

## 제주도 한라산 백록담 분화구 일대 화산암류의 암석학적 연구

고정선<sup>1</sup> · 윤성호<sup>1,\*</sup> · 강순석<sup>2</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 지구과학과, 부산광역시 금정구 장전동 산30번지

<sup>2</sup>제주도 민속자연사박물관

## Petrology of the Volcanic Rocks in the Paekrogdam Crater area, Mt. Halla, Jeju Island

Jeong Seon Koh<sup>1</sup>, Sung Hyo Yun<sup>1,\*</sup> and Soon Seok Kang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Earth Sciences, Graduate School, Pusan Nat'l University, Busan, 609-735 Korea

<sup>2</sup>Jeju-do Folklore and National History Museum, Jeju Province, Korea

**요약:** 백록담을 구성하는 암석은 백록담의 정상 서반부를 이루는 백록담조면암, 백록담 정상 동반부를 이루는 백록담조면현무암, 그리고 만세동산역암으로 구성된다. 백록담 일대 분화구의 사면에서 발달된 질리계는 백록담 분화구를 중심으로 방사상 또는 동심원상의 질리계를 발달시키고 있다. 백록담 분화구는 백록담조면암의 돛 정지 이후 화산체의 동쪽에서 백록담조면현무암의 스킨리아층 및 용암류를 분출시켜 형성된 산정 화구호이다. 백록담조면현무암은 분출 초기에는 수성 화산활동을, 그 후 스트롬볼리안 분출을 하였으며, 마지막에 하와이형으로 변하면서 백록담조면현무암을 형성하였다. 백록담 일대에 분포하는 용암류의 SiO<sub>2</sub> 함량 범위는 48.0~67.4 wt.%의 넓은 범위를 보이며, 특징적으로 SiO<sub>2</sub> 53.7~60.7 wt.%의 암석이 결여되어 있고, SiO<sub>2</sub> 53.7 wt.% 이하의 염기성 암석과 60.7 wt.% 이상의 펠식 암석으로 구성되는 바이모달의 양상을 보인다. 백록담 일원의 용암류의 주성분 원소 특징은 염기성암류에서는 단사휘석, 자철석과 티탄철석의 정출이, 펠식암류에서는 사장석과 인회석의 정출이 중요한 영향을 하였음을 나타낸다. 미량원소 및 희토류원소의 조성 특징으로 볼 때, 백록담일대의 조면현무암류를 형성시킨 마그마가 석류석-페리도타이트 맨틀이 부분용융되어 형성된 마그마로부터 진화하여 유래하였음을 시사하며, 유라시아 대륙 동연부의 지판내부의 지체구조적 환경에서 생성되었음을 지시한다.

**주요어:** 백록담, 산정분화구, 조면암, 조면현무암, 지판내부환경

**Abstract:** The Paekrogdam summit crater area, Mt. Halla, Jeju Island, Korea, composed of Paekrogdam trachyte, Paekrogdam trachybasalt, and Manseidongsan conglomerate in ascending order. Joint systems show concentric and radial patterns around the summit crater wall. The Paekrogdam crater is a summit crater lake which erupted the tuffs, scorias and lava flows of Paekrogdam trachybasalt after the emplacement of Paekrogdam trachyte dome. SiO<sub>2</sub> contents of mafic and felsic lavas are respectively, 48.0~53.7 wt.% and 60.7~67.4 wt.%, reflecting bimodal volcanism. And lavas with SiO<sub>2</sub> between 53.7 wt.% and 60.7 wt.% are not found. According to TAS diagram and K<sub>2</sub>O-Na<sub>2</sub>O diagram, the volcanic rocks belong to the normal alkaline rock series of alkali basalt-trachybasalt-basaltic trachyandesite and trachyte association. Oxide vs. MgO diagrams represent that the mafic lavas fractionated with crystallization of olivine, clinopyroxene, magnetite and ilmenite and felsic trachyte of plagioclase and apatite. The characteristics of trace elements and REEs shows that primary magma for the trachybasalt magma would have been derived from partial melting of garnet peridotite mantle. In the discrimination diagrams, the volcanic rocks are plotted at the region of within plate basalt (WPB).

**Key words:** Paekrogdam, Summit crater, Trachyte, Trachybasalt, Within plate basalt.

\*Corresponding author: Tel. 82-51-510-2723, E-mail. yunsh@pusan.ac.kr

## 서 론

제주도는 북동동-남서서 방향의 장축(74 km)과 북북서-남남동 방향의 단축(32 km)을 갖는 타원형의 화산섬으로 면적은 1,825 km<sup>2</sup>이다. 제주도 전역에는 360여 개의 작은 화산체(오름: 분석구, 응회환/응회구, 용암돔의 일부 포함)가 분포하고 있다. 이들은 한라산을 중심으로 대체로 동측과 서측에 밀집되어 분포한다. 섬의 중앙부에는 해발고도 1950.1 m의 한라산이 위치하고, 정상에는 분화구 호수인 백록담이 있으며, 분화구의 서측부는 백록담조면암이 관입하여 만들어진 돔(dome)상 용암류로 구성되고, 동측부에는 이후 분출한 백록담조면현무암 분석(噴石)과 용암류(熔岩流)가 분포하여 산정 분화구 호수(山頂 噴火口 湖水: summit crater lake)를 이루고 있다.

제주도의 화산활동은 열점 활동이며(Lee, 1982; 박준범, 1994), 지화학적으로 알칼리암 계열로 분류되는 다량의 현무암질 용암류와 비알칼리 계열의 솔리아이트질 안산암 용암류가 소량 분포하고 있다(원종관, 1976; Lee, 1982; 박준범과 권성택, 1991; 원종관 등, 1995, 1998; 박준범 등, 1999; 장광화 등, 1999; 윤성효 등, 2002). 제주도는 120만년전부터 약 100만년 이상의 기간동안 여러 분화구에서 분출한 분출물로 형성된 섬이며, 주로 접근이 용이한 해안저지대 주변을 중심으로 암석학적 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 한라산국립공원으로 지정된 한라산 산정 백록담 일대에 분포하는 화산분출물중 용암류를 주 대상으로, 지표조사를 통하여 화산층서를 밝히고, 각 용암류의 조성분, 미량성분 및 희토류원소의 함량 조성 특성, 그리고 백록담 일대의 지질구조 축적 분석 연구를 통하여, 백록담에서의 화산활동사와 화산암류를 형성한 마그마의 성인 및 지구조 환경을 밝히는 데 목적이 있다.

## 지질 층서

한라산국립공원 지역인 한라산 백록담 일원을 구성하는 화산암류는 하위로부터 상위로 감에 따라 보리악조면현무암, 한라산조면암, 백록담조면현무암, 법정동조면현무암, 윗세오름조면현무암, 만세동산역암으로 구성된다(박기화 등, 2000).

보리악조면현무암은 어리목 휴게소 계곡과 개미목 동측 관음사 등산로 대피소 부근에 분포하며, 상위의 한라산조면암과 백록담조면현무암, 법정동조면현무암에 의해 피복된다. 스킨리아와 휘석-장석을 포함하는

용암류와 회색 내지 암회색을 띠며, 1~10 mm 크기의 기공이 약 20% 정도 함유하고 있으나, 노두에 따라 변화가 크며, 부분적으로 기공이 2 cm 이내로 신장되어 있기도 하다. 장석 반정이 우세하고 휘석 반정을 함유한다. 보리악조면현무암의 K-Ar 전암 연령은  $58 \pm 3$  Ka (박기화 등, 2000)로 알려져 있다.

한라산조면암은 한라산 정상 백록담의 서반부 정상부를 점하고 있다. 한라산 정상에서 북북동쪽으로는 두께 30 m의 용암류로 관음사 등산로 능선을 이루고 있으며, 연장은 약 1 km에 이른다. 한라산 정상에서 북서쪽으로는 두께 50 m로 큰두레왓을 거쳐 작은두레왓으로 가면서 두께는 얇아진다. 윗세오름 대피소 부근의 계곡 바닥에서도 관찰된다. 백록담 남측사면의 하부에서는 심하게 풍화된 백록담조면암의 상부를 백록담조면현무암의 클링커가 피복하고 있다. 본 암은 회색, 담홍색, 담청색을 띠며 폭 1~2 m 내외의 수직절리가 발달하며, 백색의 알칼리 장석 반정을 함유하고, 흑색의 각섬석을 산점하기도 한다.

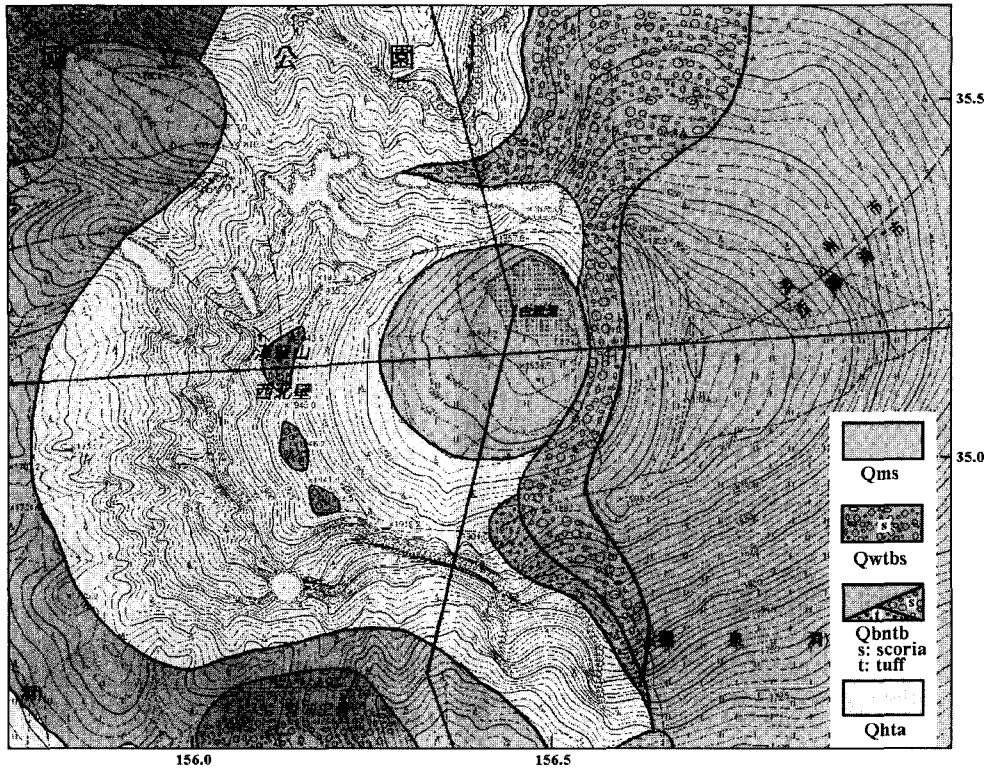
층서와 암질로 보아 한라산(백록담)조면암에 대비되는 영실조면암, 사라오름현무암질 조면안산암과는 일직선상으로 분포하여 동일 구조선 상에 위치하는 것으로 해석된다(박기화 등, 2000).

백록담조면현무암은 한라산 정상 동측부 정상으로부터 동쪽 일원에 넓게 분포하며, 하위의 암종을 피복한다. 백록담 동남측 내벽에서 유리질응회암 혹은 스킨리아층을 협재하고 한라산조면암을 피복한다.

법정동조면현무암은 윗세(죽은)오름(1690 m)과 윗세(누운)오름(1714 m)에서부터 분출하여 1100도로 주변에서 광범위한 분포를 하며, 한라산조면암과 보리악조면현무암을 피복한다. 회색 내지 암회색을 띤다. 반정광물은 장석이 우세하고 소량의 휘석과 각섬석을 함유한다. 크고 작은 분석구를 포함하는데, 분석구는 다공질의 분석과 용암피로 구성된다.

윗세오름조면현무암은 윗세(붉은)오름과 방애오름 등에서 분출한 용암과 분석들로서 구성되며, 법정동조면현무암과 한라산조면현무암을 피복한다. 용암의 두께는 1 m 내외이며 용암류 사이에 클링커와 스킨리아를 협재하면서 반복된 분출양상을 나타낸다. 윗세오름과 방애오름에는 화산탄을 함유하는 다량의 적갈색의 화산회, 분석들이 모여 분석구를 이루고 있으며, 화구에 인접한 부분에서는 고온에서 분출된 분석들과 용암 덩어리가 압착 용결되어 유상구조를 잘 보여준다.

만세동산역암은 한라산조면암의 서측 절벽 아래, 장구목 능선, 윗방애오름 능선 일대에 분포하며, 만세동산 서측의 외도천 상류바닥에 노출되며 두께 3 m 이



**Fig. 1. Geological map of the Paekrogdam area (modified from Park *et al.*, 2000).** Qhta, Hallasan trachyte (Paekrogdam trachyte); Qbntb, Paekrogdam trachybasalt (s, scoria; t, tuff); Qwtbs, Witseoreum trachybasalt; Qms, Manseidongsan conglomerate.

내로 연장은 약 500 m에 이른다. 역의 대부분은 한라산조면암으로 구성되며, 현무암 및 스크리아를 포함하고, 대부분이 역지지(礫支持)의 이동상을 보인다. 한라산조면암체에 가까운 곳(백록담 서측 절벽 아래, 장구목 능선, 옷방애오름 능선 일대 등)에는 백록담 정상부에서 떨어져 나온 애추성(崖錐性: talus) 역암이다.

### 백록담 구성암석의 암석기재

백록담을 구성하는 암석은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 백록담의 정상 서반부를 이루는 백록담조면암, 백록담 정상 동반부를 이루는 백록담조면현무암, 그리고 만세동산역암으로 구성된다.

한라산조면암군(박기화 등, 2000)에 속하는 백록담조면암은 회색을 띠며, 풍화면에서 담홍색을 띠거나 담청색을 띤다. 직경 1m 또는 2m 이내의 수직절리의 발달이 두드러진 것이 특징이며, 남측절벽 단면에서는 3회 이상의 용암분출 단위의 식별이 가능하다. 본 암은 백색의 장식(알칼리 장식)이 반정 또는 취반을 이

루고 있으며, 부분적으로 산화된 흑색의 각섬석이 산점하기도 한다. 기질부에서는 5 mm 크기의 사장석이 불규칙하게 배열되거나 또는 유동구조를 따라 배열하는 양상을 보인다.

본 암의 K-Ar 전암 연령은  $0.025 \pm 0.008$  Ma(Won *et al.*, 1986),  $0.07 \pm 0.01$  Ma(Tamanyu, 1990)으로 보고되어 있다. 백록담조면암은 윗세오름에서 바라다보면 아름다운 용암 도움구조를 나타내고 있는데, 이러한 도움구조는 조면암을 유출시킨 분화구의 화도(火道) 하부로부터 상부로 계속적인 마그마의 주입에 의해 서서히 밀면서 상승 팽창하는 내부로부터의 팽창에 의해 점점 커지게 되고, 외곽부는 냉각에 의해 수직 또는 주상절리가 발달하게 되고, 절리면을 따라 쪼개짐이 발달하게 된다(Fisher, 1979). 백록담 서측벽을 이루는 조면암에는 북서쪽 사면에서는  $N40^{\circ}\sim 45^{\circ}W$ , 수직경사, 그리고 서쪽과 남서쪽 사면에서는  $N78^{\circ}W\sim EW$ , 수직경사로 이어지는 절리면이 발달한다.

백록담조면현무암은 백록담 분화구의 동측을 접하여 분포하며 하부에는 유리질응회암과 스크리아층을 협재

하며, 용암과 용암 사이에는 클링커 또는 스코리아층을 협제한다. 용암의 두께는 화구벽의 동쪽 능선에서 2~3 m이나 화구벽의 외측 사면에서는 0.3~0.2 m로 얇아진다. 백록담조면암을 피복하는 유리질응회암은 담갈색~흑색의 함력사질층과 담황색의 니질층이 교호하며 사질엽암을 형성하고 있다. 사질엽층의 두께는 2~5 cm 정도이며, 급경사의 사층리가 발달하기도 한다. 화구벽 부근에서의 엽층의 경사각은 45°로 급경사를 이룬다. 사질엽층은 담황색의 각력상 암편(주로 조면암편)과 흑색의 유리질 물질로 구성되는데, 담황색의 각력상 암편은 크기가 0.3~1.1 cm이며, 다른 암편에 비하여 풍화가 심하여 쉽게 부서진다. 이 각력은 점이층리 및 역점이층리를 나타낸다. 이는 근원지 가까이에서 유래되어 짧은 시간 내에 퇴적된 것으로 해석된다. 흑색의 유리질 물질은 대부분이 미립 내지는 조립질이며, 1 cm 크기의 암편을 함유하는데, 원마가 되어있지 않은 각력상으로 수성분출활동의 산물로 해석된다. 니질층은 미립의 화산회로 구성되어 있으며 층의 두께는 1 cm 내외이다.

백록담조면현무암의 화산탄을 함유하는 스코리아층은 동쪽 화구벽의 하단부와 북쪽 관음사 등산로 정상부에 분포하며 용암류에 의해 피복된다. 그리고 백록담 서측의 1950 m 정상부, 1946.2 m 능선, 1944.9 m 능선부에 두께 10 m 이내로 산점하여 분포하면서 백

록담조면암을 피복하고 있다. 백록담 분화구벽 동남부에서는 용암류에 의해 피복되며 용암류의 유상구조는 N60°E, 23°SE; N11°E, 28°SE; N45°~50°E, 10°~20°SE이며 동쪽에서는 N20°W~N20°E, 10°~20°NE 또는 SE, 북동부에서는 N45°~60°W, 10°~20°NE로 나타나며, 전체적인 양상은 백록담 분화구에서 분출한 용암류가 한라산의 동쪽 산사면을 따라 유출된 것으로 해석된다. 본 암의 K-Ar 전암 연령은  $0.47 \pm 0.07$  Ma(Tamanyu, 1990)으로 보고된바 있으나, 이 연대는 상기의 조면암(0.025 Ma, 0.07 Ma)보다 오래된 연령으로, 백록담 조면현무암내에 백록담조면암편이 포획체로 잡혀있는 것과 야외지질조사에 의한 화산층서와는 불일치한다. 또한 박기화 등(2000)은 백록담 조면현무암의 K-Ar 전암 연령을 0.030 Ma(박기화 등, 2000)로 보고하였다. 이와 같은 절대연령 값의 차이는 K-Ar법을 이용하여 제주도 현무암류와 같이 너무 젊은 암석(일반적으로 1 Ma보다 젊은 암석)을 대상으로 측정하는 데는 오차가 큰 것으로 알려져 있다. 이 경우 신선한 암석에 대하여 Ar-Ar법에 의한 연대를 측정하는 것이 일반적이다. 박기화 등(2000)은 백록담조면현무암의 Ar-Ar연대를  $0.35 \pm 2.3$  Ka, 윗세오름조면현무암은  $0.167 \pm 2.5$  Ka로 보고하였으며, 측정값의 오차한계가 너무 큰 범위를 나타내나, 오차한계 범위내에서 백록담조면현무암과 윗세오름조면현무암의 형성연대는 최대 2,667년전~2,650년전

Table 1. Modal compositions of the volcanic rocks in the Paekrogdam area.

Sample	Ol		Cpx		Pl		Af		Opq		Ap	Ti	Gm	Rock Type
	ph	mph	ph	mph	ph	mph	ph	mph	ph	mph				
H1	--	0.3	--	1.1	0.3	0.5	17.7	7.0	--	0.7	--	0.1	72.1	Paekrogdam trachyte
H2	--	0.3	--	1.2	0.7	1.1	21.0	1.1	--	0.5	tr	tr	71.9	
H3	0.5	0.7	0.8	0.7	0.2	2.1	7.8	0.4	--	0.5	--	tr	86.3	
H6	0.4	0.7	--	0.4	4.5	0.8	14.8	4.1	--	0.4	0.1	tr	73.2	
H9	0.2	0.3	--	0.9	--	0.5	13.9	1.8	--	0.3	--	tr	82.0	
H4	2.8	1.4	0.5	0.6	9.1	2.6	0.4	0.6	--	0.4	--	--	81.4	Paekrogdam trachybasalt
H5	1.7	4.4	3.3	0.3	13.5	2.9	--	--	--	0.3	tr	--	73.4	
H7	0.1	3.6	1.2	5.8	6.1	13.5	--	--	--	--	--	--	69.5	
H8	0.6	0.9	0.1	1.4	17.4	2.6	0.4	0.5	0.3	0.5	--	tr	74.9	
H8-1	0.2	0.6	0.9	1.0	20.4	3.6	--	--	--	0.4	--	--	72.8	
H10	1.5	3.5	1.6	0.3	13.6	4.5	--	--	--	1.1	--	--	73.6	Witseeorum trachybasalt
H11	2.9	2.4	4.1	0.1	15.9	1.2	--	--	--	0.1	--	--	73.0	
H12	0.3	2.7	0.9	1.5	10.8	9.2	--	--	--	0.9	--	--	73.6	Peobjeongdong trachybasalt

mode point: 2000 points. tr: trace, --: not determined, Phenocryst: above 0.7 mm, Microphenocryst: 0.3~0.7 mm, Groundmass: less than 0.3 mm.

(Abbr.) Ol (olivine), Cpx (clinopyroxene), Pl (plagioclase), Af (alkali feldspar), Opq (opaque mineral), Ti (titanite), Gm (groundmass), ph (phenocryst), mph (microphenocryst).

이전으로, 제주도에서 측정된 가장 젊은 암석연령이며, 전체적인 화산층서와는 조화적임을 밝혀준다.

각 암석의 모우드 분석 결과는 Table 1과 같다.

### 백록담 일원의 지질구조

#### 광역지구조

제주도의 장축방향(N73°E)이 지난 200만년전부터 지속되어온 현생 지구조에서의 최대주응력축( $\sigma_1$ )에 평행하고, 단축방향(N17°W)이 최소주응력축( $\sigma_3$ )과 일치하고 있다는 사실은 200만년전부터 계속되어왔던 화산활동이 현생 지구조 응력장과 관련된 것으로 추정된다. 일반적으로 분석구(송이오름: scoria cone)를 형성시킨 마그마 분출은 열극(裂隙: fissure)을 따라 발생하며, 이러한 열극은 광역적인 지구조운동에 의해 형성된 구조선(構造線)에 해당하며, 지구조 응력장에서 장력(tensional stress) 또는 전단응력(shear stress)의 영향으로 형성되었을 것으로 해석된다.

제주도에 있어서 현생 지구조 체제를 고려해 볼 때, N40°E 또는 N80°W 방향의 전단 단열과 N70°E 방향의 인장 단열이 형성될 수 있는 조건을 갖추고 있으며, 제주도에 형성되어 있는 분석구들은 공간적으로 이런 방향의 단열(또는 열극)과 관련되어 분출된 것으로 추정된다(Fig. 2). 또 윤상규와 김원영(1984)는 제주도의 장축 방향을 따라 열곡대(rift valley)가 존재할 가능성을 제시한 바 있다.

한라산 정상부 백록담 주변 일대에서 (ㄱ) 영실조면암 - 백록담조면암 - 사라오름을 잇는 N70°E 방향, (ㄴ) 윗세오름 - 방에오름을 잇는 N50°W, (ㄷ) 방에오름군을 잇는 N10°W 방향들이 분석구의 분출을 촉발시킨 구조선으로 추정된다.

한라산 정상부 부근의 지표에서 확인된 지질구조는 아래와 같다.

(ㄱ) 한라산 정상부에서 관음사 등산로에 따라 분포해 있는 한라산조면암은 왕관바위 부근에서 용암층이 불연속되어 왕관바위로 이어지는데, 이 선은 백록담조면암 형성 이후의 선구조로 이 부위에 백록담조면현무암의 스크리아가 피복하고 있다. 이 선구조의 방향은 동서(EW)이다.

(ㄴ) 삼각봉 하부 관음사 등산로의 하천가에서 한라산조면암을 단절하는 수직단층이 노출되어 있고, 5m 정도 연장이 확인된다. 이 계곡 지점의 단층선은 장구목의 낮은 지점으로 이어진다. 이 단층과 평행하게 형성된 삼각봉 동측 계곡선을 경계로 한라산조면암의 두께가 양측의 한라산조면암에 비해 현저히 얇은 것으로

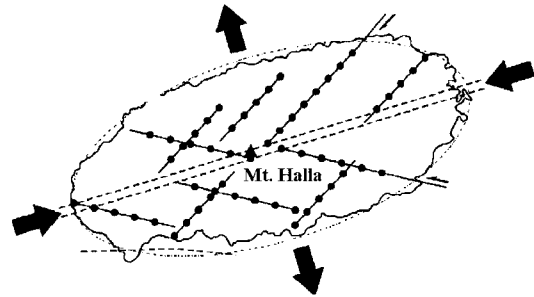


Fig. 2. Fracture forms of the Jeju island expected from recent tectonic stress regime. N40°E or N80°W trends: shear fracture, N70°E trend: extensional fracture.

보아 단층이 발달하는 것으로 추정된다. 이 단층의 방향은 N25°E로 관음사로 이어지는 계곡의 방향과 일치한다(박기화 등, 2000).

#### 백록담 일대의 지형

백록담의 지형 단면(Fig. 3)에서 보면, 서쪽 사면에서 지형 경사각은 상부로부터 45° → 35° → 30° → 20° → 10°로 낮아지며, 상부에서는 사면 불안정을 나타내는 반면, 동쪽사면에서는 15° → 20° → 10~15°로 비교적 완만한 경사를 나타내고 있다. 그리고 북쪽사면에서는 상부로부터 38° → 50° → 20°로 급경사를, 남쪽사면에서는 60° → 80° → 40° → 30° → 20°로 절벽의 상부와 중간부에서 급경사로 사면불안정을 나타내고 있다.

산정의 분화구는 장경(N86°E방향)이 585 m, 단경 375 m이고, 서쪽의 정상(1950.1 m)에서 북서쪽의 1935.2 m, 북쪽의 1857.5 m, 북동쪽의 1906.3 m, 동쪽의 1928.5 m, 동남쪽의 1893.0 m, 남쪽의 1918.0 m, 남서쪽의 1919.2 m, 1944.9 m, 1946.2 m의 외륜산 능선으로 둘러싸여 있고, 분화구 둘레의 길이는 1,720 m에 이른다. 외륜산릉으로부터 그 내부 분화구의 깊이는 111.9 m ~ 19.5 m로서 분화구 내의 가장 낮은 곳의 고도는 대략 1838 m이다. 분화구 호수인 백록담의 평상시 담수면적은 160 m × 100 m이며, 수면의 고도는 1839 m이며, 수심은 1~2 m 이내이다.

#### 백록담 일대의 절리계

백록담분화구 지역을 북서쪽, 서쪽, 남쪽, 북쪽 그리고 동쪽 사면으로 구분하여 백록담 일대 암석에서 측정된 약 100여 개의 절리계는 Table 2와 같다. 동쪽 사면은 주로 백록담 조면현무암 분포지역에서, 북쪽, 북서쪽, 서쪽 및 남쪽 사면은 백록담조면암 분포지에서 측정된 것이다(Fig. 4).

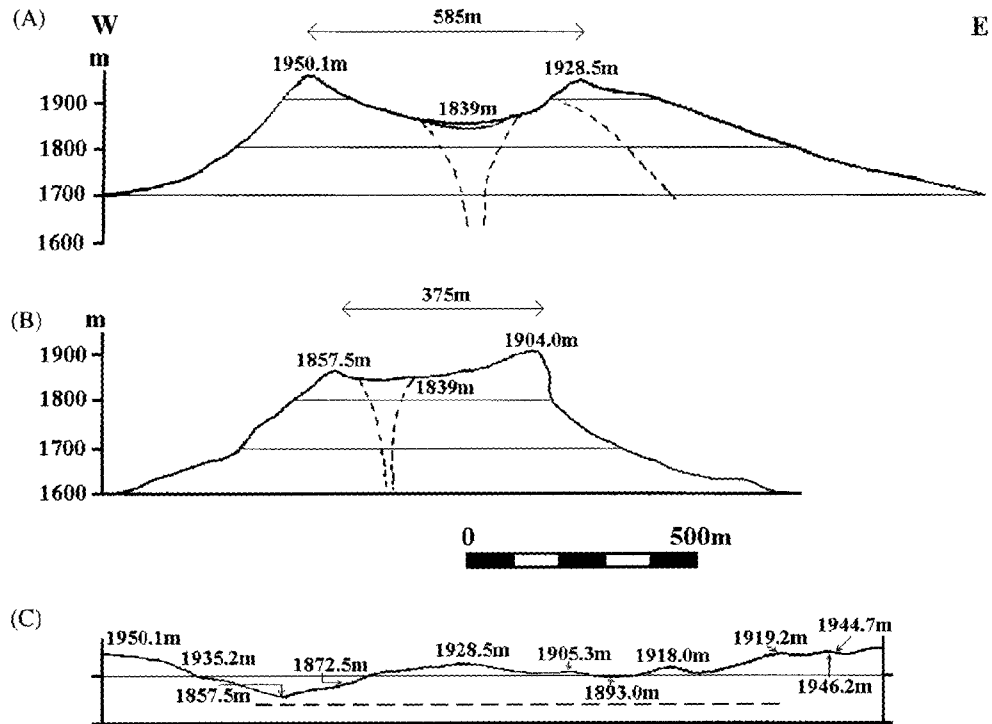


Fig. 3. Geomorphological section around the Paekrogdam summit crater area. (A) E-W section; (B) N-S section; (C) Variation of height around the crater walls. Section lines show in Fig. 1.

#### 1) 북서쪽 사면

이 지역은 백록담 서북벽 등산로 주변으로 주된 절리계의 방향은  $N45^{\circ}\sim 50^{\circ}W$ 와  $N45^{\circ}\sim 50^{\circ}E$  방향의 수직(주상)절리가 발달하면서 구성암석인 조면암은 심하게 풍화되어 있다.

#### 2) 서쪽 사면

이 지역은 NS 및  $N70^{\circ}E$ ,  $N80^{\circ}W$  방향의 절리계가 우세하며,  $N20^{\circ}E$ 와 함께 주상절리를 형성하고 있으며, 조면암은 절리면을 따라 심하게 풍화 침식되어 있다. 분화구의 외측 사면은 사면불안정으로 절리면의 하부에는 상부에서 떨어진 조면암의 에추 각력들과 풍화물이 분포하며 반세동산역암층을 형성하고 있다.

#### 3) 남쪽 사면

이 지역의 수직(주상)절리계는  $N70^{\circ}\sim 80^{\circ}W$  방향과  $N10^{\circ}W$  방향이 우세하며,  $N45^{\circ}E$ ,  $N10^{\circ}E$  방향 등이 발달하며, 크게  $N75^{\circ}W$  방향의 수직절벽을 이루고 있다.

#### 4) 북쪽 사면

이 지역은 백록담 분화구의 외륜산 중 가장 낮은 지

역으로  $N70^{\circ}W$  방향의 절리계와 더불어  $N10^{\circ}E$  방향의 수직절리계가 발달하며, 특징적으로  $N72^{\circ}E$ 의 주향에  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 의 경사각으로 북쪽으로 경사진 층상절리(sheeting joint)가 발달하여 있으며, 수직절리와 결합하여 원호파괴(circular failure)가 진행되는 가장 심하게 파괴된 지역이다. 이 층상절리는 암석의 풍화에 의하여 상부로부터의 하중의 제거에 기인하는 것으로 해석될 수 있다.

#### 5) 동쪽 사면

이 지역은 백록담조면현무암의 분포지역으로 주로 용암류의 유동방향에 따른 주향절리계(strike joint system)가 발달하며 경사는  $10^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 이다. 특징적인 수직절리계의 발달은 미약하다.

백록담 일대 분화구의 사면에서 발달된 절리계는 백록담 분화구를 중심으로 방사상 또는 동심원상의 절리계를 발달시키고 있다.

#### 백록담조면암 돔의 구조

규장질 화산암에서의 용암 돔의 형태는 Fig. 5에서와 같이 용기된 암전(岩栓)형(Upheaved plug), 침탑을

**Table 2. Joint analysis of the volcanic rocks in the Paekrogdam area.**

NW slope		W slope		S slope		E slope		N slope	
strike	dip	strike	dip	strike	dip	strike	dip	strike	dip
N55E	vertical	N70W	vertical	N35E	vertical	N60E	23SE	N86W	vertical
N28E	vertical	N80E	vertical	N65W	vertical	N11E	28SE	N85W	vertical
N45W	vertical	N64W	vertical	N78W	vertical	N45E	10SE	N80W	vertical
N55E	74NW	N85W	vertical	N76W	80NE	N50E	20SE	N80W	vertical
N45W	vertical	N80W	vertical	N70W	80SW	N78E	45SE	N80W	85NE
N40W	80NE	N12W	vertical	N65W	vertical	N45E	65SE	N80W	vertical
N42W	70NE	N10W	85SW	N70W	vertical	N10W	87NE	N84E	vertical
N40W	vertical	NS	85W	N10W	78NE	N30E	19SE	N70E	vertical
N42W	vertical	EW	vertical	N75W	vertical	N55E	12NW	NS	vertical
N45E	vertical	NS	80W	N10W	vertical	N50W	55NE	N10E	vertical
N35E	vertical	N86W	vertical	N30E	vertical			N80W	20NE
N50W	vertical	N78W	vertical	N15E	vertical			N75W	25NE
N35E	vertical	N82W	vertical	N65W	80SE			EW	20N
N48W	vertical	NS	80W	N30W	vertical			EW	10N
N45W	vertical	EW	vertical	N10W	vertical			N80W	15NE
N48E	78NW	N10W	vertical	N10E	vertical			NS	vertical
N25W	vertical	N8W	vertical	N70W	80SW			N55E	vertical
N30W	vertical	N70E	vertical	N25E	45SE			N75W	vertical
N45W	vertical	N70E	vertical	N50W	55NE			EW	85N
N55W	vertical	N72E	vertical	N32W	57NE			N10W	vertical
N45W	vertical	N24E	vertical	N65E	58SE				
N28E	vertical	N65W	70SW	N70W	vertical				
N40W	vertical	N55W	67NE	N10W	vertical				
N53E	70SE	N25E	87NW	N75W	vertical				
N45E	80NW	N80W	vertical	N55E	vertical				

수반하는 뾰족형 돔(Peleean dome), 낮은 용암돔(Low lava dome) 그리고 큐리형(熔岩流型: Coulee type)으로 구분할 수 있다(Blake, 1989). 한라산 산정부에서 돔구조를 나타내고 있는 백록담조면암체는 큐리형 용암 돔의 형태를 나타내고, 용암 돔의 외곽부에 발달하는 테일러스 에이프런(talus apron)은 침식 제거되고 그 내부의 용암류의 유동에 의한 수직 주상절리가 노출되어 있다(Fig. 6). 큐리형 용암돔에서는 분출한 용암돔의 일부가 급경사의 사면에서 하부로 이동함으로써 돔과 함께 용암류가 발달하는 돔이다. 이때 이동하는 용암류나 용암돔 내부에는 연속적인 돔의 성장으로 화도로부터 마그마가 유출됨에 따라, 먼저 만들어진 것은 외부로 밀려나게 되는 데 용암류의 외측부에서의 이동으로 인한 하부의 전단력에 의하여 램프구조(ramp structure)가 발달하기도 한다.

남측벽에서는 돔의 내부가 개석되어, 내부에서의 유동방향의 변화에 따른 3 종류의 절리계가 잘 관찰되며 하부에는 수평에 가까운 판상절리(platy joints)가 관찰

되는 데, 이는 돔 하부 부분의 전단력에 의한 것으로 응력의 상태를 보여주는 것이다. 비교적 오래된 개석된 용암 돔은 그 내부의 주상절리, 다각형 수직절리 또는 층상절리를 잘 노출시키고 있는 데, 이는 용암의 냉각과 유동방향에 연관된 응력을 반영하는 것이다. 특히, 주상절리는 돔의 냉각동안에 집적된 열적 응력(thermal stresses)을 반영하며, 그 직경은 냉각율에 비례하는 것으로 알려져 있다.

### 백록담의 형성 및 화산활동사

한라산 백록담 부근은 현재 노출되어 있는 각 용암 단위의 유출 분화구와 유동방향, 분포 등으로부터 미루어 볼 때, 윗세오름-백록담-사라오름-성널오름을 잇는 산정부 일대는 지하에 발달된 구조선을 따라 용암을 분출시킨 분출구로서의 역할을 해 왔음을 알 수 있다. 이 중 한라산 산정부에서 최후기의 용암분출 화산 활동이 있었던 백록담 일원은 한라산조면암의 분출이

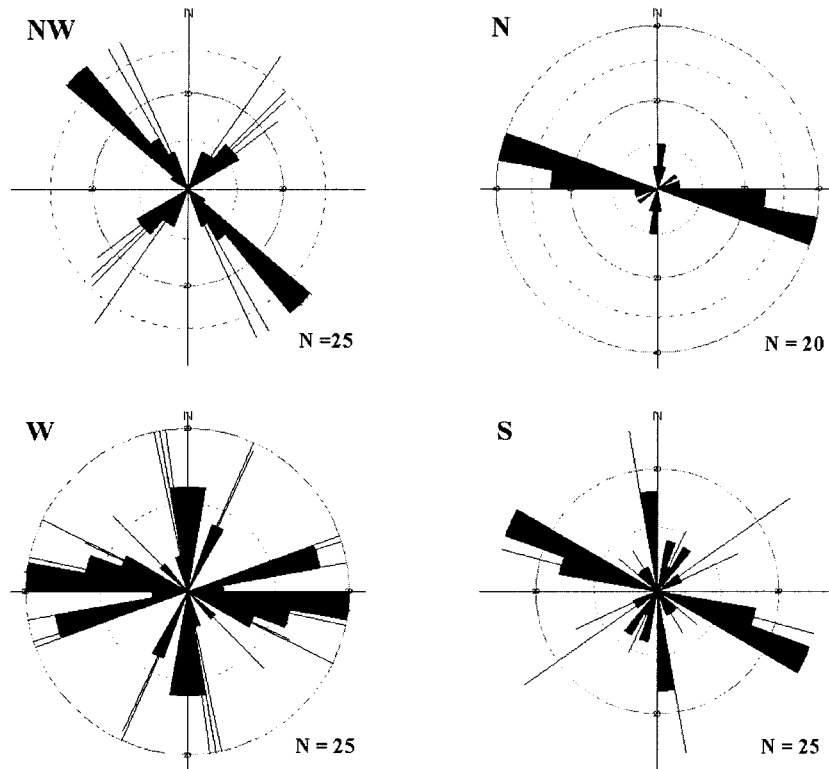


Fig. 4. Joint system analysis around the Paekrogdam area. NW: NW slope, N: N slope, W: W slope, S: S slope.

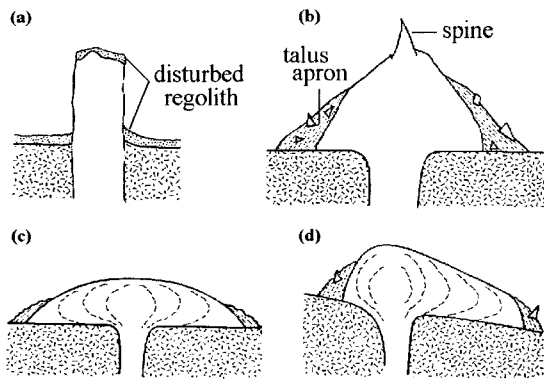


Fig. 5. Cross-sections of four types of felsic lava dome. (a) Upheaved plug, (b) Peleean dome, (c) Low lava dome, (d) Coulee type.

후에도 백록담조면현무암과 범정동조면현무암, 윗세오름조면현무암 등을 분출시킨 화산활동의 중심지였다.

한라산 정상부에서 비교적 점성이 큰 조면암질 마그마가 분출하여 산정부에 돔상의 화산체를 이루었다. 이때 한라산의 높이는 지금보다 더 높았을 것으로 추측

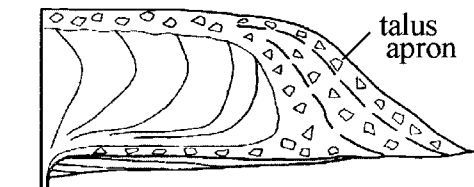


Fig. 6. Schematic cross-section of orientation of internal flow foliation in felsic dome.

된다. 이 백록담조면암 용암돔의 산정부 부근에는 정상부 함몰(summit depression)에 의한 점시형 또는 깔대기형의 작은 함몰지가 있었을 것으로 추측된다. 이러한 용암돔의 정상부 함몰은 돔의 마그마를 공급한 중앙부의 화도로부터 상승하던 마그마가 지하로 물러가거나, 가장자리로부터 마그마가 외부로 유출되면 생길 수가 있다. 대표적 예로는 이태리 나폴리만의 Ischia 섬에 있는 조면암 돔에는 직경 550×440 m의 붕락함몰지가 있다.

백록담조면암의 정치 이후 돔 화산체의 동쪽을 부수면서 백록담조면현무암을 형성시킨 마그마가 분출 일



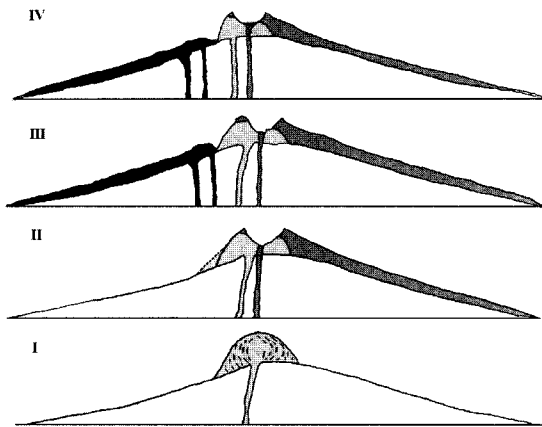


Fig. 7. Volcanic activity in the Paekrogdam crater area. I. Extrusion and dome of Paekrogdam trachyte; II. Eruption of Paekrogdam trachybasalt; III. Eruption of Peobjeongdong trachybasalt and Witseioreum trachybasalt; IV. Sedimentation of Maseidongsan conglomerate.

류(溢流)하여 성판악쪽으로 흘러 진달래밭까지 이동하면서 산정부일대의 넓은 지역에 용암을 유출하였다.

백록담조면현무암의 분출 초기에는 마그마가 물과 만나 만들어진 수성 화산활동에 의한 수성유리질응회암이 분출하였고, 물의 영향이 점차 줄어들어 따라, 화산분출양식이 스트롬볼리안 분출양식으로 변하여 적갈색 혹은 흑색의 분석을 위주로 표출하던 분석구가 형성되어 백록담 동쪽 사면일대에 스코리아를 퇴적시켰으며, 이때 나온 유리질응회암과 스코리아층은 조면암을 피복하고 있다. 그 후 분출양식이 하와이형으로 변하면서 정상부의 분화구 중심으로부터 조면현무암 용암이 서서히 일류되면서 스코리아층을 피복하고, 또 용암류 사이에 스코리아를 협재하면서 북측과 동측, 남측으로 이동하여 백록담조면현무암을 형성하였다. 거의 비슷한 시기에 정상부 서쪽 윗세오름 지역에서 조면현무암질 마그마가 분석구를 형성하며 한라산 서측부 일대에 광범위하게 용암을 유출하여 법정동조면현무암과 윗세오름조면현무암을 형성하였다(Fig. 7).

그러므로 백록담 일대는 백록담조면현무암의 스코리아층 및 용암류를 분출시킨 산정 분화구(summit crater)이며, 백록담은 산정 화구호(山頂 火口湖: summit crater lake)이다.

### 암석화학적 특징

#### 주성분 원소

백록담 일대에 분포하는 용암류의 지화학적 특징을

살펴보기 위하여 전암(全岩) 주성분원소 분석을 실시하였으며, 한국기초과학지원연구원 서울분소에서 XRF(X-선형광분광분석장치)를 이용하여 분석이 이루어졌다. 지질조사와 병행하여 야외에서 각 용암류의 지화학적 조성을 대표할 수 있는 신선한 시료를 체계적으로 채취하였고, 육안감별과 박편의 현미경 관찰을 통해 신선도, 조직과 광물조성을 기준으로 분석용 시료를 선택하였다. 분석용 시료는 오염을 방지하기 위해 조쇄기(粗碎機: jaw crusher)와 분쇄기(粉碎機: pulverize)의 사용을 피하고, 부산대학교 대학원 지구과학과 화산지질학연구실에서 햄머를 이용하여 0.5~1 cm의 작은 암편으로 만든 후, 초음파세척기에서 증류수를 3회 이상 수세하고, 부산대학교 공동실험실습관 지구과학실의 텡스텐 카바이드 불밀(日本 CMT社의 T1-100 vibrating sample mill)에서 5분간의 진동으로 분말을 제작하였으며, 최종적으로 마노 막자사발(agate mortar)에서 200메쉬 이하의 균질한 미분(微粉)으로 제작하였다.

백록담 지역에서 새로이 채취한 대표적인 12개 시료에 대한 XRF 주원소 분석치는 Table 3과 같다. 이들 분석치의 오차는 SiO<sub>2</sub>는 약 2% 미만이며, 그 외 산화물은 1% 이하이다. 이들 분석치에 기존 분석자료(박기화 등, 2000)를 합하여 특성을 고찰해 보면 아래와 같다.

백록담 일대에서 가장 초생 성분에 가까운 것은 보리악조면현무암으로 47.98 wt.%의 SiO<sub>2</sub>와 9.25 wt.%의 MgO 조성을 갖는다. 반면 가장 분화된 시료는 백록담조면암으로 67.40 wt.%의 SiO<sub>2</sub>와 0.09 wt.%의 MgO 함량을 보인다.

암석 분류 및 명명을 위하여 분석치를 Lemaitre *et al.*(1989)에 의한 TAS(total alkali(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)-silica (SiO<sub>2</sub>))를 이용한 화산암 분류도에 도시하였다(Fig. 8). 백록담 일대에 분포하는 용암류의 SiO<sub>2</sub> 함량 범위는 48.0~67.4 wt.%의 넓은 범위를 보이며, 특징적으로 SiO<sub>2</sub> 53.7~60.7 wt.%(조면안산암 영역)의 암석이 결여되어 있고, SiO<sub>2</sub> 53.7 wt.% 이하의 염기성(mafic) 암석과 60.7 wt.% 이상의 켈식(felsic) 암석으로 구성되는 바이모달(bimodal)의 양상을 보인다.

그럼 Fig. 8(상)에서 알칼리 원소 함량(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)은 SiO<sub>2</sub> 함량이 증가함에 따라 전반적으로 커지는 경의 관계를 보이며, 대부분의 분석치는 현무암(basalt)-조면현무암(trachybasalt)-현무암질 조면안산암(basaltic trachyandesite) 영역과 조면암(trachyte) 영역에 점사되며, 알칼리암 계열(alkali rock series)로 분류된다.

일반적으로 알칼리 계열의 암석은 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O비에 따라 소디(Na) 계열과 포타식(K) 계열로 나눌 수 있다.

**Table 3. Major element compositions and CIPW norms of the volcanic rocks around the Paekrogdam summit crater area.**

Sample	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
SiO <sub>2</sub>	65.15	64.86	63.20	50.87	53.10	64.04	50.94	53.71	65.17	49.44	49.30	51.97
TiO <sub>2</sub>	0.29	0.31	0.45	2.40	1.84	0.28	2.26	1.73	0.27	2.51	2.31	2.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.75	16.39	16.76	15.88	17.86	16.23	15.43	17.93	16.50	15.78	15.77	16.50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.41	2.63	3.00	3.49	3.33	2.37	2.33	3.22	2.35	3.62	3.50	3.80
FeO	2.16	2.37	2.70	7.33	5.56	2.13	8.42	5.39	2.12	7.61	7.36	6.35
FeOT	4.33	4.74	5.40	10.47	8.56	4.26	10.52	8.29	4.23	10.87	10.51	9.77
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	4.81	5.26	6.00	11.63	9.51	4.74	11.68	9.21	4.71	12.07	11.68	10.85
MnO	0.14	0.16	0.17	0.19	0.17	0.14	0.19	0.17	0.14	0.20	0.19	0.19
MgO	0.25	0.30	0.48	4.61	2.76	0.25	4.83	2.63	0.25	5.62	5.88	3.33
CaO	1.09	1.38	1.90	7.77	6.77	1.15	9.11	6.56	1.25	8.01	8.61	7.04
Na <sub>2</sub> O	5.66	5.63	5.58	3.80	4.47	5.57	3.45	4.40	5.57	3.48	3.42	4.14
K <sub>2</sub> O	5.62	5.50	5.19	2.10	2.55	5.53	1.45	2.65	5.56	1.84	1.76	2.43
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0.06	0.12	0.60	0.62	0.05	0.42	0.59	0.05	0.65	0.57	0.69
L.O.I.	0.30	0.02	0.21	0.59	0.02	0.00	0.51	0.08	0.07	0.00	0.50	0.50
Total												
CIPW norm												
Q	7.73	7.71	6.27	0.00	0.07	7.73	0.00	1.07	8.38	0.00	0.00	0.46
Or	33.39	32.67	30.84	12.54	15.23	33.47	8.68	15.84	33.14	11.02	10.55	14.57
Ab	48.04	47.78	47.37	32.43	38.15	48.16	29.50	37.57	47.44	29.78	29.29	35.46
An	3.67	3.17	5.33	20.23	21.30	2.97	22.56	21.52	3.58	22.24	22.74	19.48
DiWo	0.61	1.40	1.43	6.33	3.74	1.07	8.64	3.29	0.99	5.91	7.17	4.94
DiEn	0.17	0.40	0.54	3.74	2.12	0.30	4.55	1.84	0.27	3.67	4.52	2.89
DiFs	0.48	1.06	0.92	2.26	1.45	0.83	3.82	1.31	0.77	1.88	2.20	1.80
HyEn	0.46	0.35	0.67	5.12	4.85	0.34	6.55	4.80	0.36	5.66	3.68	5.54
HyFs	1.29	0.91	1.14	3.09	43.32	0.96	5.50	3.42	1.01	2.90	1.79	3.45
OiFo	0.00	0.00	0.00	1.94	0.00	0.00	0.78	0.00	0.00	3.43	4.69	0.00
OiFa	0.00	0.00	0.00	1.29	0.00	0.00	0.72	0.00	0.00	1.94	2.52	0.00
Mt	3.51	3.83	4.37	5.11	4.88	3.52	3.42	4.72	3.43	5.31	5.14	5.58
Il	0.55	0.59	0.86	4.60	3.53	0.54	4.34	3.32	0.52	4.83	4.45	4.29
Ap	0.11	0.13	0.26	1.32	1.37	0.11	0.93	1.30	0.11	1.44	1.26	1.53

H1, H2, H3, H6, H9 (Paekrogdam trachyte); H4, H5, H7, H8 (Paekrogdam trachybasalt); H10, H11 (Witseioreum trachybasalt); H12 (Peobjeongdong trachybasalt)

Fig. 8(하)에서 백록담 일대의 용암류는 알칼리 원소의 함량이 증가함에 따라 염기성암석들은 소덕 계열에서 포타식 계열로 전이하는 특징을 나타내며, 펠식 암석은 모두 포타식 계열에 속한다. Lee(1982)는 제주도의 알칼리암이 소덕 계열의 특징을 가지나, 전체적으로는 전형적인 포타식 계열인 고프 계열(Gough trend)과 소덕 계열의 하와이 계열(Hawaiian trend)의 중간인 전이적인 경향을 가진다고 보고한 바 있는데, 이와 잘 부합된다.

박준범(1994)은 제주도 내 용암류에 대한 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/K<sub>2</sub>O 비를 기준으로 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/K<sub>2</sub>O비가 0.3 미만인 암류(LPK군)와 0.3 이상인 암류(HPK군)로 구분하였으며, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/K<sub>2</sub>O

비는 현무암류의 분별결정화작용 동안 변하지 않아 마그마의 동질성을 지시할 수 있으며, 이들은 지화학적 특징이 서로 다르고, 궁극적으로는 별개의 모마그마로부터 각각 기원하는 것으로 해석하였다. 백록담 일원의 용암류는 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 관계에서 정(+)의 상관을 보이며, 염기성암류는 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/K<sub>2</sub>O=0.3의 경계부 부근에 분산되어 점시되며, 펠식암은 LPK군에서 K<sub>2</sub>O 함량이 약 4 wt.%에서 6 wt.%로 증가함에 따라 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 함량이 감소하는 음의 상관을 보이며 점시된다(Fig. 9). 이는 인회석(apatite)의 분별정출에 의한 영향을 해석된다.

분별결정화작용에 의한 용암류의 화학조성 변화를 알아보기 위하여 MgO 함량을 분화지수로 사용하여 다

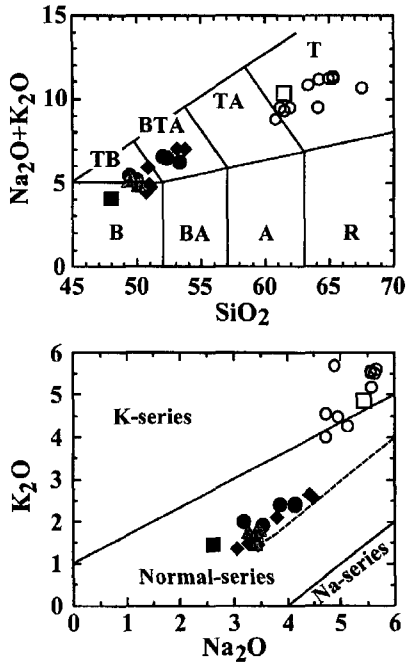


Fig. 8. TAS diagram (upper) and  $K_2O-Na_2O$  diagram (lower) of the volcanic rocks for the Paekrogdam crater area. Symbol (○), Paekrogdam trachyte; □, Youngsil trachyte; ◆, Paekrogdam trachybasalt; ●, Peobjeong-dong trachybasalt; ■, Poriak trachybasalt; ▲, Witsioreum trachybasalt). B (Basalt), BA (Basaltic andesite), A (Andesite), R (Rhyolite), TB (Trachybasalt), BTA (Basaltic trachyandesite), TA (Trachyandesite), T (Trachyte).

른 주원소 함량의 변화를 Harker 성분변화도에 나타내었다(Fig. 10).  $TiO_2$  함량과  $Fe_2O_3^T$ , CaO 함량은 염기성암류에서 MgO 함량의 4 wt.%까지는 감소함에 따라 점진적으로 감소하며, 펠식암류에서는 급격한 감소를 한다. MgO의 함량 변화에 대한  $TiO_2$ 와  $Fe_2O_3^T$  함량의 변화는 현무암질 마그마에서 Fe와 Ti를 주로 함유하는 티탄철석과 자철석의 분별결정화작용을 반영한다. 즉 자철석과 티탄철석의 정출이 거의 이루어지기 전에는 잔여 마그마에서 Fe와 Ti이 농집되다가, 이들이 정출되면서 약간 감소하기 시작한 후, 결정화작용의 후기에 자철석과 티탄철석이 많이 정출하여 빠져나가기 시작하면 Fe와 Ti의 급격한 감소가 함께 이루어질 것이다. 이들 원소의 변화경향으로 보아 백록담 일원의 용암류에서 자철석과 티탄철석은 분별결정화작용의 초기부터 정출하기 시작하였을 것이며, 그 후 MgO 함량이 약 3.4 wt.%에 이르면 자철석과 티탄철석이 빠르게 결정화되면서 잔여 마그마에서 급속하게 분리되었을 것

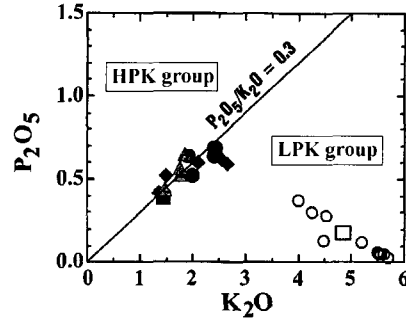


Fig. 9.  $K_2O-P_2O_5$  diagram of the volcanic rocks in Paekrogdam crater area.

으로 사료된다.

$Al_2O_3$ 와  $P_2O_5$  함량은 MgO 함량이 감소함에 따라 염기성암류에서는 증가하는 경향을 보이나, 펠식암류에서는 감소하는 경향을 보인다. 이는 염기성암류에서 Al이 분별결정화작용에서 다소 불호정적으로(incompatible) 작용하였으며, 사장석의 분별결정화작용이 주원소의 지화학적 변화에 주된 영향을 미치지 못하였음을 시사하며, 펠식암류에서는 CaO 함량 변화와 함께 사장석이 분별결정화되면서 주원소의 지화학적 변화에 주된 영향을 미쳤음을 나타낸다. CaO 함량 변화는 9.4-0.9 wt.% 범위이며, 분화 초기에는 염기성암류에서는 CaO 함량이 서서히 감소하다가, 펠식암류에서는 급속하게 감소한다. 용암류에서 CaO 함량 변화는 단사회석, 각섬석 및 사장석의 분별결정화작용에 의해 지배된다. 분별결정화작용 초기에 염기성암류는 MgO 함량이 감소함에 따라  $CaO/Al_2O_3$ 의 비가 점진적으로 감소함으로 보아 단사회석의 정출분리(segregation)에 연관되어 있는 것으로, 펠식암류는 사장석의 정출분리에 의한 영향으로 해석된다. 펠식암류에서 CaO와  $P_2O_5$ 의 뚜렷한 함량 감소는 인회석의 분별결정화작용을 시사한다. MgO의 함량 변화에 대한 MnO 함량은 뚜렷한 어떤 경향을 나타내지 않아 분별결정화작용에 의한 영향을 지시하지는 않는다.

전체 시료에서  $Na_2O$  함량은 2.6-5.7 wt.%의 변화를 보이며, MgO 함량이 감소함에 따라 급격하게 증가한다. 이는 현무암질 마그마에서 정출하는 어떤 광물에 대해서도 Na가 불호정적으로 거동하였음을 지시하고, 특히 Na-사장석의 정출이 이 지역의 용암류의 지화학적 변화에 큰 영향을 미치지 못하였음을 시사하는 것이다.

$K_2O$  함량은 전체적으로 1.2-6.7 wt.%의 변화를 보이며, MgO 함량이 감소함에 따라  $K_2O$  함량은 염기성

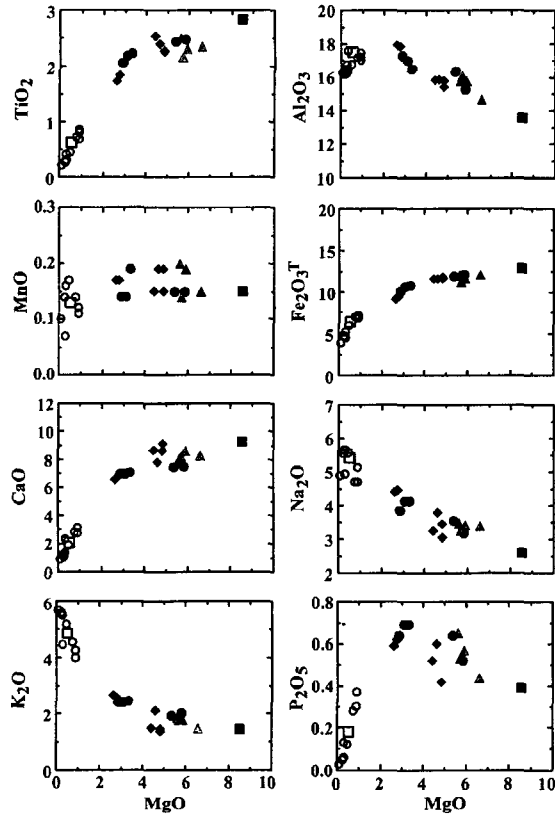


Fig. 10. Harker variation diagram (Symbols are the same as in Fig. 8).

암류에서 서서히 증가하다가 약 3 wt.% 이하의 펠릭스 암류에서는 급격하게 증가하는 경향을 보인다. 이는 MgO 함량이 약 3 wt.%인 마그마에서부터 감람석과 휘석 등 K<sub>2</sub>O 성분을 갖지 않는 광물이 상대적으로 다량으로 제거되기 시작한 것을 시사하며, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup> 함량의 변화 경향과 결부하면 자철석과 티탄철석의 다량 정출이 일어났음을 알 수 있다.

이상의 백록담 일원의 용암류의 주성분 원소 특징은 염기성암류에서는 단사휘석, 자철석과 티탄철석의 정출이, 펠릭스암류에서는 사장석과 인회석의 정출이 중요한 영향을 하였음을 나타내고, 전반적인 정출순서는 초기에서 후기로 가면서 감람석+단사휘석+사장석, 감람석+단사휘석+자철석(+티탄철석), 자철석+티탄철석+인회석+사장석의 조합으로 추측된다.

#### 미량성분 및 희토류원소

백록담 일대에 분포하는 용암류의 미량원소 및 희토류원소의 지화학적 특징을 살펴보기 위하여 한국기초

과학지원연구원 서울분소에서 ICP-MS 및 ICP-AES(유도결합 플라즈마분광분석장치)를 이용하여 분석이 이루어졌다. 분석결과는 Table 4와 같다. 화산암류에서 희토류원소를 포함한 미량원소의 함량은 맨틀근원지의 성분과 광물조합 그리고 부분용융의 정도와 같이 맨틀에서의 과정뿐만 아니라 지각 내에서의 분별정출작용 등과 같은 과정에 의해 좌우된다. 백록담 일대 화산암에 대한 희토류원소의 함량을 콘드라이트 값(Nakamura, 1974)으로 표준화했을 때, 경희토류원소가 중희토류원소에 비하여 더 부화되어 있는 패턴을 나타낸다(Fig. 11). (La/Yb)<sub>n</sub>비는 백록담조면암에서 13.8~28.6, 백록담조면현무암에서 10.2~17.0, 법정동조면현무암에서 14.7, 윗세오름조면현무암에서 13.4~14.3으로 염기성의 조면현무암류에 비하여 펠릭스암인 조면암에서 높은 비를 나타낸다.

화산암류의 전체 희토류원소의 함량은 백록담조면암에서 291~424 ppm, 백록담조면현무암에서 164~240 ppm, 법정동조면현무암에서 250 ppm, 윗세오름조면현무암에서 190~215 ppm으로 역시 조면암에서 높은 비를 나타낸다.

화산암류의 Eu이상을 살펴보면, 백록담조면현무암에서 Eu/Eu\* = 1.07~1.30, 법정동조면현무암에서 1.09, 윗세오름조면현무암에서 1.07~1.13으로 조면현무암류에서는 전체적으로 정(+이상을 나타내고 있는데, 이는 본 역 조면암류가 상당량의 사장석을 반정으로 함유하는 사실과 잘 부합된다. 이에 비하여 백록담조면암에서 한 시료(H3)를 제외하고 Eu/Eu\* = 0.44~0.67로 부(-)이상을 잘 나타내고 있다. 이는 주성분 변화경향에서 나타나는 것과 같이 조면암류가 사장석의 분별정출작용을 경험하면서 진화하였음을 시사한다.

화산암류의 미량원소의 조성 특징을 원시맨틀(primitive mantle)값(Sun, 1982)으로 표준화한 거미그림(Fig. 12)에서 고찰해 보면, Rb, Th과 같은 LIL원소는 부화된 반면, 석류석에 호정적인 Y로 감에 따라 감소하며, 감람석과 휘석에 호정성이 있는 Ni과 Cr은 원시맨틀 성분에 비하여 매우 낮다. 이러한 변화 패턴은 백록담 일대의 조면현무암류를 형성시킨 마그마가 석류석-페리도타이트 맨틀이 부분용융되어 형성된 마그마로부터 진화하여 유래하였음을 시사한다.

백록담 일대에 분포하는 조면현무암은 호정성 원소의 농도 변화가 크고, 조면현무암류의 Ni과 Cr함량(Ni 20~105 ppm, Cr 8~109 ppm)이 맨틀암과 유사한 원시 마그마의 함량보다 낮은 것으로 보아, 본 역의 염기성 암들은 초생마그마를 대표한다고 볼 수 없다. 전형적인 상부 맨틀의 평형상태에서 만들어진 초생마그마

**Table 4. Trace element and REE compositions of the volcanic rocks around the Paekrogdam summit crater area.**

Sample	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
Co	44.5	38.2	29.0	54.4	53.5	33.4	55.9	57.3	24.6	57.5	55.6	53.7
Ni	3.2	3.3	0.7	64.5	21.6	0.8	52.5	19.7	1.2	93.6	104.6	28.5
Cr	0.1	0.1	0.1	52.1	7.9	0.1	63.0	6.9	0.1	88.2	109.4	12.8
Zn	103.7	136.9	119.5	118.1	118.5	133.6	117.9	121.2	158.5	124.5	121.6	136.2
Zr	481.1	538.0	698.1	309.5	392.3	351.8	221.1	428.8	122.5	249.8	231.0	362.7
Cu	18.7	18.6	16.7	56.8	44.2	13.5	65.8	43.4	18.6	63.9	60.1	53.0
Ga	52.8	44.0	73.6	49.8	57.3	52.3	35.2	72.3	61.3	42.3	41.9	55.7
Sc	0.1	0.1	0.1	6.7	1.6	0.1	12.0	0.8	1.6	9.0	9.3	4.6
Sr	44.1	41.5	132.9	597.5	705.7	45.9	444.2	701.3	51.2	556.2	633.9	589.1
Rb	125.1	127.7	99.6	40.6	50.0	128.9	25.5	55.3	141.9	39.5	34.1	49.5
Ba	109.1	75.0	159.5	45.6	46.7	29.5	16.7	51.8	29.8	21.1	19.6	27.5
Y	30.0	43.5	28.6	23.2	23.6	41.8	22.7	24.9	40.1	25.1	21.5	25.6
Nb	102.8	106.7	75.3	50.6	53.7	105.2	34.6	56.3	116.1	48.5	46.0	59.8
Mo	3.1	4.0	3.8	1.8	3.2	5.2	2.1	3.4	6.4	2.2	1.7	2.2
Cd	0.3	0.6	0.4	0.2	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2
Sn	6.8	4.5	2.9	2.1	2.2	4.3	1.7	2.5	4.2	1.9	2.0	2.8
Cs	0.9	0.5	0.6	0.2	0.7	0.8	0.4	0.8	0.9	0.3	0.3	0.2
Hf	13.7	13.6	14.8	7.2	8.4	10.5	5.3	9.3	5.5	6.1	5.6	8.5
Pb	8.6	5.6	5.5	3.3	3.8	5.5	2.2	4.4	7.2	2.8	3.4	4.7
Th	15.4	16.2	12.3	6.3	7.2	12.9	4.2	8.2	11.5	5.7	5.3	7.1
Li	63.7	54.7	53.4	22.1	23.7	64.5	20.8	26.3	66.2	21.9	20.1	30.5
S	71.6	8.0	71.1	335.4	367.1	39.9	431.0	362.5	46.4	380.9	407.2	381.1
U	2.8	2.6	2.6	1.0	1.6	2.7	0.9	1.8	1.9	1.2	1.1	1.4
La	68.7	78.7	61.3	42.5	45.7	84.1	27.6	48.4	107.1	38.2	34.3	46.2
Ce	119.3	136.8	112.6	83.6	91.0	129.8	54.7	95.2	152.1	76.1	68.9	91.9
Pr	14.1	15.9	11.4	9.7	10.4	20.0	6.5	10.8	17.9	9.0	7.8	10.7
Nd	49.5	56.3	41.0	37.3	38.8	72.7	26.5	40.8	63.9	35.7	30.8	42.2
Sm	9.3	10.9	8.3	7.6	7.6	14.2	6.1	8.0	11.8	7.6	6.4	8.6
Eu	2.0	1.8	3.1	3.0	3.2	2.0	2.2	3.4	2.1	2.7	2.4	3.1
Gd	9.0	11.2	8.2	7.8	7.7	13.9	6.6	8.1	11.8	7.9	6.7	8.9
Tb	1.4	1.8	1.3	1.1	1.1	2.2	1.0	1.2	1.7	1.1	1.0	1.3
Dy	6.9	9.0	6.4	5.4	5.1	9.9	4.9	5.3	7.7	5.5	4.7	5.9
Ho	1.3	1.7	1.2	1.0	0.9	1.8	0.9	1.0	1.3	0.9	0.8	1.0
Er	3.6	4.8	3.4	2.5	2.4	4.8	2.4	2.6	3.4	2.5	2.2	2.8
Tm	0.5	0.6	0.4	0.3	0.3	0.6	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3
Yb	3.0	3.8	2.9	1.9	1.8	3.8	1.8	1.9	2.5	1.9	1.6	2.1
Lu	0.4	0.5	0.4	0.2	0.2	0.6	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3
REE	289.0	333.8	261.9	203.9	216.2	360.4	141.7	227.3	384.0	189.6	168.1	225.3
(La/Yb) <sub>n</sub>	15.3	13.8	14.1	14.9	16.9	14.8	10.2	17.0	28.6	13.4	14.3	14.7
Eu/Eu*	0.67	0.50	1.16	1.20	1.29	0.44	1.07	1.30	0.55	1.07	1.13	1.09

(primary magma)의 조성은 높은 Mg값(0.7 이상), 높은 Ni함량(400~500 ppm) 및 Cr함량(1000 ppm)과 낮은 SiO<sub>2</sub>의 특징을 가진다.

**화산암류의 지체구조적 위치**

Lee(1982)는 제주도 알칼리화산암의 전암 화학성분

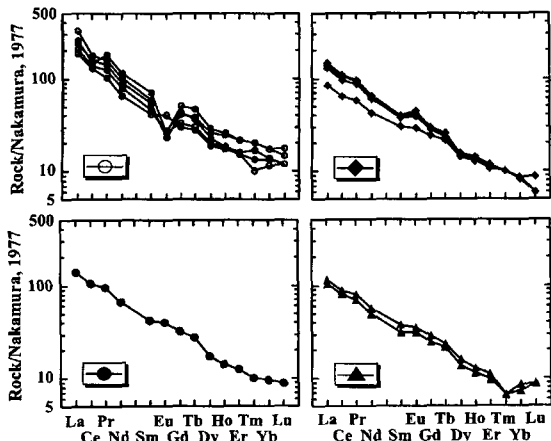


Fig. 11. REE/chondrite normalized diagram of the volcanic rocks in Paekrogdam crater area. Symbols are the same as in Fig. 8.

이 하와이의 것과 유사함으로부터 화산활동이 판 내부 환경(within plate tectonic setting)의 열점에서 형성된 것으로 해석한 바 있다. 최근 현무암류에 대한 여러 연구자들의 지구조 환경 판별도가 제안되었다. 현무암류의 주성분 원소를 이용한 조구적 위치 판별도인  $TiO_2$ - $MnO$ - $P_2O_5$  성분도(Mullen, 1983)에 백록담 일원의 염기성암을 도시해 보면 대부분이 해양도(海洋島)알칼리현무암 영역(OIA)에 도시되어(Fig. 13a) 지판의 섭입작용과 무관하게 판내부환경에서 생성되었음을 지시한다. 그리고 Wood *et al.*(1979)에 의한 Hf-Th-Nb 성분비에 의한 현무암류와 그 분화물에 대한 지체구조적 위치 판별도에서 백록담 일원의 화산암류들은 모두 지판 내부 알칼리현무암 영역(C: alkaline WPB)에 도시됨을 알 수 있다(Fig. 13). 주성분 원소 및 미량원소의 조성 특성에 있어서 백록담 일원의 조면현무암류와 조면암류는 유라시아 대륙 동연부에서 태평양판의 섭입작용과는 무관하게 판내부의 지체구조적 환경에서 생성된 것임을 의미한다.

**결 론**

제주도 한라산 백록담 일대의 화산암류에 대한 암석학적 연구 결과는 아래와 같다.

백록담을 구성하는 암석은 백록담의 정상 서반부를 이루는 백록담조면암, 백록담 정상 동반부를 이루는 백록담조면현무암, 그리고 만세동산역암으로 구성된다.

백록담의 분화구 외측의 서측, 남측 및 북측 사면에서 상부와 중간부 이상에서 지형경사각이 35° 이상의

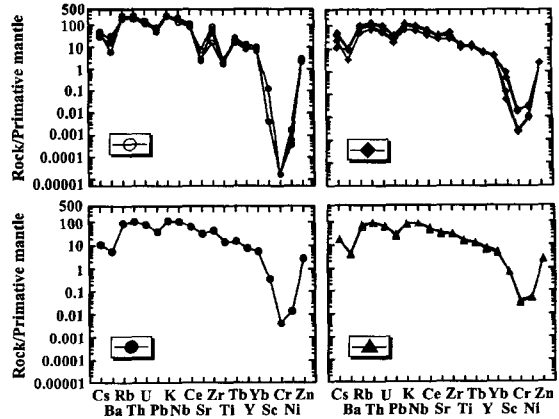


Fig. 12. Spider diagram of the volcanic rocks in Paekrogdam crater area.

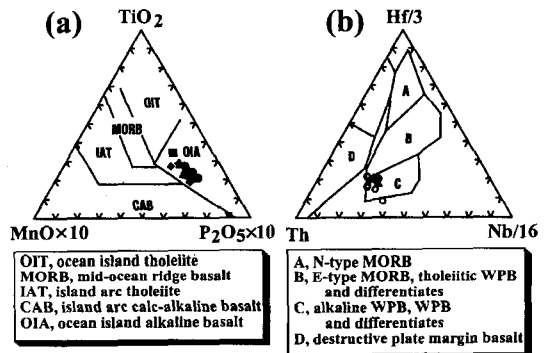


Fig. 13. Tectonodiscrimination diagrams for basaltic rocks in Paekrogdam crater area.

급경사를 나타내고 수직(주상)절계가 발달하여 사면 불안정을 나타내고 있다.

백록담 일대 분화구의 사면에서 발달된 절리계는 백록담 분화구를 중심으로 방사상 또는 동심원상의 절리계를 발달시키고 있다.

백록담 분화구는 백록담조면암의 돛 정지 이후 화산체의 동쪽에서 백록담조면현무암의 스킨리아층 및 용암류를 분출시켜 형성된 산정 화구호(山頂 火口湖: summit crater lake)이다. 백록담조면현무암은 분출 초기에는 수성 화산활동을 그 후 스트롬볼리안 분출을 하였으며, 마지막에 하와이형으로 변하면서 백록담조면현무암을 형성하였다.

백록담 일대에 분포하는 용암류의  $SiO_2$  함량 범위는 48.0~67.4 wt.%의 넓은 범위를 보이며, 특징적으로  $SiO_2$  53.7~60.7 wt.%의 암석이 결여되어 있고,  $SiO_2$

53.7 wt.% 이하의 염기성 암석과 60.7 wt.% 이상의 펠릭 암석으로 구성되는 바이모달의 양상을 보인다.

백록담 일원의 용암류의 주성분 원소 특징은 염기성 암류에서는 단사회석, 자철석과 티탄철석의 정출이, 펠릭 암류에서는 사장석과 인회석의 정출이 중요한 영향을 하였음을 나타낸다.

미량원소 및 희토류원소의 조성 특징으로 볼 때, 백록담일대의 조면현무암류를 형성시킨 마그마가 석류석-페리도타이트 맨틀이 부분용융되어 형성된 마그마로부터 진화하여 유래하였음을 시사한다.

백록담 일원의 조면현무암류와 조면암류는 유라시아 대륙 동연부의 판내부의 지체구조적 환경에서 생성되었음을 지시한다.

### 감사의 글

본 연구를 위한 야외지질조사에서 협조해 주신 국립공원한라산관리사무소 이광춘 전소장님, 한라산연구소의 고정군 박사, 신용만, 고윤정 님께 감사드립니다. 그리고 실내연구와 암석전처리과정 및 암석화학 자료분석 정리를 도와준 부산대학교 대학원 지구과학과 이정현 석사에게도 감사드립니다. 암석화학분석은 한라산연구소의 분석비 지원으로 이루어졌다. 본 논문을 읽고 심사해주신 김용준 교수님과 오창환 교수님께 감사드립니다.

### 참고문헌

박기화, 이병주, 조등룡, 김정찬, 이승렬, 김유봉, 이한영, 조병욱, 장영남, 손병국, 전희영, 김용욱, 2000, 서귀포·하효리도폭 지질보고서(1:50,000). 제주도, 한국자원연구소, p. 163.  
 박준범, 1994, 제주도 화산암의 지화학적 진화. 연세대학교 대학원 지질학과 이학박사학위논문, p. 303.  
 박준범, 권성택, 1991, 제주도 화산암의 암석화학적 진화(II): 제주 동부 월랑봉 부근 시추코아 연구. 대한지질학회 제46차 정기총회 및 학술발표회(초록), 연세대학교, 지질학회지, 27, 531.  
 박준범, 권성택, 1996, 제주도의 솔리아이트 화산활동. 암석학회지, 5, 66-83.  
 박준범, 박기화, 조등룡, 고기원, 1999, 제주도 제4기 화산암류의 암석화학적 분류. 지질학회지, 35, 253-264.

윤상규, 김원영, 1984, 제주지역 지열조사 연구. 한국자원연구소 국토이용지질조사연구 연구보고. 83-5-08, 109-140.  
 원종관, 1976, 제주도 화산암류에 대한 암석화학적 연구. 지질학회지, 12, 207-226.  
 원종관, 이문원, 윤성효, 고보균, 1998, 제주도 남동부 표선지역 화산암류의 지구화학적 특징. 지질학회지, 34, 172-191.  
 윤성효, 고정선, 박정미, 2002, 제주도 남동부 태흥리 용암에 대한 암석학적 연구. 암석학회지, 11, 17-29.  
 장광화, 박준범, 권성택, 1999, 제주 화산도의 조면암류에 대한 암석기재 및 광물화학. 지질학회지, 35, 15-34.  
 Blake, S., 1989, Viscoplastic models of lava domes. IAVCEI Prodeedings in Volcanology, Vol. 2, Lava flows and domes. pp. 88-126, Springer Verlag, Heidelberg.  
 Fisher, R.V., 1979, Magma and Volcanic Rocks. Geology, 206.  
 Lee, M.W., 1982, Petrology and geochemistry of Jeju volcanic Island, Korea. Sci. Rep. Tohoku Univ., Series 3, 15, 177-256.  
 Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyer Le Bas M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Woolley, A.R. and Zanettin, B., 1989, A classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell, Oxford.  
 Mullen, E.D., 1983, MnO/TiO<sub>2</sub>/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. Earth Planet. Sci. Lett., 62, 53-62.  
 Nakamura, N., 1974, Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrite. Geochim. Cosmochim. Acta, 38, 757-773.  
 Sun, S.S., 1982, Chemical composition and origin of the earth's primitive mantle. Geochim. Cosmochim. Acta, 46, 179-192.  
 Tamanyu, S., 1990, The K-Ar ages and their stratigraphic interpretation of the Cheju Island volcanics, Korea. Bull. Geol. Surv. Japan, 41, (10), 527-537.  
 Won, C.K., Matsuda, J., Nagao, K., Kim, K.H. and Lee, M.W., 1986, Paleomagnetism and radiometric age of trachytes in Jeju Island, Korea. Jour. Korean Inst. Mining Geology, 19, 25-33.  
 Wood, D.A., Joron, J.L. and Treuil, M., 1979, A reappraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings. Earth Planet. Sci. Lett., 45, 326-336.

(2002년 12월 23일 접수; 2003년 2월 15일 채택)