

한라산과 다랑쉬오름 등산로의 답압에 의한 토양 압밀현상*

김 태 호**

Soil Compaction of Hiking Trails Induced by Human Trampling in Mt. Halla and Darangshiorum*

Taeho Kim**

요약 : 답압으로 인하여 등산로에 발생하는 난투수층의 특성과 형성요인을 규명하기 위하여 한라산 석굴암코스과 다랑쉬오름 등산로에서 토양의 압밀 상태와 물리특성을 조사하였다. 토양경도를 비롯하여 건조밀도와 고상 비율은 대체로 등산로 중앙에서 가장 높고 가장자리로 가면서 점진적으로 감소하여 자연사면에서 최저치를 보인다. 즉 모든 등산로에서 토양의 압밀화가 진행됨으로써 등산로 중앙부에 난투수층이 출현하고 있다. 난투수층의 형성에는 등산객의 답압뿐 아니라 지형, 지질, 토양, 식생과 같은 환경요인이 관여하고 있다. 지형조건으로서 등산로의 구배와 출현위치는 답압의 강도에 차이를 일으킬 뿐 아니라 우세작용에 의한 표토의 유실과 지표류에 의한 토사의 운반·퇴적을 통하여 난투수층의 형성에 관여한다. 또한 토성을 지배하는 지질 및 토양조건은 토양의 물리특성을 통하여 등산로의 압밀화에 영향을 미친다. 반면에 식생은 난투수층의 형성에 직접 관여하기보다는 등산로의 확대속도에 작용함으로써 난투수층의 규모에 차이를 가져온다.

주요어 : 등산로, 답압, 토양 압밀, 난투수층, 한라산, 다랑쉬오름

Abstract : The hardness and physical properties of soils were measured in hiking trails of Mt. Halla and Darangshiorum in Jeju Island to examine the characteristics and formative factors of an aquiclude induced by human trampling. The soil hardness, being generally the highest on trails, decreases outward and shows the lowest on adjacent slopes in a natural condition. The bulk density and solid phase also demonstrates a similar tendency, then implying that the aquiclude occurs in the central part of trails. Although the formation of a hard layer in trails is fundamentally attributed to human trampling, the environmental factors such as landform, lithology, soil and vegetation play a role in the occurrence of the aquiclude. Soil compaction varies with the gradient and location of trails which affects a transport and deposition of soil particles to produce a hard layer. Soil compaction also depends on the physical properties of soils including the soil texture largely affected by lithology. Vegetation is not directly related with the formation of a hard layer, but affects its dimensions through an enlargement rate of bare trails depending on the response and resistance of plants to human trampling.

Key words : Hiking trail, Trampling, Soil compaction, Aquiclude, Mt. Halla, Darangshiorum

1. 서론

한라산의 등산객은 국립공원으로 지정된 1973년부터 본격적으로 증가하기 시작하여 1980년의 88,802명에서 1995년의 538,365명으로 불과 15년만에 606.3%의 급속한 증가를 기록하였다. 정상 일대에 자연휴식년제가 실시된 1996년부터 다소 감소하였으나 1998년의 550,191명을 최대로 매년 50만 명 내외의 등산객이 한라산을 찾고 있다(제주도, 2002). 그러나 단기간에 걸친 등산객의 급속한 증가는 서벽과 남벽을 이용하여 정상에 이르는 등산로의 폐쇄와

정상 일대의 출입통제로 이어질 만큼 한라산의 심각한 훼손을 초래하였다.

한라산에는 정상 일대뿐 아니라 주요 등산로를 따라서도 많은 훼손지가 분포하고 있다(우보명, 1986; 오문경, 1996; 사진 1상). 등산객이 가장 많이 이용하고 있는 어리목과 영실 등산로 주변의 훼손 면적은 50,000m²와 32,500m²로서 표고 1,300m 이상 국립공원구역 훼손면적 225,870m²의 22.1%와 14.3%를 차지하고 있다(제주도, 2000a). 한라산의 등산로 주변에 나타나는 훼손지는 등산로의 부적절한 노선설정을 비롯하여 등산로의 불편한 포장시설,

* 이 논문은 2002년도 제주지역환경기술개발센터의 연구과제(02-2-70-76)로 수행되었음.

** 제주대학교 사회교육과 지리전공 조교수(Assistant Professor, Department of Geography Education, Cheju National University)(kimtaeho@cheju.ac.kr)

등산객의 답압으로 인한 식생파괴와 토양의 고결화, 우수에 의한 나지의 가속침식, 잔존식생의 서릿발 피해 및 진동에 의한 기반암의 붕괴 등 다양한 요인에 의해 형성되고 있다(한라산국립공원관리사무소, 1997). 즉 산악지대 특유의 열악한 기후조건과 토양침식에 취약한 지질·토양조건, 식생의 느린 회복력과 같은 자연적인 요인과 함께 등산객의 급속한 증가에 따른 인위적인 요인이 복합적으로 작용하여 주요 등산로를 중심으로 훼손지가 출현하고 있다.

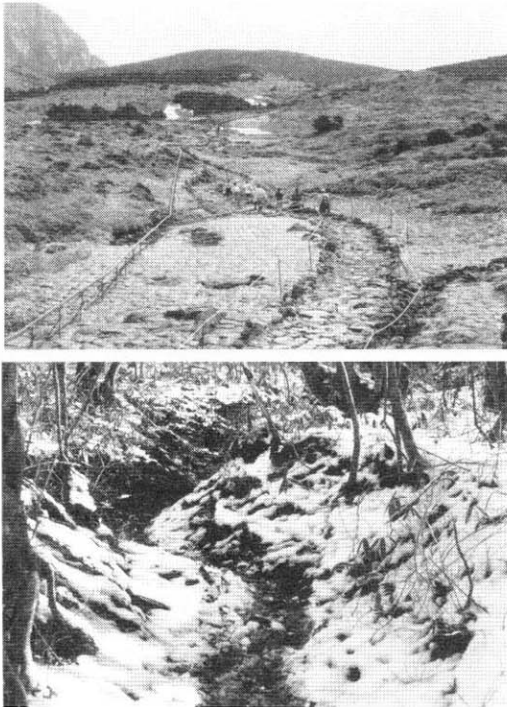


사진 1. 등산로의 훼손

상 : 어리목코스 등산로 주변의 복구된 훼손지
하 : 노꼬메큰오름의 우곡화한 등산로

이 가운데 특히 문제가 되고 있는 현상으로서 과도한 등산객에 의해 형성되는 등산로의 난투수층을 들 수 있다. 일반적으로 등산객의 답압을 통하여 등산로의 표층은 압밀되고 그 결과 토양공극률과 강우침투율을 저하시키는 난투수층이 출현함으로써 표면유출이 등산로에서 빈번하게 발생하게 된다. 따라서 포상침식이나 릿침식과 같은 우세작

용이 활발하게 일어나 표층의 토양입자를 쉽게 제거함으로써 등산로가 급속하게 훼손될 수 있다(渡辺·深澤, 1998). 또한 등산로의 난투수층은 강우 직후에 지표면에 일시적으로 우수를 고이게 하며, 이를 피하기 위하여 등산객은 등산로를 이탈하여 주변 식생지를 걷게 됨으로써 식물을 직접 손상시킬 뿐 아니라 근계 호흡을 방해하는 난투수층으로 인하여 주변 식물은 생육도 어려워져 결국 나지의 확대로 이어지게 된다(小野 외, 1990; 최오길, 2002; Ito et al., 2002).

최근 제주도에서는 소형 화산체인 오름에 대한 관심의 고조로 많은 사람이 오름을 찾고 있다. 그 결과 특히 탐방객이 몰리고 있는 오름의 등산로에서도 답압으로 형성된 난투수층을 따라 릿과 우곡이 빠른 속도로 발달하며 오름을 훼손시키고 있다(제주도·제주발전연구원, 2000; 사진 1하). 특히 오름의 대부분을 차지하고 있는 스크리아콘(scoria cone)은 화산체의 내부가 미고결 압편의 집합체에 불과하여 외부의 충격에 매우 취약한 구조를 지니고 있다. 따라서 답압과 지표류로 인하여 사면을 덮고 있는 식생과 토층이 제거되고 내부의 스크리아콘이 노출하게 되면 작은 충격에 의해서도 쉽게 부수어질 수 있다. 제주도에서는 강우나 강풍에 의해 심하게 파괴되고 있는 스크리아콘을 도처에서 볼 수 있는데, 일단 스크리아콘이 일부분이라도 훼손되면 내부의 취약한 구조로 인하여 훼손지는 빠른 속도로 확대되어 간다. 노출된 면적이 커질수록 침식은 가속화되므로 훼손지가 더욱 커지게 되는 악순환으로 스크리아콘은 짧은 시간 안에 사라질 수도 있다.

이와 같이 등산객의 증가는 필연적으로 답압으로 인한 난투수층의 형성과 지표류의 발생을 통하여 우세작용을 조장하고 등산객의 보행패턴에 영향을 미침으로써 등산로의 토양침식과 주변의 훼손지 확대로 이어지고 있다. 그러나 아직까지 토양의 압밀현상과 그로 인한 등산로의 침식프로세스에 관한 구체적인 현지조사가 이루어지고 있지는 않은 실정이다. 따라서 본고에서는 한라산 등산로의 토양침식 방지와 주변 훼손지의 복구 및 오름 보존을 위한 기초조사의 일환으로서 등산로에서 일어나는 토양 압밀현상의 특성과 원인을 규명한다.

2. 조사지역 및 방법

1) 조사지역 개관

플라이스토세 전기에 화산활동이 시작되었다고 해석하고 있는 4단계 형성사에서는 제3단계에 들어와 제주도 중앙부에 위치한 화구에서 집중적으로 분화가 일어나는 중심분화로 분화양식이 바뀌면서 중앙화구를 중심으로 현무암질 용암이 쌓여 한라산 순상화산체가 형성되었으며, 16만년 전에는 조면암질 용암이 분출하여 화산체 정상에 용암원정구가 출현하였다. 이후 10만년 전부터 시작한 후 화산활동기에 한라산 산록과 해안지대에 다수의 소형 화산체가 형성되었으며, 2.5만년 전에 다시 정상의 용암원정구에서 현무암질 용암이 분출하면서 백록담 분화구가 출현하였다(이문원, 1994; 제주도, 1994).

신생대 제4기의 화산활동으로 형성된 제주도에 섬 중앙의 한라산과 한라산을 둘러싸고 있는 산록의 소형 화산체가 어우러져 한반도 산지에서는 경험하기 어려운 독특한 지형경관을 만들고 있다. 남한에서 가장 높은 표고 1,950m의 한라산은 순상화산의 정상에 용암원정구가 놓여 있는 복식 화산으로 분류할 수 있다. 한라산 산록뿐 아니라 제주도 전역에는 350개를 상회하는 소형 화산체 즉 오름이 분포하고 있는데(박승필, 1985; 제주도, 1997), 오름은 주로 일회의 분화활동을 통하여 형성되는 단성화산이다. 제주도의 단성화산은 대부분 화산쇄설구의 일종인 스킨리아콘으로서 스트롬볼리식 분화에 의해 화구 위로 방출된 화산쇄설물이 화구 주변에 다시 떨어져 쌓임으로써 만들어지는 원추형 화산체이다.

표고 970m의 한라산 북서사면에 설치되어 있는 어리목 자동기상관측소의 자료에 의하면 연평균기온은 9.4℃이다. 최난월과 최한월의 평균기온은 7월과 2월의 21.2℃와 -2.2℃이며, 11월부터 2월까지 동계 4개월간의 평균기온은 0.1℃이다. 국내 최다우지로서 연강수량은 2,333mm이며, 태풍의 영향을 받는 8월에 551mm의 최다 강수량을 기록한다. 또한 6월부터 9월까지 하계 4개월간의 강수량은 1,463mm로서 전체 강수량의 62.7%를 차지하나, 월 100mm 이상의 강수량을 기록한 달이 9개월로서

전년에 걸쳐 강수가 발생하는 해양성기후의 특징을 보이고 있다(기상청, 2001).

2) 조사지점의 선정

한라산에는 현재 가장 많은 등산객이 이용하고 있는 북서쪽 산록의 어리목코스(4.7km)를 비롯하여 최단구간인 남서쪽 산록의 영실코스(3.7km), 동쪽 산록의 성판악코스(9.6km), 북쪽 산록의 관음사코스(8.7km) 등 전부 4개의 등산로가 개설되어 있다. 그러나 어리목코스와 영실코스는 표고 1,700m의 윗세오름대피소까지만 운용되고 있으며, 과거 남쪽 산록에 개설되었던 돈내코코스는 폐쇄된 상태이다. 이외에도 한라산국립공원구역에는 어리목에 소재하는 어승생악에 오르는 등산로(1.3km)와 아흔아홉골의 구봉곡에 소재하는 석굴암에 이르는 등산로(1.4km)가 개설되어 있다.

한라산의 등산로별 포장유형과 비율을 살펴보면, 자갈 22.1%, 돌바닥 46.5%, 판재데크 2.3%, 침목 29.0%로 이루어진 어리목코스와 쇠석 6.7%, 돌바닥 28.0%, 돌계단 8.0%, 판재데크 8.0%, 통나무데크 20.0%, 침목 17.3%로 이루어진 영실코스와 같이 나지 상태의 구간은 매우 적은 편이다(제주도, 2000a). 더욱이 나지 비율이 38.8%와 24.0%로서 비교적 높은 관음사코스와 성판악코스에서도 등산로



사진 2. 데크시설로 정비된 어리목코스 등산로

복구사업이 활발하게 진행되면서 최근 한라산 등산로의 91%인 38.3km가 정비되었다(제주일보, 2003; 사진 2). 따라서 등산로에는 나지가 출현하지 않으므로 주요 코스에서는 조사지점을 선정할 수 없었다. 반면에 아직 등산로 정비사업이 본격적으로 실

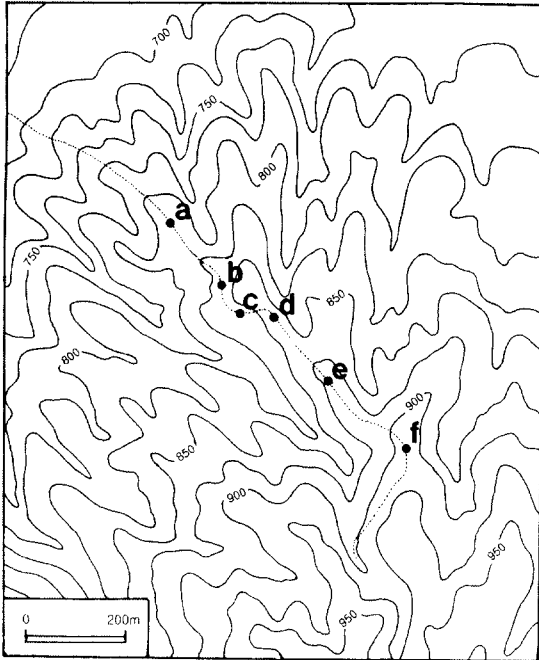


그림 1. 석굴암코스 등산로의 조사지점

시되고 있지 않은 석굴암코스에서는 일부 침목이 설치된 급경사구간을 제외하면 등산로는 대부분 나지 상태를 이루고 있으므로 석굴암코스에서 지형조건을 달리하는 6개의 조사지점을 선정하였다(그림 1).

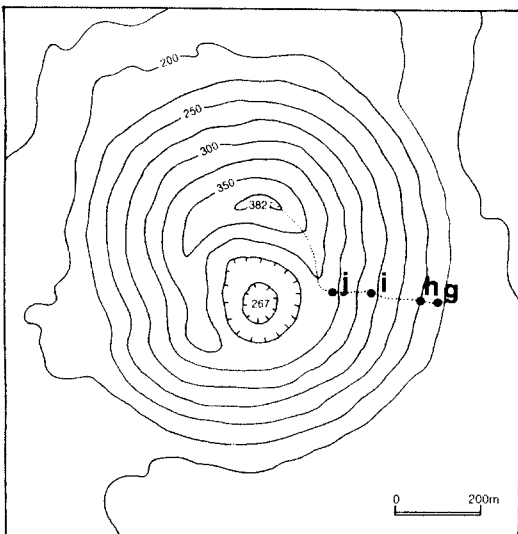


그림 2. 다랑쉬오름 등산로의 조사지점

북제주군 구좌읍에 소재하는 표고 382m의 다랑쉬오름(비고 227m)은 균제미가 돋보이는 모식적인 스크리아콘으로서 가장 많은 탐방객이 몰리고 있는 오름의 하나이다. 등산면에 개설되어 있는 등산로는 현재 우곡침식이 시작되는 등 훼손이 심해져 최근 폐쇄된 상태이나 아직도 탐방객이 이용하고 있는 실정이다. 따라서 폐쇄된 다랑쉬오름 등산로의 등산로에서도 4개의 조사지점을 선정하였다(그림 2).

3) 조사방법

조사지점에서 등산로와 주변의 자연사면을 대상으로 야마나카(山中)식 토양경도계(DIK-5520)를 이용하여 토양 표층의 경도를 계측하였다. 즉 등산로를 가로지르는 축선을 설치하고 10~20cm 간격으로 계측지점을 선정한 후에 각 지점에서 표층의 토양경도를 3~5회 계측하고 그 평균치로서 토양경도를 결정하였다. 또한 지형계측과 식생조사를 병행하여 토양 압밀현상에 미치는 지형과 식생의 영향을 검토하였다.

석굴암코스의 2개 지점에서는 단관식 관수형 침투계(辻村·恩田, 1996; 전재범, 2003)를 사용하여 토양의 투수시험을 실시하였다. 먼저 원통 모양의 관을 지표면에 삽입하여 고정시킨 뒤에 관 안에 수위가 일정하게 유지되도록 관 위에 물통을 놓아 물을 지속적으로 공급하였다. 일정한 시간 간격으로 물통에서 감소되는 물의 양을 기록하여 침투능(infiltration capacity)을 구하였다.

한편 등산로 중앙부를 비롯하여 답압을 받지 않은 등산로 주변의 자연사면, 등산로와 자연사면의 경계부에서 100ml의 금속성 시료원통을 사용하여 표층의 토양을 비교란 상태로 채취하였다. 토양시료를 대상으로 고상, 액상 및 기상 3상 분포를 비롯하여 건조밀도, 공극비, 함수비 등의 물리특성을 측정하였다. 조사지점 선정을 위한 예비조사는 2002년 10월에 주로 이루어졌으며, 야외에서의 본 조사는 2002년 11월 초순부터 12월 초순에 걸쳐 실시하였다.

3. 결과

1) 한라산 석굴암코스

산릉(815m)에 위치하는 a지점 등산로의 바닥 폭은 130cm이며 깊이는 5~9cm로서 얇은 편이다. 등산로의 중앙 우측이 가장 깊게 파여 있으나 단면형은 대칭을 이루고 있다. 등산로의 구매는 ±0.5° 이내로서 수평에 가깝다. 석굴암코스의 등산로 주변은 주로 제주조릿대로 덮여 있으며, 교목으로는 소나무와 서어나무가 산재한다. 토양경도는 가장 깊게 파인 중앙 부근이 72.6kgf/cm²으로 최고치를 보이며, 바깥으로 갈수록 감소하여 측벽과 접하는 가장자리는 6.1~9.1kgf/cm²이다. 등산로 측벽 및 자연사면으로 이어지는 부분은 1.2~3.0kgf/cm²이며, 자연사면은 1.1kgf/cm²에 불과하다(그림 3). 등산로 중앙과 등산로로부터 60cm 떨어진 좌측 자연사면에서 채취한 토양의 건조밀도는 1.085g/cm³ 및 0.623g/cm³이며, 3상 분포에서 고상 비율은 등

산로 중앙 45.1%, 자연사면 26.4%이다. 또한 공극비는 등산로 중앙의 1.22에 비하여 자연사면은 2.79로 두 배를 상회한다(표 1).

표 1. 석굴암코스 등산로 토양의 물리특성

조사지점	건조밀도 g/cm ³	3상 분포(%)			공극비	
		고상	액상	기상		
a	등산로	1.085	45.1	29.1	25.8	1.22
	자연사면	0.623	26.4	34.9	38.7	2.79
b	등산로	0.847	39.4	39.8	20.8	1.54
	중간부	0.811	32.8	39.4	27.8	2.05
c	등산로	0.849	39.8	53.4	6.8	1.51
	자연사면	0.689	30.4	23.2	46.5	2.29
d	등산로	0.930	38.5	38.6	22.9	1.60
	중간부	0.703	31.2	31.1	37.7	2.20
	자연사면	0.576	26.6	35.6	37.8	2.76
e	등산로	1.345	52.9	22.2	24.9	0.89
	중간부	0.929	41.6	41.3	17.1	1.40
	자연사면	0.790	30.8	29.8	39.4	2.24
f	등산로	1.324	51.0	21.2	27.8	0.96
	중간부	0.628	25.8	34.9	39.3	2.87
	자연사면	0.487	19.9	28.3	51.7	4.02

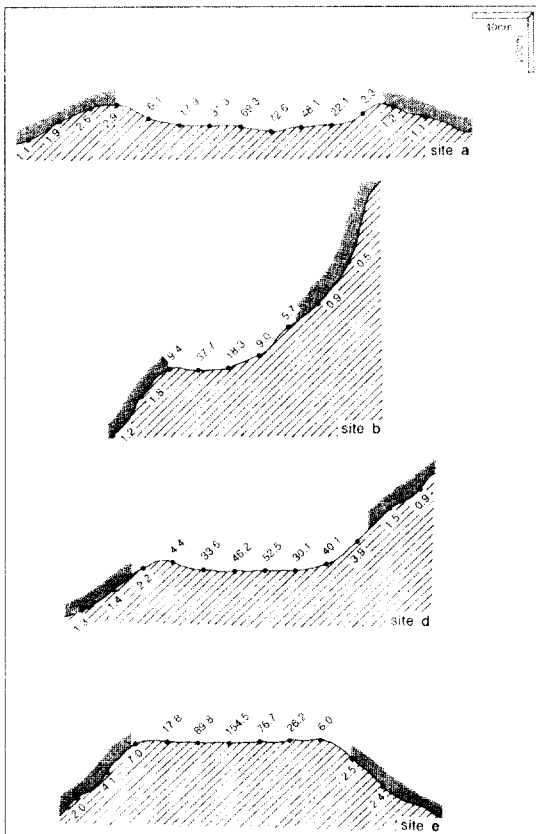


그림 3. 석굴암코스 조사지점의 지형단면과 토양경도(kgf/cm²)

사면(835m)을 가로지르는 b지점 등산로의 폭은 60cm이고 바닥은 평탄면에 가깝다. 등산로 우측으로는 사면이 측벽을 이루고 있으나 좌측은 트여 있으므로 등산로의 단면형은 비대칭적이다. 등산로는 아래쪽으로 2° 정도 완만하게 기울어져 있다. 토양경도는 등산로의 중앙 좌측이 37.7kgf/cm²으로 최고치를 보이며, 그 주변은 13.6~28.1kgf/cm², 등산로와 우측 사면이 접하는 가장자리는 9.0kgf/cm²으로 점진적으로 감소한다. 자연사면의 토양경도는 0.5~1.4kgf/cm²이다(그림 3). 등산로의 중앙 좌측을 비롯하여 우측 사면으로 이어지는 등산로 가장자리와 우측 자연사면에서 채취한 토양의 건조밀도는 0.847g/cm³, 0.811g/cm³ 및 0.540g/cm³이다. 3상 분포에서 고상 비율도 등산로 중앙 39.4%, 가장자리 32.8%, 자연사면 24.7%로 감소한다. 또한 등산로 중앙의 공극비 1.54에 비하여 자연사면은 두 배에 가까운 3.05이며, 가장자리는 2.05로 중간치를 보인다(표 1).

산릉(855m)에 위치하는 d지점 등산로의 바닥 폭은 100cm이며 깊이는 5cm 이내로서 매우 얇다. 등산로가 산릉의 약간 좌측으로 지나고 있어 우측에

한라산과 다랑쉬오름 등산로의 답압에 의한 토양 압밀현상

는 답압을 받지 않은 사면이 일부 남아 있으므로 등산로의 단면형은 비대칭적인 모습을 보인다. 등산로의 구배는 $\pm 1^\circ$ 이내로서 수평에 가깝다. 토양경도는 등산로 중앙이 $46.2\sim 52.5\text{kgf/cm}^2$ 으로 최고치를 보이며, 그 주변이 $30.1\sim 33.6\text{kgf/cm}^2$, 측벽과 접하는 가장자리는 $9.0\sim 10.2\text{kgf/cm}^2$ 이다. 자연사면으로 이어지는 부분은 $2.2\sim 3.9\text{kgf/cm}^2$ 이며, 자연사면은 $0.9\sim 1.5\text{kgf/cm}^2$ 으로 감소한다(그림 3). 등산로 중앙을 비롯하여 우측 사면과 접하는 등산로 가장자리, 등산로로부터 1.5m 떨어진 좌측 자연사면에서 채취한 토양의 건조밀도는 0.930g/cm^3 , 0.703g/cm^3 및 0.576g/cm^3 이다. 3상 분포에서 고상 비율은 등산로 중앙 38.5%, 가장자리 31.2%, 자연사면 26.6%이다. 또한 공극비는 등산로 중앙의 1.60에 비하여 자연사면은 2.76으로 증가하며, 중간지점인 등산로 가장자리는 2.20으로 중간치를 보인다(표 1).

좁은 산릉(880m)에 위치하는 e지점 등산로의 폭은 120cm이고 가장자리에 측벽이 없이 직접 사면으로 이어진다. 등산로의 구배는 $\pm 0.5^\circ$ 이내로서 수평에 가깝다. 토양경도는 등산로 중앙 일대에서 최고치 154.5kgf/cm^2 을 비롯하여 127.1kgf/cm^2 과 135.0kgf/cm^2 을 기록하여 전 조사지점에서 가장 높은 값을 보인다. 등산로 바깥으로 가면서 토양경도는 점진적으로 감소하여 가장자리는 $14.0\sim 16.7\text{kgf/cm}^2$, 자연사면으로 이어지는 부분은 $3.7\sim 7.0\text{kgf/cm}^2$ 이며, 자연사면은 $2.0\sim 2.6\text{kgf/cm}^2$ 으로 더욱 감소한다(그림 3). 등산로 중앙과 좌측 가장자리, 등산로로부터 1m 떨어진 좌측 자연사면에서 채취한 토양의 건조밀도는 1.345g/cm^3 , 0.929g/cm^3 및 0.790g/cm^3 이다. 3상 분포에서 고상 비율은 등산로 중앙 52.9%, 가장자리 41.6%, 자연사면 30.8%로 감소한다. 또한 공극비는 등산로 중앙이 0.89인데 비하여 자연사면은 2.24로 두 배를 훨씬 상회하며, 가장자리는 1.40으로 중간치를 보인다(표 1).

사면(840m)을 가로지르는 c지점과 산릉(910m)에 위치하는 f지점의 등산로는 각각 b지점과 d지점 등산로의 상황과 유사하므로 상세한 내용은 기재하지 않았으며, 조사결과만 표 1로 정리하였다.

한편 투수시험은 a지점과 d지점에서 토양경도가 가장 높게 나타나는 중앙 부근과 등산로로부터 1.5m 떨어진 좌측 자연사면을 대상으로 이루어졌는데, 자연사면에서의 침투능은 두 지점 모두 1.06

$\times 10^{-2}\sim 2.12\times 10^{-2}\text{cm/s}$ 로 비슷하다. 반면에 등산로 중앙에서의 침투능은 a지점에서는 $1.36\times 10^{-3}\sim 1.72\times 10^{-3}\text{cm/s}$, d지점에서는 $2.02\times 10^{-3}\sim 2.63\times 10^{-3}\text{cm/s}$ 로서 a지점이 다소 낮으나, 두 지점 모두 자연사면의 침투능에 비하여 1/10 수준으로 떨어지고 있다.

2) 다랑쉬오름

하부사면(200m)에 위치하는 h지점 등산로의 폭은 105cm이나 답압의 흔적이 확인되는 주변 식생지를 포함하면 폭은 180cm에 이른다. 등산로 중앙에는 폭 20cm의 릿이 나타나며, 릿을 중심으로 최대 10cm까지 침식된 등산로는 대칭적인 단면형을 이루고 있다. 등산로의 구배는 15° 이다. 다랑쉬오름의 등산로 주변은 대부분 억새와 사초류로 덮여 있다. 토양경도는 등산로 중앙의 릿에서 최고치 16.0kgf/cm^2 을 보이며, 릿 주위는 $10.0\sim 12.5\text{kgf/cm}^2$, 나지 상태의 등산로 가장자리는 $5.3\sim 6.6\text{kgf/cm}^2$ 이다. 또한 답압을 받은 등산로 주변 식생지는 $2.7\sim 6.0\text{kgf/cm}^2$ 이며, 자연사면은 $2.4\sim 2.9\text{kgf/cm}^2$ 으로

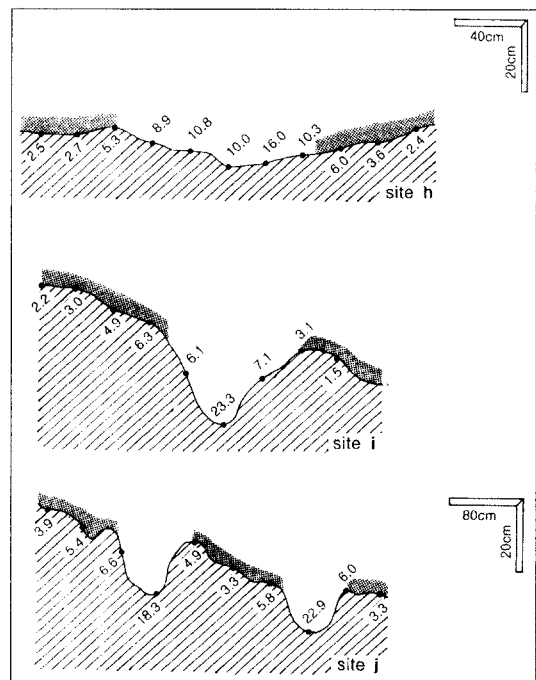


그림 4. 다랑쉬오름 조사지점의 지형단면과 토양경도(kgf/cm^2)

감소한다(그림 4). 등산로 중앙의 릿을 비롯하여 등산로 좌측의 답압을 받은 식생지와 계측구간으로부터 3m 떨어진 좌측 자연사면에서 채취한 토양의 건조밀도는 0.606g/cm³, 0.586g/cm³ 및 0.449g/cm³이다. 3상 분포에서 고상 비율은 등산로 26.8%, 답압 식생지 27.7%, 자연사면 22.7%이다. 공극비는 등산로 2.73에 비하여 자연사면은 3.41로 차이를 보이거나 중간지점인 답압 식생지는 2.61로 등산로 중앙과 비슷하다(표 2).

표 2. 다랑쉬오름 등산로 토양의 물리특성

조사지점	건조밀도 g/cm ³	3상 분포(%)			공극비	
		고상	액상	기상		
g	등산로	0.606	26.8	45.1	28.1	2.74
	중간부	0.586	27.7	51.4	20.9	2.61
	자연사면	0.449	22.7	45.5	31.8	3.41
h	등산로	0.641	28.8	48.6	22.5	2.47
	중간부	0.485	22.8	52.1	25.1	3.38
	자연사면	0.432	19.7	47.6	32.8	4.09

사면 중간(260m)에 위치하는 i지점 등산로의 폭은 80cm이나 답압을 받은 주변 식생지를 포함하면 폭은 120cm이다. 침식이 가장 많이 진행된 등산로 중앙에는 폭 40cm, 최대깊이 21cm의 반원형 우곡이 나타나며 등산로의 구배는 22°이다. 토양경도는 우곡의 중앙에서 최고치 23.3kgf/cm²를 보이거나 등산로 대부분이 10kgf/cm²를 넘지 못한다. 나지 상태의 등산로 가장자리는 3.5~5.2kgf/cm², 답압을 받은 등산로 좌측 식생지는 3.6~6.3kgf/cm², 자연사면은 1.5~3.2kgf/cm²으로 감소한다(그림 4).

화구륜으로부터 10m 떨어진 상부사면(305m)에 위치하는 j지점 등산로는 분기하여 2개로 이루어져 있다. 좌측 등산로의 폭은 70cm이며 답압을 받은 식생지를 포함하면 140cm이다. 등산로의 깊이는 15cm로서 사다리꼴 단면형을 보인다. 좌측 등산로로부터 115cm 떨어져 있는 우측 등산로의 폭은 60cm이며 답압 식생지를 포함하면 110cm이다. 깊이는 12cm로서 반원형의 단면형을 보인다. 등산로의 구배는 20° 내외이다. 토양경도는 우곡에 가까운 두 등산로의 중앙에서 각각 18.3kgf/cm² 및 22.9kgf/cm²의 최고치가 나타난다. 나지 상태의 등산로는 5.8~15.2kgf/cm²의 범위에 들어가며 바깥으로 갈수록 감소한다. 두 등산로 사이의 식생지에서 답

압을 받은 가장자리는 4.2~7.5kgf/cm²이나 답압의 흔적이 보이지 않는 중앙은 3.3kgf/cm²으로 차이를 보인다. 두 등산로 바깥쪽의 답압을 받은 식생지도 4.2~6.0kgf/cm²이며, 더욱 바깥쪽의 자연사면은 3.3~3.9kgf/cm²으로 약간 감소한다(그림 4).

등산로에 스크리아가 일부 노출하고 있는 i지점과 j지점에서는 시료토양을 채취하지 않았다. 대신에 사면 하부에 조성된 삼나무 식재림 구간에 위치하는 g지점에서 나지 상태의 등산로 중앙을 비롯하여 두텁게 쌓인 낙엽에서 답압을 받지 않은 것으로 판단되는 자연사면과 일부 답압의 흔적이 확인되는 등산로 가장자리에서 시료토양을 채취하였다. 토양경도는 등산로 중앙이 10.8kgf/cm²으로 가장 높고 가장자리 7.5kgf/cm², 자연사면 2.5kgf/cm²으로 감소한다. 건조밀도는 등산로 중앙 0.641g/cm³, 가장자리 0.485g/cm³, 자연사면 0.432g/cm³이며, 3상 분포의 고상 비율도 28.8%, 22.8%, 19.7%의 순이다. 또한 공극비도 등산로에서 2.47, 자연사면에서 4.09이며, 가장자리에서는 3.38로 중간치를 보인다(표 2).

4. 고찰 및 결론

1) 난투수층의 특성과 형성요인

한라산 석굴암코스과 다랑쉬오름 등산로의 토양경도를 비교하면 전반적으로 등산로의 중앙에서 최고치가 나타나며, 가장자리로 가면서 점진적으로 감소하여 주변 자연사면에서 최저치를 보인다. 토양의 건조밀도와 3상 분포에서 고상이 차지하는 비율도 토양경도와 유사한 경향을 나타낸다. 따라서 모든 등산로에서 정도의 차이는 있으나 답압으로 인한 토양의 압밀화가 진행되고 있으며, 이러한 물리특성과 투수시험 결과로부터 등산로 중앙 일대에 난투수층이 형성되어 있음을 알 수 있다.

등산로 중앙에 나타나는 난투수층의 가장 중요한 형성요인은 물론 등산객의 답압이라고 할 수 있다. 등산로의 나지화를 등산객의 장기간에 걸친 답압의 결과로 보고 답압이 식물에 미치는 영향을 조사한 제주도(2000a)에 의하면, 등산객의 5회 통행으로 식물은 잘리기 시작하고 20회에 소로가 출현한다. 30회를 지나면서 토양이 노출하기 시작하

한라산과 다랑쉬오름 등산로의 답압에 의한 토양 압밀현상

며, 50~100회에 식물은 완전히 절단되고 암석도 노출하여 강우시 토양침식이 일어날 수 있다. 또한 인공사면에서 실시한 답압 실험에서도 확인되듯이 등산객의 급격한 증가는 필연적으로 토양의 압밀을 통하여 등산로에 난투수층을 초래한다(Quinn et al., 1980).

그러나 토양의 압밀 상태는 등산로의 지형조건을 비롯하여 지질, 토양, 기후, 식생, 등산객의 유형과 같은 여러 환경요인에 의해 달라질 수 있다(Weaver and Dale, 1978). 예를 들면, 일본 야쿠시마(屋久島) 등산로의 난투수층 형성에는 세계자연유산으로 선정되면서 4년만에 등산객이 14.4배나 증가한 인위적인 요인뿐 아니라 풍화속도가 빠르고 우적침식(rainsplash erosion)을 받기 쉬운 등산로의 지질조건이나 빈번한 지표류를 발생시킴으로써 결과적으로 토양입자의 운반과 층상 퇴적을 일으켜 낮은 투수율의 표층을 형성시키는 연평균 강수량 4,000mm의 기후조건과 같은 자연적 요인이 강조되고 있다(大貫 외, 1999).

석굴암코스과 본고에서 언급하지 않은 돈내코코스에서도 조사는 수평면에 가까운 평탄한 구간에서만 이루어졌다. 실제로 석굴암코스의 경사구간에서 토층으로 이루어진 등산로는 거의 출현하지 않으며, 6개 조사지점 가운데 가장 경사가 급한 곳도 2°에 불과할 정도로 난투수층은 대부분 평탄지에 분포하고 있다. 답압으로 인한 난투수층은 모든 등산로에 출현하게 되지만, 우세작용이 활발하게 일어나는 경사구간의 등산로에서는 비교적 단기간에 표토가 제거되고 암반이 노출하므로 압밀된 토층으로 이루어진 난투수층은 오래 지속되기 어렵다(사진 3).



사진 3. 암반이 노출한 석굴암코스의 경사구간 등산로

이러한 측면에서 지형조건의 하나로서 등산로의 구배는 난투수층의 형성에 영향을 주는 요인으로 볼 수 있다(Coleman, 1981). 평탄지와 경사지에서 답압으로 인한 토양의 압밀 상태를 비교한 실험에 의하면, 사면 아래쪽으로 더 많은 압력이 가해지는 경사지에서 토양의 압밀은 더 크게 일어난다(Weaver and Dale, 1978). 반면에 大貫 외(1999)가 언급하였듯이 주변의 사면으로부터 지표류에 의해 다량의 토양입자를 공급받는 산악지대의 평탄지는 토사가 층상으로 퇴적되어 우수의 침투능을 저하시킴으로써 난투수층의 형성을 조장할 수 있다.



사진 4. 출현위치에 의한 등산로의 유형

상 : 산릉을 지나는 등산로(a지점)

하 : 사면을 가로지르는 등산로(b지점)

경사구간의 등산로에서 난투수층의 출현과 그로 인한 우세작용으로 우곡이 형성되고 하방침식으로 등산로가 깊게 파이면서 나타나는 등산로 측벽에서도 다양한 침식프로세스가 작용하여 등산로의 급속한 확대로 이어진다. 즉 취식작용(deflation)으로 세립질 토양입자가 쉽게 제거될 수 있으며, 강

풍이 동반되는 강우시에는 우적침식도 활발하게 일어난다. 특히 산악지대에서는 한랭한 기후조건으로 인하여 서릿발작용이나 동결융해작용이 강력하게 일어나 등산로의 훼손을 가속화시킬 수 있다. 따라서 경사구간의 등산로에 형성된 난투수층에 대해서는 표층의 유실을 방지하기 위한 대책이 우선적으로 필요하다.

본 조사에서 토양의 압밀 상태는 조사지역에 따라서 그리고 동일한 지역에서도 조사지점에 따라서 다소 차이가 나타난다. 석굴암코스 토양경도는 조사지점 대부분이 40kgf/cm²을 상회함으로써 20kgf/cm² 정도의 다랑쉬오름과는 큰 차이를 보인다. 또한 석굴암코스의 조사지점간 토양경도는 최고치가 154.5kgf/cm²인데 비하여 최저치는 37.7kgf/cm²으로서 4배 이상의 차이를 보인다.

석굴암코스에서 조사지점의 출현위치를 비교하면 4개소는 산릉에 위치하며, 2개소(b, c지점)는 사면을 가로지르는 등산로에 위치한다(사진 4). 산릉의 등산로는 다시 등산로 양쪽에 측벽이 나타나지 않는 2개소(a, e지점)와 등산로 한쪽에 측벽의 기능을 하는 사면이 일부 남아 있는 2개소(d, f지점)의 등산로로 구분할 수 있다. 이러한 출현위치에 따른 등산로의 형태와 토양경도의 관계를 비교하면 산릉의 등산로에서 토양경도는 가장 높고 사면을 횡단하는 등산로에서 가장 낮으며, 두 유형의 중간형에 해당하는 등산로에서 중간치를 보인다. 산릉의 등산로에서 토양경도를 비롯하여 건조밀도와 고상 비율이 가장 높게 나타나는 것은 답압과 관련하여 표층의 세립질 입자가 지속적으로 제거되면서 하위의 조립질 모재층이 표층을 대체하기 때문이다. 토양경도의 최고치 154.5kgf/cm²을 기록한 e지점의 중앙부는 지표면으로부터 6cm 깊이에 암반이 나타날 정도로 토층이 매우 얇다. 반면에 사면을 가로지르는 등산로에서는 표층이 제거되더라도 형태 특성상 토층이 지속될 뿐 아니라 측벽 기능을 하는 자연사면으로부터 강우시 표면유출이나 중간유출에 의해 흘러온 세립질 토사가 퇴적되므로 상대적으로 낮은 토양경도를 보이는 것으로 생각된다.

등산로의 침식에 토양의 영향은 크지 않은 것으로 알려져 있는데, Coleman(1981)은 등산로의 침식량과 갈색토, 갈색포드졸토, 포드졸토, 이탄토 등 4

유형의 토양과의 관계를 조사하여 큰 차이가 없는 것으로 보고하고 있다. 그러나 표층지질을 이탄층, 각력층, 화산회층으로 구분한 山田(1993)에 의하면 이탄층으로 이루어진 등산로에서 침식은 가장 현저하게 일어나고 있어 상반되는 견해를 보이고 있다. 일반적으로 건조밀도나 공극률과 같은 토양의 물리특성을 좌우하는 토성(soil texture)은 모재의 영향을 비교적 강하게 받고 있다(권혁재, 1998). 따라서 모재는 토양의 물리특성을 통하여 난투수층의 형성에 영향을 줄 수 있다.

석굴암코스가 소재하는 아흔아홉골 일대는 한라산조면암(제주도, 2000b)이 분포하며, 다랑쉬오름은 스크리아로 구성되어 있으므로 두 등산로는 모재를 달리하는 토양으로 이루어져 있다. 농촌진흥청(1976)은 아흔아홉골 일대를 균산토양으로 다랑쉬오름을 미악토양으로 분류하고 있는데, 특히 미악토양과 같은 스크리아 기원의 흑색토양은 건조밀도가 매우 낮으므로 공극률이 높고 토양입자가 가벼워 취식작용을 받기 쉽다(제주도민속자연사박물관, 2000). 다랑쉬오름의 자연사면에서 채취한 토양의 건조밀도와 공극비는 0.441g/cm³과 3.75로서 석굴암코스 토양의 0.618g/cm³과 2.86과는 상당한 차이를 보인다. 따라서 두 조사지역 등산로의 압밀 상태에 나타나는 차이에는 비록 등산객의 수가 같지 않다 하더라도 이러한 토양의 물리적 특성의 차이가 반영되어 있을 가능성은 매우 높다.



사진 5. 근계에 포획된 경사구간 등산로의 토층

석굴암코스의 경사구간에서는 대부분 표층이 제거되고 기반암이 노출하여 암반으로 이루어진 등산로가 나타난다. 그러나 일부 경사구간에서는 압

밀된 토층으로 이루어진 등산로가 관찰되는데, 이러한 장소는 예외 없이 등산로 바닥에 노출된 주변의 소나무 뿌리가 토양입자를 포획하여 마치 등산로의 표토 유실을 막기 위하여 설치한 계단의 기능을 함으로써 토층의 난투수층 형성에 관여하고 있다(사진 5). 많은 강수량으로 인하여 토양이 항상 포화에 가까운 상태에 있는 야쿠시마의 산간 지역에서는 삼나무 뿌리가 기근의 형태로 지표면 부근에 존재하며, 결국 이들 근계가 지표류에 의해 운반되어온 토사를 포획함으로써 등산로의 난투수층 형성을 조장하고 있다(大貫 외, 1999).

그러나 식생이 등산로 난투수층의 형성에 직접적으로 관여하지는 않는 것으로 생각된다. 등산로의 난투수층은 본질적으로 지표식생이 완전히 제거된 후에 나타나는 현상인데, 지속적이며 과도한 답압에 견딜 수 있는 식물종은 거의 없으므로 식물 유형에 따라 난투수층의 형성에 차이가 발생하지는 않는다. 답압에 대한 식물의 반응과 저항력은 식물의 생육형태 아니라 답압을 받은 장소에서 다시 번식할 수 있는 능력을 결정하는 식물의 생산력이 중요하다(Coleman, 1981). 따라서 관목보다는 초본식물이 답압에 대한 저항력이 크며, 초지식생에 비하여 고산식생은 매우 취약하다(Weaver and Dale, 1978). 또한 등산로의 폭과 등산로에 서식하는 초지식물, 조릿대, 눈잣나무, 고목과의 관계를 조사하여 등산로의 침식속도가 식생의 영향을 받고 있음을 보고한 山田(1993)에서도 확인할 수 있듯이 지표식생은 등산로 난투수층의 형성에 직접 관여하기보다는 등산로의 확대속도를 통하여 난투수층의 규모에 작용하는 것으로 생각된다.

2) 결론 및 금후의 과제

등산객의 증가로 출현하는 난투수층은 등산로의 토양침식뿐 아니라 주변으로 나지를 확대시켜 산지훼손의 원인이 되고 있다. 이러한 현상은 한라산과 같이 자연휴식년제가 적용되고 있는 일부 산지에만 국한되지 않는다. 최근 백두대간의 종주 붐과 더불어 과거 특정 산에만 한정되었던 산행이 이제는 전국 각지의 산지로 확산되고 있다. 그러나 이들 산지에는 아직까지 데크 설치나 쇄석 피복과 같은 등산로 보호대책이 세워져 있지 않으므로 등

산객의 답압으로 인한 난투수층의 형성이 등산로의 급속한 침식을 일으키고 있다. 특히 백두대간에서의 등산로 훼손은 사회적인 문제로 대두되고 있으나 아직까지 구체적인 대책방안이 세워지고 있지 못한 실정이다. 따라서 한라산 석굴암코스와 다량쉬오름을 대상으로 등산로 토양의 압밀 상태를 조사하고 이에 관여하는 요인을 검토하였다.

토양경도는 대체로 등산로 중앙에서 가장 높고 가장자리로 가면서 점진적으로 감소하여 주변 자연사면에서 최저치를 보인다. 건조밀도와 고상의 비율도 유사한 경향을 나타낸다. 따라서 모든 등산로에서 정도의 차이는 있으나 답압에 의한 토양의 압밀화가 진행되고 있으며, 등산로 중앙부에는 난투수층이 출현하고 있다. 난투수층의 형성에는 등산객의 답압뿐 아니라 지형을 비롯하여 지질, 토양, 기후, 식생 등의 환경요인이 관여하고 있다. 지형 조건으로서 등산로의 구배와 출현위치는 답압의 강도에 차이를 일으킬 뿐 아니라 우세작용에 의한 표토의 유실이나 지표류에 의한 토사의 운반·퇴적을 통하여 난투수층의 특성에 관여한다. 토성을 지배하는 지질 및 토양조건은 건조밀도나 공극률과 같은 토양의 물리적인 특성을 통하여 난투수층의 압밀 상태에 영향을 미친다. 반면에 식생은 등산로 난투수층의 형성에 직접적으로 관여하기보다는 답압에 대한 식물의 반응과 저항력의 차이가 등산로의 확대속도에 작용함으로써 결과적으로 난투수층의 규모에 차이를 가져온다.

본 연구에서는 한라산 등산로의 특성과 최근 활발하게 진행되고 있는 등산로 정비사업으로 인하여 조사가 매우 제한적으로 이루어질 수밖에 없었다. 특히 한라산은 제4기의 분화활동으로 형성되었기 때문에 다양한 지질과 토양의 검토가 이루어지지 못하였다. 따라서 한반도의 주요 산지를 이루고 있는 화강암을 비롯한 편마암, 석회암 등의 대표적인 암질과 그에 따른 고유의 토양을 대상으로 비교조사가 필요하다. 또한 고도에 따라서 기후요소가 현저하게 달라지는 산지의 기후특성을 고려하면, 주빙하환경에 놓인 아고산대나 고산대에서는 저지대와는 상이한 지형프로세스가 난투수층의 형성에 차이를 가져올 수 있으므로 이러한 점도 검토하여야 한다.

이러한 폭넓은 조사를 토대로 파악된 난투수층

의 특성은 자연휴식년제의 도입여부를 결정하는 자료로 활용할 수 있으며, 산지출입을 규제할 목적으로 수용가능 인원을 산출하는 경우에 등산로의 압밀 상태는 근거자료가 될 수 있다. 또한 등산로의 토양침식을 방지하기 위한 대책 수립이나 훼손된 등산로의 복구사업에도 난투수층의 특성은 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

文 獻

국립공원관리공단, 2002, 한라산국립공원 자연자원 조사.

권혁재, 1998, 자연지리학, 법문사, 서울.

기상청, 2001, 자동기상관측연보.

농촌진흥청, 1976, 정밀토양도 제주도.

박승필, 1985, 제주도 측화산에 관한 연구, 전남대학교 논문집, 30, 159-166.

오문경, 1996, 한라산국립공원의 훼손 방지 방안, 제주대학교 석사학위논문.

우보명, 1986, 한라산국립공원 백록담지구 훼손지 복구공법 개발에 관한 기초적 연구 및 복구실시 설계 용역보고서, 서울대학교 농업개발연구소.

이문원, 1994, 제주도의 형성사와 지질구조, 대한지하수환경학회(편) 제주도 지하수자원의 환경학적 보전과 개발이용, 제주도, 54-74.

전재범, 2003, 경기도 남부 편마암 산지의 강우유출 특성, 경희대학교 석사학위논문.

제주도, 1994, 한국의 영산 한라산, 제주도, 제주.

제주도, 1997, 제주의 오름, 신제주출판, 제주.

제주도, 2000a, 한라산 기초조사 및 보호관리수립.

제주도, 2000b, 서귀포·하효리도폭 지질보고서.

제주도·제주발전연구원, 2000, 제주 오름의 보전·관리방안.

제주도민속자연사박물관, 2000, 제주토양원색도감, 일신, 제주.

제주일보, 2003, 1. 14.

최오길, 2002, 등산객에 의한 답압이 설악산 아고산

대에 자생하는 식물의 분포에 미치는 영향, 강릉대학교 석사학위논문.

한라산국립공원관리사무소, 1997, 한라산정상보호 계획.

大貫靖浩·酒井正治·稻垣昌宏, 1999, 屋久島登山道における難透水層の形成, 地形, 20, 541-550.

渡辺梯二·深澤京子, 1998, 大雪山國立公園, 黒岳七合目から山頂區間における過去7年間の登山道の荒廢とその輕減のための對策, 地理學評論, 71, 753-764.

山田周二, 1993, 白山における登山道のひろがりとその速さ, 筑波大學水理實驗センター報告, 17, 65-72.

小野有五·依田明實·後藤忠志, 1990, 登山道の侵食について, 森林航測, 161, 15-19.

辻村眞貴·恩田裕一, 1996, 浸透能と降下浸透の測定, 恩田裕一·奥西一夫·飯田智之·辻村眞貴(編), 水文地形學, 古今書院, 24-33.

Coleman, R., 1981, Footpath erosion in the English Lake District, *Applied Geography*, 1, 121-131.

Ito, E., Yoshinaga, S., Ohnuki, Y., Shichi, K., Matsumoto, Y. and Taoda, H., 2002, Soil factors affecting the decline of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) forests in Kanto plain, Japan, *Proceedings of the 8th International Congress of Ecology*, 93.

Quinn, N. W., Morgan, R. P. C. and Smith, A. J., 1980, Simulation of soil erosion induced by human trampling, *Journal of Environmental Management*, 10, 155-165.

Weaver, T. and Dale, D., 1978, Trampling effects of hikers, motorcycles and horses in meadows and forests, *Journal of Applied Ecology*, 15, 451-457.

(접수 : 2002. 12. 17, 채택 : 2003. 3. 11)