
카나리제도 라팔마섬(La Palma Island)

현장답사 결과 보고

2025. 08.

현장답사 결과 요약

- ▣ 대상지 : 스페인 카나리제도 라팔마섬
- ▣ 기간 : 2025. 8. 4 ~ 8. 13(8박 10일, 실제 답사 3박 4일)
- ▣ 참석자 : 제주연구원 제주지하수연구센터 연구진 3인

1. 답사 목적

- 라팔마섬 화산지대 현장 지질답사를 통해 「제주도 실태조사를 위한 기초연구(2023년)」에서 제시된 숨골 유형 분류체계 보완
- 라팔마 수자원위원회 제도(갤러리 기반 지하수 개발, EU 지침 기반 관리 등)를 조사하여 제주의 수자원 보전·관리 정책 마련에 활용

2. 라팔마섬 개관

- 지리·지질
 - 면적 708km², 인구 8.4만 명, 2021년 화산분화로 새로운 용암삼각주 형성, 다양한 화산체와 함몰·협곡지형 발달
- 수문환경
 - 연평균 강수량 643~677mm로 제주(2,000mm↑)의 1/3 수준, 침투율 약 31%
→ 연간 1.5억m³ 지하수 함양(제주의 1/4 수준)
- 수자원 이용 특성
 - 갤러리(수평터널) 166개, 지하수 이용량의 80% 이상 차지
 - 우물(관정) 90개소 개발되었으나 염분·산성화 문제로 활용 제한
 - 용천수 230개 존재하나 이용 가치는 과거 대비 감소
- 보전·관리 제도
 - EU 물관리 지침에 따른 보호구역(식수원, 수욕장, 질산염 민감지역, 생태서식지 등 8종) 지정·운영

3. 답사 주요 활동

- 라팔마섬 수자원위원회 간담회(라팔마와 제주도의 수자원 관리 현황, 정책, 문제점 공유)
 - 라팔마는 단일 대수층 및 마그마 암맥구조에 기반한 갤러리(수평취수터널) 중심의 지하수 개발이 이루어지고, 농업(특히 바나나 재배)에 물 수요가 집중
 - 최근 지하수위 약 30% 하강, 일부 산성화 발생, 기후변화 등이 주요 이슈로 부각되며, 이에 대응하기 위해 하수재처리수의 재이용 및 해수담수화 정책 추진을 계획
- 주요 수자원 시설 답사
 - 갤러리(수평터널), 전통 집수시설, 저수지 등 수자원 인프라 현황 조사
- 지질답사
 - 콤브레 베이하(2021년 분화지) : 신선한 화산지대 내 제주 숨골과 유사한 지형·구조 확인
 - 테네기아(1971년 분화지) : 시간 경과에 따른 풍화 및 식생 생장에 따른 투수성 지질 구조의 변화 관찰

4. 시사점

- 지하수 자원 보전 관리 강화 필요
 - 라팔마의 사례처럼 제주 역시 지하수 고갈·염분화 가능성 상존함에 따라 점적관수 확대, 재이용수 활용, 해수담수화 기술 도입 검토 필요
- 제주 숨골 연구의 심화 및 기준 개선
 - 라팔마의 복합 화산지형 사례를 통해 기존 숨골 분류체계의 해석 기준을 보완하고, 곳자왈 지역에 대한 숨골 지정 기준 개선방안 마련 필요
- 통합적 관리체계 필요
 - 라팔마는 수자원·생태·연안환경을 통합한 수문계획(2021~2027)을 시행 중
 - 제주 또한 지하수 중심 관리에서 벗어나 수자원과 생태·연안환경을 아우르는 통합적 관리체계 구축 필요

목 차

I. 답사 개요	5
1. 배경 및 목적	5
2. 기간	5
3. 대상국가 및 방문지	5
4. 여행자 인적사항	6
5. 주요 일정	6
II. 지역 개관	6
1. 라팔마섬의 지리적 특성	6
2. 라팔마섬의 수리지질 특성	9
3. 라팔마섬 보호구역 지정 현황	20
4. 라팔마섬 환경 목표	25
5. 용수공급 및 수도비용 관련	28
6. 환경목표 달성을 위한 대책 및 예산	30
III. 라팔마 수자원 위원회 방문	38
1. 회의 개요	38
2. 회의 주요 논의 결과	38
IV. 라팔마 주요 수자원 시설 방문	46
1. 지하수 취수용 수평 터널	46
2. 저수지 및 협곡수로	47
3. 전통적 지하수 집수시설	48
V. 현장 지질답사	50
1. 라팔마 서부지역	50
2. 라팔마 남부지역	63
VI. 시사점	70
1. 수자원 위원회 회의 및 수자원 시설 방문	70
2. 현장 지질답사	70
VII. 첨부자료	74
1. 라팔마 수자원 위원회 발표자료	74
2. 센터 발표자료	77

1. 배경 및 목적

- 「제주도 실태조사를 위한 기초연구(2023년)」에서는 숨골의 지질학적 특성과 형성 과정을 바탕으로 한 유형 분류체계를 제시하였으며, 이를 기반으로 현재 지하수자원보전지구 1등급 숨골에 대한 정밀 실태조사를 단계적으로 수행하고 있음
- 그러나 2차년도 조사 대상 숨골 중 일부는 암석 풍화가 심하거나 복합적인 지질 구조를 보여 기존 분류체계만으로는 명확한 유형 구분이 어려운 사례가 다수 존재함
- 이에 따라 이러한 복합 지형에 대한 해석 기준을 보완하고, 분류체계의 현장 적용성을 강화하기 위한 과학적·지질학적 비교분석이 요구되고 있음
- 이를 위해, 제주도와 유사한 화산지질 환경을 갖춘 스페인 카나리제도 라팔마섬의 화산 지대를 방문하여 현장 지질답사를 실시하고자 하는데, 특히 라팔마섬은 현무암질 용암류가 발달해 있으며, 화산분화로 형성된 지대 내 숨골과 같은 지형 및 구조(자연오목지, 용암 동굴, 팽창함몰지, 암괴지대 등)의 분포와 형성 과정을 직접 관찰하고, 유형별 지하수 유입 특성을 비교·분석할 수 있는 적합한 연구지로 생각됨
- 아울러 라팔마섬을 포함한 카나리제도는 유네스코 세계지질공원으로 지정될 정도로 지질 유산과 수자원 보전에 대한 제도적 기반이 잘 갖추어져 있는데, 라팔마에서는 갤러리 기반의 지하수 개발, 수자원 보호구역 설정 등 독자적인 수자원 관리 제도를 운영하고 있어, 제주의 수자원 보전·관리정책을 마련하는데 참고할 수 있는 사례가 될 것으로 판단됨

2. 기 간

- 2025년 8월 4일(월) ~ 8월 13일(수) (8박 10일*)
- *이동 소요 시간을 제외한 실제 답사기간은 3박 4일

3. 대상국가 및 방문지

- 대상국가 : 스페인 카나리제도 라팔마섬
- 방 문 지 : 라팔마섬 화산지대, 라팔마섬 수자원위원회, 수평터널(갤러리), 지하수 집수 시설 등

4. 여행자 인적사항

이름	소속	직위
고창성	제주연구원 제주지하수연구센터	전문연구위원
김민철		전문연구위원
현법석		전문연구원

5. 주요 일정

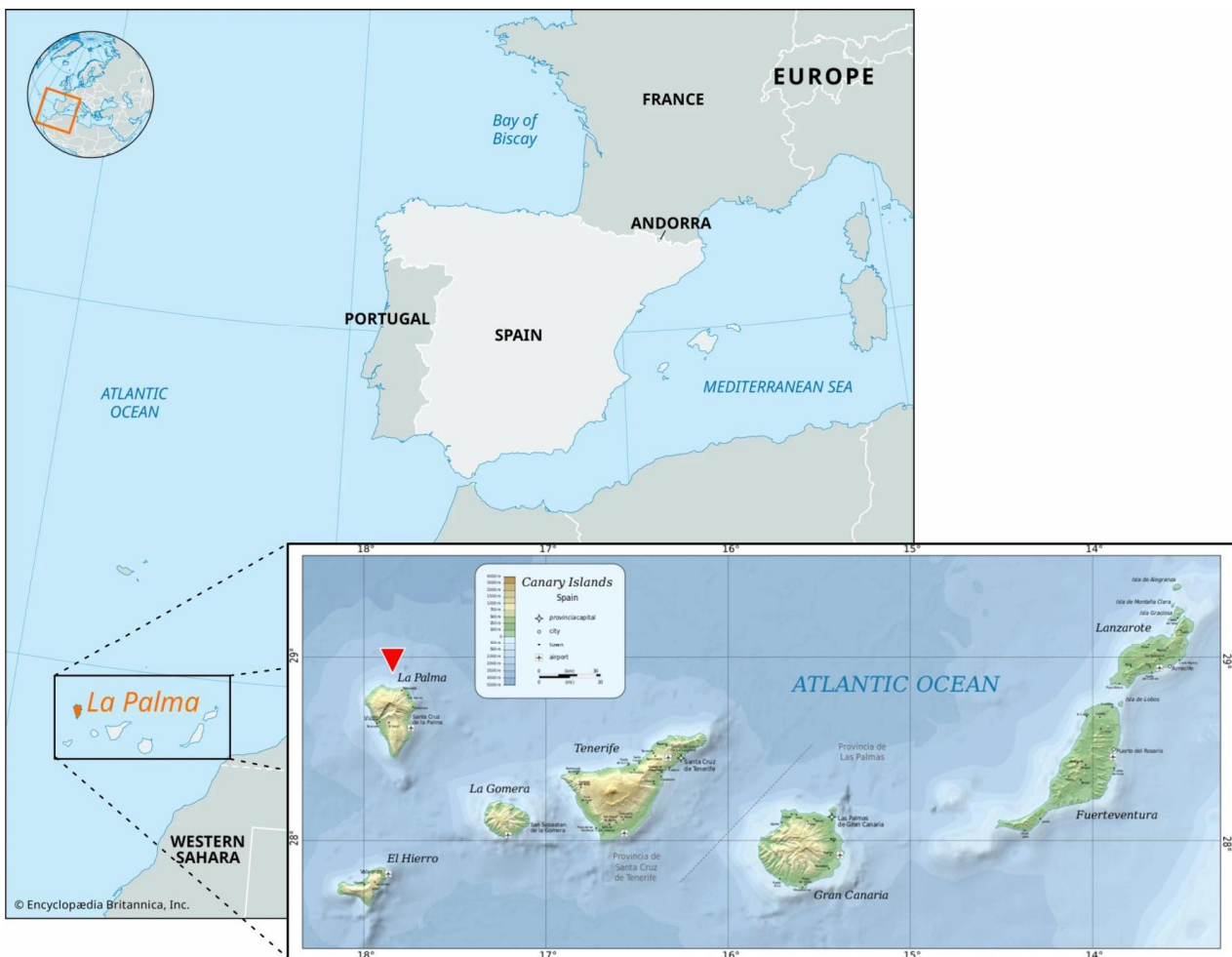
일 자	주요 방문지	주요 접촉인물	업무수행내용
8/7 (목)	라팔마섬 수자원 위원회	- Javier Peña García(위원회 대표) - Elzbieta Skupien Balon(연구원) - Raquel Rodriguez Padilla(현장·시설 관리관) - 조경래(라스팔마스 영사관 서기관)	- 라팔마 수자원 위원회 간담회(제주도와 라팔마의 지하수 보전·관련 정책 소개) - 라팔마 지하수 취수용 수평 터널 방문(Boca Este que) - 전통적 지하수 집수 시설 방문(Costa Breñas) - 라팔마 저수지 방문(La Laguna de Barlovento)
8/8 (금)	쿰브레 베이하(Cum bre Vieja) 화산지대	- Javier Peña García(위원회 대표) - Raquel Rodriguez Padilla(현장·시설 관리관) - Ruben Garcia-Hernandez(카나리아제도 화산연구소 연구원)	- 2021년 화산분화 발생 지역 - 숨골과 유사한 역할을 할 수 있는 신선한 상태의 화산 지형 및 투수성 지질구조 파악
8/9 (토)			
8/10 (일)	테네기아 (Teneguía) 화산지대		- 1971년 화산분화 발생 지역 - 식생의 생장과 풍화에 의해 화산 지형과 투수성 지질구조가 어떻게 변화하는지 그 형태와 양상을 파악

II

지역 개관

1. 라팔마섬의 지리적 특성

- 라팔마섬(La Palma Island)은 북대서양 동부 해역에 선형으로 배열된 스페인령 카나리 제도(Canary Islands)에 속한 화산섬임
※ 카나리제도 : 8개의 섬으로 이루어짐(테네리페, 푸에르테벤투라, 그란카나리아, 라팔마, 란사로테, 라고메라, 엘이예로)
- 섬의 면적은 약 708km²으로 카나리제도에서 4번째로 넓으나, 제주의(1,845km²) 38% 불과하며, 거주 인구도 약 8만 4천 명으로 비교적 규모가 작은 섬에 해당함

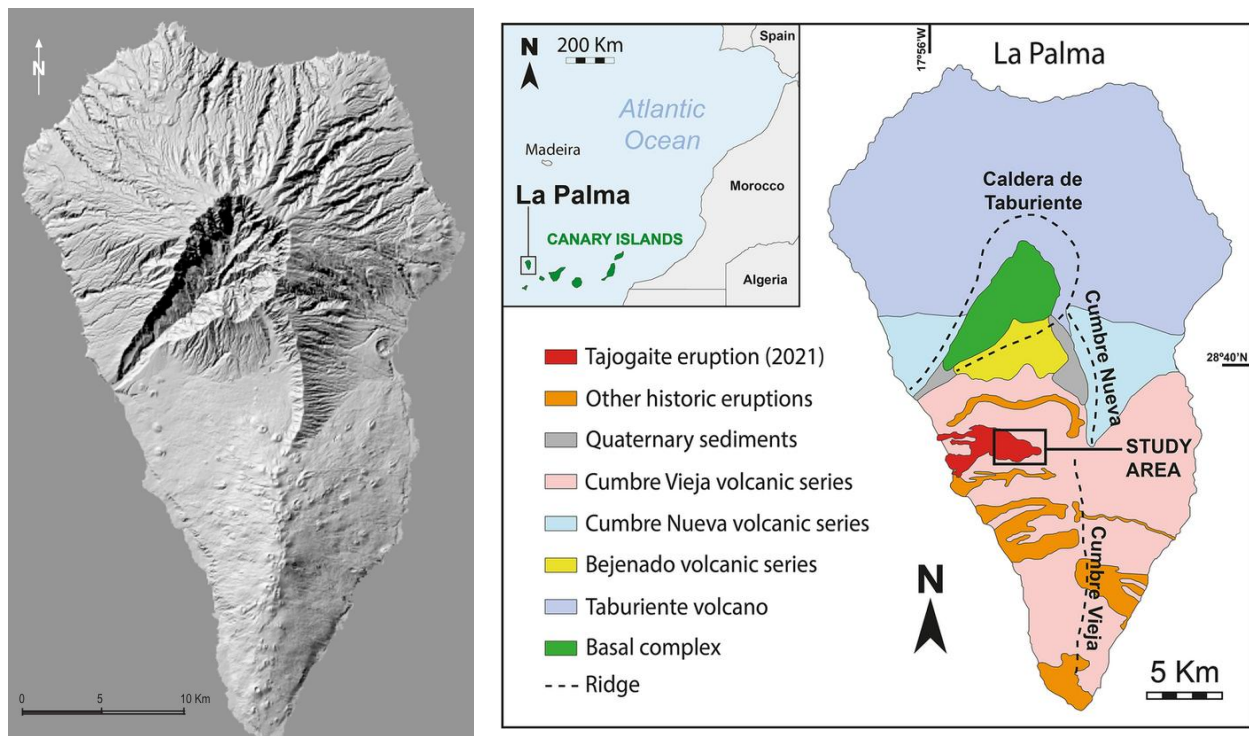


〈 라팔마섬의 지리적 위치(붉은색 화살표)(출처 : Britannica) 〉

〈 카나리제도 주요 섬별 인구 분포(자료 : 카나리제도 통계청) 〉

구분	테네리페	푸에르테 벤투라	그란카나 리아	라팔마	란사로테	라고메라	엘이에로
면적 (km ²)	2,034	1,659	1,560	708	845	369	268
인구수 (명)	965,575	124,152	862,893	84,338	154,530	22,426	11,338

- 상대적으로 규모가 작은 섬임에도 불과하고 그 지형은 매우 복잡하고 극적인 지형을 보이는데, 섬 중앙에는 해발 2,426m의 로케 데 로스무차초스(Roque de los Muchachos)를 포함한 고산지대가 솟아 있어 해안선에서 정점까지의 고도차가 크고 전반적으로 급경사 지형을 이루고 있음
- 섬의 북부에는 직경 약 8km, 깊이 2km 규모의 거대한 함몰 지형인 칼데라 데 타부리에테(Caldera de Taburiente)가 발달해 있으며, 깊은 협곡지형을 이루고 있음



〈 라팔마섬의 음영기복도와 화산체(관련 화산지대) 분포 현황(Pararas-Carayannis, 2002) 〉

- 또한 서쪽으로는 바랑코 데 라스 앙구스티아스(Barranco de las Angustias)와 같은 협곡이 발달하여, 강우 및 지하수 유출의 주요 배수로 역할을 하고 있는 것으로 알려짐
- 한편, 섬의 남부지역에는 쿰브레 베이하(Cumbre Vieja) 화산이 남-북 방향으로 길게 형성되어 있는데, 이는 라팔마의 주요 활화산지대로서 1949년, 1971년, 2021년에 걸쳐

반복적으로 분화를 하였음

- 이 밖에도 라 데세아다(La Deseada) 화산, 베헤나도(Bejenado) 화산 등 순상화산, 성층화산, 분석구 유형의 8개 주요 화산체가 존재하고 있음
- 특히 2021년 화산분화는 85일간 지속돼 용암류가 대규모로 분출되었고, 서쪽 해안 일대에 새로운 용암삼각주(lava delta)를 만들어 지형과 해안선이 크게 변화하였음
- 이처럼 라팔마는 다양한 화산분화에 의해 다단계적으로 화산지형·구조가 형성되어 있으며, 화산분화구, 용암대지, 용암동굴, 팽창·함몰지 등 다양한 화산지형 요소가 공존해 있음

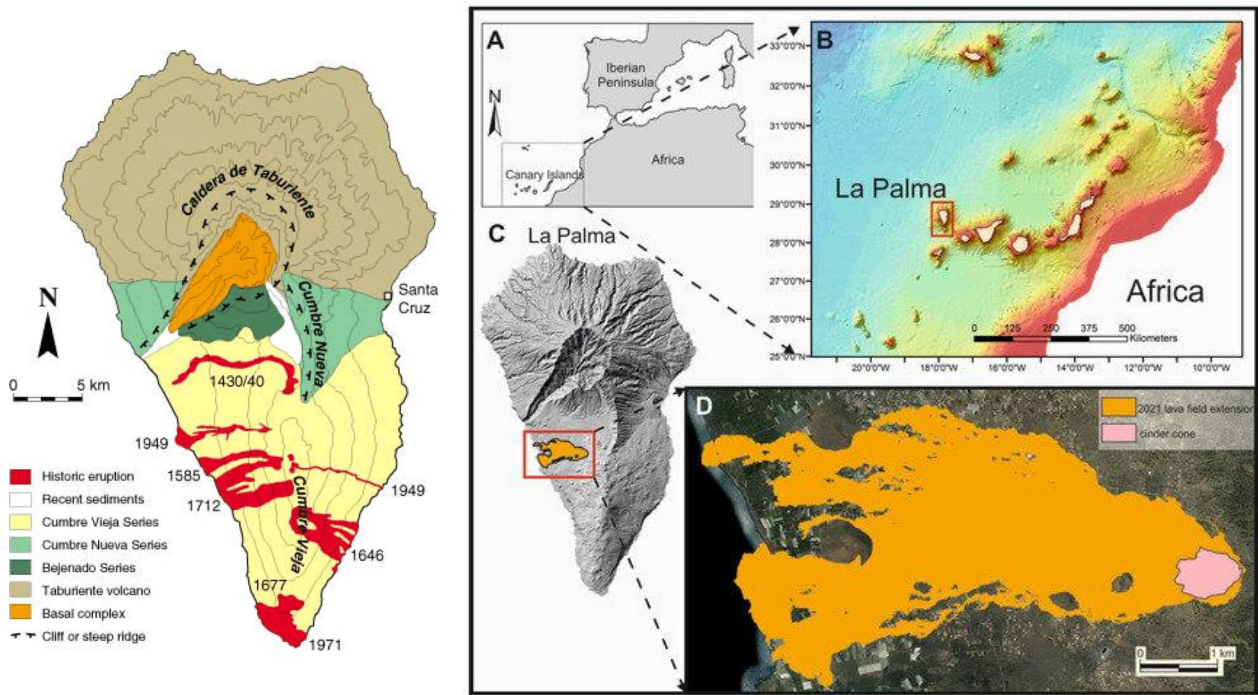
〈 라팔마섬의 화산 분포현황 및 특징(자료 : Instituto Geográfico Nacional (IGN, Spain)) 〉

주요 화산체 명칭	높이(m)	위치	화산 유형
라 데세아다(La Deseada)	1,949	남부 중앙(쿰브레 베이하 능선 최고점)	순상화산
베헤나도(Bejenado)	1,854	북서부 남쪽(칼데라 데 타부리엔테 남쪽 경계)	성층화산
오요 네그로(Hoyo Negro)	1,887	남부(쿰브레 베이하 중앙부)	분석구
엘 두라스네로(El Duraznero)	1,850	남부(쿰브레 베이하 능선)	분석구
산 안토니오(San Antonio)	657	최남단(푸엔칼리엔테 지역)	분석구
테네기아(Teeguia)	428	최남단(푸엔칼리엔테, 해안 근처)	분석구
엘차르코(El Charco)	1,850	남서부(쿰브레 베이하 북단)	분석구
타호가이테(Tajogaite)	1,120	남서부(엘 파소 남쪽, 카베사 데 바카 부근)	분석구

2. 라팔마섬의 수리지질 특성

1) 지질 특성

- 카나리제도는 대서양 해양판(ocenic plate)에 형성된 열점(hotspot)을 통해 형성된 화산섬으로서, 태평양에 위치한 미국 하와이섬과 그 기원이 동일함
- 즉, 고정된 열점과는 다르게 해양판이 이동함에 따라 열점 상부에는 새로운 화산섬이 계속해서 만들어지게 되고 결과적으로 선상의 화산제도를 이루게 됨
- 현재 형성 연대가 가장 오래된 섬은 제도의 동쪽에 위치한 푸에르테벤투라 섬으로서, 그 연대는 약 20Ma(백만년 단위)으로 알려져 있고 가장 젊은 섬은 서쪽의 엘이에로로 약 1.1Ma로 보고되었음
- 라팔마섬은 약 4Ma에 형성된 것으로 카나리제도의 섬 중 2번째로 젊은 연대를 가지며, 오늘날에도 화산분화가 발생하는 지질학적 가치가 매우 큰 화산섬이라 할 수 있음



〈 라팔마섬의 용암류 연대별 분포도(좌) 및 2021년 화산분화(우) (Miguel et al., 2024) 〉

- 가장 최근의 화산분화는 2021년 섬의 남서부지역에 위치한 엘 파소(El Paso)시 부근 쿵브레 베이하 능선을 따라 용암이 85일간 분출한 바 있으며, 이는 라팔마섬에서 역사상 최장 기간의 분출로 기록되었고, 해당 화산분화로 인해 지역에 타호가이테(Tajogatie, ‘산의 갈라진 틈’ 또는 ‘갈라진 대지’를 의미) 화산과 더불어 해안으로 흘러간 용암에 의해 육지부가 새롭게 형성됨



〈 2021년 분출된 용암류에 의해 해안지역이 확장되는 모습(출처 : 미국지질조사소(USGS)) 〉

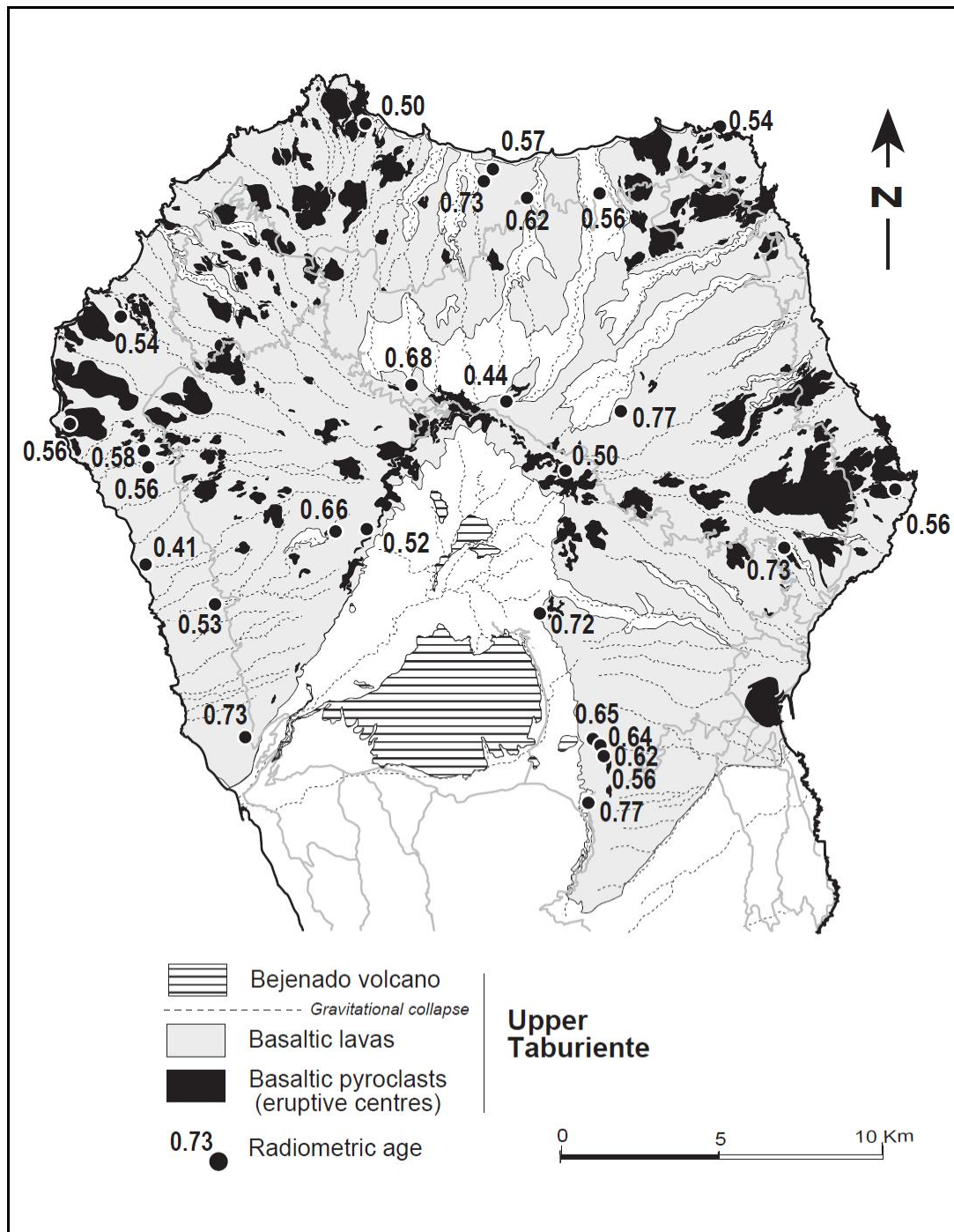
- 이 밖에도, 15세기 이후부터의 화산분화 기록이 남아 있는데 최초로 기록된 분출은 1585년 엘파소 북부 타부리엔테 칼데라(Taburiente caldera) 경계 남쪽에서 이루어진 분화임
- 이후로도 1646년, 1677년, 1678년, 1712년, 1949년, 1971년 등 다수의 화산분화에 대한 기록들이 남아 있음

〈 라팔마섬의 주요 화산분화 역사 요약(Carracedo et al., 2001) 〉

시기(연대)	주요 화산분화	비고
약 300~400만 년 전	해저 화산 기원의 베개용암(pillow lava), 유리쇄설성각력암(hyaloclastite)을 비롯한 조면암 돔 등 형성	바다위로 용기해 육지가 형성
약 120~177만 년 전	가라피아(Garafia) 순상화산 형성	이후 120만 년 경에 남서측 사면이 붕괴
약 89~120만 년 전	타부리엔테(Taburiente) 화산 형성 및 전 단계 붕괴분지를 용암류로 채움	분지를 충전한 용암류가 고원을 형성
약 56~89만 년 전	타부리엔테 화산 후반기 : 균열대 발달(북-서, 북-동, 남-북 방향)	남쪽으로 화산분화 중심지가 이동
약 56만 년 전	쿰브레 누에바(Cumbre Nueva) 균열대 과성장 → 서측 사면 대붕괴 → 아리다네(Valle de Aridane) 계곡 형성	칼데라(Caldera) 형성의 시작
약 40~56만 년 전	베헤나도(Bejenado) 화산 형성 및 붕괴분지 내부에 성층화산 형성	-
약 12.3만 년 전 ~ 현재	쿰브레 베이하 화산(Cumbre Vieja) 활동 시작 → 현재까지 비주기 적으로 계속 분화 됨	1646년, 1677년, 1678년, 1712년, 1949년, 1971년, 2021년 화산분화 기록

- 라팔마 섬의 화산 구조는 주로 알칼리 현무암(alkali basalt) 계열의 암석으로 이루어져 있으며, 섬의 대부분을 차지하는데, 주요 화산체인 가라피아(Garafia), 타부리엔테(Taburiente), 베헤나도(Bejenado), 쿰브레 베이하(Cumbre Vieja) 화산에서 모두 발견됨
- 이 현무암은 어두운 색을 띠며, 주요 구성 광물은 감람석, 휘석, 그리고 사장석으로 알려져 있음

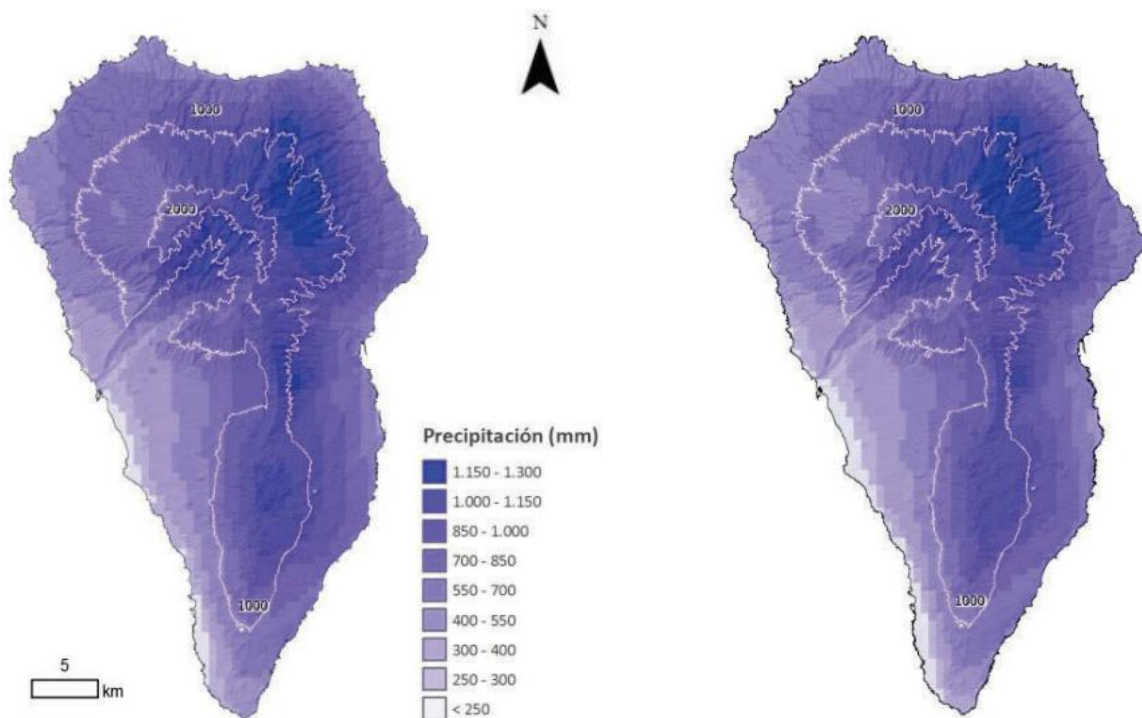
- 특히, 가라피아 화산에서는 유동성이 높은 파호이호이(pahoehoe) 용암 형태로 분출되었으며, 화산체의 수평적·수직적 성장에 크게 기여하였음
- 또한 타부리엔테 화산에서는 수평적으로 쌓인 현무암층이 중심부 고원을 형성하고 있으며, 쿼브레 베이아 화산에서도 주로 현무암질 용암이 반복적으로 분출되어 화산능을 형성하고 있음
- 한편, 아아(Aa) 용암류의 경우에는 주로 쿼브레 베이아 화산이 위치한 남부지역에 집중되어 있음



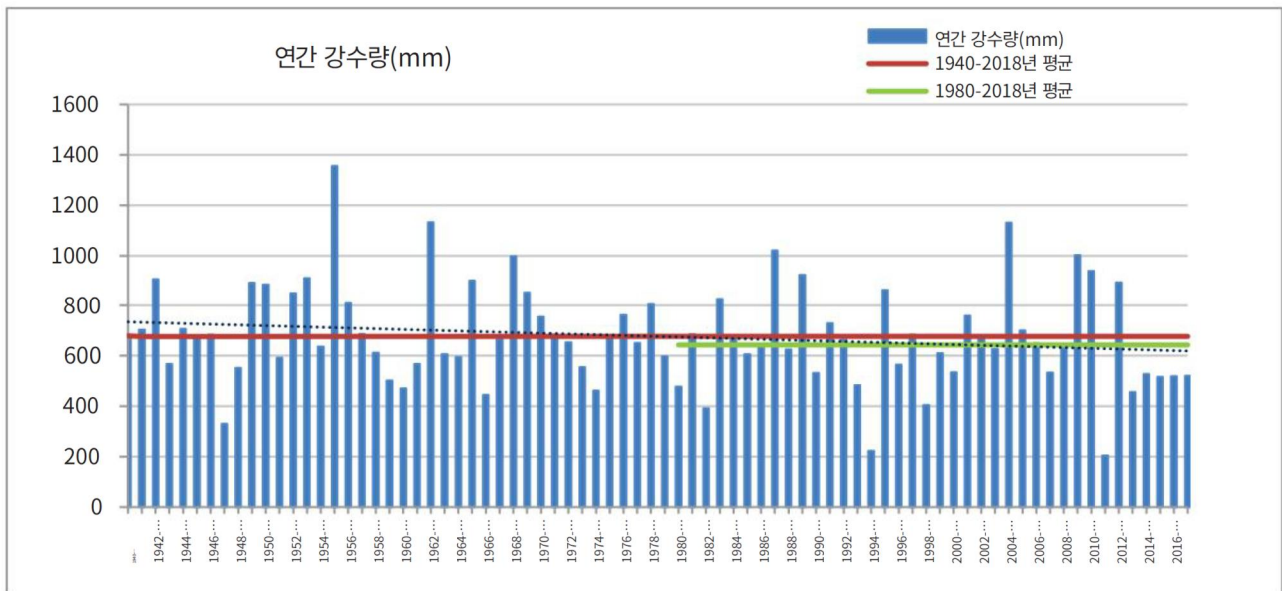
〈 상부 타부리엔테 및 베히나도 화산의 암석 분포도 〉

2) 수리 특성

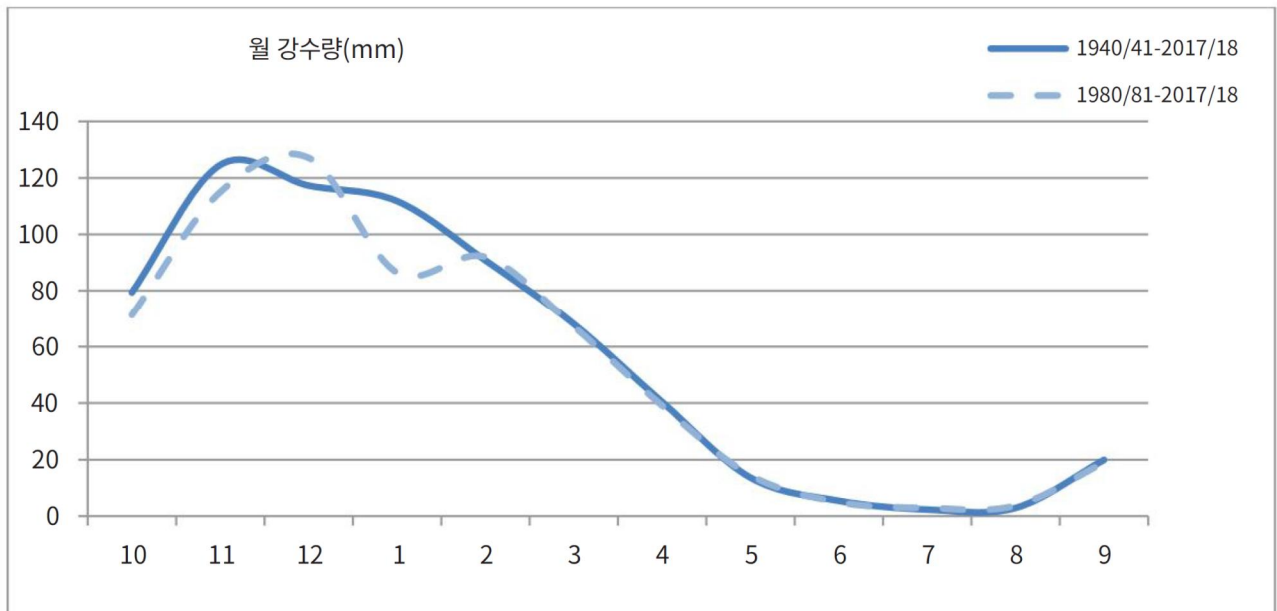
- 라팔마 2021~2027 수문계획 보고서에 따르면, 라팔마섬의 1940~2017년까지의 연평균 강우량은 677mm로 확인됨(1980~2017년까지는 643mm로 약간 적어짐)
- 이러한 강우량 수치는 제주가 연평균 2,000mm 이상인 것을 감안할 때 상당히 적은 것으로 보여지나, 두 섬의 면적차이(제주가 2.6배 더 넓음)를 감안하면 다소 적은 편이라 할 수 있음
- 연평균 강우량의 공간적 분포는 지역마다 차이를 보이는데, 남서부(푸엔칼리엔테, 푸에르토 나오스 일대 지역)에서는 300m 이하로 강우량이 적은 반면, 북동부로 갈수록 서서히 늘어나 해발 600~1,200m의 고지대(로스 티로스 산림지, Bosque de Los Tilos)에서는 강우량이 약 1,300mm에 달함
- 이러한 지역간의 강우량 차이는 북동무역풍과 높은 화산지형이 만든 전형적인 지형성 강우현상으로 알려져 있음
- 장기 관측 데이터를 통해 파악된 월별 평균 강우량 변화를 살펴보면, 적게는 10mm 이하 많게는 130mm까지 비가 내리며 우기는 10월에서 대략 4월까지 이어지고 5월부터는 20mm 이하로 강우량이 줄어듦



〈 라팔마섬의 1940~2017년(좌), 1980~2017년(우) 평균 강우량 분포도 〉

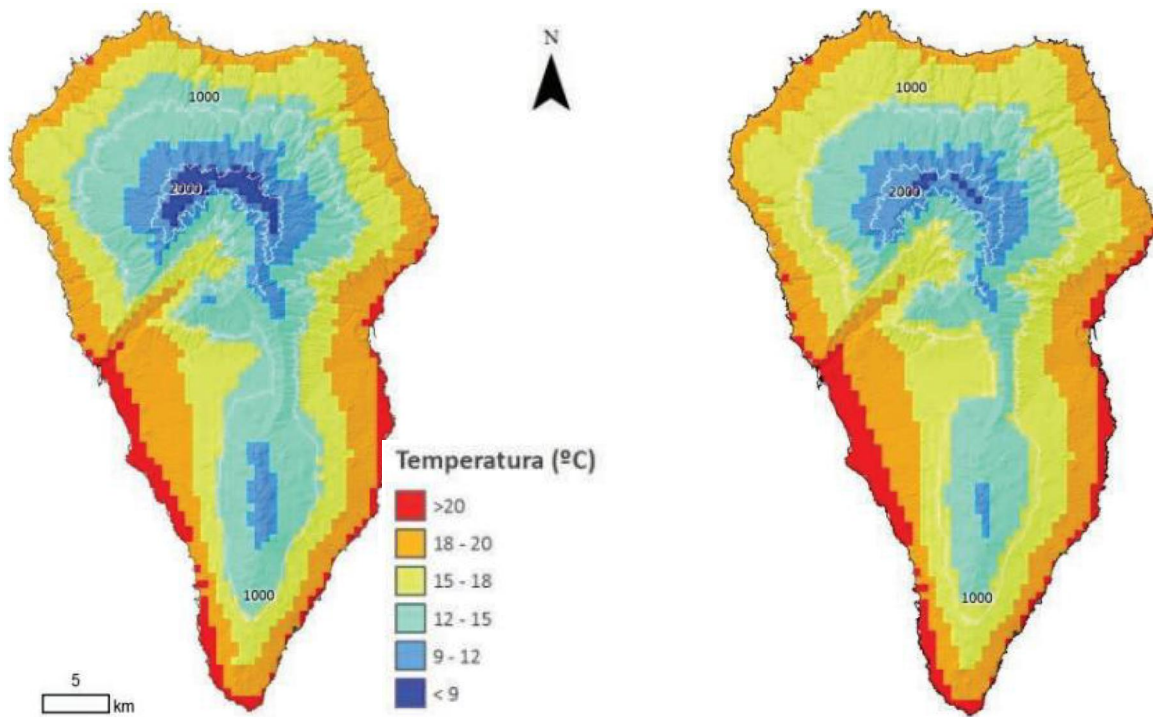


〈 라팔마섬의 연간 및 연평균 강수량 변화 차트 〉

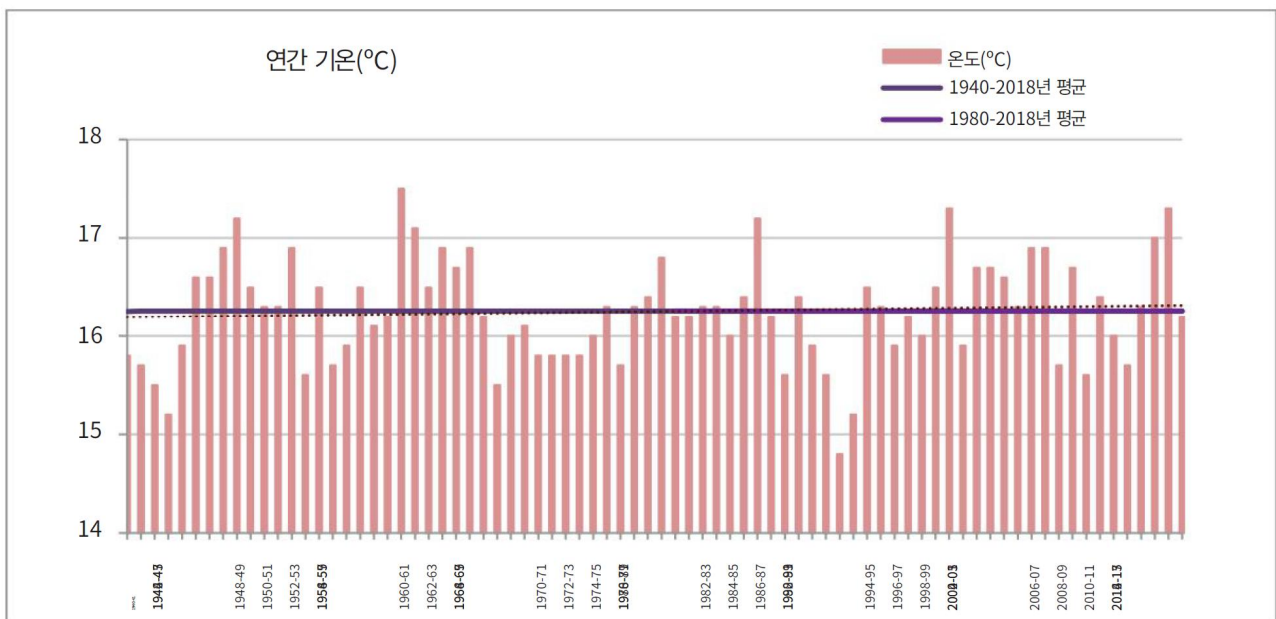


〈 라팔마섬의 월평균 강수량 변화 그래프 〉

- 섬의 기온은 연평균 16.3℃로 장기 관측(1940~2017년) 자료와 상대적으로 단기 (1980~2017년) 자료간의 유의미한 차이를 보이지 않음
- 공간적 분포는 전형적인 지대 표고에 따른 차이를 보이며, 해안저지대에서는 평균 20℃ 이상으로 나타나는 한편, 칼데라가 위치한 고지대에서는 9℃ 이하의 기온 분포를 나타냄



〈 라팔마섬의 1940~2017년(좌), 1980~2017년(우) 평균 기온 분포도 〉



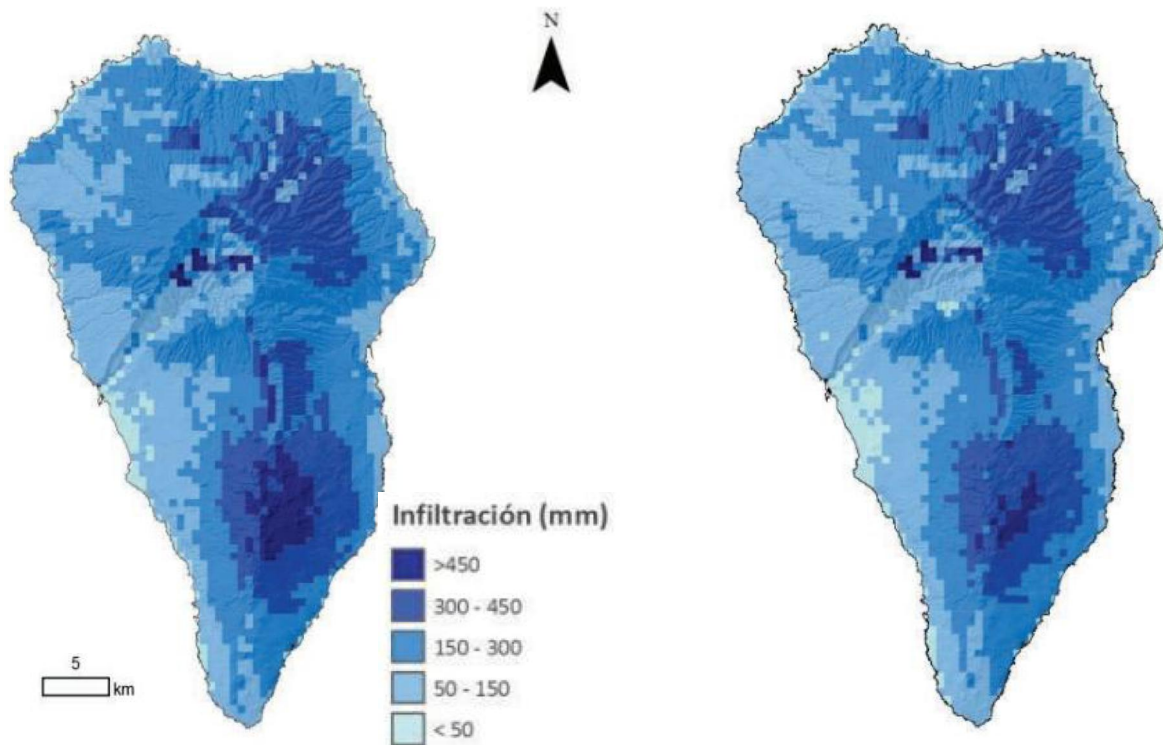
〈 라팔마섬의 연간 및 연평균 기온변화 차트 〉

3) 물수지 분석

- 물수지는 지하수 함양량을 산정하는 전통적인 방법으로, 강우량에 증발산량(식물의 증산 작용 및 태양열에 의한 증발)과 지표 유출량(지표를 따라 해양으로 빠져나가는 양)을 제외한 나머지를 지하수 함양량으로 산정하는 방식임
- 라팔마섬에서는 함양량 대신 침투량으로 장기 및 단기 관측자료 기반의 물수지를 각각

분석하였는데, 장기 평균 강우량은 앞서 언급된 약 667mm/y이며, 증발산량은 308.5mm/y, 평균 지표 유출량 154.2mm/y로 침투량은 213.4mm/y로 계산됨(평균 강우량 대비 31.5%)

- 한편, 단기 관측자료에서는 평균 강우량 643.1mm/y, 평균 증발산량 291.9mm/y, 평균 지표 유출량이 151.2mm/y이고, 침투량이 199.3mm/y로 평균 강우량 대비 약 31.0%로 산정됨
- 해당 수치는 라팔마의 면적을 고려하지 않은 것으로서, 708km²의 섬 면적을 침투량과 곱하면 장기-1억 5,108만m³, 단기-1억 4,110만m³으로 환산됨
- 제주의 경우 제주특별자치도 통합물관리 기본계획(2023~2032)에서 지하수 함양량이 총 강우량 대비 43.5%인 17억 5,800만m³으로 보고하였으며, 이 수치는 라팔마섬의 10배 이상에 달함
- 제주의 면적(1,850km²)이 라팔마섬에 비해 2.6배인 것을 감안해도 지하수 함양량이 4배가 넘는 차이를 보임



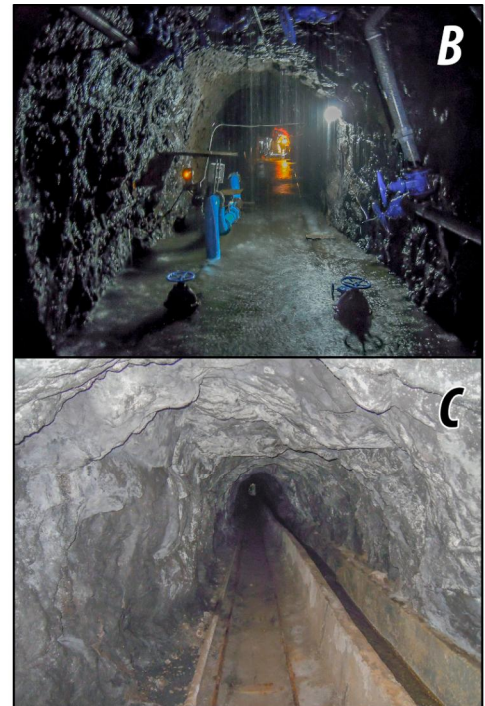
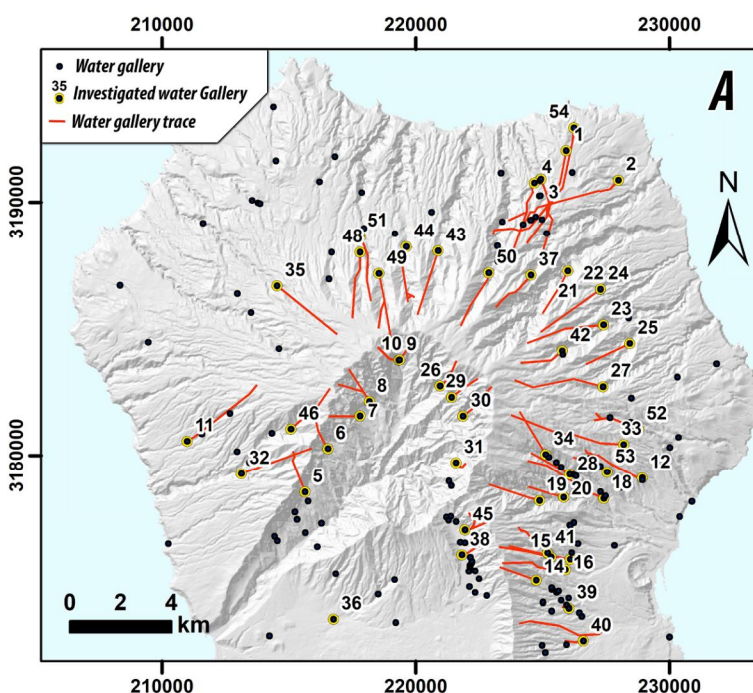
〈 라팔마섬의 1940~2017년(좌), 1980~2017년(우) 강우 침투율 분포도 〉

〈 라팔마섬의 물수지 분석 결과 요약 〉

구분	평균 강우량 (mm/y)	평균 증발산량 (mm/y)	평균 지표 유출량 (mm/y)	평균 침투량 (mm/y)	섬 면적 (km ²)
장기 관측자료 (1940~2017)	676.7	308.5	154.2	213.4	708
단기 관측자료 (1980~2017)	643.1	291.9	151.2	199.3	

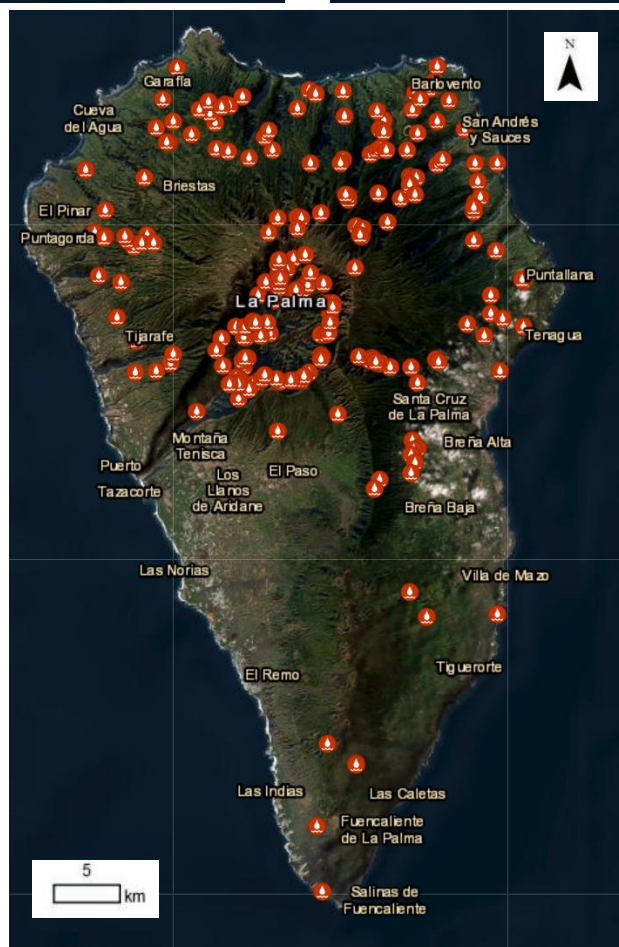
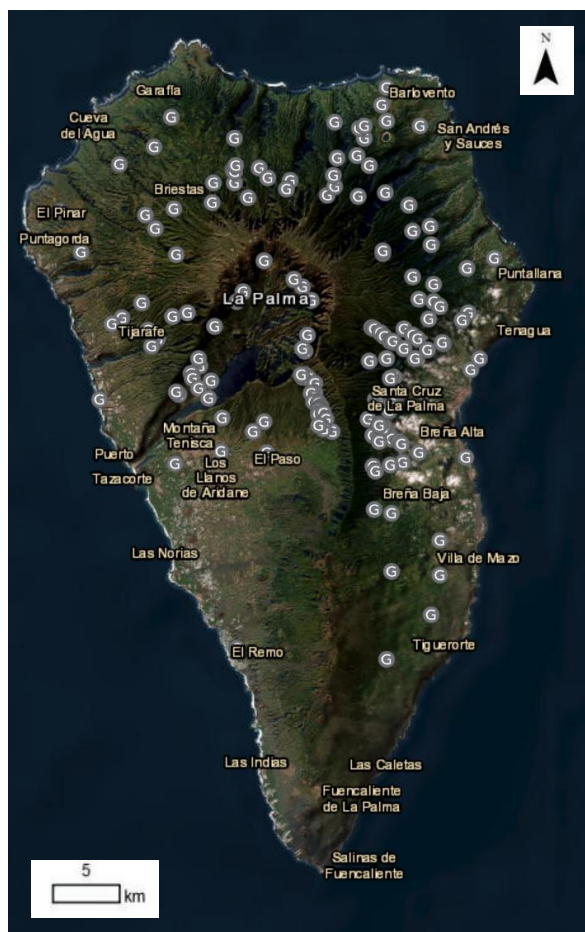
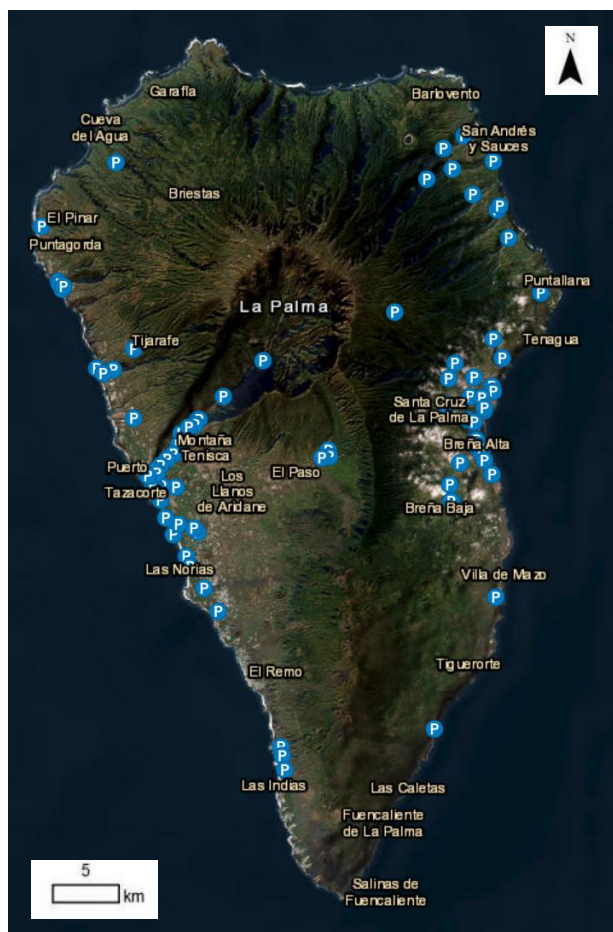
4) 지하수 이용 특성

- 라팔마섬은 과거 화산분화에 따라 만들어진 암맥들이 섬 전반에 걸쳐 형성되어 있으며, 이는 지하수를 국부적으로 가두어두는 장벽의 역할을 함
- 따라서 지하수의 수평적 유동이 원활하지 않고 암맥-암맥 사이에 가둬진 지하수간 연결성이 다소 떨어지는 양상을 나타냄
- 따라서 제주와 같이 수직적으로 굴착된 우물(관정)을 통해 지하수를 취수하는 방법과 함께, 갤러리(Gallery)라 불리는 수평 터널을 뚫고 그 안으로 떨어지는 지하수를 끌어다 사용하는 독특한 방식의 지하수 이용 방식을 가짐
- 현재 섬에 개발된 갤러리 수는 약 166개로 주로 해발 800m 이상의 고지대에 개발되어 있으며, 전체 지하수 이용량의 약 80% 이상을 차지함



〈 라팔마섬에 개발된 갤러리(검정색 원)와 연장 터널 분포(붉은색 실선) 및 갤러리 내부 모습 〉

- 한편 수직 지하수 관정은 총 90개소가 개발되어 있으며, 대개 중·저지대 또는 갯터리 개발이 어려운 지역에 위치함
- 갯터리 개발이 용이하지 않은 까닭은, 지하수위가 낮게 형성되어 있거나 경사가 완만하고 해발고도가 낮아 갯터리를 개발해도 중력 유출이 어렵고, 지하수의 함양량도 적어 효율이 낮기 때문임
- 지하수 외에도 라팔마섬에는 제주와 같이 용천수가 분포해 있으며, 그 수는 230개에 달함
- 과거 갯터리 개발이 시작된 1890년대 이전에는 제주와 마찬가지로 지표수의 발달이 미약한 관계로 용수의 대부분을 용천수나 빗물에 의존하였음
- 그러나, 오늘날에는 갯터리와 수직 지하수 관정을 활용한 지하수 이용에 치우쳐 있으며, 용천수는 수자원으로서의 이용 가치가 많이 퇴색된 상태임



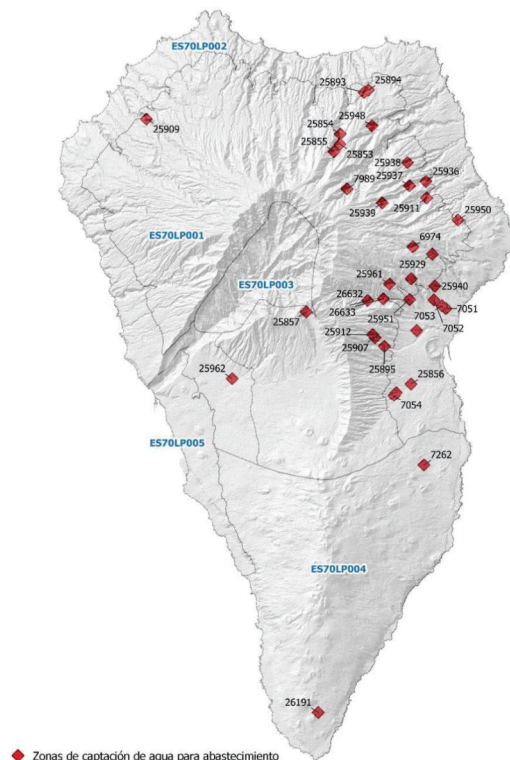
〈 갤러리(좌상, 파란색 원), 수직 지하수 관정 분포도(우상, 회색 원), 용천수(하) 분포 현황 〉

3. 라팔마섬 보호구역 지정 현황

- 보호구역은 수자원 또는 수생 생태계 보호를 위해 EU 물관리 지침(Directiva Marco del Agua, DMA), 스페인 국가법령(Texto Refundido de la Ley de Aguas, RTLA), 카나리아 수문계획 지침(Instrucción de Planificación Hidrológica de Canarias, IPHC)법령에 따라 지정됨
- 라팔마섬에서는 보호구역을 위 법령에 따라 보호구역 목록 등록부(Registro de Zonas Protegidas, RZP)에 등록하고 있으며, 총 11가지 유형의 보호구역으로 구분하고 있으나, 라팔마섬에 지정된 보호구역은 8가지로 확인됨

1) 식수원 보호구역 (Zonas de captación de agua para abastecimiento)

- 이 보호구역은 지하수 또는 해수를 통해 취수되는 식수원을 보호하기 위한 것으로, 하루 평균 10m³ 이상을 공급하거나 50인 이상에게 음용수를 제공하는 취수점이 대상임
- 이러한 지역은 수질오염으로부터의 보호를 통해 정수 비용을 줄이고, 장기적으로 안정적인 식수 확보를 위한 예방적 목적을 가짐
- 해당 보호구역은 EU 물관리 지침(DMA) 제7조, 스페인 수자원법 통합령(TRLA) 제99 bis조, 및 카나리아 수문계획 지침(IPHC) 4.1조에 의해 근거를 두고, 관리 주체는 ‘라팔마 수자원위원회(Consejo Insular de Aguas de La Palma)’임
- 취수지의 위치 및 보호 반경, 수량 정보는 국가 식수정보시스템(SINAC)과 연계되고 있으며, 라팔마 섬에는 총 36개의 식수원 보호구역이 지정되어 있음



〈 라팔마섬 식수원 보호구역 〉

2) 미래 식수원 보호구역 (Zonas de futura captación de agua para abastecimiento)

- 미래 식수원 보호구역은 현재는 이용되지 않지만 장래에 식수원으로 개발될 가능성이 있는 지역에 대해 사전 보호를 위해 설정하며, 이는 인구 증가, 기후 변화, 수자원 재배치 등의 요인을 고려하여 확보된 미래 자원에 대한 예비적 조치임
- 법적 근거는 식수원 보호구역과 동일하게 DMA 제7조, TRLA 제99 bis조, IPHC 4.2조이며, 실질적 관리는 라팔마 수자원위원회가 담당하게 되어 있음
- 그러나 현재 라팔마 섬 내에서 별도로 지정된 미래 보호구역은 없는 것으로 파악됨

3) 경제적 수생생물 보호구역 (Zonas de protección de especies acuáticas de valor económico)

- 이 구역은 상업적·양식업적 가치가 있는 어종 또는 패류의 생태적 요구조건을 만족시키기 위한 수역을 보호하기 위한 것으로 주로 담수 또는 연안해역이 해당되며, 어업의 지속가능성 보장, 종 다양성 유지 등의 목적이 있음
- 유럽 법령 2006/44/EC(수산물 수질 보전 지침)과 스페인 국내법 RD 640/2006, Orden APM/392/2017, 카나리아 자치법 Ley 15/2019 등에 근거하고, 관리기관은 카나리아 농업·수산·식량자주청이며, 어업 관리권한을 가진 부서가 수행함
- 라팔마의 경우 해당 보호구역이 지정되지 않은 것으로 파악됨

4) 수욕장 보호구역 (Zonas de uso recreativo - Aguas de baño)

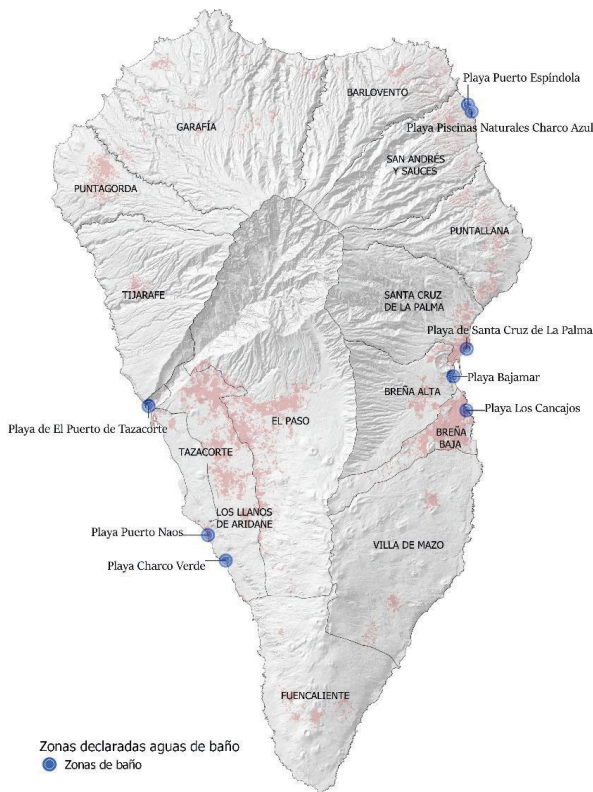
- 수욕장 보호구역은 공중 위생과 관광객 건강 보호를 위한 수질관리가 필요한 해변, 천연 풀장, 강변 수욕장 등을 대상으로 해당 지역은 정기적인 수질 모니터링과 오염원 통제가 요구되며, 사람의 접촉이 빈번한 수역 보호를 목적으로 함
- 관련 법령은 EU 지침 2006/7/EC(수욕장 수질 지침), 스페인 RD 1341/2007(수질 기준 관리법) 및 RD 876/2014(연안 규제법)에 따르며, 관리기관은 ‘카나리아 공공보건국(Consejería de Sanidad)’임
- 라팔마 섬 내에는 7개의 수욕장 보호구역이 등록되어 있음

5) 질산염 민감지역 (Zonas vulnerables)

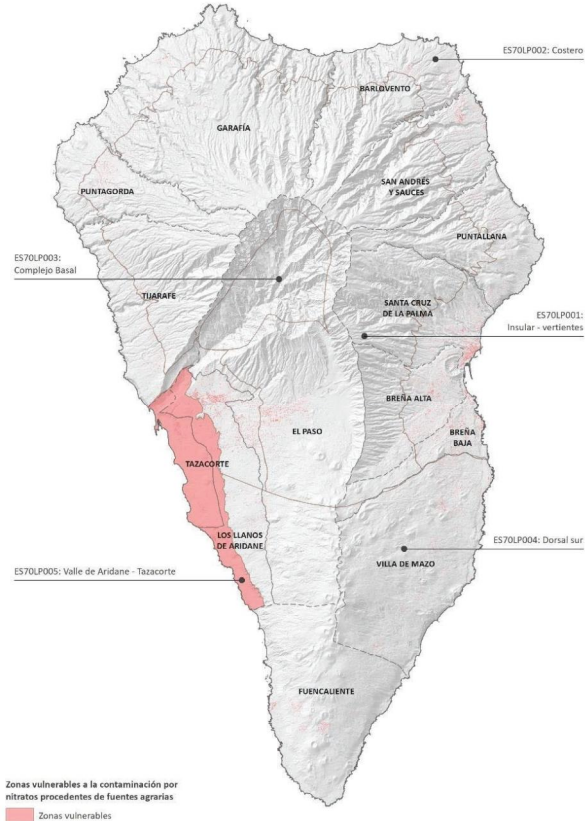
- 이 구역은 농업에서 유출된 질산염(nitratos)이 수질에 미치는 영향을 제한하기 위해 설정되며, 특히 지하수 오염을 방지하는 것이 목적임
- 해당 지역은 농업 행위에 대한 특별 규제와 비료 사용 제한을 적용받고 있음
- 근거 법령은 EU 지침 91/676/CEE(질산염 지침), 스페인 RD 47/2022, 카나리아

Decreto 54/2020이며, 관리기관은 카나리아 농업청, 환경청, 라팔마 수자원위원회가 공동으로 관할함

- 라팔마에는 1개 질산염 민감지역이 지정되어 있음



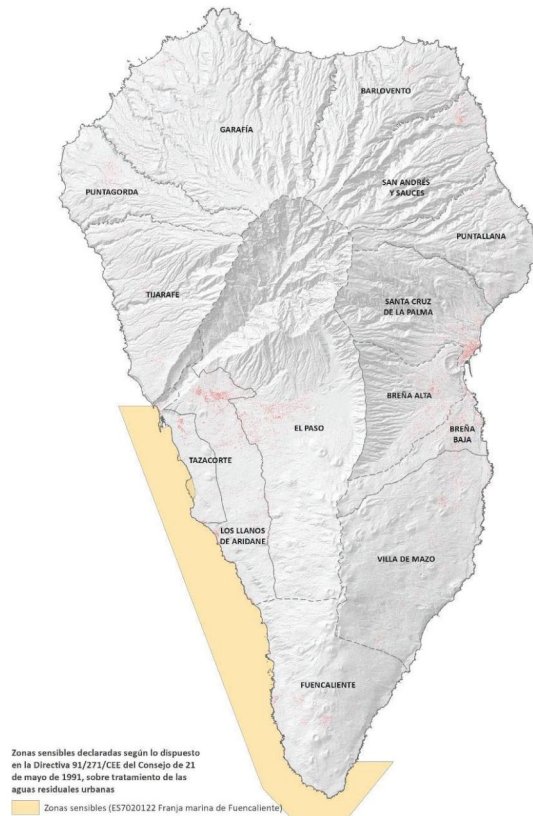
〈 라팔마섬 수욕장 보호구역 〉



〈 라팔마섬 농업으로부터 질산염 오염 취약 지역 〉

6) 오수 민감지역 (Zonas sensibles por vertidos de aguas residuales urbanas)

- 도시 오·폐수의 유입이 수역 생태계 또는 지하수에 미치는 영향을 줄이기 위해 도시폐수 처리의 효율성 및 필요성을 기준으로 지정된 보호구역으로 해당 구역은 고도처리시설의 설치와 규제가 필수적으로 요구됨
- 법적 근거는 EU 지침 91/271/CEE, 스페인 RDL 11/1995 및 RD 509/1996, 카나리아 Orden 27/01/2004이며, 주된 관리 주체는 카나리아 수자원청, 라팔마 수자원위원회임
- 라팔마섬에는 1개 오수 민감지역이 존재함



〈 1991년 도시폐수 처리에 관한 이사회 지침에 따라 선언된 민감 지역 〉

7) 특별 보전구역(생태서식지) - ZEC (Zonas Especiales de Conservación)

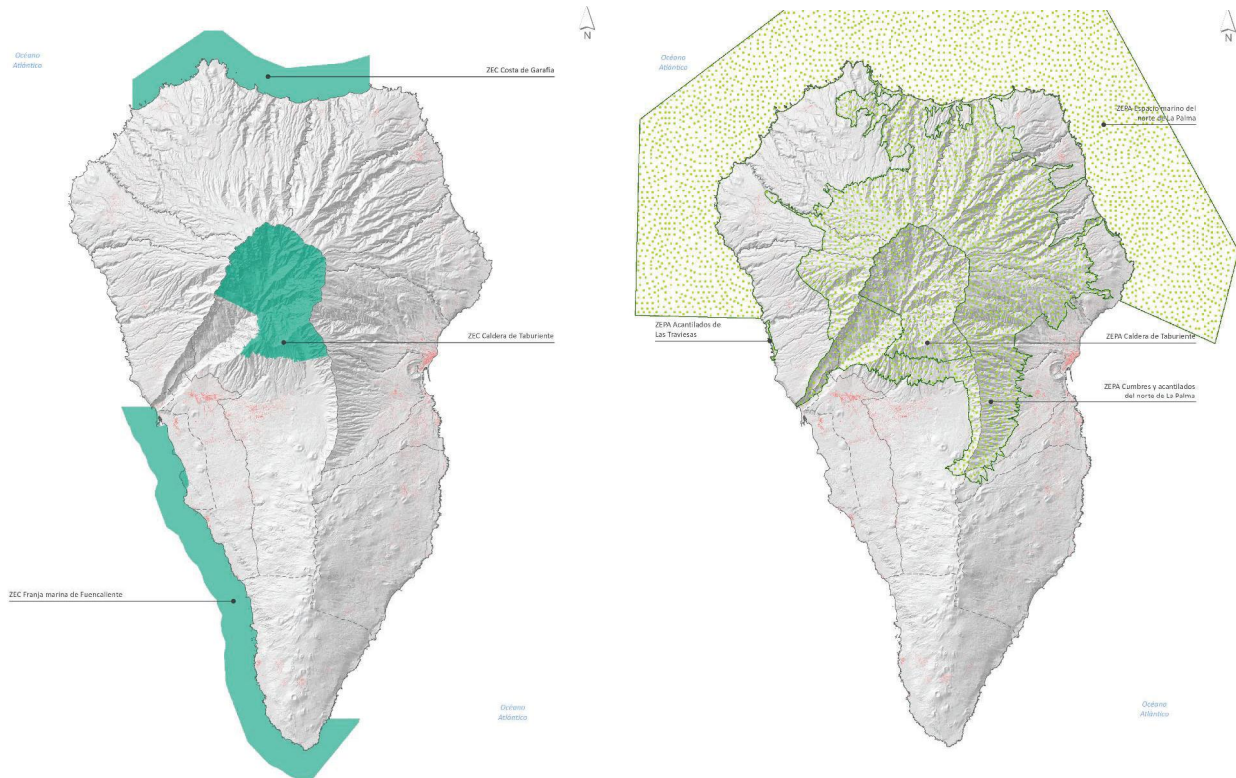
- ZEC는 유럽 Natura 2000 네트워크의 일부로서, 주요 생태서식지(습지, 숲, 연안 등)를 보호하기 위해 설정됨
- 물의 질과 양이 생물의 서식 상태에 결정적인 영향을 미치는 지역이 포함되며, 지하수/표층수 보호와 연계되어 있음
- 관련 법령은 EU 지침 92/43/CEE(서식지 지침), Ley 42/2007, RD 1997/1995 등이며, 관리기관은 스페인 환경부, 카나리아 생태환경청, 라팔마 섬정부(Cabildo Insular)임
- 라팔마 섬에는 ZEC 생물다양성 보호구역이 육상 1개소, 해양 2개소로 총 3개소가 존재함

8) 특별 보전구역(조류) - ZEPA (Zonas de Especial Protección para las Aves)

- ZEPA는 야생 조류의 보호 및 번식, 이동 경로 유지를 위한 보호구역으로, ZEC와 함께 Natura 2000 체계에 속하며, 하천 습지, 해안 조간대 등 조류 서식에 민감한 지역이 대상임
- 관련 법령은 EU 지침 2009/147/CE(조류 지침), 스페인 Orden AAA/1260/2014 등

이며, 환경부와 자치환경청이 공동 관리함

- 라팔마 섬에는 ZECA 육상 5개소, 해양 1개소로 총 6개소가 존재함



〈 특별 보전지역(좌: 생태서식지(ZEC), 우: 조류 보호구역(ZEPA)) 〉

9) 광천수 및 온천수 보호구역 (Perímetros de aguas minerales y termales)

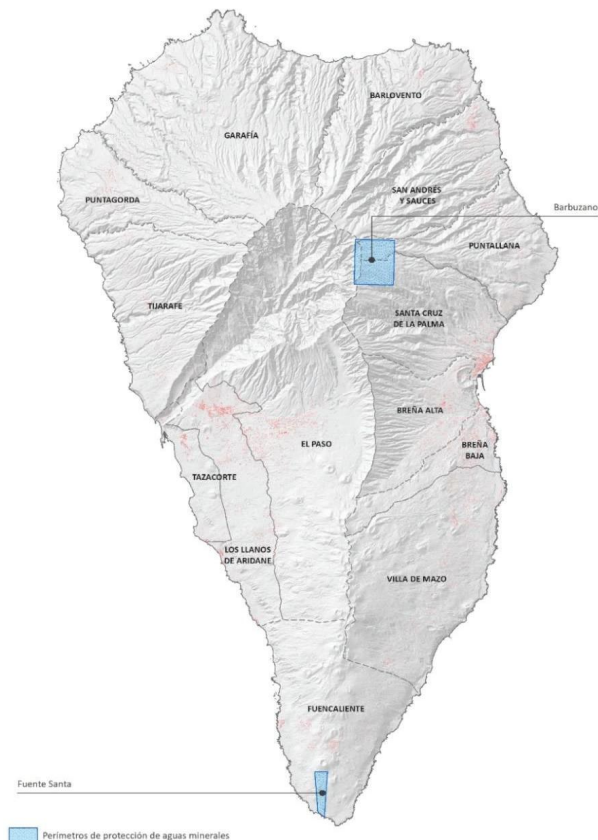
- 천연 광천수, 온천 등 지질기원 수원에 대한 보호 및 위생 관리를 위해 설정되는 보호 구역으로 주로 상업적 병입수 또는 온천 개발과 관련되어 있음
- 법적 근거는 EU 지침 2009/54/CE, 스페인 광산법 Ley 22/1973, RD 1798/2010이며, 관할 부서는 카나리아 산업청(Consejería de Industria)임
- 라팔마에는 2개 광천수 보호구역이 존재함

10) 습지 보호구역 (Zonas húmedas)

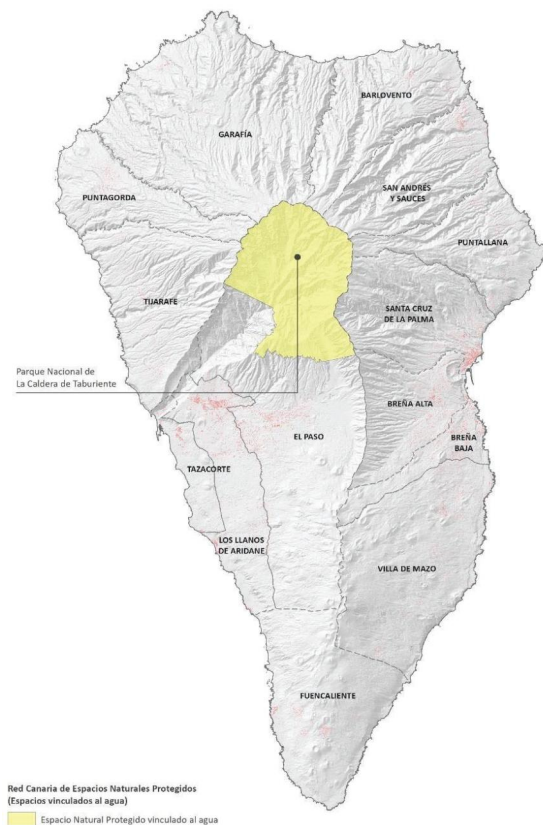
- 습지는 람사르 협약(Ramsar, 1971) 또는 스페인 국가 습지 인벤토리(INZH)에 등록된 지역을 포함하며, 물새 서식처, 탄소 저장, 홍수 완화 기능 등을 보전하는 것이 목적임
- 근거 법령은 Ramsar 협약, 스페인 RD 435/2004이며, 관리기관은 스페인 환경부(DG Calidad y Evaluación Ambiental)와 카나리아 생태청임
- 라팔마 섬에는 별도로 등록된 습지는 없는 것으로 파악됨

11) 자연보호구역 내 수생서식지 (Red Canaria de Espacios Naturales Protegidos)

- 이 구역은 카나리아 자치정부가 지정한 자연공원 또는 보호지역 중 수생 생태계가 포함된 지역에 대해 수문적으로 연계된 보호가 이뤄지는 구역임
- 법적 근거는 Ley 4/2017 (카나리아 자연공원 및 토지법)이며, 카나리아 생태환경청과 라팔마 섬정부(Cabildo Insular)가 공동으로 관리함
- 라팔마 섬에는 1개의 구역이 존재함



〈 광천수 및 온천수 보호구역 〉



〈 물관련 서식지를 포함하는 자연 보호구역 〉

4. 라팔마섬 환경 목표

- 환경목표(Objectivos Ambientales)는 유럽연합의 물관리 기본지침(DMA, 2000/60/EC)에 근거하여, 수자원 계획 전반의 핵심 요소로 간주됨
- 수체(masas de agua)는 그 특성에 따라 다음과 같은 구분에 의해 관리되며, 각각의 수체 유형에 따라 도달해야 할 목표 상태가 상이함
 - 자연 표층수 수체(masas de agua superficial natural)
 - 인공 또는 중대한 변화 수체(ACS/MAS)

- 지하수 수체(masas de agua subterránea)
- DMA 제4조는 수체의 상태가 더 악화되는 것을 방지하고, 가능한 한 '양호한 상태(buen estado)'에 도달하도록 할 것을 요구하며, 이를 통해 생태계 보호, 인류 건강, 지속가능한 이용을 도모함

1) 환경목표 유형별 설명 및 적용 대상

① 표층수 수체에 대한 목표

- 모든 자연 표층수 수체는 생태적 및 화학적 상태가 '양호(good)' 이상이 되도록 관리해야함
- 만약 특정 수체가 인공적으로 변경된 경우(중대한 변화 수체(MAS)), 양호한 생태적 잠재력(potencial ecológico bueno)이 목표로 설정됨

② 지하수 수체에 대한 목표

- 모든 지하수 수체는 두 가지 기준을 만족해야함
 - 양적 상태가 양호해야 하며 (수문적 균형 확보)
 - 화학적 상태 역시 양호해야 함 (오염 농도 기준치 이하)
- 목표 달성을 위한 주요 조건:
 - 수체의 수질이 더 이상 악화되지 않도록 할 것
 - 이미 저하된 경우에는 회복 조치를 통해 개선할 것

2) 환경목표에 대한 예외 적용 조건

유형	설명	법적 근거
목표 유예	기술적, 자연적 또는 경제적 이유로 인해 목표 달성 시점을 연장	DMA 제4조 4항
덜 엄격한 목표	과도한 비용 또는 환경영향이 경미한 경우 완화된 목표 설정 가능	DMA 제4조 5항
목표 미적용 (면제)	불가항력적 사건 등으로 목표 적용 자체가 불가능한 경우	DMA 제4조 6항

- 단, 예외 적용 시 다음과 같은 요건을 반드시 충족해야 함:
 - 기술적·경제적 제약의 정당한 증명
 - 공공 참여 및 정보 공개
 - 대체안에 대한 평가 및 문서화
 - 환경에 미치는 영향 최소화 조치 포함

3) 라팔마 지역 수체별 환경목표 적용 현황

- 전체 35개 수체 중 10개 수체(28.6%)에서 환경목표에 대한 예외가 적용되고 있음
- 예외 적용 사유
 - 유예 사유: 복원사업 지연, 기술적 제약, 자연적 회복 지체
 - 완화 사유: 비용 대비 효과 불충분, 대체 방안의 부재
 - 면제 사유: 물리적 구조 변화로 인한 생태 회복 불가능
- 환경목표 달성은 원칙적으로 2027년까지이며, 예외는 공식적인 분석, 공청회, 그리고 복원 조치 병행이 있어야만 인정될 수 있음

수체 유형	총 수	목표 유지	유예 적용	덜 엄격한 목표	목표 미적용 (면제)
표층수 (자연, 인공 포함)	22	14	6	2	0
지하수	11	8	3	0	0
중대한 변화 수체 (MAS/ACS)	2	1	0	0	1

4) 보호구역과 환경목표의 관계

- 보호구역(Zonas Protegidas)은 일반 수체보다 강화된 목표 적용이 요구되며, 특히 다음과 같은 유형에 따라 법적으로 강화된 목표가 부여됨
 - 식수원 보호구역: DMA 제7조에 따라, 화학적 오염 최소화와 상태 저하 금지 원칙이 적용됨
 - 수욕장 및 질산염 민감지역: 별도의 EU 지침(2006/7/EC, 91/676/CEE 등) 기준 병행 적용
 - Natura 2000 지역(ZEC, ZEPA): 생물다양성 보호가 최우선이며, 수체의 생태 연계성이 필수
- 보호구역 내 수체의 경우 예외 적용이 원칙적으로 제한되며, 목표 완화 또는 유예 시에도 보다 엄격한 검토 기준이 적용됨

4) 보호구역 별 목표

보호구역 유형	적용 환경목표	적용 내용	예외 허용 여부
식수원 보호구역	화학적 상태 양호, 생물학적 위험 없음	DMA 제7조 적용. 오염 예방과 수질 보전 중심	매우 제한적(거의 없음)
수욕장 보호구역	미생물 기준 충족 (2006/7/EC)	수질 등급 평가 의무화 (우수/양호/허용/불량)	일부 조건하 유예 가능
질산염 민감지역	지하수 질산염 ≤ 50mg/L	농업 비점오염 방지를 위한 WFD + Nitratos 지침 동시 적용	유예 가능
오수 민감지역	부하 감소량 충족, 부영양화 회피	도시폐수 영향 지역에 대한 추가 처리 기준 적용	유예 가능
Natura 2000 지역 (ZEC/ZEPA)	생물다양성 보존, 수체 연결성 유지	서식지 및 조류 지침 동시 적용. 수생생물 및 수문조건 유지 필요	예외 가능(보상 필요)
광천수 보호구역	미네랄 기준 충족	광천수 품질 및 상업화 기준 준수	일부 유예 가능
습지 및 자연보호지역 수체	생태 기능 유지, 수위 안정성 유지	습지의 수문 조건과 생태적 상태 유지 중심	예외 가능

5. 용수공급 및 수도비용 관련

1) 법적·제도적 근거

- 라팔마 지역의 수도비용 분석은 유럽연합 지침, 스페인 물법, 카나리아 제도 고유 법령을 기반으로 구성됨
- 특히 ‘오염자 부담 원칙’, ‘비용 회수의 투명성과 공정성’이 핵심 원칙임

법령	주요 내용
EU 물관리 프레임워크 지침 (DMA, 2000/60/CE)	제5조, 제9조: 수자원 서비스에 대한 경제적 분석과 비용 회수 원칙 적용 의무화. ‘오염자 부담 원칙’ 반영
스페인 수자원법 (TRLA, RDL 1/2001)	11제111bis조: 비용 회수 시 사회·환경·경제적 조건 고려 가능. 지리적·기후적 조건도 고려. 단계별 요금제 도입 유도
카나리아 제도 수자원법 (Ley 12/1990)	제38조: 물 사용의 경제적 분석 및 예외 사유 명시 의무화
수문계획 지침 (Decreto 165/2015)	서비스별 비용, 수입, 회수율, 환경·자원비용 포함하여 보고서에 반영해야 함

2) 라팔마 수자원 공급(서비스) 구조

- 라팔마는 스페인 본토와는 달리 민간이 주도하는 독특한 수자원 운영 구조를 가지고 있음
- 상수원 취수부터 하수처리까지 다양한 서비스 체계가 존재함

유형	설명
수면수(상류)	댐이나 운하 등에서 확보된 수면수를 대규모 운송 설비로 전달하는 공급 서비스
지하수(상류)	터널, 우물 등을 통해 확보한 지하수를 송수하는 상류 서비스
농업용수 분배 (하류)	상류에서 받은 물을 농업용으로 분배하며, 운반 손실을 제외한 실사용량 기준
도시급수 (하류)	상수도망을 통해 가정과 산업에 공급되는 최종 사용자 급수 서비스
자가공급	농업용 수자원을 개인이나 공동체가 직접 취수하여 사용하는 구조
공공 하수 수거 및 정화	하수 및 산업 폐수를 공공시설에서 수집·처리하는 서비스로 주로 지자체가 관리

3) 서비스 제공자 및 비용 회수 방식

- 라팔마에서는 공공기관뿐 아니라 수많은 민간단체와 지역공동체가 서비스 제공 주체로 참여하며, 다양한 요금제 및 과금 방식이 혼재함

서비스	제공자	회수 수단	평균 요금(€/m³)
수면수(상류)	민간, 수자원 위원회	물 요금, 운하 사용료, 공급료	민간 0.11 / 공공: 0.237(동부), 0.200(서부)
지하수(상류)	민간, 수자원 위원회	동일 방식	민간 평균 0.10
농업용수(하류)	민간, Barlovento 시청	물 요금, 공동체 회비	민간 0.17 / 공공 0.14
도시급수(하류)	각 시청, Canaragua	공공요금제 (단계별 요금)	시별 상이 (아래 내용 참조)
자가공급	농업 공동체	자체 비용 부담	실질 100% 회수
하수처리	시청, Canaragua, 수자원 위원회	하수도 및 정화요금	평균 0.22~0.30 유로

■ 도시급수 예시(요약)

- Breña Alta: 0.69~1.15 €/m³ (단계별), 기본료 3€
- Santa Cruz: 0.88~1.25 €/m³, 최소 사용량 15m³에 12.35€ 기본료
- Puntagorda: 최대 3.00 €/m³ (초과사용 시)
- El Paso: 0.90~1.56 €/m³ (단계별)

4) 비용 구조 및 회수율

- 총계: 30.11백만 유로(운영비, 유지관리비, 투자비(CAE) 포함)
- 환경비용: 하수정화 관련 0.579 백만 유로

서비스	총비용 (M€)	수입 (M€)	회수율 (%)
수면수(상류)	1.39	0.52	37.50%
지하수(상류)	10.62	6.99	65.80%
농업용수(하류)	13.48	8.2	60.80%
도시급수(하류)	7.45	4.45	59.80%
자가공급	1.29	1.29	100.00%
하수처리	3.21	0.88	27.30%
총계	30.11	14.82	49.20%

5) 지역 특이점

- 민간 중심 구조: 민간 공동체(“Heredamientos”)가 우물·터널 등을 소유하고 공급하는 전통적 구조
- 공공-민간 혼합 모델: 상류 수원부터 하수처리까지 다양한 주체가 분산되어 있어, 통합적 관리에 어려움
- 탈염 및 재이용은 미비: 오직 1개 호텔(0.1278Hm³/년)만 탈염 시설 보유, 정량적 영향 거의 없음
- 회수율 편차 존재: 하수처리 회수율(27%) 매우 낮음
- 기후변화·담수 부족 대응 필요성: 향후 해수담수화 확대 및 요금 조정 필요

6. 환경목표 달성을 위한 대책 및 예산

1) 제2차 계획의 이행 성과(이전 계획)

- 제2차 계획에서 총 98개 대책을 추진 : 현재 63개(약 64%)가 완료 또는 실행 중

- 이 중 59개는 법적·지속적 특성으로 인해 제3차 계획으로 이관됨
- 주요 주제: 수자원 지속이용, 오염(점·비점), 공급 보장, 하천 보호, 재이용수, 절수, 수문주기 지식 강화 등

2) 제3차 계획(2021 - 2027) 실행 및 예산

- 총 203개 대책 포함, 총 예산 약 2억 590만 유로(긴급공사 포함 (2021년 화산 폭발 대응: 관개·식수망 복구 등))

목표 유형	대책 수	예산(€)
환경목표 달성 (OMAS)	65개	136,915,177
수요 대응 및 합리적 사용	18개	43,067,308
기상이변 대응	64개	20,433,115
거버넌스 및 정보 강화	55개	5,086,887
기타 수자원 관련 대책	1개	450,000
총계	203개	205,952,487

3) 대책의 분류 및 특성

- 기본 대책: EU 수자원 관련 법령 이행 목적
- 보완 대책: 수생태계 보호, 기후변화 대응, 재이용 및 해수담수화 등 포함
- 비DMA 대상: 응급 복구, 특정 지역 기반시설 정비 등

유형	수량	예산(€)
기본 대책	20개	26,113,475
기타 기본	16개	16,571,537
보완 대책	117개	108,959,769
비DMA 대상	50개	54,307,705
총계	203개	205,952,487

4) 중요 주제별 예산

중요 주제	대책 수	예산(€)
수자원 관리	46	55,137,453
취수량 계측 및 자원 할당	4	1,880,170
수생태계 보호	1	420,000
하수처리 및 방류	26	33,865,987
수요 대응 어려움	43	95,369,090
기후변화 적응 및 완화	3	1,180,000
홍수 등 재해 대응	54	13,870,115
행정조정	5	1,519,482
수문정보 개선 및 계획 지원	21	2,710,190
총계	203	205,952,487

4-1) 수자원 관리 대책 (총 46개 대책, 55,137,453€) - 예산 비율이 높은 14개 사업 중심 정리

사업명	개요	소관기관	예산(€)
해수담수화장 용량 확대 및 에너지 효율화	역삼투 시스템 개선, 저장시설 확장, 에너지 효율화	라팔마 수자원 위원회	9,762,865
상수도 공급 보장 및 정비	노후 관망 정비, 누수 저감, 공급 안정성 강화	라팔마 수자원 위원회	4,830,700
위기 대비 상수도 비상 공급체계 구축	화산·가뭄 상황에 대비한 비상급수망, 저장시설 확보	라팔마 지방정부	5,000,000
신규 수원 확보를 위한 지하수 탐사	지하수 시추 및 지질조사를 통한 신규 수원 확보	라팔마 수자원 위원회	3,315,000
수자원 고갈 위험지역 조사 및 보완대책	위험지역 원인 진단 및 대체수 개발 전략	라팔마 환경청	2,302,500
농업용수 유출 감시 및 제어 시스템 도입	센서 기반 누수 감시 및 제어 시스템	농업청 및 관개조합	2,481,208
스마트 관개 시스템 구축	토양수분 센서 기반 자동화 시스템	농업청	1,562,000
수요 조정형 압력관리 시스템 도입	유량/압력 자동 조정 기반 수요 대응	라팔마 수자원 위원회	1,354,655
농업용 급수 시스템 현대화	농업지역 노후 송수관 교체, 공급 안정화	농업청 및 관개조합	1,229,900
취약지역 상수 저장시설 확충	단수 취약지역 저장조 설치	라팔마 지방정부	1,100,000
공공 급수시설 유지관리 정보시스템 구축	유지보수 이력, 운영데이터 통합 관리 시스템	라팔마 수자원 위원회	900,000
산업단지 수자원 사용 모니터링 시스템 구축	산업지역의 물 사용량 실태 분석 및 정책수립	산업청	880,000
농업용수 재이용 시스템 시범 운영	하수 재처리수의 관개 활용을 위한 기술 검증	농업청	880,000
농업관개 수질 모니터링 체계 구축	재이용수 수질 기준 충족 여부 확인	농업청	430,000
기타 수자원 관리 사업(약 31건)	물 재이용 확대, 소규모 시설 정비, 홍보·교육	수자원 위원회 등	약 16,617,625

4-2) 취수량 계측 및 자원 할당 (총 4개 대책, 1,880,170€)

사업명	개요	소관기관	예산(€)
지하수 계측기 설치 확대	모든 관정에 유량계 설치, 비인가 취수 모니터링	라팔마 수자원 위원회	550,000
실시간 수문계측망 구축	수위·유량·EC 등의 실시간 자료 확보	라팔마 수문정보센터	750,000
자원 분배 시뮬레이션 및 모델링 개발	수요/공급 기반 자원 배분 체계 수립	라팔마 기술대학 협력	380,170
수권 라이선스 갱신 시스템 도입	온라인 기반 사용자 허가 갱신체계	라팔마 수자원 위원회	200,000

4-3) 수생태계 보호 (총 1개 대책, 420,000€)

사업명	개요	소관기관	예산(€)
하천 생태복원 시범사업	하천구간 식생 복원, 생물다양성 회복	라팔마 환경청	420,000

4-4) 기후변화 적응 및 완화 (총 3개 대책, 1,180,000€)

사업명	개요	소관기관	예산(€)
기후영향 예측 수문모델 구축	시나리오별 강수·증발량 분석 기반 모델	기상청 + 수자원 위원회	500,000
탄소중립 목표에 맞춘 수처리 설비 전환	재생에너지 기반 설비 전환 시범사업	라팔마 수처리공사	480,000
기후적응형 하천 정비 가이드 개발	기후변화 반영한 홍수 대응 하천 정비 지침	라팔마 환경청	200,000

4-4) 하수처리 및 방류 (총 26개 사업, 33,865,987€) - 예산 비율이 높은 13개 사업 중심 정리

사업명	개요	소관기관	예산(€)
하수처리장(EDAR) 용량 확대	기존 시설 용량 증설 및 고도처리 도입	라팔마 수처리공사	12,000,000
재이용수 활용 시스템 구축	처리수 저장조 및 농업용 급수망 확장	농업청, 수처리공사	5,435,000
노후 하수관 정비	관로 누수 방지 및 배출효율 향상	라팔마 수처리공사	3,180,000
산간지역 독립형 하수처리시설 설치	관로 접근 곤란 지역에 소형 생물학적 처리시설 도입	라팔마 지방정부	3,200,000
도심지역 우수처리 분리관 도입	빗물·오수 이원화로 침수 및 오염 방지	라팔마 수처리공사	2,020,000
중소규모 생물반응기 기반 하수처리시설 도입	마을 단위 친환경 하수처리시설 설치	라팔마 환경청	1,100,000
우수펌프장 확장 및 저지대 침수 대응	기후변화에 따른 침수 대응을 위한 우수 배제시설 확충	라팔마 지방정부	1,500,000
방류지점 수질 모니터링 시스템 개선	해안 및 내륙 방류수 수질·생태 영향 평가 시스템	해양환경국	600,000
농촌지역 하수관로 정비	하수 미처리 지역에 신규 관로 연장	라팔마 수처리공사	1,200,000
도시지역 하수 저장조 정비	홍수기 대비 오수 저장조 정비 및 용량 확충	라팔마 수처리공사	720,000
해안방류구 환경영향평가	방류구의 생태계 영향 분석 및 지속적 평가	해양환경국	400,000
하수 재이용수 수질 향상 기술 실증	재처리수 품질 개선 기술 시험 운영	라팔마 수처리공사	780,000
하수처리장 운영효율 향상	에너지 소비 저감 및 자동화 시스템 도입	라팔마 수처리공사	500,000
기타 하수처리 및 방류 관련 사업(약 13건)	중소 정비, 재이용 교육, 방류 모니터링 등 포함	수처리공사 외	약 5,230,987

4-5) 수요 대응 어려움 (총 43개 대책, 95,369,090€) - 예산 비율이 높은 10개 사업 중심 정리

사업명	개요	소관기관	예산(€)
담수화 에너지 절감 프로젝트	태양광 등 재생에너지 연계형 담수화 시설 구축	에너지환경청	25,000,000
농업 급수 자동화 및 센서기반 시스템 구축	ICT기반 자동관개 제어, 수분센서 도입	농업청	10,000,000
수요 예측 기반 시설계획 수립	인구변화 및 수요 패턴에 기반한 장기 시설투자 로드맵	라팔마 수자원 위원회	2,000,000
절수 인센티브 및 누진 요금제 도입	절수 실적 반영 요금 시스템, 누진제 확대	재무청	1,500,000
공공시설 재이용수 이용 확대	공공공간·관광시설 등에 재처리수 공급	환경청	5,000,000
용수사용 실태조사 및 DB 구축	전 부문 물사용 통계 조사 및 시각화	라팔마 수자원 위원회	1,200,000
절수형 설비 보급 캠페인	절수기기 보급 장려, 주택·시설 대상	환경청	2,000,000
학교 및 공공기관 대상 물절약 교육	수자원 보전 및 절약 인식 제고 교육	교육청	500,000
수요 감축형 기술 실증 및 지원	절수기술 실증 및 민간 도입지원	산업청	1,100,000
담수화 폐열 재이용 기술 도입	담수화 공정 중 폐열 회수 시스템 구축	에너지환경청	670,000
기타 수요 대응 관련 사업(약 33건)	홍보, 교육, DB화, 절수기술 실증 등 포함	수자원 위원회 외 다수	약 45,199,090

4-7) 홍수 등 재해 대응 (총 54개 대책, 13,870,115€) - 예산 비율이 높은 15개 사업 중심 정리

사업명	개요	소관기관	예산(€)
저지대 도시지역의 침수예방 인프라 구축	도심 배수 불량지역의 침수 대응	라팔마 지방정부	1,502,500
집중호우 대비 하천 정비 및 제방 보강	급류·범람 대비 하천 구조물 개선	라팔마 수자원 위원회	1,200,000
기후재해 위험지도 작성 및 예경보시스템 구축	기후위험지역 지도화, 위험예측 시스템	라팔마 환경청	1,095,000
산사태 및 유출수 위험지역 모니터링 강화	재해취약지역 감시 및 실시간 경보 체계 구축	라팔마 지방정부	1,025,000
홍수 시 하수 역류 방지시설 설치	도심 역류방지 밸브 및 환기구 신설	라팔마 수처리공사	900,000
농촌지역 급수시설 보호 및 우회 도수관 설치	유량 과다 시 대체 급수망 확보	라팔마 수자원 위원회	880,000
해안가 방류시설 홍수 대비 구조개선	해수면 상승에 대응한 방류구 높이 조정 및 구조보강	해양환경국	875,000
중소규모 급수시설 침수 예방조치	저지대 저장조, 취수정 등 수밀·배수 시설	라팔마 수자원 위원회	840,000
하수관로 내 유사물 제거 및 침수 예방장치	집중호우 시 유입 유사물로 인한 역류 방지	라팔마 수처리공사	820,000
급경사지 토사유출 대응식 생물방어시설 설치	식생 기반 토사유출 완화 공법 시범적용	라팔마 환경청	785,000
비상급수차량 확보 및 운영계획 수립	자연재해 시 급수공급 유지 위한 차량 및 대응 매뉴얼 구축	라팔마 지방정부	750,000
재해 취약지역의 저류지 확장	물리적 유량 완화를 위한 임시 저류조 조성	라팔마 수자원 위원회	690,000
방재 교육 및 주민 재난 대응훈련	침수 및 급수중단 시 시나리오 기반 대응능력 강화	라팔마 지방정부	640,000
하천 감시 CCTV 및 원격감시 시스템 설치	실시간 하천 수위 모니터링 체계	라팔마 수자원 위원회	620,000
우수 유입구 필터 및 토사 유입 저감장치 설치	격자망 및 여과시설로 토사 유입 감소	라팔마 수처리공사	600,000
기타 재해 대응 관련 39개 사업	소규모 배수시설 개선, 재해지도 보완, 응급장비 유지관리 등	다수 기관	1,637,615

III

라팔마 수자원 위원회 방문

1. 회의 개요

- 회의 목적 : 라팔마섬 및 제주도 수자원 이용·관리 현황과 정책, 문제점 및 대책을 공유하고 상호 협력 방안을 모색
- 주요 내용
 - 라팔마 수자원 위원회(발표) : AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA ISLA DE LA PALMA(Elzbieta Skupien Balon)
 - 제주지하수연구센터(발표) : Hydrogeological Characteristics and Groundwater Management System of Jeju Island(고창성 전문연구위원)
 - 라팔마섬 및 제주도 수자원 관리 문제점 및 대책에 관한 토론
- 일시/장소 : 2025년 8월 7일 09:00~13:00, 라팔마 수자원 위원회
- 참석자
 - 라팔마 수자원 위원회 : Javier Peña García(위원회 대표), Elzbieta Skupien Balon(연구원), Raquel Rodriguez Padilla(현장·시설 관리관) 외 2인
 - 주 라스팔마스 한국영사관 : 조경래 서기관 외 1인
 - 제주지하수연구센터 : 고창성, 김민철 전문연구위원, 현범석 전문연구위원

2. 회의 주요 논의 결과(2장 지역 개관(중복)을 제외하여 질의응답 및 주요 내용 중심으로 정리함)

1) 라팔마 수자원 관리 체계 및 제도

- 라팔마 수자원위원회(Consejo Insular de Aguas de La Palma, CIAP)는 섬 내 모든 수자원 개발·관리의 핵심 기관으로, 유럽연합 물관리지침(DMA, 2000/60/EC), 스페인 수자원법(TRLA), 카나리아 제도 수문계획 지침(IPHC)에 근거하여 정책을 수립·시행하고 있음
- 물수지 분석은 6년 주기로 EU 차원에서 총괄되며, 3년마다 중간 검토가 이루어짐
 - 지방 단위 위원회(라팔마 수자원위원회)는 강우·취수·지하수 관측 데이터를 자체적으로 확보하여 EU에 제출하고, EU는 이를 종합 분석하여 지역별 물수지 보고서를 확정함
- 지하수 취수 및 보호구역은 RZP(Registro de Zonas Protegidas, 보호구역 등록부)에 공식 등록되어 관리되며, 이는 SINAC(국가 상수도 정보시스템)과 연계됨
- 제주도의 지하수 관리는 제주도청 물정책과(인허가)에서 수량, 수질, 산업, 보전 등 총괄 관리하고 있으나, 시설적 측면에서는 농업(농업정책과), 상수도(상하수도본부) 등으로 다

원화 되어 있음

- 라팔마는 수자원, 생태, 연안환경을 통합적으로 고려한 수문계획(2021~2027)을 수립·이행 중이며, 제주도는 10년 단위 통합물관리 기본계획(5년 보완)을 운영하고 있으나 수자원 중심에 치우쳐 환경적 요소의 통합이 부족함에 따라 제주도는 수자원과 생태·연안환경을 연계한 통합 관리체계 강화가 필요함

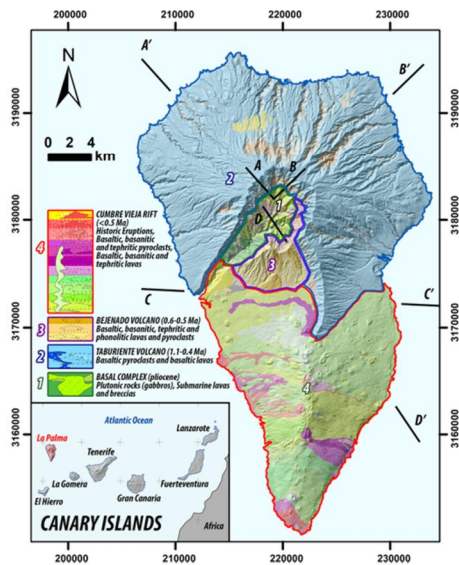


〈 라팔마 수자원 관리 시스템(수자원 위원회 발표자료 일부-배경은 수평터널 입구) 〉

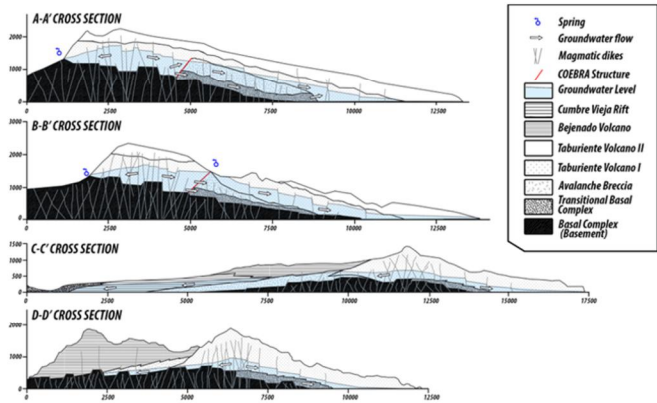
2) 지하수 이용 및 수문학적 특성

- 라팔마는 전 지역이 단일 대수층 구조로 용암류 내 발달한 다수의 마그마틱 다이크(Magmatic Dikes)에 의해 지하수가 집적되며, 지하수위는 다이크의 위치·규모에 따라 상이하게 나타남
- 갤러리 내 지하수 체류시간은 약 50년으로 산정되었으며, 제주도의 평균 체류시간(30년, 10~60년 범위)과 유사함

GEOLOGÍA DE LA PALMA



Fuente: Grafcan (2011)



Fuente: Poncela (2015) y Poncela et al. (2022)

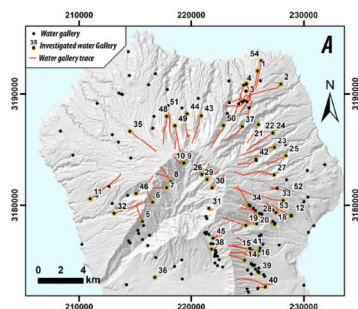
〈 대수층 구조(수자원 위원회 발표자료 일부) 〉

- 라팔마섬의 지하수 개발 방식은 크게 두 가지로 구분됨
 - 갤러리(Gallery, 수평터널): 약 187개가 개발되었으며, 현재 90개소가 운영 중임. 섬 전체 지하수 이용량의 80% 이상을 차지하고, 주로 해발 800m 이상의 고지대에 개발되며, 수질이 양호하여 식수·농업용수로 활용 가능
 - 우물(관정, Wells): 약 84개소가 개발되었으나, EC(전기전도도) 1,200~2,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 수준으로 염분 농도가 높고 이물질 유입이 빈번하여 농업에는 직접 사용 불가. 따라서 빗물이나 갤러리 지하수와 혼합해 농도를 낮추어 제한적으로 이용하고 있음. 현재는 16개소만 가동 중임
 - 최근 화산가스(H_2S , CO_2 등)와 지하수 혼합으로 pH 저하(산성화) 현상이 발생, 일부 지역에서는 지하수 활용에 제약이 커지고 있음. 이에 대응하기 위해 빗물 및 다른 수원과의 혼합·희석 전략이 적용되고 있음
- 섬 서부지역 협곡을 따라 상시 지표유출수가 존재하나, 규모가 매우 제한적임. 따라서 지표수 자원 의존도는 낮고 지하수 의존율이 압도적으로 높음
- 과거 풍부한줄 알았던 지하수 자원이 고갈(지하수위 하강)됨에 따라 기존 개발된 갤러리 및 우물이 활용되지 못하고 있으며, 제주도에서는 장기적 고갈 위험을 고려하여 지하수 보전 관리 강화가 필요할 것으로 판단됨

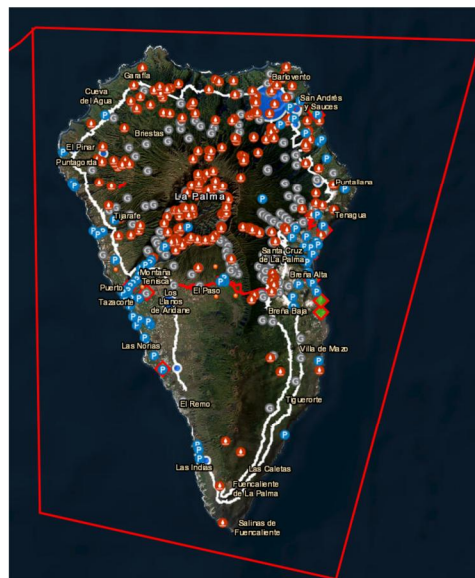
INVENTARIO DE CAPTACIONES

Captaciones					Volumen anual extraído (hm³/año)	
Tipo	Total	Activa	Inactiva	No inventariadas	2013	2022
Pozo	84	16	68	-	64,85	45,7
Galería	187	90	97	-		
Manantial	161*	53	108	-		
TOTAL	432	159	274	-		

Fuente: Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (Memoria, 2024)



Fuente: Poncela et al. (2022)



Fuente: <https://lapalmaaguas.com>

〈리팔마 수자원 개발 현황 및 위치도(수자원 위원회 발표자료 일부)〉

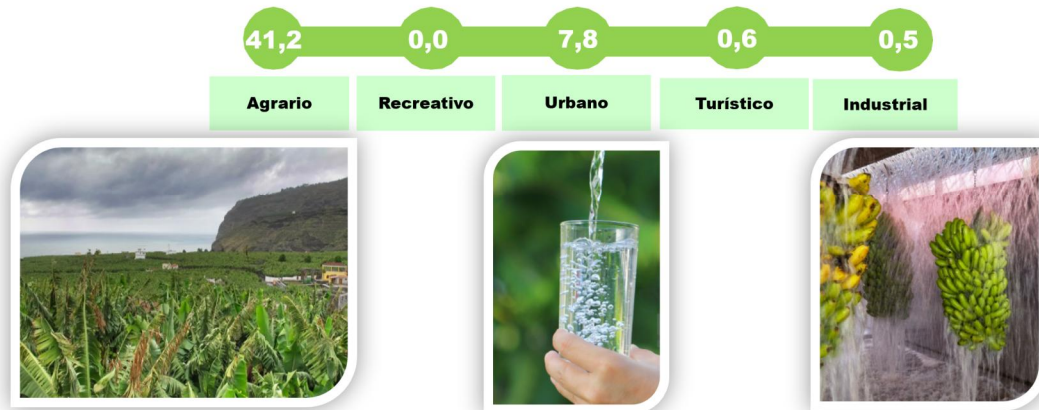
3) 농업 및 용수 이용 현황

- 농업은 라팔마 경제의 핵심 산업이며, 바나나 재배가 전체 농업용수 수요의 대부분을 차지
- 바나나 한 그루당 일일 20ℓ의 물이 필요로 하며, 바나나 산업은 라팔마 전체 수출의 약 40%를 차지하는 전략 작물임
- 특히, 연간 총 물사용량 50.1hm³/년 중 41.2hm³/년(82%)이 농업용수로 공급되고 있음
- 현재의 지하수위는 과거 대비 약 30% 감소함에 따라, 전통적인 스프링클러 방식에서 점적관수 방식으로 관개 효율을 높이는 정책을 추진 중임
- 주요 용수공급 관로를 외부로 노출하여 미관상 좋지 않지만, 누수 발생 시 신속 대처가 가능할 것으로 판단
- 과거에는 풍부한 지하수 자원으로 하수 재이용의 필요성이 낮았으나, 최근 기후변화 및 지하수 고갈로 인해 하수 재이용 및 해수 담수화 시설 확충이 주요 정책 과제로 전환됨
- 현재는 재이용수 활용 실적이 없으나, 향후 농업 관개용으로 적극 활용할 계획임

USOS DEL AGUA



TOTAL = 50,1 hm³/AÑO



Fuente: Elaborado a partir del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (Memoria, 2024)

〈 라팔마 용수 이용 현황(수자원 위원회 발표자료 일부) 〉



〈 외부로 노출된 농업용수 관로 〉

4) 수자원 보호구역 및 오염 관리

- 라팔마섬에는 EU·스페인·카나리아 법령에 따라 총 8종의 수자원 보호구역이 지정되어 있으며, 수자원 위원회에서는 아래의 4개 구역을 대상으로 관리하고 있음
 - 식수원 보호구역 : 하루 10m³ 이상 또는 50명 이상 급수하는 취수지, SINAC(국가 상수도 정보 시스템)에 상수도 용도로 등록된 취수지 등 총 36개소가 지정됨
 - 질산염 민감지역 : 주로 바나나 농업이 집중된 Valle de Aridane - Tazacorte 대수층이 지정되었으며, 지하수 내 질산염 농도가 EU 기준(50mg/L)을 초과한 사례가 확인됨. 동

위원소 분석(질소-15, 산소-18)을 통한 오염원 추적 연구가 수행되었으며, 주요 기원은 농업 비점오염으로 확인됨

- 오수 민감지역 : 도시 하수 방류에 따른 영향이 큰 지역으로 지정, 하수처리 효율 제고와 고도처리 시설 확충이 진행 중임
- 광천수 보호구역: Barbuzano 및 Fuente Santa 갤러리가 지정되어 있으며, 병입수 상업화가 가능함
- 질산염에 대한 수질 관리 방식은 감시 모니터링(Control de vigilancia)과 운영 모니터링(Control operativo)으로 이원화됨
- 감시 모니터링은 지하수체 전반의 상태를 파악하고, 운영 모니터링은 ‘위험’으로 분류된 지하수체에서만 운영됨(감시와 운영 모니터링 시설에 따라 시료채취 빈도나 항목 등 범위 차이가 있음)

5) 하수 및 재이용 정책

- 라팔마는 관광객 증가와 도시 확장으로 인한 하수량 증가 문제에 직면해 있으며, 이를 해결하기 위해 하수처리장 확대 및 고도화 사업이 추진되고 있음
- 하수처리장 설치에 대한 주민 수용성은 긍정적이며, 주거지와 거리 확보를 통해 민원 발생을 최소화하고 있음
- 재이용수는 향후 농업용으로 본격 도입될 예정이며, 각 하수처리장(EDAR)에서 독립적인 농업용수 공급망을 구축하는 계획이 수립되어 있음

6) 수자원 모니터링 및 향후 과제

- 현재 라팔마는 지하수위 실시간 모니터링 체계가 미흡하여, 일부 지점에서만 주기적 측정이 이루어지고 있음
- 2025년부터 단계적으로 센서를 도입(2개소 시범 운영)하여 수위·수질·전기전도도를 실시간으로 측정할 계획임
- 해수 담수화 시설은 아직 제한적이나, 기후변화 및 지하수 고갈에 대응하기 위해 시설 확대와 에너지 효율 개선 사업이 추진 중임
- 장기적으로는 해수 담수화 + 하수 재이용 + 빗물저장 + 갤러리 지하수 혼합을 통해 복합적이고 안정적인 수자원 공급 체계를 구축하는 전략을 수립 중임

MONITORIZACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

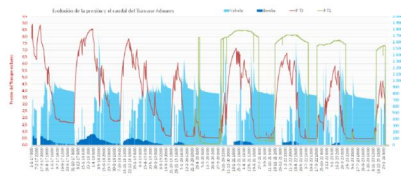


Imagen: Evolución de caudales y presión en Túnel de Tránsito (Boca Este).

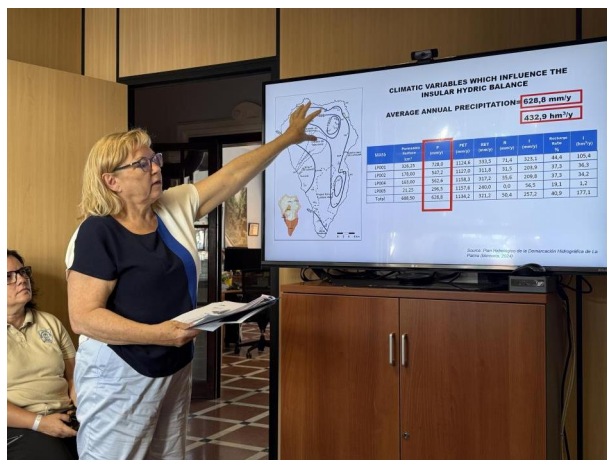
Fuente: Figura elaborada por Francisco Martín (Martín, 2025)



〈 갤러리 내부 모니터링(수자원 위원회 발표자료 일부) 〉



〈 제주지하수연구센터 발표 〉



〈 리팔마 수자원 위원회 발표 〉



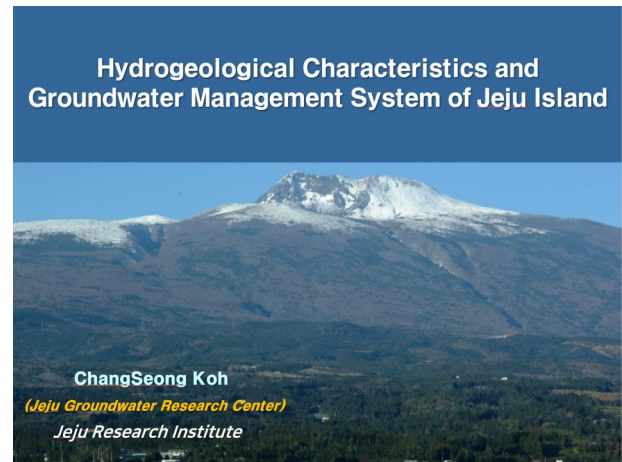
〈 발표 후 토론 〉



〈 단체 사진 〉



〈 라팔마 수자원 위원회 발표자료-표지 〉



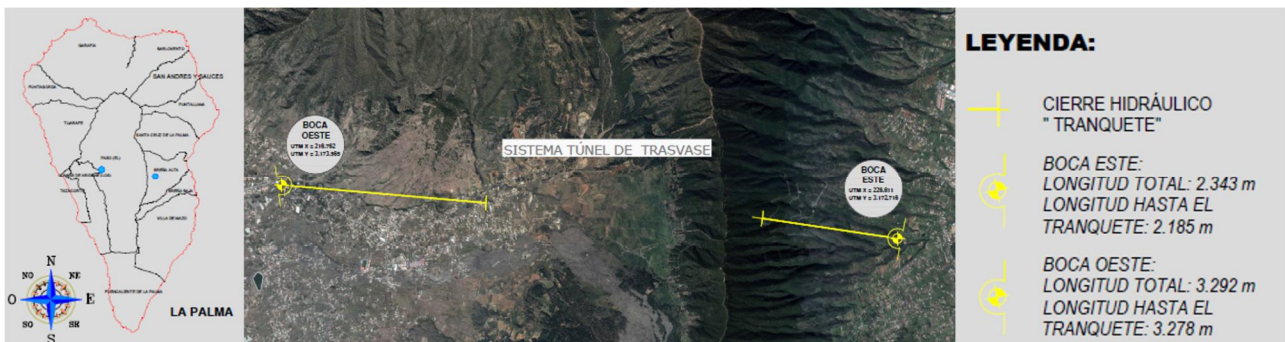
〈 제주지하수연구센터 발표자료-표지 〉

IV

라팔마 주요 수자원 시설 방문

1. 지하수 취수용 수평 터널(갤러리, Boca Este que)

- 위치 및 규모: 라팔마 동부 산악지대, 총 길이 약 2.2km
- 개발 목적 : 원래는 서부지역에서 동부지역으로 물을 이송하기 위해 착공(서부 갤러리와 연결 계획)했으나, 예상보다 풍부한 지하수 자원이 확인되어 추가 굴착을 중단하고 현재는 동부지역에 직접 공급하는 갤러리로 활용 중임
- 시설 구조:
 - 내부에 공기 공급용 관로 및 폭우 시 배수를 위한 배수관 설치
 - 수문은 최대 15bar의 수압을 견딜 수 있도록 설계
 - 갤러리 상단·중단부에서 수압을 계측하고 있으며, 최근 수량 감소로 압력이 다소 낮아진 상태
 - 수질 특성: 전기전도도(EC) 400~600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 수준으로 비교적 양호
- 관리 및 제도적 규제:
 - 수문지질학적 분석을 바탕으로 위치를 선정하며, 개발 시 수자원위원회 및 광산부의 허가 필요
 - 실패한 갤러리는 원상복구가 이루어지지 않고 방치되는 경우가 많음
 - 갤러리를 중심으로 반경 1,000m 내에는 추가 개발이 불가하며, 상호 간섭(수량 감소 등) 발생 시 양측의 취수량을 조정하는 제도가 운영됨



〈 라팔마 동부와 서부 지하수 취수용 수평터널(갤러리) 위치도 〉



〈 터널 진입 전 안전장비 착용 및 안전교육 〉



〈 터널 입구 전경 〉



〈 터널 위치 및 위험 요인 등 안내문 〉



〈 터널 내부 진입로 〉



〈 터널 중점 수문 및 수압계 시스템 설명 〉



〈 터널 입구 단체 사진 〉

2. 저수지 및 협곡수로(La Laguna de Barlovento)

- 개발 연혁: 1999년 최초 개발, 누수 보완을 거쳐 2011년 최종 준공
- 저수용량: 총 300만 톤, 현재 약 50만 톤 저장 중
- 수원 구성: 빗물 90%, 갤러리 지하수 10%
- 용도: 전량 농업용수 공급

■ 운영 특성:

- 협곡 유출수는 연간 약 5회 발생하며, 20년간 대규모 범람 사례는 단 2회
- 저수지 개발 시 현재의 수요 보다는 예비 상황을 고려하여 대규모로 설계
- 협곡 저류지 상부에 차수벽을 설치, 토사·이물질이 포함되지 않은 물만 저수지로 유입되도록 설계



〈 저류조(빨간색 원)와 저수지 위치도 〉



〈 협곡 → 저류조 유입부 〉



〈 저류조 → 저수지 공급을 위한 수문 〉



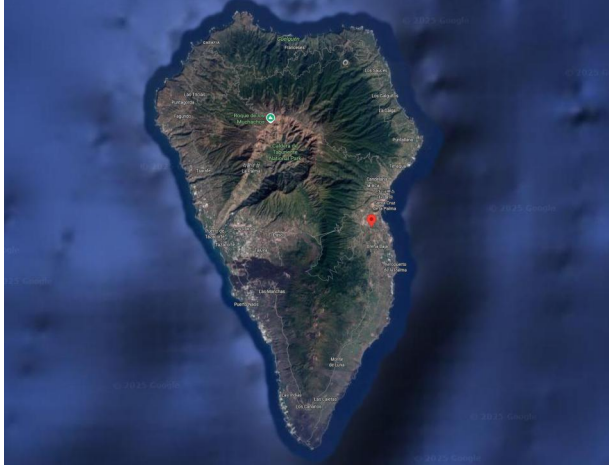
〈 저수지 전경 〉

3. 전통적 지하수 집수시설(우물, Costa Breñas)

- 개발 시기: 2023년 9월 30일 준공
- 투자 주체: 유럽연합(EU) 및 스페인 정부(농림축산식품부) 공동 투자, 농업용수 현대화 및 인프라 확충 목적
- 투자 규모: 1,162,773.64 유로
- 시설 개요: 깊이 205m, 방사상 취수방식(수직우물 + 수평갤러리 복합 구조)으로 개발됨
- 취수량: 시간당 약 68톤, 일일 약 1,680톤 공급 가능
- 특징
 - 현대화된 시설임에도 불구하고 전통적인 우물·갤러리 방식의 장점을 결합하여 농업용

수의 안정적 확보를 목표로 하고 있음

- 2.5m의 원형구조물로 굴착 및 설계하여 150mm의 취수관으로 취수하며, 필요시 내 관리자가 우물 내부로 내려가 시설을 점검하고 있음



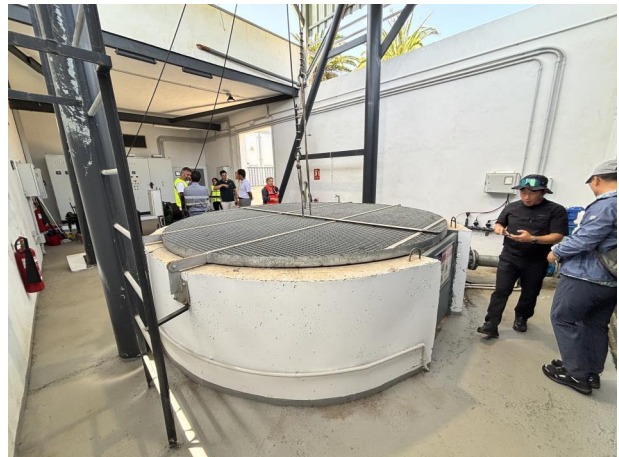
〈 우물 시설 위치도(빨간색 원) 〉



〈 우물 관리시설 전경 〉



〈 우물 설치에 목적과 지원에 관한 안내문 〉



〈 우물 외부 〉



〈 우물 내부 〉

IV

현장 지질답사

1. 라팔마섬 서부지역

- 라팔마섬 서부지역은 2021년 콤브레 베이하(Cumbre Vieja) 화산으로부터 분화가 발생한 곳으로서, 비교적 신선한 상태의 화산 지형과 구조의 관찰이 가능함
- 해당 지역에서는 제주의 숨골 유형 중 오목지형과 연관지을 수 있는 대표 지점을 3군데 선정하여 조사를 실시하였음



〈 라팔마섬 서부지역 현장 지질답사 위치 〉

1) 지점 I : 쿤브레 베이하 화산지대 북쪽 도로변 절개지

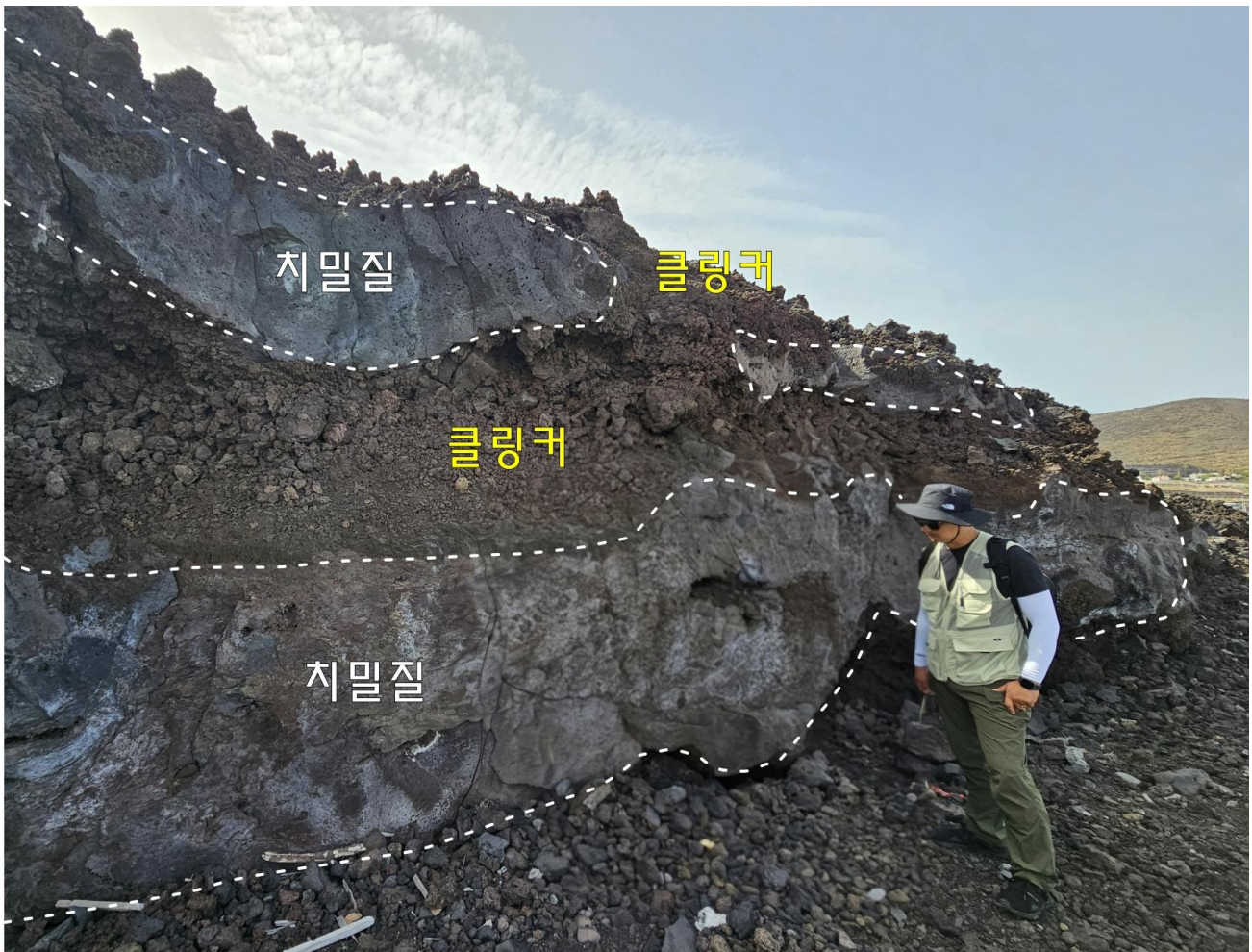
- 첫 번째 답사지는 쿤브레 베이하 화산으로부터 서쪽으로 약 4km 떨어진 곳으로서, 표고는 해발 약 325m에 달함
- 해당 지점은 2021년 쿤브레 베이하 화산 분화로 형성된 아아 용암류가 지역을 전반적으로 피복한 곳이며, 이후 도로 개설 과정을 통해 절개지가 지질노두로 드러나 있는 상태임



〈 위성사진에서 바라본 지질답사 지점 I의 모습 〉

- 이 절개지는 현장에서 아아 용암류의 전형적인 층서를 직접 확인할 수 있는 좋은 관찰 지점으로, 용암류의 상부와 하부는 불규칙하게 쌓인 다공질의 클링커(clinker)로 이루어져 있으며, 그 사이에는 비교적 치밀하고 단단한 중간부(massive zone)가 자리함
- 흐름 단위(flow unit)는 최대 두 매로 구분되며, 각 단위의 두께는 대체로 1~2m로 측정되는데, 이러한 특징은 아아 용암류가 분출과 냉각, 이동 과정에서 겪는 전형적인 변화를 잘 보여줌
- 암석은 수 mm 크기의 휘석(pyroxene)과 감람석(olivine)을 주로 함유하고 있으며, 제 주도에서 흔하게 나타나는 장석류(feldspar)는 육안으로 뚜렷하게 관찰되지 않음
- 현장에 동행한 카나리제도 화산연구소(INVOLCAN) Ruben Farcia-Gernandez 연구원에 따르면, 이 용암의 화학조성을 분석한 결과 바사나이트(basanite)에 해당하는 것으로 설명함

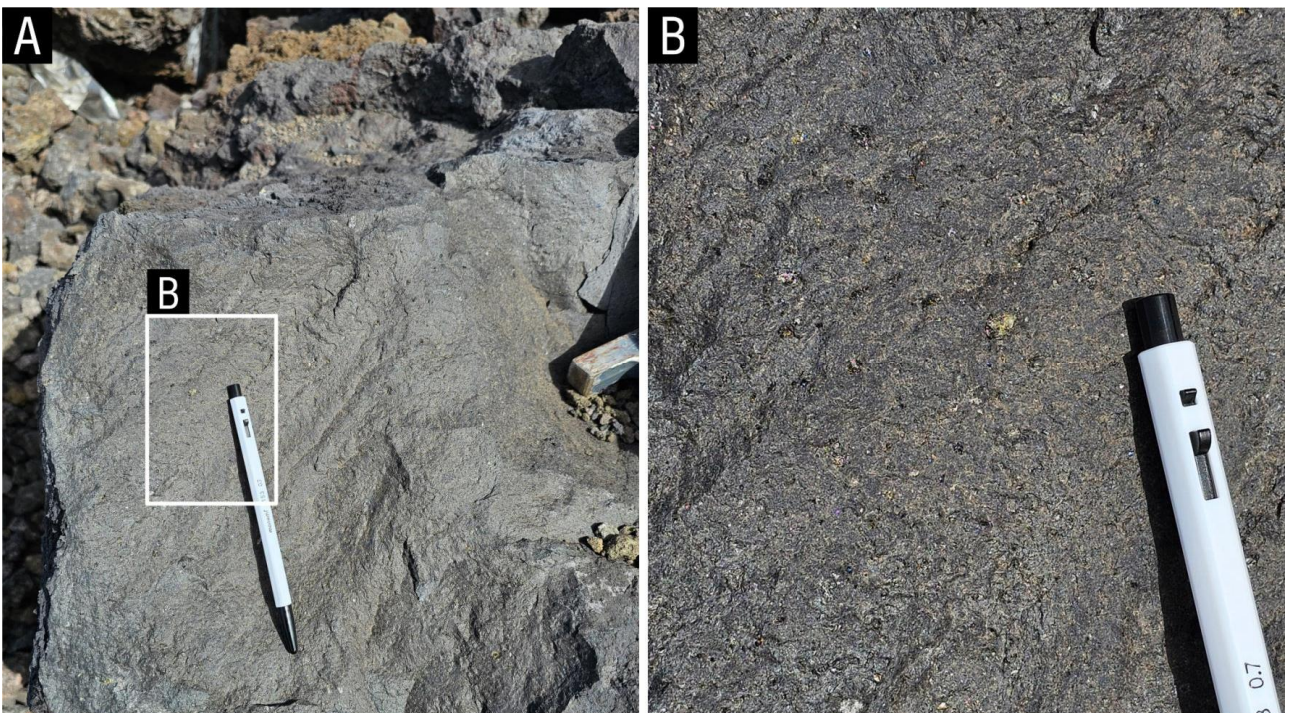
- 해당 암석의 색깔은 제주도의 현무암보다 더 어둡게 나타나는데, 이는 기원 마그나 내 철·마그네슘 함량이 상대적으로 높거나, 산화환경 차이에 의해 색조가 달라졌을 가능성이 큰 것으로 해석됨



〈 치밀질과 클링커가 수직적으로 교차하며 발달하는 전형적인 아아 용암류의 단면 〉



〈 도로변 아아 용암류 절개지에서 카나리제도 화산연구소 연구원이 지질특성에 대해 설명하는 모습 〉



〈 암석을 이루고 있는 주요광물의 모습(검정색 입자 : 휘석, 노란색 입자 : 감람석) 〉



〈 기복이 심한 지형 특징을 갖는 용암지대 드론촬영 영상 〉

- 지형은 아아 용암지대의 전형적 특징이 잘 나타나는데, 전체적으로 표면이 매우 불규칙하고, 크고 작은 함몰지 및 저지대가 산재해 있음
- 특히, 치밀질 구간이 축방으로 연속되지 못한 부분에서는 상부 클링커가 무너져 내려 자연적 함몰지가 만들어 지는 모습이 관찰되었는데, 지형적으로만 볼 때 제주의 숨골로 간주할 수 있는 오목지의 모습을 갖추고 있음



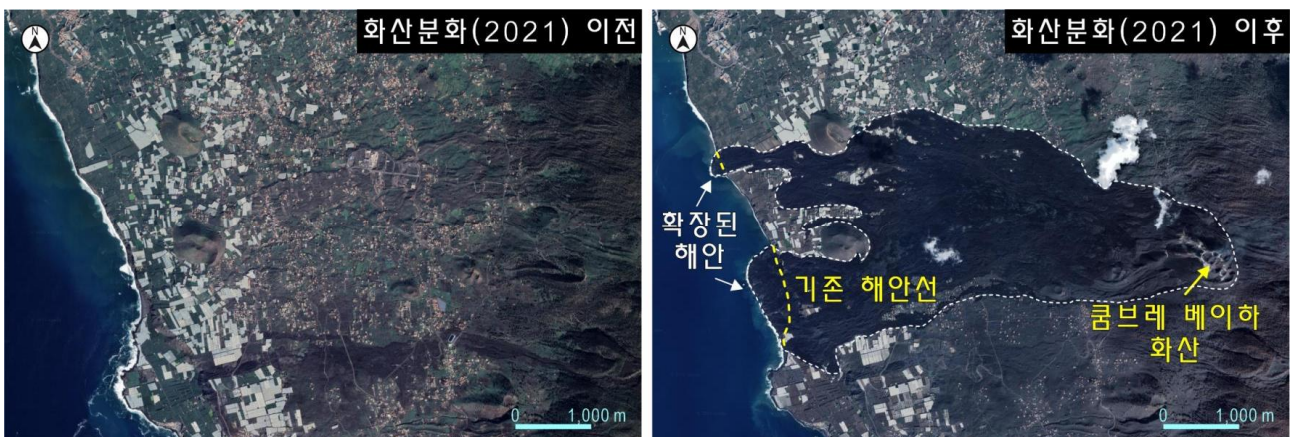
〈 치밀질부가 발달하지 않은 곳에서 나타나는 붕괴지 또는 오목지의 모습 〉

2) 지점 II : 쿤브레 베이하 화산 해안변 용암지대

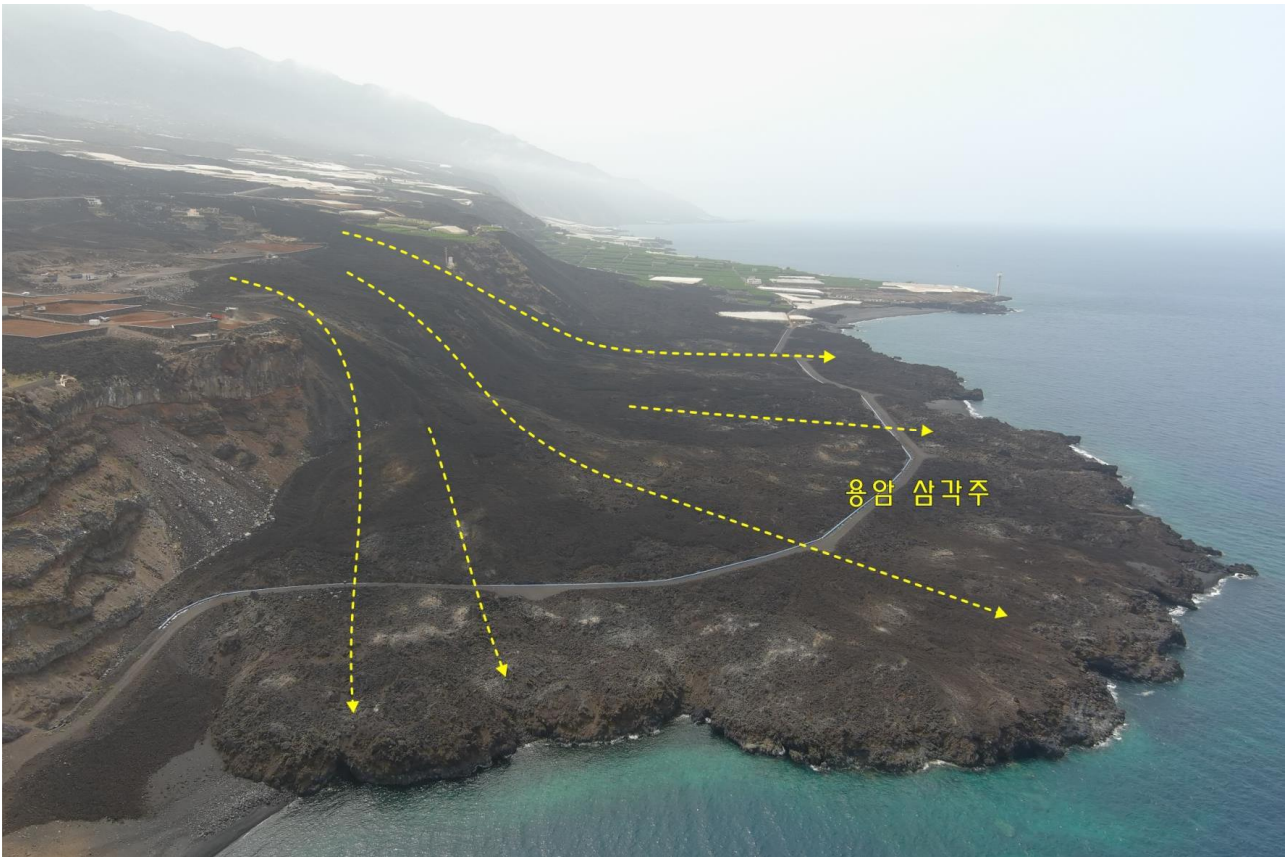
- 지점 II는 쿤브레 베이하 화산으로부터 서쪽으로 약 6km 떨어진 곳에 위치한 섬의 말단 부로서, 표고가 해발 50m 이내의 해안 저지대에 해당함
- 해당 지역은 지점 I과 마찬가지로 쿤브레 베이하 화산으로부터 분출된 용암류가 새로운 해안을 형성한 지역으로서 확장된 면적은 약 0.4km² 규모로 알려짐



〈 위성사진에서 바라본 지질답사 지점 II의 모습 〉



〈 2021년 화산분화를 통해 분출된 용암류에 의해 해안이 확장된 모습 〉



〈 해안에 발달된 용암 삼각주 〉

- 이는 라 팔마 섬의 해안선을 바꾸어 놓은 주요 지형 변화로, 접근성이 낮아 근접 관찰은 어렵지만 원거리에서도 용암 삼각주(lava delta)가 형성된 모습이 분명히 드러남
- 새로 만들어진 용암 지형은 전체적으로 요철이 심하고 불규칙한 표면을 가지며, 저지대의 경우 깊이가 10m에 이르기도 하는데 이는 기복이 심한 아아 용암류가 불균일하게 쌓이면서 생긴 결과임
- 기존 해안선은 약 20~30m의 절벽면을 이루고 있었으며, 가파른 절벽을 따라 흘러내린 용암류는 충적 선상지와 유사하게 부채꼴 모양의 용암 삼각주 지형을 이루고 있음
- 암석의 광물조성은 도로변 노두에서 관찰된 것과 동일하게 휘석과 감람석이 주요 구성 광물이며, 화학적으로도 바사나이트로 동일함
- 이 지대의 하부에서는 여전히 화산가스가 분출되고 있었으며, 원격 온도계로 측정한 결과 최고 120℃에 달하는 고온이 기록됨
- 이는 분화가 끝난 지 수년이 지났음에도 불구하고 내부 에너지가 잔존해 있음을 보여주는 현상임
- 또한 기존 토양이 용암류에 피복되어 열변질된 모습 또한 단면상으로 잘 관찰되는데, 세립질 입자들로 이루어져 있어 저투수성 지층의 역할을 할 것으로 보여짐
- 즉, 투수성이 높은 아아 용암류를 통해 지표수가 지하로 빠르게 침투된다 하더라도 하부에 고토양층이 발달해 있는 경우에는 대수층까지로의 하방침투가 원활히 이루어질 수 없기 때문에 ‘모든 숨골로 유입된 물은 대수층까지 곧바로 흘러간다’ 라는 보편적인 인식은 적절하지 않음



〈 2021년 화산분화를 통해 분출된 용암류가 기존 해안선(절벽면)을 따라 흘러내린 모습 〉



〈 다수의 오목지 또는 함몰지가 발달되어 있는 아아 용암지대 〉



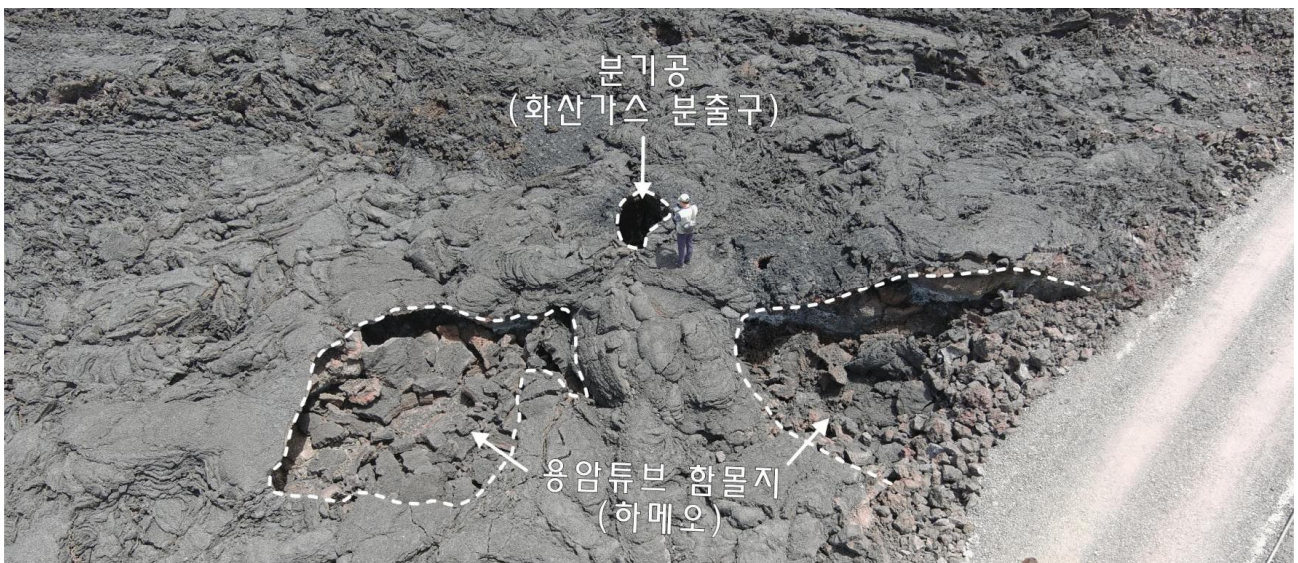
〈 아아 용암류에 의해 피복된 기존 토양의 모습(열변질에 의해 주황색을 띠) 〉



〈 새롭게 형성된 해안지대에서 수자원위원회 및 카나리제도 화산연구소 관계자들과의 단체사진 〉

3) 지점 III : 하메오(Jameo) 발달 지대

- 지점 III은 쿼브레 베이화 화산에서 서쪽 약 2.5km 떨어진 곳으로 해발 500m 내외의 표고를 가짐
- 본 지점에서는 지점 I 및 II와는 다르게 아아 용암류 뿐만 아니라 파호이호이 용암류 내지 전이형 용암류가 관찰되며, 용암튜브가(lava tube)의 천정이 붕괴되어 만들어진 함몰지가 다수로 발달해 있음
 - 카나리제도에서는 이러한 용암튜브 함몰지를 하메오(Jameo)라고 부르고 있는데, 하와이에서도 해당 구조를 키푸카(Kipuka)라 칭하고 있음
 - 비교적 규모가 큰 하메오는 장축 및 단축 약 3m, 깊이가 1.5~2.0m 정도로 추정되며, 함몰지 내부에는 용암튜브가 여러 갈래로 분기해 지하로 이어지는 모습이 관찰됨



〈 용암튜브 함몰지(하메오)와 분기공 드론촬영 영상 〉



〈 용암튜브 천정이 무너져 내려 만들어진 하메오(함몰지) 〉



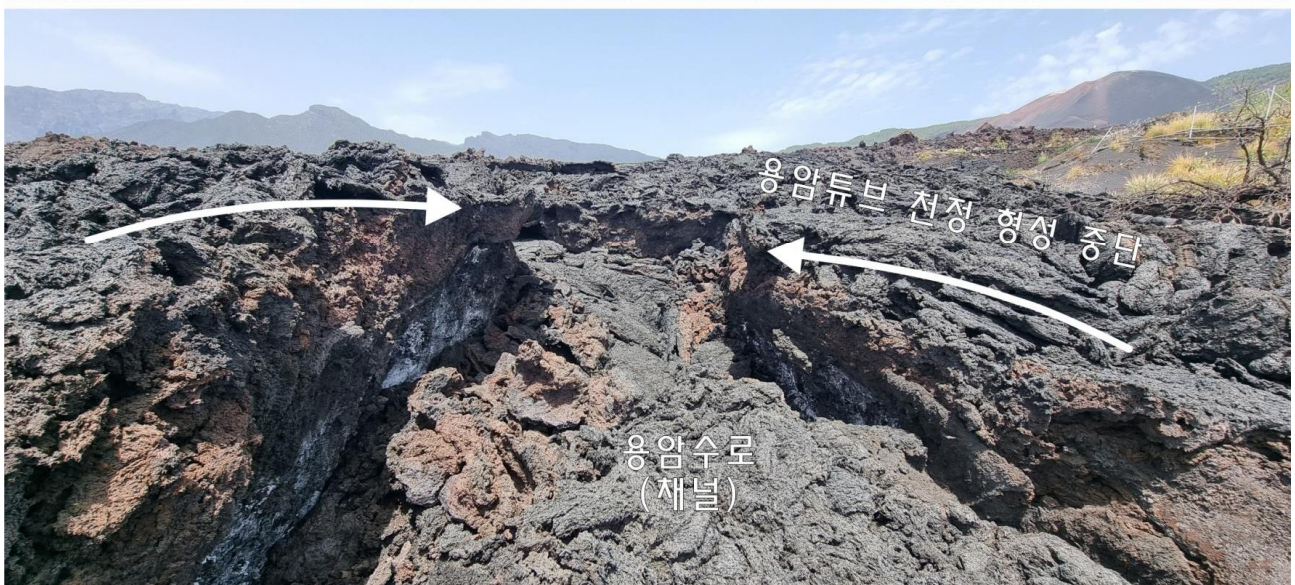
〈 하메오 내부 용암튜브가 양갈래로 분기해 뿔어 나간 모습 〉



〈 화산가스가 빠져나가는 통로인 분기공 〉

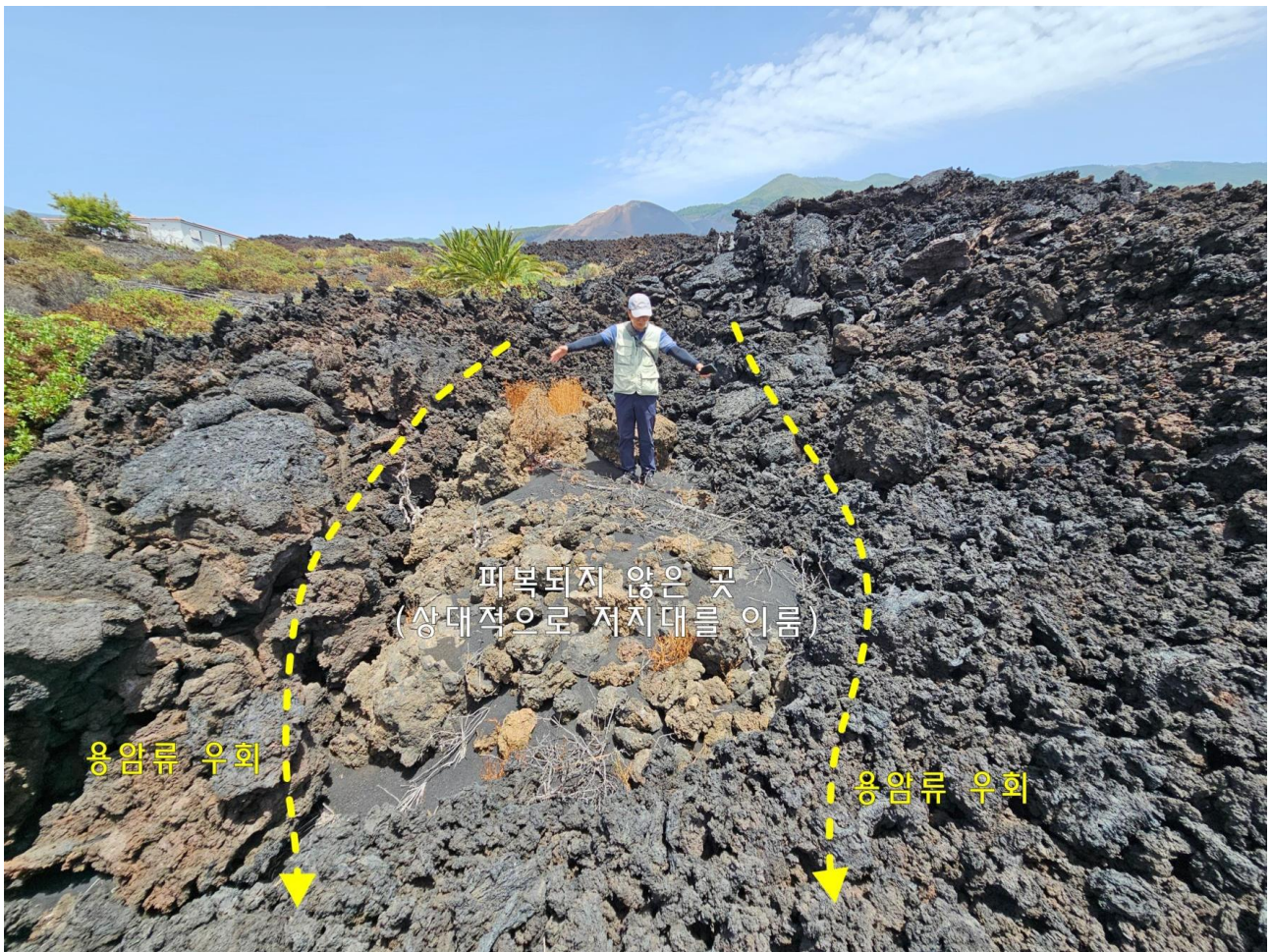
- 하메오 뿐만 아니라 화산가스가 지표 밖으로 분출하는 통로인 분기공이 지름 1m, 깊이 2m의 수직굴과 같이 발달해 있음
- 또한 용암이 흘러갔던 수로(채널, channel)가 길게 연장되어 형성되어 있는데, 수로의

상부에는 용암튜브의 천정이 만들어지다 중단된 구조도 함께 확인됨



〈 용암수로(채널)와 수로 상부에 천정형성이 중단된 모습 〉

- 용암류가 기존 지대를 피복하지 못하고 우회한 곳에서는 용암류의 팽창과 축적에 따라 상대적인 저지대가 형성되어 있음
- 해당 지역은 전반적으로 용암의 팽창과 함몰과정을 거침에 따라 불규칙한 요철지형을 이루고 있으며, 숨골로 간주할 수 있는 곳들이 다수로 존재함
- 지금까지는 용암튜브 함몰지형 숨골을 파호이호이 용암류에만 발달하는 것으로 한정하였으나, 전이형 용암류에서도 동일한 구조가 형성될 수 있음을 보여주었음



〈 용암류로 피복되지 않은 곳이 저지대를 이루는 모습 〉

2. 라팔마 남부지역

- 라팔마섬 남부에는 1971년 분화한 테네기아(Teneguia) 화산과 15세기 분화한 것으로 추정되는 산안토니오(San Antonio) 화산이 선상으로 위치해 있음
- 화산분화 이후 상당시간이 지났기 때문에, 시간에 따른 화산지형 및 구조가 어떻게 변화되어 나타나는지에 대한 파악이 가능함
- 해당 지역에서는 이러한 변화를 확인할 수 있는 지점을 3군데 선정하여 조사를 실시하였음

1) 지점 VI : 테네기아 화산 주변

- 지점 VI는 테네기아 화산으로부터 북북서 약 700m 지점에 위치하며, 북동쪽에는 산안토니오 화산과 인접해 있음. 이 지역은 두 화산이 남긴 분출물이 중첩되어 있어 시기별 화산활동의 흔적을 동시에 관찰할 수 있는 중요한 지점임
- 테네기아 화산 분화 시 방출된 다량의 화산 분출물(수 cm 크기의 암편)이 산안토니오 화산에서 기원한 파호이호이 용암류 위를 부분적으로 덮고 있는데, 이는 서로 다른 시기의 화산활동이 중첩되며 지형을 재구성한 대표적 사례임
 - 현장에서는 두 갈래의 대규모 용암수로(lava channel)가 발달해 있으며, 각 수로의 제방 높이는 10m 이상으로 비교적 큰 규모임



〈 산안토니오 화산분화 당시 만들어진 용암수로 및 천정 붕괴와 연계되어 균열이 발달한 지역 〉

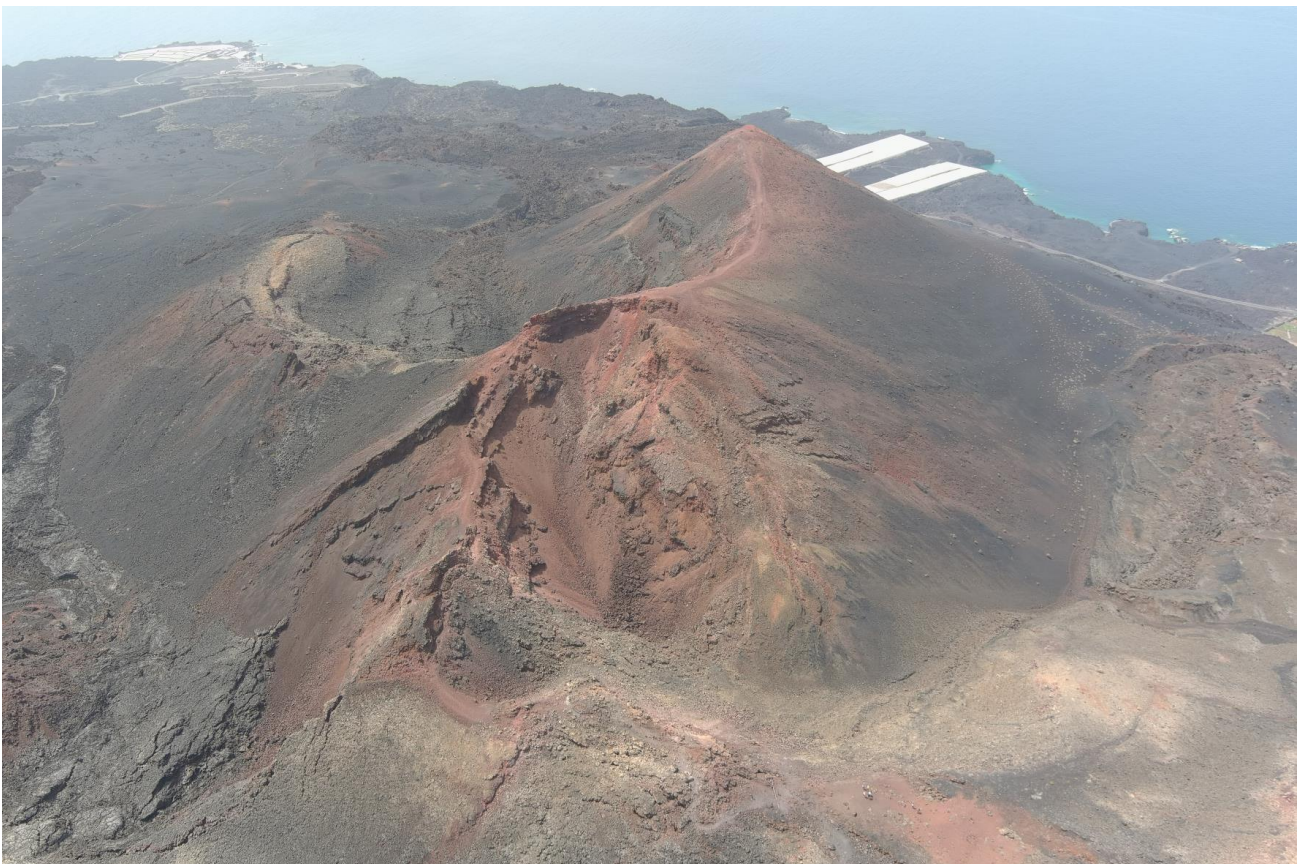
- 이 용암수로는 형성과정이 서로 달라, 결과적으로 서로 다른 형태의 제방을 만들어내고 있음
- 카나리아제도 화산연구소 연구원 설명에 따르면, 제방이 수직 절벽을 이루는 수로는 용암튜브가 형성된 이후 천정이 붕괴되면서 만들어진 구조이며 이 수로는 한때 용암의 내부 흐름이 보존되었다가 무너져 내려, 내부가 개방된 상태로 드러난 것으로 해석됨
- 반면 다른 수로는 용암튜브가 만들어지는 과정에서 천정이 지속적으로 붕괴되며 발달했기 때문에, 바깥으로 기울어져 있는 제방을 이루게 되었고, 이는 용암의 점성, 유량, 냉각 속도에 따라 달라진 구조 발달 양상으로 해석됨
- 수직 절벽 형태의 용암수로 상단 범람원 지역에서는 내부 하중이 한쪽으로 치우치면서 다수의 균열이 길게 이어져 있는데, 이러한 균열은 이후 강우나 지표수의 침수 통로가 되어, 시간이 지나면서 숨골과 같은 기능을 할 가능성이 큼
- 또한 형성 이후 시간 경과에 따른 풍화, 침식, 또 다른 화산분화 산물에 의한 피복, 토양의 발달 등 2차적인 변화를 겪음에 따라 원지형은 온전하게 남아있기 어려움
- 즉, 현재 제주에 지정된 숨골의 지질학적 특성을 이해하는 데 있어 라팔마에서 관찰된 용암수로와 균열 발달 양상은 중요한 비교 자료로 활용될 수 있음



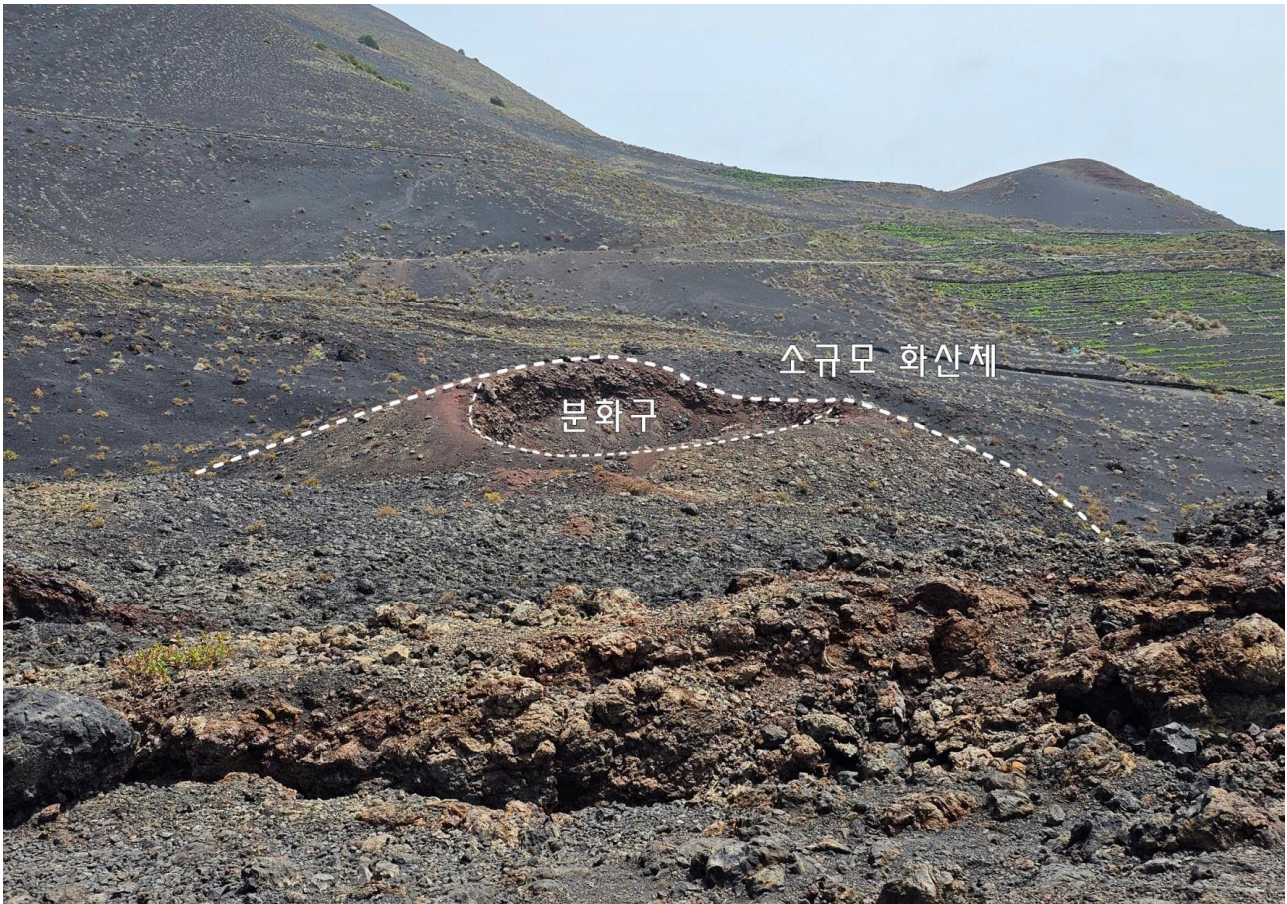
〈 용암수로 상단에 선상으로 발달되어 있는 균열대 〉

2) 지점 V : 테네기아 화산

- 지점 VI는 테네기아 화산이 위치한 곳으로 해안선과는 약 1km 떨어져 있으며, 표고는 해발 400m 내외임
 - 화산체는 장축과 단축이 약 100m, 높이는 150m 이상의 규모를 가짐
 - 화산체를 붉은색과 검은색을 띠는 다양한 크기의 분출물로 이루어져 있는데, 이는 지하수 존재 여부에 따라 산화 정도가 달라진 것이라 설명함
 - 지하수가 풍부한 지역에서는 수증기 폭발과 산화 작용이 활발히 일어나 붉은색 분출물이 쌓이고, 지하수가 부족한 곳에서는 산화가 억제되어 흑색 분출물이 퇴적됨
 - 이러한 색깔 차이는 제주에서도 화산쇄설물 퇴적층에서 부분적으로 나타나기는 하지만, 라팔마처럼 뚜렷하게 대조되는 사례는 많이 안아 비교 연구의 의미가 큼
 - 주 화산체 주변에는 수 m 규모의 소형 화산체들이 선상으로 발달해 있는데, 이는 틈새 분화(fissure eruption)에 따른 선상 분화의 결과로 해석됨
 - 이러한 구조는 제주 숨골의 지질학적 유형체계에서 오목지형으로 분류되는 유형과 밀접히 연관되며, 지표수의 집수와 하부 지하수로의 투과를 촉진하는 기능적 측면에서도 유사성을 확인 할 수 있음

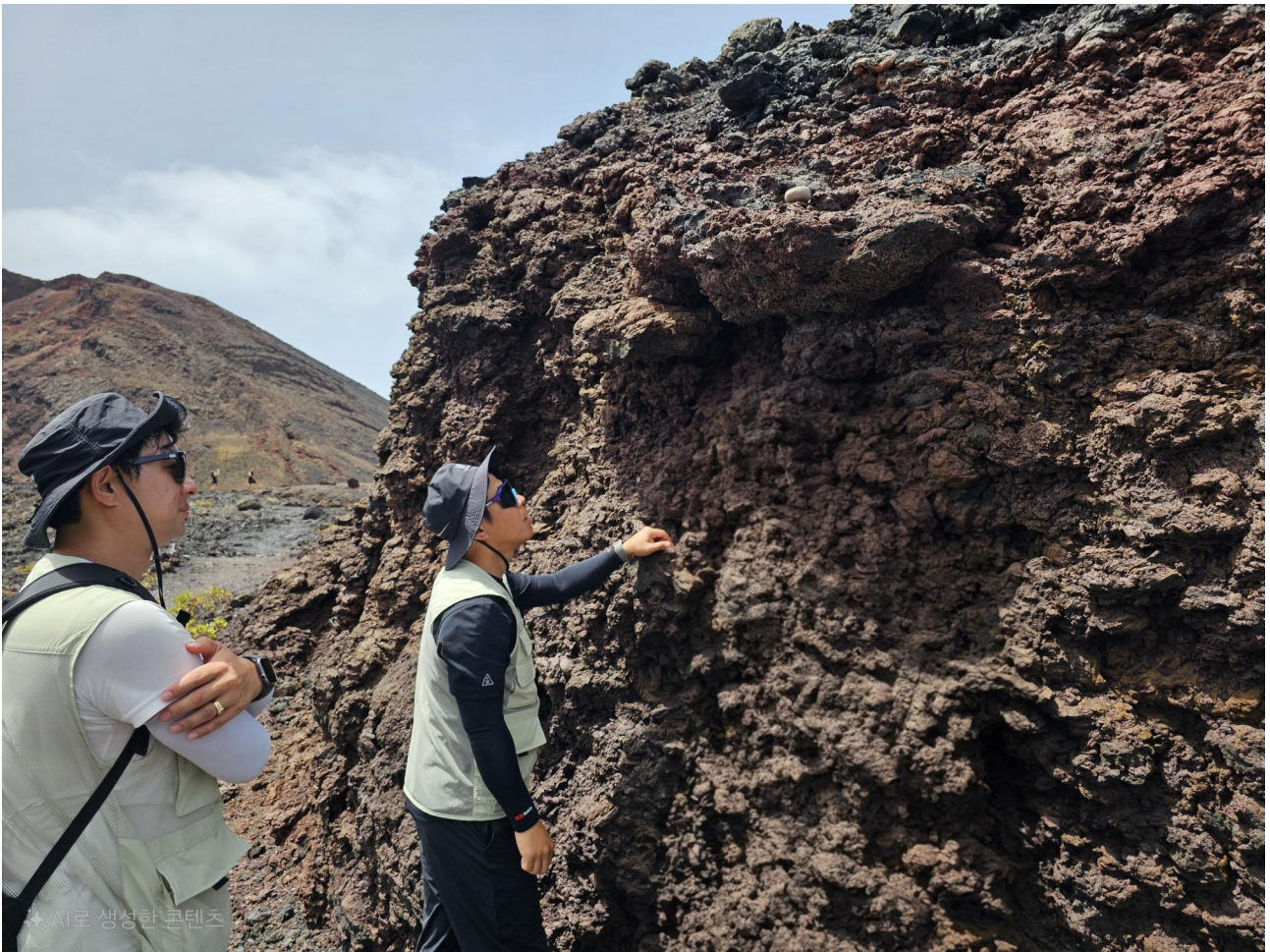


〈 붉은색 및 검정색 화산분출물이 쌓여 있는 테네기아 화산 〉



〈 테네기아 화산과 선상으로 배열되어 있는 소규모 화산체 〉

- 외곽에는 스펀터 램파트가 대규모로 형성되어 있어 분화 당시 분출물의 퇴적 과정을 잘 보여주는데, 비록 현재는 풍화와 토사 피복으로 직접적인 틈새구조를 확인하기는 어렵지만 제주도의 오름 발달 과정과 유사하게 이 지역 지하에도 다수의 틈새구조가 발달했을 가능성이 높음
- 이는 지표수가 지하 깊숙이 투과하는 통로로 작용하여 결국 숨골과 같은 수리학적 기능을 수행할 수 있다는 점에서 두 지역은 공통적인 메커니즘을 공유함
- 다만 제주에서는 식생의 피복과 풍화침식으로 인해 이러한 틈새구조를 발견하기 매우 어려운 상태이나, 테네기아 화산과 같은 오름의 발달여부, 스펀터 집적체의 존재여부 등을 통해 추정해 볼 수 있을 것으로 생각됨
- 이 밖에도 화산 주변에는 원형의 분기공들이 다수 발달해 있으며, 이곳에서는 화산가스(특히 이산화탄소)가 지속적으로 분출되고 있음
- 이러한 분기공은 제주의 경우 대부분 풍화와 식생 덮임으로 흔적이 희미해진 반면, 라팔마에서는 아직 활발한 방출이 관찰된다는 차이가 있음
- 따라서 테네기아 화산의 분기공은 숨골 연구에서 현재진행형의 투수성 지질구조를 보여주는 중요한 사례라 할 수 있음
- 즉, 제주의 오름 주변에는 현재 가리워져 있으나 틈새분화구, 분기공, 소규모 화산체 등과 같은 여러 투수성 지질구조가 존재했던 것으로 추정해 볼 수 있으며 구조적으로 해석이 난해한 오목지형 숨골의 경우 해당 구조들을 대입해보는 방안이 요구됨



〈 테네기아 화산 주변에 발달해 있는 스페터 램파트 〉



〈 화산가스가 배출되는 분기공의 모습 〉

3) 지점 VI : 테네기아 해안지역

- 지점 VI는 테네기아 화산의 해안변으로 테네기아 화산 분출 시의 아아 용암류가 지대를 피복하고 있으며, 절개지에서는 기존 용암류와의 경계가 명확하게 드러나 있어 복수 시기의 분화가 중첩되어 형성된 지질 구조를 확인할 수 있는 지점임
 - 절벽진 지형 말단에서는 지하수가 유출된 용천수가 해수와 일부 섞이며 작은 호수를 형성하고 있는데, 화산체를 통해 유입된 빗물이 절리틈을 통해 유출되는 사례로 볼 수 있음
 - 1971년 테네기아 화산체의 분화 이후에 약 200m 길이의 수평 터널이 개발되었고, 떨어지는 고온의 지하수를 온천으로 활용하였지만, 현재는 이산화탄소가 다량 분출되어 안전 문제로 폐쇄된 상태임
 - 특히 터널 내부에서는 온천수 뿐만 아니라 차가운 지하수가 동시에 부존해 있는 현상이 보고 되었는데, 이는 이 지역의 지하지질구조가 매우 복잡하다는 것을 시사함
 - 이 같은 내용을 제주의 숨골과 빗대어 보면, 숨골로 유입된 물은 지하수가 부존하는 대수층까지 도달함에 있어 매우 복잡한 경로를 따른다는 것을 의미함
 - 즉, 숨골에 대한 이해도를 높이기 위해서는 숨골의 함양기능 뿐만 아니라 지하지질구조에 대한 파악이 선행되어야 할 것으로 판단됨
 - 또한 해변 절개지에서는 다양한 규모의 암맥이 기존 용암류를 관입한 단면이 잘 드러나 있어, 마그마 이동 경로와 분출시기의 변화를 이해하는데 중요한 자료를 제공함



〈 아아 용암류가 기존 용암류를 피복한 단면 〉



〈 용암류 절리틈을 통해 새어나온 지하수(용천수)가 소규모 호수를 이룬 모습 〉



〈 과거 온천으로 활용되었던 수평터널의 입구 〉

1. 수자원 위원회 회의 및 수자원 시설 방문

- 라팔마는 과거 지하수가 풍부하다는 인식 속에서 개발이 무분별하게 이루어졌으나, 수문학적 특성과 개발 규모 간의 불균형으로 인해 지하수위가 급격히 하락하고 수자원 고갈 문제가 심화되고 있음
- 이는 지하수 보전의 중요성을 시사하는 사례로, 제주도는 현재의 지하수 관리 체계를 강화하여 동일한 실패가 나타나지 않도록 사전적·예방적 관리가 필요함
- 라팔마의 경우, 다수의 마그마 암맥 발달이 지하수의 부존 및 체류 특성에 중요한 역할을 하고 있음이 확인되었음
- 제주도의 경우에도 대수층 구조 및 지하수 부존 특성을 규명하기 위해 정밀 지질조사와 3차원 지하수 모델링이 체계적으로 추진되어야 하며, 이를 기반으로 장기적 지하수 관리 전략을 수립할 필요가 있음
- 라팔마는 수자원 관리계획 수립 시 수량·수질뿐 아니라 생태 및 연안환경 요소를 포함하여 종합적인 수문계획을 운영하고 있음
- 반면, 제주도의 통합물관리계획은 수자원 관리 중심으로 한정되어 있어, 향후에는 수자원·생태·연안환경을 포괄하는 종합적 계획으로 발전시킬 필요가 있음
- 라팔마에서는 농업이 전체 용수 이용의 80% 이상을 차지하며, 지하수 고갈 문제를 해결하기 위해 점적관수 방식으로 전환하고 있음
- 제주 역시 농업용수 비중이 높고 일부 지역에서는 해수침투 및 지하수위 하강 문제가 발생하고 있으므로, 농업용수 효율화를 위해 점적관수 방식 도입을 적극 검토해야 함
- 라팔마는 기후변화와 수자원 고갈에 대응하기 위해 하수 재이용과 해수 담수화를 핵심 정책으로 추진하고 있으며, 수문계획에도 상당한 예산을 투입하고 있음
- 제주도 또한 하수 재이용 활성화, 해수 담수화, 빗물활용 등 다양한 수원 개발을 통해 안정적이고 지속가능한 물 공급 체계를 마련할 필요가 있음

2. 현장 지질답사

- 숨골 유형 분류 체계의 보완 필요성
 - 라팔마 화산지대에 대한 현장 지질답사 결과, 기존 숨골 유형 분류 체계의 한계를 보완할 필요성이 확인됨
 - 제주의 경우 풍화, 토양 발달, 식생의 피복 등으로 인해 화산 지형의 원래 모습이 드러나지 않는 경우가 많아 현장에서 구조적 특성을 파악하기 어려운 한계가 있음
 - 반면 라팔마에서는 최근 분화로 형성된 화산지형이 원형에 가까운 상태로 보존되어 있어,

다양한 형태의 함몰지와 오목지를 직접 관찰할 수 있었음

- 이러한 비교는 제주 숨골의 성격을 보다 명확히 이해하고 분류 체계를 보완하는 데 중요한 의미를 가짐
- 기존 분류에서는 아아 용암류 지대에서는 오목지형 숨골이 발달하지 않는 것으로 정의되었으나, 쿼브레 베이아 및 테네기아 화산 일대에서는 크기와 규모가 다양한 오목지가 명확히 발달해 있음이 확인되었음
- 따라서 아아 용암류 지대를 배제한 기존 분류 체계는 재검토가 필요하며, 새로운 지질학적 근거를 바탕으로 보완되어야 함

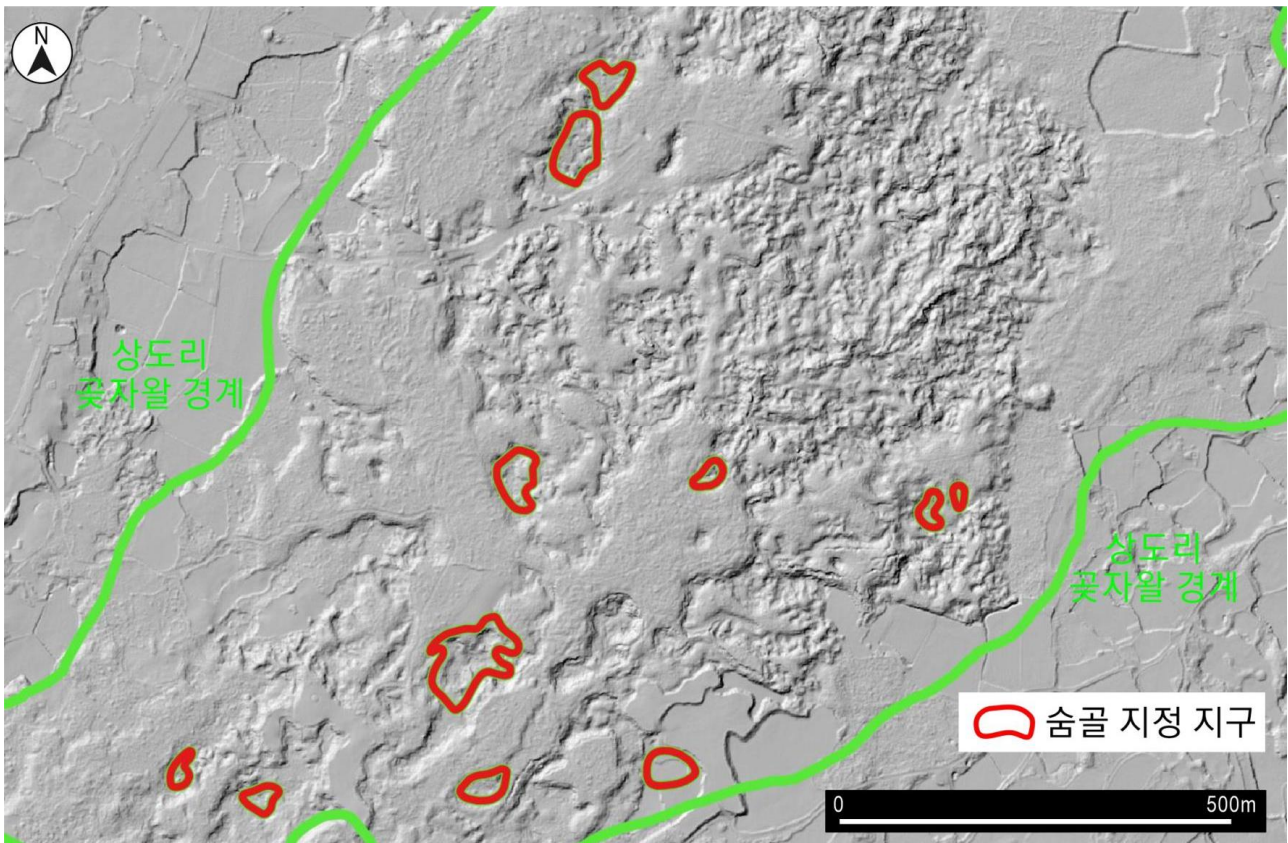
〈 라팔마 현장 지질답사를 결과를 기반으로 한 오목지형 숨골에 대한 개선(안) 〉

기존 유형분류		→	유형분류 개선(안)	
숨골 유형	투수성지질구조		숨골유형	투수성지질구조
함몰지형	팽창용암 함몰지		함몰지형	팽창용암 함몰지
	용암튜브 함몰지 또는 붕괴지			용암튜브 함몰지 또는 붕괴지
오목지형	틈새 또는 틈새분화구		오목지형	틈새 또는 틈새분화구
	분기공			분기공
	자연오목지			자연오목지
암괴지대형	아아 용암지대			아아 용암지대
	전이형 용암지대		암괴지대형	전이형 용암지대
	투물러스 풍화대			투물러스 풍화대
	스코리아층 또는 스페터층 분포지			스코리아층 또는 스페터층 분포지
절리-균열형	주상절리대		절리-균열형	주상절리대
	귀갑상절리대			귀갑상절리대
	판상절리대			판상절리대
	균열 및 파쇄대			균열 및 파쇄대
접촉형	용암류 경계면		접촉형	용암류 경계면

■ 아아 용암류 기반 숨골의 수리지질학적 의의

- 아아 용암류는 상·하부에 발달한 클링커 구조로 인해 매우 높은 다공성과 투수성을 나타냄(Macdonald, 1953; Millett et al., 2024)
- 이러한 구조적 특성은 표면에 형성된 오목지를 단순한 지형적 함몰부가 아니라, 강우와 지표수가 집중적으로 모여드는 집수 통로로 기능하게 함
- 또한 다공성이 높은 클링커를 통해 단기간 내 지하로 침투가 이루어질 수 있어, 지하수 함양에 있어서도 중요한 역할을 수행할 수 있음

- 이는 파호이호이 용암류 기반의 숨골과 비교했을 때, 아아 용암류 지대의 숨골이 보다 빠르고 집중적인 지하수 함양 경로로 작용할 수 있음을 시사함
- 따라서 향후 숨골 유형 분류와 평가에서는 단순한 지형 형태에 그치지 않고, 투수성과 지하수 함양 효율을 핵심 기준으로 설정할 필요가 있음
- 형성과정 및 발달 단계의 고려
 - 라팔마에서 확인된 함몰지, 균열, 붕괴 지형은 시간이 경과하면서 토양 발달, 풍화, 식생 피복을 거쳐 숨골로 전환될 수 있음을 보여줌
 - 이는 숨골이 정적인 단일 지형으로 존재하는 것이 아니라, 일정한 발달 단계를 거치는 동적 지형이라는 사실을 나타냄
 - 즉, 숨골은 단순히 “존재한다/존재하지 않는다”라는 이분법적 관점으로 접근하기보다, 형성 → 전환 → 성숙 → 쇠퇴라는 연속적인 변화를 겪는 지형으로 이해해야 함
 - 이러한 동적 관점은 현재 제주에서 지정된 숨골의 기원과 발달 과정을 해석하는 데에도 중요한 비교 자료가 되며, 장기적인 지하수 함양 구조의 변화를 이해하는 데 필수적임
- 다양한 지형 요소의 숨골화 가능성
 - 라팔마에서는 용암수로(lava channel), 균열, 분기공 등 다양한 화산 지형 요소가 시간이 지나면서 집수와 침투 기능을 수행할 수 있음이 확인됨
 - 이는 기존 숨골 분류가 지형과 구조 중심으로만 한정되었음을 보여주며, 향후에는 기능적 측면을 강조할 수 있도록 보완되어야 함
 - 즉, 오목지·함몰지뿐만 아니라 용암수로, 균열, 분기공 등도 장기적으로는 숨골 기능을 수행할 수 있는 잠재적 요소임을 인지해야 함
 - 따라서 향후 분류에서는 형태적 분류에 더해, 집수성·투수성·함양 가능성을 기준으로 한 “기능적 숨골” 개념을 추가하는 것이 바람직할 것으로 판단됨
- 꽃자왈 지대의 관리 방식 개선
 - 라팔마의 아아 용암류 지대에는 수많은 함몰지와 오목지가 분포하여 일종의 집합적 숨골 지대를 형성하고 있음
 - 제주의 꽃자왈 역시 아아 용암류 기반의 불규칙한 요철 지형이 넓게 발달하고 있으나, 현재는 일부 저지대만을 숨골로 지정하여 관리하고 있는 실정임
 - 그러나 드론 레이저 측량 결과, 지정된 숨골 외에도 숨골로 간주될 수 있는 저지대가 매우 많음이 확인되었고, 이들을 하나하나 개별적으로 지정하고 관리하는 것은 사실상 불가능함
 - 따라서 꽃자왈은 개별 숨골 단위가 아니라 하나의 숨골 지대로 간주하여 통합 관리하는 것이 바람직할 것으로 생각됨
 - 이러한 관리 방식은 제주뿐 아니라 하와이, 카나리아 제도와 같이 아아 용암류 지대가 넓게 분포하는 다른 화산섬에도 적용할 수 있는 모델이 될 수 있음



〈 숨골로 지정된 지구 외에 수 많은 함몰지 및 오목지가 발달해 있는 상도리 꽃자왈의 모습 〉

■ 지표수 - 지하수 - 해수 연계 연구 필요성

- 테네기아 해변에서는 지하수가 해안부에서 유출되어 해수와 직접 혼합되는 현상이 관찰되었음
- 이는 숨골을 통해 유입된 지표수가 지하수 함양 과정을 거쳐 최종적으로 해안에서 해수와 만나는 순환 과정을 보여주는데, 이러한 사례는 숨골 연구가 단순히 지표수의 집수 구조에 머무르는 것이 아니라, 섬 단위의 물 순환 체계 이해로 확장되어야 함을 시사함
- 특히 제주와 같이 해수침투 문제와 지하수 자원 관리가 중요한 지역에서는, 숨골을 통한 지표수 유입이 해안부 지하수와 해수 혼합에 어떤 영향을 미치는지 규명하는 것이 필요함
- 이는 향후 해안대 지하수 관리 및 해수침투 방지 전략 수립에도 중요한 기초자료가 될 수 있음

1. 라팔마 수자원 위원회 발표자료



Elzbieta Skupien Balon
Dra. Ingeniera de Minas, Colegiada 395
Máster en Prevención de Riesgos Laborales

Javier Peña García
Gerente del Consejo Insular
de Aguas de La Palma

SANTA CRUZ DE LA PALMA, JULIO DE 2025



ÍNDICE

- 1.- Introducción
- 2.- Gestión de agua en La Palma
 - 2.1.- Cantidad del agua
 - 2.2.- Balance hídrico
 - 2.2.- Calidad del agua
- 3.- Sistema de monitorización

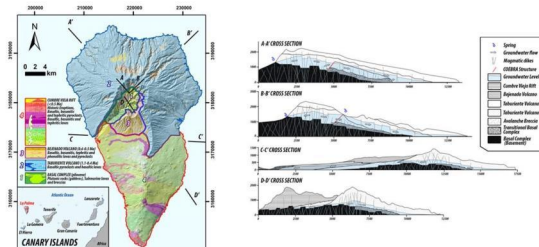
DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DE LA PALMA

- La Demarcación Hidrográfica de La Palma¹ comprende el territorio de la cuenca hidrográfica de la isla de La Palma, así como las aguas de transición y costeras asociadas.
- Se encuentra situada al Noroeste del Archipiélago², entre los paralelos 28° 52' y 28° 26' de latitud Norte y los meridianos 18° 01' y 17° 42' de longitud Oeste³, constituyendo la isla la parte emergida de un edificio volcánico oceánico cuya base submarina se apoya sobre la llanura abisal atlántica, a unos 4.000 m de profundidad y con altitudes que superan los 2.000 m, alcanzando su máxima altura en el Roque de Los Muchachos (2.426 m).
- La isla, con una extensión de 707 km² y 155 km de costa, tiene más de la mitad de su territorio ambientalmente protegido. Tiene una población residente de 85.933 habitantes, con un grado de presión sobre el territorio (269 hab/km²) inferior al soportado en otras islas del Archipiélago.
- Los conocimientos sobre la Geología, Hidrología, Geomorfología, Edafología, Vegetación, Fauna, Clima, e Hidrología subterránea se pueden ampliar en el Plan Hidrológico vigente.



Fuente: <https://lapalmaaguas.com>

GEOLOGÍA DE LA PALMA



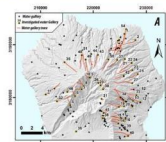
Fuente: Grafican (2011)

Fuente: Ponzola (2015) y Ponzola et al. (2022)

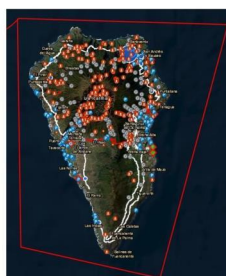
INVENTARIO DE CAPTACIONES

Tipo	Captaciones				Volumen anual estimado	
	Total	Activa	Inactiva	No inventariadas	2013	2022
Pozo	84	56	68	-	-	-
Coleta	137	60	97	-	64,85	45,7
Manantial	161*	53	108	-	-	-
TOTAL	432	159	274	-	-	-

Fuente: Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (Memoria, 2024)

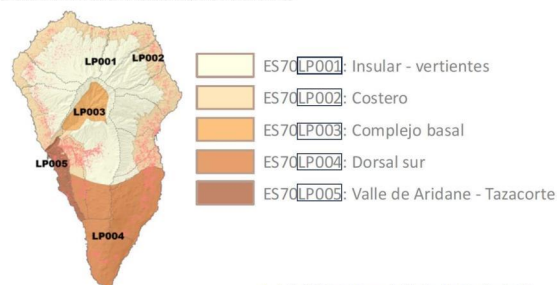


Fuente: Ponzola et al. (2022)



Fuente: <https://lapalmaaguas.com>

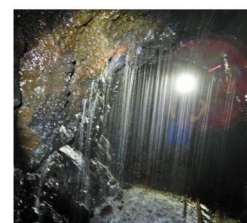
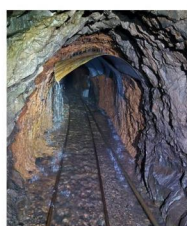
UBICACIÓN DE MASAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

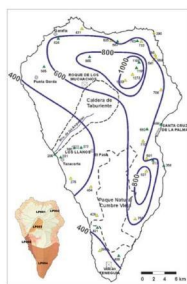


Fuente: Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (Memoria, 2024)



CANTIDAD DE AGUA



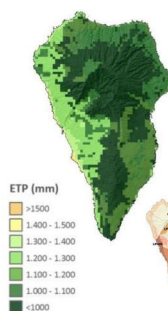


VARIABLES CLIMÁTICAS QUE INTERVIENEN EN EL BALANCE HÍDRICO INSULAR

PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL = **628,8 mm/a**
432,9 hm³/a

MASb	Superficie permeable km ²	P (mm/a)	ETP (mm/a)	ETR (mm/a)	ES (mm/a)	Ie (mm/a)	Tasa recarga %	Ie (hm ³ /a)
LP001	326,25	728,0	1124,6	333,5	71,4	323,1	44,4	105,4
LP002	178,00	547,2	1127,0	311,8	31,5	203,9	37,3	36,3
LP004	163,00	562,6	1158,3	317,2	35,6	209,8	37,3	34,2
LP005	21,25	296,5	1157,6	240,0	0,0	56,5	19,1	1,2
Total	688,50	628,8	1134,2	321,2	50,4	257,2	40,9	177,1

Fuente: Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (Memoria, 2004)

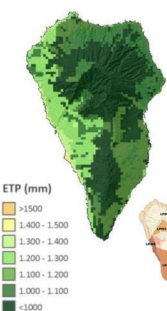


VARIABLES CLIMÁTICAS QUE INTERVIENEN EN EL BALANCE HÍDRICO INSULAR

ETP = **1134,2 mm/a** ETR = **321,2 mm/a**
221,1 hm³/a

MASb	Superficie permeable km ²	P (mm/a)	ETP (mm/a)	ETR (mm/a)	ES (mm/a)	Ie (mm/a)	Tasa recarga %	Ie (hm ³ /a)
LP001	326,25	728,0	1124,6	333,5	71,4	323,1	44,4	105,4
LP002	178,00	547,2	1127,0	311,8	31,5	203,9	37,3	36,3
LP004	163,00	562,6	1158,3	317,2	35,6	209,8	37,3	34,2
LP005	21,25	296,5	1157,6	240,0	0,0	56,5	19,1	1,2
Total	688,50	628,8	1134,2	321,2	50,4	257,2	40,9	177,1

Fuente: Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (Memoria, 2004)

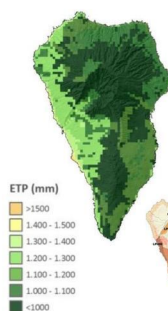


VARIABLES CLIMÁTICAS QUE INTERVIENEN EN EL BALANCE HÍDRICO INSULAR

ETP = **1134,2 mm/a** ETR = **321,2 mm/a**
221,1 hm³/a

MASb	Superficie permeable km ²	P (mm/a)	ETP (mm/a)	ETR (mm/a)	ES (mm/a)	Ie (mm/a)	Tasa recarga %	Ie (hm ³ /a)
LP001	326,25	728,0	1124,6	333,5	71,4	323,1	44,4	105,4
LP002	178,00	547,2	1127,0	311,8	31,5	203,9	37,3	36,3
LP004	163,00	562,6	1158,3	317,2	35,6	209,8	37,3	34,2
LP005	21,25	296,5	1157,6	240,0	0,0	56,5	19,1	1,2
Total	688,50	628,8	1134,2	321,2	50,4	257,2	40,9	177,1

Fuente: Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (Memoria, 2004)



VARIABLES CLIMÁTICAS QUE INTERVIENEN EN EL BALANCE HÍDRICO INSULAR

ETP = **1134,2 mm/a** ETR = **321,2 mm/a**
221,1 hm³/a

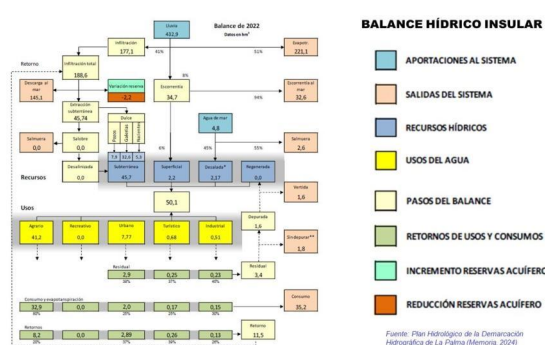
MASb	Superficie permeable km ²	P (mm/a)	ETP (mm/a)	ETR (mm/a)	ES (mm/a)	Ie (mm/a)	Tasa recarga %	Ie (hm ³ /a)
LP001	326,25	728,0	1124,6	333,5	71,4	323,1	44,4	105,4
LP002	178,00	547,2	1127,0	311,8	31,5	203,9	37,3	36,3
LP004	163,00	562,6	1158,3	317,2	35,6	209,8	37,3	34,2
LP005	21,25	296,5	1157,6	240,0	0,0	56,5	19,1	1,2
Total	688,50	628,8	1134,2	321,2	50,4	257,2	40,9	177,1

Fuente: Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (Memoria, 2004)

BALANCE HÍDRICO INSULAR

Masa de agua	Extracción (hm³/año)				Entradas (hm³/año)
	Preso	Galeras	Nacientes	Total	
EST01P001 – Insular Vertientes	0	32,35	5,3	37,7	105,4
EST01P002 – Contorno	4,28	0,05	0	5	36,3
EST01P003 – Corregido Rural	0,04	0	0	0	0
EST01P004 – Dorsal Sur	0	0	0	0	34,2
EST01P005 – Valle de Aranduno-Trancura	3,09	0	0	3	1,2
TOTAL	7,4	32,6	5,3	45,7	177,1

Fuente: Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (Memoria, 2004)



BALANCE HÍDRICO INSULAR

- APORTACIONES AL SISTEMA
- SALIDAS DEL SISTEMA
- RECURSOS HÍDRICOS
- USOS DEL AGUA
- PASOS DEL BALANCE
- RETORNOS DE USOS Y CONSUMOS
- INCREMENTO RESERVAS ACUÍFERO
- REDUCCIÓN RESERVAS ACUÍFERO

Fuente: Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (Memoria, 2004)

RECURSOS HÍDRICOS



TOTAL = **50,1 hm³/AÑO**

0,0 45,7 2,2 2,2 0,0
Agua desalada Agua subterránea Agua superficial Agua desalada Agua regenerada

AGUA SUBTERRÁNEA = 45,7 hm³/año

POZOS= 7,9 hm³/año GALERÍAS= 32,6 hm³/año NACIENTES= 5,3 hm³/año



Fuente: Elaborado a partir del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (Memoria, 2004)

USOS DEL AGUA



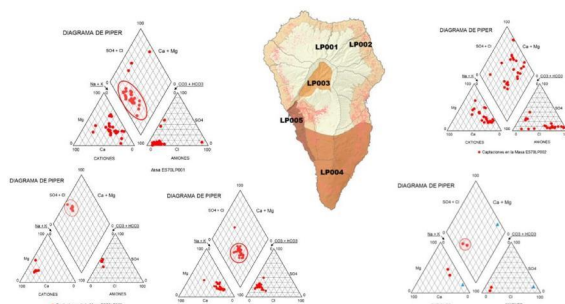
TOTAL = **50,1 hm³/AÑO**

41,2 0,0 7,8 0,6 0,5
Agrario Recreativo Urbano Turístico Industrial



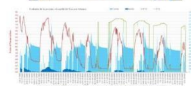
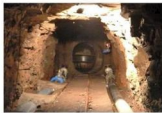
Fuente: Elaborado a partir del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (Memoria, 2004)

CALIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS



Fuente: Elaborado a partir del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (Memoria, 2004)

MONITORIZACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

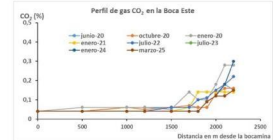
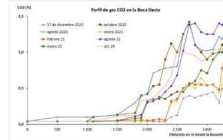


Fuente: Figura elaborada por Francisco Martín (Martín, 2005)



Fuente: Documento de Seguridad y Salud del Tínel de Tránsito (Siquen, 2005)

MONITORIZACIÓN DEL AMBIENTE DE LAS GALERÍAS

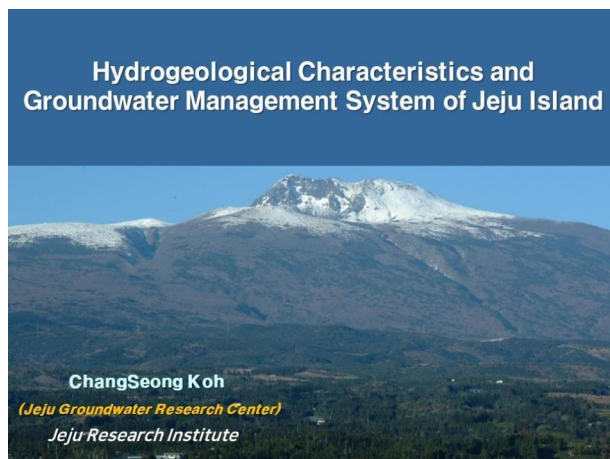


Fuente: Documento de Seguridad y Salud del Tínel de Tránsito (Siquen, 2005)

GRACIAS POR SU ATENCIÓN



2. 센터 발표 자료



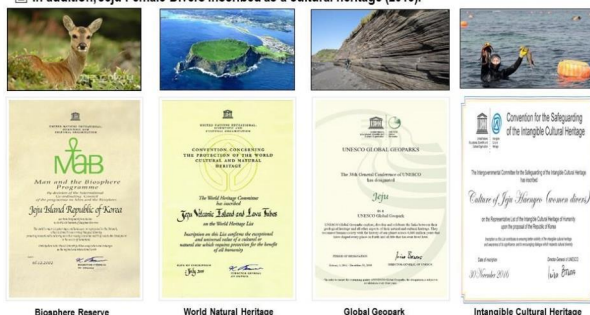
01 Location and Main Statistics, Jeju Island

- Jeju Island is located between the Korean Peninsula, China and Japan. The island is a composite volcanic structure rising 1,950 m above sea level
- The total area is 1,850 km², population is 666 thousand people (2025), visitors are 12 Million People (2024), and Gross Regional Domestic Product is \$ 21 Billion (equivalent to about \$31,200 per person) (2023).
- The industrial structure of Jeju Island is 12% for agriculture, forestry and fishing, 3% for manufacturing, 72% for service (tourism), and 13% for construction.



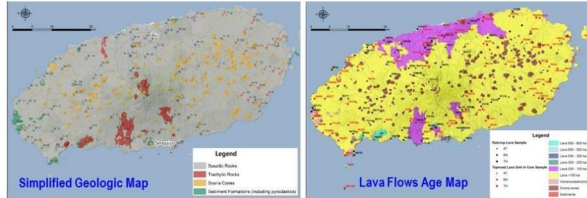
02 Jeju Island is a Treasure Island

- UNESCO designated Jeju Island as a Biosphere Reserves (2002), World Natural Heritage Site (2007) and Global Geopark (2010).
- In addition, Jeju Female Divers inscribed as a cultural heritage (2016).



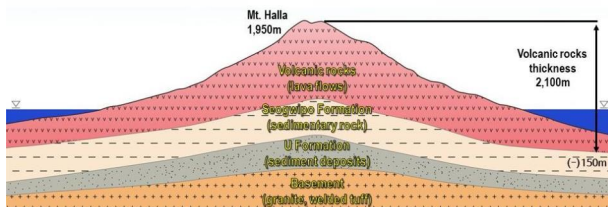
01 Young Volcanic Island

- Jeju Island is formed by volcanic activity from 1.9 Ma to 1,000 years ago. The formation age of this island is very young. Volcanic rocks cover 98% of the total area of the island while sediments cover the remaining 2% (28 km²).
- Volcanic rocks can be divided into two groups: Alkali basalt group and trachyte group. The sedimentary rocks consist of tuff, marine deposits, interbedded sediments with volcanic rocks, recent sediments, and sand dunes.
- In addition, about 400 cinder cones are composed of scoria.



03 Subsurface Geologic Structure

- The subsurface of Jeju Island is composed of volcanic rocks, Seogwipo Formation, U Formation (unconsolidated muddy sand deposits), and basement (granite, welded tuff). The Volcano is about 2 km thick (above sea level 1,950 m and below sea level 150 m), which is only 20% of the thickness of Mauna Kea Volcano in Hawaii.
- The Seogwipo Formation (mostly marine sediments) is broadly distributed beneath the volcanic rock and plays a role as a key-bed. Its subsurface depth varies by region.

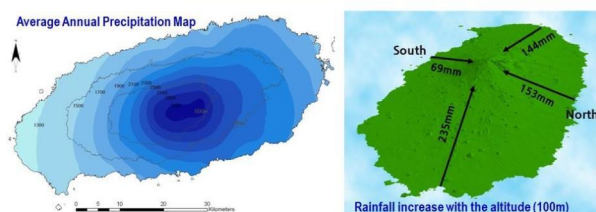


05 Kingdom of Cinder Cones

- About 400 small volcanic cones on Jeju known as 'Oreum' that are mostly cinder cones or scoria cones of permeable unconsolidated materials.
- However, tuff cones and tuff rings also occur and consist of consolidated or semi-consolidated tephra of poor permeability. Tuff is mostly found in coastal areas and tuff deposits act on a hydrogeological barrier under subsurface.



01 Precipitation Distribution



- Jeju Island has one of the highest rainy area in Korea. The average annual rainfalls (1998~) is about 2,000 mm in Jeju island and it increased with altitude.
- The average annual rainfalls in the coastal region ranges from 1,100~1,900 mm, in middle altitude area ranges from about 2,500~2,700 mm and, in mountainous area ranges from 4,500~6,500 mm.
- However, there was very large fluctuations of precipitation every year. Since 1985, the frequency of droughts and heavy rains tend to be more frequent.

02 Outcrop by Rock Types

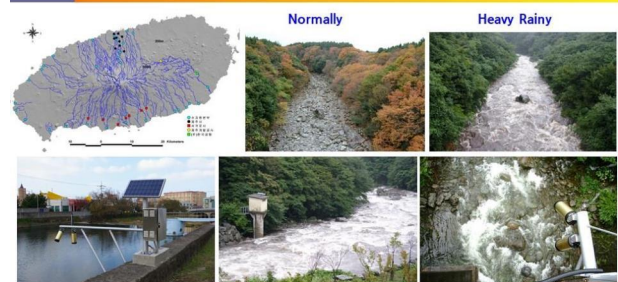


04 Subsurface Geology

- Volcanic rocks consist of pahoehoe and Aa lava flows. According to drilled core, pahoehoe lava is thin bedded (0.5~5 m) with joints, vesicles, cracks, and lava tubes.
- Aa lava thickness ranges from 5~15 m with clinker, massive core and vertical joints. Clinker layers with an average thickness of 3~5 m are developed on the top and bottom of Aa lava.
- In addition, sediment deposits between the lava flows, with an average 2~3 m.

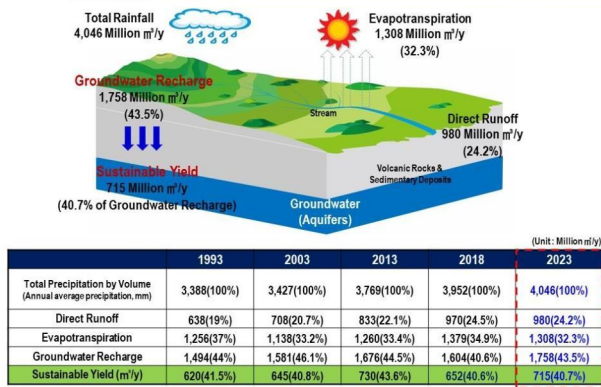


02 Stream Flows

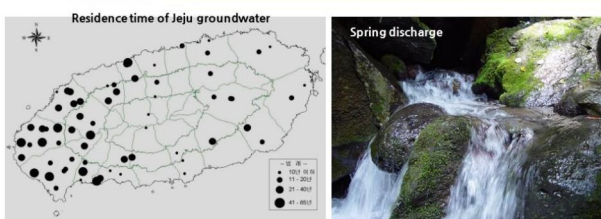


- Most of the stream development on the north-south slopes and east-west slope is a poor, stream length is short and slopes are steep therefore runoff time is short too.
- Because of composition of high permeable volcanic rocks in Jeju Island, there is no permanent stream flow. The stream flow only occurs when rainfalls over 50 mm per day.

03 Water Balance & Sustainable Yield

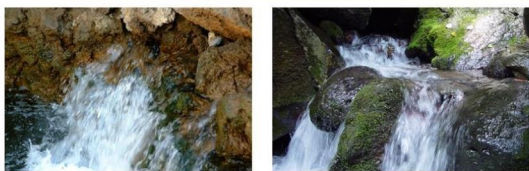


05 Groundwater Residence Time



- Average residence time of Jeju groundwater is about 22 years. In certain areas of the western region, however, 50-years or older groundwater has been found.
- Average age of groundwater greatly differs by region: Western region-30 years, Northern region-21 years, Eastern region-19 years, and Southern region-13 years.
- Groundwater flow velocity also varies by region. Some location have groundwater flow velocity about 70 m/year while other locations up to 1,500 m/year (average : 475m/year).

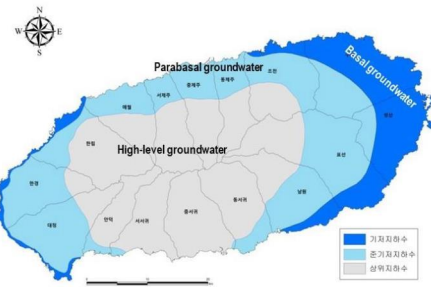
11 Groundwater Quality



- Jeju ground water quality is excellent with generally low mineral content and an average temperature of 14.3°C. Total dissolved solids is less than 100 mg/l on average and pH is 7.3 on average.
- Jeju ground water can be categorized into three types by chemical characteristics. Since basal aquifer water is influenced by salt water, it is dominated by the presence of sodium chloride.
- Water in parabasal and high level aquifers unaffected by salt water has the magnesium/calcium bicarbonate type and is the greatest resource of the Jeju island. Ground water affected by agriculture and animal feed lots have increased the levels of sodium, sulfate, and nitrate.

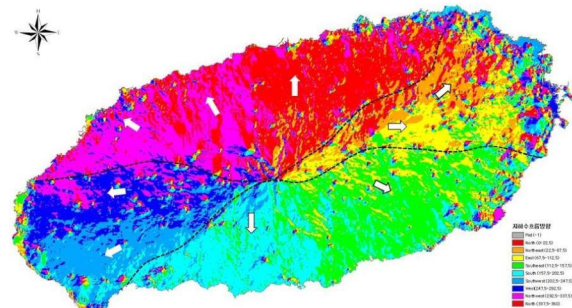
04 Groundwater Occurrence

Jeju groundwater can be classified into Basal groundwater, Parabasal groundwater, and High-level groundwater based on subsurface geologic structure, groundwater level fluctuation, vertical groundwater quality changes, hydraulic slope, and water quality properties, etc.

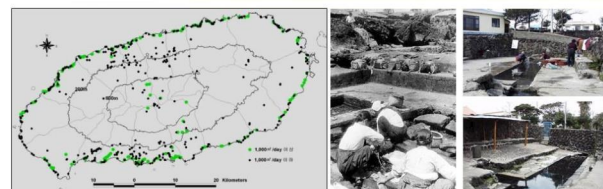


09 Groundwater Flow Direction

- As a result of analyzing the direction of groundwater flow using groundwater level data, the groundwater mainly flows north-northwest direction and south-southeast direction.
- In contrast, the groundwater flow heading east and west was relatively small.



12 Springs



- There are 646 springs in Jeju Island, with an average daily discharge of 1 million m³. It is located on the south and north slopes and on the coast.
- Springs was used as a drinking water source for residents before development of groundwater wells and are still used for a public water supply.
- However, spring discharges tend to decrease due to groundwater well development and land use changes.



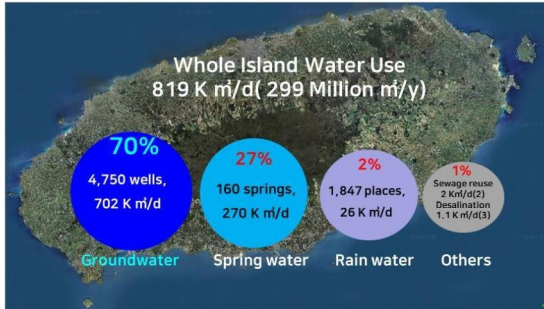
04 Water Development & Use

01 History of Water Development

Spring Water & Rainwater Use (Before 1960)	Public Water Sources Development (1961~1990)	Regional Water Supply System (1995~2010)
Women carried water every day using water jar and washed clothes in the spring.	First groundwater well was developed in 1961. Since the 1970s, springs and wells have been developed as public water sources.	Regional water supply system was constructed for Water Supply throughout Jeju Island from 1995 to 2010.

02 Water Use

- The total daily water consumption in Jeju Island is 1,005 K m³. Of these, 97% are groundwater and spring water. Rainwater is used only 3%.
- Jeju Island relies on groundwater for not only drinking water but also agricultural water.



04 Groundwater Wells and Permit

- Agricultural wells account for 67% of total wells and 57% of pumping permits.

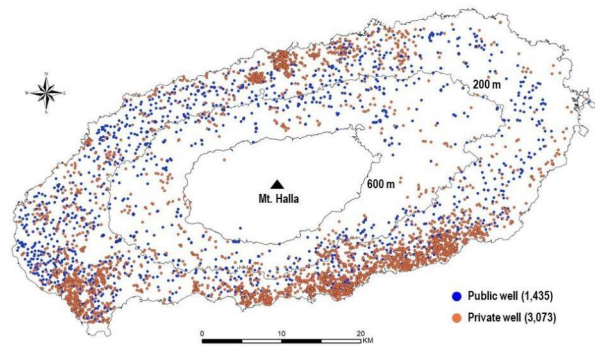
(unit: well, 10³ m³/d)

Classification	Total	Domestics	Agricultural	Industrial	Bottled Water	
total	No. of wells	4,507 (100.0%)	1,311 (29.1%)	3,061 (67.9%)	124 (2.8%)	11 (0.2%)
	Authorized amount	1,516 (100.0%)	659 (43.4%)	836 (55.1%)	17 (1.1%)	5 (0.3%)
public	No. of wells	1,435 (100.0%)	480 (33.4%)	940 (65.5%)	5 (0.3%)	10 (0.7%)
	Authorized amount	1,260 (100.0%)	561 (44.5%)	693 (55.0%)	19 (0.2%)	4.6 (0.4%)
private	No. of wells	3,072 (100.0%)	831 (27.1%)	2,308 (74.9%)	145 (3.0%)	1 (0.02%)
	Authorized amount	256 (100.0%)	98 (38.3%)	142 (55.6%)	15 (6.0%)	0.1 (0.01%)

※ Saline groundwater wells and groundwater monitoring wells were excluded

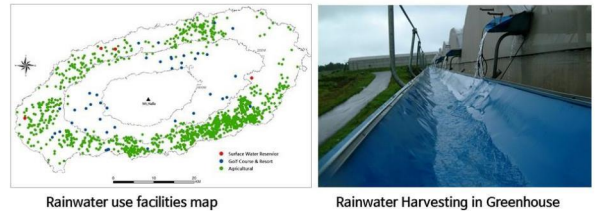
03 Groundwater Well Distribution

- 4,508 wells, Authorized permit amount 1.5 Million m³/d (2024)



05 Rain Water Use

- Rainwater use facilities**: Total 1,129 places, Storage capacity 6,191 K m³/d
 - 4 reservoirs, 30 golf course reservoirs, 1,076 for agriculture, 19 for domestic
- Rainwater Usage**: annually 9,177 K m³/y, average daily 25 K m³/d (0.4% of facility Capacity)
 - 7,037 K m³ of golf course → 51% of total golf course water use (13,797 K m³/y)
- Financial support for the construction of agricultural rainwater facilities**
 - Jeju Provincial Government provides 70% of the total construction cost



06 Bottled Water Business

- Jeju Development Corporation was established by Jeju Provincial Government(1995)
 - Started "Jeju Samdasoo" bottled water business since 1998
- Jeju Samdasoo is Korea's leading bottled water brand
 - Annual sales of 942,000 m³ of bottled water, sales of \$ 251 million
- 50% of profits from bottled water sales are returned to the local community
 - Support for groundwater protection, environmental conservation, education, housing, and start-ups
 - Ongoing partnership with UNESCO Paris HQ, donating \$84,000 annually for hydrogeological surveys in developing countries



01 Groundwater Management Principles

In Jeju Island, groundwater is not just water but life water for people and the unique subsurface resource. Therefore, Jeju Provincial Government has established and implemented the following principles for managing groundwater resources as sustainable resources.

- Groundwater resources are managed as public resources on Jeju Island.
- It is managed scientifically through hydrogeological survey and research on groundwater systems.
- The dependency on groundwater is reduced through integrated management of all water resources in Jeju Island.



02 Major Groundwater Management System

Jeju Island relies on groundwater for all water use. Thus, the Jeju Provincial Government has enacted a special law in 1991 to systematically manage groundwater. The main provisions of the Groundwater Management Act are as follows.

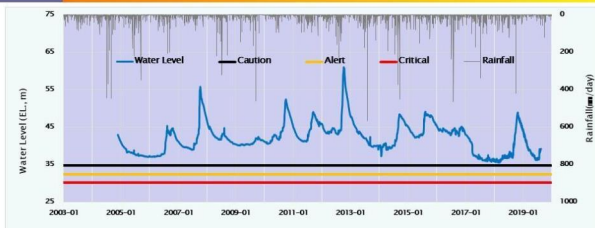
- All groundwater well development & use permit (new and renewal permit)
- All groundwater user have to pay a fee with groundwater pumped
- Bottled water production well is permitted only public corporation (private company is prohibited)
- All groundwater user have to submit an impact assessment report when applying for permission
- Designated as a special management area for reasonable use of groundwater resources
- Designated as a groundwater conservation areas (1-4 level according to contamination vulnerability)
- Designation of reference water level monitoring wells for reducing groundwater pumped
- Prohibit underground injection of potential groundwater contaminants
- Groundwater artificial recharge facility standards for construction
- Mandatory rainwater user designation and establishment of facility standards
- Restriction on the supply and use of pesticides to prevent potential groundwater contamination
- Groundwater well development and pump installation standards
- Groundwater management plan (every 10 years and 5 years revised)
- Groundwater management special accounts
- Operate groundwater monitoring network system
- Designate groundwater resources as conservation resources and restrict export to inland areas

03 Groundwater Well Development Permit



- Well development is permitted by the governor but should be declared in times of national crisis(war, etc).
- Renewal permit for all groundwater wells
 - Bottled water wells : every 2 years
 - Domestic wells : every 3 years
 - Agricultural/industry/monitoring wells : every 5 years
- Limit on permission for Groundwater Development
 - Within 10 m radius from sewer pipes line etc.
 - Within 50 m radius from livestock wastewater and spring
 - Areas within a 250 m radius from current production well, within 2 m from property boundary
- Groundwater well development supervision system
 - Development or sealing of all groundwater wells should be supervised by engineering experts
 - When the construction is completed, the supervision completion report should be submitted

05 Operation of Reference Monitoring Wells



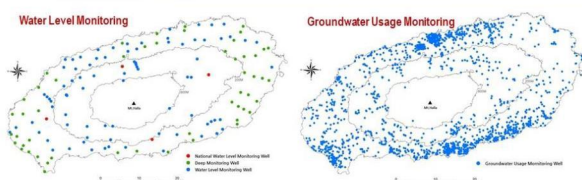
- Assignment of 61 reference water level monitoring wells to prevent excessive decline of groundwater levels and seawater intrusion. Based on the monitoring water level, progressive actions can be taken.
- Progressive actions
 - 1st stage(Groundwater level decline caution)
 - ✦ Inform the public about the decline of groundwater levels and need for water conservation
 - 2nd Stage(Groundwater level decline alert)
 - ✦ Reduce groundwater use by 10%
 - 3rd Stage (mandatory conservation)
 - ✦ Reduce groundwater use by 30%

07 Special Accounting for Groundwater Management



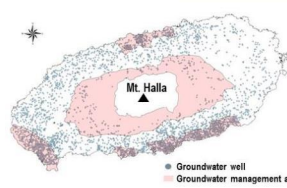
- Collect funds for the development, use, conservation, and management of groundwater, special groundwater management account was established
- Income
 - Fees for Groundwater use, general and other special accounting, and penalty
- Expenditure
 - Groundwater studies, Establishment Water Management Plan, Sealing of Groundwater Wells, Groundwater Monitoring system installation etc.

09 Real-Time Groundwater Monitoring



- Monitoring wells on Jeju Island can be categorized into five types: water levels, seawater intrusion(deep monitoring), water quality, groundwater pumped, and stream flow gauging (about 1,500 wells/sites) are in operation).
- In terms of monitoring types, water level accounts for 153, deep monitoring wells 53, groundwater usage 1,095, groundwater quality 152, and stream flow 36.
- The data from each well are transmitted to the office through a CDMA wireless network. The monthly charge for the service is about \$ 10 per well.

04 Groundwater Management Area



- Target Area
 - Areas where groundwater levels decline or is likely to decline severely
 - Area where seawater intrusion may occur or where CI exceeds the Drinking Water Quality Standard
 - Areas that need to restrict the development and use of groundwater for future water demand
- Designation procedure
 - Draft zoning(Governor) ⇒ Deliberation and consent by Jeju Provincial Government Council
 - Review of extension period (every 5 years)
- Designated and Announced : 2003. 6. 25
 - Areas : 632.2 km² (6 Districts)

06 Rainwater Use



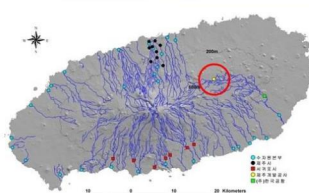
- Target
 - More than 60,000 m² golf course, more than 100,000 m² hot spring complex
 - Resort using more than 5,000m³ of water per day
- Base amount of monthly rainwater use
 - Golf course : more than 40% of total water use
 - Tourism Complex : more than 10% of total water use
- Golf course Rainwater Use
 - Approximately 6,000 to 7,000 K m³ of rainwater are used annually, accounting for about 50 ~ 60% of the total water consumption including groundwater.
 - ✧ Rainwater use in the golf course is affected by rainfall.

07 Special Accounting for Groundwater Management



- Collect funds for the development, use, conservation, and management of groundwater, special groundwater management account was established
- Income
 - Fees for Groundwater use, general and other special accounting, and penalty
- Expenditure
 - Groundwater studies, Establishment Water Management Plan, Sealing of Groundwater Wells, Groundwater Monitoring system installation etc.

10 Operation of Stream Flow Gage



- Even though surface water discharge data are essential for the water-budget analysis, no data were available until 1996.
- The Jeju government realized that the measurement of surface water was needed for proper analysis water budget. Since 1997, surface water has been monitored at 30 sites.