

## 하와이 섬의 지질과 마우나로아 및 킬라우에아의 화산활동

황상구<sup>1,\*</sup> · 이문원<sup>2</sup> · 원종관<sup>3</sup> · 우경식<sup>3</sup> · 이광춘<sup>4</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과, <sup>2</sup>강원대학교 지구과학교육과

<sup>3</sup>강원대학교 지구환경과학부, <sup>4</sup>상지대학교 자원공학과

## Geology of the Hawaii Island and Volcanic Activities of Mauna Loa and Kilauea

Sang Koo Hwang<sup>1,\*</sup>, Moon Won Lee<sup>2</sup>, Chong Kwan Won<sup>3</sup>,  
Kyung Sik Woo<sup>3</sup> and Kwang-Choon Lee<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea

<sup>2</sup>Department of Earth Science Education, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

<sup>3</sup>Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

<sup>4</sup>Department of Resource Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea

**요약:** 제주도를 세계자연유산으로 유네스코에 등록하는데 유리한 점을 찾기 위하여 이와 유사한 하와이 섬을 답사하였다. 하와이 섬은 코할라, 마우나케아, 후알랄라이, 마우나로아, 킬라우에아 등의 5개 화산으로 구성된다. 이들은 모두 해저에서 솟은 거대한 순상화산이며 이 중에서 마지막 두 화산은 활화산 연구에 자연실험실을 제공한다. 마우나로아 화산은 세계에서 가장 큰 화산이며 지금은 잠시 중지하였지만 남서 및 북동 열곡대를 따라 주로 분출하였고 중앙부에 모쿠아웨오웨오 칼데라가 형성되어 있고 중위부에 세계 최장의 용암동굴이 형성되어 있다. 킬라우에아 화산도 역시 중앙부에 킬라우에아 칼데라가 형성되어 있고 여기서부터 남서쪽과 동쪽으로 열곡대가 형성되어 있으며 이 곳을 따라 분출이 진행되고 있다. 특히 동부 열곡대의 마우나울루 분화구에서 1969~1974년에 분출되어 마우나울루 용암류역을 형성하였으며, 푸우오오 분화구에서 1983~1986년에 아아 용암류, 1986~1990년에 쿠파이아나하 분화구와, 1991년~현재까지 푸우오오 분화구에서 퍼호이호이 용암류를 분출되어 푸우오오 및 쿠파이아나하 용암류역을 형성하고 있다.

**핵심어:** 하와이 섬, 마우나로아 화산, 킬라우에아 화산, 킬라우에아 칼데라, 열곡대, 용암류역

**Abstract:** Hawaii Island makes up of five volcanoes of Kohala, Mauna Kea, Hualalai, Mauna Loa, and Kilauea. They are big shield volcanoes rising above the Pacific ocean floor and final two volcanoes provide a natural laboratory for the study of active volcanoes. Mauna Loa is the largest single volcano on earth. At the summit is an oval-shaped Mokuaweoweo caldera, from which two rift zones extend to the southwest and northeast, and in the medial part are the longest lava tube systems in the world. Kilauea has been formed largely by eruption along southwest and eastern rift zones extending from Kilauea caldera at the summit. On the eastern rift zone, spectacularly, the 1983-1986 eruption of Kilauea at Mauna Ulu crater formed the Mauna Ulu lava flow field. The 1983-1986 eruption of aa flows at Puu Oo crater, and the activities of pahoehoe flows during 1986-1990 at Kupaianaha crater and during 1991-recent at the Puu Oo has produced the Puu Oo and Kupaianaha lava flow field.

**Key words:** Hawaii Island, Mauna Loa volcano, Kilauea volcano, Kilauea caldera, Rift zone, Lava flow field

\*Corresponding author: Tel. 82-54-820-5469, E-mail. hwangsk@andong.ac.kr

## 서 언

지난 2003년 7월 26일부터 7월 31일까지 하와이 제도의 하와이 섬(일명 “큰섬”이라 부름)과 오후아 섬을 방문하여 그 곳의 지질을 답사하였다. 제주도는 이 화산섬들과 유사한 점이 많아서 이들과 같은 점과 다른 점을 살펴서 세계자연유산으로 유네스코에 등록하는데 유리한 면을 찾기 위해서 이루어졌다. 이와 더불어 하와이 섬의 화산형태와 마우나로아(Mauna Loa)와 킬라우에아(Kilauea) 화산의 화산활동에 대해 살펴 보았다.

하와이 제도의 3개 활화산은 1916년 8월 국회 법안에 의해 하와이 국립공원으로 되었다. 이 공원은 하와이 섬의 킬라우에아와 마우나로아의 일부와, 마우이 섬의 할레아칼라(Heleakala)를 포함하였지만, 1961년에 하와이화산 국립공원과 헬레아칼라 국립공원으로 분리되었다. 하와이화산 국립공원에 포함되는 킬라우에아와 마우나로아는 지구상에서 가장 크고 가장 활동적 화산 중의 하나이며 화산의 자연미를 잘 나타내고 있다.

하와이 섬에서 관광객들은 분출장면에 접근하여 가까운 거리에서 안전하게 많은 활동 장면을 볼 수 있었다. 지구상의 기타 화산들도 쉽게 접근할 수 있겠지만, 접근할 수조차 없는 것도 있다. 특히 킬라우에아 분출은 지금도 어려움 없이 접근할 수 있어 사람들을 불러들인다. 연간 수백만 명이 최근 화산활동의 결과와 장면을 보기 위해 하와이 화산을 방문한다. 운 좋은 사람은 킬라우에아와 마우나로아가 분출할 때 방문하여 거대한 용암분출, 펄펄끓는 용암호와 별경게 흐르는 용암강을 바라보기도 하였다.

## 지질학적 배경

하와이 군도는 섬들과 해산들이 체인을 형성하면서 500 km 이상 뻗는다. 이 군도에서 하와이 제도는 광활한 태평양의 해저에서 수많은 화산분출에 의해 솟아오른 큰 화산 산맥의 상단부이다. 이들 섬의 체인 주변에서 해양의 평균심도는 5,000 m 이상이기 때문에 가장 낮은 섬이더라도 높이 치솟은 뾰족한 산맥을 형성한다. 하와이 섬에서 마우나케아(Mauna Kea)와 마우나로아는 해저의 기반 위에서 10,000 m 정도 솟아있으며, 마우나케아는 해저의 기반에서 측정할 때 태평양에서 가장 높은 봉우리이며 세계에서 가장 높은 산이다(Babb, 2001; Duffield, 2003).

하와이 제도의 성인은 과학자들에게 오랫동안 흥미거리가 되어왔다. 이 문제에 대해 연구했던 초기 지질학자들은 화산들이 해저 상의 큰 열극에서 동시에 형

성되었다는 가설을 내세우고 북서쪽 화산부터 더 빨리 중지하였다고 하였다. 1960년대 전기에 판구조론의 대두와 함께, 이 섬들의 연대 측정은 새로운 설명을 가능하게 하였다. 지각과 상부 맨틀로 구성되는 지구의 암권은 더 유체성인 연약권 위를 떠도는 여러 개의 단단한 지판으로 나뉜다. 인접한 판들끼리 충돌하거나, 떨어져 확장하거나 혹은 서로 미끄러지는 판경계부는 거대한 지질변화대이며, 이 판경계부에서 지진과 화산활동이 대부분 일어난다. 그러나 하와이는 판경계부가 아니고 태평양판 중앙부에 놓인다. 하와이 화산을 들끓게 하는 마그마 공급지는 지구의 맨틀에 있는 정지된 열점이다. 이 열점은 암석을 가열하여 녹이고 상승하여 실제로 지표상에 분출한다. 태평양판이 열점 위에서 북서쪽으로 떠이동할 때, 이 섬들이 형성된다. 각 화산은 판의 이동에 의해 열점으로부터 천천히 운반되어 멀어진다. 이때 고기 화산은 마그마 공급지로부터 떨어져 후화산이 되고 새로운 섬이 이 체인의 남동단에서 형성되기 시작할 때 사화산이 된다. 그래서 하와이 제도의 섬들은 현재의 하와이 섬과 같은 위치에서 시작되었다.

이 섬들과 해산들의 길다란 체인은 70 Ma 연대치를 갖는데, 이는 태평양판이 북서쪽으로 꾸준히 이동한 증거이며 현재의 이동속도는 1년에 약 5 cm이다(Duffield, 2003). 주요 섬들 중에 가장 북서쪽에 있는 카우아이 섬의 최고기 암석은 5~7 Ma 연대를 갖는다. 대조적으로 하와이 섬에서 최고기 암석은 1 Ma 이후에 형성되었다.

젊은 하와이 화산이 해저로부터 위로 성장해갈 때 파도의 침식력과 산사태는 화산체를 축소시키기 시작한다. 화산이 해수면 위로 올라올 때, 새로운 파괴력이 일어난다. 파도, 바람, 비, 하천과 드물게 빙하는 이 새로운 섬을 깎아서 퇴적물을 바다로 되돌려준다. 화산의 큰 무게는 이 섬 아래의 지각을 휘게 하기 때문에 섬들도 역시 천천히 침강한다. 그러나 화산이 활동하는 만큼 오래 동안 섬은 계속 성장한다. 그러나 섬이 열점으로부터 천천히 멀어질 때 이의 분출이 뜸해지고 결국 정지한다. 깊은 계곡들은 하천에 의해 파이고 산호초가 해안선을 둘러싼다.

태평양판이 북서쪽으로 끌려갈 때, 고기 섬들은 풍화되고 침식되어서 결국 이들의 화산의 증거가 산호초와 환초들에 의해 감춰진다. 쿠레와 미드웨이 제도의 해수면 윗부분은 전적으로 석회암과 석회질 모래, 즉 방해석으로 감춰진 동물과 식물 유체로 형성되어있다. 그러나 단지 수십 m의 심도에서, 석회암은 큰 화산 산맥의 깎여진 봉우리 위에 놓여있다.

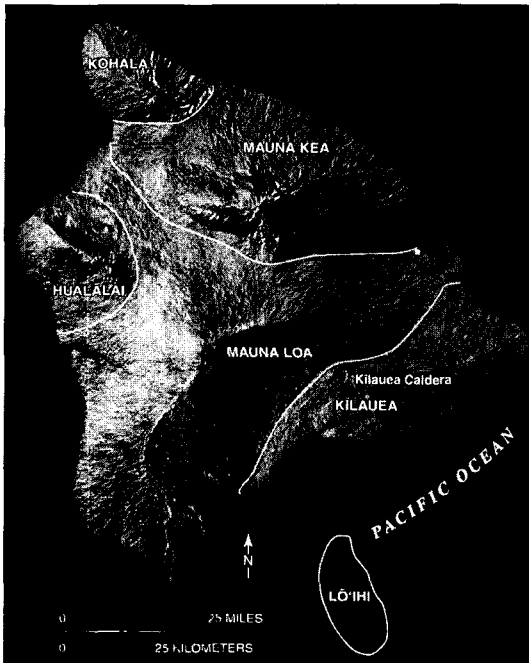


Fig. 1. Elevation model of the Hawaii Island, showing the surface boundaries between the volcanoes (from Duffield, 2003).

이 체인에서 큰 화산은 풍부한 강우를 가지며, 더구나 활화산은 녹색 열대식물로 뒤덮여 있다. 그러나 북서쪽에 이 체도를 구성하는 고기 화산의 잔류체는 너무나 작아서 무역풍으로부터 습기를 모을 수 없어 거의 비가 내리지 않고 황무지로 남아있다.

### 하와이 화산활동의 성격

하와이 섬은 하와이 제도의 최남동에 놓이고 가장 젊으며 코할라(Kohala), 마우나케아(Mauna Kea), 후알랄라이(Hualalai), 마우나로아(Mauna Loa), 킬라우에아(Kilauea) 등의 5개 화산으로 구성된다(Fig. 1).

코할라 화산은 하와이 섬에서 가장 북쪽에 위치하고 최고기 화산이며 침식에 의해 큰 협곡을 형성하고 있다. 코나에서 힐로로 연결되는 새들(Saddle) 도로를 따라 약 1,990 m 고도까지 올라갈 수 있는데, 이 고개에서 북쪽으로 마우나케아 화산이 4,138 m 높이로 솟아 있고 봉우리에 국제천문관측소가 설치되어 있다. 이 화산은 4,500년 전에 마지막 분출하였고 최후빙기 동안에 정상부에 빙하를 가졌던 것으로 알려져 있다. 이 화산의 동쪽 해안에서 6 km 안쪽에는 약 132 m 높이의 아카카(Akaka) 폭포가 형성되어 있다. 하와이 섬에서

오래된 코할라와 마우나케아 화산의 해안에는 거대한 산사태에 의해 가파른 절벽이 형성되어 있으며 이 절벽이 하천의 침식에 의해 상류쪽으로 이동하여 골짜기에 높은 폭포를 만들었다. 그리고 후알랄라이 화산은 서쪽에 위치하여 1970년대까지도 분출하여 용암류가 봉우리에서 산사면을 따라 검은 비단을 펼친 것과 같이 널려있다.

마우나로아 화산은 남서쪽에 위치하고 고도가 4,103 m이고 세계에서 가장 큰 화산이며 1984년까지 분출하여 활화산 연구를 위해서 매우 좋은 자연실험실 역할을 해왔을 만큼 지금은 잠시 쉬고있는 화산이다. 킬라우에아 화산은 가장 남쪽에 위치하고 지금도 활동중인 활화산이며 여러 학자들의 활화산 연구에 좋은 대상이 되고 세계에서 많은 관광객이 분출장면을 목격하려고 고있다.

### 용암의 조성

대부분 하와이 용암은 실리카 함량이 적다. 킬라우에아와 마우나로아에서 분출된 가장 흔한 용암은 감람석 현무암이다. 감람석은 녹색 광물이며 흔히 다른 광물의 석기 속에 입자로서 산출된다. 이 결정은 1 cm에 달하는 경우도 있지만 일반적으로 더 작다. 감람석 결정은 남쪽 끝(Ka Lae)의 녹색 모래 해변(Papakolea)에서 풍부하며, 여기서 이들은 주위의 화산에서 침식되어 온 것이다. 검은색의 큰 휘석 결정은 마우나케아와 할레아칼라의 용암과 분석구에서 산출된다.

감람석 현무암은 실리카가 현무암보다 더 풍부하고 좀더 담색인 하와이아이트와 같은 암석으로 점이된다. 하와이아이트는 킬라우에아와 마우나로아에서 알려져 있지 않지만 마우나케아와 할레아칼라에서 풍부하다.

하와이에는 두 타입의 용암류가 산출되는데, 이들에 대한 하와이 이름은 퍼호이호이와 아아이며 지질학자들은 이와 같은 용암을 기재하기 위해 흔히 사용해오고 있다. 퍼호이호이는 매끄럽고, 주름지고 혹은 새끼 끈 모양의 표면을 나타낸다; 이는 아아보다 더 고온이고 더 많은 가스를 가진다. 반면에 아아는 매우 거칠고 혹은 뒤범벅된 표면을 가지지만 그러나 치밀한 내부를 가진다. 퍼호이호이 용암류가 냉각되고 결정화될 때, 아아 용암류로 전이되지만 그러나 그 반대는 결코 나타나지 않는다. 이 두 타입의 차이는 화학조성에 따라 전혀 일어나지 않으며 차라리 온도, 가스와 결정 함량에 따라 나타난다.

아아 용암류는 가파른 사면에서 시속 56 km의 높은 속도를 내는 빠른 용암강(lava river)에 의해 공급된다. 용암강의 채널에서, 용암은 측방으로 퍼져 흐르는 연

변부에 공급되지만 그러나 가장 큰 용적이 아래로 흘러 용암류 전면부에 공급된다. 아아 용암류의 전면부는 공급 채널보다 훨씬 더 느린 속도로 움직인다. 그러나 이들 용암류는, 전면부 뒤에서 채워지는 용암이 입체 두께에 도달하여 더 냉각된 용암의 표피를 터뜨릴 때, 갑자기 앞으로 썩지를 형성한다. 1983~1985년에 아아 용암류가 로알가든을 여러 조각으로 황폐화시킬 때, 지질학자들은 2~3분에 수100 m로 썩지를 형성하는 용암류를 관찰하였다.

분출이 끝나면, 유체 용암은 빠져나가 주위 용암류보다 더 낮은 긴 채널을 남긴다. 이러한 채널은 마우나올루(Mauna Ulu)에서 나온 1973년 용암류에서 크레이터체인 도로를 따라 볼 수 있다.

퍼호이호이 용암류는 빨리 움직이는 채널을 형성할 수도 있고 혹은 용암관(lava tube)에 의해 공급되는 천천히 움직이는 용암류를 형성할 수도 있다. 용암관은 채널화된 용암류에서 발달되는데, 채널의 연변부에 껍데기가 축적되어 실제로 용암을 가로질러 지붕을 형성한다. 용암관은 용암하천(lava stream)을 격리 단열시켜 냉각과 정체되기 전에 훨씬 더 빨리 이동하게 해준다. 1986년 후기부터 2003년 사이에, 용암관은 킬라우에아의 동부 열곡대 상의 화구로부터 13 km 떨어진 해양까지 종종 뻗어나갔다. 한 화구에서 활동이 멈췄을 때, 용암관 내의 대부분 용암은 빠져나가 아취형 천장과 평탄한 바닥을 가지는 터널을 남긴다. 용암관은 관 내의 용암하천의 레벨 변화로부터 “높은 용암”의 흔적을 나타낼 수도 있다.

### 하와이언 분출의 성격

세계 화산의 대부분은 격렬하게 분출하지만 왜 하와이언 분출은 대부분 비교적 온화한가? 그 이유는 하와이언 마그마가 더 폭발적인 화산에서보다 더 유동적이고 약 0.5~0.7 wt%의 더 적은 가스 함량을 가지기 때문이다. 용암의 점성은 용암의 온도, 화학조성과 가스 함량의 3가지 일차적 요인에 의해 지배된다. 용암의 실리카 함량이 적어진다면, 점성도 낮아지며 역시 온도와 가스 함량이 많아져도 점성이 줄어든다.

용암의 점성이 매우 클 경우에 거기에 포함된 가스는 폭발로 달아나기 전에 높은 압력에까지 도달한다. 이 현상이 기포가 밀집된 곳에서 일어난다면, 그 결과는, 세인트헬렌스산(Mount St. Helens)의 1980년 분출과 필리핀의 피나투보의 1991년 분출과 같이, 폭발적으로 일어날 수 있다. 대조적으로 하와이언 감람석 현무암은 실리카가 적고, 가스를 쉽게 방출하며 보통 1,100~1,180°C로서 극히 높은 온도이어서 유체 용암을

초래한다. 용암이 공중으로 300 m 이상 치솟을 수 있는 높은 용암분출은 대부분 하와이언 분출만큼이나 맹렬하다.

비록 맹렬한 폭발은 모든 하와이언 분출 중에서 몇 %만을 수반하지만, 킬라우에아는 수100년마다 폭발적으로 분출하며, 세인트헬렌스산 만큼 그렇게 자주 폭발적이지 않다. 미국에서 현재 모든 화산 중에서 킬라우에아는 AD 1790년의 폭발적인 분출이 약 80명에서 수100명의 인명을 희생시켜 가장 치명적이었다. 그러나 하와이에서 폭발적인 분출은 1883년 인도네시아의 크라카타우 혹은 1912년 알라스카의 카트마이의 분출과 같은 대변동에 비교하면 매우 적은 편이다. 하와이에서 대부분 폭발적 분출은 지하수 혹은 지표수와 상호작용에 의해 일어난다.

하와이언 용암의 유동적 성질은 수형과 용암수에 의해 증명된다. 퍼호이호이가 나무들을 둘러쌀 때, 그 용암은 나무 줄기에 의해 냉각되고 나무 껍질의 많은 흔적을 보존하면서 단단해진다. 나무가 탄 후에, 원통형 구멍 혹은 수형은 그 나무가 이전에 서있었던 곳에 남는다. 용암이 빠져나가 용암류의 표면이 종종 낮아지면 3 m 이상 높이의 용암수와 같은 줄기 주위에 고화된 용암을 남긴다.

### 세계의 가장 큰 화산 마우나로아

마우나로아(긴 산)는 단일 화산으로서 세계의 모든 활화산 중에서뿐만 아니라 지구상에서 가장 크다. 마우나로아는 아래로 굽은 해저상의 기저로부터 16,800 m 올라와 있으며, 그 중에 4,103 m는 해수면 위에 있다. 마우나로아는 4,400 km<sup>3</sup>의 용적을 가지는데, 카스케이드 산맥에서 가장 큰 화산인 캘리포니아의 샤스타산(Mount Shasta)이 20 km<sup>3</sup>인 것과 비교하면 굉장한 크기이다. 마우나로아는 거의 대부분이 평균 3~5 m 두께의 얇은 용암류에 의해 형성되었다.

마우나로아는 12° 이하의 매우 넓고 완만한 사면을 가지는 돔 모양의 순상화산이며 똑같은 사면이 해저로 뻗는다. 이 화산의 정상부에는 길이 5 km, 너비 2.5 km, 깊이 최고 180 m되는 계란 모양의 저지가 있다. 이 저지는 정상부의 함몰에 의해 형성되었으며 모쿠아웨오웨오 칼데라(Mokuaweoweo caldera)라 부른다. 이 칼데라의 북쪽과 남쪽 끝에서는 역시 함몰에 의해 형성된 더 작고 거의 원형의 피트 분화구가 병합되어있다.

열곡대라 부르는 2개의 현저한 단열대가 마우나로아 정상부의 칼데라에서 뻗어나 있다. 이 열곡대는 열린 지표에서 열곡에 의해 표시되고, 분출동안에 공중으로

포출된 용암 조각의 축적에 의해 축조된 분석구와 스페터구에 의해 표시된다. 험령하게 고결된 분석구는 지면에 떨어지기 전에 냉각되어 고화된 많은 용암 덩어리들로 구성된다. 스페터구는 지면에 떨어질 때 아직도 부분적으로 녹아있던 용암 방울들이 함께 용결되어 있다.

마우나로아의 남서 열곡대는 정상부에서 남서 해안 끝(Ka Lae)까지 뻗어있다. 북동 열곡대는 모쿠아웨오웨오 칼데라에서 힐로쪽으로 뻗어 있다. 킬라우에아의 외륜 위에 있는 자가르(Jaggar) 박물관에서 마우나로아를 바라볼 때, 북동 열곡대는 분석구의 연속체로 표시되며, 가장 현저한 것은 3,000 m에 위치하는 푸우올라올라(Puu Ulaula: 붉은 언덕)이다.

힐로에서 11번 하와이 환상도로를 따라 코나로 향하여 마우나로아를 지나가면 사면에서 여러 색깔 변화를 발견할 수 있다. 이 색깔변화는 용암류의 연대와 표면 특징에 따라 달라진다. 이 열곡대에서 나온 신선한 아아 용암류는 검은 색을 나타내고 신선한 퍼호이호이 용암류는 햇빛에서 변색되는 은회색을 나타낸다. 더 고기 용암류는 암회색이고 훨씬 더 고기 용암류는 적갈색이다. 실제로 움직이는 용암류는 종종 더 고기 지역을 둘러싸면서 갈라지며 교란되지 않은 작은 섬(하와이에서 "kipuka"라고 부름)을 남긴다. 이 화산의 상부 사면에서, 더 새로운 검은색 용암류는 보다 더 고기 용암의 키푸카를 둘러싼다. 하부 사면에서의 키푸카는 큰 고목이 있고 식생이 많은 섬으로 남아있다. 이러한 예는 마우나로아 스트립(Mauna Loa Strip) 도로 주변에서 볼 수 있는 키푸카 키(Kipuka Ki), 키푸카 푸아울루(Kipuka Puaulu)를 들 수 있다.

최근 2세기에 걸쳐서, 마우나로아는 4.4 km<sup>3</sup> 이상의 용암을 분출시켰다. 이 기간 동안에 분출은 정상부 칼데라에서 혹은 근처에서 일어났으며, 여기서 이 분출은 열곡대를 따르는 화구로 이동하거나 혹은 북서 측부에 있는 고립된 화구로 이동하였다.

전형적인 분출은 21 km까지 뻗은 한 개 이상의 열곡으로부터 시작하였다. 수 m에서 수백 m 높이의 거의 연속적인 용암분천선은 이 열곡으로부터 일어난다. 큰 용적의 용암 분류는 곧바로 빨리 움직이는 용암류를 형성하고 스페터 램파르트는 이 열곡계를 따라 축조되었다. 용암분천선은 대개 하루 미만으로 짧게 계속되다 정지하였다. 이때 많은 열곡은 활동하지 않고 몇 개의 개별 화구에서만 분출이 일어난다. 따라서 이때 용암분천은 높이가 커지며 240 m 높이까지 도달한다. 이 분천으로부터 나온 쇄설물은 화구 주위에 축적되어 분석구 혹은 스페터구를 형성한다. 부서과 펠레의 머리털(잡아늘인 자연 유리)은 먼 거리까지 불어내



Fig. 2. Stalactites on the roof of the Kazumura lava tube system.

는 아랫바람을 일으키는 높은 분천에서 형성되었다. 이러한 분출단계 동안에, 용암류는 화구로부터 발생하고 수일 내지 수개월 동안 계속 흐를 수 있다. 최근 2세기 동안에 마우나로아에서 분출한 많은 용암류는 바다에까지 도달하여 이 섬에 새로운 땅을 추가시켰다.

**마우나로아의 최근 분출:** 1984년 3월 25일 오전 1:25분에, 용암은 모쿠아웨오웨오 칼데라 바닥 위의 열곡에서 분천으로 시작되었다. 그후 짧은 기간에 분출 열곡이 남서 열곡대에서 열리고 수 시간 내에 그 분출은 북동부 열곡대로 퍼졌다. 오전 7시에 용암은 오직 북동부 열곡대의 3,750 m 고도에서만 분출하고 있었다. 아침에 거의 1.5 km 길이의 열곡이 열려 60 m 높이의 용암분천이 치솟으면서 1시간에 거의 150만 m<sup>3</sup>의 용암을 분출하였으며 용암류가 남동쪽으로 전진하였다. 이 활동은 오후 늦게까지 계속되어 그때 열곡이 2,800 m 고도에서 지면을 찢고 상류로의 활동이 끝났다. 다음 21일간에 용암이 이 최근 화구로부터 계속 흘러나와 힐로시를 잠시나마 위협하였지만 궁극적으로 8 km 떨리에 멈춰 버렸다. 마우나로아의 1984년 분출은 1950년이래 가장 컸었지만 그러나 오직 약 60%의 용암만을 분출하였다.

**용암동굴:** 마우나로아에서 나온 용암류 내의 용암동굴은 카주무라 용암관(Kazumura lava tubes)과 쿨라카이 용암관(Kula Kai lava tubes)이 잘 알려져 있다. 이들은 개인이 관리하면서 사진과 함께 설명도를 만들어 놓았고 헬멧, 전등, 장갑, 무릎대 등의 동굴 탐사장비를 구비해 탐방객의 편의를 제공하였으며 스스로 안내하면서 설명을 해주었다. 또한 앞으로 자기가 원형 그



Fig. 3. Kula Kai lava tube system showing upper and lower tubes.

대로 보존하겠다고 하여 우리와 매우 대조적이었다. 카주무라 용암관은 길이가 약 60 km로서 세계 최장이라고 한다. 이들은 퍼호이호이 용암류에 형성되어 있으며 폭이 수 m이고 높이가 수십 m이다. 상부로 가면서 경사가 급해지고 용암폭포(lava fall)가 여러 차례 나타났다. 이 폭포들과 높은 천장은 바닥 침식에 의해 형성되었다는 것을 암시한다. 동굴벽에는 유선(flow line), 용암선반(lava shelf), 용암유석(lava flowstone), 찰흔(scratch) 등이 나타나고, 낮은 천장에는 용암종유(lava stalactite)를 보여주고(Fig. 3) 바닥에는 용암석순(lava stalagmite), 용암 뗏목(lava raft) 등이 존재하는 매우 아름다운 내부를 형성한다. 이러한 여러 내부구조들은 이 동굴이 만장굴과 유사하다는 것을 알 수 있다.

쿨라카이 용암관은 아아 용암류에 형성되어 있어 흐름단위(flow unit)가 쉽게 인지되며 내부가 매우 거칠다. 이 동굴은 구비가 심하고 여러 용암동굴이 합류하는 형태를 나타내며 상·하부 동굴이 서로 교차하는 모습을 보여준다(Fig. 3). 또한 카주무라에서 볼 수 있는 내부 구조는 거의 나타나지 않으며 천장에서 떨어진 낙반(breakdown)이 많고 짧은 거리를 둘러보기도 진땀이 흐를 지경이다. 이 동굴은 선사시대에 주거의 흔적이 있었으며 이에 대한 유물을 철저히 보존하는 것이 매우 돋보인다. 이 용암동굴도 개인이 관리하면서 사진과 함께 측량도를 만들어 놓았고 청소년의 학습장소로 매우 적합하게 해 놓았다. 관리인이 스스로 안내하면서 해박한 지식을 곁들여 설명을 해주는 것이 인상적이다.

### 화산의 여신인 펠레의 집 킬라우에아

킬라우에아 화산은 그 형태가 마우나로아를 빼닮은

순상화산이다. 이 산은 해저 위에 6,000 m 이상 솟아 있으며 정상부 칼데라에서 뿜어나는 2개의 열곡대를 따라 일어나는 분출에 의해 대부분 형성되었다. 남서와 동부 열곡대의 지표는 틈, 분석구, 스페터구, 피트 분화구와 잔류열곡을 잘 보여준다(Fig. 4). 동부 열곡대 상의 수많은 큰 피트 분화구는 크레이터체인 도로에서 볼 수 있고, 크레이터림 도로는 남서 열곡대의 평행열곡 위를 지나간다.

### 킬라우에아 화산 정상부의 분출과 칼데라 형성

킬라우에아 화산의 정상부에는 킬라우에아 칼데라가 있으며, 그 입구에는 킬라우에아 탐방관과 화산예술관이 있고 서쪽으로 크레이터림 도로를 따라 수 km 가면 하와이 화산관측소와 자가르(Thomas A. Jaggar) 박물관(고도 1243 m)이 나타난다. 자가르 박물관 앞에서 북서쪽으로 보면 마우나로아 화산이 말 그대로 방패모양의 순상화산 자태를 잘 나타내며 남동쪽으로 보면 킬라우에아 칼데라가 발 아래에 놓여 있다. 이 칼데라는 길이가 4 km, 너비가 3.2 km이고 바닥은 거의 10.5 km<sup>2</sup>로서 19세기 후반부터 분출한 용암류로 구성된다. 곳에 따라서 이 칼데라 벽은 일련의 계단상 단층대로 구성된다. 이중에서 가장 높은 곳의 칼데라 벽은 그 높이가 바닥에서 120 m 정도 된다. 이 칼데라에는 남단부에 할레마우마우(Halemauau), 동단부에 킬라우에아 이키(Kilauea Iki), 남동단에 케아나카코이(Keanakakoi)라는 피트 분화구가 있다(Fig. 5). 하와이언 원주민의 구전에 의하면, 이들 분화구는 화산의 여신인 펠레의 집(Ku Lua o Pele)으로 알려져 왔다.

피트 분화구는 폭발에 의하지 않고 수직함몰에 의해 형성된다. 마그마가 빠져나가 지하공동을 남길 때, 상위의 암석은 지지되지 못하고 함몰된다. 다음 차기분출에서 나오는 용암은 피트 분화구로 쏟아 붓거나 혹은 분출열곡이 그 분화구 내부로 열려있는 것이다. 이런 열곡은 분화구 바닥을 가로질러 수직벽 위의 외륜까지 뻗어나고 이 분화구 밖으로 연장될 수도 있다. 마우나올루(Mauna Ulu)에서의 1969~1974년 분출동안, 알로이 분화구(Aloi Crater)는 분화구 벽을 자르는 열곡에서 나온 용암으로 완전히 채워졌다.

킬라우에아 칼데라 부근에는 2개 유형의 화산쇄설물을 볼 수 있는데 이들은 주요 폭발활동의 증거를 지시해준다. 첫째 유형은 대부분 현무암질 유리편으로 구성되는 모래 크기의 화산회이며, 이들은 용암분천이 지하수에 의한 급냉으로 파편화되어 빠르게 뿜어댄 것이다. 이 쇄설물은 밤색 내지 황갈색이고 도로절개지, 단층애, 이 칼데라의 동쪽, 남쪽과 남서 끝의 틈에서도 노

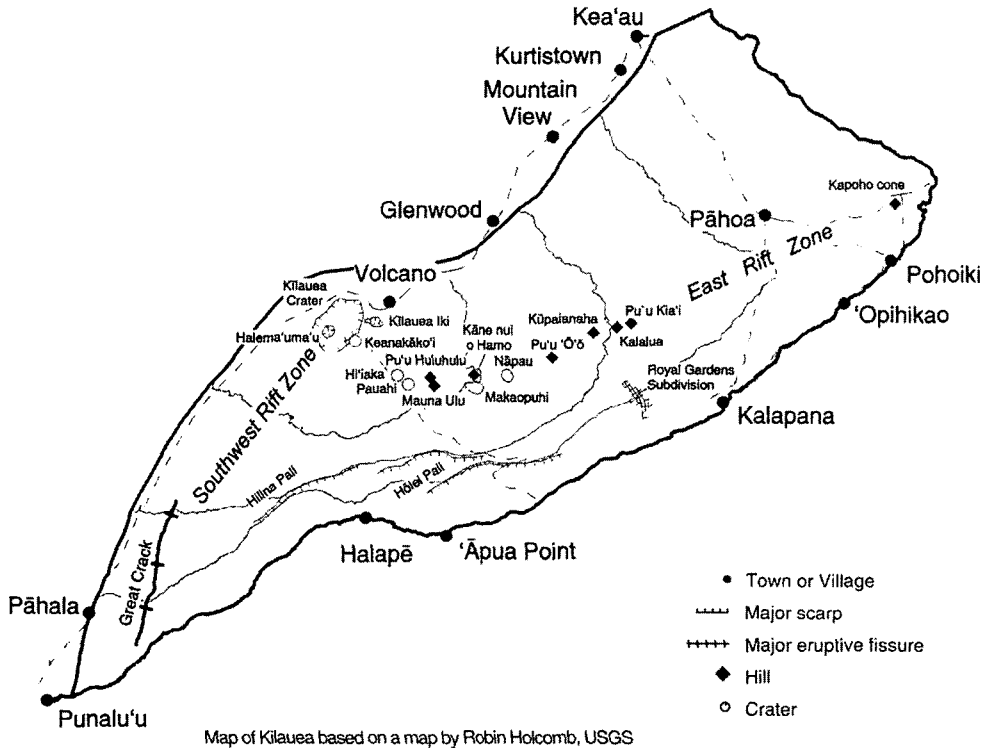


Fig. 4. Map of the Kilauea volcano.

출된다. 이 물질은 대략 1500년과 1790년 사이에 분출된 케아나카코이 화산회(Keanakakoi Ash)라 부른다. 이 화산회는 이 칼데라와 킬라우에아이키 분화구에서 덜 폭발적인 용암분출에서 나온 자갈 크기의 부석보다 훨씬 더 세립질이다. 후자에서 나온 부석은 이 칼데라의 남동부 외륜을 얇게 덮여있다.

둘째 유형의 폭발적 쇄설물은 크기가 세립질 화산회에서 큰 암괴 범위의 고기 용암편으로 구성되는데, 이들은 맹렬한 스팀폭발에 의해 깨져 불려나온 것이다. 최근 몇 세기 동안 스팀폭발이 여러 차례 일어났는데, 1500년과 1790년 사이의 여러 폭발과, 1924년에 또다른 폭발이 그것이다. 1790년의 큰 폭발에서 나온 쇄설물은 하와이 화산관측소와 자가르 박물관 근처의 지표면을 덮었다. 1924년 폭발에서 나온 물질은 할레마우마우 주변의 지표면을 깔았다. 10톤 무게의 한 암괴는 1924년 5월 18일에 할레마우마우의 중앙에서 동쪽으로 1,050 m까지 터져 나갔다.

칼데라 바닥으로 내려가면 할레마우마우 분화구를 가까이서 더 자세히 볼 수 있다. 칼데라 바닥과 분화구 바닥은 용암으로 덮여있고 그 표면에는 큰 암괴들

이 여기저기에 뒤굴고 있으며 유황 냄새를 풍기는 증기가 여기저기에서 내뿜어 금방이라도 분출할 것만 같다. 할레마우마우 분화구는 킬라우에아의 주요 화구이며 여기서 이 화산의 주 용암화도가 지표에까지 도달

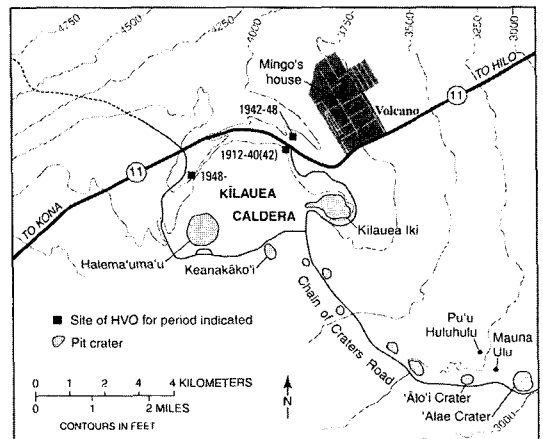


Fig. 5. Topographic map of the area around Kilauea caldera (from Duffield, 2003).

한다. 1823년 전부터 1924년의 폭발분출까지, 킬라우에아 칼데라는 주로 할레마우마우 내에서 계속 활동중인 용암호로 유명했다. 용암호로 활동하는 동안에 화도의 상단부는 반고체의 용암 플러그(plug)를 형성했다. 이 플러그를 지나가는 열극은 액체 용암을 아래에서 지표로 올라오게 하며 여기서 이 용암은 약 15m 깊이의 연못을 형성한다. 이 플러그와 유체 용암은 화도에서 자유롭게 위로 혹은 아래로 움직인다. 이 용암의 큰 유동성 때문에 이 용암호는 일반적으로 플러그보다 더 빨리 올라오거나 혹은 내려간다. 굳은 용암 덩어리는 마치 호수의 섬과 같이 용암호 위로 불쭙 나오고, 때때로 이 덩어리의 측방이동은 마치 호수에 떠다니는 섬과도 같다고 한다.

할레마우마우에서 용암은 공급샘에서 솟아나고 배수구를 통하여 빠져나갔다. 일정한 흐름이 공급지에서 흘러나와 가라앉았다. 용암호의 냉각 표면에서는 계속적으로 냉각표피가 형성되고, 넓적한 냉각표피는 종종 틸딩되어 유체용암 속으로 가라앉았다. 기타 다른 조각은 배수구 속으로 끌려 들어갔다. 용암분천은 용암호 표면 위에서 최고 9m 높이까지 솟았다. 이들의 얼마는 하위의 공급샘 혹은 배수구 위에 정지되어 남아있었다고 한다.

때때로 용암호는 완전히 빠져나가 용암호의 바닥을 형성하는 별건 용암을 노출시켰다. 어떤 때는 용암호 높이(레벨)가 때때로 단 하루에 수백 m 낮아졌다. 일반적으로 빠른 낙하 때마다 분화구벽에서 별건 물질이 마구 떨어져, 분화구의 바닥은 흔히 먼지를 실은 유황향기의 구름으로 가득했다고 한다.

**1924년의 폭발분출:** 할레마우마우에서 용암호는 1924년 초기에 침하하기 시작하여, 115m 깊이의 구덩이(pit)를 남겼다. 4월 29일 이 분화구 바닥은 함몰되기 시작하였고 수많은 지진이 이 침하에 수반되어 일어났으며, 관측소의 기기들은 마그마가 동부 열곡대로 이동한다는 것을 지시하였다. 5월에 들어서 이 분화구는 210m까지 깊어져 거의 고정됐던 암석이 불안정한 벽으로부터 떨어져 나왔다. 5월 11일에 할레마우마우는 폭발하여 칼데라 바닥에 암편을 내던졌다. 폭발은 다음 주 동안 계속되어 강도가 점점 커져 결국 5월 18일에 거대한 화운이 공중으로 6km 이상 올라갔으며 무게가 수 톤이 되는 암괴가 분화구에서 터져 나왔다. 맹렬한 번개와 폭풍은 머드 비를 수반시켰다. 할레마우마우의 벽은 점진적으로 붕괴되어 이의 직경이 420m에서 1,020m로 증가하였다. 5월 18일 후부터 폭발은 강도가 점차 감소되어 5월 27일에 끝났다고 한다.

폭발에 의해 불려나온 쇄설물은 새로운 화산물질을 함유하지 않고 대부분 분화구벽의 고기 고체암석으로 구성되어 있었다. 이는 이 폭발이 마그마 저장고 내에서 유래되지 않았고 차라리 저장고 위의 물로 포화된 암석대 내에서 유래되었다는 것을 지시하였다. 할레마우마우 아래에서 대규모 마그마의 퇴각은 주위 암석으로부터 지하수가 화도로 흐르게 하였다. 지하수는 뜨거운 화도벽을 만났을 때 스팀으로 바뀌었으며, 윗부분 암석에 의한 압력하에서 이 스팀은 일련의 폭발로 맹렬하게 달아나면서 이와 함께 암편과 먼지를 날려보냈던 것이다. 지하수의 가열이 일어날 때, 흔히 이와 같은 수증기성 폭발을 예상할 수 있을 것이다.

**1924~1966년의 활동:** 1924년의 스팀 폭발은 할레마우마우에서 마지막 깊이가 390m까지 함몰했던 연속적인 용암호 활동의 종식을 나타낸다. 다음 10년에 걸쳐서 용암은 할레마우마우에 쬐지마는 7차례 재개되어 이 분화구를 228m 깊이까지 채웠다.

킬라우에아는 다음 18년 동안 조용했다가, 용암이 할레마우마우에서 개개되어 4달 동안 지속되었던 것은 1952년이였다. 그리고 1954년에 짧은 분출이 일어난 후에, 활동 중심은 동부 열곡대로 옮겨갔다. 1955년 2월 28일에, 이 지역에서 115년만에 처음 일어났던 분출은 16km 길이의 열극계를 따라 발발하였다고 한다.

조용한 4년이 지속된 후, 1959년 후기의 용암은 킬라우에아 정상부의 킬라우에아이키(Kilauea Iki) 분화구에 다시 깔렸다. 먼저 360m 길이의 용암분천 선은 분화구 바닥 위 90m까지 남서벽 상의 틈을 따라 일어났다. 용암폭포가 이 분화구로 쏟아져 1868년 용암의 고기 바닥을 매몰시켰다. 실제로 활동은 한 개 화구로 한정되어 300m 이상 높이의 분천을 치솟게 하였으며 이는 하와이에서 기록된 가장 큰 분천이다. 이 분천에서 나온 분석과 스페터는 분화구 외륜에 쌓여 45m 높이의 원추형 언덕을 형성하였다. 이 분출이 12월 21일에 끝났을 때, 분화구 바닥은 약 108m의 새로운 용암 아래에 묻혔다.

한달 후 1960년 1월 14일에, 정상부 칼데라의 동쪽 45km의 카포호(Kapoho) 마을 교외에 용암이 다시 나타났다. 이 분출이 시작된 지 몇 시간 동안, 활동은 한 화구에서 집중되었고 여기서 큰 용적의 이중 분천이 450m 높이까지 도달하였다. 용암은 동쪽으로 향하여 바다로 쏟아졌고 옆으로 퍼져 10km<sup>2</sup> 면적의 부채꼴 용암류를 형성하였으며 카포호 마을의 대부분을 파괴하였다. 36일간의 분출로 용암이 바다로 흘러들어 해안선을 따라 2km<sup>2</sup>의 새로운 육지를 만들었다. 마그마



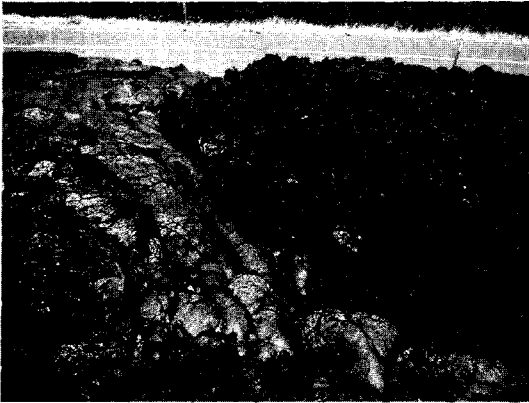


Fig. 6. Aa lava on pahoehoe lava.

가 카포호 분출에 크게 공급됨으로서, 킬라우에아의 정상부는 침하되었다. 왜냐하면 1952년 분출로부터 남아 있던 할레마우마우 바닥이 그 아래의 녹은 용암이 빠져나갔기 때문이다. 이 분화구의 바닥이 함몰되면서, 3개의 원형 구덩이를 갖는 분지가 형성되었다.

### 킬라우에아 화산의 동부 열곡대 분출

크레이터체인 도로를 따라 남동쪽으로 내려가면 많은 단층대가 나타난다. 열곡대와 평행하게 길다란 암석블록이 2개의 평행한 단층 사이에서 아래로 가라앉아서 지구대라는 길고 좁은 협곡을 남겼다. 코아에(Koae) 단층계는 킬라우에아 칼데라의 남쪽에서 2개의 열곡대와 연결된다. 킬라우에아의 남측부에는 힐리나(Hilina) 단층계라고 알려진 많은 단층대가 있는데, 이를 따라서 남쪽 블록의 일부가 바다로 향하여 아래쪽으로 내려앉았다.

#### (가) 마우나올루 용암류역

이 단층대를 가로질러서 암회색의 용암류가 펼쳐져 있다. 이 용암류는 아아 용암과 퍼호이호이 용암이 확실히 구분되며 전자가 더 많다(Fig. 6). 아아 용암은 곁에 가면 스코리아 같이 보이지만 용암류의 흐름단위별로 형성되어있기 때문에 용암의 이동시에 형성된 표층부의 클린커(clinker)라는 것을 알 수 있다. 내부의 피상 용암류들은 수직으로 자르는 크레이터체인 도로면 단면에서 작은 용암관을 무수히 보여준다. 그리고 더 상류쪽에는 용암수( lava tree)가 군데군데 서있으며 그 구멍에서 용암수형( lava tree mold)을 관찰할 수 있다. 이 용암류는 1969~1974년 사이에 분출한 마우나올루 용암류역(Mauna Ulu lava field)이다.



Fig. 7. Ropy structure on pahoehoe lava.

**1969~1974년까지 활동:** 1969년 5월 2일에 용암분출이 동부 열곡대 상부의 파우아히(Pauahi)와 알라에(Alae) 분화구 사이의 동-북동 방향에서 일어났다. 활동은 곧 열곡 중앙부에서 집중되었고 단지 몇 번 중단되면서도 5년 동안 계속되었다. 이 빈번한 범람은 주 화구 주변에 새로운 암석이 층층이 쌓여 마우나올루(Mauna Ulu; 벌건 산)라는 120 m 높이의 넓은 용암구를 형성하였다. 이 분출은 1969년에 12차례의 높은 분천(최고 530 m 높이)과 맹렬한 용암류로 특징지어지고 그 후에 지속적인 용암호와 범람으로 특징지어진다(Swanson, 1973).

크레이터체인 도로의 20 km 이상이 이 마우나올루 분출동안에 묻혔으며, 바다에 도달한 용암류는 이 섬을 0.8 km<sup>2</sup> 넓이로 늘렸다. 용암이 바다에 들어갈 때, 다이버들은 해저 용암류의 특징으로서 육상의 퍼호이호이도를 닮은 전구모양의 용암 덩어리인 배개 용암의 발달을 포함하여 물밑에서 용암의 거동을 관찰하였다(Moore *et al.*, 1973). 이는 이전에 아무도 목격하지 못했던 것이었다.

이 긴 분출과정은 1974년 7월 19일 아침에 마우나올루에서 용암호가 빠져나감으로서 연기로 가득찬 큰 분화구를 남겼다. 이때부터 마우나올루에서 5년 동안 일어났던 활동의 종말을 나타내며, 이 시기가 역사상 킬라우에아의 동부 열곡대에서 일어났던 최장기 분출이었다.

#### (나) 푸우오오 및 쿠파이아나하 용암류역

크레이터체인 도로를 따라 남동쪽으로 내려가면 용암류에서 볼 수 있는 여러 특징을 볼 수 있다. 도로면에는 모두 은회색 퍼호이호이 용암류가 펼쳐져 있는



Fig. 8. A tumulus in pahoehoe lava from Puu Oo crater.

데, 그 위에 튜물러스(tumulus)가 무수히 형성되어 있으며 표면이 매끈하고 새끼구조가 형성되어 있다(Fig. 7). 드물게 야생풀이 돌아있어서 이전의 마우나로아 용암류보다 먼저 분출되었음을 알 수 있다. 그리고 해안 근처의 감시소로부터 해안도로를 따라 동쪽으로 약 300여 m를 가면 이내 은회색 용암류가 나타나는데, 이 용암류는 아스팔트 도로를 뒤덮었고 한 포기의 풀도 없기 때문에 굳은지 얼마 안되는 퍼호이호이 용암류라는 것을 알 수 있다. 여러 종류의 새끼구조, 크고 작은 튜물러스(Fig. 8), 순간화구(ephemeral vent), 작은 용암동굴 등을 관찰할 수 있다. 이 현생 용암류 위를 걸어서 북쪽 공급지를 향하여 약 1 km 가면 지금 흐르고 있는 벌건 용암을 볼 수 있다. 멀리서도 열기가 화끈 화끈 달아오르지만 3 m 근처까지 접근할 수 있다. 용암은 퍼호이호이토(pahoehoe toe)를 형성하면서 전진하고 경사진 곳에서 표피가 미끄러져 주름이 잡히면서 새끼구조를 형성하는 것을 관찰할 수 있다(Hon *et al.*, 1994). 막대기를 갔다대면 금방 불이 붙고 용암액체가 막대기에 묻혀 나온다(Fig. 9). 이 용암류는 1983년부터 현재까지 분출하는 푸우오오 및 쿠파이아나하 용암류역(Puu Oo and Kupaianaha lava field)의 일부이다.

**1983~1986년까지 활동:** 만약 하와이 화산관측소의 기기들이 강한 진동과 지진을 기록한다면, 이는 또 다른 분출이 임박했다는 것을 지시한다. 1983년 1월 2일 자정 이후에 킬라우에아 정상부는 빠르게 가라앉았다. 지진은 동부 열곡대 아래로 이동하였고, 1월 3일 용암은 나파우 분화구(Napau Crater)에서 하류로 거의 8 km까지 열곡을 따라 분출되었다. 열곡 활동의 6개월(사건 1-3) 후부터 이 분출은 푸우오오(Puu Oo) 화구에 국

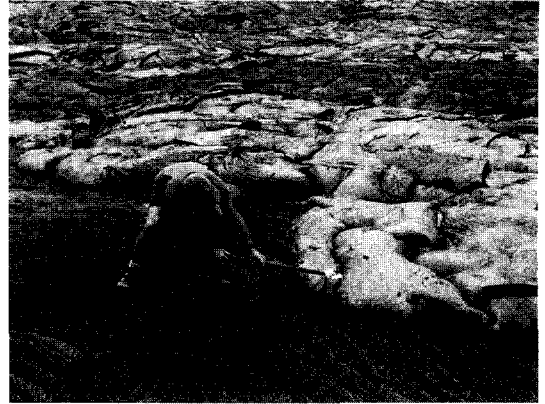


Fig. 9. Glowingly flowing lava, which a man is stirring with a stick.

한되었고, 이 화구는 하와이화산 국립공원의 동쪽 경계부에 걸쳐있다. 다음 3년 동안(사건 4-47), 푸우오오는 대체로 3~4주마다 24시간 동안 분출하였다. 이 사건들은 화구 위에 500 m 이상 높게 용암을 발진시키는 매우 불만한 용암분천에 해당한다. 높이 치솟은 용암분천에서의 강하물은 250 m 높이의 스페터구를 형성하고 채널로 아아 용암류를 공급하였다.

이 용암류는 그 화구의 남동쪽 5.6 km의 급사면에 위치하는 로알가든(Royal Gardens) 분양지에까지 위협을 가하였다. 여러번 분출하는 동안 아아 용암류는 13 일만에 이 분양지에 도달하였고 1983과 1984년에 16 가옥을 파괴시켰다.

**1986~1990년의 활동:** 1986년 7월에 푸우오오로의 수직 화도가 끊어져 푸우오오의 북동쪽 2.4 km에 있는 새로운 쿠파이아나하(Kupaianaha) 화구로 옮겨갔다. 이는 5년 반 동안 거의 계속적인 조용한 분류(사건 48)의 시작을 나타낸다. 용암호가 이 새로운 화구 위에 형성되었고 이에 잇따르는 범람은 1년 미만에 최고 54 m 높이에 달하는 넓고 낮은 방패모양 용암구를 형성하였다. 이 용암호에서 나가는 채널은 이 채널의 측부에 표피가 누적되어 용암하천(lava stream) 위를 가로질러 뻗어가면서 점진적으로 지붕을 발달시켜 나갔다. 곧 이 용암하천은 자신이 만든 관(tube)으로 봉해졌다. 용암관은 열 손실로부터 용암강(lava river)을 격리시켜 용암이 유체로 남게 하고 냉각 없이 더 멀리까지 이동케 한다.

1986년 11월 후기에 쿠파이아나하(Kupaianaha)에서 나온 용암류는 카파아후(Kapaahu)를 마구 파괴하고 해안도로를 폐쇄하면서 바다로 흘러갔다. 몇 주 후에 이

용암은 더 동쪽으로 코스를 바꿔 칼라파나(Kalapana) 마을의 북단부에서 14 가옥을 덮쳤다. 1987년 중반에서 1989년까지, 쿠파이아나하에서 분출된 용암은 대부분 바다로 직접 흘러들었다. 바다에 도달하자 스팀 폭발이 이 용암을 조각화되고 검은 모래로 만들어져 그 용암 입구의 작은 만에 몰려서 새로운 해변을 형성하였으며, 이 해변은 후에 용암에 의해 매몰되었다. 또한 용암이 조각화되면서 가파른 해저사면 위에 쌓여 용암 삼각주를 만들어질 때, 불안정한 새 토지가 섬에 추가되었다.

1989년 6월에 용암류는 하와이화산 국립공원의 와하울라(Wahaula) 관광센터를 덮쳤다. 1년 후 검은 모래 해변으로 유명한 칼라파나(Kalapana) 마을로 용암류가 틀 무렵, 이 분출은 가장 파괴적인 상으로 돌입하였다. 그 해 여름 끝날 무렵에 교회, 상점, 103가정을 포함하는 마을 전체가 15~24 m의 용암 아래에 매몰되었다. 용암류가 동쪽으로 나아갈 때, 이 용암류가 바다로 유입되어 아자수로 무성한 카이무만(Kaimu Bay)을 원래 해안선에서 510 m까지 용암 평원으로 변모시켰다. 1990년 후기에 새로운 용암동굴은 칼라파나 마을에서 판테로 우회하여 국립공원으로 되돌아왔으며 여기서 용암류는 다시 바다로 유입하였다.

**1991년~현재의 활동:** 쿠파이아나하에서 분출된 용암 용적은 1991년까지 계속적으로 줄었고, 동시에 푸우오오 용암호의 레벨과 활동이 상승하였다. 1991년 11월에는 열곡이 푸우오오와 쿠파이아나하 사이에 열려 3주 동안 분출하였다(사건 49). 쿠파이아나하도 이 사건 동안 계속 분출하였지만, 이의 분출량은 줄어들었다. 1992년 2월 7일에 쿠파이아나하 화구는 중지하였다.

10일 이후에 분출은 푸우오오로 되돌아갔다. 괴상 용암구의 서측부에 있는 열곡을 따라 용암이 낮은 분천으로 분출되었다(사건 50). 이는 다음 8년 동안 활동할 일련의 측화구 중에 첫번째이다. 쿠파이아나하에서와 같이 분출 양식은 거의 연속적인 조용한 분류이었다. 측화구로부터 나온 용암류는 푸우오오의 남쪽과 서쪽 사면 위에 빠르게 방패모양의 용암구를 축조하였다.

1992년 11월에 용암은 크레이터체인 도로를 횡단하여 그 화구에서 11 km 떨어진 카모아모아(Kamoamo)의 바다로 들어갔다. 다음 달에 관공급 피호이호이 용암류(tube-fed pahoehoe flow)는 카모아모아 선사유적지, 국립공원 야영장, 초기에 형성된 흑사 해변 등을 매몰시켰다. 1992년 말에서 1997년 1월까지 용암동굴은 용암을 바다로 계속 공급하여 카모아모아 용암류역 을 거의 계속적으로 넓혀 가갔다.

1993년이 시작되면서 푸우오오의 서측부에서 측화구로 공급되는 마그마는 용암구의 측부를 침식해 들어갈 때, 함몰 구덩이(pit)가 형성되었다. 이들 중에 가장 큰 것은 'Great Pit'로 알려져 있는데, 1996년 말에 서측부의 대부분을 말아 삼켰다. 1997년 1월 30일 밤에 마그마가 푸우오오 화도에서 빠져나감으로서 먼저 그 분화구 바닥이 함몰되고 다음에 용암구의 서측벽이 함몰되는 원인이 되었다. 그 후 얼마동안 새로운 열곡이 나파우 분화구(Napau Crater) 내와 근처에서 열려 간단하게 분출되었으며, 이 분출(사건 54)은 24시간 후에 끝났다.

푸우오오 함몰은 이 용암구의 서측부에 큰 갈라진 틈을 남겼다. 현재 자갈로 깔린 분화구는 깊이가 210 m이었고, 다음 23일 동안은 이 분출지에서 활동성 용암을 볼 수 없었다.

사건 55가 1997년 2월에 시작되었으며 그때 푸우오오 분화구로 되돌아와 용암호를 이루었다. 1달 후에, 새로운 화구가 이 용암구의 서측부와 남서측에서 열렸다.

1997년 6월에 푸우오오 내의 용암호는 상승하여 비로소 1997년 1월에 형성된 용암구의 서측벽에 갈라진 틈보다 높게 올라갔고 11년만에 처음으로 용암이 이 분화구에서 넘쳐났다. 다음 분화구 범람은 역시 동쪽 분화구 외륜 위로 넘쳐 열곡 아래 1.6 km까지 멀리 뻗어나갔다. 넘쳐흐름은 용암호가 분화구 바닥의 화도를 통해 물러나갈 때 끝났다.

사건 55호 측화구에서 나온 관공급 용암류는 기존의 카모아모아 용암유역에 추가되었으며, 용암은 1997년 7월에 하와이화산 국립공원의 동쪽 경계부로부터 바다에 도달하였다. 용암류는 다음 3년 동안 대부분 이 지역에서 바다로 계속 들어갔다.

푸우오오-쿠파이아나하 분출은 지난 500년 동안 정상부 칼데라의 외측부에서 일어난 첫 번째 분출이며 5년 이상 지속되었다. 이 분출이 1983년에 시작된 이래 거의 2 km<sup>3</sup> 용암이 킬라우에아의 동부 열곡대에서 분출되었다. 용암류는 100 km<sup>3</sup>를 뒤덮었으며 킬라우에아의 남쪽 해안에 새로운 2 km<sup>2</sup>의 땅을 추가하였다. 2003년 7월 현재까지도 이 분출은 끝날 징조가 전혀 보이지 않았다.

## 요약 및 결론

제주도를 세계자연유산으로 유네스코에 등록하는데 유리한 점을 찾기 위하여 이와 유사한 하와이 섬을 답사하였다. 하와이 섬은 코할라, 마우나케아, 후알랄라이, 마우나로아, 킬라우에아 등의 5개 화산으로 구성된

다. 이들은 모두 해저에서 솟은 거대한 순상화산이며 이 중에서 마우나로아와 킬라우에아는 활화산이다.

마우나로아 화산은 세계에서 가장 큰 화산이며 지금은 잠시 중지하였지만 남서 및 북동 열곡대를 따라 주로 분출하였으며, 중앙부에 모쿠아웨오웨오 칼데라가 형성되어 있고 중위부에 용암동굴(최장 약 60 km)이 형성되어 있다. 킬라우에아는 원주민들이 화산과 불의 여신 펠레의 집이 있는 곳으로 믿고 있다. 킬라우에아 화산도 역시 중앙부에 킬라우에아 칼데라가 형성되어 있고 여기서부터 남서쪽과 동쪽으로 열곡대가 형성되어 있으며 이 곳을 따라 분출이 진행되고 있다. 특히 동부 열곡대의 마우나올루 분화구에서 1969~1974년에 분출되어 마우나올루 용암류역을 형성하였으며 푸우오오 분화구에서 1983~1986년에 아아 용암류를, 1986~1990년에 쿠파이아나하 분화구와, 1991년~현재까지 푸우오오 분화구에서 퍼호이호이 용암류를 분출하여 푸우오오 및 쿠파이아나하 용암류역을 형성하고 있다.

결론적으로 하와이는 화산형태와 용암동굴이 세계 최대규모이고 지금 활동하고 있지만 단조롭고 넓은 곳에 분산된 면이 있다. 그러나 제주도도 규모가 작지만 매우 복잡하고 좁은 지역에서 학술적 자연유산적 가치가 풍부하고 뛰어나기 때문에 세계적이라고 할 수 있겠다. 이러한 차이는 아마도 두 섬이 모두 열점에서 형성된 화산도이지만 하와이는 지판의 이동이 있고 제주도는 지판이 고정된 환경에서 형성되었기 때문인 것으로 생각된다.

## 사 사

이 연구는 2003년 문화재청과 제주도의 지원에 의해 수행되었다. 연구 수행시에 문화재청, 제주도, 제주 문화예술재단 측의 협력에 사의를 표한다. 그리고 원고 심사과정에서 건설적인 비평과 지적을 해주신 전북대학교 오창환 교수님과 관계자에게 감사를 표한다.

## 참고문헌

- Babb, J.L., 2001, Hawaii volcanoes: The story behind the scenery. 10th printings, KC Publications, INC., 48 p.
- Duffield, W.A., 2003, Chasing lava: A geologist's adventure at the Hawaiian volcano observatory. Missoula, Mountain Press Publishing Company, 169 p.
- Hon, K., Kauahikaua, J., Denlinger, R. and Mackay, K., 1994, Emplacement and inflation of pahoehoe sheet flows: Observations and measurements of active lava flows on Kilauea volcano, Hawaii. Geol. Soc. Am. Bull., 106, 351-370.
- Moore, J.G., Grigg, R.W., Peterson, D.W. and Swanson, D.A., 1973, Flow of lava into the sea, 1969-1971, Kilauea volcano, Hawaii. Geol. Soc. Am. Bull., 84, 537-546.
- Swanson, D.A., 1973, Pahoehoe flows from the 1969-1971 Mauna Ulu eruption, Kilauea volcano, Hawaii. Geol. Soc. Am. Bull., 84, 615-626.

(2003년 11월 12일 접수, 2003년 11월 27일 채택)