

GPR을 이용한 남극 킹조지섬의 빙하 연구

이주한[‡]

한국해양과학기술원 부설 극지연구소 대륙기지건설단

요 약

남극킹조지섬의 주변 빙하에서 GPR을 이용하여 얻어진 이미지를 통해 고온성빙하(polythermal glacier)에서 주로 관찰되는 만년설-얼음의 경계와 빙하 하부 지형의 특징을 고찰하였다. 탐사는 Doctors 빙하의 경계면에서 NNW-SSE 방향으로 3.6 km와 Moczydlowski 빙하 경계면에서 NE-SW 방향으로 3.4 km 구간에서 실시되었으며 탐사 속도는 각각 3.17 m/s와 4.45 m/s 로 이루어졌다. 중심주파수가 50 MHz인 안테나를 사용하여 59 ms의 간격으로 4181 ns의 시간을 기록하였다. 빙하가 주로 퇴적되는 구간에서 층의 강한 반사면은 빙하의 상류쪽이 두께가 두껍고 하류로 갈수록 얇아져 해발고도 약 350 m 지점에 사라지며 만년설선을 형성하고 있었다. 빙하의 침식구간(ablation zone)의 한랭빙하(cold ice)는 빙하 표면으로부터 약 30 m 깊이까지 발달해 있으며, 하부의 혼잡한 반사면과는 다르게 내부 층이 잘 나타나지 않는 구간이 깨끗이 영상화 되었다. 측선상에 많은 크레바스들이 발견되어 이를 통해 profile 1의 골을 중심으로 NNW와 SSE 방향의 얼음의 유입이 차이를 갖고 있음을 추정하였다. 그 결과로 SSE 방향의 유입이 적고 계속적이지 않은 것으로 보여진다. 기반암은 비교적 강한 반사면을 갖는데 일부 구간에서는 상부의 온빙하(temperate ice)에서 나타나는 복잡한 반사면으로 인해 잘 영상화 되지 않았다. GPR 탐사의 보다 정확한 해석을 위해서 빙하 코어나 눈피트 결과와 함께 해석된다면 GPR은 눈이나 빙하 연구에 가장 강력한 도구가 될 것이다.

주요어: 킹조지섬, 고온성빙하, GPR, 만년설선, 크레바스

Joohan Lee, 2013, Investigation of polythermal glacier on King George Island, Antarctica seen by ground penetrating radar. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 6, p. 639-648

ABSTRACT: Firm-ice transition zone and subglacial properties of polythermal glaciers on King George Island were investigated by results of ground-penetrating radar (GPR). The northern 3.6-km NNW-SSE profile is along the boundary with the Doctors Icefall Glacier while the southern 3.4-km NE-SW profile is along the boundary of the Moczydlowski Glacier. Average profiling speeds were 3.17 m/s and 4.45 m/s, respectively. A center frequency of 50-MHz unshielded GPR antenna with 59 ms radar pulse intervals and 4181 ns records was used. The firm line has formed at 350 m altitude. Layers appeared on the radar sections are merged smoothly into the glacier surface and thicker at higher elevation. The upper 30 m layer of cold ice shows clear layering while the underlying warmer ice is characterized by strong scattering in the ablation zone. The accumulation of the ice mass in the profile 1 gives insight to different inflow of ice mass from NNW and SSE to the gully direction. The ice mass was not enough and had a discontinuity from the SSE. The basement is clearly imaged beneath a transparent layer of cold ice while some basement is poorly imaged underlying warmer ice characterized by strong scattering. If GPR surveys are correlated with ice cores or snow pit data, GPR will be the most powerful tool for measuring snow and glacier distributions.

Key words: King George Island, polythermal glacier, GPR, firm line, crevasse

(Joohan Lee, Division of construction of new Antarctic station, Korea Polar Research Institute, Songdomiraero 26, Yeonsu-gu, Incheon 406-840, Korea)

1. 서 론

최근 지구온난화로 인한 극지방 빙하의 양이 감

소하는 추세이며 조그만 외부 환경에도 민감하게 반응하며 변화하고 있다. 극지방 빙하의 관찰을 통하여 현재 또는 미래의 기후 변화를 예측하고 대처해 나

[‡] Corresponding author: +82-32-770-8474, E-mail: joochan@kopri.re.kr

갈 수 있다. 남극에서의 빙하 구조 연구는 남극 연구의 중요한 부분을 차지한다. 빙하의 연구는 크게 빙하의 물리적 이동과 관련된 연구와 빙하 시추를 통한 과거 기후 복원을 들 수 있다. 이 두 분야에 가장 기초적이고 중요한 정보를 제공하는 것이 레이더를 이용하는 방법이다. 최근까지 여러 종류의 레이더 시스템을 활용하여 빙하의 숨겨진 비밀을 밝혀냈으며 우리가 흔히 사용하는 상업적으로 판매되는 GPR (Ground Penetrating Radar)도 빙하 연구에 크게 일조했다.

상업화된 GPR은 대부분 만년설이나 천부의 빙하 구조를 밝히는데 활용되었다. 혹한의 기후가 장비의 배터리나 탐사 운영에 큰 영향을 미치지만 최근 개발된 장비는 남북극의 혹한을 극복할 수 있는 수준에까지 이르러 남극에서 활용하기에 크게 문제가 되지 않는다. 그 활용예로 GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc.) 사 시스템의 경우, 남 북극에서 활발한 연구를 수행하는 미국 공병대의 극한지역을 연구하는 실험실 (Cold Regions Research and Engineering Laboratory)에서 135 MHz 안테나를 이용한 알래스카 지역의 만년설 연구(Arcone, 2002)와, 남극에서 400 MHz (Arcone *et al.*, 2005)와 80 MHz (Clarke *et al.*, 2000)를 활용하여 빙하 연구를 수행하였었다. Sensors and Software사의 경우 100 MHz와 200 MHz가 남극과 북극의 빙하 연구에 주로 활용되었다(Murray *et al.*, 2000; Nath and Vaughan, 2003). Malå GeoScience사의 시스템은 50과 100, 250 MHz 안테나가 빙하 하부의 구조와 눈의 퇴적 변화, 만년설-얼음 변위영역(firn-ice transition zone) 등의 연구에 활용되었다(Pälli *et al.*, 2003, Lee *et al.*, 2010).

남극 기후변화 연구에 있어서 남극 세종기지가 위치한 킹조지섬 주변은 매우 중요한 위치에 있다. 이는 킹조지섬을 포함하는 남쉐틀랜드 군도에 있는 빙하는 압력용융점(pressure melting point) 상태에 놓여 있어 환경변화에 민감한 지역중의 하나이기 때문이다(Bintanja, 1995). 킹조지섬은 남쉐틀랜드 군도에서 가장 큰 섬이다. 기온은 1956년부터 2006년까지 51년간 평균 -2.8°C 였으며 1988년부터 2005년까지 18년간 킹조지섬의 연평균기온이 0.03°C 상승하였다(Lee *et al.*, 2008). 현재 킹조지섬은 91.7%가 빙하로 덮여 있으나 1956~2000년도 사이에 약 65 km^2 의 빙하가 녹아 내린 것으로 보고되고 있어 그 변화

의 심각성을 경고하고 있다(Simões *et al.*, 2004). 킹조지섬에서의 빙하연구는 대륙에 비해 활발하지는 않지만 남극과학위원회가 지원한 '남쉐틀랜드 빙하 연구' 프로그램의 일환으로 1995/96년, 1997/98년, 1999/2000년에 킹조지섬에서 레이더 조사가 4회 실시되어 빙원 빙체의 개략적 두께(최대 395 m)와 내부 구조를 밝힌 바 있다.

빙하에서 발달하는 내부 구조인 크레바스, 만년설선, 빙하 내부의 수로 등은 빙하의유동 등과 관련된 중요한 정보를 제공한다. 특히 빙하의 해빙(解氷)기 동안에, 빙하 표면의 신선한 눈의 가장 상부 경계로서 빙하의 축적과 침식의 경계선으로 정의되는 만년설선(Firn line)의 이해는 빙하의 물질수지(Mass balance)을 설명하는데 중요한 역할을 한다. 만년설선은 그 경계가 명확하게 나뉘어지지 않고 영역(zone)의 형태로 나타나기도 한다. 이런 만년설변위 영역의 특징들은 각 지역마다의 형태 등 상태가 다르기 때문에 일부 스발바드 빙하에서 몇몇 보고가 있을 뿐 아직까지 잘 정의되고 있지 않다(Pälli *et al.*, 2003).

이 연구는 세종기지가 있는 남극킹조지섬의 바톤반도 주변에있는 빙하에서 레이더를 통해 내부구조를 이미지화 하여 온빙하에서 주로 관찰되는 만년설-얼음의 경계와 빙하 하부 지형의 특징을 이해하기 위하여 총 7 km 구간에서 획득한 레이더 결과를 고찰할 것이다(그림 1).

2. 연구지역

킹조지섬은 남극반도의 북쪽 끝 $57^{\circ} 35'$ 와 $59^{\circ} 02' \text{ W}$, $61^{\circ} 54'$ 와 $62^{\circ} 61' \text{ S}$ 사이에 위치하고 있으며 남쉐틀랜드 군도에서 가장 큰 섬으로($1,139\text{ km}^2$) 길이가 79 km, 폭이 27 km 이다(Simões *et al.*, 2004). 연구지역은 킹조지섬의 남서쪽에 위치한 위버반도와 바톤반도 상부에 덮힌 빙하로, 기반암은 초기 백악기에서 제3기 화성암으로 이루어져 있다(Lee *et al.*, 2002). 화산성 각력암과, 현무암, 현무암질 안산암, 응회암, 화강섬록암 등이 기반암을 이루는 주요 암석이다(Lee *et al.*, 2002).

이 지역은 전형적으로 해양성 기후를 보여주고 있으며 연중 대기온도는 그리 큰 변화를 보이지 않는다. 또한 여름에는 비가 잦고 습하며 구름으로 덮

여 있는 때가 많이 있다(Rakusa-Suszczewski *et al.*, 1993). 현재까지 이 지역에서 빙하학적인 연구가 많이 이루어져 있지는 않고 있다. 최근 온도 변화에 의한 빙하의 후퇴 현상에 대한 연구나 빙하의 내부 물리적 특성에 대한 연구가 수행되기 시작했다(Chung *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2008, 2010; Kim *et al.*, 2010).

군도의 대부분 섬들은 커다란 빙모(ice cap)로 덮여 있는데 약 91.7 %에 해당한다(Simões *et al.*, 1999). 연구지역의 빙하는 열적 특징으로 구분할 때 온빙하(temperate glacier)로 구분된다(Peterson, 1994). 온빙하는 빙하의 온도나 해빙(解氷)의 정도에 따라 빙하 내부의 온도가 0°C 이상을 보일 때 지칭되는 용어이다. 이는 곧 이 지역 빙하는 대부분 압력용융점 상태에 있음을 지시한다. 특히 이 지역 빙하는 상부 층(10 - 30m)에 한랭빙하(cold glacier)와 접해있는

고온성빙하(polythermal glacier)에 속한다. 빙하 표면의 온도가 항상 0°C 이하의 온도를 갖는 아한대 빙하(sub-polar glacier)와 온빙하가 함께 존재할 때 고온성빙하라 부른다.

빙하는 그 지형학적인 유역경계(catchment boundary)가 나뉘어지는데 연구지역은 크게 두 개의 빙하의 경계 부근으로 profile1은 Doctors 빙하를 profile2는 Moczydlowski빙하를 지나가는 측선으로 이루어져 있다(그림 1). 두 빙하가 인접해 있지만 그 하부 지형적 특징이나 물질수지의 차이에 의해서 서로 다른 빙하내부구조를 갖고 있음을 짐작하게 한다.

3. 자료 수집과 처리

2007년 남극의 여름이 시작되는 12월에 Malå

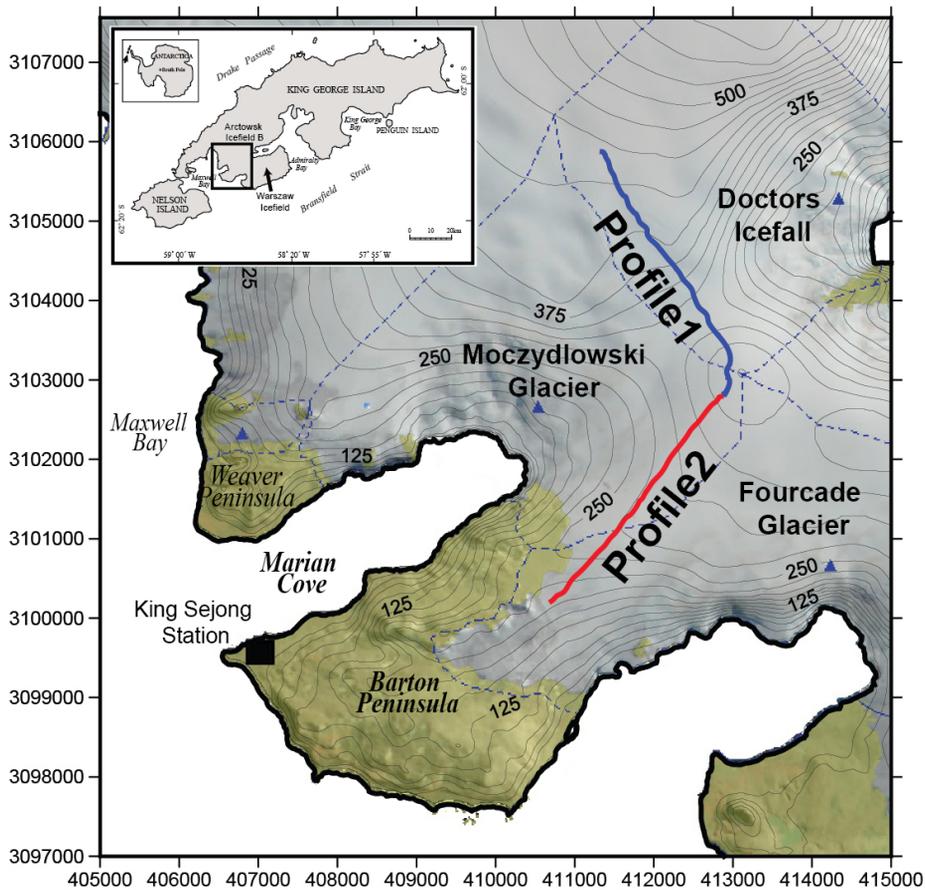


Fig. 1. Map of study area indicating location of the GPR profiles. Profiles 1 and 2 are roughly parallel to the catchment boundaries of Moczydlowski Glacier with Doctors Icefall Glacier and Fourcade Glacier, respectively. The projected coordinate system is Universal Transverse Mercator zone 58S.

GeoScience에서 제작된 RAMAC/GPR 50 MHz RTA(Rough Terrain Antenna) 안테나를 사용하여

Table 1. Acquisition parameters of 50 MHz GPR antenna.

	Profile 1	Profile 2
Antenna	Unshielded 50 MHz (RTA)	
Profile length	3.6 km	3.4 km
Direction	NNW-SSE	NE-SW
Average profiling speed	3.17 m/s	4.45 m/s
Pulse intervals	0.59 s	

총 7 km 구간에서 탐사를 실시하였다(표 1). 남극에서 일반적인 GPR안테나를 활용할 경우 견인을 위해서 썰매 등의 장비가 필요하다. 특히 빙하의 흐름 방향에 따라 빙하 내부의 재 결빙된 렌즈형 얼음이나 물 등에 의해 전기장의 분극 현상이 발생하기 때문에 주탐사 이전에 안테나의 방향에 따른 테스트를 실시하여야 한다. RTA GPR은 케이블 형태의 안테나로 설상에서 주행할 수 있는 스키두(snow mobile)에 직접 견인 이외에는 탐사 방법이 없기 때문에 사전 테스트가 생략되었다. 안테나의 총 길이는 9.25m로서 Tx와 Rx의 간격은 4m이다.

북쪽에 NNW-SSE 방향의 3.6 km(그림 1의 profile 1) 측선과 남쪽에 NE-SW 방향의 3.4 km(그림 1의 profile 2) 측선으로 탐사시 평균 이동 속도는 각각 3.17 m/s와 4.45 m/s 였으며 등간격으로 자료를 취득하기 위하여 가능한 등속으로 이동하였다. 샘플링 간격은 59 ms를 사용하였으며 이는 각각 평균 1.88 m와 2.63 m의 트레이스 간격에 해당한다. 수집된 자료의 각 트레이스의 길이는 4,181 ns이며 16회의 수직중합을 사용하여 신호대 잡음비를 향상시켰다. 자료를 취득하는 동안에 DGPS를 활용하여 보다 정확한 위치 자료를 획득하였다.

자료처리는 상업용 자료처리 프로그램인 RadExpro를 이용하여 Annan(1999)이 제안했던 자료처리 과정을 기초로 수행하였다. 처리 순서는 그림 2와 같이 진행되었다. 첫째로 포맷 변환과 각 트레이스의 위치와 고도수정을 위한 헤더 편집과 트레이스 편집, DC 성분을 제거하였다. 일반적인 경우 송수신기의 거리가 4 m 이기 때문에 공기중의 전자파 속도가 0.3 m/ns로 정의할 때 13.3 ns 후에 첫 신호가 기록되어야 하나, 남극에서 수집된 자료의 경우 제어장치나 광케이블의 외부 온도차에 의한 효과로 그보다 늦게 기록된다(장강석, 2006). 이러한 기기 지연에 의한 효과와 송수신기 거리에 효과인 51 ns의 시간차를 정보정하고 기하학적 발산을 10 ns의 자동 이득제어(AGC)을 통해 보정하였다. 이득보정 결과는 저주파수에서 고주파수에 이르기까지 신호와 잡음을 포함하는 자료이다. 자료에서 사용된 안테나의 중심주파수 대역을 제외한 나머지 주파수 성분을 제거하기 위하여 영위상을 갖는 25 ~ 80 MHz의 대역 통과필터(Band pass filter) 를 적용하였다. 레이더 단면상의 거리축에 수평으로 나타나는 링잉 현상을

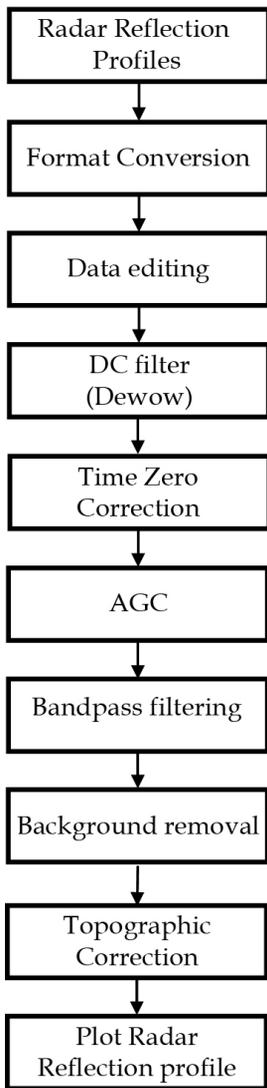


Fig. 2. Flowchart of the processing sequences for snowmobile-towed GPR data.

제거하기 위하여 각 트레이스의 평균값을 빼는 간단한 방법을 사용하여 최종 단면을 얻었다.

빙하에서의 레이더 전파 속도는 눈과 만년설, 빙하(cold ice와 temperate ice)내부에 존재하는 물과 공기의 함유량에 의해 수평/수직적으로 다양하게 변화(0.14-0.16 m/ns)한다(Lee *et al.*, 2010). 빙하에서 레이더의 전파속도는 현장에서 다양한 방법으로 측정될 수 있으나(Murray *et al.*, 2000), 이번 탐사에서는 드릴을 이용한 시추나 공심점(common midpoint) 자료, 광각반사법(Wide-angle reflection) 등의 자료를 취득하지 못해 빙하의 속도를 추정하기에 어려움이 있었다. 따라서 일반적으로 GPR 자료처리 겨우 공간파수 영역 필터링 이후 구조보정을 실시하는데 정확하지 않은 속도 구조로 인해 발생하는 자료의 왜곡을 피하기 위해 구조보정을 실시하지 않고 Kim *et al.* (2010)과 Lee *et al.* (2010)에 의해 얻어

진 빙하에서의 평균 전자기파 속도인 0.16 m/ns를 이용하여 시간-깊이를 변환만을 실시하였다. 마지막으로 지형의 효과를 적용하기 위하여 KGIS DEM 자료를 이용하여 정보정을 실시하였다.

4. 결과 및 토의

레이더 탐사 결과 고온성빙하에서 나타나는 열수적(hydrothermal) 특징들이 레이더 단면에 잘 나타난다(그림 3과 4). 빙하의 수리적 시스템과 열적 특징은 빙하의 유동 속도와 물질수지 계산, 해수면 상승 등에 영향을 끼치기 때문에 이것의 이해는 매우 중요하다. 과거 많은 연구들은 레이더를 이용하여 빙하의 이런 특징들을 밝혀내기 위한 시도를 하였다. 온빙하에서 빙하 내부의 수로(channel)는 그 모양이 녹으며 빨리 변형되는 현상을 보이므로 매우

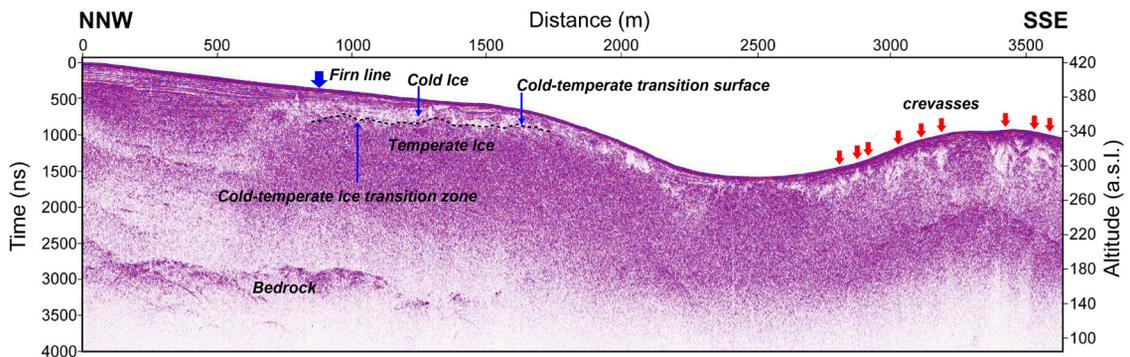


Fig. 3. Elevation corrected 50 MHz pre-migrated GPR section of Profile 1. The irregular glacier bed, chaotic structures in temperate ice, near-surface sub-horizontal layers, and surface crevasses (arrows) are imaged.

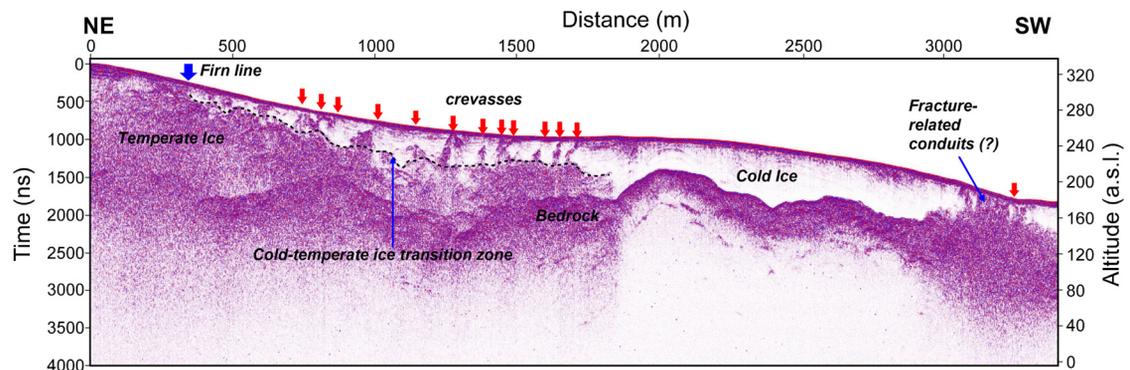


Fig. 4. Elevation corrected 50 MHz pre-migrated GPR section of Profile 2. Down-glacier of the firn-line is characterized with several crevasses in cold ice.

높은 동적인 특징을 갖는다는 것이 밝혀졌다(Stuart *et al.*, 2003). Irvine-Fynn *et al.* (2006)은 얼음 내부에 수리학적, 열적 특성이 계절적인 변화를 가져오는 것을 확인했다. 이런 연구가 가능한 것은 온빙하나 고온성빙하에서는 물의 존재로 인해 전파되는 전자기파에 강한 영향을 끼쳐 실제 빙하 내부의 구조적 특징 외에도 온/한랭 빙하의 경계와 같이 내부열의 차이에 의해 나타나는 단면을 영상화 할 수 있는 것이다. 그림 4는 그 대표적인 예로, 고온성빙하의 가장 큰 특징인 온빙하 상부에 한랭빙하가 존재하는 현상을 잘 보여주고 있다. 레이더 단면상에서 빙하 표면에서 약 30 m 하부까지 반사면이 나타나지 않는 구간이 존재한다. 이 구간이 한랭빙하로 해석된다. 내부 반사 층이 잘 나타나지 않는 원인은 층 내부에 수분의 함유량이 적어 층간 대비가 잘 나타나지 않는 것으로 해석된다. 일반적으로 레이더 단면에서 반사면이 강하게 나타나는 것은 공기가 많은 눈 층과, 녹은 물이 공기층에 채워져서 상대적으로 공기층이 적은 눈 층 사이의 대비에 의한 영향이 높기 때문이다. 빙하에서 물은 이런 종류의 투수 가능한 층을 통해서 이동하는 것으로 알려져 있는데(Oerter and Moser, 1982), 일부는 층간에 남아 얼게 되어 얼음 층을 이루기도 한다. 측점 400 - 1800 m 구간에서 한랭빙하 하부에 여러 무질서한 반사면이 나타나는데 이를 통해 온/한랭빙하와의 경계면을 쉽게 결정 지을 수 있다. 이 구간의 수많은 회절 현상은 내부

공극에 물이 침투해서 생긴 결과로 렌즈형태의 얼음이나 지하수통로 등에 의해서 발생되는 것이다. 이런 현상들은 온빙하에서 흔히 나타나는 현상으로 인근의 Johnson 빙하에서도 보고되고 있다(Navarro *et al.*, 2005).

그림 5는 그림 3의 측점 0 - 1400 m 구간을 확대한 그림이다. 레이더 단면에서 수평으로 이어진 만년설 층들이 잘 관찰된다. 계절적 만년설은 상부의 눈의 하중에 의해서 층리를 이룬다. 이는 수직으로 수센티미터에서 수미터의 두께로 압축되어 생성되며 층의 총 두께는 대개 고도와 밀접한 관계가 있다(Sharp *et al.*, 1993). 그림에서 만년설 층리는 높은 고도로 갈수록 두께가 두껍고 빙하의 하류로 갈수록 얇아지고 있다. 또한 빙하 표면에서의 각 층의 두께는 깊이 있는 층보다 두껍게 발달해 있다. 이는 만년설의 전형적인 특징으로, 상부에 쌓인 눈들이 매년 하류로 흘러가다 해빙이 시작되는 여름에, 특정 고도(주로 만년설선이 형성되는 고도)까지 눈이 녹게 되는데 다시 그 위에 눈이 쌓이고 동일한 과정을 반복하게 되는 동안 만년설선 상부쪽으로 더 두꺼운 층을 형성한다. 대부분의 층의 끝은 빙하 표면으로 노출되거나 상부에 쌓인 층의 무게에 의해 빙하 상류쪽으로 약간씩 기울어지게 된다.

빙하 상부의 눈의 퇴적 현상을 이해하면 빙하의 흐름에 대한 정보를 얻을 수 있다. 실제로 Vaughan *et al.* (1999)은 빙원에서 만년설과 천부 얼음에서 얻

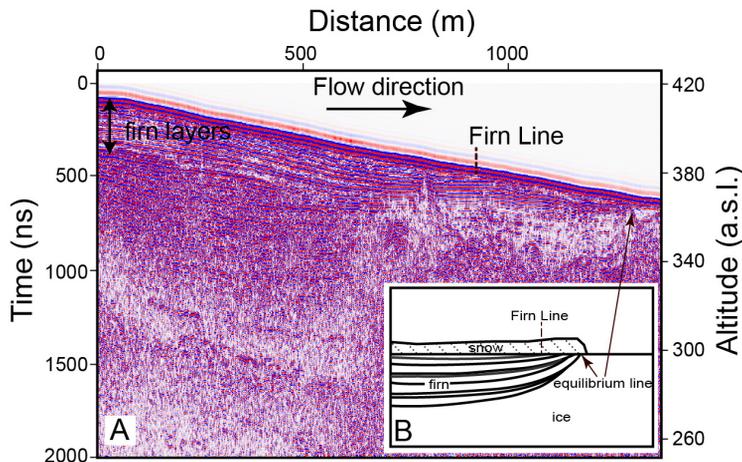


Fig. 5. (a) Enlarged image of firn layers in Figure 3 and (b) simplified cross-section of a glacier near equilibrium line location. The firn layers are subparallel and merged into glacier surface near the firn line.

어진 레이더 자료의 층서 해석을 통하여 빙하의 유동 정도를 계산해 내는데 성공하였다. Arcone *et al.* (2005)은 빙하 표면의 지형학적 특징과 얼음, 바람의 속도, 일반적인 퇴적 비율을 이용한 모델을 이용하여 공간적 층서에 영향을 미친 유동현상을 밝혀내었다. 연구 지역에서도 그림 3에서 나타난 골(2500 m 구간)을 경계로 NNW와 SSE 방향으로 공급되는 얼음의 양이 다를 수 있다. 탐사 결과에서 두 가지 증거를 찾을 수 있다. 하나는 그림 3의 NNW 방향 고도 350 m 지점에서는 눈층들이 빙하 표면과 만나며 사라지는 경향을 볼 수 있는데 이 고도를 만년설 선으로 해석할 수 있다. 반면, SSW 방향에서 만년설 선으로 정의할 수 있는 층들이 발달하지 않고 있다. 즉, 2500 m 구간으로 모여드는 얼음의 공급원이 다르다는 의미이다. 이 두 부분의 얼음의 공급원은 각각 Arctowski 빙원과 Warsaw 빙원(그림 1)에서 기인하는 것으로 해석할 수 있다. 이런 해석은 빙하 하부의 지형적인 특징과 크레바스의 분포에 의해서도 알 수 있다. Profile 1의 SSE부근과 Profile 2 하부에는 크레바스가 많이 존재한다. 크레바스의 존재는 빙하 표면의 경사 또는 흐르는 속도와 밀접한 관계가 있다(Hooke, 2005). 이를 근거로 보면 profile1의 SSE 부분으로 흘러 드는 얼음은 양과 속도가 일정하지 않으나 NNW 방향에서는 지속적인 얼음의 공급이 이루어지고 있는 것으로 보여진다.

빙하에서 레이더 탐사를 적용하기 좋은 분야 중 하나가 빙하 표면이나 내부에 숨겨진 크레바스를 찾

아내는 것이다. 레이더 단면에 나타나는 크레바스는 회절된 포물선형태의 반사파들이 여러 개 겹쳐져서 나타나는 것이 특징적이다. 온빙하에서 나타나는 포물선 이미지는 해석하기에 매우 어렵다. 온빙하나 고온성빙하의 내부에 존재하는 물이나 지하수통로, 비어있는 공동, 렌즈형태의 재냉각된 물 등과 함께 혼재돼서 레이더 단면상에 포물선형 회절이 나타날 때 크레바스에 의한 회절현상과 쉽게 구분할 수 없기 때문이다. 일반적으로 GPR자료에서는 크레바스 벽면에서 다중의 포물선형 회절이 나타나는데 때로는 한 개의 포물선형 회절이 나타난다. 이는 크레바스를 통과한 레이더의 경로가 매우 불규칙하고 직접 수신안테나로 가지 않고 여러 경로를 거치기 때문에 다중의 포물선형 회절이 나타나지 않는다(Arcone, 2002). 그러나 다행스럽게도 이번 탐사에서 얻어진 레이더 단면에서는 일부 크레바스에서 반사된 신호들은 여러개의 포물선들이 겹쳐서 나타나 쉽게 구분이 가능하다. 가장 좋은 예로 그림 6의 측정 1300 m 부근에 나타나는 크레바스인데 40 m 이상의 깊이까지 포물선들이 잘 관찰된다. 이 포물선은 그 정점부가 서로 자연스럽게 연결되어있지 않고 약간의 간격을 보이고 있는데(그림 6의 W) 특징적인 것은 끊어진 단면이 일직선상에 나타나지 않고 기울어지거나 휘어져 나타나는 것이다. 이는 하나의 이상대에 의한 다중 반사면이 아닌 크레바스 벽에서 회절되어 나타나는 것으로 해석할 수 있다(Taurisano *et al.*, 2006). 빙하 내부에서는 다양한 형태의 크레바스가

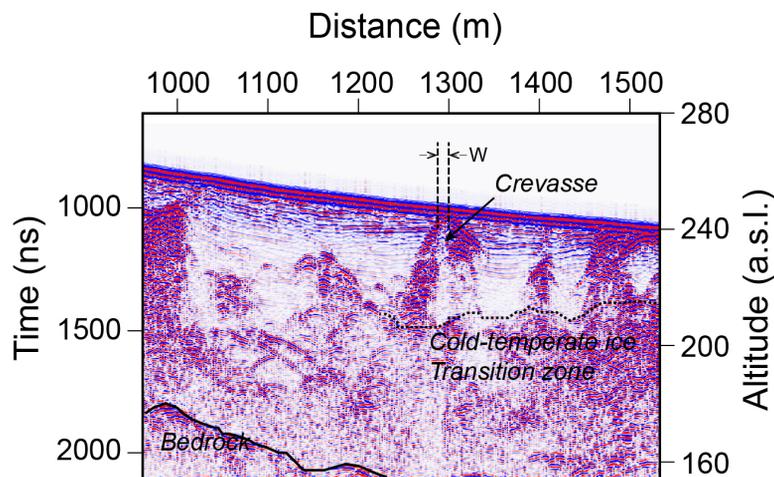


Fig. 6. Enlarged image of crevasses in figure 4. 'W' is the distance between the edges of stacked hyperbolae.

존재한다. 이번 연구에서는 사용된 주파수의 파장이 비교적 커 분해능이 떨어지기 때문에 그 형태를 자세히 구분할 수가 없다. 하지만 Clarke and Bentley (1994)는 포물선 형태와 배열 등에 따르는 크레바스 단면의 상태나 크레바스 위에 덮인 눈(Snow bridge)의 형태까지 상세하게 분류해 놓아 레이더 탐사를 통한 크레바스 형태 등의 연구가 가능할 것이다. Dalaney and Arcone (2004)은 GPR을 이용한 크레바스 연구에서 새로이 형성된 깨진 틈(일반적으로 폭이 50 cm 이하의 수직벽으로 이루어짐)과 0.5-5 m 크기로 수직벽과 단순한 형태가 비교적 잘 남아있는 크레바스, 5 m 이상의 크기로 복잡한 형태를 갖는 크레바스를 구분하였다.

사용된 안테나의 주파수의 수직 분해능이 약 86 cm ($\lambda/4$)인 것을 감안하면 그림 6에서 선명하게 나타나는 크레바스들은 그 규모가 매우 큰 것으로 판단된다. 앞에 언급된 크레바스의 경우 빙하 표면에서는 사람의 눈에 띄지 않게 눈으로 덮여 있고 그 폭이 하부에서 10 m 이상의 규모를 보인다. 탐사가 수행된 측선은 남극세종기지에서 빙원 정상으로 이동하는 이동 통로이어서 향후 기지대원들의 안전에 주의가 요구될 것으로 보인다. 또 하나 중요한 점은 크레바스 연구가 단순히 숨겨진 크레바스를 찾고 규모를 영상화함으로 위험을 피해가기 위한 조사만이 아니라 크레바스를 통해서 빙하의 흐름의 정지 기간을 추정하거나 흐름의 역학적 특징 등의 빙하의 유동과 관련된 연구 주제로 확장할 수 있는 가능성을 레이더 탐사를 통해서 실현할 수 있을 것으로 기대한다.

그림 3과 4에서 또 하나의 특징적인 것은 기반암을 영상화 하고 있다는 것이다. 레이더 단면상에서 빙하와 기반암의 경계에서 전자기파의 반사에 가장 큰 영향을 끼치는 유전율의 대비가 가장 커 두 profile 모두에서 기반암의 형태가 비교적 잘 나타나고 있다. 두께는 profile 1, 2에서 각각 130 - 220 m, 30 - 140 m 로 나타난다.

하지만 그림 5의 1500 - 3000 m 구간에서는 기반암이 깨끗하게 구분되지 않아 정확한 두께를 측정하기에 어려움이 있다. 만년설선의 하류에서는 일반적으로 나타나는 특징이기도 하는데 수많은 포물선형 회절신호에 기인한 것으로 본다. 층내에서 나타나는 산란된 잡음은 물을 많이 포함하고 있는 상온의 얼음에 의한 것이다(Irvine-Fynn *et al.*, 2006; Dowdeswell

and Evans, 2004). 깊은 심도까지 투과 가능한 GPR의 경우 빙하의 두께나 하부 지형연구에 활용이 가능하고 반사강도를 이용하여 기반암의 특성을 분류하기도 하였다(Raymond *et al.*, 2006). 하지만 온빙하에 적용할 경우 내부 물의 존재로 인해서 깊은 심도까지 레이더가 투과되지 않아 이번 연구의 일부 구간에서 확인한 것처럼 상용화 된 GPR을 200 m 이상 두꺼운 고온성빙하나 온빙하의 기반암에 대한 연구에 활용하기에 어려움이 있을 것이다.

4. 결론

상업화된 50 MHz GPR을 이용하여 킹조지섬 일부 빙하의 열수(hydrothermal) 상태의 변화와 관련된 특징들을 밝혀내었다. 연구지역 7 km 대부분의 구간에서 빙하 표면으로부터 약 30 m 깊이까지 한랭빙하가 존재하고 있어 이 지역의 빙하가 고온성빙하임을 확인하였다. 온/한랭빙하의 경계는 레이더 반사를 잘 일으키는 얼음 내부의 물의 존재와 매우 잘 일치한다. 이는 기후 변화 등으로 해빙되는 물의 양의 변화가 빙하 내부의 변화를 야기할 수 있다는 점을 시사한다.

레이더 단면상에서 보여진 눈의 층리 구조는 만년설과 얼음의 경계구간(firn-ice transition zone)에서 나타나는 전형적인 모습으로 빙하 표면으로부터 40 m 이상의 층이 잘 발달해 있으며 빙하 상부로 갈수록 두꺼워지는 특징을 보이고 한랭빙하 내부에서는 레이더 반사면을 확인하기 어려웠다. 크레바스의 수직 벽면에서 반사되는 여러겹의 포물선형 회절이 크레바스와 얼음 내의 수로나 비어있는 공동, 렌즈형태의 재 냉각된 물 등의 다른 구조와 구분이 가능했다. 또한 눈층과 크레바스의 존재를 통해서 한 측선(profile 1) 상에서 서로 다른 얼음의 유입이 있음을 확인할 수 있었다. 상업화된 레이더를 이용한 고온성빙하의 기반암 연구에서는 한계를 보여 주었다. 특히 여름에 발생하는 빙하 내부의 물은 레이더 감쇠를 가중시켜 온빙하가 많은 지역에서는 기반암에서의 반사면이 미약하거나 사라져 나타나는 현상을 볼 수 있다.

GPR을 이용하여 눈의 층서와 크레바스의 존재, 기반암의 형태 등에 이르기까지 많은 정보를 얻을 수 있었으나 이번 연구에서는 빙하 코어나 눈피트

연구자료가 없어 레이더 결과를 완벽하게 이해하는데 어려움이 있었다. GPR 탐사가 코어나 눈피트 결과와 합쳐져서 해석된다면 GPR은 눈이나 빙하 연구에 가장 강력한 도구가 될 것이다

사 사

이 연구는 2013년도 극지연구소 기본사업 “장보고 과학기지 주변 빙권과 지각권의 상호작용 규명”에 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 PE13050, KOPRI). 자료를 취득하기 위해 혹한의 기후에도 스키두를 지원해주신 세종기지 20차 월동대장 이상훈 박사님께 감사드리며 이 논문에 부족한 점을 지적해주신 심사위원들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Annan, A.P. Practical Processing of GPR Data, Proceedings of the Second Government Workshop on Ground Penetrating Radar.
- Arcone, S.A., 2002, Airborne-radar stratigraphy and electric structures of temperate firn: Bagley Icefield, Alaska, U.S.A., *Journal of Glaciology*, 48, 317-334.
- Arcone, S.A., Spikes, and V.B., Hailton, G.S., 2005, Stratigraphic variation within polar firn caused by differential accumulation and ice flow: interpretation of a 400 MHz short-pulse profile from West Antarctica, *Journal of Glaciology*, 51(174), 407-422.
- Bintanja, R. 1995. Local surface energy balance of the Ecology Glacier, King George Island, Antarctica: measurements and modeling. *Antarct. Sci.*, 7, 315-325
- Chung, H., Lee, B.Y., Chang, S-K., Kim, J.H., Kim, Y., 2004, Ice Cliff retreat and sea-ice formation observed around King Sejong Station in King George Island, West Antarctica (in Korean). *Ocean and Polar Research* 26: 1-10.
- Clarke, T.S., Liu, C., Lord, N.E., and Bentley, C.R., 2000, Evidence for a recently abandoned shear margin adjacent to ice stream B2, Antarctica, from ice-penetrating radar measurements, *Journal of Geophysical Research*, 1005(B6), 13409-13422.
- Delaney, A.J. and S.A. Arcone, 2004, Crevasse detection with GPR across the Ross Ice Shelf, Antarctica, 10th Intern. Confer. on Ground Penetrating Radar, 21-21 June 2004, Delft, The Netherlands.
- Dowdeswell, J.A., and Evans, S., 2004, Investigations of the form and flow of ice sheets using radio echo-sounding: *Rep. Prog. Phys.*, 67, 1,821-1,861.
- Hooke, R. L., 2005, *Principles of Glacier Mechanics*. Second edition, Cambridge university press, 429p
- Irvine-Fynn, T.D.L., Moorman, B.J., Williams, J.L.M., and Walter, F.S.A., 2006, Seasonal changes in ground penetrating radar signature observed at a polythermal glacier, Bylot Island, Canada: *Earth Surf. Process. Landforms*, 31, 892-909.
- Kim, K. Y., Lee, J., Hong, M.H., Hong, J.K., and Shon, H., 2010. Helicopter-borne and Ground-towed Radar Surveys of the Fourcade Glacier on King George Island, Antarctica. *Polar Research* 29 298-310. Doi:10.1111/j.1751-8369.2010.00174.x.
- Lee, J, Y.K. Jin, J.K. Hong, H.J. Yoo and H. Shon, 2008, Simultion of a tidewater glacier evolution in Marian Cove, King George Island. Antarctica, *Geosciences Journal*. 13. 59-67.
- Lee, J, K. Y. Kim, J. K. Hong and Y. K. Jin, 2010. An englacial image and water pathways of the Fourcade glacier on King George Island, Antarctic Peninsula, inferred from ground-penetrating radar. *Science China Earth Sciences*. Vol. 53 No. 6:892-900. Doi:10.1007/s11430-010-0078-z.
- Lee, J.I., Hur, S.D., Yoo, C.M., Yeo, J.P., Kim, H., Hwang, J., Choe, M.Y., Nam, S.H., K, Y., Park, P.K., Zheng, X. and López-Martínez, J., 2002. Geological map of Barton and Weaver Peninsula, King George Island, Antarctica. Korea Ocean Research and Development Institute, Korea.
- Murray, T., Stuart, G.W., Fry, M., Gamble, N.H. and Crabtree, M.D., 2000. Englacial water distribution in a temperate glacier from surface and borehole radar velocity analysis. *J. Glaciol.* 46, 389-398
- Navarro, F.J., Macheret, Y.Y. and Benjumea, B., 2005. Application of radar and seismic methods for the investigation of temperate glaciers, *Journal of Applied Geophysics*, 57, 193-211.
- Oerter, H. and Moser, H., 1982. Water storage and drainage within the firn of a temperate glacier (Vernagtferner, Oetztal Alps, Austria). *International Association of Hydrological Sciences Publication* 138 (Symposium at Exeter 1982- Hydrological Aspects of Alpine and High Mountain Areas), 71-81.
- Pälli, Anja; Moore, John C.; Rolstad, Cecilie, 2003, Firn-ice transition-zone features of four polythermal glaciers in Svalbard seen by ground-penetrating radar *Annals of Glaciology*, 37, 1. 298-304(7).
- Peterson, W.S.B. 1994. *The physics of glaciers*. Third edition. Oxford, etc., Elsevier.
- Rakusa-Suszczewski, S., Mietus, M. and Piasecki, J., 1993, Weather and climate. In: Rakus-Suszczewski S

- (Ed.). The maritime Antarctic coastal ecosystem of Adiralty Bay. Warsaw : Polish Academy of Sciences, P. 19-25.
- Raymond, C.F., G. A. Catania, N. Nereson and C.J. Van Der Veen, 2006, Bed radar reflectivity across the north margin of Whillans Ice Stream, West Antarctica, and implications for margin processes. *J. Glaciol.*, 52(176) 3-10.
- Sharp, M.J., Richards, K., Willis, I., Arnold, N., Nienow, P., Lawson, W., and Tison, J.L., 1993, Geometry, bed topography and drainage system structure of the Haut Glacier d'Arolla, Switzerland: *Earth Surf. Proc. Land.* 18, 557-571.
- Simões, J.C., Bremer, U.F., Aquino, F.E. and Ferron, F.A., 1999, Morphology and variations of glacier drainage basins in the King George Island icefield, Antarctica. *AnnGlaciol.* 29: 220-204.
- Simões, J.C., Goßmann, H., Delmas, R.J., and Moskalevsky, M.Y., 2004, Glaciological research in King George Island : Missions and developments in the 1990s. *Pesq Antart Bras*, 4, 1-4.
- Stuart, G. and Murray, T., Gamble, N., Hayes, K. and Hodson, A., 2003. Characterization of englacial channels by ground-penetrating radar: An example from austre Brøggerbreen, Svalvard. *J. Geophys. Res.*, 108(B11), 2525, doi:10.1029/2003JB002435.
- Taurisano, A., Tronstad., S. Brandt, O., and Kohler J., 2006, On the use of ground penetrating radar for detecting and reducing crevasse-hazard in Dronning Maud Land, Antarctica, *cold regions science and technology*, 45, 166-177.
- Vaughan, D.G., Corr, H.F.J., Doake, C.S.M., and Waddington, E.D., 1999, Distortion of isochronous layers in ice revealed by ground-penetrating radar: *Nature*, 398, 323-326.

투 고 일 : 2013년 12월 6일

심 사 일 : 2013년 12월 10일

심사완료일 : 2013년 12월 31일