

한라산국립공원 자연자원조사

2012. 12

제주특별자치도 한라산연구소

지 질

조사위원 : 전용문

1._ 서 론

- 가. 연구배경
- 나. 선행연구

2._ 백록담 일대의 지질조사 결과 및 고찰

- 가. 백록담 주변 암석들의 특징 및 해석

3._ 주요 탐방로 조사결과 및 고찰

- 가. 윗세오름-서북벽 정상
- 나. 윗세오름 - 남벽정상
- 다. 남벽분기점 - 돈내코 코스

4._ 결과 및 요약

5._ 참고문헌

1. 서론

가. 연구배경

제주도는 신생대 후기부터 역사시대까지 발생한 화산 분출로 형성된 방패형 화산섬으로 용암분출에 의한 두꺼운 화산암과 화산쇄설암(응회암) 및 퇴적암으로 구성되어 있다(원종관, 1976; 박기화 외, 2000a). 제주도의 지표를 피복하고 있는 화산암류는 현무암질에서 조면암질에 이르는 다양한 용암류와 10여 개의 응회환(tuff ring)과 응회구(tuff cone)를 비롯한 360여 개의 분석구(scoria cone)로 구성되어 있다(박기화 외, 2000).

제주도 화산암류의 기원은 지판 내부의 열점(hot spot)활동으로 보는 견해도 있지만(박준범, 1994; Lee, 1982), 동위원소비를 이용한 지화학적 연구에 따르면 인도와 유라시아판의 충돌과 태평양판의 섭입에 따른 응력장의 확장에 따른 감압작용(decompression)으로 천부 연약권의 부분용융에 의해 형성되었다는 견해(Choi et al., 2006)도 있다(전용문, 2009).

제주도의 중앙부에 위치한 한라산은 중심부에 화산분화구인 백록담이 있으며, 제주도의 지표를 피복하고 있는 대부분의 용암류들은 한라산에서 유래한 것으로 알려져 있다(박기화 외, 2000a). 하지만 제주도의 해안가를 따라 수행된 연구들에 비해 접근이 용이치 않아 한라산 백록담 주변의 지질에 대해서는 연구가 미흡한 편이다.

현재 한라산을 비롯한 백록담의 형성사에 대한 여러 가지 의견들이 있는데, 화산 분출에 의해 쌓인 용암과 화산쇄설암이 함몰하여 생성된 화산분화구라는 주장(고정선 외, 2003; 손영관 외, 2009; 제주특별자치도, 2010)과 상승하는 마그마에 의해 돔(dome)상으로 융기된 돔상 용기산체의 정상부가 함몰된 함몰구라는 상반된 주장(윤선 외, 2005)이 제기되어 있다. 이러한 논란은 한라산 백록담의 암상에 대한 상반된 해석, 즉 백록담의 암석이 화산분출에 의한 것인지 혹은 관입에 기인한 것인지에 대한 견해차에서 유래한다.

한라산의 형성과정에 대한 논란에 있어 최근 2003, 2010년에 수행된 한라산 백록담 주변의 지질조사를 통해 한라산 백록담은 돔상의 조면암이 형성되고 난 이후 조면암질 현무암이 분출되었다는 이론이 타당성을 얻고 있는 상태이다. 그러나 백록담을 비롯한 한라산 전체에 대한 지질학적 연구는 아직 수행되지 못한 상태이며, 장기적인 관점에서 한라산 백록담에 대한 세밀한 암상관찰과 기재 그리고 이들의 분출양상에 대한 정밀한 지질조사가 수행되어야 할 것이다.

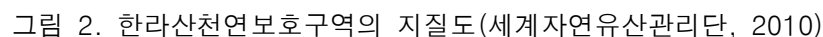
이번 조사는 한라산 백록담 주변의 대표적인 암석들을 대상으로 야외산출 형태와 기재, 분류 그리고 이들의 분출양상 및 선후관계 등을 언급하고 한라산 형성사에 대해 해석을 제시하고자 하는 목적으로 연구를 수행하였다. 또한 한라산의 고지대 등산로 구간을 중심으로 풍화에 의한 탐방로와 지형 변화에 대해서도 조사를 실시하였다.



그림 1. 한라산 백록담의 전경(상)과 한라산 내의 여러 오름(하)

1) 지질개요

한라산 정상부는 바라보는 각도에 따라 매우 다른 형상을 하고 있는데 이는 한라산 정상부가 성질이 다른 두 종류의 용암으로 만들어졌기 때문이다 (고정선 외, 2003). 즉, 백록담 분화구의 서쪽 절반은 점성이 매우 높은 조면암으로 이루어져 돔(dome)의 형상을 하고 있는 반면 동쪽 절반은 점성이 낮은 조면현무암(trachybasalt)으로 이루어져 지형이 완만한 편이다. 또한 분화구 남쪽으로는 조면암 돔의 붕괴에 의해 깎아지른 듯 한 절벽이 만들어져 있다. 한라산 정상부와 달리 아래쪽의 측면부에는 몇몇 큰 골짜기가 만들어져 있는데, 특히 영실기암에서는 주상절리와 함께 화산체의 침식과 붕괴에 의해 만들어진 지형이 잘 만들어져 있다(그림 2; 제주특별자치도, 2010).



2) 백록담 주변의 화산활동사

백록담은 순상화산체(shield volcano)인 한라산의 정상부를 구성하고 있으며 화산활동 당시의 원지형을 그대로 보유하고 있는 지역이다. 한라산 정상부에는 백록담이라고 부르는 분화구가 형성되어 있다.

백록담 분화구의 서벽 및 남벽을 구성하고 있는 조면암질 용암은 약 10~2만5천년 전 만들어진 돔(dome)상 화산체로 알려져 있다. 또한 백록담 동능의 현무암질 용암은 분화구 사면을 얇게 덮고 있을 뿐이며, 현무암 하부에는 분석으로 이루어진 수성화산 쇄설성퇴적층이 놓여 있다(박기화 외 2000b; 제주특별자치도, 2010).

한라산 정상부를 구성하고 있는 백록담 조면암체는 큐리형(熔岩流型, Coulee type) 용암돔의 형태를 나타내고 있으며, 용암돔의 외곽부에 발달하는 테일러스 에이프런(talus apron)은 침식 제거되고 그 내부의 용암류의 유동에 의한 수직 주상절리가 노출되어 있다. 큐리형 용암돔에서는 분출한 용암돔의 일부가 급경사의 사면에서 하부로 이동함으로서 돔과 함께 용암류가 발달하는 돔이다. 이때 이동하는 용암류나 용암돔 내부에는 연속적인 돔의 성장으로 화도로부터 마그마가 유출됨에 따라 먼저 만들어진 것은 외부로 밀려나게 되는데 용암류의 외측부제로의 이동으로 인한 하부 전단력에 의하여 램프구조(ramp structure)가 발달하기도 한다(고정선 외, 2003).

백록담의 남측 벽에서는 돔의 내부가 개석되어 내부에서의 유동방향의 변화에 따른 3종류의 절리계가 잘 관찰되며 하부에는 수평에 가까운 판상절리(platy joints)가 잘 관찰된다. 이는 돔 하부 부분의 전단력에 의한 것으로 응력의 상태를 보여주는 것이다(이창섭 외 2007). 따라서 백록담은 기존에 존재하고 있었던 조면암의 용암돔을 뚫고 백록담조면현무암의 스코리아층 및 용암류를 분출시킨 산정 분화구(summit crater)이다(윤성효, 외 2002; 강순석 외, 2011).

한편, 백록담 주변에는 수천년 전에 분출한 것으로 추정되는 후화산활동의 산물인 소화산체가 분포되어 있다. 오름이라고 불리는 이 작은 화산체들은 한라산 화산활동의 실체를 보여주는 좋은 연구 자료일 뿐만 아니라 이 지역의 화산활동사와 지형을 결정짓는데 기여했다. 백록담 서측에 나란한 윗세오름(붉은오름, 누운오름, 죽은오름), 남측으로 이어진 방아오름(웃방애, 알방애)은 백록담이 형성될 시기에 화산폭발을 한 것으로 추정되는 매우 젊은 화산체이다. 또한, 백록담 서북측으로 이어지는 장구목과 북동쪽 능선으로 연결된 왕관능도 독립된 화산체로서 백록담 주변의 화산지형을 형성하는데 기여했다(박기화 외 2000a). 백록담 분화구가 형성되는 동시기에 백록담 주변에

서도 후화산활동이 시작되었다. 우선 윗세 누운오름과 족은오름 화산체가 분출하였다. 이 용암류는 선작지왓과 영실 조면암을 감싸며 하류로 흘러 넓은 용암류의 화산지형을 형성하였다. 이 용암류는 법정동조면현무암으로 한라산 백록담 서측부의 한라산 고지대(영실탐방로)를 덮고 있다(그림 3). 이어서 백록담 주변에서는 윗세 붉은오름, 사재비동산, 방해오름 3개가 동시에 분화를 시작했다. 이 용암류를 구성하고 있는 윗세오름조면현무암은 선작지왓 동쪽을 통하여 영실분화구 동편까지 추적이 가능하며, 방해오름에서 유출된 용암류는 효돈천 상류인 산별른내를 중심으로 매우 두꺼운 용암류 단위를 보여주는 매우 특징적인 현무암질 용암류를 구성하고 있다.

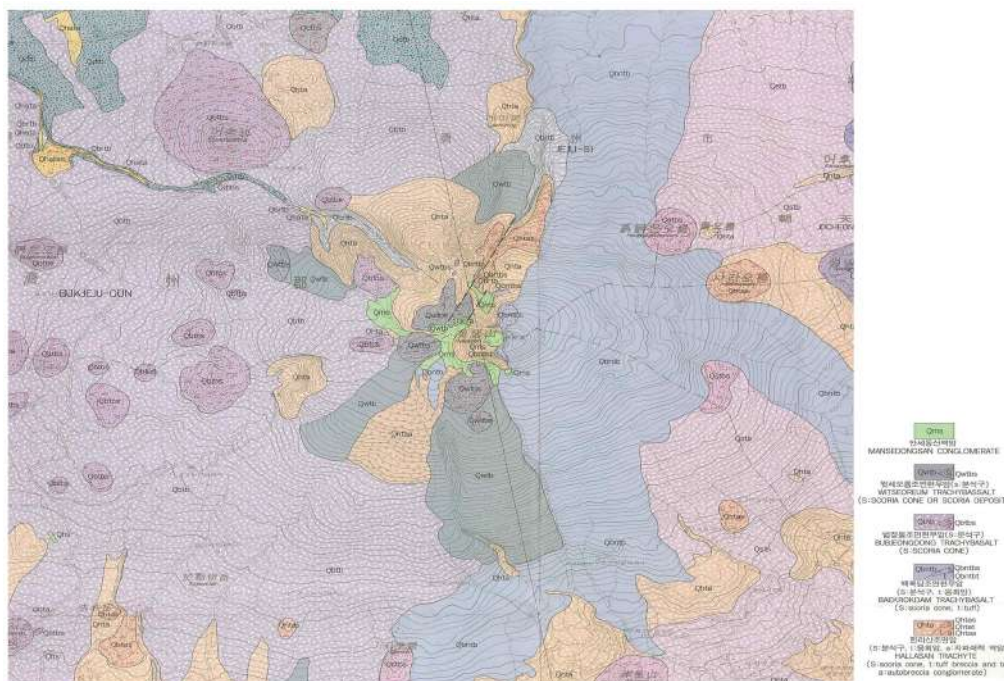


그림 3. 한라산 백록담 주변 지질도 (박기화 외, 2000)

2. 백록담 일대의 지질조사 결과 및 고찰

가. 백록담 주변 암석들의 특징 및 해석

1) 한라산조면암

〈1〉 야외산출양상

한라산조면암은 백록담 분화구의 서쪽 및 영실기암, 그리고 백록담의 북쪽과 남쪽에 넓게 분포하고 있으며, 돛상으로 솟아있는 백록담 분화구를 이루는 주요 암석이다(박기화 외, 2000a; 고정선 외, 2003).

한라산조면암으로 이루어진 백록담 분화구의 서쪽과 남쪽 절벽은 수 m~수십m 폭의 수직절리(또는 주상절리)가 발달하고 있으며 계절적 동결과 썰작용 등에 의한 박리현상으로 인해 거칠고 돌출된 지형을 이루고 있다. 그리고 절리발달에 따른 암벽붕괴 및 사면사태가 현재에도 진행 중이다(김태호, 외 2002; 이창섭 외, 2007). 절리의 형태는 서북벽과 남벽, 병풍바위에서 각각 다른 형태로 산출된다. 또한 절리의 하부에는 오랜 기간 동안 지속된 풍화침식에 따라 조면암이 토양화 작용을 받은 부분도 관찰된다(그림 4). 반면 백록담의 동측에는 절리의 발달이 전혀 관찰되지 않는다.



그림 4. 한라산조면암 병풍바위에 발달한 절리와 하부 풍화된 토양

한편, 한라산조면암으로 구성된 병풍바위는 풍화된 암석들이 절리면을 따라 절벽 아래로 떨어져 모여 있고, 오랜 기간동안 서서히 계곡의 아래쪽을 따라 흘러가는 돌서렁(talus) 형태를 보이고 있다(그림 5). 그리고 반대쪽 절벽 사면에는 계절적으로 홍수 등에 일시적으로 형성되는 폭포가 발달해 있다.



그림 5. 병풍바위 절리를 따라 붕괴된 암석으로 채워진 계곡

백록담조면암은 윗세오름이나 서북벽 또는 남벽 순환로에서 바라보면 용암돔의 구조를 보이고 있다. 이러한 용암돔 구조는 점성이 높은 조면안질 용암의 물리적인 성격과 관계가 깊다. 조면암을 유출시킨 마그마가 하부로부터 지표로 계속적으로 주입되면 지표면이 서서히 부풀어 오르면서 상승 팽창하게 되는데, 이때 초기 용암돔의 형태가 만들어지게 된다. 마그마가 계속해서 공급되어 용암돔이 부풀어 오르게 되면 용암돔의 외곽부는 냉각에 의해 수직 또는 주상절리가 발달하게 되고, 절리면을 따라 쪼개짐이 발달하게 된다. 또한 형성이후 바람과 온도, 일조량에 따른 차별적인 풍화작용에 따라 한라산조면암은 완만한 봉우리 형태나 수직절벽의 형태를 보이고 있다(그림 6).



그림 6. 작은윗세오름에서 바라본 용암돔의 전경(좌)과 돈내코 코스에서 바라본 용암돔 전경

또한 한라산조면암은 돔의 외부 사면뿐만 아니라 분화구 내부에도 절리가 잘 발달되어 있다. 특히, 돔의 내부 분화구 일대는 돔의 외부에 비해 계절적 동결 파쇄작용이 더욱 진행된 상태로 나타나며, 최근에도 사면의 붕괴가 발생한 것으로 보고된 바 있다. 붕괴된 한라산조면암은 역 지지된 돌서령의 형태로 흘러내린 모습을 보인다(그림 7).



그림 7. 한라산 조면암에 발달한 기계적 풍화작용과 돌서령 구조

백록담 서측벽을 이루는 조면암에는 북서쪽 사면에서 $N40^{\circ}-45^{\circ}W$, 수직 경사, 그리고 서쪽과 남서쪽 사면에서는 $N78^{\circ}W-EW$, 수직 경사로 이어지는 절리면이 발달한다(그림 8; 제주특별자치도, 2010; 강순석 외 2011).



그림 8. 서북벽에서 바라본 한라산조면암

한라산조면암은 암석학적으로 야외에서 보통 암회색을 띠지만 풍화면에서는 담홍색에서 담회색을 띠고 있다. 윗세불은오름 일대와 관음사 등반로에서는 조면암의 단면에서 3매 이상의 조면암 단위의 식별이 가능하지만 측방 연장성이 불량하여 정확한 용암의 단위를 구분하기는 어렵다.

한라산조면암은 야외에서 1~4mm 크기의 거정질 장식 반정이 포함되어 있으며 부분적으로 산화된 흑색의 각섬석이 포함되기도 한다. 일부 희미한 유동구조(flowage)가 나타나기도 한다(그림 9). 기공의 분포는 상부에 부분적으로 포함되어 있는 경우도 있지만 대체로 기공이 거의 없는 괴상의 형태를 보인다.

한라산조면암은 현미경관찰에 의하면 내부에 수 mm 내외의 장식 반정을 포함하고 있다. 또한 기질에 포함된 침상의 사장석은 현미경 하에서 유동구조 또는 조면조직(trachytic texture)을 잘 보여준다(손영관 외, 2009; 그림 9).

일부 연구결과에 의하면 한라산조면현무암이 상당량의 석영반정을 포함한 것으로 보고되었으나, 실제 현미경 관찰결과 석영의 관찰되지 않았다. 또한 실제 현무암 내지 조면암에서 석영의 결정이 반정으로 나타나는 경우는 거의 알려진 바가 없다.

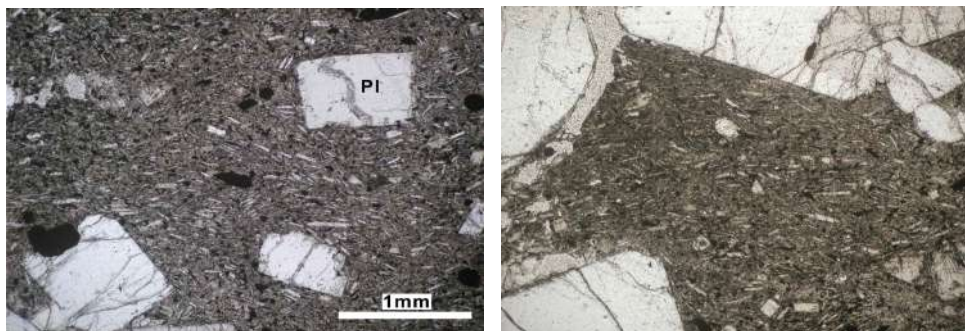


그림 9. 현미경상으로 본 한라산조면암(거정질의 사장석(PI) 반정과 유동구조를 보이는 침상의 사장석 기질로 구성된 한라산조면암)

〈2〉 해석

한라산조면암은 관음사의 등산로 능선 약 1km를 따라 나타나며, 윗세오름 대피소 부근의 계곡 바닥에서도 관찰된다. 또한, 한라산조면암은 백록담 주변뿐만 아니라 서귀포시 방향으로 광범위하게 분포하고 있으며 화학분석에서도 조면암질에서 조면안산암질까지 다양한 조성을 보이고 있다(박기화 외, 2000a). 이와같은 특징은 한라산조면암이 하나의 분화구에서 분출하였기 보다

는 점성이 낮은 조면암질 내지 조면안산암질 용암류들이 지하에 발달한 선상의 구조선을 따라 비슷한 시기에 분출했을 가능성이 높다(고정선 외, 2003). 그러나 박기화 외(2000a)는 조면암질 용암류는 상대적으로 점성이 높아 멀리 흐리지 못하고 용암돔을 형성한 뒤, 점성이 높은 조면암질 마그마가 후기에 조면암을 뚫고 분출하여 용암돔을 형성한 것으로 해석하였다. 그러나 백록담 용암돔 주변의 조면암은 구조적인 변형을 거의 받지 않아, 조면암질 용암이 분출하는 동시기에 형성되었음을 지시한다.

이번 조사에서도 한라산조면암의 남쪽 사면에서 총 3개의 절리패턴을 관찰하였다. 적벽면의 하부에는 수평에 가까운 판상절리의 형태가 관찰되고, 상부에는 수직의 주상절리가 발달하고 있다.

한편 백록담의 서측과 남측 절벽을 따라 광범위하게 진행 중인 수직의 절리와 암벽의 붕괴는 한라산조면암의 풍화와 밀접하게 관련되어 있다. 한라산조면암의 K-Ar 연령 [0.025 ± 0.008 Ma (Won et al., 1986) 0.07 ± 0.01 Ma (Tamanyu, 1990)]을 고려할 때, 이 조면암은 플라이스토세 후기의 Wisconsin 빙하기에 형성된 이래 아고산 기후 하에서 기계적 풍화작용을 심하게 겪어 현재의 지형을 형성한 것으로 해석된다(세계자연유산관리단, 2010). 또한 기존 연구에서 전자현미경과 X-선회절 분석결과 한라산조면암의 화학적 풍화작용은 아주 미비한 것으로 알려져 있어(이창섭 외, 2007) 물리적인 동결 파쇄작용이 암석의 풍화를 가속화 시킨 것으로 해석할 수 있다.

따라서 조면암 용암 돔 형성 후 이들이 냉각되는 시기에 수직절리가 발달하고, 이후 기계적 풍화작용인 동결파쇄작용에 의해 암석이 파괴, 분리되고 돌출지형이 형성된 것으로 해석된다. 그리고 최근 들어 발생한 대형 태풍 등에 의해서도 이러한 풍화지형이 쉽게 붕괴되는 것으로 보고되고 있다(손영관 외, 2009). 용암의 주상절리는 오랜 기간 차별적인 풍화침식에 의해 침식되는 부분은 계속 침식되고, 그 외 부분은 그대로 유지되면서 거대한 U자형 계곡을 형성한 것으로 해석되며, 주로 한라산의 남측벽보다 서북벽에서 잘 관찰된다.

2) 백록담조면현무암

<1> 야외산출양상

백록담조면현무암은 한라산 정상 동측부인 동능 정상에서부터 동쪽 일원에 넓게 분포하며 하위에 놓인 한라산조면암을 직접 피복한다. 특히 백록담조면현무암은 성판악 등산로를 구성하는 암석으로 서쪽의 영실 탐방로와 확연히

구분되는 지형분포를 보이는데, 성판악 등반로가 대체로 완만한 지형을 보이는 반면, 영실코스가 가파르고 절벽이 발달한 원인은 구성암석의 차이에서 비롯된다고 할 수 있다.

남벽 순화로 주변에서 보면 백록담조면현무암은 백록담 동쪽 사면을 따라 판상의 형태로 넓게 분포하고 있으며, 하부에는 수직절리가 발달한 한라산조면암을 피복하고 있어, 이들의 선후관계는 명확하게 구분된다(그림 10).



그림 10. 한라산조면암과 백록담조면현무암의 경계(하부에 수직절리가 발달한 한라산조면암을 판상의 백록담조면현무암이 피복하고 있다)

한라산조면암의 두께는 백록담 화구벽의 동쪽 능선에서 2~5m 이고 화구벽의 외측 사면에서는 0.2~1.0m로 얇아지며 연장성은 불량한 편이다.

백록담조면현무암은 유리질 응회암, 스크리아, 스패터(spatter)와 용암류로 구성되어 있다. 관찰지점에 따라 4가지 종류의 암석이 모두 나타나는 경우도 있고 일부 용암만 관찰되는 경우도 있다. 특히, 백록담 내부에서 관찰되는 백록담조면현무암은 얇은 판상의 응회암을 비롯하여 스크리아와 스패터가 협재된 용암류 형태로 산출되며, 지역에 따라 한라산조면암의 암편을 포함하고 있다(그림 11). 또한 스패터와 분석은 독립적으로 나타나는 경우도 있고, 서로 섞여 나타나는 경우도 있다(손영관 외, 2009).



그림 11. 백록담 분화구 내부의 백록담조면현무암(스코리아층과 스페터 및 용암이 교호하는 형태를 보인다)

백록담조면현무암을 구성하는 유리질 응회암, 스코리아, 스페터, 용암류 중에서 유리질 응회암은 하부의 한라산조면암을 직접 피복하고 있다. 유리질 응회암은 담갈색-흑색의 함력사질층과 담황색의 니질층이 교호하는 형태를 보인다. 사질층의 두께는 2~5cm이며, 급경사의 사층리나 수평층리가 발달하기도 한다(그림 12). 층리의 방향은 N35°- 45°E, 25 - 30°SE이며, 화구벽 부근에서 층리의 경사각은 45°로 급경사를 이루기도 한다. 사질 엽층은 담황색의 각력상 암편(주로 조면암편)과 흑색의 유리질 물질이 포함되어 있으며, 담황색의 각력상 암편의 경우 크기가 0.3~1.1cm이며, 다른 암편에 비하여 풍화가 심하여 쉽게 부서지는 특성을 보인다. 이 조면암질 각력은 부분적으로 점이 층리 및 역점이층리를 보이는데, 이는 근원지 가까운 거리에서 운반 퇴적되었음을 지시한다. 응회암층 내에 포함된 암편 중 검은색의 유리질 입자들도 관찰된다. 이 검은색의 유리질 입자는 대부분이 미립 내지는 조립질이며 모서리가 각진 입자로서 분출초기 물과의 반응에 의해 형성된 수성분출활동의 산물로 해석된다. 또한 응회암층에는 두께 1cm 내외의 세립질 화산재 지층도 관찰된다. 2000년 이후 수행된 녹화마대 사업으로 인해 분화구 내부의 응회암층 대부분이 덮혀있어 최근 들어 야외에서 응회암을 관찰할 수 있는 곳이 매우 제한적이다.



그림 12. 층리가 발달한 화산유리질 응회암

한라산조면암이 동일한 조면암질 암석들로 구성되어 있는 것에 반해, 백록담조면현무암은 용암, 스페터, 유리질응회암 및 스코리아를 포함한 다양한 산상으로 구성되어 있다. 특히, 백록담조면현무암 하부에 나타나는 스코리아층은 주로 원마도가 불량한 다공질의 스코리아(직경 2~64mm)와 화산탄(직경 64mm 이상)등으로 구성되어 있다. 스코리아층은 백록담 동쪽 화구벽의 하단부와 북쪽 관음사 등반로 정상부에 분포하며, 용암에 의해 피복된다. 그리고 스코리아층은 백록담 서측의 능선부에 두께 10m 이내로 산점하여 분포하면서 한라산조면암을 피복하고 있다(그림 13).

스코리아층은 상부로 갈수록 스코리아들이 엉겨붙은 형태의 스페터로 변해가는 양상을 보인다(그림 14). 상부 스페터는 적갈색을 띠며, 수cm~수십cm 크기의 암편들이 달라붙어 납작해진 형태로 나타난다. 주로 스페터의 양이 증가하는 경향을 보이는데, 스페터는 하와이언 분출에 의해 분석구가 형성되는 초기 과정에서 주로 형성된 것으로 해석된다.

현미경하상에서 백록담조면현무암은 주로 사장석, 감람석 및 휘석 반정과 침상의 사장석 기질로 구성되어 있다. 휘석은 주로 단사휘석이며 사장석 반정은 길쭉한 침상 또는 주상의 형태를 보인다(그림 15).



그림 13. 백록담 내부 분석구를 피복하고 있는 백록담조면현무암(스페터가 우세하게 분포하고 있으며, 내부에는 소량의 기공을 포함한 용암이 협재되어 있다)



그림 14. 굳어지지 않은 상태의 다공질의 스페터들이 엉겨붙어 눌러진 형태로 산출되는 스페터의 근접사진

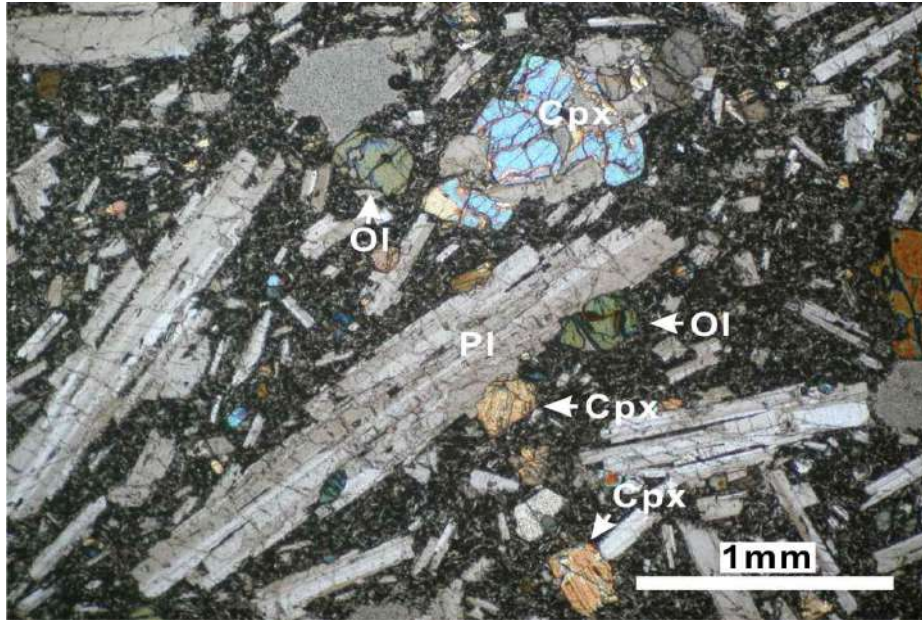


그림 15. 백록담조면현무암의 박편사진. 사장석, 감람석(Ol), 휘석(Cpx) 반정들과 침상의 사장석(Pl) 반정(우)

〈2〉 해석

백록담조면현무암의 하부를 구성하는 유리질 응회암은 백록담조면현무암 분출 초기의 수성화산 분출에 의해 형성된 화산유리질 물질이 화구의 경사진 사면에서 재 퇴적된 결과로 해석된다. 특히, 응회암층 내에 포함된 검은색의 유리질 입자는 화산분출과정에서 마그마가 물과 섞이면서 발생한 폭발적인 분출에 의해 부서진 마그마 기원의 암편으로 해석된다. 또한 입자크기가 작고 모서리가 각진 특징은 수성화산분출의 직접적인 결과물임을 뒷받침한다. 즉, 백록담조면현무암은 분출 초기 상승하던 마그마가 과거 백록담 주변에 있던 물 또는 지하수와 반응하여 수성화산분출에 기인한 화산유리질 물질이 분출한 것으로 해석 할 수 있다(제주특별자치도, 2010).

한편 응회암의 상부에 나타나는 스코리아층과 스패터는 지표수 또는 지하수가 고갈되면서 물과 마그마의 폭발적인 반응이 없어지면서 화산분출 방식이 수성화산분출에서 마그마성(스트롬볼리안) 분출로 바뀐 결과로 해석할 수 있다. 수성화산분출에서 마그마성 분출로의 변화는 제주도에서 송악산과 우도 등에서 잘 나타나는 현상과 동일한 결과로 해석할 수 있다. 초기 마그마성 분출에 의해 분출된 스코리아는 점점 그 양이 증가하고, 굳어지지 않은 상태로 떨어지면서 뜨거운 스코리아들 끼리 엉겨붙은 상태의 스패터가 된 것

으로 해석된다. 스코리아층은 상부로 갈수록 스페터의 양이 증가하는 경향을 보이는 현상은 마그마성(스트롬볼리안) 분출에 의해 분석구가 형성되는 초기 과정에서 주로 발생하는 것으로 알려져 있다. 이런 분출과정을 통해 백록담의 초기 분화구 형태가 갖추어진 것으로 해석된다. 그리고 분석구가 형성된 이후 분화구 내에는 용암이 양이 점차 증가함에 따라 하중이 증가하여 백록담의 일부 사면을 붕괴시키면서 분출된 것으로 해석된다. 용암이 분출된 방향은 현재 백록담조면현무암이 분포하는 동쪽, 즉 성판악 일대인 것으로 추정할 수 있다. 그리고 백록담 북동쪽과 남동쪽 가장자리에는 초승달 모양의 분석구의 잔여구조가 존재하고 이 두 지점 사이를 가로질러 방사형으로 용암류들이 성판악 쪽으로 퍼져나가고 있음을 잘 보여준다.

따라서 현재의 백록담은 점성이 높은 한라산조면암이 분출하면서 돛 형태의 지형을 만들고, 이후 백록담조면현무암이 용암돔의 동쪽 측벽을 무너뜨리고 분출하면서 현재의 화산지형을 형성한 것으로 해석할 수 있다. 이와 같이 분화구에 종류가 다른 암석이 공존하고 있고, 두 번에 걸쳐 각각 다른 화산활동에 의해 분화구가 만들어지는 경우는 매우 드문 현상이다.

3) 윗세오름조면현무암

<1> 야외산출양상

윗세오름조면현무암은 윗세붉은오름(이하 윗세붉은오름)과 방애오름에서 분출한 용암과 분석들로 구성되며, 법정동조면현무암과 백록담조면현무암을 피복한다(고정선 외 2003). 윗세오름은 붉은오름, 누운오름, 새끼오름이라는 세 개의 오름군으로 되어 있는데, 이중 붉은오름이 윗세오름조면현무암의 분출지로 추정되고 있다.

윗세오름조면현무암은 표식지인 윗세붉은오름에서 남서쪽 1.5km 지점으로 선작지왓 중앙부까지 나타나는데, 두께는 약 1~3m이며 복합 용암층(compound lava flows)을 이루고 있다(그림 16). 이 암석은 윗세붉은오름에서 약 300m 가량 연장되어 나타나며, 용암류의 분포범위는 동서 방향으로 폭이 800m, 남북방향으로 약 2.5km에 걸쳐 분포하고 있다(박기화 외 2000; 강순석 외 2011).

한편, 효동천 상류인 벌른내의 계곡에서 약 1m 두께의 윗세오름조면현무암질 용암류를 관찰할 수 있다. 이 용암류는 클링커와 스코리아를 협재하는 형태로 나타나며, 표면에는 미세한 밧줄구조가 관찰된다(그림 16). 또한 일부 벌른내 계곡 상류부에는 스코리아를 협재한 얇은 용암층이 관찰되는데,

측방 연장성이 양호하지 않아 정확한 암상의 특징을 파악하기 어려운 상태이다.



그림 16. 한라산조면암의 분출지로 알려진 윗세붉은오름 일대의 정경(상, 중좌)과 조면암의 근접사진(중우), 산벌른내 계곡에서 나타나는 윗세오름조면현무암(하)

윗세붉은오름과 방해오름 주변에는 화산탄을 함유한 다량의 적갈색의 화산회, 스코리아들이 모여 분석구를 이루고 있으며, 화구에 인접한 부분에서는 고온에서 분출된 분석들과 용암 덩어리가 압착 용결되어 유상구조를 잘 보여준다. 암색은 회색 내지 암회색을 띠며 1cm 크기의 기공이 용암의 상부에 우세하게 분포하고 있으며, 내부에는 기공이 거의 없는 특징을 보인다. 야외관찰에서 반정 광물로는 휘석이 우세하고 소량의 사장석과 감람석이 관찰된다.

윗세오름조면현무암의 하부에는 백록담조면현무암과 동일하게 스페터가 우세하게 분포하고 일부 기공이 거의 없는 피상의 용암류가 협재되어 있다. 특히, 하부에 협재된 스페터들은 측방으로 얇게 신장되어 있어, 수평 내지 굴곡진 형태의 유상구조를 보이기도 한다(그림 17)



그림 17. 윗세오름조면현무암의 근접사진(현무암은 측방으로 얇게 신장되어 있는 스페터가 나타나며, 희미한 유상구조를 보인다)

〈2〉 해석

윗세오름조면현무암은 직하부에 점성이 높은 용암돔(한라산조면암)을 피복하고 있어 층서적으로 조면암질 용암돔이 형성된 이후 분출한 것으로 해석할 수 있다. 이 용암은 점성이 낮고 유동성이 좋은 특징을 지니고 있으며,

중간중간 스코리아층을 포함하고 있어 용암돔 형성이후 간헐적인 스트롬볼리언 화산분출에 의해 형성된 것으로 해석된다. 고정선 외(2003)는 윗세오름조면현무암의 분출지를 백록담이 아닌 이들의 서측부에 발달한 여러개의 구조선을 따라 분출한 것으로 보고한바 있다.

영실 탐방로 병풍바위 주변에서 관찰되는 윗세오름조면현무암의 미세한 유동구조와 얇은 용암류가 반복 누적된 특징은 이 용암류가 복합 용암류에 의해 형성되었음을 지시한다. 그러나 윗세오름조면현무암의 경계와 법정동조면현무암의 경계를 야외에서 명확히 구분하기 어려워 향후 조사에서 두 암체의 명확한 차이와 분포범위를 구분해야 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

다시말해, 윗세오름조면현무암은 백록담 용암돔이 만들어진 이후 점성이 낮은 용암류들이 한라산조면암을 피복하면서 남쪽과 서쪽 방향으로 흐르면서 쌓인 것으로 해석할 수 있다.

4) 법정동조면현무암

<1> 야외산출양상

법정동조면현무암은 위세오름 중 윗세누운오름(1,714m)와 윗세죽은오름(1,690m)에서 분출하여 1100도로 주변을 피복한 용암류를 말한다(그림 18). 법정동조면현무암은 한라산 전체에 광범위한 분포를 보이며, 한라산조면암과 보리악 조면현무암을 피복하는 양상을 보인다(그림 19).

법정동조면현무암은 1100도로 영실 탐방로를 거쳐 병풍바위 일대까지 광범위하게 분포하고 있으며, 병풍바위 상부를 얇게 피복하고 있어 야외에서 쉽게 관찰 할 수 있다. 일부 영실 등반로 일대와 윗세죽은오름 부근에는 압력돔(tumuli)의 형태를 띠는 법정동조면현무암을 관찰 할 수 있다.

법정동조면현무암은 회색 내지 암회색을 띠며, 1mm 크기의 기공이 40%를 정도 함유되어 있으나 노두에 따라 변화가 크다. 반정 광물은 장석이 우세하고 소량의 휘석과 감람석을 함유한다(그림 20). 백록담 서쪽 고지대에서 크고 작은 분석구를 포함하며 분석구는 다공질의 스코리아와 용암피로 구성된다(고정선 외, 2003).



〈그림 18. 법정동조면현무암의 분출지로 알려진 죽은윗세오름 정경〉



그림 19. 영실 등반로상에서 관찰되는 법정동조면현무암(하부에 한라산조면암을 피복하는 형태로 산출된다)



그림 20. 영실등반로 상에서 관찰되는 다양한 형태의 법정동 조면현무암(근접사에서 기공이 많고 사장석 반정을 관찰 할 수 있다)

〈2〉 해석

법정동조면현무암은 윗세죽은오름에서 분출하여 1100도로 인근까지를 피복한 광역적인 용암류를 말하는데, 실제 야외조사에서 용암류의 연장성을 파악하기에 어려움이 있었다. 그러나 층서적으로는 한라산조면암과 보리악조면현무암을 피복하는 양상이 확인되어 화산 층서적으로는 한라산 형성과정에 최후기에 해당하는 화산활동으로 추정 할 수 있다. 또한 용암류 내부에 스코리아들이 포함되어 있고 얇은 용암류가 누적되어 있어 스트롬볼리안 분출에 의해 형성된 복합 용암류로 해석된다.

그러나 지금까지의 조사결과 법정동조면현무암은 상위의 윗세오름조면현무암과 명확한 구분이 어려워 향후 조사에서는 두 암체의 구분이 필요한 실정이다.

4) 만세동산역암

만세동산역암은 윗세오름 대피소 북측 하천 바닥에 1km의 연장을 갖고 분포되어 있으며, 북쪽으로는 백록담 정상부와 삼각봉 사이에 형성되어 있다.

이 역암은 제주도 최후기의 암석으로 한라산 서측 주변에 광범위하게 분포되어 있으며 이전에 분출한 모든 암석을 피복한다(박기화 외 2000). 역의 크기는 10cm에서 2m에 이르기까지 다양하다. 역의 대부분은 한라산조면암으로 구성되며, 현무암 및 스코리아를 포함하고, 대부분이 역지지의 이동상을 보인다. 역암의 두께 3 m 이내이며 분포범위는 약 500 m에 이른다(그림 21).

역의 대부분은 한라산조면암으로 구성되어 있으며, 일부 조면현무암 및 스코리아를 포함하고, 대부분 기질(matrix) 물질이 거의 없으며 역지지(grain-supported)되어 있다. 만세동산역암은 한라산조면암체에 가까운 곳(백록담 서측 절벽아래, 장구목 능선, 옷방애오름 능선 일대 등)에는 백록담 용암 돔의 정상부에서 떨어져 나온 테일러스 기원의 역암으로 산출된다(박기화 외 2000; 고정선 외, 2003).



그림 21. 만세동산 표식지와 윗세오름 인근에서 관찰되는 만세동산 역암

3. 주요 탐방로일대 조사결과 및 고찰

가. 윗세오름 - 서북벽 정상

1) 윗세붉은오름 일대

윗세오름 대피소에서 서북벽 코스로 가는 진입로에는 일반인들에게 통제되어 있는 구간으로 여름의 경우 조릿대와 구상나무 등이 무성하여 출입이 어렵고, 겨울철의 경우 희미하게 등반로의 흔적이 관찰된다(그림 22).

윗세오름 상류의 계곡 하천 바닥에는 인근의 백록담 서벽에서 유래된 한라산조면암의 노두가 노출되어 있다. 하천 바닥에는 매우 큰 암석 덩어리들이 산재되어 있다. 암석 덩어리들은 주로 백록담 정상 서벽에서 외도천 상

류부인 하천을 따라 흘러오거나 유수에 의해 운반된 조면암의 덩어리들과 모래, 자갈로 구성되어 있다. 암석은 크게 적갈색을 띠는 조면암과 청회색을 띠는 조면암으로 구분된다. 적갈색 조면암은 하상을 구성하고 있는 한라산조면암이며, 청회색 조면암은 백록담 서벽에서 이곳으로 운반되어 온 것으로 추정된다. 하상에 분포되어 있는 적갈색 조면암에는 특징적으로 매우 큰 장식반정이 많이 포함되어 있다.



그림 22. 윗세오름 대피소에서 서북벽으로 가는 등반로

2) 서북벽 등반로 중간 지점

윗세오름에서 서북벽 정상으로 가는 등반로 주변에는 한라산조면암, 윗세오름조면현무암, 만세동산역암이 분포하고 있다. 한라산조면암은 용암돔과 윗세오름 사이의 저지대를 테일러스 형태로 채우고 있는 형태로 분포하고 있다. 그리고 등반로 사면 일대에는 한라산조면암의 암괴들이 떨어져 나와 쌓인 만세동산역암도 관찰된다. 한편 장구목 일대에서는 한라산 조면암을 직접 피복하고 있는 윗세오름조면현무암 용암류가 관찰된다(그림 23). 등반로 상에 있는 윗세오름조면현무암은 내부에 화산탄과 스코리아를 포함하고 있다. 화산탄은 붉은색을 띠며 장식 반정이 많고 특히 기공이 많은 특징을 보인다(그림 24).



그림 23. 장구목 일대에서 관찰되는 윗세오름조면현무암 용암류



그림 24. 서북벽 정상으로 가는 등반로

3) 서북벽 정상 등반로

백록담 서북벽 코스의 정상 등반로에는 백록담 서벽을 구성하고 있는 한라산조면암이 분포하고 있다. 서북벽 코스 중에서 정상으로 올라가는 U자형 계곡은 풍화작용에 의해 하부로 대부분이 무너져 내려 현재는 이용할 수 없는 상태에 있다. 과거 조면암을 굴착하여 등산용 계단으로 만든 등반로도 대부분이 유실되어 있는 상태에 있다(그림 25). 서북벽 등반로에서 오른쪽으로 이어진 백록담 서벽의 수직절벽에서 보면 대부분의 조면암은 U자형 계곡을 만들며 풍화를 받아 조면암의 덩어리들이 주상절리와 함께 하부로 무너져 내리고 있다(그림 25). U자형 계곡의 형성은 비교적 풍화작용에 취약한 특성을 갖는 조면암에서 흔히 볼 수 있는 풍화혈구조(tafoni)이다. 등반로상에서 조면암이 표면 풍화와 주상절리 풍화에 의해 직경 2m의 덩어리가 무너져 있는 것이 관찰된다.

서북벽 코스 등반로상에 관찰되는 조면암은 적갈색, 유백색, 청회색을

떠며 직경 1cm 정도의 정사각형 내지는 직사각형의 장석 반정이 많은 것이 특징이다.

서북벽 코스에서 장구목으로 이어지는 곳의 정상부에는 조면암의 암반 위에 두께 3m의 용암류가 놓여 있다. 이 용암류는 장구목의 남쪽 능선을 따라 15°의 경사로 분포되어 있다. 용암류의 블록으로 나란히 배열된 용암류는 상하부에 클링커를 포함하고 있으며, 내부는 비교적 치밀한 비현정질이며 장석 반정이 많으며 휘석 반정도 포함되어 있다. 이 용암류는 윗세오름조면현 무암으로 제주도 화산활동 중에서 가장 나중에 분출된 용암류이다.



그림 25. 과거 서북벽 정상등반로로 이용되던 곳으로 U자형 풍화를 받아 돌계단이 유실

나. 윗세오름 ↔ 남벽 정상

1) 방아오름 샘 주변

방아오름 샘 주변에는 현무암질 용암류들이 넓은 지역을 피복한 전석지대가 분포하고 있다. 방아오름 일대의 윗방애, 방애, 알뱅애오름으로 불리는 작은 세 개의 오름으로 구성되어 있는데, 용암류의 전석지대는 방아오름(또는

방애오름)에서 분출된 용암류에 의해 형성된 것으로 알려져 있다.

방아오름 분석구는 주변에는 두께 약 2~5m의 용암류가 분포하고 있다(그림 26). 이 용암류는 상하부 표면이 거칠고 내부에 클링커성 암괴들이 내부에 포함되어 있어 암괴상 아아용암류가 형성된 것으로 추정된다.

한편, 방아오름 주변의 전석지대 하부에는 백록담에서 유래된 조면암의 암괴들도 분포되어 있다. 방아오름 샘 주변에서 형성된 계곡들은 효돈천의 발원지로서 서산벌근내와 동산벌근내를 통하여 하류로 흐른다.



그림 26. 방아오름 샘에서 바라본 백록담 남벽

2) 남벽 순환로 (백록담 남벽 하부)

방아오름에서 남벽 순환로를 따라 남벽 정상에 이르는 구간에는 다양한 용암류를 볼 수 있다. 남벽 정상 구간에서 한라산조면암과 백록담조면현무암을 확인할 수 있으며(그림 27), 남벽 순환로에서 방애오름을 따라 윗세오름조면현무암과 만세동산 역암이 관찰된다. 백록담 남벽에서는 백록담 조면암의

수직 노두를 관찰할 수 있으며, 절리의 내부에는 수평으로 발달한 냉각 절리대가 관찰된다. 이 절리대는 용암돔이 형성되는 과정에서 만들어진 것으로 알려져 있으며, 이번 조사에서 수평의 절리대를 자세히 확인하였다(그림 28). 백록담 남벽은 조면암의 풍화가 심하며, 최근 풍화작용으로 인하여 많은 양의 주상절리와 암석 블록들이 수직절벽에 많이 떨어져 쌓여있다. 백록담 남벽의 수직절벽을 정남쪽에서 관찰해 보면 크게 수평으로 이어진 수평절리면을 관찰할 수 있다. 또한 남벽 동측의 중상부에 있었던 조면암의 주상절리노두는 최근에 대규모로 무너져 내려 수직절벽 하부에 쌓여 있으며 조면암이 풍화된 면을 암석의 색깔에 의해 쉽게 확인할 수 있다.

한편, 남벽 정상을 오르는 구간에서는 백록담조면현무암이 수십 센티미터의 박층으로 매우 얇은 용암류로 백록담 분화구의 외륜을 따라 흘러내린 것을 알 수 있다. 방해오름 남측으로 형성된 효돈천 상류의 서산벌른내의 깊은 협곡에서는 윗세오름조면현무암의 매우 얇은 용암류 단위(lava units)가 관찰되며, 백록담 서남벽 하부에서는 하천 발원지에서 만들어진 계곡의 하상에서 만세동산 역암의 노두를 관찰할 수 있다.

남벽 순환로를 따라 백록담 서벽과 남벽으로 이어지는 등반로 구간의 등반로 상에는 조면암의 암설사태층 위에 조면암과 현무암 덩어리들이 산재되어 있다. 이곳은 백록담 서벽과 남벽이 붕괴되어 이루어진 암설사태층으로 만세동산 역암이 분포하고 있는 지역이다. 등반로상에 산재되어 있는 암석 덩어리들은 백록담에서 유래된 조면암과 인근의 윗세오름과 방아오름에서 유출된 용암류에서 유래된 현무암들이다. 이 암석 덩어리들은 평균 직경이 30cm 정도이다. 윗방아오름을 끼고 형성된 산벌른내(효돈천) 상류지역의 작은 실개천은 효돈천의 발원지이다. 결국 효돈천은 백록담 남벽에서 직접 발원한 후 산벌른내와 돈내코 계곡을 지나 쇠소깍으로 흐른다. 백록담 남벽 하부에 형성된 작은 실개천은 건천으로 폭이 2~3m 로 발달되어 있으며, 하상에 현무암질 용암이 얇게 피복되어 있어 후차적으로 윗세오름조면현무암질 용암류가 계곡을 따라 흘렀음을 알 수 있다. 이는 이곳에 하천이 형성된 이후에 윗방아오름이 최종적으로 분출하였음을 지시하는 것이다.



그림 27. 남벽순환로에서 바라본 백록담 낙쪽 절벽



그림 28. 절리내부에 수평으로 발달한 냉각절리대

3) 남벽 정상 등반로

남벽 정상 등반로에는 하부에 백록담에서 유래된 조면암이 분포하며 그 위를 백록담 조면현무암이 직접 덮고 있는 양상이다. 남벽 정상 등반로의 종착지인 백록담 남벽 정상에는 두께 35~40cm, 보통은 1m 정도이며 최대 2~3m의 현무암질 용암류가 분포되어 있다. 이 용암류는 백록담 분화구에서 유출된 용암류이다. 남벽 정상부에서 용암류는 평균 28°의 경사로 백록담 화구 외륜을 타고 하부로 흐르고 있으며 최대 경사는 34°이다. 특히 이 용암류는 정상에서 하류로 내려갈수록 두께가 감소하여 하류에서는 불과 20~30cm의 두께를 보인다. 또한 이 용암류의 하부에는 클링커와 스코리아층이 자갈과 같은 형태로 퇴적되어 분포되어 있다. 그렇기 때문에 상부에 놓인 얇은 용암류는 하부의 자갈과 같은 클링커를 타고 아래로 쉽게 미끄러진다. 과거 남벽 정상 등반로는 백록담 분화구 외륜 경사면인 주변에 있는 얇은 용암류를 깨어서 돌계단식으로 개설되었다. 한라산 남벽통제소에서 백록담 정상을 오르는 구 등반로는 가파른 남벽의 사면을 따라 설치되어 있으며, 과거 등반로로 사용되었다는 생각이 들지 않을 정도로 파괴되어 있었다. 이 등반로는 주변의 현무암을 다듬어 돌계단의 형태로 맞추고 사이에 시멘트를 주입하여 제작되었으나 가파른 사면에 가해진 중력에 의해 암석들이 분리되고 시멘트는 떨어져 나간 상태였다(그림 29). 떨어져 나간 계단석은 주변 암석들과 뒤엉켜 불규칙하게 흩어져 있으며, 답압에 의해 돌들이 빈번히 사면 아래로 굴러 떨어지는 상태였다. 이와 같이 암석들이 가파른 지형을 형성하며 성글게 쌓여있는 지형을 돌서렁이라고 하는데, 이런 지역은 지속적으로 암석들이 사면을 따라 흘러내리기 때문 구조적으로 매우 불안정한 할 수밖에 없다. 암석의 흘러내림 사태는 하나의 암석이 흘러내리면서 주변 암석을 밀어 붙일 때 주변 암석들이 도미노처럼 같이 밀리면서 흘러내리는 암설사태가 발생하는 경우도 있다. 이와 같은 암설사태는 채석장이나 가파른 사면 등에서 자주 발생하고 있다(그림 30).



그림 29. 돌계단의 원형이 사라진 가파른 과거 등반로



그림 30. 동결파쇄 작용으로 암석이 떨어져 나가는 모습

4) 백록담 내부

애추 또는 돌서렁은 오랜 세월에 걸쳐 절벽에서 돌이 떨어져 나와 형성되는 지형이다. 백록담 분화구 내부 사면에는 수m 크기의 돌서렁이 관찰된다. 돌서렁들은 주로 동쪽 사면에 집중되어 나타나고 있으며, 약 30°의 경사면에 수 cm 에서 수 m 크기의 백록담조면현무암의 각력들로 구성되어 있다(그림 31). 특히 상대적으로 큰 역들은 경사면의 아랫부분 또는 백록담의 분화구 바닥에까지 굴러 떨어져 있어 낙하분급(fall sorting)을 잘 보여주고 있다. 돌서렁이 동쪽 사면의 집중적으로 분포하는 것은 한라산조면암(서쪽 사면)과 백록담조면현무암(동쪽 사면)의 물리적 특성과 인위적인 요소에 기인하는 것으로 판단된다. 백록담조면현무암은 치밀한 용암류 사이에 수매의 분석층 및 동공(cave)들이 발달하고 있다. 따라서 아고산지대에서의 암석의 결빙에 의한 기계적 풍화작용과 더불어 인위적인 하중으로 인해 상대적으로 암석의 강도가 약한 분석층 및 동공 주변에서 이들 암석들이 붕괴되는 것으로 사료된다. 반면 한라산조면암의 경우 전체적으로 동일한 암석들로 치밀하게 구성되어 있고, 현재 등산객의 출입을 제한하고 있어 상대적으로 애추의 발달이 미약한 편이나, 이들 암석의 경우에도 기계적 풍화작용인 켜기작용이 지속적으로 발생하고 있어 모니터링이 필요한 곳이다.



그림 31. 백록담 분화구 내부에 발달한 돌서렁 지역

다. 남벽분기점 ↔ 돈내코 코스

남벽분기점에서 돈내코 탐방로는 2010년 다시 열린 탐방로이며, 총 길이는 7km에 이른다. 전체적으로 다른 한라산 탐방로에 비해 완만한 지형특징을 보이며, 돈내코 하천과 나란하게 발달되어 있다.

탐방로와 나란히 발달한 돈내코 계곡은 다양한 종류의 암석들로 구성되어 있는데, 암괴들의 하부에는 판상의 용암류가 분포하고 있다. 용암의 표면에는 부분적으로 밧줄구조가 발달되어 있다(그림 32).



그림 32. 밧줄구조가 발달한 돈내코 하천의 용암

탐방로 주변의 완사면에는 조립질과 세립질 입자들로 분급된 토양층이 발달하고 있다. 분급된 토양층은 계절적인 동결과 파쇄작용과 동결 융해에 중력의 작용이 복합적으로 작용한 솔리플럭션 또는 포행 현상에 의해 분급이 일어나고 사면의 아래쪽으로 천천히 흐른 결과로 해석된다. 기존 연구에서 이런 현상을 유상구조토로 기재하기도 하였다(그림 33; 김태호, 외 2006).



그림 33. 돈내코 등반로 인근 완사면에 발달한 유상구조토

그리고 지형에 따라 암괴들이 불규칙하게 얹혀있는 돌서렁 지형들도 관찰된다(그림 34). 이 돌서렁 지형을 만든 암괴들은 대체로 비슷한 크기의 암석들로 구성되어 있는데 암괴들이 사면을 따라 흘러내리는 과정에서 역의 크기에 따른 분급작용이 발생한 결과로 해석된다.



그림 34. 탐방로 일대에 발달한 돌서렁 지형

4. 요약

제주도의 중심이라 할 수 있는 한라산은 다양한 분야의 생태 조사가 수행된 것에 비해 지질조사는 자세하게 수행되지 못한 상태이다. 그 결과 한라산의 형성과정에 대해서 명확하게 언급된 자료는 거의 없는 실정이다. 이번 조사는 한라산 백록담 일대를 중심으로 수행된 조사로서 한라산 전체의 지질을 대표할 수는 없으며, 향후 자세한 지질조사가 이루어져야 할 것이다.

한라산의 백록담은 서편과 동편은 서로 다른 종류의 암석들로 구성되어 있다. 이들의 형성과정을 밝히기 위해 암상을 분류 및 기재 그리고 이들의 분출양상에 대해 해석하였다. 백록담의 남동쪽에서 한라산조면암을 직접 피복하고 있는 백록담조면현무암을 관찰할 수 있어, 이들의 선후관계는 야외에서 명확하게 구분된다. 먼저 백록담 서쪽 사면을 이루고 있는 한라산조면암 및 이와 층서적 위치와 암질이 동일한 암석들이 북쪽, 서쪽(영실) 그리고 남동쪽(서귀포) 방향으로 광범위하게 분포하고 있으며, 북쪽과 남쪽은 수매의 분출단위가 확인된다. 또한 이들은 조면암질에서 조면안산암질까지 다양하게 화학적 조성을 보이고 있어, 하나의 분화구에서 분출하였기 보다는 지하에 발달하고 있는 일정한 구조선을 따라 동시기 또는 거의 비슷한 시기에 열하

분출한 것으로 해석된다. 최근 고정선 외(2003)는 백록담 주변 일대의 영실조면암-한라산조면암-사라오름조면안산암을 연결하는 N70°E 방향의 구조선들을 보고하고 있고, 또한 이들 구조선의 좌우를 따라 조면암들이 넓게 분포하고 있어 점성이 낮은 조면암질 내지 조면안산암질 용암류들이 구조선을 따라 동시에 분출했을 가능성을 뒷바침하고 있다. 한편 박기화 외(2000)는 이들 조면암질 용암류들이 정치되고 난 뒤, 점성이 높은 조면암질 마그마가 후기에 이들을 뚫고 분출하여 용암돔을 형성한 것으로 해석하였다. 하지만 백록담 용암돔 주변의 조면암들의 지층들은 구조적인 변형, 즉 지층의 경동, 들을 전혀 받지 않아, 용암돔은 조면암질 마그마들이 분출하는 동시기에 형성되었음을 지시한다. 따라서 백록담의 조면암질 마그마는 다른 곳보다 상대적으로 점성이 높아 멀리 흐리지 못하고 용암돔을 형성한 것으로 해석된다(손영관 외, 2009). 그러나 이러한 해석과는 달리 두 암석의 형성시기가 차이가 나는 것으로 해결해야 할 문제이다.

한라산조면암의 분출한 이후 돔 화산체의 동쪽을 부수면서 백록담조면현무암을 형성시킨 마그마의 분출이 시작하고, 이들은 성판악 쪽으로 흘러 백록담 동편의 산정부일대의 넓은 지역을 피복하였다. 백록담조면현무암의 분출 초기에는 마그마가 물과 반응하여 만들어지는 수성화산분출에 기인한 화산유리질 물질이 이들의 하부에 퇴적되었고, 이후 마그마의 양이 점차 증가함으로써 화산분출이 수성화산활동에서 스트롬볼리언 분출양상으로 변하여 적갈색의 분석구와 스펀더가 교호하는 분석구를 형성하였다. 일반적으로 분석구가 형성된 뒤 분화구 내에는 용암이 점점 채워지게 되고 이들의 양이 증가하여 분석구의 측벽을 붕괴하여 많은 양의 용암이 일시에 지표의 낮은 곳으로 흘러내리고 말발굽 모양 및 초승달 모양의 분석구의 형태를 남기게 된다. 백록담 동쪽 측벽과 산정부 일대는 이러한 화산지형의 형태, 즉 백록담 북동쪽과 남동쪽 가장자리에는 초승달 모양의 분석구의 잔여구조가 존재하고 이 두 지점 사이를 가로질러 방사형으로 용암류들이 성판악 쪽으로 퍼져나가고 있음을 잘 보여주고 있다. 따라서 현재의 한라산 백록담은 백록담조면현무암의 화산활동으로 인해 한라산조면암의 동쪽 측벽을 무너뜨리고 분석구와 방사형의 용암류를 만들고 현재의 화산지형을 형성한 것으로 해석된다. 이러한 결론은 한라산 백록담이 돔상 용기체(윤선 외, 2005)가 아닌, 백록담에서의 화산분출에 의한 화산분화구임을 지시한다(박기화 외, 2000b).

한라산 백록담이 형성된 뒤에도 백록담의 서측부 일대에서 조면현무암질 마그마를 광범위하게 분출하여 법정동조면현무암을 형성하고, 스트롬볼리언 분출에 의해 윗세오름조면현무암을 형성한 것으로 해석된다. 하지만 이들의

화산 분화구는 현재의 백록담이 아닌 이들의 서측부에 발달한 여러 개의 구조선을 따라 분출한 것으로 보고되고 있다(박기화 외, 2000b; 고정선 외, 2003; 손영관 외, 2009).

5. 인용문헌

- 강순석, 2011, 한라산 자연유식년제 등산로 구간 환경조사 보고서, 1-43
- 고정선, 윤성효, 강순석, 2003, 제주도 한라산 백록담 분화구 일대 화산암류의 암석학적 연구. 지질학회지 12(1), 1-15
- 김기영, 홍명호, 전용문, 2010. 한라산 백록담 천부 지진파 속도구조. 지질학회지 46(6), 609-617.
- 김태호, 2002. 한라산 아고산대의 초지 박리현상. 한국지형학회지 9(2), 71-81.
- 김태호, 2006. 한라산 아고산 초지대 나지의 확대속도와 침식작용. 대한지리학회지 41, 657-669.
- 박기화, 이병주, 조등룡, 김정찬, 이승렬, 김유봉, 이한영, 조병욱, 장영남, 손병국, 전희영, 김용욱, 2000a. 서귀포-하효리 도폭 지질보고서 (1:50,000). 제주도, 한국자원연구소, 대전.
- 박기화, 이병주, 조등룡, 김정찬, 이승렬, 최현일, 박덕원, 이사로, 최영섭, 양동윤, 김주용, 서정율, 신현모, 2000b. 제주(백아도, 진남포) 지질도폭설명서 (1:250,000). 한국자원연구소, 대전.
- 박준범, 1994. 제주도 화산암의 지화학적 진화. 박사학위논문, 연세대학교, 서울, 303 pp.
- 손영관, 우경식, 권창우, 김련, 전용문, 2009, 지질유산과 지질모니터링: 제주도 사례를 중심으로. 지질학회지 45(6), 751-770.
- 이창섭, 조태진, 이상배, 원경식, 2007, 제주도 한라산조면암의 풍화특성에 관한 연구. 지질공학학회지 17(2), 235-251.
- 원종관, 1976. 제주도의 화산암류에 대한 암석화학적인 연구. 지질학회지 12(4), 207-226.
- 윤선, 현원학, 정차연, 2005. 제주도 한라산의 지질. 지질학회지 41, 481-497.
- 윤성효, 고정선, 강순석, 2002, 한라산 백록담 분화구 일대 화산암류의 화산암석학적 연구. 대한지질학회, 대한자원환경지질학회, 한국석유지질학회, 한국암석학회 76

- 정창식, 정연중, 손영관, 최만식, 박병권, 2006. 제4기 화산암에 대한 ^{238}U - ^{230}Th 연대측정의 시료 전처리와 열이온화질량분석법의 소개. 지질학회지 42(3), 455-465.
- 홍명호, 김기영, 2010, 제주도 상시미동 H/V 스펙트럼 분석. 지구물리와 물리탐사13(2), 144-152.
- Cheong, C.-S., Choi, M.S., Khim, B.K., Sohn, Y.K., Kwon, S.-T., 2006. $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dating of Holocene mollusk shells from Jeju Island, Korea, by multiple collectors inductively coupled plasma mass spectrometry. Geosciences Journal 10(1), 67-74.
- Choi, S.H., Mukasa, S.B., Kwon, S.T., Andronikov, A.V., 2006. Sr, Nd, Pb and Hf isotopic compositions of late Cenozoic alkali basalts in South Korea: Evidence for mixing between the two dominant asthenospheric mantle domains beneath East Asia. Chemical Geology 232(3-4), 134-151.
- Lee, M.W., 1982. Petrology and geochemistry of Jeju volcanic Island, Korea. Science Reports of the Tohoku University15, 177-256.
- Sohn, Y.K., Park, K.H., 2004. Early-stage volcanism and sedimentation of Jeju Island revealed by the Sagye borehole, SW Jeju Island, Korea. Geosciences Journal 8(1), 73-84.
- Sohn, Y.K., Park, K.H., 2007. Phreatomagmatic volcanoes of Jeju Island, Korea: IAVCEI-CEV-CVS Field Workshop, Jeju Island, Korea. OB Communications, Daejeon, Korea, 83 pp.
- Won, J.K., Matsuda, J., Nagao, K., Kim, K.H., Lee, M.W., 1986. Paleomagnetism and radiometric age of trachytes in Jeju Island, Korea. Journal of Korean Institute of Mining Geology 19, 25-33.