

하와이, 빅 아일랜드의 푸우오오 용암에 대한 암석학적 연구

권석범¹ · 장윤득^{1,*} · 박병준¹ · 김영규¹ · 김정진²

¹경북대학교 지질학과, ²안동대학교 지구환경과학과

Petrology of Puu Oo lavas from the Big Island, Hawaii

Suk Bom Kwon¹, Yun Deuk Jang^{1,*}, Byeong Jun Park¹,
Yeong Kyoo Kim¹, and Jung Jin Kim²

¹Department of geology, kyungpook National University, 1370 Sankyuk-dong, Buk-gu, Daegu 702-701, Korea

²Department of Geoenvironmental Sciences, Andong National University,
388 Seongcheon-dong, Andong-city, Gyeongsangbuk-do, 760-749, Korea

요약: 푸우오오 용암분출은 1983년에 분출이 시작된 이래 현재까지 활동하고 있으며, 다양한 성분 변화와 (5.6~10.1 wt.% MgO), 지표분출 면적을 가지는(~2 km³) 하와이의 역사적인 분출 중에 하나이다(Garcia *et al.*, 1999). 다년간에 걸쳐 하와이 분출에 대한 연구가 수행되어 왔으나, 최근 수년 이내에 분출된 푸우오오 용암의 지질학적인 특성에 대한 연구 결과의 부재와 푸우오오 분출 역사를 통한 하와이 마그마 분출과정의 특성을 파악하고자 시공간적으로 채취한 시료를 바탕으로 광물과 암석의 조직과 화학조성연구를 수행하였다. 박편 상에서 단사휘석이나 사장석 반정은 드물고 감람석이 대부분의 반정을 차지한다. 이것은 푸우오오 지역이 마그마 분화 초기단계에 머물러 있다는 것을 지시한다. MgO를 상대로 주원소에 대해 도시해 본 결과 MgO가 증가함에 따라 TiO₂, Al₂O₃, Na₂O, SiO₂는 감소하는 경향을 보인다. 미량원소의 경우 K₂O값에 대한 Zr, Y, Sr 그리고 V 도표에서 P18과 P19시료가 타 용암에 비해 진화가 더 진행된 영역에 도시되고 있다. 2003년에서 2006년 분출년도 간에 높은 Ni 함량이 나타나는데, 이것은 동일 기원마그마의 유입에 의한 결과이다.

핵심어: 하와이, 푸우오오, 마그마 분화, 미량원소, Ni

Abstract: The Puu Oo eruption in Hawaii since 1983 is one of the largest eruptions on Hawaii's volcanic history with prominent compositional variation (5.6~10.1 wt.% in MgO content). Although intense researches of Hawaiian eruption have been conducted for recent years, there is no up-to-date study on Puu Oo lavas that is erupting hot lavas today. in order to obtain basic information on the geological characteristics of the eruption including any noticeable change in its petrological trend and magma dynamics, we applied several geological approaches such as field survey, systematic sampling, petrography, mineralogy, and geochemistry. Clinopyroxene and Plagioclase phenocrysts are rarely observed on the thin section, however Olivine crystals are much more obvious in the study area. It indicates that Puu Oo is early stage of magma differentiation. Variation diagram of whole rock composition shows that the elements such as TiO₂, Al₂O₃, SiO₂ and Na₂O decrease with increasing MgO. In the trace element Sr, Y, Zr and V versus K₂O, P18, P19 samples are plotted in primitive area. Variations of the Ni contents during 2003~2006 may suggest a sudden change in magma composition probably caused by new magma injection.

Key words: Hawaii, Puu Oo, magma differentiation, trace element, Ni

서 언

하와이 군도는 북태평양의 중앙부에 위치한 알레시안(Aleutian) 열도로부터 적도 중앙부지역까지 연장된

하와이 군도-엠펜러 해산열이라고 불리는 길이 5,600 km 인 화산구조의 동남단에 위치한 일련의 섬들이다(Loren, 2000). 하와이 군도는 8개 이상의 섬들이 존재하는데, 이 화산섬들 중에 하와이 섬이 가장 최근의 섬이며, 현

*Corresponding author: jangyd@knu.ac.kr

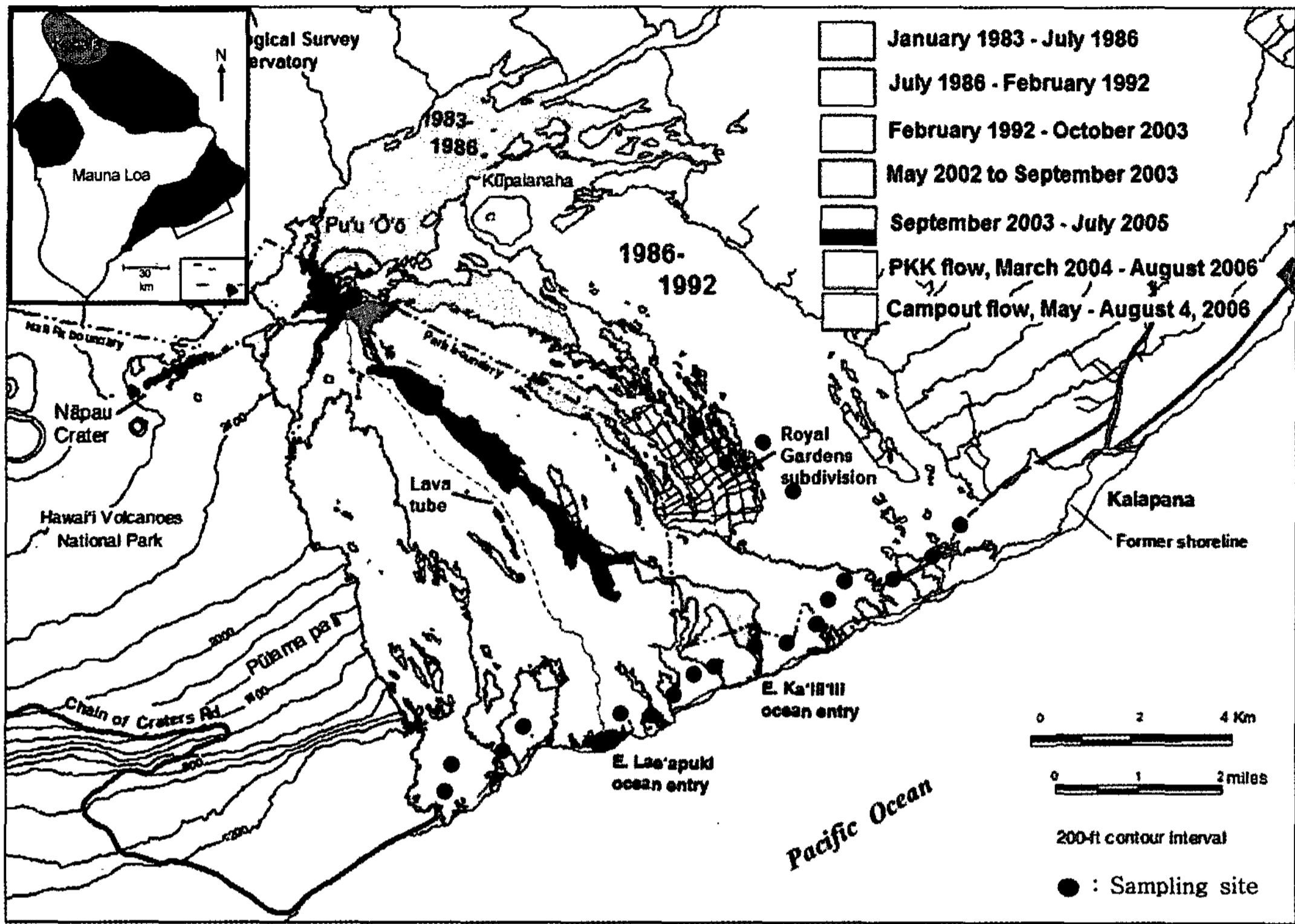


Fig. 1. Geological map of the Puu Oo eruption on the east rift of Kilauea Volcano, Hawaii (1983~2006). The inset shows the location of the eruption site on the island. Dots indicate location of sampling. Modified from Hawaiian Volcano Observatory (2006).

재 화산활동이 진행 중인 화산은 빅 아일랜드 동부 열곡대의 푸우오오 분화구와 하와이 남동쪽의 활화산인 로이히(Loihi) 해산이다. 푸우오오 분화구는 킬라우에아 동부 열곡대의 중앙부에 위치하고 있다(Fig. 1). 푸우오오 화산의 최초 분출은 1983년 킬라우에아 동부 열곡대를 중심으로 시작되어 현재까지 활발한 분출 양상을 보이고 있다. 지속적인 용암분출물의 집적으로 1997년에는 남동부 해안가에 약 2 km²에 해당하는 새로운 땅을 형성하였다. 분출이 시작된 이후 최초 20일간 열극 분출이 이루어졌고, 1983년 3월 분출부터 푸우오오 분화구에서 본격적인 분출이 시작되었다(Wolfe et al., 1987). 킬라우에아 화산의 경우에는 역사적으로 오래된 분출을 반영하듯 용암 표면 자체만 보더라도 분출 시기가 구분이 될 정도로 분출시기에 따라 풍화도의 차이를 나타내는 특징적인 양상을 보여주고 있으나, 푸우오오 지역은 최근에 분출이 시작되어 현재도 활발하게 활동이 이루어지고 있어 용암의 표면이 신선하여 육안으로는 상대적인 분출 연도를 인지하기가 용이하지 않다. 하와이의 대부분 화산들이 유사한 진화

단계를 거쳤지만 각각의 하와이 화산들은 활동을 시작한 이후에 분출 시기별로 독특한 화학조성을 가지는 용암을 분출했다(Macdonald and Katura, 1964; 1988). 다양한 암석학적 및 지화학적 특성을 가지는 하와이 용암 중 현재 활발하게 활동 중인 푸우오오 지역의 용암들에 대해 야외조사와 대표적인 표본채취 및 실내연구를 실시하였다. 이 논문의 목적은 2000년 이래로 분출된 푸우오오 용암의 암석학적 특징에 대한 최초의 암석학적 연구로서 이전의 푸우오오의 용암류에 대한 암석학적 연구결과를 종합하여 분출년도에 따른 마그마 특성 변화 유무와 변화 특성에 대한 원인을 파악하고자 하는 것이다.

지질 개요 및 분출 사건 요약

지질개요

하와이 섬(일명: Big island)은 코할라(Kohala), 후알라이(Hualali), 마우나케아(Mauna Kea), 마우나로아(Mauna Loa), 킬라우에아(Kilauea)등의 화산으로 이루

어 졌다(Fig. 1). 하와이 화산을 활동하게 하는 근원은 정지된 열점이며, 이러한 열점 위를 태평양판이 이동하면서 하와이는 현재 8개의 섬을 이루었다. 수회의 반복적인 관입과 분출로 형성된 푸우오오 화산은 킬라우에아 동부 열곡대의 중앙부에 위치하고 있다. 지진과 및 지표조사(Wolfe *et al.*, 1987)에 의하면 푸우오오의 마그마 저장소는 분출당시에 형성된 것이 아니라, 분출활동이 일어난 이후에 나타난 것이며, 상부 동부 열곡대로부터 연쇄적인 관입에 의해 열곡대의 중심부로 마그마를 충전하였다. 초기 분출이 시작된 이후 맨틀에서부터 마그마 저장고로 연간 0.1 km³의 마그마가 공급되었고, 마그마 저장고에는 분출 전 동쪽과 남서쪽 지역으로 마그마가 주입되기 전에 일시적으로 저장되어 이루어지고 있었다(Dzurisin *et al.*, 1984). 중앙 화도의 일부 마그마는 열곡대의 깊은 심도로 주입되거나, 저장고를 우회하여 이동을 하였다(Ryan 1988; Delaney *et al.*, 1990). 2007년 현재 활동 중인 용암류가 분출되는 아푸키(Apuki) 지역을 포함하여 연구지역 최근의 화산 활동에 의해 연구지역의 해안도로는 용암류로 대부분 피복되었다. 해안을 따라 여러 개의 튜물러스들이 발달해 있고(Fig. 2A), 아푸키 지역에는 용암관을 통해 용암류가 해안으로 유입되고 있었으며, 뜨거운 용암류가 해수와 만나 상당량의 증기를 발생 시키고 있다(Fig. 2B). 분출된 용암류가 지표를 이동하면서 물성 변화에 의하여 생성되는 용암류의 반복적인 해안으로의 유입은 새로운 땅을 형성시켰다(Fig. 2C). 연구지역에서 관찰되는 용암류의 형태는 주로 파호에호에(pahoehoe)와 아아(aa)용암이 관찰되는데, 파호에호에는 표면이 매끄럽고 새끼모양의 특징을 보여주는데 비하여(Fig. 2D), 아아 용암은 표면이 매우 거친 형상을 나타낸다(Fig. 2E). 해안과 인접한 지역은 대체로 표면이 광택을 보이는 은회색의 파호에호에가 주로 분포하고, 로얄 가든 지역에서 아아가 주로 분포하고 있다(Fig. 2E & F).

분출역사

푸우오오의 최초 분출은 1983년 1월 3일에 시작되어 6개월 동안 동부 열곡대의 나파우(Napau)와 칼라우아(Kalaua)분화구 사이에 열곡을 따라 약 7.5 km에 달하는 용암을 간헐적으로 분출 하였다(Fig. 1). 1983년 6월부터 푸우오오에서 분출이 본격적으로 나타났으며, 이후 3년 동안 매 3~4주 마다 약 24시간 정도의 분출을 나타냈으며, 이때 달하는 용암분천이 관찰되기도 하였는데, 이로 인해 화도 주위에 분석구와 255 m 높이의 스페터구가 형성되었다. 용암분천은 주로 아아를 형성하여 화구에서 남서쪽방향으로 6 km 급사면에 존재

하는 로얄 가든에 1983, 1984년 두 차례에 걸쳐 16채의 가옥을 파괴시켰다.

1986년 7월 푸우오오로의 마그마 공급이 끊어지고 남동쪽으로 약 3 km 지점에 위치한 쿠파이나나하(Kupaianaha)로 분출 장소가 이동되었다. 분출 장소가 달라지면서 이곳에서는 푸우오오의 활발한 초기 분출과 달리 약 5년 동안 비교적 조용한 분출이 이루어졌다. 1991년 푸우오오와 쿠파이나나하 사이에 2 km의 열곡 체계가 형성이 되었고 이후 1992년 2월 푸우오오 측부에서 열곡 체계가 형성 되어 푸우오오에서의 분출이 다시 시작되었으며, 이때 쿠파이나나하 분출은 생을 마감하였다.

1992년 말에서 1997년 1월까지 용암관을 통해 대부분의 용암이 바다로 흘러 들어갔고, 카모아모아(Kamoamo) 지역으로 분출면적을 넓혀갔다. 1997년 6월 중엽 푸우오오 측부의 화구로부터 용암관을 통해 용암류는 1997년 7월 하와이 화산 국립공원의 동쪽 경계부 근처 해안가에 도달하였으며, 1998년에는 근접해 있는 와하올라(Wahaula)와 카모쿠나(Kamokuna) 해안가로 용암류가 유입되었다.

2000년 초기에 들어서 용암류는 화산국립공원의 동쪽 경계부를 가로질러 사유지를 잠식하였다. 이후 2002년 5월까지 용암은 총 189개의 구조물을 파괴 시켰다. 2001년 말에 해안으로 유입되던 용암류들의 활동은 서서히 지체되기 시작했고, 2002년 1월에 해안으로의 유입이 마감되었다. 2002년 3월말 해발 686~610 m 사이에서 폭 1.5 km, 길이 2.7 km의 8개의 방패형 용암구들이 형성되었다. 2002년 초기 3개월 동안에 기괴하고 다양한 크기의 호니토들이 용암관위에 형성이 되었고, 2002년 4~5월 동안 푸카 누이(Puka Nui)에서 수십 개의 스페터구가 형성이 되었으며, 새로운 용암류가 피트분화구에서 흘렀다. 2002년 중엽 이래로 푸카 누이의 직경이 180~200 m에 달하였고, 새로운 스페터구가 서쪽 틈에서 형성되었다. 2004년 1월 소규모의 용암류는 서쪽 틈과 동쪽 외륜부를 따라 3회 정도 범람하였다. 2004년 2월 6일에서 9일 사이에 분화구내의 화도로부터 용암은 최초로 푸카 누이내로 유입되었다. 2004년 11월 서쪽부의 용암들이 처음으로 동쪽 아푸키 해안으로 들어갔고, 2005년 1월에는 동쪽 용암들이 해안으로 유입되었다. 2005년 6월 용암류는 하이캐슬(Highcastle)에서 카이일리(Kailili)까지 해안선의 넓은 지역을 가로질러 해안으로 들어갔고, 2007년 현재는 용암관을 통해 아푸키 해안과 이곳으로부터 남서쪽으로 1km정도 떨어진 지점에서 소량의 용암류가 해안으로 흘러들어 가고 있다.

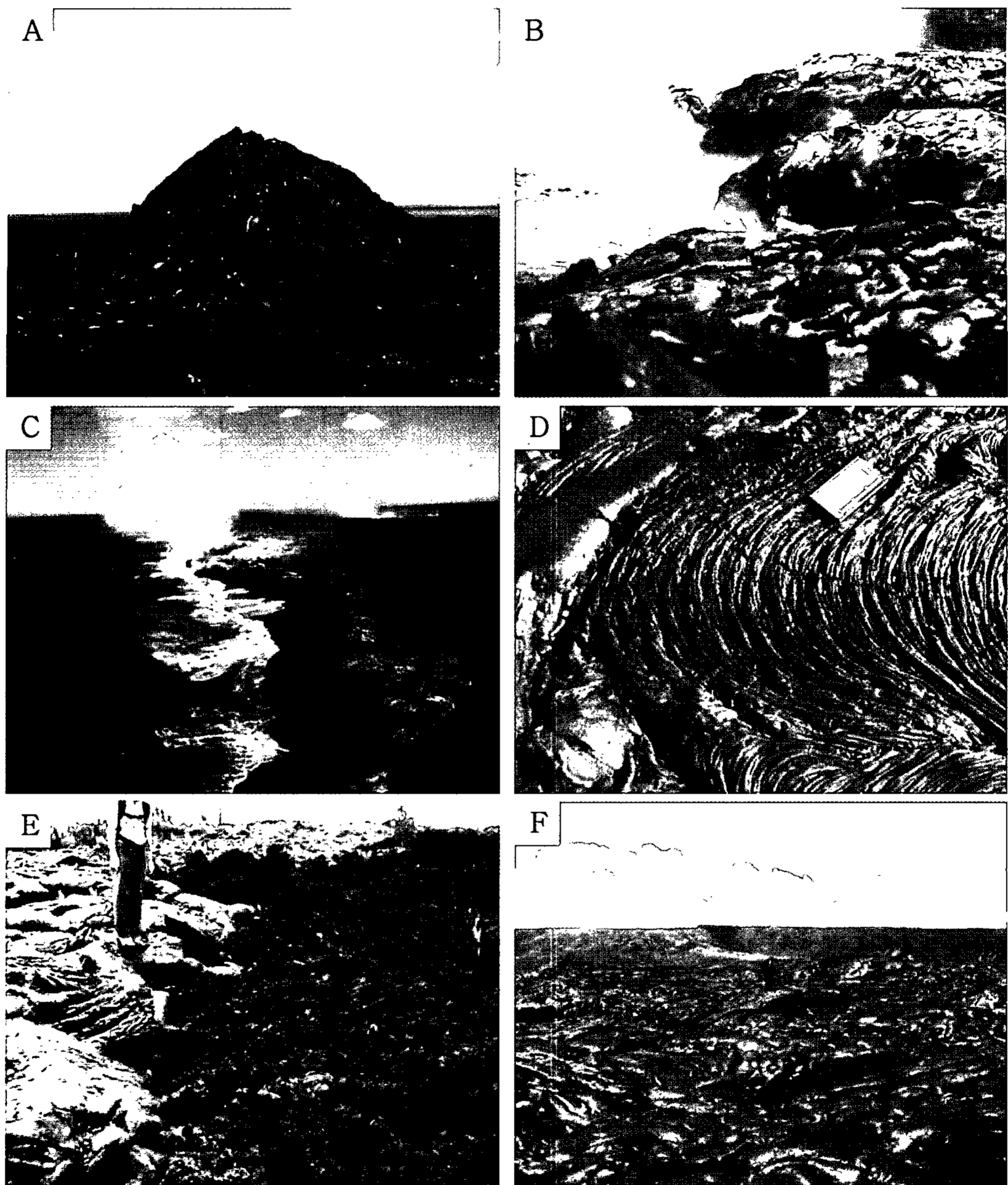


Fig. 2. Outcrop photographs in study area. A; tumulus (1986~1992), B; lava entry, C; steam plume in Apuki (2003~2006), D; ropy structure of pahoehoe lava (1992~2003), E; aa lava on pahoehoe lava (1983~1986), F; pahoehoe lava surface (1992~2003).

시료 채취 및 연구방법

시료 채취

연구지역에서의 시료 획득은 분출역사 전 기간의 용암류가 잘 분포하고 있는 해안주변을 따라 주로 채취

하였으며 1983~1986년도의 푸우오오 초기 분출에 해당하는 용암류가 분포하는 로얄 가든 주변의 시료를 포함하여 총 21개 시료를 채취하였다. 21개의 용암 시료 중 2개가 아아(aa)이며, 나머지 시료는 파호에호에(pahoehoe)에 해당한다.

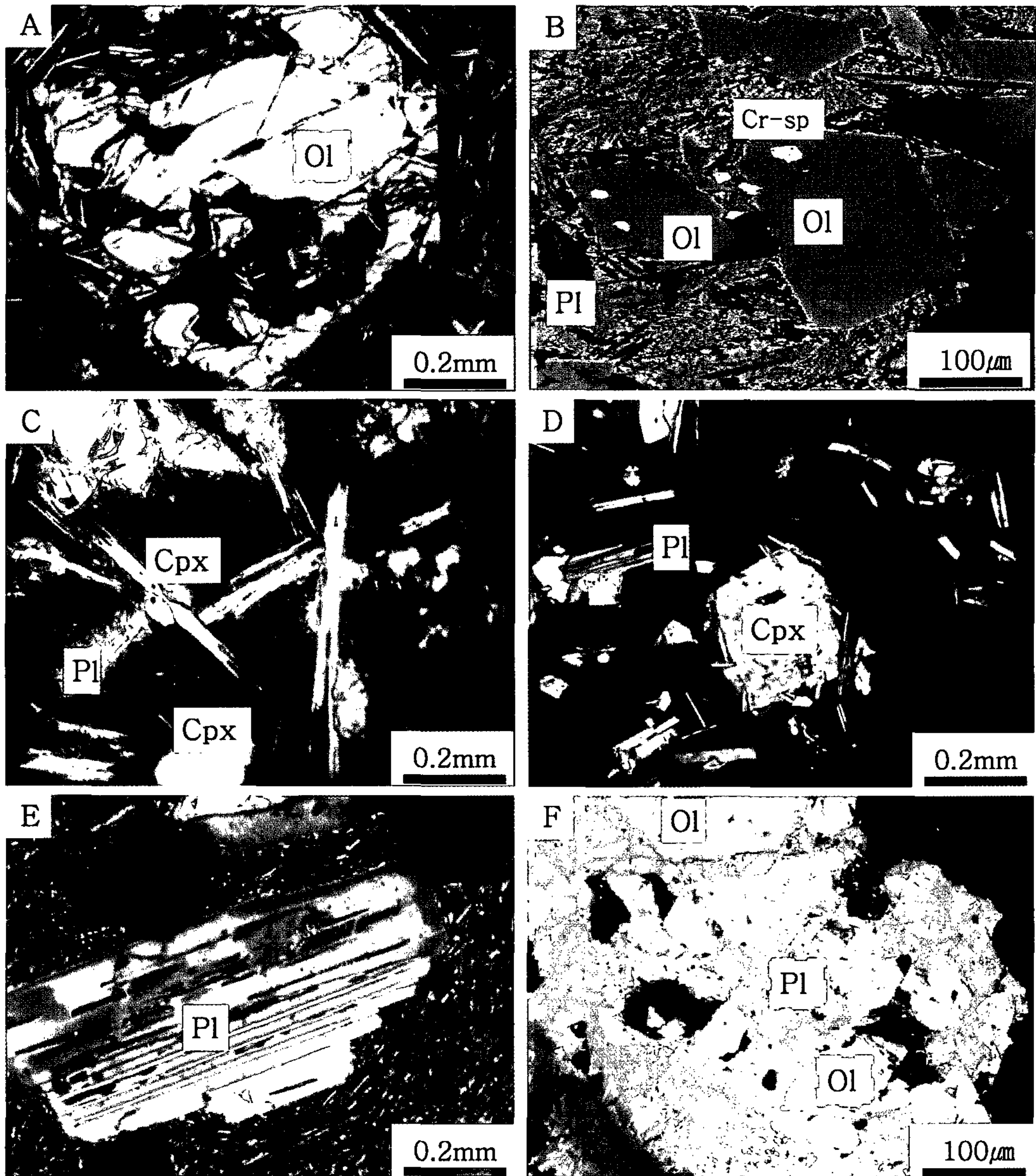


Fig. 3. Photomicrographs (A, C, D, E) and BSE images (B, F). Phenocrysts observed under microscope includes plagioclase (Pl), clinopyroxene (Cpx) and olivine (Ol). The matrix is composed mainly of vitric or fine grained crystals of cpx and plagioclase. A; skeletal olivine suggesting unstable environment during its growth (crossed nicols), B; Cr-spinel in the olivine, C; cpx crystal with shallow tail suggesting rapid growth followed by large undercooling. near euhedral plagioclase-augite microphenocryst intergrowth (opened nicols), D; cpx phenocryst-plagioclase ophitic texture (crossed nicols), E; plagioclase with zoning and sieve texture (crossed nicols), F; plagioclase microphenocryst intergrown with resorbed olivine. Abbreviation: Ol; olivine, Cpx;clinopyroxene, Pl; plagioclase, Cr-sp; chrome spinel.

연구방법

연구지역은 해안가에 인접하여 해수에 의한 오염의 가능성이 있으므로 채취된 모든 시료를 대상으로 수회에 걸친 증류수 세척 과정을 실시하여 해수에 의한 영

향을 제거 하였다. 채취된 총 21개의 시료에 대해 암석기재학적 연구를 수행하기 위해 표준연마박편 제작을 하였다. 편광 현미경하에서 모드 분석과 각 박편에 대한 구조 및 조직 관찰을 실시하였다. 모드 분석은 표

준점샘법에 의한 반정과 석기의 구성비를 조사하였다. 반정과 석기의 광물 구성성분과 미세조직에 대한 분석은 전자현미분석기(Shimadzu, EPMA 1600)를 이용하였다. 분석 조건은 15 kV 가속전압, 빔 직경 3 μm , 빔 전류 20 nA 상태로 측정하였고, 분석결정으로는 PET와 LIF를 사용하였다. 원소 분석은 각 원소당 50초로 두고 분석하였고, 분석치 보정은 ZAF프로그램을 통해 수행되었다. 분석 광물의 중심부 3지점을 측정 하여 평균값을 취하였다.

연구지역의 암석화학적 특성을 규명하기 위하여 21개의 전암 시료에 대하여 기기분석 및 습식분석을 실시하였다. 주원소는 X선형광분석기(Philips 1404/10)를 이용하였고, FeO/Fe₂O₃ 분석은 Mettler Toledo DL50 Graphix 적정기를 사용하였으며, 미량원소 및 희토류의 분석은 ICP-MS를 이용하여 수행하였다.

암석기재

현미경하에서 관찰된 구성광물의 크기에 따라 반정(직경>0.5 mm), 미반정(0.5~0.1 mm) 그리고 석기(직경

<0.1 mm)로 구분 하였다. 연구지역의 시료들은 대부분 비정질내지 유리질(유리질 함량 >95 vol.%)이며 기공이 잘 발달 하고(최대 10 vol.%) 반정의 함량이 적은 것(<5 vol.%) 관찰 할 수 있다(Table 1). 반정으로 산출되는 광물은 감람석이 대부분이고, 일부 시료에서는 소량의 사장석과 단사회석이 반정으로 산출 된다. 감람석은 분출이 시작된 후 후기로 갈수록 반정으로서의 상대적인 양이 감소하는 경향을 보이는데, 최근 분출 시료(1992~2006)는 반정과 미반정의 비율이 비슷하게 나타난다. 석기를 구성하는 광물로는 감람석, 단사회석, 사장석등으로 구성된다.

감람석은 푸우오오 분출 현무암에서 가장 흔하게 관찰되는 광물로(1~4.5 vol.%) 반정과 미반정 및 석기를 이루는 광물로 산출되고 있다. 주로 반자형이나 타형으로 나타나고 간혹 자형의 결정이 관찰된다. 대부분 자형의 감람석은 석기에 의해 둘러싸인 반상조직을 보여준다. 반자형 혹은 타형의 감람석 내부는 균열이 발달하고 용식되거나 골격 구조(skeletal structure)를 보여 주며 일부 반정에서는 반응연(reaction rim)이 관찰되기도 하였다(Fig. 3A). 일부 감람석 반정은 크롬스피넬

Table 1. Modes for Puu Oo volcanic rocks from Phenocrysts (Ph); >0.5 mm in diameter, microphenocrysts (Mph); 0.1~0.5 mm in diameter.

Sample #	Eruption time	#Mg	Olivine		Clinopyroxene		Plagioclase		Groundmass
			ph	mph	ph	mph	ph	mph	
P-18	1983-1986	59.4	0.1	0.5	0	0	0	0	99.4
P-19	1983-1986	63.8	0	0	0	0.4	0.2	1.5	97.9
P-15	1986-1992	65.0	1.5	4.1	0.1	0	0	0.3	94.0
P-16	1986-1992	67.1	0.1	2.3	0	0.1	0	0.2	97.3
P-17	1986-1992	59.5	0.2	4.5	0	0.1	0	0.5	94.7
P-20	1986-1992	57.0	1.5	2.3	0	0.2	0	0.1	95.9
P-21	1986-1992	56.5	0	0	0	0.2	0	0.3	99.5
P-01	1992-2003	57.7	2.4	1.5	0	0.3	0	0.1	95.7
P-03	1992-2003	58.1	0.2	0.7	0.2	0.5	0	0.1	98.3
P-04	1992-2003	59.4	1.5	1.3	0	0.4	0	0.1	96.7
P-06	1992-2003	60.9	0.1	0.3	0.2	1.8	0	0.5	97.1
P-08	1992-2003	58.8	0.3	1.2	0	0.1	0	0	98.4
P-10	1992-2003	59.6	0.2	1.5	0	0.2	0	0.4	97.7
P-11	1992-2003	61.1	0.3	0.6	0	0.2	0	0.2	98.7
P-12	1992-2003	60.4	1.5	2.4	0.1	0.2	0	0.1	95.7
P-13	1992-2003	62.1	1.7	3.1	0.1	0.1	0	0.2	94.8
P-14	1992-2003	58.9	1.8	2.5	0.3	0.2	0	0.1	95.1
P-02	2003-2006	58.1	2.5	1.2	0.3	0	0	0.3	95.7
P-05	2003-2006	59.7	0.1	0.7	0.1	0.2	0	0	98.9
P-07	2003-2006	63.4	0	0	0	0.1	0	0.5	99.4
P-09	2003-2006	60.0	0	0.2	0	0.1	0	0.3	99.4

Mg#: [MgO/(MgO+FeO)]*100 for whole rock.

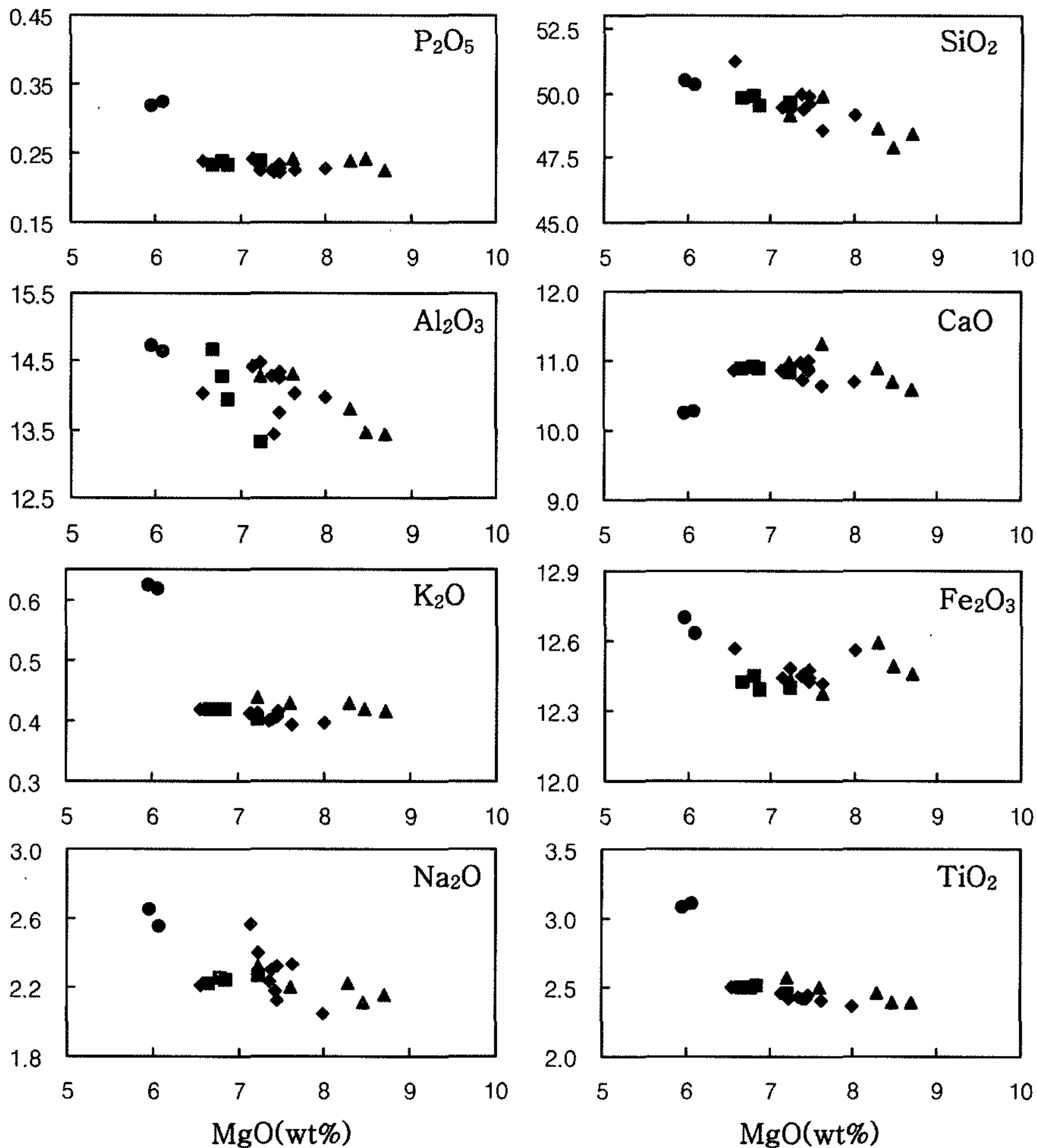


Fig. 4. Variation diagram of major oxides with MgO for Puu Oo lavas. Symbols: solid circles; 1983 lavas, solid triangles; 1983~1992 lavas, solid diamonds; 1992~2003 lavas, solid boxes; 2003~2006 lavas. Fe₂O₃*: total iron as Fe₂O₃. significant difference between 1983 lavas and others are observed.

포유물을 가진다(Fig. 3B).

단사회석은 푸우오오 초기 용암에서는 대부분 미반정으로 관찰되고, 시간이 지나면서 몇몇의 시료에서 반정도로 산출되나 그 함량은 미약하다. 미반정은 푸우오오 전체 분출시기에서 대부분 거의 동일하게 나타나는데(0.1~0.5 vol.%), P06은 1.8 vol.%의 상대적으로 높은 함량을 보여주고 있다. 단사회석 반정은 석기의 판주상 사장석에 의해 둘러싸인 오피틱 조직(ophitic texture)과 인터그로스(intergrowth texture)조직이 관찰되고, 사장석은 제비꼬리 모양의 조직이 관찰이 되고(Fig. 3C & 3D), 감람석 반정은 사장석 및 휘석과 함께 취반상 조직(glomerophyritic texture)을 나타내기도 한다. 휘석은 사장석결정 사이를 충전하는 간립상 조직

으로 산출되기도 한다.

사장석은 본 역의 시료 중 P19번 시료에서 유일하게 반정이 산출 되는데(Fig. 3E), 이 시료의 경우 감람석이나 단사회석 반정이 존재하지 않고, 일부 미반정의 단사회석이 산출된다. 사장석은 모든 시료에서 대부분 미반정으로 나타나고, 결정은 칼스바드 쌍정을 보여주고 있으며, 모드 분석결과와 같이 모든 시료에서 소량 산출된다. 사장석 반정에서는 채망(sieve) 조직과 누대구조가 빈번하게 관찰되며, 일부 사장석 미반정은 단사회석과 함께 취반상 조직을 형성한다. 또한 사장석 미반정은 용식된 감람석 결정내로 인터그로스 조직을 나타낸다(Fig. 3F). 초기 분출(1986년 이전) 용암의 경우 단사회석이나 사장석 반정이 거의 나타나지 않는

데(Garcia *et al.*, 1992), 사장석과 단사회석은 분출 초기의 시료에서는 미반정으로 산출되고 있는데 반하여, 최근 분출 시료에서는 소량의 단사회석 반정들이 관찰되고 있다.

암석 화학

주원소

연구지역 현무암류의 21개의 시료에 대한 암석화학적 분석을 수행하였다(Fig. 4, Table 2). MgO 성분은 조암광물 중 감람석과 단사회석의 결정화에 민감하게 반응하므로 MgO 도표는 이들 광물들에 호정성을 띠는 주원소 및 미량원소의 변화를 잘 나타내 준다. 푸우오오 용암의 감람석 반정 함량과 Mg#는 비례적으로 증가하는 정(+)의 상관관계를 보이고 있다.

푸우오오 지역에 분포하는 1983년부터 2006년 용암의 주원소 특징은 마그마가 진화하는 방향 즉, MgO가 감소함에 따라 TiO₂, Na₂O, Al₂O₃ 그리고 SiO₂는 증가하는 경향을 나타내고, P₂O₅와 K₂O는 MgO함량에 따른 특별한 경향을 보이지 않는다. 푸우오오 최초 분출이 있었던(1983년) P18과 P19 시료는 MgO 함량이 가장 낮은 곳에 위치하며, 타 용암과 확연하게 다른 경

향을 보이고 있다(Fig. 4). 주원소 분석에 따른 각 원소에 대한 특징을 살펴보면 SiO₂는 1983년 최초 분출 당시 50.3wt%로 다른 분출 연도의 시료에 비해 상대적으로 높게 나타나고, 1986년 분출이후에는 분출년도에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. Al₂O₃역시 1983년도 분출시료에서 가장 높은 함량을 보여주고, 전체적인 함량은 13에서 14.7wt%로 증가하고 있다. K₂O와 P₂O₅는 1983년 분출당시에 각각 0.6wt%, 0.3wt%로서 타 분출시료와의 확연한 차이를 보이고 있다. TiO₂는 P18, P19의 초기 분출 시료에서 최근 용암에 비해 3wt% 정도 더 높은 값을 보여준다. 주원소 분석결과 푸우오오 지역의 최초 분출(1983년) 시료인 P18과 P19는 연구지역의 타 시료들과 확연하게 다른 경향을 보이고, 이후 1986년부터 2006년까지의 용암에서는 각 원소의 변화가 분출년도에 따른 시간적인 변화양상(temporal variation)이 잘 나타나고 있다(Fig. 4).

미량원소 및 희토류 원소

주원소는 이동성이 큰 원소이므로 기원마그마의 성분을 잘 보존하지 못하는 경향이 있으나, 이동성이 적은 미량원소는 암석의 화학적 특징을 보다 더 잘 보존할 수 있기 때문에 주원소에 의한 접근보다는 더 신뢰

Table 2. Major element analyses of whole-rocks from the Puu Oo eruption(wt%).

Sample#	Eruption time	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total
P-18	1983	50.31	14.65	3.11	8.33	3.38	0.17	6.08	10.28	2.55	0.62	0.32	99.80
P-19	1983	50.47	14.73	3.08	8.01	3.80	0.17	5.95	10.25	2.66	0.62	0.32	100.06
P-15	1986-1992	48.66	13.80	2.45	8.40	3.26	0.17	8.29	10.90	2.23	0.43	0.24	98.82
P-16	1986-1992	49.88	14.32	2.49	9.28	2.06	0.17	7.61	11.25	2.20	0.43	0.24	99.94
P-17	1986-1992	49.18	14.28	2.57	8.75	2.70	0.17	7.23	10.98	2.32	0.44	0.24	98.86
P-20	1986-1992	47.91	13.47	2.39	7.40	4.26	0.16	8.47	10.70	2.11	0.42	0.24	97.53
P-21	1986-1992	48.42	13.43	2.39	8.36	3.17	0.17	8.70	10.58	2.15	0.42	0.22	98.01
P-01	1992-2003	51.24	14.02	2.50	8.14	3.83	0.17	6.55	10.88	2.21	0.42	0.24	100.19
P-03	1992-2003	49.34	13.44	2.42	8.06	3.50	0.17	7.39	10.72	2.30	0.40	0.22	97.96
P-04	1992-2003	48.58	14.02	2.40	8.92	2.51	0.17	7.62	10.64	2.33	0.39	0.23	97.81
P-06	1992-2003	49.90	13.73	2.43	8.46	3.03	0.17	7.44	11.01	2.18	0.41	0.23	98.99
P-08	1992-2003	49.90	14.25	2.42	9.01	2.46	0.17	7.45	10.88	2.32	0.41	0.22	99.49
P-10	1992-2003	49.95	14.29	2.43	8.75	2.73	0.17	7.36	10.97	2.24	0.40	0.23	99.51
P-11	1992-2003	49.44	14.42	2.46	8.91	2.55	0.17	7.14	10.87	2.57	0.41	0.24	99.17
P-12	1992-2003	49.15	13.98	2.36	8.24	3.40	0.17	8.00	10.69	2.04	0.40	0.23	98.65
P-13	1992-2003	49.40	14.47	2.42	8.28	3.28	0.17	7.23	10.94	2.40	0.41	0.23	99.22
P-14	1992-2003	49.57	14.33	2.44	8.96	2.48	0.17	7.46	10.86	2.12	0.42	0.23	99.04
P-02	2003-2006	49.67	13.32	2.46	8.79	2.63	0.17	7.22	10.82	2.27	0.40	0.24	97.99
P-05	2003-2006	49.54	13.94	2.52	8.82	2.59	0.16	6.85	10.89	2.25	0.42	0.23	98.21
P-07	2003-2006	49.87	14.28	2.50	8.72	2.76	0.17	6.79	10.93	2.26	0.42	0.24	98.92
P-09	2003-2006	49.82	14.69	2.51	8.70	2.75	0.17	6.66	10.90	2.23	0.42	0.23	99.07

FeO and Fe₂O₃ are measured by wet chemistry.

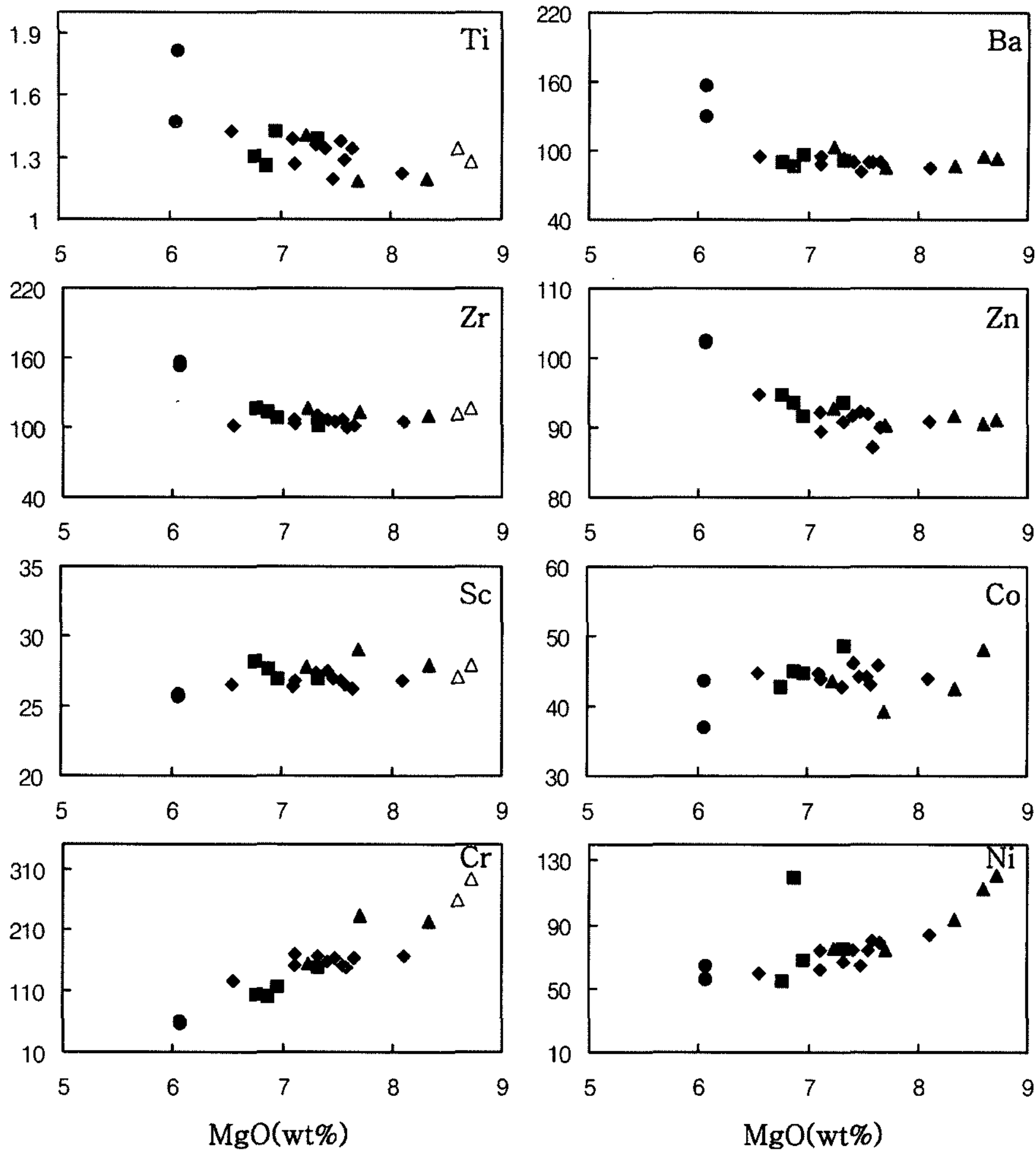


Fig. 5. Harker Variation diagram of trace elements with MgO in the study area. Symbols as in Fig. 4. Trace elements of 1983 lavas are also different from others. The 1983 lavas are characterized with more evolved magma.

성이 높다(Rollinson, 1993). MgO값에 대한 전암의 미량원소 변화를 요약하면 MgO가 감소함에 따라 Ti과 Zr은 증가하는 양상을 보이고, Co, Zr 그리고 Ba은 마그마가 분화가 이루어지는 동안 함량의 증감이 나타나지 않는다. 반면, Cr과 Ni은 대표적인 호정성 원소로서 마그마가 진화할수록 감소하는 경향을 나타낸다(Fig. 5, Table 3). 특히 Ni의 경우 2003년에서 2006년에 해당하는 시료에서 기존 용암의 Ni 함량에 비해 월등하게 큰 값을 보여주고 있다. 푸우오오의 최초 분출(1983년)시료인 P18과 P19는 주원소 분석결과와 유사하게 미량원소에서도 타 용암에 비해 확연히 다른 진화가 많이 된 경향을 보여준다. K₂O값에 대한 전암의 미량원소 Sr, Y, Zr 그리고 V에 대한 도표를 살펴보면 최초 분출시료인 P18과 P19는 타 용암에 비해 K₂O함량

이 높은 즉, 좀 더 진화된 영역에 이겨되어 도시되고 있다(Fig. 6).

MgO의 함량변화로 지시되는 마그마 진화와 연관된 미량원소 변화 경향의 고찰과 함께 특정미량원소 균인 희토류와 거미변화도에 이용되는 미량원소의 지구화학적 특성을 고찰하였다(Table 4). MORB미량원소 값(Pearce, 1983)을 이용하여 표준화한 연구지역 암석의 미량원소 거미변화도는 해양도 현무암(OIB)의 전형적인 양상을 따르고 있고(Fig. 7A), 콘드라이트로 표준화한(Sun & Mcdonough, 1988) 연구지역 희토류 원소 함량 변화는 LREE는 부화되어 있으나 HREE는 상대적으로 결핍되어 있는 전형적인 OIB 현무암의 양상을 보여주고 있다(Fig. 7B). 최초 분출시료(1983년)를 제외하면 연구지역의 희토류 원소의 함량과 분포 경향이

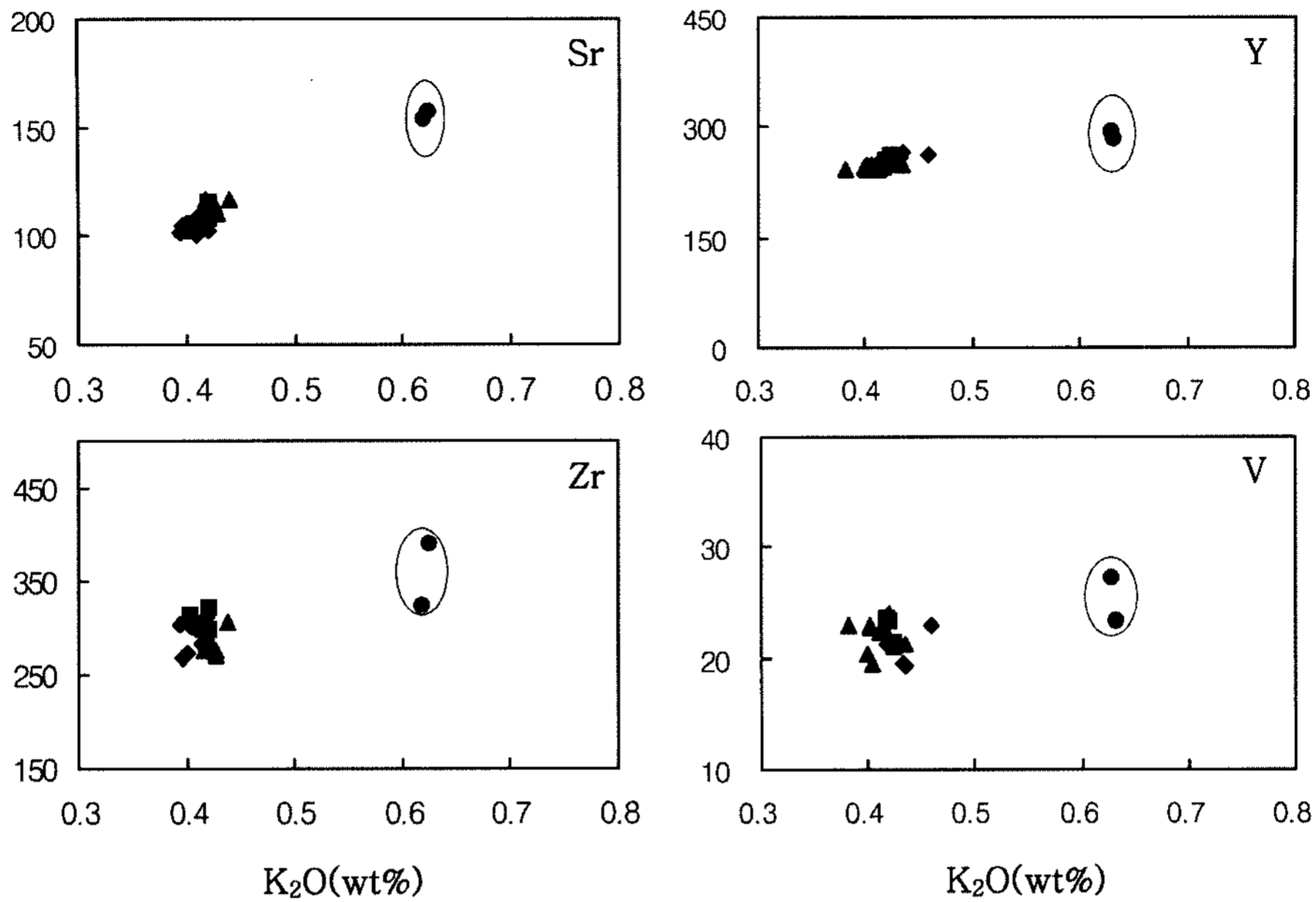


Fig. 6. K₂O versus Sr, Y, V and Zr for Puu Oo lavas. These elements are normally highly incompatible in Kilauea lavas. Symbols as in Fig. 4. Circles are indicate 1983 lavas.

연구지역 용암의 기원지가 동일하다는 기존의 제안 (Fordor *et al.*, 1992)과 부합하고 있다. 최초 분출 시료 (1983년)의 경우 REE 패턴과 거미변화도에서 전체적인 경향은 유사하나 원소의 함량이 타 시료에 비하여 부화되어 있는데, 동일 혹은 유사한 기원에서 유래하나 연구지역의 타 시료 보다 진화가 보다 진행된 마그마 저장소에서 기원한 것을 시사하고 있다.

감람석 광물화학

감람석은 하와이 용암에서 가장 빈번하게 산출되는 반정광물로서 마그마 진화 초기의 감람석 분별작용동안 마그마의 성분을 규제하였다(Raymond, 2000). 연구지역 현무암의 감람석 반정의 중심부에 대한 전자현미 분석을 실시하여 각 연도별 대꽃값을 구하였다(Table 5).

Fo#는 감람석 반정에 대한 EPMA 분석을 통해 얻은 MgO와 FeO의 mol%로서, 연구지역내 전체 시료의 Fo# 함량은 77에서 85로 나타났다. Fo#에 따른 감람석 결정 내부에 포함된 원소의 특징을 살펴보면 Fo# 값이 감소함에 따라 MgO와 Al₂O₃는 감소하는 양상을 보여주고 있고, MnO, FeO 및 CaO 함량은 Fo#가 감소함에 따라 즉, 마그마 분화가 진행되어 가면서 증가하는 경향을 보여주고 있으며, K₂O와 SiO₂는 주목할 만한 변화 양상을 나타내지 않는다(Fig. 8). 연구지역의 감람

석에 포함된 각 원소의 특징을 살펴보면 FeO는 15.3에서 18.9wt%로 Fo#가 감소하는 방향인 마그마가 진화함에 따라 증가하는 경향이 잘 나타나고 있으며, MgO 역시 39에서 44wt%로 마그마 진화에 따라 감소하는 것을 관찰 할 수 있다. K₂O의 경우 다소 분산되지만 대부분 0에 가까운 값을 보여주고 있고, Al₂O₃는 연구지역 감람석 내에 아주 소량으로 존재하지만, Fo#가 감소함에 따라 소폭으로 감소하는 경향을 보여주고 있다. SiO₂와 CaO는 Fo# 변화에 따른 증가나 감소를 나타내지 않는다. EPMA 분석 결과 동일한 분출 시기의 감람석이 다른 Fo#를 보이고 있는데, 이것은 반정의 기원이 다양함을 시사하고 있다.

토 의

마그마 분화 양상

하와이 화산암은 쏘레아이트질 암석과 알칼리 암석이 공히 존재하는데, 이중 쏘레아이트질 암석이 하와이 암석의 99%를 차지하고 있다(Macdonald and Katsura, 1964; Hawkins and Melchior, 1983). Peterson과 Moore(1987)는 하와이 용암에서 MgO에 대한 CaO의 굴곡 경향을 관찰하여 단사회석과 사장석의 분별결정 작용에 의한 결과라고 논하였다. 연구지역의 현무암은 대부분의 반정이 감람석으로 구성되었으며, 단사회석

Table 4. Rare earth element analyses of whole-rocks from Puu Oo lavas(ppm).

Sample #	1992 ~ 2003										2003 ~ 2006										
	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1986 ~ 1992	1986 ~ 1992	1986 ~ 1992	1986 ~ 1992	1986 ~ 1992	1986 ~ 1992	1986 ~ 1992	1986 ~ 1992	1986 ~ 1992	1986 ~ 1992	
Eruption time	P18	P19	P15	P16	P17	P20	P21	P01	P03	P04	P06	P08	P10	P11	P12	P13	P14	P02	P05	P07	P09
La	12.29	14.43	8.29	8.12	9.66	9.06	8.89	9.82	8.98	9.00	9.44	8.92	7.76	8.35	8.11	8.95	9.15	9.52	9.53	8.57	8.58
Ce	30.0	35.5	20.7	20.4	24.1	22.7	22.2	24.6	22.8	22.7	22.3	22.4	19.7	21.1	20.3	22.5	23.0	23.7	24.1	21.5	21.53
Pr	4.39	5.28	3.14	3.08	3.66	3.51	3.37	3.72	3.47	3.43	3.39	3.43	2.98	3.23	3.07	3.41	3.54	3.59	3.63	3.25	3.27
Nd	20.7	24.6	15.2	15.0	17.7	16.7	16.3	17.6	16.7	16.8	16.4	16.6	14.5	15.6	15.1	16.6	17.0	17.21	17.63	15.92	15.90
Sm	5.36	6.32	4.13	4.07	4.81	4.59	4.45	4.89	4.70	4.64	4.60	4.57	3.95	4.38	4.17	4.64	4.83	4.88	4.87	4.31	4.46
Eu	1.79	2.15	1.43	1.43	1.67	1.57	1.53	1.67	1.64	1.63	1.62	1.61	1.39	1.51	1.47	1.65	1.62	1.68	1.71	1.54	1.55
Gd	5.60	6.53	4.47	4.48	5.14	4.91	4.79	5.26	5.05	5.16	4.98	5.07	4.41	4.72	4.70	5.05	5.14	5.29	5.32	4.77	4.72
Tb	0.83	0.99	0.68	0.69	0.80	0.75	0.72	0.82	0.80	0.80	0.78	0.80	0.67	0.73	0.72	0.77	0.81	0.81	0.82	0.73	0.75
Dy	4.89	5.77	4.04	4.04	4.74	4.52	4.39	4.88	4.73	4.74	4.66	4.73	4.09	4.46	4.17	4.71	4.76	4.82	4.91	4.40	4.41
Ho	0.91	1.09	0.77	0.77	0.90	0.85	0.82	0.93	0.89	0.88	0.89	0.88	0.77	0.84	0.81	0.89	0.91	0.91	0.93	0.82	0.84
Er	2.38	2.79	2.00	2.05	2.34	2.23	2.19	2.42	2.34	2.34	2.31	2.31	2.02	2.19	2.10	2.32	2.38	2.41	2.42	2.17	2.19
Tm	0.31	0.36	0.26	0.27	0.31	0.29	0.28	0.31	0.30	0.31	0.30	0.30	0.26	0.29	0.28	0.31	0.32	0.31	0.32	0.28	0.29
Yb	1.84	2.18	1.58	1.57	1.83	1.76	1.68	1.91	1.84	1.85	1.81	1.83	1.61	1.72	1.65	1.84	1.90	1.86	1.89	1.71	1.74
Lu	0.26	0.31	0.23	0.23	0.27	0.25	0.24	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.23	0.25	0.23	0.26	0.26	0.26	0.27	0.25	0.25

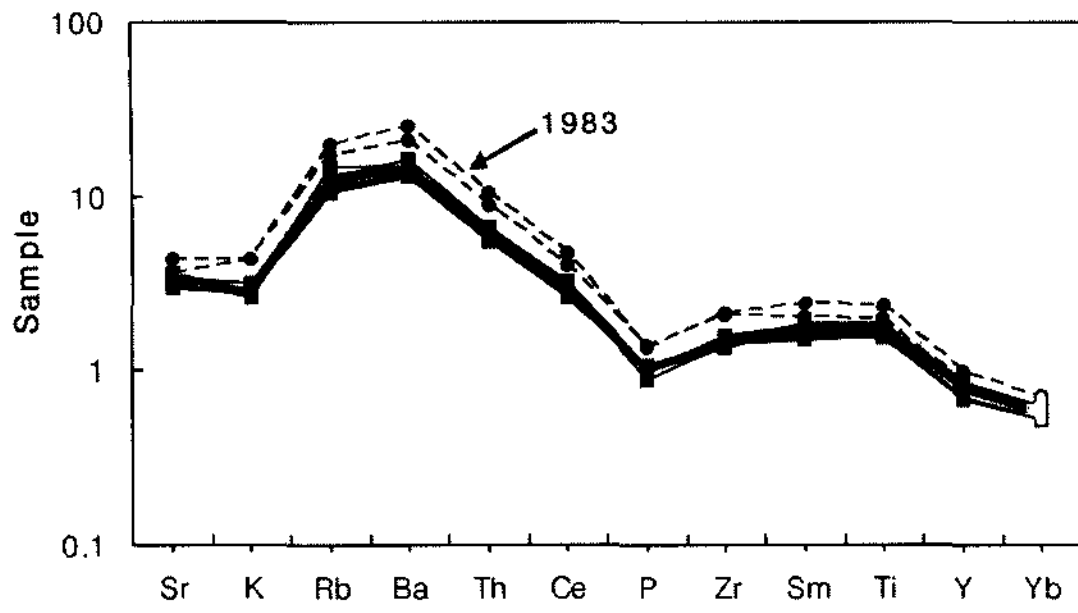


Fig. 7A. MORB normalized spider diagram for trace element. Dashed line; 1983 eruption lavas.

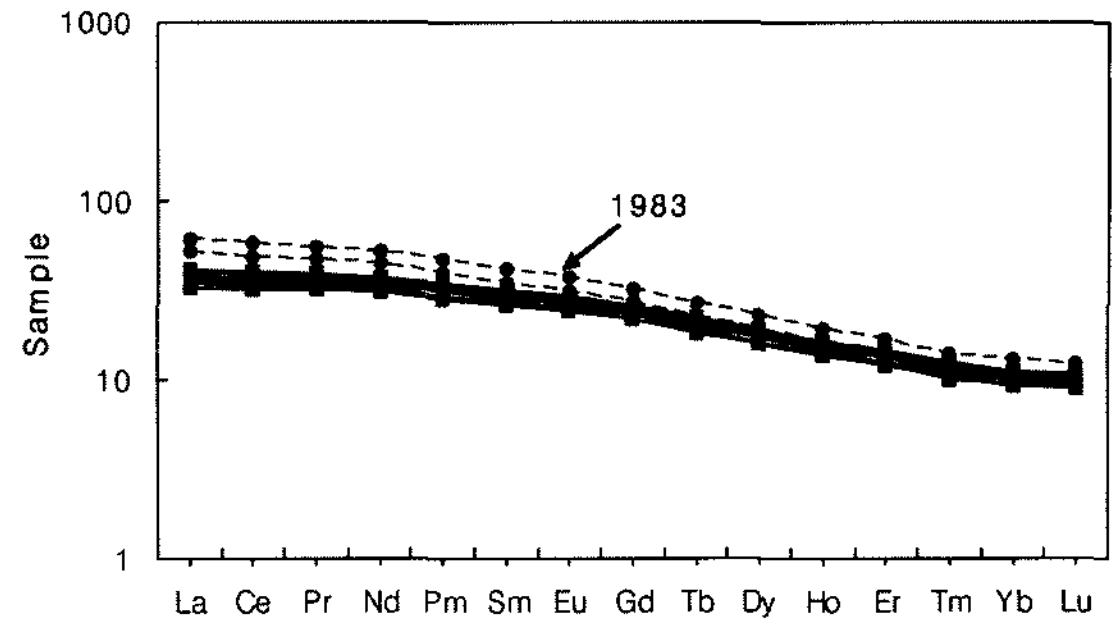


Fig. 7B. Chondrite-normalized rare earth element patterns, showing the range of variation. Dashed line; 1983 eruption lavas.

특히 사장석의 결정화는 아주 미비하여 CaO의 굴곡 경향은 관찰 되지 않았다. 실제 박편 상에서 단사회석이나 사장석의 반정은 거의 산출되지 않는 특성으로 미루어 푸우오오 지역의 마그마는 최근의 분출까지 마그마 진화과정의 초기 단계에 머무르고 있는 것으로 해석되어진다.

연구지역의 전암의 MgO함량 변화경향(Fig. 4 & 5)에 의하면 푸우오오 지역의 초기 용암시료는 주원소 및 미량원소가 타 용암시료들과 비교해 현저히 다른 양상을 보여주며 보다 분화된 양상을 시사하고 있다. 이와 같은 양상은 미량원소 값에 대해 불호정성을 나

타내는 K₂O변화도에서도 유사한 경향을 관찰할 수 있다(Fig. 6). REE 다이어그램이나 거미도표 상에서도 각 원소의 경향은 타 용암과 일치하지만 부화정도의 차이로 보아 이들 시료는 연구 지역 내 타 용암들에 비해 보다 분화된 마그마로 생각된다.

위와 같은 푸우오오 지역 현무암의 지화학적 양상은 시간에 따른 분출활동의 변화역사와 밀접한 연관을 가지는 것으로 생각된다. 푸우오오 지역은 1983년에 최초의 분출이 시작된 이후 1986년에 들어서 기존 분출 활동이 있었던 푸우오오 화도로부터 남서쪽으로 3 km

Table 5. Representative microprobe analyses of olivine cores in the Puu Oo lava(wt%).

Sample	P18(1983)			P15(1986~1992)		P17(1986~1992)		P1(1992~2003)	
Type	mph	mph	mph	ph	ph	ph	ph	ph	ph
SiO ₂	40.06	40.08	39.94	40.54	40.11	40.53	41.10	39.41	39.14
FeO	18.93	19.06	20.86	15.91	14.84	17.95	14.21	18.69	20.50
MgO	39.75	39.87	38.71	42.76	44.78	40.60	44.10	41.82	40.03
CaO	0.26	0.28	0.27	0.29	0.27	0.28	0.25	0.28	0.31
FeO	18.93	19.06	20.86	15.91	14.84	17.95	14.21	18.69	20.50
NiO	0.26	0.10	0.13	0.23	0.20	0.18	0.29	0.22	0.17
Total	99.53	99.65	100.23	99.90	100.37	100.00	100.12	1100.66	100.38
Fo %	78.92	78.85	76.78	82.70	84.30	80.13	84.69	79.96	77.87
Sample	P12(1992~2003)			P13(1992~2003)		P2(2003~2006)		P5(2003~2006)	
Type	ph	ph	ph	ph	ph	ph	mph	ph	ph
SiO ₂	41.36	40.93	40.83	40.92	39.97	39.63	40.14	41.58	39.75
FeO	17.96	17.82	17.87	15.32	17.18	19.88	18.19	16.27	20.13
MgO	41.04	41.42	40.93	43.19	41.39	39.15	41.22	42.03	39.18
CaO	0.27	0.27	0.27	0.25	0.28	0.30	0.26	0.27	0.31
MnO	0.23	0.19	0.26	0.22	0.25	0.23	0.23	0.22	0.28
NiO	0.09	0.14	0.12	0.17	0.18	0.13	0.18	0.18	0.12
Total	100.94	100.76	100.27	100.05	99.26	99.32	100.21	100.45	99.77
Fo %	80.29	80.56	80.33	83.41	81.11	77.83	80.15	82.16	77.62

Total Fe as FeO. Abbreviation: ph; phenocryst, mph; microphenocryst. Fo% : Mg/(Mg+Fe)*100.

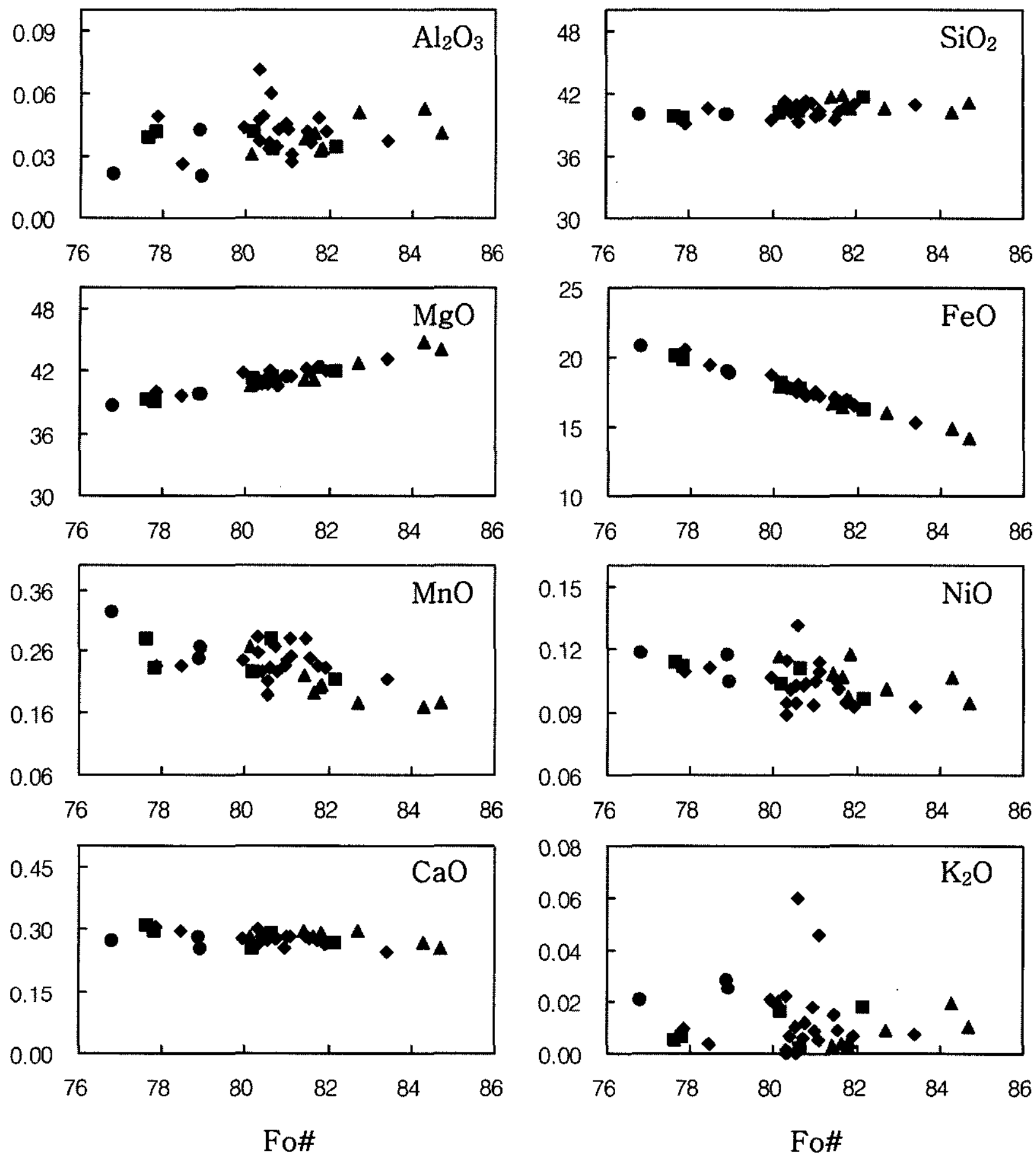


Fig. 8. Variation diagram of major elements with Fo# of olivine for the study area. Symbols as in Fig. 4.

떨어진 쿠파이아나하 분화구로 분출 장소가 이동되었으며, 이후 1992년 까지 이곳에서 마그마 분출이 이루어졌는데, 이전 푸우오오 분출과 달리 쿠파이아나하 화도에서는 12회에 걸친 마그마 휴식기를 가졌다. 맨틀로부터 마그마의 원활한 공급이 이루어지지 않아 분출 휴지기를 갖는 동안 마그마 저장소 내에서는 다량의 감람석결정의 분화가 발생되고, 분출이 재개될 무렵에는 마그마 저장소 하단에 축적된 감람석 결정들이 마그마의 급격한 분출활동으로 다량의 감람석이 분출되고, 휴지기가 오면 저장소 내에서 정체하는 과정이 수회 반복되면서 MgO의 다양성을 유래한 것으로 생각된다.

Ni 함량 변화

Cr과 Ni은 감람석이나 휘석 등의 광물에 분별되므로 마그마가 진화되면서 점차 함량이 낮아지는 경향을 나타낸다. 연구지역 현무암의 미량원소중 하나인 Ni의 경향은 분화가 진행됨에 따라 급속하게 감소하는 전형적인 Ni 진화경로를 보여주고 있는데, 일부시료에서는 이와 같은 경향과 달리 Ni의 강한 농집이 관찰된다. 이러한 높은 함량의 Ni값은 다양한 원인에 의하여 생성될 수 있다. 갑작스런 Ni의 증가는 보다 진화가 덜 된 마그마 즉 Ni 함량이 높은 마그마의 유입에 의하여 생성될 수 있으므로 연구지역에 새로운 마그마의 유입을 지시하는 증거로 간주될 수 있다. 그러나 연구지역

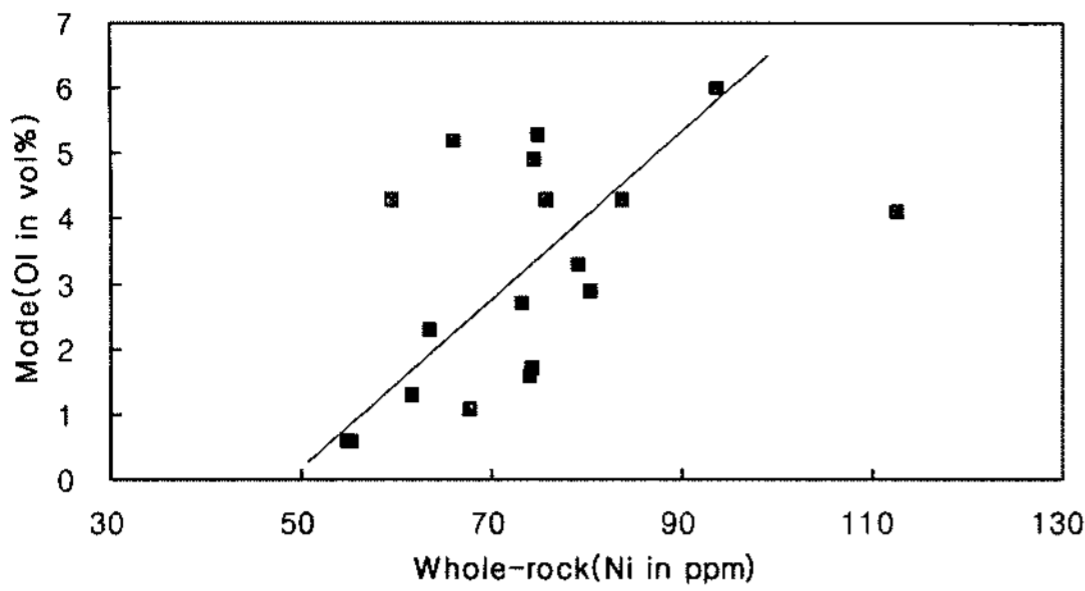


Fig. 9A. Ni (ppm) in trace element vs. modal abundance of olivine (vol%). Abbreviation: Ol; Olivine.

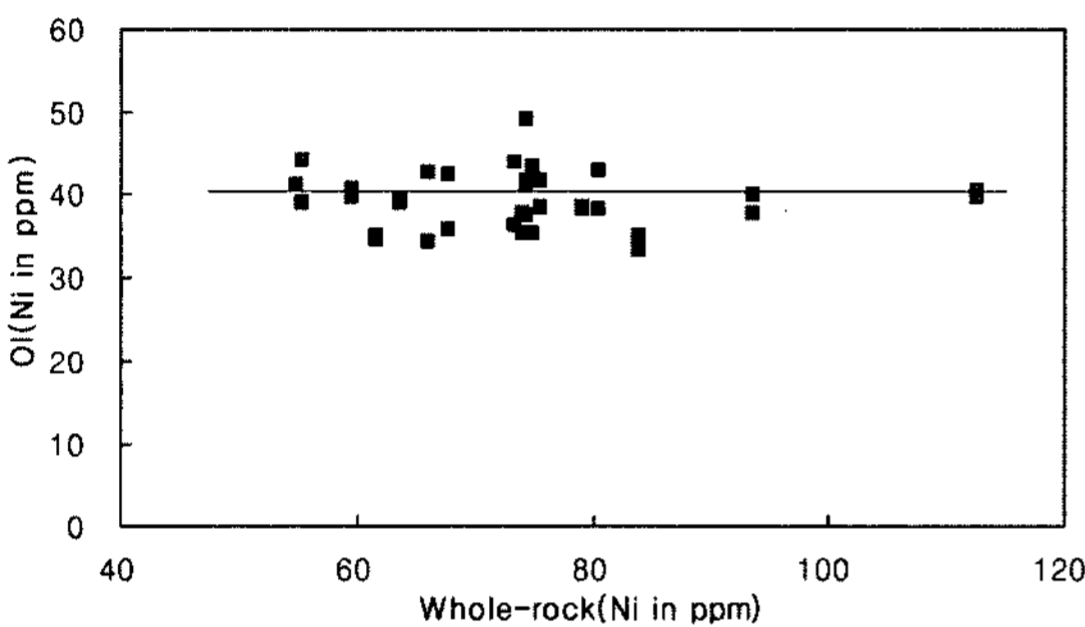


Fig. 9B. Ni (ppm) in trace element vs. Ni (wt%) in olivine. Abbreviation: Ol; Olivine.

현무암의 모드분석과 감람석 성분 분석 결과를 해석해 보면 감람석의 Ni 함량은 대체로 일정하게 유지되고 있는데 비해(Fig. 9A) 감람석의 모드함량은 Ni 값과 밀접한 정(+)의 상관관계를 가지고 있다(Fig. 9B). 전암의 Ni 값은 감람석 반정의 함량에 좌우되고, 감람석 내에 존재하는 Ni 값은 전암의 Ni 값과 무관하다는 것을 유추할 수 있다. 즉, 연구지역의 Ni 함량은 감람석 모드에 의해 조절된다고 할 수 있다. 하지만 P7번 시료의 경우 연구지역의 시료 중 가장 최근의 용암(2003~2006년)에 해당하며, 모드분석 결과 동일 분출 연도의 시료와 달리 감람석 결정이 관찰되지 않았다. 연구지역의 Ni 함량은 감람석 모드의 거동에 따라 영향을 받지만 P7번 시료의 경우에는 시료 내 감람석 결정이 존재하지 않으므로, P7시료의 경우에는 결정의 영향이 아닌 Ni 함량이 높은 마그마가 유입되어 Ni의 과부화를 나타낸 것으로 해석될 수 있다. Ni 함량의 농집을 보여주는 시료의 REE미량원소와 거미도의 특성을 타 시료와 비교해 볼 때 거의 동일한 양상을 보여주는 것 또한 이 시료가 동일기원의 마그마에서 유래한 것임을 시사하고 있다.

결론

현재도 활발하게 활동하고 있으며, 오랜 역사를 가지는 킬라우에아의 푸우오오 분출에 대해 야외조사와 총 21개의 시료에 대한 지화학적·광물학적 및 암석학적 자료를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

푸우오오 지역의 시료의 주원소는 마그마가 진화하는 방향에 따라 TiO_2 , Na_2O , Al_2O_3 그리고 SiO_2 는 증가하는 경향을 나타내고, P_2O_5 와 K_2O 는 변화가 관찰되지 않는다. MgO변화에 대한 전암의 미량원소는 마그마가 진화함에 따라 Ti과 Zr은 증가하는 양상을 보이고, Co, Zr 및 Ba은 마그마가 분화가 이루어지는 동안 함량의 증감이 나타나지 않는다. 반면, Cr과 Ni은 대표적인 호정성 원소로서 마그마가 진화할수록 감소하는 경향을 나타낸다. MORB값으로 표준화한 연구지역 시료의 거미변화도와 REE다이아그램은 Sun(1980)이 제시한 해양도 현무암(OIB)의 전형적인 양상을 보여주고 있다. K_2O 와 MgO 함량에 대한 주원소 및 미량원소의 변화 특성은 푸우오오 지역의 최초 용암 시료인 P18과 P19번 시료가 연구지역내 타 시료들과 다른 특성을 보이는데, 보다 진화된 영역에 속하며, 타 시료들과는 다른 진화과정을 거쳤음을 시사하고 있다.

일반적으로 현무암에서 Ni과 Cr은 호정성 원소로서 감람석과 크롬 스피넬의 결정 분화작용에 의해 마그마 진화 과정 중 감소하는 경향을 보여주고 있는데, 2003년에서 2006에 해당하는 P7번 시료가 높은 Ni값을 보이는 이유는 근원 마그마에 가까운 새로운 마그마의 유입에 의하여 설명될 수 있으나 이 시료가 높은 감람석 모드값을 가지나 감람석내의 Ni함량은 다른 시료와 거의 유사하고 REE나 거미도표의 양상이 또한 다른 시료와 유사하므로 유사한 마그마에서 기원하였음을 시사하고 있다. 푸우오오 분출의 시간적인 지화학적 양상 변화를 살펴보면 시간에 따른 연속적인 경향을 잘 보여주고 있으며, 이러한 경향은 푸우오오 지역의 분출은 단일 모 마그마로 부터 최근까지 연속적으로 이루어지고 있다는 것을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문의 질적 향상에 좋은 조언을 해주신 심사위원들께 진심으로 감사드립니다. 본 연구는 학술진흥재단의 지원(R05-2003-000-10783-0)을 받아 수행되었다. 한국 기초과학지원연구원의 실험분석 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- Delaney P.T., Okamura A.T., Miklius A., Sako M., 1990, Present day deformation rates at Kilauea volcano, Hawaii. *EOS.*, 71, 1711 p.
- Dzurisin, D., Robert Y., Koyanagi and Thomas T., 1984, Magma supply and storage at Kilauea volcano, Hawaii. *Bull. Volcanol.*, 177-206.
- Fordor, R.V., Frey, F.A., Bauer, G.R. and Clague, D.A., 1992, Age, rare-earth element enrichment and alkalibasalts from Kahoolawe island, Hawaii. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 110, 442-462.
- Garcia, M.O., Rhodes, J.M., Wolfe, E.W., Ulrich, G.E. and Ho, R.A., 1992, Petrology of lavas from episodes 2-47 of the Puu Oo eruption of Kilauea Volcano, Hawaii: evolution of magmatic processes. *Bull. Volcanol.*, 55, 1-16.
- Garcia, M.O., Rhodes, J.M., Trusdell, F.A. and Pietruszka, A.J., 1996, Petrology of lavas from the Puu Oo eruption of Kilauea Volcano : •đ. The Kupaianaha episode (1986-1992). *Bull. Volcanol.*, 58, 359-357.
- Garcia, M.O., Pietruszka, A.J., Rhodes, J.M. and Kierstin swanson, 1999, Magmatic Processes During the Prolonged Pu'u 'O'o Eruption of Kilauea Volcano, Hawaii. *J. Petrol.*, 41,7, 967-990.
- Hawkins, J. and Melchior J., 1983, Petrology of basalts from Loihi seamount, Hawaii. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 356-368.
- Klein, F.W., Koyanagi, R.Y., Nakata, J.S. and Tanigawa, W.R., 1987, The seismicity of Kilauea's magma system. *US Geol. Surv. Prof. Pap.*, 1350,1019-1185.
- Macdonald, G.A. and Katsura, T., 1964, Chemical Composition of Hawaiian Lavas. *J. Petrol.*, 5: 82-133.
- Macdonough, W.F. and Sun, S., 1988, A primitive mantle composition from xenoliths. *Chem. Geol.*, 12.
- Neal, C.A. and Lockwood, J.P., 2006, Geologic map of the summit region of Kilauea Volcano, Hawaii. *usgs.*
- Pearce, J.A., 1983, Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. in:Hawkesworth C.J. and Norry M.J., *Continental basalts and mantle xenoliths.* Shiva, Nantwich, 230-249.
- Peterson, D.W. and Moore R.B., 1987, Geologic history and evolution of geologic concepts, Island of Hawaii. In : Decker R.W., and Wright T.L., and Stauffer P.H.(eds.), *Volcanism in Hawaii.* US Geol. Surv. Prof. Pap., 1350, Vol. 1, 149-189.
- Ryan M.P., 1988, The mechanics and three-dimensional internal structure of active magmatic systems, Kilauea Volcano, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, 93, 4213-4248.
- Rollinson, H.R., 1993, *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation.* Longman Scientific and Technical, 102, 147 p.
- Rollinson, H.R. and Lowry, D., 1993, Early basic magmatism in the evolution of the northern marginal zone of the archaean limpopo belt. *Precambrian Research*, 33-45.
- Sun, S.S., 1980, Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island arcs. *Phil. Trans. R. Soc.*, A297, 409-445.
- Wolfe E.W., Garcia M.O., Jackson D.B., Koyanagi R.Y., Neal C.A. and Okamura A.T., 1987, The Puu Oo eruption of Kilauea Volcano, episode 1 through 20, January 3, 1983, to June 8, 1984. *US Geol. Surv. Prof. Pap.*, 1350, 471-508.

(2007년 11월 15일 접수; 2007년 12월 10일 채택)