

빅토리아 빙하코어시료의 강설량복원을 통한
과거대기대순환 복원

Reconstruction of past large-scale atmospheric circulation
by reconstruction of snow accumulation rate from ice cores
in Victoria land



이화여자대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “국제심부빙하시추 네트워크를 활용한 대기-빙상 상호작용의 자연적·인위적 특성규명” 과제의 위탁연구 “빅토리아랜드 빙하코어시료의 강설량복원을 통한 과거대기대순환 복원” 과제의 단계보고서로 제출합니다.



2026. 01. 12

(본과제) 총괄연구책임자	: 한영철
위탁연구기관명	: 이화여자대학교
위탁연구책임자	: 이정훈
위탁참여연구원	: 문세인
“	: 김채영
“	: 김서연
“	: 이승현

보고서 초록

위탁연구과제명		빅토리아랜드 빙하코어시료의 강설량복원을 통한 과거대기대순환 복원				
위탁연구책임자		이정훈	해당단계 참여연구원수	5명	해당단계 연구비	170,000,000
연구기관명 및 소속부서명		이화여자대학교 과학교육과 지구과학전공		참여기업명		
국제공동연구		상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)					보고서 면수	114
본 연구는 남극 장보고기지 인근 빅토리아 지역에서 국내 연구진에 의해 최초로 획득된 빙하시료를 활용하여 강설량을 복원하고, 이를 기반으로 과거 기후 및 대기순환 인자를 규명하는 것을 연구목적으로 한다. 이를 위해 스노우핏 및 천부 빙하(firn) 코어 시료의 불안정동위원소를 분석하고, 주요이온 및 재분석자료를 결합하여 연대측정을 수행하였다. 추정된 연대를 바탕으로 빅토리아 지역의 강설량 변화를 복원하였으며, 복원된 강설량과 해빙 면적 간의 상관성을 분석하였다. 그 결과, 최근 수십 년간 빅토리아 지역에서는 해빙 면적 증가와 함께 강설량이 감소하는 경향이 나타남을 확인하였다. 또한 삼중산소 동위원소(¹⁷O)를 활용하여 연구지역 주변의 과거 습도 및 수분공급원 조건을 추정할 수 있는 가능성을 제시하였다. 더불어 희토류원소 및 미량원소에 대한 문헌 조사와 분석을 통해, 미량원소가 대기대순환 및 강설량 변화에 의해 조절되며 과거 대기순환의 잠재적 프록시로 활용될 수 있음을 논의하였다. 아울러 아문젠 해역 인근에서 획득한 스노우핏 시료 분석을 통해 해당 해안지역의 높은 강설 특성을 제시함으로써, 향후 다양한 남극 해안 및 내륙 지역으로 연구 확장이 가능함을 제안하였다.						
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	빅토리아지역, 물동위원소, 과거대기대순환, 강설량, 아이스코어				
	영 어	Victoria Land, Stable water isotopes, past atmospheric large scale circulation, ice core				

요 약 문

I. 제 목

빅토리아랜드 빙하코어시료의 강설량복원을 통한 과거대기대순환 복원

II. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구에서는 빙하 코어시료를 이용하여 남극 빅토리아랜드 주변의 고기후 변화를 복원할 수 있는 방법을 제시하고 실제 극지연구소에서 보유하고 있는 다수의 빙하 코어시료의 불안정동위원소 및 미량원소를 분석하여 과거 대기 대순환을 복원할 수 있는 기법을 연구하고자 함. 또한 국내에서는 안정동위원소 기반 연대측정 및 강설량 복원 기법이 완전히 정립되지 않았으므로, 본 연구는 국내 극지 빙하코어 기반 고기후 복원 연구의 방법론을 고도화하고, 미량원소·동위원소 프록시를 대기대순환 해석으로 연결하는 기반을 마련하는 데 필요함.

III. 연구개발의 내용 및 범위

빙하시료를 이용한 남극 빅토리아랜드 및 인접 해역의 강설량 복원과 과거 기후인자-대기대순환의 연계를 통해 과거 대기대순환을 복원함

- 천부 빙하(firn) 코어 및 스노우핏 시료의 불안정동위원소/주요이온/미량원소 분석을 수행함.
- 불안정동위원소 및 화학성분을 활용한 연대측정을 수행하고, 연대 결과를 기반으로 강설량(축적률)을 산정·복원함
- 복원된 강설량과 해빙, 해양온도 및 재분석 기후변수와의 상관성을 분석하여 강설량의 기후적 의미를 규명함
- 강설량·동위원소·미량원소 신호를 대기대순환 지수(SAM, ASL 등) 및 원격 상관(teleconnection)과 연결하여 과거 대기대순환 변동을 재구성함
- 로스해(북빅토리아)와 아문젠해 천부 빙하시료를 대상으로 지역별 강설량 특성을 복원하고, 두 해역의 대기대순환 차이를 비교·해석함
- 동위원소탑재 전지구순환모델 및 재분석자료를 활용하여 강설량 복원 결과의 물리적 타당성을 보강하고, 동위원소 신호에 영향을 주는 인자(예: 동위원소 이질성, 용융/융해 영향 등)를 모델·실험 기반으로 검토함
- 미량원소 자료에 대해 다변량 통계기법(예: PMF 등)을 적용하여 기원·수송 경로를 분리하고, 미량원소가 대기대순환/기후변동의 프록시로 활용될 수 있는 가능성을 평가함
- 삼중산소동위원소(^{17}O) 및 희토류원소(REE) 관련 해외 연구 동향을 수집·정리하고, 수분 기원 지 습도 추정 및 입자 기원 추적 등 향후 극지 빙하 연구 확장 적용 가능성을 제시함

IV. 연구개발결과

스틱스지역의 편(firn) 코어의 불안정동위원소 분석을 완료하였으며, 현재 미량원소분석을 수행하였음

- 스틱스빙하시료의 안정동위원소 및 주요이온, 모델 결과를 활용하여 25년의 연대를 추정하였음
- 빙하의 연대측정을 통한 스틱스지역의 강설량을 추정하여 해빙과의 상관관계를 밝혔음
- 스노우핏 시료를 이용하여 해빙의 면적과 안정동위원소 값에 상관성이 있음을 밝혔음
- ^{17}O 의 빙하연구 가능성에 대하여 타진하였음
- 스노우핏을 이용하여 월평균 안정동위원소 값이 대기 온도와 상관관계가 있음을 밝혔음
- 빙하코어의 미량원소분석 결과를 향후 기상자료와 비교하기 위하여 스틱스 지역에서 가져온 편코어의 미량원소 분석 결과 분석 수행하고 있음
- 빙하코어의 melting layer 해석하기 위해 얼음 용해 실험 수행하였음
- 아이스코어 시료에 대한 미량원소 분석을 수행하였으며, 이를 통해 연구 지역 기후인자와의 상관성을 분석하였음
- 재분석자료와의 비교를 통해 연구 지역의 강설량을 복원하고, 빙하시료로부터 추정된 강설량과의 일치 여부를 검증하였음
- 물안정동위원소 값을 이용하여 연구 지역의 과거 기온을 복원하고, 얼음 내 안정동위원소 변동에 영향을 미치는 주요 인자를 분석하였음
- GV7 빙하시료의 물안정동위원소를 이용하여 연대를 산정하였으며, 화산 분출에 기인한 전기전도도 자료를 활용하여 연대 결과를 상호 검증하였음
- 연구 기간 동안 재분석자료와 빙하시료 간의 상관성 분석을 수행하여, 빙하시료 기록에 영향을 줄 수 있는 공간적 기후 인자를 규명하였음
- 아이스코어 시료에 대해 물동위원소 분석, 연대측정 및 화학성분 분석을 종합적으로 수행하였으며, 재분석자료와의 비교를 통해 전지구적 기후 변동과의 상관성을 제시하였음

V. 연구개발결과의 활용계획

- 빙하 또는 편코어의 연대측정을 통한 강설량 복원기법은 향후 빙하시료분석의 원천기술로 활용될 것으로 기대됨
- 복원된 강설량은 극지역 기후변화의 프록시로 활용될 수 있음
- 안정동위원소, 주요이온, 미량원소 및 재분석자료를 통합한 분석 방법은 기존 단일 자료 기반 연구의 한계를 보완하는 접근으로, 다양한 남극 빙하시료에 적용될 수 있음
- 빙하시료의 연대측정을 통해 복원된 강설량은 해빙 변화 및 대기대순환 변동을 해석하는데 활용될 수 있는 신뢰도 높은 기후 프록시로 활용 가능함
- 강설량 복원을 통해 과거 대기대순환 변동을 해석하는 연구는 남극 북부 빅토리아 지역의 고기후 복원에 중요한 기초자료를 제공함
- 본 연구는 빙하시추와 시료 분석에 국한되었던 국내 극지 연구를 대기대순환, 해빙, 기후 프록시 해석으로 확장함으로써 극지 연구 역량을 한 단계 고도화함
- 재분석자료 및 전지구적 기후자료와의 비교 분석을 통해 연구 결과의 정합성과 신뢰도를 확보하였으며, 이는 향후 국제 공동연구 확대의 기반이 됨
- 극지역 기후변화는 중·저위도 지역의 기후 및 해수면 변화에 영향을 미칠 수 있으므로, 본 연구 성과는 국내 기후변화 영향에 대한 선제적 대응 능력 향상에 기여함
- 남극 빙하 변화와 연계된 해수면 상승 예측 연구는 해안 저지대 침수, 항만 및 연안 산업 피해 등 경제·산업적 손실을 사전에 평가하고 대응하는 데 활용 가능함

- 본 연구는 파리기후협약 이후 신기후체제 대응과 IPCC 의장국 역할 수행이라는 국가적 위상에 부합하는 극지역 기후변화 연구로서 국가 이미지 제고에 기여함
- 남극 빙상 변화와 해수면 상승의 연계를 과학적으로 제시함으로써 국제사회와 기후위기의 심각성을 공유하고 국제 협약 논의에서 주도적 역할을 수행할 수 있는 근거를 제공함
- 또한 남극 빙하와 기후변화에 대한 국민적 관심을 충족시키고, 초등교육부터 대학 및 전문 연구 영역에 이르기까지 교육 자료로 활용 가능함
- 이를 통해 빙상 용융으로 인한 해수면 상승의 심각성에 대한 사회적 인식을 제고하고 다학제적 빙하 연구의 중요성을 확산함



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Reconstruction of past large-scale atmospheric circulation by reconstruction of snow accumulation rate from ice cores in Victoria land

II. Purpose and Necessity of R&D

The scope of this research is related to the approach to reconstruct the past climate changes in regions near Victoria Land, Antarctica based on the ice core records, and the technique to reconstruct the large-scale climate circulation by analysing the water stable isotopes and trace elements in the ice cores obtained by Korea Polar Research Institute

III. Contents and Extent of R&D

Reconstruction of past large-scale atmospheric circulation in Victoria Land based on the relationship between snow accumulation rate reconstructed from ice core and past climate factors

- Age dating of shallow ice core based on water stable isotopes
- Estimation of snow accumulation rate based on the age scale
- Identification of the potential relationships for snow accumulation rate, trace element records in ice core with climate factors
- Retrieval of correlations between climate factors and indicators of large-scale atmospheric circulation (e.g., SAM, ASL) near Victoria Land
- Reconstruction of large-scale atmospheric circulation using ice core records

IV. R&D Results

- Stable water isotope analysis of firn cores from the Styx region has been completed, and trace element analysis is currently being conducted
- The chronology of approximately 25 years was established using stable water isotopes, major ions, and model results from Styx glacier samples
- Snow accumulation in the Styx region was reconstructed based on ice-core dating, and its relationship with sea-ice variability was identified

- Using snow-pit samples, a correlation between sea-ice extent and stable water isotope values was identified
- The applicability of $\delta^{17}O$ isotopes to glacier research was preliminarily examined.
- Monthly mean stable water isotope values derived from snow-pit samples were found to be correlated with atmospheric temperature
- To compare trace element results with meteorological data, trace element data obtained from firn cores collected in the Styx region are currently being analyzed and organized
- Ice-melting experiments were conducted to interpret melting layers within ice cores
- Trace element analyses were performed on ice-core samples, and correlations with regional climatic factors were analyzed
- Snow accumulation was reconstructed through comparison with reanalysis data, and consistency between reconstructed accumulation and ice-core-derived estimates was verified
- Past temperature variations in the study area were reconstructed using stable water isotope values, and key factors influencing isotopic variability in ice were analyzed
- Chronology for the GV7 ice-core samples was established using stable water isotopes, and the results were cross-validated using electrical conductivity data associated with volcanic eruptions
- Correlation analyses between reanalysis data and ice-core records were conducted over the study period to identify spatial climatic factors influencing ice-core signals
- Stable water isotope analysis, chronological reconstruction, and chemical component analyses were comprehensively conducted on ice-core samples, and their relationships with global-scale climate variability were presented through comparison with reanalysis data

V. Application Plans of R&D Results

- The snow accumulation reconstruction technique based on glacier or firn-core dating is expected to be utilized as a core source technology for future ice-core analyses
- Reconstructed snow accumulation records can be used as reliable proxies for understanding climate change in polar regions
- The integrated analytical approach combining stable isotopes, major ions, trace elements, and reanalysis data overcomes limitations of single-dataset studies and

can be applied to a wide range of Antarctic ice-core samples

- Snow accumulation reconstructed through ice-core dating can serve as a high-confidence climate proxy for interpreting changes in sea ice and atmospheric circulation
- Reconstruction of past atmospheric circulation through snow accumulation records provides essential baseline data for paleoclimate studies in northern Victoria Land, Antarctica
- This study advances domestic polar research beyond ice drilling and sample analysis by integrating atmospheric circulation, sea ice, and climate proxy interpretations, thereby elevating national research capability
- Comparison with reanalysis and global climate datasets enhances the consistency and reliability of the research outcomes, forming a foundation for future international collaborative research
- As climate change in polar regions influences mid- and low-latitude climate and sea-level variations, the outcomes of this study contribute to improving proactive national responses to climate change impacts
- Research on Antarctic glacier change and associated sea-level rise can be utilized to assess and mitigate potential economic and industrial losses, including coastal flooding and damage to ports and coastal infrastructure
- This study aligns with national priorities under the post-Paris Agreement climate regime and Korea's role as an IPCC chair country, contributing to enhanced global scientific leadership and national image
- By scientifically demonstrating the linkage between Antarctic ice-sheet changes and sea-level rise, this research provides a basis for shared international understanding of climate risks and supports leadership in global climate agreements
- Furthermore, the results can be utilized as educational resources from primary education to higher education and professional fields, addressing public interest in Antarctic glaciers and climate change
- Through these efforts, the study contributes to raising societal awareness of the severity of sea-level rise caused by ice-sheet melting and promoting recognition of the importance of multidisciplinary glacier research

목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌



제 1 장 서론

본 과제의 최종목표 및 6년간의 단계별 목표를 정리하면 다음과 같다. 국내외 관련분야와 최종목표와의 관련된 내용은 다음 장에 제시하였다.

□ 최종목표

1단계: 빙하시료를 이용한 남극 빅토리아 주변 강설량 복원 및 과거 기후인자와의 상관성을 통한 과거대기대순환 복원

- 천부빙하코어의 물안정동위원소를 이용한 연대측정
- 연대측정을 통한 빅토리아랜드 강설량 복원
- 강설량, 미량원소와 기후인자간의 상관성 파악
- 이러한 기후인자와 빅토리아랜드 주변의 대기대순환(SAM, ASL)등과의 상관성 확보
- 빙하코어시료를 이용하여 과거 대기대순환 복원

2 단계: 로스해와 아문젠해 천부 빙하시료를 통한 두 지역 강설량 특성 비교

- 로스해 천부빙하시료의 물안정동위원소, 재분석자료, 동위원소 탑재 전지구순환모델을 이용한 강설량복원
- 아문젠 해 스노우핏과 아이스코어를 이용하여 강설량복원 및 대기대순환과의 상관성 파악
- 로스해와 아문젠해와의 대기대순환 비교

□ 연차별 연구목표

연차		연구 목표	연구 내용	비고
1 단계	1차년도 (2020)	빙하코어시료의 안정동위원소분석 및 기후인자와의 상관성 분석	빙하코어시료의 안정동위원소분석 및 미량 원소분석	
			분석된 안정동위원소를 이용하여 빙하의 연 대측정	
			빙하의 연대측정을 통한 강설량 복원	
	2차년도 (2021)	기후인자와 대기대순환과의 상관성분석	복원된 강설량과 기후인자와의 상관성 파악	
			기후인자와 대기대순환과의 상관성 연구	
	3차년도 (2022)	빙하코어시료를 이용한 과거 대기대순환 복원	빙하코어시료와 대기대순환과의 상관성을 설명할 수 있는 프록시개발	
2 단계	1차년도 (2023)	로스해(북빅토리아 지역) 강설량복 원	아이스코어 시료의 미량원소 분석 및 분석 값의 적정성	
			재분석자료 확보 및 아이스코어 시료에서 얻은 강설량과의 비교	
	2차년도 (2024)	빙하시료연대측정 및 대기재분석자료 와의 연결성 제시	빙하시료 물안정동위원소분석을 통한 연대 측정	
			재분석자료를 이용한 강설량 비교	
	3차년도 (2025)	복원 된 로스해 및 아문젠해 강설량 특성	아이스코어 시료 물동위원소분석 및 연대측 정 및 화학성분 분석	
			재분석자료와 아이스코어시료에서 분석된 자료와의 전지구적 상관성 제시	

제 2 장 국내외 기술개발 현황

2.1. 빅토리아랜드 주변 빙하코어시료

극지연구소는 남극 장보고기지를 거점으로 북빅토리아랜드(Northern Victoria Land) 지역에서 장기간에 걸쳐 빙하 및 고기후 연구를 수행해 왔으며, 현재 이 지역에서 총 4개의 천부빙하코어 시료를 확보하고 있다(그림). 확보된 빙하코어 시료는 남극 북빅토리아랜드의 주요 지형 및 기후 환경을 대표하는 지점에서 시추되었으며, 각각 GV7 (2013 - 2014 시즌, 80m), Styx Glacier (2014 - 2015 시즌, 210m), Hercules Névé (2015 - 2016 시즌, 80m), Tourmaline Plateau (2018 - 2019 시즌, 65m)이다. 이러한 빙하코어 시추는 남극 해안 - 내륙 전이대에서의 대기 - 해양 상호작용을 이해하기 위한 핵심 자료 확보를 목적으로 수행되었다.

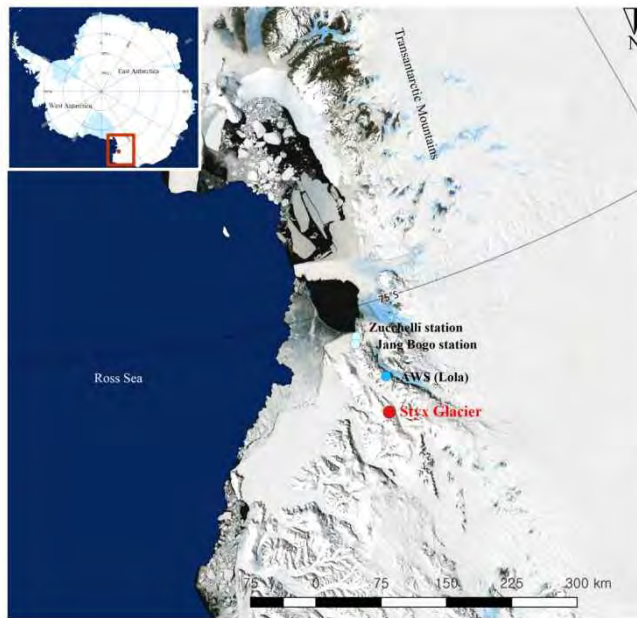
현재까지 GV7 빙하코어는 불안정동위원소 자료를 이용한 연대측정이 완료되어 과거 강설량 변화 및 기후 변동성 연구에 활용되고 있으며, Styx 빙하코어는 연대측정이 진행 중이다. Hercules Névé와 Tourmaline Plateau 지역의 빙하코어는 아직 정밀 연대측정이 수행되지 않았으나, 향후 연대 구축이 이루어질 경우 북빅토리아랜드 전반의 공간적 기후 변동성을 비교·분석할 수 있는 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

북빅토리아랜드 지역은 주로 로스해(Ross Sea)에서 기원한 수증기가 내륙으로 유입되는 경로 상에 위치해 있으며, 이러한 지리적·기상학적 특성으로 인해 해양 조건과 대기대순환 변화가 빙하코어 기록에 비교적 민감하게 반영되는 지역으로 알려져 있다. Stenni et al. (2000)은 이 지역이 상대적으로 높은 적설량을 보이며 눈의 재결정 및 풍식에 의한 교란이 제한적이어서, 빙하코어를 이용한 고기후 복원 연구에 적합한 지역임을 제시한 바 있다.

일반적으로 적설량이 낮은 남극 내륙 고원 지역에서는 빙하의 불안정동위원소 조성이 주로 기온에 의해 지배되며, 이에 따라 기존 연구들은 동위원소 - 온도 관계를 이용한 기온 복원에 초점을 맞추어 수행되어 왔다. 반면, 빅토리아랜드와 같은 해안 인접 지역은 적설량이 상대적으로 높고, 수증기 공급원이 해양에 의해 지배되기 때문에 불안정동위원소 기록이 기온뿐만 아니라 해빙 면적, 해수면 온도, 수증기 이동 경로와 같은 해양·대기 조건의 영향을 복합적으로 반영한다는 특징을 가진다.

특히 로스해의 해빙 면적 변화는 수증기 증발 조건과 이동 과정에 영향을 미치며, 이는 빙하코어에 기록된 불안정동위원소 값의 변동으로 나타날 수 있다. 이러한 특성으로 인해 빅토리아랜드 지역의 빙하코어는 단순한 온도 지시자를 넘어, 해빙 변화 및 대기 - 해양 상호작용을 복원할 수 있는 잠재적인 고기후 프록시로 평가되고 있다. 따라서 적절한 통계적·화학적 자료 처리 기법을 적용할 경우, 빙하코어 시료를 이용하여 과거 해빙 면적 변동 및 해양 환경 변화를 정량적으로 복원하는 연구가 가능할 것으로 기대된다.

이와 같이 북빅토리아랜드 지역에서 확보된 빙하코어 시료는 남극 해안 지역의 기후 시스템을 이해하는 데 중요한 기초 자료를 제공하며, 국내외적으로도 해안 빙하를 이용한 고기후 연구의 기술적·학문적 발전에 기여할 수 있는 연구 기반으로 평가된다.



<그림> 장보고기지 주변 Styx 빙하시료 위치

2.2. 강설량 복원

빙하코어 시료를 이용한 강설량 복원은 남극 고기후 연구에서 핵심적인 분석 기법 중 하나로, 빙하 표면에 기록된 연속적인 강설 기록을 통해 과거의 대기 및 수문 순환 변화를 정량적으로 평가할 수 있는 장점을 가진다. 일반적으로 빙하코어의 연대는 물안정동위원소 분석을 기반으로 추정되며, 특히 물안정동위원소($\delta^{18}\text{O}$, δD)의 계절적 변동성을 이용한 연대측정 기법이 널리 활용되고 있다. 물안정동위원소 값은 계절에 따라 주기적인 변동을 보이며, 이러한 변동은 수학적으로 사인 함수 형태로 표현될 수 있다. 이때 연속적으로 나타나는 최대값 또는 최소값 간의 간격은 1년 주기를 나타내므로, 이를 이용해 빙하코어 시료의 연차 구분이 가능하다.

이와 같이 물안정동위원소의 계절성을 이용해 연대가 확정되면, 각 연차 구간의 두께와 밀도 정보를 결합하여 강설량을 물의 등가 길이(water equivalent)로 환산할 수 있다. 이러한 강설량 복원 방법은 비교적 높은 시간 해상도를 제공하며, 최근 수십 년에서 수백 년 규모의 강설량 변동성을 재구성하는 데 효과적인 접근법으로 평가되고 있다. 특히 해안 인접 지역의 빙하코어는 적설량이 상대적으로 높아 연대 구분이 명확하고, 강설량 복원에 유리한 조건을 갖추고 있다.

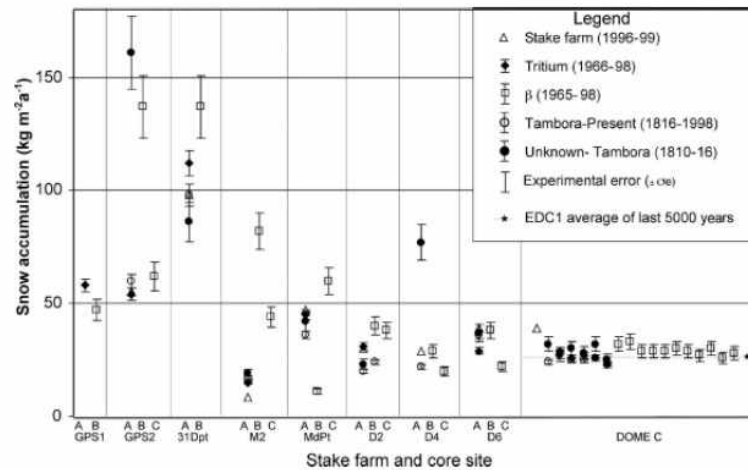
남극에서의 강설량 변동은 단순한 지역적 기후 요소를 넘어, 남극 물순환 전반과 밀접한 연관성을 가지며 전 지구적 해수면 변동과도 직·간접적으로 연결되어 있다. 강설량은 빙상 표면 질량수지(surface mass balance)를 결정하는 주요 요인 중 하나로, 해안 지역에서의 강설량 변화는 남극 빙상의 질량 증가 또는 감소에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 빙하코어를

이용한 강설량 복원 연구는 남극 빙상의 질량 균형(Antarctic mass balance)을 이해하는 데 필수적인 기초 자료를 제공한다.

극지역에서의 강설량은 다양한 요인에 의해 결정된다. 강설 이후 눈의 재분배 과정에서 승화(sublimation)나 강한 바람에 의한 재이동(wind redistribution)이 발생할 수 있으며, 이는 실제 강설량 기록을 왜곡시키는 요인으로 작용할 수 있다. 또한 대기대순환의 변화, 해빙 면적의 변동, 해수면 온도 변화 등은 수증기 공급과 이동 경로에 영향을 미쳐 강설량의 시·공간적 분포를 변화시킬 수 있다. 이러한 복합적인 영향으로 인해 남극 강설량 복원 연구에서는 관측 자료뿐만 아니라 재분석 자료(reanalysis)와 기후 모델 결과를 함께 비교·검토하는 접근이 필요하다. 다음 표와 그림은 지역별로 강설량의 변동을 나타낸 것이다.

<표> 빅토리아랜드 주변의 평균적인 강설량

Locations	Accumulation $\text{kg m}^{-2} \text{ y}^{-1}$	Time period	Reference
Styx-A core	164±71	1951-2014	Nyamgerel et al (submitted)
Styx-A core	124±40	1990-2014	
Styx-B core	146±59	1990-2014	
Hercules Neve, northern Victoria Land	160	1971-1992	Udisti, 1996
Styx Glacier	203 (111-335)	1994-1970	Stenni and others, 2000
Talos Dome	86.6	1965-2007	Stenni and others, 2002
Northern Victoria Land (GPS2)	93±44	-	Frezzotti and others, 2004
Nearest to northern Victoria Land from traverse data (GV5/TDN)	141/83.9	1998-2001	Becagli and others, 2004
Styx Glacier	260	2009-2012	Kwak and others, 2015
Styx Glacier (model result in same core)	130	~1360-2014	Han and others, 2015
GV7, northern Victoria Land	242±71	2008-2013	Caiazzo and others, 2017



<그림> 트래버스를 하면서 측정한 강설량변화

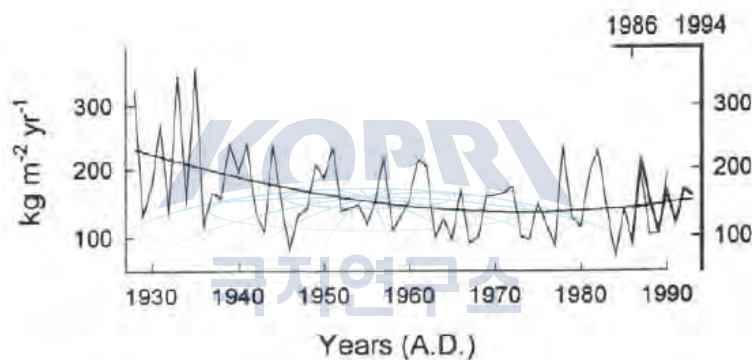


Fig. 4. Record of annual accumulation rate from the firn core (thin line, left and lower axes) and the snow pit (thick line, right and upper axes). The second-order correlation line shows the general variability in the accumulation trend.

<그림> 편코어에서의 강설량의 변동. 강설량 변동에 경향성이 있음

국내에서는 Styx 지역의 천부 빙하코어 및 편 코어(firn core)를 대상으로 불안정동위원소를 이용한 연대측정이 시도되었으며, 이를 기반으로 강설량을 복원한 후 재분석 자료 및 기후 모델 결과와의 비교 분석이 수행되어 왔다(그림). 이러한 연구는 빙하코어 기반 강설량 기록이 관측 및 모델 자료와 어느 정도 일관성을 가지는지를 검증하는 데 중요한 역할을 한다. 국외 연구 사례로 Thomas et al. (2017)은 최근 수십 년간 남극 빙상의 질량 변화 원인을 분석한 결과, 해안 인접 지역에서의 강설량 증가가 빙상 질량 증가의 주요 원인 중 하나임을 제시하였다. 해당 연구에서는 최근 10년간 평균 대비 약 $123 \pm 44 \text{ Gt yr}^{-1}$ 규모의 표면 질량 증가가 관측되었으며, 특히 고도가 낮은 해안 지역에서의 강설량 증가가 두드러진 것으로 보

고되었다. 이는 지역별 강설량 자료, 재분석 자료, 그리고 기후 모델 결과를 종합적으로 비교·분석한 결과로, 해안 지역 강설량 변화의 중요성을 강조한 대표적인 연구 사례로 평가된다. 이와 같이 빙하코어를 이용한 강설량 복원 연구는 남극의 지역적 기후 특성을 이해하는 데 그치지 않고, 빙상 질량 균형과 전 지구 해수면 변화 연구로 확장될 수 있는 중요한 기술적 기반을 제공한다. 특히 북 빅토리아랜드와 같은 해안 인접 지역에서 확보된 빙하코어 자료는 남극 해안 지역 강설량 변동의 장기적 특성을 규명하는 데 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다.

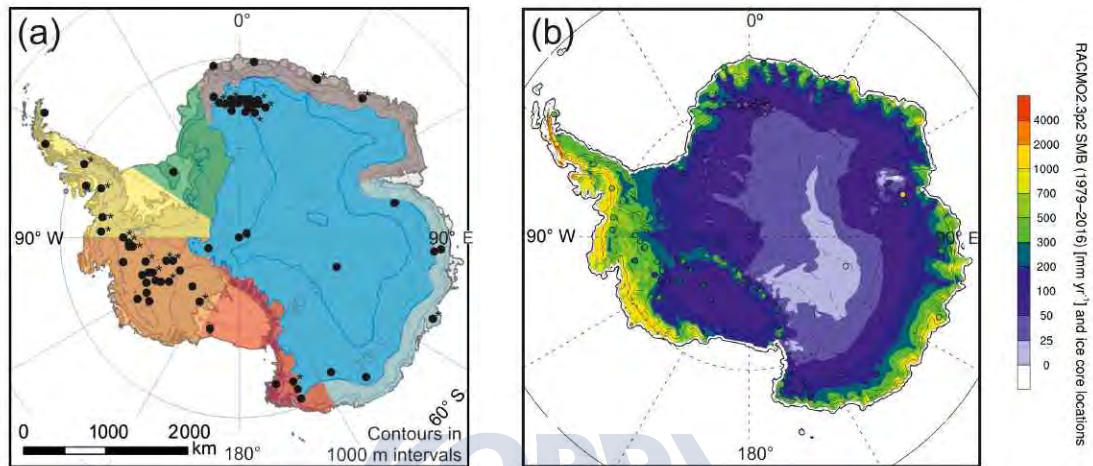
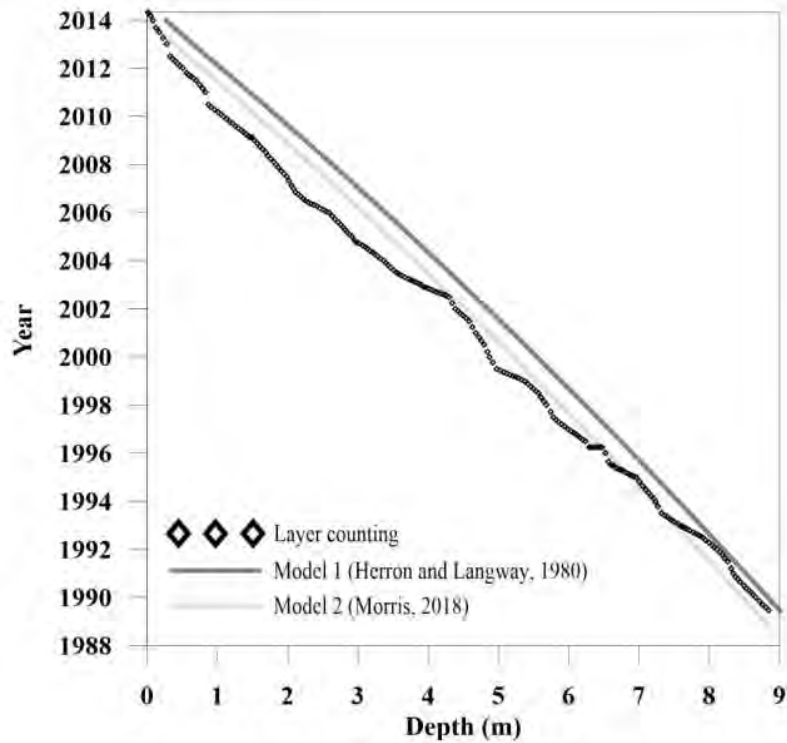


Figure 1. (a) Location of all ice cores and the regional boundaries used in this study: EAP (blue), WL (cyan), WS (green), AP (yellow), WAIS (orange), VL (red), and DML (brown). Stars denote sites where correlation between ice core snow accumulation and RACMO2.3p2 SMB is significant at $p < 0.05$. (b) RACMO2.3p2 SMB (1979–2016) overlain with ice core SMB since 1979 at each location.

<그림> 해안가의 강설량 중요성을 나타내는 연구결과



<그림> 모델과의 비교를 통한 강설량 추정

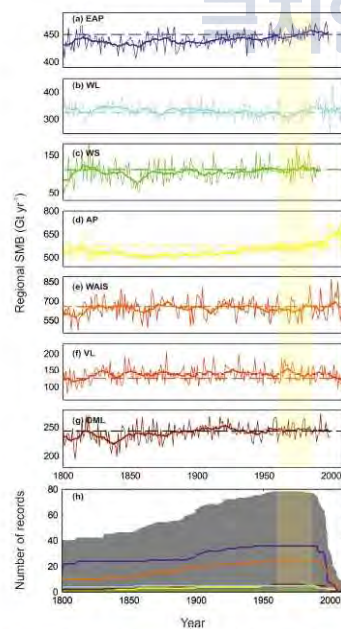


Figure 6. Regional SMB composites (1800-2010 AD) shown as annual averages (thin lines) and 5-year means (thick lines) for (a-g) the East Antarctic Plateau (EAP, dark blue); Wilkes Land coast (WL, cyan), Weddell Sea coast (WS, green), Antarctic Peninsula (AP, yellow), West Antarctic Ice Sheet (WAIS, orange), Victoria Land (VL, red), and Dronning Maud Land (DML, brown). Panel (h) represents the total number of records (solid grey) and the number of records by region.

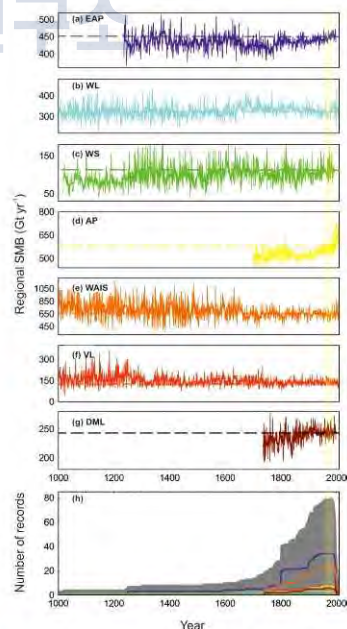


Figure 7. Regional SMB composites (1000-2010 AD) shown as annual averages (thin lines) and 10-year running means (thick lines) for (a-g) the East Antarctic Plateau (EAP, dark blue); Wilkes Land coast (WL, cyan), Weddell Sea coast (WS, green), Antarctic Peninsula (AP, yellow), West Antarctic Ice Sheet (WAIS, orange), Victoria Land (VL, red), and Dronning Maud Land (DML, brown). Panel (h) represents the total number of records (solid grey) and the number of records by region.

<그림> 최근 200년(좌)과 1000년(우)의 국지적인 남극 강설량 비교

2.3. Amundsen Sea Low (ASL)과 남극진동(Southern Annular Mode, SAM)

Amundsen Sea Low(ASL)는 남극 아문젠해 - 벨링스하우젠해 인근에 준영구적으로 형성되는 저기압성 순환 시스템으로, 서남극 및 로스해 주변 기후 변동성을 조절하는 핵심적인 대기 순환 요소로 알려져 있다. ASL의 강도와 위치 변화는 남극 해안 및 인접 내륙 지역에서의 표면 기온, 바람장, 강수량, 그리고 해빙(sea ice) 분포에 광범위한 영향을 미치며, 특히 서남극과 로스해 연안의 기후 변동을 이해하는 데 중요한 역할을 한다.

ASL의 변동성은 남극진동(Southern Annular Mode, SAM)과 밀접하게 연관되어 있다. SAM은 남반구 중위도와 고위도 사이의 기압 차이를 나타내는 지수로, 양의 SAM 상태에서는 편서풍대가 극 방향으로 수축하고 강화되며, 음의 SAM 상태에서는 편서풍대가 적도 방향으로 확장되는 특성을 보인다. 이러한 SAM의 위상 변화는 ASL의 평균 위치와 강도에 영향을 미쳐, 결과적으로 남극 해안 지역의 기후 조건을 변화시킨다.

다수의 선행 연구에 따르면, 1990년대 이후 로스해 주변에서는 해빙 면적의 증가 경향이 보고되어 왔으며, 이는 양의 SAM 상태의 빈도 증가 및 ASL의 공간적 배치 변화와 연관되어 있는 것으로 해석된다. 이러한 조건 하에서 빅토리아랜드를 포함한 로스해 연안 지역에서는 상대적으로 기온이 감소하는 경향이 나타났으며, 이는 해빙 확장에 따른 해양 - 대기 열 교환 감소와 밀접한 관련이 있다. 본 연구에서 활용된 Styx 지역의 강설량 자료에서도 최근 약 20년간 강설량 감소 경향이 관찰되었으며(그림), 이는 로스해 해빙 증가 및 대기대순환 변화와 연관된 결과로 해석될 수 있다.

이와 같은 기후 변동은 해빙 면적 변화와 밀접한 상호작용을 통해 설명될 수 있다. 일반적으로 해빙 면적이 감소할 경우, 노출된 해수면에서의 증발이 증가하여 주변 대기로 공급되는 수증기량이 늘어나며, 이는 인접 지역의 강설량 증가로 이어질 수 있다. 반대로 해빙 면적이 증가하면 해수면 증발이 억제되고 수증기 공급이 제한되어 강설량이 감소하는 경향을 보인다. 따라서 해빙의 공간적 분포와 계절적 변화는 남극 해안 지역 강설량의 주요 조절 요인 중 하나로 작용한다.

이러한 수분 공급 조건과 이동 경로의 변화는 빙하코어 시료에 기록된 물안정동위원소 조성에도 직접적인 영향을 미친다. 수증기의 발생 지역, 이동 거리, 그리고 이동 과정에서의 응결 조건이 달라질 경우 눈의 안정동위원소 값($\delta^{18}\text{O}$, δD , d-excess)은 온도 변화뿐만 아니라 대기대순환 및 해빙 조건의 영향을 함께 반영하게 된다. 따라서 빙하코어를 이용하여 과거 기후를 복원할 때에는 온도 외에도 ASL과 SAM에 따른 대기 순환 변화, 해빙 면적 변동과 같은 요인을 함께 고려하는 것이 필수적이다.

더 나아가 빙하코어 시료에 포함된 화학성분, 특히 해양 기원을 가지는 주요 이온(Na^+ , Cl^-)과 미량원소는 해빙 면적 및 해양 영향의 변화를 추적하는 데 유용한 보조 지표로 활용될 수 있다. 해빙이 확장되거나 축소됨에 따라 해염(aerosol) 생성과 대기 중 수송 양상이 변화하며,

이러한 변화는 빙하코어 화학 기록에 반영된다. 따라서 물안정동위원소 자료와 화학성분 자료를 함께 분석함으로써, 해빙 면적 변화와 대기대순환 변동을 보다 정밀하게 복원할 수 있을 것으로 기대된다(그림).

이와 같이 ASL과 SAM은 남극 해안 지역의 강설량, 해빙, 그리고 빙하코어 프록시 기록을 연결하는 핵심적인 기후 조절 인자로서, 빅토리아랜드를 포함한 로스해 인접 지역에서의 고기후 복원 연구에 중요한 이론적·기술적 배경을 제공한다.

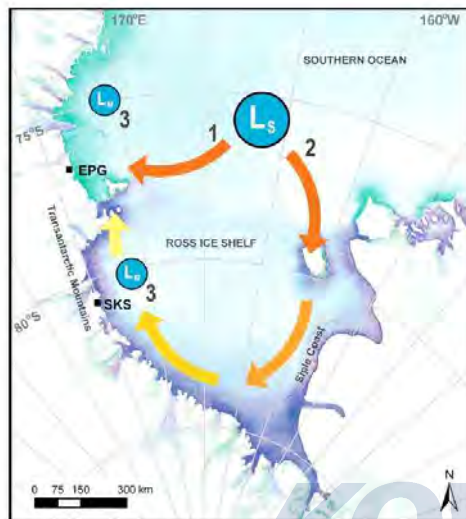
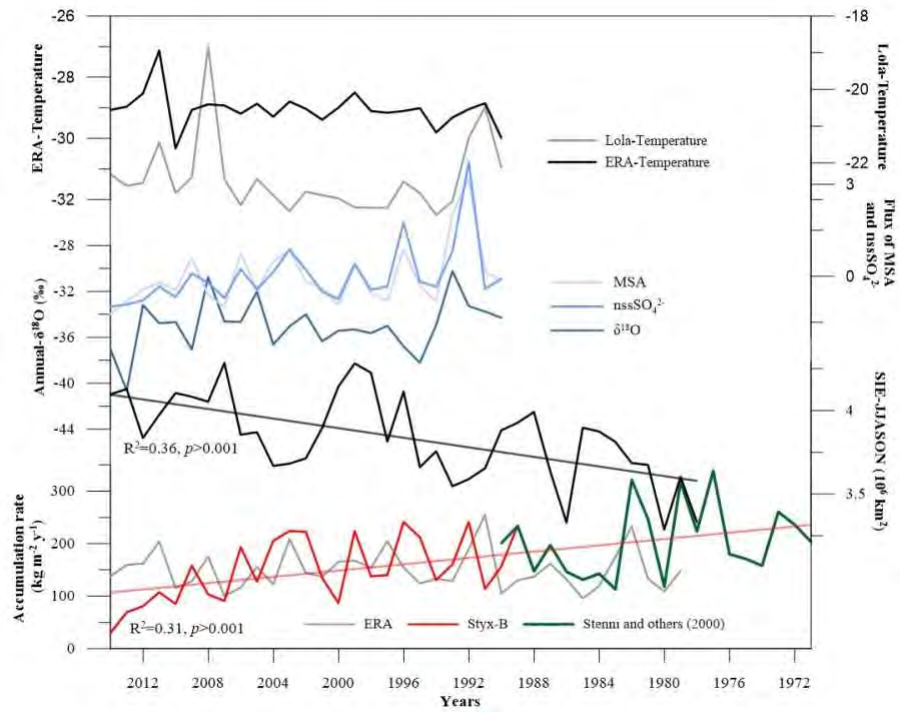


Figure 7. A schematic diagram of three mechanisms of snow delivery to the western margin of the Ross Sea and ice core sites, SKS and EPG: (1) low-pressure systems (L_s) that track around the margin of the continent bringing moist marine air; (2) low-pressure systems that sweep across the Ross Ice Shelf and are constrained by the inland topography, bringing high accumulation to inland sites and less snow at more northern sites; and (3) mesocyclones (L_M) bringing short-duration pulses of snow particularly near the Byrd Glacier and in the Terra Nova Bay region.

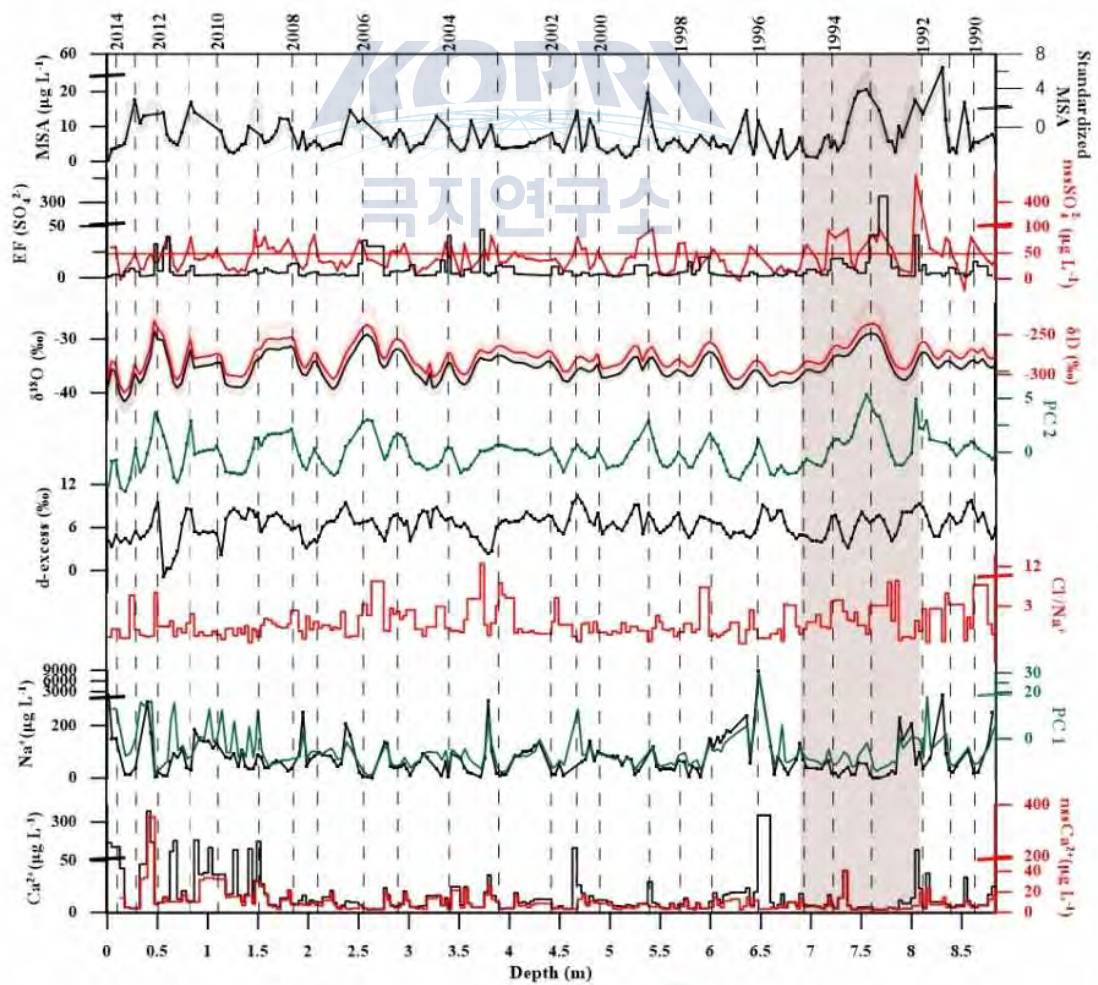


Figure 1. Map of surface wind pattern in Antarctica (modified after King and Turner, 1997). Grey arrows indicate wind flow direction. Triangles represent Transantarctic Mountain range. Top inset: McMurdo Sound region and location of the McMurdo Dry Valleys; Marble Point (MP), Victoria Lower Glacier (VLG), and Lake Vida (LV). Bottom inset: typical position of Amundsen Sea Low (L_{AS}) during La Niña and El Niño events (modified after Cullather *et al.*, 1996). Red arrows indicates relatively warm airmasses (even warmer during El Niño) and blue arrow indicates cold airmasses. The size of ' L_{AS} ' indicates its strength.

<그림> 로스해 주변 강설량 기작 및 표면에서의 바람장에 대한 지도



<그림> Styx 강설량 및 동위원소 결과



<그림> Styx 지역 편코어의 화학성분 변화

2.4. 본 연구과제와의 상관성

극지연구소의 본 연구과제는 “국제심부빙하시추 네트워크를 활용한 대기 - 빙상 상호작용의 자연적·인위적 특성 규명”을 목표로 수행되고 있으며, 국제 네트워크의 일원으로서 남극 내륙 기지 및 심부빙하시추(drilling) 사업에 참여함으로써 극지 빙하 연구에 필요한 시추 및 시료 처리 기술을 단계적으로 습득하는 데 목적을 두고 있다. 이러한 국제 협력 연구를 통해 확보되는 심부빙하코어 자료는 장기적인 기후 변동을 이해하는 데 핵심적인 역할을 하지만, 심부빙하코어의 해석에는 지역적 기후 특성과 대기 - 해양 상호작용에 대한 충분한 이해가 선행되어야 한다.

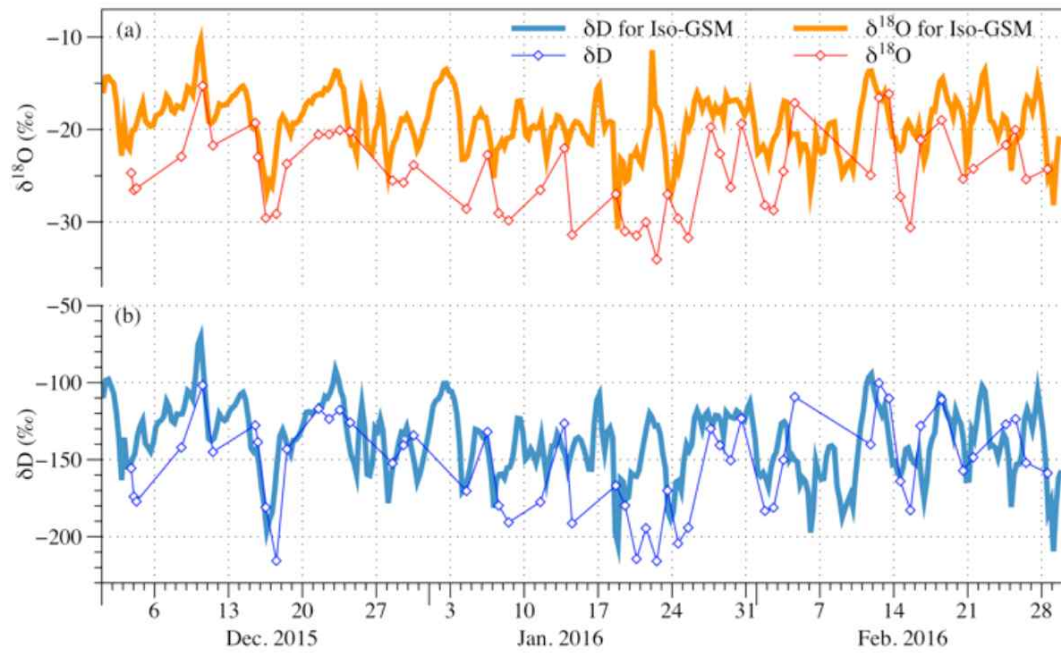
이러한 맥락에서 본 과제는 심부빙하시추 연구와 병행하여, 비교적 접근이 용이한 천부빙하코어를 이용한 고해상도 기후 복원을 수행함으로써 심부빙하코어 해석을 보완할 수 있는 기초 자료를 구축하는 것을 중요한 목표로 설정하고 있다. 특히 빅토리아랜드 주변에서 확보된 천부빙하코어 시료는 해안 인접 지역의 기후 특성을 반영하고 있어, 대기대순환 변화와 해양 조건이 빙하 기록에 어떻게 반영되는지를 분석하는 데 적합한 자료로 평가된다.

본 연구에서는 빅토리아랜드 지역에서 확보한 천부빙하코어 시료를 이용하여 자연적인 기상 변동과 강설량 간의 상관성을 분석하고, 이를 통해 강설량을 과거 기후 변화를 지시하는 하나의 프록시(proxy)로 활용할 수 있는 가능성을 검토하고자 하였다. 앞서 언급한 바와 같이, 해안 남극 지역에서는 대기대순환 변화에 의해 해빙 면적이 조절되며, 이러한 해빙 변화는 수증기 발생 조건과 이동 경로를 변화시켜 눈의 불안정동위원소 구성에 영향을 미친다. 따라서 빙하코어에 기록된 동위원소 신호는 단순한 온도 변화뿐만 아니라, 대기대순환 및 해빙 조건 변동을 함께 반영하는 복합적인 기후 지표로 해석될 수 있다.

이와 더불어, 빙하코어 시료에 포함된 화학성분(미량원소 및 주요 이온)은 해양 기원, 대륙 기원, 그리고 장거리 수송 기작을 구분하는 데 유용한 정보를 제공한다. 본 과제에서는 이러한 동위원소 및 화학성분 자료를 주성분 분석(principal component analysis, PCA)과 같은 다변량 통계 기법을 적용하여, 빙하코어 화학 구성에 가장 큰 영향을 미치는 요인을 선별하고, 각 요인의 기여도를 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해 빙하코어 기록에 반영된 기후 신호를 보다 체계적으로 분리·해석할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

나아가, 본 연구에서 산출된 빙하코어 동위원소 자료는 동위원소가 포함된 대기대순환모델인 Iso-GSM 모델 결과와의 비교 분석에 활용될 예정이다(그림). 관측 기반의 빙하코어 동위원소 기록과 모델 시뮬레이션 결과를 비교함으로써, 동위원소 모델이 남극 해안 지역의 수증기 수송과 강설 과정을 얼마나 잘 재현하는지를 평가할 수 있으며, 향후 동위원소 모델을 활용한 고기후 복원 연구의 적용 가능성을 타진할 수 있을 것으로 판단된다.

이와 같이 본 과제는 국제 심부빙하시추 연구와 연계된 천부빙하코어 분석을 통해, 남극 해안 지역의 대기 - 해양 - 빙상 상호작용을 이해하기 위한 기초 자료를 제공하고, 장기적인 심부빙하코어 해석 및 동위원소 기반 기후 모델링 연구로 확장될 수 있는 기술적·학문적 기반을 구축하는 데 기여하고자 한다.



<그림> Iso-GSM과 직접 포획한 수증기동위원소와의 비교 연구



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

앞 장에서 제시한 연구목표를 달성하기 위하여 다음과 같이 연구를 수행하였다.

성과목 표	세부목표	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
빙하코어시 료의 안정 동위원소분 석 및 기후 인자와의 상관성 분 석	빙하코어시료의 안정동위 원소분석 및 미량원소분석	- 스틱스지역의 편(firn) 코어의 불안정동위원 소분석을 완료하였으며, 현재 미량원소분석을 수행하고 있음	아래 내용 참조
	분석된 안정동위원소를 이 용하여 빙하의 연대측정	- 스틱스빙하시료의 안정동위원소 및 주요이 온, 모델결과를 활용하여 25년의 연대를 추정 하였음	
	빙하의 연대측정을 통한 강설량 복원	- 빙하의 연대측정을 통한 스틱스지역의 강설 량을 추정하여 해빙과의 상관관계를 밝혔음	
기후인자와 대기대순환 과의 상관 성분석	복원된 강설량과 기후인자 와의 상관성 파악	- 스노우핏 시료를 이용하여 해빙의 면적과 안정동위원소 값에 상관성이 있음을 밝혔음 - ¹⁷ O의 빙하연구 가능성에 대하여 타진하였 음	
	기후인자와 대기대순환과 의 상관성 연구	- 스노우핏을 이용하여 월평균안정동위원소 값이 대기온도와 상관관계가 있음을 밝혔음	
빙하코어시 료를 이용 한 과거 대 기대순환 복원	빙하코어시료와 대기대순 환과의 상관성을 설명할 수 있는 프록시개발	- 빙하코어의 미량원소분석 결과를 향후 기상 자료와 비교하기 위하여 스틱스지역에서 가져 온 편코어의 미량원소 분석결과 분석 및 정리. - 빙하코어의 melting layer 해석하기 위해 얼 음 용해 실험 수행하였음.	
	빙하코어시료로부터 과거 대기대순환 복원	- 자료 분석 및 정리	
로스해(북 빅토리아지 역) 강설량 복원	아이스코어 시료의 미량원 소 분석 및 분석값의 적정 성	- 아이스코어 시료의 미량원소분석 - 미량원소분석을 통한 기후인자와의 상관성 파악	
	재분석자료 확보 및 아이 스코어 시료에서 얻은 강 설량과의 비교	- 재분석 자료와의 비교를 통한 연구지역 강 설량 복원 - 불안정동위원소값을 이용한 연구지역 온도 복원 - 얼음의 안정동위원소에 미치는 인자 파악	
빙하시료 연 대측정 및 대기재분석 자료와의 연 결성 제시	빙하시료 불안정동위원소 분석을 통한 연대측정	- 불안정동위원소를 이용하여 빙하시료 연대 측정(GV7) - 추정된 빙하시료의 연대를 화산분출에 의한 전기전도도 자료를 이용하여 상호 검증	
	재분석자료를 이용한 강설 량 비교	- 재분석자료와 빙하시료를 이용하여 복원된 강설량과의 비교	
		- 연구기간동안 재분석자료와 빙하시료와의 상관성 분석	
		- 상관성분석을 통한 빙하시료에 영향을 줄	

		수 있는 공간적인 인자 파악	
복원된 로스해 및 아문젠해 강설량 특성	아문젠 해 아이스코어 미량원소 분석 및 대기대순환 차이분석	- 아이스코어 시료 물동위원소분석 및 연대측정 및 화학성분 분석	
	아이스코어 시료를 이용한 과거 대기대순환 복원	- 재분석자료와 아이스코어시료에서 분석된 자료와의 전지구적 상관성 제시	

3.1. 남극 북빅토리아 스틱스 빙하의 연대추정을 통한 강설량 계산

빙하시료의 연대측정은 빙하코어에 기록된 물리·화학적 신호를 시간 축에 정확히 배열함으로써, 과거 기후 및 환경 변화를 정량적으로 복원하기 위한 핵심적인 기초 과정이다. 특히 남극 해안 인접 지역에서는 강설량과 표면 질량수지(surface mass balance)의 공간적·시간적 변동성이 크기 때문에, 신뢰도 높은 연대 구축을 기반으로 한 강설량 추정 연구가 필수적이다. Styx 빙하는 로스해와 인접한 북빅토리아랜드 지역에 위치한 해안성 빙하로, 상대적으로 높은 강설량과 명확한 연간 층 구조를 보이는 특성을 지녀 천부빙하코어 기반 연대 및 강설량 연구에 적합한 지점으로 평가되어 왔다.

본 연구에서는 2014 - 2015년 남극 하계 기간 동안 Styx 빙하(73°50.975' S, 163°41.640' E, 해발 1623m)에서 채취한 총길이 8.84 m의 펄코어(firn core)를 이용하여 연대추정을 수행하고, 이를 바탕으로 1990년부터 2014년까지 약 25년간의 연간 강설량 변동을 복원하였다. 해당 지역은 로스해를 주요 수증기 공급원으로 하며, 해양 - 대기 상호작용의 영향을 민감하게 반영하는 남극 연안 전이 지역으로, 이후 심부 빙하코어(Styx-M) 해석을 위한 기준 연대 확립이라는 측면에서도 중요한 의미를 갖는다.

연대추정은 불안정동위원소($\delta^{18}\text{O}$, δD)와 화학성분의 계절적 변동성을 활용한 연층 계수(annual layer counting)를 기본으로 수행하였다. 구체적으로 $\delta^{18}\text{O}$ 의 여름철 최대값을 기준으로 연간 경계를 설정하였으며, 해양 생물 기원 지표로 활용되는 메탄설폰산(MSA)과 비해염 황산염(nssSO_4^{2-})의 계절적 피크를 보조 지표로 사용하여 연층 식별의 신뢰도를 높였다. 또한 1991년 발생한 Pinatubo 화산 및 Cerro Hudson 화산 분출에 기인한 황산염 피크를 기준층(reference horizon)으로 활용하여 연대 결과를 교차 검증하였다. 이러한 다중 지표 접근법을 통해 연구 기간 동안 연속적인 연간층 구조를 안정적으로 확인할 수 있었다.

연대가 확정된 이후에는 각 연간 층의 밀도 자료를 적용하여 수당량(water equivalent) 기준의 연간 강설량을 산출하였다. 분석 결과, Styx 지역의 평균 강설량은 $146 \pm 60 \text{ kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 추정되었으며, 연구 기간 동안 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 이러한 값은 기존에 보고된 로스해 연안 및 북빅토리아랜드 지역의 강설량 범위와 잘 일치하며, 펄코어 밀도 모델(Herron - Langway 모델 등)을 이용한 계산 결과와도 비교·검증되었다.

더 나아가 연간 평균 $\delta^{18}\text{O}$, MSA 및 nssSO_4^{2-} 의 연간 플럭스 변화를 로스해 해빙 면적 (sea ice extent, SIE)과 비교한 결과, 동절기(JJASON) 해빙 면적이 증가할수록 강설량과 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 감소하는 유의미한 상관성이 확인되었다. 이는 해빙 확장 시 해양 수증기 공급이 제한되고, 이에 따라 강설량 감소 및 동위원소 고갈 현상이 나타나는 메커니즘을 반영하는 것으로 해석된다. 이러한 결과는 Styx 빙하가 단순한 국지 기온 신호뿐 아니라, 해빙 변화와 해양-대기 상호작용을 효과적으로 기록하는 기후 아카이브임을 시사한다.

종합적으로 본 연구는 Styx 빙하 천부빙하시료를 이용한 정밀 연대 구축과 강설량 복원을 통해, 로스해 인접 남극 해안 지역에서 강설량을 기후 프록시로 활용할 수 있는 가능성을 제시하였다. 또한 본 연구에서 확립된 연대 프레임은 향후 Styx-M 심부 빙하코어를 이용한 장기 기후 복원 연구의 핵심적인 기준 자료로 활용될 수 있으며, 남극 빙상 질량수지 변화 및 해양 환경 변동 연구에도 중요한 기초 자료를 제공할 것으로 기대된다.

Table 3.1.1. Summary of statistics of water stable isotopes in ‰ ($n = 227$) and chemical species in $\mu\text{g L}^{-1}$ ($n = 197$) in the firm core.

	Min	Max	Range	Mean	Median	Std. error	Std. deviation	Mean nss %
$\delta^{18}\text{O}$	- 43.13	- 26.70	16.43	- 34.92	- 34.85	0.21	3.13	-
δD	- 340.63	- 205.17	135.46	- 273.11	- 272.99	1.68	25.32	-
MSA	1.34	53.71	52.37	8.12	5.25	0.51	7.17	-
Cl^{-}	6.58	16394.61	16388.03	339.42	151.98	88.34	1239.98	25.1
SO_4^{2-}	13.38	2506.58	2493.20	91.63	65.80	13.43	188.53	65.5
Na^{+}	1.20	8802.32	8801.12	171.07	64.45	47.81	671.04	(a)-
K^{+}	0.43	373.13	372.70	7.38	2.61	2.04	28.60	19.2
Mg^{2+}	1.07	1042.42	1041.35	20.86	10.01	5.53	77.67	19.1
Ca^{2+}	2.73	362.57	359.83	26.97	9.91	3.64	51.08	74.0

(a) assumed to be solely sourced from sea spray

Table 3.1.2. Loadings of 11 variables for first three principal components (PC) in the firn core with larger values highlighted in bold.

	PC 1	PC 2	PC 3
$\delta^{18}\text{O}$	- 0.12	0.92	- 0.24
δD	- 0.12	0.93	- 0.17
d-excess	- 0.03	0.33	0.92
MSA	0.15	0.60	0.09
Cl^-	0.99	- 0.01	0.02
ssSO_4^{2-}	0.99	- 0.01	0.02
nssSO_4^{2-}	0.33	0.60	0.01
Na^+	0.99	- 0.01	0.02
K^+	0.99	- 0.02	- 0.01
Mg^{2+}	0.99	0.00	0.02
Ca^{2+}	0.62	- 0.03	- 0.19
Variance explained (%)	49.52	23.14	8.86
Cumulative percent (%)	49.52	72.66	81.52
Number of variables	197	197	197



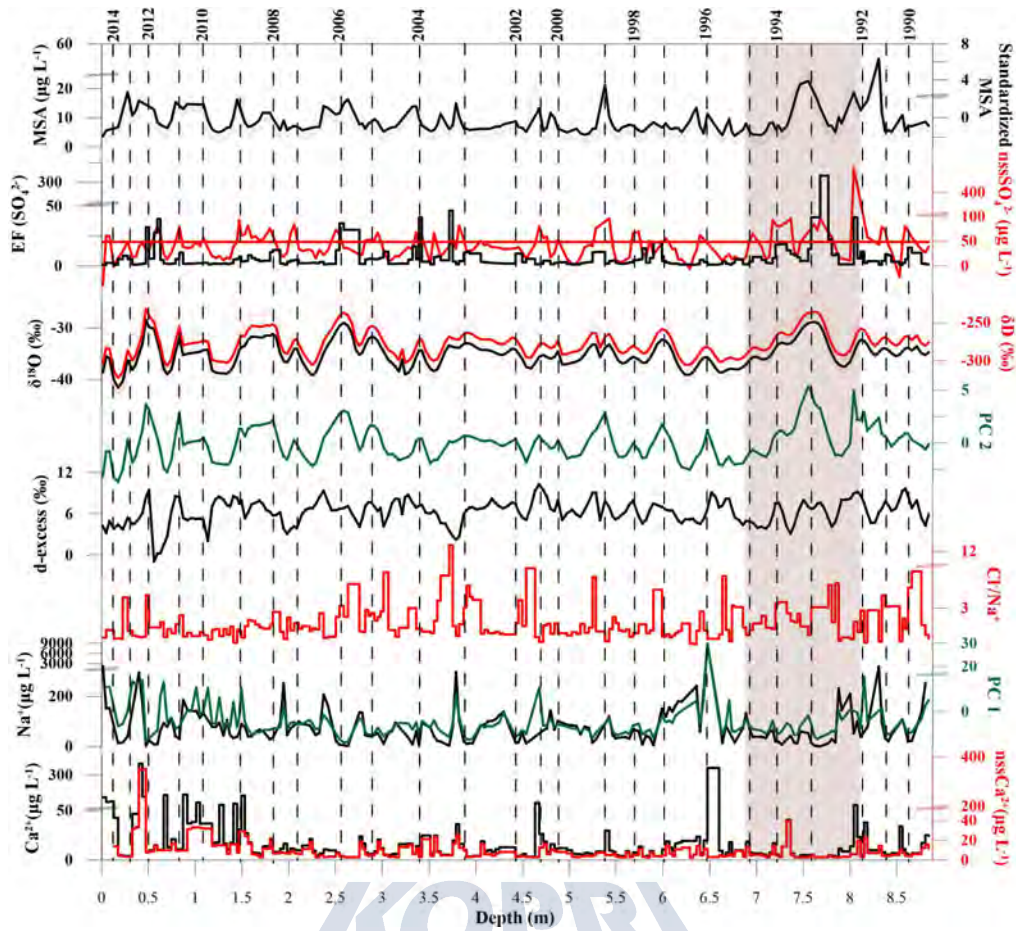


Fig 3.1.1. Annual layer counting of the isotopic and ionic species with PC 1 and PC 2 score, starting from the year of drilling (2014). The Cl^- , Mg^{2+} , K^+ are not shown in the figure because those are similar to Na^+ ($r > 0.99$), but the ratio of Cl^-/Na^+ shown. Non-sea-salt portions are indicated for Ca^{2+} . The raw values (wide line) of $\delta^{18}\text{O}$, δD , and MSA shown with standardized profile in thin line. Enrichment factor (EF) of nssSO_4^{2-} was shown in black line and horizontal red line indicate the average nssSO_4^{2-} . Brown shading represent depth range to increased nssSO_4^{2-} which indicate the period of Pinatubo and Cerro Hudson volcanic signals.

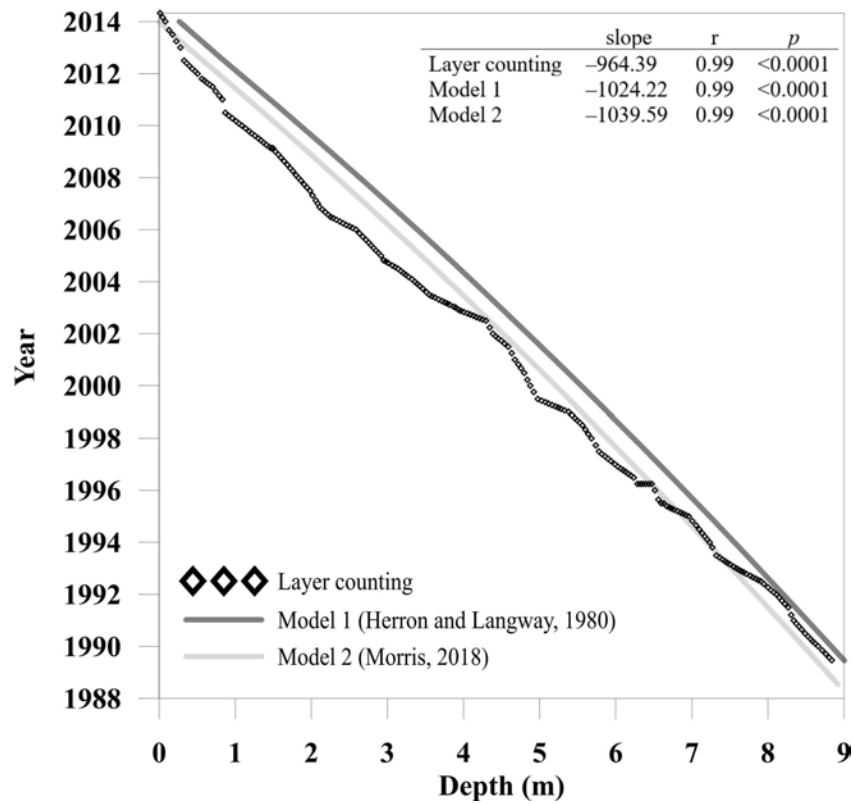


Fig 3.1.2. The comparison of the depth-age relationship of the annual layer counting and the firn densification models.

Table 3.1.3. Mean accumulation rates estimated near to the Styx glacier for comparison to the firn core

Locations	Accumulation rate, $\text{kg m}^{-2} \text{y}^{-1}$	Time period	Reference
Styx Glacier	146 ± 60	1990 - 2014	This study
ERA-Interim	154 ± 37	1990 - 2014	Dee and others, 2011
ERA-Interim	150 ± 36	1979 - 2014	
Hercules Neve	160	1971 - 1992	Udisti, 1996
Styx Glacier	203 (111-335)	1971-1990	Stenni and others, 2000
Talos Dome	86.6	1965 - 2007	Stenni and others, 2002
Styx Glacier	226	2009 - 2012	Kwak and others, 2015
Styx-M (densification model for Styx-M-core)	130	~1360 - 2014	Han and others, 2015
GV7	242 ± 71	2008 - 2013	Caiazzo and others, 2017

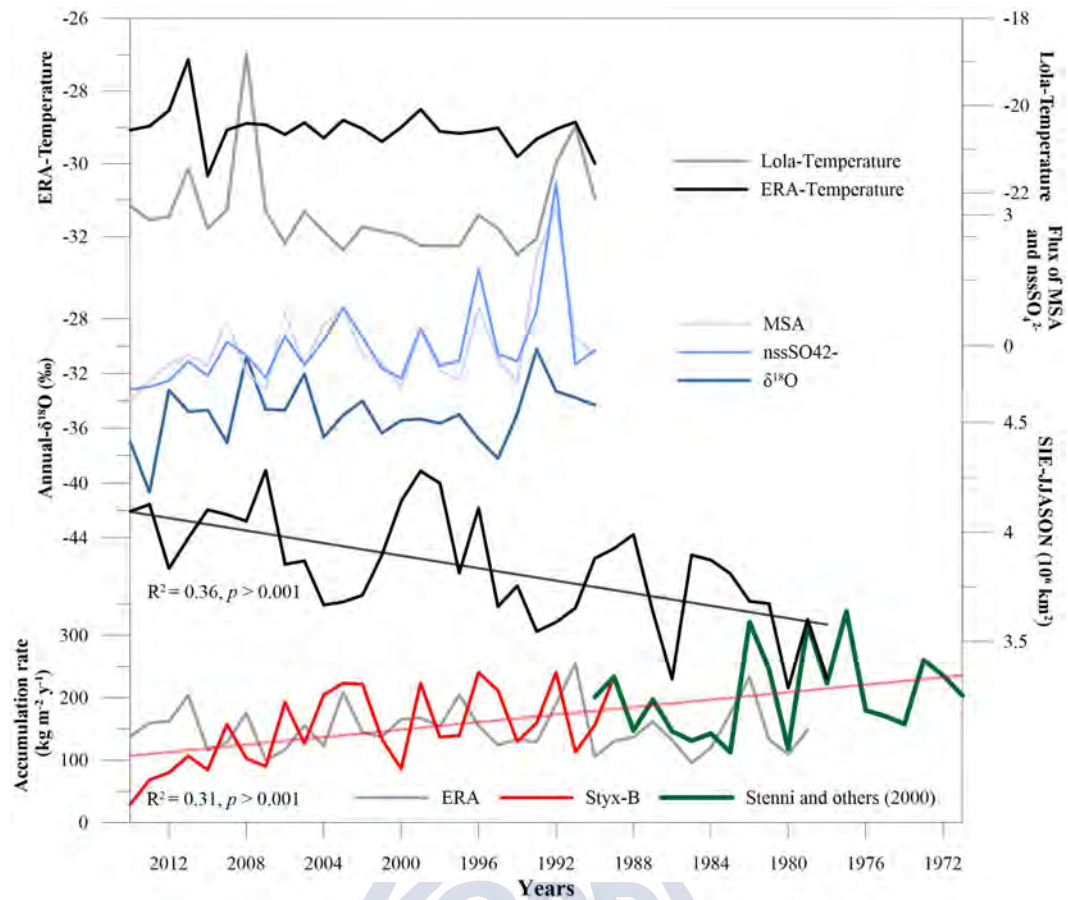


Fig 3.1.3. Comparison of annual accumulation rate (Styx-B firn core, ERA-interim, Stenni and others, 2000), annual mean $\delta^{18}\text{O}$, standardized annual flux of MSA and nssSO_4^{2-} , SIE during cold period (JJASON) and temperature record from Lola AWS and ERA-Interim reanalysis data. The linear trendlines shown for annual accumulation rate (Styx-B firn core for the period of 1990–2014 together with Stenni and others (2000) up to 1971 from 1990) and trend of SIE between 1979 and 2014)

위의 내용은 다음의 논문으로 출판되었다.



3.2. 남극 해안가 주변의 스노우핏의 기상학적인 특성

극지방의 스노우핏과 빙하코어는 강수 과정에서 대기 중에 존재하던 물질과 기후 신호가 비교적 직접적으로 반영되기 때문에, 과거 기후 및 환경 변화를 복원하는 데 중요한 자료로 활용된다. 특히 스노우핏은 최근 수년에서 수십 년 규모의 고해상도 기후 정보를 보존하고 있어, 장기 빙하코어 자료를 해석하기 위한 기준 자료(reference record)로서 중요한 역할을 한다. 그러나 남극 지역은 강설량과 기온의 시·공간적 변동성이 매우 크고, 자동기상관측소(AWS)의 공간적 분포 또한 제한적이기 때문에, 관측 자료만을 이용하여 과거 기후 기록을 해석하는 데에는 본질적인 한계가 존재한다. 이러한 제약으로 인해, 남극 빙하 기록에 포함된 기후 신호를 정확히 이해하기 위해서는 현장 기반의 고해상도 관측 자료와 화학·동위원소 조성에 대한 체계적인 분석이 필수적이다.

최근 연구에서는 공간적인 차이보다 동일 지점에서의 시간적 변동성이 실제 환경 변화를 보다 직접적으로 반영한다는 점이 강조되고 있다. Caiazzo et al. (2016)은 특정 지역 내에서 관측되는 시간적 변화가 기후 변동의 핵심 신호를 포함하고 있음을 지적하였으며, 이에 따라 개별 지점(site-based)에서 수행되는 고해상도 분석의 중요성이 부각되고 있다. 이러한 연구 배경 하에서, 본 연구는 동남극 빅토리아랜드 해안에 위치한 스틱스(Styx) 빙하에서 채취한 스노우핏 시료를 이용하여, 현재 기후 조건이 눈에 어떻게 기록되는지를 규명하고, 이를 향후 빙하코어 해

석에 적용하기 위한 기초 자료를 구축하는 것을 목표로 하였다.

본 연구에 사용된 스노우핏 시료는 2014 - 2015년 남극 하계 탐사 기간 동안 극지연구소(KOPRI)에 의해 채취되었으며, 총 깊이는 1.57 m로 약 2011년부터 2015년까지 4년간의 강설 기록을 포함하고 있다. 해당 시료에 대해 물안정동위원소($\delta^{18}\text{O}$, δD)와 주요 이온 성분(Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , MSA, Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})을 고해상도로 분석하였으며, 이를 계절 단위로 기상 관측 자료(AWS 기온), 재분석 자료, 해빙 면적 자료와 비교 분석하였다. 이러한 다각적인 비교를 통해, 스노우핏에 기록된 화학 및 동위원소 조성이 어떤 기후 요인에 의해 조절되는지를 종합적으로 평가하고자 하였다.

분석 결과, $\delta^{18}\text{O}$ 와 δD , 메탄설폰산(MSA), 비해염 황산염(nssSO_4^{2-}), 질산염(NO_3^-)은 뚜렷한 계절성을 보이며 주로 봄에서 여름철에 최대값을 나타냈다. 이러한 계절적 증가는 고온기 동안 해양으로부터의 수증기 공급이 증가하고, 해양 생물 기원 에어로졸의 생성과 수송이 강화되기 때문으로 해석된다. 이는 해당 성분들이 해양 - 대기 상호작용에 민감하게 반응하며, 상대적으로 따뜻한 계절의 환경 조건을 잘 반영하고 있음을 시사한다.

반면, Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- 등 해염 기원 이온은 일정한 계절성을 보이지 않고, 간헐적인 고농도 사건(event-based deposition)이 두드러지게 나타났다. 이러한 특성은 해염 에어로졸의 침적이 단순한 계절 주기보다는 겨울철 폭풍, 강한 바람장, 해빙 형성과 같은 단기적인 기상 사건에 의해 크게 좌우됨을 의미한다. 이온 조성 분석과 해수 조성비와의 비교 결과, Styx 지역 스노우핏에서는 연구 지점이 해안에 인접해 있다는 지리적 특성으로 인해 해염 에어로졸의 기여도가 지배적인 것으로 확인되었다. 특히 Na^+ 를 기준으로 한 다른 이온들과의 선형 회귀 관계는 해수 조성비와 매우 유사하여, 해염 기원이 주요한 공급원임을 명확히 뒷받침한다. 다만 Ca^{2+} 및 비해염 황산염의 경우에는 일정 수준의 비해염 성분이 확인되어, 대륙 기원 먼지나 장거리 수송의 영향 또한 일부 반영된 것으로 판단된다.

물안정동위원소와 기상 자료의 비교 결과, 월평균 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 주요 풍향 방향에 위치한 자동기상 관측소(AWS)에서 관측된 기온과 유의한 양의 상관관계를 보였다. 이는 Styx 지역 스노우핏 기록이 지역 기온 변동을 비교적 충실하게 반영하고 있음을 의미하며, 동시에 수증기 수송 경로와 대기 순환의 영향을 함께 포함하고 있음을 시사한다. 또한 연구 기간 동안 관측된 동위원소 조성의 미세한 감소와 강설량의 감소 경향은, 로스해 주변의 개수면 면적 감소, 즉 해빙 면적 증가와 연관되었을 가능성이 제시되었다. 이는 해빙 확장이 해양으로부터의 수증기 공급을 제한함으로써, 강설량과 동위원소 조성에 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

종합적으로 본 연구는 Styx 지역 스노우핏이 비교적 잘 보존된 계절 신호와 기후·환경 정보를 포함하고 있음을 확인하였으며, 해안 남극 지역에서 해빙 면적 변화, 해양 - 대기 상호작용, 대

기대순환 변동이 눈의 화학적·동위원소적 구성에 어떻게 기록되는지를 이해하는 데 중요한 자료를 제공한다. 이러한 스노우핏 기록은 향후 동일 지역에서 확보된 장기 빙하코어 자료를 해석하는 데 있어 신뢰할 수 있는 비교 기준으로 활용될 수 있으며, 남극 해안 지역의 고기후 복원 연구 및 후속 대기대순환 연구의 기초 자료로 기여할 것으로 판단된다. 본 연구 결과는 2021년 Earth Interactions에 게재되었다.



Table 3.2.1 Statistics of the isotopes and ions from different studies in northern Victoria Land

		Stenni et al. 2000	Gragnani et al. 1998	This study	Nyamgerel et al. 2020	Stenni et al. 2000	Stenni et al. 2000	Severi et al. 2009
Time period		1980 - 1987	1986 - 1994	2010-2014	1990 - 2014	1971 - 1990	1973 - 1992	
Type of record		Firn core	Firn core	Snowpit	Firn core	Firn core	Firn core	Ice core
Accumulation rate, kg m ⁻² y ⁻¹		130 - 426	140 - 180	143.71	146	111 - 335	83 - 265	77.4
Altitude, m a.s.l		650	1560	1630	1630	1800	3000	2316
Distance from coast, km		40	~70	~60	~60	50	75	250
Location		McCarthy Ridge	Campbell Glacier C	Styx Glacier	Styx Glacier	Styx Glacier	Hercules Neve	Talos Dome
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Mean	-25.5	-33.5	-36.16	-34.92	-32.9	-33.6	-
	SD	4.4		5.02	3.13	3.2	2.4	-
	Max	-17.1	-27.2	-24.90	-26.70	-23.7	-27.0	-
	Min	-37	-40.8	-43.91	-43.13	-39.2	-42.0	-
MSA (µg/l)	Mean	26.7	16.17	14.12	8.12	13.6	94	5.36
	SD	24.4	12.36	15.78	7.17	10.1	6.9	6.61
	Max	143.0	71.32	66.08	53.71	57.3	118.3	40.49
	Min	2.0	3.80	2.03	1.34	2.5	12.7	0.42
nssSO ₄ ²⁻ (µg/l)	Mean	131.6	62.44	44.36	49.87	57.5	46.2	42
	SD	92.8	76.85	37.82	49.22	36.0	27.8	27.47
	Max	405.9	408.27	163.28	523.03	270.4	178.6	100.2
	Min	5.2	273.78	5.00	4.10	1.7	0.8	6.59
Na ⁺ (µg/l)	Mean	-	485.07	59.23	171.07	-	-	21.79
	SD	-	625.30	1480.14	671.04	-	-	16.14
	Max	-	4620.79	6706.94	8802.32	-	-	84.87
	Min	-	20.69	1.16	1.20	-	-	2.52
Ca ²⁺ (µg/l)	Mean	-	82.16	24.56	26.97	-	-	2.80
	SD	-	54.11	52.04	51.08	-	-	1.88
	Max	-	402.78	236.13	362.57	-	-	20.71
	Min	-	18.04	2.77	2.73	-	-	0.76
K ⁺ (µg/l)	Mean	-	144.66	20.47	7.38	-	-	-
	SD	-	191.58	57.15	28.60	-	-	-
	Max	-	1266.78	275.63	373.13	-	-	-
	Min	-	19.55	0.84	0.43	-	-	-
Mg ²⁺ (µg/l)	Mean	-	44.96	61.58	20.86	-	-	2.31
	SD	-	60.76	165.31	77.67	-	-	1.63
	Max	-	466.66	768.47	1042.42	-	-	10.56
	Min	-	8.51	1.49	1.07	-	-	0.36
Cl ⁻ (µg/l)	Mean	-	808.33	1018.27	339.42	-	-	46.73
	SD	-	1052.95	2672.45	1239.98	-	-	30.72
	Max	-	6877.88	12205.73	16394.61	-	-	184.1
	Min	-	88.63	7.30	6.58	-	-	6.54
SO ₄ ²⁻ (µg/l)	Mean	-	182.52	178.20	91.63	-	-	47.52
	SD	-	158.50	373.67	188.53	-	-	27.47
	Max	-	979.84	1732.80	2506.58	-	-	139.6
	Min	-	43.23	14.08	13.38	-	-	12.42

NO ₃ ⁻ (μg/l)	Mean	-	60.14	49.28	42.46	-	-	47.38
	SD	-	26.04	24.42	19.15	-	-	13.49
	Max	-	189.73	130.7	118.91	-	-	100.2
	Min	-	12.40	12.68	10.09	-	-	21.59



Table 3.2.2. Correlation matrix for the isotopic and ionic species in the snowpit. The correlation coefficient values larger than 0.4 were highlighted in bold ($n = 32$)

	$\delta^{18}\text{O}$	δD	d-excess	MSA	Cl^-	nss SO_4^{2-}	SO_4^{2-}	NO_3^-	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
$\delta^{18}\text{O}$	1.00											
δD	1.00	1.00										
d-excess	-0.19	-0.11	1.00									
MSA	0.41	0.45	0.35	1.00								
Cl^-	0.11	0.12	0.02	-0.15	1.00							
nss SO_4^{2-}	0.56	0.57	0.02	0.63	0.05	1.00						
tot SO_4^{2-}	0.17	0.18	0.02	-0.08	0.99	0.15	1.00					
NO_3^-	0.31	0.28	-0.43	-0.02	0.03	0.42	0.07	1.00				
Na^+	0.12	0.12	0.02	-0.14	1.00	0.04	0.99	0.03	1.00			
K^+	0.35	0.12	0.02	-0.14	1.00	0.05	1.00	0.03	1.00	1.00		
Mg^{2+}	0.11	0.12	0.03	-0.14	1.00	0.06	1.00	0.02	1.00	1.00	1.00	
Ca^{2+}	0.14	0.15	0.00	-0.14	0.99	0.11	0.99	0.07	0.99	0.99	0.99	1.00

Table 3.2.3. Linear regression of Na^+ versus K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} and Cl^- with comparison to their theoretical ratios in seawater (Pilson, 2013)

	Cl^-	nss SO_4^{2-}	Mg^{2+}	K^+	Ca^{2+}
Sea water ratio	1.794	0.252	0.119	0.037	0.038
Slope	1.805	0.251	0.112	0.038	0.035
Intercept	44.734	42.87	1.444	-0.346	5.75
R^2	0.999	0.989	0.997	0.999	0.983
n	32	32	32	32	32
p	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

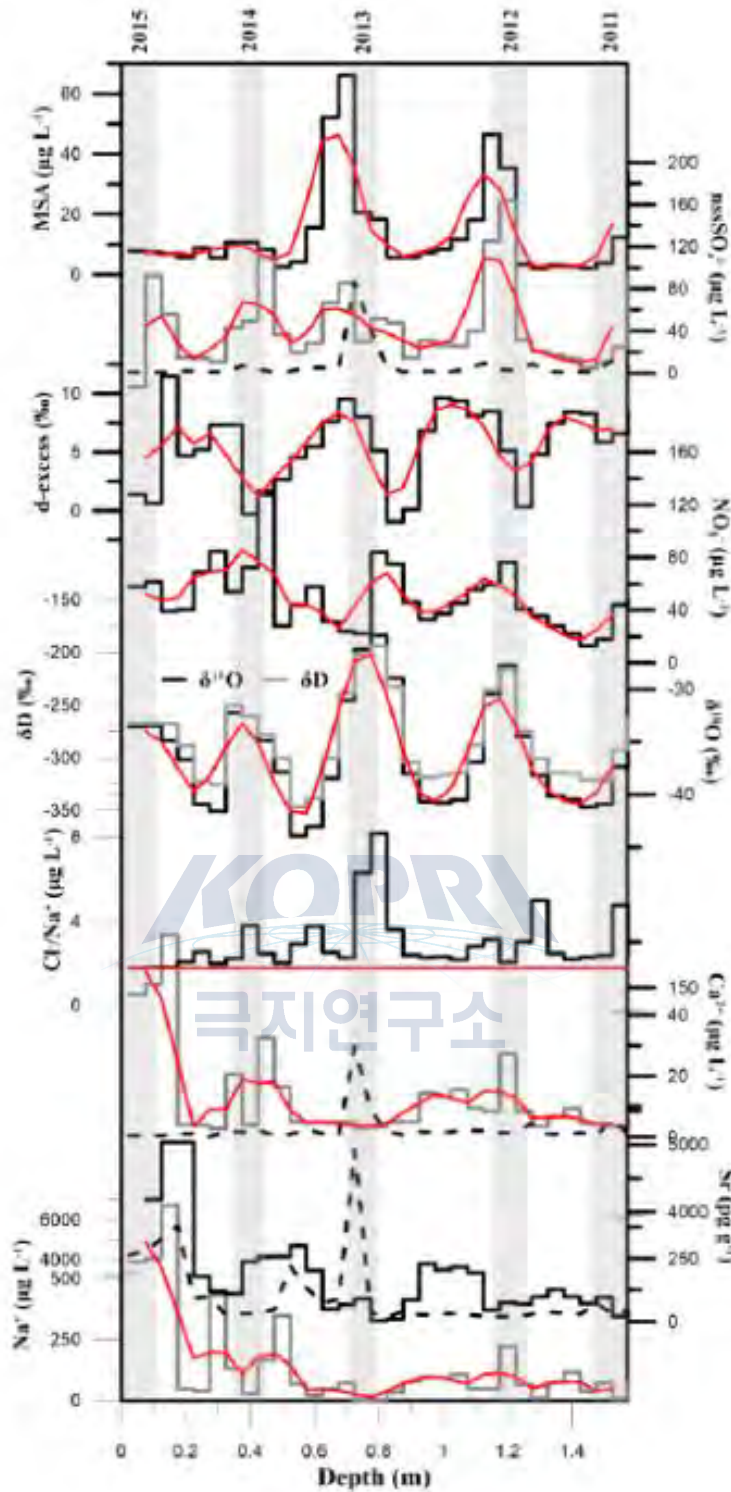


Fig 3.2.1. Concentration vs. the depth profiles of isotopic composition and ionic species with 3-point running average (red lines). Cl^-/Na^+ ratio was shown with their typical seawater ratio of 1.794 (red line). The shaded area represents the summer peak from January 2011 to January 2015. Dashed lines (black) are the sea salt EF for SO_4^{2-} and Ca^{2+} and crustal EF for Sr which are highlights the sharp increase in January 2013.

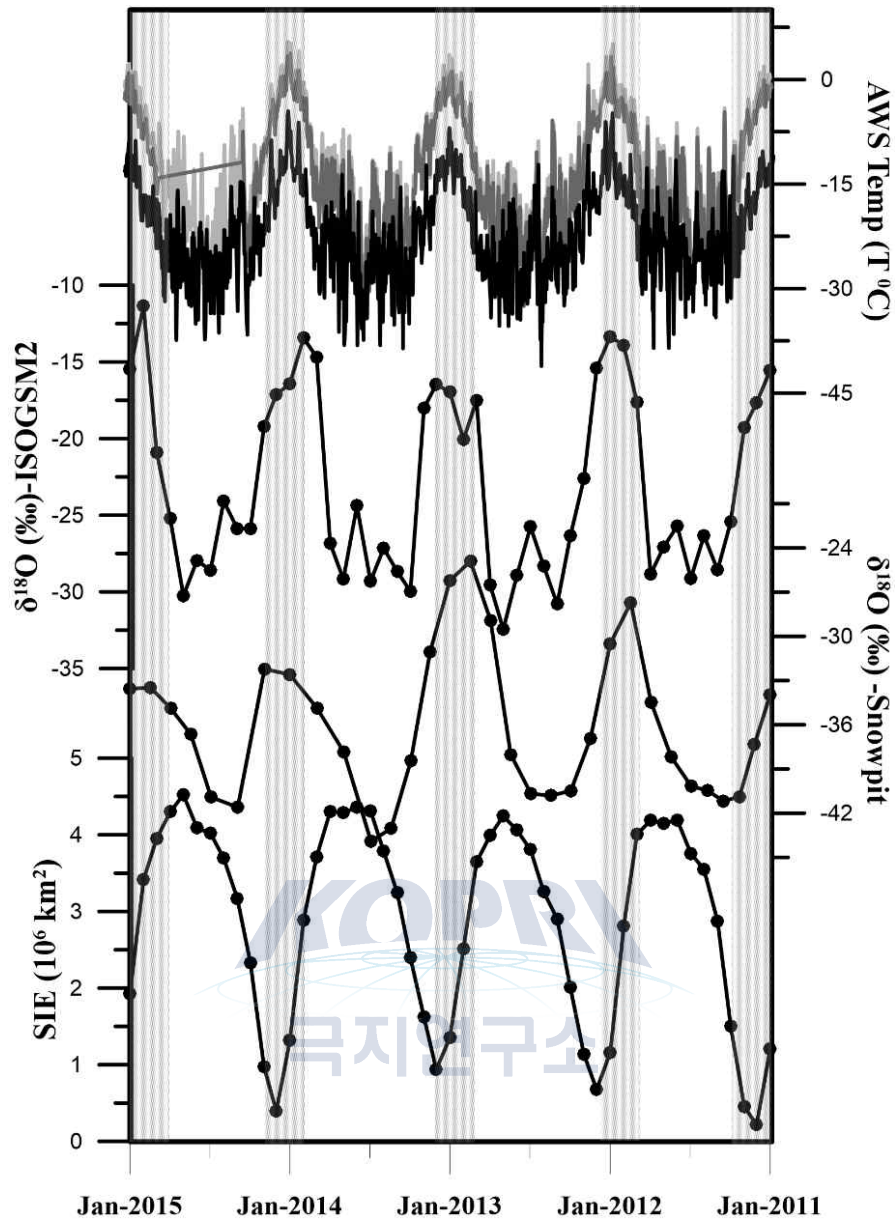


Fig 3.2.2. Comparison of monthly mean SIE in the Ross Sea, $\delta^{18}\text{O}$ of the snowpit and IsoGSM2 simulation, and daily temperature from Lola (bold black), Alessandra (black), and Eneide (grey).

Table 3.2.4. Annual mean values of $\delta^{18}\text{O}$, temperatures (temp) from AWS (Lola, Eneide, Alessandra) and ERA-Interim reanalysis data, SIE, snow accumulation rate (SA) from the snowpit and ERA-Interim reanalysis data (the largest values are highlighted in bold).

Year	$\delta^{18}\text{O}$	Temp (Lola)	Temp (Eneide)	Temp (Alessandra)	Temp (ERA)	SA (ERA)	SA (Snowpit)	SIE (10^6km^2)
2014	-36.05	-22.30	-13.32	-10.19	-29.07	137.88	129.85	3.01
2013	-36.49	-22.62	-13.62	-15.16	-28.96	159.84	129.85	3.10
2012	-35.16	-22.54	-13.60	-15.33	-28.53	162.15	148.40	2.78
2011	-37.16	-21.44	-12.48	-14.04	-27.14	203.74	166.95	2.74

Snow-Pit Record from a Coastal Antarctic Site and Its Preservation of Meteorological Features

YALALT NYAMGEREL,^{a,b} SANG-BUM HONG,^b YEONGCHEOL HAN,^b SONGYI KIM,^{a,b} JEONGHOON LEE,^a
AND SOON DO HUR^b

^a Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul, South Korea

^b Division of Glacial Environment Research, Korea Polar Research Institute, Incheon, South Korea

(Manuscript received 22 September 2020, in final form 19 May 2021)

ABSTRACT: Polar snow pits or ice cores preserve valuable information derived from the atmosphere on past climate and environment changes. A 1.57-m snow-pit record from the coastal site (Styx Glacier) in eastern Antarctica covering the period from January 2011 to January 2015 was discussed and compared with meteorological variables. The dominant contribution of the deposition of sea-salt aerosols due to the proximity of the site to the ocean and processes of sea ice formation was revealed in the ionic concentrations. Consistent seasonal peaks in $\delta^{18}\text{O}$, δD , MSA, nsSO_4^{2-} , and NO_3^- indicate the strong enhancement of their source during warm periods, whereas the sea-salt ions (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , and totSO_4^{2-}) exhibit a distinct distribution. Monthly mean $\delta^{18}\text{O}$ positively correlates with the air temperature record from an automatic weather station (AWS) located in the main wind direction. Despite the shortness of the record, we suspect that the slight depletion of the isotopic composition and lowering of the snow accumulation could be related to the cooler air temperature with the decrease of open sea area. Consistency with previous studies and the positive correlation of sea-salt ions in the snow pit indicate the relatively good preservation of snow layers with noticeable climate and environmental signals [e.g., changes in sea ice extent (SIE) or sea surface temperature]. We report a new snow-pit record, which would be comparative and supportive to understand similar signals preserved in deeper ice cores in this location.

KEYWORDS: Antarctica; Sea ice; Snow

3.3. 장보고기지 주변 스노우핏의 화학성분, 동위원소성분의 계절성

본 연구는 장보고과학기지가 건설되기 이전인 2011년 하계에 동남극 테라노바만(Terra Nova Bay) 인근 해안 지역에서 채취한 스노우핏 시료를 대상으로, 화학성분과 불안정동위원소 조성을 분석하고 이들의 뚜렷한 계절 변동성을 이용하여 스노우핏의 연대를 추정함과 동시에 해안 인접 지역 스노우팩의 기후·환경적 특성을 규명하는 것을 목적으로 수행되었다. 연구 대상 스노우핏은 약 1.95 m 깊이로 채취되었으며, 분석 결과 해당 스노우핏에는 약 3년(2008 - 2010년)에 걸쳐 축적된 적설 기록이 비교적 연속적으로 보존되어 있음이 확인되었다.

불안정동위원소($\delta^{18}\text{O}$, δD) 분석 결과, 스노우핏 내에서는 여름철에 상대적으로 높은(중질 동위원소가 풍부한) 값이, 겨울철에는 낮은 값이 반복적으로 나타나는 뚜렷한 계절 주기가 관찰되었다. $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$ 관계식의 기울기는 약 8.2로, 전지구 강수선(Global Meteoric Water Line) 및 남극 지역 국지 강수선(Local Meteoric Water Line)과 매우 유사한 값을 보였다. 이는 시료가 증발, 승화, 용융과 같은 후퇴적(post-depositional) 과정의 영향을 거의 받지 않았으며, 인접 해양을 기원으로 하는 수증기 공급 특성이 잘 보존되어 있음을 시사한다. 이러한 결과는 해당 스노우핏이 신뢰할 수 있는 연대 지시자로 활용 가능함을 보여주며, 이후 확보된 빙하코어 기록을 해석하기 위한 기준 자료(reference record)로서의 활용 가능성을 뒷받침한다.

화학성분 분석에서는 Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} 등 해염 기원 이온들이 겨울철에 뚜렷한 농도 증가

를 보였으며, 이는 해빙 위에서 형성된 해염 에어로졸이 강한 폭풍과 블로잉 스노우(blowing snow)에 의해 내륙으로 수송·침적되는 과정을 반영하는 것으로 해석된다. 특히 Na^+ 와 Cl^- 의 농도 변화는 해수 조성비와 유사한 패턴을 보여, 해염 기원이 지배적인 공급원임을 명확히 지시하였다. 이러한 겨울철 해염 이온 증가는 로스해 인근에서의 활발한 저기압 활동과 해빙 형성과 밀접하게 연관된 것으로 판단된다.

반면, 메탄설폰산(MSA)과 비해염 황산염(nssSO_4^{2-})은 봄에서 여름철에 상대적으로 높은 농도를 보였으며, 이는 해빙 이후 증가하는 해양 생물 생산성과 관련된 디메틸설파이드(DMS) 기원의 영향을 반영하는 전형적인 계절 패턴으로 해석된다. MSA와 nssSO_4^{2-} 의 동시 증가는 해양 생물 기원 에어로졸이 스노우핏 기록에 효과적으로 반영되고 있음을 보여주며, 해당 성분들이 해빙 및 해양 생태계 변화에 민감한 지시자로 활용될 수 있음을 시사한다.

또한 주성분분석(PCA)을 적용한 결과, 대부분의 해염 기원 이온(Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+)은 동일한 주성분에 강하게 적재되어 공통된 해양 기원 및 수송 경로를 가지는 것으로 나타났다. 반면 $\delta^{18}\text{O}$, MSA, NO_3^- 등은 별도의 주성분으로 분리되어 계절 변동성을 대표하는 성분군으로 구분되었다. 이는 화학성분과 불안정동위원소가 각각 해염 기원 입력과 계절성·기후 조건을 지시하는 서로 다른 정보를 제공하며, 상호 보완적으로 스노우팩의 형성 환경을 기록하고 있음을 의미한다.

종합하면, 본 연구는 장보고기지 인근 해안 지역 스노우핏에서 불안정동위원소와 화학성분의 계절성이 명확히 보존되어 있음을 입증하였으며, 이를 통해 해당 지역이 고해상도 빙하코어 연구 및 과거 대기·해빙·해양 환경 복원을 위한 핵심 연구 거점이 될 수 있음을 제시하였다. 본 연구 결과는 이후 북빅토리아랜드(Styx, GV7, Hercules Névé 등) 지역에서 수행된 빙하시료 분석과 해석의 기초 자료로 활용되었으며, 해안 남극 지역에서 대기 - 해양 - 해빙 상호작용이 눈에 기록되는 과정을 이해하는 데 중요한 기여를 하였다. 본 연구 성과는 2021년 Polish Polar Research에 게재되었다.

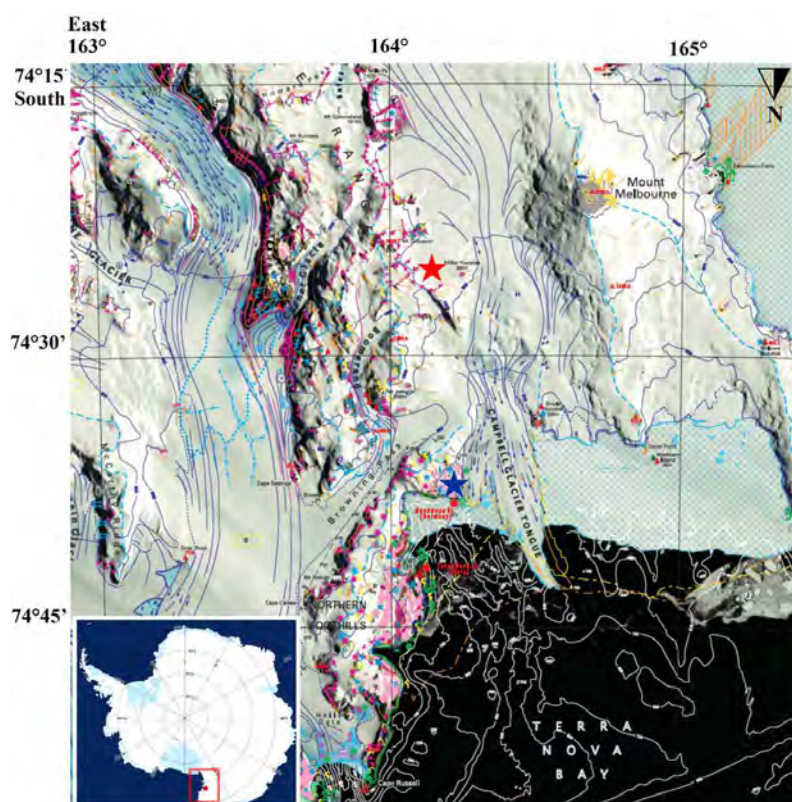


Fig 3.3.1. Location of the snowpit (red star) near the Korean Jang Bogo Station (blue star) in Terra Nova Bay, East Antarctica.

Table 3.3.1. The isotopic and chemical compositions of four snow samples (JBG-01, JBG-01, JBG-03, JBG-04) and snowpit.

	JBG-01	JBG-02	JBG-03	JBG-04	Snowpit mean	Snowpit SD*
Location	S74° 36.665' E164° 13.536' North of JBS	S74° 37.097' E164° 12.239' Northwest of JBS	S74° 37.249' E164° 11.644' Northwest of JBS	S74° 37.489' E164° 12.894' Southwest of JBS	S74° 25.344' E164° 10.429'	
MSA	47.88	522.62	494.68	504.28	36.59	32.54
Cl ⁻	759.21	15,329.19	10,997.50	20,394.78	493.51	546.08
SO ₄ ²⁻	212.73	2614.34	2085.81	3166.07	205.70	116.18
NO ₃ ⁻	189.08	1582.84	1469.41	1587.28	64.24	78.81
Na ⁺	412.45	8674.51	6406.89	11,635.68	298.32	312.94
K ⁺	70.43	582.13	565.36	376.85	22.32	18.95
Mg ²⁺	175.86	2160.94	1916.33	2495.20	56.05	68.89
Ca ²⁺	74.94	3262.69	3078.66	3248.20	51.64	71.95
δ ¹⁸ O	-13.88	-14.86	-18.15	-16.77	-24.34	4.84
δD	-99.48	-117.88	-146.55	-130.79	-186.50	39.82
d-excess	11.57	0.98	-1.36	3.35	8.22	5.16

Note: SD: standard deviation.

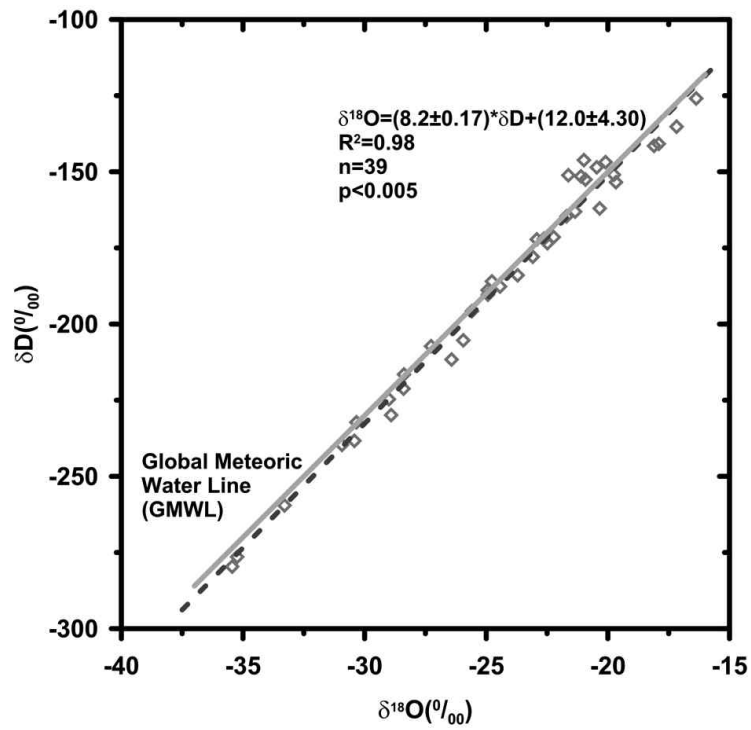


Fig 3.3.2. The linear regression line between δD and $\delta^{18}O$. The regression line is similar to that of the GMWL (grey line) and LMWL.

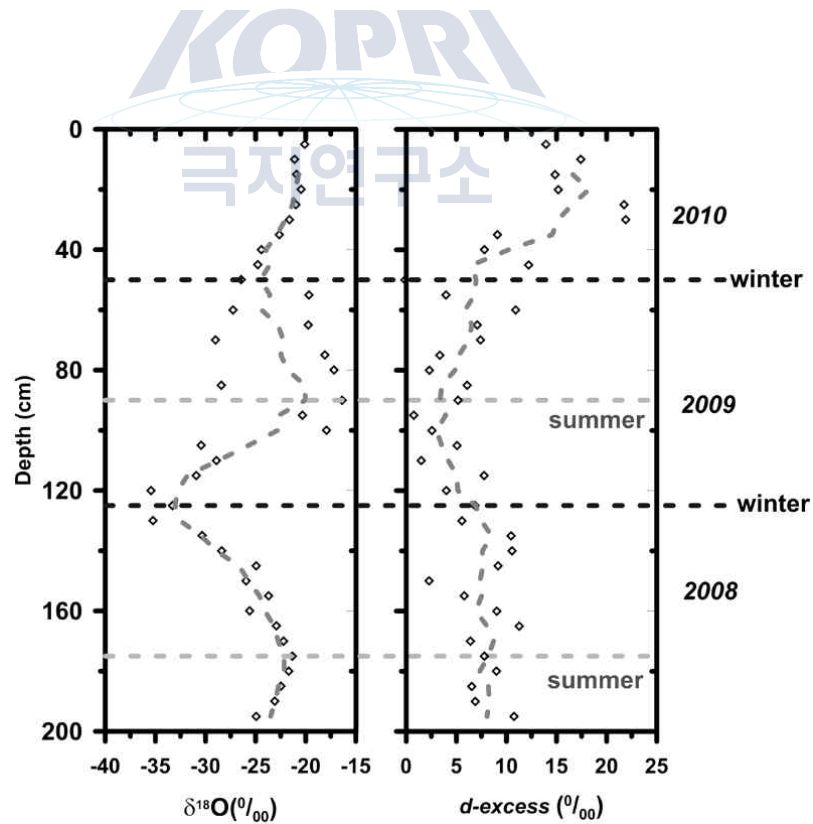


Fig 3.3.3. Vertical profiles of stable water isotopes. Summer and winter in the snowpit were defined from the maximum and minimum values of the stable water isotopes, respectively.

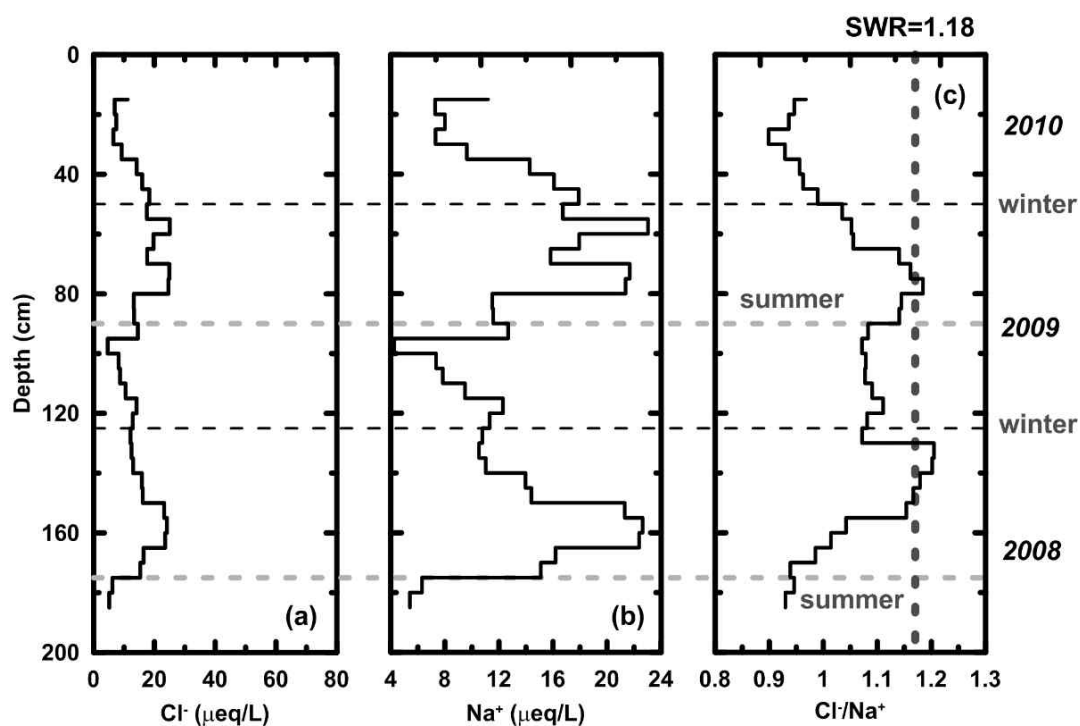


Fig 3.3.4. Vertical profiles of Cl^- , Na^+ , and the Cl^-/Na^+ ratio. The dashed line represents the Cl^-/Na^+ ratio in the Sea Water Ratio (SWR, 1.18).

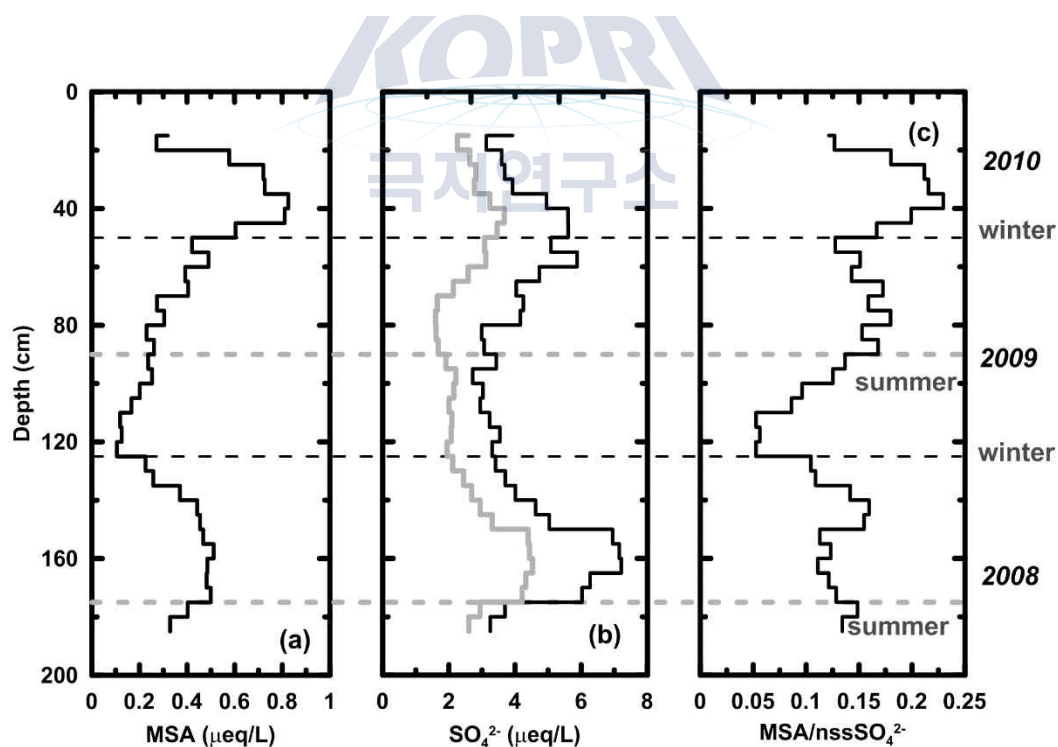


Fig 3.3.5. Vertical profiles of MSA, sulfate, and $\text{MSA}/\text{nssSO}_4^{2-}$ ratio. The gray line in the middle indicates non-sea-salt (nss).

www.czasopisma.pan.pl

PAN
POLSKA AKADEMIA NAUK

www.journals.pan.pl



POLISH POLAR RESEARCH

vol. 42 no. 4, pp. 221–236, 2021

DOI: 10.24425/ppr.2021.137146

**Seasonality of isotopic and chemical composition of snowpack
in the vicinity of Jang Bogo Station, East Antarctica**

Soon Do HUR¹ , Jiwoong CHUNG¹ , Yalalt NAMGEREL^{1,2} 
and Jeonghoon LEE^{2,*} 

¹Division of Glacial Environment Research, Korea Polar Research Institute,
26, Songdomirae-ro, Yeonsu-gu, Incheon 21990, Korea
<sdhur@kopri.re.kr> <jjw79@kopri.re.kr> <yalaltm@gmail.com>

²Department of Science Education, Ewha Womans University, 52, Ewhayeodae-gil,
Seodaemun-gu, Seoul 120-750, Korea

* *corresponding author* <jeonghoon.d.lee@gmail.com>

3.4. 물순환에서 ^{17}O 의 적용가능성에 대한 리뷰

물안정동위원소는 수문 순환과 기후 시스템을 이해하는 데 있어 가장 널리 활용되는 자연 추적자(tracer)로, 전통적으로 $\delta^{18}\text{O}$ 와 δD 가 강수 형성, 수증기 수송 경로, 증발 및 응결 과정 해석에 사용되어 왔다. 그러나 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 조합만으로는 수문 기원지의 상대습도 변화나 운동학적 분별(kinetic fractionation)과 같은 미세한 수문 과정을 독립적으로 분리해 해석하는 데 한계가 있다. 최근 분석 기술의 발전으로 삼중 산소 동위원소 체계(triple oxygen isotope system) 중 하나인 ^{17}O 의 미세한 변동을 정밀하게 측정할 수 있게 되면서, 기존 동위원소 지표를 보완할 수 있는 새로운 가능성이 제시되고 있다.

본 연구는 ^{17}O 를 활용한 수문 및 기후 연구의 국제적 연구 동향을 종합적으로 정리한 리뷰 논문으로, 2021년 Molecules에 게재되었다. 특히 ^{17}O 과잉값(^{17}O -excess)이 수문 기원지의 상대습도, 증발·확산 과정에서의 운동학적 분별, 그리고 극지역 특유의 대기 및 빙상 조건을 해석하는 데 어떻게 활용될 수 있는지를 중점적으로 고찰하였다. 삼중 산소 동위원소 체계에서 ^{17}O 는 자연계에 매우 낮은 비율(약 0.038%)로 존재하지만, $\delta^{17}\text{O}$ 와 $\delta^{18}\text{O}$ 간의 질량 의존 분별 관계로부터 정의되는 ^{17}O -excess는 기존의 d-excess와는 다른 물리적 정보를 제공하는 지표로 주목받고 있다.

^{17}O -excess는 증발 과정에서의 상대습도 변화에 민감하면서도 온도의 직접적인 영향은 상대적으로 적게 받는 특성을 지니며, 이로 인해 수문 기원지 조건을 보다 직접적으로 반영할 수 있는 장점이 있다. 리뷰 결과에 따르면, 저위도 및 중위도 지역에서는 ^{17}O -excess가 주로 수증기 기원지의 상대습도, 강수 중 재증발, 대류성 강수 과정, 그리고 수증기 혼합 과정에 의해 조절되는 것으로 나타났다. 반면, 고위도 및 극지역에서는 이러한 요인 외에도 과포화 조건(supersaturation)에서의 눈 결정 형성, 성층권 수증기 유입, 해빙 면적 변화, 지역 규모의 대기 순환, 강설 이후의 승화 및 재순환과 같은 후퇴적(post-depositional) 과정이 ^{17}O 분포에 중요한 영향을 미치는 것으로 보고되었다.

특히 남극 지역에서는 해안과 내륙 간 ^{17}O -excess 분포 차이가 수증기 수송 경로와 해빙 경계의 위치 변화에 민감하게 반응하며, 이는 ^{17}O -excess가 해빙 면적 변화 및 해양-대기 상호작용을 추적할 수 있는 잠재적 지표임을 시사한다. 일부 연구에서는 빙하코어 내 ^{17}O -excess 변동이 간빙기-빙기 규모의 해양 상대습도 변화 및 바람장 변화를 반영할 수 있음을 제시하였으며, 이는 기존 $\delta^{18}\text{O}$ 기반 온도 해석을 보완할 수 있는 중요한 단서를 제공한다.

본 논문에서는 또한 ^{17}O 분석에 활용되는 주요 분석 기법으로 이중 유입 동위원소비 질량분석기(dual-inlet IRMS)와 레이저 흡수 분광법(laser absorption spectroscopy)의 원리와 특성을 비교·정리하였다. 각 분석 기법의 정밀도, 표준화 절차, 분석 시간 및 시료 요구량, 그리고 극지 시료 분석 시 고려해야 할 불확실성과 한계점이 함께 논의되었으며, 이는 향후 극지역 강수, 스노우펫, 천부빙하코어 및 심부빙하코어 시료에 ^{17}O 분석을 적용하기 위한 방법론적 기초 자료로 활용될 수 있다.

종합적으로 본 리뷰 연구는 ^{17}O -excess가 기존의 물안정동위원소 지표만으로는 분리하기 어려웠던 수문 기원지 조건과 운동학적 분별 과정을 해석하는 데 유용한 새로운 동위원소 지표임을 제시하였다. 특히 남극과 같은 극지역에서는 해빙 면적 변화, 과포화 조건 하의 강설 형성, 성층권 수증기 유입 등 복합적인 요인이 ^{17}O 신호에 반영되므로, $\delta^{18}\text{O}$ 및 d-excess와 함께 ^{17}O -excess를 병행 분석할 경우 대기-빙상-해양 상호작용에 대한 보다 정교한 해석이 가능할 것으로 판단된다. 이러한 관점에서 본 논문은 향후 남극 빙하코어 기반 고기후 복원 연구에서

^{17}O 를 새로운 프록시(proxy)로 활용할 수 있는 이론적·방법론적 기반을 제공하며, 본 과제에서 수행되는 물안정동위원소 기반 연구의 확장 가능성을 제시한다는 점에서 중요한 학술적 의의를 가진다.

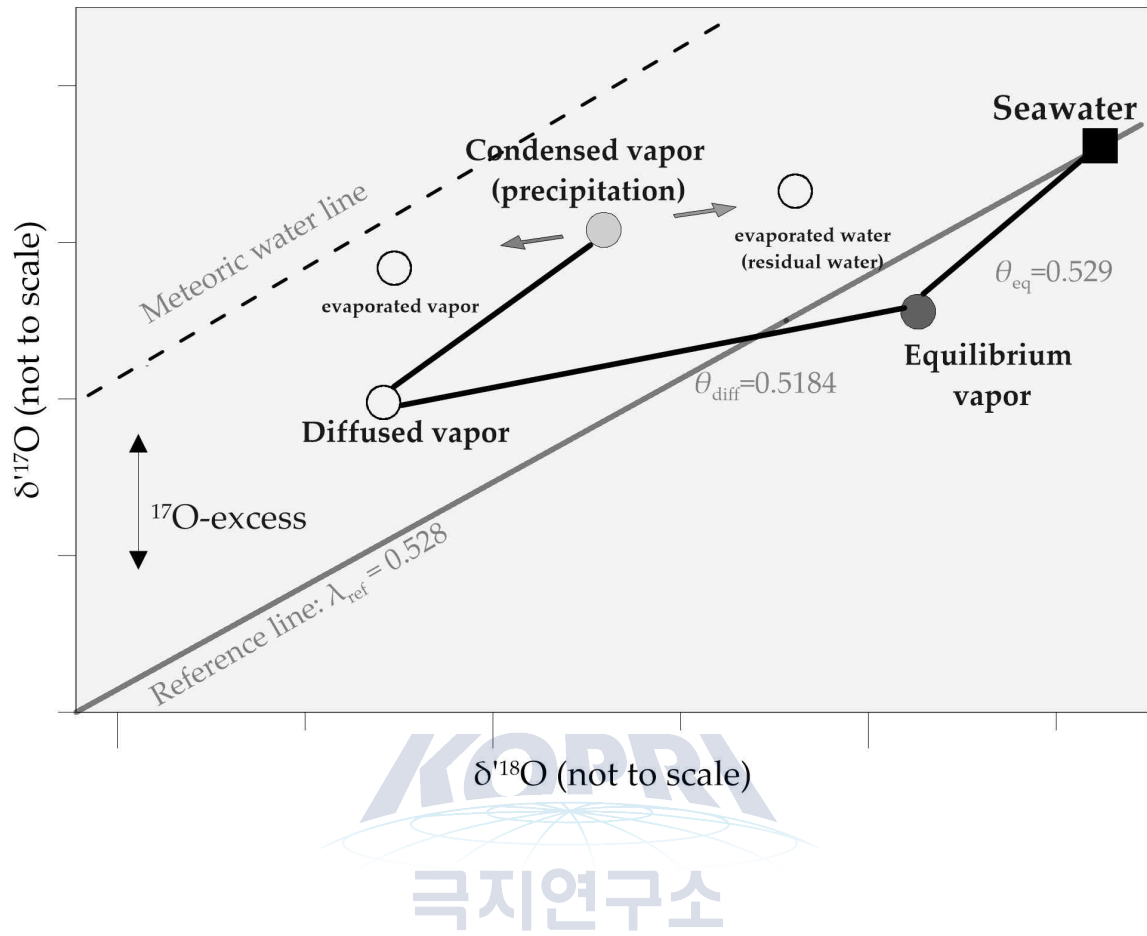


Table 3.4.1. Summary of published $\delta^{18}\text{O}$, λ_{ref} and ^{17}O -excess in different samples. All values are averaged from published values. We note that the sampling location, period, and sampling numbers are distinct depending on the studies; thus, values are representative of local scale variations

Sample Type	$\delta^{18}\text{O}$ Range	^{17}O -Excess Mean or Range (per meg)	λ_{ref}	Analytical Method	Time Scale	Reference
Low- and mid-latitude Precipitation						
Vapor (Mt.Zugspitze, Germany)	(-34.4 to -20.4)	(30 to 82)	0.5265	IRMS	2016 (Feb to May)	Surma et al., 2021
Cave water (Canada and USA)	-9.69 (-17.67 to -6.39)	0.05 (0.03 to 0.07)	0.530	IRMS	2005 (Feb, Jul)	Luz et al., 2010
Cave drip waters (Northwest Switzerland)	-8.7	19	-	Picarro CRDS	2010 (Nov) to 2014 (Jun)	Affolter et al., 2015
Fluid inclusions (Northwest Switzerland)	-8.3	10	-	Picarro CRDS	2012 (Mar) to 2014 (Jun)	Affolter et al., 2015
Leaf water (Mpala central Kenya)	7.84 (-0.27 to 16.14)	-0.06 (-0.16 to 0.04)	-	IRMS	2012 (Jun-Jul)	Li et al., 2017
Stem water (Mpala central Kenya)	-2.46 (-4.71 to 0.59)	0.02 (0.01 to 0.03)	-	IRMS	2012 (Jun-Jul)	Li et al., 2017
Pond (Sistan Oasis, Iran)	25.83 (13.81 to 29.07)	-144.4 (-172 to -56)	-	IRMS	-	Surma et al., 2015
Lake and pond	-8.06 (-16.03 to 4.19)	0.02 (-0.02 to 0.04)	0.528	IRMS	2002, 2008	Luz et al., 2010
Surface water	-8.88 (-20.31 to 9.56)	-46.4 to 55.67 (mostly 14 to 33)	0.528	IRMS	Global scale	Aron et al., 2020
River, terminal lakes, well, spring, irrigation channel (Sistan Oasis, Iran)	-1.69 (-6.84 to 14.03)	-3.91 (-59 to 25)	-	IRMS	-	Surma et al., 2015
Lake and river (western USA)	-9.58 (-19.11 to -0.34)	5.28 (-39 to 46)	-	IRMS	-	Passey et al., 2019
Dam water (Mpala central Kenya)	-1.08 (-3.98 to 2.26)	0.01 (-0.004 to 0.02)	-	IRMS	2012 (Jun-Jul)	Li et al., 2017
Tap, spring water (Israel)	-4.99 (-5.74 to -4.24)	0.04 (0.03 to 0.05)	0.515	IRMS	2008	Luz et al., 2010
Tap water (continental USA)	-8 $\pm$ 4.7 (-20.7 to -0.7)	17 $\pm$ 11 (-6 to 43)	0.526 to 0.527	IRMS	2006 to 2011	Li et al., 2015
Tap and puddle water (Mpala central Kenya)	3.36 (2.33 to 4.39)	-0.01 (-0.01 to -0.003)	-	IRMS	2012 (Jun-Jul)	Li et al., 2017
Precipitation (Northwest Switzerland)	-9.9	18	-	Picarro CRDS	2012 (Mar) to 2014 (Jun)	Affolter et al., 2015
Precipitation (Okinawa Island, Japan)	-4.81 (-9.88 to -1.05)	25.26 (4 to 54)	-	Picarro CRDS	2011 (Jan) to 2012 (Dec)	Uechi et al., 2019
Precipitation (central USA)	-6.25	31	0.5275	OA-ICOS	2014 (Jun) to 2018 (May)	Tian et al., 2019
Rain (Indonesia, India, and Israel)	-5.45 (-9.03 to -2.53)	0.04 (0.02 to 0.06)	0.522	IRMS	2005 (Mar to Nov) 2001 to 2008 2008 (Feb to Aug)	Luz et al., 2010
Water vapor (south Indian and Southern Ocean)	-15.45 (-23.41 to -11.65)	13.51 (-6 to 46)	0.532	IRMS	2005 (Dec) to 2006 (Jan)	Uemura et al., 2010
Seawater (Atlantic, Pacific Ocean, Mediterranean, and Northern Red Sea)	0.42 (-0.42 to 2.43)	-0.0045 (-0.01 to 0.0038)	0.528	IRMS	-	Luz et al., 2010
Snow (Mt.Zugspitze, Germany)	(-21.7 to -8.3)	(17 to 62)	-	IRMS	-	Surma et al., 2021
Snow, ice (Canada, Montenegro)	-17.34 (-26.11 to -5.44)	0.02 (-0.01 to 0.04)	0.529	IRMS	2009, 2010	Luz et al., 2010

High-latitude precipitation						
Vapor (NEEM, Greenland)	-41.77 (-44.63 to -38.33)	32.33 (15 to 48)	0.528	IRMS	2008 (Aug)	Landais et al., 2012a
Snow precipitation (NEEM, Greenland)	-29.60 (-35.53 to -24.33)	35.67 (23 to 43)	-	IRMS	2008 (Aug)	Landais et al., 2012a
Firn core (NEEM, Greenland)	-32.17 (-38.80 to -26.70)	49.70 (30 to 73)	-	IRMS	2003 (Jan) to 2005 (Aug)	Landais et al., 2012a
Snow pit (Vostok)	-57.13 (-61.20 to -51.39)	7.43 (-36 to 42)	-	IRMS	1949 to 2008	Winkler et al., 2013
Surface snow (traverse from Zhongshan station to Dome A)	-34.30 (-58.69 to -17.60)	34.95 (9 to 51)		IRMS	2009 (Dec) to 2010 (Jan)	Pang et al., 2015
Snow (transect from Syowa to Dome Fuji)	-47.26 (-56.69 to -30.20)	24.82 (6.1 to 43.8)	-	IRMS	-	Touzeau et al., 2016
Ice core (Vostok)	-58 (-50.74 to -62.05)	24.31 (-6 to 54)	-	IRMS	150ka years	Landais et al., 2008
Surface snow (Vostok, Antarctica)	-41.27 (-28.23 to -51.03)	44.5 (25 to 62)	0.528	IRMS	-	Landais et al., 2008
Snow or ice (Dome F, Antarctica)	-58.42	-0.006	-	IRMS	-	Luz et al., 2010
Ice core (Talos Dome, Antarctica)	-41.67 to -36.52	-	0.5278	IRMS	9.15 to 33.78 ka age	Winkler et al., 2012
Ice core (WAIS, Antarctica)	-35.44 (-42.68 to -31.61)	25.22 (2.9 to 38.46)	-	IRMS	25 ka	Schoenemann et al., 2019
Ice core (Taylor Dome, Antarctica)	-39.56 (-42.92 to -37.36)	14.28 (-1 to 28)	0.5313	IRMS	-	Schoenemann et al., 2019
Ice core (Siple Dome Antarctica)	-31.31 (-36.21 to -24.02)	19 (8 to 27)	-	IRMS	-	Schoenemann et al., 2019
Snow precipitation (Vostok, Antarctica)	-68.47 to -50.51	-27 to 29	0.5308	IRMS	2000 (Feb-Oct)	Landais et al., 2012b
Snow precipitation (Vostok, Antarctica)	-58.5 to -52.6	-	0.5269	IRMS	1999 (Dec) to 2000 (Jun)	Touzeau et al., 2016
Ice core (Dome C, Antarctica)	-56.48 to -46.639	-	0.5294	IRMS	7.61-24.8 ka age	Winkler et al., 2012
Snow precipitation (Dome C, Antarctica)	-55.58 (-69.63 to -38.89)	18.43 (-11 to 47)	0.5282	IRMS	2010 (Sep-Nov)	Touzeau et al., 2016
Snow (Dome C, Antarctica)	-54.25 (-61.35 to -48.19)	31.64 (14 to 47)	0.5287	IRMS	2010 (Dec) to 2011 (Dec)	Touzeau et al., 2016
Snow pit (Dome C, Antarctica)	-51.14 (-55.31 to -46.06)	31.68 (17 to 51)	0.528	IRMS	-	Touzeau et al., 2016

Figure 2. Schematic of $\delta^{17}\text{O}$ and $\delta^{18}\text{O}$ fractionation in the hydrological cycle. This figure is a simplified modification of the descriptions from Luz and Barkan and Aron et al.





Review

Review on Applications of ^{17}O in Hydrological Cycle

Yalalt Nyamgerel ¹, Yeongcheol Han ², Minji Kim ¹, Dongchan Koh ³ and Jeonghoon Lee ^{1,*}

¹ Department of Science Education (Earth Sciences), Ewha Womans University, Seoul 03760, Korea; yalaltn@gmail.com (Y.N.); minji.jane.kim@gmail.com (M.K.)

² Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Korea; yhan@kopri.re.kr

³ Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Korea; chankoh@kigam.re.kr

* Correspondence: jeonghoon.d.lee@gmail.com; Tel.: +82-2-3277-3794

Abstract: The triple oxygen isotopes (^{16}O , ^{17}O , and ^{18}O) are very useful in hydrological and climatological studies because of their sensitivity to environmental conditions. This review presents an overview of the published literature on the potential applications of ^{17}O in hydrological studies. Dual-inlet isotope ratio mass spectrometry and laser absorption spectroscopy have been used to measure ^{17}O , which provides information on atmospheric conditions at the moisture source and isotopic fractionations during transport and deposition processes. The variations of $\delta^{17}\text{O}$ from the developed global meteoric water line, with a slope of 0.528, indicate the importance of regional or local effects on the ^{17}O distribution. In polar regions, factors such as the supersaturation effect, intrusion of stratospheric vapor, post-depositional processes (local moisture recycling through sublimation), regional circulation patterns, sea ice concentration and local meteorological conditions determine the distribution of ^{17}O -excess. Numerous studies have used these isotopes to detect the changes in the moisture source, mixing of different water vapor, evaporative loss in dry regions, re-evaporation of rain drops during warm precipitation and convective storms in low and mid-latitude waters. Owing to the large variation of the spatial scale of hydrological processes with their extent (i.e., whether the processes are local or regional), more studies based on isotopic composition of surface and subsurface water, convective precipitation, and water vapor, are required. In particular, in situ measurements are important for accurate simulations of atmospheric hydrological cycles by isotope-enabled general circulation models.

Keywords: ^{17}O -excess; kinetic fractionation; stable water isotopes



Citation: Nyamgerel, Y.; Han, Y.; Kim, M.; Koh, D.; Lee, J. Review on Applications of ^{17}O in Hydrological Cycle. *Molecules* **2021**, *26*, 4468. <https://doi.org/10.3390/molecules26154468>

3.5. 희토류원소의 지하수 및 빙하연구에서의 의미

희토류 원소(Rare Earth Elements, REEs)는 화학적으로 유사한 거동을 보이면서도, pH, 산화-환원 상태, 착화 반응과 같은 미세한 지화학적 환경 변화에 민감하게 반응하는 특성을 지닌 원소군으로, 지하수 및 저온 수문 시스템 연구에서 중요한 지화학적 추적자(tracer)로 활용되어 왔다. 지하수 환경에서 희토류 원소는 주로 주변 암석과의 상호작용, 광물 용해, 흡착·탈착 과정, 그리고 용액 내 착화(complexation)에 의해 용존 상태로 이동하며, 이러한 특성은 지하수의 기원, 유동 경로, 혼합 과정 및 암석-물 상호작용을 규명하는 데 유용한 정보를 제공한다.

본 연구는 지하수 지화학 분야에서 수행된 희토류 원소 관련 선행 연구들을 종합적으로 검토한 리뷰 논문으로, 2021년 Journal of the Korean Earth Science Society에 출판되었다. 본 논문에서는 희토류 원소의 분포와 분별(fractionation)을 지배하는 주요 지화학적 요인을 체계적으로 정리하고, 희토류 원소가 지하수 지화학 연구에서 어떠한 방식으로 활용될 수 있는지를

중점적으로 논의하였다. 특히 암석 기원 신호(source signature)와 용액 내 화학 조건(pH, 산화-환원 환경, 탄산염 및 유기 리간드와의 착화 반응)이 희토류 원소 패턴 형성에 미치는 영향을 중심으로 기존 연구 결과를 비교·분석하였다.

리뷰 결과에 따르면, 지하수 내 희토류 원소 분포는 대체로 지하수가 통과한 지층의 조성을 반영하며, 세일 또는 콘드라이트로 정규화한 희토류 패턴을 통해 암석 기원 및 지하수 혼합 여부를 효과적으로 판별할 수 있는 것으로 나타났다. 중성에 가까운 pH 조건에서는 탄산염 착화가 희토류 원소의 용존 형태를 지배하며, 이로 인해 경희토류(LREE)와 중·중희토류(MREE - HREE) 간의 분별 특성이 뚜렷하게 나타난다. 반면 산성 환경에서는 중희토류(MREE)의 상대적 농축과 같은 특징적인 분별 패턴이 관찰되며, 이는 지하수의 화학적 진화 과정과 환경 조건 변화를 추적하는 데 중요한 지표로 활용될 수 있다.

또한 본 논문에서는 주성분분석(principal component analysis, PCA)과 같은 다변량 통계 기법이 희토류 원소 자료 해석에 매우 효과적으로 적용될 수 있음을 제시하였다. 다수의 희토류 원소 농도 자료를 소수의 주성분(principal components)으로 축약함으로써, 지하수 유동 경로, 서로 다른 수원의 혼합 비율, 그리고 암석 기원 차이를 정량적으로 구분할 수 있으며, 이는 기존의 주요 이온 분석이나 안정동위원소 분석을 보완하는 강력한 해석 도구로 평가된다.

더 나아가 본 연구는 희토류 원소의 활용 범위를 지하수 시스템에 국한하지 않고, 빙하 및 빙하코어 연구로 확장할 수 있는 개념적 가능성을 제시하였다. 빙하 환경에서 희토류 원소는 주로 대기 중 입자상 물질(dust)에 의해 운반되어 침적되며, 빙하코어에 보존된 희토류 원소의 농도와 분포 패턴은 먼지의 기원 지역(source region), 대기 수송 경로, 그리고 대기대순환의 장기적 변동을 반영하는 것으로 알려져 있다. 선행 연구들에 따르면, 빙하코어 내 희토류 원소 분석을 통해 과거 먼지 유입 강도, 사막화 변화, 대륙 기원 물질의 기여도 및 대기 순환 구조 변화를 추적할 수 있는 것으로 보고되었다.

이와 같이 희토류 원소는 지하수 연구에서 축적된 지화학적 해석 기법과 개념을 극지 및 빙하 연구로 확장할 수 있는 잠재력을 지니고 있다. 특히 극지역에서는 희토류 원소가 화학적으로 비교적 보존적인 거동을 보이면서도, 대기 입자 기원의 정보를 효과적으로 기록하기 때문에, 빙하코어를 이용한 고기후·고환경 복원 연구에서 보조적인 화학 프록시(proxy)로 활용될 수 있다.

종합적으로 본 리뷰 논문은 희토류 원소의 지하수 지화학적 활용 가능성을 체계적으로 정리함과 동시에, 이를 빙하 및 극지 연구로 확장할 수 있는 이론적·방법론적 근거를 제시하였다. 이는 향후 빙하코어 기반 대기대순환 및 물질 수송 연구에서 희토류 원소를 안정동위원소 및 주요 이온 자료와 함께 통합적으로 활용할 수 있는 기반을 마련하였다는 점에서 중요한 학술적 의의를 가진다.

Distribution of Rare Earth Elements and Their Applications as Tracers for Groundwater Geochemistry - A Review

Heejin Hwang¹, Yalalt Nyamgerel², and Jeonghoon Lee^{2,*}

¹Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Korea

²Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 03760, Korea

Abstract: Several studies investigating the behavior and environmental distribution of rare earth elements (REEs) have been reviewed to determine the geochemical processes that may affect their concentrations and fractionation patterns in groundwater and whether these elements can be used as tracers for groundwater-rock interactions and groundwater flow paths in small catchments. Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS), equipped with an ultrasonic nebulizer and active-film multiplier detector, is routinely used as an analytical technique to measure REEs in groundwater, facilitating the analysis of dissolved REE geochemistry. This review focuses on the distribution of REEs in groundwater and their application as tracers for groundwater geochemistry. Our review of existing literature suggests that REEs in ice cores can be used as effective tracers for atmospheric particles, aiding the identification of source regions.

Keywords: rare earth element, groundwater-rock interaction, groundwater flow paths, ice core study

3.6. 높은 강설량을 나타내고 있는 아문젠 지역의 스노우핏

아문젠 해역(Amundsen Sea Embayment)은 최근 수십 년간 남극에서 가장 급격한 빙하 질량 손실이 관측되고 있는 지역 중 하나로, Pine Island Glacier와 Thwaites Glacier를 포함한 해안 빙하들의 빠른 후퇴와 얇아짐으로 인해 전 지구적 해수면 상승과 직접적으로 연결된 핵심 지역으로 인식되고 있다. 이 지역의 빙하 질량 변화는 해양 순환, 대기대순환, 해빙 변화가 복합적으로 작용한 결과로 이해되고 있으며, 이러한 상호작용을 정량적으로 파악하기 위해서는 강설량(surface mass balance)의 시·계절적 변동을 정확히 복원하는 것이 필수적이다. 특히 해안 인접 지역의 강설 기록은 대기-해양-빙상 상호작용을 직접적으로 반영할 수 있어 최근 빙하 및 기후 연구에서 그 중요성이 더욱 강조되고 있다.

본 연구에서는 서남극 아문젠 해역 연안에 위치한 Moore Dome ice rise에서 채취한 약 2.5 m 깊이의 스노우핏 시료를 대상으로 화학성분과 물안정동위원소($\delta^{18}\text{O}$, δD , d-excess)를 분석하여, 해당 지역의 최근 강설량 규모와 계절적 축적 특성을 규명하고자 하였다. 해안 인접 ice rise는 일반적으로 강설량이 높고 빙하 유동 속도가 느려 연대 교란이 상대적으로 적기 때문에, 고해상도의 기후·환경 기록을 제공할 수 있는 유리한 지점으로 평가된다. 따라서 본 연구는 아문젠 해역에서 향후 수행될 장기 빙하코어 연구를 위한 기초 자료 구축의 성격을 함께 가진다.

스노우핏 시료는 5cm 간격의 고해상도 샘플링을 통해 분석되었으며, 주요 이온 성분과 메탄설폰산(MSA), 비해염 황산염(nssSO_4^{2-}), 그리고 물안정동위원소의 계절적 변동성을 종합적으로 이용하여 연대를 추정하였다. 특히 해양 생물 기원의 지표로 활용되는 MSA와 nssSO_4^{2-} 의 계절적 최대값과 $\delta^{18}\text{O}$, δD , d-excess의 주기적 변화를 함께 해석함으로써, 해당 스노우핏 기록

이 2011년 남극 겨울부터 2011/2012년 여름까지의 강설 축적을 포함하고 있음을 확인하였다.

밀도 자료를 바탕으로 산출된 수적 강설량은 연평균 약 1.03 m water equivalent yr^{-1} 이상으로 추정되었으며, 이는 기존에 보고된 다른 남극 해안 ice rise 지역과 비교할 때 매우 높은 값에 해당한다. 이러한 결과는 아문젠 해역 연안이 단기간에도 대기 및 해양 변화 신호를 고해상도로 기록할 수 있는 환경임을 시사하며, 강설량 변동을 통해 단기 기후 변동 및 극한 기상 사건을 추적할 수 있는 잠재력을 보여준다.

물안정동위원소 조성의 변동은 2011년 겨울철에 상대적으로 온난하고 변동성이 큰 기상 조건이 존재했음을 지시하였으며, 특히 $\delta^{18}\text{O}$, δD 및 d-excess의 동시 변동은 해빙 면적 변화와 수증기 수송 경로의 변화를 반영하는 것으로 해석되었다. 이는 아문젠 해역에서의 강설이 단순한 온도 신호뿐만 아니라, 대기 순환과 해빙 - 해양 조건의 영향을 복합적으로 기록하고 있음을 의미한다.

종합적으로 본 연구는 아문젠 해역 연안 Moore Dome ice rise에서 매우 높은 강설량이 유지되고 있음을 입증하였으며, 이러한 환경이 장기 빙하코어 자료에서 계절 이하(sub-annual) 규모의 기후·환경 변동까지 복원할 수 있는 잠재력을 지니고 있음을 제시하였다. 본 연구 결과는 향후 이 지역에서 확보될 장기 빙하코어가 남극 대기 - 해양 상호작용, ASL(Amundsen Sea Low), SAM 등 대기대순환 변동을 복원하는 데 핵심적인 자료가 될 수 있음을 시사하며, 아문젠 해역이 남극 기후 변화 연구의 전략적 거점임을 강조한다. 본 연구 성과는 이러한 과학적 의의를 바탕으로 2023년 Polish Polar Research에 게재되었다.



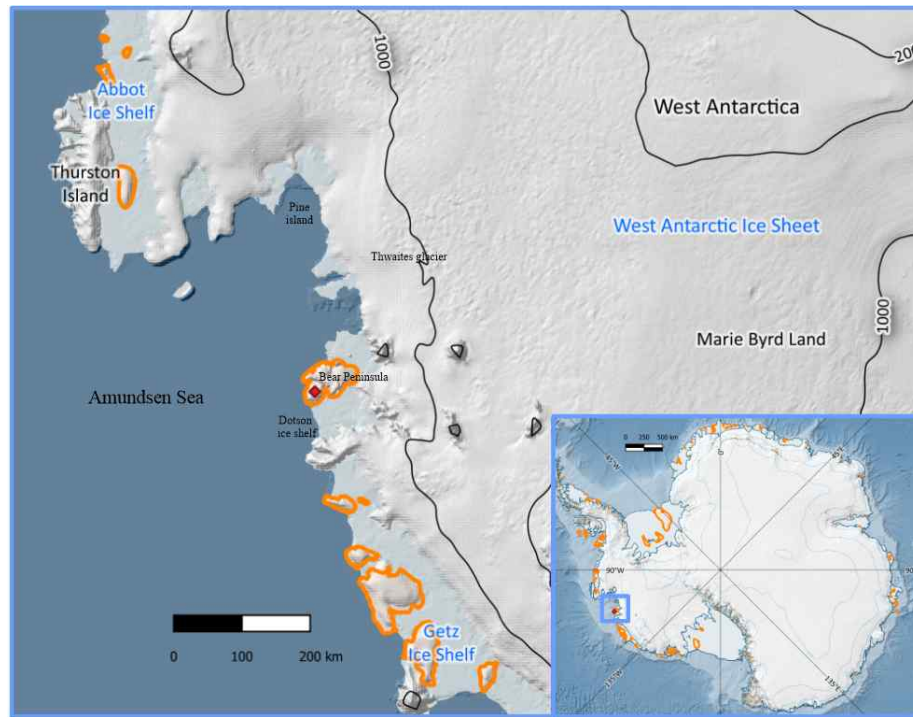


Fig 3.6.1. Location of a snowpit (red rhombus symbol) at Moore Dome ice rise in Bear Peninsula, West Antarctica. Ice rises (colored in yellow) are shown, and the map is generated by the Quantarctica GIS package.



Table 3.6.1. Mean, standard deviation, minimum, maximum values of isotope (‰) and ions (μeq/L).

<i>Variables</i>	Mean	Standard Deviation	Minimum	Maximum
δD	-107.11	21.97	-156.65	-70.96
δ ¹⁸ O	-14.05	2.83	-20.85	-9.03
d-excess	5.27	3.05	0.25	11.76
Na ⁺	9.31	9.65	0.27	64.95
NH ₄ ⁺	0.25	0.13	0.06	0.57
K ⁺	0.21	0.25	0.00	1.57
Mg ²⁺	2.20	2.15	0.26	14.00
Ca ²⁺	0.52	0.43	0.07	2.40
MSA	0.40	0.45	0.01	1.68
Cl ⁻	11.67	12.44	0.43	83.69
SO ₄ ²⁻	1.88	1.61	0.19	7.69
nssSO ₄ ²⁻	0.76	1.05	-0.43	3.53
NO ₃ ⁻	0.47	0.37	0.07	1.86

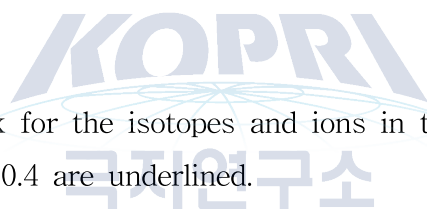


Table 3.6.2. Correlation matrix for the isotopes and ions in the snowpit. Correlation coefficient values larger than 0.4 are underlined.

	δD	δ¹⁸O	d-excess	NO₃⁻	Cl⁻	SO₄²⁻	MSA	Na⁺	NH₄⁺	K⁺	Mg²⁺	Ca²⁺
δD	1.00											
δ ¹⁸ O	<u>0.99</u>	1.00										
d-excess	-0.15	-0.28	1.00									
NO ₃ ⁻	0.09	0.02	<u>0.51</u>	1.00								
Cl ⁻	-0.22	-0.25	0.26	0.04	1.00							
SO ₄ ²⁻	-0.26	-0.31	<u>0.45</u>	0.04	<u>0.76</u>	1.00						
MSA	-0.26	-0.30	0.38	-0.10	0.32	<u>0.83</u>	1.00					
Na ⁺	-0.21	-0.24	0.27	0.05	<u>1.00</u>	<u>0.76</u>	0.32	1.00				
NH ₄ ⁺	0.18	0.12	<u>0.45</u>	<u>0.50</u>	0.35	0.56	0.42	0.36	1.00			
K ⁺	-0.19	-0.22	0.27	0.08	<u>0.99</u>	<u>0.74</u>	0.30	<u>0.99</u>	0.39	1.00		
Mg ²⁺	-0.23	-0.26	0.28	0.05	<u>1.00</u>	<u>0.77</u>	0.34	<u>1.00</u>	0.37	<u>0.99</u>	1.00	
Ca ²⁺	-0.21	-0.24	0.30	0.05	<u>0.95</u>	<u>0.78</u>	0.37	<u>0.95</u>	<u>0.43</u>	<u>0.96</u>	<u>0.97</u>	1.00

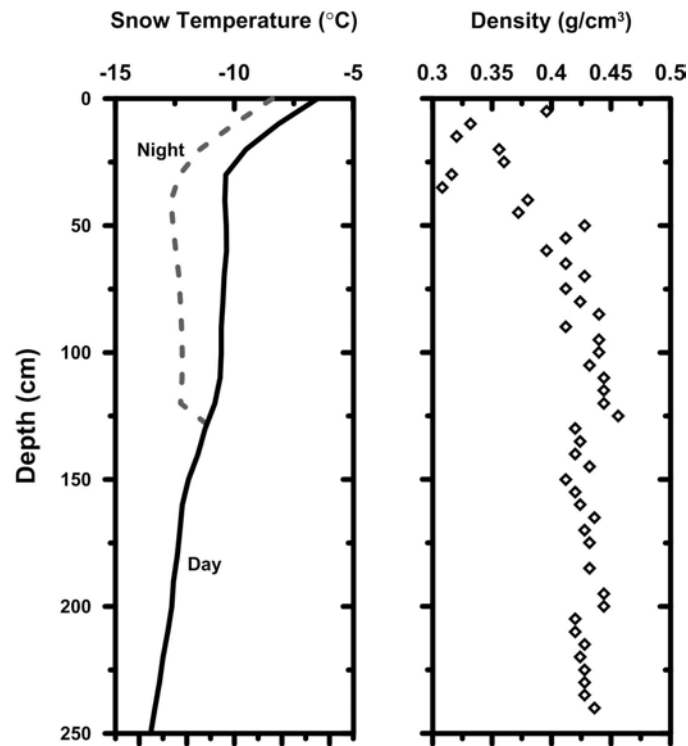


Fig 3.6.2. Vertical profiles of snow temperature and snow density in the Moore Dome snowpit

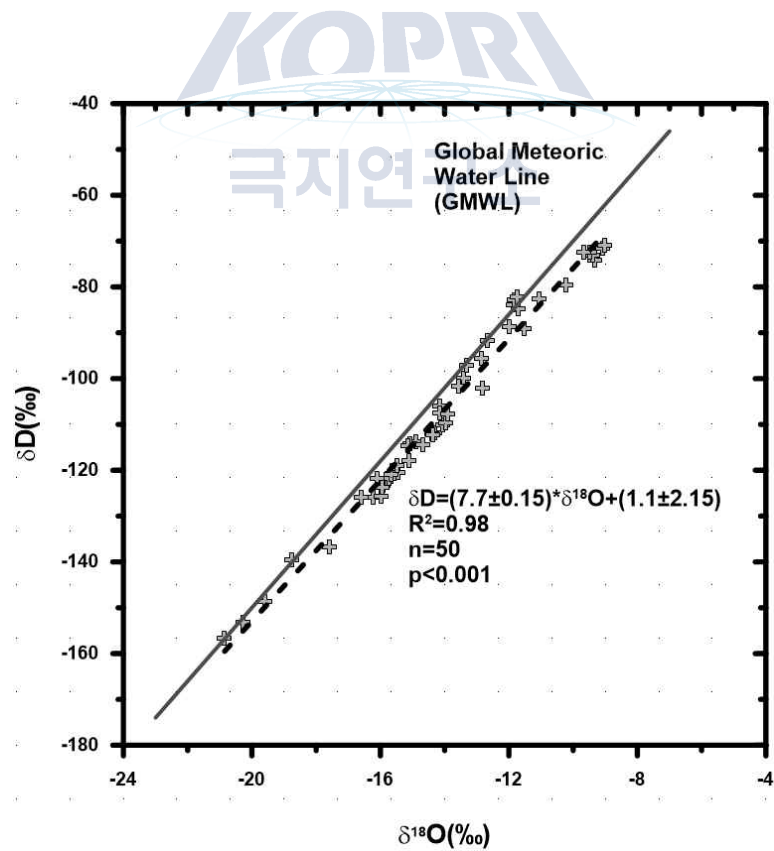


Fig 3.6.3. $\delta^{18}O$ -dD diagram of the snowpit with Global meteoric water line (Craig, 1961)

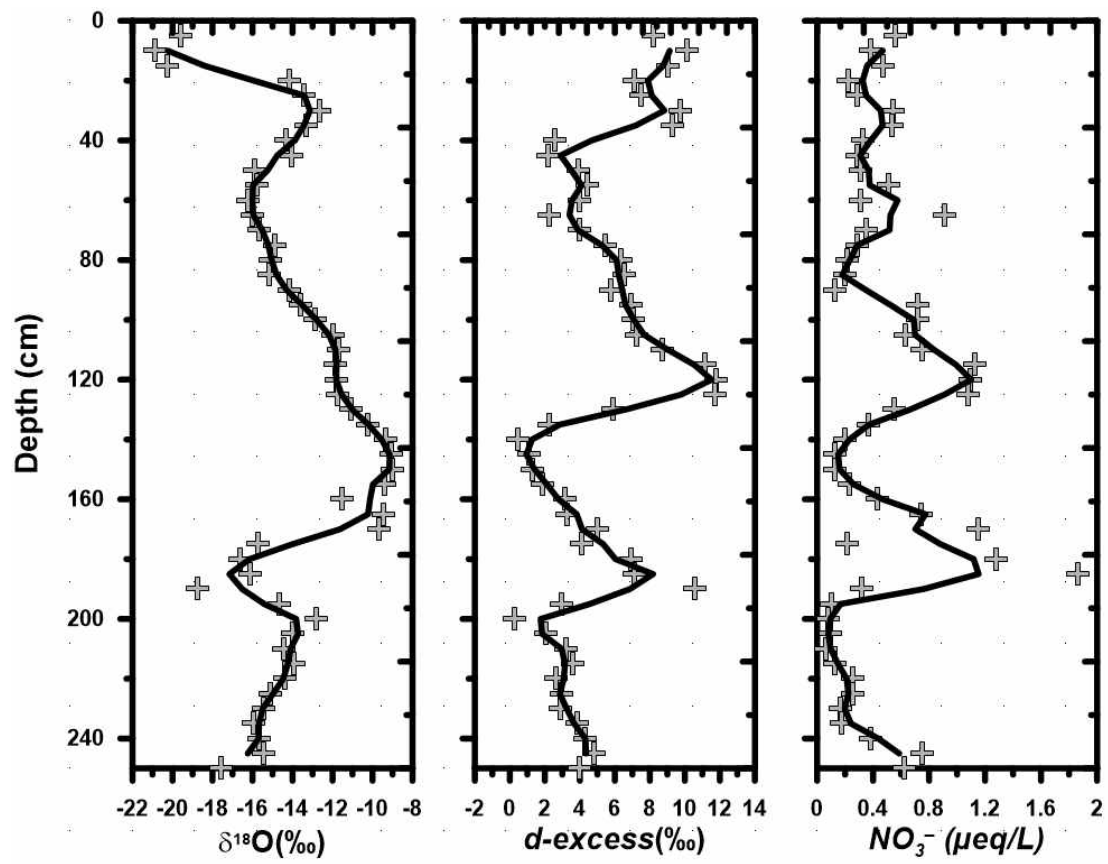


Fig 3.6.4. Vertical profiles of $\delta^{18}\text{O}$, $d\text{-excess}$, NO_3^-



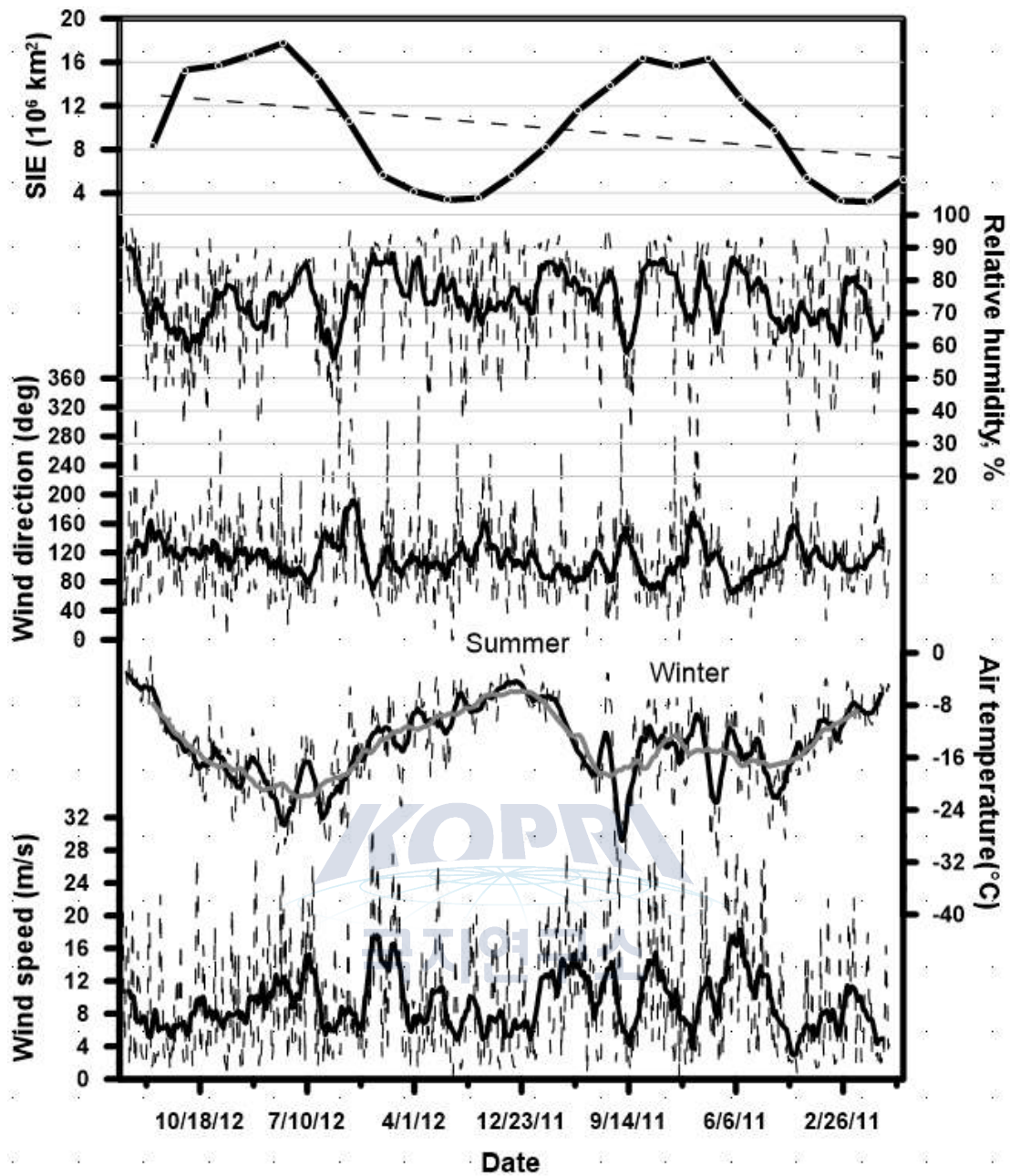


Fig 3.6.5. Daily mean and 15-point running averaged (grey line is 60 day-averaged for air temperature data only) meteorological data between Jan 2011 to Dec 2012 in Bear Peninsula AWS with monthly mean SIE data.

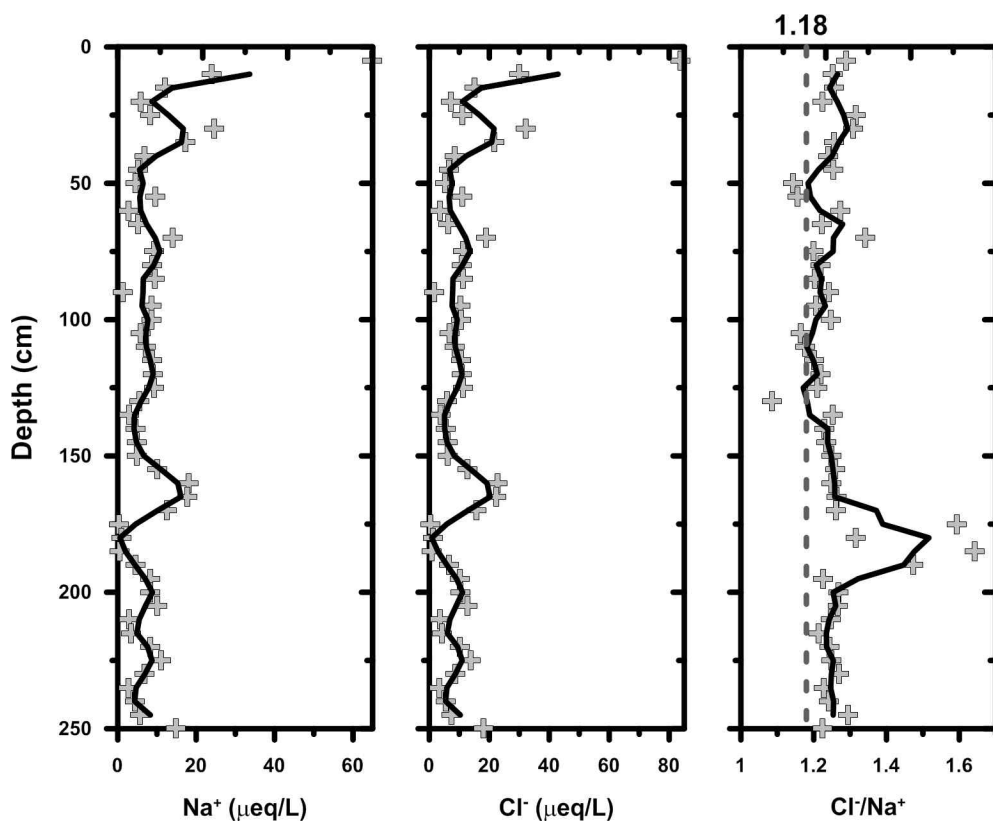


Fig 3.6.6. Vertical profiles of Na^+ and Cl^- ions and their ratio

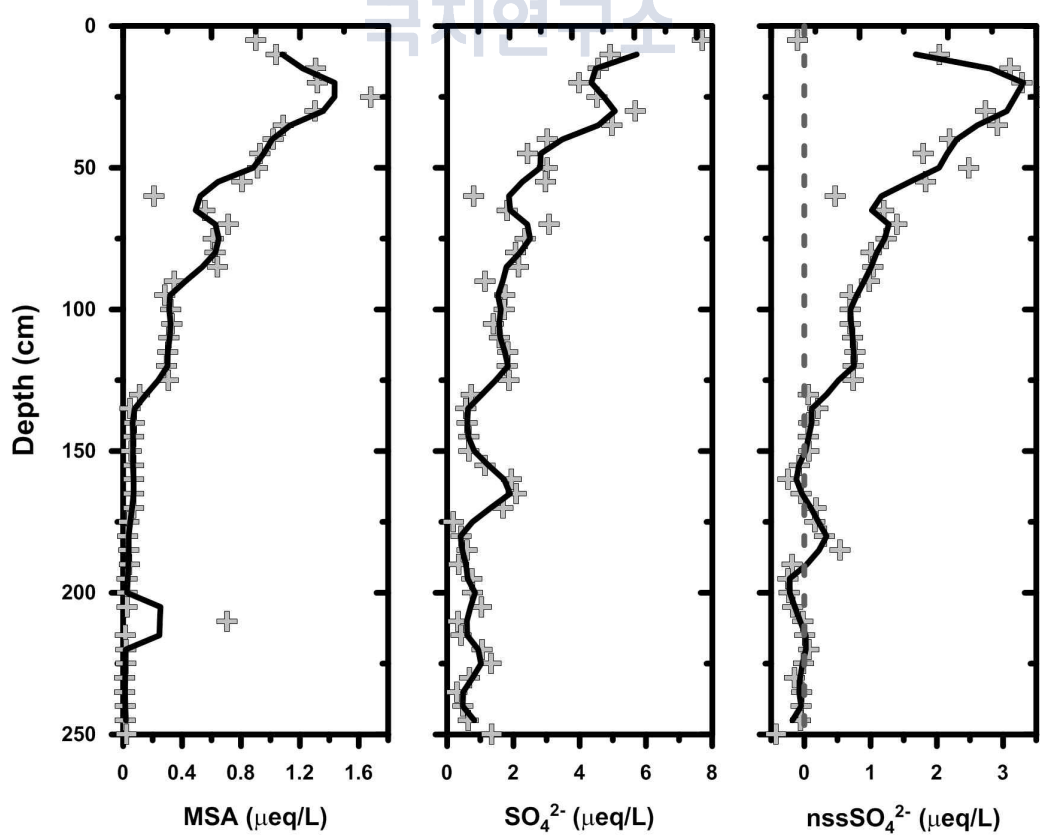


Fig 3.6.7. Vertical profiles of MSA, SO_4^{2-} and nssSO_4^{2-}



High snow accumulation on Amundsen Sea coastal ice rise, West Antarctica

Sang-Bum HONG¹ , Yalalt NYAMGEREL² ,
Won Sang LEE¹  and Jeonghoon LEE^{2*} 

¹*Division of Glacial Environment Research, Korea Polar Research Institute, 26,
Songdomirae-ro, Yeonsu-gu, Incheon 21990, Korea*

²*Department of Science Education, Ewha Womans University, 52,
Ewhayeodae-gil, Seodaemun-gu, Seoul 120-750, Korea*

* corresponding author <jeonghoon.d.lee@gmail.com>

3.7. 얼음의 용해 시 이질성에 의한 물동위원소의 변화

빙하 및 적설층의 용해 과정에서 물안정동위원소($\delta^{18}\text{O}$, δD)는 단순히 초기 강설 시의 값을 보존하지 않으며, 용해수와 잔존 얼음 사이에서 발생하는 동위원소 교환 과정에 의해 시간에 따라 지속적으로 변화한다. 이러한 현상은 특히 해안 및 저지대와 같이 용해가 빈번하게 발생하는 지역에서 채취된 스노우핏 및 빙하코어 자료 해석 시 중요한 고려 요소로 작용한다. 최근 기후변화로 인해 용해 빈도와 강도가 증가함에 따라, 물안정동위원소를 이용한 수문·기후 해석의 불확실성 또한 확대될 가능성이 제기되고 있다.

기존 연구들은 주로 동위원소 조성이 균질한(homogeneous) 적설층을 가정하여 용해 과정 중 동위원소 변화를 해석해 왔으나, 실제 자연 조건에서 형성되는 적설층은 강설 시기의 기상 조건, 수증기 기원, 대기 혼합 및 이동 경로 차이에 따라 서로 다른 동위원소 조성을 지닌 층들이 누적된 이질적(heterogeneous) 구조를 갖는 경우가 일반적이다. 그럼에도 불구하고, 이러한 초기 적설층의 동위원소 이질성이 용해수의 동위원소 진화에 미치는 영향에 대한 정량적 연구

는 제한적으로 이루어져 왔다.

본 연구에서는 동위원소 조성이 다른 두 개의 적설층으로 구성된 이질적 스노우팩을 가정하고, 용해 과정에서 나타나는 불안정동위원소 변화 양상을 물리 기반 1차원 동위원소 교환 모델을 이용해 정량적으로 분석하였다. 모델 실험에서는 초기 적설층 간 동위원소 조성 차이, 층서 배열(상부층 - 하부층), 동위원소 교환 효율(ψ), 얼음 - 액체 상호작용 비율(f), 적설층의 수분 포화도(S) 등의 주요 매개변수를 단계적으로 변화시키며 용해수 및 잔존 적설층의 동위원소 변화를 모의하였다. 또한, 모델 결과는 기존 실험 연구 자료와 비교하여 자연 조건 적용 가능성을 검증하였다.

연구 결과, 용해수의 불안정동위원소 변화는 초기 적설층의 동위원소 조성 차이와 층서 배열에 매우 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 특히 동위원소적으로 상대적으로 풍부한(enriched) 층이 상부에 위치할 경우, 용해 과정 중 상부층에서 유래한 용해수가 하부의 상대적으로 고갈된(depleted) 적설층의 동위원소 조성을 크게 변화시키며, 이로 인해 용해수의 동위원소 변동 폭이 더욱 확대되는 특징이 확인되었다. 또한 동위원소 교환 효율(ψ)과 얼음 - 액체 상호작용 비율(f)이 증가할수록, 용해수 및 잔존 적설층의 동위원소 변화는 더욱 뚜렷하고 복잡한 패턴을 보였다.

이러한 결과는 용해 과정에서 관측되는 불안정동위원소 신호가 단순히 적설층 평균 조성을 반영하는 것이 아니라, 초기 적설층의 이질성과 용해 조건에 의해 크게 변형될 수 있음을 시사한다. 따라서 스노우팩, 빙하코어, 또는 눈 용해수가 주요 수문 성분으로 작용하는 지역에서 불안정동위원소를 이용한 수문 분리(hydrograph separation)나 기후 해석을 수행할 경우, 적설층의 동위원소 층서 구조와 용해 환경에 대한 사전 정보가 필수적으로 고려되어야 함을 강조한다.

본 연구는 이질적인 적설층 구조가 용해수 동위원소 진화에 미치는 영향을 체계적으로 규명한 연구로서, 향후 눈과 빙하 용해가 증가하는 기후변화 조건 하에서 불안정동위원소 기반 수문·빙하 연구의 해석 정확도를 향상시키는 데 중요한 기초 자료를 제공한다. 본 연구 성과는 2024년 Catena에 게재되었다.

Table 3.7.1. The model parameters used in the present simulation

Parameter	Value	Source
Gravitational acceleration (g), m s^{-2}	9.8	—
Viscosity (μ), N s m^{-2}	1.793	Kestin et al., 1978
Intrinsic permeability (k), m^{-2}	2.2×10^{-9}	Colbeck, 1982
Density of ice, g cm^{-3}	0.917	—
Density of water, g cm^{-3}	1.000	—
R (D/H) _{VSMOW}	1.5576×10^{-4}	Hagemann et al., 1970
R ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) _{VSMOW}	2.0052×10^{-3}	Baertschi, 1976
Equilibrium fractionation factor (α) for hydrogen	1.0195	O'Neil, 1968
Equilibrium fractionation factor (α) for oxygen	1.0031	O'Neil, 1968
Water saturation (S)	0.06	Taylor et al., 2002
Porosity (ϕ), %	0.57	Taylor et al., 2002
Irreducible water content (S_i)	0.04	Jordan, 1991
Fraction of ice involved in isotopic exchange (f)	0.3	Taylor et al., 2002
Dimensionless rate constant of isotopic exchange (Ψ)	3.0	Taylor et al., 2002
Initial δD for the two layers, ‰	−87.7 and −114.9	Lee et al., 2010
Initial $\delta^{18}\text{O}$ for the two layers, ‰	−12.6 and −16	Lee et al., 2010



Table 3.7.2. The calculated and experimental values obtained from Herrmann et al. (1981) and Taylor et al. (2002).

Parameter	Value	Source
Bulk density (average of two layers), g cm^{-3}	0.397	Herrmann et al., 1981
Snowpack height, cm	35	Herrmann et al., 1981
Specific discharge, cm h^{-1}	0.2	Herrmann et al., 1981
Porosity	0.58	Calculated
Percolation velocity, cm h^{-1}	3.53	Calculated
Water saturation (S)	0.06	Taylor et al., 2002
Initial δD (top layer), ‰	-141.4	Herrmann et al., 1981
Initial δD (bottom layer), ‰	-124.8	Herrmann et al., 1981
Mass of liquid (a), g cm^{-3}	0.06	Calculated
Mass of ice (b), g cm^{-3}	0.50	Calculated
f	0.3	Optimized
ψ	3	Optimized
k_r , h^{-1}	0.30	Calculated
γ	0.73	Calculated

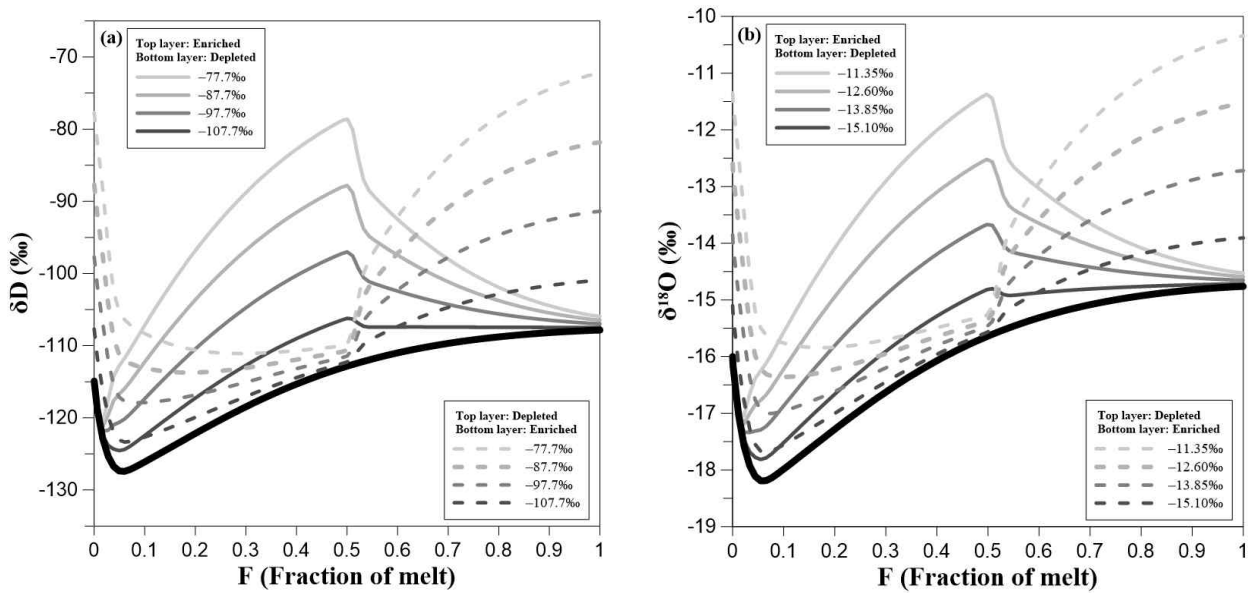


Fig 3.7.1. The modelled isotopic evolution of the meltwater by varying the isotopic difference between two layers: (a) δD ; (b) $\delta^{18}O$. The thick black lines represent the homogeneous layer with δD (- 114.9‰) or $\delta^{18}O$ (- 16‰); the thin lines are the simulations for an enriched top layer and depleted bottom layer, and the dashed lines are the simulations for a depleted top layer and enriched bottom layer.



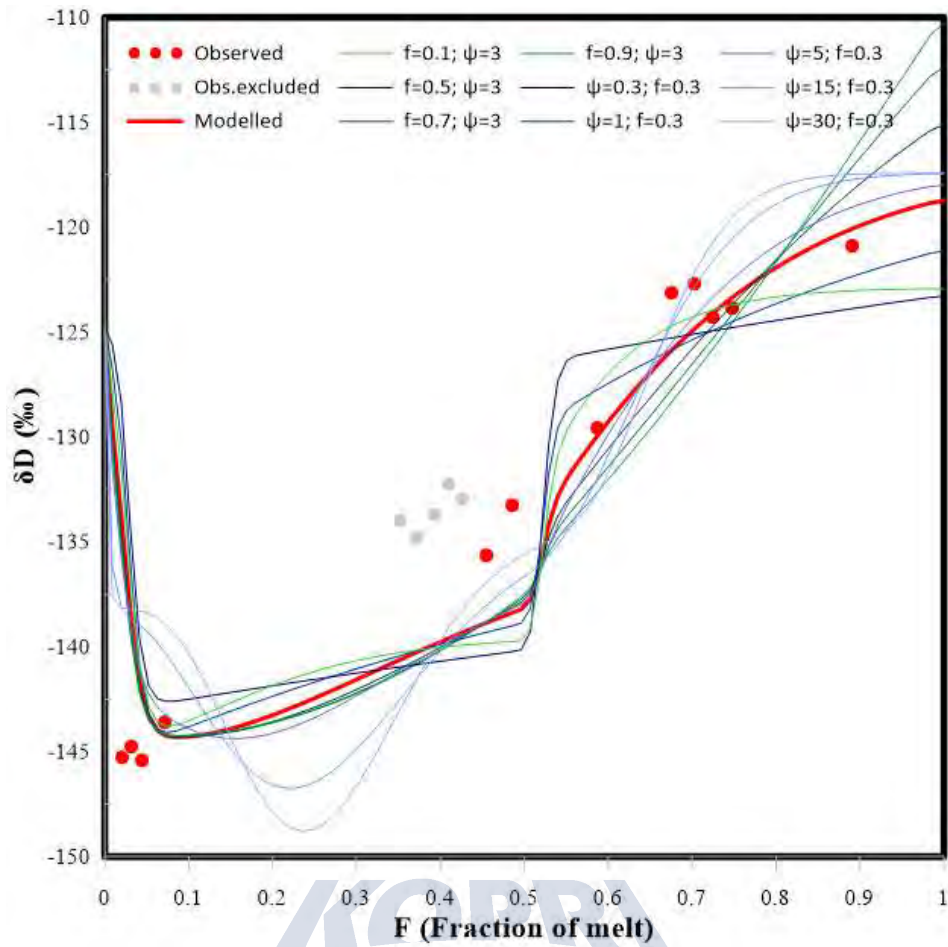


Fig 3.7.2. A comparison of the present model results (solid lines) with the experimental isotopic composition of meltwater according to Herrmann et al., 1981 (red circles). The red line is the good fit to the observed data. The grey circles represent outlying experimental data points that were excluded from the model fitting.

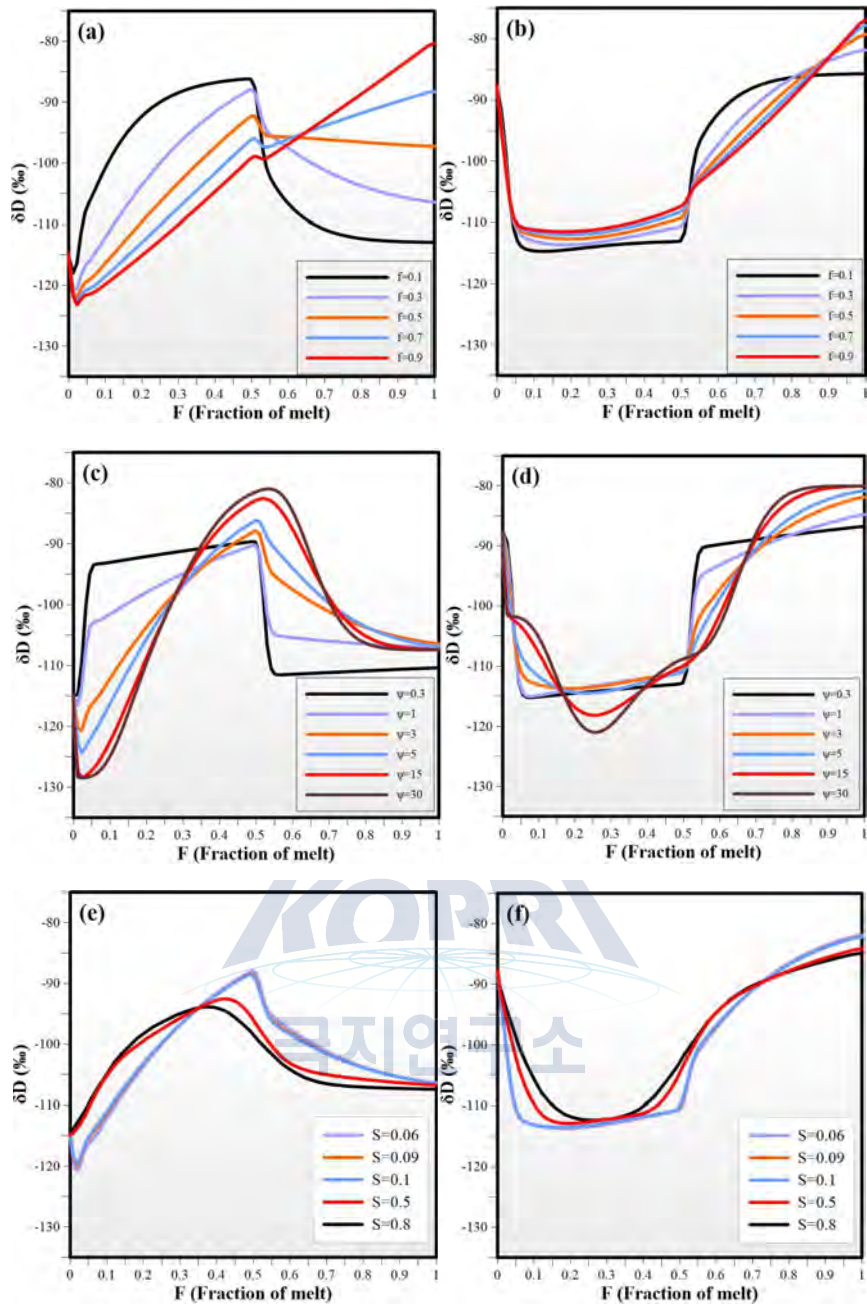


Fig 3.7.3. The simulated evolution of the δD value of meltwater as a function of the fraction (F) of melted snowpack with various values of f (a and b), ψ (c and d), and S (e and f), where the left-hand panels (a, c, and e) represent the results for the isotopically-depleted top layers and enriched bottom layers, while the right-hand panels (b, d, and f) represent the results for the isotopically-enriched top layers and depleted bottom layers.

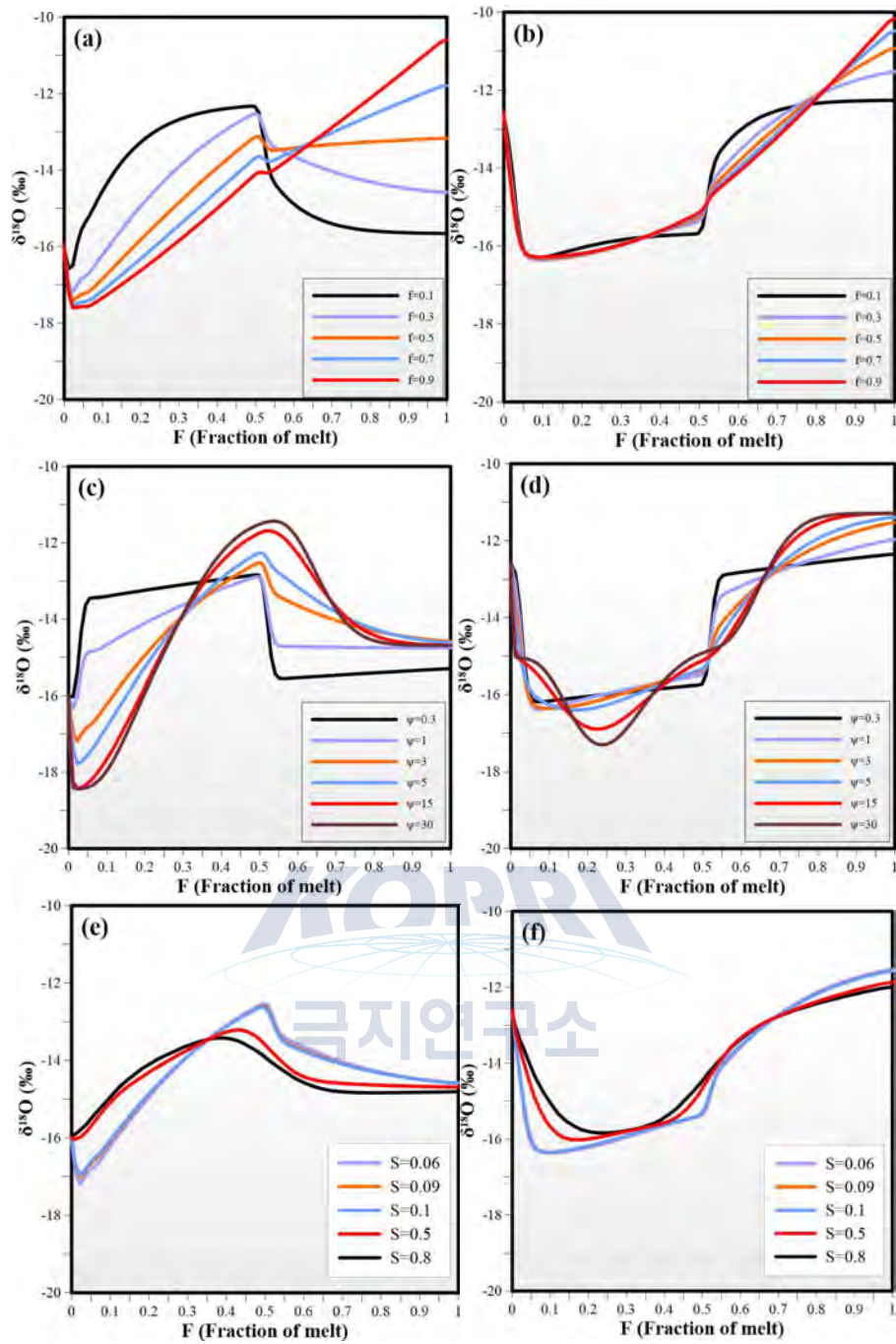


Fig 3.7.4. The simulated evolution of the $\delta^{18}\text{O}$ value of meltwater as a function of the fraction (F) of melted snowpack with various values of f (a and b), ψ (c and d), and S (e and f), where the left-hand panels (a, c, and e) represent the results for the isotopically-depleted top layers and enriched bottom layers, while the right-hand panels (b, d, and f) represent the results for the isotopically-enriched top layers and depleted bottom layers.

Table 3.7.3. The slopes of δD vs. $\delta^{18}O$ with various f , Ψ , and S values (Dep = depleted, Enr = enriched).

Layer sequence	$f = 0.1$	$f = 0.3$	$f = 0.5$	$f = 0.7$	$f = 0.9$	
Dep-Enr	6.85	7.60	6.37	6.04	5.81	
Enr-Dep	6.87	7.97	6.07	5.98	6.03	
Layer sequence	$\Psi = 0.3$	$\Psi = 1$	$\Psi = 3$	$\Psi = 5$	$\Psi = 15$	$\Psi = 30$
Dep-Enr	6.85	7.66	7.20	6.79	6.80	6.82
Enr-Dep	6.87	8.37	8.26	6.77	6.79	6.82
Layer sequence	$S = 0.06$	$S = 0.09$	$S = 0.1$	$S = 0.5$	$S = 0.8$	
Dep-Enr	6.85	6.90	6.92	7.35	7.52	
Enr-Dep	6.87	6.99	7.03	7.92	8.05	



Table 3.7.4. The isotopic variation in meltwater and its contribution to runoff reported in some studies

Location	Sample type	$\delta^{18}\text{O}$ and/or δD	Contribution to runoff	Melting season and study period	Reference
Permafrost catchment, Wolf Creek Research Basin, Yukon, Canada	Snowmelt	$\delta^{18}\text{O} = -25.9\text{‰}$ to -23.8‰	~21% of total freshet	April to June 2002	Carey & Quinton, 2005
Granger Basin within Wolf Creek Research basin, Canada	Snowmelt	$\delta^{18}\text{O} = -24.18\text{‰}$; $\delta\text{D} = -188.12\text{‰}$	32% based on $\delta^{18}\text{O}$; 23% based on δD	April to July 2008	Boucher and Carey, 2010
Western Mongolia (Upper Khovd River Basin)	Glacier melt	–	15.4–18.7% (2000–2016)	Late June and early July	Pan et al., 2019
Changbai Mountain area, semi-arid region in China	Snowmelt	$\delta^{18}\text{O} = -18.83\text{‰}$ to 12.38‰ ; $\delta\text{D} = -134.5\text{‰}$ to -85.34‰	14.4% to 59.8%	April to June, 2020	Feng et al., 2022
Juncal river basin, Central Chile	Glacier meltwater	$\delta^{18}\text{O} = -18.3\text{‰}$ to -17.1‰ ; $\delta\text{D} = -136.0\text{‰}$ to -126.8‰	50% to 90 %	2011 to 2012 (unusual dry year)	Ohlanders et al., 2013
High and Mid Atlas Mountain region, Morocco	Snow	$\delta^{18}\text{O} = -10.0\text{‰}$ to -2.4‰ ; $\delta\text{D} = -72.6\text{‰}$ to -11.6‰	47%	–	Rhoujjati et al., 2021
Snowy range watershed in Southern Rocky Mountains, China	Snowmelt (event)	$\delta^{18}\text{O} = -18.27 \pm 0.52\text{‰}$	70.5% to 74.4% during melting event	Melting out by June	Millet et al., 2021
Upper Ganga River near snout of the Gangotri Glacier, India	Snowmelt and glacial melt	Snowmelt: $\delta^{18}\text{O} = -14\text{‰}$ to -4‰ (mean = -11.4‰); $\delta\text{D} = -103\text{‰}$ to -27‰ (mean = -78.2‰); Glacial melt: $\delta^{18}\text{O} = -18.5\text{‰}$; $\delta\text{D} = -132.8\text{‰}$	Snowmelt: 59.6% ; Glacial melt: 36.8%	During ablation period, 2004 to 2005	Rai et al., 2019
Forested (disturbed and undisturbed) mountain catchment, Šumava National Park, Czech Republic	Precipitation (Snow and rain) in the cold season	$\delta^{18}\text{O} = -14.1\text{‰}$ to -8.1‰ ; $\delta\text{D} = -100.3\text{‰}$ to -54.0‰	$\delta^{18}\text{O} = 29\text{‰}$ to 65‰ ; $\delta\text{D} = 38\text{‰}$ to 53‰	May to October	Vystavna et al., 2018
Himalayan River (Satluj), India	Glacial, snow melt	$\delta^{18}\text{O} = -9.6\text{‰}$ to -24.7‰	15–64%	–	Maurya et al., 2018
Beas basin, western Himalaya, India	Snow/Glacial melt	$\delta^{18}\text{O} = -10.05\text{‰}$	50% to annual runoff	April to June, 2010–2011	Ahluwalia et al., 2013
High elevation catchment of Rofenache stream, Alps	Snowmelt	$\delta^{18}\text{O} = -18.8\text{‰}$ (early melt event) to -17.9‰ (peak melt event)	35% (early melt season) to 75% (peak season)	April to June 2014	Schmieder et al., 2016
Bridge Creek catchment in Italian Dolomites	Snow/Glacial melt	$\delta\text{D} = -26.1$ to -202.0‰	58–72%	March April 2011 to 2013	Penna et al., 2016
Tizinafu glacier river in north Kunlun Mountains, China	Ice meltwater	–	28.31–65.43%	2011–2012	Fan et al., 2015
Saldura river catchment in the Eastern Italian Alps	Snowmelt and glacial melt	Snowmelt: $\delta^{18}\text{O} = -15.62\text{‰}$ to -14.09‰ ; Glacial melt: $\delta^{18}\text{O} = -15.33\text{‰}$ to -13.86‰	Snowmelt: 33% Glacial melt: 65%	May to July 2011–2013	Engel et al., 2016
Wind River Range watershed, American Rockies	Glacial melt	–	53–59%	2007–2008	Cable et al., 2011



Isotopic evolution of snowmelt and its hydrometeorological importance in snow-covered regions

Yalalt Nyamgerel^a, Yeongcheol Han^b, Jeonghoon Lee^{a,*}

^a Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Republic of Korea

^b Division of Glacial Environment Research, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea

3.8. 스틱스 지역 빙하시료를 이용한 미량원소·안정동위원소 기반 대기대순환 연구

북빅토리아랜드(Northern Victoria Land) 지역은 로스해(Ross Sea)와 인접한 남극 연안 환경으로, 해양 - 대기 상호작용과 대기대순환 변화에 민감하게 반응하는 기후 전이대에 위치한다. 이 가운데 Styx Glacier 지역은 국내 연구진이 장기간에 걸쳐 천부 및 심부 빙하코어를 확보하고 체계적인 분석을 수행해 온 대표적인 연구 지점으로, 해양 기원 수증기의 유입과 대규모 대기 순환 신호를 동시에 기록할 수 있는 중요한 기후 아카이브로 평가된다.

본 연구에서는 극지연구소(KOPRI)가 시추한 Styx-M 빙하코어 상부 구간(약 9.9m)을 대상으로, 1979년부터 2014년까지 약 36년간의 불안정동위원소($\delta^{18}\text{O}$, δD , d-excess), 강설량(snow accumulation), 주요 이온 및 미량원소(희토류원소 포함) 자료를 종합 분석하였다. 연대는 $\delta^{18}\text{O}$ 와 해양 생물 기원 지시자인 MSA, nssSO_4^{2-} 의 계절 변동을 이용한 연층 판별을 기본으로 하되, Pinatubo(1991), El Chichón(1982) 등 대규모 화산 분출에 따른 황산염 신호를 활용하여 보정함으로써 연대 신뢰도를 확보하였다.

불안정동위원소 자료는 인근 자동기상관측소(AWS)와 ERA-Interim 재분석 자료와 비교되었으며, 그 결과 연평균 $\delta^{18}\text{O}$ 는 국지 기온 변화와의 직접적인 상관성은 제한적인 반면, 여름철(DJF)에는 수증기 기원지의 해수면 온도(SST) 및 해빙 면적(SIE)과 약한 양의 상관성을 보였다. 이는 Styx 지역의 $\delta^{18}\text{O}$ 가 현지 기온보다는 태평양 - 로스해 해역의 해양 환경과 대기 수송 경로에 의해 크게 조절됨을 시사한다. d-excess와 강설량 역시 해빙 면적과 SST 변화에 민감하게 반응하여, 수증기 발생 조건과 대기대순환의 변동을 반영하는 보조적 지표로 작용함을 확인하였다.

강설량 분석 결과, Styx 지역의 연강설량은 남극진동(SAM), Amundsen Sea Low(ASL),

ENSO와 같은 대규모 대기대순환 지수 및 로스해 해빙 변화와 유의한 연관성을 보였다. 특히 해빙 면적이 감소하는 시기에는 해양 수증기 공급이 증가하며 강설량이 증가하는 경향이 나타났다, 이에 따라 강설량은 이 지역에서 해양 기후 변동을 가장 직접적으로 반영하는 프록시로 활용될 수 있음을 제시하였다.

미량원소 분석은 1979 - 1999년 구간을 대상으로 수행되었으며, ICP-SF-MS 자료에 대한 주성분분석(PCA) 결과 휘토류원소를 포함한 다수의 원소가 하나의 주성분(PC1)으로 강하게 군집되는 특징을 보였다. 이는 Transantarctic Mountains 인근에서 기원한 지각성 먼지가 Styx 지역 빙하에 주요 공급원으로 작용함을 시사한다. 동시에 일부 원소군은 비지각성(해양 또는 장거리 대기 수송) 기원을 보여, 대기 순환 강도와 수송 경로 변화가 미량원소 변동을 지배하는 핵심 요인임을 확인하였다.

아울러 본 연구에서는 기존 북빅토리아랜드 - 로스해 지역에서 제시된 동위원소 - 온도 공간적 관계식에 Styx-M 자료를 추가하여 관계식을 수정·보완하였다. 그 결과, 공간적 스케일에서는 $\delta^{18}\text{O}$ - 온도 관계가 유지되지만, 단일 지점의 시간적 변동성에서는 해양 환경과 대기대순환의 영향이 지배적임을 명확히 제시하였다. 이는 남극 연안 빙하코어 해석 시 온도 단일 요인 접근의 한계를 강조하는 결과이다.

종합적으로 본 연구는 Styx-M 빙하코어가 로스해 인근 해양 환경 변화와 대기대순환 변동을 민감하게 기록하는 고해상도 기후 기록임을 입증하였다. 특히 강설량과 미량원소·휘토류원소 자료를 결합한 접근은, 향후 심부 Styx-M 빙하코어를 이용한 장기 고기후 복원과 기후모델 검증 연구를 위한 핵심 기초 자료를 제공한다는 점에서 중요한 학술적 의의를 지닌다. 본 연구 결과는 2024년 Science of the Total Environment에 게재되었다.

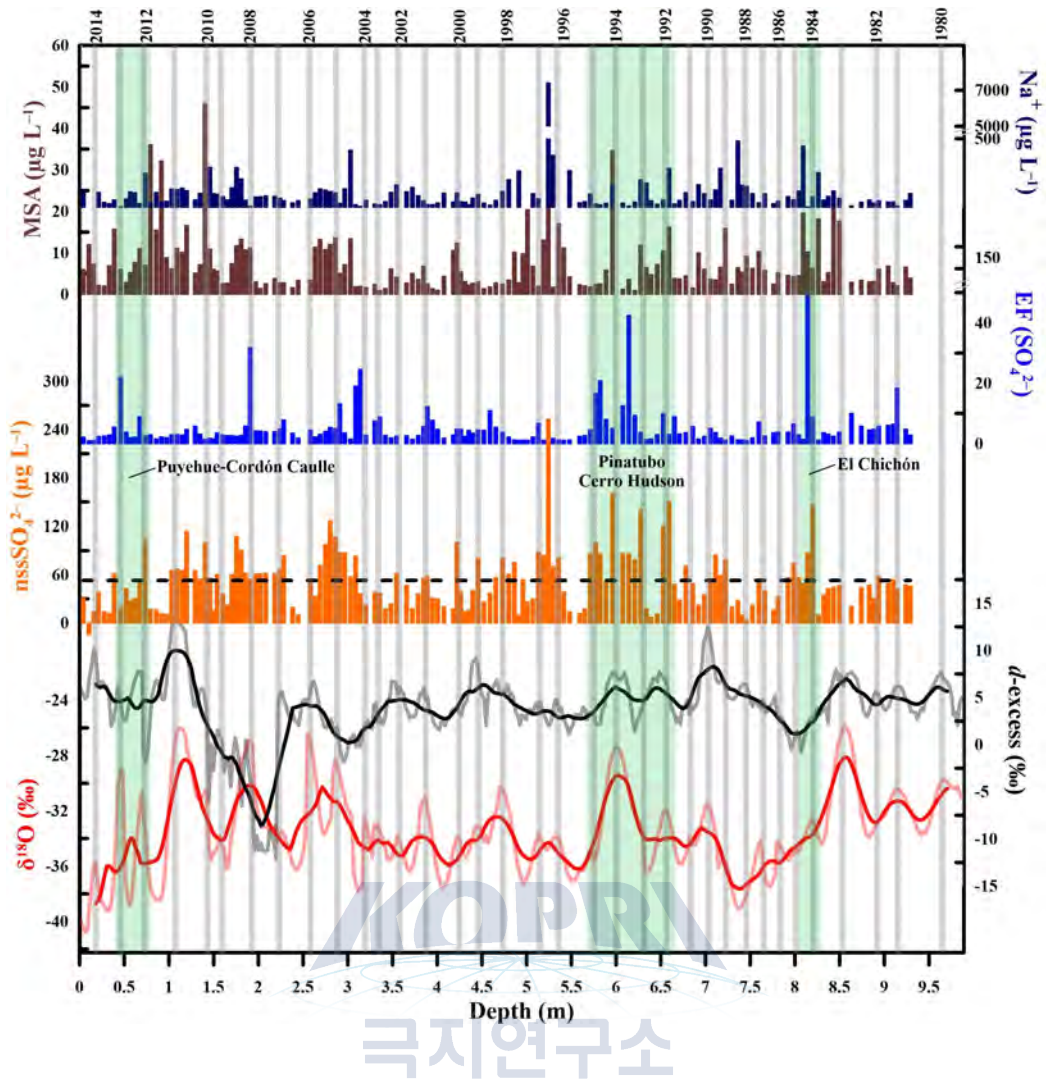


Fig. 2. Profiles of $\delta^{18}\text{O}$, d -excess, nssSO_4^{2-} , $\text{EF}(\text{SO}_4^{2-})$, MSA , and Na^+ of the Styx-M ice core. Thick red and black lines in $\delta^{18}\text{O}$ and d -excess indicate the 15-point moving averages. Vertical grey lines indicate the austral summer peaks (Jan 1) of each year, and green shaded areas represent increased nssSO_4^{2-} corresponding to the volcanic deposition events of El Chichón (1982), Pinatubo (1991), and Puyehue - Cordón Caulle (2011). The dashed black line is the mean value of nssSO_4^{2-} .

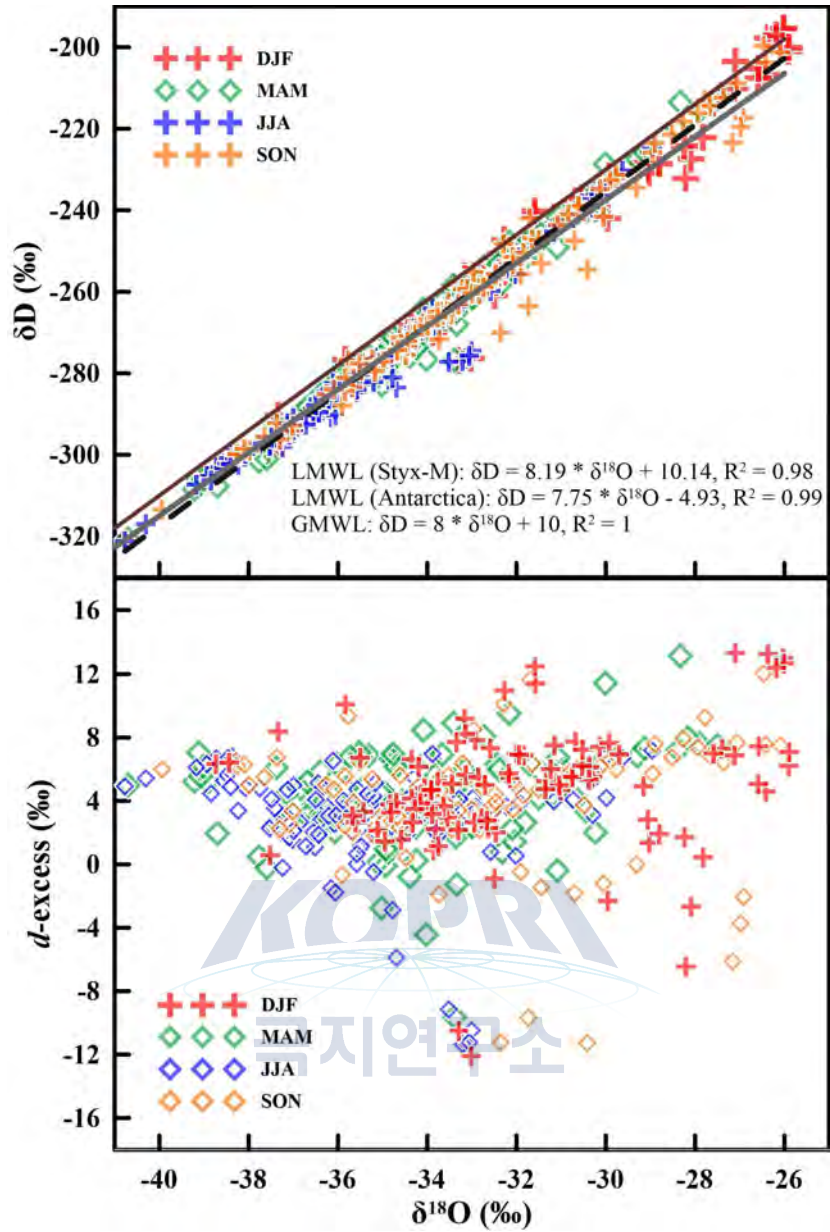


Fig. 3. Plots of δD and d -excess against $\delta^{18}O$ from the Styx-M ice core, with points corresponding to austral summer (DJF), autumn (MAM), winter (JJA), and spring (SON). The local meteoric water line (LMWL) for the Styx-M ice core (dashed line), the LMWL for Antarctica (grey line; from Masson-Delmotte et al., 2008), and the global meteoric water line (GMWL, black; from Craig, 1961) are shown.

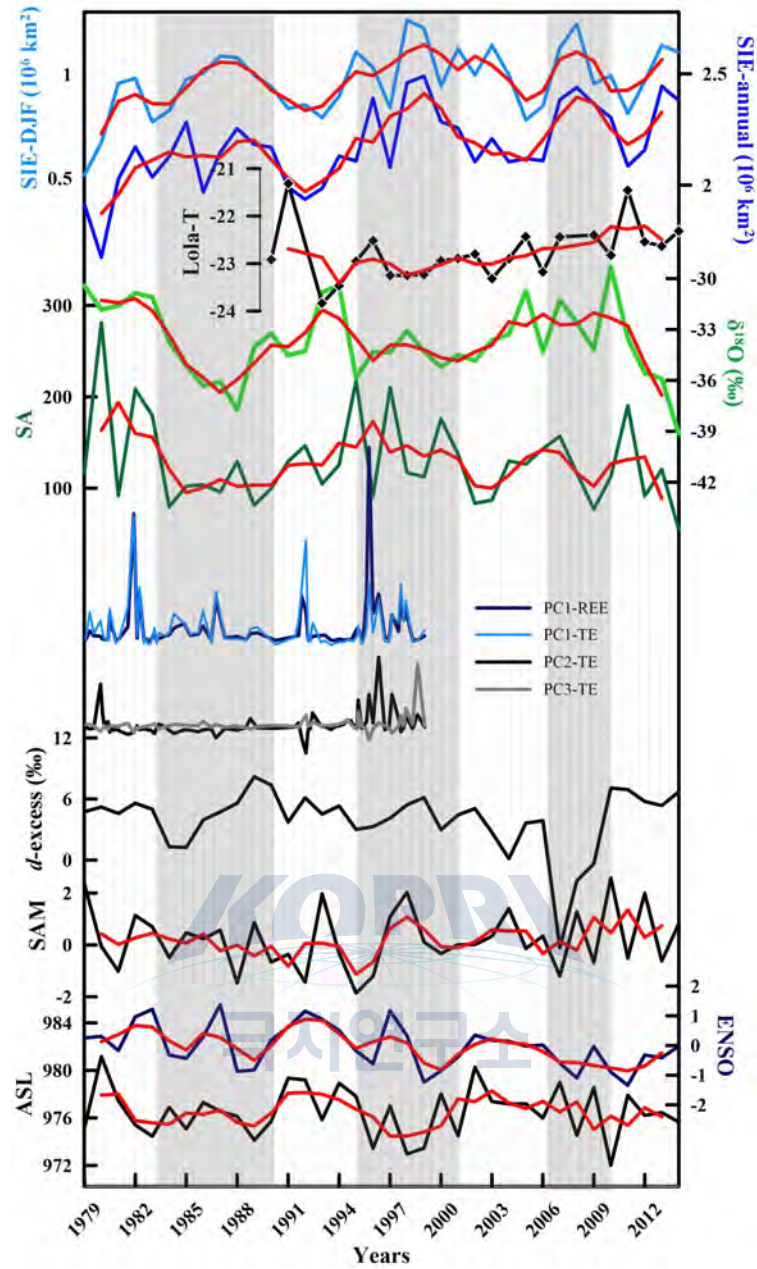


Fig. 4. Comparison of the annual mean values of the Styx-M ice core records ($\delta^{18}\text{O}$, d-excess, and SA) with the ASL, ENSO, summer (DJF) and annual SIE, local temperature at Lola (Lola-T), and the JJA mean of SAM. Red lines indicate the 3-point moving average trend, whereas grey vertical shading indicates the years with higher SIE values. The PC1 score of rare earth elements (PC1-REE) and the PC1, PC2, and PC3 scores of the trace elements (TE) are shown (axis is not to scale).

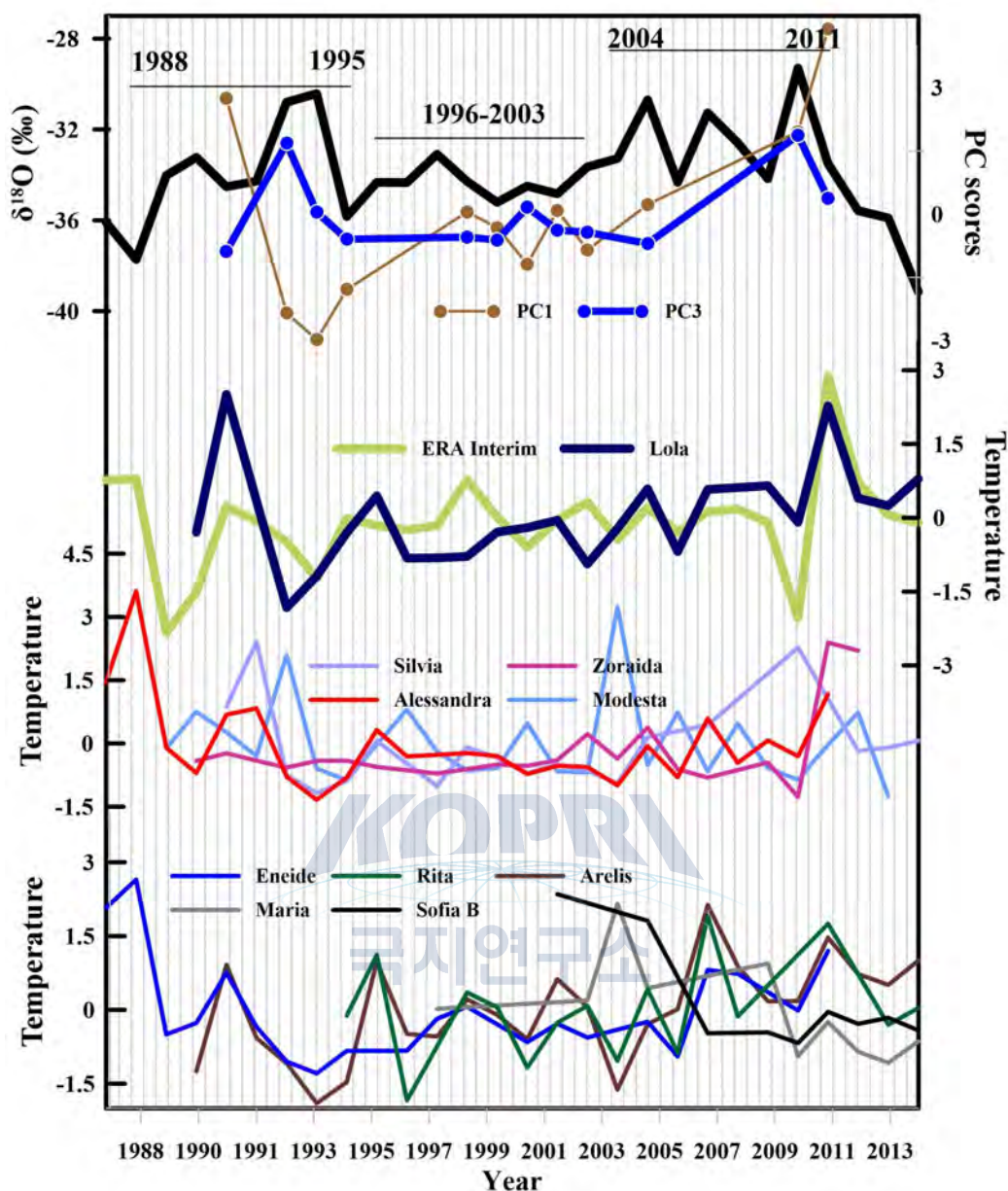


Fig. 5. Comparison of the variations of annual temperatures (standardized) at the nearby AWSs and the ERA-Interim reanalysis with the mean $\delta^{18}\text{O}$ of the Styx-M ice core. The periods with $\delta^{18}\text{O}$ peaks and steady values are highlighted in the underlined years at the top of the figure. The PC1 and PC3 scores from the principal component analysis (PCA) on the AWS temperatures are shown.

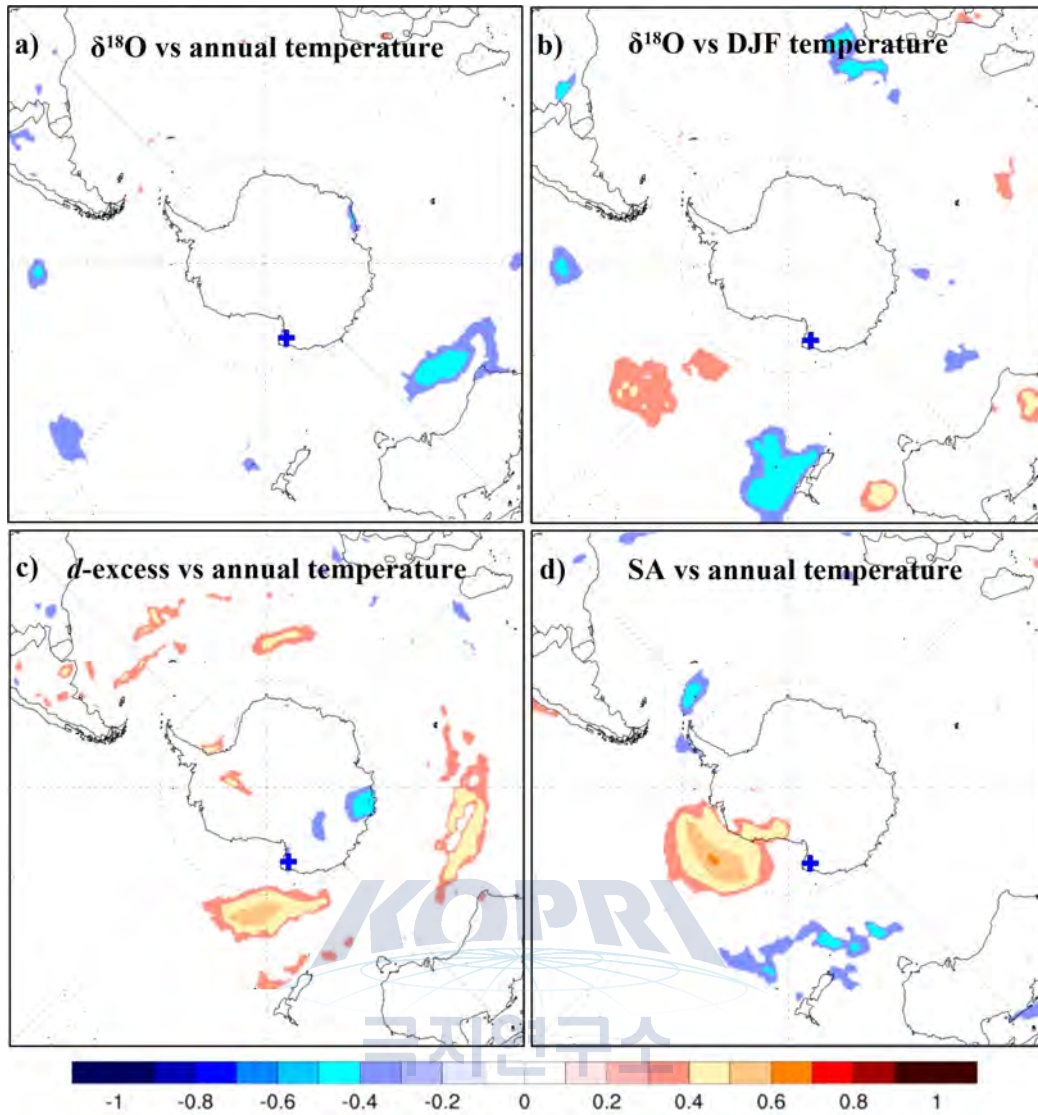
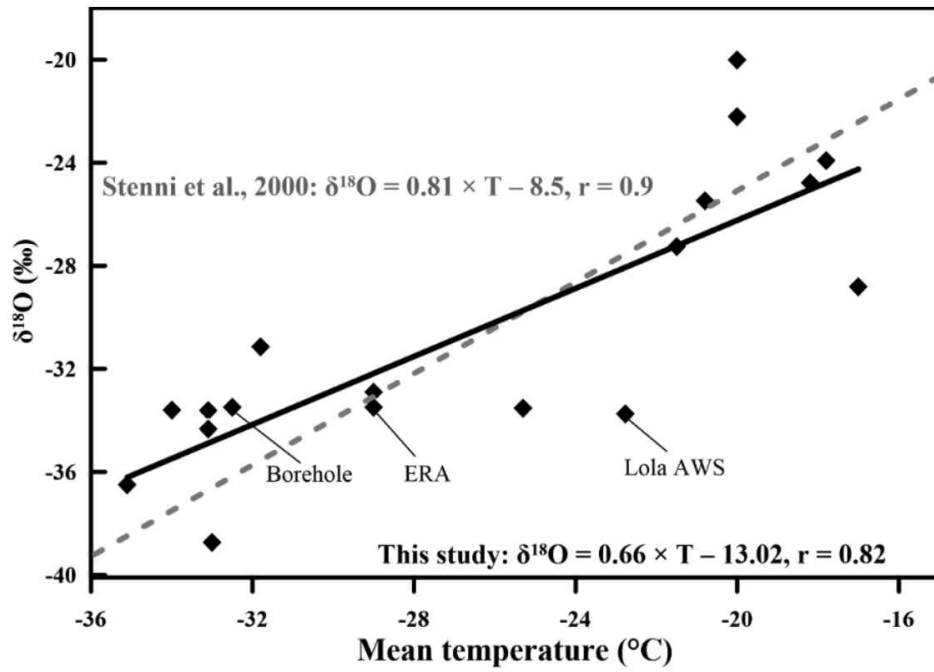


Fig. 6. Spatial correlation maps between the annual mean $\delta^{18}\text{O}$ of the Styx-M ice core and 2-m temperature from the ERA-Interim reanalysis for annual (a) and DJF (b). The same map is presented for the annual mean *d*-excess (c) and SA (d) with the annual mean temperature. Blue crosses indicate the location of the Styx-M ice core site. The scale bar indicates the Pearson's correlation coefficients at the 95 % significance level. This correlation analysis was performed using Climate Reanalyzer by Climate Change Institute of University of Maine, USA (<https://climatoreanalyzer.org/>).



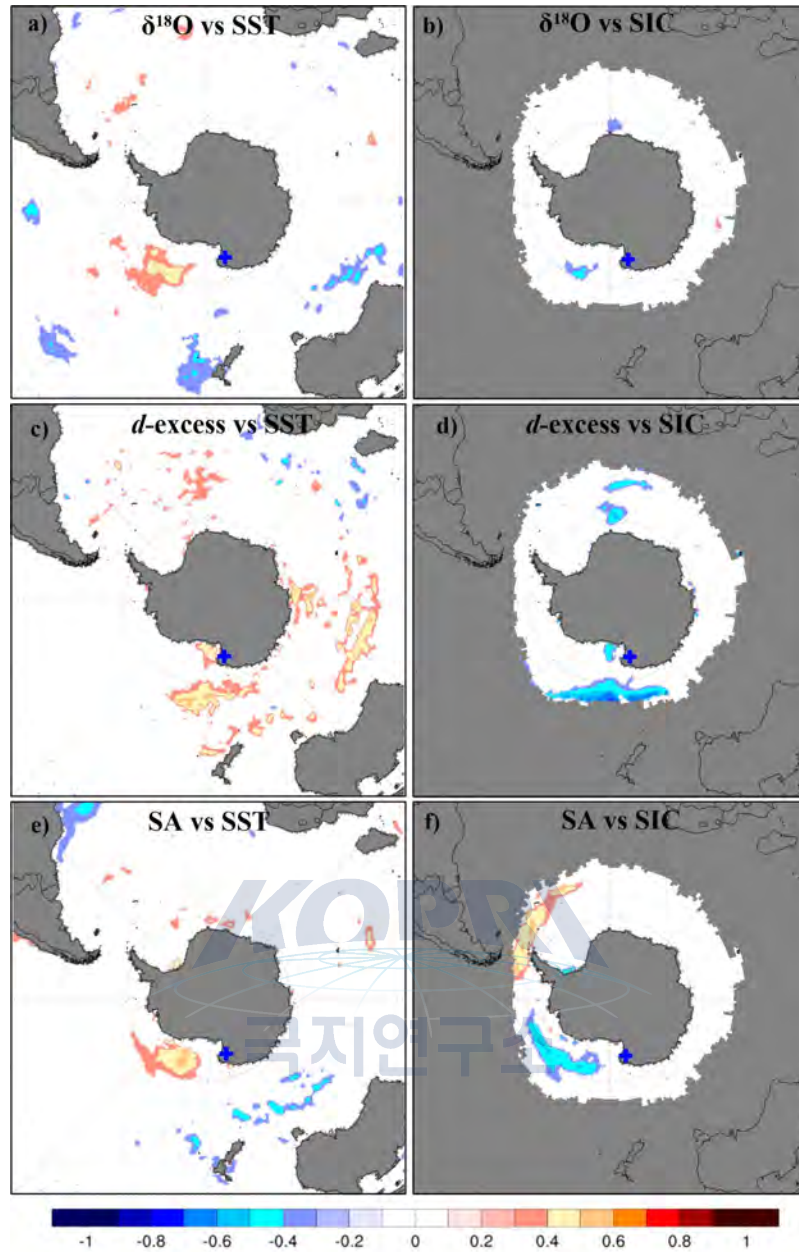


Fig. 8. Spatial correlation maps of the annual mean of the Styx-M ice core records ($\delta^{18}\text{O}$, d -excess, and SA) with SST (a, c, e) and SIC (b, d, f) of the ERA-Interim reanalysis data. The white area (b, d, f) indicates the boundary of the SIC data utilized in the correlation analysis. Blue crosses indicate the location of the Styx-M ice core site. The scale bar indicates the Pearson's correlation coefficients at the 95 % significance level. This correlation analysis was performed using Climate Reanalyzer by Climate Change Institute of University of Maine, USA (<https://climatoreanalyzer.org/>).

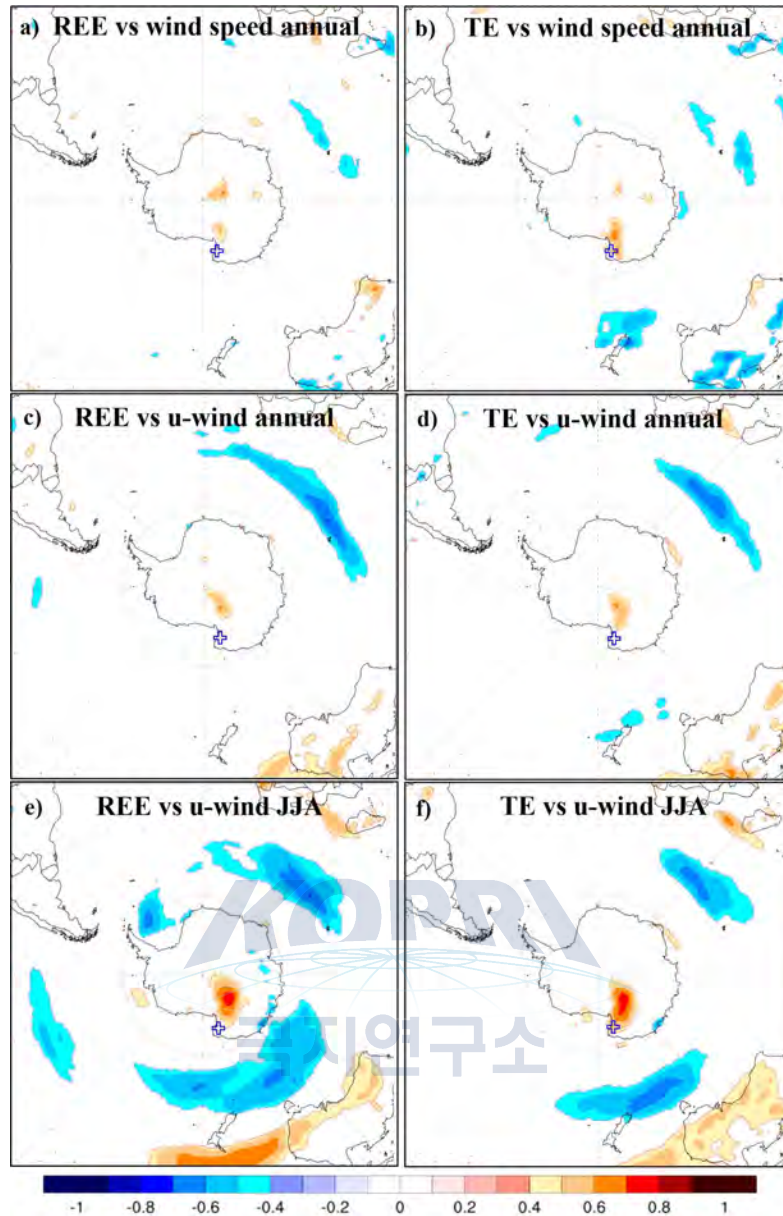


Fig. 9. Spatial correlation maps between the PC1 scores of REE (a, c, e) and TE (b, d, f) of the Styx-M ice core records with 10-m wind speed and 10-m u-wind components (annual and JJA season) of the ERA-Interim reanalysis data. Blue crosses indicate the location of the Styx-M ice core site. The scale bar indicates the Pearson's correlation coefficients at the 95 % significance level. This correlation analysis was performed using Climate Reanalyzer by Climate Change Institute of University of Maine, USA (<https://climatereanalyzer.org/>).

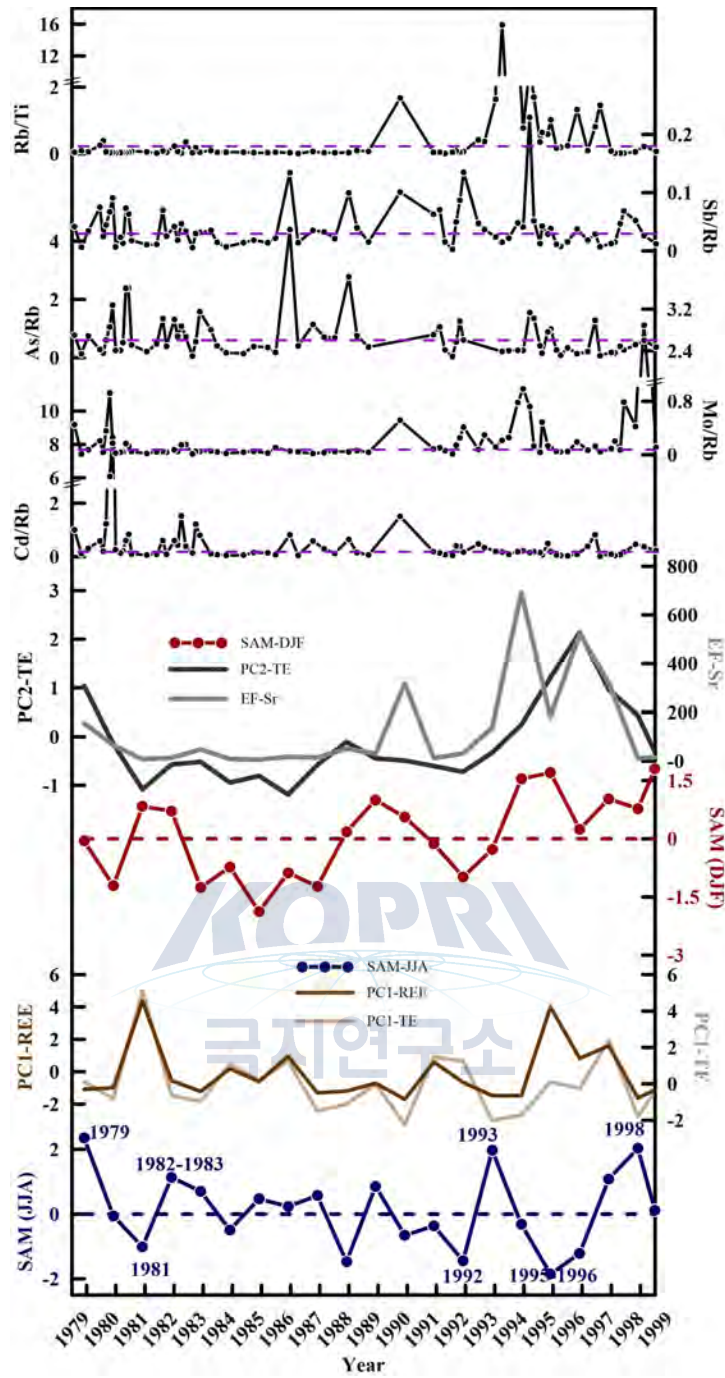


Fig. 10. Comparison of the PC1-REE, PC1-TE, and PC2-TE with the SAM index during the DJF (red) and JJA (blue) seasons spanning the 1979 - 1999 period. Horizontal blue and red dashed lines indicate the SAM index at zero. The elemental ratios of Cd/Rb, Mo/Rb, As/Rb, Sb/Rb, and Rb/Ti in the Styx-M ice core were plotted with those in Mount Erebus Plume (purple dashed line).



Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv



Climate-related variabilities in the Styx-M ice core record from northern Victoria Land, East Antarctica, during 1979–2014

Yalalt Nyamgerel^a, Yeongcheol Han^b, Heejin Hwang^b, Changhee Han^c, Sang-Bum Hong^b, Soon Do Hur^b, Jeonghoon Lee^{a, *}

^a Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Republic of Korea

^b Division of Glacial Environment Research, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea

^c Earth System Science Research Center, Yonsei University, Seoul 03722, Republic of Korea

3.9. GV7 지역 빙하시료를 이용한 강설량 복원 및 원격 대기대순환 영향 분석



동남극 북빅토리아랜드의 GV7 지역은 비교적 높은 강설량과 낮은 퇴적 후 변형(post-depositional effect) 특성을 지니고 있어, 고해상도 기후 신호가 잘 보존되는 대표적인 빙하 연구 지점으로 평가되어 왔다. 본 연구에서는 2013 - 2014년 남극 하계 동안 한국 - 이탈리아 공동연구로 시추된 GV7-C 빙하코어(총 길이 78m)를 대상으로, 물안정동위원소($\delta^{18}\text{O}$, δD , d-excess)와 강설량 기록을 분석하여 과거 강설 변동성과 원격 대기대순환(teleconnection)의 영향을 규명하고자 하였다.

빙하코어의 연대는 물안정동위원소의 계절적 변동성을 이용한 연층 분석을 기반으로 구축하였으며, 피나투보(Pinatubo), 아궁(Agung), 탐보라(Tambora) 등 주요 화산 분출에 따른 황산염 및 전기전도도 피크를 활용하여 연대의 정확성을 검증하였다. 확정된 연대 - 심도 관계에 밀도 자료를 적용함으로써, 연간 강설량을 물등가(mm w.e. yr^{-1}) 단위로 정량화하였다. 그 결과, GV7 지역의 평균 강설량은 약 $223 \pm 59 \text{ mm w.e. yr}^{-1}$ 로 산출되었으며, 이는 인근 동남극 해안 지역에서 보고된 기존 자료와 잘 부합하는 수준이다.

강설량 시계열을 남극진동(SAM), ENSO, 인도양 관련 지수(IOD 등) 및 ERA5 재분석 자료와 비교한 결과, 강설량 자체는 특정 단일 대기대순환 지수와 일관되고 강한 상관성을 보이지 않았다. 이는 남극 해안 지역의 강설량이 대규모 기후 모드 하나에 의해 지배되기보다는, 대기 수송 경로, 사이클론 활동, 단기적 강수 이벤트 등 다수의 요인이 복합적으로 작용한 결과임을

시사한다.

반면, 불안정동위원소 기록은 원격 대기 - 해양 변동과의 뚜렷한 연관성을 보였다. $\delta^{18}\text{O}$ 는 주로 태평양 영역의 기후 변동(ENSO, 남태평양 해빙 변화 등)에 민감하게 반응하며, 수증기 수송 경로와 대기대순환 변화의 영향을 반영하는 것으로 해석되었다. d -excess는 인도양 기원 수증기의 상대적 기여도와 밀접하게 연관되어, 인도양 남동부 해역의 해수면온도(SST) 및 장주기 대기 - 해양 변동을 안정적으로 추적하는 지표로 작용함을 확인하였다.

주성분분석(PCA) 결과에서도 이러한 특성이 명확히 드러났다. $\delta^{18}\text{O}$ 는 주로 태평양 영역 및 SAM과 연계된 변동성을 반영하는 반면, d -excess는 인도양 기원 수증기의 열역학적 조건과 보다 밀접하게 관련된 성분으로 분리되었다. 이는 GV7 빙하시료가 국지적 기후 신호뿐 아니라, 태평양과 인도양을 연결하는 원격 대기 - 해양 상호작용을 동시에 기록하고 있음을 의미한다.

종합적으로 본 연구는 강설량과 불안정동위원소 신호를 분리하여 해석함으로써, 남극 해안 빙하코어 기록에 내재된 기후 신호의 복잡성을 체계적으로 규명하였다. 강설량은 다양한 동적 요인의 영향을 받는 반면, $\delta^{18}\text{O}$ 와 d -excess는 수증기 기원지와 원격 해양 기후 변동을 보다 안정적으로 반영할 수 있음을 제시하였다. 이러한 결과는 향후 남극 빙하코어를 이용한 대기대순환 복원 및 수분 기원 연구, 그리고 동위원소 기반 기후모델 검증 연구에 중요한 기초 자료를 제공한다는 점에서 학술적 의의가 크다. 본 연구는 현재 EGUsphere에 투고되어 심사 중에 있다.

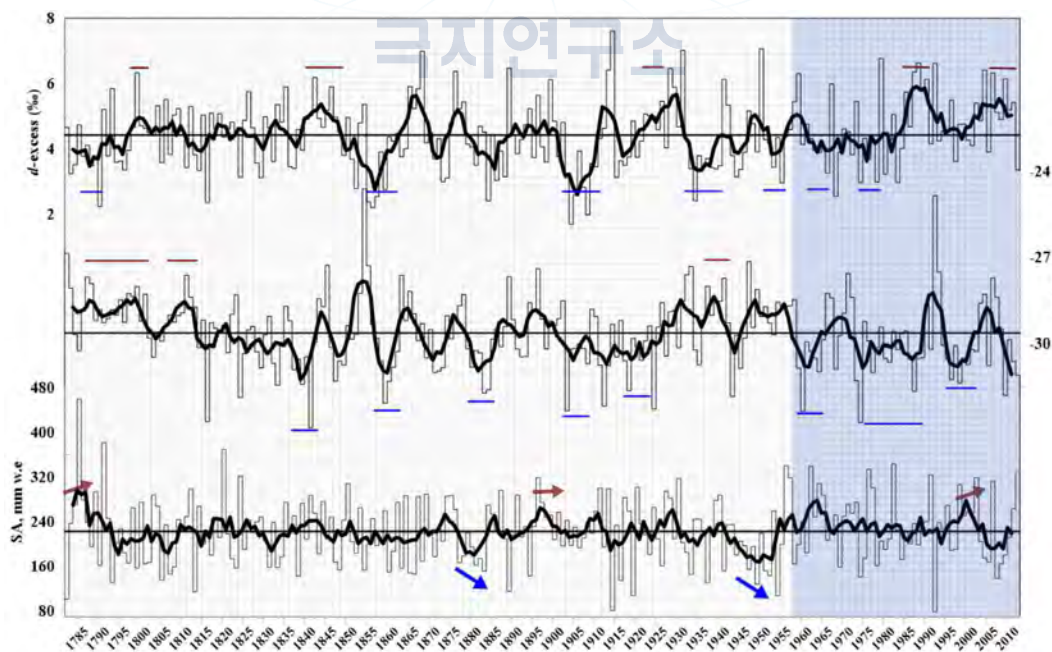


Figure 2. Temporal variation in the SA (bottom panel), $\delta^{18}\text{O}$ (middle panel), and d -excess (top panel), with the horizontal black line indicating the overall mean. The thick black lines represent the 5-year running average. The blue and red lines (arrows) indicate the periods that are higher or lower than average for at least four continuous years.

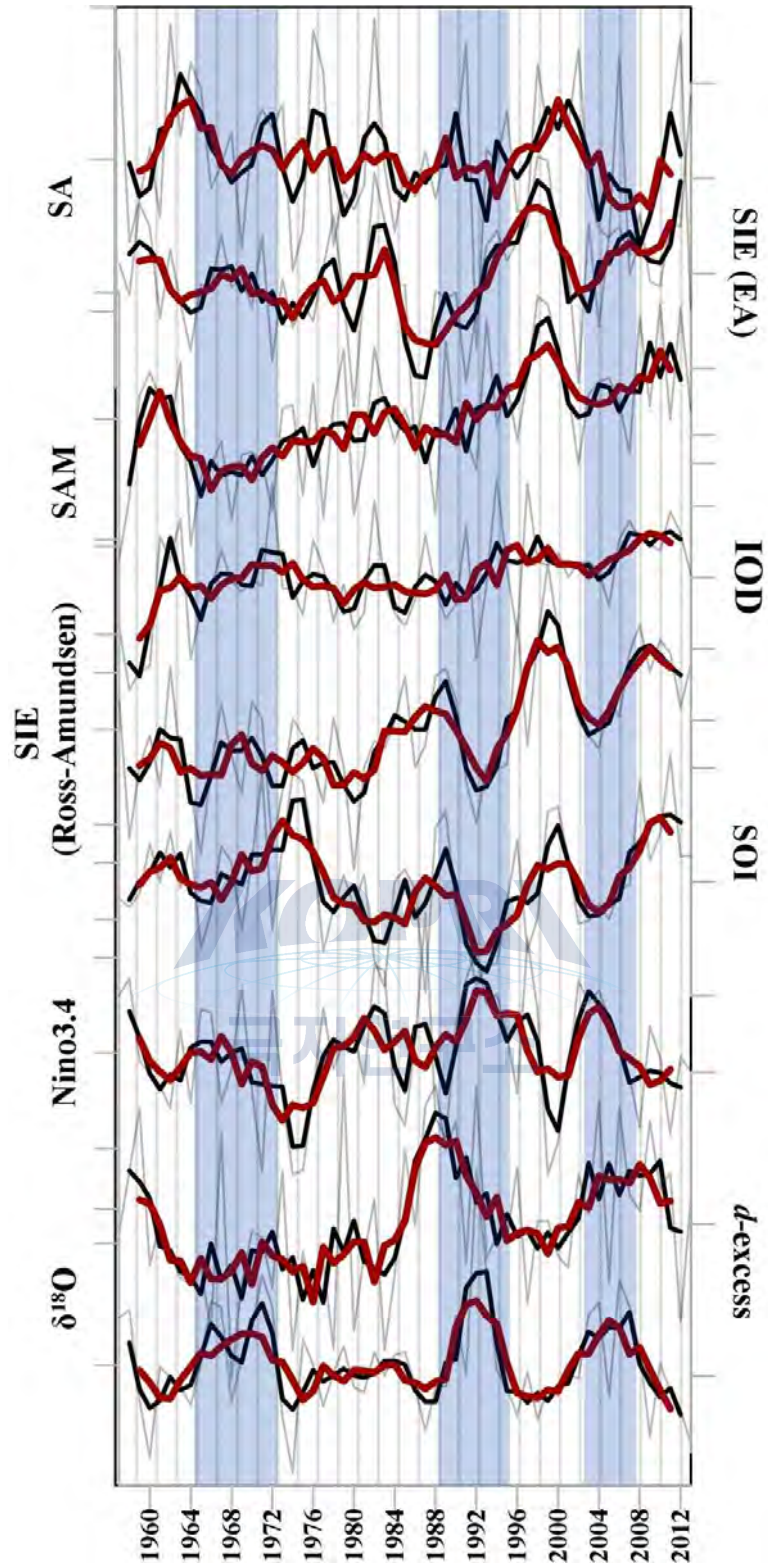


Figure 3. Comparison of the standardized profiles (grey lines) for SA, $\delta^{18}\text{O}$, and d -excess with the climate variables for 1957 - 2013 CE. The red and blue lines indicate the 3- and 5-year running average. The vertical red shading indicates periods with large $\delta^{18}\text{O}$ values.

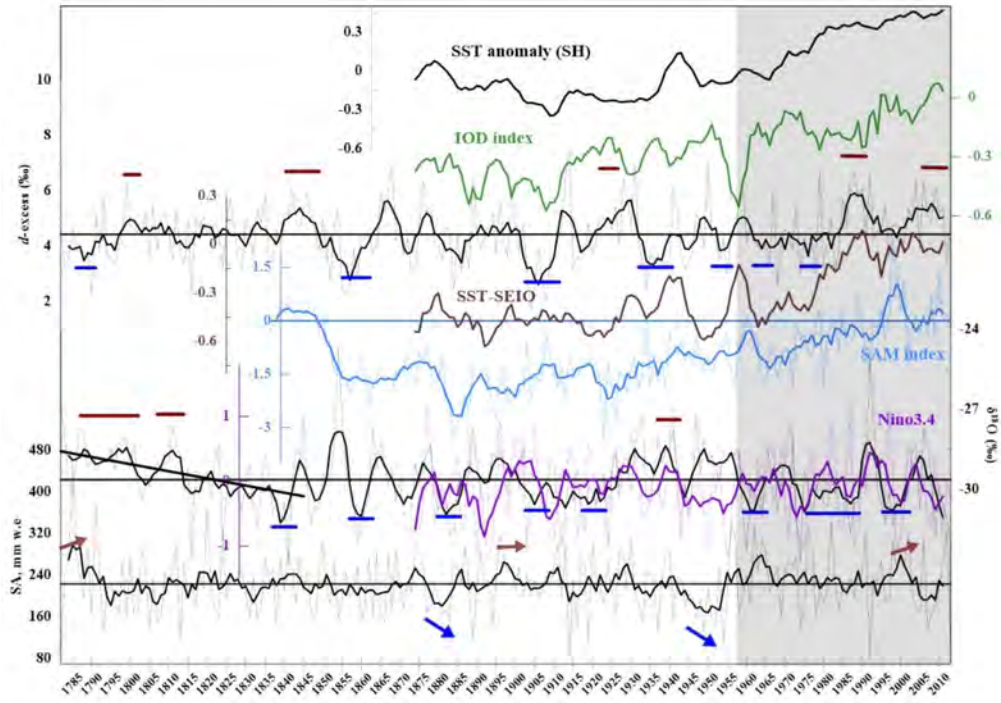


Figure 4. Comparison of the 5-year running average for SA, $\delta^{18}\text{O}$, and d -excess with the IOD, SST anomaly of the southeastern Indian Ocean (SST-SEIO), SST anomalies over the Southern Hemisphere, the SAM, and Nino3.4 for 1872 - 2013 CE. The SAM index is presented with the annual mean (thin blue line) and the neutral (at zero) horizontal line. The thin purple line indicates the annual mean of Nino3.4. The thin grey line represents the annual mean of the SA, $\delta^{18}\text{O}$, and d -excess. The blue and red lines (or arrows) indicate the periods with a higher or lower than average SA, $\delta^{18}\text{O}$, and d -excess over at least four consecutive years. The gray shading corresponds to the period after 1957. The linear trend in $\delta^{18}\text{O}$ during the 1782 - 1845 CE period is represented by the black line.

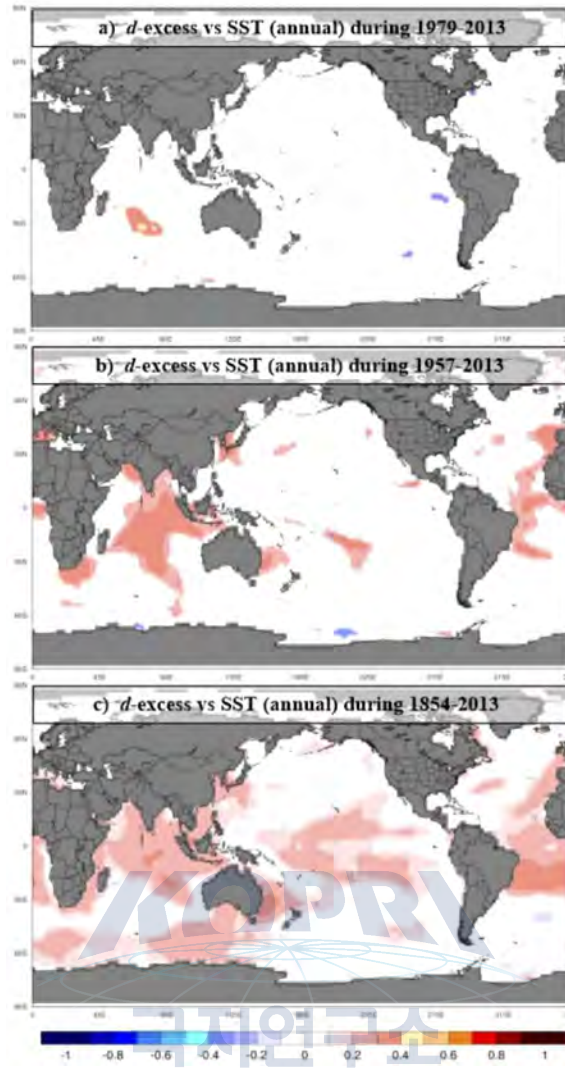


Figure. 5. Spatial correlation of d -excess with annual SST variability for (a) 1979 - 2013 CE, (b) 1957 - 2013 CE, and (c) 1854 - 2013 CE. The scale bars indicate Pearson's correlation coefficient (r) at $p < 0.05$. This figure was generated using Climate Reanalyzer (<https://climatoreanalyzer.org/>) from the Climate Change Institute, University of Maine, USA.

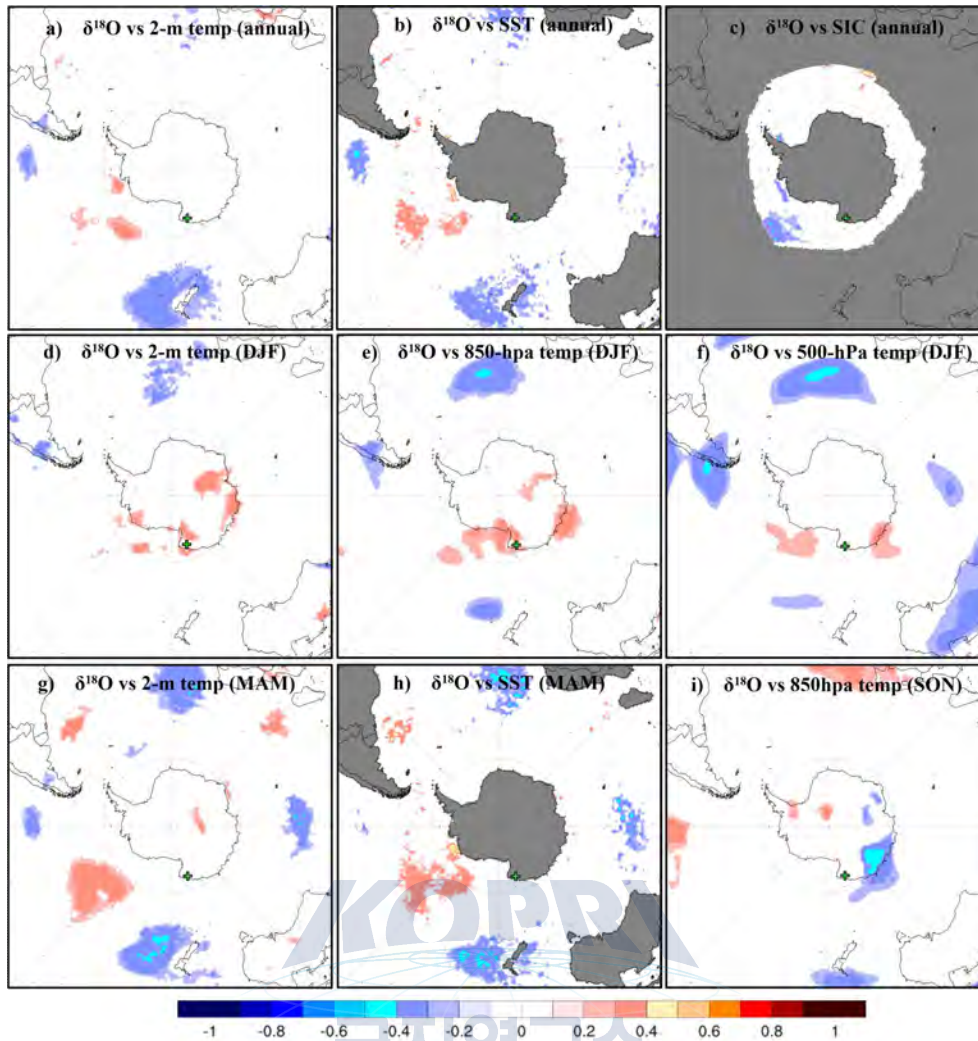


Figure S1. Spatial correlation of $\delta^{18}\text{O}$ with (a, d, e, f, g, h, i) air temperature, (b) SST, and (c) SIC from the ERA5 reanalysis data for different seasons over the 1957 - 2013 CE period. The scale bars indicate Pearson's correlation coefficient (r) at $p < 0.05$. This figure was generated using Climate Reanalyzer (<https://climatreanalyzer.org/>) from the Climate Change Institute, University of Maine, USA.

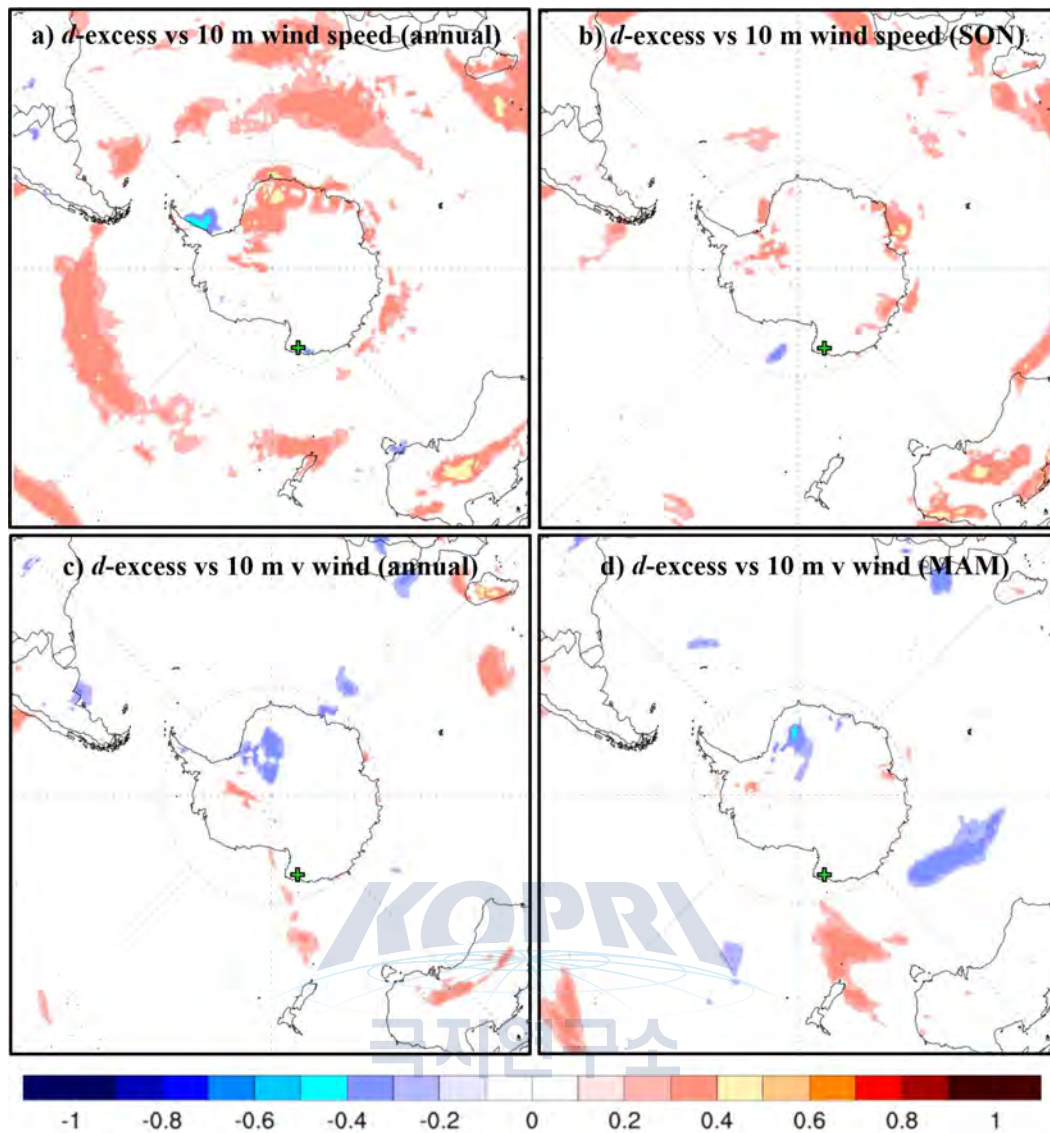


Figure S6. Spatial correlation of *d*-excess with the (a, b) 10 m wind speed and (c, d) *v*-wind component from ERA5 reanalysis data for different seasons over the 1957 - 2013 CE period. The scale bars indicate Pearson's correlation coefficient (r) at $p < 0.05$. This figure was generated using Climate Reanalyzer (<https://climatreanalyzer.org/>) from the Climate Change Institute, University of Maine, USA.

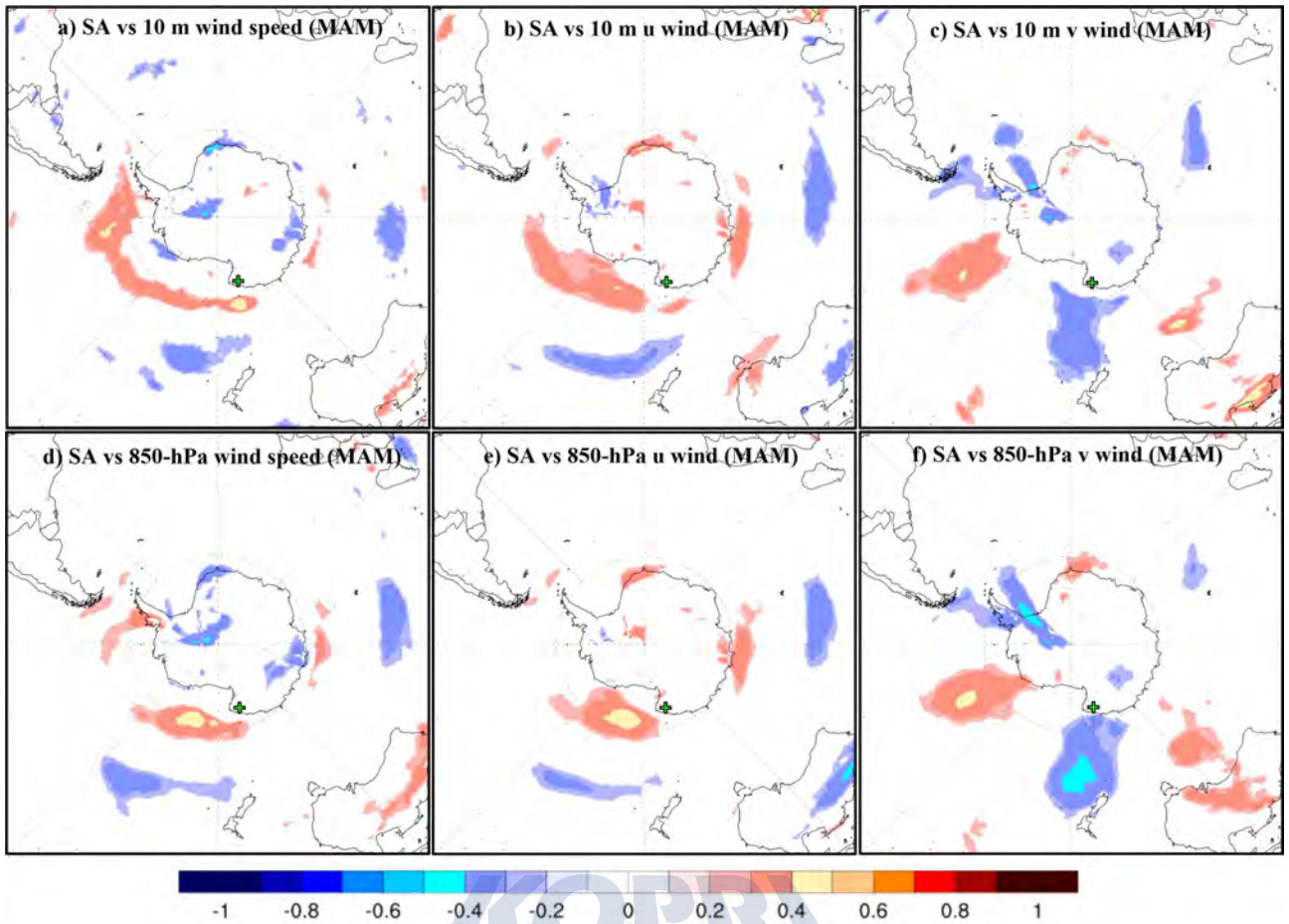


Figure S8. Spatial correlation of SA with (a, d) wind speed, (b, e) u-wind components, and (c, f) v-wind components from ERA5 reanalysis data during the MAM season over the 1957 - 2013 CE period. The scale bars indicate Pearson's correlation coefficient (r) at $p < 0.05$. This figure was generated using Climate Reanalyzer (<https://climatereanalyzer.org/>) from the Climate Change Institute, University of Maine, USA

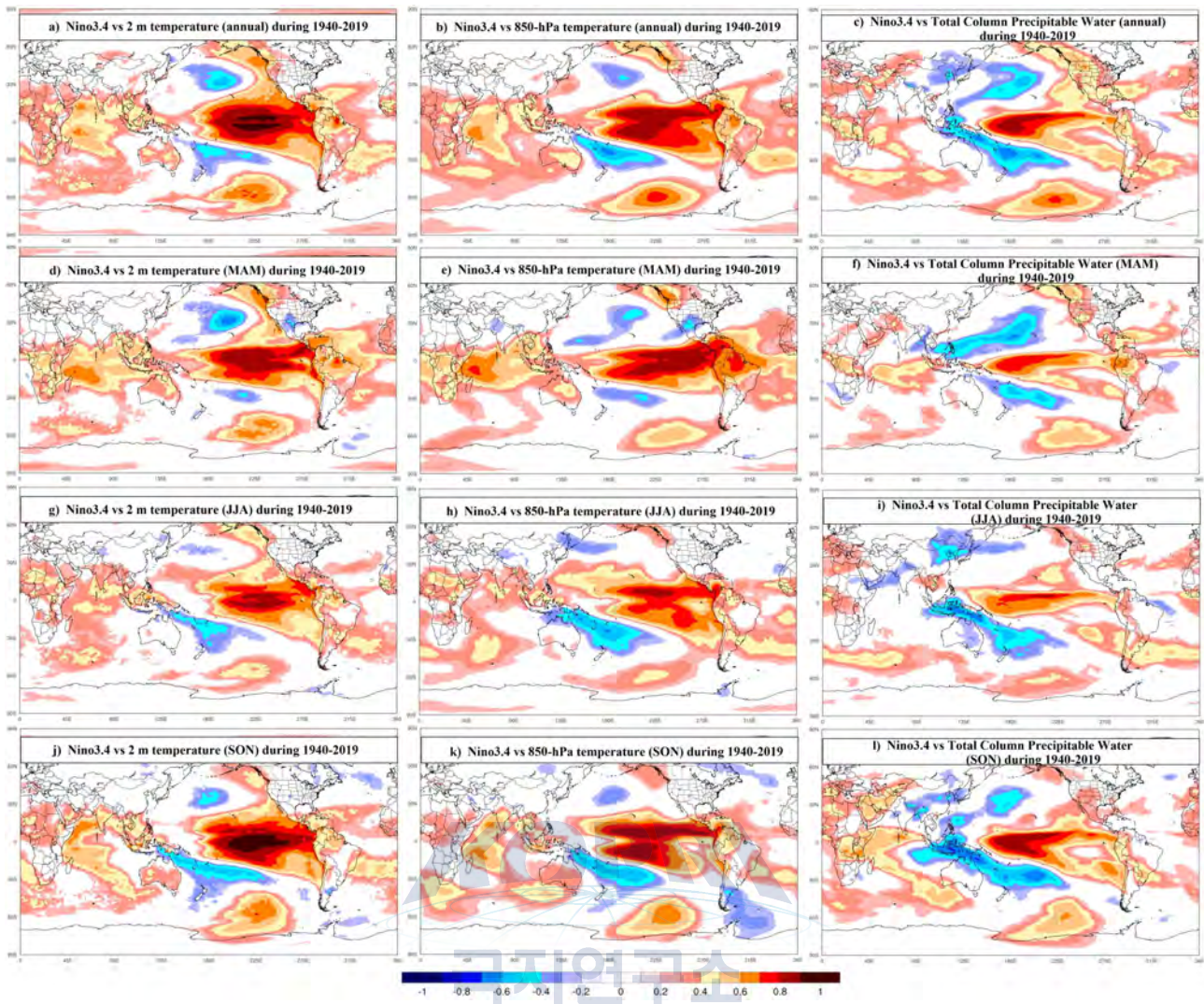


Figure S10. Spatial correlation of the Niño3.4 index with ERA5 reanalysis data for different seasons over the 1940 - 2019 CE period. The scale bars indicate Pearson's correlation coefficient (r) at $p < 0.05$. This figure was generated using Climate Reanalyzer (<https://climatreanalyzer.org/>) from the Climate Change Institute, University of Maine, USA

3.10. 미량원소 기반 프록시 개발을 위한 Positive Matrix Factorization 적용 연구

극지연구소는 남극 빙하 및 적설층에 포함된 미량원소(trace elements)를 활용하여 과거 환경 변화를 복원하는 프록시(proxy) 연구 분야에서 지속적인 성과를 축적해 왔다. 미량원소는 대기 중 먼지, 해양 에어로졸, 해빙 생성 과정, 국지적 및 원격 기원 입자의 유입 등을 통해 빙하 및 적설층에 기록되며, 이들의 조성과 변동 특성은 대기 수송 경로와 기원지를 추적하는 데 중요한 정보를 제공한다. 그러나 극지역 환경에서는 복수의 기원이 동시에 작용하고, 침적 과정이 사건성(event-based)으로 발생하는 경우가 많아, 개별 미량원소 신호를 단일 기작으로 해석하는 데에는 본질적인 한계가 존재한다. 이에 따라 미량원소 기반 프록시의 신뢰도를 향상시키기

위해서는 보다 정교한 통계적·정량적 접근이 요구된다.

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위한 방법으로 Positive Matrix Factorization(PMF) 기법을 적용하였다. 연구 대상은 중국 종산기지(Zhongshan Station)에서 출발하여 남극 내륙으로 이어지는 Lambert Glacier Basin 경로를 따라 설정된 네 개의 관측 지점에서 채취된 적설 및 빙하시료로, 해안에서 내륙으로 이동함에 따라 나타나는 미량원소 조성의 공간적 변화와 기원 분리를 목적으로 하였다. 해당 지역은 강한 카타바틱 바람, 해양 및 대륙 기원 공기의 혼합, 노출된 암반 및 국지적 먼지 기원지의 존재 등으로 인해, 해양 에어로졸과 지각성 먼지, 장거리 수송 입자가 복합적으로 침적되는 특성을 지닌다.

PMF는 관측된 미량원소 농도 자료를 여러 개의 독립적인 요인(factor)으로 분해함으로써, 각 요인이 전체 농도에 기여하는 비율과 조성 특성을 동시에 산출할 수 있는 수용체 모델(receptor model)이다. 본 연구에서는 기존에 널리 사용되어 온 주성분분석(PCA)이나 요인분석과 달리, PMF가 비음수(non-negativity) 제약 조건을 기반으로, 물리적으로 해석 가능한 결과를 제공한다는 점에 주목하였다. 이를 통해 각 미량원소가 해양 기원, 지각성 기원, 혹은 장거리 대기 수송 기원 중 어느 요인에 의해 지배되는지를 정량적으로 구분하고, 각 요인의 상대적 기여도를 평가하였다.

분석 결과, PMF는 네 개 관측 지점의 미량원소 자료에서 최소 네 개의 주요 요인을 안정적으로 도출하였다. 이 중 하나의 요인은 Na, Mg, Sr 등을 중심으로 한 해양 에어로졸 기원을 대표하는 것으로 해석되었으며, 또 다른 요인은 희토류원소(REEs)를 포함한 지각성 먼지 기원을 특징으로 하였다. 아울러 일부 요인은 해안에서 내륙으로 이동함에 따라 상대적 기여도가 증가하는 경향을 보였는데, 이는 장거리 대기 수송 과정에서의 선택적 침적과 혼합 효과가 미량원소 조성에 중요한 영향을 미치고 있음을 시사한다. 이러한 결과는 남극 적설층에 기록된 미량원소 신호가 단순한 농도 변화가 아니라, 기원지와 수송 경로가 중첩된 복합적 결과임을 정량적으로 입증한다.

본 연구는 또한 PMF 분석 결과를 농축계수(enrichment factor) 분석 및 기존 다변량 통계 기법과 비교함으로써, 미량원소 기원 해석의 신뢰도를 검증하였다. 이를 통해 PMF가 극지역과 같이 복잡한 기원 신호가 공존하는 환경에서 미량원소 기반 프록시를 정량적으로 해석하는 데 특히 적합한 도구임을 확인하였다.

종합적으로 본 연구는 PMF 기법을 남극 미량원소 연구에 체계적으로 적용함으로써, 미량원소를 정성적 보조 지표가 아닌 정량적 환경 프록시로 활용할 수 있는 방법론적 기반을 제시하였다. 특히 해안-내륙 경로를 따라 변화하는 미량원소 요인 구조에 대한 정량적 제시는, 향후 빙하코어 시료에서 관측되는 장기 미량원소 기록을 해석하는 데 중요한 참조 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구 결과는 미량원소 기반 프록시 개발과 극지역 대기-빙상 상호작용 연구의 정밀도를 한층 향상시키는 데 기여하며, 2025년 Geoscience Frontiers에 게재되었다.

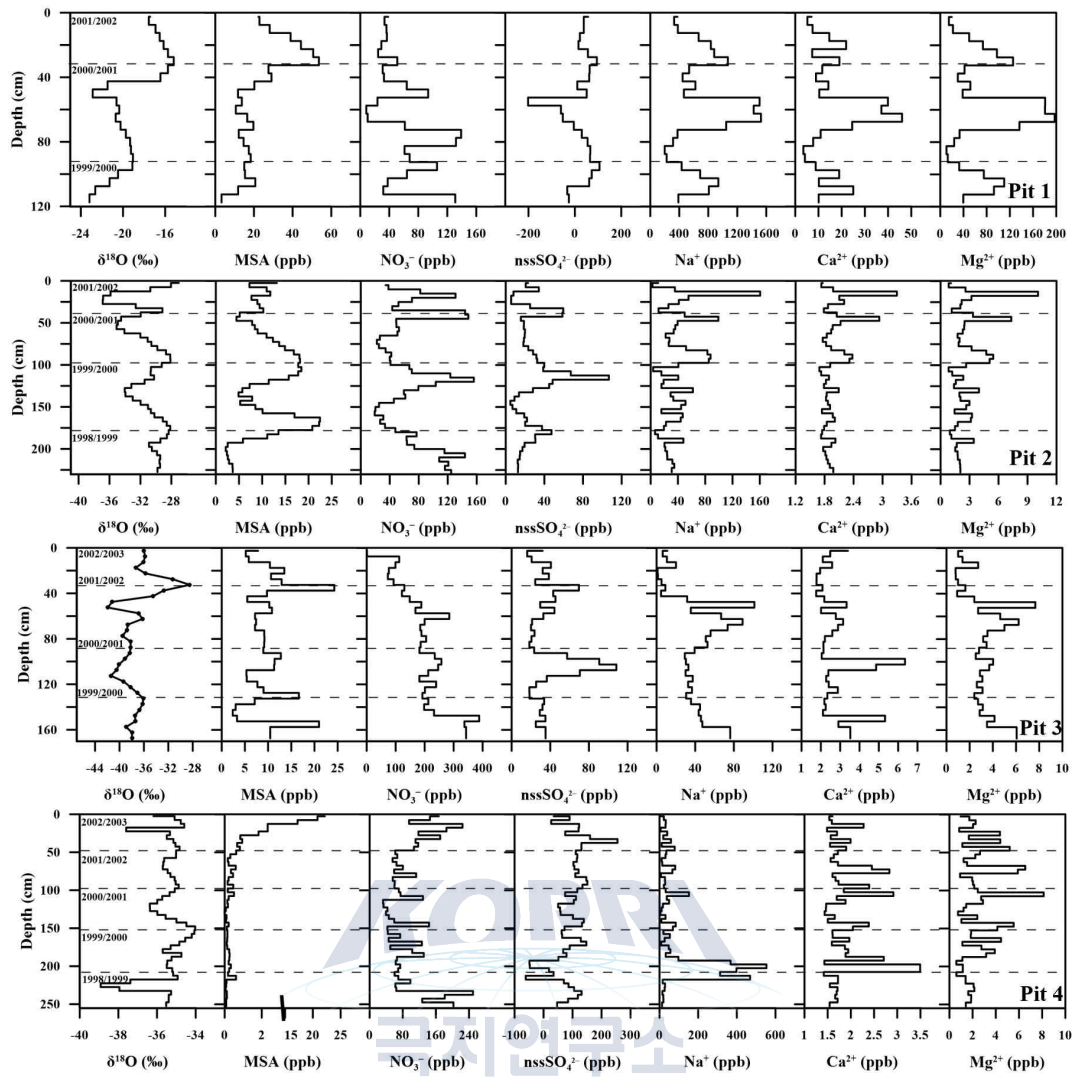


Fig.2. Depth profiles of $\delta^{18}\text{O}$ and major ion concentrations in the four snow pits. Horizontal dash lines denote the maxima of $\delta^{18}\text{O}$ values, indicating the austral summer season.

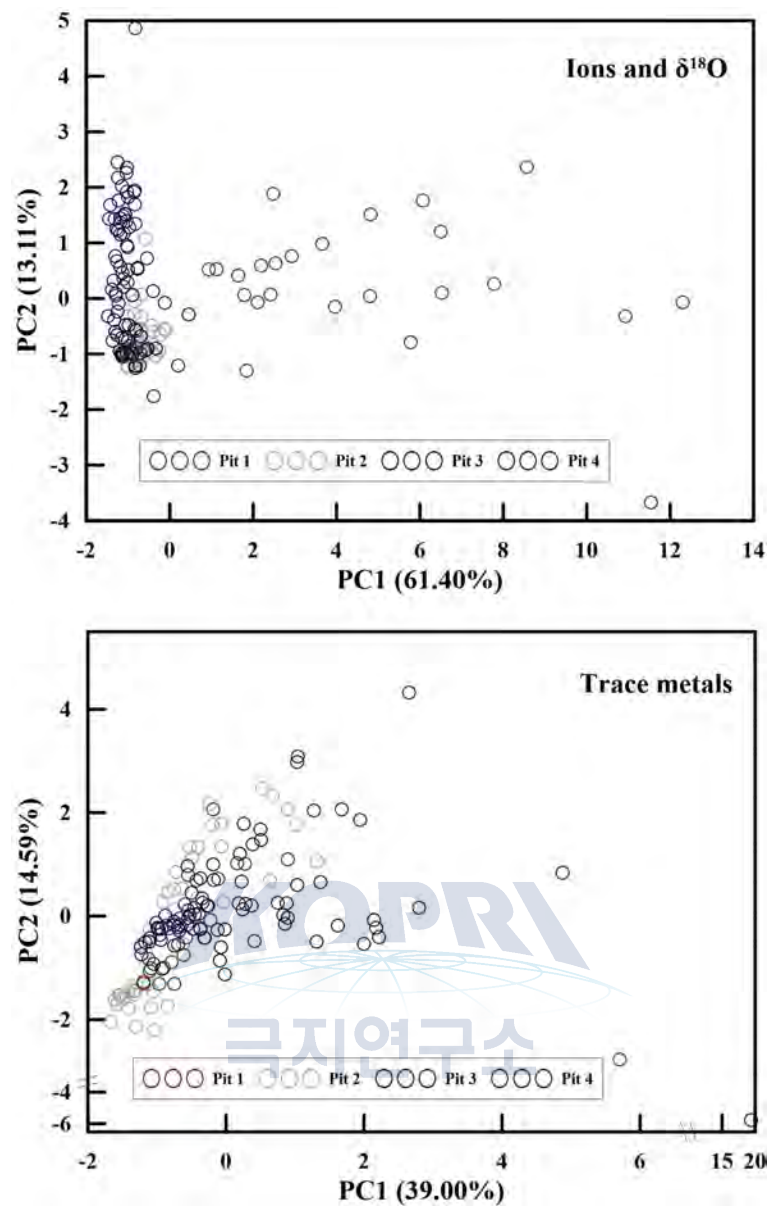


Fig.4. PCA plots (PC1vsPC2) for the four snow pits. Total variances are indicated on each axis.

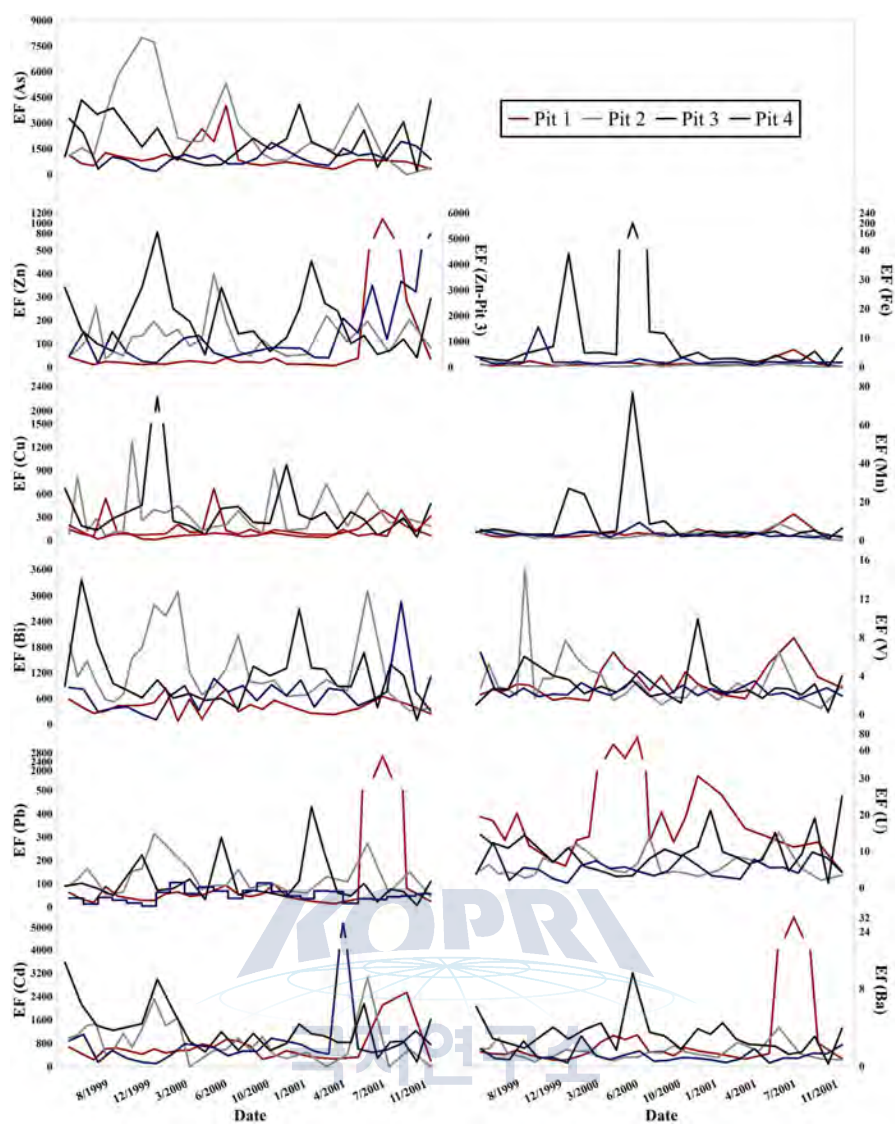


Fig.5. Temporal variations in the crustal enrichment factors (EF_c) of the snow pits during the period 1999 - 2002.

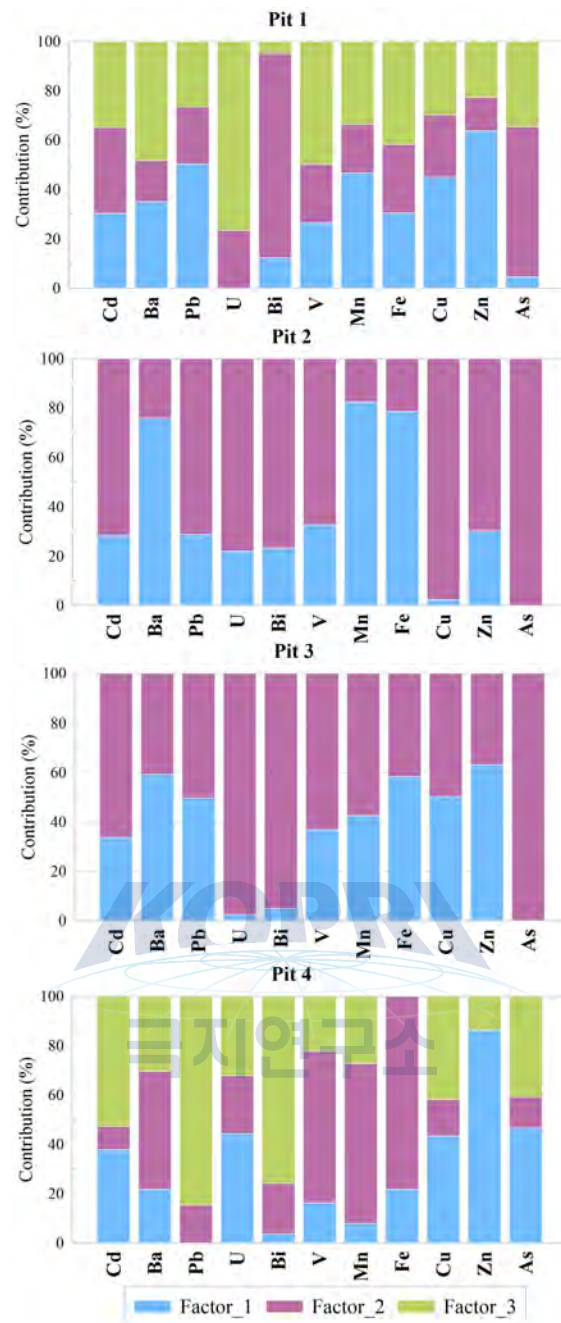


Fig.6. Percentage contributions of each metal in the factor profiles derived from the PMF analysis of the trace elements in the snow pits from 1999to2002.

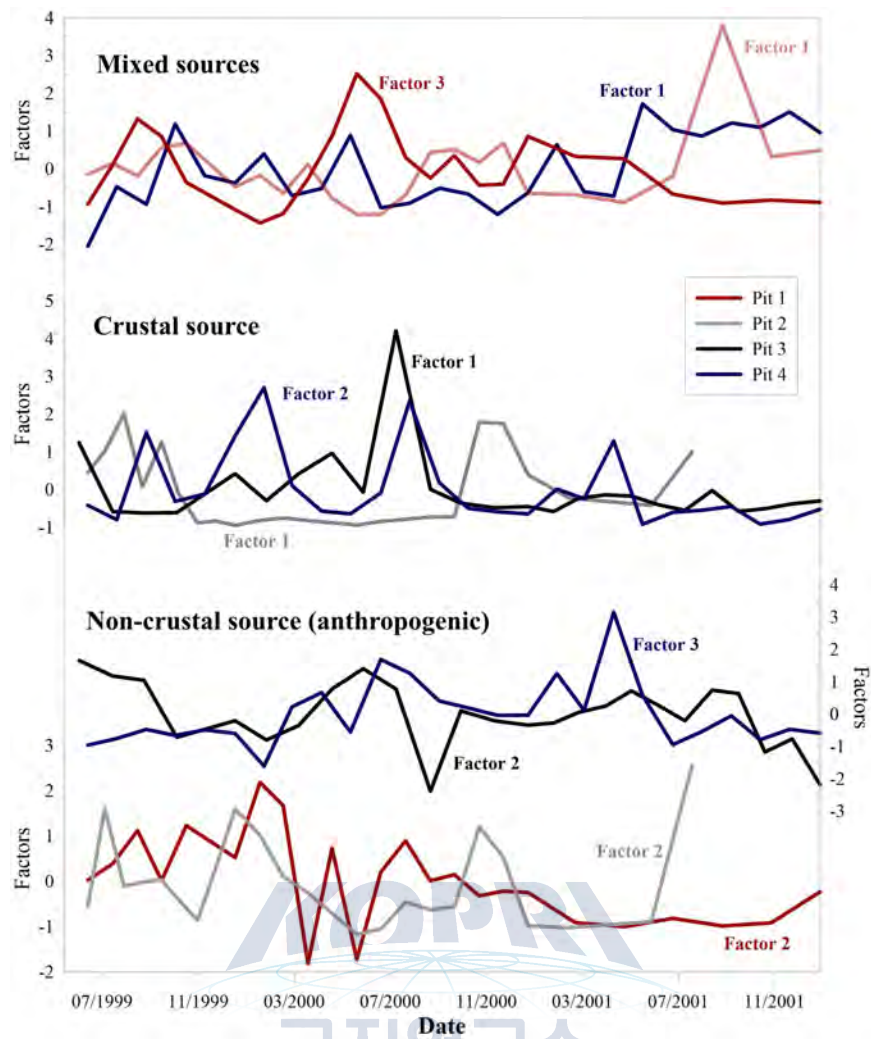
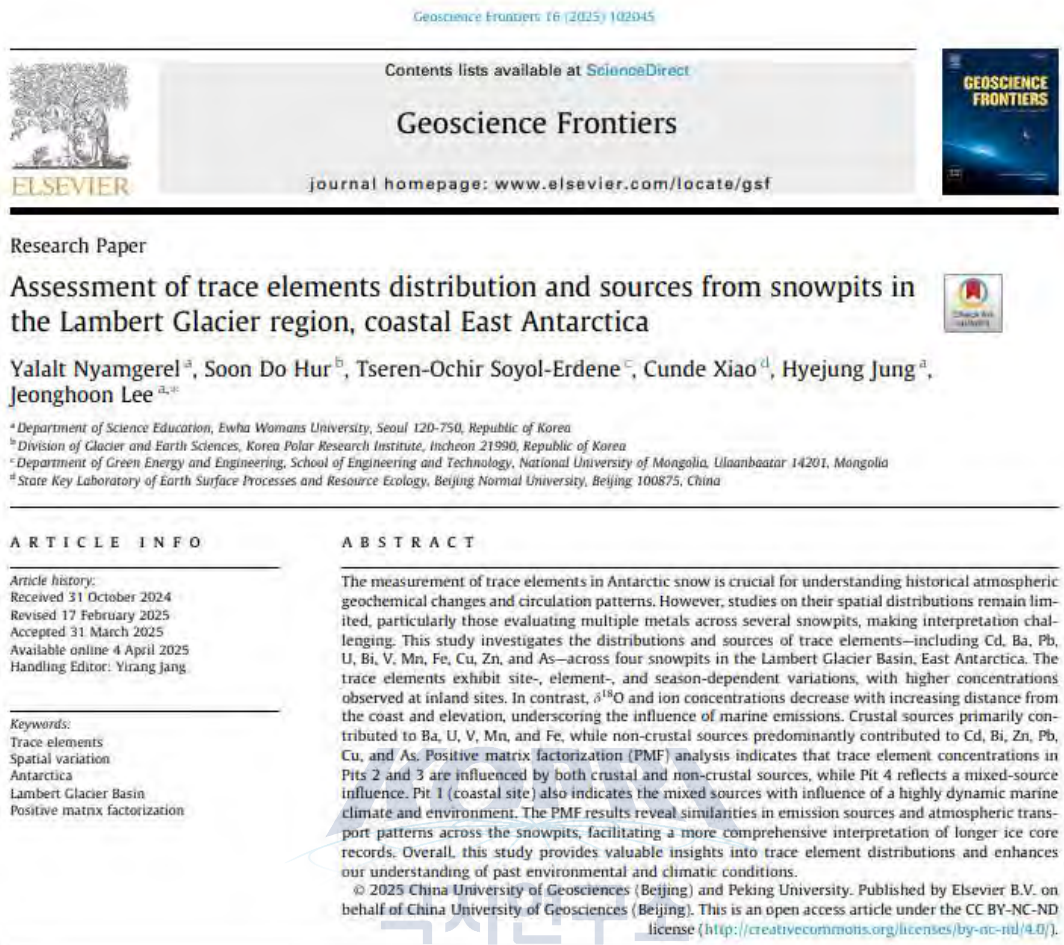


Fig.7. Comparison of the temporal variation trends of the PMF factors (standardized) for the snowpits.



3.11. Hercules Névé 지역 빙하시료를 이용한 여름 강수 특성 및 바람장 영향 연구

북빅토리아랜드(Northern Victoria Land)에 위치한 Hercules Névé 지역은 연 강설량이 비교적 높고 계절 신호가 잘 보존되는 특성을 지닌 남극 연안 - 내륙 전이 지대로, 여름철 강수 특성과 대기대순환 신호를 분석하기에 적합한 빙하 연구 지역이다. 극지연구소는 2015년 해당 지역에서 단독으로 빙하시료를 채취하였으며, 본 연구에서는 이 빙하시료에 기록된 불안정동위원소 조성을 이용하여 여름철(DJF) 강수의 기후·대기역학적 조절 요인을 규명하고자 하였다.

빙하시료의 연대는 불안정동위원소($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$)의 계절 변동성을 기반으로 한 연층 판독과 방사성 동위원소(^{239}Pu)를 이용한 독립적인 검증 을 통해 구축되었으며, 이를 바탕으로 1979년부터 2015년까지 약 37년에 걸친 여름철 고해상도 동위원소 시계열을 확보하였다. 분석에는 ERA5 재분석 자료를 활용하여, 기온, 강수량, 해빙 농도(sea ice concentration, SIC), 해수면 온도(sea surface temperature, SST), 그리고 10m 고도의 바람장(u, v 성분)과의 관계를 종합적으로 비교·분석하였다. 이를 통해 단순한 온도 - 동위원소 관계를 넘어, 대기 순환과 수증기 수송 과정

이 여름 강수 동위원소 구성에 미치는 영향을 평가하였다.

분석 결과, Hercules Névé 지역의 여름철 $\delta^{18}\text{O}$ 는 기온 및 강수량과 유의한 양의 상관성을 보였으나, 특히 바람장의 변화가 동위원소 변동성을 조절하는 핵심 요인으로 작용함을 확인하였다. 남향 성분(v-wind)이 강화되는 시기에는 상대적으로 따뜻하고 수증기가 풍부한 공기의 유입이 증가하면서 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 높아지는 경향을 보인 반면, 서풍 성분(u-wind)이 강화될 경우 차갑고 원거리 기원의 수증기가 유입되어 동위원소가 상대적으로 고갈되는 양상이 나타났다. 이는 남극 연안 지역에서 여름철 강수의 동위원소 구성이 단순한 국지 기온 신호뿐 아니라, 바람장에 의해 조절되는 수증기 수송 경로와 기원지 특성을 직접적으로 반영할 수 있음을 시사한다.

또한 d-excess 분석 결과, 여름철 d-excess는 해빙 농도 및 해수면 온도 변화와 밀접하게 연관되어 나타났으며, 이는 연안 해빙 조건 및 폴리냐(polynya) 활동이 수증기 증발 조건과 동위원소 분별 과정에 영향을 미쳤음을 의미한다. 특히 해빙이 감소하고 개수면이 확대되는 시기에는 상대적으로 낮은 상대습도 조건에서 증발된 수증기의 기여가 증가하면서 d-excess 변동성이 뚜렷해지는 경향이 관찰되었다. 이러한 결과는 Hercules Névé 빙하시료가 여름철 해빙 - 해양 - 대기 상호작용을 동시에 기록하는 복합적인 기후 아카이브임을 보여준다.

더 나아가 본 연구에서는 Amundsen Sea Low(ASL) 및 Zonal Wave-3(ZW3)와 같은 대규모 대기대순환 구조가 여름철 바람장과 수증기 수송 경로를 조절함으로써, 지역적 동위원소 변동성에 간접적인 영향을 미친다는 점을 확인하였다. 이는 Hercules Névé 지역의 여름철 동위원소 기록이 국지적 기상 조건을 넘어, 남극 주변 해양 및 대기대순환 변동과 연계된 원격 신호(teleconnection)를 반영할 수 있음을 의미한다.

종합적으로 본 연구는 남극 연안 - 내륙 전이 지역에서 여름철 빙하시료의 불안정동위원소 기록이 기온뿐 아니라 바람장, 해빙 조건, 대기대순환 구조를 통합적으로 반영할 수 있음을 실증적으로 제시하였다. 이는 향후 남극 연안 빙하코어를 이용한 계절 규모 기후 복원 연구에서, 온도 기반 해석을 보완하고 대기역학적 요인을 함께 고려해야 함을 강조하는 중요한 근거를 제공한다. 본 연구 결과는 Hercules Névé 지역을 여름 강수 및 바람장 기반 동위원소 연구의 핵심 기준 지점으로 제시하며, 현재 The Cryosphere에 게재될 예정이다.

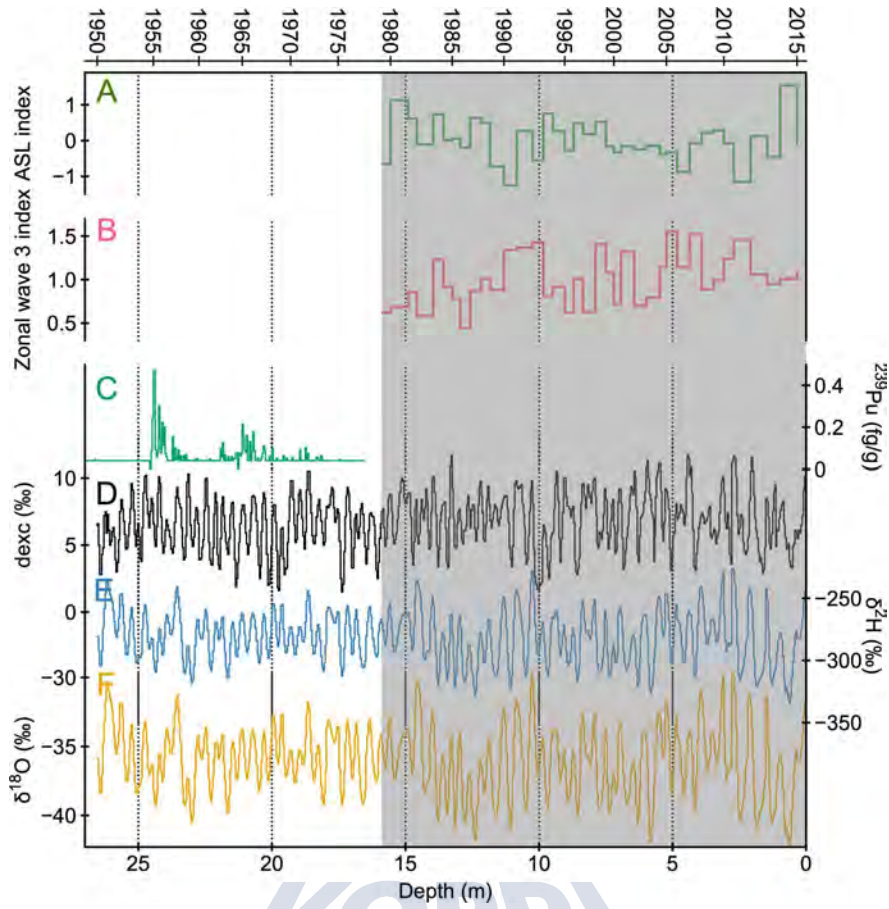


Figure 2. Depth profiles of climate indices and isotopic parameters from the surface to a depth of 26m from the Hercules Névé ice core. Panel (A) represents the Amundsen Sea Low (ASL) index derived from principal component analysis (PCA) based on longitude, latitude, and strength of the ASL defined in Hosking et al. (2013), specifically displaying PC3, which showed significant correlation with isotopic data. Panel (B) shows the Zonal Wave 3 (ZW3) index obtained from Goyal et al. (2022). Panel (C) depicts the ^{239}Pu concentration profile for the period 1950 - 1975. Panels (D) - (F) illustrate water isotope measurements (dexc, 2H , and ^{18}O , respectively) spanning from 1950 to 2016. Data utilized for detailed analysis in this study (1979 - 2015) are indicated by the shaded grey region.

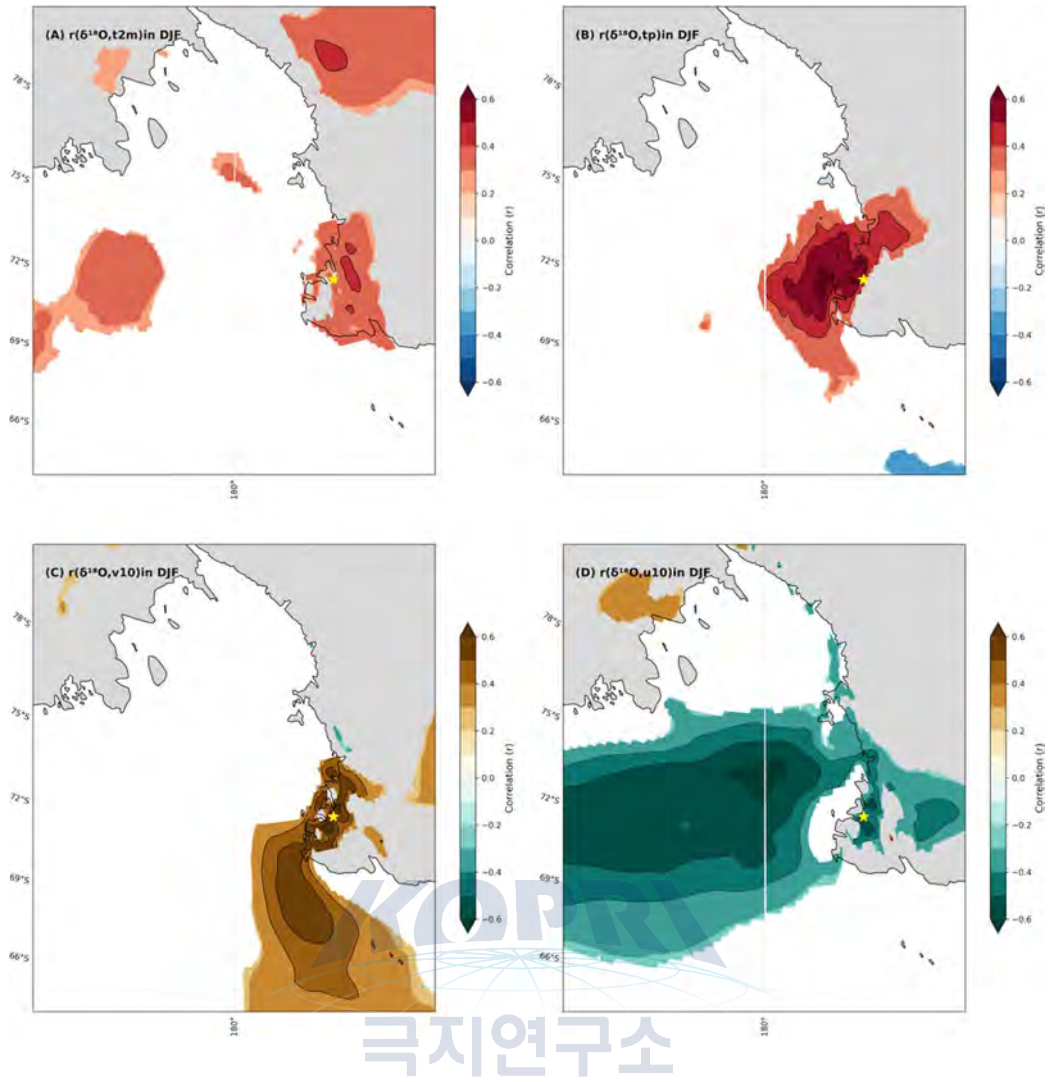


Figure 3. Spatial correlation analysis of (A) the 2m temperature (T2m), (B) total precipitation (tp), (C) 10m v-wind (v10), and (D) 10m u-wind (u10) across Antarctica based on ERA5 data with 180 in HN ice core (black symbol) from 1979 to 2015 during DJF. The $p < 0.1$ confidence level is indicated by black contours.

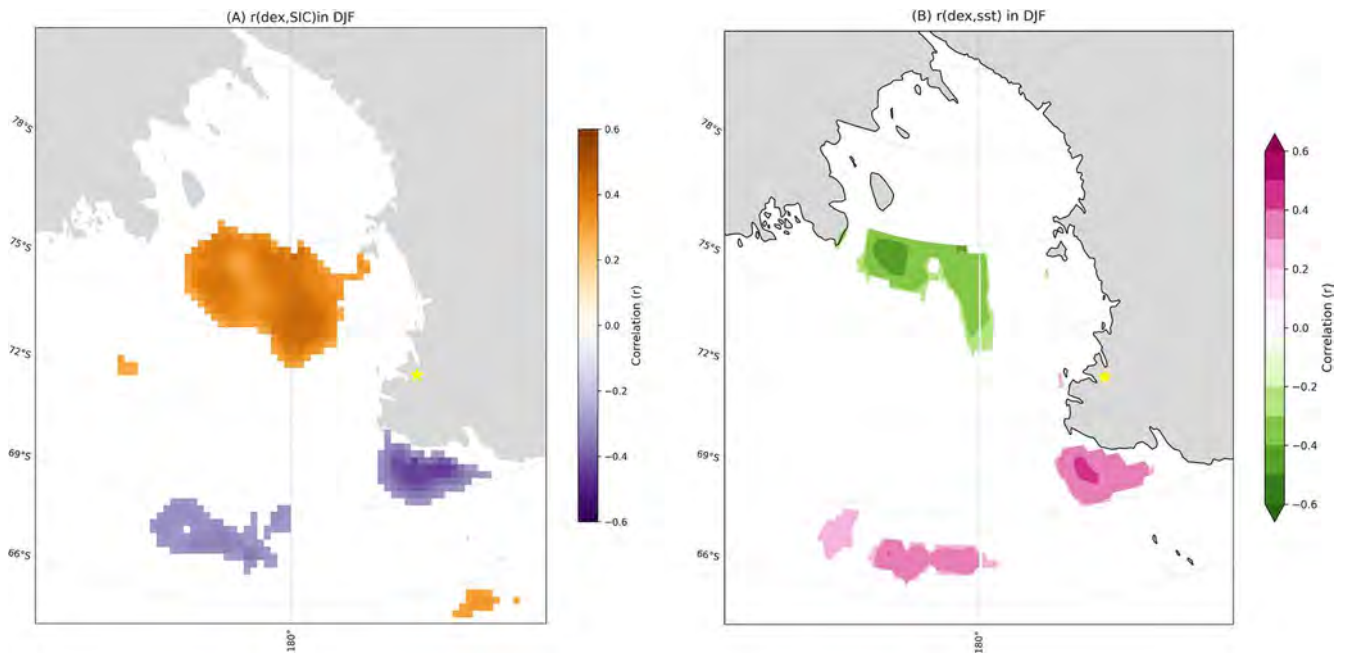


Figure 4. Spatial correlation analysis results between the secondary parameter dexc from the HN ice core (black symbol) and (A) the sea ice concentration (SIC) and (B) sea surface temperature (SST) from ERA5 data during DJF for 1979 - 2015. The $p < 0.1$ confidence level is indicated by black contours.

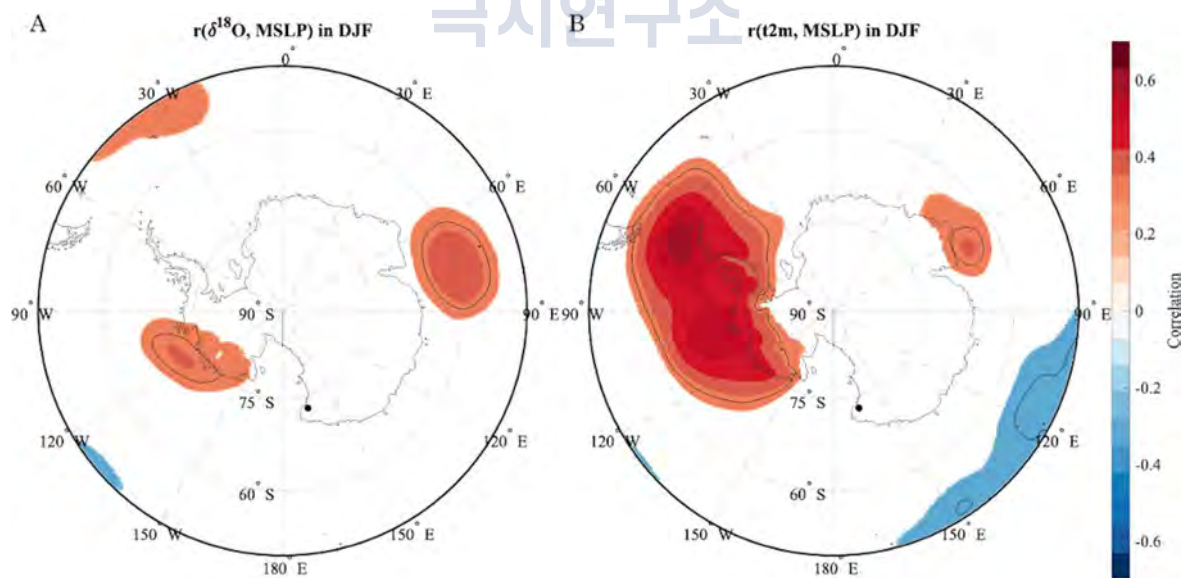


Figure 5. Spatial correlation analysis for (A) 18O from the HN ice core (black symbol) and (B) the 2m temperature (T2m) from ERA5 data with the mean sea level pressure (MSLP) from 1979 to 2015 in DJF. Contour plots are used for $p < 0.05$ and black lines for $p < 0.01$.

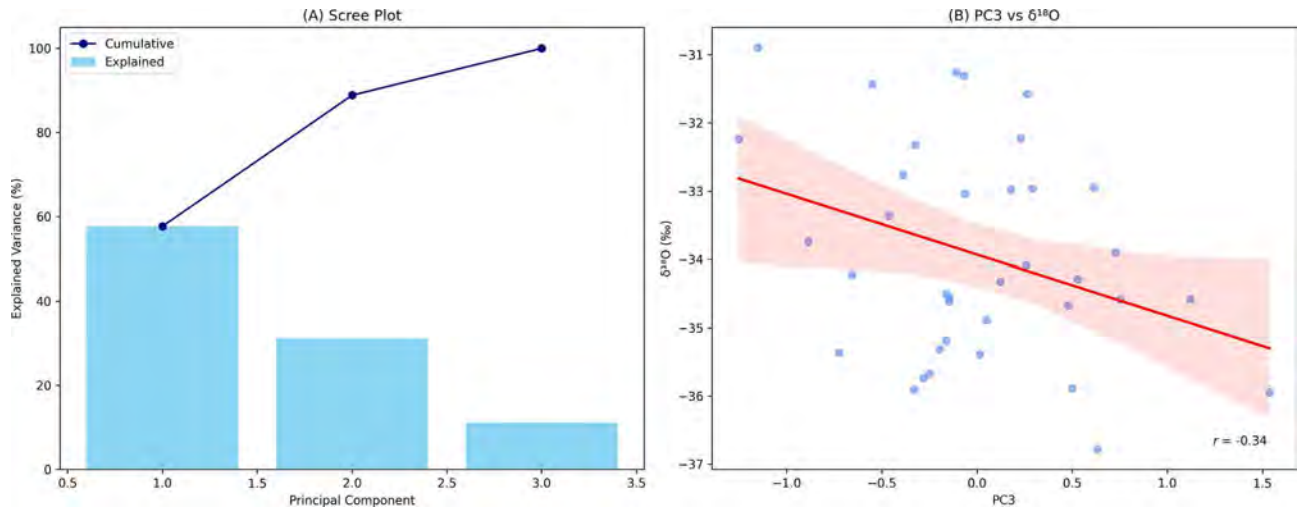


Figure 6. (A) Scree plot showing the variance explained by each principal component derived from ASL monthly variability (central pressure, latitude, and longitude) during DJF (1979 - 2015). (B) Scatterplot between PC3 and $\delta^{18}\text{O}$ values from Hercules Névé ($r = -0.34$), based on DJF-averaged data, showing the strongest correlation among all PCs.

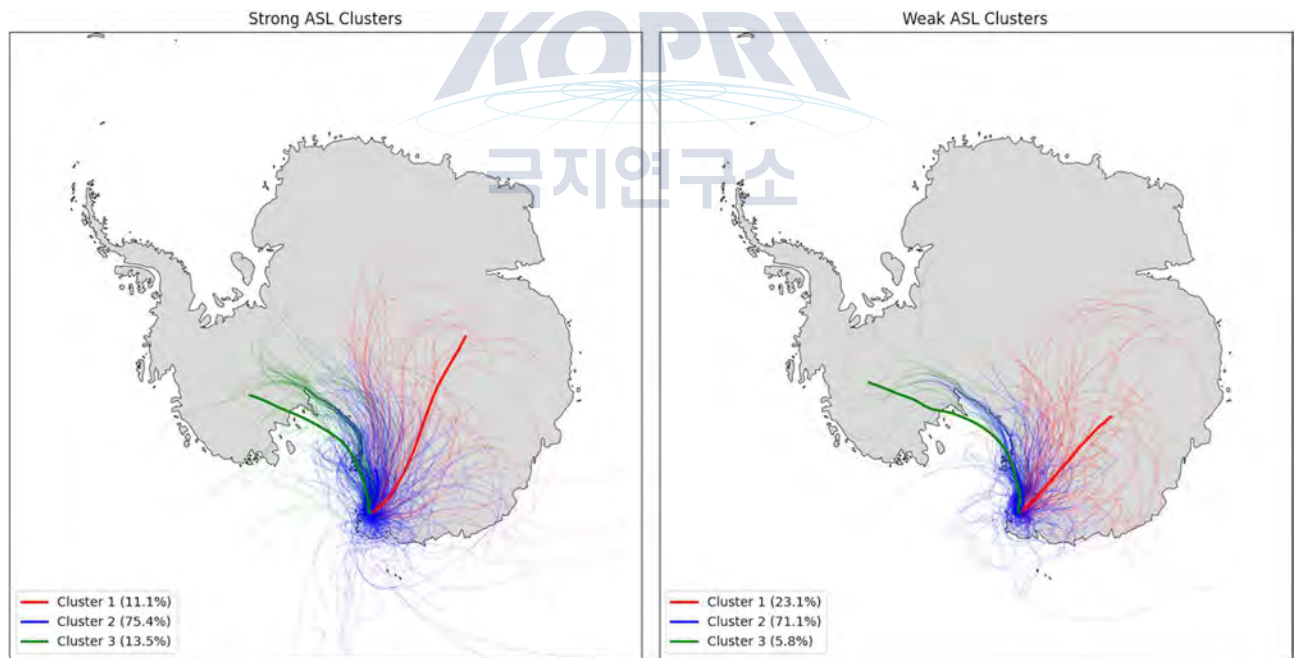


Figure 7. 7 d HYSPLIT back-trajectory clusters arriving at Hercules Névé during (left) the five strongest ASL summers and (right) the five weakest ASL summers (DJF, 1979 - 2015). Strong ASL cases show dominant air mass transport from inland Antarctica and the Ross Ice Shelf, while weak ASL cases are associated with zonal trajectories originating from the Amundsen Sea and lower-latitude ocean sectors.

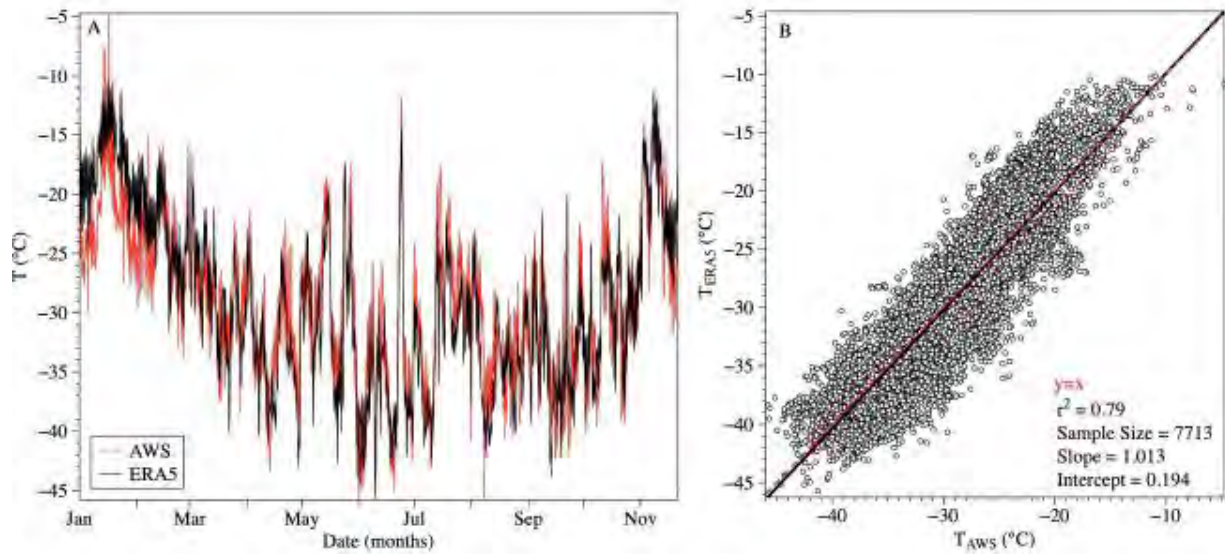


Figure S1: (A) Time series of hourly-averaged temperature data from ERA5 reanalysis (black line) and AWS observational data (red line) during the post-drilling period in 2016, covering the operational period of the AWS. The ERA5 dataset provides reanalyzed atmospheric data, while AWS measurements represent in-situ observations. (B) Correlation between the hourly-averaged temperature data from ERA5 and AWS.



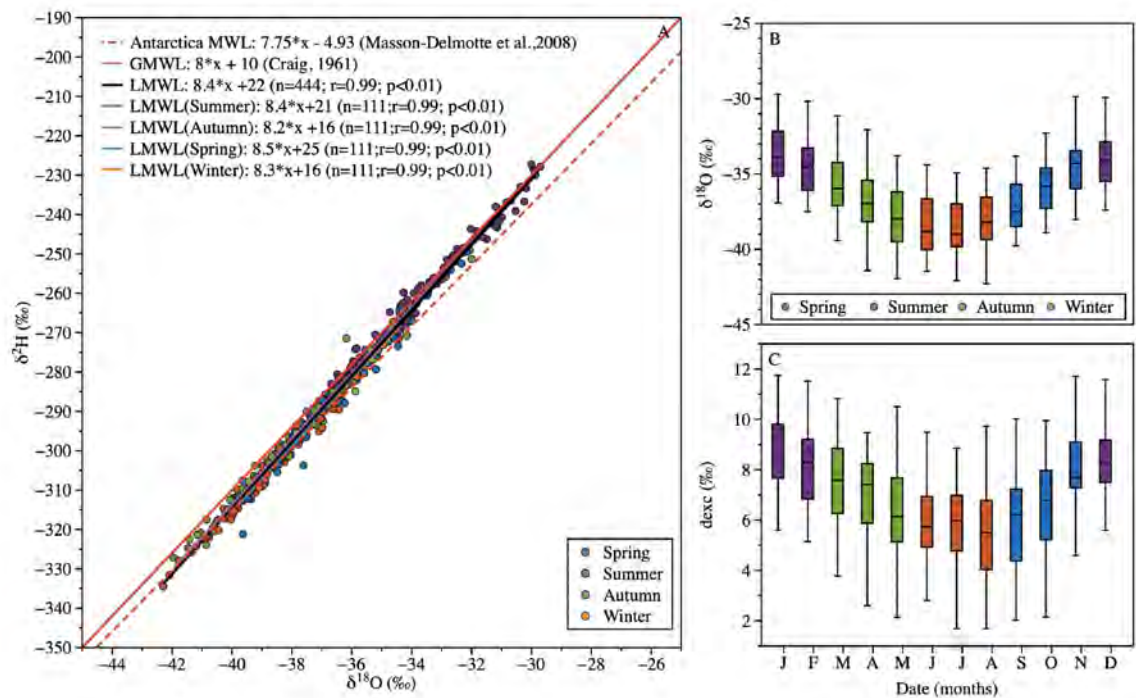


Figure S2: Seasonal variation in the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) of ice core at Hercules Névé. (A) Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values across four seasons and regression lines for each season's local meteoric water line (LMWL). Regression lines for the Antarctic meteoric water line (AMWL) and the global meteoric water line (GMWL) are presented for reference. (B) Box plot showing $\delta^{18}\text{O}$ values by month, categorized by season (spring, summer, autumn, and winter) at Hercules Névé. (C) Box plot showing deuterium excess (dex) values at Hercules Névé by month and season.

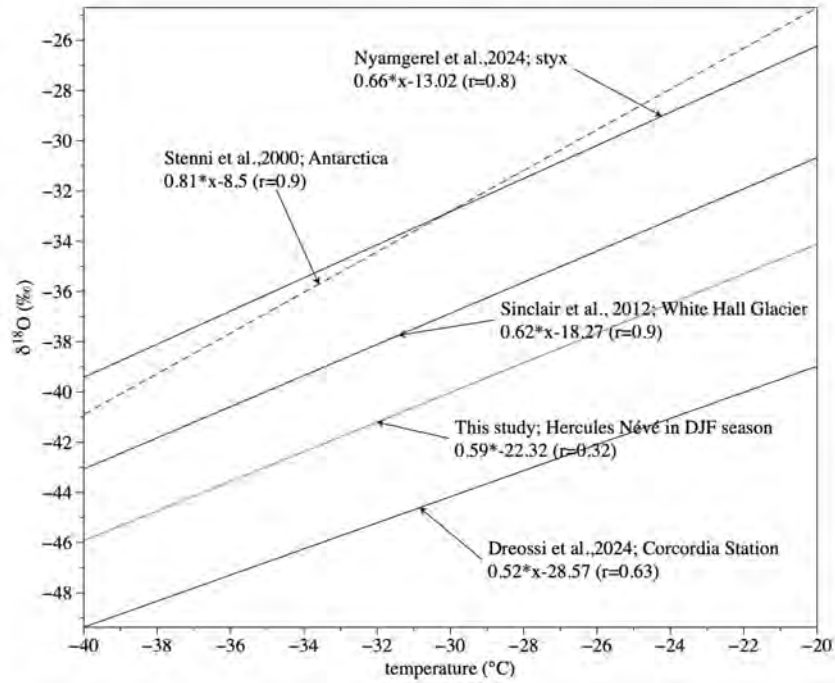


Figure S3: Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and temperature for various Antarctic studies. The linear regression depicts the correlation between $\delta^{18}\text{O}$ and temperature ($^{\circ}\text{C}$) for different sites, including this study at Hercules Nève during the DJF season. The slopes and correlation coefficients (r) are shown for each dataset, with comparisons to previous studies from Stenni et al. (2008), Nyamgerel et al. (2024), Sinclair et al. (2012), and Dreossi et al. (2024). The red line represents the regression calculated in the present study.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
1. 빙하시료를 이용한 남극 빅토리아 주변 강설량 복원 및 과거 기후인자와의 상관성을 통한 과거 대기대순환 복원	1-1	빙하코어시료의 안정동위원소분석 및 기후인자와의 상관성 분석	- 빙하코어시료의 안정동위원소분석 및 미량원소분석 - 분석된 안정동위원소를 이용하여 빙하의 연대측정 - 빙하의 연대측정을 통한 강설량 복원	100%, 논문출판(Nyamgerel et al., 2020, Journal of Glaciology)
	1-2	기후인자와 대기대순환과의 상관성분석	- 복원된 강설량과 기후인자와의 상관성 파악 - 기후인자와 대기대순환과의 상관성 연구 - 빙하코어시료를 이용한 과거 대기대순환 복원	100%, 논문출판(Nyamgerel et al., 2021, Earth Interactions; Hur et al., 2021, Polish Polar Research; Nyamgerel et al., 2024, Catena; Nyamgerel et al., 2024, Science of the Total Environment)
2. 로스해와 아문젠해 천부 빙하시료를 통한 두 지역 강설량 특성 비교	2-1	로스해(북빅토리아지역) 강설량복원	- 스틱스지역 아이스코어 시료의 미량원소분석 - 재분석자료를 이용한 강설량 비교	100%, 논문출판(Nyamgerel et al., 2025, Geoscience Frontiers)
	2-2	아문젠해 강설량 복원	- 아문젠해 빙하시료 불안정동위원소분석을 통한 연대측정 - 재분석자료 확보 및 아이스코어 시료에서 얻은 강설량과의 비교 - 로스해와 아문젠해와의 대기대순환 비교	85%, 논문출판(Hong et al., 2023, Polish Polar Research; Nyamgerel et al., submitted, Paleoceanography and Paleoclimate; S. Kim et al., submitted, The Cryosphere)

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 연구는 남극 북빅토리아랜드 지역에서 시추된 빙하코어 시료를 대상으로 화학성분과 물안정동위원소를 분석하고, 이를 통해 단기 기상변수와 장기 기후변수 간의 상관관계를 규명하는 것을 목표로 수행되었다. 본 과제에서 분석된 화학성분과 안정동위원소 성분은 빙하에 기록된 1단계(Level 1) 기후 정보에 해당하며, 이를 기반으로 연대측정과 밀도 자료를 결합하여 산출된 강설량은 2단계(Level 2) 기후 정보로 활용될 수 있다. 강설량은 해빙 면적 변화, 대기대순환 패턴 및 해양-대기 상호작용과 밀접한 연관성을 가지므로, 강설량과 주요 기후 변수 간의 관계를 규명할 경우 과거 강설량을 정량적으로 복원하고, 나아가 과거의 기상·기후 인자를 유도해 낼 수 있을 것으로 기대된다.

특히 강설량은 빙하 내 미량원소 농도에 직접적인 영향을 미치는 주요 요인이므로, 미량원소와 기상·기후 변수 간의 상관성을 파악하는 것은 빙하시료 해석의 정확도를 향상시키는 데 필수적이다. 이에 따라 본 연구에서는 Styx 지역에서 시추한 빙하코어 시료를 대상으로 미량원소 분석을 수행하였으며, 이를 통해 미량원소 자료를 강설량 및 대기대순환 변화와 연계하여 해석하고자 하였다. 남극 적설 및 빙하시료 내 미량원소 농도는 매우 낮고 외부 오염에 취약하므로, 분석에 앞서 엄격한 제염(decontamination) 절차를 적용하였다. 이는 기존 연구(Hong et al., 2003; Han et al., 2020)에서 제시된 기계적 제염 방법을 따른 것으로, 오염 가능성이 가장 높은 외부층을 제거하고 상대적으로 오염이 적은 내부 시료를 분석 대상으로 활용하는 방식이다.

미량원소 분석에 사용된 빙하코어 구간은 깊이 4.32m에서 9.87m 사이였으며, 세척된 세라믹 나이프(Kyocera, Japan)를 사용하여 외부 약 1cm 두께의 층을 수작업으로 제거하였다. 제염 과정은 Han et al. (2020)에서 제시된 초청정(ultraclean) 절차를 따랐다. 해당 구간의 빙하코어 밀도는 $460 - 510 \text{ kg m}^{-3}$ 범위였으며, 빙하코어 한 섹션의 평균 길이는 약 0.43m였다. 제염 과정 동안 시료를 고정하기 위해 빙하코어는 플라스틱 홀더에 맞도록 절단되었다. 깊이 4.32 - 7.07 m 구간의 빙하코어는 단면 크기 $3.5 \times 4.25\text{cm}$, 평균 길이 15.5cm로 준비되었고, 깊이 7.17 - 9.87 m 구간의 빙하코어는 단면 크기 $5.8 \times 5.8\text{cm}$, 평균 길이 21.3 cm로 준비되었다. 시료 절단 해상도는 평균 $5.5 \pm 1\text{cm}$ 였으며, 이는 각 빙하코어 섹션의 상태에 따라 조정되었다.

제염, 시료 준비 및 분석 전 과정은 극지연구소(KOPRI)의 청정 실험시설에서 수행되었다. 모든 시료 준비 기구는 사전 세척 과정을 거쳤으며, 이 세척 절차는 이전 빙하시료 미량원소 분석 연구(Han et al., 2020)에서 성공적으로 적용된 바 있다. 모든 분석 장비는 Class 1000 클린 룸 내 Class 10 레미나 플로우 클린 부스에 설치되었다. 세척 및 시료 준비에는 Millipore RO 정수 시스템(Model Elix-3)과 Milli-Q 시스템(Milli-Q Academic, Millipore Corp., Darmstadt, Germany)을 통해 생산된 비저항 $18.2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ 의 초순수가 사용되었으며, 블랭크 시료 및 표준 용액 준비에는 서브보일링 초순수(DuoPUR, Milestone, Sorisole, Italy)가 사용되었다.

빙하시료는 Class 10 클린벤치 내부에서 LDPE 병(500mL 또는 1000mL)에 담아 상온에서 용융되었으며, 용융 후 초고순도 질산(Fisher Optima grade nitric acid)을 사용하여 1% 농도로

산성화하였다. 총 81개 시료의 미량원소 농도는 고해상도 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-SF-MS; Element2, Thermo Fisher Scientific, Germany)와 고감도 도입 시스템(Apex IR, Elemental Scientific Inc., Omaha, NE, USA)을 이용하여 분석하였다. 분석에는 다점 표준 보정이 적용되었으며, 내부표준으로 Rh가 사용되었다. 분석 정확도를 평가하기 위해 캐나다 국립연구위원회(National Research Council, Ottawa, Canada)에서 제공한 하천수 인증 표준물질 SLRS-6을 회석하여 함께 분석하였다. SLRS-6 분석 결과, Sb, Tl, Th, U, Al, Cr을 제외한 대부분의 원소에서 19% 이내의 양호한 회수율을 보였다. 검출한계는 8개의 블랭크 시료 표준편차의 3배로 계산하였다(Tables 8.1, 8.2).

희토류원소(REEs)와 Rb, Sr, Mo, Cd, Sb, Ba, Tl, Pb, Bi, Th, U는 저해상도 모드에서 분석되었으며, Al, Sc, Ti, V, Ce, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn은 중해상도 모드에서 측정되었다. As는 고해상도 모드에서만 분석되었다. 제염 절차의 효과를 검증하기 위해 외부층 3개를 분리 채취하여 가장 바깥층과 두 번째 층(중간층)을 비교하였다. 세 번째 층은 시료량이 매우 적어 외부층과의 비교가 불가하였다. 깊이 4.73 - 4.97m 구간에서는 중간층의 미량원소 농도가 외부층에 비해 1n 기준 1.03배(Rn)에서 최대 73.83배(Cr)까지 낮게 나타났으며, 깊이 7.17 - 7.57 m 구간에서는 1.50배(Rb)에서 147.54배(Cd)까지 감소하였다. 깊이 7.82 - 8.24 m 구간에서도 중간층 농도는 외부층 대비 1.51배(Rb)에서 32.67배(Bi)까지 낮게 나타났다.

반면, 깊이 6.63 - 6.76m 구간에서는 U와 Mn이 중간층에서 각각 0.17배 및 0.12배 높은 농도를 보였으며, 깊이 7.67 - 7.73m 구간에서는 Th, U, Al, Ti, Fe 일부 원소에서 중간층 농도가 증가하는 현상이 관찰되었다. 일반적으로 내부층의 농도가 외부층보다 낮게 나타나는 것이 통상적이나, 이러한 예외적 결과는 제염 과정에서의 기계적 처리 차이(치즐링 길이 차이) 또는 특정 깊이에서 실제 고농도 신호가 반영되었을 가능성으로 해석된다. 특히 7.67 m 깊이에 해당하는 내부 시료는 상대적으로 높은 농도를 보여, 해당 깊이에서 더 많은 치즐링이 중간층에 포함되었을 가능성이 제시되었다. 미량원소 분석 시료에 대한 연대는 불안정동위원소와 주요 이온 성분을 이용하여 구축된 연대 모델을 기반으로 보간하여 적용하였다.

본 연구에서 구축된 강설량 복원 기법과 미량원소 - 기후변수 통합 분석 방법은 향후 남극 및 극지역 빙하시료 분석의 핵심 원천기술로 활용될 수 있다. 특히 장기 빙하코어 자료와 결합할 경우 고기후 복원, 기후모델 검증, 해빙 변화 및 해수면 상승 예측 연구로 확장 활용이 가능할 것으로 기대된다. 본 연구는 빙하시료 분석을 단순한 화학 분석 단계에 머무르지 않고, 대기대 순환과 물질 수송을 복원하는 종합적 기후 연구로 확장함으로써 국내 극지 연구의 활용성과 국제적 경쟁력을 동시에 제고하는 데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

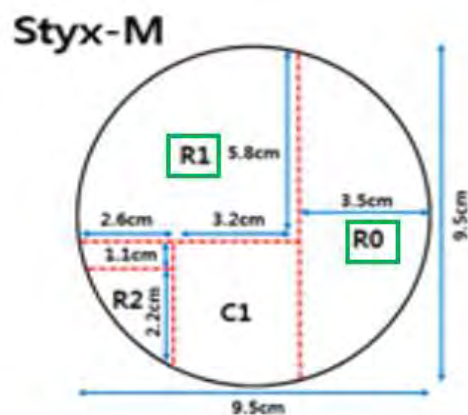


Fig 5.1. R1 and R0 (half of it) section that used for trace element analysis



Fig 5.2. Chiselling procedure of the portions of Styx-M ice core for trace elements analysis and the class 100 clean bench in a cold room at KOPRI.



Fig 5.3. Inner layer with diameter of $\sim 1\text{--}1.2$ cm after chiselling for the depth sections between 4.2 to 6.2m



Fig 5.4. Inner layer with diameter of ~ 3 cm after chiselling for the depth sections between 6.2 to 9.8m

Table 5.1. Mean, standard deviation (SD), median, max, min, and DL in pg g^{-1} of trace elements

	Element	Mean	SD	Max	Min	Range	n	DL
1	Rb	15.37	19.92	94.81	0.99	95.64	81	0.010
2	Sr	286.90	677.62	3609.80	1.80	2002.92	81	0.042
3	Mo	4.04	15.55	129.90	0.07	1960.17	81	0.030
4	Cd	2.48	2.32	14.12	0.51	27.77	81	0.018
5	Sb	0.43	0.68	4.75	0.05	89.77	81	0.024
6	Ba	38.58	56.40	382.17	2.65	144.01	81	0.063
7	Tl	2.09	17.09	153.97	0.02	7810.11	81	0.009
8	Pb	52.41	120.07	901.22	1.85	487.32	81	0.342
9	Bi	0.08	0.08	0.43	0.01	55.48	75	0.005
10	Th	1.05	1.99	14.06	0.02	872.94	81	0.001
11	U	0.28	0.49	2.71	0.00	828.42	80	0.003
12	Al	3246.28	7777.26	60846.28	7.30	8330.47	80	0.755
13	Ti	261.15	475.95	2586.57	0.49	5273.71	81	0.148
14	V	6.39	10.12	46.59	0.01	4689.26	78	0.013
15	Cr	10.25	33.63	262.41	0.14	1839.56	62	0.073
16	Mn	125.39	212.02	1534.14	1.02	1503.91	81	0.020
17	Fe	2757.99	4950.40	30529.82	3.14	9730.39	81	0.861
18	Co	5.06	9.61	78.81	0.06	1378.03	81	0.014
19	Ni	1139.35	2723.20	15699.84	3.96	3963.45	81	0.522
20	Cu	164.07	505.95	4156.93	1.12	3700.62	81	0.194
21	Zn	1336.42	1161.55	6088.50	23.38	260.36	81	1.101
22	As	4.98	3.89	29.89	0.78	38.33	73	0.322

Table 5.2. Mean, SD, median, max, min, and DL in pg g^{-1} of rare earth elements

	Element	Mean	SD	Max	Min	Range	n	DL
1	Sc	0.69	1.01	5.52	0.03	218.29	64	0.024
2	La	3.98	8.16	53.40	0.03	1861.90	81	0.002
3	Ce	8.59	18.63	104.65	0.06	1614.49	81	0.003
4	Pr	0.87	1.79	11.53	0.01	1972.20	81	0.002

5	Nd	3.37	7.26	47.34	0.03	1585.25	80	0.037
6	Sm	0.58	1.25	7.17	0.01	1095.65	81	0.005
7	Eu	0.13	0.31	2.03	0.00	468.47	75	0.004
8	Gd	0.54	1.14	6.56	0.01	487.95	75	0.012
9	Tb	0.07	0.15	0.89	0.00	635.25	76	0.001
10	Dy	0.39	0.86	5.06	0.01	818.32	78	0.003
11	Ho	0.07	0.14	0.88	0.00	458.44	79	0.001
12	Er	0.17	0.36	2.26	0.00	1026.70	81	0.001
13	Yb	0.17	0.31	1.91	0.00	715.46	65	0.006
14	Lu	0.02	0.04	0.26	0.00	224.28	75	0.001

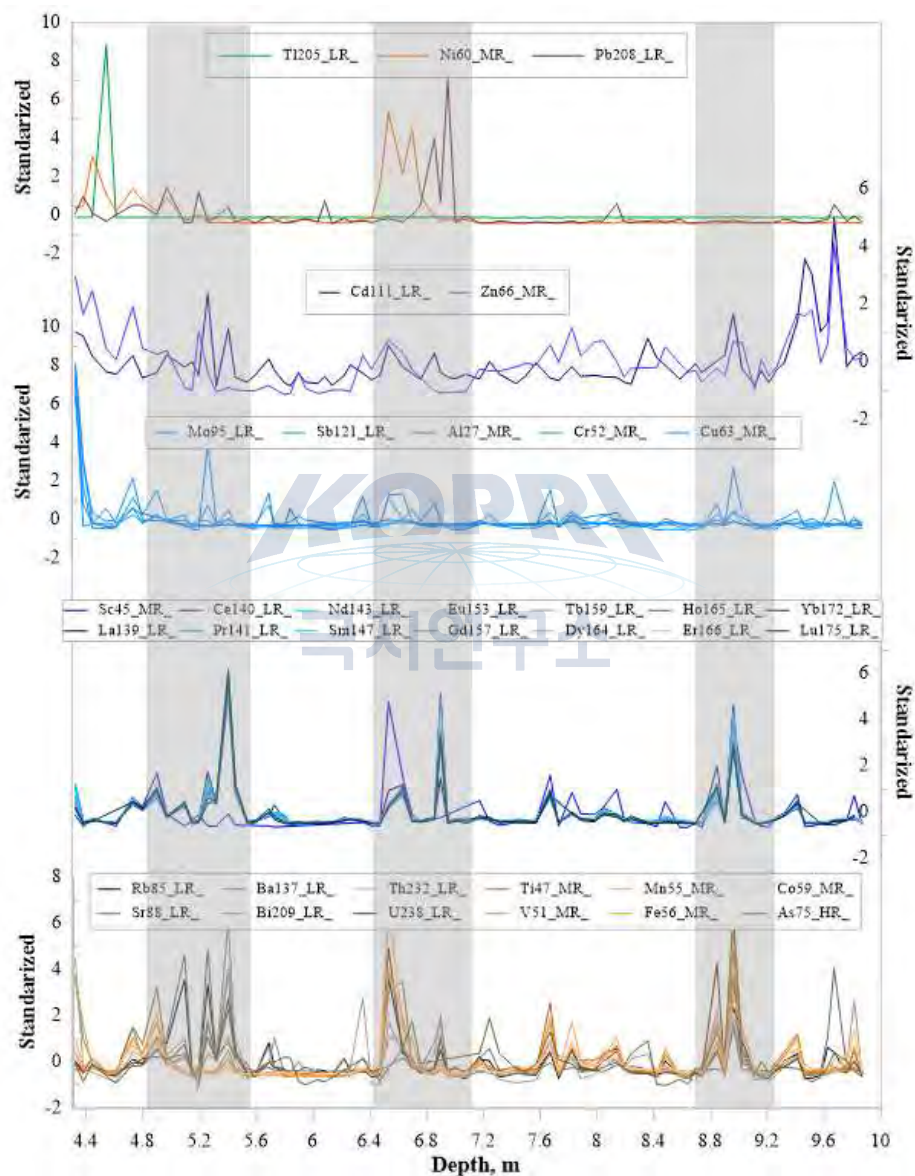


Fig 5.5. Depth vs standardized profile of trace elements measured in the portion of Styx-M ice core

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

연구개발과정에서 수집한 해외 과학기술정보는 극지역 빙하·강설량 복원 연구의 해석력을 높이기 위한 핵심 기반자료로 활용하였으며, 그 결과를 종합하여 두 편의 리뷰논문을 출판하였다. 첫째, Nyamgerel et al. (2021, Molecules)에서는 물순환 및 기후 연구에서의 삼중 산소동위원소(^{16}O , ^{17}O , ^{18}O) 활용 가능성을 정리하고, 특히 ^{17}O -excess가 수분공급원 조건 및 수송·강수(증착) 과정의 동위원소 분별을 반영하는 지표로서 의미가 있음을 해외 선행연구를 통해 체계적으로 검토하였다. 해당 리뷰에서는 기존 연구에서 보고된 $\delta^{18}\text{O}$, λ_{ref} , ^{17}O -excess의 범위와 분석법(IRMS, CRDS 등), 시·공간 규모별 적용 사례를 표로 정리하여 연구자들이 비교·활용할 수 있는 기준 범위를 제시하였다. 또한 극지역에서는 과포화(supersaturation) 효과, 성층권 수증기 유입, 승화에 따른 국지 수분 재순환 등 퇴적 후 과정, 지역 순환 및 해빙 농도, 국지 기상 조건 등이 ^{17}O -excess 분포를 좌우하는 주요 요인으로 제시되었으며, 이는 남극 빙하코어 해석 시 온도 이외 요인을 정량적으로 분리·해석하기 위한 해외 기술 동향으로써 의미가 크다. 더불어 동위원소탐재 대기대순환모델(isotope-enabled GCM)의 정확한 수문과정 모사를 위해 현장(in situ) 수증기 및 강수 동위원소 관측자료의 필요성을 강조하였으며, 국내 남극 관측·시료 분석 체계에 ^{17}O 계열 지표를 단계적으로 접목할 수 있는 적용 방향을 논의하였다.

둘째, 이정훈 외(2021, 한국지구과학회지 영문판)에서는 희토류원소(REE)의 지화학적 거동과 분별 패턴을 바탕으로, 지하수계에서의 암석-물 반응 추적자(tracer)로서의 활용과 더불어 빙하시료에서 입자(먼지) 기원 및 공급원(source region) 추적 지표로 확장 적용될 수 있는 가능성을 종합적으로 정리하였다. 특히 희토류원소가 지질기원 물질의 이동·침적 과정과 연계될 수 있어, 빙하에 기록된 REE 특성을 통해 주변 지질·대기수송 경로·순환 변동을 간접적으로 지시할 수 있음을 해외 문헌 기반으로 제시하였다. 또한 지하수 연구에서 사용되는 ICP-MS 기반 분석 접근과 자료 해석 프레임워크를 정리하여, 향후 빙하코어 미량원소 분석 및 대기대순환 프록시 개발 연구에 적용 가능한 분석·해석 기반을 제공하였다.

종합하면, 본 과제는 ^{17}O -excess 및 REE에 관한 해외 연구성과를 체계적으로 검토·정리하여, (1) 빙하코어 안정동위원소 해석에서 수분공급원·해빙·국지 기상 요인의 분리 가능성을 확대하였고, (2) 입자/미량원소 기반 프록시 개발을 위한 분석·해석 기반을 확립하였으며, (3) 향후 동위원소·미량원소·재분석자료·모델을 통합하는 고도화된 강설량/대기대순환 복원 연구로의 확장 가능성을 제시하였다. 이는 3장에 자세하게 설명되어 있다.

제 7 장 참고문헌

1. Affolter, S and 4 others (2015) Triple isotope ($_2\text{D}$, $_ {17}\text{O}$, $_ {18}\text{O}$) study on precipitation, drip water and speleothem fluid inclusions for a Western Central European cave (NW Switzerland). *Quat. Sci. Rev.* 2015, 127, 73 - 89.
2. Aron, P.G and 8 others (2004) Triple oxygen isotopes in the water cycle. *Chem. Geol.* 2020, 565, 120026.
3. Becagli, S and 12 others (2004) Chemical and isotopic snow variability in East Antarctica along the 2001/02 ITASE traverse. *Annals of Glaciology*, 39, 473-482. doi:10.3189/172756404781814636.
4. Bertler, N. A. N and 5 others (2004) El Niño suppresses Antarctic warming, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L15207, doi:10.1029/2004GL020749.
5. Caiazzo L and 25 others (2017) Prominent features in isotopic, chemical and dust stratigraphies from coastal East Antarctic ice sheet (Eastern Wilkes Land). *Chemosphere.*, 176, 273-287.
6. Dansgaard W (1964) Stable isotopes in precipitation. *Tellus.*, 16(4), 436-468, (doi: 10.3402/tellusa.v16i4.8993).
7. Dee DP and 35 others (2011) The ERA Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137 (656), 553-597.
8. Dinniman, M.S and 2 others (2012) Sensitivity of Circumpolar Deep-Water Transport and Ice Shelf Basal Melt along the West Antarctic Peninsula to Changes in the Winds. *Journal of Climate*, 2012. 25(14): p. 4799-4816.
9. Frezzotti M and 13 others (2004) "New estimations of precipitation and surface sublimation in East Antarctica from snow accumulation measurements. *Climate Dynamics.*, 23, 803-813.
10. Furukawa R and 6 others (2017) Seasonal scale dating of a shallow ice core from Greenland using oxygen isotope matching between data and simulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.*, 122, 10873 - 10887, (doi.org/10.1002/2017JD026716).
11. Gragnani, R and 3 others (1998) Chemical and isotopic profiles from snow pits and shallow firn cores on Campbell Glacier, northern Victoria Land, Antarctica. *Annals of Glaciology.*, 27, 679-684, https://doi.org/10.3198/1998AoG27-1-679-684.
12. Han YC and 7 others (2015) Shallow ice-core drilling on Styx glacier, northern Victoria Land, Antarctica in the 2014-2015 summer. *Journal of the Geological Society of Korea.*, 51(3), 343-355.
13. Hong, S.-B., Nyamgerel, Y., Lee, W. S. and Lee, J. (2023) High snow accumulation on Amundsen Sea coastal ice rise, West Antarctica. *Polish Polar Research*, 44(4), 365 - 384. doi:10.24425/ppr.2023.145440.
14. Hwang, H and 2 others (2021) "Distribution of Rare Earth Elements and Their Applications as Tracers for Groundwater Geochemistry - A Review," *Journal of the Korean earth science society*. The Korean Earth Science Society. doi: 10.5467/jkess.2021.42.4.383.
15. Hock, R and 12 others (2019). High mountain areas. Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate: IPCC.
16. IPCC, 2019: Technical Summary [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.- O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
17. Kwak H and 6 others (2015) A Study on High-Resolution Seasonal Variations of Major Ionic Species in Recent Snow Near the Antarctic Jang Bogo Station. *Ocean & Polar Research.*, 37 (2), 127-140, (doi: 10.4217/OPR.2015.37.2.127).

18. Landais, A and 2 others (2008) Record of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{17}\text{O}$ -excess in ice from Vostok Antarctica during the last 150,000 years. *Geophys. Res. Lett.* 2008, 35, 1 - 5.
19. Landais, A and 5 others (2012) Triple isotopic composition of oxygen in surface snow and water vapor at NEEM (Greenland). *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2012, 77, 304 - 316.
20. Landais, A and 3 others (2012b) Seasonal variations of $\delta^{17}\text{O}$ -excess and δ^{d} -excess in snow precipitation at Vostok station, East Antarctica. *J. Glaciol.* 2012, 58, 725 - 733.
21. Lee, J. and 5 others (2025) Assessment of trace elements distribution and sources from snowpits in the Lambert Glacier region, coastal East Antarctica. *Geoscience Frontiers*, 16, 102045.(doi:10.1016/j.gsf.2025.102045)
22. Legrand M and Mayewski P (1997) Glaciochemistry of polar ice cores: A review. *Review of Geophysics.*, 35(3), 219 - 243, (doi: 10.1029/96RG03527).
23. Li, S and 2 others (2015) Continental scale variation in $\delta^{17}\text{O}$ -excess of meteoric waters in the United States. *Geochim. Cosmochim. Acta* 2015, 164, 110 - 126.
24. Li, S and 4 others (2017) Triple oxygen isotope composition of leaf waters in Mpala, central Kenya. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2017, 468, 38 - 50.
25. Luz, B and Barkan, E (2010). Variations of $\delta^{17}\text{O}/\delta^{16}\text{O}$ and $\delta^{18}\text{O}/\delta^{16}\text{O}$ in meteoric waters. *Geochim. Cosmochim. Acta* 2010, 74, 6276 - 6286.
26. Pang, H and 9 others (2015) Spatial distribution of $\delta^{17}\text{O}$ -excess in surface snow along a traverse from Zhongshan station to Dome, East Antarctica. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2015, 414, 126 - 133.
27. Masson-Delmotte V and 35 others, (2008) A review of Antarctic surface snow isotopic composition: Observations, atmospheric circulation, and isotopic modeling. *Journal of Climate.*, 21, 3359-3387, (doi:10.1175/2007JCLI2139.1).
28. Mouginot, J and 2 others (2013) Sustained increase in ice discharge from the Amundsen Sea Embayment, West Antarctica, from 1973 to 2013. *Geophysical Research Letters*, 2014: p. 2013GL059069.
29. Mulvaney, R and 8 others (2021) Ice drilling on Skytrain Ice Rise and Sherman Island, Antarctica. *Annals of Glaciology*, 62(85-86), 311-323. doi:10.1017/aog.2021.7.
30. Neff, P. 2020. Amundsen Sea coastal ice rises: Future sites for marine-focused ice core records. *Oceanography* 33-2:88 - 89, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.215>.
31. Nyamgerel, Y and 5 others (2020) Chronological characteristics for snow accumulation on Styx Glacier in northern Victoria Land, Antarctica. *Journal of Glaciology*, 1-11. Doi:10.1017/jog.2020.53.
32. Nyamgerel, Y and 5 others (2021) Snow-pit record from a coastal Antarctic site and its preservation of meteorological features. *Earth Interact.* 25, 108 - 118. doi:10.1175/ei-d-20-0018.1.
33. Nyamgerel, Y and 5 others (2021) Review on applications of $\delta^{17}\text{O}$ in hydrological cycle. *Molecules*, 26, 4468. <https://doi.org/10.3390/molecules26154468>.
34. Nyamgerel, Y. and 6 others (2024) Climate-related variabilities in the Styx-M ice core record from northern Victoria Land, East Antarctica, during 1979 - 2014.
35. Nyamgerel, Y., Han, Y. and Lee, J. (2024) Isotopic evolution of snowmelt and its hydrometeorological importance in snow-covered regions. *Catena*, 234, 107543.
36. Pan, C. G and 5 others (2018). Glacier Recession in the Altai Mountains of Mongolia in 1990-2016. *Geografiska Annaler: Ser. A, Phys. Geogr.* 100, 185 - 203. doi:10.1080/04353676.2017.1407560.
37. Passey, B.H and Ji, H (2019) Triple oxygen isotope signatures of evaporation in lake waters and carbonates: A case study from the western United States. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2019, 518, 1 - 12.
38. Schoenemann, S.W and 4 others (2014) Triple water-isotopologue record from WAIS Divide, Antarctica: Controls on glacial-interglacial changes in $\delta^{17}\text{O}$ -excess of precipitation. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014, 119, 8741 - 8763.
39. Severi, M., S and 5 others (2009) Thirty years of snow deposition at Talos Dome (Northern Victoria Land, East Antarctica): Chemical profiles and climatic implications, *Microchem. J.*, 92, 15 - 20, 2009.
40. Rhodes RH and 6 others (2012) Little Ice Age climate and oceanic conditions of the Ross Sea, Antarctica from a coastal ice core record. *Climate of the Past.*, 8,

- 1223 - 1238, (<https://doi.org/10.5194/cp-8-1223-2012>, 2012)
41. Sinclair, K. E and 2 others (2010) Synoptic controls on precipitation pathways and snow delivery to high-accumulation ice core sites in the Ross Sea region, Antarctica, *J. Geophys. Res.*, 115, D22112, doi:10.1029/2010JD014383.
 42. Steig, E.J., and Neff P.D. 2018. The prescience of paleoclimatology and the future of the Antarctic ice sheet. *Nat Commun* 9, 2730 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05001-1>.
 43. Stenni B and 6 others (2000) Snow accumulation rates in northern Victoria Land, Antarctica, by firn-core analysis. *Journal of Glaciology.*, 46(155), 541 - 552.
 44. Stenni B and 18 others (2017) Antarctic climate variability on regional and continental scales over the last 2000 years. *Climate of the Past.*, 13, 1609 - 1634, (<https://doi.org/10.5194/cp-13-1609-2017>).
 45. Stenni B and 6 others (2002) Eight centuries of volcanic signal and climate change at Talos Dome (East Antarctica). *Journal of Geophysical Research.*, 107(D9), 1-14, doi:10.1029/2000JD000317, 2002.
 46. Surma, J and 3 others (2015) Triple oxygen isotope signatures in evaporated water bodies from the Sistan Oasis, Iran. *Geophys. Res. Lett.* 2015, 42, 8456 - 8462
 47. Surma, J and 2 others (2021) Triple Oxygen Isotope Systematics in the Hydrologic Cycle. *Rev. mineral. Geochem.* 2021, 86, 401 - 428.
 48. Thomas, E. R and 15 others (2017) Regional Antarctic snow accumulation over the past 1000 years, *Clim. Past*, 13, 1491 - 1513, <https://doi.org/10.5194/cp-13-1491-2017>, 2017.
 49. Tian, C and Wang, L (2019) Data Descriptor: Stable isotope variations of daily precipitation from 2014 - 2018 in the central United States. *Nat. Publ. Gr.* 2019, 9, 1 - 8.
 50. Touzeau, A and 17 others Acquisition of isotopic composition for surface snow in East Antarctica and the links to climatic parameters. *Cryosphere* 2016, 10, 837 - 852.
 51. Traversi R and 6 others (2004) Spatial and temporal distribution of environmental markers from coastal to plateau areas in Antarctica by firn core chemical analysis. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry.*, 84(6 - 7), 457 - 470. (doi.org/10.1080/03067310310001640393).
 52. Tuohy A and 6 others (2015) Transport and deposition of heavy metals in the Ross Sea Region, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere.*, 120, 10,996 - 11,011, (doi:10.1002/2015JD023293).
 53. Udisti R (1996) Multiparametric approach for chemical dating of snow layers from Antarctica. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry.*, 63, 225-244.
 54. Uechi, Y and Uemura, R (2019) Dominant influence of the humidity in the moisture source region on the 17O -excess in precipitation on a subtropical island. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2019, 513, 20 - 28.
 55. Uemura, R and 3 others (2010) Triple isotope composition of oxygen in atmospheric water vapor. *Geophys. Res. Lett.* 2010, 37, 1 - 4.
 56. Winkler, R and 7 others (2012) Deglaciation records of 17O -excess in East Antarctica: Reliable reconstruction of oceanic normalized relative humidity from coastal sites. *Clim. Past.* 2012, 8, 1 - 16.
 57. Winkler, R and 9 others (2013). Interannual variation of water isotopologues at Vostok indicates a contribution from stratospheric water vapor. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2013, 110, 17674 - 17679.
 58. Yang J W and 10 others (2018) Surface temperature in twentieth century at the Styx Glacier, northern Victoria Land, Antarctica, from borehole thermometry. *Geophysical Research Letters*, 45, 9834-9842, (doi.org/10.1029/2018GL078770).

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.