
제주 ‘숨골’의 지질학적 개념 정립과 보전관리 방안 마련을 위한 해외현장 답사 및 선진사례 조사결과 보고

I

출장 개요

○ 목 적

- 제주도는 화산활동이 오래전에 종료됨에 따라 현재는 퇴적물의 퇴적 및 토지형질 변경 등으로 화산활동 과정에서 형성된 다양한 투수성 지질구조의 원형이 가려져 있거나, 훼손·매립되어 있어 생성 당시 ‘숨골’의 원형을 파악하기 어려운 실정임
- 제주도 숨골의 지질학적 정의 정립, 유형분류, 형성과정 해석 등을 원활히 수행하기 위해서는 용암지형 원형을 생생하게 관찰할 수 있는 해외 화산지대에 대한 사례조사 필요
- 미국 하와이주 하와이섬(빅아일랜드) 킬라우에아 화산지대에는 몇 년 전 분출된 현무암질 용암지형이 넓게 분포하고 있어 투수성 지질구조들이 원형 그대로 보존되어 있음
- 하와이섬 화산지대를 대상으로 제주도에서 ‘숨골’이라 불리는 지질구조의 지질학적 유형, 형성과정, 지질학적 정의 정립에 필요한 지질학적 근거를 확보하기 위함
- 아울러, 지하수 보전·관리의 체계가 선진적으로 갖춰진 하와이의 숨골에 대한 관리방안을 조사하고자 함

○ 기 간

- 2023년 3월 25일(토) ~ 2023년 4월 2일(일)

○ 대상국가 및 방문지

- 대상국가 : 미국 하와이주(하와이섬, 오아후섬)
- 방 문 지 : 하와이섬 킬라우에아 화산지대, 하와이주 수자원관리위원회

○ 여행자 인적사항

소 속	직 급	성 명	성 별
제주연구원 제주지하수연구센터	전문연구위원	고인종	남
	전문연구위원	고창성	남
	전문연구원	최윤호	남
제주곶자왈 공유화재단	비상임 연구위원	고기원	남

○ 주요 일정

일 자	방문지	활동내용
'23. 03. 25(토)	하와이섬 (빅아일랜드)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 코나(Kona) 화산지대 현장 지질답사 - 용암 지형, 투수성 지질구조 등 용암지대 제반 특징 현장조사(코나 공항 서쪽 1801년 용암분출 지대, Mahuaiula Beach Coast 용암지대, Puhia Pele 스파터콘 & 램파트, 용암동굴 함몰지)
'23. 03. 26(일)		
'23. 03. 27(월)		
'23. 03. 28(화)		
'23. 03. 29(수)		
'23. 03. 30(목)		
'23. 03. 31(금)	오아후섬	<ul style="list-style-type: none"> ■ 하와이 숨골 지질조사 결과 공유 및 행정적&제도적 관리방안 자문 - 하와이 수자원관리위원회 Kaleo Manuel 부국장 및 Jermey Kimura - 하와이 한인방송(KBDF) 이정태 PD - 하와이 한인이민연구소 이덕희 소장
'23. 04. 01(토) ~ '23. 04. 02(일)	귀 국	

○ 하와이주의 지리적 특성

- 미국 하와이주는 동경 155°~179°, 북위 19°~28° 사이의 환태평양 한 가운데 남동-북서 방향으로 배열된 132개의 크고 작은 섬들로 이루어져 있음
- 이처럼 수 많은 섬 중 단 8곳(남동쪽으로부터 니이하우섬, 카우아이섬, 오투섬, 몰로카이섬, 카호올라웨섬, 마우이섬, 라나이섬, 하와이섬)만이 주민들이 거주하고 있으며, 나머지는 수면 위로 솟아 있는 산호초, 암초, 해산으로 알려짐



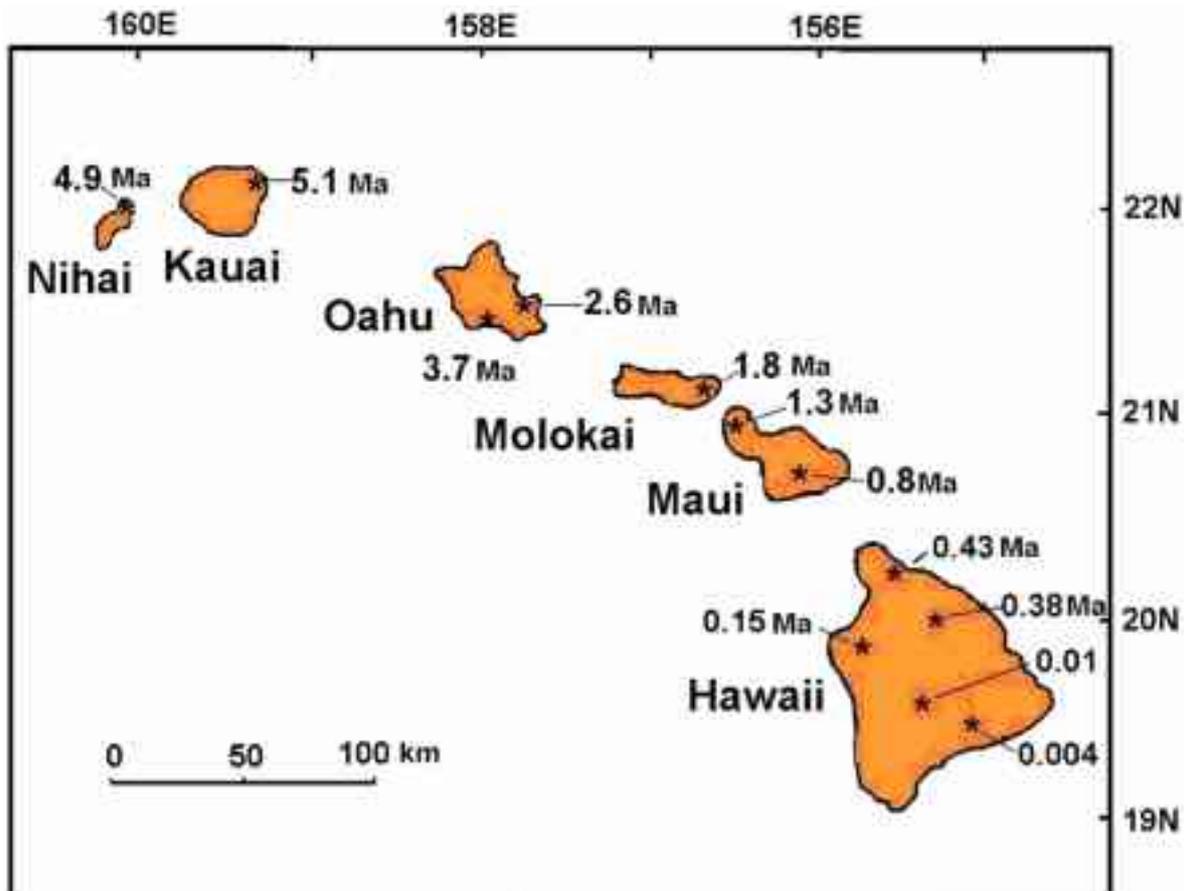
〈 하와이주의 지리적 위치 〉

- 주요 섬들의 면적을 살펴보면, 하와이섬이 10,433km²로 가장 크며 제주도 면적보다 5.6배 넓고, 그 뒤로는 마우이섬이 1,999km²로 제주도와 비슷하며, 관광객들이 가장 많이 방문하는 호놀룰루시가 있는 오아후섬은 1,547km²로 제주도 면적의 84%에 해당함
- 그 밖에 카우아이섬은 1,430km², 몰로카이섬이 674km², 라나이섬 365km², 니이하우섬 175km², 카호올라웨섬이 115km²의 면적을 가짐
- 하와이주는 열점에 의한 화산활동을 통해 형성됨에 따라 주요 섬들에는 크고 작은 화산들이 자리잡고 있으며, 가장 남동쪽에 위치한 하와이섬은 5개의 화산이 분포해 있는데, 이 중 Mauna Kea 화산은 정상이 해발 4,205m로 하와이주에서 가장 높은 것으로 알려져 있음
- 그 밖에 주요 섬들에도 최대 2개의 화산들이 형성되어 있으며, 고도범위는 최소 390m, 최대 3,055m로 나타남
- 아울러 각 화산의 형성시기는 북서쪽으로 갈수록 증가하는 양상을 보이는데, 이는 고정된 열점

상부의 태평양판의 북서쪽으로 서서히 이동함에 따라 그 위에 만들어진 화산 또한 판과 함께 이동됨으로 인해 나타나는 결과임

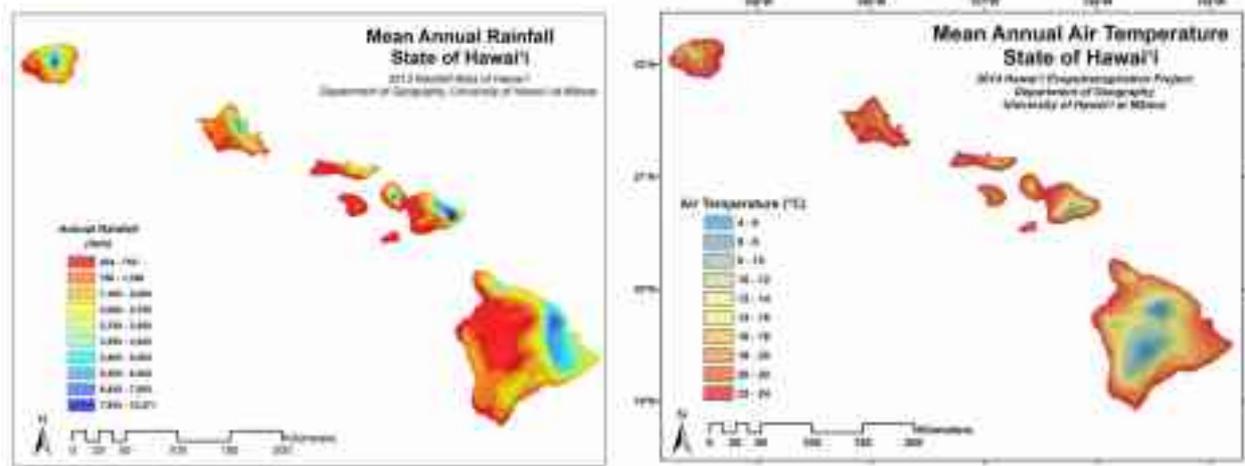
〈 하와이주 주요 섬의 지형특성(자료: The State of Hawaii Data Book 2021) 〉

주요 섬	면적(km ²)	해안선 길이(km)	주요 화산(높이, m)
하와이	10,433	428	Mauna Kea(4,205) Mauna Loa(4,169) Hulaalai(2,521) Kohala(1,670) Kilauea(1,248)
마우이	1,999	193	Haleakala(3,055) Puu Kukui(1,764)
카호 올라웨	115	47	Puu Moaulanui(452) Puu Moaulaiki(437)
몰로카이	674	142	Kamakou(1,515) Puu Nana(436)
라나이	365	76	Lanaihale(1,026)
오아후	1,547	180	Kaala(1,225) Puu Konahuanui(960)
카우아이	1,430	145	Kawaikini(1,598)
니이하후	175	72	Paniau(390)



〈 하와이주 주요 화산의 형성연대(단위 : 백만년)(Trubitsyn and Evseev, 2016) 〉

- 하와이주의 연평균 강수량은 약 200~10,000mm의 범위를 가지며, 섬의 동부지역은 연평균 3,000mm 이상으로 제주도의 수 배 이상으로 높게 나타남
- 이와는 대조적으로 섬의 서부지역은 전반적으로 연평균 강수량이 1,000mm 이하로 지역별로 뚜렷한 차이를 보임
- 연평균 기온은 해안저지대 지역에서는 평균 20℃ 내외로 제주도에 비해 4~5℃ 높은 특징을 보이며, 화산이 위치한 고지대로 향할수록 기온은 점진적으로 낮아져 정상부에서는 4~6℃로 다소 낮게 형성되어 있음



〈 하와이주의 연평균 강수량(좌) 및 기온(우)(자료 : University of Hawaii) 〉

- 인구 분포를 살펴보면, 2020년 기준 하와이주 총 인구는 1,455,271명으로 제주도 인구의 2배 이상에 하는데, 이 중 가장 많은 인구가 밀집되어 있는 섬은 오후섬(1,016,508명)으로서, 총 인구대비 약 70%가 이 섬에 거주하고 있음
- 그리고 가장 큰 면적을 갖는 하와이섬의 경우 거주 인구는 200,629명으로 총 인구의 13%에 그침

〈 하와이주 주요 섬별 인구 분포(자료: The State of Hawaii Data Book 2021) 〉

(단위 : 천명)

하와이섬	마우이	카호 올라웨	몰로카이	라나이	오아후	카우아이	니이하후
200.6	154.1	집계불가	7.4	3.4	1,016.5	73.2	0.08

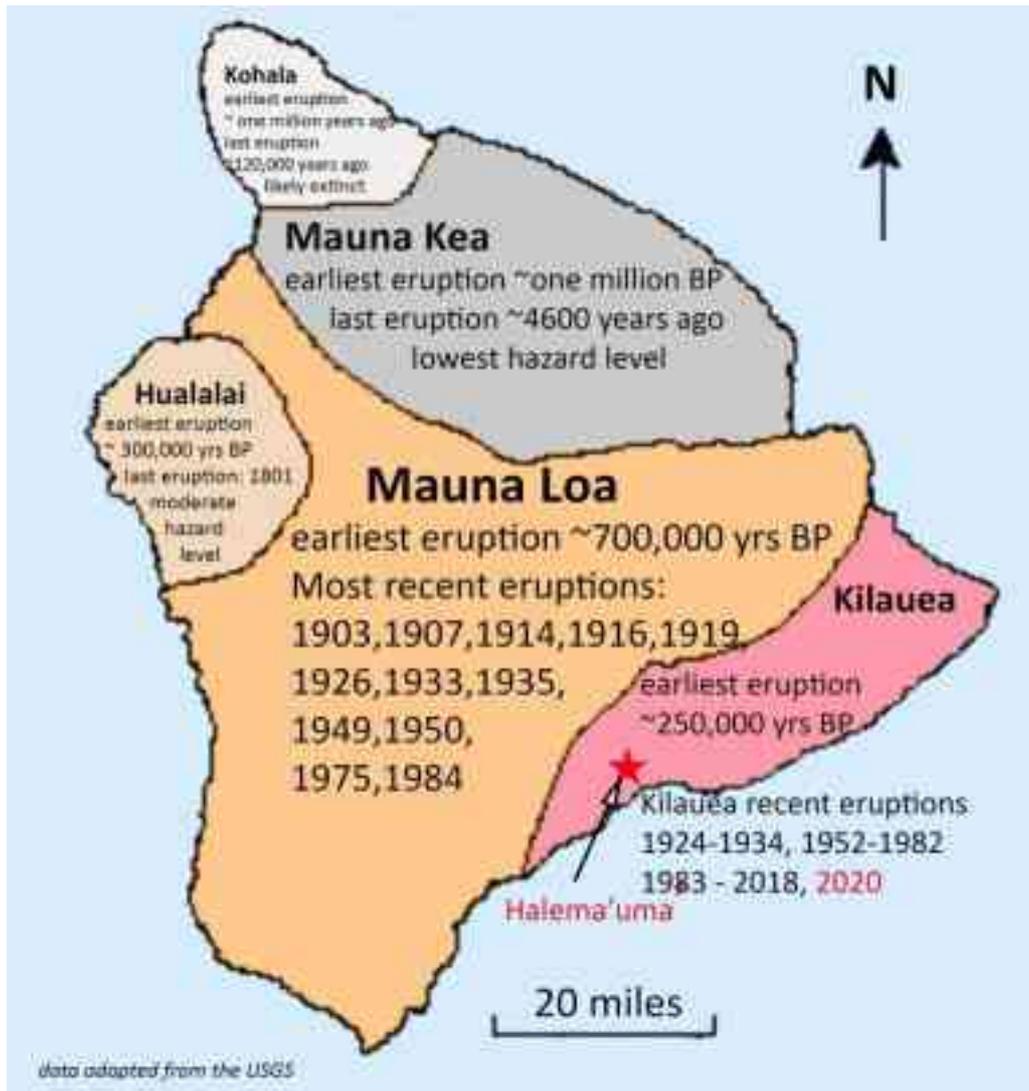
○ 하와이섬(빅아일랜드)의 수리지질특성

1) 지질 특성

- 금번 현장답사 대상지인 하와이섬은 다른 주요 섬들의 면적을 합친 것 보다 더 넓은 특징을 보이며, 때문에 빅아일랜드(Big Island)라는 별칭으로도 불리고 있으며, 섬에는 5개의 화산(Kohala,

Mauna Kea, Hualalai, Mauna Loa, Kilauea)이 위치해 있고, 이 중 Mauna Kea 화산은 하와이주의 모든 화산을 통틀어 가장 높은 고도를 갖는 화산에 해당함

- 하와이섬은 하와이주에서 유일하게 현세에도 화산활동이 발생하는 곳으로서, Mauna Loa 화산은 최근 2022년에도 그 모습이 나타나기도 하였으며 화산활동에 대한 기록은 1800년대부터 상세히 작성되어 남아있음

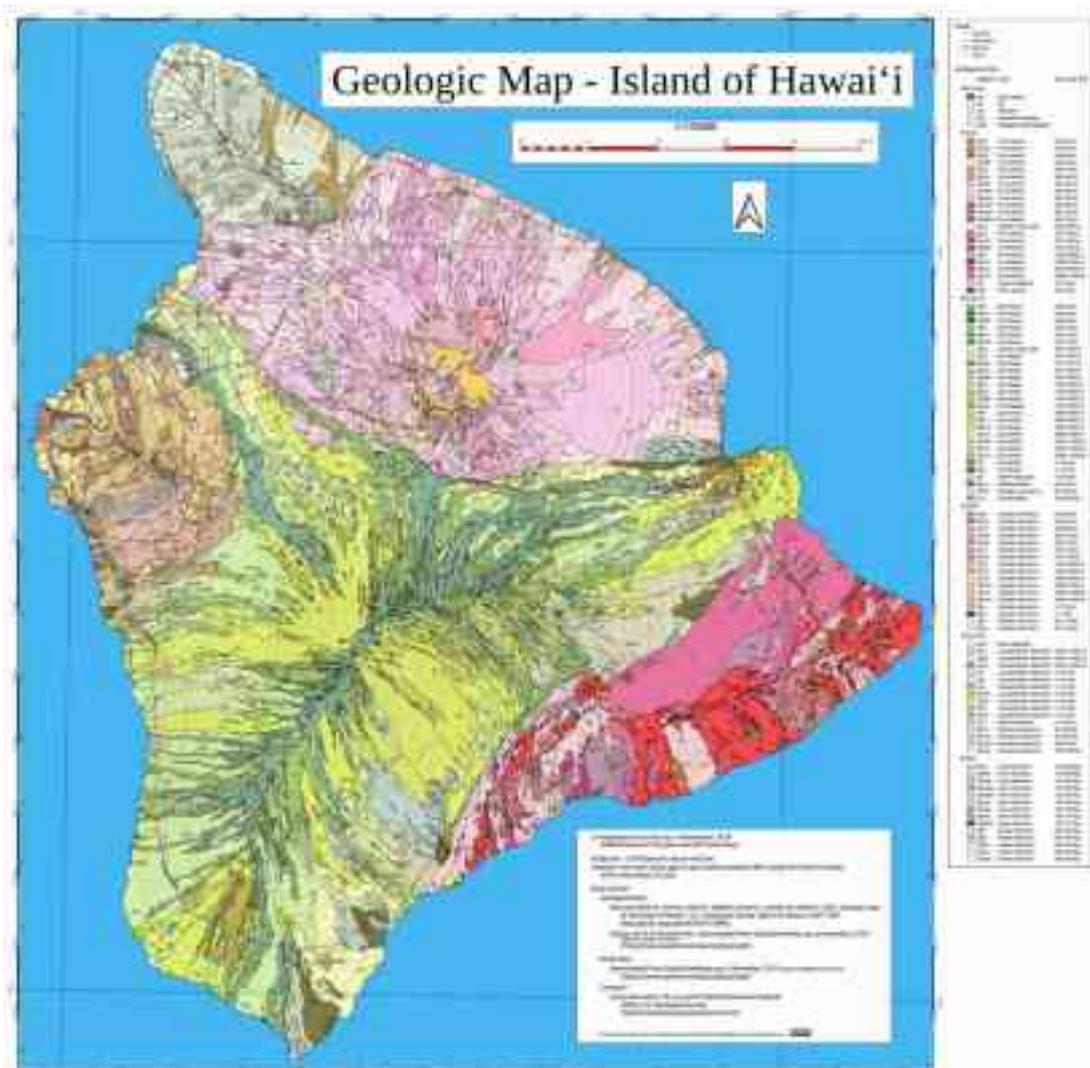


〈 하와이섬 주요 화산의 분출시기(자료 : 미국지질조사국, USGS) 〉

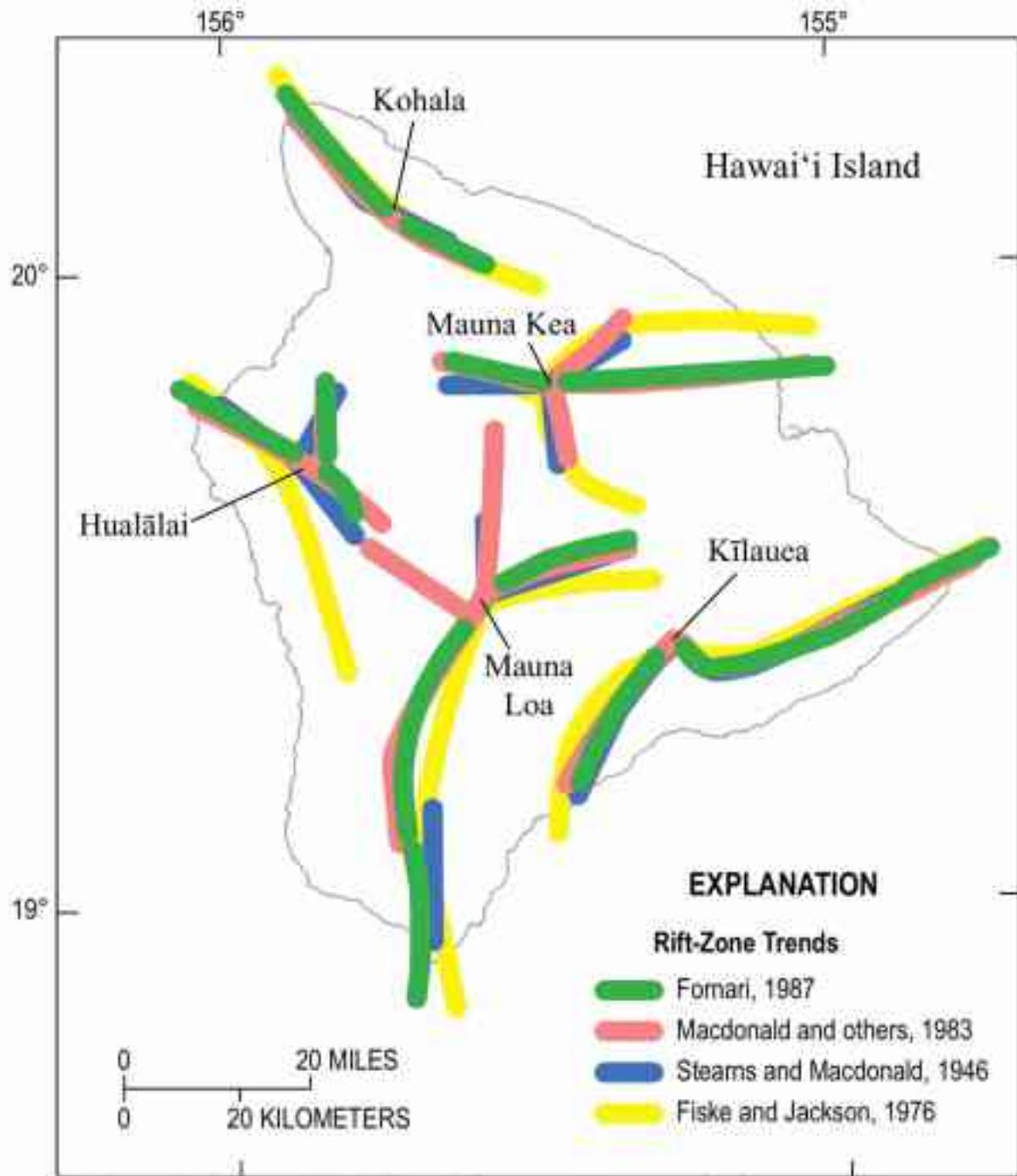
- 하와이섬의 지질특성은 19세기부터 조사·연구가 이루어져 미국지질조사국(United States Geological Survey, USGS)에 의해 지질도로 정리된 바 있음
- 지질도에 구분된 각 단위는 크게 형성시기와 암상을 기준으로 하였으며, 형성시기는 약 78만 년 전 중기 플라이스토세(Pleistocene)부터 현세(홀로세, Holocene)까지로 분류되며, 암상은 용암류, 화산성 및 비화산성 퇴적암으로 나뉘며 세부 특성에 따라 25개의 단위로 세분하였음
- 형성시기가 가장 오래된 곳은 Kohala 화산지대로서, 중기 플라이스토세의 Hawi 화산암류와 Polou 화산암류로 구성되어 있다. Hawi 화산암류는 분석구(Scoria cone), 용암돔(Lava dome), 용암류(Lava flows), 화산쇄설물(Tephra deposits)로 이루어져 있는 반면, Polou

화산암류에는 화산쇄설물이 포함되어 있지 않음

- Mauna Kea 화산지대는 약 50만 년전부터 1만 년 사이의 화산활동을 통해 형성된 분석구, 용암류, 화산쇄설물, 화도퇴적층을 비롯한 빙하기 시기에 만들어진 빙하퇴적물로 이루어져 있고, 그 밖에 Hualalai 화산지대, Mauna Loa 화산지대, Kilauea 화산지대는 약 1만 년 내외부터 현재까지의 연령을 갖는 용암류, 분석구가 지배적으로 나타남
- 이러한 하와이섬의 구성암석에 관한 특성 이외에도 지표의 갈라진 틈을 통해 발생하는 화산활동 유형인 틈새(열극, rift)분출에 대해서도 분석되어 있는데, 틈새 구조는 연장된 길이나 방향이 연구자마다 다소의 차이를 보이기는 하지만 공동적으로는 5개의 주요 화산을 중심으로 발달해 있으며, Kohala 화산에서는 북서-남동 방향으로 약 40km, Hualalai 화산은 북서-남동, 북북서-남남서 방향으로 30~40km, Mauna Kea 화산은 주로 동-서 방향으로 60km, Mauna Loa 화산지대는 북동-남서, 북-남, 북서-남동 방향으로 발달해 있으며 가장 길게 발달된 틈새는 100km 이상에 달함
- 가장 최근까지도 화산활동을 관찰할 수 있는 Kilauea 화산의 경우 북동-남서 방향으로 100km 이상 틈새구조가 나타나는 것이 확인됨



〈 미국지질조사국에서 작성한 하와이섬의 지질도 〉



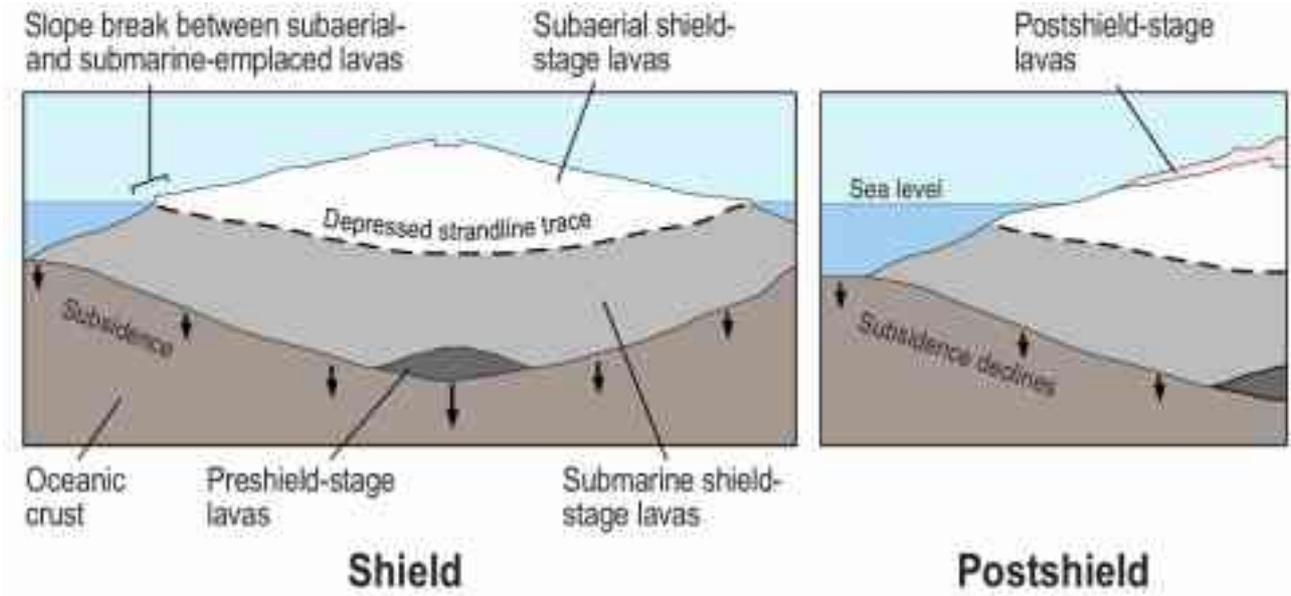
North American Datum 1983, Universal Transverse Mercator projection, zone 4N.

〈 하와이섬의 틸새구조 분포도 〉

- 아울러 시추공 지질주상도 자료들을 해석하여 주요 층서단위를 구분하였으며, 이를 기반으로 각 화산체의 분출단계 및 유형을 순상화산체 형성 전 분출(해저분출), 순상화산체 분출, 순상화산체 형성 후 분출의 3단계로 나누어 제시하였음
- Kilauea 화산은 순상화산체 형성 전 해저에서 발생한 화산활동이 먼저 일어났으며, 그 뒤 순상화산체를 형성시킨 화산활동으로 이어졌음
- Mauna Loa 화산인 경우 육상에서의 화산활동만 나타나 순상화산체를 이뤄나갔고, Hualalai 화산은 순상화산체 형성 단계부터 이후 지역적 분출까지 발생한 것으로 해석되었으며 그 밖에 Mauna

Kea 화산과 Kohala 화산은 Hualalai 화산과 동일한 화산활동 단계를 갖는 것으로 나타남

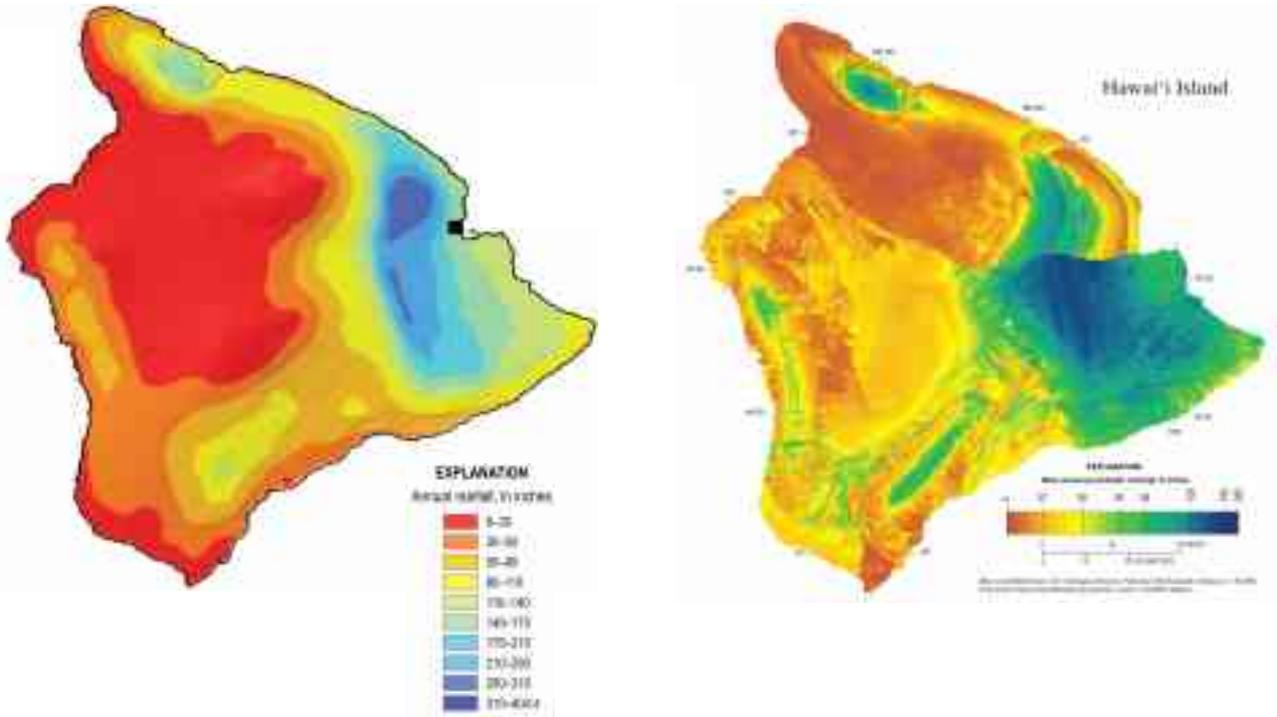
Island	Volcano	Stratigraphic units	Eruptive stages
Hawai'i	Kilauea	Puna and Hilina Basalts	Preshield (submarine ¹) to shield
	Mauna Loa	Nihoa, Kahuku, and Ka'u Basalts	Shield
	Hualalai	Hualalai Volc.	Shield (subsurface, submarine ²) to postshield
	Mauna Kea	Lanipūhoehoe Volc. Hāmākua Volc.	Postshield Shield (subsurface ²) to postshield
	Kohala	Hāwi Volc. Pohāhi Volc.	Postshield Shield



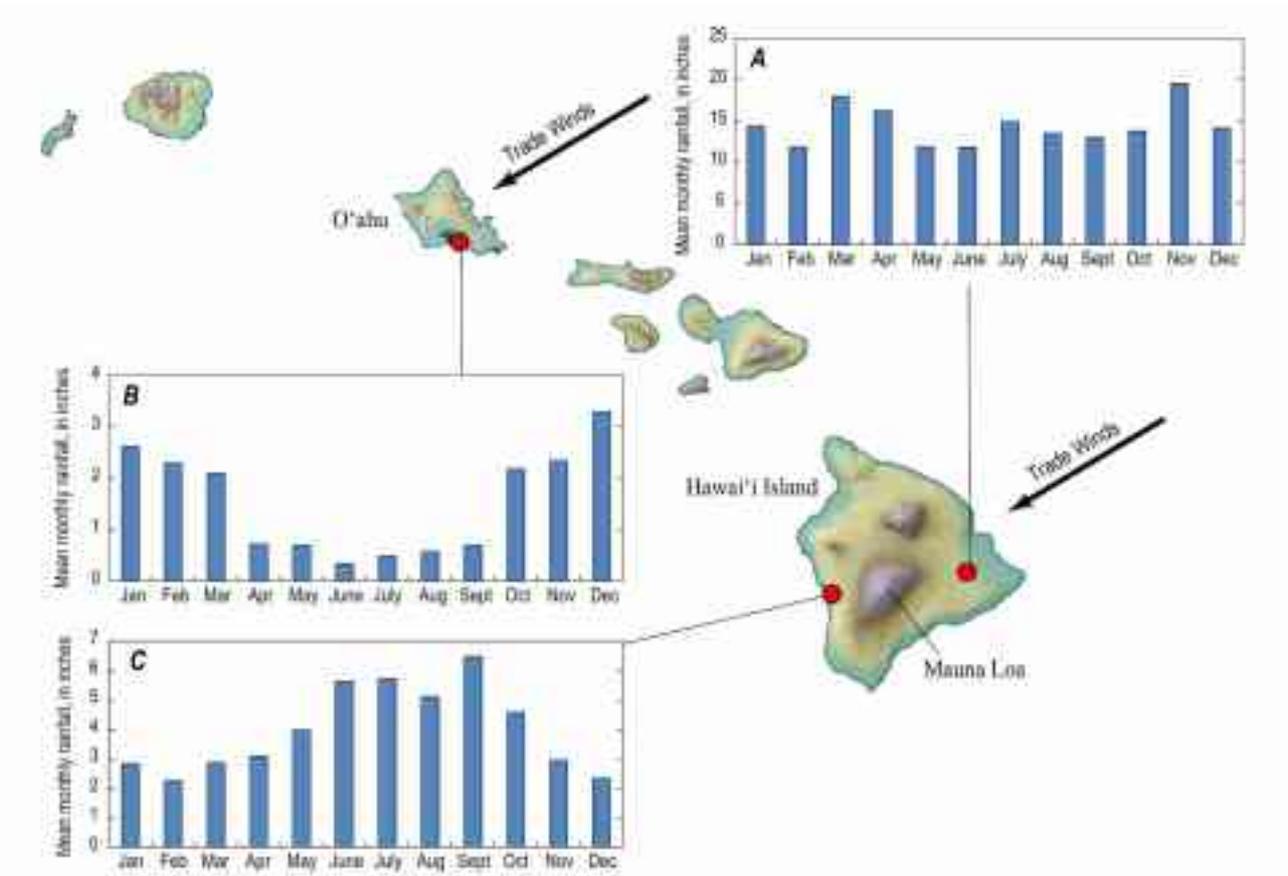
< 하와이섬 주요 화산의 화산활동 유형 및 분출단계 구분(Sherrod et al., 2007; Clague and Sherrod, 2014) >

2) 수리 특성

- 하와이섬의 연평균 총 강수량은 334,450mm(13,378inches)이며, 지역에 따라 편차가 심하게 나타남
- Mauna Kea 화산과 Mauna Loa 화산의 정상부를 중심으로 동부지역은 연평균 2,500~10,000mm(100~400inches)의 강수량을 보이는 반면, 서부지역은 대부분이 1,250mm(50inches) 이하로 상대적으로 낮은 연평균 강수량을 나타냄
- 월별 강수량의 변화를 살펴보면, 연평균 강수량이 풍부한 동부지역의 경우 대체로 400~500mm(15~20inches) 사이로 월별 강수량이 고르게 분포하는 경향을 보임
- 이와는 달리 서부지역은 6월~9월 사이가 150mm(6inches)로 강수량이 가장 높으며, 그 외에 시기에는 점진적으로 줄어들어 100mm(4inches) 이하의 강수량을 나타내는데, 이 같은 서부지역의 월별 강수량 변화는 오아후섬과는 정반대의 경향성을 보임
- 화와이섬의 연평균 지하수 함양량은 9,111,130m³으로 보고되었으며, 강수량이 높은 동부지역이 지하수 함양 또한 가장 크게 나타나는 것으로 분석되었음



〈 하와이섬의 연평균 강수량 분포도(좌) 및 연평균 지하수 함양량 분포도(USGS, 2015) 〉



〈 하와이섬 및 오후우섬의 월별 강수량(Giambelluca et al., 2013) 〉

Ⅲ

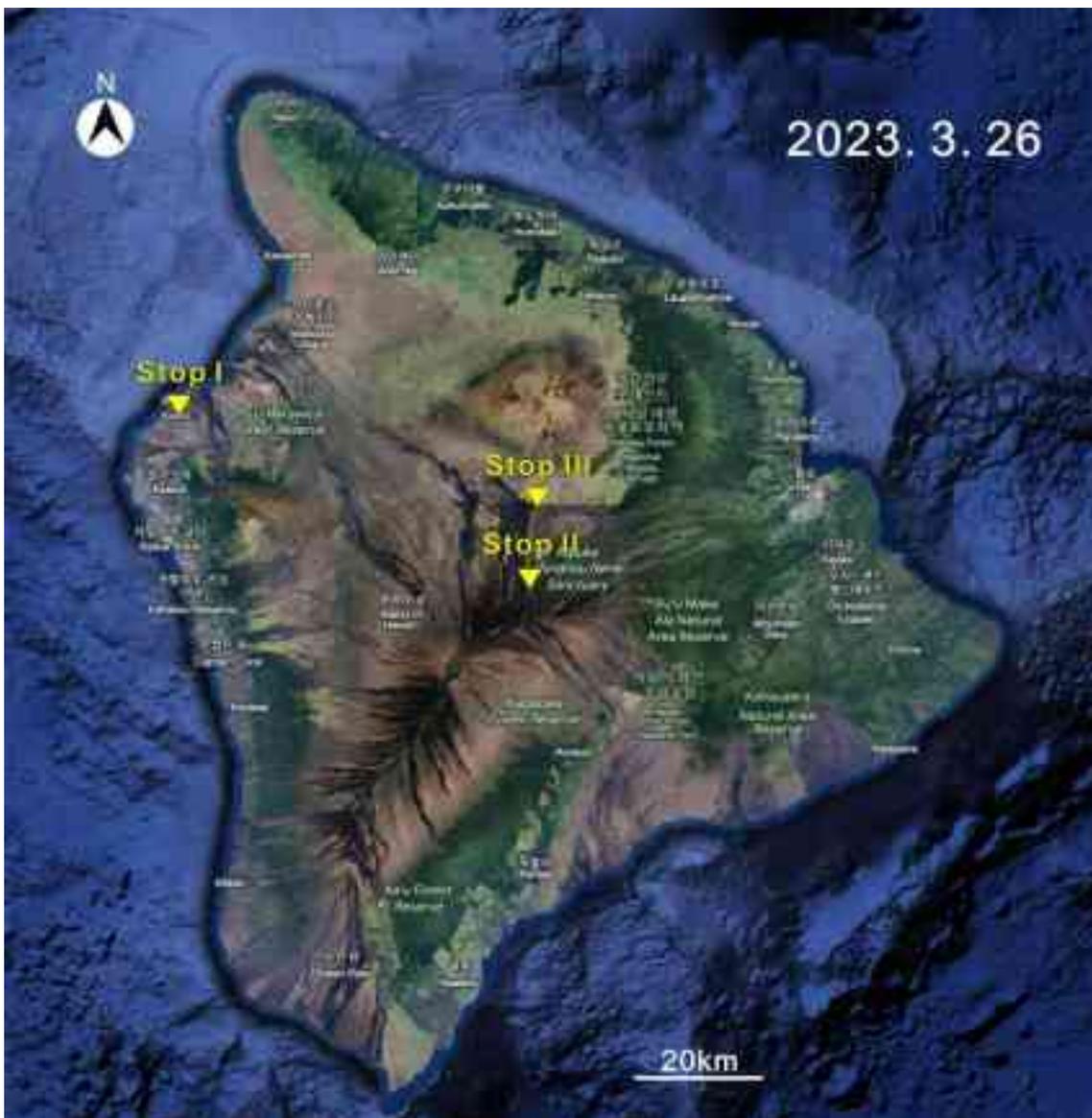
현장답사 및 기관방문 결과

○ 2023. 3. 25(토)

- 하와이섬 Kona 지역이동

○ 2023. 3. 26(일)

- 26일에는 Kalaemano Drive 주변, Mauna Loa 화산관측소 도로변, Saddle Road 주변으로 총 3곳의 용암지대에 대한 현장 지질조사를 수행하였음



〈 2023. 3. 26 현장답사 위치 〉

■ Stop I : Kalaemano Drive 주변

- 첫 번째 답사지는 Hualalai 화산지대의 Kukio 지역으로서, 답사는 해안에서 약 1.5km 내륙에 위치한 Kalaemano Drive 주변을 대상으로 수행함



〈 위성사진에서의 Stop I 위치 〉

- 지역의 표고는 해발 37m의 해안저지대에 속하며, 도로변에는 파호이호이 용암류(pahoehoe lava flows)가 지배적인 반면, 동쪽으로 약 300m 떨어진 곳에서는 아아 용암류(aa lava flows)가 광범위하게 형성되어 있음
- 파호이호이 용암류 지대에는 크고 작은 용암로브(lobe)이 중첩되어 복잡한 지형을 이루고 있으며, 소규모 용암튜브(lava tube)가 함몰되어 0.3~0.5m 깊이의 함몰 저지대가 다지점에 형성되어 있음이 확인됨



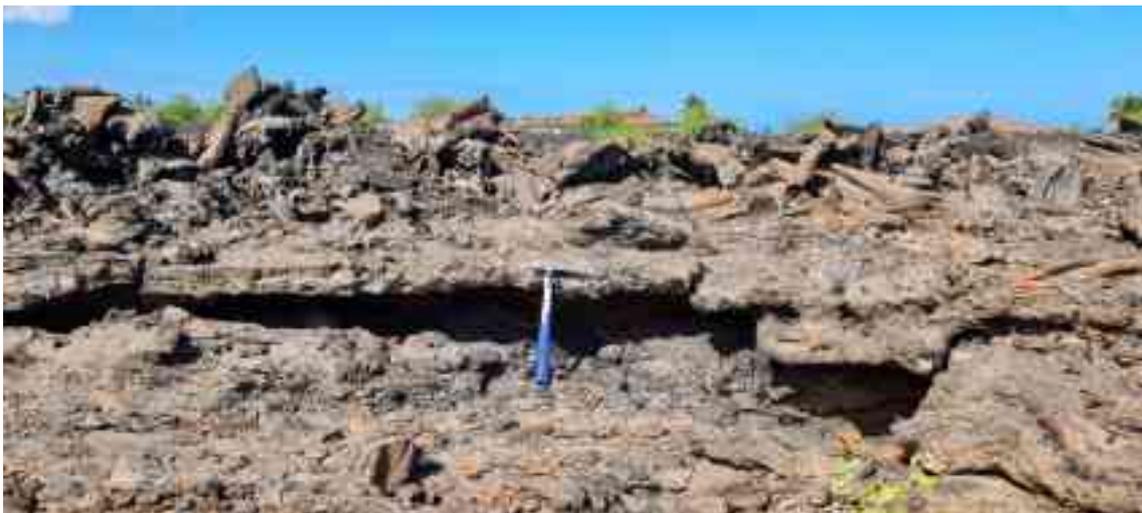
〈 Kalaemano Drive 주변에 형성된 파호이호이 용암대지 전경 〉

- 도로변에는 도로건설로 인해 절개된 용암튜브가 단면으로 잘 나타나 있는데, 개구부는 높이가 약 1m 이내, 폭은 5m 정도로 측정되었고 내부 천정부에는 용암이 물방울처럼 떨어지며 형성된 용암종유가 다량으로 형성되어 있음
- 또한 안쪽으로 연장되는 개구부가 확인되며, 지표에서도 부풀어 오른 지형이 개구부로부터 선상으로 이어지는 것이 식별되고 일부는 천정이 붕괴된 특징을 나타냄



〈 Kalaemano Drive 도로변에서 관찰된 용암튜브 〉

- 이 같은 절개지를 제외한 나머지 지역의 용암튜브는 상판이 함몰되어 저지대가 만들어져 있으며, 기존 상판과 기저부의 변위차는 1m 이내로 크지 않고 일부는 개구부가 매워진 상태를 보이기도 하였음
- 함몰지는 그 경계를 따라 용암튜브의 기존 상판이 기울어져 경사진 모습을 보이며, 기저부에는 밧줄구조가 발달된 전형적인 파호이호이 용암류의 표면구조가 잘 나타남
- 이 같이 지표와 가깝게 소규모로 발달되어 있는 용암튜브는 제주도 북오름 주변에서 관찰된 파호이호이 용암류의 용암튜브와 유사한 특징을 보이며, 함몰지형은 용암튜브 형성 후 상판이 무너져 내림에 따라 만들어진 것으로 해석됨



〈 파호이호이 용암지대에 발달된 용암튜브 함몰지 〉

■ Stop II : Mauna Loa 화산관측소 도로변

- 두 번째 현장답사는 Mauna Loa 화산관측소로 이어진 도로의 중간(표고 약 2,600m)에서 수행되었으며, 파호이호이 용암류 지대에 해당됨
- 지역은 크게 1880년대 분출된 용암류와 1930년대의 용암류가 지표를 피복하고 있는 것으로 확인되었으며, 1880년대의 용암류는 풍화로 인해 갈색 내지 암갈색의 암색을 띠고 있음
- 한편, 1930년대에 분출된 용암류는 유리질 조직의 피각이 남아 있음에 따라 유리와 같은 광택

을 보이고 있음



〈 위성사진에서의 Stop II 위치 〉

- 1903년대 만들어진 파호이호이 용암지대에는 약 300m 이상으로 연장성이 좋은 큰 규모의 용암동굴 함몰지가 발달되어 있는데, 동굴은 전체적으로 두 개의 층으로 구분되어 있음
- 함몰지의 규모는 장축 약 15m, 단축 약 10m 정도로 타원형을 이루고 있으며 깊이는 10m 이상으로 추정됨
- 함몰지는 수직절벽을 이루고 있으며, 내부는 테일러스(talus)와 같이 무너진 상판의 암괴들이 쌓여 기저를 채우고 있음
- 또한 측면부 벽면에는 열침식으로 인해 만들어지는 유선구조가 뚜렷하게 발달 하였으며, 상부층의 용암동굴은 지표와 가깝게 발달되어 있어 동굴의 연장성이 파악됨과 더불어 중간 중간 무너진 구간으로 인해 상판이 연결되어 있는 곳은 용암교가 발달되어 있음
- 용암채널로 이동하는 용암구간과 상판이 만들어지는 구간이 뚜렷하게 구분되었으며, 용암채널의 가장자리는 용암류가 흘러 내려간 구조 또한 분명하게 관찰됨
- 용암동굴 함몰지는 경사를 따라 하류지역에도 선상으로 형성되어 있으며, 이는 위성지도에서도 확인될 정도로 규모가 크고, 드론영상 촬영을 통해 용암동굴 함몰지의 지형특성을 상세하게 기록하였음
- 이와 같은 특징은 제주도의 북오름과 송당리에서 관찰된 용암동굴 함몰지와 동일한 것으로 확인되었으며, 전형적인 용암동굴 함몰지라 할 수 있음
- 이와 같은 큰 규모의 용암동굴 함몰지 이외에도 앞서 Kalaemano Drive 주변에서 조사한, 소규모의 용암튜브 및 함몰구조도 다수가 관찰되었음



〈 파호이호이 용암대지에 발달된 용암동굴 함몰지 〉

■ Stop III : Mauna Loa - Saddle Road 주변

- 26일 마지막 답사지는 Saddle Road에서 Mauna Loa 화산관측소로 진입하는 구간의 파호이호이 용암대지로서, 표고는 1,999m로 확인됨
- 이 지역은 기록에 남아 있지 않은 오래된 파호이호이 및 아아 용암대지 위를 1930년대 분출된 파호이호이 용암류가 일부 피복하고 있음이 위성지도를 통해 확인되었으며, 앞서 Mauna Loa 지역에서 관찰된 것과 같이 풍화에 따른 암색과 조직특성이 다르게 나타남
- 특히 1930년대 형성된 파호이호이 용암대지에는 제주도의 ‘빌레’라 불리는 판상의 파호이호이 용암류가 광범위하게 발달되어 있으며, 용암의 팽창(inflation)에 따라 다양한 규모의 함몰지가 다수로 형성되어 있음



〈 위성사진에서의 Stop II 위치 〉

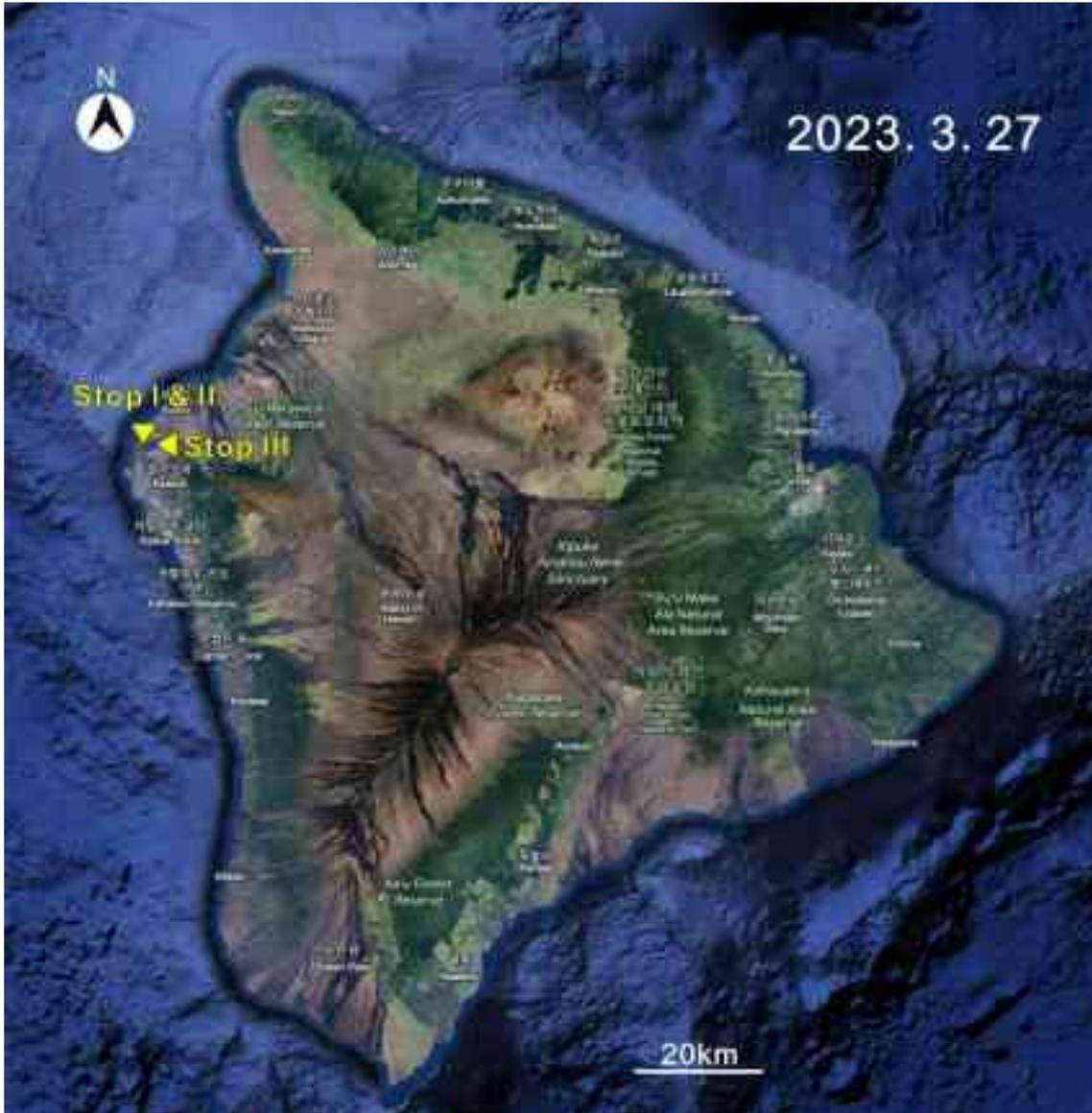
- 이 지역은 용암동굴 함몰지와는 다르게 투물러스의 측면이 붕괴되어 하부에 공동이 만들어지는 함몰지의 과정이 잘 나타났음
- 이러한 특징은 이는 북오름 주변부에서 관찰된 투물러스 사면부의 붕괴로 인해 공동만들어져 있는 모습을 설명하는데 적합할 것으로 판단됨
- 투물러스의 사면붕괴 이외에도 투물러스가 서로 중첩되어 있는 경우 투물러스의 가장자리에서 발생하는 팽창은 투물러스와 투물러스 사이에 수직적 변위를 유발하여 마치 함몰된 것처럼 보이는 공동을 형성하고 있으며, 이때의 변위차는 수십 cm~수 m까지 다양하게 나타남
- 뿐만 아니라, 상대적으로 오래된 아아 용암대지에서는 제주도에서의 꽃자왈과 같이, 화산암괴로 이루어진 지역에 식생들이 무성하게 자라 있는 특징이 광범위하게 관찰되었음



〈 파호이호이 용암류의 투물러스 구조에서 나타나는 함몰지형의 특징 〉

○ 2023. 3. 27(월)

- 27일은 하와이주정부의 협조아래 Kekaha Kai Beach의 북부와 남부지역에 대한 현장 지질조사를 집중적으로 수행하였으며, 이 밖에도 자체적으로 Kalaoa 고속도로 동쪽에 형성되어 있는 용암동굴 함몰지도 추가로 조사하였음



〈 2023. 3. 27 현장답사 위치 〉

- Stop I : Kekaha Kai Beach 북부
 - Kekaha Kai Beach는 Kona 국제공항으로부터 북쪽으로 약 4.6km 떨어진 지점에 위치하며, 내륙으로는 1801년에 분출한 파호이호이 용암류로 대부분 덮혀 있음
 - 현장답사는 해변으로 연결되는 도로를 중심으로 북쪽과 남쪽으로 구분하여 진행하였으며, 표고는 각각 31m, 15m임
 - 먼저 북쪽은 장축이 수십 m 이상, 높이는 1~2m 내외의 낮은 투물러스(tumulus)가 다수로 발달해 있으며, 정상부를 따라 균열이 길게 이어지고 사면은 팽창이후 붕괴되어 빈공간이 노출

되어 있기도 함



〈 위성사진에서의 Stop I 위치 〉

- 이 지역에서 관찰되는 저지대는 크게 3가지 유형으로 구분되는데, 첫 째는 투물러스와 투물러스 사이에 나타나는 자연 오목지로서 상대적으로 부풀어 오른 투물러스 구조들이 산재함에 따라 나타나는 저지대를 말함
- 이때 길게 연장된 투물러스가 평행하게 발달되고 사면의 붕괴가 동반될 경우에는 기존 곳자왈 지역에서 붕괴도랑으로 불리는 구조와 매우 흡사하게 저지대 지형이 나타나는 것이 확인됨



〈 곳자왈 지역에 형성되어 있는 붕괴도랑과 유사한 함몰구조 〉

- 두 번째로는 중첩된 투물러스의 가장자리가 팽창되어 상승함에 따라 겹쳐지지 못한 부분은 마치 공동처럼 구멍이 형성될 때의 저지대에 해당하는데, 이때 투물러스의 가장자리 부분이 붕괴되어 절벽면과 같은 경사를 갖는 함몰지가 만들어지기도 함

- 특히, 투물러스 측면 내지 가장자리가 함몰되었을 경우 단면 틈을 따라 용암이 빠져나오는 구조들 또한 함께 나타났으며, 이때의 용암류는 점성이 높아 날카로운 형태를 보임
- 뿐만 아니라, 투물러스의 상부의 균열을 따라 용암류가 새어나오는 경우에는 기존 투물러스의 표면을 뒤덮고 있는 모습이 나타나기도 하였고 대체로 전이형 용암류의 조직특성이 나타남



〈 중첩된 투물러스의 비대칭 팽창에 의해 만들어지는 공동과 투물러스 균열을 따라 흘러 나온 용암류의 모습 〉

- 세 번째는 용암류의 흐름 방향에 장애물이 놓여 있는 경우, 이를 우회하며 용암류가 팽창됨에 따라 만들어지는 용암상승 구덩이가 관찰됨
- 용암상승 구덩이는 내부에 소규모 투물러스 내지 용암 둔덕이 발달해 있으며, 이를 중심으로 타원형 내지 원형의 함몰지가 약 10m 이내로 발달해 있음
- 이때 다른 저지대 지형과 마찬가지로 기존 장애물 지형과 접해 있는 용암이 부풀어 오르고 균열이 발생하는 경우 함몰지와 같이 외곽부가 붕괴된 블록들이 구덩이 안을 채우고 있는 모습도 함께 확인됨
- 이처럼 기존에 남아 있는 용암지형을 새로운 용암이 완전하게 피복하지 못하고 일부 노출되어 있는 구조를 Kipuka라고 부르며, 보다 북쪽에 위치한 상대적으로 오래된 파호이호이 용암류

대지와 근접할수록 관찰되는 수가 많아짐



〈 용암상승 구덩이가 발달된 ‘Kipuka’의 모습 〉

- 아울러 오래된 파호이호이 용암류가 광역적으로 발달된 곳은 용암류의 각력화, 균열의 확장 등 풍화의 흔적들이 일부 관찰되나 정도가 심하지는 않음
- 다만 육안으로 보여지는 투물러스 구조는 수 m의 높이로 상대적으로 높게 솟아 있는 모습이 나타나고, 균열부를 중심으로 각력화가 일부 진행된 것이 드론 촬영을 통해 확인되었음(현재 이곳은 하와이주 정부의 관리구역이 아닌 관계로 도보 접근이 불가)



〈 드론영상 촬영으로 확인된 오래된(풍화가 상당 진행된) 파호이호이 용암대지 〉

■ Stop II : Kekaha Kai Beach 남부

- Kekaha Kai Beach 남부 또한 1801년 파호이호이 용암류로 이루어진 용암대지로서, 북부와 동일하게 투물러스가 다수로 형성되어 있음



〈 위성사진에서의 Stop II 위치 〉

- 다만, 해안과 가까워져 감에 따라 투물러스를 이루는 용암류는 서서히 줄어들고 하부의 판상 용암류가 나타나기 시작함

- 판상의 용암류는 표면이 매끈하고 평탄하며 다각형의 판으로 균열이 발달해 있고, 이러한 판들은 횡압력에 의해 마치 팽창된 것처럼 변위를 가지기도 함
- 이처럼 변위가 나타난 곳에서는 압력에 의해 부서지고 깨진 조각들이 쌓여 있는 모습을 보이며, 다소 풍화가 진행된 구간에서는 판들이 뒤섞여 전이형 용암류의 조직특성이 나타나기도 함



〈 판상의 파호이호이 용암류 및 전이형 용암류 〉

- 이 지역에는 수십 m의 길이와 20~30m의 폭을 갖는 대규모 용암채널이 형성되어 있으며, 내부는 기존의 판상 용암류가 깨어진 판조각들과 압괴들이 뒤섞인 전이형 용암류로 채워져 있음
- 그리고 채널의 제방 바깥부분에는 밀려가면서 넘쳐오른 클링커와 판의 조각들이 쌓여 있는 것도 또한 잘 관찰됨



〈 대규모 용암채널과 제방으로 바깥으로 흘러나온 클링커 〉

■ Stop III : Kalaoa 고속도로 동쪽

- Kona 국제공항으로부터 북동쪽으로 약 3.5km 떨어진 Kalaoa 고속도로를 기준으로 서쪽과 동쪽에는 용암동굴 함몰지가 1.4km에 달하는 길이로 선상 배열되어 나타남



〈 위성사진에서의 Stop III 위치 〉

- 현장답사는 동쪽에 한하여 진행되었으며, 고속도로와 곧바로 접해 있는 곳에서부터 용암동굴의 개구부가 확인됨
- 함몰지들의 규모는 장축이 최소 10m, 최대 약 120m이고 단축은 최소 3m, 최대 10m로 다양하며, 형태는 주로 타원형에 해당함
- 함몰지 깊이는 약 15~20m 정도로 추정되며, 함몰되지 않은 구간은 용암교가 함몰지 사이에 발달해 있음



〈 용암동굴 함몰지의 전경 〉

- 용암동굴 개구부의 단면을 살펴보면, 상판의 두께는 2~5m 정도로 수 개의 판상 용암류로 이루어져 있으며, 용암류 단위 사이에는 팽창으로 인해 일부 소규모 공동이 발달해 있음
- 아울러 동굴의 천장에는 용암종유가 형성되어 있으며, 벽면에는 뜨거운 용암에 의해 코팅된(라이닝) 매끄러운 표면이 나타남
- 동굴이 함몰된 이후 벽면을 따라 흘러들어간 용암류로 인해 내장구조(entraill)가 나타나기도 하며, 가장 동쪽에 위치한 함몰지의 말단부에서는 용암폭포가 형성되어 있음
- 뿐만 아니라, 흘러내리는 양이 상대적으로 적은 경우에는 용암석순이 지표로부터 2~3m 높이로 솟아있기도 하였음

- 동굴 함몰지 경계를 따라 지표를 이루는 파호이호이 용암류에는 로브의 내부가 비어있는 수 m의 소규모 공동이 다수 관찰되는데, 이는 26일 Kalaemano Drive 주변에서 관찰된 특징과 동일함



〈 용암동굴 함몰지의 단면과 동굴 상부를 이루는 파호이호이 용암류에 형성된 소규모 튜브 〉

- 또한 일부 지표 용암류는 전이형으로 나타나기도 하지만 그 범위는 다소 국부적이며, 함몰지 주변은 대부분 크고 작은 투물러스가 복잡하게 얽혀 나타나 낮은 언덕(hummocky)지형을 이루고 있음
- 이때의 투물러스는 Stop I, II에서 관찰된 것보다 높이가 2~3m 이상 높게 솟아있으며, 균열로부터 빠져나온 용암류가 지형기복을 채우고 있어 함몰지와 같은 지형의 관찰이 어려운 경우도 있음
- 대부분은 높게 발달된 투물러스와 투물러스 사이에 발달된 도랑 형태의 저지대가 우세하게 관찰되었음



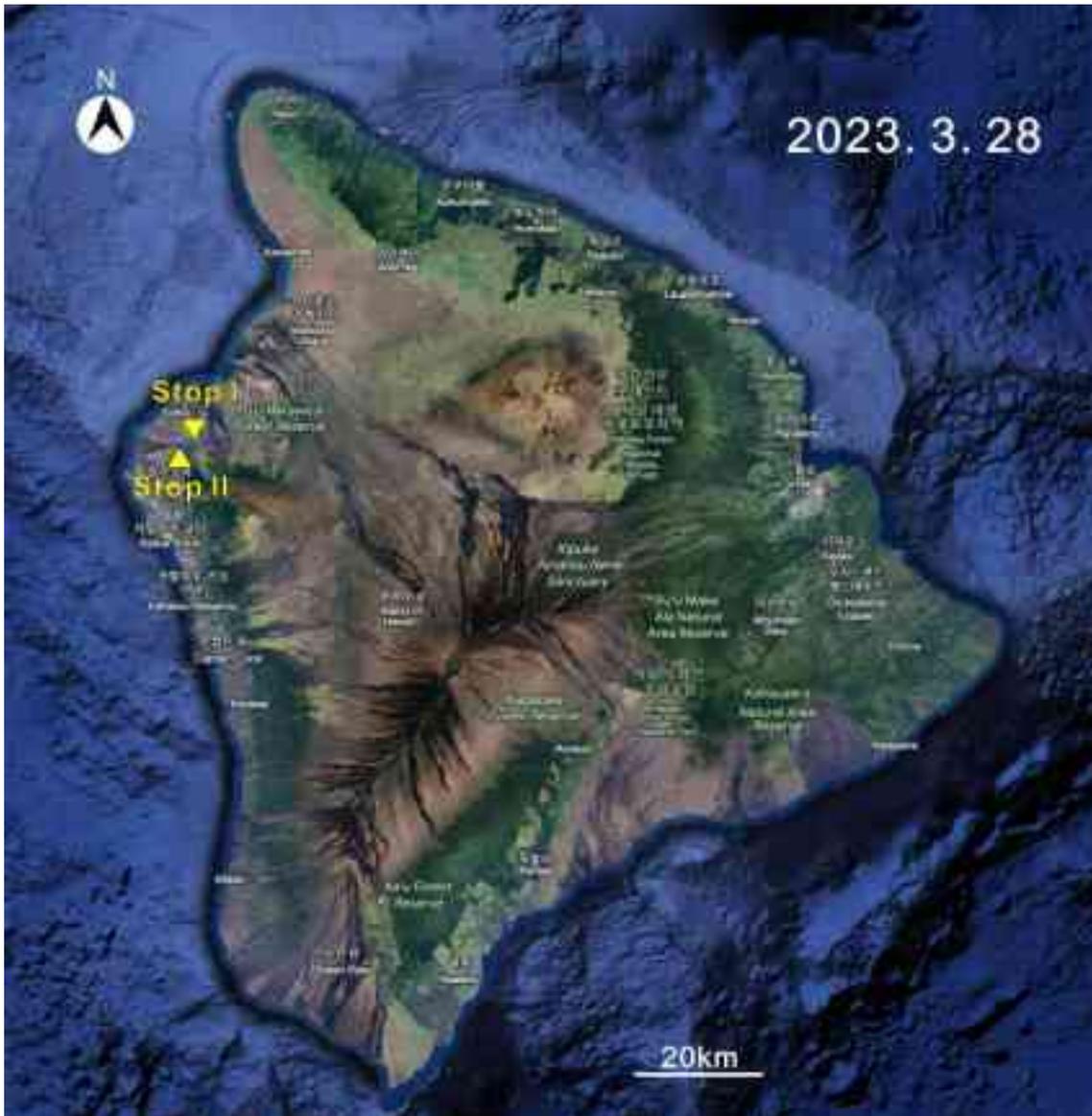
〈 용암동굴 함몰지로 흘러내린 용암류에 의해 형성된 내장구조 〉



〈 용암동굴 함몰지에 형성된 용암폭포 및 용암석순 〉

○ 2023. 3. 28(화)

- 28일에는 총 2곳에 대한 현장답사를 수행하였으며, 답사를 마친 이후에는 하와이섬 동쪽에 위치한 Hilo 지역으로 이동하였음



〈 2023. 3. 28 현장답사 위치 〉

- Stop I : Kaupulehu road 남서쪽 용암동굴 함몰지
 - 답사지는 Kukio 지역으로부터 남쪽 Nenea Golf Club으로 이어지는 Kaupulehu road 남서쪽에 위치하고 있으며, 크고작은 규모의 용암동굴 함몰지가 다수로 발달해 있음
 - 용암동굴 함몰지는 북서쪽으로 선상 배열되어 있으나, 접근이 가능했던 도로변의 함몰지에 국한하여 조사를 수행하였음
 - 이 용암동굴 함몰지는 장축이 50m, 단축이 20m 정도로 타원형을 이루고 있으며, 장축의 양쪽 기저부에는 육안상 수 m 규모의 용암동굴 개구부가 잘 나타나 있음
 - 그리고 단축의 경계부는 암괴의 대량 붕괴로 쌓인 애추사면이 형성되어 있으며, 암괴들은 대체로 1m 이상으로 큰 특징을 보임



〈 위성사진에서의 Stop 1 위치 〉



〈 용암동굴 함몰지의 드론촬영 영상 〉

- 아울러 용암동굴 상부는 수 매의 파호이호이 용암류로 덮혀 있으며, 최상부에는 용암로브 내부가 공동으로 비어있는 구조가 다수로 관찰됨
- 육안 관찰이 불가능한 함몰지는 드론 영상촬영을 통해 그 특징을 확인하였는데, 남쪽에 위치한 용암동굴 함몰지의 경우 기존 함몰지의 특성과 마찬가지로 개구부가 장축 가장자리에 각각 발달해 있으나 발달 높이의 차이가 최소 10m 이상으로 함몰지의 경사가 급하게 나타나기도 하였음
- 그 외에 북쪽에 발달된 함몰지들은 원형, 타원형의 외형을 보였으며, 함몰지들은 수 십m 정도

의 간격을 두고 연속해서 배열되어 있는 경향을 가짐

- 이와 같이 선상 배열된 함몰지들은 하나의 라인이 아닌 적어도 3개 이상이 관찰되며, 이는 용암동굴계를 이루고 있을 가능성이 있는 것으로 추정



〈 용암동굴 상부 파호이호이 용암류에 발달된 소규모 용암튜브 〉



〈 선상의 연장성을 보이는 용암동굴 함몰지 드론촬영 영상 〉

■ Stop II : Puhia pele 틈새 분출지역

- Puhia Pele는 Kona 국제공항으로부터 동쪽으로 약 7km 떨어진 지점에 위치하고 있는 화산으로서, 틈새분출에 의해 만들어진 스패터콘(spatter cone), 스패터 램파트(spatter rampart)가 약 500m에 걸쳐 나타남



〈 위성사진에서의 Stop II 위치 〉

- 틈새를 따라서 스패터콘과 램파트가 서로 중첩되어 발달해 있으며, 고도는 최대 20m 정도인 것으로 관찰됨
- 쌓여 있는 스패터는 표면이 매우 날카롭고 예리한 특징을 보이며, 퇴적 이후 흘러내린 유동구조 또한 잘 관찰됨
- 아울러 기공함량이 약 60% 이상으로 다공질 조직을 가지며, 매우 가벼운 특징을 나타냄
- 스패터콘과 램파트 사면, 램파트의 중심부에는 빈 공동이 다수 형성되어 있으며, 안쪽으로의 깊이는 1.5~2.0m로 깊지 않지만 안쪽으로부터 공기가 통하는 것이 느껴짐
- 스패터콘과 램파트 사면을 따라 파호이호이 용암류가 흘러내려간 채널 또는 튜브가 다 지점에 발달해 있으며, 대부분 내부가 비어있는 모습을 보임
- 이러한 용암류는 기저부에서도 채널, 튜브, 로브의 다양한 형태로 퍼져나갔으며 분출지로부터 약 400~500m 떨어진 지점부터는 피각이 깨지고 부서져 전이형 용암류로 변화되는 양상이 나타남
- 뿐만 아니라 대규모 용암동굴 함몰지도 관찰되는데, 이 또한 스패터콘의 사면으로부터 흘러내려간 파호이호이 용암류에 의해 만들어진 것으로 파악됨
- 용암동굴은 중간 중간 상판이 붕괴되어 있어 용암교가 만들어지기도 하였으며, 대규모 붕괴지는

그 규모가 장축 15m, 단축 12m로 원형을 이루고 있음



〈 틈새구조를 통해 만들어진 스페터 콘과 램파트 드론촬영 영상 〉



〈 스페터 램파트 전경 〉

- 한편, 함몰지 내부에는 용암동굴이 1.5~2.0m 크기로 상대적으로 작은 규모로 나타났으며, 외부에 비해 온도가 낮은 공기의 흐름 특성 또한 확인되었음
- 아울러 용암동굴 함몰지에서는 동굴상부를 피복하고 있는 판상의 파호이호이 용암류가 팽창됨에 따라 소규모 공동 내지 튜브가 발달해 있는 것도 관찰되었음
- 용암동굴의 측벽에는 라이닝 구조, 열침식, Squeeze up 구조 등이 다채롭게 나타남이 확인됨
- 틈새구조 및 스페터콘과 램파트의 가장자리 부근에서는 clastogenic lava가 협재되어 있는 스페터 램파트도 더불어 확인됨

- 육안으로 관찰되는 틈새구조의 서쪽 가장자리에는 수 십m 깊이의 용암채널이 형성되어 있으며, 이때의 폭 또한 10m 정도로 매우 큰 규모를 가짐
- 이와 같은 특징을 갖는 Puhia pele 화산은 1801년에 용암이 분출하였으며, Kekaha Kai Beach가 위치한 해안선까지 퍼져나간 것으로 보고되었음



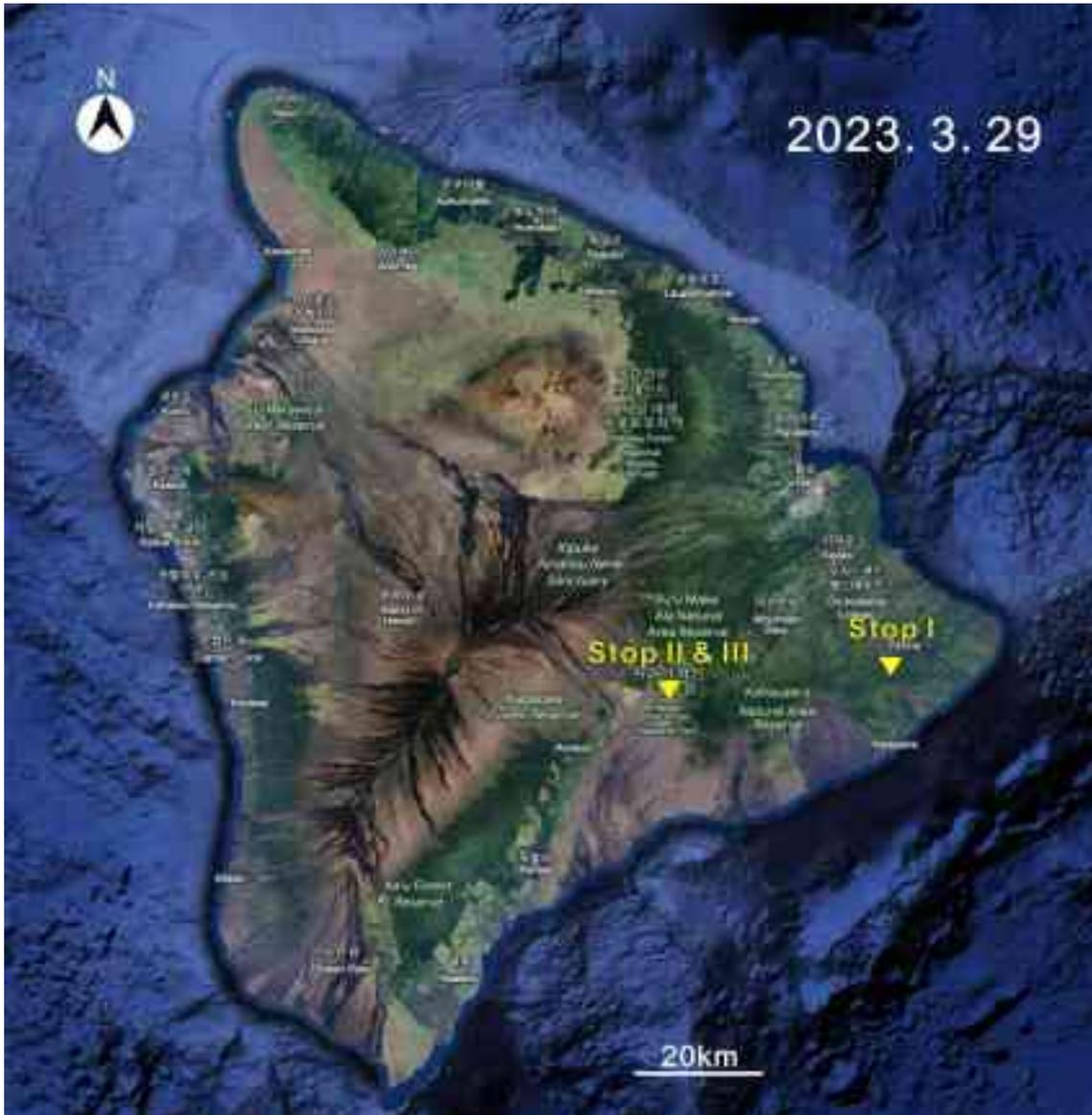
〈 스페터 램파트의 사면을 따라 흘러내린 파호이호이 용암류의 용암튜브 및 채널 〉



〈 틈새를 통해 분출된 파호이호이 용암 내부의 동굴이 함몰된 지역 〉

○ 2023. 3. 29(수)

- 29일은 2018년도에 화산분화가 발생된 Fissure 8지역과 더불어 킬라우에 정상부 및 마우나 울루 서부의 틈새구조를 대상으로 현장답사를 진행하였음



〈 2023. 3. 29 현장답사 위치 〉

- Stop I : Fissure(틈새구조) 8
 - 틈새구조 8은 2018년에 선상으로 갈라진 지각의 틈을 통해 용암이 분출된 지역으로서, 생생한 화산구조를 관찰할 수 있는 지역임
 - 진입로에는 파호이호이 용암류가 뒤틀리고 깨진 전이형 용암류가 기저를 이루고 있으며, 그 위에는 틈새분출을 통해 만들어진 소규모 화산체가 약 30~40m의 높이로 솟아있음
 - 또한 이 화산체를 기준으로 남서쪽에는 수 m의 소형 화산이 선상으로 발달해 있으며, 화도를 통해 뜨거운 증기가 배출되고 있는 것이 확인됨
 - 이들 화산체를 이루고 있는 구성물질은 스킨리아와 레티쿨라이트(reticulite)가 지배적이며, 스

패터(spater)는 상대적으로 그 비율이 적게 나타남



〈 위성사진에서의 Stop 1 위치 〉

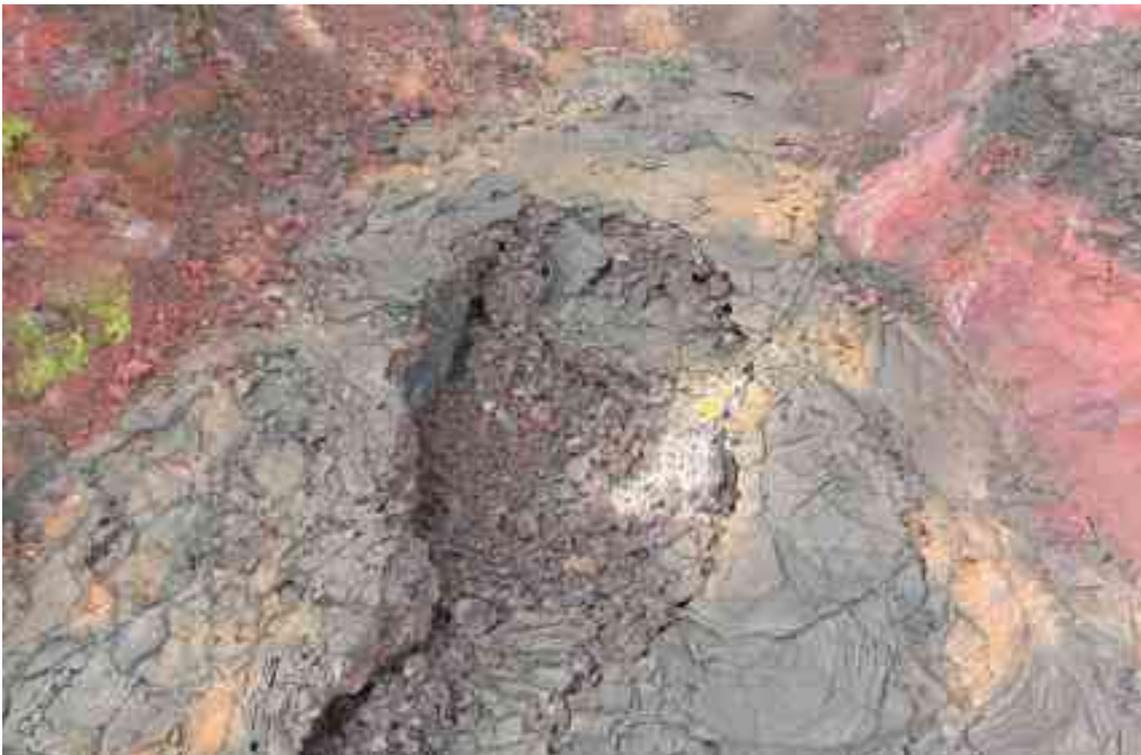


〈 틈새구조 8을 따라 형성된 다양한 규모의 스킨리아콘과 대규모 용암채널 〉

- 이 밖에도 펠레의 머리카락, 펠레의 눈물 등의 화산 분출물이 다량 분포되어 있음
- 아울러 화산체 기저는 파호이호이 용암류로 채워져 있으며, 그 중심부는 붕괴되어 함몰지가 형성되어 있음
- 또한 화산체 내부 측벽은 지면으로부터 약 10~20m 부근까지는 층리로 보여지는 층구조가 관

찰되었으며, 상당 부분은 붕괴되어 있는 모습을 보임

- 드론 촬영 결과, 화산체의 외형은 말굽형으로 최종 단계에서 흘러나온 용암류에 의해 북동 측 벽이 붕괴되어 있음
- 이때 분출된 용암류는 경사를 따라 북동쪽으로 대형 용암채널을 형성하였고 현재도 채널의 기저에는 파호이호이 용암류가 일부분 채워져 있는 상태를 보임



〈 드론촬영을 통해 관찰된 스킨콘의 내부 전경 〉



〈 스킨아콘의 봉고된 사면과 이를 따라 발달된 대규모 용암채널의 모습 〉



〈 현재도 뜨거운 증기가 밖으로 분출되고 있는 소규모의 스킨아콘 〉



〈 스킨아콘의 사면을 피복하고 있는 스파터, 레티쿨라이트, 스킨아콘 〉

■ Stop II : Kilauea 화산 분화구 관측소

- Kilauea 화산은 정상부에 설치된 관측소에서 분화구 관람만 가능하며, 현장에 대한 조사나 답사는 불가함
- 관측소에서는 기상 악화로 인해 분화구의 모습이 또렷히 관찰되지 않았으나, 대략적인 특징을 살펴볼 수 있었음



〈 위성사진에서의 Stop II 위치 〉

- 분화구의 내부는 용암으로 채워져 용암호수(lava lake)가 만들어져 있으며, 용암호수의 상부는 유동성을 나타내지 않고 피각으로 굳어져 있는 것으로 추정됨
- 굳어진 피각의 틈새로부터 뜨거운 증기가 밖으로 분출되고 있는 모습이 확인되며, 이러한 균열은 분화구 내부 뿐만 아니라 사면부를 따라서도 광범위하게 나타나고 있음



〈 Kilauea 화산의 분화구 전경 〉

- 또한 관측소에서 200~300m 가량 떨어진 지점에서는 뜨거운 증기가 뿜어져 나오는 분기공이 형성되어 있었으며, 증기의 온도는 약 60℃로 측정되었음



■ Stop III : Mauna Ulu 화산 인근 틈새구조

- 마우나 울루 서부에는 약 2km의 틈새구조가 형성되어 있으며, 틈새구조를 따라 스페터 램파트가 길게 연장되어 나타남



〈 위성사진에서의 Stop III 위치 〉

- 틈새구조는 그 깊이가 육안으로 확인되지 않으며, 표면에는 분출된 파호이호이 용암류가 틈새구조 안으로 흘러들어가는 Drain back 구조가 관찰됨
- 또한 틈새를 따라 스페터 램파트가 형성되어 있으며, 뚜렷한 스페터콘의 형태는 관찰되지 않음
- 스페터 램파트는 약 4~5m의 높이를 가지며, 일부는 그 이하로 낮게 형성되어 있는 구간도 존

재하였음



〈 지각이 갈라져 나타나는 틈새구조 및 틈새 안으로 흘러들어가는 용암류 〉

- 스페터 램파트에는 흘러내린 유동구조를 갖는 스페터들이 두껍게 쌓여 있으며, clastogenic lava flow의 형태는 확인되지 않았음
- 아울러 스페터 램파트로부터 붕괴된 암괴들이 파호이호이 용암류에 둘러싸여 마치 달갈과 같은 타원형의 매끈한 구조들이 틈새구조를 따라 불규칙하게 발달해 있음

- 틈새구조 내부에는 이끼류, 관목류 등의 식생이 나타나기도 하였음
- 또한 이 지역의 기저를 이루고 있었던 파호이호이 용암류는 판상으로 지역을 뒤덮고 있으며, 용암류 판간의 유동에 따라 서로 밀어올리거나, 찌그러지는 등 곳곳에 용암류 판이 서로 엉겨 작은 둔덕을 이루고 있는 지형이 관찰됨
- 그리고 용암류 판과 판 사이에는 호니토로 추정되는 용암 기둥이 형성되어 있으며 그 높이는 수 m에서 수 cm까지 다양하게 나타남
- 아울러 용암수형, 펠레의 눈물과 같은 화산구조 내지 암석들이 다채롭게 분포해 있음이 확인됨



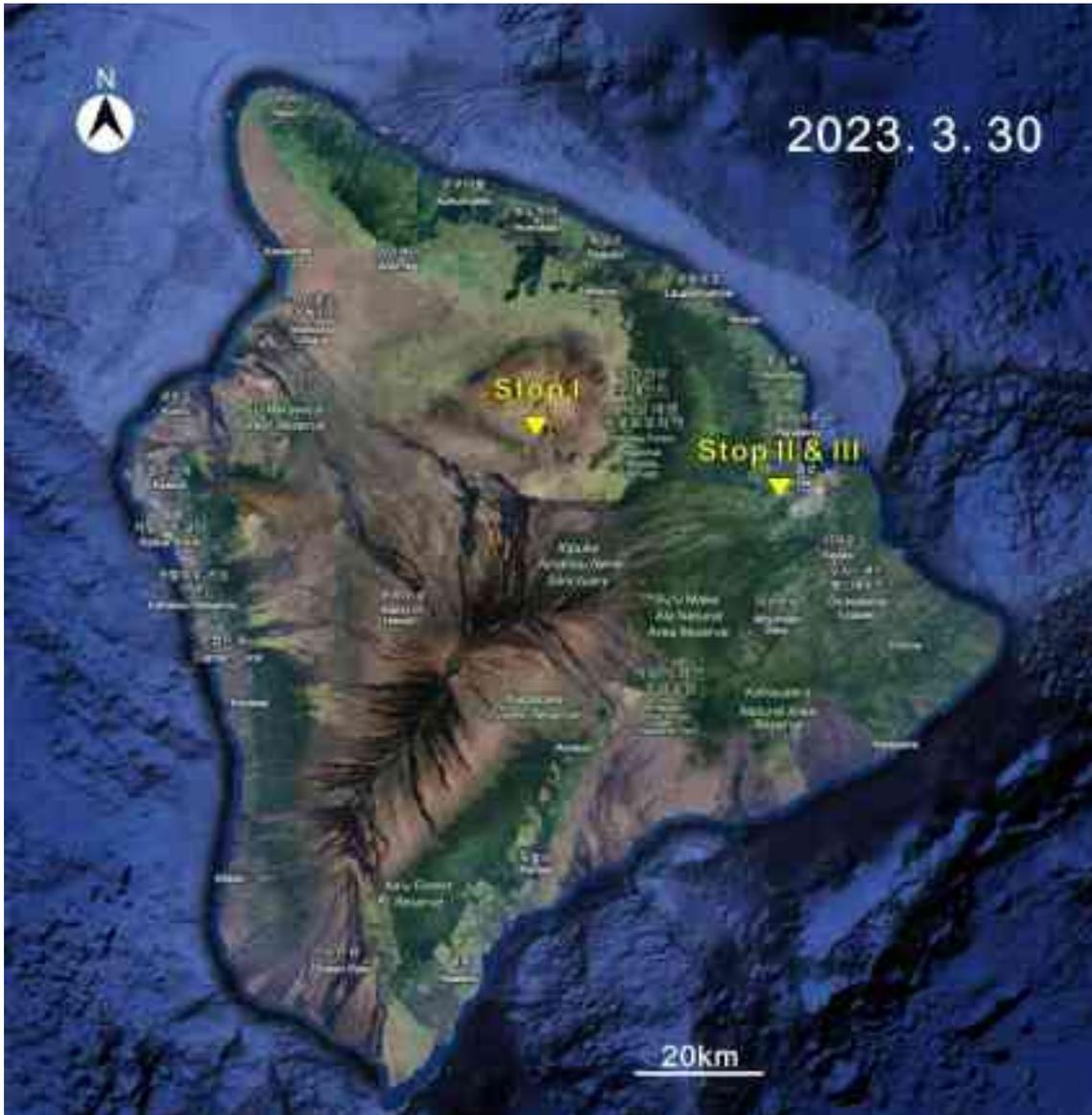
〈 파호이호이 용암류의 균열위로 용암이 솟구쳐 만들어진 호니토 구조 〉



〈 수목을 흘려가는 용암이 감싸 만들어진 용암수형 구조 〉

○ 2023. 3. 30(목)

- 30일은 Mauna Kea 화산의 정상부, Kaumana 용암동굴과 Rainbow 폭포를 답사한 뒤 오후 우섬의 호놀룰루로 이동하였음



〈 2023. 3. 30 현장답사 위치 〉

■ Stop I : Mauna Kea 화산

- 하와이주에서 가장 높게 솟아 있는 Mauna Kea 화산은 차량을 이용해 정상부 탐방이 가능하나, 현지에서의 사정으로 인해 약 2,780m 고지에 위치한 방문객 센터 주변을 대상으로 답사를 진행하였음
- 방문객 센터 서쪽으로 스킨리야콘이 형성되어 있으며, 정상부의 고도는 약 2,850m로 확인됨
- 트레일 코스를 따라 이동하는 과정에서 크기가 다양한 화산탄을 비롯한 스킨리야 퇴적물들이 관찰되었으며, 상당 부분 풍화가 진행되어 있는 특징을 보임
- 스킨리야 뿐만 아니라 스파터도 종종 확인되었으며, 규모가 큰 경우에는 장축이 2m 이상으로

도 나타났으며 불규칙한 유동구조가 잘 남아 있음



〈 위성사진에서의 Stop 1 위치 〉



〈 스킨아콘 사면부 전경 〉



〈 스킨아콘 사면부에서 관찰된 화산탄 〉



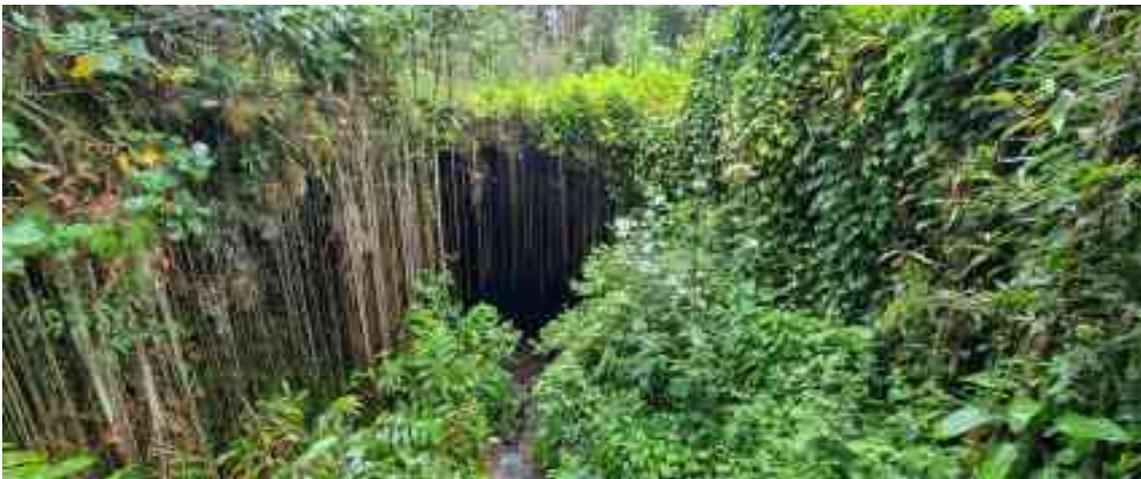
〈 다양한 크기와 형태를 갖는 스파터 〉

■ Stop II : Kaumana 용암동굴

- Kaumana 용암동굴은 힐로 지역의 해안선으로부터 내륙방향으로 약 6.5km 떨어져 있는 곳에 위치해 있으며, 표고는 287m로 확인됨
- 이 용암동굴은 1881년 Mauna Loa 화산분화 당시 형성된 것으로 알려져 있으며, 연장길이는 약 2km로 세계에서 57번째로 긴 용암동굴로 등재되었음
- 진입로는 용암동굴이 함몰된 곳으로서, 약 10m 정도의 깊이를 갖는 함몰지의 양쪽 가장자리에는 동굴의 개구부가 각각 형성되어 있음
- 함몰지는 동굴의 상판이 무너져 내린 암괴들로 채워져 있음
- 동굴 개구부의 높이는 2~3m, 5~6m로 각각 차이를 보이며, 그 상부에는 풍화된 파호이호이 용암류가 여러겹으로 동굴 상부를 피복하고 있음
- 아울러 다우지에서 자라나는 식생이 동굴 주변부를 광범위하게 뒤덮고 있는 모습을 보임
- 동굴 내부에는 용암이 흘러감에 따라 지면을 녹이며 깊어지는 열침식 구조와 벽면을 코팅시킨 라이닝 구조가 잘 나타났으며, 2차적으로 용융되어 흘러내린 용암이 로브형태로 부풀어 오른 모습도 함께 관찰되었음



〈 위성사진에서의 Stop II 위치 〉



〈 용암동굴 입구의 전경 〉



〈 열침식에 의해 용암동굴 내부에 형성된 소규모 개구부 〉

- 아울러 동굴의 기저부에는 파호이호이 용암이 흘러감에 따라 만들어진 소규모 용암채널이 형성되어 있기도 함
- 이와 같은 특징들은 숨골 현장조사를 통해 확인된 제주도에 형성된 용암동굴 및 용암동굴 함몰지에서 나타나는 특징과 동일함



〈 용암동굴 내부의 열침식구조, 라이닝, 용암채널 〉

■ Stop III : Rainbow 폭포

- Rainbow 폭포는 힐로지역의 해안까지 이어지는 와이루쿠강의 중류지역에 위치해 있으며, 표고는 약 117m로 확인됨



〈 위성사진에서의 Stop III 위치 〉

- 폭포의 높이는 약 40m 정도로 추정되며, 강의 상류로부터 흘러가는 물은 용암류의 지형적 낙차가 발생하는 지점에서 폭포수로 쏟아져 내리는 모습을 보임
- 폭포 주변에 단면에서 확인되는 지질은 파호이호이 용암류이며, 수 m 두께의 파호이호이 용암류가 시루떡과 같이 겹겹이 쌓여 있는 구조를 나타냄
- 아울러 폭포의 하부에는 폭포수가 떨어지며 안쪽을 침식시켜 만든 침식동굴이 확인됨
- 다만, 이와 같은 용암류의 지형적 낙차의 발생이 단순 하천에 의한 침식인지 아니면 용암동굴의 붕괴에 따라 형성된 것인지는 명확하게 파악하기 곤란함



〈 Rainbow 폭포의 전경 〉



〈 폭포 상류인 와이루쿠강의 하천수가 흘러가는 모습 〉

○ 2023. 3. 31(금)

- 31일은 오후섬의 호놀룰루시에서 하와이주의 수자원 정책 및 제도에 대한 자문을 구하기 위해, 오전에는 하와이 한인이민연구소 이덕희 소장, 하와이주 한인방송 이정태 PD와 간담회를 가졌으며, 오후에는 하와이주 수자원관리위원회(Commission on Water Resource Management)에 방문하였음
- 오전 : 하와이 한인이민연구소 이덕희 소장, 이정태 PD 간담회
 - 하와이주는 1978년 주 헌법에 ‘수자원’ 항목을 마련하여 수자원을 보호·관리하고 개발을 적절히 규제할 것을 명시해놓고 있음
 - 아울러 이전에는 물을 개인이 사유화할 수 있었으나, 1973년 영토 내의 모든 물의 관할권은 주 정부에 있다는 대법원 판결을 통해 물의 공공화가 도모되었음
 - 현재 하와이주의 수자원은 기능별로 관할 부서를 구분하였는데, 수량은 수자원관리위원회가 총괄 담당하고 있으며, 수질은 보건국, 농업용수는 농업국에서 전담하여 관리하고 있음
 - 이렇게 구분되어 관리되는 상황에서 관리주체별로 협력 또는 소통의 문제 등이 우려되지만, 수자원관리위원회에서 종합적으로 이를 컨트롤하는 컨트롤타워로서의 기능을 수행하고 있기 때문에 부서별 불협화음이 나타나지 않음
 - 하와이주는 거주인구를 비롯한 지속적인 관광객 증가로 인해 지하수 고갈에 대한 우려의 목소리가 커지고 있는 실정임
 - 이에 따라 주 정책으로 식당에서의 물 제공을 의무화하지 않는 제도를 시행한 바 있으며, 고객이 원하는 경우에만 제공하도록 하였음
 - 뿐만 아니라, 호놀룰루 수도국에서는 오아후섬에서 발생한 레드힐 연료탱크 누유사태와 다가오는 건기를 고려하여, 주민들이 여름철 자발적으로 수도 사용량을 절약해줄 것을 호소하였고, 이에 주민들의 협조로 2022년 물 사용량을 5% 감소시킨 사례도 존재하였음
 - 그 밖에도 하와이주에서는 물 이용을 줄이고 아끼자는 측면에서 활동하고 있는 거버넌스와 더불어 지하수 함양 유역을 보호하는 유역관리 거버넌스가 있어 주민 참여형 지하수 보전·관리가

자연스럽게 이루어짐

- 이 같은 지하수 보전·관리에 대한 시민운동은 정부에서 연간 100억 이상의 예산을 지원해주고 있는데, 즉 시민운동을 법으로 보장시켜 보다 효과적으로 지하수 보전·관리가 이루어질 수 있도록 한 것임
- 제주도 또한 하와이주에서의 사례와 같이 제주도민이 참여한 지하수·보전관리 정책을 수립해 나가야 할 것이며, 도민들의 자발적 참여를 위해서는 이에 필요한 지원을 아낌없이 해 나가야 할 것으로 생각됨



〈 이덕희 한인이민연구소 소장과의 간담회 사진 〉



〈 이정태 하와이주 한인방송 PD와의 간담회 사진 〉

- 오후 : 하와이주 지하수관리위원회 Kaleo Manuel 부국장, Kimura Jeremy
 - 오후에는 하와이주 지하수관리위원회(Commission on Water Resources Management)를 방문하여 금번 현장답사에 대한 결과를 공유하고, 하와이주에서는 제주도의 '숨골'과 같은 지하수에 영향을 미칠 수 있는 지질구조의 행정적 제도적 관리 방안에 대한 논의를 진행하였음
 - 하와이주에서는 제주도의 숨골과 같은 함몰지 내지 구덩이와 같은 구조 'Puka'라고 칭하고 있으며, 작은 구덩이나 구멍을 뜻하고 있음
 - 이러한 Puka는 재래식 화장실, 고인의 풍장을 위한 매장 등의 용도로 활용하였거나 현재도 활용되고 있으며, 그 수는 하와이주 전체를 통틀어 약 8만개 이상이 분포하고 있는 것으로 조사됨

- 다만, 이외에도 조사되지 못한 Puka가 수 없이 많이 분포되어 있을 것으로 생각되고 이를 일일이 다 파악하는 것은 불가능한 일이라 생각함
- 이러한 Puka 통해 오물, 하수, 폐수등을 배수시키는 문제로 인해 현재 하와이주에서도 지하수의 질산성질소 오염이 두드러지게 나타나고 있음
- 따라서 2005년 미국 환경보호청에서는 ‘안전한응용수법’에 따라 Puka를 통해 대량의 오염물을 배출하는 행위를 금지하는 법을 제정하였음
- 아울러 시가화된 지역을 제외하고는 대부분의 지역이 보전관리구역으로 지정이 되어 있어, Puka를 이용한 무단 오염물 투기가 이루어지기 어려운 실정임
- 그리고 개발행위에 대해서는 엄격한 환경영향평가가 이루어지기 때문에, Puka와 같이 오염물질이 지하로 유입될 수 있는 구조를 개인이 점유하여 사용할 수 없음
- 아울러, 하와이주의 보건부에서는 하와이주 전역에 분포되어 있는 약 80,000개의 cesspool(Puka 구조에 오물이 차있는 웅덩이) 중 상당수를 제거하고 개선하기 위해, 2백만 달러에 달하는 예산을 투입하였음
- 당초 계획은 2050년까지로 수립되었고, 2030~2035년까지 약 26,188개의 cesspool을 개선하는 것으로 계획하였음
- Cesspool의 개선은 현재 제주도의 개인하수처리시설과 같은 현대화 설비를 갖추는 것으로서, 대규모로 나타나는 경우에는 앞서 설명된 것과 같이 사용자체를 금하는 것으로 개선방향을 잡고 있음
- 제주도의 숨골과 하와이주의 Puka와 같이 수 없이 형성되어 있는 오염물질의 유동 통로에 대한 정책적 관리는 현재 제주도 뿐만 아니라 하와이주에서도 개선이 시급한 사항으로서, 보다 효과적인 관리를 위해서는 양국간 정보 교류가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단됨





〈 하와이주 지하수관리위원회 회의 사진 〉

○ 하와이주 화산지대 현장조사를 통한 숨골의 지질학적 유형정립 기반 마련

- 제주도의 지표를 피복하고 있는 용암류는 적어도 수 만년 전에 분출된 것으로서, 숨골 현장조사에서도 식생의 피복, 암석의 풍화 등과 같은 문제로 인해 지질학적 유형을 정립하는데 많은 어려움이 있었음



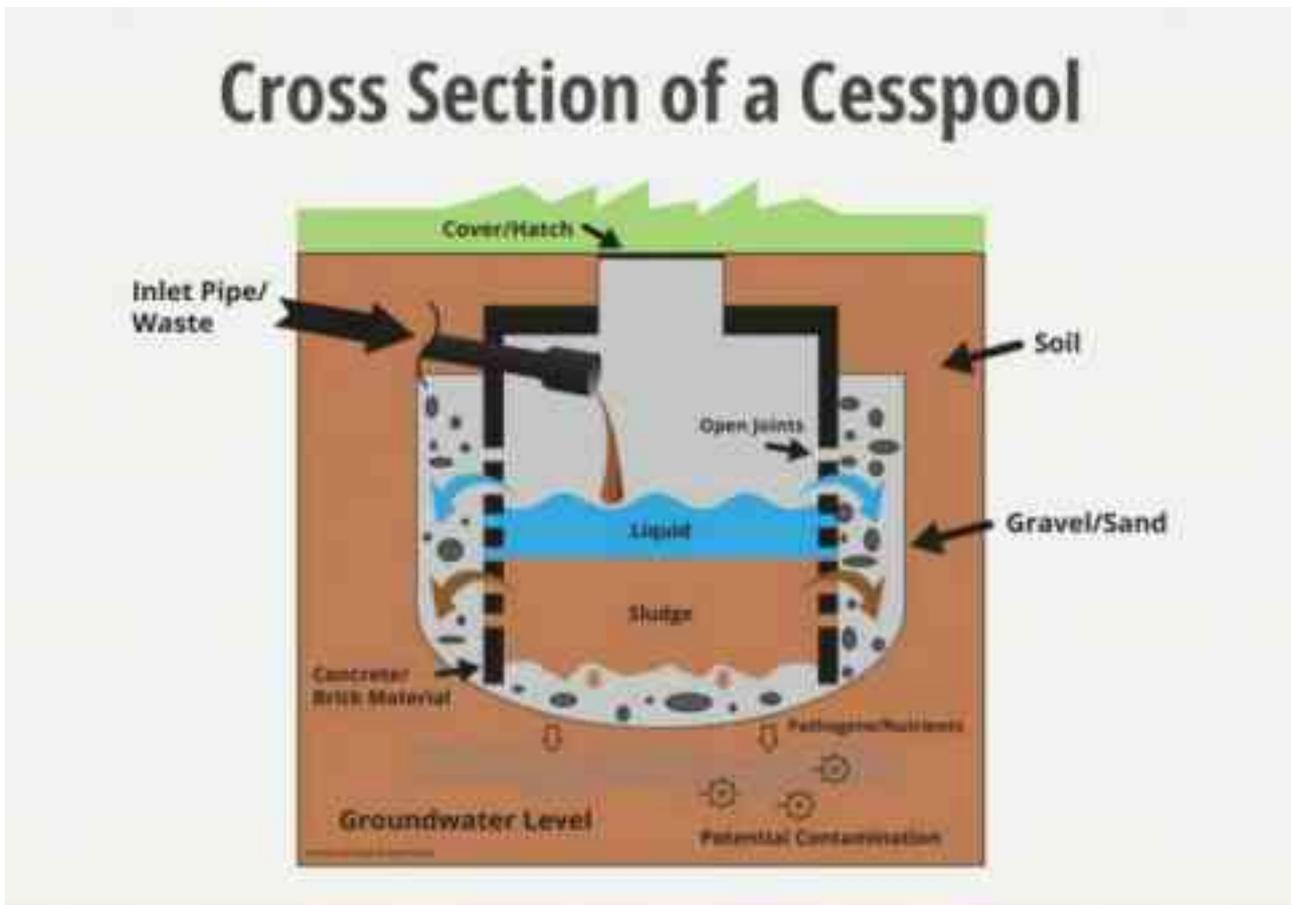
〈 식생이 무성하게 자라있는 제주도 숨골(구좌읍 송당리) 〉

- 이와는 다르게 하와이주에서는 화산분화가 이루어진지 채 100년도 되지 않은 신선한 상태의 화산암, 용암류, 지형, 구조 등을 살펴볼 수 있었고, 제주도에서 관찰된 내용을 토대로 숨골지형의 세부구조, 발달과정과 같은 여러 특징을 확인할 수 있었음
- 특히, 파호이호이 용암류의 팽창과 함몰에 따라 형성되는 공동, 함몰지, 저지대의 특징은 제주도 숨골조사에서 해석하기 난해한 부분으로 남아있었으나, 이번 하와이주 현장답사를 통해 이를 해석할 수 있는 실마리를 찾게되었음
- 따라서 금번 수행된 현장답사의 결과는 제주도 숨골의 지질학적 유형을 분류하는데 근거자료로서의 활용이 가능할 것으로 판단됨
- 숨골에 관한 부분 이외에도, 틈새분출과 같이 현재 제주도에서는 보고되지 않은 지질특성들을 살펴봄으로써 제주도에서의 화산분화 형태 및 화산활동사 또한 다시 한번 재검토 해볼 수 있는 계

기가 되었음

○ 하와이주의 지하수 오염관리 정책에 대한 지속적 교류 필요

- 하와이주에서도 제주도와 마찬가지로 개인하수 배출로 인한 지하수 오염에 직면해 있으며, 이를 해결하기 위한 개선책을 마련해 나가고 있음
- 특히, Cesspool로 칭해지는 Puka 구조를 통해 오수를 배출하는 웅덩이는 하와이주에서 수질오염의 주범 중 하나로 인식하고 있으며, 이를 통해 발생하는 지하수 수질오염 문제를 방지하기 위한 제도가 수립되어지고 있는 실정



〈 Cesspool로 인해 지하수가 오염되는 모습을 나타낸 모식도 〉

- 제주도에서는 1994년 '숨골에 의한 지하수 오염방지 종합대책'을 통해 숨골로 인해 발생하는 지하수 오염을 방지하기 위한 사업이 진행된 바 있으나, 개선을 위한 방법론적 문제로 인해 지속되지 못한 경우가 있었음
- 또한, 아직까지도 숨골에 대한 명확한 정의와 분포현황 등이 확립·규명되지 않은 상태이기 때문에 현 단계에서는 정책적 접근이 불가하다 할 수 있음
- 따라서 하와이주에서 수행하였던 Puka와 Cesspool의 정의와 분포를 정립하기 위한 제반 과정을 살펴볼 필요성이 있으며, 행정적 제도적으로 어떠한 방법을 통해 개선을 해 나아가는지에 대한 벤치마킹이 필요할 것으로 판단됨

- 이를 위해서는 단순 이벤트성의 상호 교류가 아닌 확고한 네트워크 구축을 통한 지속적인 교류와 협력체계가 마련되어야 하며, 현안 문제에 대한 학술교류 세미나, 기술교류, 현장답사 등도 함께 이루어져야 할 것으로 생각됨