Vol. 36(1):13-24
http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2014.36.1.013

Ocean and Polar Research

March 2014

Article

빙하코어의 전처리 방법 및 기초 프록시 분석법 확립

전성준[1,2] · 홍상범[2] · 허순도[2] · 이정훈[3] · 강정호[2] · 황희진[2] · 정지웅[2] · 정혜진[2] · 한창희[1] · 홍성민[1*]

[1]인하대학교 자연과학대학 해양과학과
(402-751) 인천광역시 남구 인하로 100
[2]한국해양과학기술원 부설 극지연구소
(406-840) 인천광역시 연수구 송도미래로 26
[3]이화여자대학교 사범대학 과학교육과
(120-750) 서울특별시 서대문구 이화여대길 52

Establishment of an Ice Core Processing Method and Analytical Procedures for Fundamental Proxies

Seong Joon Jun[1,2], Sang Bum Hong[2], Soon Do Hur[2], Jeonghoon Lee[3], Jung-Ho Kang[2], Hee Jin Hwang[2], Ji Woong Chung[2], Hye Jin Jung[2], Changhee Han[1], and Sungmin Hong[1*]

[1]Department of Ocean Sciences, College of Natural Sciences, Inha University
Incheon 402-751, Korea
[2]Korea Polar Research Institute, KIOST
Incheon 406-840, Korea
[3]Department of Science Education, College of Education, Ewha Womans University
Seoul 120-750, Korea

Abstract : We established the first complete ice core processing method and analytical procedures for fundamental proxies, using a 40.2 m long ice core drilled on the Mt. Tsambagarav glacier in the Mongolian Altai mountains in July 2008. The whole core was first divided into two sub ice core sections and the measurements of the visual stratigraphy and electrical conductivity were performed on the surface of these sub core sections. A continuous sequence of samples was then prepared for chemical analyses (stable isotope ratios of oxygen ($^{18}O/^{16}O$) and hydrogen ($^{2}H/^{1}H$), soluble ions and trace elements). A total of 29 insoluble dust layers were identified from the measurement of visual stratigraphy. The electrical conductivity measurement (ECM) shows 11 peaks with the current more than 0.8 μA. Comparing the profiles of SO_4^{2-} and Cl^- concentrations to correlate with known volcanic eruptions, the first two ECM peaks appear to be linked to the eruptions (January and June 2007) of Kliuchevskoi volcano on the Kamchatka Peninsula of Russia, which supports the reliability of our ECM data. Finally, the composition of stable isotopes ($\delta^{18}O$ and δD) shows a well-defined seasonal variation, suggesting that various chemical proxies may have been well preserved in the successive ice layers of Tsambagarav ice core. Our ice core processing method and analytical procedures for fundamental proxies are expected to be used for paleoclimate and paleoenvironmental studies from polar and alpine ice cores.

Key words : ice core processing, fundamental proxies, Electrical Conductivity Measurement (ECM), Visual Stratigraphy (VS), stable water isotopes

*Corresponding author. E-mail : smhong@inha.ac.kr

1. 서 론

극지방과 중저위도 고산지역에 분포하는 빙하는 매년 내리는 강설이 녹지 않고 쌓이면서 짧게는 수백 년에서 길게는 수십만 년에 걸쳐 형성된다. 강설은 구름에서 눈의 결정체가 형성되고 지표면으로 퇴적되는 과정을 통해 당시의 기후 및 대기성분들에 의해 조절되는 다양한 물리화학적 특성들을 간직하기 때문에 빙하를 과거의 기후와 환경변화 기록을 보존하고 있는 '냉동타임캡슐'이라 일컫는다(Boutron 1995; Legrand and Mayewski 1997). 빙하에 축적되어 있는 물리화학적 특성들을 과거의 기후와 환경변화를 지시하는 '프록시'라고 하며, 이러한 프록시를 분석하여 고기후 및 고환경변화의 기록을 복원하기 위해 기계적 절삭이나 가열 방법을 이용하여 원통형(내경 60~200 mm)으로 시추한 빙하시료를 빙하코어(ice core)라고 한다.

빙하코어에서 분석하는 물리화학적 프록시들의 예를 들면, 기후변화는 산소와 수소 안정동위원소($\delta^{18}O$와 δD) 및 온실기체(CO_2, CH_4, N_2O), 대기 순환과 지표면 환경변화는 수용성 이온(Na^+, NH_4^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, $CH_3SO_3^-$ 등), 화산활동은 전기전도도, 화산재, 수용성 이온(Cl^-, F^-, SO_4^{2-})과 미량원소(Bi, Tl, Cd, In 등), 인간활동의 영향은 미량원소(Cu, Zn, As, Cd, Sb, Pb 등), 그리고 바람세기의 변화는 불용성 먼지 크기와 농도 등이 있다(Boutron 1995; Legrand and Mayewski 1997).

지금까지 빙하코어를 활용한 고기후 및 고환경 연구는 프랑스, 영국, 미국, 일본 등 빙하연구의 선도국가들을 중심으로 수행되어 왔다. 1990년대 후반부터 극지연구소를 중심으로 빙하연구를 시작한 우리나라는 아직까지도 국제공동연구를 통해 확보한 빙하코어 시료를 활용하여 제한된 연구 분야만 접근하고 있다(Hong et al. 2003, 2004, 2009; Lee et al. 2011; Hur et al. 2013). 선도국가들처럼 종합적인 빙하코어 연구를 수행하기 위해서는 다음의 네 가지 조건이 충족되어야 한다(Boutron 1995; Hong et al. 2000). 첫째, 대부분 극한지에 분포하는 빙하에 접근할 수 있는 로지스틱스(logistics)와 빙하코어를 시추할 수 있는 공학기술이 요구된다. 둘째, 시추한 빙하코어의 전처리 기술과 기초 프록시 분석기술이 필요하다. 셋째, 물리화학적 프록시 기록을 활용하기 위해서는 빙하코어의 연대측정(age-dating)이 선행되어야 한다. 마지막으로 빙하코어에서 극미량으로 존재하는 화학성분을 분석할 수 있는 청정실험실과 분석 장비의 인프라가 구축되어야 한다.

현재 우리나라의 빙하연구는 극미량의 화학성분 분석기술과 인프라 구축 단계에서 빙하코어 시추기술 개발 단계로 진입하고 있다. 하지만 아직까지 독자적인 빙하코어 시료를 활용하여 빙하시료 전처리 과정과 기초 프록시를 분석한 경험이 없기 때문에 선진국 수준의 종합적인 빙하연구를 수행하기 위해서는 앞서 언급한 두 번째와 세 번째의 기술력 확보가 시급한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 우리나라가 주도한 국제공동연구를 통해 2008년 6월에 몽골 알타이산맥 참바가라브(Tsambagarav)산에서 시추한 40.2 m 길이의 빙하코어를 활용하여 국내 처음으로 빙하시료 전처리 기술과 기초 프록시 분석 기술을 확립하여 종합적인 빙하코어 연구를 수행하기 위한 기초연구를 시도하였다. 이에 다양한 분석 목적에 맞는 빙하코어 처리방법(processing method)과 시각적 층위구분(visual stratigraphy) 방법을 설정하였으며, 전기전도도 측정(electrical conductivity measurement) 장비를 제작하여 빙하시료에 적용함으로써 성능 검증과 더불어 ECM 기록을 복원하였다. 마지막으로 물 안정동위원소(stable water isotopes, $\delta^{18}O$와 δD)를 분석하여 몽골 참바가라브 빙하코어에 기록된 화학적 프록시의 보존 상태를 확인하였다.

2. 재료 및 방법

몽골 참바가라브산 빙하코어 시추

본 연구에서 이용된 빙하코어는 2008년 6월에 한국, 중국 그리고 몽골 3개국의 국제공동연구를 통해 몽골 알타

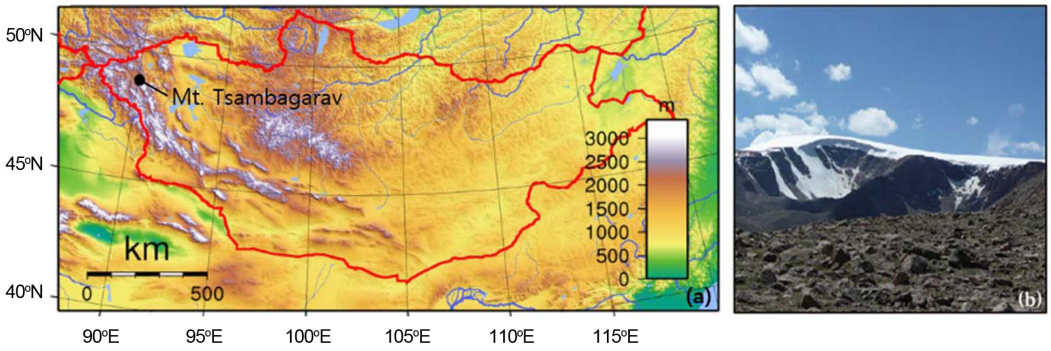


Fig. 1. Map of the location of ice core drilling site, Tsambagarav (a) and view of the Tsambagarav ice cap where an ice core was recovered (b)

이(Altai) 산맥의 참바가라브산(48º 38'N, 90º 57'E, 해발 3,830 m) 정상부 빙원에서 시추되었다(Fig. 1a). 몽골 알타이 산맥은 건조한 대륙성 기후의 영향을 받는 지역으로서 연 강수량은 160 mm이며, 해발 2750 m부터 4374 m에 걸쳐 약 250개의 빙하가 분포하고, 총 면적은 514 km^2로 추정된다(Enkhtaivan 2006). 참바가라브산의 빙하는 골짜기를 따라 이동하는 큰 곡빙하(valley glacier)와 정상부의 모자형 빙원(ice cap)으로 이루어져 있고, 전체 빙하 면적은 약 70 km^2로서 1970년에 비해 약 30% 정도 감소한 것으로 보고되고 있다(Kadota and Davaa 2007).

참바가라브산의 빙하코어 시추 지점은 GPR(Ground Penetrating Radar) 탐사를 통해 빙하의 두께와 내부구조를 조사한 후 빙하의 수평적 내부층이 교란되지 않고 최대 두께(90 m)가 관측된 모자형 빙원의 정상부 부근에서 진행되었다(Fig. 1b). 빙하시추기는 외부 경통이 없고 경량의 고산용 빙하시추기로 개량된 중국 란저우 빙하연구소의 빙하시추기(내경 90 mm)를 사용하였다. 빙하코어 시추는 총 72회에 걸쳐 시행되었고 1회 시추에서 획득된 빙하코어의 길이는 30~80 cm(평균길이 55 cm)이며, 시추 도중에 케이블 절단으로 인하여 40.2 m 깊이에서 시추가 중단되었다(극지연구소 2011). 시추한 빙하코어 시료는 베이스캠프에서 발전기를 이용하여 −20ºC 냉동고에 보관하였으며, 이후 극지연구소 빙하코어 시료저장실까지 운반하는 전 과정에서 −20ºC의 냉동 상태를 유지하였다.

빙하코어 절삭 과정

시료의 양이 매우 제한적인 빙하코어에서 다양한 분석(물리적 특성, 산성도, 물 안정동위원소, 수용성 이온성분, 극미량 원소, 불용성 먼지 등)을 수행하기 위해서는 분석에 적합한 시료를 확보하기 위한 계획적인 절삭 과정이 선행되어야 한다(Stauffer et al. 1988). 절삭 과정은 원통형 빙하코어를 수직방향으로 절삭하는 1차 절삭 과정과 절삭된 반원통 형태의 서브 빙하코어(sub ice core: SIC)를 분석 목적에 따라 재 절삭하는 2차 절삭 과정으로 구분할 수 있다(극지연구소 2011). 빙하코어 절삭은 극지연구소 빙하코어시료 저장실(−15ºC)에 설치된 수직 띠톱(BS10KA vertical band saw, Rexon, US)을 이용하였다.

본 연구에 적용된 빙하코어 절삭방법은 이전의 남극 Dome Fuji 빙하코어와 그린란드 GRIP 빙하코어의 절삭방법을 참고하였다(Shuji et al. 2002). 1차 절삭 과정에서는 직경 90 mm의 빙하코어에서 향후 추가 분석이나 분석자료 검증을 위한 보관용 시료로 활용하기 위하여 전체 시료 양의 40%에 해당하는 35 mm의 단면 지점을 수직으로 절삭하였다(Fig. 2의 R1). 나머지 60%(65 mm)의 코어 시료는 SIC로 분류하여 물리적 특성, 산성도, 물 안정동위원소, 수용성 이온성분, 극미량 무기원소 그리고 불용성 먼지 분석을 수행하기 위한 시료의 양을 확보하였다(Fig. 2). 1차 절삭된 SIC의 절삭면에서 시각적 층위구분과 ECM을 측정하였으며, 측정이 완료된 빙하코어 시료는 물 안정동위원소($\delta^{18}O$와 δD)와 화학적 프록시 분석을 위한 2차 절삭을 진행하였다. Fig. 2의 S-2 부분은 연구지역의 연 강수량(160 mm/yr)을 고려하여 물 안정동위원소의 연 주기 변화를 복원하는데 필요한 최소한의 시료 개수(8개)를 확보하도록 20 ± 2 mm 간격으로 재 절삭하였으며, 물 안정동위원소 분석에 이용할 총 1,935개의 시료를 확보하였다. 절삭된 시료는 세척된 스테인리스 강 재질의 끌로 표면을 약 1 mm 정도 깎아 내서 절삭 과정에서 유입될 수 있는 오염물질을 제거하였다. 빙하시료 용융을 통해 화학성분 분석에 사용될 시료는 S-2 부분이 절삭된 SIC에서 빙하코어 시료표면의 오염물질 제거를 위한 용융장치에 적합하도록 사각형 막대 형태(가로 40 ± 4 mm, 세로 40 ± 4 mm, 길이 80 mm)로 재 절삭하여 분석이 불가능한

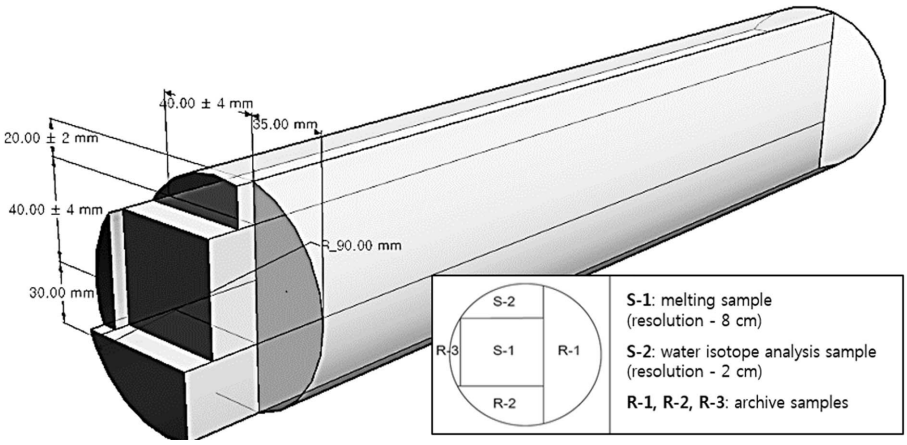


Fig. 2. Schematic diagram of the ice core cutting. The first cutting sequence is shown with gray plane (R-1) and the second cutting sequences are shown as black planes (sub ice core: SIC)

부분을 제외하고 총 374개의 시료를 확보하였다. 1차와 2차에서 절삭된 모든 시료들은 분석 전까지 LDPE(Low Density Polyethylene) 비닐봉투에 넣어 −20°C의 냉동 상태로 보관한다.

시각적 층위구분 측정

빙하코어의 시각적 층위구분은 시료의 보존 상태는 물론 화산재와 먼지바람에 의한 불용성 먼지층(insoluble dust layer), 공기 기포층(air bubble layer), 하절기에 발생하는 융설수의 침투(percolation)와 재결빙(refreezing), 빙하층의 부정합(unconformity) 등의 물리적 특성에 관한 기초 정보를 제공한다(Koerner 1997). 이전의 시각적 층위구분은 연구자가 직접 관찰하여 빙하코어 주상도(column map)를 그리는 방식으로 수행되었다. 하지만 최근에는 이미징 장치들의 발전에 따라 디지털라인스캐너(digital line scanner)를 이용하여 빙하코어 시료에 빛을 투과시킨 후 얼음 내부의 상태에 따라 회절되는 빛의 강도를 통해 고해상도의 입체적인 시각적 층위구분 자료를 획득할 수 있게 되었다(Anders et al. 2005). 디지털라인스캐너를 통한 입체적인 이미지 정보는 빙하코어의 불용성 먼지와 공기 기포층의 분포에 따라 흑백의 명암 차이가 발생하게 되는데, 분포의 양이 많으면 회절되는 빛의 양이 증가하여 이미지는 백색으로, 분포의 양이 적으면 회절되는 빛의 양이 감소하여 이미지는 흑백으로 나타난다(Kinnard et al 2008).

본 연구에서는 퇴적물코어 시료표면 스캐닝시스템(scanjet G4000 series, Hewlett-Packard, USA)을 이용하여 총 72개의 SIC의 표면에서 시각적 층위구분을 측정하였다(극지연구소 2010a). 코어 시료표면 스캐닝시스템은 4800 dpi 이상의 해상도를 가지고 있으며, 1회에 가로 31.1 cm, 세로 21.6 cm의 스캐닝 면적으로 2 m 길이의 코어 시료에서 시각적 층위구분을 측정할 수 있는 성능을 보유하고 있다. 얼음의 하부에서 빛을 투과하는 빙하코어 전용 이미징 장치인 디지털라인스캐너와 달리 퇴적물코어 시료표면 스캐닝시스템으로는 입체적인 정보를 획득할 수 없으나 빙하시료 내부의 물리적 상태를 파악할 수 있는 기초적인 자료 획득은 가능하였다.

전기전도도 측정

전기전도도 측정은 빙하코어의 층서에 따라 수소이온 농도를 지시하는 산성도(acidity)를 측정하는 것으로서 산성도 변화는 과거 대기환경의 변화를 지시하는 지표로서 활용될 수 있다(Glen et al. 1975). 이러한 빙하코어의 산성도 측정 자료는 산성도를 지시하는 수소이온(H^+) 농도를 제공하여 SO_4^{2-}, Cl^- 그리고 NO_3^-과 같은 이온 성분들의 분포를 직접적으로 지시할 수 있다(Hammer 1980). 예를 들어, 대규모의 화산활동에 의한 황산(H_2SO_4) 플럭스의 증가는 산성도의 증가를 유발하고, 육상기원 먼지의 플럭스 증가는 산성도 감소를 유발한다(Hammer 1980). 다량의 시료에서 화학성분을 분석하는데 요구되는 시간 소모에 비해 전기전도도 측정은 매우 신속하게 빙하코어의 화학적 특성을 판별할 수 있고, 고해상도의 자료를 획득할 수 있다는 장점 때문에 빙하코어 연구에서 널리 활용되고 있다(Hammer et al. 2004).

전기전도도 측정은 1980년 Claus Hammer에 의해 제안된 electrical conductivity measurement (ECM) (Hammer 1980)과 1987년 Moore와 Paren에 의해 제안된 dielectric profiling technique (DEP) (Moore et al. 1989)로 구분된다. 본 연구에서는 극지연구소에서 제작한 ECM 시스템(빙하 전도도 측정 스캐너, Digiparts, KOREA)을 이용하여 산성도를 측정하였다(Fig. 3). ECM 시스템은 1827년 Georg Simon Ohm의 옴의 법칙(Ohm's law)과 1843년 Sir Charles Wheatstone의 휘스톤 브릿지 이론(Wheatstone Bridge Theory)을 적용하여 빙하 코어의 저항값(Ω)과 전류값(μA)을 측정하였으며 적용되는 수식은 다음과 같다.

$$V = I \cdot R \tag{1}$$

$$V_G = \left(\frac{R_x}{R_3 + R_x} - \frac{R_x}{R_1 + R_2}\right) V_s \tag{2}$$

위 식 (1)에서 V는 회로상 전압의 크기, I는 전류의 세기, R은 전기저항이며, 식 (2)에서 V_G는 양쪽 브릿지 회로에 전달되는 전압 값, R_x는 가변저항 값, R_1, R_2, R_3는 표준저항 값, V_S는 공급되는 전압 값을 나타낸다. 휘스톤 브릿지 이론은 브릿지 회로에 두 갈래의 저항 값을 균형적으로 조정($R_1 + R_2 = R_3 + R_x$)하여 빙하 코어의 전기적 저항을 측정하는데 사용된다. 측정된 전기적 저항은 식 (2)의 옴의 법칙에 의하여 전류값(μA)으로 환산되어 빙하 코어의 깊이에 따른 연속적인 전류 값을 2차원 그래프를 통해 데이터로 산출된다. 빙하코어의 ECM 측정은 자료의 신뢰성을 확보하기 위하여 스테인리스 강 재질의 끌로 SIC 절단면을 3~5회 연마하여 1차 절삭과정에서 유입될 수 있는 이물질에 의한 영향을 제거하는 과정이 반드시 필요하다. 본 연구에서 활용한 ECM 측정기기는 2개의 ECM 측정 probe가 표면이 평탄한 SIC 표면을 약 10 mm/s의 일정한 속도로 이동하면서 probe 간 전류흐름의 값을 연속적으로 측정하며, ECM 시스템에 대한 구성도는 Fig. 3에 나타내었다. 동일한 빙하코어에 대해 3회 이상 ECM 측정을 수행하였다.

빙하코어 시료표면 오염물질 제거를 위한 용융장치

극지방 및 고산 빙하코어에 함유된 대부분의 화학성분

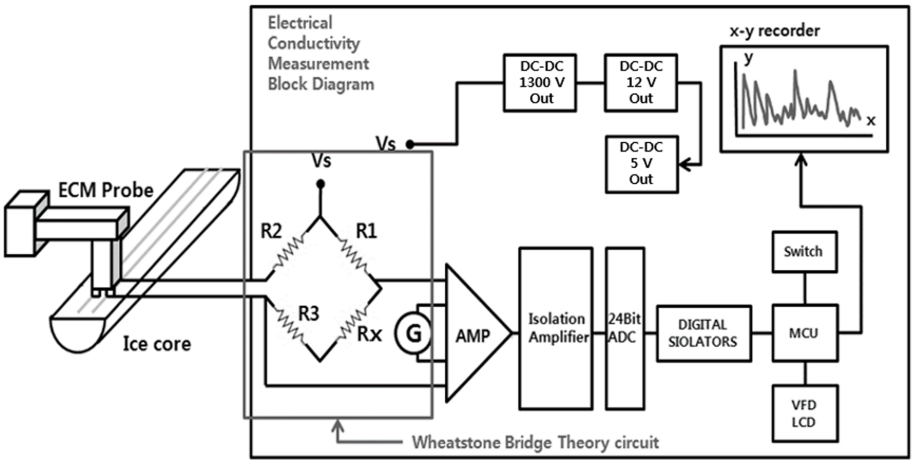


Fig. 3. ECM system diagram (Vs: Test Voltage DC +1300 V, R1: Test Standard Resistance 1-10 MΩ, R2: Test Standard Resistance 2-10 MΩ, R3: Test Standard Resistance 3-10 MΩ, Rx: Digital Potentiometer (0-10 kΩ), G: AMP Gain (x5, x10, x20, x30, x40, x50, x100, x1000))

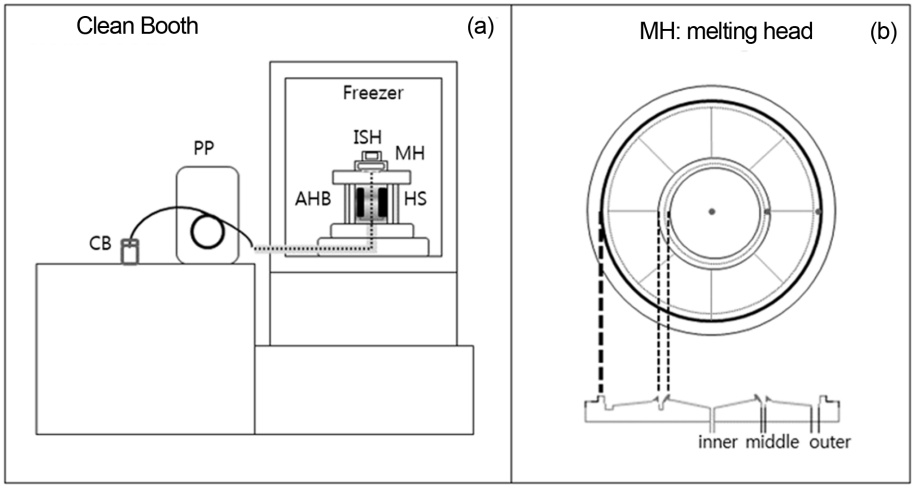


Fig. 4. Schematic diagram of KOPRI melting system (a) and top view (upper panel) and cross-section (lower panel) of the melting head with separator ridges (3 mm high) and drain-off slits (1.5 mm in diameter) on the Ti plate nests (b). CB, collecting bottle, PP, peristaltic pump (IP65, Ismatec), Freezer (LCT-110F, Lassele), ISH, ice sample holder, AHB, Al heating body, MH, melting head, HS, heating source

은 ppb(1 ppb = 10^{-9} g/g) 내지 ppt(1 ppt = 10^{-12} g/g) 수준의 극미량으로 존재하기 때문에 분석 자료의 신뢰성은 빙하코어의 시추부터 절삭과정에 이르기까지 표면에 유입되는 오염물질의 제거과정에 의해 좌우된다(Hong et al. 2000). 시료 표면의 오염물질을 제거하는 전처리 방법은 스테인리스 강 재질의 끌을 이용한 기계적 절삭방법(chiseling method)과 용융장치(melting device method)를 이용한 방법으로 구분된다. 기계적 절삭방법은 산 세척된 스테인리스 강 재질의 끌을 이용하여 시료 표면을 여러 겹으로 제거하는 방법이다. 이 방법은 ppt~sub-ppt 수준의 초극미량 무기원소 분석에 적합하지만 실험도구와 실험실 환경의 청정도 관리가 어렵고, 시료 전처리 속도가 느리며, 최소한 20 cm 이상의 시료 길이가 요구되기 때문에 고분해능의 자료를 획득할 수 없다는 한계점을 가지고 있다(Candelone et al. 1994). 반면 용융장치를 이용한 방법은 상대적으로 시료 오염에 덜 영향을 받는 화학성분 분석에 활용되며, 표면 오염물질 제거 처리 속도가 빠르고 고분해능 분석이 가능하다는 장점을 가지고 있다(Col-Dai et al. 2006; Osterberg et al. 2006).

본 연구에서는 극지연구소에서 제작한 용융장치를 이용하여 시료를 용융한 후 화학분석을 수행하는 방법을 적용하였다(Fig. 4a). 용융장치의 용융면은 열전도도가 낮은 단점이 있으나 반응성이 매우 낮아 화학적 간섭현상이 적은 Ti 재질로 제작되었다(Meconnell et al. 2002; Hong et

al. 2014). 그리고 시료 용융과정에서 오염물질이 유입되어 있는 바깥 표면 층이 용융되면서 가장 외부의 slit으로 제거되고 오염되지 않은 중심부 시료가 가장 내부의 slit을 통해 포집되도록 용융면은 3개의 영역(inner, middle, outer)으로 구분하여 설계되었다(Fig. 4b). 용융면은 시료가 안정하게 용융되는 45°C의 일정한 온도를 유지하도록 온도조절장치가 연결되어 있으며, 45°C의 온도에서 용융 속도는 평균 1 cm/min이다. 시료의 용융 과정에서 외부 오염원을 차단하기 위해서 HEPA(High Efficiency Particulate Air) 필터가 달린 class 100의 클린부스에서 진행되었으며, 실험자는 방진복, 방진 마스크, 그리고 비닐 장갑을 착용하였다. 용융 시료의 포집은 극지연구소의 청정실험실에서 세척된 LDPE 재질의 플라스틱 병을 사용하였다. 극미량 무기원소 분석을 위한 용융 시료 포집병은 Hong 등 (2000)이 제시한 방법에 따라 질산으로 세척하였다. 이온 성분 분석을 위한 시료 포집병은 Milli-Q Element의 3차 증류수로 3회 공 세척을 수행한 후 24시간 동안 3차 증류수를 이용하여 용출과정을 거쳐 초음파세척기를 이용하여 1시간 동안 초음파 세척을 진행하였다. 그리고 최종적으로 증류수로 3회 공 세척을 하고 class 10의 클린벤치에서 건조한 후에 시료분석을 위하여 사용하였다(극지연구소 2010b). 인공 빙하시료를 이용하여 용융장치에 의한 시료 오염 제거 여부를 검증하였으며, 3개 영역 중 가장 내부 영역인 inner 영역은 표면 오염물질에 의해 영향을 받지 않는 것으로 판명되었다.

물 안정동위원소 분석

빙하코어의 물 안정동위원소 조성비($^2H/^1H$와 $^{18}O/^{16}O$)는 특정지역의 기온변화, 강수량 및 수증기의 기원에 따라 조절되기 때문에 조성비의 장기 변화는 고기후 연구에서 가장 중요한 도구로 활용되고 있으며(Dansgaard, 1964), 계절변화를 보이는 연 주기성을 이용하여 빙하코어 연대 측정의 기초 프록시로 활용되고 있다(Lee et al. 2008). 본 연구에서는 물 안정동위원소 분석은 파장 스캔 공동 광자 감쇠 분광법(Wavelength Scanned Cavity Ring-Down Spectroscopy, WS-CRDS)이 적용된 안정동위원소 측정 시스템(L2120-i, Picarro Inc, US)을 이용하였다. WS-CRDS 시스템은 액상시료를 기화시키는 기화장치(liquid evaporator)와 다량의 시료를 신속하고 연속적으로 측정할 수 있는 자동시료주입장치(HTC-PAL, Leap Technologies, US), 진공펌프(vacuum pump), 그리고 측정된 자료를 처리하는 데이터 수집 시스템(DAS)으로 구성되어 있다.

WS-CRDS 원리는 적외선레이저를 이용한 흡수 흡광법을 적용시켜 물 안정동위원소의 조성비를 측정하도록 고안되었으며 측정되는 원리는 아래 식과 같다(Gupta et al. 2009).

Table 1. $\delta^{18}O$ and δD reference values (‰) of SMOW, GISP and SLAP2

Standard	Matrix	Reference value [$\delta^{18}O$]	Reference value [δD]
SMOW	Water	0‰	0‰
GISP	Water	−24.76‰	−189.5‰
SLAP2	Water	−55.5‰	−427.5‰

$$\tau = \frac{1}{c(L+A)} \quad (3)$$

식 (3)에서 τ는 레이저의 시간상수, c는 빛의 속도, L은 비어있는 광학셀의 레이저 소멸양, A는 측정상의 가스 흡수 소멸양이며, 기체상(gas phase)의 시료에서 광학 셀(optical cell)로부터 부상하는 레이저의 소멸시간을 측정하여 물 안정동위원소비를 분석한다.

절삭된 빙하 시료의 물 안정동위원소는 Milli-Q Element의 3차 증류수로 2~3회 세척 후 건조시킨 용기 안에서 분석 직전에 시료를 용해하여 분석하였다. 물 안정동위원소의 검량선(calibration curve)은 국제원자력기구(IAEA)에서 제공하는 SMOW(Standard Mean Ocean Water), GISP (Greenland Ice Sheet Precipitation), 그리고 SLAP(Standard Light Antarctic Precipitation) 표준물질을 사용하여 작성하였으며, 표준물질에 대한 물 안정동위원소 조성비는 Table 1과 같다.

3. 결과 및 고찰

시각적 층위구분

몽골 참바가라브 빙하코어의 시각적 층위구분을 통해 확인된 불용성 입자층들을 Table 2에 명시하였다. 시각적 층위구분 결과 전체 72개 시료 가운데 26개의 시료에서 다양한 두께(1~15 cm)를 가진 총 29개의 불용성 입자층이 관찰되었으며, 특히 1, 18, 51 시료의 표면촬영 자료에서는 확연하게 눈에 띄는 불용성 입자층이 관찰되었다 (Fig. 5). 빙하코어의 불용성 입자층 존재와 두께는 대기순환의 변화, 입자 기원지의 계절적 건조 상태, 입자 이동 중의 유실(washout) 정도, 대규모 화산폭발, 그리고 산불 발생과 같은 다양한 환경적 요인과 연관되어 있다. 참바가라브 빙하코어에서 나타나는 불용성 입자층은 다음의 환경적 요인들과 연관된 것으로 추정된다. 첫 번째는 대기순환과 입자 기원지 건조 상태의 계절적 변화에 의해 먼지 유입량이 일시적으로 크게 증가하는 경우이다. 중앙아시아 지역의 대기 먼지 농도는 시베리아 고기압이 약화되는 봄철에 건조한 지역이나 사막에서 발생하는 먼지바람에 의해 급격히 증가하며, 중앙아시아 지역의 빙하코어의 기록

Table 2. Description of dust and particle layers observed in Tsambagarav ice core

Layer No.	Run No.	Depth (m)		Description
		Top	Bottom	
1	1	0.23	0.28	dust particle
2	3	1.75	1.80	light dust layer
3	7	4.36	4.40	light dust layer
4	8	4.62	4.64	large dust layer
5	17	9.77	9.91	light dust layer
6	18	10.30	10.55	large dust layer
7	22	12.58	12.63	light dust layer
8	29	16.21	16.24	dust particle
9	30	16.83	16.85	light dust layer
10	32	17.73	17.74	light dust layer
11	37	20.03	20.04	dust particle
12	39	20.45	20.56	dust particle
13	42	22.93	22.98	dust particle
14	43	23.38	23.60	dust layer, particle
15	44	24.06	24.20	light dust layer
16	45	24.74	24.76	dust particle
17	45	25.02	25.06	dust particle
18	49	27.02	27.03	dust particle
19	50	27.52	27.53	dust particle
20	51	28.20	28.21	dust particle
21	51	28.43	28.53	dust layer, particle
22	52	28.86	28.92	dust particle, layer
23	53	29.12	29.13	dust particle
24	55	30.39	30.40	dust layer, particle
25	56	30.51	30.52	dust layer, particle
26	58	31.97	31.98	dust particle
27	63	35.05	35.06	light dust layer
28	68	37.76	37.77	light dust layer
29	68	38.04	38.05	light dust layer

에서도 봄철에 먼지 플럭스가 증가하는 현상이 보고되고 있다(Kang et al. 2003; Olivier et al. 2006). 따라서 계절적 요인과 연관된 먼지층은 화학적 프록시를 이용한 참바가라브 빙하코어의 연대측정에서 보조 자료로 활용될 수 있을 것으로 보인다(Alley et al. 1997). 두 번째는 대규모 화산폭발이나 산불에 의한 화산재(volcanic ash)나 산불재(forest-fire ash)가 유입되는 경우이다. 이러한 요인들에 의해 형성된 불용성 입자층은 화산폭발이나 산불이 발생한 정확한 연대를 알 수 있기 때문에 빙하코어 연대측정의 시간표시자(time marker)로서 활용이 가능하다. 대규모 화산폭발에 의한 불용성 입자층은 화산기원의 프록시로 활용되는 이온성분(SO_4^{2-}, Cl^-, F^- 등), 산성도의 증가(또는 ECM 시그널 증가), 그리고 휘발성 극미량 원소(Tl, Bi, As 등)들의 농도 피크와 연계하여 구분할 수 있다(Kellerhals et al. 2010). 그리고 산불과 연관된 불용성 입자층에서는 K^+, NH_4^+, NO_3^-, $HCOO^-$와 같은 이온 성분들이 증가하는 경향을 보이며, 특히 NO_3^-의 농도 증가가 뚜렷이 나타난다(Eichler et al. 2011). 따라서 ECM 자료와 더불어 현재 진행 중인 주요 이온성분과 극미량 원소들의 고분해능 분석이 완료되면 화산활동과 산불에 의한 불용성 먼지층을 구분하여 참바가라브 빙하코어의 연대측정에 활용하고자 한다.

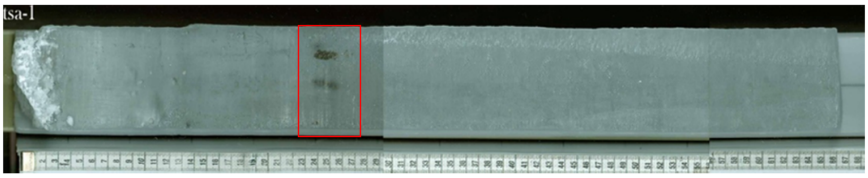
본 연구에서 적용된 퇴적물코어 시료표면 촬영시스템에 의한 시각적 층위구분 자료는 입체적인 정보를 제공하지는 못하였지만, 빙하시료 내부의 물리적 상태를 파악하는데 필요한 기초적인 정보를 획득할 수 있었으며, 향후 하부에서 빛을 투과하는 빙하코어 전용 이미징 장치인 디지털라인스캐너 시스템 도입과 운영에 필요한 참고 자료로서 활용 가능성을 보여주고 있다.

전기전도도 측정 결과

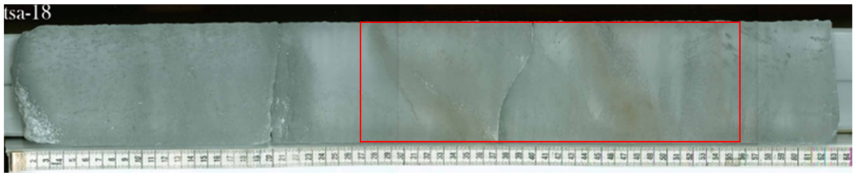
빙하코어의 수소이온(H^+)의 농도 변화에 따른 산성도 변화를 나타내는 ECM 신호의 피크는 일차적으로 화산활동과 연관되어 있기 때문에 과거 화산활동의 기록 복원과 연대측정의 기초 자료로 활용되어 왔다(Hammer et al. 2004). 본 연구에서 전체 72개 코어시료에서 측정한 ECM 신호 자료를 보면 전반적으로 0.5 μA 범위 내에서 ECM 신호가 변화하고 있으며, 특정 깊이(0.7, 1.2, 10.6, 17.2, 25.8, 27.7, 30.2, 33.6, 34.8, 37.8, 그리고 39.8 m)에서 총 11개의 ECM 신호 피크(>0.8 μA)가 나타나는 것을 알 수 있다(Fig. 6). 특히 0.7 m, 1.2 m의 깊이에서는 2 μA 이상의 ECM 신호가 측정되었다.

본 연구에서 나타나는 ECM 신호 피크와 화산활동과의 연관성을 알아보기 위하여 상부 3 m 깊이까지 분석이 완료된 이온성분 중에서 화산활동을 지시하는 프록시인 SO_4^{2-}와 Cl^-의 농도 변화와 ECM 신호 피크 1과 2를 비교하였다(Fig. 7). Fig. 7를 보면, 0.7 m와 1.2 m 깊이에서 ECM 신호 피크와 SO_4^{2-} 및 Cl^-의 농도 피크(>30 μeq/L)가 뚜렷이 일치하고 있다. 따라서 참바가라브 빙하코어에서 나타나는 ECM 신호 피크 1과 2는 과거의 대규모 화산활동과 연관되어 있다는 것을 알 수 있다. 다음 절에서 설명되는 물 안정동위원소의 기록에서 유추한 연대측정 결과를 보면 ECM 신호 피크 1과 2는 2007년 1월과 6월에 발생한 러시아 캄차카반도의 Kliuchevskoi 화산 분출과 연관된 것으로 추정된다. 본 연구에서 확보한 ECM 분석 자료는 앞으로 이온성분 분석이 완료된 후에 과거의 화산활동과 관련 있는 ECM 신호 피크들을 검색하여 연대측정의 오차를 최소화할 수 있는 보정자료로서 활용할 예정이다.

Run	1	**Drilling Site**	Tsambagarav (48°38'N, 90°57'E, elevation 3830 m)
Length	68.0 cm	**Remarks**	**visible dust layer**
VS Image			



Run	18	**Drilling Site**	Tsambagrarv (48°38'N, 90°57'E, elevation 3830 m)
Length	63.0 cm	**Remarks**	**visible heavy dust layers**
VS Image			



Run	51	**Drilling Site**	Tsambagrarv (48°38'N, 90°57'E, elevation 3830 m)
Length	71.5 cm	**Remarks**	**visual dust particles**
VS Image			

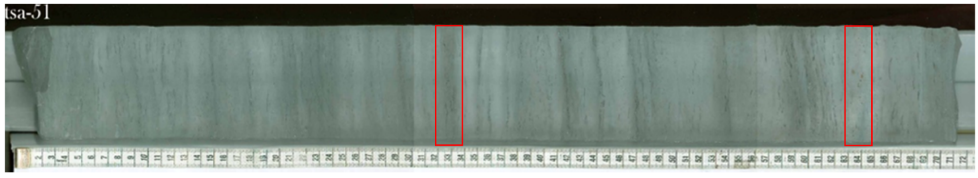


Fig. 5. Visual stratigraphy of the selected Tsambagarav ice core sections. Well-preserved dust layers and dust particles sparsely scattered in the ice are shown in red squares

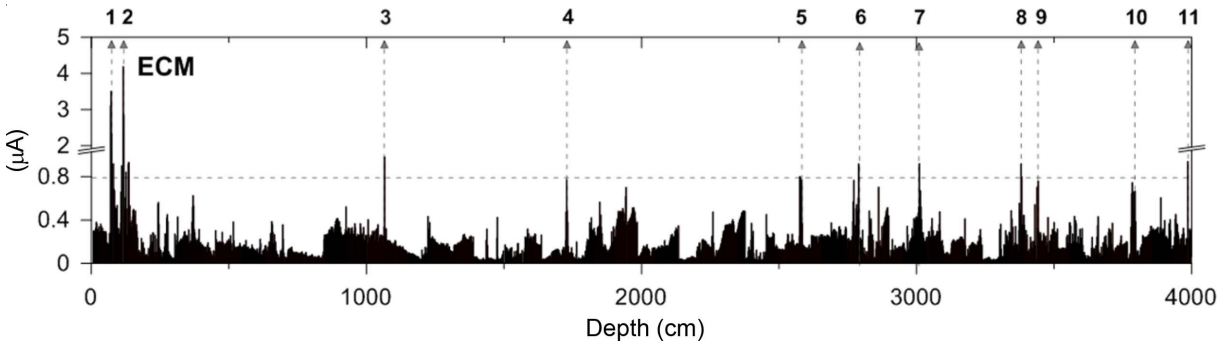


Fig. 6. ECM data determined in the 40.2 m long Tsambagarav ice core. The numerical dashed arrows (1-11) represent the ECM signals with more than 0.8 μA

물 안정동위원소의 계절변화

물 안정동위원소의 분별작용(fractionation)은 일차적으로 수증기의 증발(evaporation) 및 응축(condensation) 과정과 밀접한 연관이 있고, 부차적으로 대륙효과(continental effect)와 고도효과(altitude effect)와 같은 지형변수와 온도효과(temperature effect)와 우량효과(amount effect) 같은 기상변수에 의해서도 발생한다(Dansgaard 1964). 본 연구에서는 물 안정동위원소비의 변화 추세와 연관된 기후학적 해석보다는 참바가라브 빙하코어의 상부에서 분석한 물 안정동위원소비의 계절 주기성을 고찰하여 빙하층이 여름철 융해작용에 의해 교란되었는지를 살펴보고자 한다.

빙하코어의 상부 5 m 구간에서 2 cm 간격으로 분석한 물 안정동위원소의 자료를 Fig. 8에 도식화하였다. 산소 안정동위원소비 $\delta^{18}O$과 수소 안정동위원소비 δD는 표준물질인 SMOW(Standard Mean Ocean Water)에 대한 상

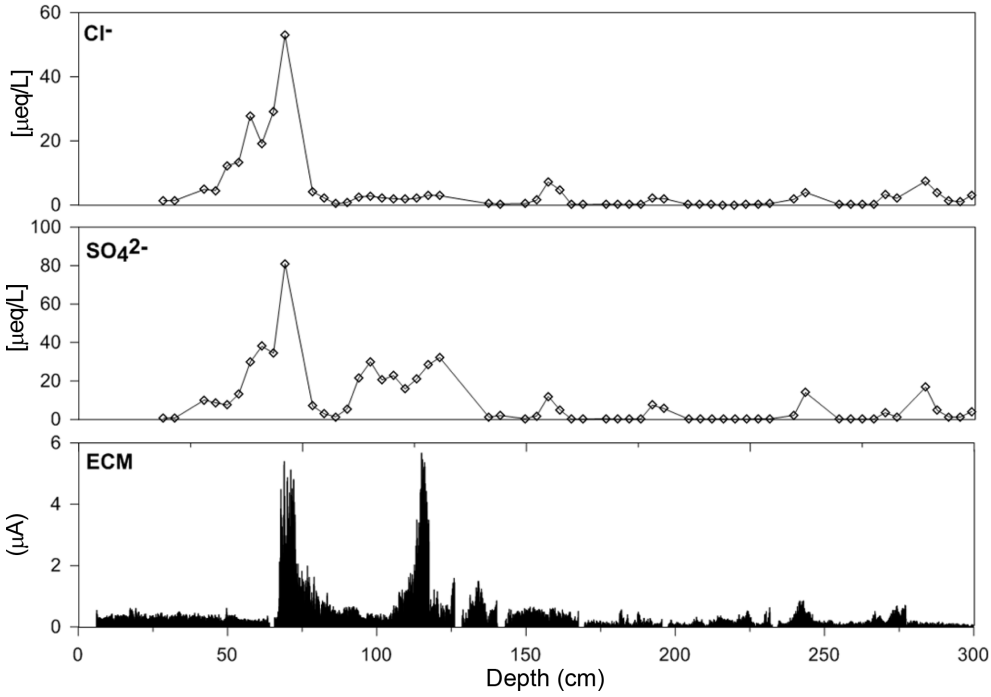


Fig. 7. The upper 3 m profiles of ECM, SO_4^{2-} and Cl^- in Tsambagarav ice core

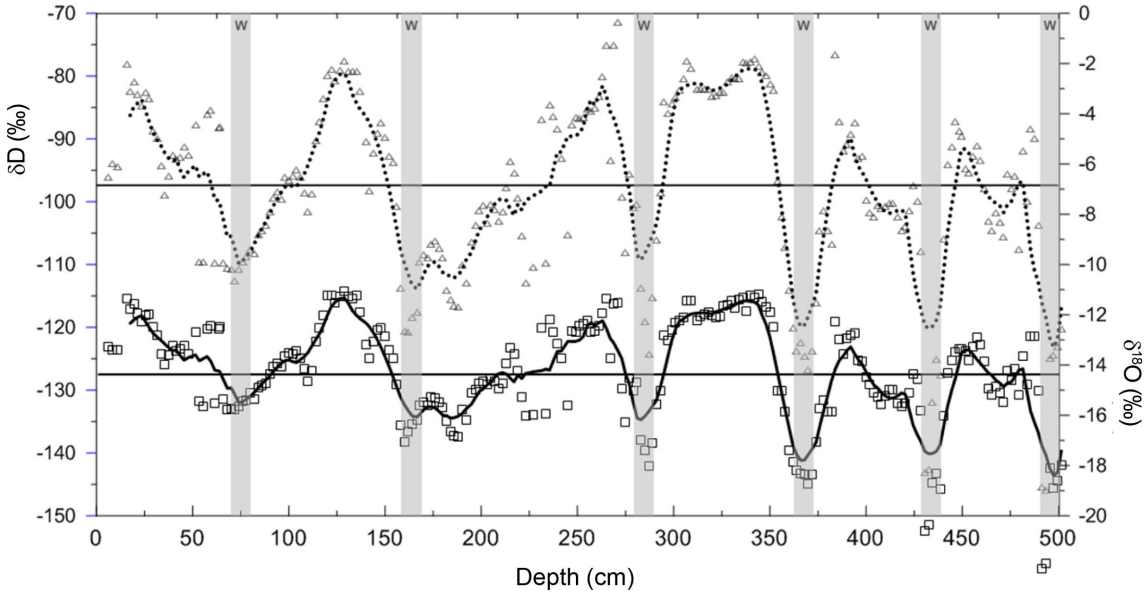


Fig. 8. The upper 5 m profile of δD (△) and $\delta^{18}O$ (□) measured in Tsambagarav ice core. The dotted lines are the 9-point running averages from δD values and solid lines are the 9-point running averages of $\delta^{18}O$ values

대 조성비를 나타내고 δ의 정의는 아래 식과 같다.

$$\delta = \left[\frac{R_{sample} - R_{SMOW}}{R_{SMOW}}\right] \times 10^3‰ \quad (4)$$

식 (4)에서 R_{sample}과 R_{SMOW}는 각각 측정된 시료와 표준물질의 $^{18}O/^{16}O$ 또는 D/H(D, deuterium)를 나타낸다.

빙하시료에서 분석한 $\delta^{18}O$의 최소값은 −21.9‰, 최대값은 −11.1‰이며, δD의 최소값은 −145.8‰, 최대값은 −71.9‰이다. $\delta^{18}O$와 δD의 평균값은 각각 −14.2‰과 −97.7‰이며, 중앙아시아 고산지역에서 시추한 다른 빙하코어의 $\delta^{18}O$와 δD 평균값과 비슷한 범주에 들어가는 것으로 나타난다(Table 3). 이것은 참바가라브 빙하코어에

Table 3. Comparison of stable water isotope composition from alpine ice cores in Central Asia (–, no data available)

Site	Altai	Pamirs	Tien Shan			Mongolia Altai	
Glacier	Belukha	Muztagata	Inilchek	Urumqi Glacier No.1	Gregoriev ice cap	Tsast Ula	Tsambagarav
Elevation (m a.s.l.)	4115	7010	5100	3960+4140	4660	4200	3830
latitude, longitude	49°28'N, 86°35'E	75°06'N, 38°17'E	43°N, 79°E	43°07'N, 86°48'E	42°N, 78°E	48°41'N, 90°43'E	48°38'N, 90°57'E
Period (year)	1985-2000	1955-2002	1994-2000	1988-1989	1940-1990	1970-1991	
$\delta^{18}O$ (mean ‰)	−13.6	−16.55	−16.04	−16.4	−10.0	−15.8	−14.2
δD (mean ‰)	−98.14	-	−105.3	-	-	−115.1	−97.7
Reference	Aizen et al. (2005)	Tian et al. (2006)	Kreutz et al. (2001)	Wake et al. (1993)	Thompson et al. (1993)	Schotterer et al. (1997)	This study

기록된 물 안정동위원소의 조성비가 후퇴적 과정에 의해 크게 교란되지 않았다는 것을 의미한다. Fig. 8을 보면, 약 75 cm, 160 cm, 285 cm, 370 cm, 435 cm 그리고 495 cm 깊이에서 $\delta^{18}O$와 δD의 값이 크게 감소하고 있고, 반면에 $\delta^{18}O$와 δD의 최소값 구간 사이에서 $\delta^{18}O$와 δD의 값의 피크들이 잘 나타나고 있다. 중앙아시아 지역의 경우 강수의 $\delta^{18}O$와 δD의 변화는 시·공간적으로 매우 복잡한 형태를 나타내지만, 대부분 여름철에 높은 값을 보이고 겨울에 상대적으로 낮은 값이 나타난다(Schotterer et al. 2004). 따라서 참바가라브 빙하코어의 상부 5 m 구간에서 나타나는 $\delta^{18}O$와 δD의 변화는 계절변화를 반영하고 있다고 판단되며, 2003/2004년 겨울부터 총 6차례의 계절주기를 확인할 수 있었다.

참바가라브 빙하코어에서 물 안정동위원소 조성비 변화의 계절 주기성이 잘 보전되었다는 것은 수용성 이온과 같은 화학적 프록시들의 보존상태도 양호할 것으로 추정할 수 있으며, 앞으로 다양한 화학적 프록시 분석이 완료되면 빙하코어의 연대측정이 가능할 것으로 기대된다.

4. 요 약

본 연구에서는 선진국형의 종합적인 빙하코어 연구를 수행하기 위해서 요구되는 빙하시료 전처리 방법 설정과 기초 프록시 분석 기술을 확립하였다. 빙하코어 시료는 2008년 6월에 국제공동으로 몽골 알타이 산맥의 참바가라브산에서 시추한 40.2 m 길이의 빙하코어를 활용하였다. 빙하코어의 기초 프록시인 시각적 층위구분과 ECM 측정은 1차 절삭한 빙하코어의 절단면에서 수행하였으며, 2차 절삭과정을 통해 물 안정동위원소 분석용 시료 1,935개와 화학적 프록시 분석을 위한 시료 374개를 확보하였다. 전체 빙하코어의 시각적 층위구분 결과 총 29개의 불용성 입자층이 관찰되었으며, ECM 측정으로 11개의 ECM 신호 피크를 찾아냈다. 극지연구소에서 제작한 용융장치를 활용하여 분석한 SO_4^{2-} 및 Cl^-의 농도와 상부 0.7 m와 1.2 m 깊이의 ECM 신호 피크의 비교 결과는 이들 ECM 신호 피크가 러시아 캄차카반도의 Kliuchevskoi 화산 분출과 연관된 것을 보여준다. 이러한 결과는 극지연구소에서 자체 제작한 ECM 측정 시스템으로 분석한 ECM 자료의 신뢰성이 높다는 것을 나타낸다. 마지막으로 참바가라브 빙하코어의 상부 5 m에서 분석한 물 안정동위원소비의 변화는 뚜렷한 계절 주기성을 보이고 있고, 이 결과는 참바가라브 빙하코어의 화학적 프록시 기록이 후퇴적과정에 의해 크게 교란되지 않았다는 것을 지시한다. 본 연구에서 확립한 빙하시료 전처리 방법 설정과 기초 프록시 분석 기술은 앞으로 우리나라가 독자적으로 남북극 및 고산지역에서 시추하는 빙하코어에 적용하여 다양한 고기후 및 고환경 연구에 활용될 것이다.

사 사

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소의 연구사업인 “극한지 빙하시추와 Ice Core Bank 운영을 위한 핵심 기술 개발(PE13070)”, “과거, 현재의 극지기후 관측과 재현을 통한 기후변화 메커니즘 규명(PE14010)”과 한국연구재단의 “극지 빙설을 이용한 초극미량 휘발성 원소의 납/ 오스뮴 동위원소의 전 지구규모 대기화학적 거동 연구(2012R1A1A2001832)”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

극지연구소 (2010a) 고산빙하, 육상퇴적물 및 기후모델을 이용한 아시아 고기후 복원. 기상청, RACS 2010-3007, 182 p

극지연구소 (2010b) 빙하코어시료의 용융장치 개발을 통한 극미량 proxies 측정 기법 연구. 한국해양과학기술원 부설 극지연구소, PK09050, 32 p

극지연구소 (2011) 극한지 빙하시추와 Ice Core Bank 운영을 위한 핵심 기술 개발. 한국해양과학기술원 부설 극지연구소, BSPP10010-174-7, 733 p

Aizen VB, Aizen EM, Fujita K, Nikitin SA, Kreutz KJ, Takeuchi LN (2005) Stable-isotope time series and precipitation origin from firn-core and snow samples, Altai glaciers, Siberia. J Glaciol **51**:637-654

Alley RB, Shuman CA, Meese DA, Gow AJ, Taylor KC, Cuffey KM, Fitzpatrick JJ, Grootes PM, Zielinski GA, Ram M, Spinelli G, Elder B (1997) Visual-stratigraphic dating of the GISP2 ice core: Basic, reproducibility, and application. J Geophys Res **102**:26367-26381

Anders S, Soren WN, Sepp K, Sigfus JJ, Jorgen PS, Matthias B, Urs R, Regine R (2005) Visual stratigraphy of the North Greenland Ice Core Project (NorthGRIP) ice core during the last glacial period. J Geophys Res **110**:D02108. doi:10.1029/2004JD005134

Boutron CF (1995) Historical reconstruction of the earth's past atmospheric environment from Greenland and Antarctic snow and ice cores. Environ Rev **3**:1-28

Candelone JP, Hong S, Boutron CF (1994) An improved method for decontaminating polar snow or ice cores for heavy metal analysis. Anal Chim Acta **29**:9-16

Cole-Dai J, Budner DM, Ferris AG (2006) High speed, high resolution, and continuous chemical analysis of ice cores using a melter and ion chromatography. Environ Sci Technol **40**:6764-6769

Dansgaard W (1964) Stable isotope in precipitation. Tellus **14**:436-468

Eichler A, Tinner W, Brütsch S, Olivier S, Papina T, Schwikowski M (2011) An ice-core based history of Siberian forest fires since AD 1250. Quat Sci Rev **30**:1027-1034

Enkhtaivan (2006) Physical-Geographical Characteristics of the Altai Region. In: Vogtmann H, Dobretsov N (eds) Environmental Security and Sustainable Land Use - with special reference to Central Asia, NATO Security through Science Series, pp 349-351

Glen JW, Paren JG (1975) The electrical properties of snow and ice. J Glaciol **15**:15-38

Gupta P, Noone D, Galewsky J, Sweeney C, Vaughn BH (2009) Demonstration of high-precision continuous measurements of water vapor isotopologues in laboratory and remote field deployments using wavelength-scanned cavity ring-down spectroscopy (WS-CRDS) technology. Rapid Commun Mass Sp **23**:2534-2542

Hammer CU (1980) Acidity of polar ice core in relation to absolute dating, past volcanism, and radio-echoes. J Glaciol **25**:359-372

Hammer CU, Clausen HB, Langway CC (2004) Electrical conductivity method (ECM) stratigraphic dating of the Byrd Station ice core, Antarctica. Ann Glaciol **20**:115-120

Hong S, Liuberas A, Rodriguez F (2000) A clean protocol for determining ultralow heavy metal concentrations: its application to the analysis of Pb, Cd, Cu, Zn and Mn in Antarctic snow. Korean J Pol Res **11**:35-47

Hong S, Kim Y, Boutron CF, Ferrari CP, Petit JR, Barbante C, Rosman K, Lipenkov VY (2003) Climate-related variations in lead concentrations and sources in Vostok Antarctic ice from 65,000 to 240,000 years BP. Geophys Res Lett **30**:2138. doi:10.1029/2003GL018411

Hong S, Boutron CF, Gabrielli P, Barbante C, Ferrari CP, Petit JR, Lee K, Lipenkov VY (2004) Past natural changes in Cu, Zn and Cd in Vostok Antarctic ice dated back to the penultimate interglacial period. Geophys Res Lett **31**:L20111. doi:10.1029/2004GL021075

Hong S, Lee K, Hou S, Hur SD, Ren J, Burn LJ, Rosman K, Barbante C, Boutron CF (2009) An 800-year record of atmospheric As, Mo, Sn, and Sb in central Asia in high-altitude ice cores from Mt. Qomolangma (Everest), Himalayas. Environ Sci Technol **43**:8060-8065

Hong SB, Lee K, Hur SD, Hong S, Soyol-Erdene T-O, Kim SM, Jung JW (2014) Development of advanced melting system for measurement of trace elements and ions in ice core. J Glaciol (Submitted)

Hur SD, Soyol-Erdene T-O, Hwang HJ, Han C, Gabrielli P, Barbante C, Boutron CF, Hong S (2013) Climate-related variations in atmospheric Sb and Tl in the EPICA Dome C ice (East Antarctica) during the past 800,000 years. Global Biogeochem Cy **27**:930-940

Kadota T, Davaa G (2007) Recent glacier variations in Mongolia. Ann Glaciol **46**:185-188

Kang S, Mayewski PA, Yan Y, Qin D, Yao T, Ren J (2003) Dust records from three ice cores: relationships to spring atmospheric circulation over the Northern Hemisphere. Atmos Environ **37**:4823-4835

Kellerhals T, Tobler L, Brütsch S, Sigl M, Wacker L, Gäggeler HW, Schwikowski M (2010) Thallium as a tracer for preindustrial volcanic eruptions in an ice core record from Illimani, Bolivia. Environ Sci Technol **44**:888-893

Kinnard C, Koerner RM, Zdanowicz CM, Fisher DA, Zheng J, Sharp MJ, Nicholson L, Lauriol B (2008) Stratigraphic analysis of an ice core from the Prince of Wales Icefield, Ellesmere Island, Arctic Canada, using digital image analysis: High-resolution density, past summer warmth reconstruction, and melt effect on ice core solid

conductivity. J Geophys Res **113**:D24120. doi:10.1029/2008JD011083

Koerner RM (1997), Some comment on climatic reconstructions from ice cores drilled in areas of high melt. J Glaciol **43**:90-97

Kreutz KJ, Aizen VB, Cecil LD, Wake CP (2001) Oxygen isotopic and soluble ionic composition of a shallow firn core, Inilchek glacier, central Tien Shan. J Glaciol **47**:548-554

Lee K, Hur SD, Hou S, Hong S, Qin X, Ren J, Liu Y, Rosman K, Barbante C, Boutron CF (2008) Atmospheric pollution for trace elements in the remote high-altitude atmosphere in central Asia as recorded in snow from Mt. Qomolangma (Everest) of the Himalayas. Sci Total Environ **404**:171-181

Lee K, Hur SD, Hou S, Burn-Nunes LJ, Hong S, Barbante C, Boutron CF, Rosman K (2011) Isotopic signatures for natural versus anthropogenic Pb in high-altitude Mt. Everest ice cores during the past 800 years. Sci Total Environ **412-413**:194-202

Legrand M, Mayewski P (1997) Glaciochemistry of polar ice cores: A review. Rev Geophys **35**:219-243

McConnell JR, Lamorey GW, Lambert SW, Taylor KC (2002) Continuous ice-core analyses using inductively coupled plasma mass spectrometry. Environ Sci Technol **36**:7-11

Moore JC, Mulvaney R, Paren JG (1989) Dielectric stratigraphy of ice: A new technique for determining total ionic concentrations in polar ice cores. Geophys Res Lett **16**:1177-1180

Olivier S, Blaser C, Brütsch S, Frolova N, Gäggeler HW, Henderson KA, Palmer AS, Papina T, Schwikowski M (2006) Temporal variations of mineral dust, biogenic tracers, and anthropogenic species during the past two centuries from Belukha ice core, Siberian Altai. J Geophys Res **111**:D05309. doi:10.1029/2005JD005830

Osterberg EC, Handley MJ, Sneed SB, Mayewski PA, Kreutz KJ (2006) Continuous ice core melter system with discrete sampling for major ion, trace element, and stable isotope analyses. Environ Sci Technol **40**:3355-3361

Schotterer U, Frohlich K, Gaggeler HW, Sandjordj S, Stichler W (1997) Isotope records from Mongolian and alpine ice cores as climate indicators. Climatic Change **36**:519-530

Schotterer U, Stichler W, Ginot P (2004) The influence of postdepositional effects on ice core studies: examples from the Alps, Andes, and Altai. In: Cecil LD, Green JR, Thompson LG (eds) Earth Paleoenvironments: Records Preserved in Mid- and Low-Latitude Glaciers, Developments in Paleoenvironmental Research, Volume 9, Kluwer Academic Publishers, pp 39-60

Shuji F, Nobuhiko A, Yoshiyuki F, Takao K, Kokichi K, Hideaki M, Hideki N, Hitoshi S, Okitsugu W (2002) Ice core processing at Dome Fuji Station, Antractica. Mem Natl Inst Polar Res **56**:275-286

Stauffer B, Burkhalter J, Sigg A (1988) New Methods in Ice Core Processing. In: Proceeding of the Third International Workshop on Ice Drilling Technology, US Ice Drilling Program, pp 151-157

Tian L, Yao T, Li Z, MacClune K, Wu G, Xu B, Shen Y (2006) Recent rapid warming trend revealed from the isotopic record in Muztagata ice core, eastern Pamirs. J Geophys Res **111**:D13103. doi:10.1029/2005JD006249

Thompson LG, Mosley-Thompson E, Davis M, Lin PN, Yao T, Dyurgerov M, Dai J (1993) "Recent warming": ice core evidence from tropical ice cores with emphasis on Central Asia. Global Planet Change **7**:145-156

Wake CP, Mayewski PA, Zichu X, Ping X, Zhonggin L (1993) Regional distribution of monsoon and desert dust signals recorded in Asian glaciers. Geophys Res Lett **20**:1411-1414

국문 참고자료의 영어 표기

English translation / romanization of references originally written in Korean

KOPRI (2010a) Paleoclimate Reconstruction of Asia using Alpine Ice Core, Land Sediment and Climate Model. Korea Polar Research Institute, RACS 2010-3007, 182 p (in Korean)

KOPRI (2010b) Development of Advanced Meltering System for Measurement of Traceable Proxies in Ice Core. Korea Polar Research Institute, PK09050, 32 p (in Korean)

KOPRI (2011) Development of Core Technology for Ice Core Drilling and Ice Core Bank. Korea Polar Research Institute, BSPP10010-174-7, 733 p (in Korean)

Received Dec. 26, 2013
Revised Feb. 17, 2014
Accepted Mar. 13, 2014