



표 지(기본사업)

보고서발간번호

불순물이 극지방 얼음지형 변화를 초래하는 미래 예측 연구

The influence on topographic change in polar regions by the  
increase of impurities in ice



2024. 2.

한 국 해 양 과 학 기 술 원  
부 설 극 지 연 구 소

## 제 출 문

### 극지연구소장 귀하

본 보고서를 “불순물이 극지방 얼음지형 변화를 초래하는 미래 예측 연구”과제의 (최종)보고서로 제출합니다.

2024. 2.

연구 책임자 : 김 대 영

참 여 연 구 원 소 : 정 지 응

“ : 한 영 철

“ : 박 창 근

“ : 박 승 현

“ : 김 도 현

“ : 김 이 정

“ : 이 재 석

보고서 초록

과제관리번호	PE23430	해당단계 연구기간	2021. 2. 1. - 2023. 12. 31.	단계 구분	1 / 1
연구사업명	중 사업명	연구·정책지원사업			
	세부사업명	Seed형 선행과제			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	불순물이 극지방 얼음지형 변화를 초래하는 미래 예측 연구			
연구책임자	김 대 영	해당단계 참여연구원수	총 : 8 명 내부 : 8 명 외부 :   명	해당단계 연구비	정부: 300,000 천원 기업:           천원 계:           천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 지권연구본부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 중국		상대국연구기관명 : 중국과학원		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	62
<p>1. 연구목표</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 얼음 내 불순물 함량에 따른 물리적 변화 측정</li> <li>• 얼음의 물리적 특성 변화에 따른 극지방 얼음지형 모델링</li> <li>• 얼음의 물리적 특성 파악을 위한 장비 개발</li> </ul> <p>2. 연구 내용 및 결과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 합성얼음의 물리적 특성 변화 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 극지방 바다 및 얼음에서 산출하는 불순물의 종류 및 함량 조사</li> <li>- 불순물의 종류 및 함량을 다양화한 합성얼음 제작</li> <li>- 변형실험장비 테스트</li> <li>- 다양한 함량의 불순물을 함유한 합성얼음을 이용한 변형실험</li> <li>- 합성얼음의 물리적 특성 변화를 이용한 극지방 얼음지형 모델링</li> </ul> </li> <li>• 얼음의 물리적 특성 파악을 위한 장비 개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>- EBSD 장비 설치 및 기본기능 운용</li> <li>- 얼음합성장치 개발을 위한 기초자료 작성</li> <li>- 2종의 얼음합성장치 설치 및 운용</li> <li>- Cryo-system 설치를 위한 기초자료 작성</li> </ul> </li> </ul> <p>3. 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 국내 미개척 연구분야 최초 도전</li> <li>• 극지방 얼음지형 변화에 대한 인류세 영향 이해</li> <li>• 환경오염에 대한 지질학을 바탕으로 한 경고</li> </ul>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	얼음, 변형실험, 유동법칙, 합성, 미구조			
	영 어	ice, deformation experiment, flow law, synthesis, microstructure			

# 요 약 문

## I. 제 목

불순물이 극지방 얼음지형 변화를 초래하는 미래 예측 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

### 1. 연구개발 목표

- 얼음 내 불순물 함량에 따른 물리적 변화 측정
- 얼음의 물리적 특성 변화에 따른 극지방 얼음지형 모델링
- 얼음의 물리적 특성 파악을 위한 장비 개발

### 2. 연구개발 필요성

- 지난 수십년간 플라스틱의 사용과 폐기가 급격하게 늘어나 북반구 산악지역 뿐 아니라 남극 눈, 빙하에서도 미세플라스틱이 발견
- 얼음 변형행동에 불순물의 함량이 많아질수록 변형률-응력 관계 기울기가 급해지고, 이는 적은 응력으로 많은 변형을 일으킬 수 있다는 의미이므로, 이물질 함량이 얼음의 유동법칙에 영향을 미칠 수 있음을 의미
- 최근 급격히 증가하는 플라스틱의 소비로 인해, 극지방 얼음에 미세플라스틱이 불순물로 함유되었을 때 극지방 얼음지형 변화에 대해 연구가 필요

## III. 연구개발의 내용 및 범위

### 1. 합성얼음의 물리적 특성 변화

- 극지방 바다 및 얼음에서 산출하는 불순물의 종류 및 함량 조사
- 불순물의 종류 및 함량을 다양화한 합성얼음 조사
- 다양한 함량의 불순물을 함유한 합성얼음을 이용한 변형실험 실시
- 다양한 조건의 변형실험 테스트
- 합성얼음의 물리적 특성데이터 해석
- 합성얼음의 물리적 특성 변화를 이용한 극지방 얼음지형 모델링

### 2. 얼음의 물리적 특성 파악을 위한 장비 개발

- EBSD 장비 설치 및 기본기능 운용
- 합성얼음장치 개발을 위한 기초자료 작성
- 2 종의 합성얼음장치 설치
- 합성얼음장치 운용
- Cryo-system 설치를 위한 필요조건 조사
- Cryo-system 기초자료 작성

#### IV. 연구개발결과

##### 1. 합성얼음의 물리적 특성 변화

###### (1) 변형실험에 사용할 불순물의 종류 및 함량 결정

- 극지방 바다 및 얼음에서 산출하는 불순물의 종류 및 함량을 기존 논문을 이용하여 조사함
- polyamide, polyethylene, rubber가 고산지대 만년설, 극지방 바다 및 얼음에 가장 많이 존재하는 것을 확인하였음
- 인위적으로 가공할 수 있는 polyethylene 시료를 변형실험에 사용하는 것으로 결정

###### (2) 불순물의 종류 및 함량을 다양화한 합성얼음 제작

- 두 종류 사이즈의 polyethylene 20  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ 를 100  $\mu\text{m}$  의 얼음씨앗(ice seed)과 섞어 고온 압축(hot-pressing) 방법을 이용해 제작
- 제작 후 처음으로 사용하는 변형실험 장비의 데이터를 테스트하기 위해 순수얼음도 합성함

###### (3) 다양한 함량의 불순물을 함유한 합성얼음을 이용한 변형실험

- 다양한 함량의 불순물을 포함한 합성얼음을  $-10^{\circ}\text{C}$  조건에서  $10^{-6.5} \text{ s}^{-1}$ ,  $10^{-6.0} \text{ s}^{-1}$ ,  $10^{-5.5} \text{ s}^{-1}$ ,  $10^{-5.0} \text{ s}^{-1}$ 로 변형률을 증가시키며 각 단계별로 2%의 변형을 주며 변형률증가(rate stepping) 변형실험을 실시함
- 기계데이터(mechanical data)는 각각의 변형률 단계별로 무게(load)가 증가하지 않는 안정상태(steady state)에 돌입했음을 보여주며, 계산된 응력지수(stress exponent, n)값은 약 1.8-2 이므로 결정 입계 미끄럼(grain boundary sliding, GBS)이 주요 변형 메커니즘으로 작동했음을 지시함

###### (4) 합성얼음의 물리적 특성 변화를 이용한 극지방 얼음지형 모델링

- 변형실험에서 일으켰던 주요 변형 메커니즘이 GBS이기 때문에 얼음의 흐름보다 물리적 특성에 집중해 모델링을 실시
- 얼음변형 모델링으로 획득한 n, 얼음 유동성 매개변수(ice fluidity parameter, A) 값을 바탕으로 슬로프 모델(slope model)에 대입한 결과, 응력지수가 높아질수록 점도가 높아지는 것을 나타냄

##### 2. 얼음의 물리적 특성 파악을 위한 장비 개발

###### (1) EBSD 장비설치 및 기본기능 운용

- 극지연구소에 기설치된 전계방출주사전자현미경은 저진공모드가 있어 샘플표면을 코팅할 필요가 없고, 전계방출(field emission) 건에서 발생한 전자를 이용하므로 EBSD 설치가 적절한

것으로 판단됨

- 추후 얼음샘플 분석을 위한 사전작업의 일환으로 EBSD 장비를 설치완료하고 현재 암석 샘플 분석에 이용하고 있음

(2) 2 종의 얼음 합성장치 설치

- 표준얼음(standard ice) 합성장치는 기존에 설치하려고 계획했었고, 2년차 목표인 변형실험을 실시하지 못해 추가적으로 고온 압축(hot-pressing) 합성장치도 설치하였음
- 표준얼음 합성장치는 미국 펜실베니아 대학교, 중국과학원에 설치된 장치를 참고하여 국내에서 제작함
- 고온압축 합성장치는 원통형 틀(ice die)을 구매하고, 유압프레스(hydraulic press)를 이용해 압축하여 제작함

(3) Cryo-system 설치를 위한 기초자료 작성

- 전자현미경에서 얼음샘플을 관찰하기 위해 극저온을 유지하는 방법은 액체질소챔버의 설치, 샘플홀더 제작 및 액체질소챔버와 연결, 액체질소를 이용한 샘플연마, 이동, 샘플에 직접적 접촉 등이 있음
- 얼음샘플 표면의 성애(frost) 방지를 위해 이동상자(transfer box) 설치, 액체질소의 직접적 접촉, 전자현미경 진공을 풀어줌으로 기화(evaporation)시키는 방법 등이 있음

V. 연구개발결과의 활용계획

- 연구개발 결과는 모델링을 보강하며 정리 중이며, 모델링과 정리가 끝나는대로 국제학술지에 투고할 예정
- 코로나를 거치며 배달음식의 증가로 특히 많이 증가한 대표적인 환경오염 물질인 미세플라스틱에 대한 관심 증가
- 새로운 연구주제인 얼음의 물리적 특성연구 분야에서 국내 최초로 실험한 연구결과로 변형실험과 모델링의 다학제적 연구를 할 수 있는 계기 마련

# S U M M A R Y

## (영 문 요 약 문)

### I. Title

The influence on topographic change in polar regions by the increase of impurities in ice

### II. Purpose and Necessity of R&D

#### 1. Purpose of R&D

- Measurement of changes in physical properties according to impurity contents in ice
- Polar ice topography modelling in a factor of physical properties of ice
- Development of equipment to understand the physical properties of ice

#### 2. Necessity of R&D

- The use and disposal of plastic has increased dramatically over the past few decades, not only in mountainous northern hemisphere, but also in Antarctic snow and ice.
- The content of impurities increases in the ice deformation behavior, the gradient of the strain-stress relationship becomes urgent. This means that it can cause a lot of deformation with little stress, so the foreign substance content in accordance with the flow law can be affected by the impurity content.
- Due to the recent rapid increase in plastic consumption, a study is needed on the change of polar ice topography when microplastics are contained as impurities in polar ice.

### III. Contents and Extent of R&D

#### 1. Changes in the physical properties of synthetic ice

- Investigation of the type and content of impurities produced in polar seas and ice
- Investigation of synthetic ice with various types and contents of impurities
- A deformation experiment using synthetic ice containing various contents of impurities
- Test variations under different conditions
- Analysis of Physical Characteristics of Synthetic Ice Data
- Polar ice topography modeling using the physical properties of synthetic ice

## 2. Development of equipment to understand the physical properties of ice

- Installation of EBSD equipment and operation of basic functions
- Preparation of basic data for the development of synthetic ice devices
- Installation of two types of synthetic ice equipment
- Operation of synthetic ice equipment
- Investigate Requirements for Cryo-system Installation
- Create cryo-system basic data

## IV. R&D Results

### 1. Changes in the physical properties of synthetic ice

#### (1) Determining the type and content of impurities to be used in the deformation experiment

- The types and contents of impurities produced in polar seas and ice were investigated using existing papers
- It has been confirmed that polyamide, polyethylene, and rubber are most present in alpine ice caps, polar seas, and ice
- It is decided to use artificially processed polyethylene samples for deformation experiments

#### (2) Manufacture of synthetic ice with various types and contents of impurities

- Two types of polyethylene 20  $\mu\text{m}$  and 150  $\mu\text{m}$  are mixed with 100  $\mu\text{m}$  ice seeds and manufactured using hot-pressing method
- Pure ice is also synthesized to test the data of the deformation experiment equipment used for the first time since fabrication

#### (3) Deformation experiment using synthetic ice containing various contents of impurities

- rate stepping deformation experiment was conducted by increasing the strain of synthetic ice containing various contents of impurities to 10-6.5 s<sup>-1</sup>, 10-6.0 s<sup>-1</sup>, 10-5.5 s<sup>-1</sup>, and 10-5.0 s<sup>-1</sup> at -10°C
- Mechanical data shows that the weight has entered a steady state where the weight does not increase at each stage of strain, and the calculated stress index (n) value is about 1.8-2, indicating that the grain boundary sliding (GBS) worked as a major deformation mechanism

#### (4) Polar ice topography modeling using the physical properties of synthetic ice

- Since GBS is the main deformation mechanism that caused the deformation experiment, the modeling is conducted focusing on physical properties rather than the flow of ice
- Based on the values of n, ice fluidity parameter (A) obtained by ice deformation modeling, it is shown that the higher the stress index, the higher the viscosity

## 2. Development of equipment to understand the physical properties of ice

(1) Installation of EBSD equipment and operation of basic functions

- The field emission scanning electron microscope installed in the polar research center has a low vacuum mode, so there is no need to coat the sample surface, and it is judged that EBSD installation is appropriate because it uses electrons generated in field emission cases
- As part of the preliminary work for the analysis of ice samples in the future, EBSD equipment has been installed and is currently being used for rock sample analysis

(2) Installation of two types of ice synthesis devices

- A standard ice synthesis device was previously planned to be installed, and an additional hot-pressing synthesis device was also installed because the second-year goal of deformation experiment was not conducted
- Standard ice synthesis devices are manufactured in Korea by referring to devices installed at the University of Pennsylvania and the Chinese Academy of Sciences
- The high-temperature compression synthesis device is manufactured by purchasing a cylindrical mold and compressing it using a hydraulic press

(3) Creating Basic Materials for Cryo-system Installation

- Methods of maintaining cryogenic temperatures to observe ice samples under an electron microscope include installing a liquid nitrogen chamber, making a sample holder and connecting it to the liquid nitrogen chamber, polishing and moving samples using liquid nitrogen, and direct contact with samples
- To prevent frost on the surface of the ice sample, there are methods such as installing a transfer box, direct contact of liquid nitrogen, and vaporizing by releasing the electron microscope vacuum

## V. Application Plans of R&D Results

- R&D results are being organized by reinforcing modelling and they will be submitted to an international academic journal as soon as modelling and organizing are completed
- Interest in microplastics, a representative environmental pollutant that has increased particularly significantly due to the increase in delivery food through COVID-19
- The results of the first experiment in Korea in the field of study on the physical properties of ice, a new research topic, provide an opportunity for multidisciplinary research on deformation experiments and modeling

# C O N T E N T S

## (영 문 목 차)

### Chapter 1 Introduction

- 1.1 Research necessity
- 1.2 Final objective of the research and goals by year
- 1.3 Research promotion system and processing method

### Chapter 2 Current R&D Status in Korea and Other Nations

- 2.1 Current research status in Korea
- 2.2 Current research status in the world

### Chapter 3 R&D Implementation Contents and Results

- 3.1 Investigation of the type and content of impurities produced in polar seas and ice
- 3.2 Manufacture of synthetic ice with various types and contents of impurities
- 3.3 Installation of EBSD equipment and operation of basic functions
- 3.4 Fundamental information for ice synthetic device development
- 3.5 Test of deformation experimental equipment
- 3.6 Installation and operation of 2 types of ice synthetic device
- 3.7 Deformation experiment using synthetic ice containing various contents of impurities
- 3.8 Polar ice topography modelling using the physical properties of synthetic ice
- 3.9 Fundamental information for cryo-system installation

### Chapter 4 Degree of R&D Goal Achievement and Degree of Contribution to Outside Research Institute

- 4.1 Achievement of R&D objectives
- 4.2 Contribution to technological development

### Chapter 5 Application Plans of R&D Results

### Chapter 6 References

# 목 차

## 제 1 장 서론

- 1.1절 연구개발의 필요성
- 1.2절 연구 최종 목표 및 연차별 목표
- 1.3절 연구 추진 체계 및 수행 방법

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 2.1절 국내 연구 현황
- 2.2절 국외 연구 현황

## 제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

- 3.1절 극지방 바다 및 얼음에서 산출하는 불순물의 종류 및 함량 조사
- 3.2절 불순물의 종류 및 함량을 다양화한 합성얼음 제작
- 3.3절 EBSD 장비 설치 및 기본기능 운용
- 3.4절 얼음합성장치 개발을 위한 기초자료 작성
- 3.5절 변형실험장비 테스트
- 3.6절 2종의 얼음합성장치 설치 및 운용
- 3.7절 다양한 함량의 불순물을 함유한 합성얼음을 이용한 변형실험
- 3.8절 합성얼음의 물리적 특성 변화를 이용한 극지방 얼음지형 모델링
- 3.9절 Cryo-system 설치를 위한 기초자료 작성

## 제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- 4.1절 연구개발목표 달성도
- 4.2절 기술발전에서의 대외기여도

## 제 5 장 연구개발결과 활용계획

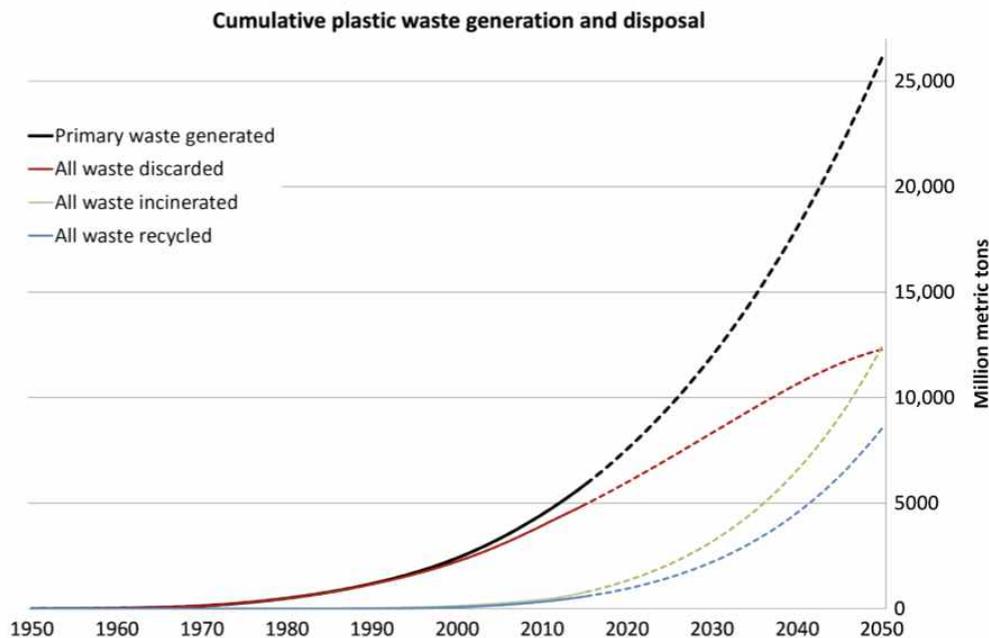
## 제 6 장 참고문헌

# 본 문

## 제 1 장 서론

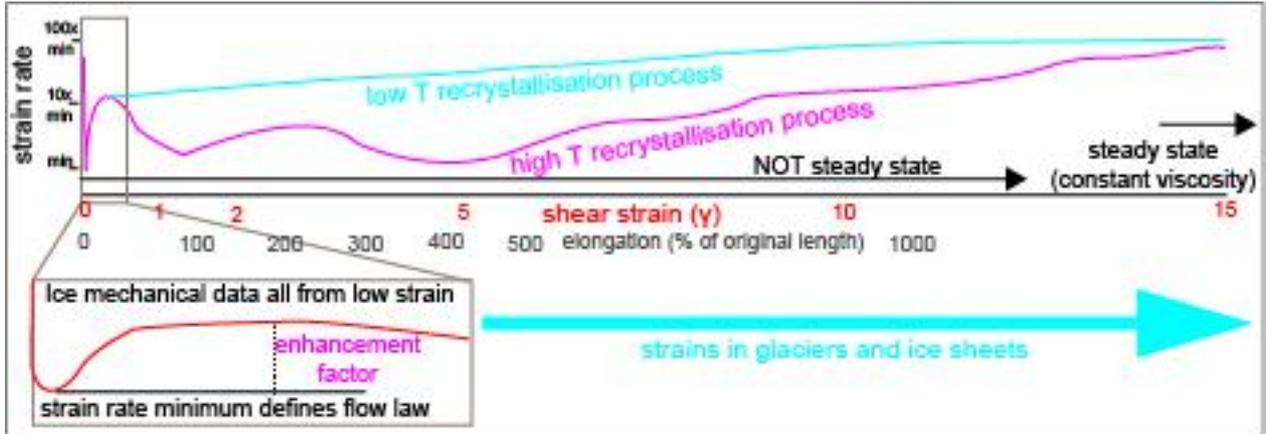
### 1.1절 연구개발의 필요성

지난 수십년간 플라스틱 폐기물의 생성과 폐기의 증가는 전적으로 인류세의 활동에 기인한다(Geyer et al., 2017). 미세플라스틱은 플라스틱의 기계적 해체와 풍화작용에 의해 형성되며, 바다를 통해 이동한다(Jambeck et al., 2015). 현재 미세플라스틱은 대기, 해양, 북극 눈, 남극 해빙, 남극 눈, 남극 빙하 등 다양한 생태계에서 뚜렷하게 나타난다. 1950년부터 2015년까지 플라스틱 생산량과 처리량을 비교해보면, 초반기에는 생산량 증가가 완만하였지만, 최근으로 갈수록 기하급수적으로 생산량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 미래에는 더욱 가파른 생산량 증가가 예상된다.



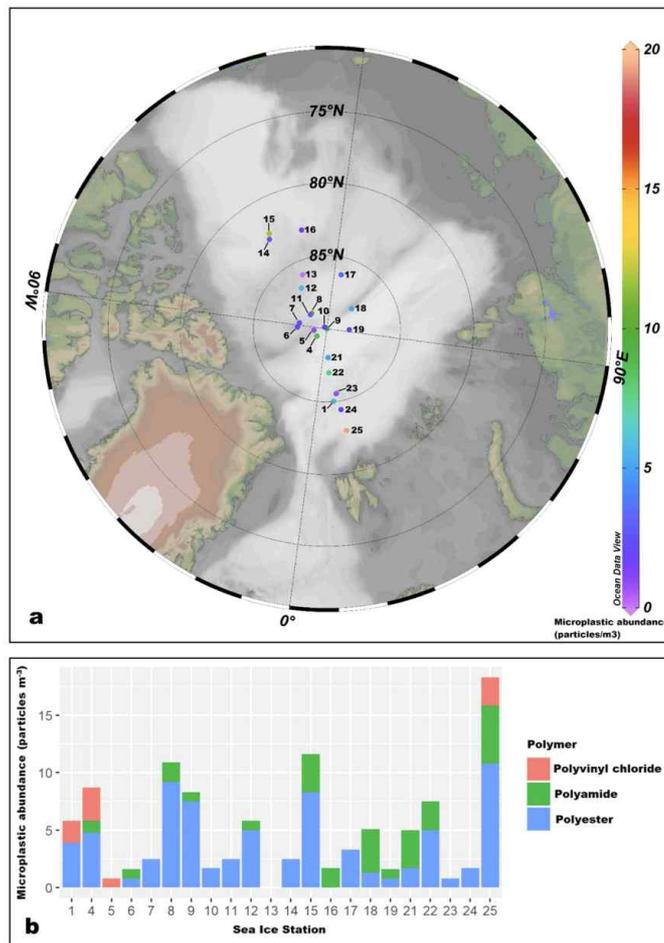
<플라스틱 누적생산량과 처리량(백만톤 단위). 실선은 1950년에서 2015년까지 데이터를 나타내고, 점선은 이전까지의 트렌드에 따라 예측한 결과임(Geyer et al., 2017). 이 데이터에 따르면 미래로 갈수록 기하급수적으로 플라스틱 생산량/처리량이 증가함>

지구온난화에 따른 극지방 얼음의 상실은 해수면 변동을 일으키고, 이는 간접적으로 기후 변화를 일으킨다(Alley et al., 2012; DeConto and Pollard, 2016; Pollard and DeConto, 2009). 기존의 얼음 유동법칙은 높은 변형을 얻을 수 있는 장비의 부족으로 부정확하며, 빙하의 붕괴 등 자연현상을 예측하는데 직접적으로 적용되지 못한다.



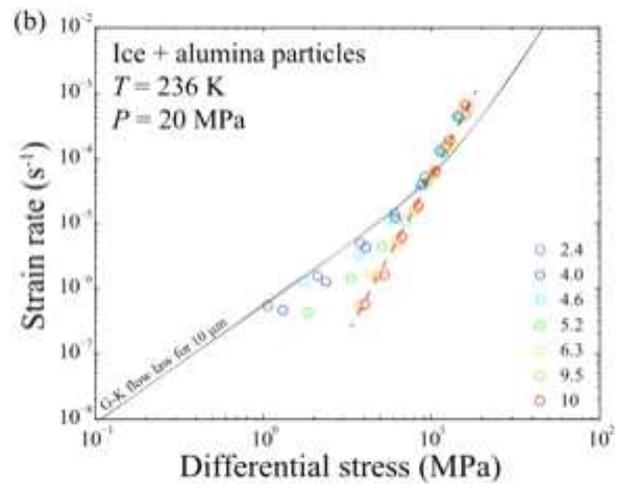
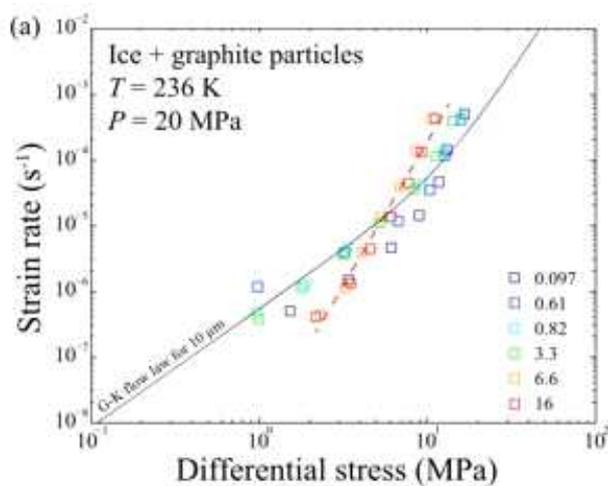
<대리석, 석영, 감람석 등의 변형-변형률 관계의 도식도. 변형실험에 의해 획득할 수 있는 변형은 한정되어 있기 때문에, 적절한 유동법칙을 획득하지 못하는 경향이 있음>

대기, 해양, 지하수, 눈 등에서 미세플라스틱이 상당량 함유되어 있다는 논문들이 출간되면서 인류가 사용하고 있는 미세플라스틱에 의한 오염이 심해지고 있다는 것이 알려졌다. 미세플라스틱 사용이 증가한다면 미래에 북반구 얼음, 남반구 눈, 얼음에서도 미세플라스틱이 상당량 검출될 가능성이 높다.



<북극 해빙에 함유된 미세플라스틱의 함유량(Kanhai et al., 2020)>

지질학자들은 얼음 내 함유된 테프라(tephra: 화산재 일종)가 얼음 흐름법칙에 끼치는 영향을 연구하기 위해 흑연(graphite), 알루미늄(alumina)을 함유하여 고압실험을 실시하였지만, 지구 또는 극지방에 실험결과를 응용하지 못하고 화성의 얼음층(South Polar Layered Deposits, SPLD) 형성을 설명하는데 그쳤다(Qi et al., 2018). Qi et al. (2018)은 이물질(흑연, 알루미늄) 함유량이 많아질수록 변형률-응력 관계는 기울기가 급해지고, 이는 적은 응력으로 많은 변형을 일으킬 수 있다는 의미이므로, 이물질 함유량이 얼음의 흐름을 가속화할 수 있음을 의미한다(아래 그림 참조). 따라서 이물질을 함유한 얼음을 변형하면, 이물질 함량에 따른 새로운 얼음 흐름법칙을 구할 수 있고, 이는 미래 극지방 얼음지형 변화를 예측하는데 유용하게 사용될 것이다.



<얼음 내 불순물(a. 흑연, b. 알루미나)을 함유한 실험의 변형률-응력 관계 그래프(Qi et al., 2018). 불순물 함량이 높을수록(푸른색->붉은색) 변형률-응력 기울기가 급해지고, 작은 응력으로도 얼음이 빨리 이동한다고 해석될 수 있음>

최근 인류의 활동에 의해 생성되는 환경오염 물질의 양이 기하급수적으로 늘어남에 따라, 얼음에 포함될 불순물의 종류가 다양해지고 함량이 급격히 늘어날 것으로 전망되고 있다. 따라서 이 과정은 새로운 종류의 불순물이 얼음의 유동학적 행동을 변화시킬 수 있는 가능성을 보여줄 수 있을 것이다.

본 연구의 주제는 ‘제1차 해양수산과학기술 육성 기본계획’ 중 “전략2. 사회문제 해결을 위한 해양수산과학기술 기반 확보성”, ‘제3차 남극연구활동진흥기본계획’ 중 “남극연구 지평확대”, 및 ‘국가R&D혁신방안 실행계획’ 중 “전략1. 산학연 차별화된 R&D체제 구축-미래 선도 원천연구의 메카로 육성”과 연관된다.

## 1.2절 연구 최종 목표 및 연차별 목표

### 1. 최종목표

본 과제의 최종목표는 다음과 같다.

- 가. 얼음 내 불순물 함량에 따른 물리적 변화 측정
- 나. 얼음의 물리적 특성 변화에 따른 극지방 얼음지형 모델링
- 다. 얼음의 물리적 특성 파악을 위한 장비 개발

### 2. 연차별 목표

#### 가. 1년차 목표

- (1) 극지방 바다 및 얼음에서 산출하는 불순물의 종류 및 함량 조사
- (2) 불순물의 종류 및 함량을 다양화한 합성얼음 제작
- (3) EBSD 장비 설치 및 기본기능 운용
- (4) 합성얼음장치 개발을 위한 기초자료 작성

#### 나. 2년차 목표

- (1) 다양한 함량의 불순물을 함유한 합성얼음을 이용한 변형실험 실시
- (2) 다양한 조건의 변형실험 테스트
- (3) 합성얼음장치 설치
- (4) 합성얼음장치 운용

#### 다. 3년차 목표

- (1) 합성얼음의 물리적 특성데이터 해석
- (2) 합성얼음의 물리적 특성 변화를 이용한 극지방 얼음지형 모델링
- (3) Cryo-system 설치를 위한 필요조건 조사
- (4) Cryo-system 기초자료 작성

### 1.3절 연구 추진 체계 및 수행 방법

#### 1. 연구 추진 체계

#### 불순물이 극지방 얼음지형 변화를 초래하는 미래 예측 연구

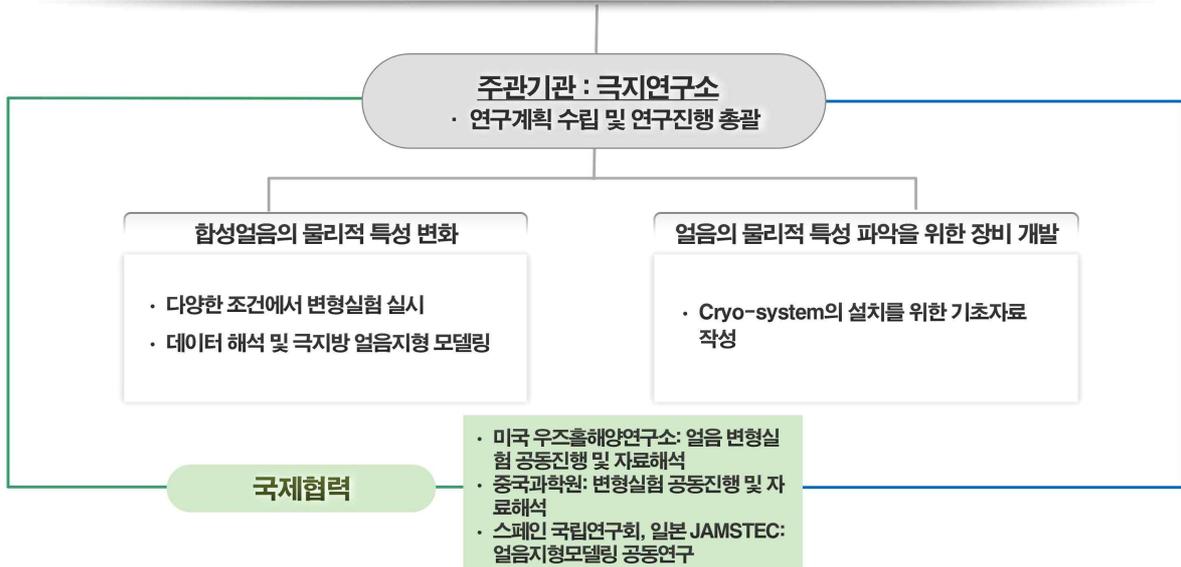


<연구 추진 체계>



#### 2. 연구 수행 방법

#### 불순물이 극지방 얼음지형 변화를 초래하는 미래 예측 연구

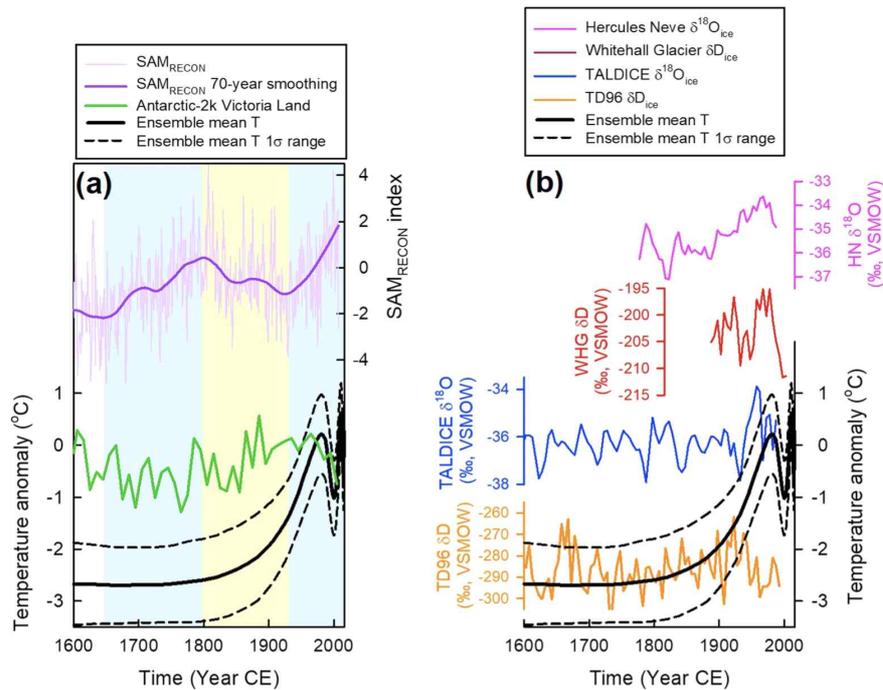


<연구 수행 방법>

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

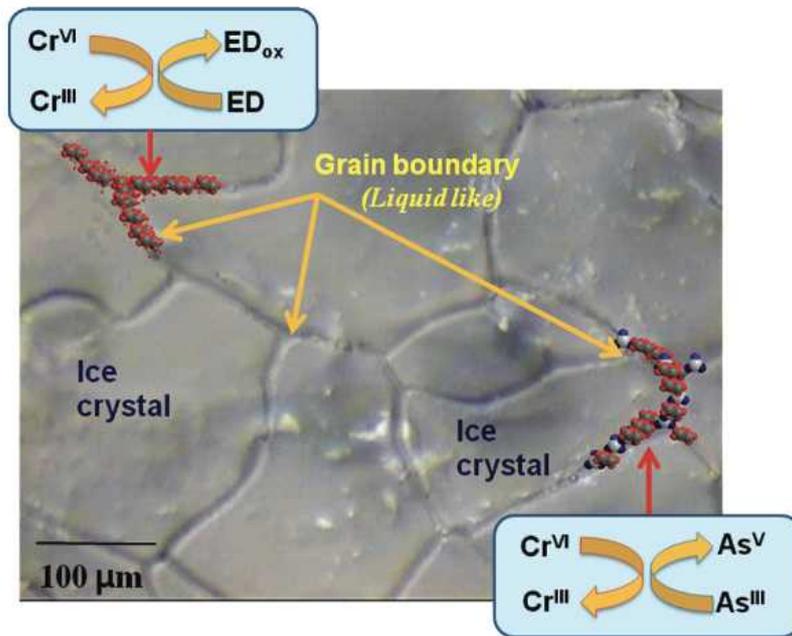
### 2.1절 국내 연구 현황

국내에서는 얼음의 물리적 특성보다 화학적 특성에 관한 연구가 활발하며, 기후변화를 추적하는데 주로 사용한다. 극지연구소 주관 하에 남극에서 천부빙하 시추를 실시한 적이 다수 있으며, 빙하코어에서 채취한 이산화탄소를 이용해 기후변화 추적에 사용한다.



<빙하코어에서 채취한 이산화탄소를 이용한  
기후변화 추적. Yang et al. (2018)에서  
발췌>

최근 극지연구소에서 결빙 과정 중 일어나는 해독 화학반응 및 그와 관련된 응용기술 개발을 주제로 한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 결빙 시 크롬염산, 아비산염 등은 입자경계에 응집하는 경향이 있으며, 산화환원 반응에 의해 독성이 줄어든다.

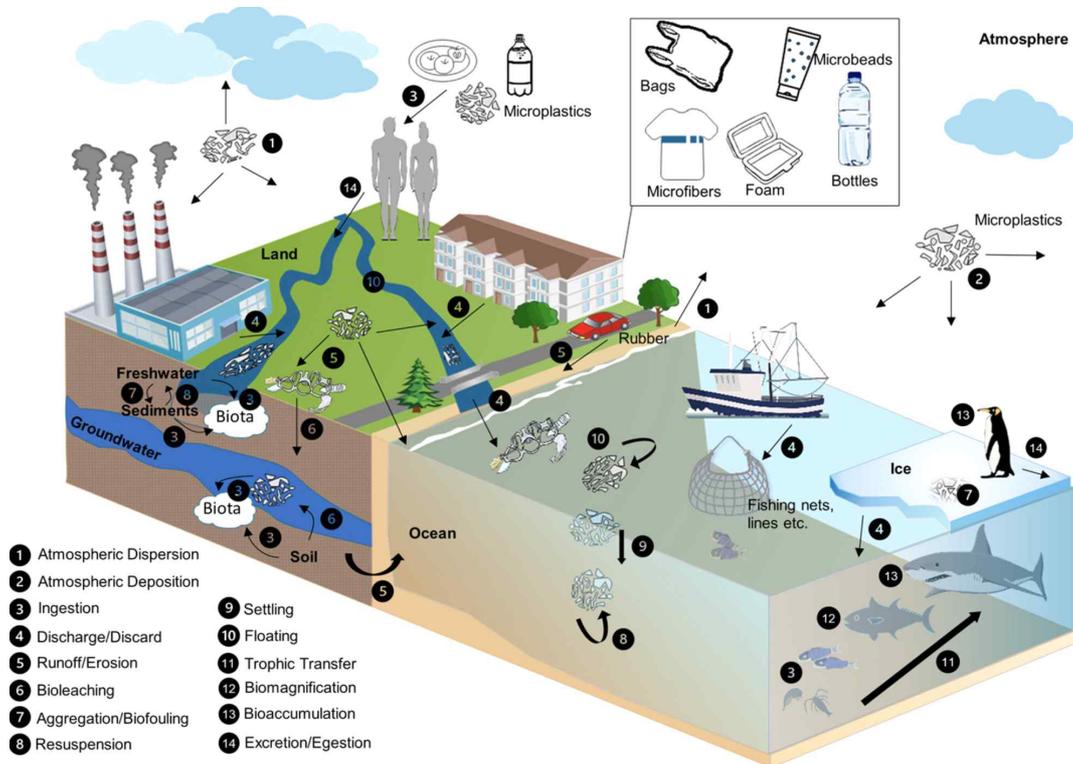


<결빙 과정에서 일어나는 크롬산염과 아비산염의 산화환원 반응. Kim et al. (2011)에서 발췌>

국내에서 얼음연구의 선구자라 할 수 있는 극지연구소에서도 얼음의 물리적 특성에 대한 연구결과가 거의 없고, 장비, 인력 등 모든 요소가 갖춰져 있지 않다. 얼음의 물리적 특성에 대한 연구는 미국, 호주, 뉴질랜드 등 많은 선진국에서 발전하고 있는 상황임을 감안할 때, 극지연구소에서 본 주제에 대해 접근할 필요가 있다. 따라서 좀더 다양한 연구주제를 선점하기 위해서, 장비를 갖추고 인력을 양성하는 등 빠른 연구실행이 필요하다.

## 2.2절 국외 연구 현황

얼음은 기포, 화산재, 기반암으로부터 유래된 암석파편 등 다양한 불순물을 가지고 있다. 최근 인류의 활동에 의한(anthropogenic) 불순물도 추가되어, 북극 또는 남극 인근에서 눈, 해수 또는 해빙 내 미세플라스틱이 발견되고 있다(아래 그림 참조). 따라서 과거에 비해 다양한 종류의 불순물이 함유된 얼음이 존재할 가능성이 커졌다.



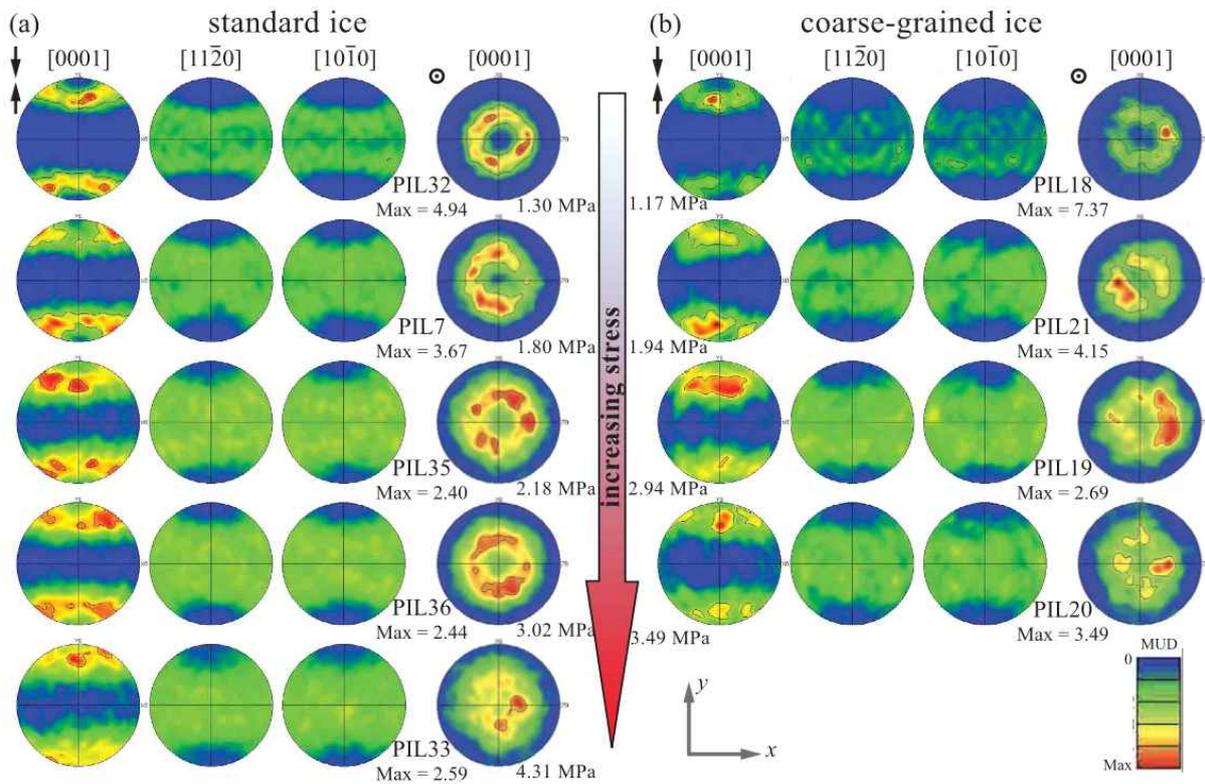
<미세플라스틱의 발생과 이동경로. Petersen and Hubbart (2021)에서 발췌>

기체를 이용한 얼음 변형실험장비(gas-medium apparatus)가 펜실베이니아대학교에 설치되어 운용된지 이미 10년 이상 지났다. 변형실험을 위해 얼음을 합성하여 표준얼음시료(standard ice, 입자크기가 180~250  $\mu\text{m}$ 로 일정하며 기공이 없는 얼음; Durham et al., 1983)를 제작하였다. 합성얼음 제작은 입자크기와 기체함량 등의 변수(variable)를 줄여주므로 변형실험을 실시하기 위해 필수적인 단계이다.

표준얼음시료를 이용한 많은 변형실험을 통해 얼음의 변형행동이 얼음입자크기, 온도, 응력 등 다양한 요인에 의해 바뀔 수 있다고 알려져 있다(아래 그림 참조). 현재까지 얼음 변형 실험 분야에서는 다양한 실험결과가 존재하지 않았기에 순수얼음의 변형행동 및 미구조 발달이 주요 관심사인 상황이다.



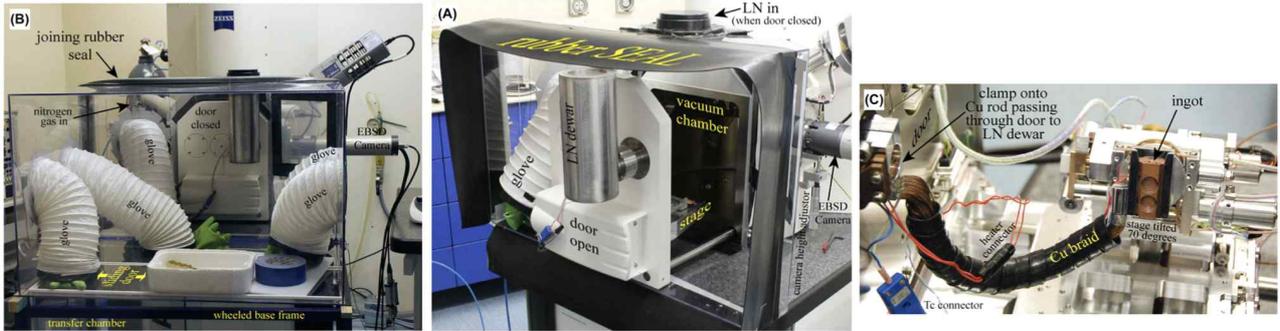
<펜실베니아대학교에 설치된 얼음합성장치의  
일부분(a)과 변형실험장비(b)의 모습>



<응력 증가에 따른 얼음미구조의 변화양상. Qi et al. (2017)에서  
발췌>

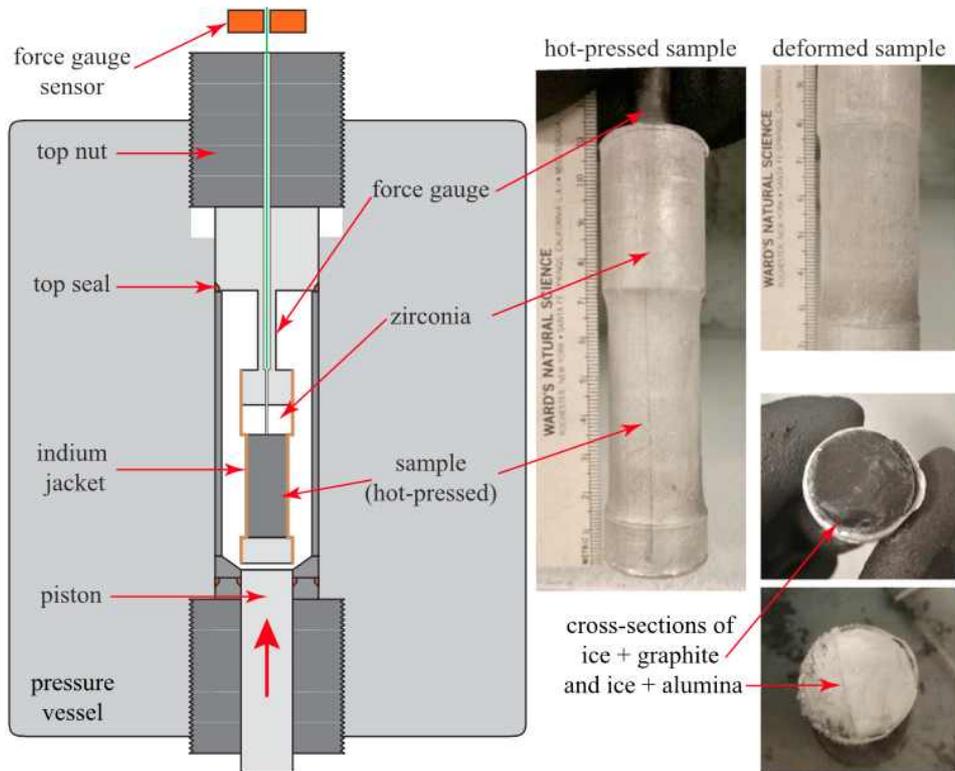
얼음미구조 측정장비(cryo-SEM-EBSD) 장비가 개발된지 10년 이상이 지났고, 결정크기가 큰 자연얼음 샘플을 분석하기 위한 장치를 개발한지 5년 이상 지났다. 미구조분석에서 많이

사용하는 결정방향성 데이터는 스테레오넷에 도시하는데(위 그림 참조), 이때 최소 100~150개 입자의 결정방향성 정보가 필요하다. 얼음결정은 일반적으로 입자크기가 크기 때문에(최소 1 mm 이상), 큰 샘플의 분석이 필요하다. 자연에서 채취한 얼음의 경우, 약 2 mm 이상의 입자 크기를 가지기 때문에 더 큰 샘플의 분석이 필요하다.



<얼음미구조 측정장비에 설치된 주요부품 개발 모습. Prior et al., (2015)에서 발췌>

순수 얼음의 변형실험 외에도 불순물을 포함한 얼음의 변형실험이 진행된 적이 있다(아래 그림 참조). 다양한 함량의 불순물(1  $\mu\text{m}$  흑연 및 0.8  $\mu\text{m}$  알루미늄 입자)을 함유한 입자크기가 작은 얼음(ca. 10  $\mu\text{m}$ )을 합성하고,  $-30\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 변형실험을 실시하였다. 불순물을 6%보다 적게 함유한 샘플은 얼음결정들이 마주하고 있기 때문에 결정입계미끄러짐(grain boundary sliding) 현상에 의해 변형운동이 일어난다. 불순물이 6%보다 많은 샘플에서는 얼음결정들이 마주하고 있지 않기 때문에 전위크립(dislocation creep)에 의해 변형운동이 일어난다. 하지만 본 연구결과는 극지방 환경에 적용하지 못하고, 화성의 얼음층(South Polar Layered Deposits, SPLD) 형성을 설명하였다.



<얼음 내 불순물(a. 흑연, b. 알루미나)을 함유한 실험의 실험장치와 샘플 사진. Qi et al. (2018)에서 발췌>

많은 구조지질학 연구자들이 얼음의 변형행동에 관심을 갖기 시작한지 3년 이상 지나 순수얼음의 변형행동에 대해 활발한 연구가 진행되고 있다. 하지만, 얼음 내 불순물이 포함된 경우에 대해서는 아직 생각하지 못하고 있다. 따라서 최근 환경 분야에서 이슈가 되고 있는 인류의 활동에 의해 형성된 불순물을 함유한 얼음의 변형행동에 대해 연구한다면 재미있는 연구결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 다양한 연구주제에 대해 선점하기 위해 본 과제의 빠른실행이 필요하다. 이와 동시에 합성얼음을 제작하는 장비, 얼음의 물리적 특성을 측정할 수 있는 장비를 개발하고, 연구인력을 양성할 필요가 있다.

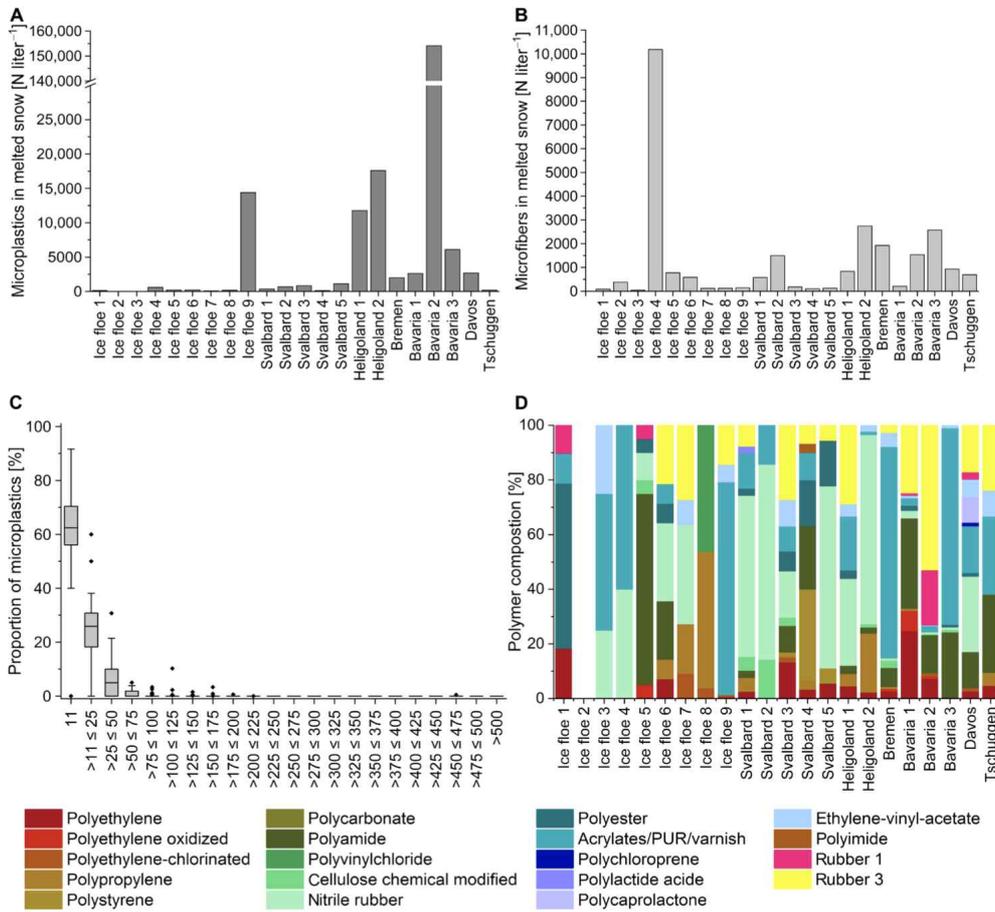
## 제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

### 3.1절 극지방 바다 및 얼음에서 산출하는 불순물의 종류 및 함량 조사

최근 실생활에서 가장 많이 주목받는 오염물질이라면 미세플라스틱이라고 할 수 있다. 특히 플라스틱의 생산량은 최근 30년간 약 6배 이상 증가(Geyer et al., 2019)하여, 미세플라스틱이 북반구 지역 산지의 해양, 눈, 빙하 뿐 아니라, 남극 눈, 빙하에서까지 산출될 정도로 많이 확산되었다.

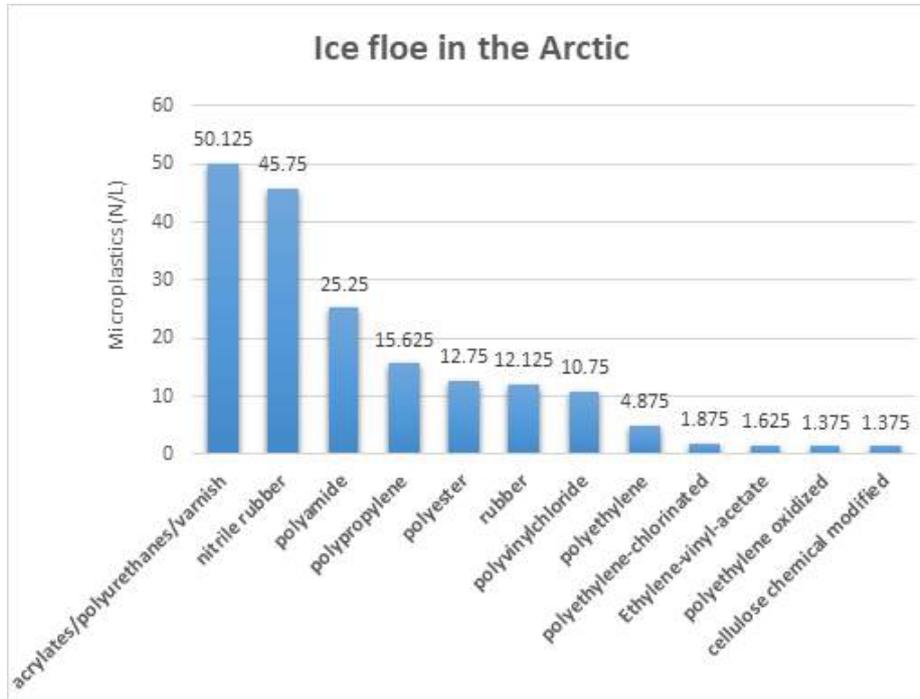
현재 극지방에서 얼음에 자연적으로 포함된 불순물은 화산재에 의한 테프라, 기반암에서 유래한 광물(석영), 눈으로 쌓였을 때 포함된 기포 등이다. 인류에 의한 영향은 미세먼지가 유일하고, 이들의 급격한 사용량/폐기량 증가는 미래 남극 빙하에 포함될 가능성이 크다는 것을 의미한다. 따라서 미세먼지의 포함이 남극 빙하의 물리적 특성 변화에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다.





<최근 발표된 극지방 눈에서 발견된 미세플라스틱의 종류 및 함량. Bergmann et al. (2019)에서 발췌>

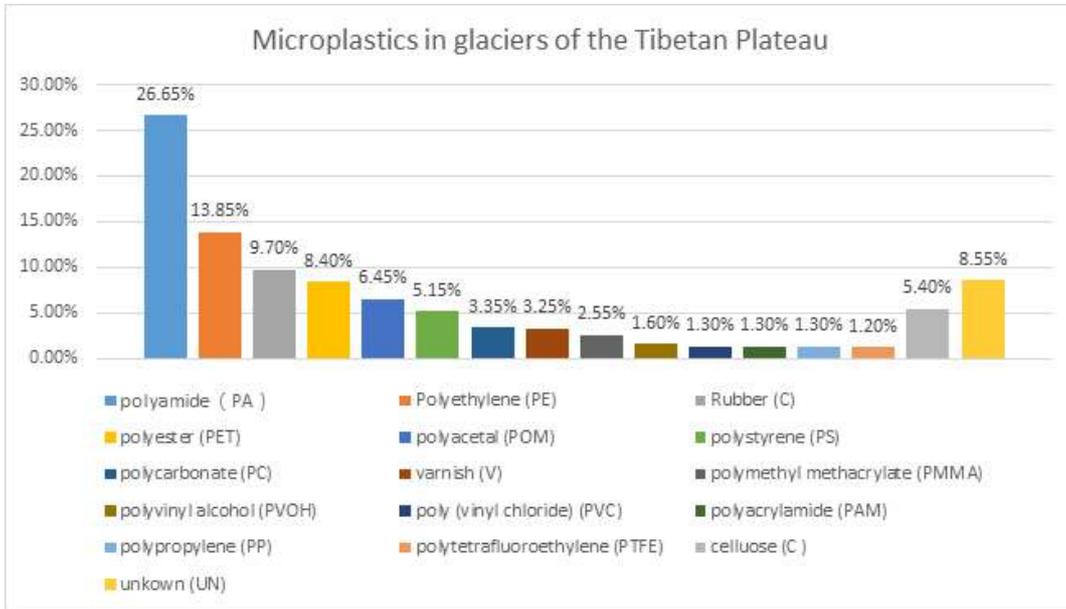
현재 남극 빙하의 거동에 대한 연구가 많이 진행되지 않았다. 따라서 현재 보고된 논문을 바탕으로 극지방에서 산출된 미세플라스틱의 종류와 함량에 대해 조사하였다. Ambrosini et al. (2019), Bergmann et al. (2019), González-Pleiter et al. (2020, 2021), Hoffmann et al. (2020), Kanhai et al. (2021), Mishra et al. (2021), Napper et al. (2020), Parolini et al. (2021), Zhang et al. (2021) 등 총 10여편의 논문을 조사하였다.



<북극지방의 유빙에서 발견된 미세플라스틱.

Bergmann et al. (2019)에서 자료수집>

자료를 조사하고, 표로 정리한 결과, 고산지대 만년설, 극지방 바다 및 얼음에는 polyamide (PA), polyethylene (PE), rubber (C), polyester (PET), polyacetal (POM), polystyrene (PS) polycarbonate (PC), varnish (V) 등 다양한 불순물을 함유하고 있음을 확인하였다. 이를 바탕으로 얼음 변형실험에 첨가할 불순물은 polyamide, polyethylene, rubber 이렇게 세 가지로 후보군을 형성할 수 있었다. 추후 인위적으로 가공할 수 있는 polyethylene 시료를 변형실험에 사용하는 것으로 결정하였다.

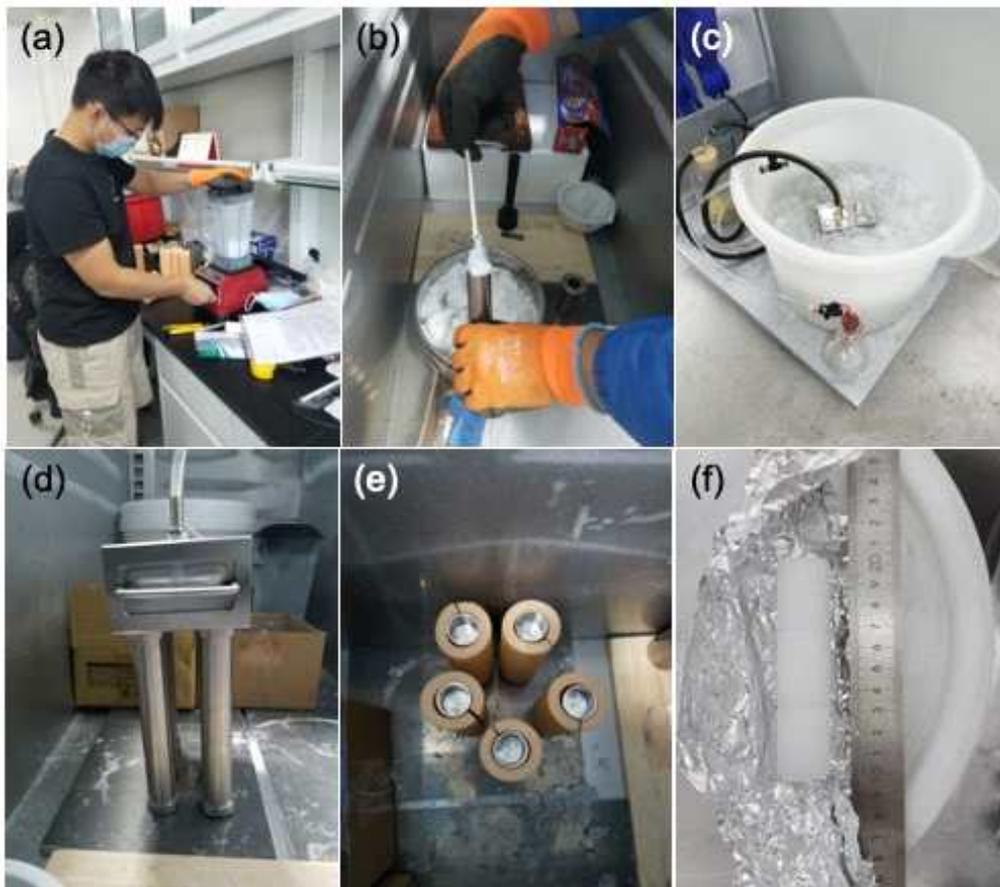


<티벳고원 만년설에서 발견된 미세플라스틱. Zhang et al. (2021) 에서 자료수집>



### 3.2절 불순물의 종류 및 함량을 다양화한 합성얼음 제작

2021년 연차목표 중 하나인 불순물의 종류 및 함량을 다양화한 합성얼음 제작은 Covid-19로 국외출장이 불가능하여, 합성얼음 제작과정을 직접 관찰하지는 못하였다. 이에 중국과학원에 설치된 얼음 합성장치를 이용해 120  $\mu\text{m}$  미세플라스틱을 2 wt%, 4 wt% 포함하고 있는 합성얼음을 제작하고 과정을 사진으로 촬영하였다. 제작방법은 얼음과 미세플라스틱 혼합물을 믹서기로 분쇄하고(a), 틀에 채우고(b), 공극에 물을 주입하고(c), 냉동고에서 얼음을 굳히고(d), 합성얼음을 빼낸 후(e), 합성얼음을 완성한다(f).



<중국과학원에 설치된 얼음 합성장비를 이용해  
미세플라스틱을 함유한 합성얼음을 제작하는 과정>

위 과정을 통해 지름 약 25 mm, 길이 약 100 mm 크기 원통형의 미세플라스틱을 포함한 합성얼음을 제작하고, 제작과정을 습득하였다.

### 3.3절 EBSD 장비 설치 및 기본기능 운용

EBSD(electron backscatter diffraction: 전자 후방산란 회절장치)는 광물의 격자(lattice) 방향성을 측정하는 장비로, 암석의 변형에 대한 정보를 제공해준다. 옥스퍼드(Oxford)사의 EBSD는 키쿠치밴드(Kikuchi pattern) 분석을 지질학에 처음 응용한 선구자이며, 현재 지질학에서 널리 사용되고 있다. 2015년 얼음샘플 시료분석에서 90% 이상의 정확도로 분석이 가능한 장비를 개발한 적도 있으므로(Prior et al., 2015), 본 제작사의 EBSD를 설치할 필요가 있다.

극지연구소에 기설치된 전계방출주사전자현미경(FE-SEM, low vacuum field emission scanning electron microscope)은 저진공 모드가 있어 샘플표면을 코팅할 필요가 없으므로, 얼음시료 분석에 적합하다. 또한 전계방출(field emission)건에서 발생한 전자를 이용하므로 오랜 시간 분석이 가능하다는 장점이 있어, 이 장비에 EBSD 설치가 적절한 것으로 판단된다.

본 장비의 설치는 추후 얼음샘플 분석을 위한 사전작업의 일환으로, 설치 후 암석샘플에 적용해 분석을 실시하고 성능을 확인한 후, 추후 확장된 규모의 연구사업으로 Cryo-system을 설치할 예정이다. EBSD 장비는 2021년 2월 국가 연구시설장비예산 심의결과를 획득하였고, 2021년 4월 연구소 내 구매요구서를 상신하였다.

#### 연구시설장비 예산심의 결과

심의일자 : 2021-02-04  
 심의번호 : 상21-072

순번	1	심의시설장비번호	상21-072	시설장비명	전자후방산란회절장치	담당부처	해양수산부
세부사업	극지연구소운영지원(주요사업비)		내역사업	기관교유	과제명	남극권 맨틀활동과 지체구조진화 연구	
유형	상시심의	단가	180	수량	1	총금액	180
요청내용 (예란)				희종결과 (예란)			
년도	정부예산 요구액	지체 부담금	합계	심의결과	정부예산 인정액	지체 부담금	정부예산 삭감액
2021	180	0	180	인정	180	0	0
합계:	180	0	180	합계:	180	0	0

- 본 장치는 광물의 결정방향성 측정 및 암석 내 광물의 변형 역사에 대한 정보를 제공해 주기 위한 것으로, 사업과의 부합 타당성이 높고, 사업의 완성도 제고를 위한 중요 장비, 및 첫 도입 장비이며, 구매으로 예산.  
 - 본 장치는 기존 구축되어 있는 FE-SEM(주사전자현미경)과 부속되어 광물의 결정 방향성을 측정하기 위한 것으로, 본 사업에서의 활용도가 높음 것으로 판단되며, 경제적 구매 효율으로 구입성이 높음으로 결정하였음.  
 - 광물의 결정 방향성 측정을 위한 적합한 구성으로 제시되었고, 장비 구축에 소요되는 비용도 과다하지 않고 적정하게 결정함.  
 - 장비 활용을 제고하기 위한 전문성 및 인력 확보 방안 등의 효율적이고 합리적인 활용 계획이 제시되었음.  
 - 장비 구축, 운영, 관리에 필요한 공간, 운영비 확보 방안 등과 관련하여도 구체적인 운영 계획이 제시됨.  
 - 이상을 종합하여 본 장비의 도입을 인정함.

#### 구매요구서(외자물품)

발의번호	2021-T220-01541	발의일자	2021. 4. 2.
소속부서	극지연구소	성명	김태영(032-700-5433)
문의제목	EBSD(electron backscatter diffraction) 구매		
발의일자	2021. 7. 30.	발의장소/인수자	극지연구소 511-420호(연자현미경실) / 김태영(54333)
판출	USD 1142.3만	최종도착처	
결제요청매제			

계정번호	계정명	비목	비목명	예산기간	지출금액	계정책임자	서명
FE21050	남극권 맨틀활동과 지체구조진화 연구	EBG	연구장비비	2021. 1. 1. ~ 2021. 12. 31.	122,134,716	박승현	박승현
FE21430	지체활동에 미치는 '열충격' 영향 평가를 통해 온대-위대 지역 연구	EBG	연구장비비	2021. 11. 31.	81,423,144	김태영	김태영

※ 해당 자. 결재순서는 계정번호입니다.

아래와 같이 신청 함.

번호	물품명 및 단위	수량	단위	추정단가 (USD)	추정금액 (USD)	계정금액 (원화)	부속비 (원화)	계정번호	사용자	
1	후방산란전자회절장치(EBSD Symmetry S2100) (주요자산번호: 543331001001)	1	EA	162000	162000	81,423,144		FE21430	186	김태영
						122,134,716		FE21050	186	김태영

추정금액 합계 : 162,000,000(USD) . 계정금액 합계 : 203,557,860원 (부대비용 10% ~ 3년단리이상인 가산)

#### <국가 연구시설장비예산 심의 결과와 극지연구소 내 구매요구서>

EBSD 장비는 2021년 8월 3일 극지연구소 내 설치를 시작하였으며 8월 6일까지 설치를 완료하였다. 추후 1일간의 테스트, 1일간의 사용자 교육을 하였고, 10일간 분석테스트도 완료하였다.



<EBSD 카메라(오른쪽)와 연구소 내 FE-SEM에 설치된 모습(오른쪽)>

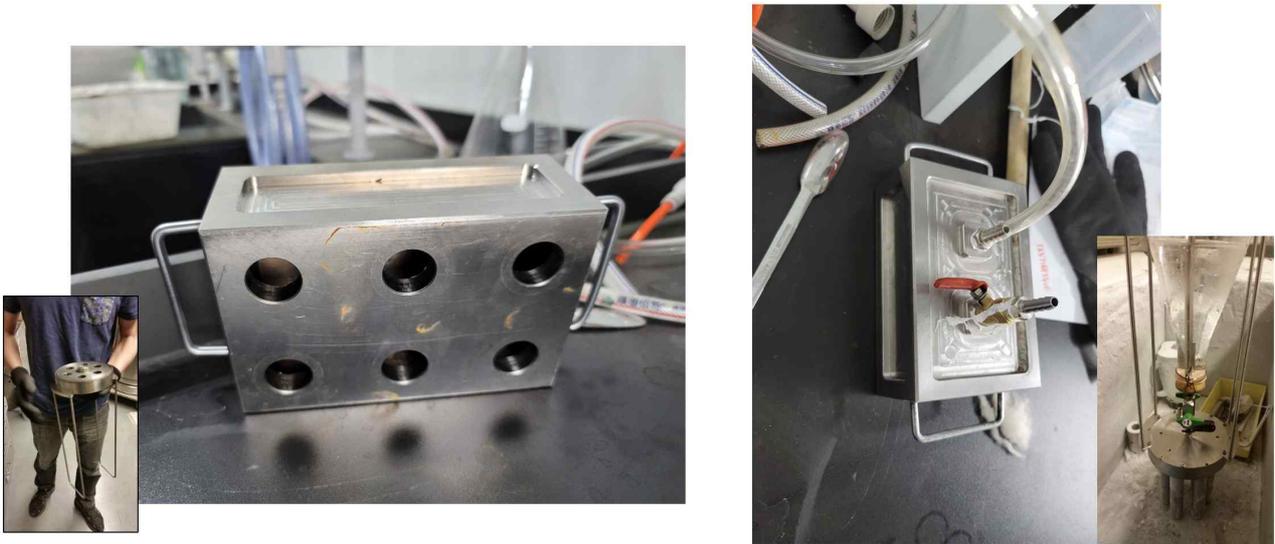


<극지연구소 내 설치된 EBSD 장비를 이용해 암석의 미구조를 분석하는 모습>

### 3.4절 얼음합성장치 개발을 위한 기초자료 작성

얼음 합성얼음장치는 다양한 변수 중 입자크기(grain size)와 기공(vapor)의 함량, 분포 등을 조절해주므로, 변형실험에 있어 필수적인 장치이다. 표준얼음(standard ice) 시료는 1983년 개발된 이래 얼음 변형실험에 많이 사용된다(Durham et al., 1983). 본 과제에서 국내 최초로 표준얼음 시료를 제작하기 위해 2021년 중국과학원, 미국 펜실베니아대학교에서 기초자료를 획득하였다.

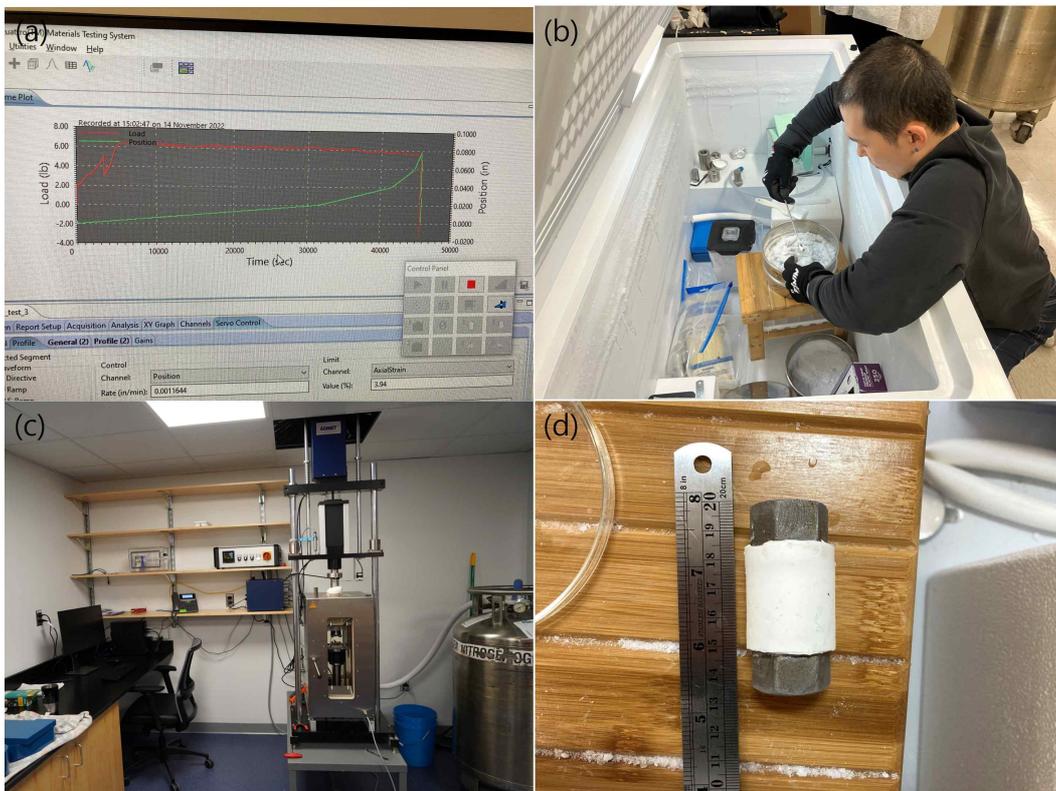
기초자료는 미국 펜실베니아대학교 장치를 바탕으로 최근 제작한 중국과학원 장치를 참고하여 작성하였다. 제작에는 기초자료를 발표자료로 만들어, 소내 기술원들과의 회의를 통해 기초자료를 정정 및 수정하였다. 합성얼음장치를 개발할 업체 정보를 소내 기술원들에게 획득하고, 인터넷 상에서 업체정보를 검색하여 얼음합성장치 제작업체를 선정하였다.



<얼음입자 내 물을 주입하는 장치의 비교>

### 3.5절 변형실험장비 테스트

변형실험은 2년차에 계획되어 있었으나, 기존 공동연구자였던 미국 펜실베이니아대학교 내부 사정상 공동연구를 실시하지 못하게 되었다. 세계적으로도 변형실험장비가 설치된 곳이 드문 상황에서 얼음변형실험장비를 설치하고 있는 곳들의 상황을 문의하였다. 이에 새롭게 얼음 변형실험장비를 설치완료한 미국 우즈홀해양연구소 Andrew J. Cross 박사와 공동연구를 협의하여, 장비의 테스트가 필요해 2022년 11월 1주일간 방문하여 파일럿 실험을 1회 실시하기로 계획하였다.



<미국 우즈홀해양연구소에서의 변형실험 (a) 변형률 변화 단계 실험 사전테스트, (b) 얼음합성을 위해 씨앗을 만들고 원형 틀에 채우는 모습, (c) 얼음합성장치와 액체질소통, (d) 제작된 불순물을 포함한 합성얼음 시료>

우즈홀해양연구소의 장비는 순수전단(pure shear), 단순전단(simple shear) 시험을 모두 가능하게 하는 특별한 장비이지만, 압력을 가하지 못하는 1 atm 상태에서만 변형실험이 가능하였다. 1주일간의 파일럿 실험은 다음과 같은 순서를 따른다.

1. 총 4단계의 변형률 변화 장비테스트
2. 불순물을 포함한 합성얼음시료 제작
3. 얼음변형장치 - 10도로 냉각(cooling)

#### 4. 변형실험 실시

#### 5. 결과해석 및 2023년 실험 계획

위 단계별로 실험에 착수하였으나, 온도 조절장치의 고장으로 변형실험을 성공적으로 실시하지는 못하였다. 공동연구자인 Andrew J. Cross 박사가 장비제작업체와 온도조절장치 수리 후 변형실험을 실시하여 결과를 전송해주기로 하였다. 실험을 진행하지 못하게 된 시간동안 추가적으로 얼음샘플을 제작하여, 불순물이 함유된 샘플과 대조하기 위한 순수 얼음샘플을 확보하였다.

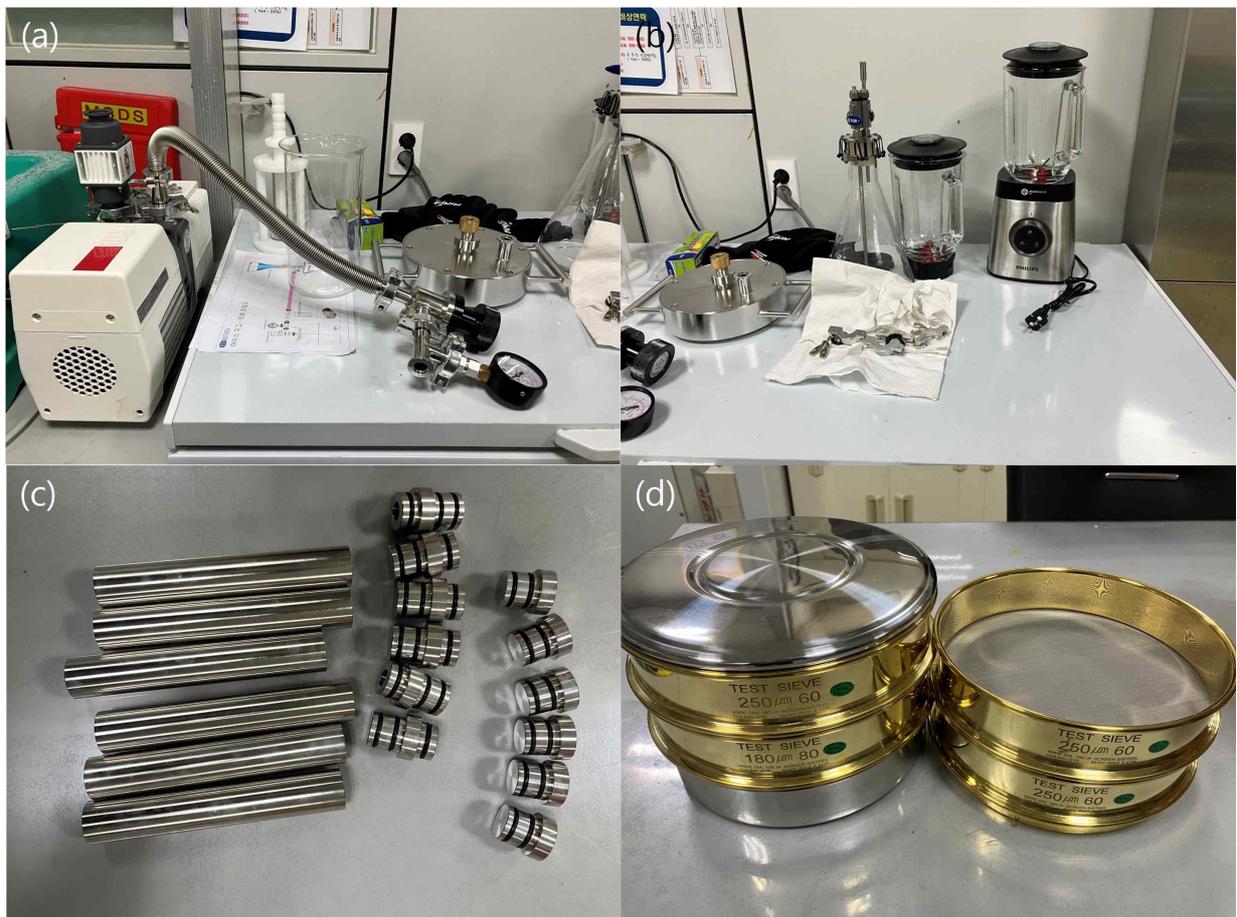


### 3.6절 2종의 얼음합성장치 설치 및 운용

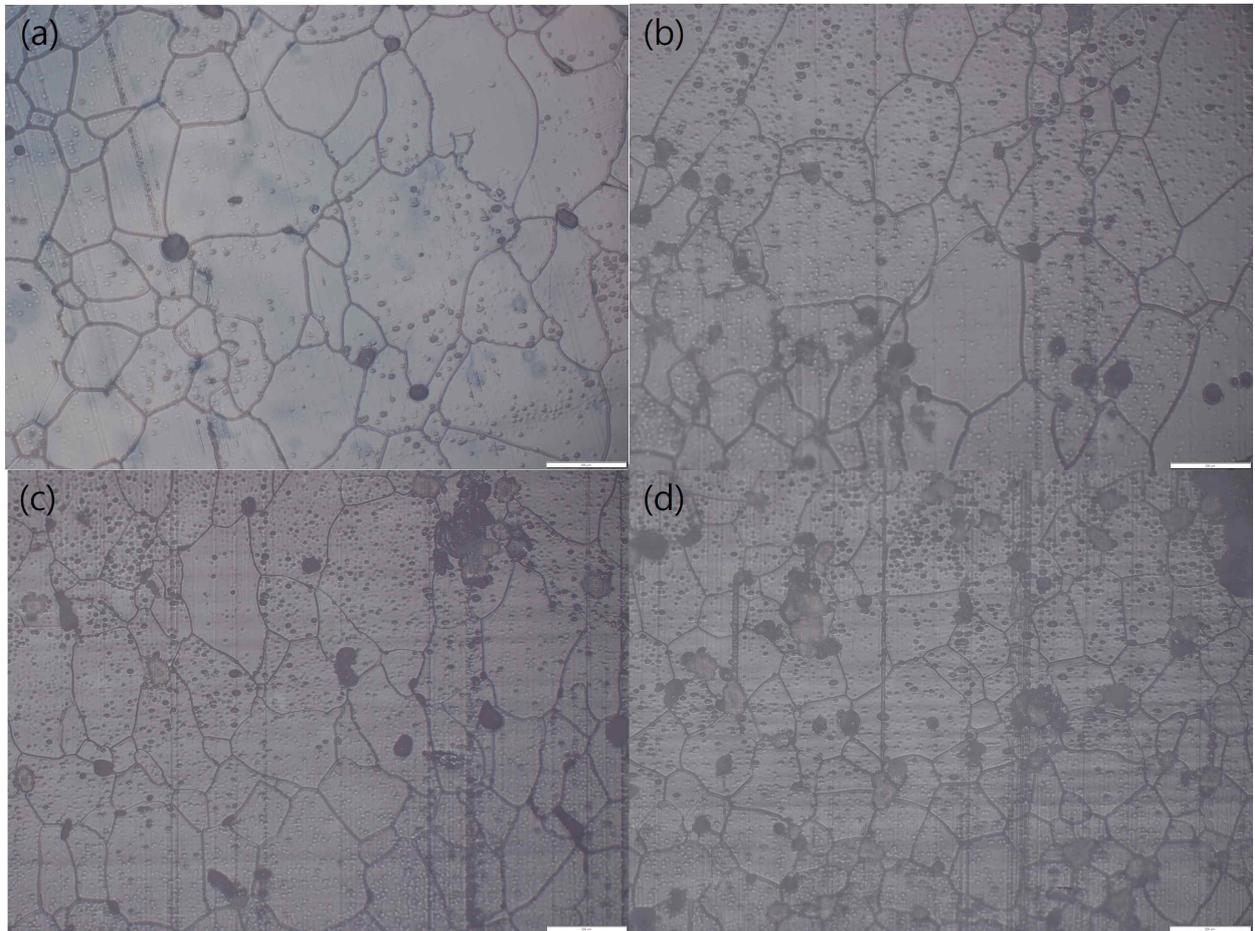
#### 1. 표준얼음 합성장치

표준얼음(standard ice: Durham et al., 1983)은 일정한 사이즈의 기포가 포함되지 않은 시료로써, 기포가 불순물로 작용할 수 있는 변형실험 환경에서 시재료(starting material)를 만드는 얼음 합성장치는 필수적이다. 얼음 합성장치를 통해서 주요 변수들인 기포를 제거하고, 얼음입자 사이즈를 균질하게 유지하여 특정 변수를 조절할 수 있게 해준다.

합성얼음을 제작하는 원리는 분쇄기로 얼음을 갈아 씨앗을 만들고, 체(sieve)로 쳐서 일정한 사이즈의 얼음씨앗(ice seed)을 획득한다. 얼음씨앗을 시료 틀에 채우고 진공을 만들어 물을 주입하면 씨앗 사이의 기공에 물이 채워지며 씨앗에서부터 기공으로 격자의 방향성을 유지한 얼음이 자라며 만들어진다. 이 과정을 거치면 얼음시료에 기포가 생기지 않고, 사이즈(~250  $\mu\text{m}$ )가 일정한 합성얼음이 만들어지며, 체의 크기에 따라 얼음 입자사이즈를 다양하게 조절할 수 있다.



<본 과제에서 고안된 얼음합성장치. (a) 펌프 및 관련 호스들, (b) 플라스크 및 블렌더, (c) 합성얼음 틀, (d) 얼음씨앗 제작을 위한 체(sieve)>



<얼음합성장치를 이용해 제작한 미세플라스틱을 포함한 합성얼음. (a) 순수얼음, (b) 20 $\mu$ m 미세플라스틱 1g 함유한 얼음, (c) 150 $\mu$ m 미세플라스틱 1g 함유한 얼음, (d) 150 $\mu$ m 미세플라스틱 2g 함유한 얼음>

## 2. 고온 압축(Hot-pressing) 합성장치

고온에서 압축하는 방법은 소결작용(sintering process)과 흡사하며, 이때 공기를 펌프로 방출시키면 기포없는 얼음이 합성된다. 이미 판매중인 원통형 틀(die set)을 구매하여, 틀에 얼음씨앗을 채우고 유압기(hydraulic press)를 이용해 압력을 가해 얼음을 합성한다. 이 장치를 이용하면 불순물의 농도를 조절할 수 있고, 얼음씨앗의 크기에 따라 합성얼음의 입자사이즈를 다양하게 조절할 수 있다.



<구매한 원통형 틀(ice die) 세트>





<원통형 얼음틀(ice die) 내 얼음씨앗을 채우고,  
유압프레스(hydraulic press)를 이용해 고온압축(hot-pressing)  
방법으로 불순물을 포함한 얼음시료를 합성하는 모습>

### 3.7절 다양한 함량의 불순물을 함유한 합성얼음을 이용한 변형실험

#### 1. 기계데이터(Mechanical data)

불순물의 종류와 함량에 따라 얼음의 변형특성이 실제로 어떻게 달라지는지 확인하기 위해서는 얼음변형실험의 수행이 필요하다. 2022년 11월 2023년 4월부터 6월까지 총 8주 동안 미국 우즈홀 해양연구소(Woods Hole Oceanographic Institution)에서 Andrew Cross 박사와 함께 얼음변형실험을 실시하였다. 우즈홀 해양연구소의 얼음변형실험기기는 1 atm 조건 하에서 온도를 낮추고 변형실험을 실행할 수 있는 장비로써, 순수 전단실험(pure shear experiment) 뿐 아니라 고변형을 달성할 수 있는 회전식 전단실험(rotary shear experiment)까지 가능한 장치이다.



<미국 우즈홀 해양연구소의 얼음변형실험기기>

얼음변형실험기기의 작동방법은 다음과 같다.

1. 외부에서 연결된 액체질소를 켜고 원하는 실험온도 조건까지 냉각시킨다. 원하는 온도

까지 내려온 후 약 1시간 동안 온도가 안정될 수 있도록(stabilize) 한다. 원기둥 형태의 합성얼음샘플을 기기 안에 넣어준 후 샘플이 실험 온도 조건에서 안정될 수 있도록 30분 이상 기다린다.

2. 변형실험은 샘플 상단에 위치한 피스톤을 최대한 얼음샘플에 가깝게 위치시키고 실시한다. 본 변형실험의 목적은 불순물의 함량 및 종류에 따른 유동법칙(flow law)의 변화를 이해하는 것이므로,  $10^{-6.5} \text{ s}^{-1}$ ,  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ,  $10^{-5.5} \text{ s}^{-1}$ ,  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  총 4개 구간의 변형률(strain rate)을 증가시키며(rate-stepping) 실험을 실시하였다. 본 변형실험 장비의 압력이 1 atm 조건이므로 얼음시료가 깨질 염려가 있어 더 빠른 변형률 하에서 변형실험을 실시할 수 없었다.



<실험샘플의 저온상태를 유지하기 위해 액체질소  
지속 공급이 필수적임. 일반적으로 약 250L  
액체질소를 1.5일만에 소모하고 따라서 1개의  
실험에 1통이 소요됨>



<실험 중 얼음이 녹지 않게 하기 위한 온도조절장치. 온도를 낮출 때는 액체질소를, 높일 때는 코일을 작동해 0.1 °C 내외의 오차를 유지시킬 수 있음>

아래 표와 같이 11개의 서로 다른 불순물 조건 하에서 얼음샘플을 합성한 후 변형실험을 수행하였다. 불순물이 없는 순수한 얼음(WHI-005)도 장비의 정확성을 확인하기 위해 포함해 총 12개 샘플이 되었다. 또한 변형(strain) 정도에 따라 차이를 두기 위해서 5개 샘플을 추가하여 총 17개 샘플에 대해 변형실험이 성공하였다. 샘플합성시 사용한 얼음씨앗의 크기는 50-100  $\mu\text{m}$  사이였기 때문에 얼음입자의 크기는 100  $\mu\text{m}$ 으로 결정하였다. 일반적으로 불순물의 입자크기를 작게 하는데, 본 실험에서는 얼음입자 크기보다 불순물 크기가 큰 경우를 추가하여 20, 150  $\mu\text{m}$  두가지 크기의 불순물을 사용했으며 불순물의 체적 백분율(volume percentage)은 1% 부터 최대 20%까지 변화시켰다. 불순물 외의 변수를 제거하기 위해 얼음 입자의 크기와 샘플 크기, 실험 온도는 모두 유사하게 유지하려고 노력하였다. 응력(stress)과 변형 속도(strain rate)간의 관계 변화를 확인하기 위해 모든 실험의 변형 속도는  $10^{-6.5} \text{ s}^{-1}$ 에서 시작해  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ,  $10^{-5.5} \text{ s}^{-1}$ 를 거쳐  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 까지 총 4단계로 증가시켰다.

샘플 샘플	샘플 지름 (mm)	샘플 길이 (mm)	실험 온도 (°C)	변형률 (%)	얼음 입자 크기 ( $\mu\text{m}$ )	불순물 입자 크기 ( $\mu\text{m}$ )	불순물 함량 (%)
WHI-005	12.7	25.4	-10	9	100	-	0
WHI-019	12.7	25.4	-10	20	100	-	0
WHI-025	12.7	25.4	-10	9	100	20	1
WHI-006	12.7	25.4	-10	9	100	20	2
WHI-027	12.7	25.4	-10	9	100	20	3.5
WHI-007	12.7	25.4	-10	9	100	20	5
WHI-022	12.7	25.4	-10	20	100	20	5
WHI-021	12.7	25.4	-10	9	100	20	8
WHI-023	12.7	25.4	-10	20	100	20	8
WHI-015	12.7	25.4	-10	9	100	20	10
WHI-024	12.7	25.4	-10	20	100	20	10
WHI-016	12.7	25.4	-10	9	100	20	20
WHI-026	12.7	25.4	-10	9	100	20	20
WHI-014	12.7	25.4	-10	9	100	150	2
WHI-013	12.7	25.4	-10	9	100	150	5
WHI-017	12.7	25.4	-10	9	100	150	10
WHI-018	12.7	25.4	-10	9	100	150	20

표. 실험조건 데이터



<변형실험을 마친 얼음샘플>

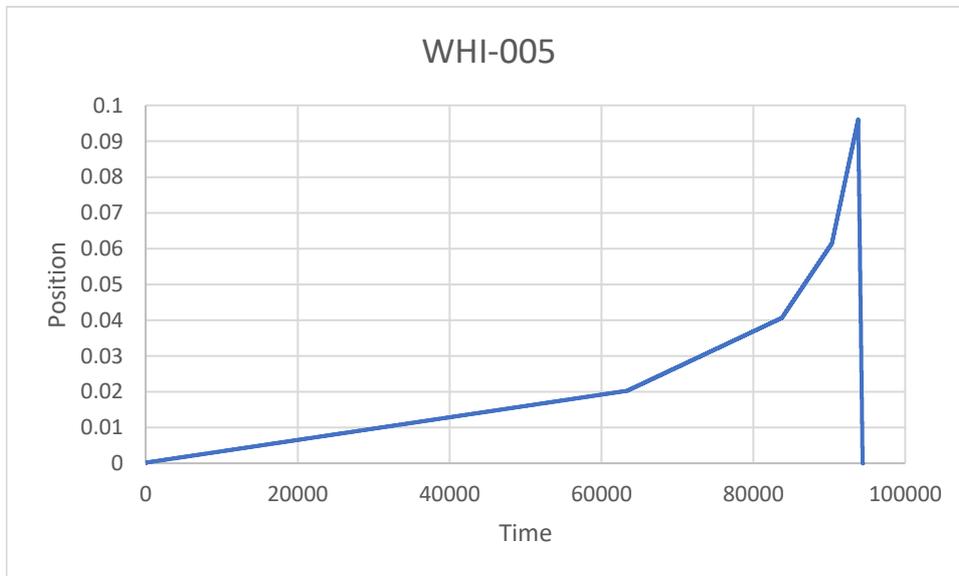
실험을 마친 이후 얼음변형실험기기와 연결된 컴퓨터를 통해 하중(load), 피스톤 이동거리(position), 실험에 소요된 시간(time), 축 변형률(axial strain)등의 정보를 엑셀파일로 저장하였다. 시간과 이동거리(time vs. position) 상관관계 그래프를 그려 각 구간의 기울기로 4개 단계에 해당하는 변형 속도를 확인할 수 있으며, 시간과 하중(time vs. load) 상관관계 그래프에서 해당 변형 속도 구간에서의 최대 하중을 확인할 수 있다. 이후 실험 환경에 맞는 계산으로 하중을 차동 응력(differential stress)으로 보정하면 불순물 조건에 따른 변형 속도와 응력간 관계 변화를 밝혀낼 수 있다. 아래 예시 샘플들의 그래프를 통해 불순물 함량이 높아질수록 하중이 줄어드는 경향을 확인할 수 있으며 이는 곧 샘플이 받은 차동 응력의 감소로 생각될 수 있다.

4가지 변형 속도에 따라 시간대 이동거리 그래프에 4가지 기울기 구간이 형성된다. 동일한 시간에 따른 하중 그래프를 보면 각 구간을 지나면서 하중이 크게 증가하는 것을 볼 수 있는데, 각 구간에 진입한 후 충분한 시간이 지나면 하중 그래프가 평평한 모습을 관찰할 수 있고, 이 구간을 우리가 안정 상태(steady state)에 도달하였다고 판단된다. 안정 상태 구간의 하중값을 보정하고 계산해 차동 응력을 구하면 변형 속도와 차동 응력간의 관계식을 알아낼 수 있다.

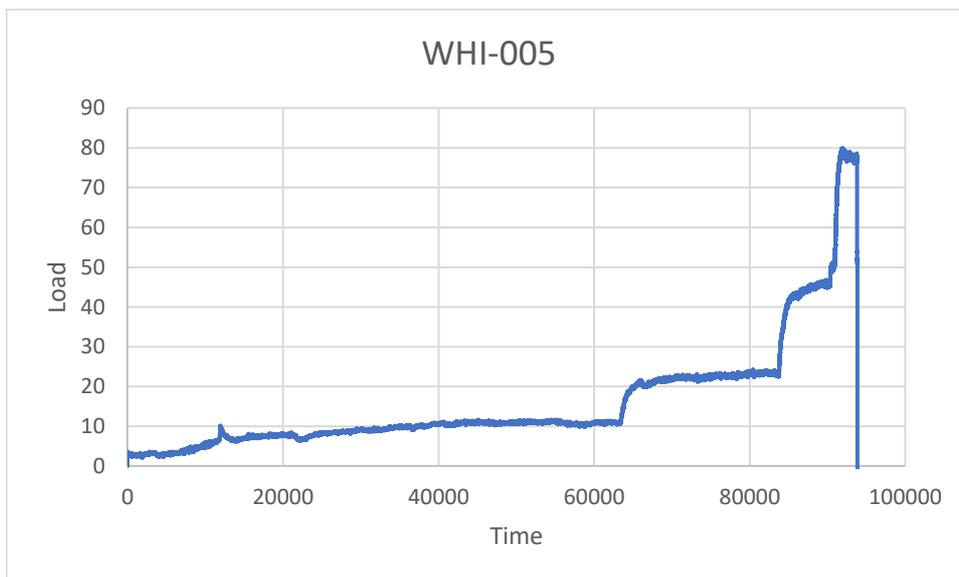


TEST_HEA	Data sour	Date	Time	Specimen	TEST_HEA	SPECIMEN	Specimen	Diameter	Length (in	Corrector	Area (sq in)	Axi
TEST_INFC	39-2023-05/1/2023		16:12:11	39	TEST_INFC	SPECIMEN	Cylinder	0.5	1	1	0.19635	
Time	Load (lb)	Position (in)	AxialStrain	Transverse	Temperature	Rotation (deg)	Torque2 (in-lb)	Angle2 (deg)	Control O	Control O	Stress (MPa)	
0	-0.0063	0	0	NaN	-10.1	0	-0.02276	0	-0.047	6.10E-04	-2.21E-04	
0.0045	-0.0063	0	-6.68E-05	NaN	-10.1	0	-0.02222	0	-1.3044	6.10E-04	-2.21E-04	
0.5045	0.848868	8.18E-05	0.003072	NaN	-10	0	-0.00596	0	-4.51749	6.10E-04	0.029808	
1.0045	2.359601	1.65E-04	0.00728	NaN	-10	0	0.01084	0	-4.09754	6.10E-04	0.082857	
1.5045	3.31773	2.03E-04	0.010553	NaN	-10	0	-0.00163	0	0.047	6.10E-04	0.116501	
4.5045	3.252594	2.03E-04	0.011087	NaN	-10	0	-0.00488	0	-1.67674	6.10E-04	0.114214	
7.5045	3.464811	2.04E-04	0.010753	NaN	-10	0	0.01084	0	-2.23585	6.10E-04	0.121666	
10.5045	3.588779	2.05E-04	0.01229	NaN	-10	0	0.015176	0	-1.8623	6.10E-04	0.126019	
13.5045	3.529947	2.07E-04	0.012223	NaN	-10	0	0.012466	0	-0.65251	6.10E-04	0.123953	
16.5045	3.487924	2.07E-04	0.01269	NaN	-10	0	0.009756	0	-1.07123	6.10E-04	0.122477	
19.5045	3.458507	2.08E-04	0.012757	NaN	-10	0	0.01355	0	-1.76952	6.10E-04	0.121444	
22.5045	3.441698	2.08E-04	0.012356	NaN	-10	0	-0.00705	0	-2.5618	6.10E-04	0.120854	
25.5045	3.405978	2.09E-04	0.010887	NaN	-10	-0.00244	-0.01626	0	-2.84014	6.10E-04	0.1196	
28.5045	3.496328	2.10E-04	0.012624	NaN	-10	0	-0.0065	0	-2.23585	6.10E-04	0.122773	
31.5045	3.466912	2.12E-04	0.012757	NaN	-10	0	-0.01463	0	-1.67674	6.10E-04	0.12174	
34.5045	3.448002	2.13E-04	0.01269	NaN	-10	0	-0.02547	0	-0.83806	6.10E-04	0.121076	
37.5045	3.433294	2.14E-04	0.01269	NaN	-10	0	-0.02168	0	-1.3044	6.10E-04	0.120559	
40.5045	3.424889	2.14E-04	0.013158	NaN	-10	0	-0.02493	0	-1.90991	6.10E-04	0.120264	
43.5045	3.433294	2.15E-04	0.012557	NaN	-9.9	0	-0.02602	0	-2.5618	6.10E-04	0.120559	
46.5045	3.466912	2.16E-04	0.013158	NaN	-9.9	0	-0.02927	0	-3.02692	6.10E-04	0.12174	
49.5045	3.277808	2.17E-04	0.01456	NaN	-9.9	0	0.015176	0	-2.4678	6.10E-04	0.115099	
52.5045	3.368158	2.18E-04	0.014026	NaN	-9.9	0	0.026016	0	-1.81591	6.10E-04	0.118272	
55.5045	3.414383	2.20E-04	0.01436	NaN	-9.9	0	0.02168	0	-0.6989	6.10E-04	0.119895	
58.5045	3.433294	2.21E-04	0.014293	NaN	-10	0	0.019512	0	-0.97845	6.10E-04	0.120559	
61.5045	3.429091	2.21E-04	0.01456	NaN	-10	0	0.009756	0	-1.44357	6.10E-04	0.120412	
64.5045	3.401776	2.22E-04	0.014427	NaN	-10	0	0.005962	0	-2.04908	6.10E-04	0.119452	
67.5045	3.37236	2.23E-04	0.015562	NaN	-9.9	0	-0.00108	0	-2.74736	6.10E-04	0.118419	
70.5045	3.349247	2.23E-04	0.015696	NaN	-9.9	0	-0.0103	0	-2.98053	6.10E-04	0.117608	
73.5045	3.357652	2.25E-04	0.014961	NaN	-9.9	0	-0.0206	0	-2.23585	6.10E-04	0.117903	
76.5045	3.35345	2.27E-04	0.014828	NaN	-10	0	-0.03794	0	-0.6049	6.10E-04	0.117755	
79.5045	3.332438	2.27E-04	0.015095	NaN	-10	0	-0.02981	0	-0.79167	6.10E-04	0.117018	
82.5045	3.321932	2.28E-04	0.014494	NaN	-10	0	-0.03848	0	-1.35079	6.10E-04	0.116649	
85.5045	3.4438	2.29E-04	0.014627	NaN	-10	0	-0.03794	0	-1.90991	6.10E-04	0.120928	
88.5045	3.223178	2.29E-04	0.015829	NaN	-9.9	0	0.011924	0	-2.4678	6.10E-04	0.113181	
91.5045	3.275707	2.30E-04	0.015429	NaN	-9.9	0	0.019512	0	-2.93414	6.10E-04	0.115026	
94.5045	3.332438	2.32E-04	0.015963	NaN	-9.9	0	0.022222	0	-1.8623	6.10E-04	0.117018	
97.5045	3.340843	2.33E-04	0.016097	NaN	-10	0	0.006504	0	-1.39718	6.10E-04	0.117313	
100.5045	3.326134	2.34E-04	0.015829	NaN	-10	0	-0.00542	0	-0.6989	6.10E-04	0.116796	
103.5045	3.311426	2.35E-04	0.016097	NaN	-10	0	-0.02873	0	-1.11762	6.10E-04	0.11628	
106.5045	3.387068	2.35E-04	0.016364	NaN	-9.9	0	-0.05257	0	-1.81591	6.10E-04	0.118936	
109.5045	3.176952	2.36E-04	0.016431	NaN	-9.9	0	-0.0206	0	-2.37502	6.10E-04	0.111558	

<순수열음 샘플(WHI-005)의 실험데이터에서 획득할 수 있는 시간, 하중, 위치, 축변형률, 온도, 응력 등의 데이터>

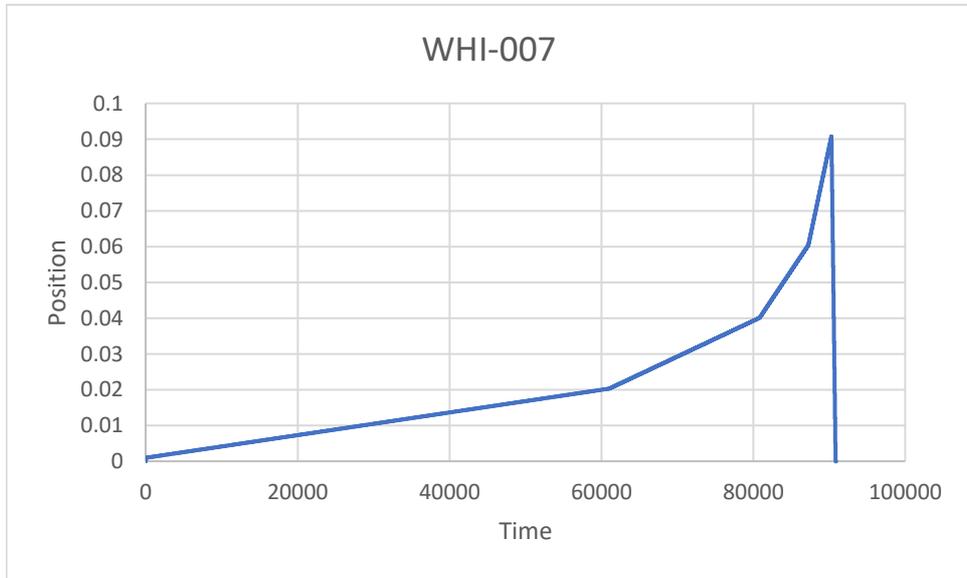


<순수얼음 샘플(WHI-005)의 시간(초)과 이동거리(인치) 상관관계 그래프. 4단계의 변형 속도에 따라 그래프 기울기가 4가지로 달라짐을 보임>

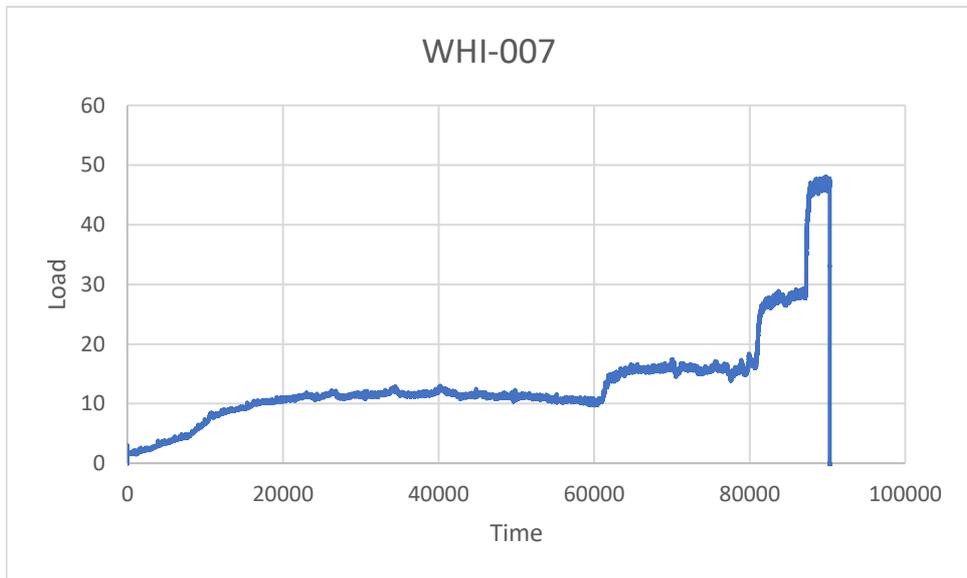


<순수얼음 샘플(WHI-005)의 시간(초)과 하중(파운드) 상관관계 그래프. 4단계의 변형 속도 구간에 따라 하중이 4단계의 계단과 같은 모습을 보임>

순수얼음이었을 때 최대 하중이 각 단계별로 약 10, 23, 45, 79파운드였던 것과 비교해, 20  $\mu\text{m}$  크기의 작은 불순물이 포함된 샘플의 변형 기계데이터(mechanical data)는 대부분의 구간에서의 하중이 각 단계별로 약 12, 17, 28, 48 파운드로 비슷하거나 감소하는 경향을 보여준다. 특히 마지막 구간 하중의 감소폭이 제일 크다. 즉, 얼음에 불순물이 포함되면 순수한 얼음이었을 때보다 빠른 변형을 받았을 때 강도가 크게 낮아진다고 할 수 있다.

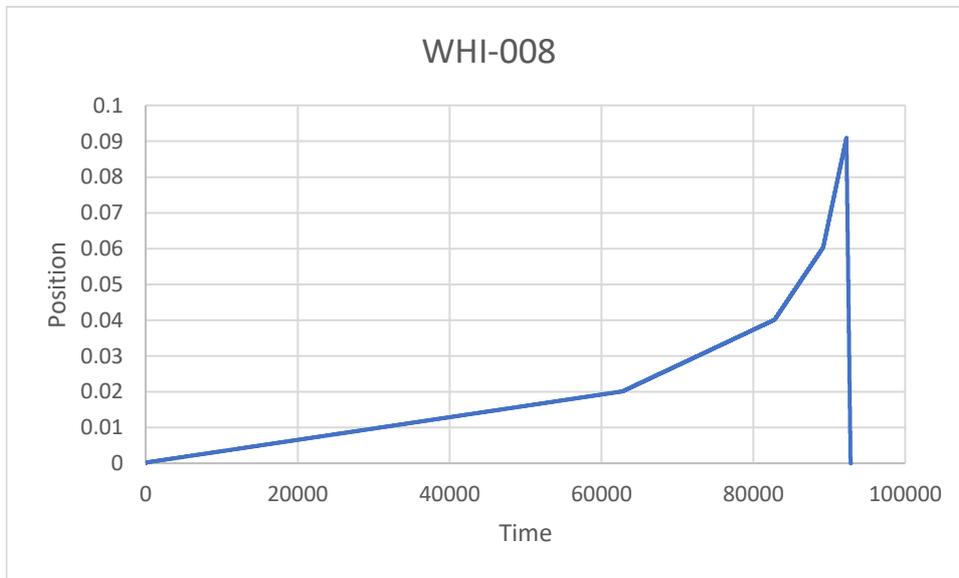


<20  $\mu\text{m}$  크기의 불순물이 5% 포함된 샘플(WHI-007)의 시간(초)과 이동거리(인치)의 상관관계 그래프>

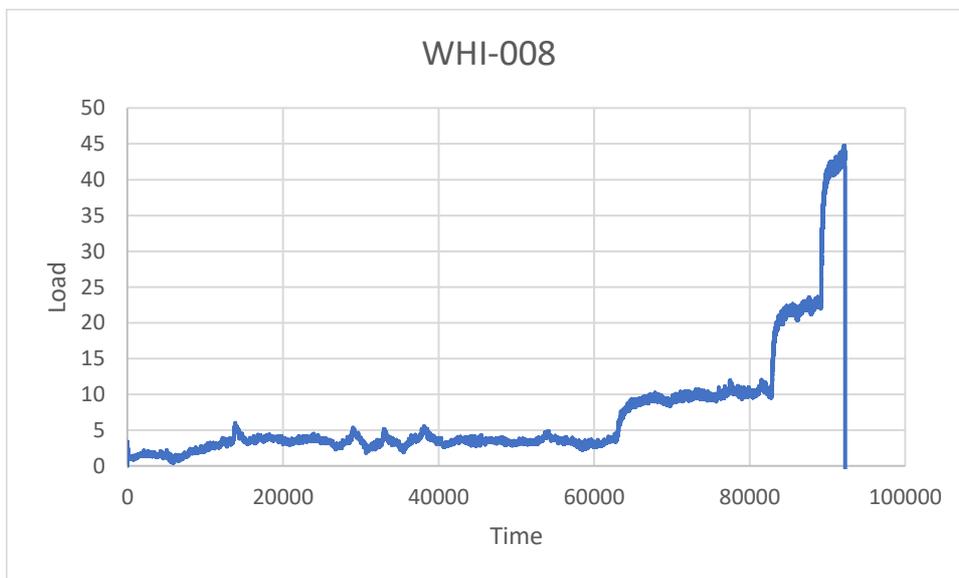


<20  $\mu\text{m}$  크기의 불순물이 5% 포함된 샘플(WHI-007)의 시간(초)과 하중(파운드)의 상관관계 그래프>

불순물 함량이 10%로 증가하자 하중이 각 단계별로 약 8, 10, 23, 43 파운드로 전반적으로 감소하는 양상을 보여준다. 이는 불순물 함량이 증가할수록 얼음의 변형특성이 변해, 응력 지수(stress exponent,  $n$ )값이 증가할 가능성을 보여준다. 하지만 마지막 구간은 상대적으로 하중 감소가 적었다.

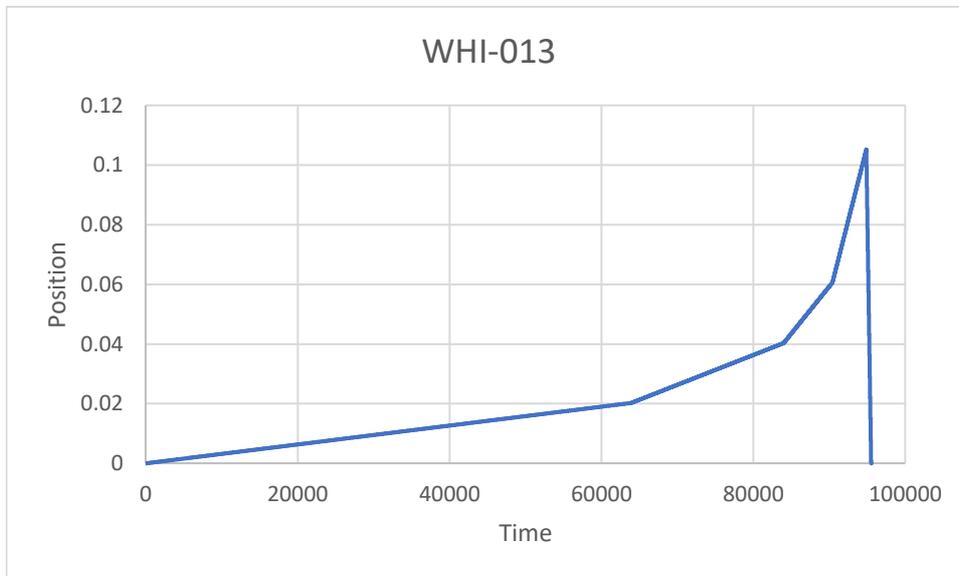


<20  $\mu\text{m}$  크기의 불순물이 10% 포함된 샘플(WHI-008)의 시간(초)대 이동거리(인치) 그래프>

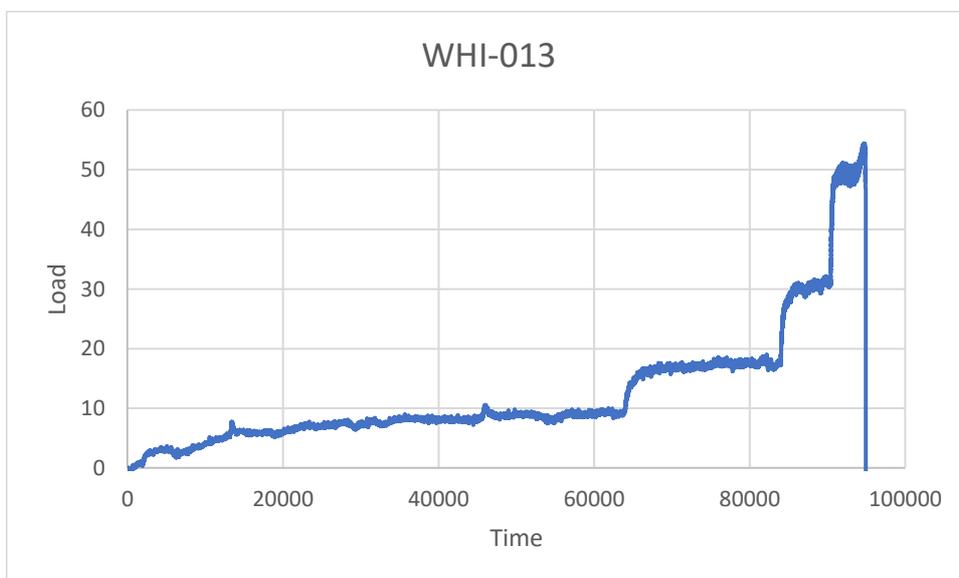


<20  $\mu\text{m}$  크기의 불순물이 10% 포함된 샘플(WHI-008)의 시간(초)대 하중(파운드) 그래프>

150  $\mu\text{m}$ 의 불순물을 함유한 얼음의 기계데이터도 20  $\mu\text{m}$ 의 불순물을 포함한 얼음의 기계 데이터와 비슷하게 순수한 얼음보다 낮은 하중(각 단계별로 약 8, 18, 31, 49 파운드)을 보여줬다. 하중 감소의 정도는 20  $\mu\text{m}$ 의 불순물을 함유한 얼음과 비교했을 때 비슷한 것으로 판단된다.

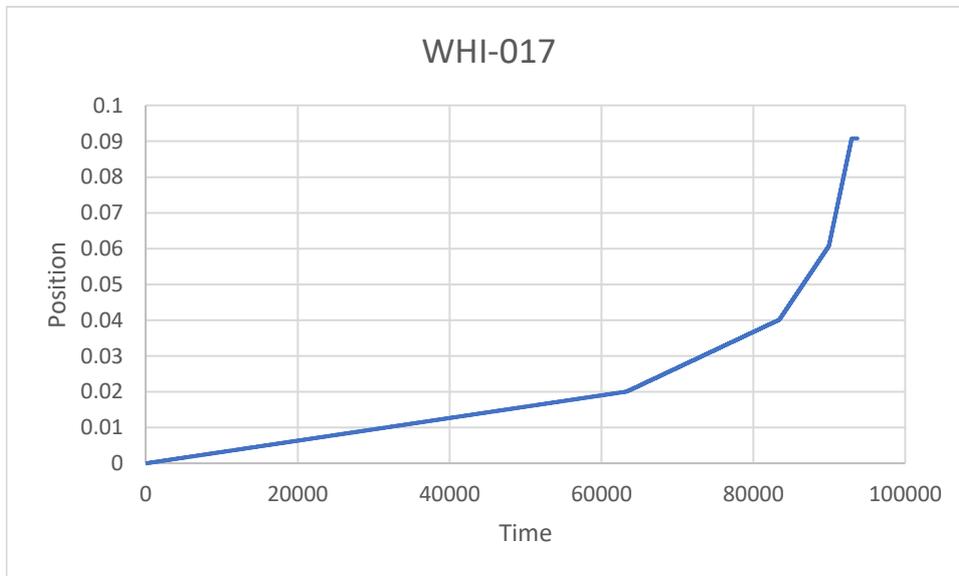


<150  $\mu\text{m}$  크기의 불순물이 5% 포함된 샘플(WHI-013)의 시간(초)과 이동거리(인치)의 상관관계 그래프>

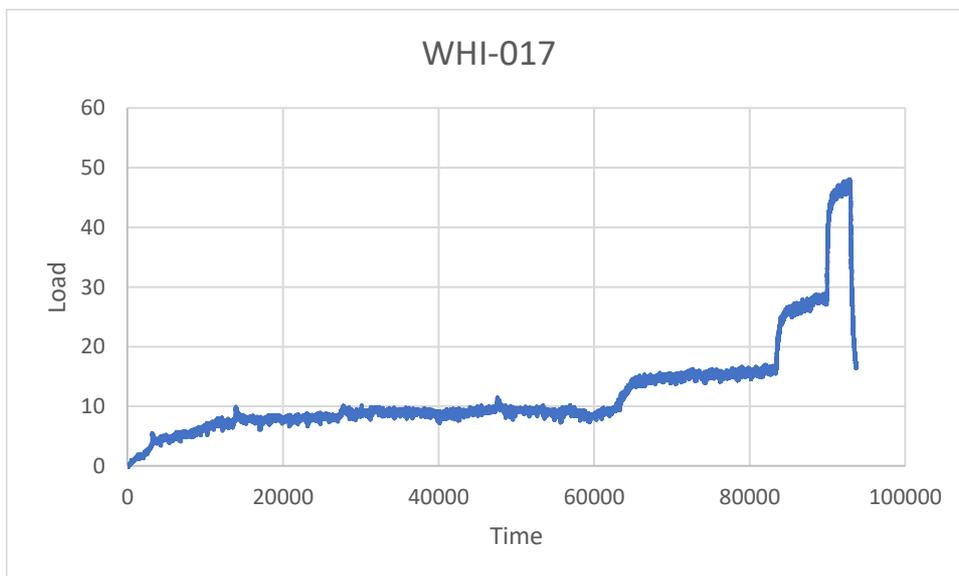


<150  $\mu\text{m}$  크기의 불순물이 5% 포함된 샘플(WHI-013)의 시간(초)과 하중(파운드)의 상관관계 그래프>

150  $\mu\text{m}$  불순물의 함량이 높아지자 20  $\mu\text{m}$ 의 불순물을 함유한 얼음과 비슷한 양상을 보이며 하중이 감소했다(각 단계별로 약 9, 16, 28, 47 파운드). 그러나 20  $\mu\text{m}$ 의 불순물을 사용했을 때와 비교하면 그 감소의 정도가 덜한 모습을 보인다. 특히 느린 변형에서의 하중을 비교하면 작은 불순물 실험보다 확연히 높은 하중을 가지고 있다. 즉, 얼음의 강도 변화에는 불순물의 존재가 큰 영향을 끼치되, 큰 불순물보다 작은 불순물의 영향이 더욱 크다고 생각할 수 있다.



<150  $\mu\text{m}$  크기의 불순물이 10% 포함된 샘플(WHI-017)의 시간(초)과 이동거리(인치)의 상관관계 그래프>



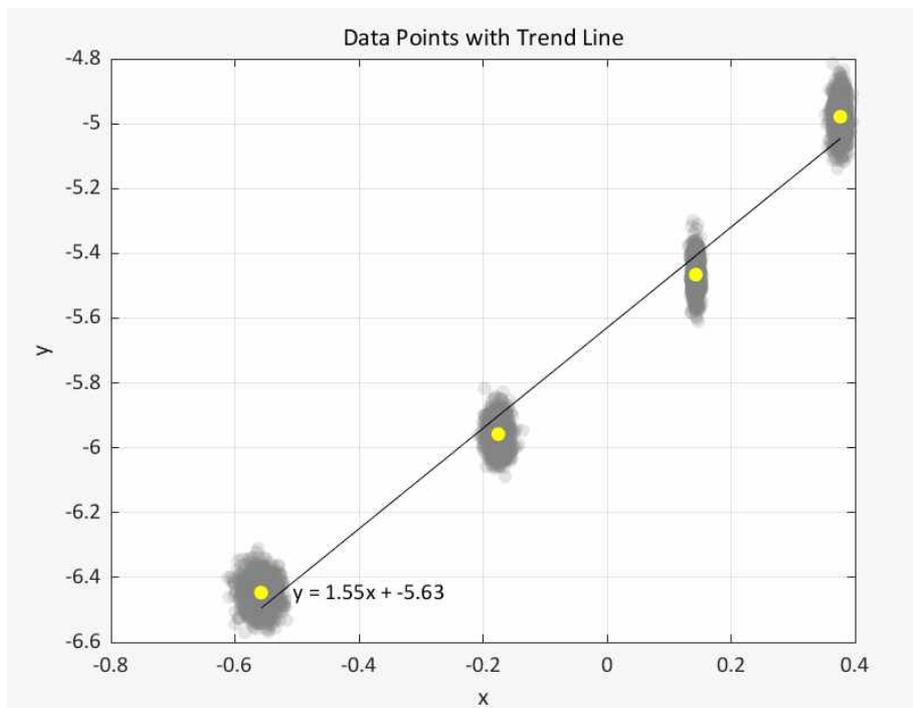
<150  $\mu\text{m}$  크기의 불순물이 10% 포함된 샘플(WHI-017)의 시간(초)과 하중(파운드)의 상관관계 그래프>

## 2. 얼음의 유동법칙(flow law)

얼음 변형실험 결과를 이용해 유동법칙에서 응력지수(stress exponent)  $n$  값을 구하였다. 일반적으로 암석의 유동법칙은 아래와 같이 표현된다.

$$\dot{\epsilon} = A \frac{1}{d^p} \sigma^n \left( \frac{-Q}{RT} \right)$$

여기서  $\dot{\epsilon}$ 는 변형률(strain rate),  $A$ 는 재료상수(material parameter),  $\sigma$ 는 차동응력(differential stress),  $d$ 는 입자크기(grain size),  $p$ 는 입자크기 상수(grain size parameter)를 나타낸다. 응력지수  $n$  값은 일반적으로 암석의 경우 3, 얼음의 경우 3-5 사이에 분포(Goldsby and Kohlstedt, 2001)하는 것으로 알려져 있으나 아직 논쟁 중에 있다. 실험한 장비는 보온박스로서 들어가는 피스톤이 미끄럼-고착 행동을 반복하고 있어 기계데이터 처리를 매텔랩의 trend\_line이라는 기능을 이용해서 실시하였다.



<매텔랩에서 trend\_line 기능을 이용해 기계데이터를 구하는 예시>

네 개의 다른 변형률을 이용해 계산된  $n$  값은 아래 표와 같다.

	20 um			150 um		
	n	error	impurity	n	error	
WHI-005	1.55	0.072	0	1.55	0.072	WHI-005
WHI-025	1.35	0.132	1			
WHI-006	1.65	0.128	2	1.28	0.160	WHI-014
WHI-027	1.36	0.156	3.5			
WHI-007	2.10	0.173	5	1.59	0.218	WHI-013
WHI-015	1.52	0.100	10	1.79	0.153	WHI-017
WHI-016	1.67	0.224	20	1.45	0.271	WHI-018

<네 개의 변형률( $10^{-6.5} \text{ s}^{-1}$ ,  $10^{-6.0} \text{ s}^{-1}$ ,  $10^{-5.5} \text{ s}^{-1}$ ,  $10^{-5.0} \text{ s}^{-1}$ )을 이용해  
계산한 응력지수 n 값>

하지만 위 데이터 내 순수얼음의 n 값이 1.55로 기존에 알려진 1.8의 값(Goldsby and Kohlstedt, 2001)과는 차이가 있다. 피스톤의 미끄럼-고착 행동이 특히 낮은 변형률에서 잘 일어날 수 있음을 감안해  $10^{-6.0} \text{ s}^{-1}$ ,  $10^{-5.5} \text{ s}^{-1}$ ,  $10^{-5.0} \text{ s}^{-1}$  세 개의 변형률만 이용해 n 값을 계산한 결과는 아래 표와 같다.

	20 um			150 um		
	n	error	impurity	n	error	
WHI-005	1.76	0.122	0	1.76	0.122	WHI-005
WHI-025	1.70	0.185	1			
WHI-006	1.87	0.173	2	1.74	0.273	WHI-014
WHI-027	1.91	0.224	3.5			
WHI-007	1.90	0.245	5	1.83	0.414	WHI-013
WHI-015	1.62	0.131	10	1.87	0.220	WHI-017
WHI-016	1.97	0.300	20	1.94	0.652	WHI-018

<세 개의 변형률( $10^{-6.0} \text{ s}^{-1}$ ,  $10^{-5.5} \text{ s}^{-1}$ ,  $10^{-5.0} \text{ s}^{-1}$ )을 이용해 계산한  
응력지수 n 값>

세 개의 변형률을 이용해 계산한 순수얼음의 n 값은 1.76으로 1.8과 거의 흡사하다. 또한 불순물을 함유한 얼음샘플들의 n 값도 1.8에서 크게 벗어나지 않는다. 따라서 불순물을 함유한 얼음샘플의 변형행동은 결정입계 미끄럼(grain boundary sliding) 기작으로 판단된다.

### 3.8절 합성얼음의 물리적 특성 변화를 이용한 극지방 얼음지형 모델링

얼음 변형실험 결과를 대입하기 위해, 먼저 예비로 응력지수(stress exponent)  $n$  값을 임의로 설정하여 기존에 존재하던 얼음지형 모델링에 대입해 보았다. 일반적으로 암석의 유동법칙은 아래와 같이 표현된다.

$$\dot{\epsilon} = A \frac{1}{d^p} \sigma^n \left( \frac{-Q}{RT} \right)$$

여기서  $\dot{\epsilon}$ 는 변형률(strain rate),  $A$ 는 재료상수(material parameter),  $\sigma$ 는 차동응력(differential stress),  $n$ 은 응력지수(stress exponent),  $d$ 는 입자크기(grain size),  $p$ 는 입자크기 상수(grain size parameter)를 나타낸다.

이를 간단히 정리하면(Glen, 1955),

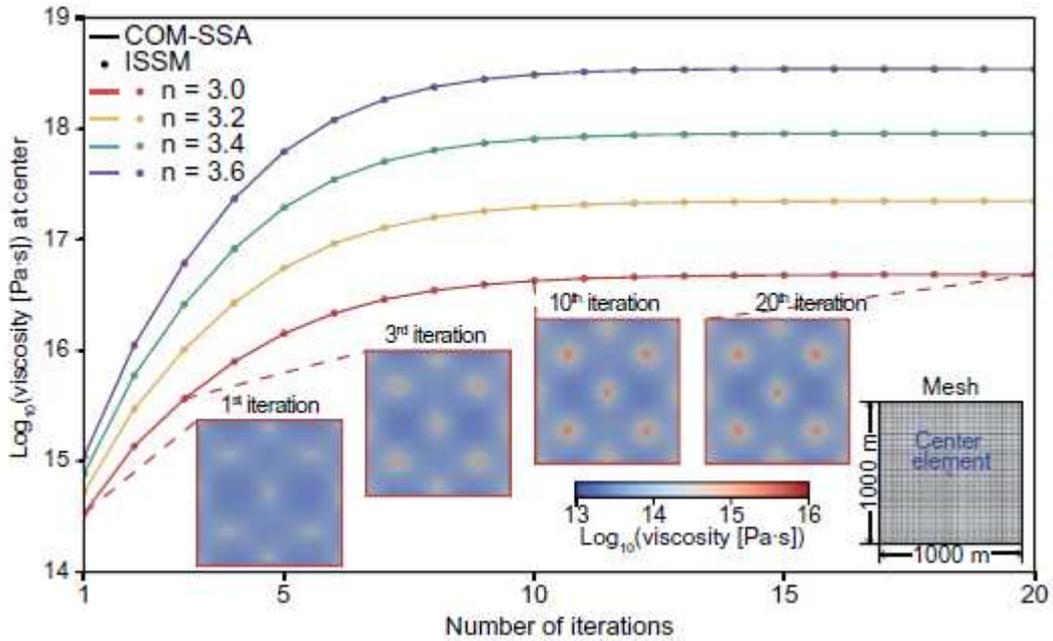
$$\dot{\epsilon} = k \sigma^n$$

여기서  $k$ 와  $n$ 은 상수이다.

이 식을 얼음의 물리적 특성 중 하나인 점도(viscosity)와 연관해서 정리하면,

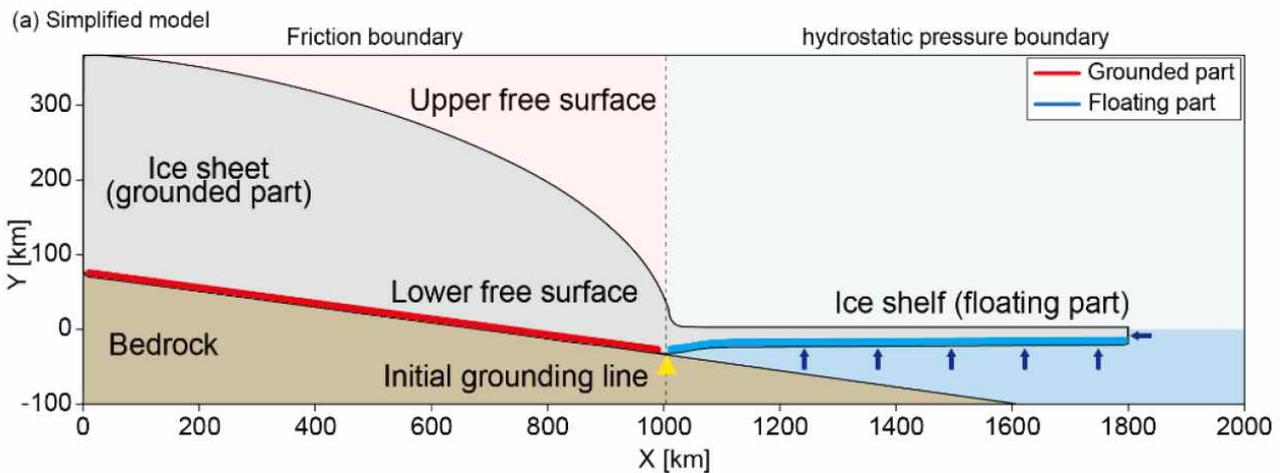
$$\eta = 2^{-1} A^{-1/n} \dot{\epsilon}_e^{(1-n)/n}$$

여기서  $n$ 은 유동 응력지수(power stress exponent),  $A$ 는 얼음 유동성 매개변수(ice fluidity parameter)를 나타낸다(Lim et al., 2023).



<응력지수(n) 값의 변화에 따른 얼음의 점도(viscosity) 변화. Baek et al. (2023)에서 발췌함>

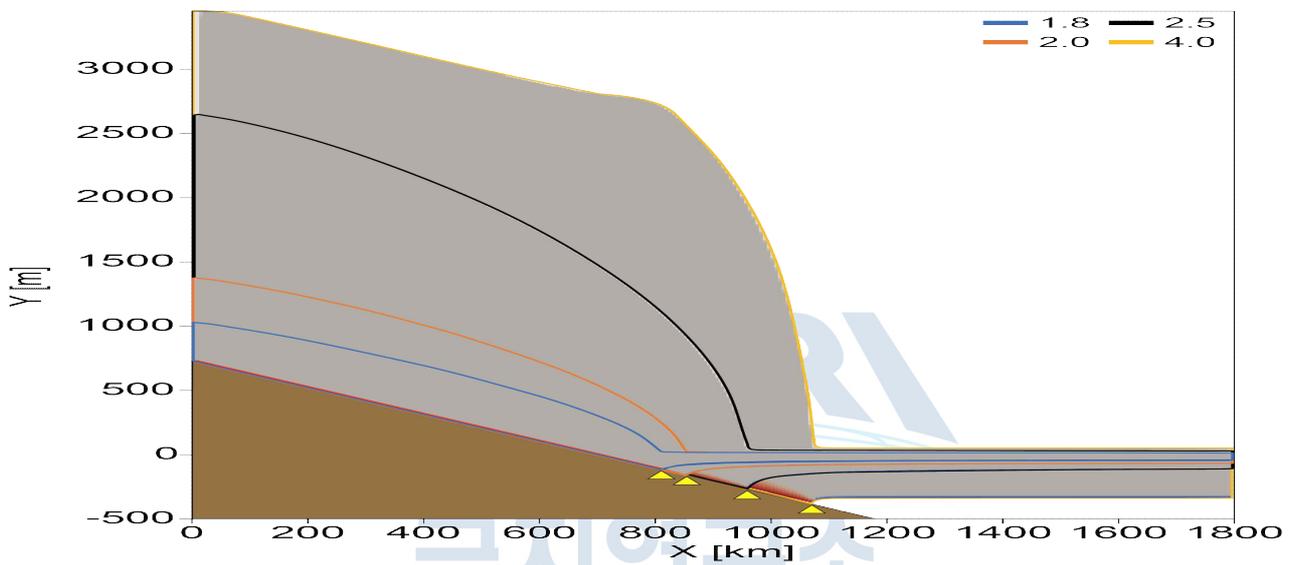
빙상역학(ice sheet dynamics)에 관한 오픈소스 소프트웨어는 획기적으로 발달해왔다. 주목할만한 예는, Ice Sheet System Model(ISSM; Larour et al., 2021a, b), Parallel Ice Sheet Model (PISM; Bueler and Brown, 2009), Elmer/Ice(Gagliardini et al., 2013)으로 빙상 시스템의 물질균형(mass balance)에 대해 수치적으로 사용되어 왔다. 한편, COMSOL Multiphysics는 유한요소 소프트웨어로 지구물리, 공학 분야에서 물질 모양, 타입, 크기 등에 대한 다양한 옵션을 제공해 준다(Krenk and Hededal, 1995; Trim et al., 2021). 이에 COMSOL 내에서 SSA(Shallow Shelf Approximation) 기법(MacAyeal, 1989, 1992)을 대입하여 모델링을 실시하였다.



<간단화된 슬로프모델(slope model). Lim et al. (2023)에서 발췌함>

응력지수(n) 값이 1.8, 2.0, 2.5, 4.0 총 4개의 값을 통해 2차원 빙상 수치 모형 변화를 확인하였다. 연간 0.3 m의 눈이 10,000년 동안 1800 km × 0.1 km의 얇은 판에 쌓이도록 하였다. 응력지수 값이 작은 경우 전반적으로 눈이 얇게 쌓인 것을, 응력지수 값이 큰 경우 두께가 증가하는 것을 확인하였다.

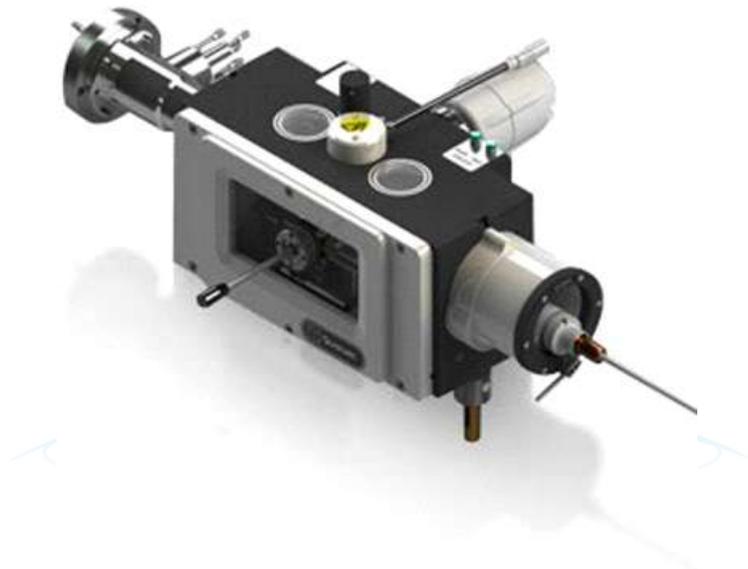
빙상의 아랫부분과 지표면이 닿는 곳(grounding line)의 위치가 809 km (n = 1.8), 851 km (n = 2), 962 km (n = 2.5), 1078 km (n = 4)로 점진적으로 앞으로 나가는 것을 보여주며, 이는 응력지수가 높아질수록 점도가 높아지는 것을 의미한다. 실험에서 획득한 데이터를 이용해 계산된 응력지수 값을 대입하여, 불순물의 함량에 따른 얼음지형 모델링 결과를 조금 더 정확하게 업데이트할 예정이다.



<응력지수(stress exponent) 변화에 따른 얼음의 두께변화 모델링 결과>

### 3.9절 Cryo-system 설치를 위한 기초자료 작성

얼음변형행동의 특성을 관찰하기 위해서 변형실험을 실시한 샘플을 전자현미경 하에서 관찰하는 것이 필수적이다. 특히 의미있는 EBSD 패턴을 획득하기 위해서는 최소 200개 입자 (grain)의 데이터가 필요하기 때문에 사이즈가 큰 샘플의 준비/분석이 필요하다. 기존에 존재하는 Quorum사의 극저온챔버(cryo-chamber)는 장치 하나만으로 샘플의 준비 및 분석이 가능하지만 샘플사이즈가 수 mm 단위로 제한적이며, 상당히 비싼 가격 때문에 극저온시스템 (cryo-system)의 개발이 필요하다.



<즉시 구매가 가능한 Quorum사의 극저온챔버(cryo-chamber). 가격이 상당히 비싸고, 수 mm 단위의 샘플만 취급할 수 있어 최소 200 광물(grain)에서 데이터를 획득해야 하는 EBSD 용으로 적당하지 않음>

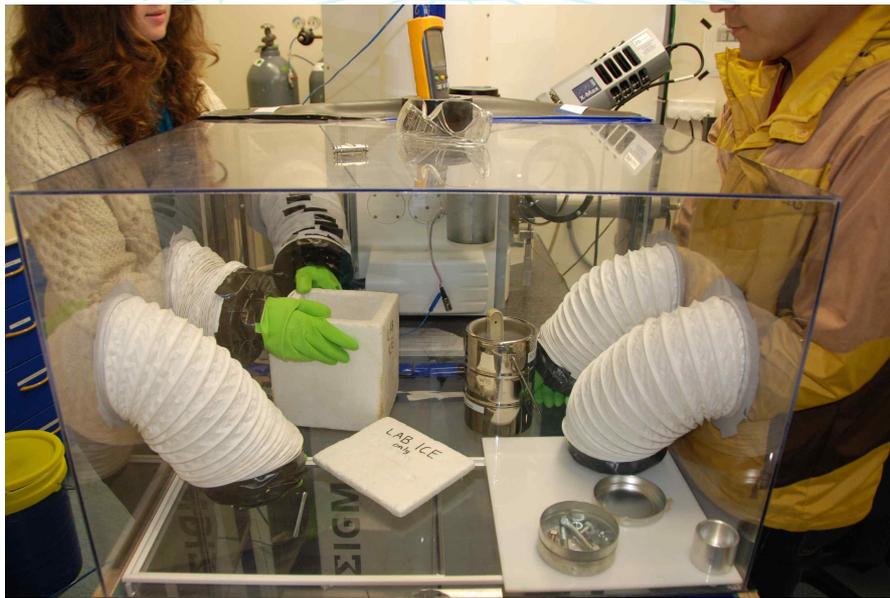
뉴질랜드 오타고 대학교의 cryo-EBSD 시스템은 전자현미경 내 샘플을 저온으로 유지시킬 수 있어, 얼음의 미구조 분석 연구에 세계적으로 사용되어 신뢰도를 입증받아왔다 (Craw et al., 2018; Fan et al., 2020, 2021; Kim et al., 2020; Qi et al., 2019; Thomas et al., 2021). 본 보고서에는 오타고 대학교에 설치된 cryo-EBSD를 사용하면서 터득한 기술을 바탕으로 극저온 시스템 사용법을 기재한다.

극저온시스템(Cryo-system)에서 필수적인 항목은 온도 조절과 샘플표면에 생길 수 있는 성에(frost)를 최소화하는 기술이다. 온도조절과 성에제거는 샘플 준비단계부터 중요하다. 샘플 준비시 스티로폼 박스 내 일정한 공간을 두고 사포(sand paper)를 설치한다. 액체질소를 스티로폼 박스와 사포 사이에 주입하며 사포의 온도를 약  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  정도로 유지시키며 얼음표면을 연마한다.



<스티로폼과 사포를 이용해 얼음연마장치를 설치하고, 얼음샘플을 연마하는 모습>

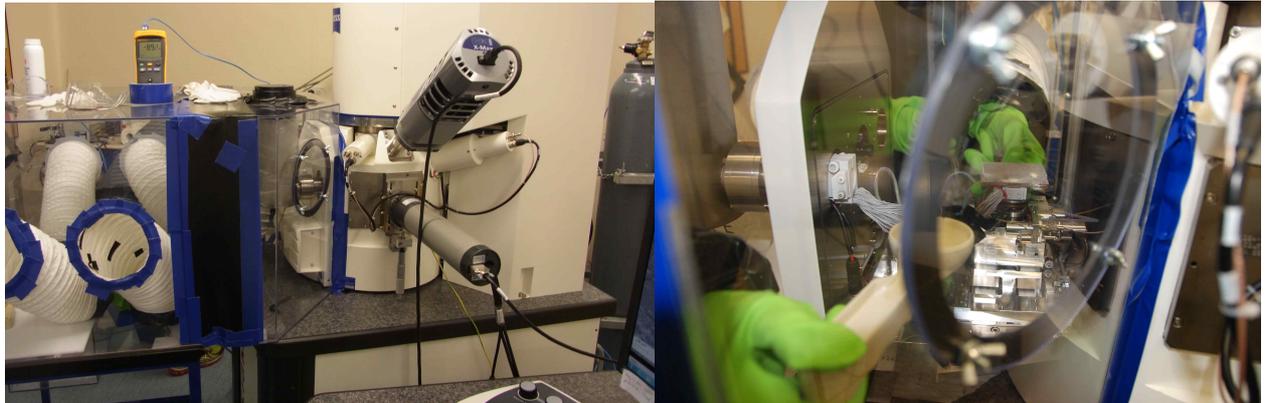
연마가 끝난 샘플은 온도를 유지하며 전자현미경에 삽입한다. 이때 철망을 설치한 작은 스티로폼 박스를 이용하며, 철망 위 샘플이 놓인 곳의 온도는 약  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이다. 이 박스를 이동상자(transfer box) 내에서 전자현미경에 넣게 되는데, 이 장비는 질소를 지속적으로 주입하여 공기중에 존재하는 수증기 입자를 최소화해 얼음샘플 표면에 붙게 되는 것을 방지해준다.



<이동상자(transfer box)의 모습. 박스로 지속적으로 질소를 주입하여 공기중에 존재하는 수증기 입자를 최소화함>

샘플홀더는 얼음샘플을 전자현미경에 부착한 액체질소 챔버(liquid nitrogen chamber)와 연결할 수 있게 해줘서 낮은 온도를 유지시키는 장치이다. 샘플을 전자현미경에 투입할 때, 샘플을 위치시키고 액체질소를 부어줘 온도를 낮게 유지시키고 표면에 있을지 모를 성에를 제거

한다. 샘플을 전자현미경에 주입한 후 온도는 전자현미경에 부착한 액체질소챔버를 이용해 온도를 낮춰준다. 고진공일 때 샘플홀더의 온도는  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 보다 낮아지고, 저진공일 때 샘플홀더의 온도는 약  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$  정도를 유지한다.



<전자현미경에 부착된 액체질소 챔버(liquid nitrogen chamber)의 모습과, 얼음샘플을 전자현미경에 넣는 모습. 샘플을 홀더에 부착시키고 액체질소를 부어줘, 온도를 낮추고 샘플표면에 부착된 성에를 제거하는 역할을 함>

극저온 시스템(cryo-system)은 샘플의 온도를 낮춰 전자현미경에서 작동할 수 있게 해준다. 이 방법들은 전자현미경과 결합된 후방산란전자회절장치(electron backscattered diffraction, EBSD)를 이용하는 얼음의 구조연구 뿐 아니라, 생물 등 다양한 분야에 응용될 것으로 판단된다.

## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

### 4.1절 연구개발목표 달성도

#### 1. 연구 목표 달성도

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내용				계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중 치 (A)	달성실적	
1년차 (2021)	1. 합성얼음의 물리적 특성 변화	1-1. 극지방 바다 및 얼음에서 산출하는 불순물의 종류 및 함량 조사	0.5	조사 완료	100
		1-2. 불순물의 종류 및 함량을 다양화한 합성얼음 제작		제작 완료	100
	2. 얼음의 물리적 특성 파악을 위한 장비 개발	2-1. EBSD 장비 설치 및 기본기능 운용	0.5	기본기능 운용 중	100
		2-2. 얼음합성장치 개발을 위한 기초자료 작성		작성 완료	100
	계		1.0		100
2년차 (2022)	1. 합성얼음의 물리적 특성 변화	1-1. 불순물을 함유한 합성얼음의 다양한 변형률로 변형실험 실시 및 장비 점검	0.5	변형실험 실시 및 장비 점검	100
					100
	2. 얼음의 물리적 특성 파악을 위한 장비 개발	2-1. 2종의 얼음합성장치 설치 및 운용	0.5	합성얼음장치 설치 완료	100
		계			1.0

3년차 (2023)	1. 합성얼음의 물리적 특성 변화	1-1. 다양한 조건의 변형실험 테스트	0.5	2가지 불순물을 함유한 변형실험 실시 완료 및 얼음지형 모델링 업데이트 중	90
		1-2. 합성얼음의 물리적 특성 변화를 이용한 극지방 얼음지형 모델링			
	2. 얼음의 물리적 특성 파악을 위한 장비 개발	2-1. Cryo-system 설치를 위한 기초자료 작성	0.5	기초자료 작성 완료	100
계			1.0		95

2. 정량적 목표 달성도

구분	논문		비고
	SCI(E) 목표 (1저자/공동)	SCI(E) 달성 (1저자/공동)	
1차년도 (2021)		1	
2차년도 (2022)	1	1	상위 10% 이내
3차년도 (2023)	1	a	논문투고 준비 중
합 계	2	2 + a	

3. 연구성과 세부내용

가. 논문 목록

해당 년도	논문제목	학술지 명	게재 일	저자명 / 소속						
				제1저자		교신저자		공동저자		
				성명	소속	성명	소속	성명	소속	
1	2021	Microstructure and crystallographic preferred orientations of an azimuthally oriented ice core from a lateral shear margin: Priestley Glacier, Antarctica	Frontiers in Earth Science	21.11.26	R.E. Thomas	오타고대	R.E. Thomas	오타고대	D.J. Prior 김대영 등	오타고대 극지 등
2	2022	Ultrasonic and seismic constraints on crystallographic preferred orientations of the Priestley Glacier shear margin, Antarctica	The Cryosphere	22.8.24	F. Lutz	오타고대	F. Lutz	오타고대	D.J. Prior 김대영 등	오타고대 극지 등

나. 학술대회 발표

해당 년도	논문제목	회의명	발표자	발표일자	국가명	
1	2023	Impurity effects on ice deformation	2023 대한지질학회 빙권/극지분과 워크숍	김도현	23.7.19	대한민국

다. 국제협력

	대상국	대상기관	연구내용
1	미국	Woods Hole Oceanographic Institution	얼음 변형실험 공동수행
2	중국	Chinese Academy of Science	기계데이터 해석 및 응용
3	뉴질랜드	University of Otago	미구조 분석 및 해석



## 4.2절 기술발전에서의 대외기여도

### 1. 국내 미개척 연구분야 최초 도전

국내에서 얼음을 주제로 연구하는 과학자들은 대부분 화학적 특성에 집중하는 경향이 있다. 국제적으로도 얼음의 물리적 특성에 대한 연구는 얼음의 결정구조가 석영과 흡사하여 변형 특성 유사성에 대해 몇몇 소수의 연구자들만 수행하고 있었다. 2015년 뉴질랜드 오타고대학교의 David J. Prior 교수가 Journal of Microscopy에 얼음의 결정방향성에 대해 정보를 주는 EBSD라는 장비의 성공확률을 90% 이상 달성하였다는 논문을 발표함(Prior et al., 2015)에 따라 구조지질학 연구자들이 얼음의 변형, 미구조 진화에 관심을 갖게 되었다.



<뉴질랜드 오타고대학교에 설치된 성공률 92% 이상을 자랑하는  
Cryo-EBSD>

암석의 변형실험에는 높은 압력을 만들 수 있는 변형실험장비가 필수적이다. 또한, 온도, 압력, 변형률 등 제한해야 할 변수가 많다. 특히 얼음의 경우 온도조절이 필요하며, 불순물 중 하나인 기포제거가 필수적이다. 이에 국내 최초로 얼음 내 기포를 제거하는 장치 두 점을 극지연구소 내 설치하였다.

첫 번째 장치는 얼음씨앗(ice seed)을 가득 채운 통에 진공을 잡고, 0°C 물을 흘려보내 진공이 있는 자리를 얼음씨앗이 자라고 채우면서 기포가 들어가야 할 자리를 없애는 방식이다. 이 방법을 이용하면, 일정한 결정크기를 갖고, 기포가 없는 합성얼음 시료를 만들 수 있으나, 다른 불순물을 추가할 때 양을 조절하지 못하는 등 단점도 있다.

두 번째 장치는 고온압착(Hot-pressing) 방식이다. 노즐을 이용해 얼음씨앗을 스프레이

(spray)로 액체질소 통에 분사한 후, 얼음틀(ice die)에 투입하고 유압프레스(hydraulic press)를 이용해 압축시킨다. 이 방법은 얼음씨앗을 만들 때 사용하는 노즐의 사이즈에 따라 얼음씨앗의 크기를 조절할 수 있고, 불순물을 추가할 때 양을 조절할 수 있는 장점이 있다. 한가지 단점은 유압프레스를 이용해 압축시킬 때, 결정의 방향성이 미세하게 발달할 수 있다는 점이다.

얼음 합성장치의 설치는 국내 최초이며, 얼음화학을 연구하는데도 협업할 수 있는 기초적인 장비이다. 이 장치의 설치를 통해 획득한 얼음시료를 취급하는 경험은 추후 연구를 확장하는데도 큰 도움이 될 것이다.



## 제 5 장 연구개발결과 활용계획

본 과제 의 연구결과는 불순물 함유에 따라 얼음의 물리적 특성이 바뀌어 극지방 얼음지형이 변화할 수 있음을 보여주었다. 특히 과제에서 다루는 불순물은 자연상에서 발생하는 것이 아니라 인류에 의해 만들어진 인공물질로, 최근 70여년 동안 사용량이 폭발적으로 증가한 미세플라스틱이다. 본 연구에서 인류에 의해 발생한 불순물이 자연상 얼음에 함유될 때 보여주는 효과는 자연상에 존재하는 불순물보다 효율적임을 기존 연구들과 비교해 보여주었다. 따라서 본 연구결과는 인류가 만들어내는 물질의 위험성을 강조해 자원절약 및 효율적 이용, 대체재 개발 등의 기초자료로 사용될 수 있다. 현재 연구결과는 모델링을 보강하며 저널 투고를 목적으로 정리 중이다. 따라서 정리가 끝나는대로 공저자들과 결과를 공유 및 수정한 후, 국제 학술지에 투고할 예정이다.

본 과제에서 개발한 2종의 얼음합성장치는 얼음의 물리적 특성 연구에 기초적 장비로, 이 장비를 이용해 얼음을 합성할 수 있다. 이때 합성된 얼음은 일정한 입자사이즈를 갖고, 또다른 불순물이라 할 수 있는 기포를 포함하지 않는 특징을 가지고 있으므로 얼음의 기초연구에 적합하다. 따라서 이 장비를 이용해, 추후 진행할 수 있는 합성얼음의 물리적 특성 연구에 활용할 수 있다.

최근 실생활에서 가장 많이 주목받는 오염물질 중 대표적인 것이 미세플라스틱이다. 이 과제의 연구주제는 오염물인 불순물의 대기, 물, 눈에서의 함량, 얼음변형에 있어 불순물 영향, 얼음 내 화학반응 등 각 분야에 한정된 것이 아니라 다학제적 경향이 있으므로 학계에서도 많은 관심을 끌 것으로 판단된다.

추후 얼음 내 불순물과 관련된 다른 주제를 가지고 새로운 연구를 시작하는 바탕을 마련하였다. 아직 얼음 변형특성에 대한 연구는 많은 부분이 미지수로 남아 있어 새로운 연구성과를 창출하는 데 용이하기 때문에 극지연구소 뿐만 아니라 학계 차원에서도 많은 관심이 요구된다.

## 제 6 장 참고문헌

- Alley, R.B., Joughin, I., 2012. Modeling ice-sheet flow. *Science* 336, 551-552, doi:10.1126/science.1220530.
- Ambrosini, R., Azzoni, R.S., Pittino, F., Diolaiuti, G., Fronzetti, A., Parolini, M., 2019. First evidence of microplastic contamination in the supraglacial debris of an alpine glacier. *Environmental Pollution* 253, 297-301, doi:10.1016/j.envpol.2019.07.005.
- Baek, Y.-J., Lim, S.-J., So, B.-D., 2023. Development and benchmarking of the shallow shelf approximation ice sheet dynamics module. *Ocean Science Journal* 58, 27, doi:10.1007/s12601-0.2-00120-3.
- Bergmann, M., Mützel, S., Primpke, S., Tekman, M.B., Trachsel, J., Gerdts, G., 2019. White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic. *Science Advances* 5, eaax1157, doi:10.1126/sciadv.aax1157.
- Bueler, E., Brown, J., 2009. Shallow shelf approximation as a “sliding law” in a thermomechanically coupled ice sheet model. *Journal of Geophysical Research* 114, F03008, doi:10.1029/2008JF001179.
- Craw, L., Qi, C., Prior, D.J., Goldsby, D.L., Kim, D., 2018. Mechanics and microstructure of deformed natural anisotropic ice. *Journal of Structural Geology* 115, 152-166, doi:10.1016/j.jsg.2018.07.014.
- DeConto, R.M., Pollard, D., 2016. Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature* 531, 591-597, doi:10.1038/nature17145.
- Durham, W.B., Heard, H.C., Kirby, S.H., 1983. Experimental deformation of polycrystalline H<sub>2</sub>O ice at high pressure and low temperature: Preliminary results. *Journal Geophysical Research* 88, B377-B392, doi:10.1029/JB088iS01p0B337.
- Fan, S., Hager, T.F., Prior, D.J., Cross, A.J., Goldsby, D.L., Qi, C., Negrini, M., Wheeler, J., 2020. Temperature and strain controls on ice deformation mechanisms: insights from the microstructures of samples deformed to progressively higher strains at -10, -20 and -30° C. *The Cryosphere*, 14, 3875-3905, doi:10.5194/tc-14-3875-2020.
- Fan, S., Prior, D.J., Cross, A.J., Goldsby, D.L., Hager, T.F., Negrini, M., Qi, C., 2021. Using grain boundary irregularity to quantify dynamic recrystallization in ice. *Acta Materialia* 209, 116810, doi:10.1016/j.actamat.2021.116810.
- Gagliardini, O., Zwinger, T., Gillet-Chaulet, F., Durand, G., Favier, L., De Fleurian, B., Greve, R., Malinen, M., Martín, C., Råback, P., Ruokolainen, J., Sacchetti, M., Schäfer, M., Seddik, H., Thies, J., 2013. Capabilities and performance of Elmer/Ice, a new-generation ice sheet model. *Geoscientific Model Development* 6, 1299-1318, doi:10.5194/gmd-6-1299-2013.

- Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L., 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances* 3, e1700782, doi:10.1126/sciadv.1700782.
- Glen, J.W., 1955. The creep of polycrystalline ice. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences* 228, 519–538, doi:10.1098/rspa.1955.0066.
- Goldsby, D.L., Kohlstedt, D.L., 2001. Superplastic deformation of ice: Experimental observations. *Journal Geophysical Research* 106, 11017–11030, doi:10.1029/2000JB900336.
- González-Pleiter, M., Velázquez, D., Edo, C., Carretero, O., Gago, J., Barón-Sola, Á., Hernández, L.E., Yousef, I., Quesada, A., Leganés, F., Rosal, R., Fernández-Piñas, F., 2020. Fibers spreading worldwide: Microplastics and other anthropogenic litter in an Arctic freshwater lake. *Science of The Total Environment* 722, 137904, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137904.
- González-Pleiter, M., Lacerot, G., Edo, C., Lozoya, J.P., Leganés, F., Fernández-Piñas, F., Rosal, R., Teixeira-de-Mello, F., 2021. A pilot study about microplastics and mesoplastics in an Antarctic glacier. *The Cryosphere* 15, 2531–2539, doi:10.5194/tc-15-2531-2021.
- Hoffmann, L., Eggers, S.L., Allusen, E., Katlein, C., Peeken, I., 2020. Interactions between the ice algae *Fragillariopsis cylindrus* and microplastics in sea ice. *Environmental International* 139, 105697, doi:10.1016/j.envint.2020.105697.
- Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K.L., 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 374, 768–771, doi:10.1126/science.1260352.
- Kanhai, L.D.K., Gardfeldt, K., Krumpfen, T., Thomson, R.C., O'Connor, I., 2020. Microplastics in sea ice and seawater beneath ice floes from the Arctic Ocean. *Scientific Reports* 10, 5004, doi:10.1038/s41598-020-61948-6.
- Kim, D., Prior, D.J., Han, Y., Qi, C., Han, H., Ju, H.T., 2020. Microstructures and fabric transitions of natural ice from the Styx Glacier, northern Victoria Land, Antarctica. *Minerals* 10, 892, doi:10.3390/min10100892.
- Kim, K., Cho, W., 2011. Enhanced redox conversion of chromate and arsenite in ice. *Environmental Science and Technology* 45, 2202–2208, doi:10.1021/es103513u.
- Krenk, S., Hededal, O., 1995. A dual orthogonality procedure for nonlinear finite element equations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 123, 95–107, doi:10.1016/0045-7825(95)00779-Z.
- Larour, E., Morlighem, M., Seroussi, H., Schiermeier, J., Rignot, E., 2012a. Ice flow sensitivity to geothermal heat flux of Pine Island Glacier, Antarctica. *Journal of Geophysical Research–Earth* 117, 1–12. doi:10.1029/2012JF002371.
- Larour, E., Schiermeier, J., Rignot, E., Seroussi, H., Morlighem, M., Paden, J., 2012b.

- Sensitivity analysis of Pine Island Glacier ice flow using ISSM and DAKOTA. *Journal of Geophysical Research–Earth* 117, 1–16. doi:10.1029/2011JF002146.
- Lim, S.-J., Baek, Y.-J., So, B.-D., 2023. Refinement of the fluidity parameter range with a stress exponent of four in Glen’s law: insights from Antarctic bed topography model. under review.
- MacAyeal, D.R., 1989. Large-scale ice flow over a viscous basal sediment: Theory and application to ice stream B, Antarctica. *Journal of Geophysical Research–Solid Earth* 94, 4071–4087, doi:10.1029/JB094iB04p04071.
- MacAyeal, D.R., 1992. The basal stress distribution of Ice Stream E, Antarctica, inferred by control methods. *Journal of Geophysical Research* 97, 595, doi:10.1029/91JB02454.
- Mishra, A.K., Singh, J., Mishra, P.P., 2021. Microplastics in polar regions: An early warning to the world’s pristine ecosystem. *Science of The Total Environment* 754, 147149, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.147149.
- Napper, I.E., Davies, B.F.R., Clifford, H., Elvin, S., Koldewey, H.J., Mayewski, P.A., Miner, K.R., Potocki, M., Elmore, A.C., Gajurel, A.P., Thompson, R.C., 2020. Reaching new heights in plastic pollution—Preliminary findings of microplastics on Mount Everest. *One Earth* 3, 621–630, doi:10.1016/j.oneear.2020.10.020.
- Parolini, M., Antonioli, D., Borgogno, F., Gibellino, M.C., Fresta, J., Albonico, C., De Felice, B., Canuto, S., Concedi, D., Romani, A., Rosio, E., Gianotti, V., Laus, M., Ambrosini, R., Cavallo, R., 2021. Microplastic Contamination in Snow from Western Italian Alps. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18, 768, doi:10.3390/ijerph18020768.
- Petersen, F., Hubbart, J.A., 2021. The occurrence and transport of microplastics: The state of the science. *Science of The Total Environment* 758, 143936, doi:10.1026/j.scitotenv.2020.143936.
- Pollard, D., CeConto, R.M., 2009. Modelling West Antarctic ice sheet growth and collapse through the past five million years. *Nature* 458, 329–332, doi:10.1038/nature07809.
- Prior, D.J., Lilly, K., Seidemann, M., Vaughan, M., Becroft, L., Easingwood, R., Diebold, S., Obbard, R., Daghlian, C., Baker, I., Caswell, T., Golding, N., Goldsby, D., Durham, W.B., Piazzolo, S., Wilson, C.J.L., 2015. Making EBSD on water ice routine. *Journal of Microscopy* 259, 237–256, doi:10.1111/jmi.12258.
- Qi, C., Goldsby, D.L., Prior, D.J., 2017. The down-stress transition from cluster to cone fabrics in experimentally deformed ice. *Earth and Planetary Science Letters* 471, 136–147, doi:10.1016/j.epsl.2017.05.008.
- Qi, C., Prior, D.J., Craw, L., Fan, S., Llorens, M.G., Griera, A., Negrini, M., Bons, P.D., Goldsby, D.L., 2019. Crystallographic preferred orientations of ice deformed in direct-shear experiments at low temperatures. *The Cryosphere* 13, 351–371,

doi:10.5194/tc-13-351-2019.

- Qi, C., Stern, L.A., Pathare, A., Durham, W.B., Goldsby, D.L., 2018. Inhibition of grain boundary sliding in fine-grained ice by intergranular particles: Implications for planetary ice masses. *Geophysical Research Letters* 45, 12757–12765, doi:10.1029/2018GL080228.
- Thomas, R. E., Negrini, M., Prior, D. J., Mulvaney, R., Still, H., Bowman, M. H., ... & Lutz, F. (2021). Microstructure and crystallographic preferred orientations of an azimuthally oriented ice core from a lateral shear margin: Priestley Glacier, Antarctica. *Frontiers in Earth Science*, 9, 702213.
- Trim, S.J., Butler, S.L., Spiteri, R.J., 2021. Benchmarking multiphysics software for mantle convection. *Computers & Geosciences* 154, 104797, doi:10.1016/j.cageo.2021.104797.
- Yang, J.-W., Han, Y., Orsi, A.J., Kim, S.-J., Han, H., Ryu, Y., Jang, Y., Moon, J., Choi, T., Hur, S.D., Ahn, J., 2018. Surface temperature in twentieth century at the Styx Glacier, northern Victoria Land, Antarctica, from borehole thermometry. *Geophysical Research Letters* 45, 9834–9842, doi:10.1029/2018GL078770.
- Zhang, Y., Gao, T., Kang, S., Allen, S., Luo, X., Allen, D., 2021. Microplastics in glacier of the Tibetan Plateau: Evidence for the long-range transport of microplastics. *Science of The Total Environment* 758, 143634, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.143634.

KORRI  
극지연구소

## 뒷 면

(국내 과제용)

### 주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.