

한라산 유상 구조토의 붕괴 프로세스와 요인

김 태 호 *

Processes of Thufur Disintegration in Mt. Halla

Taeho Kim*

요약: 한라산 백록담 분화구에 분포하는 유상 구조토 가운데 마운드의 내부 토양이 노출되어 있는 프로스트 스카를 대상으로 유상 구조토의 붕괴 프로세스를 살펴보고 이 프로세스에 영향을 미치는 요인을 조사하였다. 유상 구조토는 마운드 정상부에 초기 나지가 생기고 이 나지로부터 토양 입자가 제거되면서 요형의 미지형으로 발달한다. 요형의 나지는 옆으로 확대될 뿐 아니라 아래쪽으로도 깊어져 결국 마운드의 해체로 이어진다. 유상 구조토의 붕괴에는 여러 요인이 작용하고 있으나 그 중심에는 동결작용이 놓여 있다. 하루 주기의 동결융해가 빈번하게 출현하는 시기에 발생하는 서릿발은 토양 표층을 들어올려 토양 입자를 이완시킴으로써 나지의 확대를 조래하며 특히 융해기에 유상 구조토 토층의 함수비가 높아지므로 서릿발의 발생을 돕는다. 또한 취식작용도 유상 구조토의 붕괴를 일으키는 요인으로 서 한라산 정상 일대는 강풍 환경에 놓여 있을 뿐 아니라 암갈색 토층이 제거된 프로스트 스카의 나지 표면이 세력으로 덮여 있는 점으로부터 바람의 영향을 확인할 수 있다. 프로스트 스카의 나지와 마운드가 완전히 붕괴되어 흔적만 남아 있는 장소에는 고사한 눈향나무가 나타나고 있어 유상 구조토의 붕괴에 지구 온난화가 영향을 미치고 있을 가능성도 있다.

주요어: 유상 구조토, 프로스트 스카, 서릿발작용, 취식작용, 지구 온난화, 한라산

Abstract: Bare-topped thufur is called as frost scars, implying the rupturing stage of vegetated mounds. Field observations and measurements provide empirical information on the process and factors of thufur disintegration in Mt. Halla. Initial bare patches on mound apexes are scaled up by continuous removal of soil and vegetation, resulting in the formation of crater-like thufur. Frost action plays a primary role in thufur disintegration. In particular, piprake loosens soil particles within the bare patches and subsequently accelerates the degradation of vegetated mounds during periods with frequent diurnal freeze-thaw cycle and high soil moisture. Deflation also has an impact on thufur breakup in that the bare patches usually lack upper dark brown soil and are covered with granules. Withered shrubs such as *Juniperus chinensis* var. *sargentii* are frequently observed in frost scars and disrupted mounds, indicating that thufur disintegration has been probably influenced by global warming.

Key Words: thufur, frost scar, piprake, deflation, global warming, Mt. Halla

1. 서론

분급작용이 이루어지지 않은 구조토로 분류되는 유상 구조토(thufur)는 영구동토 지역(Crampton, 1977; Tarnocai and Zoltai, 1978; Mackay, 1980; Van Vliet-Lanoë, 1991)은 물론이거니와 계절적 동토 지역(Rapp, 1960; Costin and Wimbush, 1973; Schunke, 1977; Scotter and Zoltai, 1982; Ballantyne, 1986; 澤口, 1988; Grab, 1994)에도 폭 넓게 분포하고 있어 형성 가능한 범위가 가장 넓은 주빙하 지형으로 알려져 있다(Washburn, 1980). 따라서 그 분포의 기후학적 한계도 연평균 기온 3°C에 해당하는 분급 구조토보다 훨씬 높은 6°C의 등온선으

로 추정하고 있다(Lundqvist, 1969; 小嶋 등, 1974).

유상 구조토는 한반도에서도 여러 지역에 출현하고 있는데 백두산(Demek, 1973)을 비롯하여 한라산(김도정, 1970; 김태호, 2001), 지리산(장호, 1983), 오대산(손명원·박경, 1999) 등 비교적 산정 효과가 잘 나타나는 산악 지역에 주로 발달하고 있다. 이 가운데 한라산의 유상 구조토는 백록담 분화구 내부의 남서쪽 완사면 위에 집중적으로 분포하고 있으며, 타원형의 마운드는 대부분 초본 식생으로 덮여 있다. 그러나 일부 유상 구조토는 마운드의 정상부를 덮고 있는 식생 피복이 벗겨져 내부 토양이 노출되어 있으며, 때로는 마운드 자체가 부분적으로 부수어져 있거나 완전히 파괴되어 구조토

* 제주대학교 지리교육과 부교수 (Associate Professor, Department of Geography Education, Cheju National University) (kimtaeho@cheju.ac.kr)

의 형태를 상실하는 경우도 관찰되고 있다(김도정, 1973).

극 지역에 나타나는 머드 허mock(mud hummock, Mackay, 1980) 과 같은 구조토를 제외하면 일반적으로 유상 구조토는 초본 식생으로 덮여 있다(Washburn, 1980). 유상 구조토 가운데 마운드 정상부에 식생 피복이 벗겨져 있는 경우에 대해서는 구조토가 형성되는 과정에서 출현하는 것으로 보는 견해(小嶋 1965)와 함께 구조토가 붕괴되는 과정에서 나타나는 것으로 보는 견해(Billings and Moony, 1969)도 제시되고 있다. 한라산 유상 구조토의 사례에 대해서는 실태가 정확하게 파악되고 있지 않으나 현지에서의 관찰에 의하면 후자와 유사한 경우로 해석할 수 있다. 따라서 이 논문에서는 한라산 유상 구조토의 붕괴 프로세스를 살펴보고 이 프로세스에 영향을 미치는 요인에 대하여 언급한다.

2. 조사 지역 및 방법

1) 조사 지역

한라산의 유상 구조토는 표고 1,845m의 백록담 분화구 화구저에 발달하고 있다. 분화구 안쪽의 남사면과 서사면은 대부분 30° 이상의 급경사를 보이며 개석에 따른 침식곡이 산재하고 있다. 특히 화구저의 남서쪽과 서쪽으로는 침식곡 전면에 소규모의 충적추가 발달하며, 유상 구조토는 이 충적추의 사면 하부에 집중적으로 분포하고 있다(그림 1).

백록담 분화구는 동서 길이 500m, 남북 길이 400m, 둘레 1.7km, 최대 깊이 110m의 폭렬 화구로서 그 형성 시기를 둘러싸고 아직도 논란이 이어지고 있다. 즉 7만 년 전에 조면암질 용암이 분출하면서 한라산 정상에 용암돔(lava dome)과 함께 분화구가 형성되었다는 의견(윤선, 1995)에 대하여 용암돔으로부터 25만 년 전에 다시 현무암질 용암이 분출하면서 비로소 분화구가 형성되었다는 의견(이동영, 1994)이 맞서고 있다. 어느 쪽이던 간에 백록담 분화구는 최종 빙기를 경험한 것으로 보이며 분화구 안쪽의 동사면에 넓게 발달한 압괴원의 존재도 이러한 점을 시사하고 있다(김도정, 1970).

제주기상청에서 운영하고 있는 표고 970m의 어리목 관측소와 표고 750m의 성판악 관측소에서 자



그림 1. 유상 구조토가 발달한 백록담 화구저의 완사면

동 관측한 연평균 기온은 9.5℃ 및 10.9℃이며, 연평균 강수량은 2,531mm 및 2,931mm이다. 따라서 한라산의 기온 체감률 -0.58℃(공우석, 1999)를 적용하면 조사 지역의 연평균 기온은 4.4℃~5.5℃로 추정된다. 조사 지역 인근의 표고 1,810m 장구목오름에서 2000년 2월부터 8월까지 관측한 기상 자료에 의하면 2월과 3월의 평균기온은 -7.9℃ 및 -2.4℃로서 영하를 가리키며 같은 기간에 기록된 최저 기온은 2월 8일의 -16.3℃이다(제주도, 2000). 동계에 백록담 화구저는 강설로 인하여 전면 눈으로 덮이게 되나 유상 구조토는 강풍과 비교적 긴 일조시간으로 화구 안에서 가장 먼저 눈이 사라지는 장소에 주로 분포하고 있다.

2) 조사 방법

조사 지역에 5m×5m 크기의 방형구를 설정하여 유상 구조토의 분포 및 형태 특성을 파악하였으며, 마운드 정상부에 식생 피복이 벗겨져 있는 유상 구조토 가운데 모식적인 마운드를 선정하여 크기와 형태를 실측하였다. 또한 조사 지역의 토양 단면을 기재하고 토색으로 구분되는 토층 층위별로 시료용 토양을 채취하여 유상 구조토 토양의 물리적 성질을 조사하였다. 토양의 삼상 분포를 비롯하여 건조밀도, 공극비, 함수비, 포화도를 조사하기 위하여 채토기를 사용하여 비교란 상태로 시료용 토양을 채취하였고 동시에 입도 분석을 위한 교란 상태의 토양도 채취하였다. 입도 조성은 0.075mm 이하 세립토와 모래, 자갈로 분류하는 200번 체 통과량 시험법(KS-F2309)으로 구하였다.



그림 2. 유상 구조토와 온도 관측 장비

조사 지역의 온도 특성을 파악하기 위하여 마운드 사이 저지에 깊이 25cm의 구멍을 파고 바람이 통하는 일사 차폐기(HOBO-RS1)를 단 높이 100cm의 기둥을 세웠다. 그리고 지면으로부터 높이 65cm 지점에 호보 온도 센서(TMC6-HC)를 설치하였다. 이 지점은 주변 마운드 정상으로부터 40~45cm 높이에 해당한다. 이와 더불어 최고 높이가 25cm에 달하는 마운드의 내부 2cm 및 20cm 깊이에도 온도 센서(TMC6-HA)를 설치하였으며, 각 센서는 4채널 데이터로거(H08-008-04)에 연결하여 동계 기온과 지온을 자동 관측하였다(그림 2). 온도 센서의 측정 범위는 -40°C 부터 100°C 까지이며, 20°C 에서 $\pm 0.41^{\circ}\text{C}$ 의 정밀도를 갖고 있다. 관측은 매시간 정각에 이루어졌으며 관측 기간은 2002년 11월 15일부터 2003년 5월 13일까지 182일이다.

3. 조사 결과

1) 분포 및 형태

방형구 안에는 유상 구조토가 20~40cm의 간격으로 모두 17개가 출현하여 $0.68\text{개}/\text{m}^2$ 의 비교적 높은 밀도를 보인다. 이 가운데 일부 마운드는 측면이 다소 우묵하게 파여져 완전한 도움의 형태를 이루지 못하고 있으나 표면은 대부분 초본 식생으로 덮여 있다. 그러나 2개의 마운드는 정상부에 원형 또는 타원형의 형태로 식생이 결여 되어 있다. 방형구 밖에도 도처에 식생 피복이 결여되어 있는 마운드가 나타나는데 장소에 따라서는 마운드가 완전히 파괴되어 나지의 폐치를 이루는 곳도 관찰된다.

<그림 3>의 유상 구조토는 장경이 130cm, 단경이 100cm로서 남북 방향으로 약간 길게 늘어진 타원형의 마운드로서 높이는 10~15cm 정도이다. 조사 지역에서 관찰된 유상 구조토 가운데 마운드 정상부에 비교적 모식적인 화구 모양의 나지를 지니고 있다. 즉 장경이 78cm, 단경이 34~50cm인 타원형 나지가 마운드 중앙에 나타나며 그 밖의 마운드 표면은 김의털(*Festuca ovina*), 겨이삭(*Agrostis*

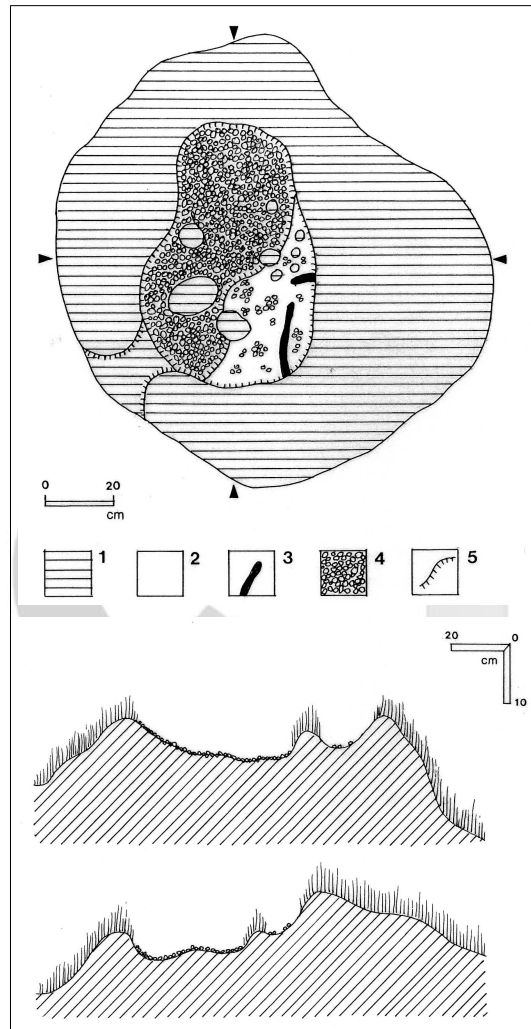


그림 3 마운드 정상부에 나지를 지닌 유상 구조토의 평면(위) 및 단면(아래) 형태

단면 형태에서 위쪽은 종단면형, 아래쪽은 횡단면형이며 축선의 위치는 평면도에 삼각형으로 표시되어 있음.

1 식생, 2 근계가 탁월한 암갈색 토층, 3 고사목 줄기, 4 자갈, 5 단애

표 1. 유상 구조토 토양의 물리적 특성

토 층	토 색	입도 조성(%)			건조밀도 (g/cm ³)	공극비	함수비 (%)	포화도 (%)
		세립토	모 래	자갈				
암갈색	10YR 2/3	61.8	29.2	9.0	0.801	1.986	59.1	70.5
혼 합	10YR 3/4	49.5	30.6	19.9	0.860	1.883	38.7	51.1
갈 색	10YR 4/4	46.5	28.1	25.4	0.967	1.558	27.5	43.3

flaccida) 및 한라부추(*Allium taquetii*) 등의 초본 식생으로 덮여 있다. 중앙의 나지에도 국지적이지만 김의털이나 겨이삭이 조금씩 남아 있다.

나지는 5~10cm 정도의 높이 차이를 보이는 2단 구조를 이루고 있는데 아래쪽 표면은 전면 2~10mm 크기의 조면암질 세력과 중력으로 덮여 있다. 자갈 밑으로는 조사 지역의 표층토인 암갈색 토층은 보이지 않으며 대신 갈색 토층이 나타난다. 반면에 위쪽 나지의 표면은 근계와 같은 유기물로 대부분 덮여 있으며 2~5mm 크기의 세력이 산재하고 있다. 그러나 근계 밑으로는 암갈색 토층이 나타난다. 또한 위쪽 표면에는 근계 사이로 1.5cm 두께의 고사한 눈향나무(*Juniperus chinensis* var. *sargentii*)의 줄기도 일부 보인다(그림 3).

2) 토양

조사 지역의 토양 단면은 토색에 의해 두 개의 층위로 구분된다. 상부의 토층은 10YR 2/3이나 3/3의 암갈색인데 비하여 하부의 토층은 10YR 4/4나 4/6으로 갈색을 띠고 있다. 또한 토층의 육안 관찰에 의하면 암갈색 토층에는 세력이 거의 포함되어 있지 않으나 갈색 토층에는 3~7mm의 세력이 나타나며 때로는 5~7cm 정도의 중력도 보인다. 암갈색 토층의 두께는 장소에 따라 차이를 보이는데 유상 구조토가 발달하지 않은 장소에서는 12~14cm로 거의 균일하나 유상 구조토 내부에서는 5~14cm로 마운드에 따라 두께가 달라진다. 토층에는 표면을 덮고 있는 사초과 식생의 근계가 잘 발달하고 있는데 전반적으로 암갈색 토층에 더 많이 밀집되어 나타난다.

유상 구조토의 토양 단면에는 층위의 동결교란으로 인한 불규칙한 토양 구조가 관찰되며 마운드에 따라서는 암갈색 토층과 갈색 토층이 혼합되어 토층의 경계가 불명료하다. 이러한 혼합층의 토색

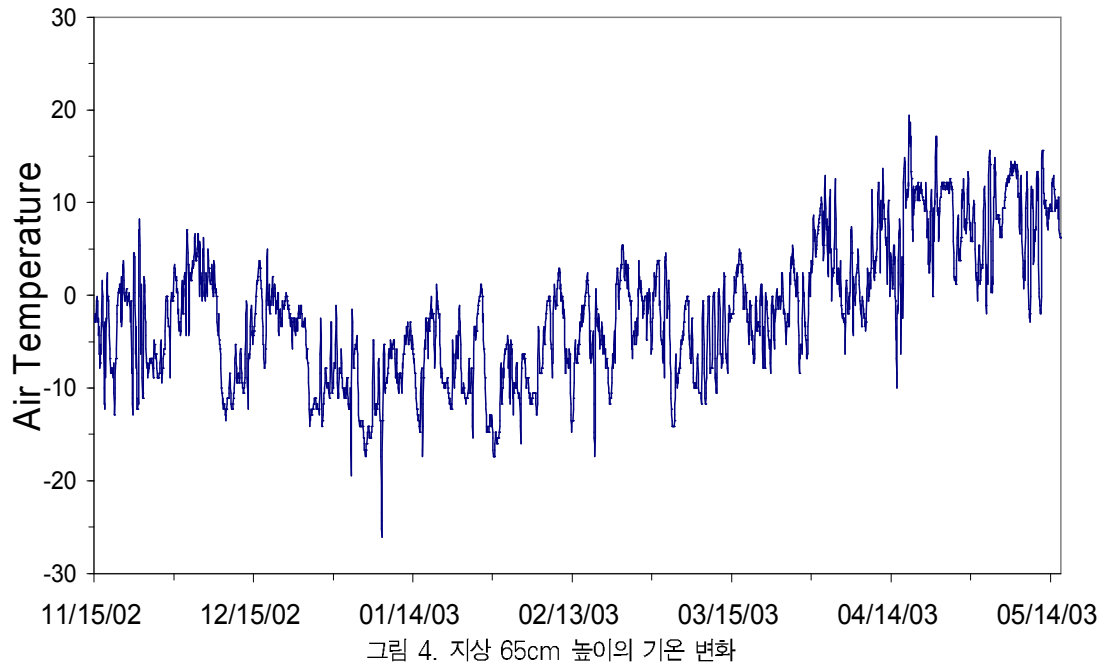
은 10YR 3/4나 4/4이며, 토양 특성도 두 층위의 접이적인 모습을 보인다.

유상 구조토 토양의 입도 조성은 0.075mm 이하 세립토 46.5~61.8%, 모래 28.1~30.6%, 자갈 9.0~25.4%로서 특히 암갈색 토층의 세립토 함유량이 높게 나타난다(표 1). 층위별 토층의 건조밀도를 비교하면 암갈색 0.801g/cm³, 갈색 0.967g/cm³, 두 토층의 혼합층 0.860g/cm³로서 밑으로 내려갈수록 토양은 치밀해지는 경향을 보인다. 공극비도 유사한 경향을 보여 갈색 토층의 공극비가 1.558로 가장 낮고 토양의 삼상 분포에서도 갈색 토층의 고상이 38.6%로 가장 높게 나타난다(표 1).

함수비와 포화도를 비교하면 암갈색 토층이 59.1% 및 70.5%로서 가장 높고 밑으로 내려갈수록 토양은 건조해져 갈색 토층의 함수비와 포화도가 각각 27.5% 및 43.3%로서 가장 낮다(표 1). 동계에 함수비는 전반적으로 증가하여 콘크리트 상태로 동결되어 있는 암갈색 토층과 갈색 토층의 수분 함량은 73.9~118.0% 및 49.9~82.8%에 이른다. 또한 동토가 대부분 용해되는 4월 하순에도 암갈색 토층은 62.3~111.7%의 높은 함수비를 유지하고 있다.

3) 온도 특성

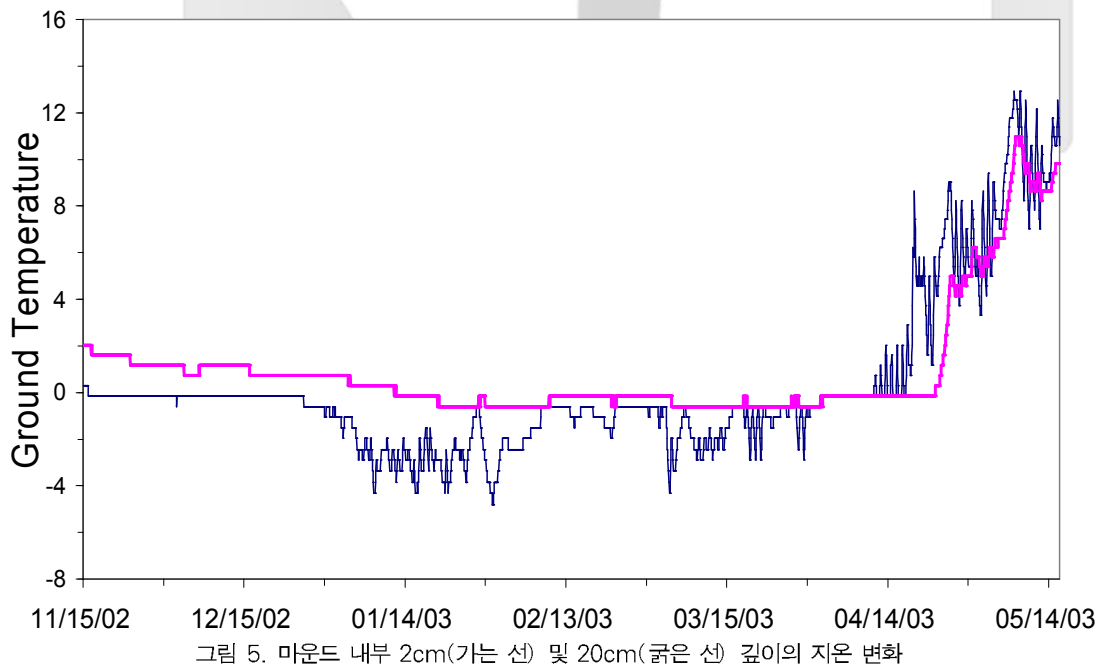
마운드 위쪽 45cm 지점, 즉 지상 65cm 지점의 기온 관측에는 특별한 문제가 없었으나 지온의 경우는 온도 센서의 이상으로 정확한 계측이 이루어지지 않았다(그림 4와 5). 우선 일평균 기온의 변동을 보면 11월에는 2일간을 제외하고 전부 0℃ 이하를 기록하였다. 12월에 들어와 처음 6일간은 영상의 기온을 보였으나 8일부터 다시 0℃ 이하로 떨어졌으며, 1.01℃가 관측된 2월 10일까지 6일간에 걸쳐 영하의 날씨가 이어졌다. 관측 기간에 기록된 최저 기온도 이 시기에 출현하여 일평균 기온의 최저치는 1월 29일 관측된 -16.06℃이며, 시



간별 최저 기온은 1월 8일 오전 4시에 관측된 -26.11°C 이다. 이후 0°C 이하의 일평균 기온은 3월 29일까지 이어졌으며, 이 기간 영상의 기온을 기록한 일수는 2월에는 4일, 3월에는 3일로 전부 7일에 불과하였다. 4월에 들어와서도 3회에 걸친 영하의

기온이 관측되었으나 4월 9일 기록된 -0.61°C 를 마지막으로 일평균 기온은 0°C 이하로는 떨어지지 않았다.

관측을 시작한 11월 15일부터 12월 21일까지 최고 기온과 최저 기온이 0°C 를 사이에 두고 변동하



는 소위 동결융해 교대일이 22일간 출현하였다. 그러나 12월 22일부터 2월 8일까지는 1월 하순의 2일간을 제외하면 최고 기온도 영하에 머무르는 동결일이 이어졌다. 동결융해 교대일은 2월 9일부터 다시 출현하여 3월 10일까지 30일 동안에 동결일과 동결융해 교대일이 각각 15일씩 똑같이 출현하였다. 이후 동결융해 교대일의 출현 빈도가 더 많아져 3월 29일까지 4일간의 동결일에 비하여 동결융해 교대일은 15일에 이른다. 최저 기온이 0℃ 이상을 기록하는 융해일은 3월 30일 최초로 출현하여 5월 12일까지 동결융해 교대일과 반복하여 관측되었다. 4월의 경우 동결융해 교대일이 나타난 일수는 상순 7일, 중순 4일 및 하순 2일로 전부 13일간이었다. 5월 들어서도 동결융해 교대일은 관측이 종료된 15일까지 전부 5회 기록되었다.

한편 마운드 내부 2cm 깊이의 지온은 온도 센서의 문제로 정확한 관측이 이루어지지 않는 것이나 일부 관측된 자료를 살펴보면 늦어도 12월 26일부터 마운드 표층부는 동결 상태에 들어간 것으로 보인다. 표층부의 동결 상태는 3월 말까지는 계속되는 것으로 보이며, 이러한 결과는 동계에 관찰한 유상 구조토의 내부 단면에서도 확인할 수 있다(김태호, 2001). 이 시기에 지온의 최저치도 출현하는데 일평균 지온은 1월 30일의 -4.29℃이며, 시간별 최저치도 -4.82℃도 같은 날에 관측되었다. 4월 11일부터 17일까지 7일간은 0℃를 사이에 두고 지온이 2~3℃의 범위에서 변동하고 있는데 이와 같은 동결융해 교대일은 3월 말부터는 발생하는 것으로 추정된다. 4월 18일 이후로 마운드 표층부의 지온은 0℃ 이하로 떨어지지 않는다.

마운드 내부 20cm 깊이의 지온에 대해서는 전체적인 경향만 살펴보면, 1월 12일부터 0℃ 이하의 온도가 관측되고 있으며 늦어도 1월 20일부터는 마운드 전체가 동결 상태에 들어가는 것으로 추정된다. 마운드의 동결은 적어도 4월 1일까지는 지속되는 것으로 생각되는데 0℃를 넘는 지온은 4월 하순인 22일 이후에 관측되는 것으로 보인다.

4. 고찰

1) 붕괴 프로세스

유상 구조토의 정상부에 식생 피복이 벗겨져 있는 상태에 대해서 小嶋(1965)는 유상 구조토가 형성되는 과정에서 나타나는 하나의 단계로 보고 있다. 유상 구조토의 형성 프로세스를 살펴보면, 적설이 적은 장소에서 토양이 심층까지 동결하면 지표면에는 수축작용으로 인하여 다각형의 틈(frost crack)이 생기게 되고 식물은 수분 조건에 유리한 틈 주변에 주로 정착하게 된다. 틈 주변의 식생은 점차 다각형 내부의 나지로 진출하게 되며, 이와 더불어 지표면의 동상은 다각형 내부의 나지에서 최대가 되므로 마운드의 형태가 나타나게 된다. 이후 내부의 나지가 모두 식생으로 덮이게 되고 이 과정에서 불균등 동상으로 중앙부가 솟아오르고 주변부의 각진 부분이 떨어짐으로써 원형이나 타원형의 유상 구조토가 나타나게 된다. 따라서 식생 피복이 벗겨진 마운드는 유상 구조토가 형성되기 이전에 다각형 내부의 나지가 아직 식생으로 완전히 덮이지 않은 상태를 가리키고 있는 것으로 보고 있다.

반면에 Billings and Mooney(1959)는 유상 구조토가 형성된 이후에 나타나는 붕괴 과정의 한 단계로 해석하고 있다. 즉 동결작용과 식생의 결합으로 형성된 유상 구조토는 다시 해체 과정을 밟게 되는데, 우선 마운드 정상부의 식생 피복이 파괴되고 더불어 내부의 토양이 제거되면서 마운드의 높이는 점차 낮아진다. 지하수위 높이까지 낮아지게 되면 더 이상 마운드의 형태를 보이지 않게 되며, 구조토의 모습도 식생으로 둘러싸인 다각 구조토로 바뀌게 된다. 그러나 지하수위가 상승하면 다각 구조토는 다시 식물의 영향과 동결작용으로 유상 구조토로 발전하는 일종의 순환 과정을 이루게 된다. 따라서 유상 구조토로부터 다각 구조토로 바뀌는 과정에서 마운드 정상부의 식생 피복이 제거된 구조토가 출현하는 것으로 보고 있다. 또한 이러한 상태의 구조토를 프로스트 스카(frost scar)라고 불러 유상 구조토와 구분하였다. 프로스트 스카의 유사어로 프로스트 보일(frost boil), 머드 보일(mud boil), 머드 서클(mud circle) 등의 용어도 사용되고 있다(Péwé, 1969; Mackay and Mackay, 1976).

한편 조사 지역에 식생으로 경계가 구분되는 다각 구조토는 출현하지 않으므로 앞에서 언급한 구조토의 순환 과정을 확인할 수는 없으나 마운드의

상태를 비교하면 이곳의 경우도 붕괴 과정에 있는 프로스트 스카에 해당하는 것으로 볼 수 있다. <그림 6>은 조사 지역에서 관찰할 수 있는 프로스트 스카의 여러 단계를 보여주고 있다. 우선 마운드 정상에 초기의 작은 나지가 생기면(그림 6a) 이 나지로부터 표층의 토양 입자가 제거되면서 요형의 미지형으로 발달한다(그림 6b와 6c). 요형의 나지는 옆으로 점차 확대될 뿐 아니라 표층의 암갈색 토층이 사라지면서 아래쪽으로도 깊어져 화구와 같은 형태로 변하며(그림 6d와 6e) 결국 마운드의 해체로 이어지게 된다(그림 6f).

침식 속도의 차이로 일시적으로 나지 표면에 계단 모양의 미지형이 출현하기도 하며(그림 3), 나지 내부에는 식생 피복의 일부가 남아 있기도 한다(그림 6e). 그러나 토양 입자의 지속적인 제거와 동결작용으로 인하여 나지의 미기복과 식생은 전부 사라지게 된다. 조사 지역에서 일어나고 있는 유상 구조토의 붕괴 과정은 비가역적(非可逆的)으로 진행되고 있는 것으로 보인다.

2) 붕괴 요인

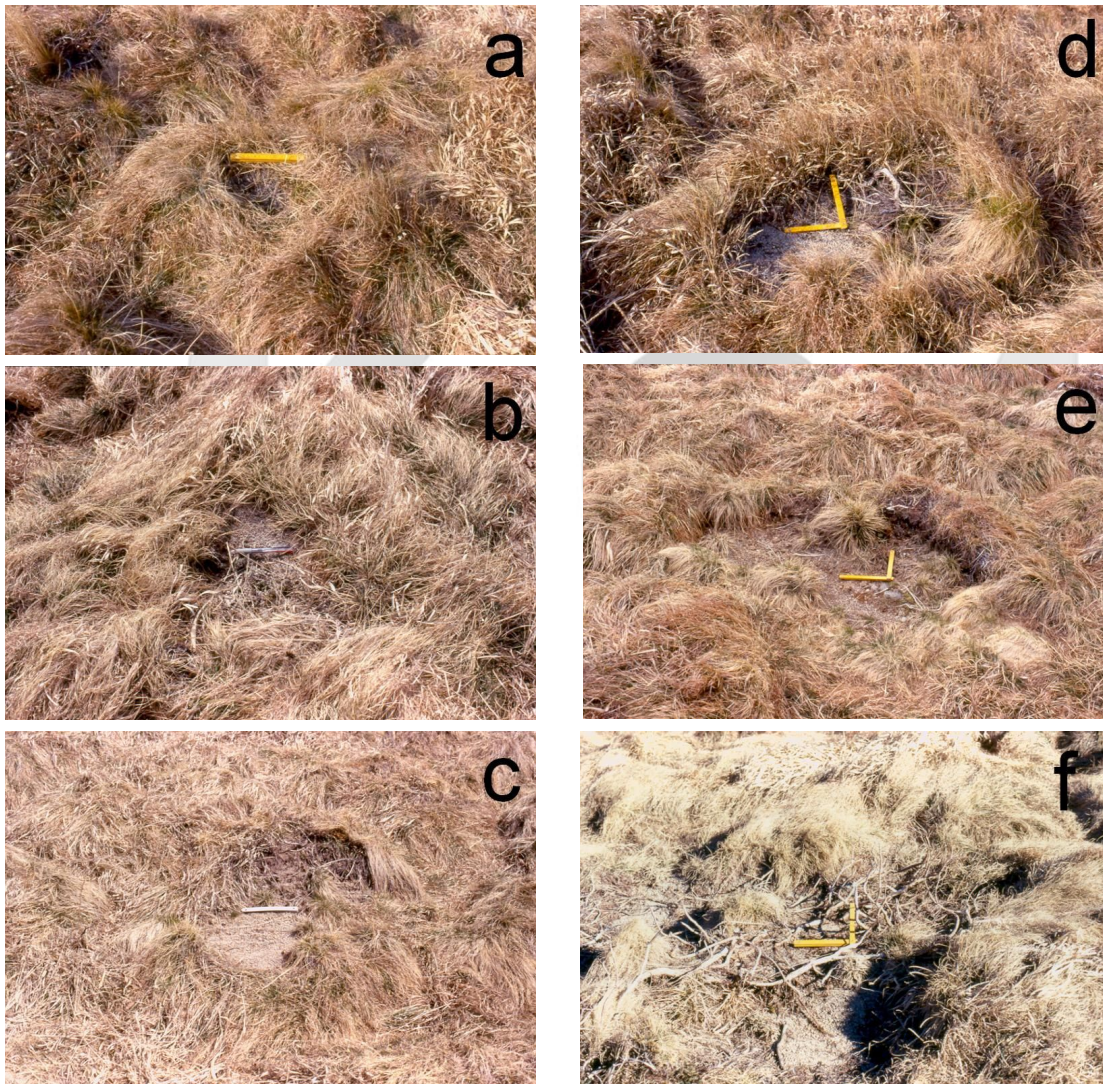


그림 6. 유상 구조토의 붕괴 단계를 보여주는 프로스트 스카

유상 구조토의 붕괴에는 다양한 요인이 관여하고 있으나 그 중심에는 동결작용이 놓여 있다. 영구동토 지역에서는 결빙 전선의 압박으로 인하여 구조토 내부의 미동결 부분에 작용하는 동결압(cryostatic pressure)에 의해 구조토가 파괴될 수 있다(Crampton, 1977; Van Vliet-Lanoë, 1988). 반면에 계절적 동토 지역에서는 동결압으로 인한 유상 구조토의 파괴에 관한 사례는 없으나 서릿발과 관련된 동결작용이 마운드의 해체로 이어질 수 있다(김도정, 1973; Scotter and Zoltai, 1982; Grab, 1994; Van Vliet-Lanoë *et al.*, 1998).

동결작용은 동결과해를 비롯하여 동상, 동결상승, 솔리플렉션 등 토양과 암석의 강력한 동결이나 동결융해의 반복으로 일어나는 프로세스로서 동결융해작용이라고도 한다. 토양과 암석의 동결 형태는 수분 조건이나 공극의 크기와 분포에 따라 다르므로 온도가 0℃를 오르내리는 빈도만으로는 동결작용의 강도를 결정하기 어려우나 일반적으로는 지온이 0℃를 오르내리는 횟수가 동결작용의 기준이 되고 있다(町田 등, 1981).

조사 지역에서는 12월 중순까지의 동결 진행기와 3월, 4월의 융해기에 지표 부근의 동결융해가 활발하게 일어나고 있는 것으로 추정된다(그림 5). 이러한 경향은 기온에서도 확인할 수 있는데 182일의 관측일 가운데 하루 주기의 동결융해(diurnal freeze-thaw cycle)가 일어난 일수는 전부 71일이며 특히 11월과 3월에 출현 빈도가 높다(그림 4). 따라서 유상 구조토가 분포하고 있는 백록담 분화구 일대는 동결작용이 비교적 활발하게 일어나고 있는 장소로 볼 수 있다.

동결이 진행되면 토양중의 수분은 모세관 현상으로 인하여 지표면으로 상승하게 된다. 그리고 이 과정에서 수분이 0℃ 이하의 층에 도달하면 지표면에 대하여 수직 방향으로 가늘고 길게 늘어선 빙정, 즉 서릿발로 변하게 된다. 지표면 부근에 발생한 서릿발은 토양 표층을 들어올림으로써 토층을 교란시킬 뿐 아니라 토양 입자를 이완시킨다. 그 결과 고산 지역에 분포하는 초지대 훼손의 가장 중요한 요인으로 서릿발작용을 드는 경우가 많다(King, 1971; Pérez, 1992; 김태호, 2005).

조사 지역에서도 유상 구조토를 덮고 있는 식생 피복이 제거되어 토층이 노출되면 서릿발이 쉽게

발생함으로써 마운드 정상부 나지의 확대를 초래한다. 특히 이 지역은 동결 진행기와 융해기에 하루 주기의 동결융해가 빈번하게 발생하고 있을 뿐 아니라 융해기에 유상 구조토의 토층은 높은 함수비를 지님으로써 서릿발의 출현을 돕고 있다. 예를 들어 4월 하순에 유상 구조토의 암갈색 토층은 대부분 융해되나 함수비는 62.3~111.7%로서 높은 값을 유지하고 있다. <그림 7>은 조사 지역 인근의 표고 1,800m 동향 사면에 3월 하순 오전에 발생한 서릿발의 모습으로 길이는 최대 12cm 정도이다.

이외에 토양의 입도 조성은 온도, 수분 조건과 함께 토층의 동상성(凍上性)¹⁾을 결정하는 중요한 인자의 하나이다(日本雪氷學會, 1990). 일반적으로 세립질 토양에서는 토양 공극이 작으므로 높은 공극 수압이 유지되어 서릿발이나 아이스 렌즈와 같은 분리빙(segregated ice)이 형성되기 쉽다. 반면에 조립질 토양에서는 공극 수압이 낮아 분리빙보다는 공극빙(pore ice)이 형성되므로 상대적으로 동상성이 떨어진다(French, 1996). 유상 구조토 토양의 세립질 함유량은 46.5~61.8%로 비교적 높은 편이며 특히 암갈색 토층의 함유량이 높다(표 1). 따라서 서릿발 형성에 유리한 동상성이 큰 입도 조성을 지닌 것으로 볼 수 있다.

서릿발과 더불어 유상 구조토의 붕괴에 영향을 미치는 또 다른 요인으로 바람을 들 수 있다(Billings and Mooney, 1959; Van Zinderen Bakker and Werger, 1974; Mark, 1994). 토양 입자가 바람에 날려감으로써 진행되는 취식작용은 강풍 환경에 놓여 있는 고산대의 초지 훼손에 매우 중요한 요인으로 간주되고 있다(原田·小泉, 1997; 福井·小泉, 2001). 일반적으로 건조하고 응집력이 없는 토



그림 7. 조사 지역 인근에 3월 하순 출현한 서릿발

표 2. 한라산 아고산대 평균 풍속(%)의 월 변화(제주도, 2000)

관측 지점	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월
장 구 목(1802m)	16.1	16.8	16.4	15.2	18.0	17.0	17.2
선작지왓(1654m)	11.0	10.1	10.3	8.0	8.3	8.5	8.8

양이 취식작용을 받기 쉽다. 따라서 강풍이 부는 지역일지라도 응집성 토양으로 이루어져 있다면 그 영향은 크지 않으며(Pérez, 1992), 유상 구조토의 붕괴도 일어나지 않는다(Boelhouwers, 1991; Grab, 1994).

현재 백록담 분화구 일대의 바람에 관한 자료는 극히 제한적이므로 바람 특성에 관하여 논의하기는 어려운 실정이다. 그러나 2000년 2월부터 8월까지 조사 지역 인근의 장구목오름에서 한시적으로 관측한 기상 자료에 의하면 평균 풍속은 16.7%이며, 214일의 관측기간 가운데 19% 이상의 풍속을 기록한 일수가 34일로서 한라산 정상 일대의 강풍 환경을 잘 보여주고 있다(표 2). 또한 마운드 정상부의 나지는 <그림 3>과 <그림 6>에서 볼 수 있듯이 암갈색 토층이 제거된 채 세력과 중력으로 덮여 있는 경우가 많다. 유상 구조토의 표층을 이루는 암갈색 토층은 세립토가 61.8%를 차지하고 있으므로 취식작용을 받기 쉬우며, 특히 나지가 화구와 같은 오목한 형태를 이루고 있으므로 나지로부터 토양 입자의 제거는 주로 바람에 의해 이루어지게 된다(그림 3). 따라서 분화구 안쪽의 조사 지역과 바깥쪽 산릉부의 풍속을 단순히 비교할 수는 없으나, 마운드 정상부의 나지 표면이 대부분 자갈로 덮여 있는 사실로 보아 조사 지역에서도 세립토를 제거할 수 있는 바람은 부는 것으로 생각된다.

유상 구조토가 사면에 분포하고 있는 경우에는 포행과 솔리플렉션에 의해 마운드가 붕괴될 수도 있다. 이러한 경우에는 주로 사면 위쪽으로 면한 마운드의 측면부가 부수어지게 되며, 시간이 지나면서 마운드는 식생으로 덮인 단애와 나지 상태의 평탄면으로 이루어진 계단상 구조토의 형태로 변형된다(Boelhouwers, 1991). 조사 지역의 유상 구조토도 완사면에 분포하고 있으나 사면은 매우 안정적이며 표층 물질의 이동 현상도 보이지 않는다. 따라서 메스무브먼트로 인한 유상 구조토의 붕괴

는 일어나지 않는 것으로 생각된다.

한편 프로스트 스카의 나지 부분이나 마운드가 완전히 붕괴되어 흔적만 남아 있는 장소에는 고사한 관목들이 나타나고 있어 유상 구조토의 붕괴가 이들 관목과 관련을 갖고 있는 것처럼 보인다(그림 6d와 6f). 고사목들은 주로 눈향나무와 시로미(*Empetrum nigrum* var. *japonicum*)로서 한라산 아고산 초지대를 대표하는 관목류이다.

한라산에서는 장기간에 걸친 기상 자료가 축적되어 있지 않으므로 기온의 경년 변화를 파악하기는 어렵다. 그러나 지난 40년 동안의 기온 변화를 살펴보면 제주시 0.72℃, 서귀포시 1.56℃ 등 제주도 전역에 걸쳐 기온 상승을 확인할 수 있다(Lim et al., 2006). 그 결과 한라산의 식생도 온난화의 영향을 받고 있는데, 아고산대의 대표 수종인 구상나무(*Abies koreana*)도 지속적인 기온 상승을 쇠퇴의 한 원인으로 보고 있다(구경아 등, 2001; Lim et al., 2006).

이러한 현상은 좁은 온도 범위에서 생존하고 있는 한라산 정상 일대의 고산식물에게 더욱 현저하게 나타나며, 관목의 경우에는 최난월 일최고 기온의 온도 범위가 좁은 눈향나무가 돌매화나무(*Diapensia lapponica* subsp. *obovata*)와 함께 온난화의 영향을 쉽게 받을 수 있다(공우석, 1999). 따라서 온난화의 영향으로 눈향나무와 시로미가 쇠퇴하는 과정에서 서릿발작용이나 취식작용을 통하여 유상 구조토 표면에 초기 나지가 출현할 수 있다. 그러나 조사 지역에 나타나는 고사한 관목들은 과거 백록담 분화구를 찾았던 등산객의 답압에 따른 결과일 수도 있으므로 이에 대해서는 앞으로 더 조사가 필요할 것이다.

5. 결 론

한라산 정상의 백록담 분화구 내부에는 초본 식생으로 덮여 있는 유상 구조토가 분포하고 있다.

그러나 유상 구조토 가운데에는 마운드를 덮고 있는 식생 피복이 벗겨져 내부 토양이 노출되어 있거나 때로는 마운드가 부수어져 구조토의 형태를 상실하는 경우도 나타나고 있다. 따라서 이들 구조토의 붕괴 프로세스를 살펴보고 이 프로세스에 영향을 미치는 환경 요인을 밝힐 목적으로 조사 지역에 방형구를 설정하여 유상 구조토의 분포와 형태 특성을 파악하고 마운드 정상부에 식생 피복이 벗겨져 있는 모식적인 유상 구조토를 선정하여 크기와 형태를 실측하였다. 또한 조사 지역의 토양 특성을 조사하고 동계 기온과 지온을 관측하였으며 정기적인 현지 관찰을 실시하였다.

조사지역에 나타나는 나지를 지닌 유상 구조토는 프로스트 스카에 해당하며 다양한 단계에 놓여 있는 마운드를 현지에서 확인할 수 있다. 이들 프로스트 스카는 외부로부터의 작용으로 마운드 정상에 초기의 작은 나지가 생기면 이 나지로부터 토양 입자가 제거되면서 요형의 미지형으로 발달한다. 요형의 나지는 옆으로 점차 확대될 뿐 아니라 아래쪽으로도 깊어져 결국 마운드의 해체로 이어지게 되며, 이러한 붕괴 프로세스는 비가역적으로 진행되는 것으로 보인다.

유상 구조토의 붕괴에는 다양한 요인이 관여하고 있으나 그 중심에는 동결작용이 놓여 있다. 조사 지역은 동결 진행기와 융해기에 하루 주기의 동결융해가 빈번하게 출현함으로써 동결작용이 매우 활발하게 일어나고 있는 장소이다. 이 시기에 발생하는 서릿발은 토양 표층을 들어올려 토양 입자를 이완시킴으로써 마운드 정상부 나지의 확대를 초래하는데 특히 융해기에 유상 구조토 토층의 함수비가 높아져 서릿발의 발생을 돕고 있다. 이와 더불어 토양 입자가 바람에 날려감으로써 진행되는 취식작용도 유상 구조토의 붕괴에 영향을 미치는 요인이다. 한라산 정상 일대는 강풍 환경에 놓여 있으며 세립질 암갈색 토층이 제거된 프로스트 스카의 나지 표면이 자갈로 덮여 있는 점으로부터도 바람의 영향을 확인할 수 있다. 프로스트 스카의 나지와 마운드가 완전히 붕괴되어 흔적만 남아 있는 장소에는 눈향나무와 같은 온난화에 취약한 관목류가 고사한 상태로 나타나고 있어 유상 구조토의 붕괴에 지구 온난화가 영향을 미치고 있을 가능성도 있으나 이에 대해서는 앞으로 조사가 더

필요하다.

註

- 1) 동상성(凍上性)은 토양이 동결하는 과정에서 동상(frost heave)이 일어나기 쉬운 정도를 표현하는 용어로서 영어의 frost susceptibility에 해당한다(日本雪氷學會, 1990). 입자가 크거나 매우 작은 모래질 또는 점토질 토양보다는 그 중간 크기에 해당하는 실트질 토양에서 분리빙이 잘 형성되고 그 결과 동상도 잘 일어나게 되는데 구미의 엔지니어들은 이러한 토양에 대하여 '동상성이 크다(frost-susceptible)'라는 표현을 사용한다 (French, 1996, 34).

참 고 문 헌

- 공우석, 1999, 한라산의 수직적 기온 분포와 고산식물의 온도적 범위, 대한지리학회지, 34, 385-393.
- 구경아·박원규·공우석, 2001, 한라산 구상나무(*Abies koreana* W.)의 연륜연대학적 연구-기후 변화에 따른 생장변동 분석-, 한국생태학회지, 24, 281-288.
- 김도정, 1970, 한라산의 구조토 고찰, 낙산지리, 1, 3-10.
- 김도정, 1973, 한국의 상식의 유형, 지리학, 8, 1-7.
- 김태호, 2001, 한라산 백록담 화구저의 유상구조토, 대한지리학회지, 36, 233-246.
- 김태호, 2002, 한라산 아고산대의 초지 박리현상, 한국지형학회지, 10, 1-10.
- 김태호, 2005, 한라산 아고산대의 초지 훼손특성에 관한 연구, 제주지역환경기술개발센터.
- 손명원·박 경, 1999, 오대산국립공원 내 질피늪의 지형생성환경, 한국지역지리학회지, 5, 133-142.
- 윤 선, 1995, 제주도 형성사, 제주도, 98, 148-164.
- 이동영, 1994, 제주도의 화산활동사, 제주도(편) 한국의 영산 한라산, 제주도, 69-76.
- 장 호, 1983, 지리산지 주능선 동부(세석-계석봉)의 주빙하지형, 지리학, 27, 31-50.
- 제주도, 2000, 자연친화적인 한라산 식도설치 타당성조사, 제주도.
- 福井幸太郎·小泉武榮, 2001, 木曾駒岳高山帯での風食ノッチの後退とパッチ状裸地の擴大, 地學雜誌, 110, 355-361.
- 小嶋尚, 1965, 大雪火山群の構造土, 地理學評論, 38,

- 179-199.
- 小嶋尚・野上道男・岩田修二, 1974, ひかし北海道の化石氷河現象とその古気候學的意義, 第四紀研究, 12, 177-191.
- 原田經子・小泉武榮, 1997, 三國山脈・平標山におけるパッチ状裸地の形成プロセスと侵食速度, 季刊地理學, 49, 1-14.
- 日本雪氷學會, 1990, 雪氷辭典, 古今書院, 東京.
- 町田貞・井口正男・貝塚爽平・佐藤正・榎根勇・小野有五, 1981, 地形學事典, 二宮書店, 東京.
- 澤口晉一, 1988, 北上山地中部一杯森のアースハンモック, 駿台史學, 74, 111-133.
- Ballantyne, C.K., 1986, Nonsorted patterned ground on mountains in the Northern Highlands of Scotland, *Biuletyn Peryglacjalny*, 30, 15-34.
- Billings, W.D. and Mooney, H.A., 1959, An apparent frost hummock-sorted polygon cycle in the alpine tundra of Wyoming, *Ecology*, 40, 16-20.
- Boelhouwers, J., 1991, Present-day periglacial activity in the Natal Drakensberg, Southern Africa: a short review, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2, 5-12.
- Costin, A.B. and Wimbush, D.J., 1973, Frost cracks and earth hummocks at Kosciusko, Snowy Mountains, Australia, *Arctic and Alpine Research*, 2, 111-120.
- Crampton, C.B., 1977, A study of the dynamics of hummocky microrelief in the Canadian north, *Canadian Journal of Earth Science*, 14, 639-649.
- Demek, J., 1973, Die Klimamorphologie des vulkanischen Gebietes von Changbai-san in Nord Korea, *Zeit für Geomorphologie Supplementband*, 17, 58-71.
- French, H.M., 1996, *The Periglacial Environment (second edition)*, Longman, Singapore.
- Grab, S.W., 1994, Thufur in the Mohlesi Valley, Lesotho, Southern Africa, *Permafrost and Periglacial Processes*, 5, 111-118.
- King, R.B., 1971, Vegetation destruction in the sub-alpine zones of the Cairngorm Mountains, *Scottish Geographical Magazine*, 87, 103-115.
- Lim, J., Woo, S., Jin, G., Han, M., Kim, Y. and Shin, J., 2006, Global warming related decline of Korean fir forest in Mt. Halla, Korea, *Proceedings of the 6th Korea-Japan Joint Seminar on Forest Ecology*, 3-9.
- Lundqvist, J., 1969, Earth and ice mounds; A terminological discussions, in Péwé, T.L.(ed.), *The Periglacial Environment*, McGill University Press, Montreal, 203-215.
- Mackay, J.R., 1980, The origin of hummocks, western Arctic coast, Canada, *Canadian Journal of Earth Science*, 17, 996-1006.
- Mackay, J.R. and Mackay, D.K., 1976, Cryostatic pressures in nonsorted circles(mud hummocks), Inuvik, Northwest Territories, *Canadian Journal of Earth Science*, 13, 889-897.
- Mark, A.F., 1994, Patterned ground activity in a southern New Zealand high-alpine cushionfield, *Arctic and Alpine Research*, 26, 270-280.
- Pérez, F.L., 1992, Processes of turf exfoliation (Rasenabschälung) in the high Venezuelan Andes, *Zeit für Geomorphologie Supplementband*, 36, 81-106.
- Péwé, T.L., 1969, The periglacial environment, in Péwé, T.L.(ed.), *The Periglacial Environment*, McGill University Press, Montreal, 1-9.
- Rapp, A., 1960, Recent periglacial phenomena in Sweden, *Biuletyn Peryglacjalny*, 8, 143-154.
- Schunke, E., 1977, Zur Genese der Thufur Islands und Ost-Grönlands, *Erdkunde*, 31, 279-287.
- Scotter G.W. and Zoltai, S.C., 1982, Earth hummocks in the Sunshine area of the Rocky Mountains, Alberta and British Columbia, *Arctic*, 35, 411-416.
- Tamocai, T. and Zoltai S.C., 1978, Earth hummocks of the Canadian Arctic and Subarctic, *Arctic and Alpine Research*, 10, 581-594.
- Van Vliet-Lanoë, B., 1988, The significance of cryoturbation phenomena in environmental

- reconstruction, *Journal of Quaternary Science*, 3, 85-96.
- Van Vliet-Lanoë, B., 1991, Differential frost heave, load casting and convection: converging mechanism: a discussion of the origin of cryoturbation, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2, 123-129.
- Van Vliet-Lanoë, B., Bourgeois, O. and Dauteuil, O., 1998, Thufur formation in northern Iceland and its relation to Holocene climate change, *Permafrost and Periglacial Processes*, 9, 3 4 7 - 3 6 5 .
- Van Zinderen Bakker, E.M. and Werger, M.J.A., 1974, Environment, vegetation, and phytogeography of the high-altitude bogs of Lesotho, *Vegetatio*, 29, 37-49.
- Washburn, A.L., 1980, *Geocryology*, John Wiley, New York.

(접수 : 2006. 5. 24, 채택 : 2006. 7. 11)

K C I