

Firn air 추출기법 개발 및 빙하 상부 온실기체
거동 연구(2년차)

Technique development firn air sampling and study for
greenhouse gas movement in the firn air (second year)



서울대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “과거, 현재의 극지기후 관측과 재현을 통한 기후변화 메커니즘 규명” 과제의 위탁연구 “Firn air 추출기법 개발 및 빙하 상부 온실기체 거동 연구” 과제의 2년차 최종 보고서로 제출합니다.



총괄연구책임자 : 김 성 중

위탁연구기관명 : 서울대학교

위탁연구책임자 : 안 진 호

보고서 초록

위탁연구과제명	Firn air 추출기법 개발 및 빙하 상부 온실기체 거동 연구				
위탁연구책임자	안진호	해당단계 참여연구원수	3	해당단계 연구비	69,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교 지구환경과학부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	?
<p>1. 연구개발의 목적 및 필요성</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Firn air 시료 확보 기술 개발 ○ 장보고기지 주변 Styx 빙하 상부에서의 온실기체 거동 연구 <p>2. 연구개발의 내용 및 범위(2015년도)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Styx 빙하에서의 firn air 시료 채취 ○ Firn air 온실기체 농도 분석 <p>3. 연구결과(2015년도)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 13개 깊이구간에서 16개의 유리플라스크와 6개의 SilcoCan canister에 시료 채취 ○ 시료 채취 시 현장에서 CO₂ 농도 분석으로 diffusion zone과 bubble close-off 깊이 확인 ○ Firn air 모델링에 필요한 시추공 온도 정밀 측정 ○ 채집된 firn air의 온실기체(CO₂, CH₄) 농도 측정 ○ 두 종류의 용기에 관계없이 같이 깊이구간에서 농도 일정함을 확인 ○ 중력에 의한 농도 변화 보정을 위하여 δ¹⁵N-N₂ 측정 <p>4. 연구개발결과의 활용계획</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 향후 Styx 빙하코어를 비롯한 본격적인 빙하코어 연구의 기초자료로 활용 					
색인어 (각 5개 이상)	한글	핀공기, 빙하코어, 온실기체			
	영어	firn air, ice core, greenhouse gas			

요 약 문

I. 제 목

Firm air 추출기법 개발 및 빙하 상부 온실기체 거동 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- Firm air 시료확보 기술 개발
- 장보고기지 주변 Styx 빙하 상부에서의 온실기체 거동 연구

III. 연구개발의 내용 및 범위

- Firm air 추출장치 개발(2014년)
- Styx 빙하 시추지역에서 firm air 시료채취 및 분석(2015년)
- Styx 빙하 firm air에서의 온실기체 거동 모델 개발(2016년)

IV. 연구개발결과(2015도)

- Styx 빙하에서의 firm air 시료채취
- Firm air 온실기체 농도분석

V. 연구개발결과의 활용계획

- 추가연구의 필요성
- 타 연구에의 응용

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Technique development firn air sampling and study for greenhouse gas movement in the firn air

II. Purpose of the research

- Technique development for firn air sampling
- Study for firn air behavior in Styx glacier near Jang Bogo station

III. Research plan and scopes

- Construction of firn air sampling device (year of 2014)
- Firn air sampling and gas (CO_2 and CH_4) analysis for Styx firn air (year of 2015)
- Medel development for greenhouse gas movement in Styx firn air (year of 2016)

IV. Results (year of 2015)

- Firn air sampling at Styx glacier, Antarctica
- Greenhouse concentration analysis

V. Broader impact and applications

- Needs for further study
- Applications for other ice core studies

Contents

Chapter 1. Introduction

1. Purpose
2. Needs
3. Scope

Chapter 2. R&D status in Korea and foreign countries

1. Status in foreign countries
2. Status in Korea

Chapter 3. Research contents and results

1. Methods
2. Details of research works
3. Results



Chapter 4. Achievements of the research goal and broader impacts

1. Achievements
2. Broader Impacts

Chapter 5. Application plan for the research products

1. Further research
2. Application to other studies

Chapter 6. References

목 차

제 1 장 서론

- 1절. 연구개발의 목적
- 2절. 연구의 필요성
- 3절. 연구범위

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 1절. 국외 연구개발 현황
- 2절. 국내 연구개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

- 1절. 연구방법 개관
- 2절. 세부 연구수행 방법 및 내용
- 3절. 연구결과



제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- 1절. 연구개발목표 달성도
- 2절. 연구개발 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 1절. 추가연구의 필요성
- 2절. 타연구에의 응용

제 6 장 참고문헌

제1장. 서 론

1절. 연구개발의 목적

1. 연구개발의 최종목적

- 빙하시추 지역에서의 firm air 시료확보 기술 개발
- 장보고기지 주변 Styx 빙하상부에서의 온실기체 거동 연구

2. 2차년도(2015) 목표

Styx빙하 시추지역에서 firm air와 지표면 공기 채취, 채취된 공기의 CO₂, CH₄ 농도분석

빙하상부 약 70-100 미터 두께의 눈송이층 사이에 있는 공기(firm air)는 최근 수십 년 간의 공기를 보존하고 있어, 인류활동에 의한 대기 중 온실기체 농도변화를 복원하고, 모니터링하는데 매우 효과적으로 사용될 수 있다. 더불어, 빙하코어 자료를 해석하는데 있어 반드시 필요한, firm densification과 공기포집과정, 기체연령-얼음연령 차이를 이해하는데 firm air연구가 반드시 필요하다. 본 위탁과제는 총 3년 계획으로 2014년도부터 진행되었으며, 1차년도에 이어 2015년도에도 계획대로 과제를 수행하였다.



그림 1. Styx빙하 시추지점 주변 풍경. 헬리콥터로 시추관련 물품을 운반하고 있다.

2절. 연구의 필요성

- firm air의 거동을 이해하는 것은 firm air의 연령을 알아내는데 필수적이다. firm air를 연

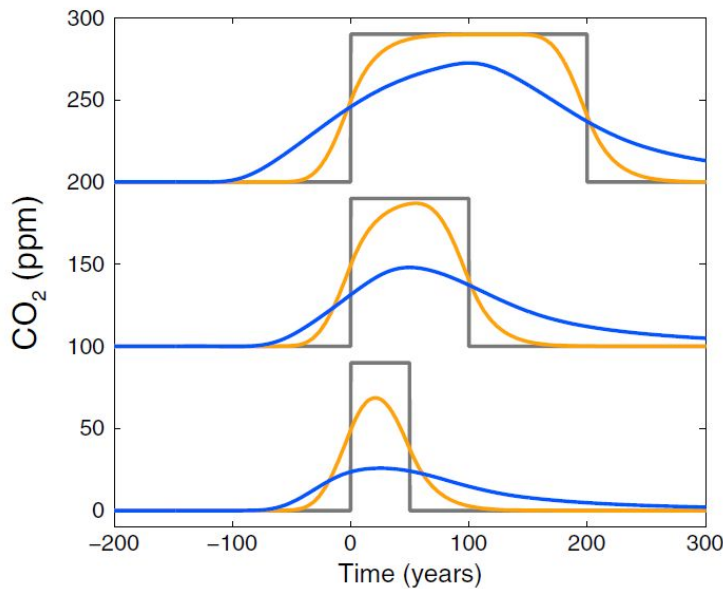


그림 2. 빙하상부 firn에서의 기체거동에 의한 빙하코어기록의 smoothing효과. 회색선:가상의 대기 농도변화, 오렌지색선: 가상의 대기 농도변화가 Siple Dome 빙하코어 기록되는 경우의 시뮬레이션 결과, 파란색선: 가상의 대기 농도변화가 Dome C 빙하코어에 기록되는 경우의 시뮬레이션 결과 (Ahn et al., 2014)

$^{15}\text{N}-\text{N}_2$)를 측정하여 연구를 수행하여야 한다. 이러한 자료는 3차년도에 수행될 온실기체 확산에 대한 모델링에 반드시 필요하다.

3절. 연구범위

2014년도에 개발된 firn air 채집 장비를 활용하여 남극 Styx빙하 시추코어에서 firn air를 채집하고, 실험실로 시료를 운반 후, CO_2 , CH_4 농도를 분석하여 깊이별 프로파일을 작성하여 차기년도 온실기체 거동 모델개발에 필요한 기초자료를 생산하였다. 또한, 질소기체의 $\delta^{15}\text{N}$ 을 분석하여, 중력장에 의한 기체농도변화를 추정하는데 쓰일 수 있는 기초자료를 함께 생산하였다. Firn air 분석결과 약 90년된 공기가 Styx빙하 상부 firn에 존재함을 확인하였는데, ‘남극내륙에서 500m 중부빙하시추를 위한 한국 주도형 국제 빙하시추프로그램 개발’에 반드시 필요한 연령측정기법으로 firn air 분석기술이 요구되므로, 본 과제를 수행하면서 기술적 인프라를 구축하였다.

1. Firn air 시료채취

가. Firn air 추출장치

Firn air 추출장치는 본 과제의 1차년도(2014)에 성공적으로 개발되었다. 이 장치는 크게

령은 빙하코어 자료 해석 및 빙하 거동에 대한 기초자료로서 firn air 관련 기술은 향후 빙하코어 연구에 반드시 필요하다.

○ firn air 샘플링 기술장치는 미국, 유럽, 일본이 각각 1대씩 보유하고 있으며, 국내에는 관련 장치 및 운용기술이 전무하였다. 본격적인 빙하연구를 위해서 국내에 관련 기술이 시급히 요구된다.

○ firn air의 깊이 및 연령에 따른 분포를 모델로 재현하기 위해서는 firn air의 밀도 및 온도, 화학분석 자료 등이 필요하다. 1차년도(2014년)에 개발된 시료채집 장치 및 온도 측정장치를 이용하여, 실제 빙하코어 시추지점에서 시료를 채취하고, 획득한 시료에 대하여 온실기체 농도, 질소 동위원소($\delta^{15}\text{N}$)를 측정하여 연구를 수행하여야 한다. 이러한 자료는 3차년도에 수행될 온실기체 확산에 대한 모델링에 반드시 필요하다.

세 부분으로 나뉘어지는데, (1)펌프장치, (2)bladder, 그리고 (3)저장용기이다.

펌프장치는 3개의 진공펌프와 여러 개의 압력계, 진공밸브 등으로 구성되었고, 현재까지 가장 정밀한 것으로 알려진 스위스 베른의 장치와 유사하게 제작되었다. 펌프는 시추공의 공기를 빨아들이고, bladder를 팽창/수축 시키는 역할을 하도록 설계되어 있다. 압력계, 진공밸브 등은 1/4 인치 스테인레스 스틸 튜빙을 사용하여 연결하였다.

Bladder는 고무로 이루어져 안쪽 공기압에 따라 팽창할 수 있다. 시추공 안에 넣은 다음 공기를 주입하여 압력을 높이면 팽창하게 되고, 시추공을 단단히 막아서 시추공 내의 공기와 외부의 공기를 효과적으로 차단할 수 있도록 하였다. Bladder의 안쪽으로 2개의 튜빙이 들어가게 되어, 한쪽은 지상의 펌프장치와 연결되고 다른 쪽은 빙하시추 바닥 지점에 닿게 된다.

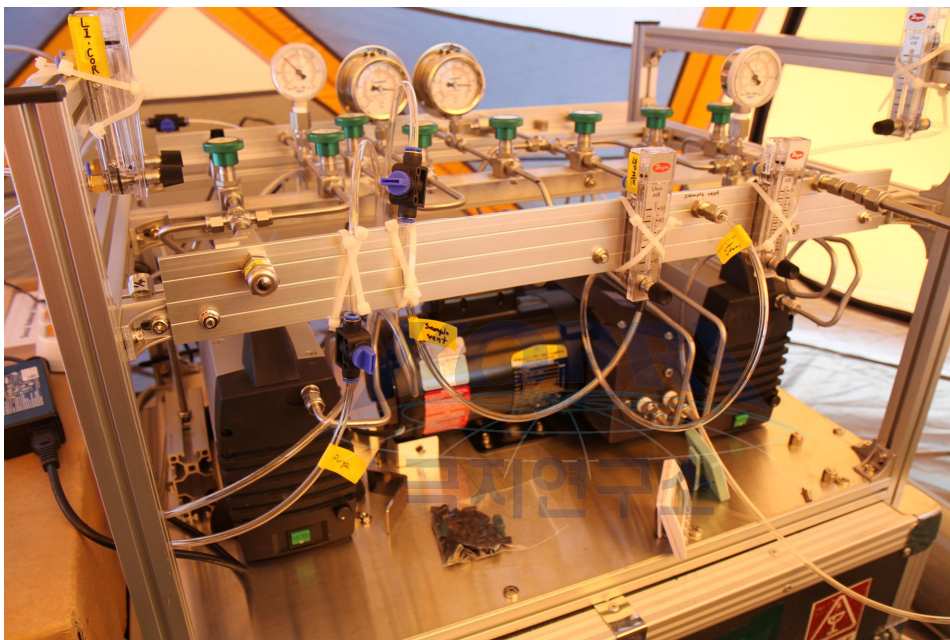


그림 3. 1차년도(2014)에 개발된 firm air추출용 펌프장치

나. Firm air 추출

LI-COR LI-840A 분석 장비를 컴퓨터에 연결하여, firm air 샘플링시 CO₂ 농도를 측정하도록 하였다. CO₂ 농도 측정은 bladder를 시추공에 주입할 때, 현대의 공기가 시추공 속으로 들어 간 것이 충분히 빠져 나왔는지 확인하고, firm air 시료를 용기에 담은 시점을 결정하기 위하여 사용되었다. 현장에서의 효과적인 calibration을 위하여 이미 농도를 알고 있는 표준공기 탱크 2개를 준비하여 사용하였고, Firm air는 눈의 승화(sublimation)에 의해서 많은 수증기를 포함하고 있어, 일부 온실기체 농도에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 이러한 효과를 줄이기 위해서 수증기 트랩을 장착하였다.

다. Firm air 저장용기 비교

국내에서 제작한 3리터 유리 플라스크와 SilcoCan canistor를 같은 깊이 시료에 사용하여 시료를 채집하였다. 시료용기에 따른 농도변화를 확인하기 위한 것으로서 연구결과의 신뢰도를 높이기 위함이 목적이었다. 또한, 지표면 공기도 함께 채취하여, 모델링연구에 필요한



그림 4. 펌프장치에 연결된 firm air 포집용기

기초자료를 충분히 확보하였다.

2. Firm air 농도측정

가. 온실기체 농도측정

CO₂, CH₄의 정확한 농도를 측정하기 위하여, 현장에서 측정한 CO₂ 대신, 실제로 채취한 시료를 실내에서 정밀측정을 실시하였다. 국제적으로 공인된 자료획득을 위하여 NOAA에서 정밀한 농도측정을 실시하였다.

나. δ¹⁵N-N₂ 측정

중력에 의한 fractionation 효과를 보정하기 위하여 δ¹⁵N을 해외 분석인프라를 이용하여 분석하였다. 미국 Jeff Severinghaus 실험실에서 유리플라스크시료에 대한 측정을 실시하였다 (Severinghaus et al., 1998; Severinghaus and Brook, 1999).

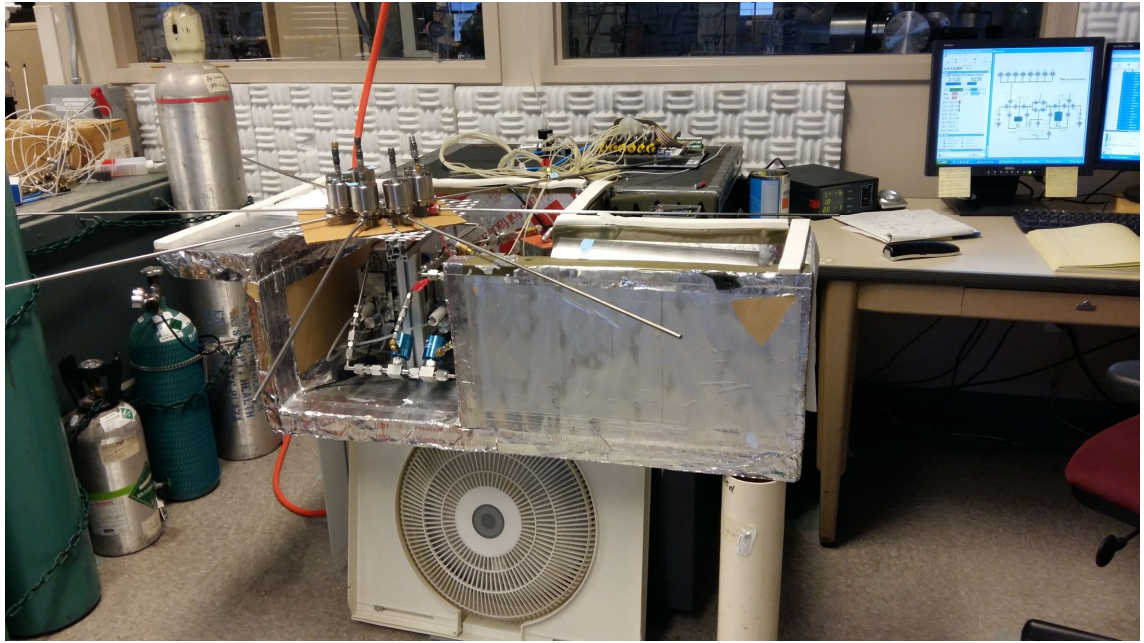


그림 5. 미국 샌디에고 캘리포니아주립대학 Jeff Severinghaus교수 실험실에 설치된 $\delta^{15}\text{N-N}_2$ 측정용 질량분석기.



제 2 장. 국내외 기술개발 현황

1절. 국외 연구개발 현황

1. 미국, 유럽, 일본에 각각 1대의 firn air sampling 장비를 갖추고 있으며, 미국과 유럽 중심으로 지속적인 시료채취가 이루어지고 있음.
2. 미국은 최근 남극점(south pole)에서 중부시추를 진행하면서 firn air 시료를 동시에 채취하고 있음.
3. 관련논문이 Nature와 Science에 다수 출간되었고(Aydin et al., 2011; Battle et al., 1996; Schwander and Stauffer, 1984; Severinghaus et al., 1998; Severinghaus and Brook, 1999). 2012년에는 그린랜드 NEEM빙하시추와 관련되어 수행된 firn air 연구결과가 ACP(Atmospheric Chemistry and Physics)에서 특별호로 출간되었음.
4. 그린랜드에 비하여 남극에서의 고해상도 연구는 미약한데, 다양한 지역에서의 시료 채취가 시급히 요구됨.

2절. 국내 연구개발 현황

1. 본 과제에 의해서 국내 최초로 firn air sampling 장비가 개발되었고, 독자적인 시료확보가 가능함.
2. 시료분석 결과에 대한 수치모델링 기술확보가 되어있지 않으나, 본 과제 3차년도(2016년)에 국내에서 관련기술을 확보할 수 있을 것으로 기대됨.

제 3 장. 연구개발수행 내용 및 결과

1절. 연구방법 개관

1. 추진전략

2014년도에 firm air 샘플링을 위한 펌프장치 및 bladder가 구성되었다. 이를 바탕으로 2014/2015년도 남극 하계시즌 동안 장보고 기지에서 북쪽으로 약 80km 떨어진 Styx빙하에서 시료를 채취하였다. 시료 채취시 LI-COR analyzer를 이용하여, 시료 채취상태를 모니터링 하였으며, 시료용기는 국내에서 제작한 유리플라스크와 스테인리스스틸로 만들어진 Silcocan canistor를 함께 사용하여, 결과값을 비교하였다. 채취된 시료에 대해서는 온실기체(CO₂, CH₄) 농도를 정확히 측정하였고, 시추시 측정된 온도/밀도 자료도 확보하였다. 3차년도(2016)에는 획득된 자료를 바탕으로 온실기체 농도변화를 모델링하여 firm air 시료채취/분석/모델에 관한 기초기술을 확보한다.

2. 연구방법

가. Firm air sampling

firm air는 빙하상부에서 확산에 의해서 서서히 움직인다. 깊이가 증가할수록 연령이 증가하고, 인류활동에 의해서 대표적인 온실기체인 CO₂, CH₄ 및 N₂O 농도가 과거 150년간 계속 증가했기 때문에, 일반적으로 시추공 깊이가 깊어 질수록 firm air에서 CO₂, CH₄ 및 N₂O 농도가 증가하게 된다. 시료채취 지점에서 시추공에 bladder를 넣을 경우 현대의 공기가 같이 들어갈 수 있어, 시추공에서 나오는 공기는 firm air의 조성과 다를 수 있다. 계속해서 firm air를 뽑아내면서 CO₂ 농도를 측정하게 되면 CO₂ 농도가 점점 감소하다가 일정 값에 수렴하게 되는 시점에 도달하게 되는데, 이때부터 나오는 공기는 시추공 바닥 깊이에서의 firm air로서 현대의 공기에 오염되지 않은 것으로 판단하고 시료보관용 플라스크에 포집할 수 있다. 야외조사에서는 여러 개의 깊이구간을 나누어 각각의 구간별로 시료를 채취한다. 시료용기는 분석하려는 기체 종에 따라서 최적의 용기가 달라질 수 있다. 본 위탁과제에서는 약 3 리터의 유리플라스크를 국내에서 제작하여 사용하였고 또한, Restek에서 생산하는 SilcoCan canister를 동시에 사용하여 측정결과를 비교하였다. 각각의 시료용기에는 공기를 약1.5기압이 되도록 시료를 채취하였다.

나. 시료분석

중요한 온실기체인 CO₂, CH₄ 농도를 서울대학교 빙하/고기후연구실에서 가스크로마토그래피 (Gas Chromatography)법을 이용하여 1차 분석후, 정밀한 분석을 위하여 NOAA에 의뢰하여 국제적으로 공인된 자료를 획득하였다. 중력에 의한 fractionation효과를 보정하기 위하여 $\delta^{15}\text{N}-\text{N}_2$ 자료가 필요한데, 이것은 미국 샌드에고 소재 캘리포니아주립대학의 Jeff Severinghaus교수 실험실에서 측정하였다.

2절. 세부 연구수행 방법 및 내용

성과목표	세부목표		평가지표(핵심성과 스펙)	검증방법	가중치 (%)
1. Firm air 추출장치 개발 (2014년)	1-1	Firm air 펌프장치 구성	- 펌프3개, 압력계, 밸브, 라인을 연결한 장치구성 - Firm air 보관용 유리플라스크 8개 이상 구성	- 구성된 장치 사진 제시	40%
	1-2	Bladder 구성	- Bladder 양 끝단 금속부분 기계공작으로 구성 - 고무관, 공기튜브(약 1/4") 등으로 firm air 이동장치 구성	- 구성된 장치 사진 제시	
2. Stix빙하 시추지역에서 Firm air와 지표면 공기 분석 (2015년도)	2-1	Stix빙하 firm air sampling test	- 유리플라스크에 firm air 채취	- CO ₂ , CH ₄ 농도 프로파일 제시	30%
	2-2	Stix빙하 firm air 1차 분석	- 8개 이상 깊이구간에서 채취한 시료 반복분석	- CO ₂ , CH ₄ 농도 프로파일 제시	
3. Firm air에서의 온실기체 거동 모델 개발 (2016년도)	3-1	Firm densification 모델 개발	- 깊이(연령) 증가에 따른 밀도 증가 모델 개발	- firm 밀도 모델자료 제시	30%
	3-2	모델을 이용한 Stix빙하 firm air 농도 프로파일 복원	- 깊이(연령) 증가에 따른 온실기체 농도변화 모델 개발 - 실제 측정값과 비교분석	- firm air 농도자료와 모델자료 제시	
	3-3	(2차년도 sampling이 불충분할 경우) firm air sampling	- 유리플라스크에 firm air 채취	- CO ₂ , CH ₄ 농도 프로파일 제시	
	3-4	firm-ice 변이 깊이구간 빙하코어 분석	- 공기방울을 가진 빙하코어와 마찬가지로, CO ₂ 및 CH ₄ 농도 측정 (3개 깊이구간 이상)	- CO ₂ , CH ₄ 농도 측정값 제시	

3절. 연구결과(2015년도)

1. 연구결과 요약

성과목표	세부목표	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
Styx빙하 시추지역에 서 Firm air와 지표면 공기 분석 (2015년도)	Styx빙하 firm air sampling test	유리플라스크와 SilcoCan canister에 firm air 채취 및 비교연구	<ol style="list-style-type: none"> 1. 13개 깊이구간에서 16개의 유리플라스크와 6개의 SilcoCan canister에 시료채취. 2. 시료채취 시 현장에서 CO₂ 농도 분석으로 diffusion zone과 bubble close-off depth 확인 3. firm air 모델링을 위한 시추공 온도측정
	Styx빙하 firm air 1차 분석	13개 깊이구간에서 채취한 시료 반복분석	<ol style="list-style-type: none"> 1. 두 종류의 용기에 보관한 시료 분석 및 비교. 2. CO₂ 및 CH₄ 프로파일 획득 3. δ¹⁵N-N₂ 측정

극지연구소

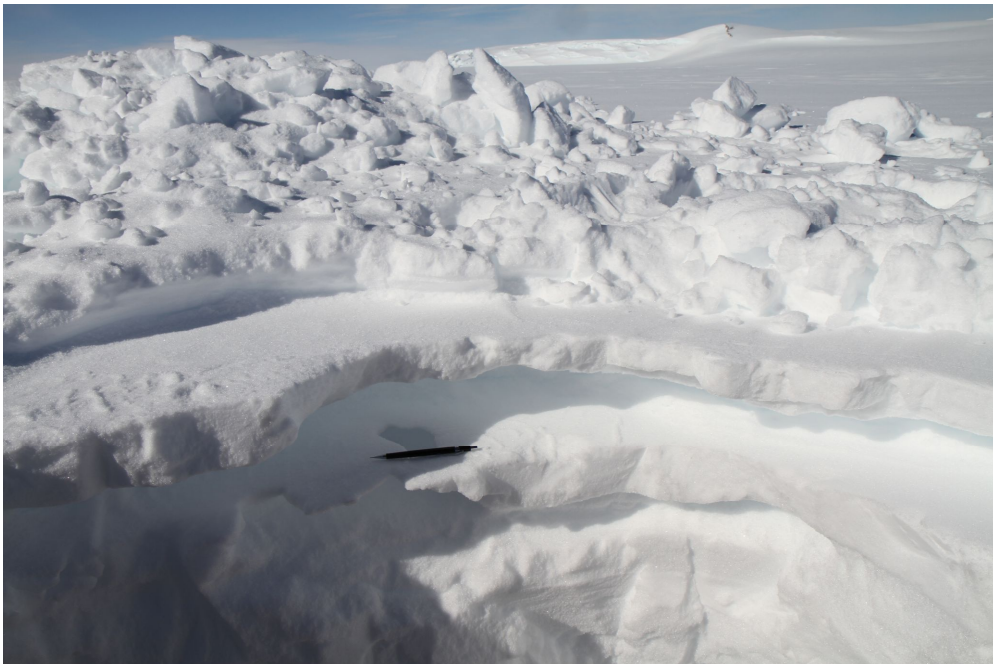


그림 6. Styx빙하 상부에서 관찰되는 눈층. 수십 cm 간격으로 딱딱한 눈층이 관찰된다.

2. 연구결과 세부 내용

가. Styx빙하 firm air sampling

(1) Firm air 샘플링 텐트 설치

Styx glacier에 도착한 첫째 날, 숙소용 텐트를 설치한 후에 firm air 샘플링 텐트를 설치하였다. 텐트는 시추장비와 2명의 사람이 들어가 작업할 수 있도록 공간이 넉넉한 (5~6인용 이상) 텐트를 준비하여야 한다. Firm air 샘플링 텐트는 빙하코어 시추텐트로부터 약 10 m 정도 남서쪽으로 떨어진 곳에 위치하였으며, 숙소텐트로부터는 북쪽으로 약 100 m 이상 떨어진 곳에 설치되었다. 이는 숙소텐트나 발전기로부터의 오염된 공기의 유입을 막기 위해서이다. 텐트를 설치하기 위해 눈을 약 50 cm 정도 파고 눈을 밟아서 터를 타졌으며, 파낸 눈을 벽돌 모양으로 만들어 바람을 막기 위한 눈 벽을 텐트 주변에 쌓았다.



그림 7. Styx 빙하위에 설치된 숙소 및 식당텐트



Figure 8. Bladder를 세팅하는 모습



Figure 9. Firm air 샘플링 텐트

(2) Bladder 조립

숙소용 텐트와 시추 텐트를 설치한 다음날에는 firm air 샘플링을 위한 Bladder를 조립하였다. Bladder의 조립은 남극으로 출발하기 전, 실내에서 수 차례 조립/분해 연습을 통해 충분히 익숙해지도록하였다. 현장 상황이 매우 열악하기 때문에 (낮은 기온, 한정된 시간), 최대한 빠른 시간 안에 조립하는 연습이 필요하다. 또한 남극에서 부품을 분실하거나 또

는 예상치 못하게 여분의 부품이 필요한 경우가 생길 수 있으므로, 조립에 사용되는 부품들을 필요한 양보다 2배 정도 준비하였다. Bladder의 조립 순서는 bladder top과 데카본 튜브의 연결 -> bladder bottom과 데카본 튜브의 연결 -> bladder rubber와 top/bottom과의 연결 순으로 진행하였다. Bladder rubber와 top/bottom 사이의 연결부분은 Swiss Ligatech 사의 Ligarex 제품을 사용하였다.



Figure 10. 데카본 튜브

극지연구소

Bladder에 연결된 데카본 튜브는 위의 그림과 같이 8자 모양으로 정리해 놓았다. 데카본 튜브가 눈에 닿아있게 되면 bladder를 시추공 내부로 내릴 때 데카본 튜브에 달라붙은 눈들이 시추공 내부로 따라 들어가 시추공을 오염시킬 수 있으므로, 대나무로 받침대를 만들어서 그 위에 데카본 튜브를 올려놓을 수 있도록 하였다. 데카본 튜브에는 튜브 길이를 색깔 테이프로 표시해 놓아, bladder를 시추공 내부로 내릴 때 대략 어느 정도 깊이까지 내려갔는지 알 수 있도록 하였다.

(3) Bladder leak 체크

Bladder 조립 및 샘플 라인과 펌프시스템 사이의 연결이 모두 끝난 후 leak이 있는지 조사하였다. 먼저 purge 라인을 통해 bladder 내부로 10분간 공기를 불어넣었을 때 bladder 내부의 압력이 over 0.2 bar 이었으나 5초 후에 over 0.05 bar로 떨어지는 것을 보고 leak이 존재하는 것을 확인하였다. 이 문제는 Bladder bottom 부분과 데카본 튜브의 이음새 부분을 조임으로써 해결되었다. 두번째로, bladder rubber 내부에 공기를 불어넣어 부풀린 후에 공기의 유출이 있는지 시험해 보았다. Bladder rubber 내부를 약 over 0.2 bar 로 가압한 후 1시간 후에 압력을 확인해 봤을 때 그대로 유지되는 것으로 보아 bladder 내부에는 leak이 없는 것으로 확인되었다. Bladder 내부의 공기를 빼내는 데는 약 10분이 소요되

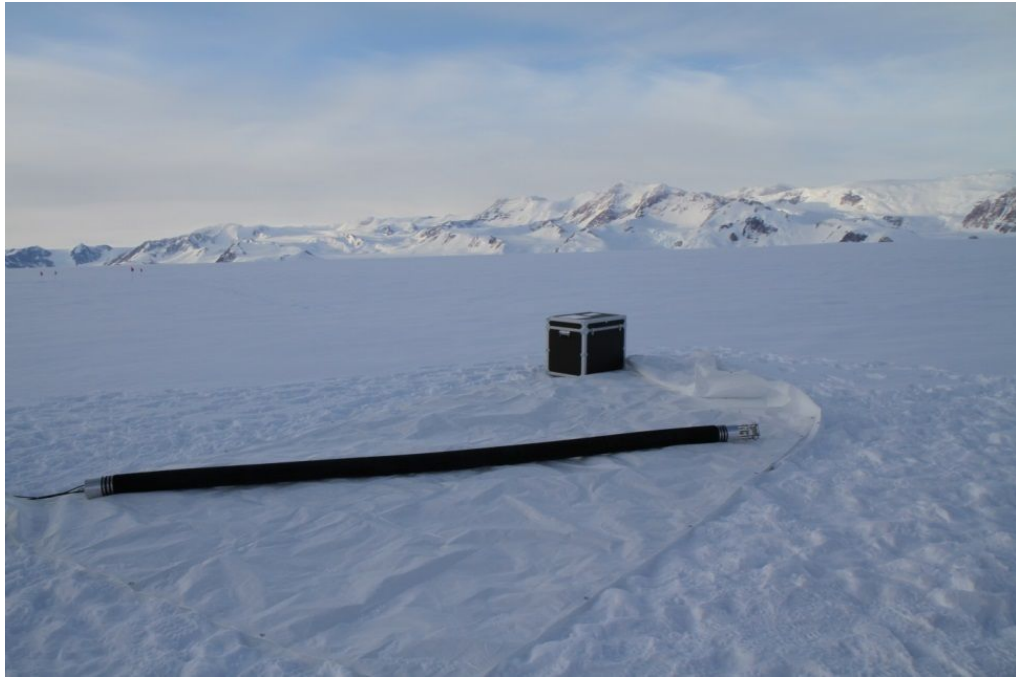


Figure 11. Bladder leak 체크

었다.

(4) LI-COR 보정



그림 12. 컴퓨터모니터로 LI-COR 측정결과를 지켜보는 모습

LI-COR 오차로 간주하였다.

매일 firm air 샘플링 전에 CO₂ 농도를 알고 있는 표준 공기를 이용하여 LI-COR 보정을 해주었다. CO₂ 농도 302.7 ppm 표준공기를 이용하였으며, LI-COR로 측정한 결과와 실제 CO₂ 농도와의 차이를 그 날의

(5) Bladder 가압 실험

Bladder 내부에 공기를 불어넣어 bladder를 부풀렸을 때, 어느 정도까지 가압을 해야 bladder가 시추공을 빈틈없이 막을 수 있을지 알아보는 실험이다. Bladder 내부에 공기를 불어넣어 bladder를 부풀렸을 때, 어느 정도까지 가압을 해야 bladder가 시추공을 빈틈없이 막을 수 있을지 알아보는 실험이다. Over 0.31 bar 까지 bladder 내부의 압력을 높이는 데 걸린 시간은 9분 미만이었고, bladder가 터질 듯이 부풀어오르는 것을 확인하였다. 펌프 최대 출력으로 -0.05 bar (시추공에 넣기 전 bladder 내부 압력) 까지 공기를 빼내는데 걸린 시간은 14분이었다. 실제 샘플링에서는 bladder 내부를 over 0.2-0.4 bar만큼 압력을 가하였다. 그리고 27.02 m 의 깊이에서 bladder 내부의 압력을 -0.05 bar → +0.30 bar 까지 가압하는데 걸린 시간은 8분이었다.



Figure 13. Bladder 가압 실험

(6) 시추공 내부로 Bladder 내리기

약 5-10 m 의 빙하코어 시추가 끝나면, firm air 샘플링을 재개하였다. 먼저 bladder를 빙하코어 시추가 끝난 시추공의 바닥 깊이까지 내리는데, 이 때 데카본 튜브에 표시해 높은 깊이 정보를 참고하도록 하며, 원치 케이블의 팽팽함 정도를 보고 bladder가 시추공 바닥에 도달했는지 알 수 있다. Bladder가 시추공 내부에 도달하면 bladder를 약 10 cm 정도 위로 들어올린 후 firm air 샘플링을 시작하였다.

Bladder를 시추공 내부로 내릴 때, 시추 텐트 밖에서는 대나무 받침대 위에 올려져 있는 데카본 튜브를 영키지 않게 풀어 주었다.

(6) 시료 용기에 채집하기



Figure 14. Firm air 샘플링 - Silco can 이용



Figure 15. 시추공 내부에 bladder를 내리는 모습

Firm air를 채집하는 용기는 silcocan과 유리 플라스크를 이용하였다. Silcocan 같은 경우는 용기 안에 pure N₂ 가 채워져 있기 때문에, 이를 비운 후에 다시 firm air를 채우고 비우는 작업을 3번씩 반복하였다. Silcocan에는 샘플링 장소의 기압보다 2기압 높은 정도로 공기를 채집하였다. 유리 플라스크는 남극에 가기 전에 진공을 시킨 후에 옮겼으나, 현장에서 플라스크를 보니 절반 이상의 플라스크 밸브가 열려있었다. 스태프록에 사용된 고무링이 저



Figure 16. 시추공 내부에 bladder를 내릴 때 시추텐트 바깥의 모습

온에서 수축되면서 스타프콕이 열리게 된 것이었다. 따라서, 펌프를 이용하여 충분히 진공을 시키고, firm air를 이용하여 flushing을 시킨 후에 firm air 채집을 하였다.

나. 시추공 내부온도 측정

(1) 시추공 내부의 온도 측정

온도에 따라 저항이 달라지는 써미스터를 시추공 내부로 집어넣어 저항을 측정하고, 이 측정값을 Steinhart-Hart equation에 대입하여 온도로 변환하였다. 써미스터는 University of Washington에서 빌린 것으로 원래 17 m 의 길이였으나 100 m 전선을 추가로 연결하여 시추공의 깊은 곳까지 온도측정이 가능하도록 하였다. 어떤 깊이의 써미스터 저항을 측정할 때에는 5분 간격으로 저항 값을 노트에 기록하였으며, 최소 5분 이상 저항 값들이 변하지 않을 때까지 기다렸다가 최종 값을 결과 값으로 사용하였다. 저항 값이 안정될 때까지 기다린 시간은 10-100분이었다. 깊이 3 m 지점에서는 써미스터의 저항 값이 안정화 될 때까지 100분을 기다려야 했는데, 이것은 이 때 작동시켰던 히터의 영향 때문으로 생각된다. 히터에서 나온 바람이 텐트 내부의 공기를 교란시켜서 깊이 3 m 의 시추공 내부에도 온도의 변화를 준 것으로 보인다. 15m 깊이까지는 계절적 변동성의 영향을 받기 때문에 깊이에 따른 온도의 변화가 크고, 그보다 더 깊은 깊이에서는 계절적 변동성의 영향을 받지 않기 때문에 변화율이 매우 작게 나타났다. 추후 편 공기 모델링이나 Herron-Langway 편 모델에 15m 깊이에서의 온도를 연평균 기온으로 이용할 수 있었다.



Figure 17. 시추공 내부 온도 측정 장치



Figure 18. 시추공 내부 온도 기록

다. Firm air 기체 측정결과

(1) CO₂, CH₄ 농도 측정

이산화탄소, 메탄 등의 온실기체의 농도는 NOAA에서 측정되었다. 오차의 경우 이산화탄소는 0.3ppm, 메탄은 1.1ppb로 측정값의 약 0.1% 수준이었다. Lock-in depth 보다 얕은

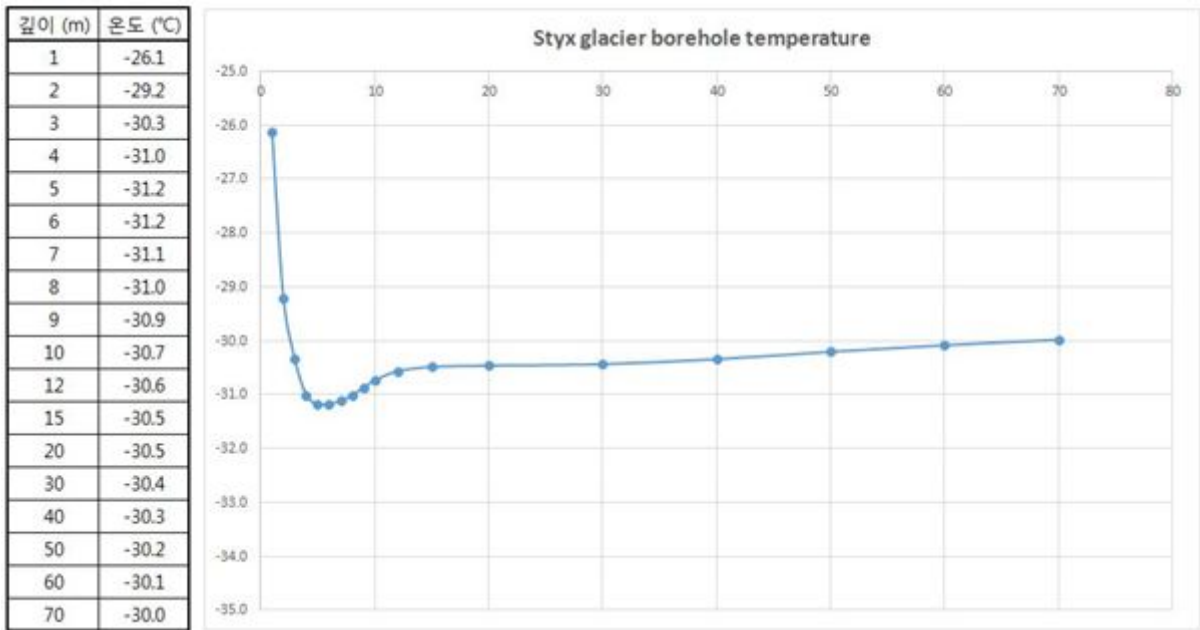


그림 19. 시추공 온도측정 자료

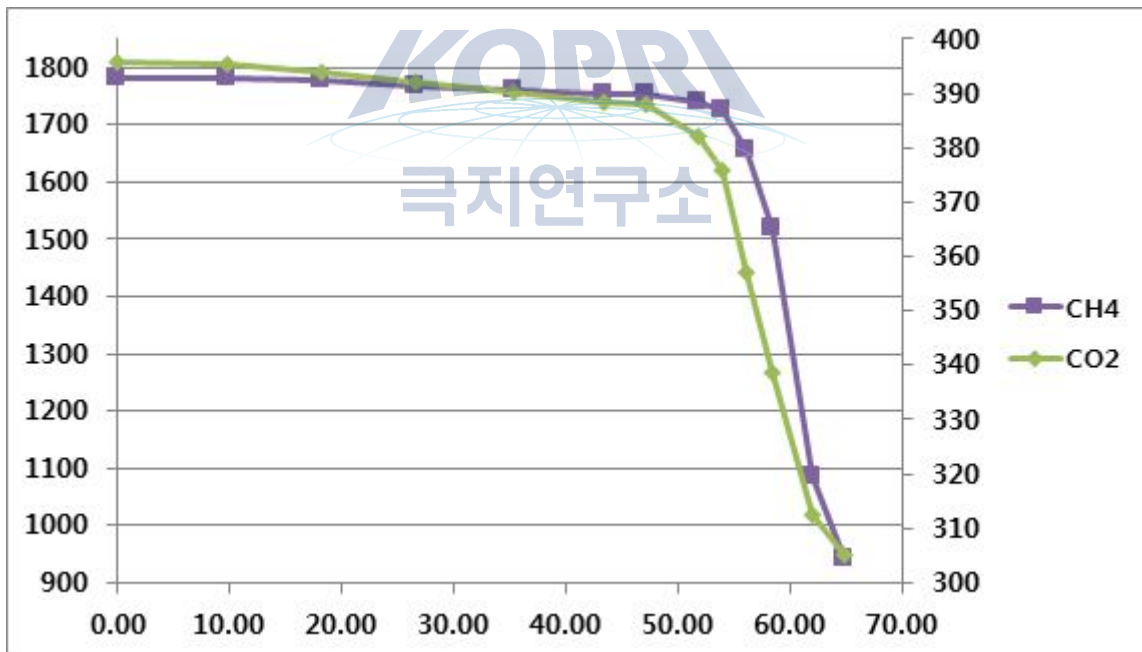


Figure 20. Firn air CO₂,CH₄농도 측정 결과

깊이에서는 이산화탄소와 메탄의 변화율이 1m 당 0.2ppm, 0.7ppb로 작고, Lock-in depth 보다 깊은 깊이에서는 변화율이 각각 7.9ppm, 81.2ppb로 높은 것을 확인할 수 있었다. 편 공기를 채집할 수 있었던 가장 깊은 곳에서의 이산화탄소 농도는 305.18ppm 이었는데, 이는 1927년의 남극에서의 관측 값과 일치하므로, 약 90년 동안의 남극 Styx 지역의 공기를 채집한 것으로 볼 수 있다.

(2) $\delta^{15}\text{N}-\text{N}_2$

편 공기의 질소 동위원소 비율은 스크립스 해양연구소에서 측정되었다. 확산 구간은 질량 이동이 분자 확산보다 더 지배적이므로 깊이에 따라서 질소 동위원소의 비가 증가한다.

Depth (m)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	uncertainty
0.00	0.014	0.003
9.90	0.090	0.002
18.21	0.060	0.002
26.68	0.098	0.001
35.36	0.154	0.001
43.42	0.201	0.002
47.21	0.224	0.001
51.75	0.240	0.002
53.95	0.244	0.001
56.11	0.249	0.001
58.32	0.251	0.001
61.95	0.249	0.002
64.76	0.262	0.001

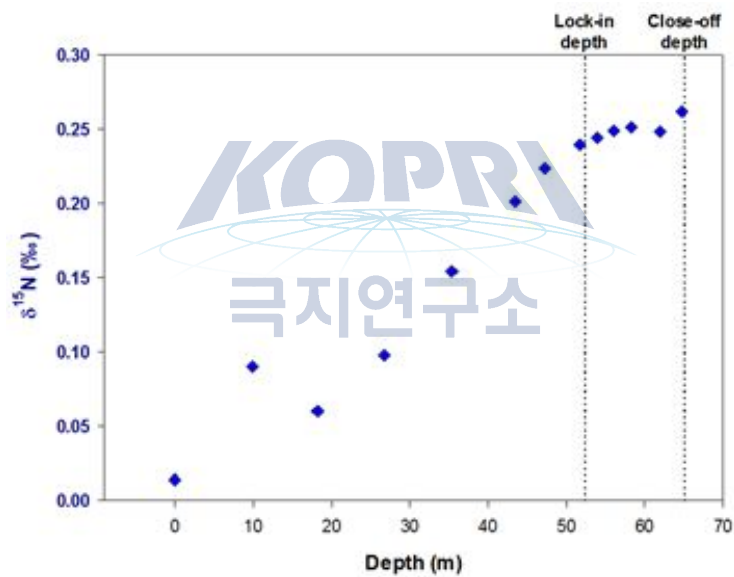


Figure 21. 깊이에 따른 firm air의 질소 동위원소 비 측정 결과

Lock-in zone (비확산 구간)은 이류가 질량 이동보다 지배적이기 때문에 때문에 질소 동위원소의 비가 일정하게 유지된다.

(3) Lock-in depth 추정

Lock-in depth(52.4m)에서의 이산화탄소 농도(387.1 ppm)는 남극점에서의 2010년 12월의 관측 값(NOAA)과 일치하였고, 이 깊이에서의 얼음 연령은 Herron-Langway age model에 의하여 261년으로 추정되어, 얼음-기체연령차를 257년으로 계산하였다.

Table 1. 깊이에 따른 CO₂,CH₄농도 측정 자료

Depth (m)	CO ₂ (ppm)	CH ₄ (ppb)
0.00	395.78	1780.59
9.90	395.35	1781.35
18.21	393.84	1776.50
26.68	392.25	1768.04
35.36	390.16	1759.78
43.42	388.42	1754.89
47.21	387.90	1752.51
51.75	382.15	1741.04
53.95	375.70	1724.76
56.11	356.89	1656.58
58.32	338.52	1520.06
61.95	312.35	1085.89
64.76	305.18	943.36
uncertainty	0.3	1.1

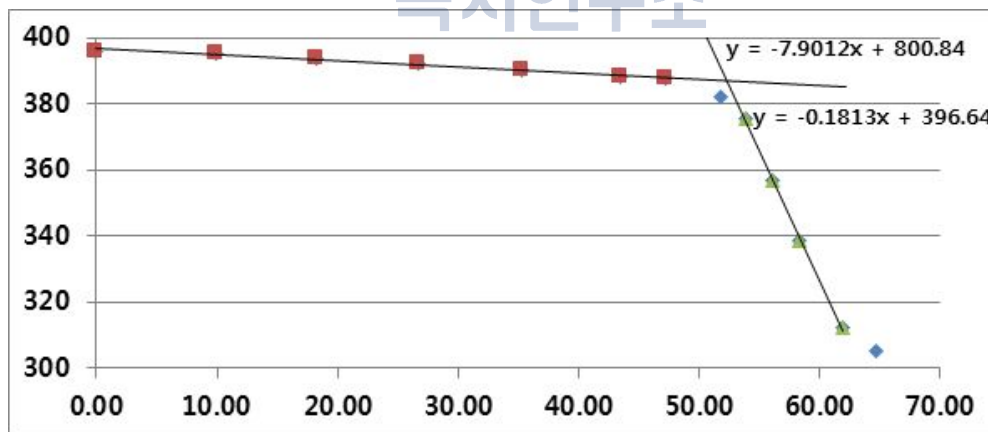


Figure 22. Firn air CO₂ 농도를 이용한 Lock-in depth 추정

(4) Firn air 채집용기에 따른 측정결과 비교

편 공기를 채집하는 용기로 유리 플라스크와 스테인리스 용기를 모두 사용하였다. 4개의 깊이에서 용기선택에 따른 온실기체 농도 차이를 계산해 본 결과, 평균적으로 CO₂농도는 유리 플라스크에서의 측정 값이 0.4ppm 낮게 나오고, CH₄농도는 유리 플라스크에서의 측정 값이 0.4ppb 더 높았다. 이는 측정오차와 비슷하거나 더 작은 수준으로, 유리 플라스크와 스테인리스 용기의 가격 차이를 고려한다면 유리플라스크를 사용하는 것이 훨씬 더 경제적이라고 할 수 있다.

Table 2. Firm air 채집 용기에 따른 CO₂,CH₄농도 결과의 차이

Difference between glass flask and silcocan canister				
Flask #	Depth (m)	CO ₂ (ppm)	CH ₄ (ppb)	Comments
S-02	0.00	395.99	1780.92	Glass flask
C-02	0.00	395.57	1780.25	Glass flask
SSC-1	0.00	399.64	1780.13	Silcocan canister
SSC-5	0.00	395.70	1780.85	Silcocan canister
SSC-6	0.00	395.75	1780.39	Silcocan canister
		-1.25	0.13	difference (Glass - Silcocan)

Flask #	Depth (m)	CO ₂ (ppm)	CH ₄ (ppb)	Comments
S-28	35.36	390.16	1759.78	Glass flask
SSC-2	35.36	390.45	1758.58	Silcocan canister
		-0.29	1.20	difference (Glass - Silcocan)

Flask #	Depth (m)	CO ₂ (ppm)	CH ₄ (ppb)	Comments
S-27	43.42	388.42	1754.89	Glass flask
SSC-3	43.42	388.65	1754.27	Silcocan canister
		-0.23	0.62	difference (Glass - Silcocan)

Flask #	Depth (m)	CO ₂ (ppm)	CH ₄ (ppb)	Comments
C-01	53.95	375.70	1724.76	Glass flask
SSC-4	53.95	375.69	1725.25	Silcocan canister
		0.01	-0.49	difference (Glass - Silcocan)

(5) Firm air 채집시 개선해야 할 점

○ 유리플라스크의 stop-cock

유리플라스크는 실험실에서 충분히 진공을 시킨 후 밸브를 잘 잠그고 남극에 가져갔으나, 남극에 도착해보니 밸브가 절반 이상 열려있는 것을 확인하였다. 현장에서 다시 유리플라스크를 충분히 진공시키고 firm air 채집을 실시하였으나 이에 따른 시간 지체가 발생하였다. 한국으로 돌아온 후에 냉동고에서 실험한 결과, 상온에서 잠근 유리플라스크를 낮은 온도의 냉동고에 가져가게 되면 수일 후에 밸브가 열리는 현상이 일어났다. 따라서 좀 더 온도에 둔감한 재질의 stop-cock이 필요할 것으로 생각된다.

-> 2015년 6월 22일에 저온에서 유리플라스크 밸브가 열리는지 확인하기 위하여 유리플라스크 #S-23에 현생대기 (25-1동 옥상)를 채집한 후 영하 20도의 냉동고에 보관하였다. 약 48시간 후에 확인한 결과, 스탑콕의 흰색 선이 매우 열어졌지만 열리지는 않은 것으로 확인되었다. 그 유리플라스크를 약 10분 정도 실온에 두었더니 스탑콕의 흰색 선이 다시

원래대로 두꺼워진 것을 확인할 수 있었다. 이번에는 동일한 유리플라스크를 스탑콕을 살짝 더 잠근 후에 영하 45도 이하의 참치 냉동고에 넣어 두었다. 약 23시간 뒤에 관찰한 결과, 유리플라스크의 스탑콕은 열려있었다.

○ 원치, 케이블

케이블을 내린 깊이가 표시되는 원치 시스템이 필요하다. 또는 케이블에 미리 깊이를 표시하여 bladder가 내려간 깊이가 몇 m인지 정확하게 아는 것이 중요하다. Bladder를 내리고 올릴 때에는, 케이블이 서로 꼬이지 않도록 주의하도록 한다.

○ 온도 측정 장치의 연결전선 재질

온도 측정 장치의 써미스터를 100 m 길이의 전선과 연결하여 시추공 내부의 온도를 측정하고자하였다. 써미스터를 아래로 내리면서 시추공 내부의 온도를 측정할 때는 문제가 발생하지 않았으나, 써미스터를 올리는 과정에서 낮은 온도 (약 영하 35도)에 견디지 못한 전선의 피복이 손상되는 일이 발생하였다. 낮은 온도에 잘 견딜 수 있는 더 강하고 유연한 재질의 전선이 필요하다.

○ 샘플 플라스크를 보관할 박스

샘플 플라스크 박스를 운반하는 과정에서 외부 온도의 변화가 매우 심하므로, 이를 완화할 수 있도록 단열효과가 있는 샘플 플라스크 박스의 제작이 필요하다.



제 4 장. 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

1절. 연구개발목표 달성도 (2015년도 2년차 연구 목표 달성도)

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
Styx빙하 시추지역에서 Firm air와 지표면 공기 분석	1-1	Styx빙하 firm air sampling test	- 유리플라스크에 firm air 채취	100%
	1-2	Styx빙하 firm air 1차 분석	- 8개 이상 깊이구간에서 채취한 시료 반복분석	100%

2절. 연구개발 대외기여도

1. 학술적/경제적 파급효과

- 가. 대한민국 최초로 firm air 연구기술 기반 구축
- 나. 온실가스와 기후변화와의 관련성 연구에 기여
- 다. 대기 극미량 기체종 연구를 위한 firm air 시료 확보기술 획득
- 라. 국내 최초의 firm air 연구로 대한민국 빙하연구의 효율성 증대
- 마. 국내 극지연구의 위상 격상으로 대한민국 국가브랜드 가치 증대

2. 학술지 게재

Yeongcheol Han, Seong Joon Jun, Morihiro Miyahara, Hun-Gyu Lee, Jinho Ahn, Ji Woong Chung, Soon Do Hur, Sang Bum Hong. Shallow ice-core drilling on Styx glacier, northern Victoria Land, Antarctica in the 2014-2015 summer, *Journal of the Geological Society of Korea* (2015)

WAIS-Divide Project Members, Precise interhemispheric phasing of the bipolar seesaw during abrupt Dansgaard-Oeschger events, *Nature*, 520, 661-665, doi:10.1038/nature14401 (2015)

3. 학술회의 발표

Hun-Gyu Lee, Jinho Ahn, Sang Bum Hong, Yeongcheol Han, Seong Joon Jun and Soon Do Hur, "Firm air sampling in Styx Glacier", The 21st International Symposium on Polar Sciences, Incheon, Republic of Korea, May 2015 (Poster).

Yeongcheol Han, Seong Joon Jun, Morihiro Miyahara, Sang Bum Hong, Hun-Gyu Lee,

Jinho Ahn, Ji Woong Chung and Soon Do Hur, “Shallow ice-core drilling on Styx glacier, northern Victoria Land, Antarctica in the 2014-2015 summer season”, The 21st International Symposium on Polar Sciences, Incheon, Republic of Korea, May 2015 (Poster).

Hun-Gyu Lee, Jinho Ahn, Yeongcheol Han, Seong Joon Jun, Sang Bum Hong and Soon Do Hur, “Analysis for firm air in Styx glacier, Antarctica”, Fall Joint Conference of Geology, Mineral and Energy Resources, , Jeju, Republic of Korea, October 2015 (Oral).



제 5 장. 연구개발결과의 활용계획

1절. 추가연구의 필요성

1-2차년도 목표가 100% 달성되어 추가 연구가 필요 없음.

2절. 타연구에의 응용

다른 빙하코어 연구에의 응용

본 위탁과제에 의해서 확보된 얼음연령-기체연령 차이값은 향후 Styx빙하코어의 연령을 확립하는데 매우 중요한 자료로 사용될 것으로 예상된다. 또한, firm air자료에 대한 측정 및 모델결과 값은 Styx빙하코어 온실기체 농도 자료를 해석하는데 매우 중요하다. 예를 들어, 모델로 알게된 기체 연령분포 자료는 실제 대기에서의 농도변화 속도를 계산하는데 사용될 수 있다. 본 과제에서 축적된 분석기술은 향후 수행될 중부시추 및 심부시추 연구에서 반드시 필요한 빙하학적 정보를 제공하는데 사용되어 한국의 연구수준을 최정상급으로 만드는데 기여할 것으로 기대된다.



제 6 장. 참고문헌

- Ahn, J. and E.J. Brook. Atmospheric CO₂ and climate change on millennial timescales during the last glacial period. *Science*, 322, 83–85 (2008)
- Ahn, J., E.J. Brook, L. Mitchell, J. Rosen, J.R. McConnell, K. Taylor, D. Etheridge, and M. Rubino, Atmospheric CO₂ over the last 1000 years: A high-resolution record from the West Antarctic Ice Sheet (WAIS) Divide ice core, *Global Biogeochemical Cycles*, 26, doi:10.1029/2011GB004247 (2012).
- Aydin, M. et al. Post-coring entrapment of modern air in some shallow ice cores collected near the firn-ice transition: evidence from CFC-12 measurements in Antarctic firn air and ice cores, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 5135–5144 (2010)
- Aydin, M. et al. Recent decreases in fossil-fuel emissions of ethane and methane derived from firn air. *Nature*, 476, 198–201 (2011)
- Battle, M. et al. Atmospheric gas concentrations over the past century measured in air from firn at the South Pole. *Nature*, 383, 231–235 (1996)
- Battle, M. et al., Controls on the movement and composition of firn air at the West Antarctic Ice Sheet Divide, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 11007–11021 (2011).
- Becagli, S., M. Proposito, S. Benassai, R. Gragnani, O. Magand, R. Traversi, R. Udisti, Spatial distribution of biogenic sulphur compounds (MSA, nssSO₄²⁻) in the northern Victoria Land-Dome C-Wilkes Land area, East Antarctica, *Annals of Glaciology*, 41, 23–31 (2005).
- Buizert, C. et al. Gas transport in firn: multiple-tracer characterization and model intercomparison for NEEM, Northern Greenland, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 4259–4277 (2012).
- Etheridge, D.M., L.P. Steele, R.L. Langenfelds and R.J. Francey, Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn, *Journal of Geophysical Research*, 101, 4115–4128 (1996).
- Yeongcheol Han, Seong Joon Jun, Morihiro Miyahara, Hun-Gyu Lee, Jinho Ahn, Ji Woong Chung, Soon Do Hur, Sang Bum Hong. Shallow ice-core drilling on Styx glacier, northern Victoria Land, Antarctica in the 2014–2015 summer, *Journal of the Geological Society of Korea* (2015)
- Herron, M.M. and C.C. Langway, Firn densification: an empirical model, *Journal of Glaciology*, 25, 373–385 (1980)
- Schwander, J. and B. Stauffer, Age difference between polar ice and the air trapped in its bubbles, *Nature*, 311, 45–47 (1984).
- Severinghaus, J. P., T. A. Sowers, E. J. Brook, R. B. Alley and M. L. Bender, Timing of abrupt climate change at the end of the Younger Dryas interval from thermally fractionated gases in polar ice, *Nature*, 391, 141–146 (1998).

Severinghaus, J. P. and Brook, E. J. Abrupt climate change at the end of the last glacial period inferred from trapped air in polar ice, *Science*, 286, 930-934 (1999).



#별첨1: firm air 펌프시스템 작동법 정리 개정판(서울대학교 빙하/고기후 연구실)

*남극 현장조사 기간 동안 경험한 것을 바탕으로 1차년도에 작성한 실험 protocol을 수정하였다.

* 시작 전: 밸브가 모두 잠겨있는지 확인한다.

* 플라스크 번호, 샘플링 날짜, 샘플링 깊이를 노트에 기록한다.

1단계 (블래더에 공기 주입)

1) Diacom- I 멀티탭 ON / Diacom- I 전원 ON / 강도 조절.

2) 5번 밸브를 연다. (purge 쪽에서 공기를 빨아들인다.)

3) 7번 밸브를 연다. (블래더로 공기를 주입시킨다.)

4) 중간중간 7번 밸브를 잠가서 압력계를 체크하여, 0.4 bar만큼 공기가 들어갔으면 7번 밸브를 잠근다. (블래더 쪽으로 공기 주입을 멈춘다.)

5) 블래더 내부의 압력을 노트에 기록한다.

* 라인 내부의 압력이 일정수준 이상으로 올라갈 경우, 라인 바깥쪽으로 공기가 새어나갈 수 있도록 릴리즈밸브를 잘 조절하도록 한다. 그렇지 않을 경우에는 4)번 과정에서 Diacom- I 펌프에 무리가 갈 수 있다.

2단계 (LI-COR 작동)

1) LI-COR 멀티탭 ON / 노트북 프로그램 ON / 프로그램에서 connect 버튼을 누른다.

2) 3-way 밸브가 LI-COR 쪽으로 되어있는지 확인한다.

3) 8번 밸브를 열어서 LI-COR flowmeter 눈금이 50 cc/min이 되도록 조절한다. (LI-COR 쪽으로 50 cc/min 속도로 공기를 주입한다.)

3단계 (샘플라인 flushing)

1) Metalcom 멀티탭 (전원) ON

2) 4번 밸브를 오픈과 동시에 3번 밸브를 연다. (sample tube에서 공기를 빨아들여서 샘플라인을 flushing 해주는 과정)

3) 샘플라인 flushing 시작 시각과 flow rate을 노트에 기록한다.

3) 10~20분 후 CO2 농도가 완전히 저하되면 약 1ppm 이내에서 안정되어 있는지 확인한다(그렇지 않다면 안정될 때까지 기다린다). 온도 드리프트나 압력변동 등에 따른 약간의 변화는 무시해도 좋다. 일본의 경우, 보통 400리터 이내, 드릴 낙하 속도가 1m/s 이상인 경우에는(지상의 공기를 편 내부로 끌고 들어가버린 경우) 최대 800리터를 흘릴 필요가 있었다고 한다. 실제로 본 실험에서도 블래더를 쉬지 않고 내린 경우에는 CO2 안정화를 위해 50분 이상 기다릴 필요가 있었다.

4) 샘플라인 flushing을 마치는 시각과 그 때의 LI-COR에 표시된 CO2 측정 값(purge 라인)을 노트에 기록한다.

4단계 (샘플라인 vacuum 및 leak 체크)

- 1) Diacom-Ⅱ 멀티탭 ON / Diacom-Ⅱ 전원 ON / 강도 조절.
- 2) 1번 밸브를 연다. (Diacom-Ⅱ를 이용하여 vacuum)
- 3) 충분히 vacuum 시킨 후(Diacom-Ⅱ에 연결된 flowmeter의 flow rate이 0에 도달한 후)에 1번 밸브를 잠그고 Diacom-Ⅱ을 끈 다음, 1분간 P1 압력계에 표시된 압력이 변하는지 살펴본다. (샘플 플라스크 주입부분의 leak 체크)

5a 단계 (유리 플라스크의 경우, 샘플 플라스크 flushing 및 샘플 채취)

- 1) 4단계 과정에서 이상이 없다면 2번 밸브를 열고, 샘플 플라스크의 입구 밸브를 연다. 그 다음에 3번 밸브를 잠근다.
- 2) 샘플 플라스크 내부의 압력이 대기압 이상으로 올라가게 되면 샘플 플라스크의 출구 밸브를 열어 flushing 을 시작한다.
- 3) 샘플 플라스크 flushing 지속시간과 flow rate을 노트에 기록한다.
- 4) 샘플 플라스크 내부의 flushing이 끝났다면 샘플 플라스크의 출구 밸브를 잠그고 샘플 채취를 시작한다. 대기압보다 1기압 높은 만큼 샘플 채취를 하도록 한다.
- 5) P1 압력계의 압력을 체크하여 샘플채취가 다 되었는지 확인하고 샘플 플라스크의 입구 밸브를 잠근다. 그와 동시에 3번 밸브를 연다.
- 6) 샘플 플라스크 내부의 압력 값과 LI-COR의 CO₂ 측정 값(purge 라인)을 노트에 기록한다.
 ※ close-off depth에 가까운 깊이에서는 sample vent 쪽에 LI-COR를 연결하여 sample 라인의 CO₂ 값을 꼭 기재하도록 한다.
- 7) 샘플 채취를 마친 시각을 노트에 기록한다.
- 8) 4번 밸브를 잠그고, 그 후 2번과 3번 밸브를 잠근다.
- 9) Metalcom 멀티탭 (전원) OFF

5b 단계 (SilcoCan의 경우, 샘플 플라스크 vacuum 및 샘플 채취)

* SilcoCan의 경우 약 2기압의 질소로 채워져 있으므로, 용기를 vacuum 해야 한다. 처음에는 SilcoCan에 채워져 있는 질소 공기를 Diacom-Ⅱ 펌프를 이용하여 뽑아내고, 그 다음에는 SilcoCan에 샘플라인의 공기를 채운 후 비워내는 과정을 두 번 반복한다.

- 1) 4단계 과정에서 이상이 없다면, Diacom-Ⅱ 펌프를 켜고 1번 밸브를 연 후에 SilcoCan의 입구를 연다. Diacom-Ⅱ 펌프에 연결된 flowmeter의 flow rate이 0을 가리킬 때까지 vacuum 시킨다.
- 2) vacuum이 다 되었다면 1번 밸브를 잠그고 Diacom-Ⅱ 펌프를 끈다.
- 3) 2번 밸브와 SicoCan 입구를 열고 3번 밸브를 잠근다. SilcoCan 내부의 압력이 대기압보다 1기압 높을 때까지 샘플라인의 공기를 주입한다. P1을 확인하여 공기 주입이 완료되면 SilcoCan의 입구를 닫음과 동시에 3번 밸브를 연다. 그리고 2번 밸브를 닫는다.
- 4) Diacom-Ⅱ 펌프를 켜고 1번 밸브를 연다. SilcoCan 입구를 열어 SilcoCan 내부를 펌프를 이용하여 vacuum 시킨다.
- 5) 2), 3), 4) 과정을 한번 더 반복한다.
- 6) vacuum이 다 되었다면 1번 밸브를 잠그고 Diacom-Ⅱ 펌프를 끈다.

- 7) 샘플 플라스크 내부의 vacuum이 끝났다면 2번 밸브와 SilcoCan의 밸브를 연다. 그리고 3번 밸브를 닫는다. 대기압보다 2기압 높은 만큼 샘플 채취를 하도록 한다.
- 8) P1 압력계의 압력을 체크하여 샘플채취가 다 되었는지 확인하고 SilcoCan의 밸브를 잠근다. 그와 동시에 3번 밸브를 연다.
- 9) 샘플 플라스크 내부의 압력 값과 LI-COR의 CO2 측정 값(purge 라인)을 노트에 기록한다.
 ※ close-off depth에 가까운 깊이에서는 sample vent 쪽에 LI-COR를 연결하여 sample 라인의 CO2 값을 꼭 기재하도록 한다.
- 10) 샘플 채취를 마친 시각을 노트에 기록한다.
- 11) 4번 밸브를 잠그고, 그 후 2번과 3번 밸브를 잠근다.
- 12) Metalcom 멀티탭 (전원) OFF

6단계 (블레더 공기 빼내기)

- 1) 3-way 밸브를 돌려서 공기가 밖으로 빠져나갈 수 있도록 한다.
- 2) 5번 밸브를 잠근다. (purge로부터의 공기 유입 중단)
- 3) 6번 밸브를 연다. (블레더로부터 공기를 빨아들임)
- 4) 압력계를 체크하여 게이지가 떨어지는 것을 확인한다.
- 5) 6번과 8번 밸브를 잠근다.



#별첨2: firm air sampling sheet 자료 (서울대학교 병하/고기후 연구실)

Flask No.	Date (yyyy/mm/dd)	Depth (m)		Bladder pressure	Sample air venting			CO2 conc.	Sample container flushing		air pressure in flask	CO2 conc.		End time	Comment
		Drilling depth	Firm tubing depth		start time	flow rate	end time		at purge	flow rate		duration	at purge		
S-02	2014/12/12	현생대기	현생대기	-	20:42	10 l/min	20:59	397.5 ppm	5.0 l/min	20 min	over 1.0bar	397.5 ppm	-	21:21	유리플라스크 1N 쪽 입구에 Mg(ClO ₄) ₂ 들어감.
S-06	2014/12/12	9.90m	9.90m	over 0.21bar	23:24	9 l/min	23:49	397.0 ppm	5.0 l/min	41 min	over 1.0bar	397.0 ppm	-	00:45	-
S-05	2014/12/13	18.21m	18.295m	over 0.20bar	04:33	9 l/min	04:43	394.0 ppm	5.0 l/min	20 min	over 1.0bar	394.1 ppm	-	05:16	-
S-20	2014/12/13	18.21m	18.295m	over 0.20bar	05:17	9 l/min	05:26	394.0 ppm	5.0 l/min	20 min	over 1.0bar	394.1 ppm	-	05:53	플라스크 입구가 열려있어서 10분간 진공 시킴.
SSC-1	2014/12/13	현생대기	현생대기	-	08:13	9 l/min	08:34	396.2 ppm	common t ⇒	22 min	over 2.0bar	396.0 ppm	-	08:59	evacuate + 3*(fill+evacuate)
S-32	2014/12/13	26.68m	27.02m	over 0.35bar	21:52	9 l/min	22:00	392.5 ppm	5.0 l/min	20 min	over 1.0bar	392.5 ppm	-	22:26	-0.8bar에서 플라스크 입구 열 때 -0.4bar로 바꿈.
S-28	2014/12/14	35.36m	-	over 0.35bar	03:00	9 l/min	03:19	391.8 ppm	5.0 l/min	20 min	over 1.0bar	391.1 ppm	-	03:40	플래셔를 내릴 때 쉬지 않고 내려서, 50분 이상 안정화 시켰는데도 불구하고 CO2 안정화가 잘 된 상태임.
SSC-2	2014/12/14	35.36m	-	over 0.20bar	03:45	9 l/min	04:05	390.8 ppm	common t ⇒	20 min	over 2.0bar	390.7 ppm	-	04:10	evacuate + 2*(fill+evacuate)
S-28	2014/12/14	35.36m	-	over 0.35bar	04:14	9 l/min	04:24	390.6 ppm	5.0 l/min	20 min	over 1.0bar	390.6 ppm	-	04:50	S-28 플라스크 다시 채집함.
S-27	2014/12/14	43.42m	44.07m	over 0.35bar	08:27	9 l/min	08:38	387.3 ppm	5.0 l/min	32 min	over 1.0bar	387.3 ppm	-	09:13	플라스크 입구가 열려있어서 10분간 진공 시킴.
SSC-3	2014/12/14	43.42m	44.07m	over 0.35bar	09:21	9 l/min	09:42	387.3 ppm	common t ⇒	20 min	over 2.0bar	387.4 ppm	-	09:47	evacuate + 2*(fill+evacuate)
S-19	2014/12/14	현생대기	-	-	21:50	9 l/min	-	-	-	-	-	-	-	-	전기 문제로 나중에 다시 채집하기로 함.

Flask No.	Date (yyyy/mm/dd)	Depth (m)		Bladder pressure	Sample air venting			CO2 conc.		Sample container flushing		air pressure in flask	CO2 conc.		End time	Comment
		Drilling depth	Firn tubing depth		start time	flow rate	end time	at purge	at purge	flow rate	duration		at purge	at sample vent		
S-19	2014/12/14	47.21m	47.86m	over 0.4bar	23:28	9 l/min	23:40	388.6 ppm	5.0 l/min	20 min	over 1.0bar	388.6 ppm	-	00:03	플라스크 out 밸브가 열려있어서 128분간 진공 시킴.	
S-31	2014/12/15	47.21m	47.86m	over 0.4bar	00:05	9 l/min	00:35	388.6 ppm	5.0 l/min	35 min	over 1.0bar	388.6 ppm	-	01:14	플라스크 in, out 밸브가 열려있어서 26분간 진공 시킴.	
S-24	2014/12/15	51.75m	52.51m	over 0.4bar	03:41	9 l/min	03:51	385.2 ppm	5.0 l/min	20 min	over 1.0bar	385.2 ppm	382.7 ppm	04:20	플라스크 in, out 밸브가 열려있어서 149분간 진공 시킴.	
C-01	2014/12/15	53.95m	54.71m	over 0.4bar	06:01	9 l/min	06:11	376.7 ppm	5.0 l/min	20 min	over 1.0bar	376.7 ppm	375.7 ppm	06:36	플라스크 in, out 밸브가 열려있어서 105분간 진공 시킴.	
SSC-4	2014/12/15	53.95m	54.71m	over 0.42bar	06:41	9 l/min	07:02	376.7 ppm	comment t ⇒	21 min	over 2.0bar	376.6 ppm	375.5 ppm	07:11	evacuate + 2*(fill+evacuate)	
C-02	2014/12/15	현생대기	-	-	10:09	9 l/min	10:24	395.8 ppm	5.0 l/min	20 min	over 1.0bar	395.7 ppm	-	10:50	플라스크 in, out 밸브가 열려있어서 88분간 진공 시킴.	
SSC-5	2014/12/15	현생대기	-	-	10:51	9 l/min	11:35	395.7 ppm	comment t ⇒	42 min	over 2.0bar	395.7 ppm	-	11:40	evacuate + 2*(fill+evacuate)	
S-03	2014/12/15	56.11m	57.12m	over 0.4bar	21:38	9 l/min	21:51	360.9 ppm	5.0 l/min	25 min	over 1.0bar	359.8 ppm	-	22:20	플라스크 in, out 밸브가 열려있어서 96분간 진공 시킴.	
S-22	2014/12/16	58.32m	59.24m	over 0.4bar	00:07	9 l/min	00:17	340.5 ppm	5.0 l/min	30 min	over 1.0bar	340.5 ppm	339.7 ppm	00:54	플라스크 in, out 밸브가 열려있어서 112분간 진공 시킴.	
S-07	2014/12/16	61.95m	63.01m	over 0.4bar	03:14	9 l/min	03:42	313.6 ppm	4.8 l/min	20 min	over 1.0bar	313.2 ppm	313.0 ppm	04:06	플라스크 in, out 밸브가 열려있어서 164분간 진공 시킴.	
S-04	2014/12/16	64.76m	65.80m	over 0.4bar	06:23	3.5 l/min	06:34	307.0 ppm	2.0 l/min	20 min	over 1.0bar	306.7 ppm	305.4 ppm	07:01	플라스크 in, out 밸브가 열려있어서 140분간 진공 시킴.	
S-18	2014/12/16	66.81m	68.26m	over 0.4bar											공기가 받아들여지지 않았음.	

Flask No.	Date (yyyy/mm/dd)	Depth (m)		Bladder pressure	Sample air venting			CO2 conc. at purge	Sample container flushing		air pressure in flask	CO2 conc.		End time	Comment
		Drilling depth	Firm tubing depth		start time	flow rate	end time		flow rate	duration		at purge	at sample vent		
S-18	2014/12/16	66.31m	67.76m	over 0.2bar	09:02										공기가 빨아들여지지 않았음.
S-18	2014/12/16	65.81m	67.26m	over 0.25bar	09:16										공기가 빨아들여지지 않았음.
S-18	2014/12/16	65.41m	66.86m	Over 0.25bar	09:28	1.5 l/min									저음에는 펌프로 공기를 빨아낼 수 없었으나, 시간이 지난 후 flow rate이 0에 가까워서 샘플링하지 못함.
S-18	2014/12/16	65.11m	66.56m	over 0.25bar											저음에는 펌프로 공기를 빨아낼 수 없었으나, 시간이 지난 후 flow rate이 0에 가까워서 샘플링하지 못함.
SSC-6	2014/12/17	현생대기	-	-	13:14	9 l/min	13:44	396.3 ppm	comment t ⇒	45 min	over 2.0bar	395.7 ppm	-	14:40	evacuate + 2*(fill+evacuate)



주 의

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.