

남극 킹조지섬 바톤반도에 나타나는 구조토의 특징과 성인

전용문¹ · 김승범² · 최문영³ · 손영관^{1,*}

¹경상대학교 지구환경과학과/기초과학연구소

²한국석유공사 개발지원팀

³한국해양연구원 부설 극지연구소 극지지구시스템연구부

요 약

남극 킹조지섬 바톤반도의 남서부 평탄면에는 기하학적 형태의 지표구조인 구조토가 잘 발달해있다. 구조토는 역지된 잔자갈-거력으로 이루어진 테두리와 실트-왕모래로 구성된 중심부로 이루어져 있으며, 테두리의 형태에 따라 원형, 다각형, 계단형, 선형구조토로 구분된다. 원형구조토는 테두리가 원형 또는 타원형인 반면 다각형구조토는 테두리가 이웃한 구조토의 테두리와 연결되어 불규칙한 다각형의 형태를 지닌다. 계단형구조토는 경사면을 따라 계단모양으로 나타나며 테두리가 화살촉 또는 초승달 형태를 지닌다. 선형구조토는 잔자갈-왕자갈 크기의 조립질 부와 중립사-왕모래 크기의 세립질 부가 띠 모양으로 경사방향에 평행하게 발달한다. 구조토의 형태는 지면의 경사각에 따라 달라지는데 경사가 상대적으로 완만한(0-10°) 평탄면에서는 원형과 다각형의 구조토가 우세한 반면, 경사가 급한(10-30°) 사면에서는 계단형과 선형의 구조토가 우세하게 나타난다. 구조토의 형태적 차이는 활동층에서 동결-해동작용에 의한 자가-조직화작용이 측면압축 현상과 함께 사면 아래쪽에서의 비대칭적인 입자 순환과 이동이 일어난 결과로 해석된다. 특히 계단형구조토는 수분을 포함한 활동층 전체가 헛바닥 모양으로 천천히 사면 아래로 이동하는 솔리플렉션현상에 의해 형성된 것으로 해석된다. 구조토의 테두리를 따라 이끼류와 지의류가 우세하게 분포하는 반면 중심부에는 식생의 발달이 적고 내부구조토와 견열 등의 구조가 나타나는 것은 현재까지도 구조토의 중심부에서 입자 순환이 계속되고 있음을 시사한다. ¹⁴C 또는 OSL 연대측정을 통해 구조토의 형성시기를 해석함에 있어 구조토 물질이 현재에도 계속 순환하는지의 여부를 판단하는 것이 중요하다. 현재에도 물질의 순환이 일어나고 있는 구조토의 경우 ¹⁴C 또는 OSL 연대는 구조토 물질의 순환주기 이내의 값을 보이거나 구조토의 형성시기와 무관한 값을 보일 것으로 판단된다.

주요어: 남극, 킹조지섬, 구조토, 주빙하지형, 영구동토, 활동층, 연대측정

Y. M. Jeon, S.B. Kim, M.Y. Choe and Y.K. Sohn, 2009, Characteristics and origin of patterned ground in the Barton Peninsula, King George Island, Antarctica. Journal of the Geological Society of Korea. v. 45, no. 1, p. 29-46

ABSTRACT: Patterned ground with distinct geometric shapes is well developed in the southwestern part of the Barton Peninsula, King George Island, Antarctica. The patterned ground consists of stone borders composed of clast-supported pebbles and boulders and central parts of coarse sand- to silt-size materials. The patterned ground can be classified into circular, polygonal, stepped, and striped types according to the shapes of the stone borders. The stone borders of the circular patterned ground have circular or elliptical shapes whereas those of the polygonal patterned ground have the shape of irregular polygons because they are interconnected with one another. Stepped patterned ground occurs as a terraced slope and has arrowhead-like or cusped stone borders. Striped patterned ground consists of slope-parallel bands of coarse-grained (pebbly to cobbly) and fine-grained (granule to medium sandy) parts. The types of the patterned ground change according to the slope gradient with the circular and polygonal types dominant on gentle (0-10°) slopes and the stepped and striped types common on steep (10-30°) slopes. The difference in the shape of the patterned ground is interpreted to have formed by different degrees of asymmetric material circulation and downslope soil movement in association with self-organization of the soil materials in the active layer caused by repeated freeze-thaw cycles. The stepped patterned ground is in particular interpreted to have formed by slow downslope mass movement or solifluction of the water-logged active layer. The absence or poor development of vegetation in the central parts of the patterned ground, compared with the common presence of moss and lichen on the surface of the stone borders, and the good preservation of internal patterned ground and mudcracks in the central parts indicate that the materials in the central parts of the patterned ground are still in active circulation. When interpreting the timing of formation of the patterned ground on the basis of ¹⁴C or OSL

* Corresponding author: +82-55-751-6005, E-mail: yksohn@gnu.ac.kr

ages, it is important to know whether the materials in the patterned ground are still in active circulation. In case the patterned ground is still in active circulation, the ^{14}C or OSL ages of the soil materials are interpreted to have values within the circulation period of the soil materials. Otherwise, the ages may have no relation with the timing of formation of the patterned ground.

Key words: Antarctica, King George Island, patterned ground, periglacial landform, permafrost, active layer, age dating

(Y. M. Jeon and Y.K. Sohn, Department of Earth and Environmental Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea; S.B. Kim, Korea National Oil Corporation, Gwanyang-dong, Dongan-gu, Anyang 431-711, Korea; M.Y. Choe, Division of Polar Earth-System Sciences, Korea Polar Research Institute, KORDI, Songdo Techno Park, 7-50 Songdo-dong, Yeosu-gu, Incheon 406-840, Korea)

1. 서론

주빙하(periglacial) 지역은 주로 극(arctic) 또는 아극(subarctic) 지역이나 고산기후 지역의 빙하 주변부에서 토양층의 동결과 융해의 반복에 따라 독특한 지표구조가 형성되는 지역이다. 이 지역은 연평균 기온이 0°C 이하이고, 낮 기온이 영상으로 유지되는 여름철이 짧기 때문에 영구동토(permafrost)가 발달하고 상부에는 활동층(active layer)이 형성된다(Washburn, 1956; French, 1976; Bockheim, 1995). 계절별로 또는 날마다 동결과 해동을 반복하는 활동층은 동결 시에는 토양속의 수분이 얼음으로 변하면서 체적팽창이 일어나 지표면이 상승하는 동상(frost heaving) 현상이 발생하고, 해동 시에는 토양층이 내구력을 잃고 자체 하중으로 인해 아래로 내려앉는 해동침하(thaw settlement) 현상이 반복적으로 일어나는 층이다(Campbell and Claridge, 1987; Matthews *et al.*, 1998). 반면, 영구동토는 지온이 연중 0°C 이하로 유지되고 1년 내내 얼어붙어있어 활동층의 수분 이동을 막는 불투수층 역할을 한다(French, 1996; Matsuoka *et al.*, 2003; 한옥 외, 2006).

주빙하지역에서는 독특한 기하학적 모양의 지표 구조로 알려진 구조토(patterned ground)가 발달한다. 구조토는 활동층의 동결과 해동이 반복됨에 따라 토양 속의 역들이 지표 위로 밀려 올라와 배열되어 만들어지는 지표구조이다(Washburn, 1956; Corte, 1971; French, 1996). 구조토는 자갈 테두리(stone border)와 자갈이 없는 중심부(stone-free center)로 구성되며, 자갈 테두리의 형태에 따라 원형(circle), 다각형(polygon), 그물형(net), 계단형(step) 그리고 선형(stripe)으로 구분된다(Washburn, 1956, 1980; French, 1996).

세종기지가 위치한 남극 킹조지섬(King George Island)의 바톤반도(Barton Peninsula)에는 빙하작용과 관련된 지형이 잘 발달해있으며, 특히 다양한

형태의 구조토가 광범위하게 나타난다(이동영, 1992; 장순근, 1997; 장순근 외, 1998; López-Martínez *et al.*, 2002). 최근 바톤반도의 구조토 물질에 대해 연대측정이 이루어 졌으나(Jeong, 2006; 최정현 외, 2008), 이 지역 구조토의 형태적 특징과 성인에 대한 연구는 아직까지 이루어진바 없다. 이 논문은 바톤반도의 구조토에 대해 자세한 기재와 분류를 시도하였으며, 구조토의 형태적 특징과 내부구조 그리고 지역별 산출양상을 바탕으로 형성과정을 해석하고자 하였다. 이와 같은 구조토의 특징과 성인에 대한 연구는 극지방의 제4기 환경변화의 이해와 연대측정 결과의 올바른 해석은 물론 주빙하지역에서 토양의 거동 특성을 이해하기 위해 필요하며 나아가 극지 건축물의 설계와 건설에도 응용될 수 있을 것이다.

2. 지형과 기후

바톤반도는 남극반도 북서쪽 남 셰틀랜드 군도(South Shetland Islands)에서 가장 큰 킹조지섬에 위치해있다(그림 1). 바톤반도는 하부의 화산쇄설성 세중층과 상부의 염기성-중성 화산암 그리고 후기의 관입암류로 구성되어있다(Yoo *et al.*, 2001; Yeo, 2004; Kim *et al.*, 2005). 킹조지섬은 대부분 두꺼운 빙하로 덮여있으나, 해안을 따라 주빙하지형이 발달하는데 바톤반도는 주빙하지형이 가장 넓게 노출된 지역 중 하나이다(장순근, 1997; 장순근 외, 2003; 정호성 외, 2003)(그림 1, 2A). 바톤반도에는 몇몇 봉우리를 제외하고 평탄면이 넓게 발달해 있으며 주로 기반암의 동결-풍화에 의해 생긴 직경 수 cm-수십 cm 크기의 각진 암편으로 덮여있다(그림 2B). 또한 이 지역에는 빙하작용에 의해 형성된 피오르드(fjord), 빙퇴석(moraine), 권곡(cirque), 빙하조선(striation), 표석(erratic) 등이 나타난다(그림 2A,C). 해안의 급경사면에는 기반암의 물리적 풍화로 부서져 흘러내린 돌서령(talus)이 발달하고, 용기대지에는 등근 자

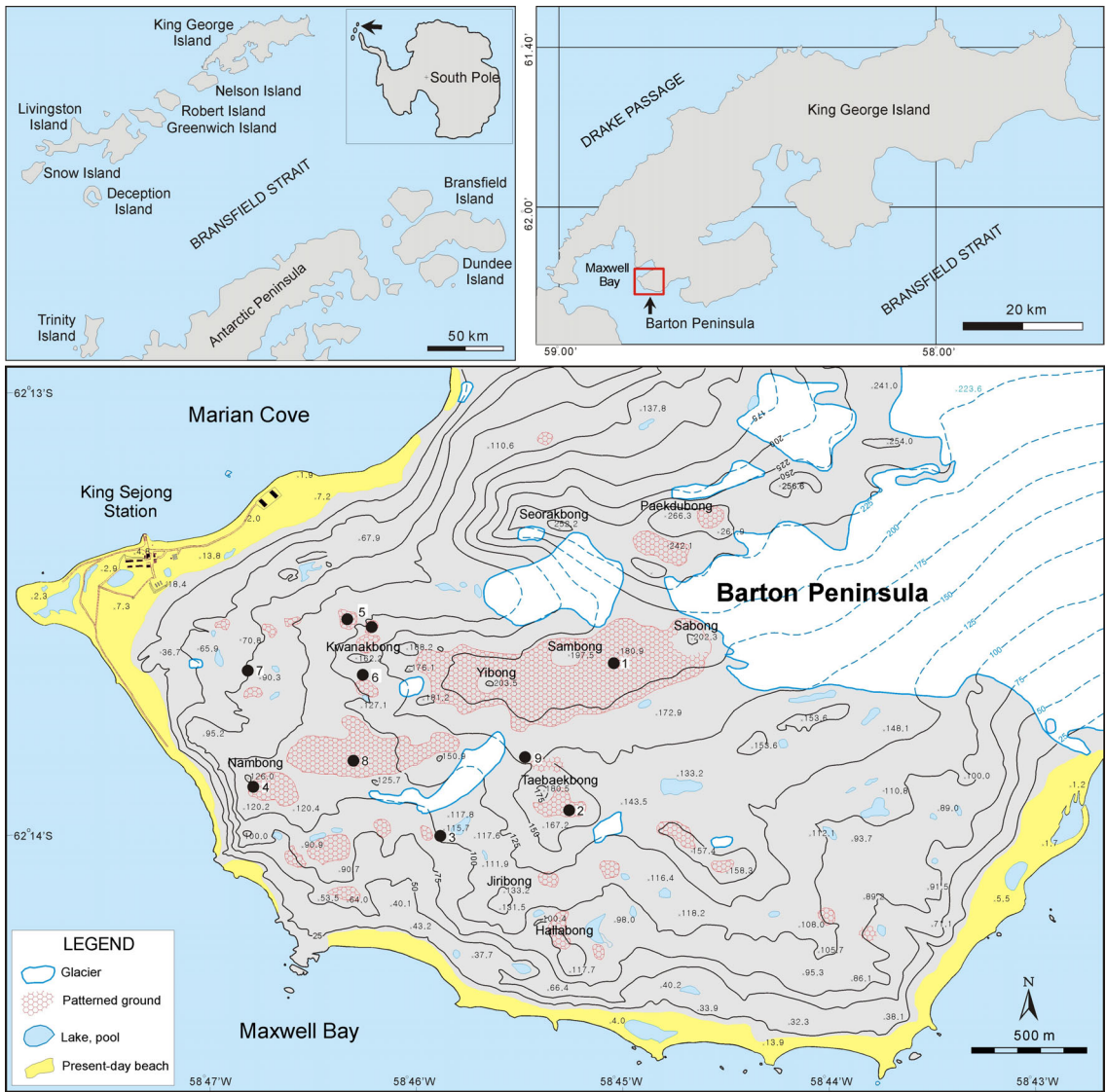


Fig. 1. Map of the Barton Peninsula, King George Island, Antarctica. Contour is in 25 m interval; the altitudes are in meters. The polygonal pattern indicates the area of the patterned ground.

갈로 구성된 고해빈(palaeobeach) 층이 분포한다 (John and Sugden, 1971; 진명식 외, 1989; 이동영, 1992; 고영이, 1993; 최태진 외, 2003; Seong *et al.*, 2006)(그림 2D,E).

세종기지에서 측정된 17년간(1988년-2004년)의 기상자료에 의하면 바톤반도의 연평균 기온은 -1.6°C 였으며, 평균습도는 89%, 연간수량은 484 mm, 평균풍속은 8 m/s이다(정호성 외, 2003; 최태진 외, 2006). 바톤반도는 연간수량이 적은 편이지만 여름에는 높은 습도와 눈 녹은 물로 인하여 표토의 공극

은 물이나 수증기로 포화되어 있고, 영구동토층의 불량한 지하배수로 인해 일시적으로 계류(rill flow)가 형성되기도 한다(정기영 외, 1999).

바톤반도의 토양층에 대해 김동욱(1990)은 지표 하 50-60 cm에서 굴착이 곤란한 동결된 토양층을 보고하였고, 한욱(1994)과 Han and Jung(1994)은 깊이 따른 여름철 지온변화를 통해 지표 하 60-70 cm 이하에서 온도가 영상 1°C 전후로 안정된다고 보고하였다. 김형수 외(1995)는 탄성파 및 전기 비저항 탐사를 통해 영구동토층이 지표 하 약 1 m에 위치하는

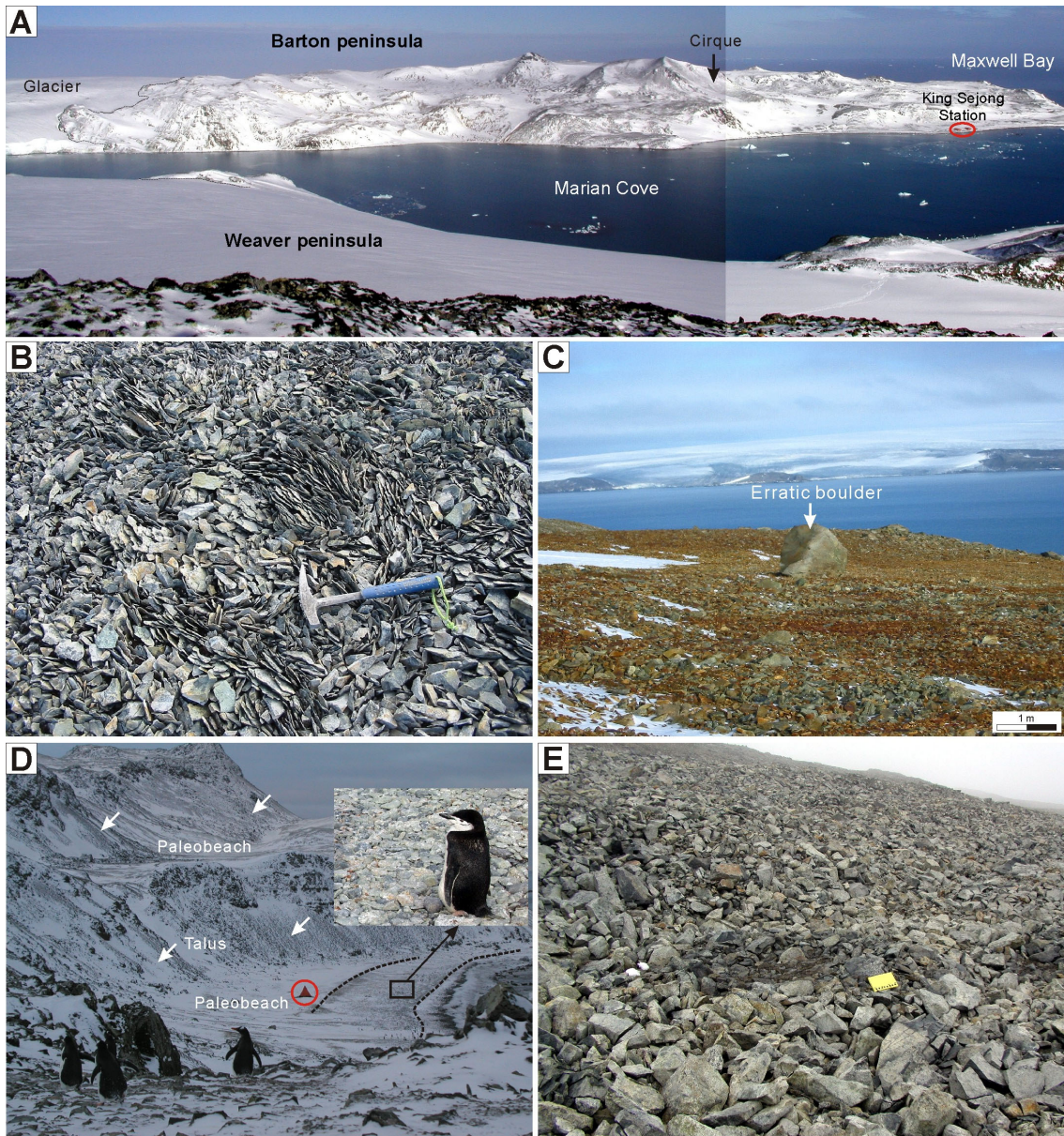


Fig. 2. (A) Panoramic view of the Barton Peninsula mostly covered by glacier but exposed near the coastal area. (B) In situ fragmented platy rock fragments that are commonly aligned subvertical to the ground surface. (C) The study area is covered by very poorly sorted glacial sediment (till) with erratic boulders. (D) Stepped coastal morphology of the study area consisting of relatively flat paleobeaches and steep slopes with coalescing talus cones (arrows). A tent for scale (circled) is 2 m in height. (E) Angular cobble-to-boulder clasts exposed on the steep slopes.

것으로 보고하였다. 바톤반도의 구조토와 관련하여 이동영(1992)과 López-Martínez *et al.*(2002)는 구조토의 분포지역을 보고하였고, 정기영 외(1999)는 구조토 중심부의 점토광물 조성을 분석하여 빙하후퇴 이후 점토광물의 생성에 필요한 충분한 시간이 경과

하지 않았음을 보고하였다. 구조토의 형성시기(빙하 후퇴시기)와 관련하여 Yoon *et al.*(1997)은 맥스웰만 퇴적물의 퇴적률(sedimentation rate)을 근거로 빙하의 후퇴가 약 17,000 yrs BP에 시작된 것으로 보고 하였다. Hjort *et al.*(1998)은 북남극반도 주변의 이끼

(moss)를 대상으로 방사성 탄소연대를 측정하여 빙하의 후퇴가 5,000-9,000 yrs BP 사이에 일어난 것으로 추정하였다. 또한 Björk *et al.*(1998)과 Yoon *et al.*(2000)은 빙해양(glaciomarine) 퇴적물의 방사성 탄소연대를 근거로 빙하의 후퇴시기를 5000 yrs BP로 제안한 바 있다. 한편, Jeong(2006)은 원형구조토 내에 보존된 이끼와 지의류(lichen)를 이용하여 290-4,710 yrs BP의 방사성 탄소동위원소 연대를 보고하였으며, 이 연대를 빙하 후퇴시기의 하한으로 제시하였다. 최정현 외(2008)은 원형구조토의 중심부에서 석영입자의 CSL(Optically Stimulated Luminescence) 연대측정을 통해 11 ± 1 ka의 연대를 얻었고, 이를 빙하 후퇴의 하한으로 제시하였다. 그리고 최근 Seong *et al.*(2008)은 우주기원(cosmogenic) 동위원소 ^{36}Cl 의 연대측정을 통해 위버반도와 바톤반도 일대의 빙하후퇴 시기를 15.5 ± 2.5 ka로 제안하였다.

3. 구조토의 분포

바톤반도에 나타나는 구조토의 분포지역과 범위는 이동영(1992)과 López-Martínez *et al.*(2002)의 제4기 지질도(Quaternary geomorphological map; 1:10,000)를 참조하였다. 조사지역은 대부분 겨울철에 눈으로 덮이고 여름철에는 지표면이 드러나는 지역으로, 조사는 (아)극지방의 여름에 해당하는 1월에서 4월 사이에 이루어졌다. 조사지역에서 구조토는 주로 해발고도 약 30-190 m의 남봉-관악봉-사봉-태백봉 주변을 따라 분포한다. 이 지역들은 지형적으로 각 봉우리의 (완)사면과 사면 말단부, 그리고 사면 사이의 완만한 평탄면이며, 일부는 여름철 눈 녹은 물이 흐르거나 고이는 얇은 물웅덩이 주변지역이다. 반면, 빙하 지역에 가까운 백두봉과 설악봉 이북의 급경사 지역과 태백봉-사봉 동쪽의 구릉과 완사면에서는 구조토가 나타나지 않았다(그림 1). 이 지역들은 공통적으로 사면의 경사가 급하고 빙하의 후퇴가 비교적 최근에 일어났으며(이동영, 1992; Jeong, 2006), 겨울철에는 일조량이 충분하지 않은 지역이다. 본 연구에서는 구조토의 발달이 양호한 9개 지점에서 각 구조토의 형태와 조직 및 입자 특징 그리고 단면상의 내부구조를 조사하였다(그림 1).

4. 구조토의 형태와 특징

일반적으로 구조토는 자갈 테두리의 형태에 따라 원형, 다각형, 그물형 그리고 선형 등으로 분류한다(Washburn, 1956; French, 1996). 그러나 각각의 구

구조 형태가 독립적으로 나타나기보다는 연속적인 변화를 보이며 복합적으로 나타나기 때문에 어느 한 지역의 구조토를 하나의 형태로 분류하기 어려운 경우가 대부분이다. 따라서 조사지역의 구조토 형태 분류는 전반적으로 우세한 형태를 기준으로 하였다. 구조토의 형태를 분류함에 있어 원형과 아원형 구조토는 장단축의 비율에 대한 기준이 없고 함께 나타나는 경우가 많아 원형구조토로 통합하여 기재하였다. 다각형구조토는 테두리의 형태가 불규칙한 삼각형, 사각형, 육각형 등이며 테두리가 서로 연결된 형태를 보인다. 이와 같이 테두리가 연결된 형태를 그물형구조토로 분류하는 경우도 있지만 산출빈도가 낮고 각각의 테두리 형태가 다각형을 띠는 경우가 많아 이들을 세분하지 않고 다각형구조토로 합쳐 분류하였다. 경사면을 따라 계단 형태로 나타나는 구조토는 테두리의 형태가 다양하고 원형 또는 다각형구조토와 확연히 구별되어 따로 계단형구조토로 분류하였다. 선형구조토는 경사면을 따라 조립질 부와 세립질 부가 띠 모양으로 반복 배열된 형태로 나타난다. 본 연구에서는 구조토의 형태를 크게 원형, 다각형, 계단형, 그리고 선형으로 구분하여 기재하였다.

4.1 원형구조토(circular patterned ground)

원형구조토는 이봉과 사봉 사이 약 $1.5 \times 0.5 \text{ km}^2$ 에 걸쳐 광범위하게 분포하고 있으며(그림 3A), 지리봉 북서쪽과 남봉 동쪽의 완사면 및 관악봉 북쪽의 사면 말단부에서도 소규모로 나타난다(그림 1). 이 지역들은 사면의 경사각이 5° 이하인 평탄면이며, 국부적으로 경사각이 5° 이상으로 증가하는 곳에서는 타원형이나 다각형구조토로 전이되기도 한다. 원형구조토는 세립질 퇴적물로 구성된 중심부를 조립질 테두리 역들이 둘러싼 형태를 보인다(그림 3B, C). 구조토의 직경은 장축을 기준으로 평균 1-2 m이며, 최대 3.5 m에 달한다. 테두리 역들은 지표면에서 수 cm-수십 cm 높이(최대 30 cm)로 솟아 있으며 대부분 잔자갈-왕자갈(일부 거력을 포함) 크기의 판상 또는 주상의 역들로 구성된다(그림 3B to D).

원형구조토의 중심부는 약 10 cm 이내의 기복을 가지며 완만하게 솟아있는(convex-up) 형태가 일반적이지만(그림 3C, D), 일부 지역에서는 아래로 오목한(convex-down) 형태를 보이기도 한다(그림 3E). 위로 완만하게 솟은 형태의 중심부는 주로 세립-조립사 크기의 사질 입자로 구성되고, 지면에 수직으로 서있는(suscitic cryogenic fabric) 잔자갈-왕자갈 역들도 포함되어 있다(그림 3D). 중심부 내에는 방사상으로 발달한 폭 1-3 cm의 홈(furrow)을 따라 중심부가

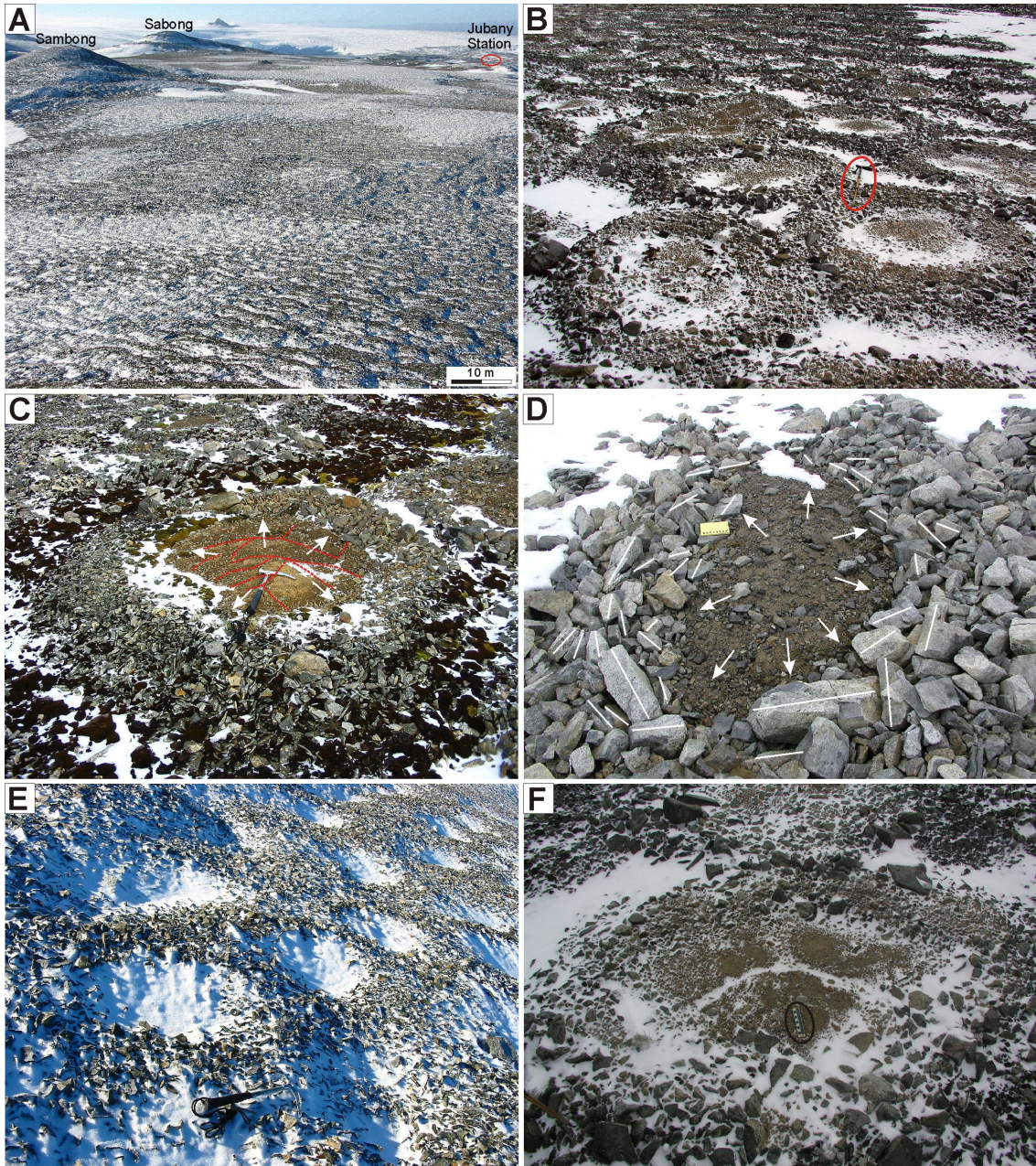


Fig. 3. (A) An overview of site 1 with well developed circular patterned ground. (B) A closer view of the circular patterned ground consisting of fine-grained central parts and distinctive stone borders. A stick for scale (circled) is 70 cm long. (C) Circular patterned ground at site 3 with stone borders partly covered by dark brown mosses. Internal patterned ground within the fine-grained central part is indicated by red broken lines. (D) An elliptical patterned ground at site 5 with the long axes of the border stones aligned parallel to the outline of the border. A notebook for scale is 15 cm long. (E) Patterned ground at site 4 with concave-up central part. (F) Close-up of internal patterned ground at site 4. The scale bar is graduated in centimeters. White arrows in C and D indicate declivity within the fine-grained central parts.

여러 다각형 조각들로 나뉜 내부구조토(desiccation polygon or micro-scale polygon; Washburn, 1980)

가 나타난다(그림 3C, F). 내부구조토의 홈은 아래로 오목한 V자 형태이며 왕모래-잔자갈 크기의 입자들

로 채워져 있다(그림 3F). 한편, 아래로 오목한 형태의 원형구조토 중심부는 판상의 잔자갈 역들로 구성되어있으며 사질 입자들이 거의 포함되어있지 않다(그림 3E).

원형구조토에 발달한 식생은 주로 테두리 역들을 피복하고 있는 이끼류이며, 일부 역들의 표면에서는 고착된 균류의 일종인 지의류도 관찰된다(e.g., 김지희 외, 2004)(그림 3C). 그러나 구조토의 중심부에는 지의류가 일부 분포하지만 대부분 식생의 발달이 없거나 미약한 편이다.

단면상에서 원형구조토는 입자 크기에 따라 역질(잔자갈-왕자갈) 테두리와 세립질(세립-조립사) 중심부로 분리된 형태를 보인다(그림 4). 역질 테두리는 약 20-30 cm 깊이로 U자형 단면을 지니며, 역지지되어 있고 공극은 비어있거나(openwork) 지면에 수직 방향으로 발달한 서리발(needle ice)과 눈으로 채워져 있다. 지표면에서 약 60-80 cm 하부에는 분급이 불량한 세립사-왕모래 크기의 입자와 각진 역들이

불규칙하게 섞여 있는 괴상의 영구동토층이 나타난다. 영구동토층은 내부구조가 없고 공극의 얼음에 의해 입자들이 단단하게 결합되어 있다.

4.2 다각형구조토(polygonal patterned ground)

다각형구조토는 테두리가 이웃한 구조토의 테두리와 연결되어 불규칙한 삼각형, 사각형, 육각형 등의 형태를 보인다(그림 5). 다각형구조토는 설악봉과 백두봉 사이의 능선, 남봉 남쪽의 얇은 함몰지형 그리고 관악봉과 태백봉의 남쪽 사면 말단부에서 나타난다(그림 1). 이 지역들은 공통적으로 사면의 경사각이 5-10° 내외인 완만한 경사지역이다. 다각형구조토는 세립질 중심부와 역질 테두리로 구분되며, 크기는 장축을 기준으로 평균 2-4 m(최대 5.5 m)이다. 테두리는 잔자갈-거력 크기의 역들로 구성되어 있으며, 역의 형태는 판상과 주상이 우세하다(그림 5B, C). 역들은 대체로 테두리의 바깥쪽에서 안쪽(중심부 방향)으로 갈수록 크기가 작아지는 경향을 보이며, 역

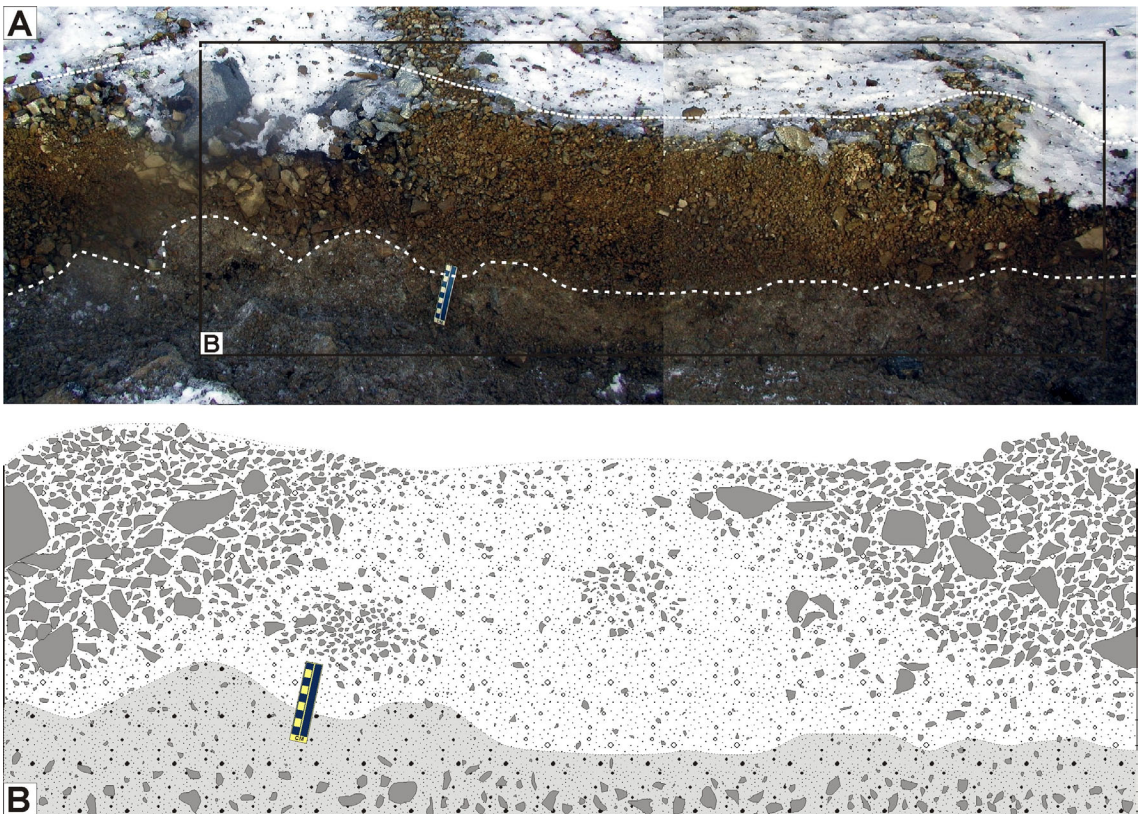


Fig. 4. Photograph (A) and sketch (B) of the cross-section of circular patterned ground at site 1. The white broken line indicates the boundary between the active layer and the permafrost layer, of which the materials have distinctly different sorting characteristics.

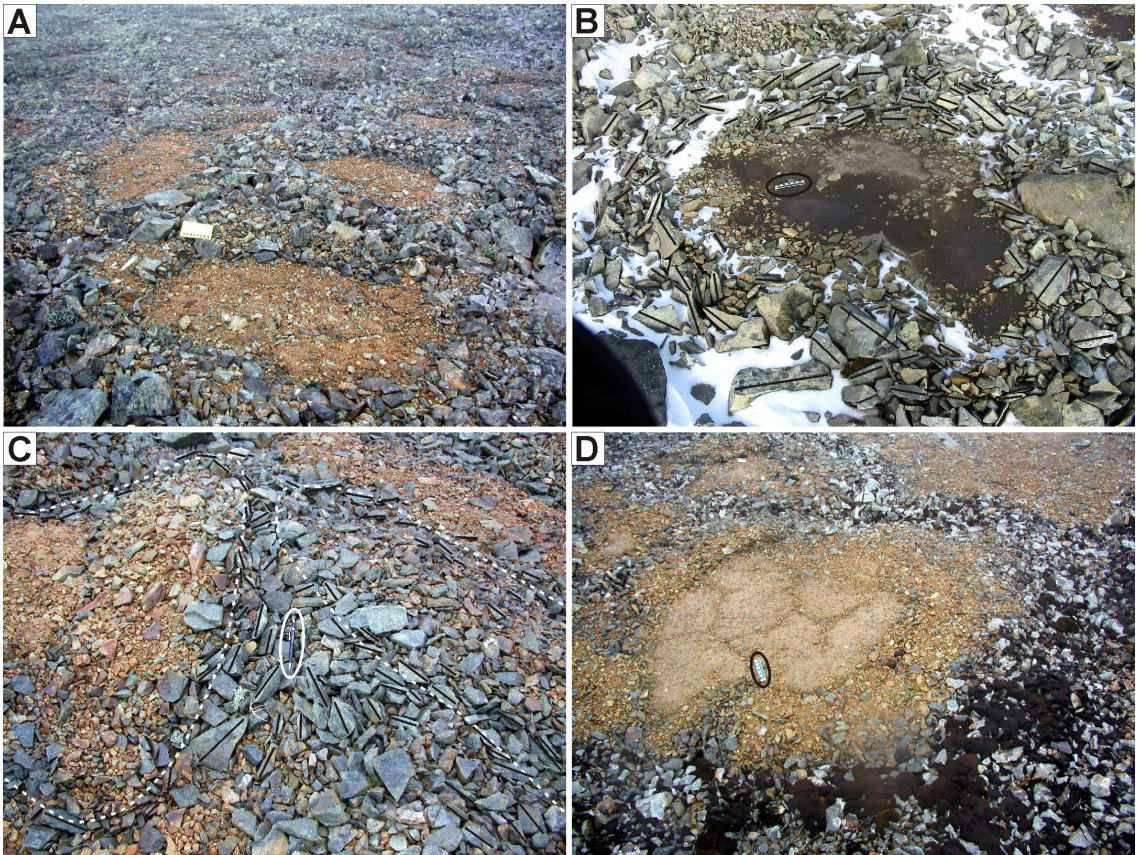


Fig. 5. (A and B) Polygonal patterned ground at site 6 (A) and at site 3 (B) with the interconnected borders. Black lines in B indicate the long axes of the border stones that are aligned parallel to the border. (C) Irregularly interconnected stone borders of polygonal patterned ground at site 7 with the long axes of the border stones aligned parallel to the border. (D) Close-up of internal patterned ground surrounded by moss-covered border stones at site 7. A notebook for scale in A is 15 cm long. The scale bars in B and D are graduated in centimeters.

의 장축이 중심부를 에워싸듯 나란히 배열되어 있다(그림 5B, C). 또한, 테두리가 서로 맞닿아 있는 경우에는 각 테두리의 역들이 서로 반대 방향으로 기울어져 있으며, 두 테두리 사이에 위치한 역들은 지표면에 수직으로 서있는 형태를 보인다(그림 5C).

다각형구조토의 중심부는 10 cm 이내의 기복으로 완만하게 솟아있으며, 주로 실트-왕모래 크기의 입자로 구성된다(그림 5A, B). 중심부에는 지면에 수직으로 서있는 잔자갈-왕자갈 역들이 포함되어 있으며, 불규칙한 홈을 따라 방사상으로 연결된 다각형의 내부구조토가 발달한다(그림 5A, D). 각 내부구조토의 중심부는 세립-중립의 사질입자로 구성되고, 홈은 왕모래-잔자갈 크기의 입자들로 채워져 있다(그림 5D).

중심부가 실트로 구성된 다각형구조토(2번 지역)는 여름철 눈 녹은 물이 고이는 물웅덩이 가장자리

주변을 따라 나타나며, 중심부에는 0.5-2 cm 길이의 손톱자국 같은 불규칙한 건열(desiccation crack)이 발달한다(그림 6A). 해발고도가 110-120 m인 5번 지역에는 구조토의 중심부에 원마도가 양호한 잔자갈 역들이 지표면과 평행하게 누워있는 형태로 나타난다(그림 6B). 이 역들은 원마도와 크기, 배열방향 등이 앞서 언급한 수직으로 서있는 판상의 역들과 구별된다. 다각형구조토에서 식생(이끼류와 지의류)은 테두리 역들을 부분적으로 피복하는 형태로 나타난다(그림 6C, D). 세립질 중심부에는 국부적으로 지의류가 분포하지만 대부분 식생의 발달이 없거나 매우 미약한 편이다.

4.3 계단형구조토(steppered patterned ground)

계단형구조토는 엄밀한 의미에서 테두리의 형태에 따른 분류라기보다는 경사면을 따라 계단모양으

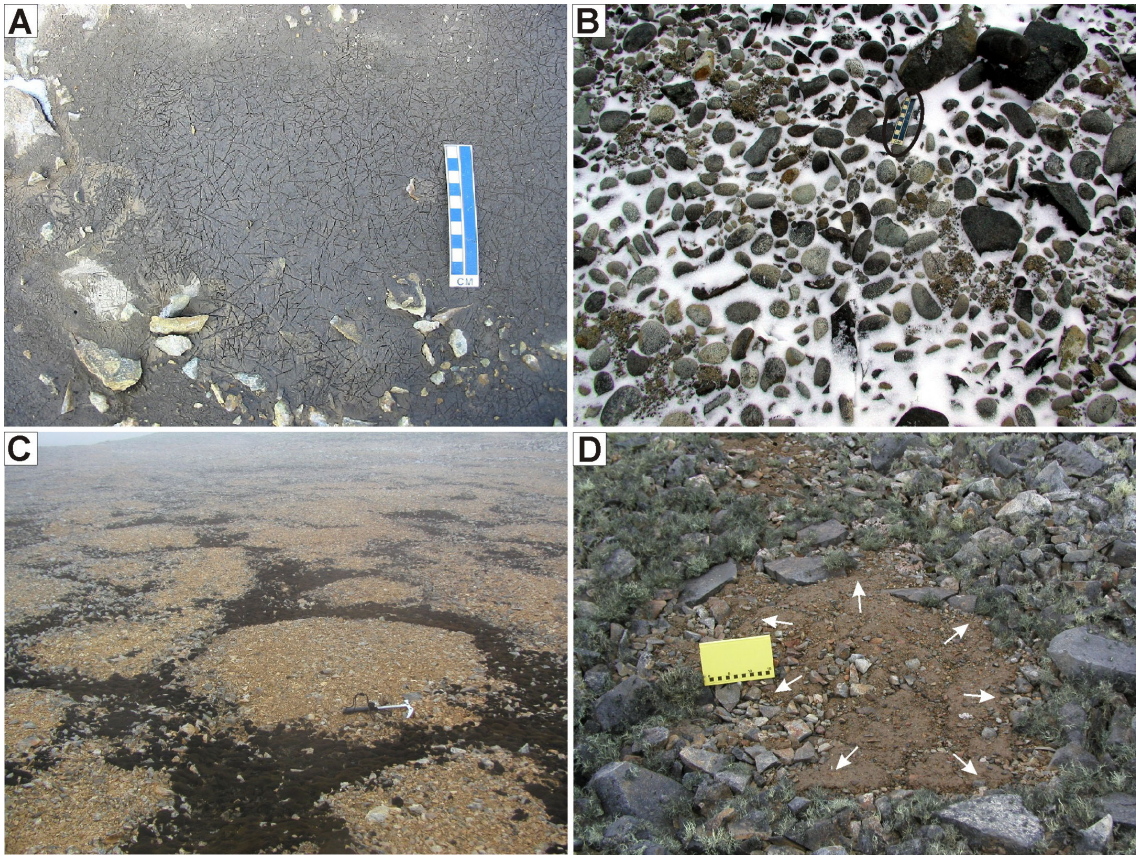


Fig. 6. (A) Mudcracks in the silty central part of a polygonal patterned ground at site 2. (B) Flat-lying, well rounded gravel clasts in the central part of a circular patterned ground at site 5. (C) Well-developed lichen (*Usnea*) on the border stones at site 5. (D) Net- or polygonal-type internal patterned ground at site 7 surrounded by moss-covered border stones.

로 발달하는 불규칙한 형태의 구조토를 지칭한다(그림 7A). 계단형구조토는 경사각이 약 10-15° 내외인 태백봉의 북쪽 사면을 따라 나타나며 경사각이 10° 미만으로 감소하는 완사면에서는 원형이나 다각형 구조토로 전이되기도 한다. 계단형구조토는 테두리가 비대칭적인 화살촉, 반달, 초승달 등의 형태를 보이며, 대부분 각각의 테두리들이 서로 연결되어 있다(그림 7A). 구조토는 장축의 직경이 1-2.5 m이며, 장축이 사면의 경사방향과 나란하게 배열되어있다(그림 7B). 테두리의 역할은 잔자갈-거력 크기이며, 형태는 주상 또는 판상이 우세하다(그림 7C).

중심부는 분급이 불량한 세립사에서 왕모래 크기의 사질입자로 구성되며, 잔자갈-왕자갈 역이 포함되어 있다. 특히, 판상의 역할은 지면에 수직으로 서 있으며 제자리에서 분리된 형태를 보이기도 한다(그림 7D). 중심부에는 방사상으로 발달한 홈을 따라 중심부가 불규칙한 다각형으로 나뉜 내부구조토가

나타난다. 계단형구조토에서는 식생의 발달은 매우 빈약하여 일부 테두리 역의 표면에서만 지의류가 드물게 나타난다.

4.4 선형구조토(striped patterned ground)

선형구조토는 조립질 부분과 세립질 부분이 띠 모양으로 반복하며 경사방향과 평행하게 배열된 형태의 구조토이다. 선형구조토는 관악봉 남쪽의 사면 말단부에서 경사각이 약 10°-30°인 급사면을 따라 나타나고(그림 1), 경사각이 10° 이하로 감소함에 따라 다각형이나 타원형구조토로 전이되기도 한다(그림 8A). 조립질 부분과 세립질 부분은 반복 교호하며 경사방향과 평행하게 일직선으로 발달한 경우와(그림 8B), 구불구불하게 발달한 형태로 구분된다(그림 8C). 일직선으로 발달한 선형구조토는 조립질과 세립질 부분이 일정한 간격으로 규칙적으로 배열되어있어 외형상 이랑과 고랑(ridge and furrow)의 형태를 지닌

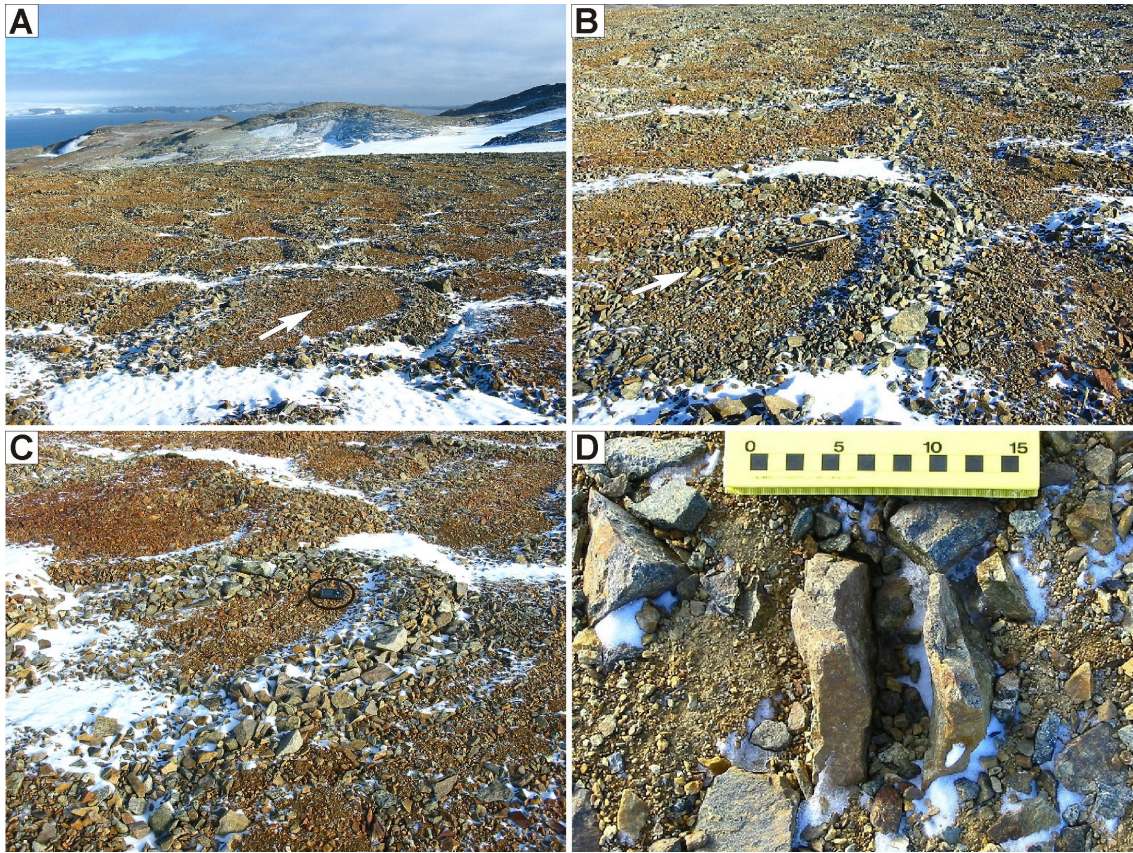


Fig. 7. (A) Stepped patterned ground at site 9 with irregular borders. An arrow indicates the downslope direction of the ground surface. (B and C) Stepped patterned ground with bow- or crescent-shaped border stones on a slope dipping 10° . (D) In situ fragmented and vertically oriented clasts in the central part of the stepped patterned ground.

다(그림 8B).

선형구조토의 조립질 부분은 주로 판상의 잔자갈-왕자갈(일부 거력 포함)로 구성되며 역들은 대부분 지표면에 수직으로 서있거나 수평으로 누워있다(그림 8B, D). 지표면에 수직으로 서있는 역들은 장축이 경사방향과 나란하게 배열되어있다(그림 8D). 반면, 세립질 부분은 수 cm 높이로 완만하게 솟아있는 형태이며, 중립사-왕모래 크기의 사질 입자로 구성된다(그림 8E). 선형구조토에서 식생(이끼류와 지의류)은 주로 조립질 역을 부분적으로 피복하는 형태로 나타난다(그림 8C, D). 세립질 부분에서는 상대적으로 식생의 발달이 미약하거나 없다.

단면상에서 조립질 부분은 U자형 단면을 보이며 내부구조의 발달이 없고 역지되어 있다(그림 8E). 역들의 공극은 비어있거나 지표에 수직으로 발달한 서릿발로 채워져 있다. 세립질 부분은 괴상이며, 소량의 잔자갈-왕자갈 역들이 기질지되어있다. 지표

면에서 약 40-70 cm 하부에는 분급이 불량한 사질입자에 역들이 기질지된 괴상층이 나타나며 공극의 얼음에 의해 입자들이 단단하게 결합되어 있는 영구동토층이 나타난다(그림 8E).

5. 토의

5.1 구조토의 특징과 형성과정

지금까지 알려진 구조토의 형성 이론은 크게 세 가지로 요약해 볼 수 있다. 첫 번째는 수분을 포함한 토양층이 동결될 때 입자 크기에 따른 공극률의 차이에 의해 조립질 입자가 상대적으로 높이 들어 올려진(up-heaving) 후 중력에 의해 입자들이 낮은 곳으로 이동하여 집적된다는 이론이다(Matsuoka *et al.*, 2003). 그러나 이 이론은 최초로 분급이 불량한 토양층에서 세립질과 조립질 입자들이 분리되는 원인을 설명하지 못한다. 두 번째는 조립질 역은 열전도율이

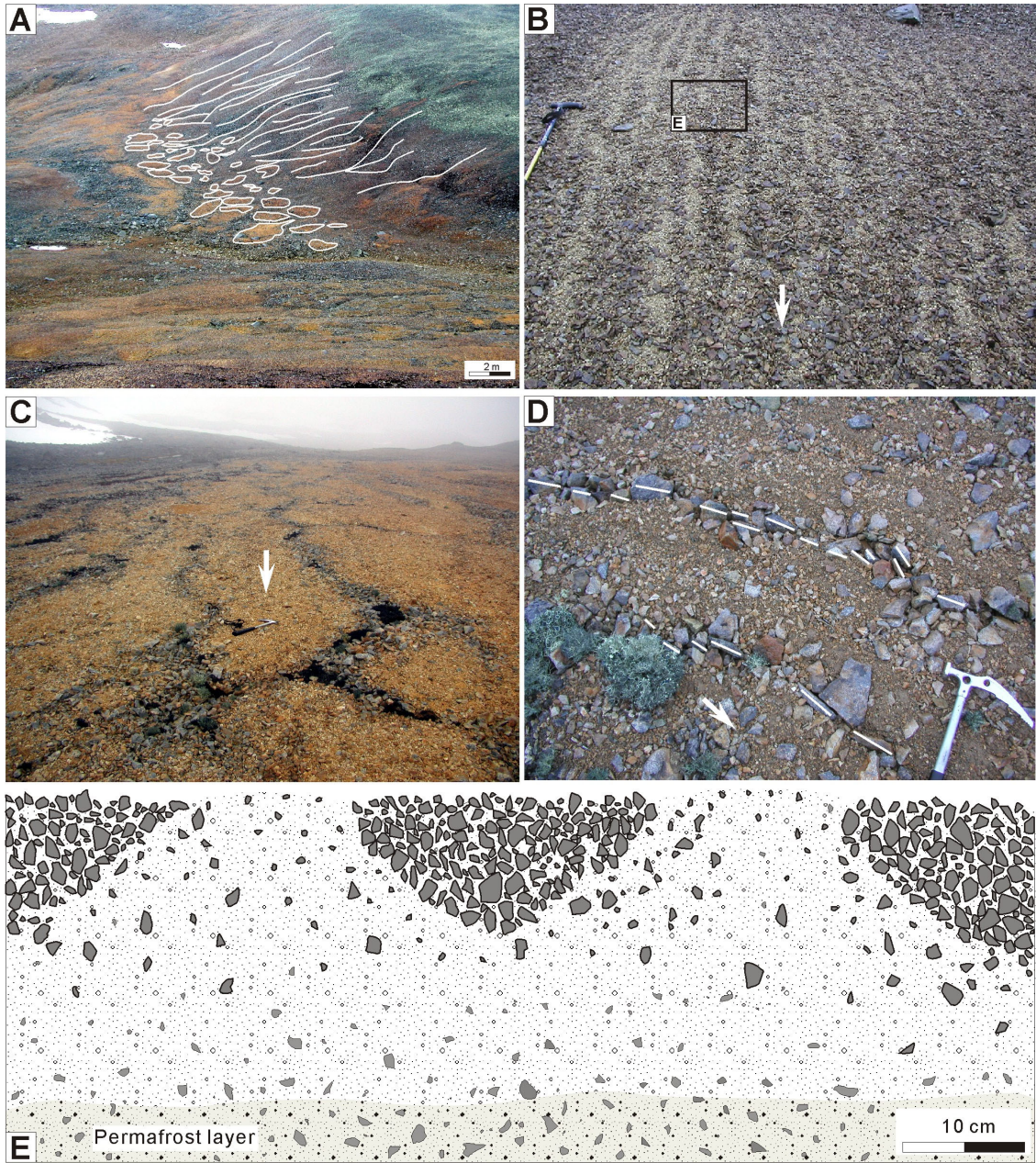


Fig. 8. (A) An overview of site 7, showing the changes in the type of patterned ground from stripes on steep slopes to polygons at the foot of the slope. (B) Close-up of the striped patterned ground in A, characterized by alternations of straight and parallel bands of coarse-grained and fine-grained materials. (C) Close-up of the striped patterned ground at site 8 characterized by irregular and anastomosing stone borders, which are partly covered by mosses. (D) Close-up view of striped patterned ground at site 8 with parallel-aligned border stones. (E) Sketch of the cross-section of striped patterned ground in B. Arrows in B, C, and D indicate downslope direction of the ground surface.

크기 때문에 역과 접하고 있는 토양층이 빨리 냉각되고, 동결될 때 서릿발 작용 등에 의해 높이 들어 올려져 세립질 입자에 비해 지면 가까이 놓이게 되고, 수

분을 함유한 그 밑의 세립질 층이 동결·팽창되면서 위로 솟아오르게 되면 이 경사면을 따라 역들이 낮은 곳으로 이동하여 집적된다는 이론이다(Hallet and

Putkonen, 1994; Ballantyne, 1996). 그러나 이 이론은 동결 시 세립질 입자들이 상대적으로 더 높이 들어 올려진다는 것이 실험적으로 증명되었으며 (Matsuoka *et al.*, 2003), 동결 시 솟아오른 세립질 토양층의 경사각이 역들을 측면으로 이동시킬 정도로 클 수 있을지에 대해 의문이 남아 있다. 세 번째는 토양층 내에 포함된 공극수의 대류현상으로 여름철 눈 녹은 물(4°C)은 밀도가 커서 토양층 밑으로 가라앉고 반대로 아래에 있던 상대적으로 밀도가 낮은 물이 상부로 올라오는 대류현상이 일어나고, 상승 대류가 발생하는 곳에서 역들이 들어 올려지고 중력에 의해 측면으로 유동·집적된다는 이론이다(Rayleigh-free or buoyancy-driven convection; Ray *et al.*, 1983; Hallet and Prestrud, 1986; Krantz, 1990). 그러나 이 이론은 상승대류에 의해 조립질 역들이 안식각 이상의 각도로 들어 올려질 수 있을지가 의문으로 남아 있다. 이 세 가지 이론들은 각각의 결함을 지니고 있지만 공통적으로 활동층 내에서 일어나는 계절적인 동결·해동의 반복에 의해 상대적으로 큰 입자(역)는 바깥쪽으로 이동하고, 세립질 입자는 안쪽으로 모인다는 설명을 제시하고 있다. 최근 계절적인 동결·해동의 반복에 따라 토양입자들이 순환을 반복하면서 스스로 조립질과 세립질 입자로 분리·집적되는 자가-조직화(self-organization) 작용과 지속적인 되먹임(feedback)작용에 의해 원형구조토가 형성된다는 이론이 제시되었다(Kessler and Werner, 2003).

지금까지 제시된 원형구조토 형성에 대한 다양한 이론들을 바탕으로 바톤반도 원형구조토의 성인을 유추해 보았다. 먼저 바톤반도의 활동층은 불투수층 역할을 하는 영구동토층 위에 놓여있기 때문에 여름철 눈 녹은 물이 밑으로 빠져나가지 못하여 물로 포화된 상태를 유지한다(그림 9A). 물로 포화된 활동층은 동결·해동의 반복에 의해 입자 크기에 따른 수직적 분급작용(vertical sorting)이 발생하여 조립질 입자는 상부로, 세립질 입자는 하부로 이동하여 분리된다(e.g., Corte, 1971; Grab, 2002; Sumner, 2004)(그림 9B, C). 분급이 이루어진 상부 토양층은 지속적인 동결·해동의 반복에 따른 자가-조직화작용으로 조립질과 세립질 입자로 분리된다. 특히, 조립질 입자들은 지면에서 수 cm-수십 cm 높이로 솟아오른 형태를 보이고(그림 9D), 입자들은 중력에 의한 포행(creep)으로 낮은 곳에 집적된다(e.g., Matsuoka *et al.*, 2003; Kessler and Werner, 2003)(그림 9E). 집적된 조립질 입자들은 동결 시 세립질 입자들의 부피 팽창에 의해 압축되면서 점진 전상으로 입자들이 배열되는 측면압축(lateral squeezing) 현상이 일어난다(e.g., Krantz, 1990; Boelhouwers *et al.*, 2003;

Kessler and Werner, 2003)(그림 9F). 그리고 이와 같은 과정은 계절적인 동결·해동에 따라 반복적으로 발생하여 테두리의 자갈들이 점차 양호한 배열을 보이는 원형구조토를 형성한 것으로 해석할 수 있다(e.g., Kessler and Werner, 2003; Guglielmin *et al.*, 2008).

그러나 원형구조토를 제외한 다각형, 계단형, 선형구조토의 성인에 대해서는 연구자에 따라 견해가 다른데, 입자 크기(또는 비율), 지표 경사각, 수분 함량 등에 따라 구조토의 형태가 달라지는 것으로 알려져 있다(Washburn, 1980; Matthews *et al.*, 1998; Mann, 2003). 조사지역의 경우 원형구조토의 테두리와 중심부는 다각형구조토의 테두리와 중심부 그리고 선형구조토의 조립질과 세립질 부분에 비교해 볼 때 입자 크기와 분급 및 조직에서 큰 차이를 보이지 않는다. 또한 한 지점에서 원형과 타원형구조토가 함께 산출되고, 중심부를 구성하는 입자도 실트에서 왕모래까지 다양한 입도범위를 보인다. 따라서 구조토의 형태를 좌우하는 요인은 입자 크기와 분급이 아니라 지표 경사각의 변화에 가장 큰 영향을 받는 것으로 추정할 수 있다. 즉, 활동층에서의 자가-조직화 작용과 측면압축 현상에 더불어 사면의 경사에 의한 수직·수평방향의 물질 순환과 이동이 차별적으로 발생하여 다각형과 선형구조토가 형성되는 것으로 해석된다(e.g., Kessler and Werner, 2003; Luoto and Hjort, 2006; Ballantyne, 2007)(그림 10).

계단상의 지형을 이루며 테두리가 초승달이나 화살촉 형태를 보이는 계단형구조토는 원형, 다각형, 선형의 구조토와 달리 여름철에 수분을 포함한 활동층 전체가 중력에 의해 헛바다 모양으로 천천히 사면 아래로 이동하는 솔리플렉션(solifluction) 현상에 의해 형성된 것으로 해석된다(e.g., Mackay, 1980; Ballantyne, 2007). 따라서 계단형구조토는 동결·해동 작용과 더불어 활동층 전체가 중력에 의해 사면이동하여 형성된 것으로 해석된다.

다각형구조토의 중심부에 포함된 원마도가 원형·아원형인 잔자갈 역들(그림 6B)은 산출지역의 해발고도가 110-120 m임을 고려할 때 바톤반도의 용기와 관련된 고해빈 기원의 자갈로 판단된다. 특히, 바톤반도에서 보고된 용기해빈은 주로 해안을 따라 연장성이 좋게 분포하지만 바톤반도 중앙부의 평탄면에도 나타나는 것으로 알려져 있다(이동영, 1992). 따라서 해안단구의 정확한 형성연대는 알 수 없지만, 구조토의 형성시기가 적어도 단구 형성 이후일 것으로 추정할 수 있다.

5.2 구조토의 연대

빙하퇴적물의 퇴적연대는 빙하의 후퇴시기 및 극

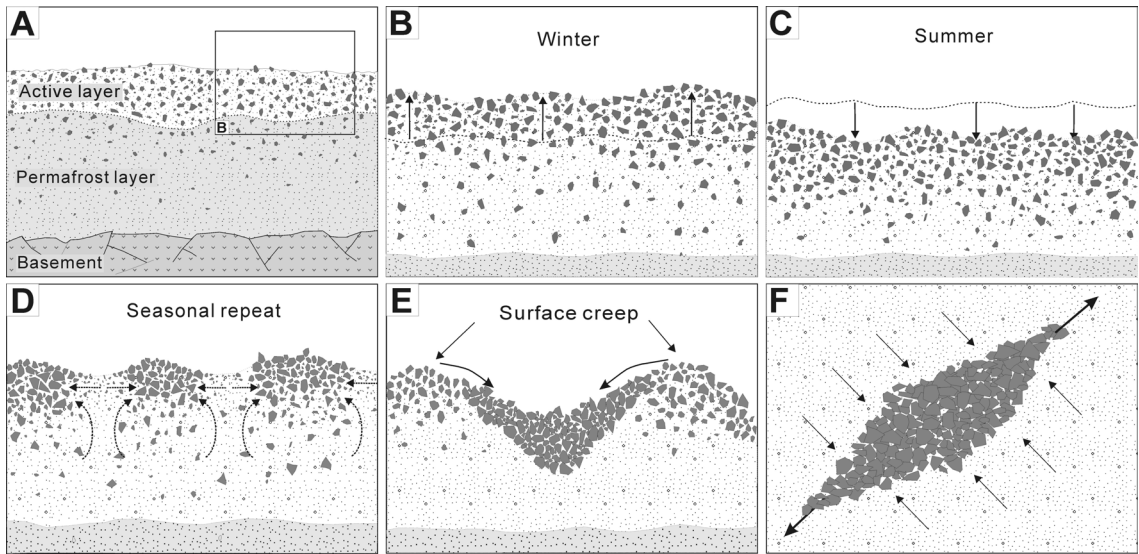


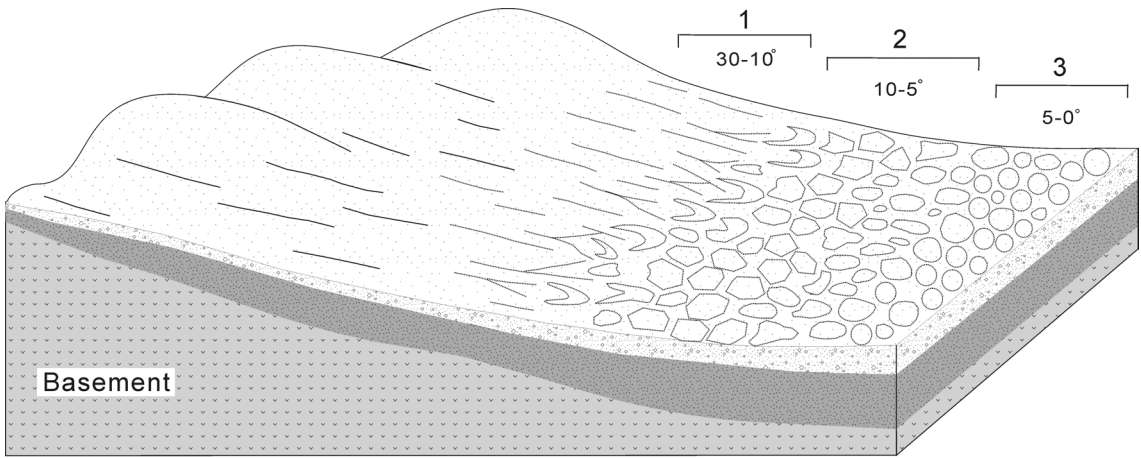
Fig. 9. Schematic illustrations depicting vertical and lateral segregation of soil materials through repeated freeze-thaw cycles in the active layer (modified after Kessler and Werner, 2003).

지 기후변화의 양상을 이해하는데 중요한 정보를 제공한다. 최근 최정현 외(2008)는 원형구조토의 중심부에서 석영입자의 OSL 연대를 측정하여 빙하의 후퇴가 적어도 11 ± 1 ka 이전에 일어난 것으로 해석하였다. 한편 Jeong(2006)은 원형구조토의 중심부에 보존된 이끼와 지의류를 이용하여 290-4710 yrs BP의 탄소동위원소 연대를 보고하였다. 이와 같이 동일한 구조토를 대상으로 얻어진 절대연령 값이 큰 차이를 보이는 것은 연대측정의 방법상 차이에 기인한 것일 수도 있으나 구조토의 형성과정과 관련이 있을 수도 있다. 따라서 본 연구는 원형구조토를 대상으로 절대연령 측정값이 큰 차이를 보이는 원인과 구조토 물질의 연대측정 결과의 해석 방법에 대해 살펴보았다.

지금까지 구조토가 만들어지는데 걸리는 시간에 대해서는 분포지역과 환경 등에 따라 차이가 있지만 대부분 수십-수백년 이내라는 견해가 지배적이다 (Grab, 1997; Matthews *et al.*, 1998; Kessler and Werner, 2003; Ballantyne, 2007). 구조토가 완전한 형태를 갖춘 후 정지된 상태로 남아있는 경우도 있겠지만, 동결·해동작용이 지속되면 구조토의 형태는 계속적으로 변화하고 내부 물질은 끊임없이 순환하고 재배열할 것이다(e.g., Matthews *et al.*, 1998; Grab, 2002; Haugland, 2004; Ugolini *et al.*, 2006; Ogino and Masuoka, 2007). 바톤반도 구조토의 경우 현재까지도 구조토의 변화가 진행 중임을 지시하는 증거들이 발견된다. 예를 들어, 원형과 다각형구

구조토의 중심부에는 내부구조토와 건열 등의 구조들이 나타나고, 테두리 역들의 입자크기는 바깥쪽에서 안쪽으로 갈수록 감소하는 경향을 보인다. 이 구조들은 반복적인 동결·해동 작용에 따라 중심부 입자들이 순환하면서 크기에 따라 분리·재배열 작용이 발생하고 있음을 지시한다(e.g., Grab, 1997; Matthews *et al.*, 1998). 또한 습윤한 해양성 기후에 영향을 받는 바톤반도의 기후적 특징을 고려한다면 사질입자로 구성된 세립질의 중심부가 역들로 구성된 테두리에 비해 식물의 생장에 유리한 조건임에도 불구하고 식생의 발달이 거의 없는 점은 구조토의 중심부가 현재까지도 활동하고 있음을 뒷받침한다.

최근, Kessler and Werner(2003)와 Sumner(2004)는 원형구조토의 형성이 반복적인 동결·해동에 따라 토양물질이 대류세포(convection cell)를 형성하여 끊임없이 순환하며 이 과정을 통해 자가-조직화한다는 이론을 제시하였다(그림 11). 이 이론에 따르면 구조토 중심부의 석영 입자들은 수많은 재순환과정을 거치기 때문에 빙하의 후퇴와 함께 한꺼번에 매몰(dumping)된 일반적인 빙하퇴적 물과 달리 주기적으로 햇빛에 노출될 기회가 많다. 또한 지표에 발달했던 식생의 잔해가 토양 속으로 섞여 들어가 토양과 함께 구조토의 물질순환에 참여할 가능성도 높다. 이 경우 석영이나 유기물의 OSL 또는 ^{14}C 연대는 구조토의 형성시기와는 전혀 무관한 값을 갖게 될 것이다. 석영의 OSL 연대를 예로 들자면, 지표에 드러난 입자(그림 11B의 ①)의 연대는 0이겠지만 지표면 직



1. Striped patterned ground
2. Polygonal (to net-type) patterned ground
3. Circular patterned ground

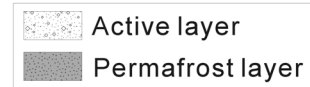


Fig. 10. A cartoon illustrating the changes in the types of patterned ground from circle to stripe as the slope angle changes in study area.

하부의 입자(그림 11B의 ④)는 구조토 물질의 순환 주기를 끝내기 직전의 가장 오래된 연대를 갖고 있을 수 있으며, 더 깊은 곳의 물질(그림 11B의 ②와 ③)은 상대적으로 더 젊은 연대를 보일 수 있다.

식물편을 이용한 탄소동위원소 연대측정 결과 위버반도의 구조토 중심부를 대상으로 지표하 10 cm와 30 cm에서 얻어진 연대가 각각 1980과 2320 yrs BP인 반면, 필데스(Fildes) 반도 구조토의 동일한 깊이에서 얻어진 연대는 각각 1880과 720 yrs BP로 오히려 깊이에 따라 연대가 젊어지는 경향이 나타난다(Jeong, 2006). 이와 같이 심도에 따라 다양한 연대값이 얻어진 것은 구조토 중심부의 표층 입자들이 가장 젊은 연대와 가장 오래된 연대를 함께 갖고 있을 수 있으며, 표층 밑의 입자들은 물질순환 주기의 최대치와 최소치 사이의 다양한 연대를 갖고 있기 때문에 나타난 결과로 해석할 수 있다. 따라서 이상의 연대 측정치는 구조토의 형성연대 보다는 구조토 물질의 순환주기를 반영하거나 구조토 물질의 순환에 의해 심하게 왜곡된 연대인 것으로 보인다. 한편, OSL 연대측정을 통해 얻어진 11 ± 1 ka의 연대 역시 구조토의 형성연대로 해석하기 곤란하다. ^{14}C 연대에 비해 매우 큰 OSL 연대값은 구조토 물질순환에 참여하지 못한 구조토 중심부의 하부 물질(그림 11B⑤)의 연대일 가능성이 높다. 따라서 11 ± 1 ka의 OSL 연대는 구조토의 형성시기 보다는 빙하의 후퇴와 함께 빙하기원 퇴적물이 매몰된 시기로 해석하는 것이 타당해 보인다.

결론적으로, 바톤반도 원형구조토의 중심부에서 얻어진 다양한 연대측정 값은 이 지역 구조토의 중심부가 현재까지도 활발하게 순환하고 있다고 가정한다면 충분히 설명이 가능하다. 앞으로 원형구조토의 수직 단면 여러 곳에서 깊이에 따른 연대측정을 하여 연대분포를 파악할 수 있다면 구조토의 순환주기 뿐만 아니라 빙하의 후퇴시기에 대한 더욱 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각한다.

6. 결론

세종기지가 위치한 킹조지섬 바톤반도에는 주빙하지형이 넓게 노출되어 있으며 빙하작용과 관련된 지형이 잘 발달되어 있다. 특히, 바톤반도 남서부 평탄면에는 활동층의 반복적인 동결·해동에 따라 형성된 기하학적 형태의 구조토가 잘 나타난다. 구조토는 조립질 테두리와 세립질 중심부로 이루어져 있으며, 테두리의 형태에 따라 원형, 다각형, 계단형, 선형구조토로 구분된다. 원형구조토는 테두리가 원형에서 타원형이며, 다각형구조토는 테두리가 연결되어 있으며 다각형에서 그물형까지 다양한 형태를 띤다. 원형과 다각형구조토의 테두리는 역지된 잔자갈-왕자갈 역들로 구성되고, 중심부는 실트-왕모래 크기의 입자들로 구성된다. 계단형구조토는 경사면을 따라 계단모양으로 나타나며, 테두리가 비대칭적인 화살촉, 반달, 초승달 형태로 나타난다. 선형구조토는 잔자갈-왕자갈 크기의 조립질 부와 왕모래-잔자갈의

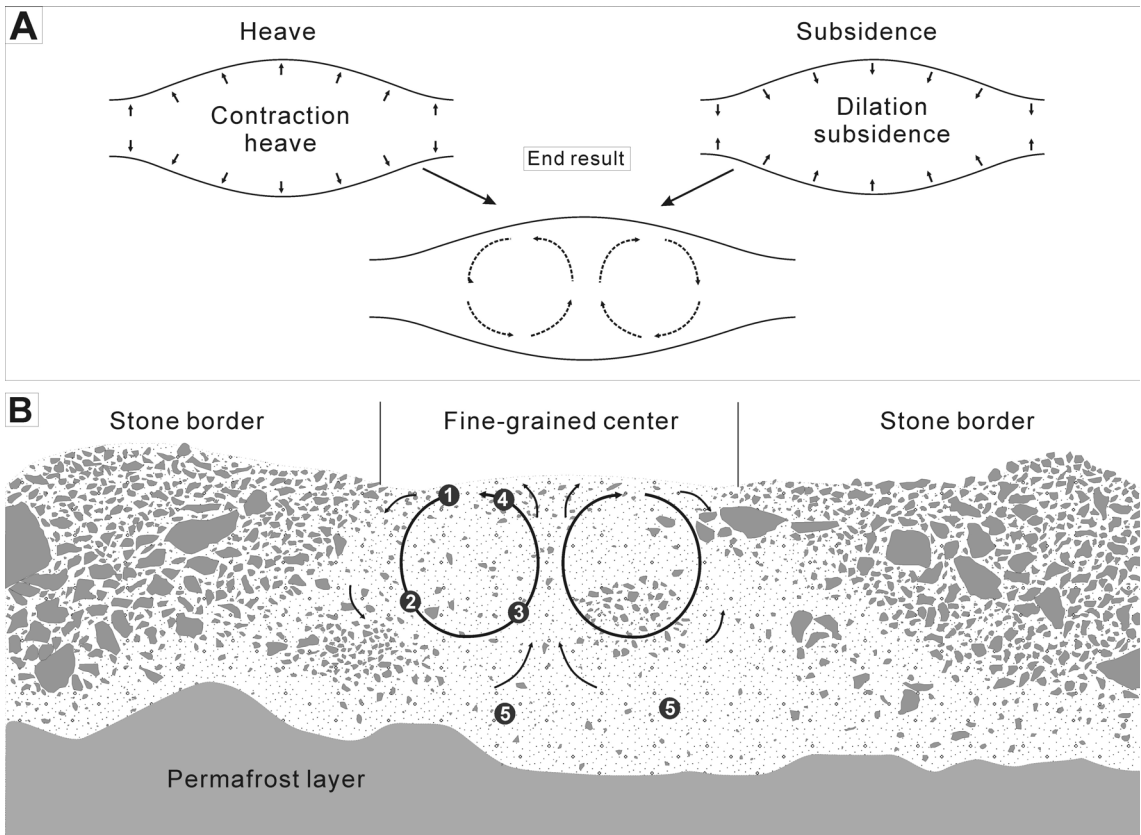


Fig. 11. (A) A model for material convection within the active layer caused by repeated moisture-induced freezing and thawing (after Mackay, 1980). (B) The materials constituting the patterned ground can have different OSL or ¹⁴C ages depending on the sample location, the period of material cycle, and the extent of the material convection. Very young (1) and very old (4) materials may coexist near the ground surface whereas the materials of intermediate ages (2 and 3) may be present deep within the active layer. Some materials that didn't participate in the material convection (5) may have quite old ages that are unrelated to the formation of the patterned ground. Dating the formation age of the patterned ground can therefore be very tricky.

세립질 부가 경사면에 평행하게 발달하고 있다. 구조토는 지면의 경사가 상대적으로 완만한(0-10°) 지역에서는 원형과 다각형이 우세하고, 경사가 급한(10°-30°) 지역에서는 계단형과 선형이 우세하게 나타난다. 그러나 조사지역의 다양한 구조토 형태에 비해 테두리와 중심부를 구성하는 입자들의 크기와 분급, 배열 등은 큰 차이를 보이지 않는다. 이러한 사실은 구조토의 형태가 주로 지표면의 경사각에 따라 달라졌음을 지시한다. 즉, 활동층의 반복적인 동결-해동 작용에 의한 자가-조직화작용과 측면압축 현상과 더불어 사면 아래쪽으로 입자들의 비대칭적인 순환과 이동이 발생하여 여러 형태의 구조토가 만들어진 것으로 해석된다. 그리고 계단형구조토는 수분을 포함한 토양층 전체가 헛바닥 모양으로 천천히 사면 아래

로 이동하는 솔리플렉션현상에 의해 형성된 것으로 해석된다.

조사지역 구조토의 중심부에는 내부구조토와 건열 등의 미세구조들이 나타나고, 식생의 발달도 거의 없다. 이와 같은 특징은 구조토의 중심부를 따라 물질의 순환이 현재까지도 계속되고 있음을 지시한다. 최근 조사지역의 원형구조토 중심부에서 11±1 ka의 OSL 연대와 290-4710 yrs BP의 탄소동위원소 연대가 얻어졌다. 이와 같이 동일한 원형구조토에서 절대연령 값이 큰 차이를 보이는 것은 구조토의 중심부에서 물질의 순환이 현재까지도 일어나고 있으며, 순환의 위치에 따라 구조토 물질이 수백 년에서 수천 년 사이의 다양한 연대값을 갖고 있기에 나타난 결과로 해석된다. 따라서 수백-수천년의 연대는 구조토의

형성시기보다는 구조토 물질의 순환주기를 반영하고 있는 것으로 해석함이 타당하며, 만년 이상의 연대는 빙하의 후퇴 이후 퇴적물의 매몰이 일어난 시기로 해석하는 것이 타당해 보인다.

세종기지 주변의 지하에 분포하는 활동층은 하부에 불투수층 역할을 하는 영구동토층으로 인해 수분으로 포화된 상태를 유지하고 있으며, 여름에는 수분이 녹고 겨울철에는 얼어붙는 변화가 반복된다. 이로 인해 활동층은 극히 완만한 경사면이라도 쉽게 흘러내릴 수 있는 조건을 갖추고 있다. 그 결과 극지방에서는 건축물이 기울거나 지하의 파이프라인이 휘어지는 등의 현상이 발생하게 된다. 또한 영구동토층의 얼음썰기(ice wedge)가 녹으면서 지면이 함몰되어 열카르스트(thermokarst)가 형성되거나 나무가 기울어져 이른바 술취한 숲(drunk forest) 등의 지형이 나타날 수 있다. 이와 같이, 활동층과 영구동토층에 대한 연구는 극지방과 주변지역에서 토양의 거동 특성을 이해하는데 중요한 의미가 있다. 그러나 활동층과 영구동토층에서 일어나는 변화를 직접 관찰하는 것이 현실적으로 어렵기 때문에 활동층의 상부에 나타나는 구조토를 통해 활동층과 영구동토층의 특성과 변화를 간접적으로 추정할 수 있다. 따라서 구조토는 독특한 지표면의 형태로서도 중요하지만 지표면의 변화를 통해 활동층의 움직임에 추정하는데도 중요한 의미가 있다. 그리고 이러한 관찰과 연구는 궁극적으로는 극지 건축물 설계와 건설에 응용될 수 있을 것이다. 이런 중요성에도 불구하고 극지방 토양층에 대한 국내의 연구는 매우 미약한 실정이며 향후 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 생각한다.

감사의 글

이 논문은 첫 번째 저자가 2002년 12월부터 2003년 12월까지 1년 동안 세종기지에서 제16차 월동대원으로 근무하며 수집한 자료를 토대로 작성되었다. 자료의 분석은 “남극의 형성, 진화와 신기지가 활동 연구(PE08020)”로부터 지원 받았다. 심사를 통해 원고에 대한 세심한 지적과 조언을 주신 성영배 박사님과 익명의 심사위원께 감사드린다. 그리고 세종기지에서 뜻 깊은 1년을 함께한 강영철 박사님과 제16차 대한민국 남극 월동연구대원 모두에게 감사드린다.

참고문헌

고영이, 박용안, 최문영, 1993, 바탄반도와 위버반도의 해빙 자갈에 관한 연구. 한국극지연구, 4, 39-51.

- 김동욱, 1990, 남극 세종기지 건설기. 한국극지연구, 1, 51-67.
- 김지희, 정호성, 2004, 남극 세종기지 주변에 새로이 정착한 현화식물 남극좁새풀(*Deschampsia antarctica*)의 개체군 공간분포. *Ocean and Polar Research*, 26, 23-32.
- 김형수, 남상헌, 김예동, 강천운, 1995, 남극 세종기지 주변에서의 천부 영구동토층 조사를 위한 지구물리탐사: 천부 반사법 탄성파 및 전기 비저항 탐사. 해양연구소, BSPN 00258-82-7, 75-107.
- 이동영, 1992, 남극 바탄반도 주변지역의 용기지형 특성. 한국극지연구, 3, 71-84.
- 장순근, 1997, 남극세종기지 부근의 지면의 특성. 한국지구과학회지, 18, 443-449.
- 장순근, 윤호일, 정호성, 1998, 지구온난화와 서남극 남 웨틀랜드군도 킹조지섬의 최근 빙벽후퇴. 한국지구과학회지, 19, 101-106.
- 장순근, 이중익, 최문영, 허순도, 2003, 남극 바탄반도 킹조지섬 주위의 지질. 지질학회지, 39, 271-286.
- 진명식, 이민성, 강필중, 1989, 킹조지섬의 바탄반도 및 위버반도 일대의 지질학적 및 암석학적 연구. 해양연구소, BSPG00081-246-7, 73-106.
- 정기영, 윤호일, 박병권, 1999, 서남극 킹조지섬 바탄반도의 토양점토광물의 분포 및 기원. 지질학회지, 35, 265-278.
- 정기영, 2003, 남극 사우스셰틀란드 킹조지섬 바탄반도 빙하쇄설물의 화학적 풍화작용: 미조직학적 증거. 한국광물학회지, 16, 181-189.
- 정호성, 이방용, 장순근, 김지희, 김예동, 2003, 세종기지 주변에서 관찰된 빙벽후퇴와 바다결빙. *Ocean and Polar Research*, 26, 1-10.
- 최정현, 임현수, 윤호일, 정창식, 임창복, 김종욱, 장호완, 2008, 남극 킹조지섬에 분포하는 원형구조토(Sorted Circles)에 대한 OSL 연대측정 적용가능성 연구. 지질학회지, 44, 523-539.
- 최태진, 이용일, 윤호일, 2003, 서남극 킹조지섬에 분포하는 해빙 모래의 특징. 지질학회지, 39, 391-402.
- 최태진, 이방용, 김성중, 박유민, 윤영준, 2006, 남극 세종기지 주변의 복사, 지온 및 풍향의 특징. 대한지구물리학회지, 9, 397-408.
- 한옥, 1994, 남극 세종기지에서 지표면 온도 변화에 따른 동토의 온도 반응. 한국지구과학회지, 15, 170-176.
- 한옥, 이춘기, 정상조, 이방용, 남상헌, 2006, 남극 세종기지 활동층 토양의 온도와 열물성 연구. 지질학회지, 42, 577-586.
- Ballantyne, C.K., 1996, Formation of miniature sorted patterns by shallow ground freezing: a field experiment. *Permafrost and Periglacial Processes*, 7, 409-424.
- Ballantyne, C.K., 2006, Periglacial landforms. *Encyclopedia of Quaternary Science*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. Hardbound, 4 volumes, 2182-2191.
- Bockheim, J.G., 1995, Permafrost distribution in the southern circumpolar region and its relation to the environ-

- ment: a review and recommendations for further research. *Permafrost and Periglacial Processes*, 6, 27-45.
- Boelhouwers, J., Holness, S. and Summer, P., 2003, The maritime subantarctic: a distinct periglacial environment. *Geomorphology*, 52, 39-55.
- Björck, S., Malmer, N., Hjort, C., Sandgren, P., Ingolfsson, O., Wallen, B., Smith, R.I.L. and Jonsson, B.L., 1998, Stratigraphic and paleoclimatic studies of a 5500-year-old moss bank on Elephant Island, Antarctica. *Arctic and Alpine Research*, 23, 361-374.
- Campbell, I.B. and Claridge, G.G.C., 1987, Antarctica: Soils, Weathering Processes and Environment. *Developments in Soil Science*, Elsevier, Amsterdam, 368 p.
- Corte, A.E., 1971, Laboratory formation of extrusion features by multicycle freeze-thaw in soils. *Colloque International de Geomorphologie, Liege-Caen, Centre de Geomorphologie a Caen, Bulletin No. 13*, 117-131.
- French, H.M., 1976, *The Periglacial Environment*. Longman, London and New York, 309 p.
- French, H.M., 1996, *The Periglacial Environment*. 2nd Edition. Longman, London, 341 p.
- Grab, S., 1997, Thermal regime for a thufa and its adjoining depression, Mashai Valley, Lesotho. *Permafrost and Periglacial Processes*, 8, 437-445.
- Grab, S., 2002, Characteristics and palaeoenvironmental significance of relict sorted patterned ground, Drakensberg plateau, South Africa. *Quaternary Science Review*, 21, 1729-1744.
- Guglielmin, M., Ellis Evans, C.J. and Cannone, N., 2008, Active layer thermal regime under different vegetation conditions in permafrost areas. A case study at Signy Island (Maritime Antarctica). *Geoderma*, 144, 73-85.
- Hallet, B. and Prestrud, S., 1986, Dynamics of periglacial sorted cycles in western Spitzbergen. *Quaternary Research*, 26, 81-99.
- Hallet, B. and Putkonen, J., 1994, Surface dating of dynamic landforms: young boulders on aging moraines. *Science*, 265, 937-939.
- Han, U. and Jung, H.C., 1994, Temperature response in the permafrost at the Sejong Station, Antarctica. *Journal of Korean Earth Science Society*, 15, 170-176.
- Haugland, J.E., 2004, Formation of patterned ground and fine-scale soil development within two late Holocene glacial chronosequences: Jotunheimen, Norway. *Geomorphology*, 61, 287-301.
- Hjort, C., Björck, S., Ingolfsson, O. and Moller, P., 1998, Holocene deglaciation and climatic history of the northern Antarctic Peninsula region: a discussion of correlations between the Southern and Northern hemisphere. *Annals of Glaciology*, 27, 110-112.
- Jeong, G.Y., 2006, Radiocarbon ages of sorted circles on King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica. *Antarctic Science*, 18, 265-270.
- John, B.S. and Sugden, D.E., 1971, Raised marine features and phases of glaciation in the South Shetland Islands. *British Antarctic Survey Bulletin*, 24, 45-111.
- Kessler, M.A. and Werner, B.T., 2003, Self-organization of sorted patterned ground. *Science*, 299, 380-383.
- Kim, S.B., Sohn, Y.K. and Choe, M.Y., 2005, The Eocene Volcaniclastic Sejong Formation, Barton Peninsula, King George Island, Antarctica: Evolving arc volcanism from precursory fire fountaining to Vulcanian eruptions. In Fütterer, D.K. *et al.* (eds.) *Antarctica: Contributions to Global Earth Sciences*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 261-270.
- Krantz, W.B., 1990, Self-organization manifest as patterned ground in recurrently frozen soil. *Earth-Science Reviews*, 29, 117-130.
- López-Martínez, J., Serrano, E. and Lee, J.I., 2002, Geomorphological map of Barton and Weaver Peninsulas King George Island, Antarctica (1:10,000). Polar Sciences Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan.
- Luoto, M. and Hjort, J., 2006, Scale matters a multi-resolution study of the determinants of patterned ground activity in subarctic Finland. *Geomorphology*, 80, 282-294.
- Mackay, J.R., 1980, The origin of hummocks, western Arctic coast. *Canadian Journal of Earth Science*, 17, 996-1006.
- Mann, D., 2003, On patterned ground. *Science*, 299, 354-355.
- Matsuoka, N., Abe, M. and Ijiri, M., 2003, Differential frost heave and sorted patterned ground: field measurements and a laboratory experiment. *Geomorphology*, 52, 73-85.
- Matthews, J.A., Shakesby, R., Berrisford, M. and McEwen, L., 1998, Periglacial patterned ground on the Styggedalsbreen glacier foreland, Jotunheimen, southern Norway: micro-topographic, paraglacial and geoecological controls. *Permafrost and Periglacial Processes*, 9, 147-166.
- Ogino, Y. and Matsuoka, N., 2007, Involutions resulting from annual freeze-thaw cycles: a laboratory simulation based on observations in northeastern Japan. *Permafrost and Periglacial Processes*, 18, 323-335.
- Ray, R.J., Krantz, W.B., Caine, T.N. and Gunn, R.D., 1983, A model for sorted patterned-ground regularity. *Journal of Glaciology*, 29, 317-337.
- Seong, Y.B., Lim, H.S., Yoon, H.I., Lee, Y.I., Kim, Y.D., and Owen, L.A., 2006, A preliminary geomorphic overview of late Quaternary glacier fluctuations in the South

- Shetland Islands, West Antarctica. *Journal of Korean Geographical Society*, 41, 513-526.
- Seong, Y.B., Owen, L.A., Lim, H.S., Yoon, H.I., Kim, Y., Lee, Y.I. and Caffee, M.W., 2009, Rate of Late Quaternary ice cap thinning on King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica defined by cosmogenic ^{36}Cl surface exposure dating. *Boreas*, accepted.
- Sumner, P., 2004, Relict sorted patterned ground in Lesotho. *Permafrost and Periglacial Processes*, 15, 89-93.
- Thorn, C.E., 1976, A model of stony earth circle development, Schefferville, Quebec. *Proceedings of the Association of American Geographers*, 8, 19-23.
- Ugolini, F.C., Giuseppe, C. and Giacomo, C., 2006, Pedogenesis in the sorted patterned ground of Devon Plateau, Devon Island, Nunavut, Canada. *Geoderma*, 136, 87-106.
- Washburn, A.L., 1956, Classification of patterned ground and review of suggested origins. *Geological Society of America Bulletin*, 67, 823-865.
- Washburn, A.L., 1980, Permafrost features as evidence of climatic change. *Earth-Science Reviews*, 15, 327-402.
- Yeo, J.P., 2004, Geochemistry and origin of igneous rocks in Barton and Weaver Peninsulas, King George Island, Antarctica. PhD thesis, Seoul National University, 147 p.
- Yoo, C.M., Choe, M.Y., Jo, H.R. and Kim, K.H., 2001, Volcaniclastic sedimentation of the Sejong Formation (Late Paleocene-Eocene) Barton Peninsula, King George Island, Antarctica. *Ocean and Polar Research*, 23, 97-107.
- Yoon, H.I., Han, M.W., Park, B.K., Oh, J.K. and Chang, S.K., 1997, Glaciomarine sedimentation and plaeo-glacial setting of Maxwell Bay and its tributary embayment, Marian Cove, in the South Shetland Islands, West Antarctica. *Marine Geology*, 140, 265-282.
- Yoon, H.I., Park, B.K., Kim, Y. and Kim, D., 2000, Glaciomarine sedimentation and its paleoceanographic implications along the fjord margins in the South Shetland Islands, Antarctica during the last 6000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeocology*, 157, 189-211.

투 고 일 : 2008년 10월 6일

심 사 일 : 2008년 10월 21일

심사완료일 : 2009년 2월 2일