

서남극 빙붕 후퇴 지역 주변의 해저퇴적물에
분포하는 점토광물을 이용한 생지화학적
변이작용 및 과거 퇴적 환경 변화 연구

The study of reconstruction of paleo-depositional
condition and biogeochemical alteration using clay
minerals in marine sediments distributed in glacial
retreating area West Antarctica



극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “과거 온난기의 서남극 빙상 후퇴 및 해양 순환 변화 연구” 과제의 위탁연구 “서남극 빙붕 후퇴 지역 주변의 해저퇴적물에 분포하는 점토광물을 이용한 생지화학적 변이작용 및 과거 퇴적 환경 변화 연구” 과제의 단계보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 유 규 철
위탁연구기관명 : 연세대학교 산학협력단
위탁연구책임자 : 김 진 옥
위탁참여연구원 : 박 영 규
“ : 박 한 범
“ : 강 인 성

보고서 초록

위탁연구과제명	서남극 빙봉 후퇴 지역 주변의 해저퇴적물에 분포하는 점토광물을 이용한 생지화학적 변이작용 및 과거 퇴적 환경 변화 연구				
위탁연구책임자	김진욱	해당단계 참여연구원수	3	해당단계 연구비	150,000,000
연구기관명 및 소속부서명	연세대학교 지구시스템과학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	
<p>1. 서남극 빙봉 주변 해양 퇴적물 채취 및 광물학적 분석</p> <p>1-1) 극지연구소와 협력하여 서남극 빙봉 후퇴 지역 퇴적물 채취</p> <p>1-2) 해저 퇴적물의 퇴적상 변화에 따른 점토광물의 성분비, 광물구조 분석 - 서남극의 대륙붕 근처에서 채취한 코어에 대해 깊이 별 색깔이나 퇴적 구조를 이용하여 퇴적상 분석한 결과, 하부에서 상부로 갈수록 빙하기에서 빙봉이 후퇴하는 간빙기로 변화함을 확인함.</p> <p>1-3) 과거 온난기 시기의 대륙붕 및 대륙 저면의 해저 퇴적물에 대한 광물학적 분석 - 과거 온난기의 아문젠 해 대륙붕 및 대륙저면 퇴적물에 대해 XRD를 이용한 광물학적 분석 결과, 빙하기와 간빙기 간의 광물 구성의 차이를 확인함.</p> <p>2. 해저 퇴적물을 이용한 고환경 해석 및 철 환원 미생물에 의한 광물의 Biomarker 조사 (I)</p> <p>2-1) 빙봉 후퇴 지역 퇴적물 코어에 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석 - 빙봉 후퇴 지역에서 채취한 코어에 대해 깊이에 따른 광물학적 분석 결과, 퇴적상에 따라 일라이트의 illite crystallinity가 구간에 따라 변화함을 확인함.</p> <p>2-2) 해저 퇴적물 코어의 점토광물 화학 성분 분석을 통한 고환경 해석 proxy 개발 - 점토광물의 함량비 변화와 함께, 대륙성 퇴적물의 영향을 확인하기 위한 TEM 분석 결과, 최후 빙하기와 현생 퇴적물 간에 스멕타이트의 화학성분 분포가 다르게 나타나는 것을 확인하고, 대륙성 기원의 화학 성분 자료를 확보함.</p> <p>2-3) 과거 온난기 시기의 대륙붕의 해저 퇴적물에 대한 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석 - 해당 퇴적물에 대해 산화-환원 조건에 해당하는 퇴적물 간에 광물상의 변화가 관찰되었고, 또한 나노스케일에서의 점토 광물 구조 변화, 점토 광물의 화학 성분 변화, 점토 광물의 철 산화수 변화가 미생물과 철 함유 광물 중 하나인 점토광물 간의 생지화학적 반응과 상관성이 있음을 확인함.</p> <p>3. 해저 퇴적물을 경 해석 및 철 환원 미생물에 의한 광물의 Biomarker 조사 (II)</p> <p>3-1) 빙봉 후퇴 지역의 퇴적물 코어의 성분 분석 및 biomarker 분석 - 결과를 통해 남극의 빙봉 하부의 극한 환경에서도 퇴적물에서 광물-미생물 반응에 의한 철의 공급 가능성을 제시함.</p> <p>3-2) 해저 퇴적물의 빙기-간빙기에 따른 고환경 변화에 따른 퇴적물 기원지 분석 - 2차년도까지 결과를 바탕으로 대륙붕과 대륙저면 퇴적물을 포함한 점토광물의 분포와 점토광물 중 스멕타이트의 화학성분 분포 지도를 확보함.</p> <p>3-3) 과거 온난기 시기의 대륙붕의 해저 퇴적물의 종합적인 고환경 해석 - 과거 온난기 (MIS 5)부터 현재 (표층퇴적물)까지의 종합적인 고환경 해석을 위해 과거 온난기의 점토광물 분석을 진행함. - 과거 온난기에는 점토광물 중 스멕타이트의 함량이 높았던 것을 확인하였고, 이는 표층 퇴적물의 분포와 유사함을 확인하고, 점토광물의 화학성분 변화를 분석함.</p>					
색 인 어	한 글	생지화학적 반응, 철 함유 스멕타이트, 철환원 박테리아, 극지 환경, 빙저호, X선			

(각 5개 이상)		회절 분석, 투과 전자 현미경, 일라이트 결정도, 퇴적물 기원지
	영 어	Biogeochemical reation, NAU-2, Fe reducing bacteria, Antarctica, Subglacial lake, XRD, TEM, Illite crystallinity (IC), sediment provenance, smectite composition



요 약 문

I. 제 목

서남극 빙봉 후퇴 지역 주변의 해저퇴적물에 분포하는 점토광물을 이용한 생지화학적 변이작용 및 과거 퇴적 환경 변화 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

이 과제는 서남극의 과거 기후변화에 따른 고환경을 유추하기 위해 해저 퇴적물의 점토광물을 이용한 과거 퇴적환경 복원 및 빙봉의 움직임에 의한 산화-환원 환경에 따른 저온 환경에서 서식하는 미생물과 광물간의 생지화학적 반응 (biogeochemical reaction)에 중점을 둔 연구과제이다. 나아가, 과거 최후 빙하기와 온난기에 해당하는 서남극 빙봉 후퇴지역의 해저 퇴적물에서 점토광물의 광물학적 특징과 화학 성분의 변화를 통한 과거 퇴적 환경을 규명하는 새로운 proxy를 개발하고자 한다. 또한 본 연구는 점토광물의 빙기-간빙기 시기에 물리적, 화학적 풍화작용과 함께 수반되는 미생물에 의한 산화-환원 환경 변화에 따른 생지화학적 변이작용 (bio-alteration)에 대한 연구를 통해 서남극 빙봉 지역의 점토광물의 분포와 물리적 화학적 변화 및 미생물에 의한 생지화학적 변이를 규명할 수 있는 광물 구조적 변화를 nano-scale의 고환경 지시자로서 찾아보고자 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1) 서남극 빙봉 주변 해양 퇴적물 채취 및 광물학적 분석:

- 탐사를 통한 서남극 빙봉 후퇴 지역 피스톤 코어 채취

- 채취한 해저 퇴적물의 X-ray diffractometer (XRD)를 이용한 광물학적 분석
- 반정량분석 (Biscaye, 1965)을 통한 깊이별 점토광물 함량비 변화 분석
- 빙봉 후퇴 지역의 해저 퇴적물의 점토광물에 대한 SEM, TEM을 이용한 광물학적 분석
- 과거 온난기 시기의 대륙붕 해저 퇴적물에 대한 퇴적상의 차이에 따른 깊이별 illite crystallinity (IC), 광물구조, 광물의 화학성분 변화 분석

2) 해저 퇴적물을 이용한 고환경 해석 및 철 환원 미생물에 의한 광물의 Biomarker 조사 (I)

- 빙봉 후퇴 지역의 퇴적물 코어의 깊이에 따른 IC 측정
- 빙봉 후퇴 지역의 퇴적물 코어의 IC 변화에 따른 점토광물의 TEM 분석
- TEM-EELS를 이용하여 퇴적상에 따른 실제 점토광물 구조 내에서의 Fe-redox state를 측정
- 해저 퇴적물 코어의 깊이에 따른 점토광물의 TEM-EDS를 이용한 화학성분 분석
- 과거 온난기 시기의 대륙붕 퇴적물에 대한 batch 실험을 통한 광물-미생물간의 생지화학적 분석
- Batch 실험에 대한 time point 별 철의 환원 및 용출, 2차 광물 생성, SAED pattern을 통한 광물의 구조 변이 분석

3) 해저 퇴적물을 이용한 고환경 해석 및 철 환원 미생물에 의한 광물의 Biomarker 조사 (II)

- 빙봉 후퇴 지역의 퇴적물 코어의 퇴적상에 따른 Pyrosequencing data analysis를 통한 미생물의 군집 분석
- TEM을 이용한 점토광물의 Crystal Size Distributions (CSDs) 측정
- IC, CSDs, Fe-redox state 등의 광물학적 특징과 미생물 군집 분포 비교 및 해석
- 2차년도까지의 결과를 통한 연구지역 주변의 퇴적물에 대한 점토광물 분포 및 화학성분 분포 지도 확보 및 해석
- 최후 빙하기-간빙기 (현생 퇴적물)에 대한 해저 퇴적물 코어의 점토광물에 대한 양이온 교환능, 화학성분 분포를 통한 서남극 빙봉 변화에 따른 종합적인 퇴적물의 기원지 분석
- 2차년도까지의 결과를 통한 과거 온난기부터 빙하기에 이르는 대륙붕과 대륙저 퇴적물의 종합적인 광물학적 변화와 생지화학적 변화 간의 상호관계 분석
- 온난기 시기의 서남극 빙봉의 움직임과 주변 해역 및 해류 순환에 관한 퇴적 환

IV. 연구개발결과

1) 서남극 빙봉 주변 해양 퇴적물 채취 및 광물학적 분석:

1-1) 극지연구소와 협력하여 서남극 빙봉 후퇴 지역 퇴적물 채취

● 서남극 빙봉 후퇴 후의 대륙 근처 지역의 피스톤 코어에 대하여 깊이 별로 팔콘 튜브에 약 10-15 ml 퇴적물 시료를 샘플링 실시

1-2) 해저 퇴적물의 퇴적상 변화에 따른 점토광물의 성분비, 광물구조 분석

● 서남극의 대륙붕 근처에서 채취한 코어에 대해 깊이 별 색깔이나 퇴적 구조를 이용하여 퇴적상 분석한 결과, 하부에서 상부로 갈수록 빙하기에서 빙봉이 후퇴하는 간빙기로 변화함을 확인

1-3) 과거 온난기 시기의 대륙붕 및 대륙 저면의 해저 퇴적물에 대한 광물학적 분석

● 과거 온난기의 아문젠 해 대륙붕 및 대륙저면 퇴적물에 대해 XRD를 이용한 광물학적 분석 실시

● 점토광물의 함량비와 함께 TEM을 이용하여 과거 온난기의 스멕타이트에 대한 화학 성분을 분석 및 기원지 proxy에 대한 규명

2) 해저 퇴적물을 이용한 고환경 해석 및 철 환원 미생물에 의한 광물의 Biomarker 조사 (I)

2-1) 빙봉 후퇴 지역 퇴적물 코어에 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석

● 빙봉 후퇴 지역에서 채취한 코어에 대해 깊이에 따른 광물학적 분석 결과, 퇴적상에 따라 일라이트의 illite crystallinity가 구간에 따라 변화함을 확인

● 빙봉 후퇴 지역에서 채취한 코어에 대해 깊이에 따른 퇴적상과 입도 분포 변화, 점토 광물의 함량비 변화, 광물종류의 변화, 구조적인 변화를 볼 때 하부 구간에서 생지화학적 영향과 상관성이 있음을 확인

2-2) 해저 퇴적물 코어의 점토광물 화학 성분 분석을 통한 고환경 해석 proxy 개발

● 연구 지역에 영향을 미칠 수 있는 대륙붕 안쪽의 퇴적물에 대해 광물학적 분석 결과, 빙봉이 전진한 빙하기에 대륙성 기원의 영향을 받았음을 확인함

● 점토광물의 함량비 변화와 함께, 대륙성 퇴적물의 영향을 확인하기 위한 TEM 분석 결과, 최후 빙하기와 현생 퇴적물 간에 스멕타이트의 화학성분 분포가 다르게 나타나는 것을 확인하고, 대륙성 기원의 화학 성분 자료를 확인

2-3) 과거 온난기 시기의 대륙붕의 해저 퇴적물에 대한 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석

● 빙봉 하부 환경으로 추정되는 극한 조건에서 채취한 퇴적물에 대해서 철 함유 광물 내에서 철의 환원 작용이 일어날 수 있음을 확인

● 해당 퇴적물에 대해 산화-환원 조건에 해당하는 퇴적물 간에 광물상의 변화가 관찰되었고, 또한 나노스케일에서의 점토 광물 구조 변화, 점토 광물의 화학 성분 변화, 점토 광물의 철 산화수 변화가 미생물과 철 함유 광물 중 하나인 점토광물 간의 생지화학적 반응과 상관성이 있음을 확인

3) 해저 퇴적물을 이용한 고환경 해석 및 철 환원 미생물에 의한 광물의 Biomarker 조사 (II)

3-1) 빙봉 후퇴 지역의 퇴적물 코어의 성분 분석 및 biomarker 분석

● 2차년도까지 확인한 생지화학적 반응이 관찰된 구간에 대해 미생물 배양 실험을 실시

● 결과를 통해 남극의 빙봉 하부의 극한 환경에서도 퇴적물에서 광물-미생물 반응에 의한 철의 공급 가능성을 확인

3-2) 해저 퇴적물의 빙기-간빙기에 따른 고환경 변화에 따른 퇴적물 기원지 분석

● 2차년도까지 결과를 바탕으로 대륙붕과 대륙저면 퇴적물을 포함한 점토광물의 분포와 점토광물 중 스멕타이트의 화학성분 분포 지도를 획득

● 연구지역의 빙하기와 간빙기 (표층 퇴적물)의 종합적인 광물학적 특징을 비교하고, 해당 시기의 서남극 빙봉의 움직임과 연결했을 때, 빙하기와 간빙기에 퇴적물 기원지가 변했으며, 퇴적물이 공급된 경로를 확인

3-3) 과거 온난기 시기의 대륙붕의 해저 퇴적물의 종합적인 고환경 해석

● 과거 온난기 (MIS 5)부터 현재 (표층퇴적물)까지의 종합적인 고환경 해석을 위해 과거 온난기의 점토광물 분석을 실시

● 과거 온난기 (MIS 5)에는 점토광물 중 스멕타이트의 함량이 높았던 것을 확인하였고, 이는 표층 퇴적물의 분포와 유사함을 확인하고, 점토광물의 화학성분 변화를 분석 실시

● 과거 온난기-빙하기-현재 (표층 퇴적물)까지의 변화를 관찰 해볼 때, 따듯했던 시기에는 빙봉이 후퇴함에 따라 스멕타이트가 빙하기보다 여러 지역으로부터 공급되었음을 확인함. 특히 따듯한 시기에는 상대적으로 온도가 높은 해류인 남극순환 심층수의 공급이 증가하여 원양성 퇴적물도 함께 공급이 증가하는 것을 확인

V. 연구개발결과의 활용계획

미생물에 의한 서남극의 빙봉 후퇴 지역의 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 화학적 특성의 변화가 퇴적물의 이동에 관련된 단서를 제공할 수 있다. 더 나아가, 이러한 나노스케일에서의 점토광물의 연구는, 향후 외계 행성의 생명체에 대한 biomarker로 활용되어 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.



S U M M A R Y

I. Title

The study of reconstruction of paleo-depositional condition and biogeochemical alteration using clay minerals in marine sediments distributed in glacial retreating area, West Antarctica

II. Purpose and Necessity of R&D

This proposal is focused on reconstruction of paleo-depositional condition using clay minerals in marine sediments in West Antarctica and biogeochemical reaction between mineral and microbe in extremely cold environment according to changes of redox condition through glacial movement. The objective of this proposal is to develop new proxy indicating paleo-depositional condition through mineralogical characteristics and clay mineral chemical composition changes in the marine sediment from glacial retreating area. Also, this study is for finding out traces of bio-alteration induced by microbes according to redox condition changes accompanied by physico-chemical weathering of clay mineral during glacial-interglacial period. The result of this study could be a nano-scale indicator of clay mineral distribution, physico-chemical changes of clay mineral and microbially induced mineral structural changes.

III. Contents and Extent of R&D

1) Investigation of sampling location of glacial retreating area and mineralogical analysis:

- Sampling using piston core in the vicinity of glacial retreating area on Antarctic expedition

- Mineralogical analysis using X-ray diffractometer (XRD) in marine sediment samples
- Investigation of clay mineral assemblages with depth through semi-quantitative analysis (Biscaye, 1965)
- TEM, SEM analysis of marine sediments in the vicinity of glacial retreating area
- Observation of changes of Illite crystallinity (IC), mineral structure, and chemical composition of mineral according to sedimentary facies of marine sediments on the continental shelf during past warm period

2) Interpretation of paleo-environment using marine sediments and investigation of biomarker of Fe-reducing bacteria in mineral (I):

- IC measurement of sediment core with depth in the vicinity of glacial retreating area
- TEM analysis of clay mineral in the sediment core according to IC changes in the vicinity of glacial retreating area
- Measurement of Fe-redox state in clay mineral structure according to sediment facies using TEM-EELS
- Chemical composition analysis of clay mineral in the sediment core with depth using TEM-EDS
- Biogeochemical analysis of microbe-mineral interaction from batch experiment of past warm period continental shelf deposits
- Analysis of extent of Fe reduction for each time point, secondary mineral precipitation and observation of SAED pattern from the result of batch experiment

3) Interpretation of paleo-environment using marine sediments and investigation of biomarker of Fe-reducing bacteria in mineral (II):

- Pyrosequencing data analysis of marine sediment with depth in the vicinity of glacial retreating area
- Measurement of Crystal Size Distribution (CSDs) of clay mineral using TEM

- Interpretation of mineralogical characteristics including IC, CSDs, and Fe-redox state with comparing them to microbial community
- Mapping and interpretation of distribution and chemical composition of clay mineral in the sediment of research area through the results of last 2 years
- Sediment provenance interpretation through cation exchange capacity and chemical composition distribution of clay mineral in sediment core during last glacial-interglacial period
- Interpretation of relationship between mineralogical changes and biogeochemical changes of sediment from continental shelf to continental rise from past warm period to glacial period through the result of last 2 years
- Interpretation of relationship between sedimentary environment and West Antarctic ice shelf movement with oceanic current circulation during past warm period

IV. R&D Results

1) Investigation of sampling location of glacial retreating area and mineralogical analysis:

1-1) Sampling of marine sediments in the vicinity of glacial retreating area, West Antarctica

- Collecting sediment cores with depth from glacial retreating area

1-2) Clay mineral assemblages and mineralogical analysis of marine sediments according to sediment facies

- Identification of transition from glacial period to interglacial period as the sediment core depth getting shallower through the result of sediment facies analysis including color and sediment structural differences with depth

1-3) Mineralogical analysis of marine sediments from continental shelf and continental rise during past warm period

- Mineralogical analysis using XRD of marine sediments from continental shelf and continental rise during past warm period

- Investigation of sediment provenance proxy through smectite chemical

composition analysis using TEM combined with clay mineral assemblages result

2) Interpretation of paleo-environment using marine sediments and investigation of biomarker of Fe-reducing bacteria in mineral (I):

2-1) Biogeochemical analysis of sediment core in the vicinity of glacial retreating area

- Identification of variation in illite crystallinity with depth as a result of mineralogical analysis from sediment core in the vicinity of glacial retreating area

- Identification of biogeochemical reaction in deep sediments through the result of analysis according to depth such as sedimentary facies changes, grain size distribution, clay mineral assemblages, mineralogy differences, and structure changes

2-2) Development of proxy of paleo-environment using clay mineral chemical composition analysis

- Identification of supply of detrital mineral in research area during glacial advance through mineralogical analysis of inner ice shelf sediments

- Identification of variation of smectite chemical composition distribution between present sediments and last glacial period sediments. Identification of existence of detrital mineral through result of clay mineral assemblages and TEM analysis

2-3) Biogeochemical analysis of marine sediments in continental shelf during past warm period

- Identification of possibility of reduction of iron in iron bearing mineral sampled from extremely cold condition which assumed to be subglacial environment

- Observation of changes of mineral phase of sediments in between reduced and oxidized condition and identification that biogeochemical reaction of iron bearing clay mineral have relationship with changes of iron oxidation state of clay mineral, clay mineral chemical composition changes, and nano-scale clay mineral structure changes

3) Interpretation of paleo-environment using marine sediments and investigation of biomarker of Fe-reducing bacteria in mineral (II):

3-1) Sediment core analysis of glacial retreating area and biomarker investigation

- Microbial batch culture experiment for core section where biogeochemical reaction is observed through the result of last 2 years

- Identification of possibility of iron supply from mineral by microbe-mineral interaction in subglacial environment

3-2) Sediment provenance analysis according to changes of paleo-environment from glacial-interglacial period

- Mapping of clay mineral assemblages distribution and smectite chemical composition distribution at continental shelf and continental rise through the result of last 2 years

- Identification of route of sediment supply and changes of sediment provenance between glacial and interglacial period through the result of mineralogical characteristics differences between glacial and interglacial period combined with West Antarctic ice shelf movement at each time

3-3) Interpretation of paleo-environment of marine sediment in continental shelf during past warm period

- Clay mineral analysis of past warm period sediments for paleo-environmental interpretation from past warm period (MIS5) to present (surface sediment)

- Clay mineral chemical composition analysis for past warm period (MIS5) through the observation that smectite content is higher at past warm period and that this result is similar with that of surface sediments

- Identification of various origin of sediments in the past warm period by ice shelf retreat through the observation of changes of clay mineral chemical composition according to past warm period-glacial period-present (surface sediments). Identification of increase in pelagic sediments by increase of Circumpolar Deep Water during warm period

V. Application Plans of R&D Results

Since few studies have been conducted on the changes in characteristics of marine sediments by microbial activity, this study is valuable academically. The result of

this study can be linked to other fields that use clay mineral such as hydrocarbon exploration, hydrocarbon migration/maturation, clay-organic matter interaction, and relationship between carbon and clay mineral structure. It is also important that this study is related to biosignature, the clue of origin of life, through figuring out relationship between clay mineral and microbe in the extremely cold condition. Changes of chemical characteristics of mineral can be a proof related to sediment transport when interpreting paleo-environment using clay mineral in the marine sediments from Antarctica. Furthermore, nano-scale clay mineral study is expected to be an important role of finding out biomarker from extraterrestrial planet.



목 차

제 1 장 서론

- 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 서론

1-1. 연구개발의 목적

이 과제는 서남극의 과거 기후변화에 따른 고환경을 유추하기 위해 해저 퇴적물의 점토광물을 이용한 과거 퇴적환경 복원 및 빙봉의 움직임에 의한 산화-환원 환경에 따른 저온 환경에서 서식하는 미생물과 광물간의 생지화학적 반응 (biogeochemical reaction)에 중점을 둔 연구과제이다. 나아가, 과거 최후 빙하기와 온난기에 해당하는 서남극 빙봉 후퇴지역의 해저 퇴적물에서 점토광물의 광물학적 특징과 화학 성분의 변화를 통한 과거 퇴적 환경을 규명하는 새로운 proxy를 개발하고자 한다. 또한 본 연구는 점토광물의 빙기-간빙기 시기에 물리적, 화학적 풍화작용과 함께 수반되는 미생물에 의한 산화-환원 환경 변화에 따른 생지화학적 변이작용 (bio-alteration)에 대한 연구를 통해 서남극 빙봉 지역의 점토광물의 분포와 물리적 화학적 변화 및 미생물에 의한 생지화학적 변이를 규명할 수 있는 광물 구조적 변화를 nano-scale의 고환경 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 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 극한 지역에 대한 연구는 극지연구소의 육성 연구 분야 중 **생명과학과 지권과학의 융합적인** 연구 주제이다. 극한지역의 bio-alteration에 의한 연구는 향후 물리적/화학적 풍화 작용뿐만 아니라, 빙저호와 같은 극한 환경에서 미생물에 의한 광물의 변이를 퇴적물의 특성 변화 및 다양성에 대한 또 다른 factor로 적용 가능하게 한다. 또한 최근 급격히 빙봉이 무너지고 있는 라센 C 지역에서 성공적으로 채취한 샘플에 대해 점토광물을 이용하여 남극 기후변화에 대한 나노스케일의 proxy 연구를 Nature Communication에 publish 하였다. 이로써 일라이트의 crystallinity index가 기후변화

에 대한 “indicator”로서의 사용 가능성을 평가 할 수 있다. 또한 2021년에 발간된 IPCC 보고서에 따르면, 최근 빙봉의 후퇴와 함께 해수면의 상승에 대한 문제점이 대두되고 있다. 미래 기후를 예측하기 위한 수단으로 과거의 퇴적환경을 복원할 수 있는 proxy 개발 연구가 많이 수행되고 있는데, 본 연구에서 진행되는 고퇴적 환경 변화에 영향을 받는 다양한 광물학적 proxy 개발은 미래 기후를 예측하는데 많은 기여를 할 것이다.

나. 경제적 파급효과

미생물에 의한 퇴적물 및 토양의 특성 변화에 대한 연구는 남극과 같은 극한지에서 수행된 바 없기 때문에 본 연구의 내용은 가치가 높다. 본 연구에서 미생물에 의한 점토 광물의 변이가 검토되면, 물리·화학적 factor와 별개로 미생물에 의한 **bio-alteration**을 새로운 factor로 남극 퇴적 환경의 다양성에 대한 해석을 가능하게 해준다. 또한 향후 극지연구소의 극지 바이오센터와의 공동연구가 진행된다면, 미생물의 metabolism을 광물의 변이작용과 연계하여 해석할 수 있고, 환경 유전체 분석과 같은 빅데이터 해석에 도움을 줄 수 있다, 이에 따라 극한지에서 생명체의 활동성 및 다양성에 대한 연구를 가능하게 해준다. 또한 남극 퇴적환경에 대한 해석을 미생물에 의한 광물의 전이 과정과 연계하여, 퇴적 당시의 생지구화학적 특성을 예측할 수 있으며 고기후 해석에 기여 할 수 있다. 본 연구는 기초연구로서 당장의 경제적 파급효과를 기대할 수는 없지만, 퇴적 환경 변화에 대한 나노스케일 분석을 가능하게 할 수 있는 연구로서 가치가 크다.

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 표면적 변화, 물의 흡수율 변화, 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 천부환경에서 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 스�멕타이트를 일라이트로 전이시키는 메커니즘은 명확히 규명되지 않았다. 하지만 최근 게재된 Jung et al., (2019)의 라센C 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. 또한, 퇴적물의 점토광물을 이용한 연구에서는, 다양한 고환경 복원을 시도하는 방법으로 사용되고 있다. 기존의 점토광물을 이용한 고환경 복원 연구에서는 단순히 퇴적물의 점토광물의 함량비를 이용하여 퇴적물의 이동에 대해 보고하였다 (Hillenbrand et al., 2003; Ehrmann et al., 2011). 하지만, 남극의 경우 과거 빙하기-간빙기에 따라 빙붕의 움직임이 달라지고 이로 인해 주변 퇴적환경이 변하는데, 점토광물의 함량비 만으로는 퇴적물의 이동 및 기원지를 파악하는데 한계점이 있었다. 그래서 스�멕타이트의 화학 성분을 분석함으로써 빙하기-간빙기에 따른 퇴적물 기원지를 추적하는 연구가 수행되었다 (Park et al., 2019). 이처럼 남극에서는 점토광물을 활용하여 고환경을 복원하고, 극한지와 같은 화학적 풍화작용이 우세하지 않은 지역에서 미생물에 의한 bio-alteration에 대한 연구와 나노스케일에서의 접근 방식은 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 퇴적물내의 고환경 변화에 따른 스�멕타이트 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 빙붕이 움직이면서 빙붕 아래의 환경에서 산화-환원 조건이 달라지는 데 이에 대한 증거로써 광물 내의 bio-alteration의 흔적을 확인 함으로써 고환경 복원에 대한 새로운 접근을 할 수 있는 시도이다.

● 본 연구실의 경우 점토광물의 저도변성 (low-grade metamorphism) 과정에서 광물의 속성 작용, 미생물-점토광물 간의 반응, 세일의 미세구조 등의 주요 연구를 수행하면서 특히, 미생물에 의한 점토광물의 구조 내 철의 산화 환원 반응과 그로 인해 야기되는 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.

● 최근 발간된 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 6차 보고서에 따르면 최근 급격한 남극 빙하의 후퇴는 상당한 해수면 상승을 야기할 수 있고, 이는 인류의 생존에 큰 위협이 될 수 있다는 내용을 발간하였다. 이에 따라 전세계적으로 고기후를 복원하고 향후 기후를 예측하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 연구실은 점토광물의 다양한 특성에 대해 연구를 수행하면서 남극의 퇴적물에 기록된 점토광물의 물리적, 화학적 특성의 변화가 고퇴적 환경을 지시한다는 것을 확인함으로써 고환경 복원에 대한 다양한, 새로운 접근을 시도하고 있으며, 이러한 연구는 지금까지 수행된바가 거의 없다.

2-3. 연구과제의 중요성

최근 연구에 의하면, 박테리아에 의한 스팍타이트-일라이트 상전이시 부수적으로 침전 (secondary precipitation)되는 siderite (FeCO_3)가 biosignature가 될 수 있다는 가능성이 제시되었다 (Zhang et al., 2007). 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 상관 관계를 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 구조 분석은 향후 외계행성의 생명체에 대한 연구에 중요한 역할을 할 수 있으며, 실제로 최근 발견된 외계 행성 중 두꺼운 얼음으로 덮혀 있는 행성의 경우 아래에는 액체 상태의 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. 남극에는 이와 같이 두꺼운 얼음의 밑에 호수 형태로 존재하는 빙저호가 존재하고 빙저호에서 생명체의 대사과정에 점토광물이 포함된 퇴적

물이 하나의 철 순환에 역할을 할 수 있다는 가능성이 제시되고 있다. 하지만 이에 대한 연구가 아직은 부족한 상황이고 우리 연구실의 연구 결과가 해당 주장을 충분히 증명할 수 있다. 이 외에도, 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

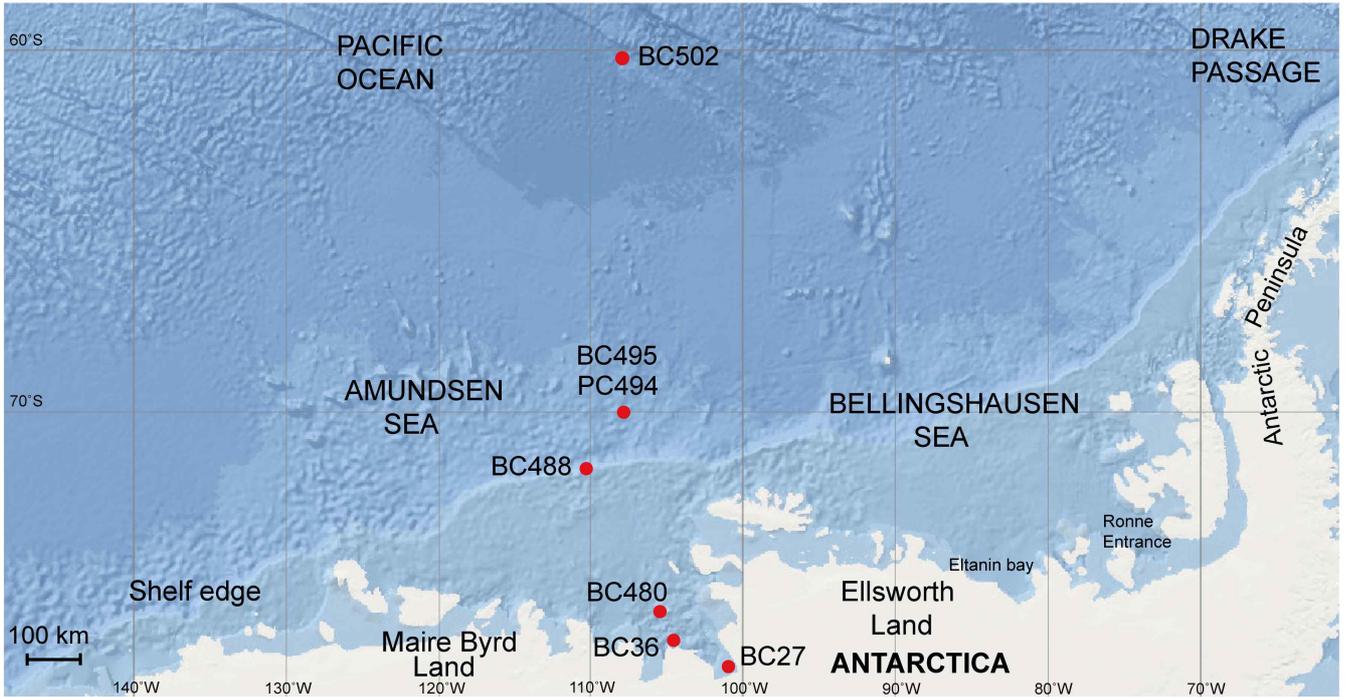


그림 1) 서남극 아문젠 해 (Amundsen Sea) 대륙붕 및 대륙저면 탐사지역. 본 연구에서는 아문젠 해 파인 섬 입구 (Pine Island), 스웨이트 빙하 (Thwaite Glacier), 아문젠 해 대륙붕, 대륙저면, 남태평양 분지에서 채취한 코어에 대한 분석을 진행함.

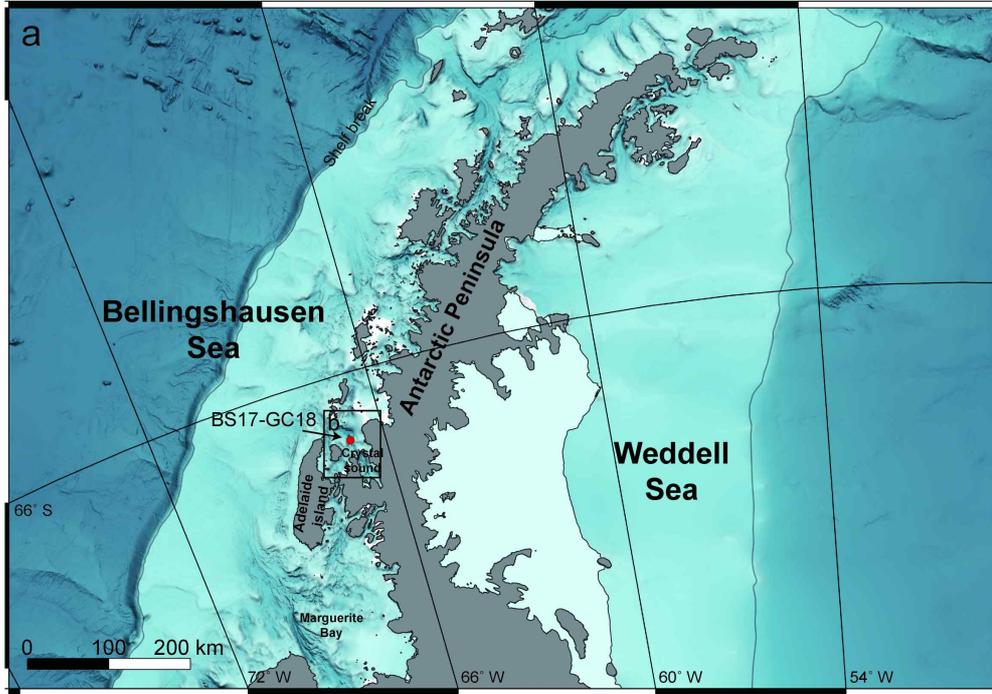


그림 2) 벨링스하우젠 해의 크리스탈 사운드 지역 (Crystal Sound, Bellingshausen Sea, West Antarctica). 서남극 빙붕의 최후 빙하기 때 이후로 후퇴하면서 드러난 대륙붕 안쪽의 분지 지역에 대해 중력 코어 (BS17-GC18)를 이용한 퇴적물 시료 분석 및 배양 실험을 진행함.

극지연구소



그림 3) 로스 해의 케이프 스캇 지역 (Cape scott, Ross Sea, West Antarctica). 서남극 빙봉의 최후 빙하기 이후 드러난 대륙붕 안쪽 지역에 대해 중력 코어 (BS19-GC16)를 이용한 퇴적물 시료 분석.

나. 연구방법

1) 서남극 빙붕 주변 해양 퇴적물 채취 및 광물학적 분석:

1-1) 극지연구소와 협력하여 서남극 빙붕 후퇴 지역 퇴적물 채취

● 퇴적물 코어의 깊이 별 색깔 변화와 퇴적 구조를 이용하여 샘플링 실시

1-2) 해저 퇴적물의 퇴적상 변화에 따른 점토광물의 성분비, 광물구조 분석

● X-ray diffractometer (XRD)로 구한 그래프를 이용해 Biscaye (1964)에서 제시한 반정량 분석법을 통한 점토광물의 상대적 함량 변화 분석 실시

● Master sizer를 이용하여 퇴적물의 깊이 별 입도 분포를 구하고 퇴적 환경과의 비교를 실시

1-3) 과거 온난기 시기의 대륙붕 및 대륙 저면의 해저 퇴적물에 대한 광물학적 분석

● TEM, EDS를 이용하여 코어의 위치 별 스멕타이트의 화학 성분을 분석하여 기원 지 구분에 대한 proxy로써 사용할 수 있음을 확인

2) 해저 퇴적물을 이용한 고환경 해석 및 철 환원 미생물에 의한 광물의 Biomarker 조사 (I)

2-1) 빙붕 후퇴 지역 퇴적물 코어에 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석

● X-ray diffractometer (XRD)로 구한 그래프를 이용해 Kubler index (Eberl, 1989)에서 제시한 illite crystallinity 분석 실시

● XRD, Transmission Electron Microscopy (TEM)을 이용하여 나노스케일에서의 점토광물 함량비, 화학 성분, 구조적인 분석 실시

2-2) 해저 퇴적물 코어의 점토광물 화학 성분 분석을 통한 고환경 해석 proxy 개발

● X-ray diffractometer (XRD)로 구한 그래프를 이용해 Biscaye (1964)에서 제시한 반정량 분석법을 통한 점토광물의 상대적 함량 변화 분석 실시

● TEM, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)를 이용하여 퇴적물 내 점토광물인 스멕타이트를 나노스케일에서 분석하고 화학 성분 분석 실시

2-3) 과거 온난기 시기의 대륙붕의 해저 퇴적물에 대한 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석

● XRD, TEM을 이용해서 퇴적물 내 철 함유 광물에 대한 화학 성분을 분석하고, 산화-환원 환경에 따른 광물의 구조적인 변화에 대한 SAED와 crystallinity, Crystal size distribution, 철의 산화수 분석 실시

3) 해저 퇴적물을 이용한 고환경 해석 및 철 환원 미생물에 의한 광물의 Biomarker 조사 (II)

3-1) 빙붕 후퇴 지역의 퇴적물 코어의 성분 분석 및 biomarker 분석

- M1 medium을 이용한 저온 환경에서 퇴적물 배양 실험을 통해 미생물에 의한 철의 환원을 관찰하고 1,10 phenanthroline method을 이용하여 환원 정도를 측정 실시
 - TEM을 이용하여 시간 별 배양 시료에 대해 점토광물의 화학적, 구조적인 변화를 나노스케일에서 분석 실시
- 3-2) 해저 퇴적물의 빙기-간빙기에 따른 고환경 변화에 따른 퇴적물 기원지 분석
- 코어 별 점토광물의 함량비, 화학성분 비율을 이용하여 분포도 작성
 - Kolmogrov-Smirnov test (K-S test)를 이용하여 기원지와 연구지역간의 유사성 분석 실시
- 3-3) 과거 온난기 시기의 대륙붕의 해저 퇴적물의 종합적인 고환경 해석
- TEM, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)를 이용하여 퇴적물 내 점토광물인 스�멕타이트를 나노스케일에서 분석하고 화학 성분 분석 실시
 - Kolmogrov-Smirnov test (K-S test)를 이용하여 빙하기-간빙기 별로 기원지와 연구지역 간의 유사성 분석 실시



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3-2. 연구개발 수행 내용 및 연구결과

가. 연구개발 수행 내용

1) 서남극 빙봉 주변 해양 퇴적물 채취 및 광물학적 분석:

- 탐사를 통한 서남극 빙봉 후퇴 지역 피스톤 코어 채취
- 채취한 해저 퇴적물의 X-ray diffractometer (XRD)를 이용한 광물학적 분석
- 반정량분석 (Biscaye, 1965)을 통한 깊이별 점토광물 함량비 변화 분석
- 빙봉 후퇴 지역의 해저 퇴적물의 점토광물에 대한 SEM, TEM을 이용한 광물학적 분석
- 과거 온난기 시기의 대륙붕 해저 퇴적물에 대한 퇴적상의 차이에 따른 깊이별 illite crystallinity (IC), 광물구조, 광물의 화학성분 변화 분석

2) 해저 퇴적물을 이용한 고환경 해석 및 철 환원 미생물에 의한 광물의 Biomarker 조사 (I)

- 빙봉 후퇴 지역의 퇴적물 코어의 깊이에 따른 IC 측정
- 빙봉 후퇴 지역의 퇴적물 코어의 IC 변화에 따른 점토광물의 TEM 분석
- TEM-EELS를 이용하여 퇴적상에 따른 실제 점토광물 구조 내에서의 Fe-redox state 를 측정
- 해저 퇴적물 코어의 깊이에 따른 점토광물의 TEM-EDS를 이용한 화학성분 분석
- 과거 온난기 시기의 대륙붕 퇴적물에 대한 batch 실험을 통한 광물-미생물간의 생지 화학적 분석
- Batch 실험에 대한 time point 별 철의 환원 및 용출, 2차 광물 생성, SAED pattern 을 통한 광물의 구조 변이 분석

3) 해저 퇴적물을 이용한 고환경 해석 및 철 환원 미생물에 의한 광물의 Biomarker 조사 (II)

- 빙봉 후퇴 지역의 퇴적물 코어의 퇴적상에 따른 Pyrosequencing data analysis를 통한 미생물의 군집 분석
- TEM을 이용한 점토광물의 Crystal Size Distributions (CSDs) 측정
- IC, CSDs, Fe-redox state 등의 광물학적 특징과 미생물 군집 분포 비교 및 해석
- 2차년도까지의 결과를 통한 연구지역 주변의 퇴적물에 대한 점토광물 분포 및 화학성

분 분포 지도 확보 및 해석

- 최후 빙하기-간빙기 (현생 퇴적물)에 대한 해저 퇴적물 코어의 점토광물에 대한 양이온 교환능, 화학성분 분포를 통한 서남극 빙붕 변화에 따른 종합적인 퇴적물의 기원지 분석
- 2차년도까지의 결과를 통한 과거 온난기부터 빙하기에 이르는 대륙붕과 대륙저 퇴적물의 종합적인 광물학적 변화와 생지화학적 변화 간의 상호관계 분석
- 온난기 시기의 서남극 빙붕의 움직임과 주변 해역 및 해류 순환에 관한 퇴적 환경과의 상관 관계 해석

나. 연구결과

1) 서남극 빙붕 주변 해양 퇴적물 채취 및 광물학적 분석:

(가) 극지연구소와 협력하여 서남극 빙붕 후퇴 지역 퇴적물 채취

- 서남극의 아문젠 해에 위치한 대륙붕, 대륙저면, 대륙사면, 그리고 남태평양 분지의 표층 퇴적물과 코어 퇴적물을 획득하여 분석하였다 (그림 1).
- 해양 퇴적물의 위치 선정은 아문젠 해의 경우 남태평양과 맞닿아 있는 해양으로써 최근 인공위성 관측을 통해 서남극 지역 중 가장 급격하게 빙붕이 후퇴하고 있는 지역 중 한 곳으로 알려져 있다 (Rignot et al., 2011). 그러므로, 아문젠 해의 급격한 빙붕 후퇴로 드러난 지역에 대해 과거 퇴적 환경을 조사하여 이 지역의 과거 빙하기-간빙기에 따른 서남극 빙상의 변화 동안에 어떠한 퇴적 환경 변화를 겪었는지 파악하는 것이 매우 중요하다. 특히 퇴적 환경의 변화는 이 지역의 퇴적물의 이동과 기원지에 영향을 미친다. 그래서 퇴적물 기원지 및 퇴적물의 이동 경로를 파악하는 것은 과거 퇴적 환경을 복원하는 중요한 단서라 할 수 있다. 또한 서남극 빙상의 영향을 받는 여러 해역 중, 아문젠 해는 오직 서남극 빙상만의 영향을 받는다. 최근 급격한 빙상의 후퇴를 보이는 로스 해나 웨델 해의 경우, 동남극 빙상과 서남극 빙상의 영향을 모두 받기 때문에 서남극 빙상만의 영향을 받는 아문젠 해를 연구하는 것이 매우 적합하다.
- 아문젠 해는 최근 점토광물을 이용한 기원지 분석을 통해, 대륙 저면의 퇴적물이 빙하기-간빙기에 따라 기원지가 다르다는 것이 제시되었다. 간빙기의 경우, 아문젠 해의 스멕타이트 함량보다 상당히 높은 스멕타이트의 함량을 보이는 구간이 아문젠 해 북동부 대륙저면 지역에서 관찰되었다. 하지만 이에 대한 연구가 적기 때문에 이 구간의 스멕타이트가 높은 이유에 대해 충분히 설명되지 못했다. 이에 해당 연구 지역의 퇴적물 시료를 채취하여 해당 퇴적물의 기원지와 이동 경로에 대한 자세한 연구가 필요했고, 퇴적물 분석을 진행하였다.

- 아문젠 해는 남극을 시계 방향으로 순환하는 남극 순환류 (Antarctic Circumpolar Current)에 영향을 받는 지역이다 (Orsi et al., 1995). 남극 순환류는 남극 주변을 위도 60도 부근에서 순환하는 해류이며 수송량이 매우 큰 해류 중 하나이다. 또한 이외에도 아문젠 해는 심층 해류의 영향을 받는 지역이다. 대표적으로는 환남극 심층수와 남극 저층수가 있다. 환남극 심층수는 온도가 비교적 높고 염분이 높은 해류로 중위도부터 남극 대륙 안쪽까지 영향을 미칠 수 있다.
- 퇴적물 시료는 1차 년도에는 기원지를 파악하고자 하는 아문젠 해 대륙저면의 PC494, BC495 시료와 아문젠 해 대륙붕에 위치한 BC480, BC488시료, 남태평양 분지의 BC502시료를 샘플링하여 분석하였다 (표 1). BC480은 파인 섬 근처의 퇴적물이 모이는 구간에 위치한 시료이며 PC494와 BC495는 대륙저면 상부에 위치하며 대륙붕으로부터 온 퇴적물과 원양으로부터 오는 퇴적물의 영향을 모두 확인 할 수 있다. BC488은 대륙사면에 위치한 퇴적물로 대륙붕 끝단에서 공급된 퇴적물의 영향이 많다고 예상할 수 있다. 반면에 BC502는 아문젠 해에서는 많은 거리가 떨어진 남태평양의 남동쪽에 위치한 분지에서 획득한 퇴적물이다.



Ge ar	Sta- tion	Location	Latitude	Longitude	water depth	sediment description	sample depth	Age
BC	480	Amundsen Sea, inner continental shelf (Pine Island Bay)	74° 08' .30	105° 44' .40	1452	Brownish mud on top, grey mud below	0-3	modern
BC	488	Amundsen, upper continental slope	71° 09' .78	110° 04' .87	1378	Brownish foraminiferal ooze/mud	0-3	modern
PC	494	Amundsen Sea, drift crest on continental rise	70° 02' .93	108° 20' .69	3450	Brownish foraminiferal ooze/mud	199-202	last glacial period
BC	495	Amundsen Sea, drift crest on continental rise (very close to site PC494)	70° 02' .92	108° 20' .95	3468	Brownish foraminiferal ooze/mud	0-3	modern
BC	502	Amundsen Sea, abyssal plain (at Polar Front)	60° 32' .11	108° 18' .14	5205	Brownish diatomaceous ooze	0-3	modern

표 1. BC480, BC488, BC495, PC494, BC502 코어에 대한 위치, 수심, 퇴적물의 특징, 연대

		Description
	Unit 1	Diatomaceous mud. Bioturbated silty clay w/ laminations. N3 (Dark Gray)/Bright 5Y5/6 (Light olive gray) (alternated laminations).
	Unit 2	Bioturbated diatomaceous clay w/ laminations. N2(Grayish black) /N3 (Dark gray) (alternated laminations).
	Unit 3	Diatomaceous clay. Structureless facies w/ many small holes. N2 (Grayish black) w/ 4 distinctive Dark 5Y5/6 (Light olive gray) layers.

그림 4) RS19-GC16의 깊이별 퇴적상 및 퇴적물의 색깔

- 로스 해 케이프 스카트의 대륙붕에서 로스 해의 빙상이 후퇴하고 드러난 지역에서 RS19-GC16 퇴적물 코어를 획득하였다 (그림 3). 코어의 퇴적상에 따라 구간을 3개로 구분하고 10-15 cm 간격으로 샘플링을 진행하여 광물 분석을 실시하였다.
- BS19-GC16 코어는 총 409 cm 깊이의 코어로 크게 3개의 구간으로 퇴적물의 색과 구조로 구분된다. 먼저 구간 3은 259-409 cm 깊이의 구간이며 대부분 회색이 도는 검은 색의 색상을 띄며 일부 구간에서 밝은 올리브 회색의 층이 교호되어 나타난다. 대부분 구조질 점토로 구성되어 있으며 일부 구멍이 퇴적물에서 관찰된다. 특징적으로 옅은 황냄새를 맡을 수 있다. 구간 2에서는 구간 3보다는 밝은 회색빛 검은색과 어두운 회색의 색상을 보인다. 일부 생교란 작용의 흔적을 관찰할 수 있으며 구조질 점토와 엽리의 흔적을 관찰 할 수 있다. 일반적으로 이러한 퇴적물은 빙상이 점진적으로 후퇴하면서 나타난 흔적이라 볼 수 있다. 생물의 생산성이 점차 증가하면서 생물성 기원의 퇴적상의 흔적도 증가한 것으로 보인다. 구간 1로가면 밝은 올리브 회색과 어두운 회색의 퇴적물이 나타난다. 또한 점차 생교란 작용의 흔적이 증가하는 것을 관찰 할 수

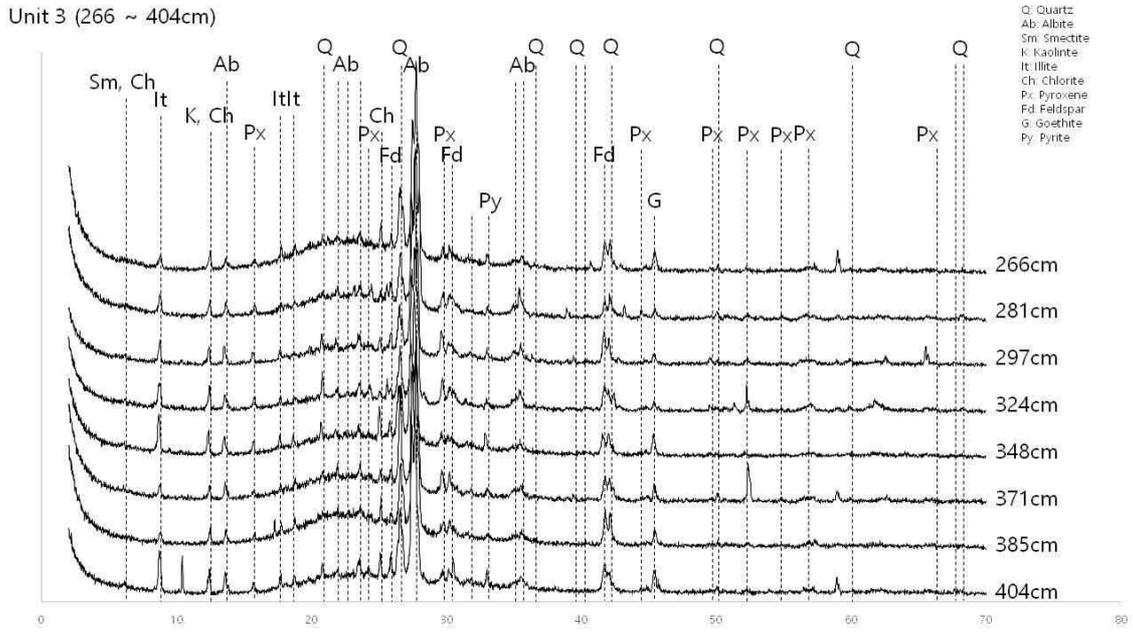


그림 7) RS19-GC16 코어 구간 3에서의 입도 분리하지 않은 시료에 대해 부정 방위법 XRD 분석 결과 (266 - 404 cm)

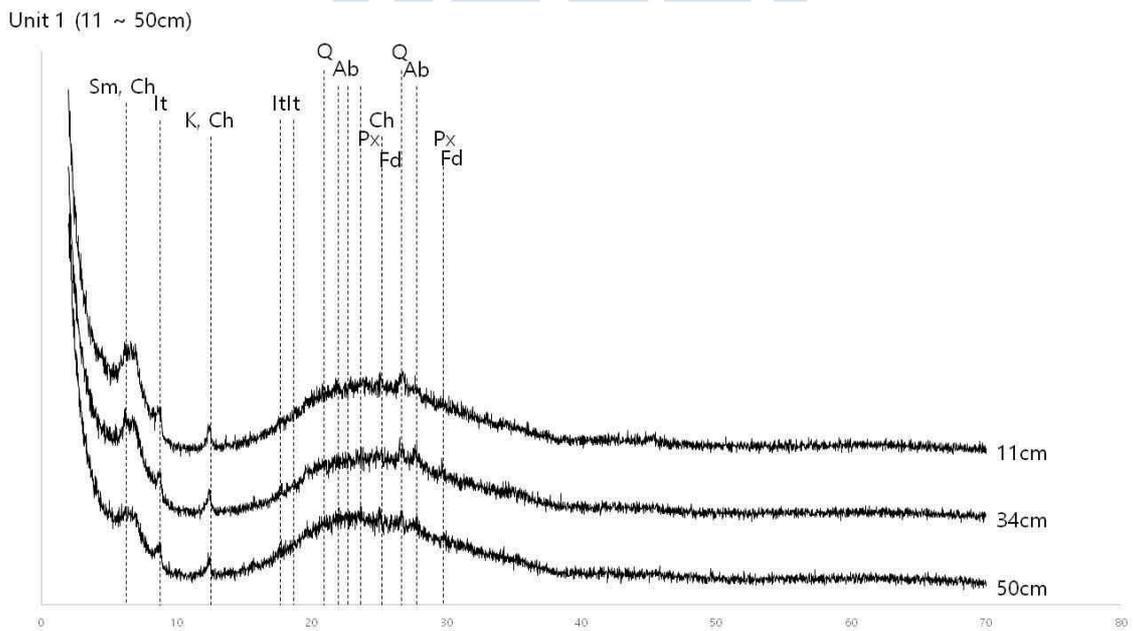


그림 8) RS19-GC16 코어의 퇴적물에 대해 2 μm 이하로 입도 분리한 후 점토광물의 정방 위 XRD 측정 분석 결과 (11 - 50 cm)

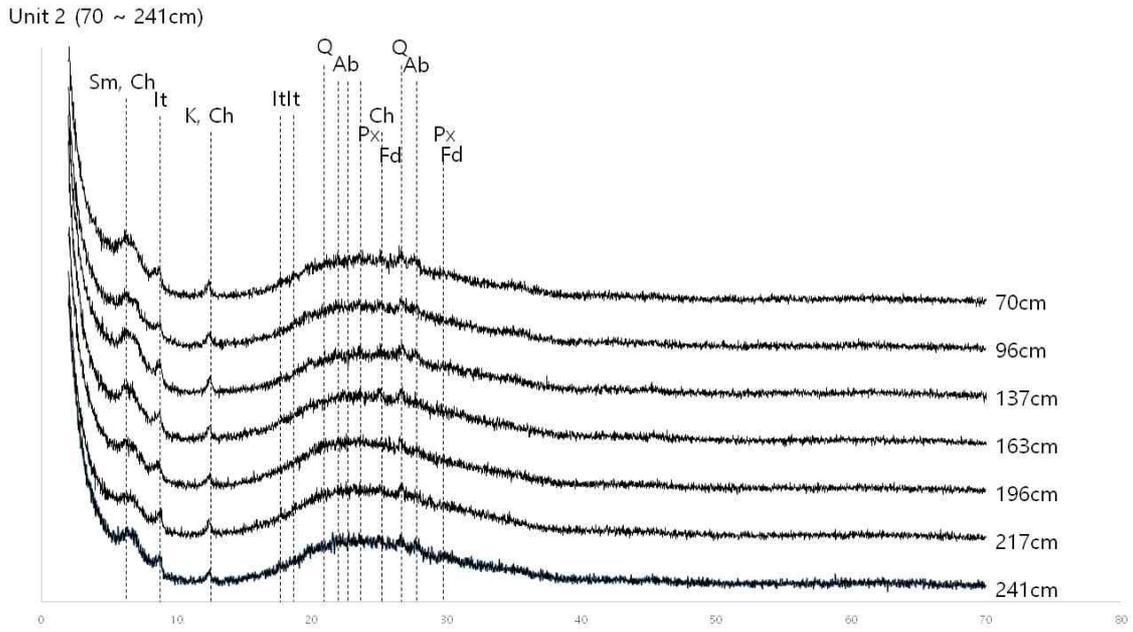


그림 9) RS19-GC16 코어의 퇴적물에 대해 2 μm 이하로 입도 분리한 후 점토광물의 정방 위 XRD 측정된 분석 결과 (70 - 241 cm)

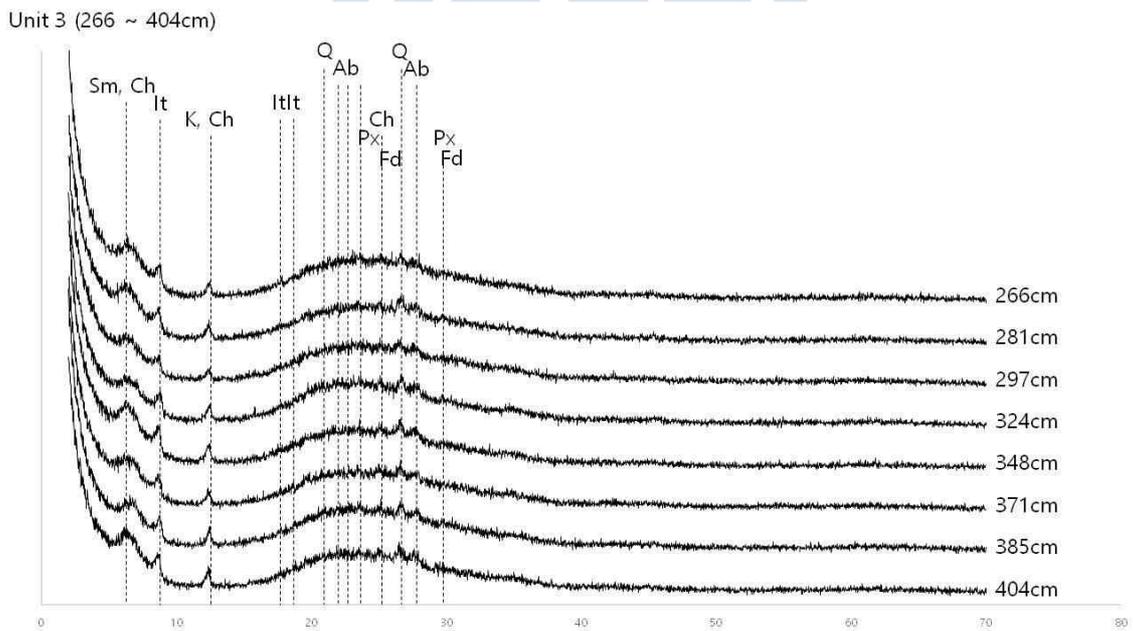


그림 10) RS19-GC16 코어의 퇴적물에 대해 2 μm 이하로 입도 분리한 후 점토광물의 정방 위 XRD 측정된 분석 결과 (266 - 404 cm)

있다. 이러한 퇴적물과 함께 구조질 점토와 엽리의 혼적도 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 빙상이 대륙쪽으로 상당히 후퇴하면서 유빙의 양도 감소하고, 이에 따라 일차 생산성이 많이 증가하여 연니의 공급이 증가되었으며, 원양성으로부터 공급된 퇴적물이 다량 퇴적되어 올리브색의 퇴적물이 나타난 것으로 보인다 (Yoo et al., 2008; Lucchi et al., 2002).

- 코어 퇴적물은 X선 회절 분석 (X-ray diffraction, XRD)에서 각 광물 별 명확한 구분을 위해 30 % 과산화수소수를 이용하여 퇴적물 내의 유기물을 충분히 제거하고, 원심분리기를 이용하여 상층액을 제거한다. 그리고 증류수로 워싱을 실시한 뒤 동결건조하여 유기물을 제거한 분말 상태의 퇴적물 시료를 획득하였다. 전체적인 퇴적물의 광물 동정을 위해 입도 분리를 하지 않은 시료를 부정방위법으로 XRD를 실시하였다. X선 회절 분석기는 Rigaku 사의 Miniflex II를 이용하였으며, Cu-K α radiation을 이용하여 분석 조건은 2 theta 구간에서 2~70° 범위를 주사 간격 0.02°, 스캔 속도 1.5 °/min 조건으로 측정하였다 (그림 5, 6, 7).
- 점토광물의 동정은 유기물을 제거한 분말 상태의 퇴적물 시료를 증류수로 채운 후, Stoke's law를 이용하여 원심분리기를 이용해 2 μ m 이하의 입자만 포함된 현탁액을 추출하였다. 이 현탁액을 진공펌프에 연결된 유리 깔대기에 넣고 필터에 침전시켜서 점토광물의 정방위 시료를 획득하였다. 정방위 시료는 유리 슬라이드 위에 도포하여 공기 중에서 건조한 뒤 XRD 분석을 실시하였다. 점토광물에 대한 정방위 시료는 2 theta 구간 2~70° 범위를 측정하였고, 건조 시료를 24시간 동안 에틸렌글리콜로 포화시킨 후 해당 시료를 2 theta 구간 2~30° 범위를 측정하여 결과를 비교하였다 (그림 8, 9, 10).
- 광물 분석 결과 부정방위법에 대한 XRD 결과, 선명하지는 않으나 거의 모든 샘플에서 화산활동 기원의 일차광물인 석영과 장석(특히 조장석)이 가장 우세하게 나타났으며, 각각 $2\theta = 26.82^\circ$, $2\theta = 27.78^\circ$ 에서 피크를 보였다. 또한 스�멕타이트, 녹니석, 일라이트, 카올리나이트 등의 점토광물 피크도 관찰됐으며, 휘석, 침철석, 황철석과 같이 철성분이 포함된 광물들의 피크도 나타났다. 깊이에 따라서 미세한 광물간 비율상의 차이가 나타나며, 구간 2와 구간 3에서 $2\theta = 15^\circ \sim 30^\circ$ 사이의 피크가 넓게 나타났으나, 전체적으로는 새로운 광물이 나타나지는 않았다. 각 구간별로 비교했을 때, 더 깊은 구간일수록 일라이트와 녹니석의 피크가 점진적으로 강하게 나타나는 경향이 나타나며, 석영과 조장석의 피크 강도가 역전되는 특징이 나타난다.
- 점토광물에 대한 분석 결과, 스�멕타이트는 $2\theta = 6.16^\circ$ 에서 피크를 나타냈으며 녹니석의 피크와 겹쳐서 나타나기 때문에 구분하기 어렵다. 일라이트는 $2\theta = 8.807^\circ$ 에서 피크를 나타냈고, 카올리나이트의 피크는 12.34° 에서 녹니석의 피크와 겹쳐서 나타났다.

녹니석은 앞서 언급한 $2\theta = 6.16^\circ$, $2\theta = 12.34^\circ$, 그리고 $2\theta = 25.04^\circ$ 에서 나타났으며, 앞서 스멕타이트와 겹치는 피크에 대해서는 에틸렌글리콜 처리를 통해 분리했다. 에틸렌글리콜 처리 시, 스멕타이트의 층간 물질을 에틸렌글리콜 분자가 치환해 스멕타이트의 층간 간격이 증가하게 된다. 이로 인해 스멕타이트의 피크는 XRD 상에서 왼쪽으로 이동해 녹니석의 피크와 구분된다. 녹니석의 피크는 $2\theta = 6.16^\circ$ 으로 일정했고, 스멕타이트의 피크는 $2\theta = 5.2^\circ$ 으로 왼쪽으로 이동하면서 에틸렌글리콜 처리 전보다 점토 광물 구조 내의 d-spacing이 증가한 것을 확인할 수 있었다.

(다) 과거 온난기 시기의 대륙붕 및 대륙 저면의 해저 퇴적물에 대한 광물학적 분석

Bulk mineralogy

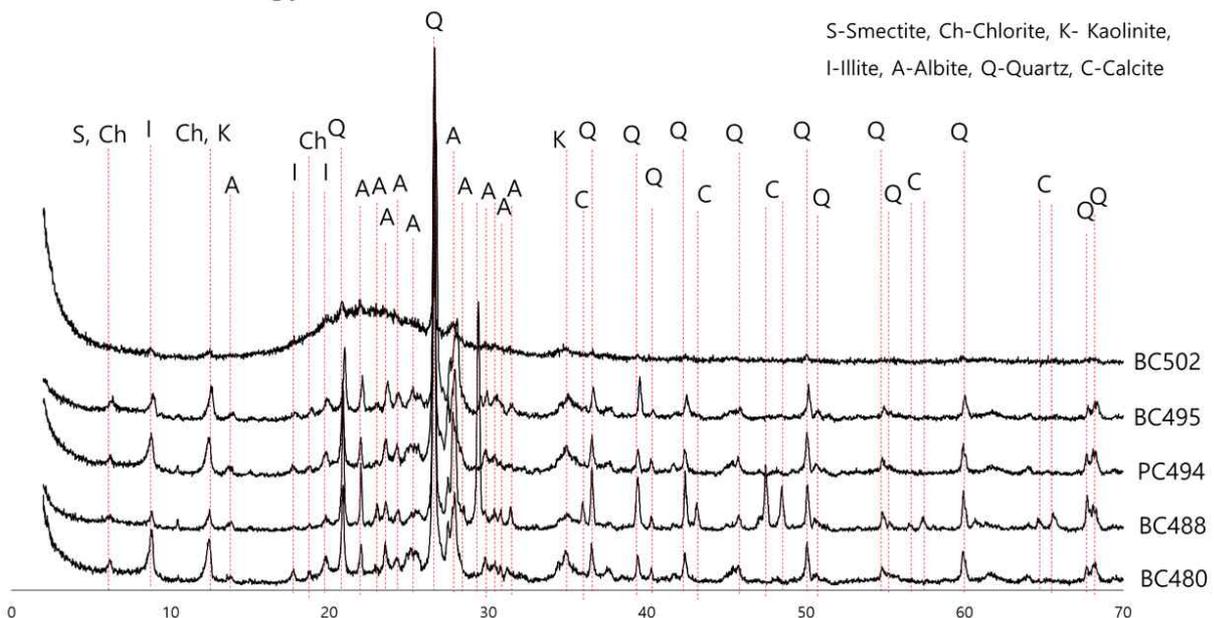


그림 11. BC480, BC488, PC494, BC495, BC502 코어의 입도 분리하지 않은 시료에 대해 부정 방위법 X선 회절 분석법으로 측정한 분석 결과, 광물 종류에서 큰 차이가 없었다.

Clay mineralogy

Ch-Chlorite, I-Illite,
Q-Quartz, K-Kaolinite, S-Smectite
A-Albite, An-Anorthite

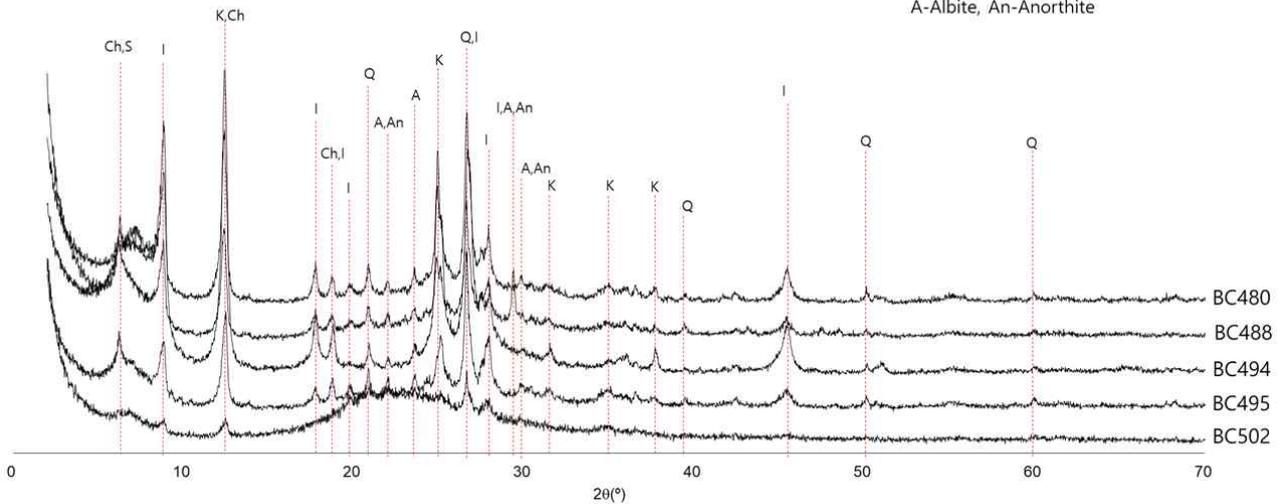


그림 12. BC480, BC488, PC494, BC495, BC052 코어의 퇴적물에 대해 2 μm 이하로 입도 분리한 후 점토광물의 정방위 XRD 측정된 분석 결과이다.

- 아문젠 해의 해양 퇴적물 시료에 대해 각 시료별 특징을 보면 전반적으로 BC480, BC488, PC494, BC495, BC502 코어는 표층 퇴적물이기 때문에 생교란 흔적이 있는 갈색의 유공층 연니 퇴적물들이 관찰된다. 대부분 0-3 cm의 표층 퇴적물을 분석하였으며 원양성 퇴적물이 많이 퇴적된 것으로 보인다. PC494의 경우 빙하기의 시료로 표층 퇴적물이 아닌 피스톤 코어의 199-202 cm의 퇴적물을 분석하였다. 퇴적층의 특징으로는 갈색의 유공층 연니가 함유된 이토층으로 관찰되었다.
- 퇴적물 시료는 대부분 빙붕이 후퇴한 다음인 공해 환경 (open marine condition)의 퇴적 환경 특징을 보이며 빙붕이 매우 후퇴하여 grounding line으로부터 매우 먼 환경에서 퇴적된 것으로 보인다. 그래서 대부분 갈색의 원양성 퇴적물이 우세하며 바다를 덮은 빙하의 양이 줄어드는 간빙기 퇴적물이기 때문에 생물의 활동성이 증가하고 다량의 유공층 연니가 퇴적된 것으로 보인다 (Lucchi et al., 2007). 각각의 코어 시료들에 대해 광물학적 분석을 위해서 5-10 mL를 소분하여 유기물 제거 과정을 진행하였다.
- 코어 퇴적물은 X선 회절 분석 (X-ray diffraction, XRD)에서 각 광물 별 명확한 구분을 위해 30 % 과산화수소수를 이용하여 퇴적물 내의 유기물을 충분히 제거하고, 원심분리기를 이용하여 상층액을 제거한다. 그리고 증류수로 위상을 실시한 뒤 동결건조하여 유기물을 제거한 분말 상태의 퇴적물 시료를 획득하였다. 전체적인 퇴적물의 광물 동정을 위해 입도 분리를 하지 않은 시료를 부정방위법으로 XRD를 실시하였다. X선 회절 분석기는 Rigaku 사의 Miniflex II를 이용하였으며, Cu-Kα radiation을 이용하여 분석 조건은 2 theta 구간에서 2~70° 범위를 주사 간격 0.02°, 스캔 속도 1.5 °/min 조건으로 측정하였다 (그림 3).

- 점토광물의 동정은 유기물을 제거한 분말 상태의 퇴적물 시료를 증류수로 채운 후, Stoke's law를 이용하여 원심분리기를 이용해 2 μm 이하의 입자만 포함된 현탁액을 추출하였다. 이 현탁액을 진공펌프에 연결된 유리 깔대기에 넣고 필터에 침전시켜서 점토광물의 정방위 시료를 획득하였다. 정방위 시료는 유리 슬라이드 위에 도포하여 공기 중에서 건조한 뒤 XRD 분석을 실시하였다. 점토광물에 대한 정방위 시료는 2 theta 구간 2~70° 범위를 측정하였고, 건조 시료를 24시간 동안 에틸렌글리콜로 포화시킨 후 해당 시료를 2 theta 구간 2~30° 범위를 측정하여 결과를 비교하였다 (그림 4).
- XRD 분석 결과 코어에 따라 전반적인 광물의 종류는 점토광물로는 스멕타이트, 클로라이트, 일라이트, 카올리나이트가 관찰되었고, 석영, 조장석이 관찰되었다. 코어에 따라 광물별로 피크에 차이가 관찰되었다.
- 2 μm 이하로 입도 분리를 실시한 퇴적물은 점토광물에 대해 더 자세하게 관찰하기 위해 슬라이드 글라스에 공기 중 건조 형태로 정방위법 XRD 측정을 진행하였다. 점토광물인 스멕타이트, 일라이트, 클로라이트, 카올리나이트가 주된 점토광물로 관찰되었고, 일부 장석류와 석영의 광물들도 관찰되었다. 각 코어별로 점토광물에 따른 강도의 차이를 관찰 할 수 있다. 그래서 점토광물의 함량비를 비교하기 위하여 Biscaye, 1965가 제시한 반정량 분석법을 실시하여 코어 별로 점토광물의 함량비를 측정하였다.

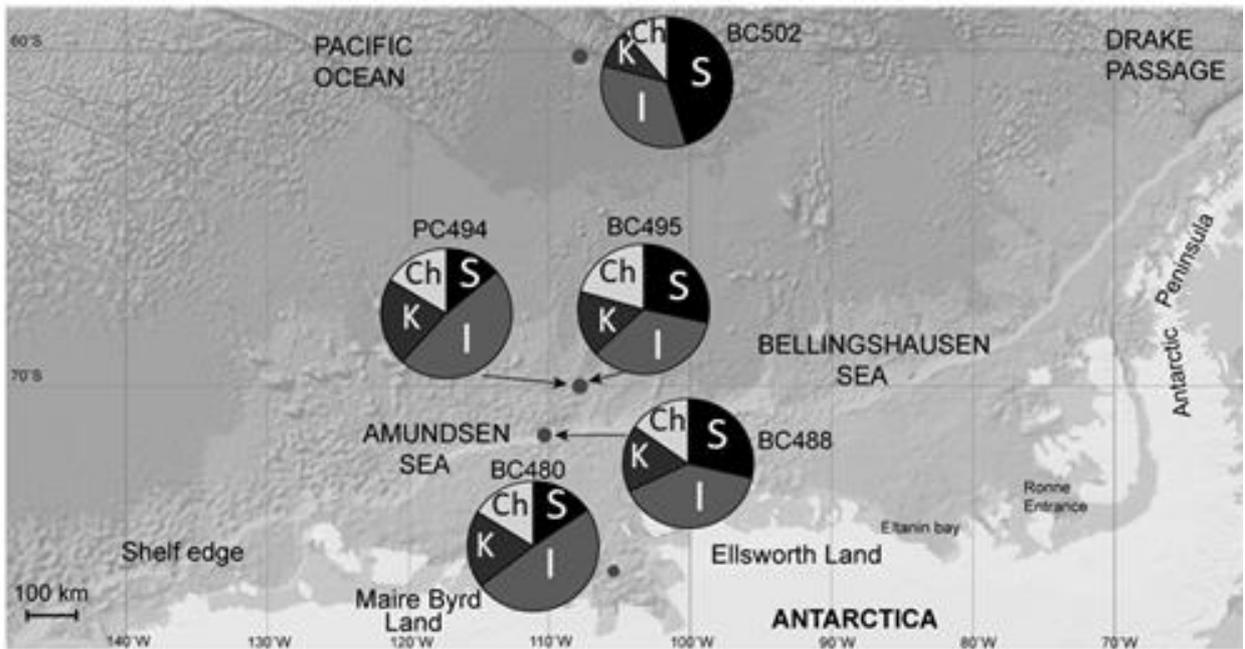


그림 13. BC480, BC488, PC494, BC495, BC502 코어의 점토광물 함량비와 이를 통해 BC495가 스멕타이트가 증가하는 것을 관찰 할 수 있다.

Depth (cm)	S (wt%)	I (wt%)	K (wt%)	C (wt%)
BC480	15.54	49.09	19.26	16.11
BC488	28.62	39.32	16.75	15.31
PC494	13.97	47.81	21.86	16.36
BC495	28.39	34.69	16.37	20.55
BC502	45.21	33.92	9.78	11.09

표 2. BC480, BC488, PC494, BC495, BC502 코어의 점토광물 함량비

- 반정량 분석 결과 아문젠 해 대륙붕의 점토광물은 일라이트가 49 %로 대부분의 함량을 차지하고 있다. 대륙저면의 BC495와 PC494는 매우 인접한 위치임에도 불구하고 점토광물의 함량비에 큰 차이를 보인다. PC494는 일라이트의 함량이 48 %, 스멕타이트가 14 % 정도로 나타나는데, 이는 대륙붕 BC480의 점토광물 함량비와 매우 유사하다. 즉 빙하기에 대륙붕 끝단까지 빙상의 성장으로 인해 대륙성 퇴적물이 대륙저면까지 공급된 것으로 보인다.
- 반면에 BC495는 스멕타이트의 함량이 28 % 일라이트가 35 %로 PC494에 비해 높은 스멕타이트와 낮은 일라이트의 함량비를 보인다. 이는 퇴적 당시 점토광물 함량에 영향을 주는 퇴적물이 달라졌음을 의미한다. 또한 아문젠 해의 남태평양 쪽인 BC502를 보면 스멕타이트의 함량이 약 45퍼센트로 매우 높은 함량을 보여준다. 즉 BC495가 퇴적된 시기에는 상대적으로 스멕타이트의 함량이 높은 퇴적물이 영향을 미쳤음을 의미한다. 이를 통해 간접적으로 아문젠 해 대륙저면의 퇴적물은 남태평양 분지와 같은 먼 지역으로부터 퇴적물이 공급될 수 있음을 유추할 수 있다.
- 하지만, 점토광물의 함량비 만으로는 실제 퇴적물 기원지를 특정하기 어렵다. 그래서 투과전자현미경 (Transmission electron microscopy, TEM)을 이용하여 각각의 코어에 있는 스멕타이트의 화학성분을 TEM에 부착된 energy dispersive spectroscopy (EDS)를 통해 나노스케일에서의 분석을 진행했다.

극지연구소

2) 해저 퇴적물을 이용한 고환경 해석 및 철 환원 미생물에 의한 광물의 Biomarker 조사

(I)

(가) 빙봉 후퇴 지역 퇴적물 코어에 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석

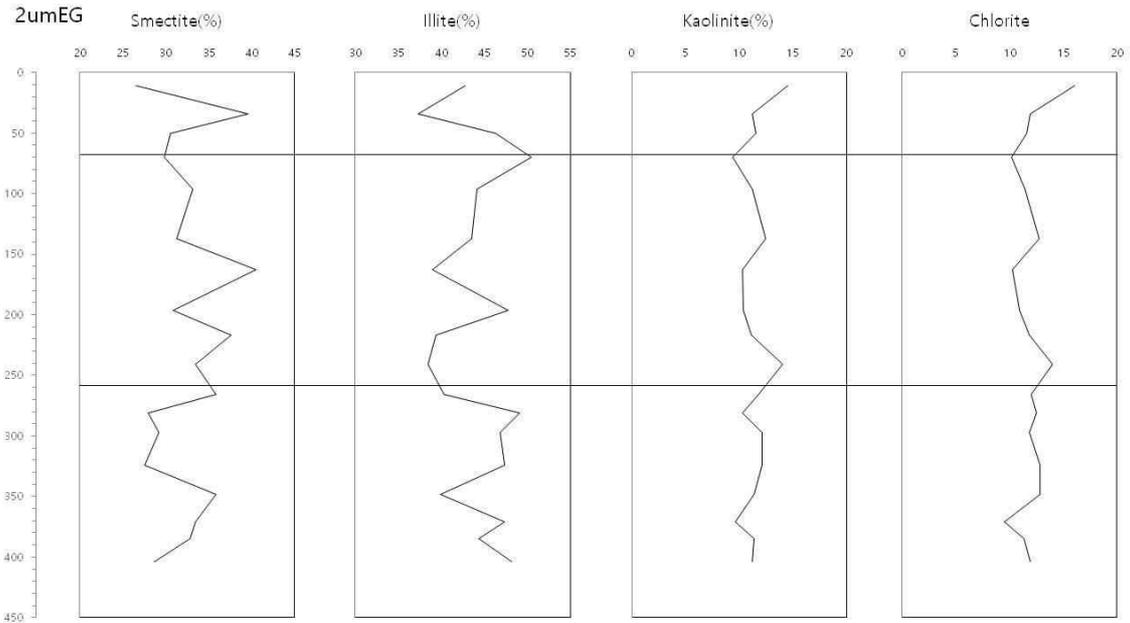


그림 14. RS19-GC16 코어의 깊이별 반정량 분석에 따른 점토광물 함량 변화

- 로스 해 케이프 스캇에서 획득한 RS19-GC16 코어에 대해서 퇴적상에 따라 구간을 나누고 해당 구간에서 깊이 별로 샘플링을 진행하였다. 획득한 샘플에 대해서 1차년도 까지 진행된 입도분리한 시료에 대한 정방위법 XRD와 에틸렌 글리콜 처리한 XRD에 대해서 점토광물의 상대적인 함량 변화를 관찰하기 위해 Biscaye, 1965가 제시한 반정량 분석법을 실시했다.
- RS19-GC16 코어에서 스멕타이트, 일라이트, 카올리나이트, 클로라이트의 함량은 구간에 따라 우세한 점토광물이 차이를 보였다. 구간 3에서는 일라이트의 함량이 약 44% 이상으로 제일 우세하게 나타났다. 스멕타이트의 함량은 약 33 %로 일라이트보다는 적게 나타났으며 클로라이트와 카올리나이트는 약 10%의 함량을 보였다. 구간 2에서는 클로라이트와 카올리나이트는 큰 변화 없이 거의 일정한 양상을 보였는데, 일라이트의 경우 약 40 %로 구간 3에 비해 감소하는 양상을 보였으며 이에 반해 스멕타이트는 약 35 %로 증가하는 경향을 보였다. 구간 1에서는 일라이트의 함량이 약 38%로 상당히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 상대적으로 다른 함량비를 가지는 퇴적물이 공급된 것이라 가정할 수 있다. 또한 스멕타이트의 함량은 35 % 이상 증가하는 양상을 관찰 할 수 있다. 카올리나이트와 클로라이트는 구간 1-3에 따라 5% 내외로 거의 변동하지 않는 것을 확인할 수 있었다 (그림 14).
- 일반적으로 남극 퇴적물의 경우, 저온의 환경으로 인해 화학적 풍화가 잘 일어나지 않

는다. 그러므로 남극 주변 해저 퇴적물은 자생으로 생성된 점토광물보다는 육성 기원 또는 원양성 기원 퇴적물의 공급이 우세하다. 연구 지역 역시 남극의 로스 해 주변의 퇴적물로 퇴적 환경의 변화에 따라 공급되는 퇴적물의 변화로 점토광물 함량이 변한 것임을 유추할 수 있다. RS19-GC16 지점에서의 점토광물 비율은 구간과 상관없이 일라이트가 가장 우세하게 나타났고, 그 다음으로는 스멕타이트, 클로라이트, 마지막으로 카올리나이트 순으로 나타났다. 남극과 같은 극지 환경에서 우세하게 발생하는 물리적 풍화에 의한 대륙성 기원 점토광물들인 일라이트와 녹니석이 우세하게 나타났으므로, 해당 지점에서의 퇴적물 기원지는 인근 남극 대륙임을 확인할 수 있었다.

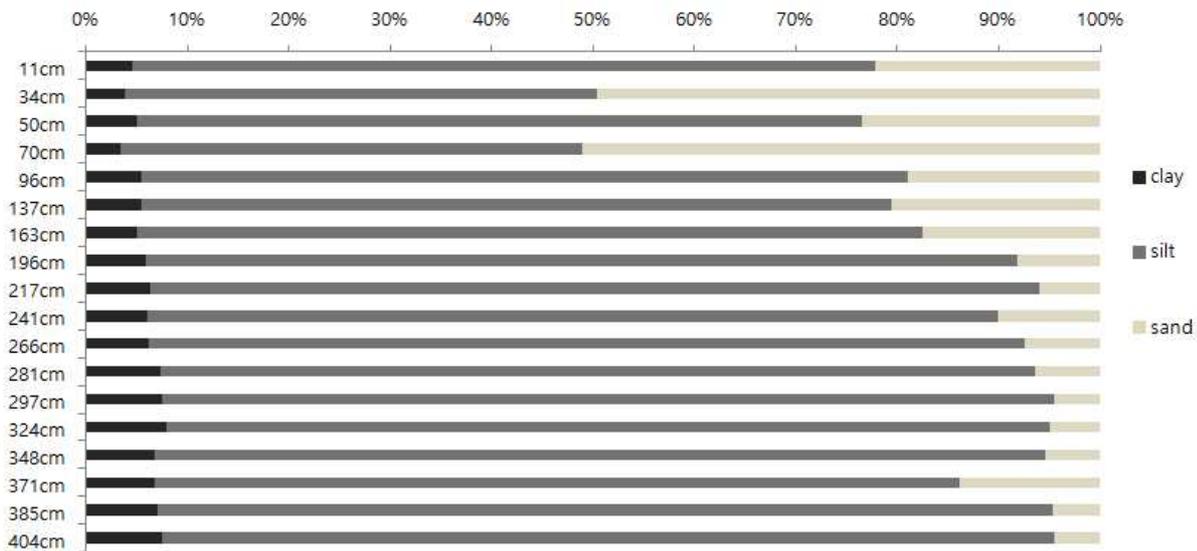


그림 15) RS19-GC16의 깊이에 따른 입도 분포

- RS19-GC16의 시료에 대한 입도 분석 결과, 구간 3에서는 점토, 실트, 모래의 비율이 평균 7.1 %, 86.4 %, 6.5 %의 구성을 보였다. 상부로 갈수록 구간 2에서는 평균 5.3 %, 75.6 %, 18.9 %로 모래의 구성이 늘어나고 실트질 크기의 함량이 줄어드는 것을 관찰 할 수 있다. 구간 1에서는 평균 4.4 %, 63.7 %, 31.8%의 입도 크기의 함량비를 보이고 있다. 상부로 갈수록 점토와 실트의 비율이 감소하고 모래의 비율이 증가하는 양상을 관찰 할 수 있다.
- 일반적인 빙하기-간빙기에서의 퇴적물의 경우, 빙하기 기간 동안 빙봉이 전진하면서 빙봉 하부에서 빙하 쇄설물이 빙봉과 분리되면서 대륙붕으로 조립질의 입자들이 공급 됨에 따라 역을 포함한 모래 크기 이상의 퇴적물이 우세하게 퇴적된다. 반대로 간빙기가 되면 빙봉이 후퇴하기 시작하면서 대륙붕으로의 빙하 쇄설물의 공급이 감소하고, 해양 환경에서 해류의 영향이 커짐에 따라 점토 및 실트 크기의 퇴적물이 우세하게 대륙붕으로 공급되어 퇴적된다 (Lucchi et al., 2007). 때문에 중력 코어에서 대륙붕에서 획득한 해당 지역의 입도를 분석하게 되면 빙하기에서 간빙기로 변할수록 주로 상

향 미세화 경향이 나타난다.

- 그러나 RS19-GC16 중력 코어의 경우에는 이와 반대로 구간 2와 구간 3에서는 미립질의 입자들이 우세하게 나타나며, 구간 1에서는 비교적 조립질의 입자들이 앞선 구간들보다 더 비율이 높은 것으로 나타났다. 이는 여러 퇴적 환경적인 요인이 있을 수 있다. 첫 번째는 빙하기에 퇴적된 역을 포함한 퇴적물이 있는 심부까지 충분히 포함되지 못한 것이다. 일반적으로 빙하기에 퇴적된 퇴적물은 역을 포함하여 입도가 큰 빙하 쇄설물을 다량 포함하지만, 해당 코어는 빙하기에 퇴적된 퇴적물까지 충분히 깊게 들어가지 못하고, 빙붕이 점차 후퇴하며 퇴적된 후기 빙하기부터의 퇴적물을 포함한 것으로 추정된다. 두 번째는 빙붕이 점차 대륙쪽으로 더 후퇴하면서 외부 해양 환경과의 상호작용이 전보다 증가하게 되었으며, 특히 빙붕 하부에서의 해류의 영향력이 강해져 미립질 입자의 경우, 강한 해류로 인해 지속적으로 부유하게 되면서 빙하기와는 반대로 조립질의 입자의 퇴적이 우세하게 나타나게 된 것으로 추정할 수 있다 (Rodriguez and Anderson., 2004).
- RS19-GC16의 코어에 대한 깊이별로 일라이트의 결정도 지수 분석을 진행했다. 일라이트의 결정도는 일라이트의 (001) 피크의 최대 반폭치 (full width at half maximum height, FWHM)를 측정하였고 (Eberl and Velde, 1989), 해당 일라이트 지수에 대해서 깊이별로 비교하였다. 고퇴적 환경 유추를 위해 일라이트의 결정도 지수를 분석하였다. 일라이트 결정도 지수는 구간 3에서 구간 1로 변하면서 점점 지수가 낮아지는 경향을 보인다. 일라이트 결정도 지수는, 지수 값이 낮은 쪽으로 향할수록 일라이트의 결정도가 좋다는 것을 의미한다. 그래서 구간 3에서는 일라이트의 결정도 지수가 상대적으로 안좋은 편이다. 약 0.4 이상으로 증가하는 지수는 구간 3에서 나타나고 있다. 일반적으로 빙하기에 가까울수록 건조하고 추운 환경에서 일라이트가 기원하기 때문에 결정도가 좋은 일라이트가 관찰되고, 간빙기에 가까울수록 화학적 풍화작용이 우세하기 때문에 일라이트의 결정도가 나빠지는 경향을 보인다 (Pandarinath et al., 2009). 하지만 RS19-GC16 중력 코어에서는 반대되는 경향을 관찰할 수 있다 (그림 16).
- 퇴적상에 대한 기술에서 구간 3에서는 강한 황 냄새가 난 것과 생교란 구조가 나타나지 않은 것, 그리고 입도 분포 결과에서 미립질이 우세한 환경이라는 점을 바탕으로, 구간 3의 환경이 빙붕 하부 환경이었음을 유추할 수 있다. 이는 곧 구간 3가 퇴적되었을 당시, 일부 빙하기 기간 동안 빙상의 전진에 의해 외부 대기와 차단되어있던 곳이었다고 판단할 수 있다. 특히 퇴적상에 대한 묘사 및 서술에서 구간 3에서 특징적으로 나타난 황 냄새와 유일하게 생교란 구조가 나타나지 않은 것을 통해 빙상 하부 환경, 즉 외부 대기와 차단된 환원 환경임을 유추할 수 있었고 더욱이, 제한된 기원지로 인해 X선 회절 분석(XRD)에서 일라이트의 결정도 지수가 높게 나타나는 광물 특성 변

화의 경우, 남극 대륙 외의 기원지를 둔 광물이 유입된 것이 아닌 해당 지역에서 퇴적물내의 점토광물과 미생물간의 반응의 결과로 예상된다. 이러한 변화들이 실제로 미생물과의 반응을 통해 발생했음을 확인하기 위해서는 광물의 구조적, 화학적 분석을 통해 미생물에 의한 광물 변질을 관찰하고 점토광물에서의 Fe-liberation을 확인할 필요가 있다.

- 반면에 구간 1과 구간 2에서는 생교란 구조가 나타난 것을 통해 외부 대기와 접촉된 환경, 상대적으로 산화 환경이었음을 확인할 수 있었다. 이러한 생교란 구조는 빙봉이 후퇴하면서 점차 공해 환경으로 변해감에 따라 1차 생산성이 증가하고 그 결과 규조류와 같은 생물들의 양이 증가해서 생교란 구조가 나타나는 빈도가 증가하는 것으로 보인다. 또한 입도 분포 상에서 다른 층들보다 구간 1에서는 조립질의 입자가 우세하게 나타나는 점, 그리고 퇴적상의 색상이 올리브 색을 포함하고, 입도의 변화가 구간 3과 구간 2 사이의 경계면보다 구간 2와 구간 1 사이의 경계면에서 크게 변한 점을 통해 구간 2는 빙봉이 점차 후퇴하는 시기에 퇴적된, 즉 빙하기에서 간빙기로 넘어가는 전환기 시점에 퇴적된 층이라고 볼 수 있으며, 구간 1은 빙봉의 후퇴가 장기간 이루어져 외부 해양환경에 노출된 시기에 퇴적된 것으로 판단할 수 있다.



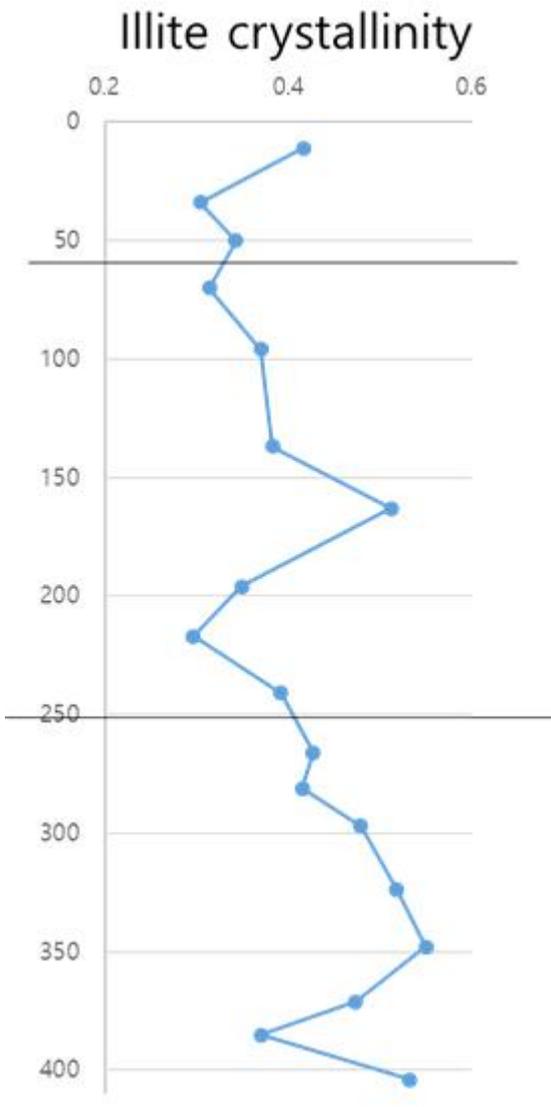


그림 16) RS19-GC16의 깊이에 따른 일라이트 결정도 지수 분포 (illite crystallinity)

(나) 해저 퇴적물 코어의 점토광물 화학 성분 분석을 통한 고환경 해석 proxy 개발

- 서남극 빙붕의 급격한 후퇴 지역인 아문젠 해 대륙붕, 대륙저면에 대하여, 이 지역의 빙붕 후퇴 과정과 이에 따른 퇴적물 이동 과정을 밝히기 위해 1차 년도에 이어 추가적인 분석을 진행하였다 (그림 1, 표 3).

Gear	Station	Location	Sample depth (cmbsf)	Age
BC	27	Amundsen Sea, Pine island Glacier front	0-1	modern
BC	36	Amundsen Sea, North of Thwaite Glacier	0-1	modern

표 3. BC27, BC36 코어에 대한 위치, 깊이, 연대

- 1차 년도에 이어, 아문젠 해의 파인 섬 앞의 BC27 코어와, 스웨이즈 빙하 앞의 BC36 코어를 분석 진행하였다. 이 코어의 경우 최근 급격한 빙붕의 후퇴로 인해 심판의 날 빙하라고 불리는 스웨이즈 빙하 앞의 퇴적물에 대한 코어로, 서남극 빙붕의 퇴적 환경을 해석하는데 많은 정보를 제공할 것이라 여겨진다.
- 아문젠 해의 대륙붕 안쪽의 스웨이즈 빙하와 파인섬 빙하 앞에서 획득한 BC36과 BC27은 유기물 제거를 거친 뒤에 전체적인 퇴적물 광물 동정을 위해 XRD 분석을 실시하였다. XRD 분석은 1차 년도에 진행된 분석과 동일한 조건에서 실시하였다.

Bulk mineralogy

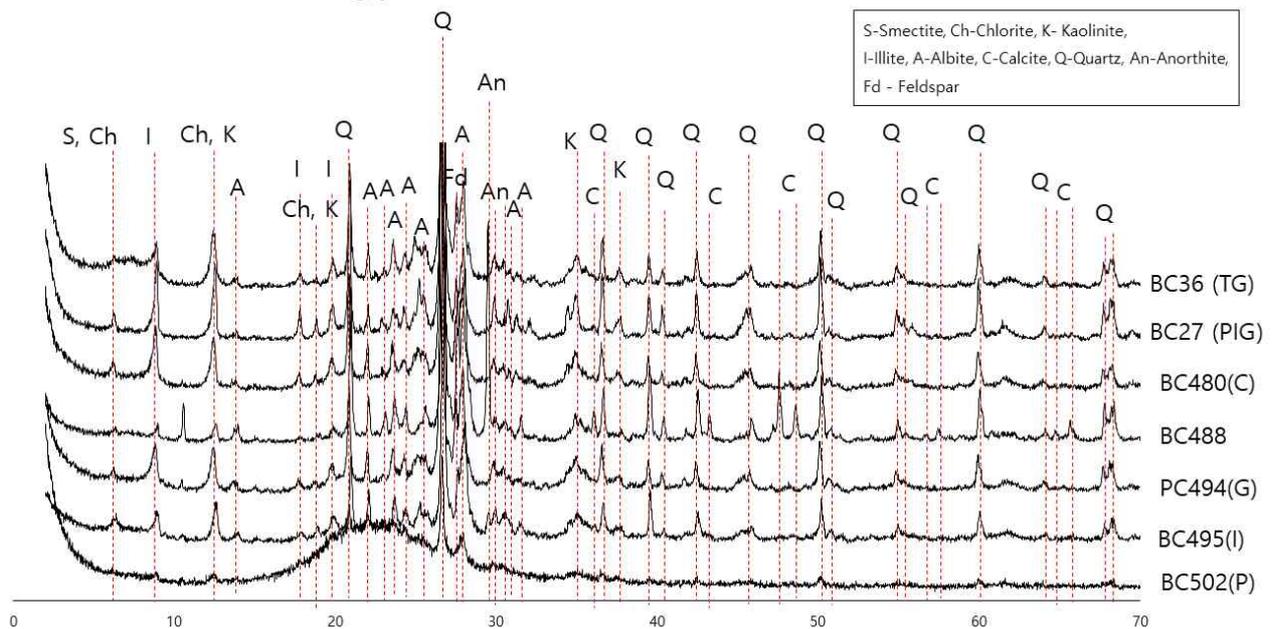


그림 17) BC36, BC27, BC480, BC488, PC494, BC495, BC502 코어의 입도 분리하지 않은 시료를 부정방위법 XRD 측정된 분석 결과

- 유기물을 제거하고 입도 분리를 하지 않은 부정 방위법 XRD에서는 석영, 조장석, 회장석, 장석류, 탄산염 광물이 관찰되었다. BC36과 BC27은 앞선 대륙붕과 대륙저면에서 획득한 코어와 비슷한 광물상을 보였으며, 점토광물도 관찰되었기 때문에 2 μm 이하로 입도분리를 실시하였다.
- 2 μm 이하로 입도분리를 실시한 BC36과 BC27 시료는 정방위법 XRD를 측정하여 점토광물을 자세히 관찰하였다. 점토광물로는 스펙타이트, 일라이트, 클로라이트, 카올리나이트의 광물들이 관찰되었다. 입도분리한 시료에서도 역시 석영, 장석, 조장석, 회장석의 피크가 발견되었다. BC27, BC36을 포함한 표층 퇴적물의 경우 코어 간에 점토광물의 픽의 세기가 다르게 관찰되었다. 그래서 각 코어별로 함량을 비교하기 위해 반정량 분석을 실시하였다.



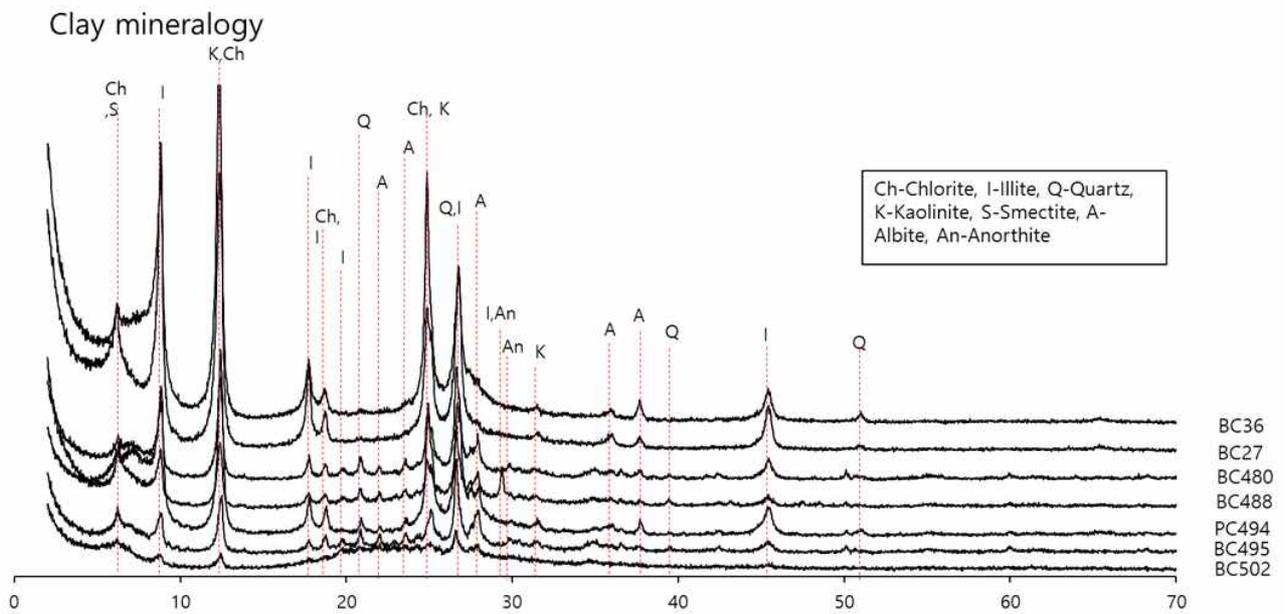


그림 18) BC36, BC27, BC480, BC488, PC494, BC495, BC502 코어의 2 μm 이하로 입도 분리를 시료를 정방위법 XRD 측정 한 분석 결과



Core	Smectite (wt%)	Illite (wt%)	Kaolinite (wt%)	Chlorite (wt%)
BC480	15.5	49.1	19.3	16.1
BC488	28.6	39.3	16.7	15.3
PC494	14.0	47.8	21.9	16.4
BC495	28.4	34.7	16.4	20.5
BC502	45.2	33.9	9.8	11.1
BC27	11.0	56.9	16.9	15.2
BC36	24.5	35.7	25.6	14.2

표 4. BC27, BC36 코어의 점토광물 함량비

● 1차년도에 분석한 결과와 더불어 BC27, BC36의 점토광물 함량비를 함께 도시하였다. BC27은 파인 섬 앞의 퇴적물로 일라이트의 함량이 높고 상대적으로 스�멕타이트의 함량이 낮다. 반면에 스웨이츠 빙하 앞의 BC36은 스�멕타이트의 함량이 높고, 일라이트의 함량이 비교적 낮은 것을 관찰 할 수 있다. 아문젠 해는 대부분 일라이트와 카올리나이트의 함량이 높은 곳으로 알려져 있는데, 이에 따라 두 코어 역시 대륙 근처에 있다 보니 일라이트의 함량이 비교적 높은 것을 관찰 할 수 있다. 특징적인 점은 아문젠 해 대륙 안쪽의 BC27과 BC36은 각각 파인섬 만으로 향하는 두 퇴적물 기원지의 대표적인 성격을 나타낸다고 할 수 있다. 파인섬 만은 아문젠 해 동쪽에서 퇴적물의 공급이 많은 곳 중 한 곳이다. BC36과 BC27의 퇴적물은 모여서 BC480이 퇴적된 파인섬만으로 흘러가게 된다. 그 결과 BC480의 퇴적물은 BC27과 BC36 점토광물의 영향을 받아 함량이 두 점토광물의 값 사이에 나타난 것을 확인 할 수 있다. 즉 BC480과 BC36, BC27은 아문젠 해 대륙붕에 대표적인 값들을 나타낸다고 할 수 있다.

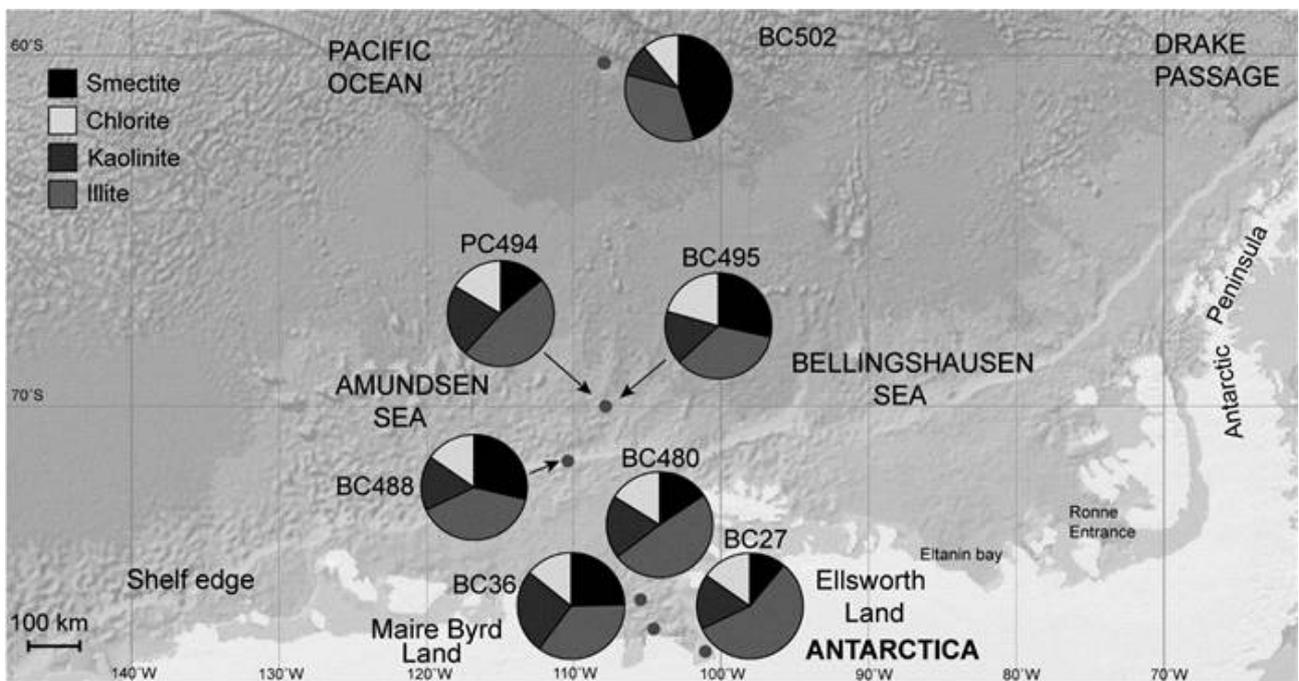


그림 19) BC380, BC488, PC494, BC495, BC502, BC27, BC36 코어의 점토광물 함량비를 통해 BC27, BC36, BC480의 코어가 아문젠 해 대륙붕의 대표적인 점토광물 함량비를 나타내는 것을 확인 할 수 있다.

- 위의 결과를 통해 우리는 PC494, BC495의 대륙저면에 위치한 퇴적물에 대해 각각의 기원지를 추적할 수 있는 정보를 확인 할 수 있었다. 하지만, BC495의 스�멕타이트는 대륙붕의 스�멕타이트에 비해 높은 값을 가지고 있다. 이는 BC495가 퇴적될 당시, 공급된 퇴적물이 대륙붕 외에도 다른 지역에서부터 공급되었을 가능성을 제시한다. 그렇기 때문에 점토광물 함량 결과에 더하여 각각의 스�멕타이트를 구분할 수 있도록 투과전자현미경을 통해 스�멕타이트의 화학성분을 분석하였다.
- 각각의 스�멕타이트를 분석하기 위해 스�멕타이트의 구불구불한 모양과 비교적 흐린 전자 회절 패턴 (selected area electron diffraction, SAED), 격자 간격 (lattice fringe) 등을 종합하여 선정하였다. 또한 스�멕타이트의 격자 간격은 TEM의 강한 빔을 맞게 될 경우 층이 무너져 일라이트와 구분이 어렵게 될 수 있기 때문에 플라스틱 레진을 이용하여 치환해 주었다. 레진은 L.R white resin을 사용하여 TEM 시료를 먼저 증류수로 충분히 스�멕타이트의 층간을 포화시켜준 뒤, 레진과 메탄올을 섞은 용매에 두고 점차 메탄올의 농도를 낮추고 레진의 농도를 높이는 방향으로 메탄올-레진 치환 과정을 거쳐서 스�멕타이트의 층간에 레진이 충분히 포화될 수 있게 전처리 작업을 진행하였다 (Kim et al., 1995). 전처리를 통해 레진으로 치환된 시료는 오븐에서 굳힌 뒤, microtome을 이용하여 잘라내 스�멕타이트의 격자간격을 관찰 할 수 있게 시료를 준비해서 TEM 분석을 진행하였다.

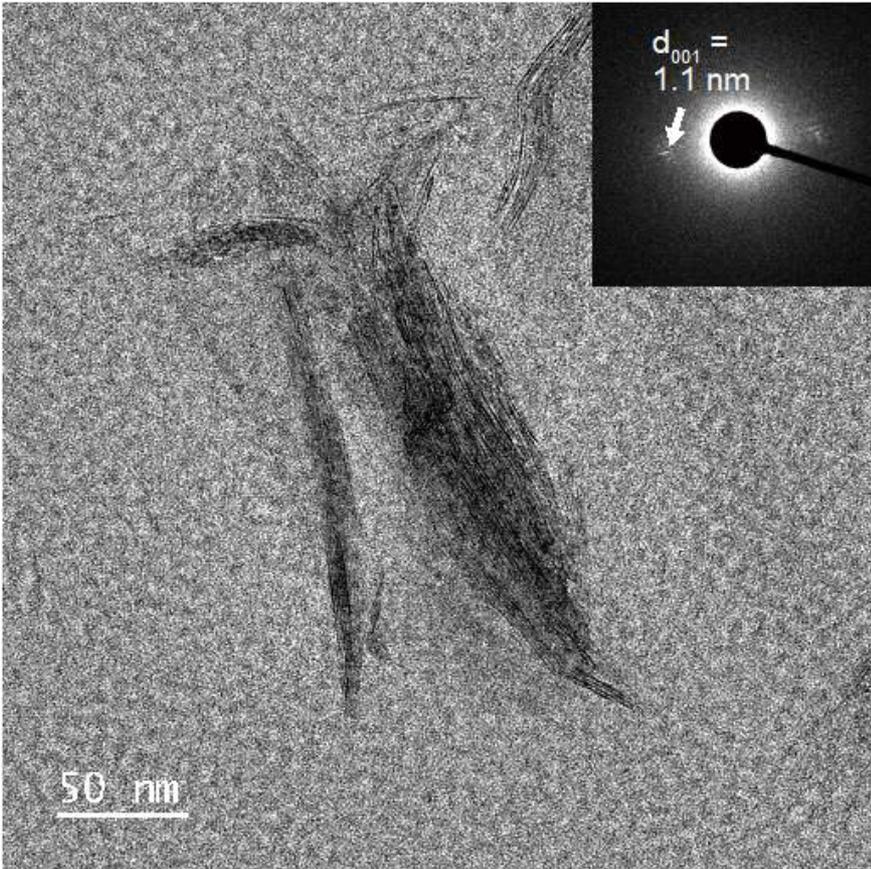


그림 20) BC480 코어의 대표적인 스�멕타이트 이미지

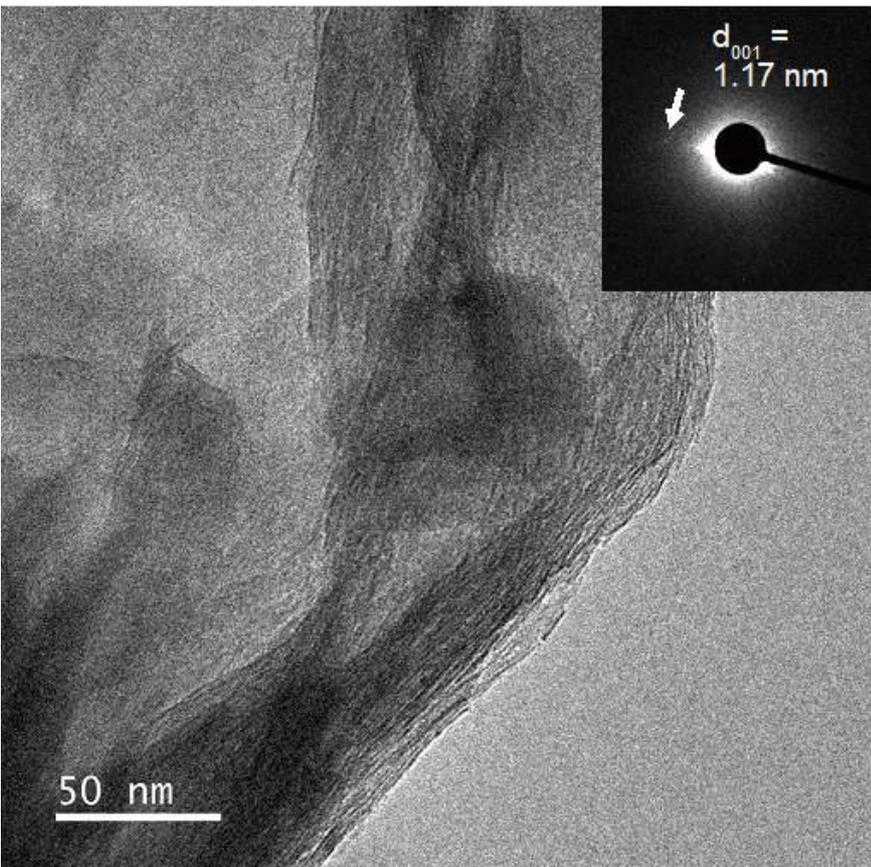


그림 21) BC488 코어의 대표적인 스�멕타이트 이미지

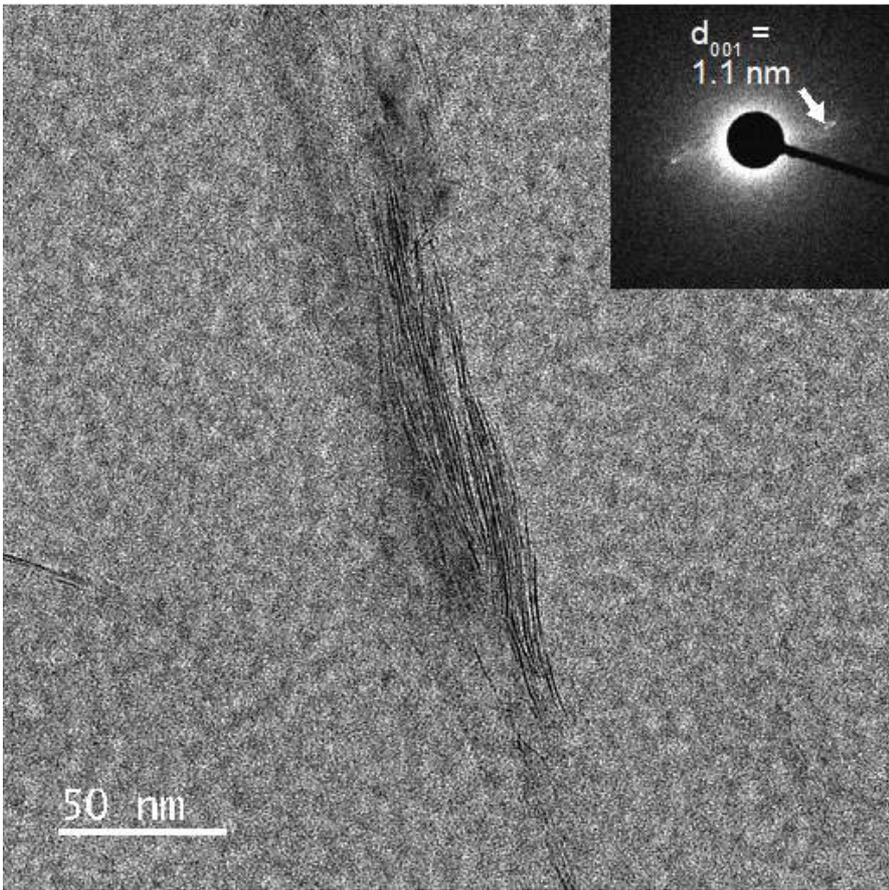


그림 22) PC494 코어의 대표적인 스�멕타이트 이미지

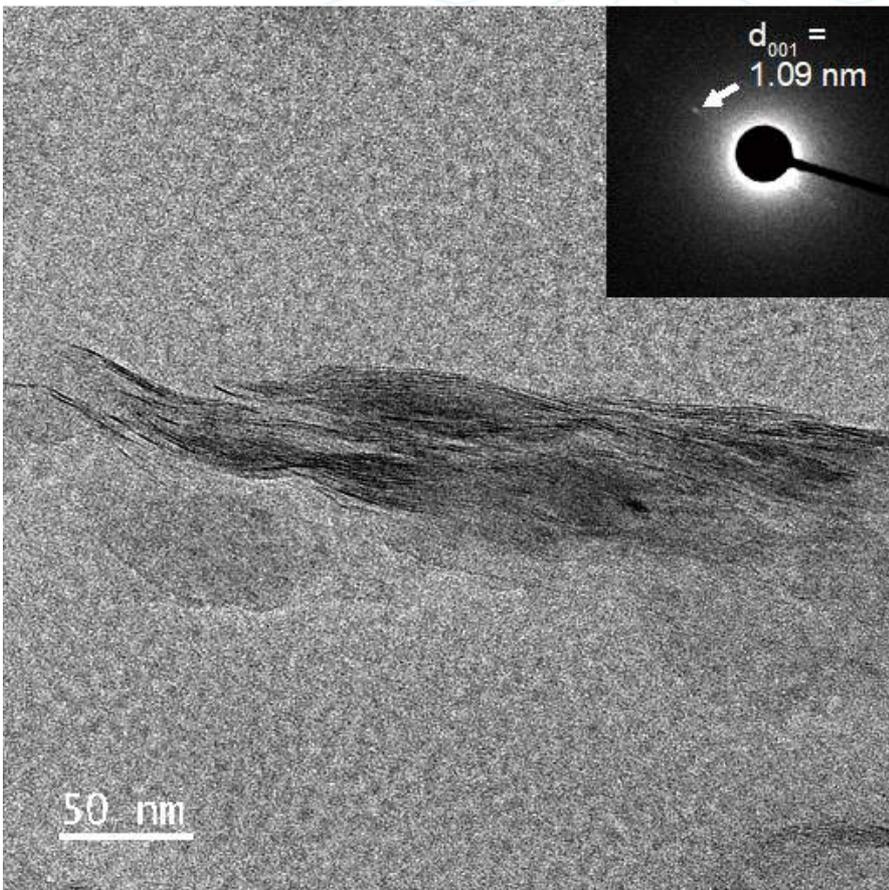


그림 23) BC495 코어의 대표적인 스�멕타이트 이미지

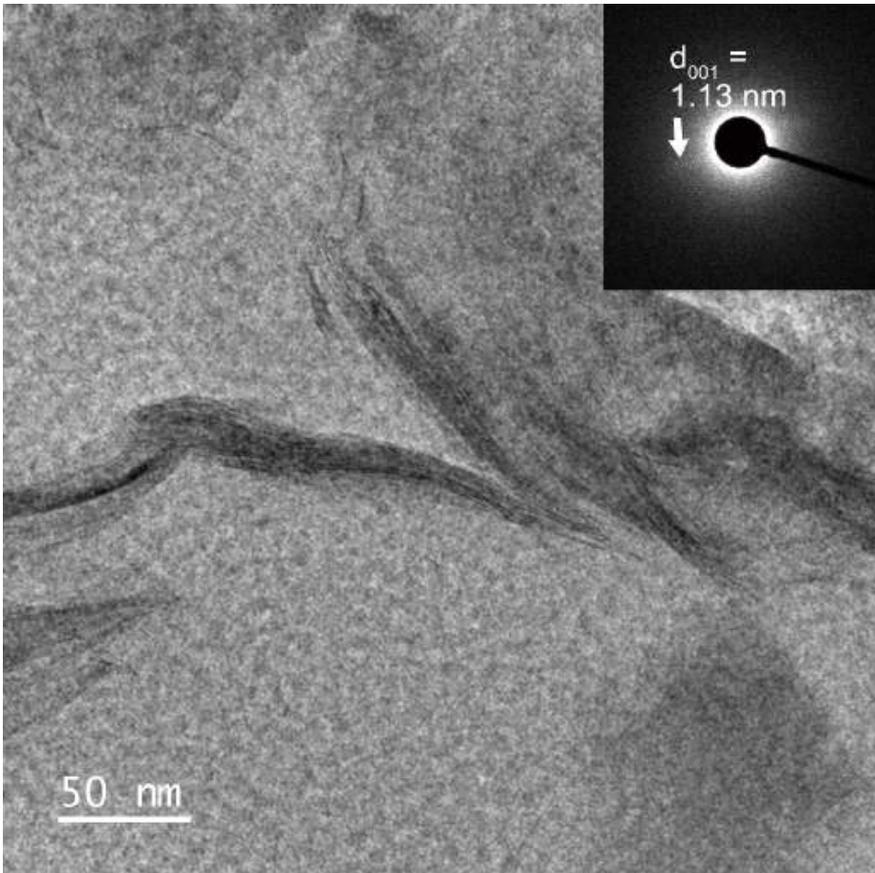


그림 24) BC502 코어의 대표적인 스택타이트 이미지

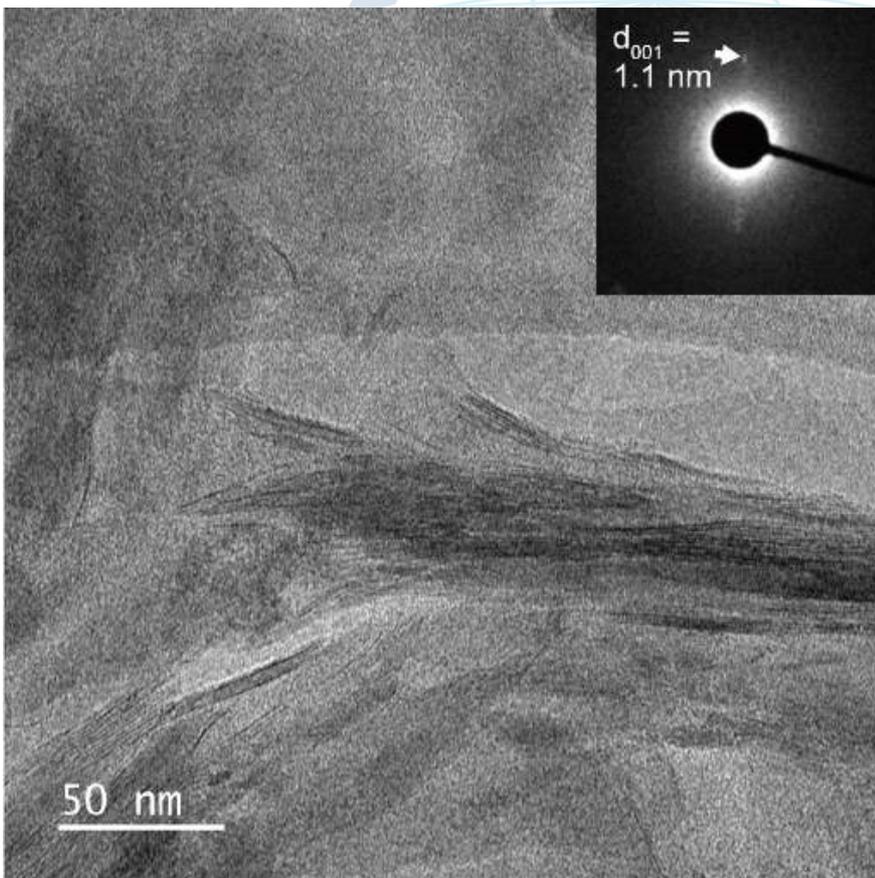


그림 25) BC27 코어의 대표적인 스택타이트 이미지

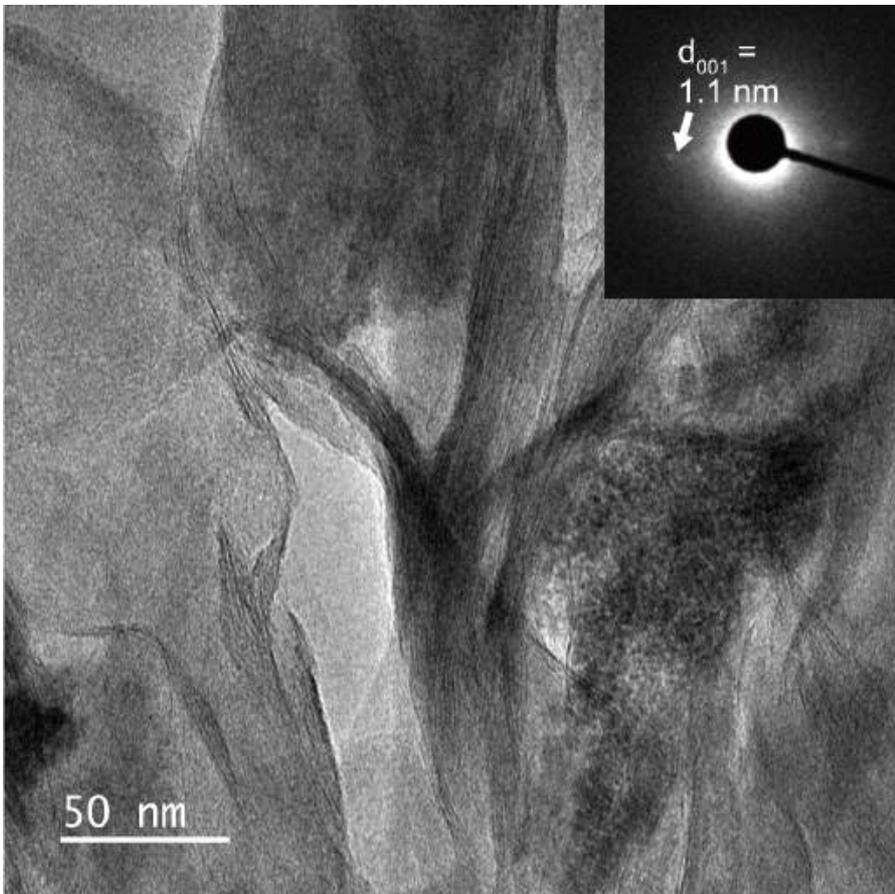


그림 26) BC36 코어의 대표적인 스멕타이트 이미지

- 각각 코어 별로 TEM 시료를 제작한 뒤 점토광물 중 스멕타이트를 구별하여 측정하였다. 모든 코어에서 충분한 양의 스멕타이트를 관찰 할 수 있었으며 (그림 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26), 대부분 자생 기원 스멕타이트가 아닌 것으로 추정되었다 (Setti et al., 2000). 또한 해당 스멕타이트에 대해 화학 성분을 얻기 위해 EDS를 이용한 분석을 진행하였다. 이는 같은 스멕타이트 안에서도 생성된 기원지의 모암에 따라 여러 스멕타이트로 구분될 수 있는데, 예를 들어 스멕타이트의 팔면체 판의 Al, Mg, Fe의 함량에 따라 각각 Al이 풍부한 몬모릴로나이트, Mg이 풍부한 사포나이트, Fe이 풍부한 논트로나이트로 구분이 될 수 있다. 그래서 측정한 값들은 weight percent로써 각각의 값들에 대해 스멕타이트의 구조식으로 환산하여 팔면체 안의 Al, Mg, Fe의 값에 대한 상대적인 비율을 구했다. 구한 값에 대해서는 삼각 토표안에 3개의 축으로 기준을 삼고 도시하였다 (그림 27, 28).

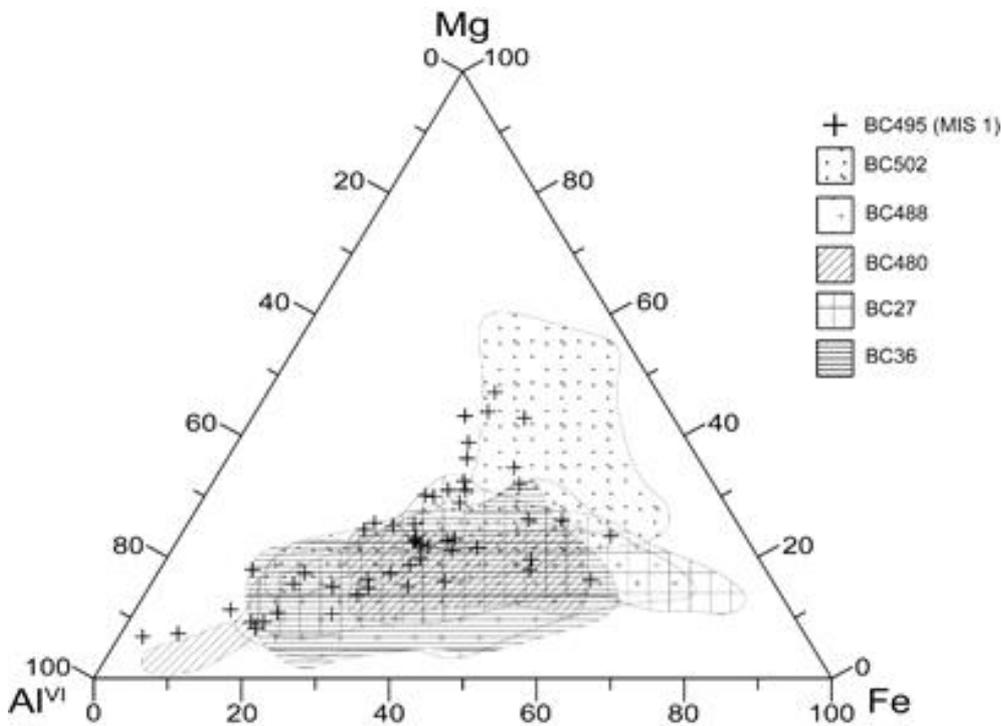


그림 27) 대륙저면 BC495 스펙타이트와 주변 코어의 스펙타이트의 화학 성분 구성

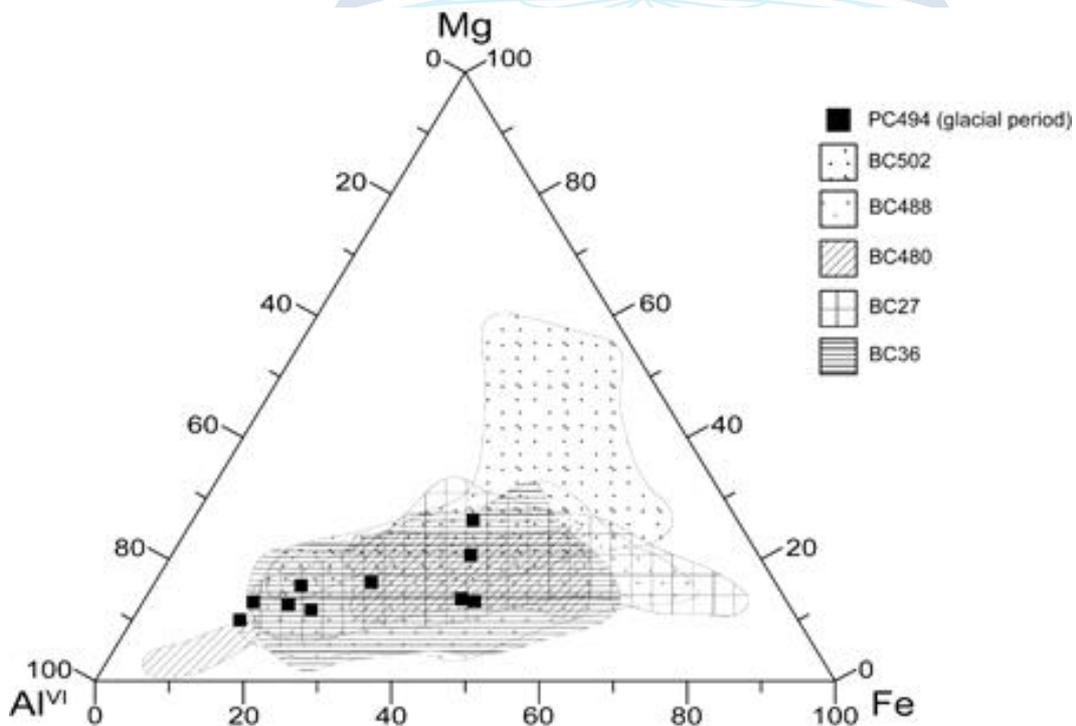


그림 28) 대륙저면 PC494 스펙타이트와 주변 코어의 스펙타이트의 화학 성분 구성

- 대륙저면의 PC494, BC495를 중심으로 주변 퇴적물 코어에 대한 스�멕타이트를 삼각도표안에 도시하였다 (그림 27, 28). 대륙붕에 위치한 BC480, BC36, BC27은 대부분 Al과 Fe이 풍부한 스�멕타이트가 관찰되었다. 이는 아문젠 해의 대륙붕 쪽의 스�멕타이트가 공급될 때 파인 섬과 스웨이츠 빙하의 하부에서 침식된 퇴적물의 영향을 받았음을 유추할 수 있다. 파인 섬과 스웨이츠 빙하로 흘러들어온 빙하 쇄설물은 대륙 쪽에서 화강암으로 구성된 기저면이 침식되거나 (Pereira et al., 2018, 2020), 일부 깊은 퇴적층에 포함된 pre-Oligocene 시기의 퇴적 지층이 빙하 침식에 의해 공급되면서 Al과 Fe이 풍부한 스�멕타이트가 공급된 것으로 보여진다 (Hillenbrand et al., 2003). 그래서 BC480의 스�멕타이트의 경우 파인섬만에 퇴적물이 모이기 때문에 BC27과 BC36의 영향을 모두 받은 퇴적물이 관찰된다. 실제로 BC480의 스�멕타이트도 Al과 Fe이 풍부한 스�멕타이트들이 관찰된다.
- BC502의 스�멕타이트는 앞선 대륙붕에 위치한 스�멕타이트와는 다르게 Mg와 Fe이 풍부한 스�멕타이트가 관찰된다. BC502는 아문젠 해에서 떨어진 남태평양에 남동쪽 분지에 위치한 퇴적물이다. 이 근처에는 남태평양의 동쪽을 남북으로 가르는 동태평양 해령의 근처에 위치해 있다. 그래서 이 지역의 스�멕타이트는 화산성 기원의 유리질이나 현무암의 열수 변질 과정을 통해 ferro-magnesian mineral을 풍부하게 함유한 암석들이 풍화 작용을 겪으면서 Mg나 Fe이 높은 스�멕타이트를 형성하여 공급했을 수 있다 (Smellie, 1999). 실제로 동태평양 해령 근처의 남태평양 분지에서 획득한 퇴적물에서는 Mg이 풍부한 사포나이트와 Fe이 풍부한 논트로나이트가 퇴적물에서 발견되었다 (Rong et al., 2018). 그래서 BC502의 스�멕타이트는 대륙붕 기원의 스�멕타이트와는 다르게 Mg의 함량이 높은 방향으로 스�멕타이트 그룹을 형성하고 있다.
- 위의 결과들을 바탕으로, BC495와 PC494의 스�멕타이트의 구성을 살펴보자면, 먼저 PC494의 스�멕타이트는 대부분 Al이 높고 Fe이 비교적 높으며, Mg의 함량이 낮은 스�멕타이트로 구성되어 있다. 이러한 스�멕타이트가 관찰되는 코어는 BC480, BC488, BC27, BC36의 스�멕타이트와 유사하게 나타난다. 또한 점토광물의 구성 성분에서 PC494는 대부분 일라이트의 함량이 우세한 것을 관찰할 수 있었다. 이는 PC494가 퇴적될 당시 대륙성 퇴적물의 영향을 많이 받았다는 것을 유추할 수 있다. 대륙저면에 대륙성 퇴적물이 공급되기 위해서는 빙하기에 빙봉의 전진 과정이 필수적이다. 빙하기에 빙봉이 대륙붕 끝단까지 전진하면서 빙봉 아래에서 침식된 빙하 쇄설물이 물리적으로 대륙사면을 따라 대륙저면으로 밀려날 수 있다. 이 때 빙봉이 밀어낸 퇴적물은 중력류나 저탁류에 의해 퇴적물을 포함한 채 대륙저면까지 공급된다 (Lucchi et al., 2007). 이러한 과정으로 PC494의 스�멕타이트가 빙하기에 대륙붕으로부터 공급된 것으로 추정된다.

- 반면에 BC495에 포함된 스펙타이트에는 넓은 범위의 스펙타이트를 관찰 할 수 있다. 스펙타이트가 Al이 풍부한 구간부터 Mg이 풍부한 구간까지 넓은 범위의 스펙타이트를 관찰 할 수 있다. 이러한 결과는 점토광물 함량비에서 PC494보다 높은 스펙타이트 함량을 보여주는 것과 비슷한 양상이라고 추정할 수 있다. 즉 BC495가 퇴적될 당시에는 여러 퇴적물로부터 공급이 되었고 그래서 다양한 성분을 가진 스펙타이트가 공급되었다는 것이다. 먼저 Al이 풍부한 스펙타이트를 보면 대륙붕에 포함된 BC480 스펙타이트와 일부 범위가 중첩된다. 이 스펙타이트는 빙붕이 후퇴하면서 빙붕 일부가 떨어져 나가면서 대륙성 퇴적물을 포함한 ice rafted debris (IRD)를 함유한 해빙이 대륙 저면까지 흘러들어와 녹으면서 공급된 퇴적물로 추정하고 있다. 또한 일부 BC495에는 Mg가 풍부한 스펙타이트가 관찰되는데 해당 스펙타이트는 남태평양 분지에서 획득한 BC502의 스펙타이트와 유사한 함량 분포를 관찰할 수 있다. BC495의 스펙타이트는 대륙붕에서부터 남태평양 분지에 이르기까지 넓은 범위의 퇴적물로부터 영향을 받았다는 것을 통해 간빙기에 빙붕이 후퇴하면서 다양한 해류 및 퇴적 작용으로 퇴적물이 공급되었음을 유추할 수 있다. 이는 일반적인 간빙기 퇴적물에서 나타나는 스펙타이트의 화학 성분 분포와 유사한 결과이다. 드레이크 해협에서 실시한 스펙타이트의 화학 성분 분석 결과에서도, 빙하기에는 비교적 드레이크 해협에 가까운 남극반도로부터 스펙타이트가 공급된 반면, 간빙기에는 빙붕이 후퇴함에 따라 드레이크 해협으로 영향을 주는 해류의 공급이 증가하여 웨델 해부터 멀리는 벨링스하우젠 해까지 영향을 받았음을 제시하였다 (Park et al., 2019). 이를 통해 BC495와 PC494는 각각 간빙기, 빙하기에 퇴적되었으며 빙하기에는 서남극 빙붕의 전진으로 주로 대륙성 기원의 퇴적물이 공급되었고, 간빙기에는 빙붕이 후퇴하면서 외부로부터 퇴적물들이 유입될 수 있는 환경이었음을 알 수 있다.

(다) 빙하 하부에 존재하는 대륙붕의 해저 퇴적물에 대한 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석

● 남극 대륙은 낮은 온도, 두꺼운 빙하 그리고 영양분의 공급이 어려운 환경으로 빙상 하부에는 지구상의 약 90%의 담수가 담겨있다. 특히 최근 탐사를 통해 남극을 덮고 있는 빙하 아래 많은 양의 물이 모여 있는 호수 형태의 지형이 발견되었다. 이러한 호수는 빙저호라고 표현하며 주로 빙하 기저부가 녹으면서 기반암을 따라 흐르다가 분지 형태로 된 지형에 물이 모여서 형성된 지형을 말한다. 빙저호에는 일반적으로 빙하 하부의 수계 환경을 대표적으로 나타낸다. 빙하 하부의 수계 환경은 두꺼운 빙상의 존재로 인해 탐사하여 분석하기가 매우 어렵다. 하지만 빙저호는 일정한 공간이 존재하기 때문에 빙하 하부의 수계 환경에 대한 조사가 비교적 용이하다 할 수 있다. 특히 빙하 하부는 외부 대기와 접촉이 차단되어 있고, 햇빛을 받지도 못하기 때문에 매우 극한 조건이다. 이러한 환경에서 미생물을 포함한 생명체가 활동하는지 밝히는 것은 매우 중요한 주제라 할 수 있다. 최근 빙저호는 여러 남극 연구자들의 주요 탐사 대상이 되어 왔다. 이러한 의문점을 해결하기 위해 빙저호로 추정되는 곳에서 획득한 시료에 대해 광물학적 분석을 진행하였다. 특히 퇴적물 내의 점토광물 분석을 통해 실제로 빙저호로 추정되는 곳에서 사는 미생물이 햇빛 없는 환경에서 무산소 호흡을 거치면서 점토광물의 철을 이용하지는 않는지, 이용한다면 점토광물의 물리적, 화학적 특성은 어떻게 변하는지, 어떤 미생물들이 활용하고 그 과정은 무엇인지 알아내고자 하였다.

퇴적물 코어A XRD

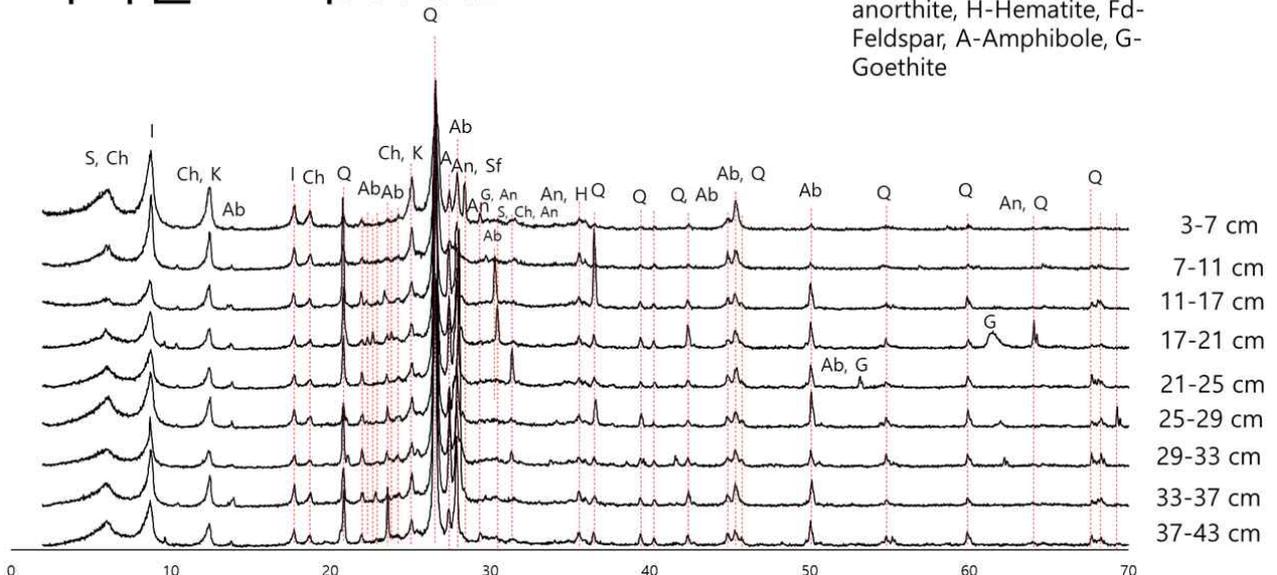


그림 29) 로스해 근처 퇴적물 코어A XRD 광물 성분 분석

퇴적물 코어B XRD

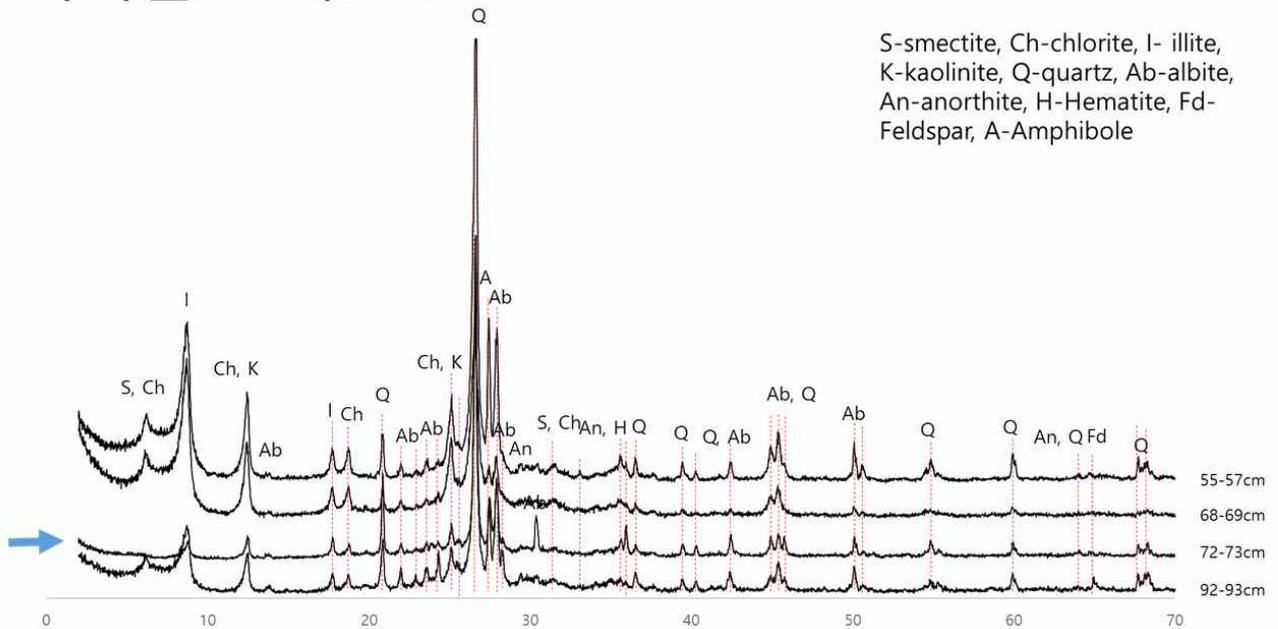


그림 30) 로스해 근처 퇴적물 코어B XRD 광물 성분 분석

● 퇴적물 코어 A, B, C는 빙저호로 추정되는 지역에서 획득한 코어 퇴적물이다. XRD 분석결과 대부분의 코어에서 점토광물을 발견할 수 있었다. 또한 철 함유 광물인 적철석과 침철석을 관찰 할 수 있었고, 석영, 조장석, 회장석, 각섬석류의 광물을 관찰 할 수 있었다. 대부분의 코어는 대륙 안쪽에 위치해 있었기 때문에 대륙성 기원의 광물이 많이 함유된 것을 확인 할 수 있다. 빙저호로 추정된 환경에서 획득한 코어 A, B, C는 빙저호의 미생물 성장 메커니즘을 밝혀내는데 중요한 단서로 사용될 수 있다. 특히 빙저호는 퇴적물과 물 간의 경계면에서 화학 반응이 활발하게 일어난다고 알려져 있다. 그래서 퇴적물의 표층을 확인하는 것이 매우 중요하다. 빙저호는 일정한 주기로 호수 내의 물이 빠져나가고 채워지는 수계 순환을 겪는다고 알려져 있다. 그래서 일정 시간동안 호수에 물이 채워져 있을 때는 호수 퇴적물에서 주로 관찰되는 염리층과 미립질 퇴적물이 주로 관찰되고 호수의 물이 빠져나가게 되면 역을 포함한 퇴적물이 쌓여서 표층과 구분할 수 있다. 코어 A, B, C를 살펴보면 코어 B에서 72cm 구간, 코어 C에서 122 cm 구간은 주변 퇴적층과 다른 XRD 프로파일을 보여준다. 이 구간에서는 코어 퇴적상에서 다른 색상을 보이며 앞서 말했던 호수 물이 빠져나갔다가 채워진 구간의 특징을 보여주고 있으며 각각의 72cm와 122cm가 표층 퇴적물일 가능성에 대해 제시하고 있다. 코어 A의 경우 가장 상층부인 3-11cm가 호수와 퇴적물의 경계부이다. 그래서 각각의 점토광물의 함량은 어떤 변화를 보이는지 관찰하기 위해 입도 분리 시료를 제작하여 점토광물의 함량비를 측정하였다.

퇴적물 코어C XRD

S-smectite, Ch-chlorite, I- illite,
K-kaolinite, Q-quartz, Ab-albite,
An-anorthite, H-Hematite, Fd-
Feldspar, A-Amphibole

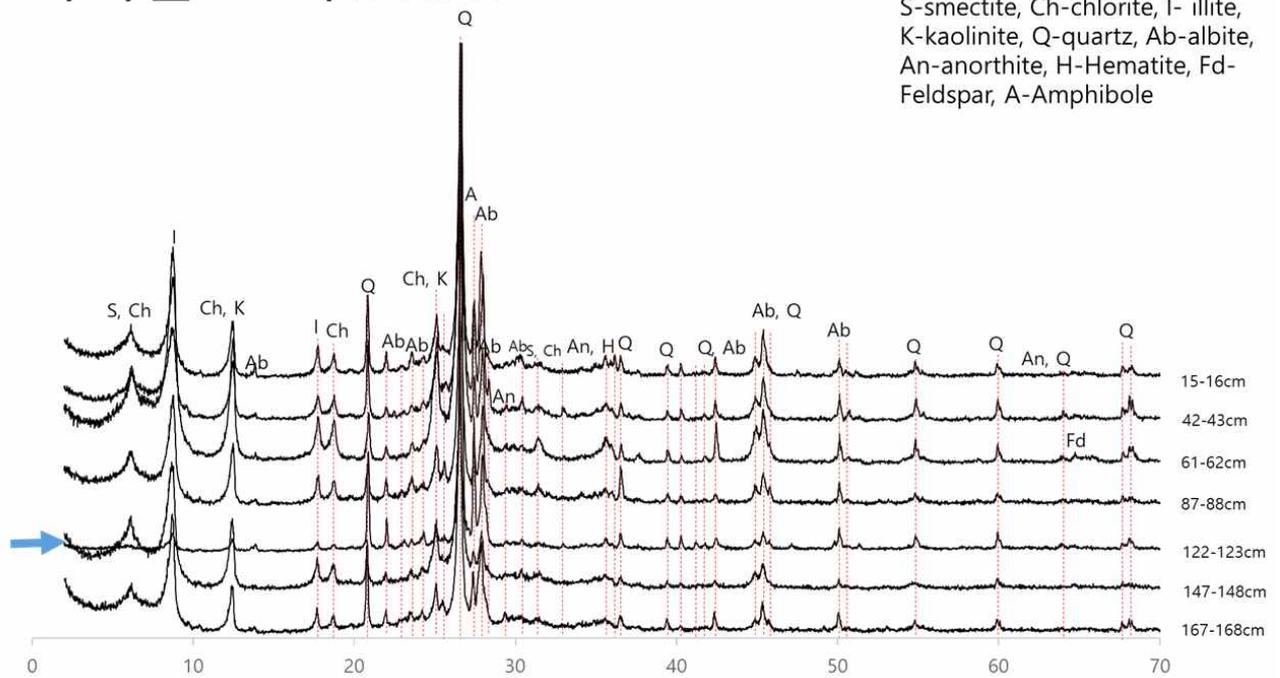


그림 31) 로스해 근처 퇴적물 코어C XRD 광물 성분 분석



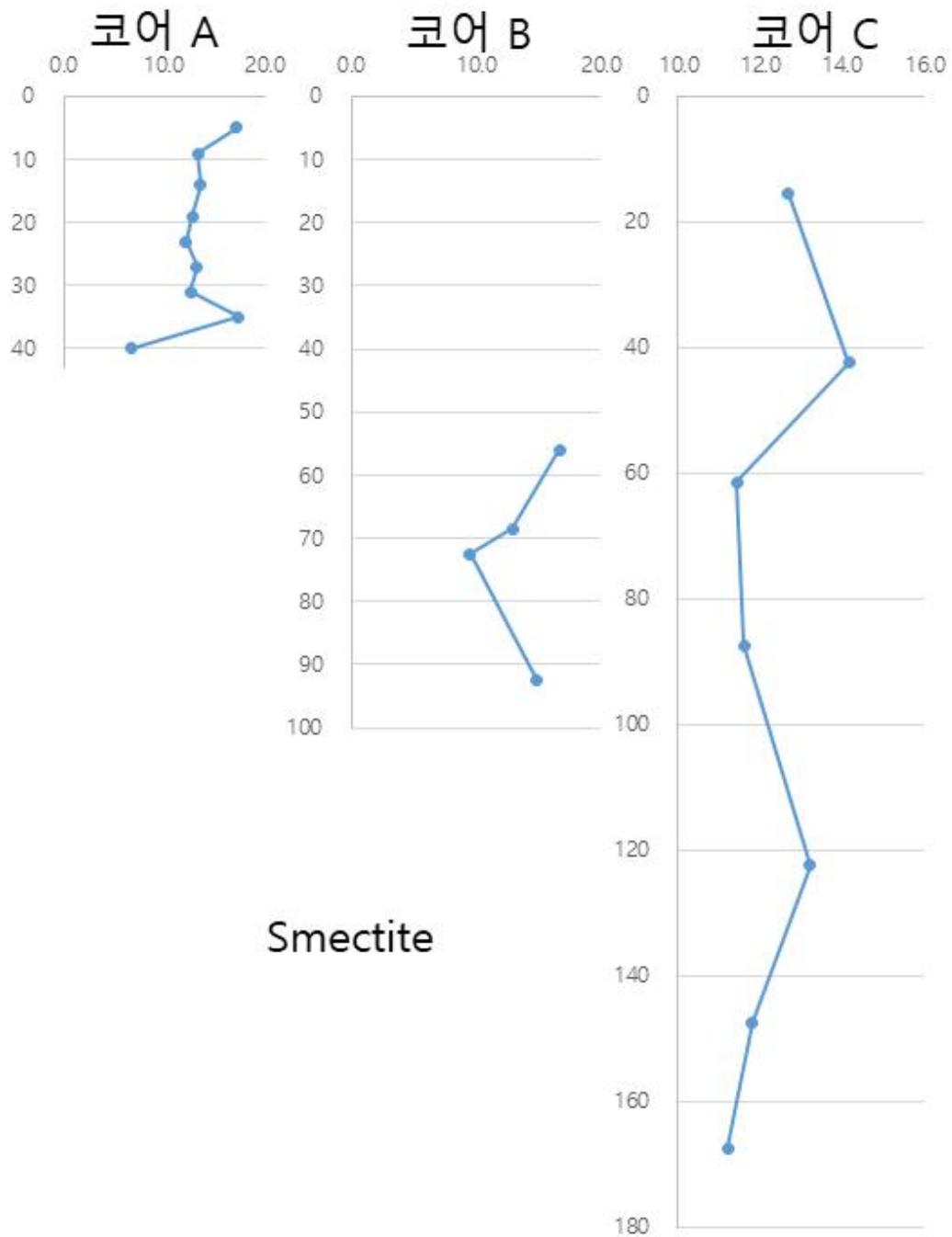


그림 32) 로스해 근처 퇴적물 코어A, B, C의 점토광물 중 스멕타이트의 함량비 변화

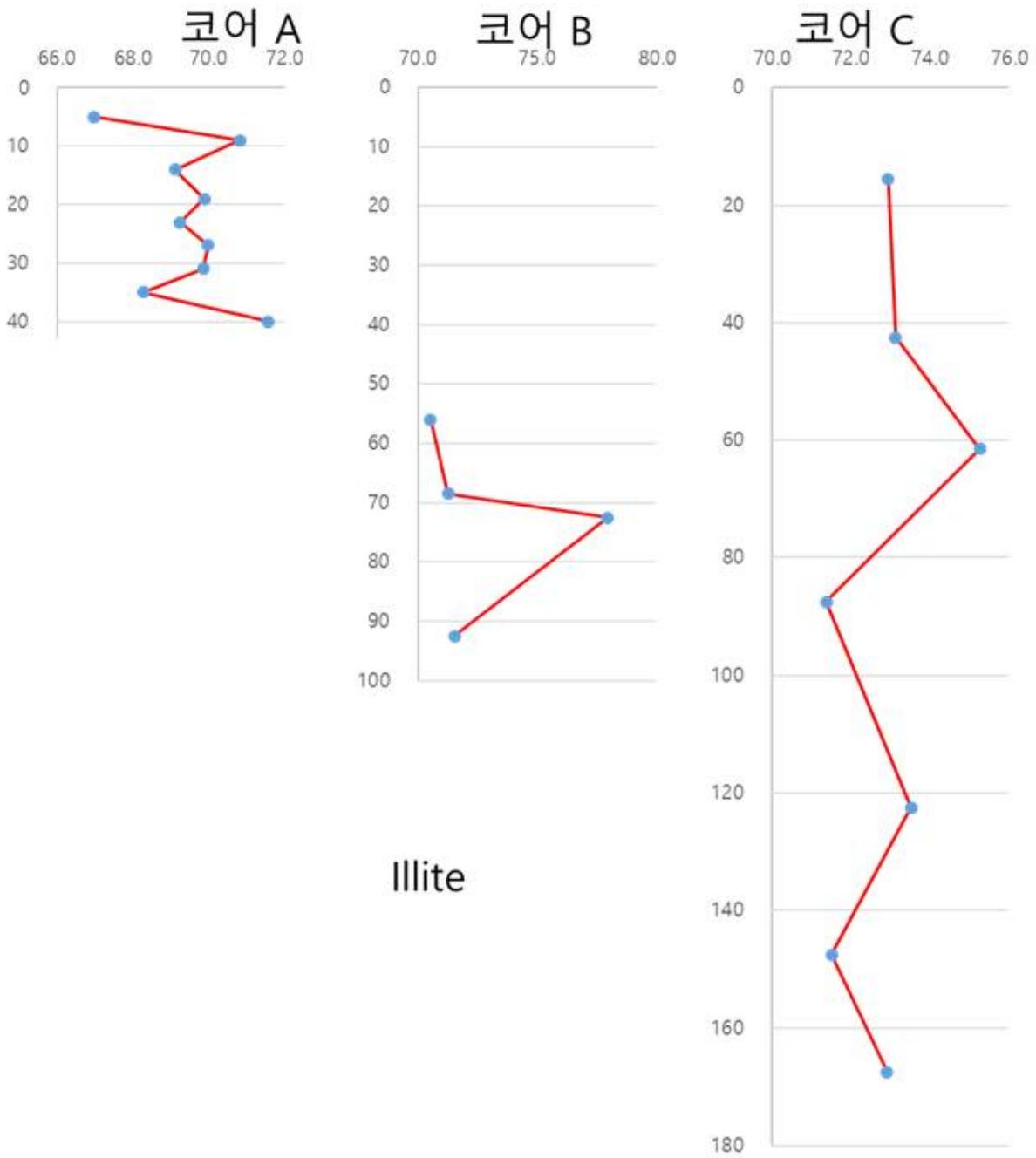


그림 33) 로스해 근처 퇴적물 코어A, B, C의 점토광물 중 일라이트의 함량비 변화

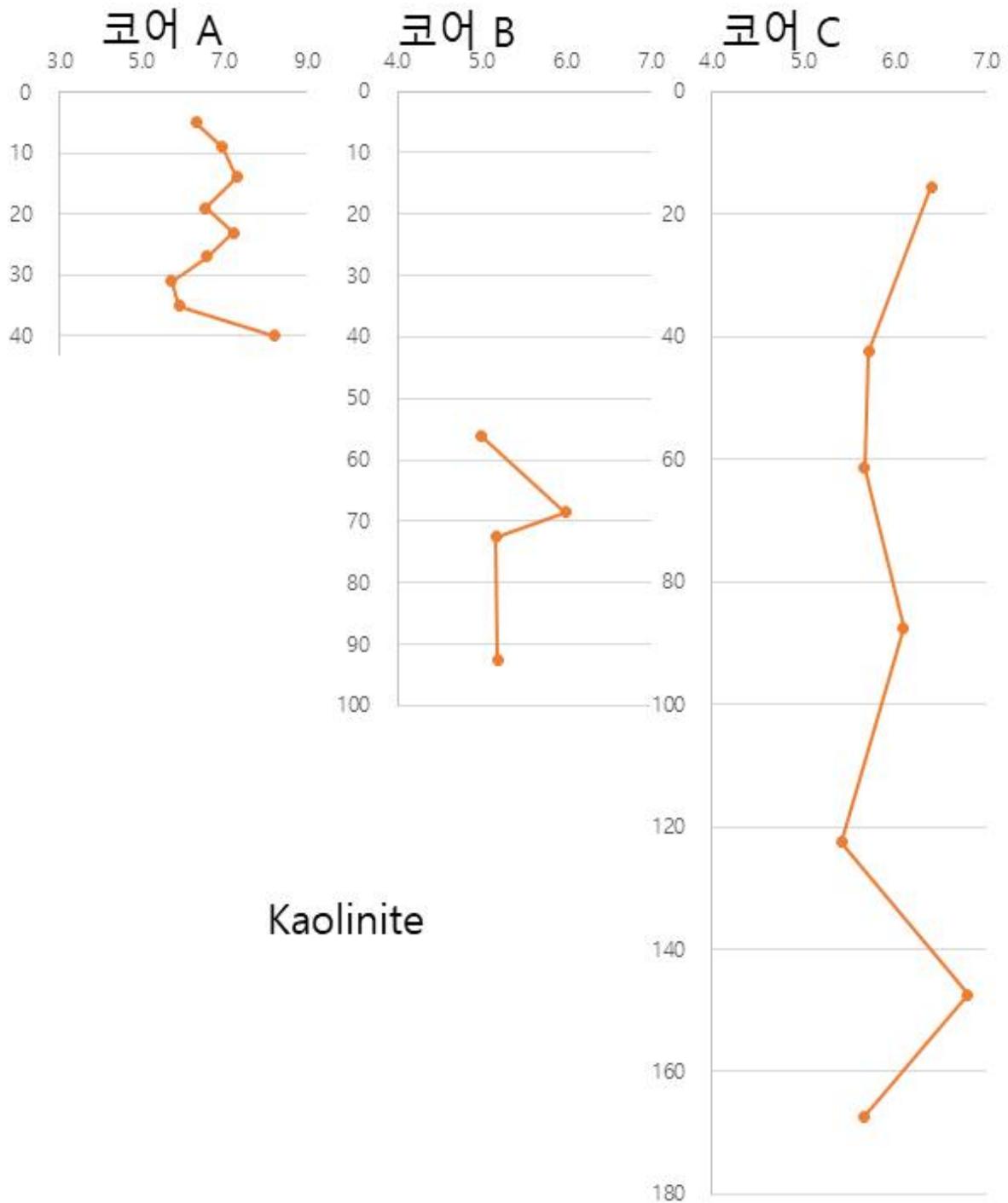


그림 34) 로스해 근처 퇴적물 코어A, B, C의 점토광물 중 카올리나이트의 함량비 변화

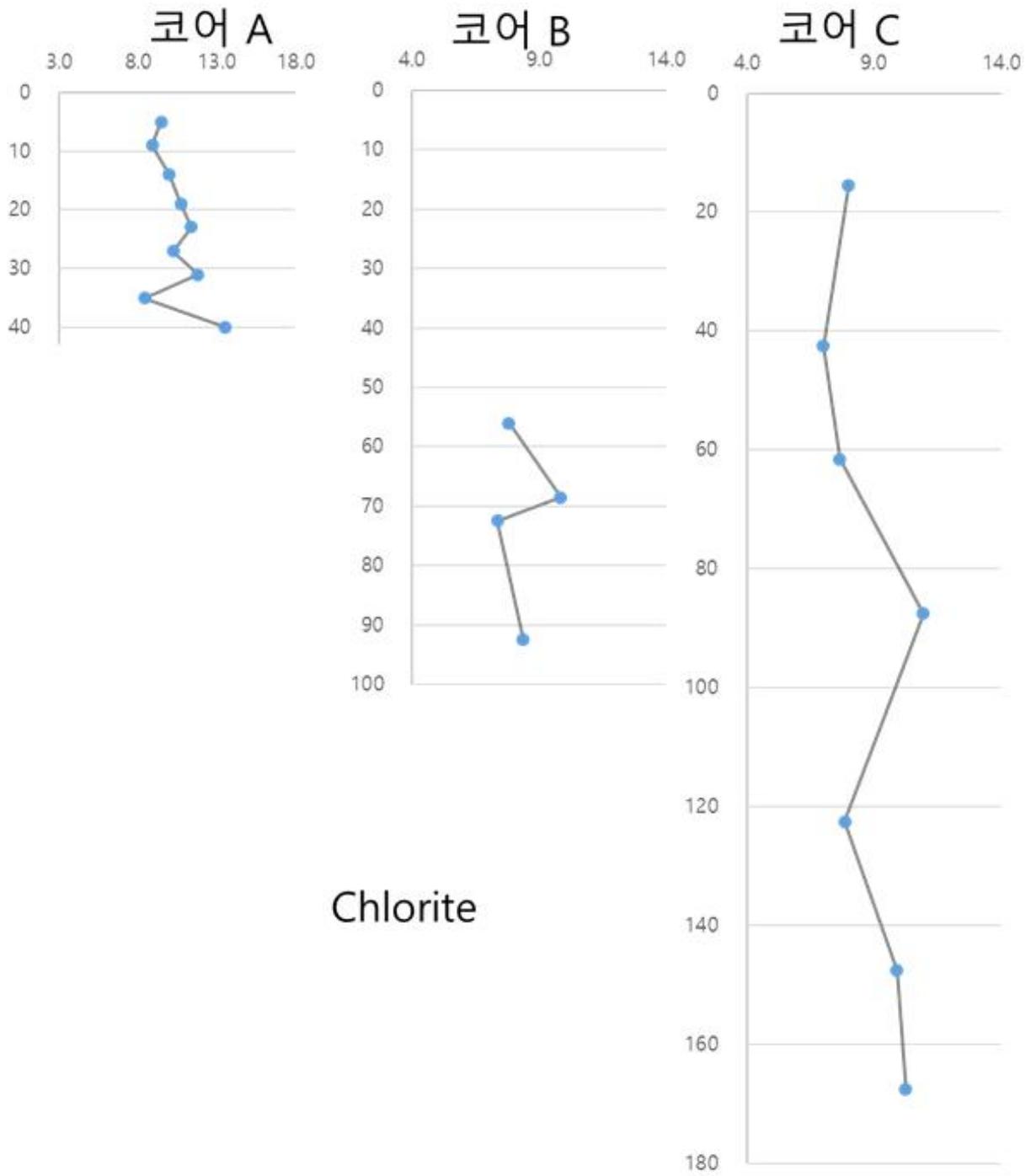


그림 35) 로스해 근처 퇴적물 코어A, B, C의 점토광물 중 클로라이트의 함량비 변화

- 각 코어에 대해 깊이별로 점토광물의 함량비를 분석하였다 (그림 32, 33, 34, 35). 각각의 코어에 해당하는 깊이가 다르기 때문에 코어 별로 다르게 표시하여 나타냈다. 스�멕타이트의 경우 코어 A는 전반적인 깊이가 얇은 부분을 포함하고 있는데 코어 A는 스�멕타이트가 약 15-18 %를 보이며 코어 B는 약 15 % 코어 C는 약 12-14 %의 스�멕타이트 함량을 보인다. 코어 C를 보면 중간 70 cm 부근에서 스�멕타이트의 함량이 낮아지는 것을 관찰 할 수 있다. 일라이트는 세 개의 코어 모두 60 % 이상으로 점토광물 중 가장 우세한 비율을 차지하고 있다. 이는 코어를 획득한 연구 지역이 대륙성 기원의 영향을 많이 받음을 의미한다. 특징적으로 코어의 퇴적상에서 과거 표층 구간으로 의심되는 구간인 코어B 72cm 와 코어C 122cm에서는 일라이트의 함량이 높아지는 것을 관찰 할 수 있다. 이는 이 시기에 환경적 요인의 변화로 인해 일라이트가 풍부한 퇴적물의 유입이 증가했을 가능성에 대해 제시하고 있다. 빙저호에서 그러한 변화는 외부로부터 물의 유입이 증가하는 시기고, 퇴적물이 쌓인 시기는 표층일 가능성이 있다. 카올리나이트와 클로라이트는 전반적으로 함량이 매우 낮은 것을 관찰 할 수 있다. 세 개의 코어 모두 카올리나이트와 클로라이트가 깊이에 따른 변화가 크지 않은 것을 관찰 할 수 있다.



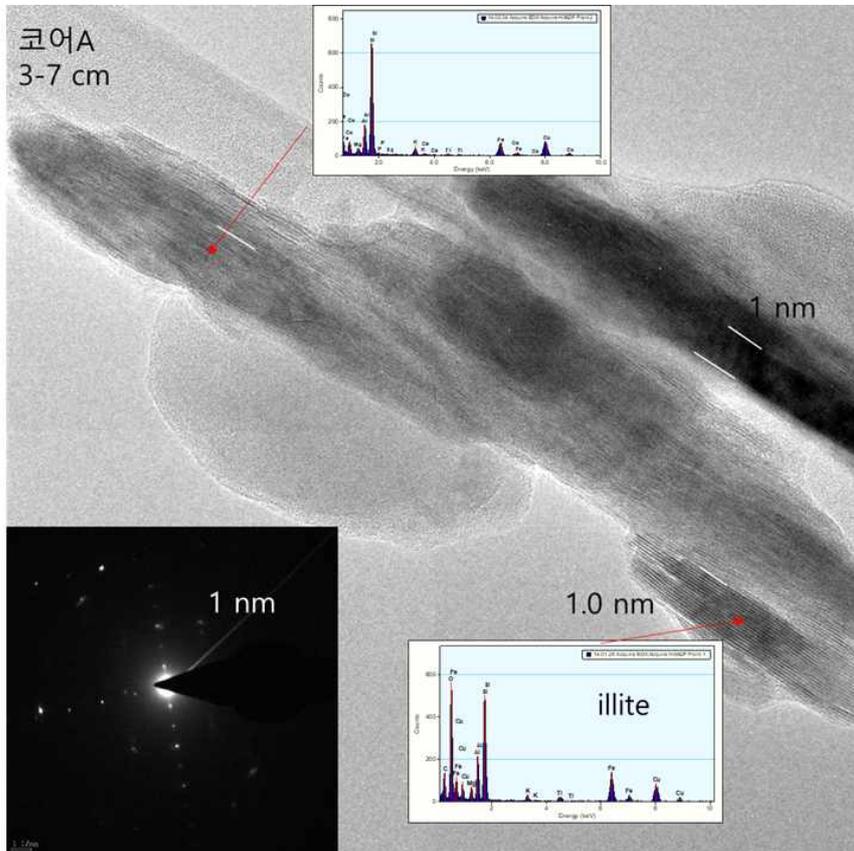


그림 36) 로스해 근처 퇴적물 코어A 3-7cm의 일라이트의 TEM 분석 결과

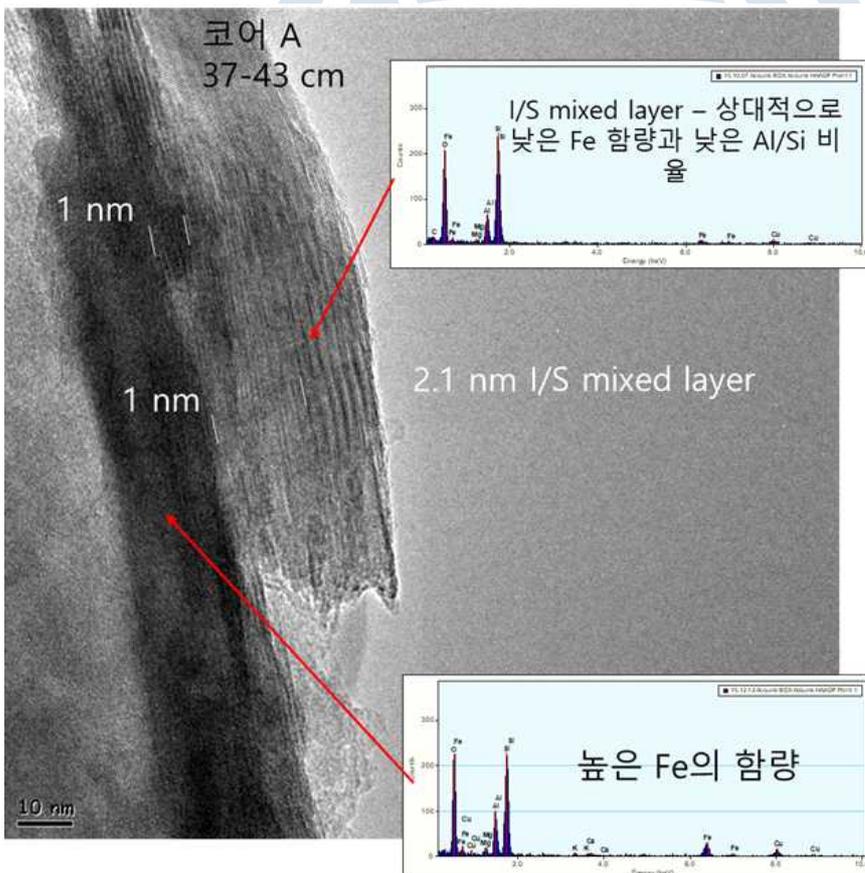


그림 37) 로스해 근처 퇴적물 코어A 37-43 cm의 일라이트의 TEM 분석 결과

- 점토광물의 함량과 함께 코어 A의 표층 부근의 시료와 같은 코어에서 가장 깊은 곳에 위치한 43cm의 점토광물을 TEM을 이용해 분석을 진행하였다 (그림 36, 37). 가장 함량이 높은 일라이트를 위주로 분석을 진행하였으며 TEM 분석을 통해 빙저호에서 점토광물과 미생물간의 생지화학적 반응을 살펴보고자 하였다.
- TEM 분석 결과 3-7cm 와 37-43cm에서 모두 일라이트가 관찰되었다 (그림 36, 37). 또한 일라이트의 화학 성분을 보면 대부분 Fe이 풍부한 일라이트가 관찰되었으며 이는 미생물이 철 산화물 외에 점토광물도 철을 이용한 화학적 호흡에 사용될 가능성이 있음을 시사한다. 상부와 하부의 일라이트를 비교했을 때 차이점은 상대적으로 하부의 일라이트의 두께가 두꺼운 것을 관찰 할 수 있었다. 이는 상부의 일라이트가 표층에 있으므로 하부에 비해 더 많은 풍화 작용을 겪었거나, 아니면 소스가 일부 차이 나는 일라이트가 공급되었을 가능성이 있다. 하부의 일라이트에서는 2.1 nm를 가지는 일라이트/스멕타이트 혼합층 광물을 발견할 수 있었다. 이 혼합층 광물은 일반적으로 표층보다는 더 깊은 심부에 나타나는 광물이다. 그런데 이 시료는 43 cm로 거의 표층에 해당한다. 혼합층 광물의 발견은 여러 가지 의미를 시사한다. 일부 깊은 지역에서 반응한 광물이 빙하의 침식으로 인해 표층까지 공급되었을 수도 있고, 미생물에 의해 스멕타이트가 철 환원 반응으로 구조적 변이를 거치면서 일라이트의 광물 변이 과정을 겪었을 수도 있다. 이처럼 아직 TEM 관찰만으로는 37 cm 구간에서 발견된 혼합층 광물이 생지화학적 반응의 부산물이라고 확정할 수 없다. 그래서 이 부분을 보충하기 위한 Fe의 산화수 측정, 일라이트의 결정 크기 분포, 화학 성분 분포, 구조적 변화 연구 등 추가적인 광물 분석이 필요할 것으로 보인다.

3) 해저 퇴적물을 이용한 고환경 해석 및 철 환원 미생물에 의한 광물의 Biomarker 조사
(II)

(가) 빙봉 후퇴 지역의 퇴적물 코어의 성분 분석 및 biomarker 분석

- 벨링스하우젠 해의 빙봉 후퇴 지역에서 획득한 코어 BS17-GC18에 대해서 빙봉이 후퇴하고 대륙붕에 있는 지역임에도 불구하고 일반적인 대륙붕 빙하기 퇴적물이 아닌 다른 퇴적상이 있는 점을 확인했다 (그림 38).

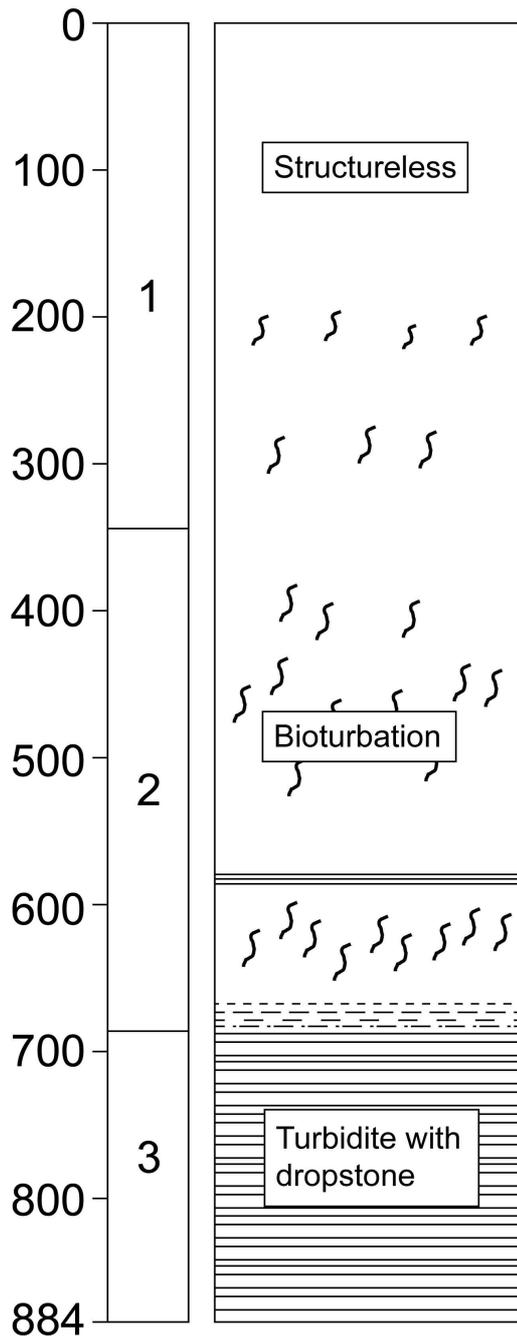


그림 38. 남극 반도 벨링스하우젠 해의 크리스탈 사운드에 위치한 BS17-GC18 코어 퇴적상

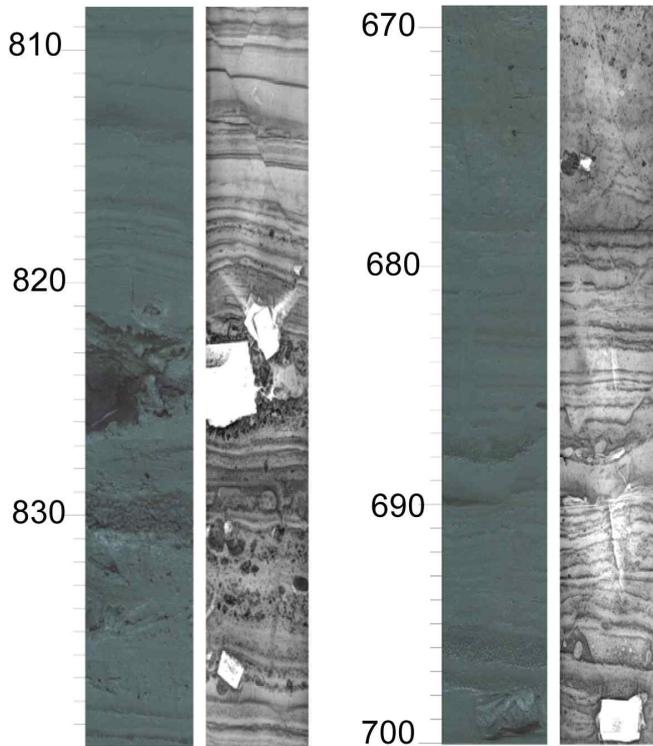


그림 39. 남극 반도 벨링스하우젠 해의 크리스탈 사운드에 위치한 BS17-GC18의 670-884cm 구간에서 실제 코어의 이미지

- BS17-GC18 코어의 경우 670-884cm 구간에 모래 크기의 입자들과 함께 어두운 회색의 사질 터비다이트 층이 지배적으로 나타난다 (그림 38, 39). 이와 함께 713 cm, 825 cm, 830 cm 부근에서 다이어믹턴이 관찰된다. 상부로 갈수록 670cm 위쪽에서는 빙붕이 후퇴하면서 보이는 686 cm부터 하부의 사질 터비다이트 층이 사라지고 갈색의 실트질층이 퇴적물에 섞여서 관찰되고 344 cm부터 원양성 퇴적물의 증가와 함께 갈색 퇴적물이 증가하고 실트질 구조도와 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 빙붕이 기후 변화에 따라 전진과 후퇴하면서 동반되는 퇴적 작용의 변화이다. 이는 일반적인 대륙붕의 빙하기에 관찰되는 두꺼운 다이어믹턴과는 다른 빙하기의 퇴적상이라 할 수 있다.
- 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 빙붕은 빙하기 동안 빙상으로 대륙붕의 경계부근까지 전진한다. 그래서 빙상의 기저부에 퇴적된 이전의 퇴적물들이 역의 형태로 빙상과 함께 움직이면서 운반 및 재퇴적과정을 거친다. 670cm 하부의 경우, 회색의 사질 터비다이트 층과 그사이에 큰 역들 쌓여서 다이어믹턴 층을 이루는 것을 관찰 할 수 있다. 670cm 하부에서 지배적

으로 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 저탁류로써 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 670cm 하부는 빙하기에 빙상이 크리스탈 사운드의 코어를 획득한 지점을 덮고 있었으며, 주변으로부터 다량의 퇴적물이 공급된 터비다이트층이 형성된 것으로 주변보다 급격한 경사를 가진 분지 형태의 지형으로 추측할 수 있다.

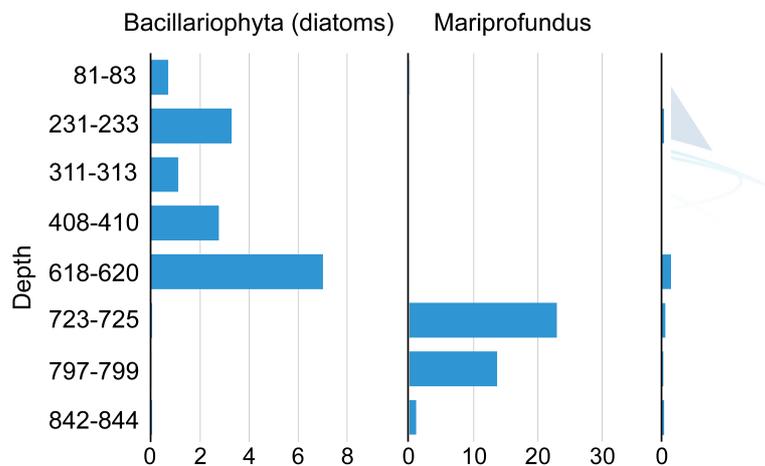


그림 40. 남극 반도 벨링스하우젠 해의 크리스탈 사운드에 위치한 BS17-GC18의 코어의 깊이 별 규조류와 박테리아의 상대적 함량 분석

- 극지연구소 생명과학연구부의 공동 연구를 통해 그림 40과 같이 깊이별로 많은 함량을 보이는 종인 Bacillariophyta 와 Mariprofundus에 대해 분석을 실시하였다. 전반적으로 약 670cm 기준으로 박테리아가 감소하거나, 규조류가 새롭게 나타나는 급격한 변화를 관찰 할 수 있다. 이는 이 깊이에서 퇴적 환경이 급격하게 변한다는 것을 확인할 수 있다.
- 그림 40의 Bacillariophyta는 돌말류 또는 규조류로 해양성 독립영양 원생생물로 식물성 플랑크톤이다. 주로 광합성을 이용해 에너지를 확보하여 성장하기 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 670cm 하부 구간에서는 규조류가 관찰되지 않았다. 이를 통해 돌말류 혹은 규조류가 급격하게 증가하는 618 cm 구간부터는 광합성이 가능한 퇴적 환경이었다는 것을 간접적으로 확인할 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 670cm 하부 구간에 해당하는 723 ~ 884 cm 구간에서 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 특히 670cm 하부에서 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. 이러한 박테리아는 화학합성 무기 영양 박테리아로 빛이 없는 환경에서 주변에 철을 산화시키면서 무기탄소를 유기탄소로 환원할 수 있다. 이런 과정을 통해 빙하 하부에서는 박테리아가 성장을 유지할 수 있다.
- 위의 결과들을 통해 대륙빙임에도 주변보다 1000m 이상의 깊은 지형, 빙하기에 대륙빙에서 주로 관찰되는 퇴적상이 아닌 터비다이트와 역이 함께 나타나는 퇴적상, 코어의 하부에서 관찰되는 다른 미생물 군집을 토대로 코어의 하부 환경이 일반적인 빙봉 하부의 환경이 아닌 다른 특별한 환경일 가능성이 있다. 그래서 이를 밝혀보고자 배양 실험을 진행하였다.

	Composition		
	Sediment (713, 718 cmbsf)	Medium	Glutaraldehyde
Enriched slurry	V	V	
Unenriched slurry	V	V	V
pH	7		
Temperature	4 °C		
Medium composition	M1 Basal salts, M1 Trace element, M1 Phosphate, M1 metal supplement, MOPS, 15 mM Sodium selenate, 0.2 M NaHCO ₃ , M1 Amino acid, 2 M C ₃ H ₅ O ₃ Na, 2 M HCOONa		

표 5. BS17-GC18 퇴적물에 대한 배양실험 조건

- 빙하기의 퇴적물은 대부분 터비다이트층으로 이루어져 있다. 기존 빙저호 연구를 통해 빙저호 퇴적물에서 미생물의 활동이 가장 활발한 구간은 빙저호의 물과 퇴적물이 맞는 표면 구간이었다 (Christner et al., 2014). 그래서 GC18 코어에서도 퇴적당시의 표면으로 추정되는 터비타이트층에서 가장 작은 입자가 나타나는 층에서 배양 실험에 대한 시료를 획득하였다. 퇴적물은 12g/L의 농도에 맞춰 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.

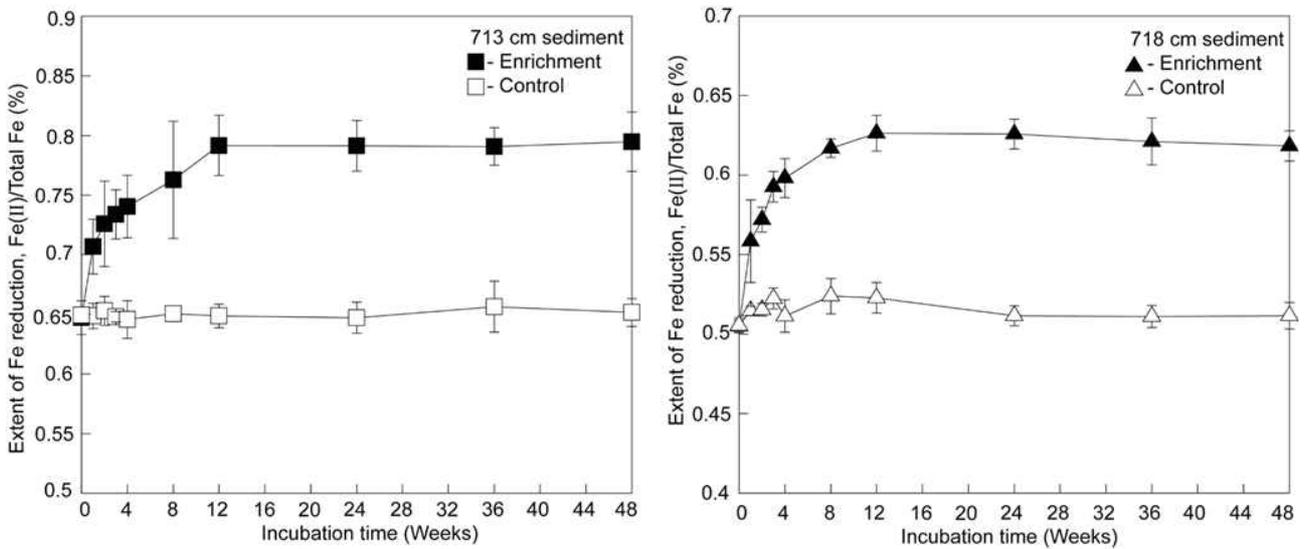


그림 41. BS17-GC18 코어 713cm, 718cm 퇴적물의 철환원능

- 배양 실험을 통해서 1년까지 반응을 진행했을 때, 철 환원능이 713cm, 718cm 두 퇴적물에서 모두 증가하는 것을 관찰 할 수 있다 (그림 41). 713cm 퇴적물은 초기 2가철이 약 65% 정도였으나 12주가 지났을 때 약 79%까지 14%의 2가철 함량이 증가하였다. 718cm 퇴적물은 초기에는 약 51%의 2가철 함량을 보였는데, 시간이 지날수록 63% 정도까지 증가함으로써 12%의 함량 증가를 관찰 할 수 있다. 이 결과를 토대로 두 퇴적물 모두 철 환원 박테리아가 활동한다는 점을 확인 할 수 있었다. 또한 퇴적물 내에서 배양 실험을 통해 철 함유 광물과 미생물이 반응을 했다고 유추할 수 있는데, 가능성이 있는 광물로는 철 산화물과 점토 광물이 있다. 최근 연구를 통해 점토광물 내 일라이트가 남극의 라센C 빙봉 아래의 저온 환경에서도 미생물과의 상호작용을 통해 철을 환원하고 빠져나온 용해 철이 남극해로 유입될 수 있다는 연구가 제시되었다 (Jung et al., 2019). 그러므로 저온 조건에서 배양한 실험 역시 철 환원 박테리아가 점토광물과 상호작용 했을 가능성도 고려할 수 있다. 이를 밝히기 위해 TEM을 이용해 광물의 변질작용의 흔적을 확인하고 점토광물의 물리적, 화학적 특성의 변화에 대해 분석하고자 한다. 또한 배양 실험에서 활동성을 나타낸 박테리아에 대해 타임포인트별 미생물 군집을 분석해 어떤 컨소시엄을 통해 산화 환원 반응에 참여했는지 밝히고자 하였다.

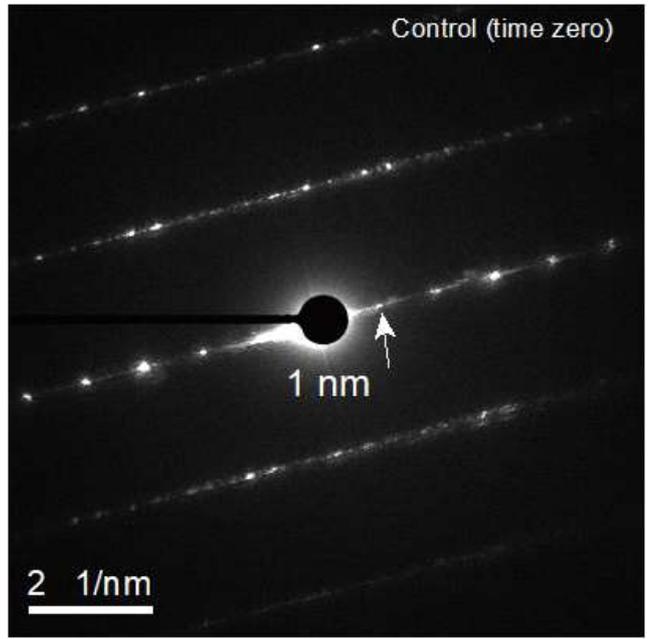
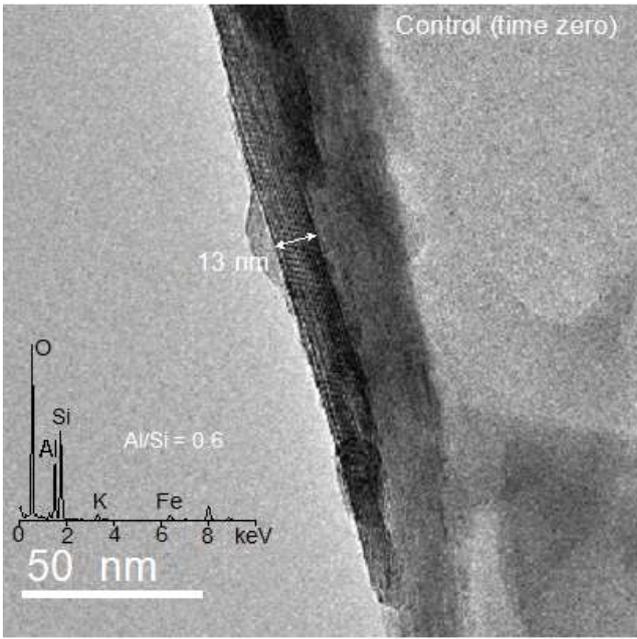


그림 42. BS17-GC18 코어 배치 실험의 time zero의 일라이트 이미지 및 SAED 패턴

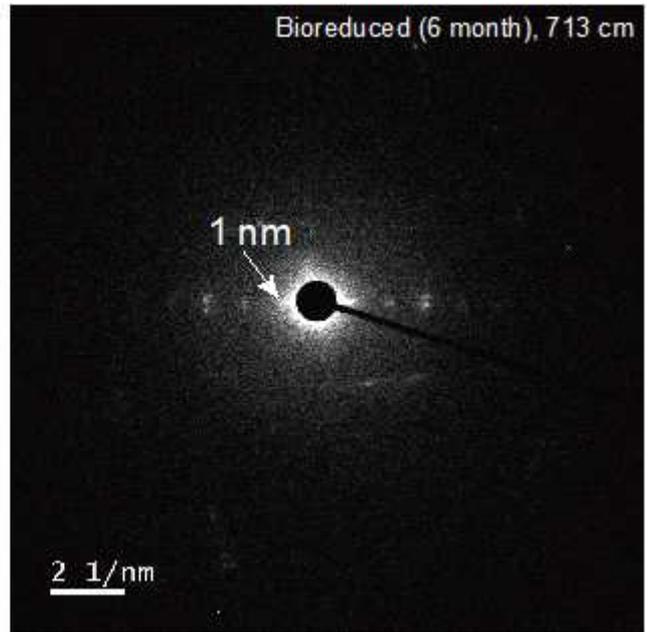
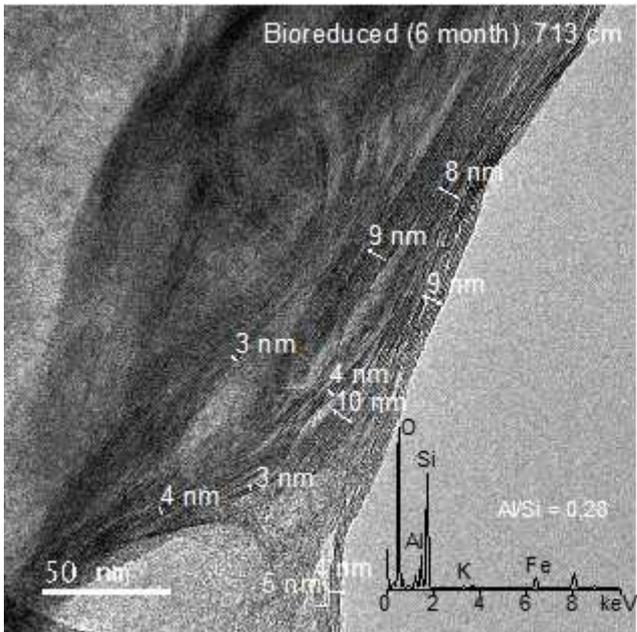


그림 43. BS17-GC18 코어 배치 실험의 배양한지 6개월 쯤 일라이트 이미지 및 SAED 패턴

- 배치실험에 대한 TEM 분석 결과 점토광물인 일라이트의 변이를 관찰 할 수 있었다. 철 환원능 결과에서 time zero에 비해 12주로 갈수록 철 환원능의 값이 증가하는 것을 확인할 수 있었는데, 실제로 TEM 분석 결과에서도 일라이트의 두께가 점차 얇아지며 SAED 패턴상에서도 변화가 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 일라이트의 구조 내의 철을 환원했다면, 철 환원에 따라 점토광물 내 전체 전하 균형에 영향을 받을 수 있다. 또한 일부 환원 과정에서 구조 내 철이 용해되면서 빠져나옴에 따라 일라이트가 이루고 있던 구조가 무너지고 변형되는 과정을 겪을 수 있다. 일라이트는 층상규산염 광물로 적층 방식에 따라 폴리타입이 구분된다. 그림 42에서 관찰되는 일라이트는 배양 시작점의 일라이트를 관찰 한 것으로 대부분 육성 기원 퇴적물로부터 공급된 일라이트이기 때문에 1M으로 보이는 폴리타입을 가지는 일라이트를 관찰 할 수 있다. 배양 시작점에서 관찰되는 일라이트는 대부분 두께가 13 nm 이상으로 큰 값들을 보이고 있다.
- 배치 실험이 6개월 지났을 때 일라이트를 관찰한 분석 결과 배양 초기에 관찰된 일라이트와는 차이가 나는 것을 관찰 할 수 있다 (그림 43). 6개월이 지났을 때 배치 실험의 철 환원능은 약 13-14% 증가한 것을 관찰 할 수 있었다 (그림 41). 그렇다면 3가 철을 포함한 광물이 환원되었다는 것인데, 일라이트도 하나의 후보 광물이다. 실제로 6개월 쯤의 일라이트에 대해 TEM 관찰한 이미지를 보면 일라이트의 두께가 상당히 얇아졌음을 확인할 수 있다. 대부분의 일라이트가 배양 시작점의 일라이트보다 두께가 10 nm 이하로 값이 작아졌다. 또한 SAED 패턴 상에서 1M으로 관찰되던 일라이트는 거의 관찰되지 않았다. 이는 철 환원에 따라 일라이트가 구조 내 철이 빠져나갔을 수 있고, 그 결과 일부 붕괴된 일라이트가 관찰된 결과라 보여진다. 다른 가능성으로는 일부 스멕타이트에서 철 환원이 진행된 경우, 스멕타이트의 구조 내 철이 환원되고 전자 균형이 전반적으로 음전하를 띄는 방향으로 점토광물이 변이되면서 이를 보충해 주기 위해 양이온이 점토광물 내 층간에 치환될 수 있다. 일반적으로 K이 스멕타이트의 층간에 치환 될 수 있는데, K이 치환되면 층간에 있던 물 분자가 빠져나가면서 스멕타이트의 층간이 무너지고 1 nm의 lattice fringe를 가지는 K smectite로 변할 수 있다. 이 경우, 일라이트처럼 TEM 상에서 관찰될 수 있다. 이후 보다 명확한 입도 크기 변화를 확인하기 위해 입도 크기 분포 (crystal size distribution)을 계산해서 비교하고자 한다.

718cm
3 week

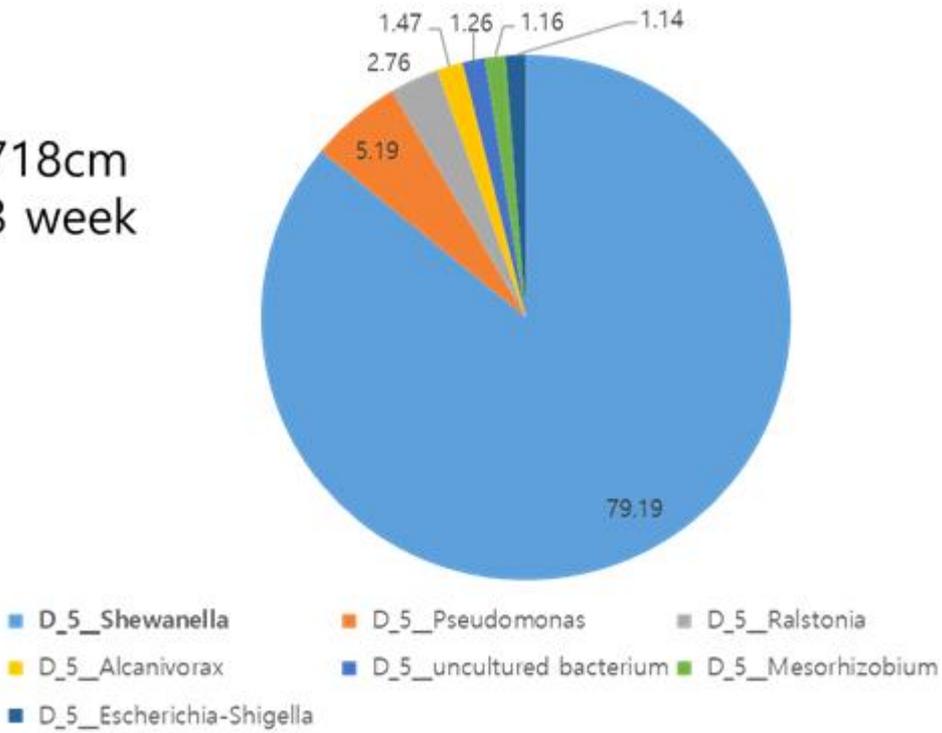


그림 44. BS17-GC18 코어 배양 실험의 16s rRNA 분석을 통한 3주차의 미생물 군집



718cm
12 week

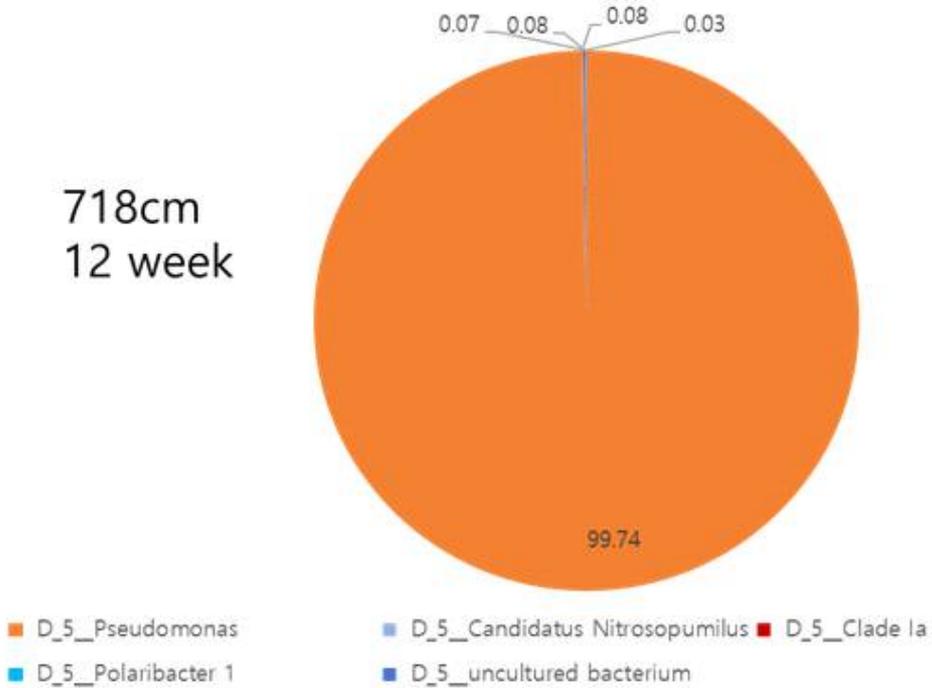


그림 45. BS17-GC18 코어 배양 실험의 16s rRNA 분석을 통한 12주차의 미생물 군집

718cm
24 week

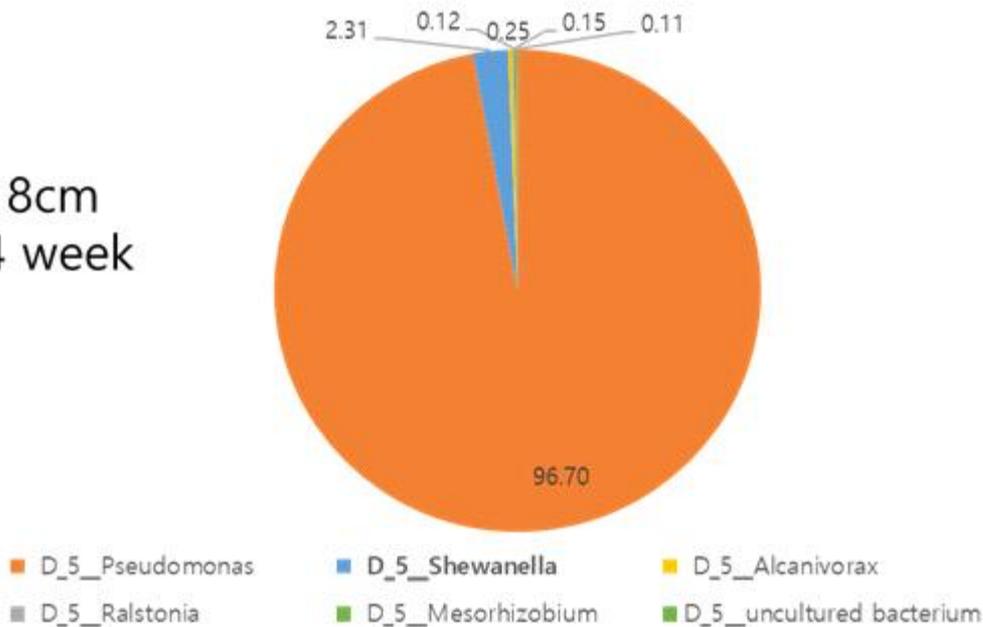


그림 46. BS17-GC18 코어 배양 실험의 16s rRNA 분석을 통한 24주차의 미생물 군집

- 퇴적물을 이용한 미생물 배양 실험의 타임포인트 별로 샘플을 채취해 미생물 군집의 변화를 관찰하기 위해 공동 연구 중인 황청연 교수와 함께 16s rRNA 분석을 진행하였다. 배치 실험과 대조군 실험 모두 샘플을 분석하였는데, 대조군 실험에서는 미생물이 검출되지 않았다. 또한 모든 타임포인트에서 미생물이 검출되지 않는 않았지만, 검출된 퇴적물에서는 유의미한 결과를 확인 할 수 있었다. 특징적인 점은 3주와 24주 배양 시료에서 *Shewanella* 속이 관찰된 것이다. 3주 배양 시료에서는 79%의 높은 비율로 *Shewanella* 속이 관찰되었다. 이는 3주차 때 이 종이 우점종이었음을 의미한다. 실제로 3주차에는 철 환원능이 매우 급격하게 증가하는 시기로, 배양 실험 안에서 미생물에 의한 환원 반응이 활발하게 일어나는 구간이다. *Shewanella* 종은 대표적인 철 환원 박테리아로 알려져 있으며, 이전 연구를 통해 점토광물과의 반응으로 철 환원 실험에 많은 연구가 진행되어 왔다 (Kostka et al., 1996). 이전 연구에서는 상온 조건이나 온도가 높은 조건에서 연구가 많이 진행되었고, 4도와 같은 저온에서는 철 환원 실험이 진행된바가 거의 없다. 하지만 본 연구를 통해 4도의 저온 조건에서도 점토광물의 철 환원 반응이 일어날 수 있다는 점을 제시할 수 있다. *Shewanella* 종은 3주 이후 12주에서는 거의 발견되지 않고, *Pseudomonas* 속이 우점종으로 변한 것을 확인 할 수 있다. *Pseudomonas* 속에도 철을 산화하고 환원하는 미생물 종이 존재하기는 하나, 어느 종이 관여했는지는 명확하게 분석되지 않았다.

(가) 해저 퇴적물의 빙기-간빙기에 따른 고환경 변화에 따른 퇴적물 기원지 분석 및 종합적인 고환경 해석

- 아문젠 해의 대륙붕, 대륙저면 퇴적물에 대해 서남극 빙붕의 빙하기-간빙기의 변화에 따른 퇴적물 기원지를 해석하고 고환경 변화를 유추하기 위해 최후 간빙기인 marine isotope stage 5 (MIS 5) 시료를 2차년도까지 분석한 시료에 더하여 분석을 진행하였다. MIS 5 시료는 PC494의 496cm의 깊이에 해당하는 시료를 분석하였으며, 채취한 시료에 대해 광물분석과 TEM 분석, TEM-EDS 분석을 진행하였다.

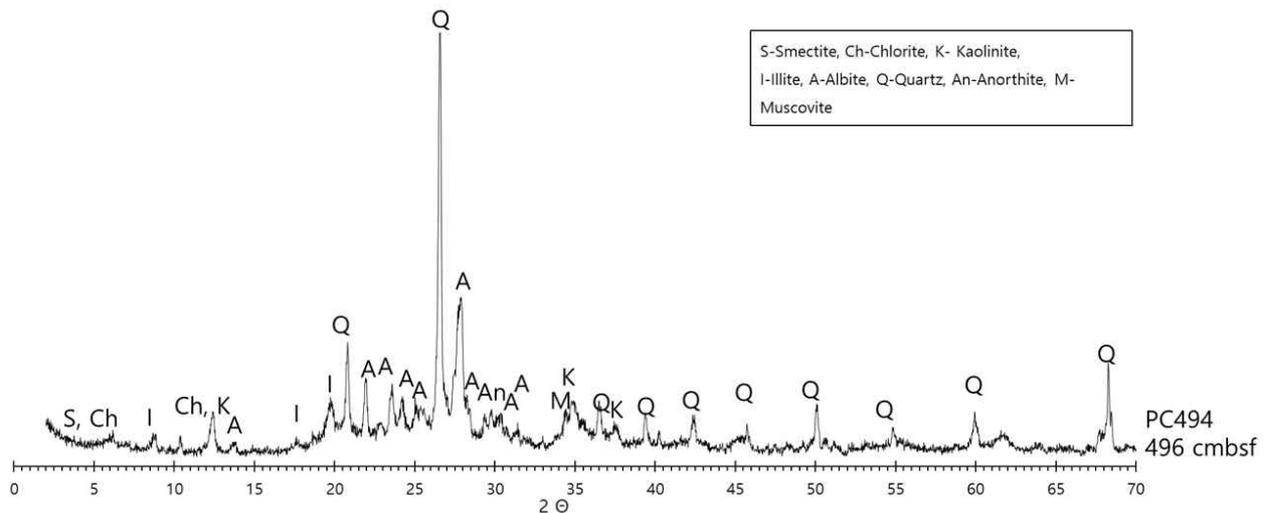


그림 47. PC494 496cm 코어의 부정방위법 XRD 분석 결과

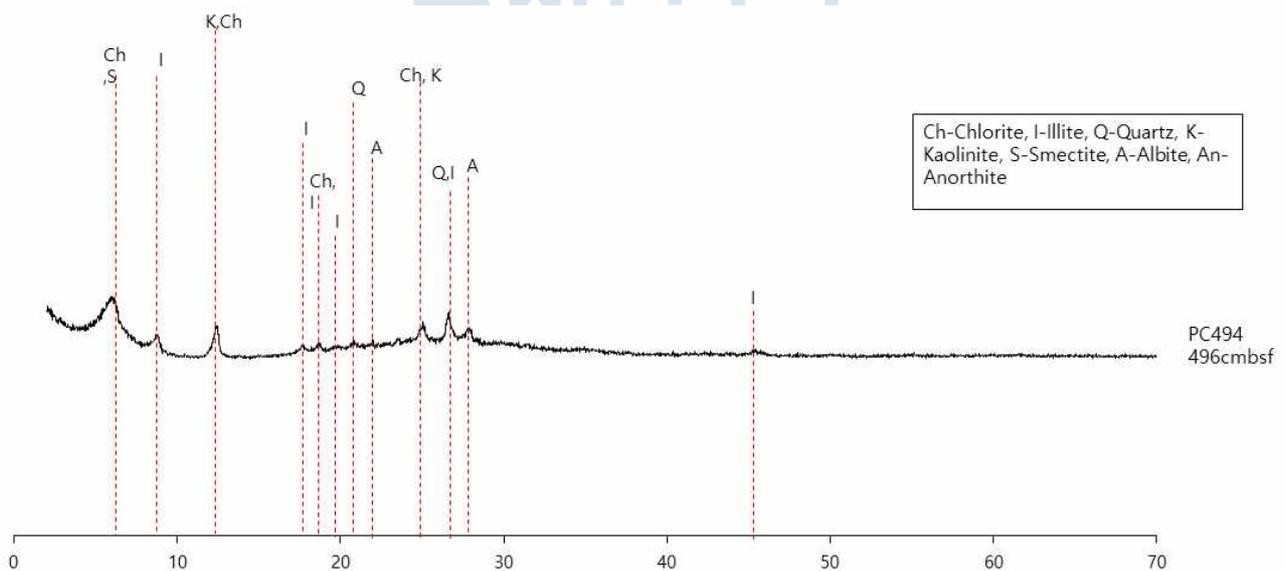


그림 48. PC494 496cm 코어의 정방위법 XRD 분석 결과

- 아문젠 해 대륙저면 PC494 496cm (MIS 5) 시료에 대해 2차년도까지 진행된 대륙붕 및 대륙저면 지역의 시료와 비교하기 위해 유기물 제거 후 광물 동정을 위한 XRD 분석을 실시하였다. XRD 분석은 1차년도, 2차년도와 같은 조건에서 진행되었다. 유기물 제거 후 기본적인 광물 종류는 부정방위법 XRD를 통해 확인할 수 있었다 (그림 47). 광물은 석영, 장석, 조장석, 운모류의 광물이 발견되었으며 점토광물인 스멕타이트, 일라이트, 클로라이트, 카올리나이트의 광물도 발견되었다. 구분된 광물은 대륙붕과 대륙저면에서 획득한 BC480, BC488, BC495, BC27, BC36, BC502와 유사하였으며 특징적으로 다른 광물상을 보이지는 않았다.
- 점토광물을 위주로 관찰하기 위해 2 μm 이하로 입도 분리한 시료에 대해서 정방위법 XRD 분석을 진행하였다 (그림 48). XRD 분석 결과를 바탕으로 점토광물에 대한 함량비를 구하기 위해 에틸렌 글리콜 처리하여 분석을 진행했다. 점토광물의 함량비는 2차년도까지 진행된 코어들과 함께 비교하여 MIS 5에 따르는 시기의 변화를 확인하였다 (표 6).

코어/깊이 (cm)	Smectite	Illite	Kaolinite	Chlorite
BC480/0-3	15.5	49.1	19.3	16.1
BC488/0-3	28.6	39.3	16.7	15.3
PC494/199-202	14.0	47.8	21.9	16.4
PC494/496-498	45.8	32.4	9.4	12.3
BC495/0-3	28.4	34.7	16.4	20.5
BC502/0-3	45.2	33.9	9.8	11.1
BC27/0-1	11.0	56.9	16.9	15.2
BC36/0-1	24.5	35.7	25.6	14.2

표 6. PC494의 496cm, 199cm를 포함한 대륙붕, 대륙저면의 2차년도까지 진행된 점토광물 함량비 분석 결과

- 표에서 보여지듯이, PC494의 496cm 시료는 높은 스�멕타이트의 비율과 상대적으로 낮은 일라이트의 함량을 보이고 있다. 이는 같은 코어에 있는 199cm의 시료와 상당한 차이를 보이고 있다. 스�멕타이트의 함량이 약 30% 높아졌으며, 일라이트의 함량은 약 15% 낮아졌다. 이를 통해 PC494 496cm은 간빙기라고 추측되며 상대적으로 스�멕타이트의 공급이 여러 곳에서 가능한 시기였다고 여겨진다. 카올리나이트는 다른 코어와 비교해서 매우 낮은 함량을 보이고 있는데, 이는 두가지 가능성이 있다. 첫 번째는 상대적으로 스�멕타이트와 같은 카올리나이트 외의 점토 광물의 함량이 증가하여 카올리나이트의 함량이 감소했을 가능성이 있고, 두 번째는 실제로 카올리나이트의 공급량이 감소했을 가능성이다. 카올리나이트는 아문젠 해 안쪽 마리버드 랜드에서 대부분 공급된다 (Hillenbrand et al., 2003). 이러한 대륙성 기원 퇴적물은 주로 빙하기에 대륙 저면으로 많이 공급되기 때문에 상대적으로 빙빙이 후퇴한 간빙기에는 대륙성 기원 물질의 공급이 줄어서 카올리나이트의 함량이 감소했을 가능성이 있다. 이처럼 점토광물의 함량으로 기원지를 추정하는 것은 여러 가지 불확실성이 존재하기 때문에 TEM을 이용하여 개별의 스�멕타이트 입자를 관찰하고, EDS를 사용하여 화학 성분을 측정하고자 하였다.



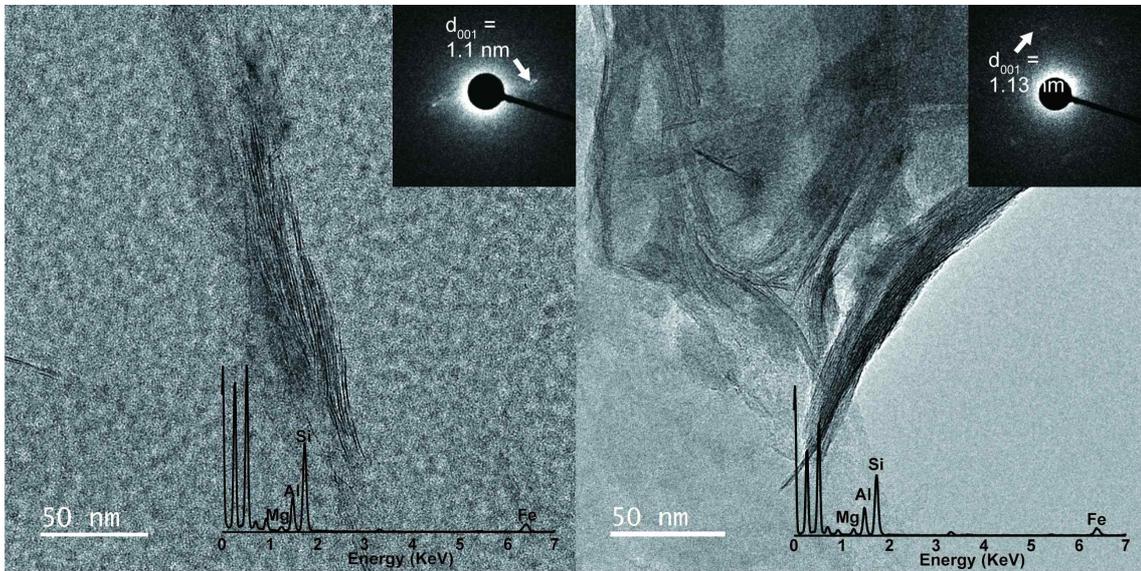


그림 49. PC494 496cm 코어 (MIS 5)의 TEM 관찰로 확인한 스멕타이트의 대표적인 이미지

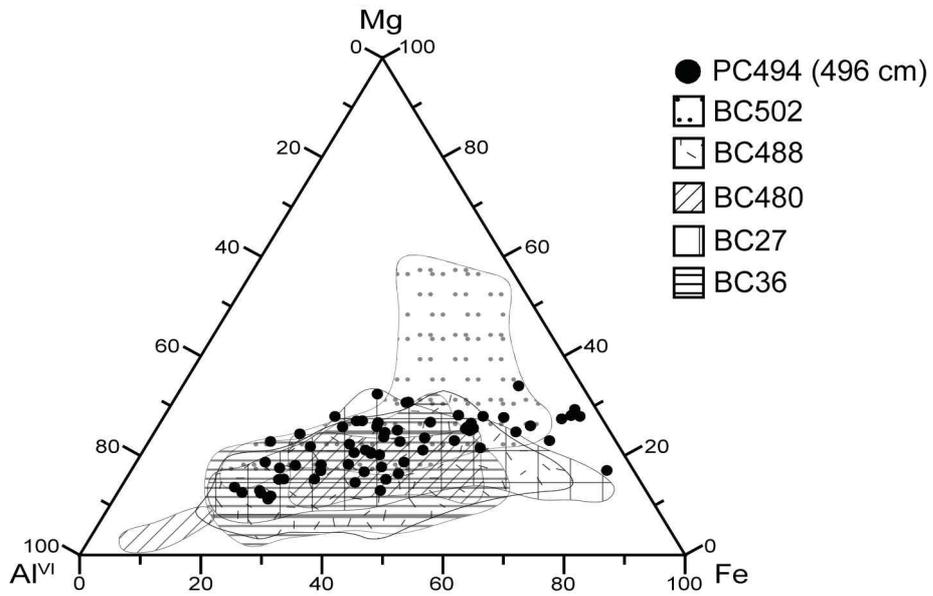


그림 50. PC494 496cm 코어 (MIS 5)의 스멕타이트의 화학 성분에 대한 삼각도표

- TEM 분석 결과 MIS 5 시료에서도 충분한 양의 스멕타이트를 관찰 할 수 있었다. 모양과 SAED 패턴, 격자 간격이 1.1-1.3 nm를 보이는 광물을 선정하고 스멕타이트 여부를 확인하였다 (그림 49). 스멕타이트에 대해서 EDS를 측정하여 각각의 화학성분을 삼각 도표에 도시하였는데, 팔면체 판의 Al, Mg, Fe을 기준으로 값을 구하기 위해서 측정된 weight percent의 화학성분 값을 화학식을 계산하였다. 분석 결과를 보면 496cm의 스멕타이트는 Al이 풍부한 구간부터 Fe, Mg가 풍부한 구간까지 넓게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 대륙붕에 위치한 BC480, BC36, BC27은 대부분 Al과 Fe이 풍부한 구간에 스멕타이트를 가지고 있으며, MIS 5 시료에서는 당시에 대륙붕으로부터도 스멕타이트가 공급되었음을 확인 할 수 있다. 또한, 일부 Fe과 Mg가 풍부한 스멕타이트가 관찰된다 (그림 50). 이 스멕타이트는 명확하게 BC502와 유사한 스멕타이트라고 말하기는 어렵다. BC502의 스멕타이트에 비해 Fe의 함량이 높은 구간으로 보여지기 때문이다. 그러므로, 2차년도까지의 결과와 비교해볼 때 간빙기에 해당하는 BC495와 PC494 496cm의 스멕타이트는 기원지에 일부 차이가 있음을 유추할 수 있다.
- 위의 결과를 바탕으로 우리는 아문젠 해 대륙 저면 지역에 빙하기-간빙기에 따른 퇴적물 기원지를 모식도로 표현하였다 (그림 51, 52). 먼저 PC494가 퇴적된 빙하기에는 점선과 불투명한 회색으로 표현된 빙봉이 대륙붕 끝단까지 전진한다. 이에 따라 빙봉 하부에서 빙봉에 의해 침식된 빙하 쇄설물이 대륙붕 끝단까지 전진할 수 있고 물리적으로 대륙사면을 따라 대륙저면으로 공급될 수 있다. 이 시기에는 빙봉에 의해 대륙사면에서 중력류나 저탁류에 의해 퇴적물이 하부까지 공급될 수 있다. 실제로 PC494의 스멕타이트는 주로 Al이 풍부하고 Fe이 일부 풍부한 스멕타이트가 관찰되었으며 이러한 스멕타이트는 주로 BC480, BC27, BC36 등 대륙붕에 위치한 스멕타이트와 유사한 분포를 보였다. 반면에 간빙기에는 표층 퇴적물인 BC495와 MIS 5의 퇴적물인 PC494 496cm를 확인 했을 때 두 스멕타이트 분포 모두 Al이 풍부한 구간부터 Mg 또는 Fe이 풍부한 구간까지 넓은 범위에 스멕타이트를 관찰 할 수 있었다. 이는 빙봉이 대륙 안쪽으로 후퇴함에 따라 다양한 지역으로부터 스멕타이트가 공급될 수 있다는 것이다. 특히 간빙기에는 상대적으로 남극 순환류의 해류가 강해지면서 이와 함께 남극의 대륙 방향으로 뻗어나가는 남극 순환 저층수 (Circumpolar Deep Water)의 공급이 증가한다. 실제로 여러 위성 관측을 통해 남극 순환 저층수의 영향으로 간빙기에 대륙 빙하가 상당 부분 녹고 있다는 보고가 있었다 (Hillenbrand et al., 2017). 즉 간빙기에는 남극 순환 저층수가 중위도부터 고위도까지 공급이 증가한다는 것을 알 수 있다. 이러한 해류의 영향으로 중위도에 위치한 BC502와 같은 남태평양 분지의 퇴적물이 아문젠 해 대륙저면까지 공급되면서 간빙기에 Mg과 Fe이 풍부한 스멕타이트가 운반되는 것이라 유추할 수 있다.

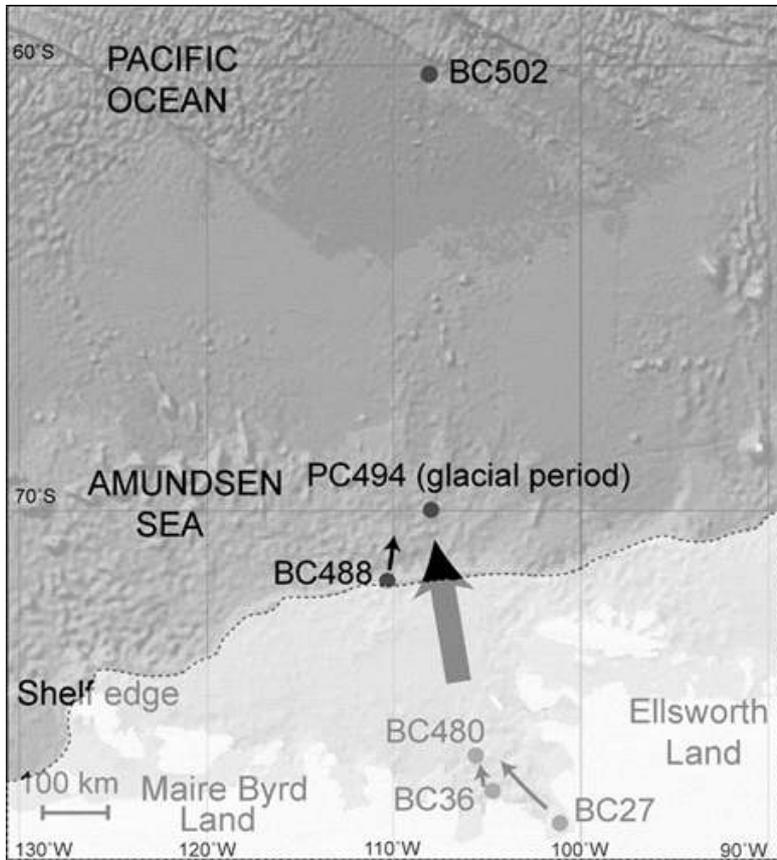


그림 51. PC494 199cm 코어 (빙하기)의 퇴적물 기원지 및 이동에 대한 모식도

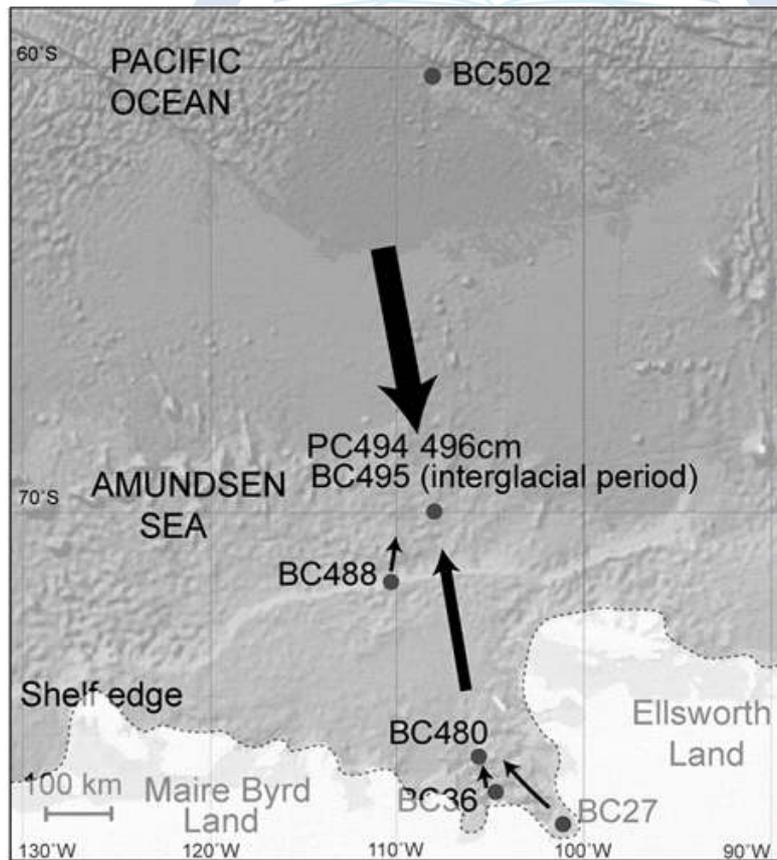


그림 52. BC495, PC494 496cm (MIS 5) 간빙기에 퇴적물 기원지 및 이동에 대한 모식도

- 하지만 간빙기에 따라 표층 퇴적물인 BC495와 MIS 5 퇴적물인 PC494 496cm의 스펙타이트 분포는 차이를 보인다. 이러한 차이를 나타내는 요인을 추정해보자면, 첫 번째는 간빙기에 따른 해류의 세기가 차이이기 때문이다. 남극 순환류는 앞서 설명한대로 빙하기-간빙기에 따라 해류의 세기가 달라지고, 해류가 흐르는 범위가 변한다. 남극 순환류는 중위도에서 부는 편서풍에 영향을 가장 크게 받는다. 그런데 편서풍은 간빙기에 세기가 상대적으로 증가하고 이에 따라 남극 순환류의 세기도 증가할 수 있다. 이러한 간빙기와 빙하기에 따른 변화는 같은 간빙기여도 차이가 나타날 수 있다 (Horrock, 2018). 두 번째는 아직 밝혀지지 않은 새로운 스펙타이트 기원지로부터 퇴적물이 공급될 가능성이 있다. 실제로 본 연구에서 획득한 퇴적물은 남태평양 분지 중 일부인 BC502의 스펙타이트 성분이다. 하지만 간빙기에는 빙붕이 후퇴하면서 훨씬 다양한 지역으로부터 퇴적물이 공급될 수 있다. 한 예시 지역으로 남태평양 서쪽 지역에 스펙타이트가 매우 풍부하다고 보고된 지역이 있다 (Aoki and Oinuma, 1980). 이 지역은 남극 순환류의 영향을 받아 아문젠 해 대륙저면지역으로 충분히 스펙타이트를 공급할 수 있는 환경이다. 그래서 이처럼 아직 밝혀지지 않은 소스로부터 스펙타이트가 공급되어 간빙기에도 스펙타이트 분포가 차이 나는 것이라고 유추해볼 수 있다.



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/실적					
		국외			국내		
논문		SCI	기타	소계	SCI	기타	소계
			1/	/	/	/	/
Proceeding		국외			국내		
		/			학회발표/11		
단행본(저서)		/					
특허		국외			국내		
	출원	/			/		
	등록	/			/		
기술실시계약		/					
세미나개최		/					
인터넷사이트 개설		/					
기타사항		/					

● 학술대회 발표 성과

발표일	논문명/특허명/기타	저자	학술대회명	국내외구분
2020.08.20	Tracing sediment provenance in Amundsen Sea continental rise using elemental composition and cation exchange capacity of smectite	Young Kyu Park, Moonseon Koo, Claus-Dieter Hillenbrand, Kyu-Cheul Yoo, Jaeil Lee, Jinwook Kim*	한국광물학회	국내
2020.10.27	Identification of sediment provenance in Amundsen Sea continental rise using elemental composition and cation exchange capacity of smectite	Young Kyu Park, Moonseon Koo, Claus-Dieter Hillenbrand, Kyu-Cheul Yoo, Jaeil Lee, Jinwook Kim*	추계 지질학회	국내
2021.08.26	Identification of sediment provenance using smectite elemental composition during glacial-interglacial period: Amundsen Sea continental rise, West Antarctica	Young Kyu Park, Claus-Dieter Hillenbrand, Werner Ehrmann, Moonseon Koo, Hanbeom Park, Kyu-Cheul Yoo, Jae Il Lee, Jinwook Kim*	한국광물학회	국내
2021.06.26	Variation of sediment provenance during glacial-interglacial period in the Amundsen Sea continental rise, West Antarctica	Young Kyu Park, Claus-Dieter Hillenbrand, Werner Ehrmann, Moonseon Koo, Hanbeom Park, Kyu-Cheul Yoo, Jae Il Lee, Jinwook Kim*	춘계 지질학회	국내

2021.11.04	Elemental composition of smectite as an indicator of sediment source: Implication of sediment provenance for the Amundsen Sea continental rise, West Antarctica	Young Kyu Park, Claus-Dieter Hillenbrand, Werner Ehrmann, Hanbeom Park, Moonseon Koo, Kyu-Cheul Yoo, Jae Il Lee, Jinwook Kim*	한국 해양학회	국내
2022.06.15	스멕타이트의 화학성분 변화를 이용한 퇴적물 기원지 지시자 개발 연구	박영규, 김진욱*	한국 광물학회	국내
2022.06.02	서남극 아문젠 해 퇴적물의 스멕타이트 화학 성분을 활용한 최근 빙하기-간빙기에 대한 기원지 연구	Young Kyu Park, Claus-Dieter Hillenbrand, Werner Ehrmann, Hanbeom Park, Moonseon Koo, Kyu-Cheul Yoo, Jae Il Lee, Jinwook Kim*	한국 해양학회	국내
2022.10.25	Variations in smectite elemental composition, "indicator of sediment provenance" during glacial-interglacial period for the Amundsen Sea continental rise	Young Kyu Park, Claus-Dieter Hillenbrand, Werner Ehrmann, Hanbeom Park, Kyu-Cheul Yoo, Jae Il Lee, Jinwook Kim*	추계 지질학회	국내
2022.06.03	신생대 후기 아문젠 해 대륙대의 빙기 간빙기에 따른 점토광물의 조성 변화 연구	강인성, 박영규, 김진욱*	한국 해양학회	국내
2022.06.15	일라이트와 스멕타이트의 결정도 분석을 통한 아문젠 해 표층 퇴적물의 공급지 연구	강인성, 박영규, 김진욱*	한국 광물학회	국내

2022.10.27	Statistical measurement to the multi-sources of sediment provenance in the Dotson-Getz Trough, Amundsen Sea: Cluster analysis of Illite crystallinity, Illite chemical index, smectite IB value, and clay mineral assemblage	Insung Kang, Young Kyu Park, Kyu-Cheul Yoo, Minkyung Lee, Jinwook Kim*	추계 지질학회	국내
------------	--	--	---------	----



나. 연구개발목표 및 달성도

성과목표	세부목표	달성 주요내용	달성도(%)
1. 서남극 빙봉 주변 해양 퇴적물 채취 및 광물학적 분석	1-1	극지연구소와 협력하여 서남극 빙봉 후퇴 지역 퇴적물 채취 - 서남극 빙봉 후퇴 후의 대륙 근처 지역의 피스톤 코어에 대하여 깊이 별로 팔콘 튜브에 약 10-15 ml 퇴적물 시료를 샘플링 실시	100
	1-2	해저 퇴적물의 퇴적상 변화에 따른 점토광물의 성분비, 광물구조 분석 - 서남극의 대륙붕 근처에서 채취한 코어에 대해 깊이 별 색깔이나 퇴적 구조를 이용하여 퇴적상 분석 - 채취한 해저 퇴적물에 대한 XRD를 이용하여 bulk mineralogy와 2 um 이하로 입도 분리한 시료를 airdry와 ethylene glycol 처리하여 광물학적 분석 - 빙봉 후퇴 지역에서 채취한 퇴적물에 대해 master sizer를 이용하여 깊이별 입도 분포를 분석	100
	1-3	과거 온난기 및 대륙 저면의 해저 퇴적물에 대한 광물학적 분석 - 과거 온난기의 아문젠 해 대륙붕 및 대륙저면 퇴적물에 대해 XRD를 이용한 광물학적 분석 - 점토광물의 함량비와 함께 TEM을 이용하여 과거 온난기의 스펙타이트에 대한 화학 성분을 분석 및 기원지 proxy에 대한 규명	100
2. 해저 퇴적물을 이용한 고환경 해석 및 철 환원 미생물에 의한 광물의 Biomarker 조사 (I)	2-1	빙봉 후퇴 지역 퇴적물 코어에 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석 - 빙봉 후퇴 지역에서 채취한 퇴적물의 깊이 별 점토광물, 입도 분포, 결정 구조 분석을 이용하여 퇴적상에 따른 생지화학적 분석 실시	100
	2-2	해저 퇴적물 코어의 점토광물 화학 성분 분석을 통한 고환경 해석 proxy 개발 - 퇴적물 코어에 영향을 미칠 대륙붕 안쪽의 퇴적물에 대한 XRD를 이용하여 bulk mineralogy와 2 um 이하로 입도 분리한 시료에 대해 airdry와 ethylene glycol을 처리한 광물학적 분석 - 최후 빙하기와 현생 퇴적물 간의 기원지 변화를 유추하기 위한 퇴적물의 스펙타이트에 대한 화학 성분 분석 - 최후 빙하기와 현생 퇴적물의 기원지 끝성분에 대한 유사성 비	100

			교를 위한 K-S test를 이용한 통계 분석	
	2-3	과거 온난기 시기의 대륙붕의 해저 퇴적물에 대한 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 빙봉 하부 환경으로 추정되는 극한 환경의 퇴적물에 대한 철의 환원 분석 - 퇴적물에 대한 광물-미생물 간의 생지화학적 반응을 알아보기 위한 광물상 분석, 광물 구조 분석, 철의 산화수 분석 	100
해저 퇴적물을 경 해석 및 철 환원 미생물에 의한 광물의 Biomarker 조사 (II)	3-1	빙봉 후퇴 지역의 퇴적물 코어의 성분 분석 및 biomarker 분석	<ul style="list-style-type: none"> - Illite crystallinity, CSDs, Fe-redox state 등의 nano-scale 에서의 광물학적 특징과 미생물 군집 분포 비교 및 해석 - 2차년도까지 결과를 바탕으로 시료의 미생물 배양 실험을 통해 퇴적물로부터 Fe의 환원 및 용출과 철 함유 광물에 대한 bio-alteration 조사 및 해석 	100
	3-2	해저 퇴적물의 빙기-간빙기에 따른 고환경 변화에 따른 퇴적물 기원지 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 2차년도까지 결과를 바탕으로 연구지역 주변 퇴적물에 대한 점토광물 분포와 점토광물의 화학 성분 분포 지도 확보 및 해석 - 최후 빙하기-간빙기 (표층 퇴적물)에 대한 광물학적 특징을 바탕으로 서남극 빙봉 변화에 따른 종합적인 퇴적물 기원지 분석 	100
	3-3	과거 온난기 시기의 대륙붕의 해저 퇴적물의 종합적인 고환경 해석	<ul style="list-style-type: none"> - 과거 온난기 (MIS 5)부터 현재까지 대륙붕과 대륙저 퇴적물의 종합적인 광물학적 변화 분석 - 온난기의 연구지역의 서남극 빙봉 움직임과 주변 해류 순환을 고려한 퇴적 환경 분석 	100

다. 연구수행 세부 내용 및 결과(우수성)

● 성과목표 1 (1차년도):

연구 내용	연구 결과
극지연구소와 협력하여 서남극 빙봉 후퇴 지역 퇴적물 채취	<ul style="list-style-type: none"> - 서남극 빙봉 후퇴 후의 대륙 근처 지역의 피스톤 코어에 대하여 색깔과 특징적인 구간에 대해 10-15 cm 간격으로 팔콘 튜브에 약 10-15 ml 퇴적물 시료를 샘플링 실시함.
해저 퇴적물의 퇴적상 변화에 따른 점토 광물의 성분비, 광물구조 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 서남극의 대륙붕 근처에서 채취한 코어에 대해 깊이 별 색깔이나 퇴적 구조를 이용하여 퇴적상 분석한 결과, 하부에서 상부로 갈수록 빙하기에서 빙봉이 후퇴하는 간빙기로 변화함을 확인함. - 채취한 대륙붕 근처 코어에 대한 XRD를 이용하여 bulk mineralogy와 2 um 이하로 입도 분리한 시료를 airdry와 ethylene glycol 처리하여 광물학적 분석한 결과, 구간에 따라 점토광물의 함량 변화가 서로 상관성이 있음을 확인함. - 빙봉 후퇴 지역에서 채취한 퇴적물에 대해 Master sizer를 이용하여 깊이별 입도 분포를 분석한 결과, 구간 별로 입도 분포가 변화함을 확인함.
과거 온난기 시기의 대륙붕 및 대륙 저면의 해저 퇴적물에 대한 광물학적 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 과거 온난기의 아문젠 해 대륙붕 및 대륙저면 퇴적물에 대해 XRD를 이용한 광물학적 분석 결과, 빙하기와 간빙기 간의 광물 구성의 차이를 확인함. - 점토광물의 함량비와 함께 TEM을 이용하여 과거 온난기의 스멕타이트에 대한 화학 성분을 분석한 결과, 빙하기의 스멕타이트의 화학 성분 분포와 다르게 Al-Fe이 풍부한 스멕타이트가 분포하는 것을 확인함.

● 성과목표 2 (2차년도):

연구 내용	연구 결과
빙봉 후퇴 지역 퇴적물 코어에 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 빙봉 후퇴 지역에서 채취한 코어에 대해 깊이에 따른 광물학적 분석 결과, 퇴적상에 따라 일라이트의 illite crystallinity가 구간에 따라 변화함을 확인함. - 빙봉 후퇴 지역에서 채취한 코어에 대해 깊이에 따른 퇴적상과 입도 분포 변화, 점토 광물의 함량비 변화, 광물종류의 변화, 구조적인 변화를 볼 때 하부 구간에서 생지화학적 영향과 상관성이 있음을 확인함.
해저 퇴적물 코어의 점토광물 화학 성분 분석을 통한 고환경 해석 proxy 개발	<ul style="list-style-type: none"> - 연구 지역에 영향을 미칠 수 있는 대륙붕 안 쪽의 퇴적물에 대해 XRD를 이용하여 bulk mineralogy, 2 um 이하로 입도 분리한 시료에 대해 airdry, ethylene glycol 처리하여 광물학적 분석 결과, 빙봉이 전진한 시기에 대륙성 기원의 영향을 받았음을 확인함. - 점토광물의 함량비 변화와 함께, 대륙성 퇴적물의 영향을 확인하기 위한 TEM 분석 결과, 최후 빙하기와 현생 퇴적물 간에 스멕타이트의 화학성분 분포가 다르게 나타나는 것을 확인하고, 대륙성 기원의 화학 성분 자료를 확보함. - 최후 빙하기와 현생 퇴적물 간의 기원지 끝성분에 대한 유사성을 분석한 결과, K-S test를 이용한 통계처리 분석에서 최후 빙하기와 현생 온난기의 스멕타이트가 서로 다른 기원지 끝성분과 유사성을 보이고, 최후 빙하기에는 2차년도에서 분석한 대륙성 퇴적물의 영향을 더 많이 받는 것을 확인 함.
과거 온난기 시기의 대륙붕의 해저 퇴적물에 대한 광물-미생물에 대한 생지화학적 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 빙봉 하부 환경으로 추정되는 극한 조건에서 채취한 퇴적물에 대해서 철 함유 광물 내에서 철의 환원 작용이 일어날 수 있음을 확인함. - 해당 퇴적물에 대해 산화-환원 조건에 해당하는 퇴적물 간에 광물상의 변화가 관찰되었고, 또한 나노스케일에서의 점토 광물 구조 변화, 점토 광물의 화학 성분 변화, 점토 광물의 철 산화수 변화가 미생물과 철 함유 광물 중 하나인 점토 광물 간의 생지화학적 반응과 상관성이 있음을 확인함.

● 성과목표 3 (3차년도):

연구 내용	연구 결과
빙봉 후퇴 지역의 퇴적물 코어의 성분 분석 및 biomarker 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 2차년도까지 확인한 생지화학적 반응이 관찰된 구간에 대해 미생물 배양 실험을 진행함. - 배양 실험에서 획득한 시료에 대해 시간 별로 확인 했을 때 점토광물의 화학적, 구조적 변화와 철의 산화수 변화, 미생물 군집의 변화를 확인함. - 결과를 통해 남극의 빙봉 하부의 극한 환경에서도 퇴적물에서 광물-미생물 반응에 의한 철의 공급 가능성을 제시함.
해저 퇴적물의 빙기-간빙기에 따른 고환경 변화에 따른 퇴적물 기원지 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 2차년도까지 결과를 바탕으로 대륙붕과 대륙저면 퇴적물을 포함한 점토광물의 분포와 점토광물 중 스멕타이트의 화학성분 분포 지도를 확보함. - 연구지역의 빙하기와 간빙기 (표층 퇴적물)의 종합적인 광물학적 특징을 비교하고, 해당 시기의 서남극 빙봉의 움직임과 연결했을 때, 빙하기와 간빙기에 퇴적물 기원지가 변했으며, 퇴적물이 공급된 경로를 확인함.
과거 온난기 시기의 대륙붕의 해저 퇴적물의 종합적인 고환경 해석	<ul style="list-style-type: none"> - 과거 온난기 (MIS 5)부터 현재 (표층퇴적물)까지의 종합적인 고환경 해석을 위해 과거 온난기의 점토광물 분석을 진행함. - 과거 온난기에는 점토광물 중 스멕타이트의 함량이 높았던 것을 확인하였고, 이는 표층 퇴적물의 분포와 유사함을 확인하고, 점토광물의 화학성분 변화를 분석함. - 과거 온난기-빙하기-현재 (표층 퇴적물)까지의 변화를 관찰 해볼 때, 따듯했던 시기에는 빙봉이 후퇴함에 따라 스멕타이트가 빙하기보다 여러 지역으로부터 공급되었음을 확인함. 특히 따듯한 시기에는 상대적으로 온도가 높은 해류인 남극순환 심층수의 공급이 증가하여 원양성 퇴적물도 함께 공급이 증가하는 것을 확인함.

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, 퇴적 분지 해석, 석유지질학 연구 분야에도 많은 기여를 할 것이다. 특히 Geomicrobiology 분야 중 극한 지역에 대한 연구는 극지연구소의 육성 연구 분야 중 **생명과학과 지권과학의 융합적인 연구 주제**이다. 극한지역의 bio-alteration에 의한 연구는 향후 물리적/화학

적 풍화 작용뿐만 아니라, 빙저호와 같은 극한 환경에서 미생물에 의한 광물의 변이를 퇴적물의 특성 변화 및 다양성에 대한 또 다른 factor로 적용 가능하게 한다. 또한 최근 급격히 빙붕이 무너지고 있는 라센 C 지역에서 성공적으로 채취한 샘플에 대해 점토광물을 이용하여 남극 기후변화에 대한 나노스케일의 proxy 연구를 Nature Communication에 publish 하였다. 이로써 일라이트의 crystallinity index가 기후변화에 대한 “indicator”로서의 사용 가능성을 평가 할 수 있다. 또한 2021년에 발간된 IPCC 보고서에 따르면, 최근 빙붕의 후퇴와 함께 해수면의 상승에 대한 문제점이 대두되고 있다. 미래 기후를 예측하기 위한 수단으로 과거의 퇴적환경을 복원할 수 있는 proxy 개발 연구가 많이 수행되고 있는데, 본 연구에서 진행되는 고퇴적 환경 변화에 영향을 받는 다양한 광물학적 proxy 개발은 미래 기후를 예측하는데 많은 기여를 할 것이다.

나. 경제적 파급효과

미생물에 의한 퇴적물 및 토양의 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 퇴적 환경의 다양성에 대한 해석을 가능하게 해준다. 또한 향후 극지연구소의 극지 바이오센터와의 공동연구가 진행된다면, 미생물의 metabolism을 광물의 변이작용과 연계하여 해석할 수 있고, 환경 유전체 분석과 같은 빅데이터 해석에 도움을 줄 수 있다, 이에 따라 극한지에서 생명체의 활동성 및 다양성에 대한 연구를 가능하게 해준다. 또한 남극 퇴적환경에 대한 해석을 미생물에 의한 광물의 전이 과정과 연계하여, 퇴적 당시의 생지구화학적 특성을 예측할 수 있으며 고기후 해석에 기여 할 수 있다. 본 연구는 기초연구로서 당장의 경제적 파급효과를 기대할 수는 없지만, 퇴적 환경 변화에 대한 나노스케일 분석을 가능하게 할 수 있는 연구로서 가치가 크다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

미생물에 의한 퇴적물 및 토양의 특성 변화에 대한 연구는 남극과 같은 극한지역에서 수행된 바 없기 때문에 본 연구의 내용은 가치가 높다. 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 연구에서 미생물에 의한 점토광물의 변이가 검토되면, 물리, 화학적 factor와 별개로 미생물에 의한 bio-alteration을 새로운 factor로 남극 퇴적환경의 다양성에 대한 해석을 가능하게 해준다. 향후 극지연구소의 극지 바이오센터와의 공동연구가 진행된다면, 미생물의 metabolism을 광물의 변이작용과 연계하여 해석할 수 있고, 환경 유전체 분석과 같은 빅데이터 해석에 도움을 줄 수 있다. 이에 따라 극한지역에서 생명체의 활동성 및 다양성에 대한 연구를 가능하게 해준다. 이 외에도 남극 퇴적환경에 대한 해석을 미생물에 의한 광물의 전이 과정과 연계하여, 퇴적 당시의 산화-환원 환경을 추적하고 명확하게 밝혀지지 않은 **극한 환경에서의 철의 순환**과 전 지구적 지질 현상을 설명하는 심화연구의 기초 연구로 사용 될 수 있다. 이러한 **Biomarker**를 밝히고, 나노스케일에서의 고환경 분석에 대한 연구는 향후 **외계행성의 생명체에 대한 연구**에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

극지연구소

제 6 장 참고문헌

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Ehrmann, W., Hillenbrand, C. D., Smith, J. A., Graham, A. G., Kuhn, G., & Larter, R. D. (2011). Provenance changes between recent and glacial-time sediments in the Amundsen Sea embayment, West Antarctica: clay mineral assemblage evidence. *Antarctic Science*, 23(5), 471-486.
- 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.

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.

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.

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.

Eberl, D. D., & Velde, B. (1989). Beyond the Kubler index. *Clay minerals*, 24(4), 571-577.

Rignot, E., Mouginot, J., & Scheuchl, B. (2011). Ice flow of the Antarctic ice sheet. *Science*, 333(6048), 1427-1430.

Orsi, A. H., Whitworth III, T., & Nowlin Jr, W. D. (1995). On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 42(5), 641-673.

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

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.

Rodriguez, A. B., & Anderson, J. B. (2004). Contourite origin for shelf and upper slope sand sheet, offshore Antarctica. *Sedimentology*, 51(4), 699-711.

Pandarinath, K. (2009). Clay minerals in SW Indian continental shelf sediment cores as indicators of provenance and palaeomonsoonal conditions: a statistical approach. *International Geology Review*, 51(2), 145-165.

Kim, J. W., Peacor, D. R., Tessier, D., & Elsass, F. (1995). A technique for maintaining texture and permanent expansion of smectite interlayers for TEM

- observations. *Clays and clay minerals*, 43(1), 51–57.
- Setti, M., Marinoni, L., López-Galindo, A., & Delgado-Hubertas, A. (2000). Compositional and morphological features of the smectites of the sediments of CRP-2/2A, Victoria Land Basin, Antarctica. *Terra Antarctica*, 7(4), 581–587.
- Pereira, P. S., van de Flierdt, T., Hemming, S. R., Hammond, S. J., Kuhn, G., Brachfeld, S., ... & Hillenbrand, C. D. (2018). Geochemical fingerprints of glacially eroded bedrock from West Antarctica: Detrital thermochronology, radiogenic isotope systematics and trace element geochemistry in Late Holocene glacial-marine sediments. *Earth-Science Reviews*, 182, 204–232.
- Pereira, P. S., van de Flierdt, T., Hemming, S. R., Hammond, S. J., Kuhn, G., Brachfeld, S., ... & Hillenbrand, C. D. (2018). Geochemical fingerprints of glacially eroded bedrock from West Antarctica: Detrital thermochronology, radiogenic isotope systematics and trace element geochemistry in Late Holocene glacial-marine sediments. *Earth-Science Reviews*, 182, 204–232.
- 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.
- Rong, K., Zeng, Z., Yin, X., Chen, S., Wang, X., Qi, H., & Ma, Y. (2018). Smectite formation in metalliferous sediments near the East Pacific Rise at 13° N. *Acta Oceanologica Sinica*, 37(9), 67–81.
- 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), e667.
- 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.
- Kostka, J. E., Stucki, J. W., Nealson, K. H., & Wu, J. (1996). Reduction of structural Fe (III) in smectite by a pure culture of *Shewanella putrefaciens* strain MR-1. *Clays and Clay Minerals*, 44(4), 522–529.
- Hillenbrand, C. D., Smith, J. A., Hodell, D. A., Greaves, M., Poole, C. R., Kender, S., ... & Kuhn, G. (2017). West Antarctic Ice Sheet retreat driven by Holocene warm water incursions. *Nature*, 547(7661), 43–48.
- HORROCKS, J. (2018). The formation and Late Quaternary palaeoenvironmental history of sediment mounds in the Amundsen Sea, West Antarctica (Doctoral

dissertation, Durham University).

Aoki, S., & Oinuma, K. (1980). Clay mineral composition in shallow water sediment samples near the Antarctic Peninsula and in deep-sea core samples from the Pacific and the Indian-Antarctic Basins. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 36(1), 23-29.

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



뒷 면

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.