

<Technical Report> 2014-2015 하계 남극 북빅토리아랜드 스틱스 빙하(Styx glacier) 천부 시추

한영철¹ · 전성준¹ · Morihiko Miyahara² · 이훈규³ · 안진호³ · 정지웅¹ · 허순도¹ · 홍상범^{1,‡}

¹한국해양과학기술원 부설 극지연구소 기후변화연구부

²ANORI Inc., Japan

³서울대학교 지구환경과학부

요 약

빙하로부터 획득한 얼음코어는 과거 기후와 환경을 복원하고 그 변화를 추적하는 데 유용하여 극지 여러 지역에서 시추되어 연구되고 있다. 본 연구에서는 대한민국 제 2 남극 기지인 남극장보고과학기지 설립 후 처음으로 극지연구소가 진행한 천부빙하시추 프로그램의 경과를 보고한다. 시추는 2014-2015년 남극 하계 기간에 기지로부터 북쪽으로 85 km 떨어진 스틱스 빙하(Styx glacier)에서 진행하였고, 20일 동안 총 300회의 시추를 수행하여 누적 길이 210.5 m의 얼음코어를 획득하였다. 깊이에 따른 밀도변화와 시추지 연평균기온으로부터 경험적으로 추정된 Herron-Langway 편밀도 모델(firm densification model) 결과 얼음코어의 최하단은 약 1.36 ka의 연령을 가진다. 시추 중 104 m 깊이에서 시추기 드릴이 얼음 사이에 끼어 운동력을 상실하였으나 에탄올을 활용하여 드릴을 회수한 후 시추를 속행하였다. 총 세 깊이(97.01 m, 99.18 m, 165.37 m)에서 화산재 층을 관찰하였다. 편밀도 모델을 통하여 각 층의 연령을 추정된 결과 0.56, 0.57, 1.04 ka였으나 정확한 화산 분출시기를 알기 위하여 추가로 심도 있는 연대기학적 연구가 필요하다.

주요어: 얼음코어, 남극장보고과학기지, 화산재, 시추기

Yeongcheol Han, Seong Joon Jun, Morihiko Miyahara, Hun-Gyu Lee, Jinho Ahn, Ji Woong Chung, Soon Do Hur and Sang Bum Hong, 2015, Shallow ice-core drilling on Styx glacier, northern Victoria Land, Antarctica in the 2014-2015 summer. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 3, p. 343-355

ABSTRACT: Ice cores are drilled from polar glaciers because they are useful for studying past climate and environment that change through time. We here report on the progress of the first shallow ice-core drilling program of Korea Polar Research Institute since the establishment of the Antarctic Jang Bogo station, the second Antarctic research station of Korea. The drilling was performed on the Styx glacier about 85 km north of the Jang Bogo station in the 2014-2015 summer season, and a 210.5 m long ice core was taken in 300 runs, in 20 days. The age at the bottom of the ice core was estimated to be 1.36 ka based on the depth-density profile and on the temperature at 15 m depth. The drill was stuck at a depth of 104 m but was recovered by using ethanol. The tephra ash layers were observed at depths of 97.01, 99.18 and 165.37 m, whose ages were tentatively estimated to be 0.56, 0.57 and 1.04 ka, respectively. Further study should include in-depth work for the tephra layer ages.

Key words: ice core, Antarctic Jang Bogo Station, tephra, drill

(Yeongcheol Han, Seong Joon Jun, Ji Woong Chung, Soon Do Hur and Sang Bum Hong, Division of Climate Change, Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, Republic of Korea; Morihiko Miyahara, ANORI Inc., Hyogo 662-0957, Japan; Hun-Gyu Lee and Jinho Ahn, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-747, Republic of Korea)

[‡] Corresponding author: +82-32-760-5464, E-mail: hong909@kopri.re.kr

1. 서 론

빙하는 지구의 기후·대기환경 변화와 함께 변동하는 기온, 여러 에어로졸과 대기 가스 농도 기록을 간직하고 있어 지구 대기환경 변화의 타임캡슐로 알려져 있다(Boutron, 1995; Petit *et al.*, 1999; Jouzel, 2013). 빙하는 고위도 양극 지역과 중·저위도 고산지대에 분포하고 있다. 남극의 대륙 빙하는 지리적으로 고립된 지역에 위치하고 있기 때문에 남반구 혹은 전 지구적인 기후와 환경변화 기록을 간직하고 있는 반면에(Legrand and Mayewski, 1997; Petit *et al.*, 1999; Soyol-Erdene *et al.*, 2011), 인류 활동이 상대적으로 활발한 북반구의 북극 그린란드 빙하(Legrand and Mayewski, 1997; Gabrielli *et al.*, 2008)와 중·저위도 지역의 고산 빙하(Lee *et al.*, 2011; Thompson *et al.*, 2013)는 주변 지역의 특성을 반영한 기후와 환경변화 기록을 보존하고 있다.

얼음코어(ice core)를 이용하여 고기후·고환경을 복원하는 연구는 빙하 연구 선진국들을 중심으로 지난 수십 년간 활발히 진행되어 왔고, 연구 주제별로 다양한 국제 공동 연구프로그램들이 추진되고 있다. 이 가운데 남극연구과학위원회(The Scientific Committee on Antarctic Research, SCAR)의 ITASE (International Trans-Antarctic Scientific Expedition) 프로그램은 지난 200년(일부 지역은 1000년) 동안의 기후변화를 고해상도로 복원하기 위하여 19개국에 참여한 국제 공동 연구프로그램이다. 현존하고 있는 얼음코어가 기록하고 있는 과거 약 팔십 만 년(Jouzel *et al.*, 2007; Parrenin *et al.*, 2007)과 비교할 때 비록 과거 200-1000년은 짧은 기간이나, 기후학적인 측면에서 이 기간은 산업화 시대 전후를 걸치고 있어 인간활동의 영향을 연구할 수 있으므로 매우 중요하다. 또한 20세기 중반 이후에 축적되어 온 신뢰할 만한 대기 및 위성 관측 자료들은 고해상도의 얼음코어 기록과 비교하기에 유용하다(Mayewski *et al.*, 2005; Ahn *et al.*, 2012). 이와 같은 ITASE 연구 주제의 중요성은 2004-2005년에 개최된 IPICS (International Partnerships in Ice Core Sciences) 회의에서 다시 한 번 강조되었고, 이는 'IPICS 2k array' 프로그램으로 발전되었다(Brook and Wolff, 2006). 'IPICS 2k array'는 ITASE 프로그램에서 연구가 미흡했던 연구 지역을 추가로 포함하고 있다. 또한 기후변화 변동성 연구

결과의 신뢰도 향상을 위하여 과거 2000년 동안의 기후, 환경 변화 복원을 목표로 제시하였다. 일례로, 'IPICS 2k array'의 연구주제를 수행하기 위하여 2013-2014년 하계 기간에 동남극 조지브이랜드 GV7 지점에서 한국-이태리 공동 빙하시추프로그램이 수행되었다.

극한지에서 얼음코어를 성공적으로 시추하기 위해서는 빙하 시추 기술, 화물 수송과 현장 캠프운영 능력이 매우 중요하다. 빙하 시추는 시추 깊이에 따라 천부(<100 m 내외), 중부(1000 m 이내), 심부(1000 m 이상)로 구분할 수 있는데(Raynaud and Parrenin, 2009), 보통 심부로 갈수록 더욱 고도화된 시추 기술과 더불어 시추지의 강설량, 기상 조건, 빙하의 두께, 유동, 기저면의 지형 등에 대한 정밀한 사전 조사가 요구된다. 아울러 시추 깊이가 깊어질수록 시추 기간이 길어지고 현장에서 필요한 화물의 양이 많아지므로 보다 체계화된 화물 수송 전략과 캠프 운영 기술이 요구된다. 상대적으로 천부빙하시추는 단기간에 소규모 캠프를 통하여 진행할 수 있는 장점이 있다. 이 때, 시추기는 시추 이외의 기능을 배제하고 최대한 경량화하여 운송, 설치와 유지보수가 용이하도록 하는 것이 일반적이다.

극지연구소는 남극 대륙 연구를 강화하고자 2014년 2월 테라노바만(Terra Nova Bay)에 남극장보고 과학기지(이하 장보고기지)를 설립하여 연구에 박차를 가하고 있다. 그 일환으로 극지연구소는 장보고기지 인근 스틱스 빙하(Styx glacier) 천부 시추 프로그램을 계획하였다. 시추의 주요 연구 목표는 스틱스 빙하에서 얼음코어를 획득하여 과거 수 백 년 동안의 로스해 지역 해빙면적(sea ice extent) 변동성과 빙하 상부 편(firn)층 및 공기방울에 포집된 온실가스 농도자료를 고해상도로 복원하는 것이고, 해당 내용은 ITASE 프로그램의 연구목표와 부합한다. 시추지 선정에는 현재 국내 시추 기술력, 화물수송 능력, 캠프 운영 경험 등이 추가로 고려되었다.

본 시추프로그램을 통하여 연구팀은 210.5 m 깊이의 얼음코어를 시추하는 성과와 더불어 다양한 경험을 축적하였다. 예를 들면, 시추를 편 가스의 포집과 병행한 것, 시추 중 발생한 드릴끼임(drill stuck) 현상을 해결한 것, 시추공 내부 온도를 정확히 측정할 것, 눈폭풍(blizzard) 등의 악기상 조건에서 캠프를 안정적으로 유지한 것을 꼽을 수 있다. 시추지에

서는 시추 이외에 다양한 연구활동(예: 편 가스 포집, 주상 눈시료 획득, 기저면 지구물리 탐사 등)이 이루어졌으나 본 연구에서는 천부빙하시추 과정에 대하여 중점적으로 기술하고 시추 과정 중 체득한 현장 경험을 보고하고자 한다. 이는 장보고기지를 기반으로 향후 본격적으로 전개될 남극 대륙 빙하 연구를 위한 중요한 출발점이며 기초 경험이라 사료된다.

2. 연구 방법

2.1 연구지역

얼음코어 시추는 장보고기지에서 북쪽으로 85 km 가량 떨어진 스틱스 빙하(73° 51.10'S, 163° 41.22'E, 해발고도 1623 m)에서 진행되었다(그림 1). 해당지역

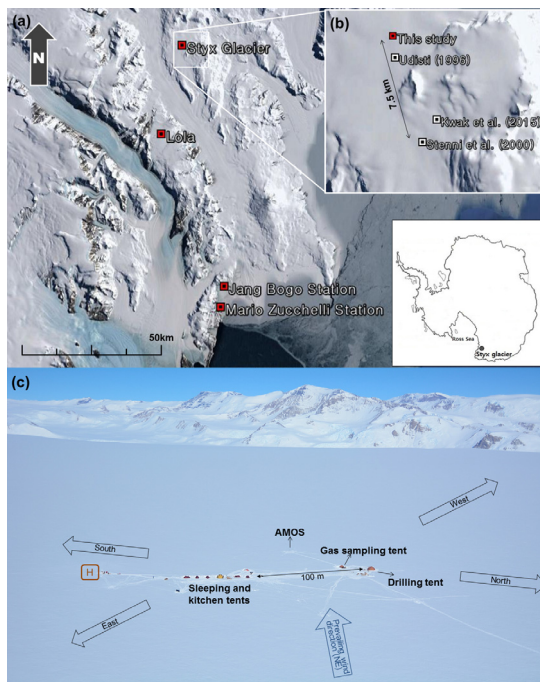


Fig. 1. (a) The location of Styx glacier 85 km north of Jang Bogo Station (JBS) and Mario Zucchelli Station (MZS). An automatic weather system (AWS) maintained by MZS is located on the Lola site. (b) The snow/ice sampling sites for the previous studies and this study within the Styx glacier area. The map was modified from a Google Earth image. (c) The aerial photo of the drilling camp. AMOS stands for automatic meteorological observation system. “H” indicates the main helicopter landing zone.

은 비교적 평탄하여 약 100 km² 이상의 면적이 100 m 이내의 고도 차를 갖는다. 또한 이 지역은 활강 바람(katabatic wind)의 영향을 적게 받아 강설이 퇴적 후 비교적 잘 보존되는 지역으로 알려져 있다 (Frezzotti 1998; Stenni *et al.*, 2000). Stenni *et al.* (2000)은 편(firm) 상부층의 깊이에 따른 화학적 조성 변화를 연구하여 북빅토리아랜드의 적설량을 광범위하게 조사하였는데 스틱스 빙하를 이 지역의 대표적인 적설지역으로 보고하고 있다. 극지연구소는 사전연구로서 2011-2012년 남극 하계 기간에 인근 지점(73°54'S, 163°47'E)에서 1.5 m 깊이의 주상눈 시료와 10 m 편코어를 획득하여 조사하였다(Hur, 2013). 그 결과 해당 지역은 적설량이 226 kg m⁻² yr⁻¹로서 천부빙하시추를 통하여 과거 수 백 년 동안의 기후·환경 변화를 고해상도로 복원하기에 적합한 것으로 나타났다(Kwak, 2014). 또한 스틱스 빙하는 장보고기지, 이탈리아 마리오주첸렐리지(Mario Zucchelli Station)와 비교적 가까워 화물과 인력 수송에 용이하고 급격한 기상 변화나 응급 상황에 대처하기에 수월하여 시추캠프를 보다 안정적으로 운영할 수 있는 장점이 있다. 따라서 추후 장보고기지를 기반으로 하여 원격지의 대륙 빙하를 연구하기에 앞서 시추캠프 운용 경험을 축적하기에 적합한 지역이라 할 수 있다.

시추캠프는 2014년 12월 10일부터 2015년 1월 2일까지 유지되었다. 2014년 12월 10일 장보고기지에서 시추지로, 2015년 1월 2일부터 4일까지 시추지에서 장보고기지로 헬기를 이용하여 약 3톤의 화물과 인력을 수송하였다. 시추캠프는 크게 시추동, 편가스 포집동, 숙소동으로 나뉘는데 이 지역의 주 풍향(북동풍)을 고려하여 각각 배치하였다(그림 1c). 시료의 오염 가능성을 최소화하기 위하여 발전기와 LPG 가스가 사용되는 숙소동은 시추동과 편가스 포집동으로부터 남동쪽으로 100 m 이상 떨어진 곳에 설치하였다. 발전기 두 대(3 kW 와 2 kW)를 숙소동 인근에 설치하였고 전선을 사용하여 시추동과 편가스 포집동에 전력을 공급하였다. 시추작업은 주로 오후 8시부터 명일 오전 8시 사이의 야간에 이루어졌다. 이는 주간에는 시추동 텐트 내부의 기온이 외부 기온보다 약 10도 이상 영상으로 올라가는 등 시추작업에 적합하지 않았기 때문이다.

2.2 천부빙하시추기

시추에는 일본 Geotech사의 천부빙하시추기(모델명: 天手降臨)가 사용되었다(그림 2). 본 시추기는 크게 드릴(drill), 윈치(winch), 제어기(controller)로 구성된다. 드릴은 빙하 표면에 접하여 얼음을 절삭, 윈치는 드릴을 승강시키는 역할을 하고 각각은 제어기를 통하여 동작한다. 드릴은 다시 얼음 표면에 맞닿아 얼음을 절삭하는 날(cutter), 날이 한 번 회전할 때 시추되는 깊이(피치, pitch)를 조절하는 슈(shoe), 얼음코어를 수직 방향으로 절단하는 캐치(catcher), 얼음코어와 절삭편(ice chips)이 담기는 배럴(barrel, 2 m length), 배럴 내에서 얼음코어와 절삭편을 분리해주는 분리판(separator), 배럴 외부를 둘러싸는 자켓(jacket), 날이 회전할 때 드릴을 고정시켜주는 안티토크(anti-torque), 드릴모터(DC100V, 350W)로 구성된다. 윈치는 윈치드럼(winch drum)과 윈치모터로 나뉜다. 윈치모터는 윈치드럼을 회전시켜 길이 270 m의 윈치케이블을 풀고 감아 드릴을 승강시키는 역할을 한다. 제어기를 통하여 윈치모터와 드릴모터에 부여되는 전압과 전류를 확인하면서 조절할 수 있고, 로터리 인코더(rotary encoder)를 통하여 측정되는 드릴의 깊이를 실시간으로 모니터링할 수 있다. 드릴의 깊이, 즉 시추 심도는 로터리 인코더가 풀리의 회전수를 측정하여 계산된다(그림 2a).

일 회의 시추가 이루어지는 과정은 다음과 같다. 드릴이 윈치에 의하여 하강하여 시추공 바닥면에 접한 후 회전을 시작하면 얼음코어는 배럴 내 분리판 하부 공간으로, 절삭편은 배럴과 자켓 사이의 아르키메데스 나선(Archimedes' screw; 그림 2b)을 따라 드릴 상부를 거쳐 배럴 내 분리판 상부로 수송된다. 절삭편이 분리판 상부에 가득 차거나 얼음코어가 분리판 하부에 닿게 되면 드릴모터의 전류가 변동하는데, 이 때 드릴 회전을 종료시키고 드릴을 상승시킨다. 캐치는 배럴 내에서 얼음코어가 한 방향으로만 움직일 수 있도록 한다. 즉 캐치는 드릴이 회전하면서 하강할 때에는 수직방향으로 놓여 얼음코어가 배럴 내에서 하부로부터 상부로 유입되도록 허용하나, 드릴 회전 종료 후 드릴을 인력이나 윈치로 상승시키면 수평방향으로 놓여(그림 2b) 얼음코어를 절단하고 드릴이 지표로 상승하는 동안 얼음코어가 시추공 하부로 떨어지지 않고 배럴 내에 머물도록 한다. 캐치의 수직-수평 방향간의 움직임은 스프링에 의하여 보조된다. 드릴 내 얼음코어와 절삭편은 윈치에 의하여 지표로 상승된 후 회수된다. 이 때 얼음코어가 담긴 배럴을 자켓으로부터 분리한 후, 배럴 내 얼음코어를 2 m 길이의 나무 막대로 배럴 하부로부터 상부 방향으로 밀어 얼음코어를 배럴과 분리시킨다. 각각의 시추마다 시추 시작 시간, 시추

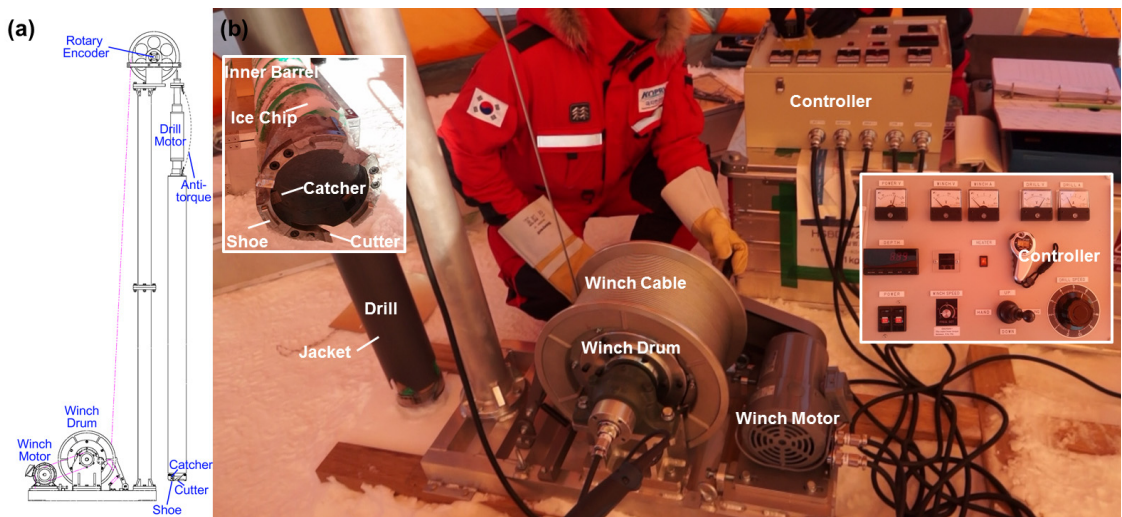


Fig. 2. (a) The design of the drilling system. Only one of three anti-torque blades is depicted. (b) The picture of the drill installed in the drilling tent. The insets show the inner barrel containing an ice core (left) and the controller (right).

소요 시간, 시추 심도, 드릴모터의 전압과 전류, 윈치 모터의 전압과 전류, 사용된 드릴 날과 피치, 특이사항을 기록하였다.

윈치에 의한 드릴의 승강 속도는 제어기의 인버터(inverter)를 통하여 조절되는데 너무 높을 경우 드릴 승강 시 윈치케이블의 펄름 현상이 발생하므로 깊이 100 m 상부 시추 시에는 0.5 m s^{-1} 이하, 100 m 하부 시추 시에는 0.6 m s^{-1} 이하로 조절하였다. 시추 깊이가 깊어질수록 드릴이 시추공을 왕복하는 데 소

요되는 시간이 길어지는데, 예를 들어 200 m 심부를 왕복하는 데에는 약 11분의 시간이 소요되었다. 시추 속도는 드릴이 시추공 바닥면에서 회전하여 얼음을 절삭하기 시작한 후 시간에 따라 드릴의 깊이가 증가하는 정도를 의미하는데 드릴의 회전 속도, 얼음의 밀도, 피치, 커터의 날 섹 정도(sharpness)에 의하여 영향을 받는다. 드릴의 회전 속도는 일반적으로 60-80 rpm에서 최적화 되어있고 본 연구에서 사용한 시추기는 70 rpm을 기준으로 하였다.

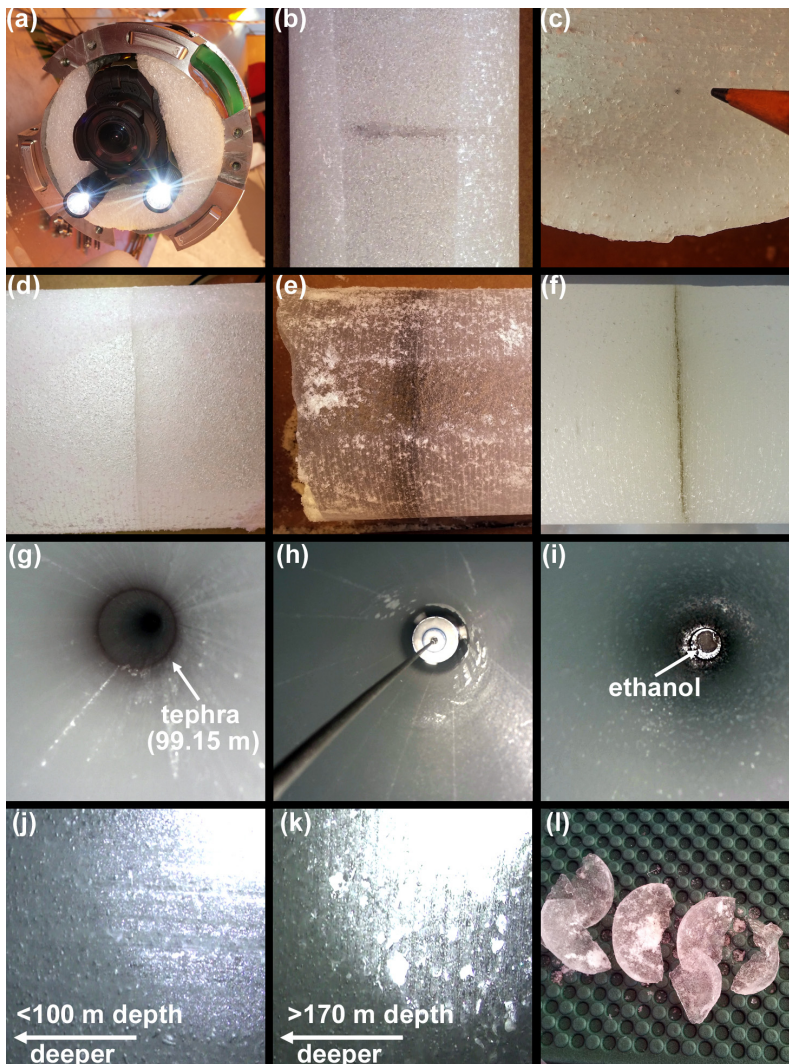


Fig. 3. (a) The video camera (WG-M1, Ricoh) for borehole recording. (b) A melting layer. (c) A dust particle. (d-f) Tephra layers at depths of 97.01, 99.18 and 165.37 m, respectively. (g-i) Vertical views of the borehole for (g) the tephra layer at the depth of 99.15 m, (h) the drill stuck at the depth of 104 m and (i) the ethanol remaining after the drill was recovered. (j-k) Horizontal views of the borehole (j) above (<100 m depth) and (k) within the brittle zone (>170 m depth). (l) Ice core sections recovered from the brittle zone.

Table 1. Coefficients for the S-H equation at a temperature range of $-29.9 \sim -32.9^{\circ}\text{C}$.

$(-29.9 \sim -32.9^{\circ}\text{C})$	Thermistor #1	Thermistor #2	Thermistor #3	Thermistor #4
S-H constant A	3.0203E-02	3.6182E-02	5.3374E-02	5.1395E-02
S-H constant B	-4.2593E-03	-5.2152E-03	-7.9923E-03	-7.7247E-03
S-H constant C	1.6778E-05	2.0402E-05	3.1146E-05	3.0554E-05

Table 2. Coefficients for the S-H equation at a temperature range of $-22.9 \sim -29.9^{\circ}\text{C}$.

$(-22.9 \sim -29.9^{\circ}\text{C})$	Thermistor #1	Thermistor #2	Thermistor #3	Thermistor #4
S-H constant A	-6.3568E-03	-6.0603E-03	-5.9645E-03	-6.2789E-03
S-H constant B	1.5518E-03	1.5070E-03	1.5011E-03	1.5593E-03
S-H constant C	-4.9716E-06	-4.8166E-06	-4.8523E-06	-5.1165E-06

2.3 얼음코어의 특성과 전처리

시추를 통하여 회수한 각각의 얼음코어에 대하여 시추 현장에서 코어의 길이, 코어 단면의 직경, 질량을 측정하여 기록하였고 얼음이 깨져서 회수된 경우 깨진 지점이나 기타 시각적으로 확인되는 특이사항을 추가로 기록하였다. 이 후 얼음코어를 폴리에틸렌(polyethylene) 백에 담아 임시로 눈에 묻어두었다가 일정량이 모이면 길이 50 cm 내외로 절단하여 시료 수송용 박스에 담아서 장보고기지의 냉동컨테이너로 수송하여 보관하였다.

2.4 시추공 촬영

시추공 내부는 필요에 따라 수직, 수평방향으로 동영상 촬영되었다. 녹화에는 시추공의 크기에 적합한 범용의 소형 촬영장비(수직: HDR-AS100V, Sony, WG-M1, Ricoh, 이하 액션캠; 수평: DSC-TX30, Sony)들이 사용되었는데, 장비에 광원이 없어 소형 LED 플래시(KBL-T1305, 코베아)를 두 개 부착하여 사용하였다(그림 3a). LED 플래시를 부착한 촬영장비를 드릴 하단에 스티로폼을 사용하여 고정(그림 3a)하거나 혹은 별도로 준비한 원치에 부착하여 시추공 내부를 왕복시켜 촬영하였다. 수평촬영의 경우 촬영장비의 접사능력이 중요한데 액션캠의 경우 상대적으로 접사능력이 떨어져 소형 디지털카메라(DSX-TX30)를 드릴 하단에 스티로폼으로 고정하여 사용하였다.

2.5 시추공 온도 측정

시추공 내부 온도측정 센서 및 전선 장치는 미국 University of Washington에서 빌린 17 m 길이의 것

에 100 m 전선을 추가로 연결하여 사용하였다. 온도측정 전선장치 최하단에는 GE Measurement & Control사의 NTC (Negative Temperature Thermistor) type P100 (모델명: P100DA202M) 써미스터(thermistor) 4개와 2개의 내부연결 전선이 있다. 온도를 알고자 하는 시추공 내부에 온도측정용 써미스터를 집어 넣어 저항을 측정하고, 이 측정값을 Steinhart-Hart equation (S-H식)에 대입하여 온도로 변환하였다(Steinhart and Hart, 1968). 써미스터 교정(calibration)은 Alexander and MacQuarrie (2005)의 방법을 이용하여 서울대학교 빙하-고기후연구실에서 수행하였다. 본 실험에서는 저온항온순환기로 LAUDA사의 Proline RP855를 사용하고, 표준온도계로 WIKA CTH7000 온도계를 이용하였다. WIKA CTH7000은 한국인정기구 KOLAS (Korea Laboratory Accreditation Scheme)에서 인정을 받은 교정기술원(주)에서 성능시험을 거쳐 0.01°C 의 정확도를 갖는 것을 확인하였다. 에틸렌글리콜(ethylene glycol)과 증류수를 3:1로 혼합한 용액을 저온항온순환기 안에 넣고 온도를 변화시켜 가며 써미스터의 저항을 측정하여 교정하였다. 온도를 다섯 개의 구간으로 나누어 S-H식 상수를 구하였으며, Styx 시추공 내부온도에 해당하는 온도구간 1 ($-29.9^{\circ}\text{C} \sim -32.9^{\circ}\text{C}$)과 온도구간 2 ($-22.9^{\circ}\text{C} \sim -29.9^{\circ}\text{C}$)의 S-H식 상수는 표 1, 2와 같다.

3. 결과 및 토의

3.1 천부빙하시추

총 20일 동안 왕복 300회(running)의 빙하 시추

를 수행하였고, 이를 통하여 누적 길이 210.5 m의 얼음코어를 획득하였다(그림 4, 5). 각각의 시추에 의하여 획득한 얼음 코어의 길이는 19-101 cm 사이, 평균 길이는 70.2 cm이었다. 얼음 코어의 직경은 평균 9.5 cm이었다. 1-3회째 시추는 주간 수행하였는데 시추 텐트 내부의 온도가 높아 여러 문제가 발생하였다. 일례로 드릴이 고온의 시추 텐트와 저온의 시추공을 왕복하면서 배럴 내부에 얼음이 응결되었는데, 이 때 응결한 얼음이 얼음코어와 배럴 사이의 마찰을 높여 얼음 절삭 시 드릴모터의 전류를 변동시켰고 절삭 후에는 얼음코어를 배럴로부터 회수하기 어렵게 하였다. 따라서 4회째 시추부터는 오후 여덟 시 이후의 야간에 수행하였고 위와 같은 문제는 야간 시추 작업 시에는 발생하지 않았다. 일반적으로 시추 작업 공간의 온도는 -10°C 이하가 적당한 것으로 알려져 있다.

일반적으로 시추공의 깊이가 깊어짐에 따라 드릴이 시추공을 왕복하는 데에 소요되는 시간이 길어져 하루에 회수되는 얼음코어의 총 길이는 점점 짧아지게 된다. 이런 경향을 12/18일 이후에서 관찰할 수 있는데, 드릴끼임(3.3 참조)이 발생한 12/21-22일을 제외하고는 하루에 회수되는 얼음코어의 길이가 점점 짧아지는 것을 볼 수 있다(그림 4). 시추 초기 12/12-17 일에는 얼음 시추와 편층 기체 채집을 병행하였다.

시추 속도는 $0.11\text{-}0.44\text{ m min}^{-1}$ 사이에서 변동하였는데 전반적으로 시추가 진행되면서 감소하는 경향을 보였다(그림 5). 깊이 50 m 상부에서 급격한 시추 속도 감소의 주된 이유는 얼음의 밀도 증가 때문이다. 50 m 이상의 깊이에서는 밀도 증가와 함께 드릴 날의 마모가 시추 속도를 감소시켰을 것으로 보

인다. 드릴 날 마모의 영향은 얼음의 밀도가 비교적 일정($\sim 0.9\text{ Mg m}^{-3}$)하게 유지되는 100 m 하부에서 시추 진행에 따른 시추 속도 감소와 드릴 날 교체에 따른 시추 속도가 증가(Run 145, 247)로부터 확인할 수 있다. 114번째 시추부터 피치를 5에서 3 mm로 감소시켰을 때 시추 속도가 다소 감소하였다.

시추 심도는 시추기의 인코더에 의하여 기록된 값과 얼음코어의 누적 길이 실측 값으로부터 독립적으로 측정되었다. 두 값 간의 차이를 보정하기 위하여 약 97 m 깊이 시추 후 100 m 길이의 줄자에 추를 달아 내려서 시추공의 실제 깊이를 측정하였다. 그 결과(97.058 m) 인코더 기록값(95.88 m)에 비하여 얼음코어의 누적길이(97.03 m)가 0.03% 이내의 차이를 보여 보다 정확한 것으로 나타났다. 인코더의 기록값이 상대적으로 높은 오차를 보이는 주된 이유는 드릴을 승강시키는 과정에서 윈치케이블이 폴리의 회전 없이 폴리를 통과하는 경우가 있기 때문으로 관찰되었다. 따라서 100 m 이상의 시추 심도는 얼음코어의 누적 길이를 시추 심도로 사용하였고, 이는 빙하 시추의 시추 심도 결정에 있어서 통용되는 방법이다.

3.2 깊이에 따른 얼음 코어의 특성 변화

획득한 얼음코어의 밀도는 표층(0.35 Mg m^{-3})으로부터 깊이가 깊어지면서 점차 증가하다가 100 m 하부에서는 얼음의 밀도인 0.92 Mg m^{-3} 근처에서 일정하게 유지되었다(그림 6). 밀도의 변화는 시각적으로도 확인할 수 있었는데, 천부에서 회수된 코어는 다져진 눈과 같은 편 상태였으나 심부로 갈수록 점차 얼음 상태로 변화하였다.

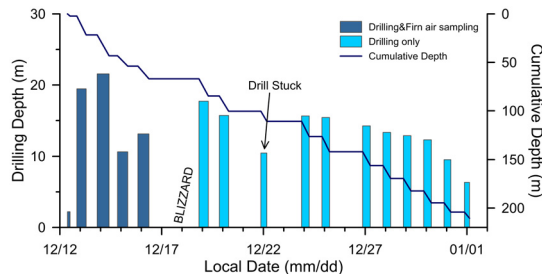


Fig. 4. The drilled depth per day (bar) and the cumulative drilled depth (line). The firn air sampling and the ice drilling were performed alternately during 12-17 December 2014.

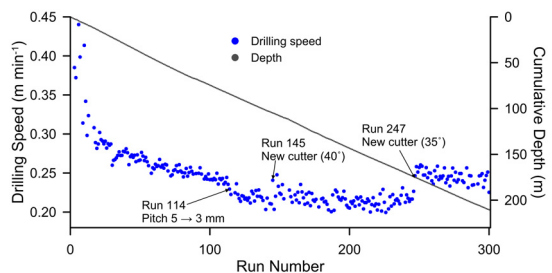


Fig. 5. The drilling speed (blue circle) and drill depth (black circle) for each drill run. The changes of the pitch and cutter are noted.

획득한 얼음코어에 대하여 시각적인 특이사항을 관찰하여 기록하였는데, 여기에는 눈이 녹았다가 다시 얼어서 생성되는 용융층(melt layer)(그림 3b), 지각 물질 기원의 입자들(dust particle)(그림 3c), 화산재(tephra)(그림 3d-g), 얼음코어가 깨진 상태로 회수되는 구간(brittle zone)(그림 3j-l) 등이 포함되었다. 용융층은 주로 여름철에 기온이 상승하여 표층 눈의 용융액이 편층의 공극을 따라 하부로 투수되다가 눈 입자가 작은 층에서 공극을 채우고 얼면서 생성되는 것으로 알려져 있고 기포를 포함하지 않는 특성을 갖는다(Das and Alley, 2005). 최근 연구 결과에 의하면 기포를 포함하지 않는 층이라도 용융층이 아닌 경우도 있고(Ahn *et al.*, 2012), 용융층이 얼음 절삭 과정에서 생기는 절삭흔과 혼동될 여지가 있어 추후에 이산화탄소 또는 메탄과 같이 물에 용해도가 높은 기체를 측정하여 확인할 필요가 있다(Ahn *et al.*, 2008; Dahl-Jensen *et al.*, 2013). 한편, 다수의 지각 기원 입자들을 육안으로 확인할 수 있었는데(그림 3c), 입자 크기로 미루어 볼 때 지표면이 노출된 인근 지역으로부터 기원한 것으로 추정된다(Delmonte *et al.*, 2010). 화산재 층은 총 세 번 97.01, 99.18, 165.37 m 깊이에서 관찰되었다(그림 3d-g). 특히 99.15 m 깊이의 층(그림 3e, 3g)은 두께가 2 cm 이상으로 다른 두 층(3 mm 이하)에 비하여 두꺼웠고, 하부에서 상부로 갈수록 입자 크기가 작

아졌는데 이는 작은 크기의 화산재 입자가 대기 중에 오래 체류하였기 때문인 것으로 보인다. 이 층은 Udisti *et al.* (1999)가 보고한 층과 동일한 층으로 추측된다. 약 100 m 깊이 상부에서는 대부분의 얼음코어를 하나의 덩어리로 획득하였으나 하부에서는 일부 깨진 상태로 획득되기도 하였다. 그 이유는 불분명하나 깊이에 따라 얼음 자체의 물리적인 특성이 변하기 때문인 것으로 보인다(그림 3j-k). 특히 170 m 하부에서는 얼음이 디스크 형태의 얇은 판상으로 쪼개지는 것이 관찰되었다(그림 3l). 이런 형태의 쪼개짐은 다른 지역에서도 일반적으로 관찰되는 것으로 알려져 있다(Motoyama *et al.*, 2014).

3.3 드릴끼임(drill stuck) 현상

깊이 111 m에서 155회째 시추 중 드릴이 얼음 사이에 끼어 운동력을 상실하고 윈치모터와 드릴모터의 동력에 반응하지 않는 현상이 발생하였다(그림 3h-i). 이와 같은 드릴끼임 현상은 빙하 시추 중 다양한 이유로 종종 발생한다. 드릴끼임 발생 시 시추팀은 드릴을 회수하기 위하여 다양한 시도를 하나 대부분의 경우 회수하지 못하고 윈치케이블을 절단하여 윈치만 회수하며 해당 시추공을 포기하기에 이른다. 본 연구에서는 약 24시간의 노력 끝에 드릴을 회수할 수 있었고, 이 후 동일한 시추공에서 시추를 속행하였다. 이는 저자들이 아는 한 극히 드문 경우이므로 그 경과를 상술할 가치가 있다고 판단된다.

윈치케이블은 약 2톤 이상의 장력을 견딜 수 있으므로, 우선 드릴끼임 발생 즉시 케이블에 윈치 모터 토크 이상의 강한 장력을 주어 얼음 사이에 끼인 드릴의 상승을 시도하였다. 이 때, 인력으로 윈치케이블을 순간적으로 강하게 당기거나, 윈치드럼을 수동으로 감아 케이블에 높은 장력을 수 시간 지속시키는 방법을 반복하여 시도하였으나 효과가 없었다. 이 외에 드릴 모터의 전극을 역전시켜 드릴을 역회전 시키는 방법을 시도하였으나 드릴이 얼음에 강하게 끼어있어 회전하지 않았다. 최종적으로 드릴에 접한 얼음을 녹여내는 방법을 시도하였다. 이 경우 녹는점이 낮은 용매를 사용하는데 본 연구에서는 드릴끼임에 대비하여 어는점 -100°C 이하의 에탄올(ethanol)과 부동액으로 널리 사용되는 에틸렌글리콜을 사전에 준비하였다. 이 중 우선 얼음 코어 시료의 오염이 상대적으로 덜한 에탄올을 선택하였다.

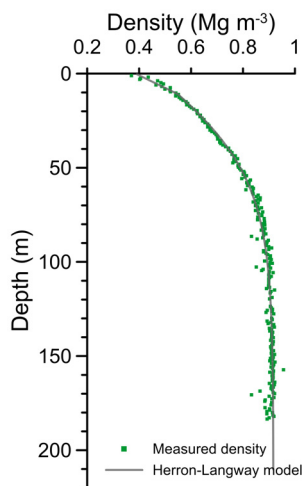


Fig. 6. The density of ice core with depth (green square). The gray line indicates the modelled density by the Herron-Langway model (See section 3.5 and Figure 8).

첫 번째로 약 1.5 L의 에탄올을 비닐백에 담아 길이 150 m 이상의 나일론 로프에 고정한 후 끓는 물에 넣어 에탄올을 중탕가열하였다. 이를 시추공을 통하여 50 m 가량 서서히 내린 후 자유낙하시켜 비닐백이 시추기에 충돌하여 터져 드릴 하부까지 흘러내리면서 드릴끼임을 발생시킨 얼음을 녹여내도록 하였으나 드릴이 회수되지 않았다. 두 번째로 지표에서

Table 3. Borehole temperature at the drilling site.

depth (m)	temperature (°C)
1.00	-26.1
2.00	-29.2
3.00	-30.3
4.00	-31.0
5.00	-31.2
6.00	-31.2
7.00	-31.1
8.00	-31.0
9.00	-30.9
10.00	-30.7
12.00	-30.6
15.00	-30.5
20.00	-30.5
30.00	-30.4
40.00	-30.3
50.00	-30.2
60.00	-30.1
70.00	-30.0

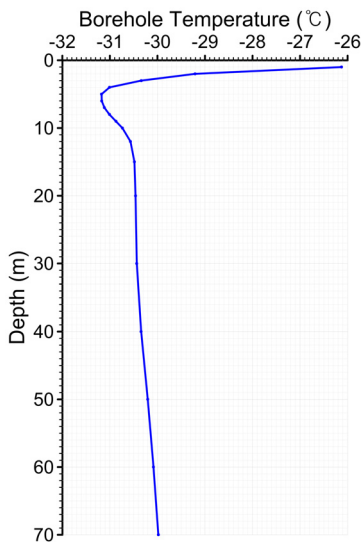


Fig. 7. The borehole temperature profile.

약 2 L의 에탄올을 윈치케이블을 따라 서서히 부어 주었으나 역시 개선되지 않았다. 세 번째는 첫 번째와 동일하나 나일론 로프 대신 별도로 준비한 윈치를 사용하여 에탄올이 담긴 비닐백을 드릴 위 수 m 지점까지 내린 후 자유낙하시켜 드릴과 충돌시켰는데 이를 통하여 드릴을 회수할 수 있었다. 세 번째 방법과 비교하였을 때 첫 번째 방법의 경우 비닐백이 하강하면서 나일론 로프가 시추기의 윈치케이블과 꼬이면서 마찰로 인하여 비닐백의 자유낙하가 수월하지 않았다. 실제로 약 5회 정도의 시도 끝에 터진 비닐백을 회수하였는데 이 비닐백이 실제로 시추기에 충돌하였는지 윈치케이블과의 마찰 때문에 터졌는지 불분명하다. 두 번째의 경우 역시 지표면에서 부은 에탄올이 드릴에 도달하였는지 명확하지 않다. 그러나 이 두 방법이 세 번째 방법의 성공을 보조하였을 가능성을 배제할 수는 없다.

드릴 회수 후 동영상 촬영 결과 시추공 하부에 에탄올이 약 45 cm (약 4 L) 높이로 채워져 있는 것을 확인하였다(그림 3i). 이 에탄올은 이후 5회에 걸친 시추 과정에서 절삭편과 섞여 대부분 회수되었고 이후 시추에서는 절삭편의 상태가 드릴끼임 발생 전과 유사하였다.

3.4 시추공 내부온도 측정결과

시추공 내부 온도는 빙하 시추가 끝난 후 약 15시간 후에 측정을 시작하였다. 지표면으로부터 10미터 깊이까지는 1미터 간격으로, 10미터 깊이부터 15미터 깊이까지는 약 2.5미터 간격으로, 10미터 이하 깊이부터 공기방울폐쇄(bubble close-off) 깊이까지는 10미터 간격으로 저항을 측정하였다. 써미스터가 지정된 깊이까지 내려가면 주변 공기와 열적 평형을 이룰 때까지 기다렸는데, 써미스터의 저항 값이 안정되어 5분 이상 변하지 않을 때까지 5분 간격으로 저항 값을 기록했다. 기록된 저항 값을 아래의 S-H 식에 대입하여 온도로 변환하였다.

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C (\ln(R))^3 \quad (\text{Steinhart and hart, 1968})$$

여기서, T는 절대온도, R은 써미스터로 측정된 저항값이고, A, B, C는 상수이다. 변환된 온도 값과 그래프는 표 3과 그림 7과 같다. 지표면부터 약 15 m

깊이까지는 계절적 요인으로 인하여 깊이에 따라 온도가 급격하게 감소하다가 완만하게 상승하는 모습을 보여주며, 15 m 이하 깊이에서는 온도가 아주 완만하게(70 m 깊이까지 약 0.5°C 상승) 증가한다. 따라서 본 연구에서는 계절적 요인이 배제된 15 m 깊이에서의 온도인 -30.5°C를 연평균 기온으로 이용하였다.

3.5 Herron-Langway 편밀도 모델

Herron and Langway (1980)는 눈의 깊이(z)에 따른 밀도(ρ) 증가를 깊이와 $\ln(\rho/\rho_i - \rho)$ 로 도식할 경우 밀도 0.55 Mg m⁻³를 전후로 두 개의 직선으로 설명할 수 있고, 이 두 직선의 기울기(C)는 경험적으로 $\rho < 0.55 \text{ Mg m}^{-3}$ 구간에서는 해당 지점의 연평균기온(T, 절대온도), 0.55 Mg m⁻³ < $\rho < 0.8 \text{ Mg m}^{-3}$ 구간에서는 연평균 기온과 연간적설량(A, Mg m⁻² y⁻¹)을 변수로 하는 수식으로 표현할 수 있다고 제안하였다. 여기서 ρ_i 는 얼음의 밀도(0.917 Mg m⁻³), R은 기체상수(8.314 J K⁻¹ mol⁻¹)이고, 연평균 기온과 연간적설량은 일정하다고 가정되었다.

$$C = \frac{d\ln(\frac{\rho}{\rho_i - \rho})}{dz} = 11\rho \exp\left[-\frac{10160}{RT}\right], (\rho < 0.55 \text{ Mg m}^{-3})$$

$$= \frac{575\rho}{A^{0.5}} \exp\left[-\frac{21400}{RT}\right], (0.55 \text{ Mg m}^{-3} < \rho < 0.8 \text{ Mg m}^{-3})$$

두 밀도 구간에 대하여 선형회귀선의 기울기 C는

각각 0.0648 ($\rho < 0.55 \text{ Mg m}^{-3}$)과 0.0363 ($0.55 \text{ Mg m}^{-3} < \rho < 0.8 \text{ Mg m}^{-3}$)이었다(그림 8a). $\rho < 0.55 \text{ Mg m}^{-3}$ 구간의 경험식으로부터 연평균기온 T를 역으로 계산하면 -31.1°C로 시추공 깊이 15 m 지점의 온도로부터 추정된 연평균 기온(-30.5°C)에 근사하였다. 0.55 Mg m⁻³ < $\rho < 0.8 \text{ Mg m}^{-3}$ 구간에 대하여 기울기와 연평균기온 값을 대입하여 연간적설량을 구하면 0.13 Mg m⁻² y⁻¹였다. Herron and Langway (1980)에 의하면 경험식으로부터 구한 연간적설량과 실측값은 ±20% 이내의 차이를 보였다. 연평균기온과 계산된 연간적설량을 바탕으로 깊이에 따른 밀도 변화를 계산하여 그래프로 나타내면 실제 깊이-밀도 관계를 잘 따르는 것을 볼 수 있다(그림 6).

본 연구에서 얻은 연평균기온과 연간적설량 값을 기존 연구 결과와 비교하면 표 4과 같다. 본 연구에서 연평균기온은 약 8 km 떨어진 지점에서 측정된 Stenni *et al.* (2000)의 결과보다 약 1.5도 가량 낮았다. 연간적설량은 기존 연구 결과들에 비하여 상대적으로 낮았는데, 이를 바탕으로 스틱스 빙하 지역 내 적설량이 공간적인 차이를 보인다고 할 수 있다. 본 연구와 Udisti (1996)의 연구 지점이 다른 두 연구에 비하여 빙하 상류 지점인 것을 고려할 때(그림 1), 스틱스 빙하 상류가 하류에 비하여 적설량이 낮은 것으로 추측되나 추후 물 동위원소 비나 눈 조성의 화학 분석을 통하여 보다 정밀한 적설량 산정이 필요하다.

위 경험식에 $dz/dt = A/\rho$ 의 관계식을 대입하면

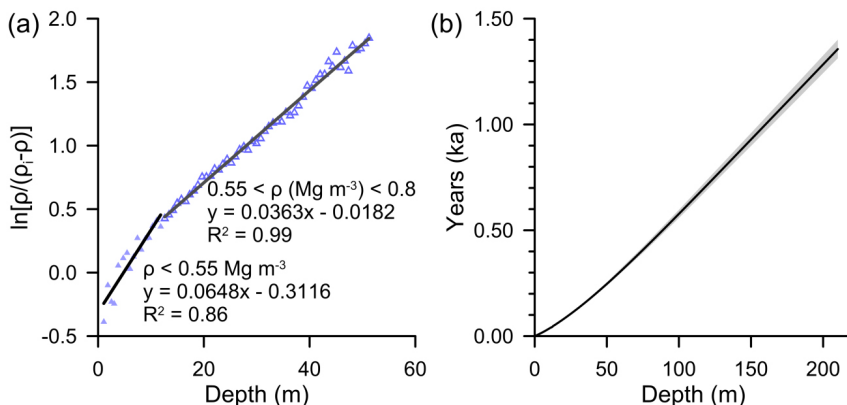


Fig. 8. (a) Two best-fit lines for the density intervals of $\rho < 0.55 \text{ Mg m}^{-3}$ and $0.55 < \rho < 0.8 \text{ Mg m}^{-3}$ in the $\ln[\rho/(\rho_i - \rho)]$ vs. depth plot. (b) Modelled depth-age relationship. The shaded area indicates the uncertainty (standard deviation) propagated from the 15 m depth borehole temperature and the slope of the best-fit line for the density interval of $0.55 < \rho < 0.8 \text{ Mg m}^{-3}$.

Table 4. Mean accumulation rates and annual temperatures for different sites within the Styx glacier, whose locations are depicted in Figure 1. The accumulation rates were estimated from the chemical analysis of the snow composition in the previous studies.

Location	Accumulation rate (Mg m ⁻² y ⁻¹)	Mean annual temperature (°C)	Reference
73° 51.10'S 163° 41.22'E	0.13 (model result)	-30.5 (15 m depth)	This study
73° 51.90'S 163° 41.50'E	0.16 (chemical analysis)	N.A. ^a	Udisti (1996)
73° 55'S 163° 45'E	0.203 (chemical analysis)	-29 (10 m depth)	Stenni <i>et al.</i> (2000)
73° 54.19'S 163° 46.89'E	0.226 (chemical analysis)	N.A.	Kwak (2014)

^aN.A. - not available

깊이에 따른 연대(t)를 추정할 수 있다. 그림 8b는 경험식으로부터 추정된 깊이-연대 모델을 시추공 깊이 전체로 확장한 것이다. 그 결과 시추공 최하부(깊이 210.51 m)는 약 1.36 (±0.06) ka에 해당하였다. 총 세 번 발견된 화산재 층의 연령은 상부로부터 97.01 m 층은 0.56 (±0.02) ka, 99.18 m 층은 0.57 (±0.02) ka, 165.37 m 층은 1.04 (±0.03) ka로 산정되었다. 각각의 오차는 15 m 깊이의 온도와 밀도 구간 0.55 Mg m⁻³ < ρ < 0.8 Mg m⁻³에서의 기율기 C의 표준편차로부터 계산되었다. 그러나 이 오차는 다양한 이유로 커질 수 있다. 예를 들어 연평균기온과 연간적설량이 일정하다는 모델 자체의 가정과 얼음의 유동이 고려되지 않은 것을 고려할 때 심부로 갈수록 오차는 더욱 커질 것으로 생각된다. 따라서 깊이-연대 모델은 추후 다양한 프록시(proxy)들을 종합하여 보다 정밀하게 개선할 필요가 있다.

4. 요약

2014-2015 남극 하계 기간에 장보고기지로부터 북쪽으로 약 85 km 가량 떨어진 스틱스 빙하에서 20일간 총 300회의 시추를 수행하여 깊이 210.5 m의 천부빙하코어를 획득하였다. 얼음의 깊이에 따른 밀도변화와 연평균기온으로부터 추정된 결과 시추 지점의 적설량은 0.13 Mg m⁻² y⁻¹로 기존 인근 지역에서의 연구 결과에 비하여 낮고, 얼음코어는 지난 약 1400년간 형성된 것으로 나타났다. 그러나 이들은 물동위원소비, 얼음의 화학적 조성, 온실기체를 이용한 연령대비 등을 이용하여 보다 정확하게 산정할

필요가 있다. 시추 기간 중 드릴끼임이 발생하여 시추가 중단되었으나 에탄올을 활용하여 드릴을 회수한 후 시추를 속행하였다. 시추기간 동안 총 세 번의 화산재 층을 관찰하였는데 이들은 북빅토리아랜드 내 인근 지역의 화산활동 결과로 보이며 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

사 사

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소 주요사업(기관목적사업) “과거, 현재의 극지기후 관측과 재현을 통한 기후변화 메커니즘 규명(PE15010)”의 지원을 받아 수행되었습니다. 현장활동에 도움을 주신 극지연구소 임직원, 남극장보고과학기지 1·2차 월동연구대 대원들, 시추에 조언을 해주신 National Institute of Polar Research (NIPR)의 H. Motoyama 교수님, Geotech사의 A. Takahashi 선생님, Outward Bound Korea (OBK) 대원들께 감사드립니다. 논문의 심사 과정에서 발전적인 조언을 해주신 염종권 박사님과 익명의 심사위원께 감사드립니다. 마지막으로 현장 캠프 운영과 연구원들의 안전요원으로서 활동하신 OBK 손병우 강사님에게 감사드립니다.

REFERENCES

- Ahn, J., Brook, E.J., Mitchell, L., Rosen, J., McConnell, J.R., Taylor, K., Etheridge, D. and Rubino, M., 2012, Atmospheric CO₂ over the last 1000 years: A high-resolution record from the West Antarctic Ice Sheet (WAIS) Divide ice core. *Global Biogeochemical Cycles*, 26,

- GB2027, doi:10.1029/2011GB004247
- Ahn, J., Headly, M., Wahlen, M., Brook, E.J., Mayewski, P.A. and Taylor, K.C., 2008, CO₂ diffusion in polar ice: observations from naturally formed CO₂ spikes in the Siple Dome (Antarctica) ice core. *Journal of Glaciology*, 54, 685-695.
- Alexander, M.D. and MacQuarrie, K.T.B., 2005, Toward a standard thermistor calibration method: Data correction spreadsheets. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 25, 75-81.
- Boutron, C.F., 1995, Historical reconstruction of the earth's past atmospheric environment from Greenland and Antarctic snow and ice cores. *Environmental Reviews*, 3, 1-28.
- Brook, E. and Wolff, E., 2006, The future of ice core. *Science*, 87, 39.
- Dahl-Jensen, D. and NEEM community members, 2013, Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core. *Nature*, 493, 489-494.
- Das, S. and Alley, R.B., 2005, Characterization and formation of melt layers in polar snow: observations and experiments from West Antarctica, *Journal of Glaciology*, 51, 307-313.
- Delmonte, B., Baroni, C., Andersson, P.S., Schoberg, H., Hansson, M., Aciego, S., Petit, J.-R., Albani, S., Mazzola, C., Maggi, V. and Frezzotti, M., 2010, Aeolian dust in the Talos Dome ice core (East Antarctica, Pacific/Ross Sea sector): Victoria Land versus remote sources over the last two climate cycles. *Journal of Quaternary Science*, 25, 1327-1337.
- Frezzotti, M., 1998, Surface wind field of Victoria Land (Antarctica) from surveys of aeolian morphologic features. *Terra Antarctica Reports*, 1, 43-45.
- Gabrielli, P., Barbante, C., Plane, J.M.C., Boutron, C.F., Jaffrezo, J.L., Mather, T.A., Stenni, B., Gaspari, V., Cozzi, G., Ferrari, C. and Cescon, P., 2008, Siderophile metal fallout to Greenland from the 1991 winter eruption of Hekla (Iceland) and during the global atmospheric perturbation of Pinatubo. *Chemical Geology*, 255, 78-86.
- Herron, M.M. and Langway, C.C., 1980, Firn densification: an empirical model. *Journal of Glaciology*, 25, 373-385.
- Hur, S.D., 2013, Development of core technology for ice core drilling and ice core bank. Korea Polar Research Institute, Incheon, 398 p (in Korean).
- Jouzel, J., 2013, A brief history of ice core science over the last 50 yr. *Climate of the Past*, 9, 2525-2547.
- Jouzel, J., Masson-Delmotte, V., Cattani, O., Dreyfus, G., Falourd, S., Hoffmann, G., Minster, B., Nouet, J., Barnola, J.M., Chappellaz, J., Fischer, H., Gallet, J.C., Johnsen, S., Leuenberger, M., Loulergue, L., Luethi, D., Oerter, H., Parrenin, F., Raisbeck, G., Raynaud, D., Schilt, A., Schwander, J., Selmo, E., Souchez, R., Spahni, R., Stauffer, B., Steffensen, J.P., Stenni, B., Stocker, T.F., Tison, J.L., Werner, M. and Wolff, E.W., 2007, Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. *Science*, 317, 793-796.
- Kwak, H., 2014, A high resolution record of seasonal variations of major ionic species on recent snow at Styx Glacier plateau in Victoria Land, Antarctica. M.Sc. thesis, Inha University, Incheon, 27 p (in Korean with English abstract).
- Lee, K., Hur, S.D., Hou, S., Burn-Nunes, L.J., Hong, S., Barbante, C., Boutron, C.F. and Rosman, K.J.R., 2011, Isotopic signatures for natural versus anthropogenic Pb in high-altitude Mt. Everest ice cores during the past 800 years. *Science of The Total Environment*, 412-413, 194-202.
- Legrand, M. and Mayewski, P., 1997, Glaciochemistry of polar ice cores: a review. *Reviews of Geophysics*, 35, 219-243.
- Mayewski, P., Frezzotti, M., Bertler, N., Van Ommen, T., Hamilton, G., Jacka, T.H., Welch, B., Frey, M., Dahe, Q., Jiawen, R., Simões, J., Fily, M., Oerter, H., Nishio, F., Isaksson, E., Mulvaney, R., Holmund, P., Lipenkov, V. and Goodwin, I., 2005, The international trans-Antarctic scientific expedition (ITASE): an overview. *Annals of Glaciology*, 41, 180-185.
- Motoyama, H., Furusaki, A., Takahashi, A., Tanaka, Y., Miyahara, M., Shinbori, K., Matoba, S., Sugiyama, S., Mori, S., Sawagaki, T. and Takata, M., 2014, Recent technologies of shallow/intermediate depth drill and borehole measurement. JSSI&JSSE Joint Conference (Abstracts), Hachinohe, September 20-23.
- Raynaud, D. and Parrenin, F., 2009, Ice Cores, Antarctica And Greenland. In: Gornitz, V. (ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*. Springer Netherlands, 453-457.
- Parrenin, F., Barnola J.-M., Beer, J., Blunier, T., Castellano, E., Chappellaz, J., Dreyfus, G., Fischer, H., Fujita, S., Jouzel, J., Kawamura, K., Lemieux-Dudon, B., Loulergue, L., Masson-Delmotte, V., Narcisi, B., Petit, J.-R., Raisbeck, G., Raynaud, D., Ruth, U., Schwander, J., Severi, M., Spahni, R., Steffensen, J.P., Svensson, A., Udisti, R., Waelbroeck, C. and Wolff, E., 2007, The EDC3 chronology for the EPICA Dome C ice core. *Climate of the Past*, 3, 485-497.
- Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.-M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lipenkov, V.Y., Lorius, C., Pepin, L., Ritz, C.,

- Saltzman, E. and Stievenard, M., 1999, Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399, 429-436.
- Soyol-Erdene, T.-O., Huh, Y., Hong, S. and Hur, S.D., 2011, A 50-year record of platinum, iridium, and rhodium in Antarctic Snow: Volcanic and Anthropogenic sources. *Environmental Science and Technology*, 45(14), 5929-5935.
- Steinhart, I.S. and Hart, S.R., 1968, Calibration curves for thermistors. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 15, 497-503.
- Stenni, B., Serra, F., Frezzotti, M., Maggi, V., Traversi, R., Becagli, S. and Udisti, R., 2000, Snow accumulation rates in northern Victoria Land, Antarctica, by firn-core analysis. *Journal of Glaciology*, 46, 541-552.
- Thompson, L.G., Mosley-Thompson, E., Davis, M.E., Zagorodnov, V.S., Howat, I.M., Mikhailenko, V.N. and Lin, P.-N., 2013, Annually Resolved Ice Core Records of Tropical Climate Variability over the Past ~1800 Years. *Science*, 340, 945-950.
- Udisti, R., 1996, Multiparametric approach for chemical dating of snow layers from Antarctica. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 63, 225-244.
- Udisti, R., Barbante, C., Castellano, E., Vermigli, S., Traversi, R., Capodaglio, G. and Piccardi, G., 1999, Chemical characterization of a volcanic event (about AD 1500) at Styx Glacier plateau, northern Victoria Land, Antarctica. *Annals of Glaciology*, 29, 113-120.
-
- Received : February 16, 2015
Revised : April 22, 2015
Accepted : April 27, 2015