

남극 빙붕 주변 해저퇴적물 내의 점토광물을
이용한 고환경 복원 및 생지화학적 변이작용
연구

The study of biogeochemical alteration and
reconstruction of paleo-environment using clay
minerals in marine sediments distributed in ice shelf
regions, West Antarctica



제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “퇴적물을 활용한 지난 2백만년간의 남극 빙권 및 해양 변화 복원”과제의 위탁연구“남극 빙봉 주변 해저퇴적물 내의 점토광물을 이용한 고환경 복원 및 생지화학적 변이작용 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.



위탁연구기관명 : 연세대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 김진욱

위탁참여연구원 : 구태희

“ : 정재우

“ : 박영규

“ : 이기환

보고서 초록

위탁연구과제명	남극 빙봉 주변 해저퇴적물 내의 점토광물을 이용한 고환경 복원 및 생지화학적 변이작용 연구				
위탁연구책임자	김진욱	해당단계 참여연구원수	4	해당단계 연구비	80,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	연세대학교 학과	지구시스템과	참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 연수	84
<p>1. 종합적인 고환경 해석 및 호냉성 철 환원 미생물에 의한 해저 퇴적물에서의 Biological activity 조사 (I)</p> <p>1-1) 서남극 지역 Samplings location 선정 및 채취</p> <p>1-2) 퇴적상 변화에 따른 벨링스하우젠 해와 크리스탈 사운드 지역의 XRD, TEM을 이용한 점토광물 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> - XRD, TEM을 이용한 광물학적 분석한 결과, 빙기-간빙기에 걸친 퇴적상의 변화에 따른 점토 광물의 상대적인 함량 변화 관찰 <p>1-3) 결빙시 철 함유 광물-미생물 반응 실험 설계</p> <ul style="list-style-type: none"> - 결빙시 산화철 광물과 미생물간의 반응에 의한 광물변이 분석을 위한 batch 실험 setup을 통해 0도 이하의 저온 환경에서도 철 환원 미생물에 의한 삼가 철의 환원을 관찰 <p>2. 종합적인 고환경 해석 및 호냉성 철 환원 미생물에 의한 해저 퇴적물에서의 Biological activity 조사 (I I)</p> <p>2-1) 극지연구소 생명과학연구부와 협력하여 퇴적물 내에 분포하는 호냉성 철 환원 미생물에 대한 분리동정에 대한 해석 실시</p> <ul style="list-style-type: none"> - 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 microbial community와 퇴적상의 변화 간의 상관관계 관찰 <p>2-2) 크리스탈 사운드와 벨링스하우젠해의 퇴적물에 대한 TEM과 SAED pattern을 이용하여 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석 실시</p> <ul style="list-style-type: none"> - 크리스탈 사운드의 BS17-GC18코어의 illite crystallinity (IC)를 통해 빙기-간빙기에 걸친 퇴적 환경 변화를 관찰 - 빙저호로 추정되는 구간의 퇴적물 배양 실험을 통해 time point 별로 장기간 배양시 anoxic, 저온, 어두운 환경에서 일어나는 점토광물-미생물 간의 생지화학적 광물 변이 현상 모니터링 <p>2-3) 결빙시 철 함유 점토광물-미생물 간의 반응 batch 실험 설계</p> <ul style="list-style-type: none"> - 결빙시 철 함유 스멕타이트 (NAu-2)과 미생물에 의한 유기/무기적 반응을 확인하기 위한 batch 실험 setup을 통해 0도 이하의 저온 환경에서도 미생물에 의한 점토광물의 삼가 철 환원이 활발함을 관찰 					
색인어 (각 5개 이상)	한글	생지화학적 반응, 철 함유 스멕타이트, 철환원 박테리아, 극지 환경, 빙저호, X선 회절 분석, 투과 전자 현미경, 일라이트 결정도			
	영문	Biogeochemical reation, NAu-2, Fe reducing bacteria, Antarctica, Subglacial lake, XRD, TEM, Illite crystallinity (IC)			

요 약 문

I. 제 목

남극 빙봉 주변 해저퇴적물 내의 점토광물을 이용한 고환경 복원 및 생지화학적 변이작용 연구 (2년)

II. 연구개발의 목적 및 필요성

이 과제는 남극과 같은 기후변화 연구에 있어 핵심이 되는 지역에서 점토광물을 이용한 고환경 복원 및 저온환경에서 서식하는 미생물과 광물간의 생지화학적 반응 (biogeochemical reaction)에 중점을 둔 연구과제로, 서남극 빙봉 후퇴지역의 해저 퇴적물에서 점토광물의 광물학적 특징을 통한 과거 퇴적 환경을 규명하는 새로운 proxy를 개발하고자 한다. 따라서 본 연구는 점토광물의 퇴적 환경에 따른 물리적, 화학적 풍화작용과 함께 수반되는 미생물에 의한 생지화학적 변이작용 (bio-alteration)에 대한 연구를 통해 서남극 빙봉 지역의 과거 퇴적 환경 변화에 의해 달라질 수 있는 점토광물의 분포와 광물학적 특징 및 생지화학적 변이시 나타날 수 있는 광물 구조적 변화를 nano-scale 지시자료써 찾아보고자 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1) 종합적인 고환경 해석 및 호냉성 철 환원 미생물에 의한 해저 퇴적물에서의 Biological activity 조사 (I):

1-1) 극지연구소와 협력하여 벨링스하우젠 해, 크리스탈 사운드 지역 퇴적물 채취

● 탐사를 통한 벨링스하우젠 해 및 크리스탈 사운드지역 피스톤 코어 채취

1-2) 퇴적상 변화에 따른 XRD, TEM을 이용한 점토광물의 광물구조, 화학성분 분석

- 채취한 해저 퇴적물의 X-ray diffractometer (XRD)를 이용한 광물학적 분석
- 반정량분석 (Biscaye, 1965)을 통한 깊이별 점토광물 함량비 변화 분석
- 벨링스하우젠 해의 퇴적물의 점토광물에 대한 TEM을 이용한 광물학적 분석

1-3) 결빙시 철 함유 광물-미생물 반응 실험 설계

- 결빙시 산화철과 미생물에 의한 유기/무기 반응을 확인하기 위한 batch 실험 진행
- Batch 실험에 대한 extent of Fe reduction, 2차 광물 생성, SAED pattern을 통한 광물의 구조변이 분석

2) 종합적인 고환경 해석 및 호냉성 철 환원 미생물에 의한 해저 퇴적물의 biological activity 조사 (II):

2-1) 극지연구소 생명과학연구부와 협력하여 퇴적물 내에 분포하는 호냉성 철 환원 미생물에 대한 분리동정에 대한 해석

- 극지연구소 생명과학연구부와 협력하여 크리스탈 사운드의 해저 퇴적물에서 Pyrosequencing data analysis를 통해 미생물의 군집 분석

2-2) TEM과 SAED pattern을 이용하여 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석

- 벨링스하우젠 해의 점토광물 중 스�멕타이트의 TEM-EDS 성분 분석
- 기존에 연구된 벨링스하우젠 해의 점토광물의 함량비 분포와 비교하여 이 지역의 종합적인 기원지 분석
- 크리스탈 사운드의 빙저호 퇴적물의 퇴적 환경에 따라 다르게 나타날 것으로 예상되는 퇴적층 깊이별 illite crystallinity 측정
- TEM-EELS를 이용하여 빙저호의 퇴적상에 따른 실제 점토광물 구조 내에서의 Fe redox state를 측정
- 빙저호의 oxic/anoxic 환경에 따른 점토광물-미생물 간의 생지화학적 분석 및 군집 분포와 비교

2-3) 결빙시 철 함유 점토 광물과 미생물 간의 반응에 의한 광물 변이 분석을 위한 batch 실험

- 결빙시 철 함유 스�멕타이트 (NAu-2)과 미생물에 의한 유기/무기적 반응을 확인하기 위한 batch 실험 진행
- Batch 실험에 대한 time point 별 철의 환원 및 용출, 2차 광물 생성, SAED pattern을 통한 광물의 구조 변이 분석
- 실제 남극의 sea ice를 이용해 얼음 안에 있는 광물과 미생물간의 반응을 관찰하기 위해 M1 medium을 첨가해 미생물의 활동성을 촉진하여 batch 실험 실시

IV. 연구개발결과

1) 종합적인 고환경 해석 및 호냉성 철 환원 미생물에 의한 해저 퇴적물에서의 Biological activity 조사 (I):

1-1) 극지연구소와 협력하여 벨링스하우젠 해, 크리스탈 사운드 지역 퇴적물 채취

- 벨링스하우젠 해의 빙하 후퇴에 따른 대륙으로부터 거리별 퇴적물 코어 (BS17-GC15, BS17-GC04) 채취
- 크리스탈 사운드의 빙봉 후퇴로 드러난 빙저호 퇴적물의 피스톤 코어 (BS17-GC18)를 이용한 채취

1-2) 퇴적상 변화에 따른 XRD, TEM을 이용한 점토광물의 광물구조, 화학성분 분석

- 벨링스하우젠 해의 퇴적물에서 빙하의 후퇴에 따른 퇴적상의 변화와 점토광물의 상대적인 함량 변화 간의 상관관계 확인
- 크리스탈 사운드의 빙저호 퇴적물의 퇴적상으로 유추한 하부 빙저호 환경일 때 광물 종류, 광물의 함량비가 다른 특징을 나타냄을 확인

1-3) 결빙시 철 함유 광물-미생물 반응 실험 설계

- 결빙시 산화철 광물과 미생물간의 반응에 의한 광물변이 분석을 위한 batch 실험 setup을 통해 미생물에 의한 광물의 생지화학적 변화가 일어나는 최적의 농도 조건 확인

2) 종합적인 고환경 해석 및 호냉성 철 환원 미생물에 의한 해저 퇴적물의 biological activity 조사 (II):

2-1) 극지연구소 생명과학연구부와 협력하여 퇴적물 내에 분포하는 호냉성 철 환원 미생물에 대한 분리동정에 대한 해석

- 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 깊이 별 시료에 대해 퇴적상의 변화와 microbial community의 깊이에 따른 미생물의 다양성 변화 확인

2-2) TEM과 SAED pattern을 이용하여 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석

- 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 빙저호 추정 퇴적물에 대해 깊이 별 illite crystallinity (IC)가 퇴적상과 상관관계를 확인
- 크리스탈 사운드의 빙기-간빙기에 따라 TEM을 이용하여 스멕타이트의 화학 성분 변화를 통한 기원지 확인
- BS17-GC18 코어의 빙저호로 추정되는 구간의 퇴적물 배양 실험을 통한 time point 별 anoxic, 저온, 어두운 환경에서 점토광물-미생물 간의 생지화학적 상관성 확인

2-3) 결빙시 철 함유 점토 광물과 미생물 간의 반응에 의한 광물 변이 분석을 위한 batch 실험

- 결빙시 철 함유 스멕타이트(NAu-2)와 미생물에 의한 유기/무기적 반응을 통해 생지화학 반응이 일어나는 최적의 온도와 농도 조건을 확인

V. 연구개발결과의 활용계획

이 과제는 남극과 같은 극한환경(extreme environment)지역에 서식하는 미생물과 광물간의 생지화학적 반응(biogeochemical reaction) 및 점토광물을 이용한 고환경 복원에 중점을 둔 연구과제로, 서남극 빙하후퇴지역 퇴적물에서 광물학적 특징을 통한 퇴적환경 규명 및 미생물에 의한 점토광물의 변이와 이에 수반될 수 있는 2차 광물형성에 대한 연구를 수행하

고자 한다. 따라서 본 연구는 물리적, 화학적 풍화작용과 함께 수반되는 생지화학적 변이작용(bio-alteraion)에 대한 연구를 통해 서남극 빙봉 지역의 점토광물 분포와 기원에 미치는 미생물의 역할을 규명 및 생지화학적 변이시 나타날 수 있는 Biomarker의 광물 구조 분석을 연구목표로 한다. 또한 nano-scale로 지구 환경변화에 대한 proxy를 광물 구조분석을 통하여 개발하고, 이를 이용한 남극 기후변화연구를 목표로 한다.



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

The study of biogeochemical alteration and reconstruction of paleo-environment using clay minerals in marine sediments distributed in ice shelf regions, West Antarctica (2 years)

II. Purpose and Necessity of R&D

This proposal is focused on the microbe-mineral interaction in extreme environment and reconstruction of paleo-depositional condition using clay mineral in marine sediment of the West Antarctica. The objective of this proposal is, therefore, to understand the effects of microbial alteration (that accompanies with physical and chemical weathering during glacial-interglacial period) on the clay minerals that influence the origin and distribution of clay minerals depends on paleo-depositional condition. This result could be an nano-scale indicator in sedimentary environment in West Antarctic ice shelf and will indicate that the feasibility of the microbial Fe-respiration utilizing minerals and possible mechanism of Fe-liberation to the Antarctic ocean.

III. Contents and Extent of R&D

1) Identification of paleo-depositional environment and investigation of biological activity by psychrophilic Fe reducing bacteria in marine sediment (I):

1-1) Investigation of sampling location in Bellingshausen Sea and Crystal Sound, West Antarctica

- Sampling using piston core in Bellingshausen Sea and Crystal Sound on Antarctic expedition

1-2) XRD/TEM Analysis of the mineral structure and chemical composition of clay mineral according to sedimentary facies

- Mineralogical analysis using X-ray diffractometer (XRD) in marine sediment
- Investigation of clay mineral assemblages with depth through semi-quantitative analysis (Biscaye, 1965)
- TEM analysis of mineral structures in marine sediment of Bellingshausen Sea at nano-scale

1-3) Batch experiment of Fe-bearing mineral-microbe interaction in the freezing condition

- Investigation of optimal condition of batch experiment to confirm biotic/abiotic reaction in Fe-bearing mineral in the freezing condition
- Analysis of extent of Fe reduction, secondary mineral precipitation and observation of SAED pattern for batch experiment

2) Identification of paleo-depositional environment and investigation of biological activity by psychrophilic Fe reducing bacteria in marine sediment (II):

2-1) Investigation of microbial community including Fe reducing bacteria in marine sediment

- Pyrosequencing data analysis of marine sediment in Crystal Sound with Division of Polar Life Sciences

2-2) Investigation of bio-alteration of mineral using TEM/SAED pattern

- Observation of chemical composition of smectite in Bellingshausen Sea using TEM-EDS
- Investigation of sediment provenance using clay mineral composition in Bellingshausen Sea
- Measurement of illite crystallinity (IC) with depth in sediment core according to sedimentary facies in Crystal Sound
- Measurement of Fe-redox state in clay mineral using TEM-EELS in paleo-subglacial lake sediment
- Investigation of microbe-mineral interaction depends on oxic/anoxic condition in paleo-subglacial lake and comparing microbial community

2-3) Batch experiment of Fe-rich smectite-microbe interaction in the freezing condition

- Investigation of optimal condition of batch experiment to confirm biotic/abiotic reaction in Fe-rich smectite (NAu-2)l in the freezing condition
- Analysis of extent of Fe reduction, secondary mineral precipitation and observation of SAED pattern for batch experiment
- Batch experiment of natural sea ice which sampled in Southern Ocean to investigate microbe-mineral interaction in ice

IV. R&D Results

1) Identification of paleo-depositional environment and investigation of biological activity by psychrophilic Fe reducing bacteria in marine

sediment (I):

1-1) Investigation of sampling location in Bellingshausen Sea and Crystal Sound, West Antarctica

- Collecting sediment cores (BS17-GC15, BS17-GC04) from the glacial retreat area in the Bellingshausen Sea continental shelf
- Collecting sediment core (BS17-GC18) from the paleo-subglacial lake sediment in the Crystal Sound

1-2) XRD/TEM Analysis of the mineral structure and chemical composition of clay mineral according to sedimentary facies

- Interpretation of the relationship between the variation of sedimentary facies and clay mineral assemblages during glacial-interglacial period
- Identification mineralogy and clay mineral assemblages in paleo-subglacial lake sediment in the Crystal Sound

1-3) Batch experiment of Fe-bearing mineral-microbe interaction in the freezing condition

- Determination of optimal experiment condition about batch experiment to confirm biotic/abiotic reaction in Fe-bearing mineral in the freezing condition

2) Identification of paleo-depositional environment and investigation of biological activity by psychrophilic Fe reducing bacteria in marine sediment (II):

2-1) Investigation of microbial community including Fe reducing bacteria in marine sediment

- Interpretation of the relationship between variation of sedimentary facies and microbial community with depth in BS17-GC18 core of Crystal Sound

2-2) Investigation of bio-alteration of mineral using TEM/SAED pattern

- Measurement and interpretation of the relationship between sedimentary facies and illite crystallinity in BS17-GC18 core
 - Identification sediment provenance in Crystal Sound using chemical composition of smectite by TEM-EDS during glacial-interglacial period
 - Observation of batch experiment for BS17-GC18 core sediment in anoxic, low temperature and dark condition and interpretation mineral-microbe interaction of paleo-subglacial lake sediment
- 2-3) Batch experiment of Fe-rich smectite-microbe interaction in the freezing condition
- Determination of optimal experiment condition about batch experiment to confirm biotic/abiotic reaction in Fe-rich smectite (NAu-2) in the freezing condition

V. Application Plans of R&D Results

This proposal of this study focuses on biogeochemical reactions between microbes and minerals in extreme environments such as Antarctica and the reconstruction of paleoenvironment using clay minerals. We will perform that identification of paleo-depositional condition, observation of bio-alteration of clay mineral and secondary mineral precipitation by microbial activity using mineralogical characteristic of clay mineral. At the end of the research, a new direction of research in weathering in Antarctic area will be provided by focusing on the role of various microbial interaction with clay minerals. Such that the data set from this proposal will be new clue to the origin and distribution of clay minerals that was previously investigated by chemical/physical weathering process. Therefore,

structural/chemical modification of Fe-bearing clay minerals could be a nano-scale indicator that reflects the depositional environment in Glacial and Interglacial period.



목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요

- 1-1. 연구개발의 목적
- 1-2. 연구개발의 필요성

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 2-1. 관련 연구동향
- 2-2. 독창성 (창의성)
- 2-3. 연구과제의 중요성

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

- 3-1. 연구지역 및 연구방법
- 3-2. 연구개발 수행 내용 및 연구결과

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- 4-1. 연구개발 목표 달성도
- 4-2. 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 참고문헌

제 1 장 연구개발과제의 개요

1-1. 연구개발의 목적

이 과제는 남극과 같은 기후변화 연구에 있어 핵심이 되는 지역에서 점토 광물을 이용한 고환경 복원 및 저온환경에서 서식하는 미생물과 광물간의 생지화학적 반응 (biogeochemical reaction)에 중점을 둔 연구과제로, 서남극 빙봉 후퇴지역의 해저 퇴적물에서 점토광물의 광물학적 특징을 통한 과거 퇴적환경을 규명하는 새로운 proxy를 개발하고자 한다. 따라서 본 연구는 점토광물의 퇴적 환경에 따른 물리적, 화학적 풍화작용과 함께 수반되는 미생물에 의한 생지화학적 변이작용 (bio-alteration)에 대한 연구를 통해 서남극 빙봉 지역의 과거 퇴적 환경 변화에 의해 달라질 수 있는 점토광물의 분포와 광물학적 특징 및 생지화학적 변이시 나타날 수 있는 광물 구조적 변화를 nano-scale 지시자로서 찾아보고자 한다.

1-2. 연구개발의 필요성

가. 학술적 파급효과

미생물학과 지질학이 연결되어 새로이 만들어진 “Geomicrobiology” 라는 학문은 최근 10년 사이에 많은 관심 속에 연구가 수행되어 왔다. 특히, 박테리아와 광물의 반응 (microbe-mineral interaction)분야, 즉 biomineralization에 많은 관심이 집중되어지고 있는데, 이는 나노 소재 개발과도 밀접한 관계를 갖고 있기 때문이다. 본 연구에서는 점토광물과 박테리아의 반응을 통하여 속성작용 시 S-I의 상전이 메커니즘 연구 분야에 유기물의 영향을 밝혀내는 최첨단 연구이며, “Geomicrobiology” 분야뿐만 아니라, 퇴적분지 해석, 석유지질학 연구 분야에도 많은 기여를 할 것이다. 특히 Geomicrobiology 분야 중 **극한지역에 대한 연구는 극지연구소의 육성 연구 분야 중 생명과학과 지권과학의 융합적인 연구 주제**이다. 극한지역의 bio-alteration에 의한 연구는 향후 물리적/화학적 풍화 작용뿐만 아니라, 미생물에 의한 광물의 변이를 퇴적물의 특성 변화 및 다양성에 대한 또 다른 factor로 적용 가능하게 한다. 또

한 최근 본 연구실에서는 급격히 빙붕이 무너지고 있는 라센지역에서 성공적인 샘플 채취를 함으로써 점토광물을 이용하여 남극 기후변화에 대한 연구를 진행하였다. 한 예로써, 일라이트의 crystallinity index 가 기후변화에 대한 “indicator”로서의 사용 가능성을 평가 할 수 있다. 이를 바탕으로 본 연구에서도 서남극 지역에서 채취한 샘플들을 이용하여 위의 결과들을 적용 및 남극 기후변화에 대한 나노스케일의 proxy 연구를 정립해 나갈 수 있다. 더 나아가, 최근 외계 생명체 탐사에 있어서 두꺼운 빙하가 존재하는 외계 행성에서 빙하 밑의 얼지 않은 물과 암석 간의 반응을 통해 생명체가 존재하는 흔적을 찾기 위한 연구가 시도되고 있다. 본 연구는 이와 같은 생명의 기원에 대한 간접적인 증거들을 제시 할 수 있다.

나. 경제적 파급효과

미생물에 의한 해저 퇴적물의 특성 변화에 대한 연구는 남극과 같은 극한지에서 수행된 바 없기 때문에 본 연구의 내용은 가치가 높다. 본 연구에서 미생물에 의한 점토광물의 변이가 검토되면, 물리·화학적 factor와 별개로 미생물에 의한 bio-alteration을 새로운 factor로 남극 퇴적환경의 다양성에 대한 해석을 가능하게 해준다. 또한 향후 남극에서도 극한 환경인 두꺼운 대륙 빙하 밑의 빙저호 탐사와 관련된 공동 연구가 진행된다면, 생명체가 살기 힘든 매우 극한 환경에서 미생물의 metabolism이 빙저호 퇴적물안의 광물 변이작용과 연계하여 해석 할 수 있고, 이에 따라 극한지에서 생명체의 활동성 및 다양성에 대한 연구를 가능하게 해준다. 또한 남극 퇴적환경에 대한 해석을 미생물에 의한 광물의 전이과정과 연계하여, 퇴적 당시의 생지구화학적 특성을 예측할 수 있고 이를 통하여 더 자세한 고환경 복원을 실시할 수 있다. 본 연구는 기초연구로서 당장의 경제적 파급효과를 기대할 수는 없지만, 퇴적 환경 변화에 대한 나노스케일 분석이 가능하다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

2-1. 관련 연구동향

무산소 환경에서 박테리아와 점토광물의 반응에 대한 연구, 특히 스�멕타이트와 철 환원 박테리아의 반응 작용에 대한 연구 (Stucki et al., 1987; Kostka et al., 1999)에서는 철 환원 박테리아가 스�멕타이트 구조 속에 있는 철을 환원시켜 에너지를 얻는다는 사실이 규명되었다. 또한 고전적 개념의 스�멕타이트-일라이트 상전이 반응은 퇴적분지 등의 지역에서 속성작용에 의해 고온, 고압 환경에서 장시간에 걸쳐 일어나는 반응으로 해석되어 왔다. 하지만 최근 미생물의 대사작용이 스�멕타이트-일라이트 상전이 반응에 촉매로 작용하여 상온, 상압에서 14일~4개월의 짧은 시간안에도 일어난다는 것이 “Science”지에 보고됨에 따라 이를 자연환경에서 규명하는 것의 중요성이 매우 높아졌다고 볼 수 있다 (Kim et al., 2004). 특히 이러한 미생물의 촉매 작용은 기존의 고전적 상전이에 대한 개념의 해석과 대비되는 것으로 천부 환경이나 온도, 압력 조건이 충분하지 않은 환경에서도 철 환원 작용에 의해 스�멕타이트-일라이트 반응을 일으킬 수 있기 때문에, 기존의 지질학적 해석 및 예측 시스템을 보완하며 새로운 연구 분야로의 발전 가능성을 시사하고 있어 매우 중요하고 필요한 연구라 할 수 있다. 특히 미생물에 의한 스�멕타이트-일라이트 상전이 반응은 철의 환원과 연계되어 퇴적물의 지화학적 특성, 예를 들어 양이온 교환 반응 및 교환능 (Cation exchange capacity, CEC), 유기탄소의 거동 특성 및 유해금속의 흡/탈착과 광물의 구조 변화, 자연 환경에서의 이용가능한 철의 공급 등에도 영향을 줄 수 있다.

기존의 스�멕타이트-일라이트 상전이 반응에 대한 메커니즘 연구에서는 박테리아 반응의 역할을 전혀 고려하지 않았지만, 위의 “Science”지의 연구를 포함하여 최근에는 박테리아가 스�멕타이트-일라이트 반응을 촉진시키기 때문에 고온, 고압, 혹은 상당시간의 속성작용이 전제조건으로 작용하지 않을 수 있다는 연구가 발표되고 있다 (Kim et al., 2002, 2004; Dong et al., 2003; Zhang, 2007). 또한 최근 일본 난카이 해구의 IODP 탐사를 통해 천부 환경에서 미생물에 의한 스�멕타이트-일라이트의 상전이 반응이 자연환경에서 최초로 발견 되었다 (Kim et al., 2019).

본 연구가 수행되는 남극은 일반적으로 생명체가 활동하기 힘든 저온의 극한 환경으로 이 지역에서 박테리아가 철을 환원시킴과 동시에 스펙타이트를 일라이트로 전이시키는 메커니즘은 명확히 규명되지 않았다. 하지만 Jung et al., (2019)의 라센 빙봉 지역의 퇴적물 코어에서 일라이트의 결정도 연구를 통해, 빙봉 아래의 저온, 혐기성 조건의 극한 환경에서 저온성 철 환원 박테리아에 의한 일라이트의 결정 구조 내 삼가철의 환원과 이를 통한 남극 바다의 이용 가능한 철의 공급의 가능성을 제시하였는데 (Jung et al., 2019), 이는 남극의 저온 환경에서도 미생물의 bio-alteration이 가능함을 시사하고 있다. 지금까지 극한지에서의 변이작용 즉 남극처럼 화학적 풍화작용이 우세하지 않은 지역에서 미생물에 의한 bio-alteration에 대한 연구는 거의 보고 되지 않았기 때문에 본 연구는 매우 중요성을 가진다고 볼 수 있다.

2-2. 독창성 (창의성)

- 본 연구는 국제 학술회인 American Chemical Society (ACS) 와 Goldschmidt, Clay Minerals Society (CMS)에서 중요 관심 분야 (target areas)로 여겨지는 “광물 형성의 메커니즘 (dissolution/solid state)” 및 “유기물 (organic matter) 과 점토광물과의 반응” 에 부합하는 연구과제이며, 남극 관련 국제학회인 Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR)에서 저온 환경에서의 박테리아의 성장 메커니즘에 관한 퇴적물의 역할 등에 부합하는 연구로 중요 관심 분야인 서남극 지역에서 해저 퇴적물 내의 고환경 변화에 따른 스펙타이트 점토광물의 박테리아에 의한 생지화학적 변이작용에 대한 최초의 연구이다.

- 남극처럼 화학적 풍화작용이 우세하지 않은 지역에서 점토광물의 다양성 및 분포에 대한 연구에 미생물에 의한 bio-alteration을 접목시켜 연구하는 새로운 시도이다. 또한 과거 빙기-간빙기에 따라 빙봉이 움직이면서 빙봉 아래의 환경에서 산화-환원 조건이 달라지는 데 이에 대한 증거로써 광물 내의 bio-alteration의 흔적을 확인 함으로써 고환경 복원에 대한 새로운 접

근을 할 수 있는 시도이다.

- 본 연구실의 경우 점토광물의 저도변성 (low-grade metamorphism) 과정에서 광물의 속성 작용, 미생물-점토광물 간의 반응, 셰일의 미세구조 등의 주요 연구를 수행하면서 특히, 미생물에 의한 점토광물의 구조 내 철의 산화 환원 반응과 그로 인해 야기 되는 스�멕타이트-일라이트의 상전이 반응을 전자현미경으로 규명한 연구를 수행한 바 있다. 하지만 남극 환경에서 채취한 퇴적물을 이용하여 박테리아의 반응에 의한 S-I 상전이시 수반되는 화학적 변화와 부수적으로 생성되는 이차광물의 침전 (secondary mineral precipitation)을 XRD와 TEM을 이용하여 크기, 구조, 성분과 산화/환원도를 조사하는 연구는 지금까지 수행된 바가 거의 없다.

2-3. 연구과제의 중요성

최근 연구에 의하면, 박테리아에 의한 스�멕타이트-일라이트 상전이시 부수적으로 침전 (secondary precipitation)되는 siderite (FeCO_3)가 biosignature가 될 수 있다는 가능성이 제시되었다 (Zhang et al., 2007, unpublished data). 따라서 본 연구의 결과는 자연계에서 석유탐사 (hydrocarbon exploration), 석유의 이동/숙성 (hydrocarbon migration/maturation), 점토광물과 유기물의 상호 반응작용 (clay-organic matter interaction)시 탄소와 점토광물 구조와의 관계 연구에 많은 영향을 미치며, 극한지에서 미생물과 점토광물의 상관관계를 통하여 생명체의 기원 (origin of life)을 찾을 수 있는 단서, 즉 “biosignature” 연구에도 많은 영향을 줄 수 있다는 점에서 매우 중요하다.

또한, 본 연구는 남극의 해저 퇴적물에서 점토광물과 미생물의 반응 및 변이에 대한 연구는 최초로 제안되는 연구과제이며, 향후 해저 퇴적물에서 고환경을 해석하는 과정에 있어서 점토광물의 변이 및 다양성을 해석하는 연구에서 생지화학적 변수를 첨가하여 여러 각도에서 과학적 접근이 가능하다. 더 나아가, 이러한 Biomarker에 의한 구조분석은 향후 외계행성의 생명체에 대한 연구에 중요한 역할을 할 수 있으며, 실제로 최근 발견된 외계 행성 중 두꺼운 얼음으로 덮혀 있는 행성의 경우 아래에는 액체 상태

의 거대한 바다가 존재하는데 이 곳에서 암석에 포함된 철이나 유기물과 반응을 통해 미생물과 같은 생명체의 에너지원으로 활용될 수 있고 이를 통해 생명의 기원을 밝혀내는 연구들이 진행되고 있다. 또한 화성의 퇴적층에서 물과 생명체에 대한 흔적에 대한 최근 연구 (Bishop et al. 2013)에서도 이러한 미생물에 의한 점토광물의 변이에 대한 가능성을 제시하고 우리 연구실의 연구결과를 인용하고 있다.



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3-1. 연구지역 및 연구방법

가. 연구지역

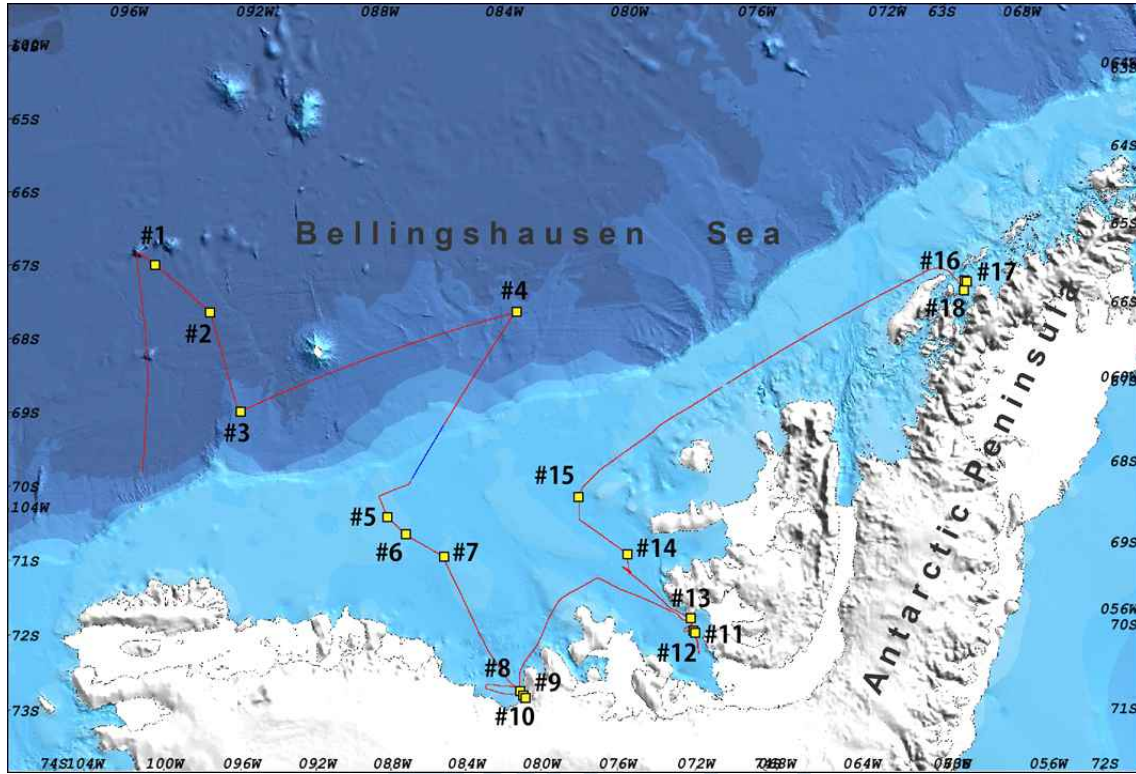


그림 1) 서남극 벨링스하우젠 해 (Bellingshausen Sea) 탐사의 탐사지역. 본 연구에서는 벨링스하우젠 해의 론만 입구 (Ronne Entrance) 근처에서 채취한 BS17-GC15, 벨링스하우젠 해의 대륙저에서 채취한 BS17-GC04에 대한 분석을 진행함.



그림 2) 벨링스하우젠 해의 크리스탈 사운드 지역 (Crystal Sound, Bellingshausen Sea, West Antarctica). 빙하 후퇴로 드러난 분지 지역에 대해 중력 코어를 이용한 퇴적물 시료 채취를 진행하여 실험을 진행함.

나. 연구방법

1-1) 극지연구소와 협력하여 벨링스하우젠 해, 크리스탈 사운드 지역 퇴적물 채취

- 벨링스하우젠 해 및 크리스탈 사운드지역 중력 코어와 박스코어를 이용하여 채취 후 팔콘 튜브를 이용하여 깊이별 퇴적물 시료 샘플링

1-2) 퇴적상 변화에 따른 XRD, TEM을 이용한 점토광물의 광물구조, 화학 성분 분석

- 채취한 해저 퇴적물의 X-ray diffractometer (XRD)를 이용한 광물상 측정
- 반정량분석 (Biscaye, 1965)을 통한 깊이별 점토광물 함량비 변화 측정
- 퇴적물의 점토광물에 대해 TEM을 이용하여 스멕타이트 측정

1-3) 결빙시 철 함유 광물-미생물 반응 실험 설계

- Batch 실험의 농도별로 1,10 phenanthroline을 이용한 extent of Fe(III)

reduction 및 색 변화 측정

- Batch 실험에 대한 2차 광물 생성, SAED pattern을 통한 광물의 구조변이 측정

2-1) 극지연구소 생명과학연구부와 협력하여 퇴적물 내에 분포하는 호냉성 철 환원 미생물에 대한 분리동정에 대한 해석

- 극지연구소 생명과학연구부와 협력하여 크리스탈 사운드의 해저 퇴적물에서 Pyrosequencing data analysis를 통해 미생물의 군집 측정

2-2) TEM과 SAED pattern을 이용하여 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석

- 점토광물 중 스멕타이트의 화학 성분을 TEM-EDS를 이용하여 측정
- 빙저호 퇴적물 XRD profile의 결과를 이용하여 깊이별 illite crystallinity 측정
- 빙저호의 oxic/anoxic 환경에 따른 점토광물-미생물 간의 생지화학적 분석 및 군집 분포 비교

2-3) 결빙시 철 함유 점토 광물과 미생물 간의 반응에 의한 광물 변이 분석을 위한 batch 실험

- Batch 실험의 시간 별로 1,10 phenanthroline을 이용한 extent of Fe(III) reduction 및 색 변화 측정
- Batch 실험에 대한 time point 별 철의 환원 및 용출, 2차 광물 생성, SAED pattern을 통한 광물의 구조 변이 측정

3-2. 연구개발 수행 내용 및 연구결과

가. 연구개발 수행 내용

1) 종합적인 고환경 해석 및 호냉성 철 환원 미생물에 의한 해저 퇴적물에서의 Biological activity 조사 (I):

1-1) 극지연구소와 협력하여 벨링스하우젠 해, 크리스탈 사운드 지역 퇴적물 채취

- 벨링스하우젠 해의 빙하 후퇴에 따른 대륙으로부터 거리별 퇴적물 코어 (BS17-GC15, BS17-GC04) 채취
- 크리스탈 사운드 지역 빙봉 후퇴로 드러난 빙저호 퇴적물의 피스톤 코어 (BS17-GC18)를 이용한 채취

1-2) 퇴적상 변화에 따른 XRD, TEM을 이용한 점토광물의 광물구조, 화학성분 분석

- 벨링스하우젠 해의 퇴적물에서 빙하의 후퇴에 따른 퇴적상의 변화와 점토광물의 상대적인 함량 변화 간의 상관관계 확인
- 크리스탈 사운드의 빙저호 퇴적물의 퇴적상으로 유추한 하부 빙저호 환경일 때 광물 종류, 광물의 함량비가 다른 특징을 나타냄을 확인

1-3) 결빙시 철 함유 광물-미생물 반응 실험 설계

- 결빙시 산화철 광물과 미생물간의 반응에 의한 광물변이 분석을 위한 batch 실험 setup을 통해 미생물에 의한 광물의 생지화학적 변화가 일어나는 최적의 농도 조건 확인

2) 종합적인 고환경 해석 및 호냉성 철 환원 미생물에 의한 해저 퇴적물의 biological activity 조사 (II):

2-1) 극지연구소 생명과학연구부와 협력하여 퇴적물 내에 분포하는 호냉성 철 환원 미생물에 대한 분리동정에 대한 해석

- 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 깊이 별 시료에 대해 퇴적상의 변화와 microbial community의 깊이에 따른 미생물의 다양성 변화 확인

2-2) TEM과 SAED pattern을 이용하여 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석

- 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 빙저호 추정 퇴적물에 대해 깊이 별

illite crystallinity (IC)가 퇴적상과 상관관계를 확인

- 크리스탈 사운드의 빙기-간빙기에 따라 TEM을 이용하여 스멕타이트의 화학 성분 변화를 통한 기원지 확인
- BS17-GC18 코어의 빙저호로 추정되는 구간의 퇴적물 배양 실험을 통한 time point 별 anoxic, 저온, 어두운 환경에서 점토광물-미생물 간의 생지화학적 상관성 확인

2-3) 결빙시 철 함유 점토 광물과 미생물 간의 반응에 의한 광물 변이 분석을 위한 batch 실험

- 결빙시 철 함유 스멕타이트(NAu-2)와 미생물에 의한 유기/무기적 반응을 통해 생지화학 반응이 일어나는 최적의 온도와 농도 조건을 확인

나. 연구결과

1) 벨링스하우젠 해, 크리스탈 사운드 지역 퇴적물 채취

- 서남극 지역 벨링스하우젠 해와 남극 반도 (Antarctic Peninsula) 크리스탈 사운드 탐사를 통해 서남극 빙봉 지역의 해양 퇴적물을 박스 코어, 중력 코어, 롱코어를 이용하여 채취하였다 (그림 1, 2).
- 코어 시추 위치 선정은 벨링스하우젠 해에서 최근 수 십년간 빙봉의 후퇴 속도가 가장 빠른 엘타닌 만 (Eltanin Bay)과 론만 입구 (Ronne Entrance)의 최근 노출된 지역에서 코어를 채취하였다. 남극반도의 크리스탈 사운드 (Crystal Sound)에서는 지형 탐사를 통해 주변 지형보다 수심이 깊고 호수 형태로 과거 빙저호일 가능성이 있는 곳에서 코어를 채취하였다.
- 벨링스하우젠 해에서는 기존의 연구를 통해 점토 광물의 함량비 분포를 통한 기원지 분석을 실시하였는데 론만 입구 부근의 기원지에 대한 세밀한 해석에 한계를 나타냈다 (Hillenbrand et al., 2009). 그래서 본 탐사에서 채취한 해저 퇴적물의 점토 광물 함량비 분포를 이용하여 이 지역의 빙기-간빙기에 따른 기원지 분석을 실시하였다.
- 샘플링은 벨링스하우젠 해에서 대륙붕 안쪽의 BS17-GC15, 심해의 대륙저 부근의 BS17-GC04 코어에 대해 실시하였다. BS17-GC15 코어는 70°51.6187S, 79°41.9466W인 벨링스하우젠 해 대륙붕 동쪽에 위치한 중력 코어로 수심 631 m 깊이에서 샘플링을 실시하였고 218 cm의 코어를 획득

하였다. 대륙대에 위치한 BS17-GC04 중력코어는 68°17.2026S, 82°58.8510W로 수심 3,662 m에서 길이 771 cm의 코어를 획득하였다. 퇴적상의 변화에 따라 10 ~ 15 cm 간격으로 샘플링을 진행하였고 GC15 코어는 17개의 부시료를 채취하였고, GC04 코어는 30개의 부시료를 채취하였다 (그림 1).

- 남극 반도의 크리스탈 사운드 지역은 bathymetry map을 봤을 때 주변 지역보다 수심이 약 1000 m 이상 깊은 분지가 형성된 지역에서 코어를 획득하였다. 이 지역은 과거 빙하기에 빙상에 덮혀 있었다면 빙상 아래에 분지 형태의 호수로써 빙저호로 존재할 가능성이 있는 지역으로 시료를 획득할 가치가 매우 높은 지역이라 말할 수 있다. BS17-GC18 코어는 66°44.2629'S, 66°56.0963'W로 수심 1218 m에서 길이 890 cm의 코어를 획득하였다. 퇴적상의 변화에 따라 약 10 ~ 15 cm 간격으로 샘플링하였다. 특히 GC18 코어의 경우, 하부 680 cm 이하부터 나타나는 터비다이트 (turbidite)와 다이어믹턴 (diamicton)의 교호되는 퇴적층에 대해 더 촘촘히 샘플링을 진행하였다. 획득한 샘플은 팔콘 튜브에 담아 냉장보관 (4 °C)에 보관 중이다 (그림 2).

2) 퇴적상 변화에 따른 XRD, TEM을 이용한 점토광물의 광물구조, 화학성분 분석

- BS17-GC15 코어와 BS17-GC04 코어에서 퇴적상을 깊이에 따라 구분하고 채취한 해저 퇴적물의 유기물 제거 과정을 거친 뒤 2 μm 이하로 size fraction 하여 점토광물 분석을 실시하였다 (그림 3).
- BS17-GC15 코어의 경우 아래쪽 퇴적상 B에 자갈과 함께 어두운 회색의 사질 역질층이 나타난다. 상부로 갈수록 전이퇴적상 (IG-transition)인 54 cm부터 점점 갈색의 니질 모래층 퇴적물이 섞여서 관찰되고 퇴적상 A인 33 cm부터 갈색 퇴적물이 나타나면서 평균 입도 크기가 모래에서 실트 크기로 줄어든다. 그와 함께 퇴적상 A에서는 생교란 흔적과 실트질 구조도가 나타난다 (그림 3). 코어를 채취한 벨링스하우젠 해의 대륙붕에서 퇴적환경의 변화를 일으키는 가장 중요한 요인은 서남극 빙붕의 기후 변화에 따른 전진과 후퇴이다. 서남극 빙붕은 빙하기동안 빙상으로써 대륙붕과 대륙사면의 경계부근까지 전진했으며, 이에 따라 빙상의 기저부에 퇴적되어 있던 과

거 퇴적물들이 침식되어 운반 및 재퇴적과정을 거친다. 퇴적상 B에서는 회색의 사질 역질층이 관찰되고 평균 입도 크기가 15 μm 이상으로 높게 나타난다 (그림 3). 일반적으로 역질층은 빙상으로부터 공급된 육성기원 퇴적물들이 주를 이루고 점토부터 자갈 크기의 입자가 뒤섞여서 분급이 매우 불량하게 나타난다 (Domack et al., 1999; Ha et al., 2018). 이러한 퇴적상의 특징은 남극의 다른 대륙붕에서 빙하기 시기에 나타나는 일반적인 특징과 일치하기 때문에(Domack et al., 1999; Hillenbrand et al., 2010; Licht et al., 1999), 퇴적상 B는 빙하기에 빙상 밑에서 퇴적된 빙력토(till)로 해석된다. 기후가 온난해지는 빙하기에서 간빙기로 변하는 시기 동안 빙상이 후퇴하면서 대륙붕에 빙봉이 형성되며 그라운드링 라인(grounding line)을 기준으로 전이퇴적상에는 다양한 퇴적환경의 변화가 일어난다. 코어의 전이퇴적상을 보면 역질이 나타나는 퇴적상 B 바로 위에 갈색의 니질 모래층이 있으며 평균 입도크기가 10 μm 로 감소한다. (그림 3). 그라운드링 라인 근처에서 퇴적된 전이퇴적상의 경우, 육성기원 퇴적물이 비교적 우세하며 생교란 흔적은 일반적으로 매우 적게 나타나고 분급이 나빠 고르지 않은 입도 분포를 보이며, 니질의 자갈, 모래층이 역질층 바로 위에 퇴적된다 (Domack et al., 1999; Hillenbrand et al., 2010). 이러한 특징은 본 코어의 전이퇴적상에서도 관찰된다. 상부로 가면서 퇴적상 A에는 갈색의 생교란 흔적이 보이는 실트질 구조토가 관찰되고 가장 작은 평균 입도 크기를 보인다 (그림 3). 간빙기 동안 대륙붕에서는 빙봉이 후퇴하면서 그라운드링 라인으로부터 멀어지고 계절적인 해빙이 나타나는 공해 환경이 되면서 반원양성, 원양성 퇴적물의 공급이 증가하고, 그에 따라 대륙붕에 갈색의 실트질 퇴적물이 증가한다 (Barker et al., 1999). 또한 온난한 간빙기 동안에는 표층해수의 일차생산성의 증가로 인해 생물기원의 입자들이 급격하게 증가하는데 (Grobe and Mackensen, 1992), 이를 통해 퇴적상 A의 생교란 흔적이 보이는 구조토는 간빙기에 공해 환경에서 퇴적된 것으로 보인다.

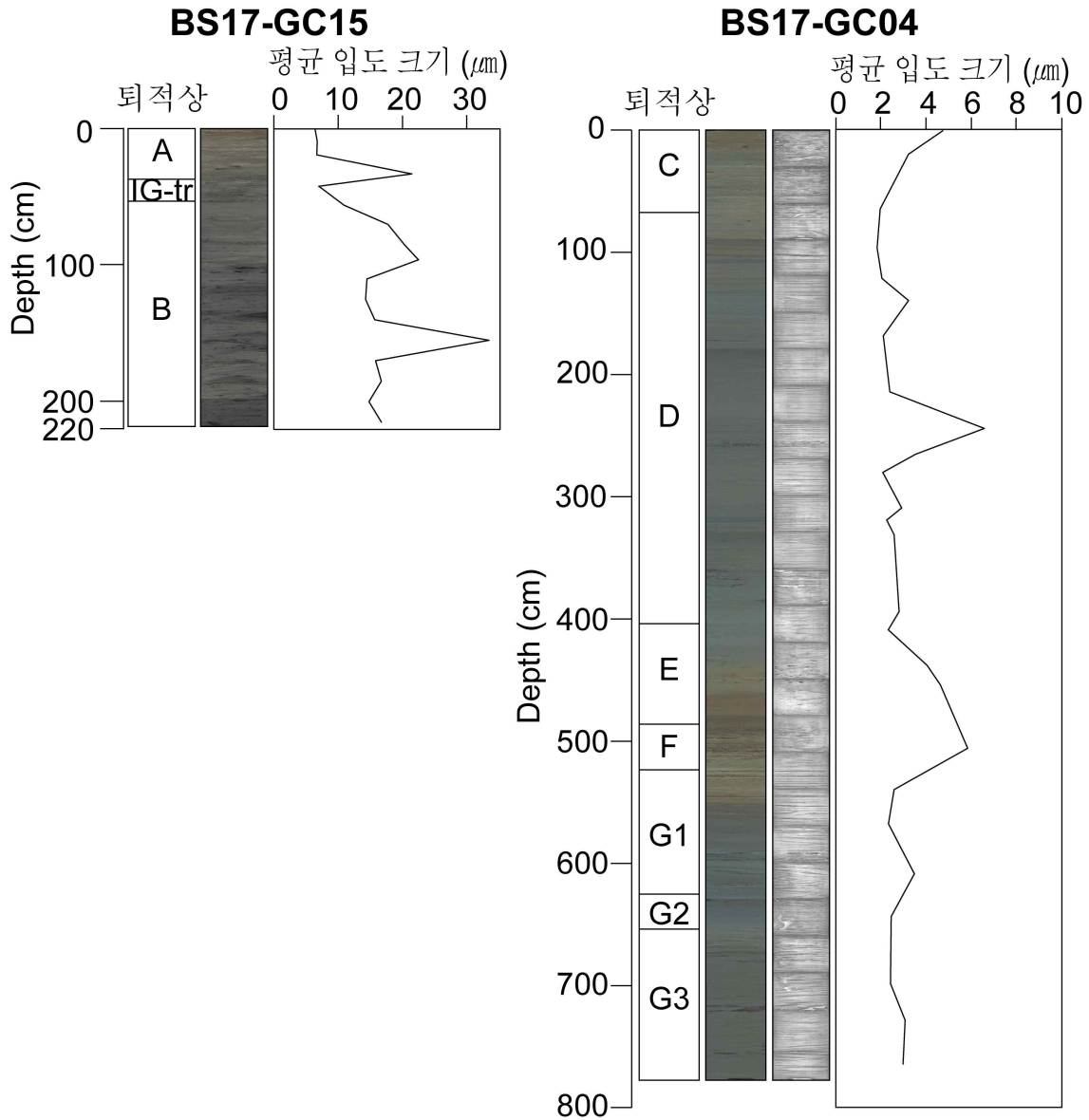


그림 3) BS17-GC15와 BS17-GC04 코어의 퇴적상과 평균 입도 크기. 퇴적상을 기준으로 변동이 관찰됨.

- BS17-GC04 코어에서는 코어 퇴적물의 평균 입도 크기가 대부분 실트 크기로 구성되어 있으며 퇴적상 G1, G3인 522 cm에서 625, 653 cm에서 771 cm까지 회색의 실트질 이토층에 터비다이트 구조가 우세하게 나타난다. 상부로 가면서 퇴적상 F에서 500 cm 부근에 갈색의 실트질 이토층이 보이고 그와 함께 487 cm에서 522 cm에 테프라 (tephra)층이 나타난다. 그리고 퇴적상 D에서 녹회색의 실트질 엽리층이 우세하게 나타나고 최상부인 퇴적상 C에서는 생교란 흔적과 함께 갈색, 회색의 이토층이 우세하게 나타난다 (그

림 3). 이 코어는 서남극 대륙대에 위치해 있기 때문에 대륙붕의 퇴적학적 특성과는 차이가 보인다. 대륙대 퇴적물의 기원은 주로 표층수에서의 생물 생산성이나 대륙주변부로부터 공급된다. 특히 육상기원 입자의 공급은 빙상의 전진과 후퇴 및 해류에 의해 조절된다. 벨링스하우젠 해의 빙하기에는 빙상이 대륙붕단까지 진출하기 때문에 쇄설성 입자를 포함하는 저탁류가 빙상 밑의 해저골이나 대륙사면을 가로질러 대륙대에 육상기원 입자를 유입시킨다. 이러한 환경에서 나타날 수 있는 특징적인 퇴적상으로는 저탁류에 의한 퇴적층, 실트질 엽리층, 빙하기 니질층이 퇴적될 수 있다 (Lucchi et al., 2002; Yoo et al., 2008). 이를 통해 퇴적상 G1과 G3가 퇴적 당시 대륙붕단 근처까지 전진된 육상빙하 기저부에서 용빙수에 의한 세립질 입자로 구성된 탁류(turbid plume)에 의해 형성된 것으로 해석되고 빙하기 니질층인 G2는 해빙의 확장으로 인한 해양의 일차생산성의 감소로 생교란 흔적이 보이지 않는 것으로 해석된다 (Lucchi et al., 2002). 후빙기로 가면서 온난한 기후에 의해 빙하가 후퇴하고 해빙이 감소하는데, 이 구간에서는 생물 생산성이 점차 증가하고 유빙운반에 의한 소량의 조립질 입자가 나타나기 시작한다. 퇴적상 G1의 상부에 이어 F에서는 퇴적물이 회색에서 갈색으로 변하는 것을 관찰할 수 있고, 퇴적상 F에서는 갈색의 사질 실트층과 함께 테프라가 특징적으로 나타난다. 이는 빙하기의 육상기원 퇴적물에서 점차 반원양성, 원양성 갈색의 니질 퇴적물이 증가하는 것으로 해석된다 (Barker et al., 1999; Lucchi et al., 2002). 또한 테프라를 통해 주변의 화산섬으로부터 GC04 코어 근처로 화산 기원 퇴적물이 공급된 것으로 해석된다. 퇴적상 E에서는 대부분 이토층으로 갈색에서 다시 회색으로 변하고 생교란 흔적을 관찰할 수 있으며 입도 분포에서는 대부분 실트질로 이루어져 있다 (그림 3). 이는 해빙 감소에 의한 후빙기 동안의 퇴적환경의 변화에 따른 일차생산성 증가와 유빙 운반에 의한 조립질 입자가 공급된 결과로 해석된다 (Lucchi et al., 2002). 퇴적상 D에서는 생교란 흔적이 없는 회색의 실트질 엽층과 불량한 분급의 특징을 보이는데, 이는 대륙대 퇴적물에서 등수심 해류(contour current)에 의해 퇴적된 등수심 퇴적층(contourite)에서 나타나는 특징과 유사하다(Lucchi and Rebesco, 2007; Stow, 1982; Yoo et al., 2008). 퇴적상 C인 최상층에서는 실트질 엽층이 희미해지고 생교란 흔적의 증가와

갈색의 점토와 실트의 생물기원 규조토의 입자가 우세하게 나타난다. 대륙대에서 후빙기를 지나 완전한 간빙기 상태로써 반원양성, 원양성 퇴적물의 공급이 증가하고 해빙이 감소하면서 표층 생산성이 증가하고 생물기원(규조토)의 입자들이 증가하여 나타나는 특징으로 해석된다 (Lucchi et al., 2002).

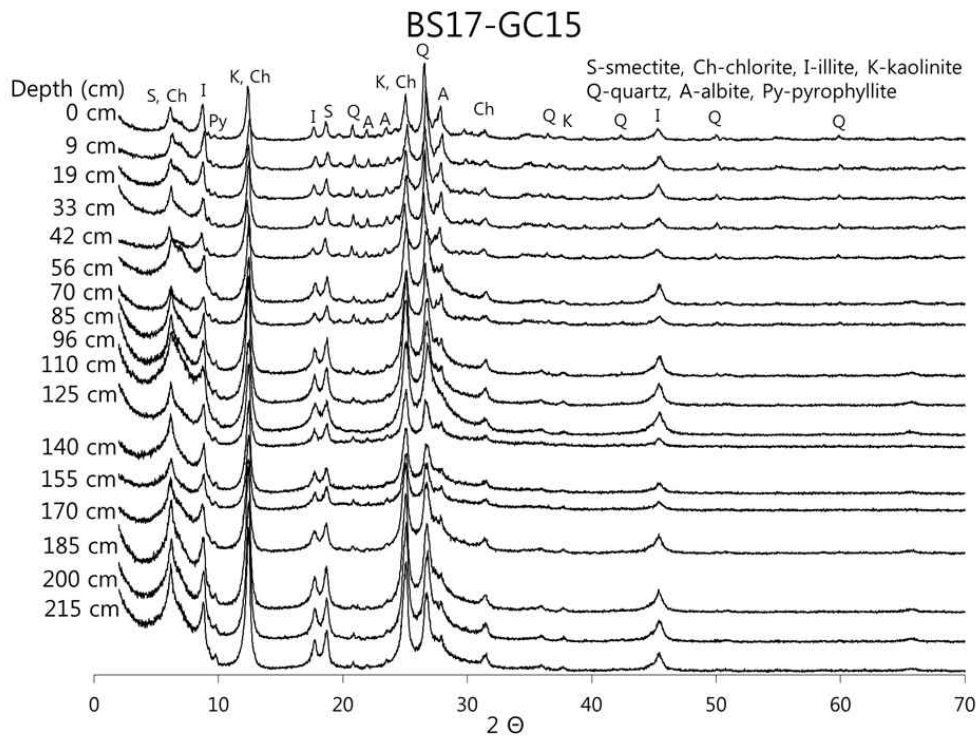


그림 4. BS17-GC15 코어의 2 μm 이하 size fraction을 실시한 시료의 XRD 분석 결과 광물은 스멕타이트, 녹니석, 일라이트, 카올리나이트, 석영, 조장석, 엽랍석 (pyrophyllite)을 관찰.

- X선 회절 분석 결과 깊이에 따른 전반적인 광물 종류는 GC15, GC04 중력 코어 대부분 석영, 장석류인 조장석 등의 화산활동 기원 초생광물들과 점토 광물인 스멕타이트, 일라이트, 카올리나이트, 녹니석 위주로 관찰되었다 (그림 4, 5, 6). 깊이에 따라 피크 강도는 차이가 보였지만, 구성 광물종은 유사하게 나타났다.
- 점토를 분리한 X선 회절 분석 결과에서 깊이에 따라 점토광물들의 피크 강도가 차이가 나기 때문에 반정량 분석 (Biscaye, 1964)을 실시하여 스멕타이트, 일라이트, 녹니석, 카올리나이트의 비율로 깊이에 따라 퇴적상과 함께 나타냈다 (그림 7, 8).

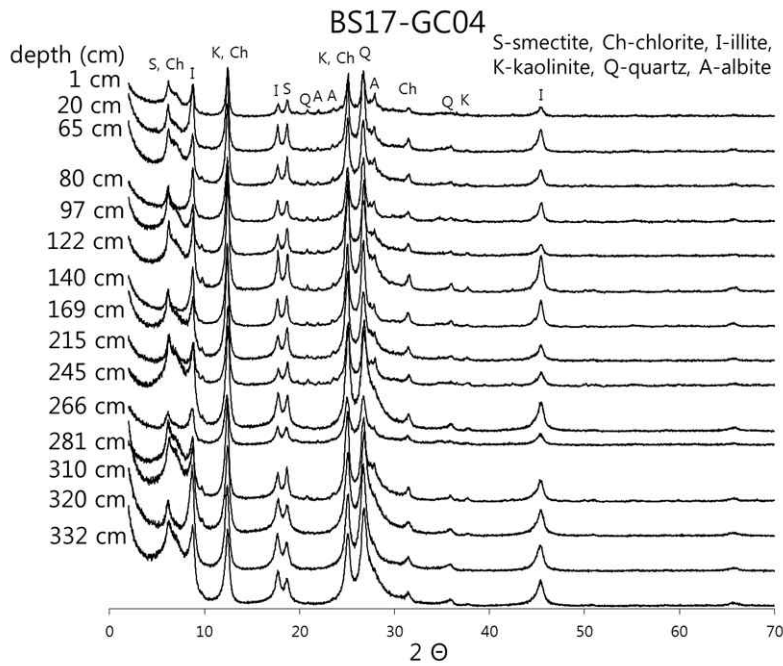


그림 5. BS17-GC04 코어의 2 μm 이하 size fraction을 실시한 샘플의 XRD 분석 결과. 스멕타이트, 녹니석, 일라이트, 카올리나이트, 석영, 조장석을 관찰 (1 ~ 332 cm).

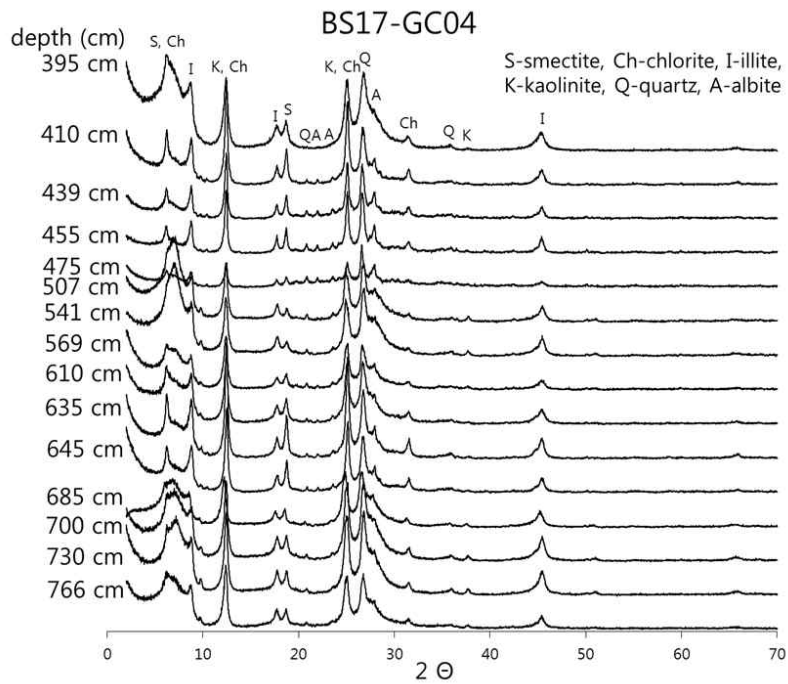


그림 6. BS17-GC04 코어의 2 μm 이하 size fraction을 실시한 샘플의 XRD 분석 결과. 스멕타이트, 녹니석, 일라이트, 카올리나이트, 석영, 조장석을 관찰 (395 ~ 766 cm).

- 대륙붕에 위치한 GC15 코어는 퇴적상 B 구간에서 스멕타이트가 평균 31.1 %, 일라이트가 28.4 %, 녹니석이 22.3 % 카올리나이트가 18.2 %의 함량을 보이고 전이퇴적상층에서는 스멕타이트가 20 %, 일라이트가 38 %, 녹니석이 21 %, 카올리나이트가 21 %의 평균적인 함량을 보인다. 가장 위쪽의 갈색 실트질 구조토가 포함된 퇴적상 A에서는 평균 스멕타이트가 25.1 %, 일라이트가 44.5 %, 녹니석이 17.6 %, 카올리나이트가 12.8 %의 함량을 나타내는데, 상부로 갈수록 일라이트의 함량이 증가하고 스멕타이트가 비교적 감소한다 (그림 7). 코어의 빙하기 시기의 점토광물 함량은 벨링스하우젠 해의 론만 입구에 위치한 GC360 코어 빙하기의 점토광물 함량과 유사하게 나타난다(Hillenbrand et al., 2009). 빙하기의 벨링스하우젠 해 대륙붕은 점토광물 함량이 다른 퇴적물이 용빙수나 저탁류에 의해 운반되기 때문에 빙붕의 변화를 파악할 수 있다 (Hillenbrand et al., 2009). 일반적으로 현재 빙붕이 후퇴한 벨링스하우젠 해 대륙붕에는 일라이트와 녹니석은 주로 빙상 아래에서 남극반도의 토양들이 침식되어 육성기원 퇴적물들이 암설류나 쇠설류 형태로 공급되고, 스멕타이트는 주로 동쪽의 베토벤반도 (Beethoven Peninsula)에서 공급되고, 일라이트는 서쪽의 엘타닌 만으로부터 주로 공급된다 (Hillenbrand et al., 2003; Hillenbrand et al., 2009). 론만 입구에 위치한 BS17-GC15 코어를 보면 비교적 높은 스멕타이트의 함량이 빙하기 시기에 나타난다. 이는 올리고세 이전에 남극 대륙주변부에 퇴적되었던 퇴적층에서 빙상의 발달로 인한 침식 및 재퇴적 현상으로 스멕타이트가 풍부한 올리고세 이전 퇴적물이 공급된 것으로 해석된다 (Hillenbrand et al., 2009; Park et al., 2019). 이후에 빙상이 후퇴하면서 전이퇴적상구간에서는 올리고세 이전 퇴적층에 대한 재퇴적 작용이 일어나지 않으면서 GC15의 스멕타이트의 함량이 감소하는 것으로 해석된다 (Hillenbrand et al., 2009). 간빙기에는 다시 스멕타이트의 함량이 증가하는데, 공해환경이 되면서 기존의 스멕타이트가 풍부하다고 알려진 베토벤 반도로부터 공급되는 세립질 쇠설류와 조류나 풍성류에 의해 공급되는 대륙 해안근처의 퇴적물들이 혼합되어 나타난 것으로 해석된다 (Hillenbrand et al., 2009; Park et al., 2019).

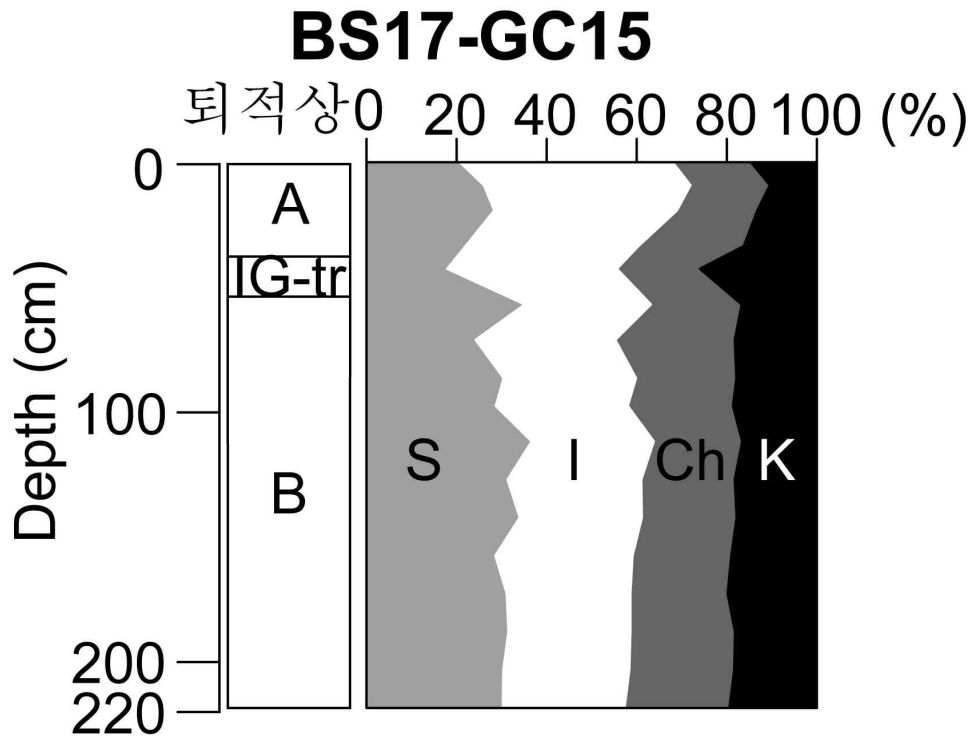


그림 7. BS17-GC15 코어의 스�멕타이트, 녹니석, 일라이트, 카올리나이트에 대한 반정량 분석 결과.

- 벨링스하우젠 해 동쪽 대륙대에 위치한 BS17-GC04 코어는 퇴적상 G1, G3에서는 스�멕타이트가 평균 47.2 %, 일라이트가 21.3 %, 녹니석이 16 %, 카올리나이트가 15.5 %의 함량을 보이고, 퇴적상 G2에서는 스�멕타이트가 19.3 %, 일라이트가 37 %, 녹니석이 29.1 %, 카올리나이트가 14.5 %의 평균 함량으로 스�멕타이트가 감소한다. 테프라가 포함된 퇴적상 F의 실트질 이토층에서는 스�멕타이트가 54.4 %, 일라이트가 20.1 %, 녹니석이 12.2 %, 카올리나이트가 13.3 %로 다시 스�멕타이트가 증가하고 녹니석, 일라이트의 비율이 감소한다. 퇴적상 E에서는 평균 스�멕타이트가 18.5 %, 일라이트가 41 %, 녹니석이 26 %, 카올리나이트가 14.5 %이고, 상부의 퇴적상 D에서는 스�멕타이트가 24.7 %, 일라이트가 38.5 %, 녹니석이 20.6 %, 카올리나이트가 16.2 %의 평균적인 함량을 보이고 최상부 퇴적상 C에서는 스�멕타이트가 20.6 %, 일라이트가 43.2 %, 녹니석이 22 %, 카올리나이트가 14.2 %로 일라이트의 함량이 가장 우세하게 나타난다. 카올리나이트는 코어에서 전반적으로 거의 일정한 함량 변화를 보인다 (그림 8). 빙하기의 퇴적상 G1, G3

구간에서는 대륙붕에서 공급되는 점토광물의 함량에 비해 비교적 스멕타이트의 함량을 보인다. 이 시기의 점토광물 함량은 테프라가 관찰되는 퇴적상 F의 점토광물 함량과 유사하게 나타나는데, 이는 벨링스하우젠 해의 대륙붕에서 공급되는 퇴적물과 함께 근처의 화산섬으로부터 퇴적물이 공급된 것으로 추측된다. 코어 근처에 위치한 피터 1세 섬(Peter I Island)은 신생대 시기의 화산암이나 화산쇄설암으로부터 형성된 풍부한 스멕타이트의 퇴적물(> 81 %)로 이루어져 있다 (Hillenbrand et al., 2003). 또한 이 지역은 남극대륙을 중심으로 시계 방향으로 순환하며 대륙대 위로 흐르는 남극순환류의 영향을 받는 지역이기 때문에 (Hernandez-Molina et al., 2006; Hillenbrand et al., 2003), 피터 1세 섬으로부터 스멕타이트가 풍부한 퇴적물이 충분히 공급될 수 있다. 반면에, 후빙기로 갈수록 일라이트와 녹니석의 함량이 증가한다. 일라이트와 녹니석의 기원지는 대부분 남극반도이며, 일라이트는 서쪽 벨링스하우젠해의 엘타닌 만에서 주로 공급되고, 녹니석은 남극반도 동쪽의 그레이엄랜드(Graham Land)로부터 공급될 수 있다 (Hillenbrand and Ehrmann, 2001; Hillenbrand et al., 2003). 퇴적상 D, E로 갈수록 높은 일라이트와 녹니석의 비율을 보이는데, 이는 남서 방향으로 흐르는 등수심 해류에 의한 분산 기작의 결과로 빙상이 점차 후퇴함에 따라 남극반도의 녹니석과 일라이트가 풍부한 퇴적물이 등수심 해류에 의해 연구 지점까지 공급된 것으로 해석된다 (Hillenbrand et al., 2003; Yoo et al., 2008). 퇴적상 C인 간빙기에서는 이제 빙방이 완전히 후퇴하여 현재와 비슷한 퇴적환경이 만들어지고 대륙대에 론만 입구와 엘타닌 만의 퇴적물이 표층해류와 빙산에 의해 혼합되어 공급된 것으로 해석된다 (Hillenbrand et al., 2003; Hillenbrand et al., 2009). 카올리나이트의 경우, 아문젠 해 서쪽 마리버드랜드(Marie Byrd Land)에서 높은 함량을 보인다고 보고되었는데 (Hillenbrand et al., 2003), GC15, GC04 코어는 아문젠 해에서 떨어진 곳에 위치해있기 때문에 카올리나이트의 공급이 비교적 제한된다. 그래서 깊이에 따라 빙하기-간빙기로 변하면서 카올리나이트의 변화는 크지 않은 것으로 사료된다 (그림 7, 8).

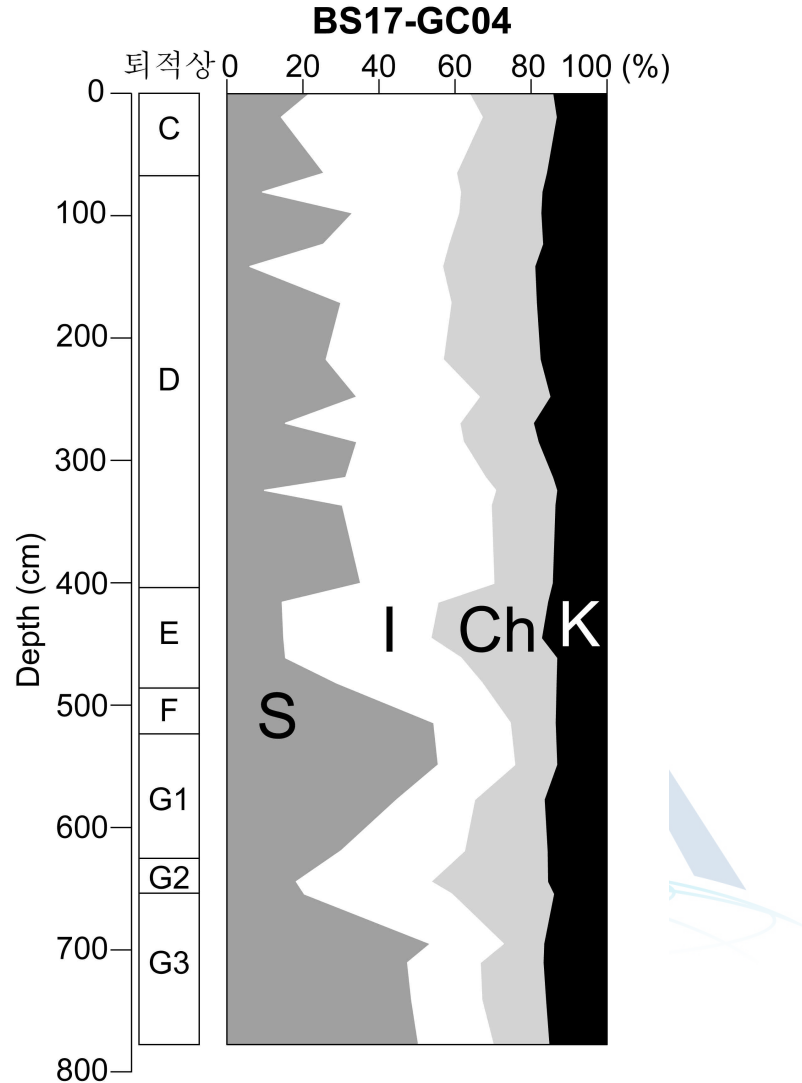


그림 8. BS17-GC04 코어의 스�멕타이트, 녹니석, 일라이트, 카올리나이트에 대한 반정량 분석 결과.

3) 결빙시 철 함유 광물-미생물 반응 실험 설계

- 현재까지 알려진 대표적인 철의 소스로, 가장 많은 양을 차지하는 것은 대기 중으로 날아와 퇴적되는 Atmospheric deposition으로 공급되는 dust 내의 철과 해저퇴적물로부터 녹아 나와 올라오는 Upwelling supply of dissolved Fe 가 있다. 이러한 소스들의 총합을 계산해보면, 식물성 플랑크톤에 의한 전체 철의 필요양보다 10퍼센트 정도가 부족하기 때문에 남극해 지역 Fe fertilization의 새로운 소스로써 가능성 제시하고자 남극 환경에서 가장 많이 존재하는 얼음 내에서 결빙시 microbe와 광화학 반응에 의한

Fe-liberation을 확인하기 위한 실험조건에 대한 preliminary 연구를 진행하였다. 남극 지역에서의 유기적/무기적 과정에 의한 산화철과 점토광물의 철 용출의 반응은 빙권 지역의 낮은 온도와 동결 조건에서 연구된 바가 없기 때문에 본 연구를 수행하였다.

- 위의 내용을 바탕으로 여러 가지 대기 중의 dust에 포함된 Fe-oxide 중 maghemite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)를 전자 수용체로 하여 Fe-liberation에 대한 실험을 진행하였다.

Fe source	Maghemite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$: electron acceptor)		
Carbon source	Lactate (electron donor)		
Temperature	1 °C and 4 °C		
Bacteria	<i>Shewanella vesiculosa</i>		
Atmosphere	Experiment, Control : Anaerobic (H_2/N_2 mix: 3~5% H_2)		
Concentration		Maghemite	pH
	1	80 mmol	7
	2	8 mmol	7
	3	0.8 mmol	7

표 1. 결빙시 microbe와 Fe-oxide 간의 광화학 반응에 의한 실험 조건

- 실험조건을 확인하기 위해 여러 가지 문헌을 조사하였으나 biotic process를 통해 결빙조건에서 철 함유 광물의 Fe reduction 실험을 진행한 경우는 없었다. 그래서 maghemite를 미생물에 의한 Fe reduction이 어느 농도에서 optimum condition을 보이는지 확인하기 위해 3가지 농도 조건으로 실험을 진행하였다. 전자 공여체로는 carbon source로 lactate를 사용하였고, 미생물의 활동이 충분히 boost up 되기 위해 M1 medium을 첨가해 주었다. 결빙 조건에서 미생물에 의해 Fe reduction이 일어난 것을 확인하기 위해 대조군으로 미생물을 넣지 않는 조건에서 실험을 진행하였다. 미생물은 호냉성 철 환원 박테리아로 알려져 있는 *Shewanella vesiculosa* (Bozal et al., 2009)를 사용했다.
- 최종적인 실험 목표는 결빙이 진행되는 단계별로 미생물에 의한 Fe reduction을 확인하기 위해 15도부터 -10도까지 온도를 낮춰가며 반응을 진행하고자 한다. 기존의 결빙시 Fe reduction되는 반응으로는 abiotic

process로 물 분자가 액체 상태에서 고체상태로 변하면서 물 분자 사이로 Fe(III), H⁺ 등의 이온들이 모여서 고농도의 상태로 변한다. 이 과정에서 수소이온에 의한 환원 반응을 통해 철 이온이 환원되는데 이를 'Freezing concentration effect'라 하고 실험실 조건에서 반응이 일어나는 것을 확인하였다 (Kim et al., 2010; Jeong et al., 2012). 하지만 본 실험에서는 abiotic process 보다는 biotic process에 초점을 맞추었기 때문에 15도부터 결빙이 되는 과정까지 온도가 낮아지는 조건에서도 미생물에 의해 철 환원 반응이 일어나는지 관찰하고자 하였다.

- 본 실험에 들어가기에 앞서 본 실험에서 철 함유 광물의 적합한 농도를 확인하기 위해 maghemite를 0.8 mmol, 8 mmol, 80 mmol 조건으로 4주간 배양을 진행하였다. 그림 9와 같이 온도는 4도와 1도로 설정하여 배양을 진행하였다. 그림 9를 보면, 시간이 지날수록 8 mmol과 0.8 mmol에서는 4도와 1도의 색 차이가 크지 않았다. 하지만 80 mmol의 경우 4도에서 배양한 시료의 색이 더 진하게 변하는 것을 통해 4도 조건에서 Fe의 reduction이 더 활발하게 일어났음을 알 수 있다.
- 실제로 1,10 phenanthroline으로 각각의 time point 별로 샘플링한 시료에 대해 철 환원 정도를 구하고 이를 이용해 2가철의 농도를 계산하였다 (그림 10). *S. vesiculosa*의 경우 약 1.0×10^7 cells/ml의 농도에 박테리아를 실험에 철 환원 박테리아로 넣었다. 가장 높은 철 환원 농도를 보인 것은 80 mmol maghemite에서 반응한 실험군으로 관찰되었다. 일반적으로 농도가 높을수록 높은 철 환원능을 보였는데, 80 mmol의 경우 1도보다 4도에서 더 높은 철 환원능을 관찰할 수 있었다. 이는 저온성 박테리아여도 너무 낮은 온도에서는 박테리아의 활동성이 떨어져서 나타나는 현상으로 보인다. 하지만 1도의 낮은 온도에서도 충분히 높은 철 환원능을 보였기 때문에, 본 실험에서도 일반적인 상온 조건이 아닌 영하의 조건에서도 충분히 철 환원이 가능할 수 있음을 시사하고 있다.

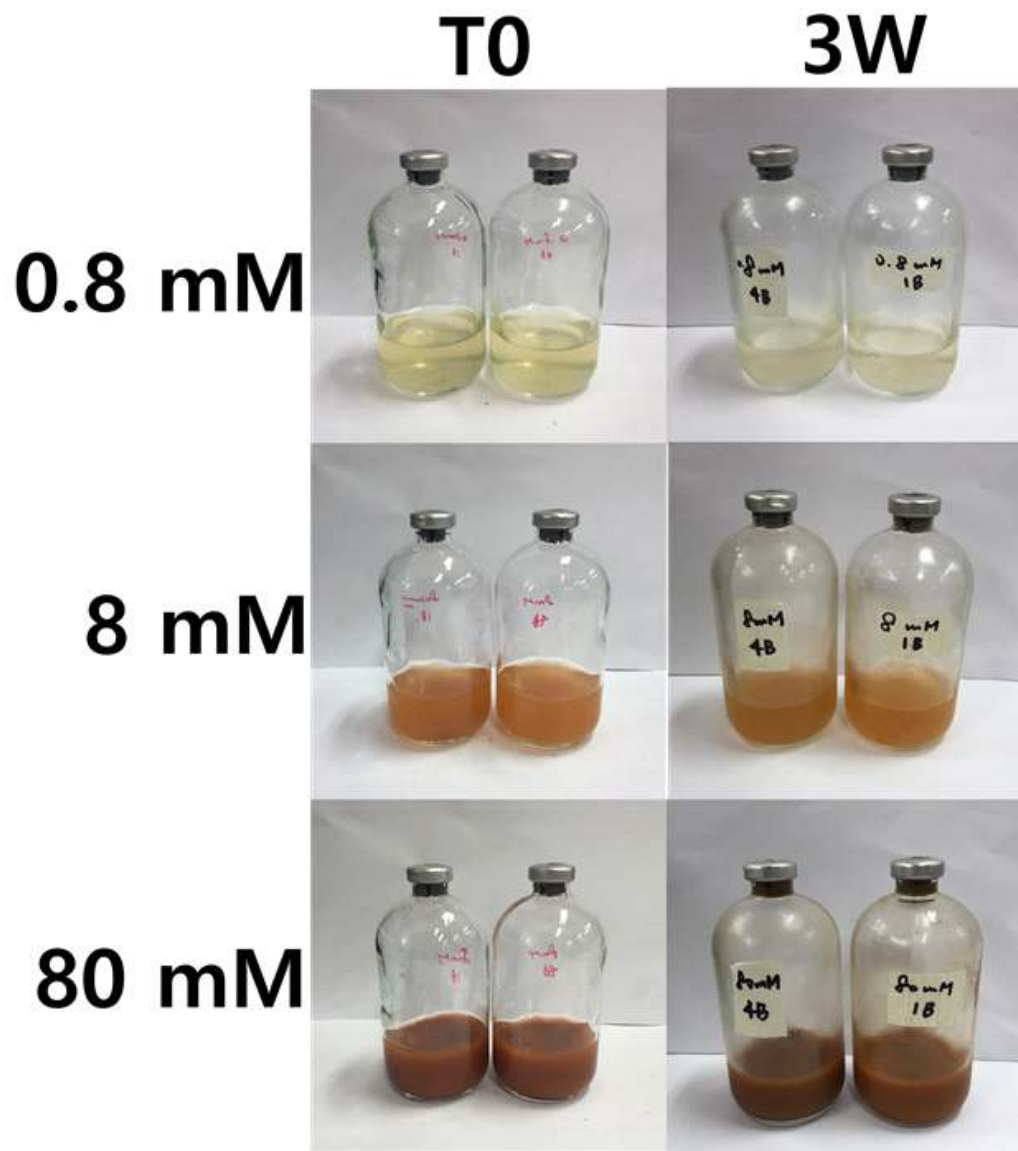


그림 9. 결빙시 철 함유 광물(maghemite)-미생물 간의 농도별 batch 실험 결과 색 변화.

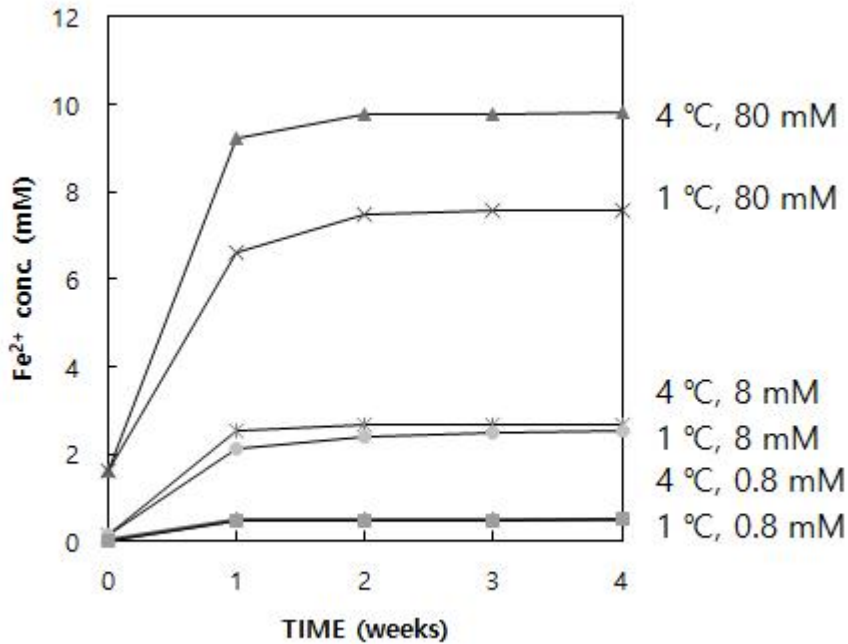


그림 10. 결빙시 철 함유 광물(maghemite)-미생물 간의 농도별 batch 실험에 대한 Fe^{2+} 의 농도 결과.

4) 극지연구소 생명과학연구부와 협력하여 퇴적물 내에 분포하는 호냉성 철 환원 미생물에 대한 분리동정에 대한 해석

- 깊이에 따른 미생물 분석은 극지연구소 생명과학연구부와 협력하여 BS17-GC18 코어에 대해 깊이별로 퇴적상을 기준으로하여 총 8개의 지점에 대해 분석을 진행하였다. 81-83 cm (D1), 231-233 cm (D2), 311-313 cm (D3), 408-410 cm (D4), 618-620 cm (D5), 723-725 cm (D6), 797-799 cm (D7), 842-844 cm (D8)를 각각 미생물 분석을 진행하였다. Microbial community 분석은 16S rRNA pyrosequencing을 통해 미생물 군집을 확인하였다.
- 16S rRNA pyrosequencing을 통해 미생물을 species 단위로 분류하였고 unidentified된 종의 경우 유사한 계통이 발견된 지점과 비교하였다.
- 미생물 분석 결과를 보기에 앞서, BS17-GC18의 전반적인 깊이에 따른 퇴적상 분석, 광물학적 분석을 통해 구간별 특징들을 확인하였다 (그림 11, 12). 퇴적상을 깊이에 따라 구분하고 채취한 해저 퇴적물의 유기물 제거 과정을 거친 뒤 2 μm 이하로 size fraction 하여 점토광물 분석을 실시하였다.

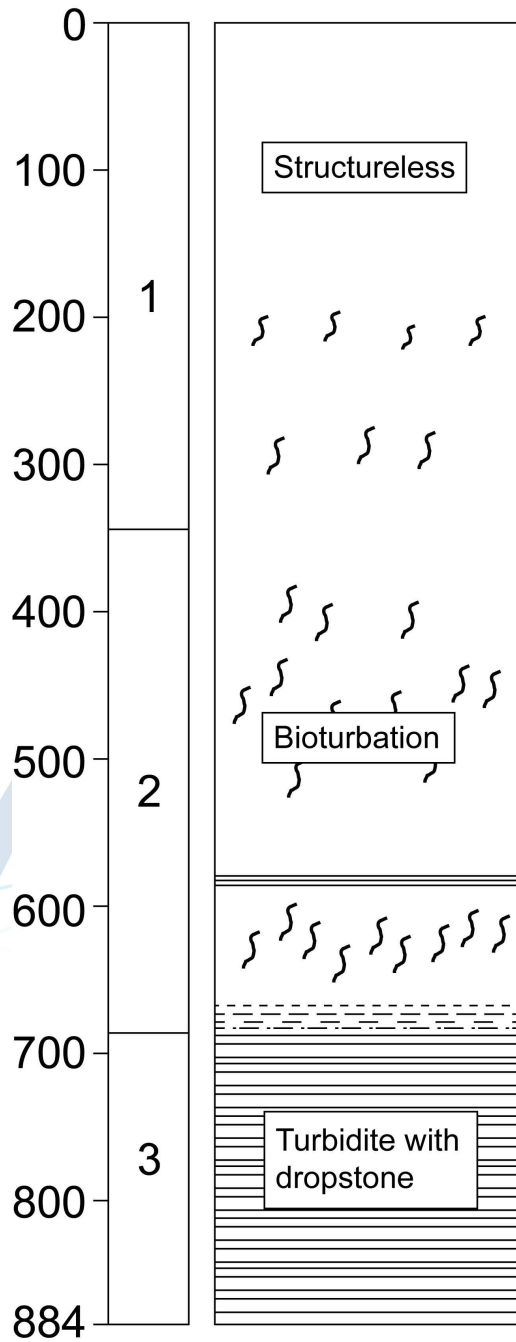


그림 11. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 퇴적상.

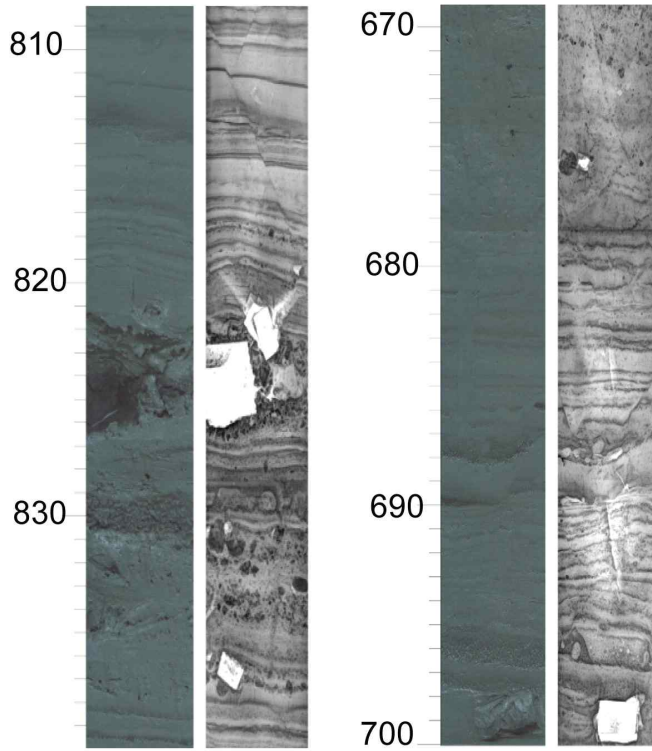


그림 12. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 퇴적상에 따른 실제 코어 이미지 (670 ~ 884 cm).

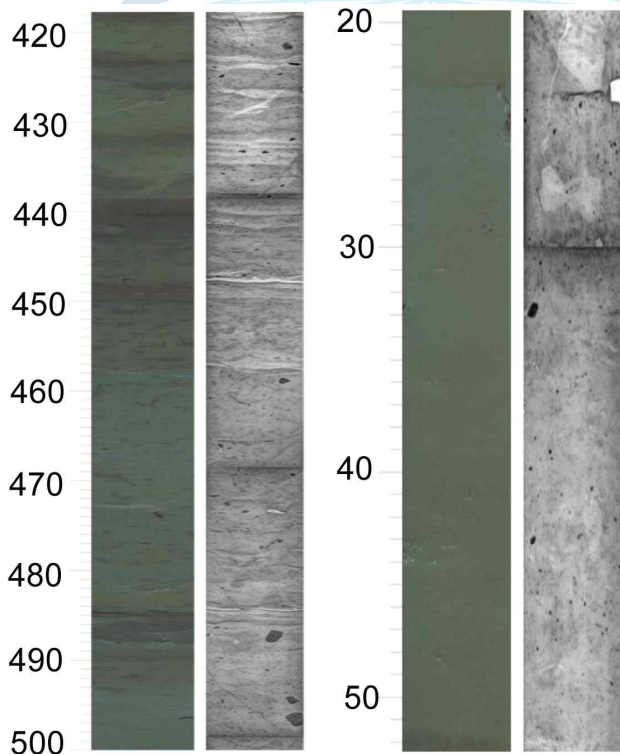


그림 13. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 퇴적상에 따른 실제 코어 이미지 (0 ~ 500 cm).

- BS17-GC18 코어의 경우 아래쪽 퇴적상 3에 모래 크기의 입자들과 함께 어두운 회색의 사질 터비다이트 층이 지배적으로 나타난다. 이와 함께 713 cm, 825 cm, 830 cm 부근에서 다이어믹턴이 관찰된다. 상부로 갈수록 퇴적상2에서는 빙봉이 후퇴하면서 보이는 686 cm부터 하부의 사질 터비다이트 층이 사라지고 갈색의 실트질층이 퇴적물에 섞여서 관찰되고 퇴적상1인 344 cm부터 원양성 퇴적물의 증가와 함께 갈색 퇴적물이 증가하고 실트질 구조토와 ice rafted debris (IRD)가 관찰된다. 코어를 채취한 벨링스하우젠 해의 크리스탈 사운드 지역은 대륙붕 안쪽의 대륙과 인접한 지역이다. 이 지역에서 퇴적상의 차이를 일으키는 가장 큰 요인은 서남극 빙봉이 기후 변화에 따라 전진과 후퇴하면서 동반되는 퇴적 작용의 변화이다. 또한 이 지역은 일반적인 대륙붕 환경과는 다르게 bathymetry map을 참조했을 때, 주변 대륙붕보다 약 1000 m 이상의 깊은 분지 형태로 이루어진 지역이다. 그래서 지형학적 특징 또한 이 지역의 퇴적상을 결정짓는데 매우 중요한 역할을 한다고 할 수 있다. 일반적으로 빙봉은 빙하기 동안 빙상으로 대륙붕의 경계부근까지 전진한다. 그래서 빙상의 기저부에 퇴적된 이전의 퇴적물들이 역의 형태로 빙상과 함께 움직이면서 운반 및 재퇴적과정을 거친다. 퇴적상 3의 경우, 회색의 사질 터비다이트 층과 그사이에 큰 역들 쌓여서 다이어믹턴 층을 이루는 것을 관찰 할 수 있다. 퇴적상 3에서 지배적으로 나타나는 터비다이트는 일반적으로 대륙사면이나 호수와 같이 경사가 급격하게 높아지는 구간에서 발생한다. 다량의 퇴적물이 중력에 의한 중력류나 빙상의 전진으로 인해 퇴적물이 한번에 공급되어 급격한 경사를 따라 혼탁류로써 공급된다. 이 과정에서 큰 입자들이 쌓이면서 퇴적물을 멀리까지 운반하기도 한다 (Lewe, 1982). 하지만 크리스탈 사운드의 경우 대륙붕 안쪽에 있기 때문에, 분지 형태로써 주변보다 급격한 경사를 지닌 점이 터비다이트가 형성될 수 있는 원인이라 할 수 있다. 이와 함께, 큰 역들이 터비다이트 층 중간 중간에 같이 퇴적된 것을 관찰 할 수 있다. 이러한 역들은 빙하기 시기에 빙상이 전진하면서 빙상의 기저부에서 침식되어 운반된 퇴적물들이 분지형태의 지역을 만나 기저부가 녹으면서 떨어져 퇴적된 흔적이라고 볼 수 있다. 그래서 터비다이트 층과 함께 다이어믹턴의 역층이 같이 나타난 것이라 해석된다. 이를 통해 퇴적상 3은 빙하기 시기에 빙상이 크리

스탈 사운드의 코어를 획득한 지점을 덮고 있었으며, 주변으로부터 다량의 퇴적물이 공급된 터비다이트층이 형성된 것으로 주변보다 급격한 경사를 가진 분지 형태의 지형으로 추측할 수 있다. 이는 일반적으로 빙저호 환경에서의 퇴적층의 양상과 유사하다 (Livingstone et al., 2012). 또한 일반적인 빙하기 시기의 대륙붕의 퇴적물과 같이 분급이 불량한 사질 자갈 퇴적층이 나타나는 것도 빙하기의 특징이라 보인다 (Domack et al., 1999; Ha et al., 2018). 빙저호는 빙상 하부에 존재하는 호수로서 일반적으로 수 백미터 깊이의 빙상 아래에 존재하며 빙상 하부의 용빙수들이 이동하는 통로의 역할을 하는 매우 중요한 지역이다. 또한 빙저호의 경우, 빙상에 덮혀 있기 때문에 외부로부터의 빛, 영양소, 산소 등의 출입이 제한되기 때문에 생명체가 사는데 매우 극한 환경이라 할 수 있다. 하지만 빙저호는 대부분 남극 대륙 안쪽에 두꺼운 빙상 하부에 존재하기 때문에 접근이 매우 제한되고 연구를 실시하는데 큰 어려움이 있다. 그래서 위의 코어와 같이, 빙하기 이후 빙봉이 후퇴하면서 드러난 과거 빙저호로 존재하는 지역을 탐색함으로써 현재 빙저호의 환경에 대해 유추해 볼 수 있을 것이다. 코어의 상부로 가면서 퇴적상 2가 시작되는 686 cm를 보게되면 터비다이트 층이 갑자기 나타나지 않는 것을 관찰 할 수 있다. 이 지점을 기준으로 이 시기 전후로 빙저호가 열리면서 외부로부터 해수와 퇴적물이 공급될 가능성이 있다. 퇴적상 2는 전반적으로 빙상이 후퇴하면서 대륙붕에 빙봉이 형성되며 그라운드링 라인을 기준으로 퇴적환경의 변화가 일어난다. 터비다이트 층이 나타나지 않는 깊이를 기준으로 위쪽에는 점점 갈색의 퇴적층이 섞여서 관찰되기 시작하고 생교란 흔적을 관찰 할 수 있다. 일반적으로 대륙붕에서 그라운드링 라인 근처의 퇴적물에서는 육성기원 퇴적물이 비교적 우세하게 나타나며 생교란 흔적이 적게 보이고 분급이 나빠 고르지 않은 입도 분포를 보이며, 니질의 자갈, 모래층이 역질층 바로 위에 퇴적된다 (Domack et al., 1999; Hillenbrand et al., 2010). 하지만 GC18 코어의 경우 실트질 엽층이 보이며 갈색과 회색의 불규칙한 층이 교호되며 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 그라운드링 라인 근처에서 빙봉 하부에서 빙봉의 움직임에 의한 sediment plume에 의해 형성되는 불규칙한 층으로 해석된다 (Evans et al., 2005). 그래서 이 시기에는 빙봉이 점차 후퇴하면서 그라운드링 라인으로부터 멀어지

고 있음을 유추할 수 있다 (그림 12). 상부로 가면서 퇴적상 1에서는 갈색/회색의 니질층이 두껍게 관찰된다. 이와함께 생교란 흔적이 조금 관찰되고 실트질 구조도와 해빙에 의해 공급된 IRD가 관찰된다. 간빙기 동안 대륙붕에서는 빙붕이 완전히 후퇴하면서 그라운드 라인으로부터 멀어지고 계절적인 해빙이 나타나는 공해 환경이 된다. 이와 함께 반원양성, 원양성 퇴적물의 공급이 증가하는데 그에 따라 대륙붕에는 갈색의 실트질 퇴적물의 함량이 증가한다 (Barker et al., 1999). 또한 온난한 간빙기 동안에는 표층 해수의 일차생산성의 증가로 인해 생물기원의 입자들이 급격하게 증가하고 (Grobe and Mackensen, 1992), 이를 통해 퇴적상 1의 생교란 흔적과 실트질 구조도가 간빙기에 공해 환경에서 퇴적된 것으로 보인다 (그림 13).

- 퇴적 환경에 따른 깊이 별 광물의 변화를 관찰 하기 위해 X선 회절 분석을 실시 하였다. 먼저 유기물 제거 과정을 거친 뒤 bulk sample은 random mount XRD로 측정을 진행하였다. 전반적인 광물 종류는 퇴적상 3과 상부의 퇴적상 1, 2가 다른 광물상들이 관찰되었다. 점토광물로는 스�멕타이트, 녹니석, 일라이트, 카올리나이트, 엽랍석이 관찰되었고, 철 산화광물로는 goethite, magnetite, ferrihydrite가 관찰되었고 황화철, 그리고 석영, 장석, 휘석, 각섬석, 제올라이트를 관찰하였다. 퇴적상 3에서 상부로 갈수록 제올라이트의 픽은 약해지는 것을 관찰하였다 (그림 14, 15, 16). 제올라이트의 경우 크리스탈 사운드 주변 대륙인 남극반도의 경우 island-arc belt로 형성된 지역과 밀접하게 연관되어 있기 때문에 저변성 작용으로 생성된 zeolitized folded rock으로부터 제올라이트가 공급될 수 있다 (Suarez, 1976). 특히 퇴적상 3의 경우 빙하기로써 빙상에 의해 대륙성 퇴적물들이 다량으로 공급될 수 있기 때문에 제올라이트가 남극 반도로부터 공급된 것으로 해석된다.

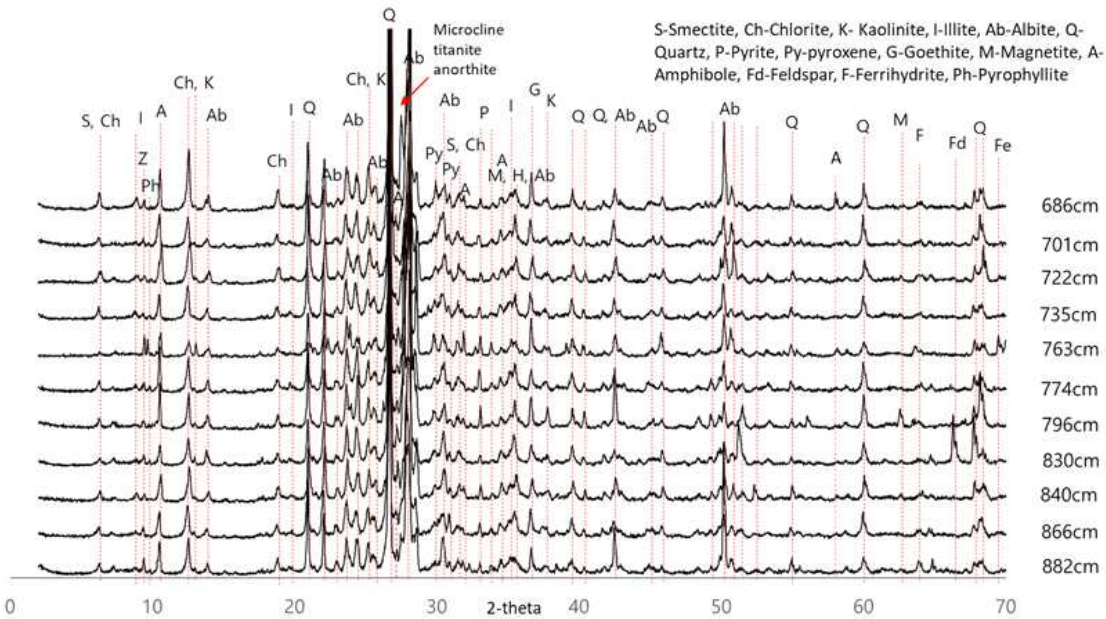


그림 14. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 bulk sample XRD (686 ~ 882 cm).

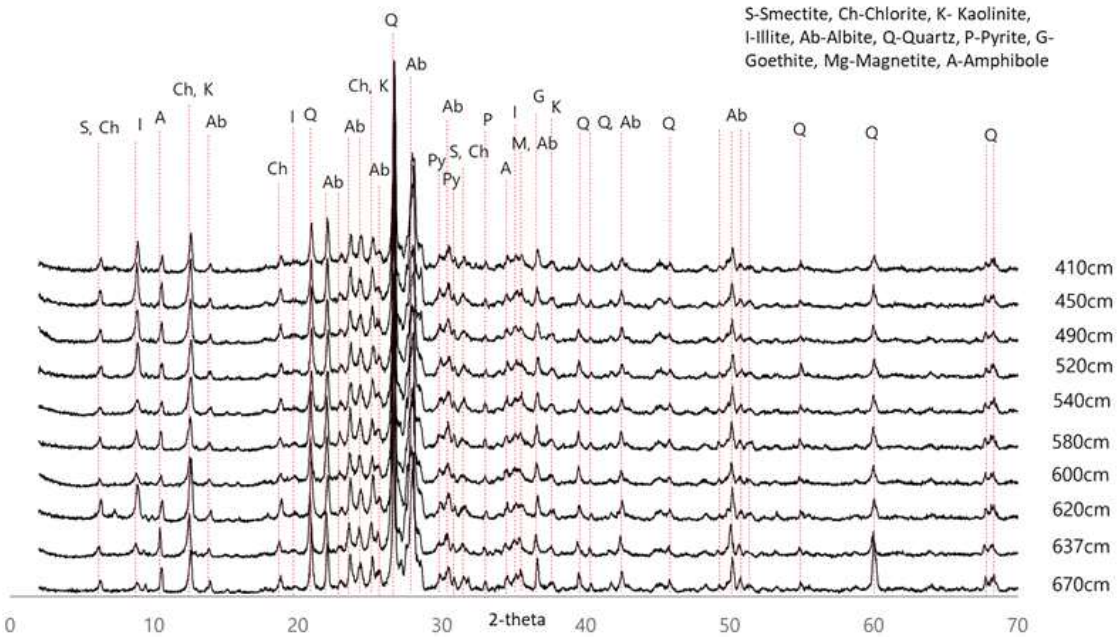


그림 15. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 bulk sample XRD (410 ~ 670 cm).

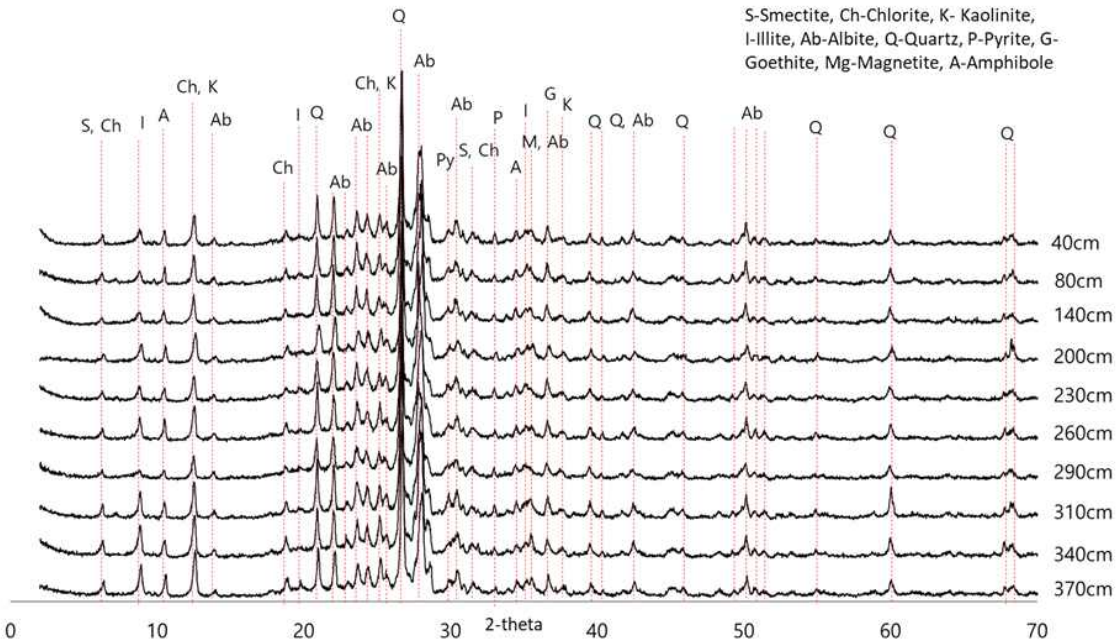


그림 16. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 bulk sample XRD (40 ~ 370 cm).

- 앞선 XRD 그래프의 결과를 바탕으로 (그림 14, 15, 16), 깊이에 따라 점토 광물의 함량을 관찰하기 위해 2 μm 이하로 size fraction 하여 점토광물 분석을 실시하였다 (그림 17, 18, 19).
- Size fraction하여 측정된 XRD를 보면 점토광물로는 주로 스멕타이트, 녹니석, 일라이트, 카올리나이트가 지배적으로 나타나는 것을 관찰 할 수 있다. 깊이에 따라 픽의 세기에는 차이가 보였지만, 광물상에는 차이가 없었다 (그림 17, 18, 19). 깊이별 점토광물의 함량 변화를 확인하기 위해 반정량 분석을 실시하였다 (Biscaye, 1965).

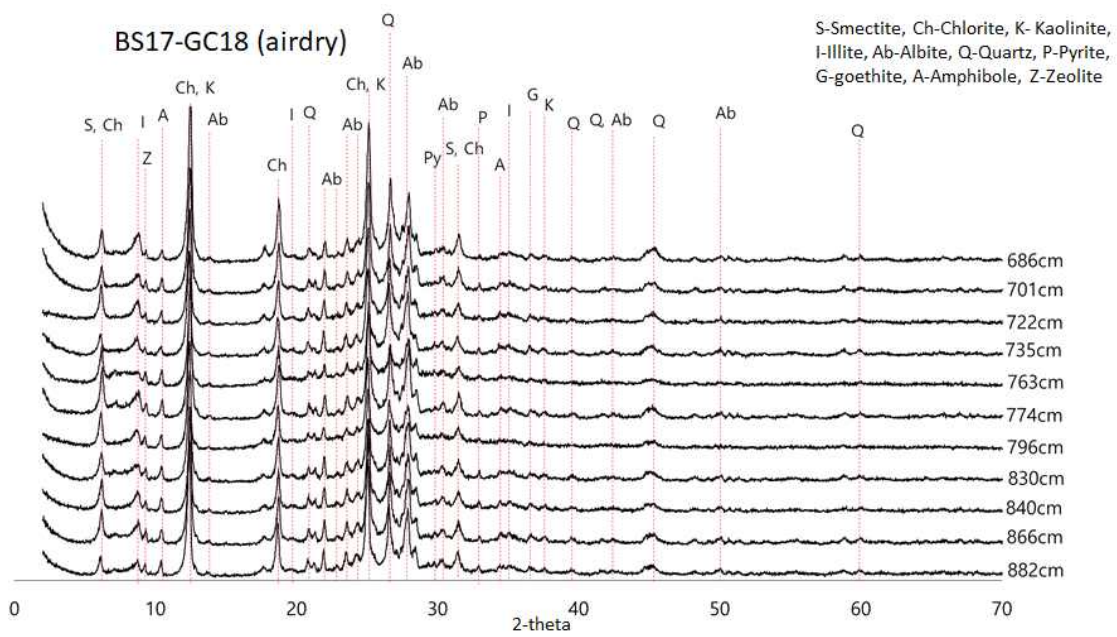


그림 17. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 bulk sample XRD (686 ~ 882 cm).

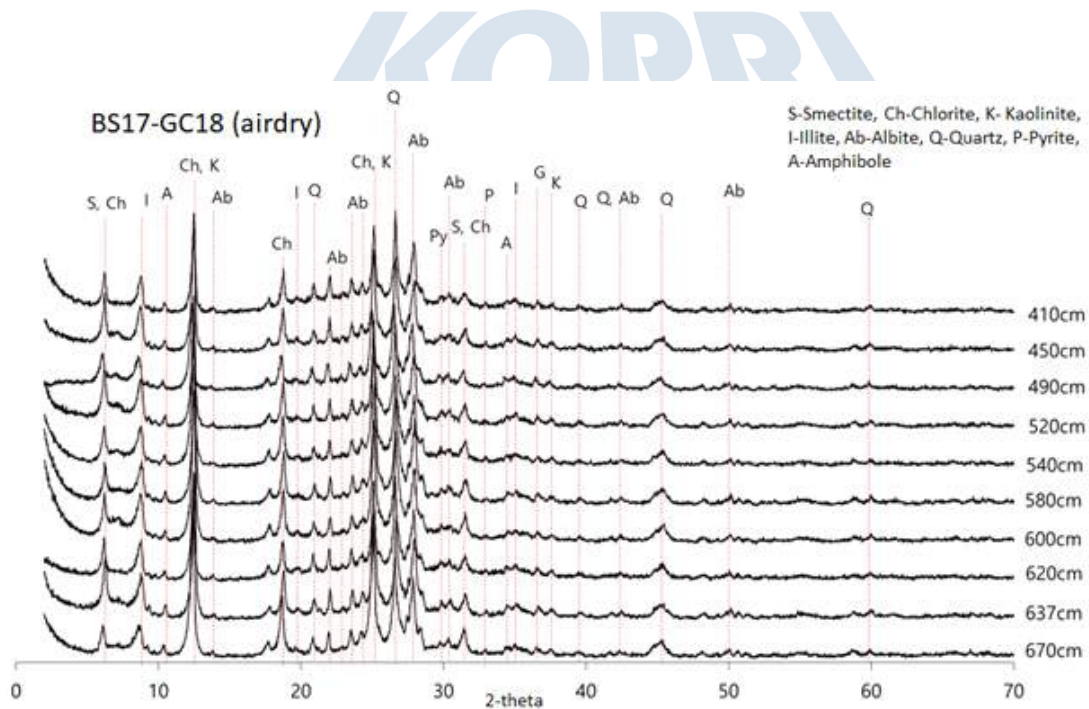


그림 18. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 bulk sample XRD (410 ~ 670 cm).

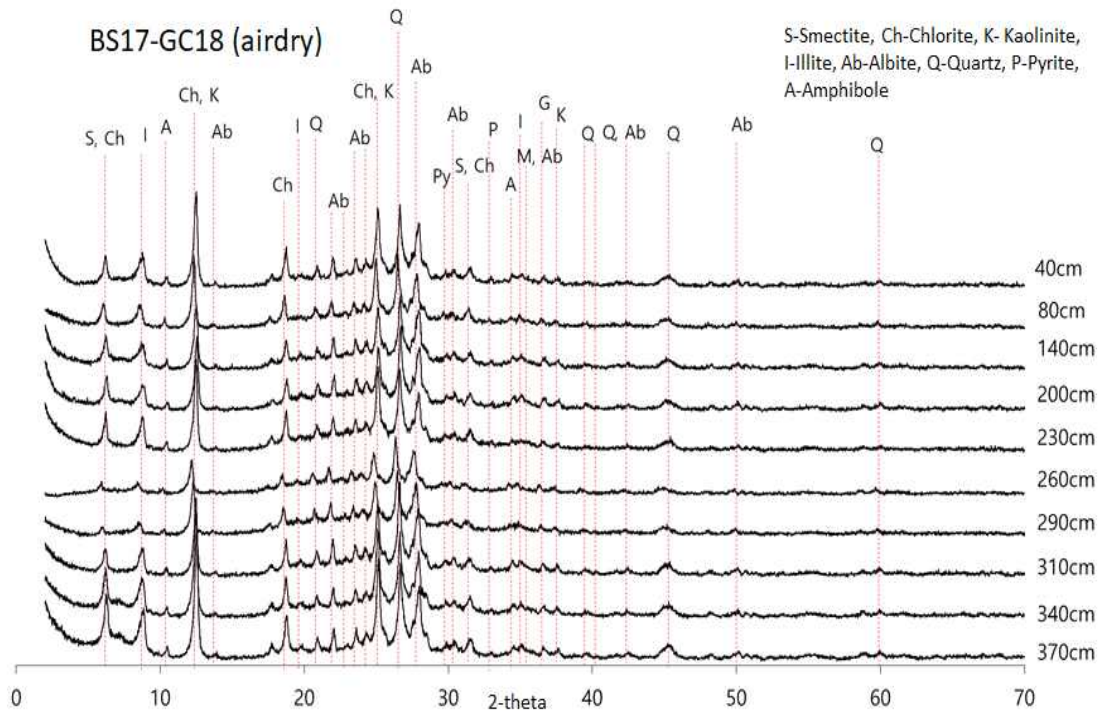


그림 19. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 bulk sample XRD (40 ~ 370 cm).

- 벨링스하우젠 해 안쪽에 위치한 BS17-GC18 코어는 퇴적상3 구간에서 스멕타이트가 평균 11.2 %, 일라이트가 27.3 %, 녹니석이 42.9 %, 카올리나이트가 18.6 %의 함량을 보이고 빙봉이 후퇴하면서 나타나는 퇴적상2 구간에서는 스멕타이트가 14.7 %, 일라이트가 36.5 %, 녹니석이 33.1 %, 카올리나이트가 15.7 %의 평균적인 함량을 보인다. 가장 위쪽의 간빙기의 실트질 구조와 IRD가 나타나는 퇴적상1 구간에서는 평균 스멕타이트가 10.6 %, 일라이트가 38.6 %, 녹니석이 33.3 %, 카올리나이트가 17.4 %의 함량을 나타낸다. 상부로 갈수록 일라이트의 함량이 증가하고 녹니석의 함량은 감소하는 것을 관찰 할 수 있다. 스멕타이트의 경우 점토광물의 함량비를 볼 경우에는 비교적 변동폭이 작다 (그림 20). 이 GC18 코어의 빙하기의 점토광물의 함량은 높은 녹니석의 함량비를 보여주고 있다. 벨링스하우젠 해 대륙붕의 경우 일라이트와 녹니석은 주로 빙상 아래에서 남극반도의 토양들이 침식되어 육성기원 퇴적물들이 암설류나 쇄설류 형태로 공급하게 되는데 녹니석의 경우 남극반도 동쪽의 그레이엄 랜드로부터 공급될 수 있다 (Hillenbrand and Ehrmann, 2001; Hillenbrand et al., 2003). 앞선 퇴적상에

서 관찰한 결과를 보면 이 시기에는 빙상에 의한 대륙성 퇴적물들의 공급이 많았다고 유추할 수 있기 때문에 점토광물의 함량비에서도 녹니석이 높은 비율로 나타난 것으로 보인다. 상부로 갈수록 녹니석의 함량은 감소하고 일라이트의 함량이 증가하는 양상을 보인다. 이는 빙봉이 후퇴하면서 빙상에 의한 육성 기원 퇴적물의 공급이 제한되어 나타나는 결과로 보인다. 간빙기의 공해환경으로 변하면서 일라이트가 가장 높은 함량비를 보이는데 일라이트는 대부분 남극 반도를 기원지로 엘스워스 랜드나 알렉산더 섬 북쪽으로부터 많은 일라이트의 공급이 된다고 알려져 있다 (Hillenbrand et al., 2003). 크리스탈 사운드에 위치한 GC18의 경우 빙봉이 후퇴하면서 공해환경이 되면 이 지역들로부터 남극순환류나 대륙 근처에서 흐르는 surface current에 의해 일라이트가 공급되는 것으로 보인다. 스펙타이트의 경우 코어의 빙하기와 간빙기에 평균 함량의 큰 차이가 없다 (그림 20). 하지만 스펙타이트의 경우 스펙타이트가 생성된 기원지의 근원암에 따라 스펙타이트를 구성하는 화학성분비가 달라질 수 있다 (Weaver and Pollard, 1973). 그래서 빙하기와 간빙기의 대표적인 깊이에 대해 스펙타이트의 화학 성분 분석을 실시하였다. 이는 아래의 장에서 서술하였다. 카올리나이트는 서남극 지역에서 아문젠 해에서 가장 높은 함량을 보이며 주 기원지로 알려져있다 (Hillenbrand et al., 2003). 크리스탈 사운드는 아문젠 해로부터 떨어진 곳에 위치하기 때문에, 카올리나이트의 변동이 깊이에 따른 빙하기-간빙기 별로 크지 않게 나타나는 것으로 해석된다 (그림 20).

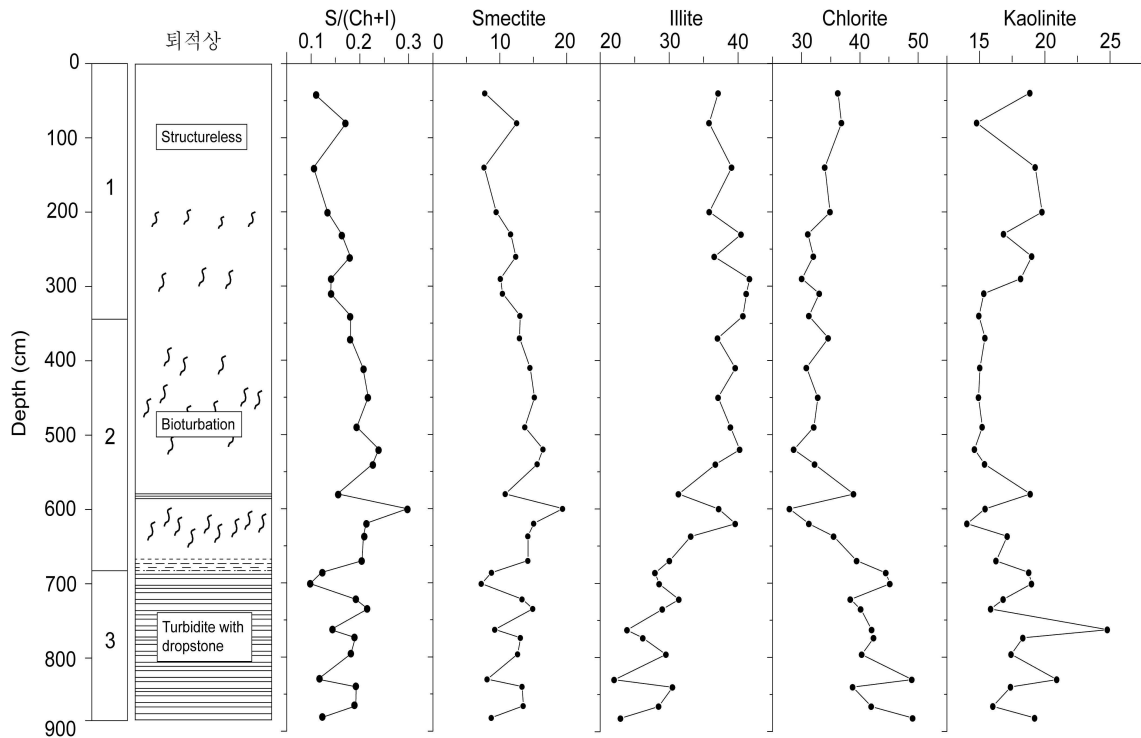


그림 20. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 깊이 별 퇴적상 및 반정량 분석을 통한 스멕타이트/(녹니석 + 일라이트)의 함량비, 스멕타이트, 일라이트, 녹니석, 카올리나이트의 함량.

- 위의 퇴적상, 광물학적 분석을 통해 코어를 크게 3가지 퇴적 환경으로 구분하였다. 이에 맞춰 미생물 분석을 깊이에 따라 총 8개의 깊이를 분석을 진행하였다. 미생물 분석은 극지연구소 생명과학연구부와 협력하여 분석을 진행하였는데 코어의 전체에서 약 2,211 종의 박테리아와 고세균 종이 확인되었다. 이 중 규명된 종들에 대해 박테리아들의 세부적인 특징들에 대해 분석을 진행하였다. 깊이별로 발견된 종들에 대해 유사성을 확인해보기 위해 종들간의 상관성에 대해 주성분 분석 (principal component analysis; PCA) 방법으로 표본들간의 유사성을 확인하였다. 계통간의 유사성을 비교해 봤을 때, 퇴적상 3 구간인 D6, 7, 8이 서로 유사한 종들을 보였고, 빙봉이 후퇴하면서 D5의 그룹이 빙봉이 완전히 후퇴하면서 간빙기 환경으로 넘어가는 D2, 3, 4의 그룹 사이에 별개의 그룹으로 관찰 되었다. 그리고 완전히 빙봉이 후퇴한 최상층인 D1에서 다른 그룹과 유사하지 않게 떨어져서 나타났다. 이는 빙봉이 후퇴하면서 공해 환경에서 여러 박테리아들의 유입

으로 나타난 결과로 보인다.

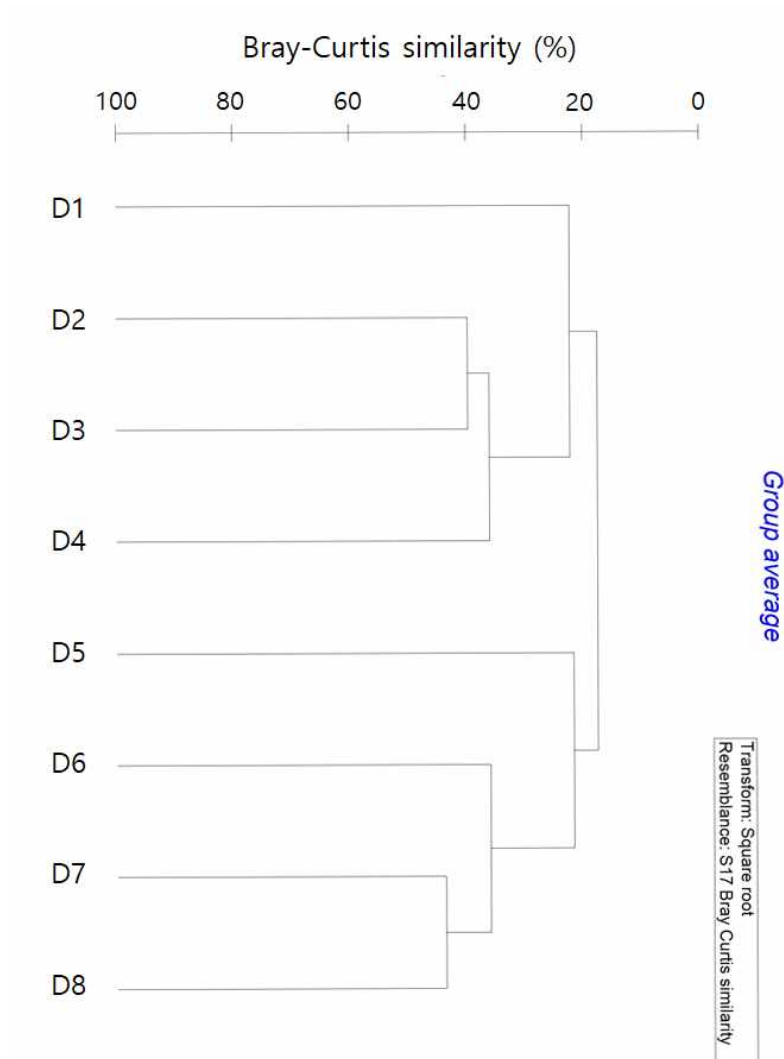


그림 21. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 깊이 별 미생물 군집 간의 유사성 분석.

- 그림 21은 Bray-Curtis similarity 분석으로 서로 다른 두 지점간의 조성 유사성을 정량화하는데 사용되는 통계로 위의 결과에서도 볼 수 있듯이 크게 D4와 D5를 기준으로 상부와 하부 사이의 차이가 있고 퇴적상 3에 해당하는 D6, 7, 8이 유사성을 띄는 것을 관찰 할 수 있다.

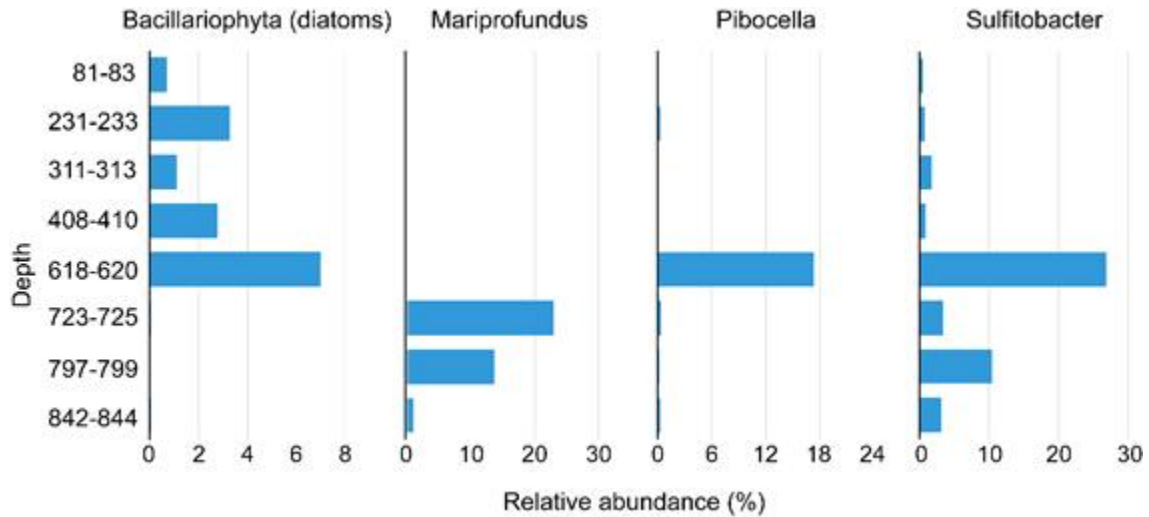


그림 22. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 깊이 별 규조류와 박테리아의 상대적 함량 분석.

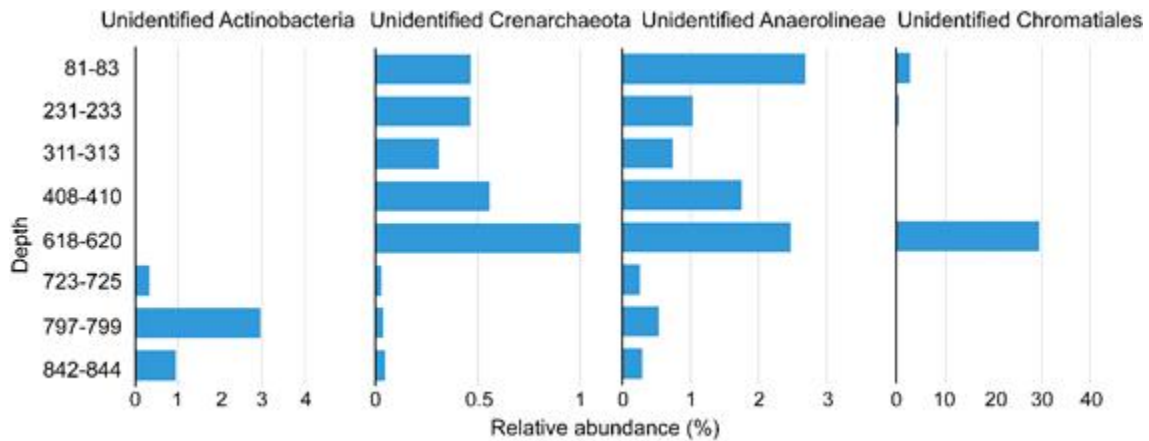


그림 23. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 깊이 별 박테리아의 상대적 함량 분석.

- 극지연구소 생명과학연구부의 공동 연구를 통해 그림 22, 23와 같이 깊이별로 많은 함량을 보이는 종들에 대해 각각의 종들에 대한 분석을 실시하였다. 전반적으로 퇴적상 3에서 퇴적상 2로 변하는 약 680 cm 기준으로 박테리아가 새롭게 나타나거나, 많이 나타나던 박테리아가 나타나지 않는 급격한 변화를 관찰 할 수 있다. 이는 이 깊이에서 퇴적 환경이 급격하게 변한다는 것을 확인 할 수 있다.
- 그림 22의 Bacillariophyta는 돌말류 또는 규조류로 해양성 독립영양 원생생물로 식물성 플랑크톤이다. 주로 광합성을 이용해 에너지를 확보하여 생장하기 때문에 대양에 많이 분포하는 1차 생산성과 연관이 있다. 돌말류는

723-884 cm 구간에서는 출현하지 않은 반면, 618 cm부터 돌말류가 급격하게 증가하는 것을 관찰 할 수 있다. 실제로 공동연구팀의 현미경 관찰 결과에서도 퇴적상 3에 해당하는 구간에서는 규조류가 관찰되지 않았다. 이를 통해 돌말류 혹은 규조류가 급격하게 증가하는 618 cm 구간부터는 광합성이 가능한 퇴적 환경이었다는 것을 간접적으로 확인 할 수 있었고, 그 하부 구간의 경우에는 광합성이 어려운 빛이 차단된 환경임을 유추할 수가 있다.

- Mariprofundus에는 *Mariprofundus ferrooxydans* 라는 철 산화 박테리아가 속해있다 (Emerson et al., 2007). 이 박테리아의 경우 2가 철을 산화하여 에너지를 얻는 박테리아로 퇴적상 3에 해당하는 723 ~ 884 cm 구간에서 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 특히 퇴적상 3의 상부로 갈수록 높은 함량을 보이는데 이는 가장 하부의 구간보다 점점 빙봉이 후퇴하면서 oxygenation 됨에 따라 상부가 비교적 oxic한 환경으로 변하는 과정에서 철 산화 박테리아의 활동성이 증가하는 것으로 보인다.
- Pibocella는 일반적으로 호기성 박테리아로 알려져 있고 chemo-organotroph하는 박테리아로 깊이 별로 관찰 했을 때 퇴적상이 급격하게 변하는 680 cm 위쪽부터 나타나는 것을 관찰할 수 있다.
- 모든 박테리아들에 대해 명확한 종 분석은 진행되는 중이기 때문에 퇴적상 3의 환경에서 reducing condition을 지시할만한 박테리아는 아직 관찰되지 않았다. 하지만 퇴적환경이 명확하게 변한다는 점, 빙봉의 후퇴에 대한 흔적들이 관찰된다는 점들을 통해 빙하기 환경에는 이 지역이 빙저호와 유사한 빙봉에 의해 외부와 차단된 환경이었을 것으로 유추해 볼 수 있다. 더 나아가 환원 환경을 지시할 수 있는 철 환원 박테리아, 황산염 환원 박테리아 등의 종 분석을 진행하고 있다 (그림 23).

5) TEM과 SAED pattern을 이용하여 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석

- BS17-GC18 코어의 퇴적상 분석, 광물학적 분석, 미생물 분석을 통해 빙하기로 추정되는 퇴적상 3의 부분에서는 녹니석의 함량이 높고 빙봉이 후퇴하기 시작하는 퇴적상 2, 퇴적상 1 시기에는 간빙기로 일라이트의 함량이 높게 분포하는 것을 확인하였다. 이를 통해 빙하기-간빙기에 걸쳐 나타난 기후 변화에 따른 빙봉의 유무에 의해 공급되는 점토광물의 소스가 달라졌

다는 것을 예상해 볼 수 있었다.

- 위의 결과를 바탕으로 퇴적 환경의 변화를 clay size에서 지시해 줄 수 있는 illite crystallinity의 변화를 깊이에 따라 분석해 보았다 (Jung et al., 2019) (그림 24). Illite crystallinity (IC)는 XRD 상의 일라이트 픽에서 반치전폭 (half-height width)를 측정하여 얻게 되는데, 회절 분석으로 얻은 패턴의 I_r 의 너비는 일라이트의 결정의 두께와 관련이 있다. 일반적으로 얇은 packet은 broad한 픽을 보이고, 두꺼운 packet은 더 narrow한 픽을 보인다. 따라서 두꺼운 packet과 얇은 packet의 간섭에 의해 픽이 좁고 넓어지는 차이가 나타난다. 그래서 그림 17, 18, 19의 airdry의 그래프를 보면 IC가 나쁜 빙하기, IC가 좋아지는 빙하기에서 간빙기로 전이하는 구간, IC가 좋게 나타나는 간빙기 상부부분으로 크게 3개의 부분으로 구분할 수 있다. 일반적으로 남극해의 경우 open system이기 때문에 단순히 한 가지 요인에 의해 영향을 받았다고 할 수는 없지만 여러 원인에 의해 IC가 변했을 것이라고 예상할 수 있다. 먼저 빙하기와 간빙기 부분의 차이를 보면, 퇴적상 3인 빙하기에서의 시료들의 IC가 더 나쁘게 나타나고 있다. 일반적으로 빙하기에 확장된 빙하에 의해 육지로부터 운반되어 퇴적된 육성기원 일라이트는 low-order 일라이트이기 때문에 간빙기에 해양으로부터 퇴적된 일라이트보다 IC가 좋게 나타난다. 하지만 GC18 코어에서는 빙하기 안에서 일부 구간에서 IC 값이 높고 점차 낮아지는 양상을 관찰 할 수 있다. 이러한 원인은 퇴적환경 변화에 따른 oxic, anoxic condition의 변화, 퇴적 속도 차이에 의한 residence time의 차이, 미생물에 의한 mineral alteration 정도의 차이가 있을거라 예상된다. 그래서 이러한 원인에 대해 자세히 알아보기 위해 TEM으로 일라이트의 두께를 직접 측정하고, 그 결과를 통계 분석하여 crystal growth mechanism을 유추하고 있으며, 깊이에 따른 미생물 군집과 비교하여 IC와 상관관계를 알아보려고 한다.

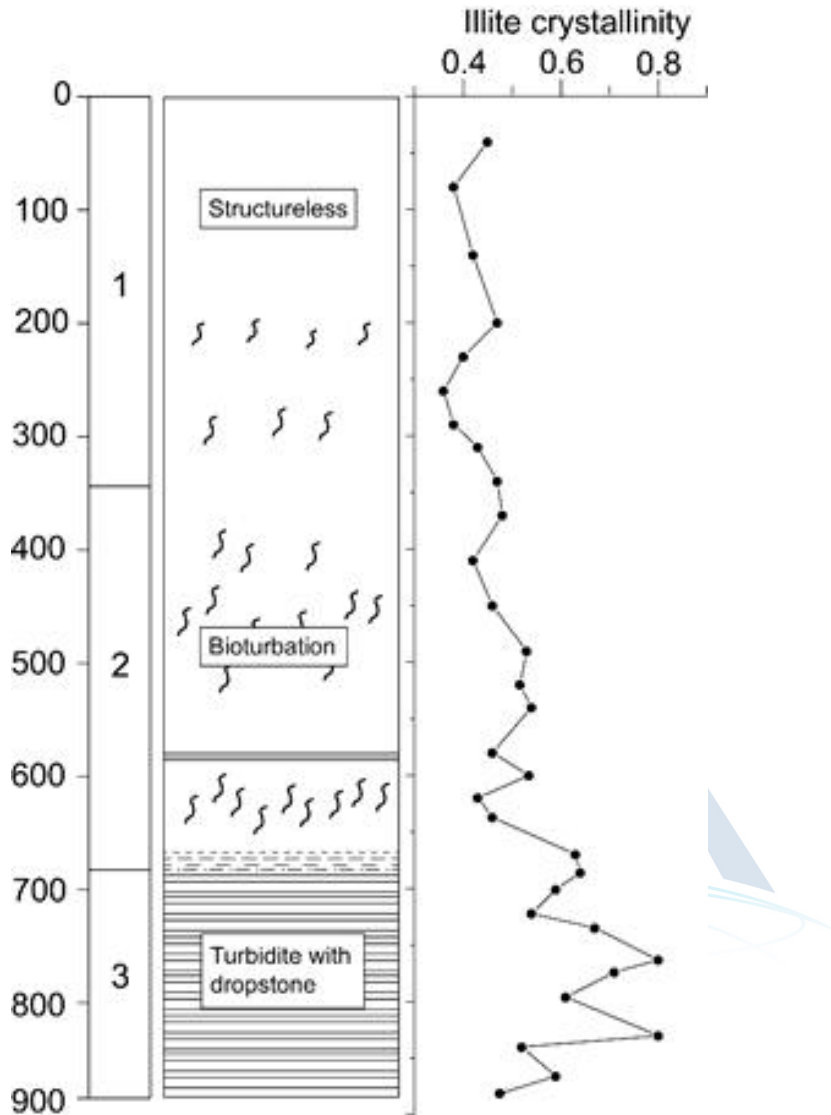


그림 24. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 퇴적상과 illite crystallinity (IC)의 측정 결과.

- 앞선 BS17-GC18 코어의 깊이별 점토광물 분석에 있어서 스�멕타이트의 경우 빙하기와 간빙기에 걸쳐서 함량 변화가 크게 나타나지 않았다. 하지만 기존의 연구들을 통해 같은 스�멕타이트여도 생성된 기원지의 근원암에 따라 서로 다른 화학성분을 가진 스�멕타이트가 형성 될 수 있다 (Weaver and Pollard, 1973). 스�멕타이트는 일반적으로 화산성 물질이나 화성암의 화학적 풍화작용에 의해 생성되면서 Fe이 풍부한 논트로나이트, Mg이 풍부한 사포나이트, Al이 풍부한 몬모릴로나이트-베이델라이트로 화학 성분에

따라 구분될 수 있다. 실제로 이러한 특징을 이용하여 퇴적물 기원지를 구분하는데 많이 쓰이는 방법인 점토광물의 함량비를 이용한 퇴적물 기원지 분석으로 한계가 있는 지점들에 대해 스�멕타이트의 화학성분을 이용해 기원지를 구분할 수 있다 (Park et al., 2019).

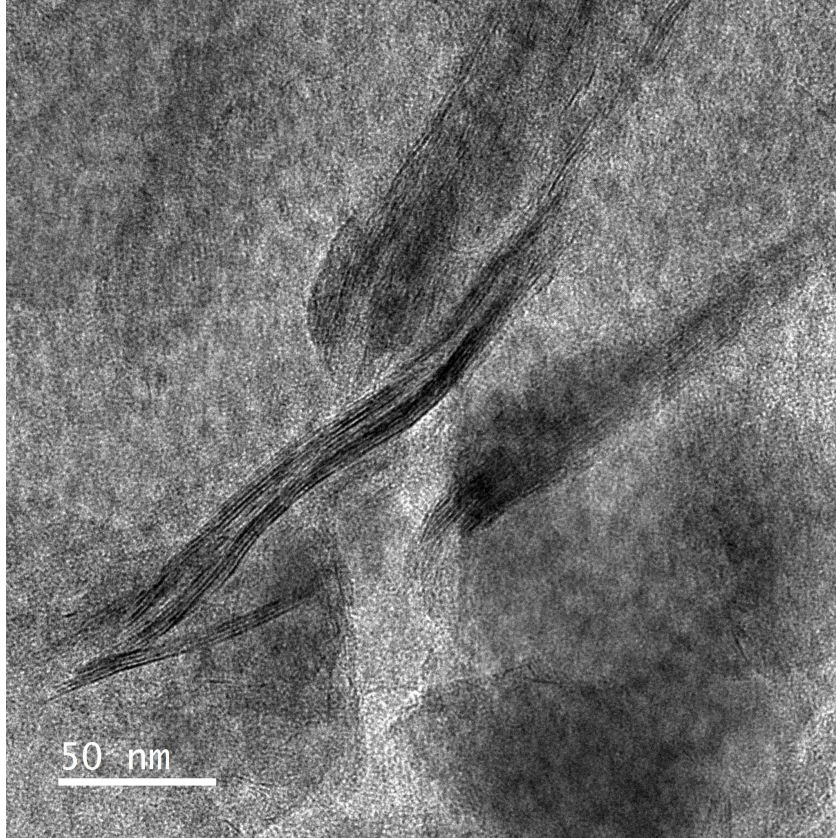


그림 25. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 빙하기 701 cm의 대표적인 스�멕타이트 TEM 이미지.

- 본 연구가 수행된 크리스탈 사운드의 경우 벨링스하우젠 해에 포함된 지역으로 이 지역으로 스�멕타이트가 공급될 수 있는 퇴적물 기원지로는 남극 반도 북단에 위치한 사우스 셰틀랜드 제도나 웨델 해로부터 스�멕타이트가 공급될 가능성이 있다. 그래서 이를 확인하기 위해 TEM을 이용하여 빙하기의 701 cm와 간빙기의 80 cm 두 시료에 대해 TEM 분석을 실시하였다.
- 스�멕타이트를 TEM에서 구분하기 위해 시료에 대한 전처리를 진행하였다. 스�멕타이트는 수화 점토광물로 TEM에서 강한 빔에 의해 층간에 물이 기화되어 interlayer가 붕괴될 수 있다. 그러면 일라이트와 구분하기 어렵게

때문에 이러한 현상을 방지해야 한다. 그래서 LR White resin을 층간에 스며들게 함으로써 층간 붕괴를 막아준다. 전처리를 완료한 시료는 TEM 분석 과정에서 �멕타이트의 구분을 가능하게 한다. 먼저 비교적 구불구불한 모양을 띄며 흐릿한 SAED 패턴을 보이고 11 ~ 13 Å의 lattice spacing을 보이는 광물들을 선정하고 (그림 25, 26), TEM-EDS를 측정한다. 측정하여 획득한 값들은 weight percent로써 각각의 값들에 대해 �멕타이트의 구조식으로 환산하여 팔면체 안의 Al, Mg, Fe의 값들의 상대적인 비율을 구한다. 구한 값들은 삼각 도표안에 3개의 축으로 하여 구분하였다 (그림 27).

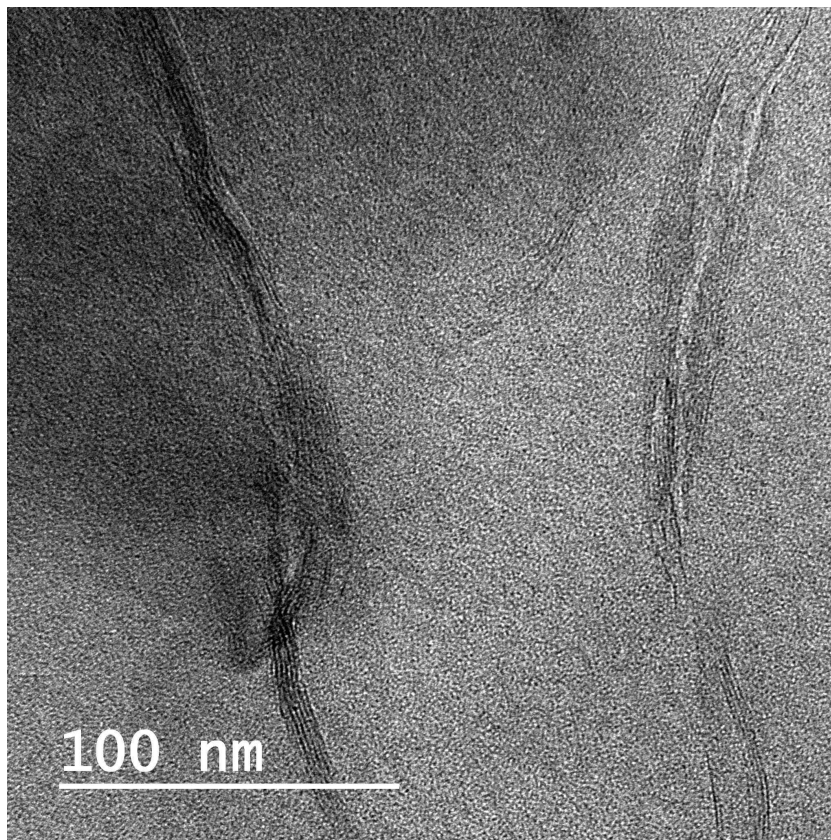


그림 26. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 간빙기 80 cm의 대표적인 �멕타이트 TEM 이미지.

- 빙하기의 �멕타이트는 삼각 도표안에서 검은 점으로 표시하였다 (그림 27). 빙하기의 �멕타이트의 화학 성분의 특징으로는 높은 Mg, Fe의 함량을 보이고 낮은 Al의 비율을 보인다. 낮은 Al의 �멕타이트는 남극반도를 이루고 있는 화산암의 풍화작용으로 생성될 수 있는 대표적인 �멕타이트

이다 (Weaver and Pollard, 1973). 또한 남극 반도의 post-subduction으로 형성된 알칼리성 현무암의 경우 ferro-magnesian minerals을 풍부하게 함유하고 있기 때문에 풍화 작용으로 Mg, Fe이 높은 스멕타이트가 형성될 수 있다 (Smellie, 1999). 형성된 스멕타이트는 빙하기의 빙상의 움직임에 의한 운반 및 재퇴적 작용으로 시료가 위치한 크리스탈 사운드로 공급된 것으로 보인다.

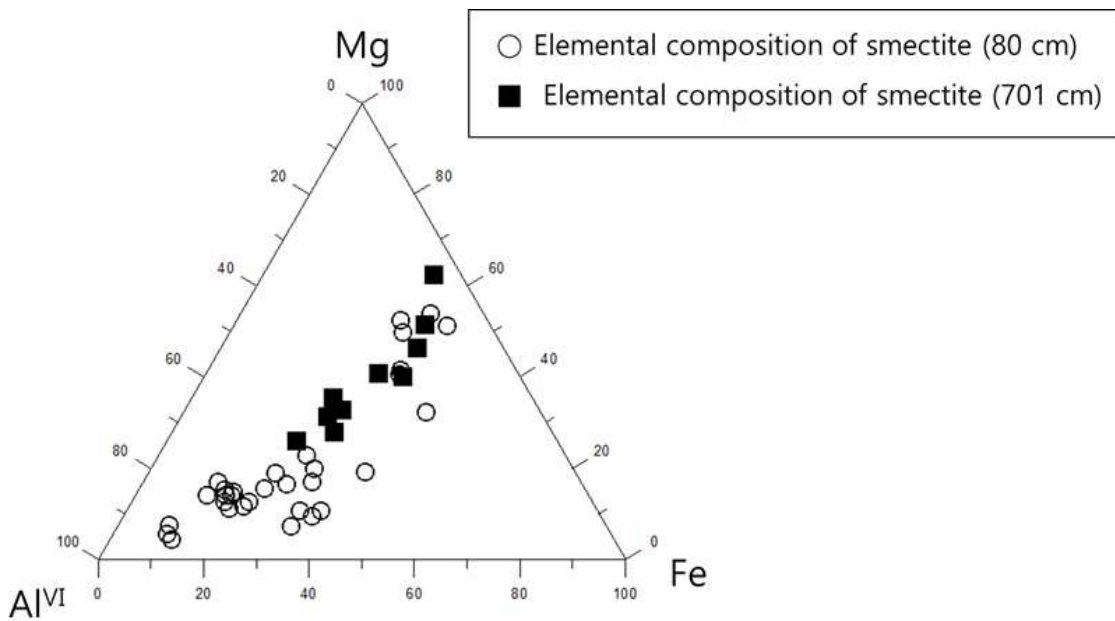


그림 27. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 빙하기-간빙기에 따른 스멕타이트의 화학성분 분포도.

- 간빙기의 스멕타이트는 흰색 원으로 표기하였다 (그림 27). 간빙기의 경우 빙봉이 후퇴하면서 공해 환경이 됨에 따라 외부로부터 다양한 기원지의 퇴적물들이 공급될 수 있다. 간빙기의 스멕타이트의 화학 성분을 보면 Al의 함량이 매우 넓은 범위로 분포하는 것을 관찰 할 수 있다. 약 10 %의 낮은 비율부터 90 %의 높은 비율까지 나타나는데 이를 통해 간빙기 시기에 빙하기에서 공급되던 기원지 외에 다른 Al이 풍부한 스멕타이트를 함유한 퇴적물들이 공급되었음을 유추 할 수 있다. 기존의 빙하기에 공급되던 Al이 부족한 스멕타이트는 조류나 바람에 의해 형성된 해류에 의해 공급될 수 있다. 이와 함께 Al이 풍부한 스멕타이트는 크리스탈 사운드 근처에 스멕타

이트가 풍부한 기원지로 알려진 곳으로부터 공급될 가능성이 있다. 하나는 남극 반도 북쪽의 사우스 셰틀랜드 제도로 화산섬으로써 화산암으로부터 형성된 스�멕타이트가 풍부하게 존재하는 곳으로 매우 높은 스�멕타이트의 함량을 보유하고 있다 (Jeong and Yoon, 2001). 다른 Al이 풍부한 스�멕타이트의 기원지는 웨델 해 동쪽으로, 기존의 연구를 통해 벨링스하우젠 해와 웨델 해 사이에 있는 드레이크 해협에서의 퇴적물 기원지 연구를 통해 간빙기에 Al이 풍부한 스�멕타이트가 웨델해로부터 공급되었음이 제시 되었다 (Park et al., 2019). 본 연구에서도 간빙기에 빙붕이 후퇴하면서 웨델 해로부터 반시계 방향으로 흐르는 Weddell Sea Deep Water나 Warm Deep water에 의해 Al이 풍부한 스�멕타이트인 몬모릴로나이트가 함유된 퇴적물이 공급된 것으로 보인다 (Souza et al., 2014, Park et al., 2019). 이를 통해 GC18 코어가 빙하기-간빙기로 변하면서 빙붕의 움직임에 의해 퇴적 환경이 확실히 변하였고 특히 빙하기에는 외부에서의 퇴적물 공급이 제한된 반면, 간빙기에는 외부로부터 퇴적물들이 충분히 유입될 수 있는 환경이었음을 알 수 있었다.

- BS17-GC18 코어는 퇴적상, 광물학적 분석, 미생물학적 분석, 지화학적 분석을 통해 퇴적상 3에 해당하는 하부 686 cm 이하의 구간이 외부로부터 비교적 빙붕에 의해 덮혀있는 분지 형태의 호수로 존재할 수 있는 가능성을 보였다. 이는 과거 빙하기에 빙저호로 존재할 수 있는 점을 시사하는데, 빙저호는 남극의 두꺼운 빙상 아래에 존재하는 호수으로써 저온, 낮은 영양분, 빛이 없고 산소가 상대적으로 적은 환경으로 남극 내에서도 매우 극한 환경이라고 할 수 있다. 하지만 최근 로스 해 근처의 윌란스 빙저호 탐사를 통해 빙저호의 퇴적물과 물을 분석 했을 때, 다양한 수의 박테리아들이 존재하는 것으로 밝혀졌다 (Christner et al., 2014). 박테리아는 퇴적물 내의 Fe, N, S를 산화 환원함으로써 무기 탄소를 유기탄소로 바꾸는 탄소 고정에 사용하여 에너지를 얻는다. 하지만, 이러한 Fe의 소스로써 실제로 어떤 광물들이 사용되는지에 대해서는 연구가 진행된 바 없다. 그래서 크리스탈 사운드의 과거 빙저호 환경으로 추정되는 퇴적물을 미생물 배양 실험함으로써 Fe의 환원 환경을 극대화하여 Fe 함유 광물들이 특히 점토광물이 미생물과 어떤 반응을 하는지 관찰하고 반응에 대한 철 환원 정도, 2차 광물

의 생성, mineral alteration에 대해 관찰해 보고자 한다. 이러한 결과를 토대로 실제 빙저호에서의 Fe-liberation을 확인함으로써 남극 해에서의 철 공급처로서 빙저호의 역할에 대해 규명해보고자 한다. 이를 위한 퇴적물의 미생물 배양 실험을 진행하였다.

Fe source	Bulk sediment (iron bearing mineral, clay mineral)	
Carbon source	Lactate (electron donor)	
Temperature	4 °C	
Atmosphere	Experiment, Control : Anaerobic (H ₂ /N ₂ mix: 3~5% H ₂)	
Concentration	Bulk sediment	pH
	12g/L	7

표 2. 빙저호 추정 퇴적물과 미생물 간의 반응에 의한 실험 조건

- 빙하기의 퇴적물은 대부분 터비다이트층으로 이루어져 있다. 기존 빙저호 연구를 통해 빙저호 퇴적물에서 미생물의 활동이 가장 활발한 구간은 빙저호의 물과 퇴적물이 맞닿는 표면 구간이었다 (Christner et al., 2014). 그래서 GC18 코어에서도 퇴적당시의 표면인 터비타이트층에서 가장 작은 입자가 나타나는 층에서 배양 실험에 대한 시료를 획득하였고, 이를 비교하기 위해 그 아래쪽의 큰 입자를 지닌 퇴적물도 배양 실험을 진행하였다. 퇴적물 배양은 M1 medium을 넣어서 박테리아의 반응을 촉진하였으며 철 환원능에 대해 주로 관찰하기 위해 무산소 조건을 유지하기 위해 질소 퍼징을 실시하고, 빛에 의한 반응을 방지하기 위해 알루미늄 호일로 배양 병을 감싸서 실험을 진행하였다. carbon source는 lactate를 이용하였고 저온 조건을 유지하기 위해 4도에서 배양을 진행하였다. 미생물 반응에 대해 확인하기 위해 대조군으로는 미생물의 활동을 억제하기 위해 glutaraldehyde를 넣어주었다. 타임포인트를 설정하여 시료를 채취한 뒤 철 환원능을 측정하기 위해 1,10 phenanthroline method를 이용하여 측정하였다.

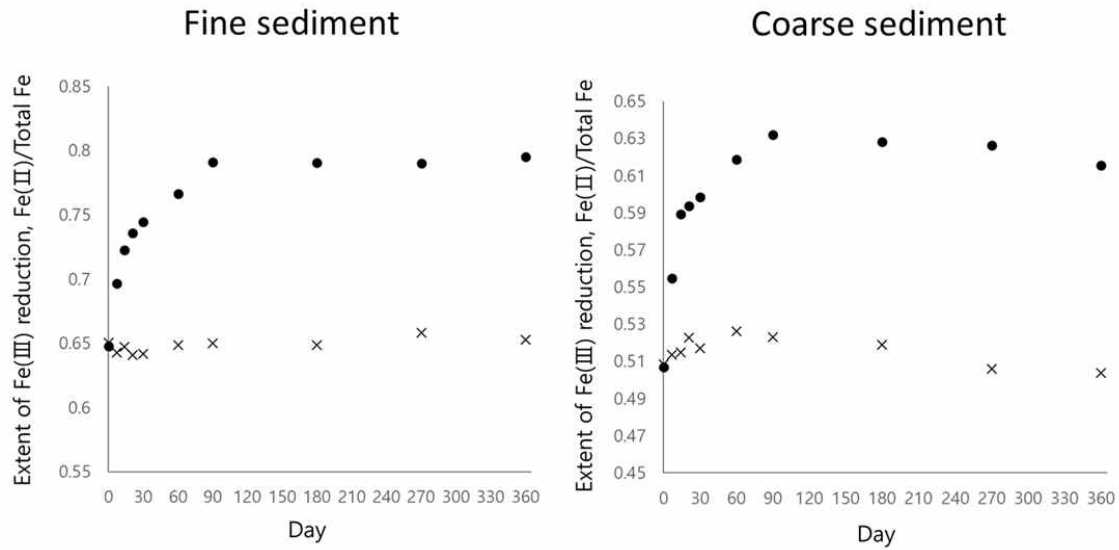


그림 28. 남극 반도 크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 빙저호 추정 퇴적물에 대한 세립질 퇴적물과 조립질 퇴적물의 배치 실험에 대한 철 환원능 결과.

- 빙저호 추정 퇴적물에 대해서 1년까지 반응을 진행했을 때 철 환원능에 대해서 도시하였다 (그림 28). 초기 시료의 철 환원 정도는 세립질 퇴적물의 경우 약 65 %, 조립질 퇴적물의 경우 약 51 %인 반면 3개월이 되었을 때 철 환원능은 79 %, 64 %로 13 - 14 % 까지 증가하는 것을 관찰하였다. 이후에는 큰 변동없이 비슷한 수준의 값을 유지하였다. 이 결과를 토대로 퇴적물 내에서 철 환원을 이용하는 박테리아가 활동한다는 점을 확인하였다. 추 후 박테리아에 의한 철 환원 반응으로 영향을 받은 철 함유 광물에 대해 SEM과 TEM을 이용하여 mineral alteration의 흔적, 2차 광물의 형성, 철 함유 광물이나 점토 광물 내의 구조내 철의 산화수 변화 등에 대해 분석을 진행할 예정이다. 또한 배치 실험에서 활동성을 나타낸 박테리아에 대해 타임포인트별 미생물 군집을 분석하여 미생물이 어떤 컨소시엄을 통해 산화 환원 반응을 진행하는지 밝히고자 한다. 배치 실험에 대한 광물학적 분석들과 함께 미생물 컨소시엄에 대한 결과는 과거 빙저호라는 극한 환경에서 미생물들이 어떻게 생장을 유지해 나갔는지 mechanism을 밝히는 연구가 될 것이다.

6) 결빙시 철 함유 점토 광물과 미생물 간의 반응에 의한 광물 변이 분석을 위한 batch 실험

- 현재까지 알려진 대표적인 철의 소스로, 가장 많은 양을 차지하는 것은 대기 중으로 날아와 퇴적되는 Atmospheric deposition으로 공급되는 dust 내의 철과 해저퇴적물로부터 녹아 나와 올라오는 Upwelling supply of dissolved Fe 가 있다. 이러한 소스들의 총합을 계산해보면, 식물성 플랑크톤에 의한 전체 철의 필요양보다 10퍼센트 정도가 부족하기 때문에 남극해 지역 Fe fertilization의 새로운 소스로써 가능성 제시하고자 남극 환경에서 가장 많이 존재하는 얼음 내에서 결빙시 microbe와 광화학 반응에 의한 Fe-liberation을 확인하기 위한 실험조건에 대한 preliminary 연구를 진행하였다. 남극 지역에서의 유기적/무기적 과정에 의한 산화철과 점토광물의 철 용출의 반응은 빙권 지역의 낮은 온도와 동결 조건에서 연구된 바가 없기 때문에 본 연구를 수행하였다.

Fe source	Nontronite (NAu-2; electron acceptor)	
Carbon source	Lactate (electron donor)	
Temperature	From 15 °C to 0 °C	
Atmosphere	Experiment, Control : Anaerobic (H ₂ /N ₂ mix: 3~5% H ₂)	
Concentration	Nontronite	pH
	5 g/L	7

표 3. 결빙시 microbe와 nontronite (NAu-2) 간의 광화학 반응에 의한 실험 조건

- 위의 내용을 바탕으로 1차 년도에서 여러 가지 대기 중의 dust에 포함된 Fe-oxide 중 maghemite (γ -Fe₂O₃)를 전자 수용체로 하여 Fe-liberation에 대한 실험을 진행하였다. 1차 년도의 결과를 통해 maghemite는 농도가 높을수록 미생물 반응에 의한 철 환원능이 더 뛰어난 것을 확인하였다. 또한 철 함유 점토광물인 논트로나이트 (NAu-2)를 이용하여 결빙시 미생물에 의한 철 환원이 가능한지에 대한 연구가 없었기 때문에 본 실험에 들어가기에 앞서 NAu-2에 대한 온도를 15도부터 4도, 0도까지 낮춰가며 실험을 진행하였다. 이 결과를 바탕으로 최종적으로는 결빙이 진행되는 단계별로 미생물에 의한 Fe reduction을 확인하기 위해 15도부터 -10도까지 온도를 낮춰가며 반응을 진행하고자 한다. 기존의 결빙시 Fe reduction되는 반응으

로는 abiotic process로 물 분자가 액체 상태에서 고체상태로 변하면서 물 분자 사이로 Fe(III), H⁺ 등의 이온들이 모여서 고농도의 상태로 변한다. 이 과정에서 수소이온에 의한 환원 반응을 통해 철 이온이 환원되는데 이를 'Freezing concentration effect'라 하고 실험실 조건에서 반응이 일어나는 것을 확인하였다 (Kim et al., 2010; Jeong et al., 2012). 하지만 본 실험에서는 abiotic process 보다는 biotic process에 초점을 맞추었기 때문에 15도 부터 결빙이 되는 과정까지 온도가 낮아지는 조건에서도 미생물에 의해 철 환원 반응이 일어나는지 관찰하고자 한다.

- 실제로 1,10 phenanthroline으로 각각의 time point 별로 샘플링한 시료에 대해 철 환원 정도를 구하고 이를 이용해 2가 철의 함량 변화를 계산하였다. *S. vesiculosa*의 경우 약 $\sim 3.3 \times 10^7$ cells/ml의 농도에 박테리아를 실험에 철 환원 박테리아로 넣었다. 미생물 반응에 의한 철 환원을 확인하기 위해 대조군에는 미생물을 넣지 않았다. 타임포인트 별로 48시간씩 반응을 시키고 온도를 15도, 4도, 0도까지 낮춰가며 반응을 진행하였다. 시간이 지날수록 미생물을 넣어준 병의 색깔이 짙은 녹색으로 변하는 것을 관찰 할 수 있다. 특히 초기 시작하고 15도에서 48시간 반응을 실시 할 때 가장 큰 색의 변화를 관찰 할 수 있다. 2가철의 함량도 15도에서 48시간 반응하는 동안 약 10 %가 증가하고 4도로 변하면서 약 5 %가 증가, 0도로 낮아지는 과정에서도 약 4 %가 증가하였다. 이는 호냉성 철 환원 박테리아가 온도가 낮아짐에도 불구하고 지속적인 철 환원능을 보여주고 있음을 시사한다. 특히 0도까지 떨어짐에도 불구하고 2가철의 함량이 지속적으로 증가하는 것을 통해 결빙시까지 온도가 떨어지더라도 충분히 미생물이 광물로부터 철 환원 반응을 일으킬 수 있음을 알 수 있었다. 위의 결과를 바탕으로 미생물에 의한 철 환원에 의한 광물의 구조적 변이, 2차 광물의 형성, 광물의 구조내 철의 산화수 변화에 대해 SEM과 TEM을 이용하여 분석을 지속하고자 한다 (그림 29).

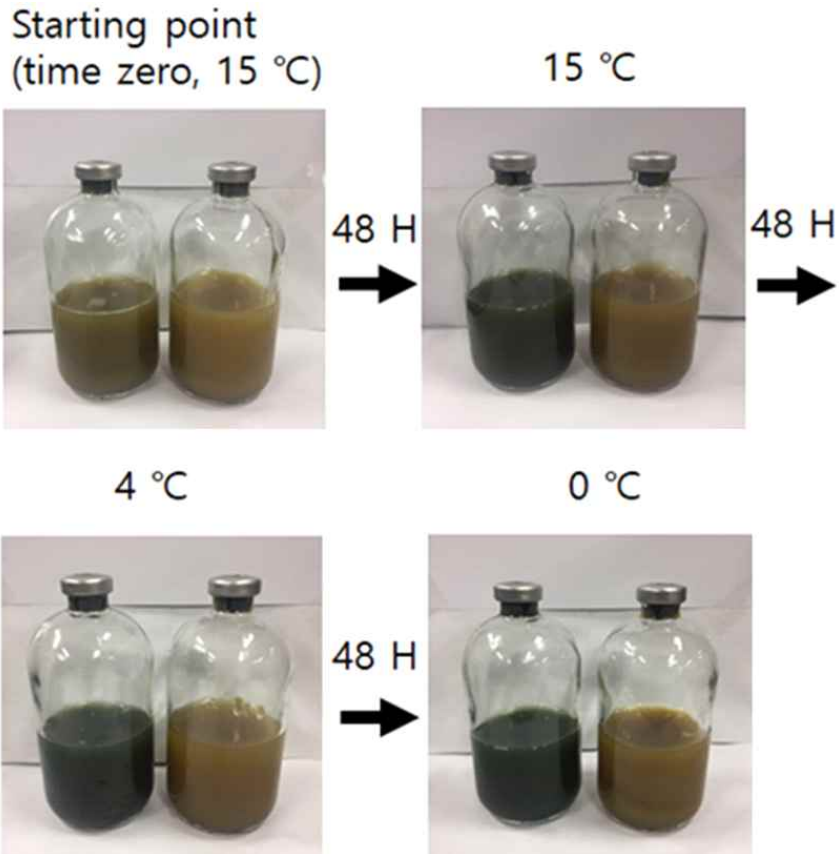


그림 29. 결빙시 철 함유 점토광물(nontronite)-미생물 간의 농도별 batch 실험 결과 색 변화.

극지연구소

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

4-1. 연구개발 목표 달성도

가. 연구성과 (정량적 성과)

- 계획 대비 실적

(계획(건수)/대비(건수))

구분		계획					
		국외			국내		
논문	SCI	기타	소계	SCI	기타	소계	
	1/3	/	/	/	/2	/	
	국외			국내			
Proceeding		학회발표 /4			/		
단행본(저서)		/					
특허		국외			국내		
	출원	/			/		
	등록	/			/		
기술실시계약		/					
세미나개최		/					
인터넷사이트 개설		/					
기타사항		/					

● 학술대회 발표 성과

발표일	논문명/특허명/기타	저자	학술대회명	국내외구분
2019.07.24	Biogeochemical modification of clay minerals in Antarctic region: Implications	Jinwook Kim ^{1*}	ISAES 2019	국제
2019.07.25	Identification of elemental composition of smectite tracing the sediment provenance in the glacial-interglacial period: Bellingshausen Sea	Young Kyu Park ^{1*} , Jaewoo Jung, Kee Hwan Lee, Jaeil Lee, Claus-Dieter Hillenbrand, Sung-Han Kim, Kyu-cheul Yoo, Jinwook Kim ¹⁺ ,	ISAES 2019	국제
2019.07.25	Microbial alteration of Fe-bearing minerals in freezing condition	Jaewoo Jung ^{1*} , Kitae Kim, Young Kyu Park, Jaeil Lee, Kyu-Cheul Yoo, Hanbeom Park, Jinwook Kim ^{1*}	ISAES 2019	국제
2019.07.25	Characteristics of clay minerals deposited in the sediment: Larsen Ice Shelf Embayment, Antarctica	Kee Hwan Lee ^{1*} , Kyu-Cheul Yoo, Jaewoo Jung, Young Kyu Park, Jaeil Lee, Jinwook Kim ^{1*}	ISAES 2019	국제
2019.05.30	Identification of sediment provenance using elemental composition of smectite during the glacial-interglacial period: Example of sediments in the Bellingshausen Sea and Drake Passage	Young Kyu Park ^{1*} , Jaeil Lee, Jaewoo Jung, Claus-Dieter Hillenbrand, Kyu-cheul	한국광물학회	국내

		Yoo, Jinwook Kim ¹⁺ ,		
2019.05.14	Elemental composition of smectite tracing the sediment provenance in the southern Drake Passage and Bellingshausen Sea during glacial-interglacial period	Young Kyu Park ^{1*} , Jaewoo Jung, Jaeil Lee, Claus-Dieter Hillenbrand, Kyu-Cheul Yoo and Jinwook Kim ^{1*}	극지 심포지움	국내
2019.10.24	Preliminary result of mineralogical and biogeochemical evidence for the paleo-subglacial lake: Crystal Sound, Antarctica	Young Kyu Park ^{1*} , Kyu-Cheul Yoo, Chung Yeon Hwang, Jaewoo Jung, Kee Hwan Lee, Jae Il Lee, Jinwook Kim ^{1*}	추계 지질학회	국내
2019.07.04	Preliminary result: Investigation of microbe-mineral interaction in the paleo-Subglacial lake: Crystal Sound, Antarctica	Young Kyu Park ^{1*} , Jaewoo Jung, Kee Hwan Lee, Kyu-Cheul Yoo, Chung Yeon Hwang, Jae Il Lee, Jinwook Kim ^{1*}	KGU 연례학술대회	국내

- 학술논문 발표 성과
- Jung, Jaewoo, et al. "Microbial Fe (III) reduction as a potential iron source from Holocene sediments beneath Larsen Ice Shelf." *Nature Communications* 10.1 (2019): 1-10.



ARTICLE

<https://doi.org/10.1038/s41467-019-13741-x>

OPEN

Microbial Fe(III) reduction as a potential iron source from Holocene sediments beneath Larsen Ice Shelf

Jaewoo Jung¹, Kyu-Cheul Yoo², Brad E. Rosenheim³, Tim M. Conway^{3,4}, Jae Il Lee², Ho Il Yoon², Chung Yeon Hwang², Kiho Yang¹, Christina Subt³ & Jinwook Kim^{1*}

Recent recession of the Larsen Ice Shelf C has revealed microbial alterations of illite in marine sediments, a process typically thought to occur during low-grade metamorphism. *In situ* breakdown of illite provides a previously-unobserved pathway for the release of dissolved Fe²⁺ to porewaters, thus enhancing clay-rich Antarctic sub-ice shelf sediments as an important source of Fe to Fe-limited surface Southern Ocean waters during ice shelf retreat after the Last Glacial Maximum. When sediments are underneath the ice shelf, Fe²⁺ from microbial reductive dissolution of illite/Fe-oxides may be exported to the water column. However, the initiation of an oxygenated, bioturbated sediment under receding ice shelves may oxidize Fe within surface porewaters, decreasing dissolved Fe²⁺ export to the ocean. Thus, we identify another ice-sheet feedback intimately tied to iron biogeochemistry during climate transitions. Further constraints on the geographical extent of this process will impact our understanding of iron-carbon feedbacks during major deglaciations.

¹Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 03722, Korea. ²Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Korea. ³College of Marine Science, University of South Florida, Tampa, FL, USA. ⁴School of Geosciences, University of South Florida, Tampa, FL, USA. *email: jimwook@yonsei.ac.kr

- Jung, Jaewoo, et al. "Clay Mineralogical Characteristics of Sediments Deposited during the Late Quaternary in the Larsen Ice Shelf B Embayment, Antarctica." *Minerals* 9.3 (2019): 153.



Article

Clay Mineralogical Characteristics of Sediments Deposited during the Late Quaternary in the Larsen Ice Shelf B Embayment, Antarctica

Jaewoo Jung ¹, Kyu-Cheul Yoo ², Kee-Hwan Lee ¹, Young Kyu Park ¹, Jae Il Lee ² and Jinwook Kim ^{1,*}

¹ Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 03722, Korea; jaewoojung87@yonsei.ac.kr (J.J.); khlee1009@yonsei.ac.kr (K.-H.L.); pyk125@yonsei.ac.kr (Y.K.P.)

² Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Korea; kcyoo@kopri.re.kr (K.-C.Y.); leeji@kopri.re.kr (J.I.L.)

* Correspondence: jinwook@yonsei.ac.kr; Tel: +82-2-2123-5668

Received: 21 January 2019; Accepted: 27 February 2019; Published: 3 March 2019



Abstract: Variations in grain size, clay mineral composition, and stable isotopes ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) are closely linked to the sedimentary facies that reflect mineralogical and geochemical modification during the retreat and advance of the Larsen ice shelf. A whole round core of marine sediment (EAP13-GC17, 236 cm below the sea floor) was collected on the northwestern Larsen B embayment of the Antarctic Peninsula during a marine geological expedition (the ARA13 Cruise Expedition by the Korea Polar Research Institute, 2013). Four sedimentary facies (U1–U4) were clearly distinguishable: bioturbated sandy mud (open marine, U1), laminated sandy mud (sub-floating ice shelf, U2), sandy clay aggregates (deglacial, U3), and muddy diamictons (sub-glacial, U4), as well as interbedded silty. Clay minerals, including smectite, chlorite, illite, and kaolinite, were detected throughout the core. An increase in the clay mineral ratio of smectite/(illite + chlorite) was clearly observed in the open marine condition, which was strongly indicated by both a heavier isotopic composition of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ (−24.4‰ and 4.3‰, respectively), and an abrupt increase in ^{10}Be concentration (~30 times). An increase in the average values of the crystal packet thickness of illite (~1.5 times) in U1 also indicated sediments transported in open marine conditions. Based on the clay mineral composition in U1, the sediments are likely to have been transported from the Weddell Sea. The clay mineralogical assessments conducted in this region have significant implications for our understanding of paleodepositional environments.

Keywords: Larsen ice shelf; clay mineral composition; smectite/illite; isotopic composition; ice shelf retreat and advance

1. Introduction

Mineralogical and geochemical investigations of marine sediments from the continental shelf around Antarctica provide significant clues about the stability and proximity of ice shelves, and the influx of terrigenous sediments and meltwater during deglaciation [1,2]. Since clay minerals are major components of continental shelf sediments [3], their assemblages [4–6], structures [7], and chemistry [8,9] are frequently used to determine the paleoceanography and paleoclimatology. Smectite clay minerals, typical of the chemical alteration of mafic igneous rocks in warm and humid climates [10], and structurally defect-rich hydrous minerals [11] are good indicators of sediments provenance from a warm and humid location; in contrast, illite and chlorite result from the physical weathering of metamorphic and sedimentary rocks under cold climate conditions [12]. Variations in clay mineral composition are therefore useful for investigating the provenance and source rock of sediments, particularly in Antarctic environments where secondary mineral alteration is minimal [9,13].

- Park, Young Kyu, et al. "Elemental compositions of smectites reveal detailed sediment provenance changes during glacial and interglacial periods: The Southern Drake Passage and Bellingshausen Sea, Antarctica." *Minerals* 9.5 (2019): 322.



Article

Elemental Compositions of Smectites Reveal Detailed Sediment Provenance Changes during Glacial and Interglacial Periods: The Southern Drake Passage and Bellingshausen Sea, Antarctica

Young Kyu Park¹, Jae Il Lee², Jaewoo Jung¹, Claus-Dieter Hillenbrand³, Kyu-Cheul Yoo² and Jinwook Kim^{1,*}

¹ Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 03722, Korea; pyk125@yonsei.ac.kr (Y.K.P.); jaewoojung87@yonsei.ac.kr (J.J.)

² Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Korea; leeji@kopri.re.kr (J.I.L.); kcyoo@kopri.re.kr (K.-C.Y.)

³ British Antarctic Survey, Cambridge CB3 0ET, UK; hilec@bas.ac.uk

* Correspondence: jinwook@yonsei.ac.kr; Tel.: +82-2-2123-5668

Received: 8 May 2019; Accepted: 24 May 2019; Published: 26 May 2019



Abstract: Variations in clay mineral assemblages have been widely used to understand changes in sediment provenance during glacial and interglacial periods. Smectite clay minerals, however, have a range of various elemental compositions that possibly originated from multiple different sources. Therefore, it might be crucial to distinguish the various types of smectites by analyzing their elemental composition in order to verify the sediment provenances with certainty. This hypothesis was tested for the clay mineral characteristics in a marine sediment core from the southern Drake Passage (GC05-DP02). Rare earth elements and ϵ_{Nd} data had previously indicated that fine grained detritus was supplied from the Weddell Sea to the core site during interglacial periods, when the sediments contained more Al-rich smectite (montmorillonite). Indeed, marine sediments collected close to the Larsen Ice Shelf on the eastern Antarctic Peninsula continental shelf, western Weddell Sea embayment, show more Al-rich smectite components as compared with other possible West Antarctic sources, such as the Ross Sea embayment or King George Island, South Shetland Islands. Furthermore, two types of smectite (Al-rich and Al-poor) were identified in core GC360 from the Bellingshausen Sea shelf, suggesting that during glacial periods some sediment is derived from subglacial erosion of underlying pre-Oligocene sedimentary strata containing predominantly Al-rich montmorillonite. This finding reveals different sources for smectites in sediments deposited at site GC360 during the last glacial period and during the present interglacial that show only minor differences in smectite contents. For the interglacial period, two groups of smectite with a wide range of Al-rich and Mg-Fe-rich were identified, which indicate delivery from two different sources: (1) the detritus with high contents of Mg-Fe-rich smectite supplied from Beethoven Peninsula, southwestern Alexander island and (2) the detritus with higher contents of Al-rich smectite (montmorillonite) possibly derived from the subglacial reworking of pre-Oligocene sedimentary strata. These results demonstrate that the elemental compositions of smectites can be used to differentiate the sources of smectites in marine sediments, which is an important tool to define sediment provenance in detail, when down-core changes observed in clay mineral assemblages are interpreted.

Keywords: West Antarctica; Drake Passage; Bellingshausen Sea; clay mineralogy; elemental composition of smectite; transmission electron microscopy

- 정재우, et al. "남극 로스해 대륙대 플라이스토세 코어 퇴적물의 점토광물학적 특성 및 기원지 연구." 한국광물학회지 32.3 (2019): 163-172.

남극 로스해 대륙대 플라이스토세 코어 퇴적물의 점토광물학적 특성 및 기원지 연구

Clay Mineralogical Characteristics and Origin of Sediments Deposited during the Pleistocene in the Ross Sea, Antarctica

정재우(Jaewoo Jung)¹ · 박영규(Youngkyu Park)¹ · 이기환(Kee-Hwan Lee)¹ ·
홍종용(Jongyong Hong)¹ · 이재일(Jaeil Lee)² · 유규철(Kyu-Cheul Yoo)² ·
이민경(Minkyung Lee)² · 김진욱(Jinwook Kim)^{1*}

¹연세대학교 지구시스템학과

(Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 03722, Korea)

²극지연구소 극지고환경연구부

(Division of Polar Paleoenvironment, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Korea)

요약 : 2015년 극지연구소의 로스해 지질탐사 동안 로스해와 남빙양이 접하는 대륙대 지역에 위치한 정점에서 롱코어(RS15-LC48)를 시추하였다. 이 코어에서 지난 홀로세와 플라이스토세 동안 퇴적된 해양 퇴적물을 구성하는 점토광물의 특성과 기원지를 규명하고자 퇴적물의 퇴적상, 입도분포, 점토광물의 종류와 함량비, 일라이트의 결정도 지수와 화학지수를 분석하였다. 퇴적학적 특성에 따라 크게 네 개의 퇴적단위로 구분되며 이들은 플라이스토세부터 홀로세 시기에 걸친 여러 번의 빙하기/간빙기 퇴적작용에 의해 형성된 것으로 해석된다. 퇴적물은 주로 사질 점토와 실트질 점토, 빙하 해설물들로 구성되어 있다. 깊이에 따른 퇴적물의 입도 분포와 모래 입자의 함량 변화는 대자율의 변화와 매우 유사하게 나타났다. 또한 점토광물의 상대적 함량비는 전체적으로 일라이트(52.7 %)가 가장 우세하고 스멕타이트(27.7 %), 녹니석(11.0 %), 카올리나이트(8.6 %) 순서로 나타났으며, 석영, 사장석 등의 화산 활동 기원 초생광물도 함께 수반되어 나타났다. 일라이트와 녹니석 함량의 증가와 해당 깊이에서의 일라이트 결정도지수와 화학지수는 퇴적물이 주로 로스해 빙상 하부에 위치한 남극 종단산맥의 기반암으로부터 기인했음을 지시한다. 반면 스멕타이트의 함량은 다른 점토광물의 변화 양상과 반대로 나타나는데, 이는 간빙기 동안 로스해 서안의 빅토리아 랜드 연안에서 북동쪽으로 흐르는 해류에 의해 스멕타이트가 추가적으로 운반되어 퇴적된 것으로 사료된다.

주요어 : 남극, 로스해, 해양퇴적물, 점토광물, 일라이트 결정도지수, 일라이트 화학지수

ABSTRACT: A long core (RS15-LC48) was collected at a site in the continental rise between the Southern Ocean and the Ross Sea (Antarctica) during the 2015 Ross Sea Expedition. The mineralogical characteristics and the origin of clay minerals in marine sediments deposited during the Quaternary in the Ross Sea were determined by analyzing sedimentary facies, variations in grain size, sand fraction, mineralogy, clay mineral composition, illite crystallinity, and illite chemical index. Core sediments consisted mostly of sandy clay, silty clay, or ice rafted debris (IRD) and were divided into four sedimentary facies (units 1-4). The variations in grain size distribution and sand content with depth

*Corresponding author: +82-2-2123-5668, E-mail: jinwook@yonsei.ac.kr

- 박영규, et al. "벨링스하우젠 해의 동쪽 대륙붕과 대륙대의 코어의 점토광물을 이용한 기원지 연구." 한국광물학회지 32.3 (2019): 173-184.

벨링스하우젠 해의 동쪽 대륙붕과 대륙대의 코어의 점토광물을 이용한 기원지 연구

Sediment Provenance using Clay Mineral in the Continental Shelf and Rise of the Eastern Bellingshausen Sea, Antarctica

박영규(Young Kyu Park)¹ · 정재우(Jaewoo Jung)¹ · 이기환(Kee-Hwan Lee)¹ · 이만경(Minkyung Lee)² · 김성한(Sunghan Kim)² · 유규철(Kyu-Cheul Yoo)² · 이재일(Jaeil Lee)² · 김진욱(Jinwook Kim)^{1*}

¹연세대학교 지구시스템과학과

(Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 03722, Korea)

²한국해양과학기술원 부설 극지연구소 극지고환경연구부

(Division of Polar Paleoenvironment, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Korea)

요약: 남극 벨링스하우젠 해(Bellingshausen Sea)의 동쪽 대륙붕과 대륙대에 위치한 증력코어(BS17-GC15, BS17-GC04)를 2017년 ANA07D 탐사 동안 획득하였다. 두 코어를 이용하여 벨링스하우젠 해의 해양 퇴적물 내 빙기-간빙기에 따른 점토광물의 분포와 성인을 조사하였다. 두 코어에 대해 퇴적상의 특성을 기술하고, 입도 분석, X선 회절 분석을 실시하여 점토광물의 조성 변화를 관찰하였다. 퇴적학적 특성에 따라 BS17-GC15 코어는 세 개의 퇴적상들로 구분되며 이들은 마지막 빙하기, 전이퇴적상, 간빙기 시기의 퇴적작용에 의해 형성된 것으로 보인다. BS17-GC04 코어는 하부에 빙하기저부 기원의 저탁류의 조합으로 퇴적되는 저탁류 퇴적층과 니질층이 관찰되고, 위쪽으로 올라갈수록 실트질 염층이 나타나며 상부에서는 생물교란 흔적이 포함된 반원양성 니질층이 나타난다. 퇴적상이 변환에 따라 점토광물의 함량비도 다르게 나타난다. BS17-GC15 코어는 시기에 따라 일라이트가 평균 28.4~44.5%로 가장 큰 변화를 보이고, 스�멕타이트는 빙하기 때 평균 31.1%에서 20%로 감소하였다가 간빙기 때 25.1%로 다시 증가하는 양상을 보였다. 녹니석과 카올리나이트의 함은 빙하기 때 평균 40.5%에서 간빙기 때 30.4%로 감소하였다. 빙하기 동안 퇴적물이 남극 반도로부터 유입되기 때문에 높은 일라이트와 녹니석 함량을 보인다. 반면, 대륙대에 위치한 BS17-GC04 코어는 빙하기 때 스�멕타이트의 함량이 평균 47.2%에서 상부로 갈수록 평균 20.6%까지 감소하고 일라이트는 하부에서 평균 21.3%에서 43.2%로 증가한다. 빙하기 동안의 높은 스�멕타이트 함량은 근처의 스�멕타이트가 풍부한 퇴적물인 피터 1세 섬에서 퇴적물이 남극순환류에 의해 운반되었을 것으로 예상되고, 그 이후 간빙기에는 상대적으로 서쪽으로 흐르는 등수심 해류의 영향으로 동쪽의 벨링스하우젠 해의 대륙붕 퇴적물로부터 일라이트와 클로라이트가 풍부한 퇴적물이 운반되었을 것이라 예상된다.

주요어: 점토광물, 벨링스하우젠 해, 대륙대, 퇴적물 기원지, 빙하기, 간빙기

ABSTRACT: Variations in grain size distribution and clay mineral assemblage are closely related to the sedimentary facies that reflect depositional conditions during the glacial and interglacial periods. Gravity cores BS17-GC15 and BS17-GC04 were collected from the continental shelf and rise in the

*Corresponding author: +82-2-2123-5668, E-mail: jinwook@yonsei.ac.kr

나. 연구개발목표 및 달성도

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
1. 종합적인 고환경 해석 및 호냉성 철 환원 미생물에 의한 해저 퇴적물에서의 Biological activity 조사 (II)	1-1	극지연구소 생명과학연구부와 협력하여 퇴적물 내에 분포하는 호냉성 철 환원 미생물에 대한 분리동정에 대한 해석	- 극지연구소 생명과학연구부와 협력하여 크리스탈 사운드의 해저 퇴적물에서 Pyrosequencing data analysis를 통해 미생물의 군집 분석	100(%)
	1-2	크리스탈 사운드와 벨링스하우젠해의 퇴적물에 대한 TEM과 SAED pattern을 이용하여 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석	- 크리스탈 사운드의 BS17-GC18코어의 빙저호 추정 퇴적물에 대해 깊이별 illite crystallinity 측정 - 빙저호의 oxic/anoxic 환경에 따른 점토광물-미생물 간의 생지화학적 분석 - BS17-GC18 코어의 퇴적상의 변화에 따른 점토광물의 구조적, 화학적 변화를 관찰하기 위한 SEM, TEM 분석 - 미생물의 군집 분포와 기존 연구를 통해 측정된 코어의 측정값을 비교 분석	100(%)
	1-3	결빙시 철 함유 점토광물과 미생물 간의 반응에 의한 광물 변이 분석을 위한 batch 실험	- 결빙시 철 함유 스�멕타이트 (NAu-2)와 미생물에 의한 유기/무기적 반응을 확인하기 위한 batch 실험	100(%)

다. 연구수행 세부 내용 및 결과(우수성)

- 성과목표 1: 종합적인 고환경 해석 및 호냉성 철 환원 미생물에 의한 해저 퇴적물에서의 biological activity 조사
 - 세부목표 1-1: 극지연구소 생명과학연구부와 협력하여 퇴적물 내에 분포하는 호냉성 철 환원 미생물에 대한 분리동정에 대한 해석

연구 내용	연구 결과
극지연구소 생명과학연구부와 협력하여 퇴적물 내에 분포하는 호냉성 철 환원 미생물에 대한 분리동정에 대한 해석	크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 깊이 별 (81-83cm, 231-233cm, 311-313cm, 408-410cm, 618-620cm, 723-725cm, 797-799cm, 842-844cm) 시료에 대해 microbial community 분석한 결과, 깊이에 따른 미생물의 다양성 변화 확인

- 세부목표 1-2: 크리스탈 사운드와 벨링스하우젠해의 퇴적물에 대한 TEM과 SAED pattern을 이용하여 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석

연구 내용	연구 결과
크리스탈 사운드와 벨링스하우젠해의 퇴적물에 대한 TEM과 SAED pattern을 이용하여 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석	크리스탈 사운드의 BS17-GC18코어의 빙저호 추정 퇴적물에 대해 XRD를 이용한 깊이별 illite crystallinity (IC) 측정 결과, 퇴적상에 따라 IC 값의 변화 확인
	크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 퇴적상의 변화에 따른 SEM, TEM을 이용한 광물 분석 결과, 퇴적상에 따라 하부 빙저호 추정 환경과 공해 환경에서 광물의 구조적, 화학적으로 변화 됨을 확인
	크리스탈 사운드의 코어의 깊이에 따른 광물 분석 결과와 미생물의 군집 분포 간의 상관성이 퇴적상에 따라 변화됨을 확인
	크리스탈 사운드의 BS17-GC18 코어의 빙저호로 추정되는 구간에 대해 anoixc, 저온, 어두운 환경에서 퇴적물을 이용한 배치실험을 통해 점토광물-미생물 간의 생지화학적 상관성 확인

- 세부목표 1-3: 결빙시 철 함유 점토광물과 미생물 간의 반응에 의한 광물 변이 분석을 위한 batch 실험

연구 내용	연구 결과
결빙시 철 함유 점토광물과 미생물 간의 반응에 의한 광물 변이 분석을 위한 batch 실험	결빙시 철 함유 스펙타이트 (NAu-2)과 미생물에 의한 유기/무기적 반응을 확인하기 위한 batch 실험 setup을 통해 0도의 저온 환경에서도 미생물에 의한 광물의 생지화학적 변화가 상관성이 있음을 확인 Batch 실험에 대한 time point 별 Fe reduction 및 광물학적 변이 확인

4-2. 대외기여도

가. 학술적 파급효과

미생물학과 지질학이 연결되어 새로이 만들어진 “Geomicrobiology” 라는 학문은 최근 10년 사이에 많은 관심 속에 연구가 수행되어 왔다. 특히, 박테리아와 광물의 반응 (microbe-mineral interaction)분야, 즉 biomineralization 에 많은 관심이 집중되어지고 있는데, 이는 나노 소재 개발과도 밀접한 관계를 갖고 있기 때문이다. 본 연구에서는 점토광물과 박테리아의 반응을 통하여 속성작용 시 S-I 의 상전이 메커니즘 연구 분야에 유기물의 영향을 밝혀내는 최첨단 연구이며, “Geomicrobiology” 분야뿐만 아니라, 퇴적분지 해석, 석유지질학 연구 분야에도 많은 기여를 할 것이다. 특히 Geomicrobiology 분야 중 극한지역에 대한 연구는 극지연구소의 육성 연구 분야 중 생명과학과 지권과학의 융합적인 연구 주제이다. 극한지역의 bio-alteration에 의한 연구는 향후 물리적/화학적 풍화 작용뿐만 아니라, 미생물에 의한 광물의 변이를 퇴적물의 특성 변화 및 다양성에 대한 또 다른 factor로 적용 가능하게 한다. 또한 최근 본 연구실에서는 급격히 빙붕이 무너지고 있는 라센지역에서 성공적인 샘플 채취를 함으로써 점토광물을 이용하여 남극 기후변화에 대한 연구를 진행하였다. 한 예로써, 일라이트의 crystallinity index 가 기후변화에 대한 “indicator”로서의 사용 가능성을 평가 할 수 있다. 이를 바탕으로 본 연구에서도 서남극 지역에서 채취한 샘플들을 이용하여 위의 결과들을 적용 및 남

극 기후변화에 대한 나노스케일의 proxy 연구를 정립해 나갈 수 있다. 더 나아가, 최근 외계 생명체 탐사에 있어서 두꺼운 빙하가 존재하는 외계 행성에서 빙하 밑의 얼지 않은 물과 암석 간의 반응을 통해 생명체가 존재하는 흔적을 찾기 위한 연구가 시도되고 있다. 본 연구는 이와 같은 **생명의 기원**에 대한 간접적인 증거들을 제시 할 수 있다.

나. 경제적 파급효과

미생물에 의한 해저 퇴적물의 특성 변화에 대한 연구는 남극과 같은 극한지에서 수행된 바 없기 때문에 본 연구의 내용은 가치가 높다. 본 연구에서 미생물에 의한 점토광물의 변이가 검토되면, 물리·화학적 factor와 별개로 **미생물에 의한 bio-alteration**을 새로운 factor로 남극 퇴적환경의 다양성에 대한 해석을 가능하게 해준다. 또한 향후 남극에서도 극한 환경인 두꺼운 대륙 빙하 밑의 빙저호 탐사와 관련된 공동 연구가 진행된다면, 생명체가 살기 힘든 매우 극한 환경에서 미생물의 metabolism이 빙저호 퇴적물안의 광물 변이작용과 연계하여 해석 할 수 있고, 이에 따라 극한지에서 생명체의 활동성 및 다양성에 대한 연구를 가능하게 해준다. 또한 남극 퇴적환경에 대한 해석을 미생물에 의한 광물의 전이과정과 연계하여, 퇴적 당시의 생지구화학적 특성을 예측할 수 있고 이를 통하여 더 자세한 고환경 복원을 실시할 수 있다. 본 연구는 기초연구로서 당장의 경제적 파급효과를 기대할 수는 없지만, **퇴적환경 변화에 대한 나노스케일 분석**이 가능하다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

미생물에 의한 남극의 해저 퇴적물의 특성 변화와 관련된 연구는 거의 수행된 바가 없기 때문에 학술적 가치가 매우 높다고 할 수 있다. 본 연구의 결과는 점토광물을 활용한 다른 분야인 자연계에서 석유탐사 (hydrocarbon exploration), 석유의 이동/숙성 (hydrocarbon migration/maturation), 점토광물과 유기물의 상호 반응작용 (clay-organic matter interaction)시 탄소와 점토광물 구조와의 관계 연구에 많은 영향을 미치며, 극한지에서 미생물과 점토광물의 상관관계를 통하여 생명체의 기원 (origin of life)을 찾을 수 있는 단서, 즉 “biosignature” 연구에도 많은 영향을 줄 수 있다는 점에서도 매우 중요하다. 또한, 남극의 해저 퇴적물을 이용해서 고환경을 해석하는 과정에 있어서 점토광물의 변이 및 다양성을 해석하는 연구에서 기존의 물리적/화학적 풍화에 더하여 생지화학적 변수를 첨가하여 여러 각도에서 과학적 접근이 가능하다. 더 나아가, 이러한 Biomarker를 밝히기 위한 점토광물의 구조분석은 향후 외계행성의 생명체에 대한 연구에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

극지연구소

제 6 장 참고문헌

- Biscaye, P. E. (1965). Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geological Society of America Bulletin*, 76(7), 803-832.
- Weaver, C. E., & Pollard, L. D. (1973). The chemistry of clay minerals. *Dev. Sedimentology*, 15, 213.
- Suárez, M. (1976). Plate-tectonic model for southern Antarctic Peninsula and its relation to southern Andes. *Geology*, 4(4), 211-214.
- Stow, D. A. V., & DAV, S. (1982). Bottom currents and contourites in the North Atlantic.
- Lewis, D. W. (1982). Channels across continental shelves: corequisites of canyon-fan systems and potential petroleum conduits. *New Zealand journal of geology and geophysics*, 25(2), 209-225.
- Stucki, J. W., Komadel, P., & Wilkinson, H. T. (1987). Microbial reduction of structural iron (III) in smectites. *Soil Science Society of America Journal*, 51(6), 1663-1665.
- Grobe, H., & Mackensen, A. (1992). Late Quaternary climatic cycles as recorded in sediments from the Antarctic continental margin. *The Antarctic paleoenvironment: A perspective on Global Change; Antarctic Research Series*, 56, 349-376.
- Barker, P. F., Barrett, P. J., Cooper, A. K., & Huybrechts, P. (1999). Antarctic glacial history from numerical models and continental margin sediments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 150(3-4), 247-267.
- Domack, E. W., Jacobson, E. A., Shipp, S., & Anderson, J. B. (1999). Late Pleistocene - Holocene retreat of the West Antarctic Ice-Sheet system in the Ross Sea: Part 2—sedimentologic and stratigraphic signature. *Geological Society of America Bulletin*, 111(10), 1517-1536.
- Kostka, J. E., Wu, J., Nealson, K. H., & Stucki, J. W. (1999). The impact of

structural Fe (III) reduction by bacteria on the surface chemistry of smectite clay minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(22), 3705-3713.

Licht, K. J., Dunbar, N. W., Andrews, J. T., & Jennings, A. E. (1999). Distinguishing subglacial till and glacial marine diamictos in the western Ross Sea, Antarctica: Implications for a last glacial maximum grounding line. *Geological Society of America Bulletin*, 111(1), 91-103.

Smellie, J. L. (1999). The upper Cenozoic tephra record in the south polar region: a review. *Global and Planetary Change*, 21(1-3), 51-70.

Hillenbrand, C. D., & Ehrmann, W. (2001). Distribution of clay minerals in drift sediments on the continental rise west of the Antarctic Peninsula, ODP Leg 178, Sites 1095 and 1096. In Barker, PF, Camerlenghi, A., Acton, GD, and Ramsay, ATS (Eds.), *Proc. ODP, Sci. Results, 178* [Online]. Available from World Wide Web: http://www-odp.tamu.edu/publications/178_SR/VOLUME/CHAPTERS/SR178_08.PDF (Vol. 1).

Jeong, G. Y., & Yoon, H. I. (2001). The origin of clay minerals in soils of King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica, and its implications for the clay-mineral compositions of marine sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 71(5), 833-842.

Lucchi, R. G., Rebesco, M., Camerlenghi, A., Buseti, M., Tomadin, L., Villa, G., ... & Giorgetti, G. (2002). Mid-late Pleistocene glacimarine sedimentary processes of a high-latitude, deep-sea sediment drift (Antarctic Peninsula Pacific margin). *Marine Geology*, 189(3-4), 343-370.

Kim, J. W., & Peacor, D. R. (2002). Crystal-size distributions of clays during episodic diagenesis: The Salton Sea geothermal system. *Clays and Clay Minerals*, 50(3), 371-380.

Dong, H., Kostka, J. E., & Kim, J. (2003). Microscopic evidence for microbial dissolution of smectite. *Clays and Clay Minerals*, 51(5), 502-512.

Hillenbrand, C. D., Grobe, H., Diekmann, B., Kuhn, G., & Fütterer, D. K. (2003). Distribution of clay minerals and proxies for productivity in surface

sediments of the Bellingshausen and Amundsen seas (West Antarctica) - Relation to modern environmental conditions. *Marine Geology*, 193(3-4), 253-271.

Kim, J., Dong, H., Seabaugh, J., Newell, S. W., & Eberl, D. D. (2004). Role of microbes in the smectite-to-illite reaction. *Science*, 303(5659), 830-832.

Evans, J., Pudsey, C. J., ÓCofaigh, C., Morris, P., & Domack, E. (2005). Late Quaternary glacial history, flow dynamics and sedimentation along the eastern margin of the Antarctic Peninsula Ice Sheet. *Quaternary Science Reviews*, 24(5-6), 741-774.

Lucchi, R. G., & Rebesco, M. (2007). Glacial contourites on the Antarctic Peninsula margin: insight for palaeoenvironmental and palaeoclimatic conditions. *Geological Society, London, Special Publications*, 276(1), 111-127.

Zhang, G., Kim, J., Dong, H., & Sommer, A. J. (2007). Microbial effects in promoting the smectite to illite reaction: Role of organic matter intercalated in the interlayer. *American Mineralogist*, 92(8-9), 1401-1410.

Emerson, D., Rentz, J. A., Lilburn, T. G., Davis, R. E., Aldrich, H., Chan, C., & Moyer, C. L. (2007). A novel lineage of proteobacteria involved in formation of marine Fe-oxidizing microbial mat communities. *PloS one*, 2(8).

Zhang, G., Dong, H., Kim, J., & Eberl, D. D. (2007). Microbial reduction of structural Fe³⁺ in nontronite by a thermophilic bacterium and its role in promoting the smectite to illite reaction. *American Mineralogist*, 92(8-9), 1411-1419.

Bozal, N., Montes, M. J., Minana-Galbis, D., Manresa, A., & Mercade, E. (2009). *Shewanella vesiculosa* sp. nov., a psychrotolerant bacterium isolated from an Antarctic coastal area. *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 59(2), 336-340.

Hillenbrand, C. D., Ehrmann, W., Larter, R. D., Benetti, S., Dowdeswell, J. A., Cofaigh, C. Ó., ... & Grobe, H. (2009). Clay mineral provenance of sediments in the southern Bellingshausen Sea reveals drainage changes of the West Antarctic Ice Sheet during the Late Quaternary. *Marine Geology*,

265(1-2), 1-18.

Hillenbrand, C. D., Larter, R. D., Dowdeswell, J. A., Ehrmann, W., Cofaigh, C. Ó., Benetti, S., ... & Grobe, H. (2010). The sedimentary legacy of a palaeo-ice stream on the shelf of the southern Bellingshausen Sea: Clues to West Antarctic glacial history during the Late Quaternary. *Quaternary Science Reviews*, 29(19-20), 2741-2763.

Kim, K., Choi, W., Hoffmann, M. R., Yoon, H. I., & Park, B. K. (2010). Photoreductive dissolution of iron oxides trapped in ice and its environmental implications. *Environmental science & technology*, 44(11), 4142-4148.

Jeong, D., Kim, K., & Choi, W. (2012). Accelerated dissolution of iron oxides in ice. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 12(22).

Livingstone, S. J., Clark, C. D., Piotrowski, J. A., Tranter, M., Bentley, M. J., Hodson, A., ... & Woodward, J. (2012). Theoretical framework and diagnostic criteria for the identification of palaeo-subglacial lakes. *Quaternary Science Reviews*, 53, 88-110.

Bishop, J. L., Loizeau, D., McKeown, N. K., Saper, L., Dyar, M. D., Des Marais, D. J., ... & Murchie, S. L. (2013). What the ancient phyllosilicates at Mawrth Vallis can tell us about possible habitability on early Mars. *Planetary and Space Science*, 86, 130-149.

Christner, B. C., Priscu, J. C., Achberger, A. M., Barbante, C., Carter, S. P., Christianson, K., ... & Vick-Majors, T. J. (2014). A microbial ecosystem beneath the West Antarctic ice sheet. *Nature*, 512(7514), 310-313.

Souza, K. K. D., Schaefer, C. E. G., Simas, F. N. B., Spinola, D. N., & de Paula, M. D. (2014). Soil formation in Seymour Island, Weddell Sea, Antarctica. *Geomorphology*, 225, 87-99.

Kim, J., Dong, H., Yang, K., Park, H., Elliott, W. C., Spivack, A., ... & Inagaki, F. (2019). Naturally occurring, microbially induced smectite-to-illite reaction. *Geology*, 47(6), 535-539.

Jung, J., Yoo, K. C., Rosenheim, B. E., Conway, T. M., Lee, J. I., Yoon, H.

I, ... & Kim, J. (2019). Microbial Fe (III) reduction as a potential iron source from Holocene sediments beneath Larsen Ice Shelf. *Nature Communications*, 10(1), 1-10.

Jung, J., Yoo, K. C., Lee, K. H., Park, Y. K., Lee, J. I., & Kim, J. (2019). Clay Mineralogical Characteristics of Sediments Deposited during the Late Quaternary in the Larsen Ice Shelf B Embayment, Antarctica. *Minerals*, 9(3), 153.

Park, Y. K., Lee, J. I., Jung, J., Hillenbrand, C. D., Yoo, K. C., & Kim, J. (2019). Elemental compositions of smectites reveal detailed sediment provenance changes during glacial and interglacial periods: The Southern Drake Passage and Bellingshausen Sea, Antarctica. *Minerals*, 9(5), 322.

유규철, 윤호일, 이재일, & 임현수. (2008). 서남극 벨링스하우젠 해 대륙대의 빙해양 퇴적작용. *지질학회지*, 44(1), 15-31.

하상범, 김부근, 조현구, 에스더, & 콜리자. (2018). 남극 로스해 펜넬-이젤린 퇴 동쪽 대륙사면의 코어 RS14-GC2 의 점토광물의 기원지 연구. *한국광물학회지*, 31(1), 1-12.

극지연구소

주 의

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