

<Short Note>

동남극 빅토리아랜드 블루아이스 예비 연구

장영준¹ · 한영철² · 류영준¹ · 문장일³ · 주현태⁴ · 양지웅¹ ·
이훈규¹ · 전성준³ · 이주한⁵ · 허순도² · 이종익³ · 안진호^{1,†}

¹서울대학교 지구환경과학부

²한국해양과학기술원 부설 극지연구소 극지고환경연구부

³한국해양과학기술원 부설 극지연구소 K-루트사업단

⁴한국해양과학기술원 부설 극지연구소 극지지구시스템연구부

⁵한국해양과학기술원 부설 극지연구소 기술지원실

요 약

블루아이스는 빙하가 표면으로 상승하여 승화에 의해 삭박되는 지역에서 형성되기 때문에, 빙하 표면에서도 오래된 연령의 시료를 채취할 수 있다. 또한, 블루아이스는 같은 연령의 빙하가 수평적으로 연결되고, 수직적으로 연령변화가 적기 때문에, 같은 연령의 빙하시료를 다량으로 확보하는데 유리하다. 본 논문에서는 2014-2017년 수행된, 동남극 빅토리아랜드(Victoria Land) 일대에 분포하는 블루아이스에 대한 탐사 및 시료에 대한 지화학 분석 예비 결과를 보고한다. 2014-2015년 엘리펀트 모레인(Elephant Moraine) 에서 채취한 표층 빙하시료의 분석결과 이산화탄소(CO₂)와 메탄(CH₄) 농도 값이 매우 분산되어 있고, 낮은 공기함량(0.03-0.04 ml/g)을 갖는데, 이는 표층에서 발달한 균열면을 따라 변질 되었음을 시사한다. 또한, 중수소 과잉값이 평균 -3.4‰로 낮는데, 적설 이후 동위원소 조성이 변질되었을 가능성이 높다. 반면, 2015-2016년 타른 플랫(Tarn Flat) 지역에서 시추한 10 m 코어 시료의 경우 산업혁명 이전 간빙기체 농도분포를 보였고, 불안정동위원소비는 상부 방향으로 서서히 증가하는 형태가 관찰됐다. 2016-2017년 남극 하계 기간에는 오염되지 않은 시료를 확보하기 위하여, 엘리펀트 모레인 3개 지역에서 10 m 길이의 코어를 포함한 총 15개의 코어를 시추하였다. 현장에서는 층서구조를 파악하기 위한 GPR 탐사 및 화산재층 면(tephra layer)의 3차원적 연장성 측정이 수행되었다. 그 결과, 표면에서 깊이 450-800 m의 사이에서 기반암이 존재하고 화산재층이 20-59°의 경사진 형태로 노출되어 있음이 확인되었다. 향후 블루아이스의 연구를 위해서, 불활성기체의 동위원소를 이용한 정확한 연령 측정과, 변질되지 않고, 연속적인 연령의 시료확보를 위하여 천부 및 중부심도 시추가 시급히 필요하다.

주요어: 남극, 블루아이스, GPR 탐사, 화산재층, 고기후

Youngjoon Jang, Yeongcheol Han, Yeongjun Ryu, Jangil Moon, Hyeon-Tae Ju, Ji-Woong Yang, Hun-Gyu Lee, Seong Joon Jun, Joohan Lee, Soon Do Hur, Jong Ik Lee and Jinho Ahn, 2017, A preliminary study for blue ice in Victoria Land, East Antarctica. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 53, no. 4, p. 567-580

ABSTRACT: Because blue ice forms where ice flows up to the surface and ablates by sublimation, we may get old ice on the surface. We can also obtain large amount of ice samples for same ages on the surface because the same age ice horizontally extends on the surface and vertical age change is small. This paper reports the exploration on the blue ice at Victoria Land, East Antarctica in austral summers of 2014-2017, and preliminary results of geochemical analysis for the ice. The surface blue ice samples collected from the Elephant Moraine in 2014-2015 show scattered CO₂ and CH₄ concentrations within neighboring ice, and very low total air content of 0.03-0.04 ml/g ice, indicating alteration along the crack surfaces. The mean deuterium excess was low at -3.4‰, very likely due to isotopic alteration. On the other hand, the 10 m core collected from the Tarn Flat in 2015-2016 shows relatively

† Corresponding author: +82-2-880-6726, E-mail: jinhoahn@gmail.com

constant greenhouse gas concentration levels of pre-industrial interglacials and the water isotope ratios were observed to gradually increase upward. To obtain unaltered samples at the Elephant Moraine, 15 blue ice cores including 10 m cores were drilled in 2016-2017. Furthermore, ground penetration radar (GPR) survey for stratigraphic analysis and measurement of 3-dimensional extensivity of a tephra layer were conducted in the field. GPR results show the bed rock laid down to 450-800 m from the surface and we found tephra layer tilted with an angle of 20-59° in the surface. For the future study, we urgently need noble gas isotope analysis for accurate ages as well as shallow or intermediate-depth drilling to obtain unaltered samples with continuous ages.

Key words: Antarctica, blue ice, GPR survey, tephra layer, paleoclimate

(Youngjoon Jang, Yeongjun Ryu, Ji-Woong Yang, Hun-Gyu Lee and Jinho Ahn, Seoul National University School of Earth and Environmental Science, Seoul 08826, Republic of Korea; Yeongcheol Han, Soon Do Hur, Jangil Moon, Seong Joon Jun, Jong Ik Lee, Hyeon-Tae Ju and Joohan Lee, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea)

1. 서 론

빙하는 과거 지구의 기후, 대기조성, 대기순환, 지질학적 사건 등에 대한 다양한 정보를 보존하고 있다(e.g., Raynaud *et al.*, 1993; Schwander *et al.*, 1993; Jouzel, 2013). 빙하는 표면에서 눈이 쌓임에 따라 하부의 압력과 눈의 밀도가 증가하면서 형성되기 때문에, 깊어질수록 나이가 증가한다. 따라서, 오래된 기록을 얻기 위해서는 더 깊은 깊이까지의 시추가 필요하고, 결국은 더 높은 수준의 시추기술과 더 많은 비용이 필요하다.

이런 점에서 블루아이스(blue ice)를 이용한 연구는 전통적인 빙하코어 연구의 대안이 될 수 있다. 블루아이스는 빙하의 흐름이 산맥이나 기반암의 돌출된 부분을 만나, 급격한 경사로 상부를 향하면서 얼음이 지속적으로 삭박(ablation)되면서 형성된다. 또한, 블루아이스 지역에서는 강한 바람과 저속의 얼음 이동, 급격한 지형변화가 동반되어 예외적으로 대량의 질량 손실이 일어나고(Bintanja, 1999), 결국 오랜 연령의 빙하가 표면에 드러나게 된다(Spaudling *et al.*, 2012).

블루아이스를 이용한 연구는 몇 가지 장점을 가지고 있다. 첫째로, 기존 심부 빙하 코어 시추(deep ice coring)를 통해서만 얻을 수 있었던 오래된 연령을 가진 얼음을 표면에서 깊이 얇은 곳에서 채취할 수 있다는 것이다(Moore *et al.*, 2006). 또한, 최근 연구에서 가장 오래된 연령의 시료가 발견되어 새로운 연구자료로 주목 받고 있다(Higgins *et al.*, 2015). 전통적인 심부시추에 의해 보고된 가장 오랜 빙하코어는 Dome C 지역에서 채취한 것으로 80만 년의 연

령을 갖는다(Jouzel *et al.*, 2007; Spaulding *et al.*, 2012). 반면, 최근 100만 년 이상의 가장 오래된 빙하가 엘리펀트 모레인(Elephant Moraine) 근처인 앨런 힐스(Allan Hills) 지역의 블루아이스에서 발견되었다(Higgins *et al.*, 2015). 둘째로, 같은 연령의 얼음이 거의 수직적으로 배열되어, 표면에서는 수평 이동에 따라 연령이 증가하거나 감소하게 된다. 따라서, 동일한 연령의 빙하를 거의 무제한으로 얻을 수 있고(Petrenko, 2013), 다량의 시료를 필요로 하는 극미량 원소 및 극미량 기체연구에 매우 유리하다.

이러한 장점에도 불구하고, 블루아이스의 층서 복원이 쉽지 않기 때문에, 정확한 연령측정이 필수적으로 요구된다. 블루아이스 연령측정에 참고할 수 있는 것은 운석의 연령이다. 블루아이스 지역에서는 운석이 많이 발견되는데, 그 이유는 운석은 떨어지면 빙하의 흐름에 따라 이동하다가 삭박이 일어나는 블루아이스 지역 표면에 노출되면서 쌓이기 때문이다(Scherer *et al.*, 1997). 운석이 지구에 떨어졌을 때부터의 연령인 지표 연령(terrestrial age)은 블루아이스의 연령에 대한 정보를 제공한다. 남극 운석의 지표 연령은 보통 50만 년보다 낮지만 200만 년이 넘는 것도 발견됐다(Welten *et al.*, 1997; Scherer *et al.*, 1997; Sinisalo and Moore, 2010). 따라서, 200만 년 이상 오래된 빙하가 블루아이스지역에서 발견될 가능성이 있다.

빙하의 상승운동으로 화산재층(tephra layer)도 지표에 노출되는데, 동남극의 앨런 힐스(Goldsten *et al.*, 2004), 테일러 빙하(Baggenstos *et al.*, 2017) 등에서 채집되어 연구된 바 있다. 화산재층 면은 같은 연령을 지시하기 때문에, 화산재층의 주향과 경사를

측정하여, 층서 뿐만 아니라, 빙하의 운동방향을 알아내는 데 사용할 수 있다(Curzio *et al.*, 2008). 또한, 화산재의 성분을 분석함으로써 화산재의 기원지와 (Wilch *et al.*, 1999) 화산재를 포함하는 블루아이스의 연령을 측정할 수 있다. 그러나, 정확한 연령측정을 위하여 독립적인 방법이 필요하다. 빙하에 포집된 기체상의 Ar, Kr 동위원소를 이용한 연령측정법이 최근 개발되었다(Bender *et al.*, 2008; Buizert *et al.*, 2014; Higgins *et al.*, 2015). ^{81}Kr 은 우주선(cosmic ray)에 의해 생성되는 과정을 겪지 않고, 반감기가 길어서($t_{1/2} = 2.29 \times 10^5 \text{ y}$) 오래된 빙하의 연령측정에 용이한데, 최대 150만 년의 얼음 연령측정이 가능하다(Buizert *et al.*, 2014). 그러나, 다량의 시료가 필요하고 측정오차가 크다는 단점이 있다. 반면, Ar 동위원소를 이용할 경우, ^{81}Kr 보다 훨씬 적은 양의 시료가 필요하여 실제적인 연구에 활용가치가 높다. 다만, 연령측정 오차가 약 10% 가량이 되기 때문에 (Bender *et al.*, 2008), 오차를 줄이기 위해서는 추가적인 연령측정법이 이용되어야 한다. Jouzel *et al.* (2007)의 연구에서 과거 80만 년의 기록은 남극 Dome C 빙하코어로 비교적 잘 연구가 되었기 때문에, 물안정동위원소($\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = ((^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}} / (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}} - 1) \times 1000$, $\delta\text{D}(\text{‰}) = ((^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{sample}} / (^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{SMOW}} - 1) \times 1000$)와 온실기체(CO_2 , CH_4 , N_2O) 농도 자료를 대비하여 세부적인 정확한 연령을 도출할 수 있다(Martinerie *et al.*, 1992; Faure *et al.*, 1993).

블루아이스 지역은 극심한 바람, 극저온의 환경, 표면에 드러난 다량의 균열로 인해, 블루아이스 연구에서는 일반적인 빙하시료와는 다른 접근방법이 필요하다. 이 연구에서는 2014-2015년 엘리펀트 모레인(Elephant Moraine), 2015-2016년 타른 플랫(Tarn Flat), 2016-2017년 엘리펀트 모레인 지역에서 남극 하계 기간 동안 수행한 블루아이스 연구내용을 담고 있다. 이 중 앞선 두 기간에 채취한 블루아이스에 대해 얼음 속 공기의 온실기체 농도와 물안정동위원소 분석을 진행했다. 2016-2017년 남극 하계 기간 동안에는 향후 양질의 시료 확보와 천부 및 중부심도의 시추를 위한 기초 현장조사를 수행하였는데, 본 논문에서는 핸드오거(hand auger)를 이용한 코어시추 과정, 지구물리 탐사, 화산재층 방향 측정, 시추공 촬영 등의 연구결과를 보고한다.

2. 연구방법

2.1 연구지역

엘리펀트 모레인(Elephant Moraine)은 빅토리아랜드(Victoria Land)의 서쪽에 위치하고, 장보고과학기지에서 약 280 km 떨어져 있다(그림 1). 빙퇴석(moraine)은 빙하의 흐름에 따라 북동 방향으로 길이는 약 5.6 km, 폭은 최대 1.7 km로 분포해 있다(Faure and Mensing, 2010). 빙하의 움직임에 의해 표면에 노출된 빙퇴석들이 마치 코끼리의 코를 닮았다고 해서 엘리펀트 모레인이라는 지명이 붙여졌다(그림 3b). 이 빙상의 기저로부터 기원해서 노출된 암편의 띠는 얼음이 흐른 방향과 평행하게 분포해있다. 앞으로 이 논문에서 사용할 엘리펀트 모레인이라는 지명은 남위 $76^{\circ}12' - 76^{\circ}24'$, 동경 $155^{\circ}80' - 157^{\circ}30'$ 사이에 위치한 블루아이스 지역을 특정하여 통칭할 것이다. 한편 타른 플랫(Tarn Flat)은 라센빙하(Larsen glacier) 상류에 위치해 있으며, 장보고 과학기지에서 약 85 km 떨어져 있다(그림 1). 반복되는 강한 활강바람(katabatic wind)의 영향을 받기 때문에 강설이 퇴적 후 보존되기 힘들고 이 때문에 블루아이스 지대가 발달되었다.

엘리펀트 모레인 지역에서 남동쪽으로 70 km 떨어진 앨런 힐스 메인 아이스필드(Allan Hills Main Icefield) 블루아이스 지역에서 이루어진 일련의 이전 연구에서는 삭박에 의해 표면으로 노출된 운석들의 지표 연령이 측정되었으며, 이 중 일부 운석의 지표 연령이 220만 년에 이르는 것이 확인되었다(Scherer *et al.*, 1997). 이는 앨런 힐스 메인 아이스필드 블루아이스 지역의 지표면에 노출된 얼음의 연령이 기존 심부 시추를 통해 복원된 최대 연령(~80만 년)에 비해 더 오래될 수 있을 가능성을 지시하는 간접적인 지표로, 최근 연구에서 이 지역에서 시추한 천부 빙하코어(shallow ice core)의 기체 연령이 100만 년에 이르는 것이 밝혀졌다(Higgins *et al.*, 2015). 엘리펀트 모레인도 극지연구소 운석팀에 의해 다량의 운석이 집중적으로 발견된 지역으로, 운석의 지역적인 밀도가 매우 크다. 이는 앨런 힐스 지역과 같이 얼음 표면의 빠른 삭박에 의해 운석이 지역적으로 농집되었을 가능성과 더불어 오래된 얼음이 존재할 가능성을 제시한다.

2.2 기상자료

기상자료는 극지연구소에서 2016년 초 엘리펀트 모레인 지역에 설치한 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS) 정보를 이용했다. 약 1년여 간의 기상정보 측정이 진행됐지만 겨울 기간인 4월부터 9월까지의 저온으로 인한 배터리 고장으로 데이터가 정상적으로 수집되지 않았다. 이 기간을 제외하고 2016년 1월 4일부터 2016년 12월 12일까지의 기온, 풍속, 풍향이 그림 2에 나와 있다. 관측된 최고기온은 1월 18일의 -11°C 이고, 최저기온은 9월 12일의 -53°C 였다. 이를 통해 측정되지 않은 동계 최저기온은 -53°C 보다 더 낮을 것으로 추정된다. 바람의 방향은 남서풍으로 연중 거의 일정한 방향을 보였다. 풍속은 하계에 0-15 m/s의 범위를 보였는데 동

계에는 이보다 더 큰 값일 것이라고 예상된다.

2.3 엘리펀트 모레인 표층 빙하시료 및 타른 플랫 빙하코어 분석

2014-15년에는 엘리펀트 모레인 4개의 지역에서 9개(EM-1~EM-9)의 표층 블루아이스 시료가 채집되었다(그림 3a). 이 지역에서는 화산재층이 지표에 동서방향으로 10 m 정도 길이로 분포한다. 2015-16년에는 타른 플랫 지역에서 12 m 깊이의 빙하코어(TF)가 시추되었다(그림 3c). 타른 플랫 시추지역에서는 화산재층이 습곡에 의해 휘어진 것이 관찰되었다. EM-1~EM-9는 각 샘플당 한 번씩, TF는 깊이 별로 이산화탄소와 메탄 농도, 그리고 물동위원소분석이 이루어졌다.

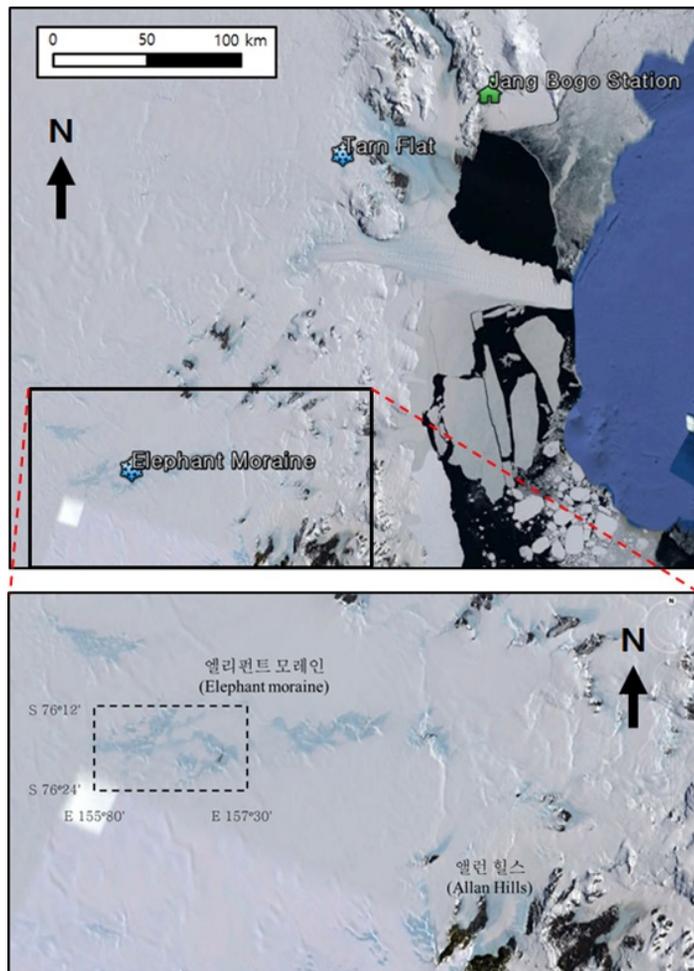


Fig. 1. The location of Elephant Moraine and Tarn Flat blue ice area in Victoria Land, Antarctica.

빙하시료 속 공기의 온실기체 농도는 서울대학교 빙하/고기후 연구실에서 분석하였다. 공기를 빙하에서 추출하기 위해 두 가지 추출법을 사용했다. 메탄(CH₄)과 총 공기함량(total air content)은 빙하시료를 녹인 후 다시 얼려서 포집된 공기를 추출하는 습식기체추출법을 이용하여 분석했다(Yang *et al.*, accepted). 총 공기함량은 습식추출을 진행하면서 플라스크의 온도, 팽창 시 진공라인 내부의 기체 압력, 그리고 분석 시료의 질량과 부피를 통해 이상기체상태방정식을 이용하여 계산되었다(Martinerie *et al.*, 1992; Yang, in preparation). 반면, 이산화탄소(CO₂)는 물에 대한 용해도가 높기 때문에 분석 과정 중 얼음시료를 녹이지 않는 건식기체추출법을 이용하여 분석되었는데, 진공상태로 유지되는 스테인리스스틸 시료캡 속에 위치한 약 10 g의 빙하 시료를 금속 바늘을 이용하여 파쇄하고, 수증기 포집 장치를 통해 건조시킨 후 극저온(약 11K) 장치로 공기를 포집

하였다(Ahn *et al.*, 2009).

얼음시료의 불안정동위원소비는 극지연구소에 설치된 공동광자감쇠분광분석기(Cavity Ring-Down Spectrometer, L2130-i and L2140-i, Picarro)를 사용하여 분석하였다. 적외선 분광법을 이용한 불안정동위원소 측정법은 국내에 Jung *et al.* (2013)에 소개된 바 있다. 깊이별로 절삭된 얼음 시료를 상온에서 녹여 일부를 0.45 μm 주사기 필터로 2 mL 용기(glass vial)에 담긴 약 400 μL 인서트(insert)에 채워 분석용으로 준비하였다. 분석 장비의 자동시료채집기(auto sampler)는 인서트 내 시료를 1회에 약 180 nL씩 기화기(vaporizer)로 이송시킨다. 액체 상태의 시료는 섭씨 110도의 기화기 내에서 수증기 상태로 바뀌어 공동(cavity)으로 이송된다. 공동에서는 특정 파장의 레이저에서 방출된 빛이 3개의 거울을 순회하면서 수증기와 상호작용한다. 이 과정에서 빛이 감쇠되는데 걸리는 시간이 수증기의 동위원소 구성에 따라

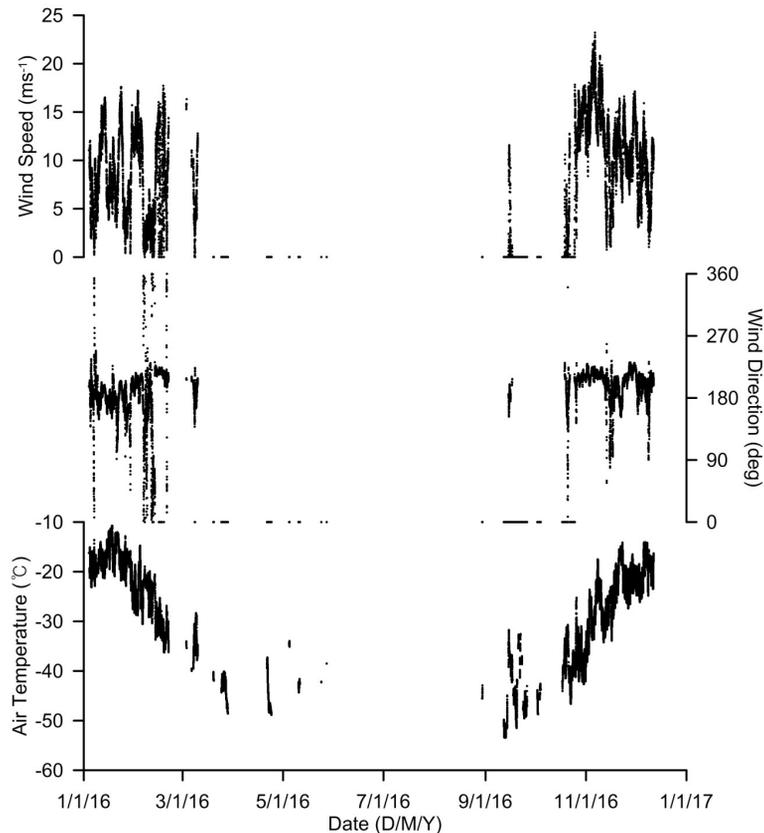


Fig. 2. Meteorological data (top: wind speed, middle: wind direction, bottom: air temperature) from AWS (Automatic Weather System) at Elephant Moraine during January 4, 2016 to December 12, 2016.

달라지는 성질을 이용하여 동위원소 조성을 얻을 수 있다. 이 때 표준물질로는 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency)에서 제공하는 VSMOW2 (Vienna Standard Mean Ocean Water 2), GISP (Greenland Ice Sheet Precipitation), SLAP2 (Standard Light Antarctic Precipitation 2)를 사용하였다. 또 분석의 재현성을 검증하기 위하여 남극에서 얻은 얼음 시료의 용빙수를 자체 표준물질로 사용하여 매 10개의 시료마다 분석하였다. 이를 통하여 얻은 외부재현성(external reproducibility)은 $\delta^{18}\text{O}$ 와 δD 에 대하여 각각 0.05‰과 0.4‰이었다. 이는 해당 장비의 사양($\delta^{18}\text{O}$: 0.025‰, δD : 0.1‰)보다 다소 높은데, 소모성 부품(예: 자동시료채집기 주사기, 진공펌프

의 다이어프램 등)의 소모 정도에 따른 오차요인이 장기 측정 결과에 반영된 것으로 볼 수 있다.

3. 빙하시료 지화학 분석결과

동일한 깊이에서 측정된 블루아이스 속 메탄과 이산화탄소의 농도를 비교한 것이 그림 4a에 제시되어 있다. 타른 플랫 블루아이스에서 메탄은 길이 9-10 cm 간격으로 측정된 반면에 이산화탄소는 약 3 cm 간격으로 측정했기 때문에 이산화탄소 농도의 3개의 평균을 메탄 농도와 비교했다. 엘리펀트 모레인 표층시료는 메탄 220-800 ppb, 이산화탄소 250-410 ppm의 큰 농도분포를 보였다. 그러나, 타른 플랫 코

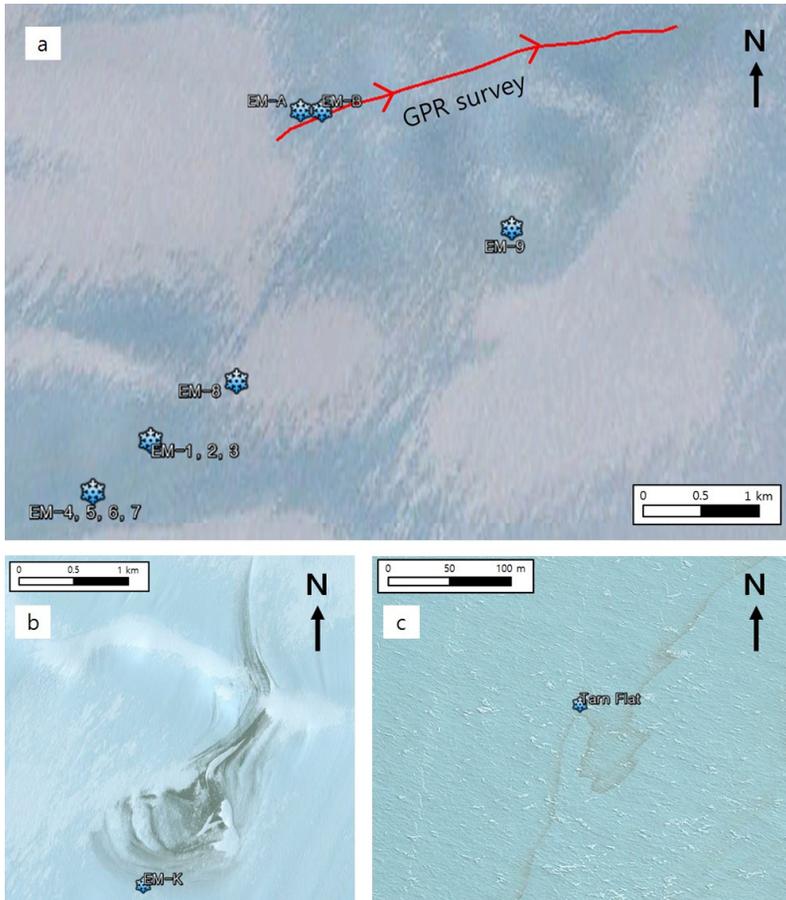


Fig. 3. Aerial photographs of study areas (Google Earth). (a) EM-1~EM-9 sites where surface ice was collected in 2014-15 and EM-A~EM-K were cored in 2016-17 during austral summers. Dark and light areas represent the blue ice field and the snow-covered area respectively. The arrow indicates the GPR survey line and the arrow is the direction. (b) Elephant Moraine area where rock clasts from the base of the ice sheet are exposed (Faure and Mensing, 2010). (c) Tarn Flat area showing a tephra layer.

어시료는 메탄 농도 580-680 ppb, 이산화탄소 농도 240-280 ppm으로 그 값이 서로 비슷하게 분포했다. 특히 과거 80만 년까지의 온실기체 기록이 복원된 Dome C 코어의 이산화탄소와 메탄 농도의 범위가 각각 180-300 ppm, 340-800 ppb인 것을 감안하면 (Loulergue *et al.*, 2008; Lüthi *et al.*, 2008) 엘리펀트 모레인 표층시료는 이 범위에서 크게 벗어나는 것을 확인할 수 있다. 그림 4b는 메탄 농도와 총 공기함량을 같이 비교한 그래프이다. 블루아이스에서 총 공기함량은 기원지의 고도에 대한 정보를 제공하는데 보통 그 값이 작을수록 고도가 더 높은 곳에서 기원한다고 볼 수 있다(Martinerie *et al.*, 1992). 엘리펀트 모레인 표층시료의 총 공기함량은 다른 플랫폼

비해 절반 정도로 작았다. 따라서 총 공기함량이 낮은 엘리펀트 모레인은 고도가 높은 곳에서 기원하였을 가능성도 있지만, 기존 빙하코어 분석값보다 온실기체 농도가 높고 총 공기함량이 낮은 것을 통해 엘리펀트 모레인 블루아이스에서는 균열로 인한 자연적인 변질이 일어났을 것으로 추정하는 것이 타당하다.

물안정동위원소비는 타른 플랫폼 블루아이스의 경우 깊이 11.5 m 상부 구간에서는 3-6 cm 간격으로, 하부 구간에서는 1 cm 간격으로 측정하였다. 결과 범위는 $\delta^{18}\text{O}$ 와 δD 가 각각 -37.59~-27.93‰과 -297.0~-214.5‰였다($n=123$; 그림 5). 깊이에 따른 변동을 보면 고해상도로 측정된 11.5 m 하부 구간에서는 15

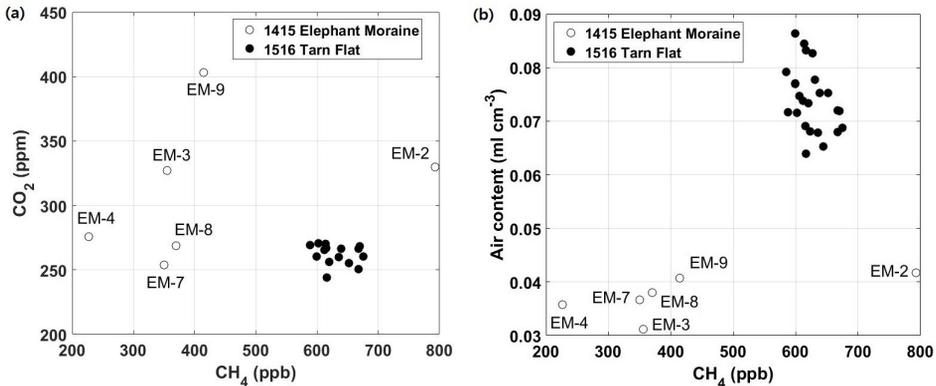


Fig. 4. (a) Cross-plot of CO_2 and CH_4 from Elephant Moraine (EM, open circles) and Tarn Flat data (TF, closed circles). TF data are gathered together, but EM data are spread out. (b) Cross-plot of air content and CH_4 . The air contents of EM samples are lower than those of TF.

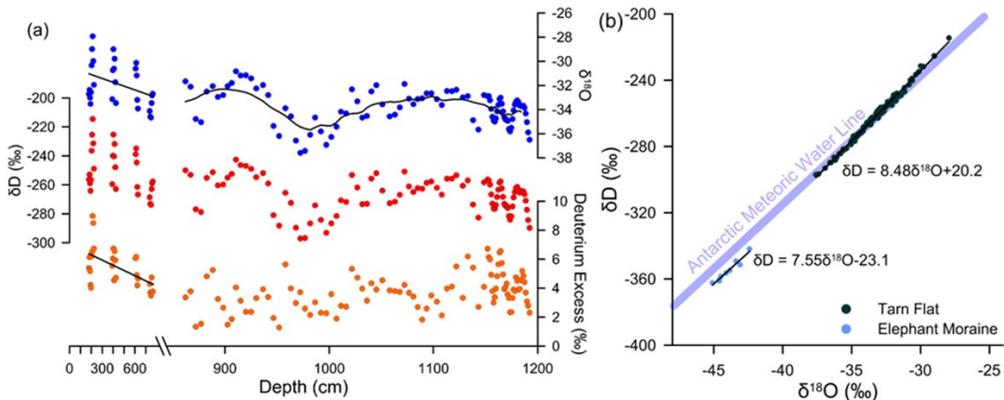


Fig. 5. (a) Water isotope composition ($\delta^{18}\text{O}$, δD and deuterium excess) of the Tarn Flat blue ice samples, varying with depth. The line indicates the 15-point running average. (b) δD versus $\delta^{18}\text{O}$ for the Tarn Flat and the Elephant Moraine blue ice samples. Linear regression lines and their equations are shown. The Antarctic meteoric water line is from Masson-Delmotte *et al.* (2008).

Table 1. The information of sampled blue ice cores. EM and TM stand for Elephant Moraine and Tarn Flat, respectively.

Core	Location	Sampling date (YYYY/MM/DD)	Drilling depth (cm)	Drilling run #
EM-1	S 76°17'01.3" E 156°30'24.9"	2014/12/03	-	-
EM-2				
EM-3				
EM-4	S 76°17'16.3" E 156°29'20.9"	-	surface sampling	-
EM-5				
EM-6				
EM-7				
EM-8	S 76°16'43.25" E 156°32'06.12"	-	-	-
EM-9	S 76°15'52.58" E 156°38'01.92"	2014/12/12	-	-
TF	S 74°55'48.50" E 161°34'10.00"	2016/01/03	1192.5	18
EM-A-1	S 76°15'09.03" E 156°33'12.05"	2016/11/25	22	1
EM-A-2			30.5	1
EM-A-3			42	1
EM-A-4			135	3
EM-A-5			455.5	9
EM-B	S 76°15'09.07" E 156°33'42.04"	2016/11/26, 2016/11/28	1015.5	32
EM-C		2016/12/13	670.5	18
EM-D			1014	23
EM-E		102	1	
EM-F		100	1	
EM-G		114	3	
EM-H		2016/12/14	85	1
EM-I			85	1
EM-J			72	1
EM-K		S 76°19'43.09" E 157°12'45.02"	-	545

cm 이내의 주기를 갖는 변동이 관찰되었으나, 상대적으로 저해상도로 측정된 상부에서는 주기성이 뚜렷하지 않았다. 전반적으로 12 m 깊이에서 상부 방향으로 증감을 반복하면서 서서히 증가하는 경향이 관찰되는데, 이는 6 m 상부에서 뚜렷하다. 이런 경향은 심부가 천부에 비하여 보다 고도가 높은 내륙에서 내린 강설이 형성한 얼음으로 이루어졌거나, 심부가 천부보다 저온 환경의 강설로 이루어졌을 가능성을 제시한다. EM의 경우 상대적으로 보다 고도가 높은 내륙지역에 위치하고 있어 낮은 동위원소비 범

위를 가졌다. $\delta^{18}\text{O}$ 와 δD 의 범위는 각각 -45.10~-42.4 1‰와 -362.3~341.9‰였다(n=9). δD 와 $\delta^{18}\text{O}$ 사이의 관계식은 그 기울기가 7.55로 Antarctic Meteoric Water Line의 기울기인 7.75(Masson-Delmotte *et al.*, 2008)와 유사하였으나(그림 5), 특징적으로 중수소 과잉값(deuterium excess= $8 \times \delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$)이 평균 -3.4‰로 낮았다. 중수소 과잉값은 지표수의 물순환 과정에서 동역학적 분별작용(kinetic fractionation)이 기여한 정도를 주로 지시하는데, 극지역 강설에서 이 값을 변화시키는 가장 큰 요인으로는 수증기

기원지의 온습도와 극지역 대기의 과냉각을 꼽을 수 있다(Masson-Delmotte *et al.*, 2008). 비록 남극에서 음의 중수소 과잉값이 관찰되기는 하나 고도 2000 m 이상에서는 중수소 과잉값과 고도 사이에 양의 상관 관계를 가지므로(Masson-Delmotte *et al.*, 2008), 본 결과는 적설 이후 변질된 동위원소 조성을 가리킬 가능성이 높다. 특히 표층 얼음의 동위원소비가 대기와 상호작용에 의하여 변화했을 수 있다(Sokratov and Golubev, 2009).

4. 엘리펀트 모레인 지역 빙하특성 조사

4.1 블루아이스 시추

온실기체 농도 분석 결과, 엘리펀트 모레인의 표층 블루아이스의 공기시료가 변질되었다고 판단되어, 2016-2017년에는 화산재층이 수 km로 연속성을 보이는 장소를 선정해서 얼음 층의 층서 관계 및 얼음 연령 측정을 위한 시료확보에 주안점을 두었다.

블루아이스 코어시추 및 현장탐사는 헬기로 장보고기지지에서 접근이 가능한 기상조건을 갖는 날에 수행되었는데, 총 다섯 차례 진행되었으며, 시추에는 핸드오거, 전동핸드드릴, 3 kW 발전기, 변압기가 사

용되었다(표 1). 10 m 이상 깊이로 블루아이스를 시추하여 표층에서 변질되지 않은 블루아이스 시료 획득을 목표로 하였으나, 대부분의 경우 얼음을 절삭하는 날(cutter)이 암석파편에 의해 손상되거나, 일부 깊이에서 다량의 크랙과 부수어진 얼음 조각이 발견되어 10 m 보다 얇은 깊이에서 시추가 중단되었다.

EM-A 시추지역(S 76°15'09.03.3", E 156°33'12.05")에는 화산재층이 동서방향으로 수 km 연장되어 분포하며, 화산재층 색깔은 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 열어졌고, 표면에 노출된 폭은 약 80 cm이고 특히 짙은 부분은 10 cm 내외이다(그림 6a). 이 화산재층에 5개의 코어(동쪽부터 서쪽으로 순서대로 각각 456, 135, 42, 22, 31 cm의 깊이)가 나란히 시추되었다.

EM-A 시추지역에서 동쪽으로 약 200 m 가량 떨어진 곳에서 9개의 코어가 추가로 시추되었는데, 이중 2개의 코어는 10 m 이상으로 시추되었고, 각 코어는 EM-B부터 알파벳 순서대로 EM-J까지 명명되었다(그림 7). 이 지역도 화산재층이 동서방향으로 수 km 연장되어 분포되어 있는데, EM-B 코어의 최상부에서 관찰되는 화산재층의 주향과 경사는 각각 EW와 59°S이다. 화산재층의 연장성을 확인하기 위

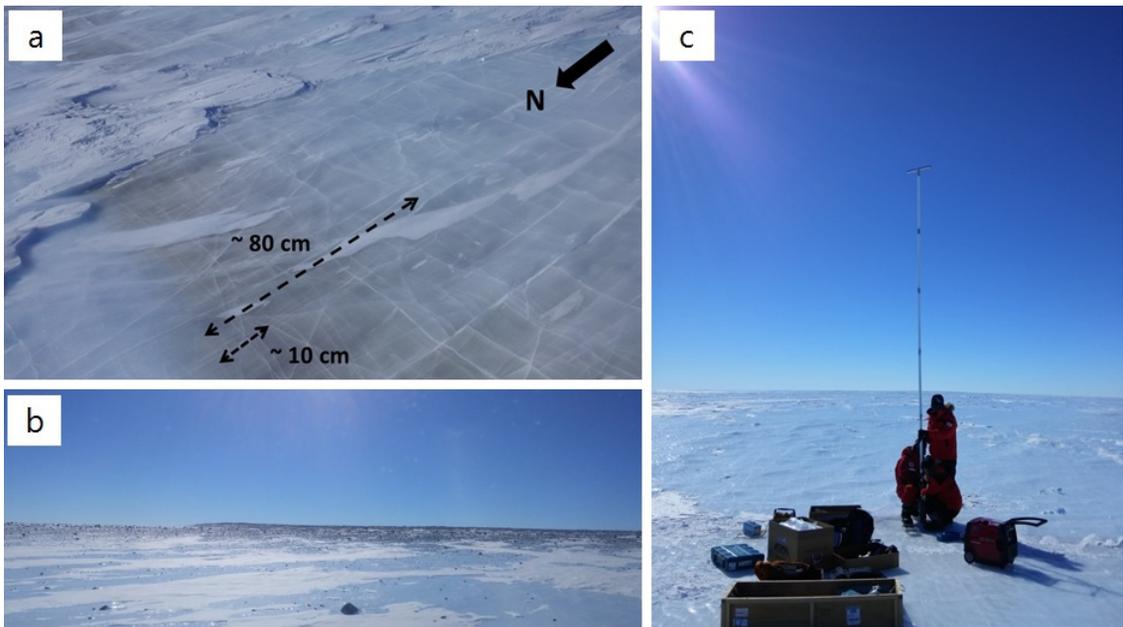


Fig. 6. (a) The exposed tephra layer with 10-80 cm thickness at EM-A site. (b) The rock clasts and large boulders exposed on the surface at EM-K site. (c) Field sketch of drilling blue ice in Elephant Moraine.

하여 EM-B 코어의 남쪽과 북쪽으로 3 m씩 떨어진 지점에 각각 EM-C와 EM-D 코어가 시추되었다. EM-B에서 관찰된 화산재층이 경사가 유지된다면 EM-C 코어에서는 5 m 깊이에서 화산재층이 발견될 것이라 예측되었으나, 실제로 예상보다 얇은 76 cm 깊이에서 관찰되었다. EM-B의 표면에서 관찰된 화산재층의 기울기 및 연속성을 알아내기 위해 EM-B와 EM-C 사이의 세 지점에서 코어를 시추했고, EM-B로부터 화산재층에 남쪽으로 수직하게 30, 100, 205 cm 떨어진 지점을 각각 EM-E, EM-F, EM-G라고 명명하였다(그림 7). 3개의 코어를 약 1 m씩 시추한 결과 화산재층은 보이지 않아서, EM-B의 표면에서 관찰된 화산재층과 EM-C의 76 cm에서 발견된 것이 이어져있기보다는 각기 다른 층인 것으로 판단된다.

화산재층 면의 3차원적 분포를 이해하기 위하여 추가적인 연구를 진행하였는데, EM-B로부터 동쪽으로 3 m 떨어진 화산재층 위에 EM-H 코어를 시추했고 이곳에서 남서쪽으로 각각 49, 96 cm 떨어진 곳에 EM-I, EM-J 코어를 시추하였다. 화산재층은 EM-H코어에서는 표면에, EM-I는 13 cm, EM-J는 25 cm 깊이에서 관찰되었고, 표면에서부터 깊어질수록 화산재층의 색깔이 얼어짐을 확인하였다. 이 세 개의 코어의 수평적 위치와 화산재층 깊이 분포

를 바탕으로, 화산재층면의 주향과 경사가 각각 EW와 20°S인 것을 확인하였다(그림 7).

EM-K 코어는 EM-B에서 남동쪽으로 20 km 떨어진 곳에서 시추되었는데, 엘리펀트 모레인 지역에서 코끼리 코 모양으로 암설이 노출된 곳에 해당한다(그림 6b). 시추장소에는 수 cm에서 수십 cm 크기의 다양한 종류의 암석이 블루아이스 표면에 노출되어 있는데, 오랜 기간 바람에 의해 풍화를 받은 것으로 추정된다.

4.2 GPR 탐사

GPR (Ground Penetrating Radar) 탐사는 라디오 파가 지면을 투과할 때 암석, 눈, 얼음, 공기 같은 지하 구성 물질 상태에 따라 유전율 차이로 인해 생성되는 반사파를 탐지하는 탐사 방법이다. GPR 탐사를 통해 빙하에서 발달하는 내부 구조인 크레바스, 만년설선, 빙하 내부의 수로 등을 알 수 있고 빙하의 유동과 관련된 중요한 정보를 얻을 수 있다.

시추 기간 중 엘리펀트 모레인 블루아이스 지역에 대해, 연구팀이 총 길이 3,636 m를 걸으며 GPR탐사를 수행했다(그림 3a). 기반암에 대한 정보를 얻기 위해 기존에 두 구간을 계획하였으나 한 구간은 GPR 장비 이상으로 도중에 중단하고 나머지 한 구간에 대한 정보만 얻었다. GPR 조사 결과, 경로 내에서는

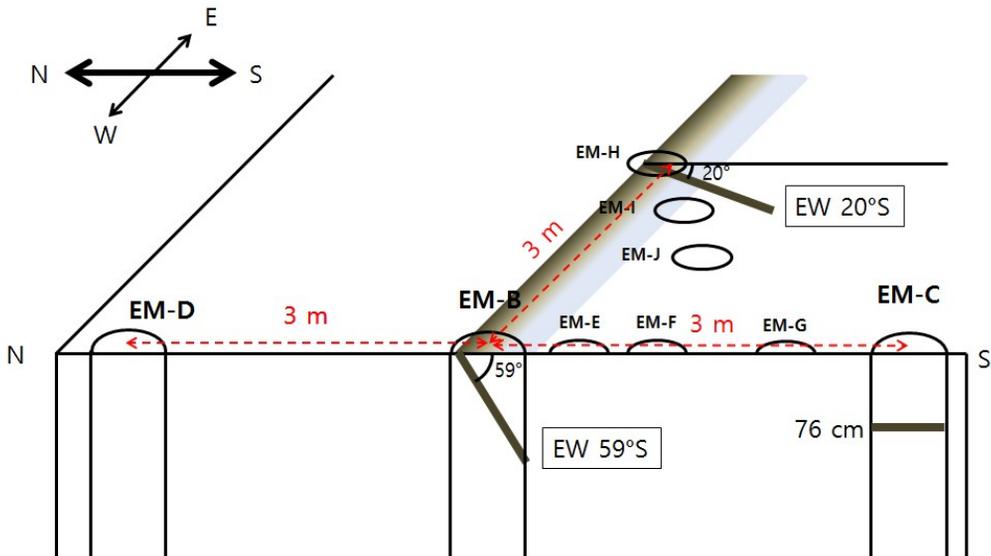


Fig. 7. Schematic illustrations of the tephra layer at Elephant Moraine sites. Dark line at the surface and in the borehole represent tephra layers and ellipses indicate coring locations.

깊이 450 m에서 800 m의 사이에서 기반암이 존재하는 것으로 나타났다(그림 8). GPR 자료를 통해 기반암이 깊이 800 m에서 450 m까지 솟음으로 빙하가 기반암을 따라 상승하여 배사구조(Fahnestock *et al.*, 2000; Frezzotti *et al.*, 2002)가 되므로 삭박작용

으로 블루아이스 지역이 형성되며, 이로 인해 기반암 경사를 따라서 화산재층이 수평이 아닌 20-59°의 경사진 형태로 노출된 것으로 추정된다. GPR자료는 층서구조 파악 및 연령측정 뿐만 아니라, 시추지점을 설정하는데 매우 유용하게 활용될 것으로 전망

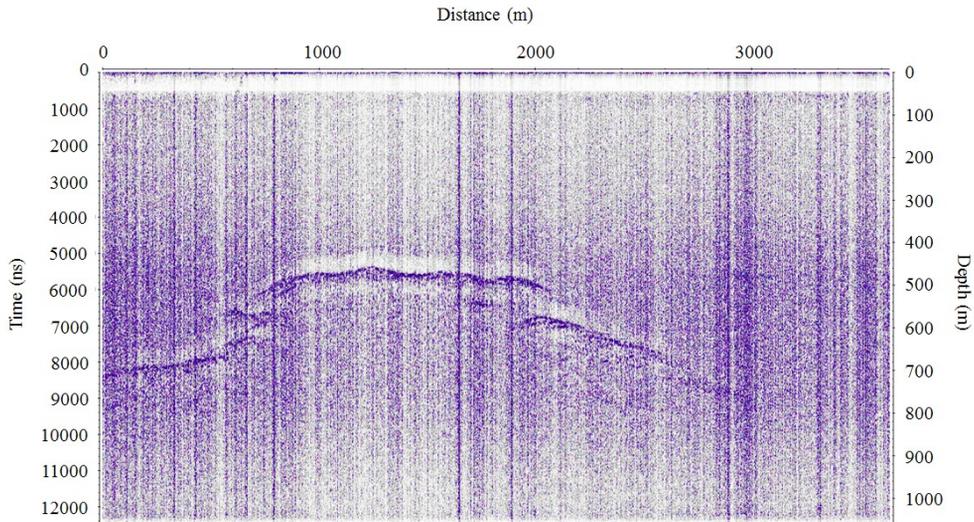


Fig. 8. Ground penetrating radar (GPR) results. The bed rock is laid down to 450-800 m from the surface.

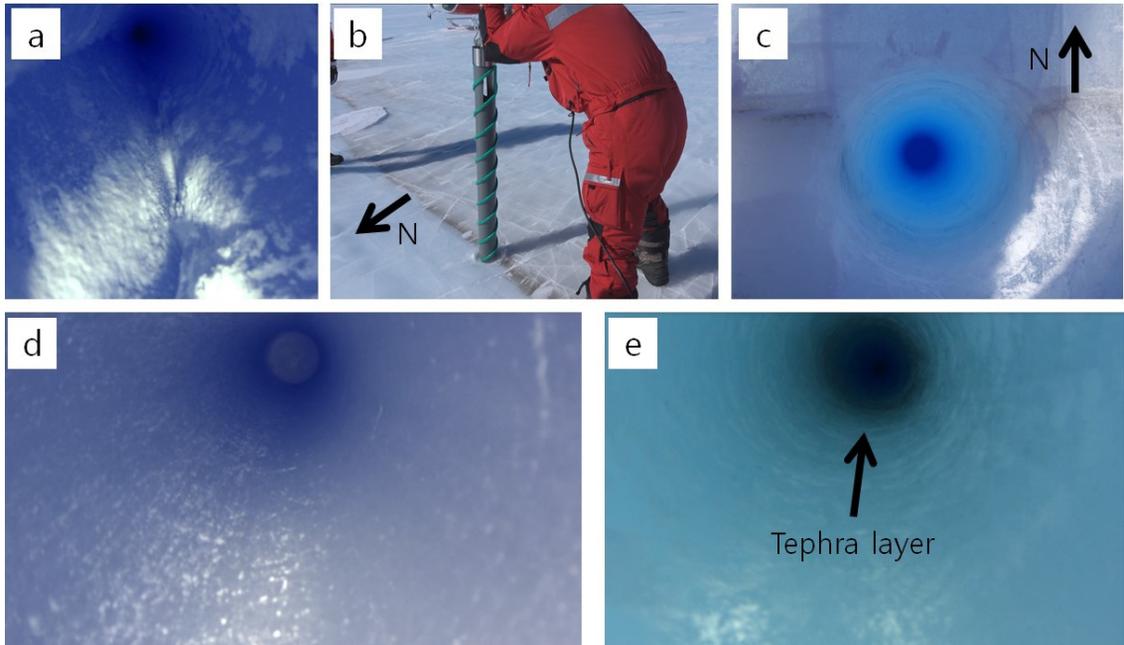


Fig. 9. Cavity and tephra layers. (a) The cavity at the depth of 3-7 m in the EM-D, (b) EM-B core was drilled on the tephra layer, (c) The tephra layer tilted with an angle of 59° found in the surface, (d) The bottom of EM-D core, (e) the tephra layer at the depth of 76 cm in the EM-C.

된다(Brian *et al.*, 2009).

4.3 시추공 내부 촬영

EM-B, EM-C, EM-D 총 3개의 블루아이스 시추가 완료된 후에 시추공을 촬영하였다. 촬영 장비와 방법은 Han *et al.* (2015)의 연구를 참고했다. 시추공 내부 촬영을 통해 블루아이스 내부 구조 및 균열, 화산재층의 유무 등을 판단할 수 있었다. 시추된 모든 블루아이스 코어에서는 상하방향의 균열이 발견되었지만, EM-B와 EM-C 시추공 내의 균열은 관찰되지 않았다. 반면, EM-D 시추공은 약 3~7 m 깊이 구간에서 깊은 균열과 빈 공간이 확인되었다(그림 9a). 이로 인해 EM-D 코어에서 다량의 균열과 부서진 얼음 조각이 나타난 것으로 사료된다. 그러나 7 m 이후 EM-D의 시추공 내부는 EM-B와 EM-C 시추공 내부와 마찬가지로 균열이 관찰되지 않았다(그림 9d). 그럼에도 시추된 코어에서는 깊고 많은 균열이 관찰되었다.

EM-B에서는 표면에 노출된 화산재층 위에서 시추를 진행하였다(그림 9b). 이를 통해서 EM-B 코어 최상부에서는 약 59°남쪽으로 기울어진 화산재층을 촬영할 수 있었다(그림 9c). 화산재층을 기준으로 남쪽으로 3 m 떨어진 EM-C 코어에서는 약 76 cm 깊이에서 화산재층이 발견되었다(그림 9e). 반면, 화산재층을 기준으로 북쪽으로 3 m 떨어진 EM-D 코어에서는 화산재층이 발견되지 않았다.

5. 결론

3년간의 예비 연구를 바탕으로 향후 연구에 필요한 점을 제시한다. 첫 번째로, 블루아이스 지역은 일반적으로 바람이 세고 극저온의 환경이어서, 기상상황에 민감한 헬기운용으로는 효율적인 시추 및 탐사 연구를 담보하기 어렵다. 따라서, 블루아이스 지역에서 캠프를 하면서 시추 및 탐사를 수행하는 것이 필수적으로 요구된다. 안전 확보 및 효율적인 시추를 위해서는 바람에 강한 튼튼한 구조물을 설치하고 실내에서 작업하는 방법도 고려해 볼 만하다. 두 번째는, 과학적 목적에 맞는 시추지점을 찾기 위해서 광범위하고 집중적인 지구물리 탐사가 필요하다. 빙하 바닥과 표면의 고도자료, 층의 발달상태, 유속 등에 대한 정보의 확보가 시급하다. 세 번째는, 정확한 연

령측정을 위하여 다량의 빙하시료에서 공기시료를 추출하는 장치의 개발과 고해상도 불활성기체 측정 장비 활용을 위한 해외 연구기관과의 공동연구도 함께 모색되어야 한다. 끝으로, 블루아이스 연구는 빙하학, 고기후학, 운석암석학, 기상학 등의 다학제적 연구가 가능한 분야로서 향후 공동연구를 위한 학계의 관심과 지원이 요구된다.

사 사

이 논문은 한국연구재단 중견연구자지원사업(NRF-2015R1A2A2A01003888), 서울대학교 유망선도연구 자지원사업, 연암해외연구교수지원사업 및 극지연구소의 창의연구사업(PE15350)과 주요사업(PE17040)의 지원을 받아 수행된 연구사업이다.

REFERENCES

- Ahn, J., Brook, E.J. and Howell, K., 2009, A high-precision method for measurement of paleoatmospheric CO₂ in small polar ice samples. *Journal of Glaciology*, 55, 499-506.
- Baggenstos, D., Bauska, T.K., Severinghaus, J.P., Lee, J.E., Schaefer, H., Buizert, C., Brook, E.J., Shackleton, S. and Petrenko, V.V., 2017, Atmospheric gas records from Taylor Glacier, Antarctica, reveal ancient ice with ages spanning the entire last glacial cycle. *Climate of the Past*, 13, 943-958.
- Bender, M.L., Barnett, B., Dreyfus, G., Jouzel, J. and Porcelli, D., 2008, The contemporary degassing rate of ⁴⁰Ar from the solid Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 8232-8237.
- Bintanja, R., 1999, On the glaciological, meteorological, and climatological significance of Antarctic blue ice areas. *Reviews of Geophysics*, 37, 337-359.
- Brian, C.W., Robert, W.J. and Steven, A.A., 2009, First results from profiles collected along the US-ITASE traverse from Taylor Dome to South Poll (2006-2008). *Annals of Glaciology*, 50, 35-41.
- Buizert, C., Baggenstos, D., Jiang, W., Purtschert, R., Petrenko, V.V., Lu, Z.T., Muller, P., Kuhl, T., Lee, J., Severinghaus, J.P. and Brook, E.J., 2014, Radiometric ⁸¹Kr dating identifies 120,000-year-old ice at Taylor Glacier, Antarctica. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 6876-6881.
- Curzio, P., Folco, L., Laurenzi, M.A., Mellini, M. and Zeoli, A., 2008, A tephra chronostratigraphic framework for

- the Frontier Mountain blue-ice field (northern Victoria Land, Antarctica). *Quaternary Science Reviews*, 27, 602-620.
- Fahnestock, M.A., Scambos, T.A., Shuman, C.A., Arthern, R.J., Winebrenner, D.P. and Kwok, R., 2000, Snow megadune fields on the East Antarctic Plateau: extreme atmosphere-ice interaction. *Geophysical Research Letters*, 27, 3719-3722.
- Faure, G. and Mensing, T.M., 2010, *The Transantarctic Mountains: Rocks, ice, meteorites and water*. Springer Science & Business Media, 804 p.
- Faure, G., Wehn, K.S., Montello, J.M., Hagen, E.H., Strobel, M.L. and Johnson, K.S., 1993, Isotope composition of the ice and sub-glacial geology near the Allan Hills, Victoria Land, Antarctica. *Gondwana Eight*, 485-495.
- Frezzotti, M., Gandolfi, S. and Urbini, S., 2002, Snow megadunes in Antarctica: sedimentary structure and genesis. *Journal of Geophysical Research*, 107, 4344.
- Goldstein, S.J., Murrell, M.T., Nishiizumi, K. and Nunn, A.J., 2004, Uranium-series chronology and cosmogenic ^{10}Be - ^{36}Cl record of Antarctic ice. *Chemical geology*, 204, 125-143.
- Han, Y., Jun, S.J., Miyahara, M., Lee, H-G., Ahn, J., Chung, J.W., Hur, S.D. and Hong, S.B., 2015, Shallow ice-core drilling on Styx glacier, northern Victoria Land, Antarctica in the 2014-2015 summer. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 343-355 (in Korean with English abstract).
- Higgins, J.A., Kurbatov, A.V., Spaulding, N.E., Brook, E., Introne, D.S., Chimiak, L.M., Yan, Y., Mayewski, P.A. and Bender, M.L., 2015, Atmospheric composition 1 million years ago from blue ice in the Allan Hills, Antarctica. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 6887-6891.
- Jung, Y.Y., Koh, D.C., Lee, J. and Ko, K.S., 2013, Applications of isotope ratio infrared spectroscopy (IRIS) to analysis of stable isotopic compositions of liquid water. *Economic and Environmental Geology*, 46, 495-508 (in Korean with English abstract).
- Jouzel, J., Masson-Delmotte, V., Cattani, O., Dreyfus, G., Falourd, S., Hoffmann, G., Minster, B., Nouet, J., Barnola, J.-M. and Fischer, H., 2007, Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years. *Science*, 317, 793-796.
- Jouzel, J., 2013, A brief history of ice core science over the last 50 yr. *Climate of the Past*, 9, 2525-2547.
- Loulergue, L., Schilt, A., Spahni, R., Masson-Delmotte, V., Blunier, T., Lemieux, B., Barnola, J.M., Raynaud, D., Stoker, T.F. and Chappellaz, J., 2008, Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH_4 over the past 800,000 years. *Nature*, 453, 383-386.
- Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K. and Stocker, T.F., 2008, High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature*, 453, 379-382.
- Martinerie, P., Raynaud, D., Etheridge, D.M., Barnola, J.M. and Mazaudier, D., 1992, Physical and climatic parameters which influence the air content in polar ice. *Earth and Planetary Science Letters*, 112, 1-13.
- Masson-Delmotte, V., Hou, S., Ekaykin, A., Jouzel, J., Aristarain, A., Bernardo, R.T., Bromwich, D., Cattani, O., Delmotte, M., Falourd, S., Frezzotti, M., Gallée, H., Genoni, L., Isaksson, E., Landais, A., Helsen, M.M., Hoffmann, G., Lopez, J., Morgan, V., Motoyama, H., Noone, D., Oerter, H., Petit, J.R., Royer, A., Uemura, R., Schmidt, G.A., Schlosser, E., Simões, J.C., Steig, E.J., Stenni, B., Stievenard, M., van den Broeke, M.R., van de Wal, R.S.W., van de Berg, W.J., Vimeux, F. and White, J.W.C., 2008, A review of Antarctic surface snow isotopic composition: Observations, atmospheric circulation, and isotopic modeling. *Journal of Climate*, 21, 3359-3387.
- Moore, J.C., Nishio, F., Fujita, S., Narita, H., Pasteur, E., Grinsted, A., Sinisalo, A. and Maeno, N., 2006, Interpreting ancient ice in a shallow ice core from the South Yamato (Antarctica) blue ice area using flow modeling and compositional matching to deep ice cores. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111, D16302.
- Petrenko, V.V., 2013, Ice Margin Sites. *Encyclopedia of Quaternary Science*, 2, 416-430.
- Raynaud, D., Jouzel, J., Barnola, J.M., Chappellaz, J., Delmas, R.J. and Lorius, C., 1993, The ice record of greenhouse gases. *Science*, 259, 926-934.
- Scherer, P., Schultz, L., Neupert, U., Knauer, M., Neumann, S., Leya, I., Michel, R., Mokos, J., Lipschutz, M.E., Metzler, K., Suter, M. and Kubik, P.W., 1997, Allan Hills 88019: An Antarctic H-chondrite with a very long terrestrial age. *Meteoritics & Planetary Science*, 32, 769-773.
- Schwander, J., Barnola, J.M., Andrié, C., Leuenberger, M., Ludin, A., Raynaud, D. and Stauffer, B., 1993, The age of the air in the firn and the ice at Summit, Greenland. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98, 2831-2838.
- Sinisalo, A. and Moore, J.C., 2010, Antarctic blue ice areas-towards extracting palaeoclimate information. *Antarctic Science*, 22, 99-115.
- Sokratov, S.A. and Golubev, V.N., 2009, Snow isotopic content change by sublimation. *Journal of Glaciology*, 55, 823-828.
- Spaulding, N.E., Spikes, V.B., Hamilton, G.S., Mayewski,

- P.A., Dunbar, N.W., Harvey, R.P., Schutt, J. and Kurbatov, A.V., 2012, Ice motion and mass balance at the Allan Hills blue-ice area, Antarctica, with implications for paleoclimate reconstructions. *Journal of Glaciology*, 58, 399-406.
- Welten, K.C., Alderliesten, C., Van Der Borg, K., Lindner, L., Loeken, T. and Schultz, L., 1997, Lewis Cliff 86360: An Antarctic L-chondrite with a terrestrial age of 2.35 million years. *Meteoritics & Planetary Science*, 32, 775-780.
- Wilch, T.I., McIntosh, W.C. and Dunbar, N.W., 1999, Late Quaternary volcanic activity in Marie Byrd Land: Potential $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -dated time horizons in West Antarctic ice and marine cores. *Geological Society of America Bulletin*, 111, 1563-1580.
- Yang, J.W., Ahn, J., Brook, E.J. and Ryu, Y., 2017, Atmospheric methane control mechanisms during the early Holocene. *Climate of the Past*, accepted.

Received : June 30, 2017

Revised : August 25, 2017

Accepted : August 25, 2017