BSPE15350 - 013 - 7

극지 블루아이스에서 장주기 기후변화 복원을 위한 연대측정법 개발

Age Determination of Blue Ice for Long-term Paleoclimate Reconstruction



2017. 02. 28

한 국 해 양 과 학 기 술 원 부 설 극 지 연 구 소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 "극지 블루아이스에서 장주기 기후변화 복원을 위한 연대측정법 개발" 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2017. 2. 28

연구책 임자: 허순도

참 여 연 구 원 : 홍상범, 황희진, 강정호, 한영철, 이강현, 정지웅, 전성준, 문장일, 양지웅, 장영준 안진호 (서울대)

보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간	해당단계 연구기간 2015.9.7.~2016.12.31 단계 구분				1			
여그시어며	중 사 업 명	창의연구사업	창의연구사업							
<u> 17713</u>	세부사업명	Seed형 선형	Seed형 선형과제							
	중과제명									
연구과제명	세부(단위) 과제명	극지 블루아이스에서 장주기 기후변화 복원을 위한 연대측 법 개발								
연구책임자	허 순 도	해당단계 참여연구원수	총 : 내부: 외부	12명 11명 1명	해당단계 연구비	정부: 기업: 계:	151,000천원 천원 151,000천원			
연구기관명 및 소속부서명	극지고	지고환경연구부 참여기업명								
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :								
위탁연구	연구기관명	: 연구책임자 :								
요약(연구결과	요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내) 보고서 면수 48									

남극의 블루아이스 지역의 빙하는 오래된 빙하가 삭박에 의해 노출 된 지역으로 수만년~수십만년 이상된 빙하시료를 심부 빙하시추를 통하지 않고도 확보할 수 있다. 특히 백만년 이상된 빙하시료를 확보할 수 있는 가능성이 있다. 남극 장보고 과학기지 부근의 블루아이스를 대상으로 빙하 탐사 및 빙하시추를 통해 블루아이스 시료를 채집하고 물 안정동원소와 이온 성분 분석을 통해 생성 시기를 유추하였다. 향후 가스 성분 분석을 통해 엘리펀트 모레인 블루아이스 지역의 빙하시료에 대한 가스 성분 분 석을 통한 연대측정 등의 연구가 필요하다.

색 인 어	한 글	블루아이스, 빙하코어, 기후변화, 고기후, 연대측정			
(각 5개 이상)	영	Blue Ice, Ice Core, Climate Change, Paleoclimate, Age			
	어	Determination			

요 약 문

I.제 목

극지 블루아이스에서 장주기 기후변화 복원을 위한 연대측정법 개발

- Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성
 - 남극 장보고과학기지 주변 블루아이스에서 수만년~수십만년 이상된
 빙하시료 확보를 위한 예비 연구 수행
 - 블루아이스의 절대연령 측정법 개발과 고기후 연구에 사용 가능성
 검증

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위 연구소

- 남극 장보고과학기지 주변 블루아이스에 대한 현장조사 및 시료 채
 집
- 물 동위원소분석, 이온분석 등의 빙하의 연령 추정 및 고기후 연구
 에의 적용 가능성 검토

Ⅳ. 연구개발결과

- 남극 장보고과학기지 주변 Tarn Flat 블루아이스 지역과 엘리펀트
 모레인 지역 블루아이스 지역 빙하탐사 및 블루아이스 빙하코어 시
 추
- Tarn Flat 블루아이스 빙하코어 코어에 대한 물 동위원소분석와 이
 온분석을 통해 홀로세 이후의 해안에서 먼 거리에서 생성된 빙하코
 어 임을 확인

- V. 연구개발결과의 활용계획
 - 블루아이스 지역에서의 유사한 연구활동을 위한 기초 자료 제공
 - 획득된 블루아이스 시료에 대하여 가스 성분 분석, 안정동위원소와
 이온 성분 분석을 통해 블루아이스의 연대 측정 연구 수행
 - 수만~십만년 주기의 빙하기와 간빙기로 반복되는 과거 기후변화 복
 원 및 기후변화 원인 규명 연구 수행
 - 블루아이스 형성 모델 수립을 위한 기초 자료 제공
 - 블루아이스를 기반으로 하는 지질, 지구물리, 대기, 빙하 등의 다학
 제 연구 프로그램 운영을 위한 기반 자료 제공



SUMMARY (영 문 요 약 문)

I. Title

Age Determination of Blue ice for Long-term Paleoclimate Reconstruction

II. Purpose and Necessity of R&D

- A preliminary study to acquire ice samples for study to long-term climate cycle from several thousand to several hundred thousand years in blue ice around Jangbogo Station.
- O Development of age determination method of blue ice and validation of availability in paleoclimate research



III.

- Field survey and ice coring blue ice around Jangbogo station
- O Estimation of age of ice samples using such as water isotope analysis and ion analysis

IV. R&D Results

- O Glacial exploration and ice coring in Tarn Flat and Elephant moraine blue ice areas
- \bigcirc From water isotope and ion analysis of the ice core confirm that ice generated from a long distance from the coast and in the Holocene

- V. Application Plans of R&D Results
- Providing basic data for similar research activities in Blue Ice region
- For blue ice samples obtained, analysis of gaseous components, analysis of stable isotopes and ion components,
- \bigcirc Reconstruction of past climate change
- \bigcirc Providing basic data for establishing blue ice formation model
- Providing base concepts for operation of multi-disciplinary research programs based on blue ice such as geology, geophysics, atmosphere, and glaciology



CONTENTS (영 문 목 차)

Chapter 1 Introduction	1
Chapter 2 Current R&D Status in Korea and Other Nations	3
Chapter 3 R&D Implementation Contents and Results	5
Chapter 4 Degree of R&D Goal Achievement and Degree of Contribution to Out Research Institute	tside 34
Chapter 5 Application Plans of R&D Results	35
Chapter 6 References	37
국지연구소	

목 차

제	1	장	서론	1
제	2	장	국내외 기술개발 현황	3
제	3	장	연구개발수행 내용 및 결과	5
제	47	장 여	연구개발목표 달성도 및 대외기여도	34
제	5	장	연구개발결과의 활용계획	35
제	6	장	연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	36
제	7	장	참고문헌	37
			극지연구소	

제 1 장 서론

블루아이스(블루아이스)는 극지에서 표면의 눈이 바람이 쓸려나가 하부의 얼 음 층이 노출되어 있는 지역으로 해안가에 분포하는 눈이 녹아 노출된 얼음 층과는 구별된다. Bintanja(1999)는 블루아이스 지역을 (1) 물질 균형 (mass balance)가 음 인 지역, (2) 주요 삭박과정이 승화(sublimation)에 의해 형성되며, (3) 표면 알베도 가 눈지역 보다 낮은 지역으로 규정하였다.

블루아이스는 주로 해안가나 산악지대를 중심으로 분포하고 있으며 이는 블 루아이스의 생성 과정이 빙하 하부 지형과 깊이 관련되어 있기 때문이다.

자세한 인공위성 자료를 이용하여 측정한 남극에서의 블루아이스 지역은 234,549km²로 전체 남극 면적의 1.67%를 차지한다(Hui et al., 2014).

그동안 블루아이스 지역은 운석이 밀집되어 산출되는 곳으로 중요한 운석산 지로 각광받아 왔지만, 최근에는 남극에서 백만년 이상된 얼음이 산출될 수 있는 지역으로 주목을 받고 있다.

현재까지 남극 빙하코어에서 확인된 가장 오래된 기후변화 기록은 남극 Dome C 에서 시추된 EPICA 빙하코어로써 약 80만년이전까지의 기후변화 기록이 복원되었으며, 약 10만주기로 빙하기와 간빙기가 반복되고 있음이 확인되었다. 반 면, 해양퇴적물에서 복원된 백만년 이상된 기후변화 기록에서는 백만년 이전에는 4 만년 주기의 기후변동을 보이고 있어 그 이유를 규명하고 백만년 이상된 온실가스 성분을 확보하기 위한 백만년 이상된 빙하코어 시추 프로젝트 (The Oldest Ice Core: 1.5Ma record of Climate and Green house Gases from Antarctica)가 빙하고 기후 분야의 최고의 관심사이다 (IPICS white paper, Fischer et al., 2013).

수만년 이상의 오래된 빙하코어를 획득하기 위해서는 1,000m 이상의 심부빙 하시추가 필요하며 이에 수반된 남극내륙탐사, 남극횡단, 내륙 빙하시추 돔기지 건 설 등의 고난이도의 극지 인프라운영 기술과 막대한 비용이 필요하다. 반면, 오랜 기간 삭박되어 형성된 극지의 블루아이스는 오래된 빙하가 표층에 노출되어 있어 손쉽게 시료를 획득할 수 있는 장점이 있다.

즉, 블루아이스를 대상으로 정확한 연대를 알 수 있다면 심부빙하시추 없이 오래된 빙하시료 획득이 가능하다. 그러나 대부분의 블루아이스는 장기간의 이동과 심한 변형에 의해 심각하게 변질되어 있거나 오염되어 있다.



Fig 1. The distribution of Blue Ice Areas in Antarctica (from Hui et al., 2014).

이 연구에서는 장보고 기지 주변에 분포하는 블루아이스 지역 시료를 채집하 고 각 시료들의 특성을 고찰하고 기본 기후지시 프록시를 측정하여 연대를 추정하 며 향후 오래된 빙하코어 획득 및 장주기 기후변화 연구에의 적용 가능성을 검토하 고자 한다.

특히, 장보고과학기지가 위치한 북빅토리아랜드에는 반경 300km 이내에 Allan Hills, Elephant Moraine과 Frontier Mountains 블루아이스 지역 등의 운석탐 사가 활발하게 이루어지고 있는 넓은 지역의 블루아이스 지역이 인접하고 있어 상 대적으로 접근이 용이한 장점이 있어 앞으로 심도 깊은 연구가 기대된다.



Fig. 2. Climate changes from the marine sediments core and Antarctic ice cores.



Fig. 3. Ice core drilling in Blue ice areas. They used large diameter (9.5 inch, 241mm) ice core drilling system for recovering large amount of samples (form U.S. Ice Drilling Program).

제 2 장 국내외 기술개발 현황

최근 미국을 중심으로 블루아이스를 이용한 기후변화 연구 수행을 위해 다양 한 방법의 연대측정 방법이 시도되고 있으며, 그 결과 2015년에는 남극 Allan Hills 블루아이스 지역에서 백만년 이상된 된 대기 성분을 찾았으며, 그 지역을 중심으로 심도 깊은 연구를 수행하고 있다.

대표적인 블루아이스 연대측정법 연구를 정리하면 아래와 같다.

- (1) 40Ar/38Ar ratio를 이용한 연대 측정을 통해 남극 Allan Hills 블루아이
 스에서 시추된 126m 길이의 빙하코어 하부 12m 섹션에서 백만년된 얼
 음 시료 확인 (Higgins et al, 2015)
- (2) 블루아이스에 함유된 가스 성분 중 Noble Gas의 Ar 동위원소와 Kr 동위 원소를 이용한 절대연령 측정법 개발 (Buizert et al., 2014)
- (3) 운석의 낙하시기를 측정하여 블루아이스의 연령 추정 (Nishiizumi et al., 1989)
- (4) 블루아이스내 테프라 층의 연령 측정을 통해 블루아이스 연령 측정 (Folco et al., 2006)
- (5) 블루아이스에서 천부 빙하코어를 지추하여 산소와 수소 동위원소의 변화 패턴을 기존의 빙하코어에서의 자료와 비교하여 연령 추정 (Spaulding et al., 2013)



Fig. 4. Records of (A) CH4, (B) CO2, and (C) δD from the Allan Hills BIA (Site 27; black line and black symbols between 115 and 250 ka) compared with records from Vostok/EPICA Dome C (green, red, and blue lines) (11, 18 - 20). (from Higgins et al., 2015)

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 Tarn Flat 블루아이스 지역 현장조사 및 시료 채집

1차년도인 2015-16년 남극 하계시즌에는 지속된 악기상으로 조사 예정지인 Elephant Moraine 블루아이스 지역이 아닌 장보고기지 남서쪽 85km 지역에 위치한 Tarn Flat 부근 블루아이스에 대하여 현장조사 및 시료 채집을 실시하였다.

조사지역은 Tarn Flat 위 빙원지역으로 폭 4km, 길이 6km의 블루아이스 지역이 발달하고 있으며 표면은 이동 속도차에 의해 생성된 것으로 보이는 균열 발 달되어 있고 여러 매의 테프라 층이 발달되어 있다 (그림 5).

블루아이스 시료 채집은 핸드오우거를 이용하여 총 18회 시추를 통해 약 12m 깊이의 블루아이스 코어를 시추하였으며, 원활한 작업 수행을 위하여 전동 핸드드 릴을 동력으로 핸드오우거 작동하였다 (그림 6).

채집된 코어 시료는 상부에 발달된 균열의 영향으로 30cm 내외의 길이로 절 단되어 회수 되었다. 상부 50cm 부근에서 테프라 층이 확인되었다.



Fig. 5. Location and photos of Tarn Flat Blue ice area. (A) Location of Tarn Flat blie ice area in a satellite image. (B) and (C) Satellite images of Tarn Flat blue ice area and tephra layer. (D) Panorama photo of Tarn Flat blue ice area. (E) Photo of tephra layer in the blue ice.



Fig. 6. Photos of ice core sampling using hand auger(A) and cutting plan of blue ice samples(A, B and C). (B) A fracture plan filled with recrystallized ice crystal in a blue ice core. Cutting plan of ice core of depth at 6m(C) and 11m (D).



Fig. 7. Photos of drilled hole. (A) A tephra layer at depth of 50cm. (B) a fracture zone filled snow (C and D) Fractures and cracks are decreasing with depth increase.



제 2 절 엘리펀트 모레인 (Elephant moraine) 지역 블루 아이스 탐사 및 시료 채집

엘리펀트 모레인 지역은 남위 76°12′에서 남위 76°24′, 동경 155°80′에서 157°30′사이에 위치한 블루아이스 지역을 통칭하며, 속칭 'Meteorite city', 'Texas bowl', 'Elephant moraine'이라 불리는 지역을 포함한다(그림 8).

엘리펀트 모레인 지역은 2007-2016년 한국 극지연구소 운석팀에 의해 947개 의 운석이 집중적으로 발견된 블루아이스 지역으로, 운석의 지역적인 밀도가 매우 크다. 이는 앨런 힐스 지역과 같이 얼음 표면의 빠른 삭박에 의해 운석이 지역적으 로 농집 되었을 가능성과 더불어 오래된 얼음이 존재할 가능성을 의미한다.

본 필드 탐사는 엘리펀트 모레인 블루아이스 지역에서의 표면 빙하 코어 시 추를 통해 시료를 확보, 동위원소를 비롯한 화학적 조성 및 포집된 기체의 조성에 대한 기본적인 정보를 얻는 것을 목표로 진행되었으며, 1번의 GPR(ground penetrating radar) 조사가 수반되었다.



Fig. 8. Satellite image of Elephant Moraine blue ice area.

(1) 엘리펀트 모레인 지역 블루아이스 시추

2015-2016년 하계 남극 필드 조사에서 확인한 화산 재 층(volcanic ash layer; tephra layer)이 보이는 표면 부분에서 블루아이스 천부 시추를 진행하였다(남위 76°15'09.02", 동경 156°33'12.06"; 그림 9). 블루아이스 지역에서 얼음 층의 층서 관 계 및 얼음 연령 측정에 대해 화산 재 층은 추후 중요한 연구 대상 및 지표로 활용 될 수 있을 것으로 여겨진다. 화산 재 층은 헬기 저공비행을 통해 수 킬로미터 수 준의 연속성을 보이는 것을 확인하였다. 당일 천부 시추 장소의 표면에 나타난 화 산 재 층은 거의 동-서 방향에 가깝게 분포하며 두께는 진한 부분에서 연한 부분까 지 80 cm 정도, 진한 부분은 10 cm 내외로, 남쪽으로 갈수록 옅어지는 경향을 확인 하였다(그림 10).

핸드오거를 사용하여 시추를 진행하였으며, 다섯 개의 시추 공에서 40 cm 깊이 내외 시료 세 곳, 1.35 m 깊이 시료 한 곳, 4.55 m 깊이 시료 한 곳을 시추하 였으며(그림 11), 포장된 시료의 번호와 내역은 아래 표와 같다(표 1). 1.35 m 깊이 시추를 진행한 시추공에서는 암석 파편이 발견되어 이후 시추를 중단하였다.



Fig. 9. Drilling site in Elephant Moraine blue ice area (EM–A, EM–B, EM–K). EM–C, D, E, F, G, H, I, J drilled within 5m of EM–B.



Fig. 10. A tephra layer in Elephant Moraine blue ice area.



Fig 11. A sketch of ice coring in a tephra layer.

	S 76°15'09.03"		S 76°15′09.02"		
Site 위치	E 156°33'12.05"	Site 위치	E 156°33'12.06"		
Run #	(저쪽에서 구 번째) Zlol (cm)		(서쪽에 다섯 번째, GPS 오차범위		
1-1	22	Run #	기) 기) (cm)		
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	22	6-1	47		
	0.524,500.00%	8-1	46		
ে;+১ ৩) কা	5 75°15'09.02" E 156929'19.09"	8-2	22		
Sile A	E 130 33 12.03 (가자 서쪽에 의치)	9-1	29.5		
Run #	것이 (cm)	9-2	36		
1-2	30.5	10-1	12		
총 깊이 (cm)	30.5	10-2	18		
	S 7601 EVAD A04	11-1	-40		
	F 156932'12.05"	12-1	40		
Site 위치	(서쪽에서 세 번째, GPS 오차범위	13-1	36		
	내)	13-2	25		
Run #	<u> 곳</u> !이 (cm)	14-1	ົວວົ		
2-1	18	15-1	49		
2-2	24	총 깊이 (cm)	455.5		
총 깊이 (cm)	42				
0	S 76°15'09.02"				
Site 위치	E 156°33'12.06"				
	(서쪽에서 네 번째)				
Run #	깊이 (cm)				
3-1	55 1710 1				
3-2					
4-1	18				
5-1	51				
총 깊이 (cm)	135				

Table 1. A sampling list of ice coring in EM-A.

11월 25일 시추 지역(EM-A)에서 동쪽으로 200 m 가량 떨어진 곳의 화산 재 층 표면에서 새로운 코어 시추를 진행하였다(EM-B라 명명). 11월 26일 필드 조 사에선 3 kW 발전기의 점화 플러그 이상으로 전력 생산이 없는 상태에서 블루아이 스 시추를 진행하였으며, 휴대용 드릴 또한 과열되어 수동으로 시추를 진행하여, 총 5.65 m 깊이의 시료를 채취하였다(그림 12). 채취한 시료의 화산 재 층의 기울기에 미루어, 얼음 층이 남쪽에서 북쪽 방향으로 진행하며 상승하고 있음을 확인하였다 (그림 13).

11월 28일 필드 조사에선 11월 26일 이루어진 시추공(EM-B)에서 연이은 시추를 진행하였다. 3 kW 발전기가 정상적으로 가동되었으며, 최종적으로 10.155 m 깊이의 블루아이스 시추에 성공하였다. 채취된 시료 내역은 표2와 같다.



Fig. 12. A photo of ice core drilling in EM-B site.



Fig. 13. A sketch of dip and direction of tephra layer guessed from data of EM-B hole.

Site 위치		S 76°15'09.07" E 156°33'42.04"
Bag #	깊이 (cm)	메모 사항
1	27.5	상부 13.5 cm 까지 tephra 보임
2	24	상부 2 cm 정도 깨짐
3	26	상부 20 cm, 하부 6 cm
4	36	깨끗함(아직까지는 크랙이 보임)
5	24	상부 21 cm, 하부 3 cm(하부는 두 조각남)
6	30	
7	54	
8	40	
9	46	상부 27 cm, 하부 19 cm
10	45.5	
11	38	
12	32	상부 11 cm, 하부 21 cm
13	37	상부 13 cm, 하부 24 cm
14	37	
15	18	
16	34	상부 13.5 cm, 하부 20.5 cm
17	16	상부 10.5 cm, 하부 5.5 cm
18	19	2016년 11월 28일 시작
19	53	가 이 마 이 트 스 크 가기가 나는
20	14	겉근 Kun들 돕으도 실다시 나눔
21	40	상부 36 cm, 하부 4 cm
22	34	
23	27	상부 15 cm, 하부 12 cm (하부는 바스라짐)
24	32	
25	31	상부 17 cm, 하부 14 cm
26	37	상부에서부터 20 cm, 12 cm, 5 cm (바스라짐)
27	37	상부에서부터 15 cm, 12 cm, 10 cm
28	27	상부에서부터 4.5 cm, 9.5 cm, 13 cm
29	36.5	상부에서부터 10.5 cm, 10 cm, 16 cm
30	38	9.5 cm, 18.5 cm, <mark>10 cm (Run이</mark> 다름)
31	25	10 cm, 15 cm (Run이 다름)
총 깊이(cm)	1015.5	

Table 2. A sampling list of ice coring in EM-B.

EM-B 시추공에서 남, 북으로 각각 3 m 떨어진 지점에서 핸드오거 두 대를 사용하여 동시에 시추가 이루어졌다. 남쪽 시추공은 EM-C, 북쪽 시추공은 EM-D 라 명명되었으며 12월 13일, 14일 양일 동안 각각의 시추공에서 6.705 m, 10.14 m 깊이의 블루아이스 시료를 채취하였다(표 3). EM-B 얼음 시료에서 보였던 화산 재 층의 기울기를 감안하였을 때, EM-C 시추공에서 얻어진 얼음 시료에서는 약 5 m 깊이 내외에서 화산 재 층이 나타날 것으로 예상하였으나, EM-C 시추공의 6.705 m 깊이 얼음 시추에서는 표면에서와 같이 진한 화산 재 층을 발견할 수 없었다. 다 만 50 cm 내외 깊이에서 화산 재 층이라 짐작되는 연한 회색의 층을 확인하였다. 채취한 블루아이스 시료는 대부분 상당히 큰 균열이 존재하였다.

화산 재 층의 기울기 및 연속성을 확인하기 위해 2016년 12월 14일에는 EM-B 시추공과 EM-C 시추공 사이 구간에서 1 m 내외 깊이의 시료를 여러 채취 하였으며(EM-E, EM-F, EM-G라 명명), EM-B 시추공에서 동쪽으로 약 3 m 떨어 진 화산 재 층 표면과 그에 남서쪽으로 1 m 구간 내에서도 3개 시추공에서 1 m 내외 깊이의 시료를 채취하였다(EM-H, EM-I, EM-J라 명명)(그림 14). 채취된 시 료의 내역은 아래와 같다(표 4).



Fig 14. A sketch of ice coring site in Elephant Moraine blue ice area.

Site 위치 (EM-C)		S 76°15'09.06" E 156°33'42.5" altitude: 2026 m	Site 위치 (EM-D)	S 76°15'09.06" E 156°33'42.05" altitude: 2026 m		
Bag #	<u> 곳</u>] 이 (cm)	데모 사항	Bag #	깊이 (cm)	뎨모 사항	
1	24.5	7L 0 D	1	27	(17 cm + 10 cm), (18 cm + 14 cm)	
2	55	₩ E ⊂ Kuli	2	32	같은Run	
3	54	71 O D	3	55		
4	29	~~~ Kuli	4	51	25 cm + 18 cm + 8 cm (바스라짐)	
5	42	깨짐 (3조각)	5	51		
6	40		6	37	710 0	
7	27	같은 Run을 돕으로 잘다서 나눔	7	25	€ ⊂ Kun	
8	40		8	45	20 cm + 25 cm (바스라짐)	
9	35		9	45	35 cm + 10 cm	
10	29		10	34	(12 cm + 14 cm + 8 cm). (15 cm + 10 cm)	
11	18		11	25	같은 Run	
12	33		12	48	완전히 바스라짐	
13	43		13	33	(11 cm + 11 cm + 11 cm)	
14	13		14	46	(15 cm + 22 cm + 9 cm)	
15	25		15	21	(17 cm + 14 cm), (7 cm + 11 cm + 9 cm)	
16	21		16	38	같은 Run	
17	38		17	27	(9 cm + 8 cm + 10 cm), (11 cm + 16 cm)	
18	14		18	27	같은 Run	
19	35		19	38	(15 cm + 15 cm + 8 cm)	
20	11		20	50	완전히 바스라짐	
21	44	21 cm + 9 cm + 14 cm (12월 14일 시추)	21	28	(18 cm + 10 cm)	
총 깊이(cm)	670.5		22	43	(18 cm + 5 cm + 8 cm + 10 cm)	
			23	34	(6 cm + 11 cm + 8 cm + 4 cm + 5 cm)	
			24	36	(2 cm + 24 cm + 5 cm + 5 cm)	
			25	36	(7 cm + 8 cm + 6 cm + 5 cm + 10 cm)	
			26	34	(1 cm + 9 cm + 10 cm + 14 cm)	
			27	27	(5 cm + 10 cm + 6 cm + 2 cm + 6 cm)	
			-28	21	(7 cm + 4 cm + 10 cm)	
		득시간	총 깊이(cm)	1014		

Table 3. A sampling list of ice coring in EM-C and EM-D.

Table 4. A sampling list of ice coring in EM-E, F,G, H, I, J.

Site 위치 (EM-E)	S 76°15'09.6" E 156°33'42.05" altitude: 2026 m		Bag # (EM-H)	깊이 (cm)	메모 사항
Bag #	<u> 곳</u>)이 (cm)	볘모 사항	1	40	40 cm. (30 cm + 15 cm)
1	53	710 Dun	2	45	같은 Run
2	49	'E ⊂ Kun	총 깊이(cm)	85	
총 깊이(cm)	102				
Bag #	깊이 (cm)	메모 사항	Bag # (EM-I)	깃이 (cm)	메모 사항
(EM-F)			1	42	(19 cm + 23 cm) - 13 cm 에서 화산재 충
1	50	(17 cm + 10 cm), (18 cm + 14 cm)	2	43	(30 cm + 13 cm), 같은 Run
2	50	같은 Run	총 깊이(cm)	85	
총 깊이(cm)	100				
Bag #	깊이 (cm)	메모 사항	Bag # (EM-J)	<u>깊</u> 이 (cm)	메모 사항
			1	30	(12 cm + 18 cm) - 25 cm 화산재 충
1	42		2	42	42 cm, 같은 Run
2	37	상부 4~5 cm 구간 화산재 충	총 깊이(cm)	72	
3	35				
총 깊이(cm)	114				

기존 EM-B 시추 지역에서 남동쪽으로 20 km 떨어진 거리에 위치한 엘리펀 트 모레인 블루아이스 지역에서 새로운 코어를 시추하였다(EM-K라 명명; 그림 15). EM-K 시추공이 위치한 지역은 모레인이나 기반암이 드러난 노두로 추정되나 아직 많은 연구가 진행되지 않은 지역으로 다양한 암석이 블루아이스 표면에 드러 나 있다(그림 16).

드릴 비트 파손으로 수리에 시간을 소비하였으며, 총 5.45 m 깊이의 블루 아이스 시료를 채취하는 데 성공하였다(표 5).



Fig 15. A satellite image of Elephant Moraine and drilling site of EM_K.



Fig. 16. A photo showing stones around EM-K drilling site.

Ske 위치 (EM-K)	S 76°19′43.09" E 157°12′45.02" altitude: 1994 m				
Bag #	깊이 (cm)	데보 사항			
1	50	(18 cm + 32 cm), 39 cm			
2	33	같은 Run			
3	38				
4	30				
5	48				
6	21				
7	21				
G	35				
9	45				
10	13				
11	40				
12	26				
13	15				
14	33	33 cm, (8 cm + 20 cm)			
15	28	같은 Run			
16	38	10 cm + 10 cm + 9 cm + 9 cm			
17	31	? cm + 3 cm + 7 cm + 14 cm			
충 깊이(em)	545				

Table 5. A sampling list of ice coring in EM-K.

(2) GPR 조사

엘리펀트 모레인 블루아이스 지역에 대해 GPR 조사가 이루어졌다. 기존에 계 획하였던 두 구간 중 한 구간은 GPR 조사를 완료하였으나, 나머지 한 구간은 GPR 장비 이상으로 도중에 중단되었다(그림 17). GPR 조사 결과, 경로 내에서는 표면에 서 약 400 m 에서 800 m 하부에 지면이 존재하는 것으로 확인되었다(그림 18).



Fig 17. A route of GPR survey in Elephant Moraine blue ice area.



Fig 18. A basement structure analysed from the data of GPR survey.

제 3 절 시료 전처리 및 블루아이스의 단면 스캔

1차 현장조사에서 채집된 Tarn flat 블루아이스 시료에 대하여 물리적 특성 분석 및 화학분석을 위한 시료 전처리를 실시하였다. 시료는 절삭 전 두께, 길이, 무게등 기초적인 조사를 진행 후 절삭을 하였다. 시료의 기초 정보는 표 6과 같다. 블루아이스 절삭은 극지연구소 냉동실험실에 설치된 수직 띠톱(BS10KA vertical band saw, Rexon, US)을 사용하였다. 절삭 계획은 그림 19와 같다. R0 시료는 보 관용 시료로 확보하였다. R1 시료는 가스성분, R2 시료는 이온성분 분석, R2-1 시 료는 물 안정동위원소 비 분석을 위한 시료를 얻었다(그림 19). 절삭이 완료된 시료 는 LDPE(Low Density Polyethylene)비닐에 넣어 보관 하였다.

Run	Bag	top	bottom	weight	diameter	Density
No.	No.	(cm)	(cm)	(g)	(mm)	(g/m ³)
1		0.0	92.0			·
2		92.0	175.0			
3	3-1	175.0	226.0	2952.0	93.80	0.84
3	3-2	226.0	233.0			
4		233.0	298.0	<		
5		298.0	366.0			
6	6-1	366.0	390.0	$-\gamma$		
6	6-2	390.0	428.0	2250.0	94.03	0.85
7		428.0	505.0			
8		505.0	565.0			
9	9-1	565.0	605.0			
9	9-2	605.0	659.0			
10		659.0	733.0			
11	11-1	733.0	765.5	1772.0	91.40	0.83
11	11-2	765.5	798.0			
12		798.0	859.0			
13	13-1	859.0	896.0	2218.0	94.13	0.86
13	13-2	896.0	933.5	2216.0	94.00	0.85
13	13-3	933.5	979.5	2750.0	93.88	0.86
14	14-1	979.5	1009.0	1928.0	94.84	0.93
14	14-2	1009.0	1043.0	1968.0	94.12	0.83
15	15	1043.0	1070.0	1600.0	97.00	0.80
16	16	1070.0	1126.0	3236.0	94.00	0.83
17	17	1126.0	1151.5	1560.0	94.08	0.88
18	18	1151.5	1192.5	2476.0	94.07	0.87

표 6. A sample list and some information of Tarn flat blue ice cores.



Fig. 19. A cutting plan of ice core sample of Tarn Flat blue ice cores.

단면 스캔은 얼음 입자 상태와 포획된 가스 방울의 크기 등 얼음의 상태를 육안으로 확인 할 수 있다. 일반화질 단면 스캔은 Schäfter+Kirchhoff사(독일)의 ILCS(Intermediate Layer Core Scanner) 장비를 사용하였으며, 고화질 단면은 LASM(Large Area Scan Microscope)를 사용하였다(그림 20). 일반화질 단면은 RO 시료의 6m, 8.7m, 10m, 12m 깊이에 해당하는 코어를 스캔하였다. 고화질 스캔은 최 대 깊이인 12m에 해당하는 14-2번의 RO시료를 1cm 두께로 절삭하였다(그림 19). 고화질 스캔의 경우 얼음 표면에 상태에 따라 이미지에 영향을 줄 수 있다. 깨끗한 이미지를 얻기 위해 절단면을 Trimming blade(F-130P, Feather Safety Razor Co., Ltd, Japen)을 이용하여 깨끗이 연마하였다. 연마된 단면은 표면의 절삭 자국을 지 우기 위해 냉동실험실에서 3일 동안 승화시켰다. 승화하는 동안 붙은 단면의 습기 는 에탄올을 이용하여 제거하고 스캔을 하였다.

고해상도 스캔 이미지를 통해 얼음 입자 상태와 포획된 가스 방울의 크기 등 을 확인할 수 있었으며, 채집된 시료 중 최하부 시료에서 보여진 얼음 결정 상태로 보아 심한 교란이나 깊은 심도를 거친 얼음으로 보이진 않는다 (그림 22).



Fig. 20. (a)Intermediate Layer Core Scanner and optical scheme. (b) Scheme of the LASM and optical scheme of bright-field illumination.



Fig. 21. Photos of image scan of blue ice samples. Depth at 6m, 8.7m, 10m, 12m from top to bottom.







Fig 22. Photos of high resolution image scan.



제 4 절 물 안정동위원소 분석

빙하코어의 대부분을 구성하고 있는 물의 동위원소 조성을 통해 과거 강설 당시의 기후 조건을 비롯한 다양한 정보를 제공한다. 이번 연구에서는 1차 현장조 사에서 채집된 Tarn Flat 블루아이스 시료 중 보존 상태가 좋은 최하부 시료인 12m 깊이의 시료에 대하여 최대 해상도(약 1.2cm 간격)로 분석하여 시기의 물 동 위원소 패턴이 어떤 시간 간격을 지시하는지 간접적으로 비교해 보았다.

물 동위원소 분석은 극지연구소의 CRDS 물안정동위원소 분석기를 이용하여 수소와 산도 동위원소를 분석하였다.

분석결과 8¹⁸O는 - 32.89~-36.50% (평균 - 34.25%), 8D는 - 256.37~-289.6 8% (평균 - 269.66%)을 보인다 (그림 23). 그림 23에서와 전체 45cm 길이의 코어 에서 같이 산소와 수소 동위원소의 거동 패턴은 뚜렷한 계절변화의 특성을 보이고 있으며 약 3.5년에 걸친 연대를 보여지는 것으로 확인된다. 이로부터 이 빙하코어 압축률이 그렇게 높지 않은 홀로세 이후에 해당되는 시료로 보여진다.



Fig. 23. Diagram showing water isotopes of blue ice samples from depth at 12m in Tarn Flat blue ice area.

북빅토리아랜드 인근 지역인 Styx glacier 지역과 GV7 지역의 빙하코어에서 얻어진 물 안정동위원소 값과 비교하여 보면 Tarn Flat 블루아이스의 값이 유사하 다는 것을 알 수 있다 (그림 24). 이로부터 Tarn Flat 블루아이스가 2,000m 내외의 고도에서 홀로세 이후의 간빙기 시기에 형성된 얼음임을 알 수 있다.

중수소 과잉값과 ¹⁷O 값의 변화(그림 25)는 상부의 블루아이스는 해안 가까이 에서 생성된 것으로 보연진다. 이는 이곳의 블루아이스가 남극 내륙에서 형성된 이 후 차츰 해안가로 이동하였으며, 이동 중에도 계속 눈이 쌓이면서 얼음 층을 형성 하였고 현재의 위치까지 이동하여 삭박된 것으로 생각된다.



Fig. 24. Diagram showing water isotopes of Tarn Flat blue ice, Styx glacier ice core and GV7 ice core.



Fig. 25. Diagram showing δ^{18} O, δ D, Deuterium excess and 17 O values of Tarn Flat blue ice.

제 5 절 이온 성분 분석

블루아이스에 포함된 주성분 이온 분석은 극지연구소의 이온크로마토그래피 분석시스템(ICS-2000와 ICS-2100)을 이용하여 양이온과 음이온 성분을 분석하였으 며(그림 26), 상세한 분석 조건은 표7과 같다.

분석결과는 표8과 9와 같으며, 분석결과 중 Na, Cl, MSA 등 해양성 성분들의 농도 수준으로 보아(그림 27와 28) 해안에서 비교적 먼 거리에서 퇴적된 강설로 보 이며, 먼 거리를 이동하여 현재의 해안가 부근에 위치한 것으로 보인다. 또한 물동 위원소에서와 같이 고해상도의 성분분석 결과에서는 계절 단위의 변동을 보인다 (그림 27와 28).



Fig. 26. Photo of Ion Chromatography system (ICS-2100 and CS-2000).



Fig 27. Diagram showing cation ions composition of blue ice samples.



Fig. 28. Diagram showing anion ions composition of blue ice samples.

	양이온 (ICS-2100 with	음이온 (ICS-2000 wit	
	AS)	AS)	
Analytical Column	Ion Pac^{TM} CS12A 4mm	Ion Pac^{TM} AS15 2mm	
Guard Column	Ion Pac TM CG12A	Ion Pac TM AG15	
Eluent	20 mM MSA, Isocratic	6-55 mM KOH, Gradient	
Flow Rate	1.0 mL/min	0.5 mL/min	
Temperature	30°C	30°C	
Detection	Suppressed Conductivity	Suppressed Conductivity	
Suppressor	CSRS 300^{TM} 4mm	ASRS 300 TM 2mm	
Applied Current	59 mA	69 mA	
Injection Volume	500 uL	500 uL	
	극지연구수		

Table 7. Analytical conditions of ion analysis.

Run no.	top (cm)	bottom (cm)	$\mathrm{Na}^{\scriptscriptstyle+}$	$\mathrm{NH_4}^+$	$\mathrm{K}^{\scriptscriptstyle +}$	Mg^{2^+}	Ca ²⁺
	175.5	181.5	53.53	1.20	3.90	7.96	12.58
	181.5	186.5	46.22	2.22	3.08	9.15	10.78
	186.5	191.0	48.20	1.03	2.60	5.40	8.32
0 1	191.0	195.0	50.52	1.34	3.13	10.29	10.42
3_1	200.0	205.0	21.51	0.75	2.58	5.94	8.81
	205.0	210.0	130.55	2.43	12.01	19.99	36.23
	210.0	215.5	167.77	1.47	6.68	21.64	11.90
	215.5	221.0	116.67	1.36	5.36	17.65	20.56
	390.5	395.5	78.63	1.01	8.98	14.52	23.80
	395.5	400.5	110.42	1.34	15.51	20.37	57.67
C 0	400.5	405.5	56.58	1.02	13.54	15.91	42.80
6_2	405.5	410.5	70.60	1.16	6.71	13.01	21.33
	410.5	417.5	54.63	1.22	4.31	12.35	11.36
	417.5	423.5	56.21	1.43	3.09	10.81	11.18
	609.5	614.5	113.32	1.86	16.33	17.17	62.60
0.0	614.5	619.5	82.52	1.03	6.28	13.72	14.63
9_2	619.5	624.5	55.00	1.08	4.38	13.31	9.51
	625.0	631.0	86.59	1.40	15.95	16.25	188.40
	733.5	738.5	113.55	1.46	16.50	13.92	67.15
	738.5	745.5	26.99	0.89	5.39	12.33	17.54
11_1	745.5	750.5	56.69	0.78	5.17	11.85	16.51
	750.5	756.0	37.64	0.85	14.20	14.89	28.22
	756.0	761.0	108.00	1.41	44.51	30.41	194.53
	859.5	864.5	61.11	1.55	8.34	12.72	27.55
	864.5	869.5	21.97	0.87	8.49	6.71	25.47
10 1	869.5	874.5	101.65	1.97	30.66	20.57	225.62
13_1	874.5	879.5	75.85	1.57	12.78	27.85	89.94
	879.5	885.5	35.72	0.84	6.86	12.86	18.40
	885.5	891.0	83.02	1.44	16.82	22.03	78.14
	900.5	904.5	63.10	1.95	14.19	24.30	61.05
	904.5	908.5	144.31	1.87	27.06	30.24	276.18
	908.5	912.5	25.15	1.23	7.06	13.65	21.30
13_2	912.5	917.5	60.30	1.40	3.84	10.98	12.63
	917.5	922.5	48.54	2.93	5.75	12.66	20.51
	922.5	927.5	49.09	1.56	5.32	13.63	21.06
	927.5	932.5	37.63	1.90	11.29	12.37	35.51

Table 8. Analytical result of cation composition (unit; ug/L).

	934.0	939.0	19.49	0.90	2.50	5.38	6.79
	939.0	944.0	79.21	1.80	8.41	11.66	28.23
	944.0	949.0	58.31	1.18	6.21	9.13	27.98
13_3	949.0	955.0	37.06	0.66	2.58	8.70	8.99
	955.0	961.0	62.42	1.47	6.98	13.91	24.09
	966.0	970.0	52.99	1.46	3.96	10.31	25.36
	970.0	974.5	38.35	0.67	3.14	6.79	20.82
	984.0	989.0	34.57	1.19	4.15	10.51	24.31
	989.0	995.0	21.41	0.74	2.78	5.82	10.41
14_1	995.0	999.5	31.10	0.70	4.91	12.12	12.22
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	999.5	1004.5	65.38	0.85	7.67	12.01	27.05
	1009.5	78.43	0.92	7.21	9.14	26.43	
	1013.5	1019.0	25.05	1.15	2.55	5.13	14.22
14.0	1019.0	1024.5	19.36	0.44	1.87	5.71	6.28
14_2	1024.5	1029.5	95.95	0.72	3.34	10.53	10.52
	1029.5	1034.0	34.49	0.66	4.99	12.17	18.24
	1034.0	1038.5	32.67	0.37	3.97	6.10	11.11
	1047.5	1054.5	28.24	0.63	3.02	8.61	9.24
15	1055.5	1060.5	31.10	0.77	5.72	6.65	25.06
	1060.5	1065.5	29.81	0.86	3.31	6.75	16.68
	1074.5	1078.5	23.38	0.69	5.58	6.87	16.41
	1078.5	1083.0	54.07	0.61	15.04	14.76	46.14
	1083.0	1087.0	22.25	1.07	7.22	10.52	14.08
	1087.0	1091.5	87.42	0.90	13.85	12.99	72.26
16	1091.5	1095.5	33.58	1.54	4.66	10.05	14.13
16	1095.5	1100.5	55.89	1.11	6.75	9.42	22.87
	1105.5	1110.5	37.78	1.05	3.89	10.22	18.43
	1110.5	1115.5	31.40	1.25	8.84	12.58	28.05
	1115.5	1120.0	44.81	1.11	6.76	10.85	21.80
	1120.0	1124.0	46.08	1.41	6.94	7.05	17.56
	1130.5	1135.5	35.56	1.03	3.86	11.68	12.80
17	1135.5	1140.5	23.85	0.75	2.31	5.59	6.04
17	1140.5	1146.0	31.82	0.56	4.03	8.34	14.26
	1146.0	1151.0	83.73	0.63	12.49	12.05	29.67
	1156.0	1160.5	39.04	0.94	5.93	9.90	23.97
	1160.5	1166.0	19.83	0.47	4.23	7.18	16.17
18	1166.0	1172.0	31.43	0.97	3.78	9.29	12.34
	1172.0	1177.5	27.04	0.74	2.68	6.62	8.98
	1177.5	1182.5	45.16	0.87	4.10	9.16	19.94
	1183.50	1188.00	31.88	1.46	4.60	12.09	17.61

Run no.	top (cm)	bottom (cm)	F^{-}	Acetate	Format e	MSA	Cl^-	$\mathrm{SO_4}^{2^-}$	NO_3^-
	175.5	181.5	0.70	0.93	1.58	7.33	100.66	93.43	71.15
	181.5	186.5	0.49	0.79	1.70	8.11	87.70	96.67	58.96
	186.5	191.0	0.22	1.26	1.82	13.59	90.49	49.27	47.19
3_1	191.0	195.0	0.50	1.23	2.01	9.03	97.28	75.47	42.25
	200.0	205.0	0.32	0.79	1.81	2.23	50.51	72.59	50.79
	205.0	210.0	0.91	0.80	2.11	21.65	229.46	206.16	61.56
	210.0	215.5	0.31	1.36	2.26	5.50	296.12	166.77	42.93
	215.5	221.0	0.72	1.41	2.35	23.58	215.74	135.05	45.51
0.0	390.5	395.5	1.05	1.45	2.41	13.88	162.97	75.75	64.23
	395.5	400.5	1.70	1.68	2.39	28.81	204.57	156.56	134.20
	400.5	405.5	1.61	1.76	2.76	30.69	99.91	153.77	113.43
0_2	405.5	410.5	1.18	1.60	2.74	15.67	141.38	106.36	73.23
	410.5	417.5	1.11	1.26	2.17	4.66	129.22	133.35	68.87
	417.5	423.5	1.42	1.10	2.69	12.78	129.61	80.77	72.10
	609.5	614.5	1.78	1.29	3.08	27.17	172.60	140.40	136.78
0.2	614.5	619.5	0.62	1.27	2.36	6.74	153.92	82.04	57.88
9_Z	619.5	624.5	1.07	1.38	2.73	4.41	117.78	79.24	40.30
	625.0	631.0	1.90	2.16	3.08	20.40	156.36	119.17	90.63
	733.5	738.5	2.97	1.98	2.53	32.16	223.21	118.45	94.05
	738.5	745.5	2.58	0.80	2.09	6.87	133.34	81.07	39.24
11_1	745.5	750.5	0.69	1.26	2.54	8.27	117.84	101.80	69.66
	750.5	756.0	0.72	1.11	2.22	16.32	57.14	130.72	78.81
	756.0	761.0	3.27	2.59	6.69	36.17	128.87	147.57	168.67
	859.5	864.5	0.39	3.75	2.83	4.33	102.09	114.03	78.29
	864.5	869.5	0.40	0.91	3.27	6.00	33.55	57.04	57.50
10 1	869.5	874.5	2.52	1.47	6.18	31.89	135.30	132.00	164.53
13_1	874.5	879.5	2.35	1.38	2.94	9.69	109.14	388.99	94.19
	879.5	885.5	2.43	1.13	2.32	2.21	96.70	116.16	59.16
	885.5	891.0	3.60	1.81	3.12	19.90	123.09	234.08	131.63
	900.5	904.5	3.45	2.16	3.74	14.21	105.67	210.71	90.08
13_2	904.5	908.5	12.6 1	2.24	5.77	34.75	192.45	434.00	228.23
	908.5	912.5	0.85	1.25	3.45	3.40	59.87	125.28	67.93
	912.5	917.5	1.21	1.33	2.78	5.00	116.17	85.38	81.59
	917.5	922.5	2.78	0.72	1.75	6.28	111.56	167.19	71.86
	922.5	927.5	3.20	1.21	2.95	1.93	110.12	200.41	42.32
	927.5	932.5	1.78	1.41	3.79	18.89	73.53	161.41	63.19

Table 9. Analytical result of anion composition(unit; ug/L)

	934.0	939.0	0.14	1.47	3.52	1.19	45.91	83.99	45.79
	939.0	944.0	0.93	1.79	4.13	18.44	133.17	113.88	82.05
	944.0	949.0	1.76	1.93	3.12	19.43	116.55	93.47	85.22
13_3	949.0	955.0	1.73	1.37	2.35	1.66	144.21	100.00	40.10
	955.0	961.0	5.55	1.50	2.63	14.21	178.94	145.79	74.05
	966.0	970.0	1.79	2.00	3.51	5.60	173.26	58.77	59.24
	970.0	974.5	3.41	1.79	2.93	11.26	191.59	71.58	58.95
	984.0	989.0	6.43	0.96	2.05	13.03	243.32	143.65	68.39
	989.0	995.0	3.76	0.72	2.24	9.67	177.68	62.43	65.13
14_1	995.0	999.5	4.56	1.43	2.86	10.52	205.84	98.98	48.69
	999.5	1004.5	5.62	1.19	2.44	18.62	195.80	133.96	86.30
	1004.5	1009.5	2.33	1.29	2.00	12.24	174.28	114.39	102.58
	1013.5	1019.0	1.11	0.74	2.27	10.24	61.02	67.07	79.71
	1019.0	1024.5	0.50	0.99	2.35	2.09	47.69	98.29	68.26
14_2	1024.5	1029.5	1.10	1.07	2.46	9.58	182.71	78.34	60.02
	1029.5	1034.0	2.29	1.36	2.69	19.25	87.80	95.44	66.60
	1034.0	1038.5	1.36	1.29	2.65	6.27	82.79	51.49	61.99
	1047.5	1054.5	2.11	0.81	2.04	2.47	76.26	85.83	41.87
15	1055.5	1060.5	1.05	0.96	2.70	14.94	64.85	73.81	65.42
	1060.5	1065.5	1.51	1.32	3.08	10.98	67.27	75.49	56.71
	1074.5	1078.5	0.42	1.36	3.33	5.71	54.36	45.70	47.59
	1078.5	1083.0	1.63	1.44	2.95	19.59	81.37	115.96	86.69
	1083.0	1087.0	0.50	1.40	3.06	2.57	53.31	83.74	51.81
	1087.0	1091.5	1.70	1.57	3.11	25.60	110.27	164.59	130.90
1.0	1091.5	1095.5	0.67	1.11	2.93	2.08	86.00	107.27	66.42
16	1095.5	1100.5	2.83	1.46	2.66	4.79	161.81	113.83	63.78
	1105.5	1110.5	1.60	1.46	2.89	5.05	103.76	95.83	69.45
	1110.5	1115.5	3.87	1.62	3.59	13.86	125.19	119.50	67.13
	1115.5	1120.0	2.66	1.33	2.95	10.07	142.72	72.79	68.09
	1120.0	1124.0	1.88	1.57	3.44	7.67	150.49	43.98	79.79
	1130.5	1135.5	2.23	2.47	3.76	5.39	110.59	118.08	86.77
17	1135.5	1140.5	1.83	2.16	3.67	5.39	82.85	57.78	67.58
	1140.5	1146.0	2.62	2.79	3.24	8.99	113.40	78.56	68.50
	1146.0	1151.0	3.31	2.53	0.72	16.14	214.34	102.47	80.41
	1156.0	1160.5	2.82	3.18	4.02	9.61	139.55	91.80	76.03
	1160.5	1166.0	2.43	1.54	1.95	13.72	55.68	70.79	88.44
10	1166.0	1172.0	2.02	0.95	2.67	11.59	111.81	83.52	48.52
18	1172.0	1177.5	1.12	1.24	2.90	7.67	79.81	72.21	56.73
	11/2.0	111110							
	1177.5	1182.5	1.81	1.64	2.92	14.32	102.07	111.68	70.99

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

본 연구사업에서는 남극의 블루아이스가 항상 강한 바람이 불며, 기온이 아주 낮은 남극 내륙의 고지대에 위치하는 상황을 고려하여 안정적인 시료 확보 가능성 에 주안점을 두었다. 특히 1차년도에는 블루아이스 지역에서의 빙하 시추 활동이 전무한 상태에서 시료 확보 여부에 중점을 두어 블루아이스 지역에서 핸드오우거들 이용하여 5m 이상의 빙하 시료 채집을 성과 목표로 설정하였다. 결과적으로 1차년 도에는 핸드 오우거를 이용하여 12m 깊이의 블루아이스를 시추하여 헬기를 이용한 간단한 로지스틱 지원으로 기본적인 현장탐사 및 시료 채집이 가능함을 확인하였 다.

1차 현장작업을 기반으로 2차 현장탐사에서는 대상지역인 엘리펀트 모레인 지역에서 다수의 블루아이스 시료를 채집하고 다양한 탐사 활동을 수행함으로써, 향후 블루아이스 지역에서의 다양한 연구 활동 수행을 위한 기반을 다졌다.

시료 분석은 1차 현장조사에서 획득한 시료에 대하여 고해상도 물안정동위원 소와 이온 성분 분석을 통해 본 시료들이 계절 변동 주기성을 나타내는 것과 물 동 위원소 조성으로 보아 홀로세 이후의 비교적 젊은 연령을 가진 빙하코어로 생각된 다.

본 연구과제가 연구소의 주요사업 운영 정책에 따라 예정되었던 3년간의 연 구기간을 단축하여 16개월간수행하고 조기 종료됨에 따라 2차 조사에서 획득한 시 료에 대한 본격적인 시료분석 연구가 수행되지 못하였다. 이에 대해서는 확보된 시 료에 대하여 물안정동위원소, 이온 성분, 다양한 가스 성분 분석 등의 연구를 지속 적으로 수행하여 본 과제가 수행하고 자 했던 오래된 빙하코어 획득을 위한 연령측 정법 개발 성과를 이룰 수 있도록 노력하여야 한다.

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

- 남극 블루아이스 지역에서의 빙하탐사와 빙하시추 수행 경험은 향후 블루아이
 스 지역에서의 유사한 연구활동을 위한 기초 자료 제공
- 획득된 블루아이스 시료에 대하여 가스 성분 분석, 안정동위원소와 이온 성분
 분석을 통해 엘러펀트 모레인 지역에 분포하는 블루아이스의 연대 측정 연구
 수행
- 연대 분석 이후 수만~십만년 주기의 빙하기와 간빙기로 반복되는 과거 기후변
 화 복원 및 기후변화 원인 규명 연구 수행
- 블루아이스 형성 작용 이해를 위한 빙하 거동 모델 수립을 위한 기초 자료 제
 공
- 블루아이스를 기반으로 하는 지질, 지구물리, 대기, 빙하 등의 다학제 연구 프
 로그램 운영을 위한 기반 자료 제공



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 과제 수행을 위해 조사된 해외 과학기술정보는 제2장에 정리하였다.



제 7 장 참고문헌

- Bintanja, R., 1999. On the glaciological, meteorological, and climatological significance of Antarctic blue ice areas. Review of Geophysics., 37,3, 337–359.
- Buizert, C, Baggenstos, D., Jian, W., Purtschert, R., Petrenko, V.V., Lu, Z.-T., Muller, P., Kuhl, T., Lee, J., Severinghaus, J.P., and Brook, E.J. Radiometric 81Kr dating identifies 120,000-year-old ice at Taylor Glacier, Antarctica, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111, 6876–6881.
- Fischer, H., Severinghaus, J., Brook, E., Wolff, E., Albert, M., Alemany, O., Arthern, R., Bentley, C., Blankenship, D., Chappellaz, J., Creyts, T., Dahl-Jensen, D., Dinn, M., Frezzotti, M., Fujita, S., Gallee, H., Hindmarsh, R., Hudspeth, D., Jugie, G., Kawamura, K., Lipenkov, V., Miller, H., Mulvaney, R., Parrenin, F., Pattyn, F., Ritz, C., Schwander, J., Steinhage, D., van Ommen, T., and Wilhelms, F. 2013. Where to find 1.5 million yr old ice for the IPICS "Oldest-Ice" ice core. Climate of the Past, 9(6), 2489-2505, doi:10.5194/cp-9-2489-2013.
- Folco, L., Welten, K.C., Jull, A.Jt., Nishiizumi, K., and Zeoli, A., 2006, Meteorites constrain the age of Antarctic ice at the Frontier ountain blue ice field (northern Victoria Land), Earth and Planetary Science Letters, 248, 209–216.
- Higgins et al, 2015 Higgins, J.A., Kurbatov, A.V., Spaulding, N.E., Brook, E., Introne, D.S., Chimiak, L.M., Yan, Y., Mayewski, P.A., and Bender, M.L., 2015, Atmospheric composition 1 million years ago from blue ice in the Allan Hills, Antarctica: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112, 6887 - 6891.
- Hui F, Cl, T., Cheng, X, Scambos, T.A., Liu, Y., Zhang, Y. Chi, Z., Huang, H., Wang, X., Wang, F., Zhao, C., Jin Z., and ang, K., 2014 Mapping blue-ice areas in Antarctica using ETM + and MODIS data. Annals of Glaciology. 55, 129 - 137.
- Nishiizumi, K, Elmore, D, and Kubik, P.W., 1989, Update on terrestrial ages of Antarctic meteorites, Earth and Planetary Science Letters, 93, 299–313.

Spaulding, N.E., Higgins, J. A., Kurbatov, A.V., Bender, M.L., Arcone, S.A., Campbel, S., Dunbar, N.W., Chiiak, L.M., Introne, D.S., and Mayewski, P.A., 2013, climate archives from 90 to 250 ka in horizontal and vertical ice cores from the Allan Hills Blue Ice Area, Antarctica, Quaternary Research, 80, 562–574.



편집순서 9

뒷 면

(국내 과제용)

