

천부 빙하코어를 이용한 미량기체 거동
정량적 연구

Quantitative study for trace gas behavior using
shallow ice cores



서울대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “빙하코어를 활용한 남극 빅토리아랜드 고해상도 기후·환경 복원연구” 과제의 위탁연구 “천부 빙하코어를 이용한 미량기체 거동 정량적 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



총괄연구책임자 : 허 순 도

위탁연구기관명 : 서울대학교

위탁연구책임자 : 안 진 호

보고서 초록

위탁연구과제명	천부 빙하코어를 이용한 미량기체 거동 정량적 연구				
위탁연구책임자	안진호	해당단계 참여연구원수	18	해당단계 연구비	232,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교 지구환경과학부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명: 일본, 미국 상대국연구기관명: 저온연구소(Institute of Low Temperature Science), 오레곤주립대(Oregon State University)				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	63
<p>1. 연구개발의 목적 및 필요성</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 편얼음의 불균질성이 빙하코어 온실기체 자료에 미치는 영향분석 ○ 온실기체 농도를 이용한 연령측정법 개선 <p>2. 연구개발의 내용 및 범위</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 편층에서의 물리적 성질의 불균질성 분석 ○ 편층에서 물리적 성질과 온실기체 농도변화와의 상관성 연구 ○ 모델을 이용한 측정자료 해석 및 기체 포집과정에 대한 연구 <p>3. 연구결과</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 편시료의 건식, 습식추출법을 이용한 온실기체 농도 고해상도 분석 ○ 밀도 및 공기함량의 고해상도 분석 및 상관성 연구 ○ 밀도에 따른 공기의 포집 과정에 대한 이해 ○ 남극 현장에서의 편층 기체성분 조사에 필요한 장비운용 개선 ○ 편층에서의 온실기체 확산에 대한 모델연구 <p>4. 연구개발결과의 활용계획</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 빙하코어 속 기체 연령분석 기술로 활용 					
색인어 (각 5개 이상)	한글	편공기, 빙하코어, 온실기체, 고해상도 밀도 측정			
	영어	firm air, ice core, greenhouse gas, high-resolution density measurement			

요 약 문

I. 제 목

천부 빙하코어를 이용한 미량기체 거동 정량적 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 편얼음의 불균질성이 빙하코어 온실기체 자료에 미치는 영향분석
- 온실기체 농도를 이용한 연령측정법 개선

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 편층에서의 물리적 성질의 불균질성 분석
- 편층에서 물리적 성질과 온실기체 농도변화와의 상관성 심화연구
- 모델을 이용한 측정자료 해석 및 기체 포집과정에 대한 연구

IV. 연구개발결과

- 편시료의 건식, 습식추출법을 이용한 온실기체 농도 고해상도 분석
- 밀도 및 공기함량의 고해상도 분석 및 상관성 연구
- 밀도에 따른 공기의 포집 과정에 대한 이해
- 남극 현장에서의 편층 기체성분 조사에 필요한 장비운용 개선
- 편층에서의 온실기체 확산에 대한 모델연구

V. 연구개발결과의 활용계획

- 추가연구의 필요성
- 타 연구에의 응용

S U M M A R Y

(영 문 요약 문)

I . Title

Quantitative study for trace gas behavior using shallow ice cores

II . Purpose of the research

- Assessment of the effects of firn ice heterogeneity on greenhouse gas concentrations in ice cores
- Improving chronology with greenhouse gases in the firn

III . Research plan and scopes

- Analyses of inhomogeneous physical properties of firn layers
- Study of correlations between greenhouse gas concentrations and physical properties of firn layers
- Model study for gas trapping in firn layers using measurement data

IV . Results

- Analysis of high-resolution greenhouse gas concentrations of firn samples using dry and wet extraction methods
- Study for the relationship between density and air content
- Understanding gas trapping processes associated with density distributions
- Improvement of instrument operations in gas analysis during field work in Antarctica
- Model study for greenhouse diffusion in the firn layers

V . Broader impact and applications

- Needs for further study
- Applications to other studies

Contents

Chapter 1. Introduction	7
1. Purpose	7
2. Needs	9
3. Scope	12
Chapter 2. R&D status in Korea and foreign countries	14
1. Status in foreign countries	14
2. Status in Korea	14
Chapter 3. Research contents and results	15
1. Methods and contents	15
2. Results	17
Chapter 4. Achievements of the research goal and broader impacts	37
1. Achievements	37
2. Broader Impacts	38
Chapter 5. Application plan for the research products	41
1. Further research	41
2. Application to other studies	41
Chapter 6. References	42

목 차

제 1 장 서론	7
1절. 연구개발의 목적	7
2절. 연구의 필요성	9
3절. 연구범위	12
제 2 장 국내외 기술개발 현황	14
1절. 국외 연구개발 현황	14
2절. 국내 연구개발 현황	14
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	15
1절. 연구방법 및 내용	15
2절. 연구결과	17
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	37
1절. 연구개발목표 달성도	37
2절. 연구개발 대외기여도	38
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	41
1절. 추가연구의 필요성	41
2절. 타연구에의 응용	41
제 6 장 참고문헌	42

제1장. 서 론

1절. 연구개발의 목적

1. 연구개발의 최종목적

◦ 빙하 상부 편(firn)층에서의 물리적 불균질성이 온실기체 농도보존에 미치는 영향을 정량적으로 이해한다.

2. 연도별 목표

연차	연구 목표
1차년도(2017)	편층에서의 물리적 성질의 불균질성 분석
2차년도(2018)	편층에서 물리적 성질과 온실기체 농도변화와의 상관성 심화연구
3차년도(2019)	모델을 이용한 측정자료 해석 및 기체 포집과정에 대한 연구

본 연구의 1차년도에는 firn편얼음 속의 단위질량당 공기함량과 온실기체 농도를 측정 후 비교분석하였다. 또한, 편얼음의 물리적 불균질성을 관찰 및 고해상도 밀도 측정을 통한 분석을 하고 얼음의 불균질성과 포집된 공기 양과의 관계를 비교하는데 목표를 두었다.

2차년도 목표는 1차년도의 연구결과를 바탕으로 편얼음 속 공기함량과 온실기체를 심화 분석하는 것이다. 특히, 편층에서의 물리적 성질의 불균질성은 고해상도 밀도자료를 통해 알 수도 있지만, 빙하코어 안에 포집된 공기의 함량 및 온실기체의 농도를 통해서도 유추할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 밀도와 온실기체와의 상관성에 대해 분석함으로써 편에서 공기의 포집과정에 대한 이해를 높이는데 주력하였다.

3차년도는 기존의 모델과 실제로 관찰되는 농도변화, 연령변화를 이해하는 데 초점을 두었다. cm 규모에서의 온실기체 농도 불균질성이 과거 대기 농도를 복원하는데 미치는 영향을 정량평가 할 수 있는 기반이 되었다.

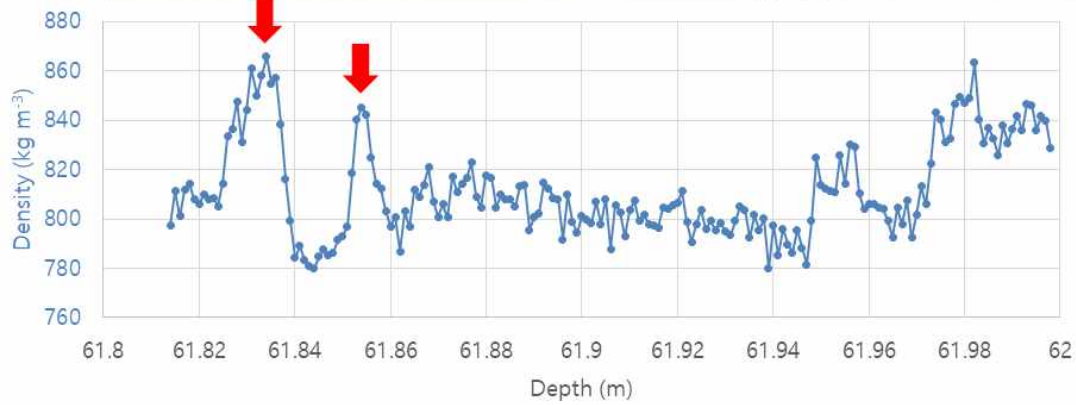
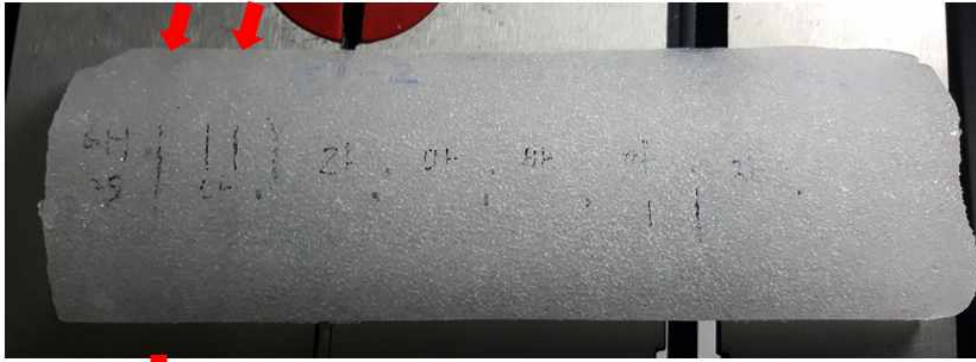


그림 1. 약 62 m 깊이의 스틱스 편 코어와 1 mm 간격으로 측정된 밀도. 빨간색 화살표는 약 1-2 cm 두께의 밀도가 높은 층을 표시한 것이다. 밀도가 높은 층은 인근의 밀도가 낮은 층에 비해 밀도가 최대 10% 정도 더 높다.

극지연구소

2절. 연구의 필요성

1. 본과제와의 연관성

빙하코어를 이용한 고해상도 기후환경 복원연구를 위하여, 시료의 시간적 해상도를 높이는 것이 반드시 필요하다. 이전 기체 연구에서는 주로 수 미터 간격으로 측정하여 10-20년 해상도를 갖도록 측정하는 것이 수행되어 왔으나, 고해상도 연구를 위하여 반드시 필요한, 시료의 불균질성(밀도, 공극률, 기체농도 등)에 대한 기초적인 연구가 부족하다. 제안된 위탁과제에서는 수 cm 규모에서의 변화를 측정하여, 시료의 불균질성이 고해상도 자료해석에 미치는 영향을 파악하는 것을 주 목적으로 하였다.

2. 연구 필요성

○ 빙하코어를 이용한 온실기체를 비롯한 미량기체 농도 복원은 기후변화를 이해하는데 매우 중요하다. 최근 들어, 고해상도 연구가 활발히 진행되면서 학계에서의 관심은 정확한 농도복원과 연령측정에 모아지고 있으나, 빙하코어 자료 간의 약간의 농도차이와 연령오차가 고해상도 자료의 고기후 자료해석에 걸림돌이 되고 있다. 예를 들면, 과거 1000년 간의 대기 이산화탄소 농도 복원자료를 비교해 보면, 빙하코어 마다 약 3-5 ppm의 차이를 보이며 이러한 변화는 산업혁명 이전의 대기 농도 변동성과 비슷한 수준이다(Ahn et al, 2012).

○ 빙하를 이용한 미량기체의 정확한 고기후학적 이용을 위해서는 빙하 상부 약 50-100미터 두께의 편(firn)층에서의 공기 이동과 공기방울에 공기가 포집되는 과정이 수 cm 규모에서의 온실기체 농도 변화에 미치는 영향을 정확히 이해하는 것이 필수적으로 요구되고 있다.

○ 편층에서 기체가 확산에 의해서 천천히 움직이고, 공기방울이 점이적으로 형성됨에 따라, 자연적으로 평활화(smoothing) 과정이 진행되고 있다. 따라서, 최종적으로 빙하 특정 깊이에서 특정 기체종의 연령은 특정한 값을 갖는 것이 아니라, 일정 기간의 연령분포를 갖게된다. 따라서, 평활화 정도를 정확하게 이해하는 것이 고해상도 연구에서는 필수적으로 요구되고 있다.

○ 편층에서의 기체 거동은 빙하 상부의 공기와 섞일 수 있게 만들어서 특정 깊이에서의 공기 연령은 얼음연령보다 작게된다. 과거 온도 복원은 얼음의 산소 및 수소 동위원소비를 이용하므로, 얼음연령을 따르고, 온실기체 농도는 기체연령을 따르므로, 이 두 연령간의 차이에 대한 정확한 모델이 만들어 져야 기후변화(온도변화)와 온실기체 농도 변화 간의 시기적 상관관계 규명이 가능하다.

○ 빙하 속에 포집된 공기는 과거 표면의 공기가 편을 통과하면서 close off 과정을 거쳤기 때문에 생성된 것이다(그림 2). 따라서 빙하코어 속 공기를 분석하여 과거 기후를 정확히 해



그림 2. 남극 Styx 편층의 공기를 채집하는 모습. 펌프시스템을 이용하여 3리터 유리플라스크에 편공기를 채집하는 모습.

석하려면 이 편층에서 공기가 포집되는 과정을 제대로 이해할 필요가 있다.

○ 편 속에서 공기는 깊이에 따라 점진적으로 포집되는 것이 아닌 물리적 불균질성에 따라 포집되는 정도가 달라진다. 일반적으로 밀도가 높은 층은 낮은 층보다 더 일찍 close off가 진행된다(Hörhold et al., 2011). 이에 따라 바로 인접한 깊이일지라도 밀도 차이가 있다면, 닫힌 공극의 공기함량 및 공기의 조성이 크게 달라질 가능성이 있다. 그러나, 이에 대해 정량적으로 분석한 연구는 아직 진행되지 않았다. 본 연구에서는 편 의 밀도차에 따른 온실기체의 농도를 정량적으로 분석함으로써 편 속에서 공기의 포집과정에 대한 이해를 높일 수 있다. 또한, 이 연구를 통해 편 속의 공기가 과거에 언제 포집되었는지 유추할 수도 있다.

○ 편 공기는 특정한 깊이에서 단 하나의 연령을 갖는 것이 아니고, 여러 연령의 공기가 섞여 있다. 왜냐하면 편 공기는 확산이 멈출 때까지 표면의 신선한 공기와 계속 순환하며 섞이고, 공기의 close off 과정에서도 밀도층에 따라 공기방울이 점이적으로 형성되기 때문이다. 이 평활화(smoothing) 정도는 편 공기 자료를 이용한 모델을 통해서 계산이 가능하다. 따라서 이 연구를 통해 빙하코어 자료 해석 시, 서로 다른 지역마다 평활화(smoothing) 정도에 따라 발생하는 농도 차이를 설명할 수 있다.

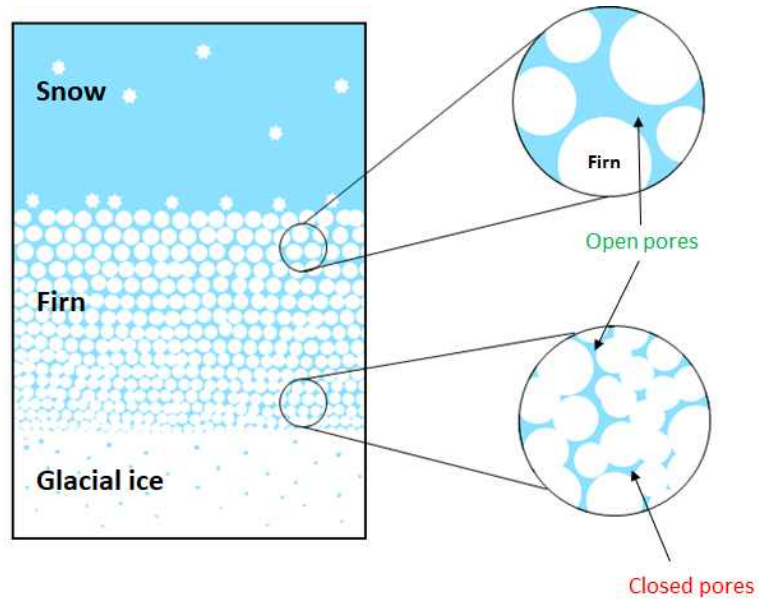


그림 3. 편층 구조의 개념도. 편층의 공기는 열린 공극(open pore) 혹은 닫힌 공극(closed pore) 속에 존재한다. 이 중 열린 공극 속의 공기를 편 공기라 한다.



3절. 연구범위

1. 1년차 연구범위(2017년도)

가. 편층 공기함량 1차 분석

Styx 빙하는 남극의 다른 지역보다 층들 간 밀도의 불균질성이 큰 것으로 추정된다. 즉, 일반적으로 공기함량은 Lock-in depth 인근에서부터 급격하게 증가하기 시작하지만 Styx 빙하는 더 상부에서부터 공기함량이 발견될 것으로 보인다. 공기함량은 습식추출법 분석하거나 건식추출법을 이용하여 간접적으로 확인하였다.

나. 편층 CH₄, CO₂ 농도변화 1차 분석

편층 속 공기방울에 갇힌 공기를 추출하여 온실기체 농도를 측정하였다. 특히, Lock-in zone에서 이미 공기방울에 포집되어 있는 공기에 대한 1차 분석을 실시하였다.

다. 편층 공기함량과 온실기체 농도간의 1차 비교

편층 내 공기함량은 closed porosity에 대한 정보를 제공해 주고, 깊이에 따른 porosity 변화는 firm층에서의 공기가 포집되는 과정에 대한 정보를 제공해 줄 것이다. 2017년도에는 1차분석으로 몇몇 깊이에 대해서 측정을 수행하였으며, 그 결과를 온실기체(CO₂, CH₄)농도와 비교하는 연구를 수행하여, 공기가 포집된 시기(연령)에 대한 정량적 이해를 도모하였다.

2. 2년차 연구범위(2018년도)

가. 편얼음 속 포집된 온실기체 농도 분석

편층은 아직 모든 공극이 완벽하게 방울형태로 포집되지 않은 구간이다. 일반적으로 lock-in zone에서 공극이 하나 둘 닫히기 시작한다고 알려져 있지만, 그 양이 적기 때문에 그 공기를 추출해 분석을 한 연구는 그동안 별로 진행되지 않았다. 본 연구에서는 서울대학교 빙하/고기후 연구실의 정밀한 추출장비를 이용하여 오차범위 내에서 의미 있는 값을 도출하기 위해 편얼음 속 공기를 분석했다.

나. 편얼음의 불균질성이 빙하코어 온실기체 자료에 미치는 영향분석

편 얼음의 불균질성은 밀도자료를 통해 알 수 있다. 그러나, 그 밀도층은 1-2 cm 내에서도 크게 변동하므로 밀도층에 따른 온실기체를 분석하기 위해서는 정밀한 절삭 과정이 필요하다. 또한, 시료의 양이 제한적이고, 공기함량이 적기 때문에 오차는 최소화하면서 층의 구분하여 분석된 온실기체 농도의 변동성을 극대화할 수 있는 구간을 찾는 것이 중요하다.

다. 편 공기 및 편얼음 샘플링 방법 개선

편 얼음은 열린공극이 존재하기 때문에 외부의 공기가 편 내부까지 맞닿아 있다(그림 3). 그러므로 보관할 때 열린 공극이 승화에 의해 닫힌 공극으로 바뀌는 상황이 발생하지 않게 주의해야 한다. 만약 이러한 현상(post-coring close-off)이 일어날 경우, 공기함량 및 온실기체 농도의 실험 오차가 발생하게 된다. 특히, 이산화탄소는 사람이 활동하는 공간에

서의 농도가 자연 상태의 농도보다 월등히 높기 때문에 더 큰 오차가 발생할 것으로 예측된다. 실험방법의 정확성을 높이고자 시추 후 오염을 최소화하는 방법을 연구했다 (별첨 #1).

편에는 포집되어 있지 않고 열린 공극(open pore)을 통해 이동하는 편 공기가 존재한다. 편 공기는 아직 포집되지 않은 공기로, 동일한 깊이에서 편 공기와 편 얼음의 추출된 공기를 비교하면 편 공기가 상대적으로 더 연령이 낮다. 이 둘 사이의 관계를 정확히 이해하는 것 또한 중요하기 때문에 편 공기의 샘플링도 필수적이다. 편 공기가 변질되지 않고 온전히 보존될 수 있는 firm air sample 보관용기 및 야외용 밀도측정도구 제작하였다.

3. 3년차 연구범위(2019년도)

가. 편층 불균질성이 기체 연령분포에 미치는 영향 평가

편층에서 기체 확산 속도가 상대적으로 느리거나, 공기방울이 단혀지는 상대적 시기가 큰 범위를 가질수록 연령분포가 넓어져 고해상도 연구에 시료 분석자료를 사용할 수 없게 된다. 현재까지의 모델은 눈층의 밀도 변동성에 대해서 충분히 반영하고 있지 않아, 실제 측정값을 바탕으로 비교하였다.

나. 편층 불균질성이 기체 평균연령에 미치는 영향 평가

기체의 연령분포 뿐만 아니라, 전체 평균 연령은 기존의 모델과 다를 수 있다. 실제 관측값을 바탕으로 얼마나 차이가 있는지를 정량적으로 파악하였다.

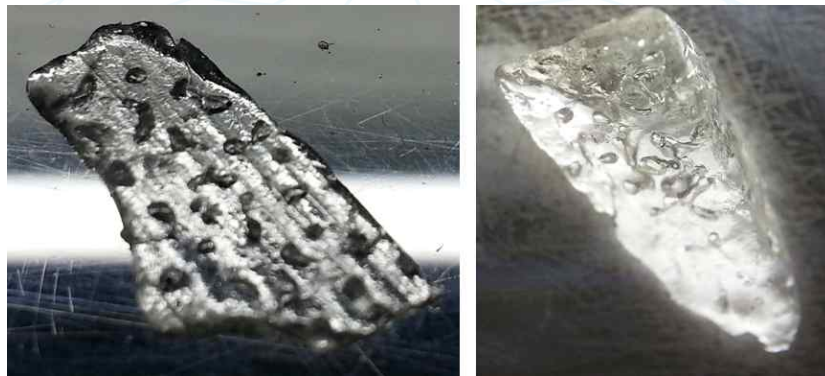


그림 4. 편 빙하코어에서 떨어져 나온 2 cm 내외 크기의 조각. 빛을 비추면 공극의 형태가 잘 관찰된다. 공극 중 일부는 단혀있고, 일부는 닫히지 않아서 외부공기와 맞닿아 있다.

제 2 장. 국내외 기술개발 현황

1절. 국외 연구개발 현황

○편코어 속 공기를 추출하여 분석한 연구는 아직 많이 진행되지 않았다. Mitchell et al. (2015) 연구에서는 WAIS Divide 빙하코어의 lock-in zone 구간의 시료를 분석하여 CH₄ 농도를 측정하였다. 그 결과 밀도에 메탄 농도와 air content가 반상관성을 확인하였고, 이를 통해 더 일찍 closed off 된 공기가 더 오래된 공기를 포함하고 있다는 것을 밝혔다. 그러나, 밀도와의 연관성에 대해서는 직접적인 비교를 하지 않았다. 특히, 본 연구처럼 밀도에 따라 층을 정확히 나누어 분석하는 연구는 진행하지 않았다. 그리고, LID 상부에 대한 자료 해석이 없었다.

○유럽은 프랑스 LGGE, 스위스 베른대학이 주도가 되어서 남극과 그린랜드 편공기 채집과 모델링 연구를(Herron et al, 1980; Schwander et al., 1984) 수행하고 있다. 다른 예로, NEEM 빙하코어를 분석한 연구에서는 LIZ 구간에서 continuous melter system 으로 측정한 메탄 농도를 Ca 농도와 비교하여 계절적 변화를 설명했다 (Rhodes et al., 2013). 그러나, 이 역시 밀도 자료와 정량적인 비교는 하지 않았다.

○일본은 빙하코어 시료 해석에 필요한 최소한의 편공기 채취 및 모델링 연구를 수행하나, 연구인력 부족으로 연구수행이 미미하다. 편공기와 연구와 별도로 본 과제와 관련된 편얼음에 대한 고해상도 물리특성 연구 및 온실기체 농도측정 연구는 최근에 연구가 시작되었다.

극지연구소

2절. 국내 연구개발 현황

국내에서 편 공기와 관련된 연구는 2014년부터 진행되어 왔다. 2014년에 스틱스 빙하에서 편 공기와 편 빙하코어를 샘플링했고, 이 샘플링을 위해 사전에 장비 제작 및 샘플링 용기 확보 등 다양한 사전 연구가 진행되었다. 채취한 편 공기는 미국 NOAA, SIO (Scripps Institution of Oceanography) 등 분석정확도가 이미 공인된 연구기관에서 온실기체 농도와 동위원소가 측정되었다. 이 자료를 편 공기 이동 모델에 적용하여 스틱스 빙하 코어의 편 공기에 가장 잘 맞는 모델을 적용하였다. 서울대학교 빙하/고기후 연구실에서 습식 및 건식 추출법을 통해 CO₂, CH₄ 농도가 분석되었다. 본 과제에서는 이 자료를 종합적으로 이용하여 물리적 불균질성이 편 속 기체의 포집과정에 미치는 영향에 이해하고자 한다.

제 3 장. 연구개발수행 내용 및 결과

1절. 연구방법 및 내용

1. 1차년도(2017)

가. 편층 공기함량 1차 분석

Styx 빙하는 남극의 다른 지역보다 층들 간 밀도의 불균질성이 큰 것으로 추정된다. 즉, 일반적으로 공기함량은 Lock-in depth 인근에서부터 급격하게 증가하기 시작하지만 Styx 빙하는 더 상부에서부터 공기함량이 발견될 것으로 보인다. 공기함량은 습식추출법 분석하거나 건식추출법을 이용하여 간접적으로 확인하였다.

나. 편층 CH₄, CO₂ 농도변화 1차 분석

편층 속 공기방울에 갇힌 공기를 추출하여 온실기체 농도를 측정하였다. 특히, Lock-in zone에서 이미 공기방울에 포집되어 있는 공기에 대한 1차 분석을 실시하였다.

다. 편층 공기함량과 온실기체 농도간의 1차 비교

편층 내 공기함량은 closed porosity에 대한 정보를 제공해 주고, 깊이에 따른 porosity변화는 firm층에서의 공기가 포집되는 과정에 대한 정보를 제공해 줄 것이다. 2017년도에는 1차분석으로 몇몇 깊이에 대해서 측정을 수행하였으며, 그 결과를 온실기체(CO₂, CH₄)농도와 비교하는 연구를 수행하여, 공기가 포집된 시기(연령)에 대한 정량적 이해를 도모하였다.

극지연구소

2. 2차년도(2018년)

2017-2018년도에 실험실에서 분석을 통한 고해상도 자료 생성에 주력했고, 2019년도에 모델을 이용한 시뮬레이션 결과와 비교하여, 편층의 불균질성이 온실가스 농도 및 변동성에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 계획이다. 2018년도에는 편층 속 공기의 포집과정에 대한 이해를 높이고자 밀도를 기준으로 편 코어 속 공기함량, CH₄, CO₂를 분석했다. 또한 현장에서 편 공기 샘플링에 필요한 유리플라스크와 표면에서의 밀도 변동성을 측정하기 위한 밀도측정장비를 제작하였다.

가. 편층 공기함량 2차 분석

서울대학교 빙하/고기후 연구실의 습식추출(Wet extraction)장치를 이용하여 편층 내 빙하 코어 속 총공기함량을 분석하였다. 측정된 깊이 중 하나는 33 m로 lock-in depth가 시작하는 52 m보다 상부이다. 이 깊이에서는 일반적으로 포집된 공기가 없을 것으로 예상되지만 측정 결과 일반 빙하코어의 약 1% 정도의 공기 함량이 추출되었다. 또한, 61 m에서 측정된 결과, 밀도에 따라 일반 빙하코어 대비 15~105% 공기 함량을 보였다.

나. 편층 CH₄, CO₂ 농도변화 2차 분석

습식 및 건식추출(Dry extraction)장치를 이용하여 공기를 추출 후 메탄과 이산화탄소의

농도를 가스크로마토그래피로 분석했다. 특히 빙하코어의 밀도에 따른 포집된 온실기체 농도 변화를 알아보기 위해 편 코어를 밀도에 따라 정밀하게 커팅하였다.

다. 편층 공기함량과 온실기체 농도간의 2차 비교

2018년도에는 2017년도에 이어 추가로 측정된 온실기체 농도를 공기함량과 비교하였다. 공기함량은 해당 층에서의 얼음의 밀도와 관련이 있고, 온실기체 농도는 공기가 포집된 시기에 대한 정보를 준다. 따라서 이 둘을 비교하면 얼음의 밀도가 공기의 포집 시기에 어떤 영향을 미치는지 알 수 있다.

라. Firm air sample 보관용기 및 야외용 밀도측정도구 제작

향후 편 공기를 포집하기 위해 샘플 용기를 제작하였다. 시료의 변질이 일어나지 않았다는 것이 검증된 기존 모델과 동일하게 유리플라스크 20개가 제작되었다. 또한, 편 상부의 눈층에서 수 cm 간격의 밀도 변동성을 측정하기 위해 3 cm 깊이 해상도의 밀도측정도구를 제작하였다.

3. 3차년도(2019): 모델을 이용한 측정자료 해석 및 기체 포집과정에 대한 연구

가. 온실기체 농도 추가분석 및 농도를 이용한 포집연령 계산

Lock-in zone에서의 온실기체 농도 자료를 X-ray 밀도 측정 자료와 비교하여, 시추 후 온실기체 농도 변질에 대해서 확인한 후, 신뢰할 만한 자료에 대해서, 포집 연령계산을 계산하였다. 고해상도 농도 측정에 자료가 부족한 경우에 추가적으로 온실기체 농도 분석을 실시하였다.

나. 모델결과와 비교

모델을 이용한 시뮬레이션 결과와 비교하여, 편층의 불균질성이 온실가스 농도 및 변동성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 편층에서의 온실기체 농도, 연령에 관한 모델은 미국 오레곤주립대의 Buizert박사 모델코드를 활용하였다.

극지연구소

2절. 연구결과

1. 1년차 연구결과

성과목표	세부목표	구체적인 내용
편층에서의 물리적 성질의 불균질성 분석 (2017년도)	편층 공기함량 1차 분석	서울대학교 빙하/고기후 연구실의 습식추출(Wet extraction)장치를 이용하여 편코어의 공기함량 분석. 현장에서 snow-pit을 만든 후 퇴적된 눈층에 대해 물리적 불균질성을 관찰. 또한 density cutter를 이용하여 부피밀도를 측정.
	편층 온실기체 농도변화 1차 분석	편코어의 메탄농도 분석. 편 샘플의 부피밀도 측정, 모델 및 부피밀도와 비교.
	편층 공기함량과 온실기체 농도간의 1차 비교	편층에서 온실기체를 분석한 결과를 이용하여 깊이에 따른 연령 분포를 계산. 이것을 통해 새로운 LID 계산 및 모델로 구한 공극률과 비교.

가. 편층 공기함량 1차 분석

(1) 습식추출법을 이용한 총공기함량 분석

서울대학교 빙하/고기후 연구실의 습식추출(Wet extraction)장치를 이용하여 편층 내 빙하 코어 속 총공기함량과 CH₄ 농도를 총 4개 구간에 걸쳐 3cm 깊이 간격으로 총 124개의 깊이구간에 대해 측정했다(그림 5). 깊이가 깊어질수록 오래된 공기가 나오기 때문에 메탄의 농도는 감소했고, 밀도가 증가해서 close-off 비율이 증가하기 때문에 공기함량은 증가했다. 그러나 수 cm ~ 18 cm 간격으로 증감을 반복했고 이는 편 내부에서 공기의 이동에 영향을 주는 요인이 있음을 지시한다.

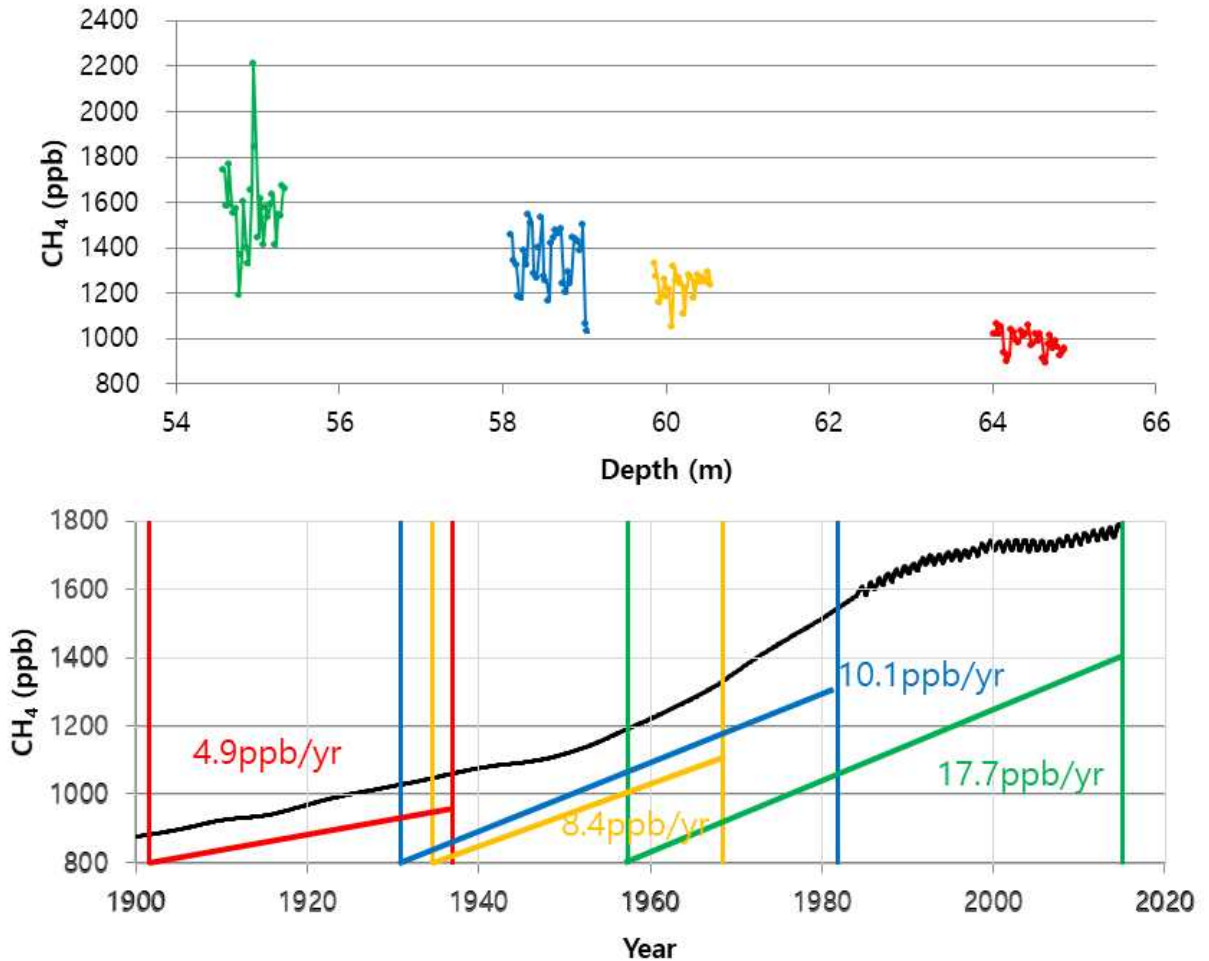


그림 5. 편코어의 메탄농도 분석 결과(위)와 1900년부터 대기 중 메탄 농도의 변화(아래)이다. 메탄농도는 깊어질수록 변동이 작아지는 것처럼 보인다. 이는 대기 중 메탄 농도 변화가 시기에 따라 증가율이 다르기 때문으로 추정된다. 또한, 버블이 close-off 되는 과정에서 해당 구간의 열린 공극과 닫힌 공극 간의 비율도 영향을 줄 것이다.

(2) Styx빙하 상부 눈층의 물리적 불균질성 관찰

Styx 빙하의 표면 2.2 m에 대한 물리적 불균질성을 관찰하였다. 이 깊이의 적설은 크게 두 가지 층으로 구분할 수 있는데 입자의 크기가 크고 부드러운 경도가 낮은 층과, 입자의 크기가 작고 경도가 높은 층이다. 각 층의 두께는 1 cm부터 20 cm까지 다양했고, 이 지역의 연간 적설량(0.14 m ice/yr)을 고려했을 때 1년에도 수차례 두 가지 특성의 층이 반복하여 배열되어 있음을 알 수 있다(그림 6).

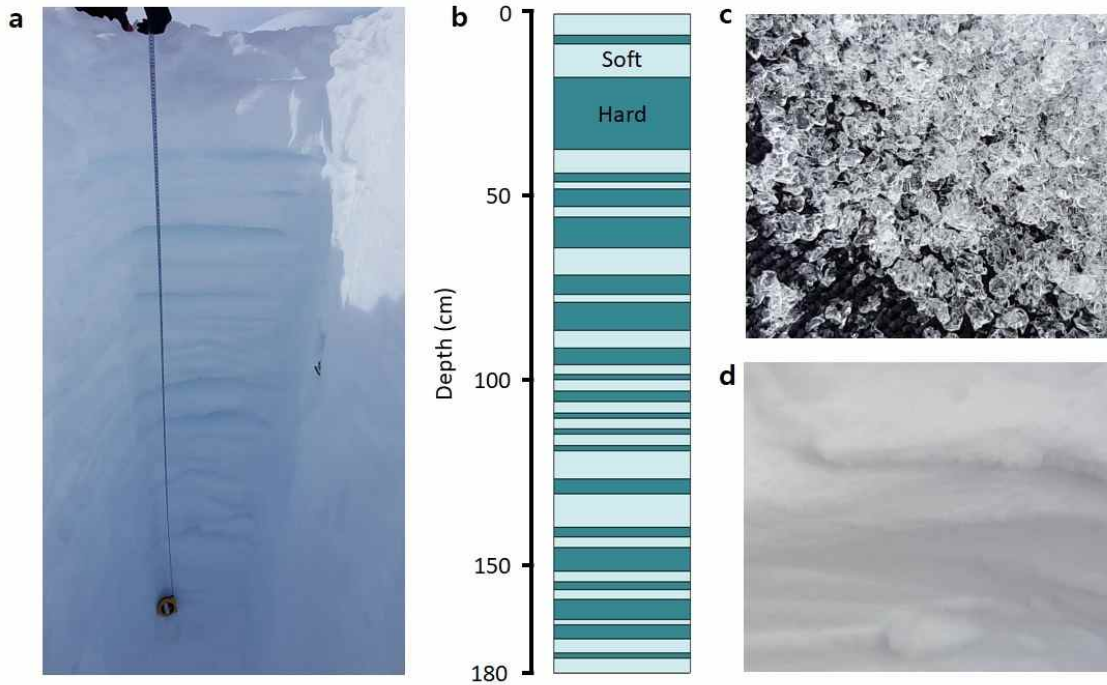


그림 6. (a) Styx 지역의 snow-pit 현장 사진이다. 벽면을 손으로 긁었을 때 쉽게 파이는 부분과 파이지 않는 부분을 구분했다. (b) 표면에서부터 1.8 m까지의 물리적 불균질성을 분류한 그림이다. 연한 부분은 상대적으로 경도가 낮아서 파였고, 짙은 부분은 경도가 높아서 쉽게 파이지 못했다. (c) 경도가 낮은 부분의 적설은 입자 모양이 뚜렷하고, 그 크기가 수 mm로 크다. (d) 경도가 높은 부분의 적설은 눈 같은 모양의 미세한 입자로 이루어져있다.

극지연구소

(3) 눈층에 대한 밀도 측정

10 cm 간격으로 표면부터 깊이 150 cm까지 측정한 결과(그림 7), 표면의 밀도는 296 kg/m³이 나왔고 1.5 m 깊이 사이에서 290-424 kg/m³ 사이의 값이 측정되었다(그림 8). 표면 근처에서의 밀도변화는 깊이에 따른 점진적인 증가보다는 계절변화 혹은 다른 기상 특성에 의한 영향을 더 크게 받는 것으로 추정된다.

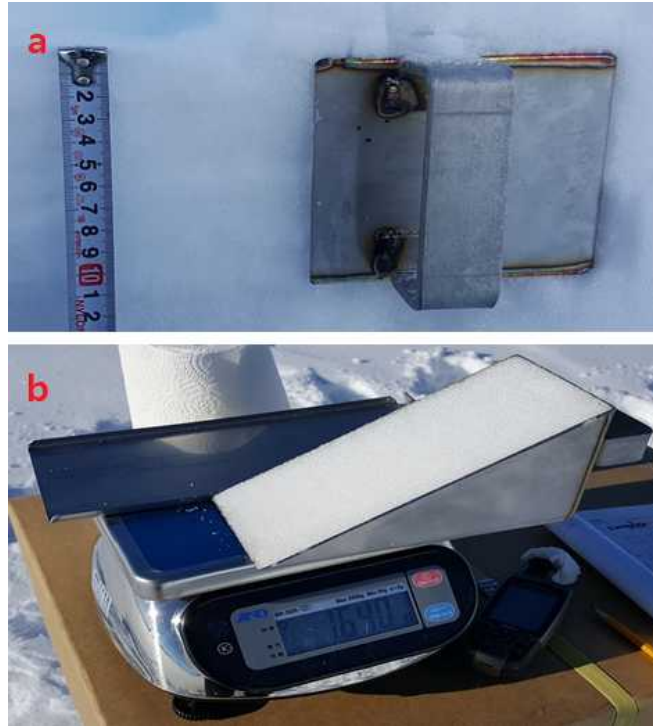


그림 7. Styx 지역에서 수행한 밀도 측정 방법이다. (a) density cutter(RIP 1 Cutter, Snowmetrics)를 이용하여 Styx 지역 snow-pit 벽면에 대해 밀도를 측정하고 있다. 해상도는 10 cm이다. (b) density cutter로 부피 1000mL(10×10×20/2 cm) 눈울 채취할 수 있다. 부피밀도는 눈울 포함하고 있는 커터의 무게에서 커터의 무게(1238 g)를 뺀 값을 부피 1000mL로 나눠서 계산하였다.

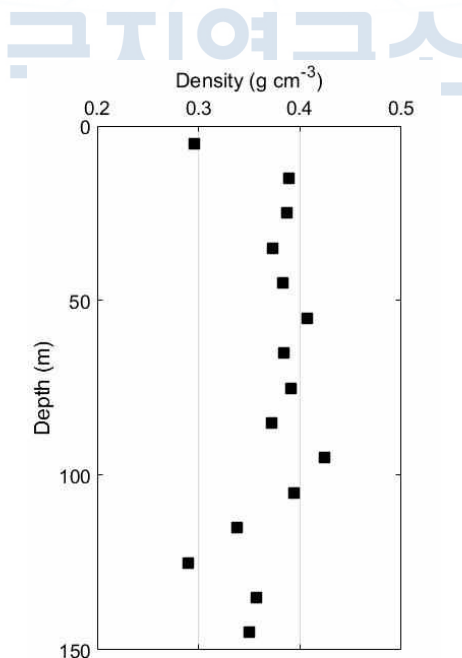


그림 8. 10 cm 간격으로 측정한 Styx의 상부 1.5 m 적설에 대한 밀도. 수평으로 1 m 이내의 구간에서 두 차례 측정한 값을 평균한 결과이고, 최대 오차는 깊이 35 cm에서 35 kg/cm³이다. 최댓값은 깊이 95 cm에서의 424 kg/cm³, 최솟값은 깊이 125 cm에서의 290 kg/cm³이다.

나. 편층 온실기체 농도변화 1차 분석

(1) 편층 공기함량과 CH₄ 농도 비교 후 상관관계 분석

CH₄ 농도와 총공기함량은 반비례 관계를 보인다(그림 9). 편은 밀도에 따라 닫힌 공극(closed porosity)이 변하는데, 밀도가 상대적으로 높은 층은 우선적으로 close-off가 일어나고 표면과의 신선한 공기가 차단되게 된다. 결과적으로 더 오래된 공기가 공기방울 속에 갇히게 되면서 낮은 메탄농도를 갖고 총공기함량은 높은 값을 보인다.

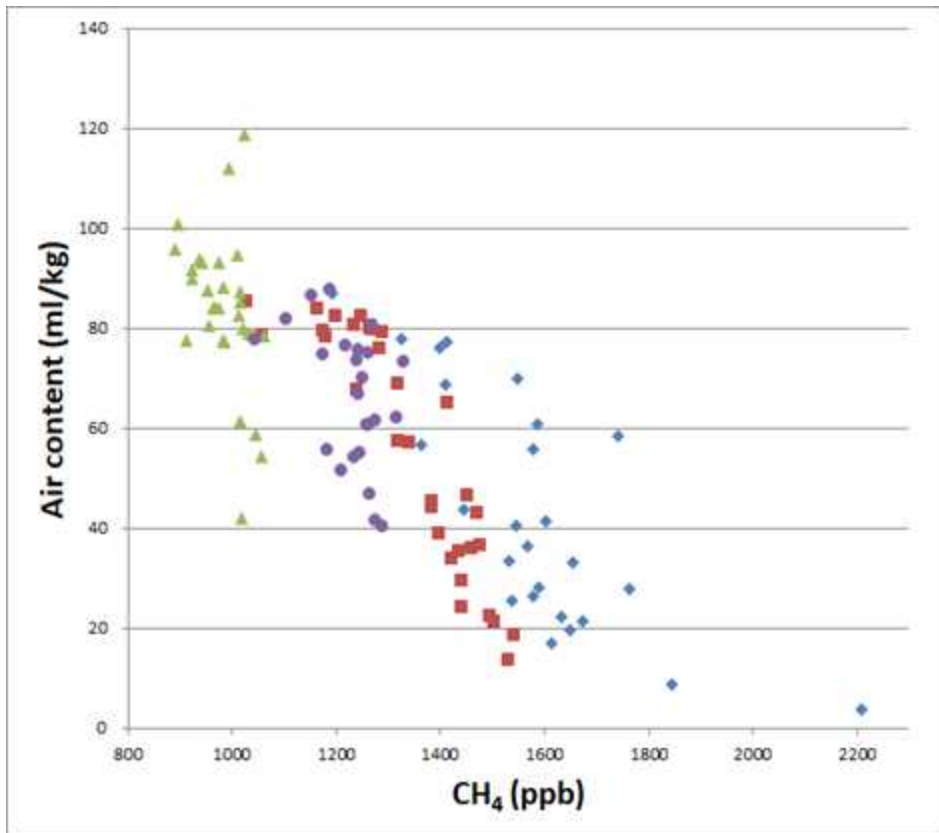


그림 9. Lock-in zone 내 빙하코어의 메탄 농도와 총공기함량 비교. 각 기호는 Lock-in zone 내에서의 서로 다른 구간을 나타낸다. 초록색, 보라색, 빨간색, 파란색 순으로 깊어지는 순서이다. 각 구간 내에서도 대체적으로 메탄농도와 공기함량은 반비례 관계로 보인다.

(2) Lock-in zone에서의 편밀도와 공기함량 비교

그림 10에서 Lock-in zone에서의 공기함량과 고해상도 밀도자료(별첨 1.)를 비교했다. 밀도가 높은 층에서는 다른 인근의 밀도가 낮은 층에 비해 열린 공극(open pore)를 통해 움직이던 편 공기가 더 일찍 공기방울 속에 갇히게 되었을 것이라고 예상된다. 그러므로 밀도가 높은 층에서 공기함량도 높고, 반대로 밀도가 낮은 층에서는 공기함량이 낮을 것이다. 밀도를 측정한 곳에서 공기함량을 직접 측정하지는 않았지만, 그 주기를 살펴본다면 한 주기에 수 cm에서 십 수 cm 정도를 양쪽 모두 보이고 있다.

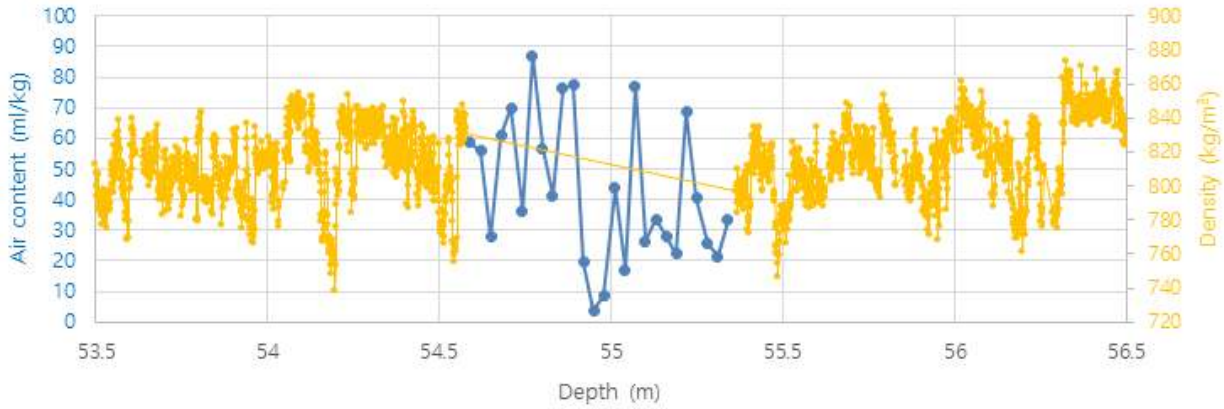


그림 10. Lock-in zone에서의 공기함량(파란선, 왼쪽 축)과 고해상도 밀도(노란선, 오른쪽 축) 비교

(3) Lock-in zone에서의 편밀도와 메탄농도의 관계

밀도가 높은 층에서는 상대적으로 공기가 더 일찍 close-off 되므로 밀도가 낮은 층에 비해 더 오래된 공기가 버블 속으로 포집되고, 그러므로 더 낮은 온실기체 농도를 갖을 것이다(그림 11). 반대의 경우, 밀도가 낮은 층에서는 더 나중에 공기가 포집되고, 더 최근의 농도가 높은 메탄이 포집되게 된다.

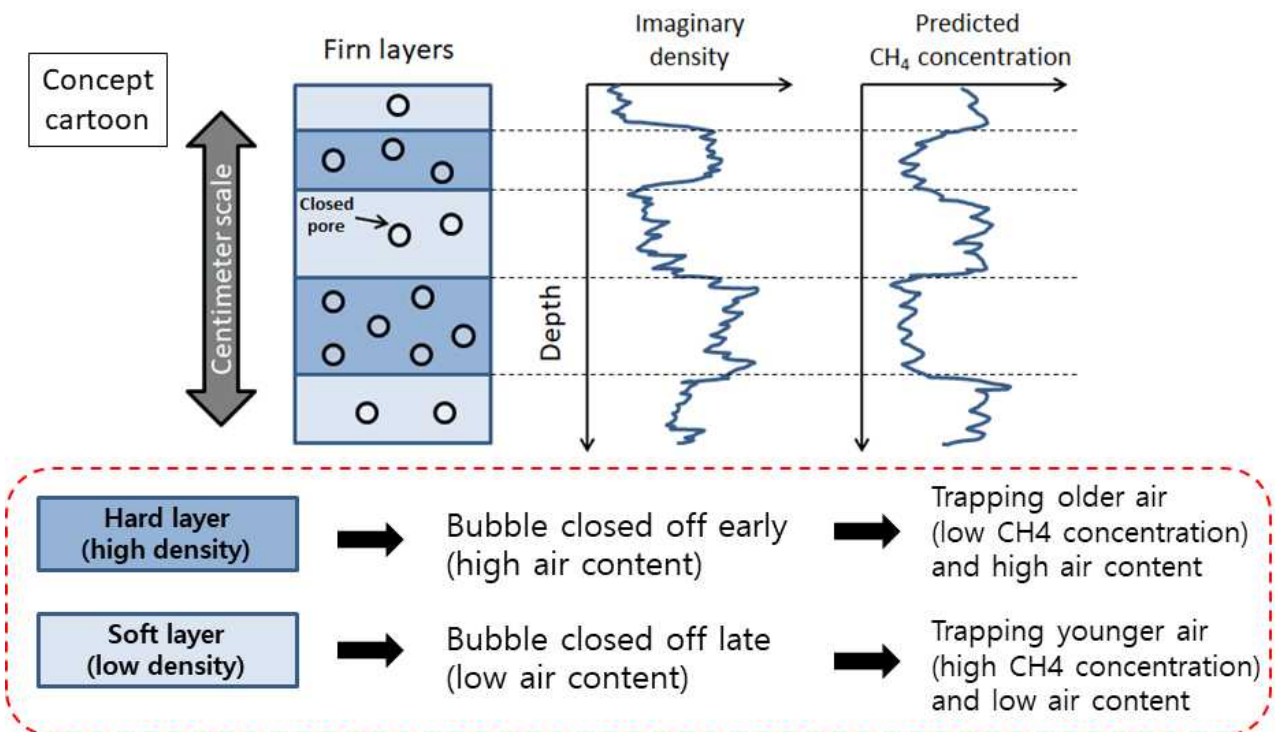


그림 11. 편밀도에 따라 예상되는 메탄의 농도 차이를 그린 개념도. 편층에 표시한 closed pore는 공기함량을 지시하고, 따라서 공기함량과 메탄과의 관계도 설명이 가능하다.

다. 편층 공기함량과 온실기체 농도간의 1차 비교

(1) 편코어 속 메탄의 농도를 연령으로 변환

South Pole의 연도별 메탄농도 자료를 이용하여 편코어 속 메탄의 농도를 연령으로 환산했다. 이를 편공기의 연령과 비교해보면 일부 실험오차(54.95 m 외 2개)를 제외하고 전반적으로 편코어 속 공기는 같은 깊이의 편공기보다 오래된 연령을 보였다. 하지만, 연령변화가 1 m 이내 구간에서도 약 40년 차이가 관찰되었고, Close-off depth 인근에서는 편공기보다 젊은 편코어 속 공기가 다수 발견되었다. 이를 통해 편에서 close-off 과정이 단순히 깊이에 따라 진행되는 것이 아니라 close-off 될 당시의 물리적 특성의 영향을 받을 것으로 예상된다.

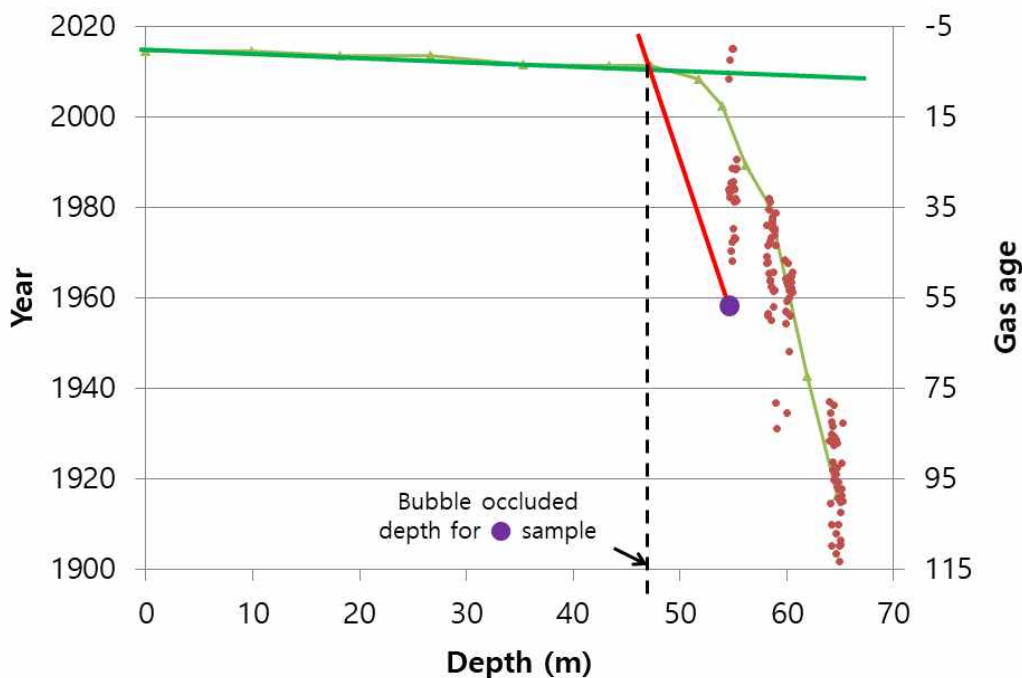


그림 12. 실험을 통해 획득한 메탄 농도를 이용하여 역으로 이 시료의 버블이 언제 close-off 되었는지 계산하는 방법이다. 만약 보라색 점을 예로 든다면, 버블이 close-off 된 이후에는 얼음의 연령증가와 같은 속도로 이동하기 때문에 그 기울기를 역으로 그려줬다(빨간선). 이 직선이 firm air 선(초록선)과 만나는 지점에서 버블이 close-off 되기 시작했을 것이다.

(2) 편코어 분석 결과를 이용한 Lock-in depth 계산

빙하 상부에서 쌓인 눈은 퇴적되면서 Lock-in depth에 다다를 때부터 close-off가 진행된다. 결국 이 깊이부터 얼음과 공기의 연령차가 일정해진다. 이 논리를 이용하여 역으로 방울에 갇힌 공기의 나이를 계산한 후(그림 12), Lock-in zone에서의 모델로 구한 깊이에 따른 얼음나이의 변화(6.2 year/m)를 적용시키면 3 cm 간격의 각 샘플이 언제 LID를 지났는지 계산할 수 있다. 그 결과 46-56 m 사이에서 close-off가 시작되었다.

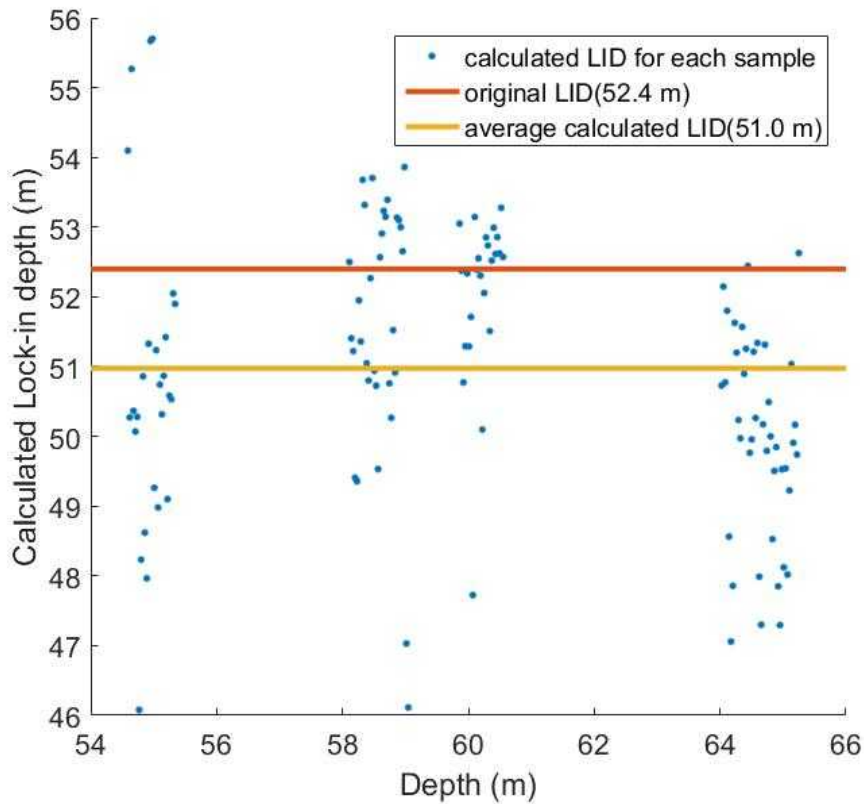


그림 13. 농도를 측정된 결과를 이용하여 각 샘플의 Lock-in depth(LID)를 계산하였다. 기존에는 52.4 m로 LID를 설정하였지만, 새로 계산한 LID는 평균 51.0 m의 값을 갖는다.

(3) 편공기 이동 모델(Firm air transport model)을 이용하여 구한 공극률과 비교 모델로 구한 공극률을 보면 깊이 50 m보다 상부에서부터 closed porosity가 관찰되기 시작한다. closed pore는 공기가 얼음에 포집될 때의 공극으로 이것이 발견되는 곳부터 Lock-in depth에 해당된다. 즉, 그림 9과 그림 10를 통해 각 샘플의 closed pore가 생기는 시점과 깊이는 다양할 수 있고, 기존의 52.4 m보다 더 상부에서 시작될 가능성이 있다.

2. 2년차 연구결과

성과목표	세부목표	구체적인 내용
편층에서 물리적 성질과 온실기체 농도변화와의 상관성 심화연구 (2018년도)	편층 공기함량 2차 분석	서울대학교 빙하/고기후 연구실의 습식추출(Wet extraction)장치를 이용하여 편코어의 공기함량 분석.
	편층 CH ₄ , CO ₂ 농도변화 2차 분석	미리 측정한 밀도 자료를 바탕으로 밀도가 낮은 층과, 높은 층을 정확히 구분하여 커팅 후 각각의 시료의 CH ₄ , CO ₂ 농도를 분석.
	편층 공기함량과 온실기체 농도간의 2차 비교	편층 공기함량과 온실기체 농도를 비교하기 위해 습식추출법으로 구한 CH ₄ 의 농도와 같은 깊이에서의 총공기함량을 분석했고, 건식추출법으로 구한 CO ₂ 의 농도와 그 때 추출된 공기의 압력으로 대략적인 총공기함량을 계산함.
	Firn air sampling 장치 보완 및 제작	성능과 보관의 용이성 등을 고려하여 이미 제작한 것과 같은 크기의 유리플라스크를 제작. 또한, 3 cm 간격으로 측정할 수 있는 밀도측정장비도 제작.

가. 편층 공기함량 2차 분석

(1) 습식추출법을 이용한 총공기함량 분석

서울대학교 빙하/고기후 연구실의 습식추출 장치를 이용하여 Styx 편 코어 속 공기함량을 분석했다. 분석한 코어 중 하나는 Run #44 (깊이 약 33 m)로 1차년도에 측정한 샘플보다 상부에 위치해있는 것이다. 특히 아직 bubble의 closed process가 일어나지 않는 깊이로 생각되었지만, 분석 결과 일반 빙하코어의 약 1% 되는 양 (1 ml/kg)의 공기함량이 측정되었다 (그림 14). 이는 lock-in zone에 이르지 않더라도 bubble이 closed 될 수 있다는 것을 의미한다. 또한 측정 깊이인 33 m보다 더 표면에서부터 공기가 포집될 가능성을 제시한다. 그러나, 시추 후 보관하는 동안 새롭게 만들어진 단힌 공극일 가능성도 배제할 수는 없다.

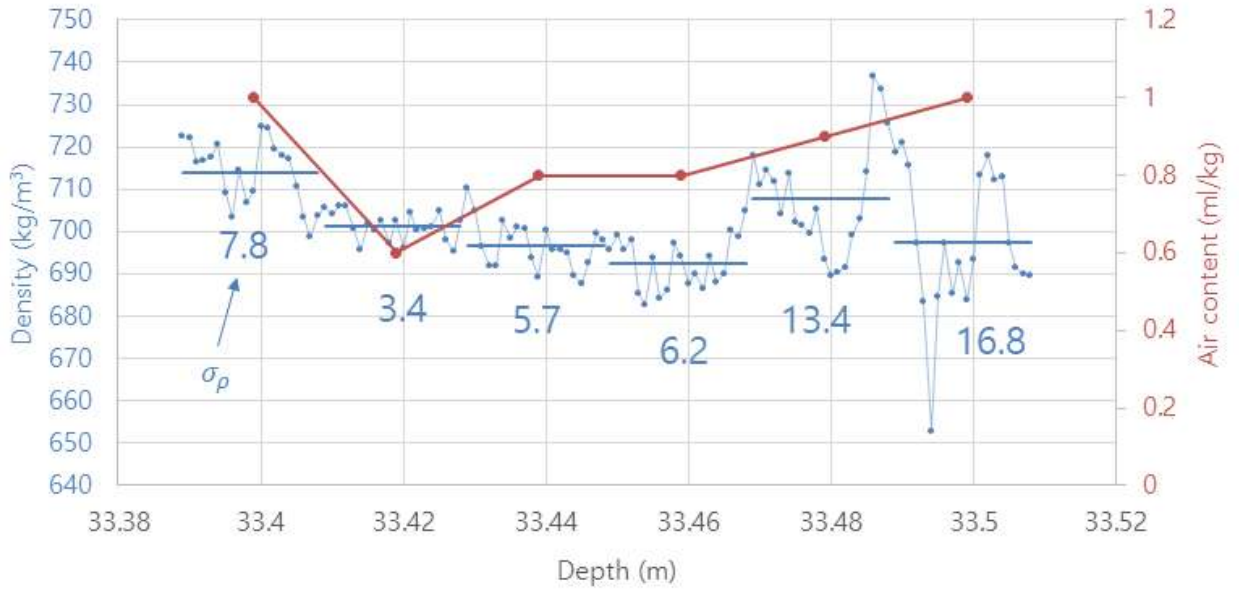


그림 14. 편코어의 공기함량(빨간색) 및 고해상도 밀도(파란색) 분석 결과. 파란색으로 표시한 직선은 3 cm 평균값을 의미하고, 숫자는 해당 구간 밀도의 표준편차를 의미한다.

(2) 밀도와 공기함량 간의 상관성 비교

공기함량을 측정하기 전에 밀도를 1 mm 해상도로 측정하였다(그림 15). 그 후, 공기함량 분석 깊이구간과 일치하게 밀도의 평균을 계산하였다. 일반적으로 밀도가 높으면 더 일찍 bubble close가 발생하여 더 높은 공기함량을 보인다. 이 분석 결과에서는 그러한 뚜렷한 경향성은 보이지 않았다(그림 14). 이는 공기함량이 적어서 압력계 및 실험에서 발생하는 오차 때문인 것으로 추정된다. 그러나, 밀도의 표준편차(σ_p)와 공기함량을 비교하면 밀도의 변동성이 클수록 공기함량이 더 높은 경향성이 나타났다. 이는 공기함량은 일차적으로 밀도가 높은 때 그 값이 커지지만, 밀도가 동일한 경우에는 밀도 변동성이 더 큰 경우에 공기함량이 커진다는 것을 의미한다.

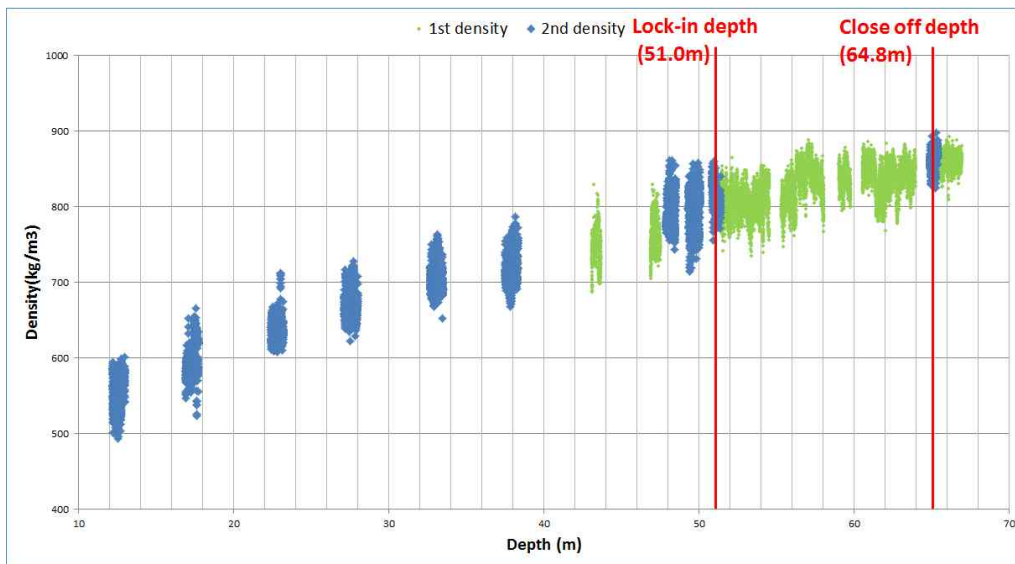


그림 15. Styx 상부 편층 추가 밀도측정 자료.

(3) 고해상도 밀도 추가 측정

고해상도 밀도 자료로 복원한 편층의 밀도 분포에서 얼음에 기체가 갇히기 시작하는 깊이인 Lock-in depth (LID)는 총 공극률이 0.1 미만으로 내려가 최소 1cm 두께 이상으로 유지되는 지점을 의미하며 이를 51.0m로 유추하였다(그림 16). 또한 현장에서 open pore의 공기가 마지막으로 측정된 깊이인 64.8m를 close off depth로 정의하고 이 사이의 구간을 lock-in zone (LIZ)으로 정의하였다.

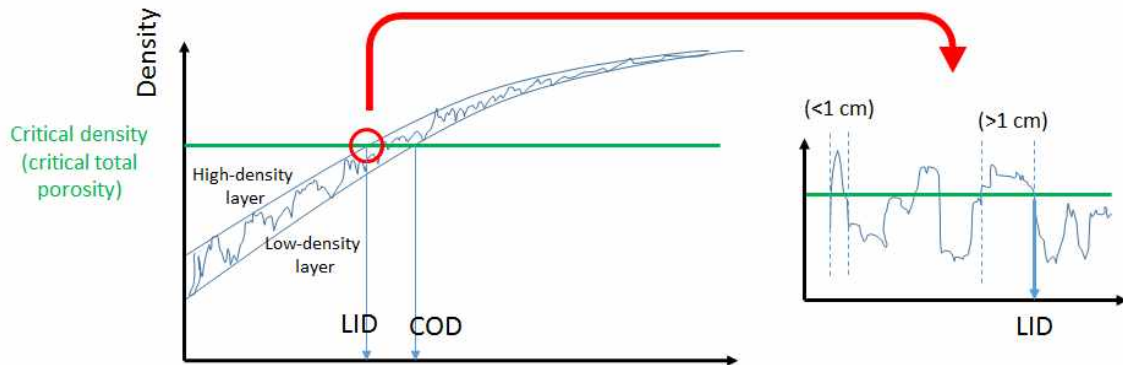


그림 16. 총 공극률(total porosity)을 이용하여 LID와 COD를 정의하는 방법.

나. 편층 CH₄, CO₂ 농도변화 2차 분석

(1) 편층 밀도 변화에 따른 CO₂ 변화의 상관관계 분석

편층의 밀도와 해당 깊이에서 CO₂ 농도는 반비례 관계를 보인다. 편은 그림 5에서처럼 수 cm 깊이 간격에서도 고밀도층과 저밀도층이 연속해서 번갈아가며 분포하는데 고밀도층에서는 총공기함량이 높게 측정되었으며, CO₂ 농도는 낮게 측정되었다. 이 결과는 번갈아가며 나타나는 고밀도층과 저밀도층이 LID에서 일률적으로 closed pore를 생성하기 시작한 것이 아닌, 고밀도층이 더 먼저 closed 되었다는 것을 알려주며, 더 일찍 포집된 CO₂ 농도가 당시 대기의 CO₂ 값을 반영하고 있음을 알 수 있다. 이러한 연구는 고밀도층과 저밀도층의 정밀한 기체 분석이 이루어지면 공기의 포집되는 시기의 차이가 close off depth 아래에까지 미치는 영향에 대해 추론할 수 있는 가능성을 제시한다.

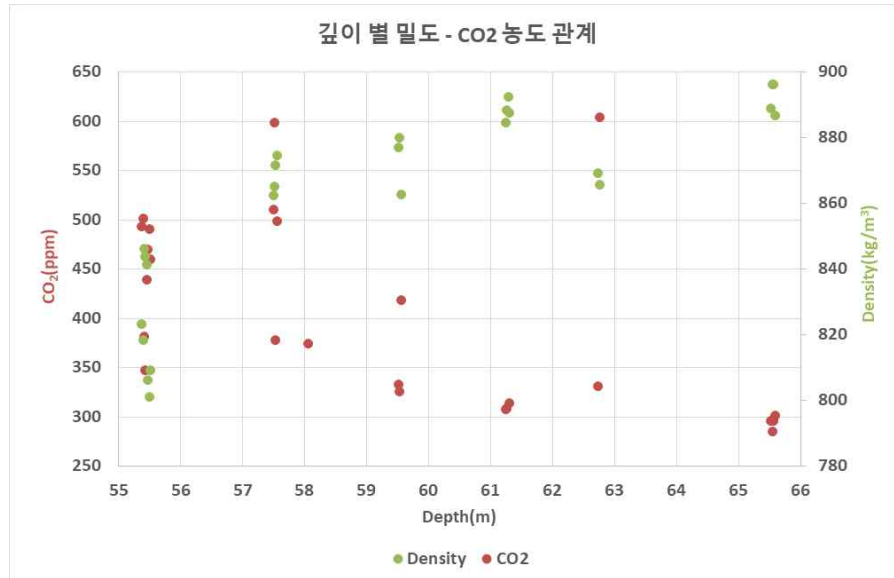


그림 17. 깊이에 따른 CO₂ 농도와 밀도를 나타낸 그래프.

밀도는 깊이가 깊어질수록 증가하는 경향성이 있었던 반면, 온실기체 농도는 깊이에 따라 감소함을 확인할 수 있었다(그림 17). 그러나, closed pore 속의 공기를 추출하여 CO₂ 농도를 측정된 결과는 open pore 속 편 공기의 CO₂ 농도보다 훨씬 높은 값을 보였다. 실제로 측정된 CO₂의 농도는 현생대기 값(약 400 ppm) 이상의 분포를 가지는 것도 있었기 때문에 시추 후에 배경값보다 CO₂ 농도가 높은 공기의 영향을 받았을 가능성이 있다. 그렇다 해도 CO₂ 농도는 밀도와 대략적으로 반대의 경향을 보이기 때문에 이 분석결과는 향후 close off 되는 과정을 이해하는 데 도움이 될 수 있다.

(2) 편층 밀도 변화에 따른 CH₄ 변화의 상관관계 분석

밀도에 따른 공기방울의 포집과정을 알아내기 위해 CH₄ 농도를 분석했다. 스틱스 빙하 코어에서 lock-in zone은 대략 52-65 m인데, lock-in depth인 52 m 인근에서는 공기의 양이 적고, close off depth인 65 m 부근에서는 밀도변화가 크지 않아서 측정이 어렵다는 문제점이 있었다. 따라서, 측정 가능할 정도 이상의 공기함량을 보유하면서 밀도 변동성이 잘 보이는 구간으로 61-62 m 구간을 분석했다. 분석 결과, 61.7-62.0 m 구간에서는 밀도와 메탄 농도가 서로 반비례하는 것이 보였으나, 그보다 상부인 61.3-61.7 m에서는 메탄 농도의 뚜렷한 변화가 보이지 않았다(그림 18). 마찬가지로 총공기함량도 61.7 - 62.0 m 구간에서 밀도의 경향성과 잘 일치했다. 메탄의 농도와 총공기함량은 서로 거울쌍대칭을 보였고, 이는 이전 분석에서도 관찰된 결과이다.

메탄 농도를 이전 실험 결과와 비교해보면, 전체적인 깊이에 따른 추세는 일치했지만, 1200 ppb 이상의 몇 구간에서는 추세보다 더 높은 편이었다. 이를 post-coring 효과에 의한 오염으로 볼 수도 있지만, 만약 그러한 오염이 있었다면 농도의 증가는 200 ppb보다 낮을 것으로 예상된다. 또한, CO₂ 측정 결과 보인 배경값 이상의 post-coring 오염은 메탄에서는 크게 관찰되지 않았다.

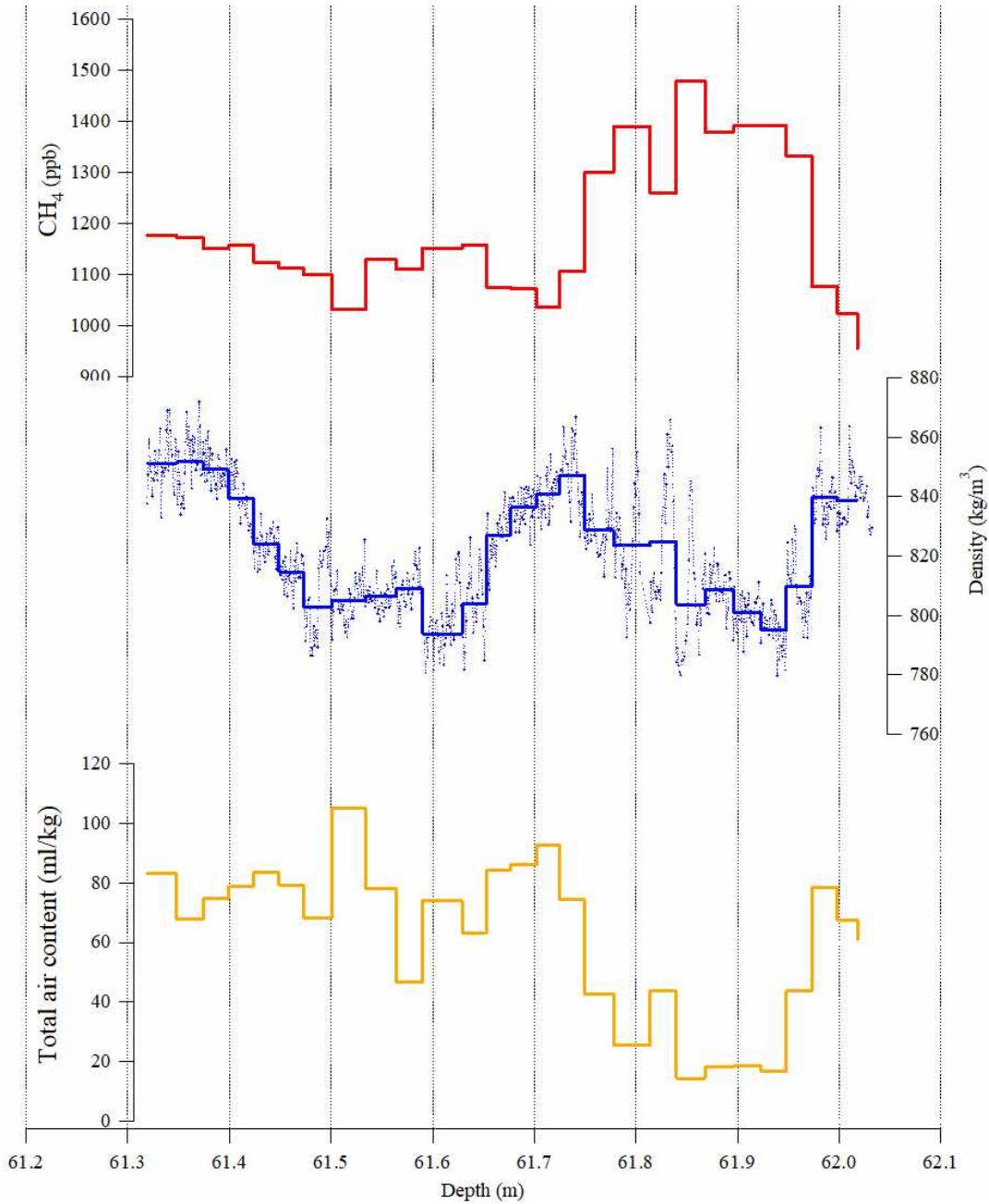


그림 18. 깊이 별 총공기함량(노란색), 밀도(파란색), 메탄 농도(빨간색)를 나타낸 그래프.

다. 편층 공기함량과 온실기체 농도간의 2차 비교

(1) 메탄 농도, 공기함량과 밀도와의 상관성 비교

Close off depth (64.8 m) 부근의 빙하 코어에 대해 습식 추출법으로 메탄과 공기함량을 측정했고, 같은 깊이의 다른 코어를 이용하여 고해상도 밀도 측정을 했다 (그림 19). 그 결과 메탄의 농도와 공기함량은 그림 8과 마찬가지로 거울쌍 대칭을 보였고, 밀도와 비교했을 때 공기함량은 비례, 메탄의 농도는 반비례 관계를 보였다. 특히, 65.25 m에서 메탄의 농도가 급격하게 증가하는데 이는 밀도와 공기함량의 급감과 일치한다고 볼 수 있다.

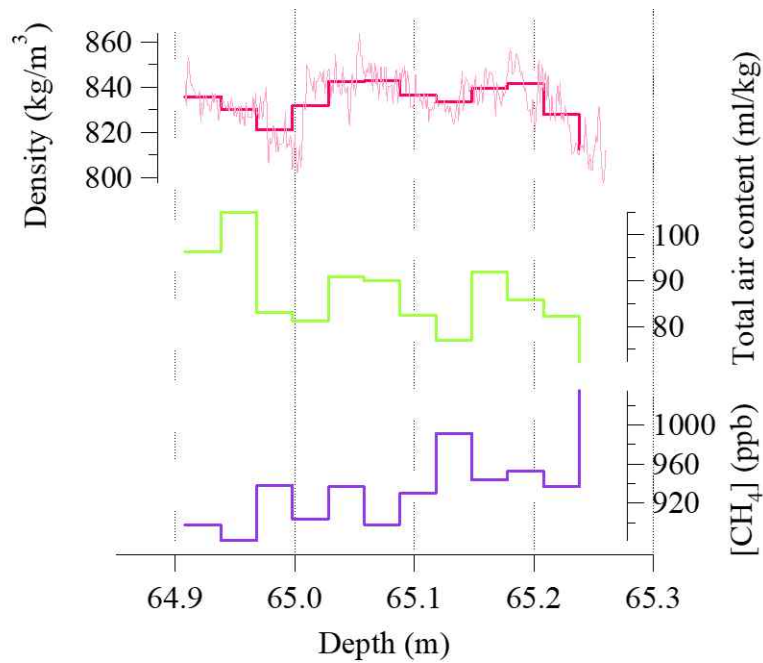


그림 19. Close off depth 인근에서 메탄농도(보라색), 공기함량(연두색), 밀도(분홍색)를 측정하는 것이다. 밀도는 1 mm 점을 3 cm 간격으로 평균했다.

(2) 밀도에 따른 공기의 포집 과정에 대한 이해

밀도가 높을수록 편 안에 존재하던 open pore는 더 일찍 closed 된다. 즉, 편에서는 높은 밀도층과 낮은 밀도층이 수 cm 간격으로 배열되어 있는데 밀도가 높은 층에서는 방울이 일찍 포집되어 공기함량이 높다. 일찍 포집된 공기는 더 오래된 연령의 공기이므로 온실기체 농도로 봤을 때는 더 낮은 농도를 보이게 된다(왜냐하면 온실기체 농도는 지난 수 백년 동안 인간 활동에 의해 꾸준히 증가해왔다.). 반대로 밀도가 낮은 층은 더 늦게 공기 방울이 포집되어 낮은 공기함량을 갖고 비교적 최근의 공기가 포함되어 있어서 온실기체 농도는 높다.

라. Firn air sampling 장치 보완 및 제작

(1) Firn air 보관용 유리플라스크 또는 Silcocan Canister 제작 및 구성

펌프장비를 이용하여 획득한 편 공기를 보관하기 위해서는 전용 용기가 필요하다. 2014-2015 Styx 지역에서 동일한 깊이에서 유리플라스크와 Silcocan Canister (스테인리스 재질 용기)에 편 공기 샘플링을 하였고, 두 경우의 이산화탄소 및 메탄의 농도 차이가 오차범위 내에 크지 않았던 것을 통해 재질에 따른 기체 성분 변화가 없다는 것을 알 수 있었다. 이에 추가적인 편 공기 샘플링을 위해 이전 샘플링으로 최적화된 디자인의 3 L 유리플라스크를 주문제작하였다(그림 20).



그림 20. 주문제작한 3 L 유리플라스틱.

(2) 깊이 3 cm 이내의 해상도를 갖는 빙하표면 밀도측정장비 제작

기존의 밀도측정장비의 깊이 해상도는 10 cm였기 때문에 수 cm의 두께의 밀도층을 구별하기 힘들었다. 그렇기 때문에 해상도를 높인 밀도측정장비 제작을 위해 도면을 그렸고, 정밀 제작업체에 주문 및 제작했다(그림 21, 22). 향후 연구지역에서는 3 cm의 해상도를 갖는 밀도측정장비를 통해 표면부터 약 2 m까지 밀도가 높은 층과 낮은 층을 구별할 수 있을 것으로 기대한다.

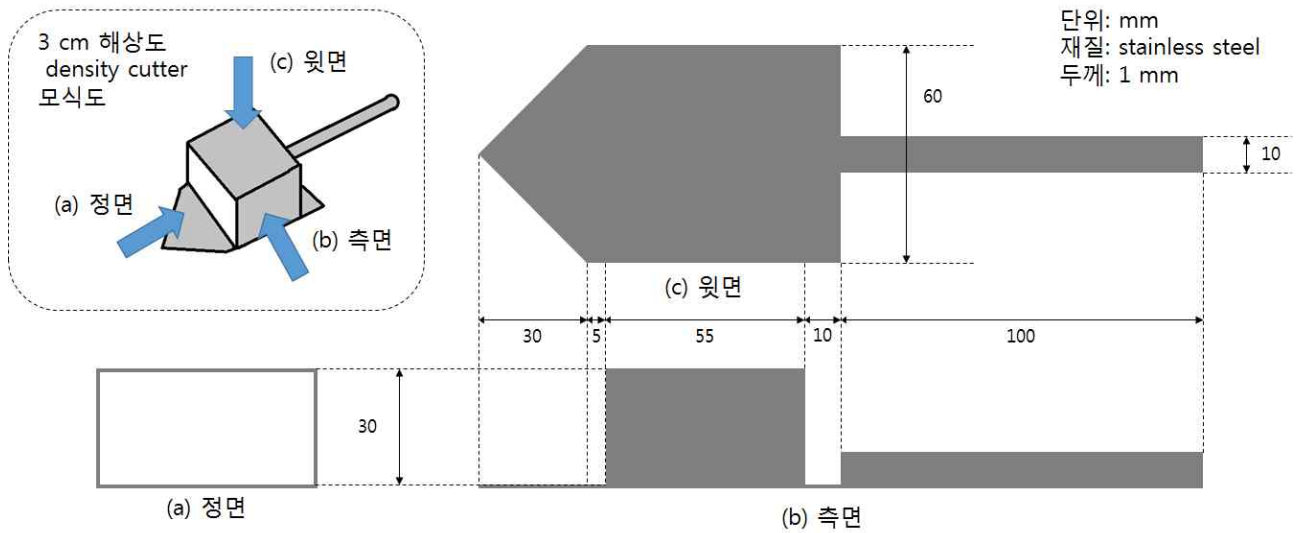


그림 21. 3 cm 해상도의 밀도측정장비 모식도와 설계도.

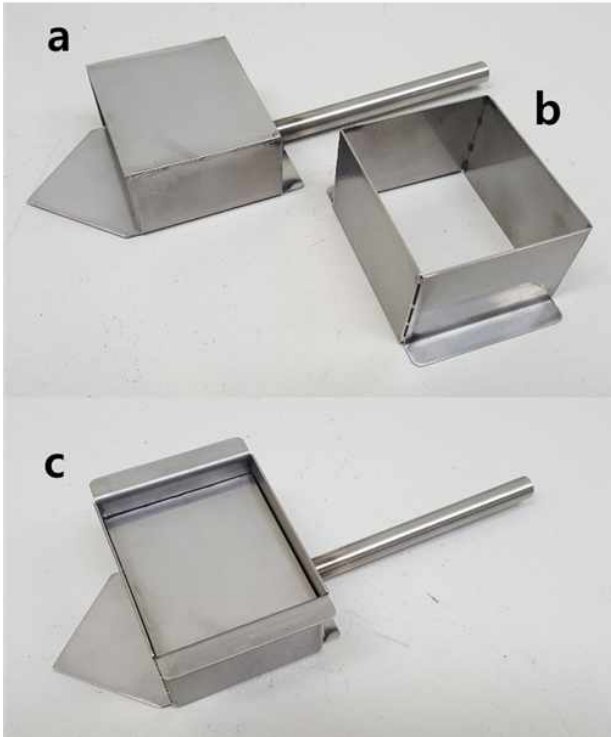


그림 22. 설계도를 바탕으로 제작된 밀도측정장비. a와 b를 결합하면 c처럼 된다.

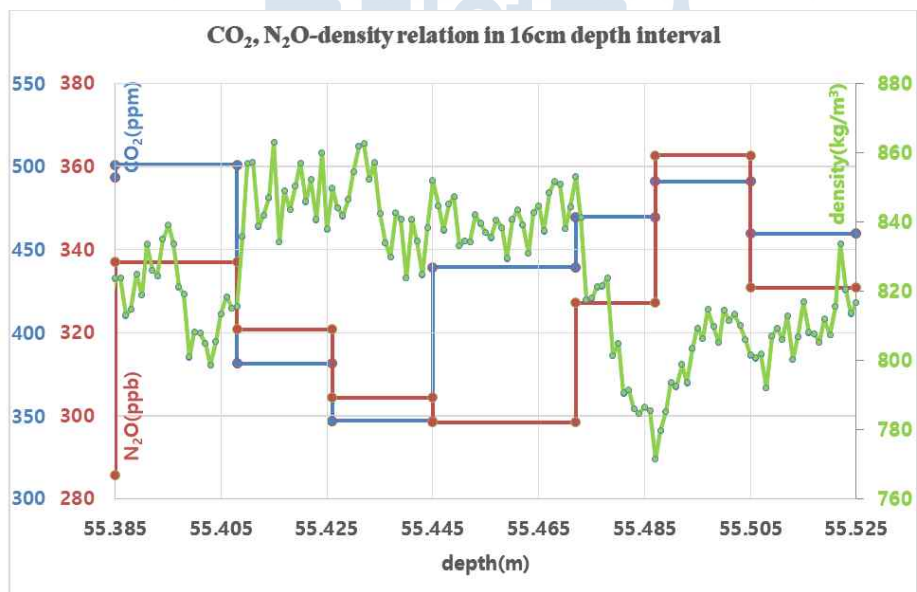


그림 23. 밀도와 CO₂ 및 N₂O의 농도 상관관계. 일반적으로 반비례 관계에 있다.

3. 3년차 연구결과

성과목표	세부목표	구체적인 내용
모델을 이용한 측정자료 해석 및 기체 포집과정에 대한 연구 (2019년도)	온실기체 3종(CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)의 보존성 확인	Lock-in zone에 해당하는 firm ice의 closed porosity에 분포하는 온실기체 3종(CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)의 농도 측정결과 cm규모에서 농도에 있어서의 변화가 관찰되었으며, 일반적으로 농도와 밀도(또는 air content)는 반비례 관계에 있는 것으로 확인(그림 24,25,26 참조)
	신뢰할 만한 온실기체 농도에 대한 연령 복원	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O 중에서 CH ₄ 을 이용한 연령복원이 가장 신뢰할 만한 것으로 판단되었다.
	Lock-in zone 안에서의 연령분포 변화 확인	CH ₄ 을 이용하여 연령을 측정한 결과(그림 27 참조), firm air보다도 연령이 적은 것이 관찰되었다. 이것은 시추 후에 현대의 공기가 유입되어 오염된 것으로 판단되었다. 그림에도 불구하고, 모델에 의한 closed pore에서의 연령보다 훨씬 큰 연령이 확인되었으면, 이것은 Lock-in zone에서 cm 규모에서도 다양한 기체연령이 존재할 수 있음을 시사한다.
	밀도층 변화에 따른 기체 평균연령 변화 이해	밀도층 변화에 따른 closed porosity에서의 연령과 open porosity에서의 연령은 깊이에 따라서 줄어들게 된다. 왜냐하면, open porosity의 공기가 계속해서 더해지기 때문이다. 이러한 문제를 구별하기 위하여, 공기함량을 고려한 full closed-off 깊이에서의 closed porosity의 기체연령과 open porosity의 연령차이 (age difference)를 계산하였다(그림 28).
	밀도가 점이적으로 변화는 경우와 불균질하게 변화는 경우 비교	시료 보관 동안 open porosity가 닫히면서 현대 공기를 포집하여 오염될 수 있다는 가정을 검증하기 위하여, open porosity와 age difference를 비교한 결과, 가정을 지지하는 결과값을 획득하였다(그림 29). 밀도가 점이적으로 변한다면 모델결과에 의해서 그림4와 같이 일정하게 증가하여야 하지만, 실제 관측값은 넓은 분포를 보인다(그림 27과 그림 29).

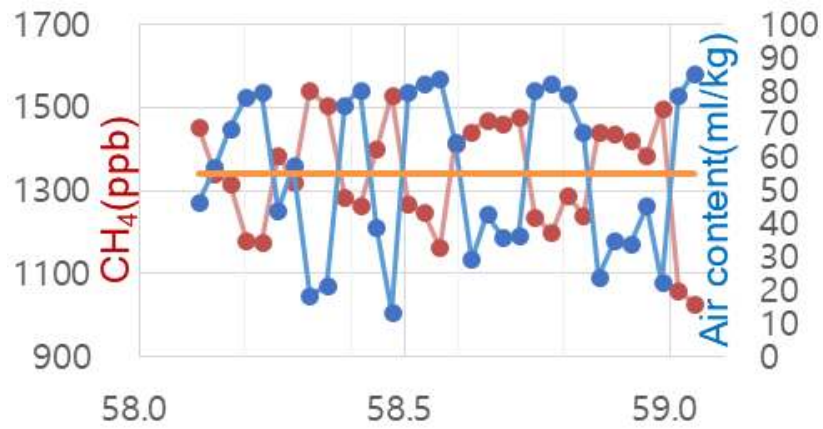


그림 24. 메탄(CH₄) 농도와 closed porosity의 지시자인 air content와의 관련성

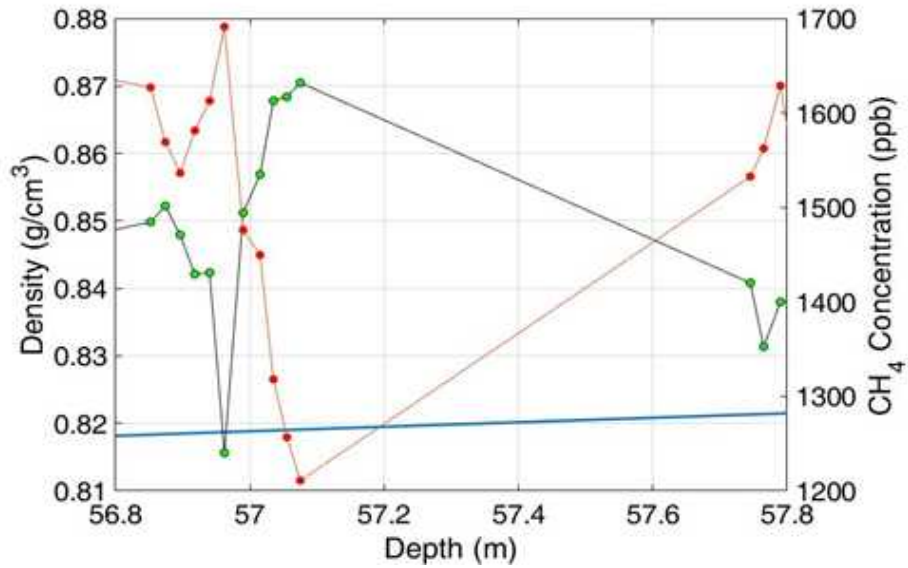


그림 25. 메탄(CH₄) 농도와 밀도(density)와의 상관성

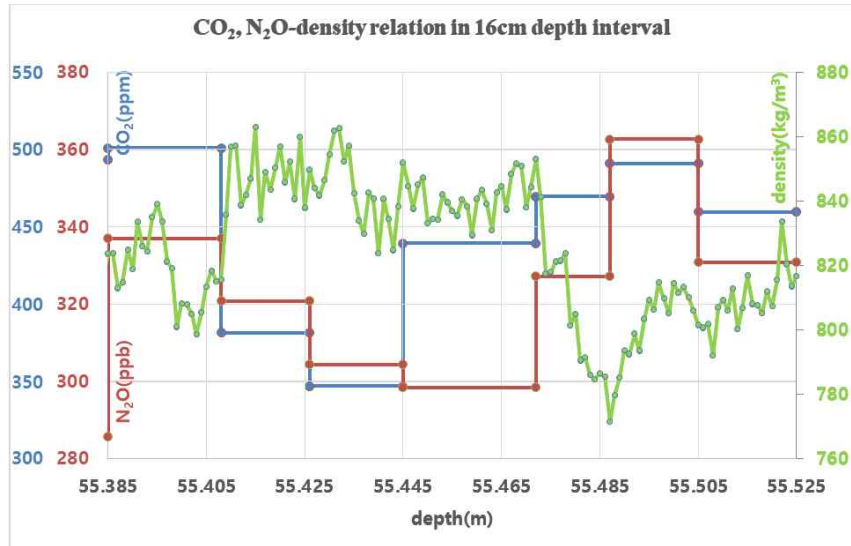


그림 26. 밀도와 CO₂ 및 N₂O의 농도 상관관계. 일반적으로 반비례 관계에 있다.

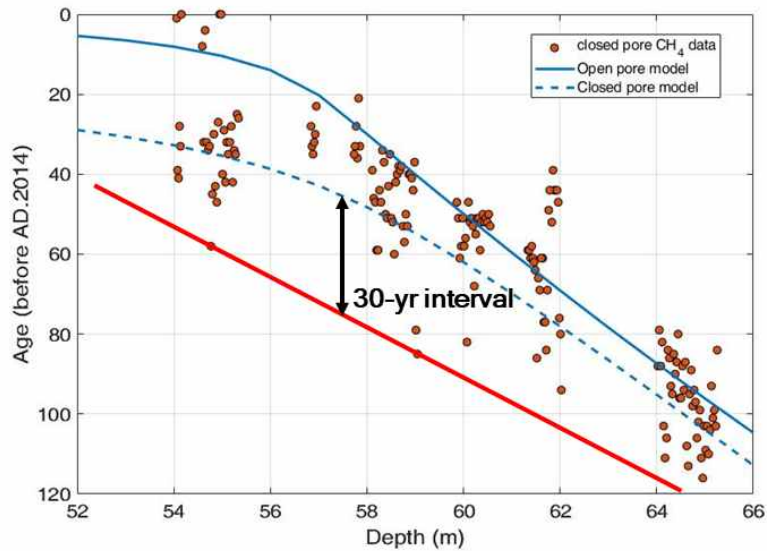


그림 27. open porosity, closed porosity에 존재하는 메탄농도를 이용한 연령비교. 빨간색 점은 closed porosity에 포집된 공기에서의 메탄농도 측정자료. 파란색 선과 파선은 각각 측정된 firn air 자료와 모델에 의해 예상되는 closed porosity에서의 메탄 농도 연령을 나타낸다. 빨간색선은 가장 연령이 오래된 결과를 연결한 선이다. firn air의 연령보다 더 작은 연령을 나타내는 closed porosity메탄 자료는 시료 보관동안 오염된 것임을 직접적으로 지시한다.

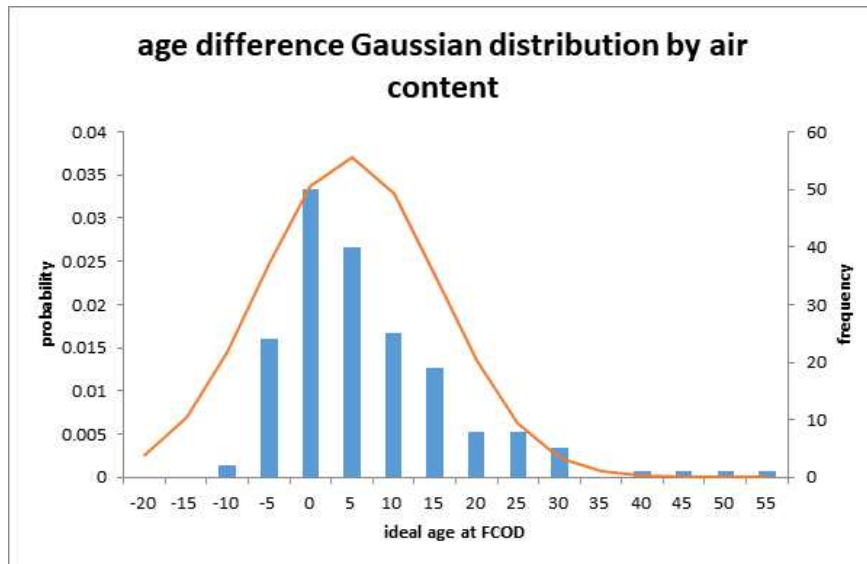


그림 28. full closed-off 깊이에서의 closed porosity와 open porosity의 기체연령 차이(age difference) 분포확률. 파란색막대선은 측정자료를 바탕으로 한 것이다. 음수는 시료들이 현대의 공기에 의해서 오염되었음을 시사한다.

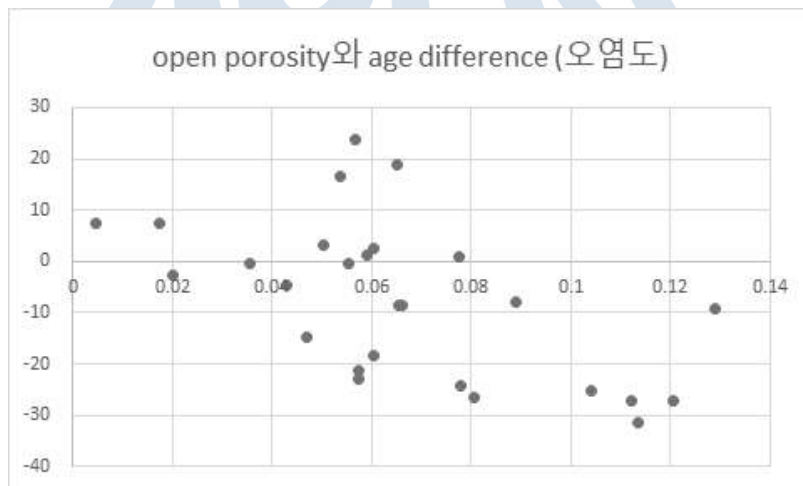


그림 29. open porosity와 age difference의 관계. open porosity가 커질수록 age difference가 감소하는데, 이것은 open porosity가 클수록 현대 대기에 의한 오염도가 커질 것이라는 가정을 지지한다.

제 4 장. 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

1절. 연구개발목표 달성도

성과목표	세부목표	달성 주요내용	달성도(%)
Firn에서의 온실기체 거동 모델 개발	1-1 ○ 편층 공기함량 1차 분석	- 습식추출법을 이용한 총공기함량 분석 - Styx빙하 상부 눈층의 물리적 불균질성 관찰 - 눈층에 대한 밀도 측정	100%
	1-2 ○ 편층 온실기체 농도변화 1차 분석	- 편층 공기함량과 CH ₄ 농도 비교 후 상관관계 분석 - Lock-in zone에서의 편밀도 비교	100%
	1-3 ○ 편층 공기함량과 온실기체 농도간의 1차 비교	- 편코어 속 메탄의 농도를 연령으로 변환 - 편코어 분석 결과를 이용한 Lock-in depth 계산 - 편공기 이동 모델(Firn air transport model)을 이용하여 구한 공극률과 비교	100%

성과목표	세부목표	달성 주요내용	달성도(%)
편층에서 물리적 성질과 온실기체 농도변화와의 상관성 심화연구	2-1 편층 공기함량 2차 분석	- 습식추출법을 이용한 총공기함량 분석 - 밀도와 공기함량 간의 상관성 비교	100%
	2-2 편층 CH ₄ , CO ₂ 농도변화 2차 분석	- Lock-in zone의 고해상도 밀도 추가 측정 - 편층 밀도 변화에 따른 CO ₂ 변화의 상관관계 분석	100%
	2-3 편층 공기함량과 온실기체 농도간의 2차 비교	- 메탄 농도, 공기함량과 밀도와의 상관성 비교 - 밀도에 따른 공기의 포집 과정에 대한 이해	100%
	2-4 Firn air sampling 장치 보완 및 제작	- Firn air 보관용 유리플라스크 또는 Silcocan Canister 제작 및 구성 - 깊이 3 cm 이내의 해상도를 갖는 빙하표면 밀도측정장비 제작	100%

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
편층에서 물리적 성질과 온실기체 농도변화와의 상관성 심화연구	3-1	편층 불균질성이 기체 연령분포에 미치는 영향 평가	<ul style="list-style-type: none"> - 온실기체 3종(CO₂, CH₄, N₂O)의 보존성 확인 - 신뢰할 만한 온실기체 농도에 대한 연령 복원 - Lock-in zone 안에서의 연령분포 변화 확인 	100%
	3-2	편층 불균질성이 기체 평균연령에 미치는 영향 평가	<ul style="list-style-type: none"> - 밀도층 변화에 따른 기체 평균연령 변화 이해 - 밀도가 점이적으로 변화는 경우와 불균질하게 변화는 경우 비교 	100%

2절. 연구개발 대외기여도

1. 학술적/경제적 파급효과

가. 빙하코어의 얼음 및 공기방울 내의 기체에 대한 연령측정 및 분포 설정에 사용
나. 기존 빙하코어 온실가스 자료의 분해능 및 실제 변화 속도 복원 기술에 활용가능
다. 최근 약 100년 간, 대기 극미량 기체중 농도 및 동위원소비 변화 연구에 기여
라. 자연적, 인위적 온실기체 농도 변동성에 대한 정량적 이해에 기여
마. 눈 밀도 변화에 대한 후속 연구에 기여 가능

2. 학술지 게재(2017-2019)

- Soon Do Hur and Jinho Ahn, Paleoclimate study using blue ice in Antarctica, *Journal of the Geological Society of Korea*, vol. 53, 597-608 (2017)
- Youngjoon Jang, Yeongcheol Han, Yeongjun Ryu, Jangil Moon, Hyeon-Tae Ju, Ji-Woong Yang, Hun-Gyu Lee, Seong Joon Jun, Joohan Lee, Soon Do Hur, Jong Ik Lee, Jinho Ahn, A preliminary study for blue ice in Victoria Land, East Antarctica, *Journal of the Geological Society of Korea*, vol. 53, 567-580 (2017)
- Ji-Woong Yang, Yeongcheol Han, Anais Orsi, and Jinho Ahn, Surface temperature in twentieth century at the Styx Glacier, northern Victoria Land, Antarctica, from borehole thermometry, *Geophysical Research Letters*, (2018)
- Youngjoon Jang , Sang Bum Hong, Christo Buizert, Hun-Gyu Lee, Sang-young Han, Ji-Woong Yang, Yoshinori Iizuka, Akira Hori, Yeongcheol Han, Seong Joon Jun, Pieter Tans, Taejin Choi, Seong-Joong Kim, Soon Do Hur and Jinho Ahn , Very old firm air linked to strong density layering at Styx Glacier, coastal Victoria Land, East Antarctica, *The Cryosphere*, 13, 2407-2419 (2019)

3. 학술회의 발표(2017-2019)

Youngjoon Jang, Jinho Ahn, Hun-Gyu Lee, Christo Buizert, Sangbum Hong, Yeongcheol Han, Seong Joon Jun, and Soon Do Hur, Variations of methane concentration in the firm by

- physical properties, 2017 Annual Fall Joint Geology Meeting, Jeju, October 25-28, 2017 (oral).
- Youngjoon Jang, Jinho Ahn, Christo Buizert, Hun-Gyu Lee, Sangbum Hong, Yeongcheol Han, Seong Joon Jun, and Soon Do Hur, 90-year-old firn air from Styx Glacier, East Antarctica, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2017, December 13, 2017, New Orleans, USA.
- Youngjoon Jang, Jinho Ahn, Hun-Gyu Lee, Christo Buizert, Sangbum Hong, Yeongcheol Han, Seong Joon Jun, Soon Do Hur, Yoshinori Iizuka, Akira Hori, and Pieter Tans, 90-year-old firn air and variable snow density layers at Styx glacier, East Antarctica, 2018 Korean Annual Fall Joint Geology Meeting, Gyeongju, October 24-27, 2018
- Sang-Young Han, Yoshinori Iizuka, Akira Hori, and Soon Do Hur, Inhomogeneous greenhouse gas concentration distributions due to snow density layer in the firn, 2018 Korean Annual Fall Joint Geology Meeting, Gyeongju, October 24-27, 2018 (oral).
- Ji-Woong Yang et al., Recent temperature changes inferred from Styx Glacier (northern Victoria Land), Antarctica by borehole thermometry, The 1st Korea Geoscience Union, May 9-11, 2018, Hongcheon, South Korea (oral)
- 장영준 외, 남극 스틱스 빙하의 90년 된 편 공기와 높은 변동성의 밀도 층, The 1st Korea Geoscience Union, May 9-11, 2018, Hongcheon, South Korea (poster)
- Sangyoung Han, Jinho Ahn, Youngjoon Jang, Soon Do Hur, Inhomogeneous greenhouse gas concentration distributions due to snow density layer in the firn at Styx, Antarctica, ISAES 2019, 19-21 July, Seoul, Korea (oral)
- Sangyoung Han, Jinho Ahn, Youngjoon Jang, Yoshinori Iizuka, Akira Hori, Soon Do Hur, Firn ice density layers and inhomogeneity of atmospheric greenhouse gas concentrations in ice cores records: Case studies with Styx glacier, East Antarctica, 2019 2nd KGU meeting, 3-5 July, Pyeongchang, Korea (oral)
- Youjeoung Yang, Jinho Ahn, HyeonTea Ju, Sangyoung Han, Sangbeom Hong, Chang Hee Han, Soon do Hur, Preliminary study for geophysical and geochemical characteristics of blue ice in Larsen Glacier, East Antarctica, 2019 International Association of Cryospheric Sciences (IACS) meeting, July 8-13, 2019 (poster)
- Sang-young Han, Jinho Ahn, Youngjoon Jang, Yoshinori Iizuka, Akira Hori, Soon Do Hur, Inhomogeneous greenhouse gas concentration distributions due to density layer in the firn ice cores records: Styx glacier, East Antarctica, The 74th Annual Meeting of the Geological Society of Korea and 2019 Fall Joint Conference of the Geological Sciences, October 23-26, Jeju, Korea (poster)
- Gi-yoon Lee, Jinho Ahn, Hyuntae Joo, Sang-young Han, Youngchul Han, Sangbeom Hong, Chang Hee Han, Soon Do Hur, Characterization of blue ice in Larsen Glacier, Antarctica, The 74th Annual Meeting of the Geological Society of Korea and 2019 Fall Joint Conference of the Geological Sciences, October 23-26, Jeju, Korea (oral)

Heterogeneous distributions of greenhouse gas concentration in snow layers of Styx Glacier, East Antarctica, Sang-young Han, Jinho Ahn, Soon Do Hur, Yoshinori Iizuka, AGU Fall meeting, December 10, 2019



제 5 장. 연구개발결과의 활용계획

1절. 추가연구의 필요성

스틱스 편 빙하코어에서 높은 밀도변동성이 관찰되었다. 이는 표면에서 관찰되는 눈의 층상 구조와도 일치한다. 이런 층상구조는 보통 계절적인 변화에 따라 겨울에 밀도가 높은 층이 만들어진다고 알려져 있다. 그러나, 스틱스 지역에서 계절적인 변동보다 더 빈번하게 발생하는 층의 주기성은 계절적 변동 이외에 다른 요인이 존재한다는 것을 보여준다. 따라서 향후 연구에서는 이러한 층상구조의 원인을 밝히기 위한 노력이 필요하다.

2절. 타연구에의 응용

편 공기 연구는 빙하코어를 이용한 고기후 해석에 기초자료로써 사용된다는 점에서 모든 빙하코어 연구에서 반드시 동반해서 수행해야 하는 연구이다. 특히 빙하 속 기체 분석 관점에서 보면, 기체의 연령을 규명하고, 어느 정도의 연령 범위를 보이는지 이해하는 데 편 공기 연구가 활용될 수 있다.

본 과제에서 진행된 연구는 전 세계적으로 이러한 활용도 면에서 중요시 생각하고 있으나, 분석 방법의 어려움 등의 이유로 쉽게 접근하지 못한다는 특징이 있다. 서울대학교 빙하/고기후 연구실은 이미 검증된 빙하코어 기체 추출 및 분석 장비를 통해 주요 온실기체인 CO₂, CH₄, N₂O를 정확하게 측정할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구는 편에서 밀도 불균질성에 따른 공기의 포집과정을 이해하고 편공기 모델 개선하는데 필요한 후속 연구에 기여할 것으로 기대된다.

극지연구소

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).
- 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).
- 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).
- Yeongeol 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)
- Hörhold, M. W., Kipfstuhl, S., Wilhelms, F., Freitag, J., Frenzel, A. The densification of layered polar firn. *Journal of Geophysical Research* (2011)
- Hori, A., Tayuki, K., Narita, H., Hondoh, T., Fujita, S., Kameda, T. Shoju, H., Azuma, N., Kamiyama, K., Fuji, Y., Motoyama, H., Watanabe, O. A detailed density profile of the Dome Fuji (Antarctica) shallow ice core by X-ray transmission method. *Annals of Glaciology*, 29(1), 211-214 (1999).
- Mitchell, Logan E., Buizert, Christo, Brook, Edward J., Breton, Daniel J., Fegyveresi, John, Bagginstos, Daniel, Orsi, Anais, Severinghaus, Jeffrey, Alley, Richard B., Albert, Mary, Rhodes, Rachael H., McConnell, Joseph R., Sigl, Michael, Maselli, Olivia, Gregory, Stephanie, Ahn, Jinho, Observing and modeling the influence of layering on bubble trapping in polar firn, *Journal of Geophysical Research* (2015)
- Rhodes, R. H., Fain, X., Stowasser, C., Blunier, T., Chappellaz, J., McConnell, J. R., Romanini, D., Mitchell, L. E., Brook, E. J., Continuous methane measurements from a late Holocene Greenland ice core: atmospheric and in-situ signals, *Earth Planet. Sc. Lett.*, (2013)
- 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).

Ji-Woong Yang, Jinho Ahn, Edward J. Book and Yeongjun Ryu, Atmospheric methane control mechanisms during the early Holocene, *Climate of the Past*, doi:10.5194/cp-2016-75 (2017)



#별첨1 : 2018/19 남극 Tourmaline Plateau 하계 탐사 준비 세부사항

1. 편공기 채취의 필요성

2014/15 시즌 탐사를 진행하여 편 공기 샘플링 및 얼음코어 시추작업을 진행했던 장소는 74°03' S 163°85' E 에 위치하고, 고도는 1218m의 Styx glacier 였다(그림 1). 2014/15 시즌 탐사 직후 편 공기의 질소동위원소, CO₂, CH₄ 등 온실기체 농도 측정은 이루어졌지만 얼음 샘플에 대한 밀도측정이 즉각적으로 이루어지지 못하고 closed pore 안에 포집된 기체 측정을 비롯한 얼음 샘플 자체에 대한 연구가 미진하였다. 그 결과 2년 후부터 본격적인 CH₄를 시작으로 CO₂, N₂O 측정이 이루어졌으나 실험 결과로 미루어볼 때 post coring 효과로 인한 시추 이후 오염효과가 매우 커서, Lock-in zone, 특히 Lock-in depth에 가까운 상부 Lock-in zone에서의 외부 공기로 인한 해석의 불안정성이 증대되는 것으로 나타났다(그림 2).

그리하여 2019년 천부 빙하코어를 이용한 미량기체 거동 정량적 연구 3년차를 맞이하기 전, 오염이 안 되어있는 상태 본연 그대로 보존되어 Lock-in zone closed pore의 온실기체만을 온전히 측정할 수 있는 샘플 확보의 필요성이 대두되었다. 기존 샘플의 일부는 이미 open pore를 통해 현생 대기가 시추 이후 추가적으로 유입되며 활발한 승화 작용 등으로 새롭게 갠히게 되어 기존 closed pore에 포집된 공기를 정확하게 측정하기 어렵게 오염된 상태로 여겨진다.

지난 탐사의 의의는 국내 최초로 시도된 편 공기 채집 탐사라는 점에서 그 의미가 있었으며, 스위스, 미국 등 이미 편 공기 포집 장비를 개발하여 선행 연구를 수행하고 있던 여러 선진국들의 선례를 참고하여 국내 탐사에 적합한 독자적인 여러 장비(편 공기 채집 펌프 시스템, 유리 플라스크, 블래더 튜브 등)들을 고안하여 이상 없이 시추 후 샘플링 및 분석까지 이루어졌다는 점에서 큰 성과를 거두었다고 볼 수 있다. 이러한 편 공기 채집을 통해 온실기체를 비롯한 미량기체 농도 복원 및 연령 측정은 기후변화를 이해하고, 더 나아가 고해상도 밀도측정을 통한 밀도 별 온실기체 농도 차의 영향성에 대해 분석하는 것은 천부 빙하 샘플에만 국한되는 것이 아닌 Lock-in zone 하부의 심부 빙하에 대한 이해도 역시 한 단계 향상시킬 수 있는 초석이 되는 연구라고 할 수 있다. 그러나 이러한 의의를 가진 중요한 연구임에도 불구하고 open pore 의 post coring 효과에 의한 오염이 진행되었으므로, 이에 대한 원인을 분석하고 정확한 분석 값을 도출해 내기 힘든 상부 Lock-in zone 시료를 비롯한 편 층의 얼음 샘플을 다시 채취하여, 이를 올바르게 파악하여 이전 연구의 단점을 보완하고 그 중요성과 의의를 퇴색되지 않게 하는 후발 과제가 필연적으로 요구되는 상황이다.

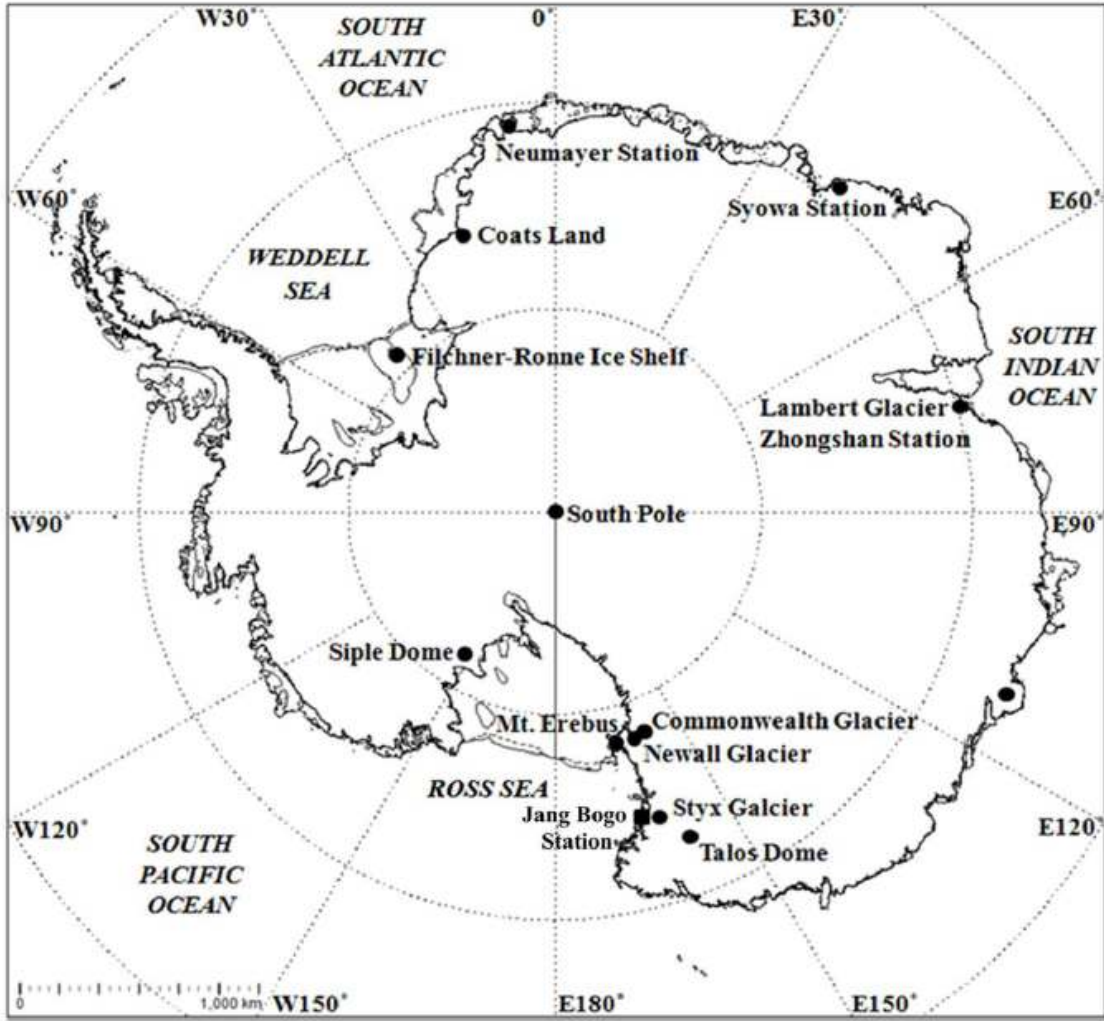


그림 1. 장보고 기지(74°37'S/164°13'E)와 Styx glacier(74°03' S/163°85' E)

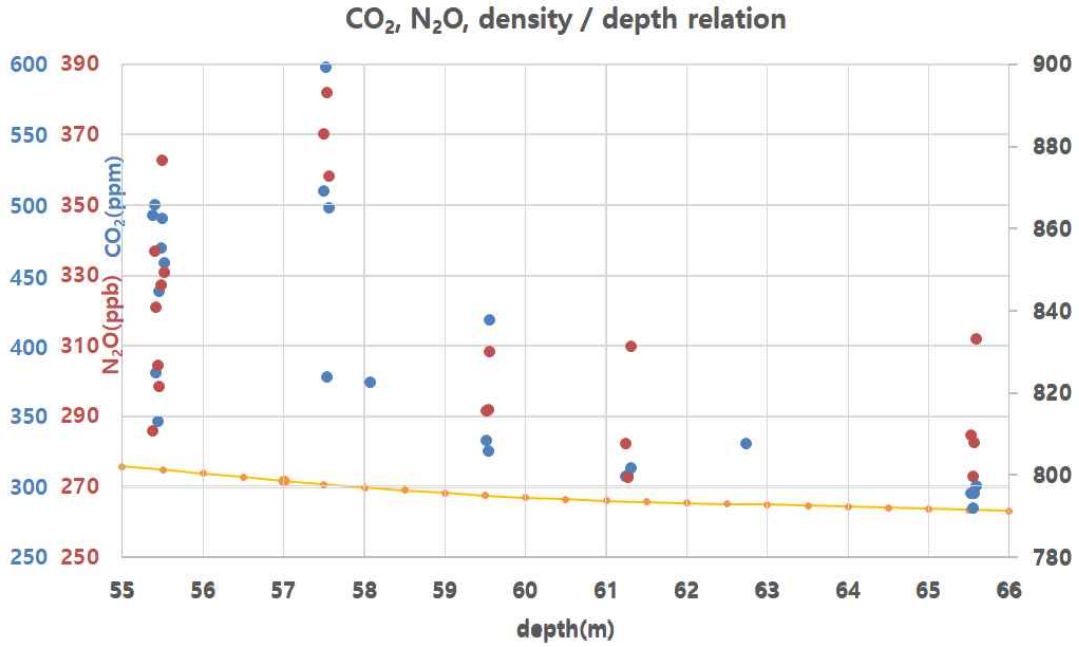


그림 2. 2014/15 Styx glacier에서 시추한 얼음 샘플의 Lock-in zone에서의 CO₂ 농도(파란색), N₂O 농도(빨간색) 분석자료. closed pore의 기체와 현장에서 바로 측정된 open pore의 CO₂ 농도(노란색)를 비교해보면 Lock-in zone의 상부 Lock-in depth 근처로 다가갈수록 차이가 커지고, Close-off depth로 다가갈수록 그 차이가 줄어드는 것을 확인할 수가 있다.

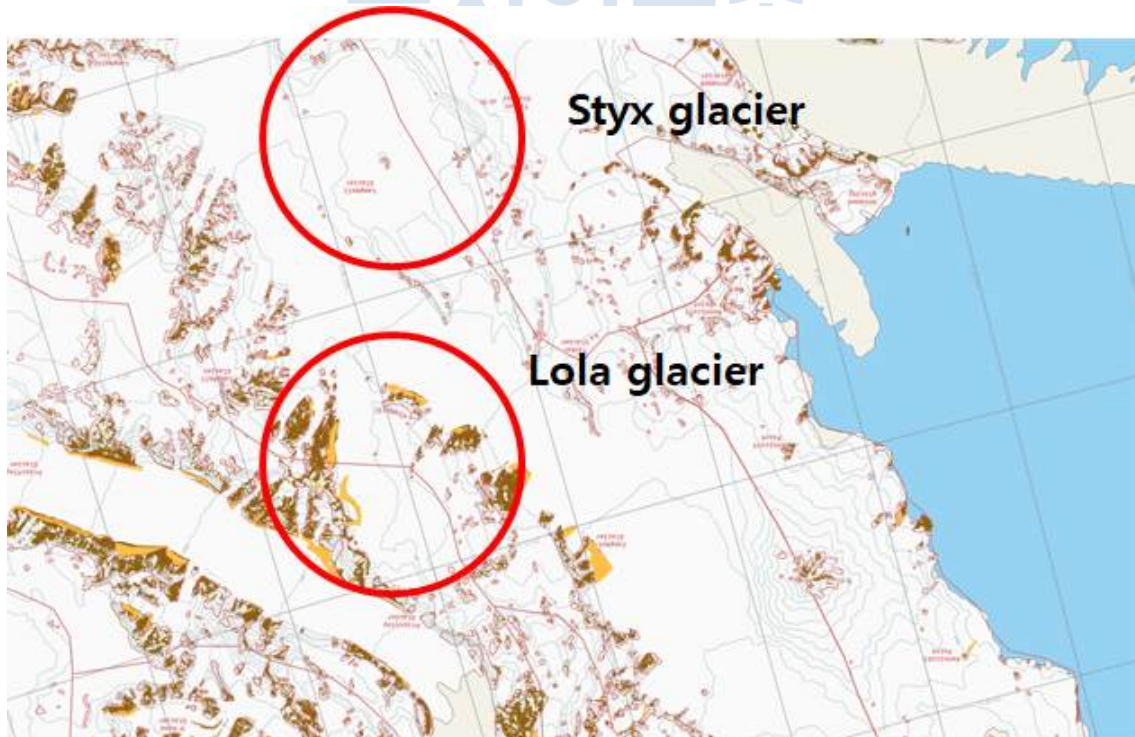


그림 3. 2014/15 하계탐사를 진행한 Styx glacier와 새로운 샘플을 시추하기 위해 진행되는 2018/19 하계탐사 장소인 Tourmaline plateau가 포함된 Lola glacier.

2. 향후 firn 시료 샘플링 개선방향

향후 진행될 편층 빙하 샘플 시추 탐사가 2014/15 Styx glacier 탐사와 차별화 되는 점은 바로 빙하 샘플 시추 후 post coring 을 막는 것이 최대 관건으로 떠올랐다는 점이다. 올바른 자료해석을 동반하기 위해서는 얼음 샘플을 시추하기 전 그 상태 그대로 실험실로 가지고 오는 것이 가장 이상적인 방법인데, 이를 위해 현재까지 진행되던 비닐에 넣은 후 스테이플러로 입구를 막고 운반하던 일반 포장 방식에서, 현장에서 시추하자마자 바로 공기와의 접촉을 차단하는 진공포장방식을 새로이 고안하였다(그림 4, 그림 5).

이러한 진공포장이 성공적으로 진행된다면, 현생 대기와의 접촉을 막아 open pore가 시추 후 승화 등 다른 작용에 의해 closed 되더라도, 이 안에 포집되는 공기가 없을 것이므로 얼음 시료 내에 존재하는 공기 함량, 온실기체 농도 등에 영향을 주지 않고 올바른 결과 값을 구할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 시추 후 얼음 샘플의 open pore에 현생 대기가 갇히는 post coring 효과가 일어나는 기간을 유추해본다면, 그림 18과 같이 Lock-in depth 근처에서의 CO₂ 농도가 500ppm 이상까지 치솟는 것을 확인할 수 있다. CO₂, N₂O 두 온실기체 모두 현생대기보다 높은 값을 보이는 결과도 존재해 시추 후 시료가 오염되었음을 간접적으로 알려준다. 또한, 상대적으로 open pore가 많은 저밀도층에서 더욱 현생대기 온실기체 농도의 영향을 받은 것으로 미루어 볼 때, post coring이 서서히 이루어졌음을 알 수 있다. 이러한 CO₂ 농도는 현장에서의 남극 현생 대기의 CO₂ 농도는 물론 북반구의 현생대기 CO₂ 농도인 약 400 ppm조차 훨씬 웃도는 수치로서, 간접적으로 post coring이 단순히 시추 직후 현장에서 빠르게 일어나는 것이 아니라 서서히 꾸준하게 진행되며, 폐쇄된 실내공기로 인해 CO₂ 농도가 높게 치솟은 채로 고립된 환경인 실험실 냉동고 내에서도 계속해서 일어난다는 것을 알려준다. 이러한 간접적으로 유추한 사실을 통해 진공포장에 몇 분 이상의 시간이 소요되더라도 확실한 진공을 잡은 후 밀봉 상태를 유지할 수 있다면 closed 된 공기만 온전히 보존할 수 있을 것이라 기대되며, 또한 확실한 밀봉이 되지 않았을 경우를 대비하여 진공포장 후 실험실까지 도달하여 실험하는데 까지 소모되는 시간을 최대한 단축하여 기존 Styx 샘플 밀도측정과 온실기체 농도측정에 걸렸던 소모된 수년의 시간 대신 몇 개월 이내로 빠른 측정을 통해 오차를 최대한 줄일 수 있을 것으로 기대된다.



그림 4. 기존에 사용하던 스테이플러를 이용한 일반 포장 방식. 샘플링한 빙하 샘플이 남극 현장에서부터 실험실 냉동고까지 꾸준하게 현생 대기에 노출되어 post coring 효과가 나타나는 원인이 된 것으로 추정된다.



그림 5. 현생 대기와의 노출을 막기 위해 일반 포장 방식에서 비닐 내부의 현생 공기를 진공 펌프로 제거한 후 고온의 열처리로 입구를 밀봉하는 Sealer와 진공포장용 내열성 특수 비닐을 사용하여 진공포장 테스트를 진행하였고, 성공적으로 사전 검증을 통과하여 현장에서 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

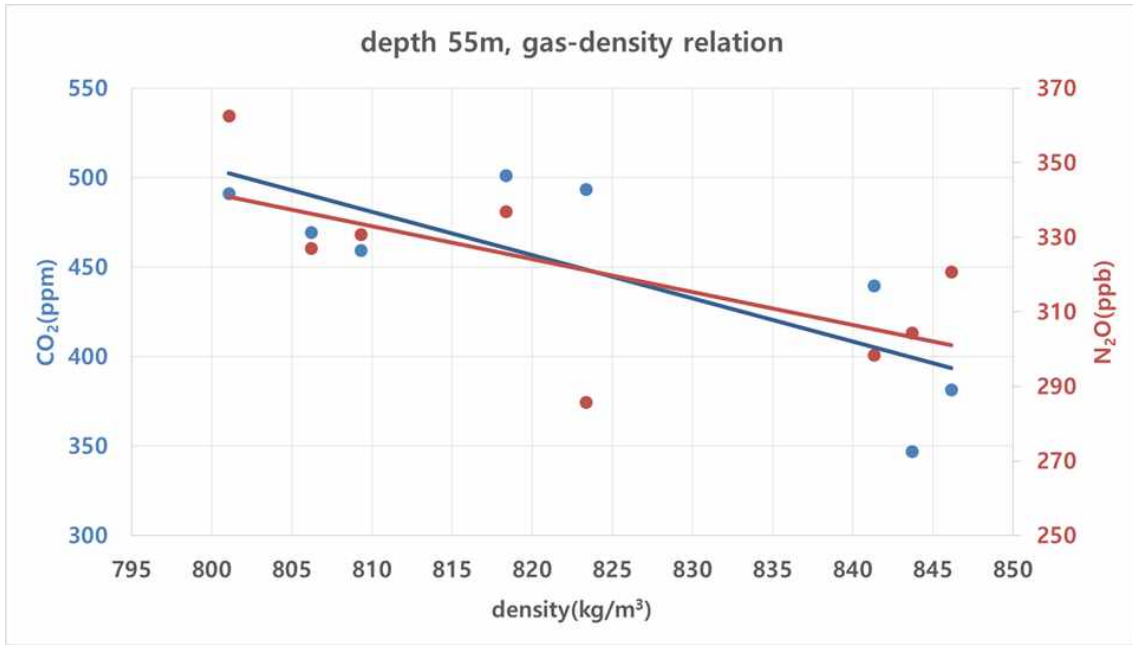


그림 6. Lock-in depth 근처 천부 빙하 코어의 십 수 cm 이내의 같은 깊이에서의 CO₂, N₂O 온실기체 농도.



3. Tourmaline Plateau 탐사 계획

이번 편 공기 샘플링 장소는 Tourmaline Plateau로 정해졌다. (74°7'48.00"S, 163°25'48.00"E)에 위치하고 있으며, 고도는 1549 m 이다. 그림 3에서 확인할 수 있는 바와 같이 2014/15 시즌 탐사 장소였던 Styx glacier와 지리적으로 가깝고 유사한 환경의 빙하 퇴적 조건을 갖춘 장소이니 만큼, 추가적인 샘플의 채취와 그 분석에 선례를 활용할 수 있는 장소임과 동시에, 그 지형이 평탄하고 Styx와 중복되지 않는 다른 지역으로서 가지는 특징을 이번 빙하 샘플 채취를 통해 동시에 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

샘플링을 진행할 때에는 편 공기가 인위적인 오염의 영향을 받지 않아야 한다. 따라서 시추 위치는 발전기에서 100미터(14/15 시즌 80미터), 사람이 많은 텐트에서 20미터 (14/15 시즌 15m) 이상 떨어져 있고, 바람이 불어오는 방향에 있어야 한다. 4년 전 Styx glacier에서 설치한 텐트의 위치는 그림 7와 같다. (Han et al, 2015)

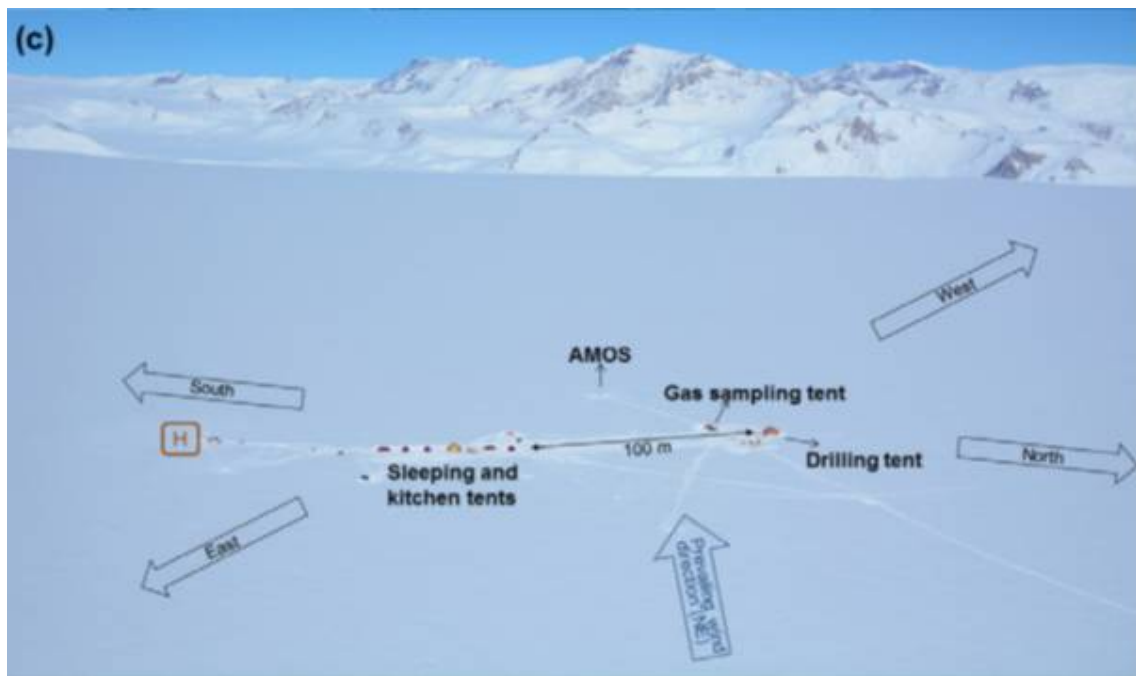


그림 7. Styx site에서 2014/15 하계 빙하 탐사팀이 구축한 캠프의 전경 (Han et al., 2015).

14/15시즌 현장에서는 시추 텐트 남서쪽에 위치하게 샘플링 텐트를 설치한 후 바람의 주된 방향이라고 생각되는 북서쪽을 향해 가장 앞에 나오게 텐트를 설치하여 현생 대기 포집에 영향이 없도록 하였다.

하지만 후에 AWS를 설치, 풍향 자료를 확인한 결과 주된 풍향은 북동풍으로, 기존 생각했던 북서풍과는 차이가 있었다. 물론 현장의 풍향은 지배적인 연평균 풍향과는 달리 시시각각 변하기 때문에 이번 Tourmaline plateau 탐사에서는 기존에 존재하는 AWS자료를 참고함과 동시에, 텐트를 설치하는 시기에 맞게 유동적으로 가장 지배적인 풍향을 고려하여 텐트를 설치하여야 한다.

편 공기 채집을 실행하기 전후에 각각 2개의 유리 플라스크를 사용하여 지상의 공기를 채집하고 나머지 26개를 편 공기 채집에 사용할 것이 권장된다. 편 층과 편 공기 분석의 주관심사인 Lock-in depth 근처에 도달하기 전 open pore의 공기는 확산에 의해 지상과 연결되므로 현재 공기와 농도 차이가 크지 않다. 따라서, 10-15m 간격으로 시추하는 것이 경제적이다. 그러나, LID를 정확히 규정하기 위해서, LID에 도달하기 전 5m 깊이부터는 2m 간격으로 샘플링 간격을 조절하고, LID에 도달하기 직전부터 COD까지 1m 간격으로 시추하는 것이 좋다. 그런데, 극지연구소에서 사용하는 시추 코어 샘플의 길이는 70cm 간격이므로, 각 심도마다 1개, 그리고 남은 용기의 개수를 봐가며 적당히 조절하여 심도 1-2개 당 한 번 씩을 채집한다.

⊙ 지표에서 2번의 현생 공기를 측정하며 감을 잡는다.

⊙ 밀도 모델로 예측한 LID 근처 5m 전까지 표면 10m 간격으로 샘플링을 시행한다.

⊙ LID 근처에 도달하였다고 생각되면 2m 단위로 페이스를 낮춘다.

⊙ LIZ에 도달하는 것은 LI-COR의 CO₂농도에 집중하며 1m보다 조밀한 간격으로 측정하여 훗날 모델링에 사용할 변곡점을 정확하게 유추해 본다.

⊙ 추정 close-off depth에 도달할때까지 0.7-1.4m 간격으로 유동적으로 조절해가며 30개의 컨테이너를 여분을 제외하고 모두 사용할 수 있도록 한다.

예) LID가 48m, COD가 60m인 경우의 채집 심도

0 - 0 - 10 - 20 - 30 - 40 - 42 - 44 - 46 - 47.7 - 48.4 - 49.1 - 49.8 - 50.5
 - 51.2 - 51.9 - 52.6 - 53.3 - 54.7 - 55.4 - 56.1 - 57.5 - 58.2 - 58.9 - 59.6 -
 60.3 - 61 (27개 구간 + 3개 여분)

실코캔 캐니스터는 그 용적이 유리 플라스크의 두 배인 6L이며 더 확실한 보관이 가능하기에 더 중요한 Lock-in zone 에서의 공기를 담는데에 사용한다. 현생 대기 공기와 diffusive zone 등의 공기를 담을 때에는 유리플라스크를 사용한다.

가장 깊은 곳에서 공기를 전혀 빨아들이지 못할 경우에는 블래더를 일단 접은 후, 약 30cm 간격으로 상승시키면서 흡입이 가능한 가장 깊은 심도에서 샘플링을 시도한다.

만약 이러한 시도에도 불구하고 공기가 잘 포집되지 않는다면, 최종 공기가 흡입된 깊이를 COD로 기록하고, 만약 30cm를 상승시켰을 때 공기가 포집된다면, 다시 조금씩 내리며 COD를 10cm 간격으로 찾는다.



그림 8. 현장에서 사용할 유리 플라스크와 실코캔 캐니스터



4. 현장에서 사용하는 물품

1) 펌프 박스



그림 9. 펌프로 구성된 편 공기 채집을 하는 펌프 시스템.

내용물 : 펌프시스템

무게 : 89kg

기본적으로 편 공기 채집과 LI-COR를 통한 편 공기 CO₂ 농도측정에 이용되는 다이어프램 펌프 두 대, 그리고 라인 안정화와 블래더 팽창에 주로 사용되는 메탈컴 펌프 한 대를 사용한다. 현재 하단부에 설치된 두개의 다이어프램 펌프 중 하나의 펌프가 신 모델로서, 스테인리스가 아닌 플라스틱 재질로 이루어져있다. 그리하여 기존 Swagelok 커넥터와 접하는 부분에서 leak 이 생기며, 힘 조절을 실패하면 쉽게 부러지기에 플라스틱 커넥터를 이용하여 펌프의 이음새 자체가 깨질 가능성을 차단하였다. 그러나 기본적인 leak check 시 펌프의 공기가 새기 때문에 이는 추후 교체가 필요해 보인다.

2) 실코캔 캐니스터 박스

내용물 : 실코캔 캐니스터 10개, 김테크, 부품상자(1), 부품상자(2), 온도측정계, 100m 줄자, Magnesium 100g, 1/8" swagelok, 3/8", 1/4", 6mm 등

무게 : 85kg

편 공기 채취에서 핵심적인 역할을 하는 실코캔 캐니스터와 장비가 고장날 경우 대응할 수 있는 각종 스페어 부품들로 이루어져있다.



그림 10. 실코켄 캐니스터와 각종 스페어 부품들

3) 유리 플라스크 박스



그림 11. 현장에서 실코켄 캐니스터를 보조하는 편 공기 채취 컨테이너인 유리 플라스크

내용물 : 유리 플라스크 20개

무게 : 48kg

내부 용량은 약 3L이다. 운송시에는 플라스크는 세로로 수납되어 있으나 샘플링을 행할 때는 수평면에 놓고 IN, OUT 두 밸브가 수평으로 위치하도록 위치를 조절하여 놓는다. 이 과정은 기체의 동위원소분별을 막기 위해 매우 중요하다. 확실한 마킹과 깨지는 현상을 방지하기 위해

테이핑을 하였으며 이름표를 붙였다.

또한, 14/15시즈 추운 기온에 노출된 플라스크의 입구부가 수축하여 밸브가 느슨해지는 현상이 있었고 대부분의 플라스크의 입구가 열려 공기가 들어가는 현상이 나타났다. 이를 방지하기 위해 미리 2기압의 공기를 불어넣은 후 냉동고에 넣어 5분마다 잠가주며 체크를 해 현장에서 생길 유사시 상황에 미리 대비하였다.

4) 데카본 튜브, 투명 튜브 박스



그림 12. 데카본 튜브와 Flow meter 등 편 공기 추출에 사용되는 장비들

내용물 : 데카본 튜브, 6mm 튜빙, 예비용 6구 멀티탭, 잭 서포터, Flow meter, 1/4" / 3/8" tubing, 레귤레이터

무게 : 30kg

바깥지름 6mm의 데카본 튜브. 100m 길이의 튜브에 20m 길이의 연장 튜브를 swagelok의 유니온 이음새로 접속하여 사용한다.

주의 1) 이음새를 분리할 경우에는 바로 이음새와 튜브에 블라인드캡을 할 것.

주의 2) 튜브의 끝 부분을 더럽히지 않도록 주의할 것. 특히 기름때나 액체를 묻히지 말 것

주의 3) 6mm 고무 튜브를 사용할 때 swagelok과 같이 스테인리스와 닿는 부분은 인서트를 삽입하여야 한다.

5. 추가 - 현장 물품 리스트

박스 번호	세부박스	내용물	수량	
1. Thermometer set. SNU-LICP #11 1/6		보어홀 전선	3	
		추	2	
		3-P 클램프	2	
		1L 밀도 측정용 트레이	1	
		텐트세트	텐트	1
		텐트세트	텐트다리	1
		텐트세트	텐트 조임줄	1
			열수축 튜브	2
			날진보틀 1L	8
			날진보틀 125ml	22
			30cm 강철판	2
			줄자 5m	1
			문구류	1
			호일	4
			킴테크	5
			등산양말	5
			가위	1
			라텍스 고무장갑	3
			덕테이프	2
			박스테이프	3
			30cm 자	2
			Fluke 멀티미터	1
		미니 원치	고정대	8
			연결대	1
			몸체	9
			oscillante	1
			체인	1
			체인걸이	2
			고리	4
		공구박스	줄자5m	1
			실리콘본드	1
			강력접착제	1
			스카치 테이프	1
		고무망치	1	

박스 번호	세부박스	내용물	수량	
1. Thermometer set. SNU-LICP #11 1/6		전기인두	1	
		튜브 벤더	1	
		육각렌치세트	2	
		커터칼	1	
		라이터	1	
		칼심	8	
		철사(0.8)*10	1	
		철사(1.6)*10	2	
		44032 저항 센서	4	
		44033 저항 센서	3	
		롱노우즈	2	
		니퍼	2	
		핀셋	1	
		십자 드라이버	소	1
		십자 드라이버	대	1
			가위	1
			항공가위	1
			멀티리더기 온도라인	2
		케이블타이	대	200
		케이블타이	중	200
		케이블타이	소	100
			종이테이프	1
			튜브 커터	2
			파랑클립	1
			인서트	Many
			십자 드라이버 심	1
			대형 스테플러 심	1
			사다리형 클램프	1
			클립	1
			스탑위치	2
		스패너	몽키12"	1
		스패너	몽키10"	1
		스패너	몽키8"	1
	스패너	몽키6"	1	
	스패너	5/8"-9/16"	1	
	스패너	9/16"-1/2"	1	

박스 번호	세부박스	내용물		수량	
1 Thermometer set SNU-LICP #11 1/6		스패너	1/2"-7/16"	2	
		스패너	1/2"	1	
		스패너	3/4"	1	
2.bladder BOX SNU-LICP #11 2/6	bladder set	6mm 패물		4	
		데카본 튜빙용6mm 너트		12	
		고리		2	
		고정고리		5	
		bottom 조임나사		14	
		bladder bottom 너트		30	
			8 스패너	1	
			렌치	1	
		연결케이블(와이어)		2	
		긴 케이블 고정 고리		1	
		bottom 긴 고정 볼트		8	
		bladder bottom 부		3	
		bladder top 부		1	
			bladder rubber	2	
			가위	1	
			A2-70 너트	4	
			A2-70 볼트	1	
			면장갑	13	
			지퍼락	2	
			100m 줄자	1	
			위생 장갑	2	
			비닐장갑	50	
			Mg(ClO4)2	1	
			유리솜	1	
		데카본 튜브1	30cm*66번=62m		1
		데카본 튜브2	30cm*15번=15m(연습용)		3
		데카본 튜브3	30cm*46번=45m		1
	LIGAREX ROLL	리가렉스 롤		3.5	
	LIGAREX SET	plier		1	
		eyes		many	

박스 번호	세부박스	내용물	수량	
2 bladder BOX SNU-LICP #11 2/6	부품 상자 2	테플론 테이프	2	
		3/8" 페룰	55	
		3/8" swagelok 너트	11	
		3/8" 고무마개	12	
		3/8" 패널용 유니온	4	
		3/8" 울트라 토르	2	
		3/8" swagelok 유니온	7	
		3/8" O-ring	10	
		LI-840A 기타부품	black polyurethane	1
		3/8"-1/4"	ultra torr 리듀서	4
		3/8"-1/4"	swagelok 리듀서	3
		1/4"	페룰	51
		1/4"	swagelok 너트	20
		1/4"	고무마개	24
		1/4"	swagelok 유니온	2
		1/4"	패널용 유니온	4
		1/4"	swagelok 너트 캡	5
		1/4"	swagelok 볼트 캡	9
		1/4"	swagelok Tee	3
		1/4"	swagelok cross	3
		1/4"	O-ring	20
		1/4"	릴리프밸브	1
		1/4"	SS 튜빙	4
		1/4"-6mm	퀵커넥터	3
		1/4"	튜빙 인서트	4
		1/4"	3 way valve	1
		1/4"	swagelok bolt valve	2
			클립	2
		1/8"	페룰	35
		1/8"	너트	6
			bladder 내부 와이어 고정고리	3
		other	튜빙 인서트	many
M I I T I BOX	6mm	볼트캡		
	6mm	너트캡	10	

박스 번호	세부박스	내용물		수량
2.bladder BOX SNU-LICP #11 2/6		6mm	페룰	50
		6mm	티	10
		6mm	엘보우	10
		6mm	크로스	1
		6mm	퀵커넥터 벨브	8
		6mm	유니온	6
		6mm	너트	
		6mm	와이	3
			6mm to NPT	2
			KnF 펌프 Dk lok	2
			KnF 펌프 플라스틱	2
			지퍼백 (소형 15cm)	20
3.PUMP SYSTEM SNU-LICP #11 3/6	n u m p system			
			멀티탭	1
4.Line spare BOX SNU-LICP #11 4/6			Polvurethane tube (d=6mm)	1
			ss tube 3/8"	2
			ss tube 1/4"	3
			plastic tube 1/4	2
			Regulator 1/4	2
			flow meter	5
			LI-840A set(LI-COR)	1
			와이프올	1
			컨테이너 연결 라인	1
			잭 서포터	2
			날진보틀 1L	22
5.유리플라스크 박스 SNU-LICP #11 5/6		유리 플라스크	SNU19-01	1
			SNU19-02	1
			SNU19-03	1
			SNU19-04	1
			SNU19-05	1
		냉동고에서 open	SNU19-06	1
		입구 부위 깨짐	SNU19-07	1

박스 번호	세부박스	내용물		수량
5 유리플라스틱 박스 SNU-LICP #11 5/6			SNU19-08	1
			SNU19-09	1
			SNU19-10	1
			SNU19-11	1
			SNU19-12	1
			SNU19-13	1
			SNU19-14	1
			SNU19-15	1
			SNU19-16	1
			S-05	1
		이전 라벨 SNU17-16 / 냉동고에서 open	S-28	1
		이전 라벨 SNU17-31	10-3-S	1
		이전 라벨 SNU17-02'	SNU19-17	1
6 식코겐 캐니스터 박스 SNU-LICP #11 6/6			SNU19-S01	1
			SNU19-S02	1
			SNU19-S03	1
			SNU19-S04	1
			SNU19-S05	1
			SNU19-S06	1
			SNU19-S07	1
			SNU19-S08	1
			SSC-1	1
			SSC-5	1
			면장갑	10
			킴테크	14
			지퍼백 (대)	100
			지퍼백 (중)	500
			지퍼백 (소)	100
			핸드드릴	2
		핸드드릴 비트	3.5mm	1
		핸드드릴 비트	4.0mm	5
		핸드드릴 비트	4.5mm	1
			절연테이프	12
		종이테이프	3	

박스 번호	세부박스	내용물	수량
6. 실코겐 캐니스터 박스 SNU-LICP #11 6/6		스탑워치	2
		AAA 전지	4
		9V 전지	3
		무게추	2
		양주	2
		스테플러	2
		sea ice 온도계	1
		목장갑	10
기타	필기류	스카치 테이프	1
		집게	5
		연필	12
		네임펜(검정)	2
		네임펜(보라)	1
		네임펜(빨강)	1
		네임펜(검정) 대	2
	유성매직	검정	3
	유성매직	빨강	2
	유성매직	파랑	2
		샤프심	1
		포스트잇	7
		볼펜(검정)	3
		볼펜(파랑)	1
		볼펜(빨강)	2
		화이트	2
		지우개	2
		커터칼	1
		샤프	1
#Bladder pump (추가발송)		예식장갑	41
HSR #6 홍상범(문장일)		Knf 펌프	2
		비닐포장 sealer	1
		갈갈이 상의	2
		갈갈이 하의	2
		플라스틱 튜브	1m
		swagelok 6mm 너트	1

박스 번호	세부박스	내용물	수량
HSR #6 홍상범 (문장일)		Knf 플라스틱 1/4" 커넥터	9
		Dk-lok 1/4" SS 커넥터	1
		벧하 코어 진공포장 비닐	3
		큰 가위	1
핸드캐리 물품		진공포장지(65*40)	100
		진공포장지(45*30)	100
	진공포장용	진공청소기	1
		청소기 커넥터(제작)	1
		플라스틱 커넥터(기성품)	1
		진공포장 셀	5
		내열성테이프	1
		구리가스켓 2.76"	20
		구리가스켓 1/4"용	30
		6mm 볼트	10
		6mm 너트	10
		6mm 스패너	1
		1/4" 커넥터(너트+글랜드)	1
		1/4" 울트라 토르 커넥터	1
		세라믹 칼	1
	9V AC 저울 (600g/0.01g)	1	



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.