

진해 천자봉-시루봉 일원에 분포하는 마이오세 화산암 (1): 암석기재와 암석화학적 특징

류삼형^{1,2} · 정윤기^{1,3,*} · 이상원¹ · 성종규^{4,5} · 류충렬⁶

¹부산대학교 지구과학과, ²금정여자고등학교, ³물금고등학교
⁴학장중학교, ⁵몽돌암석광물연구소, ⁶한국지질자원연구원

Miocene Volcanic Rocks Over the Area of Chenonja-bong and Siru-bong, Jinhae (1): Petrography and Petrochemical Characteristics

Sam-Hyung Ryoo^{1,2}, Yun-Gi Jeong^{1,3,*}, Sang-Won Lee¹,
Jong-Gyu Sung^{4,5}, and Chung-Ryul Ryoo⁶

¹Department of Earth Science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²Geumjung Girl High School, Busan 609-806, Korea

³Mulgeum High School, Yangsan, Kyungnam 626-813, Korea

⁴Hakjang Middle School, Busan 617-745, Korea

⁵Dreamstone Institute for Rocks and Minerals, Busan 609-321, Korea

⁶Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 305-350, Korea

요약: 경상분지 남부 진해의 천자봉과 시루봉 지역에 백악기 화산암과 화강암질암을 관입하거나 혹은 분출한 마이오세의 안산암과 현무암이 분포하고 있다. 시루봉안산암의 K-Ar 연대는 16 Ma, 천자봉현무암의 K-Ar 연대는 10 Ma로 측정되었으며 이는 한반도의 제3기 지역 이외에서 처음 발견되는 마이오세 화산작용을 지시한다. 이 지역의 화산암류는 하위로부터 천자봉안산암, 천자봉현무암질안산암, 시루봉안산암, 천자봉현무암으로 구분된다. 천자봉안산암은 단사회석과 사장석(An_{60-64})의 반정을 가지고 기질은 래쓰상의 사장석(An_{76-84})과 유리질이다. 천자봉현무암질안산암은 주로 사장석 반정(An_{60-64})과 래쓰상 사장석(An_{65})과 유리질의 기질이다. 시루봉안산암은 래쓰상 사장석(An_{64-68})과 유리질 기질로만 구성되며 반정이 결핍되었다. 천자봉현무암은 감람석(Fo_{69-84})과 단사회석의 반정을 가지는 전형적인 반상 조직을 보인다. 천자봉현무암의 기질은 감람석, 단사회석, 사장석(An_{66-71})의 미반정으로 구성되어 있다. 기질의 사장석(An_{57-65})은 래쓰상으로 나타나며 필로택시틱 조직, 입간상 조직을 보인다. 천자봉안산암, 천자봉현무암질안산암, 시루봉안산암은 칼크-알칼리 영역에 속하나 천자봉현무암은 알칼리현무암에 속한다. 조구조 판별도에서 연구지역의 화산암들은 수렴판 경계의 소멸 연변부에서 섭입에 의해 생성된 모마그마로부터 산출된 것으로 나타난다.

핵심어: 마이오세 화산활동, 천자봉안산암, 시루봉안산암, 천자봉현무암

Abstract: The Miocene andesite and basalt intruded into and/or extruded on the Cretaceous volcanic and granitic rocks over the area of Chenjabong and Sirubong in the vicinity of Jinhae, southern part of Kyongsang basin. The K-Ar ages of the younger volcanic rocks are from 16 Ma (Sirubong andesite) to 10 Ma (Cheonjabong basalt), which indicate the Miocene volcanism in the outer part of the Tertiary basin in the Korean peninsula. The volcanics are divided into Chenjabong andesite, Cheonjabong basaltic andesite, Sirubong andesite and Cheonjabong basalt. The Cheonjabong andesite is composed of phenocrysts of clinopyroxene and plagioclase (An_{60-64}), and groundmass with lath-like plagioclase (An_{76-84}) and glass. The Cheonjabong basaltic andesite is composed of plagioclase phenocryst (An_{60-64}) with plagioclase lath (An_{65}) and glass in groundmass. The Sirubong andesite is only consisted of plagioclase lath (An_{64-68}) and glass with absence of phenocryst. The Cheonjabong basalt shows typical porphyritic texture with phenocrysts of olivine (Fo_{69-84}) and clinopyroxene. The groundmass of the Cheonjabong basalt

*Corresponding author: Tel. 82-51-937-2433, E-mail. wjddbbs@hanafos.com

is composed of microphenocrysts of olivine, clinopyroxene and plagioclase (An_{66-71}), and plagioclase laths (An_{57-65}) showing pillotaxitic and intergranular texture. The Cheonjabong andesite, Cheonjabong basaltic andesite, Sirubong andesite are belong to calc-alkaline but the Cheonjabong basalt is alkaline basalt. By tectonic discrimination diagrams the parental magmas of the volcanic rocks have occurred boundary.

Key words: Miocene volcanism, Cheonbong andesite, Sirubong andesite, Cheonjabong basalt

서론

한반도의 남부 경상분지는 일본호와 인접하여 있으며 백악기말~고제3기 동안 화성활동이 지속되어 현무암에서 유문암에 이르는 다양한 화산암이 분포되어 있다. 이들은 주로 도호 또는 대륙호의 환경에서 생성된 것으로 알려져 있다(황상구, 1991; 윤성효 외, 1997). 경상분지 내 유천소분지에 분포하는 백악기 후기의 화산암류에 대한 암석학적 연구는 많이 이루어져 있다(차문성, 1976; 이상원, 1979; 차문성과 윤성효, 1982; 김상욱, 1982, 1986; 김상욱과 이영길, 1981; 이상만 외, 1987; 김진섭, 1990; 김상욱 외, 1991; 김진섭과 윤성효, 1993; 윤성효 외, 1994; 성종규, 2000). 그러나 본 연구지역인 진해 동측 산 능선을 이루는 천자봉-시루봉 일원에 대한 연구는 연구지역 인접 지역의 부산·가덕도폭(장태우 외, 1983), 불국사화강암에 대한 연구(이준동, 1991; Lee *et al.*, 1995; 김규한과 이화정, 1996), 화성쇄설암 내 화강암편에 관한 연구(조형성 외, 2007)에서 제한적으로 이루어졌으며, 다른 지역에 비해 매우 미약한 상태이다.

본 연구지역에 대한 야외 조사 결과, 백악기 후기 화산암류와 이들을 관입하고 있는 불국사화강암이 비교적 넓게 분포하고 있다. 이들과는 암상, 암질의 형태가 다른 매우 신선한 상태의 현무암과 안산암의 화산암류가 천자봉-시루봉 능선을 따라 분포하며, 이들 암석에 대한 K-Ar 연대 측정을 한 결과 약 10~16 Ma로 신생대 마이오세로 밝혀졌다(Table 1). 신생대 화산활동은 동해안을 따라 경북 영일군 일대의 포항, 장기와 어일, 울산광역시 하서, 정자 등지에서 보고되었을 뿐(이문원 외, 1988; 박선애, 1993; 윤성효 외, 1994; 박주희 외, 1999; 위수민과 이선구, 1999; 성종규, 2000;

이정현, 2003; 이정현 외, 2004), 유천소분지 내의 신생대 화산활동은 아직 보고된 바가 없다.

본 연구는 천자봉-시루봉 일원의 신생대 마이오세 화산암류에 대하여 야외산상의 특징, 암상변화와 분포양상 등의 암석기재학적 연구를 하고자 한다. 또한, 주 성분 및 미량성분원소의 분석을 통하여 암석화학적 특징을 살펴보고자 한다.

연구 방법

1:25,000 및 1:50,000 지형도와 부산·가덕도폭(장태우 외, 1983)을 참고하여 진해시 동북측의 천자봉-시루봉 일원에서 수십 차례의 정밀한 야외조사를 실시하였다. 천자봉과 시루봉 정상부를 가로지르면서 다양한 암상을 관찰할 수 있는 방향을 택하여, 대표적인 신선한 시료를 채취하여 80여 개의 박편을 제작하였고, 천자봉 및 시루봉의 암석에 특징적인 사장석 래쓰(lath)들에 대해서는 시료에 방향성을 표시하여 채취하였고, 박편 제작시 시료의 절단면을 방향성을 고려하여 선정하였다.

반정, 석기를 구분하여 현미경 관찰을 하였고, 현미경 관찰 결과 안산암에 대해서는 사장석 래쓰가 대부분인 것과, 휘석·사장석 반정을 가진 안산암으로 분류되었다. 암석 분석 시료는 시루봉을 이루는 안산암과 천자봉을 이루는 현무암에서 선정하였다.

본역 화산암의 조암광물인 사장석, 감람석, 휘석에 대한 화학조성상의 특징을 알아보기 위해 대표적인 시료 23개를 선정하여, 한국기초과학지원연구원 대전본소의 전자현미분석기(EPMA; CAMECA SX-50)를 이용하여 15 kV의 가속전압, 20 nA의 조사전류, 1 μm의 빔 직경 조건으로 분석하였다.

18개의 표품을 선택하여, 한국기초과학지원연구원 부

Table 1. Isotopic age data of the volcanic rocks in the study area. SA; Sirubong andesite, CB; Cheonjabong basalt.

Sample No.	Rock type	K (wt.%)	wt (g)	⁴⁰ A radiogenic (10 ^{-8ccSTP/g})	uncertainty (1.656)	³⁶ Ar (10 ^{-10ccSTP/g})	uncertainty (0.440)	Age (Ma)	uncertainty (0.551)	Air (%)
GA9-2	SA	1.555	0.01937	97.295	1.656	62.612	0.440	16.047	0.551	65.54
J-2		1.516	0.02401	97.037	1.086	14.850	0.302	16.414	0.523	31.14
C-9	CB	0.834	0.0217	32.481	0.886	13.890	0.239	10.005	0.404	55.82

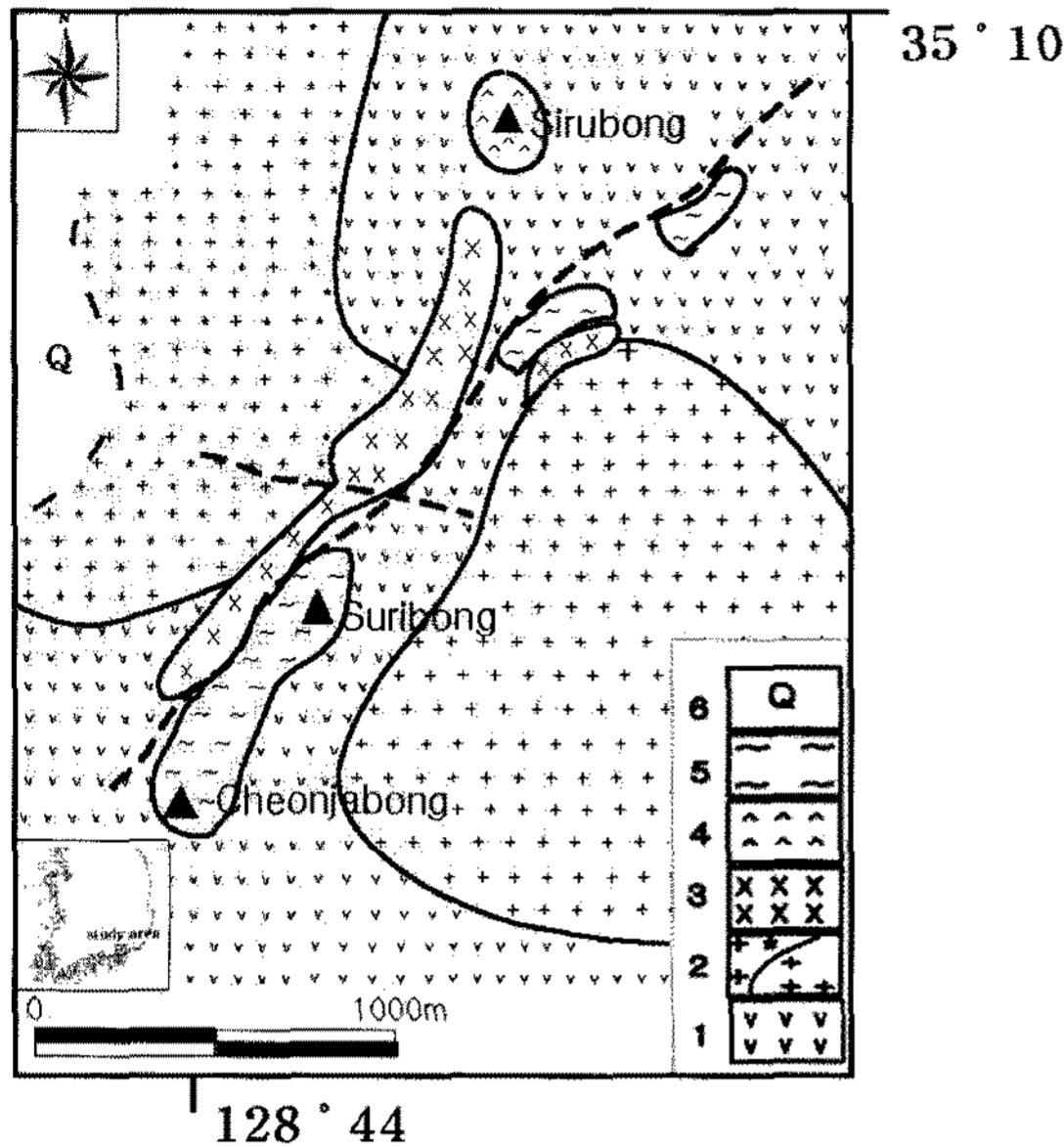


Fig. 1. Geological map of the study area(modified from Chang *et al.*, 1983). 1; Cretaceous volcanic rocks, 2; Hornblende granodiorite(++) and Biotite granite(+*), 3; Cheonjabong andesite/basaltic andesite, 4; Sirubong andesite, 5; Cheonjabong basalt, 6; Alluvium.

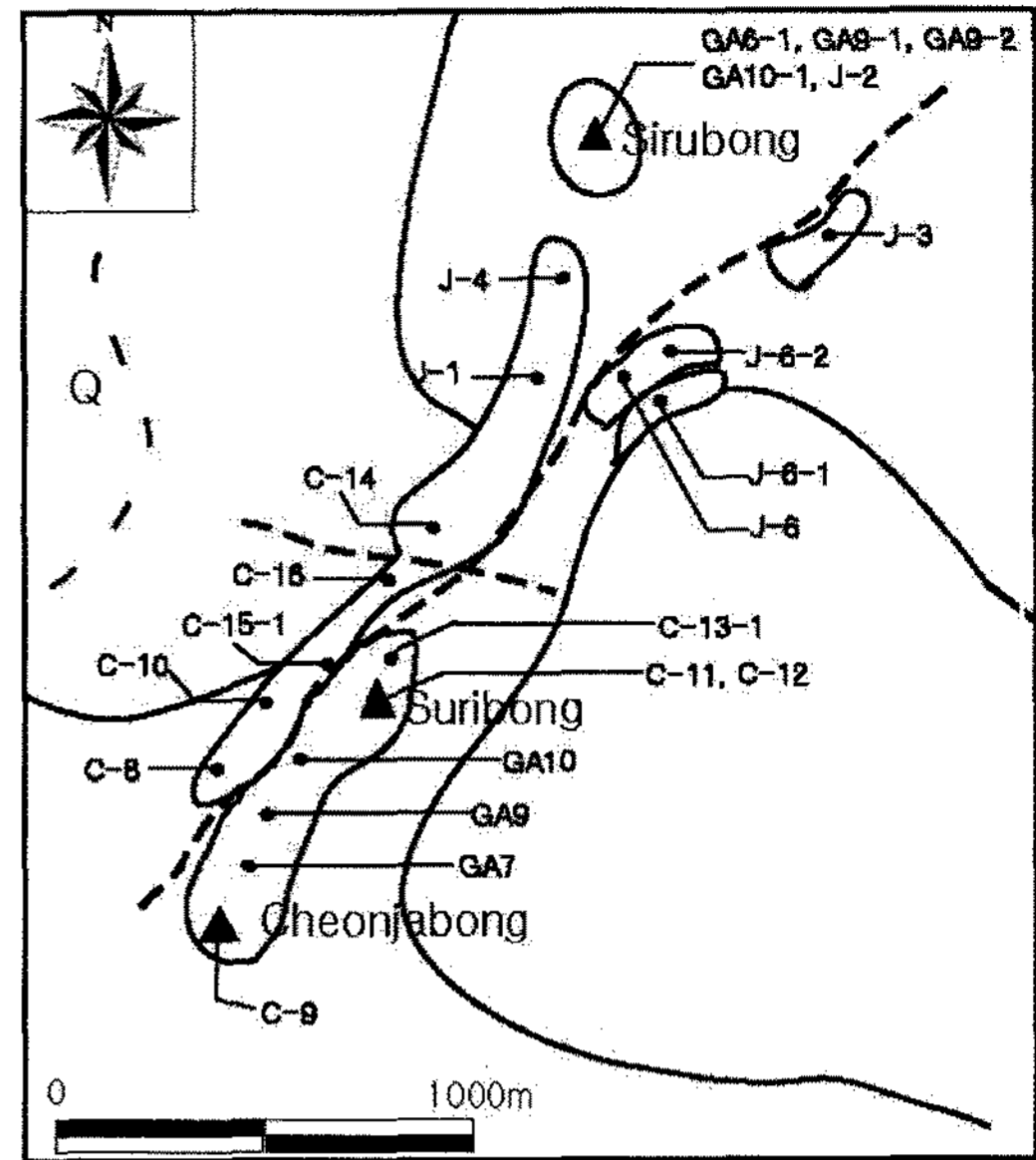


Fig. 2. Sampling sites in the study area.

산분소의 X-선 형광분광분석기(XRF; Phillips PW2400 X-ray)로 주성분원소를 분석하였다. 미량원소와 희토류 원소는 한국기초과학지원연구원 대전본소에서 유도결합플라즈마질량분석기(ICP-MS)를 이용하여 분석하였으며, 모든 분석의 정확성을 위해 각 시료에 대해 3회씩 분석한 평균치를 이용하였다. 현무암 시료 1개, 안산암 시료 2개를 선정하여 한국기초과학지원연구원 대전본소 동위원소분석팀에 K-Ar 연대측정을 의뢰하였다.

지질 개요

연구지역은 진해시 풍호동, 덕산동, 웅천동(N35°05'10"~N35°10'00", E128°41'30"~E128°41'30")에 걸쳐 위치하며, 주변의 웅산, 불모산, 장복산, 대암산, 화산, 굴암산 등의 지형은 해발고도가 높지는 않으나, 산사면의 경사가 가파른 편이다. 연구지역의 지질은 백악기 경상 누층군에 속하는 화산암류와 이들을 관입하고 있는 불국사화강암류, 이들을 관입 혹은 분출한 신생대 마이오세의 화산암으로 구성되어 있다(Figs. 1 & 2, Table 1).

백악기 화산암류는 부산·가덕도폭(장태우 외, 1983)에서 안산암질 화산각력암, 안산암질암으로 기재하였고, 이를 관입하여 분포하는 불국사화강암류는 각섬석 화강섬록암으로 기재하고 있다. 화산암류는 성분상으

로 안산암질암과 유문암질암으로 나누어지며, 산출양상에 따라서 용암류와 화성쇄설암으로 구분된다. 안산암질 화성쇄설암이 최하부층을 이루고 있으며 이들은 진해 해안과 웅산 일대에 광범위하게 분포되어 있다. 암편의 크기가 평균 직경 5cm 내외인 라필리용회암이 주이고, 곳에 따라서는 1m가 넘는 각력을 다수 함유한 화산각력암도 산출된다. 용암류인 안산암질암은 불국사화강암에 의해 가로로 절단되며 심한 열수변질작용을 받았고, 유문암류는 본역에서 아주 제한적으로 산출되며, 일부는 관입상 형태로 산출된다. 불국사화강암류는 진해와 웅천의 저지대에서 천자봉-시루봉의 8~9부 능선까지 분포되어 있으며, 진해시는 흑운모화강암, 웅천은 각섬석화강섬록암으로 구성되어 있다.

본 연구의 주 대상인 천자봉-수리봉-시루봉-웅산으로 이어지는 능선을 따라 분포하는 화산암류는 안산암질암과 현무암질암으로 구성되어 있으며, 불국사화강암의 열극을 따라 관입한 천자봉안산암, 그리고 시루봉안산암, 천자봉현무암으로 구분된다. 천자봉현무암은 천자봉-수리봉 일대에 450~550m의 고도에서 약 70m의 좁은 폭으로 총 연장길이 1,500m 정도로 단속성을 가지면서 분포하고 있다. 천자봉현무암에서 나타나는 절리의 방향은 주향 N40°~43°E, 수직 경사이며, 저지대에는 불국사화강암이 분포하고 있다. K-Ar 연대측정 결과 천자봉현무암은 10 Ma, 시루봉안산암은 16 Ma로 신생대 마이오세에 형성된 암석으로 판명되었다(Table 1).

Table 2. Modal compositions of the volcanic rocks in the study area. Modes based on about 2000 points count per samples. Phenocrysts; 0.1 mm>, groundmass; <0.1 mm, pl; plagioclase, ol; olivine, cpx; clinopyroxene, ore; opaque minerals, epi; epidote.

	pl	ol	cpx	ore	epl	groundmass	texture
Cheonjabong andesite							
C-8	23.3	-	-	1.1	12.7	62.9	intergranular
C-16	26.7	-	-	1.2	14.1	58.0	intergranular
Cheonjabong basaltic andesite							
C-14	15.2	-	8.4	1.1	-	75.3	intergranular
J-1	12.7	-	5.2	1.3	-	60.8	intergranular
J-6-1	9.8	-	5.5	1.2	5.2	78.3	intergranular, glomeroporphyritic
Sirubong andesite							
GA9-1	-	-	-	1.9	-	98.1	trachytic
GA9-2	-	-	-	1.6	-	98.4	trachytic
GA10-1	2.1	-	-	1.8	-	96.1	trachytic
J-2	2.3	-	-	1.6	-	96.1	trachytic
Cheonjabong basalt							
C-9	-	19.5	-	2.2	-	78.3	intergranular, pilotaxitic
C-12	-	20.1	-	1.3	-	78.6	intergranular
C-13-1	-	17.7	12.3	2.1	-	57.9	intergranular, amygdaloidal (10%)
GA-7	-	19.3	-	1.2	-	79.5	intergranular
GA-9	-	18.4	-	2.5	-	79.1	intergranular
J-3	-	20.2	-	1.4	-	78.4	intergranular
J-6	-	16.8	-	3.1	-	70.1	intergranular, amygdaloidal (7%)

암석 기재

본역 화성암류는 생성 시기 순으로 가장 앞선 것은 백악기말의 안산암 및 안산암질 화성쇄설암, 그리고 유문암, 이들을 관입한 불국사화강암이다. 이후 천자봉안산암이 관입하였으며 이들보다 후기에 형성된 시루봉안산암, 천자봉현무암이 분포되어 있다. 본역 암석에 대한 모우드 분석 결과는 Table 2와 같다.

백악기화산암류

백악기화산암류는 안산암질화성쇄설암, 응회질퇴적암, 안산암 및 유문암 용암류로 구성되어 있다.

안산암질화성쇄설암은 진해 해안의 낮은 지역, 응산에 넓게 분포하며 육안상으로는 회색 내지 담회색을 나타낸다. 라필리응회암, 응회각력암, 화산각력암이 나타나고, 응회각력암 및 화산각력암의 각력의 크기는 진해 해안에서 1m가 넘는 것도 있다. 각력의 종류는 적갈색세일, 안산암, 응회암 등 다양한 암석으로 구성된다. 암편은 세립질안산암, 반상안산암, 적갈색안산암 등 적어도 3종 이상의 안산암이 주이고, 세일, 사암, 화강암, 처트, 응회암 등의 암편은 소량 함유되어 있다. 결정편은 사장석이 대부분이며 휘석, 각섬석, 알칼리장석도 부분적으로 수반된다. 사장석은 변질을 받아 녹염

석, 녹니석으로 변질된 소슈라이트변질작용(saussuritic alteration)을 현저하게 나타낸다.

응회질퇴적암은 시루봉에서 응천까지 이어지는 능선부의 중간 지점에 일부분 산출되고, 응산 북동쪽 능선에서 화산까지 폭넓게 분포하고 있다. 암회색을 띠는 것이 대부분이며, 불국사화강암에 의해 열변성을 심하게 받아 담회색을 띠는 혼펠스의 노두가 시루봉에서 응천으로 이어지는 능선부에 나타난다.

안산암은 진해-응천 국도에서 천자봉 밑의 만장대까지, 천자봉-시루봉 능선을 따라 경사가 급한 양쪽 산사면에 암맥의 형태로 분포하며, 불국사화강암에 의해 횡적인 단절성이 나타나고 변질작용을 많이 받은 상태로 산출된다. 대부분의 안산암은 비반상 용암(aphyric lava) 형태로 산출되며, 육안상으로 흑색 내지 암청색을 띠고 치밀한 조직을 보인다. 비반상 용암 형태의 안산암은 노두의 풍화면이 매끄러우며, 육안상으로 반정이 관찰되지 않으나, 편광현미경하에서 뚜렷한 반상조직이 관찰된다. 반정의 대부분은 알바이트, 알바이트-칼스발드 쌍정을 보여주는 사장석이고, 약한 누대구조를 보인다. 크기는 0.2~0.3 mm 정도이며, 자형 내지 반자형으로 나타난다. 사장석 반정들은 부분적으로 중심부가 견운모로 변질되거나 녹염석, 녹니석으로 변질된

소슈라이트 변질작용을 보여준다. 육안상 반상 조직을 보이는 용암도 산출되는데, 육안으로 뚜렷이 보이는 사장석 반정은 편광현미경으로 관찰하면 대부분 녹염석으로 변질되어 있다. 반정광물의 조합은 비반상 용암과 비슷하나, 반정의 크기는 0.5~2.3 mm로 크다.

유문암은 진해-웅천 국도변 대발령 시작점의 죽곡 휴게소 부근에 일부분 나타난다. 대부분 백악기말 화산활동으로 인한 암맥 형태의 제한적인 분포를 보이며, 죽곡 휴게소 부근에서 회색의 N80°E 방향의 유동 구조를 잘 볼 수 있는 노두가 나타난다. 편광현미경하에서 광물을 구분할 수 없을 정도로 심한 열수변질을 받았으며, 사장석 래쓰들이 기질부를 형성하고 있다.

불국사화강암

불국사화강암은 본역의 낮은 지대에서 천자봉-시루봉의 거의 정상 가까이까지 비교적 넓게 분포하고 있으며, 백악기 화산암류를 관입하고 있다. 천자봉-시루봉-웅산을 경계로 진해 쪽과 웅천 쪽에 분포하는 화강암은 각각 흑운모화강암, 각섬석화강암으로 다르게 분포하고 있다.

편광현미경하에서 흑운모화강암의 주구성광물은 석영, 사장석, 알칼리장석, 흑운모로 구성되고, 자철석, 저어콘, 인회석 등이 부구성광물로 나타나며, 각섬석은 거의 함유되지 않는다. 사장석은 자형 내지 반자형으로 알바이트쌍정 및 알바이트-칼스반드 쌍정과 누대구조를 보이며, 사장석의 중심부, 흑운모의 대부분은 녹염석과 녹니석으로 각각 변질되어 나타난다. 각섬석화강섬록암은 석영, 사장석, 알칼리장석, 각섬석 및 소량의 흑운모로 구성되어 있으며, 경하에서의 특징은 흑운모화강암과 유사하게 나타난다.

천자봉안산암

천자봉안산암은 불국사화강암을 관입하고 있으며, 휘석, 사장석 반정을 포함하는 현무암질안산암과 휘석반정을 포함하지 않는 안산암으로 구분된다. 따라서 천자봉안산암을 다시 천자봉안산암, 천자봉현무암질안산암으로 구분하여 고찰하고자 한다.

천자봉안산암은 천자봉-시루봉 서쪽 산사면에 분포하며, 육안상으로 회색 내지 담회색을 나타낸다. 불국사화강암을 관입하고 있는(Fig. 4d) 치밀한 조직의 주향 N41°E를 갖는 수직 관입체 형태로 산출된다. 편광현미경하에서 반정광물은 사장석이 대부분이며 미량의 휘석 반정이 관찰된다. 사장석 반정은 0.7~1.2 mm의 크기를 가진 반자형이며, 대부분 견운모로 변질되거나 녹염석, 녹니석으로 변질된 소슈라이트 변질작용을 받았다. 시료 C-16, J-4에서 알바이트 성분(Ab_{95-98})의 사장석이 관찰된다. 기질부는 사장석 래쓰가 대부분이며 크기가 작고, 방향성 없이 배열되어 있다. 극미립의 휘석 광물들이 입간상 형태로 관찰된다.

천자봉현무암질안산암은 천자봉현무암이 존재하는 수리봉에서 시루봉으로 이어지는 북동쪽 능선부, 시루봉 남동쪽 7부 능선부에서 천자봉현무암과 불국사화강암의 접촉부 사이에서 부분적으로 나타난다. 육안상으로 연청색을 띠며 조직이 치밀한 상태로 산출된다. 편광현미경하에서 휘석과 사장석 반정이 관찰된다(Fig. 3). 휘석 반정의 평균 크기는 0.3~0.5 mm로 취반상 조직을 보인다(Fig. 3b). 사장석 반정의 크기는 0.5~0.9 mm이며, 알바이트, 알바이트-칼스반드 쌍정, 그리고 약한 누대구조를 보이며, 중심부는 쌍정면을 따라 변질되어 불투명광물로 채워져 있다. 사장석 반정은 일부 시료(J-6-1)에서 천자봉안산암처럼 알바이트 성분(Ab_{91-96})

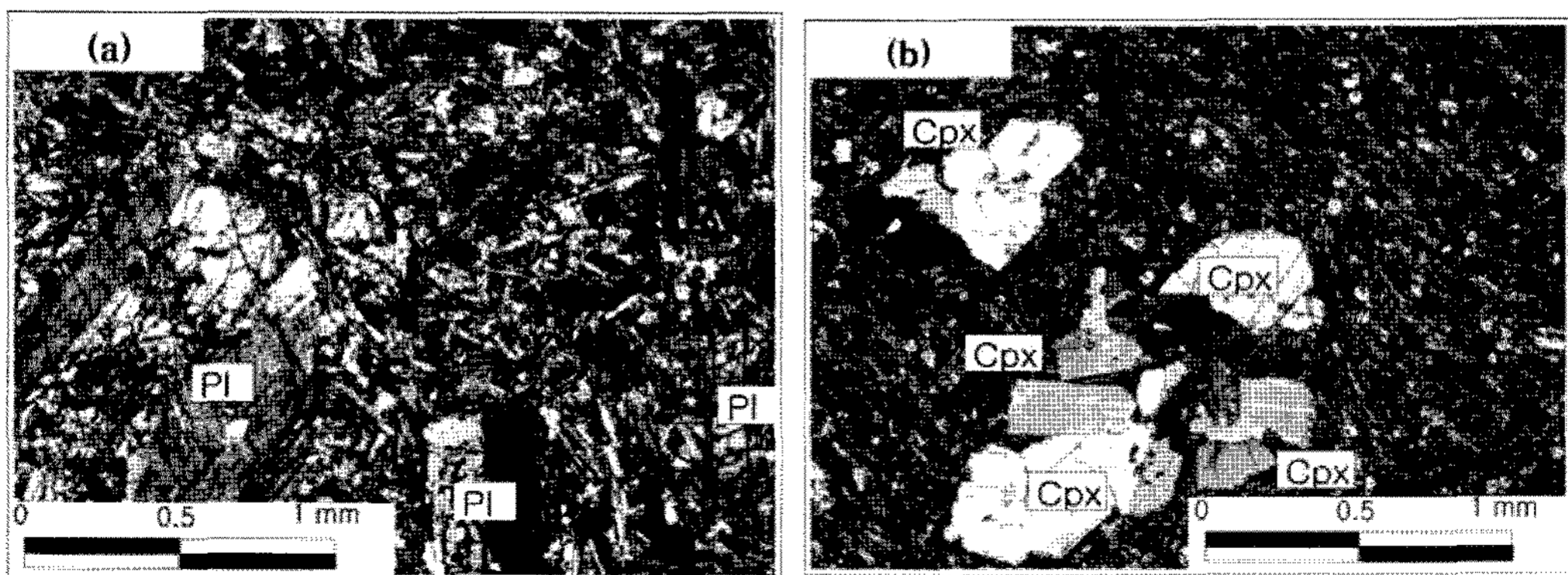


Fig. 3. Photomicrograph of Chenojaam basaltic andesite.

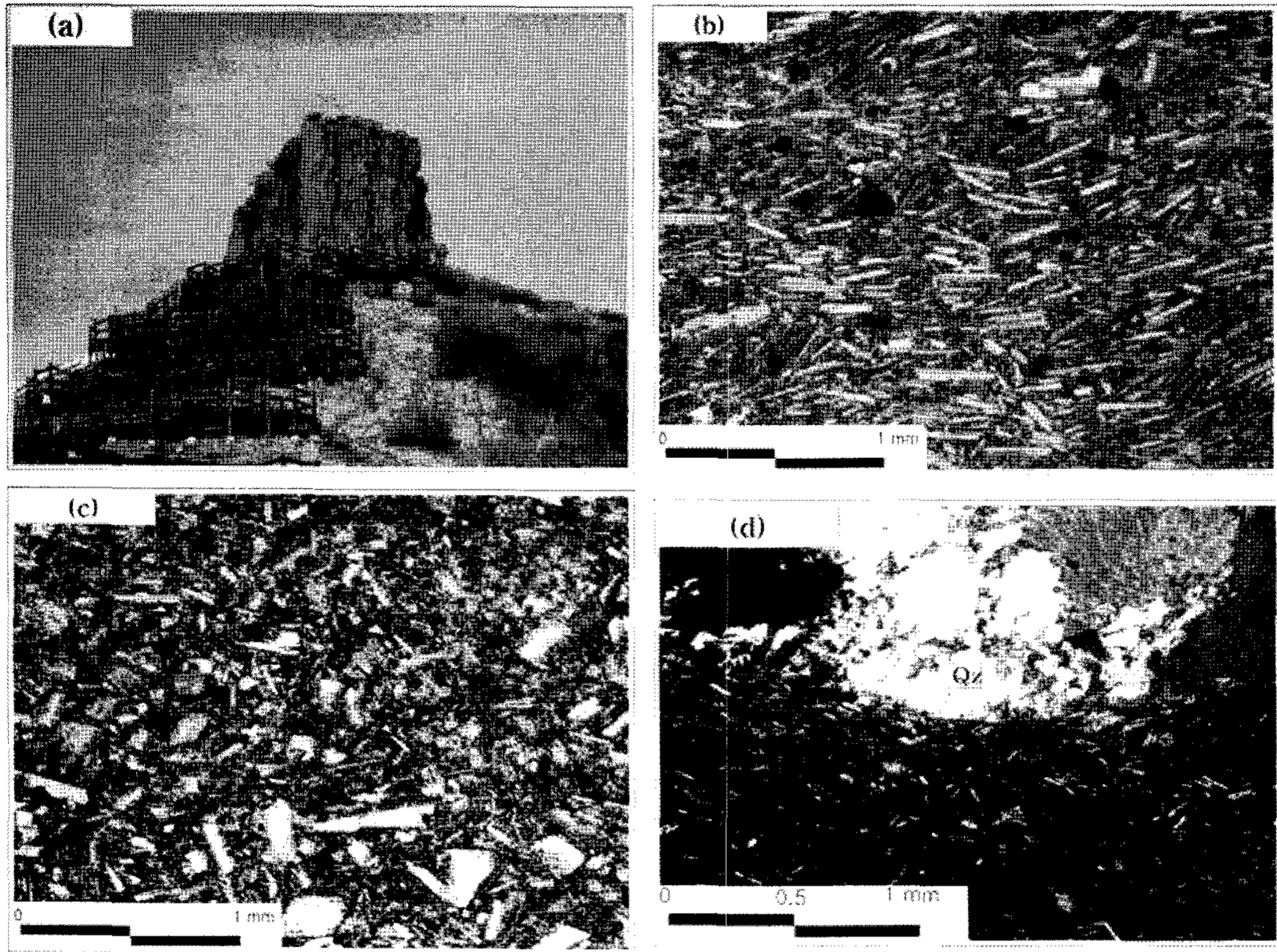


Fig. 4. (a) Outcrop of Sirubong andesite. (b), (c) Photomicrograph of Sirubong andesite which cutting on perpendicular direction (b) and horizontal direction (c). (d) Photomicrograph of Cheonjabong andesite intruded biotite granite.

을 가진 반정이 나타난다. 기질부는 방향성 없이 배열되어 있는 0.1 mm 내외의 사장석 래쓰와 입간상으로 나타나는 미립의 휘석, 유리질 물질로 구성되어 있다.

시루봉안산암

시루봉안산암은 높이 10 m, 둘레 50 m의 시루를 얹어 놓은 모양의 봉우리인 시루봉을 형성하고 있으며 (Fig. 4a), 주변의 노두에서 동일한 암색, 광물 조직과 조성을 갖는 암석은 나타나지 않고 시루봉에만 제한적으로 산출된다. 시루봉 양 측면에 수십 m 이상 발달되어 있는 테일러스에 전적으로 나타난다. 현재는 시루봉에 제한적으로 나타나지만 과거에는 상당히 넓게 분포되어 있었을 가능성이 있다. 육안상으로 표면색은 연한 적색을 띠지만 내부의 신선한 면은 흑회색으로 나타나, 표면이 철 성분의 산화작용을 받은 것으로 판단된다. 기존의 화산암류에 비해 변질 정도가 매우 미약하여 신선하고 치밀한 조직을 보이며, 비반상 형태로 산출된다. 수직절리와 수평절리가 잘 발달되어 있으며, 수평절리는 0.5~2 cm의 얇은 두께를 갖는다. 수

직방향의 절리는 주상 모양을 나타내나 전형적인 주상절리의 모습은 아니며 약하게 뒤틀려 있다.

편광현미경하에서 반정광물로 0.4~0.7 mm의 크기를 가진 사장석이 자형 내지 반자형 형태로 2% 내외의 극소량 함유되어 있다. 사장석 반정은 일부 시료(J-2)에서 용식된 형태와 용융체가 사장석에 포획되어 형성된 체구조(sieve texture)를 보이며, 알바이트-칼스반드 쌍정과 누대구조를 보여준다. 전체의 98%를 차지하는 기질부는 사장석 래쓰, 불투명광물, 소량의 극미립 휘석들로 구성되어 있고, 특히 기질부의 약 40%는 유리질로 채워져 있다. 사장석 래쓰들은 전형적인 조면암질 조직을 나타내며, 부분적으로 극미립의 휘석 반정들이 입간상 형태를 나타내고 불투명광물의 함량이 높다. 사장석 래쓰들의 평균 크기가 0.2 mm 정도로 본역 안산암질암중 가장 크며 신선하다. 사장석 래쓰들의 배열방향을 알아보기 위해 수평절리 방향을 기준으로 시료의 절단방향을 상하 방향으로 절단하고, 상하 방향에 수직된 방향으로 한 번 더 절단하여 관찰하였다. 그 결과 상하 방향의 박편에서는 사장석 래쓰들의 조면암질 조직이 잘

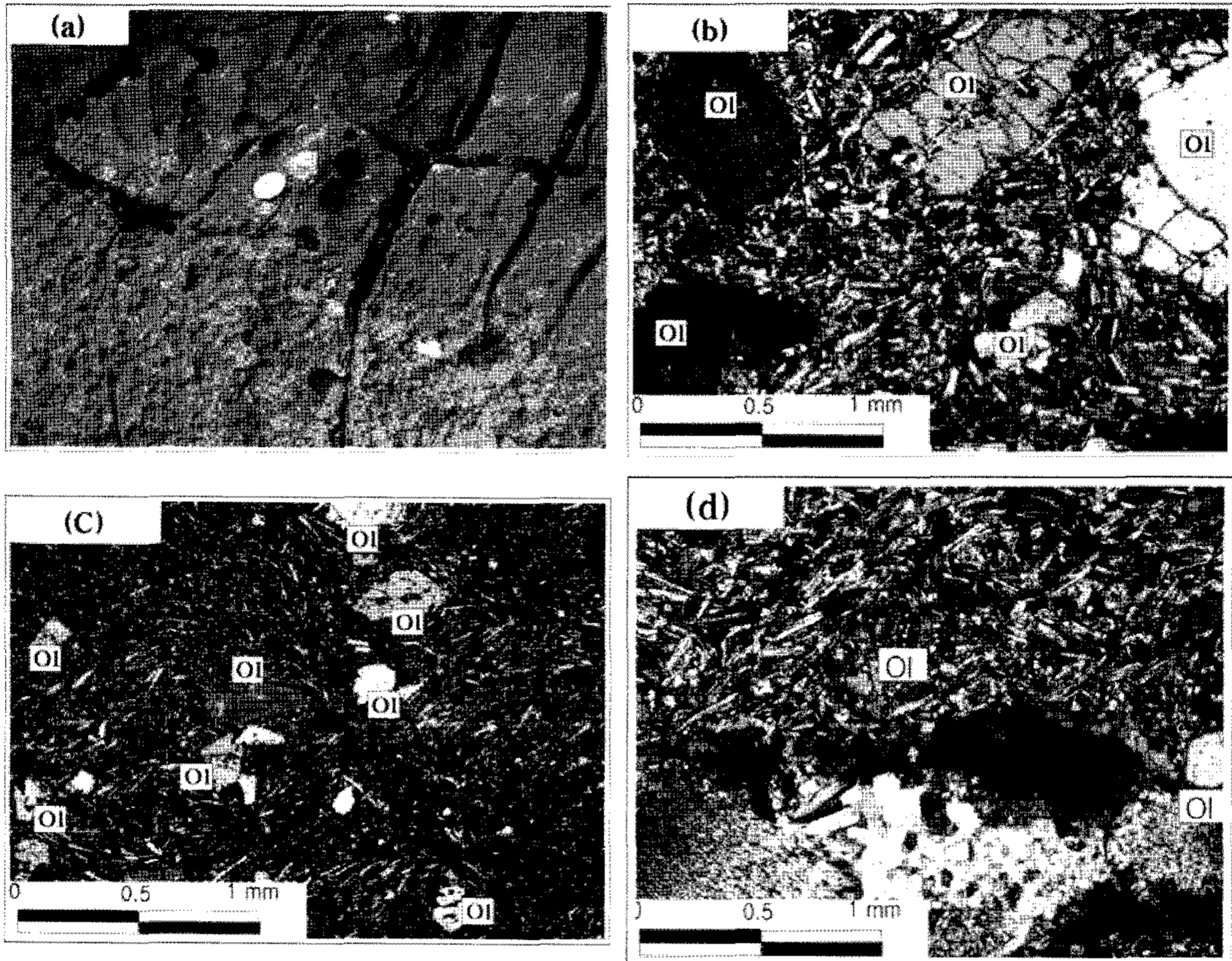


Fig. 5. (a) Photograph of Cheonjabong basalt. (b)-(d) Photomicrograph of Cheonjabong basalt.

나타나지만(Fig. 4b), 거기에 수직으로 자른 박편에서는 조면암질 조직이 잘 나타나지 않는다(Fig. 4c).

시루봉의 생성 가능한 환경은 1) 마그마 분출 후 수직으로 상승한 마그마가 화도를 채운 암경의 형태, 2) 마그마가 암상의 형태로 관입하여 차별침식을 받아 시루봉만 남은 형태, 3) 마그마가 분출한 용암류의 화산암 세 가지를 가정하여 유추해 볼 수 있다. 시루봉이 암경이나 암상의 관입형태로 형성되었다면, 시루봉 뿐만 아니라 주변지역에서도 이와 같은 특징을 보여주는 작은 암맥들이 산출되어야 할 것이다. 정밀야외조사 및 경하관찰을 통하여 고찰한 결과 시루봉과 유사한 양상의 암석은 전혀 산출되지 않았다.

사장석 래쓰들의 수평 배열, 주변지역에서 시루봉안산암과 같은 암석의 암맥들이 나타나지 않는다는 점, 유리질 함량이 높게 나타나는 특징을 통해 시루봉안산암은 관입 형태가 아닌 분출 즉, 용암류라고 판단된다. 시루봉안산암의 용암이 분출하여 측방으로 넓은 지역에 분포하였으나, 수직절리면을 따라 암석들은 삭박되고, 현재의 시루봉만 남아있다고 사료된다.

천자봉현무암

천자봉현무암은 천자봉-수리봉 사이의 주능선, 시루봉 남동쪽 7부 능선과 시루봉에서 웅천으로 이어지는 능선부에서 고도 약 450~550 m, 약 70 m의 좁은 폭으로 분포하고 있다. 주절리의 방향은 주향 N40°~43°E, 수직경사를 가지며, 총연장길이 1,500 m 정도의 단속성을 가지며 산출된다.

천자봉현무암은 풍화면에서 황갈색~흑회색을 띠는 감람석 반정을 관찰할 수 있고, 5 mm 이하의 등근 흠이 나타나며(Fig. 5a) 관상의 쪼개짐을 보인다. 시루봉 남동쪽 7부 능선부와 시루봉에서 웅천으로 이어지는 능선부의 노두는 행인상 조직 및 기공을 가지고 있으며, 수리봉 노두와 시루봉 남동쪽 7부 능선 노두는 불국사화강암과 천자봉현무암 사이에 휘석 반정을 함유한 천자봉현무암질안산암이 끼어져 있어 불국사화강암과 천자봉현무암을 동시에 접촉하고 있다.

주로 괴상의 형태로 산출되고, 수리봉과 시루봉 남동쪽 7부 능선 노두에서는 판상절리와 수직절리가 동시에 나타나며, 양측 능선을 따라 대규모의 테일러스

들이 발달되어 있으며, 이는 천자봉현무암의 분포 면적이 넓었음을 시사한다.

천자봉 정상부(시료 C-9)

만장대의 바로 위 가파른 능선부터 천자봉 정상까지 회백색의 기질부와 약 1.5 mm 정도의 흑갈색~황갈색의 감람석 반정을 쉽게 관찰할 수 있는 현무암이 나타난다. 천자봉 정상의 남동방향 아래에는 수직절리가 발달되어 있으며, 주절리의 방향은 N40°E이다.

편광현미경하에서(Fig. 5b) 반정광물로 감람석이 나타나며 휘석, 사장석은 나타나지 않는다. 기질부는 사장석 래쓰와 이들을 채우고 있는 극미립의 감람석, 불투명광물이 입간상 조직으로 관찰된다. 반정은 대부분 자형 또는 반자형으로 평균 크기는 약 1.5~2 mm이며, 사장석 래쓰는 불규칙하게 배열되어 있고, 평균 크기는 0.1 mm이다. 극미립의 감람석 석기 광물과 주상 혹은 침상의 사장석 래쓰가 반정광물의 주위를 감싸는 필로택시틱 조직이 나타나며(Fig. 5d), 감람석 반정과 사장석 래쓰는 주변의 다른 현무암에서 나타나는 반정, 래쓰의 크기보다 크다.

수리봉 정상부(시료 C-11, C-12)

천자봉-정병산으로 이어지는 임도에서 천자암 우측 계곡 정상부에 위치하는 높이 30 m, 폭 50 m 정도의 규모가 큰 노두에 천자봉현무암이 나타난다. 정상부 아래쪽으로는 대규모의 테일러스가 발달되어 있는데 대부분이 천자봉현무암으로 되어 있다. 상부와 하부에서 반정 크기와 절리 양상의 차이가 나타나는데, 하부는 반정이 세립이고 수직방향의 절리와 수평방향의 판상 절리가 우세하게 나타나고, 상부는 반정의 크기가 하부보다는 크고 수직방향의 절리가 우세하다.

편광현미경하에서 천자봉 정상부와 구성광물 및 조직적 특징은 같으며, 감람석 반정의 평균 크기는 수리봉 하부가 0.3~0.8 mm, 상부는 1.2~1.7 mm로 하부에서 상부로 갈수록 반정의 크기가 커지며, 상부의 현무암은 천자봉 정상부의 현무암과 같다.

천자봉-수리봉 사이의 능선부(시료 GA7, GA9, GA10, C-13-1)

표면색이 짙은 흑회색으로 천자봉의 회백색보다 어둡고, 반정의 크기가 세립이므로 육안 식별이 어렵다.

Table 3. Average compositions of the representative analyses and structural formulae for olivines in Chenjabong basalt. FeOT as total Fe, Mg# = Mg/(Mg+Fe2+), Abbreviation: P; phenocryst, G; groundmass, C; core, M; margin.

sample No. phase	C-11 P	C-11 G	C-12 P	C-13-1 P	GA7 P	GA9 P	GA9 G	GA10 P	J-3 P	J-6 P	J-6-2 P	C-9 P	C-9 G
SiO ₂	37.5	37.3	37.4	38.2	39.1	38.0	37.7	38.1	38.3	38.2	38.5	37.7	38.2
TiO ₂	0.1	-	-	-	-	-	0.1	-	-	-	-	-	0.1
Al ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	-	-	-	0.1
FeO ^T	26.1	27.7	26.1	22.3	16.0	22.7	24.5	22.7	22.1	22.9	20.7	24.1	23.5
MnO	0.5	0.6	0.5	0.3	0.2	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5
MgO	36.4	34.4	36.2	39.6	44.4	39.4	37.8	39.3	39.9	39.4	40.9	38.3	38.6
CaO	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1
Total	101.0	100.4	100.5	100.7	99.9	100.9	101.0	100.8	101.0	101.2	100.9	100.9	101.4
4(O)													
Si	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Al	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe	0.6	0.6	0.6	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5
Mn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	1.4	1.4	1.4	1.5	1.7	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.5	1.5
Ca	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cations	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Mg [#]	0.71	0.69	0.71	0.76	0.84	0.75	0.73	0.75	0.76	0.76	0.78	0.74	0.75

Table 4. Average compositions of the representative analyses and structural formulae for plagioclase, FeOT as total Fe, CA; Cheonjabong andesite, CBA; Cheonjabong basaltic andesite, SA; Sirubong andesite, CB; Cheonjabong basalt. Other abbreviations are the same as Table 3.

sample No Rock type phase NOA	C-8		C-8		C-16		J-4		GA6-1		GA9-1		GA9-2		GA10		GA10-1		J-2		J-2		
	P-C	P-M	P-C	P-M	P	P	P	P	P	G	P	G	G	P	G	P	G	P-C	P-M	P-C	P-M	G	G
	1	1	2	2	1	1	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	4
SiO ₂	51.7	52.0	67.2	67.8	67.8	67.8	67.8	67.8	47.3	50.9	50.0	50.6	50.6	51.65	50.89	52.76	49.48	51.49					
TiO ₂	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	-	0.14	0.03	0.05	0.01	0.05					
Al ₂ O ₃	29.5	29.3	20.6	20.0	20.0	20.0	20.0	32.6	30.1	30.7	30.8	30.8	30.05	30.17	29.64	31.50	29.94						
FeO ^T	0.6	0.6	0.1	-	-	-	-	0.5	1.0	0.7	0.8	0.8	0.91	0.90	0.50	0.66	0.90						
MnO	-	-	0.1	-	-	-	-	0.1	0.1	-	-	-	0.00	0.09	0.01	0.00	0.03						
MgO	0.1	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01						
CaO	13.1	12.8	0.8	0.3	0.3	0.3	0.3	16.4	13.4	14.2	14.1	14.1	13.01	13.16	12.44	15.09	13.24						
Na ₂ O	3.9	4.1	11.0	11.6	11.6	11.6	11.6	2.2	3.8	3.3	3.5	3.5	4.08	3.72	4.43	3.01	3.88						
K ₂ O	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.32	0.19	0.31	0.17	0.19						
Total	99.2	99.1	99.9	99.8	99.8	99.8	99.8	99.2	99.6	99.2	99.6	99.6	100.14	99.15	100.14	99.92	99.74						
8(O)																							
Si	9.49	9.54	11.78	11.88	11.88	11.88	11.88	8.77	9.35	9.23	9.26	9.26	9.42	9.37	9.57	9.08	9.42						
Al	6.39	6.33	4.25	4.13	4.13	4.13	4.13	7.12	6.52	6.67	6.63	6.63	6.45	6.54	6.34	6.81	6.45						
Ti	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01						
Fe	0.10	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.16	0.12	0.12	0.12	0.14	0.14	0.08	0.10	0.14						
Mn	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00						
Mg	0.01	0.02	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	2.58	2.51	0.16	0.06	0.06	0.06	0.06	3.26	2.64	2.81	2.76	2.76	2.54	2.60	2.42	2.97	2.60						
Na	1.40	1.47	3.75	3.94	3.94	3.94	0.79	1.34	1.34	1.18	1.25	1.25	1.44	1.33	1.56	1.07	1.38						
K	0.05	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07	0.05	0.07	0.04	0.04						
Cations	20.02	20.04	19.97	20.03	20.03	20.03	20.06	20.06	20.07	20.03	20.06	20.06	20.08	20.03	20.05	20.06	20.05						
Ab	34.60	36.50	95.45	98.30	98.30	98.30	19.50	33.30	33.30	29.20	30.80	30.80	35.50	33.50	38.45	26.25	34.28						
An	64.20	62.20	4.05	1.40	1.40	1.40	79.95	65.60	65.60	69.90	68.05	68.05	62.70	65.40	59.80	72.80	64.60						
Or	1.20	1.20	0.50	0.30	0.30	0.30	0.55	1.00	1.00	0.90	1.15	1.15	1.80	1.10	1.75	0.95	1.10						

Table 4. Continued.

sample No Rock type phase NOA	CBA(■)				CBA(●)				C-11	GA7	GA9	GA9	J-3	J-6	J-6-2	C-9	C-9	
	C-14	C-14	C-14	C-15-1	J-1	J-6-1	J-6-1	R4-4										R4-4
SiO ₂	47.89	46.72	48.22	52.84	46.57	67.32	66.69	50.11	60.83	50.68	51.72	54.28	52.40	50.80	49.27	51.25	49.40	52.76
TiO ₂	0.03	0.04	0.03	0.05	0.03	0.01	0.02	0.07	0.70	0.13	0.10	0.13	0.10	0.09	0.06	0.10	0.07	0.10
Al ₂ O ₃	32.52	33.66	32.30	29.13	33.36	20.43	21.06	30.91	22.42	30.70	29.75	28.02	29.42	30.43	31.42	30.44	31.03	29.23
FeO(T)	0.80	0.63	0.74	0.74	0.73	0.07	0.29	0.68	2.11	0.56	0.80	0.73	0.72	0.74	0.66	0.64	0.89	0.52
MnO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.06	0.04	0.00	0.03	0.00	0.05	0.04	0.04
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	16.13	17.04	15.69	12.37	17.02	0.67	1.48	14.42	7.01	13.65	12.72	10.64	12.08	13.49	14.77	13.38	14.34	11.92
Na ₂ O	2.36	1.69	2.62	4.47	1.76	11.18	10.63	3.34	4.93	3.79	4.18	5.27	4.49	3.82	3.14	3.84	3.37	4.74
K ₂ O	0.08	0.04	0.11	0.17	0.04	0.08	0.18	0.12	2.37	0.22	0.23	0.37	0.36	0.21	0.22	0.30	0.16	0.29
Total	99.82	99.83	99.72	99.76	99.54	99.75	100.52	99.64	100.37	99.71	99.56	99.48	99.58	99.60	99.54	100.00	99.28	99.58
8(O)																		
Si	8.83	8.62	8.89	9.63	8.63	11.81	11.65	9.20	10.94	9.28	9.47	9.89	9.58	9.32	9.08	9.36	9.12	9.63
Al	7.06	7.31	7.01	6.25	7.28	4.22	4.34	6.68	4.75	6.62	6.42	6.01	6.33	6.57	6.81	6.54	6.75	6.28
Ti	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.10	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Fe	0.12	0.10	0.11	0.11	0.11	0.01	0.04	0.10	0.32	0.09	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.14	0.08
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	3.19	3.37	3.10	2.42	3.38	0.13	0.28	2.84	1.35	2.68	2.50	2.08	2.37	2.65	2.92	2.62	2.84	2.33
Na	0.84	0.60	0.94	1.58	0.63	3.80	3.60	1.19	1.72	1.34	1.48	1.86	1.59	1.36	1.12	1.36	1.21	1.68
K	0.02	0.01	0.03	0.04	0.01	0.02	0.04	0.03	0.54	0.05	0.05	0.09	0.08	0.05	0.05	0.07	0.04	0.07
Cations	20.06	20.02	20.08	20.04	20.04	19.99	19.99	20.05	19.71	20.08	20.07	20.06	20.07	20.08	20.09	20.07	20.10	20.08
Ab	20.80	15.10	22.95	39.20	15.75	96.30	91.90	29.30	47.60	33.00	36.80	46.20	39.35	33.50	27.40	33.60	29.60	41.10
An	78.70	84.65	76.40	59.90	84.05	3.20	7.00	70.00	37.40	65.70	61.90	51.60	58.50	65.30	71.30	64.60	69.50	57.20
Or	0.50	0.25	0.65	1.00	0.25	0.50	1.00	0.70	15.00	1.30	1.35	2.10	2.05	1.23	1.30	1.70	0.90	1.70

Table 5. Average compositions of the representative analyses and structural formulae for pyroxenes. FeOT as total Fe. Abbreviations are the same as Table 4.

sample No Rock type phase NOA	J-2 GA10-1		C-14		C-15-1		J-1		J-6-1		R4-4		C-13-1		J-3		J-6		
	SA(▼)		CBA(■)														CB(●)		
	P	P	P	G	P-C	P-M	P-C	P-M	P-C	P-M	P	P	G	P	G	G			
	2	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	2	1	2			
SiO ₂	50.52	48.38	49.61	52.23	51.65	50.71	50.41	50.73	49.79	50.62	49.60	50.31	46.13	46.06	49.40	48.69			
TiO ₂	0.53	0.83	0.99	0.43	0.62	0.69	0.82	0.80	0.76	0.50	0.72	0.74	0.78	3.33	1.35	2.18			
Al ₂ O ₃	2.79	4.46	3.92	1.47	1.94	2.99	3.43	2.50	3.85	3.63	4.41	2.76	1.29	6.15	4.22	4.36			
FeO ^T	10.65	10.66	9.99	10.15	9.65	9.08	8.98	22.54	8.69	6.51	8.62	10.39	19.62	8.78	7.90	7.88			
MnO	0.46	0.46	0.23	0.35	0.45	0.27	0.31	0.34	0.23	0.13	0.23	0.35	0.53	0.24	0.15	0.20			
MgO	15.45	14.34	14.52	17.44	15.39	15.26	15.28	15.33	15.30	16.27	15.49	15.13	10.46	12.06	14.23	13.26			
CaO	18.85	19.43	20.27	17.16	20.01	20.57	19.68	17.71	20.18	21.28	20.00	19.36	17.26	22.23	21.94	22.48			
Na ₂ O	0.22	0.33	0.32	0.25	0.34	0.32	0.28	0.31	0.27	0.28	0.26	0.27	0.20	0.58	0.45	0.65			
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.10	0.02	0.00	0.01			
Total	99.47	98.87	99.85	99.46	100.07	99.89	99.20	110.26	99.08	99.23	99.33	99.32	96.38	99.46	99.64	99.70			
6(O)																			
Si	1.89	1.82	1.85	1.94	1.91	1.88	1.88	1.75	1.86	1.87	1.84	1.88	1.85	1.73	1.84	1.81			
Al(4)	0.11	0.18	0.15	0.06	0.08	0.12	0.12	0.10	0.14	0.13	0.16	0.12	0.06	0.27	0.17	0.18			
Al(6)	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.03	0.03	0.03	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01			
Ti	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.09	0.04	0.06			
Fe	0.17	0.17	0.16	0.16	0.15	0.14	0.14	0.33	0.14	0.10	0.13	0.16	0.33	0.14	0.12	0.12			
Mg	0.86	0.80	0.81	0.96	0.85	0.84	0.85	0.79	0.85	0.90	0.86	0.84	0.63	0.68	0.79	0.74			
Mn	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01			
Ca	0.75	0.78	0.81	0.68	0.79	0.82	0.79	0.66	0.81	0.84	0.80	0.78	0.74	0.90	0.87	0.90			
Na	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.05			
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00			
Wo	38.46	40.43	41.84	34.59	40.58	41.89	40.85	31.13	41.67	43.34	41.28	39.68	36.29	48.27	45.69	47.59			
En	43.84	41.51	41.69	48.90	43.42	43.24	44.12	37.48	43.96	46.11	44.46	43.14	30.61	36.44	41.23	39.05			
Fs	17.70	18.06	16.48	16.51	16.00	14.86	15.04	31.40	14.37	10.55	14.26	17.19	33.10	15.29	13.08	13.35			

0.5~1 m의 폭을 가진 수직절리가 나타나며, 수리봉에서 북동쪽으로 이어지는 능선과 천자암 등산로와 만나는 지점의 현무암은 기공과 행인상구조가 관찰되며, 천자봉과 수리봉에서 산출되는 현무암과 구분이 된다. 기공은 3% 정도, 행인은 2~10% 정도를 차지하고 옥수, 방해석 등이 충전되어 있다. 행인 및 기공의 평균 크기는 2 mm이며, 6 mm 정도 되는 큰 기공도 관찰된다.

편광현미경하에서(Fig. 5c) 감람석 반정의 크기가 0.2~0.9 mm로 작으며, 기질부를 이루고 있는 사장석 래쓰의 크기도 작아 수리봉 하부 현무암과 구성광물 및 조직적 특성이 비슷하다. 기공과 행인상 구조를 가지는 현무암은 감람석 반정과 같은 크기의 휘석 반정이 소량 나타난다.

시루봉 남동쪽 7부 능선과 웅천으로 이어지는 능선부(시료 J-3, J-6, J-6-2)

시루봉 남동쪽 7부 능선과 시루봉에서 웅천으로 이어지는 능선부의 현무암은 앞서 논의된 천자봉현무암의 고도와 비슷한 약 500 m 높이에 위치하며, 수리봉 북동 능선부에서 나타나는 천자봉현무암과 같이 기공과 행인상 구조가 나타나고 행인의 크기, 채우고 있는 물질이 비슷하다. 풍화면에서 평균 크기 0.5 cm, 깊이 0.3 cm 정도의 원형의 홈이 형성된 것을 볼 수 있고, 원형의 홈들은 수직·수평절리가 발달되어 있는 곳의 풍화면을 따라 나타난다. 편광현미경하에서 감람석 반정의 크기가 크고, 반정의 연변부가 변질되어 이딩사이트(iddingsite)화 되어 있거나 반정 내부나 외곽, 기질

부에 불투명광물인 산화철로 채워져 있는 것으로 보아, 감람석, 또는 산화철 광물이 치밀한 기질부보다 먼저 풍화되어 주위가 점점 넓어져 원형의 흠이 생성된 것으로 추정된다. 편광현미경하에서 구성광물, 조직적 특징은 천자봉, 수리봉 정상부의 것과 유사하다.

이상에서 살펴본 바와 같이 천자봉현무암의 야외 산상 특징은 주절리 방향이 주향 N40°~43°E, 수직경사를 나타내며, 450 m 이상의 고도에 위치한다. 수리봉 북동 능선에서 시루봉 남동쪽 7부 능선 사이에 현무암의 노두가 발견되지 않고 그 사이에 불국사화강암이 위치하여 연속적이지 못하고, 모든 노두에서 수직절리가 현저하게 발달되어 있으며, 천자봉과 수리봉 정상부를 제외한 지역에서 기공과 행인상 구조를 보이고 있다.

본역에서는 뚜렷하지는 않지만 절리 발달의 형태와 반정광물의 크기 변화, 편광현미경하의 조직에 따라 두 가지 형태의 용암이 나타난다. 천자봉과 수리봉 상부를 이루고 있는 천자봉현무암은 감람석 반정이 다른 장소에서 산출되는 것보다 크고 수직절리가 우세하게 관찰되는 반면, 수리봉 하부, 시루봉 남동쪽 능선 및 7부 능선에 나타나는 천자봉현무암은 감람석 반정이 세립이며 기공이 발달되어 있고, 수직절리와 수평의 판상절리가 잘 발달되어 나타난다. 절리발달 방향, 암질의 변화에 의해 용암단위가 구분이 되지만, 분출의 시간적 간격을 지시하는 고토양이나 화산쇄설물 등은 산출되지 않아 그 분출 간격이 비교적 짧았을 것으로 사료된다. C-13-1에서는 상당한 양의 단사회석이 나타난다(Table 2).

광물 조성

연구지역 화산암류의 조암광물 EPMA 분석 결과는 천자봉현무암의 감람석에 대해 Table 3, 연구지역 모든 화산암에 나타나는 사장석에 대해 Table 4, 천자봉안산암, 천자봉현무암질안산암의 휘석에 대해 Table 5에 정리한 것과 같다. 각 광물의 성분 변화는 분석된 모든 자료를 이용하여, 감람석의 경우 $Mg_2SiO_4-Fe_2SiO_4$ 성분도(Fig. 6, Deer et al., 1972), 사장석은 Or-Ab-An 단성분 분류도(Fig. 7, Deer et al., 1972), 휘석은 $CaSiO_3-MgSiO_3-FeSiO_3$ 단성분도(Fig. 8, Morimoto, 1988)에 나타내었다.

감람석

감람석은 반정, 미반정으로 구분되며, 반정으로 나타나는 감람석은 Fe_{84-69} 의 조성을 가지며 타형 혹은 반자형으로 나타난다. 일부 감람석 반정에서는 외연부가 일부 용식되거나, 이당사이트화되어 나타나며, 반정, 미

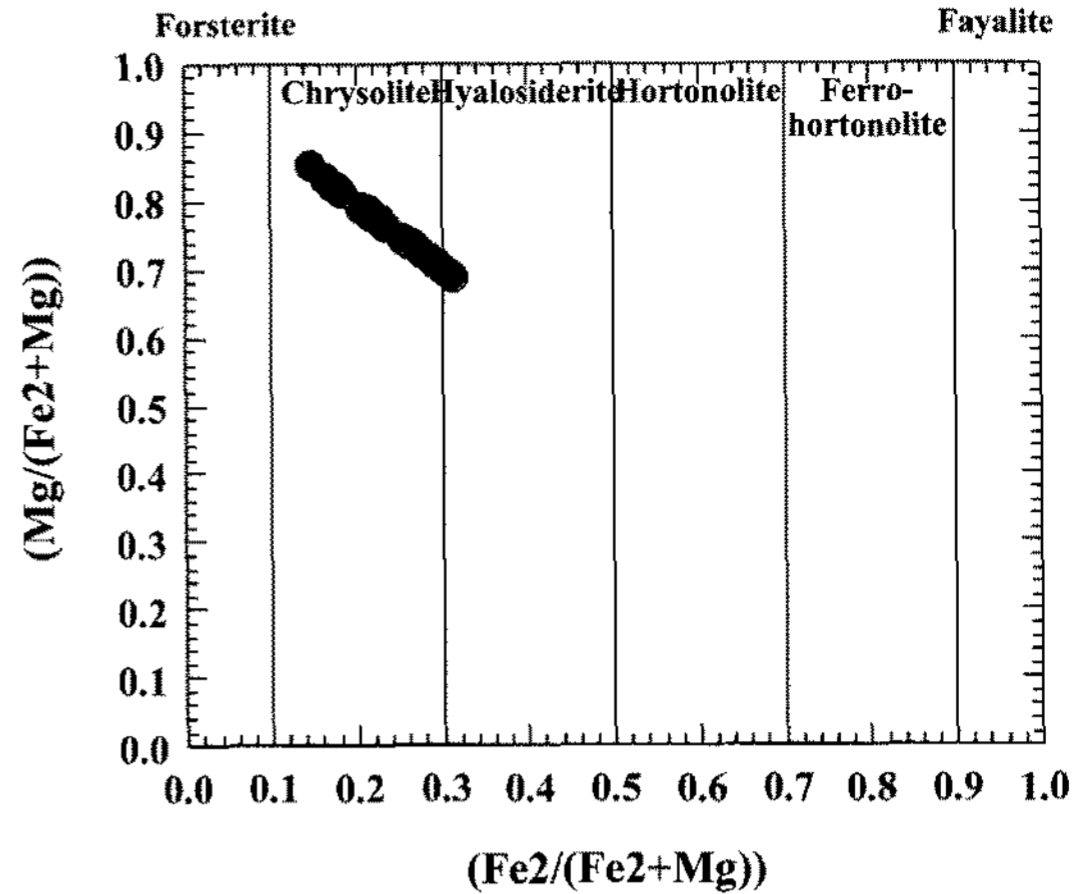


Fig. 6. Olivine compositions for Cheonjabong basalt (Deer et al., 1972).

반정의 성분차는 거의 나타나지 않는다. 본역의 감람석 성분을 $Mg_2SiO_4-Fe_2SiO_4$ 성분도(Fig. 6)에 도시해 보면 대부분 크리솔라이트(chrysolite) 조성을 갖는다.

사장석

사장석은 반정, 외래결정편, 미립의 반정과 기질부를 이루고 있는 래스로 구분된다. 분석된 천자봉안산암 시료의 반정은 An_{64-62} , 석기는 An_{65} 로 모두 라브라도라이트(labradorite) 조성을 갖는다. 시루봉안산암은 사장석 래스가 대부분이며, 반정은 나타나나 드물며 일부에서 체구조(sieve texture)를 가진 반정이 나타난다. 반정은 An_{60-80} 이며, 시료 J-2의 체구조를 가진 반정의 중심부는 An_{60} 으로 라브라도라이트 조성을, 주변부는 An_{73} 으로 비토나이트(bytownite) 조성에 해당되어 주변부로 갈수록 An 함량이 증가하는 역누대구조를 나타낸다. 석기는 An_{64-68} 로 대부분 라브라도라이트 조성을 갖는다. 천자봉현무암질안산암의 반정은 An_{60-70} 이며, 석기는 An_{76-84} 로 모두 비토나이트 조성을 갖는다. 천자봉현무암은 대부분 침상의 미반정과 석기로 이루어져 있으며, 미반정은 An_{66-71} 로 라브라도라이트-비토나이트 조성을, 석기는 An_{57-65} 로 대부분 라브라도라이트 조성을 갖는다.

연구지역의 사장석 성분을 Or-Ab-An 삼각도(Fig. 7)에 도시해 보면 천자봉현무암은 대부분 라브라도라이트 조성 영역에, 천자봉현무암질안산암은 라브라도라이트와 비토나이트 조성 영역에 도시된다. 천자봉안산암인 C-16, J-4의 시료와 천자봉현무암질안산암의 J-6-1 시료에서 각각 Ab_{95-98} , Ab_{91-96} 으로 알바이트 조성을 갖는 사장석이 나타나고, 경하에서 주변의 사장석 결

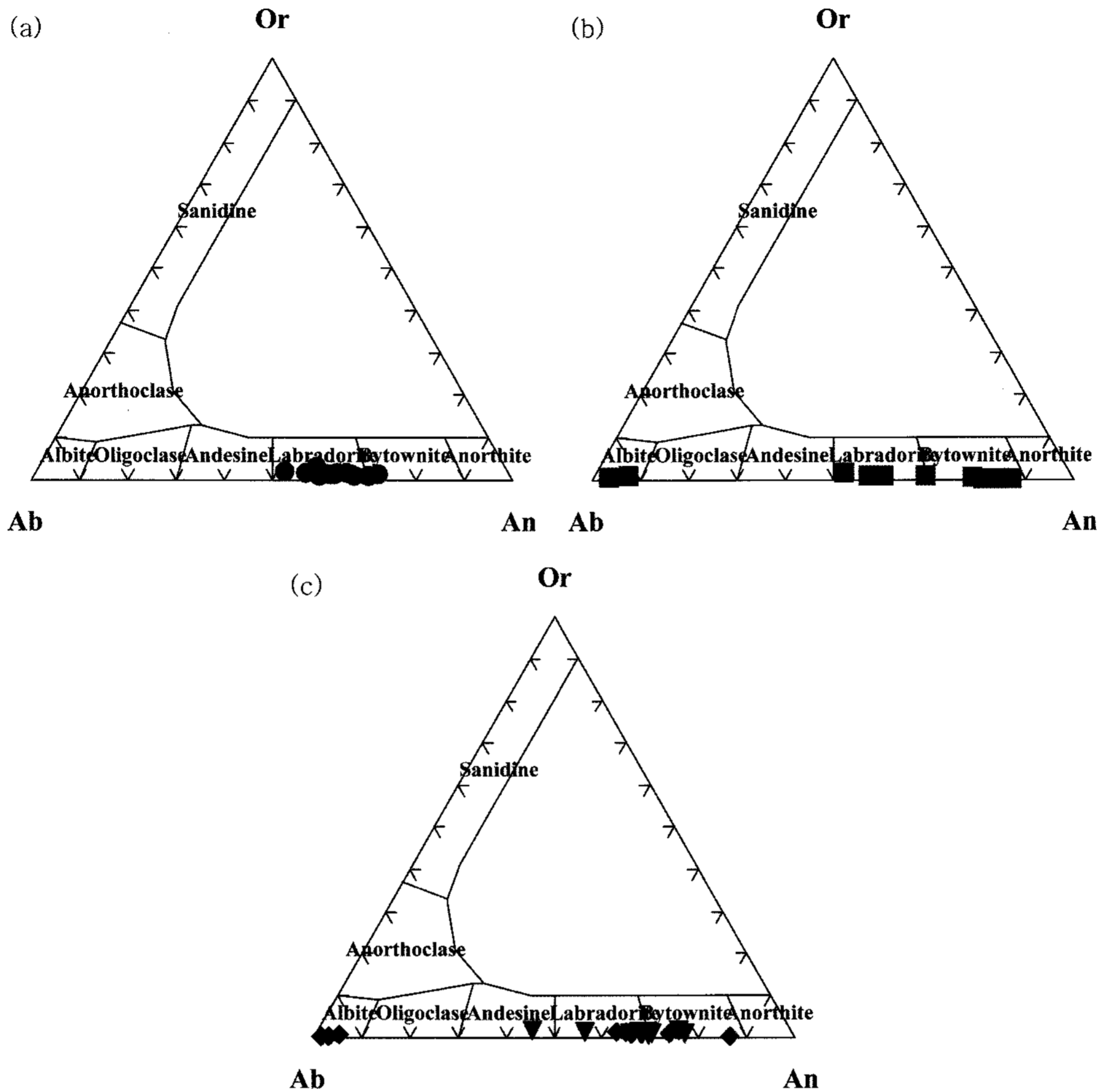


Fig. 7. An-Ab-Or diagram (Deer *et al.*, 1972) showing plagioclase compositions for basalt and andesitic rocks. (a) Cheonjabong basalt (●), (b) Cheonjabong basaltic andesite (■), (c) Cheonjabong andesite (◆) and Sirubong andesite (▼).

정보보다 큰 형태를 이루며 주변의 사장석과 비평형을 이루고 있다. 화학조성 및 체구조의 조직적 특성 등 비평형적인 현상은 이들 결정이 외래결정편일 가능성을 시사해 준다.

휘석

휘석의 대부분은 천자봉현무암질안산암의 반정과 석기로 나타나며, 천자봉현무암에서는 기공과 행인상 조직을 갖는 현무암에서 반정의 형태로 제한적으로 나타난다. 천자봉현무암질안산암의 반정은 $Wo_{40-43}En_{43-46}Fs_{10-17}$ 로서 보통휘석(augite)의 조성을 가지며, 석기는 $Wo_{34}En_{49}Fs_{16}$ 으로 반정의 성분과 변화가 거의 없다. 천자봉현무암의 성분은 반정의 경우 $Wo_{48}En_{36}Fs_{15}$, 석기는 $Wo_{45-47}En_{39-41}Fs_{13}$ 으로 반정과 석기의 성분은 거의 변화가 없으며, 투휘석(diopside)의 조성을 갖는다.

암석화학적 특징과 조구적 환경

연구지역 화산암류의 주성분원소 분석결과 및 CIPW 노움치는 Table 6과 같다. TAS 도표(Cox *et al.*, 1979)에서 현무암~안산암까지의 조성변화를 나타내며(Fig. 9a), Na_2O+K_2O 대 SiO_2 도표(Irvine and Baragar, 1971)에서, 천자봉현무암은 알칼리암, 그 밖의 안산암류는 비알칼리암 계열에 해당된다(Fig. 9b). AFM 삼각도(Kuno, 1968)에서 칼크-알칼리의 영역에 점시되고, 조산대 화산암류에 대한 K_2O 대 SiO_2 도표(Gill, 1981)에 의하면, 중~고-K 영역에 속한다(Fig. 10a). 천자봉현무암은 CIPW 노움값에서 감람석과 네펠린이 나타나며(Table 6), 노움값으로 현무암을 분류한 Yoder and Tilley(1962)의 CIPW 노움사면체(Fig. 11)에서 알칼리현무암 영역에 도시된다.

MgO에 대한 각 산화물의 변화 경향을 나타낸 Harker

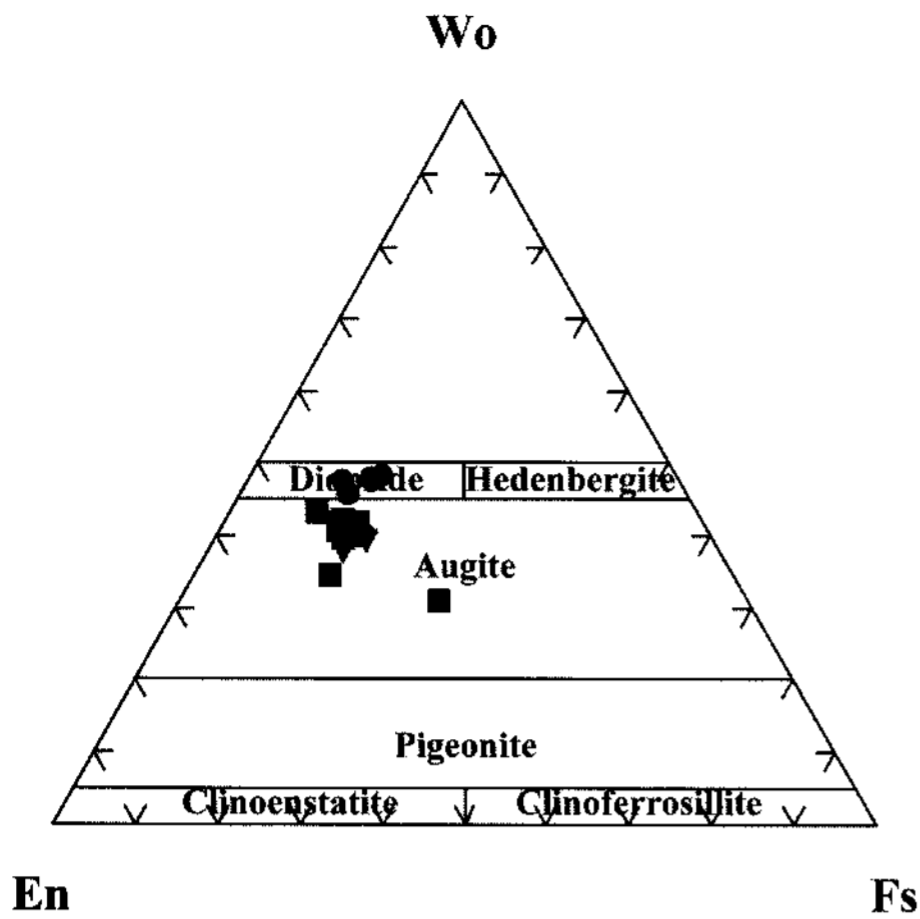


Fig. 8. Pyroxene compositions for basalt and andesitic rocks in the system of $\text{CaSiO}_3\text{-MgSiO}_3\text{-FeSiO}_3$ (Morimoto, 1988). Symbols are the same as those in Fig. 7.

변화도(Fig. 12)에서 MgO 함량이 각 암상에 따라 뚜렷한 차이를 보여 서로 독립된 마그마로부터 유래되었을 가능성도 있다. 그러나 MgO 함량이 10.4에서 2.3 wt.%로 감소함에 따라 천자봉현무암은 전체적인 분화 경향에서 떨어져 도시되지만, 천자봉현무암질안산암에서 안산암에 이르는 변화는 일련의 분화산물로 볼 수도 있다.

천자봉현무암은 MgO 함량이 감소함에 따라 Na_2O 와 K_2O 함량변화가 심하게 나타나고, 나머지 산화물은 한 곳에 집중되는 경향이 나타난다. Al_2O_3 함량은 Fe_2O_3 , CaO에 비하여 분산되지만 약간 증가되는 양상을 보인다. 천자봉현무암에서 반정광물로 감람석, 단사휘석이 나타나는데 비하여 사장석은 기질부의 래쓰상으로만 나타난다. 이와 같은 주성분원소산화물의 변화와 기재적 특징으로부터 천자봉현무암을 만든 마그마 내에서는 사장석 분별이 거의 없는 상태에서 감람석, 단사휘석의 정출이 있었다는 것을 암시한다.

안산암은 MgO 함량이 감소함에 따라 SiO_2 함량이 증가하는 경향을, Fe_2O_3 함량은 감소하는 경향을 보인다. P_2O_5 함량은 증가하는 경향을 보이지만 매우 분산되어 있고 TiO_2 , CaO, Na_2O , K_2O 함량은 다소 집중되어 있다. 반면 Al_2O_3 함량은 천자봉안산암과 시루봉안산암이 서로 분리되어 나타난다. Al_2O_3 , P_2O_5 , CaO 함량은 시루봉안산암이 높게 나타나며 TiO_2 함량은 천자봉안산암이 높게 나타난다. 천자봉현무암질안산암에서 한 개의 시료(J-6-1)가 다른 영역에 도시된다. J-6-1은 알바이트 조성의 사장석이 많이 나타나는 표품이며, 이

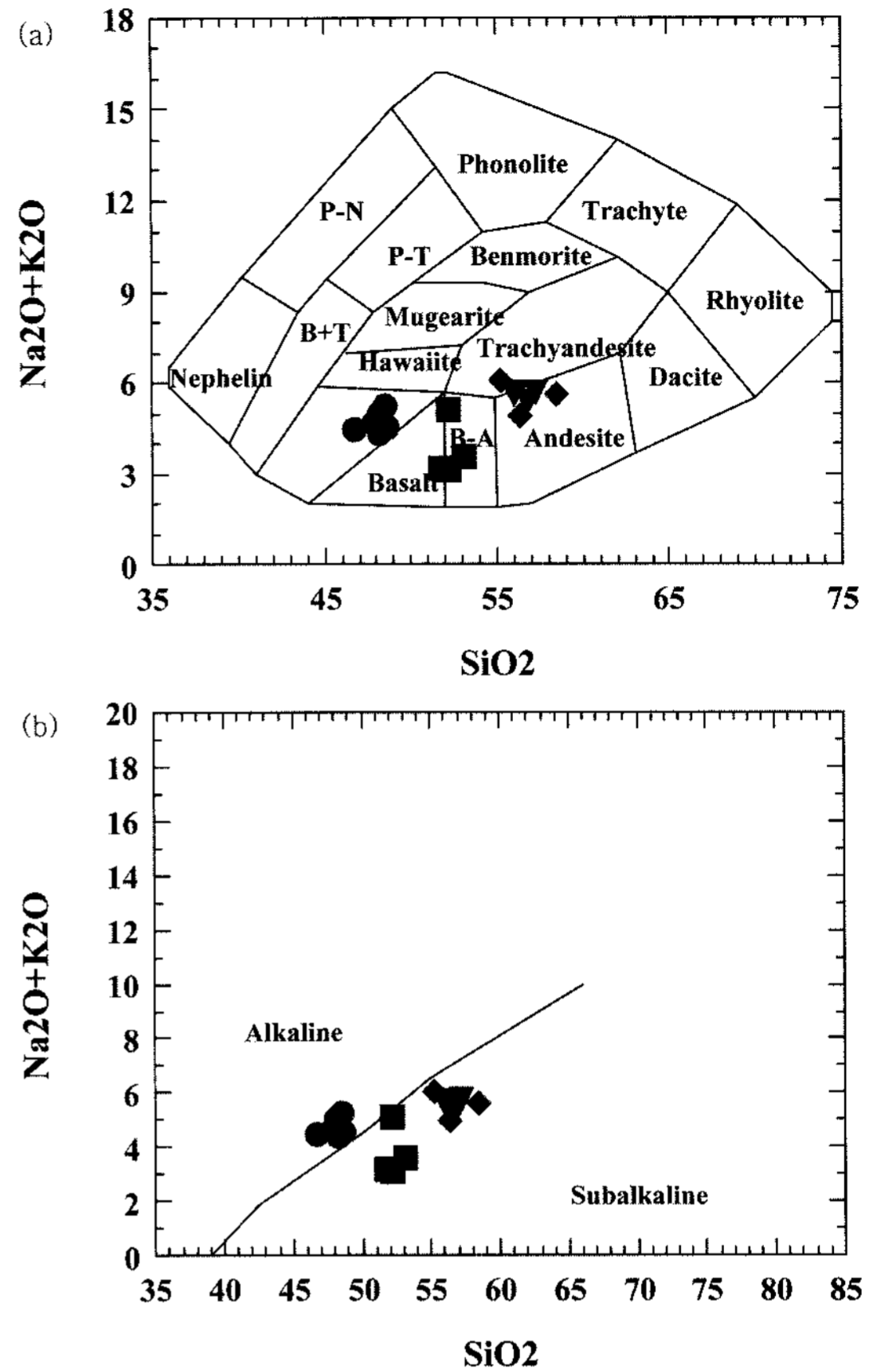


Fig. 9. (a) Nomenclature for basaltic and andesitic rocks in the study area based on TAS-diagram (wt.%) (after Cox *et al.*, 1979). (b) $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs SiO_2 discriminant diagram (after Irvine and Baragar, 1971) for basaltic and andesitic rocks in the study area. Symbols are the same as those in Fig. 7.

를 화학분석한 결과로 나타난 현상이다. 주성분 산화물들의 전체적인 경향과 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}$ 대 MgO의 도표(Fig. 13)에서 천자봉현무암질안산암에서 천자봉안산암, 시루봉안산암으로의 사장석 분별경향을 잘 보여준다.

천자봉현무암질안산암에서 사장석의 반정이 많이 관찰된다. 천자봉안산암과 시루봉안산암이 천자봉현무암질안산암의 분별작용으로 형성되었다면, 사장석 분별작용의 영향으로 Al_2O_3 함량이 감소를 하여야 하는데 천자봉안산암은 천자봉현무암질안산암에 비해 낮은 Al_2O_3 값을 가지지만, 시루봉안산암에서는 오히려 Al_2O_3 함량이 현저히 증가하고 있다. 또한 천자봉현무암질안산암과 천자봉안산암에서 공통적으로 사장석의 반정이 나타나지만, 시루봉안산암에는 사장석반정이 거의 나타나지 않는다. 따라서 시루봉안산암은 천자봉현무암

Table 6. Major elements (wt.%) and CIPW normative mineral compositions for basalt and andesitic rocks in the study area. Abbreviations are the same as Table 4.

sample	C-8	C-16	J-4	C-10	C-14	J-1	J-6-1	GA10-1	GA9-1	GA9-2	J-2	C-9	C-12	C-13-1	GA7	GA9	J-3	J-6	
Rock type	CA(◆)			CBA(■)			SA(▼)			CB(●)									
SiO ₂	56.29	55.24	58.51	53.12	51.73	52.19	52.18	56.02	57.18	55.96	56.73	48.64	48.14	48.49	48.20	48.33	48.15	47.82	
TiO ₂	0.78	0.96	1.00	1.16	0.97	0.98	0.83	0.66	0.66	0.65	0.66	1.23	1.37	1.77	1.25	1.24	1.21	1.33	
Al ₂ O ₃	17.70	16.73	17.07	17.10	17.00	17.93	17.03	18.26	18.41	18.32	19.11	16.01	16.22	16.53	16.22	15.82	16.09	15.88	
Fe ₂ O ₃ ^T	7.32	8.03	6.65	9.89	9.04	9.23	9.10	8.15	8.07	7.82	8.03	10.08	10.27	10.38	9.96	9.87	9.98	10.41	
MnO	0.13	0.17	0.15	0.17	0.16	0.16	0.16	0.19	0.19	0.18	0.17	0.16	0.16	1.16	0.15	0.16	0.16	0.16	
MgO	3.95	3.25	2.29	4.47	5.61	5.75	5.74	2.63	2.53	2.41	2.43	10.37	8.96	8.99	9.74	9.28	9.81	10.00	
CaO	6.25	5.83	5.78	9.08	9.71	9.98	7.43	6.81	6.88	6.75	6.78	8.21	8.27	8.43	8.33	8.63	8.41	8.54	
Na ₂ O	2.80	4.06	3.09	2.43	2.20	2.15	2.74	3.72	3.72	3.69	3.32	3.46	3.68	2.66	2.71	3.82	2.79	2.64	
K ₂ O	2.13	2.00	2.53	1.13	0.98	0.95	2.38	1.94	1.99	1.96	2.02	1.08	1.32	2.58	1.65	0.83	1.70	1.98	
P ₂ O ₅	0.17	0.27	0.40	0.45	0.26	0.28	0.26	0.49	0.64	0.52	0.55	0.32	0.46	0.51	0.32	0.32	0.33	0.37	
LOI	2.88	3.50	2.34	1.85	1.68	1.38	2.27	0.59	0.53	1.38	0.60	1.23	1.48	0.47	2.30	2.32	1.86	1.78	
Total	100.41	99.59	99.79	100.85	100.29	100.97	100.12	99.47	100.68	99.63	100.39	100.88	100.35	100.68	100.82	100.63	100.48	100.90	
CIPW norm																			
Q	9.50	4.46	13.13	6.51	4.14	6.51	4.14	5.63	6.60	6.26	7.93	--	--	--	--	--	--	--	--
Or	13.02	12.35	15.50	6.82	5.93	6.82	5.93	11.74	11.89	11.93	12.09	6.50	8.02	15.24	10.01	5.05	10.33	11.96	11.96
Ab	24.46	35.88	27.05	21.02	19.03	21.02	19.03	32.15	31.75	32.10	28.42	25.94	24.42	16.76	23.50	26.93	22.55	19.26	19.26
An	30.33	22.43	26.07	33.07	37.07	33.07	37.07	27.97	27.88	28.40	31.67	25.32	24.38	25.44	27.89	24.20	26.94	26.11	26.11
Ne	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	2.02	4.03	3.07	--	3.40	0.90	1.91	1.91
Di Wo	0.71	3.26	1.51	5.44	5.13	5.44	5.13	2.76	2.76	2.54	1.02	6.71	7.37	6.81	6.07	8.28	6.62	7.17	7.17
Di En	0.38	1.55	0.68	2.71	2.87	2.71	2.87	1.13	1.11	1.02	0.41	4.40	4.66	4.19	3.94	5.32	4.29	4.63	4.63
Di Fs	0.31	1.67	0.82	2.61	2.05	2.61	2.05	1.64	1.67	1.55	0.63	1.83	2.24	2.23	1.71	2.41	1.88	2.04	2.04
Hy En	9.83	6.94	5.24	8.72	11.48	8.72	11.48	5.59	5.27	5.18	5.76	--	--	--	0.29	--	--	--	--
Hy Fs	8.08	7.49	6.30	8.37	8.19	8.37	8.19	8.13	7.88	7.84	8.88	--	--	--	0.13	--	--	--	--
Ol Fo	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	15.35	12.81	12.76	14.53	12.98	14.59	14.62	14.62
Ol Fa	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	7.04	6.80	7.50	6.98	6.50	7.04	7.11	7.11
Mt	1.84	2.07	1.74	2.48	2.25	2.48	2.25	1.98	1.94	1.91	1.93	2.51	2.61	2.66	2.52	2.51	2.51	2.62	2.62
Il	1.54	1.91	1.96	2.25	1.88	2.25	1.88	1.28	1.27	1.27	1.26	2.38	2.66	3.36	2.44	2.42	2.35	2.57	2.57

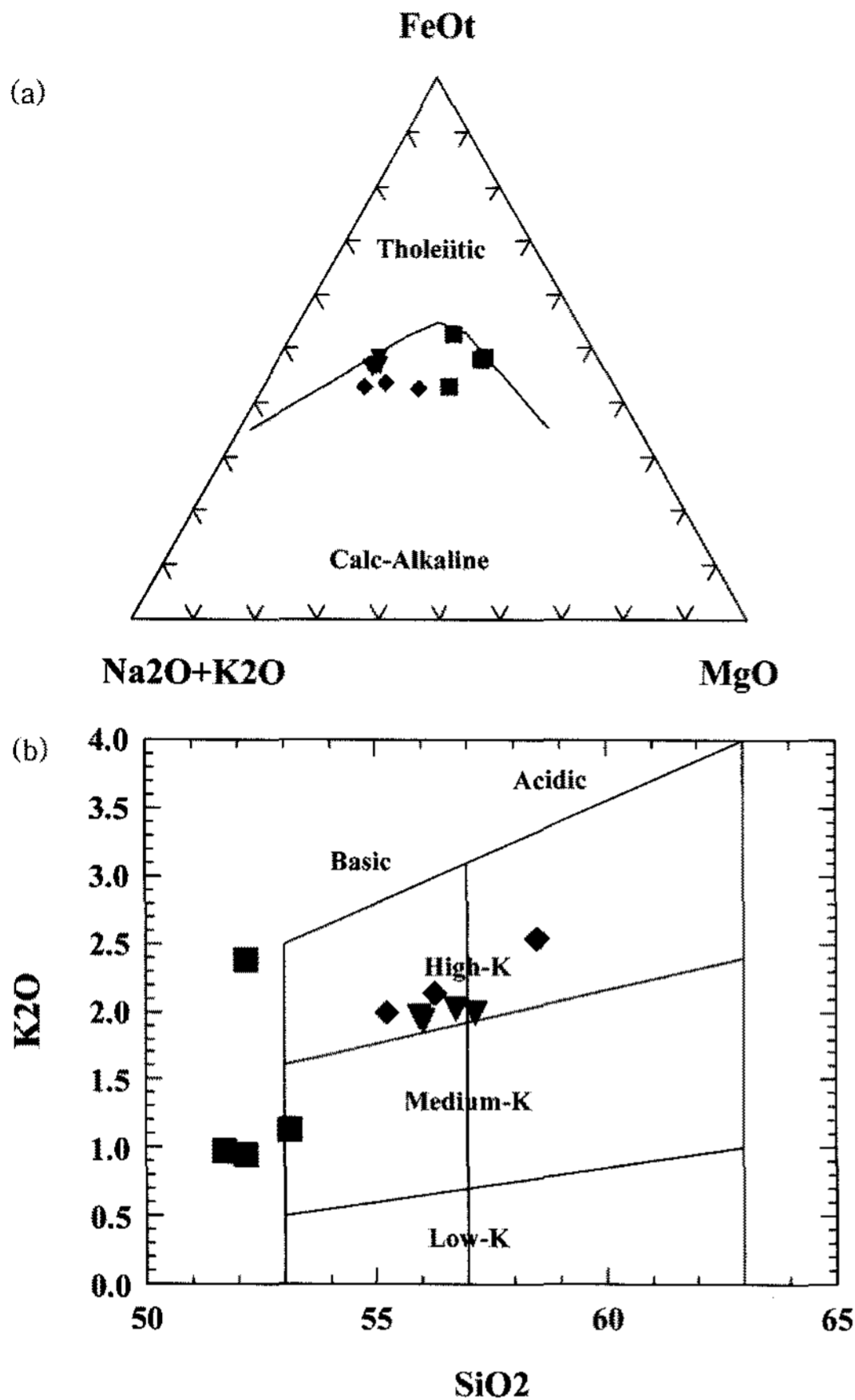


Fig. 10. (a) (Na₂O+K₂O)-FeOT-MgO (AFM; after Kuno, 1968) diagram for andesitic rocks in the study area. (b) K₂O vs. SiO₂ diagram (after Gill, 1981) for andesitic rocks in the study area. Symbols are the same as those in Fig. 7.

질안산암의 직접적인 분화산물로 보기 어렵다. 다른 주 성분산화물의 화학적 특징도 이와 같이 천자봉현무암 질안산암과 천자봉안산암은 직접적인 연관관계를 가지나 시루봉안산암과는 구분되어 나타남을 살펴 볼 수 있다.

연구지역 화산암의 Ba/La 비는 9~19의 범위로 조산대안산암에 대한 비인 15~80에 비해 낮다. 천자봉현무암질안산암은 9~11로 E-MORB의 영역에, 시루봉안산암 및 천자봉안산암은 조산대안산암의 범위에 포함된다. 천자봉현무암의 Ba/La비는 분산되어 E-MORB와 조산대안산암의 영역에 함께 나타난다. 연구지역 전체 암석의 Zr/Nb 비는 8~90의 범위로 분산된다(Table 7). 천자봉현무암과 천자봉안산암은 각각 8~11, 15~30으로 Gill(1981)에 의한 도호 및 대륙호의 범위에 유사하나

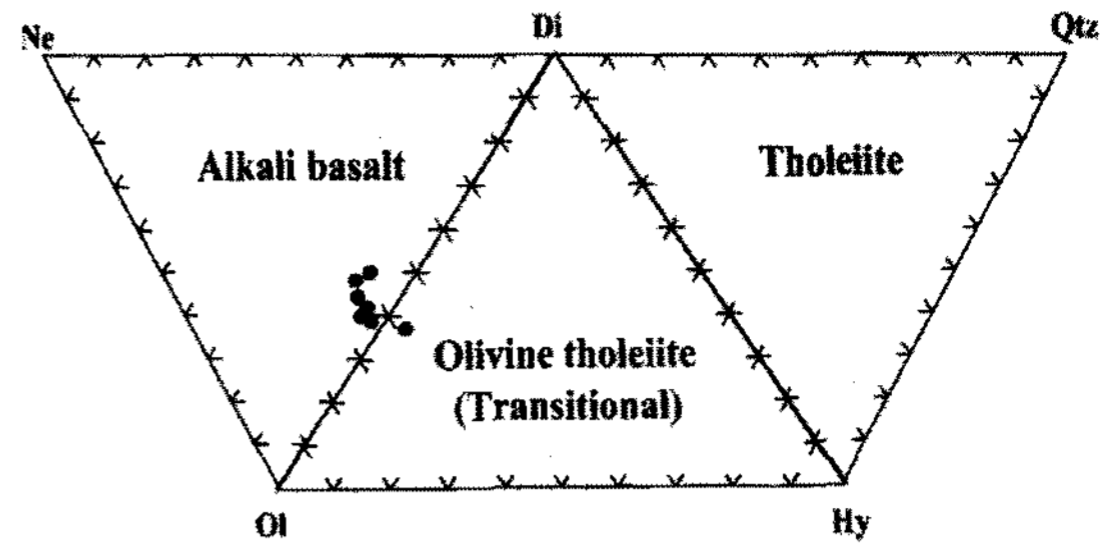


Fig. 11. The classification diagram (after Yoder and Tilley, 1962; Thompson, 1984) of basalts to CIPW normative composition for basaltic rocks in the study area. Symbols are the same as those in Fig. 7.

천자봉현무암질안산암은 매우 높은 값을 가진다. La/Th 비는 2~7로 모두 조산대안산암 고-K의 범위에 포함된다. La/Nb 비는 0.8~6.1인데 천자봉현무암질안산암과 천자봉안산암, 시루봉안산암은 Gill(1981)의 화산호 영역 중 일본호의 값인 2~5와 유사하나 천자봉현무암에서는 현저히 낮은 값을 나타낸다. 천자봉현무암질안산암의 C-10과 시루봉안산암 중 J-2의 La/Nb 비는 각각 9.20, 6.11로 벗어난 경향을 보인다.

La 대 Th 도표에서(Fig. 14) 연구지역의 암석은 모두 조산대 영역에 걸쳐서 나타난다. 천자봉현무암 중 몇 개의 시료는 La 함량이 높아 조산대의 안산암과 E-MORB의 경계에 걸쳐 있으며, 천자봉현무암질안산암, 천자봉안산암의 비는 거의 비슷하나 시루봉안산암은 La 함량은 낮으면서 Th 함량이 높은 영역에 도시된다.

미량원소(Table 7, 8)를 N-type MORB의 평균값(Pearce, 1982)으로 표준화하여 도시해 보면 Fig. 15와 같고 N-type MORB에 비하여 중희토류원소(HREE)가 결핍되어 나타난다. 전체적으로 불호정성 원소인 Rb, Ba, Sr, Th 등이 부화되어 있고, Nb, P, Ti 함량은 매우 결핍되며 Zr과 Hf 함량이 미약하게 결핍된 특징을 나타낸다. 이는 초기 LILE의 부화가 상당했던 것으로 해석된다. 또한 이와 같이 경희토류원소(LREE)에 비하여 고장력원소(HFSE)가 결핍되고, 강한 LILE 부화를 보이는 특징은 해양판의 섭입과 관련된 대륙연변부나 도호 등의 조구적 환경과 관련된 암석에서 나타나는 특징이다(Ewart, 1982; Pearce, 1982; Hickey *et al.*, 1986; Hawkesworth and Ellam, 1989; Bacon, 1990; McCulloch and Gamble, 1991; Saunders *et al.*, 1991; McDermott *et al.*, 1993; Münker and Cooper, 1995; Pearce *et al.*, 1984; 1995).

Cd, Rb, Ba, Th, U, La, Ce 등이 부화되어 있으며, Nb, P, Ti, Zr, Hf 등이 결핍되어 있는 특징을 보인다.

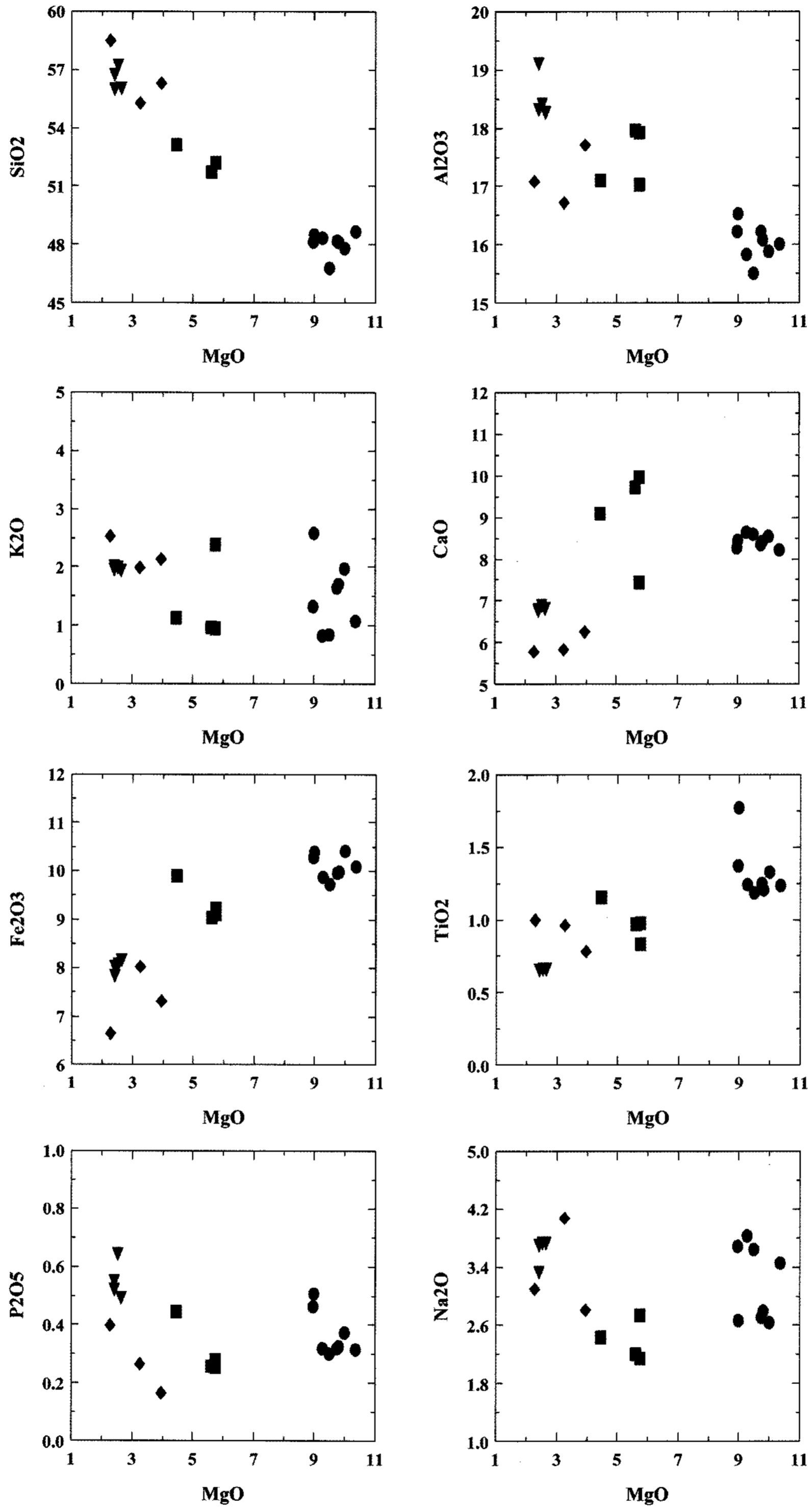


Fig. 12. Harker variation diagrams of major oxides vs. MgO for basaltic and andesitic rocks in the study area. Symbols are the same as those in Fig. 7.

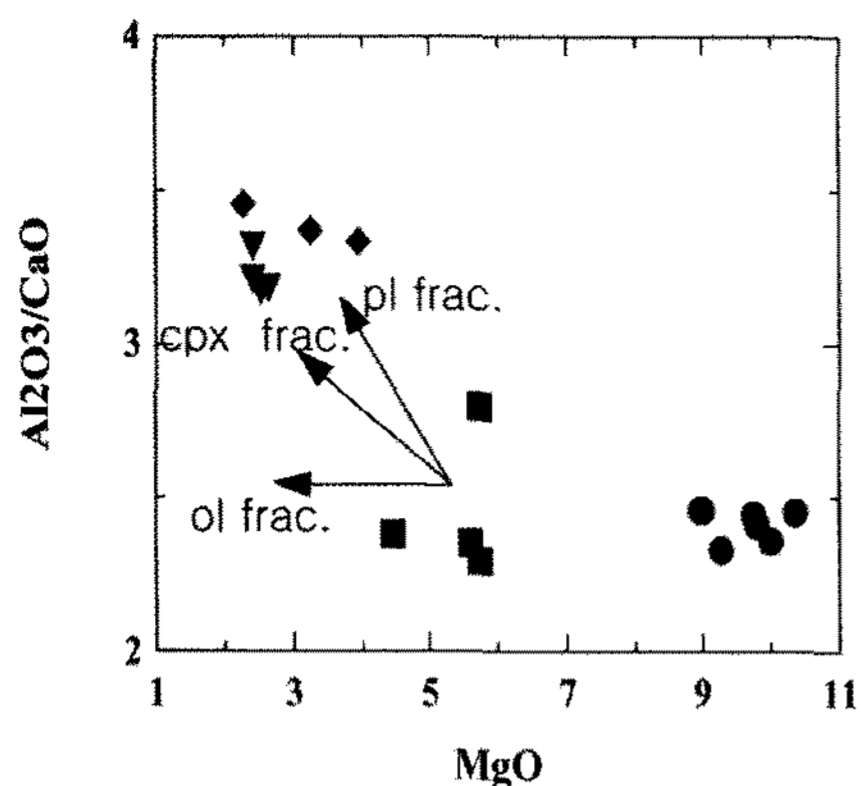


Fig. 13. Al_2O_3/CaO vs. MgO for basaltic and andesitic rocks in the study area. Symbols are the same as those in Fig. 7.

Sr, K, Rb, Ba과 같은 LILE는 함수 유체에 녹기 쉬운 유동원소이다. 이들 원소는 섭입된 슬랩(slab)의 탈수작용으로 생긴 함수 유체에 농집되어 맨틀에 유입되고 마그마에 추가된다. 그 결과, 이들 원소들의 함량이 다른 원소들에 비해서 상대적으로 높은 값을 가지며 MORB

값에 대해 부화되어 있다. 한편, 고장력원소인 Zr, Hf의 함량은 상대적으로 낮으며 Sm, Y, Yb 등은 MORB 값과 거의 같거나 조금 결핍되어 있다. 이들은 함수 유체에 녹기 어려운 원소로서 탈수작용에 의해 고체상에서 빠져나가기 어렵기 때문이다. Sr, K, Ba이 부화되면 일반적으로 경희토류원소도 부화되어 나타나는데(Wilson, 1989), 이 역시 본역 화산암류에서 관찰된다.

천자봉현무암에 비해 천자봉안산암 및 천자봉현무암질안산암에서 Nb, P, Ti 원소의 매우 심한 골(trough)을 보이는 것(Fig. 15)은 섭입과 더욱 밀접히 연관됨을 지시한다(Wilson, 1989). 또한 이러한 특징은 해양판의 섭입과 관련하여 대륙연변부에 해당하는 경상분지 내의 백악기화산활동에서 나타나는 일반적인 경향이기도 하다(윤성호, 1993).

천자봉현무암질안산암, 천자봉안산암, 시루봉안산암은 Nb, P, Ti의 심한 결핍을 보인다(Fig. 15). 이에 비해 천자봉현무암의 그 결핍정도는 약하며, Ce, Nd, Zr, Y의 미약한 결핍이 나타난다. 천자봉현무암질안산암은 Nb, P, Ti, Zr, Hf이 다른 원소들에 비해 결핍되며, 이와 같은 경향은 천자봉안산암에서 동일하게 나타난다.

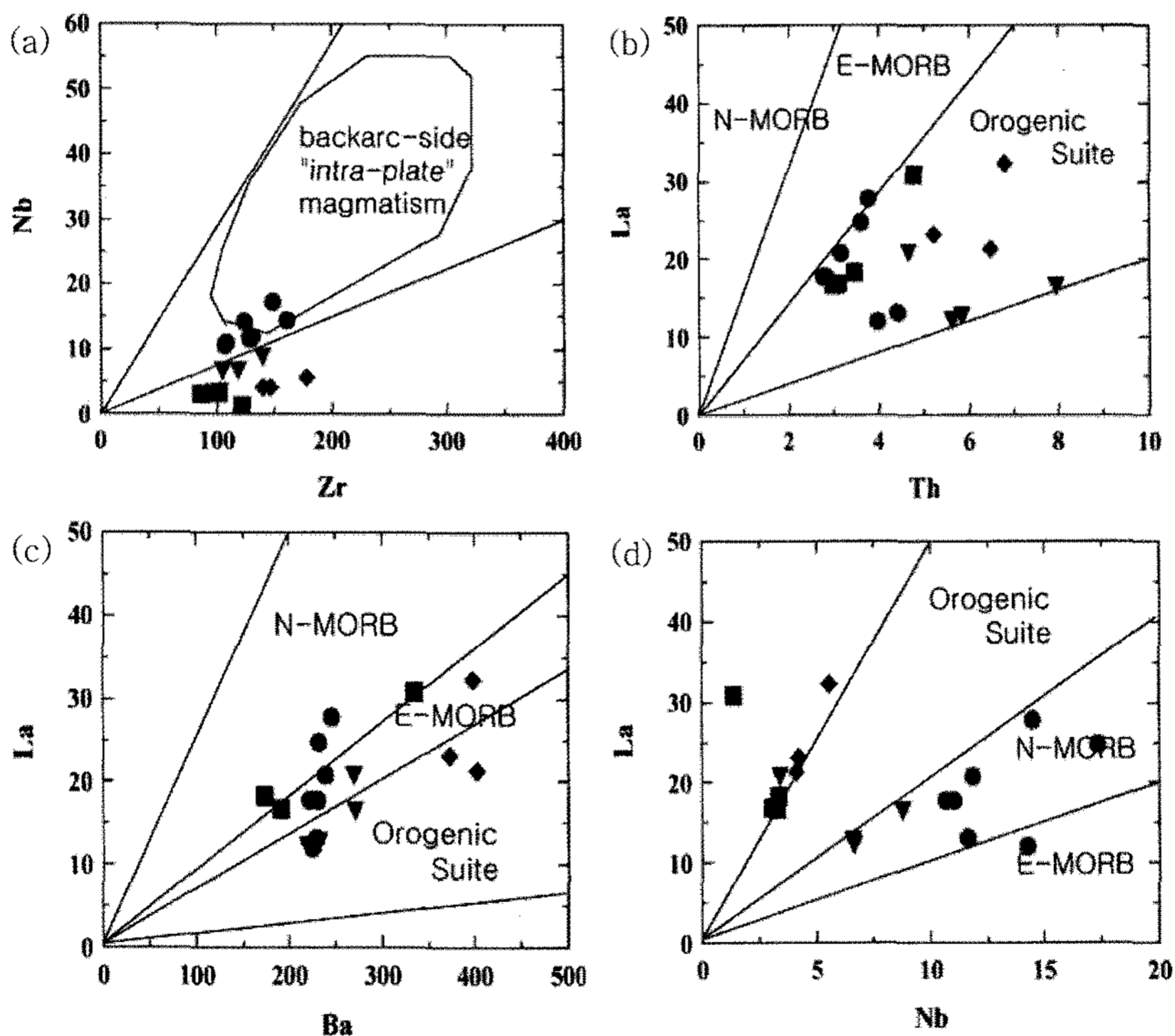


Fig. 14. Discriminant tectonic setting diagrams (after Gill, 1981) of the volcanic rocks in the study area, (a) Nb vs. Zr diagram (after Briggs and McDonough), (b) La vs. Th diagram, (c) La vs. Ba diagram and (d) La vs. Nb diagram. Symbols are the same as those in Fig. 7.

Table 7. Trace element abundances (ppm) for basalt and andesitic rocks in the study area. Abbreviations are the same as Table 4.

sample	C-8	C-16	J-4	C-10	C-14	J-1	J-6-1	GA10-1	GA9-1	GA9-2	J-2	C-9	C-12	C-13-1	GA7	GA9	J-3	J-6
Rock type	CA(◆)			CBA(■)				SA(▼)					CB(●)					
Ba	402.64	373.59	397.50	335.67	191.36	173.16	500.13	271.15	232.12	218.52	269.22	221.40	231.32	245.37	225.35	229.45	230.21	238.40
Rb	50.56	55.61	62.60	22.48	15.60	20.08	94.00	50.43	44.27	43.33	63.58	38.84	40.99	39.07	26.54	32.07	58.04	41.06
Sr	564.54	373.15	425.68	564.62	446.55	451.15	549.79	601.95	444.81	460.51	617.03	432.74	589.80	635.91	370.53	583.47	540.46	479.50
Cs	1.10	1.06	1.06	0.31	0.48	0.48	2.92	1.02	1.80	1.18	2.32	1.31	1.49	0.93	11.64	2.75	1.50	1.66
Ta	0.25	0.22	0.28	0.06	0.21	0.18	0.15	--	--	--	0.19	0.58	0.71	0.55	--	--	0.41	0.48
Nb	4.15	4.23	5.59	3.36	3.31	3.32	3.09	8.77	6.61	6.67	6.39	11.01	17.33	14.47	14.25	11.63	10.65	11.82
Hf	3.71	3.78	4.50	2.31	2.52	2.57	2.25	9.15	5.85	6.52	6.30	2.49	2.97	1.96	6.70	6.61	2.54	1.79
Zr	139.78	145.86	177.71	121.95	101.72	96.83	85.52	139.91	104.73	118.39	102.96	108.71	148.68	160.27	123.51	128.55	107.57	130.27
Y	23.59	28.28	30.23	25.51	18.64	20.45	18.14	17.31	14.95	14.36	22.68	17.98	18.86	19.50	14.19	15.66	18.07	19.46
Th	6.48	5.23	6.78	4.78	2.99	3.45	3.09	7.93	5.85	5.60	4.67	2.76	3.60	3.78	3.96	4.40	2.81	3.14
U	1.66	1.20	1.52	1.10	0.73	0.84	0.81	1.06	0.79	0.75	1.29	0.73	1.14	1.15	0.50	0.48	0.76	0.93
Cr	53.65	13.12	8.44	32.32	70.13	63.26	55.66	1.36	2.08	2.65	0.00	404.65	276.05	240.68	368.90	465.22	365.13	327.67
Ni	24.69	7.38	5.79	10.54	34.12	34.54	15.40	3.30	3.11	3.03	0.53	226.89	182.87	172.31	241.70	291.93	209.72	216.17
Co	30.21	30.14	28.19	35.23	52.58	40.21	38.27	46.47	30.77	27.38	32.49	69.70	53.49	63.95	51.03	70.83	57.07	57.94
Sc	23.88	27.19	20.54	34.01	30.14	30.87	35.94	9.92	6.53	7.30	8.92	26.59	23.23	23.31	19.34	31.58	25.82	26.28
Cu	33.76	20.77	9.28	45.96	43.70	41.63	60.50	13.34	13.44	8.55	4.26	43.51	60.41	50.79	67.17	49.48	54.08	44.07
Pb	8.90	12.56	26.42	9.46	5.60	6.55	5.28	5.07	3.99	3.87	4.83	2.19	2.29	2.45	1.84	2.05	1.72	2.30
Zn	76.48	95.80	99.69	93.79	81.73	84.14	95.30	107.37	121.46	89.18	67.13	78.78	70.06	80.64	132.18	127.58	76.04	80.97
K	8849.38	8293.19	10505.53	4682.04	4063.58	3955.66	9887.07	8052.44	8259.98	8135.46	8372.05	4491.10	5491.43	10717.22	6848.73	3445.12	7068.72	8222.62
Ti	4697.13	5763.57	5967.27	6931.86	5805.51	5853.44	4987.72	3954.22	3954.22	3894.31	3924.26	7387.20	8202.00	10622.47	7489.05	7429.14	7225.43	7938.39
P	365.88	584.97	871.98	977.15	565.26	613.46	558.68	1073.55	1402.18	1139.27	1198.43	690.14	1012.20	1106.41	701.10	701.1	714.23	815.02
Ba/La	18.82	16.16	12.34	10.86	11.42	9.45	19.76	16.45	18.23	17.96	12.99	12.41	9.37	8.86	18.64	17.83	12.94	11.48
Zr/Nb	33.68	34.48	31.79	89.67	30.73	29.17	27.68	15.95	15.84	17.75	30.37	9.87	8.60	11.08	8.67	11.05	10.10	11.02
La/Th	3.30	4.42	4.75	6.47	5.60	5.31	5.43	2.08	2.18	2.17	4.44	6.46	6.86	7.33	3.05	2.98	6.33	6.61
La/Nb	5.15	5.47	5.76	9.20	5.06	5.51	5.43	1.88	1.93	1.82	6.11	1.62	1.42	1.91	0.85	1.13	1.67	1.76

Table 8. REE abundances (ppm) for basalt and andesitic rocks in the study area. Abbreviations are the same as Table 4.

sample	C-8	C-16	J-4	C-10	C-14	J-1	J-6-1	GA10-1	GA9-1	GA9-2	J-2	C-9	C-12	C-13-1	GA7	GA9	J-3	J-6		
Rock type	CA(◆)			CBA(■)				SA(▼)												CB(●)
La	21.39	23.12	32.21	30.91	16.75	18.32	16.79	16.48	12.73	12.17	20.72	17.83	24.68	27.70	12.09	13.09	17.79	20.76		
Ce	39.88	43.05	61.96	56.86	30.60	33.99	30.71	44.31	38.22	36.66	41.71	30.72	40.30	45.97	31.85	36.04	30.79	35.88		
Pr	4.92	5.45	7.46	7.14	3.91	4.42	3.98	5.54	4.10	3.91	5.51	3.71	4.88	5.41	3.04	3.46	3.78	4.35		
Nd	20.02	22.73	30.62	29.06	16.70	19.04	16.47	24.47	18.10	17.11	23.77	15.58	19.32	21.50	12.83	14.37	15.81	17.63		
Sm	4.61	5.49	6.71	6.23	3.88	4.40	3.80	5.29	3.89	3.74	5.42	3.75	4.46	4.65	3.01	3.36	3.71	4.15		
Eu	1.20	1.46	1.78	1.73	1.19	1.34	1.18	1.61	1.19	1.16	1.61	1.21	1.43	1.57	1.08	1.19	1.25	1.35		
Gd	4.45	5.21	6.38	5.66	3.89	4.35	3.65	5.88	4.37	4.10	4.81	3.78	4.27	4.58	3.84	4.11	3.82	4.14		
Tb	0.69	0.81	0.94	0.83	0.58	0.66	0.55	0.77	0.57	0.56	0.71	0.60	0.64	0.68	0.53	0.59	0.59	0.64		
Dy	4.42	5.02	5.67	4.96	3.51	3.98	3.28	4.21	3.24	3.10	4.34	3.59	3.84	4.02	3.01	3.39	3.56	3.82		
Ho	0.90	1.04	1.15	1.00	0.72	0.81	0.69	0.84	0.63	0.63	0.89	0.72	0.76	0.77	0.59	0.67	0.71	0.76		
Er	2.70	3.07	3.36	2.85	2.13	2.34	1.91	2.49	1.97	1.84	2.62	2.04	2.11	2.17	1.73	1.95	2.07	2.20		
Tm	0.40	0.44	0.47	0.40	0.31	0.33	0.28	0.35	0.28	0.27	0.40	0.28	0.29	0.30	0.24	0.27	0.29	0.30		
Yb	2.55	2.83	3.05	2.55	1.90	2.11	1.78	2.27	1.97	1.77	2.68	1.78	1.87	1.91	1.46	1.68	1.75	1.93		
(Ce/Yb) _N	3.98	3.87	5.17	5.67	4.10	4.10	4.39	4.96	4.93	5.27	3.96	4.39	5.48	6.12	5.55	5.46	4.47	4.73		
(Ce/Sm) _N	2.31	2.09	2.47	2.14	2.11	2.06	2.16	2.24	2.62	2.62	2.10	2.19	2.41	2.64	2.83	2.86	2.22	2.31		
(La/Sm) _N	3.25	2.95	3.36	3.05	3.02	2.91	3.09	2.18	2.29	2.28	2.68	3.33	3.87	4.17	2.81	2.73	3.36	3.50		
(Eu/Eu*) _N	0.81	0.83	0.83	0.89	0.93	0.93	0.97	0.88	0.88	0.90	0.96	0.98	1.00	1.04	0.97	0.98	1.01	0.99		

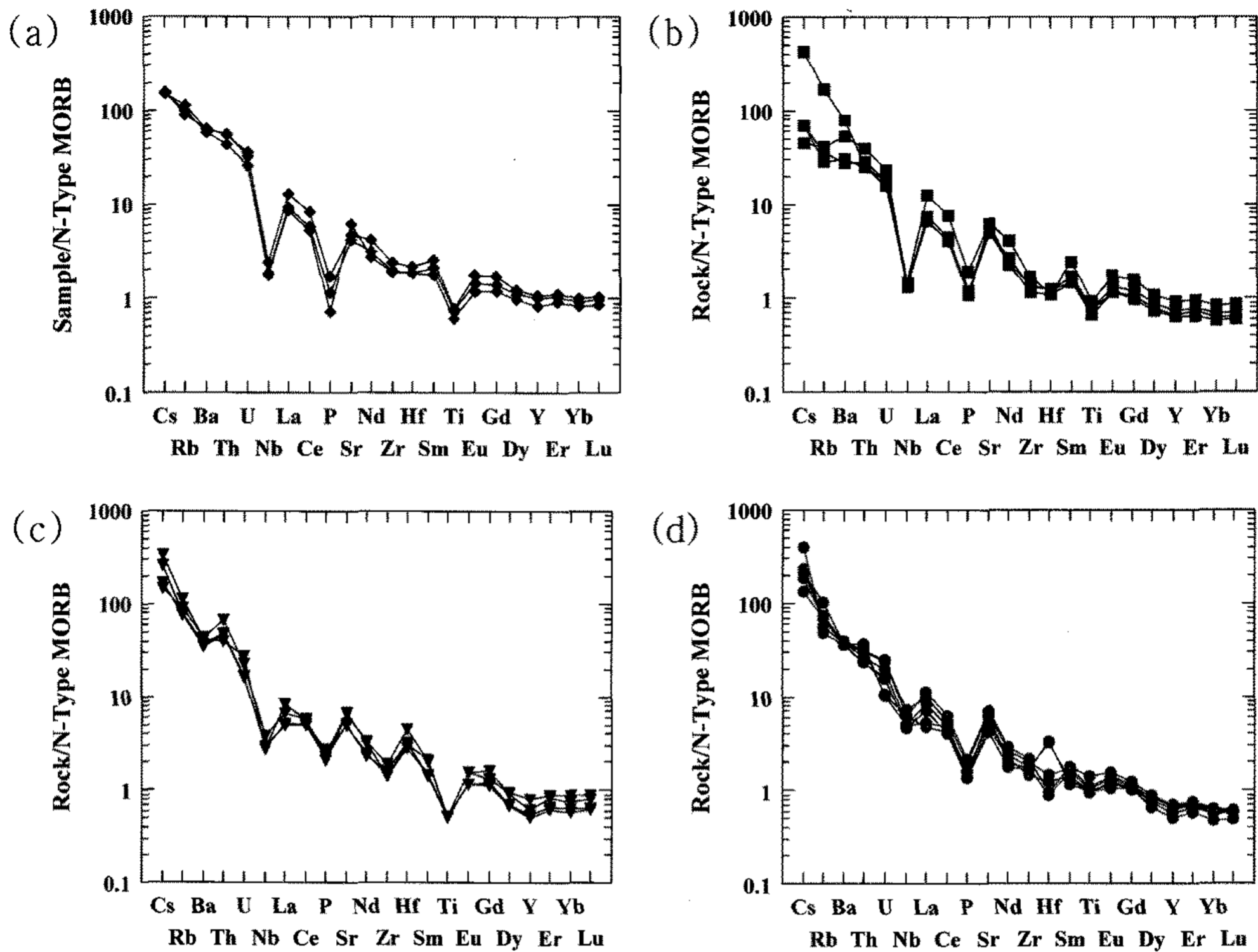


Fig. 15. N-Type MORB normalized spider diagram for basaltic and andesitic rocks in the study area. N-type MORB data from Hawkesworth and Powell(1980). (a) Cheonjabong andesite, (b) Cheonjabong basaltic andesite, (c) Sirubong andesite, and (d) Cheonjabong basalt. Symbols are the same as those in Fig. 7.

이에 비해 시루봉안산암은 Th, Sr, Hf가 부화되며, Ba, Nb, P, Nd, Zr, Ti의 결핍정도가 천자봉현무암질안산암에 비하여 미약하다.

Sr, K, Rb, Ba, Th과 같은 원소들의 유동은 칼크-알칼리 마그마가 생성되는 과정에서 섭입하는 해양판의 탈수작용에 의해서 가능하며(Pearce, 1983), Ce, P, Sm과 같은 원소들의 유동은 섭입대 암석(특히 칼크-알칼리암 계열) 생성시, 해양지각 슬랩의 부분용융에 의해 생긴 규산염용융체에 의해 운반 가능하다고 하였다(Hawkesworth and Powell, 1980).

이상에서 기술된 미량원소 및 희토류원소의 MORB 값에 대한 부화·결핍 양상은 연구지역의 화산암류가 지판의 섭입에 관련된 대륙연변부나 도호 등의 조구적 환경과 관련되어 산출되었음을 시사하는 것이다(Pearce et al., 1984).

MgO에 대한 Harker 변화도에서 Sr의 함량은 373.2~617.0 ppm의 비교적 넓은 범위를 나타내는데(Fig. 16), 이는 조산대 안산암의 성분범위(Sr, 100~1,000 ppm; Gill, 1981)에 포함되기는 하나, 천자봉현무암은 MgO

함량 변화에 비하여 매우 분산되어 나타나며, 천자봉안산암의 Sr 함량은 천자봉현무암질안산암에 비해 다소 낮아 사장석의 분별 경향을 따른다. 시루봉안산암의 Sr 함량은 천자봉안산암에 비해 높은 편이다.

Wood(1980)는 비유동 고장력원소로 Th, Hf 그리고 Ta를 이용한 조구적 판별도(Fig. 17)를 제시하였다. 특히, 이 판별도에서 D 영역은 Hf/Th=3.0을 기준으로 원시 호상열도 쏘레아이트 계열(Hf/Th>3.0)과 성숙한 호상열도의 칼크-알칼리계열(Hf/Th<3.0)로 구분된다. 본역 화산암류는 후자의 경우이다. 천자봉현무암은 안산암류와 달리 알칼리 영역에 가깝게 도시되어 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 앞서 논의되었던 불호정성 미량원소의 변화경향과 희토류원소의 경향에서도 천자봉현무암은 안산암질암과 차이가 나는 것을 알 수 있다.

결론

진해시 남동쪽 천자봉-시루봉 일원에는 중생대 백악기 화산암류를 불국사화강암이 관입하고 있으며, 불국

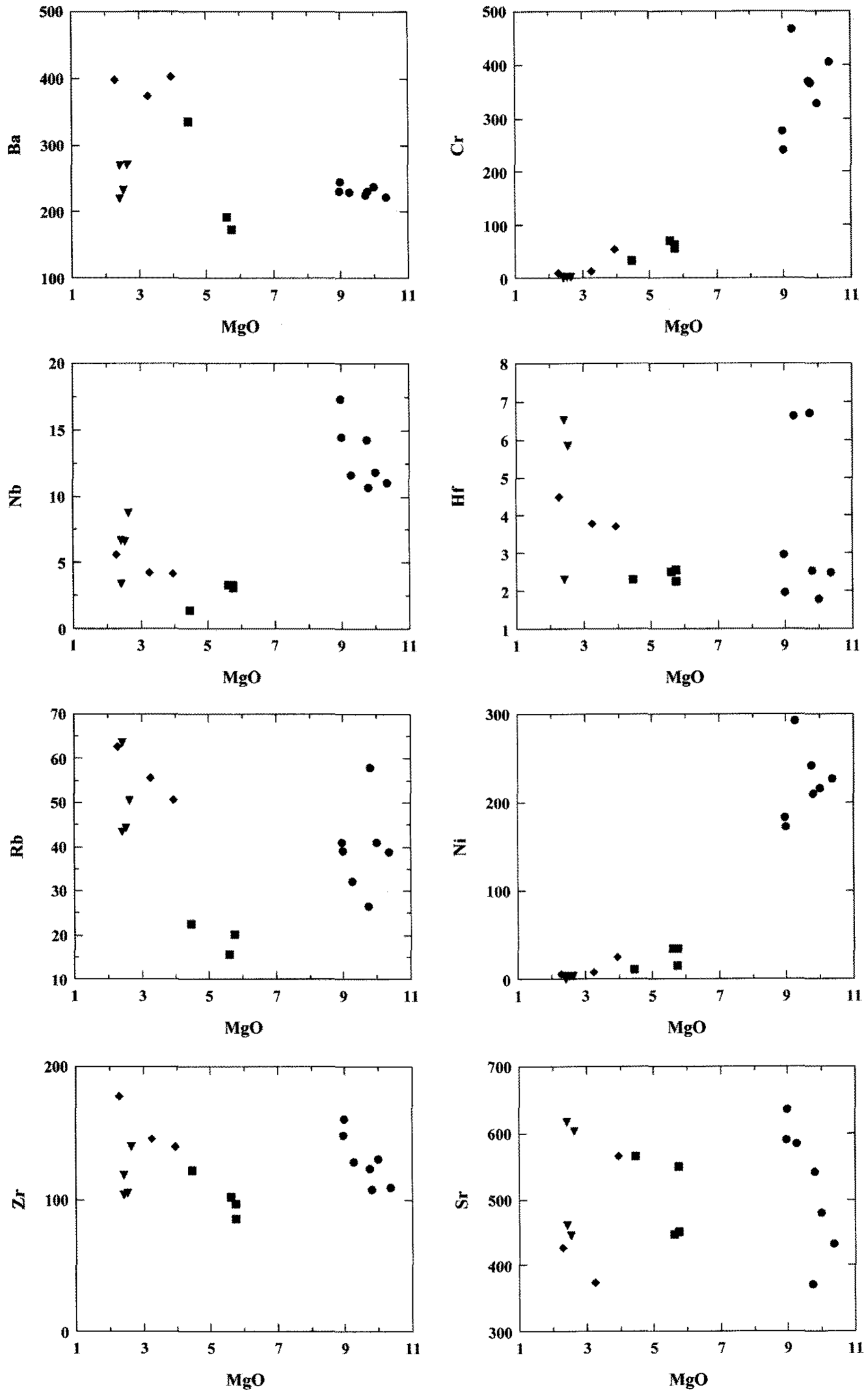


Fig. 16. Harker variation diagrams of trace element vs. MgO for basaltic and andesitic rocks in the study area. Symbols are the same as those in Fig. 7.

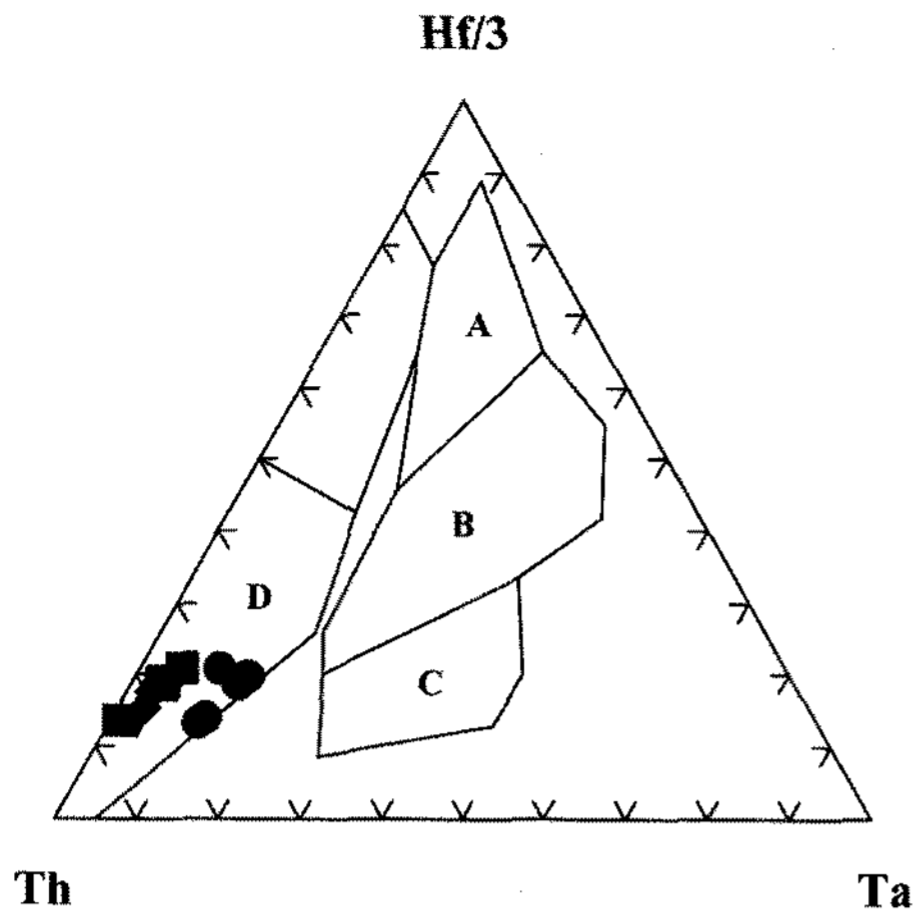


Fig. 17. Hf/3-Th-Ta discrimination diagram of the basaltic and andesitic rocks (after Wood, 1980). A; N-type MORB, B; E-type MORB and tholeiites within-plate basalts, C; alkaline within-plate basalts, D; destructive plate margin basalt. Island-arc tholeiites plot in field D where $Hf/Th > 3.0$ and calc-alkaline basalts plot where $Hf/Th < 3.0$. Symbols are the same as those in Fig. 7.

사화강암을 천자봉, 시루봉을 이루고 있는 안산암과 현무암이 관입 또는 분출하고 있다. 현무암과 안산암에 대한 K-Ar 연대측정 결과 10~16 Ma로 이들 화산암류는 경상분지 동남부에 나타난 신생대 마이오세 화산활동이라는 중요성을 갖는다. 신생대 마이오세 화산활동으로 산출되는 암석은 천자봉안산암, 천자봉현무암질안산암, 시루봉안산암, 천자봉현무암의 순서로 나타나 있다.

천자봉안산암은 불국사화강암을 관입하고 있으며 라브라도라이트 조성의 반자형 사장석 반정과, 미량의 휘석 반정을 함유한다. 기질부는 라브라도라이트 조성의 사장석 래쓰가 대부분이며 알바이트 성분의 외래결정편을 포함한다. 천자봉현무암질안산암은 천자봉안산암과의 분화산물로 라브라도라이트 조성 사장석, 보통휘석 조성 휘석의 반정광물과 비토나이트 조성의 기질, 알바이트 성분의 외래결정편이 보인다. 시루봉안산암은 비반상의 용암으로 대부분이 라브라도라이트 조성의 석기로 이루어져 있다. 천자봉현무암은, 크리솔라이트 영역의 감람석 반정, 투회석 영역의 휘석 반정과 라브라도라이트 조성의 사장석 미반정, 단사회석 미반정과 래쓰로 이루어진 석기를 보인다.

천자봉안산암과 천자봉현무암질안산암, 시루봉안산암은 칼크-알칼리계열에, 천자봉현무암은 알칼리현무암 영역으로 지화학적으로 구분이 된다. 천자봉현무암은 주로 감람석과 단사회석의 정출작용이, 천자봉현무암을

제외한 안산암질암은 주로 사장석의 분별정출작용을 겪었다. 연구지역 화산암류의 조구적환경은 지판의 섭입 경계 환경이며, 천자봉현무암질안산암, 천자봉안산암, 시루봉안산암은 성숙한 호 환경, 천자봉현무암은 이들에 비해 배호단계이거나 배호로 발전하는 단계이다.

사 사

이 논문이 이루어지기까지 부산대학교 김진섭 교수와 윤성호 교수의 도움과 익명의 두 심사위원의 세심하고 유익한 토의가 있었다. 이에 감사드린다. 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었다.

참고문헌

- 김규한, 이화정, 1996, 경상퇴적분지내에 분포하는 소위 마산암에 대한 암석학적 연구. *자원환경지질*, 29, 529-541.
- 김상욱, 이영길, 1981, 유천분지 북동부 백악기 화산암류의 화산암석학 및 지질구조. *광산지질*, 14, 34-49.
- 김상욱, 1982, 북부 유천분지 내에 분포하는 후기 백악기 화산암류의 암석학적 연구. *서울대학교대학원 박사학위논문*, 133p.
- 김상욱, 1986, 경상분지에서의 후기 백악기 화성활동에 관한 연구, 이상만 교수 송수기념논문집. 167-194.
- 김상욱, 이재영, 김영기, 고인석, 1991, 남부 유천 소분지에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 특징. *지질학회지*, 27, 24-39.
- 김진섭, 1990, 경상분지 동남부 일대에 분포하는 백악기 화산암류에 대한 암석학적인 연구. *지질학회지*, 26, 53-62.
- 김진섭, 윤성호, 1993, 부산일원에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 연구(1). *암석학회지*, 2, 156-166.
- 박선애, 1993, 경북 연일 지역에 분포하는 신생대 제3기 화산암류에 대한 암석학적 및 암석화학적 연구. *경북대학교 대학원 박사학위논문*, 109p.
- 박주희, 김춘식, 김진섭, 성종규, 김인수, 이준동, 백인성, 1999, 장기 지역에 분포하는 중성-염기성 용암에 관한 암석학적 연구(1): 일반 지질 및 암석화학적 특징. *암석학회지*, 8, 149-170.
- 성종규, 2000, 한국 남부에 분포하는 백악기-제3기 화산암류에 대한 연구: 섭입에 관련된 마그마 작용의 지화학적 진화. *부산대학교대학원 박사학위논문*. 260p.
- 위수민, 이선구, 1999, 양남분지 내에 분포하는 제3기 화산암류에 대한 지화학적 연구. *한국지구과학회지*, 20, 423-436.
- 윤성호, 김진섭, 옥수석, 홍현근, 김형식, 1994, 영일반도 일원의 화산암류에 대한 암석학적 연구. *한국지구과학회지*, 15, 126-138.
- 윤성호, 이준동, 이상원, 고정선, 서윤지, 1997, 거제도 화산암의 암석학적 연구. *암석학회지*, 6, 1-18.
- 이문원, 원종관, 김광호, 노진환, 1988, 구룡포 지역에 분포하는 신생대 화산암의 지질과 암석학적 연구. *지질학회지*, 24, 1-15.

- 이상원, 1979, 경남 밀양 천황산일대에 분포하는 산성 화산암류에 관한 연구. 부산대학교 대학원 석사학위논문
- 이상만, 김상욱, 진명식, 1987, 남한의 백악기-제3기 화성활동과 지구조적 의의. 지질학회지, 23, 338-359.
- 이정현, 2003, 감포지역의 마이오세 쌍모식 화산활동. 부산대학교 대학원 석사학위논문. 97p.
- 이정현, 윤성효, 고정선, 2004, 한반도 동남부 어일분지의 마이오세 화산암의 암석기재적 연구, 암석학회지, 13, 64-80.
- 이준동, 1991, 경남 진동-마산 일대의 화강암류에 관한 암석학적 연구. 한국지구과학회지, 12, 230-247.
- 장태우, 강필중, 박숙환, 황상구, 이동우, 1983, 한국지질도 (1:50000) 부산·가덕도폭 및 설명서. 한국동력자원연구소, 20p.
- 조형성, 김종선, 이정환, 정종욱, 손문, 김인수, 2007, 진해시 남동부 화성쇄설암 내 화강암편의 특징과 층서적 의미, 암석학회지, 16, 116-128.
- 차문성, 1976, 부산지역의 불국사 산성 화성암류의 암석학적 연구. 광산지질, 9, 85-106.
- 차문성, 윤성효, 1982, 부산시 일원의 백악기 화산활동, 특히 장산 칼데라 잔존 구조에 관하여. 부산대학교 자연과학논문집, 34, 377-390.
- 황상구, 1991, 유천소분지 중앙부의 백악기 화산암류의 암석학적 연구. 경북대학교대학원 박사학위논문, 199p.
- Bacon, C.R., 1990, Calc-alkaline, shoshonitic, and primitive tholeiitic lavas from monogenetic volcanoes near Crater Lake, Oregon. Jour. Petrol., 31, 135-166.(0)
- Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, R.J., 1979, The interpretation of igneous rocks. Allen and Unwin, London, 450p.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1972, Rock forming minerals, Vol. 1, orth- and ring silicates. Longmans, Group Ltd, London, England, 77-112.
- Ewart, A., 1982, The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks with special reference to the andesitic-basaltic compositional range, In Andesites: Orogenic andesites and related rocks(ed. R.S. Thrope), Chichester, New York, Wiley, 25-95.
- Gill, J.B., 1981, Orogenic andesites and plate tectonics. Springer-Verlag, 390p.(0)
- Hawkesworth, C.J. and Powell, M., 1980, Magma genesis in the Lesser Antilles island arc. Earth Planet. Sci. Lett., 51, 297-308.
- 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.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Can. Jour. Earth Sci., 8, 523-548.
- Kuno, H., 1968, Differentiation of basalt magmas. In Basalt V2. (eds. H.M. Hess and A. Podervart), Interscience Publishers, New York, 623-688.
- Lee, J.I., Hirro, K and Keisuke N., 1995, Petrology, mineralogy and isotopic study of the shallow-depth emplaced granitic rocks, Southern of the Kyoungsang Basin, Korea. Geochemical Jour., 29, 363-376.
- 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.
- Morimoto, N., 1988, Nomenclature of pyroxenes. Am. Mineral., 73, 1123-1133.
- Murphy, 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 Andesites: orogenic andesites and related rocks (eds. R.S. Thrope), Chichester, New York, Wiley, 525-548.
- Pearce, J.A., 1983, Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In Continental basalts and mantle xenoliths (eds. C.J. Hawkesworth and M.J. Norry), Shiva, 230-249.
- 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 Volcanism associated with extension at consuming plate margins (ed. J.L. Smellie), Geol. Soc. London Sp. Pub., No. 81, 53-75.
- 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.
- Wilson, M., 1989, Igneous petrogenesis. Unwin Hyman, London, 466p.
- Wood, D.A., 1980, The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectomagmatic 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 basalt magmas: an experimental study of natural and synthetic rock systems. Jour. Petrol., 3, 342-532.

2008년 1월 29일 접수

2008년 2월 25일 심사개시

2008년 4월 20일 채택