

하와이 킬라우에아 화산 현무암에 대한 암석학적 연구

박병준 · 장윤득*

경북대학교 자연과학대학 지질학과

Petrology of the Basalt of Kilauea Volcano, Hawaii

Byeong Jun Park and Yun Deuk Jang*

Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

요약: 하와이 제도 남단에 위치한 하와이섬의 킬라우에아 화산은 16세기 이래로 1982년 9월까지 계속적이고 간헐적인 분출로 형성된 화산체이다. 킬라우에아 화산 정상부 분화구 지역을 중심으로 야외지질조사, 체계적인 시료채취, 암석기재학 및 지구화학적 특성분석을 수행하였다. 구성광물로는 주요 반정광물인 감람석을 비롯하여, 단사회석, 사장석, 불투명광물들의 반정광물과 유리질 기질로 구성된다. 단사회석과 사장석에서는 취반상조직, 사장석 반정에는 누대구조가 간간히 관찰되었다. 주원소 함량에서 K_2O , P_2O_5 , TiO_2 는 MgO 함량이 감소할 때 증가하는 경향을 보이고 Al_2O_3 와 CaO 는 변곡점을 보이는데 Al 은 사장석, Ca 는 사장석과 단사회석의 결정화와 각각 밀접한 관련이 있는 것으로 해석된다. 감람석의 Fo%값은 60에서 90까지 넓은 변화폭을 가지고 Fo%에 대한 감람석 주원소 값에서 MnO 와 FeO 는 감소하며 반대로 SiO_2 , MgO 와 NiO 는 증가한다. 킬라우에아 화산 현무암의 Ni함량의 변화는 감람석의 모드 함량과 감람석 결정 내의 Ni함량의 변화에 의하여 규제되는 것으로 생각된다.

주요어: 킬라우에아, 현무암, 감람석, 결정분화, Ni 함량

Abstract: Kilauea volcano located in the southern part of Hawaii island chains has been formed by continuous and sporadic eruption activities from 16 century to September of 1982. Kilauea volcano was investigated from collecting the samples of basalt to identify the geochemical characteristics of the lavas. Olivine, clinopyroxene, plagioclase, and opaque minerals with glass groundmass are observed. Clinopyroxene formed glomerophopyritic texture with plagioclase and zoning texture was observed in some of plagioclase phenocrysts. Major elements such as K_2O , P_2O_5 , TiO_2 increased with respect to MgO . Al_2O_3 and CaO show the kink on Harker diagram due to the crystal fractionation of plagioclase and clinopyroxene with plagioclase respectively. Olivine has a wide range of Fo% ranging from 60 to 90, and MnO and FeO in the olivine are decreased with increasing Fo% oppositely increased SiO_2 , MgO , and NiO . Ni in the whole rock is controlled not only by the mode of olivine but also by the Ni abundance in the olivine.

Key words: Kilauea, basalt, olivine, crystal fractionation, Ni variation

1. 서 론

킬라우에아 화산은 하와이 제도의 가장 남쪽에 위치한 하와이섬(일명 Big Island라 함)을 이루는 다섯 개의 화산(코할라, 마우나 케아, 후알라라이, 마우나 로아, 킬라우에아)중의 하나로서 열점 화산활동으로 생성된 해양 화산섬이다. 킬라우에아 화산은 세계에서 가장 큰 화산인 마우나 로아와 같은 형태의 순상화산으

로 해발고도 약 4,000ft에 이르고 1500년대 이후로 계속된 화산 분출에 의해 현재의 화산체 형태를 이루게 되었다. 화산체의 남서쪽과 동쪽으로 열곡대가 발달해 있으며 최근의 화산활동은 동부 열곡대의 Puu Oo 분화구에서 현재 분출활동이 계속 되고 있다.

연구지역인 킬라우에아 정상 분화구지역은 하와이 화산 국립공원 내에 위치하고 있으며 미국 지질 조사소 산하에 하와이 화산 관측소(USGS, HVO)가 정상

*Corresponding author: jangyd@knu.ac.kr

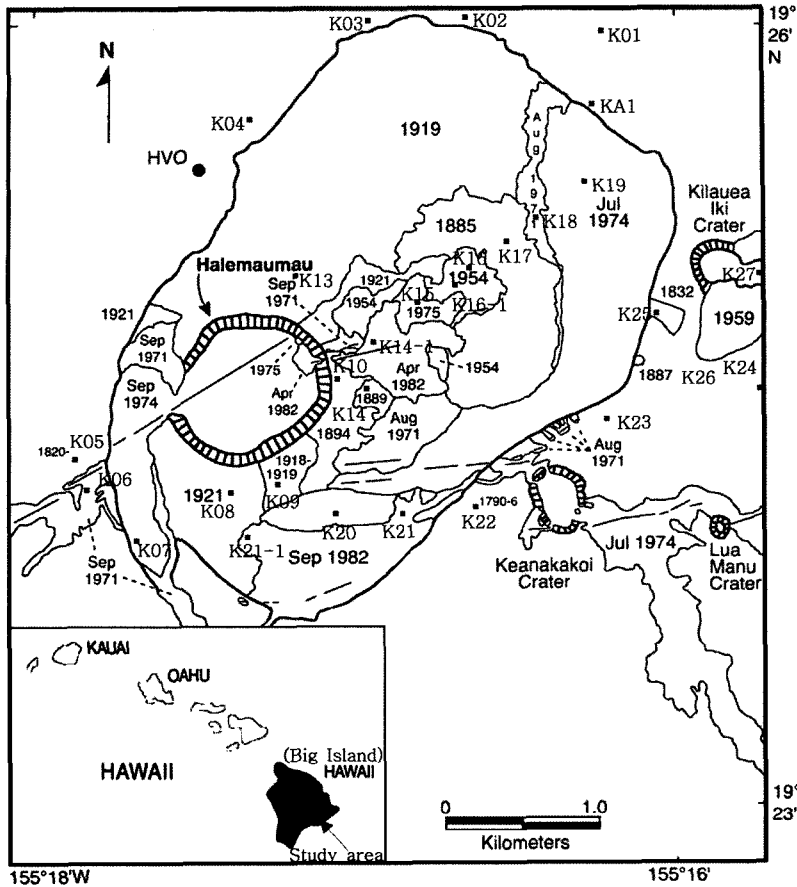


Fig. 1. Geologic map of the summit area of Kilauea Volcano modified from Neal & Lockwood (2003). Sample locations are shown by square dots with numbers. HVO is the USGS Hawaiian Volcano Observatory.

분화구의 북서쪽에 위치하고 있어 그곳 과학자들이 암석학적 연구 뿐 만 아니라 지구물리, 지진관측 등의 연구를 계속 진행하고 있다(Fig. 1). 킬라우에아 화산의 정상 분화구 지역은 지속적으로 분출된 현무암 용암으로 피복하고 있으므로 다양한 연대의 분출현무암으로부터 용암의 지화학적 특성이 시간에 따라 어떻게 변하였는지를 알 수 있다. 이와 같은 용암의 지화학적 경향의 변화 혹은 변동은 맨틀에서 기인한 마그마 조성의 변화와 저장고 내에서 발생한 마그마 성분변화의 복합적인 결과라고 유추된 바 있다(Garcia *et al.*, 2000; Pietruszka *et al.*, 2001).

다양하고 복잡한 마그마 작용을 이해하기 위해서 킬라우에아 화산의 용암 조성과 광물을 체계적으로 조사하는 것이 필수적이며 지난 수 백 년간의 킬라우에아 정상 분화구의 분출 현무암 용암들은 킬라우에아 화산의 마그마 작용을 이해하는데 아주 중요한 정보를 제

공 할 것이다(Pietruszka and Garcia, 1999a, 1999b). 기존의 암석학적, 지화학적 연구들은 킬라우에아 정상 화산에서 분출한 용암의 조성변화가 감람석 결정분화와 마그마 분화의 결과라고 주장한다(Powers, 1955; Wright, 1971; Wright and Fiske, 1971).

킬라우에아 화산의 정상 분화구 지역을 중점적으로 체계적인 지질조사와 시료채취를 실시하였으며 이를 통해 16세기부터 가장 최근의 분출활동이 있었던 1982년 분출까지의 연도별 분출 현무암 시료를 채취하여 암석기재학적 연구 및 암석화학 분석을 실시하였다. 본 연구의 목적은 킬라우에아 분화구의 용암류에 대한 체계적인 시료채취와 화학조성 분석치를 바탕으로 킬라우에아 정상 분화구를 형성시켜온 화산체의 정상부 마그마 저장고에서의 마그마 활동의 시간적인 변화양상을 추적하고 마그마 활동의 변화양상과 분출 현무암의 지화학적 변화와의 관련성을 고찰해 보는 것이다.

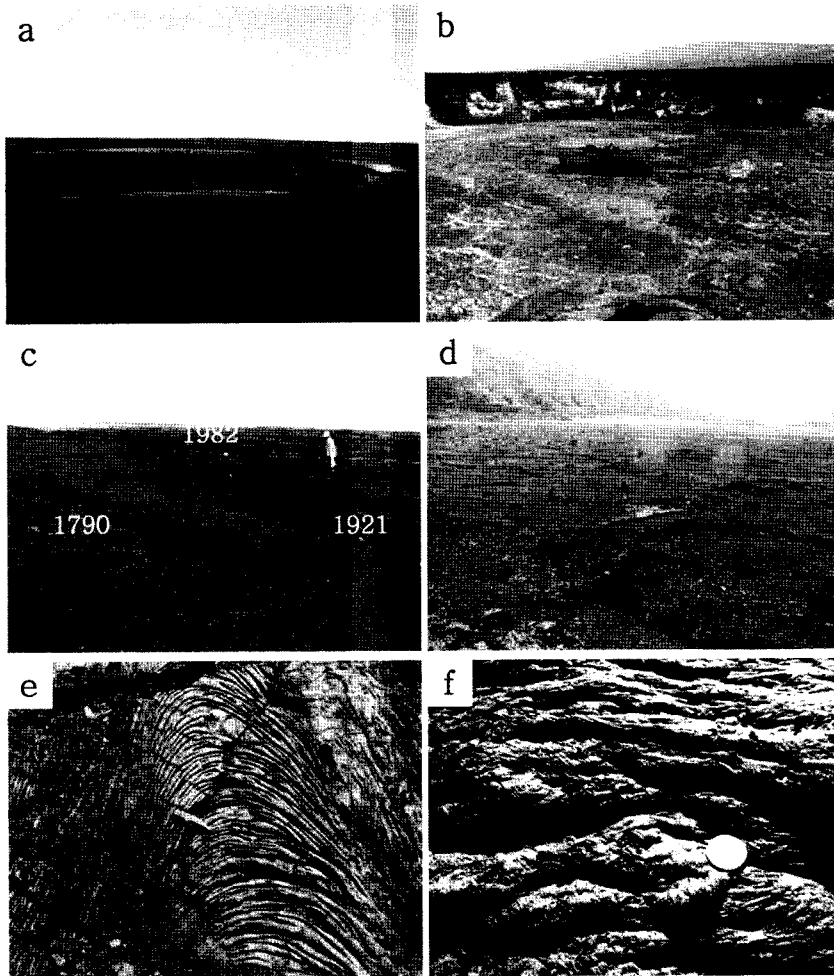


Fig. 2. Photographs of the Kilauea volcano's summit caldera region. (a) Kilauea summit caldera showing Halemaumau crater. (b) Halemaumau crater looking behind Mauna Loa volcano. (c) Triple junction of three lavas whose eruptions years are 1790, 1921, 1982, respectively. (d) Kilauea Iki crater with cracked bottom surface. (e) Ropy structure. (f) Lava flow surface.

지질개요 및 분출역사

지질개요

킬라우에아 분화구(Fig. 1)의 규모는 길이 4 km, 너비가 3.2 km이며 분화구 바닥의 면적이 약 10.5 km²이다(Dvorak, 1992). 분화구를 형성시킨 정상부 마그마 저장고의 위치는 분화구의 남서쪽에 위치한 할레마우마우(Halemaumau) 분화구의 직 하부 약 2-3 km 깊이에 위치한 것으로 추정된다(Pietruszka and Garcia, 1999a). 분화구의 북쪽, 북서쪽, 북동쪽 경계는 일련의 계단상 단층대로 구성되며 분화구 벽 높이가 100미터 이상인 곳도 있다(황상구 외, 2003). 분화구 내부는 19

세기, 20세기 분출 용암이 주로 피복하고 있으며 분화구 외부는 시대적으로 오래된 화산암류가 주변지역을 넓게 피복하고 있다.

분화구 내부의 북쪽은 1919년 분출 용암이 넓게 분포하고 있으며 분화구 남쪽에는 가장 최근에 분출한 1982년 9월 용암이 분포한다. 분화구 서쪽에는 1924년 함몰붕괴에 의해 생성된 직경 약 1 km와 낙차 약 40 m 인 할레마우마우 분화구가 자리 잡고 있다(Fig. 2a, 2b). 분화구 바닥은 아직도 증기와 유황가스가 올라오고 있으며 이 바닥부분을 1974년 9월 분출 용암이 피복하고 있다. 분화구 중앙부는 19, 20세기 용암이 넓게 피복하고 있으며 분화구 동편에는 74년 7월 용암이 피복

하고 있다. 분화구 남단에 1982년 용암과 접하는 1921년과 1790년 용암들은 야외 조사 시 암석표면의 색 차이에 의해서도 확연히 구분된다. 가장 최근의 분출 용암인 1982년 용암은 검은색을 띄는데 반해 1921년 1790년 용암은 풍화작용으로 붉게 산화된 모습을 볼 수 있다(Fig. 2c). 분화구의 동단에는 킬라우에아 이키(Kilauea Iki) 분화구가 자리 잡고 있는데 이 분화구는 1959년 폭발적인 분출 활동으로 생성된 분화구이다(Fig. 2d). 분출 현무암의 야외 산출양상은 파호에호에(Pahoehoe)가 주를 이루었으며 아아(Aa) 현무암은 조사지역에서 관찰되지 않았다. 파호에호에 용암류에서는 특징적인 새기줄구조(Fig. 2e)가 빈번하게 관찰되었으며 용암류의 유동방향을 유추할 수 있었다(Fig. 2f).

분출역사

킬라우에아 정상 분화구의 분출역사는 1500년대부터 1982년 9월까지 계속적이고 간헐적으로 있어왔으나 과학적인 관측과 조사에 의한 정확한 연구는 화산 관측소가 세워진 1912년 이후부터 수행되었다. 그 이전의 분출기록은 구전과 탄소동위원소 연대측정에 기초한 자료에 근거하고 있다. 1790년에 격렬한 폭발적 분출이 킬라우에아 정상부 분화구 지역에서 발생하였으며 격렬한 분출과 정상부 분화구가 형성되는 붕괴가 동반되었다. 1820년에서 1823년까지는 폭발적 분출양상 보다는 분화구 내부에서 용암분천이 분출하는 양상이 주를 이루었으며 1823년에 첫 번째 기록에 근거한 분출활동은 240 m 깊이 분화구에서 여러 화도로부터 분출이 있었다. 1823년에서 1924년까지는 거의 계속적이고 조용한 용암 호수 분출양상을 보인다. 1924년 지표아래 낙차 약 300 m의 함몰 붕괴에 의한 할레마우마우 분화구는 1832년에 낙차 100 m 정도의 분화구 붕괴와 분화구 주변 분출, 1840년에 100 m 정도 붕괴와 동부 열곡대 분출 그리고 1868년 진도 7.8의 지진과 그에 따른 90-180 m 분화구 함락 등의 지질사건을 통하여 형성되었다.

1924년 할레마우마우 분화구가 생기는 큰 함몰분출 이후 1982년 9월 분출까지 간헐적인 짧은 기간 용암 분출이 분화구 내부 혹은 림 주변에서 발생하였다. 1924년 이후 1934년까지 수 일에서 한 달까지 할레마우마우 분화구 내에서 분출이 있었다(Finch, 1940; Jaggard, 1947). 할레마우마우는 이후 17년 동안 분출활동이 없다가 1952, 1954, 1961, 1961-1968, 1971, 1974, 1975, 1982년에 분화구 주변과 내부에서 틈 분출을 하였다. 1959년 킬라우에아 이키 분화구 분출은 매우 큰 용암 분천으로 다른 분출양상과는 확연히 구분된다. 1982년

9월 이래로 킬라우에아 정상 분화구에서의 분출은 더 이상 없었다. 그러나 1983년부터 현재까지의 분출은 동부 열곡대에 Puu Oo 분화구에서 분출활동이 계속되고 있다. 이는 킬라우에아 정상 마그마 저장고의 화도가 동부 열곡대의 지점으로 이동하였음을 시사하고 있다.

연구방법

킬라우에아 정상 분화구를 대상으로 체계적인 야외 지질조사와 샘플채취를 실시하였다. 분출연대가 오래된 17세기 분출 현무암 시료들은 분화구 외곽에서, 20세기 분출한 최근의 용암은 분화구 내부에서 분출 현무암 시료 27개와 스코리아 시료 2점을 각각 채취하였다. 채취된 시료들은 증류수로 수회 세척하여 해수의 오염성분을 제거한 후에 박편제작과 전암 분석을 실시하였다. 총 29개 시료에 대하여 연마박편을 제작하여 구성광물의 조성, 광물조직을 편광현미경과 EPMA를 이용하여 관찰하였다. 모드분석은 반정과 석기의 구분에 초점을 맞추어 표준점법법에 의해 수행되었다. 연구지역 암석의 암석화학적 특징을 밝히기 위해 모든 시료에 대해서 기기분석 및 습식분석을 실시하였다. 암석화학분석을 위하여 우선 시료를 암석압쇄기를 사용하여 1-2 cm 크기로 분쇄하고 난 후 Miller를 이용하여 분말을 제작하고 난 후 아게이트를 이용하여 최종적으로 미분말을 제작하였다. 주원소 분석은 암석 파우더 분말로 비드를 제작하여 경북대학교 지질학과의 X선 형광분석기(XRF, philips 1404-10)를 이용하여 정량 분석하였다. FeO 및 Fe₂O₃의 함량은 적정기기(METTLER TOLEDO DL50 Graphix)를 사용하여 습식법으로 적정하였다. 주원소 함량의 정확도는 표준시료 BHVO-1의 값을 1919년 시료와 비교하였는데 약 0.1% 정도의 오차범위를 보였다(Table 2). 미량원소 분석은 대전 기초과학연구원(ICP-MS)을 이용하였다. 감광성 광물의 화학조성 분석은 경북대학교 공동실험실습관의 EPMA(SHIMAZDU-1600)를 사용하였으며 분석조건은 가속전압 15 kV, 전자빔 크기 5 μm, 빔 전류 20 nA이며, 분석치 보정 프로그램은 ZAF를 적용하였다.

암석기재

킬라우에아 정상 분화구 현무암의 암석기재학적 연구로부터 마그마의 변화양상을 고찰하려는 시도와 그 중요성은 이미 인식되어 왔다(Hofmann, 1984; Ho and Garcia, 1988). 1790년 이전 시료 9점을 포함한 1790년 이후 분출시료에서부터 1982년 9월 분출 시료에 까지

Table 1. Modal compositions of the basalt in the Kilauea volcano summit region (unit in vol.%)

Eruption date	Sample No.	Ol		Cpx		Pl		Gm
		ph	mph	ph	mph	ph	mph	
Sep. 1982	K 21	0.0	0.6	0.0	0.3	0.0	0.0	99.1
Sep. 1982	K 21-1	0.0	0.8	0.0	0.5	0.0	0.0	98.7
Apr. 1982	K 14-1	0.1	1.2	0.0	0.3	0.0	0.4	98.0
1975	K 15	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	99.6
Sep. 1974	K 07	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	99.8
Jul. 1974	K 19	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	99.4
Sep. 1971	K 06	0.4	1.2	0.0	0.2	0.0	0.0	98.2
Aug. 1971	K 18	2.0	0.3	0.0	0.4	0.0	0.2	97.1
1959	K 27	16.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	81.5
1954	K 16	0.0	0.3	0.0	0.4	0.0	0.0	99.3
1954	K 16-1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	99.8
1921	K 08	1.5	2.0	0.2	2.3	0.0	0.0	94.0
1919	K 13	0.1	0.3	0.0	0.2	0.0	0.0	99.4
1918-19	K 09	2.5	3.0	0.3	1.5	0.0	0.0	92.7
1892-94	K 10	0.1	0.3	0.0	0.4	0.0	3.0	96.2
1888-89	K 14	1.0	2.5	0.3	2.1	0.0	4.0	90.1
1882-85	K 17	0.0	0.3	0.0	1.3	0.0	1.4	97.0
1832	K 25	0.3	1.8	0.0	0.1	0.0	0.0	97.8
1790	K 20	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.0
17C	K 04	0.5	0.7	0.1	0.3	0.1	0.3	98.0
17C	K 05	0.0	0.2	0.1	0.3	0.0	0.2	99.2
17C	K 24	5.0	2.0	1.0	0.1	0.0	0.0	91.9
17C	K 03	3.0	12.0	1.0	7.0	5.0	20.0	52.0
16C	K 02	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	99.9
16C	K 23	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	99.8
16C	K 01	1.0	10.0	0.3	6.0	2.0	15.0	65.7
16C	K 22	1.0	7.0	0.4	7.0	0.0	4.0	80.6
16C	K 26	2.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	97.7
16C	K A1	3.0	10.0	1.0	5.0	4.0	18.0	59.0

Abbreviations: Ol; olivine, Cpx; clinopyroxene, Pl; plagioclase, Gm; groundmass, phenocrysts (ph); >0.5 mm, microphenocrysts (mph); 0.1-0.5 mm, groundmass; <0.1 mm

시료에 대해서 암석기재학적 연구를 실시하였다. 킬라우에아 정상 분화구 지역 현무암을 구성하고 있는 광물의 종류, 구성광물들의 상대적 함량, 그리고 구성광물과 그들의 상대적 함량이 시간에 따른 변화를 고찰해 보았다.

현미경 하에서 조사된 시료는 이차변질이나 풍화의 영향을 거의 받지 않은 상태인 것으로 확인되었다. 모드분석결과 대부분의 시료는 기공이 전체의 15% 이상을 차지할 정도로 다공질이며 반정의 비율이 전체의 5% 이하를 차지하고 있지만 K01, K03, K22, K27, KA1 시료는 특히 반정의 비율이 다른 시료에 비하여 상당히 높다(Table 1). 반정(직경 0.5 mm 이상)으로 산출되는 광물로는 감람석, 단사휘석, 사장석이며 석기를

이루는 것으로는 단사휘석과 사장석이 거의 대부분을 차지하며 소량의 감람석과 유리질 기질, 불투명 광물로 구성된다. 광물의 함량은 감람석이 가장 많은 부분을 차지하고 있으며 그 다음으로 사장석, 단사휘석의 함량 순이며 불투명 광물은 아주 소량 수반한다. 본 연구지역은 전체적으로 광물의 함량이 달라지는 것과 반정과 석기의 비율이 달라지는 점 이외에는 각 암석들에서 나타나는 조직은 거의 유사하다. 석기부분은 감람석, 단사휘석의 미반정들이 사장석 라스들 사이를 채우는 간립상 조직(intergranular texture)을 보이며 유리질이 석기를 이루는 사장석, 휘석, 감람석 광물들 사이를 채우는 간진상 조직(intersertal texture)이 빈번히 관찰된다.

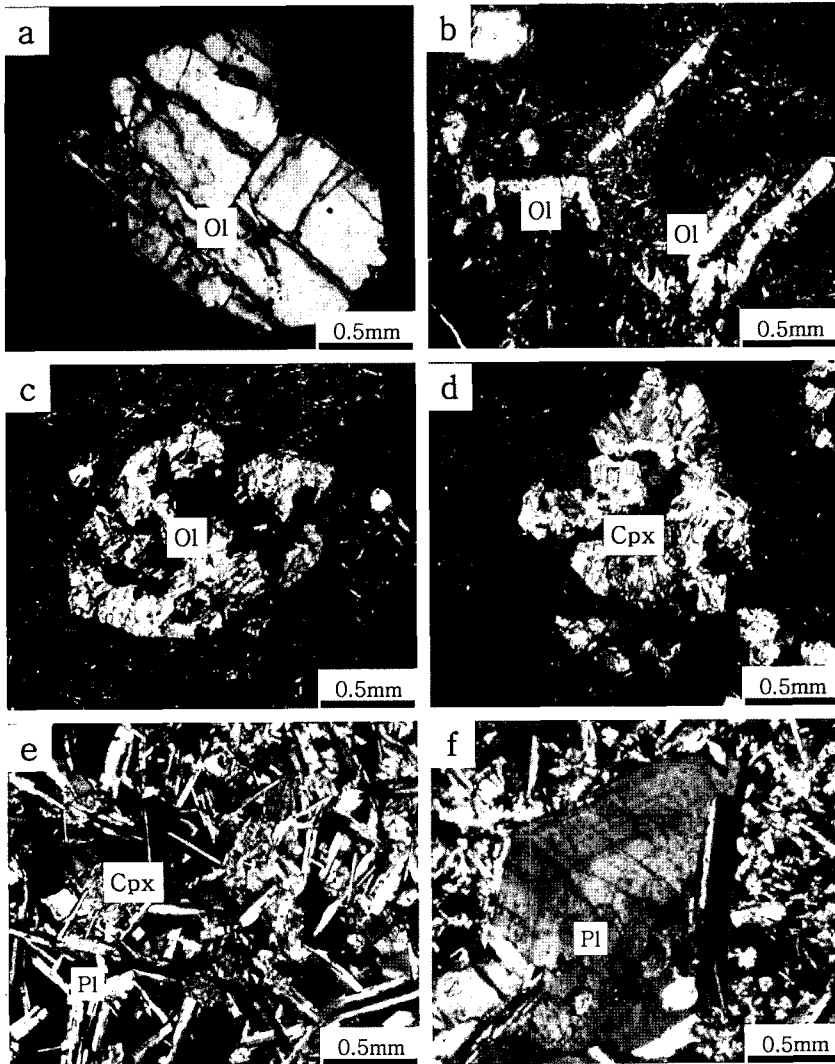


Fig. 3. Photomicrographs of Kilauea basalt. (a) Euhedral olivine phenocryst. (b) Accicular olivine phenocryst. (c) Skeletal olivine phenocryst. (d) Glomeroporphyritic texture of clinopyroxenes. (e) Intergranular texture of clinopyroxene and plagioclase. (f) Zoning texture in plagioclase phenocryst.

감람석은 킬라우에아 정상 분화구 현무암의 가장 빈번하게 관찰되는 반정 광물로서 자형, 타형, 신장형 등 다양한 결정형이 관찰된다. 감람석은 분출 이전에 킬라우에아 정상부 마그마 저장고에서 성장하여 결정을 이루고 난 후 분출한 광물이라고 생각된다(Garcia *et al.*, 2003). 반정 광물 중 감람석은 야외에서 그 모양과 색깔에 의해 육안으로 쉽게 관찰될 정도로 감람석의 함량이 다른 현무암보다 많다는 것을 알 수 있다. 자형을 잘 이룬 감람석 반정(Fig. 3a)은 저장고 내에서 천천히 성장하면서 분출 이전에 결정이 형성된 후에 분출

하였을 것으로 생각되며 신장된 감람석들(Fig. 3b)은 마그마 저장고에서 천천히 결정 성장을 하였기 보다는 분출 동안 혹은 분출 직후에 급격한 냉각에 의한 온도 변화가 급격할 때 성장한 것이라 생각된다(Helz, 1987). 일부 감람석 반정은 결정의 일부가 용식된 만곡구조를 보이는데 이는 감람석 반정의 형성과정 중에 발생한 불안정한 성장 환경을 지시한다(Shalley, 1992). 감람석 반정은 1~3%가 주를 이루고 있는데 반해 1959년 킬라우에아 이키 분화구에서 분출한 용암은 감람석 반정을 거의 18%까지 포함하고 있다. 감람석의 모드 함량

과 전암의 MgO 함량 간의 밀접한 상관관계를 가지고 있다(Fig. 6).

단사회석은 거의 모든 시료에서 나타나며 0.5에서 8%까지의 모드 함량치를 가진다. 반정광물의 단사회석은 보통 칼스베드 쌍정을 보이기도 한다. 반정으로 산출되는 것보다 미반정(직경 0.1-0.5 mm)과 기질에서 나타나는 것이 흔하며 특히 K01, K02, KA1 시료에서 많이 나타난다(6%). 반정으로 산출될 때는 자형을 이루는 것에서 타형을 가진 것까지 다양하게 산출된다. 단사회석은 감람석 미반정 혹은 다른 단사회석들과 취반상조직을 빈번히 구성한다(Fig. 3d). 전자현미분석 결과 기질을 이루는 유색 광물들 중 단사회석이 감람석보다 훨씬 많은 부분을 차지하고 있다. 미반정의 단사회석에서는 사장석과 함께 간립상 조직을 형성한다(Fig. 3e).

사장석은 반정으로 극히 드물게 나타나며 주로 미반정크기의 사장석 라쓰들과 기질부를 이루는 광물로 산출된다. 대부분의 사장석 미반정에는 알바이트 쌍정이 관찰되며 길게 신장된 사장석 라쓰도 발견된다. 일부 사장석 반정에서는 누대구조가 간혹 관찰되었다(Fig. 3f). 미반정의 단사회석 혹은 다른 사장석 라쓰들과 취반상조직을 보이기도 한다.

석기를 이루는 것은 사장석과 단사회석이 대부분이며 일부 불투명광물이 수반된다. 스코리아 산상을 보이는 K26, K27번 시료에서는 유리질 기질이 잘 관찰된다. 불투명 광물은 크롭스피넬, 티탄철석이 관찰되고 그 함량은 티탄철석이 대부분을 차지하고 있다. 조직으로는 간립상조직, 간진상조직, 취반상조직, 누대구조, 기질부의 구과상 구조 등이 관찰되었다.

주원소 암석화학

킬라우에아 화산 현무암의 주원소들에 대해서 MgO에 대한 변화도(Fig. 4)에서 몇 가지 구분되는 특징이 나타난다. MgO가 증가할 때 전반적으로 감소하는 원소들로는 Na₂O, P₂O₅, K₂O, 그리고 TiO₂가 있으며 Fe₂O₃*는 감소하다가 증가하는 약간 분산된 양상을 보인다. 특히 Al₂O₃와 CaO는 MgO가 증가할 때 증가하던 값이 갑자기 감소하는 변곡점을 가지는 양상을 보인다. 유사한 경향이 SiO₂에서도 약하게 관찰된다.

주원소중 SiO₂는 1959년 킬라우에아 이키 분화구에서 분출한 K27번에서 47 wt%의 가장 낮은 함량을 가지고 KA1 시료에서 51 wt%의 가장 높은 함량을 가진다. TiO₂는 K03번 시료의 1.74 wt%를 제외하고는 2.1에서 2.9까지의 함량범위를 나타낸다. Al₂O₃는 11에서 14 wt% 정도의 값을 보이는데 1959년 K27번 시료는

10 wt%의 낮은 값을 보이고 있다. Fe₂O₃*값은 12에서 13 wt%까지의 좁은 변화폭을 보이고 MnO는 0.15에서 0.17 wt%까지 변화의 폭이 매우 좁다. 반면에 MgO의 함량은 6에서 16 wt%까지 다양하게 나타난다. CaO는 10에서 12 wt%까지 변이 폭을 가지고 Na₂O는 2에서 3 wt%까지 변한다. K₂O와 P₂O₅는 1 wt% 미만의 낮은 함량을 가지는데 K₂O는 0.3에서 0.6 wt%까지 P₂O₅는 0.1에서 0.3 wt%까지의 변이 폭을 보여준다(Table 2; Fig. 4).

Al₂O₃는 MgO 함량이 감소하는 방향, 즉 마그마 분화가 진행될수록 처음에서 증가하다가 MgO 함량이 7 wt% 부근에서 Al₂O₃ 함량이 갑자기 감소한다. 유사한 변화 경향이 CaO와 SiO₂에서도 관찰되는데 CaO 역시 MgO 7 wt% 구간에서 증가하던 값이 갑자기 감소하는 패턴을 보인다. SiO₂는 전반적으로 같은 MgO 값에서도 변화 폭이 넓어서 분산된 넓은 변화폭을 가지지만 MgO 약 7 wt% 구간에서 변곡점을 가지고 함량이 갑자기 감소하는 경향을 보인다. Fe₂O₃*값은 분화가 진행될수록 전반적으로 감소하다가 7 wt% 구간에서 다시 증가하는 경향을 보인다. 이와는 반대로 K₂O는 MgO 함량이 감소할수록 전반적으로 증가하는 경향이나 값이 분산되어 직선적이지 않다. K₂O와 함께 Na₂O, P₂O₅, 그리고 TiO₂는 분화가 진행될수록 계속 증가하는 경향을 보인다.

감람석 광물화학

본 연구지역 현무암에서 반정으로 지속적으로 상당한 양으로 산출되는 감람석에 대하여 광물의 정량분석을 실시하였다. 감람석의 MgO, SiO₂, NiO는 Fo%가 증가함에 따라 증가하는 정관계를 나타내고 반대로 FeO와 MnO는 Fo%가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. CaO는 전반적으로 증가하다가 감소하는 경향을 보이고 Al₂O₃와 Na₂O는 낮은 함량을 보이고 있어 뚜렷한 경향을 나타내지 않는다. SiO₂의 함량은 38에서 43 wt%까지 변하며 FeO는 10에서 33 wt%까지 상당히 넓은 범위를 가진다. MgO는 28에서 48 wt%까지 큰 변위 폭을 보인다. TiO₂, Al₂O₃, MnO, CaO, Na₂O, K₂O, NiO 등은 함량이 1%미만으로 아주 소량 함유하고 있다. 감람석의 MgO와 FeO의 mol%로 구한 Fo% 값은 59에서부터 90까지 상당한 변이 폭을 가지는 것을 확인할 수 있다(Table 3; Fig 5). SiO₂는 Fo%가 증가할수록 38에서 44까지 직선적으로 증가하는 양상을 보여준다. SiO₂는 Fo%가 높은 값에서 낮은 값으로 변할 때 감람석이 fosterite에서 fayalite으로 성분이 바뀌어 감에 따라 SiO₂값이 감소하는 것으로 생각된다

Table 2. Major element compositions of the basalt in the study area (unit in wt%)

Eruption date	Sample #	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total	Mg#	Ni (ppm)
Sep. 1982	K21	49.99	2.49	13.08	8.24	3.48	0.16	8.57	10.88	2.28	0.47	0.25	100.81	65	147
Sep. 1982	K21-1	50.38	2.42	13.23	8.51	2.64	0.16	8.50	10.86	2.48	0.45	0.24	100.82	64	143
Apr. 1982	K14-1	50.33	2.65	12.42	7.51	4.14	0.17	7.47	11.23	2.10	0.49	0.26	99.62	64	87
1975	K15	49.98	2.56	13.32	8.30	3.03	0.16	7.17	11.23	2.24	0.48	0.25	99.65	61	81
Sep. 1974	K07	49.95	2.56	13.43	7.38	4.19	0.17	7.30	11.18	2.41	0.49	0.26	100.13	64	93
Jul. 1974	K19	49.82	2.36	11.59	9.10	2.40	0.16	9.42	10.52	1.90	0.43	0.22	98.95	65	173
Sep. 1971	K06	50.51	2.68	13.19	7.44	4.33	0.17	7.14	11.11	2.16	0.50	0.27	100.32	63	83
Aug. 1971	K18	49.40	2.91	12.67	9.15	2.54	0.17	6.33	10.94	2.18	0.54	0.29	98.12	55	69
1959	K27	46.60	2.25	9.91	8.68	3.02	0.16	16.93	9.66	1.74	0.46	0.23	100.60	78	454
1954	K16	49.35	2.88	13.43	8.34	3.56	0.17	7.29	11.69	2.32	0.54	0.28	100.77	61	83
1954	K16-1	49.90	2.75	13.28	8.28	3.09	0.17	7.20	11.36	2.28	0.54	0.26	100.02	61	94
1921	K08	49.68	2.65	12.76	7.84	3.90	0.16	9.12	10.33	1.93	0.49	0.27	100.01	67	210
1919	K13	49.93	2.81	13.89	8.50	2.80	0.17	7.00	11.46	2.46	0.55	0.28	100.79	59	94
1918-19	K09	49.04	2.57	12.33	8.34	3.05	0.16	9.58	10.82	2.17	0.49	0.24	99.71	67	245
1892-94	K10	49.42	2.72	13.46	8.17	3.15	0.16	7.42	10.86	2.42	0.53	0.28	99.49	62	126
1888-89	K14	49.44	2.63	13.80	8.18	3.17	0.16	7.48	11.11	2.24	0.49	0.26	99.87	62	127
1882-85	K17	50.18	2.80	13.08	8.11	3.32	0.17	6.61	11.25	2.14	0.52	0.28	99.35	59	75
1832	K25	50.26	2.46	13.28	7.90	3.78	0.17	7.12	10.86	2.19	0.38	0.23	99.49	62	78
1790	K20	50.29	2.72	12.57	7.75	3.94	0.17	6.74	10.47	2.46	0.50	0.28	98.75	61	90
17C	K03	48.95	1.75	11.66	7.82	3.93	0.16	12.35	10.12	1.71	0.33	0.16	99.80	74	289
17C	K24	49.24	2.26	12.18	8.38	3.21	0.16	10.46	10.30	2.01	0.34	0.20	99.66	69	240
17C	K04	50.09	2.50	13.34	7.91	3.10	0.16	6.67	10.69	2.41	0.45	0.24	98.43	60	89
17C	K05	50.37	2.46	13.00	7.98	2.91	0.16	6.71	10.72	2.16	0.44	0.25	98.06	60	93
16C	K02	49.71	2.13	11.49	9.09	3.15	0.17	10.84	10.10	1.94	0.32	0.19	100.14	68	177
16C	K23	49.53	2.43	13.33	9.18	2.24	0.17	7.51	10.70	2.21	0.41	0.24	98.96	59	82
16C	K01	50.60	2.31	13.57	8.51	2.56	0.16	7.21	11.07	2.31	0.40	0.23	99.88	60	94
16C	K22	50.47	2.27	11.56	8.01	3.97	0.16	10.66	10.02	1.96	0.38	0.24	100.59	70	220
16C	K26	48.61	2.64	12.86	7.71	4.26	0.17	9.52	10.77	2.06	0.54	0.27	100.26	69	228
16C	KA1	50.72	2.50	13.20	7.02	4.89	0.17	7.29	11.01	2.28	0.39	0.23	100.48	65	80
1919	BHVO-1*	49.94	2.71	13.80	8.58	2.82	0.17	7.23	11.40	2.26	0.52	0.27	99.70	59	.

$$\text{Mg\#} = \{\text{MgO}/(\text{MgO} + \text{FeO})\} \times 100$$

(Jang, 2003). NiO에서도 Fo%가 증가할 수 록 증가하는 경향을 잘 나타낸다. 이와는 반대로 FeO는 Fo%가 증가할 수 록 35에서 9까지 직선적으로 감소하는 것을 뚜렷이 보여주고 MnO도 0.5에서 0.1까지 점진적으로 감소하는 경향을 보여준다. CaO는 Fo%가 증가할 때 Fo% 80 구간대에서 약간의 정체를 보여주는데 전반적으로 분산된 값을 보인다. Na₂O와 Al₂O₃는 감람석에서 아주 소량으로 포함되어 나타나며 Fo%값이 증가할 때 증가 혹은 감소의 경향을 보이지 않으며 값이 분산되거나 0에 가까운 낮은 값을 나타낸다. 감람석의 Fo% 값은 같은 분출연도의 동일한 시료에서도 동일한 값을 가지지 않을 뿐만 아니라 분출 연대가 다른 시료들 간에도 큰 차이가 관찰된다.

토 의

암석 주원소 변화

연구지역 현무암은 주원소 함량변화에 따른 몇 가지 특이한 경향을 나타낸다. 먼저 Al₂O₃는 MgO 함량이 감소하는 마그마 분화의 경향에서 MgO 7wt% 구간까지 증가하던 함량이 MgO 7wt%를 기점으로 갑자기 감소하는 변곡점을 만든다(Fig. 4). 이는 MgO 7wt%를 전후하여 마그마 액상 내에서 Al 원소를 포함하는 사장석의 분별결정화 작용으로 인한 함량의 급감으로 생각된다. CaO도 이와 유사한 경향을 보이는데 이러한 경향을 Peterson과 Moore(1987)는 하와이 현무암에서 결정화의 상이 바뀌는 것으로 해석하였다. MgO에 대

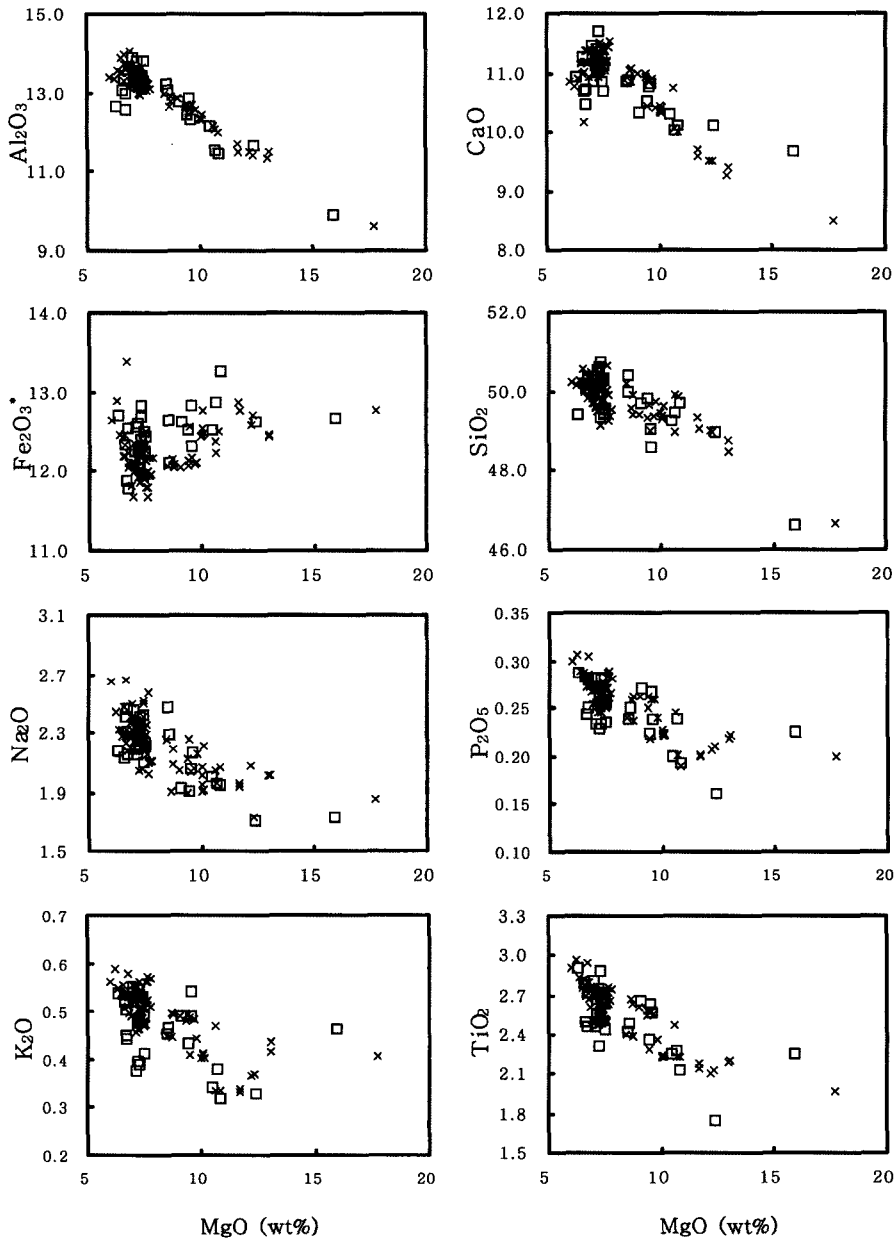


Fig. 4. MgO variation diagram for kilauea summit lavas. The data from this study are plotted with open squares and symbol X represents the data from Garcia (2003). Fe₂O₃*: total iron as Fe₂O₃

하여 정관계로 증가하던 CaO는 Ca를 취하는 사장석과 단사휘석의 결정화로 인해 액상에서 Ca가 제거되는 것을 시사한다. 이는 사장석과 단사휘석 반정이 함께 취반상조직을 이루는 현상으로 위와 같은 해석을 뒷받침하고 있다.

Fe₂O₃*의 값은 전반적으로 MgO값이 감소할 수 록

감소하다가 MgO 7 wt%구간을 전후하여 다시 증가하는 경향을 보이는데 이는 분화 초기에 Fe가 감람석과 불투명광물로 많이 집중되어 액상에서는 함량이 감소하다가 MgO 7 wt% 구간부터는 단사휘석과 사장석등의 다른 광물들이 정출하기 시작하여 상대적으로 FeO 값이 증가한 것으로 생각된다. SiO₂역시 MgO 7 wt%

Table 3. Representative microprobe analyses of olivine from basalt in the study area (unit in wt%)

Sample #	K21	K14-1	K15	K07	K19	K06	K18	K27	K16	K16-1	K08	K13	K09	K10
Eruption date	1982.9	1982.4	1975	1974.9	1974.7	1971.9	1971.8	1959	1954	1954	1921	1919	1918	1892
SiO ₂	43.39	41.24	41.55	40.72	43.13	40.25	41.63	43.03	40.55	40.71	41.53	41.59	40.91	41.02
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.09	0.04	0.07	0.04	0.03	0.01	0.02	0.04
Al ₂ O ₃	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05	0.02	0.04	0.04	0.03	0.04	0.06	0.03	0.07	0.03
FeO	13.07	16.46	16.38	15.85	13.71	19.60	19.98	12.41	18.08	19.20	9.72	17.35	13.41	20.31
MnO	0.22	0.21	0.24	0.25	0.17	0.33	0.27	0.12	0.22	0.20	0.09	0.28	0.19	0.30
MgO	42.73	41.72	42.03	41.90	43.36	39.43	37.61	43.77	41.05	39.25	48.05	39.82	44.78	37.80
CaO	0.27	0.27	0.29	0.29	0.24	0.18	0.30	0.29	0.32	0.31	0.23	0.31	0.29	0.32
Na ₂ O	0.04	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
NiO	0.41	0.20	0.21	0.26	0.34	0.25	0.26	0.44	0.26	0.20	0.31	0.23	0.40	0.26
Total	100.16	100.14	100.74	99.30	101.02	100.07	100.19	100.17	100.58	100.00	100.02	99.62	100.07	100.09
Fo%	85	82	82	82	85	78	77	86	80	78	90	80	86	77

Sample #	K14	K17	K25	K20	K04	K05	K24	K03	K02	K23	K01	K22	K26	KA1
Eruption date	1888	1882	1832	1790	17C	17C	17C	17C	16C	16C	16C	16C	16C	16C
SiO ₂	41.07	41.15	39.52	39.72	40.65	41.60	40.74	38.58	41.34	41.86	41.66	39.08	41.00	39.98
TiO ₂	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.05	0.02	0.03	0.03	0.04	0.01	0.00
Al ₂ O ₃	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.07	0.00	0.03	0.03	0.10	0.02	0.06	0.03
FeO	19.24	19.60	29.87	24.93	19.43	19.69	16.56	31.32	14.08	16.20	17.33	24.76	12.13	21.88
MnO	0.28	0.30	0.36	0.31	0.27	0.32	0.21	0.43	0.21	0.24	0.27	0.31	0.23	0.33
MgO	39.11	38.55	29.56	34.23	39.86	38.12	42.08	29.71	44.13	41.37	40.31	35.64	46.27	37.32
CaO	0.29	0.32	0.22	0.26	0.29	0.30	0.29	0.23	0.22	0.27	0.31	0.21	0.28	0.31
Na ₂ O	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.02
K ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
NiO	0.20	0.20	0.14	0.15	0.24	0.10	0.28	0.13	0.33	0.24	0.27	0.20	0.43	0.16
Total	100.26	100.20	99.70	99.62	100.79	100.05	100.25	100.45	100.37	100.24	100.28	100.27	100.42	100.03
Fo%	78	78	64	71	79	78	82	63	85	82	81	72	87	75

Fo% = {MgO mol%/(MgO mol%+FeO mol%)} × 100.

구간에서 함량이 증가하다가 감소하는데 사장석, 휘석 등이 결정화할 때 Si 원소가 사용되기 때문인 것으로 생각된다. K₂O, Na₂O, P₂O₅, 그리고 TiO₂는 광물에 의한 정출과정에 크게 포함되지 않으므로 분화가 진행할수록 계속 마그마 액상에 남아 있어 함량이 계속 증가하는 경향을 보인다고 생각된다.

주원소들의 시간별 변화경향을 추적하고자 분출연도가 정확히 알려진 1790년 이후 시료에 대하여 조사하였다(Fig. 6). Al₂O₃와 CaO의 주원소 함량곡선은 유사한 변화경향을 나타내는데 반해 MgO는 이와 반대의 경향을 나타낸다. 감람석 모드 함량은 MgO 함량곡선과 비슷한 경향을 따르는 것으로 보아 전암의 MgO 함량이 감람석 모드 함량에 좌우된다는 것을 알 수 있다.

Al₂O₃, CaO, MgO 등의 주원소의 시간적 변화는 킬라우에아 마그마 저장고의 변화의 결과로 해석될 수

있으나 MgO변이의 경우 시간에 따른 미약한 증가의 경향이 관찰되므로 일반적인 현무암질 마그마 분화경로와 배치된다. 한편 시간에 따른 감람석 모드의 변화를 고려해 볼 때 MgO의 변화경향과 완벽하게 일치하므로 킬라우에아 현무암의 MgO변화는 마그마의 변화라기보다는 화성활동 혹은 마그마 활동의 물리적인 변화에 기인한 감람석 반정의 함량변화에 기인하는 것으로 생각된다.

Ni 함량 변화

킬라우에아 현무암의 감람석의 Ni 함량은 Fo%와 밀접한 상관관계를 보이고 있다(Fig. 5). 감람석 중의 Ni 함량은 감람석과 마그마가 평형상태를 유지하고 있다면 감람석의 Ni 분배지수에 의하여 결정되므로 감람석의 Ni 분배지수가 킬라우에아 현무암이 분출되는 약

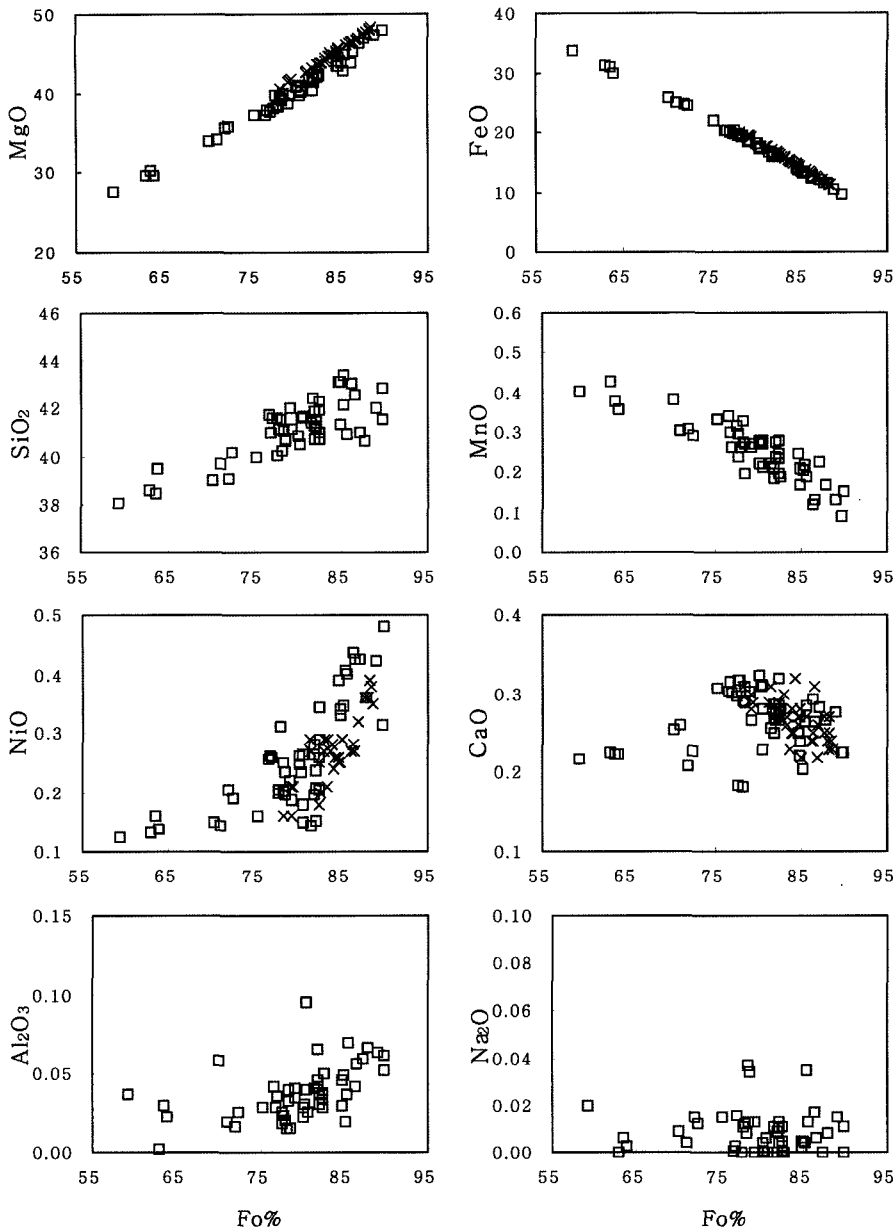


Fig. 5. Fo% variation diagram in olivine. The data from this study are plotted with open squares and symbol X represents the data from Garcia (2003).

200년 정도 내에서 변하지 않았다고 가정하면 감람석 중의 Ni함량의 관찰된 감소는 마그마 내의 Ni 함량의 시간적인 감소를 시사한다. 따라서 킬라우에아 현무암의 Ni 값의 급격한 변화는 마그마 저장소가 폐쇄계 혹은 개방계였는가를 지시해준다. 약 200년간의 킬라우에아 현무암의 Ni값의 변화는 1959년의 높은 이상을

비롯한 수 차례의 이상이 관찰된다(Fig. 7). 그러나 암석중의 Ni 이상이 발생하는 시점이 감람석의 모드가 높은 지점과 일치하고(Fig. 6) 또한 감람석내에 Ni 변화양상과도 동일하므로 관찰된 킬라우에아 현무암의 Ni 이상은 마그마 저장소에 Ni가 부화된 새로운 마그마의 유입과 같은 일시적인 마그마 개방의 결과가 아

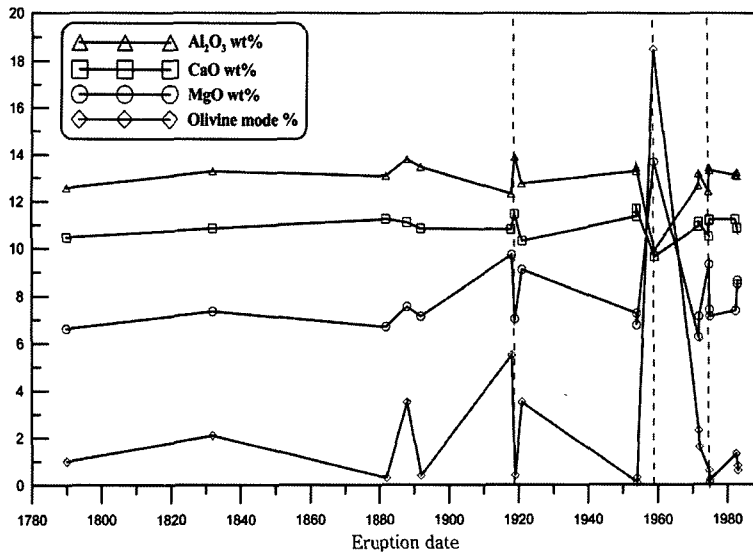


Fig. 6. Temporal variations of MgO, CaO, and Al₂O₃ wt% in whole rock and olivine mode.

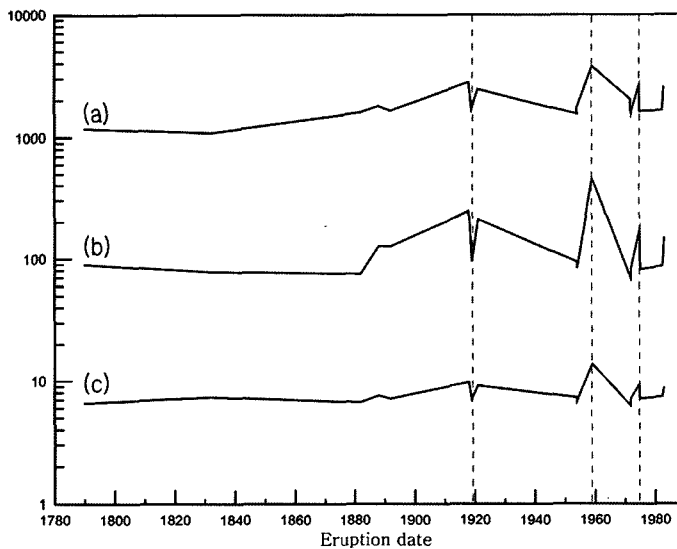


Fig. 7. Temporal variations. (a) Ni abundance of the Kilauea olivine (unit in ppm). (b) Ni abundance from the Kilauea whole rock (unit in ppm). (c) MgO wt% from the whole rock XRF analysis. Dashed lines represent abrupt changes of composition occurred in 1919, 1959, and September of 1974 respectively.

나라 마그마 활동의 증가로 인한 감람석 반정의 집중에 의한 결과로 해석된다.

결론

하와이 제도 최남단의 하와이섬(빅 아일랜드)의 킬라우에아 화산 정상부 분화구 분출 현무암 용암류에

대한 암석학적 결과는 아래와 같다.

1. 현미경 관찰 결과 기공이 전체의 15 vol% 이상을 차지할 정도로 다공질이며 감람석은 킬라우에아 정상 분화구 현무암의 가장 주된 정출 광물로서 자형을 잘 가지는 것에서부터 길게 성장한 모양까지 다양하게 산출된다. 이는 감람석 결정성장의 환경이 안정한지 불안정하였는지의 차이에 기인한다. 특히 1959년 킬라우

에아 이키 분화구에서 분출한 용암은 감람석반정의 함량이 급격하게 증가하였다. 단사회석은 미반정으로 나타나며 취반상조적을 이루며 사장석은 반정으로 거의 나타나지 않고 미반정과 기질로 존재하며 반정 중 누대조적을 보이는 것도 발견된다.

2. 전암에 대한 주원소 분석결과 Al_2O_3 , CaO, SiO_2 함량의 킱크를 보이고 P_2O_5 , TiO_2 , K_2O 는 MgO 함량이 감소할 수록 선적으로 증가한다. MgO 7 wt% 구간대에서의 Al_2O_3 변곡은 사장석 광물의 분별결정화작용으로 해석되며 CaO 변곡은 사장석과 단사회석의 광물정출로 인한 변화로 생각된다.

3. 연구지역에서 산출되는 현무암내 감람석 광물은 Fo% 값이 60에서 90까지 상당한 변이 폭을 가지고 같은 분출년도의 같은 박편에서 Fo% 값의 차이가 나는 것을 관찰할 수 있다. Fo% 값에 대한 감람석 내에 주원소들의 함량은 분화가 될 수록 즉, Fo% 값이 감소할 수록 MgO, SiO_2 , NiO는 감소하고 FeO와 MnO는 증가하는 경향을 보인다.

4. 모드분석치의 감람석 함량의 시대적 변화추이, 전암의 미량원소 Ni의 시대별 함량변화, 그리고 감람석 반정 내에 Ni 함량 이 세 가지는 똑 같은 변화 경향을 보이고 이것은 원소 Ni가 모드분석의 감람석 함량에 규제되고 또한 감람석 결정 내에 Ni 함량에도 규제되는 것을 밝혀냈다.

5. 암석중의 Ni 이상이 발생하는 시점이 감람석의 모드가 높은 지점과 일치하고 또한 감람석내에 Ni 변화양상와도 동일하므로 관찰된 킬라우에아 현무암의 Ni 이상은 마그마 저장고에 Ni가 부화된 새로운 마그마의 유입과 같은 일시적인 마그마 개방의 결과가 아니라 마그마 활동의 증가로 인한 감람석 반정의 집중에 의한 결과로 해석된다.

감사의 글

본 논문의 질적 향상에 좋은 조언을 해주신 황상규 교수님과 익명의 심사위원께 진심으로 감사드립니다. 본 연구는 학술진흥재단의 지원(R05-2003-000-10783-0)을 받아 수행되었다. 한국 기초과학지원연구소의 실험분석 지원에 감사를 드린다. 현지조사에 도움을 주신 경북대학교 글로벌 챌린저 프로그램에 감사를 표한다.

참고문헌

황상규, 이문원, 원종관, 우경식, 이광춘, 2003, 하와이 섬의 지질과 마우나로아 및 킬라우에아의 화산활동. 암석

학회지, 12(4), 184-195.
 Dvorak, J. J., 1992, Mechanism of explosive eruption of Kilauea volcano, Hawaii. *Bull. Volcanol.*, 54, 638-645.
 Finch, R. H., 1940, Engulfment at Kilauea Volcano. *The Volcano Letter*, 470, Smithsonian Institution Press, 1-4.
 Garcia, M. O. Pietruszka, A. J. and Rhodes, J. M., 2003, A petrologic perspective of kilauea volcano's summit magma reservoir. *J. Petrol.*, 44(12), 2313-2339.
 Garcia, M. O., Pietruszka, A. J., Rhodes, J. M., and Swanson, K., 2000, Magmatic processes analyses of glass and olivine from PuuOo eruption of Kilauea Volcano, Hawaii. *J. Petrol.*, 41, 967-990.
 Garcia, M. O., Ito, E., Eiler, J. M., and Pietruszka, A. 1998, Crystal contamination of Kilauea Volcano magmas revealed by oxygen isotope analyses of glass and olivine from Puu Oo eruption lavas. *J. Petrol.*, 39, 803-817.
 Ho, R. A. and Garcia, M. O., 1988, Origin of differentiated lavas at Kilauea Volcano, Hawaii: Implications from the 1955 eruption. *Bull. Volcanol.*, 50, 35-46.
 Hofmann, A. W., Feigenson, M. D. and Raczek, I., 1984, Case studies on the origin of basalt: III. Petrogenesis of the Mauna Ulu eruption, Kilauea, 1969-1971. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 88, 24-35.
 Helz, R. T., 1987, Diverse olivine types in lava of the 1959 eruption of Kilauea Volcano and their bearing on eruption dynamics. in *Volcanism in Hawaii*, US Geol. Surv. Prof. Pap., 1350, 691-722.
 Jaggard, T. A., 1947, Origin and Evolution of Craters. *Geol. Soc. Am. Memoir*, 121, 508
 Jang, Y. D., 2003, Compositional variation in olivine in the skaergaard intrusion. *J. Petrol. Soc. Korea.*, 12-3, 110-118.
 Neal, C. A. and Lockwood, J. P., 2003, Geologic map of the summit region of Kilauea Volcano, Hawaii. US Geological Survey Map I-2759.
 Peterson, D. W. and Moore, R. B., 1987, Geologic history and evolution of geologic concepts, Island of Hawaii, US Geol. Surv. Prof. Pap., 1350-1, 149-189.
 Pietruszka, A. P., Rubin, K. H., and Garcia, M. O., 2001, ^{226}Ra - ^{230}Th - ^{238}U disequilibria of historical Kilauea lavas (1790-1982) and the dynamics of mantle melting within the Hawaiian plume. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 186, 15-31.
 Pietruszka, A. J. and Garcia, M. O., 1999a, The size and shape of Kilauea Volcano's summit magma storage reservoir: a geochemical probe. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 167, 311-320.
 Pietruszka, A. J. and Garcia, M. O., 1999b, A rapid fluctuation in the mantle source and melting history of Kilauea volcano inferred from the geochemistry of its historical summit lavas (1790-1982). *J. Petrol.*, 40-8, 1321-1342.
 Powers, H., 1955, Composition and origin of basaltic magma of the Hawaiian Islands. *Geocim. Cosmochim. Acta*, 7, 77-107.

- Shelley, D., 1992, *Igneous and Metamorphic Rocks under the Microscope: Classification, Textures, Microstructures and Mineral Preferred-Orientations*, Chapman & Hall, 175pp.
- Wagner, T. P. *et al.*, 1998, Trace element abundances of high-MgO glasses from Kilauea, Mauna Loa and Haleakala volcanoes, Hawaii. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 131, 13-21.
- Wright, T. L., 1971, Chemistry of Kilauea and Mauna Loa in space and time. *US Geol. Surv. Prof. Pap.*, 735, 1-40.
- Wright, T. L. and Fiske, R. S., 1971, Origin of differentiated and hybrid lavas of Kilauea Volcano, Hawaii. *J. Petrol.* 12, 1-65.
-
- (2007년 4월 3일 접수; 2007년 4월 30일 채택)