

우주기원 동위원소 연대측정을 이용한
빙하기록 연구

Application of cosmogenic nuclides dating to the
glacial and paleoclimatological study



고 려 대 학 교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극 빙붕 변화 관측시스템 구축 및 제4기 해빙사(deglaciation history) 복원 기술 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2020 . 01 . 27

(본과제) 총괄연구책임자	:	이재일
위탁연구기관명	:	고려대학교
위탁연구책임자	:	성영배
위탁참여연구원	:	이현희
위탁참여연구원	:	Khandsuren Purevmaa

보고서 초록

위탁연구과제명	우주기원 동위원소 연대측정을 이용한 빙하기 연구				
위탁연구책임자	성영배	해당단계 참여연구원수	2	해당단계 연구비	4천만원
연구기관명 및 소속부서명	고려대학교 지리학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	51
<p>연구지역인 로스해 및 로스 빙봉은 남극에서 가장 큰 규모의 빙봉으로 최종 빙기 이후로 부터 홀로세에 걸쳐 현재까지 진행되고 있는 후빙기 빙하 소모에 가장 민감하고 가장 크게 반응하고 있다. 특히 최근의 온난화라고 불리는 기후 변화에 따라 빙하의 소모가 급격해 졌고, 이를 가속화시킬 수 있는 빙봉 소모의 범위, 규모 변화를 모니터링하는 연구의 필요성이 증대되었다. 이러한 빙봉의 변화를 과거 기후 변동의 지시자들과 상관관계, 변화관계를 분석함으로써, 이후의 기후 변화에 따른 빙하 규모 변화의 예측이 중요해졌다.</p> <p>해양의 빙봉은 대기 중의 질소, 산소 원자와 우주선과 반응하여 생성되는 방사성 동위원소 meteoric (authigenic) ^{10}Be이 생성 후 대기 중의 에어로졸에 흡착되거나 강수에 녹아 대륙, 호수, 대양 등의 지표로 침전, 퇴적물 내에 저장된다. 따라서, meteoric ^{10}Be의 거동을 활용하면 빙봉의 수평적 이동 역사와 고기후 환경을 복원할 수 있다. 육상의 빙하는 소모되면서 노출된 암석이 우주선과 반응하며 in-situ ^{10}Be, ^{14}C, ^{26}Al 등의 동위원소가 형성된다. 이 동위원소의 누적량과 비율차를 이용한 지형의 노출/매몰 역사를 통해 빙하의 거동을 복원할 수 있다.</p> <p>이를 위해 각각의 동위원소를 해양퇴적물과 육상퇴적물로부터 추출하여 빙하의 거동 변화 및 고기후 변화를 복원하기 위한 연구를 수행하였다. 해양퇴적물 연구는 라르센, 벨링스하우젠, 로스해 세 지역에서 각 연구의 목적에 맞게 고기후 변화 감지와 고지자기 변동과의 연관성 분석 등을 연구하였다. 육상퇴적물은 로스해의 테라노바 베이 인근 지역에서 2017년 탐사를 통한 샘플 획득을 통해 캠벨, 프리슬리, 데이빗 세 빙하의 거동역사 연구를 수행하였다.</p>					
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 빙하 거동 및 고환경 변화 복원

II. 연구개발의 목적 및 필요성

연구지역인 남극은 최종빙기전성기 (Last Glacial Maximum; LGM) 이후 후빙기를 맞이하며 빙하의 두께와 범위가 점점 축소되어 왔다. 특히, 최근의 온난화로 불리우는 인간의 영향력이 증대됨에 따라 기후 변화는 가속화되고 있으며, 빙하의 축소 속도 역시 증가하고 있는 것으로 밝혀지고 있다. 이에 따라 남극은 세계에서 가장 많은 빙하체적량을 보유하고 있어 가장 민감하게 빙하의 변동이 이루어지고 있으며, 과거 기후 변동의 지시자들을 분석하고, 현재 진행되고 있는 급격한 기후 변화에 따른 빙붕의 변화를 모니터링 하며, 미래의 추가적인 붕괴를 예측할 필요가 있다. 연구지역인 로스해 및 로스 빙붕은 전세계에서 가장 큰 빙하량을 보유하고 있는 빙붕이며, 벨링스하우젠, 라르센 해는 서남극반도로 이어지는 지역에서 마찬가지로 많은 빙하를 보유하고 있는 지역이다.

이와 같은 연구를 위해 두 가지 유형의 우주선 유발 동위원소(meteoric, in situ)는 고기후변화의 추적자로서 매우 유용한 역할을 할 수 있다. Meteoric ^{10}Be 은 대기 중의 질소, 산소 원자와 우주선(cosmic ray)이 반응하여 생성되는 방사성 동위원소로 생성 후 대기 중 먼지에 흡착되거나 강수에 용존되어 대륙, 호수, 대양 등의 지표로 침전, 퇴적물 내에 저장된다. 이와 같은 meteoric ^{10}Be 의 거동을 활용하면, 빙붕의 역사와 고기후 환경을 복원할 수 있기 때문에 빙하성 해양퇴적물 내의 meteoric ^{10}Be 분석 연구는 효과적인 연구방법이 될 수 있다.

Meteoric ^{10}Be 와 달리 in situ ^{10}Be 는 암석의 광물 격자내부 안의 질소, 산소 원자와 우주선이 반응하여 생성되며 노출연대 측정에 사용된다. In situ ^{10}Be 를 활용한 연대측정은 빙하 지형을 대상으로 광범위하게 활용되어져왔다. 특히 빙하에 의해 형성된 후 노출된 지형들을 대상으로 연대를 측정하여 빙하의 움직임을 역으로 추론할 수 있기 때문에 육상에서의 in situ ^{10}Be 를 활용한 노출연대 측정은 빙하의 전진과 후퇴 복원 연구에 적극적으로 활용할 수 있으며 또 다른 방사성 핵종 in situ ^{14}C , 혹은 in situ ^{26}Al 을 함께

사용하면, 겉보기 노출연대 (apparent exposure age)가 아니라 실제 노출연대를 밝혀낼 수 있다는 장점이 있다.

따라서 본 연구의 목적은 로스해 및 다른 남극 해양 지역의 해양퇴적물코어에서의 meteoric ^{10}Be 분석과 로스해, 테라노바 베이 육상지역에서의 in situ $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ 노출연대 측정을 통하여 빙봉의 성장·후퇴·붕괴와 관련된 빙봉의 역사와 고기후 환경을 복원하는 데 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

이 과제의 연구개발 내용을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

- Meteoric ^{10}Be 추출 실험 시행 및 개선
- In situ ^{10}Be 추출 실험 시행 및 개선
- In situ ^{25}Al 추출 실험 시행 및 개선
- In situ ^{14}C 추출 실험 시행 및 개선
- AMS(Accelerated mass spectrometer)를 사용하여 ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al 분석
- 해양 빙하퇴적물 코어 깊이별 meteoric ^{10}Be 농도 분석
- 육상 빙하퇴적물로부터 추출한 in situ ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al 을 이용한 노출연대 측정
- 빙봉 및 빙하의 거동 역사와 고기후 환경 복원
- 논문 투고

IV. 연구개발결과

연구개발 결과를 정리, 요약하면 다음과 같다.

- 1) Meteoric ^{10}Be 추출법을 이용하여 남극의 연구지역들에서 해양퇴적물을 분석하였다.
- 2) In situ ^{10}Be , ^{26}Al 분석을 이용해 로스해 테라노바베이 육상퇴적물에 대한 노출연대 분석을 진행하였다.
- 3) Optically Stimulated Luminances (OSL) 방법을 통해 융기해안(riased beach)의 형성 시기를 밝혀내었으나 논의 중에 있다.

S U M M A R Y

I. Project Title

Applications of CRN (Cosmogenic Radioactive Nuclides) beryllium-10 for glacial-marine sediment study

II. Objective and Importance of the Project

Our study area, Antarctica, have responded sensitively to rapid climate changes during the post-LGM (Last Glacial Maximum) and their thickness and extents have been decreased. Recent Global Warming is being accelerated by increasing anthropogenic affection, and it is also accelerating the decrement of volume of ice on the earth. Since the Antarctica has the most abundant of ice than any other places, the need for monitoring of ice shelf reponses and predicting of future collapse of ice shelf comes up. We first studied on the Ross Sea/Ross Ice Shelf, which has the most abundant of ice on the earth. Other areas on the Bellingshausen Sea, and Larsen Sea also have abundant of ice on the Antarctic Peninsula.

Two types of CRN ^{10}Be (meteoric ^{10}Be , in situ ^{10}Be) are very useful for tracking climate changes. First, meteoric ^{10}Be is produced by reaction between nitrogen and oxygen atoms in atmosphere and then, removed in atmosphere by adsorbing onto particles in atmosphere or dissolving in rainfall, and consequently deposited in surface. With the behavior of meteoric ^{10}Be , it is possible to reconstruct ice shelf history and paleo-climate, so meteoric ^{10}Be analysis in glacio-marine sediments can be effective.

Unlike meteoric ^{10}Be , in situ ^{10}Be is produced within mineral lattices of rocks from reacting between cosmic rays and nitrogen or oxygen, which is used for exposure age dating. Exposure dating method using in situ ^{10}Be has been widely used for glacier landform. The method is very useful because inference of past-glacier movement would be possible from the results of exposure dating. Moreover, with in situ ^{14}C , age obtaining from data is not apparent exposure ages but real ages.

Therefore, the purpose of this study is reconstructing ice shelf history and paleo-climate from amphibian cosmogenic data of meteoric ^{10}Be and in situ $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$.

III. Scope and Contents of the Project

This report includes the following research topics.

- Perform experiment for extracting meteoric ^{10}Be from marine sediment.
- Perform experiment for extracting in situ ^{10}Be from erratics.
- Perform experiment for extracting in situ ^{26}Al from erratics..
- Perform experiment for extracting in situ ^{14}C from erratics.
- Analyze ^{10}Be , ^{26}Al , and ^{14}C concentration through AMS (Accelerator mass spectrometry) measurement.
- Reconstruct Larsen C ice shelf history and paleo-climate based on meteoric ^{10}Be concentration change with depth and exposure age dating result using in situ ^{10}Be , ^{26}Al , and in situ ^{14}C
- Submit the result to the journal

IV. Results of research and development

This report includes the following researches and developments.

- 1) We used the developed hybrid method for extracting meteoric ^{10}Be with several study areas on the Antarctic marine.
- 2) We gathered erratic and bedrock samples at several benches on study areas for exposure age datings on Terra Nova Bay, Ross Sea.
- 3) We gathered buried beach pebbles and age dated with OSL method to reveal isostatic rebound (in discussion).

목 차

제 1 장 서론	1
제 2 장 국내외 기술개발 현황	3
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과	7
제 1 절 고려대학교 우주선유발동위원소 베릴륨 실험 수행	7
제 2 절 연구지역별 측정결과 분석.....	18
제 3 절 결론.....	35
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도.....	36
제 5 장 연구개발 결과의 활용 계획.....	37
제 6 장 참고문헌.....	38



표 목 차

표 1 EAP13-GC14A에서의 authigenic ^{10}Be 분석 결과	20
표 2 BS17-GC18에서의 authigenic ^{10}Be 분석 결과	22
표 3 빙봉 지역의 해양퇴적물 코어에서 분석한 고기후 변화와 그에 따른 환경 변화 분석 방법	24
표 4 RS15-LC42의 2019 분석 결과	25
표 5 고지자기 연대를 활용한 ^{10}Be 의 붕괴보정	26

그림 목 차

그림 1 우주선과 대기, 암석 물질의 핵반응으로 생성되는 우주선유발 동위원소	5
그림 2 Stone의 fusion 실험 방법	6
그림 3 퇴적물입자에 흡착 존재하는 베릴륨 (meteoric ^{10}Be)의 형태를 표현한 그림	6
그림 4 이번 연구에 실행한 Hybrid method for extracting meteoric ^{10}Be (Jeong et al., 2018)	8
그림 5 해양퇴적물로부터의 authigenic Be 추출 과정	9
그림 6 Korea University Geochronology Lab.의 in-situ Be/Al 실험 프로토콜	12
그림 7 육상퇴적물/기반암과쇄물로부터의 in-situ Be/Al 추출 과정	12
그림 8 KIST (Korea Institute of Science and Technology)의 6 MV Tandetron AMS (Accelerator Mass Spectrometry)	15
그림 9 EAP13 코어의 authigenic ^{10}Be 분석 결과 비교	19
그림 10 BS17-GC18 코어의 authigenic ^{10}Be 분석 결과 비교	22
그림 11 지난 연구의 LC 42 분석 결과(퇴적상, Be 변화, 고지자기연대측정)	24
그림 12 기존 2016년의 분석 결과와 2019년의 추가 분석결과(사각형: 퇴적물 연구 목적, 삼각형: 고지자기 역전지점 연구 목적)	27
그림 13 육상연구지역의 위성영상지도	29
그림 14 연구지역별 샘플 채취 지점의 항공사진. JBG, IEL, DVD 순서	30
그림 15 상부 3개의 벤치에서 모두 발견된 100 ka에 수렴하는 단순노출연대	32
그림 16 연대측정 결과를 이용한 캠벨 빙하의 변화	33
그림 17 캠벨 빙하의 시기별 고도상한선	34

제 1 장 서 론

지난 연구에서는 실험 방법을 개선하여 대기기원(meteoric) 우주선유발 동위원소 ^{10}Be 중에서도 authigenic 소스만을 추출하여 실험 방식의 신뢰도를 높인 바 있었다. 이러한 방법은 여러 연구에 활용되어 빙봉/빙하의 전진-후퇴 신호를 포착, 이를 바탕으로 그 역사를 복원하고자 하였다. 특히 라르센 해, 벨링스하우젠 해, 그리고 로스 해 등 남극의 여러 지역에서 채취한 해양퇴적물 코어로부터 많은 연구가 진행 중에 있다.

그 중, 라르센 빙봉의 육상과 해양퇴적물에 누적된 우주선 유발 동위원소를 활용하여 기후 변화에 따른 빙봉/빙하의 전진과 후퇴의 신호를 모두 포착하여 그 역사를 복원하였다. 이 연구는 2018년 Quaternary Science Reviews (Jeong et al., 2018)에 출판되어 그 실험 방법과 연구 내용에 관하여 입증받은 바 있다. 라스 빙봉은 1990년대 중반과 말, 그리고 2002년에 발생한 대규모 붕괴로 기후변화와 관련하여 많은 사람들이 관심을 갖게 된 지역이다. 또한 아직까지 대규모로 붕괴되지 않았지만 지속적으로 얇아지고 있다는 라스C 빙봉까지 해양퇴적물 코어 및 육상의 모레인 샘플을 분석하여 고기후를 복원한 연구 역시 진행 중에 있다(Shepherd et al., 2003; Jeong et al., 2018).

빙봉의 중요성은 기존의 여러 연구에서 이미 보고되었으며 빙봉이 붕괴되어 떨어져 나갈 경우 육지에서 흘러 나오는 빙상을 지탱해주는 역할을 하지 못하여 빙상 및 빙하의 흐름을 가속화시키게 된다. 이러한 빙하 흐름의 변화는 grounding lines의 후퇴속도를 빠르게 하며 대륙을 덮고 있는 빙하의 질량을 감소시키고 해수면 상승에 영향을 미치게 된다(Rignot et al., 2004; Dupont and Alley, 2005).

빙봉에 대한 연구는 주로 해양퇴적물 코어 내의 퇴적물에 대한 퇴적학적, 지구 물리·화학적, 미생물학적 분석을 통한 연구가 주로 이루어져 왔다. 특히 빙봉의 성장·후퇴·붕괴와 관련된 연구에서는 규조류나 유공충의 종류나 함량, 그리고 분포 패턴 등을 주요 지시자로 사용해왔는데, 해양 퇴적물 내에 규조류나 유공충의 함량이 매우 미미하거나 복잡한 유입경로로 인해 해석이 명확하지 않은 경우가 있었다. 이에 대해 본 연구에서 활용한 meteoric ^{10}Be 는 대기 중으로부터 일정하게 유입되어 해양퇴적물 내에 저장되므로 해당 샘플 코어의 깊이 별 meteoric ^{10}Be 농도변화 추이를 활용한다면 서로 다른 유입경로를 가지는 규조류나 유공충 분석과 더불어 상호보완적으로 빙봉의 성장-후퇴-붕괴와 관련된 빙봉의 역사를 유추할 수 있다. 더욱이 위도가 비슷한 지역에서의 meteoric ^{10}Be 의 생성률은 거의 유사하기 때문에 위도가 비슷한 남극의 다른 지역에서 추출한 meteoric ^{10}Be 농도와도 직접적인 비교가 가능하다는 장점을 가지고 있다.

이러한 연구방법을 이용하여 지난 3년간의 연구를 통해 라르센 해, 벨링스하우젠 해, 로스 해 등 남극의 여러 지역에서 채취한 해양퇴적물 코어로부터 많은 실험이 진행되었으며, 모두 연구가 진행 중에 있다.

로스해 지역에는 동남극 빙상의 빙하들이 흘러나와 로스 빙봉을 이루고 있었으나, 빙하의 후퇴로 인해 현재는 분출빙하들이 육상과 해양의 경계에 나타나고 있다. 이러한 빙하의 후퇴 및 감소로 인해 육상의 남극횡단산맥을 따라 많은 지역들이 노출되었으며 이곳에는 다량의 빙하퇴적물과 기반암이 드러나 있다. 이 노출지역들의 암석을 채취하여 표면에 누적된 우주선유발 동위원소 in-situ 성분의 양을 이용한다면 해당 지형이 언제 노출되었는지 노출연대측정을 알 수 있다.

현재 로스해의 테라노바베이 일대는 남극횡단산맥의 계곡을 통해 수많은 빙하가 흘러 나오고 있으며, 이들은 동남극 빙상의 빙하 유출에 큰 기여를 하고 있다. 이들은 최종 빙기의 전성기(Last Glaciation Maximum-LGM) 당시에 빙봉으로서 합쳐져 로스해를 뒤덮었던 것으로 여겨지며, 현재의 형태까지 후퇴, 축소된 것으로 여겨지고 있다. 해양퇴적물 코어를 이용한 빙봉의 수평적 후퇴 시기와 범위는 기존에 많이 알려져 있었으나, 육상 빙하의 수직적 감소는 최근에서야 우주선유발 동위원소 노출연대측정 방법이 많이 활용되고 있다 (Goehring et al., 2019; Rhee et al., 2019).

2017년 육상 탐사 연구는 이러한 육상 빙하성 퇴적물의 노출 연대측정을 위한 샘플 채취를 목적으로 수행하였다. David glacier, Nansen ice shelf, Reeves glacier, Priestley glacier, Campbell glacier 등을 조사, 육상 빙하성 퇴적물 시료를 채취하였다. 채취한 시료로부터 우주선유발동위원소 in-situ ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al 최대 세가지 핵종을 추출하여 연대측정 및 복합적 퇴적 역사를 확인함으로써 빙하의 거동을 복원하고 고기후를 해석하고자 하였다.

또한, 지형변화의 시기와 변위량을 정확하게 알아내기 위해 빙하의 후퇴로 인한 isostatic rebound로 융기한 해안의 해빈성 퇴적물을 채취하였다. Inexpressible island와 장보고 기지 주변의 해변을 조사하여 지형면을 분류하고 샘플을 채취하였으며, OSL 연대측정을 이용하여 해빈의 생성 시기를 알아냄으로서 isostatic rebound 융기해안의 형성 과정을 연구, 해당 지역의 융기율을 추정해보았다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

우주선 유발 동위원소 ^{10}Be (반감기: 1.387×10^6 년)은 높은 에너지를 가진 우주선이 질소와 산소를 타겟 원소로 대기 중에서 파쇄반응(spallation)을 통해 생성(meteoric ^{10}Be)되거나 지표에 있는 광물의 격자 내에서 파쇄, 뮤온, 열중성자 반응을 통해 생성(in situ ^{10}Be)된다(그림 1). 대기 중에서 생성된 ^{10}Be (meteoric ^{10}Be)는 먼지에 흡착되거나 강수에 용존되어 대륙, 호수, 대양 등의 지표로 침전, 퇴적되며 빙붕이나 얼음에 의해 불규칙하게 축적될 수 있다. 광물 격자 내에서 생성된 in situ ^{10}Be 은 빙하나 눈 등에 의한 매몰이 발생하지 않는 이상 지속적으로 우주선에 노출되므로 시간당 일정한 양이 지속적으로 생성되어 축적된다.

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, Bourles et al.,이 1989년에 제안한 leaching 방법이 가장 많이 사용되는 방법이 가장 많이 사용되고 있는 추세이다(그림 2). 이전 연구에서부터 Hybrid method for extracting meteoric ^{10}Be (Jeong et al., 2018) 을 개발하여 meteoric ^{10}Be 을 추출하는 데 있어 보다 효율적인 1998년에 Stone이 제시한 Fusion 방법과 authigenic 성분만을 추출하기 위해 Bourles의 leaching 방법을 함께 사용하여 왔다.

두 방법의 가장 근본적인 차이는 베릴륨의 authigenic phase만을 선별적으로 추출하는 데 있다. 그림 3에서와 같이 해양퇴적물 내의 ^9Be 은 ^{10}Be 이 퇴적물 입자에 흡착된 형태로만 존재하는 것과 달리 퇴적물 입자 내부에 갇혀 있는 형태로도 존재하게 된다. 베릴륨이 퇴적물에 흡착된 형태로 존재하는 경우, 주로 대기 중에서 생성된 베릴륨이 침전되며 해양을 통과하며 해양의 입자들에 흡착되어 함께 퇴적되는 과정을 거쳐 퇴적물 내에 저장된 'authigenic' 성분이라고 지칭한다. 하지만 입자의 격자 내부에 존재하는 경우는 대륙 및 대기중에서 공급된 퇴적물 입자의 내부에 존재하고 있던 성분이므로 'detrital' 성분이라고 지칭한다. ^{10}Be 을 측정하기 위해 사용되는 AMS (Accelerator Mass Spectrometry)는 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 의 비율을 측정하기 때문에 detrital ^9Be 성분을 제거해주어야 정확한 ^{10}Be 의 값을 알 수 있게 된다.

앞서 베릴륨을 추출하는 실험방식으로 언급한 Bourles와 Stone의 실험방식에서의 가장 큰 차이점은 각기 추출해내는 베릴륨 성분이 다르다는 점이다. Bourles et al.의 경우 단계적인 leaching 실험을 이용하여 베릴륨의 authigenic phase를 분리해내려고 시도하였다. 약산에서부터 점차 강산을 사용하는 단계별 leaching을 시켜 해양퇴적물의 주성분인 탄산칼슘(calcium carbonate)과 그 외 성분들(exchangeable, FeO-MnO)에서 추출된 베

틸륨을 authigenic 성분으로 보았다. 연속적인 leaching 과정에서 강산(HF, H₂SO₄)에 의해 광물까지 녹여 추출한 베릴륨을 detrital 성분, 즉 운반되어 들어 온 퇴적물질의 격자 내에서 생성된 베릴륨이라고 주장하였다. Bourles et al. (1989)의 실험방법은 샘플로부터 authigenic phase를 분리해낼 수 있다는 장점이 있으나 분리해낸 베릴륨이 완전한 authigenic phase인지를 확실히 할 수 없다는 한계가 있으며, leaching 과정이 Stone (1998)의 fusion 방법보다 더 복잡하고, 시간이 오래 걸린다는 단점을 가지고 있다. 반면에, Stone의 실험방법에서는 그림 3의 실험 과정에서 볼 수 있듯이 0.5 - 1 g 정도의 샘플을 완전히 용해시킨 후, 베릴륨을 추출하기 때문에 최종적으로 추출된 Be에는 authigenic phase뿐만 아니라 detrital phase 또한 포함되어 있다는 단점을 가지고 있다.

암석의 내부에서 추출되는 in-situ 성분의 우주선유발 동위원소는 주로 2개 이상의 핵종을 이용하여 빙하의 재진진 역사를 확인하는데 이용한다. 특히 10만년 이상의 빙기/간빙기 패턴을 복수로 경험한 시간 스케일에서는 1,380,000년, 717,000년의 반감기를 갖고 있는 ¹⁰Be과 ²⁶Al을 이용하게 된다(Lal, 1991; Gosse and Phillips, 2001). 반대로 최후빙기로부터의 빙하의 후퇴나 감소를 연구하는데에는 ¹⁰Be과 더불어 상대적으로 반감기가 매우 짧은 ¹⁴C (5,730년)을 이용하게 된다. 이러한 Be-Al, Be-C의 페어를 이용한 연구는 남극에서도 많이 진행되어 왔으나, Al 추출 실험의 어려움과 큰 오차로 인해 Be-Al 실험은 매우 오래된 노출 역사를 갖고 있는 고지대에서 주로 진행되어 왔다(Di Nicola et al., 2012; Oberholzer et al., 2008; Strasky et al., 2009). 이번 연구에서의 모든 육상 빙하성 퇴적물의 연대측정 결과가 대체적으로 MIS 6 ~ Holocene에 걸쳐 나오게 됨에 따라 Be-Al 기술이 지속적으로 이용되었고, 이 과정에서 ²⁶Al의 농도가 매우 낮은(²⁶Al/²⁷Al ≤ 1E-16) 샘플의 테스트를 통해 실험의 오차도 최소화하는데 성공하였다. 이 기술은 현재 출판된 논문을 비롯하여 앞으로 준비중인 모든 육상 연구까지 모두 활용되어 양질의 결과를 제시하였다.

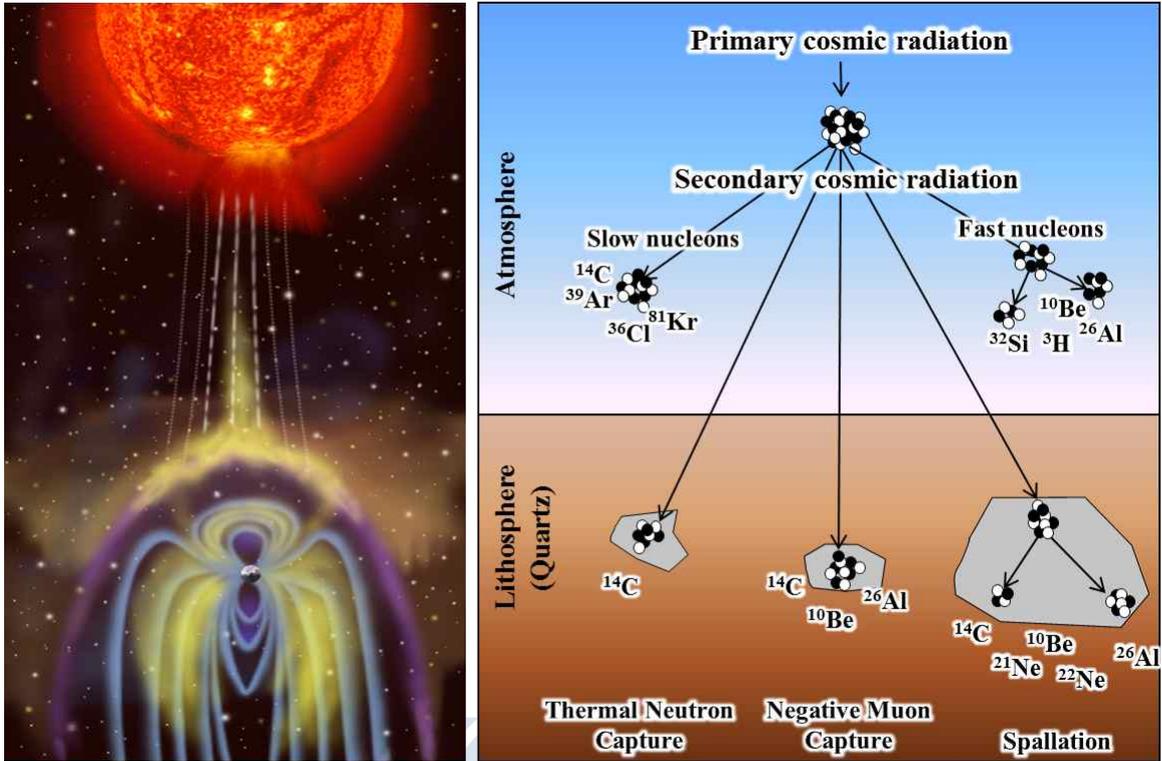


그림 1 우주선과 대기, 암석 물질의 핵반응으로 생성되는 우주선유발 동위원소

극지연구소

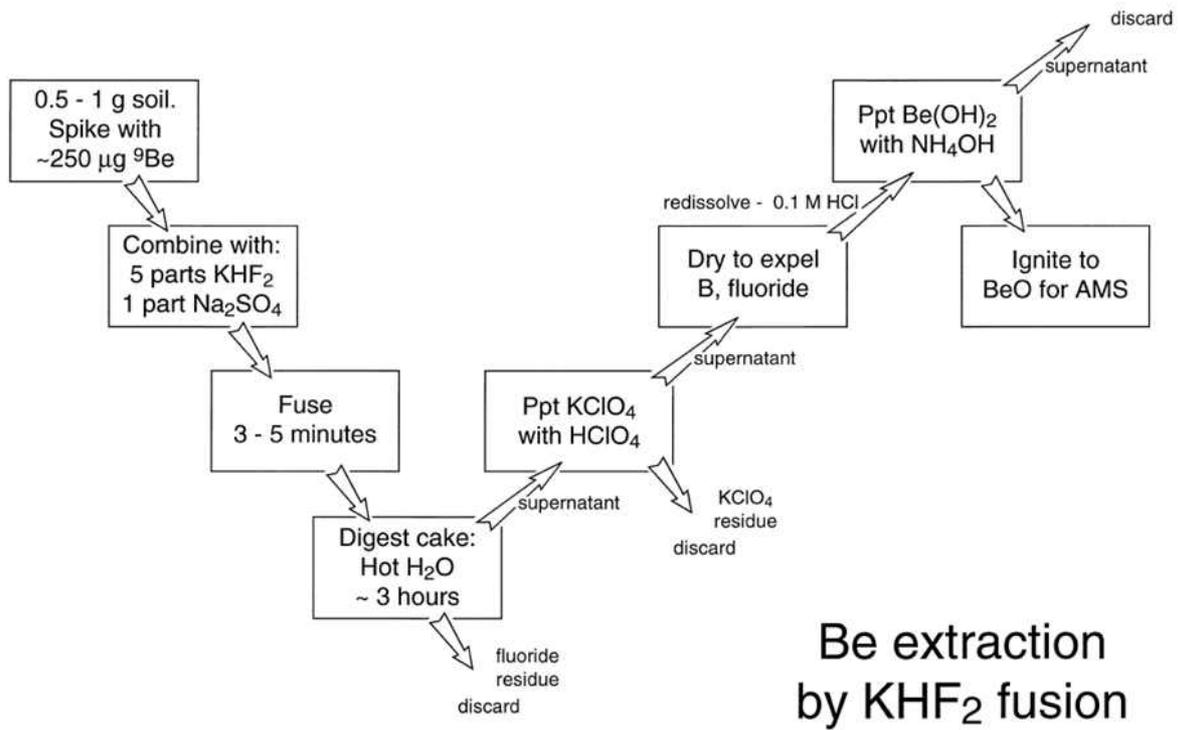


그림 2 Stone의 fusion 실험 방법

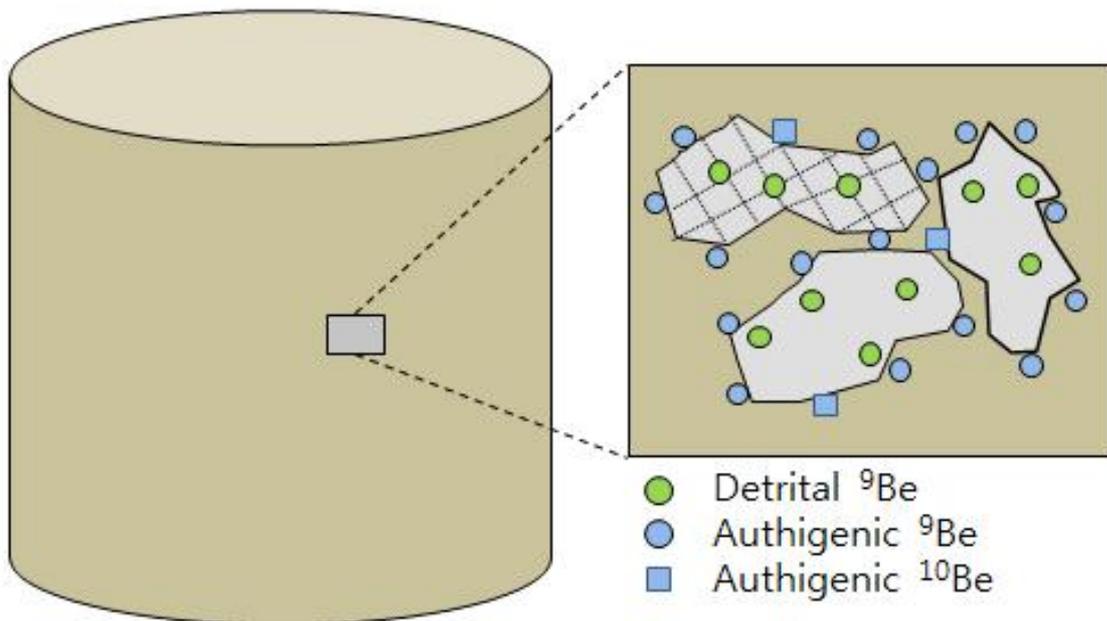


그림 3 퇴적물입자에 흡착 존재하는 베릴륨 (meteoric ^{10}Be)의 형태를 표현한 그림

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 고려대학교 우주선유발동위원소 실험 수행

1.1 해양시료 처리

고려대학교의 해양시료 authigenic ^{10}Be 추출 방식은 Bourles et al. (1989)의 leaching 방법과 Stone (1998) fusion 방법을 기반으로 각각의 방법을 부분적으로 장점을 취합하여 개선한 바 있다 (그림 4). 퇴적물 내의 detrital과의 혼합을 막기 위해 샘플을 계량하기 전 $>200\ \mu\text{m}$ 의 detrital 기원이라고 여겨지는 굵은 입자들을 제거하였으며 authigenic 만을 산에 leaching시켜 수집하였다.

1 g의 샘플을 계량하고 전처리를 위하여 알루미나 도가니에 옮긴 후, $100\ ^\circ\text{C}$ 의 오븐에 하루 동안 건조시킨다. 이후, 유기물의 제거를 위해 $500\ ^\circ\text{C}$ 의 전기 용광로에 최소한 4시간 이상 시료를 산화시켰으며, 50 ml Corning tube에 옮겨준다. 전처리를 마친 시료는 베릴륨 추출을 거쳐 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer)와 AMS 측정에 각각 알맞은 형태로 만든다(그림 5).

샘플에 흡착되어 있는 authigenic ^{10}Be 을 녹여내기 위해 Corning tube에 들어있는 샘플을 테플론 비커로 옮기고 0.04 M의 염산하이드록실아민($\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$)과 25 % 아세트산(HOAc)의 혼합용액을 20 ml 넣어준다. $95\ ^\circ\text{C}$ 의 핫플레이트로 6시간동안 가열하여 leaching을 시켜주고 50 ml Corning tube로 다시 옮겨 2500 rpm으로 5분간 원심분리를 시켜준다. 침전된 샘플을 제외한 상층액을 깨끗한 테플론 비커에 옮겨 담아 $260\ ^\circ\text{C}$ 이상에서 완전히 건조시켜준다.

샘플의 플루오린(F)를 날려주기 위해 14N의 질산(HNO_3) 4 ml와 12 N 퍼클로릭산(HClO_4) 2 ml를 넣어 $240\ ^\circ\text{C}$ 의 핫플레이트에서 가열한다. 건조된 물질은 14 N의 질산 4ml와 9N의 염산 2 ml와 섞어 녹여주며 용액을 2 ml 이하가 될 때까지 가열해준다. 용액을 깨끗한 50 ml Corning tube에 옮겨준 후 증류수를 조금 이용해 비커를 닦아 모두 수집해준다. AMS는 결과가 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 의 비율로 나오기 때문에 ICP-MS를 통해 샘플별로 ^9Be 의 양을 측정해두어야 ^{10}Be 의 양을 구할 수 있다. 샘플을 ICP-MS로 측정하기 위해 산도를 낮춰야 하므로 증류수를 20 ml까지 섞어 희석시키며 일부를 15 ml Corning tube에 옮겨 한국기초과학지원연구원 (KBSI - Korea Basic Science Institute)에서 측정한다.

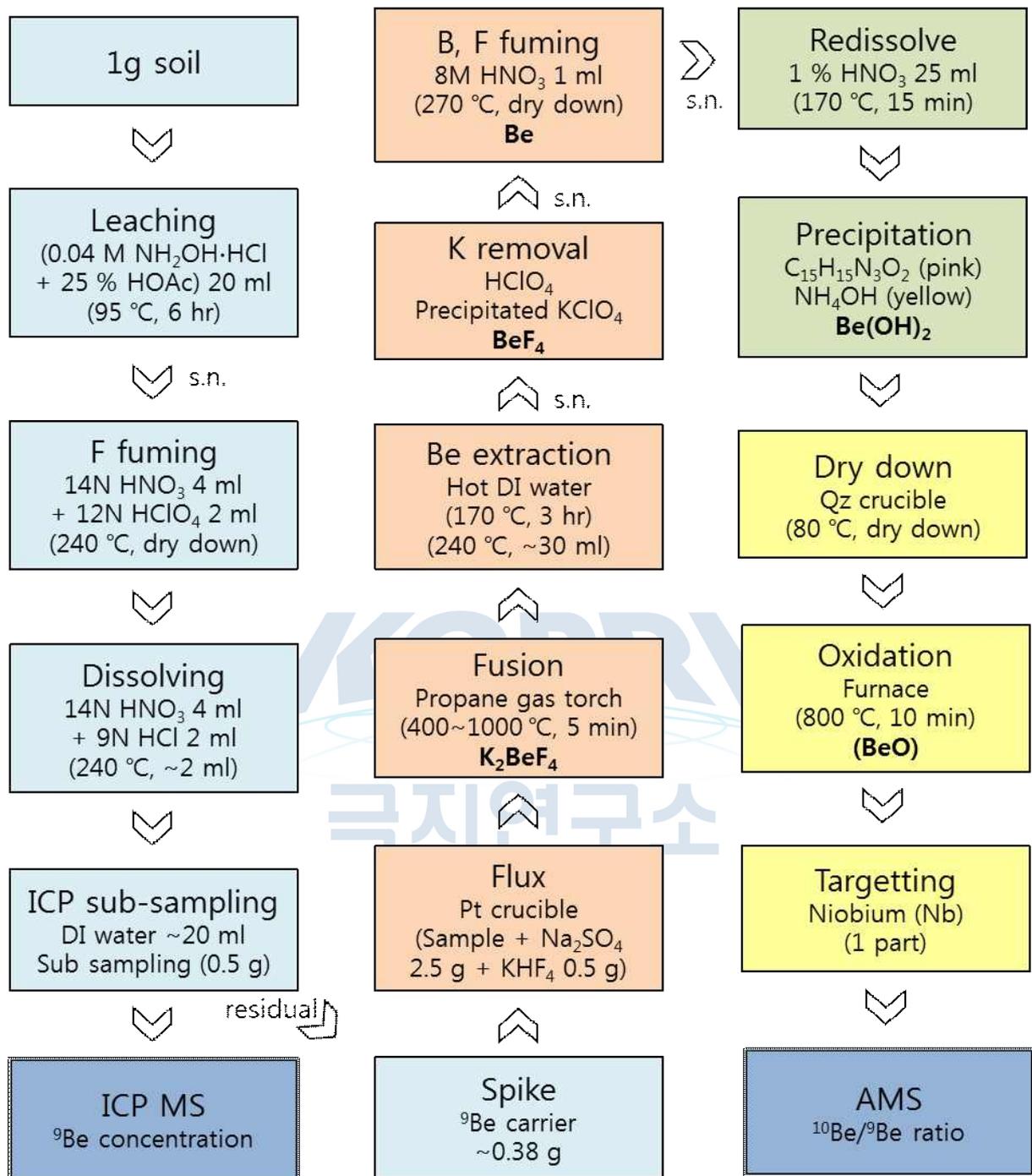


그림 4 이번 연구에 실행한 Hybrid method for extracting meteoric ^{10}Be (Jeong et al., 2018).



그림 5 해양퇴적물로부터의 authigenic Be 추출 과정.

극지연구소

산에 녹아 있는 나머지 샘플에는 Be의 절대적인 양이 매우 적기 때문에 ^{10}Be 이 거의 없고 ^9Be 이 대부분인 물질인 ^9Be 캐리어를 섞어주어야 AMS를 측정할 수 있다. 약 0.38 g의 캐리어를 섞어 백금 도가니에 옮기고 핫플레이트에서 밤새 건조시켜준다. 건조된 고체 샘플에 Na_2SO_4 와 KHF_2 용제를 각각 0.5 g, 2.5 g씩 넣어준 후, 플라스틱 막대를 사용하여 벽면에 건조되어 달라붙은 샘플을 부시고 용제와 샘플이 잘 섞이도록 한다. 용제를 이용해 샘플을 녹이는데 프로판(C_3H_8) 가스 토치를 이용하며 약 $400\sim 1000\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 단계별 fusion 작업을 시행한다. 용제와 샘플이 녹으면서 ^{10}Be 과 ^9Be 이 골고루 섞이게 되며 이때 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 의 비율이 정해지게 된다. 가열이 끝나면 백색의 케이크가 백금도가니의 바닥에 형성되며 K_2BeF_4 의 형태로 섞여있게 된다.

100 ml 테플론 비커에 백금 도가니를 넣고 증류수로 충분히 잠기도록 채운 후 뚜껑을 덮고 2-3 시간 정도 가열해준다. 이 과정은 K_2BeF_4 형태의 Be이 뜨거운 물에 잘 녹아 나오지만, Fe, Al, 과 Ti 등은 잘 녹지 않는다는 성질을 이용하여 Be을 추출하며, Fe, Al, 과 Ti 등은 아주 미량만 남게 된다. 백금 도가니를 꺼내어 플라스틱 막대를 이용하여 내용물을 테플론비커로 모두 옮긴 후 용액이 30 ml 정도 남을 때까지 가열한다. 용액을 50 ml Corning 튜브에 옮긴 후 원심분리기에 2500 rpm 으로 5분간 원심분리 시키고 상층액을 깨끗한 50 ml Corning 튜브에 따라낸다. 상층액을 따라낸 튜브에 퍼클로릭산을 넣어 KClO_4 가 침전되도록 한다. 튜브를 다시 원심분리기에 2500 rpm 으로 5분간 원심분리 시켜 K를 제거해주고 BeF_4 의 형태로 남은 상층액을 100 ml 테플론 비커에 따라낸다.

8M의 질산 1 ml를 넣고 핫플레이트에 올려 완전히 건조될 때까지 가열한다. 가열과정에서 연기가 형성되는데, 이 연기를 통하여 플루오린과 보론(B)이 제거된다. 특히 보론은 ^{10}Be 과 동중원소이므로 이 과정에서 최대한 제거를 해주어야 질량에 따라 가속되는 AMS 측정이 용이해진다. 비커에 1% 질산 25 ml를 넣은 후, 핫플레이트에 올려 15분간 가열한다. 용액을 깨끗한 50 ml Cornigng tube에 옮긴 후, 메틸레드용액($\text{C}_{15}\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_2$)을 몇 방울 떨어뜨린다. 메틸레드용액은 산도의 변화를 알 수 있는 매개로서 산성의 샘플 용액에 넣어주면 붉은색이 나타난다. 암모니아수(NH_4OH)를 한 방울씩 떨어뜨려서 산도를 낮춰준다. 황색이 나타나기 시작하는 약염기성의 상태까지 가면 수산화베릴륨($\text{Be}(\text{OH})_2$)가 침전하게 되며 원심분리기에 2500 rpm 으로 5분간 원심분리 시켜주면 바닥에 백탁색 겔 형태의 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 침전물을 얻을 수 있다. 겔 형태의 시료를 석영 도가니에 옮겨 담은 후 알루미늄 플레이트에 꽂아 핫플레이트에 올려 완전건조를 시켜준다. 건조된 시료는 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 의 전기용광로에서 10분간 산화시켜 산화베릴륨(BeO)의 형태로 만들어준다.

최종적으로 AMS로 측정하기 위한 샘플은 세슘(Cs) 이온빔의 조사(sputtering)에서 음이온으로 뽑혀 나와야 하기 때문에 전자를 얻는 반응을 위한 전기 전도도가 좋아야 한다. 또한 $1500\text{ }^\circ\text{C}$ 의 이온나이저(ioniser)에서 나오는 세슘 이온빔의 조사에 의해 가열된 샘플이 쉽게 냉각될 수 있도록 열전도도 높아야 한다. 하지만 BeO 는 이런 특성이 불량하기 때문에 나이오븀(Nb) 금속 가루를 1:1 비율로 섞어 타겟으로 만들어야 샘플의 열전도와 전기 전도도를 높임으로서 안정적인 빔 전류(*beam current*)를 얻을 수 있다.

1.2 육상시료 처리

고려대학교의 육상시료 in-situ Be/Al 추출 방식은 Kohl and Nishiizumi (1992)의 방법으로부터 발전된 방식을 사용하고 있다(Rhee et al., 2019; 그림 6). 암석 및 기반암 파편 시료를 모두 중사(250~500 μm)의 크기로 부수고 갈아준다.

순수석영 시료를 사용해야 하기 때문에 HF와 HNO₃의 저농도 혼합물을 만들어 초음파세척기나 히팅 롤러에 얹어 석영 이외의 장석, 운모 등을 녹여 없애준다. 수차례 반복 해주며 중간중간의 과정에서 자석을 이용해 자성광물도 제거해준다.

순수 석영은 약 50g을 사용하게 되며, 샘플 내에는 ⁹Be이 없기 때문에 인위적으로 정해진 양의 ⁹Be carrier를 넣어주어 ¹⁰Be/⁹Be의 비율을 측정할 수 있는 형태로 만들어준다. ²⁷Al의 경우 지질적 특징상 석영 내에 이미 어느정도 포함되어 있기 때문에 carrier를 별개로 넣어주지 않으나, ²⁶Al/²⁷Al 비율로부터 ²⁶Al의 양을 계산하기 위해서는 내재된 ²⁷Al의 양을 별도로 측정해야 한다. 석영을 녹인 용액기 위해 고농도의 HF와 HNO₃ 혼합물에 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 HNO₃를 이용해 수득하여 ICP-AES로 측정해준다.

수득된 Be/Al의 용액 역시 고농도의 HF를 제거해주기 위해 HClO₄를 이용해 F을 날려주며, 이를 통해 Be이 BeF 형태로 침전되는걸 방지하고 BeCl 폼으로 회수한다. 회수된 용액은 anion/cation exchange column을 거치며 다양한 농도의 HCl을 이용해 다른 양이온, 음이온을 최대한 제거하고 고농도의 Be으로 회수된다. Al 역시 cation exchange column에서 회수시에 Be을 회수한 이후 상대적으로 고농도의 HCl을 이용해 Al을 회수해준다. 회수된 Be/Al은 NH₄OH를 이용해 BeOH/AlOH로 침전시켜준다. 이후 각각 800/900°C에서 15분간 calcination 시켜 BeO/AlO 형태로 만들어주고 전도성을 향상시키기 위해 타겟 제작시에 Nb/Ag를 섞어서 만든다.

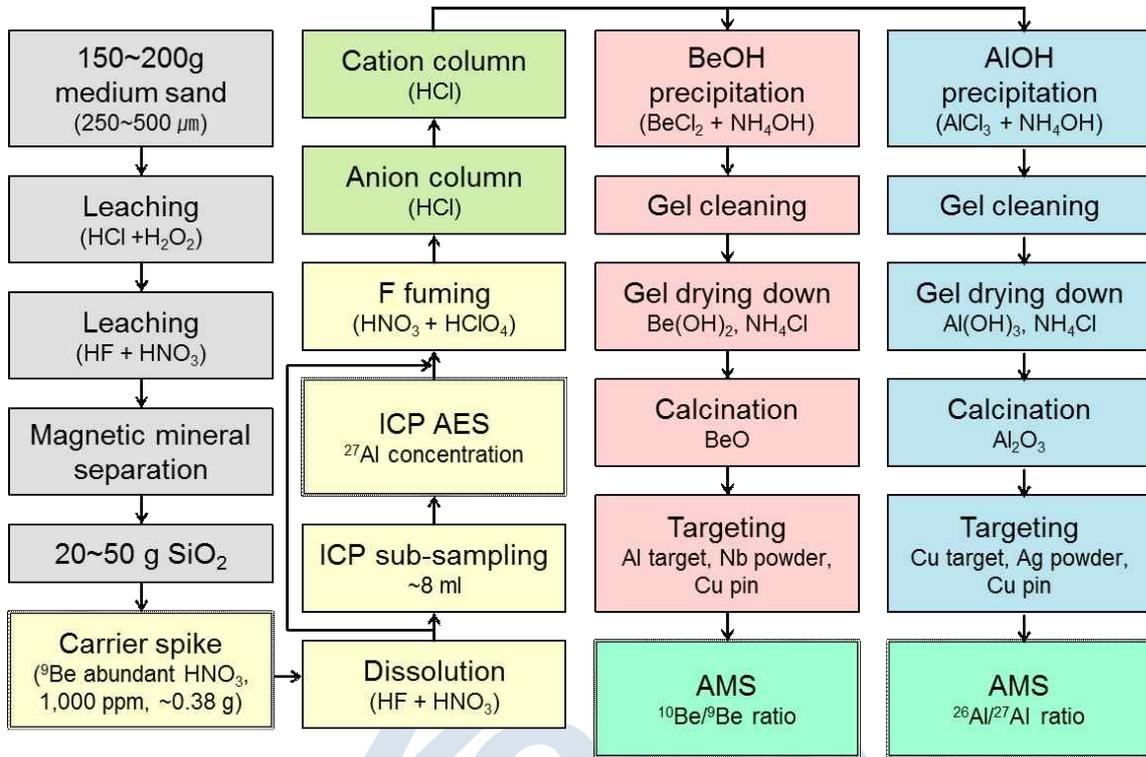


그림 6 Korea University Geochronology Lab.의 in-situ Be/Al 실험 프로토콜.



그림 7 육상퇴적물/기반암과쇄물로부터의 in-situ Be/Al 추출 과정.

1.3 AMS 측정

AMS 측정은 한국과학기술연구원(KIST)의 6MV Tandetron AMS(그림 6)를 이용하여 각 샘플별 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 의 비율을 구하였다. 보정과 튜닝을 위해 07KNSTD의 스탠다드 샘플 중 5-1, 5-2, 5-3을 사용하였으며 각각의 지정된 비율은 $2.709\text{E}-11$, $8.558\text{E}-12$, $6.320\text{E}-12$ 이다.

베릴륨 추출과정에서 BeO의 형태로 얻어진 샘플 타겟은 AMS의 샘플 챔버에 들어간 후 스탠다드 샘플을 이용하여 ^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 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 이상으로 가열하여 중성의 Cs을 증발시켜준다. 증발이 된 중성의 Cs 원자는 두가지 기능을 하게 되는데 첫번째는 $1500\text{ }^\circ\text{C}$ 로 가열된 이온나이저와 충돌하며 열전자를 방출하고 Cs+가 되면서 parabolic한 이온나이저에서 튕겨 나오며 이온빔이 된다. 동시에 타겟에 음극을 걸어 Cs+의 이온빔을 집중시켜 Cs 조사를 형성한다. 두번째는 타겟의 샘플부분은 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 익스트랙터에 의해 이온나이저의 중심을 통과하여 추출된다.

추출된 Be⁻O를 비롯한 여러 분자 및 원자들은 Low Energy Magnet에서 Magnetic Mass Separation을 거치게 된다. 이를 통해 질량이 25인 ^9BeO 분자와 26인 ^{10}BeO , 그리고 동중원소인 ^{10}BO 분자는 경로를 따라 통과하게 되지만 다른 질량을 지닌 분자나 원자는 벽에 부딪히며 에너지를 잃고 진공 펌프에 의해 빨려 나가게 된다. 또한 이 Magnetic Mass Separation에서 Bouncing Pulse Injection Magnet을 이용하여 질량에 따라 순차적으로 주입을 해준다. 이를 통해 ^9Be 은 양이 많기 때문에 상대적으로 짧은 시간동안 질량이 25인 원자나 분자(^9BeO)가 지나갈 수 있는 전압을 걸어주며 ^9Be 을 감지하는 패러데이 컵(faraday cup)을 열어준다. ^{10}Be 은 양이 적기 때문에 상대적으로 긴 시간동안 질량이 26인 원자나 분자(^{10}BeO , ^{10}BO)가 지나갈 수 있는 전압을 걸어주며 ^{10}Be 을 감지하는 GIC (Gas Ionization Chamber)로 가게 된다. 질량에 따라 다른 시간만큼씩 측정이 되기 때문에 이 순차적 주입 시간은 후에 보정이 된다.

Low Energy Magnet을 통과한 분자나 원자들은 가속기를 통과하게 되는데 Tandetron 가속기는 2번 가속을 해준다는 의미를 갖고 있다. 가속기의 앞단과 끝단은 그라운드이며 중앙에 4.5 MV를 걸어주게 된다. 앞단에서 중앙까지, 0에서 4.5 MV로 가속된 Be⁻O는 중앙의 순환 펌프에 의해 돌면서 채워져 있는 Stripping Ar gas와 충돌하며 분자를 깨지게 하고 이로 인해 Be²⁺와 O의 원자로 분리가 된다. 가속기의 끝단은 그라운드 상태이기 때문에 Be²⁺은 상대적으로 음극인 끝단을 향해 한 번 더 가속하게 된다.

가속되어 나온 원자들은 High Energy Magnet의 고정된 자성에 의해 질량별로 굴절

각도가 다르게 된다. ^{10}Be 의 경우 AMS의 말단인 GIC까지 가게 하며 ^9Be 의 경우 굴절이 더 심하기 때문에 그 앞단의 패러데이 컵으로 조절하여 받아준다. Low Energy Magnet의 순차적 주입에 의해 ^9Be 이 들어올 경우 이 패러데이 컵이 열리며 내부로 들어간 ^9Be 이온은 패러데이 컵에 부딪히며 중성화 되고 이때의 전류를 이용하여 ^9Be 의 원자 개수를 계산할 수 있다.

^{10}Be 은 ^9Be 과 굴절률이 달라 GIC까지의 경로를 쭉 따라 가며 동중원소인 ^{10}B 도 같이 통과하게 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 나가게 된다. 이렇게 추출된 ^{10}Be 은 최종적으로 GIC에 들어가 이소부탄(C_4H_{10}) 가스와 반응하며 전자를 내놓게 되는데 Si_3N_4 foil에서 제거되지 않은 ^{10}B 과 ^{10}Be 이 잃는 전자의 패턴이 다르기 때문에 GIC의 4개의 감지기를 통해 동중원소를 추가적으로 분리 해줄 수 있다.

GIC에서 검출된 ^{10}Be 의 개수는 빔전류를 계산하여 얻은 ^9Be 의 개수와 함께 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 의 비율로 결과값이 나오게 된다. 하지만 Si_3N_4 foil을 거치며 ^{10}Be 의 각도분산이 커져 ESA 내에서의 손실이 많기 때문에 결과로 나온 비율은 보정용 샘플을 측정하여 나오는 보정치에 따라 보정해주게 된다.

극지연구소



그림 8 KIST의 6 MV Tandetrón AMS. $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 를 분석하기 위해 4.5 MV까지 가속하여 Be^{2+} 로 뽑아낼 수 있기 때문에 Si_3N_4 호일을 이용해 가장 큰 동중원소 오염원인 보론을 제거해 줄 수 있다.

KOPRI
극지연구소

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

위의 실험과정을 거쳐 AMS에서 베릴륨을 측정하게 되는데 측정 결과는 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율로 나타난다. 앞서 언급하였듯이 Fusion 방법과는 달리 authigenic 성분만을 leaching하여 fusion시키는 hybrid 방식으로 베릴륨을 추출했기 때문에 이전 연구와 같이 authigenic 성분의 ^{10}Be 만을 구하기 위해서 authigenic 성분과 detrital 성분이 모두 포함되어 있는 total ^9Be 의 농도를 ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer)를 통해 측정할 필요가 없게 되었다. 따라서 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 단일 농도보다는 authigenic $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율을 분석하는 경향이 있다. 특히 퇴적물의 연대측정 연구에서 단일 ^{10}Be 동위원소 양(atoms/g)만을 사용할 경우 퇴적물 입자의 크기나 해수의 화학 성분에 의한 변동이 나타날 수 있기 때문에 비교적 시간에 따라 일정한 값을 가지는 authigenic $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율을 주로 사용했다. 현재 authigenic $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율을 분석하기 위해 AMS 측정을 준비중이며 ICP-MS로 측정된 authigenic ^9Be 값으로 나누어 authigenic $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율을 계산할 수 있게 된다.

또한 위도가 비슷한 지역에서의 meteoric ^{10}Be 의 생성률은 거의 유사하기 때문에 남극에서의 위도가 비슷한 다른 연구 지역에서 추출한 meteoric ^{10}Be 농도와 직접적인 비교를 해볼 수 있다. 남극지역의 해양퇴적물 코어에 대하여 meteoric ^{10}Be 농도 프로파일을 조사한 기존 연구들에서 meteoric ^{10}Be 농도의 최저수치가 약 10^6 atoms/g이며, 열린 해양 환경에서의 meteoric ^{10}Be 농도의 최대수치가 약 10^8 - 10^9 atoms/g로 관찰되었다 (Scherer et al., 1998, Sjunneskog et al., 2007; Arnold, 1956; Goel et al., 1957; Merrill et al., 1960).

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 경우 authigenic Be의 계산과 유사하게 ICP와 AMS의 결과를 모두 활용하여야 한다. Al의 경우 ICP-AES를 통해 ppm 단위로 얻은 ^{27}Al 의 농도를 초기의 HF 혼합물의 질량에 보정하여 원자의 개수를 구하게 된다. Be의 경우 농도를 알고 있는 ^9Be carrier를 일정량만큼 넣었기 때문에 추가적인 측정 없이 ^9Be 의 원자 개수를 구할 수 있다.

각각의 동위원소의 비율을 측정한 AMS 결과를 통해 보정된 비율을 각각 안정동위원소의 원자개수에 곱하여 불안정 동위원소의 개수를 구할 수 있다. 이 중 실험 과정에서 유입되거나 carrier에서 유입된 불안정 동위원소의 양을 구하여 제거해줌으로서 process blank를 제외한 순수 암석시료로부터의 불안정 동위원소 원자개수를 계산할 수 있다. 구해진 ^{10}Be , ^{26}Al 의 개수와 샘플지역의 고도, 경위도 등 위치 정보, 우주선을 차폐할 수 있는 주변의 지세에 의한 차폐정도 등의 정보를 이용해 연구지역에서의 우주선유발 동위원소 연간 생성량을 구할 수 있으며, 이를 통해 노출연대측정의 결과를 얻을 수 있다.

또한, 두가지 핵종을 사용함으로써 각 핵종의 연간 생성량과 반감기에 의한 붕괴상수를 통해 이 암석이 노출 후에 지속적으로 그 상태가 유지되었는지, 혹은 노출 기간 중에 표면이 침식되었다거나 빙하의 재진진으로 인해 다시 덮였었다던지 여부를 밝혀낼 수 있다.



제 2 절 연구지역별 측정결과 분석

2.1 해양시료 처리

가. EAP13-GC14A

이전 연구에서 라르센 C 빙봉 해양코어 퇴적물 GC16의 깊이 별 ^{10}Be 농도 분석 결과를 이용해 diamicton 퇴적상이 나타나는 코어 최하부에서 $\sim 10^6$ atoms/g 정도로 나타나고 diamicton에서 sandy gravelly mud로 퇴적상이 바뀌는 경계지점에서는 $\sim 10^7$ atoms/g으로 ^{10}Be 농도가 급증했던 결과를 볼 수 있었다(그림 9). 이러한 퇴적상의 변화는 빙상 아래에 있던 환경에서 빙하의 후퇴로 점차 빙봉 아래에 위치한 해양성 환경에 가까워짐을 의미한다고 밝혔다(Domack et al., 1999; Evans et al., 2005; Jeong et al., 2019). 33cm 부근에서 다시 한번 6×10^7 atoms/g로 ^{10}Be 농도 증가가 발생했으며, 코어 최상부에서는 10^8 atoms/g으로 증가하였다.

이렇게 해양코어퇴적물의 깊이에 따라 ^{10}Be 농도가 변화하는 이유는 빙봉이 후퇴하면서 해양퇴적물에 유입되는 meteoric ^{10}Be 의 양이 변화하기 때문이다. 빙기 당시에 빙상과 빙봉에 의해 덮여져 있던 곳은 대기 중에서 형성되어 침전하는 meteoric ^{10}Be 이 빙상 및 빙봉에 가로막혀 아래에 위치한 해저까지 도달하지 못하게 되므로 ^{10}Be 농도가 현저하게 낮게 나타난다. 기후가 변동하여 빙봉이 후퇴하기 시작하면 해당 지점은 점점 열린 해양(open marine) 환경에 노출되고 meteoric ^{10}Be 이 빙봉이라는 장애물에 방해받지 않고 자유롭게 해양으로 침전하여 해저로 퇴적될 수 있기 때문에 빙봉이 붕괴 후 ^{10}Be 농도는 급격하게 증가한다.

이러한 연구결과는 좀 더 외해에 존재하는 GC14A와의 비교를 통해 좀 더 뚜렷한 변화와 환경 변화 기준을 살펴볼 수 있다(그림 9, 표 2). 보다 외해에 있던 GC14A는 같은 깊이의 코어임에도 불구하고 약 40 cm 깊이보다 상부의 퇴적물에는 authigenic ^{10}Be 의 농도가 10^8 atoms/g보다 높게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 또한 40cm보다 하단부는 급격히 감소한 베릴륨 농도를 통해 빙하, 혹은 계절적인 해빙으로 인해 상대적으로 장애물이 있었다는 것을 유추해 볼 수 있다. 따라서 내해의 GC16이 보다 늦은 시기에 빙하의 후퇴로 열리게 되어 늦게 authigenic ^{10}Be 의 농도가 높아졌음을 알 수 있다.

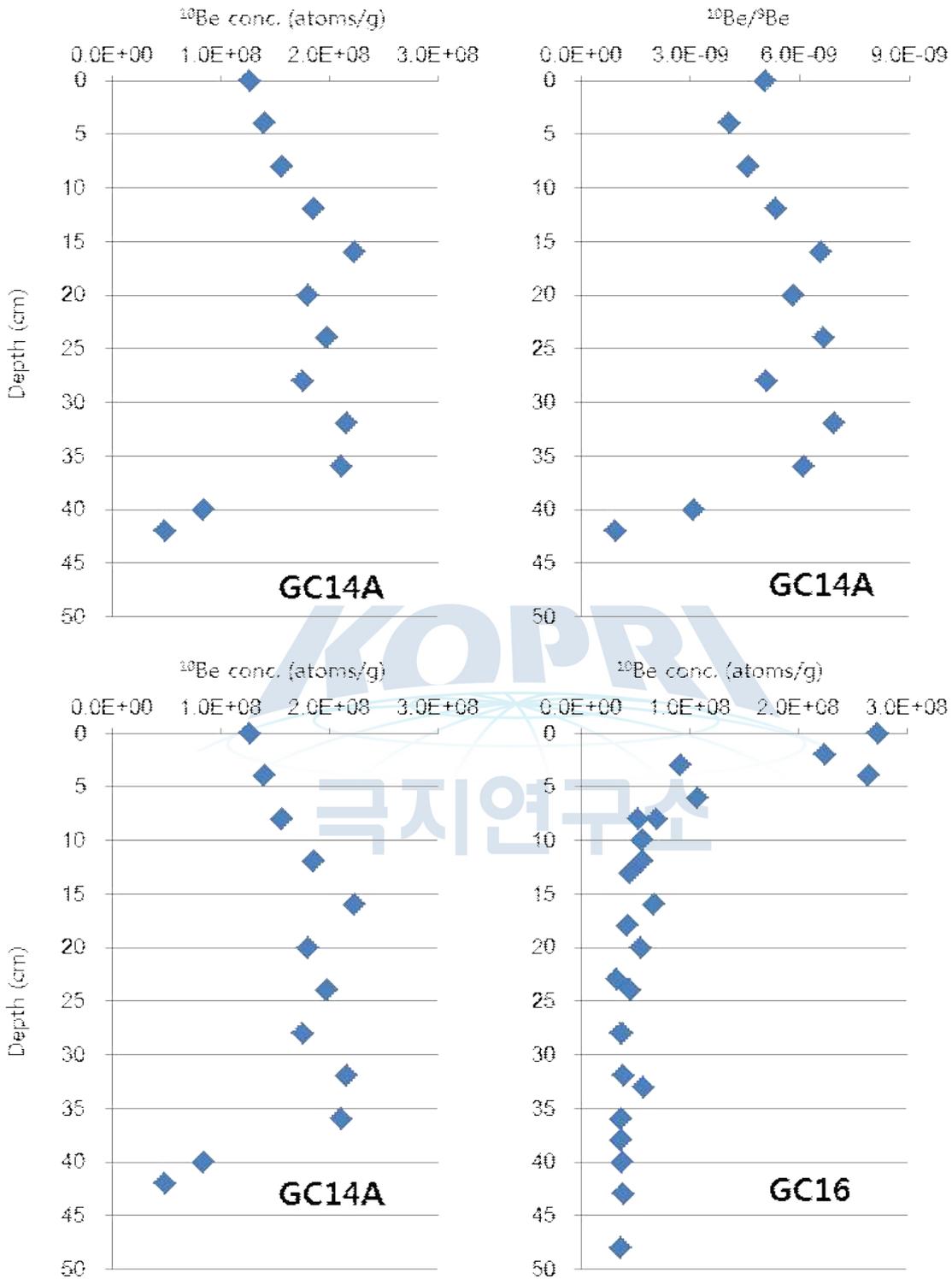
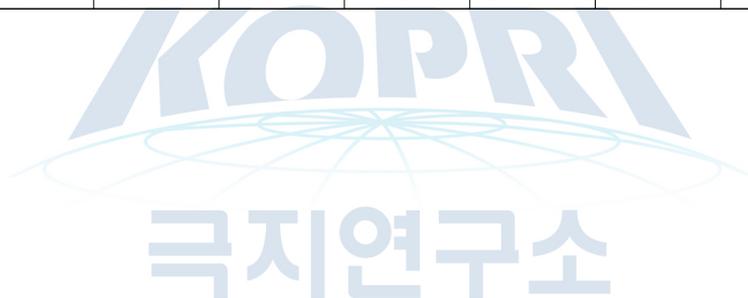


그림 9 EAP13 코어의 authigenic ^{10}Be 분석 결과 비교

표 1 EAP13-GC14A에서의 authigenic ^{10}Be 분석 결과

EAP13-GC14A	Sample	AMS measured		Sample						
	Depth (cm)	Mass (g)	10Be/9Be ratio	error	10Be/9Be ratio	error	9Be conc. (atoms)	error	10Be conc. (atoms/g)	error
	0	0.9421	4.095.E-12	6.916.E-14	5.061.E-09	9.961.E-11	2.505.E+16	4.931.E+14	1.268.E+08	2.496.E+06
	4	0.9685	4.508.E-12	5.066.E-14	4.074.E-09	6.146.E-11	3.450.E+16	5.204.E+14	1.405.E+08	2.120.E+06
	8	1.0175	5.527.E-12	5.483.E-14	4.584.E-09	6.470.E-11	3.410.E+16	4.813.E+14	1.563.E+08	2.206.E+06
	12	1.0303	6.676.E-12	6.815.E-14	5.335.E-09	7.632.E-11	3.478.E+16	4.976.E+14	1.856.E+08	2.655.E+06
	16	0.9897	7.491.E-12	7.021.E-14	6.578.E-09	9.023.E-11	3.403.E+16	4.668.E+14	2.238.E+08	3.070.E+06
	20	1.0099	6.228.E-12	1.088.E-13	5.835.E-09	1.175.E-10	3.098.E+16	6.241.E+14	1.808.E+08	3.641.E+06
	24	0.9752	6.345.E-12	7.216.E-14	6.638.E-09	1.007.E-10	2.983.E+16	4.524.E+14	1.980.E+08	3.003.E+06
	28	1.0509	6.014.E-12	7.152.E-14	5.101.E-09	7.937.E-11	3.443.E+16	5.357.E+14	1.756.E+08	2.732.E+06
	32	1.0121	7.316.E-12	6.482.E-14	6.953.E-09	9.300.E-11	3.119.E+16	4.172.E+14	2.169.E+08	2.901.E+06
	36	1.0447	7.480.E-12	6.973.E-14	6.110.E-09	8.361.E-11	3.451.E+16	4.723.E+14	2.109.E+08	2.886.E+06
	40	1.0138	2.872.E-12	3.491.E-14	3.079.E-09	4.880.E-11	2.746.E+16	4.352.E+14	8.454.E+07	1.340.E+06
	42	1.3318	2.199.E-12	3.779.E-14	9.442.E-10	1.892.E-11	5.147.E+16	1.032.E+15	4.860.E+07	9.739.E+05



나. BS17-GC18

벨링스하우젠 해의 GC18 코어는 빙저호의 퇴적물을 분석하는 연구로 아직 넓은 간격으로 6개 지점에서만 분석이 진행되어 추가적인 분석이 필요하며 해석과 논의가 준비 중인 단계이다. 하지만 230 cm 깊이 지점에서도 4×10^8 atoms/g에 육박하는 매우 높은 농도의 authigenic ^{10}Be 이 추출되었으며 깊이가 깊어질수록 점진적으로 낮아지다가 약 722 cm 지점에서부터 8×10^6 atoms/g ~ 1×10^7 atoms/g 정도의 매우 낮아진 authigenic ^{10}Be 의 농도가 나타났다(표 3, 그림 10). 특히 빙저호임에도 불구하고 남빙양에서 채취한 유사한 깊이의 롱코어 LC42에 비교했을 경우에도 상대적으로 높은 농도의 authigenic ^{10}Be 이 나타난다. 퇴적률과 시기에 따른 보정이 필요할 것으로 보이며 차후 추가적인 샘플링을 통해 논의를 진행하고자 한다.



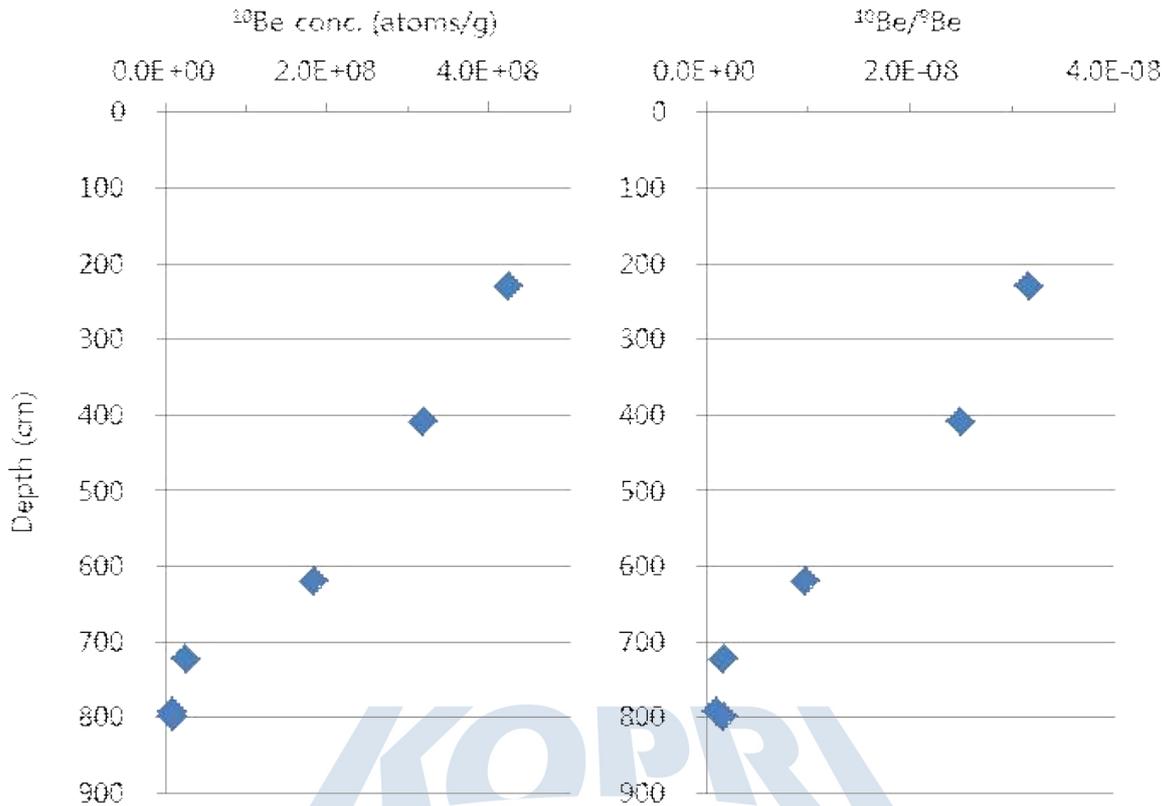


그림 10 BS17-GC18 코어의 authigenic ^{10}Be 분석 결과 비교

극지연구소

표 2 BS17-GC18에서의 authigenic ^{10}Be 분석 결과

BS17-GC18	Sample Mass (g)	AMS measured		Sample					
		$^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ratio	error	$^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ratio	error	^9Be conc. (atoms)	error	^{10}Be conc. (atoms/g)	error
230	1.0347	1.457.E-11	1.008.E-13	3.164.E-08	3.850.E-10	1.342.E+16	1.633.E+14	4.247.E+08	5.167.E+06
410	1.0203	1.130.E-11	8.427.E-14	2.489.E-08	3.108.E-10	1.285.E+16	1.604.E+14	3.199.E+08	3.993.E+06
620	1.0147	6.375.E-12	8.014.E-14	9.736.E-09	1.567.E-10	1.884.E+16	3.032.E+14	1.835.E+08	2.952.E+06
722	1.3167	1.164.E-12	2.245.E-14	1.695.E-09	3.767.E-11	1.590.E+16	3.534.E+14	2.695.E+07	5.990.E+05
792	1.0828	3.160.E-13	1.410.E-14	1.102.E-09	5.423.E-11	7.533.E+15	3.707.E+14	8.300.E+06	4.085.E+05
800	1.019	3.480.E-13	1.455.E-14	1.749.E-09	8.048.E-11	5.911.E+15	2.720.E+14	1.034.E+07	4.757.E+05

다. RS15-LC42

로스해의 롱코어 LC42는 지난 15년 샘플 획득 후 2016년부터 지속적으로 연구가 진행 중인 코어로 12 m에 육박하는 깊이로 현재까지 부분별로 나누어 분석이 진행되고 있다(그림 11). 특히 이전에 2016년에 획득한 시료를 바탕으로 현재 로스해와 남빙양의 경계가 되는 분지에서의 결과로 빙봉의 전진 및 후퇴에 의한 직접적인 차폐 영향은 거의 없을 것으로 추정되고 있다. 전반적으로 1×10^8 atoms/g 이상의 고농도를 유지하고 있으며, 2×10^8 atoms/g을 넘는 상부 200 cm, 810 cm, 1100 cm 지점들만이 높게 나타나는 것으로 분석되었다. 이번 연구를 통해 추가적으로 분석한 부분별 변위 역시 대부분 큰 변화를 보이지 않는 패턴을 보이며 이를 통해 장기간의 빙기/간빙기의 기간에도 이 지역은 빙봉이 영향이 거의 없었음을 알 수 있다(표 3, 4, 5).

고지자기 분석 결과 약 826 cm 지점에서 고지자기 역전이 나타나는 B-M boundary (0.78 Ma)가 발견되었다고 하며, authigenic ^{10}Be 의 농도 역시 약 827cm 지점 전후로 급격한 상승을 보인다(그림 12). 이는 고지자기 역전에 따라 지자기장이 약해지며 우주선의 유입이 증가하고 이에 따라 우주선유발 동위원소의 생성량이 증가하기 때문임을 확인할 수 있었다. 또다른 고지자기 역전 경계가 LC42에서는 발견되지 않아 비교는 불가한 상태지만 지난 연구의 LC48에서도 약 430cm 깊이에서 B-M boundary가 나타남에 따라 해당 깊이에 대한 상세한 분석을 통해 추가적인 검증을 할 수 있을 것으로 보인다.

다만, 이러한 빙기/간빙기 환경변화가 수십만년간 여러차례 변화해 왔음에도 불구하고 큰 변화를 보이지 않는 것으로 보이는 상태에서 최상층부에서는 4×10^8 atoms/g 이상의 가장 높은 고농도의 authigenic ^{10}Be 이 나타나고 있다. 이와 같은 경우 퇴적률 감소로 인한 상대적인 authigenic ^{10}Be 농도의 증가, 혹은 고농도의 authigenic ^{10}Be 의 외부 유입 등의 해석이 가능하다. 풍화된 물질로부터의 detrital ^9Be 의 유입이 높아질 경우 ^{10}Be 의 농도가 상대적으로 높게 나타날 가능성도 있으나, authigenic ^9Be 의 ICP-AES 측정 결과 역시 큰 차이를 보이지 않아 detrital ^9Be 의 유입이 있었다고 보기는 어렵다. 지난 연구에서 퇴적상과의 비교를 통해 IRD층이 나타나며 입도가 큰 물질들의 비율이 높아지는 구간에서 이러한 authigenic ^{10}Be 의 농도가 높게 나타나는 패턴이 발견되었다. 이를 통해 LC 42의 지점인 로스 해와 남빙양의 경계부분의 와지지역은 단순한 퇴적보다 로스 해로부터 공급되는 빙하성 운반 물질이 퇴적대며 영향을 미치는 시기들이 존재하는 것으로 보인다. 이에 따라 해당 연구지역의 퇴적률에 관하여 논의하며 진행하고자 한다.

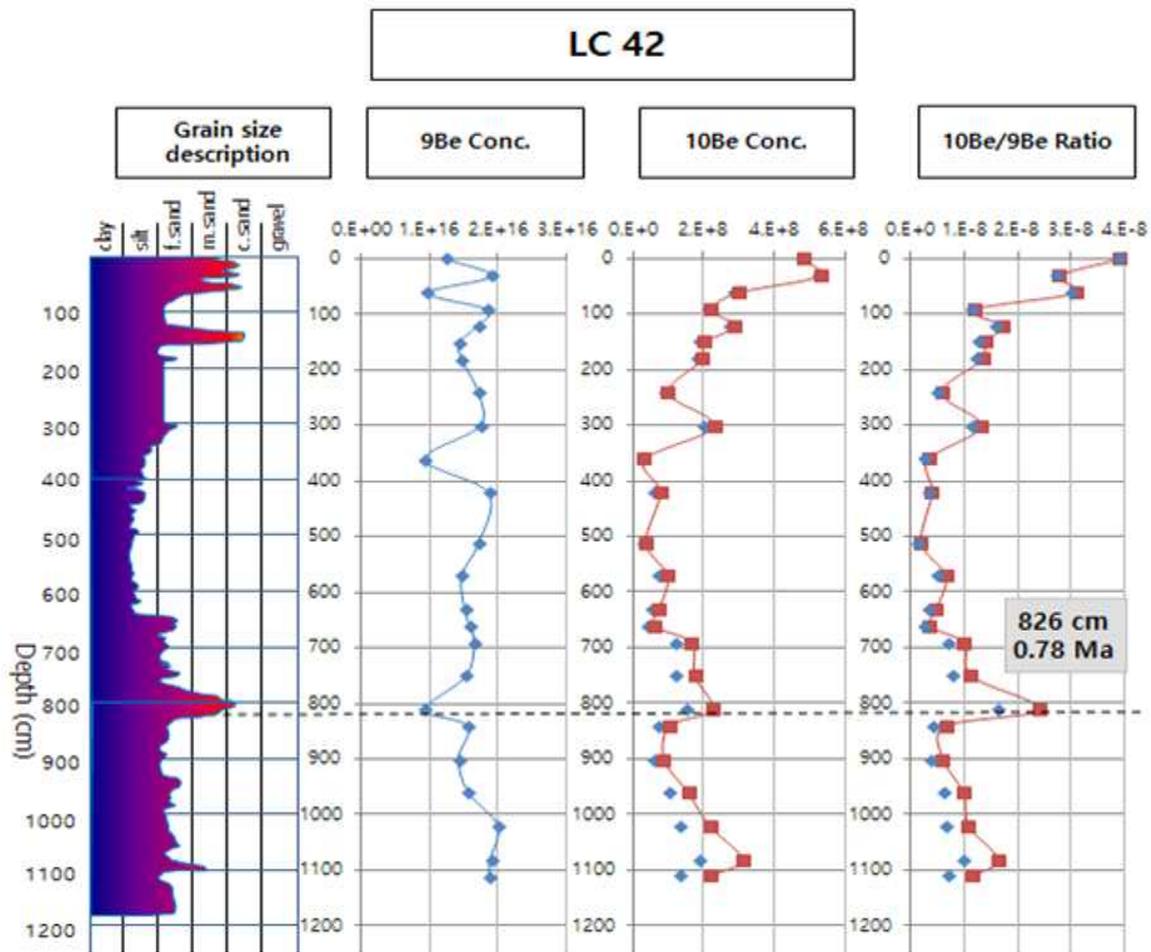


그림 11 지난 연구의 LC 42 분석 결과(퇴적상, Be 변화, 고지자기연대측정).

표 3 빙봉 지역의 해양퇴적물 코어에서 분석한 고기후 변화와 그에 따른 환경 변화 분석 방법.

환경	코어 위치의 빙하 환경	퇴적상	meteoric ^{10}Be 농도 (atoms/g)
Glacial	빙상 아래	압축 받은 diamicton	$\sim 10^6$
Sub-floating ice shelf	빙봉 아래	silty clay	4×10^7
Seasonally open marine	빙봉 말단 아래	silty clay, sand	6×10^7
Open marine	빙봉 붕괴	sand	$\sim 10^8$

표 4 RS15-LC42의 2019 분석 결과

Sample		AMS		Authigenic					
depth (cm)	mass (g)	10Be/9Be	1σ error	10Be Conc. (atoms·g ⁻¹)	1σ error	9Be Conc. (atoms·g ⁻¹)	1σ error	10/9Be	1σ error
RS15-LC42 (2019 SR)									
161	1.0870	2.72.E-12	3.53.E-14	7.64.E+07	1.26.E+06	1.76.E+16	2.90.E+14	4.35.E-09	7.19.E-11
171	1.1694	3.93.E-12	4.40.E-14	9.92.E+07	1.50.E+06	2.62.E+16	3.95.E+14	3.79.E-09	5.72.E-11
321	1.1343	1.29.E-12	2.57.E-14	3.30.E+07	7.50.E+05	2.69.E+16	6.12.E+14	1.23.E-09	2.79.E-11
341	1.0574	4.20.E-12	6.36.E-14	1.18.E+08	2.16.E+06	2.29.E+16	4.17.E+14	5.18.E-09	9.43.E-11
381	1.0658	8.41.E-13	2.26.E-14	2.38.E+07	7.02.E+05	1.00.E+16	2.95.E+14	2.38.E-09	7.02.E-11
401	1.0287	3.27.E-12	3.63.E-14	9.63.E+07	1.45.E+06	1.97.E+16	2.97.E+14	4.88.E-09	7.33.E-11
471	0.9899	1.91.E-12	3.42.E-14	5.78.E+07	1.20.E+06	2.17.E+16	4.49.E+14	2.67.E-09	5.54.E-11
491	1.0398	2.38.E-12	3.99.E-14	6.67.E+07	1.31.E+06	2.22.E+16	4.36.E+14	3.01.E-09	5.93.E-11
531	1.0003	2.41.E-12	3.81.E-14	7.25.E+07	1.37.E+06	2.10.E+16	3.96.E+14	3.46.E-09	6.53.E-11
551	1.0217	1.88.E-12	3.36.E-14	5.60.E+07	1.16.E+06	2.04.E+16	4.22.E+14	2.75.E-09	5.69.E-11
591	1.0905	1.37.E-12	2.87.E-14	3.63.E+07	8.57.E+05	1.42.E+16	3.35.E+14	2.56.E-09	6.03.E-11
611	1.0228	2.26.E-12	3.24.E-14	7.08.E+07	1.25.E+06	1.40.E+16	2.47.E+14	5.07.E-09	8.94.E-11
706	1.1148	2.35.E-12	3.28.E-14	6.27.E+07	1.09.E+06	1.92.E+16	3.33.E+14	3.26.E-09	5.65.E-11
821	1.2858	6.46.E-12	5.81.E-14	1.46.E+08	1.96.E+06	4.97.E+16	6.69.E+14	2.93.E-09	3.95.E-11
861	1.1546	1.13.E-12	2.99.E-14	3.00.E+07	8.60.E+05	1.36.E+16	3.90.E+14	2.20.E-09	6.32.E-11
881	1.0626	1.93.E-12	3.46.E-14	5.32.E+07	1.11.E+06	2.51.E+16	5.22.E+14	2.12.E-09	4.41.E-11
921	1.0165	2.51.E-12	8.72.E-14	7.45.E+07	2.70.E+06	2.51.E+16	9.10.E+14	2.97.E-09	1.08.E-10
RS15-LC42 (2019 GMR)									
822	1.0544	4.20.E-12	4.41.E-14	1.16.E+08	1.69.E+06	1.09.E+16	1.59.E+14	1.06.E-08	1.55.E-10
823	1.2547	3.84.E-12	4.06.E-14	9.38.E+07	1.37.E+06	1.68.E+16	2.45.E+14	5.60.E-09	8.19.E-11
824	1.0443	3.20.E-12	3.84.E-14	9.26.E+07	1.46.E+06	1.47.E+16	2.31.E+14	6.31.E-09	9.92.E-11
825	1.0109	5.17.E-12	5.01.E-14	1.48.E+08	2.07.E+06	1.90.E+16	2.65.E+14	7.80.E-09	1.09.E-10
826	1.1831	5.32.E-12	7.69.E-14	1.33.E+08	2.34.E+06	2.99.E+16	5.26.E+14	4.45.E-09	7.83.E-11
827	1.0691	6.08.E-12	6.03.E-14	1.72.E+08	2.43.E+06	3.43.E+16	4.84.E+14	5.03.E-09	7.10.E-11
828	1.0445	5.49.E-12	5.03.E-14	1.59.E+08	2.17.E+06	3.13.E+16	4.25.E+14	5.09.E-09	6.93.E-11
829	1.0294	4.51.E-12	4.56.E-14	1.33.E+08	1.90.E+06	1.73.E+16	2.47.E+14	7.71.E-09	1.10.E-10
830	0.7057	3.36.E-12	4.08.E-14	1.38.E+08	2.18.E+06	1.15.E+16	1.82.E+14	1.19.E-08	1.89.E-10
831	1.1140	4.40.E-12	6.13.E-14	1.24.E+08	2.13.E+06	2.48.E+16	4.27.E+14	4.99.E-09	8.58.E-11
832	1.1473	5.19.E-12	5.06.E-14	1.33.E+08	1.86.E+06	2.52.E+16	3.53.E+14	5.28.E-09	7.40.E-11

표 5 고지자기 연대를 활용한 ^{10}Be 의 붕괴보정

Sample		Decay-corrected					
depth (cm)	mass (g)	Age (years)	1 σ error	10Be	1 σ error	10/9Be	1 σ error
RS15-LC42 (2019 SR)							
161	1.0870	1.52.E+05	2.51.E+03	8.25.E+07	1.36.E+06	4.69.E-09	7.75.E-11
171	1.1694	1.61.E+05	2.43.E+03	1.08.E+08	1.62.E+06	4.11.E-09	6.20.E-11
321	1.1343	3.03.E+05	6.89.E+03	3.84.E+07	8.73.E+05	1.43.E-09	3.24.E-11
341	1.0574	3.22.E+05	5.87.E+03	1.39.E+08	2.53.E+06	6.08.E-09	1.11.E-10
381	1.0658	3.60.E+05	1.06.E+04	2.85.E+07	8.41.E+05	2.85.E-09	8.41.E-11
401	1.0287	3.79.E+05	5.69.E+03	1.16.E+08	1.75.E+06	5.89.E-09	8.86.E-11
471	0.9899	4.45.E+05	9.23.E+03	7.22.E+07	1.50.E+06	3.33.E-09	6.92.E-11
491	1.0398	4.64.E+05	9.13.E+03	8.41.E+07	1.66.E+06	3.80.E-09	7.47.E-11
531	1.0003	5.01.E+05	9.47.E+03	9.32.E+07	1.76.E+06	4.45.E-09	8.39.E-11
551	1.0217	5.20.E+05	1.08.E+04	7.26.E+07	1.50.E+06	3.57.E-09	7.39.E-11
591	1.0905	5.58.E+05	1.32.E+04	4.80.E+07	1.13.E+06	3.38.E-09	7.98.E-11
611	1.0228	5.77.E+05	1.02.E+04	9.45.E+07	1.67.E+06	6.76.E-09	1.19.E-10
706	1.1148	6.67.E+05	1.15.E+04	8.75.E+07	1.52.E+06	4.55.E-09	7.89.E-11
821	1.2858	7.75.E+05	1.04.E+04	2.15.E+08	2.89.E+06	4.32.E-09	5.82.E-11
861	1.1546	8.13.E+05	2.33.E+04	4.50.E+07	1.29.E+06	3.31.E-09	9.49.E-11
881	1.0626	8.32.E+05	1.73.E+04	8.06.E+07	1.68.E+06	3.21.E-09	6.68.E-11
921	1.0165	8.70.E+05	3.15.E+04	1.15.E+08	4.17.E+06	4.58.E-09	1.66.E-10
RS15-LC42 (2019 GMR)							
822	1.0544	7.76.E+05	1.13.E+04	1.71.E+08	2.49.E+06	1.56.E-08	2.28.E-10
823	1.2547	7.77.E+05	1.14.E+04	1.38.E+08	2.02.E+06	8.25.E-09	1.21.E-10
824	1.0443	7.78.E+05	1.22.E+04	1.37.E+08	2.15.E+06	9.31.E-09	1.46.E-10
825	1.0109	7.79.E+05	1.09.E+04	2.18.E+08	3.05.E+06	1.15.E-08	1.61.E-10
826	1.1831	7.80.E+05	1.37.E+04	1.96.E+08	3.45.E+06	6.56.E-09	1.16.E-10
827	1.0691	7.81.E+05	1.10.E+04	2.55.E+08	3.59.E+06	7.43.E-09	1.05.E-10
828	1.0445	7.82.E+05	1.06.E+04	2.35.E+08	3.20.E+06	7.53.E-09	1.02.E-10
829	1.0294	7.83.E+05	1.12.E+04	1.97.E+08	2.81.E+06	1.14.E-08	1.63.E-10
830	0.7057	7.84.E+05	1.24.E+04	2.04.E+08	3.22.E+06	1.77.E-08	2.80.E-10
831	1.1140	7.85.E+05	1.35.E+04	1.83.E+08	3.15.E+06	7.39.E-09	1.27.E-10
832	1.1473	7.86.E+05	1.10.E+04	1.97.E+08	2.76.E+06	7.82.E-09	1.10.E-10

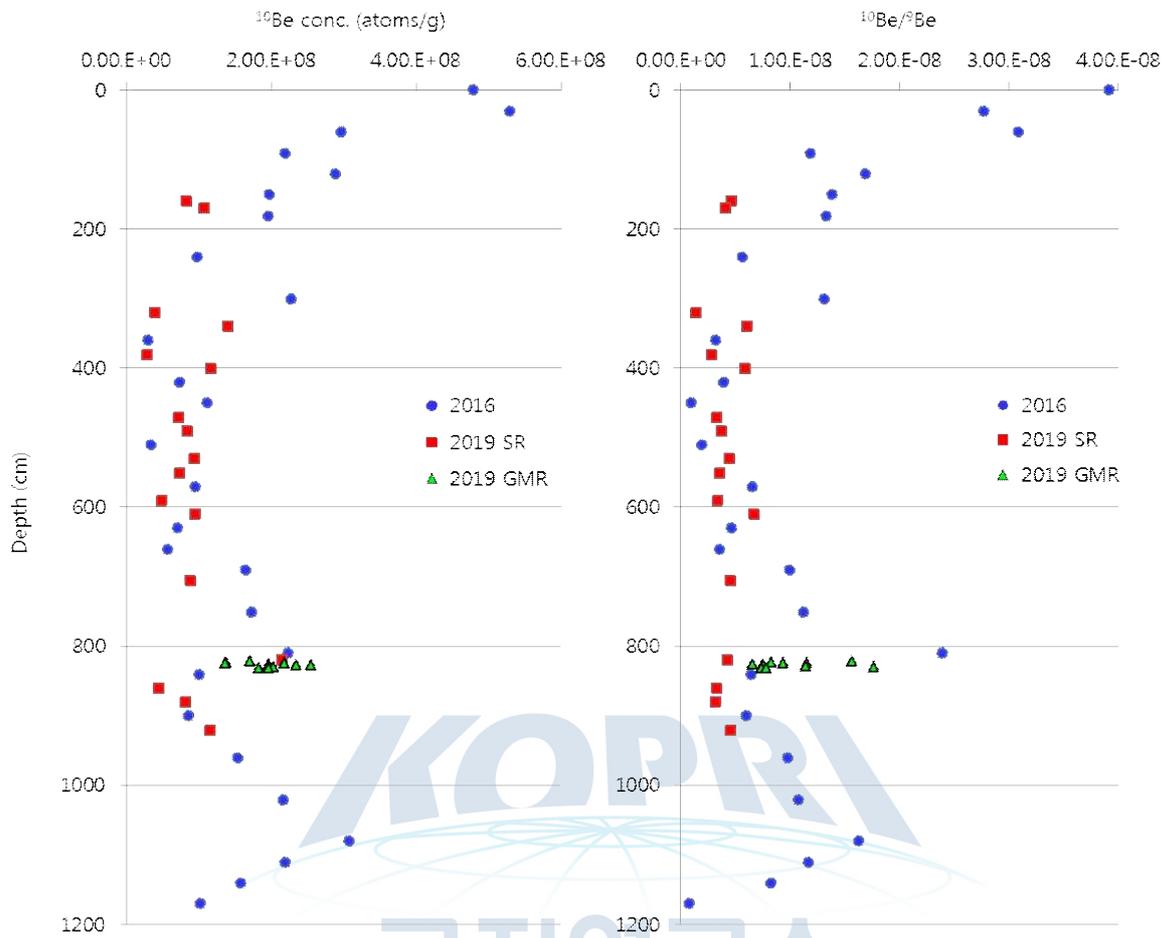


그림 12 기존 2016년의 분석 결과와 2019년의 추가 분석결과(사각형: 퇴적물 연구 목적, 삼각형: 고지자기 역전지점 연구 목적).

2.2 육상시료 처리

육상시료는 남극 로스해의 테라노바 베이의 3개의 빙하(Campbell, Priestley, David)의 말단부에 위치하는 노출지역들에서 각각 약 40~50여개씩의 샘플들을 채취하였다(Jangbogo Hills, Inexpressible Island, Mt. Priestley; 그림 13). 지역별로 3개의 연구로 나누어 진행중이며(JBG, IEI, DVD) 현재 JBG 연구는 Quaternary Science Reviews에 출판이 완료되었으며, IEI는 투고를 준비하기 위한 논의 중이며, DVD는 분석이 진행 중에 있다. 그리고 JBG와 IEI 두 지점의 융기해안에서 OSL 샘플을 채취하여 해빈성 원력의 매물연대측정을 통해 isostatic rebound를 알아내고자 하였다.

장보고 기지 배후의 산지(Jangbogo Hills/Campbell glacier)에서 6개 지점을 도보 및 스키두로 이동하며 빙하성 퇴적물을 채취하였다. 각 지점에서 6-8개의 샘플을 채취하였다. Inexpressible island를 해변으로부터 8개 지점을 헬기로 이동하며 빙하성 퇴적물을 채취하였다. 각 지점에서 6-8개의 샘플을 채취하였다. David glacier 주변 Mt. Priestley 및 주변의 3개 봉우리 지역을 헬기로 이동하며 기반암 및 빙하성 퇴적물 채취함. 총 4개의 지점에서 채취하였으며 기반암은 각 지점당 5개씩, 그리고 낮은 2개의 지점에서 빙하성 퇴적물을 약 20 여개 채취하였다(그림 14).

빙하의 축소로 인한 반동으로 급격히 증가한 융기해안에서 해빈성 퇴적물을 채취하였다. Inexpressible island와 장보고 기지의 동쪽에 위치한 해변에서 수행하였다. 채취한 시료는 모두 암석이다. Inexpressible island를 해변으로부터 도보로 이동하며 5개 지점에서 해빈 퇴적물을 채취하였다. 각 지점에서 5개의 샘플을 채취하였다. 장보고 기지 해변으로부터 5개 지점을 도보로 이동하며 빙하성 퇴적물을 채취하였다. 각 지점에서 5개의 샘플을 채취하였다.

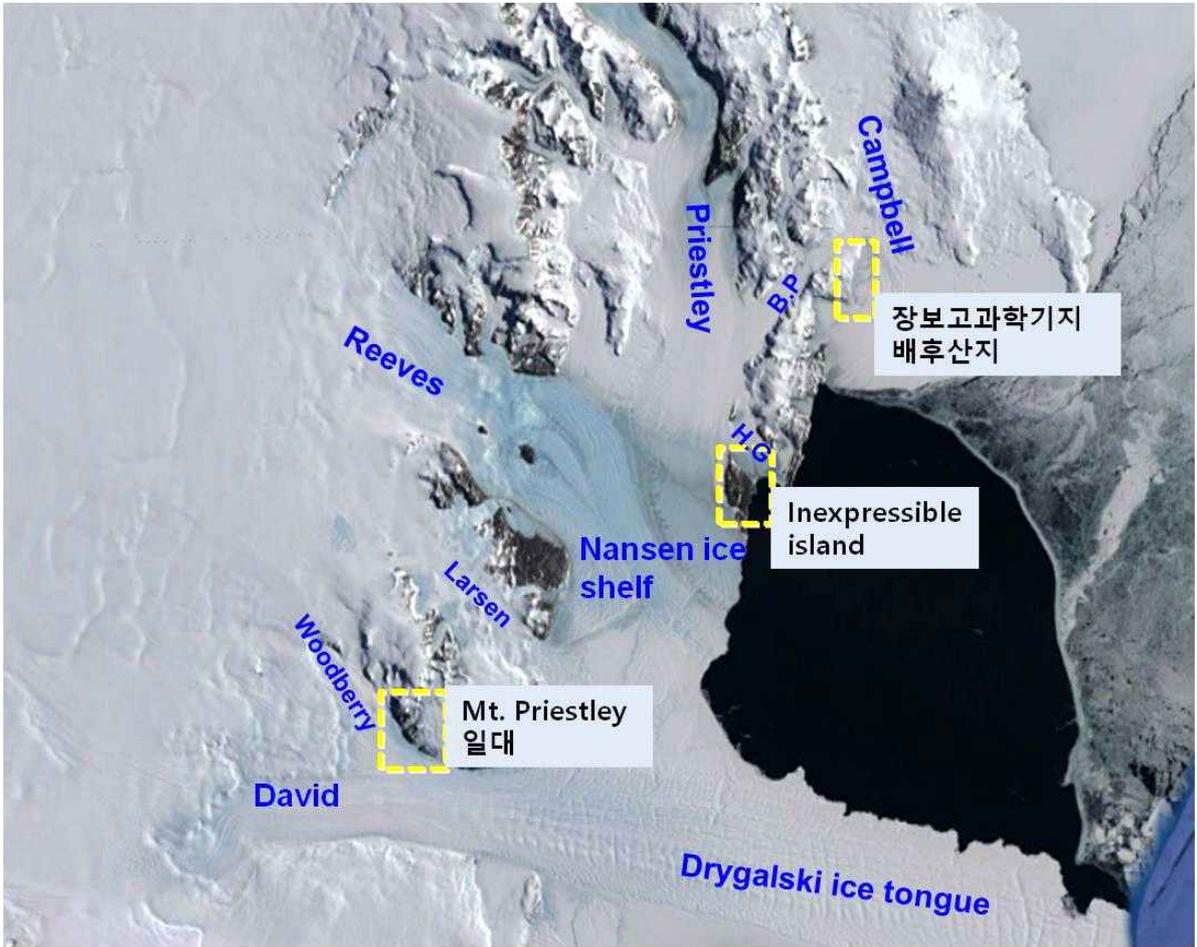


그림 13 육상연구지역의 위성영상지도

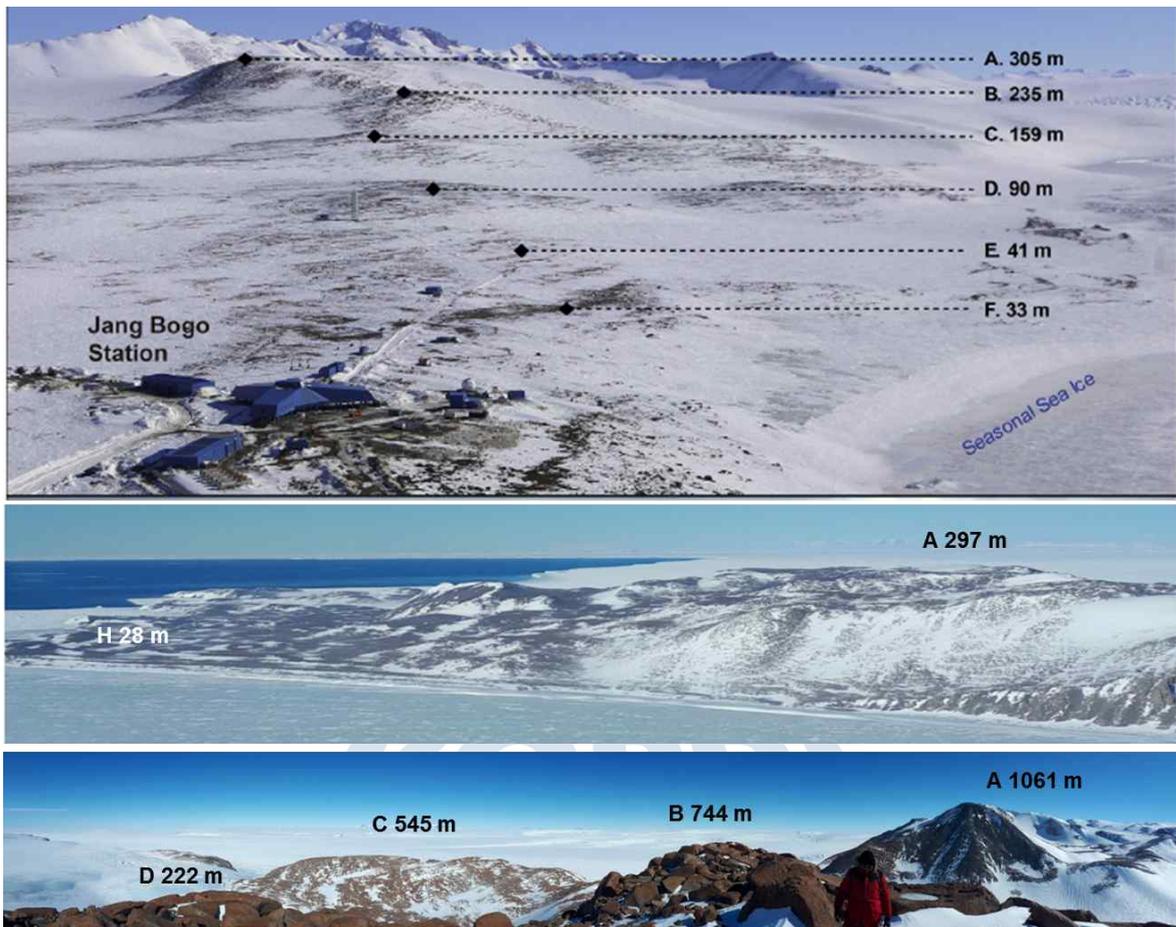


그림 14 연구지역별 샘플 채취 지점의 항공사진. JBG, IEL, DVD 순서.

가. Jangbogo Hills

장보고과학기지 배후산지에 관한 연구가 2019년 Quaternary Science Reviews에 출판되었으며 결과는 다음과 같다. 이 지역은 약 140 ka의 Penultimate Glaciation Maximum (PGM) 시기에 캠벨 빙하가 해발고도 약 600~670 m까지 성장했다는 연구결과가 있다(Di Nicola et al., 2009). 우리는 이 지역에서 Be-Al의 교차 검토를 이용한 약 305 m의 벤치부터 159m의 벤치까지 3개의 지점(bench A~C)에서 모두 약 100ka로 수렴하는 단순노출을 발견하였다(그림 15). 즉 140 ka 이후에 빙하는 약 100 ka까지 305~159m를 관통하는 매우 빠른 수직적 수축이 일어났음을 알 수 있다. 이는 MIS 5의 중후반 시기로, 상승한 기온에 의해 빙하의 수축이 일어난 관계로 파악이 된다.

높은 지점에서의 100ka 단순노출의 발견은 LGM과 관련하여 또다른 해석이 가능하다. 높은 지점이 MIS 5 이후 빙하의 재진전, 성장에 의해 매몰이 된 역사가 없다는 것은 최종빙기인 MIS 4~2의 시기에 빙하가 그만큼 성장하지 못했음을 시사하기 때문이다(그림 16).

4번째 지점인 90m 지점, bench D 에서는 7개의 샘플 중 3개의 샘플이 35ka에, 3개의 샘플이 17ka에 집중적으로 분기되어 나타남으로서 두 시기 사이의 빙하의 정체가 나타났을 것으로 해석된다. 특히 이같은 결과는 Cape Adare 와 Cape Hallet에서 나타나는 펭귄 루커리의 연대측정 결과가 35ka과 17.3ka 사이에 빙하가 존재하지 않았다는 내용과 일치한다. 이를 통해 해당 지역들은 최종빙기 기간 동안에 빙하의 성장이 거의 없었음을 나타내며, 동시에 LGM이 MIS 2가 나타나지 않고 상대적으로 MIS 5 이래로 수축해오며 MIS 4 시기에 LGM이 나타났을 것으로 해석된다(그림 17). 많은 분출빙하들이 대부분 Holocene에 걸쳐 빙하의 수축이 일어났음이 밝혀졌음에도 불구하고, 동남극빙상의 중심부와 맥머도 지역의 Denton Hills에서도 각각 50ka, 36ka에서 LGM이 나타난 것으로 보아 local LGM이 지역별로 심하게 나타났음을 알 수 있다.

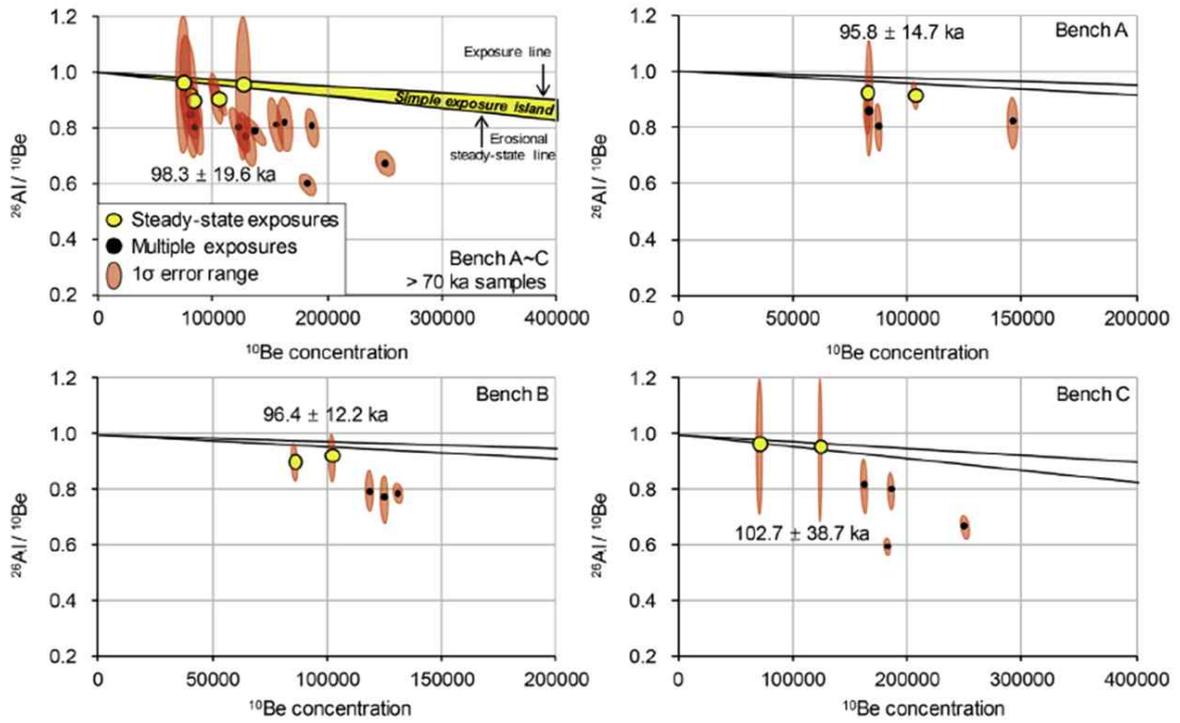


그림 15 상부 3개의 벤치에서 모두 발견된 100 ka에 수렴하는 단순노출연대



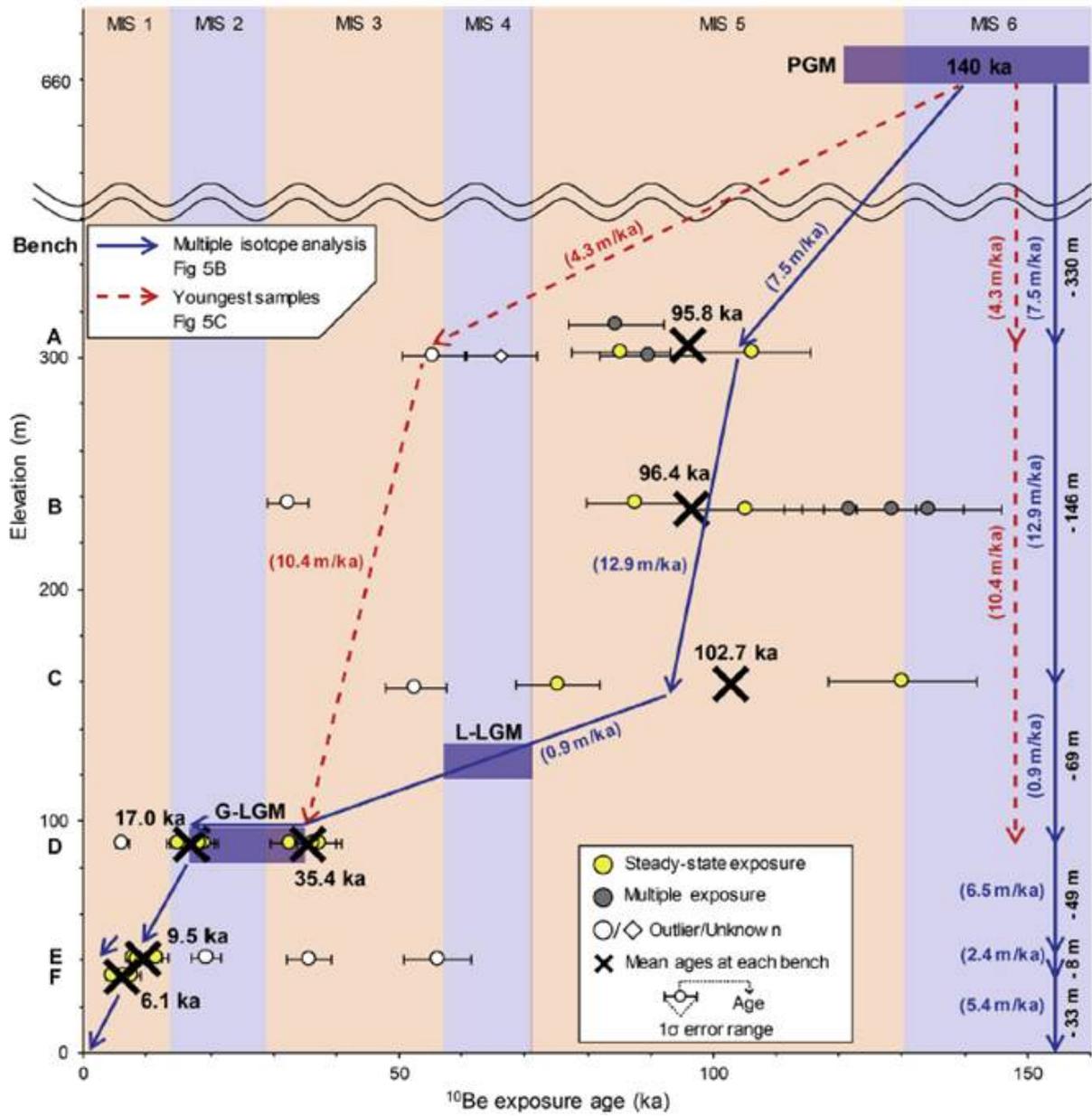


그림 16 연대측정 결과를 이용한 캠벨 빙하의 변화

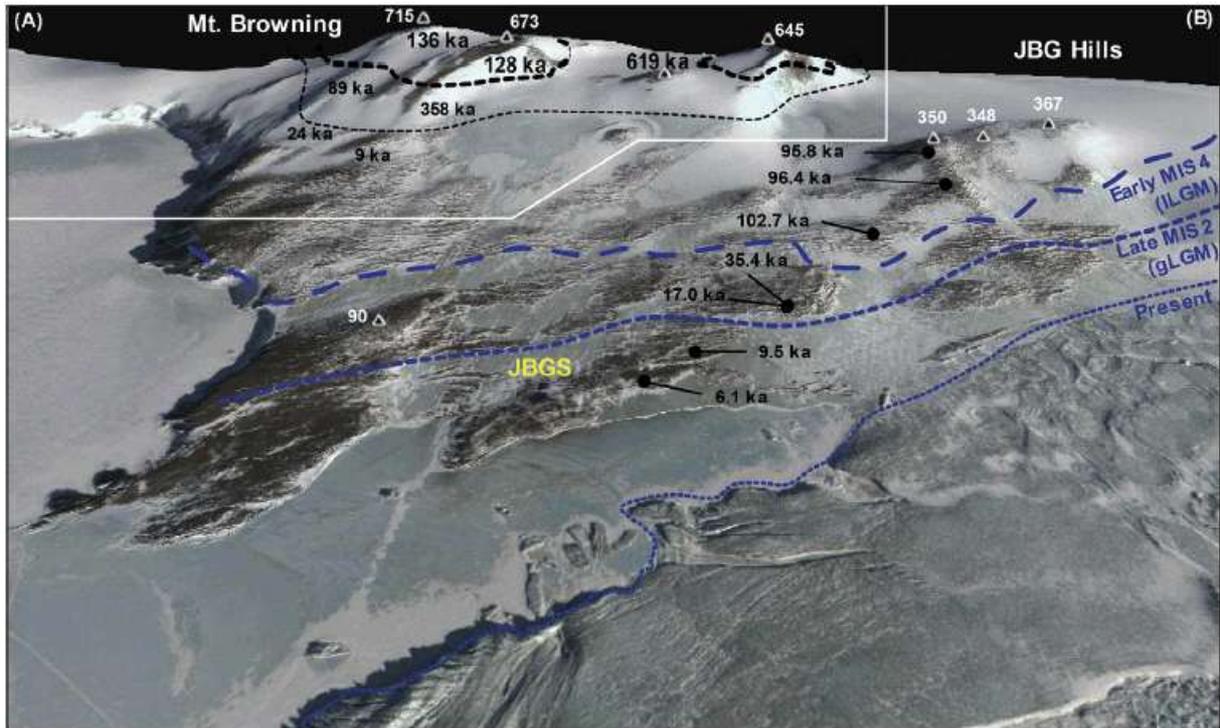


그림 17 캠프벨 빙하의 시기별 고도상한선



제 3 절 결론

지난 연구를 통해 개선한 authigenic ^{10}Be 실험 방법과 in-situ $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ 의 다핵종 분석방법을 사용하는 등 실험 방법 개선과 연구 활용의 선택지가 매우 넓어졌다. 이러한 다양한 분석과 연구지역으로부터 퇴적물들을 이용해 고기후 변화 및 빙하의 거동을 복원하는 연구가 점진적으로 진행중에 있다.

현재까지 진행된 내용은 다음과 같다.

1) 라르센 해, 벨링스하우젠 해, 로스 해 3개 지역에서의 다양한 해양퇴적물 코어로부터 authigenic ^{10}Be 분석을 성공하였다. 대부분의 연구는 많은 분야의 고환경 변화 연구에 데이터를 제공할 예정이며, 남극해의 전반적인 베릴륨 패턴을 분석하는 별도의 연구를 준비중에 있다. 활용도가 매우 높아 여러 연구 팀에서 분석의뢰가 많아 다양한 연구 목적으로 분석 결과를 제공하고 있다. 지난 연구를 통해서도 라르센 해에서의 외해/내해의 베릴륨 패턴 차이, 벨링스하우젠 해에서의 베릴륨 농도 급감 깊이 패턴 분석, 그리고 로스해에서의 퇴적물 연구 및 고지자기 연구에 대한 분석을 시행하였다.

2) 육상 빙하성 퇴적물 및 기반암의 노출연대 연구는 시기, 비용, 기상 등 제한점들이 많아 연구계획이 지연이 되었다. 하지만 지난 2017년 탐사를 통해 3개의 지역에서 양질의 샘플을 채취하는데 성공하였으며, 해당 결과 역시 논문 투고를 중점적으로 진행 중에 있다. 특히 캠벨 빙하는 로스해의 수많은 분출 빙하 중에서도 고립된 로컬빙하로서, 다른 분출 빙하들이 최종빙기 당시에 성장하고 홀로세에 집중적으로 수축된데에 반해, 최종빙기의 미흡한 성장과 MIS 6이래로의 지속적인 수축 패턴을 보임을 밝혀내었다. 이에 따라, 다른 빙하들 역시 최종빙기 당시 성장한 것이 아닌 이전 빙기로부터의 수축 패턴을 따르고 있을 수 있음을 추가적으로 논의해보고자 한다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

본 과제수행의 목표 및 달성도는 다음과 같다.

성과목표	세부목표	달성 주요내용	달성도(%)	참고
1.우주선 유발 동위원소 meteoric ¹⁰ Be 을 이용한 Ross Sea의 빙하성 해양퇴적물 연구	1-1 우주선 유발 동위원소 meteoric ¹⁰ Be 농도분석	- 성장과 후퇴를 반복하는 빙봉의 활동과 관련된 해양퇴적물에서 대기중에서 형성된 우주선 유발 동위원소 ¹⁰ Be의 농도를 분석해서, 퇴적층의 층서를 정립하고, 고기후를 복원한다.	80%	- 로스해 뿐만이 아닌 다른 연구지역들에 분석을 많이 수행함으로써 로스해의 연구 결과 실적을 내지는 못하였으나 차후 비교연구가 기대됨
2.우주선 유발 동위원소 in situ ¹⁰ Be를 이용한 기반암, 퇴적층 역사 추적	2-1 우주선 유발 동위원소 연대측정	- 육상지역의 노출연대를 우주선 유발 동위원소 in situ ¹⁰ Be를 이용하여 측정하고 퇴빙역사와 고기후를 복원한다.	70%	연구지역 3개의 탐사, 전처리, 분석 모두 완료. 1개 투고 완료. 1개 투고 준비. 1개 논의 중.

라르센 해, 벨링스하우젠 해, 로스 해에서 채취한 해양 퇴적물 코어에서 대기 중에서 형성된 우주선 유발 동위원소 ¹⁰Be(authigenic ¹⁰Be)의 분석을 진행하였다. 기존 계획의 로스 해 집중분석이 다른 연구지역의 추가 분석으로 지연되었으나, 남극해 여러 지역의 베릴륨 패턴 분석을 통해 전반적인 빙하 및 고기후 변화 역사를 밝히고자 한다.

또한 우주선 유발 동위원소 in situ ¹⁰Be 및 in situ ¹⁴C을 활용하여 육상 빙하 변화 연구를 진행하고자 하였으나, 10만년이 넘는 높은 연대로 인해 in situ ²⁶Al이 대체활용되며 새로운 실험 방법이 정립되었다. 또한 각 연구별로 새로운 발견을 통해 지속적으로 논문 작업을 진행중에 있다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

이전 연구에서 실시한 해양퇴적물코어에서의 authigenic ^{10}Be 분석은 많은 활용도와 여러 연구지역에서의 수요로 지속적으로 활용되어 왔으며 앞으로도 많은 수요가 있을 것으로 예상된다. 또한 많은 지역에서의 데이터를 구축하는만큼 연구지역을 남극해 전역으로 넓혀 베릴륨 분포 패턴, 퇴적물의 이동 등에 대해서도 연구를 할 수 있을 거라 예상된다. 또한 육상 연구가 2017년 1차 탐사에서 수집한 샘플들 중 1차 연구지역의 결과를 바탕으로 논문이 투고됨에 따라 연구의 활용도가 다른 지역에서도 지속적으로 발전할 것으로 예상된다. 이를 통해 로스해에 나타나는 다른 노출지역이나 기타 남극해 주변의 노출 지역의 탐사를 계획하고 해당 연구를 발전시켜 나가고자 한다.



제 6 장 참고문헌

Arnold, J. R. (1956). Beryllium-10 produced by cosmic rays. *Science*, 124(3222), 584-585.

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.

Brachfeld, S., Domack, E., Kissel, C., Laj, C., Leventer, A., Ishman, S., et al. (2003). Holocene history of the Larsen-A Ice Shelf constrained by geomagnetic paleointensity dating. *Geology*, 31(9), 749-752.

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.

Di Nicola, L., Strasky, S., Schlüchter, C., Salvatore, M.C., Akcar, N., Kubik, P.W., Christl, M., Kasper, H.U., Wieler, R., Baroni, C., 2009. Multiple cosmogenic nuclides document complex Pleistocene exposure history of glacial drifts in Terra Nova Bay (northern Victoria Land, Antarctica). *Quat. Res.* 71 (1), 83-92.

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.

Domack, E. W., Jacobson, E. A., Shipp, S., & Anderson, J. B. (1999). Late Pleistocene - Holocene retreat of the West Antarctic Ice-Sheet system in the Ross Sea: Part 2 - sedimentologic and stratigraphic signature. *Geological Society of America Bulletin*, 111(10), 1517-1536.

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

Evans, J., Pudsey, C. J., ÓCofaigh, C., Morris, P., & Domack, E. (2005). Late Quaternary glacial history, flow dynamics and sedimentation along the eastern margin of the Antarctic Peninsula Ice Sheet. *Quaternary Science Reviews*, 24(5), 741-774.

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.

Goel, P. S., Kharkar, D. P., Lal, D., Narsappaya, N., Peters, B., & Yatirajam, V. (1958). The beryllium-10 concentration in deep-sea sediments. *Deep Sea Research* (1953), 4, 202-210.

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

Jeong, A., Lee, J.I., Seong, Y.B., Balco, G., Yoo, K.C., Yoon, H.I., Domack, E., Rhee, H.H., Yu, B.Y., 2018. Late Quaternary deglacial history across the Larsen B embayment, Antarctica. *Quat. Sci. Rev.* 189, 134-148.

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

Merrill, J. R., Lyden, E. F., Honda, M., & Arnold, J. R. (1960). The sedimentary geochemistry of the beryllium isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 18(1), 108-129.

Oberholzer, P., Baroni, C., Schaefer, J.M., Orombelli, G., Ochs, S.I., Kubik, P.W., Baur, H., Wieler, R., 2003. Limited Pliocene/pleistocene glaciation in Deep freeze range, northern Victoria Land, Antarctica, derived from in situ cosmogenic nuclides. *Antarct. Sci.* 15 (4), 493-502.

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.

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(5373), 82–85.

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

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. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 259(1), 576–583.

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., Schlüter, 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.

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.

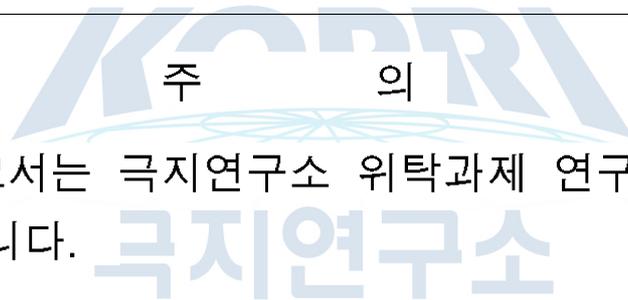
국문 표기

- 이 연구는 극지연구소의 지원을 받아 수행되었습니다.(PE19030)

영문 표기

- This work was supported by the Korea Polar Research Institute (KOPRI, PE19030)





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