

장보고기지 주변해역 해양생물 군집 구조 및
주요 개체군 변동 파악

Population dynamics and marine community structure
around JBG station



제주대학교 산학협력단

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극 장보고과학기지 장기생태연구 (JBG-LTER) - 한·뉴·이태리 3국 공동 Platform 구축” 과제의 위탁연구 “장보고기지 주변해역 해양생물 군집 구조 및 주요 개체군 변동 파악” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 최 한 구
위탁연구기관명 : 제주대학교 산학협력단
위탁연구책임자 : 박 상 울
위탁참여연구원 : 강 윤 희
“ : 최 선 경
“ : 문 경 림
“ : 김 태 현
“ : 김 민 지

요 약 문

I. 제 목

장보고기지 주변해역 해양생물 군집 구조 및 주요 개체군 변동 파악

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 본 연구 용역에서는 장보고기지 주변 해역 주요 해양생물 개체군의 변동 자료 수집과 다양한 교란 인자에 의한 군집 구조의 변동 양상 파악 및 이를 통한 장기생태계 연구 기반 체계와 분석틀 확립을 목표로 함
- 남극은 전 지구적으로 인간 활동이 가장 적은 지역에 속하여 기후변화와 같은 자연적인 교란 현상을 연구하기에 매우 적합한 지역으로 알려짐
- 2014년 우리나라가 설립한 장보고기지가 위치한 로스해 테라노바만 주변해역에서 연안생태계에 대한 연구는 초기 단계로써 자료가 부족한 실정임
- 따라서, 본 연구에서는 기존에 연안생태계 연구가 미흡한 테라노바만에 위치한 장보고기지 주변 해역을 중심으로 장보고기지 건설에 따른 다양한 교란 인자에 의한 장보고기지 주변 해역 해양생물군집의 군집 구조 변동 양상을 파악하고 주요해양생물의 개체군 변동 자료를 수집하여 장기적이고 체계적인 자료를 확보하고자 함

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 장보고기지 연안의 장기생태계 연구 기반 분석틀 확립
- 기존 영상자료 분석 및 군집 생태 지수 평가
- 교란 요인에 대한 군집 반응 패턴 규명
- 장보고기지 주변 해역 주요 개체군 변동 양상 자료 수집 및 분석
- 해양생물 인구통계표 작성
- 군집 구조의 변동 양상 파악

IV. 연구개발결과

- 장보고기지 연안의 장기생태계 연구 기반 분석틀 확립

- : 장보고기지 주변 해역에서 수집된 영상 자료를 기준으로 부두앞을 장기생태모니터링 장소로 선정하여 2012-2018년(2013년 제외) 7년간의 자료 확보하였으며, 군집구조의 대표성을 확보하기 위해서 방형구 크기를 1×1m로 설정하여 분석을 실시함
- 기존 영상자료 분석 및 군집 생태 지수 평가
 - : 장보고기지 주변 해역 해양저서생물 관찰 종 목록 리스트 작성 및 피도 측정을 실시하였으며, 군집 생태 지수 평가 결과, 지속적으로 종다양성은 증가하였으나, 우점도는 감소하였음
- 교란 요인에 대한 군집 반응 패턴 규명
 - : 교란 요인에 대한 군집 반응을 파악하기 위한 인위적, 자연적 교란 요인을 설정하였으며 교란 해역 변화 조사를 위한 가설 설정 및 실험 디자인을 완료함
- 장보고기지 주변 해역 주요 개체군 변동 양상 자료 수집 및 분석
 - : 2018-2019년에 걸쳐 남극가리비 389개체를 무작위 채집하였고, 현장에서 각고를 측정된 후, 아라온호로 선적하여 한국으로 운반, 추후 다양한 형태적 특성 측정을 실시함
- 해양생물 인구통계표 작성
 - : Heilmayer et al. (2003)의 자료를 이용해 Height-Age equation 개발하였으며, 가리비 연령의 예측치와 실측치 비교 결과, 어린 개체의 성장률이 감소하였으며, 이는 어린 개체의 생존율에 영향을 미칠 수 있음을 시사함
- 군집 구조의 변동 양상 파악
 - : 기지 운영에 의한 해양생물군집구조의 변동을 알아보기 위해 추가적으로 대조구를 설정하였으며, 대조구는 기존 실험구의 해양생물군집 구조와 매우 유사함. 집괴분석과 다차원배열분석을 통한 군집 구조 동태 파악함. 기지 건설로 인해 발생한 교란 현상 후, 점차적으로 저서생물군집이 안정화되는 것으로 사료되며, 해양생물군집 회복양상에 대한 개념모델을 수립함

V. 연구개발결과의 활용계획

- 남극가리비에 대한 연구는 2018년부터 2019년까지 2년간 축적한 자료를 바탕으로 지속적인 연구를 진행하여 연도 변화에 따른 개체 연령별 성장 특성을 분석하고 연령별 성장식을 개발하는 연구가 필요하며, 남극가리비 개체군의 생식력 분석과 유전자 분석을 통한 유효개체군 크기를 추정하는 연구도 필요함
- 본 연구에서는 극지 연안의 장기생태계 연구 기반 분석틀을 확립하였으며, 이를 통해 확립된 저서생물 연구 분석틀을 기반으로 장보고기지 중심의 장기적이고 체계적인 연구가 가능할 것으로 사료됨
- 장보고기지 주변 해역은 남극 대륙의 테레노바만에 위치하고 있어 인간 활동이

매우 제한적이며, 이로 인하여 기후변화에 따른 해양환경, 해빙, 빙하 변동 등의 연구에 매우 유리한 장점을 가짐

- 장보고기지 중심의 연안생태계 장기 연속 관측 자료 구축 및 생태계연구는 극지 연구와 관련하여 국제적인 연구 지위를 획득하고 남극 연안생태계 보호와 환경 보전을 위한 정책수립에 필요한 과학적인 연구 자료를 제공할 것으로 기대됨



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Population dynamics and marine community structure around JBG station

II. Purpose and Necessity of R&D

- The purpose of this study is to identify the changes in the community structure caused by various disturbance factors and to collect the data of the major marine populations around Jang Bogo station (JBG station).
- Antarctica is one of the continents with the lowest human activities, making it an ideal place to study natural disturbances such as climate change.
- Research on coastal ecosystems for population dynamics and marine community structure of JBG station, established in 2014, was insufficient.
- Therefore, we identified the changes in the community structure of marine organisms around the JBG station due to various disturbance factors and collected the population data of major marine organisms to accumulate long-term and systematic data in this study.

III. Contents and Extent of R&D

- Establishment of the framework for analysis of long-term ecological research based on the coast around JBG station
- Analysis of image data and evaluation of ecological index for marine

community

- Identification of patterns in benthic community response for disturbance factors
- Collection and analysis of the data on changes in major populations around the JBG Station
- Establishment of demographic table in *Adamussium colbecki*
- Identification of changes in marine community structure

IV. R&D Results

- Establishment of the framework for analysis of long-term ecological research based on the coast around JBG station

: Based on the underwater video data collected from around the JBG station, the front of pier of JBG station was selected as a long-term ecological monitoring site. From 2012 to 2018 (except 2013), seven years of data were collected and the analysis was performed by setting to 1x 1m to ensure the representativeness of the community structure.

- Analysis of image data and evaluation of ecological index for marine community

: The species list and percent coverage of marine benthic organism around JBG station were measured. As the results of the community ecological index, species diversity index increased gradually, but dominance index decreased.

- Identification of patterns in benthic community response for disturbance factors

: The anthropogenic and natural disturbance factors were established to identify the community response, and the hypothesis setting and experimental design for the study were completed.

- Collection and analysis of the data on changes in major populations around the JBG Station

: Antarctic scallops (*Adamussium colbecki*) of 389 individuals were randomly collected and transported to Korea by using Araon, and we measured various morphological parameter throughout 2018-2019.

- Establishment of demographic table in *Adamussium colbecki*

: Height-age equation of *A. colbecki* was calculated by the method according to Heilmayer et al. (2003). Comparisons between scallop age predictions and actual observations suggested that the growth rate of young scallops was reduced, which may affect the survival rate of young individuals.

- Identification of changes in marine community structure

: An additional control was set up to investigate the changes in the community structure of marine organism by operation of JBG station, and the community structure of this control was very similar to that of around JBG station. Differences in the community structure among study years were analyzed using cluster analysis and multidimensional array analysis. After disturbance caused by the construction of JBG station, the benthic community is gradually stabilized, and a conceptual model was established for the recovery pattern of the marine community.

V. Application Plans of R&D Results

- Research on Antarctic scallops requires continuous monitoring based on this data to analyze the growth characteristics of each individual age according to the year change and to develop age-specific growth rates. Moreover, additional studies are also needed to estimate the effective population size through fertility analysis and genetic analysis of the population.
- In this study, the framework of a long-term research based on ecosystem analysis was established. Based on the method, it is possible to conduct long-term and systematic research on JBG station.
- The research and long-term data on coastal ecosystem around JBG station are expected to provide scientific research data needed to establish policies to protect Antarctic coastal ecosystem and environmental conservation.

목 차

제 1 장 서론	14
제 2 장 국내외 기술개발 현황	16
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	19
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	48
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	52
제 6 장 참고문헌	54



표 목 차

표 1. 장보고기지 주변 해역 부두앞에서 관찰된 종 목록	24
표 2. 장보고기지 주변 해역의 부두앞과 곤드와나 내 대조구에서 관찰된 종 목록.....	44
표 3. 장보고기지 주변 해역의 부두앞에서 관찰된 종 목록.....	45



그림 목 차

그림 1. Terra Nova Bay에 위치한 장보고기지 부두앞 연구 장소	19
그림 2. 현장에서 촬영된 영상자료에 1×1m의 방형구를 설치하여 피도를 측정하는 방법	20
그림 3. 장보고기지 주변 연안생태계 군집 연구를 위해 장보고기지 부두앞 해역에서 scuba diving 조사를 실시하는 연구원의 모습	20
그림 4. 2014년 2월에 부두앞에서 촬영된 영상자료에 0.5×1.0m의 방형구를 설치하여 피도를 측정하는 방법	21
그림 5. Transect line에 1×1m의 방형구를 설치하여 촬영된 영상 자료	22
그림 6. 촬영된 영상 자료를 바탕으로 4개의 50×50cm 방형구에 100개의 소격자의 방형구를 설치한 모습	22
그림 7-1. 연구 장소에서 관찰된 대표적인 우점 종	24
그림 7-2. 연구 장소에서 관찰된 대표적인 우점 종	25
그림 8. 장보고기지 주변 해역 부두앞에서 측정된 저서생물군집의 제생태지수	26
그림 9. 장보고 기지의 생활용수 공급을 위한 취수시설	27
그림 10. 교란에 의한 해양생물 군집 구조의 변동 양상 분석	28
그림 11. 시계열 횡단면 분석 방법(Time Series Cross Section Analysis)을 이용한 안전벤트 의무규정 시행 전과 후에 교통사고 사상자 수의 변화 연구 사례	29
그림 12. 2018년 3월 장보고기지 부두앞 해역을 덮은 유빙의 모습	30
그림 13. 2018년 3월 장보고기지 부두앞의 유빙으로 인해 월동대원의	

로부터 중장비 지원을 받고 있는 현장 모습	31
그림 14. 2018년 3월 장보고기지 부두앞에서 연구를 진행하는 모습 ...	31
그림 15. 2018년 3월 장보고기지 주변 해역으로부터 채집된 남극가리비	32
그림 16. 2019년 3월 유빙이 빠져나간 장보고기지 부두앞의 모습	33
그림 17. 2019년 장보고기지 부두앞 해역의 scuba diving을 통한 연구 모습	33
그림 18. 2019년 장보고기지 부두앞 연구정점에서 관찰된 남극가리비의 모습	34
그림 19. 가리비 패각에 고유 번호를 표시하려는 행위로 인한 파손 ...	35
그림 20. 장보고기지 주변 해역으로부터 연구를 위하여 채집된 남극가리비	35
그림 21. 장보고기지 주변 해역으로부터 채집된 남극가리비를 연구하는 모습	36
그림 22. 남극가리비를 이용하여 관찰한 형태적인 외부형질	36
그림 23. 실험실로 운반된 남극가리비의 패각 전처리 과정	37
그림 24. 남극가리비의 패각을 이용하여 연령을 측정하는 모습	37
그림 25. 2018년 채집된 남극가리비 개체군의 각고의 빈도	38
그림 26. 2018년과 2019년에 걸쳐 채집된 남극가리비 개체군의 각고의 빈도	39
그림 27. 크기별로 정리된 남극가리비 패각의 모습	39
그림 28. 장보고기지 주변 해역 가리비로부터 측정된 von Bertalanffy growth function을 이용한 가리비 개체군의 각고와 연령과의 관계 ...	40
그림 29. Heilmayer et al. (2003)의 자료와 이번 연구의 Height-age	

equation 비교	41
그림 30. 장보고기지 주변 해역 가리비 개체군 연령의 추정치와 실측치의 비교	42
그림 31. 가리비 개체군 연령별 성장률의 추정치와 실측치의 비교	42
그림 32. 장보고기지 부두 앞 주변 해역에서 관찰된 대규모 남극가리비 개체군의 모습	43
그림 33. 곤드와나 해역에서 조사를 실시하는 모습	44
그림 34. 집괴분석과 다차원배열분석을 이용한 장보고기지 주변 해역 부두앞에서 저서생물군집 구조	46
그림 35. 장보고기지 부두앞 해양생물군집의 회복양상에 대한 개념모델	47



제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목적

- 본 연구 용역에서는 장보고기지 주변 해역 주요 해양생물 개체군의 변동 자료 수집과 다양한 교란 인자에 의한 군집 구조의 변동 양상 파악 및 이를 통한 장기생태계 연구 기반 체계와 분석틀 확립을 목표로 한다.

제 2 절 연구개발의 필요성

- 남극의 해양생태계는 전 지구적으로 인간 활동이 가장 적은 지역에 속하여 기후변화와 같은 자연적인 교란 현상을 연구하기에 매우 적합한 지역으로 알려졌다.
- 해양의 저서생물군집 구성과 변동은 해양의 환경변화와 관련되어 있으며, 환경에 대한 지표로서 사용되고 있다.
- 남극 주변 해역의 해양생태계 변동은 다른 해역에 비해 매우 느리게 진행되는 것을 감안할 때, 기후변화에 의한 연안생태계 변동을 이해하고 해석하기 위해서 장기적이고 체계적인 자료 구축하는 것이 시급하다.
- 이에 더하여, 남극의 해양생태계는 기후변화와 같은 자연적인 교란 현상과 함께 각 국의 남극 연구를 위한 기지 운영에 따른 인위적인 교란 현상이 복합적으로 작용하여 다양한 변화를 일으키고 있다고 보고되었다.
- 1988년 킹조지섬에 설립한 대한민국의 세종과학기지와는 달리 우리나라 최초로 남극 대륙 위에 세운 장보고과학기지는 2005년부터 계획이 시작되어 2010년 건설지가 확정되었으며, 2012년부터 공사가 시작된 후 2014년 완공되어 현재까지 운영되고 있다.
- 우리나라를 비롯한 세계 각국에서는 남극 대륙의 킹조지섬에서 과학 연구를 위하여 연구 기지를 운영하면서 장기간 집중적으로 많은 자료를 축적하고 있다.
- 반면, 2014년 우리나라가 설립한 장보고기지가 위치한 로스해 테라노바만 해역 주변해역은 미국, 뉴질랜드, 이탈리아 등 일부 국가에 의해 연구가 진행되고 있으며, 특히 연안생태계에 대한 연구는 초기 단계로써 장기적이며 체계적인 자료가 부족한 실정이다.
- 따라서, 본 연구에서는 기존에 연안생태계 연구가 미흡한 테라노바만에 위치한 장보고기지 주변 해역을 중심으로 장보고기지 건설에 따른 다양한 교

란 인자에 의한 장보고기지 주변 해역 해양생물군집의 군집 구조 변동 양상을 파악하고 주요해양생물의 개체군 변동 자료를 수집하여 장기적이고 체계적인 자료를 확보하고자한다.

제 3 절 연구개발의 범위

1. 연구개발의 성과 목표

- 본 연구 용역의 성과 목표는 장보고기지 기반 주요 해양생물의 개체군 변동 자료 수집, 장기생태계 연구 기반 분석틀 확립 및 다양한 교란 인자에 의한 군집 구조의 변동 양상 파악이다.

2. 연구개발의 세부 목표

- 성과 목표 달성을 위하여 위탁 연구 연도별로 세부 목표를 설정하였으며, 연도별 세부 연구 목표는 다음과 같다.
- 1차년도(2017년) 세부 연구목표는 1) 장기생태계 연구 기반 분석틀 확립, 2) 기존 영상자료 분석 및 군집 생태 지수 평가, 3) 교란 요인에 대한 군집 반응 패턴 규명이다.
- 2차년도(2018년) 세부 연구목표는 1) 개체군 변동 양상 자료 수집 및 분석, 2) 해양생물 인구통계표 작성이다.
- 3차년도(2019년) 세부 연구목표는 군집 구조의 변동 양상 파악이다.

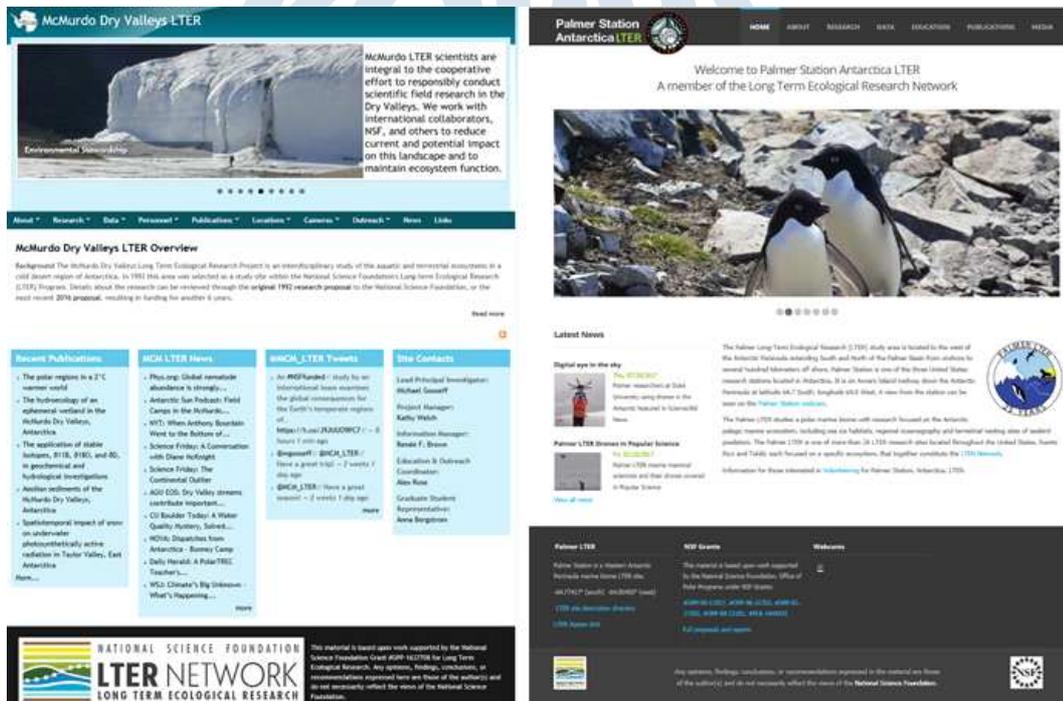
제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 연구결과 및 기술개발현황

- 국내에서 남극 해역에서 서식하는 저서생물에 대한 연구는 주로 킹조지섬에 위치한 세종기지 주변 해역을 중심으로 진행되었으며, 2010년 이후 쇄빙 연구선인 아라온의 취항과 2014년 장보고기지의 건립으로 남극 대륙의 해양 저서생물 연구가 가능하게 되었다.
- 이로 인해, 장보고기지가 위치한 로스해 테라노바만 주변 해역에 대한 국내의 저서생물 관련연구는 본 연구팀의 연구가 진행되기 이전까지 매우 미흡한 상황이었다.
- 우리나라 극지연구소 중심의 본 연구팀은 장보고과학기지 건설 이후 지난 6년간 장보고기지 모니터링 연구와 장기생태 연구를 통해 해양 물리·화학 환경요인(해수 온도, 염분, 용존산소, pCO₂, pH, 영양염 등)과 연안 해양생태계 구성 요소(chl-a, 남극도독갈매기 개체군, 남극가리비 개체군과 저서생물 군집 구조)에 대한 장기 연속 관측 자료를 축적하고 있다.
- 또한, 지난 3년간 본 과제인 장보고 장기생태 연구 과제를 통해 한·뉴·이태리 3국 공동 관측 platform을 Cape Evans, Cape Armitage, Mario Zuccelli St., Gondwana St. 및 장보고기지에 구축하고 공동 운영하며, 공동 수중 탐사 조사를 진행하였다.
- 6년 동안 장보고기지주변 해역에서 저서생물 군집 구조에 대한 장기적, 연속적, 체계적 자료를 구축하고 있으며, 다양한 환경 교란 현상에 비교적 빠르게 반응하여 군집 구조가 변화하고 있음이 관찰되고 있다.
- 또한 본 연구팀은 SCAR 생명과학분야의 생태계 관측 관련 Expert group인 ANTOS(Antarctic Nearshore and Terrestrial Observing System) 프로그램에서 연안관측 data를 담당하고 있으며, 이 프로그램을 통하여 남극 대륙 전 지역의 육상과 연안생태계를 대상으로 환경요인과 생물반응의 동시 종합 관측시스템을 구축하고 이를 활용하여 미래 변화를 예측하는 것을 목표로 하고 있다.
- 장보고기지 건립과 아라온의 취항으로 그동안 출입이 불가능하였던 남극 대륙에 대한 본격적인 연구가 우리나라에서 시작되고 있으며, 향후 진행될 장보고기지 중심의 기후변화에 따른 환경과 연안생태계 영향에 대한 관측과 대응을 위해 본 위탁연구의 저서생물 장기생태 분석틀 확립 및 기초 자료 확보는 과학적으로 매우 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

제 2 절 국외 연구결과 및 기술개발현황

- 미국에서는 남극 장기생태 연구(US Antarctic LTER 프로그램)의 일환으로 Palmer-LTER 프로그램을 실시하고 있으며 이를 통하여 1990년대 이후 지속적으로 쇄빙선, 위성 원격관측 등 다양한 연구기법과 관측기술을 활용하여, 남극 생태계 연구를 30년 가까이 수행하고 있다.
- Palmer-LTER 프로그램은 해양 물리, 화학, 생물 환경뿐만 아니라 상위 포식자 환경 등 기후변화로 인한 남극반도의 전반적인 생태환경 변화를 연구한 프로그램이다.
- 또한, 미국은 맥머도 기지를 중심으로 드라이 밸리의 장기 생태 연구(McMurdo Dry Valleys Long-Term Ecological Research, MCM-LTER) 프로그램을 통하여 기후변화에 따른 생태계의 변화과정을 연구하고 있으며 이를 통하여 기후 변화와 생태계와의 연관성을 규명하고자 남극 생태계 장기 연구를 수행하고 있다.



참고자료: 미국에서 수행중인 MCM-LTER 프로그램(좌) 과 Palmer-LTER 프로그램(우)의 웹사이트

- 뉴질랜드에서는 INTERACT 프로그램을 통해 남극연안생태계에 대한 장기 연구 수행 중에 있다.

- 이태리는 테라노바만에서 특정 해양저서생물 개체군들을 대상으로 장기 연구를 수행하고 있다.
- 이태리 연구진은 장보고기지가 위치한 남극 로스해 테라노바만에 서식하는 남극가리비(*Adamussium colbecki*)를 대상으로 1989년부터 1996년까지 총 2297개체의 남극가리비를 채집하여 분석하였으며, 이를 바탕으로 남극가리비의 연령과 생산성을 분석하였다(Heilmayer et al. 2003).
- 장보고기지가 속한 로스해와 관련된 국외 연구로는 뉴질랜드에서 2020년부터 2026년까지 로스해 해양보호구역의 연구 및 관리를 위한 장기 연구프로젝트를 기획하여 로스해 해양보호구역 지정 관련 기초 환경/생태 조사 및 보존조치 확립 과제 수행하고 있다.
- 로스해의 보호와 관리를 위하여 해양보호구역의 보존조치(CM 91-05 및 부속서)를 제정(CCAMLR)하였으며, 한국, 중국, 이태리 공동으로 인익스프레서블 섬의 남극특별보호구역 지정 추진에 따른 관리계획서 초안을 마련하였다(ATCM-CEP 2019, CCAMLR & SC-CAMLR 2019).
- 2012년 새로 개편된 남극과학위원회 과학연구프로그램(SCAR SRP)에서는 기후연구 프로그램인 AntClim, PAIS 및 생태계 및 생물반응 연구 프로그램인 AntEco와 Ant-ERA이 포함되어 기후변화와 생태계 변화 연구가 주요 연구주제로 부각되었다.
- AntEco는 남극의 생물다양성 및 생태계 작용기작의 이해, 기후변화에 의한 생태계 변화예측을 연구목표로 하며, Ant-ERA는 환경변화 스트레스에 대한 생물반응에 연구초점을 맞추고 있으며, 분자수준, 개체수준 및 군집수준까지 다양한 측면에서 생물반응을 이해하는 것을 목표로 한다.
- 남극에서 연구를 진행하고 있는 각 국은 자국의 과학기지를 기반으로 입지 환경 조건에 따른 다양한 지표와 기준, 방법으로 환경 요인과 생태계 관측을 진행해오고 있으며, 공통되는 관측항목에 대한 자료 공유로 남극지역의 기후변화 해석을 위해 노력하고 있다.
- 하지만, 각 국에서 진행되는 다양한 연구에서도 불구하고 각 국의 자국 기지를 중심으로 진행되는 다양한 장기모니터링 프로그램으로 인하여 연구 결과 비교 분석이 용이하지 않으며, 연속적인 장기 관측이 진행되지 않아서 연구 결과 해석에 한계를 나타내고 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 장보고기지 연안생태계 연구 기반 확립

1. 장기생태계 연구 기반 분석틀 확립

- 장보고기지 주변 연안생태계 군집 구조 자료 추출을 위한 분석 방법 표준화 및 장기생태계 기반 분석틀 확립을 위해서 기존의 장보고기지 주변에서 촬영된 영상자료를 분석하였다.
- 2012년부터 2014년, 2015년, 2016년, 2017년 및 2018년에 촬영된 기존 영상자료와 새로 측정된 자료를 바탕으로 연속적으로 촬영된 부두지점을 장기모니터링 장소로 설정하였다(그림 1).

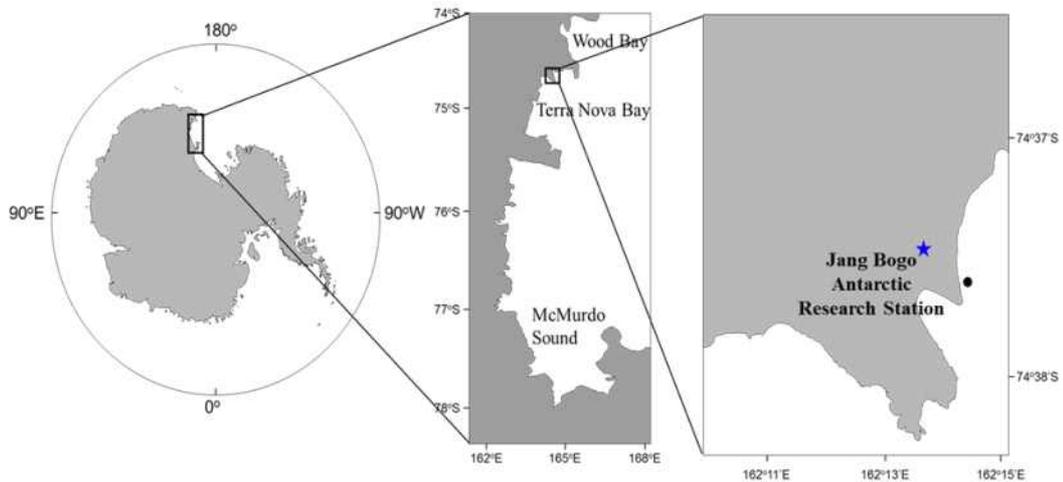


그림 1. Terra Nova Bay에 위치한 장보고기지 부두앞 연구 장소

- 장보고기지 건설 공사기간은 2012년 11월부터 2014년 3월이었으며, 이 기간 중 조사된 횟수는 2회(2012년 1월과 2014년 2월)로 매우 한정된 장소의 영상자료만 존재하였다.
- 군집 구조 분석을 위한 방형구 크기는 넓은 면적을 측정하여 군집 전체를 대표할 수 있게 1×1m로 설정하였다(그림 2).

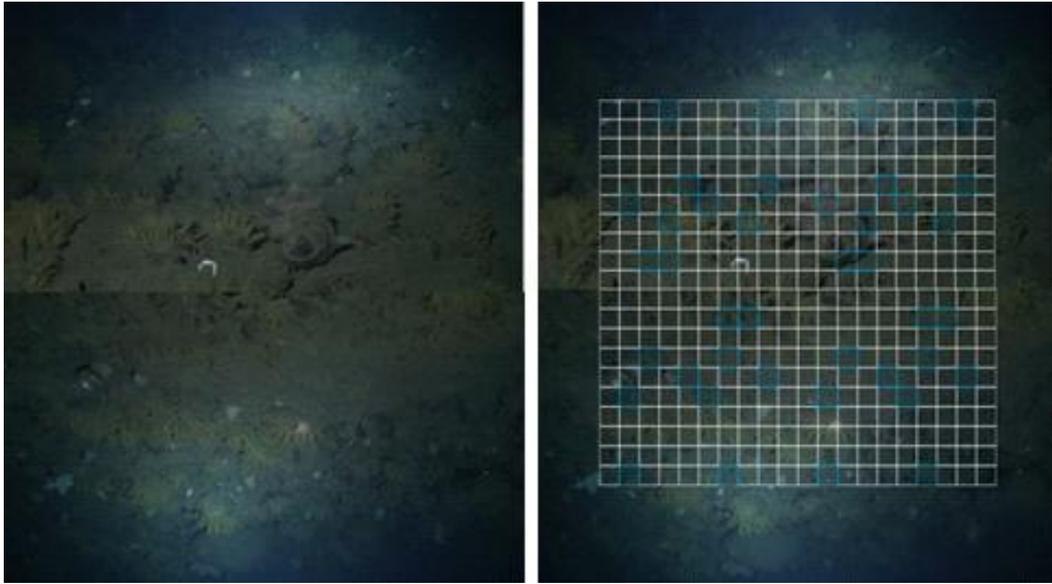


그림 2. 현장에서 촬영된 영상자료에 1×1m의 방형구를 설치하여 피도를 측정한 방법



그림 3. 장보고기지 주변 연안생태계 군집 연구를 위해 장보고기지 부두앞 해역에서 scuba diving 조사를 실시하는 연구원의 모습

- 기존에 촬영된 자료 중에서 2014년 2월에 촬영된 영상자료는 매우 제한적이었으며, 제한적인 자료를 활용하기 위하여 0.5×1m의 방형구를 이용하여 분석을 실시하였다(그림 4).

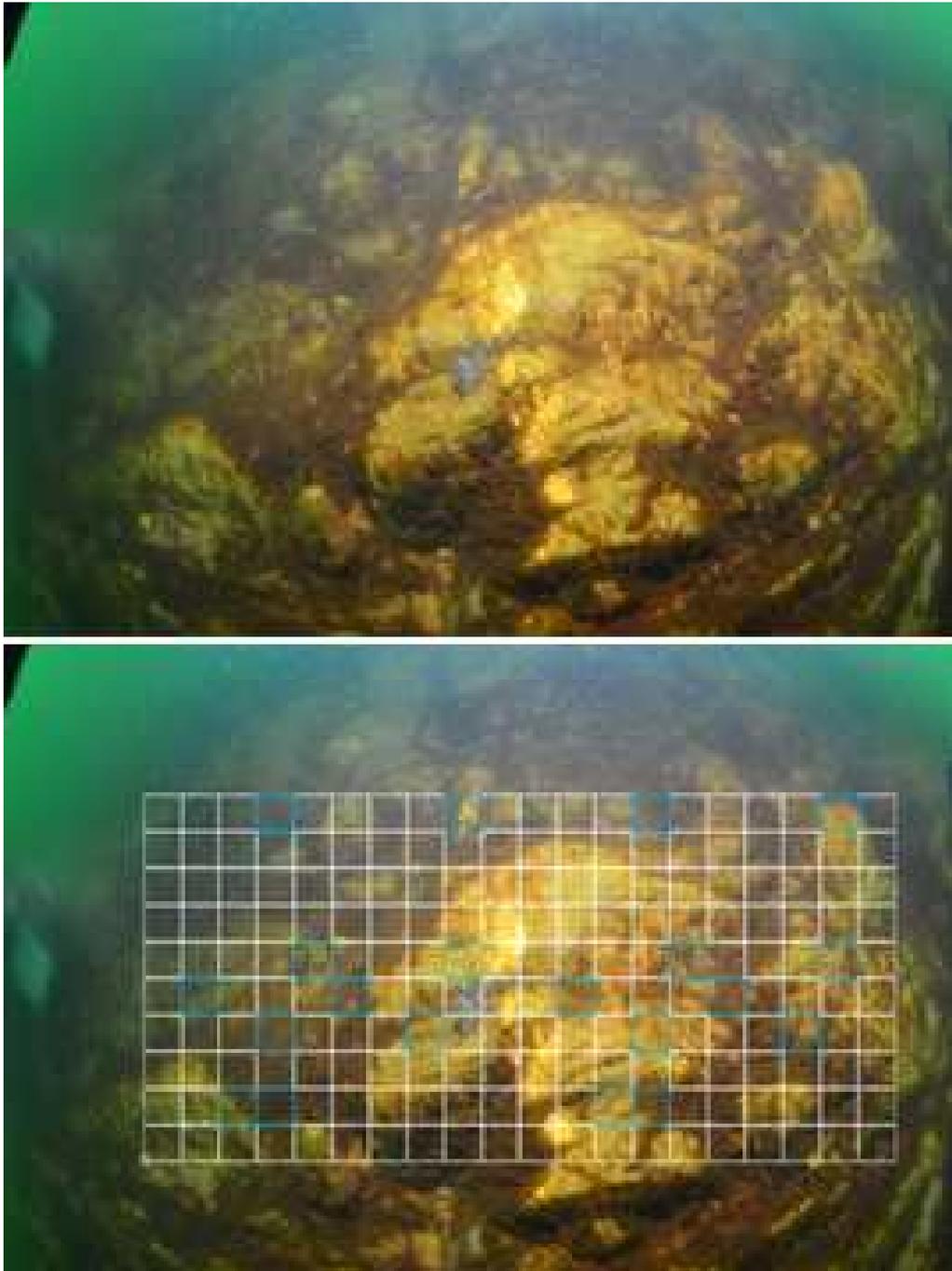


그림 4. 2014년 2월에 부두앞에서 촬영된 영상자료에 0.5×1.0m의 방형구를 설치하여 피도를 측정하는 방법

- 그러나, 2015년부터 2017년은 3개의 transect line을 설치하여 군집 전체를 대표할 수 있게 넓은 범위를 비교적 자세하게 촬영하였다(그림 5).
- 방형구 수는 통계분석이 가능한 5개 이상을 유지하였으며, 2015년부터 2017년은 각 line당 4개의 방형구를 유지하였다.

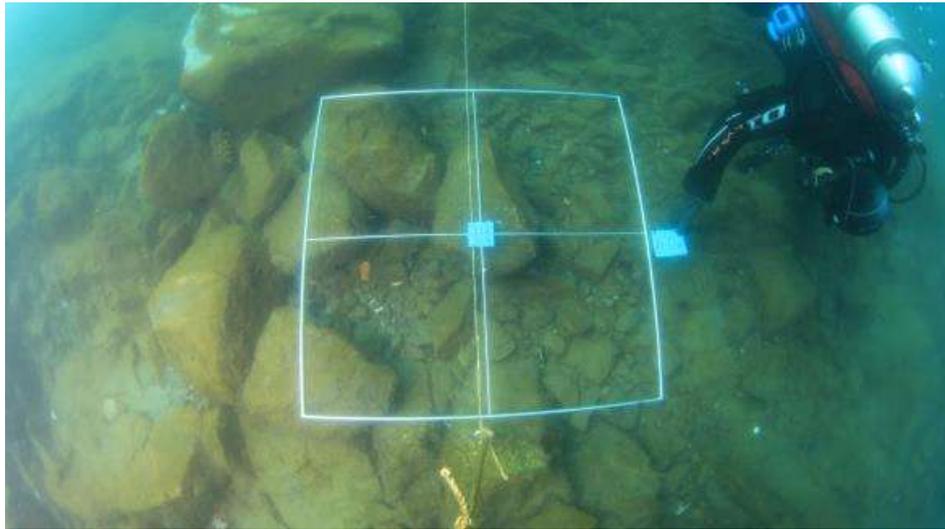


그림 5. Transect line에 1×1m의 방형구를 설치하여 촬영된 영상 자료

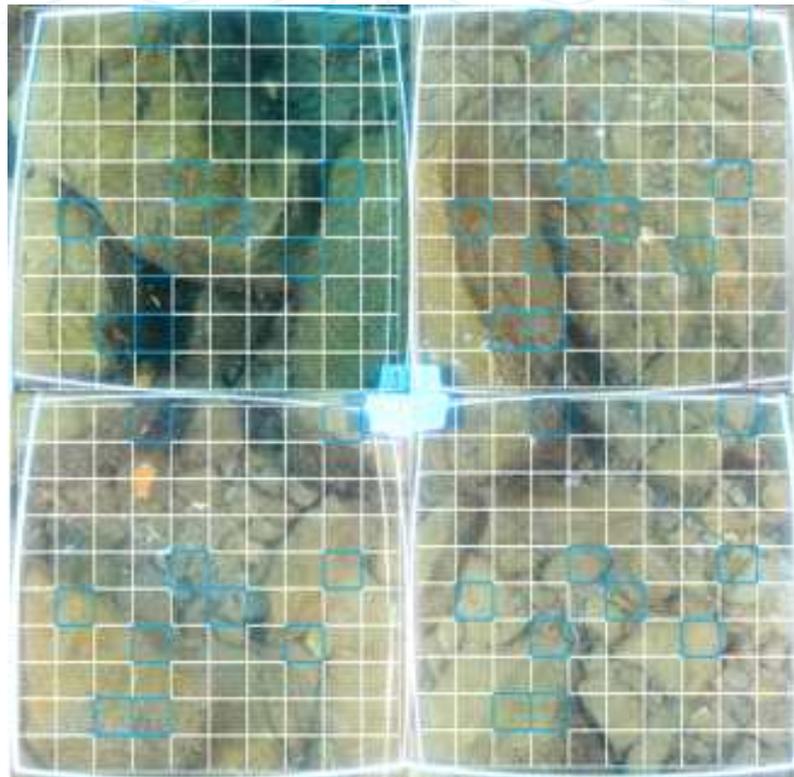


그림 6. 촬영된 영상 자료를 바탕으로 4개의 50×50cm 방형구에 100개의 소격자의 방형구를 설치한 모습

2. 기존 영상자료 분석 및 군집 생태 지수 평가

- 장보고기지 주변 연안생태계 군집 구조 분석을 위해 기존 영상자료에서 취수구와 부두앞을 연구 장소로 선정하여 자료를 추출하였다.
- 영상자료에서 방형구를 설치하여 군집 구조 파악 및 생태 지수 평가를 실시하였다.
- 부두앞은 0.5×1m(소격자 200개)와 1×1m 크기의 방형구를 영상자료의 상태에 따라서 사용하였다.
- 특히 2015년부터 2017년까지 부두앞은 30m의 transect line을 3개 설치하여 5m 간격으로 방형구를 설치하여 측정하였다.
- 촬영된 이미지 자료는 이미지 프로그램(Image J)과 visual estimation method (Dethier et al. 1993, Kim et al. 2014)을 이용해 대상 생물의 피도를 측정하고, Primer program을 이용하여 집괴분석(cluster analysis)과 다차원배열분석(Multidimensional analysis)을 수행하였다.
- 영상자료를 바탕으로 측정된 군집 자료를 바탕으로 장보고기지 주변 연안생태계 군집 구조 분석을 위해 다양한 생태 지수인 다양도 지수 H', 풍부도 지수 R, 우점도 지수 D 및 균등도 지수 J를 평가하였다.

$$H' = -\sum P_i \times \log P_i$$
$$R = \frac{S-1}{\ln(N)},$$

$$D = \frac{\sum_{i=1}^s n_i(n_i - 1)}{N(N-1)},$$

$$J = \frac{H'}{\log S}$$

S: 총 출현종수, Pi: 전체 개체수(N)에서 i번째 종이 차지하는 비율 (ni/N),

ni: i번째 종의 개체수, N: 총 개체수

- 장보고기지 주변 해역 저서생물군집 구조 파악을 위해 조사된 장보고기지 주변 해역의 저서생물은 총 26종이었으며, 이는 3종의 해조류와 23종의 무척추동물로 나눌 수 있었다(표 1).

표 1. 장보고기지 주변 해역 부두앞에서 관찰된 종 목록

Taxa	
Porifera	Cnidaria
<i>Dendrilla antarctica</i> Topsent, 1905	<i>Urticinopsis antarctica</i> (Verrill, 1922)
<i>Isodictya setifera</i> (Topsent, 1901)	<i>Alcyonium antarcticum</i> Wright & Studer, 1889
<i>Homaxinella balfourensis</i> (Ridley & Dendy, 1886)	<i>Clavularia frankliniana</i> Roule, 1902
<i>Haliclona tenella</i> (Lendenfeld, 1887)	<i>Hydractinia</i> sp.
<i>Polymastia invaginata</i> Kirkpatrick, 1907	<i>Diplulmaris antarctica</i> Maas, 1908
<i>Sphaerotylus antarcticus</i> Kirkpatrick, 1907	Mollusca
<i>Inflatella belli</i> (Kirkpatrick, 1907)	<i>Laternula elliptica</i> (P. P. King, 1832)
Nemertea	<i>Neobuccinum eatoni</i> (E. A. Smith, 1875)
<i>Parborlasia corrugatus</i> (McIntosh, 1876)	<i>Tritoniella belli</i> Eliot, 1907
Echinodermata	Annelida
<i>Odontaster validus</i> Koehler, 1906	<i>Metalaeospira pixelli</i> (Harris, 1969)
<i>Diplasterias brucei</i> (Koehler, 1907)	Ochrophyta
<i>Acodontaster hodgsoni</i> (Bell, 1908)	<i>Fragilariopsis</i> spp.
<i>Ophiosparte gigas</i> Koehler, 1922	Unknown spp.
<i>Sterechinus neumayeri</i> (Meissner, 1900)	Rhodophyta
Arthropoda	Crustose coralline algae
<i>Ammonothea clausi</i> Pfeffer, 1889	<i>Iridaea cordata</i> (Turner) Bory de Saint-Vincent, 1826

- 이번 연구에서 장보고기지 주변 해역 부두앞에서 출현한 대표적인 우점종은 *Sphaerotylus antarcticus*, *Clavularia frankliniana*, *Hydractinia* sp., *Fragilariopsis* spp., *Iridaea cordata*, *Alcyonium antarcticum*, *Metalaeospira pixell*로 확인되었다(그림 7-1, 7-2).

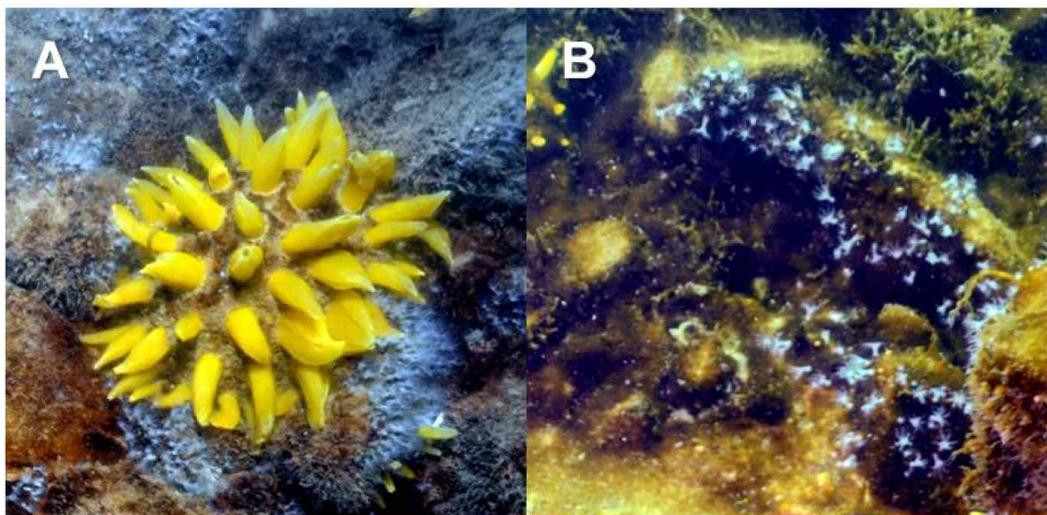


그림 7-1. 연구 장소에서 관찰된 대표적인 우점 종. (A) *Sphaerotylus antarcticus*, (B) *Clavularia frankliniana*.

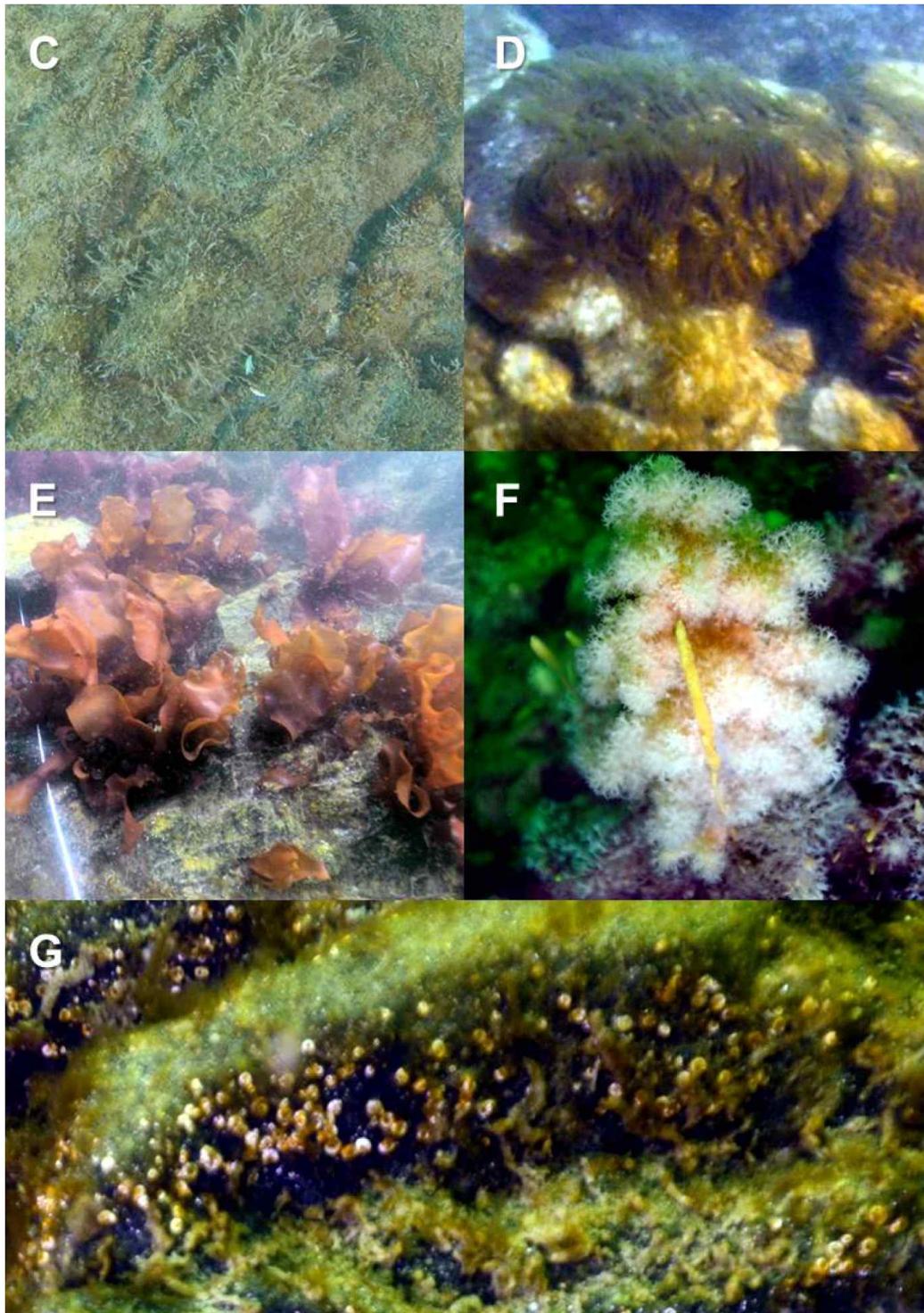


그림 7-2. 연구 장소에서 관찰된 대표적인 우점 종. (C) *Hydractinia* sp., (D) *Fragilariopsis* spp., (E) *Iridaea cordata*, (F) *Alcyonium antarcticum*, (G) *Metalaeospira pixell*.

- 장보고기지 주변 해역 부두앞의 저서생물군집의 제생태지수 중 풍부도는 점점 증가하는 것으로 나타났다(그림 8A).
- 균등도와 종다양성 지수는 2014년 낮고 2015-2018년은 상대적으로 높은 경향을 보였다(그림 8B, C).
- 2014년에 균등도와 종다양성 지수가 낮게 관찰되었고 2015년 이후 증가한 것은 2014년 규조류의 우점으로 인해 저서생물의 피도가 매우 낮게 나타난 것과 연관된다.
- 따라서 2014년에 우점도 지수는 다른 연도에 비해 상대적으로 높게 관찰되었으며, 2015년 이후에는 규조류의 피도가 낮아지면서 우점도가 다시 낮게 나타났다(그림 8D).

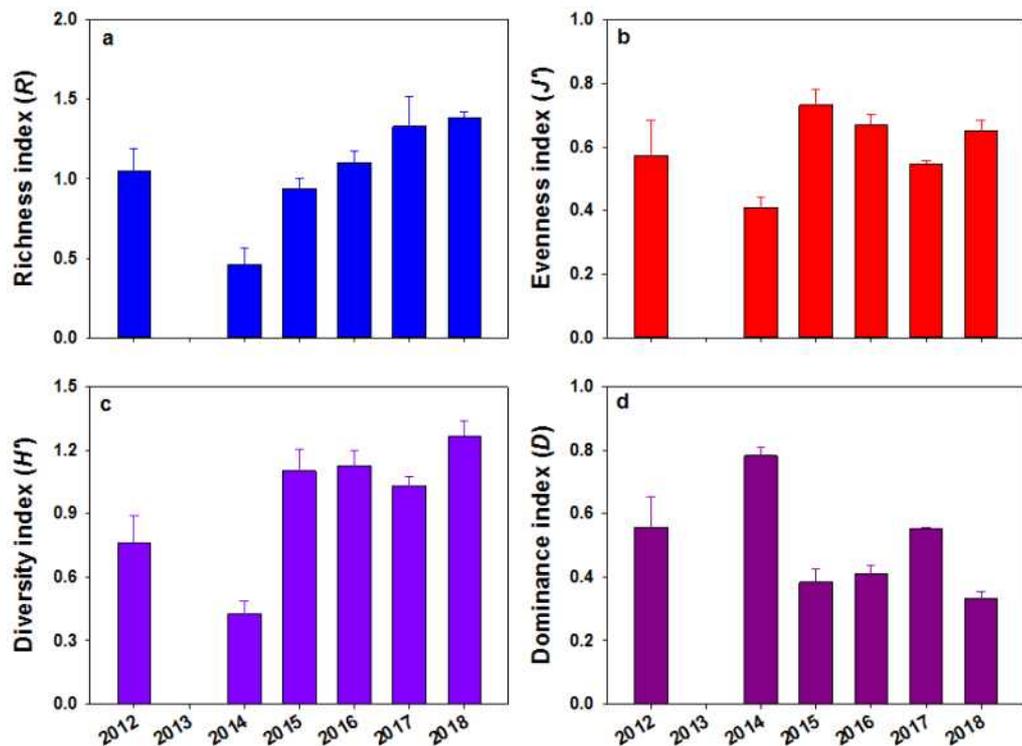


그림 8. 장보고기지 주변 해역 부두앞에서 측정된 저서생물군집의 제생태지수. 풍부도 지수(A), 균등도 지수(B), 종다양성 지수(C), 우점도 지수(D)

3. 교란 요인에 대한 군집 반응 패턴 규명

- 남극의 군집에 영향을 미치는 주요 환경은 유빙과 같은 물리적 요인과 고농도의 영양염을 포함한 생활하수의 배출과 같은 인위적 요인으로 나눌 수 있다.
- 장보고 기지에서 매년 바다로 직접 방류하고 있는 배출수의 양이 20톤으로 많지 않지만, 남극 해역이 상대적으로 오염원이 적은 청정지역이고 2014년 6월부터 2015년 9월까지 배출된 하수의 질소농도가 평균 $1450\mu\text{M}$ 임을 감안할 때, 장보고 기지 주변 해역의 주요 생물에 영향을 미쳐 군집 구조의 변동을 일으킬 수 있다.
- 따라서, 본 연구에서는 2017년 2월 측정된 유빙직후 군집을 촬영한 해역을 중심으로 지속적으로 관찰하여 교란 후 군집의 회복 양상을 관찰하며, 교란 이후의 회복 양상에 대해서 연구하고자 한다.
- 장보고기지에서는 부두 주변의 연안으로부터 해수를 취수하여 담수화하여 생활용수로 사용하고 있으며, 생활하수는 다시 부두 주변으로 배출되고 있다(그림 9).
- 그러므로 장보고기지 부두 주변 해역은 연안의 군집 구조에 대한 생활하수(높은 영양염을 포함)의 효과를 관찰할 수 있는 좋은 장소로 기대된다.



그림 9. 장보고 기지의 생활용수 공급을 위한 취수시설

- 본 과제에서는 유빙 및 생활 하수가 군집 구조 변동의 주요 원인이라는 가설 하에 주요 생물의 분포, 변동성 파악 및 주요 환경 자료와의 상관성 분석을 시도하였다.
- 교란 현상에 대한 탄성력 및 회복 양상에 대한 분석은 동일한 실험구를 반복적으로 측정하는 반복측정분산분석(repeated measured ANOVA)을 통해 교란의 시·공간적 영향을 분석하며, 해양 생물의 회복 능력을 평가하고자 한다.
- 이들 자료를 토대로 교란 현상에 반응하는 군집 구조에 대한 개념적인 모델 작성하였다(그림 10).

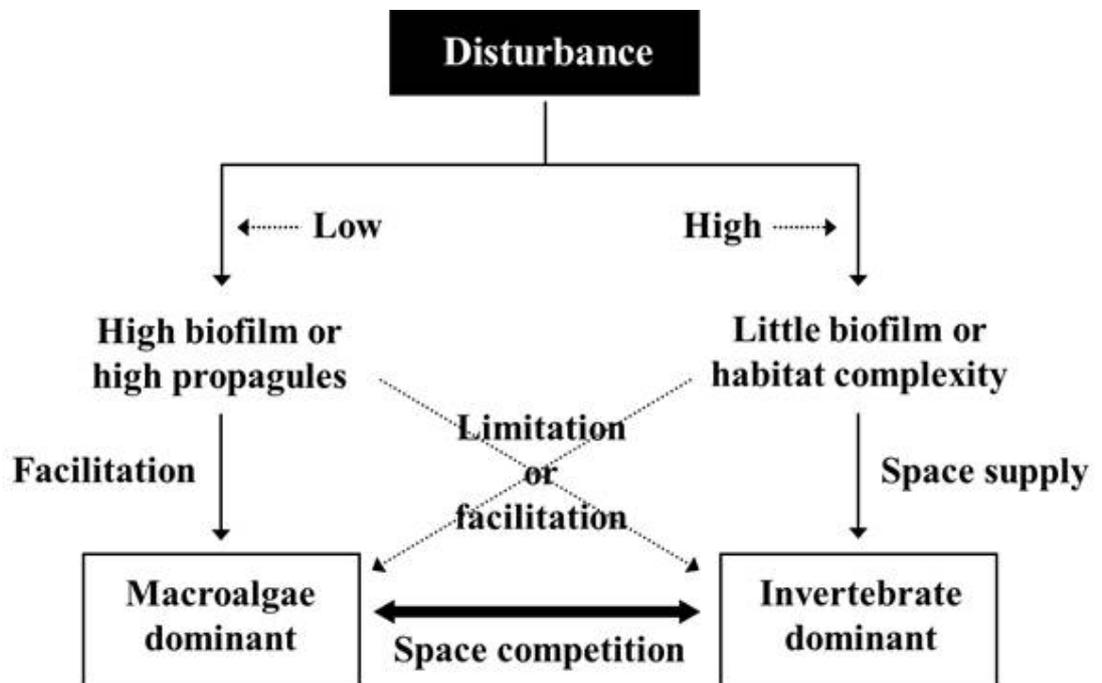


그림 10. 교란에 의한 해양생물 군집 구조의 변동 양상 분석

- 극지방에서 진행된 대부분의 연구는 연구정점에 접근성이 용이하지 못해, 여러 정점에서 자료를 얻지 못하고 한 정점에서만 자료를 획득하여 Pseudoreplicaton의 오류를 범할 수 있다.
- 이러한 문제점을 해결하기 위해서 한 정점에서 교란전과 후의 자료의 양과 패턴을 이용해 교란 현상이 자료에 미치는 영향을 추출할 수 있는 시계열 횡단면 분석 방법(Time Series Cross Section Analysis)을 적용하여 교란 인자를 추출할 예정이다(그림 11).

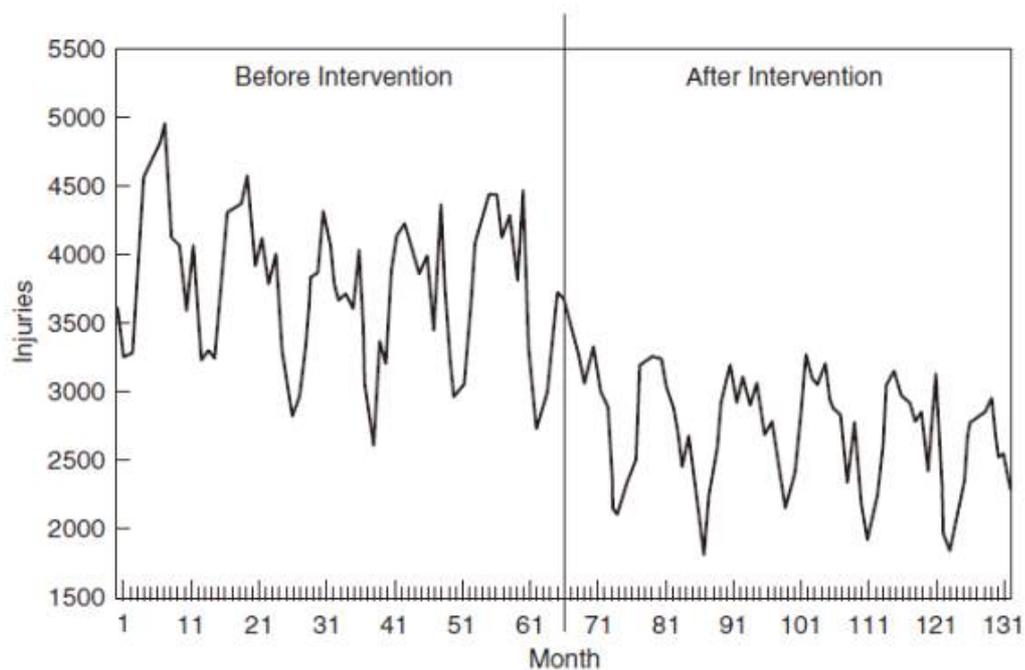


그림 11. 시계열 횡단면 분석 방법(Time Series Cross Section Analysis)을 이용한 안전벨트 의무규정 시행 전과 후에 교통사고 사상자 수의 변화 연구 사례

제 2 절 장보고기지 주요 해양생물 개체군 변동 분석

1. 개체군 변동 양상 자료 분석 및 수집

- 2018년 2-3월 및 2019년 2-3월 장보고기지를 방문하였으며, 남극가리비 개체군의 자료 수집을 위하여 scuba diving을 통한 가리비 개체군의 시료 확보를 실시하였다.
- 본 연구팀의 연구원은 2018년 남극 장보고기지 하계 연구대원으로 조사에 참여하였으며, 방문 연구 시점에 이상기후로 인하여 기지 주변 해역이 모두 유빙으로 덮여 조사를 진행하기에 어려움이 있었다(그림 12).
- Scuba diving 조사를 실시하기 위하여 장보고기지 월동대로부터 중장비의 지원을 받아 연구를 진행하였다(그림 13).
- 2018년 남극 장보고기지 하계대 조사 연구에서는 2018년 3월 8일 3개체, 2018년 3월 11일 57개체의 남극가리비를 채집하여 총 60개체의 남극가리비를 확보하였다.



그림 12. 2018년 3월 장보고기지 부두앞 해역을 덮은 유빙의 모습



그림 13. 2018년 3월 장보고기지 부두앞의 유빙으로 인해 월동대원으로부터 중장비 지원을 받고 있는 현장 모습



그림 14. 2018년 3월 장보고기지 부두앞에서 연구를 진행하는 모습



그림 15. 2018년 3월 장보고기지 주변 해역으로부터 채집된 남극가리비

- 2018년 장보고기지 부두앞 정점에서 채집된 남극 가리비는 총 61개체로 확인되었으며, 형태 분석을 통한 연령구조를 파악하기 위한 시료가 충분히 확보되지 않아 2019년 추가적인 시료 채집을 실시하였다.
- 본 연구팀의 연구원은 본 위탁과제의 일환으로 2019년 남극 장보고기지 하계 연구대원으로 조사에 참여하였으며, 2019년 하계 조사 시기에는 부두앞의 유빙에 의한 간섭이 적어 수차례에 걸친 scuba diving 조사활동을 실시할 수 있었다(그림 16).
- 2019년 남극 장보고기지 하계대 조사 연구에서는 2019년 2월 19일 123개체, 2019년 2월 21일 185개체, 2019년 3월 1일 20개체의 남극가리비를 채집하여 총 328개체의 남극가리비를 확보하였다.



그림 16. 2019년 3월 유빙이 빠져나간 장보고기지 부두앞의 모습



그림 17. 2019년 장보고기지 부두앞 해역의 scuba diving을 통한 연구모습



그림 18. 2019년 장보고기지 부두앞 연구정점에서 관찰된 남극가리비의 모습

- 기존의 연구계획으로 장보고기지 주변 해역의 남극가리비가 우점하는 정점에서 가리비 개체의 크기를 고려하여 무작위로 채집하여 가리비의 외부형태적 변이를 측정하고 각각의 개체에 고유의 번호를 부여한 후, 측정이 완료된 가리비 개체는 다시 방형구에 내 방류하고, 1년 후 재포획하여 개체군 변수 측정하고자 하고자 하였다.
- 그러나 장보고기지 주변 해역의 열악한 기후 조건 및 개체 확보의 어려움이 있었으며, 가리비의 패각이 매우 약하여 쉽게 손상되는 특징이 있어 무산되었으며, 채집 가능한 남극가리비를 전량 채집하여 연구에 이용하였다 (그림 19).



그림 19. 가리비 패각에 고유 번호를 표시하려는 행위로 인한 파손

- 따라서, 2018-2019년에 걸쳐 부두앞 포구에서 약 70m 떨어진 수심 25m에서 무작위로 채집된 남극가리비는 장보고기지에서 형태적 특성(각고)을 측정 한 후, 아라온호에 샘플을 선적하여 실험실로 운반하였다(그림 20).



그림 20. 장보고기지 주변 해역으로부터 연구를 위하여 채집된 남극가리비



그림 21. 장보고기지 주변 해역으로부터 채집된 남극가리비를 연구하는 모습

- 실험실로 운반된 가리비는 해동하여, 연체부를 분리하였으며 형태적인 특성 파악을 위하여 패각을 이용하여 각고, 각장, 각폭 등의 외부형질을 측정하였다(그림 22).



그림 22. 남극가리비를 이용하여 관찰한 형태적인 외부형질

- 외부형질 측정을 마친 가리비 패각은 5% NaOCl solution을 이용하여 패각 외부의 유기물을 제거하였으며, 96% ethanol을 이용하여 세척하고 다시 증류수로 행군 후 드라이오븐을 이용하여 60°C에서 12시간 이상 건조하였다(그림 23).



그림 23. 실험실로 운반된 남극가리비의 폐각 전처리 과정

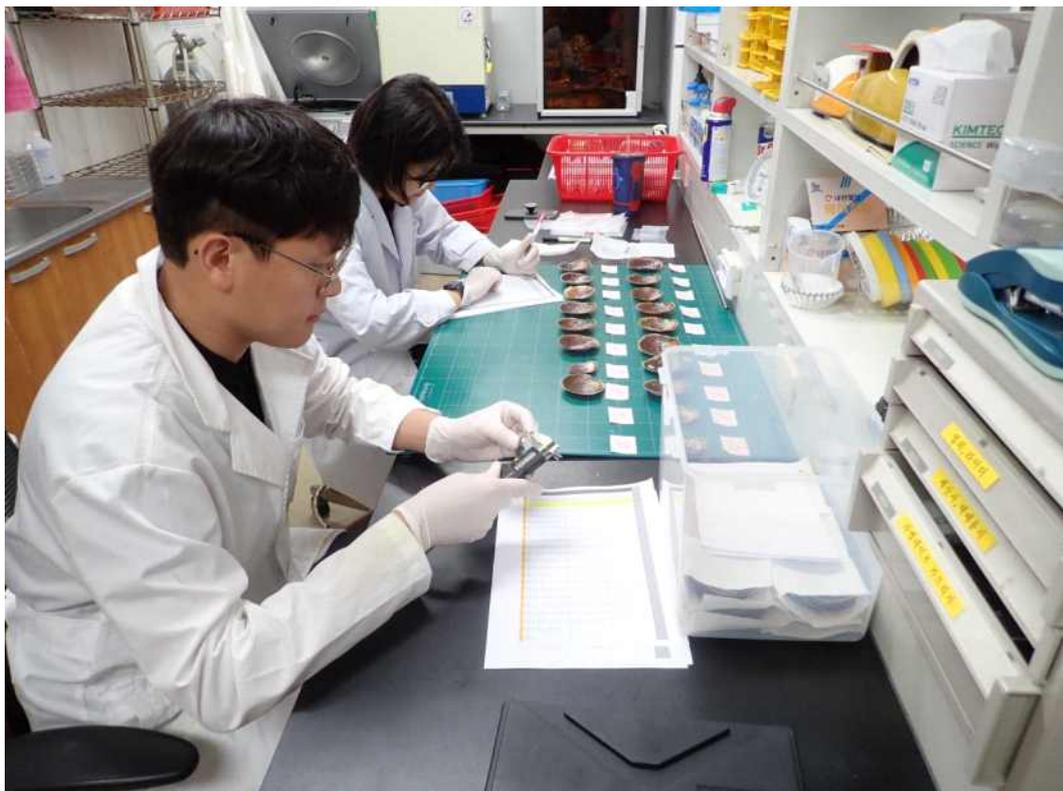


그림 24. 남극가리비의 폐각을 이용하여 연령을 측정하는 모습

- 전처리를 마친 남극가리비는 패각의 윤문을 이용하여 연령 측정을 실시하였다(그림 24).
- 2018년 채집된 남극가리비의 각고 측정 결과, 각고의 분포는 정규분포를 나타내지 않고, 어린 개체와 함께 60cm이상의 각고를 가지는 14년생 이상의 성체가 높은 비율을 차지하는 것으로 확인되었다(그림 25).
- 2018년에 채집된 남극가리비는 약 60개체로 각고를 기반으로 분석한 남극가리비의 연령이 약 20세에 이르는 것을 감안할 때, 각고를 연령별 인구통계표 분석을 위하여 추가적인 시료 확보가 필요하였다.

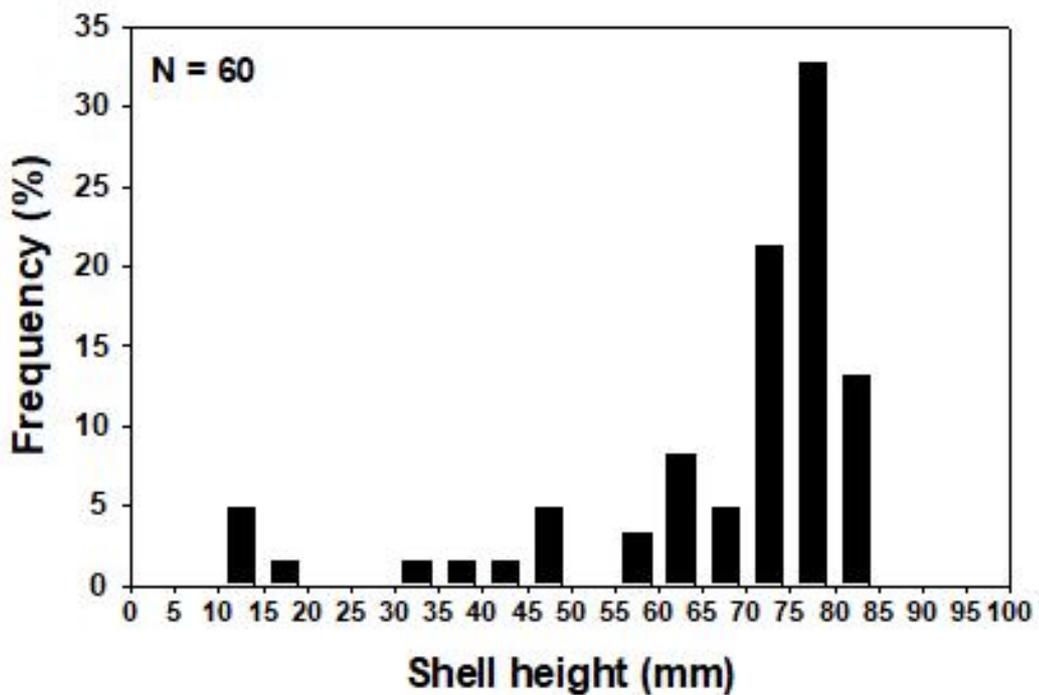


그림 25. 2018년 채집된 남극가리비 개체군의 각고의 빈도

- 따라서, 본 위탁과제 소속 연구원은 2019년 2월 하계 연구대로 남극 장보고 기지에 방문하여 추가적인 시료 확보를 위한 scuba diving을 실시하였으며, 이를 통하여 남극가리비 채집을 실시하였다.
- 2019년 장보고기지 부두앞 정점에서 채집된 남극 가리비는 총 328개체로 확인되었다.
- 2019년에 채집된 328개체의 남극가리비는 2018년 채집된 남극가리비 61개체와 함께 분석을 실시하였다.
- 2018년과 2019년에 걸쳐 채집된 남극가리비 389개체의 각고 측정 결과, 각고의 분포는 정규분포를 나타내지 않고, 60cm이상의 개체의 수가 높은 비

을 차지하는 것으로 확인되었다(그림 26).

- 가장 개체수가 많은 각고의 길이는 75-80cm이었으며, 각고가 긴 개체수가 전체 개체군에서 다수를 차지하였다(그림 26).

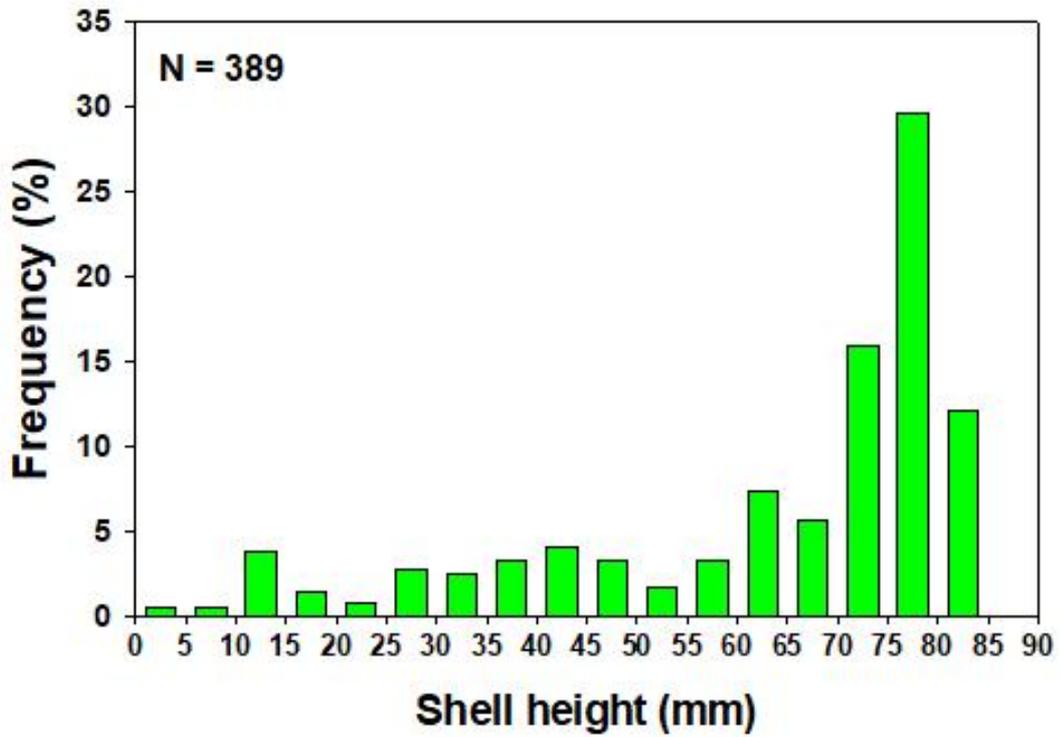


그림 26. 2018년과 2019년에 걸쳐 채집된 남극가리비 개체군의 각고의 빈도



그림 27. 크기별로 정리된 남극가리비 패각의 모습

2. 해양생물 인구통계표 작성

- 이번 연구에서 남극가리비 389개체의 율문 측정을 통하여 획득된 각고와 연령에 관한 자료를 von Bertalanffy growth function을 이용하여 Height-Age equation을 개발하였으며, 아래의 식과 같이 확인되었다.

$$\text{Height} = 106.76 \text{ mm} [1 - e^{-0.086(t+1.792)}]^{1.502}$$

- 장보고기지 주변 해역에서 관찰된 남극가리비의 각고는 연령 증가가 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 나이가 어린 시기에 성장이 더 빠르고 연령이 증가할수록 성장이 감소하는 것으로 확인되었다(그림 28).

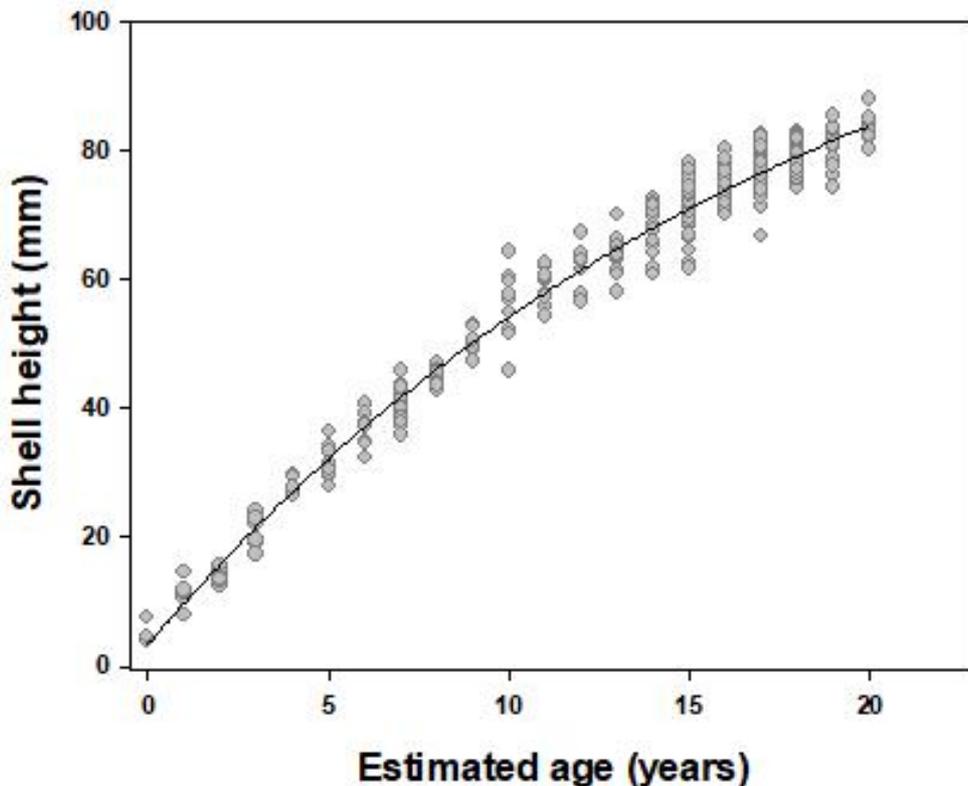


그림 28. 장보고기지 주변 해역 가리비로부터 측정된 von Bertalanffy growth function을 이용한 가리비 개체군의 각고와 연령과의 관계

- 장보고기지 주변 해역에서 관찰된 남극가리비의 von Bertalanffy growth function을 이용하여 Height-Age equation을 개발한 것과 같은 방법으로 연구된 Heilmayer et al. (2003)에 개발된 Height-Age equation과 상호 비교

를 실시하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$\text{Height} = 108.86 \text{ mm} [1 - e^{-0.114 (t+0.367)}]^{1.284}$$

- 이번 연구는 Heilmayer et al. (2003)과 유사한 성장식을 보였으나, 같은 연령에서 낮은 성장을 보인 것으로 나타났다(그림 29). 따라서 동일 연령에서 각고의 차이가 발생하였으며, 이번 연구가 Heilmayer et al. (2003)의 연구 결과보다 각고가 낮은 것으로 확인되었다(그림 29).

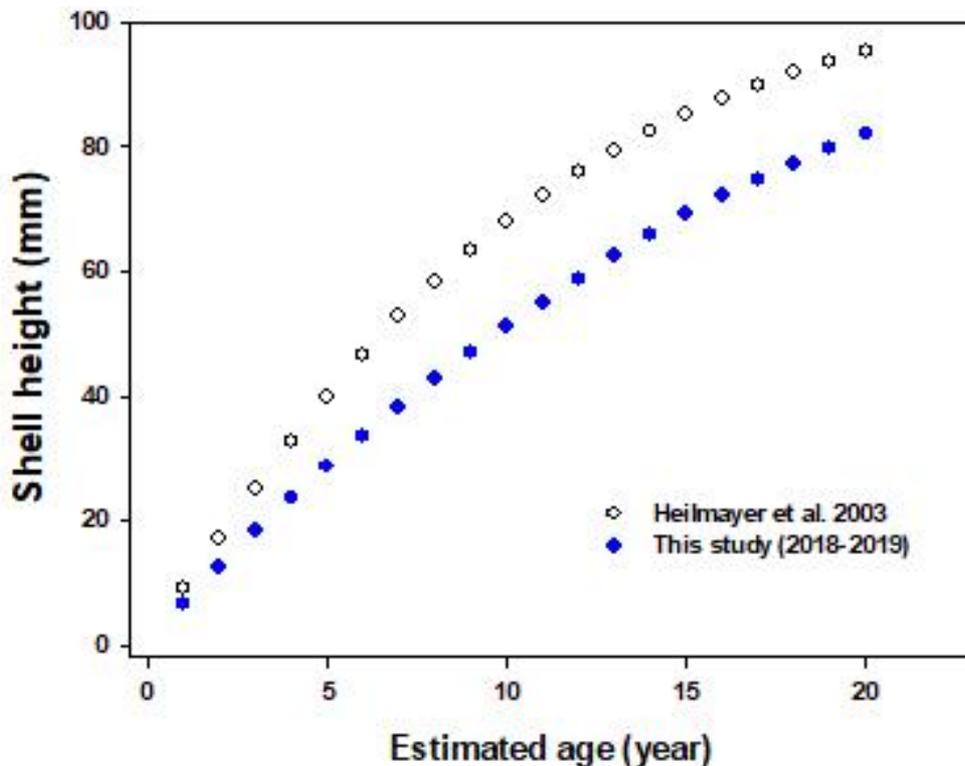


그림 29. Heilmayer et al. (2003)의 자료와 이번 연구의 Height-age equation 비교

- 장보고고기 주변 해역 가리비 연구 자료를 Heilmayer et al. (2003)에 제시된 성장식에 대입해서 추정된 연령과 실제 연령은 3-5년 정도의 차이를 보였으며, 추정된 연령에서는 17년 이상 된 개체는 관찰되지 않았으나 실제 연령은 20년생까지 관찰되었다(그림 30).

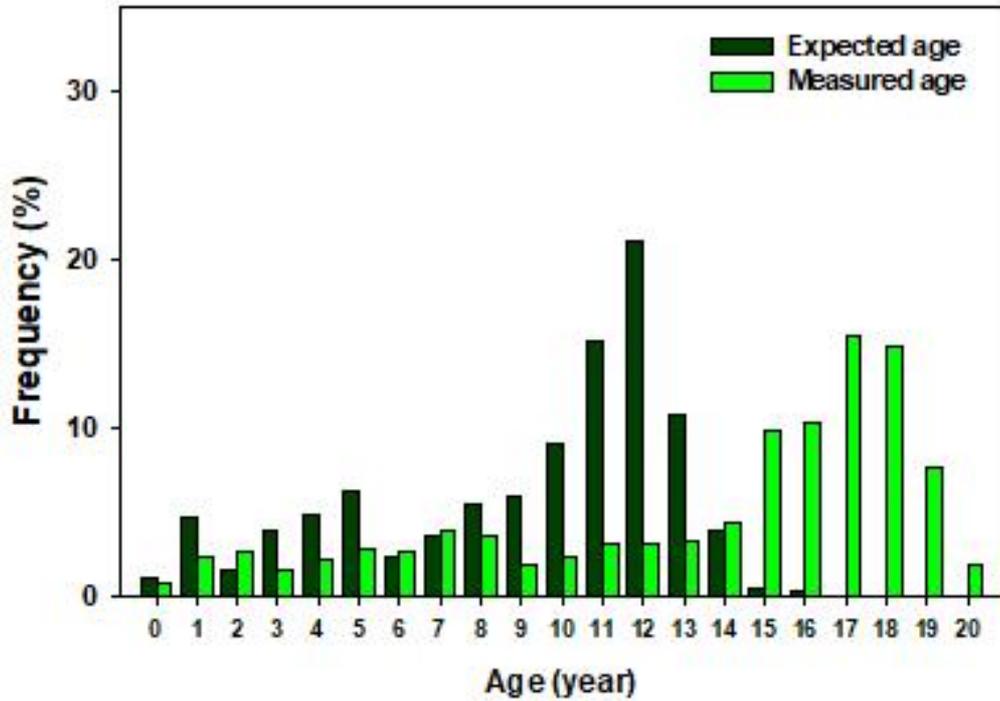


그림 30. 장보고기지 주변 해역 가리비 개체군 연령의 추정치와 실측치의 비교

- Heilmayer et al. (2003)의 연구 자료와 이번 연구 결과를 통해 획득된 연령별 성장률을 비교한 결과, 0-10년생의 성장률은 이전 연구에서 높게 관찰되었으며, 11년생은 두 자료가 동일하였다(그림 31). 그러나 12년생부터의 가리비 개체군 성장률은 이번 연구에서 더 높게 나타났다(그림 31).

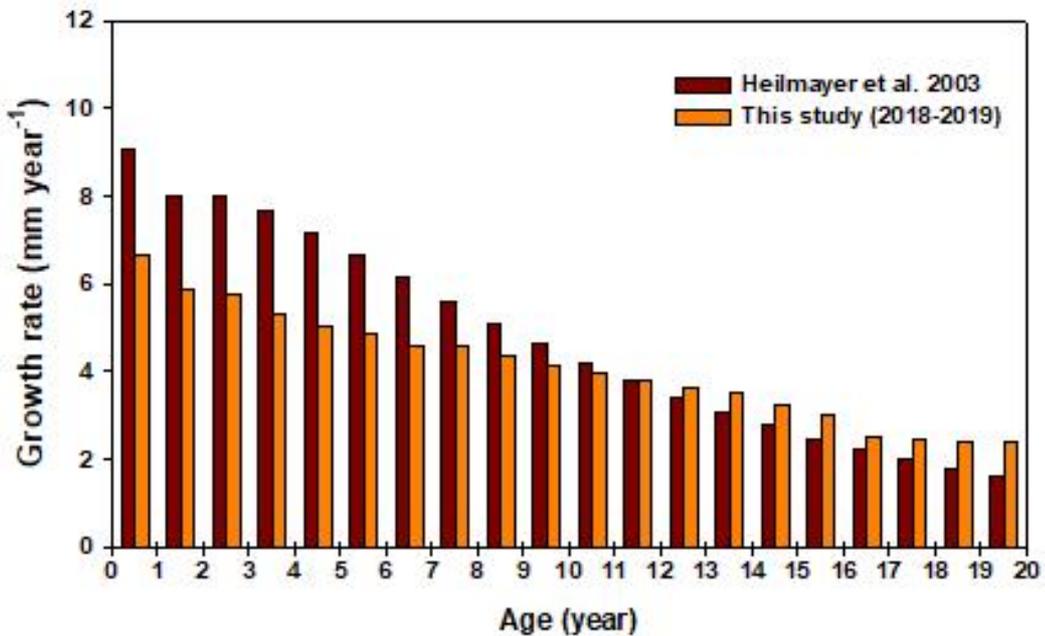


그림 31. 가리비 개체군 연령별 성장률의 추정치와 실측치의 비교

- 장보고기지 주변 해역의 남극가리비 연구 결과는 von Bertalanffy growth function을 이용하여 Height-Age equation을 개발한 기존의 다른 여러 연구 사례와 비교하여 성장률이 낮은 것으로 확인되었다(Ralph and Maxwell 1977; Stockton 1984; Berkman 1990; Pranovi et al. 1994; Heilmayer et al. 2003).
- 그러므로, 본 연구 결과는 기존에 연구된 남극가리비 연구결과와 비교하여 가리비 개체군의 성장률이 변화하고 있음을 의미한다.
- 특히, 가리비 개체군에서 어린 개체의 성장률의 감소는 전체 개체군의 생존율에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

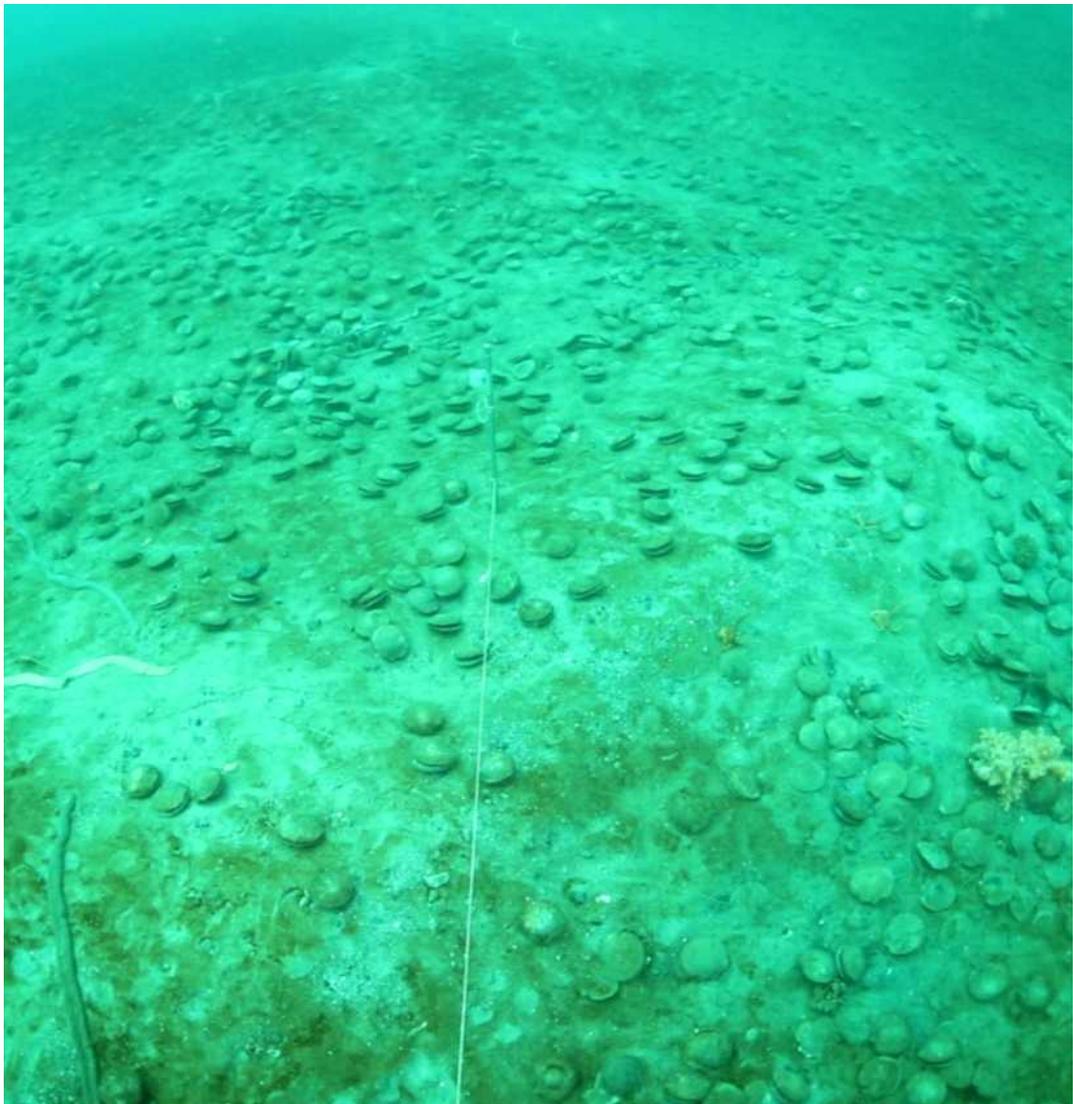


그림 32. 장보고기지 부두 앞 주변 해역에서 관찰된 대규모 남극가리비 개체군의 모습

제 3 절 장보고기지 해양생물 군집 구조의 변동 양상 파악

1. 군집 구조 변동 요인 분석 및 대조구 설정

- 장보고기지운영에 의한 주변 해역 내 해양생물군집의 영향을 조사하기 위해서 기지에 영향을 받지 않는 곤드와나 주변에 대조구를 설정하여 2019년에 조사를 실시하였다(그림 33).



그림 33. 곤드와나 해역에서 조사를 실시하는 모습

- 새로 설정된 대조구와 기존의 실험구 내 해양생물군집 구조는 매우 유사하며, 이는 장보고기지운영에 의한 실험구 내 군집구조의 변동을 연구하는데 매우 유용할 것으로 사료된다(표 2).

표 2. 장보고기지 주변 해역의 부두 앞과 곤드와나 내 대조구에서 관찰된 종 목록. C=피도, RC=상대피도

Species	Treatment		Control	
	C	RC	C	RC
Porifera				
<i>Sphaerotylus antarcticus</i>	2.7 ± 0.9	3.4 ± 1.2	0.2 ± 0.1	0.5 ± 0.3
Cnidaria				
<i>Hydractinia</i> sp.	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.1		
Echinodermata				
<i>Odontaster validus</i>	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1	1.7 ± 0.1	4.2 ± 0.2
<i>Diplasterias brucei</i>	+	+	+	+
<i>Sterechinus neumayeri</i>			0.7 ± 0.0	1.7 ± 0.1
Ochrophyta				
<i>Fragilariopsis</i> spp.	80.7 ± 4.4	94.9 ± 1.0	32.4 ± 2.9	77.6 ± 3.9
Rhodophyta				
Crust coralline algae	0.5 ± 0.1	0.7 ± 0.2	3.5 ± 2.3	8.5 ± 5.8
<i>Iridaea cordata</i>	0.6 ± 0.5	0.8 ± 0.6	3.2 ± 0.8	7.5 ± 1.5
Total coverage (%)	84.8 ± 4.0	100.0 ± 0.0	41.6 ± 1.6	100.0 ± 0.0
Total number of species	7		7	
Sediment	9.3 ± 0.4		8.9 ± 1.2	

- 장보고기지 주변 해역의 취수구와 부두앞에서 조사된 저서생물 중 *Fragilariopsis* spp.(규조류)가 우점하는 것으로 나타났으며, *Sphaerotylus antarcticus*(해면류), *Clavularia frankliniana*(산호류), *Metalaeospira pixelli*(환형동물), *Parborlasia corrugatus*(끈벌레류), *Iridaea cordata*(홍조류)가 공통적으로 관찰되었다(표 3).
- 또한, 부두앞에서 관찰된 저서생물의 종수와 피도는 매년 증가하는 것으로 나타났다(표 3).

표 3. 장보고기지 주변 해역의 부두앞에서 관찰된 종 목록. C=피도, RC=상대피도

Species	2012		2014		2015		2016		2017		2018		
	C	RC											
Porifera													
<i>Dendrilla antarctica</i>												+	+
<i>Homaxinella balfourensis</i>							+	+	+	+	1.0	1.2	
<i>Polymastia invaginata</i>	1.6	5.7							1.0	1.3	3.6	4.2	
<i>Sphaerotylus antarcticus</i>	21.6	76.9	3.8	5.3	3.3	7.6	3.6	6.5	2.3	2.8	18.8	21.8	
<i>Inflatella belli</i>									+	+			
Cnidaria													
<i>Alcyonium antarcticum</i>	+	1.1			+	1.6	+	+	+	+	+	+	
<i>Clavularia frankliniana</i>			+	+	3.6	7.2	4.1	7.4	+	+	22.7	26.3	
<i>Hydractinia</i> sp.					19.7	39.2	24.2	45.3	24.3	30.0			
Mollusca													
<i>Laternula elliptica</i>	2.2	7.8			+	+			1.1	1.4	+	+	
<i>Neobuccinum eatoni</i>									+	+			
<i>Tritoniella belli</i>									+	+			
Nemertea													
<i>Parborlasia corrugatus</i>									+	+			
Annelida													
<i>Metalaeospira pixelli</i>			1.6	2.3	+	+	2.9	6.0	2.2	2.7			
Echinodermata													
<i>Odontaster validus</i>	1.2	4.3	+	+	+	+					+	+	
<i>Diplasterias brucei</i>	+	1.8			+	+					+	+	
<i>Acodontaster hodgsoni</i>									+	+			
<i>Ophiosparte gigas</i>	+	+			+	+	+	+	+	1.1	+	+	
<i>Sterechinus neumayeri</i>									+	+	+	+	
Ochrophyta													
<i>Fragilariopsis</i> spp.			62.4	87.4	20.9	41.4	14.6	28.0	47.6	58.6	38.4	44.4	
Rhodophyta													
<i>Iridaea cordata</i>	+	2.1	2.6	3.2	1.6	3.1	3.3	6.1	+	+			
Total coverage (%)	28.1		71.6		50.4		53.2		81.1		86.5		
Total number of species	8		6		11		9		17		12		
Sediment	57.4		0.0		0.0		+		0.0		11.8		

+ indicates that coverage is less than 1%

- 2012년부터 2018년까지 조사된 저서생물군집자료를 집괴분석(cluster analysis)과 다차원배열분석(Multidimensional analysis)을 이용해서 분석을 진행한 결과, 저서생물군집은 조사년도에 의해 크게 네 그룹(A, B, C, D)으로 나눌 수 있었다(그림 34).
- 장보고 기지 건설에 의해 영향을 받은 2012년(A 그룹), 기지 완공직전의 2014년(C 그룹), 공사완료 후 2015-2017년(D 그룹) 그리고 2018년(B 그룹)으로 나눌 수 있으며, 이는 기지 건설로 인해 발생한 교란 현상 후, 점차적으로 저서생물군집이 안정화되는 것으로 사료된다(그림 34).

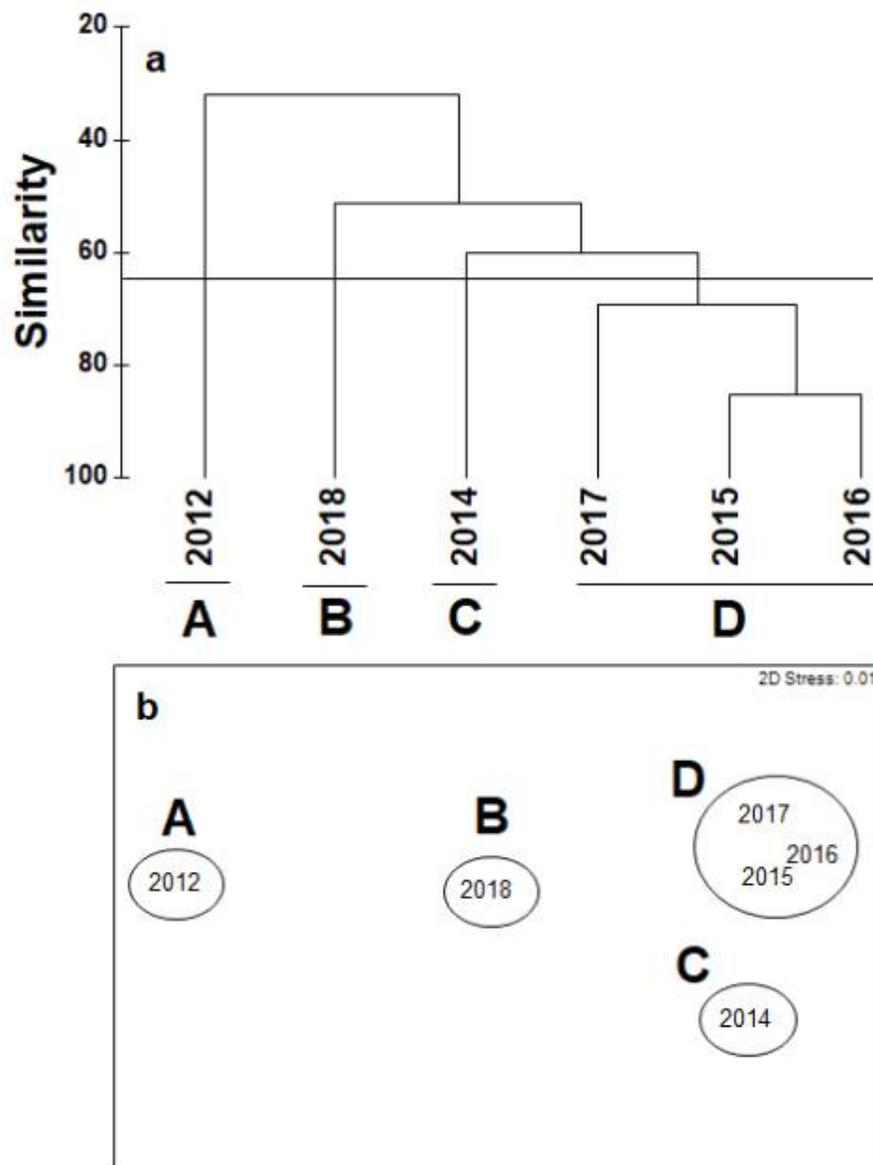


그림 34. 집괴분석(cluster analysis, a)과 다차원배열분석(Multidimensional analysis, b)을 이용한 장보고기지 주변 해역 부두앞에서 저서생물군집 구조

- 장보고기지 부두앞에서 관찰된 해양생물군집의 회복양상은 다음과 같이 개념모델로 정리할 수 있다(그림 35).

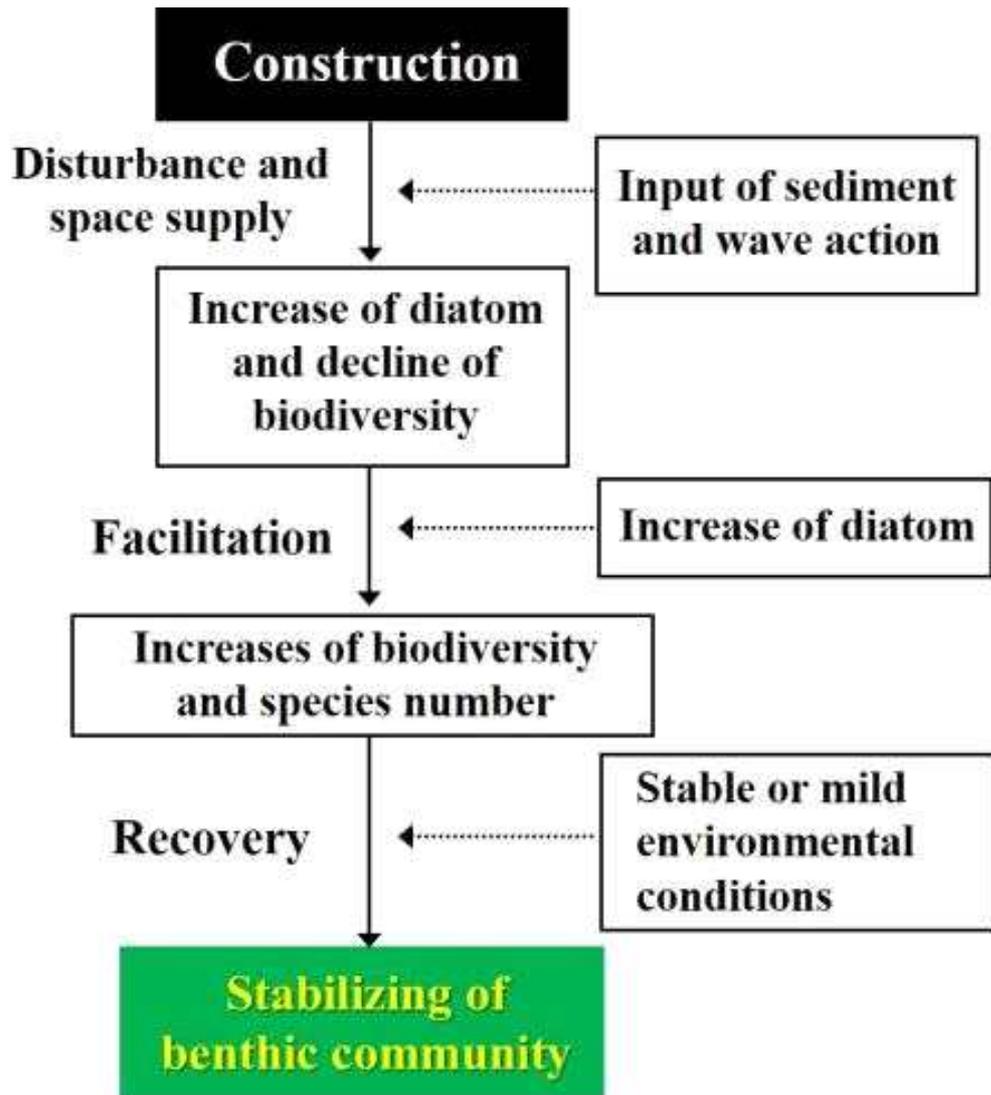


그림 35. 장보고기지 부두앞 해양생물군집의 회복양상에 대한 개념모델

- 기지 건설 중 유출된 퇴적물과 태풍에 의한 강한 파도는 종다양성을 감소시키고 새로운 개체를 위한 공간을 생성한다. 생성된 공간에 일차적으로 규조류가 착생하고, 이는 다른 종의 천이에 영향을 끼쳐 종다양성을 증가시킨다. 이후 환경조건이 안정되거나 온화할 경우, 해양생물군집의 회복이 완성된다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 평가의 착안점

년도	성과목표	세부목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
1차년도 (2017)	주요 해양생물의 개체군 변동 자료 수집, 장기생태계 연구 기반 분석틀 확립 및 다양한 교란 인자에 의한 군집 구조의 변동 양상 파악	○ 연구기반 분석틀 확립	6	1. 기초 분석 및 해석 능력 2. 자료의 표준화 여부 3. 군집 구조 및 생태지수 자료
		○ 군집 생태 지수 평가	15	
		○ 교란 요인에 대한 군집 반응 패턴 규명에 관한 실험디자인	9	
2차년도 (2018)		○ 개체군 변동 양상 자료 수집 및 분석	15	1. 가리비 개체군 형태적 특성 자료 2. 기존 자료를 활용한 연령 추 정식 개발 3. 연령별 성장률 추정
		○ 해양생물 인구통계표 작성	15	
3차년도 (2019)		○ 군집 구조 변동 양상 파악	40	1. 대조구 설정 여부 2. 집괴분석 및 다차원배열분석 3. 개념모델 작성 여부

제 2 절 연구개발목표 달성을 위한 연구수행 방법

성과목표	세부목표	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
주요 해양생물의 개체군 변동 자료 수집, 장기생태계 연구 기반 분석틀 확립 및 다양한 교란 인자에 의한 군집 구조의 변동 양상 파악	○ 연구기반 분석틀 확립	1. 표준화된 영상 분석	기존 영상 자료에 방향구를 이용한 해양생물의 피도 및 리스트 작성
	○ 군집 생태 지수 평가	2. 군집생태학적 접근	다양도, 우점도, 균등도 및 풍부도 지수 측정
	○ 교란 요인에 대한 군집 반응 패턴 규명에 관한 실험디자인	3. 가설 설정 및 실험 디자인	인위적, 자연적 교란 요인 설정
	○ 개체군 변동 양상 자료 수집 및 분석	4. 형태적 특성 파악	각고 및 운문 파악을 통한 가리비개체군 자료 수집
	○ 해양생물 인구통계표 작성	5. 인구통계학적 분석	기존 자료를 활용하여 가리비 연령을 추정할 수 있는 Height-Age equation 개발
	○ 군집 구조의 변동 양상 파악	6. 다변량 통계 분석 7. 생태학적 개념 모델 작성	집괴분석과 다차원배열분석 시행 해양생물군집 회복양상에 대한 개념모델을 수립

제 3 절 연구개발목표의 달성도

성과목표	세부목표	달성 주요내용	달성도(%)	
장보고기지 기반 주요 해양생물의 개체군 변동 자료 수집, 장기생태계 연구 기반 분석틀 확립 및 다양한 교란 인자에 의한 군집 구조의 변동 양상 파악	1-1	장기생태계 연구 기반 분석틀 확립	<ul style="list-style-type: none"> - 장보고기지 주변 해역에서 수집된 영상 자료를 기준으로 장기 생태모니터링 장소 선정 (부두 앞) - 군집구조의 대표성을 확보하기 위해서 방형구 크기를 1×1m로 설정 - 2012년과 2014년에 반복 측정 2회. 2015년~2017년에 3개의 transect line을 설치하여 일정한 간격에서 사진 촬영(n=5) 	100% (분석결과 제시)
	1-2	기존 영상자료 분석 및 군집 생태 지수 평가	<ul style="list-style-type: none"> - 장보고기지 주변 해역 해양생물 관찰 종 목록 리스트 작성 - 장보고기지 주변 해역 군집 생태 지수 평가 	100% (분석결과 제시)
	1-3	교란 요인에 대한 군집 반응 패턴 규명	<ul style="list-style-type: none"> - 교란 해역 변화 조사를 위한 가설 설정 및 실험 디자인 - 잠재적 인위적, 자연적 교란 요인 설정 	100% (실험방법 제시)
	2-1	개체군 변동 양상 자료 수집 및 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 무작위로 채집된 가리비의 형태적 특성 파악 	100% (분석결과 제시)
	2-2	해양생물 인구통계표 작성	<ul style="list-style-type: none"> - Heilmayer et al. (2003)의 자료를 이용해 Height-Age equation 개발 - 가리비 연령의 예측치와 실측치 비교를 통한 성장률 추정 	100% (분석결과 제시)
	3-1	군집 구조의 변동 양상 파악	<ul style="list-style-type: none"> - 기지 운영에 의한 해양생물군집 구조의 변동을 알아보기 위해 추가적으로 대조구 설정 - 집괴분석과 다차원배열분석을 통한 군집 구조 동태 파악 - 해양생물군집 회복양상에 대한 개념모델 수립 	100% (분석결과 제시)

제 4 절 주요 정량적 성과

1. 논문실적

- 본 연구의 결과는 ‘Composition and structure of the marine benthic community in Terra Nova Bay, Antarctica: Responses of the benthic assemblage to disturbances’라는 제목으로 2019년 12월 2일 국제 저명 학술지인 ‘Plos one’에 출판되었다.

 RESEARCH ARTICLE

Composition and structure of the marine benthic community in Terra Nova Bay, Antarctica: Responses of the benthic assemblage to disturbances

Yun Hee Kang¹, Sanghee Kim², Sun Kyeong Choi³, Kyeonglim Moon³, Han-Gu Choi², Young Wook Ko², Ian Hawes⁴, Sa-Heung Kim⁵, Ji Hee Kim^{2*}, Sang Rul Park^{4*}

1 Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju, Republic of Korea, **2** Department of Polar Life Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon, Republic of Korea, **3** Estuarine & Coastal Ecology Laboratory, Department of Marine Life Sciences, Jeju National University, Jeju, Republic of Korea, **4** Coastal Marine Field Station, University of Waikato, Sulphur Point, Tauranga, New Zealand, **5** Marine Biodiversity Research Institute, INTHESEA KOREA Inc., Jeju, Republic of Korea

* srpark@jejunu.ac.kr (SRP); jhalgae@kopri.re.kr (JHK)

 Check for updates

OPEN ACCESS

Citation: Kang YH, Kim S, Choi SK, Moon K, Choi H-G, Ko YW, et al. (2019) Composition and structure of the marine benthic community in Terra Nova Bay, Antarctica: Responses of the benthic assemblage to disturbances. *PLoS ONE* 14(12): e0225551. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225551>

Editor: Marcos Rubal Garcia, CIIMAR Interdisciplinary Centre of Marine and Environmental Research of the University of Porto, PORTUGAL

Received: May 30, 2019

Accepted: November 6, 2019

Published: December 2, 2019

Copyright: © 2019 Kang et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: All relevant data are within the manuscript and its Supporting Information files.

Funding: This work was supported by the Korea Polar Research Institute KOPRI [research grants PE19150] to SK HGC JHK SRP and the 2019 scientific promotion program funded by Jeju National University to SRP. The funder had no role

Abstract

The community structure and assemblages of marine benthic organisms were investigated in coastal areas near the Jang Bogo Antarctic Research Station in Terra Nova Bay during the 2012–2018 summer seasons. We also examined the recovery pattern of marine benthic organisms following disturbance due to the construction of the Jang Bogo Station. A total of 26 taxa were identified in the study area during the experimental period. Species number and diversity indices (richness, evenness, and diversity) were relatively low compared to data previously reported from Terra Nova Bay. *Sphaerotylus antarcticus*, *Clavularia frankliniana*, *Hydractinia* sp., *Iridaea cordata*, *Fragilariopsis* spp., *Alcyonium antarcticum*, and *Metataeospira pixelli* were the dominant species in this area. Of these, the diatom *Fragilariopsis* spp. were the most abundant species, indicating their key role in maintaining the marine benthic community and controlling biogeochemical cycling. During the construction of the Jang Bogo Station, sediment coverage increased and diatoms declined due to the release of sediment into the coastal area. In February 2014, one month after the disturbance due to cyclone, the diatom coverage increased dramatically and thereby species number, richness index, and diversity index steadily rose from 2015 to 2018. However, non-metric multidimensional scaling ordination analysis of species similarities among sampling times showed that community structure had not completely recovered by 2018. Thus, long-term monitoring is required to elucidate the post-disturbance settlement mechanisms of marine benthic organisms at the study area in Terra Nova Bay.

Introduction

Antarctica, Earth's southernmost continent, is approximately 14.2 million km² and is almost completely covered by an ice sheet. The Antarctic marine environment is one of the most

PLOS ONE | <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225551> December 2, 2019 1 / 16

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구개발결과 활용 및 추가연구의 필요성

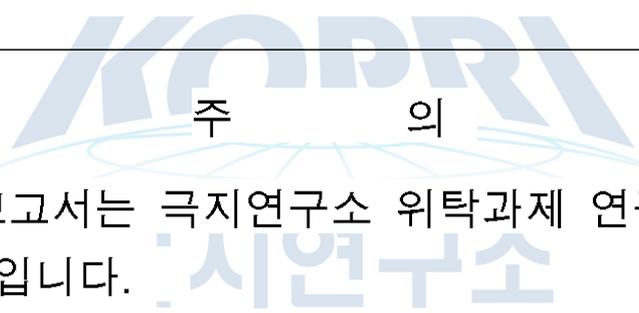
- 본 연구의 결과로써, 남극 장보고기지 주변 해역의 저서생물 군집이 기지 건설에 따른 인위적인 영향으로 특정 생물의 피도 변화가 일어났고 이로 인하여, 군집구조가 변동한 것으로 관찰되었으며, 장보고기지 주변 해역 가리비 연구 결과는 기존에 연구된 남극가리비 연구결과와 비교하여 가리비 개체군의 성장률이 변화한 것으로 확인되었다.
- 이러한 연구 결과는 기후변화에 따른 영향과 함께 장보고기지 운용에 따른 인위적인 영향이 테라노바만의 장보고기지 주변 해역에서 일어나고 있음을 시사한다.
- 하지만, 이러한 자연적인 또는 인위적인 교란 현상에 따른 저서생물 군집의 변동 및 개체군의 성장률 변화의 파악을 위해서는 보다 장기적이고 체계적인 자료 구축이 시급하다.
- 그러므로 장보고기지 중심의 연안생태계 장기 연속 관측 자료를 구축하고 연안생태계 내 저서생물군집과 환경요인과의 상관성 분석 및 주요 영향 인자를 분석하는 연구가 진행되어야 할 것이다.
- 남극가리비에 대한 연구는 2018년부터 2019년까지 2년간 축적한 자료를 바탕으로 지속적인 연구를 진행하여 연도 변화에 따른 개체 연령별 성장 특성을 분석하고 연령별 성장식을 개발하는 연구가 필요하다.
- 이에 더하여 남극가리비 개체군의 구조 변화에 영향을 줄 수 있는 가리비의 생식력 분석과 유전자 분석을 통한 유효개체군 크기를 추정하는 연구도 필요하다.
- 남극 대륙은 기후변화에 가장 빠르게 반응하는 지역 중 하나로 알려졌으나, 빙하 및 해빙에 의한 연구는 남극 대륙의 킹조지섬에서 집중적으로 진행되어서 많은 자료가 축적되고 있으며, 장보고기지가 위치한 테레노바만에 대한 연구는 미흡한 실정이다.
- 장보고기지 주변 해역은 남극 대륙의 테레노바만에 위치하고 있어 인간 활동이 매우 제한적이며, 이로 인하여 기후변화에 따른 해양환경, 해빙, 빙하 변동 등의 연구에 매우 유리한 장점을 가진다.
- 본 연구에서는 극지 연안의 장기생태계 연구 기반 분석틀을 확립하였다. 이를 통해 확립된 저서생물 연구 분석틀을 기반으로 장보고기지 중심의 장기적이고 체계적인 연구가 가능할 것으로 사료된다.

- 장보고기지 중심의 연안생태계 장기 연속 관측 자료 구축 및 장기생태계연구는 극지 연구과 관련하여 국제적인 연구 지위를 획득하고 남극 연안생태계 보호와 환경 보전을 위한 정책수립에 필요한 과학적인 연구 자료를 제공할 것으로 기대된다.



제 6 장 참고문헌

- Berkman PA (1990) The population biology of the Antarctic scallop, *Adamussium colbecki* (Smith, 1902) at New Harbor, Ross Sea. In: Kerry KR, Hempel G (Eds.), Antarctic ecosystems. Ecological change and conservation. Springer, Berlin, NY, pp. 281-288
- Dethier MN, Graham ES, Cohen S, Tear LM (1993) Visual versus random-point percent cover estimations: 'objective' is not always better. Mar Ecol Prog Ser:93-100
- Heilmayer O, Brey T, Chiantore M, Cattaneo-Vietti R, Arntz WE (2003) Age and productivity of the Antarctic scallop, *Adamussium colbecki*, in Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica). J Exp Mar Bio Ecol 288:239-256
- Kim S, Park SR, Kang YH, Kim G-Y, Lee K-S, Lee HJ, Won N-I, Kil H-J (2014) Usefulness of tissue nitrogen content and macroalgal community structure as indicators of water eutrophication. J Appl Phycol 26:1149-1158
- Pranovi F, Marcato S, Zanellato R, (1994) Analisi biometriche e biologia di popolazione del mollusco antartico *Adamussium colbecki* a Baia Terra Nova, Mare di Ross. Atti Dell' Istituto Veneto Di Scienze Lettere Ed Arti Tomo CLII (1993-1994) 152: 123-136
- Ralph R, Maxwell JGH (1977) Growth of two antarctic lamellibranchs: *Adamussium colbecki* and *Laternula elliptica*. Mar Biol 42: 171-175
- Stockton WL (1984) The biology and ecology of the epifaunal scallop *Adamussium colbecki* on the west side of McMurdo Sound. Antarct. Mar Biol 78: 171-178



주 의

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