

TSP16010-048-12

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 위탁연구 “우주기원 동위원소 연대측정을 이용한 빙하 기록 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



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

보고서 초록

위탁연구과제명	우주기원 동위원소 연대측정을 이용한 빙하기록 연구				
위탁연구책임자	성영배	해당단계 참여연구원수	2	해당단계 연구비	2천만원
연구기관명 및 소속부서명	고려대학교 지리학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약				보고서 면수	50
<p>연구지역인 남극의 로스해 및 로스 빙봉은 홀로세의 급격한 기후 변화에 의해 두께와 범위가 점차 축소하고 있으며, 남극에서 가장 큰 규모의 빙봉이기에 급격한 기후 변화에 따른 빙봉의 변화를 모니터링하고 과거 기후 변동의 프록시를 분석하여 미래의 추가적인 변화를 예측할 필요가 있다.</p> <p>Meteoric ^{10}Be은 대기 중의 질소, 산소 원자와 우주선이 핵반응을 일으키며 생성되는 우주선 유발 방사성 동위원소로, 생성 후 대기 중 먼지에 흡착되거나 강수에 용존되어 대륙, 호수, 대양 등의 지표로 침전, 퇴적물 내에 저장된다. 이와 같은 meteoric ^{10}Be의 거동을 활용하면, 빙봉의 역사와 고기후 환경을 복원할 수 있기 때문에 빙하성 해양퇴적물 내의 meteoric ^{10}Be 분석 연구는 빙봉 활동사 복원에 매우 효과적인 연구방법이 될 수 있다.</p> <p>이전 연구에서 fusion 및 leaching의 방식으로 authigenic 성분과 detrital 성분을 모두 녹여내고 이후에 보정을 했던 복잡한 실험을 각각의 장점만을 살린 혼합 추출법으로 발전시켜 authigenic Be만의 추출과 이 Be을 녹여내는 fusion 방식의 혼합을 통한 새로운 실험 방법을 제시하였다. 이를 통해 실험 중에 발생하는 오차를 줄이고 시간적, 경제적으로 간소화시켜 보다 다양한 연구의 접근 가능성을 확인하였다.</p> <p>이 방법을 이용해 로스해 외곽의 룡코어 LC42와 LC48을 분석하였으며, 약 30 cm 등간격의 퇴적물 샘플을 이용하여 meteoric ^{10}Be을 추출 및 분석하였다. 이 결과를 통해 연구지역의 빙봉의 진출과 후퇴를 복원하고 고기후의 역사를 복원해보고자 한다.</p>					
색 인 어	한 글	우주선 유발 동위원소, meteoric ^{10}Be , 로스 빙봉, 퇴빙, 질량가속기			
	영 어	CRN, Meteoric ^{10}Be , Ross Ice Shelf, Deglaciation, AMS			

요 약 문

I. 제 목

우주선 유발 방사성 동위원소(Cosmogenic Radioactive Nuclides; CRN) 베릴륨-10 분석을 통한 빙하성 해양퇴적물 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

연구지역인 로스해 및 로스 빙봉은 홀로세에 있었던 급격한 기후 변화에 의해 그 두께 및 범위가 점점 축소하고 있으며 이전 연구의 라슨 빙봉들보다도 훨씬 더 큰 규모의 빙봉이기 때문에 현재 진행되고 있는 급격한 기후 변화에 따른 빙봉의 변화를 모니터링하고 과거 기후 변동의 지시자들을 분석하여 미래의 추가적인 붕괴를 예측할 필요가 있다.

이에 대해 두 가지 유형의 우주선 유발 동위원소 ^{10}Be (meteoric ^{10}Be , in situ ^{10}Be)은 기후변화의 추적자로서 매우 유용한 역할을 할 수 있다. Meteoric ^{10}Be 은 대기 중의 질소, 산소 원자와 우주선(cosmic ray)이 핵반응을 일으키며 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, 빙봉의 역사와 고기후 환경을 복원할 수 있기 때문에 빙하성 해양퇴적물 내의 meteoric ^{10}Be 분석 연구는 효과적인 연구방법이 될 수 있다.

Meteoritic ^{10}Be 와 달리 in situ ^{10}Be 는 암석의 광물 격자내부 안의 질소, 산소 원자와 우주선에 노출되며 핵반응을 일으키며 생성되므로 암석의 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 을 함께 사용하면, 겉보기 노출연대 (apparent exposure age)가 아니라 빙하의 후퇴-전진의 반복에 의한 매몰 여부를 알 수 있으며 실제 노출연대를 밝혀낼 수 있다는 장점이 있다.

따라서 본 연구의 목적은 로스해 지역의 해양퇴적물코어에서의 meteoric ^{10}Be 분석과 육상지역에서의 in situ ^{10}Be 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 추출법에 대한 문헌 연구
- Meteoric ^{10}Be 추출 실험 시행 및 개선
- In situ ^{10}Be 추출 실험 시행
- In situ ^{14}C 추출 실험 시행
- AMS(Accelerated mass spectrometer)를 이용한 ^{10}Be , ^{14}C 분석
- 해양퇴적물 코어 깊이별 meteoric ^{10}Be 농도 분석 자료와 육상의 빙하표류석으로부터 추출한 in situ ^{10}Be , in situ ^{14}C 노출연대 측정 결과를 바탕으로 빙봉의 역사와 고기후 환경 복원
- 논문 투고



IV. 연구개발결과

연구개발 결과를 정리, 요약하면 다음과 같다.

- 1) Meteoric ^{10}Be 추출법을 개선하였다. 이전 연구에서 채택한 Stone과 Bourles의 각 실험 방법을 부분적으로 채택하여 분석의 정확도를 높이고 과정을 축소시켜 개선하였다.
- 2) 로스해의 LC42와 LC48로부터 일정 간격의 샘플을 취득해 meteoric ^{10}Be 의 추출을 진행하였고 AMS 측정 및 분석을 완료하였으며 이를 해석 및 논의하여 논문을 준비중에 있다.
- 3) 로스해의 Terra Nova Bay 주변 육상 빙하의 연구를 진행하고 있으며 이 연구를 통해 육상 빙하표류석 혹은 기반암의 채취, 분석, 논의를 진행하고자 한다.

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, Ross sea and Ross ice shelf, have responded sensitively to rapid climate changes during the Holocene and their thickness and extents have been decreased. Since the Ross ice shelf is much more larger than any other ice shelves in Antarctic Peninsula, the need for monitoring of ice shelf reponses and predicting of future collapse of Ross ice shelf comes up.

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}Be .

III. Scope and Contents of the Project

This report includes the following research topics.

- Review previous works which cover method for extracting meteoric ^{10}Be .
- 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 ^{14}C from erratics..
- Analyze ^{10}Be 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 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 developed chemical method for extracting meteoric ^{10}Be . Previous study had taken methods of Stone and Bourles and this study took their advantages for increasing accuracy and reliability and contracting the process.
- 2) We gathered glacial-marine sediment samples at regular intervals from LC42 and LC48 of Ross sea and extracted meteoric ^{10}Be . Results were all analyzed with AMS and ICP-MS measurement. Discussions are going on with those results for research paper.
- 3) In-situ studies with the glacial erratic boulders or bedrock on the land near the Terra Nova Bay is being proceeded..

목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

제 1 절 Hybrid extraction method를 이용한 로스해 LC 42, 48의 시료 분석

제 2 절 LC 42, 48 지역의 비교와 측정결과 분석

제 3 절 결론

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발 결과의 활용 계획

제 6 장 참고문헌



표 목 차

- 표 1 Bourles et al. (1989) 와 Stone (1998)의 meteoric ^{10}Be 추출방법을 비교하여 각각의 장점을 채택한 Jeong et al. (in preparation)의 hybrid extraction method
- 표 2 라슨 C 빙봉지역 해양퇴적물 코어에서 분석한 authigenic ^{10}Be 의 농도
- 표 3 빙봉 지역의 해양퇴적물 코어에서 분석한 고기후 변화와 그에 따른 환경 변화 분석 방법
- 표 4 LC 42의 meteoric Be 분석 결과표
- 표 5 LC 48의 meteoric Be 분석 결과표

그 림 목 차

- 그림 1 기권과 암권의 석영에서 우주선에 의해 형성되는 동위원소들
- 그림 2 퇴적물입자에 존재하는 베릴륨의 형태를 표현한 그림
- 그림 3 Stone의 fusion 방법을 사용하여 베릴륨을 추출해내는 실험과정
- 그림 4 고려대학교에서 개선한 베릴륨 추출 방식
- 그림 5 고려대학교에서 개선한 베릴륨 추출 과정
- 그림 6 KIST (Korea Institute of Science and Technology)의 6 MV Tandetron AMS (Accelerator Mass Spectrometry)
- 그림 7 고려대학교에서 개선한 베릴륨 계산 과정
- 그림 8 라슨 C 빙봉지역 해양퇴적물 코어에서 분석한 깊이에 따른 authigenic ^{10}Be 의 농도 그래프
- 그림 9 빙상으로부터 가깝고 멀어짐에 따라 변화하는 퇴적상
- 그림 10 연구지역인 Ross Sea의 LC42, 48 지점의 지도
- 그림 11 Ross Sea LC42의 퇴적상과 ^9Be 농도, ^{10}Be 농도, $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율, 고지자기 변화 분석을 이용한 연대 측정 결과
- 그림 12 Ross Sea LC48의 퇴적상과 ^9Be 농도, ^{10}Be 농도, $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비율, 고지자기 변화 분석을 이용한 연대 측정 결과
- 그림 13 퇴적상을 통해 유추할 수 있는 sub-floating ice shelf 환경
- 그림 14 Ross Sea LC42와 48의 시간을 보정시켜 비교 분석한 결과

제 1 장 서 론

지난 연구에서 라슨 빙붕의 우주선 유발 동위원소를 활용을 통해 기후 변화에 따른 빙상 및 빙붕의 전진과 후퇴의 신호를 육상과 해양에서 포착하여 그 역사를 복원해 본 바 있다. 특히 라슨 빙붕은 1990년대 중반과 말, 그리고 2002년에 발생한 대규모 붕괴로 인해 기후변화와 관련하여 많은 사람들이 관심을 갖게 되었다. 또한 아직까지 대규모로 붕괴되지 않았지만 지속적으로 얇아지고 있다는 라슨C 빙붕까지 해양퇴적물 코어 및 육상의 모레인 샘플을 분석하여 고기후를 복원해 보았다(Shepherd et al., 2003; Jeong et al., in preparation). 이러한 연구 방법을 토대로 서남극과 동남극의 경계인 남극 횡단 산맥의 끝에 위치한 로스해의 빙하기록을 연구하였다. 로스해는 서남극으로부터의 막대한 빙상을 공급받음과 동시에 산맥의 서쪽 사면으로부터 빙하들이 흘러들고 있는 곳이며, 로스 빙붕은 규모가 남극에서 가장 거대하기 때문에 빙붕의 붕괴와 관련하여 그 영향력이 막대할 것으로 예상된다.

빙붕의 중요성은 기존의 여러 연구에서 이미 보고되었으며 빙붕이 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). 라슨B 빙붕지역에서 레이더 위성(synthetic-aperture radar satellites: SARS)을 통해 빙붕의 붕괴전후 빙하의 흐름과 빙하 질량 변화를 추정하여 2002년 이후 라슨B 빙붕의 붕괴 이후 빙하의 흐름이 가속화되었으며 이로 인해 라슨B 만의 8개 대륙빙하에서 $27 \text{ km}^3/\text{yr}$ 이상의 빙하 질량 감소가 발생했음을 밝혀냈다(Rignot et al., 2004).

빙붕에 대한 연구는 주로 해양퇴적물 코어 내의 퇴적물에 대한 퇴적학적, 지구 물리·화학적, 미생물학적 분석을 통한 연구가 이루어져 왔다. 특히 빙붕의 성장·후퇴·붕괴와 관련된 연구에서는 구조류나 유공충의 종류나 함량, 그리고 분포 패턴 등을 주요 지시자로 사용해왔는데, 해양 퇴적물 내에 구조류나 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 구조류나 유공충 분석과 더불어 상호보완적으로 빙붕의 성장-후퇴-붕괴와 관련된 빙붕의 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.

따라서 이번 연구에서는 다른 유형의 우주선유발 동위원소 ^{10}Be 을 분석하여 해양에

서 나타난 로스 빙봉의 전진-후퇴 신호를 포착하여 이를 바탕으로 그 역사를 복원하고자 한다. 또한 이전 연구에서 활용하였던 해양퇴적물 코어 내 퇴적 샘플로부터 위의 meteoric ^{10}Be 을 추출하는 실험 과정에서 대기 중에서 생성되어 해양을 거쳐 퇴적되는 authigenic ^{10}Be 이 아닌 퇴적물 입자의 내부로부터 유입되는 detrital ^{10}Be 을 함께 추출 후 보정 계산을 통해 제외하는 방식으로부터 추출 과정에서부터 authigenic ^{10}Be 만을 추출하는 방식으로 실험 방법을 개선하였다. 이를 통해 보다 더 순수한 meteoric ^{10}Be 만을 다루어 신뢰도를 높이게 되었으며 실험의 시간적, 경제적 측면에서도 개선된 바가 있다. 이러한 연구 방법을 통해 로스해의 LC42와 LC48을 동일한 방법으로 분석하여 결과를 해석, 그 차이를 통해 지역별 빙하의 기록을 해석하였다.



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, 무온, 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 추세였다. 지난 연구를 통해 Hybrid method for extracting meteoric ^{10}Be (Jeong et al., in preparation)를 개발하여 meteoric ^{10}Be 을 추출하는 데 있어 보다 효율적인 1998년에 Stone이 제시한 Fusion 방법과 authigenic 성분만을 추출하기 위해 Bourles의 leaching 방법을 혼합한 바 있다. 이 보고서에서는 새로운 연구 방법을 이용하여 연구지역인 로스해에서 취득한 LC42와 LC48의 샘플을 등간격으로 채취하여 분석하였으며 그 결과를 밝혔다.

표1에서 확인할 수 있듯이 두 방법의 가장 근본적인 차이는 베릴륨의 authigenic phase만을 선별적으로 추출하는 데 있다. 그림 2에서와 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 시도하였

다. 약산에서부터 점차 강산을 사용하는 단계별 leaching을 시켜 해양퇴적물의 주성분인 탄산칼슘(calcium carbonate)과 그 외 성분들 (exchangeable, FeO-MnO)에서 추출된 베릴륨을 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(표 1). 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.



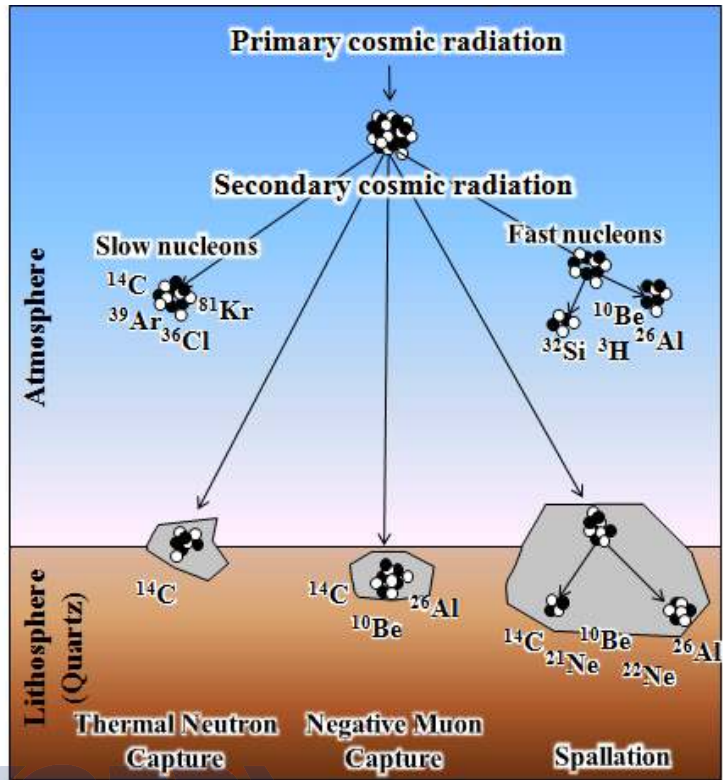


그림 1 우주에서 쏟아져 들어오는 1차 우주선(primary cosmic ray)은 지구의 자기장을 거쳐 양성자나 중성자의 형태로 지구로 유입된다. 이로 인해 형성된 2차 우주선(secondary cosmic ray)은 대기중의 특정 원소나 암석의 특정 원소와 핵반응을 일으켜 우주선 유발 방사성/안정 동위원소들을 만들어낸다.

	Bourles et al (1989)	Stone (1998)	Jeong (in prep.)
방법	<ul style="list-style-type: none"> - Solvent extraction with acetylacetone - 단계적인 leaching을 통해 authigenic phase와 detrital phase의 Be을 분리, 추출하는 방법 	<ul style="list-style-type: none"> - Fusion - Flux와 torch를 이용해 샘플 전체를 용해시키는 방법 	<ul style="list-style-type: none"> - Leaching을 통해 authigenic phase만을 추출 - Leaching한 acid로부터 Fusion을 통해 Be을 녹여 추출
장점	<ul style="list-style-type: none"> - meteoric ^{10}Be연구에 필요한 authigenic phase만을 추출할 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> - 실험이 단순하며 시간이 효율적임 	<ul style="list-style-type: none"> - Authigenic phase의 Be만을 추출 - 시간이 효율적인 실험
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 추출한 authigenic phase의 신뢰도가 떨어짐 - 상대적으로 실험이 복잡하며 시간이 오래 걸림 	<ul style="list-style-type: none"> - 샘플 전체를 용해시키기 때문에 authigenic phase와 detrital phase가 혼합됨 	<ul style="list-style-type: none"> - 분석중

표 1 Bourles et al. (1989) 와 Stone (1998)의 meteoric ^{10}Be 추출방법을 비교하여 각각의 장점을 채택한 Jeong et al. (in preparation)의 hybrid extraction method.



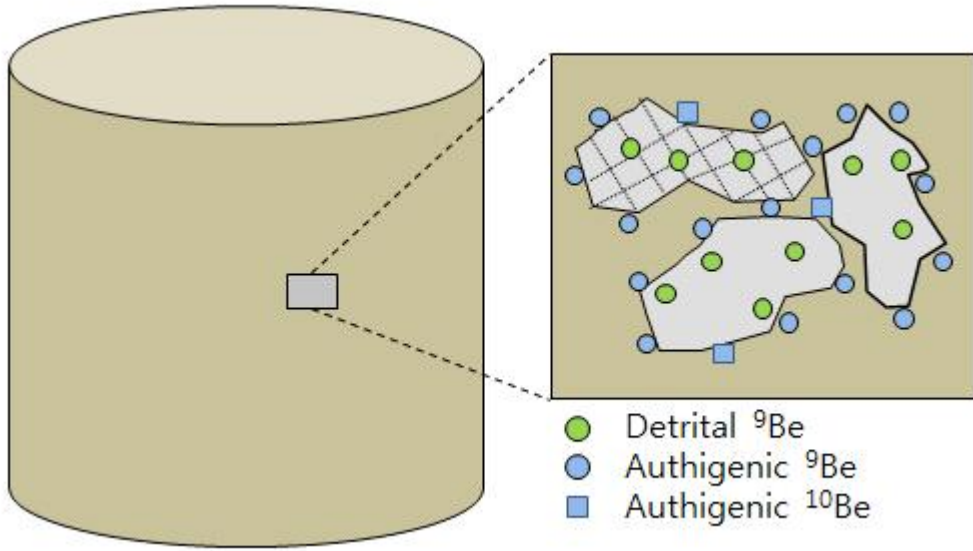


그림 2 퇴적층을 구성하고 있는 퇴적물 입자 내부에는 detrital phase의 ^9Be (녹색 원형)이 존재하며 외부에 흡착된 Be은 일부 퇴적물에서 유입된 ^9Be (청색 원형)과 우주선에 의해 형성된 극소량의 meteoric ^{10}Be (청색 사각형)인 authigenic phase로 구성되어 있다.



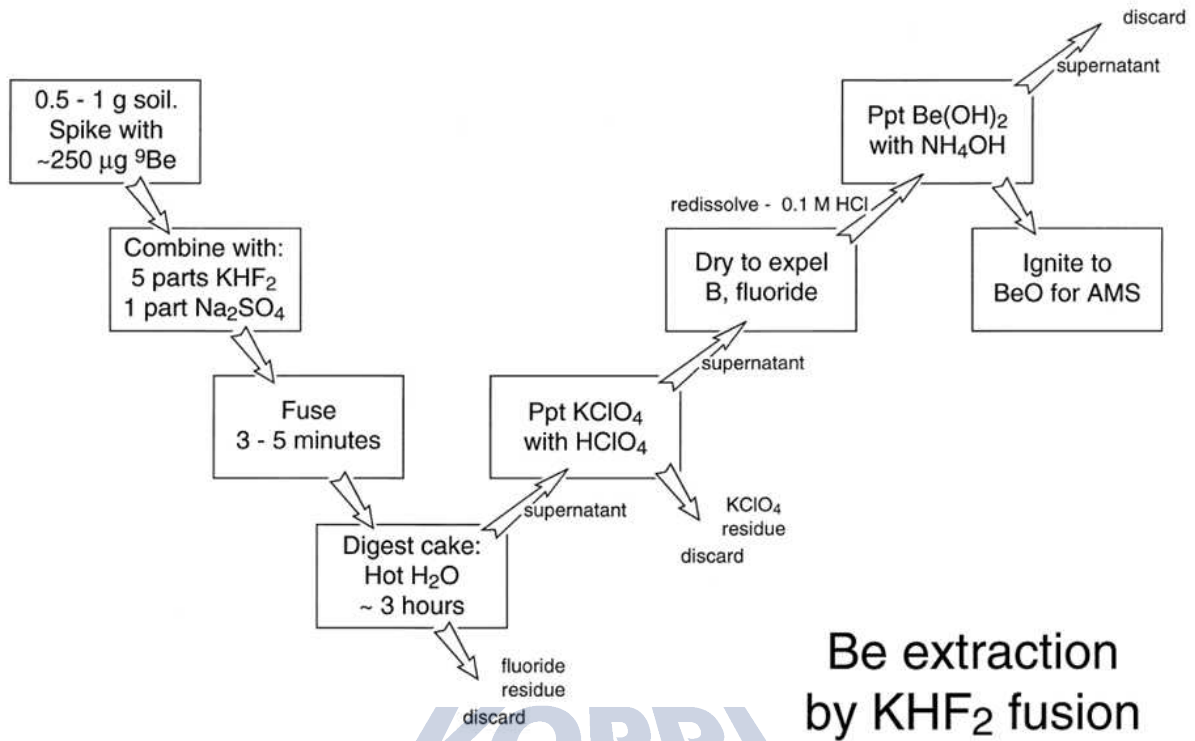


그림 3 Stone의 fusion 방법으로 베릴륨을 추출하는 실험방법. 이전 연구에서는 Stone의 fusion 방법으로 인해 함께 유입되버리는 detrital Be을 제외하는 계산을 추가적으로 해주어야 했으며 이를 위해 authigenic Be을 따로 추출하여 측정해야 했다(Stone, 1998).

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 고려대학교 대기기원 베릴륨 추출방식을 이용한 로스해 LC42, 48의 시료 분석

1.1 코어 시료 전처리

이전 연구에서 고려대학교의 베릴륨 추출 방식은 Bourles et al. (1989)의 leaching 방법과 Stone (1998) fusion 방법을 기반으로 각각의 방법을 부분적으로 장점을 취합하여 개선한 바 있다(그림 4). 두 개의 각 링코어에서 퇴적상이 달라지는 부분들을 중점적으로 등간격으로 1 g씩의 샘플들을 추출하였다. 또한 퇴적물 내의 detrital과의 혼합을 막기 위해 샘플을 계량하기 전 detrital 기원이라고 여겨지는 굵은 입자들(입자 크기 >200 μm)을 체를 이용하여 제거하였다.

1 g의 샘플을 계량하고 전처리를 위하여 알루미늄 도가니에 옮긴 후, 100 $^{\circ}\text{C}$ 의 오븐에 하루 동안 건조시킨다. 이후, 작열감량의 방식에 따라 유기물을 제거하며 그 양을 기록하였으며 이는 500 $^{\circ}\text{C}$ 의 전기 용광로에 최소한 4시간 이상 시료를 산화시키며 진행하였다. 작열감량이 계량된 샘플은 pyrex vial에 보관하고 이후 산을 이용한 베릴륨 추출을 거쳐 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer)와 AMS (Accelerator Mass Spectrometer) 측정에 각각 알맞은 형태로 만들었다(그림 5).

1.2 베릴륨 추출

샘플에 흡착되어 있는 authigenic ^{10}Be 을 녹여 추출하기 위해 샘플을 테플론 비커로 옮기고 그 양을 계량해준다. 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.

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 때

문에 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. 나머지 샘플에는 ^{10}Be 의 거의 없고 ^9Be 만 있는 carrier를 정량하며 섞어준다.



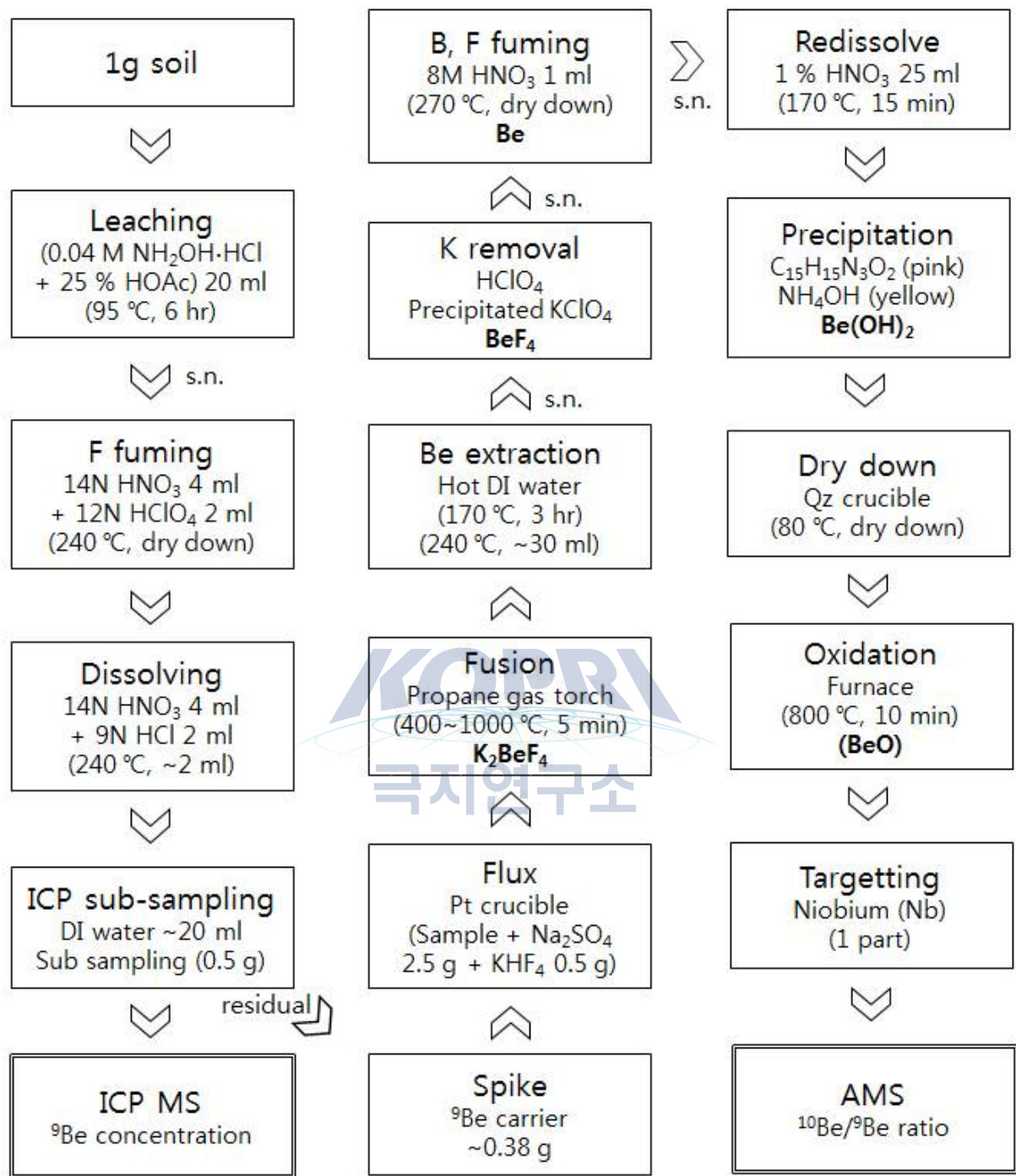


그림 4 Hybrid method for extracting meteoric ¹⁰Be (Jeong et al., in preparation).



그림 5 고려대학교 우주선 유발 방사성 동위원소 대기기원 베릴륨 추출 과정.

산에 녹아 있는 나머지 샘플에는 Be의 절대량이 매우 적기 때문에 ^{10}Be 이 거의 없고 ^9Be 이 대부분인 물질인 ^9Be 캐리어를 섞어주어야 AMS를 측정할 수 있다. 약 0.4 g의 캐리어를 섞어 백금 도가니에 옮기고 핫플레이트에서 밤새 건조시켜준다. 건조된 고체 샘플에 Na_2SO_4 와 KHF_2 를 각각 0.5 g, 2 g씩 넣고 잘 섞어준다. 샘플을 프로판(C_3H_8) 가스 토치를 이용하여 약 $400\sim 1000\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 단계별로 녹여주며 fusion 작업을 시행한다. Na_2SO_4 는 Al, Ti, Fe와 반응하여 비수용성 물질을 만들어내며 Ca, Ba와 먼저 반응을 일으켜 Be과 결합되지 않게 해준다. 이 물질들은 모두 이물질로 제거가 되며 Be은 KHF_2 와 반응을 일으켜 K_2BeF_4 의 형태로 수용성 물질로 만들어진다. 가열이 끝나면 백색의 케이크가 백금도가니의 바닥에 형성된다.

100 ml 테플론 비커에 백금 도가니를 넣고 증류수로 충분히 잠기도록 채운 후 뚜껑을 덮고 2-3 시간 정도 가열해준다. 이 과정은 수용성 물질인 K_2BeF_4 형태의 Be이 뜨거운 물에 잘 녹아 나오지만, Fe, Al, 과 Ti 등은 비수용성 물질이 되었다는 특징을 이용하여 Be을 추출하며, Fe, Al, 과 Ti 등은 아주 미량만 섞여 나오게 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 rpm으로 5분간 원심분리 시키고 상층액을 깨끗한 50 ml Corning 튜브에 따라낸다. 상층액을 따라낸 튜브에 과염소산을 넣어 KClO_4 가 침전되도록 한다. 튜브를 다시 원심분리기에 2500 rpm으로 5분간 원심분리 시켜 K을 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 rpm으로 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 꽃아 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 열전도

와 전기 전도도를 높임으로서 안정적인 빔 전류(beam current)를 얻을 수 있다.

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 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 이상으로 가열하여 중성의 Cs를 증발시켜준다. 증발이 된 중성의 Cs 원자는 $1500\text{ }^\circ\text{C}$ 로 가열된 깔때기 형태의 이오나이저와 충돌하며 열전자를 방출하고 Cs+가 되면서 튕겨 나와 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 뿜히게 된다. 뿜힌 샘플은 이오나이저 뒤에 있는 양극으로 걸어준 익스트랙터에 의해 이오나이저의 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 Tandeton 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.

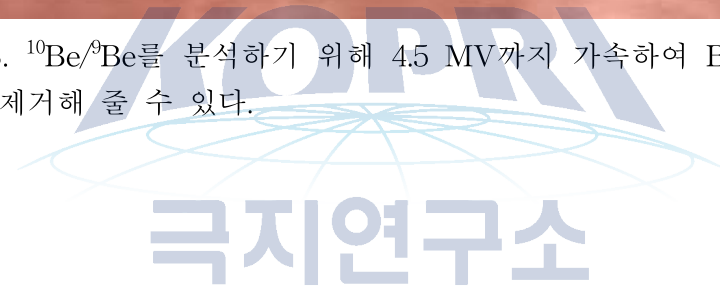
가속되어 나온 원자들은 High Energy Magnet의 고정된 자성에 의해 질량별로 굴절 각도가 다르게 된다. ^{10}Be 의 경우 AMS의 말단인 GIC까지 가게 하며 ^9Be 의 경우 굴절이 더 심하기 때문에 그 앞단의 패러데이 컵으로 조절하여 받아준다. Low Energy Magnet의 순차적 주입에 의해 ^9Be 이 들어올 경우 이 패러데이 컵이 열리며 내부로 들어간 ^9Be 이온은 패러데이 컵에 부딪히며 중성화 되고 이때의 전류를 이용하여 ^9Be 의 원자 개수를 계산할 수 있다.

^{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.



그림 6 KIST의 6 MV Tandetron 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 B를 제거해 줄 수 있다.



1.4 Authigenic ^9Be 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. 이전 연구의 Fusion 방법과는 달리 authigenic 성분만을 leaching하여 fusion시키는 hybrid 방식으로 베릴륨을 추출했기 때문에 이전의 authigenic 성분과 detrital 성분의 농도를 모두 측정해야 하는 ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer) 측정이 생략되었다. 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(그림 7).

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). 이러한 해양 퇴적물 표층시료가 점점 확보됨에 따라 meteoric ^{10}Be 의 농도를 공간적으로 분석하는 연구 역시 진행 중에 있다.

Extraction method	Stone (Fusion)	Bourles (leaching)
	$\left(\frac{{}^{10}\text{Be}(\text{Auth.})}{{}^9\text{Be}(\text{Auth.} + \text{Det.})} \times {}^9\text{Be}(\text{Auth.} + \text{Det.}) \right) \div {}^9\text{Be}(\text{Auth.})$	
Measure-ment	AMS	ICP-AES
		ICP-MS

Extraction method	Jeong (leaching+fusion)
	$\frac{{}^{10}\text{Be}(\text{Auth.})}{{}^9\text{Be}(\text{Auth.})} \times {}^9\text{Be}(\text{Auth.})$
Measure-ment	AMS
	ICP-MS

그림 7 이전 연구의 Stone의 fusion 방법을 사용할 경우 authigenic 성분과 detrital 성분이 모두 혼합되어 버리므로 각각의 농도를 구해야 했지만 LC 42, 48의 연구에서는 퇴적물 입자의 외부에 흡착된 authigenic 성분만을 추출하여 사용하였다.

제 2 절 LC 42, 48 지역의 비교와 측정결과 분석

이전 연구에서 라슨 C 빙봉 해양코어 퇴적물의 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/g 으로 ^{10}Be 농도가 급증했던 결과를 볼 수 있었다(표 2, 그림 8). 이러한 퇴적상의 변화는 빙상아래에 있던 환경에서 빙하의 후퇴로 점차 빙봉 아래에 위치한 해양성 환경에 가까워짐을 의미한다고 밝혔다(Domack et al., 1999; Evans et al., 2005; Jeong et al., in prearation). 이후 ^{10}Be 농도는 점점 증가하다가 63cm 부근에서 4×10^7 atoms/g로 급증하고 큰 변화 없이 그 수준을 유지하다가, 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(그림 9). 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.

이를 코어의 퇴적상 변화와 관련시키면 빙하의 전진 및 후퇴의 역사를 더 정교하게 복원하는 것이 가능해진다. 해양 코어 퇴적물의 채취지점은 빙봉의 성장 후퇴에 따라 노출되는 환경이 달라지는 곳이기 때문에 퇴적상 또한 위의 환경 변화에 따라 달라진다(그림 9). 이러한 기후변화에 따른 빙봉의 역사와 관련하여 빙상으로부터 가깝고 멀어짐에 따라 퇴적상이 변하게 된다(Evans et al., 2005). 빙기에 빙하가 전진하게 되면 코어의 위치는 빙상의 바로 아래에 놓이기 때문에 지탱하고 있는 빙상의 무게로 인하여 압축된(compacted) diamicton이 형성된다. Diamicton은 다양한 입자 크기로 이루어진 분급이 불량한 퇴적물로 운반력이 큰 빙하가 작은 크기의 입자부터 큰 크기의 입자까지 다양한 크기, 무게의 입자를 함께 운반시킬 수 있어 빙하성 퇴적물이라고 할 수 있다. 이후 기후가 온난해짐에 따라 빙하의 후퇴(deglaciation)가 시작되고 코어의 위치가 grounding zone에 위치하게 되면 지탱하고 있는 빙상에 의해 압축받는 영향이 감소하게 되며 압축 받지 않은(uncompacted) diamicton이 퇴적되거나 sandy gravelly mud 등이 형성된다. 퇴빙이 더 진행됨에 따라 코어의 위치가 빙봉의 아래에 위치하게 되면 빙하에 의한 영향으로부터 멀어짐에 따라 입자 크기가 큰 퇴적물들의 비율이 점차적으로 감소하며 전체적으로 코어에서는 상향세립화(finings-upward) 경향이 나타난다(Domack et al., 1999). 빙하의 영향으

로부터 더 멀어지게 되면 빙봉의 아래는 정온한 환경이 되어 입자 크기가 작은 clay가 우세해진다. 마지막으로 빙봉이 붕괴되어 빙하의 영향권으로부터 완전히 벗어난 개방된 해양에 샘플위치가 위치하게 되면 보통의 해양퇴적물과 같이 mud 퇴적물이 우세하게 되며 생교란(bioturbation) 구조가 발달하게 된다.



표 2 라슨 C 빙봉지역의 해양퇴적물 코어에서 분석한 authigenic ^{10}Be 의 농도.

Depth (cm)	Authigenic ^{10}Be 농도 (atoms/g)	오차 (atoms/g)
3	9.16.E+07	2.21.E+06
8	5.27.E+07	1.02.E+06
13	4.57.E+07	1.76.E+06
18	4.29.E+07	3.01.E+06
23	3.33.E+07	1.15.E+06
28	3.82.E+07	9.34.E+05
33	5.78.E+07	1.75.E+06
38	3.69.E+07	8.56.E+05
40	3.81.E+07	1.64.E+06
43	3.98.E+07	1.30.E+06
48	3.73.E+07	1.07.E+06
53	3.31.E+07	1.39.E+06
58	3.62.E+07	1.22.E+06
63	3.88.E+07	1.39.E+06
68	2.49.E+07	8.49.E+05
73	2.19.E+07	1.08.E+06
83	2.07.E+07	1.15.E+06
93	1.89.E+07	1.04.E+06
103	1.88.E+07	1.00.E+06
113	1.97.E+07	1.12.E+06
123	1.77.E+07	9.49.E+05
133	1.73.E+07	1.13.E+06
143	1.38.E+07	8.86.E+05
153	1.23.E+07	8.67.E+05
163	1.14.E+07	8.18.E+05
173	1.35.E+07	9.34.E+05
183	1.06.E+07	8.90.E+05
193	1.46.E+07	8.46.E+05
197	1.00.E+06	8.68.E+04
203	1.31.E+06	2.85.E+05
213	1.02.E+06	1.86.E+05
223	5.79.E+05	1.37.E+05
233	1.52.E+06	2.97.E+05

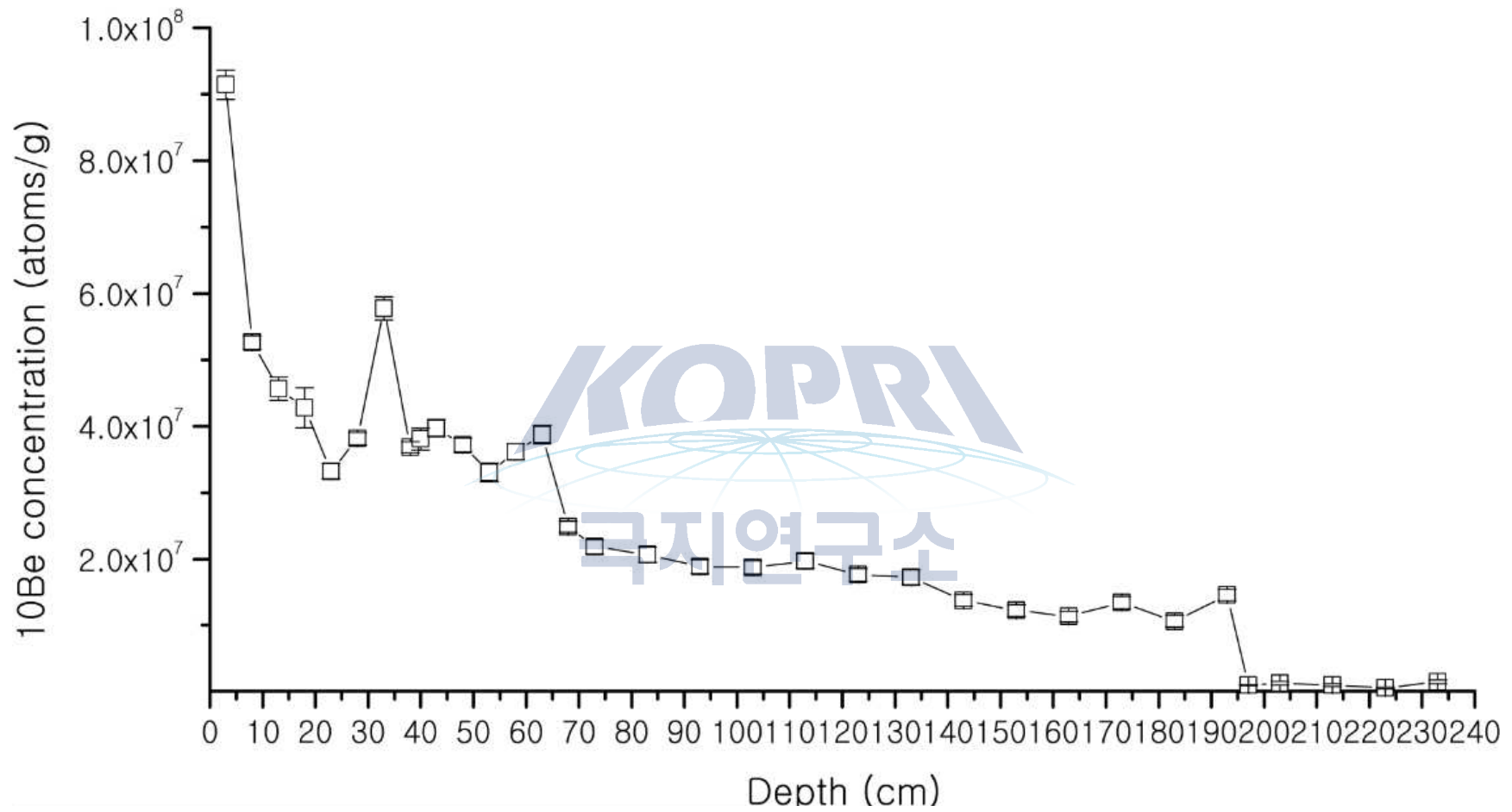
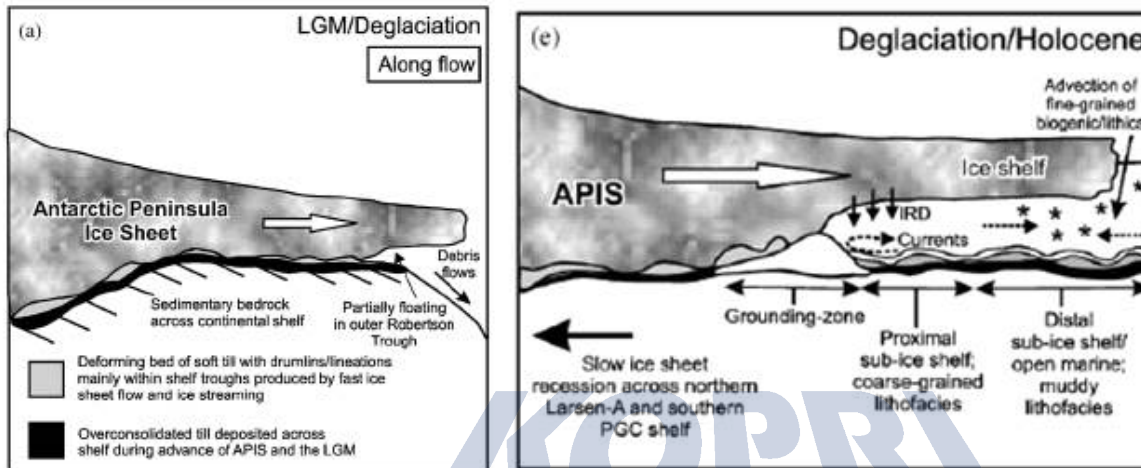


그림 8 이전 연구에서의 라슨 C 빙봉지역 해양퇴적물 코어에서 분석한 깊이에 따른 authigenic ^{10}Be 의 농도 그래프.



(Evans et al., 2005)

Proximal ←

Glacial: under the base of thick Ice Shelf.

Due to the overlying ice shelf, compacted diamict is formed.

Diamict? wide range of poorly sorted terrigenous sediment

Deglacial: grounding zone.

The transition region between the fully grounded ice sheet and the free-floating ice shelf.

Uncompacted diamict can be formed.

Sub-floating ice shelf: fining -upward due to the calm environment below the ice shelf.

→ **Distal to ice sheet**

Open marine: no interruption. There is little shaking, so clay is dominant.

그림 9 (Evans et al., 2005) 빙상(ice sheet)으로부터 가깝고 멀어짐에 따라 변화하는 퇴적상.

이번 연구는 최근 붕괴된 라슨 빙붕과 달리 LGM 이후 빙붕의 붕괴가 직접 목격되지 않은 로스해의 외곽 지역이며 처음으로 시도해보는 롱코어(Long Core; LC)로부터의 meteoric ^{10}Be 의 추출이기 때문에 지난 연구에서 사용한 퇴적상과 meteoric ^{10}Be 농도의 비교 분석을 통해 다수의 환경 변화를 감지할 수 있을 것으로 보인다(표 3). 또한 이 지역은 최종 빙기 당시 빙상 및 빙붕에 의한 차폐에 관해서는 논란이 있는 외곽 지역이다. 분석에 사용한 해양 퇴적물 코어 시료는 두가지이다. LC42는 $71^{\circ} 49.3969' \text{ S } 178^{\circ} 34.7602' \text{ E}$ 로스해 외곽에서 채취하였으며 수심 2084 m의 지점에서 1186 cm의 퇴적물을 획득하였다. LC48은 $68^{\circ} 53.9203' \text{ S } 171^{\circ} 9.9488' \text{ E}$ LC42에 비해 더욱 외곽인 지점이며 수심 3207 m의 지점에서 1491 cm의 퇴적물을 획득하였다(그림 10). 현재 분석한 결과는 실험을 통해 추출한 LC42와 48의 authigenic $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 의 비율, authigenic ^{10}Be 의 농도로, 퇴적상과 고지자기 변화의 비교 분석을 진행하였다(표 4, 그림 11, 표 5, 그림 12).

LC 42와 48 모두 Open marine 상태인 현재 퇴적층은 1 m 깊이 이전까지 sand나 sandy mud가 지속된다. LC 42의 약 1 m 부근까지는 입자의 크기가 작아지며 sandy mud와 silty mud가 나타나고 LC 48의 경우 mud에 가까운 입자 크기로 감소하게 된다. 이후 LC 42는 약 1.8 m까지 급작스러운 sand 층이 나오며 IRD (Ice-Rafted Debris)가 나타난다. 그 밑으로 sandy mud층과 silty mud 층이 약 4.6 m까지 나타나며 사이사이에 IRD가 나타나다가 약 6.4 m까지 silty mud와 mud 층이 lamination을 이루며 안정적인 층이 나타난다. 아래로 내려가면서 다시 입자가 굵어지며 약 8 m에 이르러 약 0.6 m 두께의 sand, sandy mud 층이 나타나고 두꺼운 IRD 층이 사이사이에 나타난다. 다시 약 9.3 m 까지 약 1.1 m의 두께의 silt와 mud의 lamination 층이 나타나고 이후 sandy mud와 sand 층이 지속되며 사이사이에 IRD 층이 나타난다. LC 48은 약 3 m까지 silt 층이 나오며 3.4 m 지점에서 sand층과 함께 IRD (Ice-Rafted Debris)가 나타난다. 그 밑으로 mud층이 약 3.9 m까지 나타나는데 3.6 m 부근에 IRD가 나타난다. 약 11 m까지 silty mud와 sand 층이 반복되어 나타나며 큰 변화를 보이지 않으나 중간중간의 IRD 층이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 약 11~11.6 m에 이르러 silty mud 층이 나타나고 12 m 부근이 되어서야 sandy silt 층이 나타난다. 약 12.6 m에서 급작스럽게 mud 층이 나타나며 그 하부로는 다시 IRD와 sand 층이 나타나는 것을 볼 수 있다.

지난 연구에서 퇴적상에 나타나는 모습을 갖고 IRD층과 silty mud층의 반복을 통해 sub-floating ice shelf의 환경을 지난 연구에서 예상해 보았다. 빙하가 지속적으로 후퇴하면서 코어의 위치가 grounding line, sub-floating ice shelf, calving zone에 위치하며 IRD, null zone, IRD로 퇴적상이 바뀌게 된다(Domack et al., 1999; 그림 13). 고지자기 변화를 통한 연대 분석 결과에 따르면 단순한 퇴적상 기록만으로는 이러한 해석이 어려움음을 알 수 있다. 하지만 이러한 퇴적상의 반복은 LC42와 48에도 모두 나타나고 있으며, 퇴적물의 차이로 인해 이 규모가 다름에도 불구하고 연대 측정 결과를 이용하여 보정할 경우 유사한 경향성이 나타나는 것을 볼 수 있다(그림 14).

LC42는 LC48에 비해 퇴적률이 2배 가량 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$

의 비율은 최상층에서 가장 높게 나타나고 있으며 이는 현재 차폐가 거의 없는 환경임을 지시한다. 하부로 갈수록 점차 $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$ 의 비율과 ^{10}Be 의 농도가 낮아지는 경향성을 보이고 있으나 약 300 cm 지점에서의 순간적인 급증과 700-800 cm 구간에서 지속적인 증가된 수치를 보여주고 있다. 하지만 이 역시 LC48의 수치에 비하면 상당히 낮은 수치임을 알 수 있다. 이는 퇴적상과의 비교시 유사한 페이지를 보이고 있다. 특히 높은 수치를 보이는 약 800 cm 구간에서 고지자기가 역전되는 지점이 나타나는데 이 때 퇴적상은 coarse sand까지도 나타나며 상당히 개방적인 시기였음을 알 수 있다. 이 이외의 시기는 빙기뿐만 아니라 간빙기에도 상당한 지속적인 차폐가 있었음을 알 수 있으며 이는 진출한 로스 빙봉, 혹은 계절과 무관하게 지속된 해빙의 존재라고 볼 수 있다.

LC48은 상당히 낮은 퇴적률과 함께 훨씬 더 오랜 기간의 퇴적물을 측정해 볼 수 있었다. 또한 LC42보다도 확연히 극단적인 각 수치들의 증감을 볼 수 있는데 5개 지점의 고지자기 연대측정 결과를 기반으로 선형적인 연대를 추정해 보면 지속적으로 유지된 퇴적률과 어느 정도의 주기성을 갖고 재현되는 수치들의 변동을 볼 수 있다. 퇴적상에서는 큰 변동을 감지하기가 어려우나 베릴륨의 수치 변동을 보면 LC42에 비해 큰 폭으로 농도가 달라지는 것을 감지할 수가 있다. 이를 통해 LC48 지점이 LC42 지점보다 남극을 기준으로 더욱 외곽에 있는 것을 감안하여 보면 LC48 지점은 빙봉 혹은 해빙이 지속적으로 존재하지 못하였으며 주기적으로 개폐가 반복되었음을 알 수 있다. 좀 더 세밀한 간격으로 코어를 분석하고 정확한 연대 측정 자료가 뒷받침이 될 경우 두 지역간의 차이를 더 세밀하게 알 수 있을 것으로 본다.

극지연구소

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	~10 ⁶
Sub-floating ice shelf	빙봉 아래	silty clay	4x10 ⁷
Seasonally open marine	빙봉 말단 아래	silty clay, sand	6x10 ⁷
Open marine	빙봉 붕괴	sand	~10 ⁸



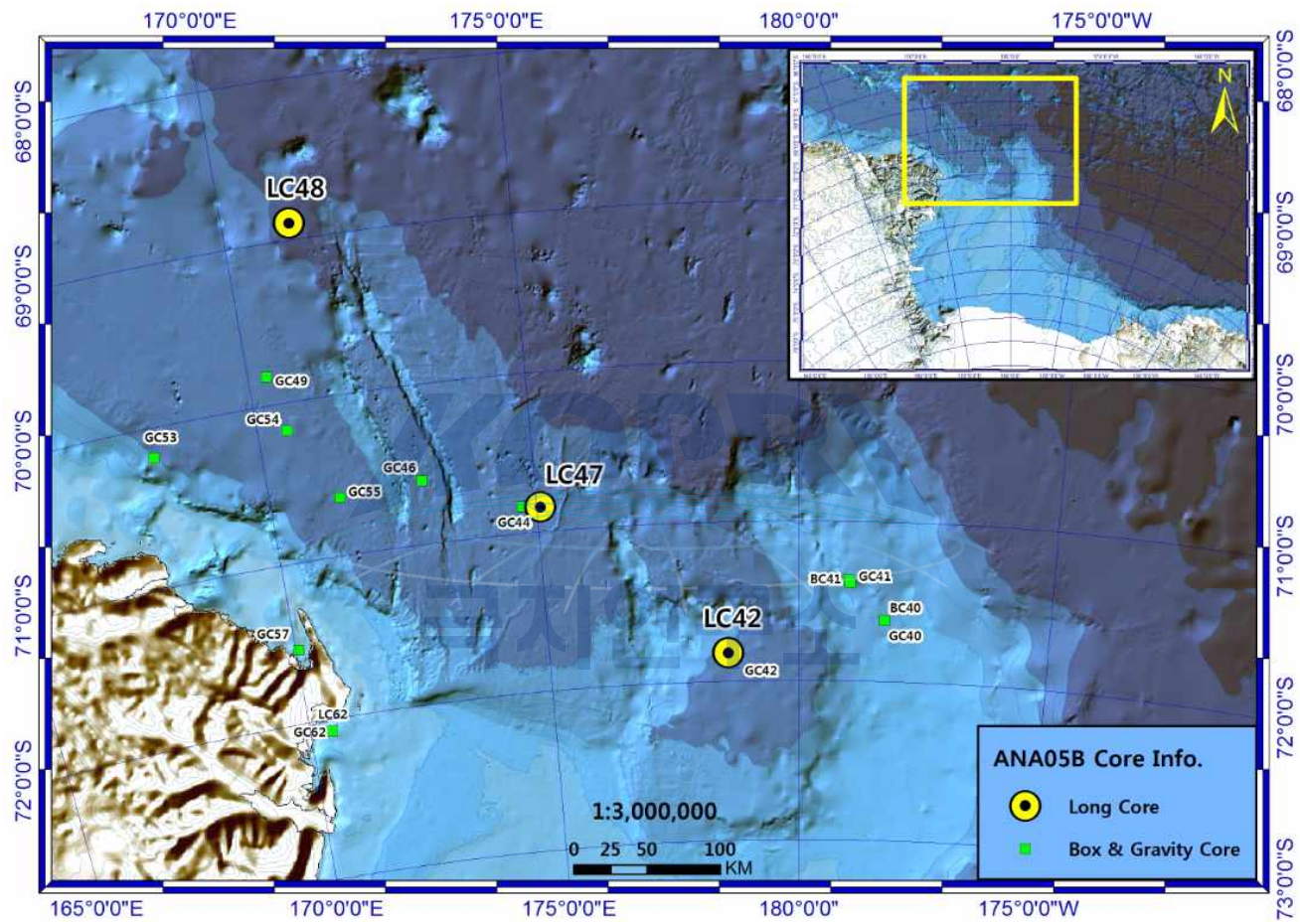


그림 10 연구지역인 Ross Sea의 LC42, 48 지점.

표 4 LC 42의 meteoric Be 분석 결과표(붉은색 수치는 9Be의 측정 에러값이 높은 것들).

Depth (cm)	Age	10Be/9Be Ratio			9Be Concentration		10Be Concentration		
		Ratio	Err	Decay corr	Conc	Err	Conc	Err	Decay corr
0	0	3.91.E-08	3.92.E-10	3.91.E-08	1.22.E+16	1.23.E+14	4.79.E+08	4.80.E+06	4.79.E+08
31	29311	2.73.E-08	2.73.E-10	2.77.E-08	1.91.E+16	1.91.E+14	5.22.E+08	5.22.E+06	5.30.E+08
61	57677	3.00.E-08	3.00.E-10	3.09.E-08	9.60.E+15	9.61.E+13	2.88.E+08	2.88.E+06	2.96.E+08
91	86042	1.14.E-08	1.14.E-10	1.19.E-08	1.85.E+16	1.85.E+14	2.10.E+08	2.10.E+06	2.19.E+08
121	114408	1.60.E-08	1.60.E-10	1.69.E-08	1.70.E+16	1.70.E+14	2.71.E+08	2.72.E+06	2.87.E+08
151	142774	1.29.E-08	1.29.E-10	1.38.E-08	1.43.E+16	1.43.E+14	1.84.E+08	1.84.E+06	1.97.E+08
181	171139	1.22.E-08	1.23.E-10	1.33.E-08	1.47.E+16	1.47.E+14	1.79.E+08	1.80.E+06	1.95.E+08
241	227870	5.05.E-09	5.07.E-11	5.66.E-09	1.71.E+16	1.72.E+14	8.65.E+07	8.70.E+05	9.70.E+07
301	284602	1.14.E-08	1.14.E-10	1.31.E-08	1.73.E+16	1.74.E+14	1.97.E+08	1.97.E+06	2.27.E+08
361	341333	2.71.E-09	3.07.E-11	3.22.E-09	9.24.E+15	1.05.E+14	2.51.E+07	2.84.E+05	2.97.E+07
421	398064	3.22.E-09	3.26.E-11	3.93.E-09	1.87.E+16	1.89.E+14	6.02.E+07	6.09.E+05	7.34.E+07
451	426430	7.63.E-10	7.67.E-12	9.45.E-10	1.18.E+17	1.19.E+15	9.03.E+07	9.07.E+05	1.12.E+08
511	483161	1.51.E-09	3.78.E-10	1.93.E-09	1.72.E+16	4.30.E+15	2.60.E+07	6.51.E+06	3.31.E+07
571	539892	4.98.E-09	5.02.E-11	6.52.E-09	1.46.E+16	1.47.E+14	7.28.E+07	7.34.E+05	9.53.E+07
631	596623	3.46.E-09	3.50.E-11	4.66.E-09	1.51.E+16	1.53.E+14	5.22.E+07	5.29.E+05	7.03.E+07
661	624989	2.61.E-09	2.68.E-11	3.57.E-09	1.58.E+16	1.62.E+14	4.14.E+07	4.24.E+05	5.65.E+07
691	653355	7.17.E-09	7.20.E-11	9.94.E-09	1.65.E+16	1.66.E+14	1.18.E+08	1.19.E+06	1.64.E+08
751	710086	7.91.E-09	7.93.E-11	1.13.E-08	1.53.E+16	1.54.E+14	1.21.E+08	1.22.E+06	1.73.E+08
811	766817	1.63.E-08	1.64.E-10	2.40.E-08	9.28.E+15	9.31.E+13	1.52.E+08	1.52.E+06	2.22.E+08
841	795183	4.35.E-09	4.39.E-11	6.47.E-09	1.56.E+16	1.57.E+14	6.77.E+07	6.83.E+05	1.01.E+08
901	851914	3.92.E-09	3.98.E-11	6.01.E-09	1.41.E+16	1.43.E+14	5.54.E+07	5.62.E+05	8.49.E+07
961	908645	6.23.E-09	6.26.E-11	9.81.E-09	1.57.E+16	1.57.E+14	9.77.E+07	9.81.E+05	1.54.E+08
1021	965377	6.65.E-09	6.67.E-11	1.08.E-08	2.01.E+16	2.01.E+14	1.33.E+08	1.34.E+06	2.16.E+08
1081	1022108	9.77.E-09	9.78.E-11	1.63.E-08	1.89.E+16	1.89.E+14	1.84.E+08	1.84.E+06	3.07.E+08
1111	1050473	6.89.E-09	6.92.E-11	1.17.E-08	1.87.E+16	1.88.E+14	1.29.E+08	1.30.E+06	2.18.E+08
1141	1078839	6.39.E-08	6.43.E-10	1.10.E-07	1.44.E+15	1.45.E+13	9.21.E+07	9.26.E+05	1.58.E+08
1171	1107205	4.46.E-10	4.68.E-12	7.75.E-10	1.31.E+17	1.37.E+15	5.83.E+07	6.13.E+05	1.01.E+08

표 5 LC 48의 meteoric Be 분석 결과표.

Depth	Age	10Be/9Be Ratio			9Be Concentration		10Be Concentration		
		Ratio	Err	Decay corr	Conc	Err	Conc	Err	Decay corr
0	0	3.50.E-08	3.50.E-10	3.50.E-08	2.15.E+16	2.15.E+14	7.63.E+08	7.63.E+06	7.63.E+08
30	52763	2.45.E-08	2.45.E-10	2.52.E-08	2.28.E+16	2.28.E+14	5.68.E+08	5.67.E+06	5.83.E+08
50	87938	3.51.E-08	3.50.E-10	3.66.E-08	2.67.E+16	2.67.E+14	9.42.E+08	9.41.E+06	9.84.E+08
80	140701	2.01.E-08	2.01.E-10	2.16.E-08	1.86.E+16	1.86.E+14	3.84.E+08	3.84.E+06	4.12.E+08
100	175876	1.99.E-08	1.99.E-10	2.17.E-08	1.28.E+16	1.28.E+14	2.54.E+08	2.54.E+06	2.77.E+08
150	263814	1.33.E-08	1.33.E-10	1.52.E-08	1.85.E+16	1.85.E+14	2.50.E+08	2.50.E+06	2.85.E+08
200	351752	2.32.E-08	2.31.E-10	2.76.E-08	1.99.E+16	1.99.E+14	4.57.E+08	4.57.E+06	5.45.E+08
250	439689	1.44.E-08	1.44.E-10	1.80.E-08	1.54.E+16	1.54.E+14	2.28.E+08	2.28.E+06	2.84.E+08
300	527627	5.92.E-09	5.94.E-11	7.70.E-09	1.73.E+16	1.73.E+14	1.02.E+08	1.03.E+06	1.33.E+08
340	597978	9.15.E-09	9.17.E-11	1.23.E-08	1.95.E+16	1.96.E+14	2.70.E+08	2.70.E+06	3.63.E+08
370	650740	1.83.E-08	1.83.E-10	2.53.E-08	1.75.E+16	1.75.E+14	3.20.E+08	3.20.E+06	4.43.E+08
390	685916	1.60.E-08	1.60.E-10	2.25.E-08	1.39.E+16	1.39.E+14	2.27.E+08	2.27.E+06	3.19.E+08
410	721091	2.11.E-08	2.11.E-10	3.03.E-08	1.55.E+16	1.55.E+14	3.12.E+08	3.12.E+06	4.48.E+08
420	738678	2.05.E-08	2.05.E-10	2.96.E-08	1.23.E+16	1.23.E+14	2.58.E+08	2.59.E+06	3.74.E+08
450	791441	1.62.E-08	1.62.E-10	2.41.E-08	1.74.E+16	1.74.E+14	2.80.E+08	2.80.E+06	4.16.E+08
500	879379	7.23.E-09	7.26.E-11	1.12.E-08	1.52.E+16	1.52.E+14	1.11.E+08	1.12.E+06	1.72.E+08
530	932142	1.13.E-08	1.13.E-10	1.80.E-08	2.13.E+16	2.13.E+14	2.45.E+08	2.45.E+06	3.90.E+08
550	967317	1.03.E-08	1.03.E-10	1.67.E-08	1.25.E+16	1.25.E+14	1.29.E+08	1.29.E+06	2.09.E+08
600	1055255	1.44.E-08	1.44.E-10	2.44.E-08	2.29.E+16	2.29.E+14	3.22.E+08	3.22.E+06	5.46.E+08
640	1125605	1.87.E-08	1.87.E-10	3.28.E-08	2.02.E+16	2.02.E+14	3.64.E+08	3.64.E+06	6.38.E+08
700	1231131	1.24.E-08	1.24.E-10	2.29.E-08	1.97.E+16	1.97.E+14	2.47.E+08	2.47.E+06	4.57.E+08
760	1336656	6.11.E-09	6.13.E-11	1.19.E-08	1.84.E+16	1.85.E+14	1.13.E+08	1.13.E+06	2.20.E+08
800	1407006	1.25.E-08	1.25.E-10	2.53.E-08	1.89.E+16	1.89.E+14	2.38.E+08	2.38.E+06	4.81.E+08
850	1494944	1.44.E-08	1.44.E-10	3.04.E-08	1.70.E+16	1.70.E+14	2.48.E+08	2.48.E+06	5.24.E+08

900	1582882	1.40.E-08	1.40.E-10	3.09.E-08	2.11.E+16	2.11.E+14	2.88.E+08	2.88.E+06	6.35.E+08
930	1635645	1.28.E-08	1.28.E-10	2.89.E-08	1.32.E+16	1.32.E+14	1.71.E+08	1.71.E+06	3.86.E+08
960	1688408	9.08.E-09	9.10.E-11	2.11.E-08	1.28.E+16	1.28.E+14	1.50.E+08	1.51.E+06	3.49.E+08
990	1741170	1.22.E-08	1.23.E-10	2.92.E-08	1.30.E+16	1.30.E+14	1.61.E+08	1.62.E+06	3.85.E+08
1025	1802727	1.58.E-08	1.59.E-10	3.89.E-08	1.17.E+16	1.18.E+14	1.89.E+08	1.89.E+06	4.65.E+08
1065	1873077	1.39.E-08	1.40.E-10	3.54.E-08	1.08.E+16	1.09.E+14	1.53.E+08	1.54.E+06	3.91.E+08
1100	1934634	1.32.E-08	1.32.E-10	3.46.E-08	1.68.E+16	1.68.E+14	2.49.E+08	2.49.E+06	6.54.E+08
1150	2022572	8.19.E-09	8.20.E-11	2.25.E-08	1.79.E+16	1.79.E+14	1.49.E+08	1.49.E+06	4.10.E+08
1200	2110510	1.69.E-09	1.83.E-11	4.86.E-09	1.21.E+16	1.31.E+14	2.10.E+07	2.27.E+05	6.04.E+07
1250	2198447	1.13.E-08	1.14.E-10	3.40.E-08	1.48.E+16	1.48.E+14	1.66.E+08	1.67.E+06	4.98.E+08
1265	2224829	9.96.E-09	9.98.E-11	3.03.E-08	1.48.E+16	1.48.E+14	1.50.E+08	1.51.E+06	4.57.E+08
1300	2286385	1.13.E-08	1.13.E-10	3.55.E-08	1.45.E+16	1.46.E+14	1.81.E+08	1.81.E+06	5.67.E+08
1350	2374323	1.45.E-08	1.45.E-10	4.75.E-08	1.44.E+16	1.44.E+14	2.13.E+08	2.14.E+06	6.98.E+08
1400	2462261	1.21.E-08	1.21.E-10	4.14.E-08	1.16.E+16	1.17.E+14	1.35.E+08	1.35.E+06	4.62.E+08
1440	2532611	7.25.E-09	7.29.E-11	2.57.E-08	1.30.E+16	1.31.E+14	9.70.E+07	9.75.E+05	3.44.E+08
1470	2585374	3.70.E-09	3.78.E-11	1.35.E-08	1.61.E+16	1.64.E+14	6.57.E+07	6.71.E+05	2.39.E+08

극지연구소

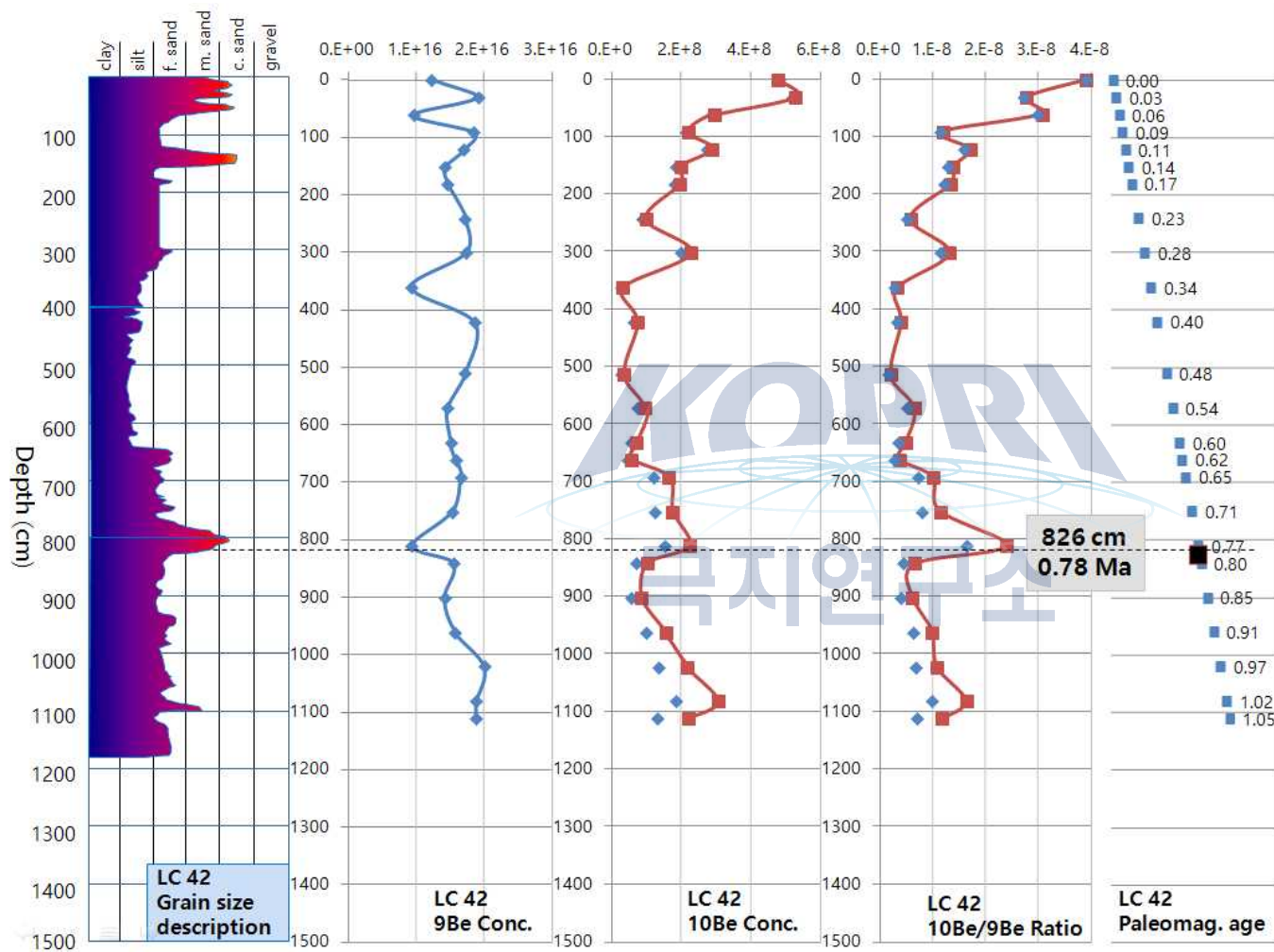


그림 11 LC42의 퇴적상, ^9Be 의 농도, ^{10}Be 의 농도, $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 의 비율, 고지자기 변화 분석을 통한 연대 결과의 비교. 모든 원본 값은 파란색 점 및 선으로 표시되었으며 ^{10}Be 의 경우 고지자기 변화 연대 측정 결과를 기반으로 반감기를 적용, 복원하여 붉은색 점 및 선으로 표현하였다.

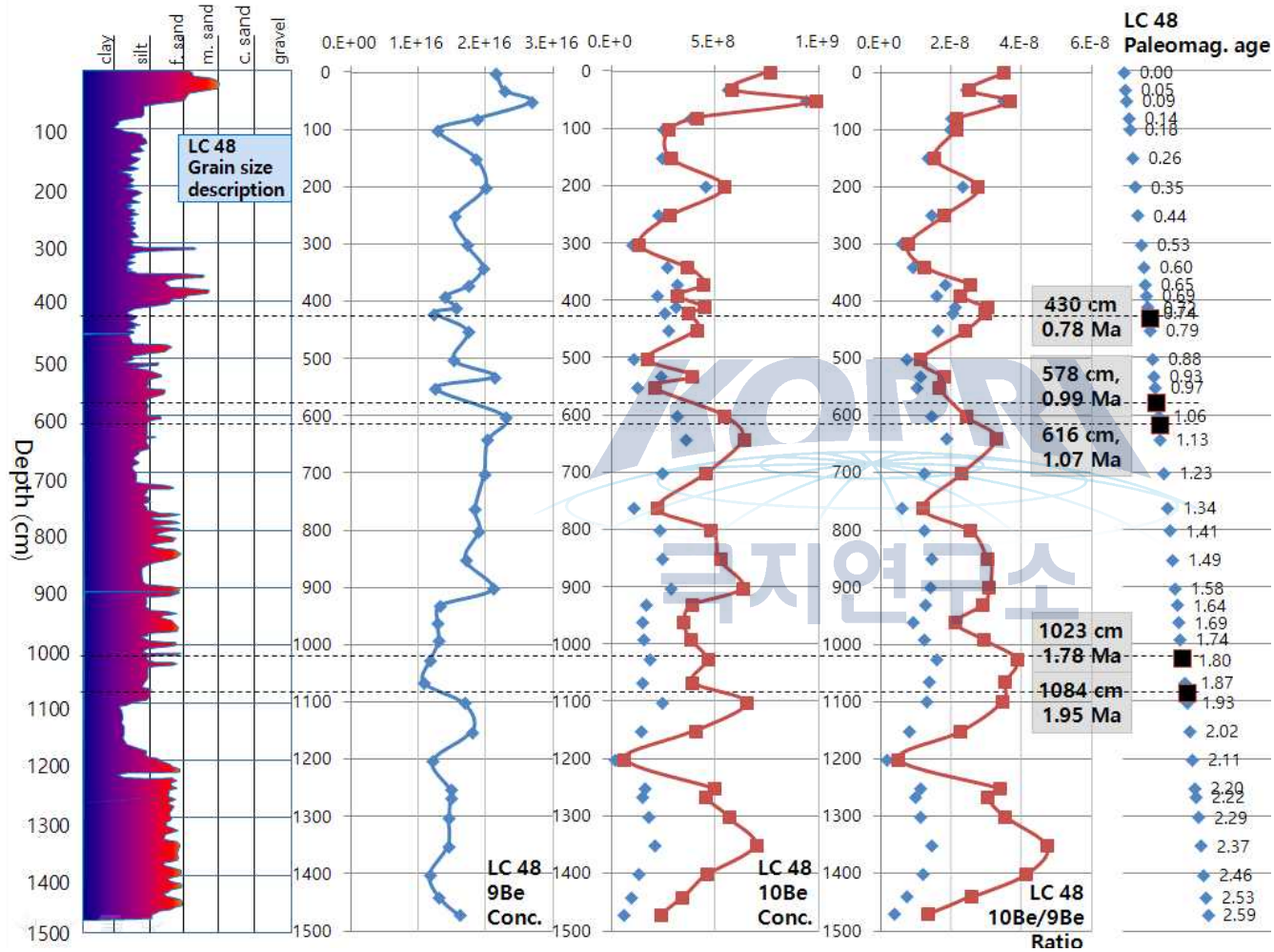


그림 12 LC42의 퇴적상, ^9Be 의 농도, ^{10}Be 의 농도, $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 의 비율, 고지자기 변화 분석을 통한 연대 결과의 비교. 모든 원본 값은 파란색 점 및 선으로 표시되었으며 ^{10}Be 의 경우 고지자기 변화 연대 측정 결과를 기반으로 반감기를 적용, 복원하여 붉은색 점 및 선으로 표현하였다.

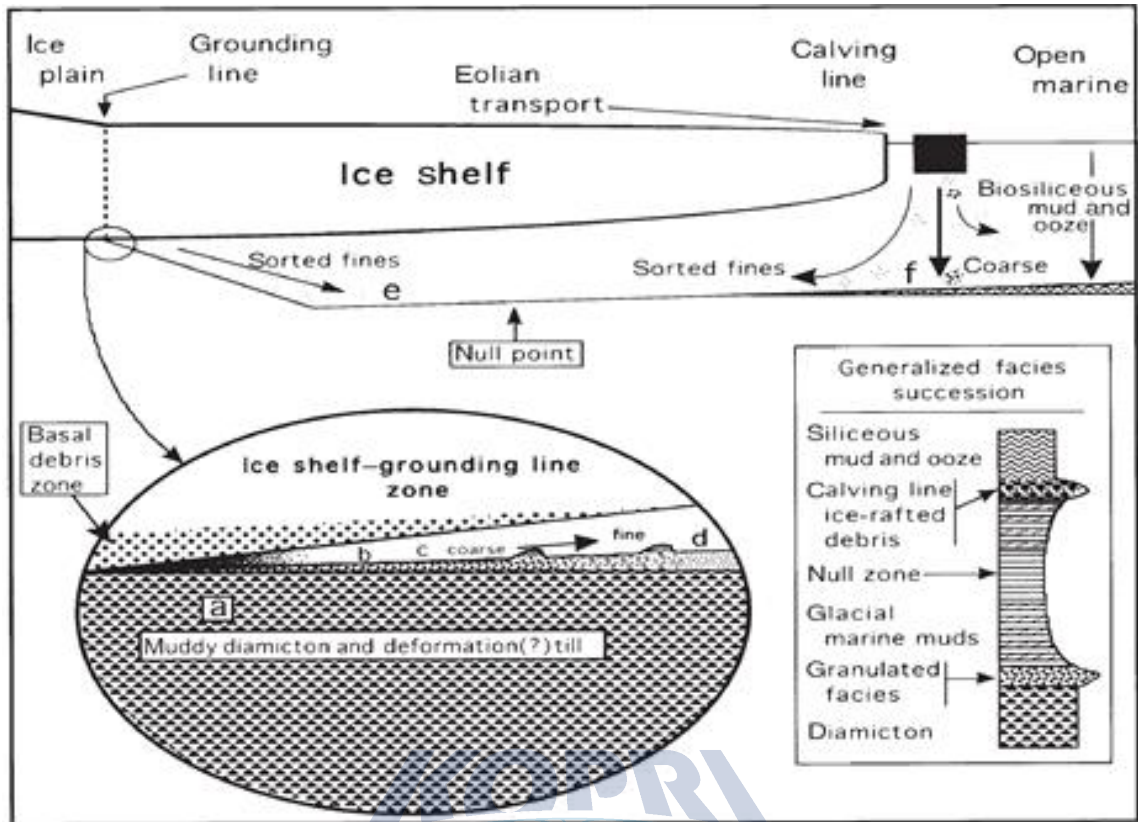


그림 13 IRD 층의 반복과 그 사이의 silty mud가 나타나는 것을 통해 알 수 있는 sub-floating ice shelf 환경(Domack et al., 1999).

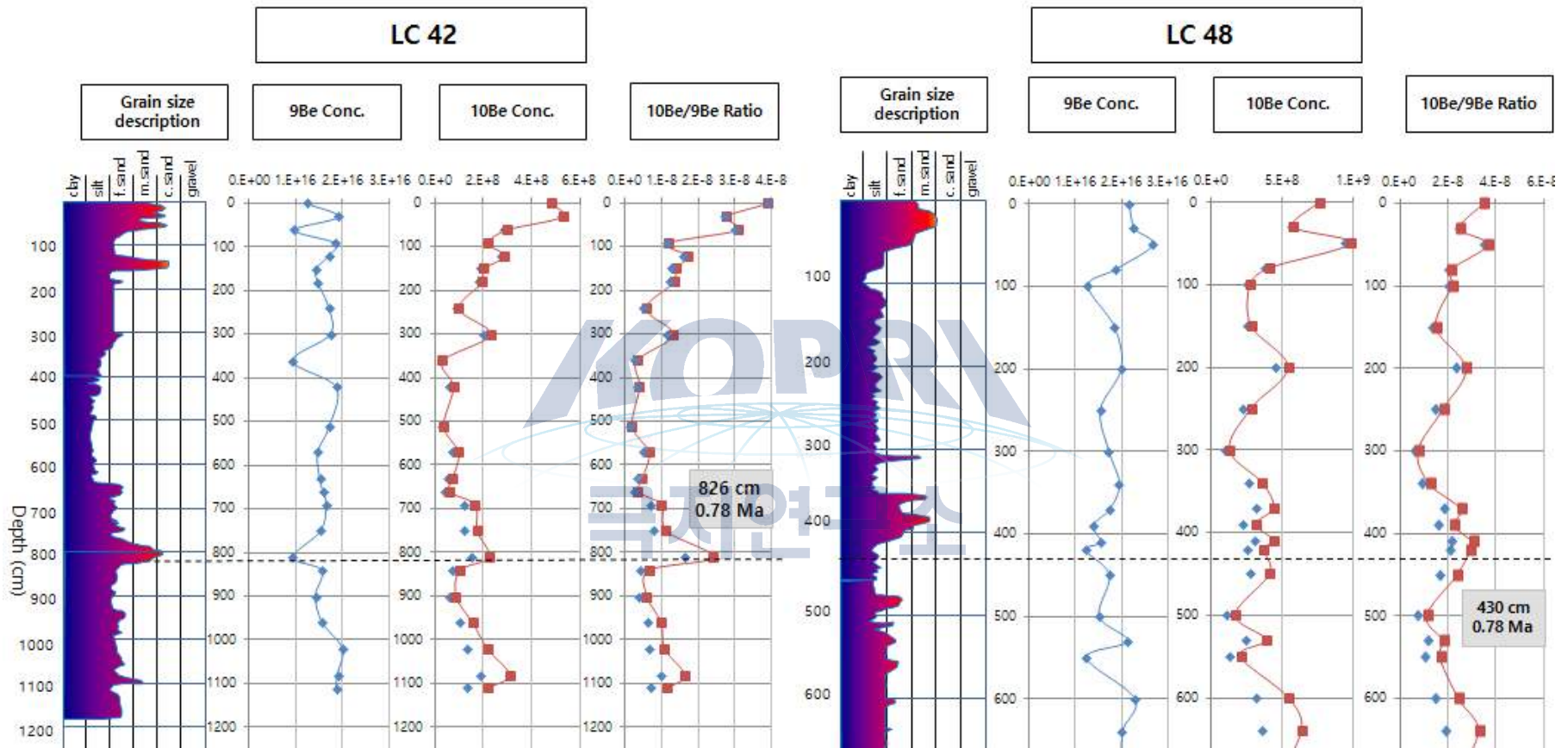


그림 14 LC 42와 48의 결과를 고지자기 변화 분석에 의한 연대 측정 결과로 보정한 결과. 모든 원본 값은 파란색 점 및 선으로 표시되었으며 10Be의 경우 고지자기 변화 연대 측정 결과를 기반으로 반감기를 적용, 복원하여 붉은색 점 및 선으로 표현하였다.

제 3 절 결론

우리는 로스해의 해양퇴적물 코어 2가지 LC42와 LC48에서 약 30 cm 등간격으로 깊이
이에 따른 meteoric ^{10}Be 의 농도를 통한 고기후 복원을 시도하였다. 이 과정에서 사용된
 ^{10}Be 을 추출하는 방법을 1989년 Bourles의 authigenic Be의 leaching 방법과 Stone의
1998년 Fusion 방법의 장점과 단점을 분석하여 부분적인 실험 방법 혼합을 통해 개선한
바 있다. 측정된 결과로부터 우리는 로스해 지역의 빙봉의 역사와 고기후를 복원하고자
해석 및 논의를 진행하고 있다. 현재까지 진행된 내용은 다음과 같다.

1) 베릴륨을 추출하는 실험방식으로 사용했던 Bourles와 Stone의 실험방식에서의 가장
큰 차이점은 각기 추출해내는 베릴륨 성분이 다르다. Bourles의 경우 단계적인 leaching
실험을 이용하여 베릴륨의 authigenic phase만을 분리해내려고 시도하였으며 Stone의 경
우 실험을 간소화시키기 위해 퇴적물질을 전부 녹여 detrital 성분까지 추출하는 fusion
방식을 이용하였다. 이를 위해 지난 연구에서 fusion 방식으로 authigenic 성분과 detrital
성분을 모두 녹여내어 혼합된 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 을 측정한 후 혼합된 ^9Be 의 농도 측정과 leaching
방식으로 authigenic 성분을 따로 추출하여 ^9Be 의 농도 측정을 통해 보정을 해주었다. 이
러한 복잡한 실험 절차에서 발생하는 오차를 줄이고 간소화시키기 위해 leaching을 통한
authigenic Be만의 추출과 이 Be을 녹여내는 fusion 방식의 혼합을 통해 새로운 실험 방
법을 제시하였다.

2) 퇴적물의 퇴적상 특징을 바탕으로 로스 빙봉의 고기후 환경과 역사를 복원하기 위해.
Meteoric Be 분석의 경우 authigenic ^9Be 농도를 측정하였으나 샘플간의 간격이 너무 크
며 세밀한 연대측정 결과값이 부족하여 분석한 결과만으로는 어떠한 환경을 지시한다고
판단하기가 어렵다. 다만 LC 42와 LC 48간의 수치 차이를 비교하여 보았을 때 LC 42는
고지자기 역전이 일어난 시기에도 큰 증가를 보이지 못한 것에 반해 LC 48은 주기적으
로 수치가 크게 변하는 것으로 보아 각각의 위치에서 영구적인-주기적인 빙봉 혹은 해빙
의 활동이 있었을 것으로 추정된다.

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.	95%	해석 및 논의 진행 중
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.	10%	2017년 신규 연구로 수행 예정

로스해에서 채취한 해양 퇴적물 코어에서 대기 중에서 형성된 우주선 유발 동위원소 ¹⁰Be(meteoric ¹⁰Be)의 분석을 진행하였으며 결과를 비교 분석 및 해석하였다. 이를 바탕으로 해당 지역의 빙봉 붕괴 역사를 밝히고 퇴빙역사와 고기후를 복원하고자 한다.

또한 우주선 유발 동위원소 in situ ¹⁰Be 및 in situ ¹⁴C을 활용하여 로스해의 인접 육상지역에서 샘플을 채취하여 노출연대를 측정하고자 연구 계획을 수립 중에 있다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

이전 연구에서 실시한 해양퇴적물코어에서의 meteoric ^{10}Be 분석경험을 통해 새로운 연구지역인 로스해 및 로스 빙붕의 샘플들에 직접 적용해볼 수 있었다. 또한 개선된 실험 방식과 처음 시도되는 10 m 이상의 롱코어에 대한 실험을 통해 보다 장기간의 고기후 역사를 복원 중에 있다. 또한 기상 및 일정 문제로 인해 수행하지 못한 in situ ^{10}Be 및 in situ ^{14}C 를 이용한 육상 빙하와의 복합적인 기록 복원은 진행 중에 있으며, 실험 방식과 AMS 측정 기술 역시 지속적으로 개선 및 축적되고 있다. 이를 통해 지속되는 남극 지역 연구에 있어 빙하의 역사를 복원하고, 고기후 환경을 유추해내는 데 반드시 유용하게 활용될 것이라고 생각된다.



제 6 장 참고문헌

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

Balco, G., & Schaefer, J. M. (2013). Exposure-age record of Holocene ice sheet and ice shelf change in the northeast Antarctic Peninsula. *Quaternary Science Reviews*, 59, 101-111.

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.

Bentley, M. J., Hodgson, D. A., Sugden, D. E., Roberts, S. J., Smith, J. A., Leng, M. J., & Bryant, C. (2005). Early Holocene retreat of the George VI ice shelf, Antarctic Peninsula. *Geology*, 33(3), 173-176.

Bentley, M. J., Hodgson, D. A., Smith, J. A., Cofaigh, C. Ó., Domack, E. W., Larter, R. D., Roberts, S. J., Brachfeld, S., Leventer, A., Hjort C., Hillenbrand, C-D., & Evans, J. (2009). Mechanisms of Holocene palaeoenvironmental change in the Antarctic Peninsula region. *The Holocene*, 19(1), 51-69.

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.

Buizert, C., Martinerie, P., Petrenko, V. V., Severinghaus, J. P., Trudinger, C. M., Witrant, E., Rosen, J. L., Orsi, A. J., Rubino, M., Etheridge, D. M., Steele, L. P., Hogan, C., Laube, J. C., Sturges, W. T., Levchenko, V. A., Smith, A. M., Levin, I., Conway, T. J., Dlugokencky, E. J., Lang, P. M., Kawamura, K., Jenk, T. M., White, J.

W. C., Sowers, T., Schwander, J., Blunier, T. 2012. Gas transport in firn: multiple-tracer characterisation and model intercomparison for NEEM, Northern Greenland. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 4259–4277, doi:¹⁰.5194/acp-12-4259-2012.

Cofaigh, C. Ó., Davies, B. J., Livingstone, S. J., Smith, J. A., Johnson, J. S., Hocking, E. P. et al. (2014). Reconstruction of ice-sheet changes in the Antarctic Peninsula since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, 100, 87–110.

Davies, B. J., Hambrey, M. J., Smellie, J. L., Carrivick, J. L., & Glasser, N. F. (2012). Antarctic Peninsula ice sheet evolution during the Cenozoic Era. *Quaternary Science Reviews*, 31, 30–66.

Ditchburn, R. G., & Whitehead, N. E. (1994). The separation of ¹⁰Be 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.

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.

Hodgson, D. A., Bentley, M. J., Roberts, S. J., Smith, J. A., Sugden, D. E., & Domack, E. W. (2006). Examining Holocene stability of Antarctic Peninsula ice shelves. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 87(31), 305-308.

Ingólfsson, Ó., Hjort, C., & Humlum, O. (2003). Glacial and climate history of the Antarctic Peninsula since the Last Glacial Maximum. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35(2), 175-186.

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.

Kulbe, T., Melles, M., Verkulich, S. R., & Pushina, Z. V. (2001). East Antarctic climate and environmental variability over the last 9400 years inferred from marine sediments of the Bunger Oasis. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 223-230.

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.

Lavoie, C., Domack, E. W., Pettit, E. C., Scambos, T. A., Larter, R. D., Schenke, H. W., Yoo, K. C., Gutt, J., Wellner, J., Canals, M., Anderson, J. B., & Amblas, D. (2014). Paleo-ice flow directions of the Northern Antarctic Peninsula ice sheet based upon a new synthesis of seabed imagery. *The Cryosphere Discussions*, 8(5), 5321-5360.

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.

Pudsey, C. J., & Evans, J. (2001). First survey of Antarctic sub-ice shelf sediments

reveals mid-Holocene ice shelf retreat. *Geology*, 29(9), 787-790.

Pudsey, C. J., Murray, J. W., Appleby, P., & Evans, J. (2006). Ice shelf history from petrographic and foraminiferal evidence, Northeast Antarctic Peninsula. *Quaternary Science Reviews*, 25(17), 2357-2379.

Rignot, E., Bamber, J. L., Van Den Broeke, M. R., Davis, C., Li, Y., Van De Berg, W. J., & Van Meijgaard, E. (2008). Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. *Nature Geoscience*, 1(2), 106-110.

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.

Sugden, D. E., Balco, G., Cowdery, S. G., Stone, J. O., & Sass III, L. C. (2005). Selective glacial erosion and weathering zones in the coastal mountains of Marie Byrd Land, Antarctica. *Geomorphology*, 67(3), 317-334.

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.

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.





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.