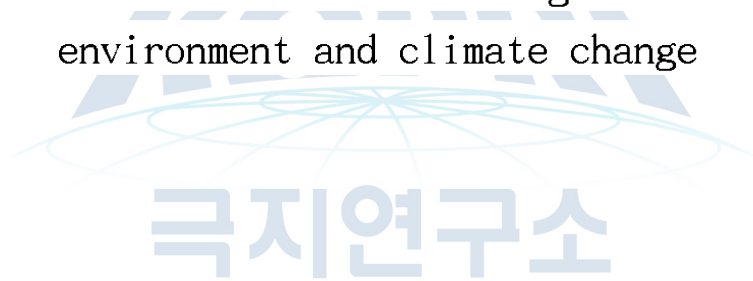


남극 해양환경 모니터 링 및 기후변화 대응을 위한  
현생유공충의 다각적 활용기반 구축연구

A study on the establishment of multiple application of  
extant foraminifera for monitoring Antarctic marine  
environment and climate change



한양대학교 산학협력단

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “국내 학·연 극지연구진흥프로그램(PAP사업)”에 관한 연구 “남극 해양환경 모니터링 및 기후변화 대응을 위한 현생유공충의 다각적 활용기반 구축연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



연구기관명 : 한양대학교 산학협력단

연구책임자 : 이 원 철

참여연구원 : 염지수

“ : 박나연

“ : 김재현

“ : 이소민

“ : 김희린

“ : 박은석

“ : 김민준

# 요 약 문

## I. 제 목

남극 해양환경 모니터링 및 기후변화 대응을 위한 현생유공충의 다각적 활용기반 구축연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 기후변화가 상대적으로 급격하게 일어나는 서남극 지역의 환경 모니터링 및 다양성 연구의 중요성이 강조되고 있으며, 기후변화 대응을 위한 고기후 복원 연구 필요성도 높아짐.
- 유공충류는 해당 연구분야에 중요한 생물 지시자로 활용될 수 있는 생물군이나, 국내 극지연구에서 이를 다각적으로 활용할 수 있는 기초 데이터 또는 연구기반이 부족함.
- 따라서 본 연구를 통해 극지 기후 및 환경 연구에 유공충을 다각적으로 활용할 수 있는 기초자료를 제공하고 활용한 연구를 수행하고자 함.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 남극 킹조지섬 마리안소만 인근 해역의 현생 유공충 시료 및 환경데이터 확보
- 시료 분석 및 향후 남극 유공충 다각적 활용을 위한 기초데이터 확보
  - 종 목록 및 고해상도 이미지 자료
  - 종 조성 및 분포 데이터
  - DNA barcode 및 단백질 질량 스펙트라 데이터
- 확보한 데이터 기반 종 다양성 연구 및 분포 연구 수행

## IV. 연구개발결과

- 2021/2022, 2022/2023 하계 남극 마리안 소만 포터소만 및 맥스웰만 유공충 시료 확보
- 킹조지섬 보고 현생 유공충 종목록 문헌조사 작성
- 마리안 소만 및 포터소만 저서 퇴적물 지화학 분석 및 유공충 종 조성 및 다양성 파악
- 마리안 소만에 대표적으로 출현하는 저서성 유공충 10종의 mtCO1 및 18S 바코드 염기서열 확보
- 마리안 소만에 대표적으로 출현하는 저서성 유공충 8종의 MALDI-TOF mass spectra 데이터 획득 방법론 구축 및 spectra 데이터 확보

## V. 연구개발결과의 활용계획

- 극지 생물다양성 및 극지 해양생태 연구에 중요한 기반 자료로 활용
- 기후변화에 따른 급격한 극지 해양 환경변화 모니터링연구에 활용
- 극지 기후변화 예측 및 대응을 위한 고기후 및 화석 균집연구 기반자료 제공
- 전문 인력 양성을 통해 미래 극지연구를 위한 인적자원 확보에 기여

# Summary

## I. Title

A study on the establishment of multiple application of extant foraminifera for monitoring Antarctic marine environment and climate change

## II. Purpose of the study

Identify the species composition and diversity of Arctic modern foraminifera in various aspects to establish the basis for multiple application of recent foraminifera in arctic climate and environment studies

## III. Research contents

- Collecting the extant foraminifera and the environmental data from waters near Marian Cove, King George Island, Antarctica
- Establishment of the database of modern foraminifera by examining the samples
  - species checklist and high resolution image data
  - species composition and distribution
  - DNA barcode and protein mass spectra data
- Conduct studies on community structure, distribution, and multiple-approach to species diversity based on the dataset obtained

## IV. Results

- Foraminiferal sample collection from Marian Cove, Potter Cove and Maxwell Bay in 2021/2022, 2022/2023 Austral Summer.
- Species checklist of foraminifera recorded in King George Island by literature survey
- Sediment geochemistry analysis and species diversity analysis
- Partial mtCO1 and 18S sequence data of the common species in Marian Cove
- Establishment and improvement of the methodology to obtain foraminiferal MALDI-TOF mass spectra data and mass spectra data establishment from 8 common species from the Marian Cove

## V. Usage of research and development results

- Principal data for the polar biodiversity and marine ecology research
- Application to the polar environmental monitoring study
- Provide fundamental data to the studies on paleoenvironmental change
- Development of the human resources for polar research by educating expert

# Contents

Chapter 1. Introduction

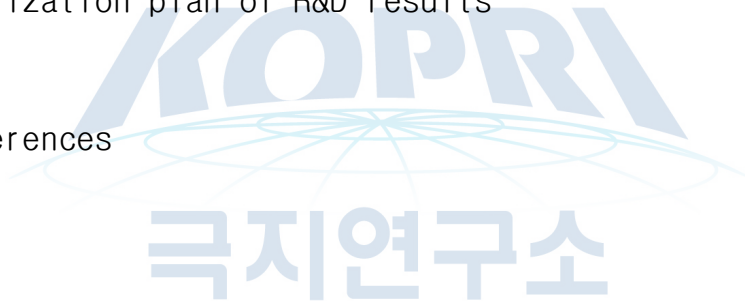
Chapter 2. Domestic and foreign technology development status

Chapter 3. Methods and Results of Research and Development

Chapter 4. Achievements of R&D goals and contribution

Chapter 5. Utilization plan of R&D results

Chapter 6. References



# 목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 참고문헌



# 제 1 장 서론

## 제 1절 연구의 필요성

### 1. 서남극 지역의 빠른 기후변화

기후변화로 인하여 급격한 극지 해양환경 변화와 생태계 파괴가 진행됨에 따라 향후 극지 기후변화 예측 및 대응을 위해 극지 생물다양성, 해양 환경모니터링 및 고기후 복원 연구의 필요성과 중요성이 증가하는 추세임.

- 극지는 지구상에서 기후변화로 인한 환경변화가 가장 급격하게 나타나는 지역으로, 특히 남극의 급격한 해양 환경변화는 생태계파괴와 전 지구적 기상이변을 초래하고 있음. 이에 따라 극지 기후변화 예측 및 대응책 마련을 위한 연구의 필요성이 높아지고 있음 (고기후/환경변화 복원, 환경모니터링, 생물다양성 연구 등).
- 온난화에 따른 남극 해빙감소가 지구 전체 해수면 상승에 영향을 주고 있으며 (Bamber and Riva, 2010), 1992년에서 2017년 사이 남극대륙 빙상이 약 2조 7천억 톤 유실되었고 그 결과 지구 해수면이 평균 7.6 mm 상승했으며 특히 서 남극지역의 연간 빙상 손실량이 세 배 가까이 증가하는 등 (IMBE team, 2018) 남극은 지구에서 기온상승으로 인한 영향을 가장 크게 받는 지역임.
- 기후변동에 관한 정부간 패널 (IPCC, International Panel on Climate Change) 은 2019년 발간한 해양 및 빙권 특별보고서를 통해 기후변화에 따른 극지환경변화, 이상 기후 증가, 해수면 상승 등의 위험을 경고하고 있으며 기후변화 예측 및 대응의 시급성을 강조하고 있음.
- 남극해양생물보존위원회 (CCAMLR, Commision for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources) 등의 국제기구는 남극 해양보호구역을 설정하고 생태모니터링을 진행함으로써 인간 활동 및 기후변화로 인한 남극환경변화와 남극 고유 생물 다양성 감소에 대응하기위해 노력하고 있음.
- 또한 현재와 미래 기후변동을 예측하고 그 원인을 파악하기 위해 미화석 (microfossil) 분석을 통한 고기후/환경 변화를 복원하는 연구의 필요성이 높아지고 있음 (Schmiedl, 2019).
- 특히 유공충은 기후변화 예측과 대응에 필요한 환경 모니터링과 고기후 연구에 널리 활용되는 중요한 지표생물임에도 국내 극지 연구에서는 거의 다루어진 바가 없어, 한국 극지 유공충 연구의 활성화를 위한 기반 조성 (연구 인력양성 및 기초 데이터 확보) 이 필요성이 높다고 판단됨.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1절 연구대상 현황

#### 1. 유공충

- 유공충은 주로 해양에 서식하는 원생생물로, 일반적으로 탄산칼슘 또는 사질의 외각을 형성함. 퇴적된 외각은 화석화 될 수 있어 초기 캄브리아기부터 시작되는 풍부한 화석기록이 남아있음. 전 세계적으로 현생종은 40 ~ 50 종의 부유성 종을 포함해 대략 1,000여 종 보고되었으며 화석종은 30,000여 종 보고되었으며 국내에서는 국가생물종목록 기준 약 1,800여 종 보고되었음.
- 그러나 전 세계적으로 미 발굴된 해역이 많고 2000년대에 들어서야 본격적으로 연구되기 시작한 유기질 외각을 갖는 그룹 및 담수/토양 서식종 등으로 보아 아직 유공충은 생물다양성이 충분히 파악되지 않은 생물군임.
- 저서성 유공충의 경우 생물학적/생태학적 특성으로 1960년대부터 해양 환경모니터링에 생물지표로 활용되고 있음 (FOBIMO protocol, Foram-AMBI Index 등).
  - 열대, 극지, 심해, 기수역 등 모든 해양환경에 분포하고, 높은 서식밀도 (100 - 10,000 개체/100cm<sup>2</sup>), 높은 다양성 (20 - 50 종/ 200개체)으로 인해 적은 양의 시료로부터 분석에 충분한 개체 확보가 가능함.
  - 생활사가 짧아 환경변화에 대한 반응이 빠르게 나타나며 (Martins et al., 2019), 해류, 염분, pH, 중금속, 탄화수소, 유기물오염 등 자연적 환경변화와 인간 활동으로 인한 환경변화에 민감하게 반응하여 분포패턴과 군집구성이 달라짐.
  - 죽은 개체의 외각이 퇴적물에 보존되기 때문에 환경 변화 이전의 생물상 복원이 가능하여 변화 전후의 군집 비교가 가능하고, 외각의 화학조성을 비교분석하여 환경변화 분석이 가능함.
  - 표준화된 유공충 활용 환경모니터링 방법론을 개발하고 적용하기위한 국제 컨소시엄인 FOBIMO (FORaminiferal BIOMonitoring) Group이 2011년 창설되어 세계 각국의 연구자들의 활발한 교류가 이루어지고 있음: 표준화된 시료확보 및 처리 프로토콜 (Schönfeld et al., 2012) 이 제작되었으며 환경평가의 척도가 되는 표준화된 생물지수인 Foram-AMBI가 개발되어 북동대서양, 북극 피오르, 지중해, 멕시코만, 보하이해 등 여러 해역의 환경모니터링 연구에 적용되고 있음.
- 현대 환경뿐만 아니라 고환경, 고기후 복원 연구에서도 유공충의 분포와 외각의 화학조성을 환경지표로 활용되고 있음.
  - 부유성 유공충 화석의 군집구조는 해수면 온도, 염분, 영양염 분포, 해빙과 관련이 있으며 저서성 유공충 화석은 수심, 산소, 먹이량에 대한 정보를 제공함.



- 유공충 외각의  $\delta^{18}O$  분석을 통해 과거의 빙상부피, 기온 및 해수면높이 변화를 추정할 수 있으며  $\delta^{13}C$  분석을 통해 심해 산소포화도 변화 및 수표면 생산성 변화를 재구성할 수 있음.
- 지난 이십여 년 간 분자유전학적 연구방법론을 적용한 유공충의 분자계통학, 분류학, 생물 다양성 연구가 진행되고 있음
- 유공충의 DNA 바코드 서열로 18S rDNA의 3' 말단부 단편서열이 널리 사용되고 있으며 현재까지 이루어진 대부분의 유공충 분자계통학 및 다양성 연구에서는 rDNA 서열이 분자지표로 사용되고 있음.

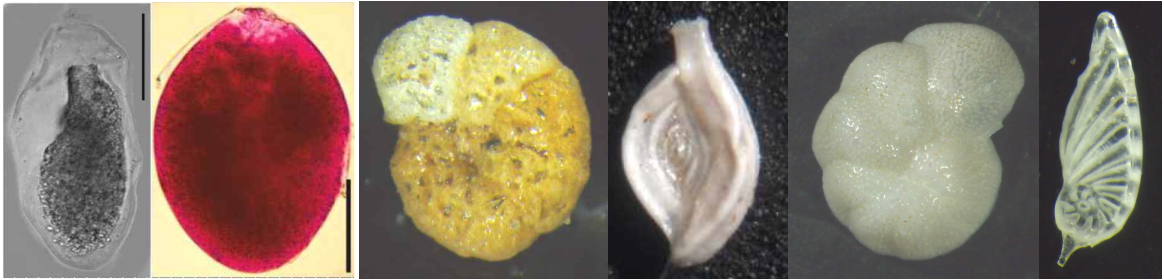


그림 1. 다양한 유공충. *Allogromiid* sp. (Stefanoudis, 2016), *Labrospira crassimargo*, *Spiroloculina* sp., *Cibicoides lobatulus*, *Planularia spinipes*,



## 제 2절 국내외 연구 현황

### 1. 국내 현황

- 국내에서 진행된 남극 현생 유공충에 대한 연구는 거의 전무한 상태이며, 대부분 고기후 복원연구를 위한 해저 시추코어 퇴적물의 유공충 외각성분 분석에 초점이 맞추어져 있음. 이마저도 제한된 인력이 수행하고 있어 국내 전문 인력양성과 전반적인 유공충 연구의 질적, 양적향상이 필요한 실정임.
- 대부분의 연구가 킹 조지섬의 마리안 소만과 맥스웰 만 근방이라는 한정적인 지역에서 저서성 유공충을 대상으로 진행됨.
  - 표층 퇴적물의 저서성 유공충 군집의 분포양상 분석 연구, 유공충 외각의 안정동위원소 분석 또는 수직분포양상 분석을 통한 고해양환경 연구 (Chang and Yoon, 1995; Park et al., 1995; Woo et al., 1996; Li et al., 2000)

### 2. 국외 현황

- 국외 남극 유공충 연구는 국내와 마찬가지로 해저 시추코어 퇴적물에서 산출된 유공충 외각의 동위원소 및 미량원소 분석을 통한 고기후/환경 연구가 주를 이루지만 남서틀랜드 제도뿐만 아니라 웨델해와 로스해 등 넓은 해역에서 연구가 진행되고 있으며, 현생 저서성 및 부유성 유공충을 대상으로 다방면의 연구가 진행되고 있음:
- 남극 현생 유공충의 다양성 및 분포에 대한 연구는 전 세계적으로 20세기 후반부터 활발히 진행되었으며 21세기에 들어서는 남극의 환경변화 양상에 대해 이해하기 위해 현생유공충의 분포와 여러 해양학적 요인들 (물리화학, 지리 및 생태) 간의 관계에 대한 연구가 진행되고 있음.
- 일부 저서성 종의 섭식형태 분석을 통해 유공충이 남극 저서 환경의 먹이망과 식물플랑크톤 유래 유기탄소 순환에 중요한 역할을 한다는 연구결과가 있었음 (Suhr and Pond, 2006; Suhr et al., 2008).
- 뿐만 아니라 유공충의 생물 다양성에 관한 연구도 활발하게 이루어져 남극 저서 퇴적물에 매우 다양한 유기질 또는 사질의 무른 단실 외각을 갖는 유공충 (monothalamiid) 이 서식한다는 것이 밝혀졌으며 신종 유공충이 발굴되기도 함 (Majewski et al., 2007; Pawlowski and Majewski, 2011)
- 분자지표를 활용한 다양성 연구도 진행된 사례가 있음. Ribosomal RNA 유전자 등의 서열분석을 통한 남극의 유기질 단실외각 유공충의 유전적 다양성 및 분자계통연구가 주로 이루어 졌으며 (Pawlowski et al., 2002, 2005; Sabbatini et al., 2004), 남극 및 북극에 모두 분포하는 저서성, 부유성 유공충의 유전적 다양성을 분석한 연구도

진행되었음 (Darling et al., 2007; Pawlowsk et al., 2007). 가장 최근에는 남극해 심해 퇴적물의 환경 DNA 메타바코딩을 통해 기존에 인식하지 못한 매우 높은 유공충 다양성을 확인한 연구가 있었음 (Pawlowski et al., 2011).

### 3. 기존 연구의 문제점

- 남극의 유공충연구는 대부분이 화석종을 환경 지표(프록시)로 활용한 고기후 복원 연구에 국한되어 있음. 고기후 복원 연구의 신뢰성과 정밀성을 확보하기 위해서는 반드시 프록시와 기후/환경 간 관계에 대해 충분한 생물학적, 생태학적 연구가 선행되어야 하지만 남극에서는 이러한 연구들이 매우 부진한 실정임.
- 환경요인과 분포양상 간 관계를 분석한 대부분의 연구에서 소수의 비생물적 요인(입자 크기, 깊이, 유기 탄소 함량)만을 다루었다는 한계점이 있음.
- 또한 생태학적 연구의 중요한 기반이 되는 정확한 종 동정이 어렵다는 점 때문에 유공충 전문가들의 접근이 쉽지 않은 실정임.
- 형태종 동정의 어려움: 기존 남극 유공충 다양성 연구에서 형태학적 기재가 누락된 경우가 다수 있으며, 유공충 형태분류 체계의 모호성으로 인해 종 수준의 동정이 불확실한 경우가 많고, 하나의 종에 해당하는 형태적 범주가 너무 넓어 다방면으로 재검토가 필요함. 하나의 종에 해당하는 형태적 범주가 넓어 북대서양 등 출현한 해역과 지리적으로 매우 먼 해역에서 기재된 종으로 동정되어 있는 등 기존 자료의 활용이 쉽지 않고 재검토가 필요함.
- 분자지표의 문제: 유전적 다양성 연구에 사용되는 유전자 마커 종류가 rRNA 유전자에 국한되어 있었으며, 일반적으로 종 수준의 다양성 연구에 사용되는 mtCO1 유전자 염기서열은 매우 최근인 2021년에 세계 최초로 보고되었음.
- rDNA 서열에서 다른 생물군에 비하여 개체 내 변이 및 종내 변이 (intragenomic polymorphism, intraspecific polymorphism)가 매우 높게 나타난다는 문제점이 보고된 바 있어 앞으로 단백질 코딩 유전자를 포함한 다양한 마커의 염기서열 정보 확보가 필요함.
- 따라서 극지 기후변화 및 환경모니터링 연구 등에 유공충을 다각적으로 활용하기 위해 생물학적 다양성, 분포양상 등의 다각적 기초 데이터 확보가 필요함.

## 제 3절 관련 연구 동향 및 독창성

### 1. 국내외 동향

#### 가. 단백질 질량 스펙트라 분석법을 적용한 종 식별 연구에의 적용 가능성

- MALDI-TOF MS (Matrix-assisted laser desorption ionization time-of-flight mass spectrometry)를 활용한 동정 기법은 종 특이적인 mass spectra peak pattern을 종 동정 지표로 활용하는 방법임. 기존의 DNA 바코드 염기서열 분석법에 비해 효율적으로 종 식별이 가능함.
- 박테리아 (Chalupova et al., 2014; Seng et al., 2010; Singhal et al., 2015), 균류 (Crossay et al., 2017) 요각류 (Bode et al., 2017; Laakmann et al., 2013) 및 어류 (Shao and Bi, 2020), 곤충 (Ulrich et al., 2017)등 다양한 분류군에 적용되어 활용성을 인정받고 있음.
- 국내에서는 본 연구팀에서 해당 방법론을 요각류 은둔종 연구 (Yeom et al., 2021) 및 관해파리류 종 식별 (Park et al., 2021)에 적용하여 활용 가능성을 확인 한 바 있음.
- 원생생물중에서는 특히 미세조류의 종 동정에 단백질 mass spectra 분석법을 활용한 연구사례가 있었으나 (Barbano et al., 2015; Baumeister et al., 2020) 아직까지 유공충의 종 식별에 적용하고자 시도된 사례는 전세계적으로 전무한 상황임.

#### 나. 기하학적 형태분석법 (Geometric morphometrics) 을 통한 형태종 연구의 적용가능성

- 기하학적 형태분석법은 개체의 크기와 모양 등 형태적 특성에서 나타나는 변이를 수치화하여 통계적으로 분석할 수 있다는 장점이 있어 형태특징 이외의 분류 지표를 활용하기 어려운 화석 (Dehon et al., 2019; Gray et al., 2017) 및 다양한 분류군의 형태 및 다양성 연구에 활용되고 있음. 따라서 본 사업을 통해 형태종 및 이미지 데이터를 확보함으로써 후속연구로 종간-종내 변이가 모호한 GM 분석법을 시도할 수 있는 기반 자료를 갖출 수 있음
- 어류, 곤충(Santos et al., 2019; Schwarzfeld and Sperling, 2014)에서부터 다양한 저서생물 (Karanovic et al., 2020; Kim et al., 2021; Theska et al., 2020) 및 원생생물에 이르는 다양한 분류군에서 종 동정 및 cryptic species 연구가 진행되고 있음.
- 유공충 연구에서도 기하학적 형태분석법이 적용된 사례가 일부 있으나, 형태분류 및 종 다양성 연구에 적용된 사례가 거의 없음: 부유성 유공충을 사용한 기하학적 형태 분석을 위한 이미지 처리기법 개발 연구 (Hsiang et al., 2016), fusulinid 유공충 화석의 기하학적 형태분석을 통한 생활사 단계를 구별한 연구 (Shi and MacLeod, 2016), 현생유공충 *Bolivina lomani* 의 퇴적물조성에 따른 종내 형태 변이연구 (Bayron-Arcelay et al., 2020).

## 제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

### 제 1절 연구개발 목표 및 추진체계

#### 1. 연구 목표

##### 가. 최종 연구목표

향후 남극 기후 및 환경연구에 유공충을 효과적으로 활용하기 위해 남극 킹조지 섬 맥스웰만 해역에 서식하는 현생 유공충 종다양성, 형태정보, DNA 바코드, 단백질 질량 스펙트라 데이터를 체계적으로 확보함으로써 국내 유공충 연구기반을 구축

##### 나. 정성적 목표

| 구분       | 연도   | 연구개발목표                         | 연구개발내용  |
|----------|------|--------------------------------|---|
| 1차<br>년도 | 2021 | 데이터 확보 및 분석<br>체계구축            | 남극 현생유공충 데이터베이스 구축을 위한 분석 전략 수립               |
|          |      |                                | 문헌조사를 통한 기록종 목록, 우점종 및 분포파악                   |
| 2차<br>년도 | 2022 | 남극 현생유공충<br>시료확보 및 분석          | 킹조지섬 근방해역의 현생 저서성/부유성 유공충 채집 (21/22 하계)       |
|          |      |                                | 출현 종 목록 및 이미지 자료 확보                           |
|          |      |                                | 종 조성 및 우점종 파악                                 |
|          |      |                                | DNA barcode 및 단백질 질량 스펙트라 데이터 확보              |
| 3차<br>년도 | 2023 | 남극 현생유공충<br>데이터 추가확보 및<br>활용연구 | 킹조지섬 근방해역의 현생 저서성/부유성 유공충 시료 추가 확보 (22/23 하계) |
|          |      |                                | 유공충 종목록 및 형태이미지 데이터 추가확보                      |
|          |      |                                | DNA barcode 및 단백질 질량 스펙트라 데이터 추가확보            |
|          |      |                                | 채집지역의 환경조건에 따른 유공충 분포, 군집구성 연구                |

##### 다. 정량적 목표

##### (1) 논문 및 특허

| 구분   | 국외논문(편) |     |      |     | 국내논문(편) |     |      |     | 특허출원(건) |    |
|------|---------|-----|------|-----|---------|-----|------|-----|---------|----|
|      | SCI     |     | SCIE |     | SCI     |     | SCIE |     | 국외      | 국내 |
|      | 주저자     | 공저자 | 주저자  | 공저자 | 주저자     | 공저자 | 주저자  | 공저자 |         |    |
| 1차년도 |         |     | 1투고  |     |         |     |      |     |         |    |
| 2차년도 |         |     | 2    |     |         |     |      |     |         |    |
| 3차년도 |         |     | 2    |     |         |     |      |     |         |    |

(2) 연구인력양성 목표

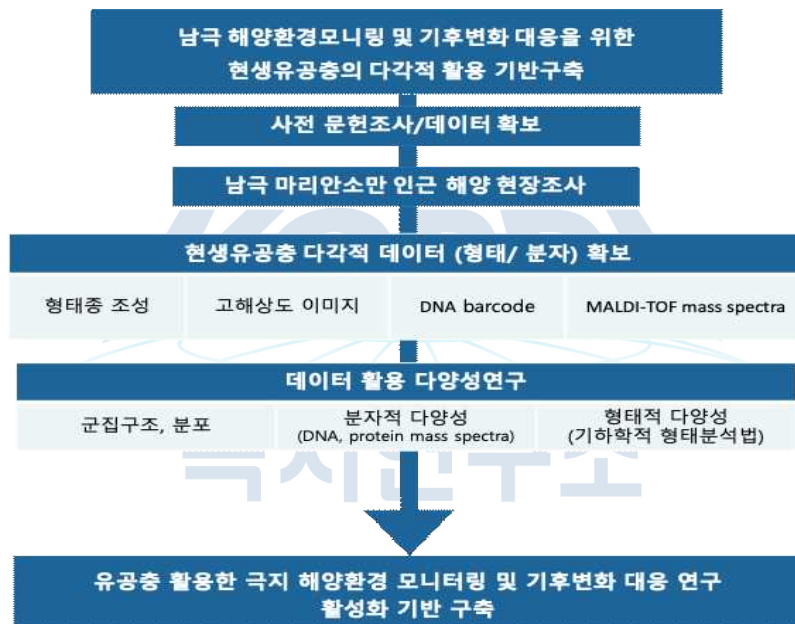
- 작성 당시 연구수행 기관 내 참여인력 현황을 기준으로 작성하였음

(명)

| 구 분  | 학 사 |    | 석 사 |    | 박 사 |    | 계  |    |
|------|-----|----|-----|----|-----|----|----|----|
|      | 현황  | 목표 | 현황  | 목표 | 현황  | 목표 | 현황 | 목표 |
| 1차년도 | 3   | -  | 2   | -  | -   | -  | 5  | -  |
| 2차년도 | 2   | -  | 2   | 2  | -   | -  | 2  | 5  |
| 3차년도 | 2   | 2  | 1   | 1  | 1   | 2  | 4  | 5  |

2. 연구 개발 추진전략 및 방법

가. 추진체계



나. 참여 연구인력 및 주요 활용사항

| 참여인력  |     | 주요 활용계획 및 사유   |
|-------|-----|--|
| 소속    | 이름  |  |
| 한양대학교 | 염지수 | 바코드분석, 단백질 분석 과정에 참여 (해당분야 연구실적 보유)                    |
| 한양대학교 | 김재현 | 바코드 분석, 형태 분석에 참여 (해당분야 연구실적 보유)                       |
| 한양대학교 | 이소민 | 채집, 형태분석, 단백질분석, 바코드 분석 등 전반적인 모든 유공충 분석과정 진행 (유공충 전공) |
| 한양대학교 | 박나연 | 채집, 부유성 시료분석, 단백질 분석 과정에 참여 (해당분야 연구실적 보유)             |
| 한양대학교 | 김희린 | 채집, 형태분석, 전반적인 분석과정 진행 및 보조 (유공충 전공)                   |
| 한양대학교 | 박은석 | 전반적인 유공충 시료 분석과정 진행 보조로 참여                             |
| 한양대학교 | 김민준 | 전반적인 분석과정에 보조로 참여                                      |

## 제 2절 연구수행 내용 및 결과

### 1. 문헌조사 및 기록 중 다양성 파악

킹조지섬 및 인근해역의 현생 유공충 다양성과 관련된 국내외 문헌조사 진행 및 킹조지섬 연,근해에 출현하는 현생 저서성/부유성 유공충 종 리스트를 작성하였음.

(참고문헌 목록)

| Type                    | Region                     | References                         |                             |
|-------------------------|----------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Planktonic foraminifera | Anvers Island              | Lipps and Krebs, 1974              |                             |
|                         |                            | Mikis et al., 2019                 |                             |
|                         | Bransfield Strait          | Boltovskoy and Boltovskoy., 1970   |                             |
|                         | Drake passage              | Boltovskoy, 1971                   |                             |
| Darling et al., 2000    |                            |                                    |                             |
| Benthic foraminifera    | Admiralty Bay              | Bernasconi et al., 2019            |                             |
|                         |                            | Gazdzcki and Majewski, 2003        |                             |
|                         |                            | Majewski et al, 2007; 2016         |                             |
|                         |                            | Majewski, 2005; 2010               |                             |
|                         |                            | Pawlowski and Majewski, 2011       |                             |
|                         |                            | Rodrigues et al., 2010; 2013; 2015 |                             |
|                         |                            | Sinniger et al., 2008              |                             |
|                         | Maxwell Bay                | Great Wall Bay                     | Li and Zhang, 1986          |
|                         |                            | Marian Cove                        | Chang and Yoon, 1995        |
|                         |                            | Marian Cove                        | Li et al., 2000             |
|                         |                            | Marian Cove                        | Woo et al.,1996             |
|                         |                            | Potter Cove                        | Mayer, 2000                 |
|                         | Other regions in Antarctic |                                    | Anderson, 1975              |
|                         |                            |                                    | Dejardin et al., 2018       |
|                         |                            |                                    | Earland, 1933               |
|                         |                            |                                    | Earland, 1934               |
|                         |                            |                                    | Earland, 1936               |
|                         |                            |                                    | Echols, 1967                |
|                         |                            |                                    | Heron-Allen & Earland, 1932 |
|                         |                            |                                    | Igarashi et al., 2001       |
|                         |                            | Majewseki_Pine island Ferrero bay  |                             |
|                         |                            | Parr, 1950                         |                             |
|                         |                            | Violanti, 1996                     |                             |
|                         |                            | Ward, 1984                         |                             |

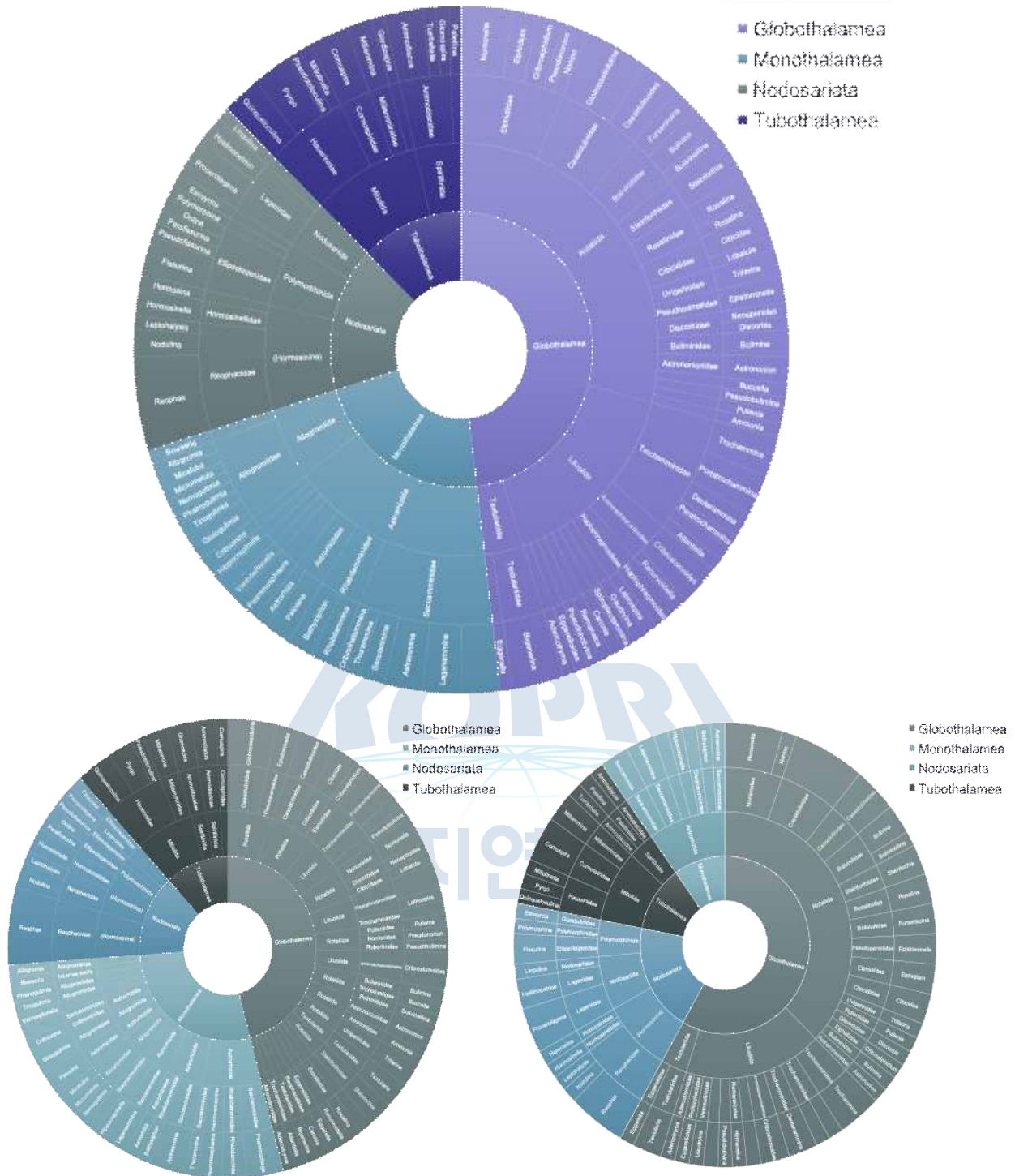


그림 2. 킹조지섬 (중앙 상단), 애드미럴티만 (좌) 및 맥스웰만 (우) 출현 저서성 유공충 종 조성 선버스트 차트.

(킹조지섬 출현 저서성 유공충 분류군 조성)

| Region                  | No. Class | No. Order | No. Family | No. Genus | No. Species |
|-------------------------|-----------|-----------|------------|-----------|-------------|
| King George Is. (Total) | 4         | 10        | 52         | 93        | 157         |
| Admiralty Bay           | 4         | 10        | 43         | 72        | 111         |
| Maxwell Bay             | 4         | 9         | 42         | 58        | 91          |



킹조지섬 출현 저서성 유공충은 총 4 강 10 목 52 과 93 속 157 종으로 집계되었음. 세부적으로 애드미럴티만 (Admiralty Bay)에서는 4 강 10 목 43 과 72 속 111 종이 보고되었고, 마리안소만 및 포터소만 등이 포함되어 있는 맥스웰 만 (Maxwell Bay)에서는 4 강 9 목 42 과 58 속 91 종이 보고되었음. 상대적으로 애드미럴티만에서 보고된 종 수가 더 많은 주요 원인은 해당 지역에서의 현생 저서성 유공충 연구가 더 많이 진행되었기 때문인 것으로 파악되며, 특히 Monothalamous 그룹의 종 다양성에 대한 연구는 맥스웰 만에서 전무하기 때문에, 맥스웰만에서 저서성 유공충이 더 적게 보고된 것으로 보여짐. 추가적으로, 킹조지섬 출현 저서성 유공충 종 목록 구축을 위해 참고문헌 검토한 결과, 킹조지섬 연구 해역에서 공통적으로 출현하는 저서성 유공충 14 종을 확인하였음.

(킹조지섬에서 출현하는 현생 저서성 유공충 종 목록)

| No | Species                             | Maxwell Bay | Admiralty Bay | No  | Species  | Maxwell Bay | Admiralty Bay |
|----|-------------------------------------|-------------|---------------|-----|--|-------------|---------------|
| 1  | <i>Adercotryma glomeratum</i>       | ○           | ○             | 80  | <i>Lingulina translucida</i>                         | ○           |               |
| 2  | <i>Allogromia cf. crystallifera</i> |             | ○             | 81  | <i>Lobatula lobatula</i>                             |             | ○             |
| 3  | <i>Ammodiscus gullmarensis</i>      |             | ○             | 82  | <i>Micatuba cf. flexilis</i>                         |             | ○             |
| 4  | <i>Ammodiscus incertus</i>          |             | ○             | 83  | <i>Micrometula sp.</i>                               |             | ○             |
| 5  | <i>Ammodiscus sp.</i>               | ○           |               | 84  | <i>Miliammina arenacea</i>                           | ○           | ○             |
| 6  | <i>Ammonia beccarii</i>             |             | ○             | 85  | <i>Miliammina earlandi</i>                           | ○           | ○             |
| 7  | <i>Astrammia cf. sphaerica</i>      |             | ○             | 86  | <i>Miliolinella sp.</i>                              | ○           |               |
| 8  | <i>Astrammia rara</i>               | ○           | ○             | 87  | <i>Nemogullmia sp.</i>                               |             | ○             |
| 9  | <i>Astrammia sp.</i>                |             | ○             | 88  | <i>Neoeponides sp.</i>                               |             | ○             |
| 10 | <i>Astrononion antarcticus</i>      |             | ○             | 89  | <i>Nodulina cf. N. dentaliniformis</i>               |             | ○             |
| 11 | <i>Astrononion echolsi</i>          | ○           | ○             | 90  | <i>Nodulina dentaliniformis</i>                      | ○           | ○             |
| 12 | <i>Astrorhiza sp.</i>               |             | ○             | 91  | <i>Nonion sloanii</i>                                | ○           |               |
| 13 | <i>Atlantiella atlantica</i>        |             | ○             | 92  | <i>Nonionella auricula</i>                           | ○           |               |
| 14 | <i>Bathysiphon cf. argenteus</i>    |             | ○             | 93  | <i>Nonionella auris</i>                              | ○           |               |
| 15 | <i>Bathysiphon flexibilis</i>       | ○           |               | 94  | <i>Nonionella bradii</i>                             | ○           | ○             |
| 16 | <i>Bigenerina minutissima</i>       |             | ○             | 95  | <i>Nonionella iridea</i>                             | ○           | ○             |
| 17 | <i>Bolivina pacifica</i>            | ○           |               | 96  | <i>Oolina lineata</i>                                |             | ○             |
| 18 | <i>Bolivina punctata</i>            | ○           |               | 97  | <i>Parafissurina felsinea</i>                        |             | ○             |
| 19 | <i>Bolivinellina pseudopunctata</i> | ○           | ○             | 98  | <i>Paratrochammina bartrami</i>                      | ○           | ○             |
| 20 | <i>Bowseria arctowskii</i>          |             | ○             | 99  | <i>Patellina corrugata</i>                           | ○           |               |
| 21 | <i>Buccella peruviana</i>           |             | ○             | 100 | <i>Pelosina aff. sphaeriloculum</i>                  |             | ○             |
| 22 | <i>Bulimina elongata</i>            |             | ○             | 101 | <i>Pelosina didera</i>                               |             | ○             |
| 23 | <i>Bulimina patagonica</i>          | ○           |               | 102 | <i>Phainogullmia cf. aurata</i>                      |             | ○             |
| 24 | <i>Caronia exilis</i>               |             | ○             | 103 | <i>Polymorphina sp.</i>                              | ○           |               |
| 25 | <i>Cassidulinoides parkeriana</i>   | ○           | ○             | 104 | <i>Portatrochammina antarctica subsp. antarctica</i> |             | ○             |
| 26 | <i>Cassidulinoides porrecta</i>     | ○           | ○             | 105 | <i>Portatrochammina karica</i>                       |             | ○             |
| 27 | <i>Cassidulinoides sp.</i>          | ○           | ○             | 106 | <i>Portatrochammina sp.</i>                          | ○           | ○             |
| 28 | <i>Cibicides refulgens</i>          | ○           | ○             | 107 | <i>Procerolagena distoma</i>                         | ○           |               |
| 29 | <i>Cibicides sp</i>                 | ○           | ○             | 108 | <i>Procerolagena gracilis</i>                        | ○           | ○             |
| 30 | <i>Cornuspira foliacea</i>          | ○           |               | 109 | <i>Procerolagena meridionalis</i>                    | ○           |               |
| 31 | <i>Cornuspira involvens</i>         | ○           | ○             | 110 | <i>Psammophaga cf. P. crystallifera</i>              |             | ○             |
| 32 | <i>Cornuspira planorbis</i>         | ○           |               | 111 | <i>Psammophaga magnetica</i>                         |             | ○             |
| 33 | <i>Criboelphidium incertum</i>      | ○           |               | 112 | <i>Psammophaga sp.</i>                               |             | ○             |
| 34 | <i>Criboelphidium sp.</i>           |             | ○             | 113 | <i>Psammosphaera fusca</i>                           | ○           | ○             |

|    |                                     |   |   |     |                                     |           |            |
|----|-------------------------------------|---|---|-----|-------------------------------------|-----------|------------|
| 35 | <i>Cribrostomoides jeffreysii</i>   | ○ | ○ | 114 | <i>Psammosphaera sp.</i>            |           | ○          |
| 36 | <i>Cribrostomoides sp.</i>          | ○ | ○ | 115 | <i>Pseudobolivina antarctica</i>    | ○         | ○          |
| 37 | <i>Cribrostomoides wiesneri</i>     |   | ○ | 116 | <i>Pseudobulimina chapmani</i>      |           | ○          |
| 38 | <i>Cribrothalammina alba</i>        |   | ○ | 117 | <i>Pseudofissurina mccullochae</i>  |           | ○          |
| 39 | <i>Crithionina sp.</i>              |   | ○ | 118 | <i>Pseudononion japonicum</i>       |           | ○          |
| 40 | <i>Deuterammina discorbis</i>       | ○ |   | 119 | <i>Pseudotriloculina patagonica</i> |           | ○          |
| 41 | <i>Deuterammina grisea</i>          | ○ |   | 120 | <i>Pullenia subcarinata</i>         | ○         | ○          |
| 42 | <i>Discorbis vilardeboanus</i>      | ○ |   | 121 | <i>Pyrgo bulloides</i>              |           | ○          |
| 43 | <i>Eggerella minuta</i>             | ○ | ○ | 122 | <i>Pyrgo elongata</i>               |           | ○          |
| 44 | <i>Eggerelloides advenus</i>        | ○ |   | 123 | <i>Pyrgo williamsoni</i>            | ○         |            |
| 45 | <i>Elphidium bartletti</i>          | ○ |   | 124 | <i>Quinqueloculina seminulum</i>    | ○         | ○          |
| 46 | <i>Elphidium sp.</i>                | ○ |   | 125 | <i>Quinqueloculina sp.</i>          |           | ○          |
| 47 | <i>Epistominella exigua</i>         | ○ | ○ | 126 | <i>Quinqueloculina vulgaris</i>     |           | ○          |
| 48 | <i>Epistominella sp</i>             | ○ | ○ | 127 | <i>Recurvoidella bradyi</i>         |           | ○          |
| 49 | <i>Esosyrinx curta</i>              | ○ |   | 128 | <i>Remaneica kellestae</i>          | ○         |            |
| 50 | <i>Fissurina annectens</i>          | ○ |   | 129 | <i>Reophax decorata</i>             | ○         | ○          |
| 51 | <i>Fissurina sp.</i>                | ○ |   | 130 | <i>Reophax fusiformis</i>           | ○         |            |
| 52 | <i>Fissurina sp. 2</i>              |   | ○ | 131 | <i>Reophax pilulifer</i>            |           | ○          |
| 53 | <i>Fursenkoina earlandi</i>         | ○ |   | 132 | <i>Reophax scorpiurus</i>           | ○         | ○          |
| 54 | <i>Fursenkoina subacuta</i>         | ○ |   | 133 | <i>Reophax sp.</i>                  | ○         | ○          |
| 55 | <i>Gaudryina sp.</i>                | ○ |   | 134 | <i>Reophax subdentaliniformis</i>   |           | ○          |
| 56 | <i>Globocassidulina biora</i>       | ○ | ○ | 135 | <i>Reophax subfusiformis</i>        |           | ○          |
| 57 | <i>Globocassidulina crassa</i>      | ○ | ○ | 136 | <i>Rhabdammina sp.</i>              |           | ○          |
| 58 | <i>Globocassidulina rossensis</i>   | ○ |   | 137 | <i>Rhabdammina triangularis</i>     |           | ○          |
| 59 | <i>Globocassidulina sp.</i>         | ○ | ○ | 138 | <i>Rosalina globularis</i>          | ○         | ○          |
| 60 | <i>Globocassidulina subglobosa</i>  | ○ | ○ | 139 | <i>Rosalina sp.</i>                 | ○         |            |
| 61 | <i>Gloioigullmia sp. 1</i>          |   | ○ | 140 | <i>Saccammina sp.</i>               | ○         |            |
| 62 | <i>Gloioigullmia sp. 2</i>          |   | ○ | 141 | <i>Saccammina sphaerica</i>         | ○         |            |
| 63 | <i>Glomospira gordialis</i>         |   | ○ | 142 | <i>Spiroplectammina biformis</i>    | ○         | ○          |
| 64 | <i>Gordiospira fragilis</i>         |   | ○ | 143 | <i>Stainforthia cf concava</i>      |           | ○          |
| 65 | <i>Haplophragmoides canariensis</i> | ○ | ○ | 144 | <i>Stainforthia feylingi</i>        | ○         |            |
| 66 | <i>Haplophragmoides sp.</i>         |   | ○ | 145 | <i>Stainforthia fusiformis</i>      | ○         | ○          |
| 67 | <i>Hemisphaerammina bradyi</i>      | ○ | ○ | 146 | <i>Textularia antarctica</i>        |           | ○          |
| 68 | <i>Hippocrepinella hirudinea</i>    | ○ | ○ | 147 | <i>Textularia earlandi</i>          | ○         | ○          |
| 69 | <i>Hormosina bacillaris</i>         | ○ |   | 148 | <i>Textularia wiesneri</i>          | ○         |            |
| 70 | <i>Hormosinella gracilis</i>        | ○ | ○ | 149 | <i>Thurammina corrugata</i>         |           | ○          |
| 71 | <i>Hormosinella sp.</i>             |   | ○ | 150 | <i>Tinogullmia sp.</i>              |           | ○          |
| 72 | <i>Hyalinonetrion elongatum</i>     | ○ |   | 151 | <i>Trifarina angulosa</i>           | ○         | ○          |
| 73 | <i>Hyalinonetrion gracilimum</i>    | ○ |   | 152 | <i>Trifarina earlandi</i>           |           | ○          |
| 74 | <i>Labrospira sp.</i>               |   | ○ | 153 | <i>Trochammina malovensisa</i>      | ○         |            |
| 75 | <i>Lagenammina arenulata</i>        | ○ | ○ | 154 | <i>Trochammina multiloculata</i>    | ○         |            |
| 76 | <i>Lagenammina difflugiformis</i>   | ○ |   | 155 | <i>Trochammina squamata</i>         | ○         |            |
| 77 | <i>Lagenammina sp.</i>              |   | ○ | 156 | <i>Turritellella shoneana</i>       | ○         |            |
| 78 | <i>Lepidoparatrochammina lepida</i> |   | ○ | 157 | <i>Vanhoeffenella gaussi</i>        |           | ○          |
| 79 | <i>Leptohalysis scottii</i>         | ○ | ○ |     | <b>Total</b>                        | <b>91</b> | <b>111</b> |

| No | Species                            | No | Species                           |
|----|------------------------------------|----|-----------------------------------|
| 1  | <i>Adercotryma glomerata</i>       | 8  | <i>Hippocrepinella hirudinea</i>  |
| 2  | <i>Bolivina pseudopunctata</i>     | 9  | <i>Miliammina arenacea</i>        |
| 3  | <i>Cassidulinoides parkerianus</i> | 10 | <i>Portatrochamina antarctica</i> |
| 4  | <i>Fursenkoina fusiformis</i>      | 11 | <i>Psammosphaera fusca</i>        |
| 5  | <i>Globocassidulina bora</i>       | 12 | <i>Pseudobolivina antarctica</i>  |
| 6  | <i>Globocassidulina crassa</i>     | 13 | <i>Spiroplectammina biformis</i>  |
| 7  | <i>Hemisphaerammina bradyi</i>     | 14 | <i>Trochammina malovenssis</i>    |

부유성 유공충의 경우 킹조지섬 내에서 연구된 사례가 전무하여 킹조지섬 및 서남극 반도 인근해역에서 (Drake passage: 남미 남쪽끝과 서남극반도 사이에 위치, Bransfield strait: 사우스서틀랜드 제도과 남극반도 사이에 위치, Anvers Is.: 남극반도 북서연안쪽에 위치한 파머제도의 가장 큰 섬) 진행된 선행연구사례를 기반으로 종 목록을 작성하였음. 해당 해역에서 총 8 종의 현생 부유성 유공충이 보고된 것을 확인하였으며, 그중 *Neogloboquadrina pachyderma*, *Turborotalita quinqueloba* 두 종이 상대적으로 우점하는 것으로 확인됨.

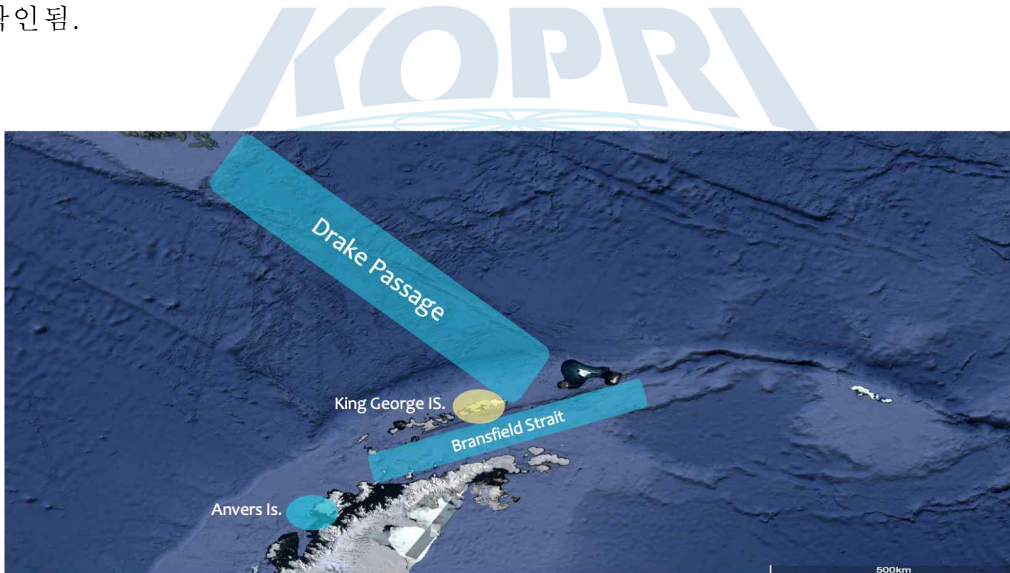


그림 3. 서남극반도 주변 해역 현생 부유성 유공충 종목록 구축에 활용한 참고문헌들의 연구지역

(서남극반도 주변 해역에서 출현하는 현생 부유성 유공충 종 목록)

| 번호 | Species                                   | Drake Passage | Bransfield Strait | Anvers Island |
|----|---|---------------|-------------------|---------------|
| 1  | <i>Globigerina bulloides</i>              | ○             | ○                 |               |
| 2  | <i>Globigerinita glutinata</i>            | ○             | ○                 |               |
| 3  | <i>Globigerinita uvula</i>                | ○             | ○                 |               |
| 4  | <i>Globoconella inflata</i>               | ○             |                   |               |
| 5  | <i>Globorotalia scitula</i>               | ○             |                   |               |
| 6  | <i>Globorotalia truncatulinoides</i>      | ○             |                   |               |
| 7  | <b><i>Neogloboquadrina pachyderma</i></b> | ○             | ○                 | ○             |
| 8  | <b><i>Turborotalita quinqueloba</i></b>   | ○             | ○                 |               |

## 2. 남극 마리안 소만 인근해역 현장조사

2021/2022 및 2022/2023 하절기에 총 두 차례 남극 세종과학기지를 방문, 마리안 소만 및 인근 해역에서 현장조사 및 시료채집을 진행하였음.

### 가. 조사 기간

- (1) 2021/2022 하계: 2021.12.16. ~ 2022.02.04. (51일, 기지 체류기간)
- (2) 2022/2023 하계: 2022.12.13. ~ 2023.02.05. (55일, 기지 체류기간)

### 나. 세부 조사지역 및 항목

#### (1) 2021/2022 하계

- 조하대: 마리안 소만 내 전반적인 지역에 출현하는 저서성 유공충 조성을 파악하기 위하여 만 내부에서 입구에 이르는 영역에서 조사를 진행하였으며, 시료 및 데이터의 공유를 통한 활용성 확대를 위하여 극지연구소에서 기 진행하던 모니터링 정점과 일치하는 정점을 포함하였음 (MC19, 3, 7, 10, 13). 추가로 맥스웰만을 마주하는 바톤반도 연안지역에 조하대 정점을 설정하였으나, 암반조간대 조건으로 인하여 퇴적물 확보에는 실패하였음.
- 조간대: 조간대 유공충 조사는 거의 전무하기 때문에 조간대 서식 유공충 조성을 파악하기 위하여 비교적 접근이 용이한 바톤반도 조간대에서 조사를 진행하였음. 일반적으로 자갈 등 조립질 조간대 퇴적물에는 유공충 출현빈도가 매우 낮기 때문에 최대한 세립한 지역에서 채집을 진행하였으며, 추가적으로 부착성 유공충류의 확보를 위해 암반조간대에 발달한 해조류 시료를 확보하였음.
- 수층: 세종기지 부둣가 및 맥스웰만 일대에서 부유성 유공충 시료 확보를 위해 조사를 진행하였음.

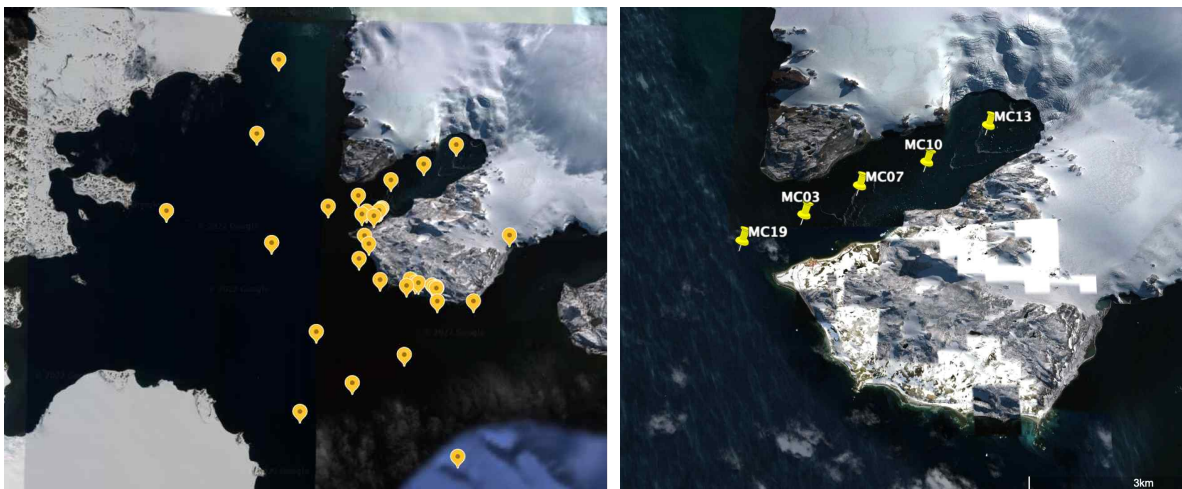


그림4. 2021/2022 하계 채집 정점도 (좌: 전체정점, 우: 그랩 저서퇴적물 확보정점)

| 지역                  | 위도             | 경도             | 채집항목                                  | 비고               |
|---------------------|----------------|----------------|---------------------------------------|------------------|
| 마리안 소만              | 62°13'4.8" S   | 58°47'31.56" W | van Veen Grab 및 아크릴코어사용, 정량 및 정성채집 진행 | 정량 시료 유공층 외각 용해  |
|                     | 62°12'50.4" S  | 58°46'26.76" W |                                       |                  |
|                     | 62°12'35.64" S | 58°45'21.6" W  |                                       |                  |
|                     | 62°12'18" S    | 58°44'17.88" W |                                       |                  |
| 맥스웰 만               | 62°17'06.30"S  | 58°44'13.44"W  | 플랑크톤 시료 채집                            | 부유성 유공층 확보 실패    |
|                     | 62°15'10.80"S  | 58°48'55.02"W  |                                       |                  |
|                     | 62°12'07.50"S  | 58°50'52.92"W  |                                       |                  |
|                     | 62°10'58.98"S  | 58°50'09.36"W  |                                       |                  |
|                     | 62°13'48.42"S  | 58°50'23.64"W  |                                       |                  |
|                     | 62°15'32.05"S  | 58°46'01"W     |                                       |                  |
|                     | 62°15'58.17"S  | 58°47'43.46"W  |                                       |                  |
|                     | 62°16'24.72"S  | 58°49'27.52"W  |                                       |                  |
| 바톤반도 연안             | 62°14'03.22"S  | 58°47'30.05"W  | van Veen Grab 사용                      | 암반 저질, 퇴적물 확보 실패 |
|                     | 62°14'22.74"S  | 58°46'48.22"W  |                                       |                  |
|                     | 62°14'28.14"S  | 58°45'55.67"W  |                                       |                  |
|                     | 62°14'42.57"S  | 58°44'54.52"W  |                                       |                  |
| 세종기지 부둣가            | 62°13'19.4"S   | 58°47'15.2"W   | 핸드네트                                  |                  |
| 펭귄마을 초입 조입 해안 조수웅덩이 | 62°13'49.49"S  | 58°47'10.48"W  | sand rinsing                          |                  |
| 펭귄마을 대피소 앞 해안       | 62°14'22.2"S   | 58°45'48.3"W   | sand rinsing                          |                  |
|                     | 62°14'25.52"S  | 58°45'32.12"W  | sand rinsing                          |                  |
| 해표마을 인근 해안          | 62°14'30.45"S  | 58°44'55.43"W  | sand rinsing, porewater filtering     |                  |



그림5. 2021/2022 하계 현장조사 활동 사진

(2) 2022/2023 하계

남극세종과학기지 근방 바톤반도 및 위버반도 연안지역을 중심으로 조간대 채집 정점을 선정하였으며, 맥스웰만 내부 및 초입 근방에 플랑크톤 정점을 선정하였고, 조하대의 경우 마리안소만과 포터소만 내부에서 입구까지 일정 간격으로 채집 정점을 선정하였음.

(조간대 채집 정점)

| 번호 | 정점             | Degree   |          | 채집방법   |
|----|----------------|----------|----------|--|
|    |                | 위도 (S)   | 경도 (W)   |  |
| 1  | 기지 앞 조간대4      | 62.22074 | 58.7788  | 대형스포이드 tide pool 퇴적물 채집,                     |
| 2  | 기지 앞 조간대5      | 62.2211  | 58.77915 | 대형스포이드 tide pool 퇴적물 채집,                     |
| 3  | 펭귄마을 대피소 앞 조간대 | 62.24051 | 58.75896 | 대형스포이드 rock pool 채집                          |
| 4  | 위버 조간대1        | 62.21138 | 58.79099 | sand rinsing, algae rinsing                  |
| 5  | 위버 조간대2        | 62.21141 | 58.79183 | sand rinsing, algae rinsing                  |
| 6  | 위버 조간대3        | 62.21087 | 58.78729 | sand rinsing                                 |
| 7  | 위버조간대0130-1    | 62.21101 | 58.79212 | 정량 아크릴코어, sand rinsing, porewater filtering  |
| 8  | 위버조간대0130-2    | 62.21103 | 58.7933  | sand rinsing                                 |
| 9  | 위버조간대0130-3    | 62.2114  | 58.78879 | sand rinsing                                 |
| 10 | 위버조간대0130-4    | 62.21073 | 58.78559 | sand rinsing                                 |
| 11 | 위버조간대0130-5    | 62.21018 | 58.78386 | 정량 아크릴코어, sand rinsing, pore water filtering |

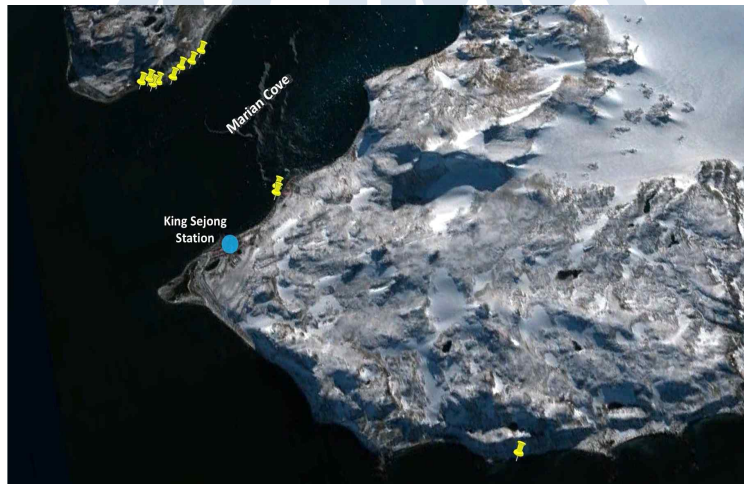


그림 6. 2022/2023 조간대 조사정점

(해상-표층 채집 정점)

| 번호 | 정점       | Degree  |          | 채집일자        | 수심(m) | 채집방법          | 선박       |
|----|----------|---------|----------|-------------|-------|---------------|----------|
|    |          | 위도 (S)  | 경도 (W)   |             |       |               |          |
| 1  | 2023-ZP1 | 62.1831 | 58.8359  | 2023.01.04. | 100   | 경사채집,<br>수평채집 | 세종<br>1호 |
| 2  | 2023-ZP2 | 62.2219 | 58.8979  |             | 94    |               |          |
| 3  | 2023-ZP3 | 62.2589 | 58.7667  |             | 433   |               |          |
| 4  | 2023-ZP4 | 62.2851 | 58.7371  |             | 442   |               |          |
| 5  | 2023-13  | 62.2051 | 58.7382  |             | 105   |               |          |
| 6  | 2023-19  | 62.2208 | 58.8087  |             | 95    |               |          |
| 7  | 기지 앞 부두  | 62.2221 | 58.78703 | 2023.01.27. | -     | 라이트 트랩, 네팅    | -        |

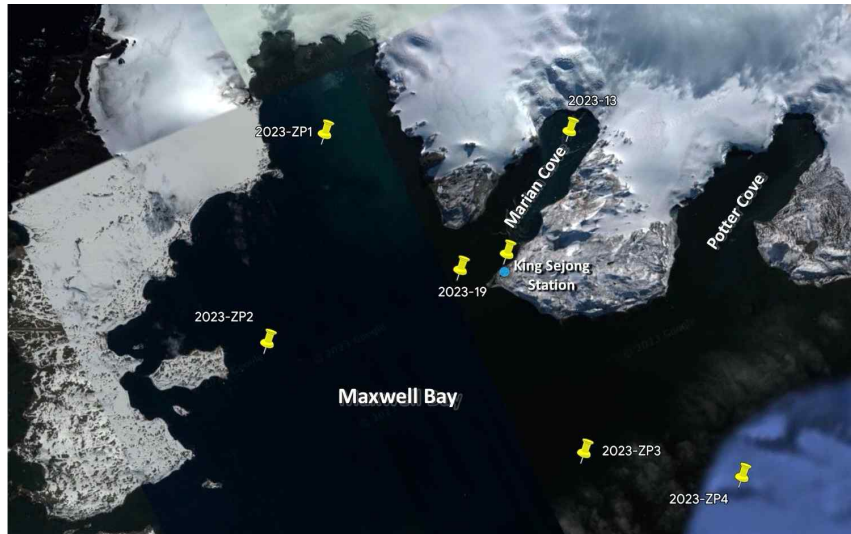


그림 7. 2022/2023 플랑크톤 조사정점

(조하대 그랩 채집 정점)

| 번호 | 정점       | Degree  |         | 채집일자        | 수심(m) | 채집방법                                  | 선박    |
|----|----------|---------|---------|-------------|-------|---------------------------------------|-------|
|    |          | 위도 (S)  | 경도 (W)  |             |       |                                       |       |
| 1  | 2023-2   | 62.2199 | 58.7898 | 2022.12.31. | 65    | van Veen Grab 및 아크릴코어사용, 정량 및 정성채집 진행 | 세종 1호 |
| 2  | 2023-3   | 62.2178 | 58.7922 | 2022.12.31. | 85    |                                       |       |
| 3  | 2023-4   | 62.2157 | 58.7946 | 2023.01.09. | 95    |                                       |       |
| 4  | 2023-7   | 62.2138 | 58.7740 | 2022.12.26. | 110   |                                       |       |
| 5  | 2023-10  | 62.2095 | 58.7561 | 2022.12.26. | 77    |                                       |       |
| 6  | 2023-13  | 62.2051 | 58.7382 | 2022.12.26. | 105   |                                       |       |
| 7  | 2023-16  | 62.2033 | 58.7302 | 2022.12.31. | 87    |                                       |       |
| 8  | 2023-19  | 62.2208 | 58.8087 | 2022.12.31. | 95    |                                       |       |
| 9  | 2023-21  | 62.2156 | 58.7719 | 2022.12.26. | 92    |                                       |       |
| 10 | 2023-22  | 62.2110 | 58.7770 | 2023.01.09. | 64    |                                       |       |
| 11 | 2023-23  | 62.2117 | 58.7541 | 2023.01.09. | 93    |                                       |       |
| 12 | 2023-24  | 62.2070 | 58.7591 | 2022.12.26. | 44    |                                       |       |
| 13 | 2023-25  | 62.2071 | 58.7355 | 2022.12.26. | 102   |                                       |       |
| 14 | 2023-26  | 62.2031 | 58.7412 | 2023.01.09. | 10    |                                       |       |
| 15 | 2023-27  | 62.2052 | 58.7277 | 2022.12.31. | 64    |                                       |       |
| 16 | 2023-28  | 62.2012 | 58.7332 | 2023.01.09. | 90    |                                       |       |
| 17 | 2023-29  | 62.2226 | 58.8065 | 2022.12.31. | 91    |                                       |       |
| 18 | 2023-30  | 62.2188 | 58.8114 | 2023.01.13. | 126   |                                       |       |
| 19 | 2023-pc1 | 62.2254 | 58.6518 | 2023.01.13. | 30    |                                       |       |
| 20 | 2023-pc2 | 62.2281 | 58.6507 | 2023.01.13. | 44    |                                       |       |
| 21 | 2023-pc3 | 62.2301 | 58.6494 | 2023.01.13. | 25    |                                       |       |
| 22 | 2023-pc4 | 62.2275 | 58.6665 | 2023.01.13. | 21    |                                       |       |
| 23 | 2023-pc5 | 62.2301 | 58.6653 | 2023.01.13. | 43    |                                       |       |
| 24 | 2023-pc6 | 62.2323 | 58.6648 | 2023.01.13. | 30    |                                       |       |
| 25 | 2023-pc7 | 62.2302 | 58.6827 | 2023.01.13. | 30    |                                       |       |
| 26 | 2023-pc8 | 62.2324 | 58.6820 | 2023.01.13. | 29    |                                       |       |
| 27 | 2023-pc9 | 62.2351 | 58.6812 | 2023.01.13. | 22    |                                       |       |



그림 8. 2022/2023 그랩 조사정점



그림 9. 2022/2023 현장 조사 활동사진



다. 조사 방법 및 사용 장비(도구)

(1) 조사장비 및 도구

- 기지보유 조사선 활용: 소형선박 (세종 1호) 및 조디악 고무보트 (세종 3호)
- plankton net (200  $\mu\text{m}$ , 90  $\mu\text{m}$  )
- hand net (78  $\mu\text{m}$ )
- 소형 반빈그랩 (van Veen Grab), Acrylic corer
- 대형 스포이드
- test sieve (30  $\mu\text{m}$ , 38  $\mu\text{m}$ , 63  $\mu\text{m}$ , 125  $\mu\text{m}$ ), YSI, 저질온도계
- 99% EtOH, 4% 중성 Formalin

(조사방법 및 장비 요약)

| 채집항목               | 채집장비   | 채집 방법                               | 고정 전처리                             | 고정액                                      |
|--------------------|--|-------------------------------------|------------------------------------|--|
| 플랑크톤 시료            | 플랑크톤 네트<br>90 $\mu\text{m}$ , 60 $\phi$<br>78 $\mu\text{m}$ , 30 $\phi$<br>+ flowmeter | 수평채집<br>(정점 주변 서행)                  | 63 $\mu\text{m}$ sieving (해수)      | 99% EtOH                                 |
|                    |  | 수직채집                                |                                    | 5% Foramalin (buffered)                  |
|                    |  |                                     |                                    | 99% EtOH                                 |
|                    |  |                                     |                                    | 5% Foramalin (buffered)                  |
| 조간대 저서 퇴적물 시료      | van Veen Grab<br>(소형 반빈그랩)   | 정량 채집<br>Acrylic corer<br>subsample | -                                  | 5% Foramalin (buffered)<br>+ Rose Bengal |
|                    |  | 정성 채집<br>(표층 퇴적물)                   | 63 $\mu\text{m}$ sieving (필터해수)    | 5% Foramalin (buffered)                  |
|                    |  |                                     | 63 $\mu\text{m}$ sieving (담수)      | 99% EtOH                                 |
|                    |  |                                     | 30, 38 $\mu\text{m}$ sieving (담수)  |  |
|                    |  |                                     | 63 $\mu\text{m}$ sieving<br>(필터해수) |  |
|                    |  |                                     | -                                  | 냉동 (퇴적물 지화학 분석)                          |
| -                  | -  |                                     |                                    |  |
| 조간대 퇴적물 및 부착 기질 시료 | 삽, 양동이,<br>대형 스포이드,<br>지퍼백 등   | 아크릴 코어                              | 30, 38 $\mu\text{m}$ sieving       | 99% EtOH                                 |
|                    |  | 간극수 필터                              |                                    |  |
|                    |  | 모래 린싱                               |                                    |  |
|                    |  | 조수웅덩이 필터링                           |                                    |  |
|                    |  | 해조류 린싱                              |                                    |  |
|                    |  | 해조류 채집                              |                                    |  |
|                    |  | 대형스포이드 tide pool/ rock pool 채집      | -                                  | 개체 sorting 후 냉동 또는 99% EtOH 고정           |

(2) 조사방법

- 조간대 시료: 기지 근방 해변으로 도보로 이동 또는 조디악에 탑승하여 위버반도로 이동, 해변채집 진행
- 아크릴코어: 정량 아크릴 코어를 사용해 표층 퇴적물 확보, 38  $\mu\text{m}$  sieving 후 99% EtOH 고정
- Pore water filtering: 모종삽을 사용해 해변의 모래, 자갈을 파낸 뒤 용출된 간극수를 38  $\mu\text{m}$  sieving 후 99% EtOH로 고정
- Sand rinsing: 해변의 모래 및 자갈을 필터해수로 rinsing한 상층액을 30 또는 38  $\mu\text{m}$  sieving한 뒤 99% EtOH로 고정

- Algae rinsing: 해변 암반 등에 부착한 해조류를 채취하여 양동이 등에 담고 rinsing 한 상층액을 30 또는 38  $\mu\text{m}$  sieving 후 99% EtOH로 고정
  - 대형 스포이드 채집: 조수웅덩이 서식 생물 및 퇴적물 확보 시 대형 스포이드를 사용해 채집하였으며, 일부는 생시료 상태로 기지 내 배양기에 유지하며 현미경 관찰, 개체 sorting 후 99% EtOH로 고정
- 조하대 저서퇴적물: 단면적 10 cm<sup>2</sup> acrylic corer 사용하여 van Veen Grab으로 확보한 표층 퇴적물 sub sampling 진행했으며, 정점 당 정량\*3, 정성\*3, 퇴적물 지화학 분석용 시료\*1 확보 하였음. 정량시료는 5% 중성 Formalin 고정 처리 했으며 그 중 일부는 63  $\mu\text{m}$  sieving 후 99% EtOH로 치환 및 Rose Bengal 시약으로 염색 하였음. 정성분석 시료는 38  $\mu\text{m}$  및 125  $\mu\text{m}$  sieving 하였음. 38  $\mu\text{m}$  sieving을 진행한 시료는 99% EtOH와 70% EtOH로 고정하였음. 필터해수를 사용해 125  $\mu\text{m}$  sieving 진행한 시료는 별도의 고정처리 없이 기지 채류기간동안 현미경 관찰 및 개체 sorting을 위해 기지 내 배양기에 유지하였음. 기지 채류기간 sorting한 개체는 유리 또는 cryovial에 옮긴 뒤 분석 목적에 따라 동결건조 (MALDI-TOF 및 DNA 분석), RNAlater (agglutinated taxa DNA 분석) 및 99 % EtOH (MALDI-TOF 및 DNA 분석) 고정 처리 후 초저온 냉동고에 보존하였음. 또한, 퇴적물 지화학분석을 위해 반빈그랩으로 확보한 표층 퇴적물 일부는 플라스틱 숟가락과 지퍼백을 이용해 채집하였고, 초저온 냉동고에 유지하였음
- 플랑크톤 시료: 정점도착 후 서행하여 망목 78  $\mu\text{m}$ , 90  $\mu\text{m}$  및 200  $\mu\text{m}$ 인 플랑크톤 넷트와 해수펌프를 사용해 수평 및 경사 채집을 진행하였음. 200  $\mu\text{m}$  넷트로 확보한 시료는 생물량에 따라 1/2 분할하여 각각 5% 중성 Formalin과 99% EtOH로 고정하였음. 78  $\mu\text{m}$  넷트 및 해수펌프로 확보한 시료는 모두 99% EtOH로 고정하였음. 확보한 시료는 기지 내 실험실에서 해부 현미경을 사용해 관찰 및 개체 선별을 진행하였음. 또한, 세종기지 앞 부두에서 일몰 후 라이트 트랩 채집과 방수 렌턴을 부착한 78  $\mu\text{m}$  넷트를 사용한 핸드네팅을 진행하였음.

### 3. 시료 분석 결과

#### 가. 퇴적물 지화학 분석

##### (1) 분석 항목 및 방법

현장 확보 후 초저온 냉동고에 보관한 퇴적물 시료는 국내로 냉동발송한 뒤, ㈜지오시스템 리서치 및 군산대학교 (마린랩)에서 분석이 진행되었음. 입도, TC (총 탄소함량), TOC (총 유기탄소함량), TN (총질소함량), Chlorophyll-a 함량을 분석하였으며, 모든 항목은 해양환경 공정시험기준 (해양수산부고시 2021 폐지, 국립수산과학원고시 제 2021-6호)에 제시된 방법론에 따라 진행되었음.

##### (2) 분석 결과

2021/2022 하계 그래프조사가 진행된 5개 정점의 입도분석결과, 모든 정점에서 mud (silt + clay) 함량이 매우 높게 나타났으며, 각 정점별 퇴적물 유형은 Sandy silt (MC03), Gravely mud (MC07), Slightly gravely sandy mud (MC10), Gravely mud (MC13), Slightly gravely sandy mud (MC19) 로 확인되었음. 분급도 (Sorting)는 2.09 ~ 3.81로 나타났으며, 해당 범위는 모두 Very poorly sorted (2.0 ~ 4.0) 범위에 해당하는 것으로 확인 되어 전체적으로 매우 분급도가 불량한 것으로 확인 되었음.

(2021/2022 그래프조사 정점별 수심, 저질온도 및 퇴적물 지화학분석 결과)

| St.  | Gravel (%) | Sand (%) | Silt (%) | Clay (%) | Sorting (Φ) | Mz (Mean, Φ) | Skew  | Kurt | Chl-a (μg/g) | TN (%) | TC (%) | TOC (%) | Depth (m) | Temp. (°C) | Mud cont. (%) |
|------|------------|----------|----------|----------|-------------|--------------|-------|------|--------------|--------|--------|---------|-----------|------------|---------------|
| MC03 | 0.00       | 11.70    | 64.33    | 23.97    | 2.09        | 6.69         | -0.14 | 1.20 | 9.12         | 0.06   | 0.68   | 0.53    | 85        | 3.32       | 88.3          |
| MC07 | 5.39       | 8.76     | 66.25    | 19.61    | 2.65        | 6.53         | -0.35 | 2.11 | 5.00         | 0.07   | 0.59   | 0.59    | 110       | 0.80       | 85.86         |
| MC10 | 0.45       | 11.35    | 59.93    | 28.28    | 2.25        | 6.81         | -0.22 | 1.24 | 1.86         | 0.05   | 0.43   | 0.37    | 80        | 1.10       | 88.21         |
| MC13 | 11.46      | 11.03    | 53.05    | 24.45    | 3.81        | 5.36         | -0.50 | 1.44 | 1.82         | 0.04   | 0.39   | 0.29    | 111       | 0.20       | 77.5          |
| MC19 | 3.09       | 32.03    | 47.67    | 17.21    | 2.97        | 5.45         | -0.29 | 0.85 | 2.10         | 0.09   | 0.74   | 0.60    | 102       | 1.00       | 64.88         |

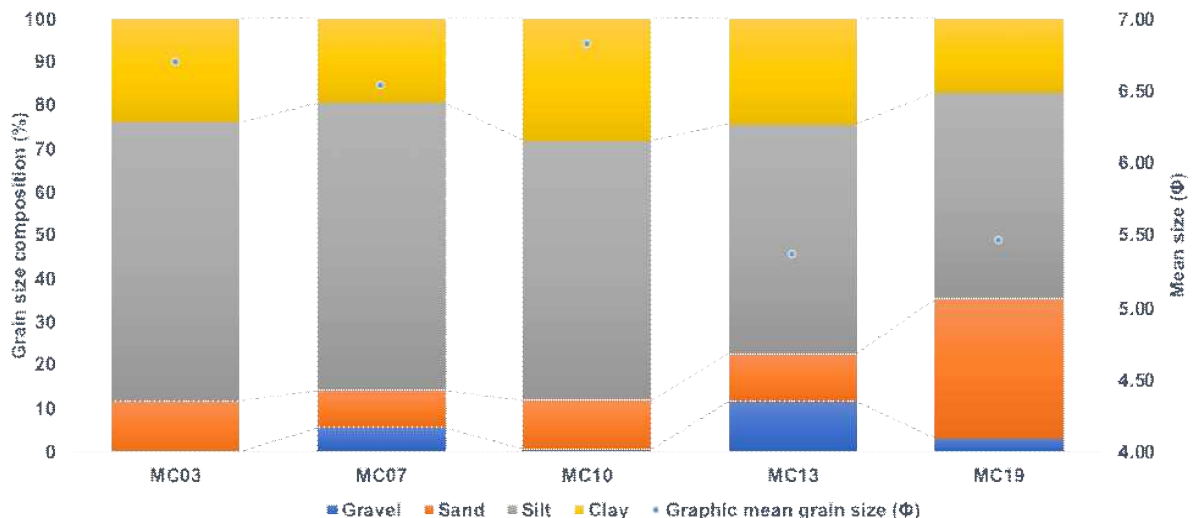


그림10. 2021/2022 정점별 입도 구성비 (%) 및 평균 입도

총 유기탄소 및 총 질소는 만 가장 외부에 위치한 정점에서 가장 높게 나타났으며, 만 가장 안쪽 정점에서 가장 낮은 값으로 측정 되었음. TOC/TN 비율은 일반적으로 퇴적물 내 유기물 기원에 대하여 대략적으로 파악할 수 있는 척도로 활용되며, 그 값이 8 미만일 경우 식물 플랑크톤 등 해양 기원, 8 ~ 12 일 경우 육상과 해양 기원 유기물 혼합, 12 초과일 경우 육상기원 유기물로 구성된 것으로 해석할 수 있음. 2021/2022 조사 정점에서는 TOC/TN 값이 6.67 ~ 8.83 으로 나타났으며 대부분이 육상 또는 육상-해양 기원 유기물로 구성된 것으로 보여짐.

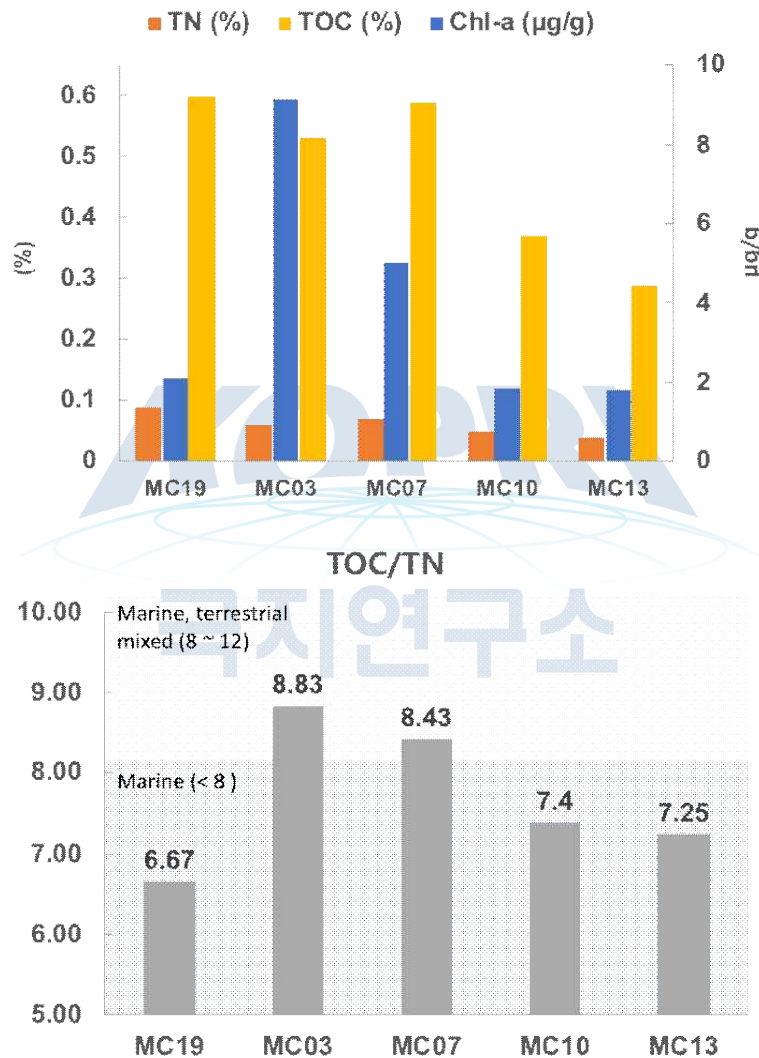


그림11. 2021/2022 정점별 TOC, TN, Chl-a 측정값 및 TOC/TN

2022/2023 하계 그래프조사가 진행된 27개 정점의 퇴적물 입도, TC, TOC, TN, Chlorophyll-a 분석 결과는 아래의 표 및 그림12 - 16에 제시되었음. 입도의 경우 일부 정점 (PC9, MC23-16, MC23-19, MC23-29)를 제외한 모든 정점에서 mud (silt + clay) 함량이 50 % 이상으로 높게 나타났음. 평균 입도 (Mean,  $\phi$ )의 경우, 마리안 소만이 포터소만에 비해 상대적으로 값이 큰 것으로 확인되며, 분급도 (Sort,  $\phi$ )의 경우 마리안 소만이 포터소만에 비해 상대적으로 더 값이 큰 것으로 확인되어, 더 분급도가 더 불량한 것으로 확인되

있음 (그림 14). 유기물 함량의 경우, 포티소만이 마리안 소만에 비해 상대적으로 더 높은 TOC 및 TN 함량 (%)이 확인 되었음 (그림 16). TOC/TN ratio 의 경우, PC1 (9.55)을 제외한 나머지 정점 모두에서 8 미만의 값이 산출되었음.

(2022/2023 그랩조사 정점별 수심, 저질온도 및 퇴적물 지화학분석 결과)

| St.  | Gravel (%) | Sand (%) | Silt (%) | Clay (%) | Mz (mean $\phi$ ) | Sort ( $\phi$ ) | Skew  | Kurt | TC (%) | TOC (%) | TN (%) | TOC/TN | Chl.a ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Depth | Temp. | fluid con. |
|------|------------|----------|----------|----------|-------------------|-----------------|-------|------|--------|---------|--------|--------|------------------------------------|-------|-------|------------|
| PC1  | 11.55      | 9.34     | 60.82    | 18.29    | 5.53              | 3.07            | -0.28 | 1.55 | 0.723  | 0.573   | 0.06   | 9.55   | 54.5                               | 85    | 0.8   | 79.11      |
| PC2  | 1.02       | 6.77     | 66.75    | 25.46    | 6.52              | 1.92            | 0.06  | 0.95 | 0.669  | 0.623   | 0.10   | 6.23   | 66.2                               | 85    | 0.6   | 92.21      |
| PC3  | 2.74       | 17.67    | 61.93    | 17.65    | 5.66              | 2.49            | 0.00  | 1.16 | 0.575  | 0.399   | 0.07   | 5.70   | 53.4                               | 95    | 1     | 79.53      |
| PC4  | 0.68       | 13.17    | 62.66    | 23.50    | 6.20              | 2.10            | 0.17  | 0.81 | 1.047  | 0.923   | 0.13   | 7.10   | 58.7                               | 110   | 0.5   | 66.16      |
| PC5  | 2.28       | 12.74    | 67.21    | 17.77    | 5.96              | 2.07            | 0.10  | 0.98 | 0.865  | 0.662   | 0.11   | 6.20   | 48.1                               | 77    | 0.5   | 84.93      |
| PC6  | 0.99       | 18.03    | 64.35    | 16.62    | 5.73              | 2.09            | 0.30  | 0.93 | 0.843  | 0.701   | 0.19   | 3.69   | 65.1                               | 105   | 0     | 82.98      |
| PC7  | 0.81       | 32.67    | 55.37    | 11.15    | 5.32              | 2.10            | 0.04  | 0.86 | 1.093  | 0.837   | 0.21   | 3.98   | 91.8                               | 87    | 0     | 66.52      |
| PC8  | 0.46       | 41.30    | 55.78    | 2.48     | 3.38              | 1.00            | -0.21 | 1.22 | 0.697  | 0.587   | 0.17   | 3.45   | 96.1                               | 95    | 1.2   | 58.24      |
| PC9  | 0.00       | 66.69    | 31.25    | 2.06     | 3.45              | 0.86            | 0.27  | 0.77 | 0.713  | 0.655   | 0.17   | 3.93   | 107.9                              | 92    | 0.5   | 33.31      |
| MC28 | 11.36      | 9.28     | 48.33    | 31.02    | 6.29              | 3.98            | -0.12 | 1.42 | 0.313  | 0.244   | 0.06   | 4.07   | 49.1                               | 30    | 1.7   | 79.35      |
| MC16 | 60.22      | 8.21     | 25.22    | 6.35     | 6.55              | 3.71            | 0.93  | 0.64 | 0.308  | 0.219   | 0.04   | 5.48   | 40.6                               | 80    | 1.5   | 31.57      |
| MC27 | 11.15      | 19.37    | 48.63    | 20.80    | 4.84              | 4.06            | -0.06 | 1.90 | 0.335  | 0.150   | 0.07   | 2.14   | 56.6                               | 30    | 1.7   | 69.43      |
| MC26 | 2.32       | 9.00     | 57.12    | 31.56    | 6.85              | 3.05            | 0.01  | 1.32 | 0.453  | 0.410   | 0.13   | 3.16   | 93.1                               | 43    | 1.7   | 83.68      |
| MC13 | 11.46      | 11.03    | 53.05    | 24.45    | 5.36              | 3.81            | -0.50 | 1.44 | 0.399  | 0.293   | 0.11   | 2.66   | 39.5                               | 64    | 0.1   | 77.50      |
| MC25 | 9.70       | 12.73    | 56.23    | 27.34    | 6.45              | 3.26            | 0.03  | 1.40 | 0.327  | 0.256   | 0.10   | 2.56   | 45.9                               | 21    | 1.7   | 83.57      |
| MC24 | 3.44       | 10.76    | 51.95    | 33.85    | 6.84              | 3.31            | -0.01 | 1.27 | 0.590  | 0.391   | 0.14   | 2.79   | 68.4                               | 25    | 1.5   | 65.60      |
| MC10 | 0.45       | 11.35    | 59.93    | 28.25    | 6.81              | 2.25            | -0.22 | 1.24 | 0.482  | 0.406   | 0.10   | 4.06   | 18.2                               | 10    | 1.4   | 66.21      |
| MC23 | 9.00       | 6.93     | 51.60    | 32.45    | 6.57              | 3.58            | -0.12 | 1.50 | 0.543  | 0.431   | 0.13   | 3.32   | 54.5                               | 44    | 1.2   | 84.07      |
| MC22 | 15.58      | 19.63    | 44.12    | 29.67    | 4.74              | 4.57            | -0.33 | 1.22 | 0.556  | 0.432   | 0.14   | 3.08   | 23.5                               | 20    | 1.5   | 73.79      |
| MC7  | 5.39       | 8.76     | 66.25    | 19.61    | 6.53              | 2.55            | -0.35 | 2.11 | 0.516  | 0.457   | 0.13   | 3.51   | 27.8                               | 102   | 0     | 85.86      |
| MC21 | 6.44       | 18.94    | 46.15    | 28.46    | 6.01              | 3.58            | -0.15 | 1.28 | 0.482  | 0.429   | 0.08   | 5.36   | 26.7                               | 128   | 1.3   | 76.62      |
| MC4  | 2.86       | 17.56    | 63.11    | 16.37    | 5.80              | 2.54            | -0.32 | 1.20 | 0.653  | 0.526   | 0.12   | 4.40   | 23.5                               | 44    | 1.3   | 79.47      |
| MC3  | 0.00       | 11.70    | 64.33    | 23.97    | 6.69              | 2.09            | -0.14 | 1.20 | 0.533  | 0.493   | 0.08   | 6.16   | 31.0                               | 93    | 1     | 88.30      |
| MC2  | 12.06      | 21.56    | 47.26    | 18.11    | 4.46              | 3.85            | -0.29 | 1.00 | 0.545  | 0.268   | 0.10   | 2.68   | 32.0                               | 64    | 0.8   | 66.37      |
| MC30 | 0.47       | 26.27    | 49.18    | 24.08    | 5.53              | 2.96            | -0.10 | 0.92 | 1.033  | 0.664   | 0.24   | 2.77   | 68.4                               | 22    | 2     | 73.26      |
| MC18 | 3.09       | 32.03    | 47.67    | 17.21    | 5.45              | 2.97            | -0.29 | 0.95 | 0.875  | 0.458   | 0.16   | 2.66   | 33.1                               | 81    | 1.3   | 64.88      |
| MC29 | 3.43       | 47.05    | 35.01    | 14.51    | 4.29              | 3.11            | 0.13  | 0.95 | 0.717  | 0.607   | 0.21   | 2.89   | 92.3                               | 29    | 1.7   | 49.52      |

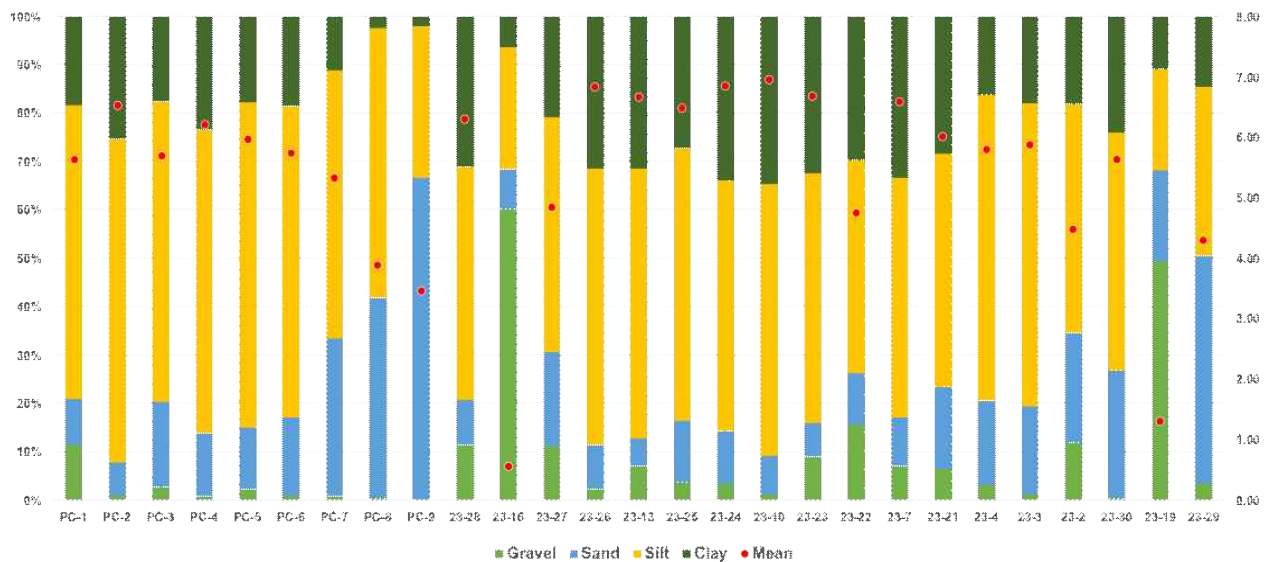


그림 12. 2022/2023 정점별 입도 구성비 (%) 및 평균 입도 ( $\phi$ ) 분포

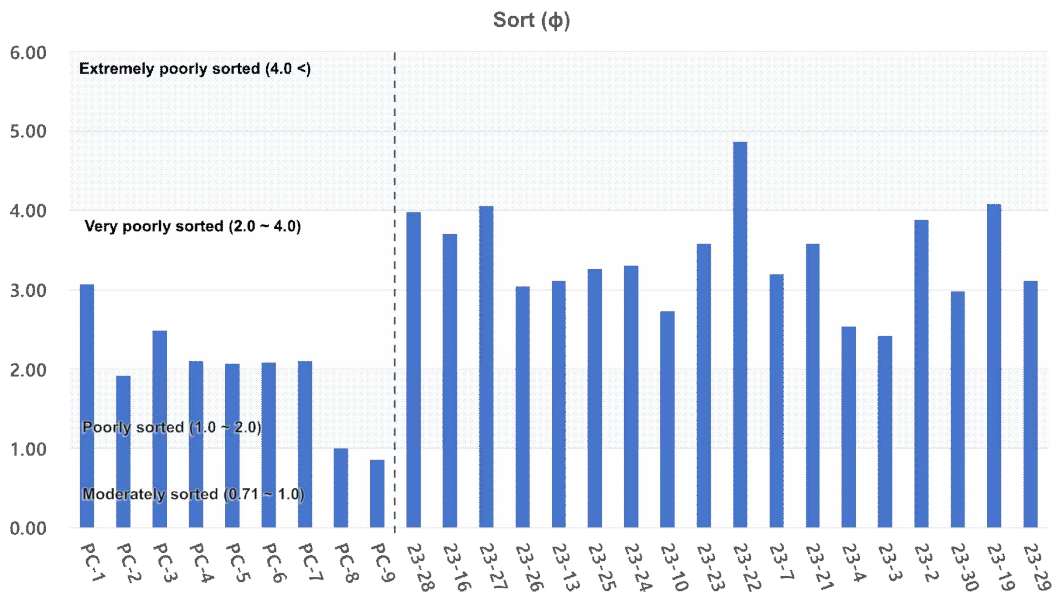


그림 13. 2022/2023 정점별 분급도 (Sort, φ)

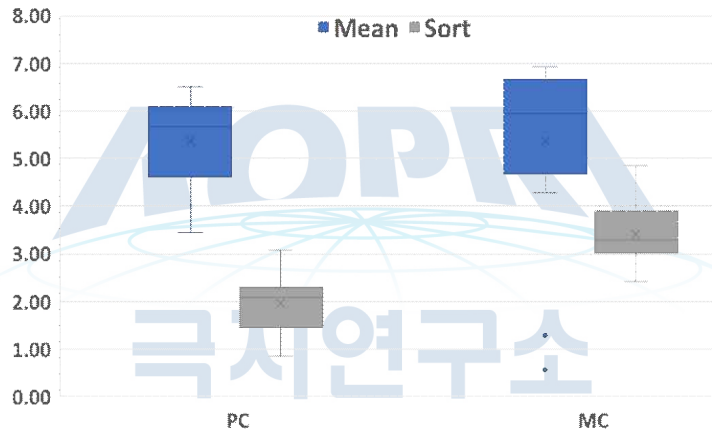


그림 14. 2022/2023 마리안소만 (MC) 및 포터소만 (PC) 평균 입도 (Mean, φ) 및 분급도 (Sort, φ) 비교

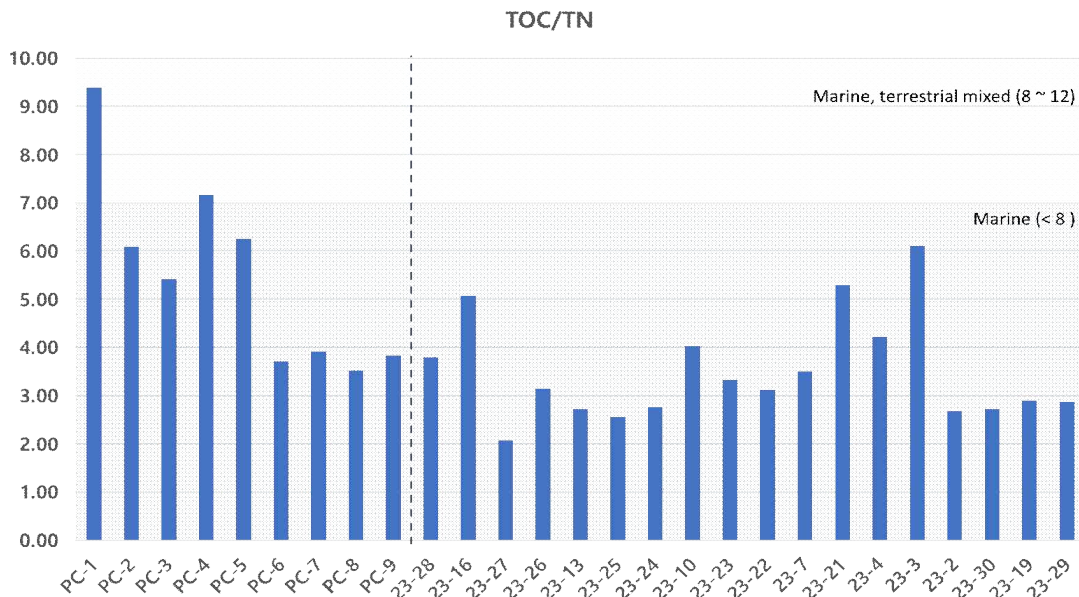


그림 15. 2022/2023 정점별 TOC/TN ratio 산출값

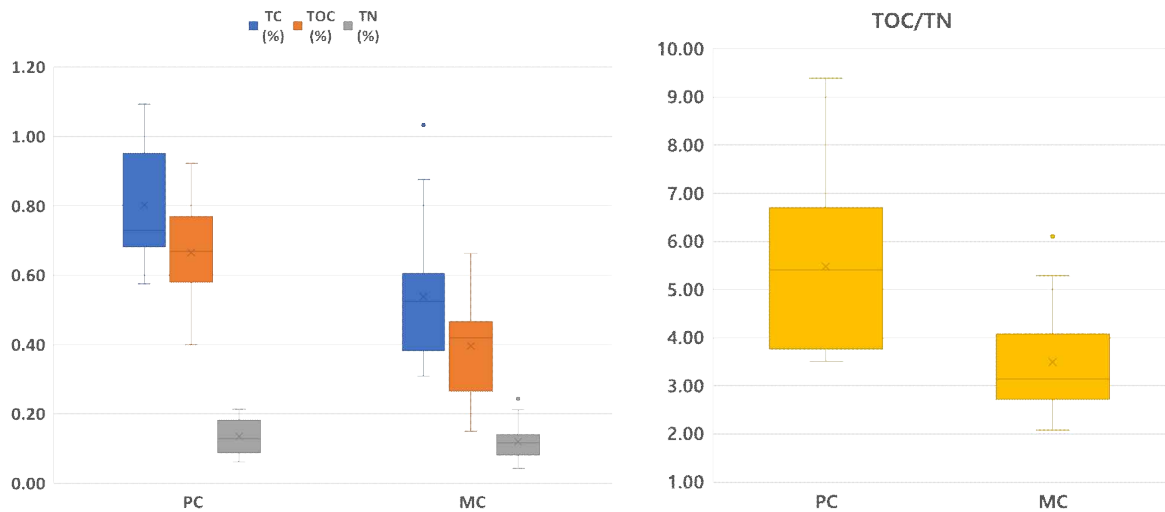


그림 16. 2022/2023 마리안소만 (MC) 및 포터소만 (PC) TOC, TN (%) 및 TOC/TN 측정결과 비교

#### 나. 유공충 종 조성 파악

유공충 종 조성분석을 위하여 다양한 환경에서 다양한 유형의 시료를 확보 하였으나, 유공충 개체가 확인된 시료는 조하대 저서 퇴적물 시료 뿐이었으며, 기타 조간대 서식 및 부유성 유공충 개체를 확보하지 못하였음. 따라서 이후의 시료 분석은 모두 저서 퇴적물을 대상으로 진행하였음.

#### (1) 분석 방법

확보한 저서 퇴적물 정량 시료는 국내로 발송된 후 63  $\mu\text{m}$  sieving 하여 50  $^{\circ}\text{C}$  dry oven에서 건조하였음. 건조된 시료는 해부현미경 (OLYMPUS SZX12) 하에서 1차 확인 후 개체수가 많은 경우 약 300개체가 남을 정도로 시료 분할기를 사용해 분할하였음. 분할한 시료는 125  $\mu\text{m}$  < fraction을 대상으로 해부 현미경 하에서 관찰 하였고, 세필 붓을 사용해 손상되지 않은 개체를 선별하여 과 또는 속 수준으로 분류하여 micropaleontology slide를 제작하였음. slide 제작 후 관련 문헌 및 원기재문을 참고하여 동정을 진행하였으며, 종 당 개체수를 계수하였음. 시료의 분할 횟수에 맞게 분할 전 시료에 있었던 개체수를 역산하여 최종적으로 단위 표면적 당 개체 수 데이터 (ind./10cm<sup>2</sup>)를 확보 하였음.

2021/2022년 마리안 소만 저서 퇴적물 정성시료의 경우, 시료 내의 탄산칼슘 외각이 용해되는 문제가 발생하여 정량시료를 활용할 수 없었음. 포르말린 고정액의 중성화 문제가 있었던 것으로 추정되며, 대안으로 63  $\mu\text{m}$  sieving 된 정성 시료를 사용하였음. 분석할 퇴적물의 건중량 측정 후, 각 정점의 63  $\mu\text{m}$  < fraction 의 비율을 통해 분석할 퇴적물의 sieving 전 건중량을 역산하였고, 종 당 개체수 값에 적용하여 최종적으로 단위 중량 당 개체 수 데이터 (ind./g sed.)를 확보하였음.

유공충 동정 시 이미지 데이터 확보 및 세부 형태형질 관찰을 위하여 일부 개체를 선별하여 이온 코터 (COXEM SPT20) 내에서 외각 표면을 금 이온 코팅한 뒤 주사전자현미경 (COXEM EM30) 분석을 진행하였음. 획득한 이미지는 포토샵 소프트웨어를 사용해 도판으로 제작하였음 (그림 19 - 22).

## (2) 분석 결과

- 2021/2022 하계 확보한 마리안 소만 5개 정점 저서 퇴적물 분석 결과 총 4,255 개체의 유공충이 산출되었으며, 총 4개 강, 7개 목, 35개 과, 54개 속, 80 종이 확인 되었음.
- Globothalamea 강은 전체 출현 종의 56.25 %에 해당하는 3 목 20 과 29 속 45 종 을 포함하는 것으로 확인되어 출현한 4개의 강 중에서 가장 species richness가 높은 것으로 나타났음. 과 수준에서는 Trochamminidae 과가 전체 출현 종의 15 %에 해당하는 종을 포함하며, 35개 과 중에서 가장 species richness 가 높은 과로 확인 되었음. 출현한 전체 80 종 중에서 54 %에 해당하는 28 속 43 종이 사질로 구성된 agglutinated test를 형성하는 종으로 확인 되었으며, 탄산칼슘질 성분의 외각을 갖는 종은 37 종으로, 그중 27 종이 유리질, 10 종이 자기질 외각을 형성하는 종으로 확인되었음.
- 2021/2022 마리안 소만 출현 종 조성과 개체수 기반 상대 풍부도 (relative abundance = ind. of a species /total ind.)는 각 정점별로 다르게 나타났음.
- 모든 정점에 공통적으로 출현한 종은 *Adercotryma glomeratum*, *Spiroplectammina biformis*, *Portatrochammina stenhausei*, *Cassidulinoides parvus*, *Globocassidulina biora*, *Psammosphaera fusca*, *Nodulina subdentaliniformis*, *Reophax subfusiformis*, *Miliammina arenacea*, *Miliammina obliqua* 로, 총 10 종 확인 되었음.
- *Bolivinellina pseudopunctata* 풍부도는 만의 바깥쪽 정점 (MC19)에서 가장 높은 것으로 나타났음.
- *Psammosphaera fusca*, *Spiroplectammina biformis*는 만의 가장 안쪽에 가까울 수록 높게 나타났음.
- 각정점별로 풍부도가 가장 높게 나타난 종들은 다음과 같이 확인 되었음.

MC03: *Reophax subfusiformis* (15.1%), *Bolivinellina pseudopunctata* (14.1%)

MC07: *Miliammina arenacia* (32.4%) 및 *Reophax subfusiformis* (30.7%)

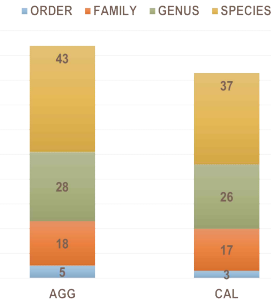
MC10: *Psammosphaera fusca* (22%)와 *Reophax subfusiformis* (8.1%)

MC13: *Psammosphaera fusca* (36.1%)와 *Miliammina areacea* (26.9%)

MC19: *Bolivinellina pseudopunctata* (44.2%)



Taxonomic composition by test wall type



| Class         | species no. | %     |
|---------------|-------------|-------|
| Globothalamea | 45          | 56.25 |
| Monothalamea  | 13          | 16.25 |
| Nodosariata   | 7           | 8.75  |
| Tubothalamea  | 15          | 18.75 |

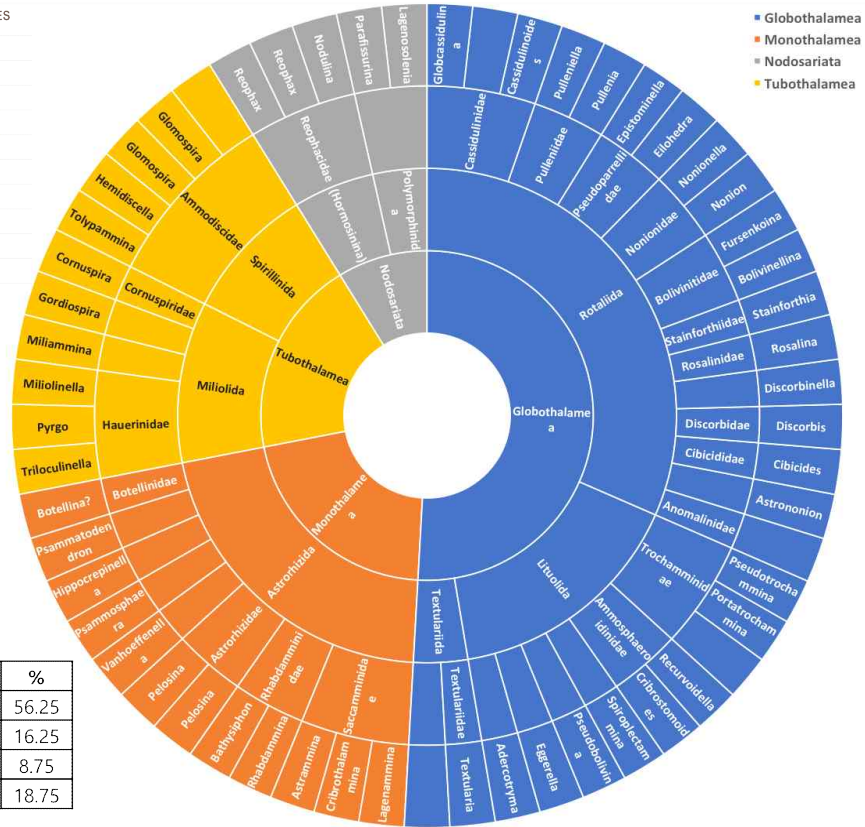


그림 17. 2021/2022 마리안 소만 그래프 정점에 출현한 저서성 유공충 종 조성

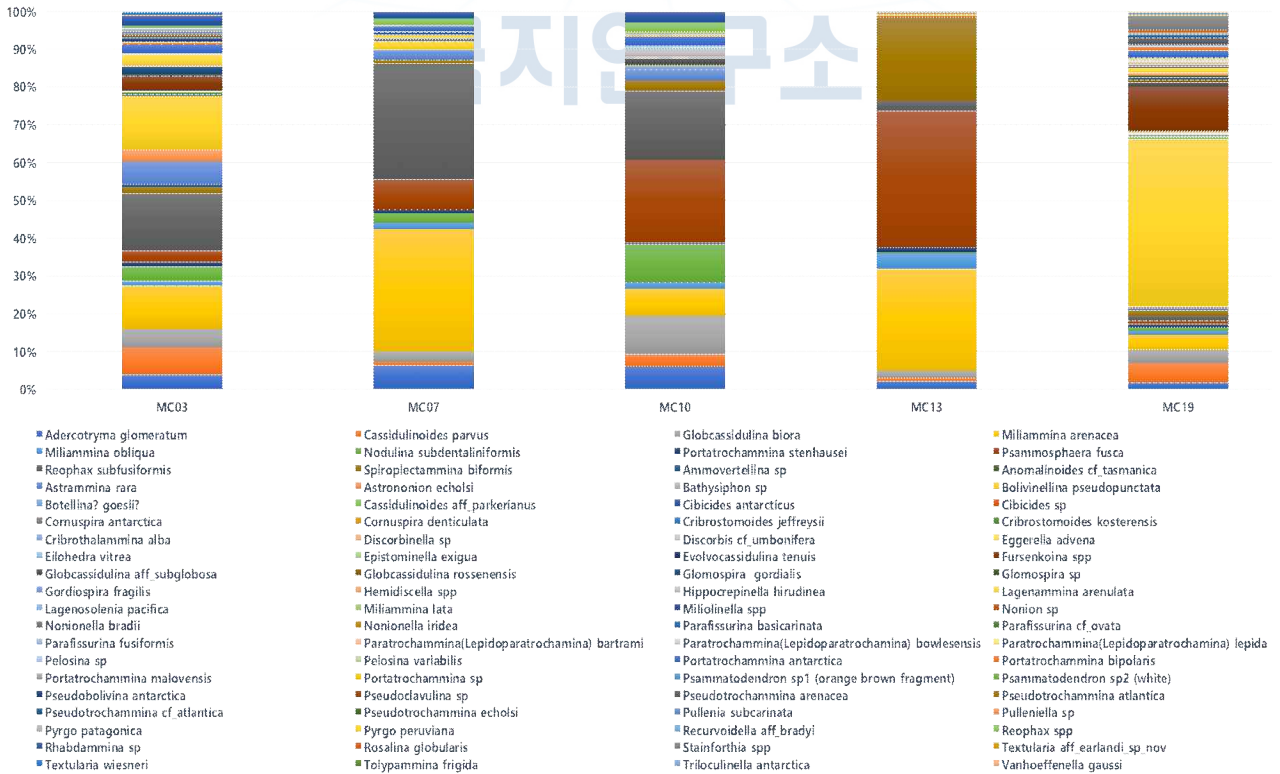


그림 18. 2021/2022 마리안 소만 정점별 출현 종 조성 및 개체수 기반 상대 풍부도 (abundance)

- 정점별 출현 종을 확인해 보았을 때 마리안 소만 내부에 외부에 이르는 정점 모두에서 공통적으로 출현하는 종은 다음의 10 종으로 확인 되었음:

*Adercotryma glomeratum*, *Spiroplectammina biformis*, *Portatrochammina stenhousei*, *Cassidulinoides parvus*, *Globcassidulina biora*, *Psammosphaera fusca*, *Nodulina cf.subdentaliniformis*, *Reophax subfusiformis*, *Miliammina arenacea*, *Miliammina obliqua*.

- 각 정점별 다양성 지수는 PAST4 소프트웨어를 사용해 단위 퇴적물중량 당 개체수 (ind/g sed.)로 표준화 한 풍부도 (abundance) 데이터를 기반으로 연산 하였으며 결과는 아래 표에 제시되었음.

(2021/2022 마리안 소만 그래프조사 정점별 다양성 지수)

|                              | MC03 | MC07 | MC10 | MC13 | MC19 |
|------------------------------|------|------|------|------|------|
| Taxa (S)                     | 41   | 31   | 35   | 15   | 58   |
| Dominance (D)                | 0.08 | 0.21 | 0.12 | 0.26 | 0.22 |
| Simpson (1-D)                | 0.92 | 0.79 | 0.88 | 0.75 | 0.78 |
| Shannon (H)                  | 2.95 | 2.07 | 2.53 | 1.65 | 2.48 |
| Evenness (e <sup>H/S</sup> ) | 0.47 | 0.25 | 0.36 | 0.35 | 0.21 |

- Taxa\_S 는 산출된 종 수 (= 종 풍부도, species richness)를 의미하며, MC19에서 가장 높게 나타났고, MC13에서 가장 낮게 나타남.
- Shannon (H)지수 및 Simpson (1-D) 지수 모두 정점 MC03에서 가장 높게 나타났고, MC13에서 가장 낮은 것으로 확인 되었음.
- 균등도 (Evenness, e<sup>H/S</sup>) 는 정점 MC03에서 가장 높고, MC19에서 가장 낮게 나타남.

(2021/2022 마리안 소만정점별 출현 종 목록)

| NO | CLASS         | Order          | FAMILY              | GENUS                          | SPECIES                            | TEST | MC03 | MC07 | MC10 | MC13 | MC19 |
|----|---------------|----------------|---------------------|--------------------------------|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 1  |               |                | Adercotrymidae      | <i>Adercotryma</i>             | <i>glomeratum</i>                  | AGG  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 2  |               |                |                     |                                | <i>jeffreysii</i>                  | AGG  | 0    |      |      |      |      |
| 3  |               |                | Ammosphaeroidinidae | <i>Cribrastomoides</i>         | <i>kosterensis</i>                 | AGG  | 0    |      |      |      | 0    |
| 4  |               |                |                     | <i>Recurvoidella</i>           | <i>aff_bradyi</i>                  | AGG  | 0    |      |      |      |      |
| 5  |               |                | Prolixoplectidae    | <i>Eggerella</i>               | <i>advena</i>                      | AGG  | 0    |      | 0    | 0    | 0    |
| 6  |               |                | Pseudobolivinidae   | <i>Pseudobolivina</i>          | <i>antarctica</i>                  | AGG  | 0    |      |      |      | 0    |
| 7  |               |                | Spiroplectamminidae | <i>Spiroplectammina</i>        | <i>biformis</i>                    | AGG  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 8  |               |                |                     | <i>Paratrochammina</i>         | <i>lepida</i>                      | AGG  |      |      |      |      | 0    |
| 9  |               |                |                     |                                | <i>bartrami</i>                    | AGG  |      |      |      |      | 0    |
| 10 |               | Lituoliida     |                     | <i>(Lepidoparatrochammina)</i> | <i>bowlesensis</i>                 | AGG  | 0    |      |      |      | 0    |
| 11 |               |                |                     |                                | <i>antarctica</i>                  | AGG  | 0    | 0    | 0    |      | 0    |
| 12 |               |                |                     |                                | <i>bipolaris</i>                   | AGG  | 0    |      | 0    | 0    | 0    |
| 13 |               |                | Trochamminidae      | <i>Portatrochammina</i>        | <i>malovensis</i>                  | AGG  |      | 0    |      |      | 0    |
| 14 |               |                |                     |                                | <i>sp</i>                          | AGG  |      |      | 0    |      |      |
| 15 |               |                |                     |                                | <i>stenhausei</i>                  | AGG  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 16 |               |                |                     |                                | <i>arenacea</i>                    | AGG  | 0    |      | 0    |      | 0    |
| 17 |               |                |                     | <i>Pseudotrochammina</i>       | <i>atlantica</i>                   | AGG  | 0    | 0    |      |      |      |
| 18 |               |                |                     |                                | <i>cf_atlantica</i>                | AGG  | 0    |      | 0    |      | 0    |
| 19 |               |                |                     |                                | <i>echolsi</i>                     | AGG  |      |      |      |      | 0    |
| 20 |               |                | Anomalinidae        | <i>Anomalinoides</i>           | <i>cf_tasmanica</i>                | CAL  |      |      |      |      | 0    |
| 21 |               |                | Astrononionidae     | <i>Astrononion</i>             | <i>echolsi</i>                     | CAL  | 0    |      |      |      | 0    |
| 22 | Globothalamia |                | Bolivinitidae       | <i>Bolivinitella</i>           | <i>pseudopunctata</i>              | CAL  | 0    | 0    |      |      | 0    |
| 23 |               |                |                     | <i>Fursenkoina</i>             | <i>spp</i>                         | CAL  | 0    |      |      |      | 0    |
| 24 |               |                |                     | <i>Cassidulinoides</i>         | <i>aff_parkerianus</i>             | CAL  |      |      |      |      | 0    |
| 25 |               |                |                     |                                | <i>parvus</i>                      | CAL  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 26 |               |                | Cassidulinidae      | <i>Evolvocassidulina</i>       | <i>tenuis</i>                      | CAL  | 0    |      |      |      | 0    |
| 27 |               |                |                     |                                | <i>aff_subglobosa</i>              | CAL  | 0    | 0    | 0    |      | 0    |
| 28 |               |                |                     | <i>Globcassidulina</i>         | <i>biora</i>                       | CAL  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 29 |               |                |                     |                                | <i>rossensis</i>                   | CAL  |      | 0    | 0    |      | 0    |
| 30 |               |                |                     |                                | <i>antarcticus</i>                 | CAL  |      | 0    |      |      | 0    |
| 31 |               |                | Cibicidae           | <i>Cibicides</i>               | <i>sp</i>                          | CAL  |      |      |      | 0    |      |
| 32 |               | Rotaliida      | Discorbidae         | <i>Discorbis</i>               | <i>cf_umbonifera</i>               | CAL  |      |      |      |      | 0    |
| 33 |               |                | Discorbinellidae    | <i>Discorbinella</i>           | <i>sp</i>                          | CAL  |      |      |      |      | 0    |
| 34 |               |                |                     | <i>Nonion</i>                  | <i>sp</i>                          | CAL  |      |      |      |      | 0    |
| 35 |               |                | Nonionidae          | <i>Nonionella</i>              | <i>bradleyi</i>                    | CAL  |      |      |      |      | 0    |
| 36 |               |                |                     |                                | <i>iridea</i>                      | CAL  |      |      |      |      | 0    |
| 37 |               |                |                     | <i>Eilohedra</i>               | <i>vitrea</i>                      | CAL  |      | 0    |      |      |      |
| 38 |               |                | Pseudoparrellidae   | <i>Epistominella</i>           | <i>exigua</i>                      | CAL  |      |      |      |      | 0    |
| 39 |               |                |                     | <i>Pullenia</i>                | <i>subcarinata</i>                 | CAL  | 0    |      |      |      | 0    |
| 40 |               |                | Pulleniidae         | <i>Pullenella</i>              | <i>sp</i>                          | CAL  |      |      |      |      | 0    |
| 41 |               |                | Rosalinidae         | <i>Rosalina</i>                | <i>globularis</i>                  | CAL  | 0    |      | 0    |      | 0    |
| 42 |               |                | Stainforthiidae     | <i>Stainforthia</i>            | <i>spp</i>                         | CAL  | 0    |      |      | 0    | 0    |
| 43 |               |                | Pseudogaudryinidae  | <i>Pseudoclavulina</i>         | <i>sp</i>                          | AGG  |      |      |      | 0    | 0    |
| 44 |               | Textulariida   |                     |                                | <i>aff_earlandi sp. nov</i>        | AGG  |      |      |      |      | 0    |
| 45 |               |                | Textulariidae       | <i>Textularia</i>              | <i>wiesneri</i>                    | AGG  | 0    |      |      |      | 0    |
| 46 |               |                |                     | <i>Pelosina</i>                | <i>sp</i>                          | AGG  |      |      | 0    |      |      |
| 47 |               |                | Astrorhizidae       | <i>Pelosina</i>                | <i>variabilis</i>                  | AGG  |      |      | 0    | 0    |      |
| 48 |               |                | Botellinidae        | <i>Botellina?</i>              | <i>goesii?</i>                     | AGG  |      |      | 0    |      |      |
| 49 |               |                |                     | <i>Psammotodendron</i>         | <i>sp1 (orange brown fragment)</i> | AGG  |      |      |      |      | 0    |
| 50 |               |                |                     |                                | <i>sp2 (white)</i>                 | AGG  | 0    | 0    | 0    |      | 0    |
| 51 | Monothalamia  | Astrorhizida   | Hippocrepinellidae  | <i>Hippocrepinella</i>         | <i>hirudinea</i>                   | AGG  |      |      | 0    |      |      |
| 52 |               |                | Psammosphaeridae    | <i>Psammosphaera</i>           | <i>fusca</i>                       | AGG  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 53 |               |                |                     | <i>Bathysiphon</i>             | <i>sp</i>                          | AGG  |      | 0    |      |      |      |
| 54 |               |                | Rhabdamminidae      | <i>Rhabdammina</i>             | <i>sp</i>                          | AGG  | 0    | 0    | 0    |      |      |
| 55 |               |                |                     | <i>Astrammina</i>              | <i>rara</i>                        | AGG  | 0    | 0    | 0    |      | 0    |
| 56 |               |                | Saccamminidae       | <i>Cribrorhammina</i>          | <i>alba</i>                        | AGG  |      |      | 0    |      | 0    |
| 57 |               |                |                     | <i>Lagenammina</i>             | <i>arenulata</i>                   | AGG  | 0    | 0    |      |      | 0    |
| 58 |               |                | Vanhoeffenellidae   | <i>Vanhoeffenella</i>          | <i>gaussi</i>                      | AGG  |      |      |      |      | 0    |
| 59 |               |                |                     | <i>Nodulina</i>                | <i>subdentaliniiformis</i>         | AGG  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 60 |               | (Hormosinina)  | Reophacidae         | <i>Reophax</i>                 | <i>spp</i>                         | AGG  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 61 |               |                |                     | <i>Reophax</i>                 | <i>subfusiformis</i>               | AGG  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 62 | Nodosariata   |                |                     | <i>Lagenosolenia</i>           | <i>pacifica</i>                    | CAL  |      |      | 0    |      |      |
| 63 |               |                |                     |                                | <i>basicarinata</i>                | CAL  |      | 0    |      |      |      |
| 64 |               | Polymorphinida | Ellipsolagenidae    | <i>Parafissurina</i>           | <i>cf_ovata</i>                    | CAL  |      |      |      |      | 0    |
| 65 |               |                |                     |                                | <i>fusiformis</i>                  | CAL  |      | 0    |      |      |      |
| 66 |               |                |                     |                                | <i>antarctica</i>                  | CAL  |      |      |      |      | 0    |
| 67 |               |                | Cornuspiridae       | <i>Cornuspira</i>              | <i>denticulata</i>                 | CAL  | 0    |      |      |      |      |
| 68 |               |                |                     | <i>Miliolinella</i>            | <i>spp</i>                         | CAL  |      | 0    |      |      | 0    |
| 69 |               |                | Hauerinidae         | <i>Pyrgo</i>                   | <i>patagonica</i>                  | CAL  | 0    |      | 0    |      |      |
| 70 |               |                |                     |                                | <i>peruviana</i>                   | CAL  |      |      | 0    |      |      |
| 71 |               | Miliolida      |                     | <i>Triloculinella</i>          | <i>antarctica</i>                  | CAL  | 0    | 0    |      |      |      |
| 72 |               |                | Hemigordiopsidae    | <i>Gordiospira</i>             | <i>fragilis</i>                    | CAL  |      | 0    | 0    |      |      |
| 73 | Tubothalamia  |                |                     |                                | <i>arenacea</i>                    | CAL  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 74 |               |                | Miliamminidae       | <i>Miliammina</i>              | <i>lata</i>                        | CAL  |      |      | 0    |      |      |
| 75 |               |                |                     |                                | <i>obliqua</i>                     | CAL  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 76 |               |                |                     | <i>Ammovertellina</i>          | <i>sp</i>                          | AGG  | 0    |      |      |      |      |
| 77 |               |                |                     | <i>Glomospira</i>              | <i>gordialis</i>                   | AGG  | 0    | 0    | 0    |      | 0    |
| 78 |               |                | Spirillinida        | <i>Glomospira</i>              | <i>sp</i>                          | AGG  |      | 0    |      |      | 0    |
| 79 |               |                |                     | <i>Hemidiscella</i>            | <i>spp</i>                         | AGG  | 0    |      | 0    |      | 0    |
| 80 |               |                |                     | <i>Tolypammina</i>             | <i>frigida</i>                     | AGG  |      |      |      |      | 0    |

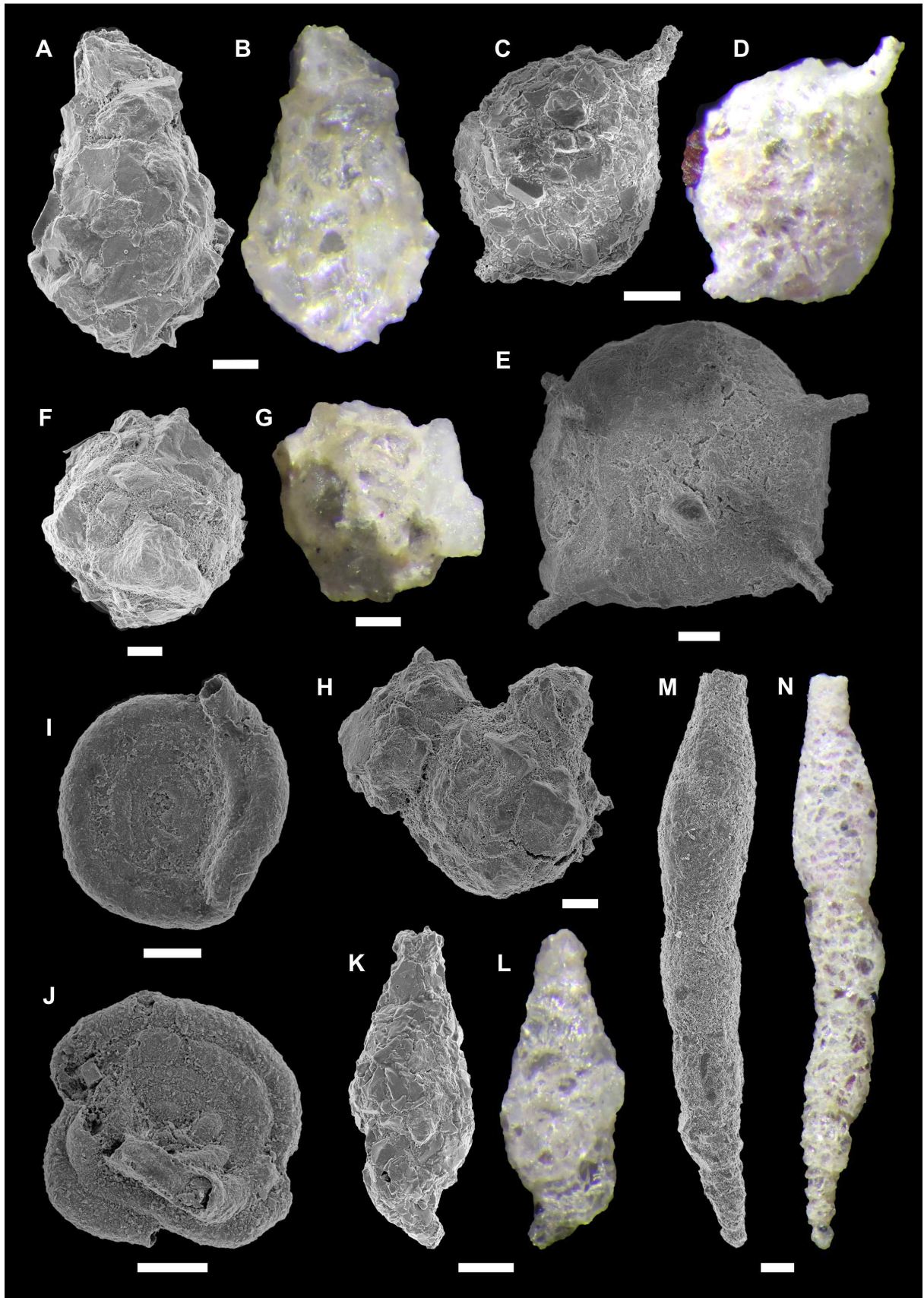


그림 19. 마리안 소만 출현 저서성 유공충의 SEM 및 디지털카메라 이미지 도판. 축척=100  $\mu\text{m}$ . (A, B) *Lagenamina arenulata* (Skinner, 1961); (C -E) *Astrammima rara* Rhumbler, 1931; (F - H) *Psammosphaera fusca* Schulze, 1875; (I - J) *Glomospira gordialis* (Jones & Parker, 1860); (K, L) *Reophax subfusiformis* Earland Em. Hoglund, 1947; (M, N) *Nodulina subdentaliniformis* (Parr, 1950)

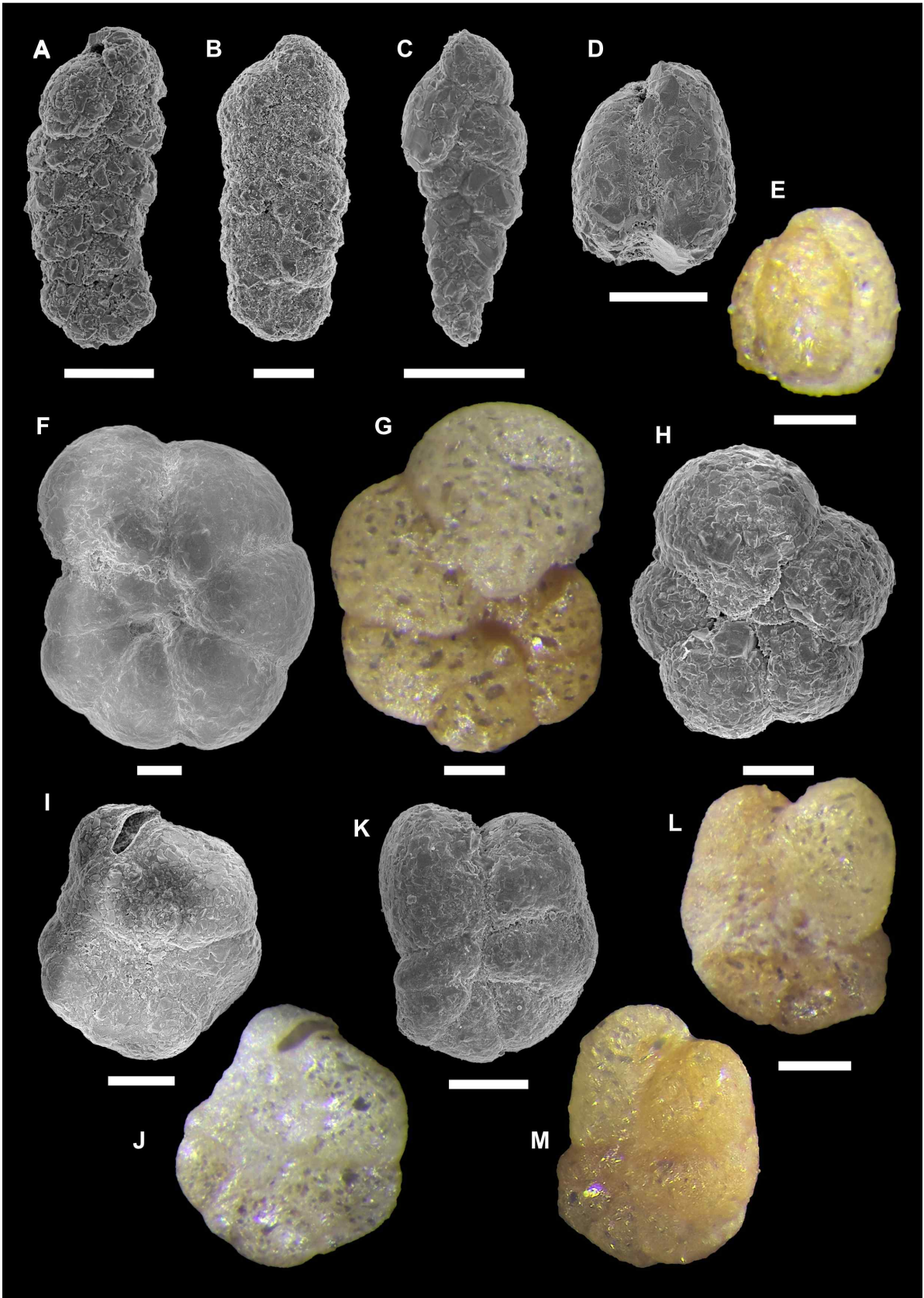


그림20 마리안 소만 출현 저서성 유공충의 SEM 및 디지털카메라 이미지 도판. 축척=100  $\mu\text{m}$ . (A, B) *Spiroplectammina biformis* (Parker & Jones, 1865); (C) *Pseudobolivina antarctica* Wiesner, 1931; (D, E) *Adercotryma glomeratum* (Brady, 1878); (F, G) *Cribrostomoides jeffreysii* (Williamson, 1858); (H) *Portatrochammina antarctica* (Parr, 1950); (I - J) *Pseudotrochammina arenacea* (Heron-Allen & Earland, 1922); (K - M) *Pseudotrochammina atlantica* (Parker, 1952).

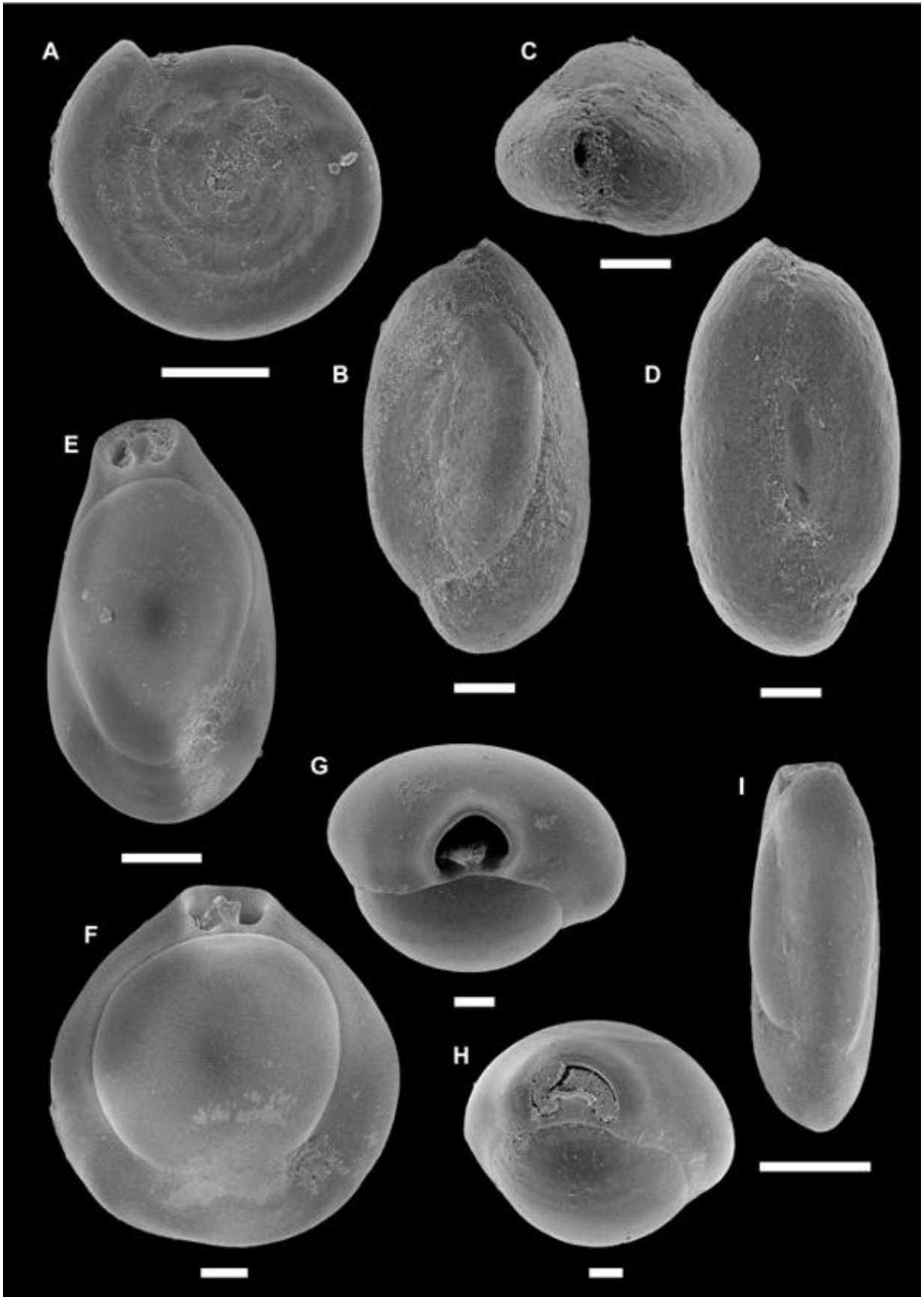


그림 21. 마리안 소만 출현 저서성 유공충의 SEM 및 디지털카메라 이미지 도판. 축척=100  $\mu\text{m}$ . (A) *Cornuspira denticulata* Heron-Allen & Earland, 1932; (B - D) *Millammina arenacea* (Chapmann, 1916); (E - H) *Pyrgoperuviana* (d'Orbigny, 1839); (I) *Triloculinella antarctica* (Kennett, 1967).

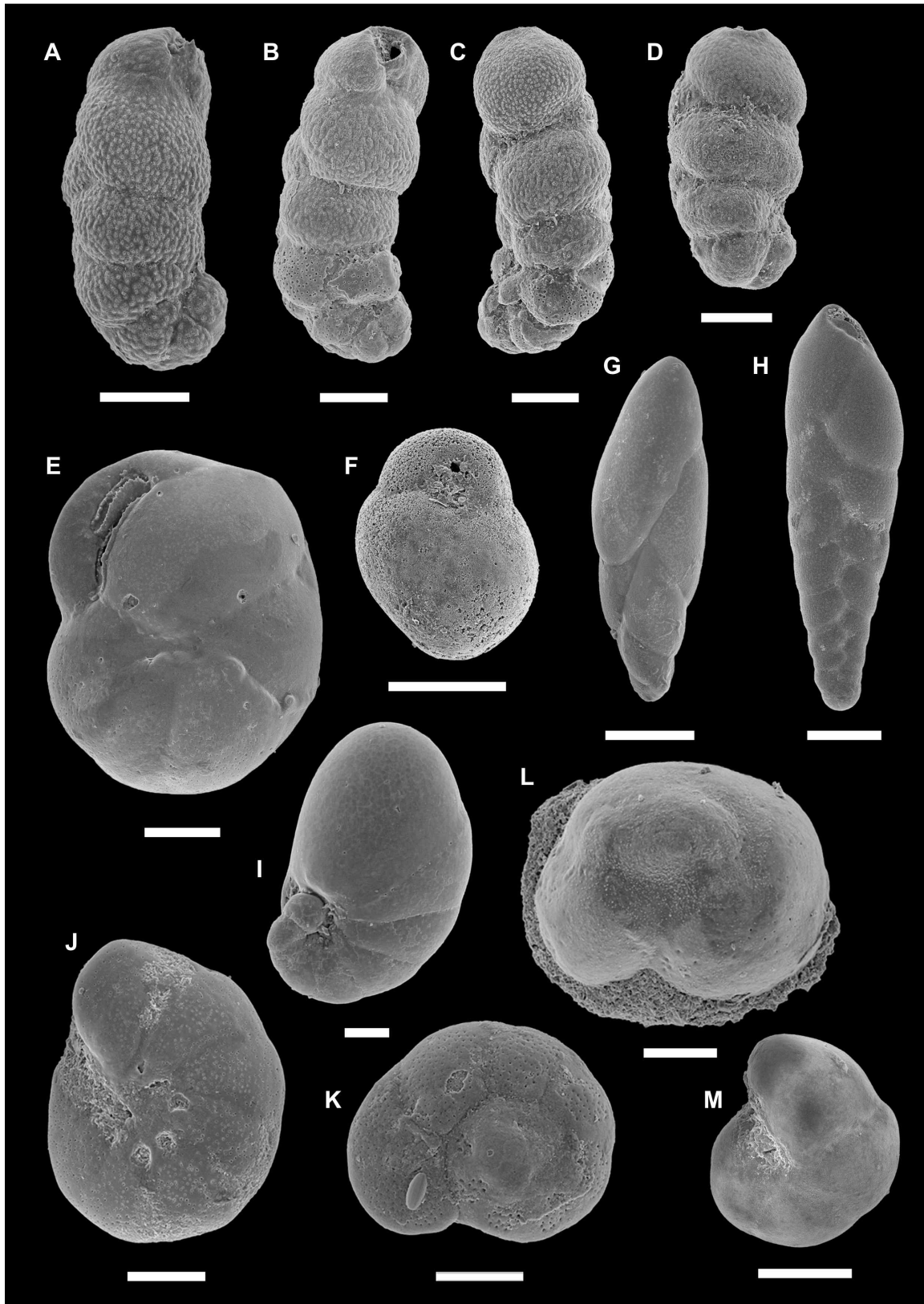


그림 22. 마리아나 소만 출현 저서성 유공충의 SEM 및 디지털카메라 이미지 도판. 축척=100  $\mu$ m. (A - D) *Cassidulinoides parvus* (Earland 1934); (E) *Globocassidulina bora* (Crespin, 1960); (F) *Globocassidulina subglobosa* (Brady, 1881); (G) *Fursenkoina fusiformis* (Williamson, 1858); (H) *Bolivinelina pseudopunctata* (Höglund, 1947); (I) *Nonionella bradii* (Chapman, 1916); (J) *Astrononion echolsi* Kennett, 1967; (K) *Rosalina globularis* d'Orbigny, 1826; (L) *Cibicides antarcticus* (Saidova, 1975); (M) *Pullenia subcarinata* (d'Orbigny, 1839).

- 2022/2023 하계 그랩 조사정점의 유공충 정량시료분석은 우선 포터소만 9개 정점에 대하여 종 준위 분류작업이 마무리되었으며, 나머지 마리안 소만정점에 대한 종 준위분류 및 계수는 현재 진행 중이며, 추후 마무리하여 해당 해역의 유공충 군집구조 및 분포 연구논문 작업을 위한 데이터로 활용될 예정입니다.

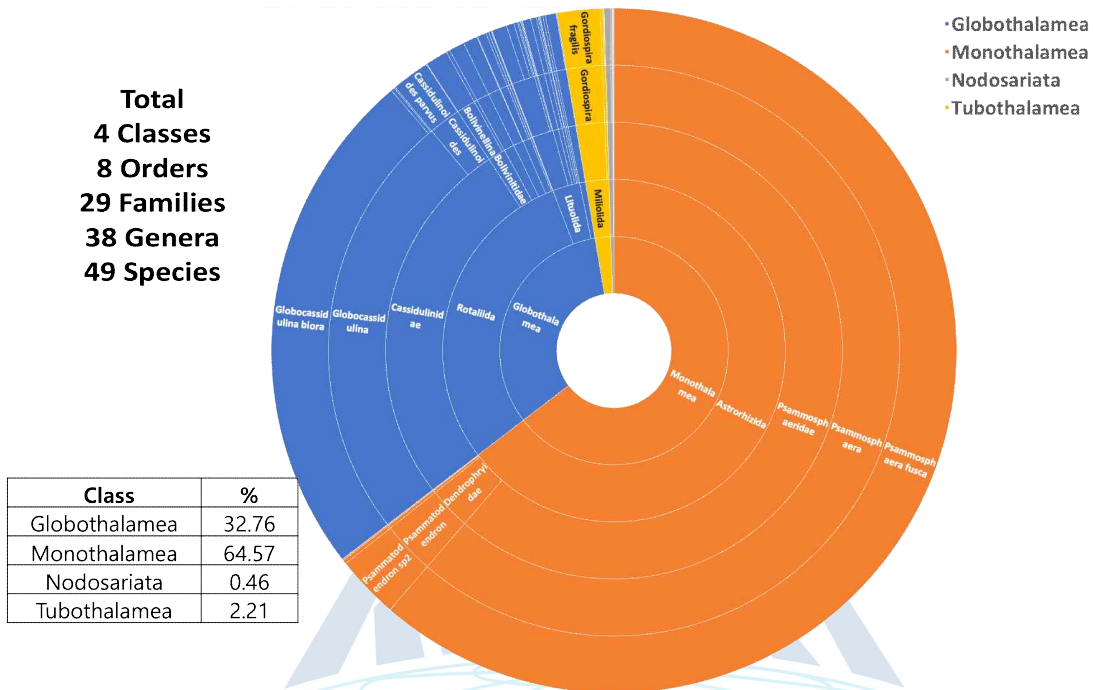


그림 23. 2022/2023 포터소만 출현 유공충 종 조성

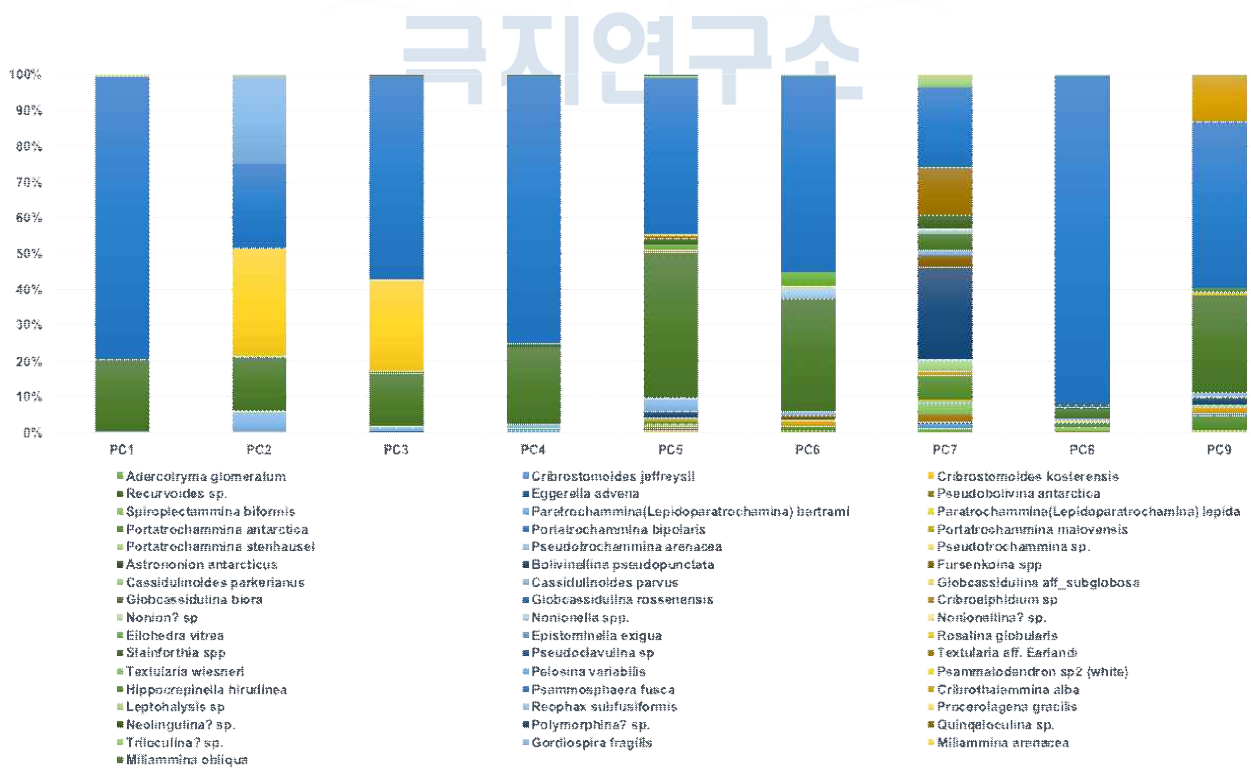


그림 24. 2022/2023 포터소만 그랩조사 정점별 유공충 종 조성



- 전체 정점에 출현한 분류군 구성은 4개 강 8개 목 29개 과 38개 속 49 종이 확인되었으며, 4개의 강 중 Monothalamea 강이 64.57 %로 가장 abundance가 높은 것으로 확인되었음.

(2022/2023 포터소만 정점별 유공충 조성)

| NO | CLASS         | ORDER          | FAMILY              | GENUS                            | SPECIES                      | TEST | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | PC5 | PC6 | PC7 | PC8 | PC9 |
|----|---------------|----------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1  |               |                | Adercotrymidae      | <i>Adercotryma</i>               | <i>glomeratum</i>            | AGG  |     |     |     |     | ○   | ○   | ○   |     |     |
| 2  |               |                |                     |                                  | <i>jeffreysii</i>            | AGG  |     |     |     | ○   |     |     | ○   |     |     |
| 3  |               |                | Ammosphaeroidinidae | <i>Cribrostomoides</i>           | <i>kosterensis</i>           | AGG  |     |     |     | ○   |     |     |     |     | ○   |
| 4  |               |                |                     | <i>Recurvoides</i>               | cf. <i>trochamminiformis</i> | AGG  |     |     |     |     | ○   |     |     |     |     |
| 5  |               |                | Prolixoplectidae    | <i>Eggerella</i>                 | <i>advena</i>                | AGG  |     |     |     |     | ○   |     | ○   |     |     |
| 6  |               |                | Pseudobolvinidae    | <i>Pseudobolvinina</i>           | <i>antarctica</i>            | AGG  |     |     |     |     | ○   | ○   | ○   | ○   |     |
| 7  |               |                | Spiroplectamminidae | <i>Spiroplectammina</i>          | <i>biformis</i>              | AGG  |     |     |     | ○   |     |     |     | ○   | ○   |
| 8  |               | Lituolida      |                     | <i>Paratrochammina</i>           | <i>bartrami</i>              | AGG  |     |     |     |     |     |     | ○   |     |     |
| 9  |               |                |                     | ( <i>Lepidoparatrochammina</i> ) | <i>lepida</i>                | AGG  |     |     |     |     | ○   |     | ○   |     |     |
| 10 |               |                |                     |                                  | <i>antarctica</i>            | AGG  |     |     |     |     | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   |
| 11 |               |                | Trochamminidae      | <i>Portatrochammina</i>          | <i>bipolaris</i>             | AGG  |     |     |     | ○   |     |     |     | ○   | ○   |
| 12 |               |                |                     |                                  | <i>malovensis</i>            | AGG  |     |     |     |     | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   |
| 13 |               |                |                     |                                  | <i>stenhauseri</i>           | AGG  |     |     |     |     | ○   |     | ○   |     | ○   |
| 14 |               |                |                     | <i>Pseudotrochammina</i>         | <i>arenacea</i>              | AGG  |     |     | ○   |     |     |     | ○   |     |     |
| 15 |               |                |                     |                                  | cf. <i>atlantica</i>         | AGG  |     |     |     |     |     | ○   |     | ○   |     |
| 16 |               |                | Astrononionidae     | <i>Astrononion</i>               | <i>antarcticus</i>           | CAL  |     |     |     |     | ○   |     |     |     |     |
| 17 | Globothalamea |                | Bolivinidae         | <i>Bolivinella</i>               | <i>pseudopunctata</i>        | CAL  |     |     |     | ○   |     | ○   | ○   |     | ○   |
| 18 |               |                |                     | <i>Furserkoona</i>               | cf. <i>earlandi</i>          | CAL  |     |     |     |     |     | ○   | ○   | ○   | ○   |
| 19 |               |                |                     | <i>Cassidulinoidea</i>           | <i>parkerianus</i>           | CAL  |     |     |     |     | ○   |     |     |     |     |
| 20 |               |                |                     |                                  | <i>parvus</i>                | CAL  | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   |
| 21 |               |                | Cassiduliridae      |                                  | aff. <i>subglobosa</i>       | CAL  |     |     |     |     | ○   |     |     |     |     |
| 22 |               |                |                     | <i>Globocassidulina</i>          | <i>biora</i>                 | CAL  | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   |
| 23 |               |                |                     |                                  | <i>rossenensis</i>           | CAL  |     | ○   |     |     |     |     |     | ○   |     |
| 24 |               | Rotulida       | Elphidae            | <i>Criboelphidium</i>            | sp.                          | CAL  |     |     |     |     | ○   |     |     |     |     |
| 25 |               |                |                     | <i>Nonion</i>                    | sp.                          | CAL  |     |     |     |     |     |     | ○   |     |     |
| 26 |               |                | Nonionidae          | <i>Nonionella</i>                | cf. <i>bradii</i>            | CAL  |     |     |     |     | ○   | ○   | ○   | ○   |     |
| 27 |               |                |                     | <i>Nonionella</i>                | cf. <i>antarctica</i>        | CAL  |     |     |     |     | ○   | ○   | ○   |     |     |
| 28 |               |                | Pseudoparrelliidae  | <i>Eliohedra</i>                 | <i>vitrea</i>                | CAL  |     |     |     |     | ○   | ○   |     |     |     |
| 29 |               |                |                     | <i>Epistominella</i>             | <i>exigua</i>                | CAL  |     |     |     |     | ○   |     |     |     |     |
| 30 |               |                | Rosalinidae         | <i>Rosalina</i>                  | <i>globularis</i>            | CAL  |     |     |     |     |     |     |     |     | ○   |
| 31 |               |                | Stainforthiidae     | <i>Stainforthia</i>              | cf. <i>fusiformis</i>        | CAL  |     |     |     |     |     |     |     | ○   | ○   |
| 32 |               |                | Pseudogaudryinidae  | <i>Pseudoclavulina</i>           | sp.                          | AGG  |     |     |     | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   |
| 33 |               | Textulariida   | Textulariidae       | <i>Textularia</i>                | aff. <i>earlandi</i>         | AGG  |     |     |     |     | ○   |     | ○   |     |     |
| 34 |               |                |                     |                                  | <i>wiesneri</i>              | AGG  |     |     |     |     | ○   |     | ○   |     |     |
| 35 |               |                | Astrorhizidae       | <i>Pelosina</i>                  | <i>variabilis</i>            | AGG  |     |     |     |     | ○   |     |     |     |     |
| 36 |               |                | Dendrophryidae      | <i>Psammotodendron</i>           | sp.                          | AGG  |     |     | ○   | ○   |     |     |     |     |     |
| 37 | Monothalamea  | Astrorhizida   | Hippocrepinellidae  | <i>Hippocrepinella</i>           | <i>hirudinea</i>             | AGG  |     |     |     |     |     |     |     |     | ○   |
| 38 |               |                | Psammospaeridae     | <i>Psammospaera</i>              | <i>fusca</i>                 | AGG  | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   |
| 39 |               |                | Saccamminidae       | <i>Cribrorhammina</i>            | <i>alba</i>                  | AGG  |     |     |     |     |     |     |     |     | ○   |
| 40 |               | (Hormosinina)  | Reophaciidae        | <i>Leptohalysis</i>              | cf. <i>catella</i>           | AGG  |     |     |     |     | ○   | ○   | ○   | ○   |     |
| 41 |               |                | Reophaciidae        | <i>Reophax</i>                   | <i>subfusiformis</i>         | AGG  | ○   |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 42 | Nodosariata   | Nodosariida    | Lagenidae           | <i>Procerolagena</i>             | <i>gracilis</i>              | CAL  |     |     |     |     | ○   |     |     |     |     |
| 43 |               |                | Nodosariidae        | <i>Neolingulina</i>              | sp.                          | CAL  |     |     |     |     | ○   |     |     |     |     |
| 44 |               | Polymorphinida | Polymorphinidae     | <i>Polymorphina</i>              | sp.                          | CAL  |     |     |     |     | ○   |     |     |     |     |
| 45 |               |                |                     | <i>Quinqueloculina</i>           | cf. <i>seminulum</i>         | CAL  |     |     |     | ○   |     |     |     |     |     |
| 46 |               |                | Hauerinidae         | <i>Triloculina</i>               | sp.                          | CAL  |     |     |     |     |     |     |     |     | ○   |
| 47 | Tubothalamea  | Miliolida      | Hemigordiopsidae    | <i>Gordiospira</i>               | <i>fragilis</i>              | CAL  |     |     | ○   |     |     |     |     |     |     |
| 48 |               |                | Miliamminidae       | <i>Miliammina</i>                | <i>arenacea</i>              | CAL  | ○   | ○   |     |     |     |     | ○   |     |     |
| 49 |               |                |                     |                                  | <i>obliqua</i>               | CAL  |     |     |     | ○   | ○   |     |     |     |     |

- 정점별 구성에서는 PC5에서 가장 많은 수의 종이 출현 함 (32 종)
- 전체 정점에서 공통적으로 출현한 분류군은 *Cassidulinoidea parvus*, *Globocassidulina biora*, *Psammospaera fusca* 세 종으로 확인 되었음.
- PC5 ~ 8 에서는 기 분석한 2021/2022 마리안 소만 시료에서는 확인되지 않았던 *Leptohalysis* 속이 확인 되었음.
- 또한 PC5 및 PC7에서는 신종(신속) 후보종인 *Textularia* aff. *earlandi* sp. nov. 가 확인 되었음 (그림 25). 해당 종은 일부 생태 선행 연구논문에서 수록된 도판에 *Textularia tenuissima* (Ishman and Domack, 1994, p. 153, pl. 1, fig. 1; Majewski, 2010, p. 65, fig. 2.2), *Spiroplectammina filiformis* (Rodrigues et al., 2010, p. 354, fig. 4b) 으로 보고된 바 있으나, 해당 종들의 원기재와 비교하였을 때 개구부 형태 및 위치, 외각 구성성분 및 내실 형태 및 배열에서 차이가 있으며, 해당 종의 형태형질과 일치하는 Textulariidae 과

내의 속 및 종이 없어 최소 신종일 것으로 판단되는 바임.

- 각정점별로 풍부도가 가장 높게 나타난 종들은 다음과 같이 확인 되었음.

PC1: *Psammospaera fusca* (79.11%), *Globocassidulina biora* (20.08%)

PC2: *Psammospaera fusca* (23.77 %), *Psammotodendron* sp. (29.92%), *Gordiospira fragilis* (24.59%)

PC3: *Psammospaera fusca* (57.06%), *Psammotodendron* sp.(25.59%)

PC4: *Psammospaera fusca* (74.84%), *Globocassidulina biora* (21.57%)

PC5: *Psammospaera fusca* (43.57%), *Globocassidulina biora* (40.58%)

PC6: *Psammospaera fusca* (54.97%), *Globocassidulina biora* (31.37%)

PC7: *Psammospaera fusca* (22.31%), *Bolivinellina pseudopunctata* (25.77%)

PC8: *Psammospaera fusca* (91.93%)

PC9: *Psammospaera fusca* (46.34%), *Globocassidulina biora* (27.18%)

- 포터소만 모든 정점에서 공통적으로 출현하는 종은 3 종으로 확인되었음:

*Cassidulinoides parvus*, *Globocassidulina biora*, *Psammospaera fusca*.

- 각 정점별 다양성 지수는 PAST4 소프트웨어를 사용해 단위 퇴적물중량 당 개체수 (ind/g sed.)로 표준화 한 풍부도 (abundance) 데이터를 기반으로 연산 하였으며 결과는 아래 표에 제시하였음.

(2021/2022 마리안 소만 그래프조사 정점별 다양성 지수)

|                | PC1  | PC2  | PC3  | PC4  | PC5  | PC6  | PC7  | PC8  | PC9  |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Taxa_S         | 5    | 9    | 8    | 9    | 32   | 14   | 24   | 13   | 16   |
| Dominance_D    | 0.67 | 0.23 | 0.41 | 0.61 | 0.36 | 0.40 | 0.15 | 0.85 | 0.31 |
| Simpson_1-D    | 0.33 | 0.77 | 0.59 | 0.39 | 0.64 | 0.60 | 0.85 | 0.15 | 0.69 |
| Shannon_H      | 0.56 | 1.58 | 1.09 | 0.73 | 1.47 | 1.25 | 2.33 | 0.45 | 1.54 |
| Evenness_e^H/S | 0.35 | 0.54 | 0.37 | 0.23 | 0.14 | 0.25 | 0.43 | 0.12 | 0.29 |

- Taxa\_S 는 산출된 종 수 (= 종 풍부도, species richness)를 의미하며, PC5에서 가장 높게 나타났고, PC1에서 가장 낮게 나타남.

- Shannon (H)지수 및 Simpson (1-D) 지수 모두 정점 PC7에서 가장 높게 나타났고, PC8에서 가장 낮은 것으로 확인 되었음.

- 균등도 (Evenness, e^H/S) 는 정점 PC2에서 가장 높고, PC8에서 가장 낮게 나타났음.



그림 25. 포터소만 출현 신종(신속) 후보 저서성 유공충 SEM 및 디지털카메라 이미지 도판. 축척=100  $\mu$  m.

## 다. 환경요인과의 상관관계 분석

### (1) 분석 방법

- 2023.01. 기준 분석이 완료된 2021/2022 하계 마리안 소만 및 2022/2023 하계 포터소만 그랩 정점 시료의 단위 퇴적물질량 당 개체수 (ind./g sed.) 데이터셋 및 지화학분석결과를 활용하여, PAST 4 소프트웨어 상에서 몇 가지 상관관계 분석을 진행하였음.
- 단위 퇴적물질량 당 개체수 (ind./g sed.) 데이터셋으로부터 각 정점별 출현 종의 상대 풍부도 데이터를 확보, Rodrigues et al. (2015)에서 적용한 기준 (한 정점 이상에서 >1%의 상대풍부도를 보이는 종)을 적용하여 각 정점별 주요종을 선별하였음.
- 주요 종의 각 정점별 상대 풍부도 데이터셋을 기반으로 Hierarchical clustering 분석을 진행 (Euclidian distance, Ward's linkage method 적용)하여 각 정점의 유사도를 파악하였음.
- 또한, 산출한 Euclidian distance를 기반으로, nMDS (nonmetric multidimensional scaling) 분석 및 plot화 하였음.
- 주요종을 대상으로 Clustering 및 nMDS 분석을 통해 확인한 그룹에 대한 InVal 분석을 진행, 각 그룹을 대표하는 지표종 (indicator species) 후보를 확인하였음.
- 각 그룹의 indicator species 와 환경 데이터 간의 Simple correlation coefficient (Pearson correlation coefficient)를 산출하여 선형관계를 갖는 종 과 환경요인을 1차적으로 확인하였으며, CCA (canonical-correlation analysis)를 진행하여 각 그룹의 지표종 및 환경데이터 간 상관관계를 전반적으로 확인하였음.
- 본 연구에서 진행한 군집구조 및 분포파악을 위한 통계 분석은 현재 진행중인 2022/2023 하계 마리안 소만 그랩정점 시료의 정량분석의 완료 후 데이터셋을 추가하여 최종적인 분석을 진행할 예정임.

### (2) 분석 결과

- 2021/2022 마리안 소만 및 2022/2023 포터소만 시료에서 총 90 종의 유공충이 산출되었으며, Rodrigues et al. (2015) 에 의거하여 총 24 종의 주요종이 선별되었음.
- Hierarchical clustering (Euclidian distance, Ward's linkage method) 결과, similarity distance 80 기준으로 두 개의 그룹으로 나뉘어지는 것을 확인함 (Group1: 마리안 소만 전 정점 및 PC7, Group2: PC7을 제외한 포터소만 전 정점).
- Euclidian distance matrix 기반 nMDS 분석결과 또한 Hierarchical clustering 결과와 동일한 경향을 띄는 것을 확인하였음(그림 26).

(선별된 주요 유공충 종 및 정점별 상대 풍부도)

| TAXA                                    | MC03  | MC07  | MC10  | MC13  | MC19  | PC1   | PC2   | PC3   | PC4   | PC5   | PC6   | PC7   | PC8   | PC9   |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>Adercotryma glomeratum</i>           | 3.78  | 6.34  | 6.11  | 2.14  | 1.74  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.22  | 0.31  | 1.12  | 0.00  | 0.00  |
| <i>Astrammia rara</i>                   | 6.18  | 2.60  | 2.68  | 0.00  | 0.63  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| <i>Bolivinellina pseudopunctata</i>     | 14.14 | 2.11  | 0.00  | 0.00  | 44.18 | 0.00  | 0.00  | 0.29  | 0.00  | 1.55  | 0.31  | 25.77 | 0.00  | 2.09  |
| <i>Cassidulinoides parvus</i>           | 7.37  | 0.98  | 3.22  | 0.92  | 5.23  | 0.27  | 5.33  | 1.18  | 0.98  | 3.44  | 1.24  | 1.12  | 0.58  | 1.05  |
| <i>Eliohedra vitrea</i>                 | 0.00  | 0.08  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 1.11  | 3.73  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| <i>Fursenkoina cf. earlandi</i>         | 3.59  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 11.80 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.11  | 0.62  | 3.36  | 0.00  | 0.35  |
| <i>Globocassidulina aff. subglobosa</i> | 0.60  | 0.33  | 1.82  | 0.00  | 1.11  | 0.00  | 0.41  | 0.29  | 0.00  | 0.44  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| <i>Globocassidulina bitor</i>           | 4.78  | 2.68  | 10.18 | 1.83  | 3.48  | 20.08 | 14.75 | 14.71 | 21.57 | 40.58 | 31.37 | 4.76  | 2.59  | 27.18 |
| <i>Hippocrepinella hirudinea</i>        | 0.00  | 0.00  | 2.14  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 1.05  |
| <i>Lagenammia arenulata</i>             | 2.99  | 0.89  | 0.00  | 0.00  | 1.43  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| <i>Miliammina arenacea</i>              | 11.55 | 32.36 | 7.18  | 26.91 | 4.04  | 0.27  | 0.41  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.28  | 0.00  | 0.00  |
| <i>Miliammina obliqua</i>               | 1.20  | 1.71  | 1.61  | 4.28  | 1.03  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.33  | 0.11  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| <i>Nodulina subdentainiformis</i>       | 3.78  | 2.52  | 10.08 | 0.31  | 0.87  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| <i>Portatrochammina antarctica</i>      | 2.39  | 1.38  | 2.57  | 0.00  | 1.90  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.89  | 1.24  | 6.72  | 1.15  | 4.18  |
| <i>Portatrochammina malovensis</i>      | 0.00  | 0.16  | 0.00  | 0.00  | 0.16  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.55  | 1.24  | 1.12  | 0.29  | 1.74  |
| <i>Portatrochammina stenhousei</i>      | 1.20  | 0.89  | 0.43  | 1.22  | 0.87  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.23  | 0.00  | 3.08  | 0.00  | 0.70  |
| <i>Psammotodendron sp. 2</i>            | 0.20  | 0.08  | 0.11  | 0.00  | 0.08  | 0.00  | 29.92 | 25.59 | 0.00  | 0.11  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| <i>Psammosphaera fusca</i>              | 2.99  | 8.05  | 21.97 | 36.09 | 0.95  | 79.11 | 23.77 | 57.06 | 74.84 | 43.57 | 54.97 | 22.13 | 91.93 | 46.34 |
| <i>Pseudobolivina antarctica</i>        | 1.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.16  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.55  | 0.31  | 2.24  | 0.29  | 0.00  |
| <i>Reophax spp.</i>                     | 0.40  | 1.71  | 2.47  | 0.00  | 0.08  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| <i>Reophax subfusiformis</i>            | 15.14 | 30.65 | 18.11 | 2.75  | 1.35  | 0.27  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| <i>Rhabdammina sp.</i>                  | 2.59  | 1.71  | 2.79  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| <i>Spiroplectammina biformis</i>        | 1.79  | 1.06  | 2.89  | 22.02 | 1.27  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.33  | 0.55  | 0.00  | 3.36  | 1.15  | 0.35  |
| <i>Stainforthia cf. fusiformis</i>      | 0.20  | 0.00  | 0.00  | 0.31  | 3.88  | 0.00  | 0.00  | 0.59  | 0.98  | 1.77  | 0.00  | 3.92  | 0.58  | 0.00  |

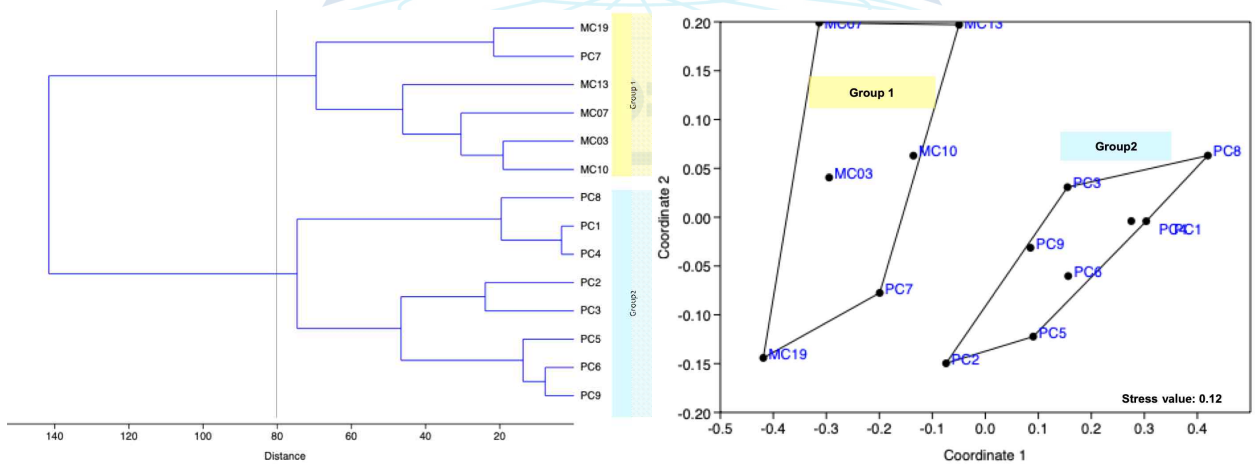


그림 26. Hierarchical clustering 및 nMDS 결과와 확인된 그룹을 표시한 정점도

### Indicator species analysis (IndVal)

IndVal (%) >70, with p<0.05

| Species                            | Group1 | Group2 |
|------------------------------------|--------|--------|
| <i>Adercotryma glomeratum</i>      | 98.16  | 0.46   |
| <i>Globcassidulina biora</i>       | 17.61  | 82.39  |
| <i>Miliammina arenacea</i>         | 99.38  | 0.15   |
| <i>Miliammina obliqua</i>          | 80.63  | 0.81   |
| <i>Nodulina subdentaliniformis</i> | 83.33  | 0      |
| <i>Portatrochammina stenhausei</i> | 90.87  | 2.28   |
| <i>Psammosphaera fusca</i>         | 20.67  | 79.33  |
| <i>Reophax subfusiformis</i>       | 83.09  | 0.037  |
| <i>Spiroplectammina biformis</i>   | 94.78  | 2.61   |

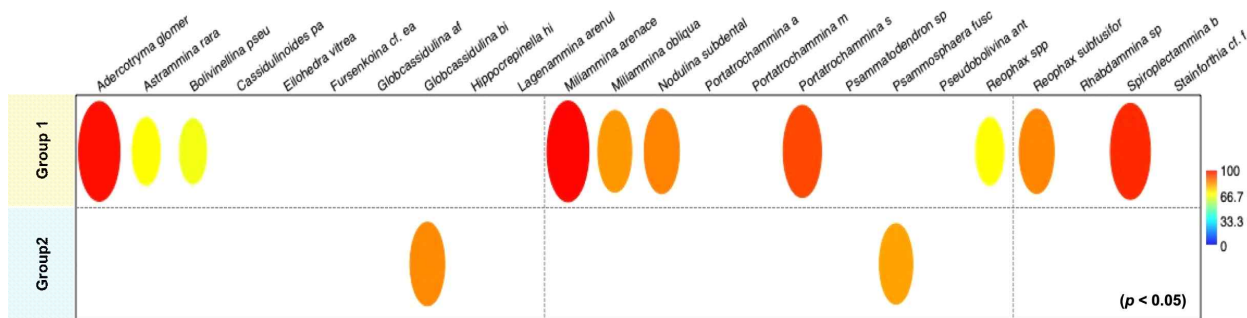


그림 27. IndVal 분석결과.

(indicator species와 환경요인 간 simple correlation coefficient)

| Species                  | Gravel (%)  | Sorting ( $\Phi$ ) | TN (%)       | TOC (%)      | TOC/TN      | Depth        | Dist. to cove entr. |
|--------------------------|-------------|--------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|---------------------|
| <i>A. glomeratum</i>     | 0.04        | 0.28               | -0.50        | -0.40        | 0.51        | <b>0.77</b>  | -0.32               |
| <i>A. rara</i>           | -0.20       | 0.03               | -0.43        | -0.26        | <b>0.53</b> | 0.53         | -0.49               |
| <i>B. pseudopunctata</i> | -0.14       | 0.18               | 0.12         | 0.19         | -0.03       | 0.32         | <b>-0.74</b>        |
| <i>G. biora</i>          | -0.17       | -0.29              | 0.29         | 0.37         | -0.21       | <b>-0.58</b> | 0.31                |
| <i>M. arenacea</i>       | 0.48        | 0.53               | -0.53        | -0.46        | 0.49        | <b>0.83</b>  | -0.07               |
| <i>M. obliqua</i>        | 0.53        | <b>0.66</b>        | <b>-0.59</b> | <b>-0.62</b> | 0.43        | <b>0.82</b>  | 0.07                |
| <i>P. fusca</i>          | 0.12        | -0.28              | 0.30         | 0.19         | -0.29       | <b>-0.72</b> | 0.53                |
| <i>R. subfusiformis</i>  | 0.03        | 0.16               | -0.46        | -0.30        | 0.53        | <b>0.66</b>  | -0.30               |
| <i>S. biformis</i>       | <b>0.57</b> | <b>0.58</b>        | -0.33        | -0.52        | 0.14        | 0.52         | 0.31                |

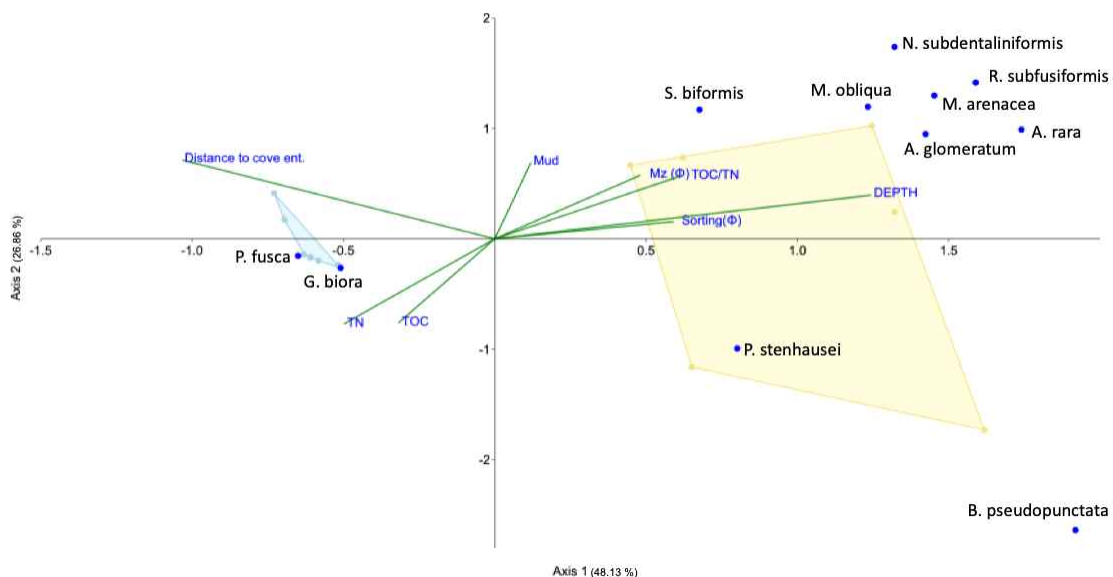


그림 28. CCA plot

- Clustering 분석결과로 확인한 두 그룹의 대표종 또는 indicator species를 확인하기 위해 IndVal 분석을 진행, 산출된 indicator species 후보 중 IndVal (%) >70,  $p < 0.05$  인 종을 indicator species로 확인하였음.
- Group 1 indicator species: *Adercotryma glomeratum*, *Miliammina arenacea*, *Miliammina obliqua*, *Nodulina subdentaliniformis*, *Portatrochammina stenhousei*, *Reophax subfusiformis*, *Spiroplectammina biformis*.
- Group 2 indicator species: *Globocassidulina biora*, *Psammosphaera fusca*.
- indicator species 후보종들과 환경요인과 simple correlation analysis 결과, 일부 종들이 일부 환경 요인과 선형의 상관관계를 갖는 것을 확인할 수있었음. correlation coefficient 절대값 > 50,  $p < 0.05$  인 경우 위의 simple correlation coefficient 결과표에 볼드체로 표기 하였음.
- 종합적으로 보았을 때 group 2를 대표하는 *P. fusca*, *G. biora* 는 낮은 수심과 높은 퇴적물내 유기물 (TOC, TN) 함량과 연관성을 보이며, group 1을 대표하는 대부분의 종들은 깊은 수심과 낮은 퇴적물내 유기물 함량과 연관성을 보이는 것을 확인할 수 있으며, 추가적으로 group1 대표종 중 일부 종 (*P. steinhausi*, *B. pseudopunctata*) 의 경우 만 입구와의 거리와 음의 상관관계를 갖는 것으로 나타남.

## 라. DNA 염기서열 데이터 확보 및 분석

### (1) 분석 방법

가지 체류기간 배양기에 유지하며 sorting 후 동결건조 또는 RNAlater 및 99% EtOH 고정 처리한 개체를 대상으로 분석을 진행하였으며, 개체수가 풍부한 common species를 우선적으로 진행하였음.

- 이미지 데이터 확보: DNA 바코드 염기서열 확보를 위한 대상 종은 이미 동정이 완료된 종을 대상으로 진행하였으며, DNA 추출 시 개체 외각의 보존이 어렵기 때문에 해부현미경 부착 디지털카메라를 사용해 다중 초점 이미지를 촬영 후 Helicon Focus 7.6.4 software를 사용해 중첩하였음.
- gDNA extraction: 유공충 gDNA 추출에 일반적으로 쓰이는 GITC\* lysis buffer를 사용한 비파괴적 추출법 (Weiner et al., 2016) 또는 QIAGEN 사의 DNeasy Blood & Tissue kit를 사용하였음. DNeasy Blood & Tissue kit 의 경우 제조사의 매뉴얼에 따라 진행하였으며, 마지막 추출 단계에서 추출 농도를 높이기 위하여 elution buffer의 volume을 50  $\mu$ L 로 줄여서 진행 하였음. 추출된 DNA template 는 -21  $^{\circ}$ C 냉동고에 보관 하였음.

- PCR amplification: 유공충류의 분자마커로 가장 일반적으로 사용되던 18S rDNA partial sequence 및 2021년 말 최초로 발표된 mtCO1 partial sequence 데이터를 확보를 위한 PCR amplification 진행하였음.
- 1.5% Agarose gel 전기영동: PCR product를 전기 영동하여 타겟 유전자 서열이 증폭되었는지 DNA band의 유무, 사이즈와 intensity 등을 확인 하였음.
- Sanger sequencing: PCR이 정상적으로 완료된 산물은 (주)바이오닉스에 sanger sequencing을 의뢰하여 결과 데이터를 확보하였음.

(Primer information)

| Gene     | Primer                | 5' - 3' sequence                   | Type    |
|----------|-----------------------|------------------------------------|---------|
| mtCO1    | Foraminifera_COI_fwd1 | GWG GWG TTA ATG CTG GTY GAAC       | Forward |
|          | Foraminifera_COI_fwd2 | AAT GCT GGT YGA ACA TYT YAY GYW CC | Forward |
|          | Foraminifera_COI_rev  | RWR CTT CWG GAT GWC TAA GAR ATC    | Reverse |
| 18S rRNA | s14F3                 | ACG CA(AC) GTG TGA AAC TTG         | Forward |
|          | s14F1                 | AAG GGC ACC ACA AGA ACG            | Forward |
|          | sB                    | TGA TCC TTC TGC AGG TTC ACC TAC    | Reverse |
|          | s17r                  | CGG TCA CGT TCG TTG C              | Reverse |
|          | s20r                  | GAC GGG CGG TGT GTA CAA            | Reverse |

(PCR mixture information)

| Chemical                   | Volume (μl)                  |
|----------------------------|------------------------------|
| PCR premix                 | (Maxime PCR premix kit-iTaq) |
| Ultra pure water           | 16                           |
| Primer (forw)              | 1                            |
| Primer (rev)               | 1                            |
| DNA template               | 2                            |
| <b>Total reaction vol.</b> | <b>20</b>                    |

(CO1 PCR condition)

| step                 | temp (°C) | time | cyle      |
|----------------------|-----------|------|-----------|
| Initial denaturation | 96        | 3 m  | x 35 ~ 40 |
| Denaturation         | 96        | 15 s |           |
| Annealing            | 50        | 30 s |           |
| Extension            | 72        | 40 s |           |
| Final extension      | 72        | 5 m  |           |

(18S PCR condition)

| step                 | temp (°C)             | time | cyle      |
|----------------------|-----------------------|------|-----------|
| Initial denaturation | 96                    | 3 m  | x 35 ~ 40 |
| Denaturation         | 96                    | 15 s |           |
| Annealing            | 50 (s14F3) 52 (s14F1) | 30 s |           |
| Extension            | 72                    | 40 s |           |
| Final extension      | 72                    | 5 m  |           |



(2) 분석결과

마리안 소만 내에서 가장 출현 빈도가 높은 10개의 종을 우선적으로 분석하였으며, mtCO1 partial 및 18S partial sequence 데이터를 확보하여 총 66개 서열정보를 확보하였음. 그 중 1 종 (*Textularia* aff. *earlandi*)은 신 종 (신속) 후보로 현재 기재를 위한 분류학적 분석을 진행 중에 있음.

(획득한 염기서열 정보 요약)

| Species                                | Barcode          | seq. no. |
|--|------------------|----------|
| <i>Cassidulinoides parvus</i>          | mtCO1_partial    | 8        |
|  | SSU rRNA_partial | 3        |
| <i>Globocassidulina biora</i>          | mtCO1_partial    | 18       |
|  | SSU rRNA_partial | 14       |
| <i>Lagenammia arenulata</i>            | mtCO1_partial    | 1        |
|  | SSU rRNA_partial | 1        |
| <i>Miliammia arenacea</i>              | mtCO1_partial    | 6        |
| <i>Nodulina subdentaliniformis</i>     | mtCO1_partial    | 1        |
| <i>Portatrochammina antarctica</i>     | SSU rRNA_partial | 3        |
|  | mtCO1_partial    | 3        |
| <i>Psammosphaera fusca</i>             | mtCO1_partial    | 2        |
| <i>Reophax subfusiformis</i>           | mtCO1_partial    | 1        |
| <i>Spiroplectammina biformis</i>       | mtCO1_partial    | 3        |
| <i>Textularia</i> aff. <i>earlandi</i> | mtCO1_partial    | 2        |

(획득한 염기서열 로우데이터 일부)

| Species                     | Gene          | Primer | Sequence  |
|-----------------------------|---------------|--------|---|
| <i>Psammosphaera fusca</i>  | mtCO1 partial | FF1-FR | GAACTTCTCATGTACCTCCTTCTATAATAAATTATGCTTCTATTGA<br>TTCCATGTTTTTTTCATTACATGTAGTTGGATTAAGTCCGCTTTTA<br>GGTTCAATTAATTTTATTGTTACTTTATTAAGGCTTCTTATCTTTC<br>TATTATTCACCTCAGCTTTATTCTTACCTTTATTTCTCGATCTATC<br>TTTCCTACTTCTTTTTCATCAATTCTATCATTACCTGTATTAGCTG<br>GATGTATTACTACGACTACTTCTGATAGACATTTTAATCCTTCTTC<br>TTTTGATCCATGTCGAGGTGGTGATATAATCTCATCTCAACATCC<br>TTTTTC |
| <i>Lagenammia arenulata</i> | mtCO1 partial | FF1-FR | GAACTTTTTATGTCCCTTTGGCTTCTATAACAACAAAGTTGTGGTG<br>ATTAGATGTTTTTCTCCTTGCATTTTGCAGGATTATCTTCTATTTT<br>ATCTTCTATCAATTTTCATAGTCTCCATTTTAGCACTATTTAGTTATT<br>CTCTTTCTCTACATTCCTTTAATTCACATTTCGCTTCGCTCGCTTC<br>GCTCCTCTTTCTTCTTCGATTTTGCTTCTTAACTCAACCATTATA<br>TGATGATCTATCTTTATTACTTCGATTTTGCTAATTATTTTCAGTG<br>CCAGTTTTGGCCGCATCTATTACTATGATTATTTTCGATCGTCAC          |

|                                  |                        |          |  |
|----------------------------------|------------------------|----------|--|
|                                  |                        |          | TTTAACTCTACTTTCTTTGATCCTATCTTAGGTGGTGATCCTTTAC<br>TCTTCCAACATCTATTCTGAT  |
|                                  | SSU<br>rRNA<br>partial | s14F1-SB | CAGAACGCGTGGAGCATGTGGCTTAATTTGACTCAACGCGGGA<br>AATCTTACCGGGTCCGGACACATCAAGGATTGACAGGCACAAGT<br>AATCACTTTTTAGTGATTTACTCATGAAATATGCTAGTCCTTTCAT<br>GATTATGTGATAGGTGGTGCATGGCCGTTCTTAGTTCGTGGGAT<br>AACTTGTACCTTAATTGGTTAACTTTTTAATATGTGATTGTGGAAT<br>TCGCGTGAGTTTCTACTTTAGTGGAATACAAACGCTCCGCATGA<br>TCATTCTTTAAACGAACGTGACCTCCACTTCTTGTTGTCCAAT<br>TTACGTTTTATCGTAATAAAAAAGTCAGCTTAGAAGGATAGCTTG<br>TTTAAGCAAGATGAAAGAGGAGGCAATAACAGGTCTGTGATGCC<br>CTTAGATGTTCCGGGCCGCACACGTGCTACAATGATTTATGCAG<br>TAAGCATCTTACAAGTTCACTCAACCTCGGTTGGTGCAAGCCTG<br>CTTCGAAAGTAAGTAGGTAATCATTATAAGTATAGATTCCTT<br>CAAGTCACTCTCATTCCCTCTTTGGGTTTGAGAATGCTTTTCAC<br>TACTTCATAGTGGGGACAGACCATTGTTAATTGTTGGTCTCGTTT<br>CAACTAGGAATGCCTTGACGGGTCTTGGTTCAACAGACCACC<br>CGGAATACGTCCCTGCCCTTGTACACACCGCCCGTCGCTCTTA<br>CCGATGGACTTATTTGTGAGCTTGAGGGACTAACCTCAAATATA<br>CCCACAAAAGTTTATGCAAACGTATTCAAATATTTATAAGTATAC<br>CTTTTGTGTTGTTGTTGATTTTTTCGGAAACTCAAGCGAACAAC<br>TGGGTCTAAAGGAAAGAGAAGTCGTAACAAGGCATCTGTAGGTG<br>AA |
| <i>Reophax<br/>subfusiformis</i> | mtCO1<br>partial       | FF1-FR   | GAACCTTATATGTTCCATTGTCTATATTAATTATTCTTCAATTGA<br>TTTATTATTTTTCTATACACATAGTTGGATTAAGTAGTTTATTAG<br>GATCTATTAATTTATAGTTACTTTATTAATCTACTAATTTATCA<br>ATCATTATTCTTCTTATTCTTACCGTTATATACTATAACCAATATT<br>ATTTACTTCTTATTATTAATTATCTTTACCAGTATTGGCAGCT<br>AGTATTACCATGATTATTTTTGATCGTCACTATAATAGTTCATTT<br>CTGATCCAATAAGAGGTGGAGATTTATTGTCACATCAACATTTAT<br>CTTGAT  |
| <i>Miliammina<br/>arenacea</i>   | mtCO1<br>partial       | FF1-FR   | GGTTGAACATTTTCATGTACCACCAAGTATTATTAATTCTTCAGCG<br>ATTGATTTAATGTTCTTCTTACATTTAGTTGGATTAAGTTCTTTAT<br>TAGGACCAATTAATCTTACTGTTACTATATTAAGCAACATCATT<br>TGCAATTTTGCAGTCTGCATTATCTATACCTTCATTTCCACGAAG<br>TATATTTTTTACCTCGATTTTATTATTAATACCTCTTCTGTATTAG<br>CTGGACGTATTACTACGATTACATCTGATAGACATTCTAATACTA<br>GCTTTCTTGATCCATTAAGAGGAGGAGATTTAATTTACCTCAAC<br>ATTCATTTGATCTCTTA  |
|                                  |                        | FF2-FR   | CACCAAGTATTATTAATTCTTCAGCGATTGATTTAATGTTCTTCTT<br>TACATTTAGTTGGATTAAGTTCTTATTAGGACCAATTAATCTTAC<br>TGTTACTATATTAAGCAACATCATTGCAATTTGCAGTCTGCA  |

|   |                        |            |   |
|---|------------------------|------------|---|
|   |                        |            | TTATCTATACCTTCATTTCCACGAAGTATATTTTTTACCTCGATTT<br>CATTATTAATACCTCTTCCTGTATTAGCTGGACGTACTACTACGA<br>TTACATCTGATAGACATTCTAATACTAGCTTTCTTGATCCATTAAG<br>AGGAGGAGATTTAATTTACCTCAACATTCATTTTTGA  |
| <i>Nodulina<br/>dentaliniformis</i>       | mtCO1<br>partial       | FF1-FR     | AACATTATATGTTCCATTGTCTATATTAATTATTCTTCAATTGATT<br>TATTATTTTTCTATACATATTGTTGGATTAAGTAGTTTATTAGGAT<br>CTATTAATTTTATAGTTACTTTATTAATACTACTAATTTATCAATC<br>ATTTATTCTTCTTTATTCTTACCCTTATATACTATAACCAATATTATT<br>TACCTCCTTGTTATTAATTATCTCTTTACCAGTATTGGCAGCTAGT<br>ATTACCATGATTATTTTTGATCGTCACTATAAATAGTTCATTTCTG<br>ATCCAATAAGAGGTGGAGATTTATTGTCACATCAACATTTATCTT<br>GAT  |
| <i>Spiroplectammina<br/>biformis</i>      | mtCO1<br>partial       | FF2-FR     | CCATTATCAATTATAAATTATTCTTCTATTGATCTTATGTTTTTTTC<br>TTTACACATTGTTGGATTAAGTAGTTTATTAGGATCTATTAATTCT<br>ATTGTTACTTTATTAAGTCTTCTAATCTTTCTATTATTAATTCATT<br>TCTATTTTTACCTTTATATTGTTGATCTATATTCTTTACATCAGTCT<br>TATTAGTTATTAGTCCTCCTGTTCTAGCAGGAGTAATTACAATGA<br>TTATTTCTGATAGACATTCTAATTGTCCTTCTTTTGATCCATTAAG<br>AGGTGGAGATTTATTATTATCTCAACATTTACCTTGAT   |
| <i>Textularia</i> aff.<br><i>earlandi</i> | mtCO1<br>partial       | FF1-FR     | GGTTGAACATCTTATGTTCCATTATCAATTATAAATTATTCTTCTA<br>TTGATCTTATGTTTTTTTCGCCACACATTGTTGGATTAAGTAGTTT<br>ATTAGGATCTATTAATTCTATTGTTACTTTATTAAGTCTTCTAATC<br>TTTTCTATTATTAATTCATTTCTATTTTTACCTTTATATTGTTGATCT<br>ATATTCTTTACATCAGTCTTATTAGTTATTAGTCCTCCTGTTCTAG<br>CAGGAGTAATTACAATGATTATTTCTGATAGACATTCTAATTGTCC<br>TTCTTTTGATCCATTAAGAGGTGGAGATTTATTATCACCTCAACA<br>TTTACCTTGATCTCTTA  |
| <i>Globocassidulina<br/>biora</i>         | mtCO1<br>partial       | FF1-FR     | ATCTCATGCTCCATTATCAATTATAAACTATTCTTCTATTGATCTC<br>ATGTTTTTTCCATTACACATTGTTGGACTTAGTAGTTTATTAGGAT<br>CTATTAATTCTATTGTTACTTTATTAATACTAGTAATCTTTCTATT<br>ATTAATTCCTTTCTGTTTTTACCTCCATATTGTTGATCTATTTTCTT<br>TACATCAGTATTATTAATTATTAGTCTTCCTGTATTAGCAGGAGTA<br>ATTACAACGATTATTTCTGATCGACATTCTAATCGTCCTTCTCTTG<br>ATCCATTAAGAGGTGGAGATTTATTATCACCTCAACATCTACCTT<br>GTGGAGCATGTGGCTTAATTTGACTCAACGCGGGAAATCTTACC<br>GGGTCCGGACACACTGAGGATTGACAGGCAATATTATAAAGTAA<br>ATCTTTGTGTCATTTCGTGGCTCAAGCGATTTTTTTATATGTTAAAT<br>ATGCTAGTCCTTTCATGATTATGTGATAGGTGGTGCATGGCCGT<br>TCTTAGTTCGTGGAGTGATCTGTCTGCTTAATTGCGTTTCACTAT<br>TGGGCTTATATAAATTACGTATGCTGTTAACGCTTTGACCCCTTTC<br>TACGGATTGCGCGTGTCTTTGTCCGTTTCGACACATACAATTAAG<br>CCCTGAAA |
|   | SSU<br>rRNA<br>partial | s14F1-s20r | TTGACTCACGCGGGAATCTTACCGGGTCCGGACACACTGAGGA<br>TTGACAGGCAATATTATAAAGTAAATCTTTGTGTCATTAGTGGCT<br>CAAGCGATTTTTTTATATGTTAAATATGCTAGTCCTTTCATGATTA<br>TGTGATAGGTGGTGCATGGCCGTTCTTAGTTCGTGGAGTGATCT  |

|                                    |                  |            |   |
|------------------------------------|------------------|------------|---|
|                                    |                  |            | <p>GTCTGCTTAATTGCGTTTTCACTATTGGGCTTATATAATTACGTAT<br/> GCTGTAAACGCTTTGACCCCTTTCTACGGATTGCGCGTGTCTTT<br/> GTCCGTTGACACATAACAATTAAGCCCTGAAAGCAACGAACGTG<br/> ACCGCAACCTCTTGTTGCTCTCCATTTGATTTATACCAGAATCG<br/> TCGCGTATTAATTTCTAATTTTAATTTTTGCACTTTGGGTGTA<br/> ATTTTTTTTTATGACTGTATTTTTTACGTTAAGAGAGCTTTCTAAA<br/> CTAGAGGGACCGCTGTTACTTTCTTAAACCAGAGGAAGGTTGCG<br/> GCAATAACAGGTCTGTGATGCCCTTAGATGTTCCGGGCTGCACA<br/> CGTGCTACAATGATTATTGGAGTGAGCATCTCATTTTTTACACAT<br/> CGCATGCGCGAGTCCATTTATTCATCACTTCGGTGTGCTTTAAA<br/> TGTGCACCTCTGCGCGCGATAAAGCCTACTTCGAGAGCAAGTG<br/> GGTAATCAATTAGAAGTAATGATTTCTTTTTTTTTCTGCACGCATA<br/> TATATGGCACTTATACCCGGGTAGCCTTGTTGTTACTTCTGTGG<br/> GTATCAGTGATACTTTGTGTTTACCACAATCGTATATTACCATAT<br/> GTGCAATTGTCAATTCATGGTGGGGACAGACCATTGTTAATTGTT<br/> GGTCTCGGTCTTAAGTAGGAATGCCTTGACGGATCTTTGGTTA<br/> AACAAACCATCCGGAATACGTCCTGCCCCT</p> |
| <i>Cassidulinonides parvus</i>     | mtCO1 partial    | FF1-FR     | <p>ATCTCATGCTCCATTATCAATTATAAACTATTCTTCTATTGATCTC<br/> ATGTTTTTTTCATTACACATTGTTGGACTTAGTAGTTTATTAGGAT<br/> CTATTAATTCTATTGTTACTTTTATAAAATCTAGTAATCTTTCTATT<br/> ATTAATTCCTTTCTGTTTTTACCTCCATATTGTTGATCTATTTTCTT<br/> TACATCAGTATTATTAATTATTAGTCTTCTGTATTAGCAGGAGTA<br/> ATTACAACGATTATTTCTGATCGACATTCTAATCGTCCTTCTCTTG<br/> ATCCATTAAGAGGTGGAGATTTATTATTACCTCAACATCTACCTT</p>   |
|                                    | SSU rRNA partial | s14F1-s17r | <p>GTGGAGCATGTGGCTTAATTTGACTCAACGCGGGAAATCTTACC<br/> GGGTCCGGACACACTGAGGATTGACAGGCAATATTGGAATGTG<br/> TTTTTACGCATTCCATGTTAAATATGCTAGTCCTTTCATGATTATG<br/> TGATAGGTGGTGCATGGCCGTTCTTAGTTCGTGGAGTGATCTGT<br/> CTGCTTAATTGCGTTTCACTAAGGGCTTATTAATTACGTGCGTAG<br/> CACTCTCTTTGACCCCTCTTCATTGAGCGCGTGTCTTAGATGATT<br/> ATGCTCGCACAAATTAAGTCCTGAAA</p>  |
| <i>Portatrochammina antarctica</i> | mtCO1 partial    | FF1-FR     | <p>ATCTCATGTTCCATTACCAATTATAAATTATTCTTCTATTGATCTTA<br/> TGTTTTTCTCTACACATTGTTGGATTAAGTAGTTTATTAGGATC<br/> TATTAATTCTATTGTTACTTTTATAAAATCTCCTAATCTTTCTATTA<br/> TTAATTCATTTACATTTTTTACCTTTATATTGTTGATCTATATTCTTT<br/> ACACCAGTCTTATTAATTATTAGTCCCTCCTGTTCTAGCTGGAGTA<br/> ATTACAATGATTATTTCTGATCGACATTCTAATTGTCCTTCTTTTG<br/> ATCCACTAAGAGGTGGAGATTTATTATTATCTCAACATTTACCTT</p>  |
|                                    | SSU rRNA partial | s14F1-s17r | <p>GTGGAGCATGTGGCTTAATTTGACTCAACGCGGGAAATCTTACC<br/> GGGTCCGGACACACTGAGGATTGACAGGTTCAAAGTAAAACGG<br/> TACTGTTGTGATAGGCGGTACCGAGGTGCAATAAAAAAGCTAGT<br/> CCTTTCATGATTGTGTGATAGGTGGTGCATGGCCGTTCTTAGTT<br/> CGTGGAGTGATTTGTCTGCTTAATTGCGTTTCGCAATGATCACTT<br/> GGTGATTTGTCATGGTTGTGACAAGTATTGACGTATGCCTTTTAA<br/> TTAAGGTATTATGGCGGTGCTTGTTTGCAGCTGTGATGGAGATC<br/> CTATTTGCTGGTCAGAAG</p>  |

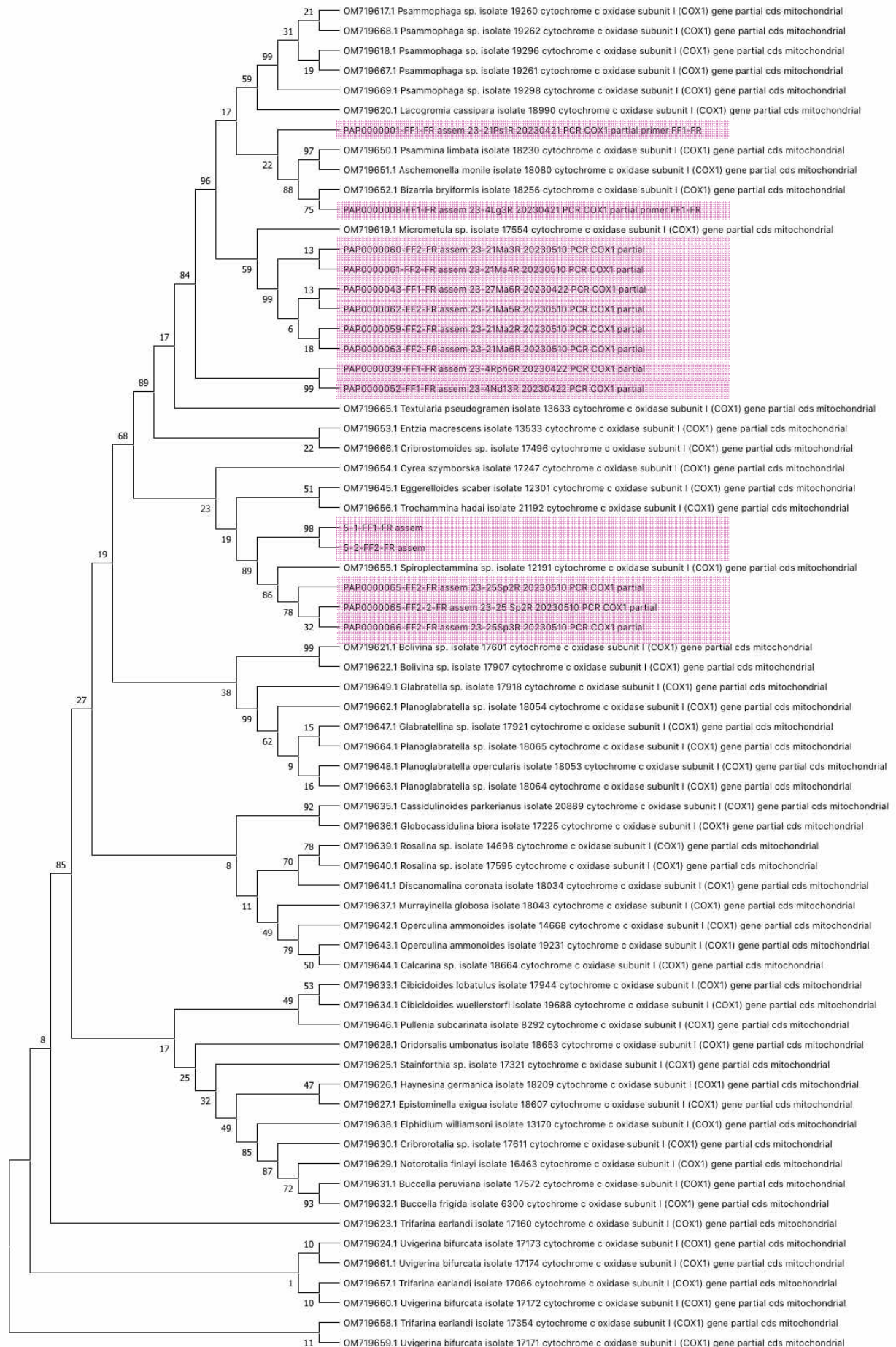


그림 29. ML bootstrap consensus tree. 분홍색 박스로 표시한 분류군이 해당 연구에서 획득한 서열.

- 본 연구에서 획득한 서열 데이터의 오류 여부 등을 확인하기 위해 MEGA X 프로그램을 통해 NCBI에 기 등록된 유공충 CO1 서열 일부와 alignment를 진행하였으며, 프로그램에 포함된 모델 파인더를 이용, (GTR+G)를 적용한 ML tree를 생성하였음. 본 연구에서 서열을 확보한 종과 동일한 종의 서열은 NCBI에 없었지만 근연 분류군 및 동일 속에 속하는 다른 종과 클레이드를 형성하는 것을 확인할 수 있었음. 유공충 mtCO1 유전자 서열이 전세계적으로 시퀀싱되기 시작한지 1년 여 밖에 되지않아 NCBI DB 상에 등록된 데이터 수가 18S에 비하여 상대적으로 적은 실정임. 본 연구 수행 결과 남극 마리안 소만에 대표적으로 서식하는 현생 유공충의 CO1 서열 데이터를 최초로 확보함으로써 추후 국내외 유공충 유전자 데이터베이스 확장에 기여할 수 있을것으로 예상됨.

## 마. MALDI TOF 데이터 확보 및 분석

### (1) 분석 방법

동결건조 또는 99% 에탄올 고정 시료를 사용하며, 형태동정 및 이미지자료 확보가 완료된 단일 개체로 분석을 진행하였음. 특히 동결건조의 경우 처리 후 중량이 감소하고 시료의 상온 보존이 가능하여 운반 및 저장이 용이하며, 이미 건조된 상태로 보존되기 때문에 MALDI-TOF 분석을 위한 전처리 단계에서 시간을 절약할 수 있다는 장점이 있어 대부분의 분석에 2022/2023 하계 마리안 소만에서 확보한 개체들을 동결건조한 시료를 사용하였음.

- 개체 동정 및 이미지 확보: 분석대상 개체는 먼저 현미경 부착 디지털카메라를 사용해 기본적인형태 데이터를 확보한 뒤 개체표면 세척 및 상온 건조 하였음.
- 개체 건조: 파이펫으로 개체를 1.5ml 튜브에 옮긴 후 99% 에탄올 200ul 추가하여 고정, 파이펫으로 2-3회 resuspension 하여 표면 세척 후 튜브에 들어있는 에탄올 전량 제거 하였음. 튜브 캡을 연 채로 rack에 담고 호일로 덮어 튜브 입구에 이물질 유입되는 것을 방지, 4도씨 냉장고에서 건조를 진행 하였음. 동결건조 시료의 경우 이미 표면 세척 단계를 거쳤기 때문에 개체를 튜브에 옮긴 뒤 별도의 단계 없이 매트릭스 추가를 진행하였음.
- matrix 추가:  $\alpha$ -Cyano-4-hydroxy-cinnamic acid (HCCA) matrix [Acetonitrile 50%; U.P. Water 47.5%; Trifluoroacetic acid 2.5%; supersaturated HCCA (30 mg for total 1 ml matrix)] 4  $\mu$ l를 추가하여 최소 20분 이상 인큐베이션 진행하였음. 이 단계에서 외각이 두껍고 내실 구조가 복잡한 경우 세포질 및 metabolite의 충분한 용해를 위해

매트릭스 추가 후 파이펫 팁 끝을 이용해 개체를 파쇄하였음.

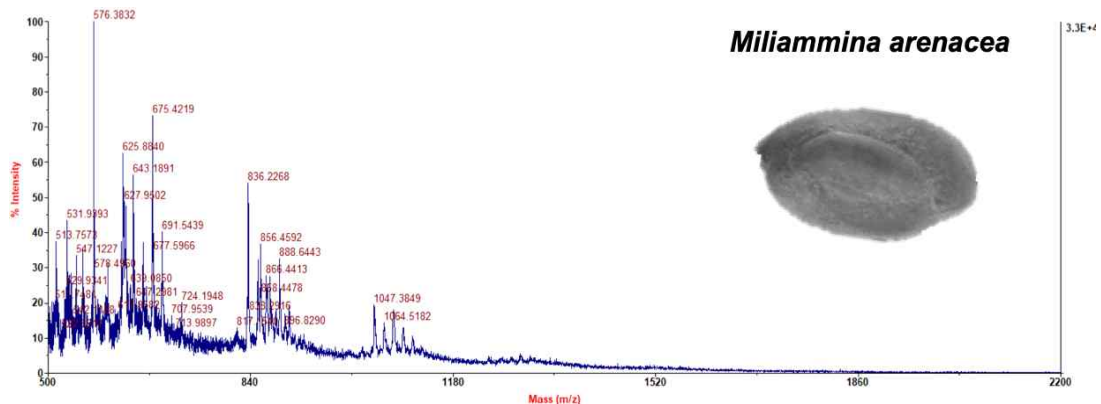
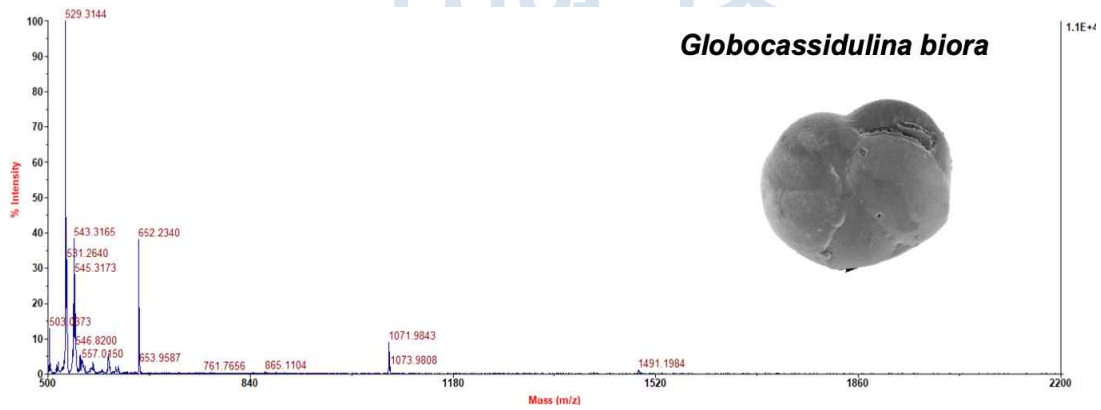
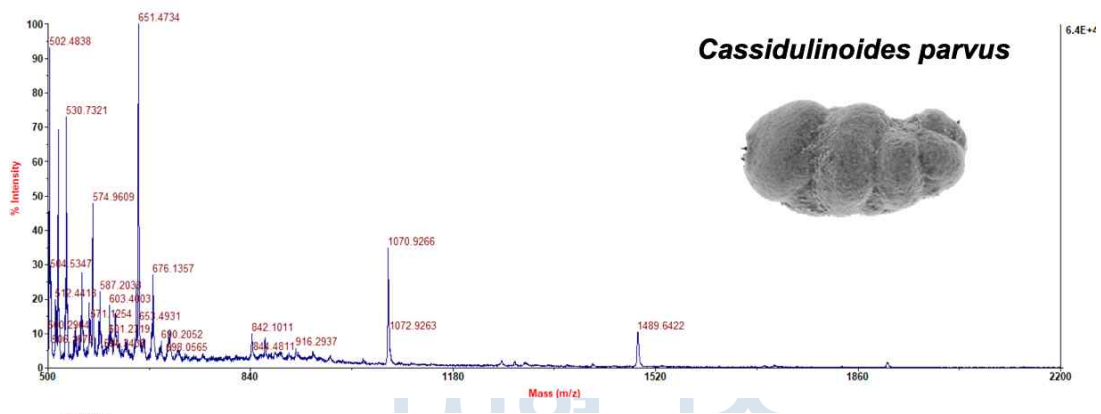
- sample loading 및 mass spectrometry: 측정기계 (Axima Confidence, Shimadzu)의 sample plate에 matrix 상층액을 2  $\mu$ l씩 분주하여 용액을 건조시킨 후 이를 1회 더 반복하였음. 분주한 용액이 모두 건조되면, plate를 기기에 로드한 뒤 Mass spectra data를 확보하였음. 주된 mass 측정 범위는 500 ~ 2,200 m/z 범위로 설정하였음 (Claydon et al., 1996 ; Evason et al., 2000).
- 결과 데이터 처리: 확보한 ASCII 형식의 raw spectra 데이터는 Data Explorer(TM) software 에서 퀄리티 등을 확인한 뒤 Yeom et al., (2021) 이 제시하고 있는 workflow 에 따라 R 프로그램 상에서 MALDIquant / MALDIquant Foreign R packages 등의 package를 사용해 peak pattern의 비교 및 clustering 및 NMDS 분석을 포함한 통계 분석을 진행하여 종 식별 여부를 확인 하였음 (quality control, transformation and smoothing, baseline correction and removal, signal-to-noise ratio estimation, peak detection).

## (2) 분석 결과

- 분석에 사용한 종: 마리안소만 정점에서 공통적으로 출현하는 8 종, 33 개체의 동결건조 샘플을 사용해 whole specimen MALDI-TOF mass spectra를 확보하였음.
  - CP: *Cassidulinoides parvus*
  - GB: *Globocassidulina biora*
  - ND: *Nodulina cf subdentaliniformis*
  - MA: *Miliammina arenacea*
  - PA: *Portatrochammina antarctica*
  - RF: *Reophax subfusiformis*
  - SB: *Spiroplectammina biformis*
  - AR: *Astrammina rara*
- 확보한 raw ASCII data는 시료 정보와 함께 목록화하여 별도의 저장매체에 관리 하고 있음.
- mass spectra peak pattern의 clustering 및 nMDS 결과, 동일 종이 하나의 cluster를 형성하는 것을 확인하였음.
- 동일 아과 (Cassidulininae)에 속하는 두 종 및 두 속 (CP, GB)이 별도의 그룹을 형성하며 구별되는 것을 확인하였음. 그룹별 가장 차이가 나는 상위 40 개 peak 양상을 나타낸 도표에서 1,490.- 및 1,071.- peak에서 나타나는 차이가 CP와 GB를 다른

agglutinated taxa와 구별되게 하는 것으로 보여짐.

- nMDS 및 clustering 결과 agglutinated group (ND,MA, PA, RF, SB, AR) 과 calcareous group 이 별도의 클러스터로 그룹화 되는 것을 확인하였음.
- peak pattern plotting을 통하여 종별 mass spectra peak pattern에 다소 차이가 나며 intensity가 높고 낮게 나타나는 mass 에 다소 차이가 나는 것을 확인할 수 있음.
- 유공충을 대상으로한 MALDI-TOF mass spectra를 이용한 종 식별연구는 아직까지 전세계적으로 진행된 사례가 없어 본 연구를 통해 표준화된 방법론 및 target mass range를 선정하는 데 성공하였음.
- 추후에도 지속적인 시료 분석을 통해 추가적인 종 및 추가 개체로부터 mass spectra를 확보하여 데이터량을 늘려 추가 분석을 진행할 필요가 있음.





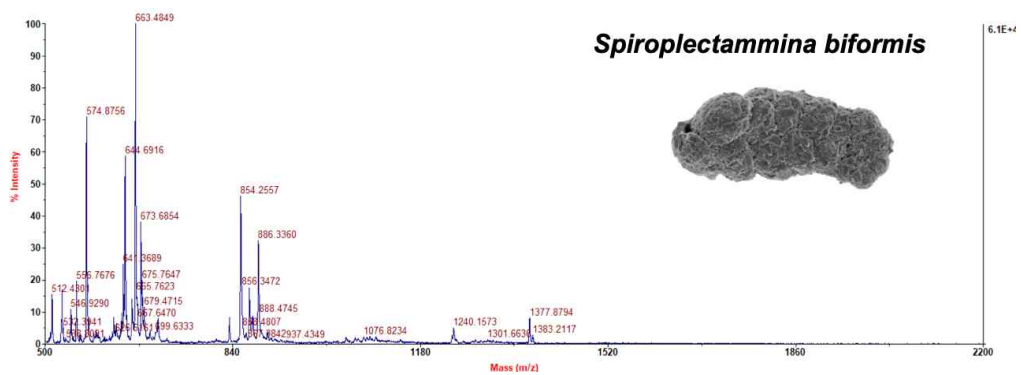
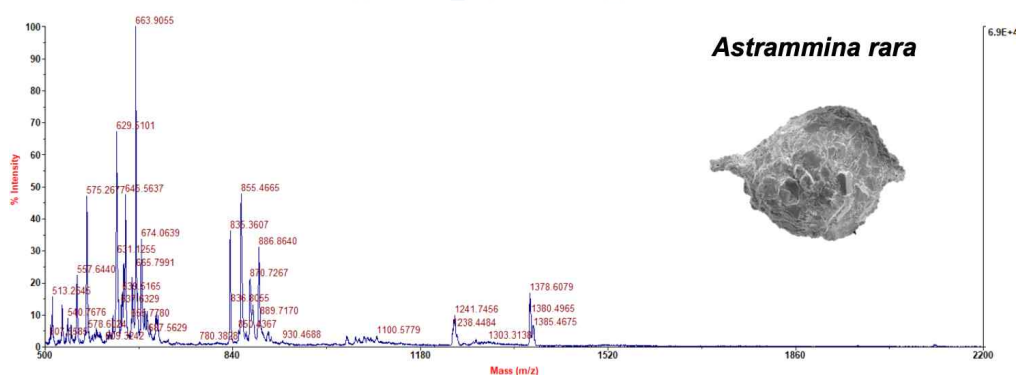
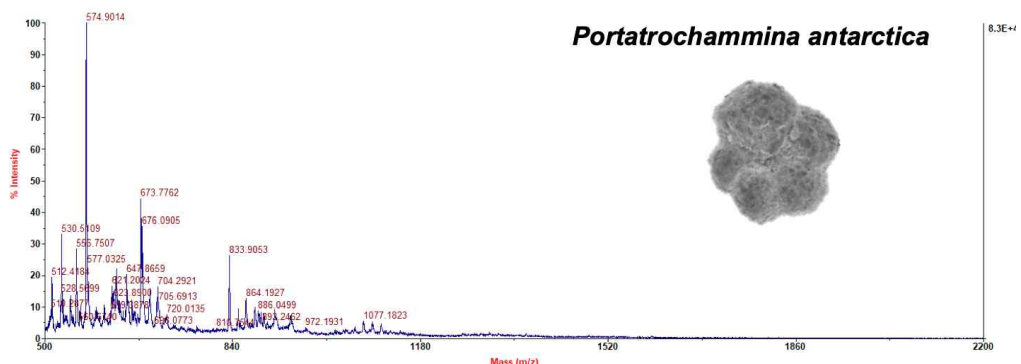
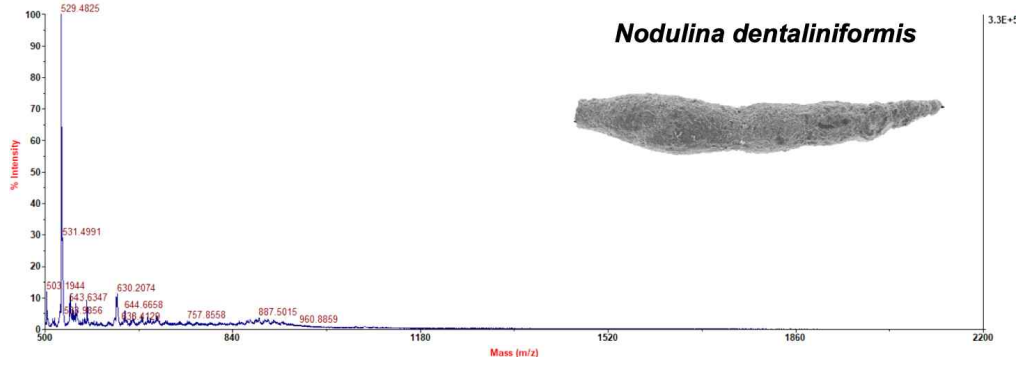
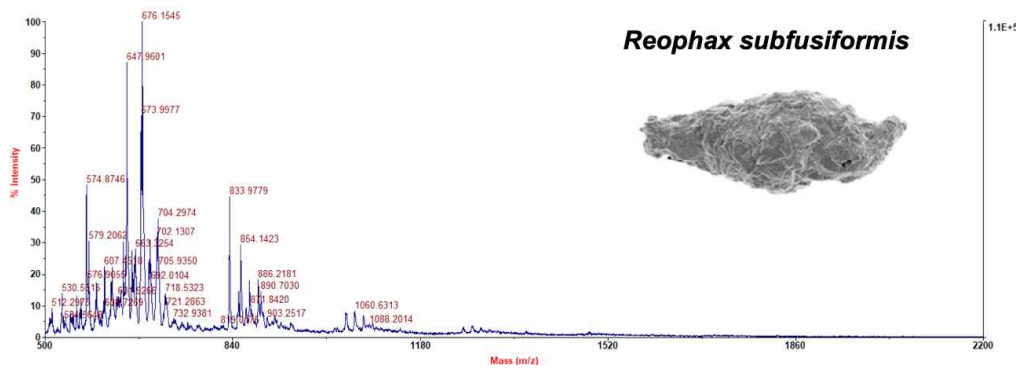


그림 30. 분석에 사용된 종의 mass spectra 500 - 2,200 m/z 구간

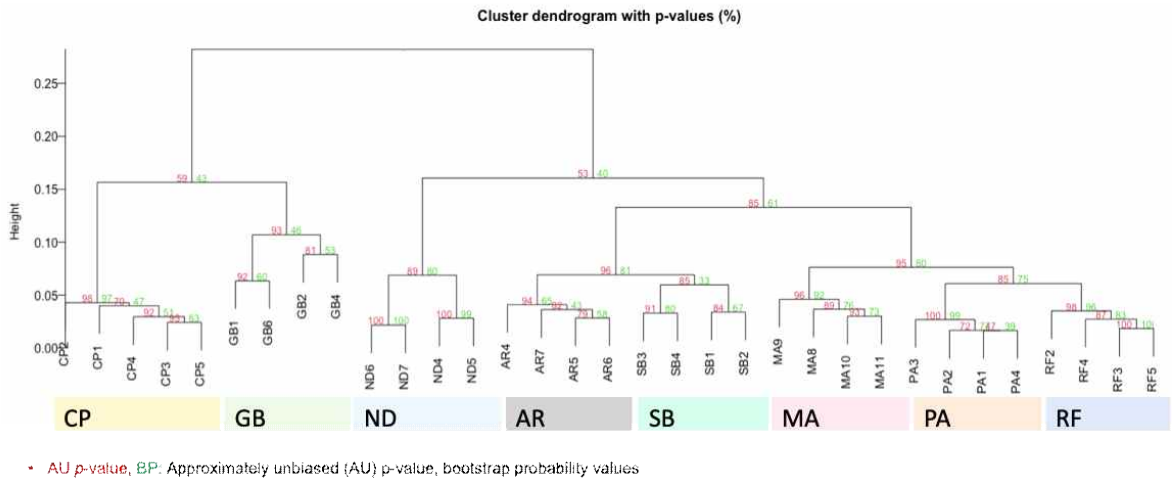


그림 31. Clustering 분석 결과

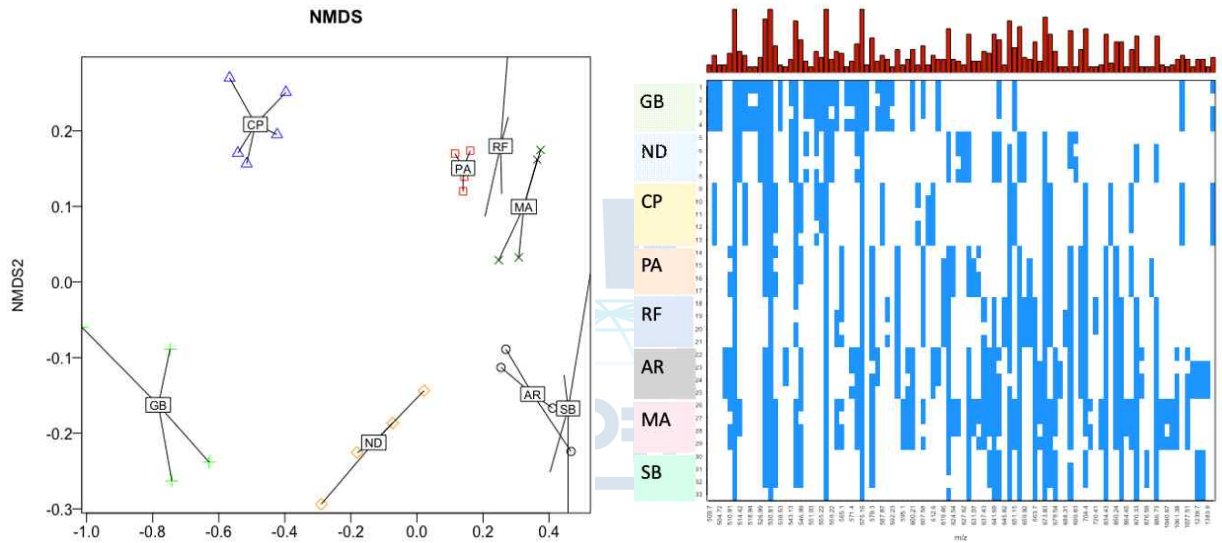


그림 32. NMDS 분석 결과 및 peak pattern plot

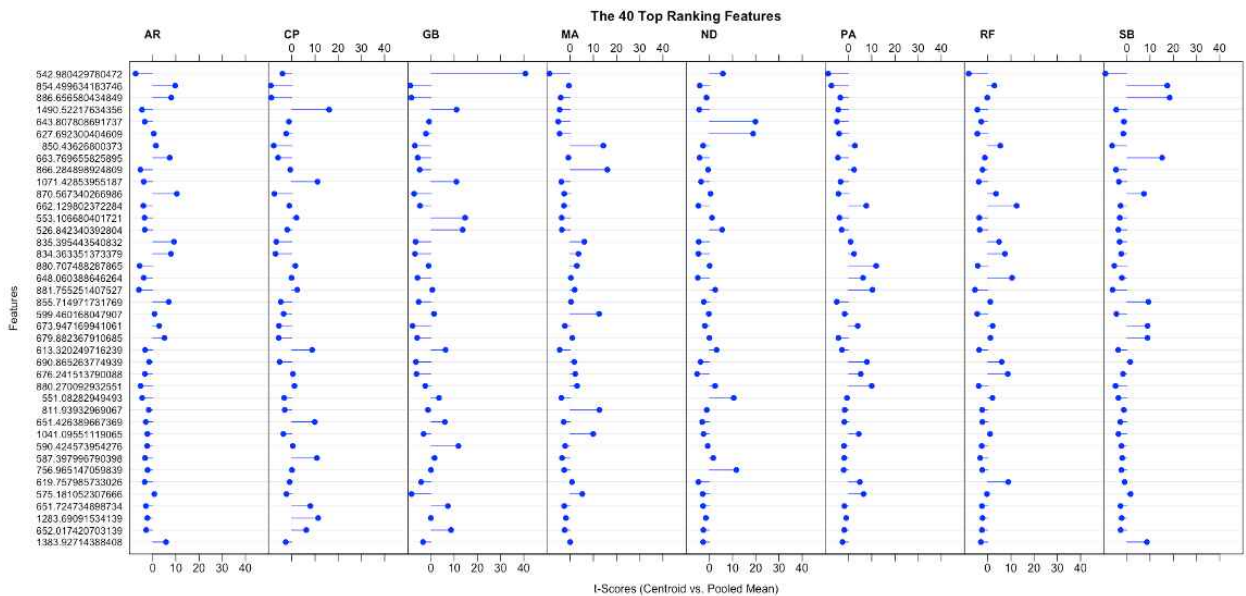


그림 33. Diagonal Discriminant Analysis 결과

## 제 4장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도

### 제 1절 목표 달성도

#### 1. 성취도

| 구 분         | %  | 성취도 판단 |    |    | 특기사항<br>(우수성 또는 부진사유 등)                                 |
|-------------|----|--------|----|----|---|
|             |    | 부진     | 정상 | 우수 |   |
| 최종목표 대비 달성도 | 70 |        | √  |    | 21/22 및 22/23 국제 해상운송 정세로 시료 화물 운송이 지체되어 시료의 분석 개시가 연기됨 |

- 2년 연속 국제정세로 인한 해상 운송 차질 발생
- 사업 수행 중 유공충 분석이 가능한 참여인력의 감소로 유공충 종에 대한 기초 분석 및 동정작업을 1인이 수행
- 현장 조사 전 극지(연) 측의 기 확보된 sediment trap 시료 및 동결건조 분쇄 퇴적물 시료에서 유공충 개체 확보를 시도하였으나 실패

등의 예외사항으로 인하여 전체적인 분석 일정에 차질이 발생하여 목표대비 100% 달성하지 못한 것으로 판단되나, 종료 후에도 중단하지 않고 분석 마무리하여 본 사업 결과를 논문화하고자 함.

#### 2. 정성정 성과

| 구분       | 연도   | 연구개발목표                               | 연구개발내용  | 달성도  |
|----------|------|--------------------------------------|---|------|
| 1차<br>년도 | 2021 | 데이터 확보 및<br>분석 체계구축                  | 남극 현생유공충 데이터베이스 구축을 위한 분석 전략 수립               | 100% |
|          |      |                                      | 문헌조사를 통한 기록종 목록, 우점종 및 분포파악                   | 100% |
| 2차<br>년도 | 2022 | 남극<br>현생유공충<br>시료확보 및<br>분석          | 킹조지섬 근방해역의 현생 저서성/부유성 유공충 채집 (21/22 하계)       | 100% |
|          |      |                                      | 출현 종 목록 및 이미지 자료 확보                           | 100% |
|          |      |                                      | 종 조성 및 우점종 파악                                 | 80%  |
|          |      |                                      | DNA barcode 및 단백질 질량 스펙트라 데이터 확보              | 70%  |
| 3차<br>년도 | 2023 | 남극<br>현생유공충<br>데이터<br>추가확보 및<br>활용연구 | 킹조지섬 근방해역의 현생 저서성/부유성 유공충 시료 추가 확보 (22/23 하계) | 100% |
|          |      |                                      | 유공충 종목록 및 형태이미지 데이터 추가확보                      | 70%  |
|          |      |                                      | DNA barcode 및 단백질 질량 스펙트라 데이터 추가확보            | 70%  |
|          |      |                                      | 채집지역의 환경조건에 따른 유공충 분포, 군집구성 연구                | 70%  |

### 3. 정량적 성과

| 구 분 |          | 목표<br>(건) | 달성<br>(건) | 주저자 실적 | 달성도   |       | 증빙자료(제출) | 비고                             |
|-----|----------|-----------|-----------|--------|-------|-------|----------|--------------------------------|
| '21 | 국외<br>논문 | SCI(E)    | 1투고       | 1출판    | 주저자1건 | 100 % | 증빙1      | (SCOPUS 등재지<br>출판)             |
|     | 국내<br>논문 | SCI(E)    | -         | -      | -     | - %   | -        | -                              |
| '22 | 국외<br>논문 | SCI(E)    | 2         | 2      | 주저자2건 | 100 % | 증빙 2,3   | -                              |
|     | 국내<br>논문 | SCI(E)    | -         | -      | -     | 100 % | 증빙4      | KCI 국내 논문 1건                   |
| '23 | 국외<br>논문 | SCI(E)    | 2         | -      | -     | - %   | -        | 종료 후 1년 이내 2건<br>투고 예정         |
|     | 국내<br>논문 | SCI(E)    | -         | -      | -     | - %   | -        | -                              |
|     | 기타       | 학회발표      | -         | 2      | 주저자2건 | 100 % | 증빙5,6    | (포스터) 국제학회 1건<br>(포스터) 국내학회 1건 |

- 논문 실적 세부사항:

| 논문제목  | 저자  | 저널명                         | 게재년월    |
|---|---|-----------------------------|---------|
| A Brief Report of Five Newly Recorded Korean Modern Benthic Foraminiferal Species             | Somin Lee,<br>Fabrizio Frontalini,<br>Wonchoel Lee  | Taxonomy                    | 2021.12 |
| Four New Species of Zosimeidae (Copepoda: Harpacticoida) from the Southwestern Gulf of Mexico | Jisu Yeom,<br>Melissa Rohal Lupher,<br>Wonchoel Lee | Diversity                   | 2022.03 |
| Eight New Records of Siphonophores (Cnidaria: Hydrozoa) in Korean Waters                      | Nayeon Park,<br>Wonchoel Lee                        | Diversity                   | 2022.06 |
| A report of three newly recorded benthic foraminiferal species from Korea                     | Somin Lee,<br>Fabrizio Frontalini,<br>Wonchoel Lee  | Journal of Species Research | 2023.02 |

- 게재 논문에 극지가 아닌 해역의 시료를 분석한 내용이 포함되어 있으나 해당 연구에 사용된 분석 방법론들은 본 사업에서 유공충 분야에 적용하고자했던 다각적 다양성 연구 수행에 필수적인 방법론들이며, 해당 논문들을 통해 확립한 방법론을 극지 유공충 연구에 적용하고자 하였음.

- 학술대회 참가 실적 세부사항:

| 성명  | 발표제목(주제)   | 저자   | 학회명                                 | 일시                           |
|-----|--|--|-------------------------------------|------------------------------|
| 이소민 | Recent benthic foraminifera from Marian Cove, King George Island, Antarctica                       | Somin Lee,<br>Fabrizio Frontalini,<br>Wonchoel Lee       | FORAMS 2023 국제<br>유공충학회<br>(포스터 발표) | 2023.06.26. -<br>2023.06.30. |
| 염지수 | Study on the Community Structure of Meiofauna in Potter Cove, King George Island, Antarctica, 2023 | Jisu Yeom,<br>Somin Lee,<br>Nayeon Park,<br>Wonchoel Lee | 한국해양학회<br>추계 학술대회<br>(포스터 발표)       | 2023.11.01. -<br>2023.11.03. |

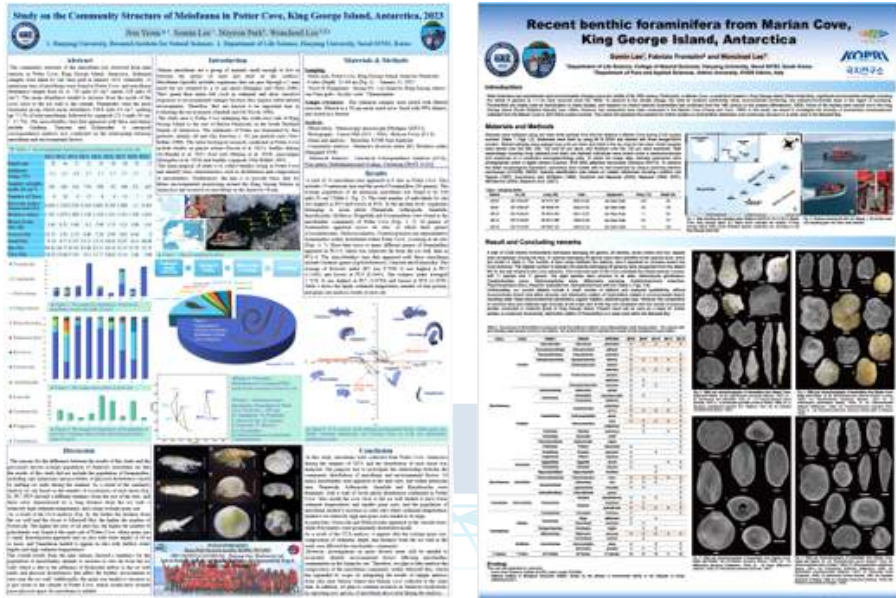


그림 34. 학회 포스터 이미지

4. 인력양성 추진내용  
가. 인력양성 성과



그림 35. 인력양성 증빙 이미지 (학위 수여증명)

(명)

| 구 분 | 학사 |    | 석사 |    | 박사 |    | 계  |   |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|---|
|     | 목표 | 달성 | 목표 | 달성 | 목표 | 달성 | 목표 | 달성 (증빙)                                       |
| '21 | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -   |
| '22 | -  | -  | 2  | -  | -  | 1  | 2  | <b>박사 1</b><br>(22년 2월 졸업)                    |
| '23 | 2  |    | 1  |    | 2  | 2  | 5  | <b>박사 2</b><br>(23년 2월 졸업 1인<br>+24년 2월 예정1인) |

- 인력 목표수치는 과거 연차에 작성당시 학위 이수자 인원수가 아닌 과제 참여 연구 인력의 학위소지 현황을 기준으로 작성하였음.
- 달성 수치는 학위 이수자 인원 수를 작성하였음.

(학위취득자 주요 기여사항)

| 이름  | 취득학위            | 해당 연구과제 주요 기여 사항                                   |
|-----|-----------------|--|
| 염지수 | 박사<br>(2022.02) | 현장조사 및 MALDI-TOF 분석 과정에 기여 (해당분야 연구실적 보유)          |
| 박나연 | 박사<br>(2023.02) | 현장조사, 부유성 시료분석, MALDI-TOF 분석 과정에 기여 (해당분야 연구실적 보유) |
| 김재현 | 박사<br>(2024.02) | 유전자 바코드 분석, 형태 분석에 참여 (해당분야 연구실적 보유)               |

- 박사 학위 취득자들의 학위 주제는 극지 유공충연구는 아니지만, 본 사업에서 적용하고자 했던 분석 방법론을 해양 중형저서생물 또는 플랑크톤에 적용한 연구를 수행 하였음 (형태 및 분자지표 - DNA 염기서열, MALDI TOF mass spectra peak pattern -를 활용한 다각적 다양성 연구 및 환경지표에 따른 군집 조성 및 분포 연구).
- 이러한 연구 경험을 바탕으로 해당 인원들은 본 사업 수행에 필요한 분석과정에 참여하여 과제 수행에 기여하였음.
- 유공충 분석을 진행한 참여연구원의 경우, 본 과제 수행을 통해 획득한 연구 데이터 처리 및 해석을 마무리하여 종료 후 1년 이내에 학위 취득 예정임.

## 제 2절 대외 기여도

- 킹조지섬 마리안 소만 인근해역에서의 미진했던 현생 유공충 다양성 연구를 다각적 방면으로 수행함으로써 한국의 극지 해양/생명분야 연구위상을 높이고 유공충 연구 분야의 발전에 기여함.
  - 국내외 현생 유공충 연구 불모지에서의 현장조사 및 연구 수행
  
- 종 조성 파악 및 DNA 염기서열 데이터 확보를 통해 기온 상승이 빠른 해당 지역의 분자적, 생물학적 장기 모니터링 수행에 기여할 수 있는 기반 데이터를 확보함으로써 국내외 극지 해양 및 생태연구 확장 및 심화에 기여함.
  - 마리안 소만 및 포터소만 현생 저서성 유공충 종 목록 이미지 데이터 확보
  - 마리안 소만 및 포터소만 유공충 DNA 데이터 국내외 최초 확보:
    - CO1 barcode : NCBI 등록 74종 184 개 서열 대비 24%에 해당하는 수의 데이터 확보 (10종, 44 서열), NCBI 미등록 서열 8종 확보
  - MALDI-TOF mass spectra peak pattern 데이터 확보 및 분석을 통한 유공충 종 식별 연구 국내외 최초 수행: 국내외 유공충 연구분야에서 시도되지 않았던 새로운 방법론의 적용
  
- 국내 극지 유공충 및 해양생물다양성 분야 전문인력 양성을 통해 장기적인 국내 극지 연구 발전에 기여함.
  
- 국제 유공충학회 및 한국 해양학회에서 본 연구의 진행상황 및 결과 발표를 통해 다양한 해양학 및 유공충 관련 연구자들의 흥미 및 연구의욕을 고취하는데 기여함.

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

### 제 1절 활용방안

- 본 연구 수행 결과 확보한 형태 이미지, 유전자 바코드서열 및 MALDI-TOF mass spectra 데이터를 종합적으로 활용하여 기하학적 형태분석, 분자계통학 및 mass spectra peak pattern 분석을 진행할 수 있으며, 이를 통해 마리안 소만 인근해역에 출현하는 유공충 중에 종 간, 종 내 구별이 매우 모호한 그룹의 (예: *Miliammina* spp., *Nodulina* spp.) cryptic diversity를 다각적 측면에서 연구할 수 있음.
- 본 연구를 통해 확보한 데이터 (형태종 목록 및 이미지, DNA 바코드, mass spectra data) 는 추후 극지 생물다양성 및 극지 해양 생태연구에 기반 데이터로 활용될 수 있음.
  - 저서성 유공충의 마리안 소만 인근해역 장기모니터링 항목화 등을 통해 지속적인 시료 및 환경 데이터의 확보가 진행될 경우, 본 연구로 확보한 데이터베이스의 지속적 보완 및 확장이 가능하며, 국제적으로 표준화된 유공충 환경 모니터링 프로토콜 적용을 통해 극지 해양환경 모니터링, 건강성 평가 등이 가능할 것으로 보여짐 (Foram-AMBI 평가 등). 동시에 본 연구로 확보한 DNA 바코드 DB의 확장시, eDNA metabarcoding 기법을 적용한 해양 모니터링 수행에 기반 데이터로 활용 가능함.
  - 지속적인 조사를 통해 맥스웰만 인근해역에서는 연구가 전무한 Monothalamous foraminifera 등의 미개척 분류군 연구수행이 가능하며, 신규 분류군 발굴 가능성이 있음.
- 본 연구를 통해 확보한 데이터를 기반으로 한 후속연구로 우점종 또는 주요한 생태적 지위를 차지하는 종을 대상으로 whole genome sequencing 분석을 진행함으로써 극지 서식 유공충에 대한 분자유전학적 이해를 향상시킬 수 있으며, 환경과의 상호작용, 다른 원생생물과의 관계에 대한 심도 있는 연구를 진행 할 수 있음.
- 아울러 본 연구를 통해 확보한 데이터는 추후 남극 대륙 근방의 해역과 북극해를 포함하는 광범위한 극지 해양을 대상으로 더욱 확장된 유공충 다양성 연구를 진행하기 위한 기반자료로 활용될 수 있음.



## 제 2절 추가연구의 필요성

### 가. 사업 종료 후 추가연구 및 성과 창출계획

| 구분    | 주요내용   | 의의(시사점)   |
|-------|--|---|
| 논문    | 2년 이내 SCI(E)급 논문 2편<br>- 신종(속) 형태.분자적 기재<br>- 마리안 및 포터소만 유공충 군집구조                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>본 사업으로 수행한 연구결과를 종료 시점까지 논문화 하지 못하였으나, 종료 이후에도 결과 보완 및 마무리하여 연구내용을 논문발표함으로써 본 사업 및 국내 극지 연구 발전에 기여함</li> </ul>                           |
| 인력양성  | 1년 이내 박사1인 양성  | <ul style="list-style-type: none"> <li>본 사업을 통해 수행한 연구결과를 기반으로한 박사인력 양성을 통해 국내 극지 및 해양연구 역량 강화</li> </ul>   |
| 추가 연구 | 마리안 소만 인근해역 common species 중 종간-종 내 형태적 변이 구별이 모호한, species complex 로 추정되는 일부 분류군 대상 GM 분석 | <ul style="list-style-type: none"> <li>본 사업으로 수행하고자 했던 GM분석을 사업 종료시점까지 충분히 수행하지 못하였으나, 종료 후에도 지속적인 관련 연구를 진행함으로써 본 사업 및 국내 극지 연구 발전에 기여함</li> </ul>                             |
|       | 극지에서 높은 다양성이 보고된 단백질성 유기물 외각을 형성하는 monothalamous 유공충의 다양성 연구                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>마리안 소만에서의 연구 전무한 상태이며, 형태적 구별이 단단한 외각을 갖는 유형보다 어렵기 때문에 본 연구에서 적용하고자 한 DNA, MALDI TOF 및 GM 분석을 진행함으로써 본 사업성과의 지속적인 확장 및 심화에 기여</li> </ul> |

#### ○ 종료 후 2년 이내 논문 게재 세부사항:

- 2021/2022 마리안 소만 유공충 형태 종 조성, 출현 종 이미지 도판 및 diagnosis, diversity indices 포함한 논문
- 신속 후보종의 분자적, 형태적 특성 기재 논문
- 22-23 하계 마리안소만 및 포터소만 정량 subsample의 분석 완료 후 환경 데이터와 종합하여 전체적인 군집구조 및 분포 연구 논문
- 해당 논문 투고 및 게재 시 본 과제 사사번호 기입하여 사업종료 후에도 성과로 보고될 수 있도록 조치.

#### ○ GM분석 관련 추가연구 계획:

- 변이, 중간형 등으로 종 간, 종 내 구별이 모호한 형태종 그룹의 정량적/수치적 형질 비교를 통한 종 식별 및 cryptic diversity 연구 수행 (*G. biora*, *Miliammina* spp., *Nodulina* spp. 등)
  - 코어 퇴적물 하층부에도 산출되는 유공충의 종 식별 해상도 향상에 기여
  - 화석 군집분석을 통한 고환경 복원연구 및 현생종 다양성 연구 정밀성 향상에 기여

## 제 6 장 참고문헌

- Bamber, J., & Riva, R. (2010). The sea level fingerprint of recent ice mass fluxes. *The Cryosphere*, 4(4), 621-627.
- Barbano, D., Diaz, R., Zhang, L., Sandrin, T., Gerken, H., & Dempster, T. (2015). Rapid characterization of microalgae and microalgae mixtures using matrix-assisted laser desorption ionization time-of-flight mass spectrometry (MALDI-TOF MS). *PLoS One*, 10(8), e0135337.
- Baumeister, T. U., Vallet, M., Kaftan, F., Guillou, L., Svatoš, A., & Pohnert, G. (2020). Identification to species level of live single microalgal cells from plankton samples with matrix-free laser/desorption ionization mass spectrometry. *Metabolomics*, 16, 1-10.
- Bayrón-Arcelay, M., Rodríguez-Camacho, K., & Acosta-Mercado, D. (2020). Morphological Response of *Bolivina Lowmani* to Sediment Composition and Organic Matter: Applying Geometric Morphometrics for Potential Bio-Monitoring. *Journal of Foraminiferal Research*, 50(3), 249-265.
- Bode, M., Laakmann, S., Kaiser, P., Hagen, W., Auel, H., & Cornils, A. (2017). Unravelling diversity of deep-sea copepods using integrated morphological and molecular techniques. *Journal of Plankton Research*, 39(4), 600-617.
- Chalupová, J., Raus, M., Sedlářová, M., & Šebela, M. (2014). Identification of fungal microorganisms by MALDI-TOF mass spectrometry. *Biotechnology advances*, 32(1), 230-241.
- Chang, S. K., & Yoon, H. I. (1995). Foraminiferal assemblages from bottom sediments at Marian cove, South Shetland Islands, west Antarctica. *Marine Micropaleontology*, 26(1-4), 223-232.
- Claydon, M. A., Davey, S. N., Edwards-Jones, V., & Gordon, D. B. (1996). The rapid identification of intact microorganisms using mass spectrometry. *Nature biotechnology*, 14(11), 1584-1586.
- Crossay, T., Antheaume, C., Redecker, D., Bon, L., Chedri, N., Richert, C., ... & Amir, H. (2017). New method for the identification of arbuscular mycorrhizal fungi by proteomic-based biotyping of spores using MALDI-TOF-MS. *Scientific reports*, 7(1), 14306.

- Darling, K. F., Kucera, M., & Wade, C. M. (2007). Global molecular phylogeography reveals persistent Arctic circumpolar isolation in a marine planktonic protist. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(12), 5002–5007.
- Dehon, M., Engel, M. S., Gérard, M., Aytekin, A. M., Ghisbain, G., Williams, P. H., ... & Michez, D. (2019). Morphometric analysis of fossil bumble bees (Hymenoptera, Apidae, *Bombini*) reveals their taxonomic affinities. *ZooKeys*, 891, 71.
- Evason, D. J., Claydon, M. A., & Gordon, D. B. (2001). Exploring the limits of bacterial identification by intact cell-mass spectrometry. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 12(1), 49–54.
- Gray, J. A., McDowell, M. C., Hutchinson, M. N., & Jones, M. E. (2017). Geometric morphometrics provides an alternative approach for interpreting the affinity of fossil lizard jaws. *Journal of Herpetology*, 51(3), 375–382.
- Hsiang, A. Y., Elder, L. E., & Hull, P. M. (2016). Towards a morphological metric of assemblage dynamics in the fossil record: a test case using planktonic foraminifera. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1691), 20150227.
- Ishman, S. E., & Domack, E. W. (1994). Oceanographic controls on benthic foraminifers from the Bellingshausen margin of the Antarctic Peninsula. *Marine Micropaleontology*, 24(2), 119–155.
- Karanovic, I., Huyen, P. T. M., Yoo, H., Nakao, Y., & Tsukagoshi, A. (2020). Shell and appendages variability in two allopatric ostracod species seen through the light of molecular data. *Contributions to Zoology*, 89(3), 247–269.
- Kim, J., Kim, J., Lee, W., & Karanovic, I. (2021). The first insight into the patterns of size and shape variation of a microcerberid isopod. *Water*, 13(4), 515.
- Laakmann, S., Gerdts, G., Erler, R., Knebelsberger, T., Martínez Arbizu, P., & Raupach, M. J. (2013). Comparison of molecular species identification for North Sea calanoid copepods (C rustacea) using proteome fingerprints and DNA sequences. *Molecular Ecology Resources*, 13(5), 862–876.
- Li, B., Yoon, H. I., & Park, B. K. (2000). Foraminiferal assemblages and CaCO<sub>3</sub> dissolution since the last deglaciation in the Maxwell Bay, King George Island, Antarctica. *Marine Geology*, 169(1–2), 239–257.
- Majewski, W., Lecroq, B., Sinniger, F., & Pawłowski, J. (2007). Monothalamous

- foraminifera from Admiralty Bay, King George Island, West Antarctica. Polish Polar Research, 187-210.
- Majewski, W. (2010). Benthic foraminifera from West Antarctic fiord environments: An overview. Polish Polar Research, (1), 61-82.
- Martins, M. V. A., Yamashita, C., e Sousa, S. H. D. M., Koutsoukos, E. A. M., Disaró, S. T., Debenay, J. P., & Duleba, W. (2019). Response of benthic foraminifera to environmental variability: importance of benthic foraminifera in monitoring studies. In Monitoring of Marine Pollution. IntechOpen.
- Park, B. -K., Yoon, H. I., Woo, H. J., Lee, K. S., Bang, E. -J., & Southon., John. (1995). Late Holocene paleoceanography from core sediments in the Admiralty Bay and Maxwell Bay, King Georgy Island, Antarctica. The Joournal of the Korean Society of Oceanography, 30(4), 302-319.
- Park, N., Yeom, J., Jeong, R., & Lee, W. (2021). Novel attempt at discrimination of a bullet-shaped siphonophore (Family Diphyidae) using matrix-assisted laser desorption/ionization time of flight mass spectrometry (MALDI-ToF MS). Scientific Reports, 11(1), 19077.
- Pawlowski, J., & Majewski, W. (2011). Magnetite-bearing foraminifera from Admiralty Bay, west Antarctica, with description of *Psammophaga magnetica*, sp. nov. The Journal of Foraminiferal Research, 41(1), 3-13.
- Pawlowski, J., Fahrni, J. F., Brykczynska, U., Habura, A., & Bowser, S. S. (2002). Molecular data reveal high taxonomic diversity of allogromiid Foraminifera in Explorers Cove (McMurdo Sound, Antarctica). Polar Biology, 25, 96-105.
- Pawlowski, J., Fahrni, J. F., Guiard, J., Conlan, K., Hardecker, J., Habura, A., & Bowser, S. S. (2005). Allogromiid foraminifera and gromiids from under the Ross Ice Shelf: morphological and molecular diversity. Polar Biology, 28, 514-522.
- Pawlowski, J., Fahrni, J., Lecroq, B., Longet, D., Cornelius, N., Excoffier, L., ... & Gooday, A. J. (2007). Bipolar gene flow in deep sea benthic foraminifera. Molecular ecology, 16(19), 4089-4096.
- Pawlowski, J., Fontaine, D., da Silva, A. A., & Guiard, J. (2011). Novel lineages of Southern Ocean deep-sea foraminifera revealed by environmental DNA sequencing. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 58(19-20), 1996-2003.
- Rodrigues, A. R., Maluf, J. C. C., de Santis Braga, E., & Eichler, B. B. (2010). Recent benthic foraminiferal distribution and related environmental factors in

- Ezcurra Inlet, King George Island, Antarctica. *Antarctic Science*, 22(4), 343–360.
- Sabbatini, A., Pawlowski, J., Gooday, A. J., Piraino, S., Bowser, S. S., Morigi, C., & Negri, A. (2004). *Vellaria zucchellii* sp. nov. a new monothalamous foraminifer from Terra Nova Bay, Antarctica. *Antarctic Science*, 16(3), 307–312.
- Sabbatini, A., Pawlowski, J., Gooday, A. J., Piraino, S., Bowser, S. S., Morigi, C., & Negri, A. (2004). *Vellaria zucchellii* sp. nov. a new monothalamous foraminifer from Terra Nova Bay, Antarctica. *Antarctic Science*, 16(3), 307–312.
- Santos, S. R., Pessôa, L. M., & Vianna, M. (2019). Geometric morphometrics as a tool to identify species in multispecific flatfish landings in the Tropical Southwestern Atlantic. *Fisheries Research*, 213, 190–195.
- Schmiedl, G. (2019). Use of foraminifera in climate science. In *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*.
- Schönfeld, J., Alve, E., Geslin, E., Jorissen, F., Korsun, S., & Spezzaferri, S. (2012). The FOBIMO (FORaminiferal BIO-MONitoring) initiative – Towards a standardised protocol for soft-bottom benthic foraminiferal monitoring studies. *Marine Micropaleontology*, 94, 1–13.
- Schwarzfeld, M. D., & Sperling, F. A. (2014). Species delimitation using morphology, morphometrics, and molecules: definition of the *Ophion scutellaris* Thomson species group, with descriptions of six new species (Hymenoptera, Ichneumonidae). *ZooKeys*, (462), 59.
- Seng, P., Rolain, J. M., Fournier, P. E., La Scola, B., Drancourt, M., & Raoult, D. (2010). MALDI-TOF-mass spectrometry applications in clinical microbiology. *Future microbiology*, 5(11), 1733–1754.
- Shao, M., & Bi, H. (2020). Direct identification of fish species by surface molecular transferring. *Analyst*, 145(12), 4148–4155.
- Shi, Y., & MacLeod, N. (2016). Identification of life-history stages in fusulinid foraminifera. *Marine Micropaleontology*, 122, 87–98.
- Singhal, N., Kumar, M., Kanaujia, P. K., & Viridi, J. S. (2015). MALDI-TOF mass spectrometry: an emerging technology for microbial identification and diagnosis. *Frontiers in microbiology*, 6, 791.
- Suhr, S. B., & Pond, D. W. (2006). Antarctic benthic foraminifera facilitate rapid cycling of phytoplankton-derived organic carbon. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 53(8–10), 895–902.

- Suhr, S. B., Alexander, S. P., Gooday, A. J., Pond, D. W., & Bowser, S. S. (2008). Trophic modes of large Antarctic Foraminifera: roles of carnivory, omnivory, and detritivory. *Marine Ecology Progress Series*, 371, 155–164.
- The IMBIE team. (2018). Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature* 558, 219 - 222.
- Theska, T., Sieriebriennikov, B., Wighard, S. S., Werner, M. S., & Sommer, R. J. (2020). Geometric morphometrics of microscopic animals as exemplified by model nematodes. *Nature Protocols*, 1-34.
- Ulrich, S., Kühn, U., Biermaier, B., Piacenza, N., Schwaiger, K., Gottschalk, C., & Gareis, M. (2017). Direct identification of edible insects by MALDI-TOF mass spectrometry. *Food Control*, 76, 96–101.
- Weiner, A. K., Morard, R., Weinkauf, M. F., Darling, K. F., André, A., Quillévéré, F., ... & Kucera, M. (2016). Methodology for single-cell genetic analysis of planktonic foraminifera for studies of protist diversity and evolution. *Frontiers in Marine Science*, 3, 255.
- Woo, H. J., Park, B. -K., Jang, H. -D., Chang, S. -K., & Yoon, H. I. (1996). Late Holocene paleoclimates of the King George Island, West Antarctica, using benthic foraminifera. *Journal of Geological society of Korea*, 32(5), 393–406.
- Yeom, J., Park, N., Jeong, R., & Lee, W. (2021). Integrative description of cryptic *Tigriopus* species from Korea using MALDI-TOF MS and DNA barcoding. *Frontiers in Marine Science*, 8, 495.



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