

우주선 유발 동위원소 연대측정을 이용한
빙하 기록 연구

Paleo-glacier Reconstruction using
cosmogenic nuclides



고려대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “과거 온난기의 서남극 빙상 후퇴 및 해양 순환 변화 연구 ” 과제의 위탁연구 “우주선유발 동위원소 연대측정을 이용한 빙하기록 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2024. 12. 31

(본과제) 총괄연구책임자 : 유 규 철

위탁연구기관명 : 고려대학교

위탁연구책임자 : 성 영 배

위탁참여연구원 : Chinmay Dash

보고서 초록

위탁연구과제명	우주선유발 동위원소 연대측정을 이용한 빙하 기록 연구				
위탁연구책임자	성영배	해당단계 참여연구원수	2	해당단계 연구비	30,000,000
연구기관명 및 소속부서명	고려대학교 지리학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약				보고서 면수	
빙봉은 빙상의 급격한 붕괴를 방지하고 안정시키는 데 중요한 역할을 하며, 이는 전 세계 해수면 상승률에도 영향을 미칠 수 있다. 연구 지역에 위치한 로스해와 로스 빙봉은 남극에서 가장 큰 빙봉으로, 동남극 빙상과 서남극 빙상에서 지속적인 공급을 받으며 해양 쪽으로 확장되고 있다. 그러나 로스 빙봉은 최종 빙기 이후 기후 변화에 가장 민감한 빙봉으로, 이미 상당한 양의 빙하 질량을 잃었다. 이러한 빙봉의 변화를 과거 기후 변동 지표들과의 상관관계, 변화관계를 분석함으로써, 미래 기후 변화로 인한 빙하 규모의 변화를 예측할 수 있다. 빙봉의 전진, 후퇴, 붕괴와 같은 수평적 변화 및 고기후 환경은 해양 퇴적물에서 추출한 대기 기원 ^{10}Be의 거동을 통해 복원할 수 있다. 대기 기원 ^{10}Be는 방사성 동위원소로, 대기 중 질소와 산소 원자가 우주선과 반응하여 생성된다. 생성된 ^{10}Be는 대기 중 에어로졸에 흡착되거나 강수에 용해된 후 대륙, 호수, 해양 표면에 퇴적되어 퇴적물에 저장된다. 빙하가 후퇴하면서 노출된 암석에는 우주선과 반응하여 ^{10}Be, ^{14}C, ^{26}Al 등의 동위원소가 형성된다. 이러한 동위원소의 누적량과 비율 차이를 이용해 지형의 노출 및 매몰 기록을 분석하여 빙하의 후퇴와 수직적 변화를 복원할 수 있다. 본 연구는 해양 퇴적물에서 동위원소를 추출하여 빙하 거동과 고기후 변화를 복원하는 것을 목표로 한다. 라르센, 벨링스하우젠, 로스해 세 지역에서 코어링을 통해 채취한 해양 퇴적물이 주요 연구 자료로 사용되었다. 또한, 2020-21년 탐사를 통해 로스해 테라노바 만 인근에서 수집된 샘플은 프리스틀리 및 데이비드 빙하, 고기후 변화 감지, 고지자기 변동 간의 상관성에 대한 연구를 수행하였다. 대기 기원 ^{10}Be와 같은 동위원소 추출 및 분석을 통해 빙봉의 수평적 및 수직적 변화를 심층적으로 이해할 수 있다. 남극 퇴적물 기록과 고지자기 데이터를 결합하여 고기후 조건과 빙하 거동의 세부적인 재구성이 가능하다. 이러한 연구는 빙봉 변화 과정을 이해하고 미래 기후 변화와 해수면 상승에 대한 예측력을 높이는 데 중요하다.					
색인어 (각 5개 이상)	한글	우주선 유발 동위원소, Meteoric ^{10}Be , In-situ $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$, 퇴빙, 질량가속기			
	영어	CRN, Meteoric ^{10}Be , In-situ $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$, Deglaciation, AMS			

요 약 문

I. 제 목

우주선 유발 방사성 동위원소(Cosmogenic Radioactive Nuclides; CRN) 분석을 통한 로스해 인근 지역의 제4기 빙하 거동 및 고환경 변화 복원

II. 연구개발의 목적 및 필요성

남극의 빙상은 침식과 용해로 인한 질량 손실이 새롭게 축적되는 강설보다 클 때 축소된다. 특히, 동남극 빙상은 전 세계 빙하 체적의 상당 부분을 차지하고 있다. 남극 대륙은 지구상에서 가장 많은 빙하와 얼음을 보유하고 있으며, 만약 남극 빙상이 모두 녹을 경우 전 세계 해수면은 약 60m 상승하여 저지대 도시와 지역 사회에 막대한 피해를 초래할 것이다. 남극 빙상과 빙봉은 과거 최종빙기전성기(LGM: Last Glacial Maximum) 이후 온도 상승에 따라 민감하게 반응해 왔으며, 최근의 지구 온난화는 빙상의 두께와 범위를 급격하게 감소시켰다. 기후 시스템 내에서 빙권의 역할을 평가하고, 미래의 온난화 시나리오에서 해수면 상승의 속도와 규모를 예측하기 위해서는 과거 지질학적 시기의 남극 빙상과 빙봉의 변동을 이해하는 것은 필수적이다. 이를 위해 우리는 지구상에서 가장 큰 빙봉인 로스해/로스 빙봉에 대해 연구를 수행했다.

퇴적 연구에서 중요한 도구 중 하나는 대기 기원 ^{10}Be 이다. 이는 우주선이 대기 중 질소와 산소와 상호작용하여 생성되는 우주선유발 방사성 핵종(cosmogenic radionuclide)이다. 대기에서 지표로 축적된 후 퇴적물에 포함되는 ^{10}Be 는 과거의 기후 및 환경 조건에 대한 귀중한 자료를 제공한다. 고빙하 연구에서 ^{10}Be 는 빙상 역학, 퇴적물 체류 시간, 침식 속도를 해석하는 데 정확한 지표(proxy)로 활용된다. 남극이 전 세계 온도와 해수면 조절에 중심적인 역할을 하기 때문에, 남극 퇴적물에서 ^{10}Be 연구는 더 큰 중요성을 가진다.

고빙하 연구에서 대기 기원 ^{10}Be 는 빙하의 확장 및 후퇴 시점과 범위를 재구성하는 데 매우 유용하다. 남극 퇴적물 코어는 빙하 활동의 연속적인 기록을 보유하고 있으며, ^{10}Be 은 얼음에 의한 차폐 변화, 고해양 변화, 퇴적물 이동을 보여줄 수 있다. 빙상이 확장되는 빙하기 동안에는 빙하로 인한 차폐 효과로 인해 ^{10}Be 침적이 크게 감소하여 퇴적물에서 낮은 농도가 나타난다. 이 시기에는 또한 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 농도가 높은 물을 남극 주변 바다로 운반하는 환남극심층수(CDW)의 유입이 감소하는 시기와 관련이 있다. 반면에 간빙기 동안에는 주변 바다에서 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 농도가 증가한다. 이러한 농도 변화를 퇴적물 코어에서 분석함으로써, 연구자들은 수천 년 동안의 빙상 역학 역사를 재구성할 수 있다.

대기 기원 ^{10}Be 은 또한 퇴적물 이동과 빙상 용해 과정을 연구하는 데 매우 유용하다. 남극의 아빙하 호수, 피오르드, 대륙붕에서 채취한 퇴적 코어는 독특한 ^{10}Be 기록을 가지고 있으며, 이는 빙하 침식 속도, 퇴적물 흐름, 빙상 기저 용해의 변화를 보여준다. 또한 대기 기원 ^{10}Be 침적은 태양 활동, 대기 순환,

지구 자기장 강도에 의해 영향을 받아 과거 기후 변동의 고해상도 기록을 제공한다. 안정 동위원소, 방사성 탄소, 퇴적학적 증거와 같은 다른 지표들과 결합할 때, ^{10}Be 데이터는 남극의 과거 기후 조건을 재구성하는 데 크게 기여한다.

남극 빙상은 해수면, 해양 순환 패턴, 지구 반사율에 큰 영향을 준다. ^{10}Be 을 사용하여 빙상의 과거 행동을 분석함으로써, 과학자들은 기후 모델을 개선하고 미래 변화를 예측할 수 있다. 이는 특히 가속화되는 기후 변화와 함께 남극 빙상의 안정성이 전 세계 환경 역학에서 중요한 요소로 부각되는 상황에서 매우 중요하다.

결론적으로, 대기 기원 ^{10}Be 는 남극에서 빙하 활동, 빙상 역학, 고기후를 이해하는 데 필수적이다. ^{10}Be 을 이용하면 퇴적물 기원, 침식 속도, 대기 과정을 추적할 수 있기 때문에 극지방 변화와 지구 기후 시스템 간의 상호작용을 이해하는 데 중심적인 역할을 한다. 남극 퇴적물에서 ^{10}Be 에 대한 지속적인 연구는 빙상의 안정성과 미래의 변화 모습을 예측하는데 중요한 통찰력을 제공하며, 기후 변화에 대응하기 위한 세계적인 노력에 기여할 수 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

이 과제의 연구개발 내용을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

- Meteoric ^{10}Be 추출 실험 시행 및 개선
- 깊이에 따른 대기기원 ^{10}Be 농도 변화 연구
- 빙붕과 빙하의 거동 및 고기후 환경 복원
- 논문 투고

IV. 연구개발결과

연구개발 결과를 정리, 요약하면 다음과 같다.

- 1) Meteoric ^{10}Be 추출법을 이용하여 로스해 대륙 경계부의 퇴적물 코어 RS15-LC47의 대기기원 ^{10}Be 을 분석하였다.
- 2) 빙기/간빙기가 나타나는 시기에 따른 대기기원 ^{10}Be 변화를 분석하였다.
- 3) 퇴적물 코어 시료에서 얻은 지화학 데이터를 분석하고 이를 ^{10}Be 기록과 비교하였다.
- 4) 퇴적물 코어의 ^{10}Be 기록을 유기 지화학적 데이터와 지자기 변화율과 비교하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

이전 연구에서 실시한 해양퇴적물 코어에서의 authigenic ^{10}Be 분석은 다양한 기후 및 해양 연구 환경에서 널리 활용되고 있으며, 앞으로의 연구에서 점점 더 중요한 가치를 지닐 것으로 예상된다.



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Reconstruction of Quaternary glacial behavior and paleo-environmental changes in the vicinity of the Ross Sea through analysis of Cosmogenic Radioactive Nuclides (CRN).

II. Purpose and Necessity of R&D

Ice sheets diminish when the rate of ice loss through calving and melting surpasses the accumulation of new snow and ice from fresh precipitation. The Antarctic Ice Sheets, particularly the East Antarctic Ice Sheet, hold immense reserves of frozen water. Given that Antarctica contains more ice than any other region on Earth, a complete melt of its ice sheets would raise global sea levels by approximately 60 m, causing catastrophic consequences for low-lying coastal cities and communities worldwide. The Antarctic ice sheets and their ice shelves have demonstrated significant sensitivity to post-Last Glacial Maximum (LGM) temperature increases, with recent global warming accelerating their thinning and retreat. Understanding the historical behavior of Antarctic ice sheets and ice shelves is crucial for assessing the cryosphere's role in the climate system and forecasting future sea level changes under warming scenarios. This study emphasizes the Ross Sea and the Ross Ice Shelf, home to the largest volume of ice on Earth.

A pivotal tool in sedimentary research is meteoric ^{10}Be , a cosmogenic radionuclide produced in the atmosphere by the interaction of cosmic rays with nitrogen and oxygen. Deposited onto the Earth's surface and incorporated into sediments, meteoric ^{10}Be provides valuable insights into past climatic and environmental conditions. In paleoglacial reconstruction, ^{10}Be serves as an accurate proxy for deciphering ice sheet dynamics, sediment residence times, and erosion rates. As Antarctica plays a central role in regulating global temperature and sea levels, the study of ^{10}Be in Antarctic sediments holds exceptional significance.

In paleoglacial studies, meteoric ^{10}Be is instrumental in reconstructing the timing and extent of glacial advances and retreats. Antarctic sediment cores often retain continuous records of past glacial activity due to ^{10}Be 's sensitivity to changes in ice cover, paleoceanographic shifts, and sediment transport dynamics. During glacial maxima, when ice sheets expand, ^{10}Be deposition decreases significantly due to ice shielding, resulting in lower concentrations in sediments. These periods are also associated with reduced influxes of Circumpolar Deep Water (CDW), which transports $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ -enriched waters to Antarctic peripheral seas. In contrast, interglacial periods see an increase in $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ concentrations in the marginal seas. By analyzing these concentration variations in sediment cores, researchers can reconstruct the history of ice sheet dynamics over millennial timescales.

Meteoric ^{10}Be also significantly enhances the study of sediment transport and ice sheet melting processes. Sediment cores from subglacial lakes, fjords, or continental shelves in Antarctica often carry distinct ^{10}Be fingerprints, revealing variations in glacial erosion rates, sediment fluxes, and basal melting of ice sheets. Furthermore, the deposition of meteoric ^{10}Be is influenced by solar activity, atmospheric circulation, and geomagnetic field strength, providing a high-resolution record of historical climate fluctuations. When combined with other proxies, such as stable isotopes, radiocarbon, and sedimentological evidence, ^{10}Be data significantly improve the reconstruction of past climatic conditions in Antarctica.

Antarctica's ice sheets profoundly affect sea levels, oceanic circulation patterns, and Earth's albedo. By decoding the historical behavior of ice sheets using ^{10}Be , scientists can enhance climate models and refine predictions of future changes. This is particularly vital as the world faces accelerating climate change, with the stability of Antarctic ice sheets emerging as a critical factor in global environmental dynamics.

In conclusion, meteoric ^{10}Be is an indispensable tool for unraveling the intricate history of glacial activity, ice sheet dynamics, and paleoclimate, especially in Antarctica. Its ability to trace sediment provenance, erosion rates, and atmospheric processes makes it central to understanding the interplay between cryospheric changes and global climate systems. Continued research on ^{10}Be in Antarctic sediments will provide crucial insights into the stability and future behavior of ice sheets, aiding in global efforts to address the challenges of climate change.

III. Contents and Extent of R&D

This report includes the following research topics.

- Perform experiment for extracting meteoric ^{10}Be from marine sediment.
- Meteoric ^{10}Be concentration change with depth
- Reconstruction of the ice shelves and glacier behavior and paleoclimatic environment
- Submission of the result to the journal

IV. R&D Results

This report includes the following researches and developments.

- 1) We used the meteoric ^{10}Be analysis in Ross Sea continental margin sediment core (RS15-LC47).
- 2) We interpreted variation of meteoric ^{10}Be during different climatic episodes.
- 3) We analysed elemental data from the sediment core and compared them with the ^{10}Be records.
- 4) The ^{10}Be record from the sediment core was compared with organic geochemical and magnetic susceptibility record from the sediment core.

V. Application Plans of R&D Results

The analysis of authigenic ^{10}Be in marine sediment cores has been widely applied across diverse climatic and marine research settings and is anticipated to become increasingly valuable in future studies.

목 차

제 1 장 서론	11
제 2 장 국내외 기술개발 현황	13
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	17
제 1 절 우주선유발동위원소 실험 수행	17
제 2 절 연구지역별 측정결과 분석	25
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	44
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	45
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	46
제 7 장 참고문헌	47

그 립 목 차

그림 1 우주선과 대기, 암석 속 광물의 핵반응으로 생성되는 우주선유발 동위원소 생성과정.....	14
그림 2 Hybrid method for extracting meteoric ^{10}Be	16
그림 3 고려대학교 Geochronology 실험실의 해양퇴적물로부터의 authigenic Be 추출실험 프로토콜	18
그림 4 고려대학교 Geochronology 실험실의 in situ Be/Al 실험 프로토콜	20
그림 5 육상퇴적물/기반암 파쇄물로부터의 in-situ Be/Al 추출 과정	20
그림 6 KIST(Korea Institute of Science and Technology)의 6MV Tandetron AMS (Accelerator Mass Spectrometry)	23
그림 7 RS15-LC42 퇴적물 코어의 위치 지도	27
그림 8 RS15- LC47 퇴적물 코어의 암상.....	29
그림 9 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율의 심도 변화와 대자율의 비교	31
그림 10 ^{10}Be vs ^9Be 의 관계도	33
그림 11 773 ka 동안의 로스해의 해양학적 조건과 관련 시간 프레임을 대표하는 X-선 이미지	36
그림 12 RS15-LC47과 RS15-LC42 퇴적물 코어의 대기 기원 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 기록 비교	37
그림 13 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 와 대자율, 총 유기 탄소(TOC), 규조토 간의 상관관계	40
그림 14 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, detrital 성분이 보정된 우라늄(Ucrr) 및 바륨 과잉의 변화	42
그림 15 로스해 퇴적물의 Ti와 Al 함량 간의 상관 관계	43

제 1 장 서 론

남극 빙봉은 해수면 상승을 완화하고 대륙 빙상의 안정성을 유지하는 중요한 완충 장치로, 빙하가 해양으로 유입되는 속도를 조절하는 데 핵심적인 역할을 한다. 그러나 지구 온난화로 인해 공기와 해양 온도가 상승하면서 빙봉의 얇아지고 붕괴가 가속화되고 있으며, 이는 빙하 손실을 증가시켜 전 세계 해안 지역에 심각한 위협을 초래하고 있다. 빙봉은 물리적 역할뿐만 아니라 해양 순환, 기후 시스템, 그리고 빙하 아래 독특한 생태계를 조절하는 데 기여하며, 지구 환경의 균형을 유지하는 데 필수적이다. 또한, 빙봉은 기후 변화의 주요 지표로 간주되며, 과거 빙봉의 변동성을 이해하는 것은 남극에서 발생할 미래 빙하 용해 시나리오를 예측하는 데 중요한 단서를 제공한다.

빙봉의 중요성은 다수의 연구를 통해 입증되었으며, 남극 빙상의 안정성 유지, 질량 균형 조절, 해양 성층화(stratification)와 저층수 형성(bottom water formation), 열염 순환(thermohaline circulation) 촉진 등 지구 시스템에서 핵심적인 역할을 수행한다. 그러나 빙봉 기저부의 용해는 빙하 접지선(grounding line)의 후퇴를 초래하며, 이는 빙봉 두께의 감소와 붕괴로 이어진다. 붕괴된 빙봉은 대륙 빙하를 지탱하는 기능을 상실하여 빙하 질량 손실을 가속화하며, 해수면 상승에 직접적인 영향을 미친다(Rignot et al., 2004; Dupont and Alley, 2005).

빙봉의 성장, 후퇴, 붕괴를 이해하기 위한 연구는 주로 해양 퇴적물 내 규조류와 유공충의 함량 및 분포 패턴을 분석하는 방법에 의존해왔다. 하지만 이러한 지표는 유입 경로가 불분명하거나 함량이 미미한 경우가 있어 한계가 있었다. 이에 반해, 대기기원 ^{10}Be 는 대기 중에서 일정하게 생성되고 해양 퇴적물에 안정적으로 축적되기 때문에 더욱 신뢰할 수 있는 지표로 활용된다. 코어 깊이에 따른 대기기원 ^{10}Be 농도를 분석하면 빙봉의 변동과 역사를 정밀하게 복원할 수 있다. 이를 바탕으로 최근 3년간 라르센해, 벨링스하우젠해, 로스해 등 남극 주요 지역에서 채취한 퇴적물 코어를 대상으로 연구가 진행되었다.

라르센 빙봉은 1992년, 2002년, 2017년에 걸친 대규모 붕괴로 주목받아 왔으며, 기존 연구들은 우주선유발 동위원소를 활용해 라르센 빙봉의 수평적(전진 및 후퇴) 변화와 수직적(두께 감소) 변화를 성공적으로 복원하였다(Shepherd et al., 2003; Jeong et al., 2018).

남극 빙상 역학(dynamic) 연구는 주로 남극 대륙 주변부의 해양 퇴적물 분석을 통해 이루어진다. 대륙대(continental rise) 퇴적물은 연속적인 기록을 보존하여 고해상도 고환경 데이터를 제공하며, 이는 빙봉 성장 및 해빙 형성과 같은 기후 변화를 반영한다(Dash et al., 2021). 해빙은 알베도를 조절하고, 에너지와 가스 교환을 촉진하며, 열염 순환과 심층수 형성에도 기여하는 등 지구 기후 시스템에서 중요한 역할을 한다(Bryan et al., 1975; Maykut, 1978).

대기기원 ^{10}Be 연구는 남극 퇴적물에서 빙봉과 해빙의 변화를 이해하는 데 중요한 역할을

해왔다. 예를 들어, Frank et al. (1995)은 웨들해(Weddell Sea) 퇴적물에서 후기 제4기 간빙기 동안 대기기원 ^{10}Be 농도가 증가했음을 밝혔고, Frank et al. (2002)은 용해된 ^{10}Be 의 준보존적(quasi-conservative) 거동을 규명하였다. 이는 빙기-후빙기 퇴적물 주기 구분 및 해빙 면적 변화 평가에 유용하게 활용되었다(Sjunneskog et al., 2007; Yokoyama et al., 2016).

로스해 빙붕은 동남극과 서남극에서 유입된 빙하로 구성되며, 최종 빙기 전성기(LGM) 동안 로스해를 덮었으나 후퇴하여 현재 형태로 축소되었다. 대기기원 ^{10}Be 농도를 분석해 빙붕의 수평적 후퇴 시기와 범위를 복원했으며, 대륙대 퇴적물의 ^{10}Be 농도를 통해 해빙 형성과 붕괴 과정을 재구성하였다(Dash et al., 2021).



제 2 장 국내외 기술개발 현황

은하계와 태양계에서 유입되는 고에너지 우주선은 지구 대기권에 진입하면서 연쇄적인 핵 반응을 일으켜 양성자, 알파 입자, 2차 중성자 및 뮤온과 같은 다양한 입자들을 생성한다. 이 과정에서 대기 중 입자들과 지표면 암석 내의 주요 광물 원소들이 상호 작용하여 ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{53}Mn 과 같은 우주선 유발 동위원소를 생성한다 (그림 1). 이 중에서 ^{10}Be 동위원소 (반감기: 1.387×10^6 년)는 고대 환경을 복원하는 데 특히 유용하게 사용된다.

대기 중에서 생성된 대기기원 ^{10}Be 는 대기 부유 입자에 흡착되거나 강수에 용해되어 대륙, 호수 및 해양의 퇴적물로 축적된다(Willenbring and von Blanckenburg, 2010). 해양 퇴적물에 농축된 대기기원 ^{10}Be 의 농도는 빙붕의 전진 및 후퇴 역사를 복원하는 데 중요한 자료로 활용된다. 이와 달리, 암석 내의 광물 격자에서 생성되는 in situ ^{10}Be 는 빙하에 의해 매몰되지 않는 한 계속해서 우주선에 노출되며, 일정한 양이 지속적으로 생성되어 축적된다. 이러한 특성으로 인해 in situ ^{10}Be 는 빙하의 후퇴와 두께 변화를 측정하고, 빙하의 수직적 및 수평적 이동을 복원하는 데 사용된다.

우주선 유발 동위원소에 기반한 연대측정 기술은 남극의 육상 및 해양 퇴적물의 연대 모델을 구축하는 데 매우 적합하다. 이 방법은 1천 년에서 수백만 년에 이르는 시간 척도에 효과적이며, 방사성 탄소 연대 측정법, 광여기루미네선스 기술 등과 함께 지구 표면 과학에서 가장 많이 활용되는 연대 측정법 중 하나로 자리 잡게 되었다. 방사성 탄소 연대 측정은 유기물의 '오래된 탄소'로 인해 최대 약 6만 년까지의 연대만 측정할 수 있다(Doran et al., 1994). 우라늄-토륨 연대 측정은 탄산염 퇴적물에 제한되며, 최대 약 50만 년의 연대 범위를 가진다(Higgins et al., 2000). 광여기루미네선스 기법은 퇴적물의 부분적인 표백작용(bleaching) 및 낮은 발광 강도와 같은 문제에 직면하며, 최대 약 10만 년의 연대 범위를 가진다(Rhodes, 2011).

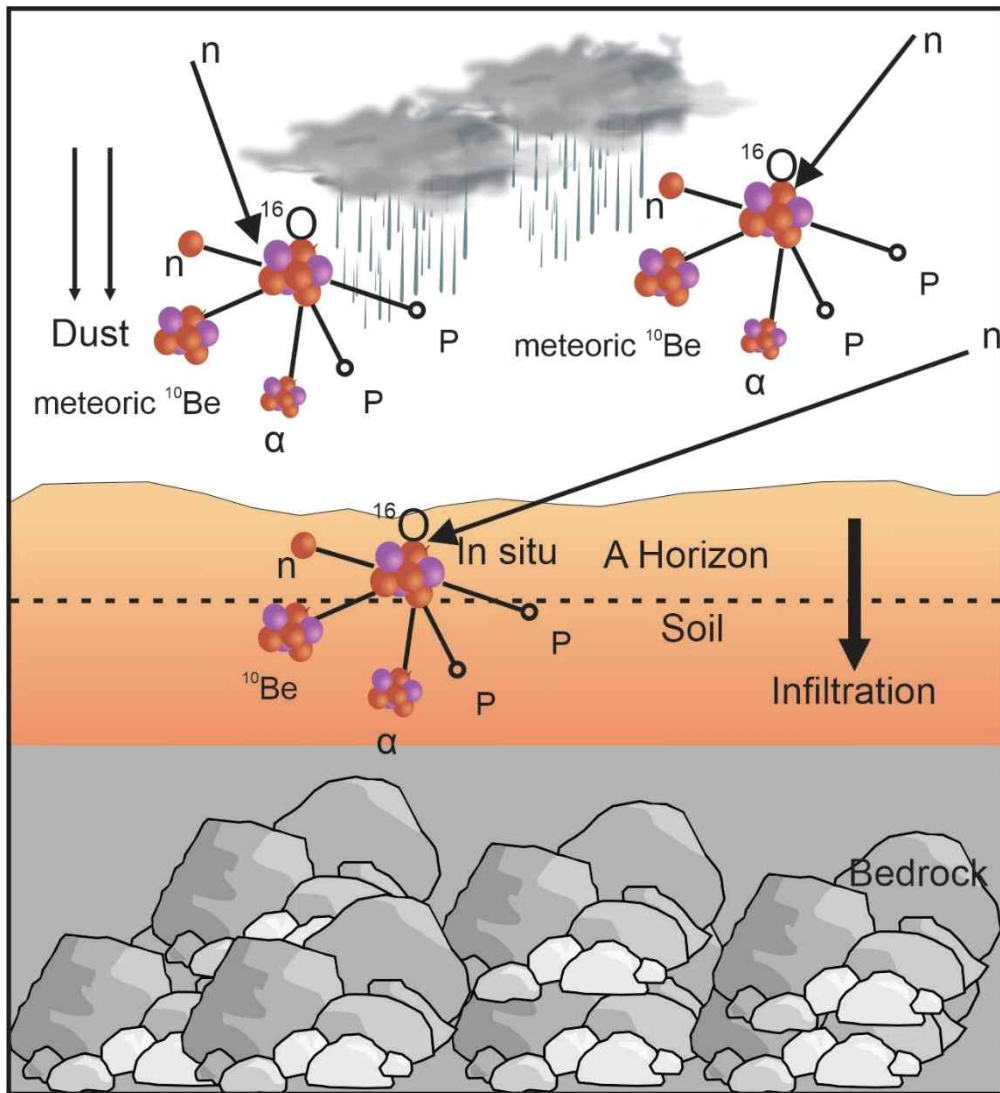


그림 1. 우주선과 대기, 암석 속 광물의 핵반응으로 생성되는 우주선유발 동위원소 생성과정

Meteoric ^{10}Be 를 추출하는 방법으로는 Selective hydroxide precipitation (Tera et al., 1986), Hydroxide precipitation with EDTA (Ditchburn and Whitehead, 1994) or with fluoride (Tera et al., 1986), Solvent extraction with acetylacetone (Bourles et al., 1989), Ion exchange chromatography (von Blanckenburg et al., 1996), Fusion method (Stone, 1998) 등이 있으며, 2018년에 Jeong et al. (2018) Stone의 Fusion 방법과 Bourles의 leaching 방법의 장점들을 사용하여 Hybrid method for extracting meteoric ^{10}Be 을 개발하였다(그림 2).

주로 대기 중에서 생성된 Be이 해양 퇴적물에 흡착된 형태로 존재하는 경우 ‘authigenic’이라고 지칭한다. 하지만 입자의 격자 내부에 존재하는 경우는 대륙 및 대기 중에서 공급된 퇴적물 입자의 내부에 존재하고 있던 성분이므로 ‘detrital’이라고 한다. 대기 중에 형성된 ^{10}Be 을 측정하는 것이 목적으로써 detrital ^9Be 을 제거해주어야 정확한 ^{10}Be 의 값을 알 수 있게 된다.

지난 10년 동안 하천과 해양 퇴적물에서 authigenic Be을 추출하려는 일부 연구들이 수행되었다. Wittmann et al. (2012)은 ‘Selective chemical extraction’ 방법을 사용하여 reactive authigenic Be을 추출하였다. Magnesium Chloride, 약산부터 강산까지 다양한 농도의 산을 사용하는 단계별 leaching 과정을 거쳐 해양퇴적물의 주성분인 탄산칼슘(calcium carbonate)과 그 외의 성분들 (exchangeable, amorphous oxide, organic, and silicate residual)을 추출하는 방식이다. 이 중 amorphous and crystalline FeO-MnO에서 추출된 베릴륨을 authigenic 성분으로 보았다. 그 외 leaching 과정에서 추출된 베릴륨을 detrital 성분, 즉 운반되어 들어 온 퇴적물질의 격자 내에서 생성된 베릴륨이라고 주장하였다. Selective chemical extraction 방법 Stone의 복잡한 fusion 방법과 달리 Ion Exchange chromatography를 사용해 음이온 및 Be 외의 양이온들을 온전히 제거할 수 있다는 장점이 있다.

2차 기원의 핵종에 의한 피폭으로 인해 암석 내부에서 in-situ 형태의 우주선유발 동위원소가 2개 이상 만들어지며, 이를 통해 다양한 지표면 사건을 밝힐 수 있다. 특히, 10만년 이상의 빙기와 간빙기 패턴이 반복된 시간 스케일에서는 반감기가 각각 1,380,000년과 717,000년인 ^{10}Be 과 ^{26}Al 이 주로 사용된다(Lal, 1991; Gosse and Phillips, 2001). 반면, 최후빙기 이후의 빙하의 후퇴나 감소를 연구할 때는 ^{10}Be 과 더불어 상대적으로 반감기가 매우 짧은 ^{14}C (5,730년)가 사용된다. 이러한 Be-Al, Be-C의 페어를 활용한 연구는 남극에서도 활발히 이루어져 왔으나, Al 추출 실험의 어려움과 높은 오차율로 인해 Be-Al 연구는 주로 매우 오래된 노출 역사를 가지는 고지대에서 진행되어왔다(Di Nicola et al., 2012; Oberholzer et al., 2008; Strasky et al., 2009). 이 기술은 현재 진행 중인 연구를 비롯하여 앞으로 준비 중인 모든 육상 연구에까지 활용되어 양질의 결과를 제시할 수 있게 한다.

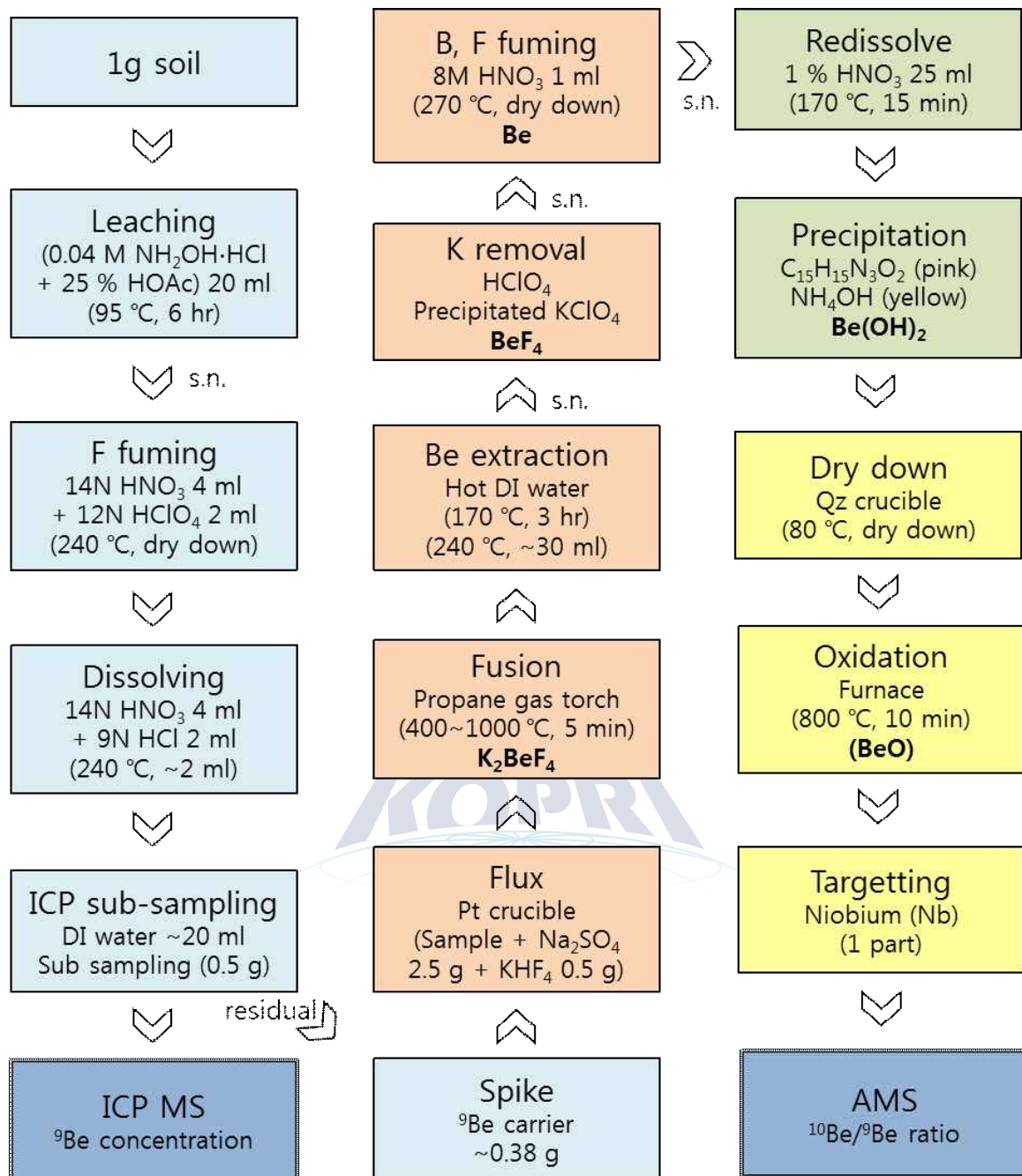


그림 2. Hybrid method for extracting meteoric ^{10}Be (Jeong et al., 2018).

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 고려대학교 우주선유발동위원소 실험 수행

1.1 해양시료 처리

2021 년부터 고려대학교는 해양시료에서 authigenic ^{10}Be 추출하기 위해 Wittmann et al. (2012)에서 제안한 selective chemical extraction 방법을 사용하고 있다. 샘플의 계량 전에 입자 크기와 Be의 흡착성 관계를 제거하기 위해 샘플을 계량하기 전 200 μm 이상의 굵은 입자들을 제거하였다. 약 0.5-1g의 샘플을 계량하고 authigenic ^{10}Be 을 추출하기 위해 단계별로 산과 시약을 사용하여 leaching 시켜준다. Leaching 과정은 5 단계로 구성된다. 1) 1M 염화마그네슘(MgCl_2)을 사용하여 exchangeable “Ex” 성분을 추출한다. 2) 0.5 M HCl로 reactive amorphous oxy-hydroxide “Am-Ox” 성분을 추출한다 3) 1M 하이드록실아민염산염($\text{NH}_2\text{OH} \times \text{HCl}$ 1M HCl에 녹인)을 사용하여 crystalline oxides “X-Ox” 성분을 추출한다. 4) 0.01M HNO_3 와 10M H_2O_2 를 사용하여 유기물을 추출한다. 5) 28M HF와 14M HNO_3 를 사용하여 silicate residue만 남긴다(그림 3).

1-3 단계에서 추출된 물질들은 authigenic Be로 여겨지며, 이를 합친 뒤 건조시켰다. 건조된 샘플을 10ml 부피로 희석시키고 이 중 1ml는 별도로 보관하여 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer)로 ^9Be 을 분석하였다. 나머지 9ml 용액에는 Be의 절대적인 양이 매우 적기 때문에 1010.29 ppm 농도를 가진 ^9Be spike를 넣고 핫 플레이트에서 건조시켰다.

완전히 건조된 샘플은 HCl에 녹인 뒤 음이온(Bio-Rad, AG 1 $\times$ 8) 및 양이온(Bio-Rad, AG-MP 레진) 교환 컬럼을 사용하여 Be를 추출했다. 이 과정에서 다양한 농도의 HCl을 사용하여 다른 양이온과 음이온을 최대한 제거하고 고농도의 Be를 추출한다. $\text{Be}(\text{OH})_2$ 는 pH 7-8 범위에서 NH_4OH 를 사용하여 침전시켰으며, 이후 침전물을 Milli-Q 물로 세척하고 원심 분리하여 깨끗한 석영 바이알에 수집하였다. 수집된 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 는 고온 가열에 의해 BeO로 전환되었다. 최종 샘플은 AMS로 측정되기 위해 세슘(Cs) 이온빔 조사(sputtering)과정에서 음이온으로 뽑아내야하며, 이를 위해 전기전도도가 높아야 한다. 또한 1500 $^\circ\text{C}$ 의 ioniser에서 나오는 세슘 이온빔의 조사에 의해 가열된 샘플이 쉽게 냉각될 수 있도록 열전도도 높아야 한다. 그러나 BeO는 이러한 특성이 약하므로, 나이오븀(Nb) 금속 가루를 1:1 비율로 혼합하여 타겟을 제작한다. 이를 통해 샘플의 열전도도와 전기전도도를 높여 안정적인 빔 전류(beam current)를 얻을 수 있다(그림 4).

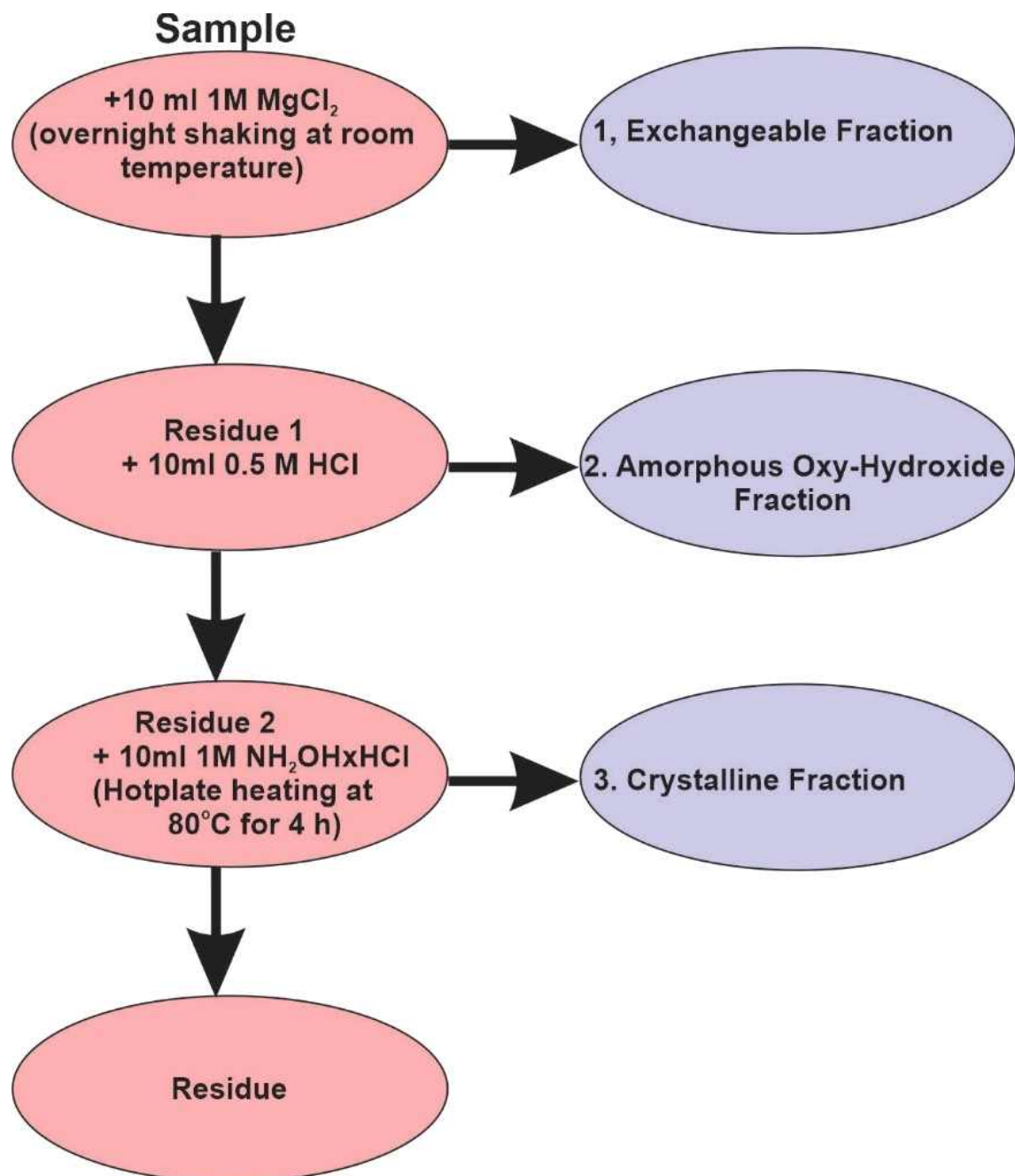


그림 3. 고려대학교 Geochronology 실험실의 해양퇴적물로부터의 authigenic Be 추출실험 프로토콜

1.2 육상시료 처리

^{10}Be 추출 실험은 고려대학교 우주선유발 동위원소 실험실에서 수행되었다. 실험은 Kohl 및 Nishiizumi가 제시한 방법을 기반으로 발전된 방식을 사용하고 있다(Kohl and Nishiizumi, 1992; Seong et al., 2024).(Rhee et al., 2019; 그림 4와 5). 암석 및 기반암 시료를 부수고 갈아 중사(250~710 μm) 크기의 시료만 얻는다.

순수한 석영 시료만 얻기 위해 HF와 HNO_3 의 저농도 혼합용액을 사용하여 초음파세척기나 히팅 롤러에 얹어 석영 이외의 장석, 운모 등을 녹여 없애준다. 4-5회 반복해주며 중간중간의 과정에서 자석을 이용해 자성광물도 제거한다.

순수 석영은 약 50g을 사용하게 되며, 샘플 내에는 ^9Be 이 없으므로, 인위적으로 정해진 양의 ^9Be carrier를 넣어 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 의 비율을 측정할 수 있는 형태로 만든다. ^{27}Al 의 경우 지질적 특장상 석영 내에 이미 어느 정도 포함되어있기 때문에 carrier를 별도로 넣어주지는 않으나, $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 비율로부터 ^{26}Al 의 양을 계산하기 위해서는 시료가 가지고 있는 ^{27}Al 의 양을 별도로 측정하는 과정이 필요하다. 석영을 녹이기 위해 고농도의 HF와 HNO_3 혼합용액을 사용하여 장시간 가열해준다. 이 용액의 일부를 덜어내 보관한 후, 이후 Be 결과에 따라 Al 측정할 샘플들을 선별하여 추가적으로 처리해준다. 이 용액은 고농도의 HF가 함유되어 있으므로 완전히 건조 후, 저농도의 HNO_3 를 이용해 수득하여 ICP-AES로 측정해준다. 수득된 Be/Al의 용액 역시 고농도의 HF를 제거해주기 위해 HClO_4 를 이용해 F을 날려주며, 이 과정을 통해 Be이 BeF 형태로 침전되는걸 방지하고 BeCl 폼으로 회수한다. 고농도의 Be을 추출하기 위해 이온 교환 컬럼을 사용하여 다양한 농도의 HCl을 이용해 다른 양이온, 음이온을 최대한 제거한다. Al 추출 역시 cation exchange column 과정에서 Be을 회수한 이후 상대적으로 고농도의 HCl을 이용해 Al을 회수해준다. 회수된 Be과 Al은 NH_4OH 를 이용해 각각 BeOH 과 AlOH 형태로 침전시켜준다. 이후 각각 800와 900 $^\circ\text{C}$ 에서 15분간 calcination 시켜 BeO 과 AlO 형태로 만들어준다.AMS 측정에 적합한 타겟으로 제작하기 위해 타겟 제작 시에 BeO 와 Nb, AlO 와 Ag를 섞어 전도성 높은 최종 시료를 제작한다.

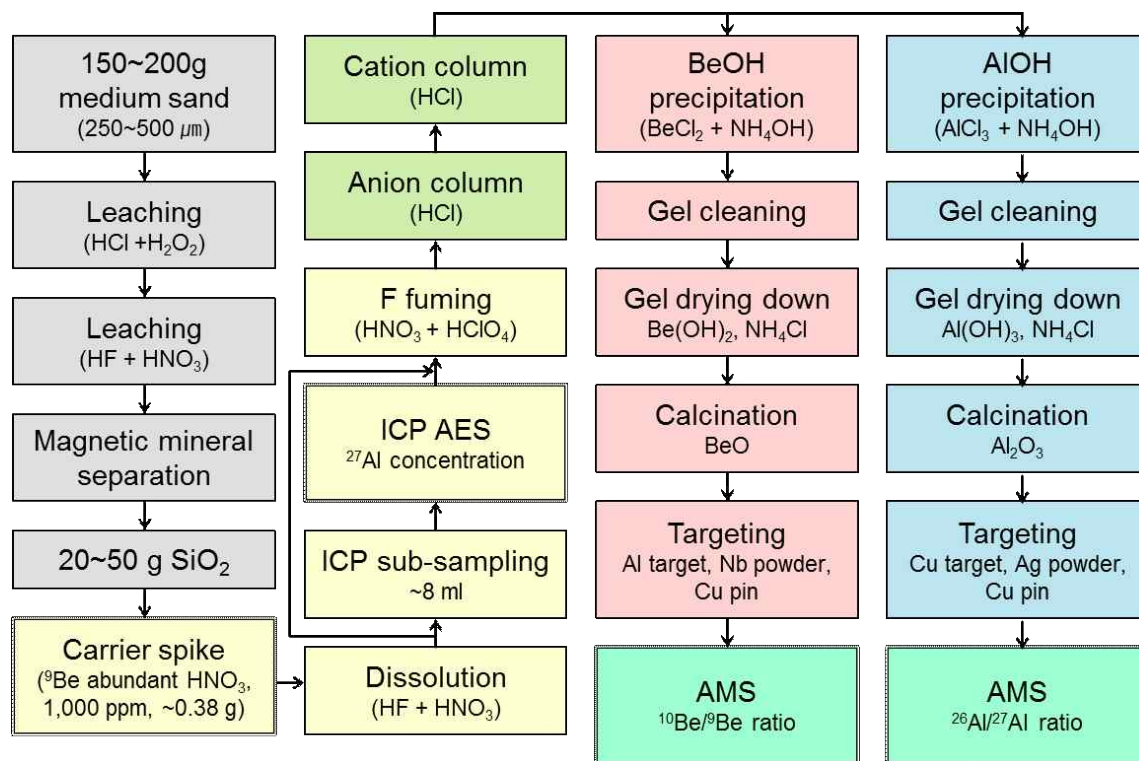


그림 4. 고려대학교 Geochronology 실험실의 in-situ Be/Al 실험 프로토콜.



그림 5. 육상퇴적물/기반암 파쇄물로부터의 in-situ Be/Al 추출 과정.

1.3 AMS 측정

한국과학기술연구원(KIST)의 6MV Tandetron AMS를 이용하여 각 샘플의 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 의 비율을 측정하고 있다 (그림6). 분석 과정에서는 시료의 최종 측정비율 보정과 튜닝을 위해 07KNSTD 스탠다드 샘플(5-1, 5-2, 5-3)을 사용하며, 각각의 지정된 비율(Nominal ratio)은 2.709×10^{-11} , 8.558×10^{-12} , 6.320×10^{-12} 이다.

Be 추출과정에서 얻어진 BeO 형태의 타겟은 AMS의 샘플 챔버에 들어간 후 스탠다드 샘플을 사용해 ^9Be 의 빔 전류, ^{10}Be 의 ROI (Region of Interest), $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율 등을 기준으로 튜닝을 거치게 된다. 샘플을 조사해줄 SNICS(Source of Negative Ions by Cesium Sputtering)는 Cs 보관소를 70℃ 이상으로 가열해 중성 상태의 Cs 증기를 생성하며, 증발이 된 중성의 Cs 원자는 두 가지 기능을 한다. 첫 번째는 1500℃로 가열된 이온나이저와 충돌하여 열전자를 방출하고 Cs^+ 로 이온화되는 과정에서 parabolic한 이온나이저에서 튕겨 나오며 이온빔이 된다. 동시에 타겟에 음극을 걸어 Cs^+ 의 이온빔을 집중시켜 Cs 조사를 형성한다. 두 번째는 타겟의 샘플 부분은 냉각이 되어 있기 때문에 이온화되지 않은 Cs 증기가 응결되며 중성의 Cs 막을 얇게 형성하게 된다. Cs^+ 이온빔이 타겟을 때려 BeO가 나오며 이 중성의 Cs 막으로부터 전자를 얻게 되며 Be-O의 형태로 샘플이 뽑히게 된다. 뽑힌 샘플은 이온나이저 뒤에 있는 양극으로 걸어준 엑스트랙터에 의해 이온나이저의 중심을 통과하여 추출된다.

추출된 Be-O를 비롯한 여러 분자 및 원자들은 Low Energy Magnet에서 Magnetic Mass Separation을 통과하며, 질량이 25인 ^9BeO 분자와 26인 ^{10}BeO , 그리고 동중원소인 ^{10}BO 분자로 분리된다. 그러나 다른 질량을 지닌 분자나 원자는 벽에 부딪히며 에너지를 잃고 진공 펌프에 의해 빨려 나가 제거된다. 또한 이 Magnetic Mass Separation에서 Bouncing Pulse Injection Magnet은 질량별로 주입 시간을 조절해준다. ^9Be 은 양이 많기 때문에 상대적으로 짧은 주입 시간을 배정받으며, 질량이 25인 원자나 분자(^9BeO)가 지나갈 수 있는 전압을 걸어주면 ^9Be 을 감지하는 패러데이 컵(faraday cup)을 통해 감지된다. 반면에 ^{10}Be 은 양이 적기 때문에 상대적으로 긴 시간을 배정받으며, 질량이 26인 원자나 분자(^{10}BeO , ^{10}BO)가 지나갈 수 있는 전압을 걸어주면 ^{10}Be 을 감지하는 GIC (Gas Ionization Chamber)로 이동한다. 질량에 따라 측정 시간이 다르기 때문에 이러한 주입 시간은 후에 보정된다.

Low Energy Magnet을 통과한 분자나 원자들은 가속기를 통과하게 되는데 Tandetron 가속기는 2번 가속을 해준다는 의미를 갖고 있다. 가속기의 앞단과 끝단은 그라운드 상태이며 중앙에는 4.5MV가 걸려 있다. 앞단에서 중앙까지, 0에서 4.5MV로 가속된 Be-O는 중앙의 순환 펌프에 의해 돌면서 가속기 속에 채워져 있는 Stripping Ar 가스와 충돌하고, 이는 분자를 깨지게 하여 Be^{2+} 와 O의 원자로 분리된다. 가속기의 끝단은 스라운드 상태이기 때문에 Be^{2+} 은 상대적으로 음극인 끝단을 향해 한 번 더 가속하게 된다.

가속된 원자들은 High Energy Magnet의 고정된 자성에 의해 질량별로 다른 굴절 각도를 가지게 된다. ^{10}Be 의 경우 AMS의 말단인 GIC까지 이동하고, 상대적으로 질량이 작은 ^9Be 의 경우 굴절이 더 많이 되므로 그 앞단의 패러데이 컵에서 측정된다. Low Energy Magnet의 순차적 주입에 의해 ^9Be 이 들어올 경우 이 패러데이 컵이 열리며 내부로 들어간 ^9Be 이온은 패러데이 컵에 부딪히며 중성화되고 이때의 전류를 이용하여 ^9Be 의 원자 개수를 계산할 수 있다.

^{10}Be 은 ^9Be 과 굴절률이 달라 GIC까지 이동할 수 있는데, 이때 동중원소인 ^{10}B 도 같이 이동하게 된다. ^{10}B 은 B의 안정동위원소로 자연계 B 중 19.9%나 존재하므로 극미량의 불안정 동위원소인 ^{10}Be 측정에서 반드시 제거되어야 한다. ^{10}Be 과 ^{10}B 은 Electrostatic deflector (ESA)에 있는 Energy Absorbing Foil (Si_3N_4)을 통과하며 Be^{2+} 에서 Be^{4+} 로, B^{2+} 에서 B^{4+} 로 각각 전자를 2개씩 잃게 되며 속도가 감소하는데 이때 양성자가 하나 더 많은 B^{4+} 는 상대적으로 상호반응이 많아 Be^{4+} 에 비해 속도가 더 감소하여 ESA의 벽에 부딪히고 진공 펌프로 빨려 나가 제거된다. 이렇게 추출된 ^{10}Be 은 최종적으로 GIC에 들어가 d-아이소부탄(C_4H_{10}) 가스와 반응하며 전자를 방출하는데 Si_3N_4 foil에서 제거되지 않은 ^{10}B 과 ^{10}Be 이 잃는 전자의 패턴이 다르기 때문에 GIC의 4개의 감지기를 통해 동중원소를 추가적으로 분리할 수 있다.

GIC에서 검출된 ^{10}Be 의 개수는 패러데이 컵에서 측정된 빔전류를 계산하여 얻은 ^9Be 의 개수와 함께 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 의 비율로 결과값이 나오게 된다. 하지만 Si_3N_4 foil을 통과하며 ^{10}Be 의 각도 분산이 커져 ESA 내에서 많은 손실이 발생하기 때문에, 결과로 나온 비율은 보정을 위해 함께 측정한 스탠다드 샘플로부터 얻은 보정치를 사용하여 보정한다.





그림 6. KIST의 6MV Tandetron AMS. $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 를 분석하기 위해 4.5MV까지 가속하여 Be^{2+} 로 뽑아낼 수 있기 때문에 Si_3N_4 foil을 이용해 가장 큰 동중원소 오염원인 B를 제거해 줄 수 있다.



1.4 Authigenic ^9Be 농도와 authigenic $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율 계산

위의 실험과정을 통해 AMS로 측정된 베릴륨의 측정 결과는 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율로 나타난다. 앞서 언급한 바와 같이, Fusion 방법과는 달리 authigenic 성분만을 추출하기 위한 leaching 과정을 진행하였다. 따라서 이전에 사용하던 실험과정에서 필요했던 authigenic ^{10}Be 만을 구하기 위해서 authigenic 성분과 detrital 성분이 모두 포함되어있는 total ^9Be 의 농도를 ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer)를 통해 측정할 필요가 없게 되었다. AMS 결과로 나온 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율과 ICP-MS 결과로 나온 authigenic ^9Be 의 양을 이용하여 authigenic ^{10}Be 의 양까지 곧바로 구할 수 있게 되었다.

해양퇴적물에서 베릴륨을 활용한 기존 연구들은 authigenic ^{10}Be 의 단일 농도보다 authigenic $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율을 분석하는 경향을 보여 왔다. 특히 퇴적물의 연대측정 연구에서 단일 ^{10}Be 동위원소 양(atoms/g)만을 사용하면 퇴적물 입자의 크기나 해수의 화학 성분에 의해 변동이 나타날 수 있기 때문에 비교적 시간에 따라 일정한 값을 가지는 authigenic $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율을 주로 사용했다.

또한 비슷한 위도의 지역에서는 meteoric ^{10}Be 의 생성량은 거의 유사하기 때문에 남극과 유사한 위도의 다른 연구 지역에서 추출한 meteoric ^{10}Be 농도와 직접적인 비교 연구가 가능하다. 남극지역의 해양퇴적물 코어에 대하여 meteoric ^{10}Be 농도 프로파일을 조사한 기존 연구들에서 meteoric ^{10}Be 농도의 최저수치는 약 106 atoms/g이며, 열린 해양 환경에서의 meteoric ^{10}Be 농도의 최대수치는 약 108-109 atoms/g로 관찰되었다(Scherer et al., 1998, Sjunneskog et al., 2007; Arnold, 1956; Goel et al., 1957; Merrill et al., 1960).

극지연구소

1.5 In-situ ^9Be , ^{27}Al 농도와 in-situ $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 비율 계산, 노출연대측정

In-situ Al의 경우에도 authigenic Be의 계산과정과 유사하게 ICP와 AMS의 결과를 모두 활용해야 한다. Al의 경우 ICP-AES를 통해 ppm 단위로 측정된 ^{27}Al 의 농도를 초기의 HF 혼합물의 질량에 보정하여 원자의 개수를 구한다. Be의 경우 농도를 알고 있는 ^9Be carrier를 일정량 넣어주기 때문에 추가적인 측정 없이 ^9Be 의 원자 개수를 구할 수 있다.

AMS를 통해 측정된 동위원소 비율($^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$)을 안정동위원소의 원자 개수에 곱하여 불안정 동위원소의 개수를 구할 수 있다. 이 과정에서 실험 중 유입되었거나 carrier에서 유입된 불안정 동위원소의 양을 구하여 제거함으로써 process blank를 제외한 순수 암석시료로부터의 불안정 동위원소 원자 개수를 계산할 수 있다. 이렇게 구해진 ^{10}Be , ^{26}Al 의 개수와 샘플 지역의 고도, 경위도 등의 위치 정보, 우주선을 차폐할 수 있는 주변 지형의 차폐 정도를 반영하여 연구 지역에서의 우주선유발 동위원소 연간 생성량을 구할 수 있으며, 이를 통해 노출연대를 측정할 수 있다.

또한, 두 가지 핵종을 사용함으로써 각 핵종의 연간 생성량과 반감기에 의한 붕괴상수를 활용하여 암석이 노출된 이후 그 상태가 지속적으로 유지되었는지, 혹은 노출 기간 중에 표면이 침식되었는지, 혹은 빙하의 재전진으로 인해 다시 덮였는지 등의 여부를 밝힐 수 있다.

제 2 절 연구지역별 측정결과 분석

2.1 해양시료 처리

로스해는 남극저층수(AABW)의 총 부피 중 약 40%를 차지하며(Orsi et al., 2002), 동남극과 서남극 모두에서 빙하가 고착된 얼음이 배출되는 주요 경로로 알려져 있다(Anderson et al., 2014). 경험적 모델들은 로스해의 해빙 범위가 해양-대기 상호작용과 빙하기-간빙기 주기 동안 열 흐름 변화에 민감하게 반응한다는 점을 강조하고 있으며(Yuan et al., 2017), 이는 이 지역의 퇴적 패턴 연구가 고해양학적 변화와 과거 빙상 역학을 밝히는 데 필수적임을 시사한다.

최근 지질학적 연구들은 로스해 지역에서 해양과 빙상 간의 과거 상호작용을 이해하는 것의 중요성을 부각시키고 있다(Nishimura et al., 1998; Jacobs et al., 2002; Chow and Bart, 2003; Bart and Owolana, 2012; McKay et al., 2012b; Halberstadt et al., 2016; Anderson et al., 2019; McKay et al., 2019; Silvano et al., 2020). 특히 서남극빙상(WAIS)의 후퇴와 관련된 연구가 더욱 주목받고 있으며(Pattyn and Morlighem, 2020), ANDRILL 1-B 코어에서는 5 ~ 1 Ma 동안 28회의 빙하기-간빙기 주기가 기록되었으며, 퇴적 기록 중 여러 공백이 발견되었다. 이러한 공백은 빙하기 동안의 침식 과정을 나타내는 것으로 보인다(Naish et al., 2009).

로스만 굽(Ross Embayment)에서 WAIS의 전진과 후퇴 주기는 주로 41,000년의 자전축 기울기(obliquity) 주기에 의해 조절되었으며, 이러한 주기는 중기 브룬헤스 전환(mid-Brunhes transition)까지 지속되었음을 제안했다(Ohneiser et al., 2023). 비록 지난 1 Ma 동안 WAIS의 해체에 대한 명확한 증거는 부족하지만, AND-1B 퇴적물 코어에 기록된 빙하기-간빙기 주기는 로스해 빙봉의 부유 상태와 고착 상태 간의 주기적 변화를 시사한다. 이러한 변화는 궤도 주기성과 함께 발생한 것으로 보인다(McKay et al., 2012b).

또한, 로스해 지역은 중기 플라이스토세 전환(Mid-Pleistocene transition; MPT) 동안과 이후에 극적인 해양학적 변화를 겪었으며, 이는 대륙 경계부 퇴적에 중요한 영향을 미쳤다. 예를 들어, Konfirst et al. (2012)는 아문드센해 저기압(Amundsen Sea Low)의 심화로 인해 MIS 16 이전에 로스해 순환(Ross Gyre)이 확장되었으며, 이로 인해 빙하 근처의 퇴적물이 외해로 운반되었음을 제안했다(Wang et al., 2022). AND-1B의 퇴적상 기록은 지난 3 Ma 동안 해빙의 지속 시간과 범위가 꾸준히 증가했으며(Naish et al., 2009), MPT 동안 빙하의 확장이 크게 일어났음을 보여준다(McKay et al., 2012b).

그러나 이 지역에서의 빙상 변화에 관한 연구는 혹독한 환경과 퇴적물의 연대 기록을 확립하는 데 따른 어려움 때문에 지난 수십만 년에 제한되는 경우가 많다. 그 결과, 남극 대륙 경계부의 특정 지역에서는 연속적인 고환경 기록이 부족하다. 로스해에서 분석된 대부분의 퇴적물 코어는 대륙붕 지역에서 채취되었으며, 이 지역에서는 빙하가 퇴적층의 연속성을 방해한다. 따라서 대륙 사면 및 대륙붕 이외의 퇴적 기록을 탐구하는 것은 연속적인 고환경 기록을 제공할 가능성을 준다.

대기 기원의 ^{10}Be 는 남극해의 빙해양 퇴적물에서 퇴적 과정과 남극 빙상/빙봉의 역학을 추적하는 데 널리 사용되고 있다(Yokoyama et al., 2016; Valletta et al., 2018). 그러나 빙하 후퇴

의 역사를 정확히 추적하고 퇴적 과정을 평가하려면, 대기 기원의 ^{10}Be 신호가 환경적 요인뿐만 아니라 입자 크기(Kretschmer et al., 2011; Wittmann et al., 2012)와 같은 다른 요소에 의해 영향을 받을 수 있음을 고려해야 한다. 이를 해결하기 위해 연구자들은 물기둥에서 대기 기원의 ^{10}Be 를 흡착하는 철 및 망간 산화수산화물에 결합된 반응성 $^{10}\text{Be}_{\text{reac}}$ 을 측정하고, 반응성 단계에서 암석 풍화로부터 유래한 안정 동위원소인 $^9\text{Be}_{\text{reac}}$ 을 함께 분석한다(von Blanckenburg et al., 2012; Wittmann et al., 2012).

본 연구의 목표는 $^{10}\text{Be}_{\text{reac}}$, $^9\text{Be}_{\text{reac}}$ 및 $(^{10}\text{Be}/^9\text{Be})_{\text{reac}}$, 퇴적학적 및 유기 지화학적 지표를 활용하여 남극 대륙 경계부의 고환경 변화와 이로 인한 퇴적 환경에 미친 영향을 종합적으로 분석하는 것이다.



가. RS15-LC47 코어

2015년 남반구의 여름에 극지연구소(KOPRI)의 IBR/Aron 크루즈에 의해 로스해의 하부 대륙 상승지에서 RS15-LC47 (70°50'45.33"S, 175°4'11.34"E)코어 시료가 수심 2417m에서 채취되었다. 이 코어는 Cape Adre에서 남쪽으로 약 148km 떨어져있으며, Scott 및 Wilson 협곡으로 경계 지어진 채널 제방 복합체에서 수집되었다(그림. 7).

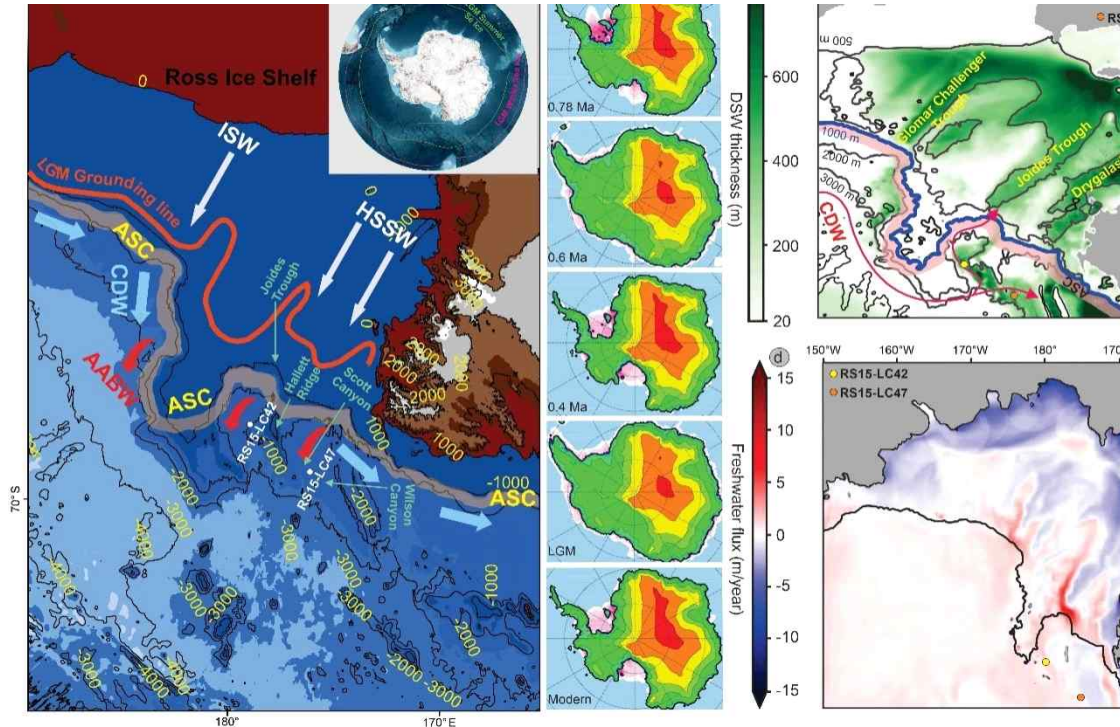


그림 7. 본 연구의 RS15-LC47과 Bollen et al (2022)에서 연구한 RS15-LC42 퇴적물 코어의 위치 지도. (a)ETOPO1 전 세계 지형 모델을 기반으로한 수심과 지형 정보(<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>). 최후빙기(LGM)의 여름 및 겨울 해빙 범위와 (Green et al., 2022), 남극 경사류(ASC), 남극저층수(AABW), 환남극 심층수(CDW), 고염분 대륙붕수(HSSW), 빙붕수(ISW) (Smith Jr et al., 2012). (b) 중기 플라이스토세 전환(MPT) 이후 모델링된 남극의 얼음 부피 변화 (Pollard and DeConto, 2009) (c) 조밀한 대륙 봉수(DSW)의 두께를 녹색 음영으로 표시했으며(Morrison et al., 2020), 연구 지역에서 활발한 저층수 수출 플룸이 활성화되어 퇴적물 코어 내 퇴적학적 변동성을 유발할 가능성이 있음을 보여준다. (d) 시뮬레이션된 로스해 표면 담수 플럭스(Morrison et al., 2020)

(1) 연대기

남극 해양 퇴적물의 연대 측정은 ^{14}C 연대 측정을 위한 유기물이 부족하고, 확립된 연속적인 산소 동위원소 지층학이 부재하여 어렵다. 그러나 상대 고지자기 강도 연대법(RPI)은 환경 변수와 독립적으로 전 세계의 지구자기 변동이 동기화된다는 점을 활용하여 남극 해양에서 유용한 방법으로 입증되었다. Ohneiser et al.(2019)는 로스해 퇴적물 코어의 연대를 확립하기 위해 규조류 기록과 지자기 역전을 활용한 자기생물연대 모델을 사용했으며, 1165cm 깊이에서 채취한 RS15-LC47 퇴적물 코어(본 연구)에서 브룬헤스-마투야마 역전(BM 역전: 773ka)이 확인되었다.

연대기를 개선하기 위해 RS15-LC47 퇴적물 코어의 MS 값을 인근 코어(RS15-LC42: Bollen et al., 2022)의 MS 값과 연계했다(그림 7). Bollen et al.(2022)은 본 연구 지역 근처의 RS15-LC42 퇴적물 코어에서 RPI 기반 연대기를 적용했다. 본 연구는 RS15-LC47 퇴적물 코어의 유일한 자기생물연대 연대 표지자인 BM 역전(773ka)에 초점을 맞추었다.

MS 값은 남극 주변 환경에서 빙하 및 간빙기 주기성과 높은 상관관계를 보이므로 두 코어의 MS 값을 비교하였다(Kim et al., 2020; Sunghan Kim et al., 2018a). 일반적으로 빙하 퇴적물은 빙하 및 빙산에 의해 운반된 거친 입자가 풍부하여 간빙기 퇴적물보다 높은 MS 값을 보였다. 두 코어의 MS 값은 유사한 경향을 보여 상관성을 확인할 수 있었다. 두 코어의 MS 값을 1cm 간격으로 연속 측정한 데이터를 QAnalyseries 소프트웨어(Kotov and Pálike, 2018)를 사용하여 정규화, 이상치 제거, 추세 제거를 수행하고 MS 값 간의 기준점을 설정하였다(그림 8).

(2) $^{10}\text{Be}_{\text{reac}}$, $^9\text{Be}_{\text{reac}}$ 및 $(^{10}\text{Be}/^9\text{Be})_{\text{reac}}$ 의 변동

$^{10}\text{Be}_{\text{reac}}$ (단위: atoms/g)의 농도는 $3.79\text{E}+09 \pm 1.15\text{E}+07$ 에서 $5.56\text{E}+07 \pm 6.65\text{E}+05$ 범위를 가지며, 평균값은 $1.48\text{E}+09 \pm 5.58\text{E}+06$ 이다. 반면, $^9\text{Be}_{\text{reac}}$ 는 $1.18\text{E}+17 \pm 1.6\text{E}+16$ 에서 $2.03\text{E}+16 \pm 3.82\text{E}+14$ 사이의 값을 가지며, 평균값은 $6.76\text{E}+16 \pm 1.85\text{E}+15$ 이다. $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율(단위: atoms/g)은 $6.26\text{E}-8 \pm 1.29\text{E}-9$ 에서 $1.77\text{E}-9 \pm 2.47\text{E}-11$ 범위를 가지며, 평균은 $2.16\text{E}-8 \pm 5.96\text{E}-10$ 이다. $^{10}\text{Be}_{\text{reac}}$ 와 $(^{10}\text{Be}/^9\text{Be})_{\text{reac}}$ 의 코어에 따른 변동은 유사한 패턴을 보인다. 이 값들은 후기 플라이스토세로 갈수록 증가하는 경향을 보이며, 550-781ka 구간에서 가장 낮은 값을 보인다(그림 9).

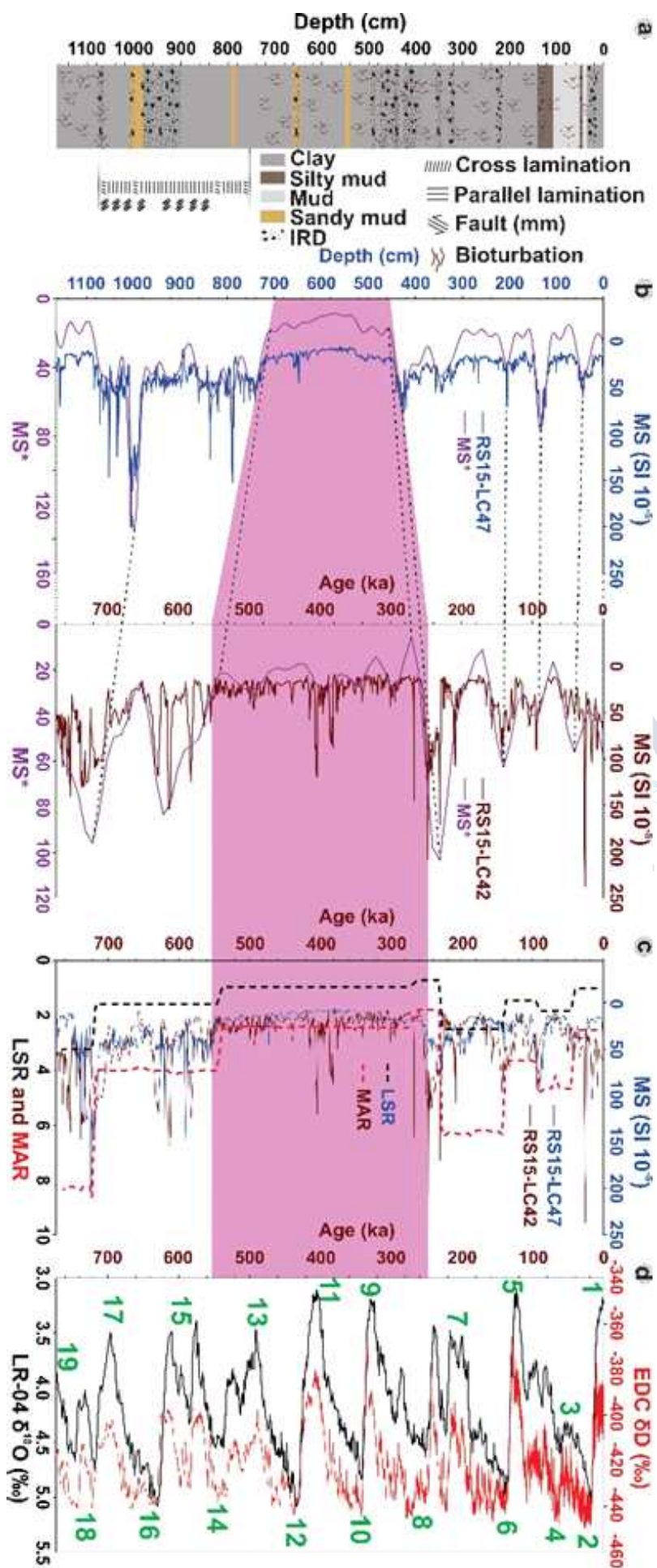


그림 8. RS15-LC47 퇴적물 코어의 암상(Lithology). (a) 연구된 구간의 하부(750-550 ka)의 암상. 이 구간은 평행 및 교차 층리와 밀리미터 규모의 단층으로 특징지어진다. (b) RS15-LC47 및 RS15-LC42 퇴적물 코어의 자기 감수율(MS) 값의 위글 매칭(Wiggle matching). 점선으로 표시된 연결선은 각 코어의 MS 값을 연결하여 데이터 세트 간의 상관성 보여준다. 두 코어 모두에서 비정상적으로 낮은 MS 값이 관찰되었으며, 이는 마커 지층(Purple box)으로 사용되었다. (c) RS15-LC47 및 RS15-LC42 퇴적물 코어의 연령 통합 MS 값, 선형 퇴적율(LSR), 그리고 질량 축적률(MAR). (d) LR-04 $\delta^{18}\text{O}$ (Lisiecki와 Raymo, 2005)와 EDC δD 기록(Jouzel 외, 2007)의 적층된 심해 유공충의 $\delta^{18}\text{O}$ 및 해양 동위원소의 단계.



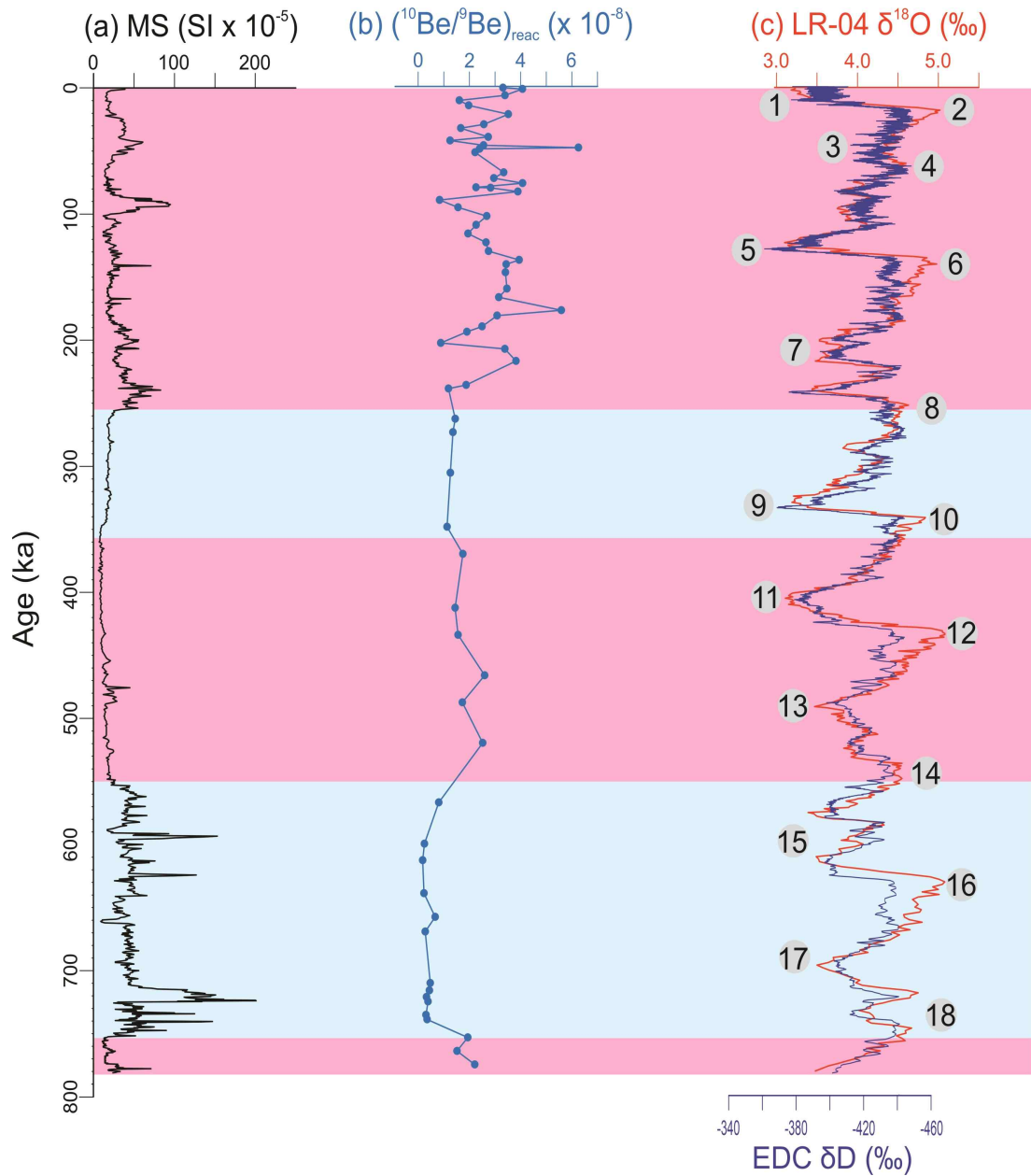


그림 9. $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율의 심도 변화와 대자율의 비교. $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율의 변화 (downcore variation)가 대자율(magnetic susceptibility)에 대해 그래프로 나타냈다. 또한, 적층된 심해 유공충의 $\delta^{18}\text{O}$ (LR-04 $\delta^{18}\text{O}$, Lisiecki와 Raymo, 2005)와 EDC δD 기록(Jouzel 외, 2007)을 함께 제시하여 해양 동위원소 단계(Marine Isotope Stages, MIS)를 보여준다. 이 그래프는 지질학적 퇴적층에서 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율과 대자율의 상관관계를 탐구하며, MIS의 시간적 변화를 이해하는 데 기여한다.

(3) 베릴륨 동위원소로 유추한 플라이스토세 빙상 역학

(가) 로스해의 ^{10}Be 총량

본 연구의 베릴륨 동위원소 기록은 로스해 지역의 개방 해양 환경에서 관찰된 값(10^9 수준, Sjunneskog et al., 2007; Yokoyama et al., 2016)과 유사하며, 빙상 아래 퇴적물에서 관찰된 값보다 높다. 이는 지역 환경 조건이 베릴륨 동위원소 총량에 영향을 미쳤음을 시사한다. 로스해 지역에서 측정된 ^{10}Be 값은 홀로세 평균 농도(대기 유속 5×10^5 atoms/cm²로 가정, 10^7 수준, Valletta et al., 2018)보다 두 자릿수 높다. 이는 빙하-해양 퇴적물에서 관찰된 ^{10}Be 농도 변동이 대기 축적만으로는 설명될 수 없으며, 추가적인 공급원을 이해할 필요가 있음을 강조한다.

남극 대륙 주변 해안에서 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율의 변동은 빙상 용융수에 의한 간헐적인 ^{10}Be 공급에서 기인된 것으로 제안된다(Valletta et al., 2018). 간빙기 동안 관찰된 ^{10}Be 농도의 증가 추세는 용융수 증가와 더 높은 흡착률에 기인한다. 그러나 대기 유속만으로는 간빙기 동안 남극 해안선에서 관찰된 ^{10}Be 총량을 설명하기에는 불충분하다는 점이 이전 연구들에 의해 인정되었다(Sjunneskog et al., 2007; Valletta et al., 2018).

용융수와 대기 유속에 의해 공급된 로스해의 ^{10}Be 총량 및 침적은 다음 공식을 사용하여 계산되었다(Behrens et al., 2019):

$$^{10}\text{Be}_{RS} = \frac{T_{\text{melt}} \rho_{\text{ice}} ^{10}\text{Be}_{\text{ice}} + ^{10}\text{Be}_{\text{flux}} A_b}{A_b SR \rho_{\text{sed}}} \quad (\text{Behrens et al., 2019})$$

로스해로 유입되는 11개의 주요 빙하(Land, Nickerson, Sulzberger, Swinburne, Withrow, Ross West, Ross East, Drygalski, Nansen, Aviator, Mariner)의 빙하 용융수(T_{melt}), 접지선에서의 연간 배출량, 기저 융해 및 빙산 분리량이 계산되었다(Rignot et al., 2013). 계산에는 퇴적물 밀도 2.5 g/cm³(본 연구 평균값)와 빙하 밀도 0.9 g/cm³(Behrens et al., 2019)을 적용했다.

로스해 분지 면적(A_b)은 4.9×10^3 km²로 산정되었으며(Comiso et al., 2011), 로스해의 평균 대기 ^{10}Be 퇴적 값으로 4.5×10^5 atoms/cm²(Lal, 1987)을 사용했다. 로스해 지역의 ^{210}Pb 기반 최대 퇴적률 0.07 cm/yr(Bettoli et al., 1998)을 적용하여 계산한 결과, 로스해 퇴적물에서 ^{10}Be 농도는 8.9×10^7 atoms/g으로 나타났다.

이는 Sjunneskog et al.(2007)이 제안한 약 1.5×10^9 atoms/g 값과 두 자릿수 차이를 보이며, 본 연구와 기존의 로스해 개방 해양 환경 보고치와도 차이가 있다. 이 계산은 용융수 기여의 과소평가나 퇴적률의 과대평가로 인해 편향될 수 있으나, $^{10}\text{Be}_{\text{reac}}$ 총량 추정에서 중요한 요소는 환남극심층수(Circumpolar Deep Water)유입이다(Jeromson et al., 2024).

용융수의 유속 증가가 퇴적 기록에서 $(^{10}\text{Be}/^9\text{Be})_{\text{reac}}$ 비율 상승의 주요 요인이었다면, 용융수가 가장 많은 지역에서 $(^{10}\text{Be}/^9\text{Be})_{\text{reac}}$ 비율이 가장 높게 나타날 것으로 예상된다. 그러나 남극 주변 바다는 용융수가 가장 풍부한 지역, 특히 빙상 유출 지역에서 다른 개방 수역보다 낮은 $(^{10}\text{Be}/^9\text{Be})_{\text{reac}}$ 를 보인다(Sjunneskog et al., 2007; Jeromson et al., 2024).

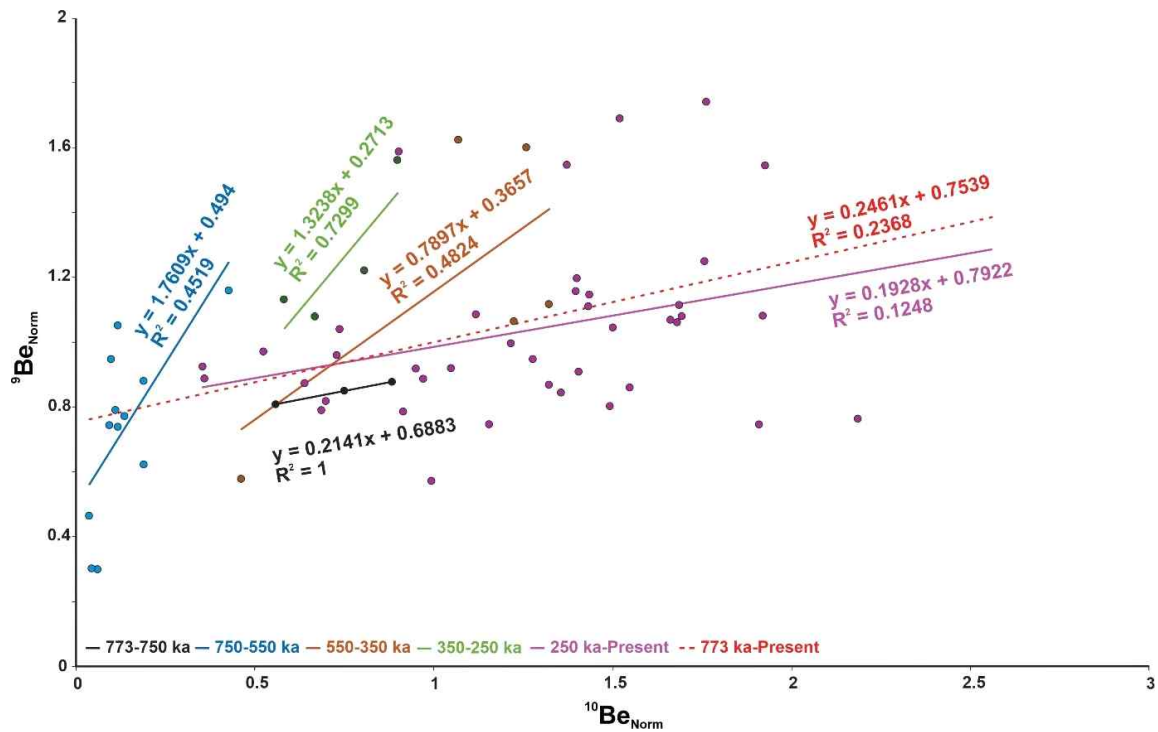


그림 10. 다양한 시기에 따른 ^{10}Be vs ^9Be 의 관계도. 기울기가 1보다 큰 경우, 빙상의 전진 중 기저 침식(basal erosion)으로 인해 ^9Be 의 공급이 증가했음을 나타낸다. 기울기가 1보다 작은 경우, 추가적인 ^{10}Be 공급원이 존재했음을 시사하며, 주로 환남극심층수(Circumpolar Deep Water, CDW)와 같은 추가적인 기여에 의한 것일 수 있다.

극지연구소

(4) ($^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$)_{reac}로부터 유추된 고환경 및 고해양 신호

($^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$)_{reac} 비율은 550–781ka 구간에서 가장 낮은 값을 나타낸다. 이 구간은 MPT(중기 플라이스토세 전환) 후기 부분에 해당하며, 확장된 빙하 조건으로 특징지어진다(그림 9, 10) (Clark et al., 2006; Bol'Shakov, 2015; Daruka and Ditlevsen, 2016; Ford et al., 2016; Herbert, 2023). 이 시기는 두 개의 명확히 구분되는 단계(MIS 25–22 및 MIS 22–16)로 나뉘는 기후 시스템의 급격한 재조직을 나타낸다. MIS 16은 최대 빙하량을 보인 시기로 간주된다.

MIS 22에서 MIS 16까지의 기간 동안, 기후 시스템은 점진적으로 더 심각한 빙하 단계로 간헐적인 간빙기를 경험했다. 이 시기 동안 남극 순환류(ASC)가 강화되면서 환남극심층수(CDW)의 유입이 감소했다. 낮은 ($^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$)_{reac} 동위원소 비율은 극지 심층수 유입이 약화되고, 해빙의 범위가 증가함에 따라 water column의 유입되는 $^{10}\text{Be}_{\text{reac}}$ 이 줄어든 결과로 해석된다(그림 9, 10).

MIS 16 이후, 특히 MIS 14–11 동안 $^{10}\text{Be}_{\text{reac}}$ 와 ($^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$)_{reac} 값은 현저히 증가하여 연장된 간빙기 기간을 나타낸다. 이 관찰은 이 시기 동안 향상된 분급과 더 높은 실트 비율의 증거와 일치한다. MPT 중후반 기간과 비교하여, MIS 16 이후 남극 주변 저기압대(ASL)의 남서쪽 이동과 강한 동풍이 해빙 체제를 아문드센해로 재배치했다(Hillenbrand et al., 2009). 이러한 변화된 시나리오는 남극 주변 저기압대의 남쪽 이동과 극지 심층수의 대륙사면으로의 증가된 이동과 함께 남극 빙상에 불안정을 초래했을 가능성이 있다.

비록 ($^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$)_{reac} 값이 이전 기간보다 높지만, 후기 플라이스토세(>250ka)에서 관찰된 값보다는 낮다. 본 연구에서는 이 기간을 “온화한” 단계로 특징지으며, 이는 연장된 지속 기간과 중간 정도의 높은 ($^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$)_{reac} 비율을 나타낸다(그림 9). 남극 주변 해역에 대한 이전 연구들도 MIS 16 이후 연장된 간빙기 기간을 제시했으며, 이는 서남극 빙상(WAIS)의 잠재적 붕괴에 기여했을 가능성을 제안한다.

Hillenbrand et al.(2009)은 아문드센해에서 생산성과 육지기원 물질 지표를 분석하여 MIS 15–13 동안 WAIS 붕괴 가능성을 제안했다. 이들은 MIS 16 이후 순환 패턴 변화가 이러한 붕괴를 유발했을 수 있다고 보았고, 621–478ka 기간 동안 생물학적 생산성과 육지기원 물질 공급의 비정상적인 증가를 관찰했다. 이와 유사하게 Scherer et al.(1998)은 WAIS 아래 퇴적물에서 ^{10}Be 농도의 증가를 기반으로 MIS 11 동안 WAIS 붕괴 가능성을 보고했다. 이는 빙상 붕괴 후의 개방 해양 조건과 관련이 있다고 해석된다. Hearty et al.(1999) 및 Kindler and Hearty(2000)는 570–390ka 기간 사이의 눈에 띄는 빙하 후퇴 사건을 나타내는 결과를 발표했다. WAIS 붕괴의 제안된 시기의 불일치는 연대기적 제약에서 기인할 수 있지만, MIS 16에서 MIS 11까지의 기간은 이러한 붕괴 가능성에 대해 가장 논란이 많은 시기로 남아 있다.

MIS 14–11 동안 관찰된 $^{10}\text{Be}_{\text{reac}}$ 와 ($^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$)_{reac}의 증가는 WAIS 붕괴에 대한 직접적인 증거를 제공하지는 않지만, 빙붕 분해에 유리한 장기적인 온화한 조건을 나타낸다. 250ka 이후 ($^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$)_{reac}는 현저히 증가하며 MS 값과 반대 경향을 보인다(그림 11). 간빙기 동안 대륙 사면으로 따뜻한 물이 유입된 것은 로스해, 아문드센해, 남극 반도 등 남극 주변 지역 전역에서 광범위하게 연구되었다(Howe and Pudsey, 1999; Steig et al., 2012; King et al., 2022; Yi et al., 2023; Lamy et al., 2024). 이러한 따뜻한 환남극심층수의 유입은 빙하 동역학에 직접적인 영향

을 미쳐 용빙률을 증가시키고 결과적으로 빙붕의 후퇴와 붕괴를 촉진했다. 간빙기 동안 환남극심층수의 침입 강화는 두 가지 주요 요인으로 설명된다. 첫째, 로스해에서 밀도가 높은 물 형성이 감소했고, 둘째, ASC(남극 순환류)의 약화로 인해 환남극심층수의 침입을 저지하는 수문학적 장벽 역할이 감소했다. 이러한 환남극심층수의 상향 흐름은 이 기간 동안 $(^{10}\text{Be}/^9\text{Be})_{\text{reac}}$ 비율 증가를 촉진한다. MS 값과 $(^{10}\text{Be}/^9\text{Be})_{\text{reac}}$ 비율 사이에는 역상관 관계가 존재하며, 이는 MS 값이 빙하 기간 동안 정점을 이루는 경향이 있다는 가설을 뒷받침한다.

두 퇴적 코어인 RS15-LC42와 RS15-LC47은 공통된 환경적 과정을 반영하는 유사성을 보여준다 (그림 12). 주요 특징 중 하나는 후기 플라이스토세 동안 환남극심층수(CDW)의 유입 증가를 반영하는 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율의 상승 추세를 가진다. 이러한 추세는 간빙기(따뜻한 시기) 동안 환남극심층수 유입이 증가하고 빙하기 동안 감소하는 것으로 알려진 패턴과 일치한다. 따뜻한 시기에는 해빙이 줄어들고 수층의 성층화가 약화되면서 영양분과 베릴륨이 풍부한 환남극심층수의 용승이 촉진되어 퇴적물에서 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율이 높아진다. 반대로, 빙하기에는 두꺼운 해빙과 강한 성층화로 인해 환남극심층수 용승이 억제되어 비율이 낮아진다.

두 코어 모두 따뜻한 시기 동안 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율이 증가하는 공통된 추세는 로스해 퇴적 과정에 대규모 해양학적 과정이 영향을 미쳤음을 시사한다. 이러한 일관된 패턴은 환남극심층수 역학이 퇴적물 내 베릴륨 신호를 형성하는 데 중요한 역할을 한다는 가설을 강조한다. 코어 간의 차이는 국지적인 요인에서 비롯될 수 있지만, 전반적인 추세는 환남극심층수 유입이 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 변동성을 주도하는 주요 요인으로, 제4기 동안의 글로벌 기후 변화와 밀접하게 연관되어 있음을 강조한다.



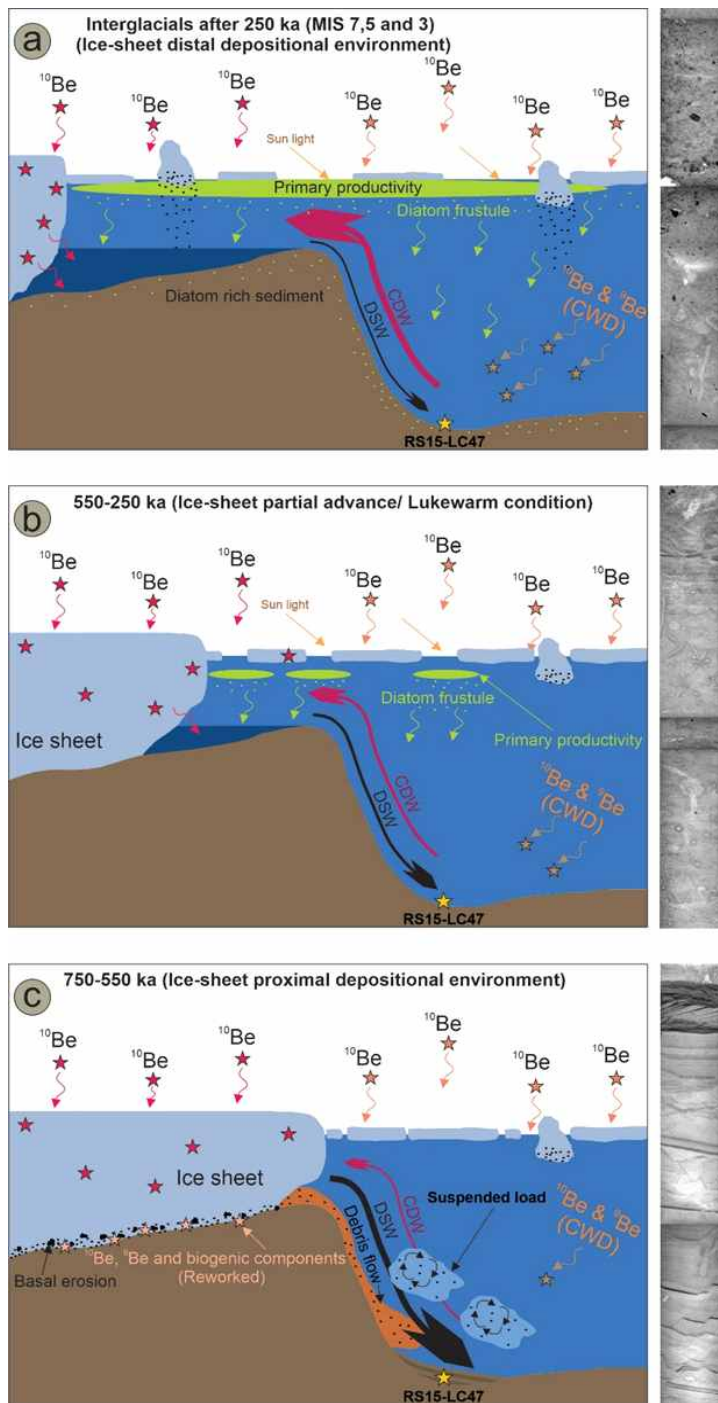


그림 11. 지난 773 ka 동안의 로스해의 해양학적 조건과 관련 시간 프레임을 대표하는 X-선 이미지. (a) 250 ka부터 현재까지의 간빙기 동안 빙상에서 멀리 떨어진 퇴적 환경. (b) 550-250 ka 동안의 미온기(Lukewarm Condition). (c) 750-550 ka 동안 빙상 근처의 퇴적 환경

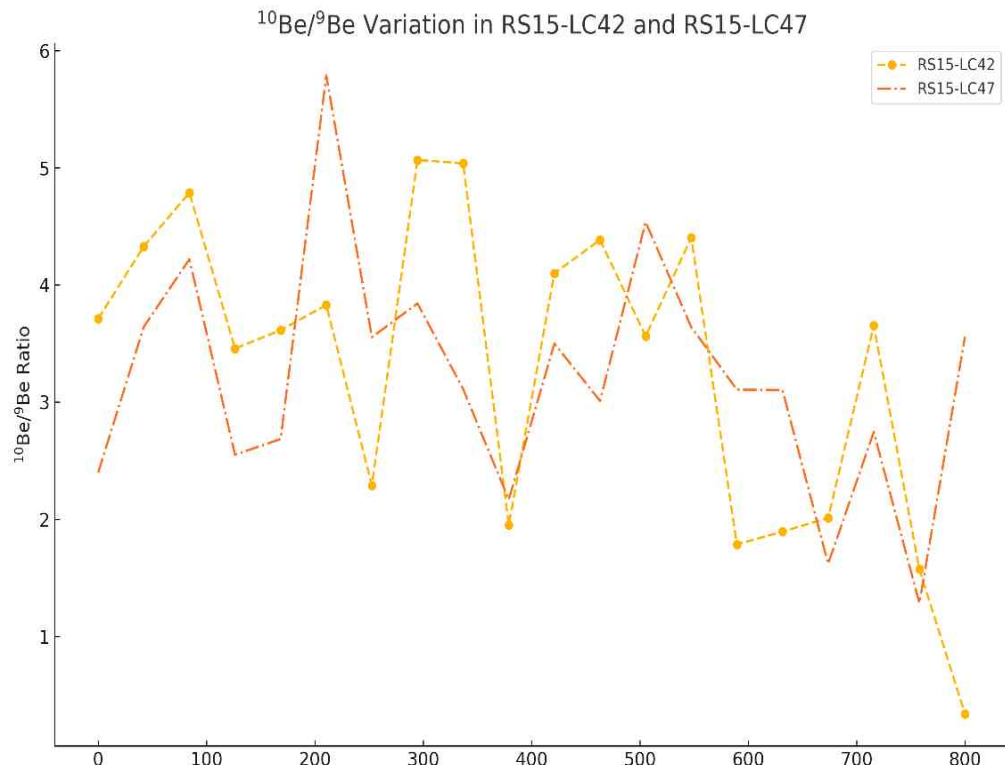


그림 12. RS15-LC47과 RS15-LC42 퇴적물 코어의 대기 기원 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 기록 비교



(5) $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 과 대자율

남극해의 퇴적 대자율(Magnetic Susceptibility, MS) 기록은 빙하기와 간빙기 사이의 뚜렷한 변화를 보여주며, 이는 해양학적 과정과 퇴적물 형성 간의 복잡한 상호작용을 반영한다. 자기 감응률은 퇴적물 내 자기 광물, 특히 자철석(magnetite)과 같은 철 함유 광물의 농도를 측정한다. 퇴적물의 입자 크기와 광물 조성 변화에 민감하게 반응한다. 남극해에서 퇴적물의 MS 값은 일반적으로 빙하기 동안 높고 간빙기 동안 낮게 나타난다. 이러한 차이는 해류 활동과 퇴적물 이동 메커니즘 간의 동적 관계에 기인한다.

빙하기 동안, 남극해의 해류는 상대적으로 약화되며, 이로 인해 다양한 입자 크기의 퇴적물이 해저에 축적될 수 있다. 특히, 자성을 띤 조립 입자(coarser fractions)가 더 많이 포함된 퇴적물이 쌓이게 되며, 이는 MS 값을 크게 증가시킨다. 이러한 자철석이 풍부한 조립 입자는 빙하기 동안의 낮은 해류 속도와 퇴적물 운반 감소의 결과이다. 반대로, 간빙기 동안에는 해류가 강해지며, 이로 인해 미세한 퇴적물 입자가 제거(winnowing)된다. 이 과정에서 자기 광물을 포함한 미세 입자들이 주로 제거되고, 비자성(non-magnetic) 성분이 남게 된다. 결과적으로, 간빙기 동안의 MS 값은 빙하기에 비해 낮아지는 경향을 나타낸다. 베릴륨 동위원소 비율($^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$)은 MS 기록과 반대 상관관계(antiphase relationship)를 보이며, 이는 두 기록 간의 역학적 관계를 명확히 보여준다 (그림 14a). 간빙기 동안 MS 값이 낮을 때 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율은 높아지고, 빙하기 동안에는 반대로 나타난다. 이러한 반대 관계는 MS와 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 이 서로 다른 환경 및 해양학적 요인에 의해 영향을 받는다는 것을 보여준다 (그림 13a).

$^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율은 대기 기원 동위원소(^{10}Be)와 육상 기원 안정 동위원소(^9Be) 간의 비율로 정의된다. ^{10}Be 은 대기에서 우주선의 상호작용으로 생성되어 해수면으로 내려오며, ^9Be 은 주로 육지의 풍화 과정을 통해 해양으로 공급된다. 간빙기 동안에는 대기의 ^{10}Be 축적량이 증가하고, 해빙 감소와 해양-대기 상호작용이 활발해지면서 ^{10}Be 의 해양 내 농도가 상대적으로 증가한다. 반면에 빙하기 동안에는 육상에서 ^9Be 의 공급이 증가하며, 이는 빙하의 확장으로 인해 육지에서 침식과 물질 공급이 활발해지기 때문이다. 동시에 해빙 증가로 인해 대기 기원의 ^{10}Be 공급은 감소한다. 결과적으로, 빙하기에는 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율이 낮아지고 간빙기에는 이 비율이 높아지는 패턴이 나타난다. 이러한 반대 상관관계는 남극해의 퇴적 및 환경 동역학을 보다 종합적으로 이해할 수 있는 기반을 제공한다. 빙하기 동안 높은 MS 값은 자철석이 풍부한 조립 퇴적물의 축적을 반영하며, 간빙기 동안 낮은 MS 값은 미세 입자의 제거와 관련 있다. 반대로, 간빙기 동안 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율이 증가하는 것은 대기 기원의 베릴륨 동위원소가 우세한 해양 조건의 영향을 보여준다.

이러한 MS와 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 기록의 관계는 빙하기-간빙기 주기 동안 해양 순환, 퇴적물 형성, 그리고 기후 조건 간의 복잡한 상호작용을 나타낸다. 이를 통해 우리는 남극해의 과거 환경 변화와 생산성, 그리고 해양 및 대기 시스템 간의 연결성을 이해하는 데 중요한 통찰을 얻을 수 있다. 이러한 연구는 빙하기-간빙기 주기의 지구 시스템 변화를 연구하는 데 핵심적인 도구로 작용하며, 미래의 기후 변화 예측에도 기여할 수 있다.

(6) $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 과 유기 지화학적 매개변수

남극해 지역에서는 고해양생산성(paleoproductivity)에 대한 정보를 얻기 위해 다양한 매개변수가 연구되어 왔다. 생산성을 연구하기 위해 자주 사용되는 유기 지화학적 매개변수로는 Opal%, 총유기탄소(TOC), 그리고 $\text{Ba}_{\text{excess}}$ 등이 있다. 특히, 남극해 퇴적물에서의 Opal%는 과거 생산성에 대한 주요 지표로 사용되며, 해양 1차 생산성의 역사적 변화를 이해하는 데 중요한 역할을 한다. 오팔은 생물기원 실리카(biogenic silica)로 이루어져 있으며, 규질 생물인 규조(diatoms)와 방산충(radiolarians)의 골격에서 형성된다. 이들 생물은 영양염이 풍부하고 생산성이 높은 환경에서 번성하며, 죽은 후 잔해가 해저로 가라앉아 퇴적층에 축적된다.

퇴적물 내 오팔 함량은 표층 해수에서의 생물학적 생산성 수준을 반영하며, 남극해에서 이는 규조가 우세한 식물플랑크톤 군집과 밀접한 연관이 있다. 특히, 심층의 영양염이 풍부한 물이 상승류(upwelling)를 통해 표층으로 공급되는 지역에서 규조의 대량 번식이 이루어진다. 이러한 환경에서 높은 오팔 함량은 과거 생산성이 높았던 시기를 나타내며, 반대로 낮은 오팔 함량은 생물학적 활동이 감소한 시기를 의미한다. 더 나아가, 오팔 함량은 해양 내 생물학적, 화학적, 물리적 과정 간의 상호작용에 대한 중요한 통찰을 제공한다. 예를 들어, 빙하기 동안 해빙의 범위, 영양염 가용성, 해양 순환 패턴의 변화는 규조 생산성과 오팔 퇴적에 영향을 미쳤다. 오팔 함량을 다른 지화학적 지표나 동위원소 기록과 비교함으로써, 과학자들은 과거의 해양 환경 조건, 영양염 순환, 탄소 격리, 그리고 남극해가 전 지구적 기후 시스템에 미친 역할을 재구성할 수 있다.

$^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율과 오팔 함량 기록은 서로 양의 상관관계를 보여주며 (그림 13b) 베릴륨 동위원소 조성 and 생산성이 높은 시기 간의 관계를 강조한다. 이 양의 상관관계는 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율이 생물학적 생산성이 증가한 시기에 높아졌음을 나타낸다. 간빙기 동안 환남극심층수(Circumpolar Deep Water, CDW)의 유입이 강해지면서 퇴적물 내 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율이 증가했다. 이 시기는 또한 개방된 해양 조건과 강화된 상승류에 의해 영양염이 표층으로 공급되고, 생물학적 활동이 촉진된 시기로 특징지어진다.

총유기탄소(TOC)와 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율 사이의 양의 상관관계 (그림 13c) 는 간빙기 동안 베릴륨 동위원소 비율이 증가했음을 추가적으로 보여준다. 반면에 빙하기 동안 심해저층수의 유입이 감소하면서 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율 또한 감소했다. 이 시기는 광범위한 해빙으로 인해 상승류가 억제되고, 영양염 가용성이 감소하여 생물학적 생산성이 줄어든 시기를 나타낸다.

결과적으로, 빙하기 동안 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율과 오팔 함량은 감소했으며, 이는 생산성 감소와 퇴적물 조성 변화의 결과이다. 이러한 베릴륨 동위원소, 해양 순환, 생물학적 생산성 간의 상호작용은 남극해의 환경이 빙하기-간빙기 주기 동안 기후 변화에 얼마나 민감하게 반응했는지를 보여준다. 이를 통해 과거의 해양 생산성과 기후 시스템의 변화를 이해할 수 있으며, 남극해가 전 지구적 기후 조절에 미친 영향을 밝히는 데 기여한다.

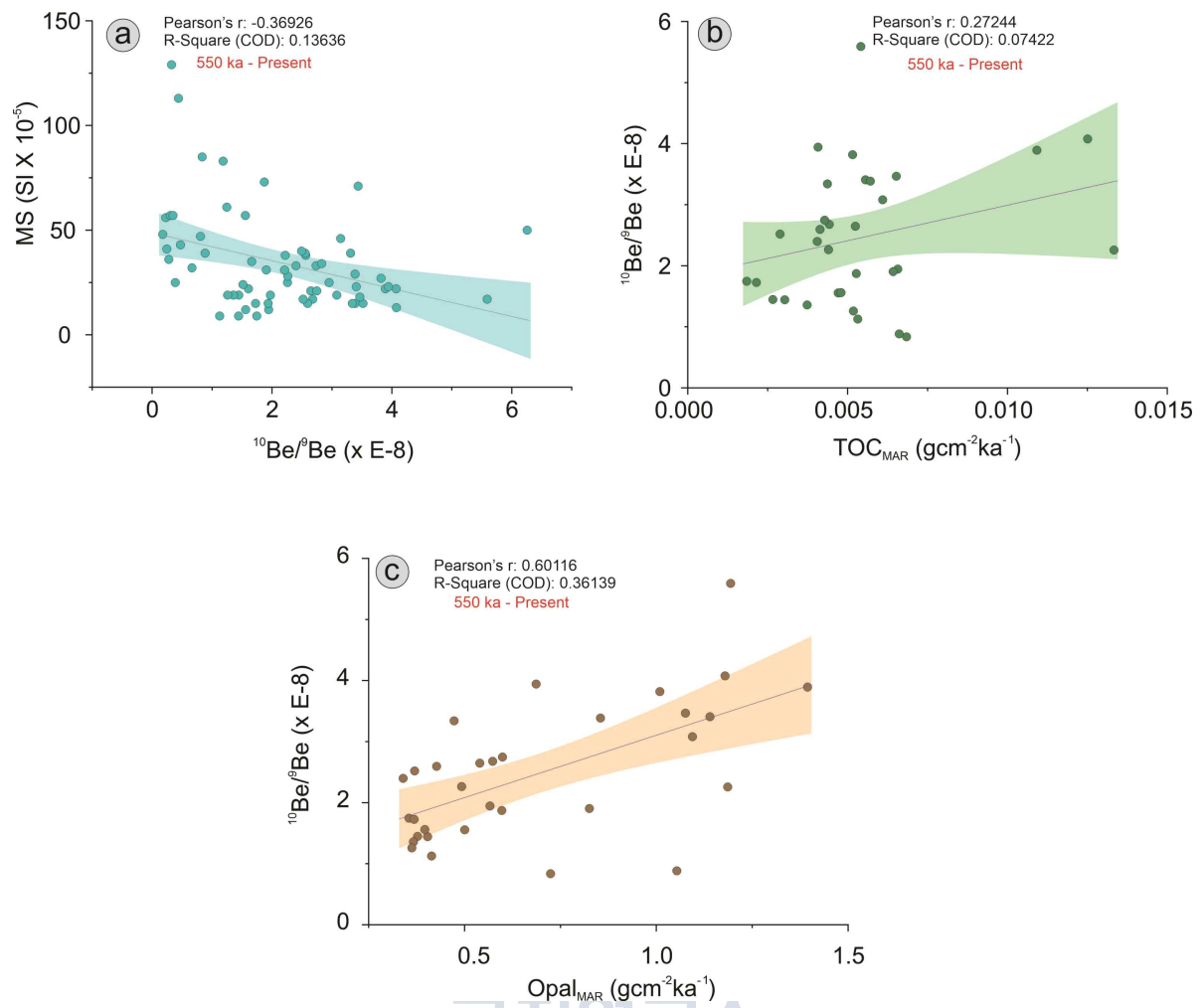


그림 13. $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 와 대자율, 총 유기 탄소(TOC), 규조토(오팔) 간의 상관 관계.

(7) $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 과 Barium Excess

Barium Excess는 해양 퇴적물에서 과거 해양 생산성을 재구성하는 데 널리 사용되는 지표로, 표층 해수에서의 생물학적 활동과 영양염 순환 강도에 대한 귀중한 통찰을 제공한다. Barium Excess는 주로 육상에서 기원하는 테리제니우스 배경(lithogenic background)을 초과하는 퇴적물 내 바륨의 부분을 의미한다. Barium Excess는 생물학적 과정에 의해 생성된 것으로, 유기물과 해양 생물에 의해 생성된 생물기원 입자와 연관되어 있다.

표층 해수에서는 플랑크톤이 유기물 형성과정에서 바륨을 흡수한다. 플랑크톤이 죽은 후 그 잔해와 생물기원 바륨은 해저로 가라앉으며, 이 과정에서 바륨은 바라이트(barite, 황산바륨) 형태로 축적된다. 이는 특히 높은 생물학적 생산성이 관찰되는 환경에서 더욱 두드러진다. 바라이트는 water column 내에서 형성되며, 주로 유기물의 분해와 관련된 미세환경 내에서 발생한다. 바라이트의 퇴적은 과거 해양의 유기물 수송 강도를 반영하며, Barium Excess는 이러한 생산성을 측정하는 신뢰할 수 있는 지표로 작용한다.

시간에 따라 통합된 생물학적 과정을 반영하며, 유기 탄소와 같은 다른 지표에 비해 이질적 변화(diagenetic alteration)에 대한 저항성이 크기 때문에 Barium Excess를 주된 생산성 지표로 사용한다. 퇴적물 코어에서 Barium Excess 값이 높은 경우는 일반적으로 영양염 가용성이 높은 환경에서 1차 생산성이 증가했던 시기를 나타낸다. 예를 들어, 상승류(upwelling) 지역에서는 영양염이 풍부한 해수가 표층으로 공급되며, 대규모 식물플랑크톤 번성을 지원하고 생물기원 바륨의 퇴적이 증가한다. 반면, 퇴적물 내 Barium Excess 값이 낮은 경우는 일반적으로 영양염 가용성이 낮거나 환경 조건이 불리했던 시기와 관련이 있다.

본 연구에서 퇴적물 코어의 하부 구간에서 Barium Excess 값을 계산한 결과, 상부 구간에 비해 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 동위원소 비율이 크게 낮은 것으로 나타났으며, 코어의 가장 아래 부분에서 최저 값을 기록했다(그림 14). 이 시기에는 알루미늄(Al) 정규화 바륨 값이 감소했으며, 이는 당시 생산성이 감소했음을 시사한다. 해양 퇴적물 내 알루미늄은 테리제니우스 외에도 생물기원에서 기여될 수 있지만, 연구 대상 퇴적물에서 Al과 티타늄(Ti) 간 높은 양의 상관관계는 알루미늄이 주로 육상 기원임을 나타낸다(그림 15).

남극 대륙붕 지역에서의 생물기원 바륨 신호는 퇴적물 열 내의 산화 환경(oxic conditions)으로 인해 용해로부터 보호받아 보존된다. 이전 연구(Shimmield et al., 1994; Bonn et al., 1998)에 따르면, 이 지역에서는 생물기원 바륨이 용해 과정에 대해 높은 저항성을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 본 연구 코어에서의 해저 기원 우라늄(U) 데이터도 Barium Excess가 무산소성(anoxic) 용해의 영향을 받지 않았음을 시사하며, 이 지표의 신뢰성을 더욱 강화한다.

Barium Excess과 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 동위원소 비율 분석은 생물학적 생산성이 해양 및 기후 조건 변화에 민감하게 반응한다는 사실을 강조한다. 이러한 데이터는 남극해의 고환경 변화에 대한 귀중한 통찰을 제공하며, 특히 빙하기-간빙기 주기 동안 생산성 증감과 관련된 환경 및 해양학적 역학을 조명한다. 나아가, 이 연구는 과거 해양 생산성 변화가 전지구적 기후 변화와 어떻게 연결되어 있었는지에 대한 이해를 도와준다.

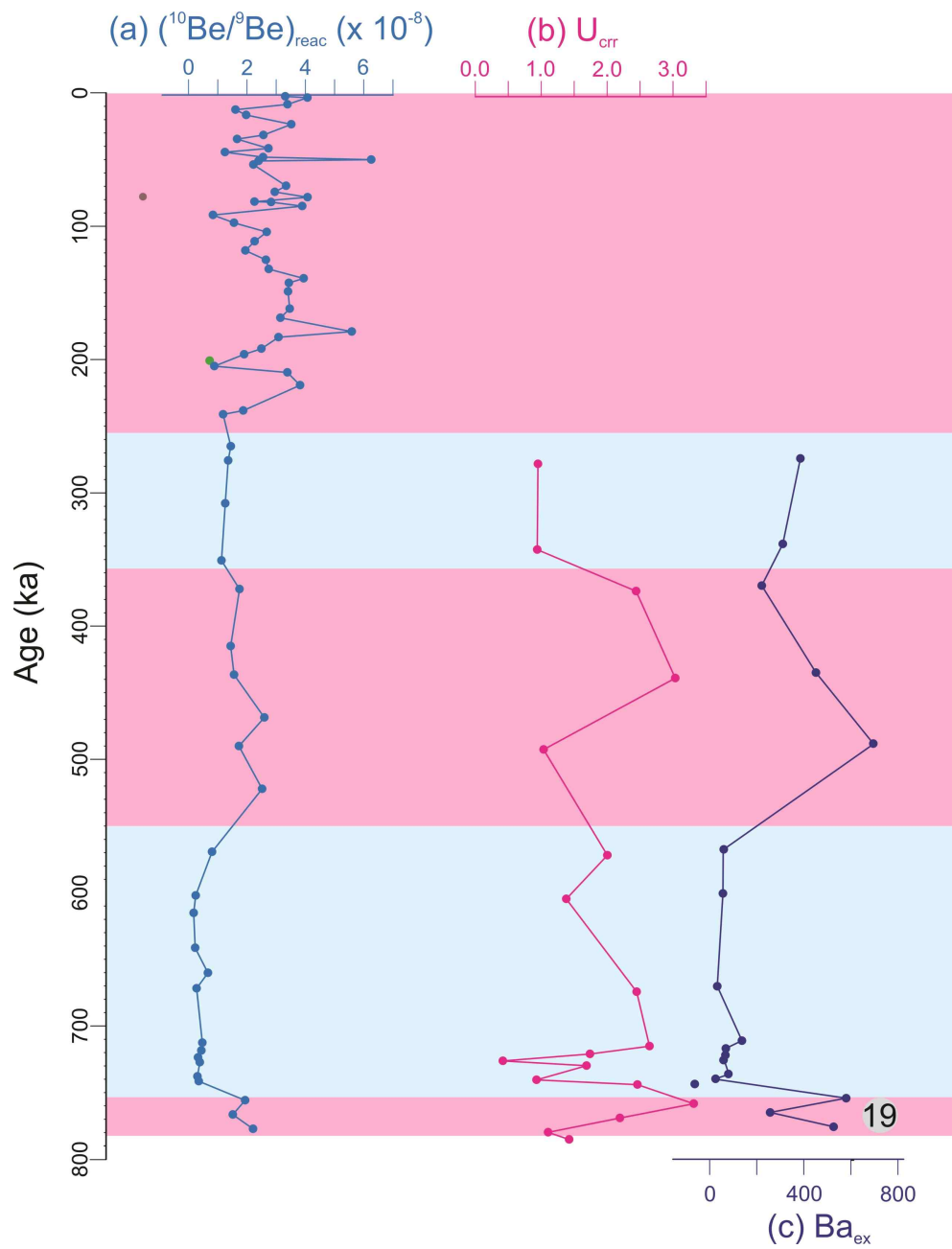


그림 14. $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, detrital 성분이 보정된 우라늄(U_{corr}) 및 바륨 과잉의 변화.

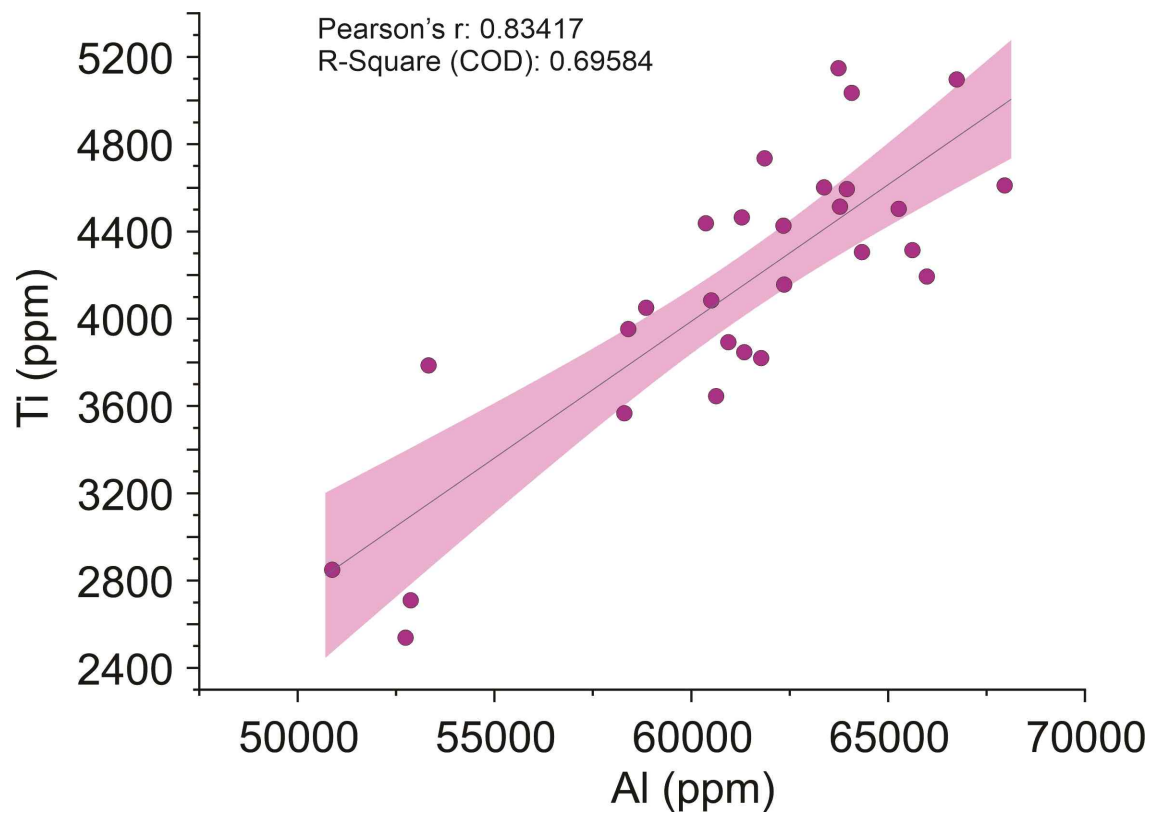


그림 15. 로스해 퇴적물의 Ti와 Al 함량 간의 상관 관계



대외기여도

본 과제수행의 목표 및 달성도는 다음과 같다.

성과목표	세부목표	달성 주요내용	달성도(%)	참고
1.우주선 유발 동위원소 meteoric ^{10}Be 의 활용	1-1 우주선 유발 동위원소 meteoric ^{10}Be 분석	- 해양 퇴적물에 포함된 대기 기원 ^{10}Be를 분석하여 빙상의 성장 및 후퇴와의 연관성을 평가 - 동위원소를 활용하여 빙하의 역사와 고기후 변화를 재구성	100%	로스해 퇴적물 코어(RS15-LC47)에서 채취된 해양 퇴적물 샘플이 오염 없이 성공적으로 추출됨

로스해에서 채취된 해양 퇴적물 코어(RS15-LC47)는 대기 기원 우주선유발 동위원소 중 authigenic ^{10}Be 를 분석하기 위해 연구되었다. 특히, 로스해 해양 퇴적물에서 추출된 베릴륨 패턴의 분석은 초기 연구 계획의 일환으로, 빙하 역사와 고기후 변화의 전반적인 역사를 밝혀내는 데 목적이 있으며, 관련 연구 논문은 현재 심사 중에 있다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

해양 퇴적물 코어에서의 authigenic ^{10}Be 분석은 이전 연구들에서 그 유용성이 입증되었으며, 다양한 기후학 및 해양학 연구 환경에서 지속적으로 활용되어 왔다. 이러한 추세는 계속될 것으로 예상되며, 데이터셋이 여러 지역에서 구축됨에 따라 연구 범위가 남극해 전체로 확장될 수 있다. 이를 통해 베릴륨 분포 패턴, 퇴적물 이동 및 관련 현상에 대한 연구가 가능해질 것으로 예상된다.

또한, 2021년 탐사에서 채취된 샘플과 해당 연구 지역의 결과를 바탕으로 논문이 제출됨에 따라, 이 연구의 적용 가능성은 다른 지역으로도 더욱 확장될 것으로 기대된다. 이러한 접근법은 로스해와 남극해 주변의 다른 노출 지역을 추가로 탐구할 수 있는 기회를 제공하여 이 연구 분야를 발전시키는 데 기여할 것으로 예상된다.



제 6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

^{10}Be 분석 외에도, 후기 제4기 동안 퇴적된 퇴적물의 수직 플럭스를 계산하기 위해 ^{230}Th -excess 측정을 계획하였다. 퇴적물의 질량 축적률은 종종 저층류에 의한 퇴적물 재분포의 영향을 받는다. 하지만 수층에서 일정한 생성률을 가지며 정상 상태 평형에 있는 ^{230}Th 플럭스를 사용하여 입자 플럭스를 정규화하면 이러한 영향을 보정할 수 있다.

또한, ^{232}Th -excess를 분석하여 육지 기원의 플럭스를 추정하고, authigenic 우라늄(U)을 분석하여 과거 해양의 산화/환원(산소가 풍부한 환경과 부족한 환경) 조건을 추론할 계획이다. 이를 통해 퇴적물의 기원과 산화환원 조건에 대한 추가적인 통찰을 제공할 수 있을 것으로 예상된다.

^{230}Th -excess에 대한 실험실 작업은 완료되었으나, 적절한 장비의 부재로 인해 기기 분석 단계는 아직 진행되지 못하였다. 현재 ^{230}Th -excess 분석의 기기 분석 단계를 진행하기 위해 연구 기관들과 협력 방안을 논의 중이며, 해당 과정의 진행을 위해 노력하고 있다.



제 7장 참고문헌

Anderson, J.B., Conway, H., Bart, P.J., Witus, A.E., Greenwood, S.L., McKay, R.M., Hall, B.L., Ackert, R.P., Licht, K., Jakobsson, M., Stone, J.O., 2014. Ross Sea paleo-ice sheet drainage and deglacial history during and since the LGM. *Quat. Sci. Rev.* 100, 31-54.

Anderson, J. B., Simkins, L. M., Bart, P. J., De Santis, L., Halberstadt, A. R. W., Olivo, E., Greenwood, S. L., 2019. Seismic and geomorphic records of Antarctic ice sheet retreat. *Geology*, 47, 101 - 115.

Behrens, B., Miyairi, Y., Sproson, A. D., Yamane, M., Yokoyama, Y., 2019. Meltwater discharge during the Holocene from the Wilkes subglacial basin revealed by beryllium isotope analysis of marine sediments. *J. Quat. Sci.*, 34, 603 - 608.

Bettoli, M. G., Cantelli, L., Quarin, D., Ravanelli, M., Tositti, L., Tubertini, O., 1998. Marine sediments and snow from Ross Sea region (Antarctica) dating by ²¹⁰Pb method. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 71, 321 - 330.

Bollen, M., Riesselman, C. R., Ohneiser, C., Albot, O., McKay, R., Lee, M. K., Yoo, K.-C., Kim, S., Lee, J. Il, Levy, R., 2022. Pleistocene oceanographic variability in the Ross Sea: A multiproxy approach to age model development and paleoenvironmental analyses. *Glob. Planet. Change* 216, 103901.

Bol'Shakov, V. A., 2015. On the mechanism of the Middle Pleistocene Transition, *Stratigr. Geol. Correl.*, 23, 536 - 550.

Bonn, W. J., Gingeles, F. X., Grobe, H., Mackensen, A., Fütterer, D. K., 1998. Palaeoproductivity at the Antarctic continental margin: opal and barium records for the

last 400 ka. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 139, 195 - 211.

Bourles, D., Raisbeck, G. M., & Yiou, F. (1989). ^{10}Be and ^9Be in marine sediments and their potential for dating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(2), 443-452.

Bryan, K., Manabe, S., & Pacanowski, R. C. (1975). A global ocean-atmosphere climate model. Part II. The oceanic circulation. *Journal of Physical Oceanography*, 5(1), 30-46.

Chow, J. M., Bart, P. J., 2003. West Antarctic Ice Sheet grounding events on the Ross Sea outer continental shelf during the middle Miocene. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 198, 169 - 186.

Clark, P. U., Archer, D., Pollard, D., Blum, J. D., Rial, J. A., Brovkin, V., Mix, A. C., Pisias, N. G., Roy, M., 2006. The middle Pleistocene transition: characteristics, mechanisms, and implications for long-term changes in atmospheric pCO_2 . *Quat. Sci. Rev.* 25, 3150 - 3184.

Comiso, J. C., Kwok, R., Martin, S., Gordon, A. L., 2011. Variability and trends in sea ice extent and ice production in the Ross Sea. *J. Geophys. Res. Ocean.* 116.

Daruka, I., Ditlevsen, P. D., 2016. A conceptual model for glacial cycles and the middle Pleistocene transition. *Clim. Dyn.* 46, 29 - 40.

Dash, Chinmay, et al. 2021. " ^{10}Be and $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ in glaciomarine sediments of Ross Sea, Antarctica: implications for mid-late Quaternary paleoenvironmental changes". *지질학회지*, 57(5): 691-705.

Di Nicola, L., Baroni, C., Strasky, S., Salvatore, M.C., Schlüchter, C., Akcar, N., Kubik, P.W., Wieler, R., 2012. Multiple cosmogenic nuclides document the stability of the East Antarctic ice sheet in northern Victoria Land since the late Miocene (5e7 Ma). *Quat. Sci. Rev.* 57, 85-94.

Ditchburn, R. G., & Whitehead, N. E. (1994). The separation of ^{10}Be from silicates. In Third workshop of the South Pacific Environmental Radioactivity Association 4-7.

Dupont, T. K., & Alley, R. B. (2005). Assessment of the importance of ice shelf buttressing to ice sheet flow. *Geophysical Research Letters*, 32(4).

Ford, H. L., Sosdian, S. M., Rosenthal, Y., Raymo, M. E., 2016. Gradual and abrupt changes during the Mid-Pleistocene Transition. *Quat. Sci. Rev.* 148, 222 - 233.

Frank, M., van der Loeff, M.M.R., Kubik, P.W. and Mangini, A., 2002, Quasi-conservative behaviour of ^{10}Be in deep waters of the Weddell Sea and the Atlantic sector of the Antarctic Circumpolar Current. *Earth and Planetary Science Letters*, 201, 171-186.

Goehring, B.M., Balco, G., Todd, C., Moening-Swanson, I., Nichols, K., 2019. Lateglacial grounding line retreat in the northern Ross Sea, Antarctica. *Geology* 47 (4), 291-294.

Gosse, J.C., Phillips, F.M., 2001. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quat. Sci. Rev.* 20 (14), 1475-1560.

Green, R. A., Menviel, L., Meissner, K. J., Crosta, X., Chandan, D., Lohmann, G., Peltier, W. R., Shi, X., Zhu, J., 2022. Evaluating seasonal sea-ice cover over the Southern Ocean at the Last Glacial Maximum. *Clim. Past* 18, 845 - 862.

Halberstadt, A. R. W., Simkins, L. M., Greenwood, S. L., Anderson, J. B., 2016. Past ice-sheet behaviour: retreat scenarios and changing controls in the Ross Sea, Antarctica. *Cryosph.* 10, 1003 - 1020.

Hearty, P. J., Kindler, P., Cheng, H., Edwards, R. L., 1999. A+ 20 m middle Pleistocene sea-level highstand (Bermuda and the Bahamas) due to partial collapse of Antarctic ice. *Geology* 27, 375 - 378.

Hesse, R., Khodabakhsh, S., Klaucke, I., Ryan, W. B. F., 1997. Asymmetrical turbid surface-plume deposition near ice-outlets of the Pleistocene Laurentide ice sheet in the Labrador Sea. *Geo-Marine Lett.* 17, 179 - 187.

Hillenbrand, C.-D., Kuhn, G., Frederichs, T., 2009. Record of a Mid-Pleistocene depositional anomaly in West Antarctic continental margin sediments: an indicator for ice-sheet collapse? *Quat. Sci. Rev.* 28, 1147 - 1159.

Howe, J. A., Pudsey, C. J., Cunningham, A. P., 1997. Pliocene-Holocene contourite deposition under the Antarctic circumpolar current, western Falkland trough, South Atlantic Ocean. *Mar. Geol.* 138, 27 - 50.

Jacobs, S. S., Giulivi, C. F., Mele, P. A., 2002. Freshening of the Ross Sea during the late 20th century. *Science* 297, 386 - 389.

Jeromson, M. R., Fujioka, T., Fink, D., Simon, K., Smith, J., Hillenbrand, C.-D., Kuhn, G., Post, A. L., Sánchez-Palacios, J. T., Blaxell, M., 2024. Circumpolar deep water upwelling is a primary source of ^{10}Be in Antarctic continental shelf sediments. *Glob. Planet. Change* 104424.

Jouzel, J., Masson-Delmotte, V., Cattani, O., Dreyfus, G., Falourd, S., Hoffmann, G., Minster, B., Nouet, J., Barnola, J.M., Chappellaz, J., Fischer, H., 2007. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years. *Science* 317, 793-796.

Kohl, C. P., & Nishiizumi, K. (1992). Chemical isolation of quartz for measurement of in situ produced cosmogenic nuclides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(9), 3583-3587.

Konfirst, M. A., Scherer, R. P., Hillenbrand, C.-D., Kuhn, G., 2012. A marine diatom record from the Amundsen Sea—Insights into oceanographic and climatic response to the Mid-Pleistocene Transition in the West Antarctic sector of the Southern Ocean. *Mar. Micropaleontol.* 92, 40 - 51.

Kretschmer, S., Geibert, W., van der Loeff, M. M. R., Schnabel, C., Xu, S., Mollenhauer, G., 2011. Fractionation of ^{230}Th , ^{231}Pa , and ^{10}Be induced by particle size and composition within an opal-rich sediment of the Atlantic Southern Ocean. *Geochim. Cosmochim. Acta* 75, 6971 - 6987.

Kim, B. K., Lee, S., Ha, S., Jung, J., Kim, T. W., Yang, E. J., Jo, N., Lim, Y. J., Park, J., Lee, S. H., 2018a. Vertical distributions of macromolecular composition of particulate organic matter in the water column of the Amundsen Sea Polynya during the summer in 2014. *J. Geophys. Res. Ocean.* 123, 1393 - 1405.

Kim, S., Lee, J. Il, McKay, R. M., Yoo, K.-C., Bak, Y.-S., Lee, M. K., Roh, Y. H., Yoon, H. Il, Moon, H. S., Hyun, C.-U., 2020. Late pleistocene paleoceanographic changes in the Ross Sea - Glacial-interglacial variations in paleoproductivity, nutrient utilization, and deep-water formation. *Quat. Sci. Rev.* 239, 106356.

Kindler, P., Hearty, P. J., 2000. Elevated marine terraces from Eleuthera (Bahamas) and Bermuda: sedimentological, petrographic and geochronological evidence for important deglaciation events during the middle Pleistocene. *Glob. Planet. Change*, 24, 41 - 58.

King, M. V, Gales, J. A., Laberg, J. S., McKay, R. M., De Santis, L., Kulhanek, D. K., Hosegood, P. J., Morris, A., and Expedition, I., 2022. Pleistocene depositional environments and links to cryosphere-ocean interactions on the eastern Ross Sea continental slope, Antarctica (IODP Hole U1525A). *Mar. Geol.*, 443, 106674.

Kotov, S., & Pălike, H. (2018, December). QAnalySeries-a cross-platform time series tuning and analysis tool. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2018, pp. PP53D-1230).

Lal, D., 1987. ^{10}Be in polar ice: Data reflect changes in cosmic ray flux or polar meteorology. *Geophys. Res. Lett.*, 14, 785 - 788.

Lal, D. (1991). Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(2), 424-439.

Lamy, F., Winckler, G., Arz, H. W., Farmer, J. R., Gottschalk, J., Lembke-Jene, L., Middleton, J. L., Van der Does, M., Tiedemann, R., Alvarez Zarikian, C., 2024. Five million years of Antarctic Circumpolar Current strength variability. *Nature* 627, 789 - 796.

Lisiecki, L. E., Raymo, M. E., 2005. A Pliocene Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records, *Paleoceanography* 20.

Maykut, G. A. (1978). Energy exchange over young sea ice in the central Arctic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 83(C7), 3646-3658.

McKay, R., Naish, T., Powell, R., Barrett, P., Scherer, R., Talarico, F., Kyle, P., Monien, D., Kuhn, G., Jackolski, C., 2012b. Pleistocene variability of Antarctic ice sheet extent in the Ross embayment. *Quat. Sci. Rev.* 34, 93 - 112.

McKay, R. M., De Santis, L., Kulhanek, D. K., 2019. Ross Sea West Antarctic Ice Sheet History. *Proc. Int. Ocean Discov. Progr.* 374.

Morrison, A. K., Hogg, A. M., England, M. H., Spence, P., 2020. Warm Circumpolar Deep Water transport toward Antarctica driven by local dense water export in canyons. *Sci. Adv.* 6, eaav2516.

Naish, T., Powell, R., Levy, R., Wilson, G., Scherer, R., Talarico, F., Krissek, L., Niessen, F., Pompilio, M., Wilson, T., 2009. Obliquity-paced Pliocene West Antarctic ice sheet oscillations. *Nature* 458, 322 - 328.

Nishimura, A., Nakasone, T., Hiramatsu, C., Tanahashi, M., 1998. Late Quaternary paleoenvironment of the Ross Sea continental shelf, Antarctica. *Ann. Glaciol.* 27, 275 - 280.

Ohneiser, C., Yoo, K.C., Albot, O.B., Cortese, G., Riesselman, C., Lee, J.I., McKay, R., Bollen, M., Lee, M.K., Moon, H.S., Kim, S., 2019. Magneto-biostratigraphic age models for Pleistocene sedimentary records from the Ross Sea. *Glob. Planet. Change.* 176, 36-49.

Orsi, A. H., Smethie Jr, W. M., Bullister, J. L., 2002. On the total input of Antarctic waters to the deep ocean: A preliminary estimate from chlorofluorocarbon measurements. *J. Geophys. Res. Ocean.* 107, 31.

Pattyn, F., Morlighem, M., 2020. The uncertain future of the Antarctic Ice Sheet. *Science* 367, 1331 - 1335.

Pollard, D., DeConto, R. M., 2009. Modelling West Antarctic ice sheet growth and collapse through the past five million years. *Nature* 458, 329 - 332.

Rhee, H. H., Lee, M. K., Seong, Y. B., Hong, S. C., Lee, J. I., Yoo, K. C., Yu, B. Y. (2019). Timing of the local last glacial maximum in Terra Nova Bay, Antarctica defined by cosmogenic dating. *Quaternary Science Reviews*, 221. 105897.

Rhodes, E.J., 2011, Optically stimulated dating of sediments over the past 200,000 years. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 39, 461 - 488.

Rignot, E., Casassa, G., Gogineni, P., Krabill, W., Rivera, A. U., & Thomas, R. (2004). Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of Larsen B ice shelf. *Geophysical Research Letters*, 31(18).

Scherer, R. P., Aldahan, A., Tulaczyk, S., Possnert, G., Engelhardt, H., Kamb, B., 1998. Pleistocene collapse of the West Antarctic ice sheet. *Science* 281, 82 - 85.

Shepherd, A., Wingham, D., Payne, T., & Skvarca, P. (2003). Larsen ice shelf has progressively thinned. *Science*, 302(5646), 856-859.

Shimmield, G., Derrick, S., Mackensen, A., Grobe, H., Pudsey, C., 1994. The history of barium, biogenic silica and organic carbon accumulation in the Weddell Sea and Antarctic Ocean over the last 150,000 years, in: *Carbon Cycling in the Glacial Ocean: Constraints on the Ocean's Role in Global Change: Quantitative Approaches in Paleoceanography*. 555 - 574.

Silvano, A., Foppert, A., Rintoul, S. R., Holland, P. R., Tamura, T., Kimura, N., Castagno, P., Falco, P., Budillon, G., Haumann, F. A., 2020. Recent recovery of Antarctic Bottom Water formation in the Ross Sea driven by climate anomalies. *Nat. Geosci.* 13, 780 - 786.

Sjunneskog, C., Scherer, R., Aldahan, A., Possnert, G., 2007. ^{10}Be in glacial marine sediment of the Ross Sea, Antarctica, a potential tracer of depositional environment and sediment chronology. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* 259, 576 - 583.

Smith Jr, W. O., Sedwick, P. N., Arrigo, K. R., Ainley, D. G., Orsi, A. H., 2012. The Ross Sea in a sea of change. *Oceanography* 25, 90 - 103.

Steig, E. J., Ding, Q., Battisti, D. S., Jenkins, A., 2012. Tropical forcing of Circumpolar Deep Water inflow and outlet glacier thinning in the Amundsen Sea Embayment, West Antarctica, *Ann. Glaciol.* 53, 19 - 28.

Stone, J. (1998). A rapid fusion method for separation of beryllium-10 from soils and silicates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(3), 555-561.

Strasky, S., Di Nicola, L., Baroni, C., Salvatore, M.C., Baur, H., Kubik, P.W., Schlüchter, C., Wieler, R., 2009. Surface exposure ages imply multiple low amplitude Pleistocene variations in East Antarctic ice sheet, Ricker Hills, Victoria Land. *Antarct. Sci.* 21 (1), 59-69.

Tera, F., Brown, L., Morris, J., Sacks, I. S., Klein, J., & Middleton, R. (1986). Sediment incorporation in island-arc magmas: Inferences from ^{10}Be . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(4), 535-550.

Valletta, R. D., Willenbring, J. K., Passchier, S., Elmi, C., 2018. $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ratios reflect Antarctic Ice Sheet freshwater discharge during Pliocene warming. *Paleoceanogr. Paleoclimatology*, 33, 934 - 944.

Von Blanckenburg, F., Belshaw, N. S., & O’Nions, R. K. (1996). Separation of ^9Be and cosmogenic ^{10}Be from environmental materials and SIMS isotope dilution analysis. *Chemical Geology*, 129(1), 93–99.

Von Blanckenburg, F., Bouchez, J., Wittmann, H., 2012. Earth surface erosion and weathering from the ^{10}Be (meteoric)/ ^9Be ratio. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 351, 295 – 305.

Wang, J., Tang, Z., Wilson, D. J., Chang, F., Xiong, Z., Li, D., Li, T., 2022. Ocean Forced Instability of the West Antarctic Ice Sheet Since the Mid Pleistocene. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 23, e2022GC010470.

Willenbring, J.K. and von Blanckenburg, F., 2010, Meteoric cosmogenic Beryllium-10 adsorbed to river sediment and soil: Applications for Earth-surface dynamics. *Earth-Science Reviews*, 98, 105–122.

Wittmann, H., von Blanckenburg, F., Bouchez, J., Dannhaus, N., Naumann, R., Christl, M., Gaillardet, J., 2012. The dependence of meteoric ^{10}Be concentrations on particle size in Amazon River bed sediment and the extraction of reactive $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ratios. *Chem. Geol.* 318, 126 – 138.

Yi, L., Medina-Elizalde, M., Tan, L., Kemp, D. B., Li, Y., Kletetschka, G., Xie, Q., Yao, H., He, H., Deng, C., 2023. Plio-Pleistocene deep-sea ventilation in the Eastern Pacific and potential linkages with Northern Hemisphere glaciation. *Sci. Adv.* 9, eadd1467.

Yokoyama, Y., Anderson, J. B., Yamane, M., Simkins, L. M., Miyairi, Y., Yamazaki, T., Koizumi, M., Suga, H., Kusahara, K., Prothro, L., 2016. Widespread collapse of the Ross Ice Shelf during the late Holocene. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113, 2354 – 2359.

Yuan, N., Ding, M., Ludescher, J., Bunde, A., 2017. Increase of the Antarctic Sea Ice Extent is highly significant only in the Ross Sea. *Sci. Rep.* 7, 41096.

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.

☐ 국문 표기

- 이 연구는 해양수산부의 재원으로 극지연구소의 지원을 받아 수행되었습니다.(본과제 계정번호*)

* 본과제 계정번호: 극지연구소에서 부여한 과제번호로 연구소 연구관리담당부서에 확인

☐ 영문 표기

- This work was supported by Korea Polar Research Institute(KOPRI) grant funded by the Ministry of Oceans and Fisheries(KOPRI, 본과제 계정번호).

* 연구결과의 발표 내용에 따라 위의 표기방식을 변경할 수 있으나, 밑줄 친 내용이 반드시 포함되어야 함

극지연구소