

EBSD를 이용한 남극 고압암석 및 빙하의
미구조 연구

Microstructural study of high-pressure rocks and ices from
Antarctica: Approaches from the electron backscatter
diffraction (EBSD) technique



2017. 02.

한국해양과학기술원
부설 극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “EBSD를 이용한 남극 고압암석 및 빙하의 미세구조 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 4.

 연구 책임자 : 김 대 영
극지연구소 참여 연구원 : 이 정 민

보고서 초록

과제관리번호	PE16270	해당단계 연구기간	2016. 3. 1부터 2017. 2. 21 까지	단계 구분	1 / 1
연구사업명	중 사업명	창의연구사업			
	세부사업명	신진연구원 지원사업			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	EBSD를 이용한 남극 고압암석 및 빙하의 미구조 연구			
연구책임자	김 대 영	해당단계 참여연구원수	총 : 2 명 내부 : 1 명 외부 : 1 명	해당단계 연구비	정부: 직접비 30,000 천원 기업: 천원 계: 48,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 극지지구시스템연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위 탁 연 구	연구기관명 :	연구책임자 :			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)					보고서 면수
<ul style="list-style-type: none"> - 암석 내 광물의 방향성분석은 지난 수십년 동안 지각 및 맨틀의 이동의 증거로써 활용되어 왔으며, 최근 FE-SEM-EBSD 분석기술의 획기적인 발달로 얼음시료의 분석이 가능함에 따라 극지방의 암석 및 빙하를 연구하는데 많은 활용도가 있을 것으로 기대된다. - 현재까지 EBSD 분석기술은 제한적인 정보의 획득 및 시간적 소모가 심했다. FE-SEM에 EBSD를 부착해서 분석시간이 획기적으로 늘어남에 따라 최근에 많이 활용하고 있는 방향성맵핑(orientation mapping) 기술에 의해서 많은 정보를 쉽게 획득할 수 있게 되었다. - 본 연구에서는 남극 장보고기지 주변에서 채취한 고압암석(에클로자이트, eclogite) 및 빙하시료의 결정방향성 측정을 실시하였고, 이 과정에서 샘플준비, 분석방법의 다양화, 맵틀랩 프로그램 내 코드작성 등의 기술을 성공적으로 습득하였다. - 에클로자이트 내 녹휘석(omphacite) 및 석류석(garnet)의 결정방향성을 분석한 결과, 에클로자이트의 변형은 녹휘석에 집중되며 이 광물에 의해서 지진학적 특성이 결정된다. - 빙하시료의 EBSD 분석결과 지역에 따라 다양한 CPO 패턴을 보였고, 이 결과는 빙하에 작용하는 응력에 의해 다양한 결정방향성을 가진 것으로 해석된다. 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	EBSD, 고압암석, 얼음, 변형, 미구조			
	영 어	EBSD, high-pressure rocks, ice, deformation, microstructure			

요 약 문

I. 제 목

EBSD를 이용한 남극 고압암석 및 빙하의 미구조 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

대륙의 이동 등 지구조적인 지질학적 현상을 연구하기 위해서는 암석 내 변형작용의 흔적을 관찰하는 것이 필수적이다. 이를 위해서 암석의 미구조 분석이 필수적인데, EBSD를 이용해 방향성지도 데이터를 획득하는 것이 최신 연구 트렌드이다. 본 과제를 통해서 극지방에서 채취한 암석 및 빙하의 미구조를 EBSD 기술을 이용해서 분석하고 그 결과를 지질학적으로 해석하려고 한다. 특히 얼음을 분석하는 EBSD 기기는 세계에서 4대밖에 존재하지 않으므로 극지연구소에서 선두적으로 연구를 진행해나갈 필요가 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구를 위해 기존 또는 2016-2017 여름시즌에 채취한 고압암석(에클로자이트, eclogite) 및 빙하시료를 이용해서 샘플 준비 및 결정방향성 분석을 실시하였다. 샘플준비, 분석과정, 데이터 처리과정에서 각각 필수기술을 습득하고 주도적으로 사용할 수 있도록 모든 과정을 반복적으로 실시하였다.

IV. 연구개발결과

암석의 미구조 분석결과, 에클로자이트의 변형행동은 녹휘석에 의해서 결정되었다. 빙하의 결정방향성 측정결과, 새로운 결정방향성 패턴이 관찰되며, 이는 블루아이스 지역에 새로운 연구가능성이 높은 얼음이 산출할 가능성을 시사한다.

V. 연구개발결과의 활용계획

남극 장보고기지 주변에서 채취한 암석 및 얼음의 미구조 분석결과, EBSD는 지질학적 연구에 활용도가 높다. 본 과제를 수행하면서 획득한 암석 및 얼음샘플의 연마 및 분석기술은 추후 얼음의 화학분석, 연대측정, 빙하이동 모델링 등 다른 분야와 융합될 수 있다. 또한 극지연구소에서 EBSD를 도입하게 된다면, 이번 과제를 통해서 획득한 경험을 주도적 연구에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

S U M M A R Y

I. Title

Microstructural study of high-pressure rocks and ices from Antarctica: Approaches from the electron backscatter diffraction (EBSD) technique

II. Purpose and Necessity of R&D

It is essential to observe deformation feature in rocks to understand geological events such as plate tectonics. Recent EBSD studies usually conduct the measurement of orientation map for analyzing microstructures of rocks. This study focuses on microstructures of high-P rocks (eclogite) and ice samples from Northern Victoria Land, Antarctica and reveals geologic implications. We need to lead microstructural researches in Antarctica because of its speciality to Antarctic materials such as ice.

III. Contents and Extent of R&D

Sample preparation and EBSD analysis on microstructures of eclogites and ice samples around Jang Bogo Station, Antarctica, that previously collected or during 2016-2017 summer season, were conducted in this study. Essential techniques during sample preparations, analyses and data post-processing were acquired and repeatedly practiced for the independent usage.

IV. R&D Results

Microstructures of rocks indicate that omphacite rather than garnet controls the deformation behaviors of eclogite. The EBSD study on ice shows new CPO pattern, indicating possible occurrence of new types of ice in blue-ice areas.

V. Application Plans of R&D Results

Microstructural analyses of rocks and ice samples imply diverse applications of EBSD for geological researches. The techniques acquired during sample preparation and analysis can be applied for other research subjects such as ice chemistry, chronology and ice-flow model, if they deal rocks and ice samples. In addition, research experience on FE-SEM-EBSD can be helpful when KOPRI will establish an EBSD facility.

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction

1.1 Research necessity

1.2 Research purpose and scope

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

2.1 Status in Korea

2.2 Status in other countries

Chapter 3 R&D Implementation Contents and Results

3.1 Collecting samples

3.2 Sample preparation and analytical methods

3.3 Result of EBSD analysis



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

4.1 Degree of R&D Goal Achievement

4.2 Degree of Contribution to Outside Research Institute

Chapter 5 Application Plans of R&D Results

Chapter 6 References

목 차

제 1 장 서론

1.1절 연구개발의 필요성

1.2절 연구 목표 및 범위

제 2 장 국내외 기술개발 현황

2.1절 국내 연구 수준

2.2절 국외 연구 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3.1절 샘플 채취

3.2절 샘플 준비 및 분석법

3.3절 EBSD 분석 결과



제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

4.1절 연구개발목표 달성도

4.2절 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 참고문헌

본 문

제 1 장 서론

1.1절 연구개발의 필요성

변형(deformation)에 관한 실험(experimentally deformed)암석 또는 자연(naturally deformed)암석 연구는 암석 및 광물에 포함되어 있는 유용한 정보를 실증적(empirical) 또는 수치적(numerical)으로 결정함으로써, 지질학적으로 대규모의 지각 및 판의 이동 및 진화를 설명하는데 필수적으로 선행되는 연구이다(e.g., Katayama et al., 2009; Whitney et al., 2014). 변형에 관한 미구조 정보를 여러 장소에서 수집하고 활용하면 지각 또는 맨틀의 구조를 밝히고, 그 진화에 대한 가설을 설정할 수 있다(e.g., Jung et al., 2001; Kim et al., 2013). 남극 또한 지질학적으로 최근인 신생대(the Cenozoic)까지도 강력한 변형작용에 의해 판이 재구성(reconstruction)되었고(e.g., Eagles et al., 2004), 미구조 분석을 통해서 미래 남극 판의 진화에 대한 정보를 제공해 줄 수 있다.

남극 특히 장보고기지 주변에는 혼성암(migmatite), 편마암(gneiss) 등 변성암(metamorphic rock)이 많이 산출되며, 이 암석들을 관입(intrusion)하고 있는 화강암(granite)도 변형구조를 잘 띄고 있다. 이들 중, 특히 에클로자이트(eclogite), 청색편암(blueschist)과 같은 저온고압암석(high-pressure and low-temperature rocks)들에는 강력한 응력(stress)에 의해 지각 하부 또는 맨틀까지 섭입(subduction)한 흔적이 남아 있으므로, 판의 진화에 대한 많은 연구를 할 수 있다(e.g., Tsujimori et al., 2006). 따라서 본 연구에서는 남극 판의 이동에 대한 기초적인 정보를 제공하기 위해, 남극 장보고기지 주변에서 기 확보된 고압암석인 에클로자이트를 대상으로 미구조 분석을 실시하려고 한다(e.g., van Roermund and Boland, 1981).

얼음 또한 지질학적 정의에 의해 암석에 포함되며, 남극 특히 장보고기지 주변에서 산출하는 난센(Nansen), 라르센(Larsen) 등의 빙하들은 높은 변형(strain)에 의해서 형성된 변형구조(deformation structure)를 잘 보이고 있다. 빙하도 암석과 마찬가지로 변형 미구조가 나타나게 되므로, 본 연구에서는 이런 빙하 내 얼음결정에 대한 미구조 분석도 실시하여 지질학적 의미를

고찰해보고자 한다.

남극에서 산출하는 암석 또는 빙하에 대한 연구는 국내에서 거의 진행된 적이 없으며, 따라서 극지연구소에서 본 연구를 진행할 필요가 있다. 특히 얼음의 미구조에 대한 연구(e.g., Prior et al., 2015)는 세계적으로도 4대 밖에 존재하지 않는 cryo-FE-SEM-EBSD(field emission-scanning electron microscopy-electron backscatter diffraction) 기기를 사용해 실시함으로써, 최근 기술적으로 새로운 도약을 이루고 있는 분야에 대한 기술습득 및 연구가치를 증명하는 것을 본 연구의 기본목표로 한다. 또한 기초적인 본 연구를 통해서 EBSD를 이용해 얻은 데이터의 활용에 대한 최근 트렌드를 이해하고, 적용할 수 있는 매틀랩 기본코딩도 얼음에 대해서 작성하였다. 이런 연구를 통해서 추후 low vacuum FE-SEM-EBSD기기가 극지연구소에 설치될 때를 대비해 기초기술 및 데이터 처리능력을 확보하는 것이 본 연구의 부수적인 목표이다.



1.2절 연구 목표 및 범위

본 연구의 주된 목표는 EBSD 기기를 효율적으로 이용하기 위해서 최근 널리 이용되고 있는 결정방향성 지도(orientation map) 측정기술을 이용하여 남극에서 산출하는 고압암석 및 빙하에 대한 미구조 분석을 실시하고, 지질학적 의미를 고찰하는 것이다.

위 연구 목표를 달성하기 위하여 다음 항목을 연구 범위로 하였다.

- 암석 및 얼음의 EBSD 분석을 위한 샘플 준비과정과 분석법의 이해 및 반복적 연습
- 얼음의 미구조 분석을 위한 FE-SEM-EBSD의 개조에서 핵심기술들의 습득
- 고압암석 및 빙하시료의 분석
- 결과를 기존의 데이터와 비교연구 및 지질학적으로 응용



제 2 장 국내외 기술개발 현황

2.1절 국내 연구 수준

국내에서 EBSD 기술을 지질학적으로 응용하고 활용하는 곳은 극히 드물다. 최근 서울대에서 광물의 결정방향성을 측정하고 그 결과를 지질학적으로 응용하고 있지만, 맨틀암석에 한정되어 있고 수동적으로(manually)만 분석을 하는 경향이 있다(e.g., Park and Jung, 2015). 이런 분석은 연구자의 주관에 데이터에 포함될 수 있으므로 최근에는 분석간격(step size)을 입력한 후, EBSD 기계가 자동적으로(automatically) 분석하고 방향성지도를 그리는 방법이 많이 사용되고 있다(e.g., Kilian et al., 2011). 이 방법은 샘플연마를 세밀히 해야 하고 방대한 분석시간이 소모되는 등의 어려움이 있지만, 광물 입자크기, 종횡비(aspect ratio) 또는 광물 내에서 방향이 탈(misorientation)의 변화를 쉽게 얻을 수 있는 등 많은 데이터를 포함하고 있기 때문에, 수동적으로 분석하는 방법에 비해 최근에 많이 활용되는 기술이다.

극지연구소는 “지구맨틀의 진화과정 연구(PE09100, 연구책임자: 최성희)” 과제를 통해서 서울대 연구팀과 공동으로 북극 스발바드(Svalbard) 지역에서 채취한 감람암(peridotite)에 대해 연구한 결과가 있다(그림 1). 과제에서는 변형미구조를 다양한 방면으로 분석하려고 노력했고, 기존의 변형실험에 의해 밝혀진 감람석(olivine)의 유형에 의해 스발바드 지역의 감람석의 CPO를 분류하고 형성되는 환경을 연구하려고 노력하였다(Jung et al., 2009). 하지만 자연적으로 산출하는 감람석에 실험적으로 밝혀진 기존의 CPO 분류방법을 단순하게 적용시키고, 지구조적 모델을 제시하지 못하는 등 지질학적 응용이 부족한 현실이다. 따라서 분석간격(step size)을 입력한 후, 고배율의 작은 부분의 분석 후 자동적으로 데이터를 합쳐주는 EBSD 최신 프로그램(AZtec program)을 사용해서 다양한 암석의 미구조 데이터를 획득하고, 그 결과를 지질학적으로 응용하는 것이 필요한 상황이다.

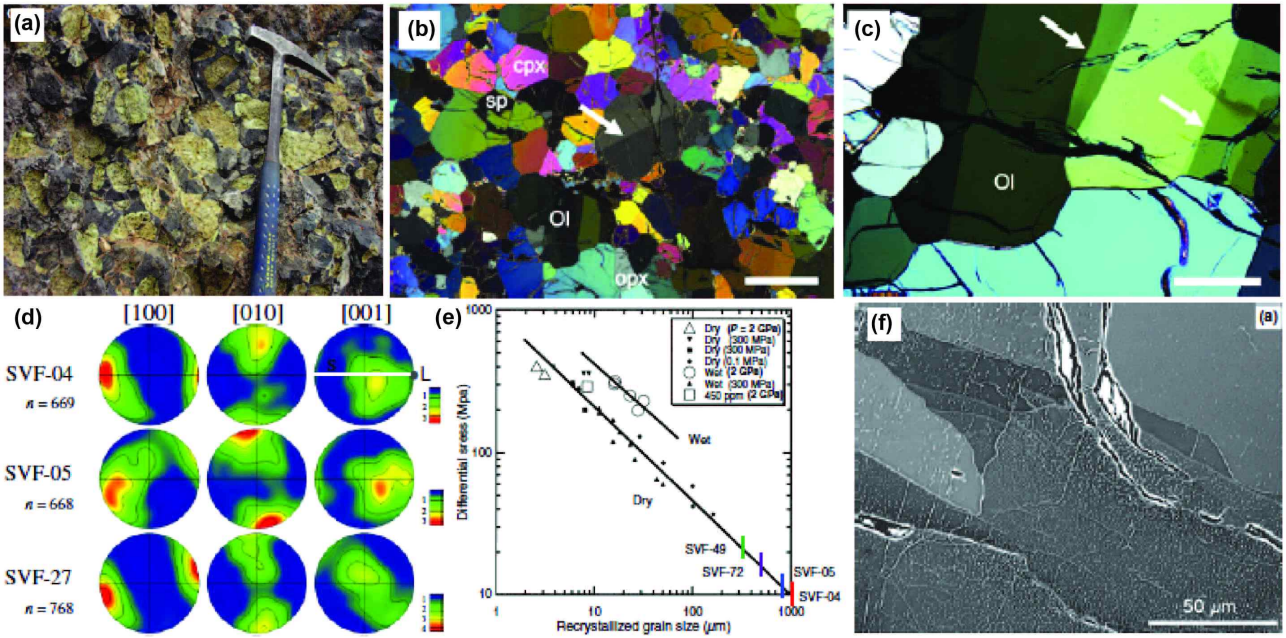


그림 1. 북극 스발바드 지역에서 채취한 감람암의 노두(a), 박편상태에서의 모습(b, c), 결정방향성(CPO, d), 입자크기 고압계(piezometer)를 사용한 차동응력 측정(e) 및 변위 측정 시 BSE(backscattered electron) 이미지(f). Jung et al. (2009).



2.2절 국외 연구 현황

전자투과현미경(transmission electron microscopy, TEM)이나 유니버설 스테이지(universal stage)를 이용한 광학현미경에 비해 훨씬 쉬운 샘플준비와 빠른 분석속도를 가지고 있는 후방산란전자회절(electron backscatter diffraction, EBSD) 분석기술은 광물의 결정방향성을 측정하는데 가장 효율적인 연구방법이다. 이 기술은 1999년에 처음으로 지질학적으로 응용되어서, 광학현미경으로는 불가능하고 TEM으로만 결정방향성 측정이 가능했던 등방성(isotropic) 광물인 석류석(garnet)의 초기 핵형성과 성장과정(e.g., nuclei coalesce and growth: Whitney et al., 2008), 한 광물결정 내에서의 미세한 광물방향성 변화(e.g., Bestmann et al., 2004) 등 많은 지질학적 질문사항을 해결하였다(after Prior et al., 1999, 그림 2).

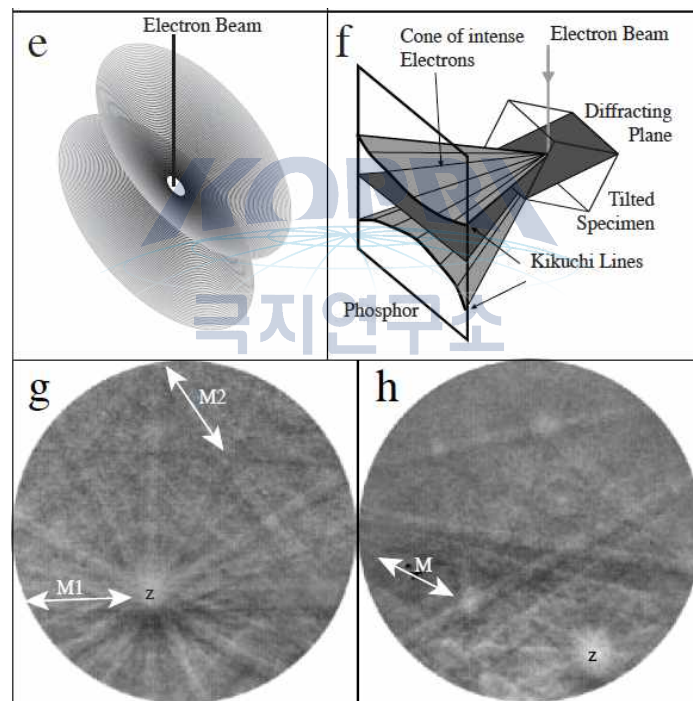


그림 2. 최초로 지질학적으로 응용된 EBSD에 대한 원리 (e, f)와 사장석(g) 및 석류석(h)의 EBSD 패턴. Prior et al. (1999).

이렇게 지질학적으로 널리 응용되었던 EBSD는 2008년 처음으로 얼음의 결정방향성을 측정하는데 사용되어 왔으며(after Piazzolo et al., 2008), 최근에는 90% 이상의 성공률을 보이는 등 기술적 발전을 이루고 있다(e.g., Prior et al., 2015, 그림 3). SEM은 1 μm 정도의 초점 크기(spot size)를 가지고 있으며, EBSD 기술은 1° 미만의 오차범위(error range)를 보이기 때문에, 이런 기술적 발달은 실험적으로 변형된 얼음샘플의 미구조 측정에 상당히 큰 도움이 되고

있다. 하지만 남극에서 얼음시료를 채취하는 것은 상당한 시간과 노력이 소요되며, 얼음샘플을 분석할 수 있는 cryo-EBSD를 보유하고 있는 호주 및 뉴질랜드의 오염물질 반입정책(남극의 빙하는 반입위험 물품)으로 인해서 자연샘플의 결정방향성 측정 및 지질학적 응용은 거의 이뤄지지 않고 있는 현실이다.

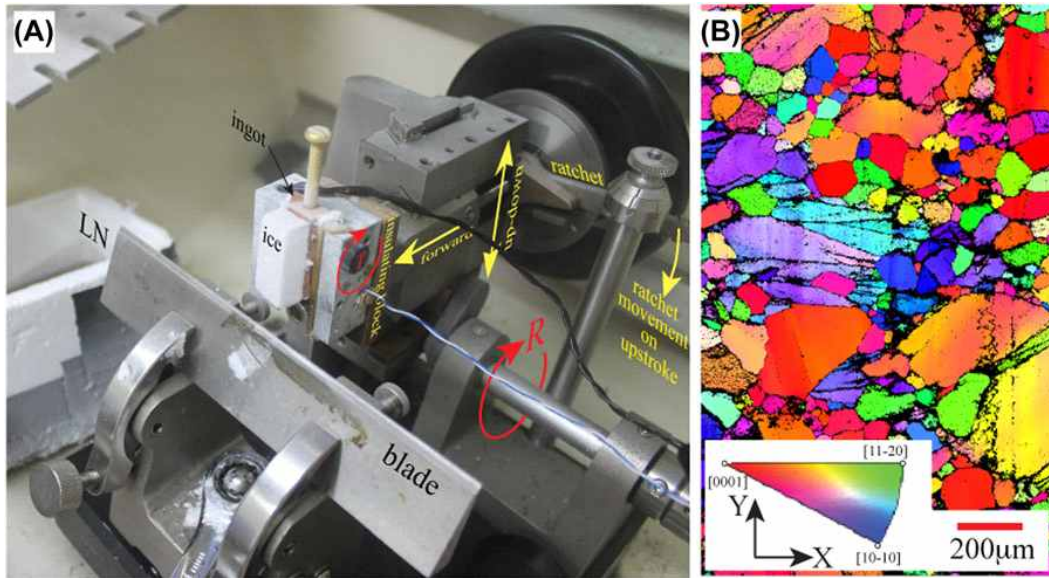


그림 3. 최근 SCI 저널에 보고된 얼음을 분석하는 EBSD의 샘플 준비방법 및 분석결과. Prior et al. (2015).



제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

3.1절 샘플 채취

1. 남극 고압암석

남극 종단산맥은 섭입대와 관련된 로스-델러매리안 조산운동(Ross-Delamerian orogeny)으로, 연구지역은 주로 퇴적암으로 구성되어 있는 낮은 변성대의 로버트슨베이 지괴 (Robertson Bay terrane), 녹색편암에서 각섬암 정도의 중간 변성단계대인 보워스 지괴(Bowers terrane), 높은 변성 또는 관입암이 많이 분포한 윌슨 지괴(Wilson Terrane)으로 크게 나뉜다 (그림 4). 기존의 “남극 빅토리아랜드 지역 지각진화 및 행성형성과정 연구(PM16030, 연구책임자: 이종익)” 과제에서는 장보고과학기지에서 북북서 방향으로 약 300km 떨어진 곳에 위치한 윌슨지괴와 보워스지괴의 경계부인 랜터만 산맥(Lanterman Range)에서 산출하는 에클로자이트를 채취하였다. 여러 에클로자이트 샘플 중에서 특징적으로 석류석과 녹휘석이 각각 많이 분포된 층을 포함하는 암석을 본 과제의 연구대상으로 하였다.

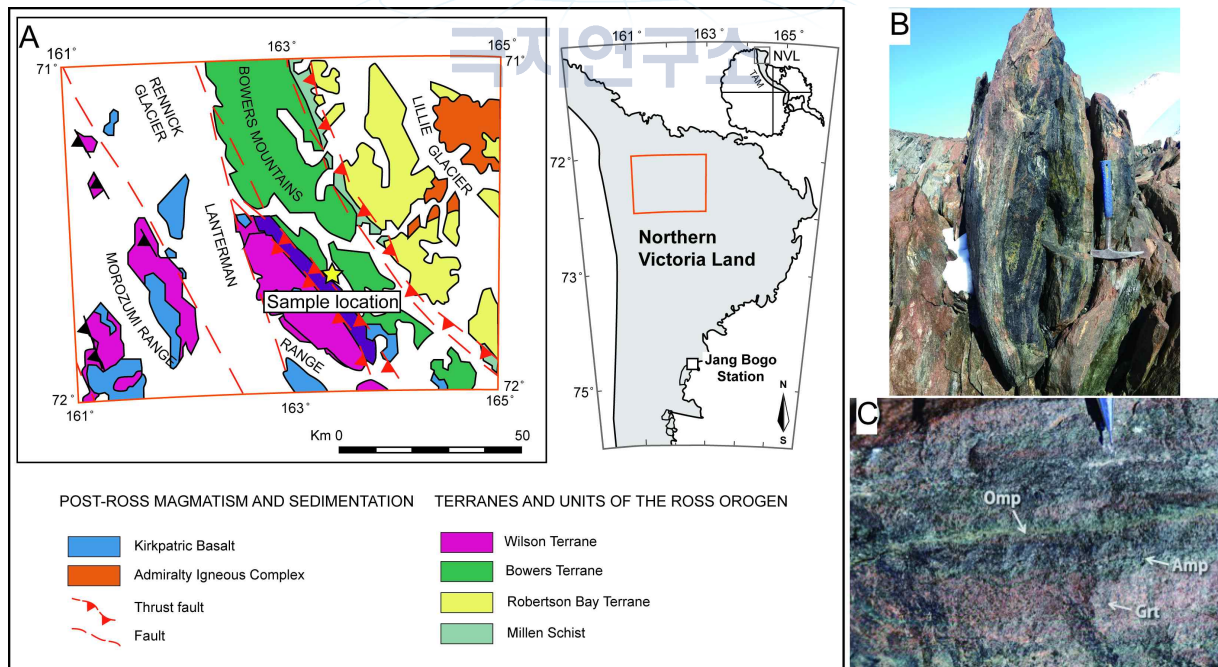


그림 4. 연구지역의 지질도(A), 산출암상의 노두사진(B) 및 석류석, 녹휘석 등이 특징적으로 많이 보이는 층을 포함한 암석의 모습(C).

2. 남극 빙하

장보고과학기지 주변에는 스틱스빙하(Styx Glacier)와 같이 적설량이 많고 바람이 불지 않는 곳에 존재해서 눈의 퇴적작용이 활발한 빙하, 난센빙붕(Nansen Ice Shelf), 프리슬리빙하(Prestley Glacier), 캠벨빙하(Campbell Glacier)와 같이 바람이 세고 활발한 증발작용에 의해 푸른색을 띠고 있는 블루아이스 등 다양한 빙하들이 존재한다. 본 과제에서는 기존에 채취한 스틱스빙하, 이 과제를 통해서 새롭게 채취한 난센 빙붕의 총 5가지 얼음시료를 EBSD 기술을 이용해서 분석하였다. 스틱스빙하에서의 얼음채취는 2014-2015 여름시즌에 주요사업 “과거, 현재의 극지기후 관측과 재현을 통한 기후변화 매커니즘 규명(PE15010)”을 통해서 수행되었다. 스틱스빙하($73^{\circ} 51' 6.0''S$, $163^{\circ} 41' 13.2''E$)는 기지로부터 북쪽으로 약 85 km 떨어져 있으며, 20일 동안 총 300회의 시추를 수행하여 누적 길이 210.5 m의 얼음코어를 획득하였다. 이 시료들은 아래위 방향은 표기되어 있지만, 시추 중 얼음이 끊어짐과 방향표시의 어려움으로 방위각(azimuth)은 표시되어 있지 않다. 시료는 50, 110, 170 m의 깊이에서 채취한 것들을 분석하였다. 보다 자세한 사항은 한영철 외(2015)를 참고할 수 있다.

난센빙붕($74^{\circ} 49' 8.6''S$, $163^{\circ} 1' 36.4''E$)에서는 2016-2017 여름시즌에 얼음시료를 채취하였다. 기존의 자연얼음 시료 미구조 분석은 방위각이 전혀 표시되어 있지 않아서, 깊이변화에 따른 입자크기(grain size)의 변화, 방향성의 강도 증가 등을 보고할 뿐, 얼음이 움직인 방향 등 지질학적 의미를 찾을 수 없었다(e.g., Gow and Williamson, 1976). 따라서 본 연구에서는 세계 최초로 얼음코어 위쪽에 방위각을 표시하고 정향샘플(oriented sample) 채취를 시도하였다(그림 5). 시추는 난센빙붕 내 전단대(shear zone)로 보이는 곳의 서쪽부분에서 실시하였고, 야외 노두에서 뿐만 아니라 위성사진을 통해서 살펴보아도 강력한 응력이 작용한 것으로 확인된다. 코어링 상황이 좋지 못해서 깊은 곳까지 진행하지 못하였기 때문에, 시료는 약 60 cm와 1 m깊이 지점에서 채취한 것 총 2개를 이용하였다.



그림 5. 연구지역의 위치 및 샘플링하는 장면.



3.2절 샘플 준비 및 분석법

1. 남극 고압암석의 샘플준비

남극 북빅토리아랜드 랜터만산맥에서 채취한 에클로자이트는 특징적으로 석류석과 녹휘석이 많이 분포한 층으로 나뉜다(그림 6). 본 연구를 위해서 두 층 사이의 구별선을 면구조(foliation)로, 녹휘석의 장축 또는 입자가 신장된 방향을 선구조(lineation)로 정의하고, 샘플은 면구조와 수직으로, 선구조와 평행한 방향으로 절단하였다. 이런 방향으로 절단된 샘플은 변형구조를 관찰하기에 최적의 면을 보여준다.

암석의 EBSD 분석은 샘플을 기계적으로, 화학적으로 연마해서 표면을 최대한 편평하게 만드는 것이 가장 큰 관건이다. 본 연구에서는 자동연마기를 이용해서 기계적인 연마(mechanical polishing)를, 진동연마기를 이용해서 화학적 연마(chemical polishing)를 실시하였다. 연마가 잘된 샘플은 표면에 얇은 탄소코팅(carbon coating)을 실시하여 SEM에 삽입하였을 시 충전현상(charging)을 해소하였다. EBSD 분석을 실시한 후 탄소코팅을 좀 더 두껍게 실시한 후, 광물의 화학성분을 전자질량분석기(electron probe micro-analyzer, EPMA)를 이용하여 분석하였다. 이를 토대로 광물의 상태(특히 녹휘석)를 동정하고 에클로자이트가 형성된 상태를 이해하려고 노력하였다.

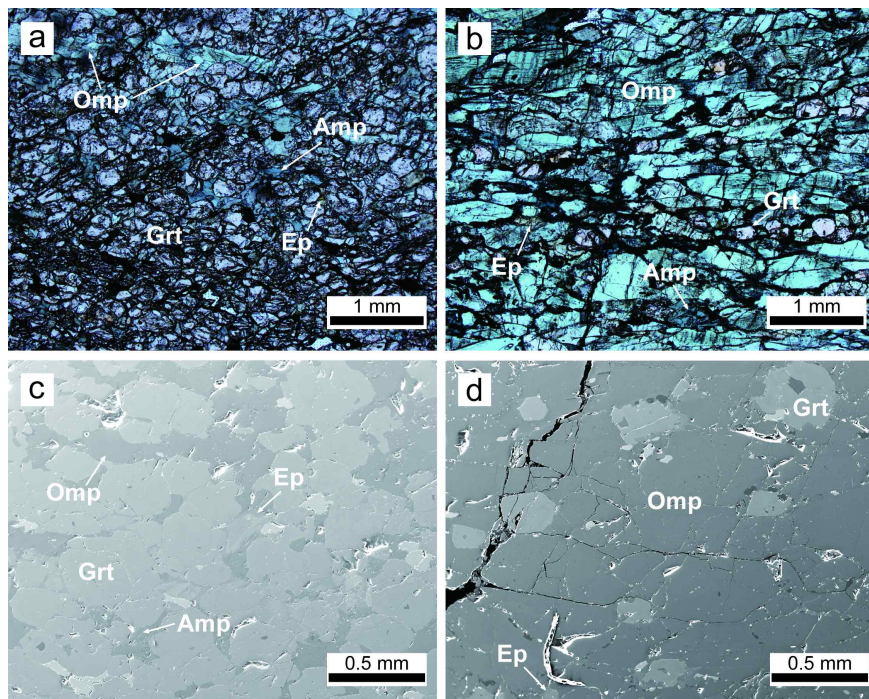


그림 6. 관찰샘플의 현미경사진(open-nicol, a and b) 및 BSE 이미지(c and d).

2. 남극 빙하의 샘플준비

얼음샘플의 EBSD 분석법은 크게 SEM 내에서 온도유지와 평편한(flat) 샘플표면의 연마 이렇게 두 가지 어려움이 있다(그림 6). 첫 번째 SEM 내에서 샘플의 온도유지는 콜드 스테이지(cold stage)를 이용해서 해결하였다. 콜드 스테이지는 열전도도가 높은 구리를 이용해서 만들었으며, 스테이지 위에 샘플홀더를 고정해서 분석을 실시한다. 샘플홀더의 온도는 외부에서 실시간으로 측정할 수 있도록 열전도선(thermocouple)을 이용해서 연결한다. 하지만 이때 외부에서 실시간으로 측정되는 온도는 샘플 전체의 온도가 아니므로 주의해야 하며, 큰 샘플을 분석할 시에는 샘플 내에서 온도차가 발생해 분석표면은 높은 온도를 띌 수 있으므로 큰 샘플의 분석은 세밀한 주의를 요한다. 두 번째 평편한 샘플표면의 연마는 EBSD 분석시 필수적으로 요구되는 사항이다. 얼음은 암석과 비교했을 때, 상당히 무른 특성을 가지고 있어서 비교적 샘플연마가 쉬운 경향이 있다. 얼음샘플의 물리적 연마(mechanical polishing)는 사포(sand paper)를, 화학적 연마(chemical polishing)는 SEM에 샘플을 삽입한 후 승화작용(sublimation)을 이용해서 실시하였다. 샘플 삽입 시 형성되는 샘플표면의 서리(frost)를 최소화하기 위해서 플라스틱으로 만든 이동상자(transition box)를 SEM 밖에 설치하였고, 지속적으로 기체 상태의 질소(nitrogen)를 상자 속으로 주입시켜서 공기 중 액체분자가 최소화 되도록 하였다.

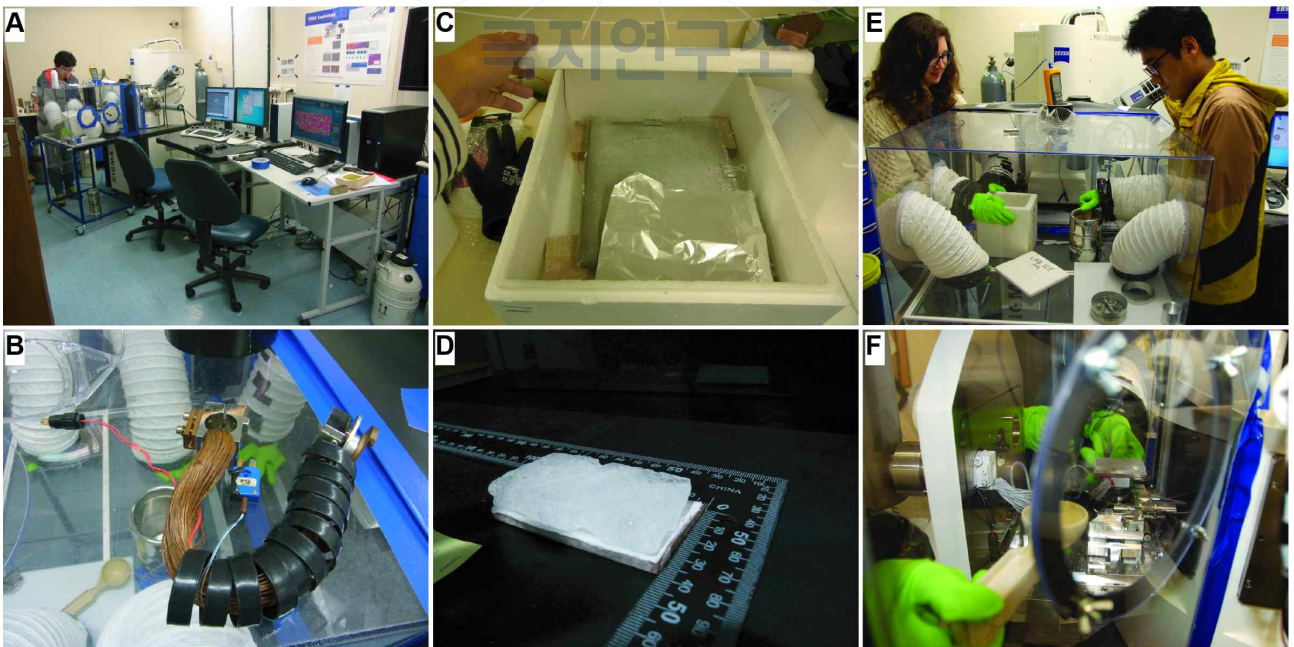


그림 6. 샘플준비 및 분석과정. 뉴질랜드 더니든 오타고대학교에 있는 cryo-FE-SEM-EBSD 장비(A), 주요장치 중의 하나인 cryo-stage (B), 실온에서 얼음샘플의 연마를 가능하게 해주는 스킨로폼 속의 연마판 및 사포들(C), 주괴홀더에 부착하여 물리적 연마가 끝난 얼음시료의 모습(D), 이동상자(transition box)에서 샘플을 SEM에 넣기 위해 준비하는 장면(E), 얼음시료를 SEM에 삽입하고 있는 모습으로 왼쪽의 스푼에는 액체질소가 있고 이를 표면에 뿌려주어 서리가 형성되는 것을 방지할 수 있다(F).

얼음샘플은 냉동창고에서 사슬톱을 이용해 가로, 세로, 두께의 길이가 각각 7 cm, 4 cm, 1 cm미만이 되도록 절단하였다. 절단한 샘플은 열전도도가 높은 구리로 만든 주괴(ingot) 홀더에 부착하고 600, 1500 mesh의 사포를 이용해서 샘플을 연마하였다. 본 연구에서는 EBSD 분석을 실시하는 도중 샘플의 연마과정을 실시하기 위해서, 스티로폼 상자 안에 액체질소를 넣고 약 5 cm위에 사포를 위치시키는 장치를 고안해서 실온에서 얼음샘플의 연마를 실시하였다. 이 때, 사포 연마면의 온도는 대략 -20~-30 °C정도가 되고, -15 °C보다 낮은 온도에서는 연마를 실시하여도 얼음표면이 녹거나 변형되지 않는다.

3. EBSD 분석법

압석에 대한 EBSD 분석은 인천 연수구 송도동에 위치한 한국생산기술연구원 산하의 희소금속산업기술센터의 장비를 이용하였다. 이 장비는 2015년 11월에 도입된 FE-SEM-EBSD로써, 전계방출 건(field emission gun)을 사용해서 필라멘트(filament)가 끊어질 염려가 없기 때문에 장시간에 걸친 결정방향성 지도 분석에 탁월하다. EBSD 분석은 AZtec 프로그램을 이용했으며, 샘플홀더를 70도 각도로 기울여서 키쿠치밴드(Kikuchi band)를 획득하고 광물방향성을 측정하였다. 고압의 조건에서 SEM을 작동해야하기 때문에, 샘플은 화학연마 후 charging을 방지하기 위해서 탄소코팅(carbon coating)을 얇게 해주었다. 샘플은 20 kV의 가속전압(acceleration voltage)을, ~10 nA의 빔 전류(beam current)를, ~20 mm의 작동거리(working distance)를 설정하고 분석을 실시하였다. EPMA 분석은 극지연구소 극지지구시스템연구부의 장비를 이용하였다. 이 장비는 두꺼운 탄소코팅을 해야 하므로, EBSD 분석을 종료한 후 EPMA 분석을 실시하였다. 분석조건은 15 kV의 가속전압으로, ~10 nA의 빔 전류(beam current)로, ~10 mm의 작동거리(working distance)로, 3-5 μm 의 분석크기(spot size)로 설정하였다.

얼음시료에 대한 EBSD 분석은 뉴질랜드 더니든에 위치한 오타고대학교의 전자현미경실에서 실시하였다. 다양한 압력(various pressure)을 이용할 수 있는 FE-SEM-EBSD 장비를 이용하기 때문에 저압조건(~10 Pa)에서 샘플분석을 실시할 수 있고, 따라서 샘플표면에 탄소코팅을 실시하지 않았다. 본 시설은 Prior et al. (2015)에 의해 개발되어 현재 세계적으로 4대밖에 존재하지 않는 얼음을 분석하는 EBSD 장비 중 하나이다. 샘플은 20 kV의 가속전압을, ~10 nA의 빔 전류를, ~20 mm의 작동거리를 설정하고 분석을 실시하였다.

3.3절 EBSD 분석 결과

1. 남극 고압암석

① 광물의 화학성분

각섬석(amphibole)은 압력, 온도, 화학성분(P-T-X) 조건에 따라 함유하는 성분을 달리 하여 성장하는 광물로서, 분석하는 암석의 미구조가 어떤 단계에서 형성되었는지 알려주는 역할을 할 수 있다. 극지연구소의 FE-EPMA를 이용하여 각섬석의 화학성분을 분석한 결과, 타형(anhedral)의 각섬석은 대부분 누대구조를 띠고 있지 않았고 나트륨 성분이 많이 포함되어 있지 않았기 때문에(barroisite) 후퇴변성작용 동안 형성된 것으로 생각된다(그림 7). 하지만 타형의 광물모양은 각섬석이 후퇴변성작용 마지막 단계에 형성되었다는 것을 의미하고, 암석 내 산출하는 고압암석의 특징적인 광물조합인 석류석+녹휘석의 존재는 본 연구에서 분석하고 있는 암석이 최소한 에클로자이트의 압력온도조건에서 형성되었다는 것을 의미한다. 따라서 이 결과를 랜터만 산맥에서 산출하는 에클로자이트의 변성과정에 대해 연구한 기존의 연구와 결합하면, 본 연구에서 분석한 암석은 대부분 에클로자이트 변성상에서 형성되었고, 추후 각섬석이 광물사이의 공간에 형성되었음을 지시한다.

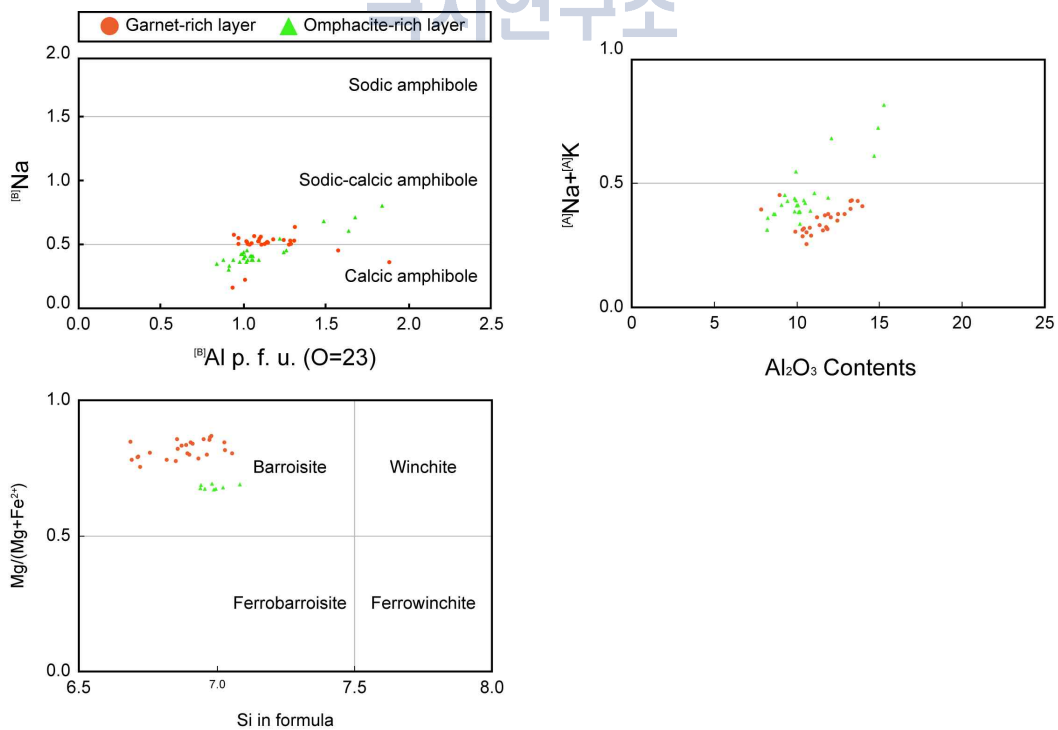


그림 7. 각섬석의 화학성분을 극지연구소에서 보유하고 있는 FE-EPMA로 분석한 모습. 분석한 각섬석의 대부분이 나트륨을 적게 포함하고 있고, 따라서 후퇴변성작용 최후기에 형성된 것으로 판단된다.

② 결정방향성

EBSD 분석결과를 결정방향성으로 나타낸 결과, 석류석은 상대적으로 약한 CPO를, 녹회석은 강한 CPO를 가지고 있다(그림 8). 구조강도(fabric strength, J - and M -indices)는 석류석이 많이 포함된 층에서는 석류석이 4.01, 0.14, 녹회석이 6.57, 0.11, 녹회석이 많이 포함된 층에서는 석류석이 4.46, 0.15, 녹회석이 7.16, 0.21로 각각 계산되었다. 따라서 석류석이 많이 포함된 층에서 두 광물 모두 약한 구조강도를 가지고 있고, 각각의 층에서 모두 석류석이 약한 구조강도를 가지고 있는 것으로 나타났다.

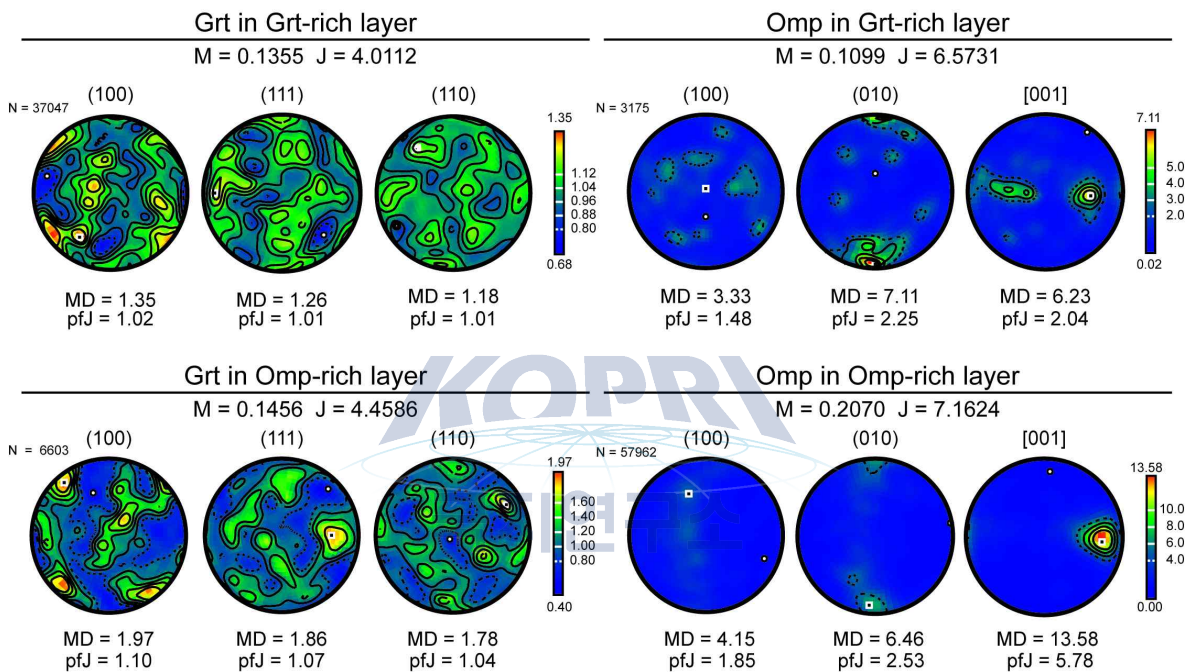


그림 8. 본 연구에서 분석한 석류석과 녹회석이 많이 포함된 층에서 산출하는 석류석과 녹회석의 결정방향성. 두 층 모두에서 석류석은 상대적으로 약한 CPO를, 녹회석은 강한 CPO를 가지고 있다.

③ 지진파 특성(seismic property)

일반적으로 암석의 지진파 특성은 각 광물의 지진파 특성을 바탕으로 암석 내 포함된 광물함유량(mineral abundance)을 계산에 포함해서 결정한다. 본 연구에서는 에클로자이트의 주구성광물인 석류석과 녹회석만을 포함하는 암석이라는 가정 하에 에클로자이트의 지진파 특성을 계산하였다. 일반적인 P파와 S파의 지진파 이등성은 다음의 계산식에 의해서 추론할 수 있다,

$$AVP = (V_{Pmax} - V_{Pmin}) / (V_{Pmax} + V_{Pmin})$$

$$AVs = (Vs1 - Vs2)/(Vs1 + Vs2)$$

계산상의 단결정 탄성계수(single crystal elastic constant, C_{ij})는 석류석은 Chai et al. (1997), 녹휘석은 Bhagat et al. (1992)의 결과를 따랐다.

석류석은 0.2 %, 0.5-0.6 %의 상대적으로 약한 P파, S파 지진이등방성을 보여준다. 그 반면 녹휘석은 3.7-5.9 %, 3.8-2.9 %의 강한 P파, S파 지진이등방성을 띄고 있다. 따라서 에클로자이트의 지진파 이등방성은 석류석이 아닌 녹휘석에 의해 결정되는 것으로 사료된다.

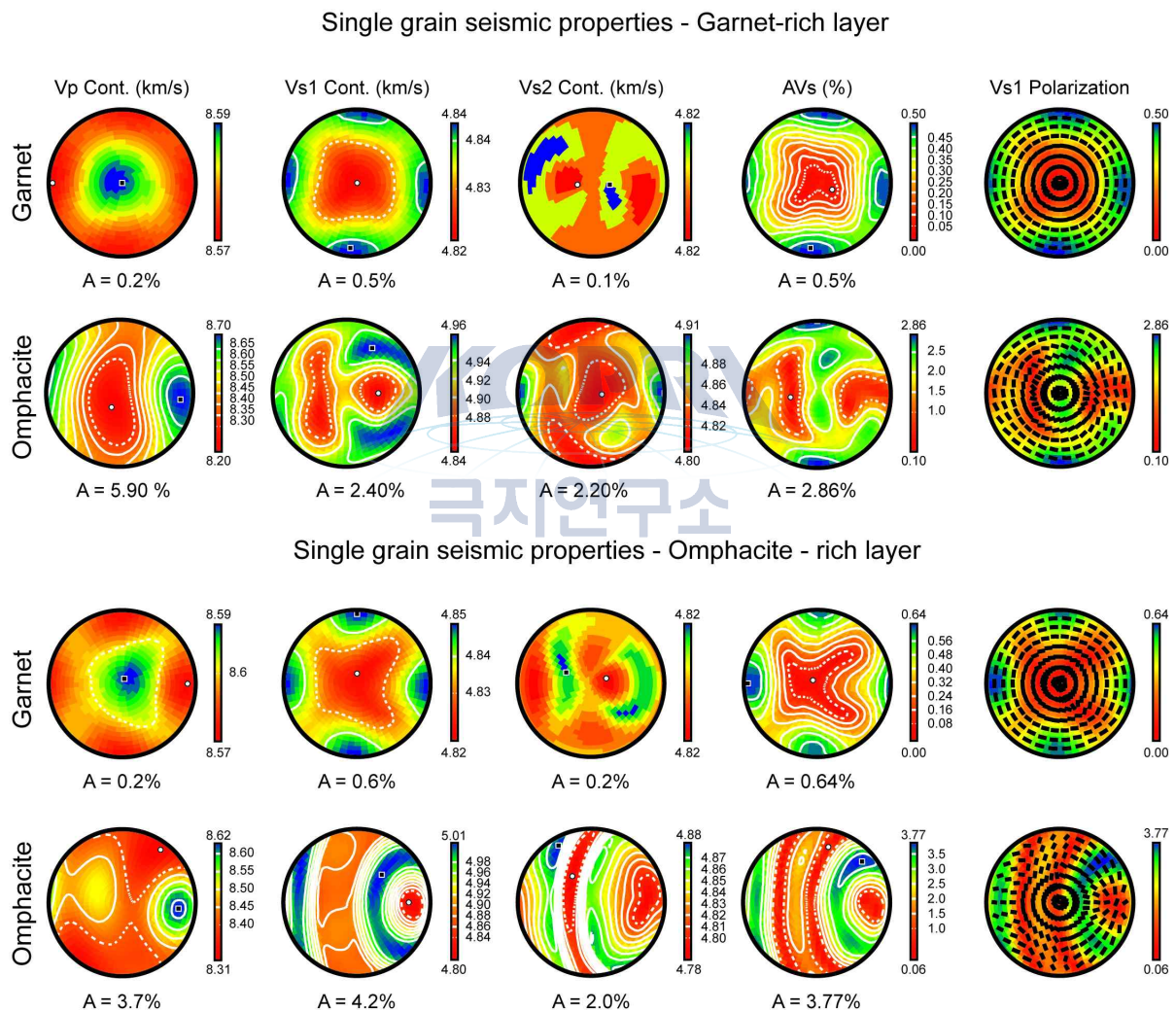


그림 9. 석류석과 녹휘석이 많이 함유된 층에 포함되어 있는 광물들의 지진파 이등방성. 단결정 탄성계수(single crystal elastic constant, C_{ij})는 석류석은 Chai et al. (1997), 녹휘석은 Bhagat et al. (1992)의 결과를 따랐다.

2. 남극 빙하

① 결정방향성 지도

결정방향성 지도에서 분석이 안 된 부분은 대부분 기포의 자리이며, 그 위치가 대비지도 (contrast map), 방향성지도(orientation map)에서 일치하는 것으로 보아 본 분석은 성공적으로 진행되었다는 것을 알 수 있었다(그림 10). 또한 샘플준비 시 발생하였던 쪼개짐(fracture)이 하나의 결정을 관통하는 경우가 있었는데, 쪼개진 곳을 기준으로 양 옆으로 결정방향성이 일치하는 것으로 보아 쪼개짐이 발생하는 시기에 얼음샘플이 주괴홀더에 잘 부착되어 있는 것으로 판단되었다. 대부분의 분석은 90% 이상의 분석성공률(success rate)을 보였고, 따라서 얼음의 미구조 분석은 성공적으로 진행되었다.

얼음은 일반적으로 변형되기 쉬운 것으로 알려져 와서 자연상에서 자형(euhedral)의 입자모양(grain shape)을 가지고 변형시 회복(recovery)이 빠를 것으로 생각되어 왔다. 하지만 본 연구결과는 반자형(subhedral) 또는 타형(anhedral)의 입자모양을 보이기도 하고 아결정 경계(subgrain boundary)를 미구조관찰시 보여줌으로써, 과거의 변형흔적이 얼음미구조에 보존될 수 있는 가능성을 보여준다.

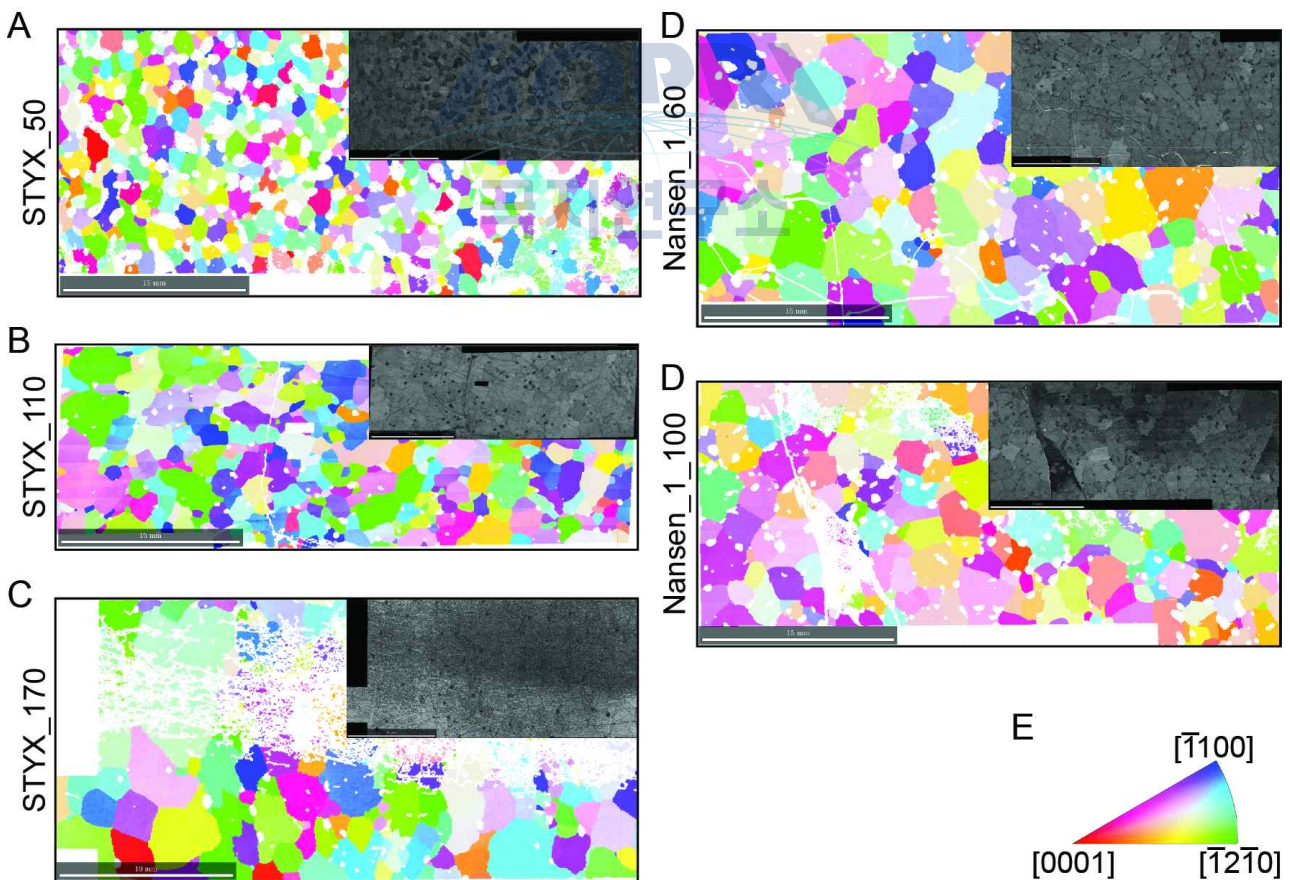


그림 10. 얼음의 미구조분석 결과인 방향성 지도(orientation map)와 대비지도(contrast map). 몇몇 샘플(e.g., STYX_170)은 승화작용(sublimation)을 너무 많이 거쳐, 화학연마에 실패하여 분석이 제대로 진행되지 않았다. 하지만 분석 포인트가 많아서 결정방향성을 도시하고, 그 의미를 해석 하는데는 큰 무리가 없었다.

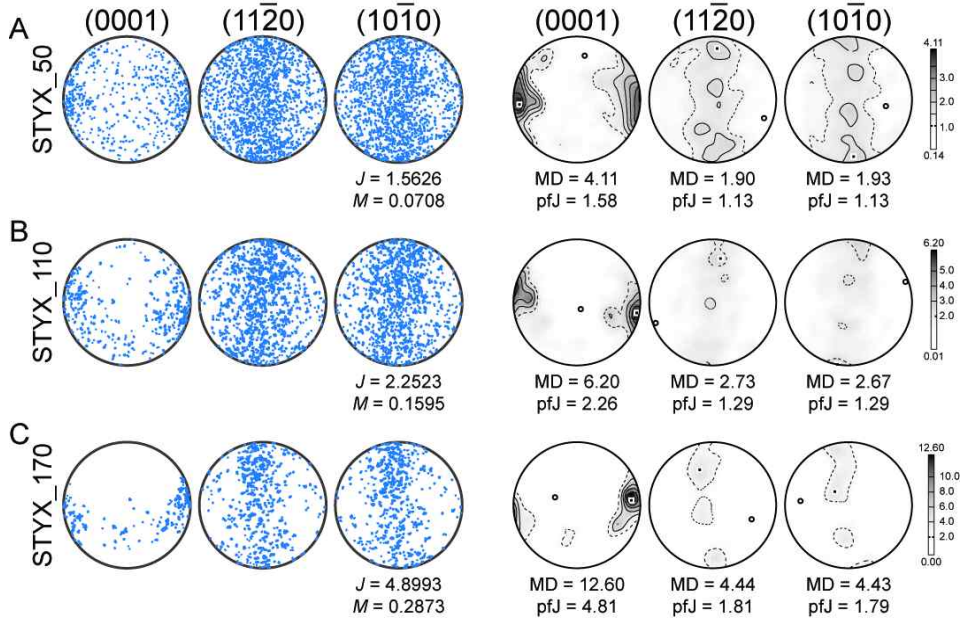
② 결정방향성(CPO)

얼음의 결정면을 스테레오넷(stereo net)에 도시하여 결정방향성을 살펴보았다. 얼음결정은 6방정계(hexagonal)로 석영(quartz)과 비슷하며, 따라서 비슷한 결정방향성을 보여줄 것으로 예상되었다. 기존의 자연에서 형성된 얼음미구조에 대한 연구에서는 c-축의 배열방향이 수평면과 수직인 방향으로 배열하고 있는 결과를 보여줬었다(e.g., Dahl-Jensen et al., 2013; Montagnat et al., 2014).

본 연구에서는 기존에 발표되었던 c-축이 지표면과 수직인 방향으로 배열하는 것과 기존에 자연샘플에서 보여주지 않았던 두 점 형태(double cluster)의 CPO를 보여주었다(그림 11). 이 중 특히 두 점 형태의 CPO는 simple shear에 의해 형성된 것으로 기존의 변형실험 결과가 있는데(e.g., Wilson et al., 2014), 자연상에서는 처음으로 산출하는 것으로 새로운 형태의 CPO를 가진 얼음이 블루아이스에서 산출할 수 있는 가능성을 보여주는 결과라고 할 수 있다.



Styx Glacier



Nansen Glacier

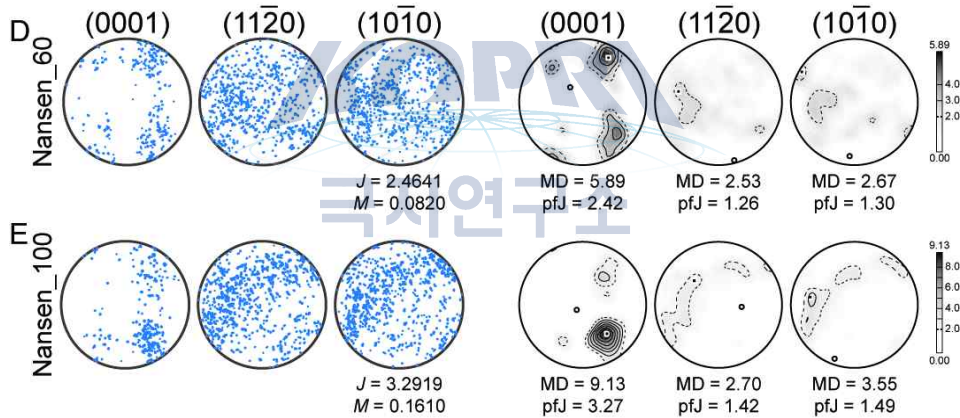


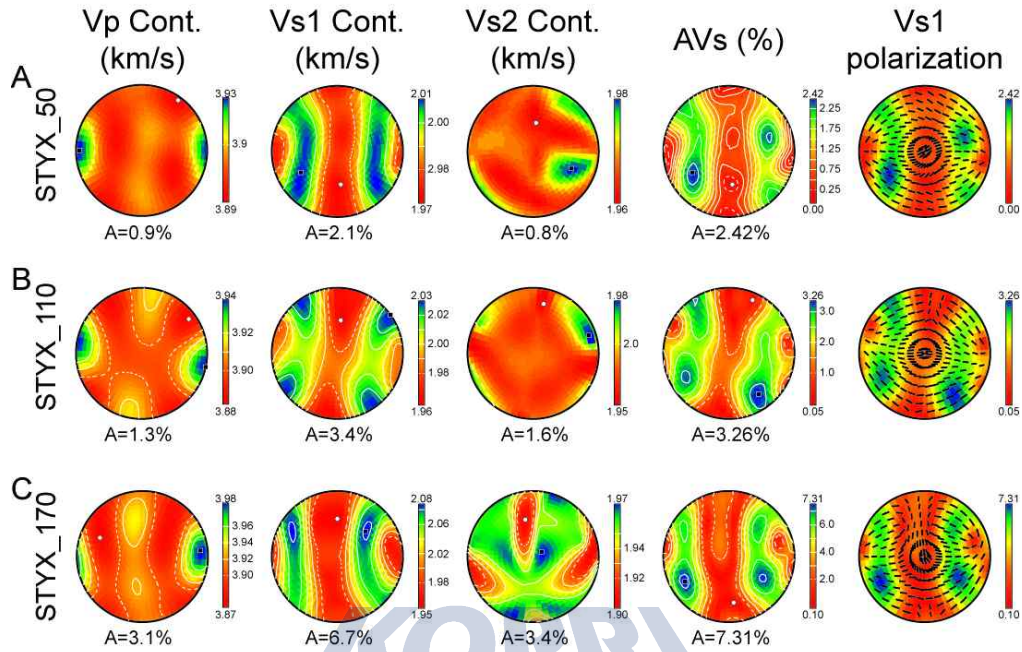
그림 11. 총 분석포인트 중 2000 포인트를 랜덤하게 도시한 것과 모든 분석포인트를 등고선(contour)으로 나타낸 얼음의 CPOs. 스틱스빙하의 얼음 샘플은 c-축이 전형적으로 수직인 방향으로 배열하고 있으며, 난센빙하의 얼음샘플은 두 개의 배열방향을 가진다.

③ 지진파 특성(seismic property)

얼음샘플의 경우 기공, 테프라 등의 불순물이 포함될 수 있지만, 이 연구에서는 얼음결정만으로 이루어져 있다는 가정 하에 지진파 이등방성을 계산하였다. 계산상의 단결정 탄성계수 (single crystal elastic constant, G_i)는 Ice 1h 상태로 Gagnon et al. (1987)의 결과를 따랐다. 계산결과 최고 7.5 %까지 S파 이등방성을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 S파 이등방성을

이용하여 지진파 연구를 실시하면 빙하 속 얼음의 다양한 구조를 밝혀낼 수 있을 것으로 생각된다.

Styx Glacier



Nansen Glacier

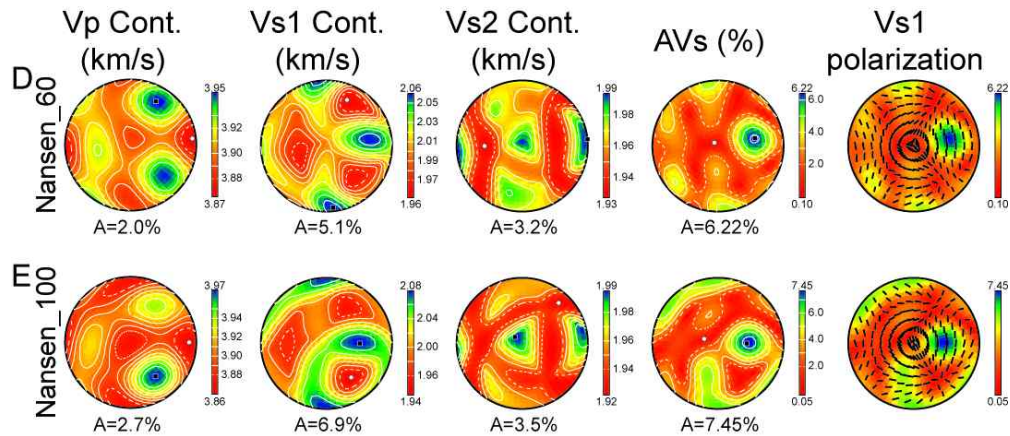


그림 12. 얼음샘플의 지진파 이등방성 계산결과.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

4.1절 연구개발목표 달성도: EBSD 분석을 위한 다양한 암석의 연마법 발전

1. 시료 처리 간소화

본 연구에서는 EBSD 분석용 시료처리를 간단히 실시하기 위해서 여러 방법을 시도하여 최적의 시료처리 방법을 발견하였다.

2. EBSD 분석을 위한 얼음의 연마법 및 연마샘플 제작

가. 시료 전처리법 개발

암석시료의 경우, 보통 EPMA분석용에서 주로 이용하던 단계인 1 μm 크기의 연마제 (diamond paste)까지 기계적 연마를 실시한 후, 1/4 μm 크기의 연마제를 이용하여 조금 더 미세한 연마를 실시한다. 다음 단계로 진동연마기를 이용하여 0.04 μm 크기의 콜로이드 규산 (colloidal silica)으로 화학적 연마(chemical polishing)를 20분간 실시하면 EBSD용 샘플의 준비가 성공적으로 끝난다.

얼음시료의 경우, 기계적 연마를 냉동고 또는 실온에서도 실시할 수 있다. 특히 실온에서는 스티로폼 박스 안에 액체질소를 채우고 약 5cm 위에 연마판을 두면, 온도를 약 $-20\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 유지할 수 있다. 얼음시료의 경우, 화학적 연마를 전자현미경 안에서 실시하여야 한다. 먼저 시료의 안정화를 위해서 냉동 시료홀더의 온도를 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하로 낮춰준다. 그 뒤, 약 $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 내외로 시료홀더의 온도를 높여주면 승화작용이 일어나서 화학적 연마가 끝난다. 하지만 이 시기를 맞추기 힘든 경우에는 분석이 실패할 수 있으므로 주의를 기울여야 한다.

3. EBSD 분석법 최적화

가. 정밀도, 정확도 개선

정밀도, 정확도 개선을 위해서 AZtec 프로그램을 이용시 정적배경(static background) 및 자동배경(auto background)을 적절히 사용하여야 한다. 특히 최대한 샘플표면에 손상이 없는 부분으로 이동해서 배경을 얻어야 하고, 넓은 영역에서 배경을 얻도록 하여야 키쿠치밴드를 해석할 수 있다.

나. 분석시간 최적화

결정방향성 지도를 작성하기 위해서는 많은 분석시간이 필요하다. 예를 들어 암석의 경우 5 μm 의 분석크기(step size)로 2 cm x 2 cm의 샘플을 분석한다고 가정할 때, 한 포인트당 10 ms의 분석시간을 사용하면 총 444시간을 사용해야 한다. 하지만 얼음의 경우 50 μm 의 분석크기로 2 cm x 2 cm의 샘플을 분석한다고 가정할 때, 한 포인트당 4 ms의 분석시간을 사용하면 총 43분밖에 사용하지 않는다. 따라서 한 포인트당 분석시간은 분석성공률에 직접적으로 연관이 있고, 샘플에 따라 상이하기 때문에, 분석 시 상황에 따른 조정이 필요하다.

4. 남극에서 산출하는 고압암석 및 빙하의 미구조 분석 및 결과해석

가. 남극 고압암석의 미구조



고압암석의 미구조는 성공적으로 분석이 진행되었다. 본 결과는 에클로자이트 내 주요광물의 변형행동을 수치적으로 나타낸 것으로 기존에 경험적으로만 정의하던 변형행동에 대한 기준이 될 수 있으며, 자연상에서 산출하는 에클로자이트의 변형행동을 예측하는데 기여할 것으로 예상된다. 이런 고압암석의 변형행동에 대한 연구는 섭입대의 깊은 곳에서 일어나는(e.g., 에클로자이트의 경우 북동일본에서 약 120 km의 깊이에서 형성됨) 지진파특성을 이용하면 지구내부의 구조 및 지진의 발생 등에 응용될 수 있다(e.g., Kim et al., 2016).

나. 남극 빙하시료의 미구조

남극 빙하시료의 미구조 연구결과는 기존에 발견하지 못했던 CPO를 찾는 등 많은 성과를 이루었다. 특히 블루아이스 지역에서 발견된 새로운 CPO는 과거 얼음의 운동방향을 얼음미구조가 보존하고 있을 가능성을 보여주는 등 해석의 다양성 측면에서 추가적인 연구가 필요하다는 것을 말해준다.

4.2절 대외기여도

본 연구 중 얼음의 미구조 분석에 관한 부분은 EBSD를 처음으로 지질학적으로 응용하고 최근 얼음을 분석할 수 있는 cryo-EBSD 분석분야에서 획기적인 기술적 발전을 이룩한 뉴질랜드 오타고대학교의 David Prior 교수와 함께 진행하였다. 특히 EBSD 분석을 뉴질랜드 오타고대학교를 직접 방문하여 실시하였고, 이 과정 속에서 해빙(sea-ice)분야의 전문가인 Pat Longhorne 교수, 인공위성 분야의 전문가인 Christina Hulbe 박사 등을 만나 극지연구소의 활발한 연구활동을 알렸다.

현재 연구내용의 대부분이 SCI 저널투고를 목적으로 논문으로 준비중에 있기 때문에, 본 보고서에서는 획득한 데이터의 많은 부분을 누락하여 수록하였다. 하지만 본 과제를 수행하며 획득한 데이터는 세계에서 최초로 새로운 얼음의 결정방향성(CPO)을 발견하였고, 블루아이스 지역에서 다양한 결정방향성을 가진 얼음이 산출하는 것을 증명하였기 때문에, 추후 연구내용이 논문으로 발간되면 대외적으로 얼음미구조 분야에 대한 극지연구의 새로운 방향성을 제시할 것으로 기대된다.



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 과제를 통해 획득한 암석시료 자료는 경험적으로만 인지되어 왔던 변형 분할작용 (strain partitioning)을 수치적으로 증명해 주는 것이기 때문에 다른 암석에도 적용될 수 있다. 따라서 현재 수행중인 북빅토리아랜드에서 산출하는 많은 고압 및 고온 변성암석을 대상으로 다른 연구를 진행할 예정이다. 현재 에클로자이트를 대상으로 한 본 연구의 결과는 SCI급 저널투고를 목적으로 논문으로 작성중이다.

본 연구결과 중 하나인 얼음시료 자료는 블루아이스 지역에서 산출하는 새로운 CPO를 밝힌 중요한 결과로써, 얼음의 화학분석 및 미구조 관찰, 연대측정, 빙하이동 모델링 등 다른 분야와 융합 시 새로운 해석이 가능하다. 따라서 타 연구와의 협업이 강력이 요구된다. 본 과제 수행으로 얻은 결과는 현재 SCI급 저널투고를 목적으로 논문을 작성중이다.



제 6 장 참고문헌

- 한영철, 전성준, Morihiro Miyahara, 이훈규, 안진호, 정지웅, 허순도, 홍상범, 2015. 2014-2015 하계 남극 북빅토리아랜드 스틱스 빙하(Styx glacier) 천부 시추. 지질학회지, 51권 343-355.
- Bhagat, S. Bass, J.D., Smyth, J., 1992. Single-crystal elastic properties of omphacite-C2/c by Brillouin spectroscopy. *J. Geophys. Res.*, 97, 6843-6848.
- Bestmann, M., Prior, D.J., Veltkamp, K.T.A., 2004. Development of single-crystal σ -shaped quartz porphyroclasts by dissolution-precipitation creep in a calcite marble shear zone. *J. Struct. Geol.*, 26, 869-883.
- Chai, M., Brown, J.M., Slutsky, L.J., 1997. The elastic constants of pyrope-grossular-almandine garnet to 20 GPa. *Geophys. Res. Lett.*, 24, 523-526.
- Dahl-Jensen, D. et al. (NEEM community members), 2013. Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core. *Nature*, 493, 489-494.
- Eagles, G., Gohl, K., Larter, R.D., 2004. High-resolution animated tectonic reconstruction of the South Pacific and West Antarctic Margin. *Geochem. Geophys. Geosy.*, 5, Q07002.
- Gagnon, R., Kieffe, H., Clouter, M., Whalley, E., 1987. Elastic constants of ice Ih, up to 2.8 kbar, by Brillouin spectroscopy. *J. Phys. Colloq.* 48, C1-23-C1-28.
- Gow, An., Williamson, T., 1976. Rheological implications of the internal structure and crystal fabrics of the West Antarctic ice sheet as revealed by deep core drilling at Byrd Station. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 87, 1665-1677.
- Jung, H., Karato, S.-I., 2001. Water-induced fabric transitions in olivine. *Science*, 293, 1460-1463.
- Jung, H., Mo, W., Choi, S.H., 2009. Deformation microstructures of olivine in peridotite from Spitsberg, Svalbard and implications for seismic anisotropy. *J. Metamorph. Geol.*, 27, 707-720.
- Katayama, I., Hirauchi, K.-I., Michibayashi, K., Ando, J.-I., 2009. Trench-parallel anisotropy produced by serpentine deformation in the hydrated mantle wedge. *Nature*, 461, 1114-1117.
- Kilian, R., Heilbronner, R., Stünitz, H., 2011. Quartz size reduction in a granitoid rock and the transition from dislocation to diffusion creep. *J. Struct. Geol.*, 33, 1265-1284.
- Kim, D., Katayama, I., Michibayashi, K., Tsujimori, T., 2013. Deformation fabrics of natural blueschists and implications for seismic anisotropy in subducting oceanic crust. *Phys. Earth Planet. Int.*, 222, 8-21.
- Kim, D., Wallis, S., Endo, S., Ree, J.-H., 2016. Seismic properties of lawsonite eclogites

from the southern Motagua fault zone, Guatemala. *Tectonophysics*, 677-678, 88-98.

- Montagnat, M., Azuma, N., Dahl-Jensen, D., Eichler, J., Fujita, S., Gillet-Chaulet, F., Kipfstuhl, S., Samyn, D., Svensson, A., Weikusat, I., 2014. Fabric along the NEEM ice core, Greenland, and its comparison with GRIP and NGRIP ice cores. *The Cryosphere* 8, 1129-1138.
- Park, Y., Jung, H., 2015. Deformation microstructures of olivine and pyroxene in mantle xenoliths in Shanwang, eastern China, near the convergent plate margin, and implications for seismic anisotropy. *Int. Geol. Rev.*, 57, 629-649.
- Piazolo, S., Montagnat, M., Blackford, J.R., 2008. Sub-structure characterization of experimentally and naturally deformed ice using cryo-EBSD. *J. Microsc.*, 230, 509-519.
- Prior, D.J., Boyle, A., Brenker, F., Cheadle, M.C., Day, A., Lopez, G., Peruzzo, L., Potts, G.J., Reddy, S., Spiess, R., Timms, N.E., Trimby, P., Wheeler, J., Zetterström, 1999. The application of electron backscatter diffraction and orientation contrast imaging in the SEM to textural problems in rocks. *Am. Mineral.*, 84, 1741-1759.
- 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., Piazolo, S., Wilson, C.J.L., 2015. Making EBSD on water ice routine. *J. Microsc.*, 259, 237-256.
- van Roermund, H.L.M., Boland, J.N., 1981. The dislocation substructures of naturally deformed omphacites. *Tectonophysics*, 78, 403-418.
- Tsujimori, T., Sisson, V.B., Liou, J.G., Harlow, G.E., Sorensen, S.S., 2006. Petrologic characterization of Guatemala lawsonite eclogites: Eclogitization of subducted oceanic crust in a cold subduction zone. *Geol. S. Am. S.*, 403, 147-168.
- Whitney, D.L., Goergen, E.T., Ketcham, R.A., Kunze, K., 2008. Formation of garnet polycrystals during metamorphic crystallization. *J. Metamorph. Geol.*, 26, 365-383.
- Whitney, D.L., Teyssier, C., Seaton, N.C.A., Fornash, K.F., 2014. Petrofabrics of high-pressure rocks exhumed at the slab-mantle interface from the "point of no return" in a subduction zone (Sivrihisar, Turkey). *Tectonics*, 33, 2315-2341.
- Wilson, C.J.L., Peternell, M., Piazolo, S., Luzin, V., 2014. Microstructure and fabric development in ice: Lessons learned from in situ experiments and implications for understanding rock evolution. *J. Struct. Geol.*, 61, 50-77.

뒷 면

(국내 과제용)



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 안 됩니다.