

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “연구선 산·학·연 공동활용 연구사업”에 관한 연구 “고환경유전체 분석을 통한 서남극 퇴적 특성 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



연구기관명 : 강릉원주대 산학협력단

연구책임자 : 한덕기

참여연구원 : 이준형

“ :

“ :

요 약 문

I. 제 목

고환경유전체 분석을 통한 서남극 퇴적 특성 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

서남극 대륙주변부(심해저, 대륙사면, 대륙붕, 연안 등)에서 시추한 퇴적물 코어를 분석하여 고기후 지질현상(과거 온난기의 서남극 빙상의 후퇴 및 해양 순환)과 deep-biosphere와의 연관성을 **microbial paleogenomics** 분석을 통하여 파악하고자 함

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 퇴적물 시추코어 확보 및 subsampling
 - ▶ 서남극 퇴적물의 생지화학분석과 미생물 생태분석(paleome)을 위한 퇴적물 시료 채취 및 전처리
- 시추코어 퇴적물의 퇴적환경 특성분석 및 미생물분석자료구축
 - ▶ 퇴적물내 유기물질 분석
 - ▶ NGS(Miseq platform) 분석을 통한 미생물군집 데이터베이스 구축
- 고기후 퇴적환경 및 paleome 분석
 - ▶ NGS data의 생물정보학적 분석 및 환경특성 자료와의 통계학적 검증
- 기후변화에 따른 퇴적환경변화 역학관계 조사
 - ▶ 고기후환경 변화와 SMTZ 퇴적층 형성 간의 연관성 파악
- Paleome기반 고환경 퇴적 특성 분석

IV. 연구개발결과

- 남극탐사수행 및 퇴적물시추코어 확보
 - ▶ 서남극 탐사수행 후 7개 연구정점에서 퇴적물 시추코어 확보
- 퇴적물시추코어의 전처리 및 퇴적특성분석
 - ▶ 퇴적물 시료의 현장 전처리 수행
 - ▶ 퇴적물내 공극수 분석을 통한 퇴적특성 분석
- 환경유전체 분석
 - ▶ 퇴적시료에서 환경유전체 추출 및 NGS DB 구축

V. 연구개발결과의 활용계획

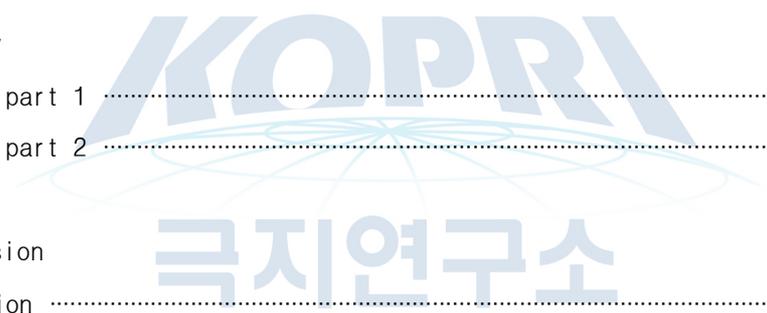
- 국제 선도 연구의 가능성
 - ▶ 다학제기반 Paleome 분석을 통한 기후변화 연구를 통하여 새로운 고기후 복원 프록시를 개발하고 세계적으로 앞선 연구 결과로 도출할 가능성이 높음
- 극지의 지구과학 전문연구인력 양성
 - ▶ 다학제 극지연구경험 습득

〈Summary〉

Purpose	<p>Microbial Paleogenomics using marine sediment in the Antarctic Ocean</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶Construction of paleoclimate database ▶Development of the paleome-based proxy 					
Contents	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sediment core subsampling 2. Construction of database for paleoclimate/geochemistry/microbial diversity 3. Paleome data production <ul style="list-style-type: none"> ▶DNA extraction -> PCR -> NGS (Miseq and Hiseq platform) 4. Bioinformatics and statistic analysis for NGS data <ul style="list-style-type: none"> ▶The construction of microbial community database and microbial diversity in the Antarctic marine sediment ▶Statistical analysis for the relation between sedimentary properties and microbial diversity 5. Development of paleome based proxy <ul style="list-style-type: none"> ▶Tracking the paleoclimate change from Antarctic sediments 6. The application of KOPRI infrastructure <ul style="list-style-type: none"> ▶The Antarctic expedition by IBRV <i>ARAON</i> ▶Mentoring system of KOPRI 					
Development Results	Construction of paleome DB					
Expected Contribution	<ol style="list-style-type: none"> 1. Seeking the internationally leading research with providing paleome based proxy for the Antarctic Ocean environments affected by climate change 2. Fostering specialists for multidisciplinary polar research 					
Keywords	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">eDNA</td> <td style="text-align: center;">Metagenome</td> <td style="text-align: center;">Antarctic Ocean</td> <td style="text-align: center;">Sediment</td> <td style="text-align: center;">Paleome</td> </tr> </table>	eDNA	Metagenome	Antarctic Ocean	Sediment	Paleome
eDNA	Metagenome	Antarctic Ocean	Sediment	Paleome		

Contents

1. Introduction	
Chapter 1-2. Research Outline	4
Chapter 3. Research Subject	5
2. Research Background	
Chapter 1. Research Trends	6
Chapter 2. Previous Study	6
3. Research Results	
Chapter 1. Research contents	8
Chapter 2. Methods	8
Chapter 2. Results	12
4. Research Summary	
Chapter 1. Summary part 1	18
Chapter 2. Summary part 2	18
5. Research Discussion	
Chapter 1. Conclusion	19
Chapter 2. Expected Benefits	19
6. References	



목 차

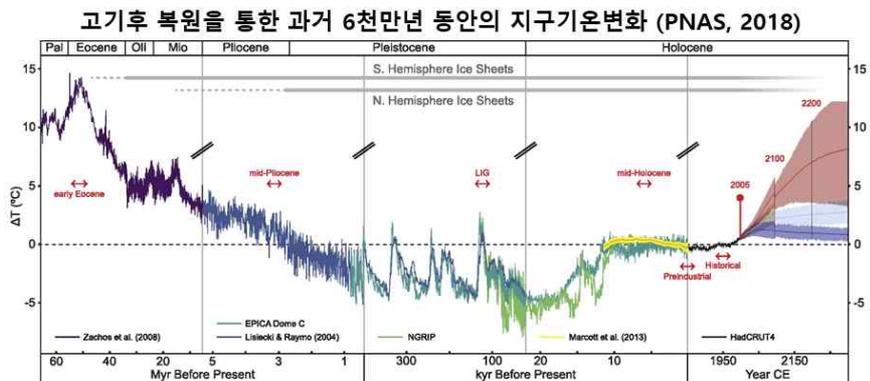
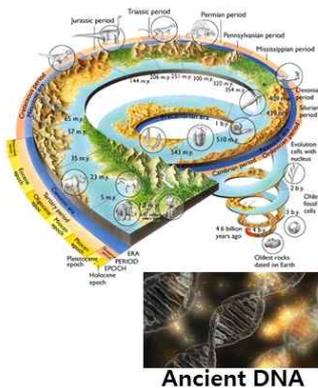
제 1 장 서론	
1 절 연구개발의 개요	6
2 절 연구개발의 필요성	6
3 절 연구개발의 최종 목표	7
제 2 장 국내외 기술개발 현황	
1 절 연구개발 대상의 국내외 현황	8
2 절 선행연구 내용 및 결과	8
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	
1 절 연구개발 내용	10
2 절 연구개발 추진전략 및 방법	10
3 절 연구결과	14
제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	
1절 추진일정 대비 연구 달성도	20
2절 연구의 우수성 및 기여도	20
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	
1절 연구개발 성과의 활용방안	21
2절 기대효과	21
제 6 장 참고문헌	

1장 서론

1절 연구개발의 개요

1. Microbial paleogenomics

서남극 대륙주변부(심해저, 대륙사면, 대륙붕, 연안 등)에서 시추한 퇴적물 코어를 분석하여 고기후 지질현상(과거 온난기의 서남극 빙상의 후퇴 및 해양 순환)과 deep-biosphere와의 연관성을 microbial paleogenomics 분석을 통하여 파악하고자 함.



Microbial Paleogenomics 기반의 고기후 환경변화추적

그림 1. Microbial paleogenomics의 개요

2절 연구개발의 필요성

1. 극지환경의 중요성

21세기의 인류는 지구 환경에 강력한 영향력을 가지게 되면서 인류세(Anthropocene)라는 새로운 지질학적 시대를 맞이함. 특히, 지구온난화로 인한 해수면 상승과 오존층 파괴로 인한 자외선량 증가와 같이 전 지구적인 환경문제가 대두되면서 극지환경이 가진 지구환경변화조절의 중요성을 인식하게 되었음.

2. 기후변화의 심각성 및 대책

지구온난화에 의해 극지의 얼음이 급격히 감소하고 있으며, 이로 인하여 극지의 환경변화는 물론 전 지구적인 기후 변화에 영향을 미칠 것으로 예측(PNAS, 2008). 당면한 인류사회의 위기에 대처하기 위해서는 현재 일어나고 있는 기후변화의 원인과 그 영향을 명확하게 규명해야 함. 아울러 기후모델을 이용하여 미래의 기후변화 양상을 정확하게 예측하기 위해서는 과거의 기후변화 특성을 추론하기 위한 다양한 형태의 자료들이 필요함.

3. 극지 고환경 복원을 위한 Paleome 기반의 프록시 개발

극지환경은 지구온난화에 매우 취약하며, 과거 지구의 기후변화로 야기된 환경변화들이 해양 퇴적물에 기록되어 있음. 고기후학/환경과학/유전체학 기반의 다학제적 고환경 복원 및 Paleome 기반의 프록시 개발을 통한 기후변화예측 및 기후모델 검증에 필요한 정밀자료가 필요함.

3절 연구개발의 최종 목표

1. 최종목표

서남극 해역에서 퇴적환경변화(기후환경변화)를 반영하는 미생물의 유전체(Microbial Paleogenomics)를 연구하여 과거 온난기의 서남극 빙상의 후퇴 및 해양 순환으로 인한 퇴적물내 지화학 특성을 메타지놈 분석을 통하여 규명하고자 함.

가. 기존 고기후환경자료들과 비교를 통하여 신규 프록시개발

나. 고환경퇴적물에서 유전체 DB 구축 및 신규 유전자원 확보

2. 핵심기술

가. Deepbiosphere연구를 위한 심해퇴적물 eDNA 추출

나. 유전체자료의 생물정보학적 분석

다. 퇴적물내 고기후 복원자료들과 유전체 자료와의 연관성 분석을 위한 통계모델



2장 국내외 기술개발 현황

1절 연구개발 대상의 국내외 현황

1. 국내외 극지연구 동향

국내에서는 2010년부터 쇄빙연구선 아라온호를 활용하는 극지해역 탐사를 통하여 국내 연구진을 주축으로 하는 국제공동연구를 수행 하고 있음. 위성 관측 및 근대 역사적 기록을 이용하는 방법으로는 지질시대의 기후변화 복원이 불가능하며, 극지에서 시추한 퇴적물이나 빙하코어에 보존되어 있는 과거의 기후변화 기록을 복원하여 비교함으로써 현재의 패턴과 미래의 기후변화를 보다 더 정확히 예측할 수 있음.

2. Microbial paleogenomics 분석을 위한 다학제적 고(古)기후환경 복원연구의 수행

퇴적물 코어의 연대기적 특징 및 퇴적학적 양상(빙하기-간빙기)에 따른 생물상(biota)의 변화 패턴을 이해한다면 고(古)해양 기원의 생물상(biota)을 유추 가능. 최근 퇴적물내 미생물 유전체(Genome)를 연구하여 고기후환경(Paleo climate)의 특성을 추적하는 Paleome(고환경유전체; Paleogenomics) 연구들이 시작되고 있음(Science, 2011; PNAS, 2013).

3. 국내외 paleogenomics 동향

국내 쇄빙연구선 아라온호의 북극해 탐사를 통해 확보한 퇴적물 시추코어에서 극지의 퇴적환경변화(기후환경변화)를 반영하는 미생물의 유전체(Microbial Paleogenomics) 특성이 확인되었음 (Scientific Reports, 2017)

2절 선행연구 내용 및 결과

1. 선행연구 사례1

본 제안과제의 연구책임자는 2011년 국내 쇄빙연구선인 아라온호의 서북극해 탐사에서 국내 최초로 발견된 홀로세 SMTZ(Sulfate Methane Transition Zone) 시추코어를 대상으로 퇴적환경변화(기후환경변화)를 반영하는 미생물의 유전체(Paleome)를 연구하여 홀로세 및 인류세의 미생물생태변화를 발견하였음 (Scientific Reports, 2017).

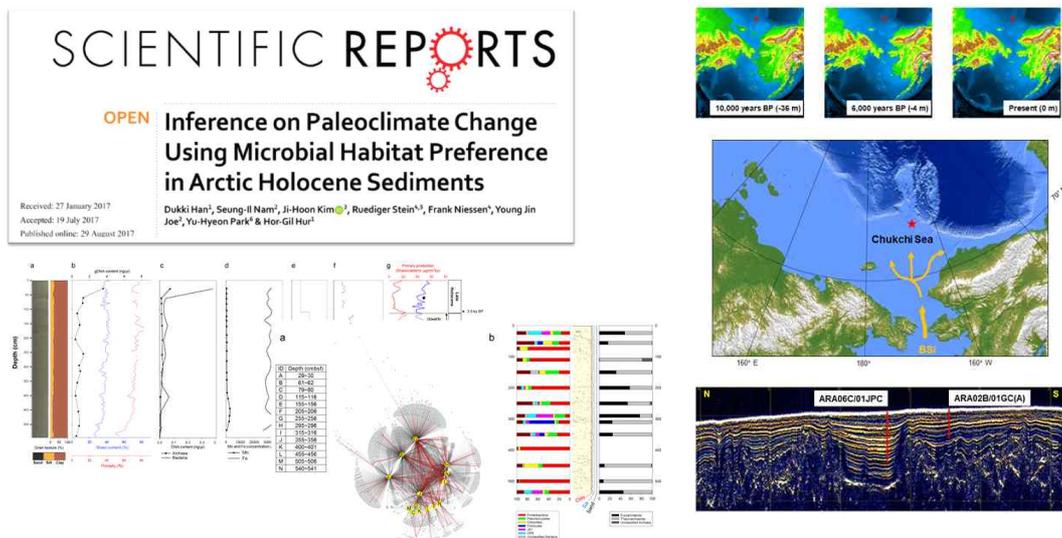


그림 2. 선행연구 사례1의 연구결과

2. 선행연구 사례 2

이후, 2015년의 북극해 탐사를 통하여 진행된 후속연구를 통하여 마지막 간빙기 이후 기후변화로 인한 퇴적물내 물질순환 및 SMTZ 퇴적물의 지화학 특성을 메타지놈 분석을 통하여 규명한 바 있음(Under review in Molecular Ecology).

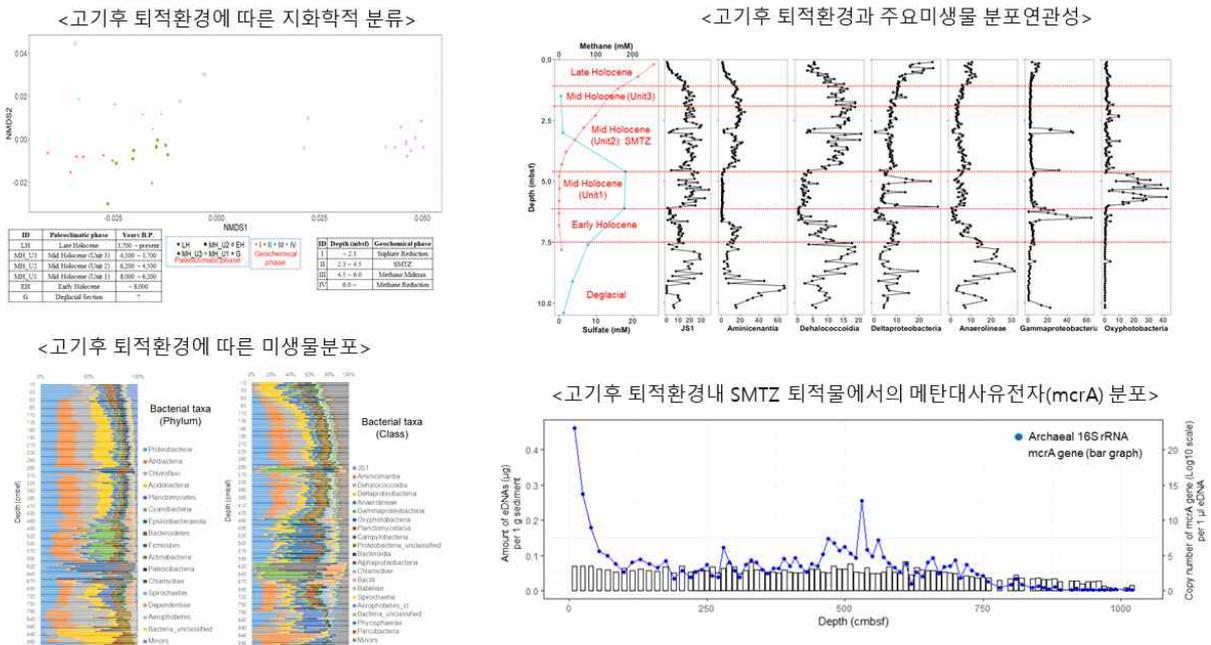


그림 3. 선행연구 사례2의 연구결과



3장 연구개발수행 내용 및 결과

1절 연구개발 내용

1. 서남극 고기후 퇴적환경 조사를 위한 퇴적물 확보

본 연구팀은 2021/2022년 아라온 남극항해(2항차 승선)에 참여하여 서남극 탐사 현장에서 퇴적물 시추코어를 확보하였으며, 시추코어들은 현장에서 개봉하여 subsampling을 수행하였음. 상기의 퇴적물 시료에서 서남극 고기후 환경에서 유기물 기원 및 퇴적 특성을 파악하고 Microbial Paleogenomics 분석을 위한 유전체 연구에 활용.

2. 퇴적환경에 따른 유기화학적 특성연구

시추코어의 유기물질 특성분석을 통해 고기후 퇴적환경에 의한 퇴적물 기원을 분석한 뒤, 이를 통해 고기후 환경변화를 특정함.

3. Microbial Paleogenomics 연구를 통한 고기후환경 유전체 DB 구축

시추코어를 대상으로 NGS(Next Generation Sequencing) 기반의 환경유전체 연구를 수행하여 Paleom 유전체 DB를 구축한 뒤, 고기후 퇴적환경의 미생물유전체 연구에 활용.

4. 기후변화모델에 적용 가능한 paleome기반 프록시 개발 (연구 종료 후 12개월 이내)

시추코어의 고기후 환경데이터와 paleome 유전체 DB에서 확보한 빅데이터들의 통계분석을 통해 고기후환경 변화와 고환경 퇴적층 형성간의 연관성을 파악. 이후 Paleome 기반의 고환경 추적 프로토콜을 개발.

2절 연구개발 추진전략 및 방법

1. 조직도 및 연구개발 역할

가. 주관연구기관: 강릉원주대학교(해양생명과학과)

본 연구는 강릉원주대의 주관으로 진행되며, 10년 이상 극지연구를 수행한 연구책임자가 서남극 해양시료(퇴적물)의 확보 및 유전체 분석을 수행함. 아울러 Paleome분야의 국외전문가들과 국제공동연구를 수행할 예정.

- 독일 University of Bremen의 Michael W. Friedrich(교수) 연구팀

- 독일 MARUM 연구소의 Marcus Elvert(선임연구원) 연구팀

나. 공동연구: 극지연구소(빙하환경연구본부)

본 연구에서는 극지연구소의 남극 고해양 연구팀(유규철 책임연구원)과 함께 서남극 퇴적물 시료를 확보하였으며, 유규철 박사 연구팀의 「과거 온난기의 서남극 빙산 후퇴 및 해양 순환 변화 연구」사업에서 확보할 고기후 복원자료 및 유기물특성 자료들을 활용하여 서남극해 시추코어의 퇴적환경 특성을 규명하고 유기물의 기원을 특정하고자 함.

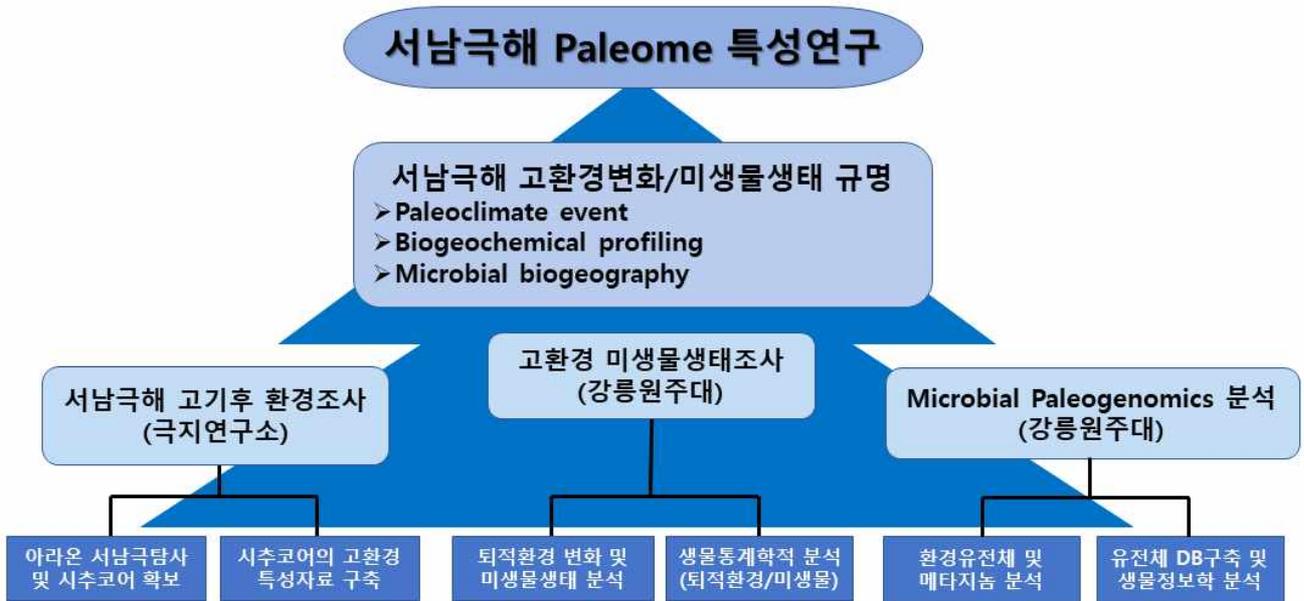
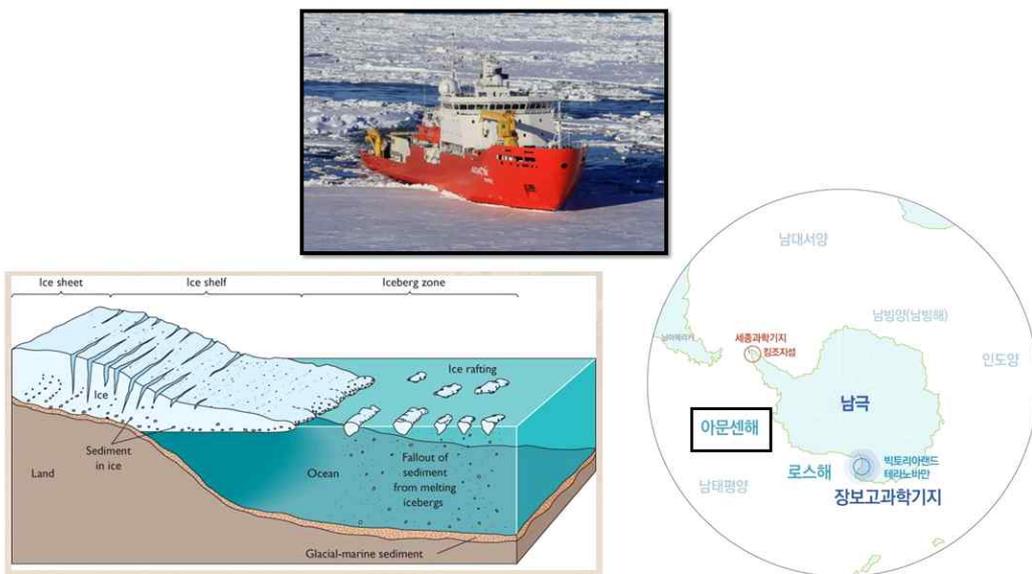


그림 4. 연구추진체계도

2. 연구개발방법

가. 서남극 해양탐사를 통한 퇴적물코어 시추

본 연구의 수행에 필요한 서남극 퇴적물코어 시추지역은 2021년 아라온 남극항해 중 획득되는 SBP(Sub Bottom Profile)자료들을 기반으로 결정되었음.



서남극 아문센해 탐사를 통한 퇴적물 시추코어 확보

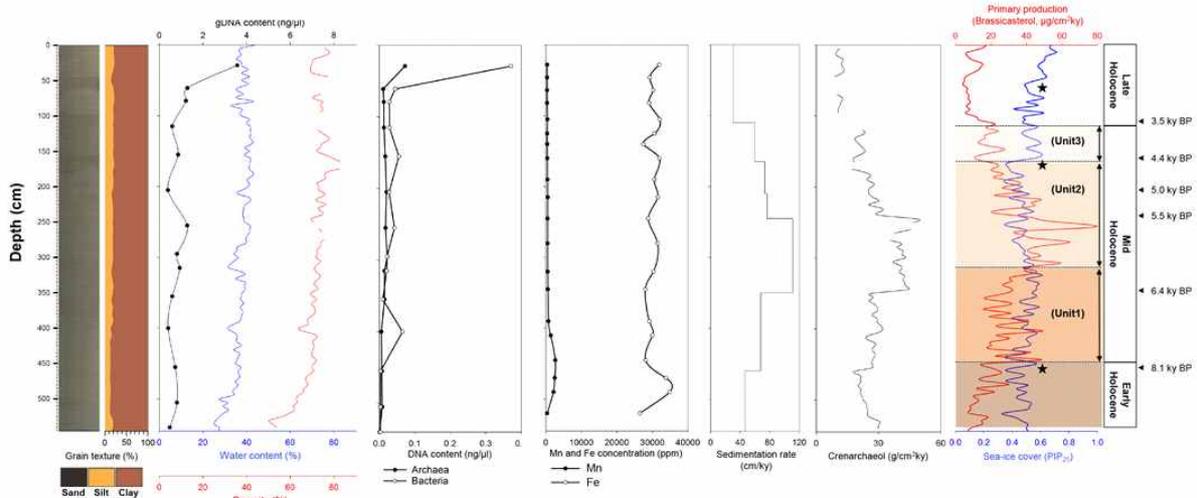
그림 5. 연구지역의 개요

나. 퇴적물 시추코어 확보 및 subsampling

본 제안연구에서는 서남극 퇴적물 시추코어를 확보하여 기존에 보고된 서남극의 퇴적상 변화를 통해 과거 온난기의 서남극 빙상의 후퇴 및 해양 순환의 특성을 구분하고자 함. 이에 현자 탐사를 통해 확보한 퇴적물 시추코어들을 section별로 분류하여 분석용도에 따라 subsampling을 수행하였음.

다. 서남극 퇴적물 시추코어의 유기물질 특성자료 구축

본 연구팀은 퇴적물내 공극수 분석을 통하여 퇴적체의 화학적 특성을 파악하고자 하며, 추후, 고기후 복원자료(극지연구소 제공)들을 기반으로 과거 온난기의 서남극 빙상의 후퇴 및 해양 순환의 특성을 구분하고자 함.

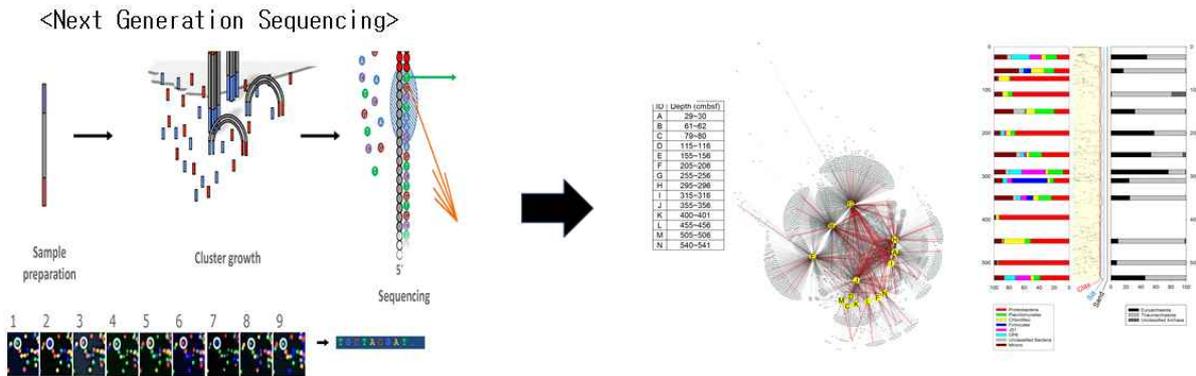


극지 퇴적물시추코어(선행연구)에서의 환경특성자료

그림 6. 퇴적특성 자료의 개요

라. 고기후 퇴적환경에서 메타지놈 분석

서남극 퇴적물 시추코어를 section 별로 구분한 뒤, 퇴적물에서 환경유전체를 분석하여(NGS 기반 메타지놈분석) Microbial Paleogenomics 연구를 수행함.



극지 퇴적물시추코어(선행연구)에서의 Paleome분석

그림 7. 환경유전체 자료의 개요

차세대 염기서열 분석기법 NGS(Next Generation Sequencing)은 기존의 Sanger method에 비해 대용량의 염기서열 데이터를 획득. 이중 Illumina 시퀀싱 기술은 증폭, 시퀀싱 및 분석이라는 세 가지 기본 단계로 작동 됨. 먼저 정제된 DNA는 어댑터, 인덱스 및 기타 종류의 분자 변형을 통해 작은 조각으로 절단 됨. 변형 된 DNA는 수십만 개의 올리고 뉴클레오타이드 (짧은 합성 DNA 조각)가 부착 된 특수한 칩에 상보적 결합을 통하여 증폭 및 시퀀싱이 이루어지며, 각 상보적 DNA 단편들은 클러스터 생성 단계에서 복제본을 생성. 이후, 형광분자를 가진 프라

이머와 변형 된 뉴클레오타이드가 칩에 들어가 각 합성 라운드가 끝나면서 발생하는 형광신호를 카메라가 촬영 함. DNA 합성 시 발생하는 빛의 시그널을 분석하여 염기서열을 결정.

마. 퇴적환경내 미생물유전체 DB 구축 및 Microbial Paleogenomics 연구

서남극 퇴적물 시추코어에서 환경유전체 기반의 Paleom DB를 구축하여 미생물생태 및 고기후 퇴적환경유래 유전체 현황을 파악한 뒤, 생지화학 대사과정에 관계한 기능성 유전자들을 분석하여 과거 온난기의 서남극 빙상의 후퇴 및 해양 순환과 관련된 유전체 지도를 작성함.

<퇴적물유래 환경유전체분석의 개요>

<유전체분석을 통한 물질대사연구>

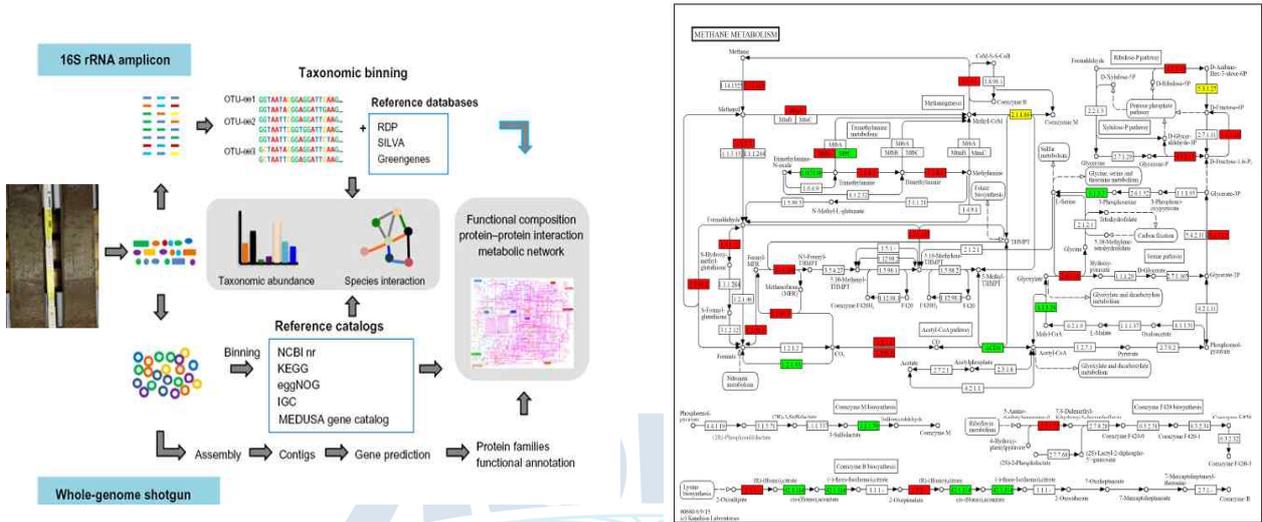


그림 8. 환경유전체 분석의 개요 및 분석결과의 예시

3. 연구추진일정

세부 연구개발 목표	추진 일정												비고	
	월별 추진 일정													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
남극탐사준비 (연구지역 문헌자료조사)														아래온 탐사기간 (2021.12.29.- 2022.03.05.)
서남극 퇴적물 시추코어 확보 및 subsampling														
퇴적물 시료에서 환경유전체 추출														아래온 한국도착 (2022.05.03.)
퇴적물내 유기물질 특성분석 및 NGS 데이터 생산														
Microbial Paleogenomics 수행 및 paleome기반 프록시 개발														연구기간 종료이후 계속수행

3절 연구결과

1. 서남극 탐사수행 및 퇴적물 시추코어 확보

본 연구팀은 2022년 1-2월경 국내 쇄빙연구선 아라온호의 서남극 스웨이츠 빙봉지역 탐사에 참여함. 탐사기간 동안 현장의 SBP 관측자료를 기반으로 Getz Ice Shelf와 Dotson Ice Shelf의 후퇴 현상을 반영할 것으로 판단되는 7개 시추정점을 선정함.



그림 9. 서남극 스웨이츠 빙봉인근 퇴적물코어 시추지점

선정된 시추정점에서 Box core와 Gravity core를 통하여 12개의 시추코어들을 확보하였으며, 시추코어들은 모두 현장에서 공극수를 추출한 뒤, 즉시 해체하여 유전체 분석과 유기물 분석용도의 subsampling을 수행 함.

표 1. 시추한 퇴적물코어의 개요

No.	Location	AM22-Core	ID	Latitude (S)	Longitude (W)	Core length (cmbf)	Water depth (SBP; m)	Porewaters	Sediments
1	Getz Ice Shelf	BOX10B	Getz1	73° 58.9692'	115° 46.1438'	40	1237	7	8
2	Getz Ice Shelf	GC10A	Getz1	73° 58.9692'	115° 46.1438'	292	1237	9	14
3	Getz Ice Shelf	BOX08B	Getz2	73° 40.8915'	115° 27.3835'	45	970	7	8
4	Getz Ice Shelf	BOX07B	Getz3	73° 30.2968'	114° 58.1766'	55.5	909	8	9
5	Getz Ice Shelf	GC07A	Getz3	73° 30.2968'	114° 58.1766'	300	909	10	12
6	Dotson Ice Shelf	BOX11B	Dotson1	74° 14.0984'	112° 36.5718'	44.5	1033	7	9
7	Dotson Ice Shelf	BOX05C	Dotson2	74° 7.8340'	112° 33.0079'	41	966	7	8
8	Dotson Ice Shelf	GC05B	Dotson2	74° 7.8340'	112° 33.0079'	301	966	11	18
9	Dotson Ice Shelf	BOX03C	Dotson3	73° 57.7007'	112° 36.0902'	42.5	909	7	8
10	Dotson Ice Shelf	GC03A	Dotson3	73° 57.7007'	112° 36.0902'	430	909	15	20
11	Dotson Ice Shelf	BOX01C	Dotson4	73° 39.1502'	113° 37.8846'	42	789	7	7
12	Dotson Ice Shelf	GC01A	Dotson4	73° 39.1502'	113° 37.8846'	277	789	10	16

연구지역내 7개 정점의 Box core에서 확보한 퇴적물들은 41-55cm의 시추코어로 구성되었으며, Box core의 정점들 중 5곳에서 Gravity core를 이용하여 277-430cm의 시추코어를 확보함. 퇴적물 시추코어(1910.5 m)에서 공극수 분석 용도의 105개 시료와 유전체 분석용도의 137개 시료를 확보함. 공극수 시료는 각각 Ferrozine assay(Fe^{2+}), 영양염, 음이온, 양이온 등의 분석을 목적으로 전처리 과정을 수행한 뒤, 분석 전까지 냉장 및 냉동으로 보관함. 유전체 분석용 시료들은 냉동 후 일부를 eDNA 추출을 목적으로 동결건조하여 보관함.

2. 남극 시추퇴적물의 공극수 분석을 통한 퇴적특성과악

본 연구에서는 서남극 시추퇴적물들의 공극수를 추출하여, salinity, chlorinity, alkalinity를 현장에서 측정하였음. 관측결과 시추코어들의 salinity, chlorinity, alkalinity 항목들은 표층에서 하부층으로 변화양상이 서로 구분되는 양상이 나타남. 시추코어들을 Ice shelf의 grounding line의 후퇴로 형성된 trough를 따라서 Getz1-Getz2-Getz3와 Dotson1-Dotson2-Dotson3-Dotson4의 순서로 공간적으로 배치함.

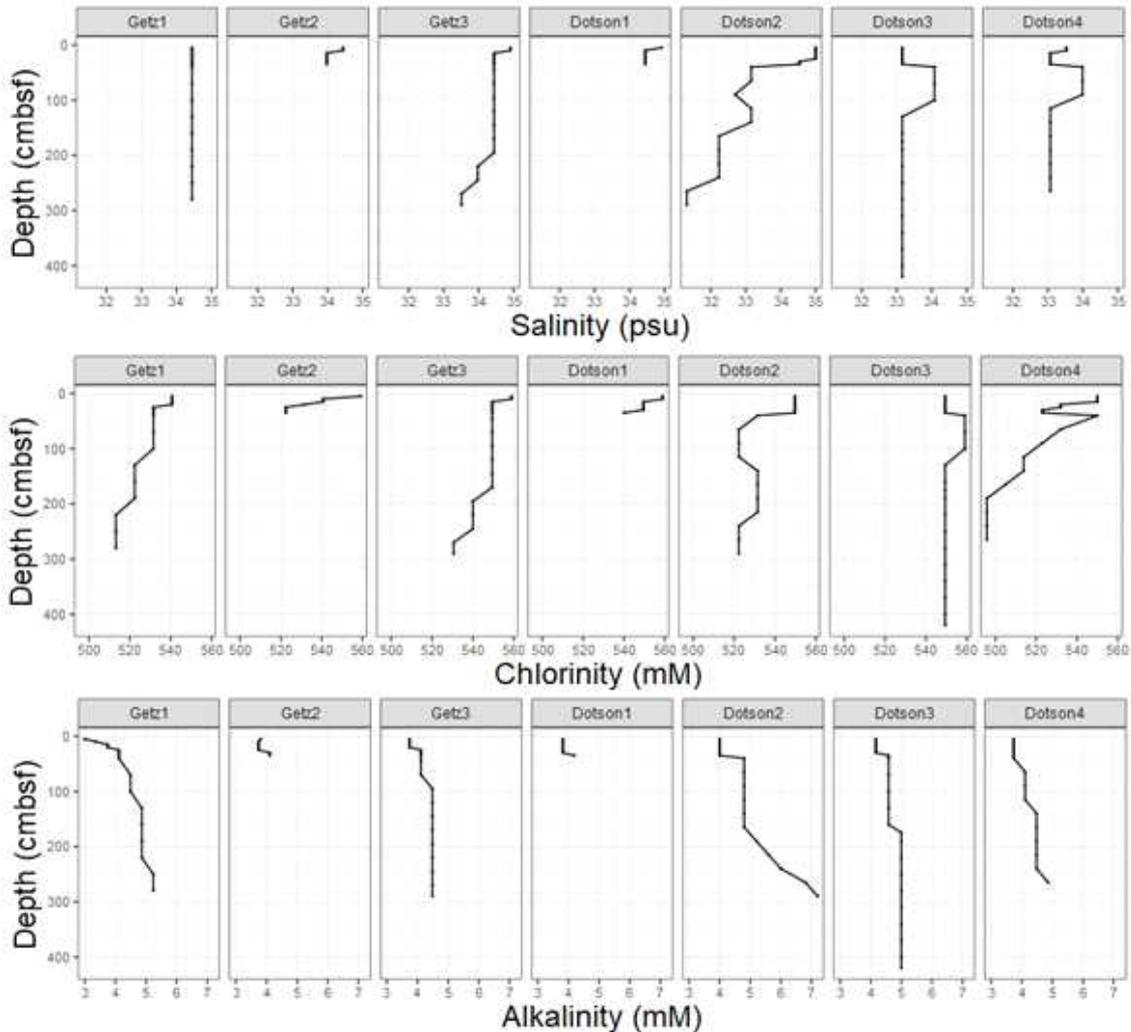


그림 10. 시추퇴적물 공극수의 현장분석결과

가. Salinity 분석결과

Salinity의 경우 Getz Ice Shelf의 Getz1에서 수치들이 하부층까지 지속적으로 유지되었으며, Getz3에서는 2미터 퇴적층 아래에서 급격한 salinity 감소가 관찰 됨. Dotson Ice Shelf에서는 내만쪽에 위치한 Dotson2에서는 하부층까지 급격한 salinity 감소현상이 관찰되며, 상대적으로 바깥쪽에 위치한 Dotson3과 Dotson4에서는 1m 깊이의 퇴적층을 기점으로 다소 낮은 Salinity 수치가 지속적으로 관찰 됨.

나. Chloride 분석결과

Chloride 수치변화는 Getz Ice Shelf내 내만과 외만에 해당하는 Getz1와 Getz3이 각각 퇴적층이 깊어짐에 수치가 낮아지는 양상을 확인 함. Dotson Ice shelf의 경우 Dotson2와 Dotson3에서 Chloride 수치차이가 전반적으로 구분되지만, 각 시추코어의 깊이에 따른 변화가 크게 나타

나지 않음. 다만, Dotson4에서는 퇴적층의 깊이에 따라서 Chloride 수치가 특이적으로 감소하는 경향이 관찰됨.

다. Alkalinity 분석결과

Alkalinity 수치는 대체적으로 퇴적층이 깊이가 하부층으로 갈수록 증가하는 경향이 관찰되며, Dotson2에서 그 경향성이 보다 뚜렷하게 나타남.

본 연구에서는 공극수의 일부 지표만으로도 Getz Ice Shelf와 Dotson Ice Shelf의 빙붕후퇴로 인한 변화양상을 구분할 수 있음을 확인 함. 아울러 유전체 분석을 통하여 미생물군집 및 다양성을 파악한 뒤, 이를 토대로 Alkalinity 변화양상을 야기하는 미생물학적 속성작용에 관여하는 분류군들을 특정하고자 하고자 함.

라. ICP 원소분석

ICP-OES 장비를 이용하여 공극수 내 Na, Mg, K, Ca, Mn, Sr의 분포를 확인하였음. Getz Ice Shelf와 Dotson Ice Shelf내 시추코어들은 grounding line을 따라 Getz1-Getz2-Getz3와 Dotson1-Dotson2-Dotson3-Dotson4의 공간적 변화를 반영하는 양상이 K를 제외한 대부분의 ICP 원소들의 변화에서 관찰되었음.

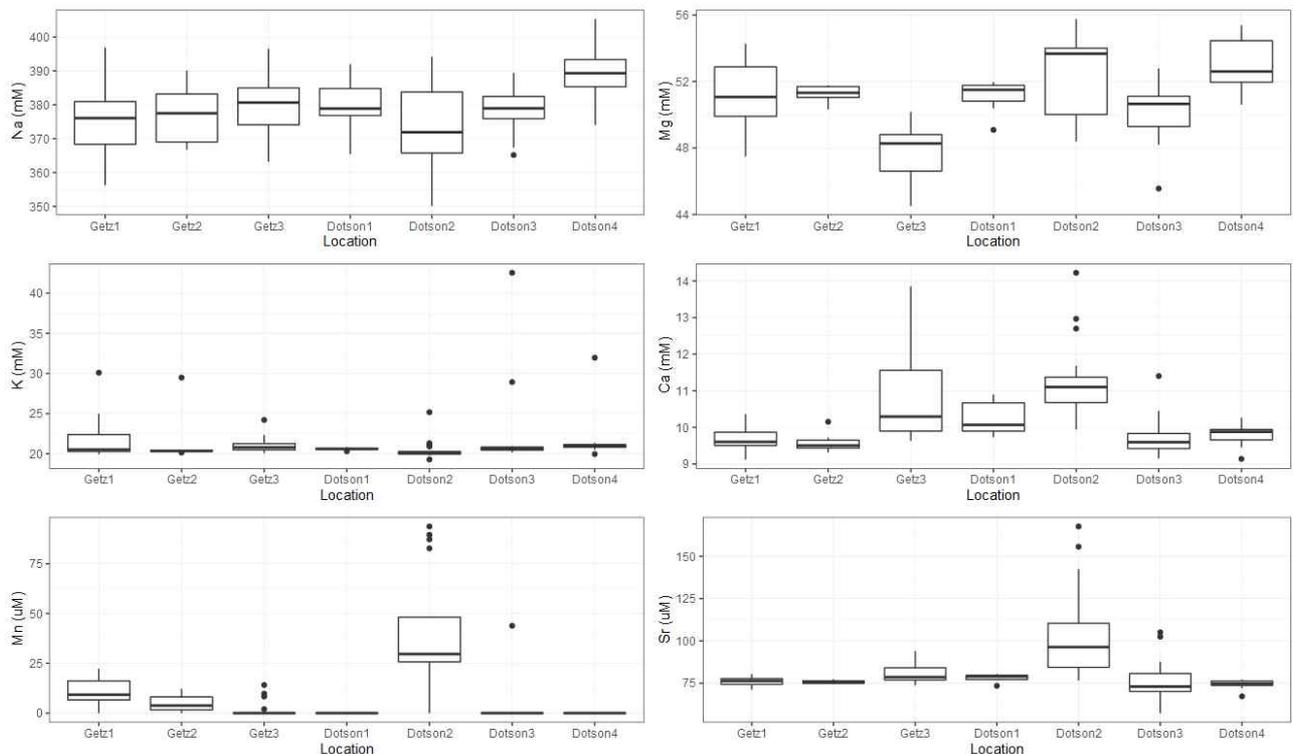


그림 11. 공극수 ICP 성분 분석결과

마. Ferrozine assay

시추코어들의 공극수에서 Ferrozine assay를 수행하여 ferrous ion(Fe^{2+})의 퇴적층 변화에 따라 형성되는 분포변화를 파악하고, sulfate(SO_4^{4-})의 분포와 비교분석을 수행함. 일반적으로 해양퇴적물에서의 ferrous ion 분포변화는 산소가 풍부한 표층의 퇴적물 아래로 미생물의 Nitrate-Mn-Fe-sulfate reduction 반응이 순차적으로 발생함. Getz Ice Shelf에서는 grounding line을 따라 Getz1-Getz2-Getz3의 순서로 iron(Fe) reduction 발생하는 퇴적층의 깊이가 깊어지

는 현상을 확인함. Dotson Ice Shelf의 경우 Dotson3에서 2 mbsf를 기준으로 퇴적층 상부와 하부에서 iron reduction이 관찰되었으며, Dotson4에서 50 cmbsf 아래부터 심부퇴적층까지 Fe-enriched 퇴적물이 관찰되었음. 이에 반에 sulfate 농도의 변화는 뚜렷하게 관찰되지 않아 sulfate reduction과 연계되지 않은 특이적 현상으로 사료 됨.

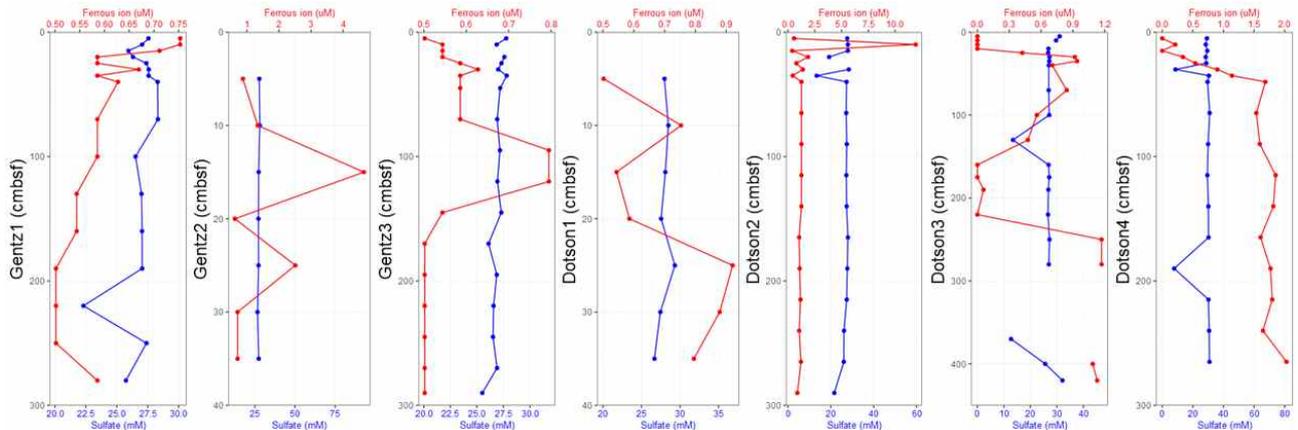


그림 12. 공극수내 ferrous ion과 sulfate의 분포변화

바. Porewater chemistry의 통계적 해석

본 연구에서는 서남극 시추코어에서 확보한 공극수 자료들을 통계적으로 해석하기 위해 주성분 분석(PCA, Principal Component Analysis)를 수행하였음. 시추코어들은 모두 상부퇴적층과 하부퇴적층들이 PC1축을 기준으로 구분되며, 이는 Ca, Sr, Alkalinity의 성분차이로 설명됨. 특히 Dotson2에서 시추한 퇴적물 코어들이 다른 코어들에 비해서 Ca, Sr, Alkalinity의 분포차이가 두드러지게 나타남. Getz3와 Dotson4의 시추코어들은 PC2축을 기준으로 구분되며, Mg과 Na의 수치에서 서로 상반되는 분포를 나타냄. 이는 Getz Ice Shelf와 Dotson Ice Shelf의 빙붕 후퇴로 인한 변화양상을 공극수의 특성으로 구분할 수 있음을 시사 함.

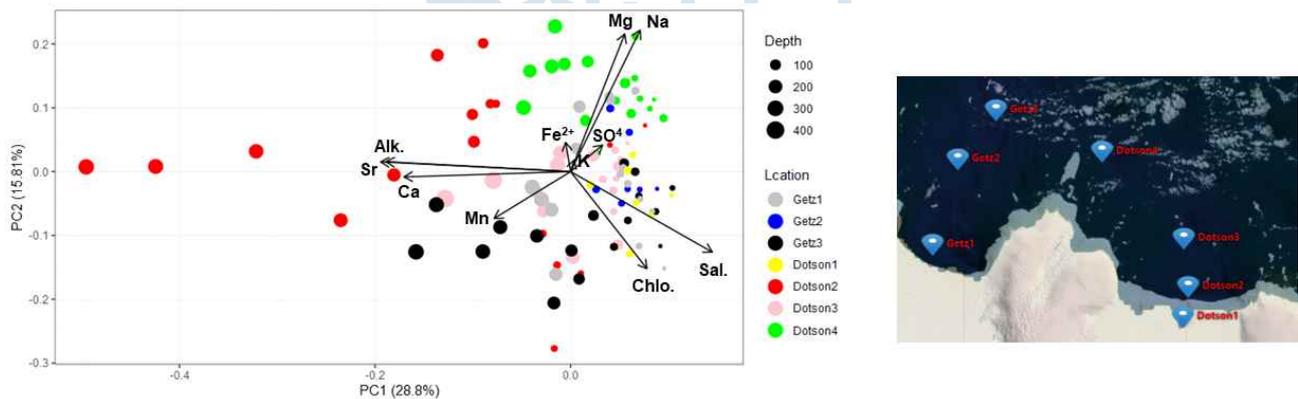


그림 13. 공극수 분석자료의 PCA 패턴

3. 남극 시추퇴적물의 유전체 분석

가. 퇴적물의 eDNA 추출

본 연구에서는 box core의 시추코어를 우선으로 환경유전체(eDNA)를 추출하여 분석을 하고자 함. eDNA의 분포는 Getz1과 Dotson1이 서로 유사한 분포양상을 보이며, Getz Ice Shelf와 Dotson Ice Shelf의 grounding line을 따라 eDNA 농도구배의 차이를 확인 함.

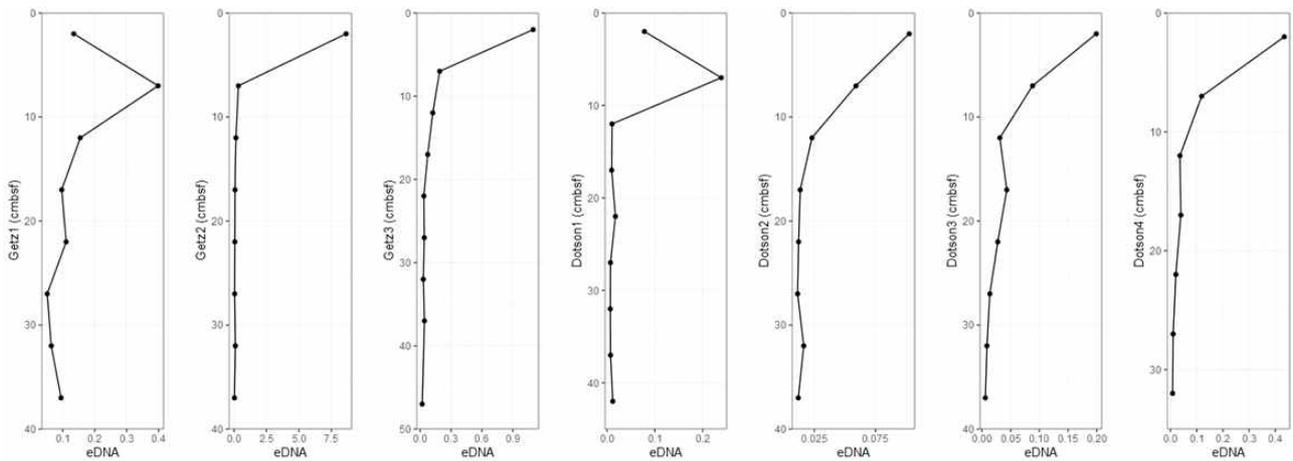


그림 14. Box core 시추코어들의 환경유전체 농도분포

나. 16S rRNA gene 메타바코딩 분석

상기의 시추퇴적물 eDNA들을 대상으로 16S rRNA gene의 메타바코딩 분석을 수행하기 위해, miseq platform library를 구축하여 군집분석을 수행 함. 시추퇴적물에서는 Proteobacteria가 전반적으로 우점하여 분포하며, Dotson1과 Getz3과 같은 일부 시추코어의 하부층에서는 Chloroflexi가 우점하게 나타 남.

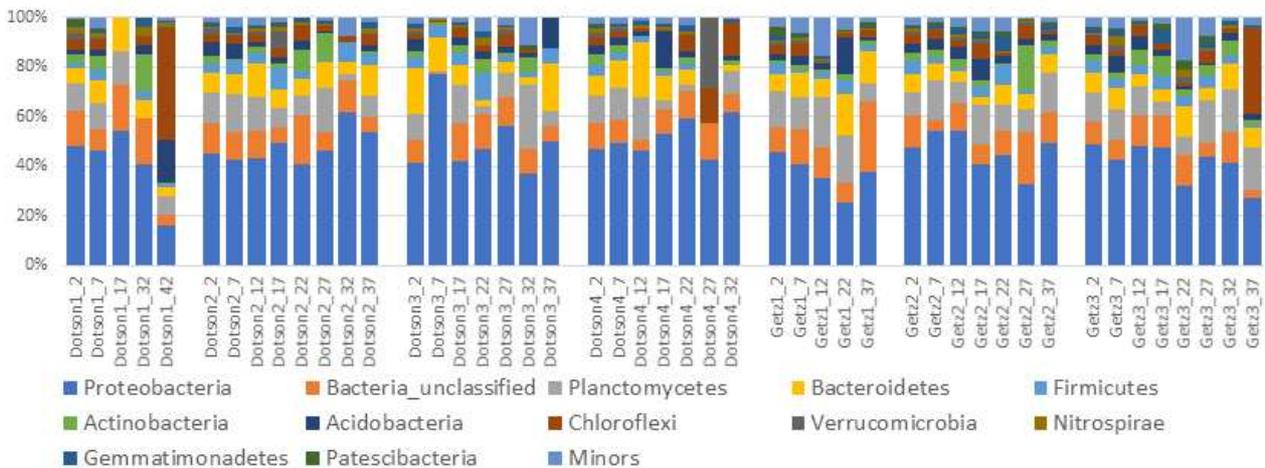


그림 15. Box core 시추코어들의 박테리아 군집구조

상기의 metabarcoding 자료들은 추후 확보하게 될 고기후 복원자료와 비교하여 심층분석을 수행 할 예정 임.

다. 과제 종료 후 수행연구 계획

과제 종료 시점까지 시추퇴적물의 지화학적 분석자료 및 metabarcoding 자료를 확보하였으며, 이후 추가적으로 확보하게 될 고기후 복원자료를 활용하여 서남극 해역에서 퇴적환경변화(기후환경 변화)를 반영하는 미생물의 유전체(Microbial Paleogenomics)를 연구하여 과거 온난기의 서남극 빙상의 후퇴 및 해양 순환으로 인한 퇴적물내 지화학 특성을 메타지놈 분석을 통하여 규명하고자 함. 과제 종료 후 논문작성을 통하여 연구에 활용된 환경유전체 DB(16S rRNA metabarcoding DB와 shotgun metagenome DB)들의 열람이 가능하도록 NCBI accession number를 논문에 공지하고자 함.

라. 후속연구 계획

과제 종료 후 수행 하게 될 서남극에서의 후속연구를 상세히 설명하기 위하여 하기의 서북극에서 수행된 연구내용을 예시로 함.

본 연구책임자는 2011년 국내 쇄빙연구선인 아라온호의 서북극 척치해 탐사에서 국내 최초로 발견된 홀로세 SMTZ(Sulfate Methane Transition Zone) 시추코어를 대상으로 퇴적환경변화(기후환경변화)를 반영하는 미생물의 유전체(Paleome)를 연구하여 홀로세 및 인류세의 미생물생태변화를 발견하였음 (Scientific Reports, 2017).

이후, 2015년의 척치해 탐사를 통하여 진행된 후속연구를 통하여 마지막 간빙기 이후 기후변화로 인한 퇴적물내 물질순환 및 SMTZ 퇴적물의 지화학 특성을 메타지놈 분석을 통하여 규명한바 있음(Under review in Molecular Ecology).

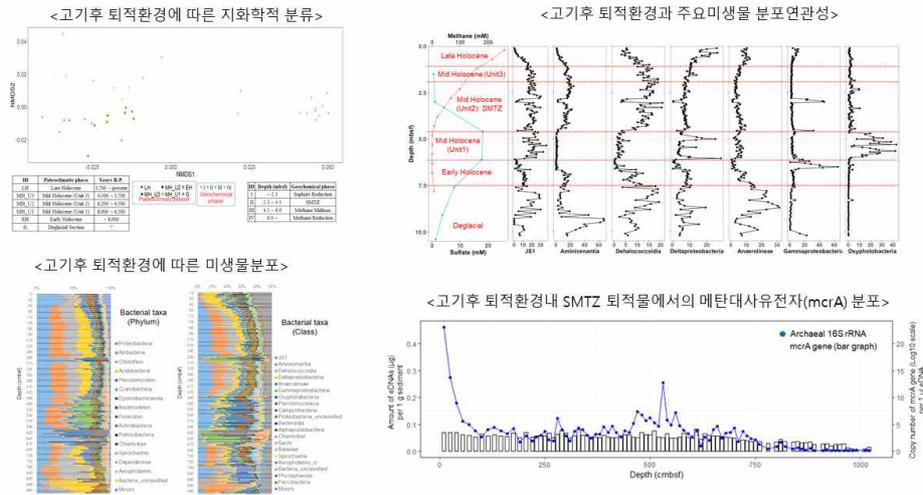


그림 16. 서북극해 척치해 Paleome 연구결과(Under review in Molecular Ecology)

본 연구팀은 상기의 척치해에서 수행된 선행연구로부터, 지난 1만 년 동안 (홀로세) 형성된 고환경 퇴적층에서 해수면 상승에 따른 해류변화와 그로 인한 지화학적·미생물학적 특성들을 Paleome 연구를 통하여 연대기적으로 구분하였음. 아울러, 상기의 선행연구의 기법을 본 연구과제의 주제인 서남극 고환경에 적용하여 퇴적환경변화(기후환경변화)를 반영하는 미생물의 유전체(Microbial Paleogenomics)를 연구하고자 함.

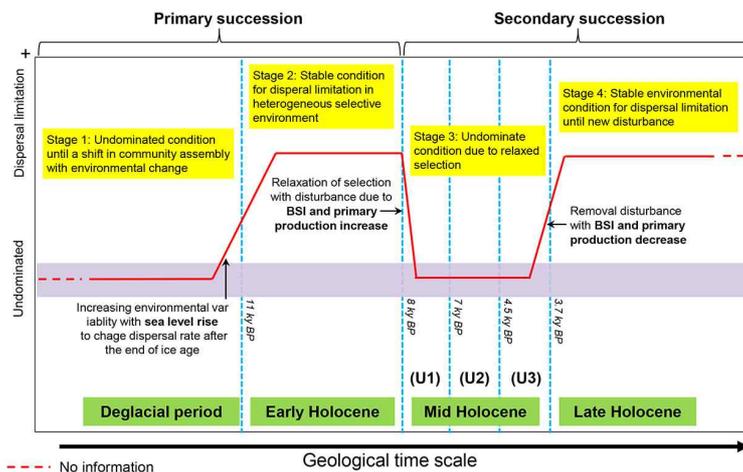


그림 17. 서북극해 척치해 Paleome 연구로 도출된 고환경 복원모델(Under review in Molecular Ecology)

4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

1절 추진일정 대비 연구 달성도

1. 목표달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
○극지 현장조사	○아라온 서남극 탐사참여 및 퇴적물시추코어 확보	100
○남극퇴적물 시료 확보	○시추코어의 subsampling 및 공극수 시료 확보	100
○퇴적물내 유기물질 특성분석	○공극수 (ICP/Ferrozine assay) 분석	100
○퇴적물 유래 환경유전체 분석	○환경유전체 추출 및 메타바코딩 수행	100

*이후의 Microbial Paleogenomics 수행을 통한 Paleom DB 구축과 미생물생태 분석은 과제종료 후에도 지속적으로 수행할 예정이다.

2절 연구의 우수성 및 기여도

1. 연구의 우수성

서남극 빙붕지역에서 환경유전체 기반의 고환경 연구는 국내·외를 아울러 본 연구가 최초이며, 현재까지 축적된 시추퇴적물의 공극수 특성자료를 통하여 Getz Ice Shelf와 Dotson Ice Shelf의 빙붕후퇴로 인한 변화양상을 파악하기에 적절한 시료임을 검증 함. 이에 현재 진행 중인 환경유전체 분석을 통하여 과거 기후변화로 인한 퇴적환경 변화를 미생물생태학적으로 규명함으로써 고환경 복원연구의 기초자료 및 지표를 다변화 할 수 있을 것으로 판단 됨.

2. 연구성과의 기여도

본 연구에서는 최근 지구온난화로 인하여 붕괴 진행도가 우려되는 서남극의 빙붕지역을 탐사했으며, 빙하 후퇴 현상으로 인한 해양생태계의 변화를 파악하기 위한 기초자료를 제공하고자 함. 특히 해당 연구지역내 시추퇴적물의 공극수 분석자료와 ferrous ion의 분포조사는 국내연구진에 의한 분석된 사례가 전무하여 본 연구의 결과가 중요한 이정표가 될 것으로 판단됨.

5장 연구개발결과의 활용계획

1절 연구개발 성과의 활용방안

1. 서남극 Paleome 분석을 통한 고기후 퇴적환경의 미생물생태 조사

선행연구기법을 적용하여 서남극 퇴적물 시추코어에서 과거 온난기의 서남극 빙상의후퇴 및 해양 순환의 영향을 반영하는 지표들을 분석할 예정. 본 연구팀은 북극에의 선행연구를 통하여 고기후 해양환경 변화로 형성된 퇴적환경에서 두드러진 미생물 분포변화를 확인하였으며, 이를 기후변화에 의한 퇴적환경 변화가 미생물 서식환경에 반영된 결과로 판단하였음. 이에 본 제안 과제에서는 선행연구의 가설들을 서남극의 퇴적물 시추코어의 Paleome 분석을 통하여 증명할 뒤, 극지환경에서의 고환경 퇴적변화를 반영하는 미생물생태 및 물질순환을 규명하고자 함.

2절 기대효과

1. 기술적 측면

본 연구는 극지퇴적물 시추코어를 대상으로 고기후학, 지화학, 분자생물학, 생물정보학, 통계학 등 융복합 기반 다학제적 연구를 제안하고 있으며, paleome기반의 고기후 퇴적환경 추적을 통하여 **신규 고기후 복원 프록시를 개발**할 수 있을 것.

2. 경제적·산업적 측면

본 연구의 최종결과에서 극지의 가스하이드레이트 부존 퇴적물과 같은 특정 퇴적환경을 발견하고 여기서 미생물의 메탄대사과정에 관련된 기능성 유전자를 탐색할 수 있다면 이를 저온환경에서의 미생물을 이용한 메탄가스 생성공정에 적용하여 기존 바이오에너지 산업에도 활용이 가능할 것으로 예상 됨.

3. 사회적 측면

국내의 극지연구는 다른 국가들에 비해 전문가의 수가 부족하며, 시급히 전문연구인력 양성이 필요함. 본 제안과제를 통해서 **극지의 지구과학 전문연구인력 양성**을 목적으로 남극해의 미생물 생태조사 및 부분적으로 유용 미생물 자원 확보를 위한 연구를 수행하고자 하며, 본 연구 과제 수행을 통해 참여연구자들은 다학제간 극지생태연구의 경험 및 생물정보학과 통계학적 분석을 통한 환경생태연구의 시점을 가지게 될 것.

6장 참고문헌

1. Orsi, W.D. Ecology and evolution of seafloor and subseafloor microbial communities. *Nat Rev Microbiol* 16, 671 - 683 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41579-018-0046-8>
2. Lloyd, Karen G., et al. Evidence for a growth zone for deep-subsurface microbial clades in near-surface anoxic sediments. *Applied and environmental microbiology* 86.19 (2020): e00877-20.
3. Jung, Jaewoo, et al. Microbial Fe (III) reduction as a potential iron source from Holocene sediments beneath Larsen Ice Shelf. *Nature communications* 10.1 (2019): 1-10.
4. Ehrmann, Werner, et al. Provenance changes between recent and glacial-time sediments in the Amundsen Sea embayment, West Antarctica: clay mineral assemblage evidence. *Antarctic Science* 23.5 (2011): 471-486.
5. Han, D., Shin, H., Lee, JH. et al. Phylogenetic diversity and spatiotemporal dynamics of bacterial and microeukaryotic plankton communities in Gwangyang Bay of the Korean Peninsula. *Sci Rep* 12, 2980 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06624-7>



KOPRI 주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 연구선 산·학·연 공동 활용 연구사업(PAP사업) 연구결과보고서 입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 연구선 산·학·연 공동활용 연구사업으로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.