

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “과거 온난기의 서남극 빙상 후퇴 및 해양 순환 변화 연구” 과제의 위탁연구 “우주선유발 동위원소를 이용한 테라노바 만 빙붕 거동 복원 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2026. 1. 30

(본과제) 총괄연구책임자 : 유 규 철

위탁연구기관명 : 국립공주대학교

위탁연구책임자 : 이 현 희

위탁참여연구원 :

## 보고서 초록

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                   |                                                                                                                                             |       |             |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|----------|
| 위탁연구과제명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                   | 우주선유발 동위원소를 이용한 테라노바 만 빙봉 거동 복원 연구                                                                                                          |       |             |          |
| 위탁연구책임자                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 이 현 희             | 해당단계<br>참여연구원수                                                                                                                              | 1     | 해당단계<br>연구비 | 3,000 만원 |
| 연구기관명 및<br>소속부서명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 국립공주대학교 환경교육과     |                                                                                                                                             | 참여기업명 |             |          |
| 국제공동연구                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 상대국명 : 상대국연구기관명 : |                                                                                                                                             |       |             |          |
| 요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                   |                                                                                                                                             |       | 보고서<br>면수   | 37       |
| <div><ul style="list-style-type: none"><li>로스해 대륙대 코어(RS15-LC47) 분석 결과, 자기감수율(MS)은 750-550 ka 구간에서 높고, 550-250 ka에 감소, 250 ka 이후 변동성이 증가함.</li><li>후기 플라이스토세(250 ka 이후)에서 IRD가 풍부해지고 authigenic <sup>10</sup>Be과의 상관성이 확인되며, 빙하-해양 상호작용 강화가 나타남.</li><li>캠벨 빙하는 MIS 4에 LLGM이 나타난 후 MIS 3-2 동안 지속적인 빙하 두께 감소가 확인됨.</li><li>캠벨 빙하는 테라노바 만의 다른 빙하들이 해양빙상 불안정성에 크게 영향을 받아 소모된 것과 비교해 독특하고 비동시적인 빙하 감소 양상을 보임.</li><li>빙하 두께 변화는 기후보다 멜버른 화산 활동과 밀접히 연관되며, 마지막 빙기에도 빙하가 지속적으로 얇아졌음을 보여줌.</li><li>테라노바 만 해저의 지형학적 증거, 케이프 워싱턴의 지질학적 증거, 연대측정학적 증거를 종합 분석함.</li><li>테라노바 빙상/빙봉의 형태 및 소모 역사를 복원하였으며 마지막 빙하기 동안 빙하의 지속적 소모를 발견함.</li></ul></div> |                   |                                                                                                                                             |       |             |          |
| 색 인 어<br>(각 5개 이상)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 한 글               | 우주선유발 동위원소, Meteoric <sup>10</sup> Be, In-situ <sup>10</sup> Be/ <sup>26</sup> Al, 빙하지형, 질량가속기                                              |       |             |          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 영 어               | Cosmogenic Nuclides, Meteoric <sup>10</sup> Be, In-situ <sup>10</sup> Be/ <sup>26</sup> Al, Glacial Landform, Accelerator Mass Spectrometry |       |             |          |

# 요 약 문

## I. 제 목

우주선유발 동위원소를 이용한 테라노바 만 빙봉 거동 복원 연구

## 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 지구 상에서 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.

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 본 연구는 빙하의 거동 변화를 복원하는데 강력한 증거로 사용될 수 있는 우주선유발 동위원소의 실험 개발과 더불어, 남극의 해양과 육상에 나타나는 빙하지형에 기술을 적용, 이용하여 연구를 수행했다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 해양퇴적물 코어의 깊이에 따른 우주선유발 동위원소 대기기원  $^{10}\text{Be}$  농도 변화 연구
- Meteoric  $^{10}\text{Be}$  추출 실험 시행 및 개선
- 육상 빙하지형의 우주선유발 동위원소 노출연대 측정 연구
- In-situ  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$  추출 및 노출연대로 환산
- 빙봉과 빙하의 거동 및 고기후 환경 복원
- 학술 회의 발표 및 논문 투고

## IV. 연구개발결과

- 로스해 대륙대 코어(RS15-LC47) 분석 결과, 자기감수율(MS)은 750-550 ka 구간에서 높고, 550-250 ka에 감소, 250 ka 이후 변동성이 증가함.
- 후기 플라이스토세(250 ka 이후)에서 IRD가 풍부해지고 authigenic  $^{10}\text{Be}$ 과의 상관성이 확인되며, 빙하-해양 상호작용 강화가 나타남.

- 캠크 빙하는 MIS 4에 LLGM이 나타난 후 MIS 3-2 동안 지속적인 빙하 두께 감소가 확인됨.
- 캠크 빙하는 테라노바 만의 다른 빙하들이 해양빙상 불안정성에 크게 영향을 받아 소모된 것과 비교해 독특하고 비동시적인 빙하 감소 양상을 보임.
- 빙하 두께 변화는 기후보다 멜버른 화산 활동과 밀접히 연관되며, 마지막 빙기에도 빙하가 지속적으로 얇아졌음을 보여줌.
- 테라노바 만 해저의 지형학적 증거, 케이프 워싱턴의 지질학적 증거, 연대측정학적 증거를 종합 분석함.
- 테라노바 빙상/빙봉의 형태 및 소모 역사를 복원하였으며 마지막 빙하기 동안 빙하의 지속적 소모를 발견함.

## V. 연구개발결과의 활용계획

해양 퇴적물 코어에서의 authigenic  $^{10}\text{Be}$  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 장보고과학기지 하계 활동에서 채취한 육상 빙하지형 시료와 테라노바 만, 빅토리아 랜드 지역의 연구 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.

# S U M M A R Y

## (영 문 요 약 문)

### I. Title

Reconstructing Ice Shelf Dynamics in Terra Nova Bay using Cosmogenic Nuclides

### II. Purpose and Necessity of R&D

Antarctic ice sheets retreat when mass loss due to erosion and melting exceeds accumulation from snowfall. In particular, the East Antarctic Ice Sheet contains a substantial proportion of the global ice volume. Antarctica hosts the largest reservoir of ice on Earth, and the complete melting of the Antarctic Ice Sheet would result in a global sea-level rise of approximately 60 m, causing severe impacts on low-lying cities and coastal communities worldwide.

Understanding past variations in Antarctic ice sheets and ice shelves during geological timescales is therefore essential for assessing the role of the cryosphere within the climate system and for predicting the rate and magnitude of future sea-level rise under warming scenarios. To this end, this study combined the development of experimental approaches for cosmogenic nuclide analysis, which provides robust constraints on glacier dynamics, with their application to glacial landforms observed in both marine and terrestrial environments in Antarctica.

### III. Contents and Extent of R&D

- Investigation of downcore variations in meteoric cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  concentrations in marine sediment cores.
- Implementation and improvement of experimental procedures for the extraction of meteoric  $^{10}\text{Be}$ .
- Cosmogenic nuclide surface exposure dating of terrestrial glacial landforms.
- Extraction of in-situ  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  and conversion to surface exposure ages.
- Reconstruction of ice-shelf and glacier dynamics and associated palaeoclimatic conditions.
- Presentation of results at scientific conferences and submission of peer-reviewed manuscripts.

#### IV. R&D Results

- Analysis of the Ross Sea continental rise core (RS15-LC47) shows high magnetic susceptibility (MS) values during 750–550 ka, a decline during 550–250 ka, and increased variability after 250 ka.
- Increased abundance of ice-rafted debris (IRD) after 250 ka, with a clear correlation to authigenic  $^{10}\text{Be}$ , indicating intensified glacier–ocean interactions during the Late Pleistocene.
- Campbell Glacier exhibits a Local Last Glacial Maximum (LLGM) during MIS 4, followed by continuous ice thickness reduction throughout MIS 3–2.
- Compared to other glaciers in Terra Nova Bay that were strongly influenced by marine ice-sheet instability, Campbell Glacier shows a distinct and asynchronous pattern of ice thinning.
- Variations in ice thickness are more closely linked to Mt. Melbourne volcanic activity than to climatic forcing, demonstrating persistent glacier thinning even during the Last Glacial Period.
- Integrated analysis of submarine geomorphological evidence from Terra Nova Bay, geological evidence from Cape Washington, and geochronological constraints.
- Reconstruction of the geometry and downwasting history of the Terra Nova Ice Sheet/Ice Shelf, revealing sustained ice loss throughout the Last Glacial Period.

#### V. Application Plans of R&D Results

Authigenic  $^{10}\text{Be}$  analyses from marine sediment cores have proven effective in previous studies and have been widely applied in diverse climatic and oceanographic research contexts. This approach is expected to continue to expand, and as datasets are established across multiple regions, the scope of research may be extended to the entire Southern Ocean, enabling investigations of beryllium distribution patterns, sediment transport processes, and related phenomena.

In addition, based on terrestrial glacial landform samples collected during the 2021 austral summer field campaign at Jang Bogo Station and research results from Terra Nova Bay and Victoria Land, manuscripts have been submitted, and the applicability of this research is expected to expand further to other regions. This integrated approach provides opportunities to investigate additional exposed areas around the Ross Sea and the Southern Ocean, thereby contributing to the advancement of this field of research.

# 목 차

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 제 1 장 서론 .....                    | 11 |
| 제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....           | 12 |
| 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 .....        | 16 |
| 제 1 절 우주선유발동위원소 실험 수행 .....       | 16 |
| 제 2 절 연구지역별 측정결과 분석 .....         | 24 |
| 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 .....    | 35 |
| 제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....          | 36 |
| 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ..... | 37 |
| 제 7 장 참고문헌 .....                  | 38 |



# 제 1 장 서 론

남극 빙붕은 해수면 상승을 완화하고 대륙 빙상의 안정성을 유지하는 핵심적인 완충 장치로서, 빙하가 해양으로 유입되는 속도를 조절하는 데 결정적인 역할을 한다. 그러나 최근 지구 온난화로 인한 대기 및 해양 온도의 상승은 빙붕의 기저 용해와 붕괴를 가속화하고 있으며, 이는 빙붕 붕괴를 촉진하여 빙하 질량 손실과 전 지구적 해수면 상승을 증가시키는 주요 요인으로 작용하고 있다. 이러한 변화는 전 세계 해안 지역에 심각한 위협을 초래할 뿐만 아니라, 해양 순환과 기후 시스템, 빙하 기저의 생태계에까지 영향을 미쳐 지구 환경 전반의 균형을 위협한다. 따라서 빙붕은 단순한 물리적 구조물을 넘어 기후 변화의 민감한 지표로 간주되며, 과거 빙붕 변동성을 규명하는 것은 남극에서의 미래 빙하 용해 시나리오를 예측하는 데 필수적이다.

기존 연구들은 빙붕이 남극 빙상의 안정성 유지, 질량 균형 조절, 해양 성층화 및 저층수 형성, 해류의 열염 순환 촉진 등 지구 시스템에서 수행하는 핵심적 역할을 명확히 입증해 왔다. 반면, 빙붕 기저부의 용해는 빙하 접지선(grounding line)의 후퇴를 유발하며, 이는 빙붕 두께 감소와 구조적 붕괴로 이어진다. 붕괴된 빙붕은 대륙의 빙상을 지탱하는 효과를 상실하게 되어 빙하 유속 증가와 질량 손실을 가속화하고, 결과적으로 해수면 상승에 직접적인 영향을 미친다(Rignot et al., 2004; Dupont and Alley, 2005).

빙붕의 성장, 후퇴, 붕괴 과정을 복원하기 위한 연구는 전통적으로 해양 퇴적물 내 규조류와 유공충의 함량 및 분포 분석에 의존해 왔다. 그러나 이러한 생물학적 지표는 유입 경로가 불분명하거나 보존 상태와 농도가 제한적인 경우가 많아 해석에 한계가 존재한다. 이에 비해 대기기원(meteoritic)  $^{10}\text{Be}$ 은 대기 중에서 비교적 일정하게 생성되어 해양 퇴적물에 안정적으로 축적되는 특성을 지니므로, 해수면의 방해물 존재 여부를 직접적으로 판단할 수 있는 신뢰도 높은 지표로 활용된다. 퇴적물 코어의 깊이에 따라 meteoritic  $^{10}\text{Be}$  농도 변화를 분석함으로써 빙붕의 전진과 후퇴, 해빙의 형성과 지속성을 정밀하게 복원할 수 있으며, 이를 바탕으로 최근 3년간 라르센해, 벨링스하우젠해, 로스해 등 남극 주요 해역에서 채취한 해양 퇴적물 코어를 대상으로 연구를 수행한 바 있다(Sjunneskog et al., 2007; Yokoyama et al., 2016; Dash et al., 2021; Rhee et al., 2022a).

또한 육상 빙하의 수직적, 수평적 변화는 최근 들어 in-situ  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{26}\text{Al}$ 을 이용한 노출연대 측정 기법 및 매물 여부 판별을 통해 본격적으로 규명되고 있다(Goehring et al., 2019; Rhee et al., 2019, 2020, 2022b, 2022c). 2021년 남극 탐사에서는 남극횡단산맥과 주요 빙하 지역(David Glacier, Nansen Ice Shelf 등)에서 암석 시료를 채취하여 in-situ  $^{10}\text{Be}$ 와  $^{26}\text{Al}$  농도를 분석함으로써 복합적인 노출·매물 이력을 해석하고 빙하 후퇴 시기를 규명하였다. 더불어, 지각평형성 용기(Glacial Isostatic Adjustment)로 형성된 해빈 퇴적물에 대해 OSL 연대측정을 수행하여 해당 지역의 용기율과 지형 진화 과정을 정밀하게 평가하였다(Hong et al., 2021). 이러한 해양 및 육상에서의 빙하지형을 이용한 복합적인 과거 빙하 거동 변화 복원 연구를 통해 남극 빙상 역학에 대한 이해에 주요한 정보들을 제공하였다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

우주계에서 유입되는 고에너지 우주방사선(Cosmic Ray, 우주선)은 지구의 대기권에 진입하면서 여러 물질과 연쇄적인 핵반응을 일으키며 양성자, 알파 입자, 2차 중성자 및 뮤온과 같은 다양한 입자들을 생성한다. 이렇게 형성된 입자 및 방사선(Secondary Cosmic Ray)은 대기를 통해 지표면까지 도달하며 계속해서 핵반응을 일으키는데, 이 과정에서 대기 중 입자들과의 충돌로 만들어지는 대기기원(meteoric) 우주선유발 동위원소와 지표의 암석들을 구성하는 원소와의 상호작용으로 만들어지는(in-situ) 우주선유발 동위원소로 구분된다.

대기 중에서 생성된 동위원소 중 meteoric  $^{10}\text{Be}$ 은 대기 부유 입자에 흡착되거나 강수에 용해되어 대륙, 호수 및 해양의 퇴적물로 축적된다(Willenbring and von Blanckenburg, 2010)(그림 1). 해양 퇴적물에 농축된 대기기원  $^{10}\text{Be}$ 의 농도는 해수면이나 호수면에 장애물의 유무 및 지속성에 따라 퇴적물이 달라지기 때문에, 빙봉의 전진 및 후퇴 역사에 대한 가장 직접적이고 강력한 증거로 활용된다. 일반적으로 탄소연대측정으로 잘 알려진  $^{14}\text{C}$  역시 대기 중에서 생성되는 meteoric 성분이며, 대기 중에서 생성 후 생물체의 광합성, 호흡 등에 의해 흡수되어 일정 비율을 유지하게 된다.

특히 대기 중에서 생성된 Be이 해양 퇴적물에 흡착된 형태로 존재하는 경우 ‘authigenic’이라고 지칭한다. 하지만 대륙 및 대기 중에서 공급된 퇴적물 내부에 기존부터 내재되어 있던 Be 성분이 있는데 이를 ‘detrital’이라고 지칭하며, 대기 중에서 형성된  $^{10}\text{Be}$ 만을 측정해야 하기 때문에 이 detrital  $^9\text{Be}$  성분은 제거해주어야 정확한  $^{10}\text{Be}$ 의 값을 알 수 있게 된다.

이와 달리, 암석 내의 광물을 구성하고 있는 다양한 원소들의 핵반응으로 형성되는 in situ 동위원소는  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  등이 있다(그림 2). 이들은 빙하나 암석과 같이 밀도가 높은 물질에 의해 매몰되어 있을 때는 우주선과의 핵반응이 일어나지 못하나, 빙하의 후퇴에 의해 노출되는 순간부터 일정한 양이 지속적으로 생성되고 축적된다. 이러한 특성으로 인해 in situ 동위원소들은 빙하의 수직적 및 수평적 이동을 복원하는 데 사용되며, 암석의 종류에 따라 생성되는 다양한 핵종들 각각 고유의 생성률(atoms/g of mineral/year)과 고유의 반감기(half-life)를 이용해 다양한 연대를 커버할 수 있다.

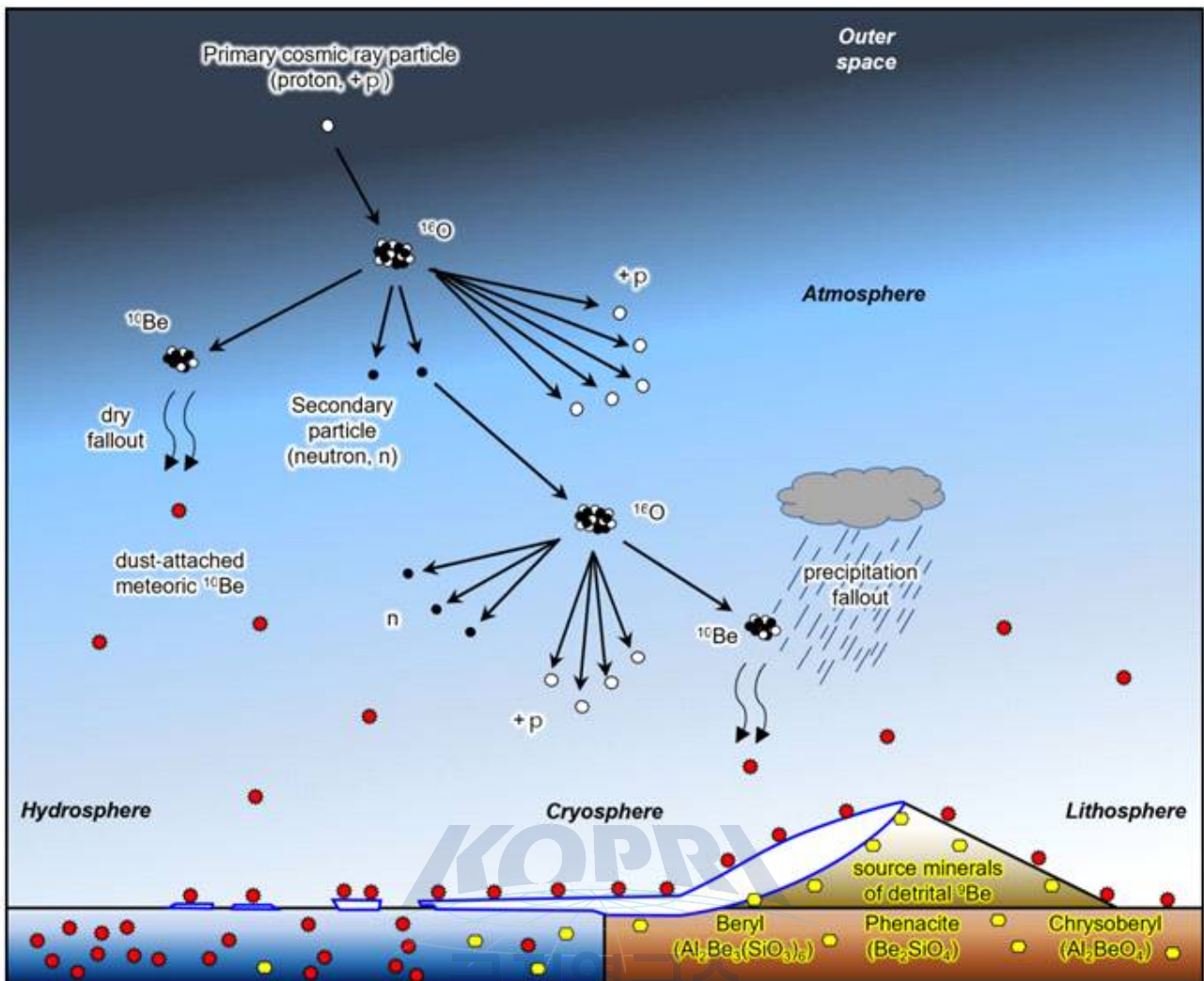


그림 1 대기기원(meteoric) 우주선유발 동위원소  $^{10}\text{Be}$ (붉은 원)과 육상으로부터 공급되는 (detrital)  $^9\text{Be}$ (노란 다이아몬드) (Rhee, 2024).

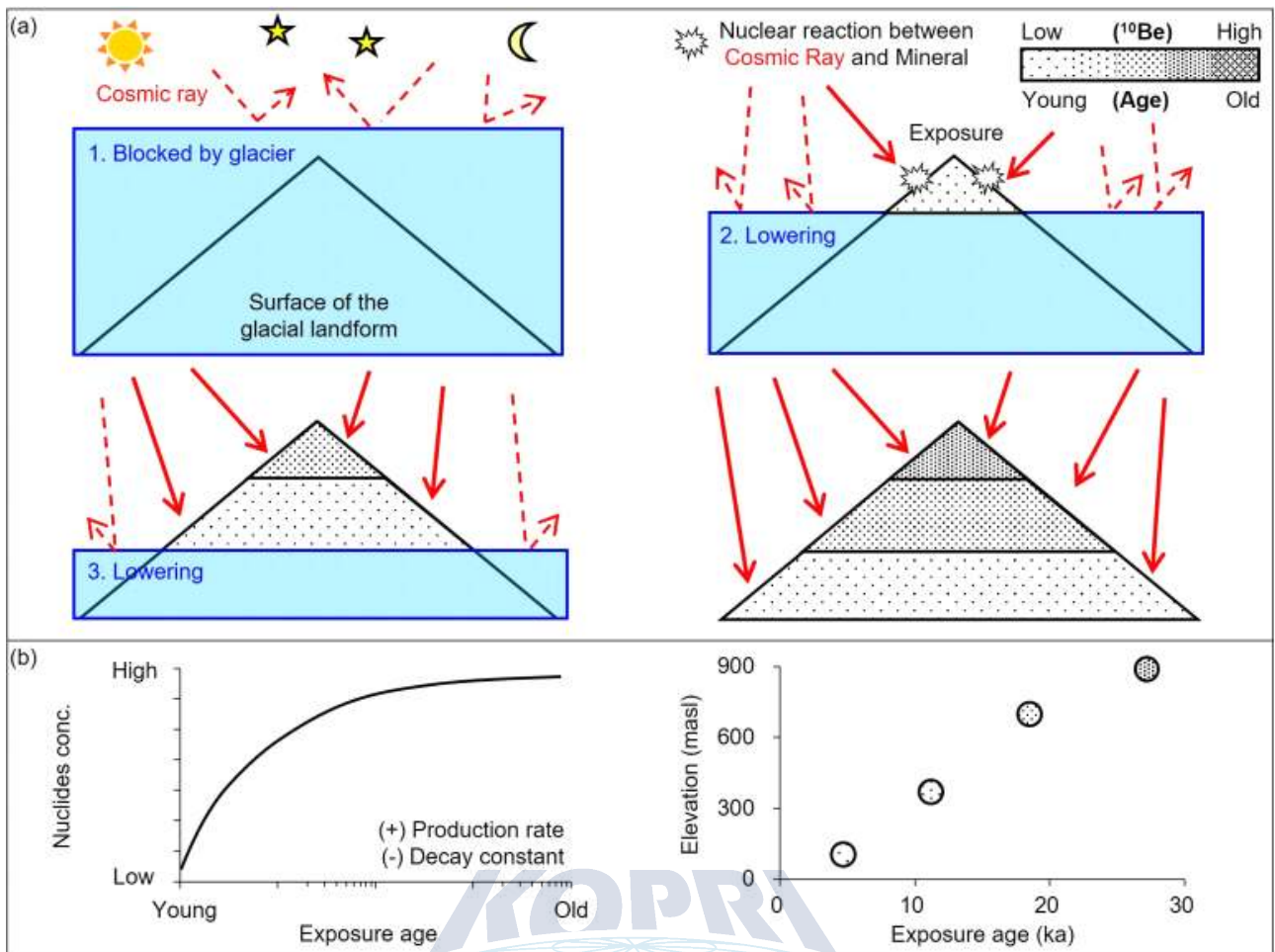


그림 2 우주선유발 동위원소의 생성, 붕괴의 원리를 활용한 빙하 지형 노출 연대 측정 방법의 모식도(Rhee, 2025).

Meteoritic  $^{10}\text{Be}$ 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, Bourles의 leaching 방법과 고순도 동위원소 추출을 위한 이온교환칼럼 방식을 혼합하여 Hybrid method for extracting meteoric  $^{10}\text{Be}$ 을 개발하였다(Rhee et al., 2022a).

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 leaching과정을 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 방법은 Stone의 복잡한 fusion 방법과 달리 이온교환칼럼을 사용해 음이온 및 Be 외의 양이온들을 온전히 제거할 수 있다는 장점이 있다.

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. 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).

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  $^{10}\text{Be}$ 과  $^{26}\text{Al}$ 이 주로 사용된다(Lal, 1991; Gosse and Phillips, 2001). 반면, 최후빙기 이후의 빙하의 후퇴나 감소를 연구할 때는  $^{10}\text{Be}$ 과 더불어 상대적으로 반감기가 매우 짧은  $^{14}\text{C}$  (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.

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1 절 국립공주대학교/고려대학교 우주선유발동위원소 실험 수행

#### 1.1 해양시료 처리

국립공주대학교 극지환경연구실에서는 기존의 고려대학교 우주선유발 동위원소 실험실(Cosmogenic Nuclides Lab.)에서 활용하던 authigenic  $^{10}\text{Be}$  추출 방식을 개선하여 아세트산, 염산하이드록실아민의 혼합 용액으로 추출해 이온교환칼럼을 거쳐 순도 높은 Be 수득 방식을 활용하고 있다(Rhee et al., 2022a).

해양퇴적물 시료의 입자는 입자 크기에 따라 Be과의 흡착성이 달라지기 때문에  $200\ \mu\text{m}$  이하의 입자들만을 사용하였다. 약 0.5-1g의 샘플을 테플론 비커에 넣고 염산하이드록실아민( $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ )과 아세트산( $\text{HOAc}$ )의 혼합 용액을 이용해 흡착된 authigenic Be을 추출하였다. 해당 용액에는  $^{10}\text{Be}$ 뿐만이 아닌  $^9\text{Be}$ 도 혼재되어 있기 때문에 시료별로  $^9\text{Be}$ 의 농도를 별도로 측정하여 파악하여야 한다. 이를 위해 용액의 일부( $\sim 8\%$ )를 따로 추출하여 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer)로  $^9\text{Be}$ 의 농도를 분석하였다.  $^{10}\text{Be}$ 의 농도는 경험적으로 매우 극미량( $^{10}\text{Be}/^9\text{Be} = 1\text{E}-15 \sim 1\text{E}-11$ )이 나타나기 때문에 질량에 따른 동위원소의 고해상도 분리, 분석을 위해 AMS(Accelerator Mass Spectrometry)가 필수적이다. 다만, AMS는  $^{10}\text{Be}$ 의 농도를 측정하는 것이 아닌  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  비율과  $^9\text{Be}$ 의 농도만 측정이 가능하기 때문에, 정확한 측정 및 보정을 위해  $^{10}\text{Be}$ 이 거의 없고  $^9\text{Be}$  농도가 일정한 시약(carrier)을 주입해주어야 한다. 이를 위해 약 1000 ppm 농도의 캐리어를 이용해  $^9\text{Be}$  spike를 넣고 건조시켰다.

완전히 건조된 샘플은 HCl에 녹인 뒤 음이온(Bio-Rad, AG  $1 \times 8$ ) 및 양이온(Bio-Rad, AG-MP 레진) 교환 컬럼을 사용하여 Be을 추출했다. 이 과정에서 다양한 농도의 HCl을 사용하여 다른 양이온과 음이온을 최대한 제거하고 고농도의 Be을 추출한다.  $\text{Be}(\text{OH})_2$ 는 pH 7-8 범위에서  $\text{NH}_4\text{OH}$ 를 사용하여 침전시켰으며, 이후 침전물은 석영 도가니에서 고온으로 가열시켜  $\text{Be}(\text{OH})_2$ 를 BeO로 하소(calcination)시켰다.

최종 샘플은 AMS로 측정되기 위해 세슘(Cs) 이온빔 조사(sputtering)과정에서 음이온으로 뽑아내야하며, 이를 위해 전기전도도가 높아야 한다. 또한  $1500^\circ\text{C}$ 의 ionizer에서 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 5).

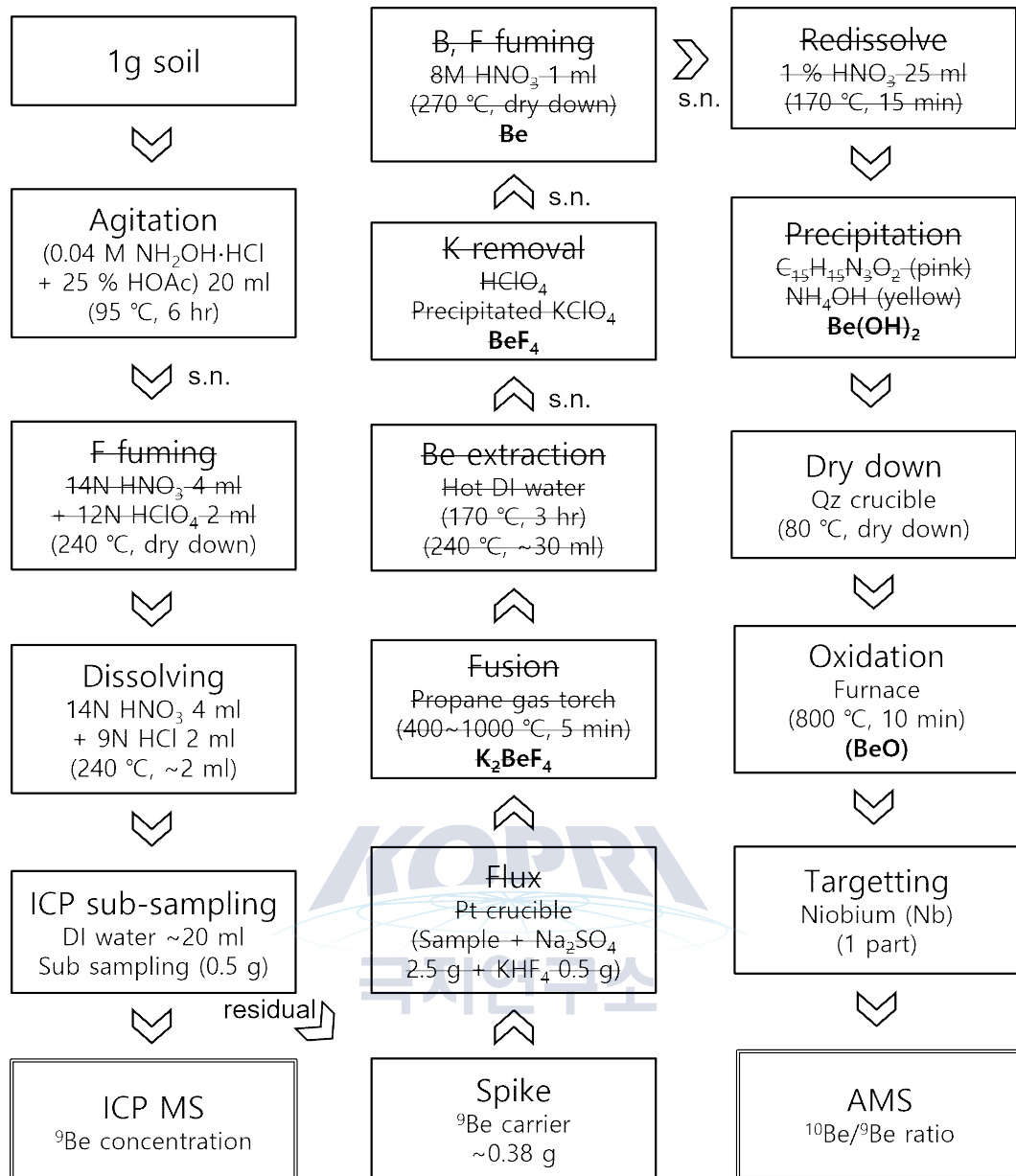


그림 3 고려대학교 우주선유발 동위원소 실험실의 해양퇴적물로부터의 authigenic Be 추출실험 프로토콜.

## 1.2 육상시료 처리

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

순수한 석영 시료만 얻기 위해 HF와  $\text{HNO}_3$ 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  $^9\text{Be}$ 이 없으므로, 인위적으로 정해진 양의  $^9\text{Be}$  carrier를 넣어  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 의 비율을 측정할 수 있는 형태로 만든다.  $^{27}\text{Al}$ 의 경우 지질적 특성상 석영 내에 이미 어느 정도 포함되어있기 때문에 carrier를 별도로 넣어주지는 않으나,  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  비율로부터  $^{26}\text{Al}$ 의 양을 계산하기 위해서는 시료가 가지고 있는  $^{27}\text{Al}$ 의 양을 별도로 측정하는 과정이 필요하다. 석영을 녹이기 위해 고농도의 HF와  $\text{HNO}_3$  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  $\text{HNO}_3$ 를 이용해 수득하여 ICP-AES로 측정해준다.

수득된 Be/Al의 용액 역시 고농도의 HF를 제거해주기 위해  $\text{HClO}_4$ 를 이용해 F을 날려주며, 이 과정을 통해 Be이  $\text{BeF}$  형태로 침전되는걸 방지하고  $\text{BeCl}$  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  $\text{NH}_4\text{OH}$ 를 이용해 각각  $\text{BeOH}$ 과  $\text{AlOH}$  형태로 침전시켜준다. 이후 각각 800와 900 $^\circ\text{C}$ 에서 15분간 calcination 시켜  $\text{BeO}$ 과  $\text{AlO}$  형태로 만들어준다. AMS 측정에 적합한 타겟으로 제작하기 위해 타겟 제작 시에  $\text{BeO}$ 와 Nb,  $\text{AlO}$ 와 Ag를 섞어 전도성 높은 최종 시료를 제작한다.

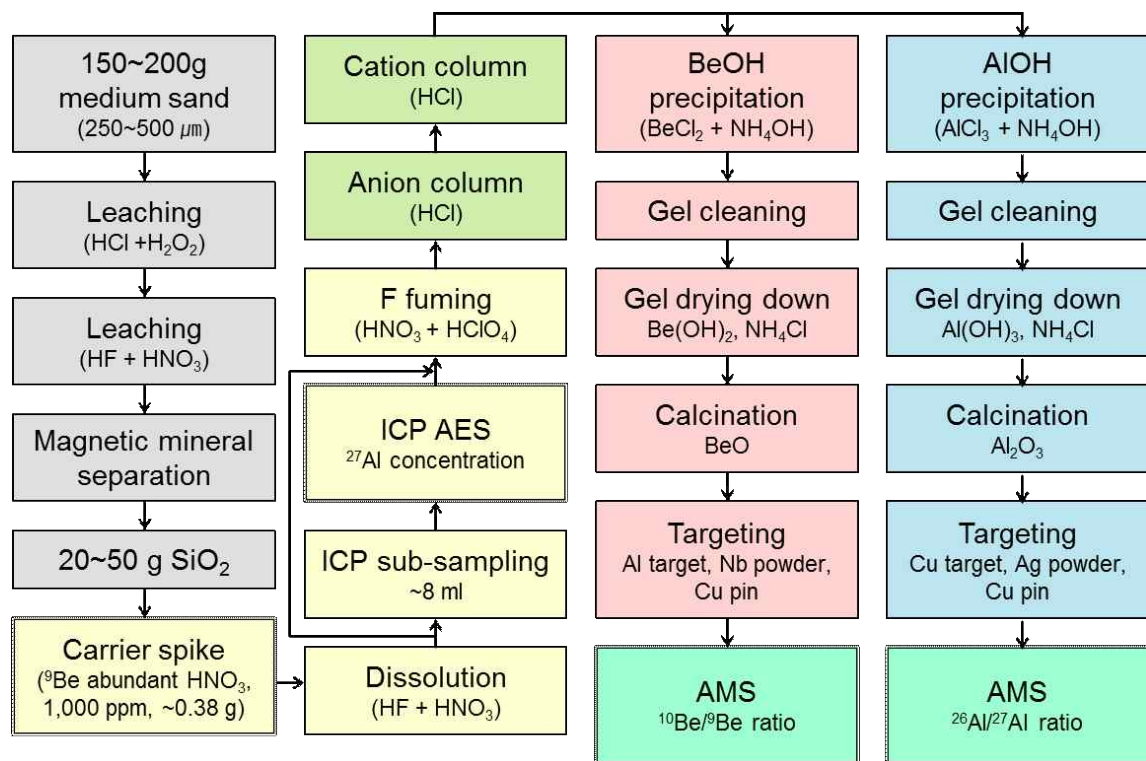


그림 4. 고려대학교 Geochronology 실험실의 in-situ Be/Al 실험 프로토콜.



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 (그림 6). 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  $2.709 \times 10^{-11}$ ,  $8.558 \times 10^{-12}$ ,  $6.320 \times 10^{-12}$ 이다.

Be 추출과정에서 얻어진 BeO 형태의 타겟은 AMS의 샘플 챔버에 들어간 후 스탠다드 샘플을 사용해  $^9\text{Be}$ 의 빔 전류,  $^{10}\text{Be}$ 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  $\text{Cs}^+$ 로 이온화되는 과정에서 parabolic한 이온나이저에서 튕겨 나오며 이온빔이 된다. 동시에 타겟에 음극을 걸어  $\text{Cs}^+$ 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.  $\text{Cs}^+$ 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 익스트랙터에 의해 이온나이저의 중심을 통과하여 추출된다.

추출된 Be-O를 비롯한 여러 분자 및 원자들은 Low Energy Magnet에서 Magnetic Mass Separation을 통과하며, 질량이 25인  $^9\text{BeO}$  분자와 26인  $^{10}\text{BeO}$ , 그리고 동중원소인  $^{10}\text{BO}$  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.  $^9\text{Be}$ 은 양이 많기 때문에 상대적으로 짧은 주입 시간을 배정받으며, 질량이 25인 원자나 분자( $^9\text{BeO}$ )가 지나갈 수 있는 전압을 걸어주면  $^9\text{Be}$ 을 감지하는 패러데이 컵(faraday cup)을 통해 감지된다. 반면에  $^{10}\text{Be}$ 은 양이 적기 때문에 상대적으로 긴 시간을 배정받으며, 질량이 26인 원자나 분자( $^{10}\text{BeO}$ ,  $^{10}\text{BO}$ )가 지나갈 수 있는 전압을 걸어주면  $^{10}\text{Be}$ 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  $\text{Be}^{2+}$ 와 O의 원자로 분리된다. 가속기의 끝단은 스톱 상태이기 때문에  $\text{Be}^{2+}$ 은 상대적으로 음극인 끝단을 향해 한 번 더 가속하게 된다.

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

$^{10}\text{Be}$ 은  $^9\text{Be}$ 과 굴절률이 달라 GIC까지 이동할 수 있는데, 이때 동중원소인  $^{10}\text{B}$ 도 같이 이동

하게 된다.  $^{10}\text{B}$ 은 B의 안정동위원소로 자연계 B 중 19.9%나 존재하므로 극미량의 불안정 동위원소인  $^{10}\text{Be}$  측정에서 반드시 제거되어야 한다.  $^{10}\text{Be}$ 과  $^{10}\text{B}$ 은 Electrostatic deflector (ESA)에 있는 Energy Absorbing Foil ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )을 통과하며  $\text{Be}^{2+}$ 에서  $\text{Be}^{4+}$ 로,  $\text{B}^{2+}$ 에서  $\text{B}^{4+}$ 로 각각 전자를 2개씩 잃게 되며 속도가 감소하는데 이때 양성자가 하나 더 많은  $\text{B}^{4+}$ 는 상대적으로 상호반응이 많아  $\text{Be}^{4+}$ 에 비해 속도가 더 감소하여 ESA의 벽에 부딪히고 진공 펌프로 빨려 나가 제거된다. 이렇게 추출된  $^{10}\text{Be}$ 은 최종적으로 GIC에 들어가 d-아이소부탄( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) 가스와 반응하며 전자를 방출하는데  $\text{Si}_3\text{N}_4$  foil에서 제거되지 않은  $^{10}\text{B}$ 과  $^{10}\text{Be}$ 이 잃는 전자의 패턴이 다르기 때문에 GIC의 4개의 감지기를 통해 동중원소를 추가적으로 분리할 수 있다.

GIC에서 검출된  $^{10}\text{Be}$ 의 개수는 패러데이 컵에서 측정된 빔전류를 계산하여 얻은  $^9\text{Be}$ 의 개수와 함께  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 의 비율로 결과값이 나오게 된다. 하지만  $\text{Si}_3\text{N}_4$  foil을 통과하며  $^{10}\text{Be}$ 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  $\text{Be}^{2+}$ 로 뽑아낼 수 있기 때문에  $\text{Si}_3\text{N}_4$  foil을 이용해 가장 큰 동중원소 오염원인 B를 제거해 줄 수 있다.



#### 1.4 Authigenic $^9\text{Be}$ 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  $^{10}\text{Be}$ 만을 구하기 위해서 authigenic 성분과 detrital 성분이 모두 포함되어있는 total  $^9\text{Be}$ 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  $^9\text{Be}$ 의 양을 이용하여 authigenic  $^{10}\text{Be}$ 의 양까지 곧바로 구할 수 있게 되었다.

해양퇴적물에서 베릴륨을 활용한 기존 연구들은 authigenic  $^{10}\text{Be}$ 의 단일 농도보다 authigenic  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  비율을 분석하는 경향을 보여 왔다. 특히 퇴적물의 연대측정 연구에서 단일  $^{10}\text{Be}$  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  $^{10}\text{Be}$ 의 생성률은 거의 유사하기 때문에 남극과 유사한 위도의 다른 연구 지역에서 추출한 meteoric  $^{10}\text{Be}$  농도와 직접적인 비교 연구가 가능하다. 남극지역의 해양퇴적물 코어에 대하여 meteoric  $^{10}\text{Be}$  농도 프로파일을 조사한 기존 연구들에서 meteoric  $^{10}\text{Be}$  농도의 최저수치는 약  $10^5$  atoms/g이며, 열린 해양 환경에서의 meteoric  $^{10}\text{Be}$  농도의 최대수치는 약  $10^8$ - $10^9$  atoms/g로 관찰되었다(Scherer et al., 1998, Sjunneskog et al., 2007).

#### 1.5 In-situ $^9\text{Be}$ , $^{27}\text{Al}$ 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  $^{27}\text{Al}$ 의 농도를 초기의 HF 혼합물의 질량에 보정하여 원자의 개수를 구한다. Be의 경우 농도를 알고 있는  $^9\text{Be}$  carrier를 일정량 넣어주기 때문에 추가적인 측정 없이  $^9\text{Be}$ 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  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ 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 해양퇴적물 분석 연구 및 결과

로스해는 전체 남극저층수(Antarctic Bottom Water, AABW) 부피의 약 40%를 형성하며, 동남극과 서남극 빙상에서 유래한 접지 빙하가 해양으로 배출되는 주요 통로에 해당한다(Orsi et al., 2002; Anderson et al., 2014). 최근의 지질학적 연구들은 서남극빙상(West Antarctic Ice Sheet, WAIS)의 후퇴가 진행되는 현재 상황에서 로스해 지역에서의 해양-빙상 상호작용의 과거 양상을 이해하는 것이 매우 중요함을 강조하고 있다. ANDRILL 1B 코어에서는 약 500만 년에서 100만 년 사이에 해당하는 28회의 빙기-간빙기 주기가 확인되었으며, 일부 퇴적 기록의 공백은 빙하 침식 시기를 반영하는 것으로 해석된다(Naish et al., 2009).

최근 연구에 따르면 로스해 만입부에서의 WAIS 전진과 후퇴는 주로 약 4만 1천 년 주기의 지구 자전축 경사도(obliquity) 변화에 의해 조절되었고, 이러한 주기성은 중기 브루네스 전이기(Brunhes transition, ~0.43 Ma)까지 지속되었다(Ohneiser et al., 2023). 지난 100만 년 동안 WAIS의 완전한 붕괴에 대한 증거는 불확실하지만, ANDRILL 1B 코어에 기록된 빙기-간빙기 반복성은 로스 빙붕이 부유 상태와 접지 상태를 반복적으로 오갔음을 시사하며, 이는 지구 공전 궤도 요소 변화와 연동된 것으로 보인다(McKay et al., 2012). 또한 중기 플라이스토세 전이기 전후로 로스해는 급격한 해양환경 변화를 겪었고, 이는 대륙 주변부 퇴적 양상에 큰 영향을 미쳤다.

그러나 혹독한 환경과 연대 설정의 어려움으로 인해 이 지역의 빙상 변동 연구는 최근 수십만 년에 국한되어 있으며, 연속적인 고환경 기록은 매우 부족하다. 대륙붕 퇴적물은 빙하의 반복적 덮임으로 층서 연속성이 훼손되는 반면, 대륙사면과 대륙대 퇴적물은 보다 연속적인 고환경 기록을 제공할 수 있다. 본 연구는 로스해 대륙대에서 회수한 퇴적물 코어(RS15-LC47)를 이용해 중기 플라이스토세 이후의 고해양 환경 변화를 규명하고자 하였으며, 자기감수율(MS), 총유기탄소(TOC), C/N 비(C/N ratio), 탄산칼슘( $\text{CaCO}_3$ ), 생물기원 규소(biogenic silica), 퇴적학적 특성, 그리고 authigenic Be 동위원소( $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ )를 종합적으로 분석하여 남극 대륙 주변부에서의 고환경 조건과 빙상 거동을 재구성하는 것을 목표로 한다(그림 7).

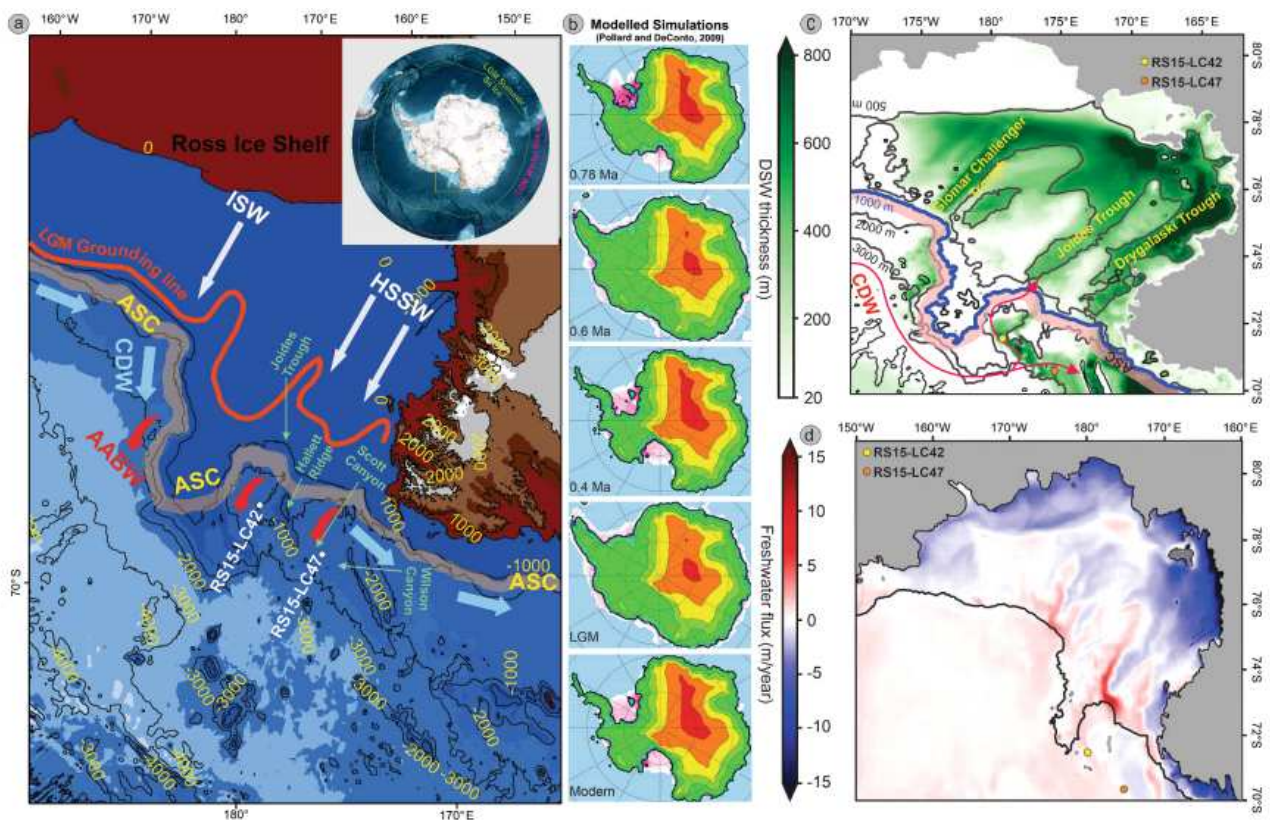


그림 7 로스해의 LC 47 인근 지역 해류와 빙권 변화 모습 예측 모식도.

RS15-LC47 퇴적물 코어에서 측정된 MS는 심도에 따라 뚜렷한 변화를 보인다(그림 8). 약 750 - 550 ka 구간에서는 뚜렷한 추세 없이 높은 MS 값이 나타나며, 550 - 250 ka 구간에서는 전반적으로 감소한다. 이후 250 ka 이후 구간에서는 MS 변동성이 다시 크게 증가한다. 이러한 변화 양상은 RS15-LC42 코어에서 관찰된 MS 변화와 잘 일치하며, 두 코어 모두에서 중간 구간의 낮은 MS 값은 위글 매칭을 위한 기준 층서로 활용되었다. 연대 보정된 MS 값 역시 두 코어 간에 높은 일치도를 보인다. RS15-LC47 코어의 MS 값은 모래 함량과 약한 상관관계를 보이지만 전반적으로는 모래 비율이 증가할수록 MS가 증가하는 경향을 나타낸다.

암상학적으로 해당 코어는 점토와 실트가 우세하며, 입도 분석 결과 역시 실트와 점토가 주된 입자 크기로 확인되었다. 코어 전반에 걸쳐 IRD (Ice Rafted Debris)와 사질, 이질 퇴적층이 반복적으로 나타나며, 특히 후기 플라이스토세(250 ka 이후)에 IRD가 풍부한 층이 두드러진다. 대부분 구간에서 생물교란 흔적이 관찰되지만, 약 500 - 700 ka에 해당하는 720 - 1040 cm 구간에서는 평행 엽리와 사층리 구조가 발달하며, 밀리미터 규모의 단층 구조도 확인된다.

$\text{CaCO}_3$ , TOC, C/N, 오팔,  $\text{Ba}_{\text{ex}}$ 의 심도별 변화는 750 - 550 ka 구간에서  $\text{CaCO}_3$ , TOC, C/N 값이 가장 높게 나타나며, 이후 감소하지만 여전히 변동성을 보인다(그림 9). 반면 오팔은 250 ka 이후 증가하고 변동성이 커진다.  $\text{Ba}_{\text{ex}}$ 는 750 - 550 ka 구간에서 상대적으로 낮은 값을 보이는데, 이는 이 시기에 TOC는 높지만 다른 생산성 지표들은 낮았음을 의미한다. 반응상  $^{10}\text{Be}$ 와  $^9\text{Be}$  농도 및  $(^{10}\text{Be}/^9\text{Be})$  비는 후기 플라이스토세로 갈수록 증가하는 경향을 보이며, 550 - 750 ka 구간에서 가장 낮다. 특히  $(^{10}\text{Be}/^9\text{Be})$ 와  $^{10}\text{Be}$ 는 MS와는 반대 경향을 보이고, 250 ka 이후에는 오팔과 TOC 변화와 잘 일치한다.

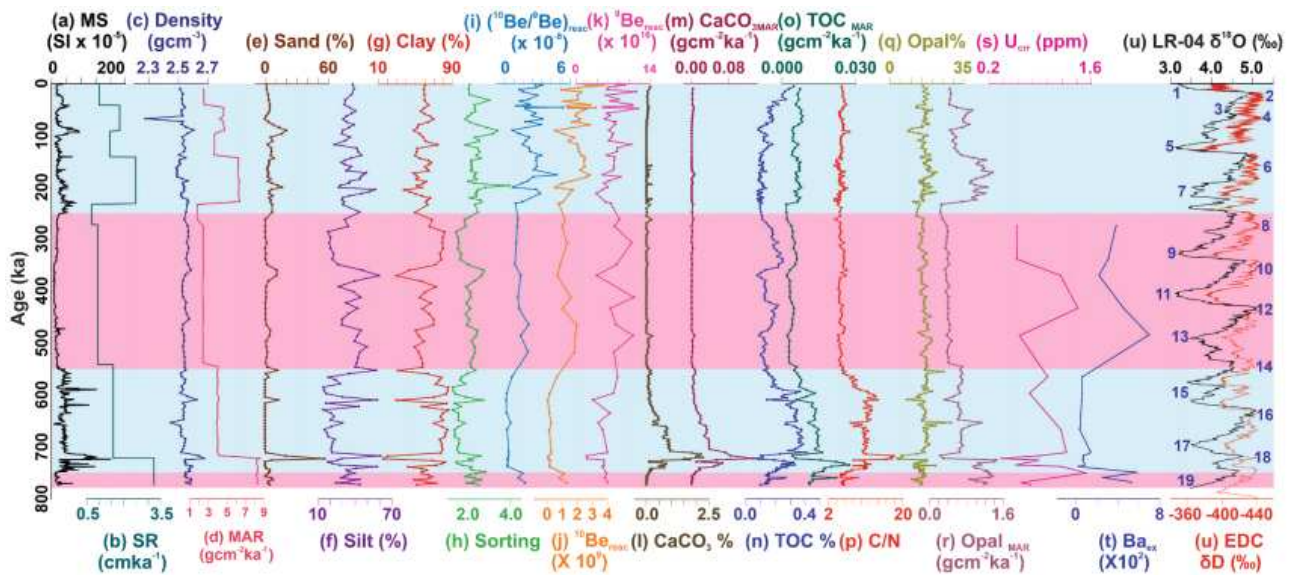


그림 8 LC47에서 분석한 Be 동위원소 정보와 기타 프록시와의 비교 분석

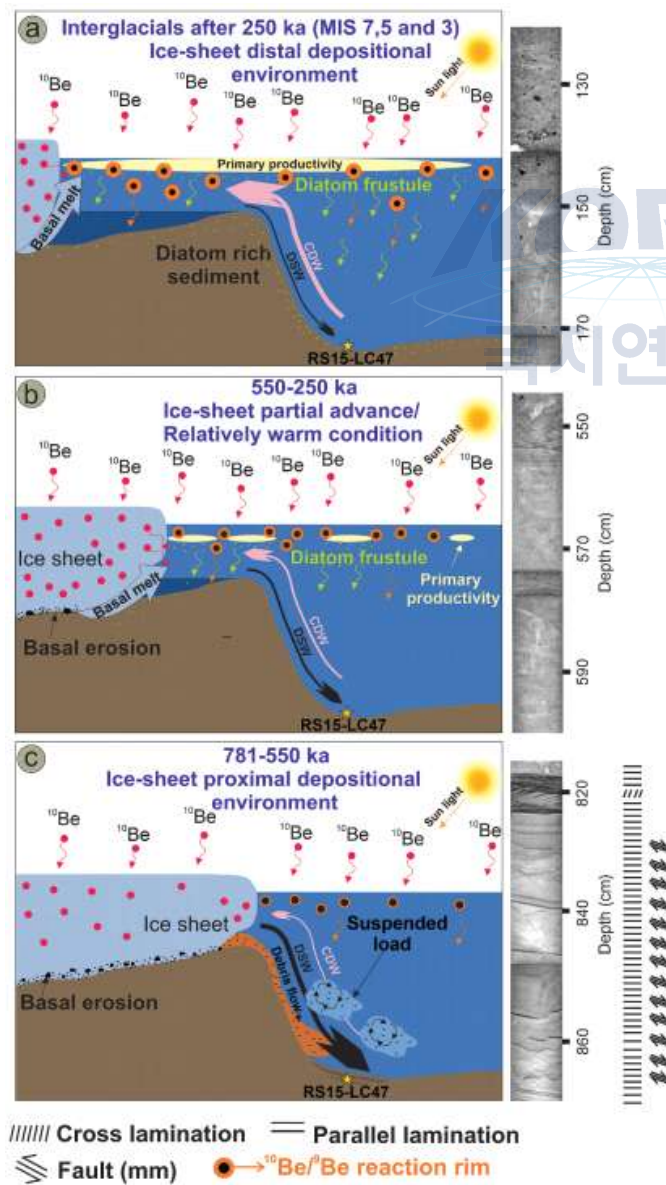


그림 9 MS, 오팔, TOC 변화와 빙권 변화에 따른 Be 동위원소 농도 변화 양상

## 2.2 육상 빙하지형 분석 연구 및 결과

### (가) 빙하화산상호작용(캠벨빙하와 멜버른 화산)

지구 기후 변화와 이에 따른 빙하 질량 변화 및 해수면 상승을 예측하기 위한 수치 모델링 연구는 과거 빙하 규모 변화에 대한 정량적이고 신뢰성 있는 이해를 토대로 수행되어야 한다. 그러나 많은 기존 예측 모델은 ‘한랭한 빙기에는 빙하가 성장하고, 온난한 간빙기에는 빙하가 후퇴한다’는 단순한 상관관계를 전제로 시나리오를 구성해 왔으며, 이러한 가정은 실제 빙하의 복합적인 반응을 충분히 반영하지 못해 모델의 정확도와 신뢰도를 저하시킬 가능성이 크다(Robinson and Dowsett, 2010). 이를 보완하기 위해 해양 퇴적물 코어와 빙하 코어에서 다양한 지시자를 지역적으로 분석하여 고기후 및 고환경을 복원하려는 연구가 진행되어 왔으나, 확보된 정보는 여전히 제한적이다.

이러한 제약을 극복하고 빙하의 수직적 두께 변화와 3차원적 부피 변화를 정량적으로 복원하기 위해, 육상 빙하지형을 구성하는 암석 표면에서 우주선유발 동위원소를 활용한 노출 연대 측정 기법이 중요한 대안으로 활용되고 있다(Lal, 1991; Balco et al., 2008). 최근 동위원소 추출 기술과 분석 해상도의 향상으로 측정 및 계산 과정에서의 오차가 크게 감소하였으며, 보정 시료와 보정 방법의 발전을 통해 보다 정확한 노출 연대 산출이 가능해졌다(Lifton et al., 2014). 더 나아가 복수 핵종의 우주선유발 동위원소를 동시에 분석하여 비교하는 ‘단순 노출 연대’ 판별 기법은 가장 최근의 빙하 후퇴 시기를 명확히 제약할 수 있는 중요한 수단으로 주목받고 있다.

남극 대륙은 막대한 빙권을 보유하고 있어 전 지구적 해수면 변화에 가장 큰 영향을 미칠 잠재력을 지닌 지역이며, 기후 변화에 민감하고 빠르게 반응하여 전 지구적 상호작용을 유발하는 핵심 지역이다. 특히 서남극빙상(WAIS)은 상대적으로 얇은 두께와 해수면 이하에 위치한 빙상 기저 특성으로 인해 해수면 상승에 매우 민감하게 반응한다(Bamber et al., 2009). 또한 서남극빙상 하부에는 다수의 활화산이 분포하고 있으며, 이들 화산에서 발생하는 지열은 현재에도 빙하 질량 감소를 유도하고 있다(de Vries et al., 2018). 빙하 질량 감소에 따른 지각 반응은 화산 활동을 오히려 촉진시켜 추가적인 빙하 축소를 유발하는 양의 피드백 메커니즘을 형성할 수 있어, 향후 해수면 변화에 중대한 영향을 미칠 위험 요소로 인식되고 있다(Yao and Wortmann, 2022).

반면 동남극빙상(EAIS)은 두꺼운 빙상으로 덮여 있어 화산 활동의 흔적이 외부로 드러나는 경우가 드물며, 화산 활동에 따른 빙하 축소 사례 역시 제한적으로 보고되어 왔다. 그러나 최근 빙하 후퇴로 노출된 동남극 빅토리아 랜드 지역에서는 화산 활동과 빙하 변화 간의 상호작용을 보여주는 지질학적 증거들이 확인되고 있다(Smellie et al., 2018). 본 연구는 이러한 동남극 지역에서의 과거 빙하 - 화산 상호작용을 규명하고, 이를 통해 도출된 인과관계와 상관관계를 바탕으로 향후 서남극빙상에서 발생할 수 있는 유사한 상호작용을 예측하는 데 기초 자료를 제공하고자 한다. 특히 캠벨 빙하 주변 빙하지형에서 확인된 단순 노출 연대 결과는 빙하 두께 감소와 후퇴 과정을 보다 정확하고 정밀하게 복원할 수 있음을 보여주며, 멜버른 화산의 국지적 화산 활동이 기후 요인과 무관하게 빙하의 급격한 후퇴를 유도할 수 있음을 입증하는 중요한 사례가 될 것으로 기대된다.

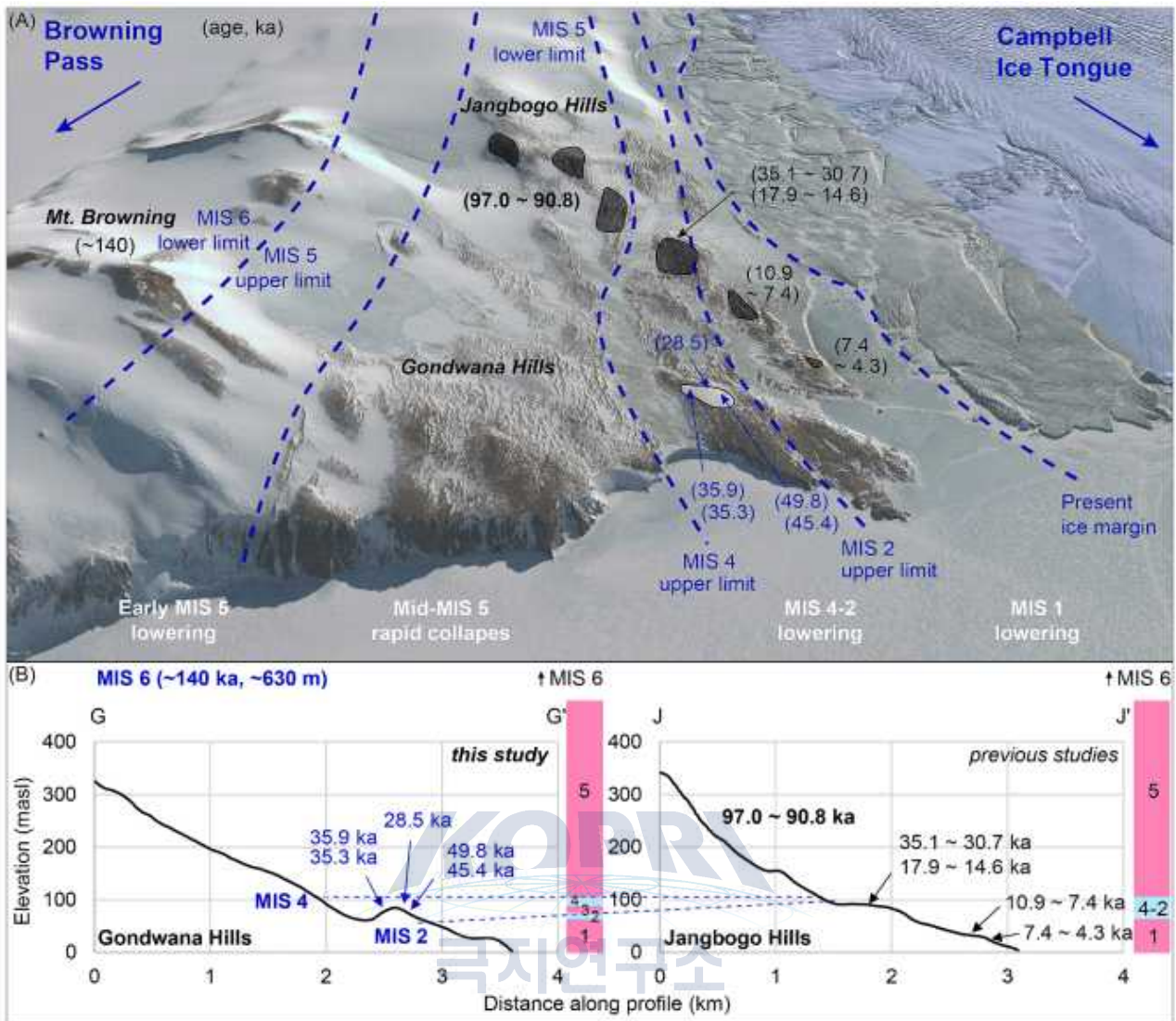


그림 10 캠퍼빙하의 소모로 발달한 빙하지형 모레인, 기반암 노출지역의 우주선유발 동위원소 in-situ  $^{10}\text{Be}$  노출연대 분석 결과

기존의 캠벨 빙하 모레인 연구는 MIS 5 중반(97.0 - 90.8 ka, 320 - 150 masl)에 해당하는 단순 노출 연대 결과를 바탕으로, MIS 6 시기의 빙하 두께가 MIS 4 시기보다 더 두꺼웠을 가능성을 제시한 바 있다(Rhee et al., 2019; 그림 10). 그러나 MIS 4 이후의 빙하 변화에 대해서는 겉보기 노출 연대(apparent exposure age)에 주로 의존해 왔기 때문에, 빙하 두께 변화에 대한 정량적이고 연속적인 재구성에는 한계가 있었다. 본 연구에서는 기반암에서 확보한 MIS 3 시기(49.8 - 35.3 ka, 87 - 78 masl)에 해당하는 단순 노출 연대 자료를 추가함으로써, 마지막 빙기 전반에 걸친 빙하 두께 감소 양상을 이전보다 훨씬 정밀하고 신뢰성 있게 복원할 수 있었다.

연구 결과, 신생대 제4기 후반에 걸쳐 캠벨 빙하의 두께가 지속적으로 감소해 왔음이 명확히 확인되었다. 특히 MIS 4 시기에는 국지적 마지막 최대 빙하기(Local Last Glacial Maximum, LLGM, 150 - 90 masl)에 해당하는 비교적 두꺼운 빙하가 존재했으나, 이후 MIS 3과 MIS 2를 거치며 빙하 축소가 지속적으로 진행되어, MIS 2의 전지구적 마지막 최대 빙하기(LGM, 78 - 41 masl) 시기에는 현저히 얇아진 빙하 두께가 나타났다. 이는 기존에 제시되어 온 ‘마지막 빙기 동안 한랭한 기후로 인한 빙하 두께의 성장’ 혹은 ‘한랭하지만 건조한 환경으로 인해 빙하 두께가 정체되었다’는 해석과는 상반되는 결과로, 마지막 빙기 동안에도 캠벨 빙하의 두께는 전반적으로 감소하였다는 새로운 해석을 요구한다.

더 나아가 캠벨 빙하의 거동은 기후, 해양 조건, 지형 변화 등 일반적으로 빙하 질량 변화를 지배하는 요인들과 비교했을 때 일관되지 않거나 역설적인 반응을 보였다. 이는 빙하 변화가 광역적인 기후 요인보다는 화산 활동과 같은 국지적이고 일시적이지만 영향력이 큰 요인에 의해 상대적으로 크게 조절되었음을 시사한다. 특히 MIS 5 중반(97.0 - 90.8 ka)과 MIS 3 시기(49.8 - 35.3 ka)에 관찰되는 급격한 빙하 붕괴와 두께 감소는 해당 시기에 기온이 오히려 하강하고 있었던 점과 대비되어, 기후 변화와 상반되는 빙하 반응을 보여준다.

이러한 시기들은 캠벨 빙하 인근에 위치한 뮐버른 화산의 주요 분출 시기(123.6 - 90.7 ka 및 50.0 - 35.1 ka)와 잘 일치하며, 빙하 코어에서 화산재 층이 현저히 증가한 시기와의 대응된다(그림 11). 이는 빙하 - 화산 상호작용이 실제로 작동했을 가능성을 강하게 뒷받침한다. 또한 연대학적 증거뿐만 아니라 빙하화산체의 형태, 모레인의 구성 물질 등 지형·지질학적 증거 역시 이러한 해석을 지지한다. 본 연구 결과는 기후, 해양, 지형과 같은 전통적인 지배 요인 외에도, 화산 활동과 같은 국지적·일시적 요인이 빙하 규모 변화에 중대한 영향을 미칠 수 있음을 강조하는 중요한 사례로, 향후 빙하 변화 예측 모델의 고도화에 의미 있는 기초 자료로 활용될 것이다.

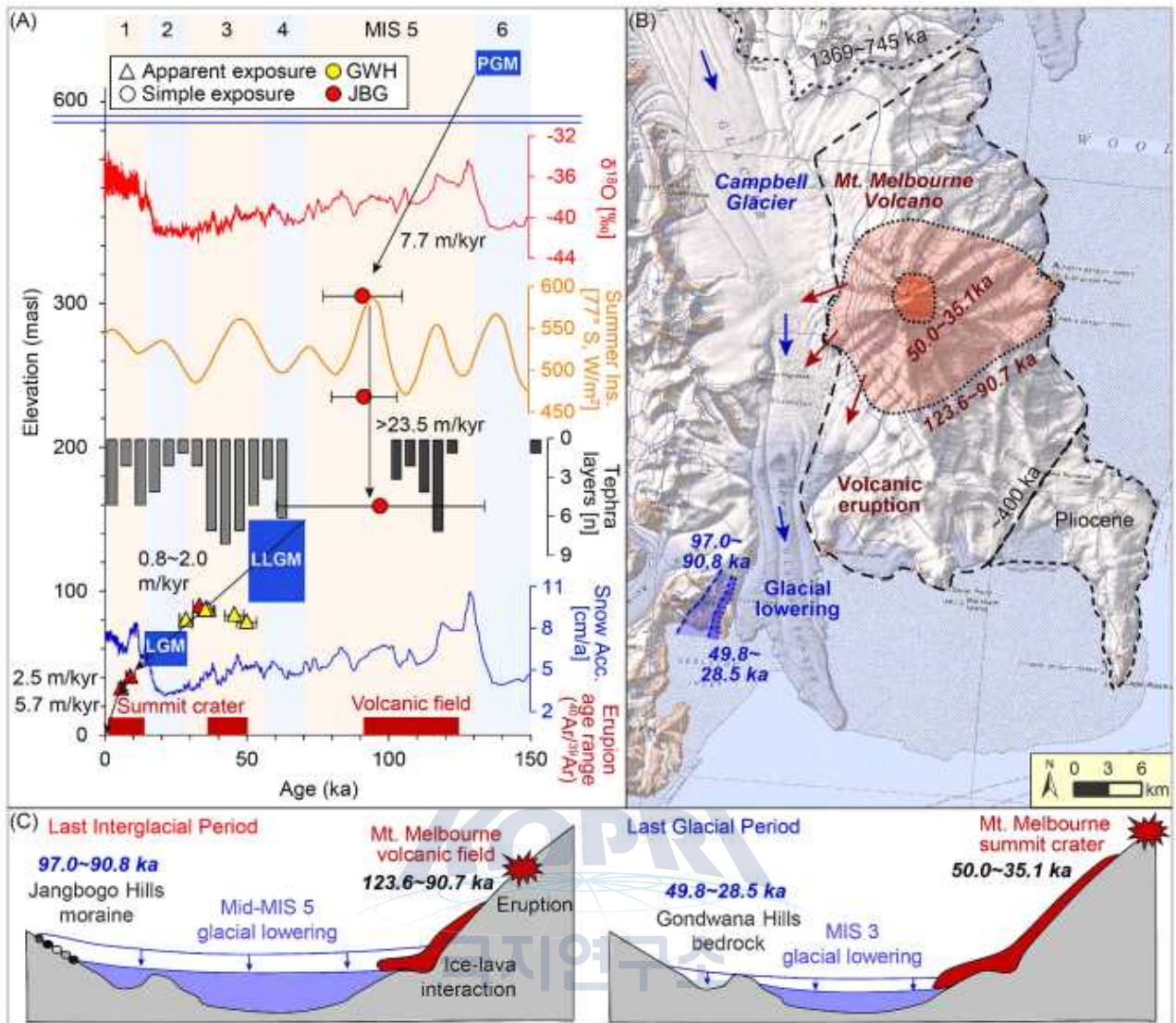


그림 11 기온 변화와 다르게 반응하는 캠프벨 빙하의 두께 변화 기록. 급격한 빙하 소모가 나타난 시기에 화산재나 용암 분출의 시기와 매우 유사하게 나타난다.

### (나) 테라노바 빙봉 복원

남극은 암권, 빙권, 수권, 대기가 상호작용하는 지구 시스템의 핵심 지역으로, 이들 요소 중 하나의 미세한 변화도 연쇄적인 반응을 통해 전 지구적 환경 변화를 유발할 수 있다. 특히 남극 빙상의 질량 변화는 해수면 변동과 해양 순환에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 과거 빙하 거동을 복원하는 연구는 미래 기후 변화를 예측하는 데 필수적이다. 로스해 서부 연안에 위치한 빅토리아 랜드는 마지막 빙기 동안 확장된 해양 기반 빙상이 분포했던 지역으로, EAIS의 과거 변화 과정을 규명하는 데 중요한 기록을 제공한다.

그동안 이 지역의 빙하 변화는 주로 해양 퇴적물의  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$  연대와 환경 지시자를 통해 수평적 빙하 확장과 후퇴를 중심으로 해석되어 왔다. 그러나 이러한 접근은 빙하 두께 변화, 특히 삭박에 따른 수직적 변화에 대한 직접적인 제약이 부족하다는 한계를 가진다. 이로 인해 마지막 빙기 동안 기온 하강에 따라 빙하가 두꺼워졌다는 가정이 널리 받아들여져 왔으나, LLGM에 대한 명확한 규명은 이루어지지 않았다.

본 연구는 지형·지질·연대학 자료를 종합하여 테라 노바 만 일대 빙하의 과거 두께 변화를 재구성하고, 빙하들이 확장·융합하여 형성된 ‘테라 노바 빙상’의 발달 과정을 규명하고자 한다 (그림 12). 해저 지형은 빙상과 빙봉의 공간적 범위를, 케이프 워싱턴 반도의 육상 지형은 빙하 두께 변화의 시기적 진화를 제약하며, 이를 통해 남극 빙하 거동이 기후와 해양뿐 아니라 다양한 환경 요인의 복합적 상호작용 속에서 변화해 왔음을 밝히고자 한다.

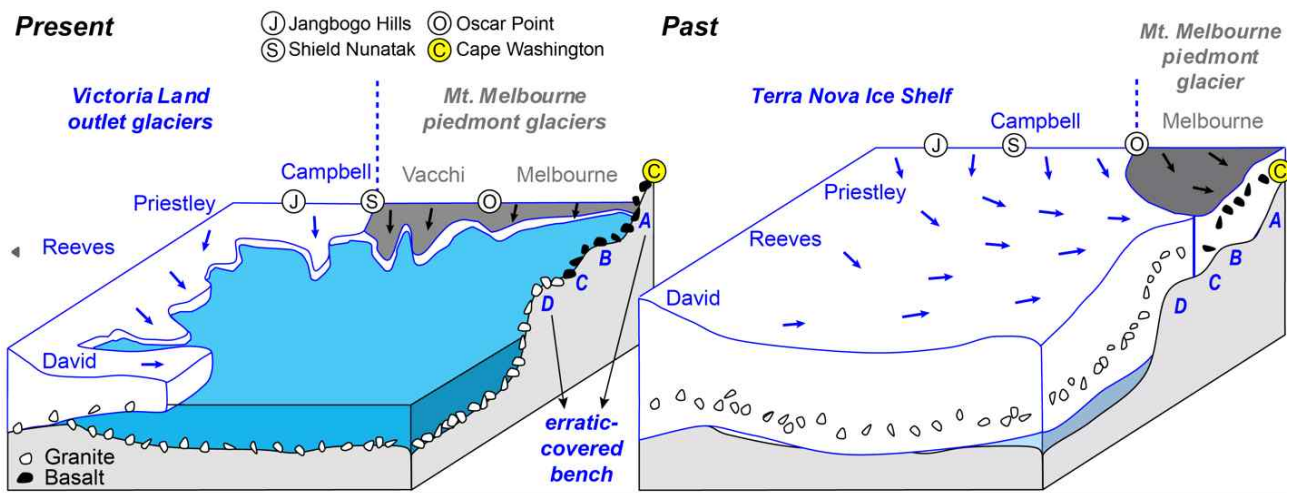


그림 12 현재와 과거의 테라노바 만 내 빙권 변화 유추 모습

테라노바 만 해저 지형 분석 결과, 표면 거칠기 값은 0~268 범위로 평탄한 지형부터 고기복 지형까지 다양하게 분포하며, 만을 가로지르는 남서 - 북동 방향의 세 개의 주요 높은 거칠기 수치가 확인되었다. 북부 해역에서는 소규모의 복잡한 지형들이 발달해 개별 빙하의 흐름 방향을 구분하기 어려운 반면, 남부 해역에서는 BPI 분석을 통해 -245에 이르는 해구와 최대 853의 능선이 뚜렷이 나타나 빙하 배수 체계와 흐름 경로가 명확하게 구분되었다.

케이프 워싱턴 반도에서 채취한 빙하성 퇴적물에 대한  $^{10}\text{Be}$  -  $^{26}\text{Al}$  우주선유발 동위원소 노출 연대 측정 결과, 최고 고도 시료에서 약 54 ka의 단순 노출 연대가 확인되었으며, 이는 MIS 3 이전 빙하 후퇴를 지시한다. 이후 고도가 낮아질수록 10.4~5.2 ka의 연속적인 노출 연대가 나타나 빙하의 점진적인 소모 과정을 보여준다. 특히 두 핵종의 비율 분석은 일부 시료가 단순 노출 조건을 만족함을 보여주어 빙하 두께 변화 복원 연도 결과의 신뢰성을 높인다.

이 자료를 바탕으로 테라노바 만 내부에 나타나는 분출빙하들인 클라크, 데이빗, 리브, 프리슬리, 캠벨 빙하 및 멜버른 화산 주변 산록 빙하가 합쳐진 과거의 테라노바 빙상/빙봉을 재구성하였다(그림 13). 남서부에서 유입된 대규모 빙하 흐름은 드라이갈스키 해곡을 따라 분출되며 빙상 내부의 응력을 증가시켰고, 이로 인해 북부 소규모 빙하들의 흐름 방향이 북동쪽으로 극류하게 되었다. 특히 케이프 워싱턴의 현무암·유문암 기반암 위에 나타난 화강암질 빙하성 퇴적물은 내륙 기원의 빙하가 과거 반도를 뒤덮으며 로스해로 흘러나갔음을 시사한다.

종합적으로, 테라 노바 지역의 빙상은 마지막 빙기 동안에도 건조한 환경 영향으로 지속적인 두께 감소를 겪었으며, LLGM은 LGM 이전에 형성된 것으로 해석된다. 가장 급격한 빙하 소모는 홀로세 중기에 발생했으며, 이는 해수면 상승이나 기온 변화보다 로스 빙봉의 접지선 후퇴에 따른 해양빙상 불안정성(MISI)의 영향이 컸음을 보여준다.

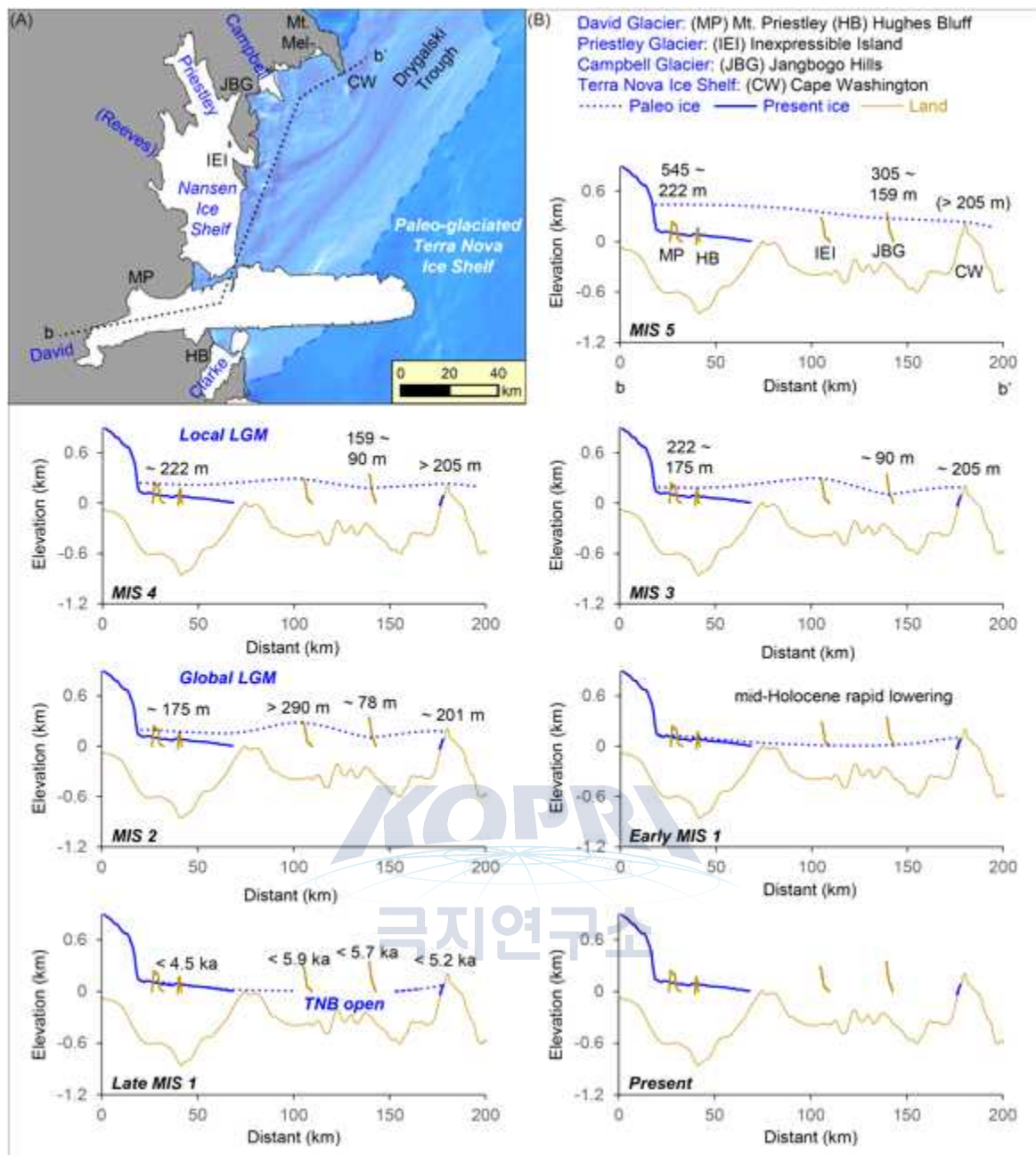


그림 13 우주선유발 동위원소 노출연대 방법을 이용해 테라노바 만 내부 육상 노출 지역의 빙하 두께 변화 복원 기록

## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

| 성과목표                                                                        | 세부목표 |                         | 평가지표(핵심성과 스펙)                                            | 검증방법                                    | 가중치 (%) | 달성도 (%) |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------|---------|
| 1. 육상 빙하 환경 변화 프록시 분석 및 연대측정 (in-situ $^{10}\text{Be}$ , $^{26}\text{Al}$ ) | 1-1  | 시료 분석 및 동위원소 추출 과정 평가   | - Be 분석 실행을 통해 겔보기 연대 신뢰도 평가<br>- 매물 여부 분석을 위한 다핵종 분석 활용 | - 학술회의 발표<br>- 논문 투고<br>- 분석 결과 제시(데이터) | 30      | 100     |
|                                                                             | 1-2  | 분석 결과를 활용한 빙하 거동 해석     | - 계산 결과를 이용한 빙하 범위 변화 복원, 도식화                            |                                         | 30      |         |
| 2. 해양퇴적물 내 빙해양 환경 변화 프록시 분석 (meteoric $^{10}\text{Be}$ )                    | 2-1  | 시료 분석 및 동위원소 추출 과정 평가   | - ICP 및 AMS 결과를 이용한 동위원소 추출도 평가                          |                                         | 20      | 100     |
|                                                                             | 2-2  | 분석 결과를 활용한 빙해양 환경 변화 해석 | - 계산 결과를 이용한 빙붕 및 해빙 거동 변화 복원, 도식화                       |                                         | 20      |         |

- Rhee, H. H., Lee, M. K., Seong, Y. B., Kim, S., Lee, J. I., Yoo, K. C., & Yu, B. Y. (2025). Glaciovolcanic processes between the Campbell Glacier and Mt. Melbourne Volcano, Antarctica: ICE and FIRE. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 657, 112611.
- Dash, C., Seong, Y. B., Singh, A. K., Lee, M. K., Lee, J. I., Yoo, K. C., ... & Yu, B. Y. (2025). Mid-to-late Pleistocene Depositional Environments at the Ross Sea Continental margin: Implications for Antarctic Ice Sheet Dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 113355.
- 이현희. (2025). Deglacial history of Campbell Glacier, Antarctica, during the last glacial period. *지질학회지*, 61(3), 247-261.
- Rhee, H. H., Yi, S. B., Lee, M. K., Seong, Y. B., & Yu, B. Y. (in production, proof). Progressive Thinning of Grounded Ice Sheet in Terra Nova Bay, Antarctica, During the Late Quaternary. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, XX. (10.1002/jgo2.70002)
- SCI(E) 3개 (mrnIF 80 이상 2개) / SCOPUS 1개

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

해양 퇴적물 코어에서의 authigenic  $^{10}\text{Be}$  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 장보고과학기지 하계 활동에서 채취한 육상 빙하지형 시료와 테라노바 만, 빅토리아 랜드 지역의 연구 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 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보



## 제 7 장 참고문헌

- Anderson, J. B., Conway, H., Bart, P. J., Witus, A. E., Greenwood, S. L., McKay, R. M., ... & Stone, J. O. (2014). Ross Sea paleo-ice sheet drainage and deglacial history during and since the LGM. *Quaternary Science Reviews*, 100, 31–54.
- Balco, G., Stone, J. O., Lifton, N. A., & Dunai, T. J. (2008). A complete and easily accessible means of calculating surface exposure ages or erosion rates from  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  measurements. *Quaternary geochronology*, 3(3), 174–195.
- Bamber, J. L., Riva, R. E., Vermeersen, B. L., & LeBrocq, A. M. (2009). Reassessment of the potential sea-level rise from a collapse of the West Antarctic Ice Sheet. *science*, 324(5929), 901–903.
- Bourles, D., Raisbeck, G. M., & Yiou, F. (1989).  $^{10}\text{Be}$  and  $^9\text{Be}$  in marine sediments and their potential for dating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(2), 443–452.
- de Vries, M. V. W., Bingham, R. G., & Hein, A. S. (2018). A new volcanic province: an inventory of subglacial volcanoes in West Antarctica.
- Di Nicola, L., Baroni, C., Strasky, S., Salvatore, M. C., Schlüchter, C., Akçar, N., ... & Wieler, R. (2012). Multiple cosmogenic nuclides document the stability of the East Antarctic Ice Sheet in northern Victoria Land since the Late Miocene (5 - 7 Ma). *Quaternary Science Reviews*, 57, 85–94.
- Ditchburn, R. G., & Whitehead, N. E. (1994). The separation of  $^{10}\text{Be}$  from silicates. In *Third workshop of the South Pacific Environmental Radioactivity Association* 4–7.
- Gosse, J. C., & Phillips, F. M. (2001). Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quaternary Science Reviews*, 20(14), 1475–1560.
- Higgins, S. M., Hendy, C. H., & Denton, G. H. (2000). Geochronology of Bonney drift, Taylor Valley, Antarctica: evidence for interglacial expansions of Taylor Glacier. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 82(2–3), 391–409.
- Kim, E., Seong, Y. B., Rhee, H. H., Khandsuren, P., Yu, B. Y., & Eliades, J. (2024). Cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  Research: Standard Reference Materials and Blank Analysis. *Journal of the Korean earth science society*, 45(6), 624–636.
- 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.
- Lal, D. (1987).  $^{10}\text{Be}$  in polar ice: Data reflect changes in cosmic ray flux or polar meteorology. *Geophysical research letters*, 14(8), 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(2-4), 424-439.

Lifton, N., Sato, T., & Dunai, T. J. (2014). Scaling in situ cosmogenic nuclide production rates using analytical approximations to atmospheric cosmic-ray fluxes. *Earth and Planetary Science Letters*, 386, 149-160.

McKay, R., Naish, T., Powell, R., Barrett, P., Scherer, R., Talarico, F., ... & Williams, T. (2012). Pleistocene variability of Antarctic ice sheet extent in the Ross embayment. *Quaternary Science Reviews*, 34, 93-112.

Naish, T., Powell, R., Levy, R., Wilson, G., Scherer, R., Talarico, F., ... & Williams, T. (2009). Obliquity-paced Pliocene West Antarctic ice sheet oscillations. *Nature*, 458(7236), 322-328.

Oberholzer, P., Baroni, C., Salvatore, M. C., Baur, H., & Wieler, R. (2008). Dating late Cenozoic erosional surfaces in Victoria Land, Antarctica, with cosmogenic neon in pyroxenes. *Antarctic Science*, 20(1), 89-98.

Ohneiser, C., Hulbe, C. L., Beltran, C., Riesselman, C. R., Moy, C. M., Condon, D. B., & Worthington, R. A. (2023). West Antarctic ice volume variability paced by obliquity until 400,000 years ago. *Nature geoscience*, 16(1), 44-49.

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. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C8), 31-1.

Rhee, H. H. (2024). Reconstructing Paleoenvironmental Changes in West Antarctic Glaciomarine Environments Using Meteoric Cosmogenic Nuclide  $^{10}\text{Be}$ . *The Korean Journal of Quaternary Research*, 34(2), 13 - 26. <https://doi.org/10.22658/KOQ.2024.34.2.013>

Rhee, H. H., Lee, M. K., Seong, Y. B., Hong, S., 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.

Rhee, H. H., Seong, Y. B., Lee, M. K., Jeong, A., Dash, C., Lee, J. I., ... & Yu, B. Y. (2022). Spatial variations of authigenic beryllium isotopes in surface sediments of the Antarctic oceans: a proxy for sea ice dynamics and sedimentary environments. *Geosciences Journal*, 26(4), 455-467.

Rhodes, E. J. (2011). Optically stimulated luminescence dating of sediments over the past 200,000 years. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39(1), 461-488.

Robinson, M., & Dowsett, H. (2010). Why Study Paleoclimate? (No. 2010-3021). US Geological Survey.

Scherer, R. P., Aldahan, A., Tulaczyk, S., Possnert, G., Engelhardt, H., & Kamb, B. (1998). Pleistocene collapse of the West Antarctic ice sheet. *Science*, 281(5373), 82-85.

Sjunneskog, C., Scherer, R., Aldahan, A., & Possnert, G. (2007).  $^{10}\text{Be}$  in glacial marine sediment of the Ross Sea, Antarctica, a potential tracer of depositional environment and sediment chronology. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 259(1), 576–583.

Smellie, J. L., Rocchi, S., Johnson, J. S., Di Vincenzo, G., & Schaefer, J. M. (2018). A tuff cone erupted under frozen-bed ice (northern Victoria Land, Antarctica): linking glaciovolcanic and cosmogenic nuclide data for ice sheet reconstructions. *Bulletin of Volcanology*, 80(1), 12.

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., ... & Wieler, R. (2009). Surface exposure ages imply multiple low-amplitude Pleistocene variations in East Antarctic ice sheet, Ricker Hills, Victoria Land. *Antarctic Science*, 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  $^{10}\text{Be}$ . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(4), 535–550.

von Blanckenburg, F., Belshaw, N. S., & O’Nions, R. K. (1996). Separation of  $^9\text{Be}$  and cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  from environmental materials and SIMS isotope dilution analysis. *Chemical Geology*, 129(1–2), 93–99.

Willenbring, J. K., & von Blanckenburg, F. (2010). Meteoric cosmogenic Beryllium-10 adsorbed to river sediment and soil: Applications for Earth-surface dynamics. *Earth-Science Reviews*, 98(1–2), 105–122.

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

Yao, W., & Wortmann, U. G. (2022). Glaciers sparked volcanism that harmed ocean health.

이현희. (2025). Deglacial history of Campbell Glacier, Antarctica, during the last glacial period. *지질학회지*, 61(3), 247–261.