

제주도 대포동현무암에 발달한 지삿개 주상절리의 형태학 및 암석학적 연구

고정선¹ · 윤성호^{2,*} · 홍현주²

¹부산대학교 과학교육연구소, 부산광역시 금정구 장전동 산30번지
²부산대학교 지구과학교육과, 부산광역시 금정구 장전동 산30번지

Morphology and petrology of Jisagae columnar joint on the Daepodong basalt in Jeju Island, Korea

Jeong-Seon Koh¹, Sung-Hyo Yun^{2,*} and Hyun-Chu Hong²

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

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

요약: 제주도 남부 대포동 해안 일대, 성천포에서 월평동까지 약 3.5 km에 걸쳐있는 지삿개 주상절리를 이루는 현무암에 대한 주상절리의 형태학과 암석기재 및 주성분 암석화학적 특징을 연구하였다. 다각형의 주상절리는 육면체가 가장 우세하며, 기둥의 수평절단면의 직경 130~139 cm, 기둥의 최대면의 폭 90~99 cm, 수평절단면에서 서로 인접한 다각형 사이에 이루는 사이 각 120~129°가 가장 우세하며, 주상 유동 띠의 폭은 최소 2~3 cm에서 최대 십 수 cm에 달한다. 대포동현무암은 약 25만년전에 녹회암 분석구에서 분출한 현무암으로 육안상 반상조절이 뚜렷하며, 경하에서 사장석, 감람석, 사방휘석, 단사휘석, 불투명 광물로 구성된다. 사장석은 반정과 석기 모두 라브라도라이트에 해당한다. 감람석의 반정의 Fo값은 0.69-0.78이며, 미반정의 Fo값은 0.66으로 나타난다. 단사휘석은 보통휘석(augite)에 해당하며, 드물게 관찰되는 사방휘석은 브른자이트에 해당한다. 불투명 광물은 티탄철석과 자철석으로 구성된다. 대포동현무암은 알칼리암 계열의 판내부현무암에 속한다.

주요어: 대포동현무암, 지삿개, 주상절리, 형태학, 암석학

Abstract: This study has been designed to elucidate the morphology of Jisagae columnar joints and the petrography and petrochemistry of Daepodong basalt in Jeju Island, distributed along the 3.5 km-long coast from Seongcheonpo to Woelpyeongdong. Colonnade of the Jisagae columnar joint typically occurs within the upper part of a flow and consists of relatively well-formed basalt columns. Most columns are straight with parallel sides and diameters from 100 cm to 205 cm, 130~139 cm in maximum. Length of the columns extends up to 20 m. Most columns tend to have 6 or 5 sides but sometimes they have as few as 3~4 or as many as 7 or 8 sides. The Daepodong basalt consists of plagioclase, olivine, orthopyroxene, clinopyroxene, ilmenite and magnetite. Plagioclase is labradorite, clinopyroxene is augite, orthopyroxene is bronzite and olivine is chrysolite and hyalosiderite. The Daepodong basalt shows porphyritic texture with matrix of mainly intersetal texture. The Daepodong basalt is plotted into alkali rock series on the TAS diagram. The tectonic setting of the Daepodong basalt represents within plate environment.

Key words: Daepodong basalt, Jisagae, columnar joint, morphology, petrology

서론

주상절리는 고체물질이 부분적으로 평형한 축들을 가지면서 다각형의 단면을 보여주는 기둥모양으로 갈

라지는, 서로 연결된 장력에 의한 절리의 네트워크를 보여준다. 이들 절리에 의한 묶여진 기둥은 다양한 물질에서 산출되며, 주상절리의 노두 폭은 수 mm에서 수백 m에 이른다.

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

냉각되어 고화된 마그마의 수축은 다양한 성분과 형태의 화산암이나 아화산암(예: 유문암에서 안산암, 현무암을 거쳐 초염기성 용암, 암맥, 암주, 암경 등)에서 큰 종횡비(aspect ratio)를 가진 기둥을 형성한다(Boyd, 1961; Huber and Rinehart, 1967; Barnes *et al.*, 1982). 유문암질 화류용회암의 용결된 부분에서도 길고, 좁은 기둥들이 나타난다(Boyd, 1961). 많은 퇴적암 물질에서도 건조의 결과로 모래와 진흙에서, 그리고 동결된 지표면의 땅에서도 주기적으로 열극이 열었다 녹았다하는 결과로 나타난다. 변성작용과 냉각작용이 결합된 효과로 화강섬록암, 사암, 탄층에서 비교적 큰 종횡비(aspect ratio)를 가지는 기둥이 보고되어져 있다(Spry and Solomon, 1964; Crelling and Dutcher, 1968). 지질학적 물질이 아닌 것(예. 광학용 크라운 유리(crown glass), 암청색 유리 슬래그(smaller slag)에서도 냉각에 의해 만들어지기도 한다(Jackson, 1970)). 현무암 용암에서 주상절리는 용암이 지표면에 노출되어 비교적 빨리 식는 환경에서 액체 상태에서 고체 상태로 굳으면서 부피가 줄어들어 생긴다. 용암이 서서히 냉각되어 굳으면서 공기에 노출된 표면 혹은 지면과 접하는 부분부터 절리가 생기게 되는 데, 용암의 내부는 서서히 냉각되기 때문에 용암 표면과 물성이 달라 절리는 암석의 내부로 가면서 방향이 휘거나 굽기가 달라진다. 주상절리의 모양은 사각형 기둥에서 칠각형 기둥에 이르기까지 다양하며, 육각형 기둥이 우세하게 나타난다고 알려져 있다.

서귀포시 대포동 해안에는 「지상개」 또는 「모시기정」이라고도 불리는 절경지가 있다. 이곳에는 육각형의 돌기둥이 켜켜이 쌓여 우뚝우뚝 솟아있는 돌기둥(주상절리) 사이로 하얀 포말이 부서지는 모습은 한 쪽의 그림과도 같으며, 파도가 심하게 일 때는 10 m 이상 용솟음치는 장관을 연출하기도 한다. 태고적 신비와 천혜의 경관을 간직한 지상개 해안은 주상절리가 발달한 곳으로 이곳의 옛 이름인 “지상개”를 살려 “지상개바위”로 부른다. 이곳은 약 2 km에 이르는 해안에 걸쳐 높이가 30 m는 족히 뒹직한 사각형, 오각형 및 육각형 기둥바위가 깎아지른 절벽을 이루고 있다. 지상개 주상절리는 현재까지 형태학적(morphological) 연구가 자세하게 이루어지지 않고 있다. 연구지역의 현무암류를 포함하는 광역적인 선행 연구로는 제주도 남사면 화산암류의 화산층서 및 암석학적 연구(이문원 외, 1994)와 1:50,000 서귀포 하효리 도폭(박기화 외, 2000a), 모슬포·한림도폭(박기화 외, 2000b) 등이 있다.

본 연구에서는 제주도 대포동현무암의 지상개 주상절리의 형태학적 구성 요소를 측정 분석하고, 주상절

리를 이루는 현무암의 암석기재 및 구성광물에 대한 화학조성 분석, 현무암의 전암 조성분 화학 조성의 특성에 대한 암석학적 연구를 수행하였다.

지질 개요

대포동 지상개주상절리를 구성하는 암석은 이문원 외(1994)에 의해 ‘녹하지암 휘석현무암’으로 명명되었으며, 박기화 외(2000a, b)의 지질 도폭(1:50,000)에서는 ‘대포동조면현무암’으로 기재하고 있으나, 본 연구에서는 대포동 일원의 암석에 대한 조성분 화학조성 분석 결과에 근거하여 ‘대포동현무암’으로 명명하였다. 대포동현무암은 성천포에서 월평동에 이르는 해안을 따라 약 3.5 km의 연장 분포를 보이며, 용암류의 상층부는 클린커(clinker)가 형성되어 거친 표면을 이루고 있고, 클린커내에는 많은 화산탄과 화산암괴를 포함하는 집괴암상을 나타낸다. 대포동 해안가 지상개 부근에서는 주상절리가 잘 발달하고 있다. 이 주상절리를 이루는 대포동현무암은 중문 북쪽의 녹하지암(鹿下旨岳) 분석구에서 분출하여 남쪽으로 흘러내린 것으로 사료되며, 일부는 인접한 모라이악, 우보악, 성천봉(星川峰) 분석구에서도 소규모로 분출된 것으로 사료된다(Fig. 1).

Fig. 1에서와 같이 이 지역에서 가장 오래된 지층은 군산용회암으로 본 역 서부 수정동 북쪽에 소규모로 노출되어 있다. 본 용회암은 군산조면현무암이 피복하며, 또 후기의 법정동조면현무암에 의해 피복된다. 그 상위의 남성리용회암과 이를 피복하는 서귀포층으로 본역 서쪽 백구천 하류 성천포구 주변에 소규모로 노출되며, 월평동 해안을 따라 그 상위의 정방동조면안산암이 노출되어 있다. 월평동 해안에서는 이들 암층을 월평동역암과 강정동현무암질조면안산암이, 중문동 해안에서는 강정동현무암질조면안산암이 피복하고 있다. 삼천포구에서 백구천 하천 바닥에 보리악조면현무암이 이들 암층을 피복하며 그 상위에 소규모로 성천포역암이 피복한다. 이들 상기의 암층을 대포동현무암이 넓게 피복하며 분포한다. 회수동부근에서는 한라산조면암이, 색달동 서측에서는 법정동조면현무암이 대포동현무암을 피복하여 분포한다. 즉, 대포동현무암은 월평동해안가에서 정방동조면현무암을 피복하며, 중문동에서는 성천포역암을 협제하면서 보리악조면현무암을 피복한다. 월평동 약천사 북쪽 하천의 서측에는 높은 지형을 이루고 동측에는 강정동현무암질조면안산암이 낮은 지형을 이루고 있다. 회수동 회수교 상단 도로변에서는 각력화된 한라산조면암에 의해 피복되며,

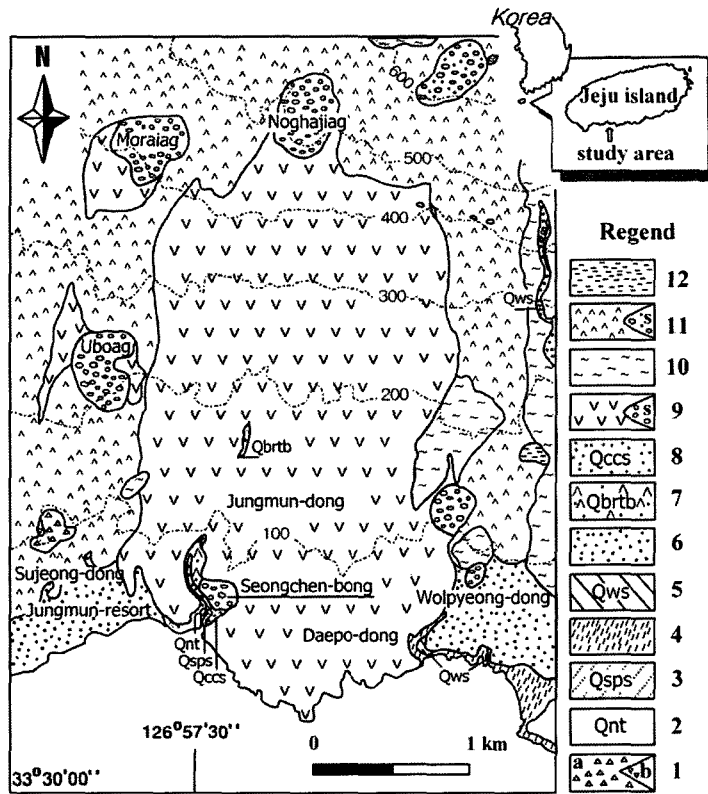


Fig. 1. Geological map of the Daepodong area. [1, (a)Kusan Tuff; and (b)Trachybasalt; 2, Namseongri Tuff; 3, Seogweipo Formation; 4, Jeongbangdong Trachyandesite; 5, Weolpeongdong Conglomerate; 6, Kangeongdong Basaltic Trachyandesite; 7, Boriak Trachybasalt; 8, Seongcheonpo Conglomerate; 9, Daepodong basalt (S: scoria cone); 10, Hallasan Trachyte; 11, Bubjeongdong Trachybasalt (S: scoria cone); 12, Mansedongsan Conglomerate].

녹하지의 위쪽에서는 법정동조면현무암에 의해 피복된다. 월평동 북쪽에서는 최후기의 만세동산역암이 소규모로 법정동조면현무암을 피복하고 있다. 정방동조면안산암과 강정동현무암질조면안산암, 보리악조면현무암과 대포동현무암 사이에는 각각 원마도가 발달한 역암층인 월평동역암과 성천포역암이 협재되는 것으로부터 이들 용암류의 분출 시기 동안에 상당한 시간 간격이 있었음을 알 수 있다.

대포동현무암(시료 S1)에서 해안가의 주상절리를 이루는 암석에 대한 전암 K-Ar연대는 한국기초과학지원연구원 대전본소에서 측정 한 결과 0.25 ± 0.04 Ma (Table 1)로 약 25만년전에 녹하지의 분석구에서 분출된 마그마로부터 형성되었음을 지시한다.

주상절리의 형태학

대포동현무암은 성천포에서 월평동에 이르는 해안을 따라 약 3.5 km의 연장 분포를 보이며(Fig. 1), 용암의 표면에는 크렁커가 형성되어 거친 표면을 보이거나 지샓개 해안절벽 지역에서는 파도에 의하여 침식당해 나타나 있는 용암유동단위(flow unit)의 중간부분을 나타내는 단면에서는 벽화와 같은 주상절리가 잘 발달한다(Fig. 2a, 2b).

이러한 주상절리는 용암이 식으면서 기둥모양으로 굳어진 것인데, 기둥의 단면은 다각형(주로 4-6각형)으로 다양한 모습을 보이는 것으로 알려져 있다(Fig. 2c, 2d). 유동성이 큰 현무암질 용암류가 냉각될 때, 냉각

Table 1. K-Ar whole rock age determination of Daepodong basalt from Jeju Island, Korea.

Sample	K (wt.%)	wt (g)	⁴⁰ Ar radiogenic (10 ⁻⁸ ccSTP/g)	³⁶ Ar (10 ⁻¹⁰ ccSTP/g)	Age (Ma)	Air (%)
S1	0.903	0.10048	0.860 ± 0.153	3.015 ± 0.033	0.25 ± 0.04	91.14

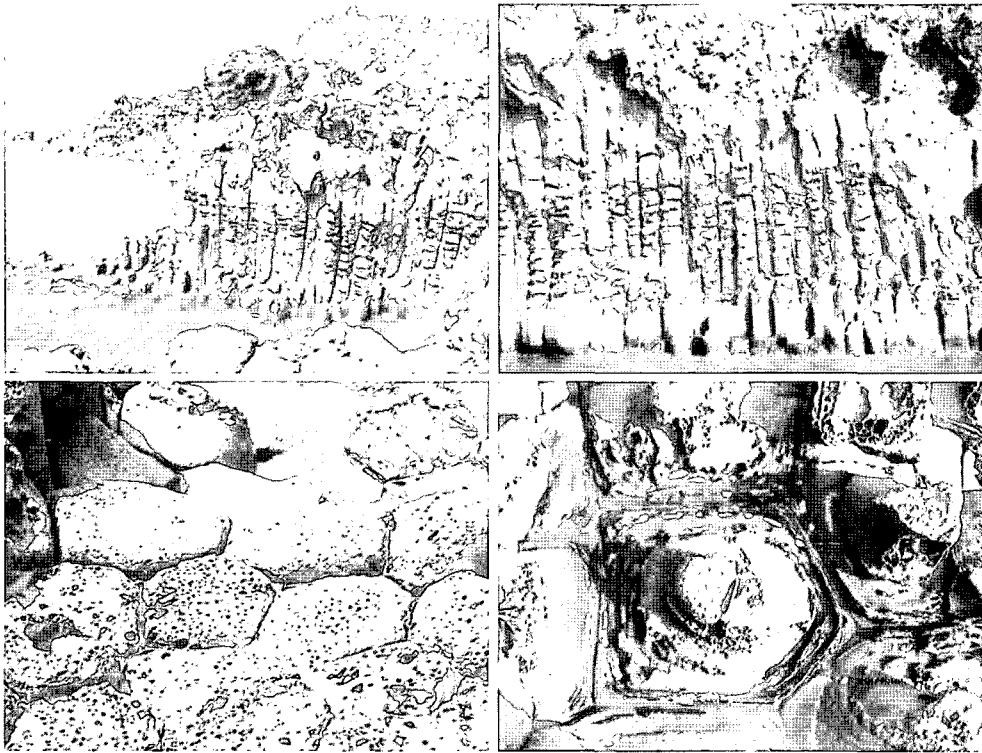


Fig. 2. (a) Outcrop of basalt showing columnal joint in the Daepodong basalt; (b) Vertical columns with horizontal bands; (c) Polygonal column faces; and (d) Column faces showing ball-and-socket structure.

중인 용암 표면에서 냉각 수축이 일어나는 중심점들이 생기게 되고 이런 중심점들이 고르게 분포하면서 그 점을 중심으로 냉각 수축이 진행되면 다각형의 규칙적인 균열이 생기게 된다. 이러한 균열들이 현무암의 유동방향에 수직으로 발달하여 현무암 용암층은 수많은 기둥으로 나누어지게 된다. 이들은 용암의 두께, 용암의 온도, 냉각 속도, 냉각율, 열구배 등에 따라 높이 수십m, 지름 수십cm의 다양한 모습으로 발달하게 된다. 일반적으로 현무암 용암에서 발달하는 주상절리는 약 1065~900°C 부근에서 액체 마그마에서 고화된 각을 만들면서 급랭하여 형성되는 것으로 알려져 있다(Ault *et al.*, 1962; Peck, 1978).

주상절리를 나타내는 형태학적 요소는 이상적인 주상절리에서 주상 기둥의 길이, 기둥의 직경, 주상절리면의 폭, 용암의 밴드폭 그리고 중횡비가 알려져 있다(Fig. 3). Spry(1962)는 이상적인 주상절리를 나타내는 현무암에서 기둥을 상부칼러네이드(upper colonnade), 엔테블러취(Entablature), 하부칼러네이드(lower colonnade)의 3부분으로 구분하였다(Fig. 3). 본 역에서는 상부칼러네이드 부분이 잘 나타나며, 엔테블러취의 발달

은 미약하다.

대포동 지상개 주상절리대에서 주상절리의 크기를 나타내는 주상 기둥의 길이는 해안절벽에서 20 m 내외로 발달하며, 상부에서 하부에 이르기까지 깨끗한 주상절리의 단면을 볼 수 있다. 해식애를 따라 발달한 주상절리는 기둥의 상부에서는 수평의 판상절리가 우세하며 하부로 가면서 수직인 면에서 수직 주상절리들이 서로 인접하여 밀접하게 붙어서 마치 조각품과 같은 모습을 나타낸다.

주상절리의 수평면상에서 다각형의 다면체들이 기하학적으로 연계되어 잘 발달하며, 측경 분석 결과 육각형(약 40%), 오각형(33%), 칠각형(19%), 팔각형(6%), 사각형(2%) 등으로 육각형의 육면체 주상절리가 가장 우세하게 발달하여 있다(Fig. 4a).

주의 직경의 최대 값은 205 m에 달하며 130~139 cm(33%), 120~129 cm(18%), 110~119 cm(12%), 150~159 cm(11%), 140~149 cm(10%)이며, 그 외 100~109 m(7%), 160~169 cm(3%), 180~189 cm(2%), 200~209 cm(%), 170~179 cm(1%), 190~199 cm(1%)로 산출된다(Fig. 4b).

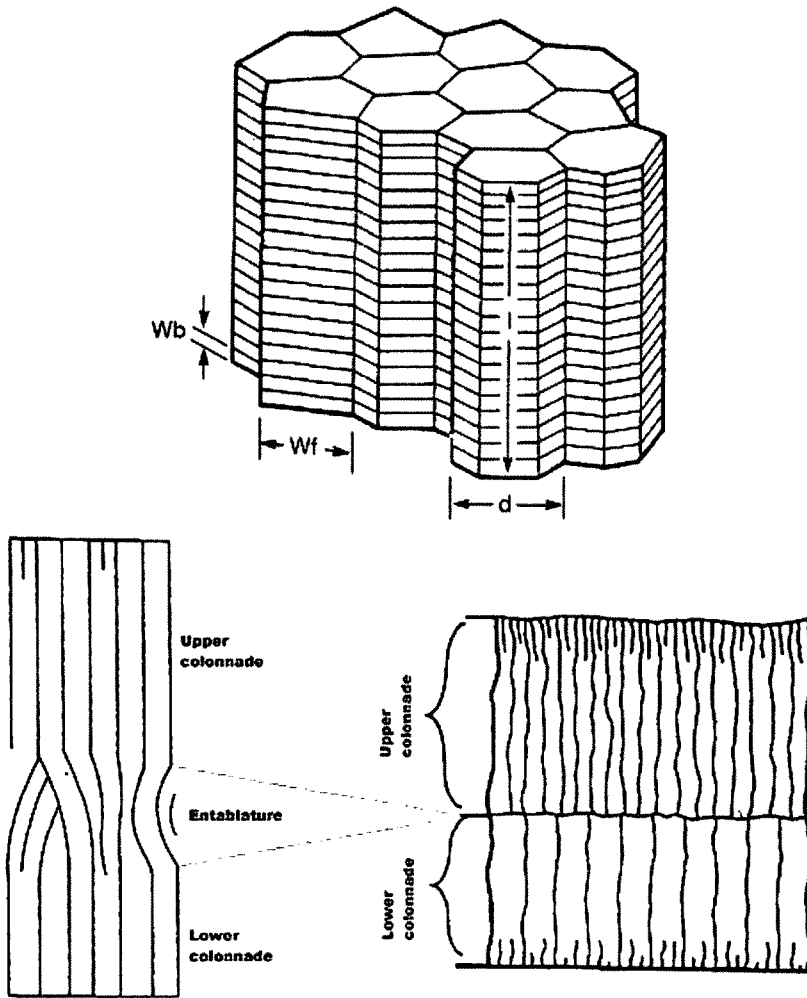


Fig 3. (Upper) Basic geometry of columnar joints. Idealized vertical columns with horizontal bands on joint surface. Symbols represent column length (l), column diameter (d), column-face width (Wf), band width (Wb), aspect ratio (l/d). (Lower) Diagram of idealized columnar basalt (after Spry, 1961; Grossenbacher and McDuffie, 1995).

주상절리 기둥의 폭 즉, 최대면 길이는 90~99 cm (28%)로 가장 우세하고, 80~89 cm(20%), 70~79 cm (12%), 110~119 cm(1%), 100~109 cm(19%)로 우세한 편이며, 그 외 60~69 cm(6%), 130~139 cm(1%), 170~179 cm(1%)로 나타났다(Fig. 4c).

주상절리의 수직 절리면에 직각인 유동방향에서 관찰 가능한 유동 용암 띠(stria)(Ryan and Sammis, 1978)의 폭은 최소 2~3 cm에서 최대 십 수 cm에 달한다.

주상절리의 단면에서 서로 인접한 다각형 사이에 이루는 사이 각이 120°인 것은 전형적인 'Y'자형의 절리가 발달하고, 최대 사이 각이 150° 이상인 것은 '굽어진 T'자형, 180°에 가까운 것은 'T'자형의 절리를 나타

낸다. 대포동현무암의 주상절리에서는 120~129°(20%), 110~109°(15%), 110~119°(15%), 130~139°(13%), 140~149° (12%), 90~99°(11%)이며, 그 외 150~159°(6%), 80~89° (3%), 160° 이상(5%)로 나타났다(Fig. 4d).

또한 해안 가까이의 육각형 또는 오각형의 절리면에 수평인 절단면에서는 절리면을 따라 파도의 침식작용으로 다각형의 주의 가장자리가 침식, 제거되고 중심부가 보다 낮은 지형을 나타내고 중심부에는 현무암이 잔존하여 마치 중절모자 형태의 불룩한 작은 지형 구조(ball-and-socket structure)을 이루고 있다(Fig. 2d). 이는 2차적인 파도의 침식작용과 주상절리 형성 초기의 열적구배에 따른 차별침식에 기인하는 것으로 해석된다.

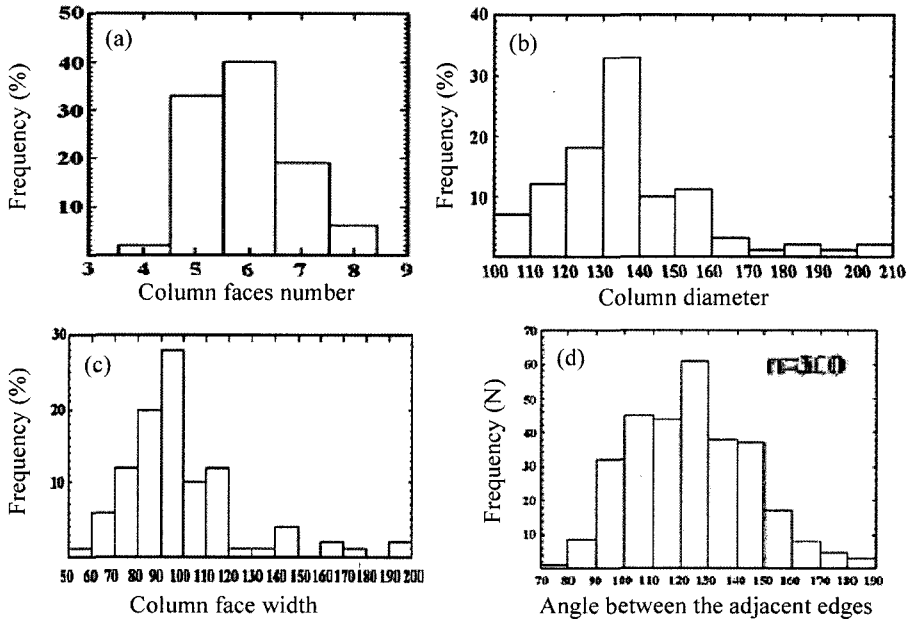


Fig. 4. (a) Frequency (%) of the number of faces to columns; (b) frequency (%) of the diameter (cm) of columns; (c) frequency (%) of the face width (cm) of columns and (d) frequency (number) of the size of the angles between the sides of columns of the Daepodong basalt.

대포동현무암 용암이 흐르면서 약 1065~900°C 부근에서 냉각 수축되어 주상절리가 만들어진 후, 해수면 밖으로 노출되어 강한 파도에 의해 침식되면서 해안절벽을 이루면서 현재와 같은 장관을 연출하게 된 것이다. 해식대에 따라 주상절리가 깨끗하게 발달하고, 부분적으로 주상절리면에 어긋나게 침식당한 부분에서는 다양한 형태의 경관을 나타내고 있다. 절리면에는 침식작용의 결과로 벽화와 같은 모습을 나타내고 있다.

암석기재

지상개 주상절리대를 구성하는 대포동현무암에 대한

암석기재는 아래와 같다.

야외조사결과에서 신선한 현무암을 박편으로 제작하여 편광현미경 관찰을 하였으며, 결정의 크기에 따라 반정(0.7 mm 이상), 미반정(0.7~0.1 mm), 그리고 석기(0.1 mm 이하)로 분류하여 암석을 기재하고, 정밀한 광물조합과 함량을 알아보기 위해 2000점 모드분석을 실시하였다(Table 2).

야외에서 암회색을 띠는 대포동현무암은 기공의 함량이 10% 미만으로, 치밀한 석기에 반상조직이 뚜렷하게 나타나며, 시료에 따라 반정과 미반정 광물 및 기공의 함량이 약간씩 차이가 난다.

현미경 관찰 결과, 전체적으로 7~16%의 반정과

Table 2. Modal compositions of the Daepodong basalt.

Sample No.	Ol		Pl		Opx		Cpx		Gm	Ve	Remarks
	ph	mph	ph	mph	ph	mph	ph	mph			
S1	4.8	2.7	7.3	8.2	0.7	0.1	3.0	0.1	69.7	2.8	Textures of all samples in the groundmass are similar; pilotaxitic, intersertal
S2	3.2	3.9	10.0	2.7			2.6	0.4	75.3	0.9	
S3	4.8	4.2	7.0	7.8	1.3	0.1	1.1	0.2	73.2	0.2	
S4	3.1	2.7	7.8	4.8	1.4	1.2	0.9	0.4	77.3	0.1	
S5	0.6	2.6	3.5	11.4			4.5	1.4	73.6	2.1	

Modes based on about 2000 counts per sample.

Phenocrysts (ph); >0.7 mm, microphenocrysts (mph); 0.1-0.7 mm, groundmass; <0.1 mm.

abbreviations: Ol; olivine, Pl; plagioclase, Opx; orthopyroxene, Cpx; clinopyroxene, Gm; groundmass, Ve; vesicle.

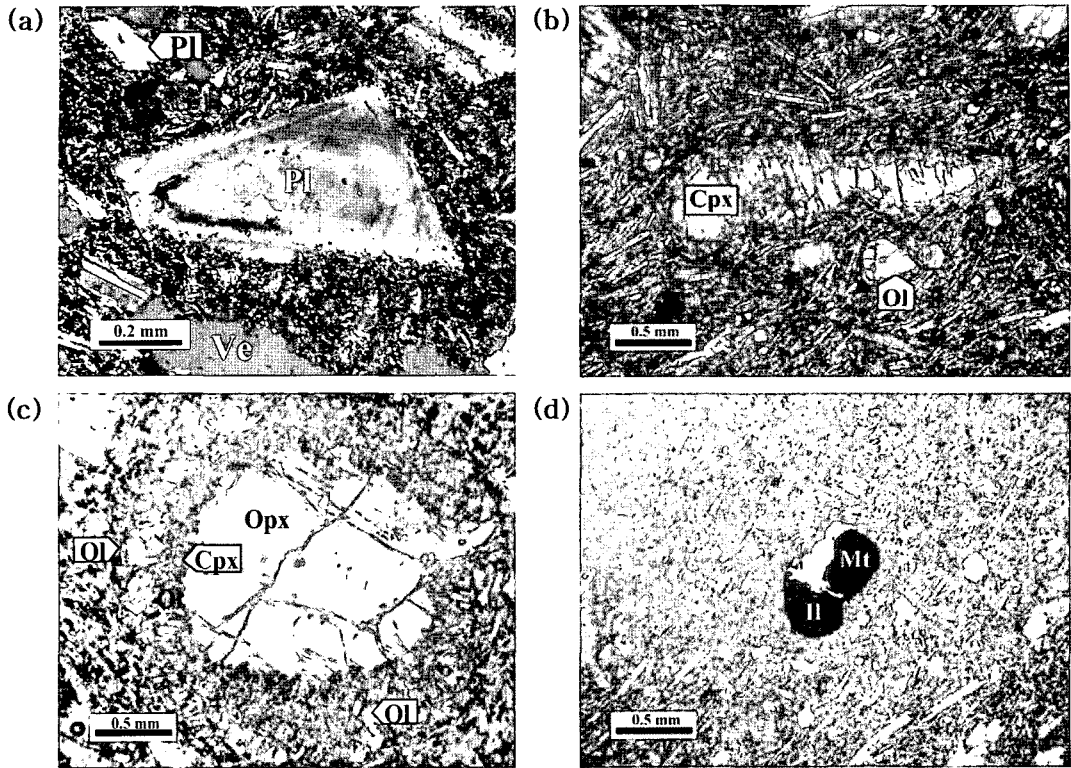


Fig. 5. (a) Photomicrograph of plagioclase phenocryst showing oscillatory zonal structure (sample, S1). (*crossed polar*); (b) Photomicrograph of clinopyroxene phenocryst with corroded rim (sample, S2). (*crossed polar*); (c) Photomicrographs of corona texture with orthopyroxene phenocryst surrounded by clinopyroxene and olivine grains (sample, S3). (*open polar*) and (d) Photomicrograph of coexisting magnetite and ilmenite (sample, S1). (*open polar*). Abbreviations: Ol = olivine, Cpx = clinopyroxene, Opx = orthopyroxene, Pl = plagioclase, Mt = magnetite, and Il = ilmenite.

70~77%의 석기를 가지는 반상 조직이 나타난다. 반정과 미반정 광물은 주로 사장석, 감람석, 단사회석이며, 소량의 사방휘석이 반정과 미반정으로 나타나기도 한다. 석기들은 주로 사장석과 감람석, 단사회석 및 이들을 채우는 불투명 광물들로 구성되어 있다. 야외 조사와 현미경적 관찰 결과, 본 연구지역은 시료에 따라 입자의 크기나 광물 함량의 차이 외에 나타나는 조직은 거의 유사하다. 석기 부분은 소량의 유리질이 석기를 이루는 미정질의 사장석, 휘석, 감람석 결정 사이를 채우고 있는 인터서털조직을 나타낸다.

반정과 미반정의 사장석은 대개 자형 내지 반자형의 주상형으로 나타나며, 석기는 대부분 주상형으로 나타난다. 반정과 미반정 결정은 대부분 알바이트쌍정, 칼스반드-알바이트 쌍정을 나타낸다. 일부 시료에서는 부분적으로 용식(resorption)되어 있거나 불투명 광물로 채워져 있는 채구조(sieve texture)를 보이는데 완전히 용식되어 잔존만이 나타나는 경우도 관찰된다. 사장석은 중심부에서 외곽부로 감에 따라 누대구조 혹은 진

동누대구조를 보여준다(Fig. 5a). 석기에 있는 사장석은 알바이트 쌍정을 나타내는 목편상(lath)으로, 감람석 혹은 단사회석 반정결정 주위로 일정한 방향성을 볼 수 있다.

감람석은 주로 자형과 반자형의 형태의 반정과 미반정 광물과 타형의 석기로 산출된다. 일부 반정은 자형의 외곽구조를 가지는 골격구조(skeletal texture)가 나타나고, 대부분 균열이 발달되어 있으며, 이 균열을 따라 혹은 가장자리를 따라 이당사이트화되어 있다. 석기를 이루는 목편상의 사장석 결정들이 감람석 반정 주위를 평행하게 둘러싸는 필로택시틱조직이 나타나기도 한다.

단사회석은 반자형의 입상조직 반정과 0.1~1.4%의 소량의 타형 미반정으로 시료에 나타난다. 드물게 단사회석의 외곽부가 용식되어 나타나는 경우도 있으며 (Fig. 5b), 직각방향으로 두 방향의 벽개를 보이는 경우도 있다. 석기를 이루고 있는 휘석은 주로 아원형의 결정들로 나타난다.

사방회석은 일부 시료(시료 S1, S3, S4)에 결정면이 발달되어 있지 않는 타형의 반정과 미반정으로 소량 나타난다. 반정의 가장자리를 미립의 단사회석과 감람석이 둘러싸는 코로나조직(Fig. 5c)이 관찰되는데, 자세히 관찰하여 보면, 반정의 사방회석이 멜트와의 반응에 의해 용융된 불규칙한 외곽부 주위를 단사회석이 둘러싸고, 그 외곽부를 감람석이 둘러싸고 형태로 관찰된다.

불투명 광물(Fe-Ti 산화광물)은 자철석과 티탄철석으로 대개 미반정과 석기 입자로서 석기를 이루고 있는 감람석, 휘석, 사장석의 간극을 채우는 형태와 시료 S1은 자철석과 적철석이 공존하는 형태로 나타난다(Fig. 5d).

광물화학 조성

광물의 정성정량분석은 한국기초과학지원연구원(KBSI) 대전본소에 설치되어있는 CAMECA SX-50 전자현미분석기(Electron-Probe Micro analyzer)를 이용하여 분석하였다. 시료는 현무암에 반정과 석기로 나타나는 주요 광물인 감람석, 휘석, 사장석, 불투명광물이고, 분할 지점을 정밀하게 선택하여 약 100여점의 분석치를 구하였다. 분석 조건은 조사전류 20 nA, 가속전압 15 KeV, 빔 직경 1 μm, 측정시간 10초이다.

본 연구에서 분석된 조암 광물은 사장석, 감람석, 휘석(단사회석, 사방회석), 불투명광물이며, 누대구조를 가지는 반정은 중심부(core)와 연변부(rim)로 구분하였다.

각 광물의 성분 변화를 알아보기 위해 반정 또는 미반정, 석기에 따라 구분하였으며, 사장석은 Or-Ab-An 단성분 분류도에, 감람석은 Fo(Mg₂SiO₄)-Fa(Fe₂SiO₄) 단성분 분류도에, 휘석류는 Wo(CaSiO₃)-En(MgSiO₃)-Fs(FeSiO₃) 단성분 분류도를 이용하였으며, 불투명 광물에 대해서는 각 화학성분과 함께 전암의 화학성분을 이용하여 고찰해보았다.

사장석

대포동현무암의 사장석 성분을 Or-Ab-An 삼각도(Fig. 6)에 도시해 보면, 목편상의 석기 사장석과 반정 대부분이 라브라도라이트 영역에 해당하며, 반정은 An₅₂₋₆₄이며, 석기는 An₃₈₋₆₂를 나타낸다. 반정의 화학성분은 석기에 비해 넓은 범위의 An 성분을 가지며, 다소 높은 An 함량을 나타낸다.

누대구조를 나타내는 사장석 반정에 대한 An성분 변화를 살펴보면, 시료 S1에서 나타나는 반정의 크기는 약 200 μm 정도로 중심부(An₅₆)에서 주변부로 갈수록

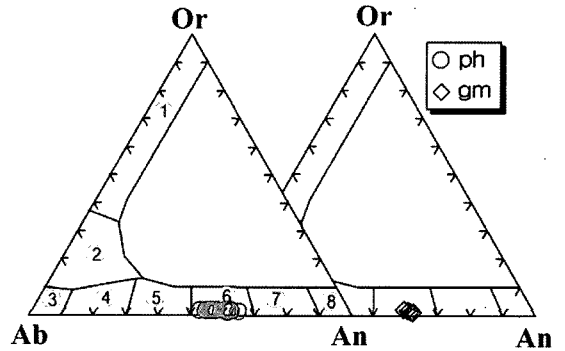


Fig. 6. Or-Ab-An diagram showing plagioclase compositions of the Daepodong basalt. [1; sanidine, 2; anorthoclase, 3; albite, 4; oligoclase, 5; andesine, 6; labradorite, 7; bytownite, 8; anorthite] (Deer et al., 1963). Abbreviations: ph; phenocryst, gm; groundmass.

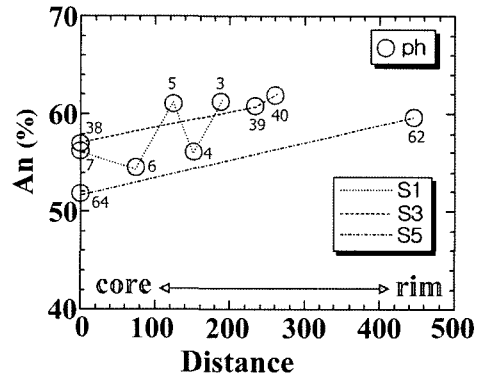


Fig. 7. An content variation diagram from core to rim of plagioclase phenocrysts of the Daepodong basalt. Abbreviations: ph; phenocryst.

감소(An₅₅)하다가 증가(An₆₁)하고, 다시 감소(An₅₆)하고 증가(An₆₁)하는 진동누대구조(oscillatory zonal structure)를 나타낸다(Fig. 7). 시료 S3에서 나타나는 반정의 크기는 약 300 μm 정도로, 중심부는 An₅₇를, 외곽부는 중심부보다 높은 An₆₁와 An₆₂를 각각 나타낸다. 시료 S5에서 나타나는 반정의 크기는 약 440 μm 정도로, 중심부는 An₅₂를, 외곽부는 중심부보다 높은 An₆₀를 나타낸다.

분석된 반정의 An 성분도는 전체적으로 중심부보다는 외곽부에서 높은 함량을 나타내고 있다.

감람석

감람석은 반정과 미반정으로 나타나는 것과 휘석의 반응환을 가지는 것이 관찰된다. 반정으로 나타나는 감람석은 Fo값은 0.78~0.69이며, 미반정의 Fo값은 0.66으

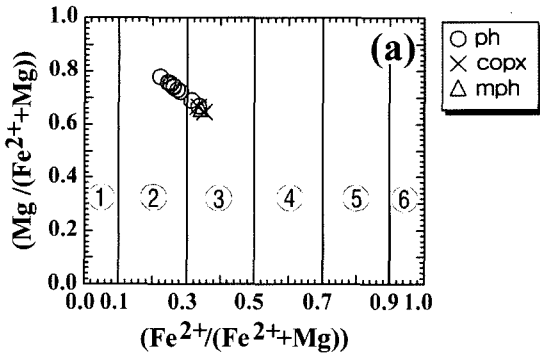


Fig. 8. Fo(Mg/(Mg+Fe²⁺)) vs. Fa(Fe²⁺/(Mg+Fe²⁺)) in olivine from the Daepodong basalt. [1; forsterite, 2; chrysolite, 3; hyalosiderite, 4; hortonolite, 5; ferro-hortonolite, 6; fayalite] (Deer *et al.*, 1963). Abbreviations: ph; phenocryst, mph; microphenocryst, cpx; reaction rim around opx phenocryst.

로 나타난다. 시료 1에서 사방휘석 반응연으로 둘러싸이는 기질부의 작은 감람석은 Fo값은 0.67로 기질의 미반정과 유사한 값을 가진다.

Mg₂SiO₄-Fe₂SiO₄ 성분도에서 반정으로 나타나는 것은 chrysolite 영역과 hyalosiderite 영역에 도시되고, 미반정과 휘석 반응환을 가지는 시료는 hyalosiderite 영역에 나타난다(Fig. 8).

단사휘석

단사휘석은 주로 반정으로 나타나며, Wo₃₈₋₄₂En₄₁₋₄₈Fs₁₃₋₁₇로서 보통휘석(augite)에 해당하고, 사방휘석의 반응연으로 산출되는 것도 Wo₄₀En₄₄Fs₁₆로 보통휘석 영역에 도시된다(Fig. 9). 보통휘석의 TiO₂ 함량은 0.8~1.9 wt.%로 나타난다.

사방휘석

대포동현무암에 예외적으로 사방휘석 결정이 나타나며, 사방휘석 결정의 성분이 Wo₃₋₅En₇₆₋₇₈Fs₁₇₋₂₁로서 브론자이트(bronzite)영역에 해당한다(Fig. 9). 이를 현미경으로 자세히 관찰해보면, 사방휘석의 외곽부는 용식에 의해 불규칙하고, 이 외곽부를 작은 결정의 감람석과 휘석이 둘러싼 구조를 나타내고 있다.

불투명광물

본역에서 산출되는 불투명 광물은 티탄철석과 자철석으로 구성된다. 자철석은 TiO₂함량이 18~22 wt.%으로 다소 높은 함량을 나타내며, FeO^{Ti}이 68~71 wt.%이다. 울보스피넬(ulvolspinel)의 몰의 함량은 51~61%로

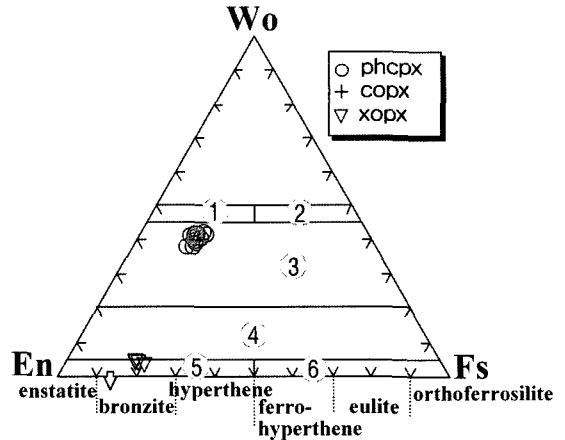


Fig. 9. Pyroxene compositions of the Daepodong basalt. [1; diopside, 2; hedenbergite, 3; augite, 4; pigeonite, 5; enstatite, 6; ferrosillite]. Abbreviations: phcpx; cpx phenocryst, cpx; opx reaction rim, xopx; opx phenocryst.

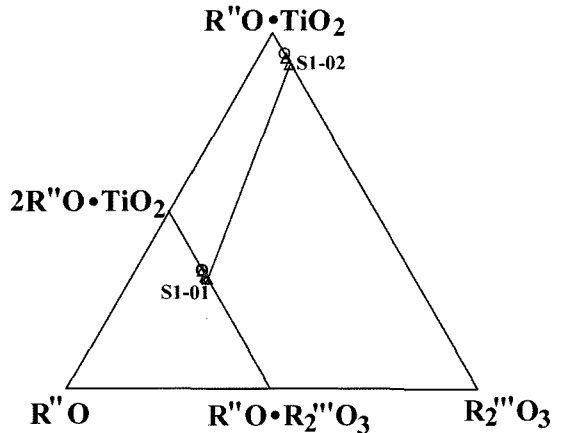


Fig. 10. Plots on the iron-titanium oxides in terms of the molecular percent of ulvospinel in the magnetite and R₂O₃ in the ilmenite after Carmichael (1967). R₂O represents FeO, MnO, CaO when part of the ulvospinel molecular, but only FeO when part of magnetite molecule. R₂O₃ represent Al₂O₃, V₂O₃, Cr₂O₃, and Fe₂O₃, TiO₂ includes the small amount of SiO₂ in the analysis. For S1 and S2, line connects the coexisting iron-titanium oxides. Symbols: ○; phenocryst and △ microphenocryst.

높은 함량을 나타낸다. 시료 S1에서 Uvo₅₁인 미반정의 자철석과 공존하는 미반정의 티탄철석의 성분을 Spencer and Lindsley(1981)의 산소분압-지온계에 적용하면 875°C, fo₂=10^{-12.7}이 구해진다(Fig. 10). 이는 제주 북부 화산암류(박준범과 권성택, 1993)의 값(870°C, fo₂=10^{-13.5})과 비교해 볼 때 유사한 값을 갖는다.

이상에서 광물 화학에 대한 분석결과 사장석의 반정
은 중심에서부터 외곽부로 감에 따라 진동누대와 점자
An의 함량이 증가하는 결과를 보이며 제주도 쏄레이
아트질 암석에서 관찰되는 사방휘석이 반정과 미반정
의 성분과 동일한 성분의 단사휘석과 감람석에 의해
둘러싸여 산출된다는 점은 제주도 남동부 지역의 일부
암석에서 산출되는 양상과 비슷하다. 이는 알칼리 현
무암질 마그마의 상변화 또는 쏄레이아이트질 마그마
의 일부분 혼합의 가능성 등 마그마 분출까지의 단순
한 과정에 의한 것임이 아님을 나타내지만, 이에 대한

논의는 생략하며 앞으로 정밀한 연구가 더 필요하리라
사료된다.

암석화학적 특징

전암 화학분석을 위한 시료의 제작시 오염을 최소화
하기 위해 해머만을 사용하여 직경 0.5~1 cm 가량의
조각으로 만든 다음 육안으로 신선한 것을 택하여 중
류수로 완전히 세척하였다. 그 다음 105°C 오븐에서
12시간 이상 건조시켜 암석 조각 표면에 남아있는 물

Table 3. Major element abundances (wt.%) and CIPW norm of the Daepodong basalt.

Sample	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
SiO ₂	48.84	49.07	49.30	49.01	49.11	47.54	49.53
Al ₂ O ₃	14.76	15.06	14.91	14.72	14.92	16.61	15.18
TiO ₂	2.62	2.61	2.59	2.63	2.59	3.03	2.41
FeO ^T	21.19	21.08	20.76	21.24	20.76	20.95	20.16
Fe ₂ O ₃ ^T	12.75	12.68	12.49	12.78	12.49	12.93	12.45
FeO	9.72	9.67	9.52	9.75	9.52	9.31	8.96
Fe ₂ O ₃	1.95	1.93	1.91	1.95	1.91	2.59	2.49
MnO	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
MgO	7.07	6.98	6.84	6.70	6.82	4.52	6.16
CaO	8.65	8.75	8.53	8.31	8.70	8.04	8.36
Na ₂ O	3.14	3.26	3.26	3.16	3.23	3.29	3.36
K ₂ O	1.30	1.37	1.42	1.42	1.38	1.53	1.41
P ₂ O ₅	0.53	0.52	0.52	0.52	0.52	0.65	0.56
LOI	-0.46	-0.46	-0.45	-0.09	-0.47	1.24	0.22
Total	99.35	99.99	99.56	99.29	99.44	91.30	98.79
CIPW norm							
Q	0	0	0	0	0	0	0
Or	7.79	8.15	8.49	8.54	8.26	9.30	8.46
Ab	26.88	27.23	27.84	27.16	27.62	28.59	28.81
An	22.59	22.52	22.05	22.12	22.36	26.73	22.46
Ne	0	0	0	0	0	0	0
DiWo	7.41	7.56	7.37	6.98	7.61	4.33	6.80
DiEn	4.20	4.27	4.16	3.88	4.29	2.22	3.85
DiFs	2.89	2.96	2.89	2.82	3.00	2.00	2.67
HyEn	5.01	3.12	4.47	5.93	4.13	4.83	6.24
HyFs	3.45	2.17	3.11	4.32	2.88	4.37	4.33
OIFo	6.09	7.12	6.06	5.06	6.18	3.20	3.88
OIFa	4.63	5.45	4.65	4.07	4.76	3.19	2.97
Mt	2.86	2.82	2.79	2.88	2.79	3.86	3.66
Il	5.04	4.99	4.97	5.08	4.98	5.92	4.65
Ap	1.17	1.14	1.15	1.15	1.15	1.46	1.24
Mg [#]	37.73	37.56	37.44	36.42	37.37	27.53	34.98
A.I.	4.47	4.49	4.37	4.48	4.44	6.25	4.30

Total iron as Fe₂O₃ and FeO recalculated according to Fe₂O₃/FeO = 0.20.
Mg[#] = 100 × MgO / (MgO + FeO + Fe₂O₃), A.I. (Alkali Index) = (Na₂O + K₂O) / [(SiO₂ - 43) × 0.17]. Data of S6 and S7 are from Park (2000)

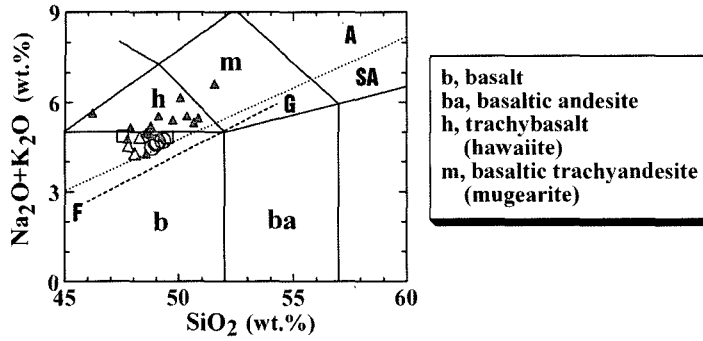


Fig. 11. Total alkali vs. SiO₂ (wt.%) (Le Bas *et al.*, 1986) plot of the Daepodong basalt. The dividing line between alkali (A) and sus-alkaline (SA) magma series is from Irvine and Baragar (1971). Line F-G is division for tholeiitic and alkaline rocks in Hawaii (Macdonald and Katsura, 1964). Symbols: Daepodong basalt: ○ (in this study), △ (data from Lee *et al.*, 1994) □ (data from Park *et al.*, 2000b); basalt in Namsamyoon area of southern part of Jeju area: ▲ (data from Lee *et al.*, 1994).

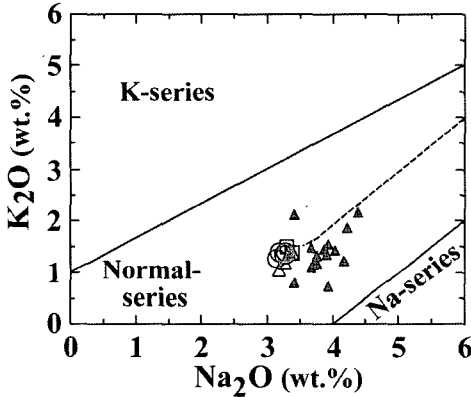


Fig. 12. K₂O vs. Na₂O (wt%) plot diagram for the Daepodong basalt. Symbols are the same as those in Fig. 11.

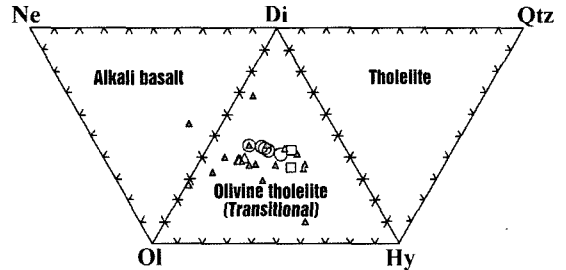


Fig. 13. Collapse of the basalt tetrahedron into the 2-dimension diagram of normative components Ne-Ol-Di-Hy-Qtz (Hyndman, 1985). symbols are the same as those in Fig. 11.

을 제거시킨 후 부산대학교 공동실험실습관 지구환경 기기실에 배치되어있는 암석 분쇄기에서 5분 동안 진동을 주어 분말을 만들었다. 이들 분말시료는 아게이트 사발에서 5-10분간 더 갈아서 미세한 분말 시료를 제작하였다. 주성분 분석은 부경대학교 공동실험실습관에서 SHIMADZU XRF-1700 X-선 형광분석기를 이용하였다.

주성분 원소

대포동현무암의 주성분 원소 분석 결과와 CIPW 노움값은 Table 3과 같다. 이분원 외(1994) 및 하호리와 모슬포·한림도폭(박기화 외, 2000b)의 분석자료와 함께 대포동현무암의 특성을 고찰해 보면 다음과 같다.

본 연구지역의 화산암의 분류를 TAS분류도(Le Bas, *et al.*, 1986)에 적용하였다. 알칼리-서브 알칼리 계열

구분선 일점쇄선(Irvine and Barager, 1971)과 구분선 FG선(Macdonald and Katsura, 1964)에 근거하면, 알칼리 계열의 현무암에 도시된다(Fig. 11). 제주도 남사면 일대의 암석들(이문원 외, 1994)은 현무암에서 하와이아이트(조면현무암)와 뮤저라이트 영역에 도시해 보면, 대포동현무암 분포 지역에서 채취된 시료들은 Na₂O + K₂O 함량이 5wt.% 이하로 모두 알칼리현무암 영역에 해당한다.

본 연구지역의 현무암류를 K₂O-Na₂O 다이어그램(Fig. 12)에 도시해 보면, Lee(1982)가 제주도의 알칼리암은 소덕계열의 특징을 가지나 전체적으로 전형적인 포타식 계열인 고프형(Gough trend)과 소덕 계열의 하와이형(Hawaiian trend)의 중간형인 전이적인 경향(정상계열)을 가진다고 보고한 것과 잘 부합된다.

연구 지역의 현무암류에 대한 노움 광물 분석 결과 노움 석영(Q)은 함유하지 않으며, Hyndman(1985)의 Ne-Ol-Di-Hy-Qtz diagram(Fig. 13)에 도시한 결과, 감

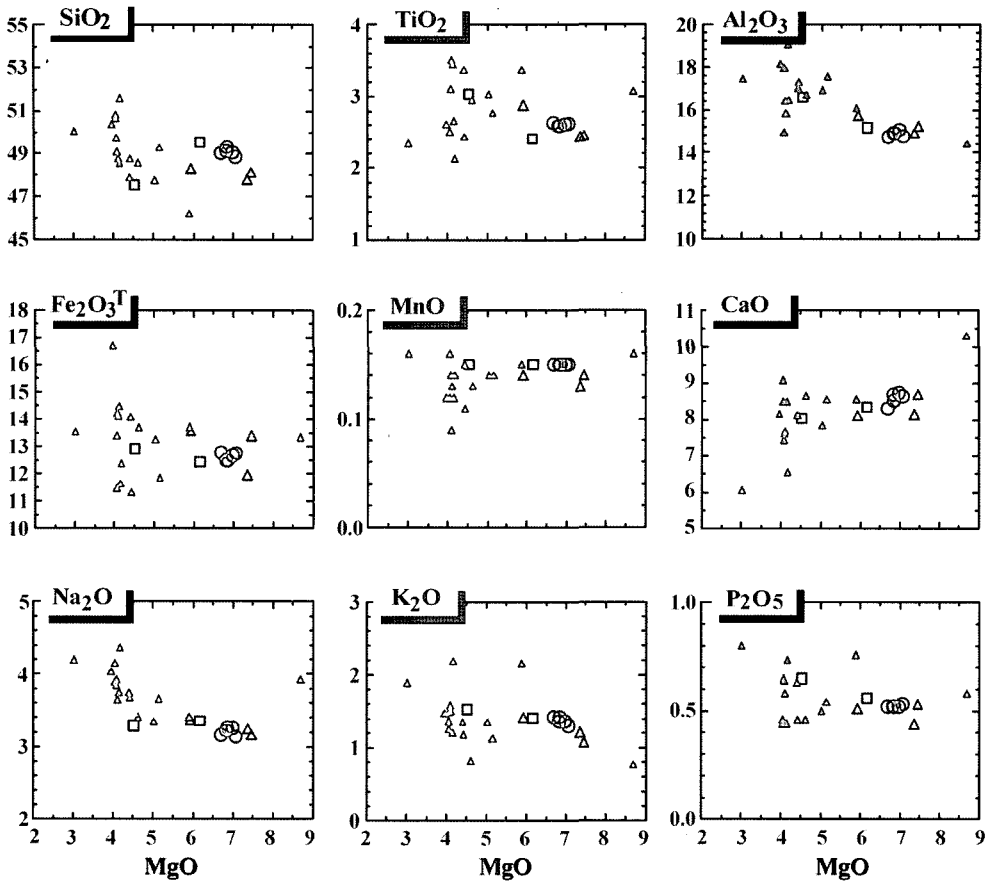


Fig. 14. Harker variation diagrams of major oxide (wt.%) vs. MgO (wt%) of the Daepodong basalt. Symbols are the same as those in Fig. 11.

람석, 투회석, 하이퍼신을 가지는 감람석 쏘레이아이드 족, 변이질현무암(transitional basalt)에 해당된다.

SiO₂와 MgO 성분 함량이 각각 47.6~49.3wt.%, 6.7~7.1wt.%의 범위를 나타낸다. 연구지역의 화산암류의 암석 조성의 분화경향을 알아보기 위하여 분화지수로서 MgO 성분을 이용하여 주성분 원소의 변화 특징을 살펴보았다.

본 대포동현무암의 분석 자료를 한라산 남사면에 분포하는 화산암류(이문원 외, 1994)와 함께 주성분 원소의 변화경향을 도시한 결과(Fig. 14), MgO가 감소함에 따라, Na₂O, P₂O₅, Al₂O₃는 점진적으로 증가하고, TiO₂, Fe₂O₃^T는 거의 일정하지만 약간 증가하는 경향을 보이며, MnO와 CaO는 거의 일정하다가 감소하는 경향을 보인다. Al₂O₃는 증가하는 경향을 가지나 CaO가 거의 일정한 것은 사장석이 마그마 분화에 크게 영향을 미치지 않았음을 의미한다.

대포동현무암의 SiO₂의 성분은 MgO 성분에 비하여 그 변화 범위가 비교적 좁게 나타나며, MgO와 CaO가 감소함에 따라 Al₂O₃가 증가하는 경향을 보이는데, 이는 감람석과 단사휘석의 정출이 분화 작용에 주된 영향을 미쳤음을 나타낸다.

지구조적 위치

Lee(1982)는 제주도 알칼리 화산암류의 전암 화학 성분이 하와이의 것과 유사함에 주목하여 판 내부 환경에서 열점에 의해 형성된 것으로 해석한 바 있다.

Mullen(1983)에 의한 현무암류의 주성분 원소에 의한 지구조적 위치 판별도인 TiO₃-MnO-P₂O₅ 성분도에서 살펴보면, 본 역의 대포동현무암의 성분을 도시해 보면 해양도 알칼리 현무암(OIA)영역에 도시되어 나타난다(Fig. 15).

이는 본 역의 대포동현무암이 인접한 태평양판과 필

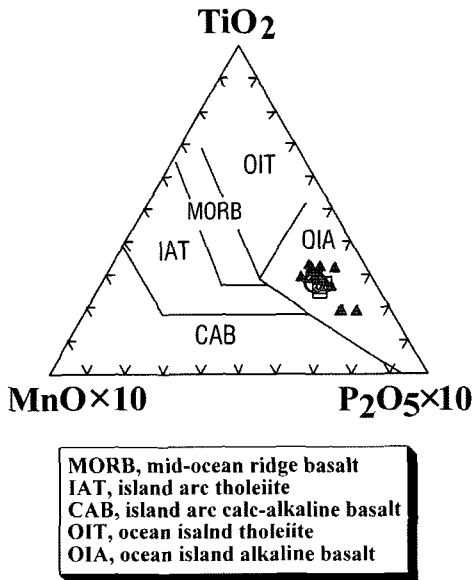


Fig. 15. Tectonic discrimination TiO_2 - MnO - P_2O_5 diagram (Mullen, 1983) of the Daepodong basalt. Symbols are the same as those in Fig. 11.

리핀판의 섭입으로 야기되는 알칼리 화산활동과는 무관한, 지판 내부의 조구적 환경에서 생성된 것임을 지시한다.

결론

제주도 남부 대포동 일대의 지삿개 주상절리를 이루는 현무암에 대한 주상절리의 형태학과 현무암의 암석 기재 및 주성분 암석화학적 특징은 다음과 같이 요약된다.

지삿개 주상절리대에서 관찰되는 다각형의 주상절리는 육면체가 가장 우세하며, 주의 직경 130~139 cm, 주상절리 기둥의 최대면 길이는 90~99 cm, 단면에서 서로 인접한 다각형 사이에 이루는 사이 각 120~129°가 가장 우세하며, 주상유동 띠의 폭은 최소 2~3 cm에서 최대 십 수 cm에 달한다.

주상절리를 이루는 대포동현무암은 약 25만년 전에 녹하지암 분석구에서 분출한 현무암으로 육안상 반상조각이 뚜렷하며, 경하에서 사장석, 감람석, 사방회석, 단사회석(보통회석), 불투명 광물로 구성된다.

사장석은 반정은 An_{52-64} 이며, 석기는 An_{58-62} 로 거의 라브라도라이트에 해당한다. 감람석의 반정의 Fo값은 0.69-0.78이며, 미반정의 Fo값은 0.66으로 나타난다. 단사회석은 $Wo_{38-42} En_{41-48} Fs_{13-17}$ 로서 보통회석(augite)에

해당하며, 사방회석은 성분이 $Wo_{3-5} En_{76-78} Fs_{17-21}$ 로 브론자이트에 해당한다. 불투명 광물은 티탄철석과 마그네타이트로 구성된다.

감사의 글

본 논문을 읽고 문제점에 대하여 유익한 조언과 문장을 개선하여 주신 박계현 교수님과 박준범 박사님께 깊은 감사를 드립니다. 본 연구는 부산대학교 교내 학술연구비(4년과제)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

박기화, 이병주, 조동룡, 김정찬, 이승렬, 김용봉, 이한영, 조병욱, 장영남, 손병국, 전희영, 김용욱, 2000a, 서귀포·하효리도폭 지질보고서(1:50,000). 한국자원연구소, pp. 163.

박기화, 조동룡, 김정찬, 2000b, 모슬포·한림도폭 지질보고서(1:50,000). 한국자원연구소, pp. 56.

박준범과 권성택, 1993, 제주 북부 화산암류의 광물화학, 암석학회지, 2(2), 139-155.

이문원, 원종관, 이동영, 박계현, 김문섭, 1994, 제주도 남사면 화산암류의 화산층서 및 암석학적 연구. 지질학회지. 528-531.

Ault, W.U., Richter, D.H. and Stewart, D.B., 1962. A temperature measurement probe into the melt of the Kilauea Iki lava lake in Hawaii. J. Geophys. Res., 67, 2809-2812.

Barnes, S.J., Coats, C.J.A., and Naldrett, A. J., 1982, Petrogenesis of a Proterozoic nickel sulphide-komatiite association: The Katinig sill, Ungava, Quebec. Econo. Geol., 77, 413-429.

Boyd F.R., 1961, Welded tuffs and flows in the Rhyolite Plateau of ellowstone Park, Wyoming. Geol. Soc. Am. Bull., 72, 387-426.

Carmichael, I.S.E., 1967, The iron-titanium oxides of salic volcanic rocks and their associated ferromagnesian silicates. Contrib. Mineral. Petrol., 7, 5-92.

Crelling, J.C. and Dutcher, R.R., 1968, A petrologic study of a thermally altered coal seam from the Purgatoire River Valley of Colorado. Geol. Soc. Am. Bull., 79, 1375-1386.

Deer, W.A., Howie, R.A., and Zussman, J., 1963, Rock forming minerals. Longmans Group Ltd., London, England, 435 p.

Grossenbacher, K.A and McDuffie, S.M., 1995, Conductive cooling of lava: columnar joint diameter and stria width as functions of cooling rate and thermal gradient. J. Volcanol. Geotherm. Res., 69, 95-103.

Huber, N.K., and Rinehart, C.D., 1967, Cenozoic volcanic rocks of the Devil's Postpile quadrangle eastern Sierra Nevada, California: U.S Geol. Surv. Prof. Pap. 554-D,

- D1- D21.
- 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. *Can. J. Earth Sci.*, 8, 523-548.
- Jackson, K.C., 1970, Textbook of lithology: Newyork, McGraw-Hill Book Company, 552 p.
- Lee, M.W., 1982, Petrology ang geochemistry of Jeju volcanic Island, Korea. *Sci. Rep. Tohoku Univ. Ser. 3*, 15, 177-256.
- 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. *J. Petrol.*, 27, 745-750.
- MacDonald, G.A. and Katsure, T. 1964, Chemical composition of Hawaiian Lavas. *J. Petrol.*, 5, 82-133.
- Mullen, E.D., 1983, MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic enviroments and its implications for petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 62, 53-62.
- Peck, D.L., 1978, Cooling and vesiculation of Alae lava lake. *Hawaii U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 935-B, 59 p.
- Ryan, M.P. and Sammis, C.G. 1978. Cyclic fracture mechanisms in cooling basalt. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 89, 1295-1308.
- Spencer, K.J. and Lindsley, D.H., 1981, A solution model for coexisting iron-titanium oxides. *Am. Min.*, 66, 1189-1201.
- Spry, A., 1962, The origin of columnar jointing, particularly in basalt flows. *Geol. Soc. Australia*, 8, 191-216.
- Spry, A.H., and Solomon, M., 1964, Columnar buchites at Apsley, Tasmania: *Geol. Soc. Lond. Quart. J.*, 120, 519-545.

(2005년 11월 30일 접수; 2005년 12월 10일 채택)