

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

연세대학교

서남극 빙붕 후퇴 지역
주변의 해저 퇴적물에
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



연세대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

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



(본과제) 총괄연구책임자 : 유 규 철

위탁연구기관명 : 연세대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 김 진 욱

위탁참여연구원 : 강 인 성

“ : 안 지 호

보고서 초록

위탁연구과제명	서남극 빙붕 후퇴 지역 주변의 해저퇴적물에 분포하는 점토광물을 이용한 생지화학적 변이작용 및 과거 퇴적 환경 변화 연구				
위탁연구책임자	김진욱	해당단계 참여연구원수	3	해당단계 연구비	100,000,000
연구기관명 및 소속부서명	연세대학교 지구시스템과학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	
빙기-간빙기의 고퇴적 환경 해석 및 저온 결빙 환경에서의 광물-미생물 반응 해석 1) 서남극 대륙붕 지역 퇴적물의 빙기-간빙기에 따른 고환경 변화 분석 - 깊이에 따라 상대적 함량비가 달라지는 것을 확인함으로 빙기-간빙기에 따른 서남극 빙하의 움직임과 주변환경 변화에 따라 나타나는 점토광물의 물리화학적 특성의 차이로 퇴적물 과거와 현재의 퇴적물 공급지에 차이가 있었을 것을 시사 2) 서남극 전반의 해저퇴적물 내 점토광물 특성 군집에 따른 기원지 분석 및 퇴적환경 해석 - Smectite의 화학분석 결과 Dotson trough에는 Al-rich한 성분이 지배적이나 Getz A trough는 Al-rich에 더해 Al-Fe-Mg moderate한 화학성분이 존재함을 확인 - Dotson trough와 Getz A trough는 서로 다른 점토광물 함량비와 smectite의 화학성분으로 두 trough의 퇴적물 기원이 서로 다를 가능성을 시사. 3) 저온 결빙 환경에서 미생물과의 반응에 의한 철 함유 광물에서의 철의 순환에 대한 종합적인 해석 - 철 함유광물과 미생물이 접촉된 시료에 대해서 한 달 동안 결빙 구간을 두 번 거친 조건에서도 광물의 환원 및 변형이 나타난 것을 통해 남극과 같은 극한 환경에서도 미생물과 광물간의 반응이 가능함을 시사					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	생지화학적 반응, 철 함유 스멕타이트, 철환원 박테리아, 극지 환경, X선 회절 분석, 투과 전자 현미경, 퇴적물 기원지			
	영 어	Biogeochemical reaction, nontronite, Fe reducing bacteria, Antarctica, X-ray diffraction, TEM, sediment provenance			

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 기후변화에 민감한 서남극 지역에서 해저퇴적물 내의 점토광물을 이용하여 퇴적물의 기원지 추적, 고퇴적환경의 복원 및 저온 환경에서 서식하는 미생물과 광물간의 생지화학적 반응 (biogeochemical reaction)에 중점을 둔 연구과제이다. 따라서 서남극 지역의 기원지 분포에 더하여, 과거 플라이오세부터의 반복되는 빙기-간빙기에 따라, 혹은 공간적인 분포에 따라 나타나는 퇴적물 내 점토광물의 물리화학적 특성의 차이를 분석하고 통계학적인 접근을 통해 종합적인 고환경 변화를 해석하고자 한다. 또한 빙하의 움직임에 의한 산화-환원 환경의 변화와, 퇴적물의 이동으로 공급된 철 함유 광물에 따라 저온 환경에서 미생물의 활동에 의해 나타날 수 있는 광물의 생지화학적 변이작용 (bio-alteration)에 대한 연구를 통해 남극해의 철의 순환을 이해하고자 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1) 서남극 대륙붕 지역 해저퇴적물 분석 및 저온에서 광물-미생물 반응 분석:

- 탐사를 통한 서남극 대륙붕 지역 피스톤 코어 채취
- 채취한 해저퇴적물의 X-ray diffractometer (XRD)를 이용한 광물학적 분석
- 저온 결빙 환경에서 철 함유 광물 (maghemite, N_{Au}-2 nontronite)과 미생물간의 유기/무기
- 반응 확인을 위한 batch 실험 진행

2) 빙기-간빙기의 고퇴적 환경 해석 및 저온 결빙 환경에서의 광물-미생물 반응 해석 (I):

- 서남극 대륙붕 지역 퇴적물 코어의 위치 및 깊이에 따른 illite, smectite integral breadth value, illite chemical index 측정
- TEM-EDS를 이용한 해저퇴적물 내 점토광물의 화학성분 분석
- 서남극 지역 전반의 해저퇴적물 내 점토광물의 물리화학적 특성 분석 결과에 대한 군집분석 알고리즘을 이용한 통계 분석 수행
- Batch 실험에 대하여 시간에 따른 미생물의 비율 변화 및 철의 환원 정도 분석
- TEM, SAED pattern을 통해 광물 미생물 반응에 의한 광물의 구조적 변화 분석
- XRD, TEM, SAED pattern을 통해 광물 미생물 반응에 의한 2차 생성 광물의 광물학적 분석

3) 빙기-간빙기의 고퇴적 환경 해석 및 저온 결빙 환경에서의 광물-미생물 반응 해석 (II):

- 2차년도까지의 결과를 통한 서남극 대륙붕 지역 퇴적물의 빙기-간빙기에 따른 고퇴적환경 변화에 대한 종합적인 해석
- 표층퇴적물의 점토광물 특성에 대한 통계적인 군집분석 결과를 바탕으로 서남극 지역의 전 체적인 퇴적물 기원지, 공급경로 유추 및 퇴적환경에 대한 해석
- 깊이에 따른 점토광물의 광물학적, 물리화학적 특성 변화를 바탕으로 한 통계적 분석 수행 결과로 시기에 따른 빙붕의 이동 및 고환경에 대한 해석
- Batch 실험 결과를 통한 저온 결빙 환경에서의 time point 별 철 함유 광물과 미생물간의 반응에 의한 철의 용출 및 광물의 변이에 대한 해석

IV. 연구개발결과

1) 서남극 대륙붕 지역 해저퇴적물 분석 및 저온에서 광물-미생물 반응 분석

1-1) 극지연구소와 협력하여 서남극 대륙붕 지역 퇴적물 채취

- 빙붕의 급격한 후퇴가 보고된 서남극 아문젠 해 대륙붕에서 Dotson-Getz trough를 따라 0~10cm 구간의 표층 퇴적물을 10~15ml 가량 채취
- Dotson ice shelf front 지역에서 7m 가량의 피스톤코어 내 퇴적물을 약 20cm 간격으로 획득

1-2) 서남극 전반의 해저퇴적물 내 점토광물의 광물학적 특성 분석

- Dotson 빙붕 앞에서 획득한 표층 퇴적물에 대하여 bulk mineralogy와 2um 이하의 clay mineralogy를 XRD 회절 패턴 분석을 통해 동정
- Bulk mineralogy에서 동정된 광물들은 남극 퇴적물에서 나타나는 광물상에서 크게 벗어나지 않음을 확인
- 2um 이하로 입도 분리한 시료에서의 반정량 분석의 결과 남극과 같은 환경에서 많이 나타나는 일라이트와 클로라이트가 많이 나타났고 아문젠 해 대륙붕의 특징적

인 카올리나이트가 상대적으로 많음을 확인

1-3) 저온 결빙 환경에서 철 함유 광물 (maghemite, N_{Au}-2 nontronite)과 미생물간의 유기/무기 반응 확인을 위한 batch 실험 진행

● 저온 결빙 환경에서 철 함유 광물 (maghemite, N_{Au}-2 nontronite)과 미생물간의 유기/무기 반응 확인을 위한 batch 실험 진행

2) 빙기-간빙기의 고퇴적 환경 해석 및 저온 결빙 환경에서의 광물-미생물 반응 해석 (I)

2-1) 서남극 대륙붕 지역 점토광물의 물리화학적 특성 분석

● 서남극 아문젠 해 대륙붕 Dotson-Getz trough를 따라 총 16개의 표층시료를 획득하여 점토광물에 대한 상대적 함량비 분석

● Dotson 빙봉 앞쪽 시료들이 Getz A 빙봉 앞쪽의 시료들보다 상대적으로 일라이트가 많고 스멕타이트가 적음을 확인함.

2-2) 서남극 전반의 해저퇴적물 내 점토광물의 특성에 따른 통계적인 군집분석

● Dotson-Getz trough 표층퇴적물의 점토광물 함량비, illite chemical index, illite crystallinity를 통한 통계분석을 진행한 결과 Dotson 빙봉쪽과 Getz A 빙봉쪽 퇴적물이 점토광물 특성에 따라 구분되는 결과를 나타냄

● TEM-EDS를 이용하여 각 빙봉 앞 퇴적물인 BC06과 S01 위치의 smectite, illite의 화학성분 분석 결과 illite에서는 Fe-rich illite가 Getz A쪽에 더 많이 분포해 있음을 통하여 대륙에서 들어오는 점토광물에 차이가 나타남을 확인.

2-3) 저온 결빙 환경에서 미생물의 활동에 의한 광물의 구조적, 화학적 분석

● Batch 실험에 대하여 미생물을 접종한 시료에 대해 시간에 따른 철 환원 정도를 분석한 결과 논트로나이트의 경우 총 27% 가량의 환원이, 자적철석의 경우 총 20% 가량의 환원이 진행됨을 확인

● 두 광물 모두에서 약 10일간 결빙 환경에 광물-미생물 반응 실험을 진행한 결과, 철 환원 작용은 떨어지지만 해동 후에도 미생물이 살아 있음을 확인

● TEM, SAED pattern을 통해 광물 미생물 반응에 의한 광물의 구조적 변화가 나타남을 확인

● XRD, SEM을 통해 미생물의 철 환원 반응에 의해 새롭게 생성된 남철석의 존재 확인

3) 빙기-간빙기의 고퇴적 환경 해석 및 저온 결빙 환경에서의 광물-미생물 반응 해석 (II)

3-1) 서남극 대륙붕 지역 퇴적물의 빙기-간빙기에 따른 고환경 변화 분석

● 서남극 대륙붕 빙봉 후퇴지역의 점토광물 분석 결과 깊이에 따라 상대적 함량비가 달라지는 것을 확인

● 빙기-간빙기에 따른 서남극 빙하의 움직임과 주변환경 변화에 따라 나타나는 점

토광물의 물리화학적 특성의 차이로 퇴적물 과거와 현재의 퇴적물 공급지에 차이가 있었을 것을 시사

3-2) 서남극 전반의 해저퇴적물 내 점토광물 특성 군집에 따른 기원지 분석 및 퇴적 환경 해석

- 점토광물 함량비 분석을 통하여 Dotson 빙봉 앞 trough의 퇴적물이 Getz A 빙봉 앞 trough의 퇴적물이 비해 illite 함량비가 많고 smectite의 함량비가 적음을 확인

- Dotson trough와 Getz A trough 퇴적물 내 smectite의 화학분석 결과 Dotson trough에는 Al-rich한 성분이 지배적이나 Getz A trough는 Al-rich에 더해 Al-Fe-Mg moderate한 화학성분이 존재함을 확인

- Dotson trough와 Getz A trough는 서로 다른 점토광물 함량비와 smectite의 화학 성분으로 두 trough의 퇴적물 기원이 서로 다를 가능성을 시사.

3-3) 저온 결빙 환경에서 미생물과의 반응에 의한 철 함유 광물에서의 철의 순환에 대한 종합적인 해석

- Batch 실험을 진행한 자적철석과 논트로나이트에 대하여 TEM-EELS를 활용한 방법으로 광물 내 철의 산화수를 측정된 결과 두 번의 결빙 주기를 거친 자적철석의 경우 약 21%, 논트로나이트의 경우 약 28% 가량의 철이 환원됨을 확인

- 철 함유광물과 미생물이 접촉된 시료에 대해서 한 달 동안 결빙 구간을 두 번 거친 조건에서도 광물의 환원 및 변형이 나타난 것을 통해 남극과 같은 극한 환경에서도 미생물과 광물간의 반응이 가능함을 시사

극지연구소

V. 연구개발결과의 활용계획

기후변화에 따른 고환경 변화를 추적하기 위해, 과거 빙하가 급격히 후퇴한 서남극 지역에서 점토광물을 나노 스케일의 새로운 proxy로 활용할 계획이다. 전통적으로는 고퇴적환경 변화에 따른 퇴적물 기원지의 변화를 추적하기 위해 점토광물의 상대적 함량비가 활용되어 왔으나, 본 연구에서는 스멕타이트의 화학 성분을 새로운 proxy로 제시하고자 한다. 기존의 미세 입자 시료 분석은 주로 방사성 동위원소 분석으로 대표되는 bulk 시료 기반의 분석에 의존해 왔으나, 스멕타이트 개별 입자의 화학 성분 분석을 통해 각 광물의 기원 및 이동 경로를 정밀하게 추적할 수 있다. 스멕타이트의 화학성분 분석은 광물 입자 하나의 구체적인 성분 분석을 통해 각 광물의 기원과 이동에 대하여 밝힐 수 있고 bulk 시료에서는 관찰할 수 없었던 차이까지 확인할 수 있어 새로운 proxy로써 중요한 역할을 할 수 있음을 시사한다. 더하여, 본 연구를 통해 규명된 저온 결빙 환경에서의 미생물-광물 상호작용에 의한 광물 내 철의 환원 및 방출 메커니즘은 극지와 같은 저온 환경에서 빙하에 존재하는 철 함유 광물이 미

생물의 활동에 의해 대양에 공급되는 하나의 철 공급원의 역할을 할 수 있음을 밝힘에 따라 극지방 해양의 1차 생산성 및 탄소 흡수 능력에 대한 이해를 증진시키는 데 기여할 수 있다. 특히, 남극해와 같은 고영양-저클로로필 (HNLC) 해역에서는 용존 철 (dFe)이 생산성을 제한하는 주요 요소로 작용하기 때문에 본 연구의 결과는 극지방 생태계 및 기후 변화에 대한 예측 모델의 정교화에 활용될 수 있다. 또한, 빙상 및 해빙 용해와 관련된 철 공급원의 생물학적 특성을 반영함으로써, 장기적으로는 지구 탄소 순환과 연계된 극지방 환경 관리 및 정책 수립에 과학적 근거를 제공할 수 있다.



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 research project focuses on tracing sediment provenance, reconstructing paleo-depositional environments, and investigating biogeochemical reactions between minerals and microbes in cold environments within the climate-sensitive West Antarctic region. By analyzing the physicochemical properties of clay minerals in sediments across glacial-interglacial cycles since the Pliocene, this study aims to interpret comprehensive paleo-environmental changes through statistical approaches. Furthermore, it seeks to understand the iron cycle in the Southern Ocean by researching the biogeochemical alteration (bio-alteration) of iron-bearing minerals facilitated by microbial activity in cold environments, influenced by redox changes driven by ice sheet dynamics.

III. Contents and Extent of R&D

1) Analysis of West Antarctic Continental Shelf Sediments and Mineral-Microbial Reactions at Low Temperatures:

- Collection of piston cores from the West Antarctic continental shelf through field expeditions.
- Mineralogical analysis of collected marine sediments using XRD.
- Batch experiments to confirm organic/inorganic reactions between iron-bearing minerals (maghemite, NAu-2 nontronite) and microbes in freezing environments.

2) Interpretation of Paleo-depositional Environments during Glacial-Interglacial Cycles and Mineral-Microbial Reactions (I):

- Measurement of illite/smectite integral breadth and illite chemical index according to core location and depth.
- Chemical composition analysis of clay minerals using TEM-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (TEM-EDS).
- Statistical analysis using clustering algorithms on the physicochemical properties of clay minerals throughout West Antarctica.
- Analysis of microbial population shifts and iron reduction rates over time in batch experiments.
- Structural analysis of minerals undergoing microbial reactions using TEM and Selected Area Electron Diffraction (SAED) patterns.
- Mineralogical analysis of secondary minerals formed through microbial reactions using XRD, TEM, and SAED.

3) Interpretation of Paleo-depositional Environments during Glacial-Interglacial Cycles and Mineral-Microbial Reactions (II):

- Comprehensive interpretation of paleo-depositional environment changes in the West Antarctic shelf based on results from the first two years.
- Inference of sediment provenance, supply pathways, and depositional environments based on statistical clustering of surface sediment clay mineral characteristics.
- Interpretation of ice shelf movement and paleo-environments by period through statistical analysis of mineralogical and physicochemical variations with depth.
- Interpretation of iron leaching and mineral alteration resulting from time-point specific reactions between iron-bearing minerals and microbes in freezing environments.

IV. R&D Results

1) West Antarctic Continental Shelf Sediment Analysis and Low-Temperature Mineral-Microbial Reactions

1-1) Sediment Collection:

- Collected 10 - 15 ml of surface sediments (0 - 10 cm) along the Dotson-Getz Trough in the Amundsen Sea.
 - Obtained 7m piston cores at ~20 cm intervals near the Dotson Ice Shelf front.
- 1-2) Mineralogical Characteristics:
- Identified bulk and clay mineralogy (<2μm) via XRD.
 - Results matched standard Antarctic mineral assemblages, showing high illite and chlorite content, with characteristic kaolinite in the Amundsen Sea.
- 1-3) Batch Experiments:
- Successfully initiated batch experiments to observe reactions between iron-bearing minerals (maghemite, NAu-2 nontronite) and microbes under freezing conditions.
2. Paleo-environmental Interpretation and Mineral-Microbial Reactions (I)
- 2-1) Physicochemical Properties:
- Analyzed 16 surface samples along the Dotson-Getz Trough.
 - Dotson Ice Shelf samples showed relatively higher illite and lower smectite compared to Getz A samples.
- 2-2) Statistical Clustering:
- Clustering analysis based on mineral content and illite indices clearly distinguished Dotson and Getz A sediments.
 - TEM-EDS revealed a higher distribution of Fe-rich illite in the Getz A region, confirming differences in continental sediment input.
- 2-3) Structural and Chemical Analysis:
- Batch experiments showed ~27% reduction for nontronite and ~20% for maghemite.
 - Microbes remained viable after 10 days of freezing. TEM/SAED confirmed structural changes, and XRD/SEM identified the formation of vivianite as a secondary mineral from microbial iron reduction.
3. Paleo-environmental Interpretation and Mineral-Microbial Reactions (II)
- 3-1) Paleo-environmental Changes:
- Confirmed depth-dependent variations in clay mineral ratios, suggesting shifts in sediment provenance between past and present driven by glacial dynamics.
- 3-2) Provenance and Depositional Interpretation:
- Dotson Trough smectite is predominantly Al-rich, whereas Getz A Trough contains Al-Fe-Mg moderate compositions, indicating distinct sediment sources for the two troughs.

3-3) Comprehensive Iron Cycle Interpretation:

- TEM-EELS confirmed ~21% iron reduction in maghemite and ~28% in nontronite after two freeze-thaw cycles.
- This demonstrates that mineral-microbial reactions and subsequent mineral transformation occur even in extreme Antarctic-like environments.

V. Application Plans of R&D Results

To track paleo-environmental changes following ice shelf retreat, clay minerals will be utilized as a new nano-scale proxy. While traditional methods rely on bulk mineral ratios, this study proposes the chemical composition of smectite as a high-precision proxy. Unlike conventional bulk analysis or radioactive isotope methods, individual particle analysis allows for precise tracing of mineral provenance and transport pathways, revealing differences previously unobservable. Additionally, the identified mechanism of iron reduction and release through mineral-microbial interactions in freezing environments highlights the role of ice-hosted minerals as a significant iron source for the ocean. This contributes to a better understanding of primary productivity and carbon sequestration in the Southern Ocean, particularly in High-Nutrient Low-Chlorophyll (HNLC) regions where dissolved iron (dFe) is a limiting factor. These findings will refine climate prediction models and provide a scientific basis for environmental management and policy-making regarding the global carbon cycle.

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 연구 방법
- 3-2. 연구개발 수행 내용 및 연구결과

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- 4-1. 연구개발 목표 달성도
- 4-2. 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

제 1 장 서론

1-1. 연구개발의 목적

이 과제는 기후변화에 민감한 서남극 지역에서 해저퇴적물 내의 점토광물을 이용하여 퇴적물의 기원지 추적, 고퇴적환경의 복원 및 저온 환경에서 서식하는 미생물과 광물 간의 생지화학적 반응 (biogeochemical reaction)에 중점을 둔 연구과제이다. 따라서 서남극 지역의 기원지 분포에 더하여, 과거 플라이오세부터의 반복되는 빙기-간빙기에 따라, 혹은 공간적인 분포에 따라 나타나는 퇴적물 내 점토광물의 물리화학적 특성의 차이를 분석하고 통계학적인 접근을 통해 종합적인 고환경 변화를 해석하고자 한다. 또한 빙하의 움직임에 의한 산화-환원 환경의 변화와, 퇴적물의 이동으로 공급된 철 함유 광물에 따라 저온 환경에서 미생물의 활동에 의해 나타날 수 있는 광물의 생지화학적 변이작용 (bio-alteration)에 대한 연구를 통해 남극해의 철의 순환을 이해하고자 한다.

1-2. 연구개발의 필요성

가. 학술적 파급효과

미생물학과 지질학이 연결되어 새로이 만들어진 "Geomicrobiology" 라는 학문은 최근 10년 사이에 많은 관심 속에 연구가 수행되어 왔다. 특히, 박테리아와 광물의 반응 (microbe-mineral interaction) 분야 즉 biomineralization에 많은 관심이 집중되어지고 있다. 본 연구는 저온의 극한 환경에서 철의 순환 중 점토광물과 박테리아의 반응을 통하여 미생물의 철을 사용하는 생장 메커니즘 및 이로 인한 광물의 물리적, 화학적 특성 변화의 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 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. 한 예로, 저온 결빙 환경에서의 미생물과 광물의 반응 연구를 통해 극지 환경에서의 미생물의 활동 관측 및 해양으로의 새로운 철의 공급원의 가능성을 밝힘으로 전지구적인 철의 생지구화학적 순환에 대한 이해의 향상을 기대할 수 있다. 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 기후변화

에 대한 "indicator"로서 일라이트 crystallinity index의 사용 가능성을 평가할 수 있다. 더불어 미래 기후를 예측하기 위한 수단으로 과거의 퇴적환경을 복원할 수 있는 proxy 개발 연구가 많이 수행되고 있는데, 본 연구에서 진행되는 고퇴적 환경 변화에 따른 다양한 광물학적 특성을 이용한 proxy 개발 연구와 결과에 대한 통계적인 처리 해석이 플라이오세부터 현생에 이르는 퇴적환경 분석에 더욱 자세하고 효율적인 해석을 제공하는 데 기여 할 것이다.

나. 경제적 파급효과

미생물에 의한 퇴적물 및 토양의 특성 변화에 대한 연구는 남극과 같은 극한지역에서 수행된 바 없기 때문에 본 연구의 내용은 가치가 높다. 본 연구에서 미생물에 의한 점토 광물의 변이가 검토되면, 물리, 화학적 factor와 별개로 미생물에 의한 bio-alteration을 새로운 factor로 남극 퇴적환경의 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 극한지역에서 생명체의 활동성 및 다양성에 대한 연구를 가능하게 해준다. 또한 남극 퇴적환경에 대한 해석을 미생물에 의한 광물의 전이 과정과 연계하여, 퇴적 당시의 산화-환원 환경을 추적하고 명확하게 밝혀지지 않은 극한 환경에서의 철의 순환과 전 지구적 지질 현상을 설명하는 심화연구의 기초 연구로 사용 될 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 스멕타이트와 철 환원 박테리아의 반응 작용에 대한 연구 (Stucki et al., 1987; Kostka et al., 1999)에서는 철 환원 박테리아가 스멕타이트 구조 속에 있는 철을 환원시켜 에너지를 얻는다는 사실이 규명되었다. 또한 고전적 개념의 스멕타이트-일라이트 상전이 반응은 퇴적분지 등의 지역에서 숙성작용에 의해 고온, 고압 환경에서 장시간에 걸쳐 일어나는 반응으로 해석되어 왔다. 하지만 최근 미생물의 대사작용이 스멕타이트-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 스멕타이트-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 스멕타이트-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 스멕타이트-일라이트 상전이 반응에 대한 메커니즘 연구에서는 박테리아 반응의 역할을 전혀 고려하지 않았지만, 위의 “Science”지의 연구를 포함하여 최근에는 박테리아가 스멕타이트-일라이트 반응을 촉진시키기 때문에 고온, 고압, 혹은 상당시간의 숙성작용이 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 스멕타이트-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 스멕타이트를 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 빙봉의 움직임이 달라지고 이로 인해 주변 퇴적환경이 변하는데, 점토광물의 함량비 만으로는 퇴적물의 이동 및 기원지를 파악하는데 한계점이 있었다. 그래서 스멕타이트의 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 생장 메커니즘에 관한 퇴적물의 역할 등에 부합하는 연구로 중요 관심 분야인 서남극 지역에서 해저 퇴적물내의 고환경 변화에 따른 스멕타이트 점토광물의 박테리아에 의한 생지화학적 변이작용에 대한 최초의 연구이다.

● 남극처럼 화학적 풍화작용이 우세하지 않은 지역에서 점토광물의 다양성 및 분포에 대한 연구에 미생물에 의한 bio-alteration을 접목시켜 연구하는 새로운 시도이다. 또한 과거 빙기-간빙기에 따라 빙봉이 움직이면서 빙봉 아래의 환경에서 산화-환원 조건이 달라지는 데 이에 대한 증거로써 광물 내의 bio-alteration의 흔적을 확인 함으로써 고환경 복원에 대한 새로운 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 스멕타이트-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 스펙타이트-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 상관관계를 통하여 생명체의 기원 (origin of life)을 찾을 수 있는 단서, 즉 “biosignature” 연구에도 많은 영향을 줄 수 있다는 점에서 매우 중요하다.

또한, 본 연구는 남극의 해저 퇴적물에서 점토광물과 미생물의 반응 및 변이에 대한 연구는 최초로 제안되는 연구과제이며, 향후 해저 퇴적물에서 고환경을 해석하는 과정에 있어서 점토광물의 변이 및 다양성을 해석하는 연구에서 생지화학적 변수를 첨가하여 여러 각도에서 과학적 접근이 가능하다. 더 나아가, 이러한 Biomarker에 의한 구조분석은 향후 외계행성의 생명체에 대한 연구에 중요한 역할을 할 수 있으며, 실제로 최근 발견된 외계 행성 중 두꺼운 얼음으로 덮혀 있는 행성의 경우 아래에는 액체 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 퇴적물이 하나의 철 순환에 역할을 할 수 있다는 가능성이 제시되고 있다. 하지만 이에 대한 연구가 아직은 부족한 상황이고 본 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 실험 설계

가. 연구지역

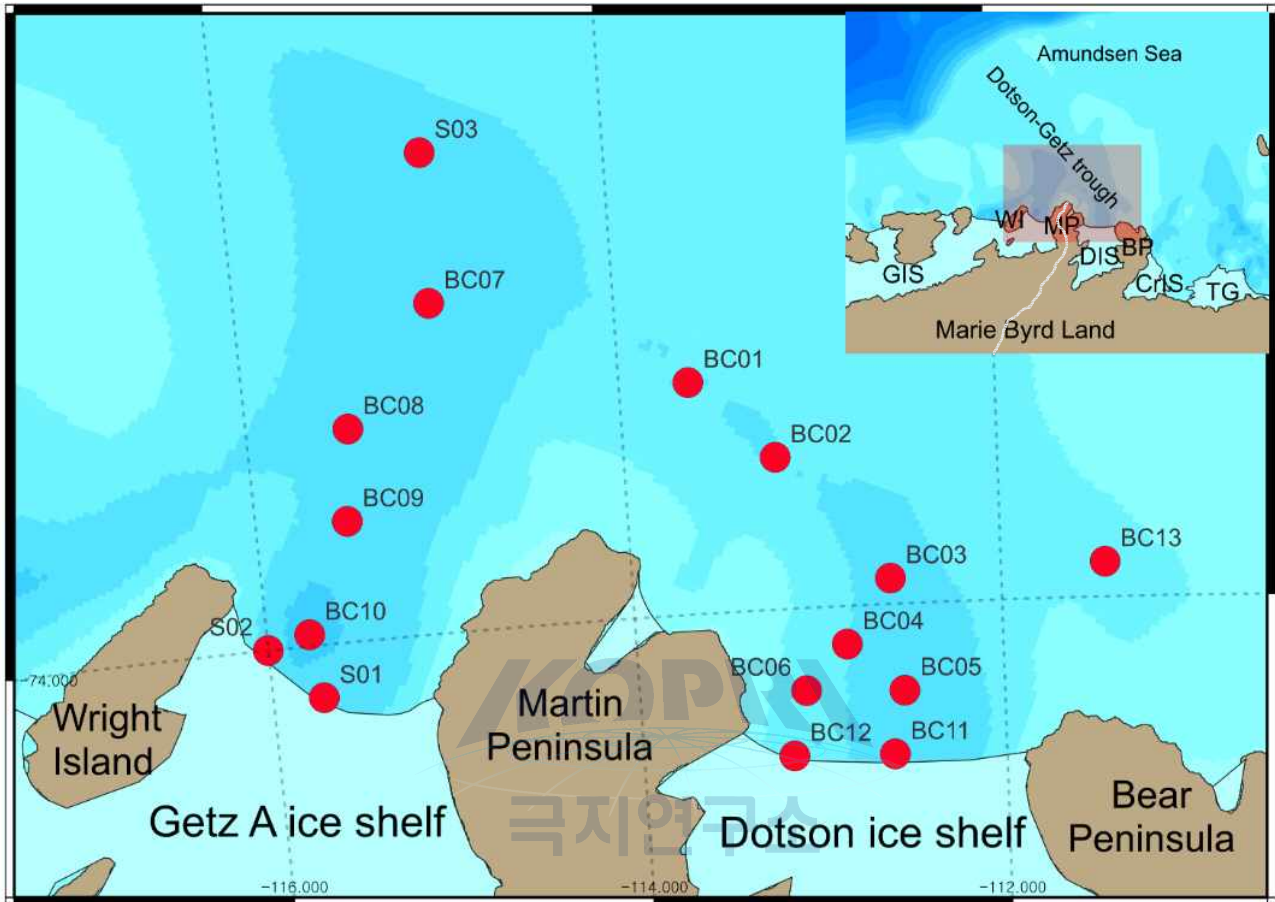


그림 1 서남극 아문젠 해 (Amundsen Sea) 대륙붕 지역. 본 연구에서는 아문젠 해 Dotson-Getz trough를 따라 총 16개 정점에서 획득한 시료에 대하여 분석을 진행

나. 연구방법

(1) 서남극 대륙붕 지역 해저퇴적물 분석 및 저온에서 광물-미생물 반응 분석

(가) 극지연구소와 협력하여 서남극 대륙붕 지역 퇴적물 채취

● 빙붕의 급격한 후퇴가 보고된 서남극 아문젠 해 대륙붕에서 Dotson-Getz trough를 따라 0~10cm 구간의 표층 퇴적물을 10~15ml 가량 채취

● Dotson ice shelf front 지역에서 7m 가량의 피스톤코어 내 퇴적물을 약 20cm 간격으로 획득

(나) 서남극 전반의 해저퇴적물 내 점토광물의 광물학적 특성 분석

● Dotson 빙붕 앞에서 획득한 표층 퇴적물에 대하여 bulk mineralogy와 2 μ m 이하의 clay mineralogy를 XRD 회절 패턴 분석을 통해 광물동정

(다) 저온 결빙 환경에서 철 함유 광물 (maghemite, NAu-2 nontronite)과 미생물간의 유기/무기 반응 확인을 위한 batch 실험 진행

● 철 함유 점토광물인 논트로나이트 (Nau-2)와 철산화물인 자적철석을 각각 미생물과 반응시키기 위해 M1 medium을 이용하여 결빙-해빙 주기를 모사한 광물-미생물 반응 회분식 실험을 진행

● 15, 4, 0, -4, -7, -8, -10°C로 이틀 간격으로 온도를 점차 낮추며 총 두 번의 결빙, 해빙 주기 동안 광물-미생물 반응 관찰

(2) 빙기-간빙기의 고퇴적 환경 해석 및 저온 결빙 환경에서의 광물-미생물 반응 해석 (I)

(가) 서남극 대륙붕 지역 점토광물의 물리화학적 특성 분석

● 서남극 아문젠 해 대륙붕 Dotson-Getz trough를 따라 총 16개의 표층시료를 획득하여 XRD 결과를 통해 Biscaye (1964)에서 제시한 clay mineral 반정량분석과 더불어 illite chemical index, illite crystallinity 분석을 진행

● TEM-EDS를 이용하여 trough 별 스멕타이트 내 화학성분 분석을 진행

(나) 서남극 전반의 해저퇴적물 내 점토광물의 특성에 따른 통계적인 군집분석

● Dotson-Getz trough 표층퇴적물의 점토광물 함량비, illite chemical index, illite crystallinity를 통한 통계분석을 진행

(다) 저온 결빙 환경에서 미생물의 활동에 의한 광물의 구조적, 화학적 분석

● 온도별 미생물에 의한 광물의 철 환원을 관찰하고 1,10-phenanthroline method를 이용하여 철의 환원 정도를 측정

● TEM을 이용하여 온도 별 배양 시료에 대한 점토광물의 화학적, 구조적 변화를 나노스케일에서 분석 진행

3) 빙기-간빙기의 고퇴적 환경 해석 및 저온 결빙 환경에서의 광물-미생물 반응 해석 (II)

(가) 서남극 대륙붕 지역 퇴적물의 빙기-간빙기에 따른 고환경 변화 분석

- GC05, GC09 코어 내 서로 다른 퇴적상에서 획득한 시료들을 대상으로 clay mineral 반정량 분석 및 smectite 화학성분 분석을 진행

- 코어 별 점토광물의 함량비, 화학성분 비율을 이용하여 분포도 작성

(나) 서남극 전반의 해저퇴적물 내 점토광물 특성 군집에 따른 기원지 분석 및 퇴적 환경 해석

- 점토광물 데이터 선별 및 군집 분포도 작성 후 위치별로 나타나는 퇴적물의 특성을 반영한 유의미한 해석 도출

(다) 저온 결빙 환경에서 미생물과의 반응에 의한 철 함유 광물에서의 철의 순환에 대한 종합적인 해석

- TEM을 이용하여 철 환원에 의한 추가적인 다른 광물의 생성 여부 확인

- 철 환원 및 광물 변이 데이터를 종합하여 결빙-해빙 전 구간에 걸친 광물-미생물 반응에 대하여 종합적으로 해석

3-2. 연구개발 수행 내용 및 연구결과

가. 연구개발 수행 내용

(1) 서남극 대륙붕 지역 해저퇴적물 분석 및 저온에서 광물-미생물 반응 분석:

- 탐사를 통한 서남극 대륙붕 지역 피스톤 코어 채취

- 채취한 해저퇴적물의 X-ray diffractometer (XRD)를 이용한 광물학적 분석

- 저온 결빙 환경에서 철 함유 광물 (maghemite, NAu-2 nontronite)과 미생물간의 유기/무기

- 반응 확인을 위한 batch 실험 진행

(2) 빙기-간빙기의 고퇴적 환경 해석 및 저온 결빙 환경에서의 광물-미생물 반응 해석 (I):

- 서남극 대륙붕 지역 퇴적물 코어의 위치 및 깊이에 따른 illite, smectite integral breadth value, illite chemical index 측정

- TEM-EDS를 이용한 해저퇴적물 내 점토광물의 화학성분 분석

- 서남극 지역 전반의 해저퇴적물 내 점토광물의 물리화학적 특성 분석 결과에 대한 군집분석 알고리즘을 이용한 통계 분석 수행

- Batch 실험에 대하여 시간에 따른 미생물의 비율 변화 및 철의 환원 정도 분석
- TEM, SAED pattern을 통해 광물 미생물 반응에 의한 광물의 구조적 변화 분석
- XRD, TEM, SAED pattern을 통해 광물 미생물 반응에 의한 2차 생성 광물의 광물학적 분석

(3) 빙기-간빙기의 고퇴적 환경 해석 및 저온 결빙 환경에서의 광물-미생물 반응 해석 (II):

- 2차년도까지의 결과를 통한 서남극 대륙붕 지역 퇴적물의 빙기-간빙기에 따른 고퇴적환경 변화에 대한 종합적인 해석
- 표층퇴적물의 점토광물 특성에 대한 통계적인 군집분석 결과를 바탕으로 서남극 지역의 전 체적인 퇴적물 기원지, 공급경로 유추 및 퇴적환경에 대한 해석
- 깊이에 따른 점토광물의 광물학적, 물리화학적 특성 변화를 바탕으로 한 통계적 분석 수행 결과로 시기에 따른 빙붕의 이동 및 고환경에 대한 해석
- Batch 실험 결과를 통한 저온 결빙 환경에서의 time point 별 철 함유 광물과 미생물간의 반응에 의한 철의 용출 및 광물의 변이에 대한 해석

나. 연구결과

(1) 서남극 대륙붕 지역 해저퇴적물 분석 및 저온에서 광물-미생물 반응 분석

(가) 극지연구소와 협력하여 서남극 대륙붕 지역 퇴적물 채취

- 급격한 후퇴가 관측되는 서남극 아문젠 해에 위치한 대륙붕 내 Dotson-Getz trough 지역에서 trough를 따라 표층 퇴적물 코어를 획득함 (그림 1)
- 아문젠 해의 경우 최근 가장 급격하게 빙붕이 후퇴하는 지역으로 알려져 있고 (Rignot et al., 2011) 이러한 사실은 이 지역으로 하여금 과거 빙하기-간빙기에 따른 남극 빙상의 변동성이 크다는 것을 시사한다. 따라서 빙상의 이동과 퇴적환경의 변화에 따른 흔적이 잘 기록되어 있으며 이러한 환경 변화는 퇴적물의 기원지를 변화시킬 수 있기 때문에 이 지역의 퇴적물 분석을 통해 고퇴적환경의 변화를 추적할 수 있다. 더불어 아문젠 해는 다른 지역과는 달리 오로지 서남극 빙상의 영향만을 받는 지역이기 때문에 본 연구 주제의 연구 지역으로 매우 적합하다.
- 아문젠 해 대륙붕의 경우 Getz Ice shelf에서부터 Ross Ice shelf에 이르는 West Amundsen Sea에 대한 연구와 빠른 후퇴가 관측되고 있는 Pine Island Glacier 및 Thwaites Glacier가 포함된 지역에 대한 연구가 많이 진행된 바 있다. 하지만 그 사이에 존재하는 Dotson Ice shelf, Getz A Ice shelf 및 Crosson Ice Shelf 등의 빙붕은 최근에 급격한 후퇴를 보이고 있음에도 불구하고 아직까지 광물화학적 연구가 크

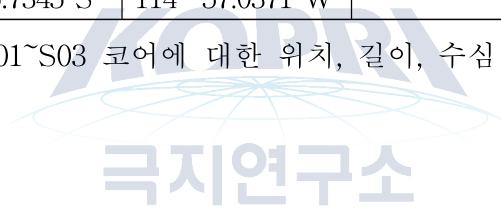
게 진행된 바가 없다. 아문젠 해 대륙저면에서는 최근 점토광물을 이용한 기원지 분석을 통해 빙기-간빙기에 따라 기원지가 다르다는 것이 제시되었는데 Dotson trough, Getz A trough 등에 쌓인 해저퇴적물이 아문젠 해 대륙저면까지 운송될 수 있음을 감안하면 아문젠 해 지역의 전체적인 점토광물 데이터 확보와 더불어 빙기-간빙기 서남극 빙상의 움직임 복원하기 위하여 필요한 연구이다. 또한 Dotson Ice shelf와 Getz A Ice shelf를 통해 나오는 퇴적물의 기원지는 두꺼운 얼음층이 위를 이루고 있어 모암에 대한 정보를 얻기가 어려운 상황이며 두 빙붕이 가까이 붙어 있음에도 각 지역에서 기인한 광물상이 차이가 나타나는지에 대한 정보는 아직까지 밝혀진 바 없다. 따라서 본 지역의 광물상 및 점토광물 분석을 통한 과거 빙상의 움직임 복원을 목적으로 퇴적물 분석을 진행하였다.

● 표층퇴적물은 각 Trough를 따라서 Getz A Trough에서 7개, Dotson Trough에서 8개를 획득하였다 (그림 1). 이 지역은 동쪽에서 서쪽으로 흐르는 표층 해류의 영향을 받을 수 있는 지역으로 (ref) Dotson Trough의 오른쪽에 나타난 sediment pocket 으로부터 1개의 시료를 획득하여 총 16개의 시료를 획득하였다.

● Dotson Trough와 Getz A Trough 내 퇴적물을 통해 과거 빙상의 움직임을 복원하기 위해 각 Dotson Trough에서 GC05, Getz A Trough에서 GC09 중력코어를 획득하였다 (그림 2). 두 코어는 Trough를 따라 이동하는 퇴적물의 특성상 각 Trough를 가장 잘 대변할 수 있는 코어라 생각되어 선정하였다. 각 코어에서 MS 값이 급격하게 증가하는 깊이를 기준으로 깊은 곳은 빙하 하부라고 생각되며 퇴적상에서도 천부에서는 생교란의 흔적이 나타나지만 MS 값이 증가하는 기점 이후로는 그 흔적이 더 이상 나타나지 않는 것 또한 이를 지지한다. 이를 기준으로 각 코어별 총 세 깊이의 퇴적물을 추가로 샘플링 하였다. GC05의 경우 110cm, 150cm, 300cm의 층에서 각각 10cc 정도를 획득하였고 GC09의 경우 100cm, 145cm, 350cm 깊이에서 같은 양의 시료를 획득하였다.

	위도	경도	코어 길이(m)	수심(m)
BC01	73° 39.1502'S	113° 37.8846'W	6	789
BC02	73° 46.3271'S	113° 11.3696'W	3.42	775
BC03	73° 57.7007'S	112° 36.0902'W	4.46	919
BC04	74° 3.4457'S	112° 51.1896'W	7.1	864
BC05	74° 7.8340'S	112° 33.0079'W	3.37	967
BC06	74° 7.4386'S	113° 5.2900'W	2.15	670
BC07	73° 30.2968'S	114° 58.1792'W	3.78	916
BC08	73° 40.8901'S	115° 27.3836'W	4.2	971
BC09	73° 49.1534'S	115° 30.3821'W	5.51	876
BC10	73° 58.9701'S	115° 46.1446'W	5.35	1248
BC11	74° 13.5203'S	112° 37.1097'W	0.445	
BC12	74° 13.2516'S	113° 10.3642'W	0.52	864
BC13	73° 56.860'S	112° 26.0850'W	2.55	686
S01	74° 4.7378'S	115° 43.4448'W		1070
S02	74° 0.0074'S	116° 5.9966''W		911
S03	73° 16.7345'S	114° 57.0371'W		831

표 1 BC01~BC13, S01~S03 코어에 대한 위치, 길이, 수심 정보



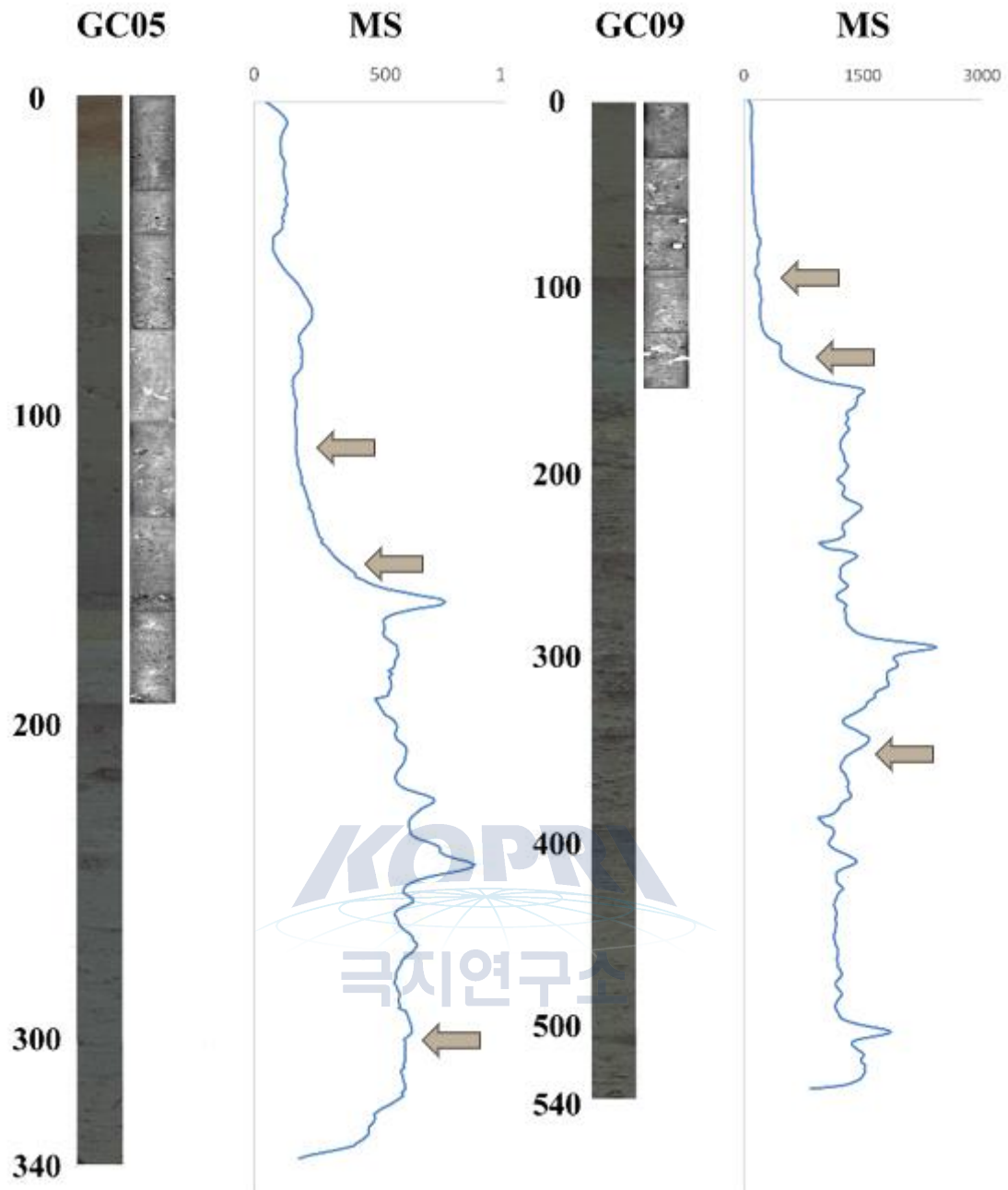


그림 2 서남극 아문젠 해 (Amundsen Sea) 대륙붕 지역 Dotson trough 내에서 획득한 GC05 및 Getz A trough 내에서 획득한 GC09 퇴적물 코어. 각 중력코어의 MS 값 및 퇴적상을 통해 확인할 수 있는 빙하 하부 시기, 그라운드링 라인 근처 시기, 개방 시기를 선택하여 추가 샘플링을 진행

(나) 서남극 전반의 해저퇴적물 내 점토광물의 광물학적 특성 분석

● 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 위성을 실시한 뒤 동결 건조하여 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 3, 4, 5). 이후의 통계분석을 진행할 것을 감안하여 보다 정확한 데이터를 얻기 위해 각 샘플에 대하여 총 3번씩 XRD 분석을 진행하였다.

● 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 6, 7, 8, 9, 10, 11).

● Bulk mineralogy에서 동정된 광물들은 모든 샘플에서 석영과 장석이 우세하게 나타났다으며 각각 $2\theta = 26.82^\circ$, $2\theta = 27.78^\circ$ 에서 피크가 나타난다. 또한 대표적인 점토광물인 스멕타이트, 녹니석, 일라이트, 카올리나이트 등의 점토광물 피크도 관찰되었으며 세 번에 걸쳐 실시한 XRD 분석 결과는 모두 동일한 결과를 보였다. 위치에 따라서는 제올라이트와 각섬석 등의 광물의 유무가 약간의 차이를 보이나 전체적으로는 비슷하고 남극 해저퇴적물에서 흔히 찾을 수 있는 광물들로 구성되었고 크게 다른 광물상을 가지고 있는 샘플은 없는 것으로 나타난다.

● 점토광물에 대한 분석 결과, 스멕타이트는 $2\theta = 6.16^\circ$ 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 나타났다. 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 상

Bulk XRD 3

Q:quartz F: feldspar Am: amphibole Z: zeolite
Sm: smectite Ch: chlorite K: kaolinite I: illite

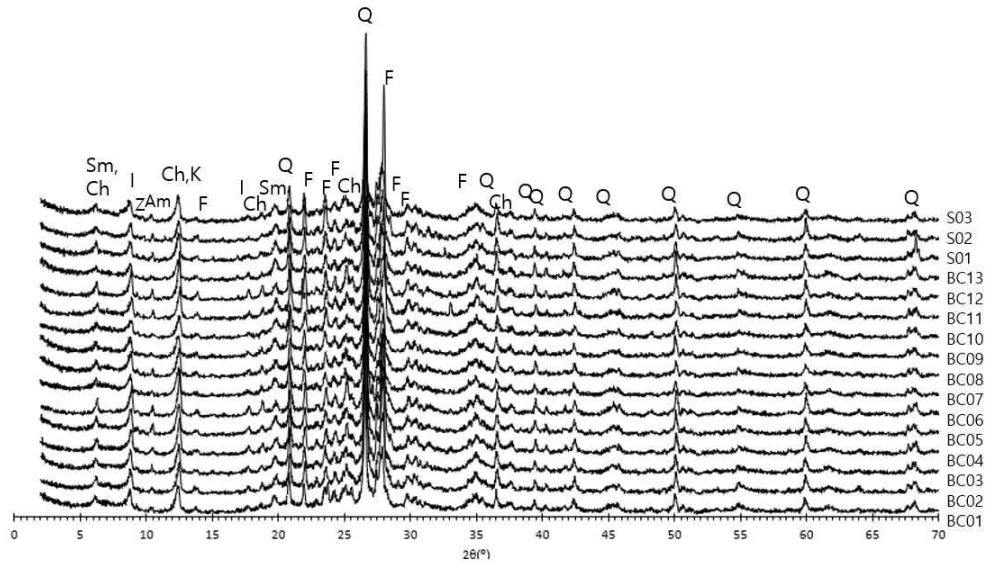


그림 5 입도 분리하지 않은 시료에 대해 부정 방위법 XRD 분석 결과 3

Oriented XRD 1

Q:quartz F: feldspar Am: amphibole Z: zeolite
Sm: smectite Ch: chlorite K: kaolinite I: illite

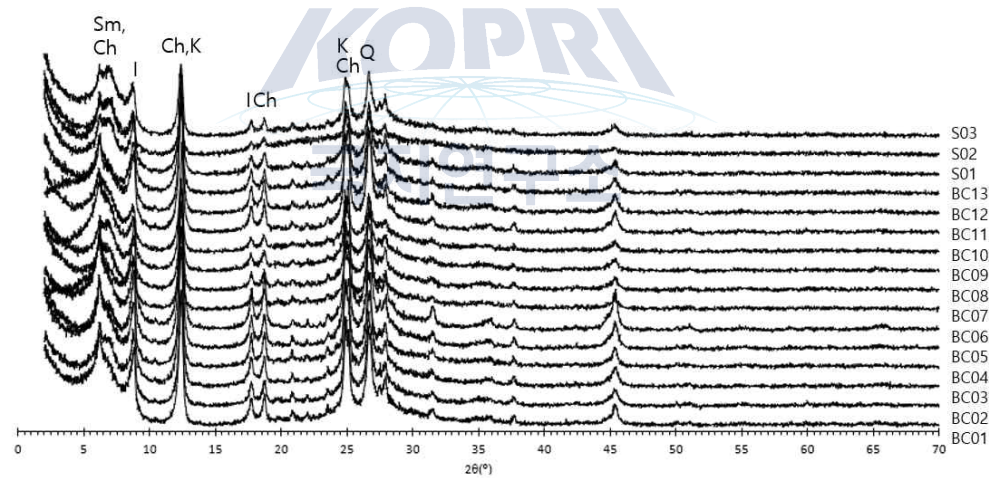


그림 6 2 μm 이하로 입도 분리한 후 점토광물의 정방위 XRD 측정된 분석 결과 1

Oriented XRD 2

Q:quartz F: feldspar Am: amphibole Z: zeolite
Sm: smectite Ch: chlorite K: kaolinite I: illite

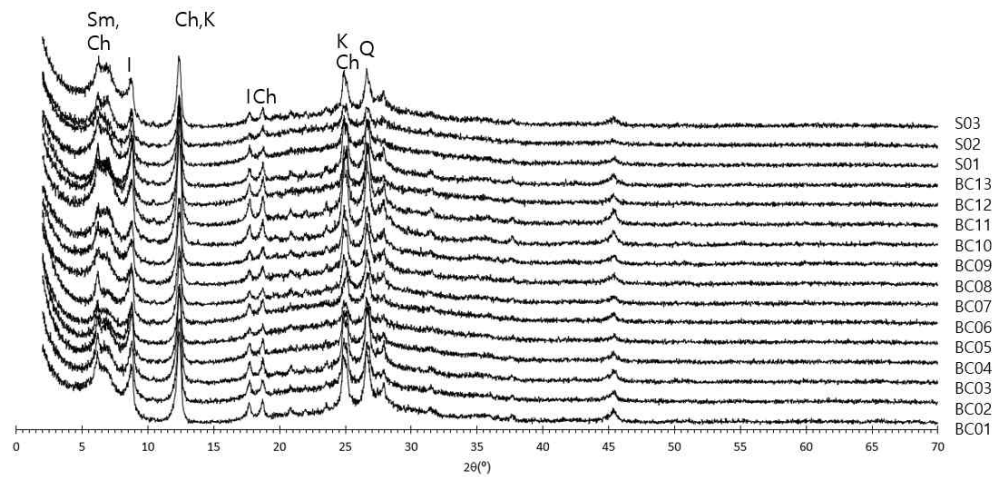


그림 7 2 μm 이하로 입도 분리한 후 점토광물의 정방위 XRD 측정한 분석 결과 2

Oriented XRD 3

Q:quartz F: feldspar Am: amphibole Z: zeolite
Sm: smectite Ch: chlorite K: kaolinite I: illite

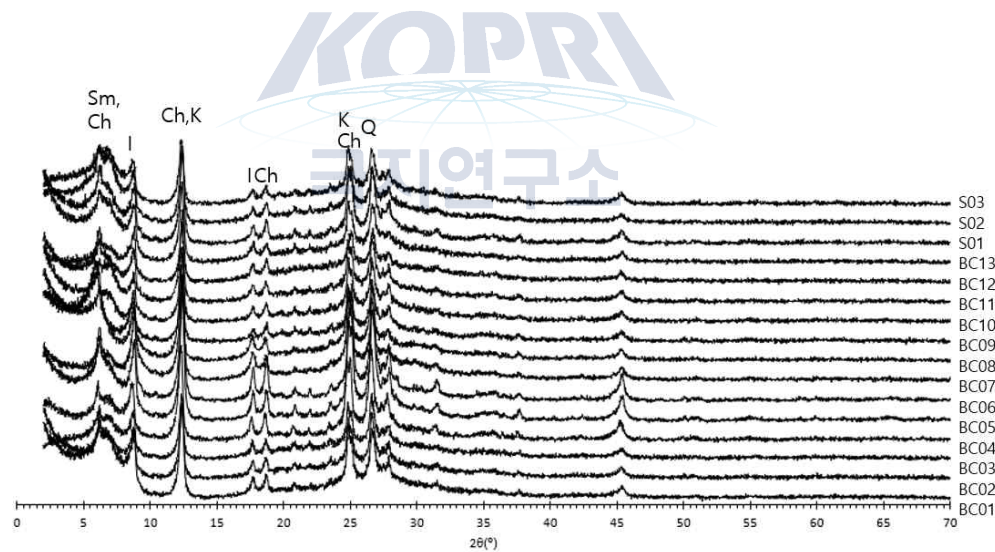


그림 8 2 μm 이하로 입도 분리한 후 점토광물의 정방위 XRD 측정한 분석 결과 3

Glycol XRD 1

Q:quartz Sm: smectite Ch: chlorite
K: kaolinite I: illite

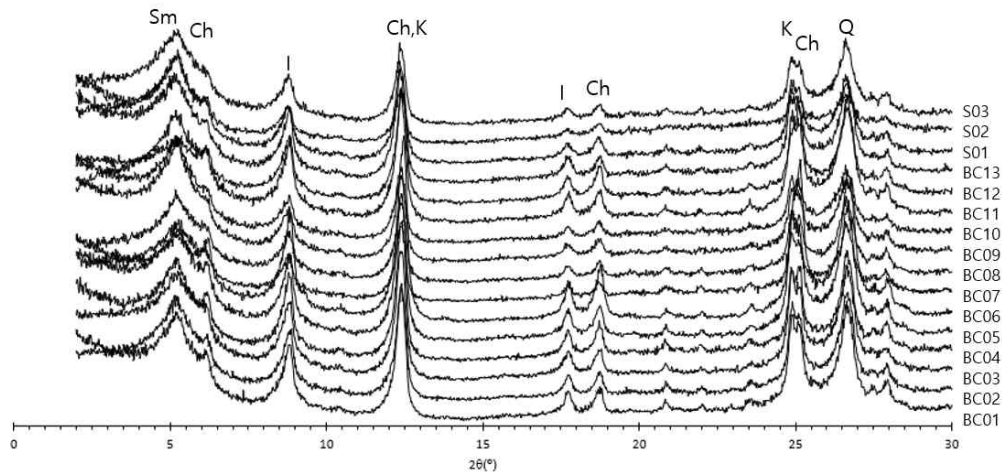


그림 9 2 μm 이하로 입도 분리한 후 에틸렌글리콜 포화시킨 점토광물의 정방위 XRD 측정 분석 결과 1

Glycol XRD 2

Q:quartz Sm: smectite Ch: chlorite
K: kaolinite I: illite

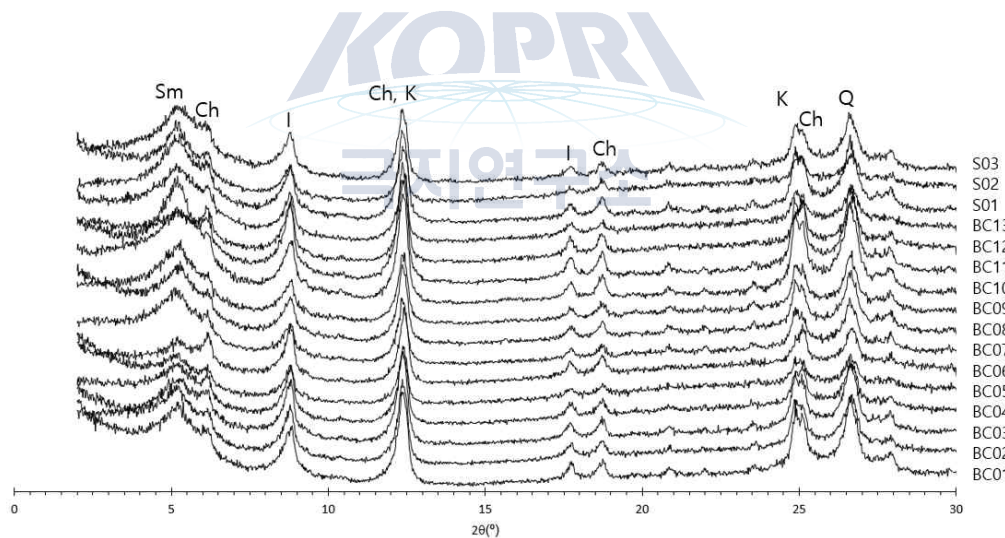


그림 10 2 μm 이하로 입도 분리한 후 에틸렌글리콜 포화시킨 점토광물의 정방위 XRD 측정 분석 결과 2

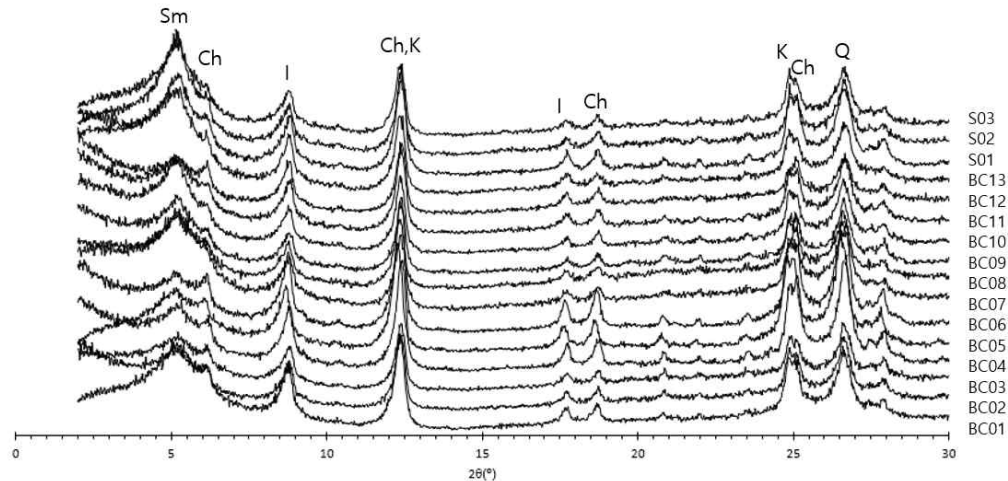


그림 11 2 μm 이하로 입도 분리한 후 에틸렌글리콜 포화시킨 점토광물의 정방위 XRD 측정된 분석 결과 3

(다) 저온 결빙 환경에서 철 함유 광물 (maghemite, NAu-2 nontronite)과 미생물간의 유기/무기 반응 확인을 위한 batch 실험 진행

● 극지와 같은 환경에서 계절적 혹은 기후적 변동으로 인해 결빙과 해빙 주기가 반복되게 되는데 이러한 극한 환경에서 미생물의 광물을 통한 상호작용 및 대사작용이 어떻게 나타나는지 알아보기 위한 회분식 실험을 설계하였다. 실험 대상 광물은 철을 함유하고 있는 스멕타이트인 논트로나이트 (Nontronite, Nau-2)와 대표적인 철 산화물인 자적철석 (Maghemite, Fe_2O_3)으로 설정하였다. 논트로나이트의 경우 구조 내 철의 약 99%가 Fe(III) 의 형태로 존재하고 자적철석은 포함하고 있는 모든 구조 내 철이 Fe(III) 로 존재한다. 미생물은 저온에서 활발하게 대사작용을 할 수 있는 *Shewanee Vesiculosa* 종을 사용하였다.

● 논트로나이트는 과거 본 연구실에서 광물-미생물 반응을 위한 시료로 사용하였던 바 같은 실험 조건을 설계하여 진행하였다. 5g/L의 논트로나이트 농도를 사용하였으며 1×10^8 mL/CFU의 미생물을 총 300mL의 슬러리에서 함께 반응시켰다. 자적철석의 경우 사전 시험을 통해 자연에서 환원되는 자적철석의 농도와 가장 비슷하게 환원율이 나타나는 80mM로 설정하였고 논트로나이트와 마찬가지로 300mL의 자적철석 슬러리에 1×10^8 mL/CFU의 미생물을 함께 반응시켰다. 각 광물별로 미생물을 넣은 시료 3개와 넣지 않은 대조군 시료 1개를 준비하였다.

● 반응 온도는 결빙-해빙 주기를 모사하기 위하여 시간에 따라 점차 변화시키면서 진행하였다. 가장 처음은 15°C 부터 시작하여 4, 0, -4, -7, -8, -10°C 까지 이틀 간격

으로 점차 온도를 낮춰가면서 진행하였고 최종 -10°C에서 이를 반응시킨 이후 다시 15°C로 돌아가며 같은 주기를 한 번 더 반복하였다. 총 두 번의 결빙-해빙 주기가 있었으며 총 28일간 반응이 진행되었다. 각 시기별, 온도별로 광물-미생물 반응을 확인하기 위하여 각 온도별로 10mL씩 샘플링을 진행하였다.

시간 (주)	80 mM 자적철석 (12.775 g/L)		8 mM 자적철석 (1.2775 g/L)		0.8 mM 자적철석 (0.12775 g/L)	
	1 °C (mM)	4 °C (mM)	1 °C (mM)	4 °C (mM)	1 °C (mM)	4 °C (mM)
0	1.635	1.62	0.163	0.162	0.016	0.016
1	6.598	9.214	2.134	2.546	0.467	0.495
2	7.5	9.762	2.387	2.65	0.484	0.499
3	7.595	9.778	2.495	2.682	0.49	0.504
4	7.571	9.816	2.542	2.652	0.494	0.506
철 환원율	9.46 %	12.27 %	31.78 %	33.15 %	61.75 %	63.25 %

표 2 *Shewanella vesiculosa* 종에 대한 자적철석 농도에 따른 철 환원율 (0.8mM, 8mM, 80mM). ~9%의 환원율을 보이는 80mM이 가장 자연 환경을 잘 모사한다고 사료되어 본 농도를 통해 자적철석과 미생물 반응을 진행.

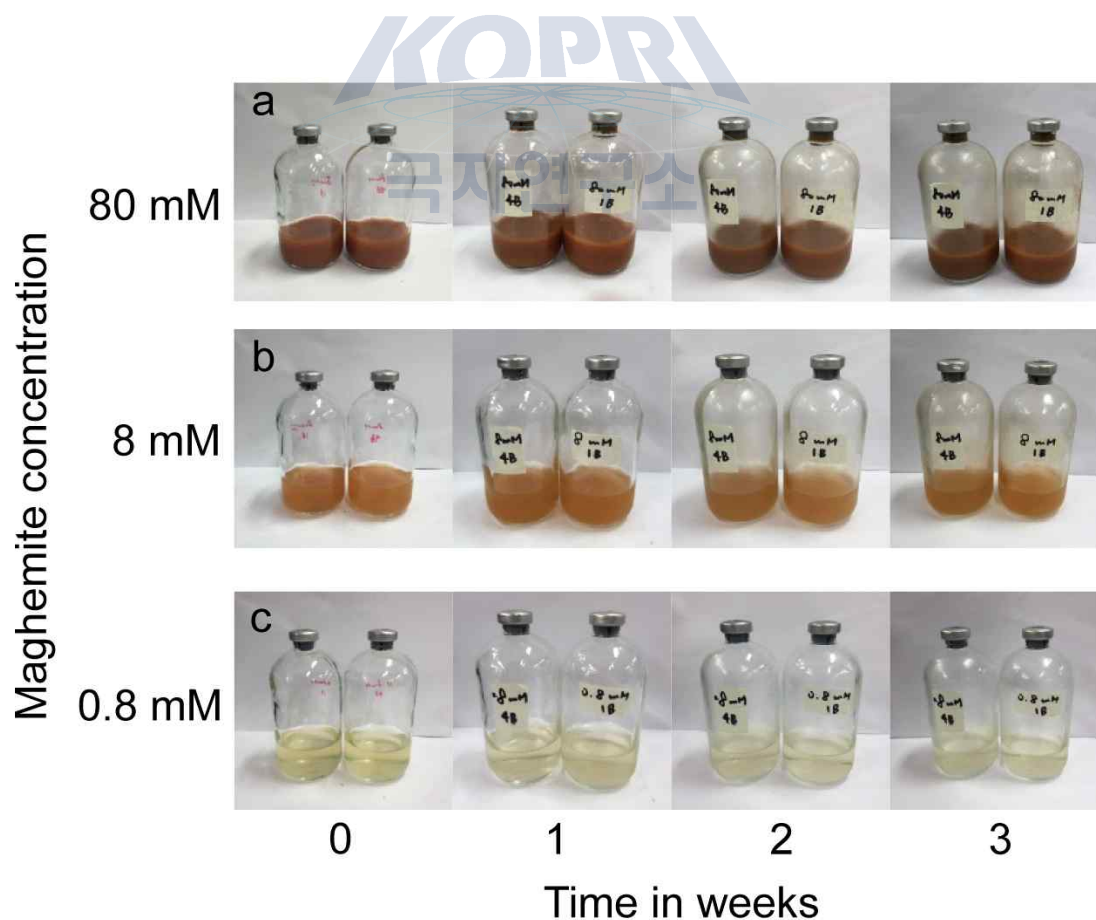


그림 12 자적철석 농도에 따른 철 환원율 변화 실험

(2) 빙기-간빙기의 고퇴적 환경 해석 및 저온 결빙 환경에서의 광물-미생물 반응 해석 (I)

(가) 서남극 대륙붕 지역 점토광물의 물리화학적 특성 분석

● 서남극 아문젠 해 대륙붕의 Dotson-Getz trough를 따라 획득한 16개의 표층시료에 대하여 Biscaye (1965) 방법을 사용하여 점토광물 상대적 함량비 분석을 진행하였다 (그림 13, 표3). 앞서 분석한 총 3개의 XRD 데이터를 모두 활용하였을 때 각 XRD 별로 도출한 결과는 크게 다르지 않았으며 최종 데이터는 세 XRD를 종합하여 평균을 낸 값을 사용하였다.

● 특징적인 부분 중 하나는 남극 해양퇴적물임에도 불구하고 상대적인 카올리나이트 함량비가 ~15% 정도로 높다는 점이다. Pereira et al., (2020)는 Pine Island Glacier와 근처에 있지만 Thwaites Glacier에서부터만 카올리나이트가 구별되게 많이 나온다는 바를 밝힌 바 있다. Dotson-Getz Trough 지역은 Thwaites Glacier와 가까이 위치해 있는데 이와 같이 많은 카올리나이트가 나타남을 통해 비슷한 기원지의 가능성에 대하여 제시할 수 있다. 특히나 카올리나이트는 따뜻한 기후조건에서 많이 생성되는 점토광물이기 때문에 과거 온난기 시기에 Dotson Ice shelf와 Getz A Ice Shelf 또한 충분히 많이 후퇴하여 카올리나이트를 형성할 수 있는 조건에 있었을 가능성도 존재한다. 그렇지만 카올리나이트의 함량비 자체는 시료의 위치별로 큰 차이가 나타나지는 않는 것을 확인할 수 있어 두 Trough가 구분됨을 지시할 수는 없다.

● 스�멕타이트와 일라이트의 경우에는 Dotson Trough와 Getz A Trough에서 실질적인 값의 차이가 나타난다. Getz A Trough에 존재하는 스�멕타이트의 함량비는 36.68% (BC07), 31.93% (BC08), 36.16% (BC09), 35.69% (BC10), 33.88% (S01), 38.8% (S02), 36.48% (S03) 으로 모두 30% 이상의 상대적인 스�멕타이트 함량비를 보이며 Dotson Trough의 경우 25.49% (BC01), 28.06% (BC02), 28.89% (BC03), 22.25% (BC04), 23.82% (BC05), 16.43% (BC06), 25.79% (BC11), 19.16% (BC12))로 모두 30% 이하의 값을 나타내는 차이를 보였다. 즉, Getz A Trough에서는 상대적으로 Dotson Trough에 비해 많은 양의 스�멕타이트를 함유하고 있음을 확인하였다.

● 일라이트는 남극에서 가장 흔한 점토광물로 일반적인 남극 해양퇴적물에 비교적 많은 양이 존재함이 알려져 있다. 따라서 본 연구의 결과에서 또한 대부분 많은 양의 일라이트를 포함하고 있지만 그 함량비 값에서의 차이가 두 Trough간 차이가 나타남을 확인할 수 있다. Getz A Trough의 경우 ~34% 정도의 값을 보이는 한편 Dotson Trough의 경우 ~40% 정도의 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는 스�멕타이트와 마찬가지로 일라이트에서 또한 Dotson Trough와 Getz A Trough 간의 차이를 나타내고 있음을 볼 수 있다.

● 녹니석의 경우에는 일라이트와 비슷한 기후 조건에서 많이 생성됨이 알려져 있기 때문에 일라이트의 함량비와 비교적 비슷한 추세를 나타내는 것을 볼 수 있다. Getz A Trough와 Dotson Trough 간에도 미세한 녹니석의 차이가 나타나지만 그 값이 너무 작아 크게 구분하기는 어려울 것으로 생각된다.

● XRD 데이터를 바탕으로 일라이트의 결정도 및 화학성분 index를 구하였다. 이는 각 XRD에 나타난 일라이트가 얼마나 구조적으로 결손이 있는지 그리고 내부에 철 등의 다른 원소 치환이 얼마나 많이 일어나 있는지를 파악할 수 있는 index로 일라이트 점토광물 내에서의 차이가 각 Trough 별로 얼마나 나타날 수 있는지를 지시하는 요소이다. 일라이트 결정도 지수의 경우 일라이트의 d(001) 피크의 반치폭을 통하여 결정하며 화학지수의 경우 d(001)과 d(003)의 면적비를 통해 결정된다. 분석 결과 일라이트 결정도 지수는 Dotson Trough 에서 대부분 0.5 이하, Getz A Trough에서 대부분 0.5 이상인 값들이 확인되나 그 값의 차이가 0.01 정도로 너무 미미하여 두 Trough 간의 차이가 나타난다고 해석하기에는 어려움이 있다. 화학지수의 경우 Dotson Trough 쪽에서 평균 0.21, Getz A Trough에서 평균 0.18로 0.03의 차이가 나타난다. 이 역시 큰 차이라고 보기는 어려울 수 있으나 Getz A Trough 내에서 S01, S03을 제외한 나머지 시료들이 모두 0.2를 넘지 못하며 Dotson Trough는 BC12를 제외하고는 모두 0.2 보다 높은 값을 나타내기 때문에 작지만 화학 성분적으로 차이가 나타날 가능성이 존재한다. 일라이트 화학 지수는 값이 낮을수록 Fe-rich 임을 지시하기 때문에 Getz A Trgouh 의 일라이트가 더 많은 Fe를 포함할 가능성이 있다.

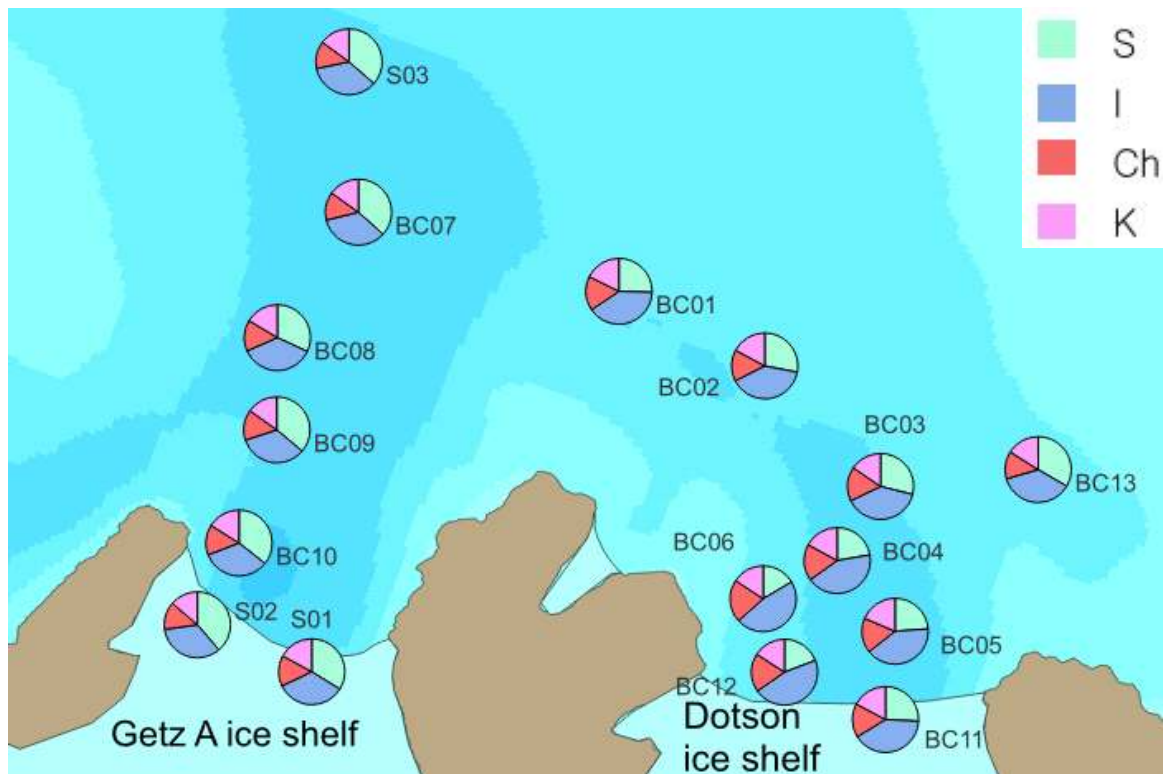


그림 13 아문젠 해 Dotson-Getz Trough 지역에서 획득한 표층 퇴적물의 점토광물 상대 함량비 분석 결과



코어	스펙타이트 (%)	일라이트 (%)	녹니석 (%)	카올리나이트 (%)	일라이트 결정도지수	일라이트 화학지수
BC01	25.49	40.07	16.82	17.63	0.49	0.204
BC02	28.06	39.48	15.37	17.09	0.49	0.203
BC03	28.89	38.99	15.39	16.74	0.5	0.227
BC04	22.25	42.85	17.88	17.01	0.47	0.201
BC05	23.82	40.56	17.05	18.56	0.47	0.241
BC06	16.43	46.94	20.94	15.69	0.47	0.219
BC07	36.68	34.47	13.81	15.04	0.52	0.162
BC08	31.93	36.53	15.22	16.33	0.5	0.178
BC09	36.16	33.81	14.90	15.13	0.52	0.185
BC10	35.69	33.44	14.85	16.02	0.52	0.179
BC11	25.79	40.42	16.61	17.17	0.49	0.186
BC12	19.16	46.16	18.90	15.77	0.49	0.204
BC13	33.45	37.03	13.54	15.98	0.48	0.24
S01	33.88	34.04	15.10	16.98	0.49	0.211
S02	38.80	33.99	13.56	13.65	0.49	0.14
S03	36.48	35.29	13.36	14.87	0.51	0.214

표 2 아문젠 해 Dotson-Getz Trough 지역에서 획득한 표층 퇴적물의 점토광물 상대 함량비, 일라이트 결정도 지수, 일라이트 화학지수 결과값

(나) 서남극 전반의 해저퇴적물 내 점토광물의 특성에 따른 통계적인 군집분석

● 표층퇴적물의 XRD를 통해 분석한 상대적 함량비, 일라이트 결정도 지수, 일라이트 화학지수의 값들에 대하여 K-means clustering을 통한 군집 분석을 진행하였다. 그룹의 개수를 특정하지 않고 모암의 데이터라는 정답이 없는 상황이기 때문에 대표적인 비지도학습 방법을 사용하였다. K-means clustering은 가장 적절한 K개의 군집을 결정해주어야하기 때문에 실루엣 계수를 통해 2개가 가장 적당함을 결정하였다 (그림 14). 이를 통해 군집 분석을 실시한 결과는 그림 15와 같이 Getz A Trough와 Dotson Trough가 나누어지는 것을 확인할 수 있다. 이를 나누는 주요한 구성요소를 살펴보기 위하여 주성분 분석의 첫 번째 주성분이 어떤 것으로 이루어져 있는지 확인한 결과 (그림 16), 스펙타이트, 녹니석, 일라이트의 함량비가 가장 주요한 변수임을 확인할 수 있었다.

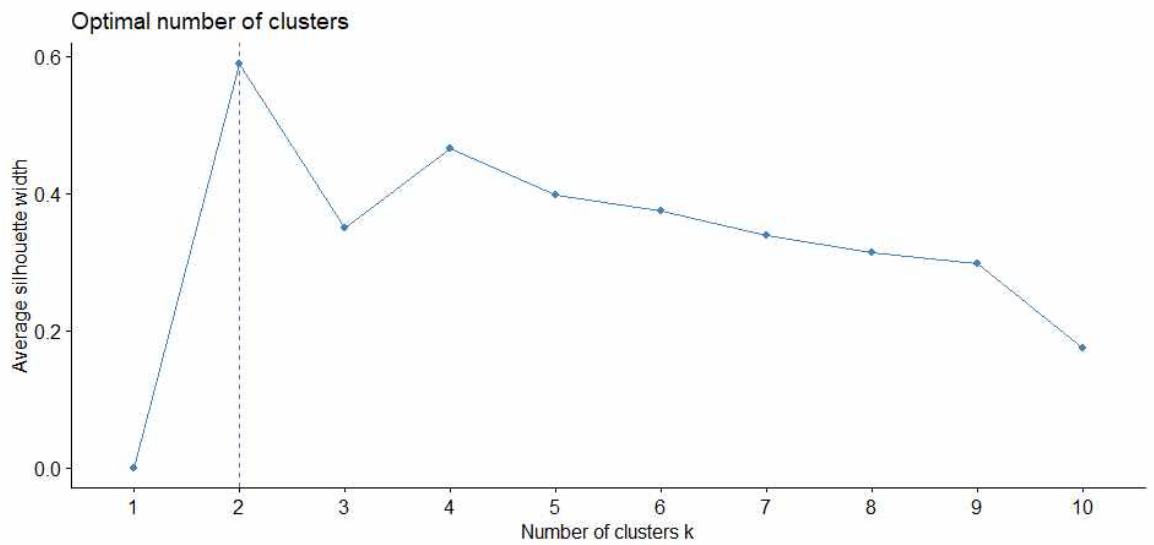


그림 14 군집 개수 결정을 위한 실루엣 분석 결과 2개 군집이 가장 이상적이라 나타남

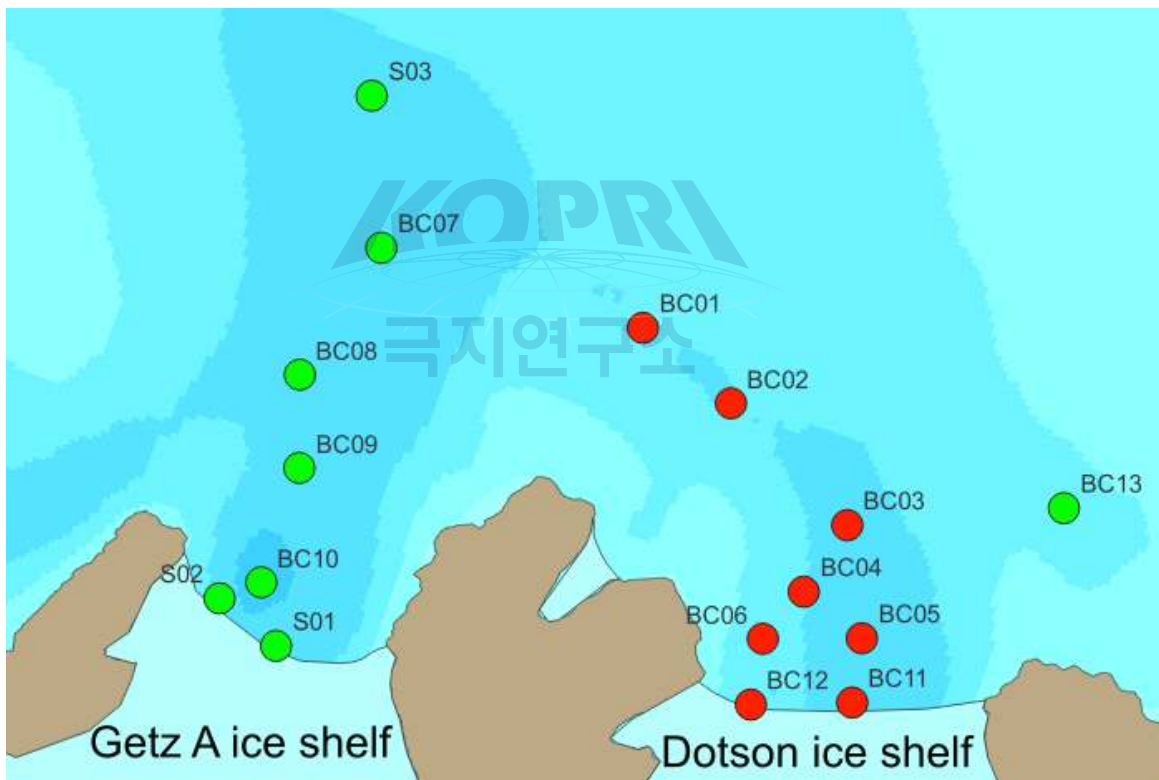


그림 15 표층퇴적물 내 점토광물 특성을 통해 군집분석을 수행한 결과, Dotson 빙붕 앞과 Getz 빙붕 앞으로 군집이 구분됨을 확인.

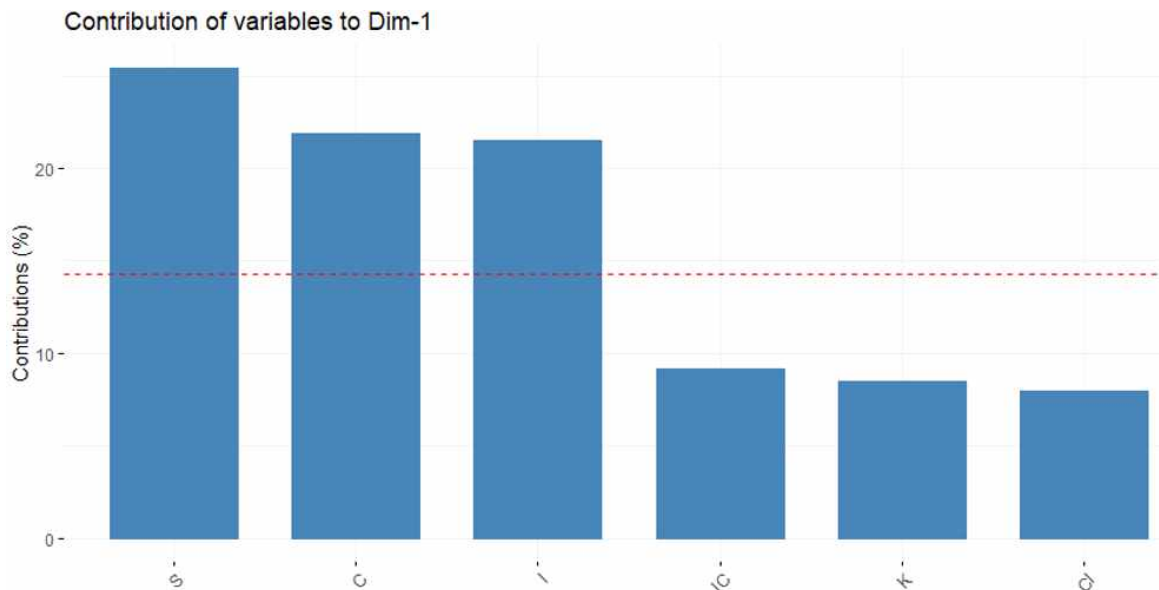


그림 16 군집을 이루는 데이터들에 대한 핵심 변수. 스멕타이트, 클로라이트, 일라이트가 가장 주요한 구성 요소임을 확인

(다) 저온 결빙 환경에서 미생물의 활동에 의한 광물의 구조적, 화학적 분석

● 미생물을 접종한 시료에 대해 시간에 따른 철 환원 정도를 분석한 결과 논트로나이트의 경우 결빙이 일어나기 시작하는 구간인 -8°C 까지 약 20% 가량 꾸준히 철 환원율이 증가하는 모습이 나타난다. 결빙 구간에서는 또한 더 이상 추가적인 환원율의 증가가 나타나지 않았지만 결빙이 끝난 16일차 15°C 에서 약 4% 가량 급격히 환원율이 증가하는 모습을 확인할 수 있다 (그림 17). 반면 미생물을 접종하지 않은 시료에 대해서는 총 28일간의 반응 시간 동안 약 1%대를 유지하며 전혀 환원이 일어나지 않은 모습이 나타난다. 자적철석의 경우 0°C 인 4일차까지 환원율이 꾸준히 증가하지만 15% 지점에서부터 결빙이 일어나는 시기까지는 비슷한 환원율을 나타낸다. 하지만 결빙이 끝나는 시기인 16일차에 논트로나이트와 마찬가지로 약 5% 가량의 급격한 환원율의 증가가 나타나며 최종적으로 약 20% 가량의 환원이 진행되는 것을 알 수 있다. 미생물을 접종하지 않은 시료의 경우 또한 논트로나이트와 마찬가지로 1%대에서 더 이상 환원율이 올라가지 않는 모습을 보임으로 인해 미생물에 의한 광물 내 철 환원 기작이 나타났음을 알 수 있다. 또한 결빙 이후 해빙 시 급격한 환원율의 증가가 두 광물 모두에게서 나타남을 통해 극지와 같은 빙권에서도 충분히 미생물의 대사가 가능하다는 것을 보여준다.

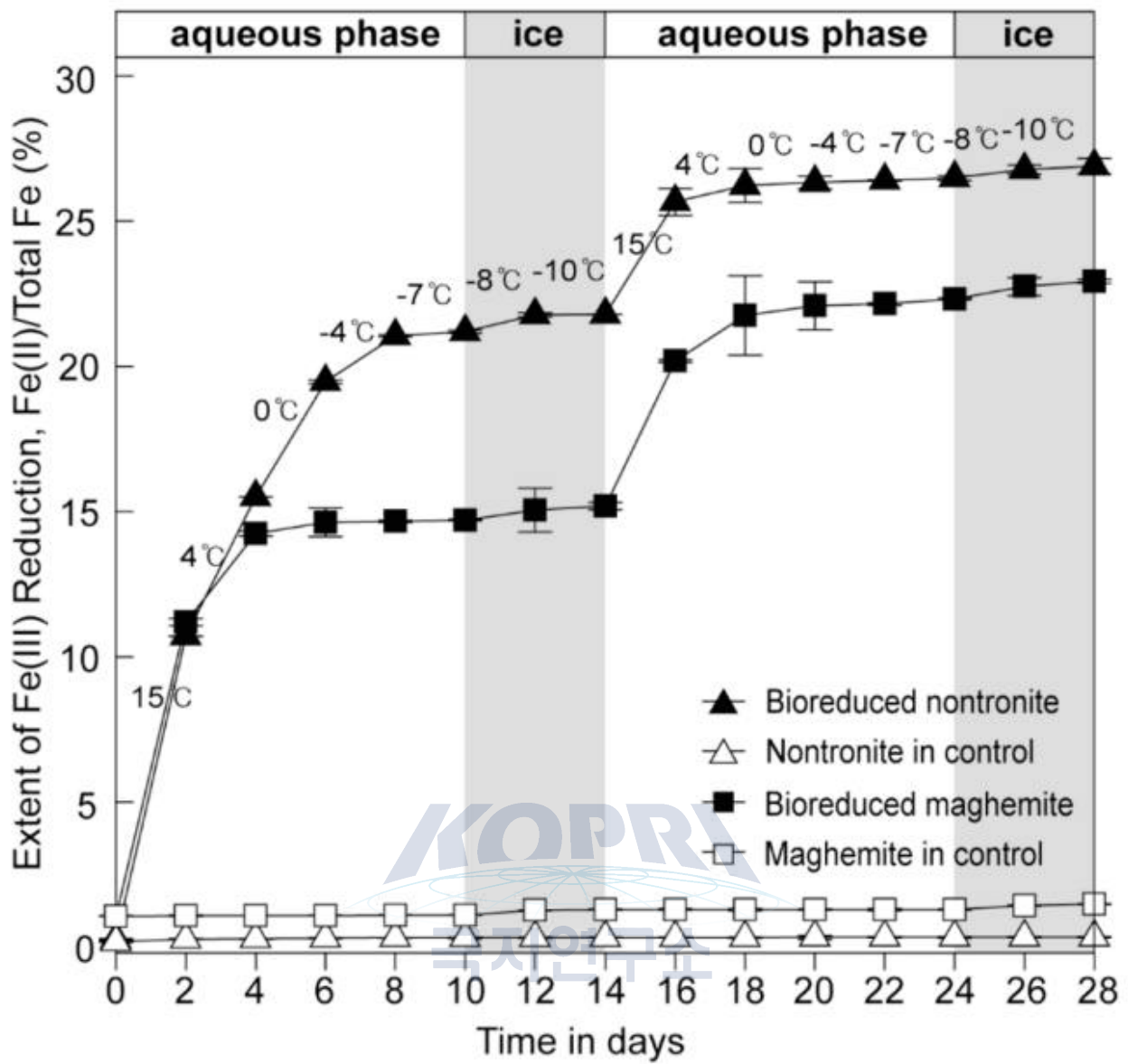


그림 17 논트로나이트 및 자적철석의 온도, 시간에 따른 철 환원율. 첫 번째 결빙 주기가 끝나는 14일차에 환원율이 급격히 상승하는 현상이 나타남.

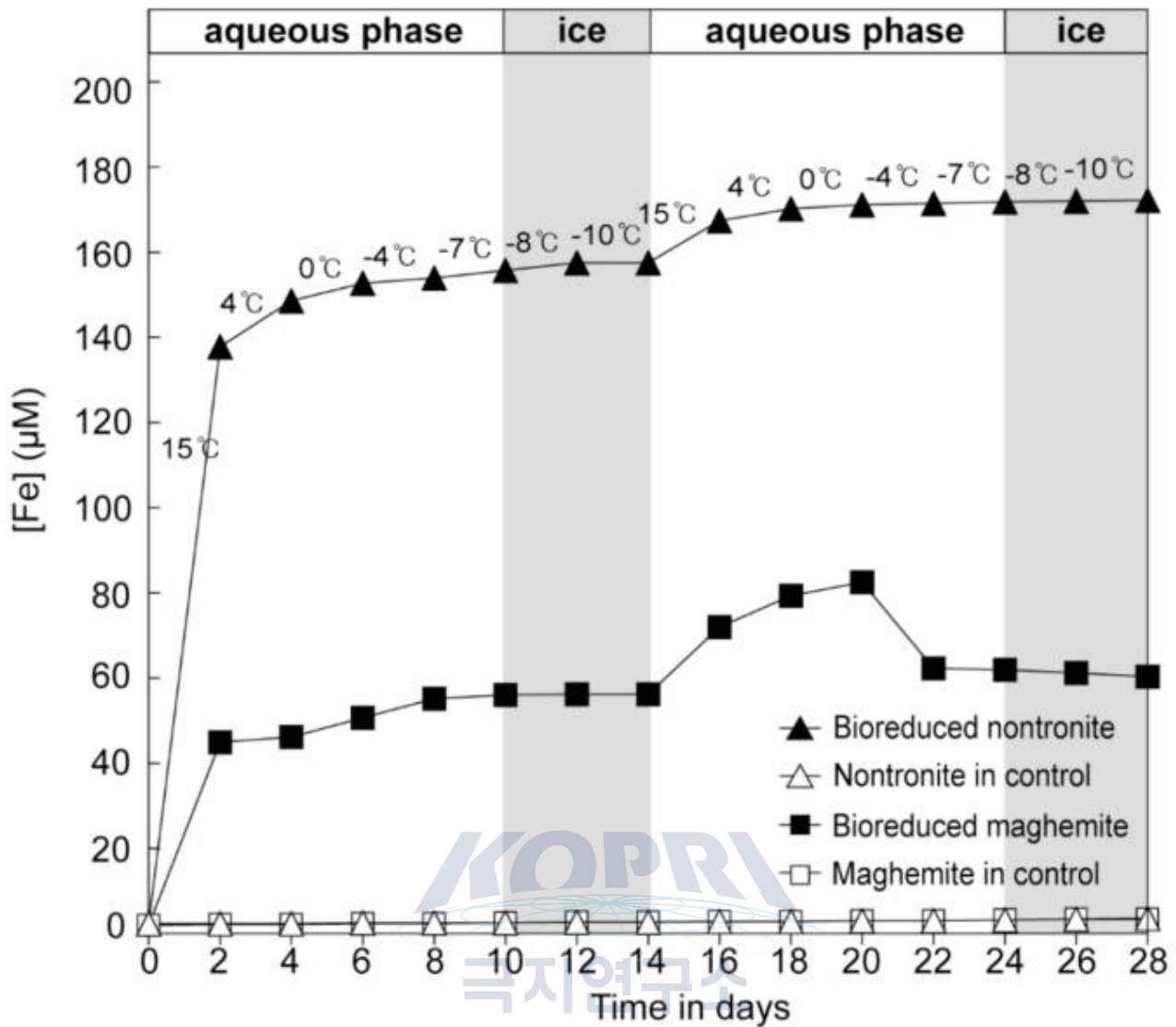


그림 18 논트로나이트 및 자적철석의 온도, 시간에 따른 철의 용출량

● 반응 시간에 따른 철의 용출량에서 또한 광물 구조 내 철이 환원되어 바깥으로 철이 용출되었음을 확인할 수 있다. 미생물을 넣어준 시료는 논트로나이트의 경우 약 160uM, 자적철석의 경우 약 60uM의 철 용출량이 나타나지만 미생물이 없는 시료의 경우 거의 0에 가까운 철의 용출량을 보여준다 (그림 18).

● XRD를 통해 광물-미생물 반응에 대한 광물의 구조적 변이 및 새로운 광물의 생성 여부를 확인하였다. 자적철석은 환원될 경우 자철석으로의 구조 변이가 가능한데 이는 XRD 상에서 거의 차이를 확인할 수 없다. 하지만 자적철석의 환원으로 인해 용출된 철에 의해 새로운 철 광물이 생성될 수 있으며 이는 XRD 상에서 새로운 광물의 존재로 나타난다. 실제로 XRD 결과 약 $2\theta = 13^\circ$ 부근에서 미생물과 반응한 자적철석 시료에서만 남철석의 피크가 새로 나타나는 것을 확인하였다 (그림 19). 또한 SEM을 통해 남철석의 존재를 확인할 수 있었다 (그림 20). 논트로나이트의 경우 남

철석과 같은 새로운 광물의 존재는 나타나지 않았지만 미생물과 반응한 논트로나이트의 d(002) 피크에서 이전의 피크들보다 훨씬 브로드한 양상이 나타났다. 이는 실제로 논트로나이트가 미생물에 의해 구조 내 철이 환원되는 경우에 나타나는 현상으로 (Koo et al., 2016), 미생물에 의해 두 광물 모두 구조 내 철이 환원되었음을 확인할 수 있다.

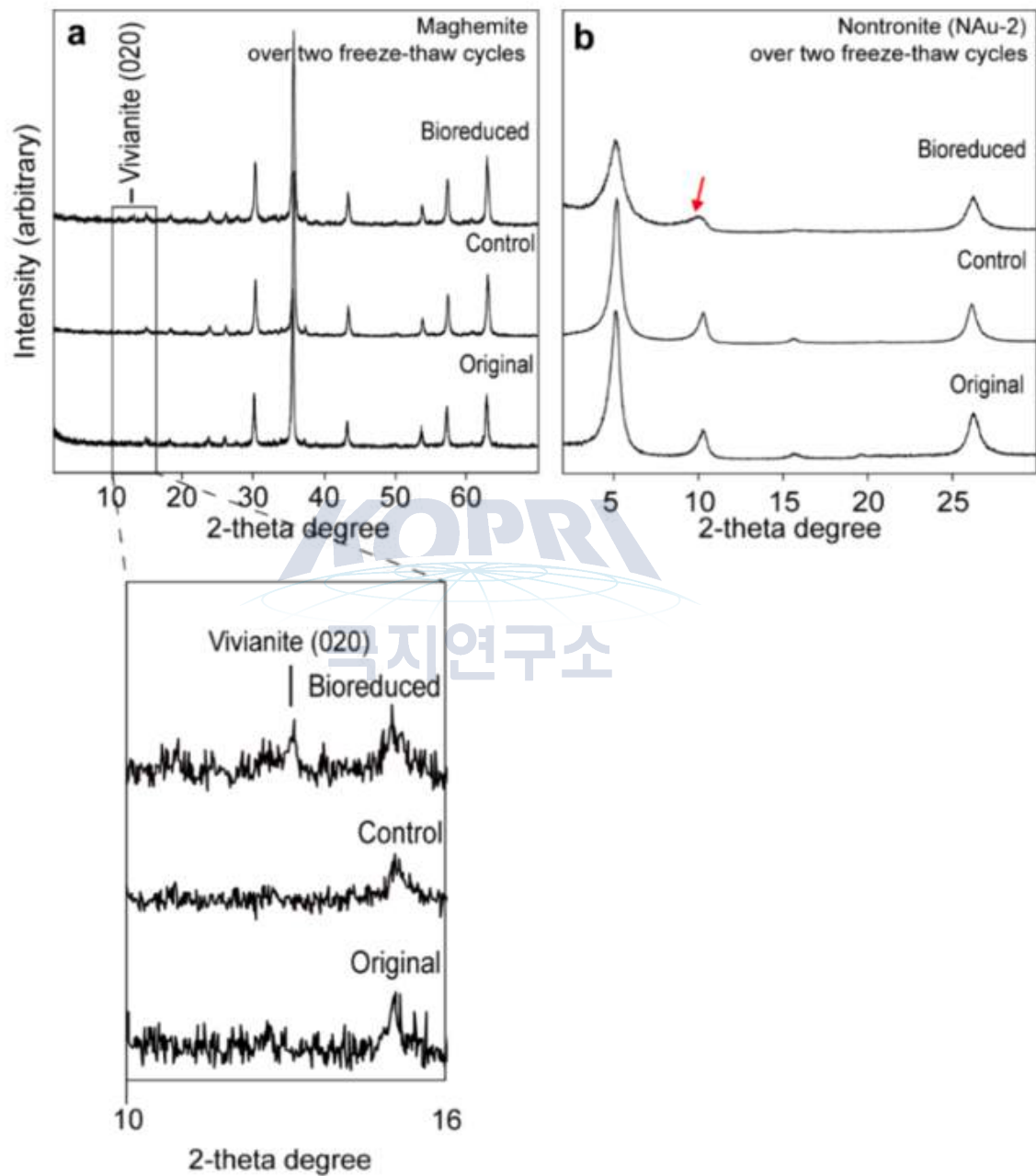


그림 19 논트로나이트 및 자적철석의 미생물 반응에 따른 광물 구조 변이 및 새로운 광물 생성

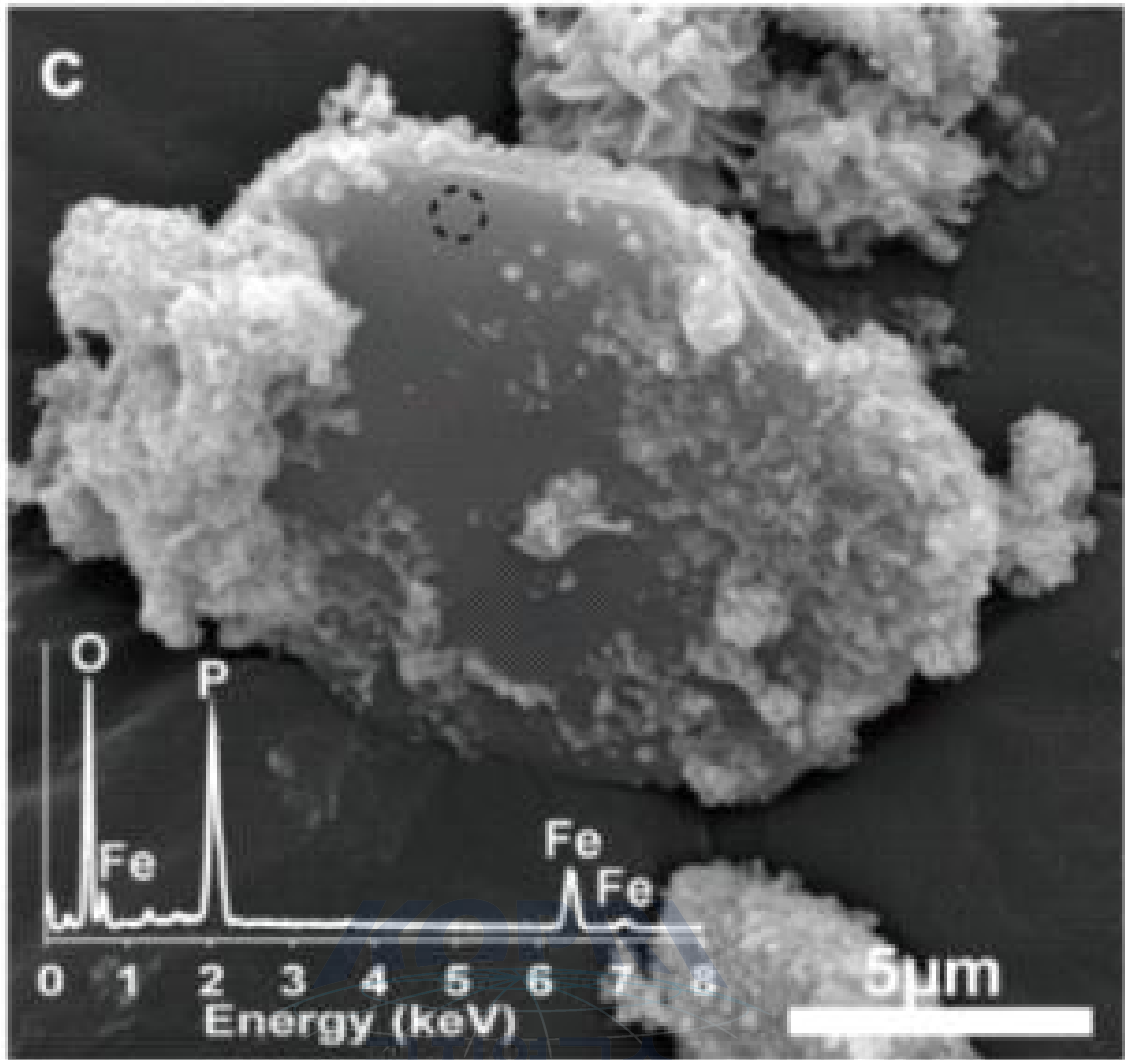


그림 20 SEM을 통해 확인한 새롭게 생성된 남철석.

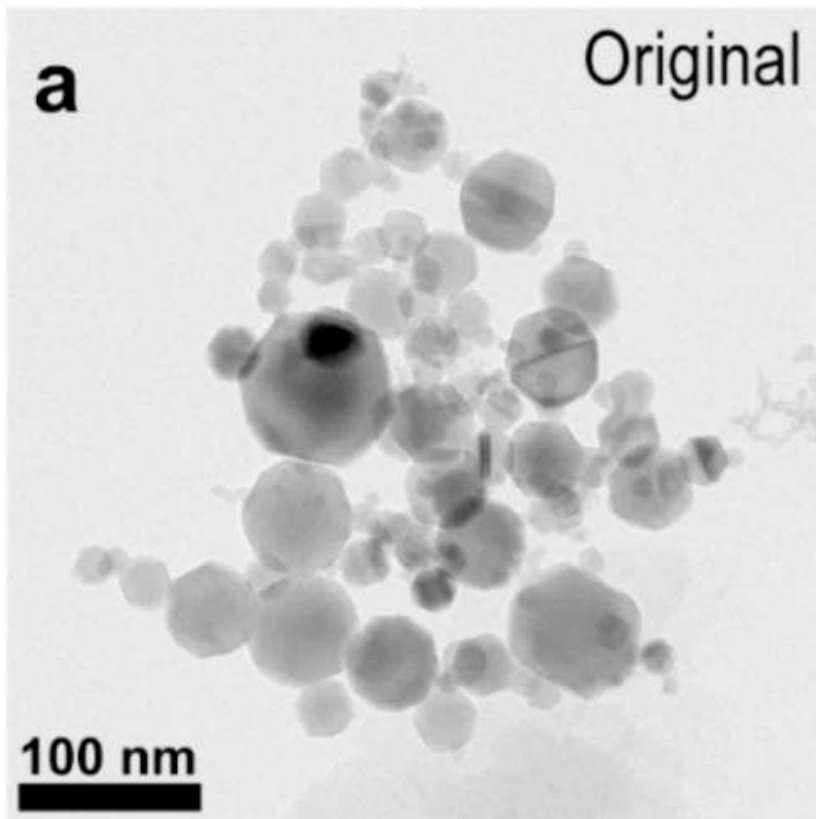


그림 21 TEM을 통해 확인한 반응 전 자적철석의 이미지

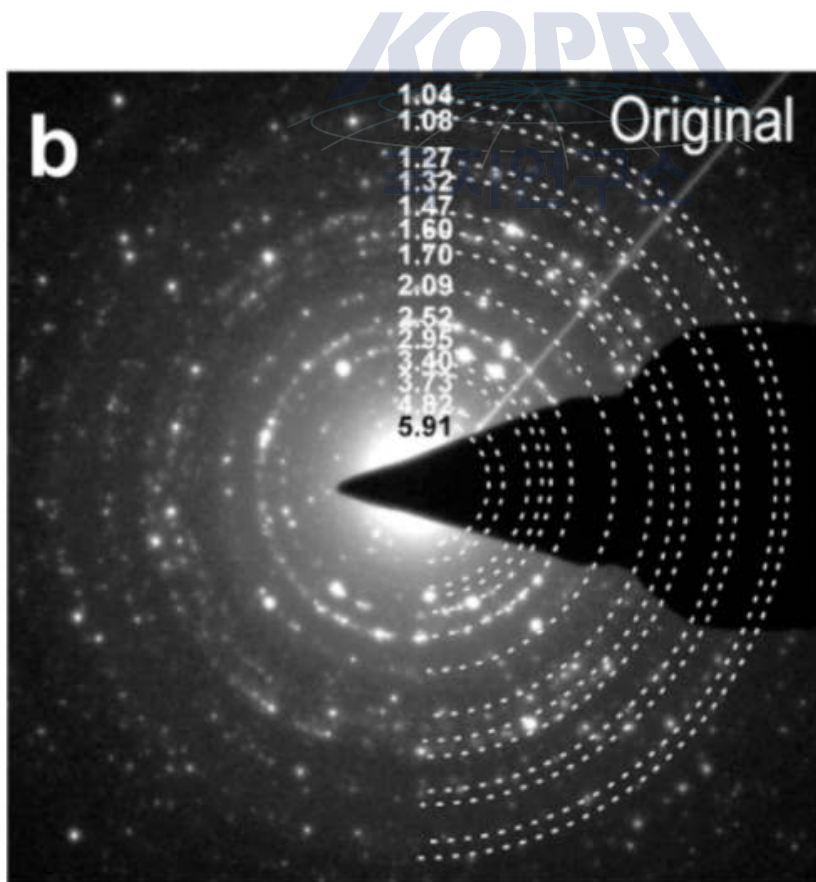


그림 22 SAED pattern을 통해 확인한 반응 전 자적철석의 격자 구조. 결손구조가 나타나지 않는다.

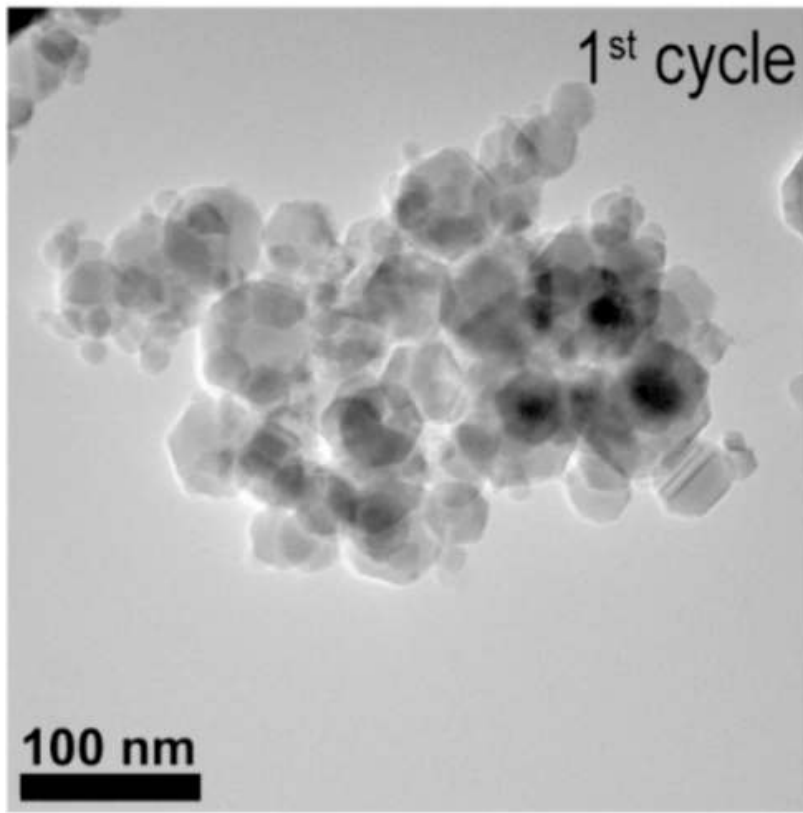


그림 23 TEM을 통해 확인한 첫 번째 결빙 이후 자적철석의 이미지

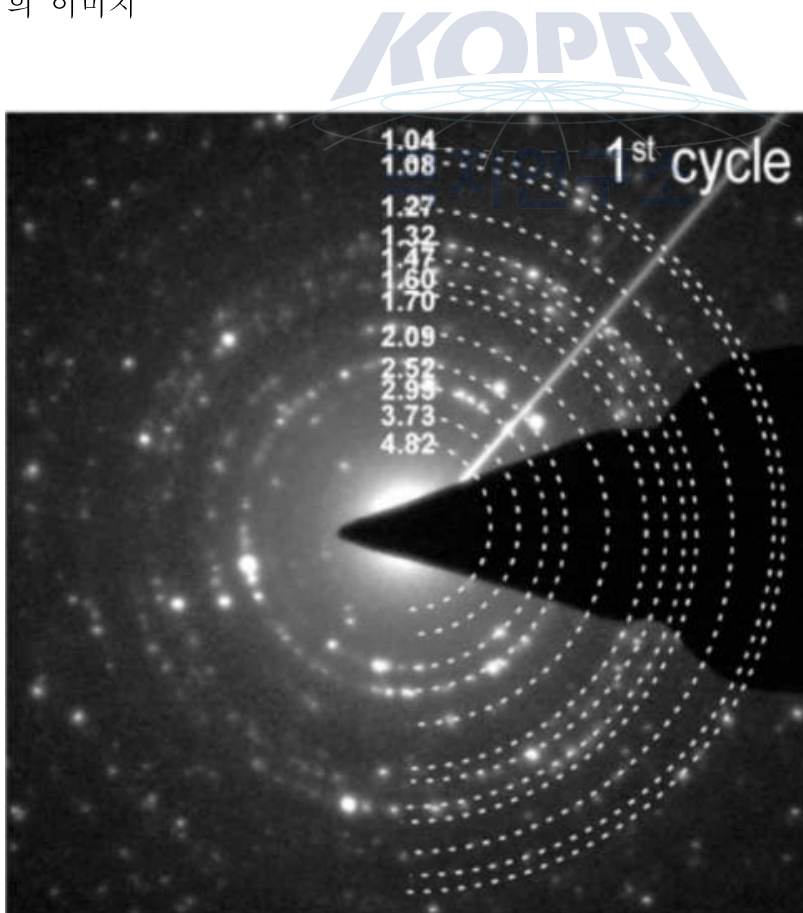


그림 24 SAED pattern을 통해 확인한 첫 번째 결빙 이후 자적철석의 격자 구조

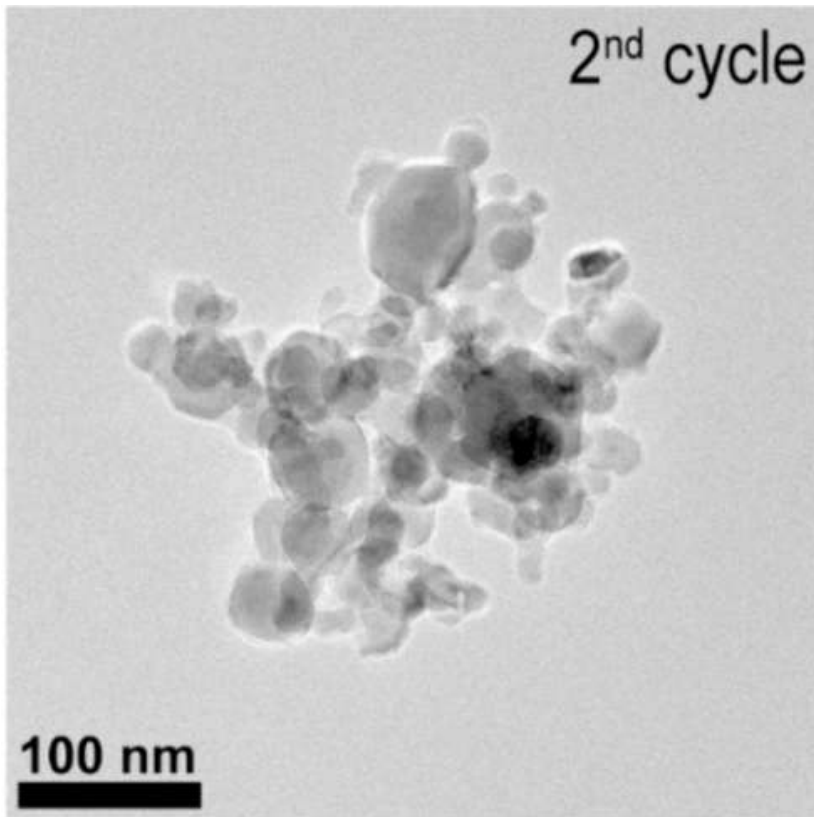


그림 25 TEM을 통해 확인한 두 번째 결빙 이후 자적철석의 이미지

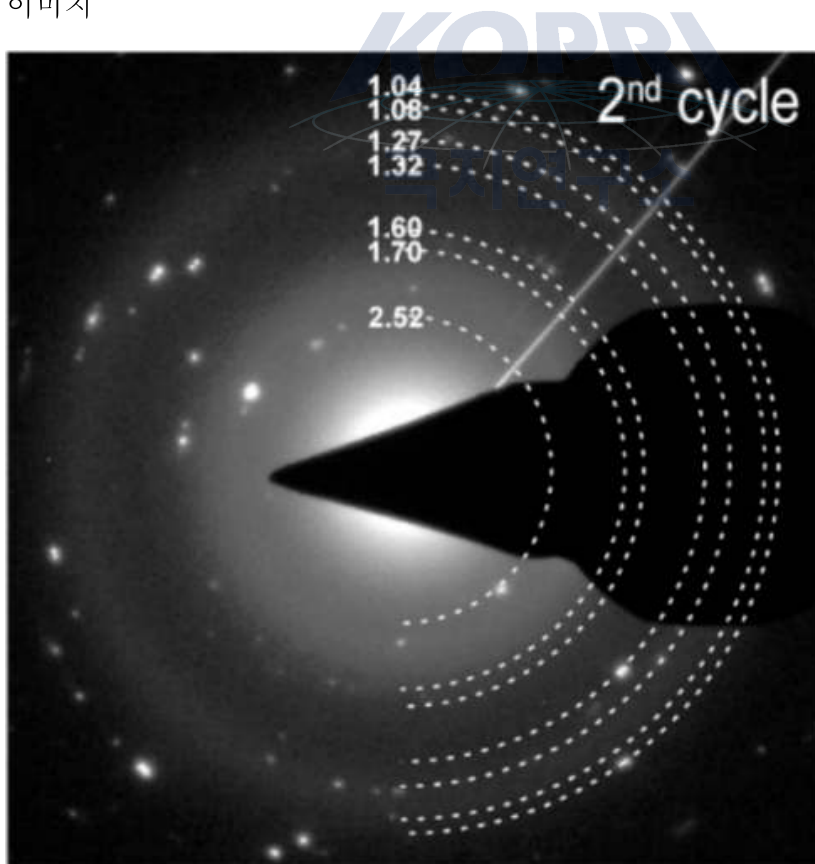


그림 26 SAED pattern을 통해 확인한 두 번째 결빙 이후 자적철석의 격자 구조

● 자적철석의 구조 변화는 XRD를 통해 확인할 수 없었으나 TEM을 통해서도 단일 입자에 대한 구조 변화를 확인할 수 있다. 이에 TEM 이미지 및 SAED pattern을 통해 광물 미생물 반응에 의한 광물의 구조적 변화가 나타남을 확인하고자 하였다 (그림 21). 미생물과 반응하지 않은 시료의 경우 자적철석 특유의 육각형 모양이 잘 나타나는 것을 확인할 수 있고 SAED 패턴 또한 특정 결손 구조 없이 모든 피크가 다 잘 나오는 것을 볼 수 있다 (그림 21, 22). 하지만 미생물과 반응을 마친 이후의 시료에 대해서는 미생물에 의해 표면이 닳은 것과 같은 이미지를 보이며 SAED 패턴 또한 반응하지 않은 시료 대비 많은 결손이 나타나는 것을 확인할 수 있다 (그림 25, 26).

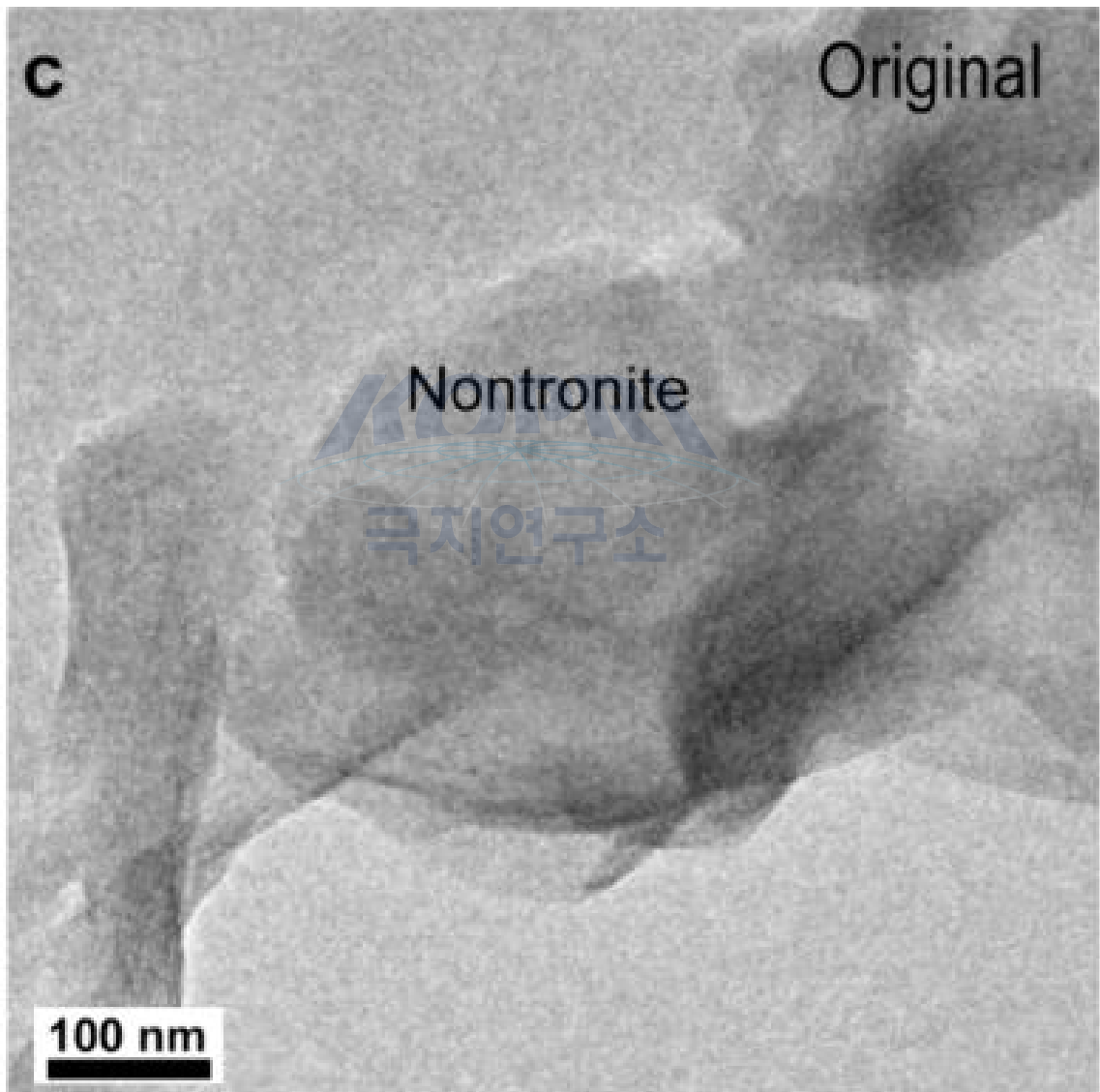


그림 27 TEM을 통해 확인한 반응 전 논트로나이트의 이미지

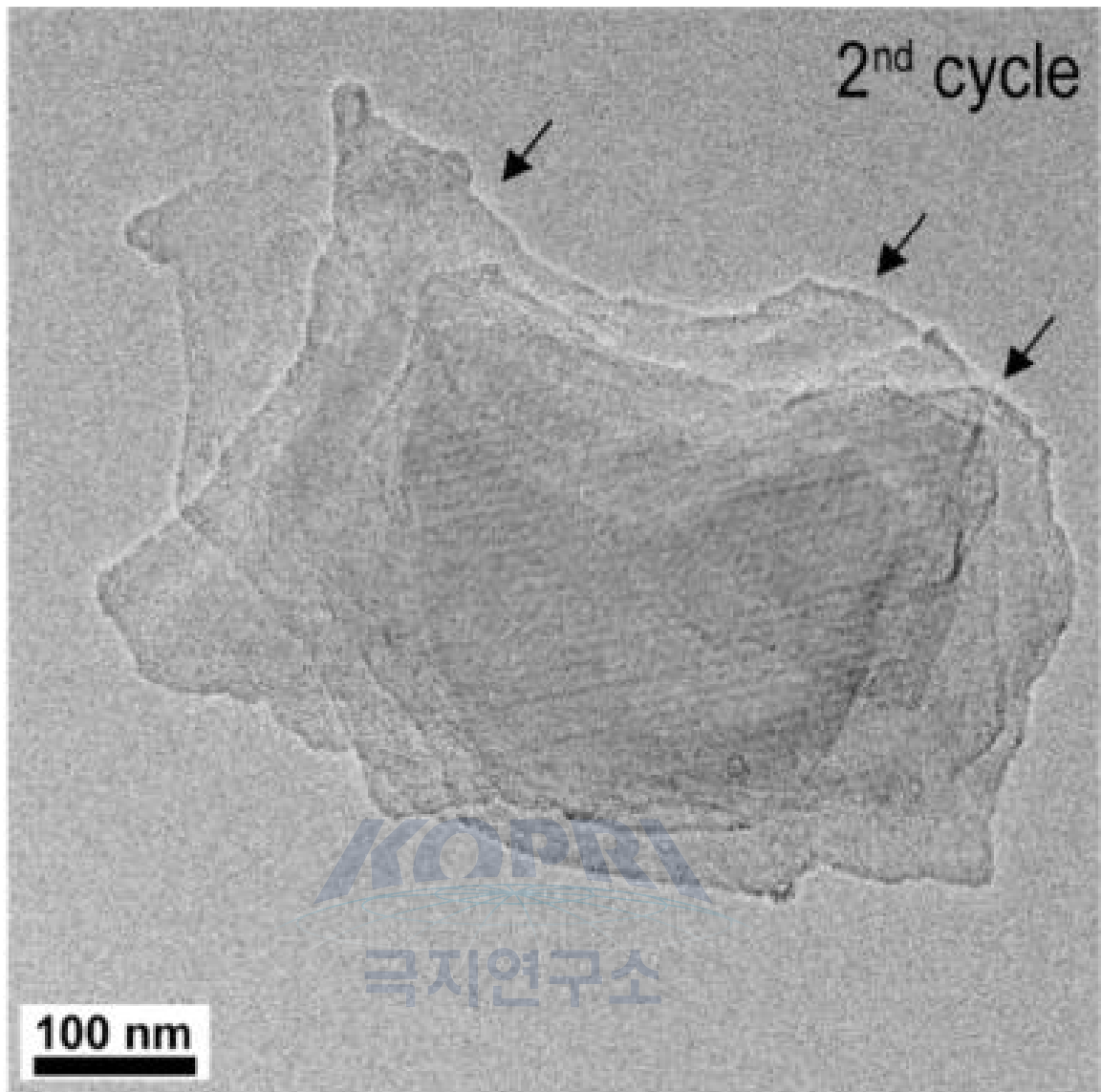


그림 28 TEM을 통해 확인한 두 번째 결빙 이후 논트로나이트의 이미지

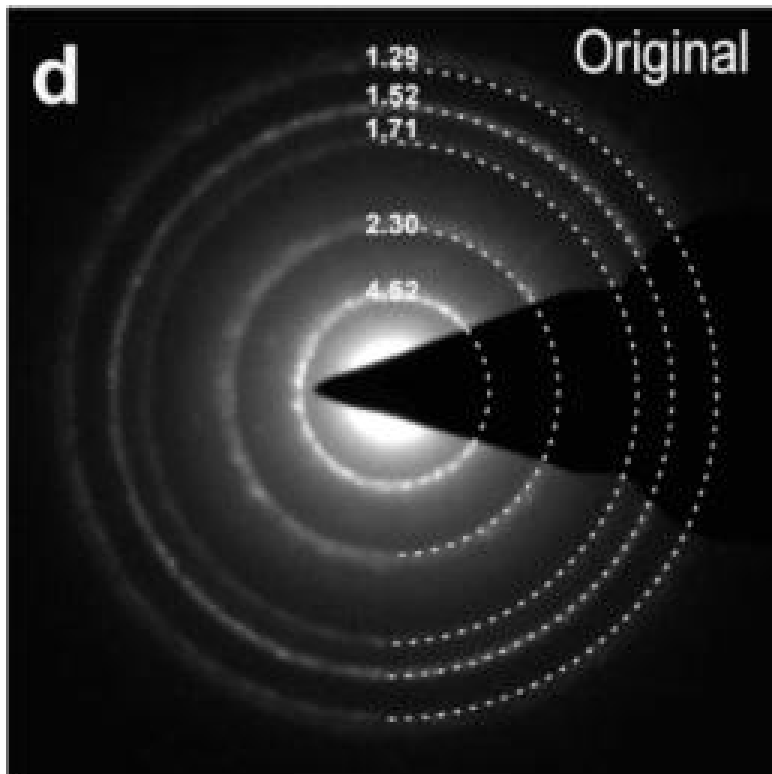


그림 29 SAED pattern을 통해 확인한 반응 전 논트로나이트의 격자 구조

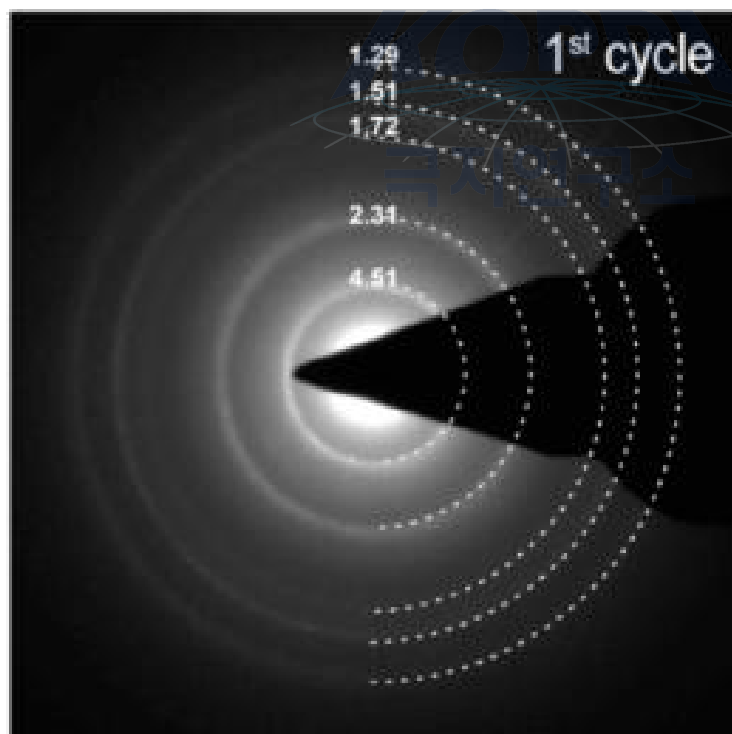


그림 30 SAED pattern을 통해 확인한 첫 번째 결빙 후 논트로나이트의 격자 구조

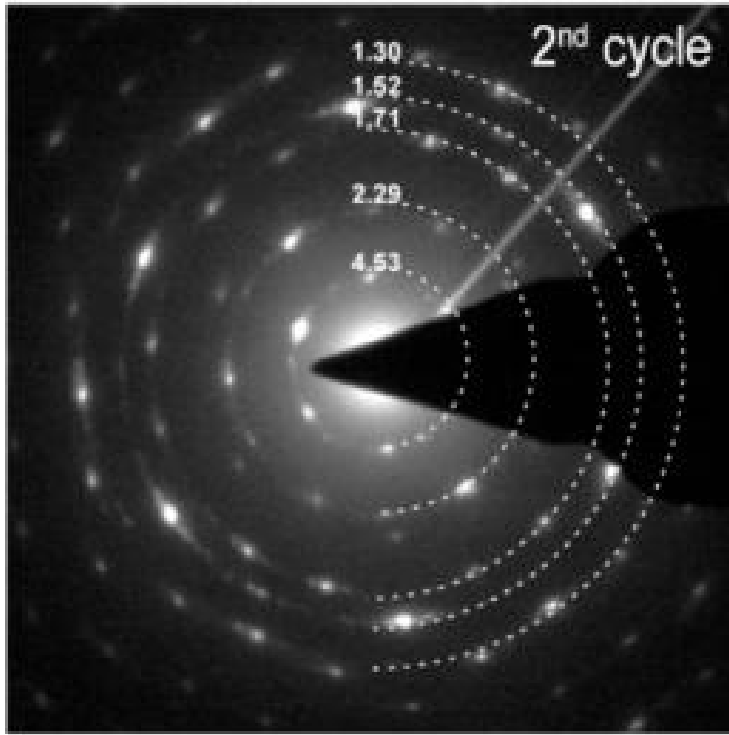


그림 31 SAED pattern을 통해 확인한 두 번째 결빙 후 논트로나이트의 격자 구조

● 논트로나이트의 반응 전 시료는 스�멕타이트의 적층 특징인 turbostratic 구조 및 SAED pattern에서 ring 모양이 잘 나타나는 것을 확인할 수 있으나 (그림 29), 반응 후 시료의 경우 그러한 구조에서 벗어나 뚜렷한 적층 구조의 특징이 나타나는 것을 볼 수 있다. (그림 28, 그림 31) 이러한 TEM 결과는 XRD 에서의 결과와 마찬가지로 미생물에 의한 논트로나이트 내 철의 환원 과정이 광물의 구조를 변화시킨다는 것을 확인할 수 있다. 첫 번째 결빙 보다 (그림 30) 두 번째 결빙 이후의 SAED pattern이 (그림 31)이 더 뚜렷한 적층구조를 나타내는 것은 철 환원율에서 확인한 바 결빙 이후에도 미생물이 계속 살아 있어 해빙한 이후에 광물과의 반응을 통해 철을 환원할 수 있다는 사실을 나타낸다.

(3) 빙기-간빙기의 고퇴적 환경 해석 및 저온 결빙 환경에서의 광물-미생물 반응 해석 (II)

(가) 서남극 대륙붕 지역 퇴적물의 빙기-간빙기에 따른 고환경 변화 분석

● GC05에서 획득한 퇴적물 시료에 대하여 깊이에 따른 점토광물 함량비 분석을 진행하였다. 그 결과 GC05 110cm, 150cm에서 약 30%의 비슷한 스�멕타이트 및 일라이트 함량이 나타나는 것을 확인할 수 있으나 300cm에서 급격하게 높아지는 스�멕타이트 및 낮아지는 일라이트의 양상을 확인할 수 있다. 이는 곧 빙하 하부 환경에 스�멕타이트를 다량 공급할 수 있는 다른 기원의 가능성을 제시한다.

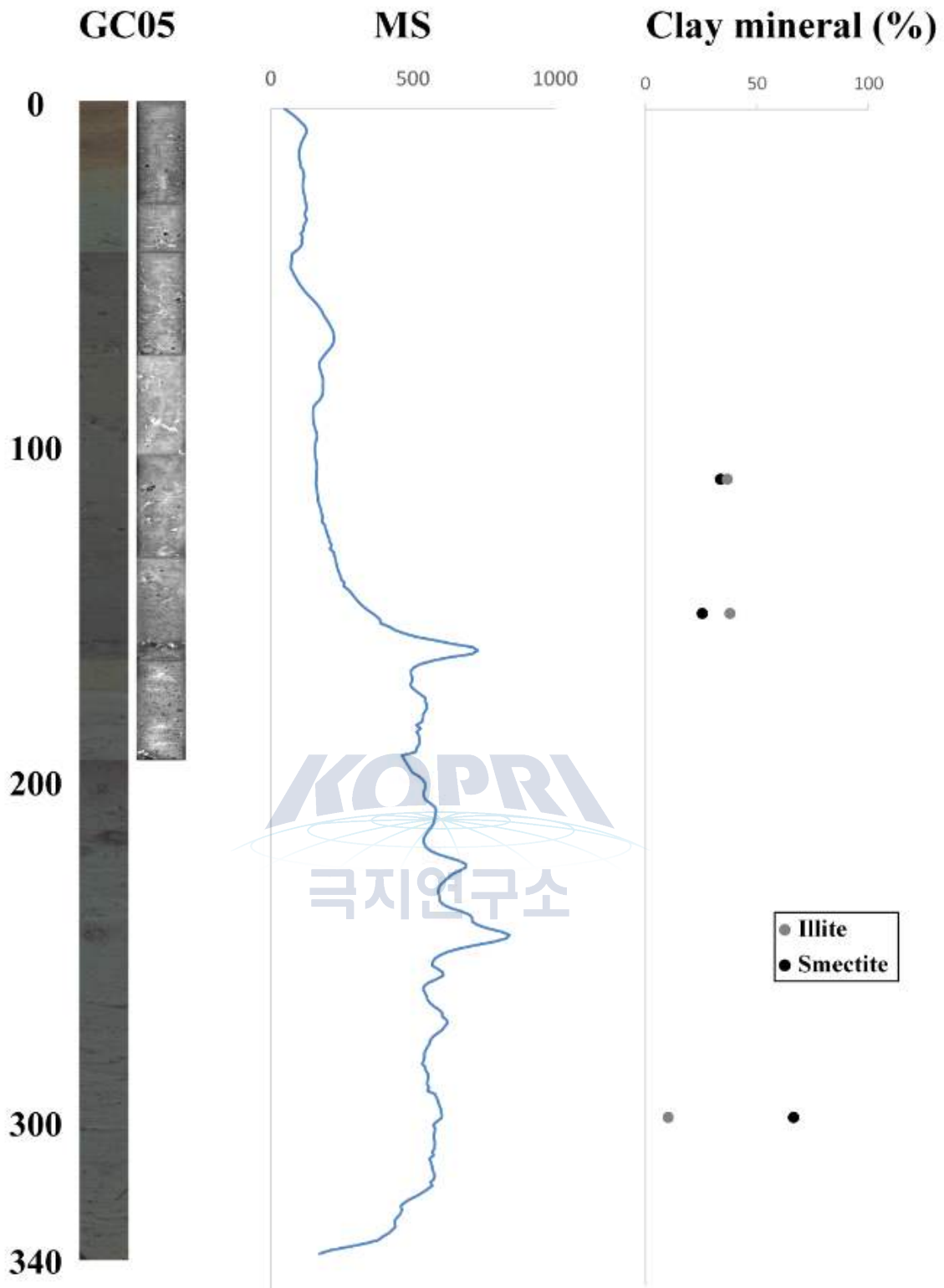


그림 32 GC05 코어 깊이에 따른 점토광물 함량비 변화

● GC09에서 또한 획득한 퇴적물 시료에 대하여 점토광물 함량비 분석을 진행하였는데 스멕타이트는 전부 20% 가량 존재하며 일라이트는 30~40% 정도로 나타나 전체적인 광물 함량비 변화에 있어서 큰 차이가 나타나지는 않는 것으로 보인다.

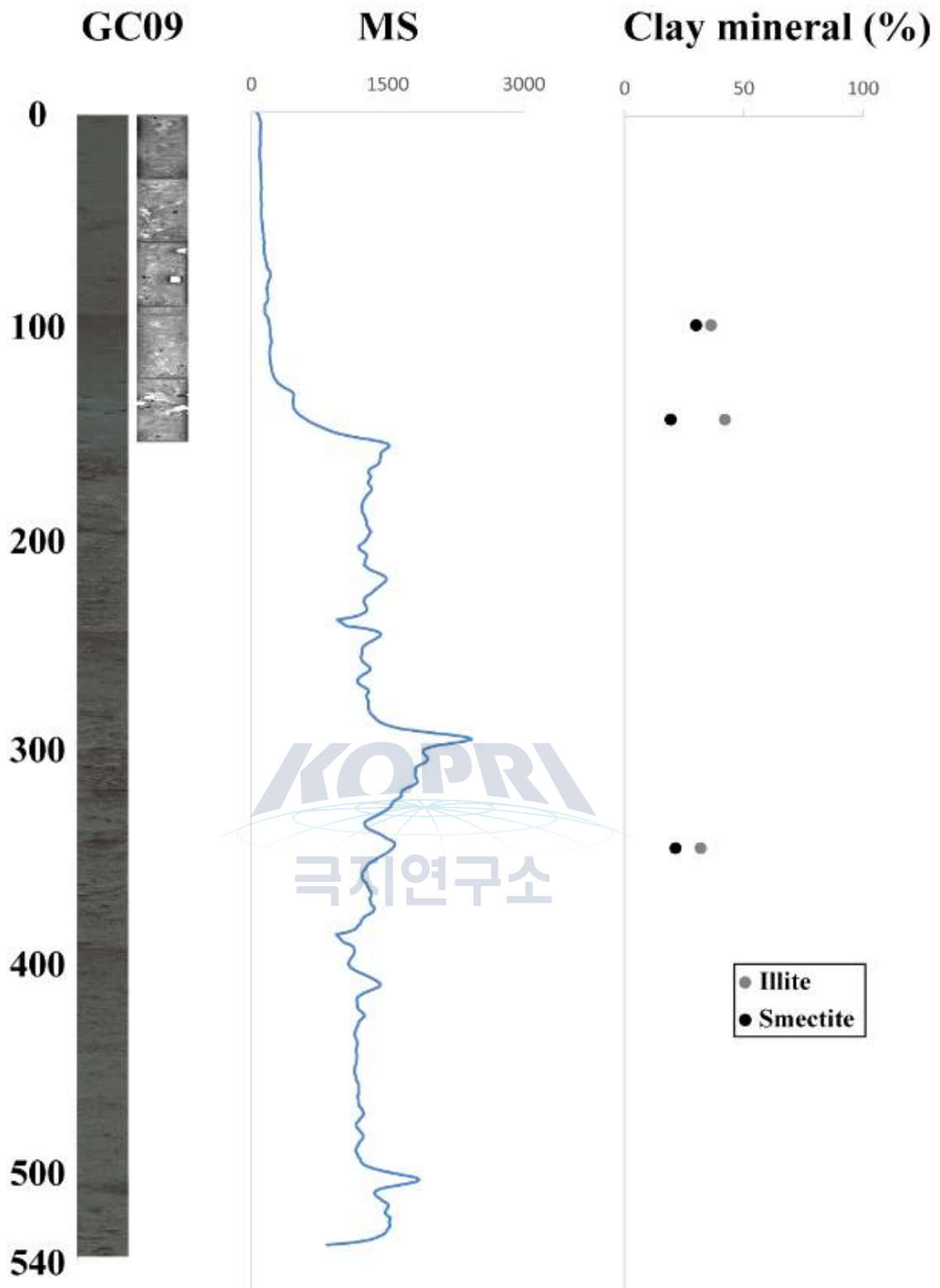


그림 33 GC09 코어 깊이에 따른 점토광물 함량비 변화

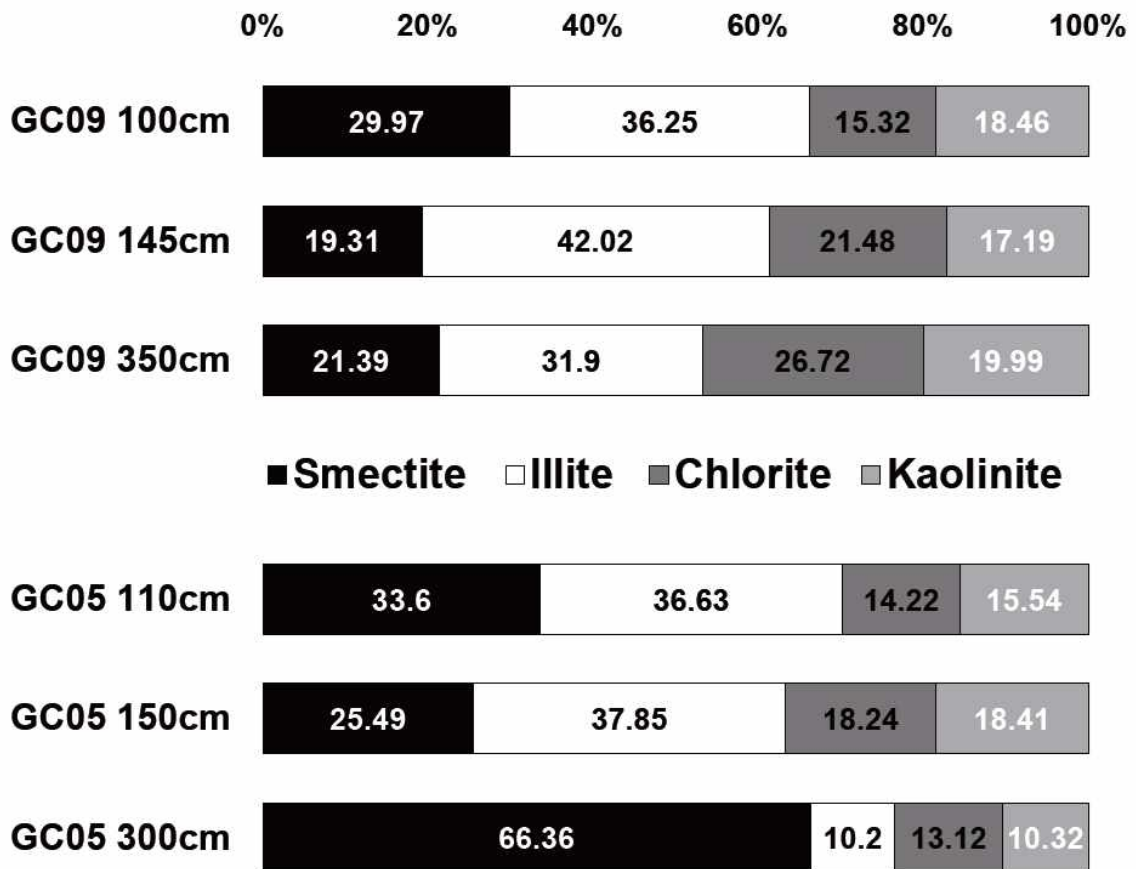


그림 34 Gc09, GC05 코어 깊이에 따른 점토광물 함량비 변화

(나) 서남극 전반의 해저퇴적물 내 점토광물 특성 군집에 따른 기원지 분석 및 퇴적 환경 해석

● 앞선 일라이트 화학지수 분석 결과 Dotson Trough와 Getz A Trough간 일라이트의 화학성분 차이가 나타날 수 있기 때문에 TEM-EDS를 통해 각 Trough 내 일라이트의 화학성분 분석을 진행하였다 (그림 35, 36, 37). 그 결과 두 지역의 일라이트 화학성분에는 큰 차이가 나타나지 않음을 확인 할 수 있다. 다만 S01 시료 (Getz A Trough)에서 BC12 시료 (Dotson Trough) 보다 더 다양한 범위의 일라이트 화학성분이 나타남은 확인할 수 있다. 그러나 그 차이가 너무 작기 때문에 XRD 결과에서 나타난 것과 같이 화학성분상 큰 차이는 없다고 할 수 있다.

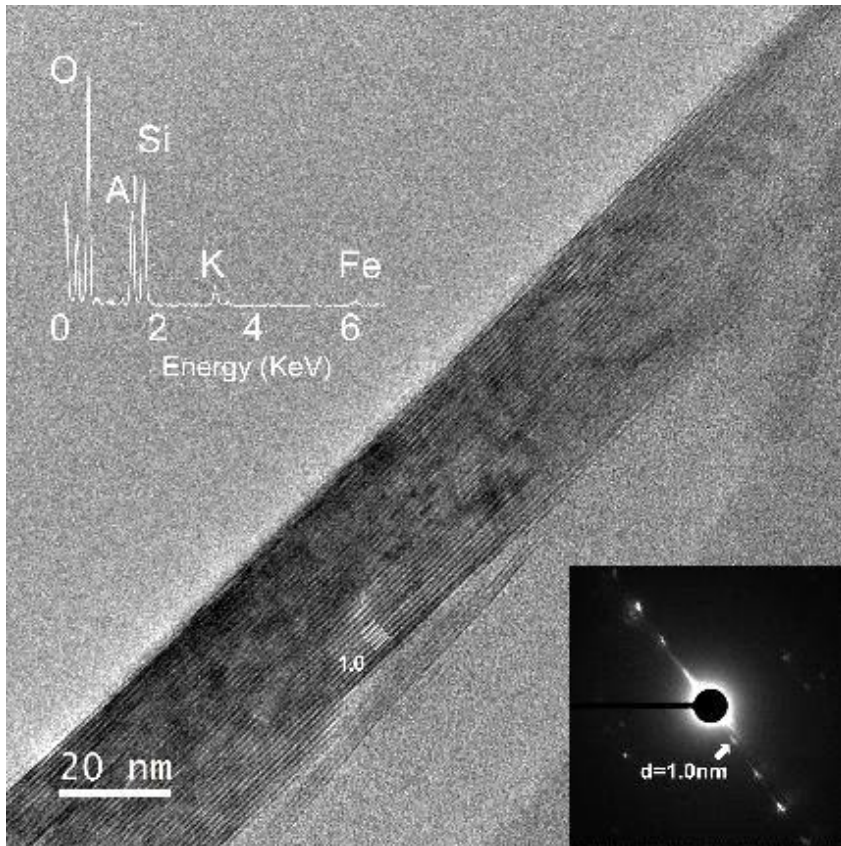


그림 35. BC12 코어 일라이트 이미지 및 SAED 패턴

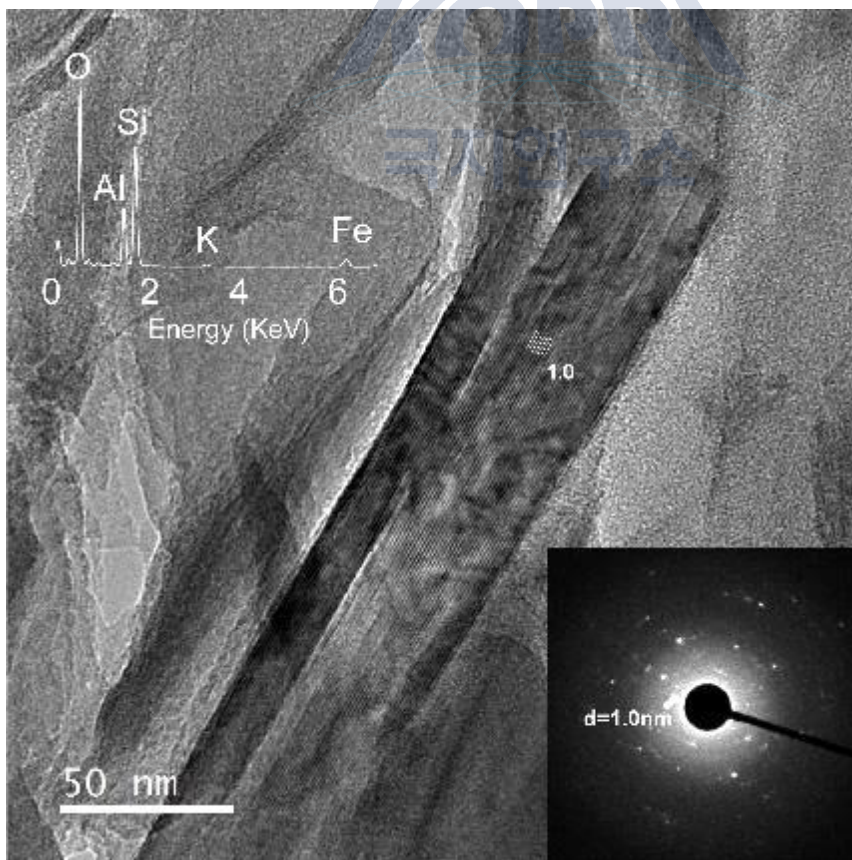


그림 36. S01 코어 일라이트 이미지 및 SAED 패턴

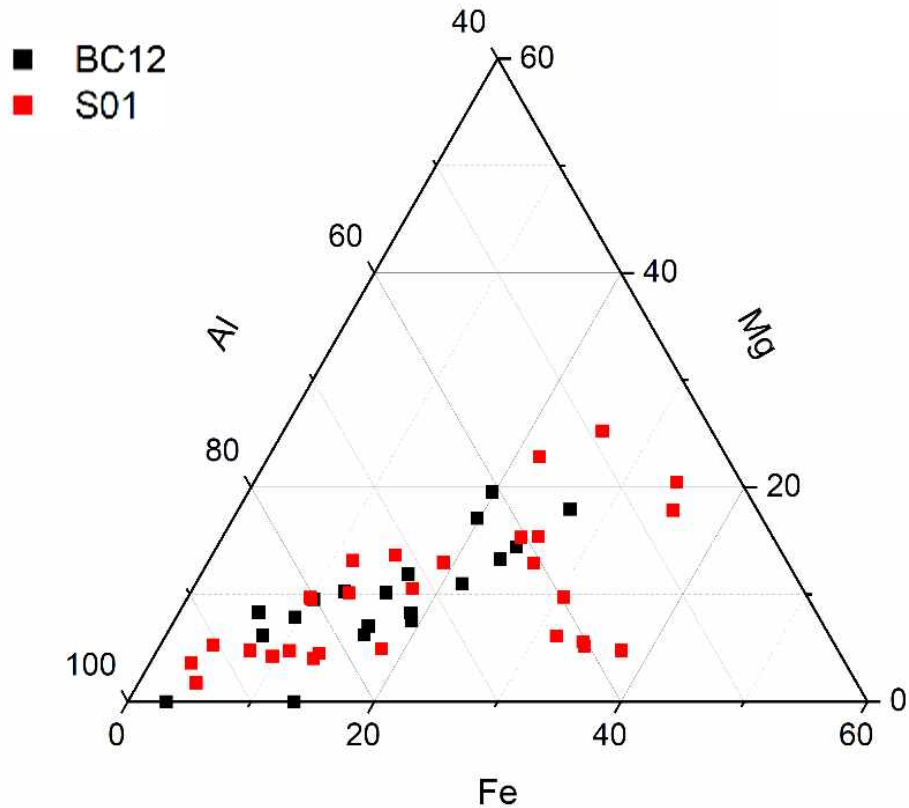


그림 37. BC12, S01 코어 내 일라이트의 화학 성분에 대한 삼각도표

● Dotson trough와 Getz A trough 퇴적물 내 smectite의 화학분석 결과 Dotson trough에는 Al-rich한 성분이 지배적이거나 Getz A trough는 Al-rich에 더해 Al-Fe-Mg moderate한 화학성분이 존재함을 확인하였다. 점토광물 함량비 분석 결과 및 통계분석 결과에서 나타난 것과 같이 스멕타이트의 함량비 변동이 가장 컸으며 그룹을 결정하는데 주요한 요소인 것과 비슷하게 TEM-EDS 에서도 스멕타이트의 화학성분의 차이가 Trough 별로 나타남을 확인하였다. 즉, Dotson trough와 Getz A trough는 서로 다른 점토광물 함량비와 smectite의 화학성분으로 두 trough의 퇴적물 기원이 서로 다를 가능성을 시사한다.

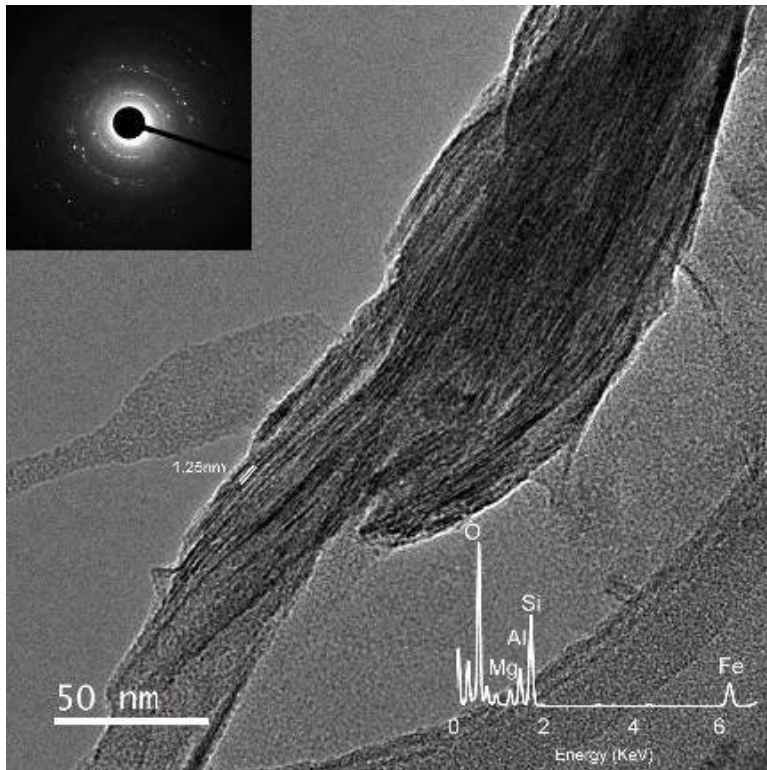


그림 38. BC12 코어 스펙타이트 이미지 및 SAED 패턴

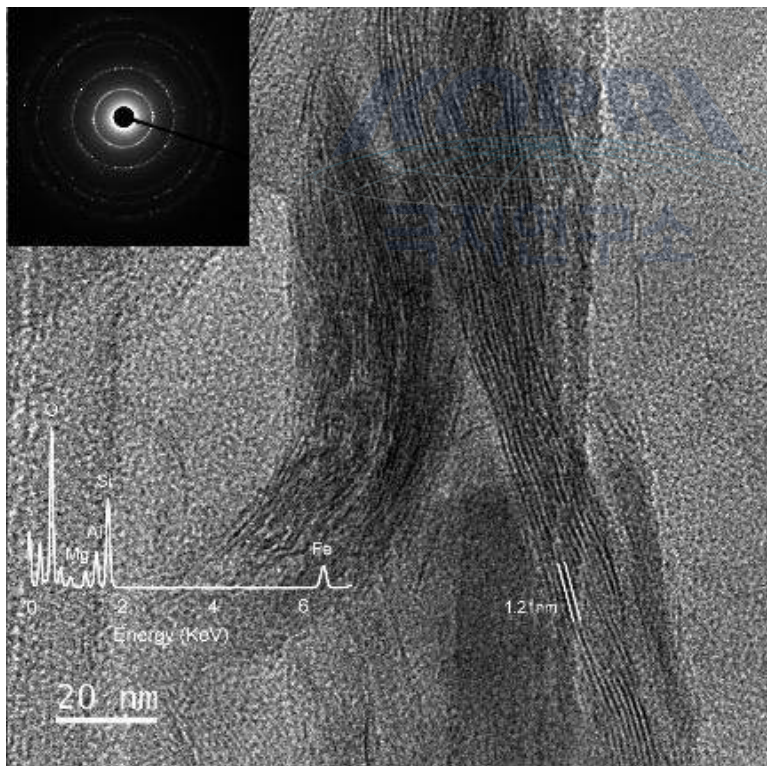


그림 39. S01 코어 스펙타이트 이미지 및 SAED 패턴

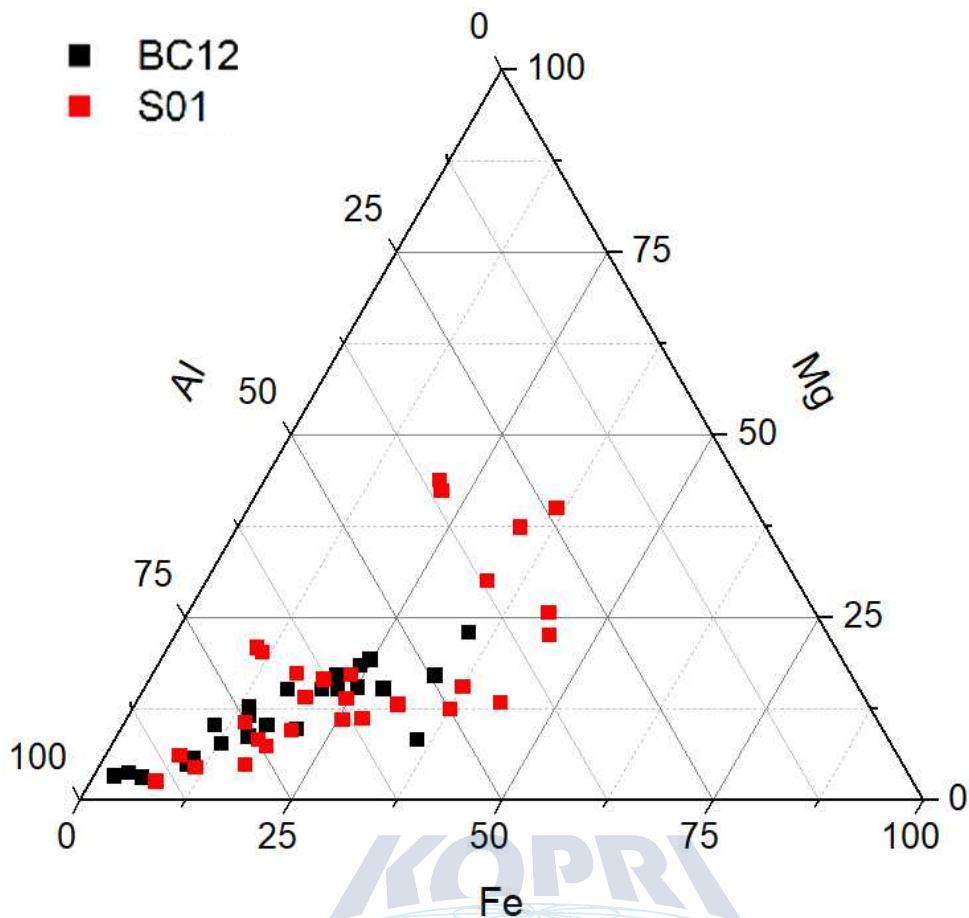


그림 40. BC12, S01 코어 내 스멕타이트의 화학 성분에 대한 삼각도표

● GC05, GC09 내 스멕타이트의 화학분석 결과 또한 분석하였다. GC05의 경우 110cm 와 300cm 내 존재하는 스멕타이트의 화학성분을 비교 분석 하였는데, 110cm 에 존재하는 스멕타이트도 Al-rich 스멕타이트 쪽의 화학성분을 나타내고 있지만 300cm에 존재하는 스멕타이트는 그보다 더욱 제한된 화학범위 내에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. GC09의 경우 350cm 와 100cm간 큰 차이가 나타나지 않았다.

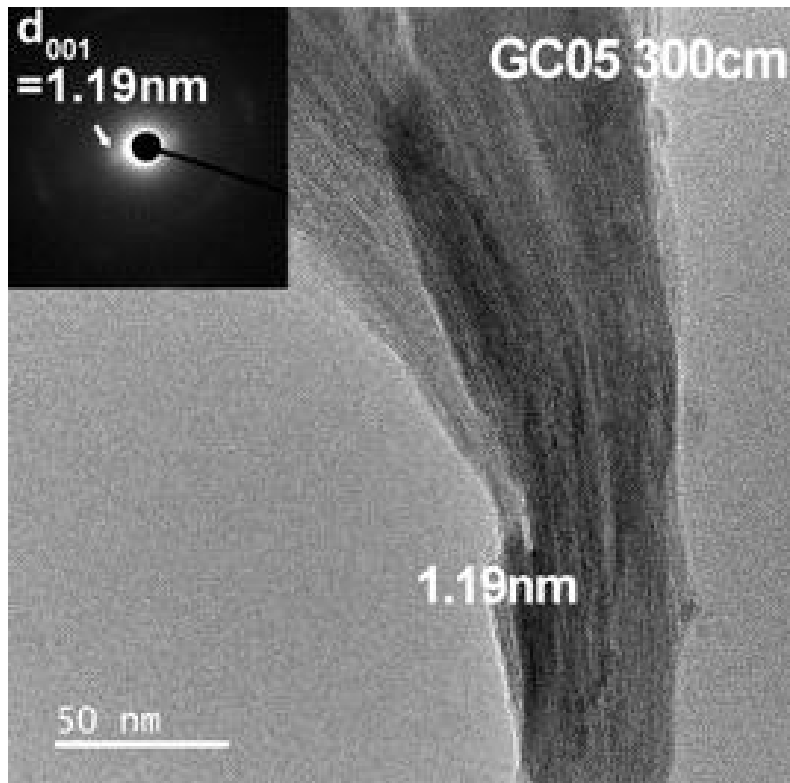


그림 41. GC05 300cm 스멕타이트 이미지 및 SAED 패턴

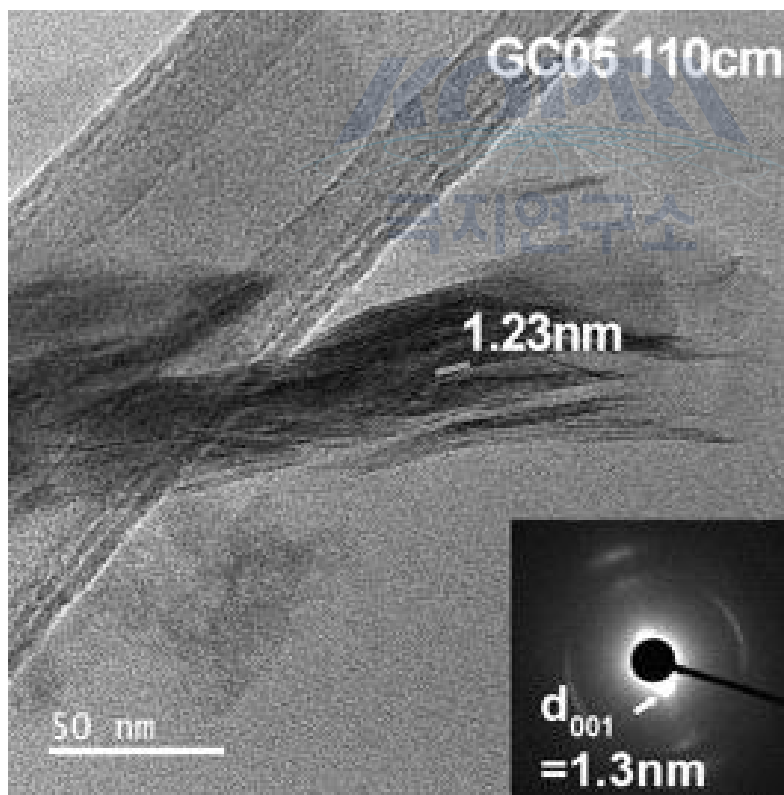


그림 42. GC05 110cm 스멕타이트 이미지 및 SAED 패턴

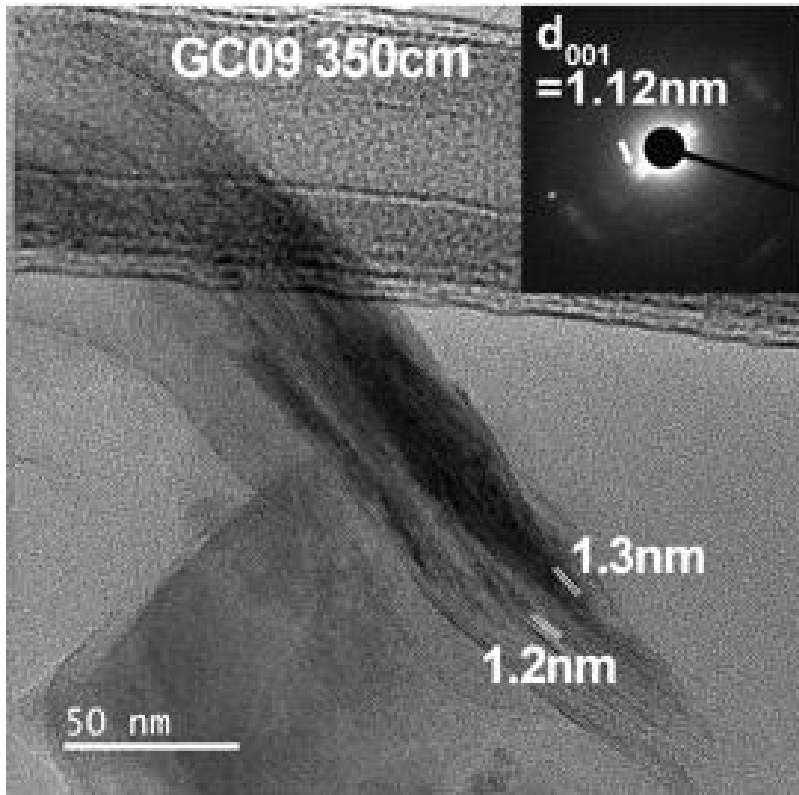


그림 43. GC09 350cm 스멕타이트 이미지 및 SAED 패턴

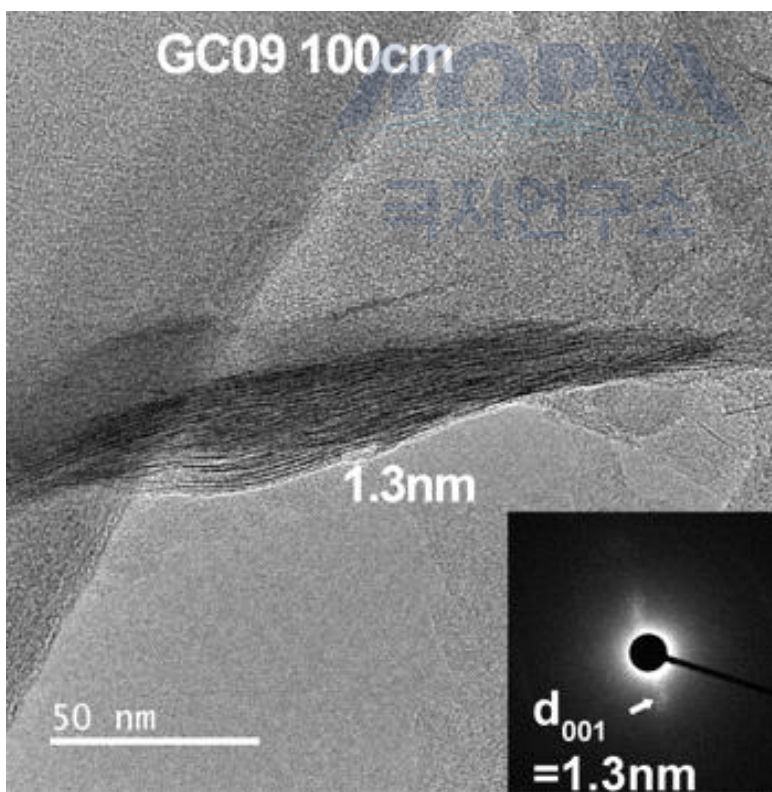


그림 44. GC09 100cm 스멕타이트 이미지 및 SAED 패턴

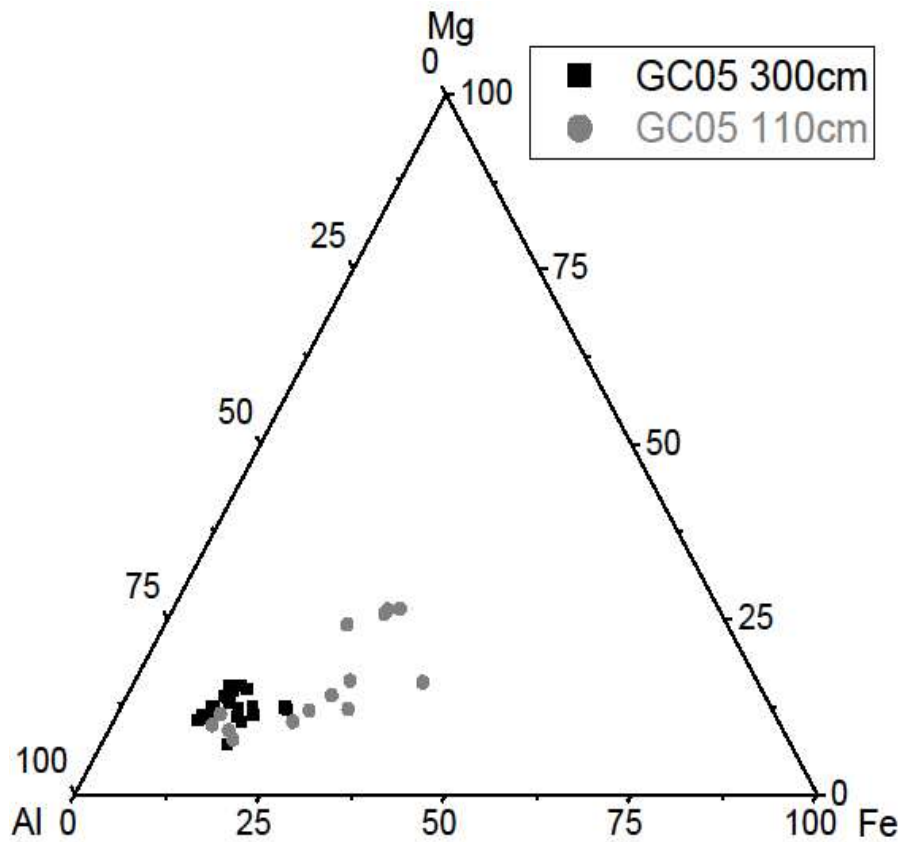


그림 45. GC05 300cm, 110cm 내 스멕타이트의 화학 성분에 대한 삼각도표

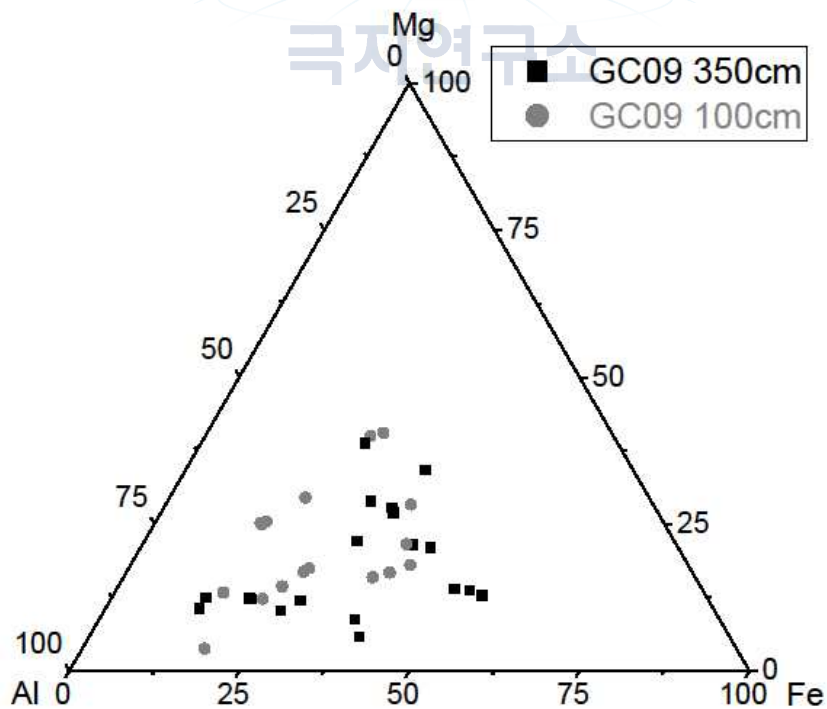


그림 46. GC09 350cm, 100cm 내 스멕타이트의 화학 성분에 대한 삼각도표

(다) 저온 결빙 환경에서 미생물과의 반응에 의한 철 함유 광물에서의 철의 순환에 대한 종합적인 해석

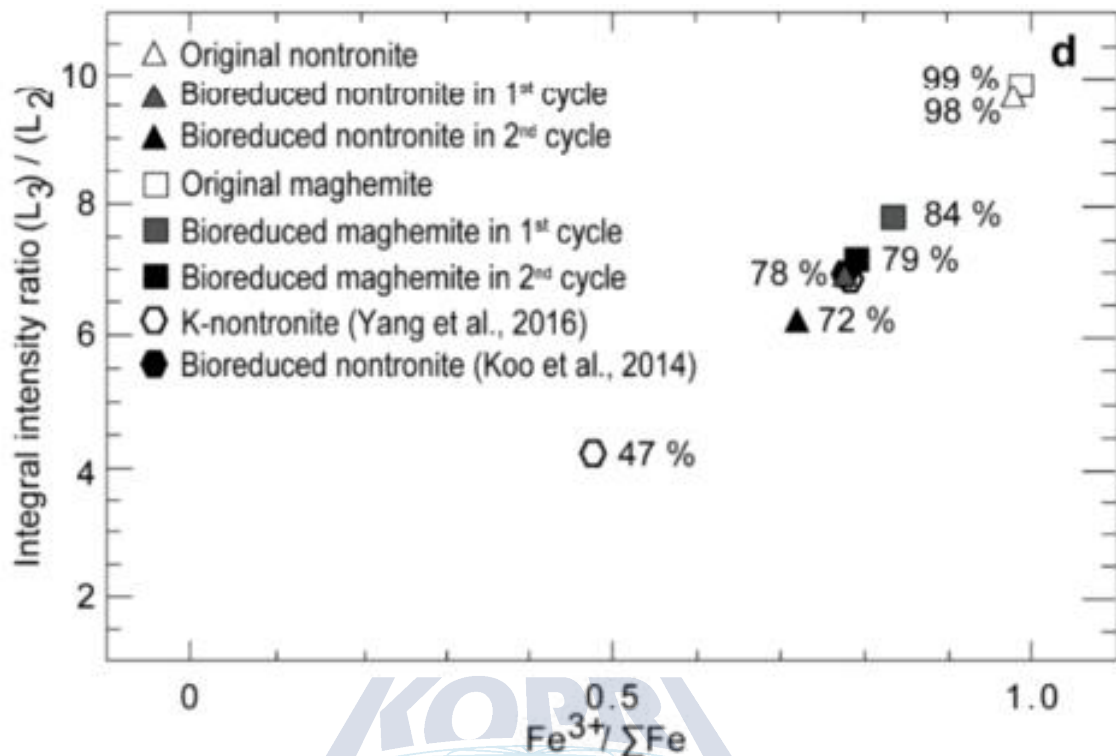


그림 47. TEM-EELS를 활용한 광물 내 철의 산화수 측정 결과

● Batch 실험을 진행한 자적철석과 논트로나이트에 대하여 TEM-EELS를 활용한 방법으로 광물 내 철의 산화수를 측정한 결과 두 번의 결빙 주기를 거친 자적철석의 경우 약 21%, 논트로나이트의 경우 약 28% 가량의 철이 환원됨을 확인하였다.

● 앞선 결과들을 종합할 때, 철 함유광물과 미생물이 접촉된 시료에 대해서 한 달 동안 결빙 구간을 두 번 거친 조건에서도 광물의 환원 및 변형이 나타난 것을 통해 남극과 같은 극한 환경에서도 미생물과 광물간의 반응이 가능함을 시사한다.

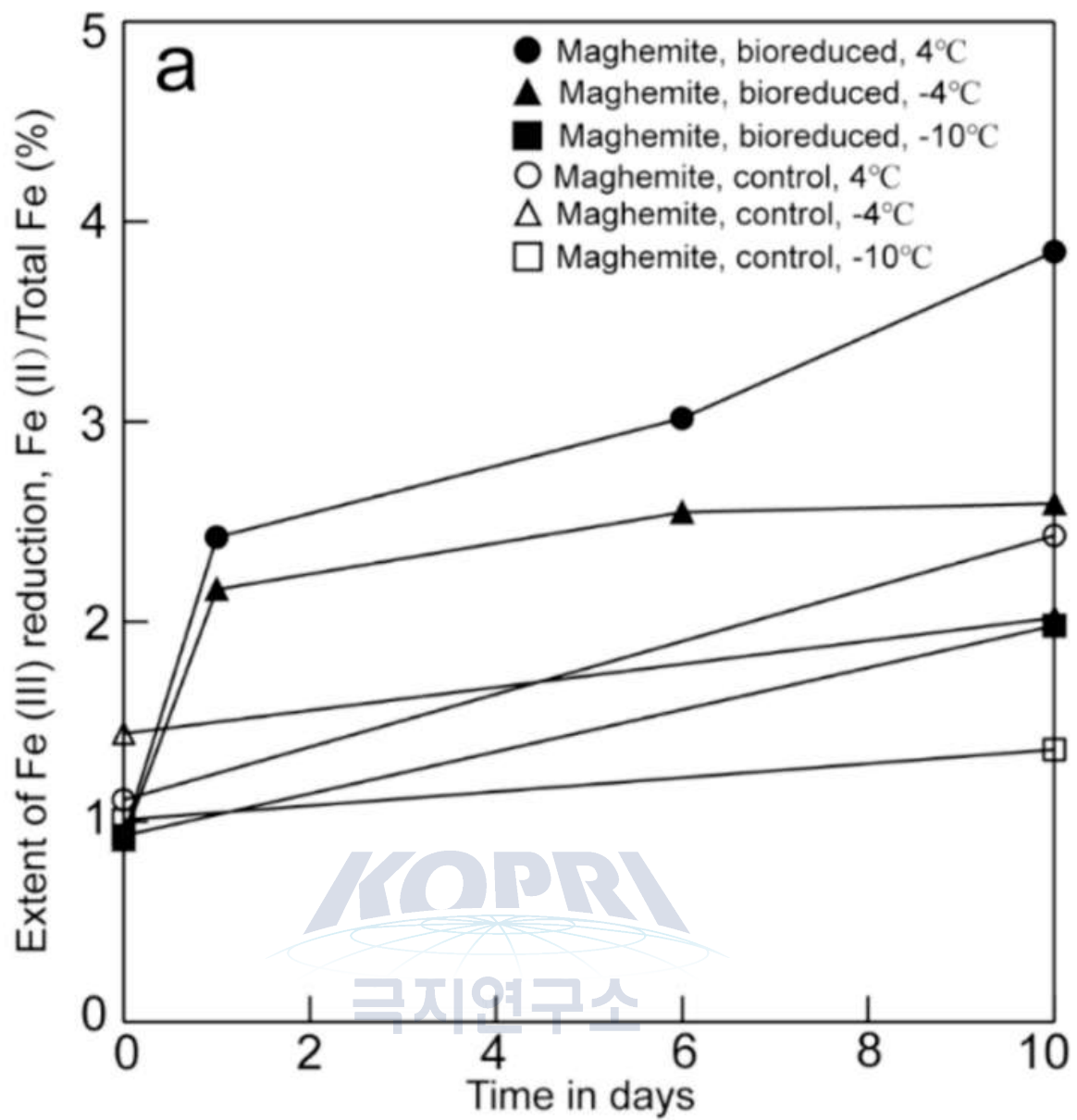


그림 48. 고정된 온도에서 자적철석을 사용하여 진행한 미생물-광물 반응 실험

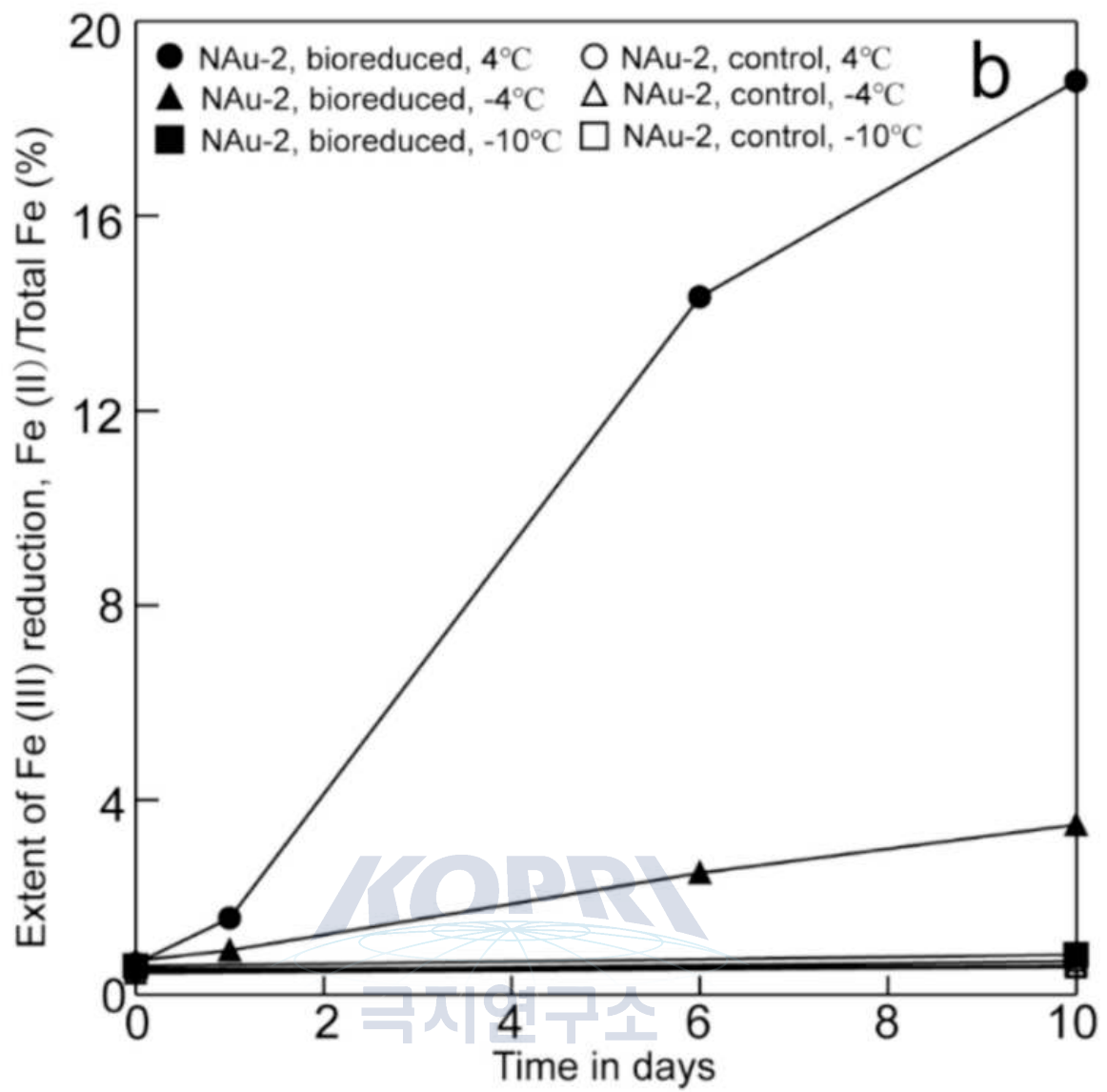


그림 49. 고정된 온도에서 논트로나이트를 사용하여 진행한 미생물-광물 반응 실험

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

● 학술대회 발표 성과

발표일	논문명/특허명/기타	저자	학술대회명	국내외구분
230622	서남극도슨-갯츠트러프퇴적물 내 점토광물 분석 결과에 대한 통계적 접근을 통한 퇴적물 공급지 및 퇴적환경 복원	강인성, 박영규, 유규철, 이민경, 김진욱	한국광물학회	국내
231108	점토광물 특성의 통계적 접근을 활용한 서남극 아문젠 해 퇴적물 공급지 연구	강인성, 박영규, 유규철, 이민경, 김진욱	춘계 지질학회	국내

230523	Statistical method to understand the sediment provenance in the Amundsen Sea, West Antarctica	Insung Kang, Young Kyu Park, Kyu-Cheul Yoo, Min kyung Lee, Jinwook Kim	Clay Mineral Society	국외
230622	Dotson-Getz 해저협곡에서 점토광물 조성 변화를 통한 퇴적물 기원지 추적	강인성, 박영규, 유규철, 이민경, 김진욱	한국광물학회	국내
251217	Tracing Sediment Provenance with Clay Minerals in the Dotson-Getz Trough, Amundsen Sea, West Antarctica	Insung Kang, Young Kyu Park, Kyu-Cheul Yoo, Min kyung Lee, Jinwook Kim	AGU25	국외

● 논문 발표 성과

순서	논문명	학술지명	게재일(출판일)	저자
1	Microbially-mediated reductive dissolution of Fe-bearing minerals during freeze-thaw cycles	Geochimica et Cosmochimica Acta	2024.05.17	Jinwook Kim, Young Kyu Park, Tae-hee Koo, Jaewoo Jung, Insung Kang, Kitae Kim, Hanbeom Park, Kyu-Cheul Yoo, Brad E. Rosenheim, Tim M. Conway

나. 연구개발목표 및 달성도

단계	성과목표	세부목표	달성 주요내용	달성도 (%)
2 단계	서남극 대륙붕 지역 해저퇴적물 분석 및 저온에서 광물-미생물 반응 분석	1-1 극지연구소와 협력하여 서남극 대륙붕 지역 퇴적물 채취	- 서남극 빙붕 후퇴 후의 대륙 근처 지역의 박스 코어 및 피스톤 코어에 대하여 위치별, 깊이 별로 팔콘 튜브에 약 10-15 ml 퇴적물 시료를 샘플링 실시	100
		1-2 서남극 전반의 해저퇴적물 내 점토광물의 광물학적 특성 분석	- 서남극의 대륙붕 근처에서 채취한 피스톤 코어에 대해 깊이 별 색깔이나 퇴적 구조를 통한 퇴적상 분석 - 채취한 해저 퇴적물에 대한 XRD를 이용하여 bulk mineralogy 분석 및 2 um 이하로 입도 분리한 시료의 airdry와 ethylene glycol 처리를 통한 fine size mineral의 광물학적 분석	100
		1-3 저온 결빙 환경에서 철 함유 광물과 미생물과의 반응에 대한 실험 및 분석	-저온 결빙 환경에서 철 함유 광물 (maghemite, NAu-2 nontronite)과 미생물간의 유기/무기 반응 확인을 위한 batch 실험 진행	100
2 단계	빙기-간빙기의 고퇴적 환경 해석 및 저온 결빙 환경에서의 광물-미생물 반응 해석 (I)	2-1 서남극 대륙붕 지역 점토광물의 물리화학적 특성 분석	- XRD, TEM을 통한 점토광물의 상대적 함량비 분석 및 화학성분 분석	100
		2-2 서남극 전반의 해저퇴적물 내 점토광물의 특성에 따른 통계적인 군집분석	- XRD 회절패턴을 통해 산출한 점토광물의 상대적 함량비, 일라이트 integral breadth, 일라이트 화학지수를 통한 통계 분석	100
		2-3 저온 결빙 환경에서 미생물의 활동에 의한 광물의 구조적, 화학적 분석	- Batch 실험 결과에 대하여 용출된 철의 양 분석 - TEM 분석을 통해 각 광물의 구조적 변이 확인	100

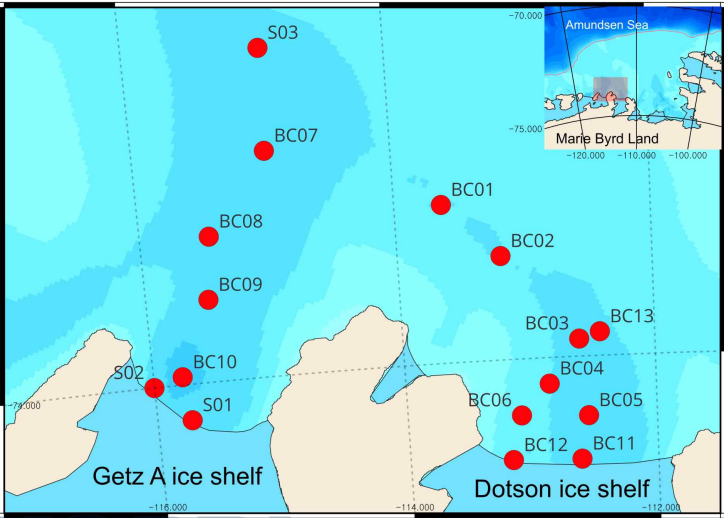
2 단 계	빙기-간빙 기의 고퇴적 환경 해석 및 저온 결빙 환경에서의 광물-미생 물 반응 해석 (Ⅱ)	3-1	서남극 대륙붕 지역 퇴적물의 빙기-간빙기에 따른 고환경 변화 분석	- 퇴적상에 따라 나타나는 점토광물의 종합적인 물리화학적 특성 분석 - 빙기-간빙기에 따른 서남극 빙하의 움직임 및 주변환경 변화에 따른 퇴적물 기원지 변화 해석	100
		3-2	서남극 전반의 해저퇴적물 내 점토광물 특성 군집에 따른 기원지 분석 및 퇴적환경 해석	- TEM-EDS를 활용하여 점토광물의 화학성분 분석 - 2차년도까지의 결과를 바탕으로 구분한 Dotson-Getz trough의 두 군집에 대하여 TEM-EDS를 통한 점토광물의 화학분석 결과를 대조하여 퇴적물 기원지 및 퇴적환경 해석	100
		3-3	저온 결빙 환경에서 미생물과의 반응에 의한 철 함유 광물에서의 철의 순환에 대한 종합적인 해석	- TEM-EELS를 활용하여 미생물과 반응한 시료 내 광물에 대한 철의 산화수 측정 - 결빙-해빙 주기에 따른 철 함유 광물과 미생물의 반응에 대한 종합적인 해석	100

극지연구소

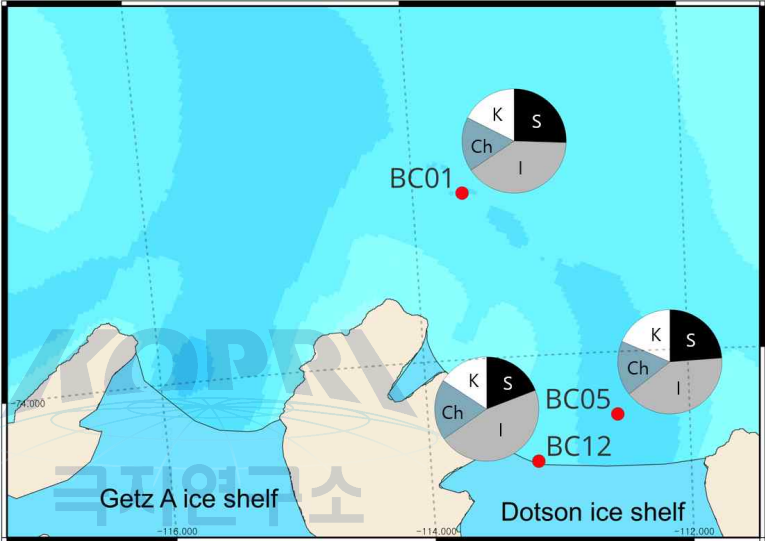
다. 연구수행 세부 내용 및 결과(우수성)

□ 성과목표 2-1 (2단계 1차년도):

○ 세부목표 2-1-1:

연구 내용	연구 결과
극지연구소와 협력하여 서남극 대륙붕 지역 퇴적물 채취	빙붕의 급격한 후퇴가 보고된 서남극 아문젠 해 대륙붕에서 Dotson-Getz trough를 따라 0~10cm 구간의 표층 퇴적물을 10~15ml 가량 채취함.  그림 50 획득한 Dotson-Getz trough의 표층 퇴적물 위치 Dotson ice shelf front 지역에서 7m 가량의 피스톤코어 내 퇴적물을 약 20cm 간격으로 획득함.

○ 세부목표 2-1-2:

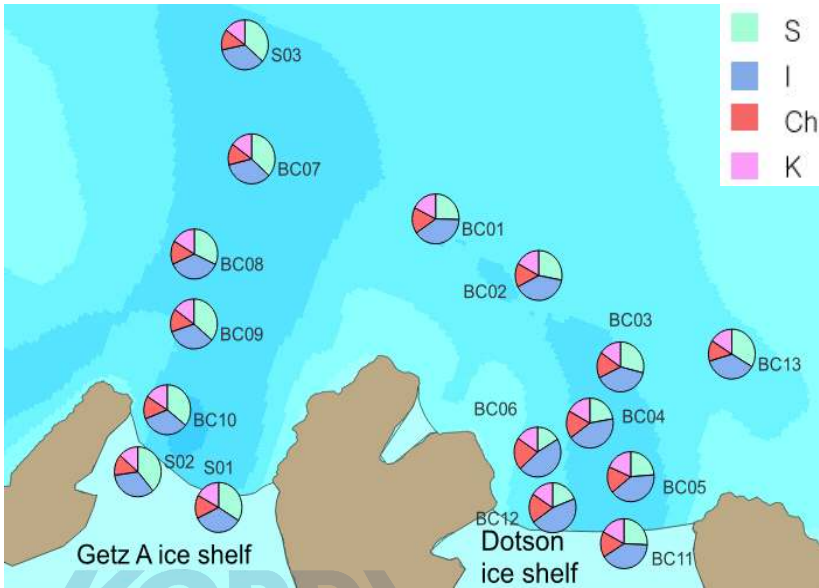
연 구 내 용	연 구 결 과
서남극 전반의 해저퇴적물 내 점토광물의 광물학적 특성 분석	Dotson 빙붕 앞에서 획득한 표층 퇴적물에 대하여 bulk mineralogy와 2um 이하의 clay mineralogy를 XRD 회절 패턴 분석을 통해 동정하고 clay mineral에 대한 반정량분석을 진행함.
	Bulk mineralogy에서 동정된 광물들은 남극 퇴적물에서 나타나는 광물상에서 크게 벗어나지 않음을 확인함.
	2um 이하로 입도 분리한 시료에서의 반정량 분석의 결과 남극과 같은 환경에서 많이 나타나는 일라이트와 클로라이트가 많이 나타났고 아문젠 해 대륙붕의 특징적인 카올리나이트가 상대적으로 많음을 확인함.
	 그림 51 Dotson 빙붕 앞 퇴적물에 대한 상대적인 점토광물 함량비 (S: smectite, I: illite, Ch: chlorite, K: kaolinite) 남극에서 비교적 많이 생성될 수 있는 점토광물인 일라이트의 integral breadth 측정과 화학지수 측정을 통해 결정도가 좋고 Fe-Mg가 비교적 많은 일라이트가 이 지역에 구성되어 있음을 확인함.

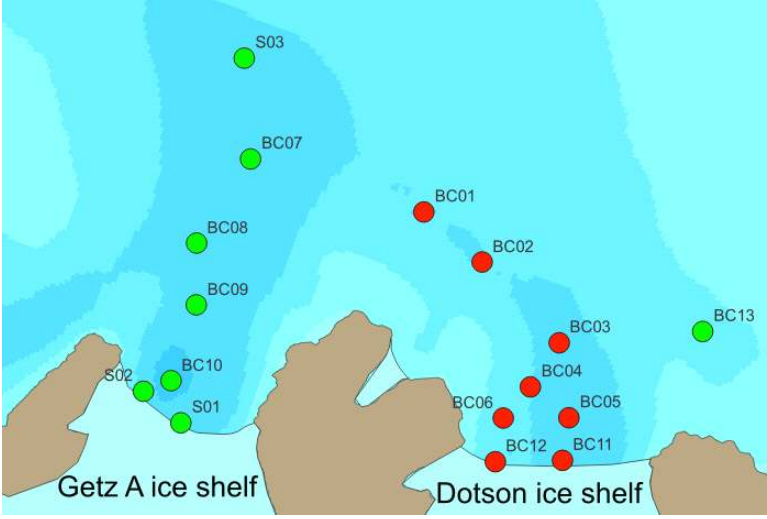
○ 세부목표 2-1-3:

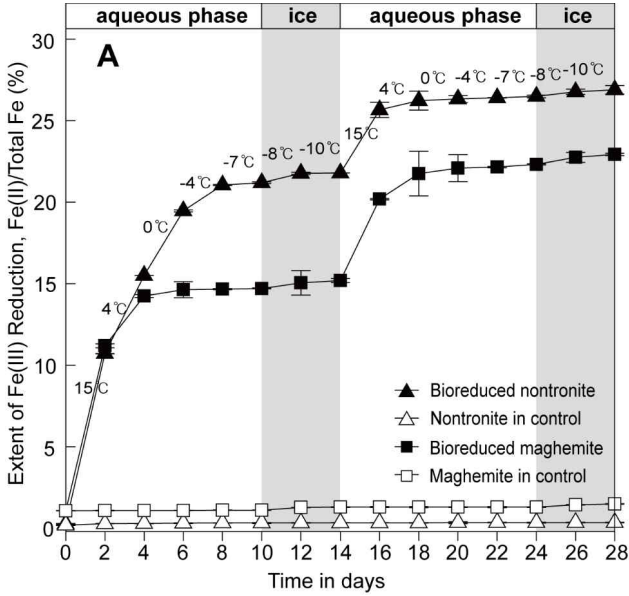
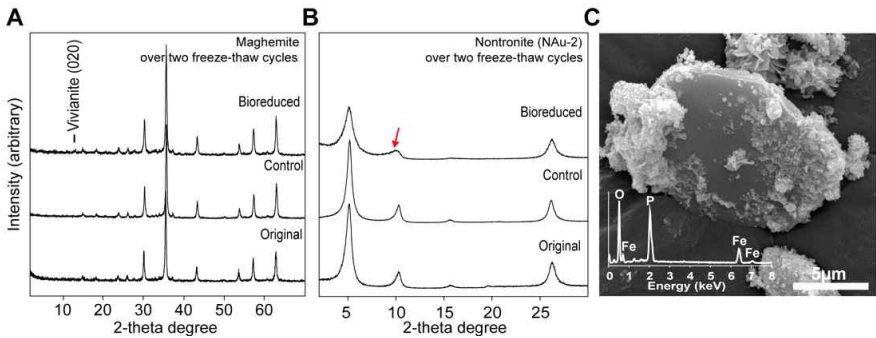
연 구 내 용	연 구 결 과
저온 결빙 환경에서 철 함유 광물과 미생물과의 반응에 대한 실험 및 분석	철산화물인 maghemite와 철 함유 점토광물인 nontronite (NAu-2) 시료에 대하여 철 환원 미생물과 각 광물의 반응에 대한 batch 실험을 진행함.  그림 52 Batch 실험 세팅. E1, E2, E3: 미생물이 접종된 시료, CN: 미생물이 접종되지 않은 시료, HK: 열로 죽인 미생물이 접종된 시료



- 성과목표 2-2 (2단계 2차년도):
- 세부목표 2-2-1:

연구 내용	연구 결과
서남극 대륙붕 지역 점토광물의 물리화학적 특성 분석	서남극 아문젠 해 대륙붕 Dotson-Getz trough를 따라 총 16개의 표층시료를 획득하여 점토광물에 대한 상대적 함량비 분석함.  그림 53 Dotson-Getz trough의 점토광물 상대 함량비 분포 Dotson 빙붕 앞쪽 시료들이 Getz A 빙붕 앞쪽의 시료들보다 상대적으로 일라이트가 많고 스멕타이트가 적음을 확인함. 남극에서 비교적 많이 생성될 수 있는 점토광물인 일라이트의 integral breadth 측정과 화학지수 측정을 통해 전체적으로 결정도가 좋고 Fe-Mg가 비교적 많은 일라이트가 이 지역에 구성되어 있음을 확인함. 양쪽 trough에서 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 확인됨.

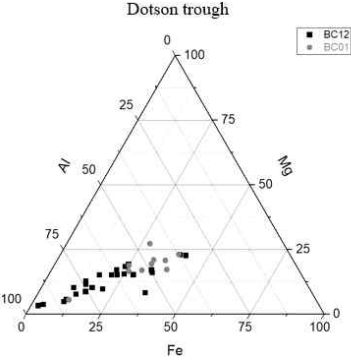
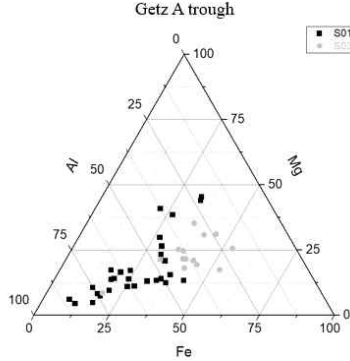
연 구 내 용	연 구 결 과
서남극 전반의 해저퇴적물 내 점토광물의 특성에 따른 통계적인 군집분석	Dotson-Getz trough 표층퇴적물의 점토광물 함량비, illite chemical index, illite crystallinity를 통한 통계분석을 진행
	 그림 54 표층퇴적물 내 점토광물 특성을 통해 군집분석을 수행한 결과. Dotson 빙봉 앞과 Getz 빙봉 앞으로 군집이 구분됨을 확인. Dotson 빙봉쪽과 Getz A 빙봉쪽 퇴적물이 점토광물 특성에 따라 구분되는 결과를 나타냄
	TEM-EDS를 이용하여 각 빙봉 앞 퇴적물인 BC06과 S01 위치의 smectite, illite의 화학성분 분석 결과 illite에서는 Fe-rich illite가 Getz A쪽에 더 많이 분포해 있음을 통하여 대륙에서 들어오는 점토광물에 차이가 나타남을 확인.

연구 내용	연구 결과
저온 결빙 환경에서 미생물의 활동에 의한 광물의 구조적, 화학적 분석	Batch 실험에 대하여 미생물을 접종한 시료에 대해 시간에 따른 철 환원 정도를 분석한 결과 논트로나이트의 경우 총 27% 가량의 환원이, 자적철석의 경우 총 20% 가량의 환원이 진행됨을 확인  그림 55 시간에 따른 자적철석(maghemite)과 논트로나이트(nontronite)의 광물 내 철 환원 정도. 미생물을 접종하지 않은 시료에 대해서는 환원이 일어나지 않았음. 두 광물 모두에서 약 10일간 결빙 환경에 광물-미생물 반응 실험을 진행한 결과, 철 환원 작용은 떨어지지만 해동 후에도 미생물이 살아 있음을 확인
	TEM, SAED pattern을 통해 광물 미생물 반응에 의한 광물의 구조적 변화가 나타남을 확인 XRD, SEM을 통해 미생물의 철 환원 반응에 의해 새롭게 생성된 남철석의 존재 확인  그림 56 두 번의 결빙-해동 주기 후 XRD 상에서 관찰된 미생물에 의한 광물의 변이작용 (A: 자적철석 bioreduced 시료에서 관찰된 남철석, B: 논트로나이트 bioreduced 시료에서 관찰된 광물의 변이, C: 새로 생성된 남철석)

- 성과목표 2-3 (2단계 3차년도):
- 세부목표 2-3-1:

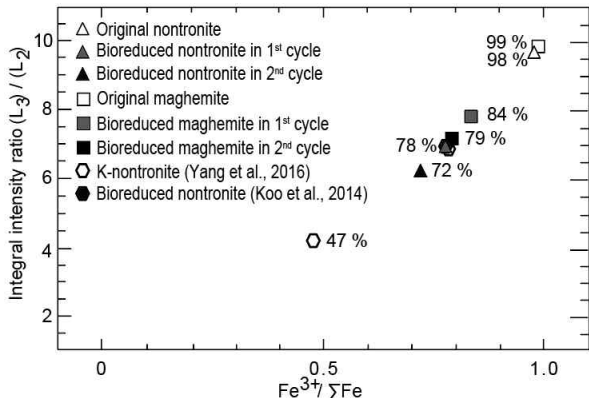
연구 내용	연구 결과
서남극 대륙붕 지역 퇴적물의 빙기-간빙기에 따른 고환경 변화 분석	서남극 대륙붕 빙봉 후퇴지역의 점토광물 분석 결과 깊이에 따라 상대적 함량비가 달라지는 것을 확인 그림 57 서남극 대륙붕 퇴적물코어 GC05의 퇴적상 및 깊이에 따른 MS와 점토광물 함량비 변화 빙기-간빙기에 따른 서남극 빙하의 움직임과 주변환경 변화에 따라 나타나는 점토광물의 물리화학적 특성의 차이로 퇴적물 과거와 현재의 퇴적물 공급지에 차이가 있었을 것을 시사.

○ 세부목표 2-3-2:

연 구 내 용	연 구 결 과
서남극 전반의 해저퇴적물 내 점토광물 특성 군집에 따른 기원지 분석 및 퇴적환경 해석	점토광물 함량비 분석을 통하여 Dotson 빙봉 앞 trough의 퇴적물이 Getz A 빙봉 앞 trough의 퇴적물 이 비해 illite 함량비가 많고 smectite의 함량비가 적음을 확인
	Dotson trough와 Getz A trough 퇴적물 내 smectite의 화학 분석 결과 Dotson trough에는 Al-rich한 성분이 지배적이나 Getz A trough는 Al-rich에 더해 Al-Fe-Mg moderate한 화학성분이 존재함을 확인 Dotson trough  Getz A trough  그림 58 Dotson trough와 Getz A trough 내 smectite의 화학성분을 Al-Fe-Mg 삼성분계에 도시한 결과 Dotson trough와 Getz A trough는 서로 다른 점토광물 함량비와 smectite의 화학성분으로 두 trough의 퇴적물 기원이 서로 다를 가능성을 시사.

극지연구소

○ 세부목표 2-3-3:

연 구 내 용	연 구 결 과
저온 결빙 환경에서 미생물과의 반응에 의한 철 함유 광물에서의 철의 순환에 대한 종합적인 해석	Batch 실험을 진행한 자적철석과 논트로나이트에 대하여 TEM-EELS를 활용한 방법으로 광물 내 철의 산화수를 측정 한 결과 두 번의 결빙 주기를 거친 자적철석의 경우 약 21%, 논트로나이트의 경우 약 28% 가량의 철이 환원됨을 확인  그림 59 두 번의 결빙주기 동안 미생물과 반응 시킨 자적철석과 논트로나이트 광물과 대조군에 대하여 TEM-EELS로 확인한 Fe^{3+}/Fe_{tot} 철 함유광물과 미생물이 접촉된 시료에 대해서 한 달 동안 결빙 구간을 두 번 거친 조건에서도 광물의 환원 및 변형이 나타난 것을 통해 남극과 같은 극한 환경에서도 미생물과 광 물간의 반응이 가능함을 시사

극지연구소

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 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 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 기여할 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

기후변화에 따른 고환경 변화를 추적하기 위해, 과거 빙하가 급격히 후퇴한 서남극 지역에서 점토광물을 나노 스케일의 새로운 proxy로 활용할 계획이다. 전통적으로는 고퇴적 환경 변화에 따른 퇴적물 기원지의 변화를 추적하기 위해 점토광물의 상대적 함량비가 활용되어 왔으나, 본 연구에서는 스멕타이트의 화학 성분을 새로운 proxy로 제시하고자 한다. 기존의 미세 입자 시료 분석은 주로 방사성 동위원소 분석으로 대표되는 bulk 시료 기반의 분석에 의존해 왔으나, 스멕타이트 개별 입자의 화학 성분 분석을 통해 각 광물의 기원 및 이동 경로를 정밀하게 추적할 수 있다. 스멕타이트의 화학성분 분석은 광물 입자 하나의 구체적인 성분 분석을 통해 각 광물의 기원과 이동에 대하여 밝힐 수 있고 bulk 시료에서는 관찰할 수 없었던 차이까지 확인할 수 있어 새로운 proxy로써 중요한 역할을 할 수 있음을 시사한다. 본 연구를 통해 규명된 저온 결빙 환경에서의 미생물-광물 상호작용에 의한 광물 내 철의 환원 및 방출 메커니즘은 극지와 같은 저온 환경에서 빙하에 존재하는 철 함유 광물이 미생물의 활동에 의해 대양에 공급되는 하나의 철 공급원의 역할을 할 수 있음을 밝힘에 따라 극지방 해양의 1차 생산성 및 탄소 흡수 능력에 대한 이해를 증진시키는 데 기여할 수 있다. 특히, 남극해와 같은 고영양-저클로로필 (HNLC) 해역에서는 용존 철 (dFe)이 생산성을 제한하는 주요 요소로 작용하기 때문에 본 연구의 결과는 극지방 생태계 및 기후 변화에 대한 예측 모델의 정교화에 활용될 수 있다. 또한, 빙상 및 해빙 융해와 관련된 철 공급원의 생물학적 특성을 반영함으로써, 장기적으로는 지구 탄소 순환과 연계된 극지방 환경 관리 및 정책 수립에 과학적 근거를 제공할 수 있다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

Dotson-Getz Trough 지역은 아직까지 많이 연구가 진행되지 않았으나 최근 Getz Ice Shelf 근처에 열수공이 있다는 정보를 학회를 통해 파악할 수 있었다. 본 과제에서 제시한 Getz A Trough 지역의 스멕타이트 화학성분의 다양성이 열수공의 영향에 의한 결과일 수 있음을 시사한다.

BAS의 Hillenbrand 박사팀은 최근 아문젠 해 중력코어 퇴적물에 대하여 네오디뮴(Nd) 데이터를 깊이별로 분석하려고 하는데 본 연구에서 밝힌 바 점토광물의 화학 성분이 기원지를 지시하는 요소로 사용할 수 있음을 미루어볼 때 대응되는 데이터를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

미국의 Rutgers University의 Danielle Santiago Ramos 교수는 K-isotope을 활용하여 해양 내 퇴적물의 K 거동을 확인하고 있다. 본 연구에서 사용된 논트로나이트는 미생물과 반응할 시 층간에 K^+ 이온을 고정하여 일라이트와 같은 구조로 바뀔 수 있는데, 이러한 과정에서 K-isotope에 대한 분별작용이 일어난다면 광물-미생물 상호작용의 생지구화학적 지시자로 사용할 수 있는 새로운 요소가 될 수 있다. 빙하 하부의 환경 및 결빙-해빙 주기간 이러한 광물-미생물 반응이 나타날 수 있음을 확인하였기에 생지구화학적 지시자 개발에 새로운 아이디어로 떠오를 수 있다.



제 7 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., Buseti, M., Tomadin, L., Villa, G., ... & Giorgetti, G. (2002). Mid-late Pleistocene glacimarine sedimentary processes of a high-latitude, deep-sea sediment drift (Antarctic Peninsula Pacific margin). *Marine Geology*, 189(3-4), 343-370.
- 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.
- Pandarínath, 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.



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.