

제주도 성산일출봉 일대 현무암에 대한 암석학적 연구

고정선¹ · 윤성효^{2,*} · 정은주²

¹부산대학교 과학교육연구소, 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30

²부산대학교 지구과학과, 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30

Petrology of the Basalts in the Seongsan-Ilchulbong area, Jeju Island

Jeong-Seon Koh¹, Sung-Hyo Yun^{2,*}, and Eun-Ju Jeong²

¹Institute of Science Education, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²Department of Earth Science, Graduate School, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Abstract: This study reports petrography and geochemical characteristics of the basalt lava flows in Seongsan-Ilchulbong area, the eastern part of Jeju island, Korea, to understand the evolutionary processes of magma. Basalt lavas are classified into the Pyoseon-ri basalt and the Seongsan-ri basalt. The Pyoseon-ri basalt is dark-gray colored with many vesicles, and mainly consists of olivine, feldspar and rarely of clinopyroxene as phenocrysts. The Seongsan-ri basalt is largely aphanitic basalt and bright-gray colored, divided into two lava-flow units: lower lava flow (B1) and upper lava flow (B2) by the intercalated yellowish lapillstone and paleosol. The lavas plotted into sub-alkaline tholeiitic basalt and alkaline basalt series. The tholeiitic basalts have characteristically higher SiO₂, FeO^T, and CaO contents, but lower TiO₂, K₂O, P₂O₅ and other incompatible elements compared to the alkali basalts. The tholeiitic basalts have higher SiO₂ to the same MgO contents than the alkalic basalts. The contents of Ni, Cr, and MgO show a strong positive correlation, which indicates that low-MgO phases like plagioclase and titanomagnetite were important during the differentiation of magma. The contents of incompatible elements against that of Th show a strong positive correlation. The chondrite-normalized REE patterns of tholeiitic and alkalic basalts are subparallel each other. LREEs contents of the former are lower than, but HREEs contents are similar to the latter. They both are similar to their K/Ba ratios. The primitive-mantle normalized spider diagram demonstrates that the contents of Ba and Th of all basaltic magma are enriched, and yet Cr, Ni are depleted. The tholeiitic and alkalic basalts may be originated from a different degree of the partial melting of the same mantle material source, and one shows a higher degree of the partial melting than the other.

Keywords: Seongsan-Ilchulbong, tholeiitic basalt, alkaline basalt, geochemistry, magma genesis

요약: 제주도 동부 성산 일출봉 일대 현무암류에 대한 암석기재, 암석화학적 특징 및 마그마 성인에 대하여 연구하였다. 본 지역의 지질은 층서적으로 최하부에 표선리현무암이 놓이며, 그 위에 성산리현무암이 분포하는데, 이는 라필리스 톤층 및 고토양층에 의해 하부용암류와 상부용암류로 구분된다. 본 지역에서 산출되는 용암류는 반정 광물의 종류 및 조직에 따라 크게 침상장석 감람석 현무암과 비현정질 현무암으로 구분할 수 있다. 본 지역의 화산암류는 TAS분류도에서 알칼리계열 현무암과 비알칼리계열 현무암으로 분류되며, 비알칼리 계열 현무암은 쏘리아이트암으로 분류된다. 쏘리아이트 현무암은 알칼리현무암에 비하여 SiO₂, FeO^T, CaO 함량이 높고, TiO₂, K₂O, P₂O₅ 함량과 다른 불호정성원소 함량의 낮은 값을 가지는 특징을 보인다. MgO 함량 변화에 따른 미량 원소 변화에서 호정성 미량 원소의 변화 경향은 대체로 정(+)의 상관 관계를 나타내고, Th을 마그마 분화 척도로 사용한 불호정성 미량 원소의 변화 경향도 정(+)의 상관 관계를 나타낸다. 암석화학적 고찰 결과는 본 지역의 암석이 동질기원 마그마 물질의 부분용융의 차이에 의해 생성되었음을 지시한다.

주요어: 성산 일출봉, 쏘리아이트 현무암, 알칼리 현무암, 지구화학, 마그마 성인

*Corresponding author: yunsh@pusan.ac.kr

Tel: 82-51-510-2723

Fax: 82-51-513-7495

서 론

제주도는 한라산(해발 1950 m)을 중심으로 동북동-서남서 방향의 장축(74 km)과 이에 수직인 방향의 단축(32 km)을 갖는 타원형의 화산섬으로 제4기 동안의 화산활동에 의해 형성되었으며, 순상화산의 지형을 나타내고, 그 면적은 약 1,850 km²에 달한다.

제주도의 화산활동은 지판 내부의 열점에 의한 것으로(Lee, 1982; 박준범, 1994), 암석화학적으로 알칼리암 계열로 분류되는 다량의 현무암질 용암류가 분포되고 있는 것으로 알려져 왔으며(원종관, 1976; Lee, 1982; 박준범과 권성택, 1991), 최근 연구에서 알칼리암류 이외에도 쏘리아이트질 현무암류도 분포하고 있음이 보고되었다(Lee, 1989; 박준범과 권성택, 1991; 원종관 외, 1993).

제주도 화산암류 중 쏘리아이트질 현무암류의 존재는 Lee(1982)에 의해 처음 제시된 후 박준범과 권성택(1991, 1996), 윤성효 외(1997)의 연구 및 성산(원종관 외, 1993), 표선(원종관 외, 1995), 제주-애월(박기화 외, 1998) 도폭 조사를 통해 이들이 주로 제주도 동부 및 북부 해안 저지대 및 중산간 지역에 비교적 광범위하게 분포하고 있음이 확인되고 있다.

제주도는 160만 년 이상의 기간 동안 여러 분화구에서 지역에 따라 분출된 시기가 다른 여러 용암류가 분출한 분출물로 형성된 섬이기 때문에 화산층서가 매우 복잡하다(Kuno, 1966; Miyashiro, 1978; 원종관, 1976; Lee, 1982; 이동영 외, 1987; 윤성효 외, 1998, 2002; 고정선 외, 2005, 2007). 제주도의 화산활동과 층서, 용암류의 지구화학적인 연구는 여러 연구자들에 의해 이루어졌으나, 제주도 동부 성산 일출봉 북쪽 성산리 일원 해안 저지대를 따라 분포하는 성산리현무암(원종관 외, 1993)은 지질도에 기재된 후 현재까지 암석학적 연구는 자세하게 이루어지지 않고 있다.

본 연구의 목적은 제주도 동부 성산리현무암의 암석기재적 연구를 통하여 주성분, 미량성분 및 희토류 원소의 함량 조성을 분석하여 암석화학적 특성을 파악하고, 화산암류를 형성한 마그마의 성인과 조구적 위치를 알아보고자 함이다.

연구방법

본 연구의 수행을 위하여 야외조사에서는 1:5,000

지형도를 이용하여 분화구로 추정되는 주변의 용암류 간의 상호 관계(층서)를 중심으로 지질조사를 진행하였다. 야외조사를 통하여 연구지역에서 각 용암류의 대표적인 신선한 표품을 채취하여 박편 제작한 후, 편광현미경하에서 대표적인 14개 박편에 대하여 조직 및 구성광물을 관찰하고 모우드 분석(2000점)하였다. 모우드 분석시 결정의 크기에 따라 반정(0.7 mm 이상), 미반정(0.7~0.1 mm), 그리고 석기(0.1 mm 이하)로 분류하여 암석기재를 하였다.

전암 화학분석을 위한 시료의 제작시 오염을 최소화하기 위해 해머만을 사용하여 직경 0.5~1 cm 가량의 조각으로 만든 다음 육안으로 신선한 것을 택하여 증류수로 완전히 세척하였다. 그 다음 105°C 오븐에서 12시간 이상 건조시켜 암석 조각 표면에 남아 있는 물을 제거시킨 후 암석 분쇄기(high-speed vibrating tungsten carbide sample mill: TI-100 model)에서 5분 동안 진동을 주어 분말화하였다. 이들 분말 시료는 보다 정확한 분석을 위하여, 아게이트 사발에서 5~10여 분간 더 갈아서 미세한 분말 시료를 제작하였다.

암석의 화학적 특징을 밝히기 위해 시료 14개에 대한 주성분 분석은 부산대학교 내 한국기초과학지원연구원 부산분소(12개)의 Philips PW 2400 X선 형광분광분석기와 한국기초과학지원연구원 서울분소(2개)의 Philips PW 2404 X선 형광분광분석기를 이용하였으며, 미량 원소 및 희토류 원소는 대덕연구단지 내 한국기초과학지원연구원의 PQ3(VG Elemental, UK) 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS: Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)로 분석하였다. 주성분 원소의 분석 방법은 전류 30 mA, 전압 40 kV 하에서 X-선을 시료에 조사한 후, 시료로부터 방출되는 원소의 특성에너지에 갖는 형광 X-선을 측정하여 형광 X-선의 방출강도를 표준시료의 것과 비교하여 화학성분의 함량으로 다시 표시하여 산화물 %를 산출하는 것이다. 이 기기분석에서 철은 모두 Fe₂O₃로 분석되기 때문에, 노움 계산을 위하여 2가 철과 3가 철의 분리는 Middlemost(1975)의 Fe₂O₃/FeO ratio에 근거하여 분석값으로부터 Fe₂O₃와 FeO를 계산하였다.

지질개요

Lee(1982)는 제주도에서의 화산활동을 크게 4단계, 즉 거저현무암 분출기(제 1단계), 용암대지 형성기(제

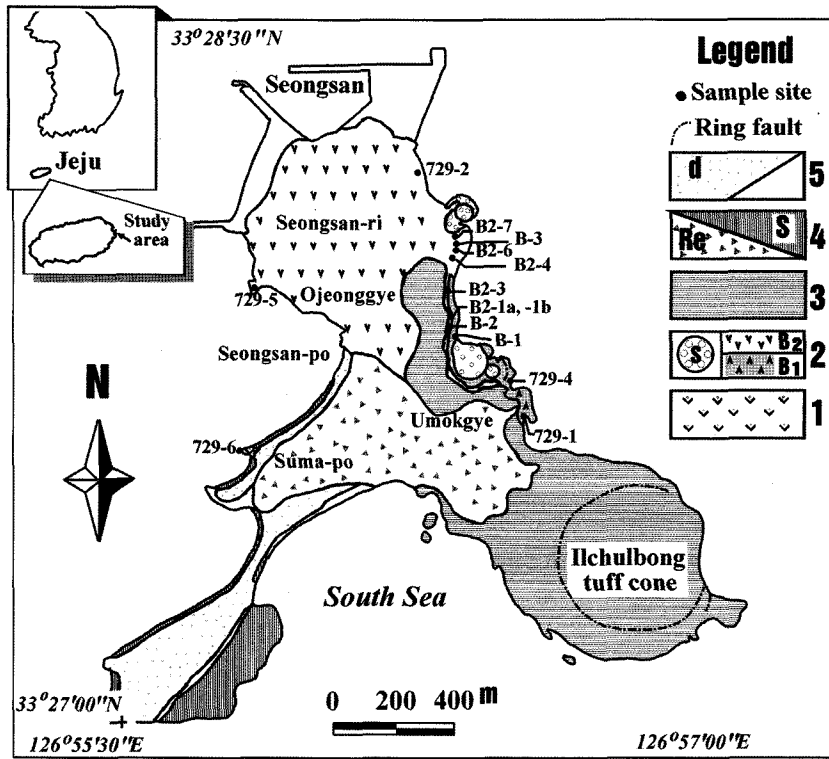


Fig. 1. Geological map of the Seongsan-Ilchulbong area (modified from Won et al., 1995). [1, Pyoseon-ri lava; 2, Seongsan-ri lava (B1, lower lava; B2, upper lava; S, spatter cone); 3, Ilchulbong tuff; 4, Ilchulbong reworked tuff (Re) and Sinyang-ri Formation (S); 5, Eolian dune sand (d) and beach sand and reclaimed area.]

2단계), 한라산체 형성기(제 3단계), 기생화산 형성기(제4단계)로 구분하였다. 그리고 제주도에는 10여 개의 응회암 및 응회구를 포함하여 360여 개의 분석구가 분포한다. 분석구들은 플라이스토세 후기 이후에 형성되었으며, 대부분이 육상에 분포하고 있다. 반면에 응회환과 응회구는 플라이스토세 전기 이후에 형성되었으며, 주로 해안선을 따라 분포하는 특징을 나타낸다(Kim et al., 1986).

본 연구지역의 화산암류를 1/50,000 성산 도폭(원종관 외, 1993)에서는 일출봉응회암과 성산리현무암으로 구분하였다. 본 지역의 지질은 연구결과를 종합하여 보면 하부로부터 표선리현무암, 성산리현무암, 일출봉응회암, 일출봉제동퇴적층 및 신양리층, 사구층, 해변사 등으로 구성된다(Fig. 1).

표선리현무암은 수마포의 서쪽 해안을 따라서 국부적으로 침상장석-감람석 현무암으로 분포한다. 이 현무암은 성산리현무암의 하부의 것으로(원종관 외, 1993) 알려져 있다.

성산리현무암은 성산 일출봉 북쪽 성산리 일원 해안 저지대에 분포한다.

일출봉응회암은 성산반도 말단부의 일출봉응회구를 구성한다. 일출봉응회구는 지름 약 600 m의 사발모양의 분화구가 있으며 화구륜(crater rim)의 고도는 최고 해발 180 m이다. 지층의 주향은 화구륜의 등고선에 대체로 평행한 경향이며, 경사는 최대 45°이며, 분화구의 중심을 기준으로 방사상의 분포형태이다(Fig. 2). 층의 경사는 거의 분화구의 바깥쪽을 향하고 있으나, 화구륜의 일부 지점에서는 분화구의 안쪽을 향하여 경사진 층들이 관찰된다. 화구륜에 평행한 단층들은 분화구의 안쪽으로 수 m 가량 낙차를 갖는 정단층들이 발달하는데 이는 일출봉의 분출도중 또는 분출이 끝난 후 분화구 내측이 침강하여 형성된 환상단층(ring fault)으로 해석된다. 일출봉응회구는 라필리로 주로 이루어져 있으며, 상대적으로 소량의 화산회와 화산암괴를 포함한다. 화산암괴와 비교적 조립의 라필리는 약 62%의 결정질 현무암편과 38%의

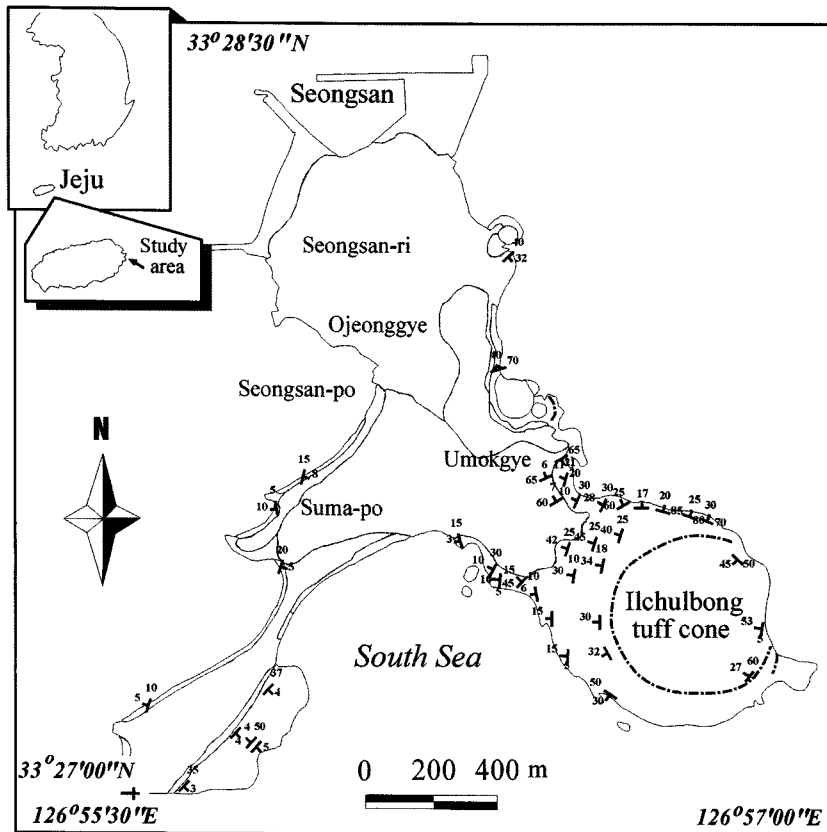


Fig. 2. Strikes and dips of tuff beds and lava flows in the Seongsan-Illchulbong area.

다공질 스크리아편으로 이루어져 있다. 결정질 현무암편은 색깔과 형태가 다양하고 감람석의 반정을 다량 함유하며, 광물조성에 근거로 이 일출봉 하부에 위치한 성산리현무암에서 유래한 유질암편으로 판단된다. 라필리는 2~3%의 결정질 현무암편을 제외하면 대부분 다공질인 유리질 암편으로 구성된다. 이들은 40~60%의 기공을 함유하며 황갈색 혹은 불투명한 유리질의 기질에 소량의 감람석 및 사장석 반정을 포함한다. 이들은 일출봉의 분출과 직접 관련된 본질 암편으로, 기포가 생성된 마그마(vesiculating magma)의 수성분출에 기인하는 것이다. 화산회는 유리질 암편으로 구성되며, 소량의 사장석 혹은 감람석 결정편을 함유한다. 이들 화산회는 매우 각진 형태를 보이며, 마그마의 수성분출시 생성된 것으로 알려져 있다.

일출봉재동퇴적층은 일출봉응회구의 사면으로부터 재이동된 응회암의 퇴적층이며, 신양리층(김봉균, 1969)은 일출봉 기원의 해성 화산원 퇴적층이다. 본 역에서 성산리현무암과 일출봉응회암을 부정합으로

피복한다. 신양리층의 주향은 해안선에 평행하며 경사는 3°~10°로 바다 쪽을 향한다(Fig. 2). 본 층은 층준에 따라 다량의 패각편을 함유하기도 하며 본 층내의 유공층 연구 결과 제4기 플라이스토세로 동정되었다. 신양리층의 상부에는 약 1m 두께의 동남 고토양(plaeosol: 윤상규 외, 1986)이 놓이며, 그 위로는 현생의 풍성사구층과 해변사가 놓인다.

암석기재

본 연구지역의 용암류는 성산 도폭에서 제주도 화산활동 단계 중 제 2단계의 표산리현무암과 제 3단계의 성산리현무암으로 크게 나눌 수 있으며(원종관 외, 1993), 육안상 반정광물의 종류 및 조직에 따라 크게 침상장석-감람석 현무암(FOB; feldspar olivine basalt)과 비현정질 현무암(APB; aphanitic basalt)으로 구분할 수 있다. 본 연구지역의 모우드 분석 결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Modal composition of the basaltic rock in the Seongsan-Ilchulbong area

Sample No.	SiO ₂ (wt.%)	olivine		cpx		pl		gm
		ph	mph	ph	mph	ph	mph	
729-5	50.24	2.8	2.1					95.0
729-6	52.25	1.9	2.2	0.2	0.3	0.5	3.9	90.9
B2	48.90	3.2	1.9					94.9
B2-1	49.35	4.2	2.9					92.8
B2-3	50.18	3.6	3.3					93.0
B2-4	50.28	3.0	2.2		0.1			94.6
B2-6	50.29	5.3	3.5	0.7	0.2			90.2
B2-7	50.32	4.5	2.5		0.1			92.8
B3	49.85	1.2	4.7					94.1
729-2	50.83	1.0	3.6					95.3
B-1	47.36	0.2	8.4		0.1		0.1	91.0
729-1	48.37	0.1	2.7					97.1
729-4	48.06	0.9	3.8					95.1

Modes based on about 2000 counts per samples.

Phenocrysts (ph) > 0.7 mm; Microphenocrysts (mph) 0.1-0.7 mm; groundmass < 0.1 mm, cpx, clinopyroxene; pl, plagioclase; gm, groundmass.

표선리현무암

성산 일출봉의 서북쪽 수마포 지역에 분포하는 표선리현무암은 침상장석-감람석 현무암으로 이루어져 있으며, 약간 어두운 회색을 띠고 다공질이며, 반정으로 감람석과 침상 사장석이 소량 나타난다.

현미경하에서 반정은 감람석 반정과 소량의 사장석 반정 및 극소량의 단사휘석 반정이 나타난다. 석기는 사장석 래쓰(lath)와 감람석, 단사휘석, 불투명 광물로 구성되어 있다. 그리고 이것들이 조립의 침상 사장석과 감람석 사이를 충전하고 있는 입간(intergranular) 조적을 보인다.

감람석: 결정형은 자형 내지 반자형이다. 반정 내에 불규칙한 열극이 존재하며 골격구조(skeletal texture)를 보인다.

사장석: 반정과 미반정들의 결정은 거의 대부분 자형 내지 반자형의 주상으로 나타나며, 알바이트-칼스바드 쌍정과 미약한 누대구조가 보인다.

성산리현무암

성산리현무암은 대부분이 비현정질 현무암으로 관찰되는데 대체로 다공질이며, 밝은 회색을 띤다. 성산리현무암은 성산 일출봉 북쪽 해안 저지대의 해안 절벽에서 붉은 색의 괴상 라필리스톤층 및 고도양층(paleosol)에 의해 크게 두 층의 용암류 즉, 하부용암류와 상부용암류로 나누어진다(Plate 1). 이 괴상 라필리스톤층의 두께는 약 32 cm이며 주로 입경 1~2 cm 정도의 라필리로 구성된다. 이 층은 전체적인 두께와 입도가 거의 같은 것을 미루어 볼 때, 분비강하(airfall)에 의한 것으로 추정된다. 이 라필리스톤층에

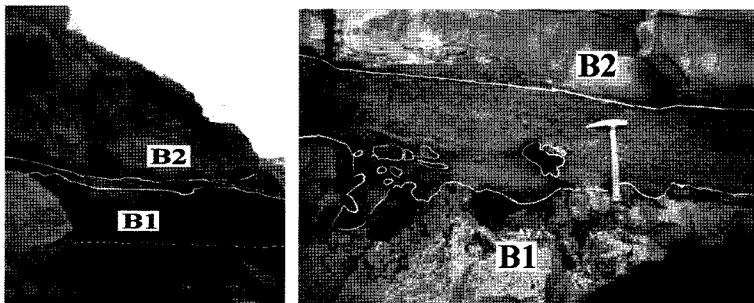


Plate 1. (Left) Outcrop of the Seongsan-ri basalt showing two flow unit (B1: lower lava and B2: upper lava). (Right) Outcrop of the Seongsan-ri basalt which is intercalated by yellowish lapillistone and paleosol (with thickness of 32 cm).

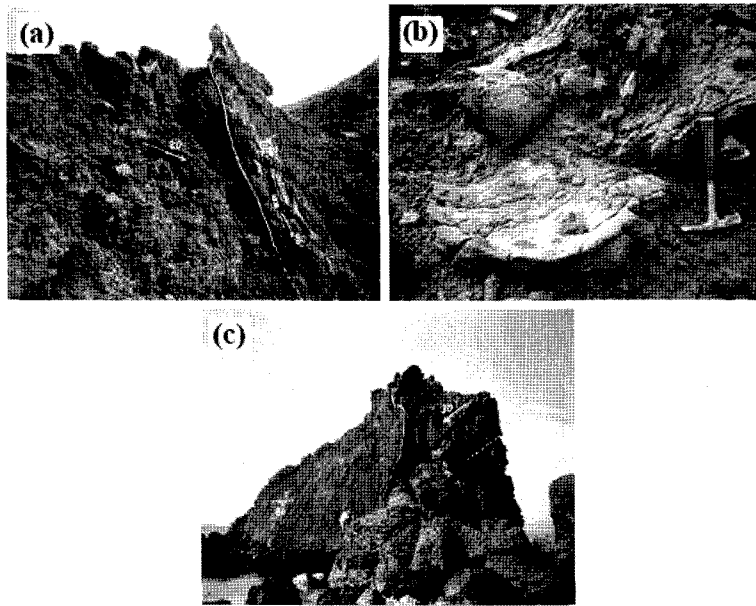


Plate 2. Outcrop of the volcanic center (small crater) which erupted B1 lavas. (a) Agglomerates around the crater wall, showing inward dipping of 80° and 20°. (b) Volcanic bombs. (c) Crater wall of inward dipping (80°) and lava flows (30°).

수반된 고토양층에 의해 하부용암류와 상부용암류의 생성에는 시간적 간격이 있었음을 추측할 수 있다. 상부용암류는 일출봉용회암에 의해 피복된다.

현미경 관찰에 의하면, 성산리현무암은 반정으로 감람석이 관찰되고, 석기는 사장석 래쓰와 감람석, 단사휘석, 불투명 광물로 구성되어 있다. 감람석 결정은 대부분 자형 또는 용식형이며, 반정 내에 불규칙한 열극이 보인다. 대체로 외곽부가 이딩사이트로 변질되어서 반응환과 같은 모습을 나타낸다.

본 지역에서는 용암류의 분화구가 발견되는데, 그 중 일출봉의 북동쪽 우묵계 해안에는 3개 정도의 작은 분화구와 이것들을 포함하는 큰 분화구의 흔적이 나타난다. 작은 분화구 중의 하나는 내벽의 주향과 경사가 호상으로 분포하며, 분화구 측벽의 상부의 경사는 20°와 27~28° 등으로 약간 낮게 나타났다. 이것으로부터 분화구의 중심으로부터 용암류가 분출했음을 짐작할 수 있다. 그리고 인접해 있는 다른 분화구는 내벽의 주향과 경사가 각각 동심원상으로 급경사를 가지며 나타난다. 이 분화구에서 흘러나온 용암들 사이에서 화성쇄설 물질이 섞여 있는 집괴암상(agglomerate)들이 관찰된다(Plate 2a). 분화구 주변에서는 대소규모의 화산탄들이 발견되는데(Plate 2b), 큰 것의 크기는 136 × 80 cm에 이른다. 위의 2개의

분화구를 둘러싸는 큰 분화구의 내벽의 경사는 70~80°이며, 분화구벽의 외벽에서의 용암류의 경사는 30°이다. 즉 분화구의 내벽의 경사는 매우 급경사이고 정상부는 저각도로 완만한 경사를 가진다(Plate 2c). 이 지점의 시료 729-4는 현미경하에서 반정이 거의 보이지 않고 다수의 기공이 관찰되고, 소량의 용식 또는 이딩사이트(iddingsite)로 변한 감람석 반정만 관찰되며, 그 밖의 반정은 확인되지 않는다. 대부분이 불투명 광물로 변질되어 있으며, 기질부는 유리질이다. 시료 729-1 지역에는 동굴(tube)이 존재하며, 그 위를 집괴암상의 현무암이 뒤덮고 있다. 집괴암의 크기는 다양하며, 화산탄(block)도 관찰된다. 시료 729-1 역시 현미경하에서 반정이 거의 보이지 않으며 반자형 내지 타형의 감람석 미반정만 관찰되고 다수의 기공이 관찰된다. 그리고 특이하게 흑운모가 관찰되는데, 이는 기반암에서 유래된 외래 결정편으로 사료된다. 시료 729-1, 729-4는 현미경하에서 인터서탈(intersertal)조직을 보인다. 성산리현무암의 하부용암류(시료 729-1, 729-4, B-1)는 이 분화구에서 유래된 용암류이다.

성산 일출봉 북쪽 오정계 동쪽 해안에는 황색의 기질에 검은 현무암 스크리아를 함유하는 스패터콘(spatter cone)이 해침에 의해 침식되어 노출되어 있



Plate 3a. Outcrop of black scoria deposit with tuff (dipping 32°) of the spatter cone which erupted B2 lavas.

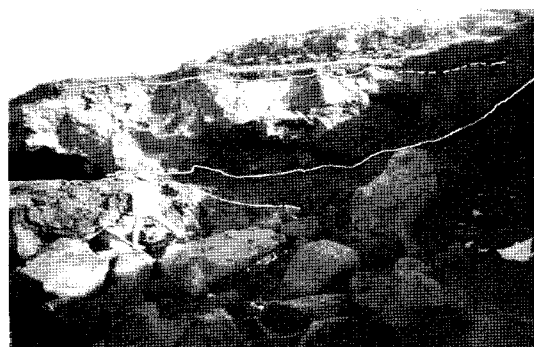


Plate 3b. Outcrop of the spatter cone which intercalates upper lavas of the Seongsan-ri basalt.

다(Plate 3a). 스패터콘 내의 스코리아는 암괴(block) 정도의 크기로 비교적 크고 굵으나, 중심에서 멀어질수록 라필리 정도로 그 크기가 점점 작아진다. 이 스패터콘으로부터 근접해 있는 지역에서는 상부용암류의 각 용암 사이에 여기에서 분출된 스코리아가 협재되어 있다(Plate 3b). 적색의 라필리스톤층과 상부용암류는 이 분화구에서 유래된 것으로 추측된다.

하부용암류

성산리현무암의 하부용암류는 대체로 다공질이며 시료 B-1 지역에서 용암류의 두께는 약 240 cm이며, 이는 다시 클링커(clinker)에 의해 하부가 약 120 cm, 상부가 약 170 cm의 두께를 가진 두 용암류로 분지되어 나타난다(Fig. 3.<STOP 1>). 그리고 용암류의 상부에 작은 용암통로(cave)가 관찰된다. 이 용암류는 각각 클링커에 의해 여러 차례 분지되어 수매의 용암단위(flow unit)를 이루어 나타난다. 각 용암류의 두께는 약 10 cm에서 수십 cm에 이르는 것으로 다

양하며 용암단위 B1-1A'의 상부표면에 로피구조(ropy structure)도 나타난다. 하부용암류에서 용암튜브(lava tube)도 관찰된다(Fig. 3. <STOP 1, 2>). 우묵계 북동 해안에서 하부용암류(Fig. 2)는 북쪽으로 감에 따라 지형이 낮아져서 해수면 아래로 들어가고, 상부용암류에 의해 피복된다.

현미경하에서 시료 B-1는 뚜렷한 유동구조를 보이지 않으며, 필로택시틱(pilotaxitic)조직과 인터서탈조직을 보이며, 감람석의 골격구조도 나타난다. 그리고 반정은 거의 보이지 않고 대부분이 감람석 미반정이며, 결정 내에 불규칙한 열극이 보인다. 그리고, 가장 자리를 따라 거의 이딩사이트로 변질되었으며, 응식형의 감람석 반정이 관찰된다. 석기에는 아주 미세한 사장석 래쓰만 구별된다.

상부용암류

성산리현무암의 상부용암류는 회색의 비현정질이며, 괴상(massive)이다. 시료 B-2 지점에서는 용암류의 상부와 하부에 수평 유동절리(flow joint)가 발달하며, 기공이 선상으로 배열되어 있음을 볼 수 있는데, 용암류의 상부에는 기공이 조금 불규칙하게 나타나고, 그보다 아래의 층의 중간에 나타나는 기공은 치밀한 구조를 보인다. 그리고 이층의 최하부는 유리질로서 약간 검게 나타나는 것으로 보아 급냉된 것으로 보인다. 하부용암류 역시 클링커에 의해 수매의 용암류로 분지되어 나타나는데 시료 B2-1의 지역에서는 다각형의 절리가 나타나며 이 용암단위 위에는 수평절리를 볼 수 있다. 용암류 B2-5 지역 주위에 높이가 각각 120, 110, 125 cm가 되는 용암단위가 존재한다. 시료 B-3 지역에서는 기공이 수직으로 선상의 배열을 보이는 것이 관찰되는데, 용암이 수직으로 떨어진 것으로 보인다(Fig. 3.<STOP 3>). 그리고 오정계 서쪽 해안의 729-5 지역에서는 용암류(lava flow)가 능선을 형성하는데, 같은 주향에 경사는 각각 반대방향으로 나타난다.

현미경하에서의 관찰에 의하면, 시료 B-3 내의 감람석 반정은 빠른 성장률 또는 용융물질의 응식에 의한 골격구조를 보인다(Plate 4). 시료 B2-4, B2-6, B2-7에서는 소량의 단사회석 반정이 관찰되며, 사장석 래쓰가 반정 주위를 둘러싸는 필로택시틱조직이 관찰된다. 시료 B2-4, B2-6, B2-7, 729-2에서는 서브오피틱(subophitic)조직이 관찰되며, 감람석 반정이 골격구조를 가진다. 그리고 시료 B2, B2-1a, B2-3,

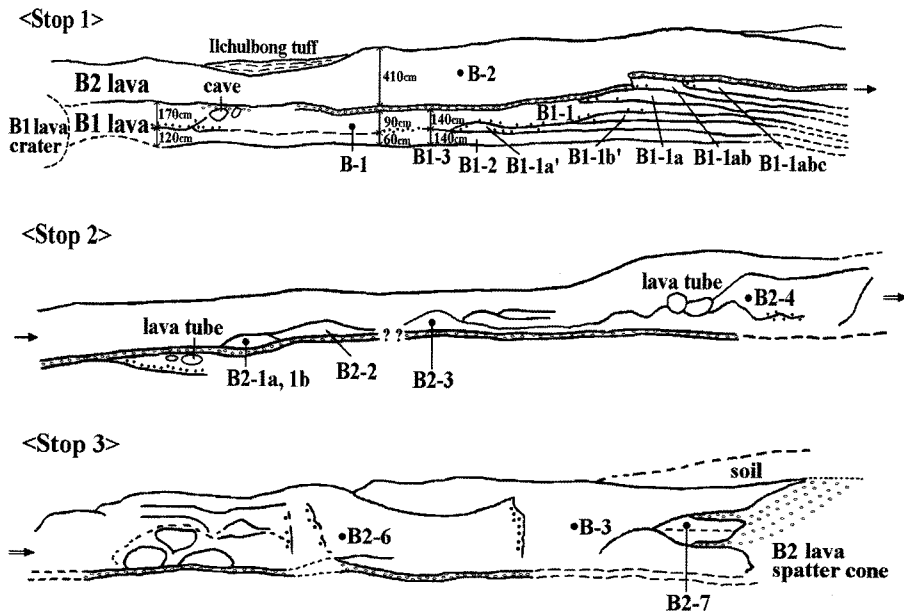


Fig. 3. Sketch section of lava flows in Stop 1, 2 and 3 of the Seongsan-Ilchulbong area (heavy dot with number shows sample locality and numbers represent separated lava flow unit). Stop 1, 2 and 3 are shown in Fig. 1. [small open circle: lapillistone and scoria, small filled circle: clinker]

B2-4, B2-6, B3, B2-7, 729-2, 729-5는 현미경하에서 전체적으로 입간조직을 보인다.

암석화학적 특징

주성분 원소

본 지역의 화산암(용암류)의 주성분 원소 분석 결과와 CIPW 노름값은 Table 2와 같다.

본 지역의 용암류는 TAS성분도($(Na_2O + K_2O) - SiO_2$ 의 IUGS분류도: Le Bas et al., 1986)에서 알칼리성분의 함량을 기준으로 하여 암석계열을 구분(Irvine and Baragar, 1971; Macdonald and Katsura, 1964)해 보면, 알칼리암 계열과 비알칼리암 계열로 구분된다. 즉 성산리현무암의 하부용암류는 알칼리암 계열에, 상부용암류와 표선리현무암은 비알칼리암 계열에 각각 도시된다(Fig. 4a).

성산리현무암의 상부용암류와 표선리현무암은 비알칼리암 계열의 현무암을 Al_2O_3 에 대한 알칼리 지수(alkali index)로 구분하는 성분도(Middlemost, 1975)에서 고알루미나질 현무암(또는 칼크-알칼리암질 현무암)에 비하여 Al_2O_3 함량이 낮은 쏘리아이트질 현무암(TH)의 영역에 도시된다(Fig. 4b). 그러므로 본 연구지역에는 알칼리 현무암과 쏘리아이트 현무암이

함께 산출된다.

본 지역의 용암류를 $K_2O - Na_2O$ 다이어그램에 도시한 결과는 Fig. 5와 같으며, 이는 Lee(1982)가 제주도의 알칼리암은 소딕 계열의 특징을 가지나, 전체적으로 전형적인 포타식 계열인 고프형(Gough trend)과 소딕 계열의 하와이형(Hawaiian trend)의 중간형인 전이적인 경향을 가진다고 보고한 것과 잘 부합된다.

본 지역의 용암류는 SiO_2 함량이 전체적으로 47.4~50.8wt.%의 범위를 나타낸다. 알칼리 현무암과 쏘리아이트 현무암의 SiO_2 범위는 각각 47.4~48.4wt.%, 48.9~52.3wt.%이다. 또한, MgO 함량은 각각 9.8~8.3wt.%, 8.6~6.4wt.%의 범위를 나타낸다. 그리고 쏘리아이트 현무암은 동일한 MgO 함량에서 알칼리 현무암과 비교해 보면, SiO_2 , FeO^T , CaO 함량이 많고, TiO_2 , K_2O , P_2O_5 함량이 적게 나타나며, Al_2O_3 , MnO, Na_2O 는 유사하다. 본 지역의 SiO_2 의 성분은 MgO 성분 에 비하여 그 변화 범위가 비교적 좁게 나타나며, MgO와 CaO가 감소함에 따라 Al_2O_3 가 증가하는 경향을 보이는데 이는 감람석과 단사회석의 정출이 분화작용에 주된 영향을 미쳤음을 나타낸다.

본 지역의 분석자료를 성산일출봉 주변의 제주도 동부 지역의 분석자료(이정숙, 1998; 김석연, 2001)들과 함께 주성분 원소의 변화 경향을 도시한 결과

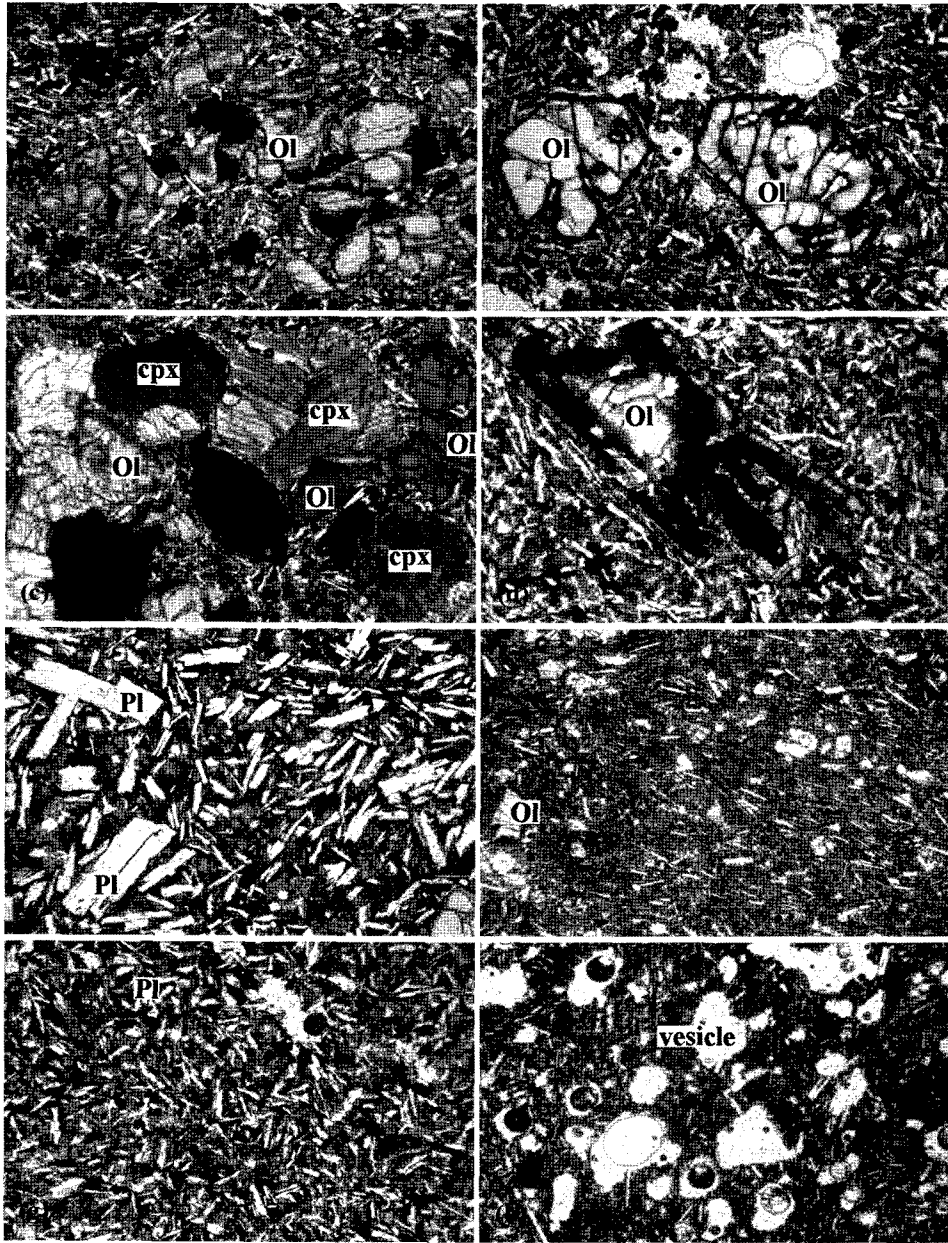


Plate 4. Photomicrograph of the basalts of the Seongsan-Ichulbong area. a. Tholeiitic basalt (sample, B2-7), showing the skeletal texture of olivine phenocryst (crossed polars). b. Tholeiitic basalt (sample, B-2), showing the skeletal texture of olivine phenocrysts (plane-polarized light). c. Tholeiitic basalt (sample, B2-6), showing the glomeroporphyritic texture of subhedral clinopyroxene phenocrysts (crossed polars). d. Tholeiitic basalt (sample, B-3), showing the iddingsite of olivine phenocryst (plane-polarized light). e. Tholeiitic basalt (sample, 729-6), showing the intergranular texture (plane-polarized light). f. Alkali basalt (sample, 729-1), showing the glassy groundmass resulted from rapid cooling (plane-polarized light). g. Tholeiitic basalt (sample, B-2), showing the intergranular texture (plane-polarized light). h. Alkali basalt (sample, 729-4), showing the glassy groundmass with small vesicle (plane-polarized light). Abbreviation: Ol = olivine, Cpx = clinopyroxene, and Pl = plagioclase. (Width of photo is about 2 mm).

Table 2. Major element abundances (wt.%) and CIPW norm of the basaltic rocks in the Seongsan-Ilchulbong area

Sample No.	729-5	729-6	B2	B2-1	B2-3	B2-4	B2-6	B2-7	B3	729-2	729-1	729-4
SiO ₂	50.24	52.25	48.90	49.35	50.18	50.28	50.29	50.32	49.85	50.83	48.37	48.06
TiO ₂	1.97	2.00	2.14	2.18	2.12	2.10	2.12	2.09	2.14	2.09	2.48	2.46
Al ₂ O ₃	14.44	14.65	14.51	14.54	14.00	13.82	14.00	13.83	14.15	13.95	14.12	14.03
Fe ₂ O ₃ ^T	12.13	11.69	13.05	12.81	12.46	12.29	12.37	12.23	12.72	12.13	12.23	12.60
MnO	0.16	0.15	0.17	0.17	0.16	0.16	0.16	0.16	0.17	0.16	0.16	0.17
MgO	8.42	6.38	8.63	8.15	8.39	8.34	8.36	8.31	8.21	8.15	8.55	9.83
CaO	9.11	8.79	9.57	9.22	9.24	9.19	9.31	9.18	9.31	9.15	9.10	9.05
Na ₂ O	3.23	3.40	3.19	3.05	3.18	3.14	3.19	3.21	3.28	3.31	3.42	2.55
K ₂ O	0.67	1.00	0.43	0.53	0.68	0.75	0.71	0.75	0.67	0.80	1.66	1.24
P ₂ O ₅	0.26	0.30	0.28	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29	0.55	0.50
L.O.I	0.28	0.18	0.07	0.32	0.29	0.51	0.38	0.61	0.44	0.57	0.40	0.09
Total	100.63	100.62	100.86	100.28	100.68	100.36	100.80	100.34	100.77	100.87	100.64	100.49
A. I.	3.17	2.80	3.61	3.32	3.16	3.14	3.15	3.18	3.39	3.09	5.56	4.41
CIPW norm												
Q	0.00	1.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Or	3.98	5.93	2.55	3.16	4.03	4.46	4.21	4.46	3.97	4.74	9.84	7.37
Ab	27.39	28.80	27.01	25.97	26.96	26.71	27.01	27.30	27.79	28.01	25.77	21.66
An	22.97	21.77	24.01	24.57	21.96	21.50	21.80	21.21	21.93	20.84	18.28	23.26
Ne	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.74	0.00
Di-wo	8.71	8.42	9.15	8.32	9.35	9.49	9.54	9.59	9.47	9.57	9.91	7.91
Di-en	5.37	5.34	5.57	5.03	5.74	5.84	5.87	5.91	5.73	5.88	6.79	5.11
Di-fs	2.82	2.54	3.06	2.84	3.06	3.09	3.11	3.12	3.21	3.13	2.32	2.25
Hy-en	8.33	10.64	5.03	9.28	8.56	9.27	8.29	8.60	6.33	8.49	0.00	6.50
Hy-fs	4.37	5.06	2.76	5.24	4.57	4.90	4.40	4.54	3.54	4.52	0.00	2.86
Ol-fo	5.19	0.00	7.71	4.36	4.72	4.11	4.75	4.48	5.95	4.22	10.24	9.16
Ol-fa	3.00	0.00	4.67	2.72	2.78	2.40	2.79	2.61	3.68	2.48	3.86	4.45
Mt	3.56	5.10	3.79	3.74	3.62	3.59	3.59	3.57	3.69	3.53	5.33	3.67
Il	3.76	3.81	4.07	4.17	4.04	4.02	4.04	4.00	4.08	3.98	4.72	4.70
Ap	0.57	0.66	0.61	0.59	0.61	0.62	0.61	0.62	0.63	0.63	1.20	1.10

Fe₂O₃^T is recalculated as FeO and Fe₂O₃ for CIPW norm. Fe₂O₃/FeO ratios for CIPW norm, calculation recommended by Middlemost(1989).

(Fig. 6)는 MgO가 감소함에 따라 즉, 분화가 진행됨에 따라 SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O, P₂O₅는 증가하고, FeO^T, MnO, CaO는 감소하는 경향을 보인다. 분화가 진행됨에 따라 CaO는 감소하고 Al₂O₃, Na₂O는 점진적으로 증가하는 경향을 나타내는데, 이는 사장석의 정출이 마그마의 분화에 크게 영향을 미치지 않았음을 의미한다. 즉, 사장석이 주된 정출광물이 아니었음을 지시한다.

주성분 원소의 노움 광물 조성을 살펴보면, 성산리 현무암의 하부용암류인 시료 729-1은 노움 네페린(Ne)을 함유하며, 상부용암류인 시료 B2-1b와 729-6은 노움 석영(Q)을 함유한다(Table 2). 노움 광물 분석 결과를 Hyndman(1985)의 다이아그램에 도시한 결과(Fig. 7), 표선리현무암은 노움 석영(극소량)+하

이퍼신+투회석을 가지는 쏘리아이트 조성의 영역에 도시되어 이 현무암은 쏘리아이트암류로 분류되어 나타났다. 그리고 성산리현무암의 하부용암류는 노움 네페린(극소량) + 감람석 + 투회석을 가지는 알칼리 현무암의 조성의 영역과 감람석 + 투회석 + 하이퍼신을 가지는 감람석 쏘리아이트(즉, 변이대 현무암: transitional basalt)의 조성의 영역에 도시된다. 그리고 성산리현무암의 상부용암류는 대부분이 감람석+투회석+하이퍼신 조성을 가지는 감람석 쏘리아이트의 영역에 해당된다.

미량성분 원소

본 지역의 용암류에 대한 미량 원소 분석 결과는 Table 3과 같다.

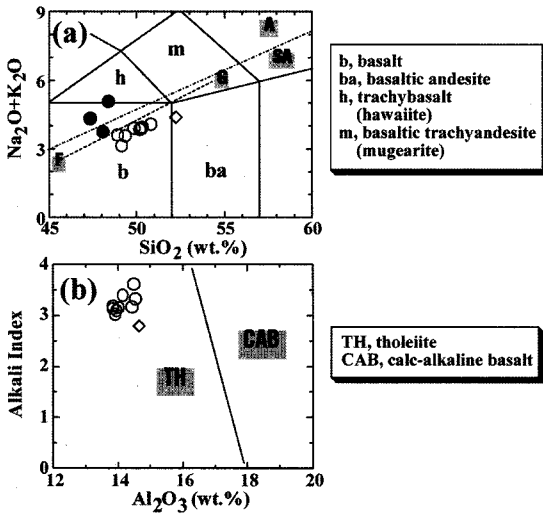


Fig. 4. (a) Total alkali vs. SiO₂ (wt.%) (Le Bas et al., 1986) plot of the basaltic rocks in the Seongsan-Ilchulbong area. The dividing line between alkali (A) and sub-alkalic (SA) magma series is from Irvine and Baragar (1971). Line F-G is division for tholeiitic and alkaline rocks in Hawaii (Macdonald and Katsura, 1964) and (b) Alkali Index (A.I.) vs. Al₂O₃ (wt.%) for the classification of tholeiitic (TH) and calc-alkaline basalts (CAB) (Middlemost, 1975). Symbols [○, tholeiitic basalt in Seongsan-ri lava; ●, alkalic basalt in Seongsan-ri lava; ◇, Pyoseon-ri lava]

불호정성 미량원소

페리도타이트 맨틀과 현무암 용융물질(melt)의 마그마 생성계에서 희토류 원소를 제외한 Rb, Ba, Th, Ta, K, Sr, P, Zr, Hf, Ti 및 Y 등은 불호정성을 나타내는 원소이다.

Th는 Zr, Y과 같이 풍화나 변질작용에 크게 영향을 받지 않으므로 마그마의 분화최도로 사용하여 이 지역 용암류의 불호정성 미량 원소에 대한 변화 경향을 성산 일출봉 주변의 제주도 동부 지역의 분석 자료와 함께 도시해 본 결과, Fig. 8과 같았다. 즉, 쏘리아이트 현무암류는 알칼리 현무암류와 함께 전체적으로 Th가 감소함에 따라 Ba, Sr, Rb, Nb, La, Zr 등이 감소하여 정(+의 상관관계를 보인다. 이것은 이들 원소들이 현무암질 마그마에서 정출된 염기성 광물들에 대해 불호정성이기 때문이다. 한편, 쏘리아이트 현무암류의 불호정성 원소 함량은 Ba, Rb, Nb 이 각각 175~209 ppm, 4.5~23.2 ppm, 및 20.2~21.7 ppm으로 알칼리 현무암류의 381~512 ppm, 26.6~37.5 ppm, 및 39.6~45.6 ppm보다 현저하게 낮다. Th

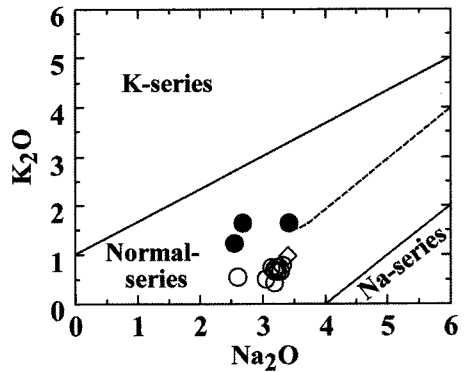


Fig. 5. K₂O vs. Na₂O (wt.%) plot diagram for basaltic rocks in the Seongsan-Ilchulbong area. Symbols are the same as those in Fig. 4.

에 대한 이들 원소의 함량 변화 경향이 뚜렷한 정(+의 상관관계를 나타내면서 쏘리아이트 현무암에서의 함량이 알칼리 현무암에 비하여 적은 것은, 이들 암석을 형성한 마그마가 성분적으로 균질한 근원 물질에서의 부분용융 정도의 차이에 기인되었을 가능성이 높다 (Hanson, 1989). 그리고, Ba/Th, Rb/Th 비가 동일하며 Y 절편이 약 0에 가깝고 기울기가 유사하게 나타나는데, 이것 또한, 두 종류의 현무암의 모마그마가 동일기원이며, 동일기원 물질의 부분용융 차이에 의한 마그마의 분화로 해석된다(Zhi et al., 1990).

호정성 미량원소

페리도타이트 맨틀-현무암 용융체의 계에서 Ni, Cr, Co, Sc, V 등은 염기성 광물에 호정성 원소이며, 페리도타이트 맨틀에서 부분용융이 발생하여 현무암 용융체가 생성될 때, 이러한 성분들은 잔류 맨틀 중에 부집된다.

MgO 성분은 조암 광물 중 감람석, 단사휘석과 같은 유색광물의 정출정도에 따라 민감하게 변화하므로 MgO 변화도는 이들 광물들에 호정적인 미량 원소의 변화를 잘 나타내 주며 또한, 쏘리아이트암과 알칼리암에 대한 암석 성분 변화에 따른 미량 원소의 특징을 구분할 수 있다. 본 역을 포함한 성산 일출봉 주변의 제주도 동부 지역의 현무암류는 전체적으로 MgO 함량이 감소함에 따라 Ni와 Cr이 급격히 감소하는 정(+의 상관관계를 나타내는데(Fig. 9), 이것은 감람석이나 단사 휘석과 같은 광물이 초기 단계에서 정출하였음을 반영하고 있다. 동일한 MgO 함량에서의 쏘리아이트암류의 호정성 원소 함량은 불호정성 원소에

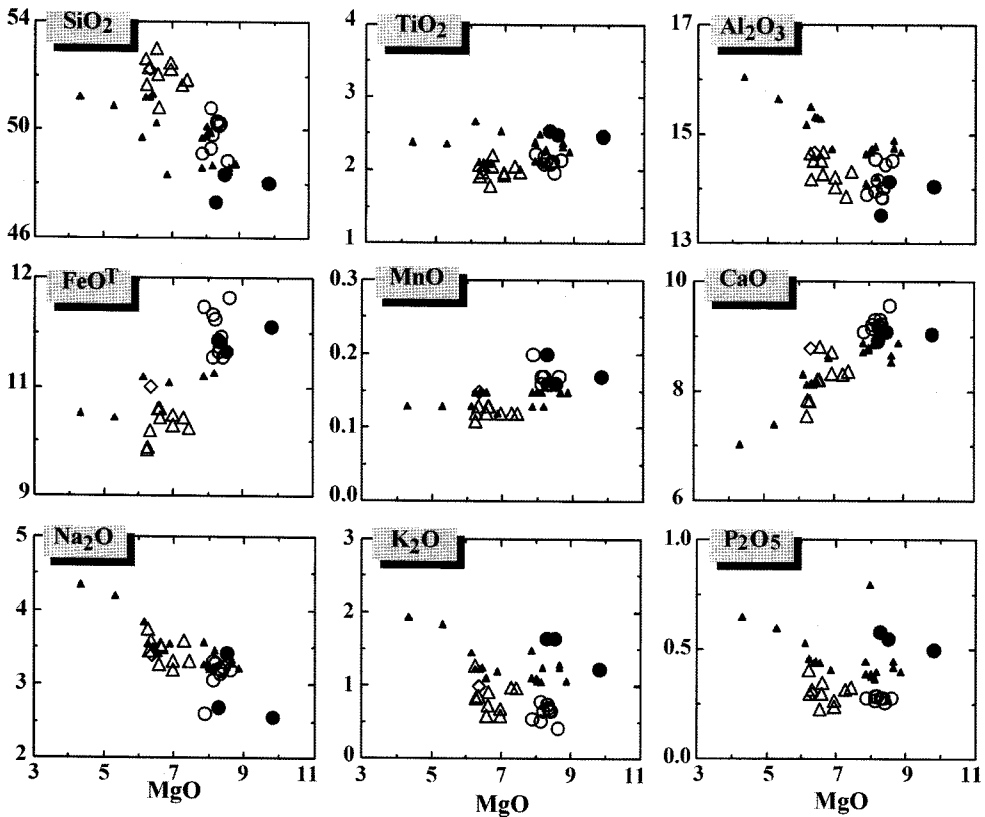


Fig. 6. Harker variation diagrams of major oxide (wt.%) vs. MgO (wt.%) of the basaltic rocks in the Seongsan-Ilchulbong area. Symbols are the same as those in Fig. 4. Symbols [Δ tholeiitic basalt from Lee (1998); \blacktriangle , alkalic basalt from Lee (1998) and Kim (2001)]

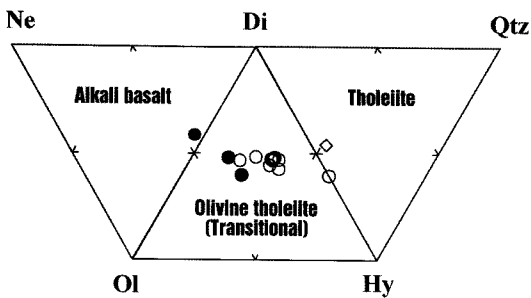


Fig. 7. Collapse of the basalt tetrahedron into the 2-dimension diagram of normative components ne-ol-di-hy-qtz (Hyndman, 1985) of basaltic rocks in the Seongsan-Ilchulbong area. Symbols are the same as those in Fig. 4.

서와는 달리 알칼리현무암류에 비하여 거의 같은 값을 가지며(원종관 외, 1998), Mg수의 변화에 따른 경향은 쏘라이트암류는 40-43의 값을 가지는데 비하여 알칼리암류는 42-46으로 약간 높은 값을 가진다.

희토류 원소

본 지역 현무암류의 희토류 원소 조성 분석 결과는 다음과 Table 4와 같다. 콘드라이트 값(Taylor and McLennan, 1985)으로 표준화(normalization)한 희토류 원소의 함량 변화를 살펴보면, LREE가 HREE보다 더 부화된 패턴을 보인다(Fig. 10). 그리고, 쏘라이트 현무암류와 알칼리 현무암류의 전체적인 변화 패턴은 대체로 유사하다. 즉, 대부분 시료들의 희토류 원소들이 별다른 이상값을 보이지 않고 거의 거의 직선 형태의 모양을 갖는다. 전체적으로 Eu의 (-)이상이 현저하지 않은 것은 지표로 분출하기 이전에 마그마가 분화하는 과정에서 사장석의 분별결정작용이나 집적작용이 심하지 않았음을 반영한다. 이러한 사실은 본 지역의 용암류가 장식, 휘석 및 감람석의 반정이 거의 없는 비현정질 암석이라는 사실과도 잘 부합된다(이문원 외, 1994). 그리고, LREE는 쏘라이트 현무암류에 비하여 알칼리 현무암류에서 그

함량이 높다. 즉, 알칼리암류가 쏘리아이트암보다 더 분화된 경향을 가지는 한편, HREE는 거의 유사한 값을 가진다. 이러한 특징은 동일기원 물질의 부분용융의 차이로 해석된다.

이 지역 미량성분 원소 조성의 특징을 원시맨틀(Pearce, 1983)값으로 규정화한 거미 성분도(spider diagram)에서 고찰해 보면, Ba 및 Th와 같은 LIL 원소는 부화된 반면, 석류석에 호정적인 Y와 Yb으로 감에 따라 감소하여 감람석과 휘석류에 호정성이 있는 Cr과 Ni는 원시맨틀 성분에 비하여 조성이 매우 낮다(Fig. 11). 알칼리암과 쏘리아이트암은 그 함량의 차이는 약간 있으나, 거의 같은 변화 패턴을 보인다. 이러한 변화 패턴은 석류석-페리도타이트 맨틀이 부분용융되어 형성된 하와이섬의 알칼리암과 쏘리아이트와 유사하다(원종관 외, 1998).

조구적 위치 및 암석성인 고찰

조구적 위치

여러 연구자들에 의해 지구조 환경의 판별을 위한

방법이 제안되어 왔다(Amstrong and Nixon, 1981, Mullen, 1983, Wood, 1980). 이미 Lee(1982)는 제주도 알칼리 화산암류의 전암 화학성분이 하와이의 것과 유사함에 주목하여 판 내부 환경에서 열점에 의해 형성된 것으로 해석한 바 있다.

미량 원소 중 Ti, Zr, Y 및 Nb는 변성작용이나 2차 변질작용 과정에서 비유동성을 보여, 지구조 환경의 분류에 이용되는데(Amstrong and Nixon, 1981), 본 지역의 현무암 시료들은 Ti-Zr-Y 함량비에 의한 현무암류의 조구적 위치 판별도(Pearce and Cann, 1973)에서 D영역(지판 내부 현무암; WPB)에 도시된다(Fig. 12a).

Mullen(1983)에 의한 현무암류의 주성분 원소에 의한 조구적 위치 판별도인 TiO_2 -MnO-P₂O₅ 성분도에서 살펴 보면, 본 역 현무암류 중 알칼리암류는 해양도 알칼리 현무암(OIA)의 영역에 도시되고, 쏘리아이트암류는 해양도 쏘리아이트 현무암(OIT) 영역에서 벗어난 해양도 알칼리 현무암(OIA) 영역의 경계에 도시되어 나타난다(Fig. 12b).

그리고, Hf-Th-Nb 성분비에 의한 현무암과 분화물

Table 3. Trace element abundances (ppm) of the basaltic rocks in the Seongsan-Ilchulbong area

Sample No.	729-5	729-6	B2	B2-1	B2-3	B2-4	B2-6	B2-7	B3	729-2	729-1	729-4
Sr	381	349	389	364	368	371	367	374	378	373	558	547
Ba	180	209	204	201	180	185	182	175	198	182	428	381
Li	5.69	7.18	3.44	4.31	3.78	3.42	4.56	4.15	3.60	4.91	5.14	1.32
P	1,440	1,635	1,382	1,338	1,406	1,437	1,573	1,388	2,583	1,489	2,512	2,452
S	775	760	708	730	729	721	1,109	730	636	726	653	745
Sc	21.20	20.00	20.50	21.10	21.10	21.30	23.00	20.40	21.10	21.10	18.20	20.90
V	177	167	173	176	176	180	202	177	178	176	197	194
Cr	254	1750	225	215	226	206	242	245	228	231	237	280
Zn	109	114	111	113	112	111	121	107	111	111	106	131
Zr	126	141	130	128	128	129	145	124	130	132	193	195
Co	71	74	72	73	71	85	68	76	67	84	66	78
Ni	189	118	189	176	176	178	177	174	170	175	170	249
Cu	63	49	81	72	69	69	65	64	67	70	53	31
Rb	14.90	23.20	5.10	4.50	13.60	15.80	12.40	15.20	7.30	17.50	37.50	26.60
Y	21.30	18.50	19.30	20.30	19.20	18.90	18.50	18.90	20.20	19.10	19.20	19.70
Nb	20.90	21.70	21.00	20.90	20.20	20.80	20.60	20.70	21.40	21.30	45.60	44.50
Mo	1.15	1.43	0.74	0.92	1.03	1.24	1.00	1.11	0.87	1.14	2.10	2.05
Cd	0.12	0.14	0.15	0.15	0.15	0.11	0.13	0.15	0.16	0.10	0.16	0.13
Sn	1.69	1.56	1.52	1.29	1.55	1.50	1.53	1.65	1.52	1.56	1.86	1.63
Cs	0.23	0.29	0.08	0.03	0.17	0.21	0.15	0.17	0.05	0.15	0.43	0.10
Hf	3.36	3.71	3.41	3.52	3.41	3.47	3.49	3.50	3.54	3.47	4.83	4.77
Ta	1.38	1.65	1.41	1.37	1.35	1.38	1.36	1.38	1.39	1.37	3.08	2.98
Pb	2.19	4.42	1.91	1.85	1.80	2.05	1.89	1.88	2.04	1.97	3.29	3.15
Th	2.67	3.00	2.34	2.35	2.23	2.33	2.16	2.27	2.42	2.40	5.89	5.65
U	0.53	0.66	0.53	0.51	0.52	0.53	0.51	0.50	0.50	0.55	1.35	1.21

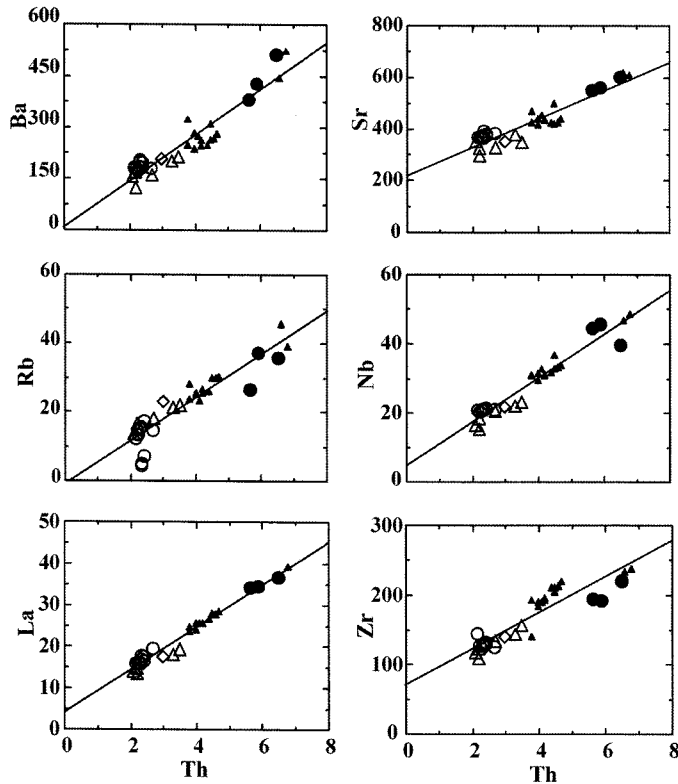


Fig. 8. Variation diagrams of incompatible elements against Th (ppm) of the basaltic rocks in the Seongsan-Ilchulbong area. Symbols are the same as those in Fig. 6.

들의 조구적 위치 관별도(Wood, 1980)에서 알칼리암류는 C영역(alkaline within plate basalt)에 도시되며, 쏘리아이트암류는 B(tholeiite within plate basalt)영역의 경계에 도시된다(Fig. 12c).

주성분 원소와 미량성분 원소의 조성 특성에 있어서 본 역 현무암류는 유라시아 대륙 동연부 지판 내부의 조구적 환경에서 생성된 것임을 지시한다.

암석성인 고찰

전형적인 상부맨틀의 평형 상태에서 만들어진 초생 마그마(primary magma)는 높은 Mg값(0.7wt.% 이상), 높은 Ni(400~500 ppm 이상) 및 Cr 함량(1000 ppm 이상)과 낮은 SiO₂(50wt.% 이하)의 조성을 갖는다. 본 지역의 현무암류는 Mg값이 0.4 이하이고, Ni과 Cr의 함량이 각각 249 ppm, 280 ppm 이하의 낮은 함량을 가지므로 초생마그마가 아니었음을 나타낸다.

각 현무암류의 Sr/Nd비 값의 변화는 비교적 작으며 (17.1~18.5), Ba와 Eu은 (-)이상을 보이지 않는다. 이는

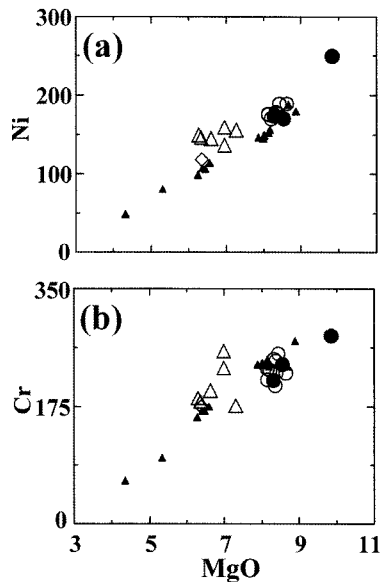


Fig. 9. Variation diagrams of compatible elements (ppm) against MgO (wt.%) of the basaltic rocks in the Seongsan-Ilchulbong area. Symbols are the same as those in Fig. 6.

Table 4. Rare earth element abundances (ppm) of the basaltic rocks in the Seongsan-Ilchulbong area

Sample No.	729-5	729-6	B2	B2-1	B2-3	B2-4	B2-6	B2-7	B3	729-2	729-1	729-4
La	19.39	17.45	16.72	17.61	15.98	15.75	15.86	15.90	17.32	16.32	34.32	33.96
Ce	35.41	36.08	33.51	33.80	32.60	33.30	33.25	33.09	34.32	34.16	68.27	66.91
Pr	4.94	4.70	4.59	4.77	4.34	4.43	4.44	4.57	4.73	4.48	8.45	8.30
Nd	21.10	20.13	19.55	20.52	18.81	19.25	18.69	19.60	20.27	19.86	33.34	32.70
Sm	5.20	5.17	5.01	5.19	4.97	4.92	4.95	5.06	5.26	5.06	7.08	6.76
Eu	1.86	1.74	1.89	1.92	1.71	1.75	1.78	1.71	1.84	1.77	2.23	2.29
Gd	5.84	5.71	5.66	6.26	5.80	5.76	5.94	5.79	6.07	5.55	6.95	6.99
Tb	0.87	0.81	0.82	0.84	0.83	0.83	0.80	0.80	0.86	0.78	0.91	0.88
Dy	4.61	4.35	4.49	4.70	4.50	4.47	4.44	4.56	4.70	4.40	4.66	4.64
Ho	0.88	0.83	0.82	0.85	0.81	0.79	0.86	0.83	0.86	0.82	0.82	0.80
Er	2.26	2.09	2.10	2.34	2.17	2.14	2.12	2.12	2.16	2.11	2.19	2.10
Tm	0.29	0.29	0.27	0.30	0.28	0.26	0.26	0.28	0.28	0.27	0.27	0.28
Yb	1.79	1.45	1.52	1.68	1.60	1.64	1.57	1.74	1.65	1.54	1.38	1.49
Lu	0.24	0.26	0.23	0.24	0.23	0.24	0.22	0.23	0.23	0.24	0.21	0.21
ΣREE	104.68	101.06	97.18	101.02	94.63	95.53	95.18	96.28	100.55	97.36	171.08	168.31

시원마그마에서 장석의 분별결정작용이 현저하게 일어나지 않았음을 암시하며, 현무암질 마그마는 얇은 곳에서 심한 분별작용이 일어나지 않았다고 볼 수 있다.

La에 대한 Ba, Rb 및 Nb 비는 부분용융 정도에 대해서도 변화하지 않아 근원지의 동질성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 본 연구지역의 시료를 생산 일

출봉 주변의 제주도 동부 지역에 분포하는 기존의 다른 분석 자료와 함께 도시해 본 결과, 알칼리암과 쏘리아이트암이 거의 일직선상의 정(+)의 상관을 보이며, 직선상으로 그 비가 같게 나타난다(Fig. 13). 따라서 제주도 동부 일대의 쏘리아이트암과 알칼리 현무암의 불호정 원소비는 이들을 형성시킨 근원물질

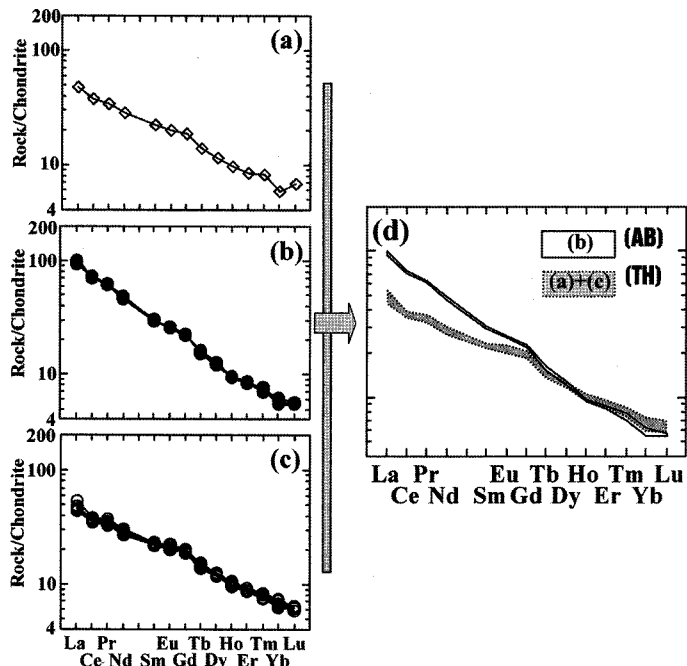


Fig. 10. Chondrite-normalized rare earth element patterns of the basaltic rocks in the Seongsan-Ilchulbong area (Taylor and McLennan, 1985). Symbols are the same as those in Fig. 4.

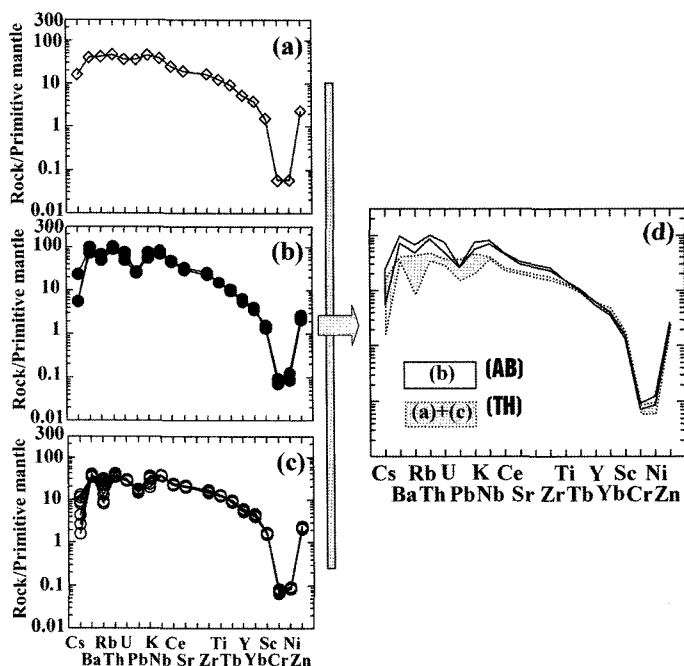


Fig. 11. Primitive mantle-normalized spider diagram for basaltic rocks in the Seongsan-Ilchulbong area (Pearce, 1983). Symbols are the same as those in Fig. 4.

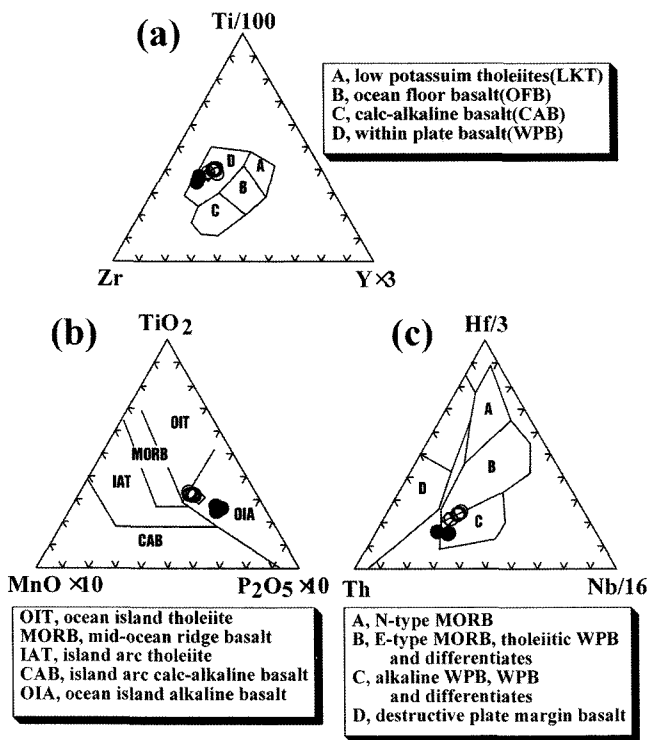


Fig. 12. Tectonic discrimination diagrams of the basaltic rocks in the Seongsan-Ilchulbong area. (a) Zr-Y-Ti diagram (Pearce and Cann, 1973), (b) TiO_2 -MnO- P_2O_5 diagram (Mullen, E.D., 1983), and (c) Hf-Th-Nb diagram (Wood, 1980). Symbols are the same as those in Fig. 4.

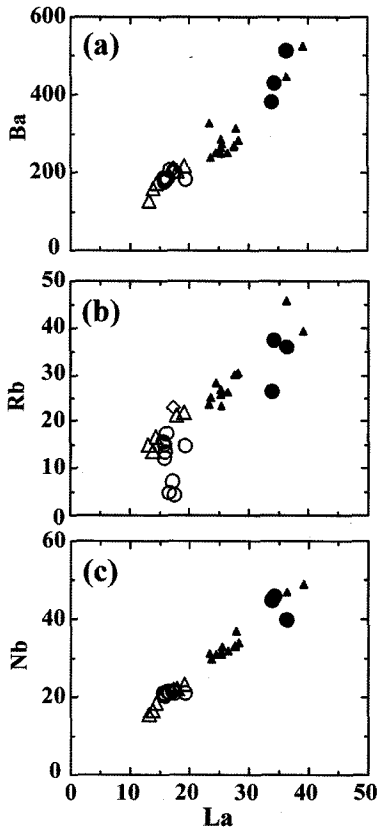


Fig. 13. Variation diagrams showing different degree of partial melting for the basaltic rocks in the Seongsan-Ilchulbong area. (a) La vs. Ba (ppm), (b) La vs. Rb (ppm) and (c) La vs. Nb (ppm). Symbols are the same as those in Fig. 6.

이 동질기원임을 시사한다.

본 지역의 $(La/Yb)_N$ 값을 살펴보면, 쏘리아이트 현무암은 6.2~8.1으로, 알칼리현무암이 15.4~16.8의 값을 가지는데 비하여 훨씬 낮은 값을 갖는다. 그리고 Nb에 대한 $(La/Yb)_N$ 비도 쏘리아이트 현무암은 알칼리현무암보다 훨씬 낮은 값을 갖는다. Nb 값은 쏘리아이트 현무암이 20~21 ppm, 알칼리현무암은 45 ppm 이상이며, $(La/Yb)_N$ 비는 쏘리아이트 현무암이 6.4~8.0, 알칼리현무암은 16.5 이상으로 차이를 나타낸다. 즉, 쏘리아이트 현무암은 알칼리현무암에 비해 LREE/HREE 비가 낮다. 이는 동질기원 물질에서 서로 다른 정도의 부분용융 정도라는 해석과 일치한다 (Hansen, 1989; Wilson, 1989). 또한, K/Ba 비는 맨틀 근원물질의 불균질성(mantle heterogeneity)에 민감한 지시물로서, 일반적으로 OIB(~28)는 MORB (20~160)에 비하여 K/Ba 비가 낮은 것으로 알려져

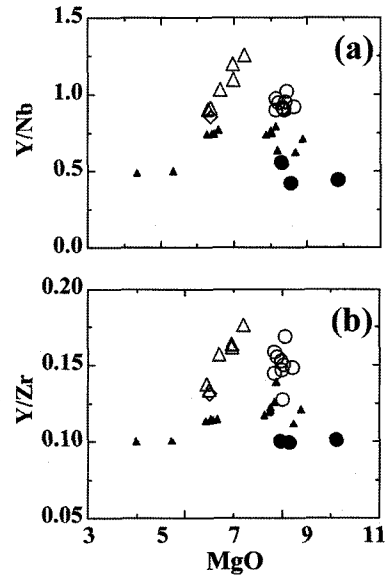


Fig. 14. MgO (wt.%) vs. (a) Y/Nb and (b) Zr/Nb diagram for the basaltic rocks in the Seongsan-Ilchulbong area. Symbols are the same as those in Fig. 6.

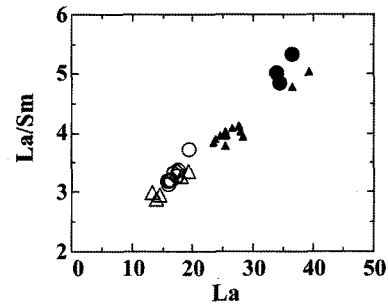


Fig. 15. La vs. La/Sm diagram for the basaltic rocks in the Seongsan-Ilchulbong area. Symbols are the same as those in Fig. 6.

있다(Macdonald, 1980). 이 지역의 쏘리아이트 현무암은 알칼리 현무암에 비하여 그 함량은 낮으나, K/Ba 비는 알칼리 현무암과 거의 같다. 이러한 사실로도 본 역은 동질의 맨틀 근원물질에서 부분용융의 차이로 형성되었음을 지시한다.

한편, 현무암질 마그마에서 정출되는 광물은 주로 감람석, 단사휘석, 사장석 이고, P와 LIL원소 등은 불호정 원소로 거동하므로 이들 간의 비는 맨틀 근원지의 특성 및 마그마의 동질성을 밝히는 데 유용하다(Weaver et al., 1987). 본 연구지역에서 현무암류의 MgO에 대한 Y/Nb비와 Y/Zr는 근원지의 알칼리도를 반영(Winchester and Floyd, 1977)하며, 이러

한 알칼리도는 근원지에서 석류석의 Y에 대한 친화성을 반영한다(Frey et al, 1978). 즉, 석류석을 가지고 있는 맨틀 근원지에서 형성된 시원마그마는 부분용융의 정도가 작을수록 알칼리도가 증가한다. 본 지역의 현무암류의 MgO에 대한 Y/Nb비와 Y/Zr는 모두 슐리아이트암이 알칼리암보다 그 값이 높게 나타나는데, 이러한 결과는 슐리아이트암의 부분용융의 정도가 알칼리암보다 더 컸음을 지시한다(Fig. 14).

화산암류의 성인에 있어서 배취부분용융(batch partial melting)과 분별결정작용(fractional crystallization)과 정중의 REE의 지구화학적 거동은 La/Sm 대 La 변화도 (Fig. 14)에서 배취부분용융이 일어나는 과정은 La/Sm값이 증가함에 따라 La 함량도 증가하는정(+)의 상관을 나타내며, 분별결정작용이 진행되는 동안 La/Sm값의 변화에 La 함량은 거의 일정한 값을 유지하는, 뚜렷한 선상의 관계를 보인다(Treuil and Joron, 1975). 본 역을 포함한 제주도 동부 일원의 화산암류에 대한 La/Sm비 값을 도시해 본 결과(Fig. 15), 암석 중의 La함량이 증가함에 따라 점진적으로 증가하는 정(+)의 상관을 나타내므로, 이 지역 마그마는 기본적으로 배취 부분용융작용(batch partial melting)으로 형성되었음을 보인다.

결론

본 연구지역인 제주도 동부 성산 일출봉 일대 현무암류에 대한 암석기재, 암석화학적 특징 및 마그마 성인은 다음과 같이 요약된다.

본 지역의 지질은 층서적으로 최하부에 표선리현무암이 놓이며, 그 위에 성산리현무암이 분포하는데, 성산리현무암은 라필리스톤층 및 고토양층에 의해 하부 용암류와 상부 용암류로 구분된다.

본 지역에서 산출되는 용암류는 반정 광물의 종류 및 조직에 따라 크게 침상장석 감람석 현무암과 비현정질 현무암으로 구분할 수 있다. 본 지역의 화산암류는 TAS분류도에서 각각 알칼리계열 현무암과 비알칼리계열 현무암으로 분류되며, 비알칼리계열 현무암은 슐리아이트암으로 분류된다.

MgO 함량 변화에 따른 미량 원소 변화에서 호정성 미량 원소의 변화 경향은 대체로 정(+)의 상관 관계를 나타내고, Th을 마그마 분화 척도로 사용한 불호정성 미량 원소의 변화 경향도 정(+)의 상관 관계를 나타낸다. 본 지역의 현무암류는 지판 내부 현무

암(WPB) 영역에 도시되고, 유라시아 대륙 동연부 지판 내부의 조구적 환경에서 생성된 것임을 지시한다. 본 지역의 알칼리계열 현무암과 슐리아이트 현무암은 동질기원 물질의 부분용융의 차이에 의해 생성되었음을 지시한다.

감사의 글

이 논문은 “부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구”되었다. 이 논문에 대한 세심한 지적과 건설적인 비평과 제안을 해 주신 익명의 심사자와 유익한 지적을 해 주신 강원대학교 이문원 교수님, 조선대학교 안건상 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- 고정선, 윤성효, 현경봉, 이문원, 길영우, 2005, 제주도 우도 단성화산의 현무암에 대한 암석학적 연구. 암석학회지, 14(1), 45-60.
- 고정선, 윤성효, 김석연, 2007, 제주도 섬지코지 선돌 분석구의 화산작용과 현무암. 한국지구과학회지, 28(4), in press.
- 김봉균, 1969, 제주도 신양리 및 고산리 지구의 신양리층에 대한 층서 및 고생물학적 연구. 지질학회지, 5(2), 103-122.
- 김석연, 2001, 제주도 동부 섬지코지 일대 현무암의 암석학적 연구. 부산대학교 석사학위논문, 60 p.
- 박기화, 이병주, 조동룡, 김정찬, 이승렬, 최현일, 황재하, 송교영, 최범영, 조병욱, 김유봉, 1998, 제주-애월도폭 지질조사. 제주도, 290 p.
- 박준범, 1994, 제주도 화산암의 지화학적 진화. 연세대학교 박사학위논문, 305 p.
- 박준범, 권성택, 1991, 제주도 화산암의 암석화학적 진화 (II): 제주 동부 월라봉부근 시추코아 연구. 대한지질학회 제 46차 정기총회 및 학술발표회, 지질학회지, 27, 531 p.
- 박준범, 권성택, 1996, 제주도의 슐리아이트 화산활동. 암석학회지, 5, 66-83.
- 원종관, 1976, 제주도의 화산암류에 대한 암석화학적 연구. 지질학회지, 12, 207-226.
- 원종관, 길영우, 이문원, 1998a, 제주도 동북사면에 분포하는 화산암류의 암석학적 연구. 지질학회지, 19, 39-342.
- 원종관, 이문원, 윤성효, 고보균, 1998b, 제주도 남동부 표선 지역 화산암류의 지구화학적 특징. 지질학회지, 34, 172-191.
- 원종관, 이문원, 윤성효, 이동영, 고보균, 1995, 표선도폭 (1:100,000) 지질설명서. 건설부, 제주도, 59 p.
- 원종관, 이문원, 이동영, 박계현, 1993, 성산도폭설명서. 제주도청, 59 p.

- 윤상규, 한대석, 이동영, 1986, 제주도 남부 지역의 제4기 지질 조사 연구. 동력자원연구소 지질보고서, KR-86-2-(B)-2, 223-278.
- 윤성호, 원종관, 이문원, 고정선, 이정숙, 1997, 제주도 동부지역의 쉐레이아이트 용암류에 대한 암석학적 연구. 한국암석학회 발표요약문, 14, 42p.
- 윤성호, 고정선, 안지영, 1998, 제주도 동부 알칼리 현무암 내 스피넬-페줄라이트 포획체의 연구. 자원환경지질, 31(5), 447-458.
- 윤성호, 고정선, 박정미, 2002, 제주도 남동부 태흥리 용암에 대한 암석학적 연구. 암석학회지, 11(1), 17-29.
- 이문원, 원종관, 이동영, 박계현, 김문섭, 1994, 제주도 남사면 화산암류의 화산층서 및 암석학적 연구. 1992년도 과학재단 자유공모과제 보고서, 65 p.
- 이동영, 윤상규, 김주용, 김윤종, 1987, 제주도 제 4기 지질 조사연구. 한국동력자원연구소, 233-278.
- 이정숙, 1998, 제주도 동부 지역의 쉐레이아이트 용암류에 대한 암석학적 연구. 부산대학교 석사학위논문, 82 p.
- Armstrong, R.L. and Nixon, G.T., 1981, Chemical and Sr isotopic composition of igneous rocks from DSDP LEGS 59 and 60, in: initial reports of the Deep Sea Drill Project 59, 719-727.
- Frey, F.A., Green, D.H. and Roy, S.D., 1978, Integrated models of basalt petrogenesis a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from south eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data. *Journal of Petrology*, 19, 463-513.
- Hanson, G.N., 1989, An approach to trace element modeling using a simple igneous system as an example. In Lipin, B.R. and McKay, G.A. (eds.) *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements. Review of Mineralogy*, 21, 79-97.
- Hyndman, D.W., 1985, Petrology of igneous and metamorphic rocks. (2nd ed.) McGraw-Hill, 786 p.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Science*, 8, 523-548.
- Kim, D.H., Hwang, J.H., and Hwang, S.K., 1986, Tuff rings and cones on Jeju Island, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 22, 1-9.
- Kuno, H., 1966, Lateral variation of basalt magma across continental margins and island arcs. *Bulletin of Volcanology*, 29, 195-222.
- 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. *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
- Lee, M.W., 1982, Petrology and geochemistry of Jeju volcanic Island, Korea. Science Report Tohoku University Series, 3, 15, 177-256.
- MacDonald, G.A. and Katsura, T. 1964, Chemical composition of Hawaiian Lavas. *Journal of Petrology*, 5, 82-133.
- Macdonald, R., 1980, Trace Element Evidence for Mantle Heterogeneity Beneath the Scottish Midland Valley in the Carboniferous and Permian. *Phil. Trans. R. Soc. Lond., Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 297 (1431), The Evidence for Chemical Heterogeneity in the Earth's Mantle (Jul. 24, 1980), 245-257.
- Middlemost, E.A.K., 1975, The basalt clan. *Earth Science Review*, 11, 337-364.
- Miyashiro, A., 1978, Nature of alkalic volcanic rock series. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 66, 91-104.
- Mullen, E.D., 1983, MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letter*, 62, 53-62.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R., 1973, Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis. *Earth and Planetary Science Letter*, 19, 290-300.
- Pearce, J.A., 1983, Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In Hawkeswoth, C.J. and Norry, M.J. (eds.) *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*, Shiva Publishing Limited, 230-249.
- Taylor, S.R., and McLennan, S.M.M., 1985, *The continental crust: its composition and evolution*. Blackwell, Oxford, 312 p.
- Treuil, M. and Joron, J.M., 1975, Utilisation des elements hygro-magmatophiles pour la simplification de la modélisation quantitative des processus magmatiques. *Societa' Italiana di mineralogia et petrologia*, 31, 125.
- Weaver, B.L., Wood, D.A., Tarney, J. and Joron, J.L., 1987, Geochemistry of ocean island basalts from the south Atlantic: Ascension, Bouvet, St. Helena, Gough and Tristan da Cunha. In Fitton, J.G. and Upton, B.G.J. (eds.), *Alkaline igneous rocks*, Geological Survey Special Publication, 30, 253-267.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A., 1977, Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20, 325-343.
- Wilson, M., 1989, *Igneous petrogenesis*. Unwin Hyman, London. 466 p.
- 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 and Planetary Science Letter*, 50, 11-30.
- Zhi, X., Song, Y., Frey, F.A., Reng, J., and Zhai, M., 1990, Geochemistry of Hannuoba basalts, eastern China; Constraints on the origin of continental alkali and tholeiitic basalt. *Chemical Geology*, 88, 1-33.

2007년 2월 7일 접수

2007년 4월 23일 수정원고 접수

2007년 5월 9일 채택