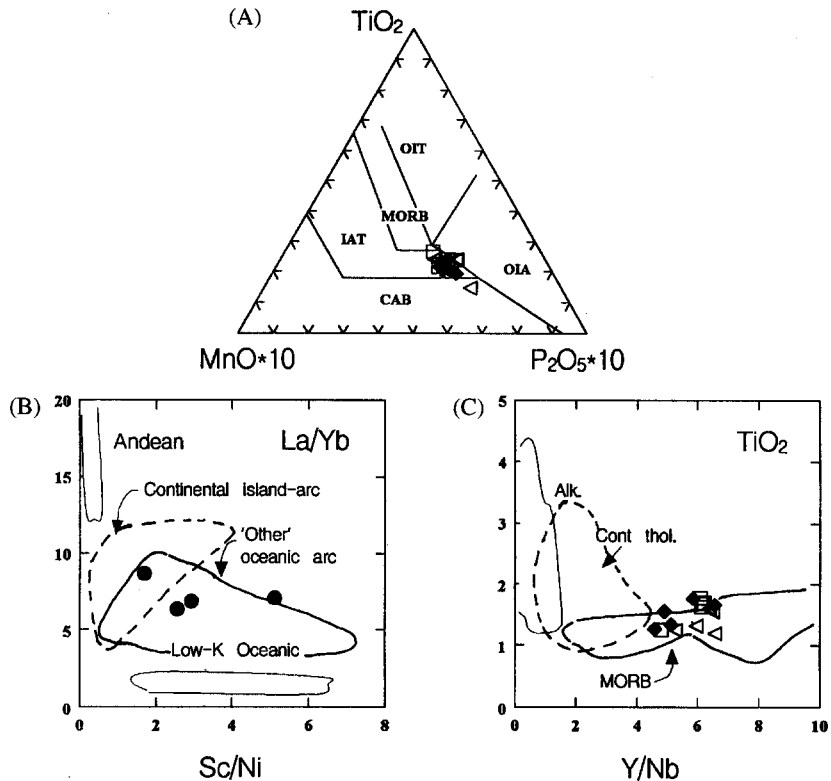


Fig. 15. A) MnO - TiO_2 - P_2O_5 discrimination diagram for basalts and basaltic andesites (45~54 wt.% SiO_2) (after Mullen, 1983). MORB, OIT; ocean-island tholeiite or seamount tholeiite, OIA; ocean-island alkali basalt or seamount alkali basalt, CAB; island-arc calc-alkaline basalt, IAT; island-arc tholeiite. B) La/Yb - Sc/Ni discrimination diagram for andesites (after Bailey, 1981) showing the fields of Andean-type (active continental margin), continental island-arc, low-K oceanic island-arc and 'other' oceanic island andesites. C) TiO_2 - Y/Nb discrimination diagram for basalts (adapted from Floyd and Winchester, 1975).

산암이 원시 도호의 조구적 영역이 아님을 감안한다면 CBA와 그 기원 마그마의 성분이 거의 같기 때문이거나, 혹은 원시 호상열도에서 생성된 것과는 차이를 가질 것으로 생각된다.

SiO_2 함량이 45~54 wt.% 영역인 암석에 대한 TiO_2 , MnO , P_2O_5 판별도(Fig. 15A; Mullen, 1983)에서 본 역의 화산암은 도호 쏘레이이트(island-arc tholeiite)의 영역에 도시된다. Bailey(1981)는 La/Yb 비와 Sc/Ni 비를 이용하여 섭입 환경에서 형성된 화산호(volcanic arc) 안산암의 4가지 유형을 구분하는 판별도를 제안하였다. 여기서 La/Yb 비는 마그마의 생성에 대륙 지각이 관여한 정도를 나타낸다. 이 판별도에 본 역의 화산암 중 CBA를 점시한 결과 'low-K 해양 도호'와 구분되는 '다른' 해양 도호의 영역에 점시된다(Fig. 15B). 이와 같은 환경은 백악기 말~고 제 3기에 걸쳐 분출한 경상분지의 화산암이 대륙 지각의 관여 정도가 큰 것에 비해 본 역의

CBA는 조산대의 환경이었고 섭입의 영향을 받았지만 경상분지의 백악기 말~고 제 3기 화산암에 비해 대륙 지각의 관여 정도가 적은, 해양 지각을 통과하여 분출한 것으로 사료된다.

본 역의 화산암을 형성시킨 조구조 환경이 조산대 화산호와 관련이 있었음을 여러 판별도를 통해 확인해 보았다. 그러나 Wood(1980)의 조구조 판별도에서 TB 및 TABA가 CBA에 비해 더욱 쏘레이이트 영역으로 치우치며, Pearce *et al.*(1984)의 판별도에서 쏘레이이트는 CBA에 비해 해양 열곡의 조구조 쪽으로 치우치는 경향을 나타내고 있다.

결론

장기 지역의 화산암은 SiO_2 함량이 48~61%로 TAS 도표에서 안산암, 현무암질안산암, 현무암 영역에 도시되며 모두 비알칼리암에 해당된다. AFM

삼각도와 Harker 변화도에서 살펴보면 장기 분지의 중성 내지 염기성용암류는 칼크-알칼리 계열과 쉐라이트 계열로 구분된다. 칼크-알칼리 현무암질안산암(CBA)은 단사회석과 사방회석을 포함하며, 쉐라이트 현무암(TB)은 사장석, 단사회석, 감람석 등을 함유하고 있으며 조직상 크게 반정이 거의 없는 비반상현무암(TAB)과 반정을 많이 포함한 반상현무암(TPB), 현무암으로부터 분화된 양상의 비반상현무암질안산암(TABA)으로 구분된다.

희토류 원소 및 불호정성 원소의 양상에서 본 역의 화산암은 LILE의 부화와 HFSE의 결핍이 관찰되며 조산대 화산호 환경과 밀접한 관련이 있으며, 쉐라이트의 성분은 칼크-알칼리 계열의 현무암질안산암(CBA)에 비해 더욱 MORB에 가깝다.

섭입에 관련된 마그마로부터 진화한 암석에 나타나는 특징과 같이 불호정성원소와 희토류원소 양상에서 칼크-알칼리와 쉐라이트 모두에서 LILE와 LREE가 부화하고 HFSE가 결핍된 양상을 보인다. 그러나, 칼크-알칼리 현무암질안산암(CBA)는 쉐라이트에 비해 LILE 및 LREE가 다소 부화되고, HFSE와 HREE는 다소 결핍된 특징을 보인다. Ba/Th, La/Th 비와 같은 편별도에서 칼크-알칼리 현무암질안산암(CBA)은 중~고-K 암체에, 쉐라이트는 중-K 암체와 MORB 영역에 도시된다. La/Yb 대 Th/Yb 도표에서 본역 화산암은 해양도호현무암의 영역에 도시되는데, 쉐라이트가 칼크-알칼리 계열에 비해 더욱 원시 환경으로 판별된다.

사 사

본 연구는 1998년도 교육부 학술진흥재단 지원(기초과학 1998-015-D00264)으로 수행되었다. 본 논문에 대하여 상세한 검토를 해준 이상원 교수와 손문 박사, 그리고 심사과정에서 문제점에 대한 유익한 지적을 해준 좌용주 교수와 진명식 박사, 익명의 심사자에게 감사드린다. 야외작업과 실내실험에 많은 도움을 준 부산대학교 지질학과 김정현군에게 깊은 사의를 표한다.

참고문헌

김봉균, 정창희, 김수진, 1975, 경북 영일 지역에 발달하는 갈탄층의 층서적 연구, 지질학회지, 11, 240-252
 김인수, 1992, 새로운 동해의 성인 모델과 양산 단층계의 주향이동운동. 지질학회지, 28, 84-109.
 김춘식, 윤선, 김진섭, 1993, 장기지역에 분포하는

hyaloclastite의 산상과 형성과정. 대한지질학회 제48차 학술발표회, 64
 김춘식, 윤성효, 정창식, 1998, 신불산-영취산 일대에 분포하는 백악기 화산암의 화산층서와 암석학적 연구. 지질학회지, 34, 136-153.
 노진환, 1989, 장기 지역 제 3기층의 불석화작용. 지질학회지, 25, 30-43.
 박선애, 1993, 경북 영일 지역에 분포하는 신생대 제3기 화산암류에 대한 암석학적 및 암석화학적 연구. 경북대학교 대학원 박사학위논문, 109p.
 박성준, 1988, 장기 지역 제3기 층서. 부산대학교 대학원 석사학위논문, 38p.
 성종규, 김진섭, 이준동, 1998, 경상분지 백악기 화산암류에 대한 암석화학적 고찰: 이원성 마그마의 가능성. 자연환경지질, 31, 249-264.
 손문, 1998, 한반도 동남부 제3기 마이오세 분지의 형성과 발달. 부산대학교 대학원 박사학위논문, 233p.
 윤선, 장기홍, 유환수, 이영길, 1991, 한반도 남부의 제3기 분지 발달사. 광산지질, 24, 301-308.
 이문원, 원종관, 노진환, 1986, 구룡포 지역의 지질 및 화산암류에 대한 연구. 한국지구과학회지, 7, 11-18.
 이문원, 원종관, 김광호, 노진환, 1988, 구룡포 지역에 분포하는 신생대 화산암의 지질과 암석학적 연구. 지질학회지, 24, 1-15.
 이현구, 문희수, 민경덕, 김인수, 윤혜수, 板谷徹丸, 1992, 포항 및 장기분지에 대한 고지자기, 층서 및 구조연구: 화산암류의 K-Ar연대. 광산지질, 25권, 337-349.
 이현구, 윤혜수, 송석환, 나춘기, 1995, 한국 동남부 제3기 퇴적분지내의 염기성 화성암류에 대한 지화학적 동위원소적 연구. 대한지질학회 제50차 학술발표회 요약집, 22-23.
 立岩 巖, 1924, 조선지질도 제 2집, 연일, 구룡포 및 조양도폭, 조선총독부 지질조사소
 진명식, 김성재, 신성천, 1988, K-Ar 및 핏선트랙법에 의한 포항-감포일대 화산암류의 암석연령 측정연구. 한국동력자원연구소, 연구보고서, KR-87-27, 51-88.
 진명식, 김성재, 신성천, 1989, K-Ar 및 핏선트랙법에 의한 한국 동남부 지역 화강암 및 화산암의 암석 광물연령 측정연구. 한국동력자원연구소, 연구보고서, KR-88-6D, 53-84.
 Bacon, C.R., 1990, Calc-alkaline, shoshonitic, and primitive tholeiitic lavas from monogenetic volcanoes near Crater Lake, Oregon. Jour. Petrol., 31, 135-166.
 Bailey, J.C., 1981, Geochemical criteria for a refined tectonic discrimination of orogenic andesites. Chem. Geol., 32, 139-154.
 Barsdell, M. and Berry, R. F., 1990, Origin and evolution of primitive island arc ankaramites from Western Epi, Vanuatu. Jour. Petrol., 31, 747-777.
 Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, R.J., 1979, *The interpretation of igneous rocks*. Allen and Unwin, London, 450p.
 Ewart, A., 1982, The mineralogy and petrology of Ter-

- tiary-Recent orogenic volcanic rocks with special reference to the andesitic-basaltic compositional range, In Thprpe, R.S., ed., *Andesites: Orogenic andesites and related rocks*: Chichester, New York, Wiley, 25-95.
- Floyd, P.A. and Winchester, J.A., 1975, Magma-type and tectonic setting discrimination using immobile elements. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 27, 211-218.
- Gill, J.B., 1981, *Orogenic andesites and plate tectonics*. Springer-Verlag, 390p.
- Hart, S.R. and Davis, K.E., 1978, Nickel partitioning between olivine and silicate melt. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 40, p. 203-219.
- Hart, S.R. and Dunn, T., 1993, Experimental cpx/melt partitioning of 24 trace elements. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 113, 1-8.
- Hawkesworth, C.J. and Ellam, R., 1989, Chemical fluxes and wedge replacement rates along recent destructive plate margins. *Geology*, 17, 46-49.
- Hickey, R.L., Frey, F.A. and Gerlach, D.C., 1986, Multiple sources for basaltic arc rocks from the Southern Volcanic Zone of the Andes (34°-41°S): trace element and isotopic evidence for contribution from subducted oceanic crust, mantle, and continental crust. *Jour. Geophys. Res.*, 91, 5963-5983.
- Huzioka, K., 1972, The Tertiary floras of Korea, *Jour. Mining College of Akida Univ.*, 5, 1-83.
- 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.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A. and Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Jour. Petrol.*, 27, 745-750.
- McCulloch, M.T. and Gamble, J.A., 1991, Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 102, 358-374.
- McDermott, F., Defant, M.J., Hawkesworth, C.J., Maury, R.C. and Joron, J.L., 1993, Isotope and trace element evidence for three component mixing in the genesis of the North Luzon arc lavas (Philippines). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 113, 9-23.
- McMillan, N.J. and Dungan, M.A., 1988, Open system magmatic evolution of the Taos Plateau volcanic field, Northern New Mexico: 3. Petrology and geochemistry of andesite and dacite. *Jour. Petrol.* 29, 527-557.
- Miyashiro, A., 1974, Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Am. J. Sci.*, 274, 321-335.
- Mullen, E.D., 1983, MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth Planet. sci. Lett.*, 62, 53-62.
- Münker, C. and Cooper, R.A., 1995, The island arc setting of a New Zealand Cambrian volcano-sedimentary sequence: implications for the evolution of the SW Pacific Gondwana fragment. *Jour. Geol.*, 103, 687-700.
- Pearce, J.A., 1982, Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In Thorpe, R.S. (ed.) *Andesites: orogenic andesites and related rocks*. Chichester, New York, Wiley, 525-548.
- Pearce, T.H., Gorman, B.E., and Birkett, T.C., 1977, The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks. *Earth Planet. sci. Lett.*, 36, 121-132.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Jour. Petrol.*, 25, 956-983.
- Pearce, J.A., Ernewein, M., Bloomer, S.H., Parson, L.M., Murton, B.J. and Johnson, L.E., 1995, Geochemistry of Lau Basin volcanic rocks: influence of ridge segmentation and arc proximity. in: Smellie, J.L. (ed.) *Volcanism Associated with Extension at Consuming Plate Margins*, Geol. Soc. London Sp. Pub., No. 81, 53-75.
- 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, 227-256.
- Poucllet, A., Lee, J.-S., Vidal, P., Cousens, B. and Bellon, H., 1995, Cretaceous to Cenozoic volcanism in South Korea and in the Sea of Japan: magmatic constraints on the opening of the back-arc basin.: In Semllie, J. L. (ed.), *Volcanism Associated with Extension at Consuming Plate margins*. Geol. Soc. London Special Pub., No. 81, 169-191.
- Saunders, A.D., Norry, M. and Tarney, J., 1991, Fluid influence on the trace element compositions of subduction zone magmas. *Philos. Trans. R. Soc. London*, A335, 337-392.
- Scarrow, J. H. and Cox, K. G., 1995, Basalts generated by decompressive adiabatic melting of a mantle plume: a case study from the Isle of Skye, NW Scotland. *Jour. Petrol.*, 36, 3-22.
- Shimazu, M., Kawano, Y. and Kagam, H., 1990, Major and minor element compositions and Sr, Nd isotopic ratios of basaltic rocks from the Pohang-Yangnam area, Korea. *Jour. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, v. 85, p. 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 process. In: Saunders, A.D. and M. J. (eds.), *Magmatism in ocean basins*. Geol. Soc. London. spec. Pub., 42, 313-345
- Wilson, M., 1989, *Igneous petrogenesis*. Unwin Hyman, London, 466p.
- 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.
- Yoder, H.S., Jr., and Tilley, C.E., 1962, Origin of basaltic magmas: an experimental study of natural and synthetic rock system. *Jour. Petrol.*, 3, 342-532.
- Yoon, S., 1986, Tectonic history of the Tertiary Pohang and Yongnam basins, Korea. In Nakagawa, H., Kotaka, T. and Takayanagi, Y. (eds.), *Kitamura Commem. Essays Geol.*, 637-644.
- Yoon, S., 1989, Tertiary stratigraphy of the southern Korean Peninsula. *Proc. Internat. Pacific Neogene. conti. Mari. Events, IGCP-246*, Nanjing Univ. Press, 195-207.
- Yoon, S., 1991, Tertiary stratigraphy of Tertiary Pohang and Yongnam 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.

(책임편집 : 좌용주)

(1999년 10월 5일 접수, 1999년 11월 15일 수리)

Petrological study on the intermediate to mafic lavas distributed in Janggi area (1): General geology and petrochemical characteristics.

Ju Hee Park^{1,2} · Choon Sik Kim³ · Jin Seop Kim¹ · Jong Gyu Sung^{1,4}
In Soo Kim¹ · Joon Dong Lee¹ and In Sung Paik⁵

¹Geological Environment Science, Pusan National University, Pusan 609-395, Korea,

²Hong-Myeong High School, Ulsan 689-860, Korea,

³Korea Institute of Construction Technology, Koyang 411-382, Korea,

⁴Jang-Jeon Middle School, Pusan 609-392, Korea,

⁵Division of Earth Environmental Science, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea)

Abstract : The volcanic lavas in the Janggi area are plotted on basalt, basaltic andesite and andesite field (SiO_2 ; 48–61 wt.%) in the TAS diagram and belong to subalkaline series. Nineteen chemical analyses of lavas show two distinct differentiation trends; tholeiitic and calc-alkaline. Calc-alkaline basaltic andesites composed of plagioclase and two-pyroxenes (cpx, opx) in their phenocrysts. Tholeiitic basaltic lavas can be classified into two sub-types. The one is porphyritic basalts composed of plagioclase, clinopyroxene and olivine phenocryst, and the other is aphyric basalt and more evolved lavas (aphyric basaltic andesite) with the same mineral phases. Incompatible elements and REE patterns show the enrichment of LILE and depletion of HFSE. This characteristics indicate that these lavas are evolved from the magmas related to subduction. However, calc-alkaline basaltic andesite lavas show that slightly higher enrichment of LILE and the depletion of HFSE than those of tholeiitic basaltic lavas. On the tectonic discriminant diagram such as Ba/Th and La/Th ratios, calc-alkaline basaltic andesite lavas belong to orogenic medium to high-K suites, whereas tholeiitic basaltic lavas belong to medium-K suites and MORB. On the other diagram, such as La/Yb vs. Th/Yb, the volcanic lavas in the study area plotted in the field of oceanic arc basalt. Tholeiitic basaltic lavas are located in more primitive environment than calc-alkaline andesitic lavas.

Key words: Janggi area, Tholeiitic, Calc-alkaline, Basaltic andesites, Incompatible element, REE element, Oceanic arc