

미량기체를 활용한 남극 해안
신규 천부시추 빙하코어 연령 측정

Age Measurement of Ice Cores from
New Shallow Drilling in Antarctic Coast Using Trace Gas



서울대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “국제심부빙하시추 네트워크를 활용한 대기-빙상 상호작용의 자연적·인위적 특성규명” 과제의 위탁연구 “미량기체를 활용한 남극 해안 신규 천부시추 빙하코어 연령 측정” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 한 영 철

위탁연구기관명 : 서울대학교

위탁연구책임자 : 안 진 호

위탁참여연구원 : 이 현 기

“ : 임 광 진

보고서 초록

위탁연구과제명		미량기체를 활용한 남극 해안 신규 천부시추 빙하코어 연령 측정			
위탁연구책임자	안진호	해당단계 참여연구원수	28	해당단계 연구비	155,000,000 원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교 지구환경과학부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	
남극의 빙하 및 블루아이스(blue ice)는 과거의 기후 변화와 대기 온실가스 조성을 복원할 수 있는 매우 중요한 자연 기록이다. 일반적으로 천부빙하 코어는 얼음동위원소와 이온분석을 통해 계절 변화를 이용한 연령측정이 가능하지만, 오래된 빙하에서는 연간층 두께가 얇아져 이러한 방법만으로는 정확한 연령 구축이 어렵다. 따라서 ^{81}Kr과 같은 방사성 동위원소 및 Ar 안정동위원소를 이용한 절대연령측정과 산소기체(O_2) 동위원소비($\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$) 등 상대연령 지표를 활용한 다중 연령추정이 필요하다. 본 과제의 1단계에서는 국내의 관련 기술 기반을 확보하기 위해 다음과 같은 3가지 연구를 수행하였다. (1) $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$, ^{81}Kr 및 Ar 안정동위원소를 이용한 라센(Larsen) 블루아이스 연령측정 (2) GPR(Ground Penetration Radar) 및 온실기체(CH_4, CO_2) 자료를 이용한 구조적 층서 이해 (3) 라센 블루아이스 표층(0-2 m)에서의 온실기체 변질 상태 수평/수직 분포 파악 주요 연구결과로는 (1) 라센 블루아이스의 $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$ 자료와 기존 빙하코어 대비를 통해 해당 시료가 빙하기-간빙기 전이 시기에 해당함을 확인하였고, (2) ^{81}Kr 및 Ar 안정동위원소를 이용한 분석을 통해 시료 연령 범위를 제한하고 다중 지표 기반 연령구축 가능성을 제시하였다. 또한 (3) 표층 1-2 m 구간에서 CH_4 및 CO_2 농도의 뚜렷한 변질을 확인하였다. 2단계 연구에서는 블루아이스에서 관찰되는 온실가스 변질과정을 규명하는데 주력하였고, 새로이 시추된 서남극 빙하코어(RAICA-CPSW)의 연령을 메탄대비법을 이용하여 설정하였다. 주요 연구결과는 (1) 기존에 알려진 변질과정을 적용하여 확인한 결과, 새로운 변질과정인 것으로 확인되었으며, 광화학반응이 가장 유력한 변질과정이라고 볼 수 있다. (2)광화학반응에 대한 반응관계 확인을 위하여, 특정 기체조성을 갖는 공기방울 인공빙하 제조법을 성공적으로 개발하였다. (3) 서남극의 RAICA-CPSW 코어의 메탄(CH_4) 농도를 측정하여 기체연령이 1950년~ 2010년에 해당함을 확인하였다. 또한, 깊이에 따른 기체연령 변화량을 바탕으로 적설량 변화에 대한 정보를 알아낼 수 있었다.					
색인어 (각 5개 이상)	한글	빙하, 남극, 블루아이스, 기체연령, 불활성기체, 층서, 온실가스, GPR, 광화학반응			
	영어	Glacier, Antarctica, Blue Ice, Gas Age, Noble Gas, Stratigraphy, Greenhouse Gas, GPR, Methane, Photochemical Reaction			

요 약 문

I. 제 목

미량기체를 활용한 남극 해안 신규 천부시추 빙하코어 연령 측정

II. 연구개발의 목적 및 필요성

○ 연구목적

불활성기체(Ar, Kr) 및 산소기체(O₂)의 동위원소 분석을 기반으로, 만 년(10 ka) 이상의 연령을 갖는 빙하시료에 대해 신뢰도 높은 연령측정(절대·상대 연령구속) 역량을 확보한다. 이를 라센(Larsen) 블루아이스 시료에 적용하여 고연령 시료의 연대 구속 체계를 구축하고, GPR 및 온실기체(CH₄, CO₂) 농도 자료를 연계하여 구조적 층서 해석 및 기체연령(gas age) 추정 방법을 고도화한다. 또한 2단계 연구를 통해 라센빙하 및 엘리펀트 모레인 시료의 CO₂ 농도 특성과 변질과정을 규명하고, RAICA-CPSW 코어에 대해 bubble close-off 하부의 기체연령 및 얼음연령(Δ age)를 추정함으로써 향후 남극 해안 천부시추 및 블루아이스 기반 온실가스 복원 연구에 필요한 국내 연대·기체 분석 기술 기반을 확립한다.

○ 연구필요성

천부빙하 코어는 얼음동위원소 및 이온성분 분석을 통해 계절 변화를 확인하고 연간층을 계수하여 연령을 산정할 수 있다. 그러나 빙하가 심부로 갈수록 연간층 두께가 감소하고 층서 구조가 복잡해져 기존 방법만으로는 연령측정에 한계가 발생한다. 최근 국제적으로 수십만~백만 년 규모의 고연령 빙하코어 확보 연구가 확대되고 있으며, 이러한 시료의 연령을 구속하기 위해서는 ⁸¹Kr과 같은 방사성 동위원소 기반 절대연령측정과 Ar 안정동위원소 기반 연령제한 기법을 반드시 활용해야 한다.

본 과제는 불활성기체(Ar, Kr) 및 산소기체(O₂) 동위원소($\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$), 얼음 동위원소($\delta^{18}\text{O}_{\text{ice}}$, $\delta\text{D}_{\text{ice}}$)를 활용한 다중 지표 기반 연령구속 기법을 국내에서 남극 빙하시료에 적용하여 연대 해석 역량을 확보하였다. 더 나아가 2단계에서는 블루아이스 표층 및 천부 구간에서 나타날 수 있는 온실기체(CO₂, CH₄) 농도 변질 문제를 정량적으로 평가하고, 납(Pb) 농도·동위원소비 분석을 통해 변질 과정의 가능 원인을 검토하였다. 또한 엘리펀트 모레인 시료 분석 및 공기방울 인공빙하 제작법 개발을 통해 변질 연구 및 검증 기반을 확장하였으며, RAICA-CPSW 코어에 대해서는 CH₄·공기함량 및 $\delta^{15}\text{N}-\text{N}_2$ 자료와 firn densification 모델을 결합하여 bubble close-off 하부의 기체연령 및 얼음연령 차이(Δ age)를 추정할 수 있는 기반을 마련하였다. 이러한 연구는 향후 국내 심부빙하시추 및 고연령 블루아이스 연구에서 연대 신뢰도를 향상시키고, 온실가스 자료의 해석 정확도를 높이는 핵심 기반 기술로 활용될 필요가 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$, ⁸¹Kr 및 Ar 안정동위원소를 이용한 라센(Larsen) 빙하지역 블루아이스(blue ice) 연령측정
- GPR(Ground Penetration Radar) 및 온실기체(CH₄, CO₂) 측정자료를 이용한 구조적 층서 이해

- 라센 블루아이스(blue ice) 표층(0-2 m)에서의 온실기체(CH_4 , CO_2) 변질상태 수평/수직 분포 파악
- 남극 라센빙하 시료의 CO_2 농도측정 및 납(Pb) 농도·동위원소비 기반 변질과정 평가
- 남극 엘리펀트 모레인(Elephant Moraine) 빙하 시료의 CO_2/CH_4 농도측정 및 공기방울 인공빙하 제작법 개발
- RAICA-CPSW 코어의 bubble close-off 하부 기체연령 및 얼음연령(Δage) 추정(CH_4 ·공기 함량 측정, $\delta^{15}\text{N}-\text{N}_2$ 기반 보정, firn densification 모델 적용)

IV. 연구개발결과

- 라센(Larsen) 블루아이스 시료의 $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$ 는 -0.075~1.126‰ 범위를 보였으며, 기존 빙하코어 기록과의 대비를 통해 빙하기-간빙기 전이 시기에 해당함을 확인하였다.
- ^{81}Kr 연령측정 결과 라센 블루아이스 시료는 약 9-41 ka 및 14-43 ka 범위의 연령으로 제한되었으며, Ar 안정동위원소 분석을 통해 추가적인 절대연령 제약을 확보하였다.
- 라센 블루아이스 표층에서 CH_4 및 CO_2 농도의 뚜렷한 변질이 확인되었으며, 변질 영향을 고려한 시료 채취 깊이 및 해석 전략 수립 필요성을 제시하였다.
- 라센빙하 시료에 대해 당초 계획 대비 확대된 깊이구간에서 CO_2 농도 측정을 수행하였고, 납 농도 및 납 동위원소비 분석을 통해 대기 에어로졸 기원의 변질 가능성을 평가하였다.
- 엘리펀트 모레인(EM-B) 코어에서 CO_2 및 CH_4 농도 측정을 수행하였으며, 변질 평가 및 검증에 위한 공기방울 인공빙하 제작법을 개발하였다.
- RAICA-CPSW 코어(80-120 m 구간)에서 CH_4 농도 및 공기함량 측정을 수행하고, firn densification 모델을 활용하여 기체연령 및 얼음연령(Δage) 추정을 수행하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 라센(Larsen) 및 엘리펀트 모레인(Elephant Moraine) 등 남극 블루아이스 시료의 기체연령 및 얼음연령 구축을 위한 연령측정($\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$, ^{81}Kr , Ar 안정동위원소) 연구에 활용
- 블루아이스 표층 및 천부 구간에서 발생하는 온실기체(CH_4 , CO_2) 농도 변질 현상에 대한 정성·정량적 평가 및 보정 기법 개발 연구에 활용
- GPR 및 온실기체 측정자료 기반의 구조적 층서 해석 기법을 향후 남극 해안 천부시추 빙하코어 및 블루아이스 연구에 적용
- RAICA-CPSW 코어의 CH_4 , $\delta^{15}\text{N}-\text{N}_2$ 및 모델 기반 Δage 추정 결과를 활용하여, 향후 천부-심부 연계 연대구축 및 고연령 코어 해석 기반 확장에 기여
- 학생연구원 참여를 통한 빙하 연대 및 미량기체 분석 분야의 전문 연구인력 양성
- 확보된 실험 결과 및 연구 인프라를 대학 수업 및 고교생 대상 서울대학교 탐방·과학체험 프로그램 등 교육·홍보 활동에 활용

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Age Measurement of Ice Cores from New Shallow Drilling in Antractic Coast Using Trace Gas

II. Purpose and Necessity of R&D

○ Purpose of study

This project aims to establish reliable age-dating capabilities (absolute and relative chronological constraints) for ice samples older than 10 ka, based on isotope analyses of inert gases (Ar, Kr) and oxygen gas (O_2). These methods are applied to the Larsen blue ice in Antarctica to build a robust chronological framework for old ice. In addition, by integrating GPR data and greenhouse-gas (CH_4 , CO_2) concentration measurements, we improve approaches for structural stratigraphic interpretation and gas-age estimation. Through the second phase of the study, we further investigate the CO_2 characteristics and alteration processes in samples from Larsen Glacier and Elephant Moraine, and estimate gas age and ice age (Δage) below the bubble close-off depth in the RAICA-CPSW core. Ultimately, this project establishes a domestic technical foundation for chronology and gas analysis required for Antarctic coastal shallow drilling and blue-ice-based greenhouse-gas reconstructions.

○ Research Necessity

Shallow ice cores can be dated by identifying seasonal variations and counting annual layers using water isotopes and ionic chemistry. However, toward deeper ice, annual-layer thickness decreases and stratigraphic structures become more complex, making conventional dating methods insufficient. International efforts have recently expanded to obtain high-age ice cores spanning hundreds of thousands to millions of years, and robust dating of such samples requires absolute age constraints using radioactive isotopes such as ^{81}Kr , as well as age-limiting approaches based on stable Ar isotopes.

In this project, a multi-proxy chronological framework was established by applying isotope-based methods using inert gases (Ar, Kr), oxygen-gas isotopes ($\delta^{18}O-O_2$), and ice isotopes ($\delta^{18}O_{ice}$, δD_{ice}) to Antarctic ice samples. Furthermore, in the second phase, we quantitatively assessed greenhouse-gas (CO_2 , CH_4) alteration in the surface and shallow blue-ice layers, and evaluated possible alteration mechanisms using Pb concentration and Pb isotope ratios. We also expanded the methodological and validation basis through Elephant Moraine sample analyses and the development of artificial ice with air bubbles. For the

RAICA-CPSW core, we combined CH₄ and air-content measurements, $\delta^{15}\text{N}-\text{N}_2$ data, and firn densification modeling to estimate gas age and the ice-gas age difference (Δage) below bubble close-off. These outcomes provide essential foundational techniques for improving chronological reliability and enhancing greenhouse-gas data interpretation in future deep drilling and high-age blue-ice studies in Korea.

III. Contents and Extent of R&D

- Age dating of Larsen blue ice in Antarctica using $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$, ^{81}Kr , and stable Ar isotopes
- Structural stratigraphic interpretation using Ground Penetrating Radar (GPR) and greenhouse-gas (CH₄, CO₂) concentration data
- Investigation of the horizontal/vertical distribution of greenhouse-gas (CH₄, CO₂) alteration in the Larsen blue-ice surface layer (0–2 m)
- CO₂ concentration measurements and evaluation of alteration processes using Pb concentration and isotope ratios in Larsen Glacier samples
- CO₂/CH₄ concentration measurements and development of artificial ice containing air bubbles using samples from Elephant Moraine, Antarctica
- Estimation of gas age and ice age (Δage) below the bubble close-off depth in the RAICA-CPSW core (CH₄ and air-content measurements, $\delta^{15}\text{N}-\text{N}_2$ -based correction, and firn densification modeling)

IV. R&D Results

- The $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$ values of Larsen blue-ice samples range from -0.075 to 1.126‰ , and comparison with existing ice-core records confirms that the samples correspond to a glacial-interglacial transition period.
- ^{81}Kr dating constrains the Larsen blue-ice samples to approximately 9–41 ka and 14–43 ka, and additional absolute age constraints were obtained through stable Ar isotope analyses.
- Clear alteration signals in CH₄ and CO₂ concentrations were identified in the Larsen blue-ice surface layer, indicating that sampling depth selection and interpretation strategies must account for alteration effects.
- CO₂ concentrations were measured for Larsen Glacier samples across expanded depth intervals compared to the original plan, and Pb concentration and isotope ratio analyses were used to evaluate the possibility of aerosol-derived alteration.
- CO₂ and CH₄ concentrations were measured in the Elephant Moraine (EM-B) core, and an artificial-ice preparation method with air bubbles was developed

for alteration assessment and validation.

- In the RAICA-CPSW core (80–120 m depth interval), CH₄ concentrations and air content were measured, and gas age and ice age (Δ age) were estimated using $\delta^{15}\text{N}-\text{N}_2$ data and firn densification modeling.

V. Application Plans of R&D Results

- Application to age-dating studies ($\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$, ^{81}Kr , stable Ar isotopes) constraining gas age and ice age of Antarctic blue-ice samples from Larsen Glacier and Elephant Moraine
- Application to qualitative and quantitative evaluation and correction-method development for greenhouse-gas (CH₄, CO₂) alteration in surface and shallow blue-ice layers
- Application of structural stratigraphic interpretation techniques based on GPR and greenhouse-gas datasets to future Antarctic coastal shallow-drilled ice cores and blue-ice studies
- Contribution to the extension of chronology frameworks linking shallow and deep ice, using RAICA-CPSW CH₄, $\delta^{15}\text{N}-\text{N}_2$, and model-based Δ age estimation results
- Training of specialized researchers in ice-core chronology and trace-gas analysis through the participation of student researchers
- Utilization of experimental results and research infrastructure in university courses and outreach/education programs (e.g., Seoul National University tours and science-experience programs for high school students)

목 차

제 1 장 서론	9
1절. 연구개발의 목적	9
2절. 연구의 필요성	10
3절. 연구범위	11
제 2 장 국내외 기술개발 현황	18
1절. 국내·외 연구동향	18
2절. 본 연구의 독창성	18
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	20
1절. 연구개발 추진체계 및 내용	20
2절. 세부 연구수행 방법 및 대응	22
3절. 연구결과	23
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	52
1절. 연구개발목표 달성도	52
2절. 연구종료후 성과창출 계획	53
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	54
1절. 활용방안	54
2절. 기대효과	54
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	55
제 7 장 참고문헌	56

제 1 장 서론

1절. 연구개발의 목적

1. 중·장기적인 궁극적 연구목적

불활성기체(Ar, Kr) 및 산소기체(O_2) 동위원소 기반의 연령측정 기법을 활용하여, 만 년(10 ka) 이상의 연령을 갖는 빙하코어에 대한 연대 추정 능력을 향상시키고 국내 빙하 연대 연구 역량을 강화한다. 또한 블루아이스 표층 및 천부 구간에서 발생할 수 있는 온실기체(CO_2 , CH_4) 변질 문제를 정량적으로 평가하고, 향후 심부 시추 코어의 연대 구축(Δage 추정 포함)까지 확장 가능한 분석·해석 기반을 마련함으로써 장주기 기후기록 확보에 기여한다.

2. 본 과제의 최종 연구목표

본 과제의 최종 목표는 Kr, Ar, O_2 등 가스상(gas phase) 동위원소비를 이용하여 만 년 이상의 연령을 갖는 빙하시료의 연령을 정량적으로 제한하고, 이를 수행하기 위한 분석·측정 기술을 확립하는 데 있다. 이를 위해 라센(Larsen) 빙하지역 블루아이스 천부 코어(약 0 - 10 m)를 대상으로 $\delta^{18}O - O_2$, ^{81}Kr , Ar 안정동위원소 등의 다중 지표 기반 연령추정을 수행하고, 표층부 변질 가능성을 고려하여 지표 간 결과를 비교·검증함으로써 최종 연령을 도출한다. 더 나아가 라센 및 엘리펀트 모레인 시료의 CO_2 농도 및 변질 특성을 평가하고, 공기방울 인공빙하 제작법을 활용한 검증 기반을 마련하며, RAICA-CPSW 코어에 대해 CH_4 ·공기함량 및 $\delta^{15}N - N_2$ 자료와 모델을 결합하여 bubble close-off 하부의 기체 연령 및 얼음연령 차이(Δage) 추정까지 수행한다.

3. 정성적 목표

연차	연구 목표	연구 내용	비 고
1단계			
1차년도 (2020)	$\delta^{18}O - O_2$, ^{81}Kr 및 Ar 안정동위원소를 이용한 Larsen 빙하지역 블루아이스(blue ice) 연령측정	동남극 Larsen Glacier 블루아이스(blue ice) 시료를 이용한 $\delta^{18}O - O_2$ 및 $\delta^{18}O_{ice}$ 자료 확보 및 층서 이해	
		^{81}Kr 를 이용한 Larsen 블루아이스(blue ice) 절대연령 측정	
		Ar 안정동위원소(^4Ar , ^{38}Ar , ^{36}Ar)를 이용한 Larsen 블루아이스(blue ice) 연령 해석	
2차년도 (2021)	GPR(Ground Penetration Radar) 및 온실기체 측정자료를 이용한 구조적 층서 이해	GPR 자료를 이용한 수평적 거리변화/연령변화 비율과 수직적 거리변화/연령변화에 대한 정량적 이해	
		신뢰할 만한 깊이구간에서의 온실기체 농도를 이용한 빙하기/간빙기 연령조건 파악	

3차년도 (2022)	Larsen 블루아이스(blue ice) 표층에서의 온실기체 변질상태 수평/수직 분포 파악	Larsen 블루아이스(blue ice) 0-2미터 구간에서의 온실기체(CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O) 농도 측정	
		표층에서의 자연적 온실기체 농도 변질정도의 수직적/수평적 분포 파악	
2단계			
1차년도 (2023)	남극 라센빙하의 CO ₂ 농도측정 및 시료 변질과정 연구	약 90여 개 깊이구간에 대해 CO ₂ 농도 측정 (당초계획 20개 깊이구간)	
		납 농도와 동위원소비를 이용한 변질과정 연구 - 10개 깊이구간에 대해 총 40개 시료의 납 농도 및 납 동위원소비 측정 - 대기 에어로졸에 의한 변질 정도 평가	
2차년도 (2024)	남극 엘리펀트 모레인 빙하의 CO ₂ 농도 변질과정 연구	EM-B 코어 CO ₂ 및 CH ₄ 농도측정 - 48개 깊이구간 CO ₂ 농도 측정 - 18개 깊이구간 CH ₄ 농도 측정	
		공기방울을 갖는 인공빙하 제작법 개발 - 공기방울 없는 인공빙하 slab에 작은 구멍을 뚫은 후, 초순수 물을 활용하여 저온에서 접착 - glove box를 이용하여, 저온에서 특정 CO ₂ 농도를 갖는 공기방울 얼음 제작	
3차년도 (2025)	RAICA-CPSW 코어에 대한 bubble close-off 깊이 하부의 기체연령 및 얼음연령 추정	RAICA-CPSW 코어 80 - 120 m 깊이구간에서 41개 시료에 대해 CH ₄ 농도 및 공기함량 측정	
		δ ¹⁵ N - N ₂ 추정	
		firm densification 모델과 기존 Law Dome CH ₄ 자료 대비를 통해 기체연령 및 얼음연령 추정	

2절. 연구의 필요성

1. 기존 연구의 문제점

대한민국 장보고 과학기지 건설과 함께 동남극 지역을 대상으로 한 빙하시추 및 고기후·빙하학 연구가 계획·확대되고 있으며, 향후 심부 빙하시추가 본격적으로 진행될 경우 빙하코어 연령측정에 필요한 핵심 기술을 국내에서 선제적으로 확보하는 것이 필수적이다. 천부빙하 코어는 얼음동위원소와 이온성분 분석을 통해 계절 변화를 확인하고 연간층을 계수하여 비교적 신뢰도 높은 연령을 산정할 수 있다. 그러나 빙하가 심부로 갈수록 연간층 두께가 얇아지고 내부 구조가 복잡해지면서, 연간층 기반 연령측정 기법만으로는 정확한 연대 구축이 어렵다는 한계가 존재한다.

이러한 한계를 보완하기 위해서는 CH_4 와 같은 미량기체 농도자료를 활용하여 다른 빙하코어 기록과 대비하는 상대연령 추정이 필요하며, 수십만 년 이상 고연령 시료를 대상으로는 화산재층, ^{10}Be , ^{81}Kr 방사성 동위원소, Ar 안정동위원소 등 다양한 절대·상대 연령측정 기법을 복합적으로 적용해야 한다. 또한 블루아이스(blue ice)의 경우 연령이 수평 방향으로 변화하고 표층에서 기체 조성이 변질될 수 있어, 단일 지표만으로는 연령 확정 및 층서 해석에 불확실성이 크게 남는다. 따라서 고연령 빙하시료에 대한 연령측정 기술 확보뿐 아니라, 온실기체(CH_4 , CO_2) 변질을 고려한 신뢰 구간 설정과 bubble close-off 이후 구간의 Δage 추정 능력까지 포함하는 통합적 기술 확보가 국내 빙하연구에서 반드시 해결해야 할 선결 과제이다.

2. 연구과제의 중요성(필요성)

본 위탁과제는 불활성기체(Ar, Kr)를 이용한 연령측정 기법을 국내 최초로 남극 빙하시료에 적용함으로써, 기존 국내 연구에서 부족했던 고연령 빙하시료 연령측정 기술을 실질적으로 확보했다는 점에서 중요한 의미가 있다. 또한 산소기체(O_2)의 동위원소비($\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$), 온실기체 농도자료(CH_4 , CO_2), 얼음의 산소/수소 동위원소($\delta^{18}\text{O}_{\text{ice}}$, $\delta\text{D}_{\text{ice}}$) 등 다중 지표를 함께 활용하여 절대연령과 상대연령 구축을 동시에 수행할 수 있는 연구 기반을 마련하였다.

특히 본 연구에 사용된 라센(Larsen) 빙하지역 블루아이스 시료는 수만~수십만 년 수준의 연령을 가질 것으로 추정되었으나 정확한 연령이 확립되지 않았던 대상이며, 본 과제를 통해 국내 연구진이 기존에 다룬 연령 범위를 크게 확장하였다. 더 나아가 2단계 연구에서는 라센 빙하 및 엘리펀트 모레인 시료의 CO_2 농도 측정과 변질과정 평가(Pb 농도·동위원소비 활용)를 수행하고, 공기방울을 갖는 인공빙하 제작법을 개발함으로써 블루아이스 기반 온실가스 연구에서 핵심적인 불확실성 요인인 “시료 변질” 문제에 대한 검증 기반을 마련하였다. 또한 RAICA-CPSW 코어에 대해 CH_4 ·공기함량 및 $\delta^{15}\text{N}-\text{N}_2$ 자료와 모델 기반 해석을 결합하여 bubble close-off 하부 구간의 기체연령 및 얼음연령(Δage) 추정 역량을 확보함으로써, 향후 천부-심부 연계 연대 구축 연구로 확장 가능한 기반을 제시하였다.

따라서 본 과제는 국내 빙하 연대 연구의 핵심 기반기술을 확립하고, 향후 심부 빙하코어 시추 및 백만 년 이상 고연령 블루아이스 연구에 직접 적용 가능한 연령측정·변질평가· Δage 추정 체계를 구축했다는 점에서 대외적으로도 중요성이 크다.

3절. 연구범위

1. Larsen 빙하지역 블루아이스(blue ice) 산출상태

본 과제에서는 2018/2019 남극 하계시즌 동안 핸드오거(hand auger)를 이용하여 라센(Larsen) 빙하지역에서 총 49개 지점에 대해 표층 천부 코어(0 - 10 m)를 시추하여 시료를 확보하였다. 사전 연구에서는 해당 블루아이스 시료가 약 40만 년 수준의 연령을 가질 가능성이 제시되었으나, 학계에서 공식적으로 인정되는 절대연령 결과는 부족한 상태였다. 특히 블루아이스는 수평적 거리 변화에 따라 연령이 증가 또는 감소할 수 있으며, 특정 연령 구간만 제한적으로 관찰될 수 있기 때문에, 전통적인 층서 대비 기법만으로는 정확한 연령 추정에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 최근 발전한 불활성기체(Kr, Ar) 동위원소 기반 절대연령 측정 기법을 함께 적용하여, 고연령 빙하시료에 대한 연령 구축 역량을 확보하고자 하였다.

라센빙하는 장보고 과학기지에서부터 약 84 km 남서쪽에 위치하며, 헬리콥터로 약 25분 내 접근이 가능하여 비교적 현장 접근성이 우수하다. 다만 블루아이스 지역은 강풍이 빈번하여 풍속이 일정 수준 이하로 낮아지는 조건에서만 시추 작업이 가능하다는 제약이 존재한다.

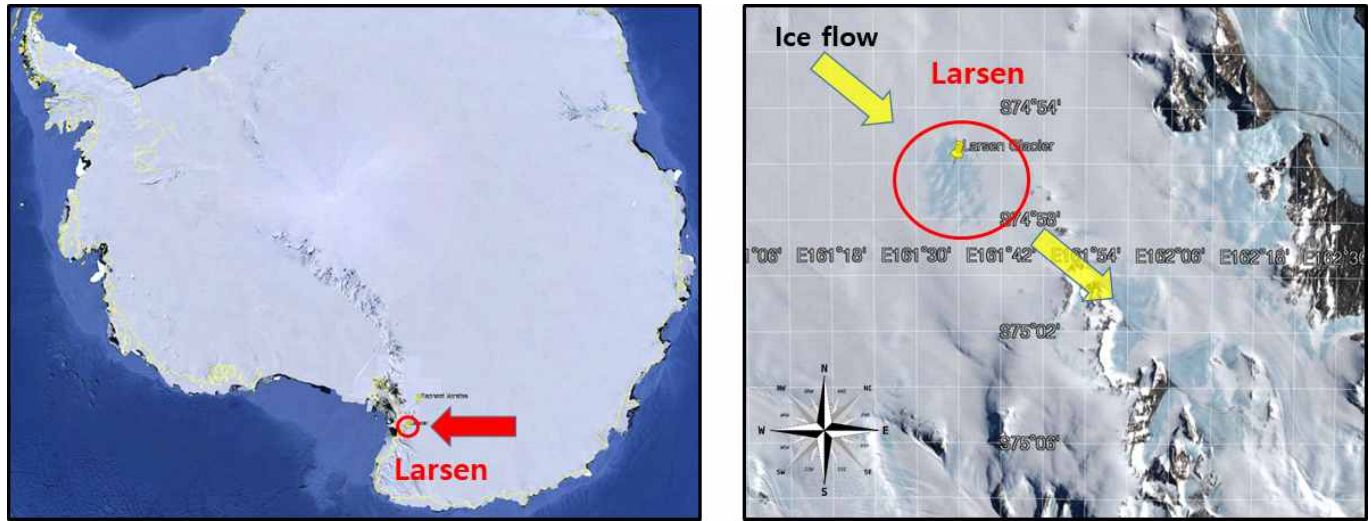


그림 1. 라센빙하 지역에서의 블루아이스(blue ice) 분포와 핸드오거로 시추한 지역(빨간색 원).

2. ^{81}Kr 및 Ar 안정동위원소를 이용한 Larsen 빙하지역 블루아이스(blue ice) 연령측정

가. Ar안정동위원소를 이용한 절대연령 측정결과 분석

대기 중 ^{40}Ar 은 지각 내 ^{40}K 의 방사성 붕괴로 지속적으로 생성·방출되며, 이에 따라 대기 조성에서 ^{40}Ar 의 비율은 장기적으로 변화한다. 이러한 특성을 이용하면 빙하에 포집된 화석공기에서 Ar 동위원소비(예: $^{40}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$, $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$)를 측정함으로써 빙하시료의 연령을 제한할 수 있다. 기존 연구에서는 이미 연령이 알려진 빙하코어(Vostok 등)를 활용하여, Ar 동위원소비의 장기 변화율이 정량적으로 평가된 바 있으며, 이를 기반으로 블루아이스 시료의 절대연령을 추정할 수 있다. 그러나 Ar 안정동위원소 기반 연령측정은 불확실성이 비교적 크며, 특히 수십만 년 규모 연령에서 오차가 크게 나타날 수 있어 단독 지표로는 세부 층서 확정에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 Ar 동위원소 결과를 독립적인 절대연령 제약 자료로 활용하되, 다른 지표와의 교차 검증을 통해 연령 신뢰도를 향상시키고자 하였다.

나. ^{81}Kr 을 이용한 절대연령측정

^{81}Kr 은 약 23만 년의 반감기를 갖는 방사성 동위원소로, 수십만~수백만 년 연령 범위의 빙하시료에 대한 절대연령측정에 적합하다. 대기 중 존재량이 매우 낮아 과거에는 측정이 어려웠으나, 최근 원자물리학 기반의 측정기술 발전으로 분석이 가능해졌다. 일반적으로 빙하시료 내 포집 공기량을 고려할 때 ^{81}Kr 연령측정을 위해서는 수 kg 이상의 얼음 시료가 요구되며, 연령대에 따라 측정 오차가 달라질 수 있다. 본 과제에서는 라센 블루아이스 시료에 대해 ^{81}Kr 절대연령측정을 수행하여, 반복되는 빙하기 - 간빙기 주기 중 해당 시료가 어느 시기에

해당하는지 판단할 수 있는 핵심 연령 제약을 확보하는 것을 연구 범위에 포함하였다.

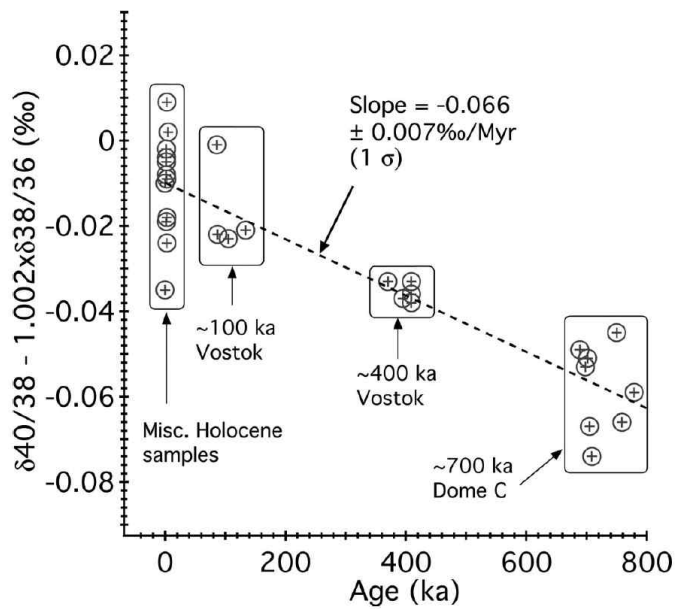


그림 2. 대기 중 Ar 안정동위원소비 값의 변화에 대한 검정(calibration) 곡선 (Bender et al., 2008, PNAS)

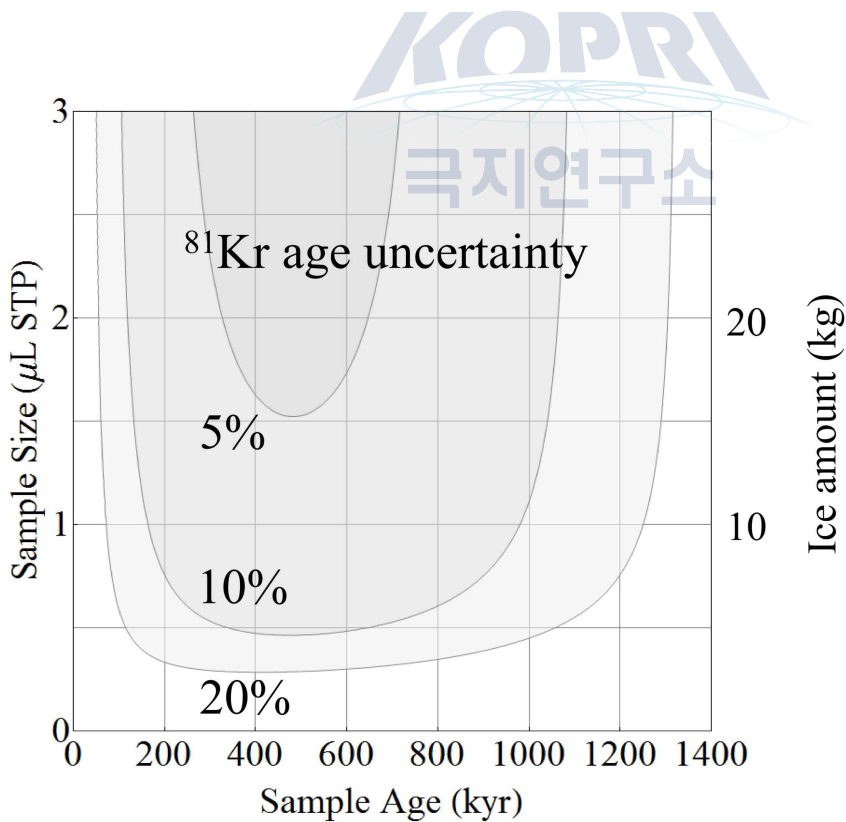


그림 3. ^{81}Kr 연령측정에 필요한 빙하시료 양과 오차범위(Z-T Lu 박사 제공)

3. $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{ice}}$ (또는 $\delta\text{D}_{\text{ice}}$)를 이용한 층서대비

^{81}Kr 또는 Ar 안정동위원소 분석을 통해 절대연령을 산정하더라도, 연령 오차가 수 % 이상 존재할 수 있어 세부 연령 확정에는 추가적인 상대연령 지표가 필요하다. 본 연구에서는 산소기체 동위원소비($\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$)와 얼음의 산소/수소 동위원소($\delta^{18}\text{O}_{\text{ice}}$ 또는 $\delta\text{D}_{\text{ice}}$)를 함께 활용하여 층서 대비를 수행하였다. 선행 연구에서는 블루아이스 시료에서 $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$ 와 얼음 동위원소를 비교함으로써 연령을 수천 년 이내 범위로 좁혀 확정한 사례가 보고된 바 있다. 라센 블루아이스 시료의 연령이 수십만 년 규모임이 명확히 규명될 경우, 이는 표층 블루아이스 기반 고연령 시료 연구의 중요한 선행 결과로서 향후 백만 년 이상 고연령 빙하시료 확보 연구에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

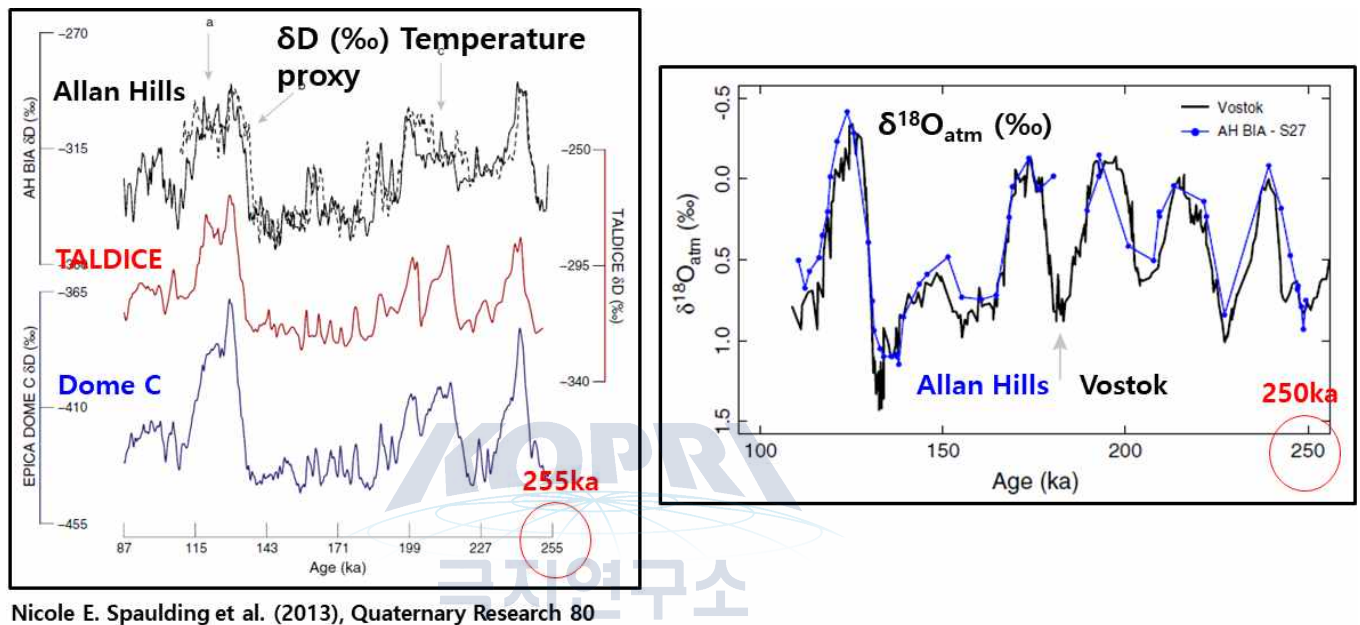


그림 4. 남극 앨런힐즈(Allan Hills)지역에서 산출되는 블루아이스 얼음의 수소 동위원소($\delta\text{D}_{\text{ice}}$)와 산소기체의 동위원소($\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$) 대비를 이용한 연령설정. 자료출처; Spaulding et al. (2013, Quaternary Research)

4. Larsen 블루아이스 GPR 및 온실기체 측정자료를 이용한 구조적 층서 이해

본 연구에서는 2018/2019 하계시즌에 확보된 GPR(Ground Penetration Radar) 자료와 기체 동위원소 및 온실기체 농도 자료를 통합하여 라센 블루아이스의 공간적 층서 구조를 해석하는 것을 연구 범위에 포함하였다. 블루아이스 지역에서는 빙하 흐름 방향을 따라 연령이 증가하는 속도와, 수직 천부 코어(약 10 m)에서 예상되는 연령 증가 패턴을 함께 고려할 필요가 있다. 또한 GPR 및 위성 영상 자료에서 일부 구간의 습곡 구조가 관찰되어, 층서 역전 및 복잡한 내부 구조 가능성이 제기된다. 따라서 본 연구에서는 층서 구조가 비교적 단순한 구간에 대해 집중적으로 분석을 수행하고, 수평·수직 방향의 연령 분포를 정량적으로 이해하는데 목적을 두었다.

5. Larsen 블루아이스(blue ice) 표층에서의 온실기체 변질상태 분석

블루아이스는 표층에서 오래된 연령의 빙하시료를 확보할 수 있다는 장점이 있으나, 기체 성분은 표면 수 m 이내에서 변질이 발생할 수 있다는 한계가 있다. 선행 연구에서는 표층 수

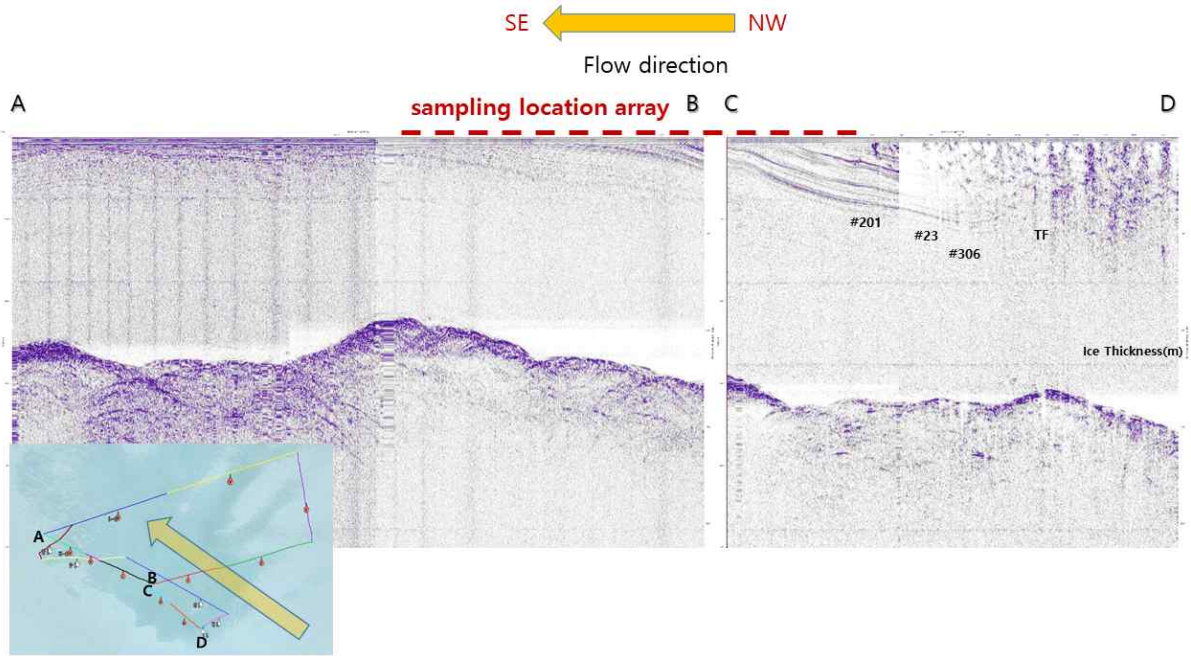


그림 5. 라센빙하 블루아이스(blue ice) 지역에서의 GPR 자료(극지연구소 주현태연구원 제공). 빙하바닥 지형과 일부 빙하층이 관찰된다.

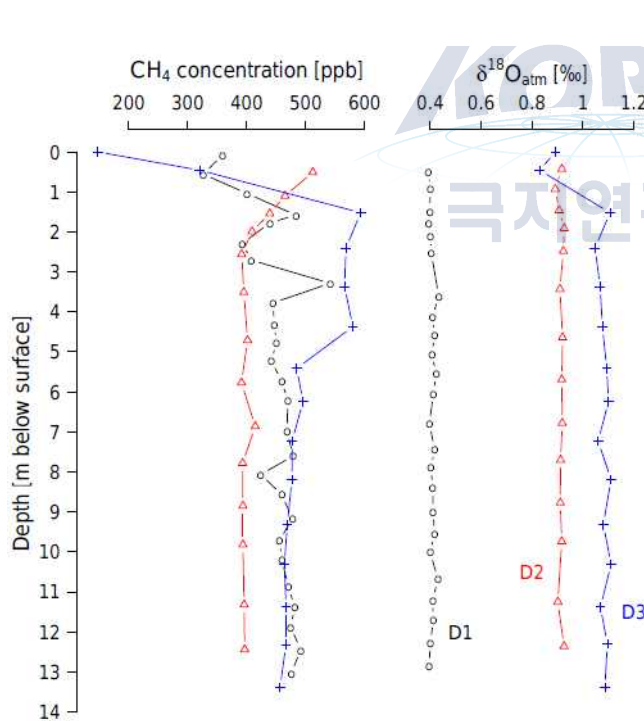


그림 6. 남극 Taylor Glacier 블루아이스 표층에서 관찰되는 메탄 농도의 변질(Baggenstos et al., 2017, Climate of the Past)

m 구간에서 메탄(CH_4) 농도가 비정상적으로 감소하거나 급격히 변하는 현상이 보고되었으며, 이는 블루아이스 기반 온실기체 복원 연구에 중요한 불확실성 요인으로 작용한다. 또한 $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$, Ar/N_2 등의 지표에서도 표층 변질 가능성이 제기되며, 변질 깊이와 정도는 지역별로 다르게 나타날 수 있다. 변질 원인은 아직 명확히 규명되지 않았으나, 표층에서의 균열(crack) 발달 및 현대 공기 유입 등 여러 요인이 제안되고 있다. 본 과제에서는 라센 빙하지역을 대상으로 표층(0 - 2 m)에서의 온실기체 변질 정도를 수평·수직적으로 평가하고, 향후 시추 깊이 선정 및 시료 활용 전략 수립을 위한 기초 자료를 확보하는 것을 연구 범위로 설정하였다.

6. 남극 라센빙하 CO_2 농도측정 및 시료 변질과정 연구

가. 라센빙하 CO_2 농도측정

CO_2 는 빙하에 포집된 과거 대기 조성을 복원하는 핵심 온실가스이며, 시료의 연대 해석 및

기후 변화 연구에 중요한 정보를 제공한다. 그러나 블루아이스 및 천부 코어에서는 표층부에서 기체 조성이 변질될 수 있어, 신뢰 가능한 깊이 구간을 규명하는 과정이 필수적이다. 본 과제에서는 라센빙하 시료에 대해 CO₂ 농도를 다수 깊이 구간에서 측정하여, 깊이별 CO₂ 농도 특성을 파악하고 변질 가능성 여부를 평가할 수 있는 기반 자료를 확보하는 것을 연구 범위로 설정하였다. 특히 당초 계획 대비 확대된 깊이 구간에서 측정을 수행함으로써, 라센빙하 시료의 CO₂ 농도 분포를 보다 고해상도로 제시하고자 하였다.

나. 납(Pb) 농도 및 동위원소비 기반 변질과정 평가

블루아이스 시료에서 나타나는 온실기체 농도 이상은 미생물 작용, 현생 대기 유입, 에어로졸 침착 등 다양한 원인을 가질 수 있으며, 이를 분리·해석하기 위해서는 독립적인 변질 지시자(tracer)가 필요하다. 본 과제에서는 납(Pb) 농도 및 납 동위원소비를 활용하여 시료 변질과정을 평가하고, 특히 대기 에어로졸 기원의 오염 가능성을 정량적으로 검토하는 것을 연구 범위에 포함하였다. 이를 통해 라센빙하 시료의 CO₂ 농도 특성이 단순한 고기후 신호인지, 혹은 표층 및 천부 구간에서의 변질 영향을 포함하는지에 대한 해석 기반을 강화하고자 하였다.

7. 남극 엘리펀트 모레인(Elephant Moraine) 빙하 CO₂ 농도 변질과정 연구

가. EM-B 코어 CO₂ 및 CH₄ 농도측정

엘리펀트 모레인 지역의 블루아이스 시료는 고연령 얼음 확보 가능성이 높아 온실가스 복원 연구에 유리하지만, 라센빙하와 마찬가지로 시료 변질 가능성을 고려해야 한다. 본 과제에서는 EM-B 코어에 대해 CO₂ 및 CH₄ 농도를 측정하여 깊이별 농도 특성을 파악하고, 변질 여부를 평가할 수 있는 비교·검증 자료를 구축하는 것을 연구 범위로 설정하였다. CO₂와 CH₄는 변질 메커니즘 및 민감도가 다를 수 있으므로, 두 기체를 함께 분석함으로써 시료 상태에 대한 종합적인 판단 근거를 확보하고자 하였다.

나. 공기방울을 갖는 인공빙하 제작법 개발

블루아이스 시료의 변질 과정은 현장 조건 및 미세 구조 특성에 의해 달라질 수 있어, 이를 검증하기 위한 실험적 기반이 필요하다. 본 과제에서는 공기방울이 포함된 인공빙하 제작법을 개발하여, 특정 CO₂ 농도를 갖는 공기방울 얼음을 실험적으로 재현할 수 있는 기술을 확보하는 것을 연구 범위에 포함하였다. 이를 통해 온실기체 변질 평가에 필요한 실험적 검증 기반을 마련하고, 향후 블루아이스 변질 기작 규명 및 보정 연구로 확장 가능한 기초 기술을 확보하고자 하였다.

8. RAICA-CPSW 코어 bubble close-off 깊이 하부의 기체연령 및 얼음연령(Δ age) 추정

가. 미량기체(CH₄) 농도 및 공기함량 측정

기체연령(gas age)과 얼음연령(ice age)은 bubble close-off 과정 및 firn column 변화에 의해 서로 차이가 발생하며, 이를 정량화하기 위해서는 미량기체 농도 및 공기함량 자료가 필요하

다. 본 과제에서는 RAICA-CPSW 코어의 bubble close-off 하부 구간을 대상으로 CH_4 농도 및 공기함량을 측정하여, 심부 구간 연대 추정에 활용 가능한 핵심 자료를 확보하는 것을 연구 범위로 설정하였다. 특히 CH_4 는 전지구적으로 잘 혼합되고 층서 대비에 유리하므로, 기체연령 구속에 중요한 지표로 활용된다.

나. $\delta^{15}\text{N} - \text{N}_2$ 기반 농도 보정 및 해석

빙하 내 기체 기록은 중력 분별, 열확산, 기체 이동 과정 등의 영향을 받을 수 있으므로, $\delta^{15}\text{N} - \text{N}_2$ 와 같은 보조 지표를 활용한 보정이 필요하다. 본 과제에서는 $\delta^{15}\text{N} - \text{N}_2$ 을 모델 기반으로 추정하여 미량기체 농도 해석의 불확실성을 줄이고, 기체연령 추정의 신뢰도를 향상시키는 것을 연구 범위에 포함하였다.

다. firn densification 모델 기반 Δage 추정

기체연령과 얼음연령 차이(Δage)는 적설량, 온도, firn 구조 변화에 따라 달라지며, 이를 재구성하기 위해서는 firn densification 모델링이 요구된다. 본 과제에서는 firn densification 모델과 기존 빙하코어(예: Law Dome CH_4 기록) 대비를 결합하여, RAICA-CPSW 코어의 기체연령 및 얼음연령을 추정하고 Δage 를 정량화하는 것을 연구 범위로 설정하였다. 이를 통해 향후 남극 해안 천부시추 코어의 연대 구축 및 고해상도 온실가스 복원 연구에 활용 가능한 기반을 마련하고자 하였다.



제 2 장 국내외 기술개발 현황

1절. 국내·외 연구동향

1. 국내에서 남·북극 빙하에 포집된 화석공기(고기체) 분석을 위한 실험 장비를 구축하고 관련 전문 인력을 배출한 기관은 현재까지 서울대학교 지구환경과학부가 유일한 수준이다.
2. 서울대학교 빙하/고기후 연구실은 빙하코어를 이용한 과거 온실가스 농도 측정 분야에서 세계적 수준의 분석 기술을 확보하고 있으나, 다양한 공기 화학종에 대한 동위원소 분석 기술은 선진국 연구진과 비교할 때 아직 확보 단계에 머물러 있으며 추가적인 기술개발이 요구된다.
3. 국내에서는 Styx 빙하코어에 포집된 화석공기에서 CH_4 농도를 측정하고 기존 빙하코어 기록과 대비하여 기체연령(gas age)을 추정하는 데 성공한 바 있다. 다만 Styx 코어의 시추 길이가 제한적이어서, 연령 구속이 가능한 구간이 약 1500년 규모에 그치는 한계가 존재하였다.
4. 해외에서는 중국과학기술대학(University of Science and Technology of China)의 Zheng-Tian Lu 박사 연구팀이 ^{81}Kr 분석을 이용하여 빙하 내 포집된 기체의 절대연령을 측정할 수 있음을 입증하였다. 그러나 분석에 필요한 시료량이 약 10 kg 수준으로 커서, 심부빙하에서 고해상도 연령측정에 직접 적용하기에는 제약이 있으며, 상대적으로 다량의 시료 확보가 가능한 블루아이스 연구에서 활용성이 높다.
5. 미국 연구진은 남극 Allen Hills 지역 블루아이스를 대상으로 $\delta^{18}\text{O} - \text{O}_2$ 및 Ar 안정동위원소 분석을 활용하여 기체연령을 추정하고, 남극 내 270만 년 이상 된 빙하의 존재 가능성을 제시하였다. 하지만 블루아이스의 구조적 층서가 복잡하여 100만 년 이상 구간에서 연속적인 고기후 기록 확보에는 여전히 한계가 있으며, 이를 해결하기 위한 지속적인 연구가 필요한 상황이다.

2절. 본 연구의 독창성

1. 국내 빙하연구에서는 Styx 빙하코어 등 비교적 짧은 코어를 대상으로 약 1500년 규모의 연령 구속 사례가 보고된 바 있으나, 만 년(10 ka) 이상 고연령 빙하시료에 대한 절대·상대 연령 측정 경험과 분석 인프라는 매우 제한적이었다. 본 과제는 라센(Larsen) 블루아이스 시료를 대상으로 불활성기체 및 산소기체 동위원소 기반 연령측정($\delta^{18}\text{O} - \text{O}_2$, ^{81}Kr , Ar 안정동위원소 등)을 수행함으로써, 국내 빙하 연대 연구의 적용 범위를 수만 년 규모까지 확장하였다. 특히 다중 지표 기반의 교차 검증 전략을 적용하여, 단일 지표에 의존할 때 발생할 수 있는 연령 불확실성을 줄이고 고연령 시료에 대한 연대 구속 신뢰도를 향상시켰다는 점에서 의미가 있다.
2. 본 과제의 연구대상인 라센 빙하지역 블루아이스(blue ice)는 심부에 존재하던 오래된 빙하가 표면에 노출된 시료로, 표층 접근만으로도 고연령 빙하시료를 확보할 수 있다는 장점을 가진다. 동시에 블루아이스는 표층 및 천부 구간에서 온실기체 농도 변질이 발생할 수 있어, 온실가스 복원 연구에서 핵심적인 불확실성 요인이 된다. 본 과제는 CH_4 및 CO_2 농도 변질 문제를 함께 다루고, 라센빙하 시료의 CO_2 농도 특성에 대한 고해상도 자료를 확보하였으며,

납(Pb) 농도·동위원소비 등의 독립 지표를 활용하여 변질 과정의 가능 원인을 평가하였다. 이를 통해 블루아이스 기반 온실가스 연구에서 시료 신뢰 구간 설정과 해석 전략 수립에 필요한 기초 자료와 방법론을 제시하였다.

3. 빙하에 포집된 화석공기 내 Kr 및 Ar 동위원소를 이용한 연령측정 연구는 고가의 장비와 전문적인 운영 인프라가 요구되어, 일부 국가와 제한된 연구그룹 중심으로 수행되어 왔다. 국내에서는 관련 장비 및 경험이 충분하지 않아 독자적 수행에 어려움이 있었다. 본 과제는 국제협력 기반으로 ^{81}Kr 및 Ar 안정동위원소 분석을 실제 남극 빙하시료에 적용하고, 연구원 파견 및 공동 해석을 통해 분석 기술 확보와 인력 양성을 병행하였다. 더 나아가 엘리펀트 모레인 시료의 CO_2/CH_4 농도 측정 및 공기방울 인공빙하 제작법 개발을 수행함으로써 변질 연구의 검증 기반을 확장하였고, RAICA-CPSW 코어에 대해서는 CH_4 ·공기함량 및 $\delta^{15}\text{N}-\text{N}_2$ 자료와 모델을 결합하여 bubble close-off 하부의 기체연령 및 얼음연령 차이(Δage)를 추정하는 분석·해석 체계를 구축하였다. 이는 국내 빙하 연대 연구가 고연령 시료의 절대연령 구축부터 온실가스 변질 평가, Δage 추정까지 포괄적으로 확장될 수 있는 기반을 마련했다는 점에서 독창성이 크다.



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1절. 연구개발 추진체계 및 내용

1. $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{ice}}$, ^{81}Kr 및 Ar 안정동위원소를 이용한 Larsen 빙하지역 블루아이스(blue ice) 연령측정

가. 불활성기체 동위원소(^{81}Kr , Ar 안정동위원소) 분석은 고가의 장비와 전문적인 운영 시스템이 요구되므로, 본 과제에서는 국제 공동연구 체계를 기반으로 국내에서 확보한 시료를 해외 분석기관/시설에서 측정하였다. 또한 국내에서 수행 가능한 얼음의 산소·수소 동위원소($\delta^{18}\text{O}_{\text{ice}}$, $\delta\text{D}_{\text{ice}}$) 분석은 극지연구소에 설치된 장비를 활용하여 수행하였다.

2. GPR(Ground Penetration Radar) 및 온실기체 측정자료를 이용한 구조적 층서 이해

가. 라센 빙하지역의 내부 구조 및 층서 해석을 위해 극지연구소와의 공동연구를 통해 기존에 확보된 GPR 자료를 활용하여 수평·수직 방향의 층서 특성을 분석하였다.

나. 온실기체(CH_4 , CO_2) 농도 측정은 국내에서 수행 가능한 분석 항목으로, 서울대학교에 구축된 온실기체 분석 장비를 이용하여 자료를 생산하고 층서 해석 및 연령 조건 파악에 활용하였다.

3. Larsen 블루아이스(blue ice) 표층에서의 온실기체 변질상태 수평/수직 분포 파악

가. 라센 블루아이스 표층(0 - 2 m) 구간에서의 온실기체 변질 정도를 평가하기 위해, 서울대학교에 설치된 온실기체 분석 장비를 활용하여 CH_4 및 CO_2 농도를 측정하고 수평 및 수직 분포 특성을 비교·분석하였다.

4. 남극 라센빙하의 CO_2 농도측정 및 시료 변질과정 연구

가. 라센빙하 시료의 CO_2 농도는 국내에서 측정 가능한 항목으로, 서울대학교에 구축된 온실기체 분석 장비를 이용하여 다수 깊이구간에 대한 농도자료를 확보하였다.

나. 시료 변질과정 규명을 위해 납(Pb) 농도 및 납 동위원소비 분석을 수행하였으며, 이를 통해 대기 에어로졸에 의한 시료 변질 가능성을 평가하였다.

5. 남극 엘리펀트 모레인(Elephant Moraine) 빙하의 CO_2 농도 변질과정 연구

가. EM-B 코어에 대해 CO_2 및 CH_4 농도를 측정하여, 표층부 변질 여부 및 깊이별 농도 변화 특성을 분석하였다.

나. 블루아이스 변질 연구의 검증 및 재현성 확보를 위해 공기방울을 갖는 인공빙하 제작법을 개발하였으며, 저온 조건에서 특정 CO_2 농도의 공기방울 얼음을 제작할 수 있도록 실험 체계를 구축하였다.

6. RAICA-CPSW 코어의 bubble close-off 깊이 하부 기체연령 및 얼음연령 추정

가. RAICA-CPSW 코어의 특정 깊이구간 시료에 대해 미량기체(CH_4) 농도 및 공기함량을 측정하여, bubble close-off 하부 구간의 기체 기록을 확보하였다.

나. $\delta^{15}\text{N} - \text{N}_2$ 추정을 통해 미량기체 농도 자료 보정을 수행하였고, firn densification 모델과 기존 Law Dome CH_4 자료 대비를 통해 기체연령 및 얼음연령 차이(Δage)를 추정하였다.

연차	연구 목표	연구 내용	비 고
1단계			
1차년도 (2020)	$\delta^{18}\text{Oice}$, $\delta^{18}\text{O} - \text{O}_2$, ^{81}Kr 및 Ar 안정동위원소를 이용한 Larsen 빙하지역 블루아이스(blue ice) 연령추정	동남극 Larsen Glacier 블루아이스(blue ice) 시료를 이용한 $\delta^{18}\text{O} - \text{O}_2$ 및 $\delta^{18}\text{Oice}$ 자료 확보 및 증서 이해	
		^{81}Kr 를 이용한 Larsen 블루아이스(blue ice) 절대연령 측정	
		Ar 안정동위원소(^{40}Ar , ^{38}Ar , ^{36}Ar)를 이용한 Larsen 블루아이스(blue ice) 연령해석	
2차년도 (2021)	GPR(Ground Penetration Radar) 및 온실기체 측정자료를 이용한 구조적 증서 이해	GPR 자료를 이용한 수평적 거리변화/연령변화 비율과 수직적 거리변화/연령변화에 대한 정량적 이해	
		신뢰할 만한 깊이구간에서의 온실기체 농도를 이용한 빙하기/간빙기 연령조건 파악	
3차년도 (2022)	Larsen 블루아이스(blue ice) 표층에서의 온실기체 변질상태 수평/수직 분포 파악	Larsen 블루아이스(blue ice) 0-2미터 구간에서의 온실기체(CO_2 , CH_4) 농도 측정	
		표층에서의 자연적 온실기체 농도 변질정도의 수직적/수평적 분포 파악	
2단계			
1차년도 (2023)	남극 라센빙하의 CO_2 농도측정 및 시료 변질과정 연구	CO_2 변질상태 확인	
		납동위원소 변질상태 확인	

2차년도 (2024)	남극 엘리펀트 모레인 빙하의 CO ₂ 농도변질과정 연구	EM-B 코어 CO ₂ 및 CH ₄ 농도측정	
		공기방울을 갖는 인공빙하 제작법 개발	
3차년도 (2025)	RAICA-CPSW 코어의 bubble close-off 하부 기체연령 및 얼음연령 추정	미량기체 농도측정: 측정자료 제시 및 모델 기반 추정자료 제시	
		$\delta^{15}\text{N} - \text{N}_2$ 자료를 이용한 미량기체 농도 보정 - 얼음연령 - 기체연령 차이 추정	

2절. 세부 연구수행 방법 및 대응

1. $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{ice}}$, ^{81}Kr 및 Ar 안정동위원소를 이용한 Larsen 빙하지역 블루아이스(blue ice) 연령측정

가. ^{81}Kr 측정은 중국과학기술대학(University of Science and Technology of China) Zheng-Tian Lu 박사팀과 공동으로 수행하였으며, Larsen 블루아이스에서 추출한 공기 시료를 해외 분석 시설에서 측정하였다.

나. $\delta^{18}\text{O} - \text{O}_2$ 는 일본 극지연구소(NIPR) Kenji Kawamura 박사팀과 공동으로 측정하였고, 서울대학교 연구원 2명을 파견하여 약 3주간 분석을 수행하였다.

다. Ar 안정동위원소 분석은 기존에 측정된 자료를 활용하되, 자료 해석을 위해 미국 스크립스 해양연구소 Jeff Severinghaus 교수와 논의하며 해석을 보완하였다.

라. 얼음의 산소 및 수소 동위원소($\delta^{18}\text{O}_{\text{ice}}$, $\delta\text{D}_{\text{ice}}$)는 극지연구소 한영철 박사팀에서 운용 중인 Picarro L2130-i 장비를 이용하여 동시 측정하였다.

2. GPR(Ground Penetration Radar) 및 온실기체 측정자료를 이용한 구조적 층서 이해

가. Larsen 빙하지역의 공간적 층서 이해를 위해 2018/2019 남극 하계시즌에 획득된 GPR 자료를 활용하였으며, 해석 과정에서 극지연구소 주현태 연구원과 협의하였다.

나. 온실기체(CO_2 , CH_4) 농도는 서울대학교 안진호 교수 연구실의 고해상도 측정장치를 이용하여 분석하였다. CH_4 는 습식 추출 방식을 적용하였고, CO_2 는 물에 대한 용해도가 높다는 점을 고려하여 건식 추출 방식을 적용하였다.

3. Larsen 블루아이스(blue ice) 표층에서의 온실기체 변질상태 수평/수직 분포 파악

가. 표층(0 - 2 m) 구간의 온실기체(CO_2 , CH_4) 변질 정도를 평가하기 위해 서울대학교 안진호 교수 연구실의 고해상도 측정장치를 이용하였다. CH_4 는 습식 추출, CO_2 는 건식

추출 방식을 적용하여 수평·수직 분포 특성을 비교·분석하였다.

4. 남극 라센빙하의 CO₂ 농도측정 및 시료 변질과정 연구

가. 라센빙하 시료의 CO₂ 농도 측정은 국내에서 수행 가능한 항목으로, 서울대학교에 구축된 온실기체 분석 장비를 활용하여 다수 깊이구간의 농도자료를 확보하였다.

나. 시료 변질과정 평가는 납(Pb) 농도 및 납 동위원소비 측정을 통해 수행하였으며, 대기 에어로졸 기원의 오염(변질) 가능성을 정성·정량적으로 평가하였다.

5. 남극 엘리펀트 모레인(Elephant Moraine) 빙하의 CO₂ 농도변질과정 연구

가. EM-B 코어에 대해 CO₂ 및 CH₄ 농도 측정을 수행하여, 깊이별 농도 분포 및 변질 양상을 파악하였다.

나. 공기방울을 갖는 인공빙하 제작은 공기방울이 없는 인공빙하 slab에 작은 구멍을 만든 뒤 초순수 물을 이용해 저온 접착하는 방식으로 수행하였다. 또한 glove box 환경에서 저온 조건을 유지하며 특정 CO₂ 농도의 공기방울을 포함하는 얼음을 제작하여, 변질 및 분석 검증에 활용할 수 있는 기반을 마련하였다.

6. RAICA-CPSW 코어의 bubble close-off 하부 기체연령 및 얼음연령 추정

가. RAICA-CPSW 코어의 80 - 120 m 깊이구간 시료를 대상으로 CH₄ 농도 및 공기함량 측정을 수행하여, bubble close-off 하부 구간의 기체 기록을 확보하였다.

나. $\delta^{15}\text{N} - \text{N}_2$ 추정을 통해 미량기체 농도 보정에 필요한 자료를 확보하였다.

다. firm densification 모델과 기존 Law Dome CH₄ 자료 대비를 통해 기체연령 및 얼음연령을 추정하고, 얼음연령 - 기체연령 차이(Δage)를 계산하였다.

3절. 연구결과

1. 연구결과 요약

성과목표	세부목표	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
$\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$, ^{81}Kr 및 Ar 안정동위원소를 이용한 Larsen 빙하지역 블루아이스(blue ice) 연령측정	· $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$ 측정 및 빙하기/간빙기 시기 파악 · ^{81}Kr를 이용한 연령측정 · Ar 안정동위원소를 이용한 연령측정	Picarro L2130-i를 이용하여 얼음의 산소, 수소 동위원소비 동시 측정	마지막 빙하기 최성기 시기에 해당함을 밝힘
		질량분석기로 산소 기체의 동위원소 비율 측정	빙하기-간빙기 전환기 중 하나에 해당하는 시기임을 밝힘
		ATTA 분석 기법을 통해 Kr의 동위원소비 측정	9-41 ka, 14-43 ka에 해당하는 시기임을 밝힘
		질량분석기로 Ar 기체의 동위원소 비율 측정	394 ± 178 ka 시기에 해당함을 밝힘
GPR(Ground Penetration Radar) 및 온실기체 측정자	· GPR자료를 이용한 내부구조 분석 · CH₄ 농도를 이용한 연령제한	50 MHz 레이다 시스템을 이용한 빙하 내부 층서 구조 파악	층서구조가 비교적 복잡하지 않은 지역임을 확인

료를 이용한 구조적 증서 이해	· CO ₂ 농도를 이용한 연령제한	습식 추출 후 가스크로마토그래피를 이용해 빙하 내의 CH ₄ 농도 측정	산소기체 동위원소 자료를 같이 이용하여 마지막 빙하기 종말기 시기 임을 밝힘
		건식 추출 후 가스크로마토그래피를 이용해 빙하 내의 CO ₂ 농도 측정	산소기체 동위원소 자료를 같이 이용하여 마지막 빙하기 종말기 시기 임을 밝힘
Larsen 블루아이스(blue ice) 표층에서의 온실기체 수평/수직 분포 파악	· 표층 (0-2미터 구간) CH ₄ 및 CO ₂ 변질상태 확인 · 향후 블루아이스 연구에 필요한 시추깊이조건 이해	습식 추출 후 가스크로마토그래피를 이용해 빙하 내의 CH ₄ 농도 측정	4.6 m 깊이부터 변질되지 않은 CH ₄ 가 측정됨
		건식 추출 후 가스크로마토그래피를 이용해 빙하 내의 CO ₂ 농도 측정	4.6 m 깊이부터 변질되지 않은 CO ₂ 가 측정됨. 그러나 다른 빙하코어 기록과 여전히 차이를 보임
		다른 블루아이스 빙하코어 자료와 비교.	지표면 온도와 변질되지 않은 온실기체가 산출되는 깊이가 서로 반비례 관계에 있음을 확인
남극 라센빙하 CO ₂ 농도 측정 및 변질과정 연구	· 남 농도·동위원소비를 이용한 변질과정 연구 · 라센빙하 CO ₂ 농도 측정	건식 추출 후 GC 기반 CO ₂ 농도 분석	당초 계획(20개 깊이구간) 대비 확대하여 90여 개 깊이구간에서 CO ₂ 농도 측정
		남 농도 및 남 동위원소비 분석	대기 에어로졸에 의한 변질 정도를 평가
남극 엘리펀트 모레인 빙하 CO ₂ 농도 변질 과정 연구	EM-B 코어 CO ₂ 및 CH ₄ 농도 측정 공기방울을 갖는 인공빙하 제작법 개발	건식 추출(GC)로 CO ₂ , 습식 추출(GC)로 CH ₄ 농도 측정	48개 깊이구간 CO ₂ , 18개 깊이구간 CH ₄ 농도 측정
		인공빙하 slab 가공 및 저온 접착, glove box 활용	특정 CO ₂ 농도를 갖는 공기방울 얼음 제작 기법 개발
RAICA-CPS Wublee close-off 부 및 기체연령 추정	미량기체(CH ₄) 농도 측정 $\delta^{15}\text{N} - \text{N}_2$ 자료를 이용한 미량기체 농도 보정 얼음연령 - 기체연령 차이(Δage) 추정	습식 추출 후 GC로 CH ₄ 농도 측정 + 공기함량 측정	80 - 120 m 깊이구간 41개 시료 CH ₄ 및 공기함량 측정
		$\delta^{15}\text{N} - \text{N}_2$ 추정	모델기반 $\delta^{15}\text{N} - \text{N}_2$ 추정법 활용
		firn densification 모델 + Law Dome CH ₄ 대비	기체연령 및 얼음연령을 추정하여 Δage 평가

2. 연구결과 세부 내용

가. $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$, ^{81}Kr 및 Ar 안정동위원소를 이용한 Larsen 빙하지역 블루아이스(blue ice) 연령측정

(1) $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$ 측정 및 빙하기/간빙기 시기 파악

(가) $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$ 측정

^{81}Kr 또는 Ar 안정동위원소를 이용하여 절대연령을 측정했다고 하더라도 여전히 연령오차

는 10% 이상을 갖게 되기 때문에, 자세한 연령은 $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{ice}}$ (또는 $\delta\text{D}_{\text{ice}}$)의 대비를 이용하여 확정지을 수 있다. Larsen 빙하의 $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ 값($1.126\text{‰} \sim -0.075\text{‰}$)은 전형적인 빙하 종결 기간에 해당한다 (그림7a).

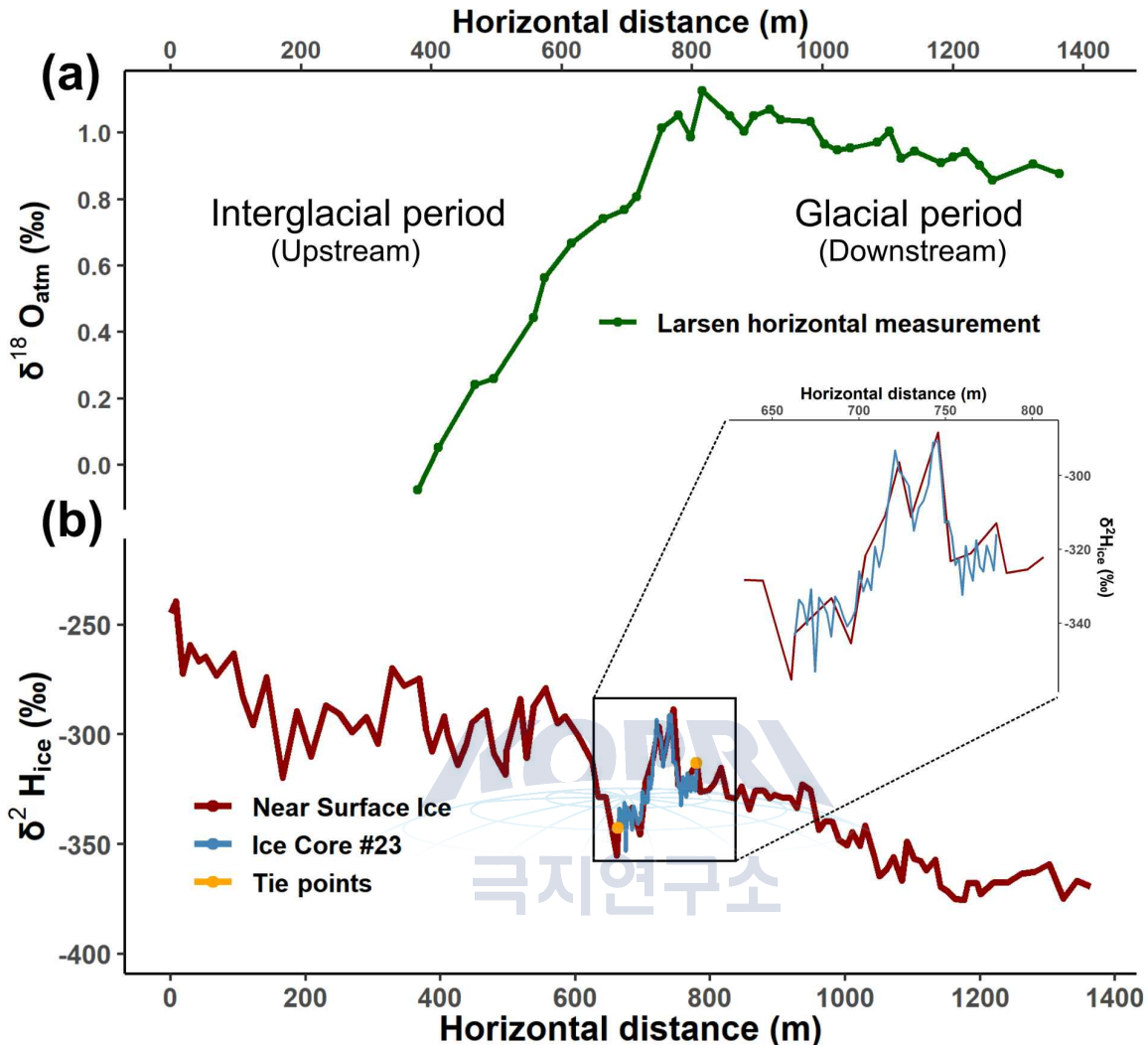


그림 7. $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ and $\delta^2\text{H}_{\text{ice}}$ ($\delta\text{D}_{\text{ice}}$) records from Larsen BIA. (a) $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ from each ice core at a 1.95 m depth (horizontal measurement). The $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ of the horizontal measurement was gravity-corrected. (b) $\delta^2\text{H}_{\text{ice}}$ from near-surface ice (~5 - 10 cm depth surface ice samples and 10 - 30 cm depth ice core samples) and ice core #23. The surface ice record was matched with core #23 using two tie-points (orange dots) and show a r^2 value of 0.85 ($p < 0.001$).

(나) $\delta\text{D}_{\text{ice}}$ 자료 측정

$\delta\text{D}_{\text{ice}}$ 는 600-800 m의 수평 거리 주변에 하류지역에서 상류지역으로 올라가면서 국소적인 하강 경향을 가지며, 이는 일시적인 저온 이벤트를 나타낸다(그림 7b). 일시적인 저온 이벤트의 $\delta\text{D}_{\text{ice}}$ 는 약 70 ‰까지 급락하면서 상류 얼음으로 향한다. 시추코어 23번은 횡단면의 중간에 위치하며 수직 $\delta\text{D}_{\text{ice}}$ 얼음 프로파일의 범위는 -353 ‰에서 -291 ‰ 사이이다.

(다) 타 빙하코어 자료와의 비교

EPICA Dome C(EDC) 기록에 따르면 I, II, IV, V, VII는 마지막 800 kyr 동안 음의 $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ 값과 $> 1.0 \text{ ‰}$ 값을 모두 갖는 Termination 이다(그림 8). 따라서, Larsen 빙하지역의 연대 추정에서 Termination III와 VI를 제외할 수 있다. 후보 기간 중 Termination V도 제외해야 하는데 EDC 기록의 최대 $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ 값이 $\sim 1.4 \text{ ‰}$ 로 Larsen의 기록보다 상당히 높기 때문이다. Larsen 빙하지역 횡단면 중간의 $\delta^2\text{H}_{\text{ice}}$ 감소(그림 7b)는 Antarctic Cold Reversal 시기 (ACR, 12.7 - 14 kyr BP) 때와 유사하다. 이는 EDC $\delta^2\text{H}_{\text{ice}}$ 기록(그림 9)에서 관찰된 바와 같이 후보 Termination (Termination I, II, IV, VII) 중 Termination I에서만 나타나는 특징이다.

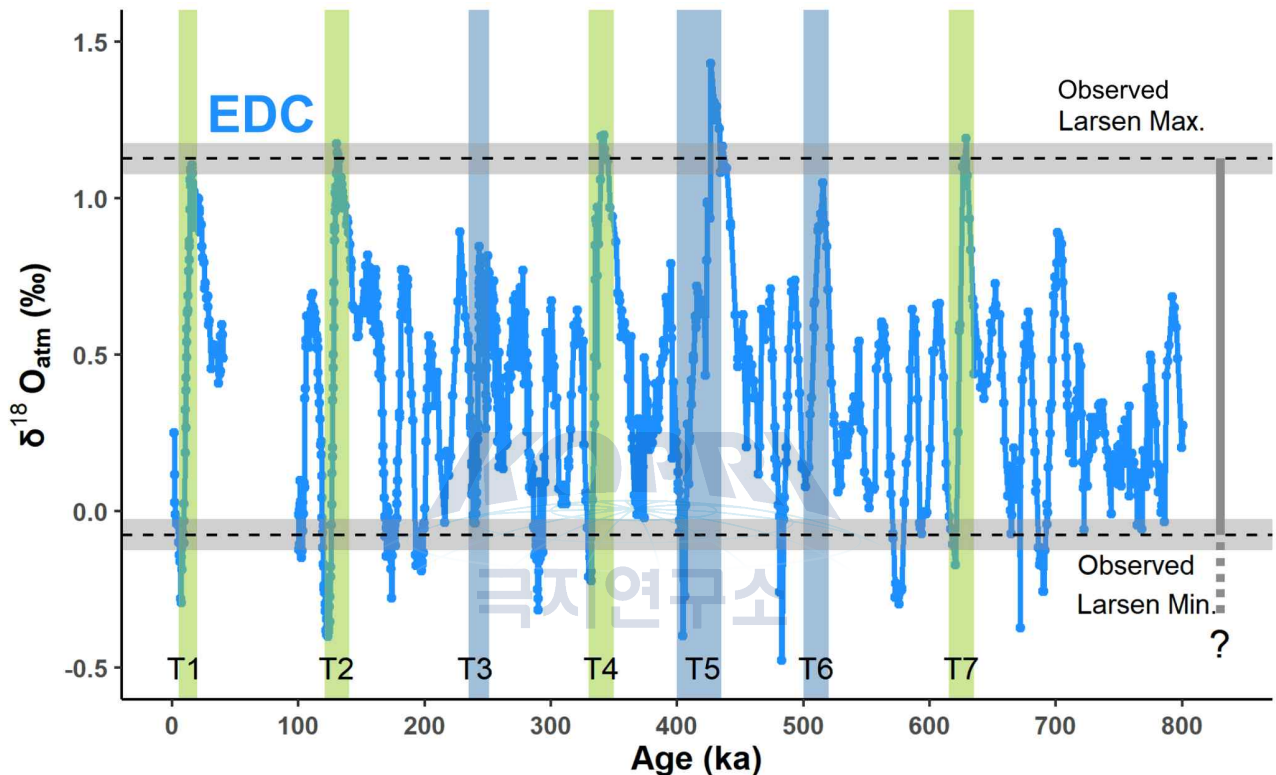


그림 8. Comparison of Larsen $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ with the EDC record. $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ records are from Landais et al. (2013) for 0 - 40 ka and Extier et al. (2018) for 100 - 800 ka, respectively. Green vertical bars represent the candidate age intervals for Larsen blue ice. T: termination. The range of Larsen $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ values is shown as a vertical grey bar. Horizontal grey bars with dashed lines represent the uncertainty in the measured $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ from the Larsen BIA.

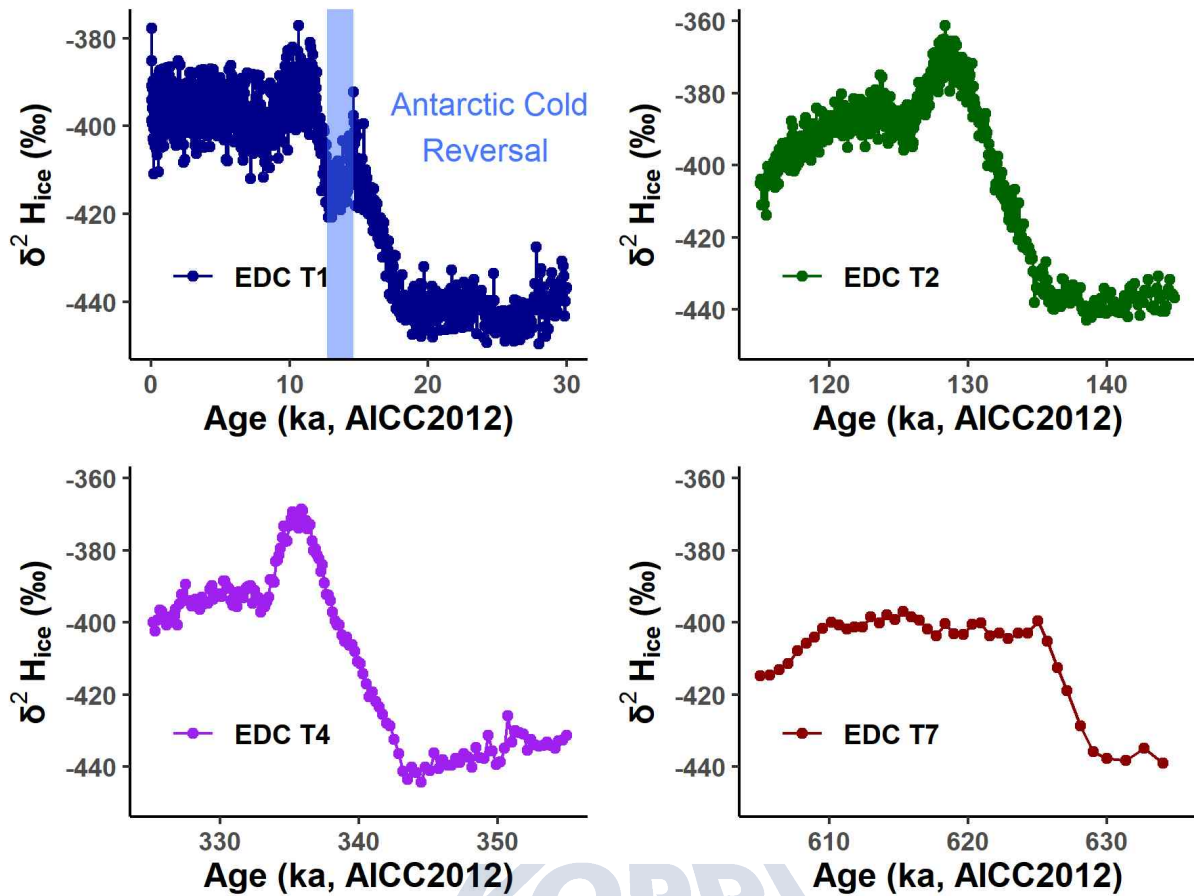


그림 9. $\delta^2\text{H}_{\text{ice}}$ records from EDC. $\delta^2\text{H}_{\text{ice}}$ records for T1, T2, T4, and T7 on the AICC2012 scale are from Bazin et al. (2013). The blue vertical bar represents the time interval of the ACR (12.7 - 14.6 kyr BP).

(2) ^{81}Kr 를 이용한 연령측정

시추 코어 23번과 TF의 ^{81}Kr 측정에는 각각 5.3 kg(깊이: 711~1040 cm)과 5.4 kg(깊이: 798~1192.5 cm)의 얼음이 사용되었다. ^{81}Kr 측정을 위한 공기는 중국과학기술대학교(USTC)가 제공한 기기를 사용하여 서울대에서 추출되었다. ^{85}Kr 은 현생 공기의 오염을 정량화하기 위해 ^{81}Kr 과 동시에 측정되었다. 측정된 ^{85}Kr 은 검출 한계 미만이었기 때문에 현생 공기 오염에 대한 보정이 필요하지 않았다. 마지막으로, ^{81}Kr 연대를 통해 Larsen 빙하의 나이를 확인했는데, TF와 23번 시추 코어의 얼음에 대해 각각 9 - 41 및 14 - 43 ka를 나타냈다(표 1).

샘플명	질량	공기량	air content	깊이	^{81}Kr age	^{85}Kr
	kg	mL LTP	mL LTP/ kg	cm	ka	dpm/cc
TF	5.4	393	73	798-1192.5	9-41	< 1.2
Larsen#23	5.27	495	94	711-1040	14-43	< 0.7

표 1. Larsen Glacier에서 샘플링한 빙하 코어 중 TF와 #23 코어에 대해서 ^{81}Kr 분석용 공기 추출을 진행함. (LTP= Lab temp and pressure, 25°C and 1bar)

(3) Ar 안정동위원소를 이용한 연령측정

	ALIQOT VALUE				Age	Age unc.	Depth (cm)
샘플명	$\delta^{40/36}\text{Ar}$	$\delta^{40/38}\text{Ar}$	$\delta^{38/36}\text{Ar}$	$\Delta 40(\text{Jeff})$	(ka)	(ka)	859-896,
TF	0.579	0.27679	0.3021	-0.026	394.12	177.71	1009-1018

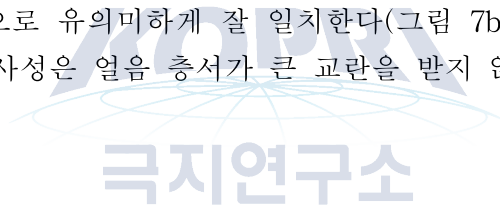
표 2. Ar 안정동위원소를 이용해 TF코어에 대해서 연령측정을 실시함. 측정에 의하면 TF코어는 394 ± 178 ka에 해당한다. Ar 안정동위원소를 이용한 연령측정법은 오차가 커서 약 40만년의 경우에 50%에 이르며, 100만년의 경우에도 약 20% 정도가 되어서 정확한 층서 결정에는 한계가 있다.

나. GPR(Ground Penetration Radar) 및 온실기체 측정자료를 이용한 구조적 층서 이해

(1) GPR자료를 이용한 내부구조 분석

(가) 23번 시추코어의 수직적 분포와 수평적 자료 간의 화학분석값 대비

두 개의 $\delta^2\text{H}_{\text{ice}}$ 프로파일(시추코어 23번 측정과 지표면 부근 얼음의 수평 측정)을 비교하기 위해, 시추코어 23번의 가장 깊은 결과를 시추코어 104번의 지표면 부근 얼음 결과에 정확히 일치시켜 시추코어 23번의 깊이를 수평 거리로 변환했다. 두 $\delta^2\text{H}_{\text{ice}}$ 프로파일은 r^2 값 0.86 ($p < 0.001$)으로 통계적으로 유의미하게 잘 일치한다(그림 7b). 이러한 수직 측정과 수평 측정 사이의 $\delta^2\text{H}_{\text{ice}}$ 의 유사성은 얼음 층서가 큰 교란을 받지 않았음을 보여준다.



(나) GPR 기반 경사도 자료와 화학적 분석값 기반 경사도 비교

GPR 조사에서 우리는 얼음 흐름 방향과 평행한 얼음층을 확인했다(그림 10). 얼음층의 각도 $1 \sim 6^\circ$ 범위이며, 상류에서 하류 방향으로 감소하는 추세를 확인했다(그림 10c).

약 10 m 길이의 23번 시추 코어는 약 117 m의 수평 거리에 해당하는 연령에 해당하며, 4.96° 의 얼음층을 가지는 것으로 계산된다(그림 7b). 이는 GPR 프로파일에서 파생된 평균 얼음층 각도와 비슷한 값을 가진다(그림 10c).

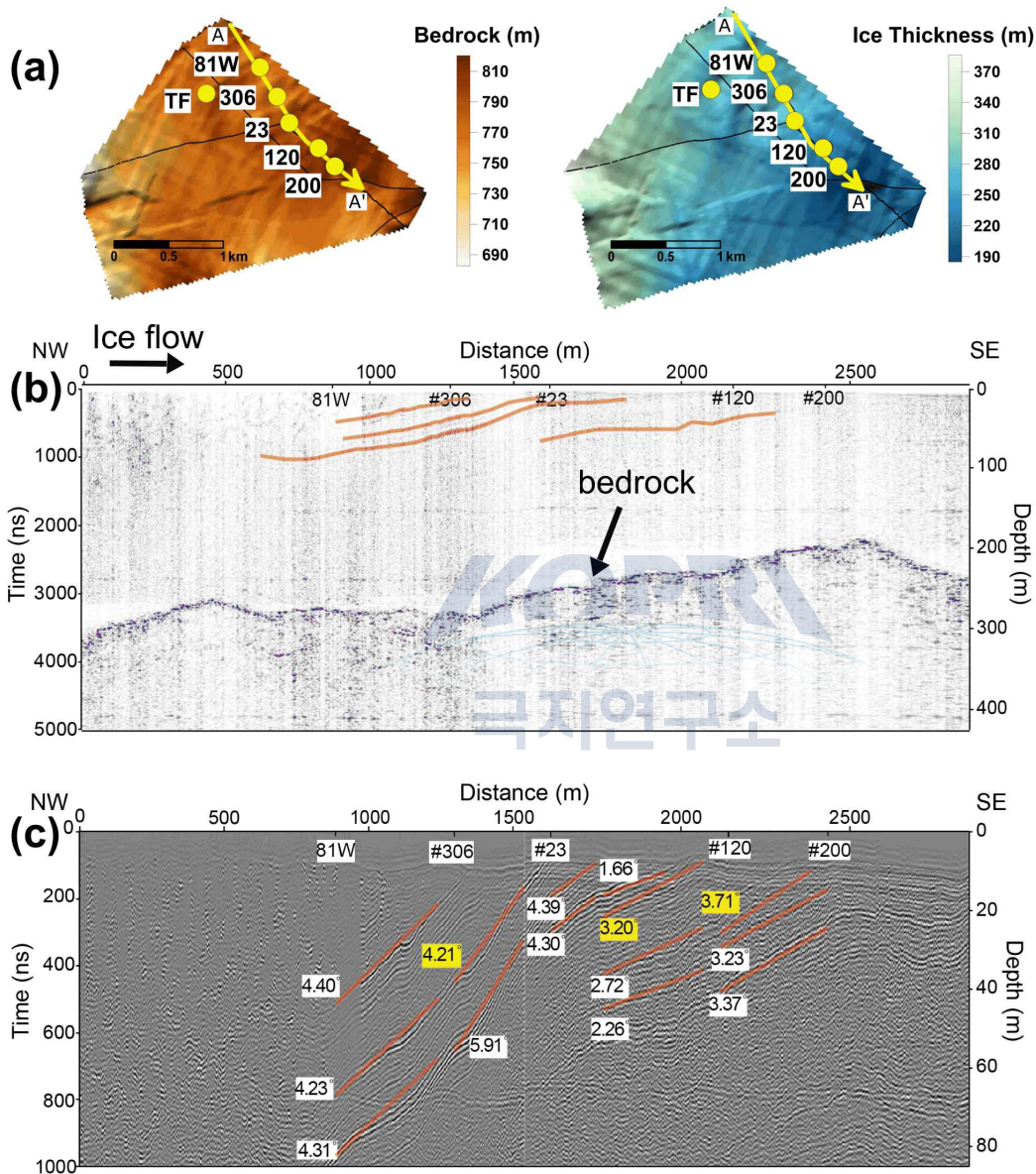


그림 10. Ground penetrating radar (GPR) survey profile. (a) Bedrock elevation and ice thickness of Larsen BIA. (b) GPR profile of the transect (AA' in (a)) through the blue ice field. Identifiable ice layers are indicated in orange lines. Ice layers are not well identified at a distance of < 800 m. (c) Enlarged upper 80 m of the GPR profile.

(다) 얼음층 경사도를 이용한 수평적/수직적 연령 결정

Larsen의 수평 $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ 값을 WD2014 타임스케일의 WAIS Divide의 $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ 값에 상관시켜 잠정적인 가스 연령을 개발했다 (그림 11a, b, c). 잠정적인 수평 가스 연령과 시추 코어 23번의 깊이-수평거리 관계(그림 7b에서 구함)를 기반으로 시추 코어 23번의 가스 연령 (~10 m 수직 얼음 코어)을 결정했다. 시추 코어 23의 CH_4 기록과 WAIS Divide의 CH_4 기록을 비교한 결과 작은 시간적 차이만이 나타났으며 (53.6 ± 38.5 년) (그림 11d의 빨간색과 짙은 파란색 선의 차이), 이는 시추 코어 23번의 수평적/수직적 연령의 성공적인 대비를 의미한다.



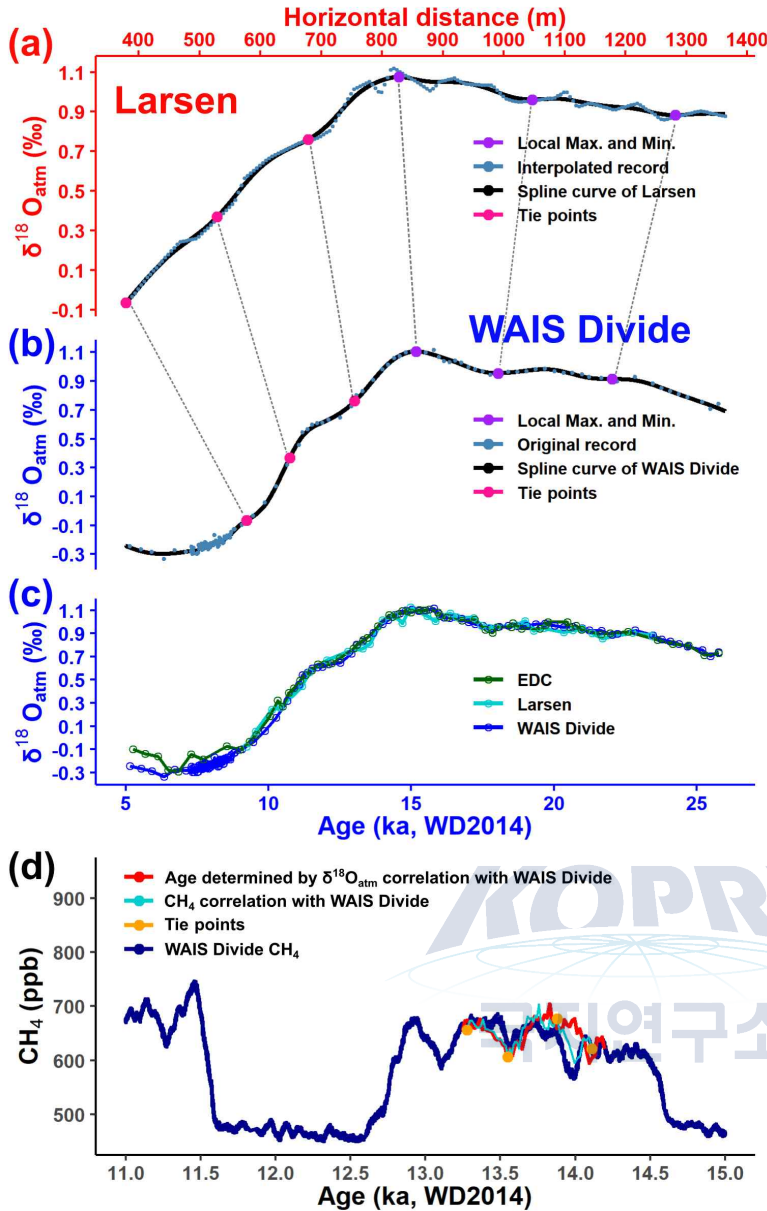


그림 11. Correlation of Larsen $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ and CH_4 records with the WAIS Divide. (a) Interpolated $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ value at 5m from the Larsen BIA with a spline curve. (b) $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ record from the WAIS Divide with a spline curve (Severinghaus, 2015). Six tie points were used to correlate each other. (c) Comparison of synchronized Larsen $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ with the EDC (Landais et al., 2013) and WAIS Divide records. (d) Comparison of the CH_4 record from Larsen no. 23 (>4:6m depth) with the WAIS Divide (Rhodes et al., 2017). Tentative gas age determined by $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ correlation with the WAIS Divide is tuned by correlating the CH_4 record using four tie points. The WD2014 timescale for the WAIS Divide and EDC is from Sigl et al. (2016) and Buizert et al. (2021), respectively.

(2) CH₄ 농도를 이용한 연령제한

(가) 수직적 CH₄ 분포에 따른 신뢰할 만한 농도 깊이구간 확인

시추 코어 23번의 CH₄ 기록은 0 - 4.6 m 깊이 구간에서 크게 변동한다. 4.6m 이상 깊이에서 부터는 변동성이 감소하며 실제 고(古)대기의 값을 반영한다(그림 12).

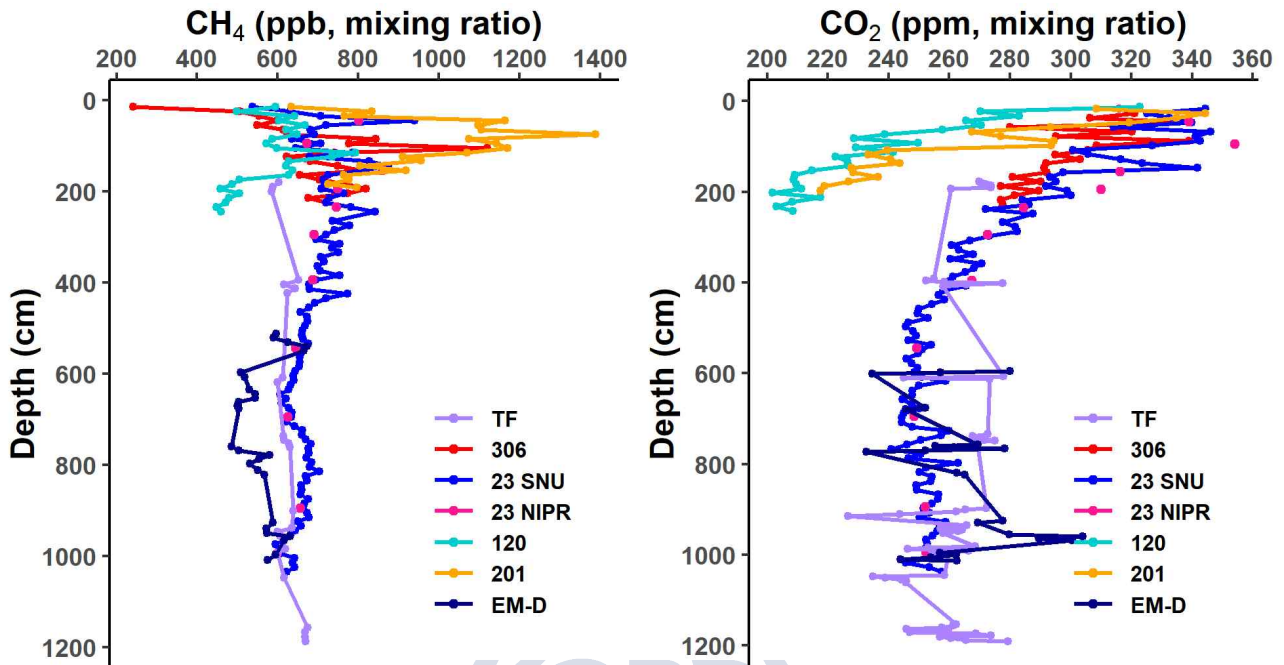


그림 12. Vertical profiles of greenhouse gas concentrations at the Larsen BIA ice cores. (a) CH₄ records. (b) CO₂ records. CH₄ was measured using a wet-extraction method, while CO₂ was measured via both dry- and wet-extraction methods at SNU and NIPR, respectively. Results of the TF core are from Jang et al. (2017).

(나) 23번 시추코어 코어의 CH₄ 자료와 WAIS Divide 코어 CH₄ 간의 대비를 이용한, 라센빙하 기체연령 결정

시추 코어 23번의 수평적/수직적 관계를 통한 연령 설정 결과 시추 코어 23번의 CH₄ 기록과 WAIS Divide의 CH₄ 기록 사이에 작은 시간적 차이가 나타났다(53.6 ± 38.5 년). 이 간격을 없애기 위해 네 개의 점(주황색 점)을 선택하고 선형 보간을 했다(그림5d). 그 결과 13.3 - 14.1 kyr BP에 해당하는 가스 연령은 CH₄를 통해 더 정확하게 얻어졌다.

(3) CO₂ 농도를 이용한 연령제한

(가) 수직적 CO₂ 분포에 따른 신뢰할 만한 농도 깊이구간 확인

시추코어 23번의 CO₂ 기록은 점차적으로 감소하고 >4.6 m 깊이에서 변동성이 감소한다.

(나) 23번 시추코어의 CO₂ 자료와 WAIS Divide 코어 CO₂ 간의 대비를 이용한, 라센빙하 기체연령 결정

3번 시추코어의 4.6m 이상 깊이에서도 여전히 다른 빙하코어의 같은 연령에 비해서 CO₂ 농도가 약 10-20 ppm 높다(그림 13).

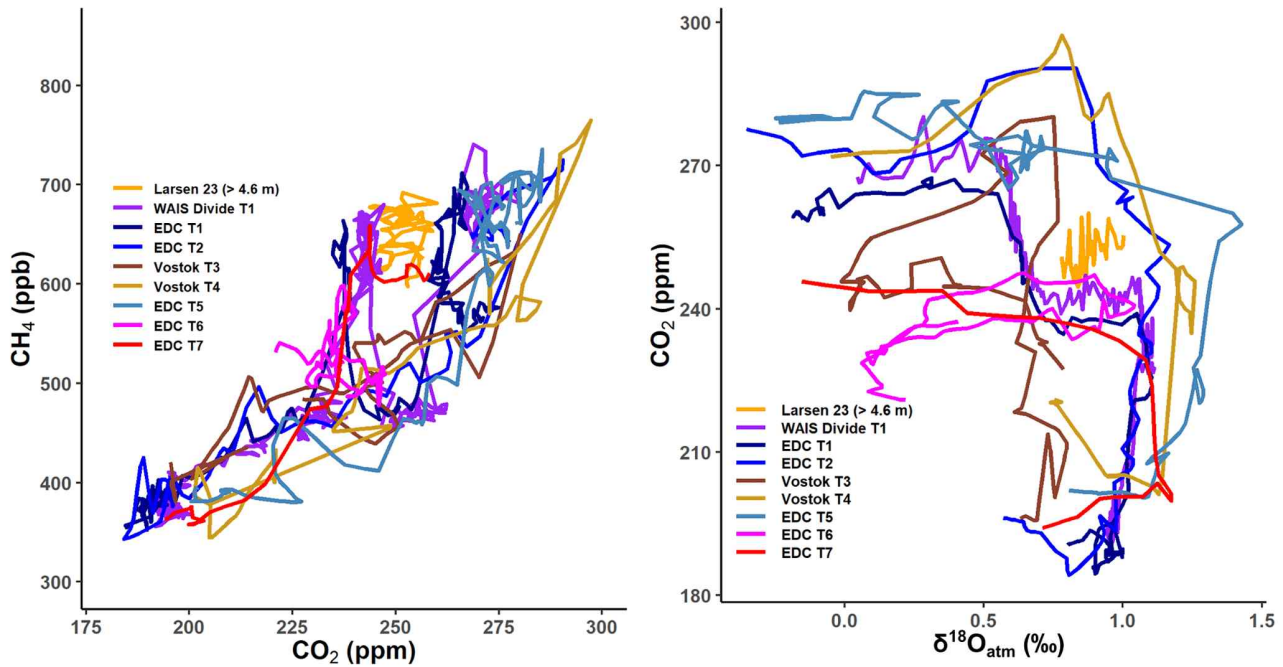


그림 13. Comparison of the CO₂ - CH₄ and δ¹⁸O_{atm} - CO₂ relationship in Larsen ice core no. 23 with existing records during glacial terminations.

다. Larsen 블루아이스(blue ice) 표층에서의 온실기체 변질상태 수평/수직 분포 파악

(1) 표층 (0-2미터 구간) CH₄ 변질상태 확인

(가) 수직적 CH₄ 분포에 따른 신뢰할 만한 농도 깊이구간 확인

빙하 표면에서 수직으로 0-10 m 깊이까지 CH₄ 농도 분포양상과 다른 빙하코어 CH₄ 자료와의 농도 차이를 알아내었다 (그림14). 자연적으로 변질되지 않은 CH₄ 농도의 분포 범위는 400-700 ppb 사이의 값을 보이는 반면 Larsen 블루아이스의 CH₄ 농도 분포는 200-1700 ppb 사이의 값을 보여준다. Larsen 블루아이스 CH₄가 원래 당시의 CH₄ 농도보다 높은 값을 보이는 경우는 미생물의 작용 또는 현생대기의 유입으로 인한 변질일 것으로 추정된다. Larsen 블루아이스 CH₄가 원래 당시의 CH₄ 농도보다 낮은 값을 보이는 경우도 있는데 미생물 또는 대기화학적 메커니즘에 따른 CH₄ 산화작용이 일어났을 것으로 추정된다. CH₄의 수직적 분포 양상은 상부에서 약 1 m 깊이까지는 농도가 증가하고 그 이후 깊이까지는 농도가 감소하는 것으로 보인다. Larsen 23번 시추 코어 분석 결과 최소 4.6 m 이상의 깊이에서 변질되지 않은 CH₄가 산출되는 것으로 보인다.

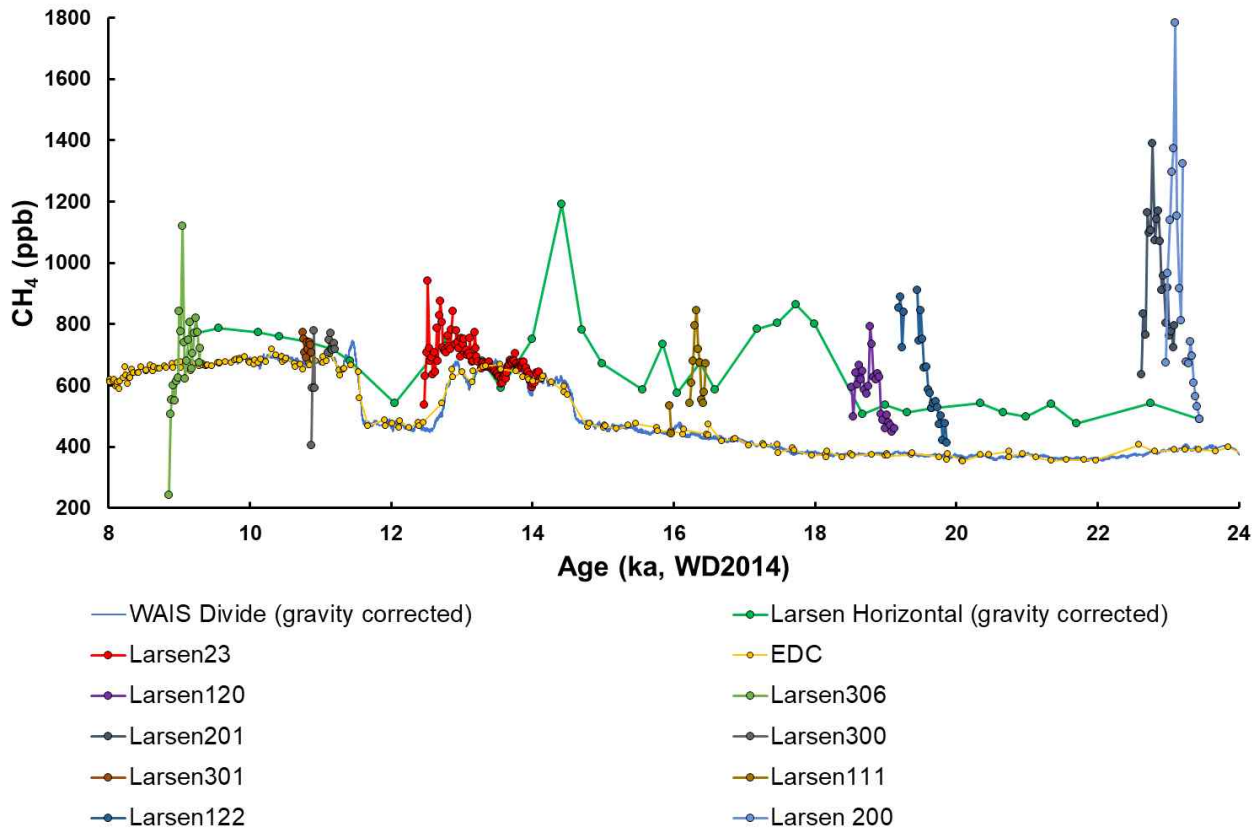


그림 14. Larsen 블루아이스와 다른 빙하코어(WAIS Divide, EDC)의 CH₄ 농도 분포.

(나) 약 2미터 깊이에서의 CH₄ 농도를 이용한 빙하기-간빙기 조건 확인

약 2 m 깊이에서의 CH₄ 농도를 이용해(그림14의 초록색 선) 상류 빙하 지역은 간빙기, 하류 빙하지역은 빙하기 시기임을 확인(그림14).

(2) 표층 (0-2미터 구간) CO₂ 변질상태 확인

(가) 수직적 CO₂ 분포에 따른 신뢰할 만한 농도 깊이구간 확인

빙하 표면에서 수직으로 0-10 m 깊이까지 CO₂ 농도 분포양상과 다른 빙하코어 CO₂ 자료와의 농도차이를 알아내었다 (그림15). 자연적으로 변질되지 않은 CO₂ 농도의 분포 범위는 200-280 ppm 사이의 값을 보이는 반면 Larsen 블루아이스의 CO₂ 농도 분포는 210-340 ppm 사이의 값을 보여준다. Larsen 블루아이스 CO₂는 원래 당시의 CO₂ 농도보다 높은 값을 보이는데 이는 미생물의 작용 또는 현생대기의 유입으로 인한 변질일 것으로 추정된다. 상부에서 깊이가 깊어질수록 CO₂ 농도가 점진적으로 감소하는 분포를 보인다. Larsen 23번 시추 코어 분석 결과 4.6 m 이상의 깊이에서 CO₂ 농도 분포가 안정되게 나타난다. 그러나 다른 빙하코어의 CO₂ 농도보다 ~10 ppm 이상의 농도 차이를 보인다. CH₄과 다르게 CO₂는 여전히 4.6 m 이상의 깊이에서도 변질 작용이 있는 것으로 파악된다.

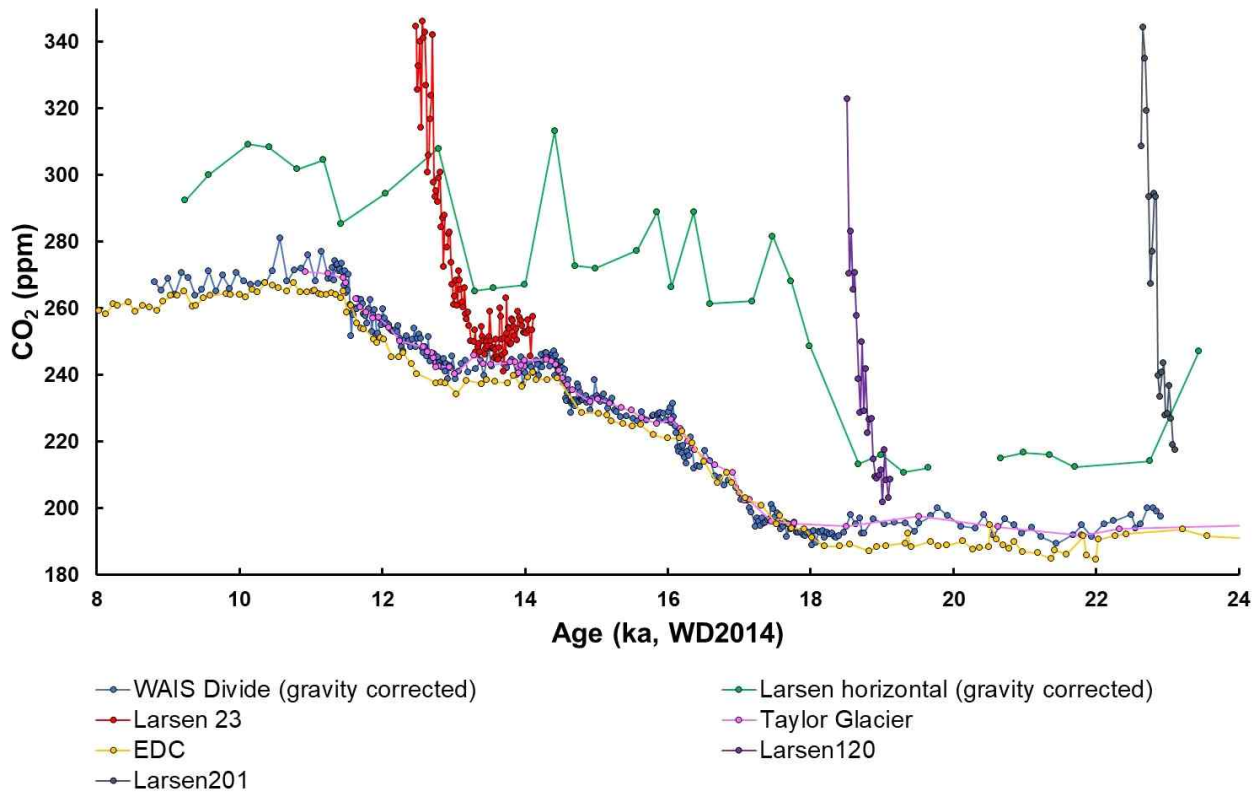


그림 15. Larsen 블루아이스와 다른 빙하코어(WAIS Divide, EDC)의 CO₂ 농도 분포.

(나) 약 2미터 깊이에서의 CO₂ 농도를 이용한 빙하기-간빙기 조건 확인

약 2 m 깊이에서의 CO₂ 농도를 이용해(그림15의 초록색 선) 상류 빙하 지역은 간빙기, 하류 빙하지역은 빙하기 시기임을 확인(그림15).

(3) 향후 블루아이스 연구에 필요한 시추깊이 조건 이해

(가) 수평적 2미터 깊이에서의 가스 자료와 23번공의 수직적 자료와의 비교

$\delta^{15}\text{N-N}_2$ 과 $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ 은 여러 시추 코어의 매우 얇은 깊이의 얼음 시료를 이용해(~1.95m) 측정되었기 때문에 해당 결과값을 시추코어 23번의 수직 분포와 비교했다. 1.95m의 얼음 시료에서 얻은 $\delta^{15}\text{N-N}_2$ 과 $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ 값은 0.5 m 미만의 매우 얇은 깊이에서 얻은 값을 제외하고 시추코어 23번의 수직 분포의 값과 유사하며(그림 16), 가스 동위원소 비율이 1.95 m의 깊이에서 일반적으로 신뢰할 수 있음을 확인했다. 23번 시추 코어의 기록과 수평 기록의 차이가 약 0.05 ‰이기 때문에 $\delta^{15}\text{N-N}_2$ 과 $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ 값의 불확실성을 $\pm 0.05 \text{ ‰}$ (1 σ)로 추정했다.

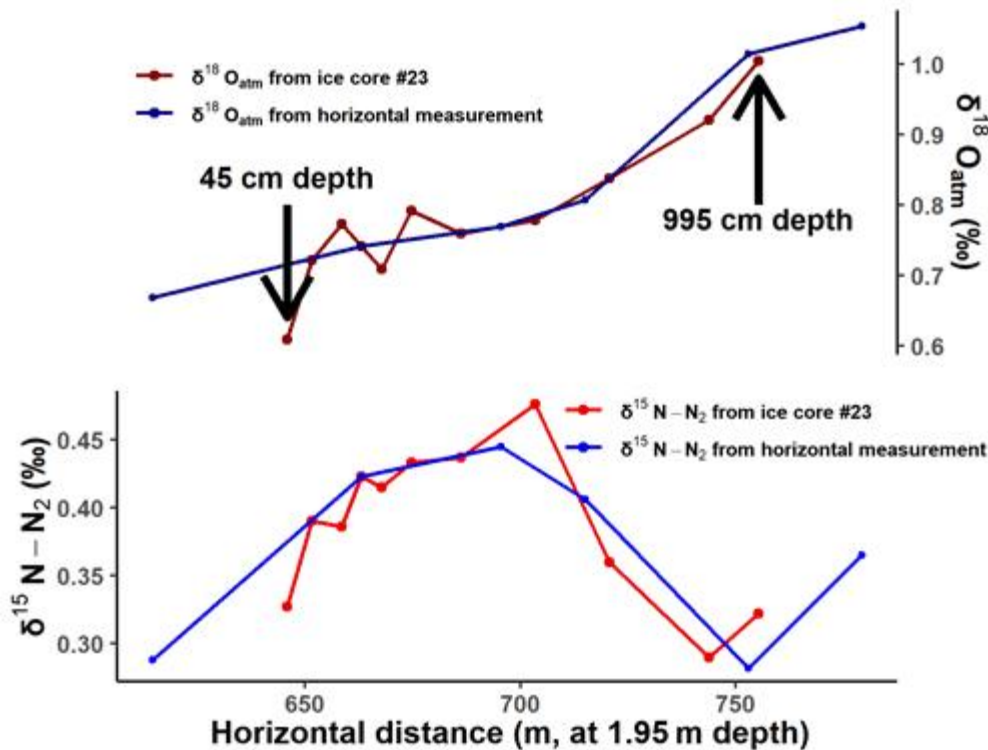


그림 16. Nitrogen and oxygen gas isotope record of ice core no. 23 and horizontal measurement. Horizontal measurement is conducted using ice cores at 1.95m depth. Depth of ice core no. 23 was converted to horizontal distance at 1.95m depth. The uncertainty in a measured $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ at a depth of 1.95m is assumed to be $\pm 0.05\text{‰}$.

(나) 2미터 깊이의 시추코어 자료를 이용한 수평적인 연령변화를 이용한 역전층 유무 검사

$\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ 의 수평 측정 결과에서 유의한 간격, 불연속성 또는 이상 징후는 발견되지 않았으며, 이는 상대적으로 방해받지 않는 층서를 나타낸다(그림 7a, 11a).

라. 남극 라센빙하의 CO_2 농도측정 및 시료 변질과정 연구

(1) 라센빙하 CO_2 농도측정

(가) 라센빙하 블루아이스 시료에 대해 CO_2 농도 측정을 수행하여 깊이별 CO_2 농도 분포 자료를 확보하였다. 본 과제에서는 당초 계획했던 20개 깊이구간보다 확대하여 약 90여 개 깊이구간에 대해 CO_2 농도를 측정함으로써, 보다 높은 해상도의 자료를 구축하였다.

(나) 확보된 CO_2 농도 자료는 라센빙하 지역에서 시료 변질 가능성을 평가하고, 이후 연구에서 신뢰할 수 있는 시료 구간을 설정하기 위한 기초 자료로 활용하였다.

(2) 납 농도와 동위원소비를 이용한 변질과정 연구

(가) 시료 변질과정의 원인을 평가하기 위해, 10개 깊이구간에 대해 총 40개 시료의 납(Pb) 농도 및 납 동위원소비를 측정하였다.

(나) 납 농도 및 동위원소비 결과를 활용하여 대기 에어로졸 유입에 의한 변질 정도를 평가하였으며, 이를 통해 라센빙하 시료에서 관찰되는 CO₂ 농도 이상 특성의 가능 원인을 검토하였다.

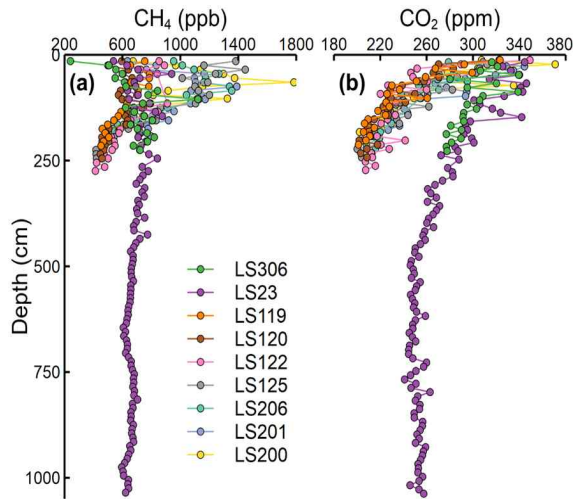


그림 17. 깊이에 따른 온실가스 농도변화

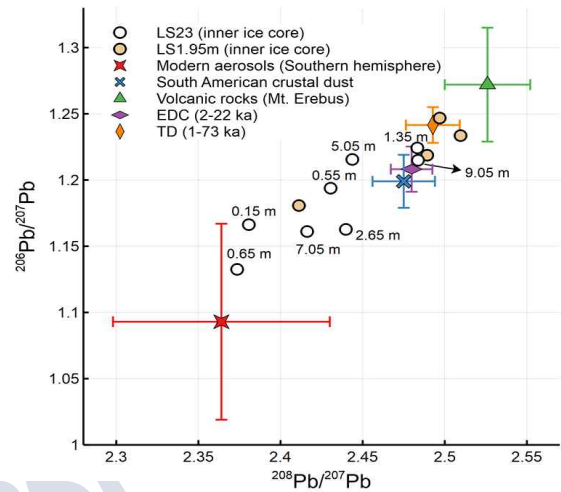


그림 18. 납 동위원소 분석결과

마. 남극 엘리펀트 모레인 빙하의 CO₂ 농도 변질과정 연구

(1) EM-B 코어 CO₂ 및 CH₄ 농도측정

(가) 엘리펀트 모레인(Elephant Moraine) 지역의 EM-B 코어를 대상으로 48개 깊이구간에 대해 CO₂ 농도를 측정하여 깊이별 CO₂ 농도 분포를 확보하였다.

(나) 동일 코어에 대해 18개 깊이구간에서 CH₄ 농도를 측정하여, CO₂ 및 CH₄ 농도의 변질 가능성을 함께 파악할 수 있는 비교 자료를 구축하였다.

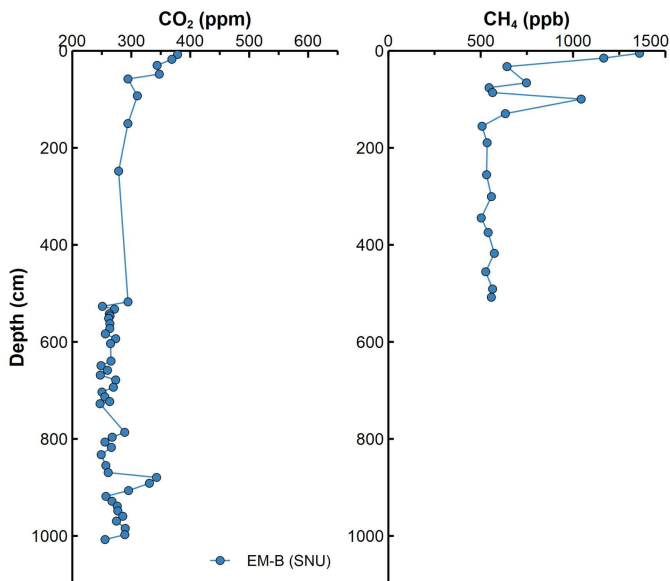


그림 19. 깊이에 따른 엘레펀트 모레인 CO₂와 CH₄ 농도 변화

(2) 공기방울을 갖는 인공빙하 제작법 개발

(가) 공기방울이 없는 인공빙하 slab에 작은 구멍을 뚫고 초순수 물을 활용하여 저온에서 접착하는 방식으로 공기방울을 포함하는 시료 제작법을 개발하였다.

(나) glove box 환경에서 저온 조건을 유지하면서 특정 CO₂ 농도를 갖는 공기방울 얼음을 제작하였으며, 이는 향후 블루아이스 시료 변질 연구 및 분석 검증을 위한 기반 기술로 활용될 수 있다.

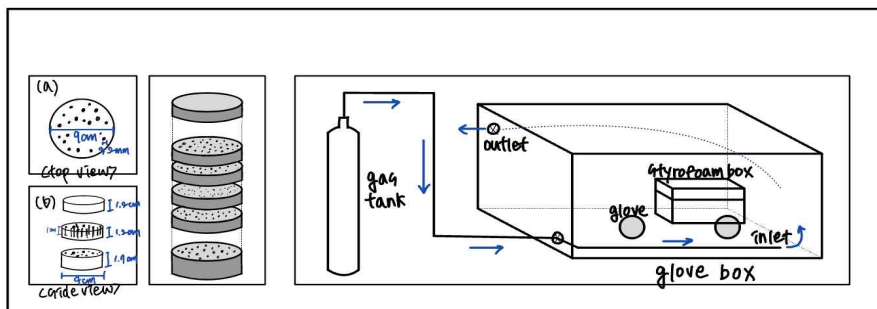


그림 20. 공기방울 갖는 인공빙하 제조 과정 모식도

바. RAICA-CPSW 코어에 대한 bubble close-off 깊이 하부의 기체연령 및 얼음연령 추정

(1) 미량기체(CH₄) 농도측정

(가) RAICA-CPSW 빙하코어의 80 - 120 m 깊이구간에서 41개 시료에 대해 CH₄ 농도 및 공기함량을 측정하여, bubble close-off 하부 구간의 기체 기록을 확보하였다.

(나) 해당 깊이구간의 CH₄ 농도자료는 기체연령 추정 및 다른 빙하코어 기록과의 대비에 활용되며, 이후 Δage 산정의 핵심 입력자료로 사용된다.

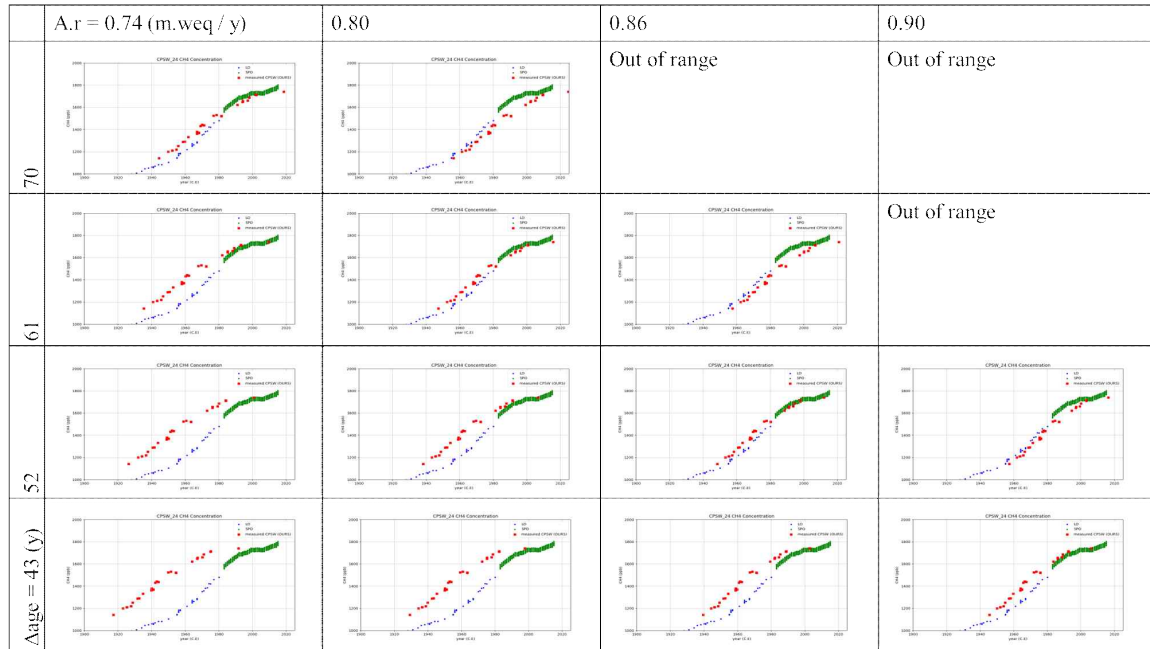


그림 21. RAICA-CPSW 코어에 대한 CH₄ 농도 분포 및 가능한 연령, 적설량 범위 모델링 결과

(2) $\delta^{15}\text{N} - \text{N}_2$ 자료를 이용한 미량기체 농도 보정

(가) $\delta^{15}\text{N} - \text{N}_2$ 를 추정하여 미량기체 농도 해석에 필요한 보정 자료를 확보하였다.

H-L model의 density-depth 식(Herron and Langway, 1980) 과, 공기방울이 갇히는 깊이
에 대한 식(아래)을 이용하여, 깊이에 따른 $\delta^{15}\text{N} - \text{N}_2$ 를 추정하였다.(Mitchell et al., 2015)

$$\rho_{\text{co}} = \frac{1}{1 - 1/75} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{\text{ice}}} + 7.02 \cdot 10^{-7} T - 4.5 \cdot 10^{-5} \right)^{-1}$$

(나) $\delta^{15}\text{N} - \text{N}_2$ 자료는 기체 포집 및 기체 이동 과정의 영향을 고려한 농도 해석에 활용
되며, 기체연령 추정의 신뢰도를 향상시키는 보조 지표로 사용하였다.

(3) 얼음연령 - 기체연령 차이(Δage) 추정

(가) Δage 추정 방법

firm densification 모델과 기존 Law Dome CH₄ 자료를 대비하여 기체연령과 얼음연령을
추정하고, 그 차이(Δage)를 계산하였다.

(나) 결과 활용

추정된 Δage 는 RAICA-CPSW 코어의 연대 수립을 위한 핵심 제약조건으로 활용되며, 향
후 남극 해안 천부시추 코어의 연령모델 개선에도 적용 가능하다.

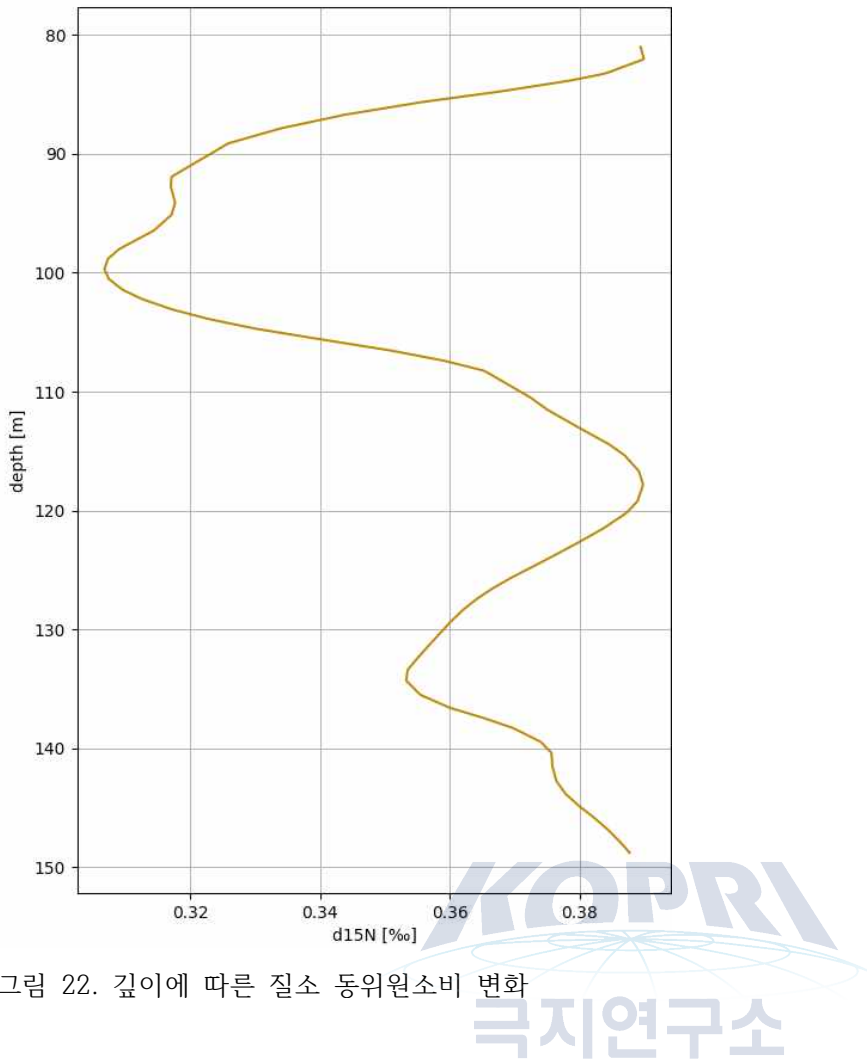


그림 22. 깊이에 따른 질소 동위원소비 변화

3. 연구결과 데이터

표3. Larsen BIA 1.95m 깊이의 가스 동위원소 비율과 온실 가스 농도.

Core	Horizontal distance (m)	Gas age (yrBP, AI CC2012)	Gas age (yr BP, WD2014)	$\delta^{15}\text{N-N}_2$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ (‰)	$\delta\text{O}_2/\text{N}_2$ (‰)	$\delta\text{Ar}/\text{N}_2$ (‰)	CH_4 (ppb)	CO_2 (ppm)
306	378.77	9441	9237	0.194	-0.075	-2.793	-0.373	767.7	293.3
305	411.00	9569	9561	0.224	0.053	-10.880	-4.337	785.7	301.0
303	467.16	10239	10125	0.305	0.242	-6.356	-2.838	771.3	310.7
302	495.81	10580	10412	0.307	0.260	-3.557	-1.517	757.7	309.8
301	527.89	10988	10811	0.320	0.453	-31.774	-15.280	740.1	303.3
300	557.12	11359	11174	0.243	0.443	-6.380	-3.042	716.1	305.7
9	573.62	11535	11425	0.264	0.564	-16.668	-8.325	676.4	286.6
98	614.57	12185	12048	0.288	0.668	-13.158	-5.474	540.8	295.9
23	663.09	12850	12785	0.423	0.741	-6.268	-3.636	748.4	309.9
100	695.43	13576	13294	0.445	0.769	-5.752	-2.420	677.1	266.9
101	715.00	13714	13551	0.406	0.807	-8.249	-3.113	588.8	267.7
103	752.92	14214	13993	0.282	1.014	-15.452	-5.500	748.4	268.2
104	779.27	14533	14414	0.365	1.054	-6.370	-2.957	1185.2	314.9
105	797.29	14754	14697	0.316	0.988	-13.788	-4.587	778.3	274.0

106	815.72	15068	14986	0.370	1.126	-23.224	-11.120	669.0	273.6
108	857.49	15816	15563	0.403	1.051	-18.432	-8.732	584.3	279.0
109	879.39	15975	15850	0.364	1.004	-10.485	-3.366	730.6	290.5
110	894.80	16087	16052	0.410	1.052	-0.642	0.122	571.5	268.1
111	918.71	16433	16365	0.416	1.070	-6.541	-4.175	671.8	290.6
112	935.91	16861	16590	0.403	1.040	-4.301	-2.079	583.6	263.0
114	981.22	17326	17184	0.393	1.033	-3.888	-1.797	779.0	263.6
115	1002.67	17598	17465	0.353	0.965	-7.884	-3.071	798.9	283.1
116	1022.44	18190	17724	0.361	0.949	-13.753	-6.743	859.2	269.6
117	1042.56	18476	17988	0.409	0.954	-1.397	-1.158	797.2	250.3
119	1083.62	19294	18670	0.368	0.971	-6.792	-5.241	503.4	214.4
120	1102.39	19564	18990	0.315	1.005	-23.341	-10.666	534.7	217.1
121	1120.63	19809	19301	0.338	0.924	-9.681	-4.745	509.8	211.7
122	1141.29	20057	19653	0.286	0.944	-4.697	-2.821	522.3	213.0
124	1181.95	20790	20346	0.403	0.909	2.806	-0.153	538.2	NA
125	1200.40	21337	20661	0.383	0.927	-14.874	-6.969	509.9	216.3
207	1219.27	21586	20982	0.391	0.942	-10.068	-5.146	495.2	217.9
206	1240.66	21793	21347	0.379	0.902	-8.148	-4.949	537.1	217.3
205	1261.12	22072	21696	0.362	0.858	-4.888	-2.992	472.6	213.5
202	1323.25	22895	22750	0.367	0.905	-7.014	-3.050	539.9	215.3
200	1363.86	23390	23439	0.379	0.877	-12.966	-9.195	487.2	248.5



표4. Larsen BIA 23번 시추코어의 가스 동위원소 비율과 온실 가스 농도.

Depth (cm)	Gas age (yrBP, AI CC2012)	Gas age (yrBP, W D2014)	$\delta^{15}\text{N}-\text{N}_2$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ (‰)	$\delta\text{O}_2/\text{N}_2$ (‰)	$\delta\text{Ar}/\text{N}_2$ (‰)	CH_4 (ppb, NIPR)	CH_4 (ppb, SNU)	CO_2 (ppm)
15	12565	12470						537.7	
25	12579	12487						631.4	
35	12595	12505						707.7	
45	12611	12522	0.327	0.609	-9.067	-3.545	801.9	940.1	339.0
55	12627	12540						719.8	
65	12643	12557						680.8	
75	12659	12575						691.1	
85	12674	12592						634.8	
95	12688	12610	0.390	0.721	-5.661	-1.575	672.2	707.6	354.2
105	12702	12627						645.2	
115	12717	12645						787.4	
125	12731	12662						679.8	
135	12748	12680						827.6	
145	12765	12697						875.0	
155	12783	12715	0.386	0.773	-16.407	-6.893	859.2	807.2	316.4
165	12799	12732						724.5	
175	12816	12750						714.0	
185	12832	12767						716.3	
195	12850	12785	0.423	0.741	-6.268	-3.636	748.4	708.1	309.9
205	12867	12802						763.4	
215	12884	12820						727.7	
225	12901	12837						719.4	
235	12919	12855	0.415	0.709	-7.730	-3.459	745.5	782.1	284.5
245	12938	12873						841.6	
255									
265	12978	12908						736.1	
275	12998	12925						778.8	
285	13018	12943						741.2	
295	13048	12960	0.433	0.792	-6.721	-2.463	690.9	720.2	272.7
305	13082	12978						694.7	
315	13115	12995						753.7	
325	13148	13013						735.3	
335	13178	13030						750.8	
345	13208	13046						706.6	
355	13238	13063						715.6	
365	13268	13080						698.1	
375	13298	13096						704.5	
385	13327	13113						753.7	
395	13357	13130	0.437	0.759	-2.119	0.065	687.5	694.0	267.4
405	13387	13146						676.9	
415	13413	13163						679.3	
425	13439	13179						773.5	
435	13466	13196						720.1	
445	13493	13213						692.6	

455	13520	13229							677.8	
465	13566	13278							656.2	
475	13576	13293							673.4	
485	13585	13308							673.9	
495	13594	13323							668.2	
505	13602	13338							661.3	
515	13611	13354							660.3	
525	13619	13369							663.6	
535	13627	13384							675.6	
545	13635	13399	0.476	0.778	-6.777	-2.612	644.5	657.4	249.4	
555	13643	13414							658.0	
565	13651	13429							655.1	
575	13659	13444							654.7	
585	13667	13459							652.5	
595	13675	13474							643.4	
605	13682	13490							638.2	
615	13690	13505							639.6	
625	13698	13520							631.4	
635	13706	13535							626.8	
645	13713	13550							605.9	
655	13720	13562							621.2	
665	13727	13574							609.1	
675	13738	13586							627.9	
685	13748	13599							634.7	
695	13759	13611	0.360	0.838	-17.349	-7.488	624.7	633.7	248.4	
705	13770	13623							621.6	
715	13781	13635							642.3	
725	13792	13647							661.0	
735	13803	13659							659.5	
745	13814	13671							669.2	
755	13827	13684							682.0	
765	13842	13696							676.0	
775	13858	13708							678.3	
785	13873	13720							671.4	
795	13888	13732							683.6	
805	13904	13744							679.1	
815	13919	13757							704.2	
825	13934	13769							669.1	
835	13951	13781							672.5	
845	13967	13793							658.6	
855	13983	13805							660.1	
865	14000	13817							656.6	
875	14016	13829							675.4	
885	14032	13842							666.4	
895	14048	13854	0.290	0.921	-5.297	-2.170	657.3	663.2	252.1	
905	14064	13866							672.6	
915	14081	13878							676.9	
925	14107	13897							650.7	

935	14132	13917						657.6	
945	14158	13936						642.6	
955	14185	13955						632.7	
965	14201	13975						615.0	
975	14214	13994						594.6	
985	14228	14013						604.3	
995	14241	14033	0.322	1.004	-5.658	-2.747	599.9	608.2	252.4
1005	14251	14052						641.5	
1015	14251	14071						636.8	
1025	14251	14091						642.6	
1035	14251	14110						621.8	

표5. 서울대에서 분석한 Larsen 시추 코어 #23의 CO₂ 농도.

Depth (cm)	CO ₂ (ppm,SNU)
17.5	344.6
27.5	325.5
37.5	332.7
47.5	340.1
57.5	314.2
67.5	346.2
77.5	341.2
87.5	342.9
97.5	327.0
107.5	300.8
117.5	305.9
127.5	316.7
137.5	323.9
147.5	342.1
157.5	297.7
167.5	293.5
177.5	295.2
187.5	292.0
197.5	299.0
207.5	300.8
217.5	284.5
227.5	287.1
237.5	272.4
247.5	287.9
267.5	278.2
277.5	282.3
287.5	282.7
297.5	273.7
307.5	267.2
317.5	261.0
327.5	263.6



337.5	268.4
347.5	260.7
357.5	271.2
367.5	268.4
377.5	265.5
387.5	261.7
397.5	260.2
407.5	266.0
417.5	258.3
427.5	256.8
437.5	258.8
447.5	254.7
457.5	250.1
467.5	249.8
477.5	253.3
487.5	246.8
497.5	245.9
507.5	248.5
517.5	249.3
527.5	246.9
537.5	254.4
547.5	251.3
556.5	250.1
567.5	246.1
577.5	247.8
587.5	249.8
597.5	248.7
607.5	251.3
617.5	259.0
627.5	250.3
637.5	247.9
647.5	248.1
657.5	245.0
667.5	247.7
677.5	250.6
687.5	245.2
697.5	244.6
707.5	244.5
717.5	248.1
727.5	259.9
737.5	257.4
747.5	250.8
757.5	246.1
767.5	241.0
777.5	250.8
787.5	246.5
797.5	262.9
807.5	252.3



817.5	250.3
827.5	254.3
837.5	253.9
847.5	249.2
857.5	249.4
867.5	256.6
877.5	256.3
887.5	254.3
897.5	251.7
907.5	253.6
917.5	250.4
927.5	259.1
937.5	257.2
947.5	256.3
957.5	254.8
967.5	252.6
977.5	252.9
987.5	252.5
997.5	256.6
1007.5	253.5
1017.5	245.7
1027.5	253.4
1037.5	257.5

표6. 표층 빙하 샘플의 물 안정동위원소 측정값.

Surface ice and core number	Horizontal distance(m)	Ice age (yrBP, AI CC2012)	Ice age (yrBP, W D2014)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{ice}}$ (‰)	$\delta^2\text{H}_{\text{ice}}$ (‰)	d-excess (‰)
81W	0.00	5631	5608	-31.25	-244.60	5.40
80W	7.30	5706	5682	-30.98	-239.40	8.44
79W	17.67	5819	5788	-34.72	-272.30	5.46
78W	28.74	5939	590	-33.02	-259.10	5.06
77W	41.55	6055	6032	-33.68	-266.90	2.54
76W	51.60	6155	6134	-33.53	-264.40	3.84
75W	67.33	6307	6294	-34.41	-273.30	1.98
74W	93.74	6574	6564	-33.38	-262.90	4.14
73W	106.82	6705	6697	-35.75	-282.80	3.20
72W	122.31	6867	6855	-37.37	-295.66	3.30
71W	142.26	7038	7025	-35.02	-273.86	6.30
70W	166.07	7244	7228	-40.27	-319.93	2.23
69W	186.50	7420	7401	-35.09	-289.41	-8.69
68W	207.56	7594	7581	-39.09	-310.09	2.63
67W	230.11	7792	7773	-36.05	-286.58	1.82
66W	249.63	7966	7939	-36.66	-290.60	2.68
65W	268.46	8133	8099	-37.59	-299.15	1.57
64W	289.96	8316	8282	-36.99	-291.88	4.04
63W	306.76	8460	8425	-38.48	-304.43	3.41

62W	327.70	8668	8636	-33.91	-269.63	1.65
61W	346.18	8888	8852	-35.08	-277.94	2.70
60W	368.26	9154	9110	-34.61	-274.32	2.56
306	378.77	9284	9233	-37.37	-298.17	0.79
59W	387.15	9386	9331	-38.86	-307.72	3.16
58W	405.33	9605	9544	-36.55	-291.82	0.58
305	411.00	9672	9610	-37.66	-301.19	0.09
57W	425.54	9842	9780	-39.49	-313.81	2.11
304	437.65	9984	9921	-38.09	-304.52	0.20
56W	446.53	10087	10025	-37.08	-294.57	2.07
303	467.16	10337	10266	-36.10	-289.17	-0.37
55W	478.47	10471	10398	-39.14	-308.81	4.31
302	495.81	10667	10601	-39.68	-318.47	-1.03
54W	498.00	10694	10626	-38.82	-307.05	3.51
53W	518.03	10941	10860	-35.83	-283.80	2.84
301	527.89	11057	10976	-38.84	-310.82	-0.10
52W	538.29	11180	11097	-36.20	-287.00	2.60
51W	556.13	11400	11306	-35.16	-278.74	2.54
300	557.12	11412	11317	-35.09	-280.80	-0.08
1W	573.62	11621	11510	-37.13	-294.90	2.14
9W	584.70	11760	11640	-36.60	-291.65	1.15
20W	604.26	12006	11868	-37.62	-300.50	0.46
21W	624.47	12260	12104	-39.26	-312.55	1.53
99	633.80	12499	12321	-41.02	-328.30	-0.14
22W	644.54	12785	12595	-41.49	-328.49	3.43
23W	661.00	13210	13015	-44.45	-355.33	0.27
23	663.09	13264	13068	-42.75	-342.69	-0.69
24W	684.07	13824	13603	-41.70	-333.23	0.37
100	695.43	14124	13893	-43.08	-345.48	-0.84
25W	703.79	14354	14106	-40.43	-321.65	1.79
101	715.00	14478	14223	-38.86	-310.92	-0.04
26W	723.30	14562	14304	-37.14	-296.40	0.72
102	729.98	14629	14368	-38.87	-311.28	-0.32
27W	745.60	14792	14519	-36.13	-288.42	0.62
103	752.92	14866	14590	-40.29	-323.20	-0.88
28W	764.49	15019	14729	-40.35	-321.13	1.67
104	779.27	15298	14982	-38.80	-312.96	-2.56
29W	785.15	15411	15082	-40.81	-326.37	0.11
105	797.29	15625	15290	-40.41	-325.45	-2.17
30W	806.61	15786	15450	-40.25	-322.12	-0.12
106	815.72	15936	15605	-39.18	-315.25	-1.81
31W	825.10	16086	15766	-41.02	-328.15	0.01
107	836.67	16272	15964	-40.91	-329.30	-2.02
32W	846.48	16427	16132	-40.52	-323.73	0.43
108	857.49	16588	16320	-41.52	-334.00	-1.84
33W	866.76	16721	16478	-40.78	-325.74	0.50
109	879.39	16903	16695	-40.45	-325.53	-1.93
34W	888.00	17026	16842	-41.18	-329.09	0.35

110	894.80	17125	16958	-40.61	-327.29	-2.41
35W	909.18	17332	17204	-41.03	-328.87	-0.63
111	918.71	17469	17367	-40.75	-328.81	-2.81
36W	928.74	17614	17539	-41.63	-333.48	-0.44
112	935.91	17713	17661	-40.05	-322.77	-2.37
37W	948.00	17892	17868	-40.66	-325.47	-0.19
113	960.85	18082	18088	-42.43	-343.63	-4.19
38W	969.41	18209	18234	-42.40	-339.84	-0.64
114	981.22	18384	18436	-42.00	-339.84	-3.84
39W	990.17	18523	18590	-43.37	-347.85	-0.89
115	1002.67	18715	18803	-43.29	-350.42	-4.10
40W	1010.13	18827	18931	-43.02	-344.43	-0.27
116	1022.44	19007	19142	-43.39	-350.76	-3.64
41W	1029.57	19112	19263	-42.46	-341.39	-1.71
117	1042.56	19298	19486	-43.92	-355.62	-4.26
42W	1050.15	19405	19616	-45.28	-364.57	-2.33
118	1060.80	19550	19798	-44.57	-361.61	-5.05
43W	1071.24	19693	19976	-44.26	-355.93	-1.85
119	1083.62	19877	20188	-45.26	-366.55	-4.47
44W	1091.17	19995	20317	-43.32	-348.81	-2.25
120	1102.39	20169	20509	-43.93	-356.82	-5.38
45W	1111.95	20329	20673	-44.47	-357.51	-1.75
121	1120.63	20470	20821	-44.66	-361.97	-4.69
46W	1133.72	20696	21045	-44.30	-357.08	-2.68
122	1141.29	20826	21172	-45.49	-369.26	-5.34
47W	1153.30	21021	21360	-46.23	-371.87	-2.03
123	1162.13	21165	21499	-46.30	-374.83	-4.43
48W	1176.66	21418	21727	-46.63	-375.53	-2.49
124	1181.95	21513	21810	-45.37	-367.45	-4.49
49W	1195.69	21758	22025	-45.82	-367.80	-1.24
125	1200.40	21841	22099	-46.09	-372.64	-3.92
207	1219.27	22178	22395	-45.62	-367.52	-2.56
206	1240.66	22559	22731	-45.39	-367.65	-4.53
205	1261.12	22924	23052	-44.91	-363.52	-4.24
204	1281.89	23294	23378	-44.79	-362.54	-4.22
203	1302.52	23664	23701	-44.42	-358.95	-3.59
202	1323.25	24044	24037	-46.57	-374.88	-2.32
201	1343.56	24413	24367	-45.49	-366.71	-2.79
200	1363.86	24763	24696	-45.68	-369.33	-3.89

표7. Larsen 시추 코어 23번 샘플의 물 안정동위원소 측정값.

Depth (cm)	Ice age (yrBP, AI CC2012)	Ice age (yrBP, WD2014)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{ice}}$ (‰)	$\delta^2\text{H}_{\text{ice}}$ (‰)	d-exce ss (‰)
20	13264	13068	-43.11	-343.35	1.53
40	13323	13127	-41.99	-333.65	2.27
60	13382	13185	-42.21	-335.07	2.61
80	13443	13243	-42.71	-340.45	1.23
100	13504	13302	-41.53	-330.80	1.44
120	13564	13360	-44.31	-353.13	1.35
140	13624	13418	-41.86	-333.05	1.83
160	13686	13477	-42.11	-334.98	1.90
180	13749	13535	-42.46	-337.40	2.28
200	13814	13594	-43.20	-343.65	1.95
220	13871	13652	-41.84	-332.76	1.96
240	13929	13710	-42.01	-334.70	1.38
260	13995	13769	-42.37	-338.12	0.84
280	14055	13827	-42.76	-340.90	1.18
300	14116	13886	-42.59	-339.16	1.56
320	14179	13944	-42.31	-336.71	1.77
340	14242	14002	-40.83	-325.98	0.66
360	14305	14061	-41.76	-331.42	2.66
380	14359	14112	-41.14	-327.94	1.18
400	14385	14135	-41.61	-331.05	1.83
420	14411	14159	-40.15	-319.31	1.89
440	14436	14183	-40.79	-324.81	1.51
460	14461	14207	-40.10	-319.61	1.19
480	14486	14231	-38.88	-309.62	1.42
500	14510	14253	-37.85	-301.67	1.13
520	14533	14275	-36.78	-293.20	1.04
540	14555	14297	-37.44	-298.78	0.74
560	14578	14319	-37.64	-300.60	0.52
580	14600	14341	-37.96	-302.78	0.90
600	14623	14363	-39.47	-314.93	0.83
620	14647	14386	-38.70	-308.72	0.88
640	14672	14408	-38.37	-306.84	0.12
660	14696	14430	-37.87	-302.48	0.48
680	14721	14452	-36.47	-291.05	0.71
700	14745	14474	-36.33	-290.77	-0.13
720	14768	14496	-37.57	-300.33	0.23
740	14791	14518	-39.10	-312.76	0.04
760	14814	14540	-39.16	-312.46	0.82
780	14837	14563	-39.66	-316.51	0.77
800	14861	14585	-40.64	-324.28	0.84
820	14889	14611	-40.43	-322.58	0.86
840	14920	14638	-41.65	-332.37	0.83
860	14950	14666	-40.08	-319.07	1.57

880	14980	14693	-40.62	-325.04	-0.08
900	15011	14721	-41.07	-328.47	0.09
920	15050	14757	-39.77	-317.57	0.59
940	15093	14796	-40.58	-324.67	-0.03
960	15136	14835	-40.80	-326.04	0.36
980	15179	14874	-39.95	-319.04	0.56
1000	15221	14913	-40.21	-321.83	-0.15
1020	15266	14953	-40.57	-325.75	-1.19
1035	15298	14982	-39.36	-315.88	-1.00

표7. Larsen 시추 코어 1.95 m 깊이 얼음 샘플의 물 안정동위원소 측정값.

Core number	Horizontal distance(m)	Ice age (yrBP, AI CC2012)	Ice age (yrBP, W D2014)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{ice}}$ (‰)	$\delta^2\text{H}_{\text{ice}}$ (‰)	d-excess (‰)
306	378.77	9571	9511	-36.96	-294.15	1.53
305	411.00	9951	9888	-37.91	-301.60	1.68
304	437.65	10265	10199	-39.11	-310.45	2.43
303	467.16	10612	10544	-38.22	-303.76	2.00
302	495.81	10960	10879	-39.64	-315.29	1.83
301	527.89	11345	11253	-37.92	-301.06	2.30
300	557.12	11713	11595	-36.51	-288.81	3.27
9	573.62	12014	11876	-36.54	-291.57	0.75
98	614.57	12764	12574	-42.87	-342.69	0.27
99	633.80	13089	12901	-43.53	-347.73	0.51
23	663.09	13605	13400	-43.58	-346.93	1.71
100	695.43	14406	14155	-37.31	-297.60	0.88
101	715.00	14731	14461	-38.66	-308.26	1.02
102	729.98	14898	14619	-39.64	-316.59	0.53
103	752.92	15196	14890	-39.67	-317.33	0.03
104	779.27	15783	15446	-41.49	-331.35	0.57
105	797.29	16143	15826	-40.97	-327.56	0.20
106	815.72	16436	16141	-41.24	-329.49	0.43
107	836.67	16738	16499	-40.81	-326.89	-0.41
108	857.49	17038	16855	-41.45	-332.03	-0.43
109	879.39	17354	17230	-41.70	-334.30	-0.70
110	894.80	17576	17494	-42.45	-340.13	-0.53
111	918.71	17922	17903	-43.13	-346.96	-1.92
112	935.91	18177	18197	-42.19	-338.87	-1.35
113	960.85	18554	18623	-43.89	-352.57	-1.45
114	981.22	18862	18972	-44.25	-355.34	-1.34
115	1002.67	19176	19339	-44.52	-358.66	-2.50
116	1022.44	19455	19677	-45.03	-361.80	-1.56
117	1042.56	19702	19988	-45.91	-368.69	-1.41
118	1060.80	19952	20270	-43.46	-351.40	-3.72
119	1083.62	20278	20622	-46.18	-371.69	-2.25
120	1102.39	20588	20941	-45.23	-365.15	-3.31
121	1120.63	20908	21251	-44.12	-355.70	-2.74

122	1141.29	21274	21599	-45.44	-369.04	-5.52
123	1162.13	21646	21927	-46.52	-375.28	-3.12
124	1181.95	21999	22238	-46.68	-375.32	-1.88
125	1200.40	22329	22528	-46.82	-376.75	-2.19
207	1219.27	22666	22825	-45.66	-368.20	-2.92
206	1240.66	23048	23161	-44.51	-358.81	-2.73
205	1261.12	23416	23484	-45.55	-367.31	-2.91
204	1281.89	23790	23812	-44.78	-360.72	-2.48
203	1302.52	24162	24139	-44.89	-360.77	-1.65
202	1323.25	24530	24475	-46.65	-375.73	-2.53
201	1343.56	24878	24804	-45.80	-368.64	-2.24
200	1363.86	25211	25131	-47.28	-379.52	-1.28



제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

1절. 연구개발목표 달성도

연차	연구 목표	연구 내용	달성도 (%)
1단계 1차년 (2020)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{ice}}$, $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$, ^{81}Kr 및 Ar 안정동위원소를 이용한 Larsen 빙하지역 블루아이스(blue ice) 연령측정	동남극 Larsen Glacier 블루아이스(blue ice) 시료를 이용한 $\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$ 및 $\delta^{18}\text{O}_{\text{ice}}$ 자료 확보 및 층서 이해	100
		^{81}Kr 를 이용한 Larsen 블루아이스(blue ice) 절대연령 측정	100
		Ar 안정동위원소(^{40}Ar , ^{38}Ar , ^{36}Ar)를 이용한 Larsen 블루아이스(blue ice) 연령해석	100
1단계 2차년 (2021)	GPR(Ground Penetration Radar) 및 온실기체 측정자료를 이용한 구조적 층서 이해	GPR 자료를 이용한 수평적 거리변화/연령변화 비율과 수직적 거리변화/연령변화에 대한 정량적 이해	100
		신뢰할 만한 깊이구간에서의 온실기체 농도를 이용한 빙하기/간빙기 연령조건 파악	100
1단계 3차년 (2022)	Larsen 블루아이스(blue ice) 표층에서의 온실기체 변질상태 수평/수직 분포 파악	Larsen 블루아이스(blue ice) 0-2미터 구간에서의 온실기체(CO_2 , CH_4) 농도 측정	100
		표층에서의 자연적 온실기체 농도 변질정도의 수직적/수평적 분포 파악	100
2단계 1차년 (2023)	남극 라센빙하의 CO_2 농도측정 및 시료 변질과정 연구	라센빙하 CO_2 농도측정	100
		납 농도와 동위원소비를 이용한 변질과정 연구	100
2단계 2차년 (2024)	남극 엘리펀트 모레인 빙하의 CO_2 농도변질과정 연구	EM-B 코어에 대한 CO_2 및 CH_4 농도측정	100
		공기방울을 갖는 인공빙하 제작법 개발	100
2단계 3차년 (2025)	RAICA-CPSW 코어에 대한 bubble close-off 깊이 하부의 기체연령 및 얼음연령 추정	미량기체(CH_4) 농도측정 및 공기함량 측정	100
		$\delta^{15}\text{N}-\text{N}_2$ 자료를 이용한 미량기체 농도 보정	100
		얼음연령 - 기체연령 차이(Δage) 추정	100

※ SCI 논문게재: 6건

Nasrin Salehnia, Eunji Byun, Jinho Ahn and Kajal Kumari, Continuous gap-filled atmospheric N_2O record for the past 800,000 years using machine learning techniques, *njp Climate and Atmospheric Science*, 8, Article number: 263 (2025) <https://rdcu.be/evB5C>

Giyeon Lee et al., A 320,000-year-old blue ice identified at the surface of the Elephant Moraine

Syed Azahrudin Jinho Ahn, Yeongjun Ryu, Ed Brook, Nasrin Salehnia, Millennial-scale changes in atmospheric nitrous oxide during the Holocene, *Earth and Space Science* 11, e2023EA002840. <<https://doi.org/10.1029/2023EA002840>> (2024)

Jinhwa Shin, Jinho Ahn, Jai Chowdhry Beeman, Hun-Gyu Lee, and Edward J. Brook, Millennial variations of atmospheric CO₂ during the early Holocene (11.7-7.4 ka), *Climate of the Past*, 18, 2063-2075 (2022)

Lee, G., Ahn, J., Ju, H., Ritterbusch, F., Oyabu, I., Kim, S., Moon, J., Buizert, C., Ghosh, S., Kawamura, K., Lu, Z.-T., Hong, S., Han, C. H., Hur, S. D., Jiang, W., and Yang, G.-M.: Chronostratigraphy of the Larsen blue-ice area in northern Victoria Land, East Antarctica, and its implications for paleoclimate, *The Cryosphere*, <<https://doi.org/10.5194/tc-16-2301-2022>> (2022)

Youngjoon Jang, Sang Bum Hong, Christo Buizert, Hun-Gyu Lee, Sang-young Han, Ji-Woong Yang, Yoshinori Iizuka, Akira Hori, Yeongcheol Han, Seong Joon Jun, Pieter Tans, Taejin Choi, Seong-Joong Kim, Soon Do Hur and Jinho Ahn, Very old firn air linked to strong density layering at Styx Glacier, coastal Victoria Land, East Antarctica, *The Cryosphere*, 13, 2407-2419 (2019)

2절. 연구종료후 성과창출 계획

구분	주요내용	의의(시사점)	비고
논문*	○SCI급 논문 1편 심사중, 1편 투고 예정	- 블루아이스에서 관찰되는 주요 온실가스(CO₂, CH₄)의 변질이 광화학반응에 의한 것임을 규명. - 특정 공기성분을 갖는 공기방울 인공빙하 제작법 개발 향후 빙하자료 변질원인 분석과 Astrobiology 분야에 활용 가능	학생 1저자, 연구책임자 교신저자
인력양성	극지 빙하, 고기후, 온실가스 연구의 전문가 계속 양성(2명 석박통합, 3명 석사 학위과정 이행 예정)	향후 대륙기지 건설 및 블루아이스 연구와 맞물려 빙하코어 연구에 중요한 인적자원이 될 것으로 기대됨.	
기타	본 과제에서 개발된 빙하 연령측정 기술은 향후 국내에서 시추하는 빙하코어 시료에 활용 (빙하코어 연령측정 및 기후변화 원인규명에 기여)		

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1절. 활용방안

1. 향후 빙하코어를 이용한 고기후 연구에서 연령측정에 활용
2. 과제 수행 중 이루어진 한-중-일-미 간의 국제 공동연구로 형성된 네트워크와 신뢰관계를 향후 국제 공동연구에 활용
3. 획득되는 연령측정 기술을 향후 대륙기지 건설과 연계되어 진행될 본격적인 빙하코어 연구에 활용
4. 블루아이스를 이용한 온실가스 연구에서 표층시료의 변질과정 이해에 활용

2절. 기대효과

1. 국내 빙하연구의 효율성 증대
2. 국내 극지연구의 위상 격상으로 대한민국 국가브랜드 가치 증대
3. 빙하를 이용한 고기후 및 빙하거동 연구에 필요한 인력양성
4. 미래 기후 예측을 위한 모델자료로 활용
5. 고기후/빙하학/대기화학/해양학의 다학제간 연구분야에 기여



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1절. 블루아이스 연구 동향

1. 미국은 2021년부터 미국연구재단(NSF)의 지원으로 COLDEX (Center for Oldest Ice Exploration)라는 대학연합체 연구센터 설립하고, 이 센터를 중심으로 100만 년 이상된 연령의 빙하시료를 찾고, 관련된 고기후 연구를 수행. 현재까지는 심부시추 보다는 남극 알렌힐스 (Allen Hills) 블루아이스 지역에서 200미터 정도의 천부시추를 수행하고, 시추된 빙하시료를 분석하는데 주력하고 있음. 2025년 12월 기준으로 600만 년된 빙하를 Allan Hills 블루아이스 지역에서 발견하였다고 보고하였음(Shakleton et al., 2025).
2. 미국은 Ar 동위원소를 이용한 연령측정법의 정밀도를 꾸준히 향상시키고 있으나, Kr 동위원소를 이용하는 중국과학자로부터 Ar 연령측정법의 정확도를 더욱 시험할 필요가 제기됨.
3. 미국은 RAID (Rapid Access Ice Drill) 프로그램을 수행하고 있는데, 작은 직경으로 빙하를 빠른 속도를 뚫은 다음, 빙하 시추공 속에 광학 및 온도센서를 넣어 층서/연령에 대한 정보를 빠르게 획득하고, 지열속(geothermal flux)을 측정하여, 가장 오래된 연령의 빙하존재 여부 판단의 정확도를 높이는 기술을 확보하였으나, 아직까지 심부에 해당하는 깊이의 빙하에 적용한 사례가 없음.

극지연구소

제 7 장 참고문헌

1. Bazin, L., Landais, A., Lemieux-Dudon, B., Toyé Mahamadou Kele, H., Veres, D., Parrenin, F., Martinerie, P., Ritz, C., Capron, E., Lipenkov, V. Y., Loutre, M.-F., Raynaud, D., Vinther, B. M., Svensson, A. M., Rasmussen, S. O., Severi, M., Blunier, T., Leuenberger, M. C., Fischer, H., Masson-Delmotte, V., Chappellaz, J. A., and Wolff, E. W.: delta Deuterium measured on ice core EDC on AICC2012 chronology, PANGAEA [data set], <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.824891>, 2013.
2. Extier, T., Landais, A., Bréant, C., Prié, F., Bazin, L., Dreyfus, G., Roche, D. M., and Leuenberger, M.: $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ records between 100 - 800 ka from EPICA Dome C ice core, PANGAEA [data set], <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.887323>, 2018.
3. Jang, Y., Han, Y., Ryu, Y., Moon, J., Ju, H.-T., Yang, J.-W., Lee, H.-G., Jun, S. J., Lee, J., Hur, S. D., Lee, J. I., and Ahn, J.: A preliminary study for blue ice in Victoria Land, East Antarctica, Journal of the Geological Society of Korea, 53, 567 - 580, <https://doi.org/10.14770/jgsk.2017.53.4.567> 2017.
4. Landais, A., Dreyfus, G. B., Capron, E., Jouzel, J., Masson-Delmotte, V., Roche, D. M., Prié, F., Caillon, N., Chappellaz, J., Leuenberger, M., Laurantou, A., Parrenin, F., Raynaud, D., and Teste, G.: EPICA Dome C Ice Core Terminations I and II Air Isotopes and CO2 Data, NOAA/WDS for Paleoclimatology [data set], https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/epica_domec/edc2013d18oatm.txt, 2013.
5. Rhodes, R. H., Brook, E. J., Blunier, T., McConnell, J. R., and Romanini, D.: Experiment-time-integrated CH4 data from all 3 instruments, calibrated and corrected for solubility and gravitational effects of the WAIS-Divide ice core, Antarctica, PANGAEA [data set], <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.875980>, 2017.
6. Severinghaus, J. P.: Low-res $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of O_2 in the WAIS Divide 06A Deep Core, U.S. Antarctic Program (USAP) Data Center [data set], <https://doi.org/10.7265/N5S46PWD>, 2015.
7. Sigl, M., Fudge, T. J., Winstrup, M., Cole-Dai, J., Ferris, D., McConnell, J. R., Taylor, K. C., Welten, K. C., Woodruff, T. E., Adolphi, F., Bisiaux, M., Brook, E. J., Buizert, C., Caffee, M. W., Dunbar, N. W., Edwards, R., Geng, L., Iverson, N., Koffman, B., Layman, L., Maselli, O. J., McGwire, K., Muscheler, R., Nishiizumi, K., Pasteris, D. R., Rhodes, R. H., and Sowers, T. A.: The WAIS Divide deep ice core WD2014 chronology - Part 2: Annual-layer counting (0 - 31 ka BP), Clim. Past, 12, 769 - 786, <https://doi.org/10.5194/cp-12-769-2016>, 2016.
8. Buizert, C., Fudge, T. J., Roberts, W. H. G., Steig, E. J., Sherriff-Tadano, S., Ritz, C.,

- Lefebvre, E., Edwards, J., Kawamura, K., Oyabu, I., Motoyama, H., Kahle, E. C., Jones, T. R., Abe-Ouchi, A., Obase, T., Martin, C., Corr, H., Severinghaus, J. P., Beaudette, R., Epifanio, J. A., Brook, E. J., Martin, K., Chappellaz, J., Aoki, S., Nakazawa, T., Sower, T. A., Alley, R. B., Ahn, J., Sigl, M., Severi, M., Dunbar, N. W., Svensson, A., Fegyveresi, J. M., He, C., Liu, Z., Zhu, J., Otto-Bliesner, B. L., Lipenkov, V. Y., Kageyama, M., and Schwander, J.: Antarctic surface temperature and elevation during the Last Glacial Maximum, *Science*, 372, 1097 - 1101, <https://doi.org/10.1126/science.abd2897>, 2021.
9. Herron MM, Langway CC. Firn Densification: An Empirical Model. *Journal of Glaciology*. 1980;25(93):373-385. doi:10.3189/S0022143000015239
 10. Shackleton, S., Hishamunda, V., Bavidge, L. et al., Miocene and Pliocene ice and air from the Allan Hills blue ice area, East Antarctica, *PNAS*, 122(44), e2502681122 (2025)
 11. Mitchell, Logan, Buizert, C., Brook, Edward, Breton, Daniel, Fegyveresi, John, Baggenstos, Daniel, Orsi, Anais, Severinghaus, Jeff, Alley, Richard, Albert, Mary, Rhodes, Rachael, McConnell, Joseph, Sigl, Michael, Maselli, Olivia, Gregory, Stephanie, Ahn, Jinho. (2015). Observing and modeling the influence of layering on bubble trapping in polar firn. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 120. 10.1002/2014JD022766.
 12. M.L. Bender, B. Barnett, G. Dreyfus, J. Jouzel, & D. Porcelli, The contemporary degassing rate of ^{40}Ar from the solid Earth, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 105 (24) 8232-8237, <https://doi.org/10.1073/pnas.0711679105> (2008).
 13. Spaulding NE, Higgins JA, Kurbatov AV, et al. Climate archives from 90 to 250 ka in horizontal and vertical ice cores from the Allan Hills Blue Ice Area, Antarctica. *Quaternary Research*. 2013;80(3):562-574. doi:10.1016/j.yqres.2013.07.004
 14. Baggenstos, D., Bauska, T. K., Severinghaus, J. P., Lee, J. E., Schaefer, H., Buizert, C., Brook, E. J., Shackleton, S., and Petrenko, V. V.: Atmospheric gas records from Taylor Glacier, Antarctica, reveal ancient ice with ages spanning the entire last glacial cycle, *Clim. Past*, 13, 943 - 958, <https://doi.org/10.5194/cp-13-943-2017>, 2017.