

<Short Note>

서남극 세종기지 주변 빙하의 균열시스템 및 용빙수 흐름
분석: 예비연구결과

윤상웅¹ · 임현수² · 박영윤¹ · 최현미¹ · 이진용^{1,*} · 윤호일²

¹강원대학교 지질학과

²한국해양연구원 부설 극지연구소

Sang Woong Yun, Hyoun Soo Lim, Youngyun Park, Hyun-Mi Choi, Jin-Yong Lee and Ho Il Yoon, 2012,
Analysis of fracture system and meltwater flow in glaciers around the King Sejong Station, West Antarctica.
Journal of the Geological Society of Korea. v. 48, no. 2, p. 201-208

(Sang Woong Yun, Youngyun Park, Hyun-Mi Choi and Jin-Yong Lee, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea; Hyoun Soo Lim and Ho Il Yoon, Korea Polar Research Institute, KORDI, Incheon 406-840, Korea)

1. 서론

최근 급격히 진행되는 지구온난화에 의해 폭염, 한파, 가뭄, 홍수, 태풍 등 여러 가지 자연재해의 빈도와 강도가 증가하면서 과거의 기후변화 연구에 대한 중요성이 점차 증가하고 있다. 특히 극지역의 경우 기후변화에 민감하게 반응하며, 과거의 기후변화 기록들이 잘 보존되어 있어 기후변화 연구가 활발히 진행되고 있다. 한국은 1988년 남극 세종과학기지를 건설한 이후 현재까지 많은 국내 연구자들이 남극반도에 환경변화 모니터링, 지질환경, 자원특성, 빙하 및 대기환경 등에 대하여 지속적인 연구를 수행하고 있다(장순근, 1997; 유규철 외, 2002; 최태진 외, 2006; Park *et al.*, 1998). 남극은 지구평균 기온의 증가에 비해 훨씬 빠르게 기온이 증가하고 있으며, 최근 수 십 년 간 대형 빙붕의 붕괴가 빈번하게 일어나고 빙하의 이동 속도도 급속히 증가하고 있다(Ward, 1995; Vaughan and Doake, 1996; Turner *et al.*, 2005).

육상빙하의 이동속도 증가와 대형 빙붕의 붕괴 등은 전 지구적 규모의 해수면 상승을 야기할 수 있기 때문에 용빙수의 거동이나 빙붕의 붕괴 기작에 대한 다양한 연구들이 수행되었다(Doake and Vaughan,

1991; Fountain and Walder, 1998; Mernild *et al.*, 2006). 최근 한국은 쇄빙연구선 아라온호를 건조하고 남극 장보고과학기지를 추가로 건설 하는 등 극지 연구에 많은 투자를 하고 있다. 그러나 빙하의 균열시스템이나 용빙수 흐름 등에 대한 국내 연구는 아직까지 이루어진 바 없다. 기후변화에 민감하게 반응하는 빙하의 균열시스템이나 용빙수의 흐름은 육상빙하의 이동 속도와 대형 빙붕의 붕괴에 큰 영향을 줄 수 있기 때문에 극지방의 환경변화 관측을 위해 매우 중요하다. 본 연구에서는 세종기지 주변 지역 빙하의 균열시스템과 용빙수 유동의 상관관계를 분석하였다. 이와 같은 자료들이 빙붕의 붕괴원인 및 용빙수의 유동시스템을 예측·분석하는데 어떻게 이용될 수 있는지 고찰하고자 하였다.

2. 연구지역 및 방법

2.1 연구지역

연구지역은 서남극 남셰틀랜드군도 킹조지섬의 바톤반도(Barton Peninsula)와 포터반도(Potter Peninsula)의 사이에 위치하는 포터 소만(Potter Cove) 부근이다(S62°14', W58°43'; 그림 1). 킹조지섬은 후기 중생대에서 초기 신생대 시기에 해양판

* Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

의 섭입에 의해 생성된 화산섬이며(Smellie *et al.*, 1984), 세종기지가 위치하는 바톤반도는 주로 하부의 화산쇄설성 퇴적암과 상부의 화산암 및 심성암으로 구성되어 있다. 또한 바톤반도 전체 지역은 광역적인 열수변질작용에 의하여 구성 암석들이 심하게 변질되었다(장순근 외, 2003b). 바톤반도는 빙식지형이 용기한 지역으로 가장 높은 곳인 백두봉(약 266 m) 하부까지 원마도가 높은 고해빈의 자갈들이 발견된다(장순근, 1997; 장순근 외, 2003b). 최근 보고된 기상자료에 의하면 1988년부터 2004년까지 연 평균 기온 -1.6°C , 연 평균 풍속 8.0 m/s 이며, 연 평균 강수량은 484 mm 이다(최태진 외, 2006). 1988년 2월 17일 세종기지가 건설된 이후로 평균

기온이 10년 동안 0.6°C 가 상승하였으며, 이로 인해 마리안 소만의 빙벽은 지난 44년 동안 평균 $1,050\text{ m}$ 후퇴하였고 $1,125,000\text{ m}^2$ 의 면적이 감소되었다(장순근 외, 2003a). 포터 소만 또한 1956년부터 1989년까지 빙하가 평균 400 m 후퇴하였으며 $360,600\text{ m}^2$ 의 면적이 감소하였다(Park *et al.*, 1998).

2.2 자료수집 및 분석

본 연구를 위한 현장조사는 2010년 12월 30일부터 2011년 1월 6일까지 8일 간 이루어졌다. 자료수집을 위하여 세종기지 주변지역을 조사하면서 용빙수의 흐름 양상 및 빙하의 균열 사진을 찍고 기록하였다. 먼저 빙벽이 잘 발달하는 해안을 따라 조사한

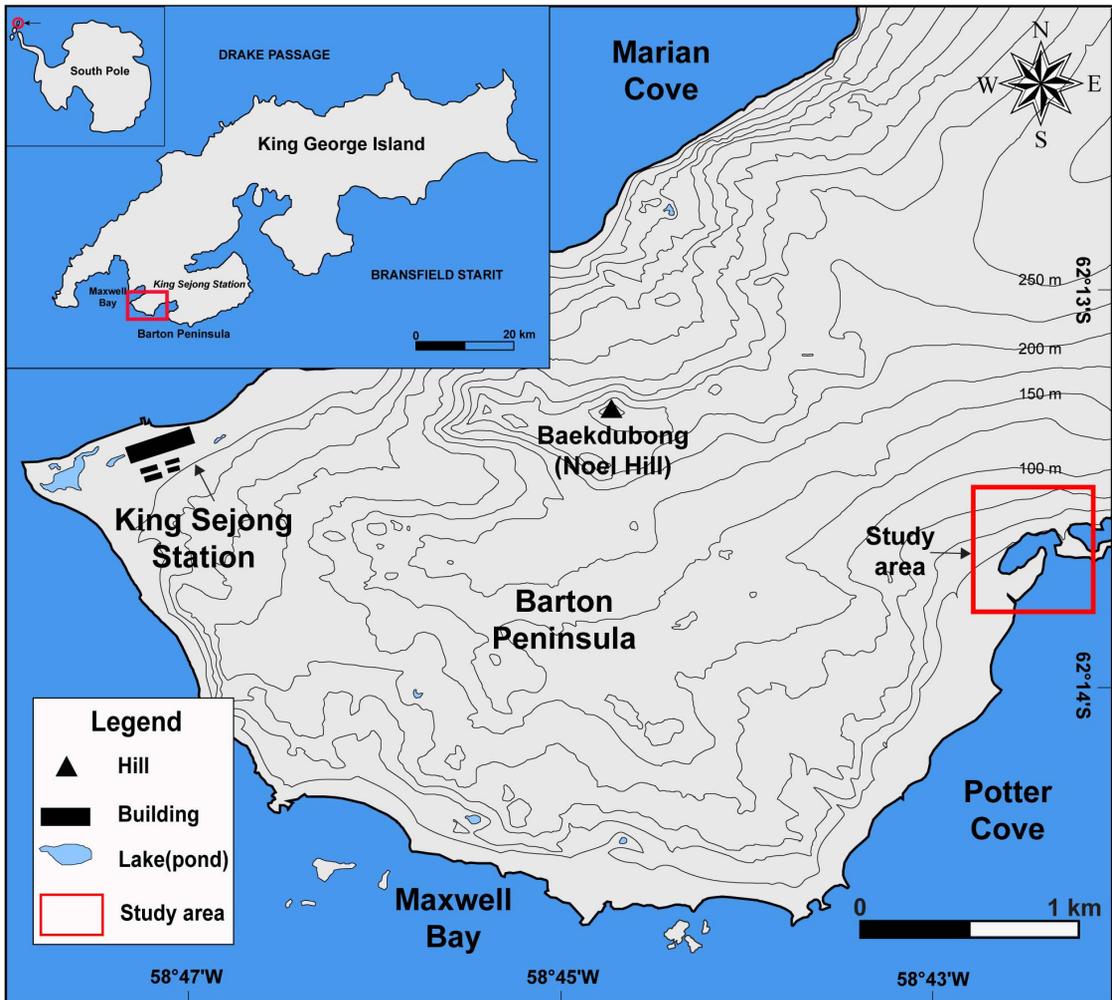


Fig. 1. Topography map of the study area.

후 균열구조가 가장 잘 나타난 빙벽을 선정하였다(그림 2a). 그 뒤 빙벽에 약 8 m × 6 m의 격자를 설정하여 총 11개의 분석면(PC1~PC11)으로 나누고 각 분석면에 발달한 균열의 길이, 방향 등과 용빙수 흐름의 특성을 조사하였다. 또한 각 분석면에 발달한 균열의 상태를 스케치하고 균열이 많이 발달한 곳을 중심으로 스캔라인(scan line)을 그었다. 스캔라인은 균열들의 발달 방향을 지시해줄 뿐만 아니라 균열사이로 이동하는 용빙수의 이동 방향을 1차원적으로 표시할 수 있다.

스캔라인에 접하는 균열들은 균열의 연결성(connectivity of fracture)에 따라 Type 1, Type 2, Type 3로 나누어 균열 유형(fracture type)을 구

분하였다(그림 2b). 여기서 균열의 연결성은 균열들 사이의 물리적 연결 정도를 의미한다. 따라서 서로 인접하는 각각의 균열들 사이의 관계를 자세히 분석하였다(Agosta *et al.*, 2010). Type 1(isolated)은 균열 양끝이 다른 균열과 만나지 않는 독립된 균열로 균열간의 연결성이 낮다. Type 2(singly connected)는 균열 양쪽 방향중 하나가 다른 균열과 만나며 연결성은 보통이다. Type 3(multiply connected)은 균열 사이의 접점이 두 지점 이상인 균열로 연결성이 가장 높다.

각 분석면의 균열 패턴 구성 비율을 이용하여 삼각다이어그램에 도시하였다. 다이어그램 내 세 구역(low, medium, high)은 각 균열 간의 연결성의 정

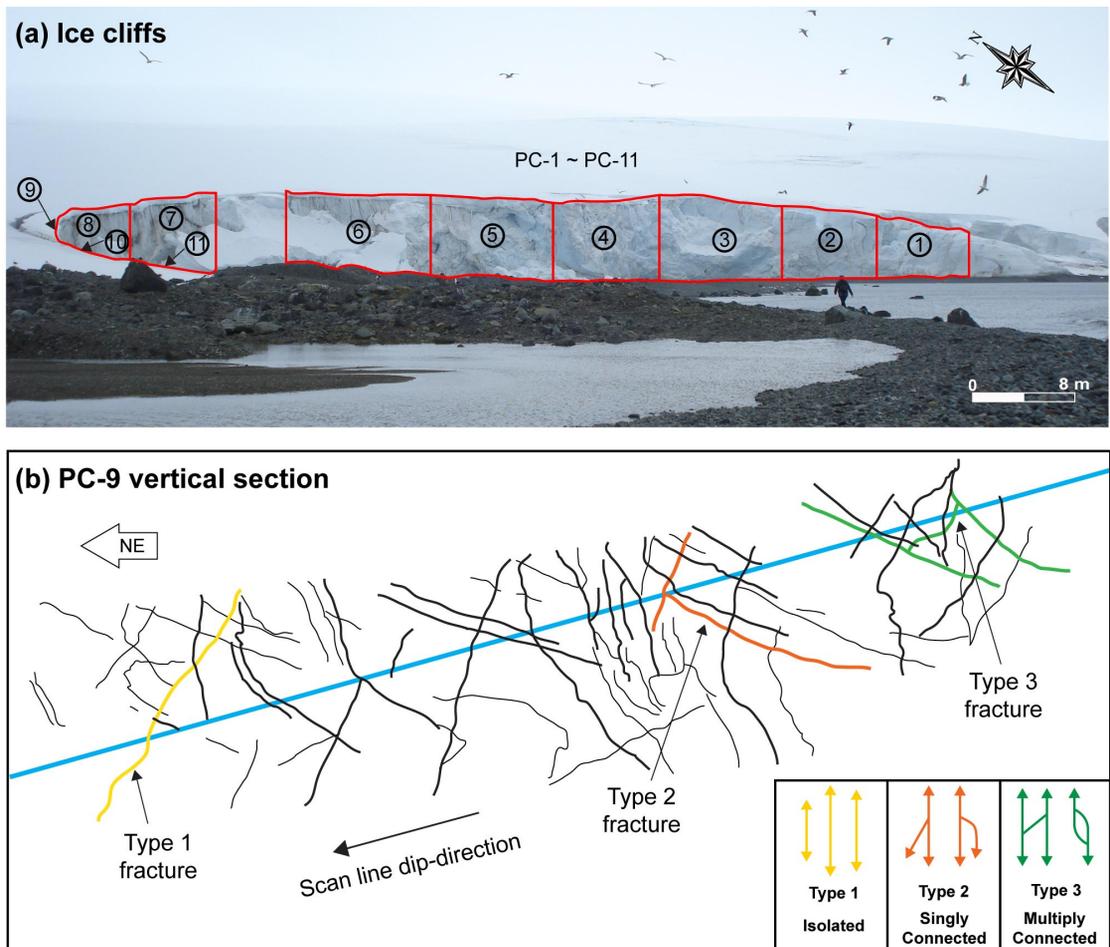


Fig. 2. (a) Photograph of the ice cliffs (PC-1~PC-11) showing the fracture systems of each scan line, (b) Fracture termination types observed in the field. Isolated fractures (Type 1), singly connected fractures (Type 2) and fractures connected with other fractures in more than one place (Type 3). (from Ortega and Marrett, 2000).

도를 의미한다. 이러한 분석 방법은 기하학적 분석을 이용하는 Ortega and Marrett (2000)의 방법이다. 이 분석 방법은 주로 구조지질학에서 탄산염암이나 사암에서 나타나는 단층의 균열 특성분석(Micarelli *et al.*, 2006; Agosta *et al.*, 2010)을 위해 사용되어 왔으며 빙하의 균열시스템에 적용한 연구사례는 아직 없다. 하지만 암석과 빙하에서 나타나는 균열 발생 기작이 서로 비슷하기 때문에 이 방법을 빙하 균열시스템에도 적용할 수 있을 것으로 판단된다 (Allègre *et al.*, 1982).

3. 결과 및 토의

3.1 용빙수 흐름 양상

그림 3은 빙하의 수문학적 구성요소들을 보여주는 빙벽의 사진(PC-9)과 이론적인 횡단면 모델이다 (modified from Röthlisberger and Lang, 1987; Fountain and Walder, 1998; Mernild *et al.*, 2006). 빙벽은 고도에 따라 축적지역(accumulation zone)과 손실지역(ablation zone)으로 구분된다(그림 3b). 축적지역은 질량이 손실되는 것보다 증가하는 지역

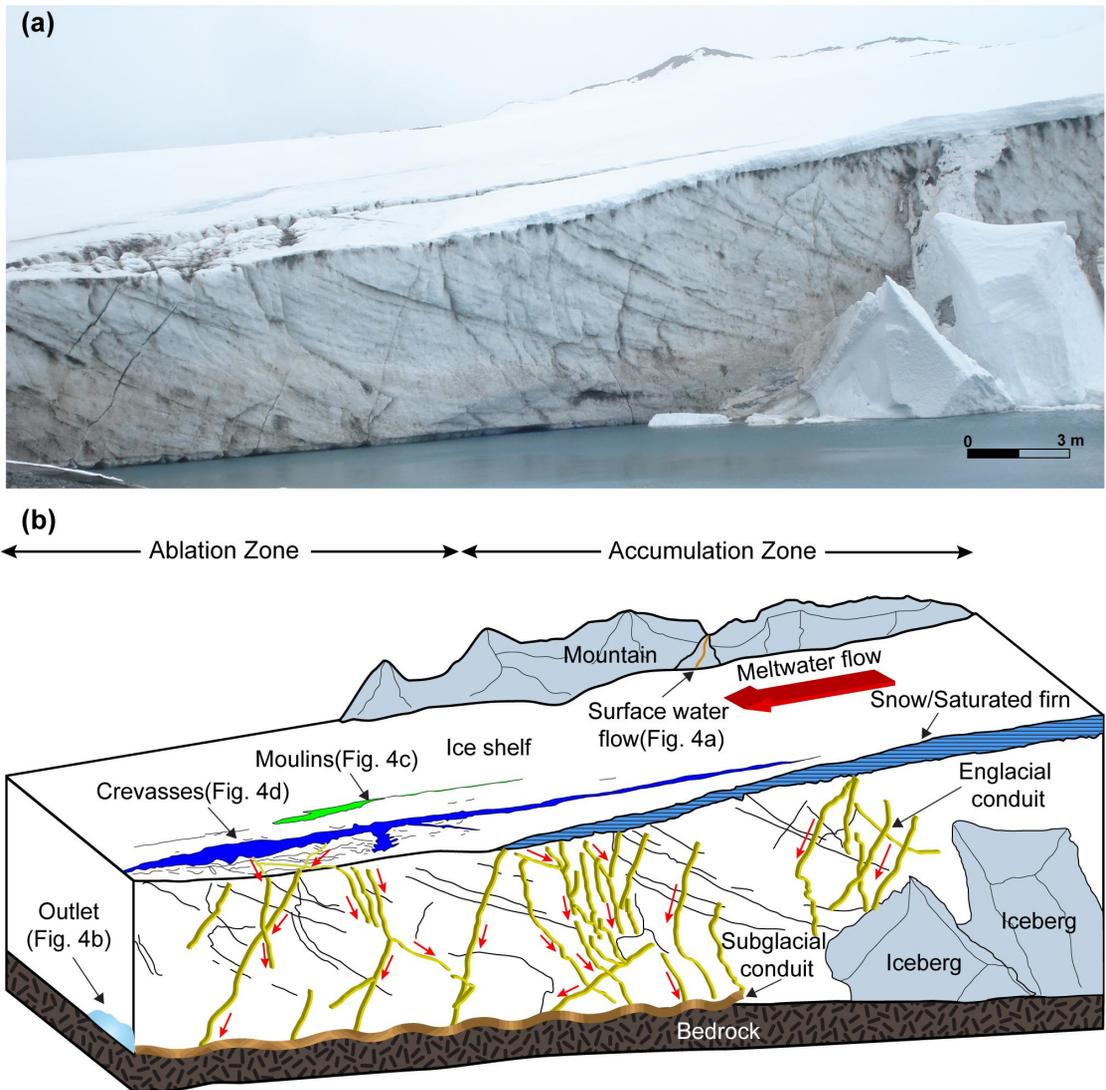


Fig. 3. Theoretical longitudinal glacier profile showing the important hydrological components (modified from Röthlisberger and Lang, 1987; Fountain and Walder, 1998; Mernild *et al.*, 2006).

을 말한다. 이 지역에는 눈, 불포화 및 포화 만년설(firn)이 있으며 만년설의 투과성(permeability)과 포화정도(degree of saturation)에 따라 용빙수의 흐름속도가 달라진다(Ambach *et al.*, 1981). 반대로 손실지역은 얻는 질량보다 손실되는 질량이 많은 지역으로 빙하표면이 노출되어있다. 또한 용빙수의 영향으로 생성되는 크레바스, 빙하구혈(moulin), 빙저수로(subglacial conduit), 배출구(outlet) 등 용빙수의 유동 구조를 관찰할 수 있다. 빙하의 표면과 내부로 이동한 용빙수는 균열을 따라 빙하의 하부로 이동하면서 수지상의 빙하 내 수로시스템(englacial conduit system)을 이룬다(Shreve, 1972; Stenborg, 1973; Röthlisberger and Lang, 1987). 이 시스템은 축적지역보다 손실지역에서 더 넓은 범위에서 빨리 발달한다. 또한 빙하의 하부로 내려온 용빙수는 빙저수로 시스템을 구성한다(Fountain and Walder,

1998).

연구지역의 용빙수 흐름 양상은 그 위치와 형태에 따라 4가지로 구분할 수 있다(그림 4). 먼저 지표수는 하천의 형태로 흐르는데 경사가 급한 지역에서는 주로 곡류하천(meandering stream), 완만한 지역에서는 망류하천(braided stream)의 형태가 우세하다. 연구지역 하천의 폭은 최소 20 cm에서 최대 수 m에 달한다(그림 4a). 크레바스는 빙하가 이동하면서 생성된 균열의 한 종류로서 폭과 깊이가 다양하다. 연구지역에서 발견한 크레바스는 폭이 15 cm, 깊이는 약 3 m 정도였으며 이곳으로 용빙수가 이동하고 있었다(그림 4b). 빙하구혈은 용빙수가 빙하표면을 녹이면서 생성된 수직적인 구멍으로서 용빙수의 수직적인 이동통로가 된다(그림 4c). 빙하내부를 이동하는 용빙수는 균열을 확장시키고 빙하의 용융을 촉진시킨다. 이러한 용빙수의 이동은 빙

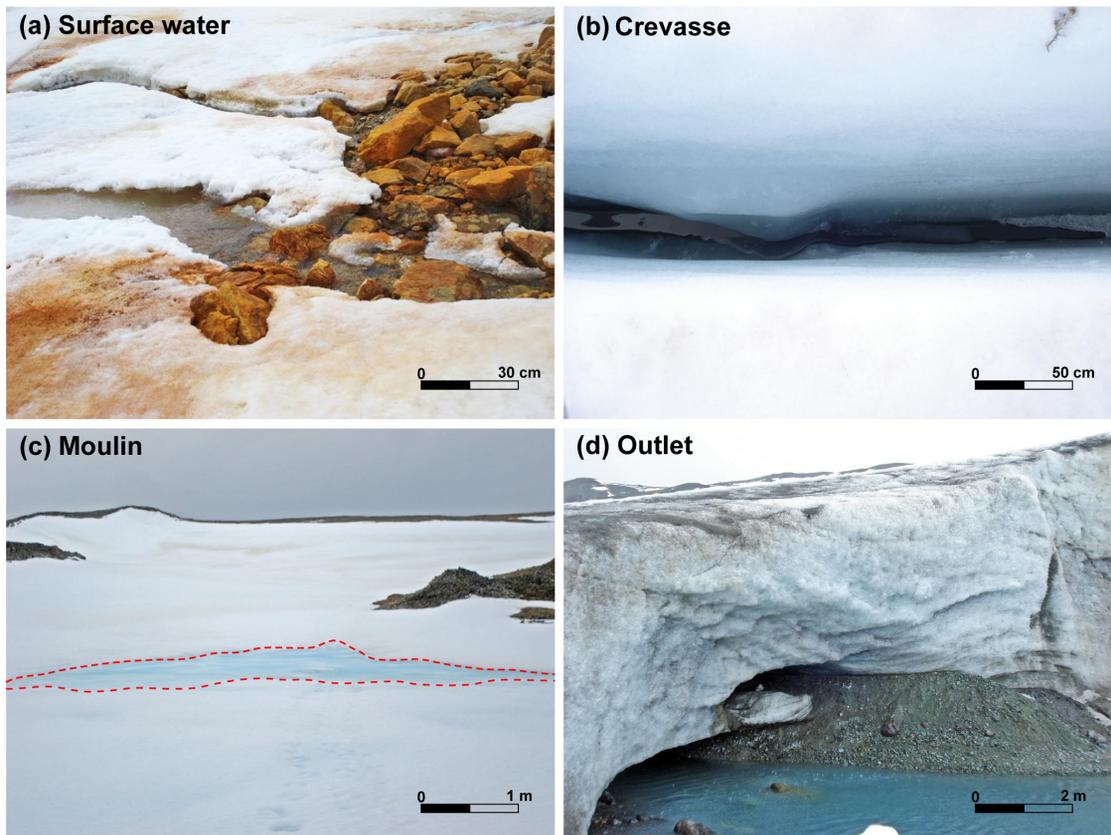


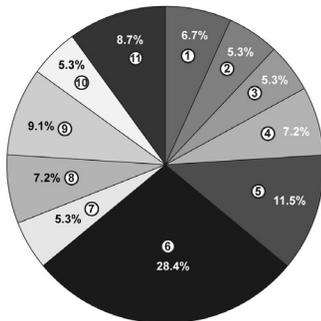
Fig. 4. Photographs showing the various meltwater pathways in the study area. (a) Surface water, (b) Crevasse and englacial conduit, (c) Moulin, (d) Outlet and subglacial conduit.

Table 1. Summary of fracture numbers and types in each scan line.

Ice cliff	Fracture type			Number of fractures
	Type 1	Type 2	Type 3	
PC-1	7	4	3	14
PC-2	9	2	-*	11
PC-3	8	3	-	11
PC-4	13	2	-	15
PC-5	17	5	2	24
PC-6	38	17	4	59
PC-7	8	2	1	11
PC-8	12	2	1	15
PC-9	12	5	2	19
PC-10	9	2	-	11
PC-11	14	3	1	18
Total	147	47	14	208
Average	13.4	4.3	1.3	19.0

* - : No data.

(a) Percentage of fractures observed in each scan line



(b) Degree of fracture connectivity from selected ice cliffs

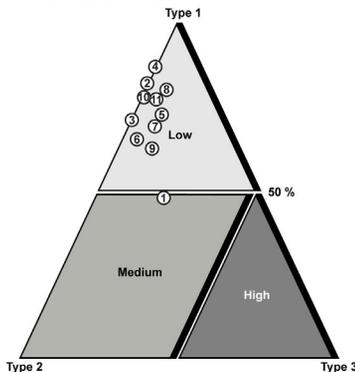


Fig. 5. (a) Statistical analysis of total fracture numbers in the Potter Cove ice cliff, (b) Triangular diagram showing the fracture connectivity computed after scan line measurements.

하 붕괴를 가속화 시키는 요인이 된다. 배출구는 용빙수에 의해 빙하말단에 형성되며 바다로 빠져나간다. 이곳의 배출구는 높이가 약 50 cm의 반원모양이며 빙하와 지표면 사이에서 용빙수가 흘러나와 포트소만으로 빠져나가고 있었다(그림 4d).

3.2 균열 상호연결성

각 분석면에서 균열의 개수를 연결성 유형에 따라 조사하였다(표 1). 분석면 전체의 균열은 208개였으며 전체 균열 유형별 개수는 Type 1이 147개, Type 2가 47개, Type 3이 14개로 Type 1이 가장 많았다. 각 분석면의 총 균열 개수 중 PC-6이 28.4%로 가장 높았고 PC-5가 11.5%, PC-9가 9.1%, PC-11이 8.7%순으로 높았다(그림 5a). 빙벽이 무너지고 있는 PC-6의 경우 총 균열 개수가 59개이며 Type 1이 38개, Type 2가 17개, Type 3이 4개로 각 전체 평균 개수보다 약 3~4배 많았다. PC-6의 바로 옆에 위치한 PC-5는 총 균열 개수가 24개, Type 1이 17개, Type 2가 5개, Type 3이 2개로 두 번째로 균열 개수가 많았다. 즉 PC-6의 균열들이 다른 균열들과 연결되고 새로운 균열들이 생성되면서 PC-5의 균열이 증가한 것으로 보인다. 또한 균열의 개수가 증가하고 균열간의 연결성이 좋아진다면 PC-5는 PC-6과 같이 붕괴할 가능성이 높을 것으로 판단된다.

각 분석면의 균열 유형별 비율을 Ortega and

Marrett (2000)의 삼각다이어그램에 도시한 결과, PC-1만 균열 간 연결성이 보통인 영역에 도시되었으며 나머지는 모두 균열 간 연결성이 낮은 영역에 해당되는 것으로 나타났다(그림 5b). 즉 현재 포터소만 빙벽의 균열들은 대부분 상호 연결성이 낮다는 것을 의미한다. 일반적으로 균열의 개수가 많고 균열간의 연결성이 높을수록 붕괴의 위험성은 높아진다고 할 수 있지만, 분석결과에 의하면 균열간의 연결성만으로 빙벽의 붕괴 위험성을 평가하기에는 부족한 것으로 보인다. 이는 이번 연구에서 빙하 단면에 드러난 균열들에 대해서만 분석이 이루어졌기 때문으로 생각된다. 따라서 빙하 내의 균열을 이용하여 빙벽이나 빙붕의 붕괴 가능성을 예측하기 위해서는 Ortega and Marrett (2000) 분석방법을 빙하 내에 존재하는 균열의 개수와 길이, 방향, 그리고 폭까지 분석하는 종합적인 패턴연구를 통해 보완할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 보다 정확한 분석을 위해서는 지하투과레이다(ground penetrating radar) 등의 장비를 이용하여 빙하 내의 균열의 분포를 3차원적으로 파악하는 작업이 선행되어야 할 것으로 보인다.

4. 결론

서남극 킹조지섬 포터소만 빙벽의 용빙수 흐름 특성과 균열 상호연결성에 대하여 조사하였다. 용빙수 흐름은 크게 지표수, 크레마스, 빙하구혈, 배출구에서 이루어지고 있었다. 또한 빙하 내로 이동한 용빙수는 복잡하게 발달한 균열들을 통하여 바다로 배출되고 있었다. 구역별로 조사한 균열들의 상호 연결성을 Ortega and Marrett (2000) 방법으로 분석한 결과 상호연결성이 대부분이 낮았다. 균열의 개수와 균열의 연결성은 용빙수의 이동을 원활히 함으로서 빙벽이나 빙붕의 붕괴를 가속화 시킬 수 있다. 즉 균열의 생성 및 발달, 분포 등의 자료를 분석하여 빙벽이나 빙붕의 붕괴 속도를 예측하는 것이 가능할 것으로 생각된다. 하지만 보다 정확한 분석 및 예측을 위해서는 기존의 균열 분석 방법에 대한 보완이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원 부설 극지연구소의

“서남극 빙붕지역 용출수량 및 수화학 조성 변화 모니터링 연구(PP12020)”에 의해 지원되었습니다. 건설적인 수정의견을 주신 편집위원장, 한국지질자원연구원의 진광민 박사님과 익명의 심사위원님께 감사드립니다.

참고문헌

- 유규철, 강천윤, 윤호일, 석동우, 오재경, 2002, 남쉐틀랜드 군도마리안 소만의 계절적인 수층 특성과 부유물질 분산. 지질학회지, 38, 573-593.
- 장순근, 1997, 남극 세종기지부근의 지면의 특징. 한국지구과학회지, 18, 443-449.
- 장순근, 윤호일, 정호성, 1998, 지구온난화와 서남극 남쉐틀랜드군도 킹조지섬의 최근 빙벽후퇴. 한국지구과학회지, 19, 101-106.
- 장순근, 이방용, 정호성, 강성호, 2003a, 지구환경변화와 남극. 한국지구과학회지, 24, 216-233.
- 장순근, 이종익, 최문영, 허순도, 2003b, 남극반도부근 킹조지섬 세종기지 주위의 지질. 지질학회지, 39, 271-286.
- 최태진, 이방용, 김성중, 박유민, 윤영준, 2006, 남극 세종기지 주변의 복사, 기온 및 풍향의 특징. 지구물리, 9, 397-408.
- Agosta, F., Alessandrini, M., Antonellini, M., Tondi, E. and Giorgioni, M., 2010, From fractures to flow: A field-based quantitative analysis an outcropping carbonate reservoir. *Tectonophysics*, 490, 197-213.
- Allègre, C.J., Le Mouél, J.L. and Provost A., 1982, Scaling rules in rock fracture and possible implications for earthquake prediction. *Nature*, 297, 47-49.
- Ambach, W., Blumthaler, M. and Kirchlechner, P., 1981, Application of the gravity flow theory to the percolation of meltwater through firn. *Journal of Glaciology*, 27, 67-75.
- Doake, C.S.M. and Vaughan, D.G., 1991, Rapid disintegration of the Wordie Ice Shelf in response to atmospheric warming. *Nature*, 350, 328-330.
- Fountain, A.G. and Walder, J.S., 1998, Water flow through temperate glaciers. *Reviews of Geophysics*, 36, 299-328.
- Mernild, S.H., Hasholt, B. and Liston G.E., 2006, Water flow through Mittivakkat Glacier, Ammassalik Island, SE Greenland. *Danish Journal of Geography*, 106, 25-43.
- Micarelli, L., Benedicto, A. and Wibberley, C.A.J., 2006, Structural evolution and permeability of normal fault zones in highly porous carbonate rocks. *Journal of Structural Geology*, 28, 1214-1227.
- Ortega, O. and Marrett, R., 2000, Prediction of macrofracture properties using microfracture information,

- Mesaverde Group sandstones, San Juan basin, New Mexico. *Journal of Structural Geology*, 22, 571-588.
- Park, B.K., Chang, S.K., Yoon, H.I. and Chung, H.S., 1998, Recent retreat of ice cliffs, King George Island, South Shetland Islands, Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*, 27, 633-635.
- Röthlisberger, H. and Lang, H., 1987, Glacial hydrology, in: Gurnell, A.M. and Clark, M.J. (Eds.): *Glacio-fluvial Sediment Transfer*. New York, Wiley, 207-284.
- Shreve, R.L., 1972, Movement of water in glaciers. *Journal of Glaciology*, 11, 205-214.
- Smellie, J.L., Pankhurst, R.J., Thomson, M.R.A. and Davies, R.E.S., 1984, The geology of the South Shetland Islands. VI: Stratigraphy, geochemistry and evolution. *Scientific Report-British Antarctic Survey*, 87, 85 p.
- Stenborg, T., 1973, Some viewpoints on the internal drainage of glaciers. *Hydrology of Glaciers*, 95, 117-129.
- Turner, J., Colwell, S.R., Marshall, G.J., Lachlan-Cope, T.A., Carleton, A.M., Jones, P.D., Lagun, V., Reid, P.A. and Iagovkina, S., 2005, Antarctic climate change during the last 50 years. *International Journal of Climatology*, 25, 279-294.
- Vaughan, D. G. and Doake, C.S.M., 1996, Recent atmospheric warming and retreat of ice shelves on the Antarctic Peninsula. *Nature*, 379, 328-331.
- Ward, C. G., 1995, Mapping ice front changes of Muller Ice Shelf, Antarctic Peninsula. *Antarctic Science*, 7(2), 197-198.

투 고 일 : 2012년 2월 28일

심 사 일 : 2012년 2월 29일

심사완료일 : 2012년 4월 4일