

제주도 섭지코지 선돌 분석구의 화산작용과 현무암

고정선¹ · 윤성호^{2*} · 김석연³

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

²부산대학교 과학교육학부 지구과학교육전공, 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30

³울산범서중학교, 689-852 울산광역시 울주군 범서읍 구영리 390

The Basalts and Volcanic Process in the Seondol Cinder Cone, Seobjikoji Area, Jeju Island

Jeong-Seon Koh¹, Sung-Hyo Yun^{2*}, and Suck Youn Kim³

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

²Department of Earth Sciences Education, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

³Beomseo Middle School, Ulsan 689-852, Korea

Abstract: The purpose of this study is to determine the petrology of basalt and the volcanic process in the Seondol cinder cone, Seobjikoji area, eastern Jeju Island. The Seondol cinder cone is mainly composed of spatters in the lower part, pyroclastic deposits including reddish brown blocks, ashes with volcanic bombs in the middle part, and dark black scoria deposits in the upper part. The volcanic sequences suggest volcanic processes that progress through Strombolian eruption and end with Hawaiian lava effusion which breached the cinder cone northwestward and extended over northwestward as lava delta and basalt emplaced as a volcanic neck in the central part of crater in the cinder cone. The age of basalt lava flows is about 95 ± 3 ka. The basalts belong to transitional basalt and show products of fractional crystallization of clinopyroxene and olivine from a parental basalt magma on the basis of variation diagram of major, trace and rare earth elements. Basalts in the region of this study are plotted at the region of within plate basalt.

Keywords: Seobjikoji, Seondol cinder cone, transition basalt, fractional crystallization, within plate basalt

요약: 이 연구에서는 제주도 동부지역 섭지코지 일원에 분포하는 선돌 분석구와 그 주변의 현무암질 화산암류를 주 대상으로, 암석기재, 주원소 및 미량원소의 특성 등을 분석하여 선돌 분석구의 화산과정과 현무암의 암석학적 특징을 검토하였다. 선돌 분석구의 하부는 스페터 위주로, 그 상부는 적갈색 화산탄을 포함하는 화성쇄설물질이 우세하며 최상부 표층부에는 흑색의 스킨리아가 다량 분포한다. 이들 화산작용은 스트롬볼리 분출상에 의해 진행되었으며 마지막에는 하와이 용암 분출상으로 용암이 분화구를 충전한 후 동북쪽으로 흘러넘치면서 분석구를 파괴하고 북쪽으로 흘러 용암 델타를 형성하였다. 분석구 중심부의 암경은 현무암으로 채워져 있다. 이 지역의 화산활동 시기는 대략 95 ± 3 ka에 해당한다. 연구 지역의 현무암은 전이 현무암으로 분류될 수 있으며, 감람석과 단사휘석의 정출이 분화작용에 주된 영향을 미쳤음을 보여주며, 동일마그마에서 기원하였음을 보여주고 있다. 이들은 판내부 현무암에 해당한다.

주요어: 섭지코지, 선돌 분석구, 전이 현무암, 분별결정작용, 판내부 현무암

서론

지구조적으로 비교적 안정된 대륙지각인 유라시아 대륙판 동연부의 한반도 주변에는 백두산 일대, 철원

-한탄강 일대, 백령도, 울릉도, 제주도, 일본의 오기-도고(隱岐島後)섬, 중국의 다둥(大同)지역 등 신생대 화산지대가 분포하고 있다. 이들 중 제주도는 열점 화산활동과 연관되어 형성된 Na-계열의 알칼리 현무암 화산섬으로 알려져 있다(Lee, 1982).

제주도는 한라산(해발 1950 m)을 중심으로 동북동-서남서 방향의 장축(74 km)과 이에 수직 방향의 단축

*Corresponding author: yunsh@pusan.ac.kr

Tel: 82-51-510-2723

Fax: 82-51-513-7495

(32 km)을 갖는 타원형의 화산섬으로서 제4기초 1.6 Ma전부터 화산분출이 시작되어 역사시대인 서기 1002년과 1007년에도 분화활동이 있었다는 기록(동국여지승람 제38권, 이조열성실록)이 있다. 제주도는 전체적으로 한라산을 중심으로 순상화산의 지형을 나타내며, 주로 현무암 용암류와 약간의 화성쇄설암, 유리쇄설암(hyaloclastite) 및 퇴적층으로 구성되어 있으며, 약 360여개의 단성화산체를 가지고 있다(원종관, 1976). 제주도 동부지역에 있는 용암류의 분포와 층서에 대한 1:50,000 지질도(원종관 외, 1993, 1995)가 완성된 후, 이 지역 일부 용암류에 대한 암석화학적 연구(윤성호 외, 1997; 이정숙, 1998; 원종관 외, 1998; 윤성호 외, 2002; 고정선 외, 2005, 2007), 스피넬-레졸라이트 포획체 연구(윤성호 외, 1998)가 있으나, 본 연구지역인 섭지코지 일대 현무암류에 대한 연구는 지금까지 없었다.

본 연구는 제주도 동부 섭지코지 선돌 분석구 일대의 현무암 용암류에 대해 암석기재 및 암석화학적 연구 그리고 선돌 분석구의 화산과정을 이해함으로써 이들 현무암과 선돌 분석구와의 성인적 관계 파악 그리고, 현무암의 주원소 및 미량원소 조성 특성을 파악하고자 한다.

지질 개요

연구지역은 제주도 동부 성산도꼭(원종관 외, 1993) 내 성산읍 고성리 섭지코지 일원의 해안 저지대에 위치한다. 본 지역은 하부의 현무암 용암류를 신양리층과 고토양 및 사구층이 피복하고 있다(Fig. 1).

성산도꼭에 의하면 현무암 용암류는 해안선을 따라 분포하는 온평리현무암과 그 상부를 덮고 있는 선돌 현무암으로 구성된다. 온평리현무암은 소위 표선리현무암(원종관, 1976)으로 분류되던 것으로 본 역에서는 최소 3매 이상의 현무암 용암류의 분출 단위가 관찰된다. 각 용암류는 화학조성과 조직이 매우 균질하며 용암류 사이에 고토양을 협재하지 않는 것으로 보아, 한 번의 화산활동이 시작되면서 용암류가 여러 번 계속해서 분출된 것으로 해석된다. 용암류의 표면은 대체로 평탄한 면을 이루는 곳이 많고, 매우 다공질이며, 기공의 모양은 유동방향에 따라 타원형을 이루는 것이 특징이며 기공의 길이는 1 cm 보다 큰 것도 있으나, 보통 5 mm 내외이다. 용암류의 상단부에서 기공은 암석의 30%를 차지하나, 용암류의

중간부분은 대체로 기공이 작고 치밀하다.

선돌 현무암은 선돌 분석구에서 분출하여 신양리반도 일원에서 온평리현무암을 피복하고 있다. 선돌 분석구는 해식에 의해 화산체의 많은 부분이 파괴되어, 원지형의 일부만이 남아 있으며, 선돌바위현무암은 화도를 충전했던 암경의 잔류물이다. 해안절벽에서 최소 4매 이상의 용암류가 관찰되며, 단위 용암류의 두께는 2 m 이하이다. 지역에 따라 두께가 20~30 cm 이하인 얇은 용암류가 발달하기도 한다. 용암류는 다공질이며, 암회색을 띤다.

신양리층은 본 역 북부의 일출봉 응회구로부터 섭지코지까지 연장되는 해안선을 따라 분포하는 해성퇴적층(김봉균, 1969)이다. 본 층은 층수에 따라 다량의 패각편을 함유하기도 하고 제4기 플라이스토스세의 유공충을 함유한다. 신양리층의 주향은 대체로 해안선에 평행한 북서방향이며 경사는 3°~10°NE로 바다 쪽을 향한다. 신양리층은 조립모래, 왕모래, 자갈 등 전체적으로 조립질의 퇴적물로 구성되어 있고, 자갈 등은 다공질이며 유리질 화산쇄설암이 많고 일부 자갈은 현무암으로 되어 있다. 신양리층은 전체적으로 준고결상태로서 현무암유리의 수화작용으로 갈색유리(펠라고나이트)로 교결되어 있다. 신양리층의 상부에는 약 1 m 두께의 고토양이 놓이며, 그 위에 풍성사구층과 해빈사가 놓인다.

풍성사구층은 주로 해안에서 약간 떨어진 지역에 해빈사가 바람에 의해 이동하여 형성된 것으로 추정되며, 사구모래는 주로 조개껍질로 된 패사(貝砂)이고 최대 두께는 약 5 m에 달한다.

선돌 분석구

선돌 분석구(일명 붉은오름)는 그 분화구를 중심으로 분석구의 동측, 남측, 서측부(분석구의 약 7/8)가 대부분 침식 삭박되어 해안절벽에서 화산체의 내부 구조를 잘 노출시키며, 북측부의 일부(분석구의 약 1/8)가 잔존되어 원래의 층 형태, 퇴적구조를 잘 노출 시킴으로서 화산생성과정을 명확하게 이해할 수 있다. 이 분석구는 스트롬볼리안 분출상에 의한 산물이며, 화산활동의 마지막에 분화구의 중심부에서 스트롬볼리안 분출에 연이어 발생한 용암분류(噴流)에 의해 분석구가 파괴되었고 그 후 차별침식에 의하여 화산 암경이 노출되어 있다.

선돌 분석구는 그 기저 직경이(Wco) 약 350 m이

며, 최고 높이는 해발 45 m 이상(현재 최고 고도는 30 m)이며, 높이/넓이는 1:7.7 정도이다. 이의 중앙부에는 직경 50 m 이하의 분화구가 있었던 것으로 추정되며, 그 분화구의 중심부 내부에 마그마가 관입하여 현재 암경을 이루고 있으며, 암경 주변부를 원형으로 용암류가 정치해 있다. 본 분석구의 표면은 흑색 및 암갈색의 암괴, 화산탄, 스페터 등의 포출물로 덮여 있는데, 산화도 증가에 일치하는 분명한 색깔 변화를 보인다. 보다 큰 암괴와 스페터는 분석구의 중심부 부근의 기저부에 무질서하게 분포하며, 분석구의 동북측 단면과 남측 단면의 내부가 노출되어 있다. 동북측 단면에서 상부에는 암회색의 다공질 분석(60~80%)와 다공질 화산탄(10~20%), 암회색의 치밀한 암괴(5~10%), 화산화(5~10%) 등의 여러 형태의 포출물이 관찰된다. 이들의 분급은 다소 양호하며, 서로 기계적으로 지지되고 있다. 미약한 점이층리를 형성하며 이의 경사는 30°~40° 정도이며, 상부는 45°에 이른다. 이 점이층리는 본 분석구의 구성물질이 스트롬볼리안 분출로부터 대기중으로 뿜어져 나와 낙하여 퇴적되었음을 반영한다. 그 하부는 보다 조립의 적갈색 화산탄과 세립의 분석과 화산회가 풍부하며, 최하부층에는 스페터가 많고, 소규모의 용암류를 포함한다. 최하부층의 경사각은 약 15°~25°이다. 분석구의 중심부의 하부에 스페터와 큰 화산탄이 풍부한 것은 스트롬볼리안 분출 초기에 스페터를 위주로 포출이 되었으며, 후기에는 다소 세립의 분석 위주로 포출되었음을 나타낸다. 분석구의 발 부분에는 약 3 m 두께의 현무암 용암류(시료 S10)가 피복하고 있다.

스페터들은 평균직경이 15~20 cm 크기이며, 최대 350×40 cm에 이른다. 암질이 화산탄과 동일하다. 스페터의 표면은 적갈색이나 내부로 갈수록 암갈색과 암회색을 띠며, 약 10% 내외의 기공을 가지고 매우 단속적인 유동상을 보인다. 특히 그 외형이 상당히 달라서 리본형, 소뿔형이며, 주위의 여러 입자들에 의해 둘러싸고 구부러져 있으며 서로 유착되어 달라붙어 있다. 스페터들은 분석구의 하부 층준에서만 발견되며, 표층부로 감에 따라 적어지고, 상부 세립의 흑색 분석내에서는 드물다. 스페터들이 중심부와 하부층에 많고 상부와 표층부로 갈수록 감소하는 것은 스트롬볼리안 분출의 초기에 스페터 위주로 분출활동이 있었고, 후기에는 분석 위주로 분출이 있었음을 나타낸다.

화산탄은 화산암경의 중심부에서는 140×90×70

cm에서 60×35×50 cm에 이르는 다양한 크기의 것이 관찰된다. 이들은 내부가 적갈색이고 그 외곽이 뽕겉질 모양을 이루고, 아몬드형, 방추형, 계란형을 이루며, 내부에는 방사상 냉각질리를 가진다. 외측부의 상부로 감에 따라 화산탄의 크기는 작아지고, 흑색의 분석내에서는 화산탄이 암회색을 띠며 최대 60 cm에서 수 cm의 것까지 다양하나 드물게 포함되어 있다. 암갈색은 산화도의 증가를 나타내며, 이는 공기와 반응이 쉬운 간헐적인 포출이 있었음을 지시하며, 흑색 및 회색은 산화도가 감소하였음을 지시한다.

암괴들은 그 크기가 다양하지만, 10 cm 정도가 가장 많고 최고 30 cm 이상 되는 것도 있다. 대부분 암회색 혹은 적갈색을 띠며, 일부는 기공을 가진 다공질인 것이 많으며 기공이 거의 없는 치밀한 것도 가끔 발견되고 있다. 이 암괴들은 분석구 내부에서는 층리를 따라 발견되며 불규칙하게 산재한다.

분석구에서 입자들은 기계적으로 지지되어 있으며, 중심부에서는 크기가 다양한 분석들이 섞여서 분급이 불량하지만 상부의 세립 흑색 분석층에서는 분급이 잘 발달한 층리가 잘 관찰된다. 즉, 라필리 테프라층, 역점이 화산탄라필리 테프라층, 역점이 암괴테프라층 등으로 구성되며, 이들은 입도에 의해 층리구조를 나타낸다. 라필리테프라층은 대부분 다공질의 분석으로 구성되며, 층리구조를 잘 보여준다. 약간 조립의 경우, 조립질 분석에서 세립질 분석으로 미약하나마 정점이 현상을 나타낸다. 이 테프라층은 분석구의 상부와 외측부에서 나타난다. 정점이 층리를 보이는 것은 입도가 큰 것이 더 빨리 낙하되어 쌓이는 것으로 생각된다. 역점이 화산탄라필리 테프라층은 분석과 화산탄(또는 암괴)들로 구성된다. 이들은 흔히 조립 분석과 세립화산탄에서 조립화산탄으로 상향 조립화하는 역점이 층리를 나타낸다. 이들은 분석구의 상부의 경사가 급한 곳(30°~40°)에서 흔히 발견된다. 분석구 상부에서 상하방향으로 역점이층리를 나타내는 것은 보다 큰 급사면에 낙하되는 입자들이 사면을 따라 순간적으로 미끄러지는 입자류에 의해 쌓인 것으로 판단된다. 입자들이 서로 달라붙을 만큼 충분한 점착성이 없기 때문에 이들은 가파른 분석구 사면 아래로 쉽게 미끄러질 것이다. 입자들이 사면을 따라 입자류로 이동하는 동안 충분한 전단운동이 일어난다면 큰 입자는 확산압력이나 기계적 여과작용에 의해서 상층부로 변위될 것이며 작은 입자는 하층부로 이동될 것이다.

현무암은 분석구의 중앙부에서 분석구를 관입해 있으며, 중앙에는 화산암경으로, 그 주변부에 동심원상으로 수직 유동구조를 나타내는 현무암이 동심원상으로 둘러싸는데 이는 화도의 크기를 나타낸다. 현무암 용암은 치밀한 비현정질 현무암이다. 경하에서 반정 광물로 감람석, 단사휘석, 사장석이 관찰되며, 기질부는 은미정질 석기에 사장석 래쓰들이 불규칙하게 배열하면서 미약한 유동구조를 나타낸다.

분석구는 주로 마그마와 아주 소량의 외부 물과의 상호작용에 의해서 또는 마그마 자체에서 분리된 가스 폭발에 의해 발생하는 스트롬볼리안 분화에 의해 형성된다(Sheridan and Wohletz, 1983; Wohletz and Sheridan, 1983; Wohletz and McQueen, 1984; Kokelaar, 1986). 이때, 주로 분석(cinder)과 화산탄(bomb)은 탄도분비(ballistically air-fall)에 의해 정지된다(Self et al., 1974; Guest et al., 1974; Fisher and Schmincke, 1984; Cas and Wright, 1987). 마그마가 분화구의 중심을 통해 상승할 때, 지하수나 또는 마그마에서 분리된 휘발성 성분에 의해 H₂O/마그마의 비가 0.1 이하가 되면 마그마성 폭발작용이 발생한다(Kokelaar, 1986). 연구지역의 스트롬볼리안 분화는 초기에 다량의 스페터를 위주로 하여 화산탄, 각상의 암괴와 소량의 분석을 분출하였으며, 소량의 화산회가 수반되었다. 이때에 마그마 내의 폭발력에 의해 큰 암괴가 생긴 것으로 해석된다. 스트롬볼리안 분화 후기에는 외부로부터 물의 유입이 많아졌거나, 마그마 내의 가스 발생이 증가하여 폭발력이 증가함에 따라 스코리아질을 지닌 라펠리 크기의 다량의 분석과 약간의 화산탄이 주로 포출되었으며, 소량의 화산회와 암괴가 수반되었다. 이들에 나타나는 좋은 등급과 점이층리는 이들이 낙하에 의해 집적되었음을 나타낸다. 화산활동의 후기에는 가스 고갈 속도가 마그마 제거속도를 증가하여 폭발력이 소진되고 스트롬볼리안 분출은 종식되었으나(Wholetz and Sheridan, 1983; Wohletz and McQueen, 1984), 화구 부근의 지하에서 마그마가 계속하여 공급되어 용암분천 또는 용암분류에 의해 화도를 채우면서 상승하여 분화구의 중심부에 관입한 것으로 해석된다.

현무암류의 암석기재

아외조사를 통해 연구지역에서 각 용암류의 대표적인 신선한 표품을 채취하여 약 50여개의 박편을 제

작한 후, 편광현미경하에서 결정의 크기에 따라 반정(0.7 mm 이상), 미반정(0.7~0.1 mm) 그리고 석기(0.1 mm 이하)로 분류하여 암석기재를 하였고, 편광현미경 관찰 결과 기공이 적고 신선한 대표적인 시료박편 15개에 대하여 2000점 모드분석을 하여 암석내 포함된 광물들의 부피비를 산출하였다. 시료채취 지점은 Fig. 1에, 모드분석 자료는 Table 1에 나타내었다.

온평리현무암

해안저지대를 따라 분포하는 온평리현무암은 최소 2매 이상의 용암류로 구성된다. 시료 S₁과 S₂는 전형적인 침상장석감람석현무암(FOB: acicular feldspar olivine basalt)이 아닌 비현정질 현무암(APB: aphanitic basalt)으로 2개의 용암흐름단위로 해안선을 따라 분포한다. 흑색의 치밀한 석기 내에 소량의 감람석을 포함하고 암회록색을 띠며 다공질이고 타원체 기공들이 측방으로 배열되어 있다. 하부 용암류(S₁)는 상부 용암류(S₂)와는 적갈색의 풍화된 용암표면과 클링커에 의해 상 하 용암류의 구분이 가능하다. 그 하부의 용암류는 해수면에 잠겨 있다. 시료 S₁과 S₂는 경하에서 대부분 크기가 작은 사장석 래쓰와 감람석 및 불투명광물로 된 석기를 약 95% 차지하고 미약한 필로텍시틱 조직을 보여준다. 반정은 대부분 자형과 반자형 감람석이며 일부는 타형 및 용식되어 나타나고 있고, 때때로 큰 반정들은 빠른 성장률에 의하거나 또는 멜트의 용식에 의한 골격구조를 보이고 있다. 그리고 전체적으로 반상조직을 나타낸다.

시료 S₁₂는 연구지역 남서부 해안 노두에서 밝은 회색의 스코리아를 포함하는 감람석 현무암 용암류에서 채취하였다. 이 용암류는 경하에서 미세한 사장석 래쓰가 보이고 있으며 기질부와 조직이 서로 다른 물질이 혼합되어 있는 양상을 보인다.

시료 S₁₃은 연구지역 북동쪽 섭지방파체로부터 섭지코지 방향의 해안가에서 2~3매의 용암류로서 미세한 기공들로 이루어진 암흑색의 용암에서 나왔다. 이는 현미경하에서 시료 S1과 동일한 조직을 나타내고 있다.

시료 S₁₄는 섭지방파체 앞 도로에서 섭지코지 방향으로 도로 끝부분에 위치하는 암흑색의 비현정질 현무암에서 채취되었으며 이는 미세한 기공들이 덩어리 형태로 포함되고 풍화면에서 감람석이 관찰된다. 또 용암 사이로 붉은색 스코리아를 볼 수 있다. 그리고 해안도로 앞 해안가에는 전체적으로 약 330 cm 두께

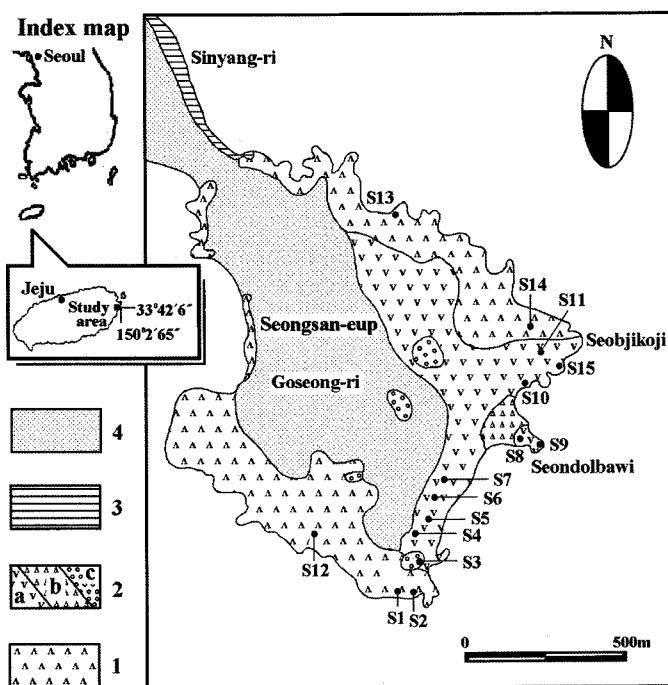


Fig. 1. Geological map and sampling sites of the Seobjikoji area, Jeju island (modified from Won et al., 1993). [1; Onpyung-ri basalt, 2-a; Seondol basalt, 2-b; Seondol cinder cone deposits, 2-c; spatter mount deposits; 3; Sinyang-ri Formation, 4; Dune sand.]

Table 1. Modal compositions of the basaltic rocks in the Seobjikoji area

Sample No.	SiO ₂ (wt%)	olivine		cpx		pl		om	gm	texture	Ref.
		ph	mph	ph	mph	ph	mph				
S ₁	51.33	1.2	5.4	-	-	0.2	0.2	2.4	90.6	pilotaxitic	O.B
S ₂	51.21	1.0	4.9	-	-	-	-	-	94.1	pilotaxitic	
S ₁₃	-	2.6	3.2	-	-	-	-	0.9	93.3	pilotaxitic	
S ₁₄	50.12	3.9	1.9	-	-	-	-	0.9	93.3	pilotaxitic	
S ₄	50.13	0.3	8.6	-	-	-	0.5	0.7	89.9	pilotaxitic	S.B
S ₅	49.78	1.7	9.0	-	-	-	0.3	2.8	86.2	pilotaxitic	
S ₆	49.84	1.5	8.7	-	-	-	0.1	2.6	87.1	pilotaxitic	
S ₇	49.94	3.7	6.7	-	-	-	0.2	2.0	87.4	pilotaxitic	
S ₁₀	51.23	1.1	9.4	-	-	0.2	0.1	0.8	88.4	pilotaxitic	Sn.B
S ₁₁	49.72	3.5	10.1	-	-	-	6.4	0.4	79.6	hyaloophitic	
S ₁₅	48.79	3.4	9.1	-	-	-	2.9	0.9	83.7	intersertal	
S ₃	48.49	3.7	11.3	1.4	1.3	0.1	20.2	4.6	57.4	intergranular	
S ₈	48.64	6.3	12.2	0.7	0.1	0.1	5.9	0.2	74.5	pilotaxitic	Sn.B
S ₉	-	4.9	6.3	2.2	0.4	0.0	6.7	4.2	85.3	pilotaxitic	

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; om, opaque mineral; gm, groundmass. O.B, Onpyung-ri basalt; S.B, Seondol basalt; Sn.B, Seondolbawi (neck) basalt.

를 갖는 2매의 용암류를 관찰할 수 있고, 용암흐름단 위의 가운데에는 미세한 기공들이 불규칙하게 덩어리 형태로 분포하고, 상부로 갈수록 기공을 균질하게 포

함하는 다공질 현무암으로 된다. 또 도로위에는 용암류가 붉은 스크리아로 덮여 있고 동굴형태를 보이고 있다. 붉은 색 스크리아를 함유한 용암은 그 위에 얇

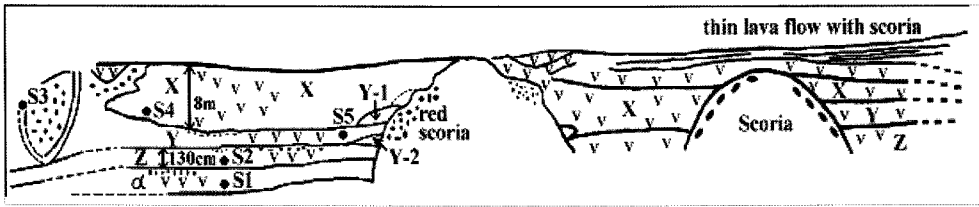


Fig. 2. Sketch section of lava flows in western part of Seondol cinder cone (dot and number show sample locality).

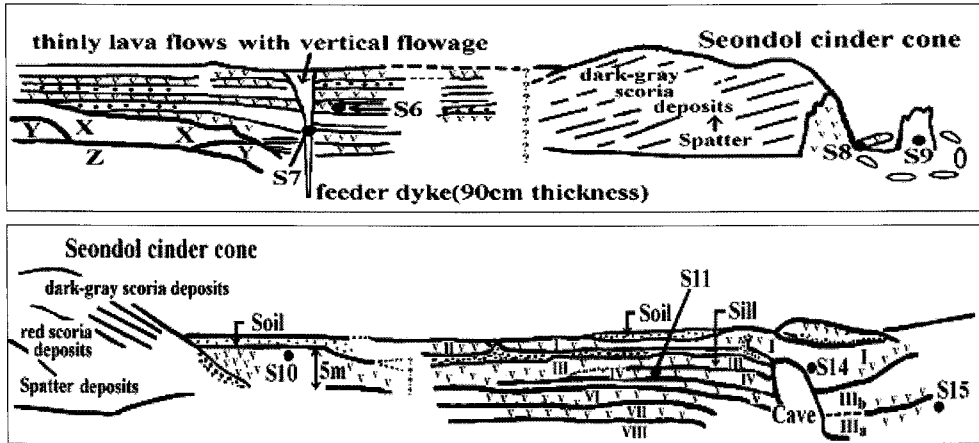


Fig. 3. Sketch section of lava flows in western part (upper) and western part (lower) of Seondol cinder cone and neck basalt (Seondolbawi; S9).

은 용암류가 덮고 있음을 볼 수 있다. 그리고 이 붉은 색 스코리아 내에는 사장석 거정(巨晶)이 포함되어 있다. 현미경하에서는 시료 S₁₂와 유사한 구조를 보이고 있다.

선돌 현무암

선돌 현무암은 선돌 분석구의 화산활동 마지막 단계에 용암의 분류로 인하여 분석구의 서북쪽을 파괴하면서 용암류가 북쪽으로 흘러 용암델타를 형성한 신양리 반도 일대에 분포하고 있다(Fig. 2, 3).

시료 S₃은 신양리 선돌 분석구중 일부인 스패터 마운트 내에서 나타나는 현무암으로부터 채취하였으며 이는 해안 바닥으로부터 붉은 색을 띤 스코리아를 수직으로 관입하고 있는 양상을 보인다. 이 용암은 갈색의 비정질 석기에 약간의 단사 휘석 반정을 함유하고 있다. 또 이 용암은 수직으로 유상구조를 나타내는데, 이는 용암류가 흘러가면서 스코리아를 포함하는 물질을 둘러싸면서 동시에 이동함으로써 생긴 것이며 그 상단부에서는 스코리아를 덮고 있고, 하단부에서는 스코리아가 덩어리 형태로 쌓여 있다. 그러

므로 수직인 곳에서는 수직유동구조를 나타낸다. 한편 현미경하에서는 약 50~60%의 석기 내에 사장석 반정(약 20%), 감람석 반정(약 15%) 및 약간의 단사 휘석 반정(약 3%)을 포함하고 있다. 단사휘석은 부채꼴 누대구조를 나타낸다. 석기는 시료 S₁과 S₂ 보다 큰 사장석 래스 사이에 감람석, 불투명광물이 채우고 있는 간립상 조직을 나타내며, 부분적으로 펠로 텍시틱 조직도 나타낸다.

시료 S₄은 S₄ 지점의 해안(Fig. 2)에서 관찰 가능한 4개의 용암류(X, Y, Z와 α) 중에서 최상부에 놓인 용암류로부터 채취되었으며 이는 암회색의 스코리아와 동시에 이동되어 형성된 것으로 생각되어 지며, 하부의 용암층 사이를 산화된 클링커가 채우고 있다. 또 이 용암은 두께가 약 7~8m 정도 크기이며, 용암 내부에 많은 기공들이 밀집되어 외관상 포획암과 같은 모양을 갖고 있다. 또 바로 아래 하부층은 산화된 클링커가 경계면을 채우고 있고, 그 상부에 많은 기공이 나타나며, 크기가 작은 기공과 큰 기공이 용암류의 유동방향에 나란하게 교호로 나타나고 있다. 그 아래의 용암류는 두께가 약 130 cm로서 평균 1 cm

이상의 큰 기공들이 밀집 분포(약 20 cm 크기)하면서 산재되어 있다. 그 하부의 용암류는 해수면에 접하여 분포하며 다공질이다. 최상부의 용암류인 S₄지점의 용암은 반상조직을 나타내며, 시료 S₁과 S₂에 비하여 크기가 작은 사장석 래쓰로 구성되는 필로택시틱 조직을 나타내며 반정의 함량도 적다. 반정은 주로 감람석으로 구성된다. 경하에서는 필로택시틱 조직을 잘 나타내고 있다.

시료 S₅는 위 지점의 4개의 용암류 중에서 해안바닥에 노출된 세 번째의 용암류로부터 채취되었으며, 동쪽으로 감에 따라 들로 나누어져 붉은 색의 스코리아와 만나게 된다. 현미경하에서는 시료 S₄와 동일한 조직과 광물조성을 보인다.

시료 S₆과 S₇은 위에 기술한 4개의 용암류의 상부에 놓여있는 수평의 얇은 용암류들이 누층을 이루고 있는 것으로 황회색의 스코리아, 클링커 등을 협재하고 있다. 이 수평의 얇은 용암류(S₆)들 사이에 수직으로 유동구조를 가지면서 관입해 있는 현무암관입체(S₇)가 나타나고 있다(Fig. 3). 이 수직의 유동구조를 가지는 현무암은 얇은 층후의 시료 S₆의 용암류를 분출한 것으로 생각되어진다. 시료 S₆은 경하에서 은미

정질 석기에 작은 사장석의 침상 래쓰가 감람석 반정을 둘러싸면서 미약한 유동구조를 보이는 필로택시틱 조직을 나타내고 있으며, 감람석 반정과 미반정은 자형 내지 반자형으로 나타나며, 일부 기질부에 의해 용식되어 골격구조를 보이기도 한다. 전체적으로 반상조직을 나타낸다. 시료 S₇은 두께가 약 90 cm 크기의 수직 피더 암맥으로 생각된다(Fig. 3). 시료 S₇은 전체적으로 광물조성과 조직은 시료 S₆과 동일하며, 사장석 래쓰가 밀집 평행 배열하는 부분과 덜 밀집되어 있는 부분이 교호하여 유동구조를 나타내는 것이 특징이다.

시료 S₈은 선돌 분석구 내부의 중앙부에서 선돌 분석구의 스페터와 스코리아를 관입암체에서 채취한 것이다(Fig. 3). 경하에서는 은미정질 석기에 감람석, 사장석 래쓰 등이 장축방향으로 배열하여 현저한 유동구조를 보인다. 반정은 자형 내지 용식형의 감람석과 소량의 단사휘석, 사장석 미반정으로 구성된다. 또한 단사휘석 미반정과 사장석, 감람석 미반정이 함께 모여 취반상조직을 나타낸다. 그리고 기질부는 미세한 침상의 래쓰가 반정광물 주위를 둘러싸는 필로택시틱 조직을 보이고 있다.

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

Sample	S ₁	S ₂	S ₁₄	S ₃	S ₈	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₅
Rock Type	2ob (○)			4cc (+)		4sb (△)						
SiO ₂	51.33	51.21	50.27	48.49	48.64	50.13	49.78	49.84	49.94	51.23	49.72	48.79
TiO ₂	2.09	2.12	2.10	2.32	2.38	2.14	2.12	2.15	2.09	2.12	2.13	2.26
Al ₂ O ₃	15.30	15.31	15.27	14.88	14.73	14.71	14.72	14.67	14.76	15.49	14.64	14.66
Fe ₂ O ₃ ^T	11.65	11.65	11.65	12.05	12.04	11.83	11.82	11.90	11.80	11.67	11.84	12.08
MnO	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
MgO	6.46	6.40	6.57	8.67	8.68	8.02	8.03	8.00	8.13	6.27	7.88	8.87
CaO	8.14	8.16	8.16	8.54	8.66	8.76	8.81	8.76	8.86	8.14	8.73	8.90
Na ₂ O	3.50	3.52	3.42	3.28	3.33	3.25	3.21	3.24	3.24	3.56	3.27	3.22
K ₂ O	1.26	1.24	1.12	1.26	1.30	1.10	1.08	1.11	1.07	1.24	1.12	1.08
P ₂ O ₅	0.45	0.44	0.44	0.42	0.45	0.39	0.38	0.38	0.37	0.46	0.39	0.40
L.O.I.	0.32	0.21	0.85	0.05	0.35	0.49	0.11	0.22	0.42	0.32	0.12	0.42
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
CIPW norm												
Or	7.50	7.39	6.74	7.52	7.74	6.54	6.44	6.62	6.36	7.38	6.70	6.42
Ab	29.76	29.97	29.43	27.98	28.31	27.60	27.36	27.59	27.53	30.27	27.94	27.36
An	22.41	22.44	23.39	22.32	21.50	22.37	22.73	22.34	22.66	22.73	22.17	22.45
Di _{wo}	6.50	6.58	6.35	7.50	7.97	7.94	7.98	8.02	8.09	6.35	8.07	8.19
Di _{En}	3.78	3.82	3.72	4.75	5.06	4.91	4.94	4.95	5.02	3.66	4.96	5.19
Di _{Fs}	2.41	2.44	2.32	2.27	2.39	2.55	2.57	2.59	2.58	2.39	2.63	2.46
Hy _{En}	9.88	9.53	9.45	1.11	0.29	7.04	6.62	6.36	6.25	9.26	6.03	2.38
Hy _{Fs}	6.29	6.10	5.91	0.53	0.14	3.65	3.44	3.33	3.21	6.06	3.19	1.13

Fe₂O₃^T is recalculated as FeO and Fe₂O₃ for CIPW norm.

2ob, Onpyung-ri basalt; 4cc, Seondolbawi basalt (S₈), spatter mount and intrusive, phase in (S₃); 4sb, Seondol basalt

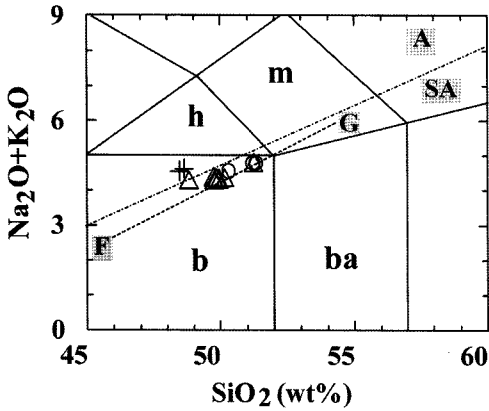


Fig. 4. Total alkalis vs. SiO₂ (wt.%) plot (Le Bas et al., 1986) of the volcanic rocks in the Seobjikoji area. The dividing line between alkali (A) and subalkalic (SA) magma series is from Irvine and Baragar (1971). Line F-G is division for tholeiitic and alkaline basalts in Hawaii (Macdonald and Katsura, 1964). [field] b: basalt, ba: basaltic andesite, h: trachybasalt (hawaiite), m: basaltic trachyandesite (mugearite). Symbols [○: Onpyung-ri basalt, △: Seondol basalt, and +: Seondolbawi neck basalt and spatter mount].

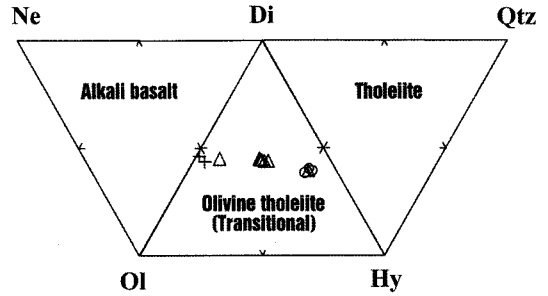


Fig. 5. Collapse of the basalt tetrahedron into the 2-dimension diagram of normative components ne-ol-di-hy-q (Hyndman, 1985). Symbols are the same as those in Fig. 4.

시료 S₉는 선돌분석구의 중앙부 선돌을 이루는 암경에서 채취되었으며(Fig. 3), 경하에서는 시료 S₈과 동일한 광물조성과 조직을 보인다. 특징적으로, 불투명광물의 치환에 의해 가상만을 가지는 감람석 반정과 그 중심부에 단사 휘석 반정을 볼 수 있다. 암경을 이루는 현무암에 대하여 한국기초과학지원연구원에 의뢰하여 측정된 결과 K-Ar전암 연대는 95±3ka이다.

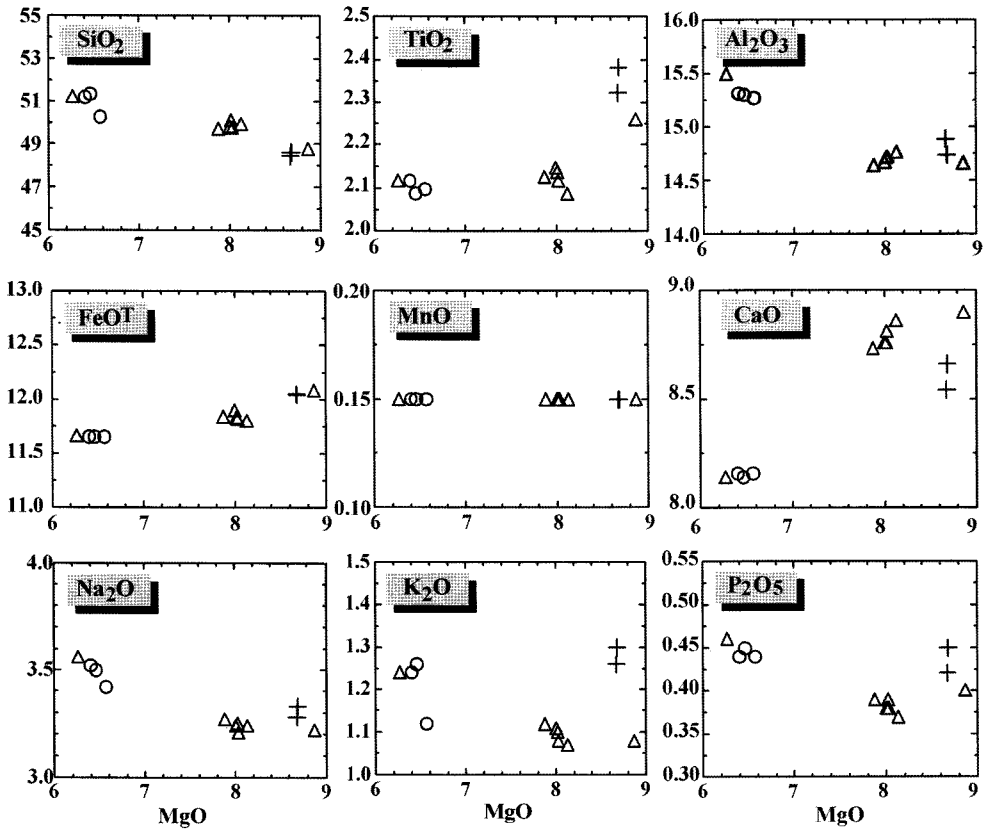


Fig. 6. MgO (wt.%) vs. major oxide diagrams of the basaltic rocks in the Seobjikoji area. Symbols are the same as those in Fig. 4.

시료 S₁₀은 선돌분석구의 동측에서 선돌분석구의 화산탄을 함유하는 흑색스코리아층을 덮고 있는 곳에서 채취되었다(Fig. 3). 이는 두께가 약 5m 정도의 용암류이며, 용암의 상부에 렌즈 형의 기공이 발달되고, 하부에는 둥근 형의 기공이 발달하고 있다. 이 용암류의 최상부는 제이동된 스코리아층과 토양으로 덮혀져 있다. 경하에서는 작은 사장석 래쓰들이 감람석 반정 주위에 배열되어 있으면서 전체적으로 약한 유동구조를 나타내는 필로텍시틱 조직을 나타낸다. 반정광물은 주로 감람석이며, 자형 내지 반자형, 또는 용식형으로 내부의 열극을 따라 부분적으로 변질된 양상을 보인다. 석기는 미세한 유색광물과 불투명 광물로서 구성되며 유동구조와 반상조직을 보인다.

시료 S₁₁은 섭지코지 해안가 위쪽에서 두께가 1~2m 정도인 8개의 용암류를 식별할 수 있는 곳에서 채취되었으며(Fig. 3), 각 용암류의 사이를 스코리아와 클링커로 채우고 있음을 볼 수 있다. 그리고 최상부 용암류 위에 토양이 덮고 있다. 6번째 용암류의 표면은 산화되어 있고 빵겉질 모양 형태를 이루고 있다.

3번째 용암류인 시료 S₁₁은 유리질 석기에 사장석 래쓰와 유색광물 결정이 들어있는 전형적인 하이알로오피틱 조직을 나타낸다. 유색광물은 미세한 별집구조를 나타낸다. 동일 암석 내의 박편에서 하이알로오피틱 조직에 인접하여 미세한 인터서탈 조직을 보이는 등 마그마혼합의 양상을 보이기도 한다. 감람석 반정은 결정의 외연부가 변질되어 불투명광물로 교대된 가상을 나타낸다.

시료 S₁₅은 섭지코지 해안절벽에서 나타나는 암회색의 비반상 현무암 용암에서 채취하였으며, 경하에서 반정으로 감람석을 가지며, 간혹 신장된 감람석 반정을 보이며, 석기는 미세한 인터서탈 조직을 보인다.

암석 화학

전암분석을 위한 분석시료의 제작은 오염을 피하기 위해 해머만을 사용하여 0.5~1cm 가량의 조각으로 만든 후 육안으로 신선한 것을 선택하였다. 그 다음에 암석에 있는 분말과 먼지를 제거하기 위해 증류

Table 3. Trace element abundances (ppm) of the basaltic rocks in the Seobjikoji area

Sample	S ₁	S ₂	S ₁₄	S ₈	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₅
Rock Type	2ob			4cc	4sb						
Sr	418.8	425.9	420.5	498.3	434.9	438.4	432.7	415.5	439.3	425.7	453.7
Ba	264.3	268.1	249.5	311.1	261.5	284.6	248.0	237.3	282.0	248.9	272.8
Li	7.7	7.7	6.9	5.0	6.8	6.4	6.5	6.8	6.3	6.2	6.5
P	1915.2	1919.0	1867.1	1972.8	1704.1	1653.5	1675.6	1646.8	1991.0	1706.3	1774.9
S	691.2	612.4	663.8	558.9	617.3	851.0	602.5	600.5	592.2	615.2	642.9
Sc	17.4	17.4	17.4	18.7	19.3	19.2	19.4	18.4	17.1	19.4	19.1
V	157.8	158.2	157.0	186.8	174.4	172.6	168.5	171.5	155.2	175.2	186.6
Cr	168.4	168.3	174.2	234.7	235.4	236.7	239.7	244.6	158.3	236.6	271.7
Zn	113.7	114.9	116.3	106.5	103.7	103.9	105.9	104.9	114.9	107.5	108.5
Zr	211.8	213.5	211.7	205.4	193.2	191.7	196.8	185.1	220.3	193.8	191.7
Co	56.8	50.5	73.8	62.4	63.7	63.3	63.3	60.8	47.2	68.5	62.5
Ni	106.4	107.6	114.2	188.1	149.5	148.5	145.6	152.8	98.8	146.3	179.1
Cu	52.7	54.9	42.1	38.6	51.7	49.4	52.6	51.3	50.3	54.8	45.2
Rb	30.2	30.2	26.8	30.2	25.9	25.8	26.9	25.3	30.4	28.3	23.4
Y	24.2	24.5	24.3	23.0	23.3	23.4	23.5	23.3	25.0	22.7	23.2
Nb	32.6	33.1	31.6	36.7	31.0	31.4	30.8	29.5	33.8	30.8	32.8
Mo	2.0	2.0	1.8	1.7	1.6	1.6	1.5	1.6	1.9	1.7	1.5
Cd	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Cs	0.4	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3
Hf	5.7	5.6	5.5	5.3	5.2	5.1	5.2	4.8	5.7	4.8	5.3
Ta	2.3	2.4	2.2	2.6	2.3	2.2	2.0	2.0	2.4	2.1	2.3
Pb	2.8	3.1	2.9	2.6	2.5	2.8	2.5	2.4	2.7	2.6	5.2
Th	4.5	4.6	4.4	4.5	4.2	4.0	4.2	4.0	4.7	3.8	4.1
U	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	0.8	0.9	0.8	1.0	0.8	0.9
Y/Nb	0.7	0.7	0.8	0.6	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7

Symbols are the same as those in Table 2.

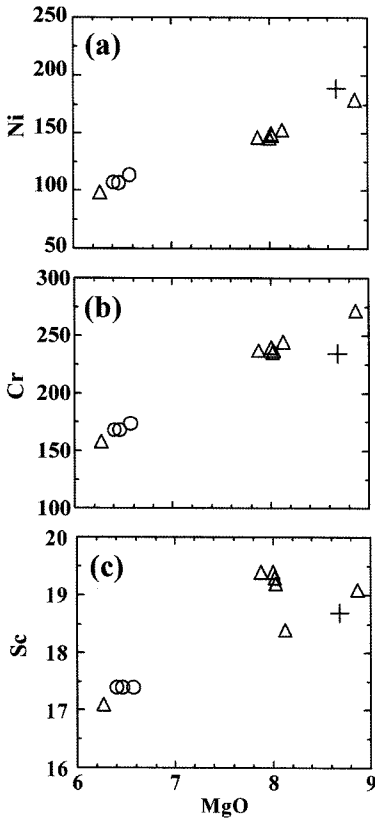


Fig. 7. Variation diagrams of compatible elements against MgO (wt.%) of the basaltic rocks in the Seobjikoji area. Symbols are the same as those in Fig. 4.

수로 완전히 세척하였고, 103°C의 오븐에서 12시간 이상 건조시킨 후, 부산대학교 공동실험실습관에 설치되어 있는 암석분쇄기에서 분말시료를 제작하였다.

암석의 화학적 특성을 밝히기 위해 채취한 시료중 신선한 대표적 시료 12개를 선택하였으며, 암석시료의 주원소 함량은 한국기초과학지원연구원 서울분소에서 X-선 형광분광분석기(XRF; Phillips PW2404)로 정량분석을 실시하였다. 노름(norm)계산을 위하여 FeO와 Fe₂O₃의 함량비는 Middlemost(1989)의 방법에 의하여 계산하였다. 그리고 미량원소와 희토류원소의 조성을 한국기초과학지원연구원 대전분소에서 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS)로 분석하였다.

주원소

본 연구 지역 용암류의 주원소 분석 결과와 CIPW 노름치는 Table 2와 같다.

본 연구 지역의 화산암의 분류와 명명은 (Na₂O +

K₂O)-SiO₂의 IUGS분류도(Le Bas et al., 1986)에 적용하였다. 용암류는 Irvine and Baragar(1971)의 구분선에 의하면 비알칼리 계열에 도시되나, MacDonald and Katsura(1964)의 구분선에 의하면 알칼리 계열인 현무암영역에 도시된다. 그러므로 본 용암류는 전이 현무암으로 분류될 수 있다(Fig. 4).

또한 연구지역의 화산암류는 SiO₂이 48.6~51.3wt.%와 MgO이 6.27~8.87wt.%의 범위를 나타낸다. 그리고 K₂O은 1.07~1.30wt.%의 비교적 균질한 분포를 보인다.

Yoder and Tilly(1962)는 현무암류를 투회석-사장석-감람석, 투회석-사장석-하이퍼신의 2면에서의 상대적 위치에 근거하여 노름 석영을 가지는 쏘레이아이트, 노름 석영이나 감람석의 유무에 관계없이 (투회석-사장석-하이퍼신 면상에 위치하는) 노름 하이퍼신을 갖는 하이퍼신현무암, 노름 석영이나 네펠린이 없는 노름 하이퍼신과 감람석을 가지는 감람석 쏘레이아이트, 노름 감람석만 가지면서 투회석-사장석-감람석 면상에 위치하는 감람석 현무암 그리고 노름 네펠린을 가지는 알칼리현무암으로 분류하였다. 연구지역의 현무암에 대한 노름계산 결과(Table 2)에 의하면, 감람석 + 투회석-하이퍼신 조성을 가지는 감람석 쏘레이아이트(즉, 전이 현무암)의 조성을 가지기도 한다 (Fig. 5).

연구 지역 화산암류의 분화경향은 알아보기 위하여 분화지수로서 MgO를 이용하여 주원소 특징을 살펴 보았다(Fig. 6). 본 연구 지역의 현무암은 MgO가 8.87wt.%에서 6.27wt.%로 감소함에 따라, CaO(8.80~8.14wt.%)는 감소하는 반면, SiO₂(48.6~51.3wt.%), Al₂O₃(14.64~15.49wt.%), Na₂O(3.21~3.56wt.%)는 점진적으로 일정하게 증가하는 경향을 나타내는데, 이는 사장석이 주된 정출광물이 아니었음을 나타낸다. 비교적 좁은 범위의 SiO₂변화에 대하여 MgO성분의 변화가 큰 것은 감람석과 단사회석의 정출이 분화작용에 주된 영향을 미쳤음을 지시한다. K₂O는 1.07 wt.%~1.30wt.%로 P₂O₅는 0.37wt.%~0.45wt.%로 증가하는 경향을 보이는데, 이는 이들 원소가 일반적으로 현무암질 마그마 용액에서 정출하는 사장석, 감람석, 단사회석과 무관한 불호정성원소이기 때문이다.

미량원소

연구지역 화산암류에 대한 미량원소의 함량은 Table 3과 같다.

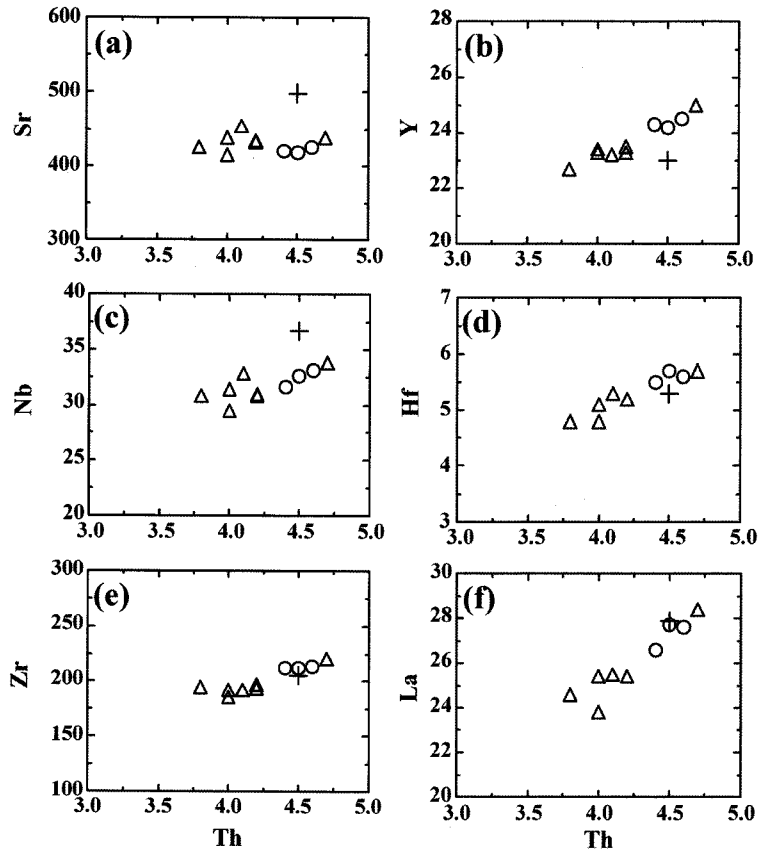


Fig. 8. Variation diagrams of incompatible elements against Th of the basaltic rocks in the Seobjikoji area. Symbols are the same as those in Fig. 4.

호정성 미량원소: 페리도타이트 맨틀-현무암 용융체의 마그마 생성계에서 Ni, Cr, Co, Sc, Cu 등은 호정성 원소이며, 페리도타이트 맨틀에서 부분용융이 발생하여 현무암 용융체가 형성될 때, 이러한 성분들은 잔류 고상 맨틀 중에 부집된다. MgO 함량이 8.87~6.27wt.%의 변화 범위를 가지는 본 연구지역 용암류에 대한 호정성 원소의 변화는 MgO 함량 변화에 대하여 비교적 뚜렷한 정(+)의 상관 관계를 가지며, MgO 함량이 감소함에 따라 Ni와 Cr함량은 급격하게 감소하는 데, 이는 감람석, 휘석과 같은 초기 정출 광물의 분별결정작용을 반영한다고 볼 수 있다. 그리고 MgO 함량이 감소함에 따라 Sc함량도 같은 경향을 잘 보여 주고 있다(Fig. 7).

불호정성 미량원소: 페리도타이트 맨틀-현무암 용융체의 마그마 생성계에서 Rb, Ba, Th, Sr, Zr, Hf, 및 Y 등은 불호정성을 나타내는 원소이다. Zr, Y과

같이, 풍화나 변질 작용에 영향을 크게 받지 않은 Th를 마그마 분화 척도로 사용하여, 연구 지역 화산암류의 불호정성 미량원소에 대한 변화 경향을 나타내었다(Fig. 8). 본 현무암의 Ba, Zr, Rb, La, Nb의 변화는 Th의 변화에 대해 뚜렷한 정(+)의 상관 관계를 보인다. 이는 이 원소들이 현무암질 마그마에서 정출된 광물들에 대해 불호정성이기 때문이다.

희토류원소

연구지역의 화산암류에 대한 희토류원소 함량은 Table 4와 같다.

콘드라이트값(Taylor and McLennan, 1985)으로 표준화된 희토류원소 함량 변화는 HREE에 비해 LREE가 더 부화된 패턴을 가진다. 그리고 희토류원소의 총량($\Sigma\text{REE}+\text{Y}$)은 152 ppm~175 ppm에 이른다. 특히 HREE의 비가 10이하(약 7 정도)로 마그마의 근원물질이 소량의 석류석을 포함하고 있었음을 알

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

Sample	S ₁	S ₂	S ₁₄	S ₈	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₅
Rock Type	2ob			4cc	4sb						
La	27.7	27.6	26.6	27.9	25.4	25.4	25.4	23.8	28.4	24.6	25.5
Ce	54.3	53.5	52.7	54.6	48.9	49.2	49.6	47.0	55.1	48.7	48.7
Pr	6.8	6.8	6.7	7.0	6.3	6.3	6.3	6.1	6.9	6.2	6.2
Nd	28.7	28.6	27.9	29.1	26.6	26.7	26.6	25.4	29.3	26.0	26.9
Sm	6.7	6.7	6.5	6.9	6.3	6.7	6.4	6.1	7.2	6.2	6.4
Eu	2.3	2.3	2.2	2.3	2.2	2.2	2.1	2.0	2.4	2.1	2.2
Tb	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.1	1.0	1.0
Gd	6.8	6.8	6.5	6.6	6.7	6.5	6.5	6.1	7.0	6.3	6.7
Dy	5.8	5.9	5.6	5.3	5.6	5.5	5.6	5.2	5.9	5.4	5.6
Ho	1.1	1.1	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	1.1	0.9	1.0
Er	2.6	2.6	2.5	2.4	2.6	2.5	2.5	2.4	2.8	2.4	2.7
Tm	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3
Yb	2.1	2.1	2.1	1.9	2.1	2.0	2.1	2.0	2.2	1.9	1.9
Lu	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
ΣREE	146.6	145.7	141.9	146.5	135.3	135.6	135.6	128.5	150.1	132.3	135.4
ΣREE+Y	170.8	170.2	166.4	171.0	158.6	159.0	159.1	151.8	175.1	155.0	158.6
La/Yb	13.2	13.1	12.7	14.7	12.1	12.7	12.1	11.9	12.9	12.9	13.4
Zr/Nb	6.5	6.5	6.7	5.6	6.2	6.1	6.4	6.3	6.5	6.3	5.8
Sm/Nd	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
(La/Yb) _N	8.9	8.9	8.6	9.9	8.2	8.6	8.2	8.0	8.7	8.7	9.1

Chondrite value used in normalizing REE from Taylor and McLennan (1985).

Symbols are shown in Table 2. $(La/Yb)_N = (La/0.367) \times (0.248/Yb)$.

수 있다(Fig. 9). 한편, Eu의 부(-)이상은 나타나지 않으며, $(La/Yb)_N$ 비는 8.0~9.9에 이른다. 온평리 현무암과 선돌 현무암 그리고 선돌바위(암경) 현무암의 변화 패턴이 거의 나란한 것을 볼 수 있다. 그리고 REE패턴에서 MgO 함량이 감소함에 따라 La/Yb비가 거의 일정함을 볼 수 있다(Fig. 10). 이는 본 연구 지역의 현무암들이 동일마그마에서 기원하였음을 알 수 있다.

조구적 위치 및 암석성인 고찰

조구적 위치

이미 Lee(1982)는 제주도 알칼리 화산암류의 전암 화학성분이 하와이의 것과 유사함에 주목하여, 제주도의 화산활동이 판내부 열점에서 형성된 것으로 해석한 바 있다. 본 연구지역 화산암류는 Ti-Zr-Y 함량비에 의한 조구적 위치 판별도(Pearce and Cann, 1973)에서 지판 내부 현무암 영역(WPB)에 도시되고, Th-Ta-Hf 성분비에 의한 현무암류 및 그 분화물들의 조구적 위치 판별도(Wood et al., 1980)에서는 지판

내부 환경의 알칼리 현무암류와 쏘레이아이트 현무암 영역의 중간인 전이적 현무암류에 도시된다(Fig. 11).

암석성인 고찰

본 연구 지역 현무암의 미량성분 원소의 조성 특징을 원시 맨틀값(Sun, 1982)으로 표준화한 거미성분도에서, 미량원소 변화 패턴은 Rb, Ba, 및 Th과 같은 LIL 원소가 부화된 반면, 석류석에 호정적인 Y와 Yb, 휘석에 호정적인 원소인 Sc으로 감에 따라 감소하고 감람석과 휘석류에 호정성이 있는 Ni과 Cr은 원시 맨틀에 비하여 결핍된 특징을 나타낸다(Fig. 12). 이는 하와이의 전형적인 알칼리현무암(코할라 및 후알라라이)의 조성 변화(Wilson, 1989)와 매우 유사한 경향을 나타낸다.

이상에서와 같이 연구 지역 현무암류는 미량성분 원소의 조성에 근거하면, 지판내부의 조구적 위치에서 형성된 화산암류임을 지시한다. 한편 MgO의 함량이 감소함에 따라 Zr/Nb비가 증가함을 보이고 있고, Th의 함량이 감소함에 따라 Sm/Nb비가 일정함을 보여 주고 있다(Fig. 13). 이는 본 연구 지역 현무

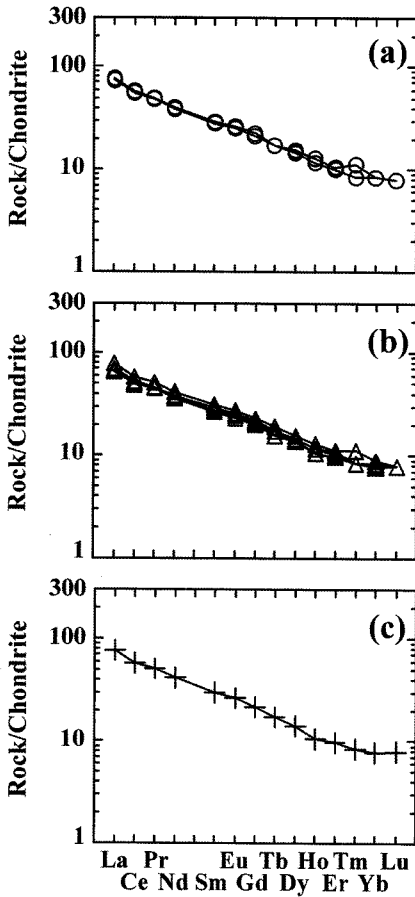


Fig. 9. Chondrite normalized rare earth element patterns of the basaltic rocks in the Seobjikoji area (Taylor and McLennan, 1985). (a) Onpyung-ri basalt, (b) Seondol basalt, and (c) Seondolbawi neck basalt. Symbols are the same as those in Fig. 4.

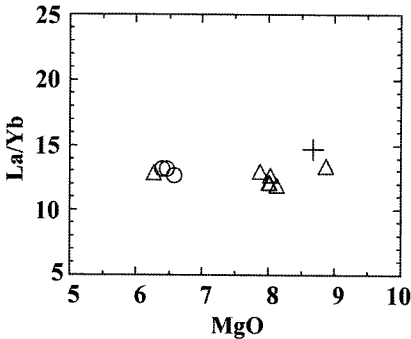


Fig. 10. MgO (wt.%) vs. La/Yb diagram of the basaltic rocks in the Seobjikoji area. Symbols are the same as those in Fig. 4.

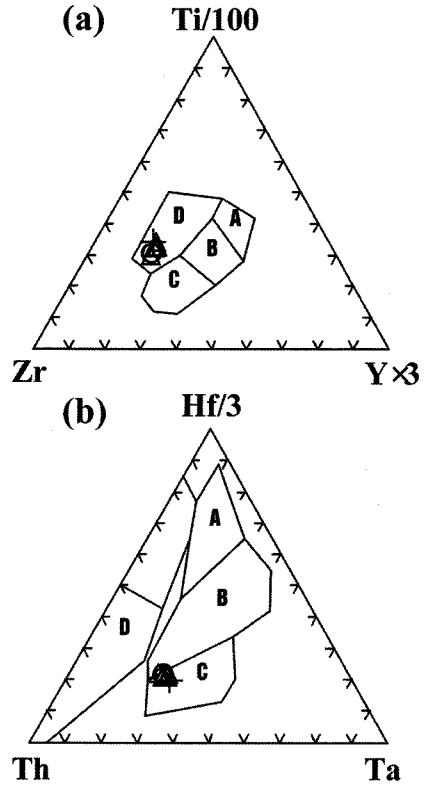


Fig. 11. Tectonic discrimination diagrams of the basaltic rocks in the Seobjikoji area. (a) Zr-Y-Ti diagram (after Pearce and Cann, 1973) [Field A: low potassium tholeiites (LPT), B: ocean floor basalt (OFB), C: calc-alkaline basalts (CAB), D: within plate basalts (WPB)] and (b) Th-Ta-Hf/3 diagram (after Wood, 1980) [Field A: N-type MORB, B: E-type MORB and tholeiitic WPB, C: Alkaline WPB, D: Destructive plate margin basalts]. Symbols are the same as those in Fig. 4.

암류의 모마그마의 화학 조성이 일정함을 나타내고 있다. 전형적인 상부맨틀의 평형상태에서 만들어진 초생 마그마의 조성은 높은 Mg값($=Mg^{2+}/(Mg^{2+} + Fe^{2+})$)(0.7 이상), 높은 Ni(400~500 ppm 이상) 및 Cr 함량(1000 ppm 이상)과 낮은 SiO_2 (50% 이하)의 특징을 가진다. 본 연구 지역 현무암류는 MgO가 6.27~8.87wt.%, Al_2O_3 가 14.64~15.49wt.%로 Mg값이 0.6 이하이고, 또한 Ni과 Cr의 함량이 각각 189 ppm, 272 ppm 이하의 낮은 함량을 가지므로, 현무암을 형성한 마그마가 초생마그마가 아니었음을 지시한다.

MgO가 감소함에 따라, CaO는 감소하는 반면에

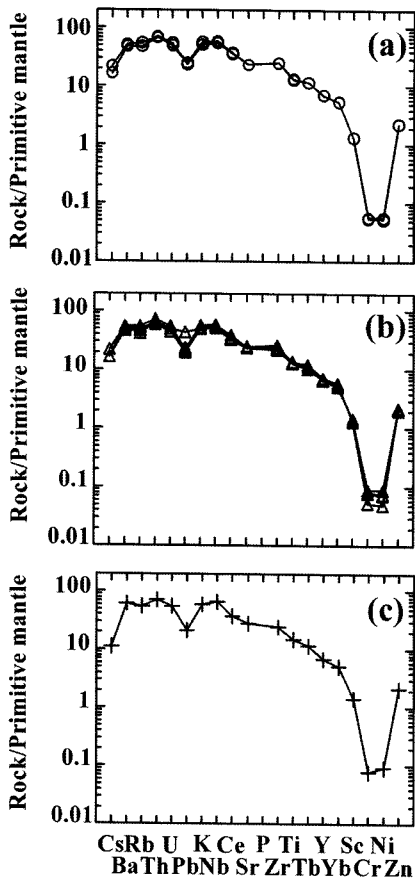


Fig. 12. Primitive mantle-normalized spider diagrams for alkali basaltic rocks in the Seobjikoji area. (a) Onpyung-ri basalt, (b) Seondol basalt, and (c) Seondolbawi neck basalt. Symbols are the same as those Fig. 4.

SiO₂, Al₂O₃, Na₂O는 점진적으로 일정하게 증가하는 경향을 나타내므로, 감람석과 단사회석의 정출이 분화작용에 주된 영향을 미쳤음을 보여준다. 또 MgO가 감소함에 따라 Cr과 Ni은 양(+)의 상관을 보이며 급격한 감소를 나타내고 있다. Th함량에 대한 불호정원소의 변화경향에서, Sr, LREE, Zr, Hf, Rb, Ba 및 Nb함량은 뚜렷한 정(+)의 상관을 나타내고 있다.

MgO에 대한 CaO/Al₂O₃의 성분도(Fig. 14)와 비교적 좁은 범위의 SiO₂ 변화에 대하여 MgO성분의 변화가 큰 것, MgO 함량이 감소함에 따라 호정성 미량원소인 Ni과 Cr함량은 급격하게 감소하는 경향 등으로부터 단사회석의 분별정출효과가 크게 작용하였음을 나타낸다. 즉 본 연구 지역의 현무암의 진화에 있어서 단사회석의 역할이 주요했음을 지시한다고 사료된다. 아울러 (La/Yb)_N 비는 8.0-9.9로 HREE에 비

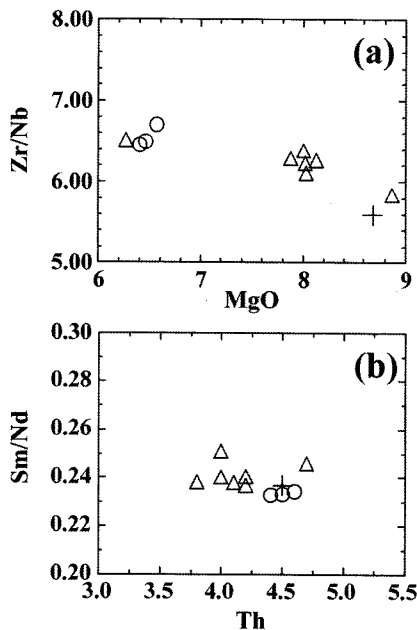


Fig. 13. (a) MgO (wt.%) vs. Zr/Nb and (b) Th vs. Sm/Nb diagrams of the for basaltic rocks in the Seobjikoji area. Symbols are the same as those in Fig. 4.

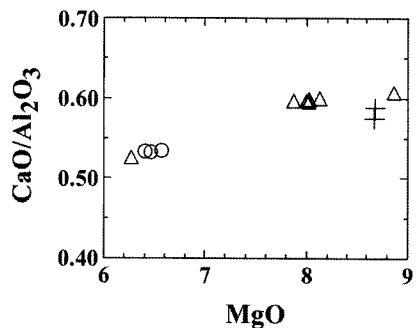


Fig. 14. MgO (wt.%) vs. CaO/Al₂O₃ diagram showing mineral fractionation of the basaltic rocks in the Seobjikoji area. Symbols are the same as those in Fig. 4.

하여 LREE가 더 부화된 패턴을 갖는 콘드라이트값으로 표준화된 희토류원소 함량변화와 Eu의 부(-)이상은 나타나지 않으므로 사장석의 분별정출효과는 매우 미약한 것으로 판단된다.

그리고 온평리 현무암, 선돌 현무암 및 선돌바위(암경) 현무암의 희토류원소 함량 변화 패턴이 거의 나란하며, La/Yb 비가 거의 일정함을 나타내므로 연구지역내 현무암은 거의 동일한 마그마로부터 기원한 현무암임을 보여주고 있다.

결 론

제주도 동부지역 섭지코지 일원에 분포하는 선돌 분석구와 그 주변의 현무암을 대상으로, 암석기재, 주원소 및 미량원소의 특성 등을 분석하여 선돌 분석구의 화산과정과 현무암의 구조적 위치 및 마그마의 성인을 검토하였다.

선돌 분석구의 하부는 스펙터 위주로, 그 상부는 적갈색 화산탄을 포함하는 화성쇄설물질이 우세하며 최상부 표층부에는 암흑색의 스크리아가 다량 존재한다. 그리고 중심부에는 화산암경으로 현무암이 정치되어 있다. 이 화산작용은 스트롬볼리 분출상에 의해 진행되었으며 마지막에는 하와이 용암 분출상으로 용암이 분화구를 충전한 후 북서쪽으로 흘러넘치면서 분석구를 파괴하고 북쪽으로 흘러 용암델타를 형성하였다.

연구 지역의 현무암은 전이 현무암으로 분류될 수 있으며, 감람석과 단사회석의 정출이 분화작용에 주된 영향을 미쳤음을 보여주며, 동일마그마에서 기원하였음을 보여주고 있다. 이들은 판내부 현무암에 해당한다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의해 연구되었다. 이 논문에 대해 유익한 지적을 해주신 이문원 교수님과 세심한 지적과 건설적인 비평과 제안을 해 주신 안건상 교수와 익명의 심사자께 감사드린다.

참고문헌

- 고정선, 윤성효, 현경봉, 이문원, 길영우, 2005, 제주도 우도 단성화산의 현무암에 대한 암석학적 연구. *암석학회지*, 14(1), 45-60.
- 고정선, 윤성효, 정은주, 2007, 제주도 성산일출봉 일대 현무암에 대한 암석학적 연구. *한국지구과학회지*, 28(3), 324-342.
- 김봉균, 1969, 제주도 신양리 및 고성리 지구의 신양리층에 대한 층서 및 고생물학적 연구. *지질학회지*, 5, 103-122.
- 원종관, 1976, 제주도 화산암류에 대한 암석학적 연구. *지질학회지*, 12, 207-226.
- 원종관, 이문원, 이동영, 손영관, 1993, 성산도폭 지질설명서. 건설부/제주도, 수자원공사, 59 p.
- 원종관, 이문원, 이동영, 윤성효, 고보균, 1995, 표선도폭 지질도 설명서. 건설교통부, 한국수자원공사, 59 p.
- 원종관, 이문원, 윤성효, 고보균, 1998, 제주도 남동부 표선지역 화산암류의 지구화학적 특징. *지질학회지*, 34, 172-191.
- 윤성효, 원종관, 이문원, 고정선, 이정숙, 1997, 제주도 동부지역의 솔레이아이트 암류에 대한 암석학적 연구. *한국암석학회 발표요약문*, 14, 42 p.
- 윤성효, 고정선, 안지영, 1998, 제주도 동부 알칼리 현무암 내 스피넬-레졸라이트 포획체의 연구. *자원환경지질*, 31(5), 447-458.
- 윤성효, 고정선, 박정미, 2002, 제주도 남동부 태흥리 용암에 대한 암석학적 연구. *암석학회지*, 11(1), 17-29.
- 이정숙, 1998, 제주도 동부지역의 솔레이아이트 용암류에 대한 암석학적 연구. 부산대학교 교육학석사 학위논문, 52 p.
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, *Volcanic successions: Modern and ancient*. Allen and Unwin, London, UK, 528 p.
- Fisher, R.V. and Schmincke, H-U., 1984, *Pyroclastic Rocks*. Springer-Verlag, Berlin, Deutschland, 472 p.
- Guest, J.E., Huntingdon, A.T., Wadge, G., Brander, J.L., Booth, B., Carter, S. and Duncanet, A., 1974, The recent eruption of Mount Etna. *Nature*, 250, 385-387.
- 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. *Earth Sciences*, 8, 523-548.
- Kokelaar, P., 1986, Magma-water interactions in subaqueous and emergent basaltic volcanism. *Bulletin of Volcanology*, 48, 275-289.
- 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*. The Science Report of Tohoku University, Series 3, 15, 177-206.
- Macdonald, G.A. and Katsura, T., 1964, Chemical composition of Hawaiian lavas. *Journal of Petrology*, 5, 82-133.
- Middlemost, E.A.K., 1989, Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chemical of Geology*, 77, 19-26.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R., 1973, Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, 19, 290-300.
- Self, S., Sparks, R.S.J., Booth, B. and Walker, G.P.L., 1974, The 1973 Heimaey Strombolian scoria deposits, Iceland, *Geological Magazine*, 111, 539-548.
- Sheridan M.F. and Wohletz, K.H., 1983, Hydrovolcanism: Basic considerations and review, In: *Explosive Volcanism* (eds) M.F. Sheridan and F. Barberi, *Journal of Vol-*

- canology and Geothermal Research, 17, 1-29.
- Sun, S.S., 1982, Chemical composition and origin of the earth's primitive mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46, 179-192.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985, The continental crust: its composition and evolution. Blackwell, Oxford, UK, 312 p.
- Wilson, M., 1989, *Igneous petrogenesis*. Unwin Hyman, London, UK, 466 p.
- Wohletz, K.H. and Sheridan, M.F., 1983, Hydrovolcanic explosions. II. Evolution of basaltic tuff rings and tuff cones. *American Journal of Science*, 283, 385-413.
- Wohletz, K.H., and McQueen, R.G., 1984, Experimental studies of hydromagmatic volcanism, In: *Explosive volcanism: Inception, evolution, and hazards, Studies in geophysics*. National Academy press, Washington, D.C., USA, 158-169.
- Wood, D.A., Joron, J.L., and Treuil, M., 1980, A reappraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings. *Earth and Planetary Science Letters*, 45, 326-336.
- Yoder, H.S., Jr., and Tilly, C.E., 1962, Origin of basalt magma: an experimental study of natural and synthetic rock systems. *Journal of Petrology*, 3, 342-532.

2007년 3월 15일 접수
 2007년 4월 23일 수정원고 접수
 2007년 6월 7일 채택