

하와이 마우이 섬의 지질과 화산과정

황상구* · 정성욱

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과

Geology and Volcanic Processes of Maui Island, Hawaii

Sang Koo Hwang* and Seong Wook Jeong

Department of Earth and Environmental Science, Andong National University, Andong 760-749, Korea

서 언

지난 2005년 12월에 하와이 제도의 마우이 섬(Maui Island)을 방문하여 그 곳의 지질을 답사하였다. 마우이 섬은 하와이 제도의 다른 섬들과 유사한 면도 많지만 다른 면도 많다. 제주도는 하와이 제도의 여러 섬들 중에서 마우이 섬과 유사한 점이 더 많다. 그래서 마우이 섬의 화산층서와 화산과정에 대해 소개하고자 한다.

하와이 제도의 3개 활화산은 1916년 8월 국회 법안에 의해 하와이 국립공원으로 되었다. 이 공원은 하와이 섬의 킬라우에아(Kilauea)와 마우나로아(Mauna Loa)의 일부와 마우이 섬의 할레이칼라(Heleakala)를 포함하였지만 1961년에 하와이화산 국립공원과 할레이칼라 국립공원으로 분리되었다. 할레이칼라는 1790년경에 활동한 적이 있지만(Macdonald *et al.*, 1983) 지금은 활동을 중지한 상태에 있으며 화산의 자연미를 잘 드러내고 있다.

할레이칼라는 킬라우에아와 같이 활화산(황상구 외, 2003; 박병준과 장윤득, 2007)으로 분출장면을 볼 수 없지만 분출 당시의 지형을 그대로 간직하고 있기 때문에 많은 사람들이 찾는 곳이다. 할레이칼라는 태양의 집이라는 뜻으로서 연간 수 십만 명이 최근 화산 활동의 결과와 경관을 보기 위해 이 화산을 방문한다.

지질개요

마우이 섬은 적어도 6개 큰 화산과 1개 작은 화산으로 구성되는 거대한 화산 복합체를 이루고 있다(Fig. 1). 현재 이 화산들 사이에는 바닷물이 들어와 마우이(Maui), 몰로카이(Molokai), 라나이(Lanai)와 카홀라웨(Kahoolawe)의 4개 섬으로 나누어졌다. 그러나 해수면이 지금보다 수 100 m 낮은 최후기 빙하기에는 이들 모두는 하나의 단일 큰 섬으로 합쳐져 있었다. 이 큰 섬은 '마우이누이(Maui Nui)'라 부르며 면적이 대체로 현 하와이 섬의 1/2보다 약간 더 큰 5,200 km² 면적을 가진다.

현재 마우이 섬 자체는 2개의 큰 화산으로 이루어져 있으며 중간 허리가 잘록한 8자 모양을 가진다(Fig. 1, 2). 이 두 화산 중에 고기 화산은 서마우이(West Maui)이고 신기 화산은 할레이칼라 혹은 동마우이(East Maui)라고 한다. 두 화산을 연결시켜주는 넓고 완만한 중앙평원(Central Plain)이 바로 마우이 지협(isthmus)이라 부르며 북쪽의 카홀루이만(Kahului Bay)과 남쪽 마알라에아만(Maalaea Bay)으로 잘록한 지역이다. 이곳은 할레이칼라 용암이 기존 서마우이 쪽으로 흐르면서 둑으로 쌓여 만들어졌다.

서마우이 화산은 지금 사화산이지만, 하와이 화산 작용의 여러 주요 단계를 거쳤으며 중간에 4차례의 소규모 침식을 겪으면서 분출을 일으켰다. 할레이칼라 화산은 가장 최근 1790년경에 분출을 일으켰으며 현재 활동을 중지하였지만, 앞으로 분출할 가능성도 거의 확실하다고 한다(Macdonald *et al.*, 1983).

*Corresponding author

Tel: 82-54-820-5469; Fax: 82-54-822-5467

E-mail: hwangsk@andong.ac.kr

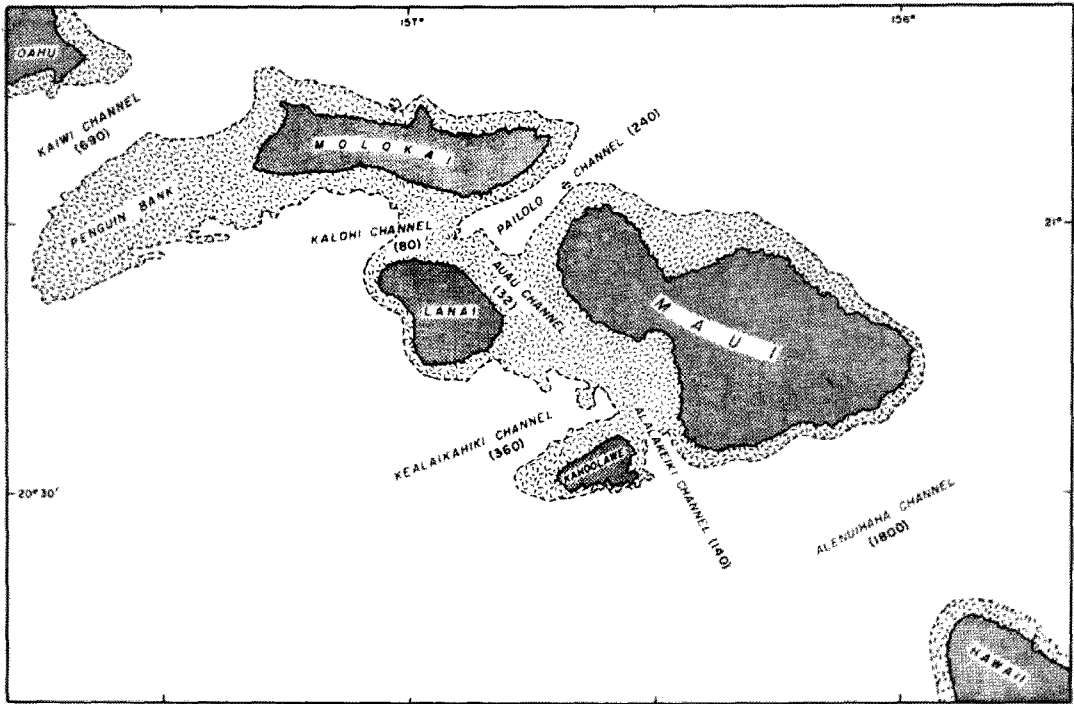


Fig. 1. Map of the islands of Maui group. The outer line of the shaded area represents 180m submarine contour. Values in parentheses indicate water depth(m) in each channel.

서마우이

우리는 먼저 서마우이부터 답사하여 지질과 화산활동을 관찰하였다. 서마우이는 마우이의 두 화산 중에서 더 고기에 해당되며, 길이가 29 km이고 너비가 24 km이며 높이가 1,754 m이다. 서마우이에서 해수면 위에 노출되는 최고기 용암은 거의 2 Ma 전에 분출하였다. 그래서 이 섬은 그전부터 해수면 위에 있었음에 틀림없다.

서마우이의 화산암류는 화산휴지기의 침식에 의해 3개 화산통으로 구분된다(Stearns and Macdonald, 1942; Macdonald *et al.*, 1983): 와일루쿠 화산통(Wailuku Volcanic Series), 호놀루아 화산통(Honolua Volcanic Series), 라하이나 화산통(Lahaina Volcanic Series)(Fig. 2).

와일루쿠 화산통은 최고기이고 순상화산을 형성하는 현무암질 용암류와 이에 조합된 화성쇄설암 및 관입암으로 구성된다. 이 순상화산은 1.3 Ma 전에 완성되었고 말기에는 압력의 감소로 산정부에 직경 약 3 km의 칼데라를 형성하였다(Kyselka and Lanterman,

1980; Macdonald *et al.*, 1983). 그리고 토양층을 만들 정도로 휴지기를 가진 후에 얇고 불연속적인 안산암질 및 조면암질 용암류, 도움과 화성쇄설층으로 구성되는 호놀루아 화산통에 의해 덮였다. 호놀루아 화산암류 중에서 최후기 용암들은 아마도 약 50만년전에 분출하였다(Macdonald *et al.*, 1983). 이 화산통의 용암은 와일루쿠 화산통보다 밝은 색을 띤다. 날씨가 맑을 때 서마우이의 깊은 계곡벽에서 와일루쿠 및 호놀루아 화산층을 쉽게 구별할 수 있다. 어두운 와일루쿠 현무암들은 하부 사면을 대부분 구성하고 밝은 호놀루아 용암류들이 이들을 피복한다.

마지막으로 장기간의 침식이 일어난 후에 SiO_2 가 결핍된 마그마가 분출하여 현무암(바사나이트) 용암류와 화산구를 만들었으며, 이 기간의 암석들을 라하이나 화산통이라 부른다. 이때 재개된 화산활동은 라하이나와 마우이 지협 사이의 해면을 따라 강한 알칼리 조성의 4개 분석구를 형성하였다. 이들 가운데 2개는 하천으로 잘렸으며, 이로 인해 분석구가 분출했던 곳에서 그 하위에 있는 고기 화산암류가 드러날 정도로 침식이 활발히 일어났다.

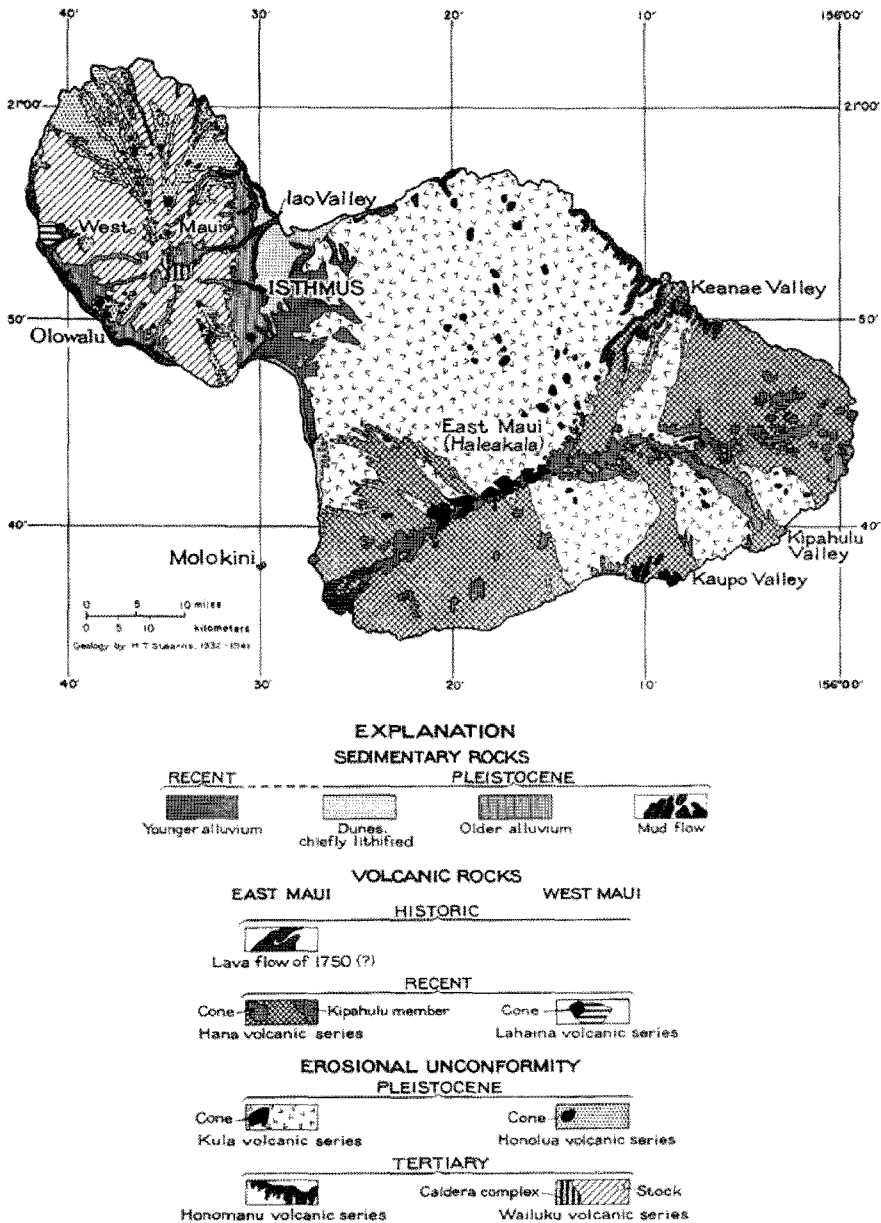


Fig. 2. Geological map of the Maui Island(from Stearns, 1946).

강수율과 침식률은 서마우이의 북동사면에서 더 커지만, 침식은 습윤한 북동사면이 건조한 남서사면보다 덜 진행되었다. 왜냐하면 건조한 남서사면은 후기 호놀루아 화산통에 의해 피복되지 않았지만 습윤한 북동사면은 피복되었던 관계로 남서사면이 훨씬 더 오랜 침식작용을 받았기 때문이다.

와일루쿠 화산통

와일루쿠 화산통은 주로 솔레아이트, 감람석 솔레아이트의 얇은 파호이호이 및 아아 용암류로 구성되며 순상화산을 형성한다. 이 순상화산 형성에 아주 작은 폭발작용이 수반되어 얇은 파리질 및 암편질 응회암층이 용암류에 협재되어 있다. 폭발성 분출량은

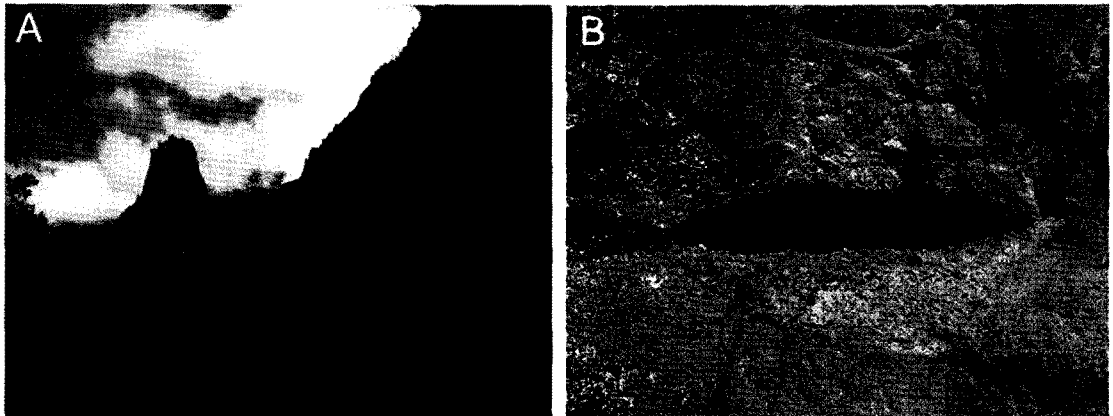


Fig. 3. (A) Iao Needle is one of many spectacular remnant features in the erosional valley of the West Maui; (B) A lava tube occurred in the Wailuku pahoehoe basalt flows.

후기로 가면서 약간 더 증가됨으로서 응회암층이 이 화산통의 최상부에서 더 많다. 그리고 약간의 수증기 폭발작용도 국지적인 암편질 각력암층을 형성할 정도로 맹렬하게 일어났다.

이 순상화산은 실제로 대양저 위에 약 6,000 m 이상 높이, 해수면 위에 1,754 m 높이로 솟아있고 직경 약 3 km의 칼데라를 가진다(Macdonald *et al.*, 198). 이 칼데라 외측에는 얇은 용암류들이 10°~20°로 밖으로 경사지는데, 이 경사는 일반적으로 하와이의 다른 화산에서보다 더 급한 편이다.

이 칼데라 내에는 한때 거의 수평이었던 두꺼운 용암류들이 반복되는 함몰에 의해 틸팅되고 단열화되었으며 또한 각력화되어 크게 혼란스럽고 상승하는 가스에 의해 변질되어 있다. 칼데라 충전층에는 원래 휘석이 녹니석으로 변질되어있는데 이 변질작용은 실리카를 용해하여 단백석과 옥수 노들로 침전시켰다. 이들은 침식되어 나간 와일루쿠 하천과 서부 해안의 해변을 따라 발견할 수 있으며, 월장석(moonstone)으로 알려져 왔다.

이아오 계곡(Iao Valley)은 대부분 하천 침식에 의해 칼데라 충전층까지 절개시켰다(Fig. 3A). 여기서 칼데라 경계부는 이아오니들(Iao Needle) 근처 주차장에서 상류로 향하여 쳐다볼 때 반대측 계곡벽이 이에 해당한다. 이 이아오니들 탐상체는 오로지 칼데라 충전층의 침식잔류체이다. 여기서 칼데라 경계부는 역시 계곡 끝부분에 노출되어있다.

서마우이에는 4개 열곡대가 있지만 다른 하와이 화산들에서보다 뚜렷하게 나타나지 않는다. 암맥들은 정상부에서 모든 방향으로 방사상을 이루며, 용암류를

공급하는 열극 및 화구 배열은 화산 평면도에서 거의 환상을 나타낸다. 그러나 2개의 암맥 밀집대가 있는데, 이중에 더 현저한 것은 거의 남북 방향으로 이 화산을 가로질러 지나간다. 다른 나머지 하나는 북동-남서 방향으로 지나간다. 각 밀집대는 수 백 개의 암맥들이 이들의 주 방향성에 평행하게 달린다.

협곡의 여러 곳에서는 작은 암주상의 반려암과 현무반암이 와일루쿠 용암들을 관입하면서 노출된다. 이들의 대부분은 평면에서 대체로 원형이고 직경이 100 m 이하이다. 2개는 이아오니들의 바로 동쪽에 있는 블랙조지(Black Jorge)에서 볼 수 있고, 더 큰 것들은 인근 계곡부에 노출되어있다. 후자 중의 한 계곡에서 관입체는 해안으로부터 2.4 km 지점에 노출되며 하천에 의해 절개되어 대체로 길이가 0.6 km, 직경이 0.25 km로 노출되어있다. 어떤 경우에 관입체는 직경이 하부로 약간 감소되는 것을 발견할 수 있다. 이들 암주 위에서 지붕의 함몰은 지표에서 함몰 분화구(pit crater)를 형성했을 것이다.

와일루쿠 화산통이 형성되고 뒤따라 풍화와 침식 시기가 있었다. 어떤 지역에서 와일루쿠 용암은 두께 1.5 m의 토양층에 의해 상위의 호놀루아 화산통의 용암과 분리되며, 기타 지역에서 양자는 구릉세탁물(hillwash)과 하천퇴적 역암에 의해 분리된다. 그러나 그밖에 호놀루아 용암은 직접 와일루쿠 용암 위에 놓인다. 더욱이 두 화산통 사이의 토양층은 거의 응회질로 구성되어있다. 그러므로 화산이 전적으로 활동하지 않았던 시기는 그리 길지 않았던 것으로 보인다. 그러나 폭발성 분출은 드물었고 이 화산의 상당부분

이 오랜 동안 용암에 의해 점령되어 있었다.

호놀루아 화산통

호놀루아 화산통에서 용암들은 대부분 조면암과 벤 모레이이트이고 소량의 하와이아이트를 수반한다. 용암류는 드물게 파호이호이이지만, 대부분 아아이고 흔히 암괴상 용암으로 전이된다. 호놀루아 용암들은 이 화산의 상당부분에 걸쳐 단지 1~2개 용암류로 불규칙하게 덮여있으며, 두께가 평균 약 20 m이고 북동 사면에서 최고 약 225 m이다.

조면암 분출기에는 마그마가 너무 점성이 커서 화구 위에 불록하게 도음을 형성하였다. 북부 협곡의 머리말에서 조면암체는 3개 용암류가 각각 60 m 이상 두께로 중첩되어있으며, 북동부 협곡의 동쪽에서 조면암체는 부석구 분화구에 에케산 도음을 형성하며 솟아있다. 이 언덕 기저부에는 이 도음에서 부쉬진 파편들에 의한 각력암이 침식되기 쉬운 부석구의 잔류체 위에 놓여있는 것을 볼 수 있다. 라하이나 동쪽 5 km 바로 내륙에 있는 작은 언덕도 조면암 도음을 이룬다. 이 도음은 형성의 후기 단계에 여러 가닥으로 갈라졌으며 그 바다쪽 부분이 아래로 이동함으로써 짧은 두꺼운 용암류를 이루었다.

호놀루아 화산통에서의 암맥들은 전기 암맥들과 같은 방향을 따르며, 화구들은 같은 주 열곡대 위에 대부분 놓인다. 류기어라이트 암맥들은 일반적으로 얇지만, 조면암 암맥들은 폭이 최고 7.5 m로 두껍고, 이들 중에 일미는 3 km까지 추적되는 것도 있다. 몇몇 암맥들은 지표 가까이까지 뻗쳐 천부 플러그를 형성하고 그 위로 불록하게 도음을 형성하고 있다. 이런 예는 남서부 계곡의 북서쪽에서 푸우코아이(Puu Koai) 분석구에 잘 나타나며, 여기서 폭 7.5 m 암맥이 플러그로 뻗쳐 나와 높이 180 m의 도음을 형성한다. 작은 분화구는 마그마가 지표에 도달했을 때 폭발작용으로 밖으로 불려나갔던 것 같다. 이 분화구에서 뻗쳐 나온 점성 큰 용암은 인접하는 와일루쿠 현무암과 드러스트로 측방경계를 이루며 이들을 각력화시키고 위로 75°로 틸팅시켰다.

라하이나 화산통

호놀루아 분출은 그 말기에 오랜 침식기간을 거치고 재개되었다. 이 분출은 서측 산사면에서 4 차례의 짧은 간격 동안 일어났던 새로운 화산작용이다(Fig. 2). 이러한 새로운 화산작용에 의한 암석들은 라하이

나 화산통으로 불려져 왔으며, 호놀루아 화산통의 암석과 매우 다르다. 이러한 분출작용 중에 가장 큰 것은 서부 라하이나 북동 2.5 km에서 하천의 충적선상지에서 일어나, 푸우라이나(Puu Laina) 분석구를 형성하였다. 용암류는 갈녹색 감람석 반정을 풍부하게 함유하는 피크로 현무암이다. 이는 카호마 계곡(Kahoma Valley)의 입구를 막아서 하천을 이전 유로에서 1 km 남쪽으로 변경시켰다.

남서부 해안에서 1 km에 있는 푸우킬레아(Puu Kilea)는 하나의 작은 분석구이며 하천의 충적층 위를 덮고 있는 바사나이트 용암류를 분출시켰다. 이 용암은 현미경하에서 네펠린을 관찰할 수 있으며, 이는 조성으로 본다면 재활동 기간의 용암과 관련된다. 라하이나 화산통의 피크로 현무암은 인식할 수 있는 네펠린을 함유하지 않는다. 그러나 이들은 할레아칼라(Haleakala)에서 하나 화산통과 같이 심하게 실리카로 불포화되어 있으며, 이들의 노음 조성은 10%의 네펠린을 함유한다.

서마우이 화산에서 하천침식은 후기 유년기에서 아장년기(submature) 단계에 도달한 것 같다. 비가 많은 북동사면은, 호놀루아 용암류가 두껍게 피복되었기 때문에, 침식이 그 밖에서 기대되었던 것보다 덜 진행되었으며, 원래 넓은 지표는 그 아래로 낮아지지 않고 깊은 협곡 사이에 놓여있다. 이와 대조적으로, 더 건조한 남서측 사면은 훨씬 더 깊게 절개되어 계곡 사이에 날카롭게 뾰족한 언덕으로 남아있다.

넓은 충적선상지들은 이 화산의 동측부와 남측부의 가장자리에 형성되어있다. 동측부를 따르는 선상지들은 적어도 부분적이지만 하천으로부터 마우이 지협을 형성했던 할레아칼라의 투수성 용암 속으로 물을 배출함으로써 형성되었다. 그러나 남서측부를 따르는 선상지들은 마우이와 라나이 사이에서 해파에 의해 이동된 것보다 하천에 의해 더 많이 운반시켜 퇴적된 암설들로 형성되어 해안선을 만들었다.

이아오 계곡부의 지질

30번 도로는 서마우이 해안을 따라 달린다. 이 도로는 와일루쿠(Wailuku)에서 이아오 계곡으로 들어가는 32번 도로로 갈라져 서마우이의 침식 칼데라로 연결된다. 이아오 계곡 도로는 교차점으로부터 1 km 지점에서부터 계곡을 따라 절개지를 이룬다. 이 도로절개지에는 역암을 노출시키고, 역시 근처 하천에도 침식 계곡부에 역암을 노출시킨다. 이들은 고기 홍수로

축적된 선상지 층적층이다.

대부분의 서마우이 화산을 형성하는 와일루쿠 현무암의 얇은 용암류들은 이아오 계곡 도로를 따라 계곡 벽에 노출된다. 계곡 상류 방향으로 약 4 km에서부터, 급경사의 풍화된 역암층이 시작된다. 이 역암층은 한때 서마우이 칼데라의 가파른 절벽 아래에 쌓였던 고기 산사태층이다. 우리가 상류 방향으로 바라보면, 이아오 계곡의 절벽을 볼 수 있는데 이 절벽은 대체로 고기 칼데라벽에 일치된다.

이 도로는 4 km 지점에서, 이아오 계곡 전망대 상류를 흘러나온 주 하천의 깊게 패인 한 지류에 해당되는, 블랙고지(Black Gorge)를 만나게 된다. 이 지역은 반려암의 원통상 암주를 형성하는 곳인데, 이 암주는 염기성 화확 조성과 고철질 광물 조성을 가지며 큰 결정으로 구성되는 반려암을 나타낸다. 이 반려암의 알칼리 조성은 이 암석이 호놀루아 화산작용 동안에 생성된 것을 암시한다. 이는 오늘날 킬라우에아의 동열곡대에서와 유사하게 합물 분화구 아래에서 결정화되었던 것으로 보인다.

종점에서는 이아오니들(Iao Needle)의 환상적인 경관을 볼 수 있다. 전망대에서 이아오니들은 해발 685.5 m, 계곡 바닥에서 약 400 m 높이로 솟아있는 뾰족한 산봉우리(pinnacle)이다. 사실상, 이는 두 하천 사이의 가파른 언덕 위에 서있는 하나의 첨탑을 닮았다.

이아오니들을 이루는 암석은 많은 암맥에 의해 관입된 얇은 와일루쿠 현무암류이다. 서마우이의 칼데라를 채웠던 암석들은 두꺼운 용암류, 자갈층과 역암 등이며 관광지 근처와 이아오 하천을 따라서 노두로 나타난다. 이들은 고기 칼데라의 동부에 쌓인 퇴적층이며 대피소로 가는 다리 아래의 하천에서도 나타난다.

이들의 경계는 전망대와 이아오니들 사이로 지나간다. 높은 칼데라 경계는, 맑은 날씨에, 관광지의 남동쪽 계곡벽을 따라 추적할 수 있다. 이아오니들 반대편의 주 계곡을 건너 바라보면, 고기 칼데라 벽은 얇은 현무암 용암류 사이에 가파른 경계로서 나타난다.

칼데라 경계부에서 퇴적층은 흔히 변질되어 있다. 상승하는 마그마는 칼데라의 바닥에서 자갈층과 용암의 공극을 통해 온수, 스팀, 기타 화산가스를 공급한다. 이러한 유독성 가스는 암석들과 반응해서 변질시켰던 것으로 보인다. 이 반응 중에 하나는 흑색 휘석을 녹색 녹니석으로 변질시킴으로서 현무암을 녹색으로 변화시켰다. 이 반응에서 나온 SiO_2 는 단열과 기공 속에 단반석과 옥수로 침전되었다. 이아오 계곡을

통해 나온 하천은 여러 갈래로 갈라지면서 자갈들 속에 SiO_2 가 둥글게 농집된 것을 볼 수 있는데, 이들은 지역적으로 보석의 일종인 월장석이라 부른다. 고기 칼데라에서 변질된 암석들은 쉽게 풍화되고 침식된다. 이는 이아오 계곡이 상류에서 그렇게 넓은 분지로 깎여 들어가게 하였다.

남서부 해안의 지질

30번 도로는 와일루쿠와 31번 도로 교차점 사이에서 서마우이의 동쪽 기저부를 달리는데, 이 부분은 대부분 호놀루아 용암으로 덮인다. 이 화산의 남서사면은 지평면 상에서 작은 언덕들이 불룩하게 나타나는데, 이들은 침식된 분석구들과 화구들이며 남열곡대를 따라 호놀루아 용암을 분출시켰던 곳이다.

맥그레고르 관광지에서는 북쪽으로와 남쪽으로 수십 km에 걸쳐 우수한 노두와 경치를 보여준다. 이 관광지 근처의 노두와 도로절개지에는 약 1.16 Ma 연대의 담회색 조면암이 노출된다. 이 조면암은 호놀루아 화산활동의 후기단계에 분출되었다. 이 조면암은 대부분 괴상이지만 용암이 사면 아래로 줄줄 흘러갈 때 내부적으로 전단작용이 일어나 생긴 깔끔한 유상엽리를 보여준다. 바다쪽에서, 이 조면암은 수직 주상절리로 깨어져 화려한 암벽을 이루는 더 어두운 색의 와일루쿠 현무암을 덮는다.

맥그레고르 관광지 동쪽 0.8 km에서 도로절개지를 주의하면, 후기단계의 알칼리 현무암 용암류를 관찰할 수 있다. 이 용암류는 황색으로 풍화된 1 m 내외의 화산회층을 덮고 있으며, 이 용암류에서 나온 열은 화산회층의 상단을 붉게 열산화시켰다. 이 화산회층은 와일루쿠 현무암 용암류를 덮는다.

이정표 10에서 동쪽에 있는 얇은 와일루쿠 현무암을 살펴보면, 이는 직경 1~2 m의 용암튜브가 풍부한 파호이호이 용암을 나타낸다(Fig. 3B). 이들은 액체 용암류의 내부가 냉각된 용암의 단단한 표피로부터 흘러나와 사면 아래로 배출될 때 발달한 것이다. 이후 이 용암튜브들은 침식작용과 도로건설에 의해 노출하게 되었다.

할레이칼라

우리는 다음으로 할레이칼라를 답사하여 지질과 화산활동을 살펴보고 정상부 분지를 관찰하였다. 할레이칼라는 태양의 집이라는 뜻이다. 초기 하와이 전설

에 의하면, 반신반인(半神半人)의 마우이는 할레이칼라 위 하늘을 횡단하면서 태양을 잡기위해 그물을 사용하였는데, 그의 어머니 히나(Hina)는 그녀의 젖은 옷을 말릴 시간을 주기 위해 산을 천천히 내려왔다고 한다(Babb, 2001).

할레이칼라는 길이가 53 km이고 너비가 32 km이며, 높이가 3,055 m이고 이는 정상에 눈이 내릴 만큼 높다. 할레이칼라는 마우나로아만큼 높지 않지만, 이들이 대양저 아래로 내려앉은 것보다 더 고기에 해당하며, 약 90만년전에 해수면 위로 드러났다(Macdonald *et al.*, 1983).

할레이칼라는 이의 전성기에 감람석 쏘레이이트 현무암 용암류를 분출하여 해양저 위에 약 7.5 km로 형성된 거대한 순상화산이었다. 이러한 전기 할레이칼라 용암들은 호노마누 화산통(Honomanu Volcanic Series)이라 부른다(Macdonald *et al.*, 1983). 이때의 현무암은 서마우이에서 후기의 와일루쿠 현무암과 유사하다. 이 순상화산은 성장하면서 그 산정부에 아마도 칼데라가 형성되었지만, 후기 암석들에 의해 채워지고 덮였다.

약 70만년 후부터 할레이칼라는 후기 성장단계로 접어들면서 순상화산의 성장이 느려졌으며, 폭발적 분출작용으로 알칼리 암석들을 분출하기 시작하였다. 이때부터 큰 분석구가 정상부에서 동쪽, 남서쪽과 북쪽으로 뻗치는 열곡대를 따라 형성되었다. 이러한 분출로 형성된 암층을 쿨라 화산통(Kula Volcanic Series)이라 부르며 35만년전까지 계속되었다(Macdonald *et al.*, 1983). 그때까지, 이 화산은 열점 위에 놓여있는 마우나케아의 현위치로부터 북서쪽으로 이동하였으며, 이에 따라 할레이칼라는 현재 열점으로부터 북서쪽으로 220 km 위치에 놓이게 되었다.

할레이칼라의 서측부는 매우 짧고 너무 건조해서 크게 침식되지 않았다. 습윤한 동측부에서 하천 계곡은 최고 1,500 m 깊게 절개되어 협곡을 형성하였다. 완만한 순상화산은 원래 측면부가 8개 큰 계곡에 의해 절개되어 분리되었다. 이들 가운데 4개는 고기 칼데라이었던 지역에서 이들의 머리가 서로 만난다.

재개 단계의 화산작용은 10만년전에 할레이칼라에서 시작되어 계속되고 있다. 수 백 개의 분석구와 아아 표면을 가진 알칼리 현무암 용암류가 이 기간에 분출하였다. 이때의 활동은 주로 동열곡대에서 정상부를 지나 남서 열곡대를 따라 일어났다. 재개 단계의 화산작용은 서마우이에서와 비교되는 활동보다 훨씬

더 강하게 일어났다. 재개 단계에서 나온 암석들은 하나 화산통(Hana Volcanic Series)이라 부른다(Macdonald *et al.*, 1983).

화산회, 용암과 스코리아들은 재개된 화산작용 동안에 케아나에(Keanae)와 카우포(Kaupo) 계곡에서 분출하였고, 이 두 계곡 머리의 낮은 부분을 채웠다. 계곡 머리의 주변에는 가파른 절벽의 상단이 새로운 화산지역 위에 들어나 있으며, 이 화산지역은 스코리아로 덮인 길이 12 km와 너비 4 km의 광활한 아고산대 분지를 이루고 있다. 처음 얼핏 보면, 이 분지는 경관이 빼어난 칼데라를 닮았다. 그러나 이 분지는, 비록 케아나에와 카우포 하천이 고기 칼데라의 약한 암층을 침식시켰던 것을 제외하더라도, 일차적으로 침식된 특징을 보여준다. 장래의 분출은 이 분지 바닥의 갈라진 틈에서 일어났을 것이다.

호노마누 화산통

할레이칼라 화산에서 원시 순상화산은 쏘레이이트, 쏘레이이트질 감람석 현무암의 파호이호이 및 아아 용암류로 구성되며, 이들은 평균 5 m 두께이고 아주 소량의 화성쇄설물을 수반한다. 이 집합체는 호노마누 화산통으로 알려져 있다(Fig. 2). 해수면 위에서 이 순상화산은 거의 전부가 후기 용암에 의해 덮여있다. 이들은 북해안 일부를 따라, 동측사면에서 계곡의 북측벽을 따라, 남동측 사면의 협곡 머리 근처에, 그리고 할레이칼라 정상부 분지의 남측벽의 하부에 현재 노출된다. 분석구, 스페터구와 얇은 응회암층들은 한 소형협곡 근처의 북쪽 해안절벽에서 노출된다.

쿨라 화산통

쿨라 화산통은 주로 하와이아이트와 소량의 알칼리 감람석 현무암과 안카라마이트(ankaramite)로 구성되며 호노마누 화산통을 덮는다. 이 하와이아이트 용암은 할레이칼라 정상부 분지의 서측 외륜의 관측소 바로 북쪽 언덕에서 하와이의 용암에서 드물게 나타나는 각섬석 반정을 함유한다. 쿨라 용암류는 할레이칼라 정상부 분지의 절벽에서와 케아나에 및 카우포 계곡의 단면에 잘 노출되며, 이들은 이 화산의 북서부와 남동부의 대부분 지표층을 이룬다. 분출작용은 전기 화산통의 것들보다 더 폭발적이었으며, 큰 분석구를 많이 형성하였다. 분석구 근처에는 흔히 완전하게 고결되지 않은 파리질 화산회층이 9 m 두께로 나타난다. 용암류는 호노마누 화산통의 것보다 특히 더 두

꺼우며, 개개 용암류는 정상부 근처에서 두께가 평균 6m이고 해안 근처에서 15m이다. 아아 용암은 보다 우세하게 나타나지만 흔히 암괴상 용암으로 접이되는 경향이고, 소량의 파호이호이 용암이 화구 근처에 존재한다. 작은 도음이 정상부 분지 절벽의 단면 몇 군데에서 노출된다. 정상부 근처에서 쿨라 화산통은 두께가 적어도 750m이지만 해안 근처에서 단지 15~60m이며 오로지 하나의 단일 용암류로만 나타나는 곳고 있다.

어떤 해안절벽에서 쿨라 화산통의 용암은 호노마누 화산통의 용암을 절개한 소협곡을 채운다. 그러나 일반적으로 접촉부에서 침식의 증거는 별로 나타나지 않는다. 어떤 곳에서 쿨라 용암들은 최고 약 15cm 두께의 적색 응회질 토양층에 의해 하위의 호노마누 용암과 분리되지만, 대부분 지역에서 두 화산통 사이에서 명확한 단절을 나타내지 않는다. 흔히 이들은 알칼리 감람석 현무암과 쏘레이이트질 현무암이 15~60m 두께로 서로 교호하지만 노두와 현미경에서 그 전이대를 쉽게 결정할 수 없다.

쿨라 분출은 잘 정의되는 3개 열곡대에서 일어났다 (Fig. 4A). 정상에서 남서쪽과 동쪽으로 뻗는 열곡대가 가장 뚜렷하며, 이 화산을 가로질러 거의 직선을 이룬다. 정상에서 북쪽으로 뻗는 세 번째 열곡대는 다른 것에 비해 현저하지 않지만, 거의 해변으로 뻗는 분석구의 열에 의해 뚜렷하게 나타난다(Fig. 4B). 남서 열곡대에서 낮은 구들은 아마도 후기 분석과 화산회로 덮여있는 쿨라 분석구일 수도 있다. 동 열곡대에서도 대부분은 후기 화산층에 의해 피복되었지만, 이 화산의 동쪽에서 뚜렷하게 불룩한 부분은 이 열곡대가 쿨라 시기에 활동했다는 것을 지시해준다. 이 열곡대에 평행한 많은 암맥들은 분화구 및 큰 계곡의 벽에 노출된다. 비록 이 암맥들은 그 밖에서 피복되어 볼 수 없지만, 같은 열곡대로서 호노마누 용암들의 공급지이었다고 생각된다.

쿨라 시기가 끝나면서, 분출 사이의 간격들이 커졌으며, 국지적 침식 부정합, 토양층, 풍화된 화산회층과, 하천에 의한 역암이 흔히 용암류 사이에서 발견된다. 쿨라 용암들에 의해 잘리고 후기 쿨라 용암류에 의해 채워진 협곡은 수 백 m로 깊고 수 백년의 시간적 간격을 지시하는 것고 있다.

수많은 암맥 외에, 쿨라 시기의 몇몇 큰 관입체들은 할레아칼라 정상부 분지의 서측벽에서 덮은 후기 화산회층 아래에 관입되어 있다. 킬로하나(Kilohana) 산

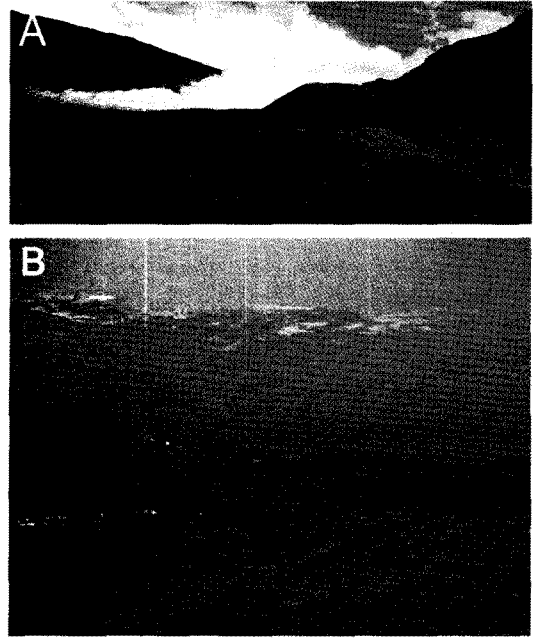


Fig. 4. (A) Vast erosional basin at Haleakala's summit, looking eastward from the Visitor Center located on the western rim, shows the continuity of the eastern rift partly covered with Hana Volcanic Series; (B) Puu Oili cinder cone on the northern rift zone.

봉 아래에서 이들 중의 하나는 길이가 1.2 km이고 직경이 0.4 km이다. 이 모두는 세립질이지 조립질 반려암을 나타내지 않는다. 이 세립질 치밀 관입암은 손도끼 제작을 위해 과거 하와이인들이 사용하였다고 한다.

동마우이에서 지질학적으로나 경관적으로 가장 호기심을 자아내는 것은 할레아칼라 정상부 분지이다 (Fig. 4A). 이 분지는 대략 길이가 11 km이고 너비가 3 km이며 깊이가 0.8 km인데, 흔히 세계에서 가장 큰 사화산 분화구라고 알려져 왔다. 이 용어는 완전히 부정확한 용어라기보다도 완전히 틀린 말이다. 할레아칼라 정상부 분지는 많은 화산 분화구보다 훨씬 더 크며, 사화산이 아니고 오로지 휴화산에 해당하는 경우가 더 많다. 엄격히 말하자면, 화산에 존재한다는 사실 외에는 화산 성인이 아니다. 그러나 이에 대한 성인은 대부분 분화구와 칼데라의 형성에 대한 이야기보다 더 큰 흥미를 준다.

쿨라 분출 말기에, 동서마우이, 카홀라웨, 라나이와 몰로카이의 화산들은 아마도 붙여서 하나의 큰 육지를 만들었다. 이 시기에 할레아칼라 화산은 현 분화구 외륜보다 더 높은 1,000 m 정상까지 솟았다. 정상

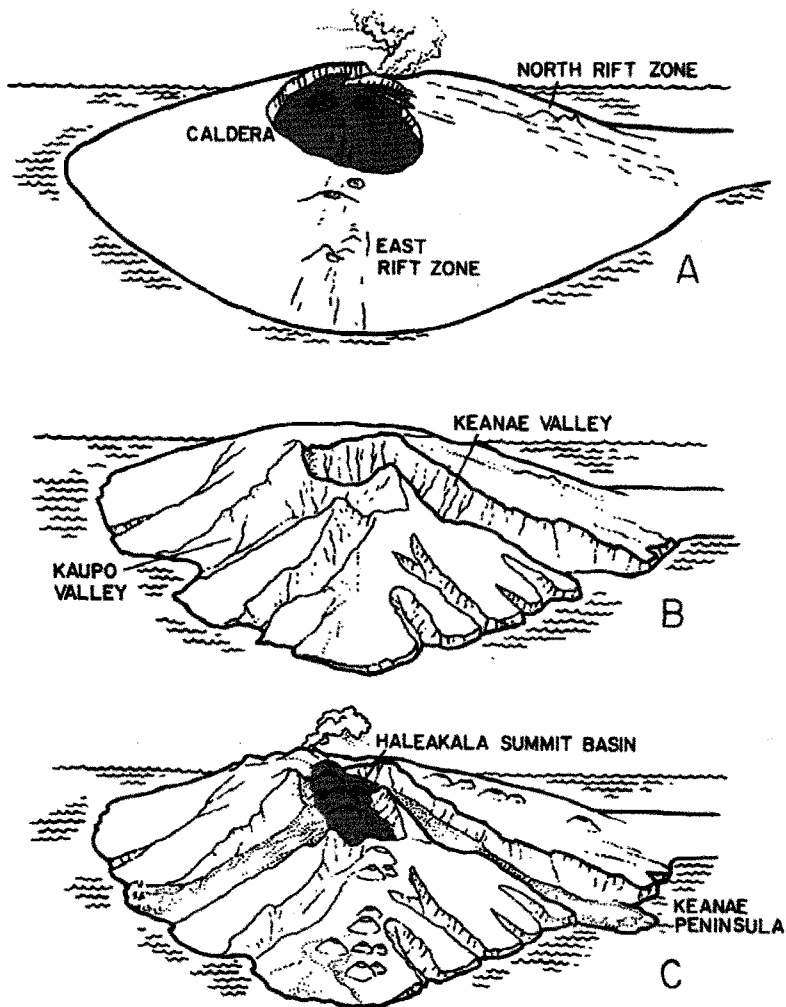


Fig. 5. It shows three erosion stages in Haleakala volcano as it had declined from the maximum stage of shield growth 0.7Ma ago to the present.

부는 큰 칼데라와 분석구들로 장식되어 있었다(Fig. 5A).

쿨라 화산통의 말기에, 활동이 모두 일시에 중단되지 않았지만, 하천 침식은 진행되기 시작하여 이 화산을 깎아나갔다. 주변에서 방사상 하천들은 계곡을 절개하기 시작하였다. 하지만 침식은 비가 많은 북측부와 동측부에서 가장 빨랐다. 어떤 하천은 다른 하천보다 더 빠르게 절개하여, 이웃 배수지를 점령하였고 더 많은 지하수 공급을 확보하였으며, 실제로 주계곡들을 깎아나갔다. 몇몇 하천은 북부에서 케아나에 계곡, 동부에서 와이호이(Waihoi)와 키파홀루(Kipahulu) 계곡, 남동부에서 카우포 계곡 등이 특히

더 크게 성장되었다. 케아나에와 카우포 계곡은 가장 짧고 가장 가파른 코스를 가지며, 한때 이 화산의 머리쪽의 심장부까지 절개하였다(Fig. 5B). 여기서 침식률은 아마도 쉽게 제거되는 많은 화성쇄설물에 의해서와 아마도 연약한 용암에 의해 가속화되었으며 가스 변질에 의해 더 쉽게 침식될 수 있었다. 두 계곡의 머리는 확장되고 합쳐져 거대한 하나의 단일 저지를 형성하였으며, 이 저지는 산정부를 전부 가로질러 확장되고 두 침식 분지 사이의 비교적 나즈마한 좁은 언덕에 의해서만 나뉜다. 키파홀루 계곡은 머리쪽으로 확대되어 카우포 계곡 머리와 거의 합쳐졌다.

침식기간은 하천이 이 화산의 중심부로 계속하여

수 천 m 깊이의 협곡으로 파내려갈 정도로 충분히 길었다. 이 침식기간 후에, 화산활동이 마지막으로 재개되었다(Fig. 5C). 주 열곡대가 이 화산의 정상부 저지를 가로질러서 측방 아래로 연결되어 다시 열렸으며(Fig. 4A), 이때 큰 침식 계곡은 용암류로 덮이고 분석구로 채워졌다. 그래서 할레아칼라 정상부 분지는, 경이적인 화산적 특징을 가지지만, 성인이 일차적으로 침식에 의한다(Kyselka and Lanterman, 1980; Macdonald *et al.*, 1983). 분지 밖으로 연결되는 쿨라우(Koolau)와 카우포 절단부(gap)는 큰 하천 절개 협곡의 상부이고 부분적으로 후기 용암류로 채워져 있다(Fig. 2).

하나 화산통

긴 침식기간 후에 분출했던 용암과 이에 조합된 분석구 및 화산회층은 하나 화산통이라 불리어진다. 이 암형은 쿨라 화산통의 것과 같지만, 알칼리 감람석 현무암과 현무암질 하와이아이트가 더 우세하다. 대다수 용암류는 사장석 반정을 가지며, 어떤 경우에 길이가 2.5 cm에 달하고 거의 창유리와 같이 투명하다. 큰 보통회석 반정이 하나 화산통의 안카라마이트에서 풍부하며(Fig. 6A), 역시 쿨라 통과 유사한 암석이 풍부하다. 하나 용암의 두드러진 특징 중의 하나는 SiO_2 의 현저한 결핍이다(Macdonald *et al.*, 1983). 화학분석에서 계산된 노움광물 조성에서, SiO_2 결핍은 네펠린의 존재 때문에 나타나지만, 네펠린은 실제 암석에서 탐지되지 않는다.

하나 화산통의 분포는 두 요인 즉 화구의 위치와 직전 지형의 성격에 의해 지배받는다. 쿨라 화산통의 북열곡대는 재개되지 않았다. 이 결과로, 하나 용암은 이 화산의 북서 영역 전부에서 나타나지 않는다. 남서 및 동열곡대에서 분출작용은 이들 영역에 용암류를 불출하였으며, 이 용암류는 이 계곡을 따라 흘렀고, 전기 침식지형의 높은 부분이 현재 덮이지 않은 채로 남아있다. 이 화산의 상단을 가로지르는 열곡대는 전적으로 침식 분지 내를 통과한다. 그래서 분지 바닥은 용암과 분석들로 깊게 덮였다. 정상부 분지와 인접 계곡에서 하나 화산층의 두께는 정확하게 알려져 있지 않지만, 아마도 900 m 가까이 된다. 이 화산의 동측 열곡대에서 나온 용암류는 훌루(Hulu) 및 와이호이 계곡으로 쏟아졌지만, 그들 사이의 높은 지역을 덮지 않았다.

하나 분출로 형성된 분석구는 작은 스페터구와 수

m 높이의 누벽(rampart)에서부터 거의 기저직경 2 km와 높이 180 m의 큰 분석구까지 규모이다(Macdonald *et al.*, 1983). 후자는 잘 발달된 구형에서 방추형 화산탄을 가진다. 해안에서 5 km 떨어진 몰로키니 섬(Molokin Islet)은 남서 열곡대 상에서 해중 분출에 의해 형성된 옹회구를 나타낸다.

할레아칼라 정상부의 지질

매년 수 십만 명의 방문객이 할레아칼라의 정상부 분지의 외륜으로 올라가기 위해 이 도로를 이용한다. 이 도로는 이 화산의 서측사면을 따라 더 가파르고 더 매마른 지역으로 올라가 고산대 환경에 들어간다. 마지막으로 해발 3,000 m 위 남서 열곡대의 정상에 도달한다.

할레아칼라 정상으로 가는 377번 도로는 37번 도로에서 갈라지며 377번 도로의 이정표는 37번과의 교차점에서 시작된다. 이 도로를 따라 나타나는 모든 암석들은 70만년과 35만년전 사이에 할레아칼라로부터 분출했던 쿨라 현무암들이다. 대부분은 Na가 풍부한 알칼리 현무암이고 일반적으로 연녹색 감람석의 결정들이 반정으로 나타난다. 교차점에서 6-8 km 사이의 도로절개지에서는 얇은 다공상 용암류를 관찰할 수 있다. 이 용암류들은 경사가 산사면과 평행한데, 이는 이들이 분출된 이래 별로 침식되지 않았음을 보여준다. 얇은 용암류는 흔히 가파른 사면에서 나타난다.

이정표 7 근처의 도로절개지에서, 거의 분석구에 가까운 푸우파후(Puupahu)로부터 분출된 화산회와 교호하는 쿨라 현무암 용암류를 관찰할 수 있다. 1.4 km 근처에서는 아아 용암류를 덮고 있는 화산회층을 관찰할 수 있으며, 이 화산회층은 쿨라 시기에 형성된 또다른 푸우오일리(Puu Oili) 분석구에서 분출된 것이다(Fig. 4B).

15 km에서 큰 골재 채석장은 또다른 푸우니아니아우(Puu Niania) 분석구의 내부를 열어 놓았다. 이곳에서는 분석구 측면에 낙하되어 쌓인 화산회층을 볼 수 있다. 큰 화산탄들이 그 아래층을 눌러 구부러진 뭉색(bomb-sag)을 관찰할 수 있으며, 후기 화산회가 채석장 벽의 한 외측부에서 고기 침식면을 덮고 있는 것을 볼 수 있다.

할레아칼라 국립공원의 경계 바로 밖의 도로절개지에서는 철갈색으로 풍화되고 층리를 보여주는 화산회층을 할 수 있다. 이는 직경이 2 cm에서 60 cm 범위를 가지는 흑색 현무암질 스페터를 가진다. 이 스페

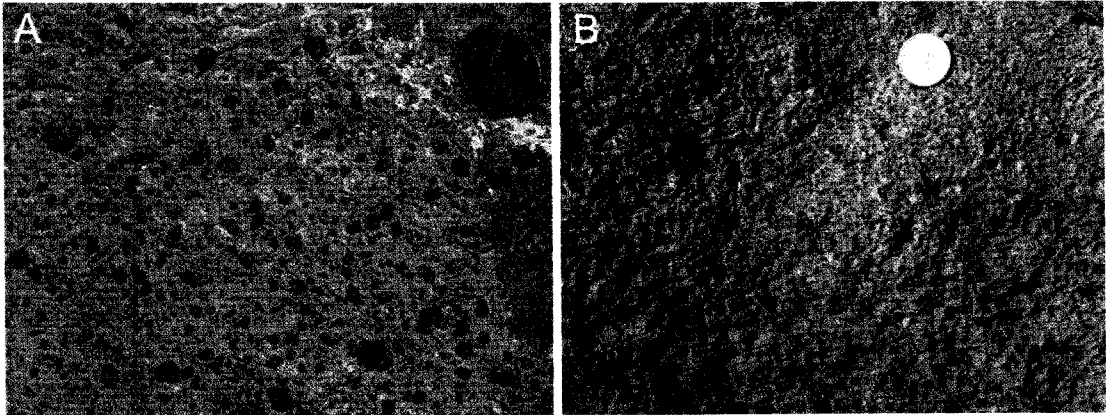


Fig. 6. (A) Large pyroxene and smaller olivine crystals included in ankaramite near Leleiwi Overlook; (B) Basalt lava showing vesicular structure near Leleiwi Overlook.

터들은 용암이 냉각될 때 잡힌 가스 기포에 의한 기공들을 다량으로 함유한다.

이 도로는 할레이칼라 국립공원의 경계를 지나면 이 화산의 북열곡대로 들어선다. 맑은 날에는 그 열곡대를 따라 해안쪽으로 열지어 있는 분석구들을 볼 수 있다. 여기서 공원관리소를 방문하면 이 화산에서 하이킹할 수 있는 소로에 관한 정보를 얻을 수 있고, 이 관리소에서 할레이칼라 정상부 분지의 외륜까지 도로가 15 km 더 연장된다.

20 km에서부터, 이 도로는 직경이 약 15 cm의 수직 주상절리를 이루는 용암류를 지그재그로 통과하며 다시 도로 아래에 있는 푸우오일리 분석구 옆을 지나간다. 이 도로는 붉은 라테라이트와 스코리아층 위에 놓인 얇은 다공상 현무암 용암류를 잘라놓았다.

렐레이위(Leleiwi) 전망대에서, 길이 12 km와 너비 4 km되는 할레이칼라의 정상부 분지의 환상적인 경치를 조망할 수 있다. 주차장에서 바다쪽을 조망하면, 멀리 몰로카이 섬과 함께 서마우이를 바라볼 수 있다.

이 전망대에서 도로 아래 30 m에서는 쿨라 현무암의 노두를 관찰할 수 있다. 이 용암류의 상부는 콩크기만한 투명한 연녹색 감람석 결정과 그것의 두배 크기의 흑색 휘석 결정이 풍부하다(Fig. 6A). 이 광물 조성은 알칼리 현무암의 일종으로서 희귀한 안카라마이트에 속한다. 그러나 이 용암류의 하부는 큰 결정을 별로 가지지 않는 일반적인 알칼리 현무암에 해당된다(Fig. 6B). 따라서 이는 같은 용암류가 상부와 하부는 서로 다르다는 것을 의미한다. 이러한 현저한 조성변화는 분출시에 큰 결정이 가라앉은 마그

마챔버의 상부를 먼저 출조하여 하부를 형성하였다는 것으로 설명된다. 그래서 용암류의 상부에서 마그마 챔버의 하부를 볼 수 있다고 할 수 있다.

칼라하쿠(Kalahaku) 전망대 주변에서는 깨진 용암류가 불룩하게 툄팅된 흔적을 관찰할 수 있다. 이들은 용암류 일부가 천천히 흘러갈 때 발달했던 압력 언덕(pressure ridge)을 나타내는데, 이는 뒤따라 전진하는 용암의 압력에 의해 표피가 뒤틀려진데 그 원인이 있다. 이 회색 용암류는 쿨라 화산층의 일부인 알칼리 현무암에 속한다.

할레이칼라의 정상부 분지 내에서 보여주는 경관은 고도와 방향에 따라 각기 상당히 다른 모습을 보여준다. 그 파노라마는 고도에 따라 더 놀랄만한 경치를 보여준다. 전망대에서 북동쪽을 보면 분지의 서반부를 침식할 때 잘린 큰 절단부로서 케아나에 하천이 지나간다. 동쪽을 보면 11 km 떨어져 카우포 절단부를 볼 수 있는데, 이 절단부는 카우포 하천이 분지의 동반부를 침식시킨 것이다. 이들 하천이 오랫동안 깊은 계곡을 침식시킨 후에, 재개된 화산활동이 계곡 바닥을 용암과 스코리아로 채움으로서 현재와 같은 분지 바닥을 만들었던 것이다.

이 분지를 가로지르는 분석구 배열은 남서 열곡대에서 정상부를 지나 동열곡대로 연결되는 하나 화구 열(Hana vent row)을 잇는다. 스코리아층은 분출 동안과 후에 스팀과 화산 가스에 의한 변질작용으로 매혹적인 붉은 색을 띤다. 이와 대조적으로 쿨라 용암들은 암녹색 암벽을 이루고 있다.

재개된 분출이 언제 정상부 분지에서 시작되었는지

확실하지 않다. 분지 바닥은 칼라하쿠 전망대로부터 600~750 m 아래에 놓인다. 가장 높은 12개 분석구들은 바닥에서 수 백 m 높이로 솟아있다. 그러나 이 수치는 저 아래 소로에서 하이커들이 직접 보는 눈만큼 그 규모를 생생하고도 정확하게 나타내주지는 않는다.

화산 정상부의 외륜 근처에 있는 관광센터에서는 주위의 분지를 조망할 수 있다. 도로는 할레아칼라 정상에 푸우올라올라(Puu Ulaula) 분화구에서 끝난다. 과학연구단지가 관광센터에서 가까운 분석구 사면에 자리잡고 있다. 여기서 태평양편이 1년에 10 cm씩 북서 방향으로 이동하여 하와이 제도를 운반시킨다는 것을 보여주는 정밀기기 측정이 행해진다. 이 연구단지에서는 역시 달과 태양 관측소, 위성탐지국과 라디오 송수신국도 설치되어 있다.

할레아칼라 정상부 분지의 내부광경을 더 자세히 보기 위해서는, 관광센터에서 분지 바닥으로 내려가, 이동모래길(Sliding Sands Trail)을 따라 걷는 것이 가장 편리한 방법이다. 그러나 이 길을 따라 가면 여러 짧은 하나 분석구까지 멀리 걸을 수 있다. 이 분석구는 2,550 m에서 3,000 m 사이의 고도에서, 수직 비고가 390 m이고, 둘레가 8 km이다.

정상부 분지에서 메마르고 산화된 분석구의 경관은 마치 달 표면과 같이 또 다른 세계의 지표만큼 초현실적 장면을 나타낸다. 직경 2 m의 화산탄들이 널려 있어 분지를 어지럽게 하였다. 이들은 스팀과 가스가 풍부한 마그마에서 유체 덩어리로서 불려나왔던 것이며 대부분이 둥글고 유선형이다. 깨어진 단면에서는 흔히 중심부가 다공상이고 외곽부가 치밀한 표피를 나타낸다. 치밀한 외곽부 가장자리는 내측에서 확장되는 가스가 중심부에서와 같은 기공들을 만들기 전에 냉각되었기 때문이다.

결 언

최후기 빙하기 동안, 해수면이 지금보다 수 백 m

낮았을 때, 마우이는 지질학자들이 마우이누이라고 부르는 훨씬 더 큰 섬의 일부이었다. 이는 그 당시 빅아일랜드 크기의 1/2보다 더 컸었다. 빙하기 말에 빙하기 녹았을 때, 해수면은 상승하였고, 마우이누이의 낮은 지역은 얇은 해협이 되었으며, 이 해협은 지금 마우이, 몰로카이, 라나이, 카홀라웨 등의 마우이 그룹으로 분리시켰다.

마우이는 하와이 제도의 두번째로 젊은 섬이며, 해저에서 솟은 서마우이와 할레아칼라의 2개의 큰 순상 화산으로 구성된다. 이 두 화산은 마우이 지협이라는 중앙평원에 의해 연결되어있다. 서마우이는 사화산이며, 할레아칼라는 1790년경에 분출하였고, 비록 마지막 쇠퇴기에 있지만, 거의 확실히 다시 분출할 수 있다. 마우이의 경관은 아고산대적 화산지역에서부터 무성한 적도계곡의 범위에 속한다.

참고문헌

- 박병준, 장윤득, 2007, 하와이 킬라우에아 화산 현무암에 대한 암석학적 연구. 암석학회지, 16, 59-72.
- 황상구, 이문원, 원종관, 우경식, 이광춘, 2003, 하와이 섬의 지질과 마우로나 및 킬라우에아의 화산활동. 암석학회지, 12, 184-195.
- Babb, J.L., 2001, Hawaii volcanoes: The story behind the scenery. 10th printings, KC Publications, INC., 48p.
- Hazlett, R.W. and Hyndman, D.W., 1996, Roadside geology of Hawaii. Mountain Press Publishing Company, Montana, 304p.
- Kyselka, W. and Lanterman, R., 1980, Maui: How it came to be. University of Hawaii Press, Honolulu, 159p.
- Macdonald, G.A., Abott, A.T. and Peterson, F.L., 1983, Volcanoes in the sea. University of Hawaii Press, Honolulu, 2nd eds, 517p.
- Stearns, H.T., 1946, Geology and ground-water resources of the island of Hawaii. Hawaii Division of Hydrography, Bull. 9, 363p.

2008년 11월 17일 접수
2008년 11월 21일 심사개시
2009년 1월 15일 채택