

표 지 (주요사업)

(16 포인트 고딕체) ↑ 15cm ↓	과제번호 PE25140 온난화로 인한 극지 서식환경 변화와 생물의 적응진화 연구 한국해양연구원 부설극지연구소 ↑ 3cm ↓	BSPE25140-121-12 ↑ 5cm ↓ 온난화로 인한 극지 서식환경 변화와 생물의 적응진화 연구 Study on polar ecosystem change by warming and adaptation mechanisms of polar organism (16 포인트 신명조체) ↑ 5cm ↓ 2026. 02. 28 한국해양과학기술원 부설극지연구소 (17 포인트 명조계열) ↑ 4cm ↓
---	--	--



제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “온난화로 인한 극지 서식환경 변화와 생물의 적응진화 연구”과제의 (최종)보고서로 제출합니다.

2026. 2. 28.

연구책임자 : 김 상 회

참여연구원 : 강 승 현

“ : 김 덕 규

“ : 김 정 훈

“ : 김 민 철

“ : 김 승 회

“ : 김 정 훈

“ : 김 종 우

“ : 김 지 희

“ : 서 태 건

“ : 서 현 교

“ : 신 승 철

“ : 이 영 미

“ : 이 원 영

“ : 이 정 은

“ : 이 태 식

“ : 조 성 미

“ : 최 한 구

위탁연구기관명 : 제 주 대

위탁연구책임자 : 박 상 울

보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간	2020.01.01. ~2025.12.31.	단계 구분	
연구사업명	중 사 업 명	기관목적사업(2020년 이후)			
	세부사업명	기관고유사업			
연구과제명	중 과 제 명	온난화로 인한 극지 서식환경 변화와 생물의 적응진화 연구			
	세부(단위)과제명				
연구책임자	김상희	해당단계 참여연구원수	총 : 51 명 내부 : 46 명 외부 : 5 명	해당단계 연구비	정부: 천원 기업: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소/생명과학연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 뉴질랜드		상대국연구기관명 : 남극과학프로그램(ASP)		
위 탁 연 구	연구기관명 : 제주대		연구책임자 : 박상율		
요약				보고서 면수	
• 극지역 서식환경 관측기술 고도화를 위해 캠벨빙하 (2014-2020자료)와 장보고만 해빙(18건 확보)의 위성 관측정보를 활용하여, 빙하 면적 및 속도 변화를 제시하고 정착 해빙 및 폴리냐 위성정보 18건 이상을 구축함. 남극 물범 포획 및 태깅 기술 매뉴얼 교본 발간하고 배포하였으며, 이를 활용한 물범 잠수 깊이별 염도 및 수온 관측자료의 분포도 15건, 행동권 관측지도 15건을 작성함. 해양 환경 장기 관측을 통한 5년간의 pCO₂ 연속 관측자료를 확보하였고, 해양 물리 계류기 자료 회수 1건, 연안 생태계 0-D 모형개발을 위한 비교 분석 1건 등을 완료함 • 서식환경 변화에 대한 생물 적응기작 연구를 위해 도둑갈매기 먹이 정보구축, 해양 미세조류 연간 군집구조 변동 파악, 저서 무척추동물 중 다양성 분석, 남극 가리비 서식 환경 및 개체 특성을 분석해 서식 환경별 성장식을 개발함. 3D 수중영상 정점별 비교 분석으로 주요 생물군집 장기 변화 조사를 수행함. 물범의 행동 및 생활사에 따른 생리 변화 연구를 위해 남극 물범 서식지 현장 시료 (혈액, 털, 번식 시료 총 9건), 성체 및 새끼 조직 시료 (혈액, 털, 번식시료 총 21건)을 수집하고, 물범의 극한지 적응 행동 관련 유전자 정보 1건 발굴 및 서식지 특성 지도 1건을 작성함. 북극권 환경 시료 대상 유해 미생물 (바이러스 포함)의 유전정보 탐색 60건 및 잠재적 병원성 추정 미생물 확보 및 생리 특성 분석 50건 수행, 병원성 미생물 및 유전체 정보 2건을 확보함. 환북극권 유해 미생물 탐색 40건을 수행하였고, 병원성 관련 유전자 분포 및 생리 특성 조사 2건을 수행함 • 공동연구 네트워크 및 기술협력 분야는 해빙 환경 특화 수중 3D 영상분석법 개발하여 뉴질랜드와 정보를 공유함. Electromagnetic induction을 이용하여 KOPRI-뉴질랜드 공동 해빙 ice platelet map 제작을 위한 조사를 수행하였으며, 전문가 그룹 워크숍을 1회 개최함. KOPRI-영국 BAS의 남극 수중 열판 실험을 공동 수행하였으며, 해양포유류 관측 국제 컨소시엄에 한국 공식 참여 1건을 등록함. 또한 One Arctic One Health 주관 미국 대표부 및 지속 가능 워킹그룹 (SDWG) 사무국, 사업주관기관인 미국 페어뱅크스대학과 극지연 연구논문 성과공유 및 러시아 공동연구기관으로부터 툰드라 시료 공유함					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	남극 해빙 위성관측, 남극 해양 환경 관측, 해빙 수중 영상분석법, 남극 생물 적응 기작, 북극권 유해 미생물			
	영 어	Antarctic sea ice monitoring by satellite observation, Observations of Antarctic marine environment, Submarine image analysis method under sea ice, Adaptation mechanisms of Antarctic organisms, Harmful microorganisms in the Arctic region			

요 약 문

I. 제 목

온난화로 인한 극지 서식환경 변화와 생물의 적응진화 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 향후 +2℃ 온난화에 따른 극지생물들의 얼음 환경변화를 추적하고 먹이망 핵심생물들의 행동, 군집양상, 병원균의 잠재적 발생, 적응과정을 장기 관측하여 향후 극지 생물들의 취약성, 건강성, 복원력을 이해하고 보존 정책에 기여하고자 한다.
- 온난화로 인한 극지 빙권 축소와 빙하후퇴는 서식환경을 파괴해 얼음 의존성 극지생물의 멸종, 군집변동, 외래생물의 유입, 우점종 변동을 일으켜 극지 생태계의 구성과 기능을 변동시키는 주요 요인으로 작용하고 있다.
- 접근이 쉬운 서남극 킹조지섬에 집중적으로 자료가 축적되고 있는 반면, 장보고기지가 위치한 테라노바만(TNB) 해역의 빙하 및 해빙, 연안생태계 연구는 초기 단계임. 특히 급격한 캬벨 빙하 용빙과 해빙 감소, 담수의 증가는 저서생태계와 얼음환경에 의존해 사는 해양생물들과 물범 같은 상위포식자들에게 큰 영향을 미칠 것으로 보인다.
- 남극 생태계 최상위포식자로서 물범과(Phocidae) 동물의 생태학적 중요성에도 불구하고, 아직 국내에선 해당 분류군의 연구가 체계적으로 이뤄진 바가 없다. 물범의 행동자료를 이용해 극한 적응 및 잠수행동을 측정하고 해양 관측에 활용하는 연구가 필요하며 국제 협력을 통해 물범 연구의 한국 거점을 확보하고 장기적 연구 기반 마련이 시급하다.
- 2018년 IPCC의 1.5도 특별보고서에 의하면 북극의 온난화는 전세계 평균을 상회하고, 북반구 육지의 1/4을 차지하는 영구동토층의 온도는 지난 10년 동안 약 0.29도가 증가하였다. 2014년에 3만 년 전의 영구동토층에서 진핵생물인 아메바를 감염시키는 거대 DNA 바이러스(Pithovirus sibericum)가 보고되었다. 이들은 인간에게 해롭지 않은 아메바들만 감염시키는 것으로 보고되었지만, 온도증가에 따라 영구동토층 또는 빙하에 묻혀있던 고대(古代) 유해 미생물이 기후변화로 인해 방출될 가능성이 대두되었다. 실제로 2016년 시베리아 영구동토층에 매장된 사체기원으로 추정되는 탄저균에 의한 순록의 집단 사망과 러시아 유목민의 사망 사례는 극지역 기후변화가 전지구적으로 영향을 주는 감염병 발생에 영향을 줄 수 있는 잠재성을 암시한다.
- 온난화로 인해 변하는 극지생물들의 서식 환경 변화를 추적하고 주요 생물군들의 행동, 군집양상, 병원균의 잠재적 발생, 적응과정을 장기 관측하여 향후 극지 생물들의 취약성, 건강성, 복원력을 이해하고 보존 정책에 기여하고자 다음과 같은 연구를 수행하고자 한다.
 - 1) 해빙과 캬벨빙하 변동, 담수 유입 등 서식지 환경변화에 따른 주요 생물지표종

의 변화와 손실, 2) 주요 상위포식자 물범의 행동 연구와 해양 물리환경 관측을 통한 서식지 변화 모니터링, 3) 유해성 병원균 분포 및 기작 규명을 통한 위험성 평가 및 대비, 4) 각국 과학기지 기반 장기생태계 관측연구와 협력, 자료 공유로 극지생물 관련 최다 자료를 보유한 선두그룹으로 자리매김

- SCAR Horizon Scan 80개 질문 중 지구 기후 변화에 따른 빙권의 담수화와 생태계 반응과 관련된 5가지 질문들이 본 과제의 주제와 직, 간접적으로 연관되어 있다.
- SCAR Horizon Scan 질문: 담수 유입량의 변화가 해양 순환 및 생태계 과정에 미치는 영향은?, 남극과 남빙양 생태계가 과거 더 따뜻한 기후 조건에 어떻게 반응했는가?, 남극과 남빙양에서 가장 취약한 생태계와 먹이망, 멸종 가능성이 가장 높은 종은?, 임계치 전이는 시공간 규모에 따라 어떻게 달라지며, 미래 환경조건 하에서 생태계 기능에 어떻게 영향을 미칠 것인가?, 남극과 남빙양의 생물상에 대한 여러 스트레스 요인과 환경변화 인자들의 시너지 효과는 무엇인가?, 영양 상호작용(trophic interactions)과 정면역학(frontal dynamics) 및 계층화(stratification)에 대한 핵심 해양종은 무엇이 될까?

III. 연구개발의 내용 및 범위

□ 온난화에 따른 극지 서식 환경변화관측 기술 고도화 및 생물의 적응기작 분석을 통한 생태계 상호작용 진단과 예측

- 극지 생물의 유일한 서식환경인 남극, 북극에 어떻게 적응 진화해 왔으며, 향후 +2℃ 기후변화가 야기하는 급격한 해양환경, 해빙, 빙하 변동에 어떤 영향을 받으며, 어떻게 대응할 것인지를 이해하기 위해 극지 서식환경 장기관측과 미생물부터 최상위 포식자 척추동물까지 포함하는, 먹이망 핵심생물 중심의 종합적인 정보를 구축하고 생태계 건강성과 복원력을 예측하고자 한다.

○ 최종성과물

- 물범 행동자료를 통해 극한지 적응 기작과 해저관측자료 구축, 극지 생물다양성, 주요 생물종 군집정보, 유전정보를 포함하는 생물, 생태환경 장기 관측자료를 확보하였다.
- 온난화가 야기하는 극지발 유해 미생물의 분포 파악을 위해 메타유전체 기반 병원성 유전자 및 유해 미생물 분포 분석 방법을 확립하고, 유해 미생물의 위험성 평가를 위한 배양체를 확보하여 유전체를 확보하고, 병원성 분석을 수행하였다.
- 온난화로 인한 얼음환경변화와 연안생태계 간 상호반응 예측 모형을 개발하였다.
- 러시아/뉴질랜드/호주/영국의 협력연구를 통해 관측장비/기술의 고도화, 국제 연구 네트워크를 강화하였다.

□ 과제 내용

- (제1세부) 장보고만 연안 환경요인과 주요 생태특성조사, 서식환경요인과 생태계반응 연구, 연안생태계에 대한 해빙과 빙하 영향평가
- (제2세부) 극지물범의 서식환경, 포획기술 습득, 행동자료를 통한 해저환경 관측자료 구축, 물범의 극한지 적응행동의 생태적 기작 규명
- (제3세부) 북극권 서식 유해 미생물 분석 방법 확립 및 탐색 미생물의 병원성 검증 기반 마련, 환북극권 유해 미생물의 정확한 위험성 평가를 위한 국내외 전문가 그룹 연구 네트워크 확립

IV. 연구개발결과

<제1세부> 성과목표: 얼음환경 변화와 생태계 영향 예측을 위한 테스트베드 구축

- 2016~2025년 캠패빙하, 드라이갈스키 빙하 빙권위성정보 분석 완료. 두 빙하 모두 calving 발생 이벤트 확인, 드라이갈스키 빙하는 rebound 되었으나 캠패빙하는 회복되지 않았음을 확인하였다.
- 2003년 ~2018년간 장보고만 주변 폴리나 활동, 기상자료 종합하여 영향 정량화하기 위해 선형 및 비선형 모델링 접근 방식을 비교했으며, 이를 통해 향후 머신러닝 모델 개발 및 물링 예측과 물리 모델을 결합하여 정착빙 면적 예측에 활용할 예정이다.
- 장보고만 19개 정점 물리화학자료 획득 완료. 수온, 염분, 용존산소, 엽록소 분석으로 테라노바만 서쪽과 북쪽이 차이를 보이는 것을 확인하였으며, 종합적으로 장보고기지 연안환경은 난센빙붕에서 카타바틱 윈드로 만들어진 저온고염수를 받는 해역으로 남에서 북으로 갈수록 생물활성과 용존산소 증가하는 것을 확인하였다.
- 취수를 이용한 연중 해양환경모니터링 시스템을 통해 수온과 염분 등의 물리환경 지시항목과 용존산소, pH, pCO₂, 엽록소, CDOM, 탁도 등의 생태환경 지시항목들 연속 관측 완료(2024년 8월에 보정기체가 소진되어 이후 자료 보정 불가)하였으며, 2025년 시스템을 집수조에서 펌프동으로 이동 설치 완료하였다.
- 여름철 Chl-a bloom이 육지에서 유입되는 용설수가 관측된 1월 하순에 일어나 육지에서 유입되는 담수에 있는 철분이 이러한 bloom을 일으키는 기폭제 역할을 한 것으로 파악하였다.
- 2024년 12월 장보고만 3개 정점에서 2.7m 해빙코어 3 set 와 말단 부위의 해빙미세조류 확보하였다.
- 저서 수층 계류 바이오로거 2기 데이터 확보 및 재설치 완료(PAR 센서 고장으로 반출 후 뉴질랜드 기술 협력사에 이송 완료)하였다.
- 해빙과 그 아래 수층 생태계를 연계한 수직 생지화학 모형(SPBM: Sympagic-Pelagic-Benthic Model)을 개발하여 생물활동부터 수층, 저층퇴적물에 이르는 전 생지화학 과정을 통합하기 위해 관측치 비교 및 평가하였다.
- 해빙하부 생물활동과 농축현상 반응이 부족한 것으로 해석되어 향후 모형 개선 필요성 확인서 수층 계류 바이오로거 2기 데이터 확보 및 재설치 완료(PAR 센서 고장으로 반출 후 뉴질랜드 기술 협력사에 이송 완료)하였다.

<제2세부> 극지생물 통합 센서스 구축

- 학술다이빙을 통해 해빙미세조류, 플랑크톤성 무척추동물 시료 확보. 수심 8m에 발달한 해조류 군집의 20m 방형구 사진과 영상 확보하고 연간 피도 변화 분석 완료하였다.
- 해역별 유효개체군 크기 추정 및 상대적 상태 평가를 위해 남극가리비 개체군의 유전자마커 개발 완료하였으며, 계통학적 위치 분석에서 pedtinidae내에서 독자적인 진화 경로를 거쳤음을 확인하였다.
- 저서 무척추동물의 경우, 비교 해역인 Caple Evnas, 이테리 기지, 곤드와나보다 장보고만 정점에서 다양성 지수의 모든 항목이 높음을 확인하였다.
- 2021 - 2025년 3개 하계 번식기 동안 케이프할렛, 인익스프레스블섬, 장보고기지 3곳에서 안정동위원소, 배설물, 모션캡처 카메라 자료 분석으로 남극도둑갈매기의 먹이원 변동 분석 완료하였다.
- 다른 2곳에 비해 장보고기지 남극도둑갈매기는 주변 환경변화에 따라 먹이원이 크게 변화하는 것을 확인(=기회주의적 포식)하였다.
- 남극 장보고과학기지 인근 Campbell Glacier Ice Tongue에 분포하는 웨델물범 중 성별을 고려하여 암컷 2개체와 수컷 2개체 총 4개체를 포획하여 CTD 부착 완료하였다.

- CLS Argos 위성망을 통해 해당 자료가 수신되어 SMRU Data Portal을 통해 확인하였다.
- 대부분 Campbell glacier Ice Tongue의 Ice Sheet 아래에서 주로 취식을 하는 것으로 확인하였다.
- 영국 남극연구소 (BAS), 뉴질랜드와 공동연구인 온난화 수증열판실험 착수를 위한 설비 사전 준비 완료하였다.
- C뉴질랜드 기술팀이 장보고기지를 방문 후 기계설비 대원들과 회의, 현장 점검, 설치계획 수립하였다(2026년 2월경 수중 설치 예정).

<제3세부> 환경변화에 따른 유해 미생물 분포 및 기작 규명

- 연속 동토의 광역 규모에서 확보한 메타유전체 분석을 통해 바이러스 분석 완료하였다.
- 식물 병원균 유전체간 비교 및 식물 병원성 분석 5건 완료하였다.
- 환동물 병원성 세균의 온도에 따른 병원성 변화 기작 확인을 위한 전사체 결과를 확보하고 분석을 완료하였다.
- 국제북극과학위원회(IASC) 포스터 세션 발표 및 과제정보 공유 완료하였다.

<공동연구 네트워크 및 기술협력>

- 뉴질랜드 남극 프로그램 ASP에 파트너로 공동연구 및 로스해 연안 공동탐사를 진행하였다.
- 뉴질랜드 NIWA, 3개 대학 연구진들과 population genetics 컨소시엄 구성하였다.
- 영국 남극과학연구소 BAS와 온난화 모사실험 공동수행하였다.
- 이태리 제노바대학과 동남극 해빙미세조류 공동조사를 진행하였다.
- 칠레 남극연구소 INACH와 육상/해양 외래종 국제 공동조사 컨소시엄을 구성하였다.
- SCAR ANTOS 프로그램의 co-leader (2단계 연안생태 프로젝트 준비)로 활동하였다.
- 러시아 IB로부터 유해 인자 분석을 위한 툰드라 시료 교환하였다.
- 미국 와이오밍대학과 극지 감염병 곰팡이의 감염기작 연구 수행하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

- ☐ 온난화에 따른 극지 서식 환경변화관측 기술 고도화 및 생물의 적응기작 분석을 통한 생태계 상호작용 진단과 예측에 활용될 것으로 기대된다.
- 극지 생물의 유일한 서식환경인 남극, 북극에 어떻게 적응 진화해 왔으며, 향후 +2℃기후변화가 야기하는 급격한 해양환경 변화, 얼음환경 소실에 어떤 영향을 받으며, 어떻게 대응할 것인지를 이해하기 위해 극지 서식환경 장기 관측과 먹이단계 핵심 생물 및 유해성 미생물을 포함하는, 생물 중심의 종합적인 정보를 구축하고 생태계 건강성과 복원력을 예측에 활용할 수 있다.
- 캠벨빙하 및 해빙 변화와 관측 가능한 기상 및 해양 환경인자 사이의 상관성 분석을 통한 장보고기지 주변 해빙(정착빙) 소멸 시기 예측 모델 개발을 통해 기지 보급 및 연안, 해양 연구 계획 수립에 활용될 것으로 기대된다.
- 장보고과학기지 주변에서 식물플랑크톤의 중단기 변동 패턴 분석을 통해 장보고과학기지 주변 남극반도에서 우점하는 우점 그룹의 변화양상과 일차생산력의 역할 이해 및 미래 해양 변동 시나리오에 활용될 것으로 기대된다.
- 러시아를 포함한 환북극권 유해 미생물의 분포 및 병원성 기작 규명 연구 결과는 북극지역 유해 미생물의 신속한 검출을 통한 위험성 판단에 활용될 것으로 기대된다.

- 물범을 활용한 겨울철 장기 연속 관측 자료를 통해 빙하 용융 및 해양 물리환경 변화에 대응할 것으로 기대된다.
- 해양포유류 태깅을 통한 극지 해양물리 위성 송수신 기술 고도화에 활용될 것으로 기대된다.
- 물범 생태 연구과정 대국민 홍보에 활용될 것으로 기대된다.
- 국제 해양포유류 네트워크를 통한 지역별 비교 연구 및 시료 획득에 활용될 것으로 기대된다.



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Study on polar ecosystem change by warming and adaptation mechanisms of polar organism

II. Purpose and Necessity of R&D

- ☐ The aim is to track the ice environment changes of polar organisms and long-term observe the behavior, community structure, potential emergence of pathogens, and adaptation processes of key species in the food web in response to the future +2°C warming. This will help to understand the vulnerability, health, and resilience of polar organisms in the future and contribute to conservation policies.
- The shrinking of sea ice and glacier retreat caused by global warming is a major factor that disrupts the habitat of ice-dependent polar organisms, leading to extinction, community change, invasion of invasive species, and changes in the composition and function of polar ecosystems.
- While data is accumulating on King George Island, a relatively easily accessible area in the western Antarctic, research on glaciers, sea ice, and coastal ecosystems in the Terra Nova Bay (TNB) area where Jang Bogo Station is located is still in the early stages. In particular, rapid melting of the Campbell Ice and decreasing sea ice, as well as increasing freshwater, are expected to have a significant impact on benthic organisms and top predators, such as seals, that rely on ice environments.
- Despite the ecological importance of seals (Phocidae) as top predators in the Antarctic ecosystem, there has been no systematic research on this taxonomic group in Korea. It is necessary to measure extreme adaptations and diving behavior using seal behavioral data and apply it to ocean observations. International cooperation is urgently needed to secure a Korean hub for seal research and establish a long-term research basis.
- According to the IPCC Special Report on 1.5°C in 2018, Arctic warming exceeds the global average, and the temperature of the permafrost, which

accounts for one-fourth of the Northern Hemisphere's land area, has increased by about 0.29°C in the past decade. In 2014, a giant DNA virus (*Pithovirus sibericum*) that infects amoebas in permafrost from 30,000 years ago was reported. Although they were reported to infect only harmless amoebas in humans, the possibility of ancient harmful microorganisms buried in permafrost or glaciers being released due to climate change is looming. In fact, cases of mass death of reindeer due to anthrax from a corpse originating from permafrost in Siberia in 2016 and deaths of Russian nomads suggest the potential for infectious disease outbreaks that may be affected by polar climate change on a global scale.

- The project aims to track changes in the habitat of polar organisms caused by global warming and to observe the behavior, community structure, potential emergence of pathogens, and adaptation processes of key species in the food web for a long time, thereby understanding the vulnerability, health, and resilience of polar organisms in the future and contributing to conservation policies. The research will focus on: 1) changes and losses of key biological indicators according to habitat environmental changes such as sea ice and Campbell Ice Cap melting, freshwater input, etc., 2) seal behavior research and monitoring of habitat changes through ocean physical environment observations, 3) risk assessment and countermeasures through the identification of the distribution and mechanisms of harmful pathogens, and 4) establishing long-term ecological observation and collaborative research based on scientific research stations in various countries and sharing data will allow us to position ourselves as a leading group in polar biology research with the largest amount of data available.
- The five questions related to the impact of global climate change on polar ice sheet freshwater and ecosystem response among the 80 questions in the SCAR Horizon Scan are directly or indirectly related to the main theme of this project.
 - SCAR Horizon Scan questions: What are the impacts of changes in freshwater inputs on ocean circulation and ecosystem processes? How did the Antarctic and Southern Ocean ecosystems respond to warmer climate conditions in the past? What are the most vulnerable ecosystems and food webs in the Antarctic and Southern Ocean? Which species are at the highest risk of extinction? How do threshold transitions vary in space and time, and how will future environmental conditions affect ecosystem functions? What are the synergistic effects of various stressors and environmental change factors on the biota of the Antarctic and Southern Ocean? Which are the key oceanic species for trophic interactions, frontal dynamics, and stratification?

III. Contents and Extent of R&D

- ☐ Advancement of observation technology for polar habitat environmental changes due to global warming and analysis of adaptation mechanisms of organisms for diagnosing and predicting ecosystem interactions
 - To understand how polar organisms have adapted and evolved to their unique habitats in Antarctica and the Arctic, and how they will be affected by rapid changes in oceanic environments, sea ice, and glaciers caused by a +2°C increase in temperature, this project aims to build comprehensive information on key species in food webs, from microorganisms to top predators, through long-term observation of polar habitats. The goal is to predict ecosystem health and resilience.
 - Final achievements:
 - Biological and ecological long-term observation data, including adaptation mechanisms of polar organisms, underwater observation data, polar biodiversity, key species information, and genetic information.
 - Assessment of the risks and spread potential of harmful microorganisms in polar regions caused by global warming, and presentation of indicators to measure the health of polar organisms.
 - Development of a predictive model of the mutual response between ice environment changes and coastal ecosystems caused by global warming.
 - Strengthening of international research networking and enhancement of observational equipment and technology through collaboration with Russia, New Zealand, Australia, and the United Kingdom.
- ☐ Project Overview
 - (Subproject 1) Investigation of environmental factors and major ecological characteristics of Jang Bogo coastal area, study of habitat environmental factors and ecosystem responses, and evaluation of sea ice and glacier effects on coastal ecosystems.
 - (Subproject 2) Acquisition of habitat information and trapping technology for polar bears, establishment of observational data on underwater environments through behavioral data, and identification of ecological mechanisms for the adaptive behavior of polar bears in extreme environments.
 - (Subproject 3) Establishment of analysis methods of harmful microorganisms in the Arctic region and verification of pathogenicity of exploratory microorganisms, establishment of domestic and international expert group research network for accurate risk assessment of harmful microorganisms in the Arctic region.

IV. R&D Results

<Subproject 1> Establishment of a Testbed for Predicting Ice Environment Changes and Ecosystem Impacts

- Satellite-based cryosphere analyses of Campbell Glacier and Drygalski Glacier (2016 - 2025) were completed. Calving events were identified in both glaciers. While Drygalski Glacier exhibited rebound characteristics, Campbell Glacier showed no clear recovery trend.
- Polynya activity and meteorological data around Jang Bogo Bay (2003 - 2018) were synthesized. Linear and nonlinear modeling approaches were compared to quantify their impacts. Based on these results, a machine learning - based rolling forecast model integrated with physical modeling is planned to predict fast-ice extent.
- Physical and biogeochemical data were collected from 19 points in Jang Bogo Bay. Analyses of temperature, salinity, dissolved oxygen, and chlorophyll revealed spatial differences between the western and northern sectors of Terra Nova Bay. The coastal environment near Jang Bogo Station was characterized as being influenced by cold, saline water formed by katabatic winds from the Nansen Ice Shelf, with increasing biological activity and dissolved oxygen toward the north.
- A year-round seawater intake-based ocean monitoring system continuously measured physical parameters (temperature, salinity) and ecological indicators (dissolved oxygen, pH, pCO₂, chlorophyll, CDOM, turbidity). Continuous observations were completed, although calibration gas depletion in August 2024 limited subsequent corrections. The system was relocated from the intake tank to the pump house in 2025.
- A summer chlorophyll-a bloom occurring in late January was associated with freshwater inflow from glacial meltwater, suggesting that iron supplied by terrestrial runoff acted as a trigger for the bloom.
- Three sets of 2.7 m sea-ice cores and terminal sea-ice microalgae samples were collected from three stations in December 2024.
- Data from two benthic moored biologgers were successfully retrieved and redeployed (PAR sensor malfunction repaired through technical collaboration in New Zealand).
- A vertical biogeochemical model linking sea ice and underlying water column ecosystems (SPBM: Sympagic - Pelagic - Benthic Model) was developed and evaluated against observational data to integrate biological activity from sea ice to sediments. Model evaluation indicated insufficient representation of under-ice biological processes and concentration mechanisms, highlighting the need for further refinement

<Subproject 2> Establishment of an Integrated Polar Biological Census in polar oceans

- Sea-ice microalgae and planktonic invertebrate samples were collected through scientific diving. Quadrat (20 m) photo and video surveys of macroalgal communities at 8 m depth were conducted, and annual coverage changes were analyzed.
- Genetic markers were developed for Antarctic scallop populations to estimate effective population size and assess population status. Phylogenetic analysis confirmed an independent evolutionary lineage within Pectinidae.
- Benthic invertebrate diversity indices at Jang Bogo Bay stations were higher than those of comparative sites (Cape Evans, Italian Station, Gondwana).
- During three austral breeding seasons (2021 - 2025), stable isotope, fecal, and motion-capture camera data from Cape Hallett, Inexpressible Island, and Jang Bogo Station were analyzed to assess dietary shifts in south polar skuas. Individuals near Jang Bogo Station exhibited greater dietary variability, indicating opportunistic predation in response to environmental change.
- Four Weddell seals (two females and two males) inhabiting the Campbell Glacier Ice Tongue were equipped with CTD tags. Data were received via the CLS Argos satellite network and verified through the SMRU Data Portal. Most individuals primarily foraged beneath the ice sheet of the Campbell Glacier Ice Tongue.
- Preparatory work was completed for a joint underwater warming chamber experiment with the British Antarctic Survey (BAS) and New Zealand collaborators. A New Zealand technical team visited Jang Bogo Station to finalize installation plans (deployment scheduled for February 2026).

<Subproject 3> Distribution and Mechanisms of Harmful Microorganisms under Environmental Change

- Viral diversity analyses were completed using metagenomic datasets obtained from large-scale continuous permafrost regions.
- Five comparative genomic analyses of plant pathogens and corresponding pathogenicity assessments were completed.
- Transcriptomic analyses were conducted to investigate temperature-dependent pathogenicity mechanisms in animal-pathogenic bacteria.
- Research outcomes were presented at the International Arctic Science Committee (IASC) poster session, and project information was shared internationally.

<Collaborative research network and technological cooperation>

- Conducted joint coastal Ross Sea expeditions in partnership with the New Zealand Antarctic Programme (ASP).
- Established a population genetics consortium with NIWA (New Zealand) and three universities.
- Conducted joint ocean warming simulation experiments with the British Antarctic Survey (BAS).
- Performed collaborative sea-ice microalgae surveys in East Antarctica with the University of Genoa (Italy).
- Formed an international consortium with the Chilean Antarctic Institute (INACH) for terrestrial and marine invasive species investigations.
- Served as Co-Leader of the SCAR ANTOS program (preparing Phase II coastal ecosystem project).
- Exchanged tundra samples with a Russian institute (IB) for harmful factor analysis.
- Conducted collaborative research with the University of Wyoming (USA) on infection mechanisms of polar pathogenic fungi.

V. Application Plans of R&D Results

- It is expected that the advancement of observation technologies for polar habitat environmental changes due to global warming, and analysis of adaptive mechanisms of organisms will be utilized for the diagnosis and prediction of ecological interactions.
- Long-term observation of polar habitats and comprehensive information including key organisms and harmful microorganisms is expected to be utilized for diagnosing and predicting ecosystem interactions to understand how polar organisms have adapted and evolved to their unique habitats and how they will be affected by rapid changes in ocean and ice environments caused by +2°C climate change in the future.
- Developing a prediction model for the disappearance of fast ice in the vicinity of Jang Bogo Station through the correlation analysis of Campbell ice shelf and sea ice changes with observable meteorological and oceanic environmental factors is expected to be utilized in establishing supply and coastal and ocean research plans.
- Analysis of seasonal variations in phytoplankton patterns around Jang Bogo Station will contribute to understanding changes in dominant groups and their role in primary productivity on the Antarctic Peninsula. This information can be used to predict future oceanic changes.
- Research on the distribution and pathogenic mechanisms of harmful microorganisms in the Arctic region, including Russia, can be used to quickly detect and assess risks associated with harmful microorganisms in the Arctic.

- Long-term continuous observations of wolverines during winter can provide insights into how to adapt to glacial melting and changes in oceanic physical environments.
- The development of polar oceanic physical satellite communication technology will be enhanced through the tagging of marine mammals.
- Research on wolverine ecology can be utilized in public outreach efforts.
- The international marine mammal network can be used to acquire samples for comparative research by region.



C O N T E N T S

(영 문 목 차)

Chapter 1 Introduction

Section 1 Research Objectives and Scope

1. Research Objectives
2. Research Necessity
3. Year-by-Year Research Goals and Contents

Chapter 2 Current R&D Status in Korea and Other Nations

Section 1 Analysis of Technology Trends

1. International Technology and Industry Trends
2. Domestic Technology and Industry Trends

Chapter 3 R&D Implementation Contents and Results

Section 1. Research and Development Implementation and Results

1. Subproject Objective 1. Establishment of a Testbed for Predicting Ice Environment Changes and Ecosystem Impacts
 - a. Research Task 1-1. Expansion of the Research Area around Jang Bogo Bay and Advancement of Coastal Cryosphere Satellite Information
 - b. Research Task 1-2. Continuous Monitoring of Ice Environment Changes
 - c. Research Task 1-3. Development of a Coastal Ecosystem Model for Jang Bogo Bay
2. Subproject Objective 2. Establishment of an Integrated Polar Biological Census
 - a. Research Task 2-1. Tracking Variability in Primary Productivity (Sea Ice/Marine Microalgae and Macroalgae)
 - b. Research Task 2-2. Predator Behavior, Responses, and Adaptation Mechanisms
 - c. Research Task 2-3. Advancement of Biological Observation Technologies
3. Subproject Objective 3. Investigation of the Distribution and Mechanisms of Harmful Microorganisms under Environmental Change
 - a. Research Task 3-1. Analysis of Harmful Microorganism Distribution
 - b. Research Task 3-2. Pathogenicity Analysis of Microorganisms
 - c. Research Task 3-3. International Cooperation and Contribution

Chapter 4 Degree of R&D Goal Achievement and Degree of Contribution to Outside Research Institute

Section 1. Annual Achievement of Objectives

Section 2. Representative Outstanding Achievements

Section 3. Overall Conceptual Framework

Chapter 5 Utilization Plan for Research and Development Results

Section 1. Future Research Directions

Section 2. Utilization Plan using Achievements

Section 3. Other Matters

Chapter 6 References



목 차

제 1 장 서론

제1절 연구 목적 및 연구범위

1. 연구 목적
2. 연구 필요성
3. 연차별 연구목표 및 연구내용

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제1절 기술동향 분석

1. 국외 기술, 산업동향
2. 국내 기술, 산업동향

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 연구개발 수행 내용 및 결과

1. 세부연구목표 1. 얼음환경 변화와 생태계 영향 예측을 위한 테스트베드 구축
가. 연구내용 1-1. 장보고만 주변 연구영역 확장 및 연안 빙권 위성정보 고도화
나. 연구내용 1-2. 얼음환경변화 연속관측
다. 연구내용 1-3. 장보고만 연안생태계 모형 구축
2. 세부연구목표 2. 극지생물 통합 센서스 구축
가. 연구내용 2-1. 1차 생산력 변동추적(해빙/해양 미세조류, 해조류)
나. 연구내용 2-2. 포식자 행동, 반응, 적응기작
다. 연구내용 2-3. 생물 관측기술 고도화
3. 세부연구목표 3. 환경변화에 따른 유해 미생물 분포 및 기작규명
가. 연구내용 3-1. 유해 미생물 분포 분석
나. 연구내용 3-2. 미생물의 병원성 분석
다. 연구내용 3-3. 국제사회 협력 및 기여
4. 종합모식도

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제1절 연차별 목표달성도

제2절 대표적 우수성과

제3절 기타성과

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제1절 향후 연구 방향

제2절 성과 활용 계획

제2절 기타사항

제 6 장 참고문헌



제 1 장 서론

제1절 연구 목적 및 연구범위

1. 연구 목적

- 가 향후 +2℃ 온난화에 따른 극지생물들의 얼음 환경변화를 추적하고 먹이망 핵심생물들의 행동, 군집양상, 병원균의 잠재적 발생, 적응과정을 장기 관측하여 향후 극지 생물들의 취약성, 건강성, 복원력을 이해하고 보존 정책에 기여하고자 함
- 캠패빙하와 장보고만 해빙을 테스트베드로 구축하여 남극 전체에서 발생 중인 급격한 Ice loss가 연안생태계 교란, 생물소실/멸종과 이동/복원 과정을 기록하고 이해
 - 급격한 해빙과 캠패빙하 소실, 담수 유입, 물질순환 등 서식지 환경변화에 따른 먹이망 핵심종들의 변화와 손실, 섭식방식, 행동방식 등의 통합적 생물센서스 구축
 - 유해성 병원균 분포 및 기작 규명을 통한 위험성 평가 및 대비로 극지역 고유생물들의 건강성, 동물매개 전파, 인간사회 전파 가능성을 사전 점검하고 대비

2. 연구 필요성

가 동남극 장기생태 연구의 부재

- 타 대륙 간 접근성이 용이하고 많은 상주 기지와 역사가 오래된 서남극이 몇 십년간의 장기 관측자료가 축적되고 있는 반면, 최근 건설된 장보고기지 주변 동남극 테라노바만 (TNB) 해역은 더 낮은 기온, 만년 해빙과 빙하로 덮인 물리적 제약과 더 오래된 지층과 바위로 이루어진 험난한 지형으로 접근이 어려워 생물계와 생태계 관측자료가 매우 부족한 연구 초기 단계임
- 남극 대륙은 남극횡단산맥을 경계로 동, 서로 나뉘어 고도가 낮은 서남극이 극심한 온도 상승을 보이고 있는데, 연구소 기후팀의 미래 예측 결과, 결국에는 동남극의 온난화 조절 능력은 한계에 부딪히고 동남극도 급격한 온난화를 겪을 것이라고 경고. 이는 온난화 초기 생태계 반응 연구에 마지막 기회로 볼 수 있음
- 실제로 남극 전지역에서 일어나고 있는 빙하 무너짐과 급격한 해빙 감소가 최근 장보고기지 해역에서도 발생하고 있는데, 급격한 캠패 빙하 용빙과 해빙 감소, 담수의 증가는 저서생태계와 얼음환경에 의존해 사는 해양 저서생물들과 새, 황제펭귄, 물범 같은 상위 포식자들의 먹이와 개체군 변동에 큰 영향을 미치고 있음
- 온난화로 인한 극지 빙권 축소와 빙하후퇴는 서식환경을 파괴해 얼음 의존성 극지 생물의 멸종, 군집변동, 외래생물의 유입, 멸종, 우점종 변동을 일으켜 극지 생태계의 구성과 기능을 변동시키는 주요 요인으로 작용
- 동남극 연안은 남극은어, 황제펭귄의 주요 서식지로 실버피쉬베이와 군락지는 SACR에서 정한 취약생태계와 연결되어 있어 서식지 보존 노력이 시급함

나 극지서식 고유 생물계 (Polar Biom) 정보의 부재

- 현재처럼 기후변화가 지속되면 기후변화와 서식지 파괴가 계속된다면 금세기말까지 지구상 생물종의 50%가 멸종하는 6차 대멸종 위기에 처할 수 있다고 경고하였고 스웨덴 스톡홀름대학의 스톡홀름 충격복원력센터는 생물다양성 소실 문제를 21C 당면한 가장 중요 현안으로 뽑음
- 2022년 네이처 기후변화 학술지에 2100년까지 해양생물 중 84%가 높은 멸종위험을 겪게 되고, 2.7%는 심각한 멸종위험을 겪을 것이며 열대와 극지방일수록 멸종위험이 클 것으로 예측. IPCC SROCC(남빙양 생물종과 생태계) 보고서에 의하면 극지에서는 크릴, 산호, 저서생물 전반, 냉수 어종, 해양조류, 황제펭귄 등이 멸종 위험이 크다고 경고
- 동남극은 수천 킬로 연안으로 이어지는 고유하고 독특한 해빙생태계가 있으며 남극 생물 80% 이상의 산란장과 서식장으로 역할하고 있음. 이 해빙생태계에 서식하는 생물들의 정보는 극히 제한적으로 일부 육안 식별이 가능한 중대형 분류군 위주로 보고되고 있어 다양성 정보 부재
- 세계에서 가장 큰 종다양성 데이터 네트워크인 GBIF (Global Biodiversity Information

Facility)를 이용한 20년간의 자료 분석 결과 종다양성 데이터가 다양한 학문 분야에 가교 역할과 통합에 기여하고 있음을 보여줌으로써 포괄적이고 광범위한 종다양성 데이터 확보가 중요함을 확인

- 생물다양성 감소가 생태계 균형을 깨고 생물자원과 인간의 삶을 파괴함에도 이를 위한 생태 조사는 광범위한 시간, 공간적 규모와 비용이 필요하다는 문제점이 있음. 이를 해결하기 위해 인공위성, 인공지능 등의 기술 활용이 빠르게 발전 중으로 국제적으로 인공지능 기술분야의 대표적인 학회로 BirdCLEF, PlantCLEF, SeaCLEF 등이 있고 저서생태 분석 기술에 관한 논문들이 최근 5년 사이 급증하고 있어 적극 활용해야 함

다 온난화로 인한 미생물 유해성 발생 증가 및 생태계 붕괴 위험성

- 온난화로 동토층이 녹고 무너지며 얼음에 갇혀있던 유해균, 미지의 세균들이 드러나 새로운 문제점으로 대두. 극지역 기후변화가 전 지구적으로 영향을 주는 감염병 발생에 영향을 줄 수 있는 잠재성을 암시
 - 사례1) 2014년에 3만 년 전의 영구동토층에서 진핵생물인 아메바를 감염시키는 거대 DNA 바이러스(Pithovirus sibericum)가 보고됨. 이들은 인간에게 해롭지 않은 아메바들만 감염시키는 것으로 보고되었지만, 온도증가에 따라 영구동토층 또는 빙하에 묻혀있던 고대(古代) 유해 미생물이 기후변화로 인해 방출될 가능성이 증가
 - 사례2) 2016년 시베리아 영구동토층에 매장된 사체기원으로 추정되는 탄저균에 의한 순록의 집단 사망과 러시아 유목민의 사망 사례 발생
 - 사례3) 2022년 고병원성 조류독감 H5N1으로 수십만 해양조류가 폐사하여 SCAR AWHWG (Antarctic Wildlife Health Working Group)에서 H5N1이 2022/23 하계시즌 남극해 유입 위험성을 경고
- 많은 연구가 해빙 감소로 병원체 확산이 더 진행될 것이며, 바다 야생동물들이 새로운 서식지를 찾아 이동하면서 새로운 감염병 이동 통로가 생기고 궁극적으로 이동거리 증가, 스트레스 등으로 질병에 취약해질 것이라고 경고. 또한 순록, 물범 등의 멸종은 이들 동물에 의존해 살아가는 극지방 원주민의 생계를 위협하고 환경과 동물, 주민들의 상황이 계속 열악해질 것이라는 경고하고 있음
- 감염병 유발 가능성을 지닌 미생물의 분포 데이터를 확보하고 온도와 활성 간 상관성을 기반으로 잠재적 감염 위험성을 파악하는 것이 필요. 더 나아가 동물매개 전파 가능 경로를 미리 예측하여 선제적 대응으로 방역체계를 구축함으로써 눈에 보이지 않는 극지 유래 감염병에 대비할 시급성이 있음

3. 연차별 연구목표 및 연구내용

가 최종 및 단계별 성과목표

1) 최종 목표

■ 온난화에 따른 극지 서식 환경변화관측 기술 고도화 및 생물의 적응기작 분석을 통한 생태계 상호작용 진단과 예측

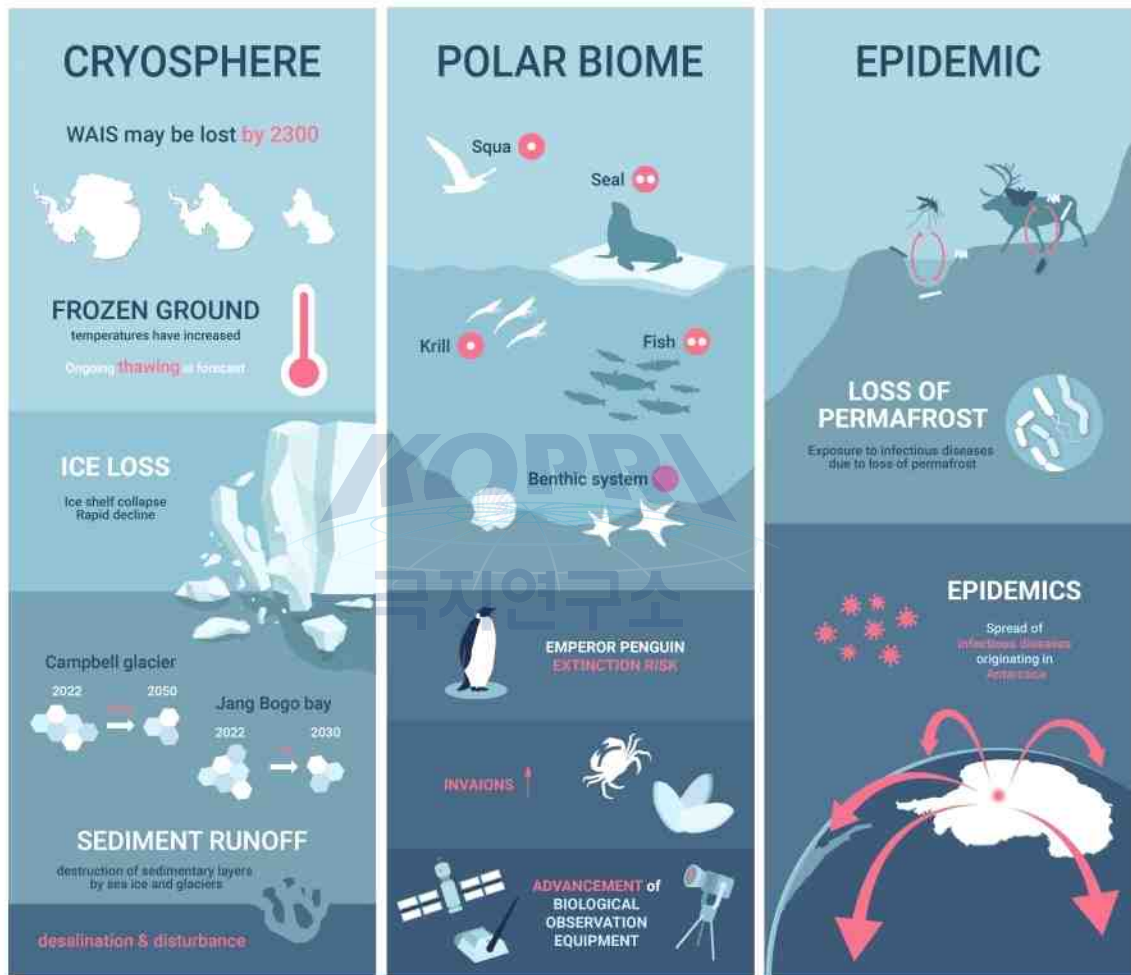
- 극지 생물의 유일한 서식환경인 남극, 북극에 어떻게 적응 진화해 왔으며, 향후 +2℃ 기후변화가 야기하는 급격한 해양환경, 해빙, 빙하 변동에 어떤 영향을 받으며, 어떻게 대응할 것인지를 이해하기 위해 극지 서식환경 장기관측과 미생물부터 최상위 포식자 척추동물까지 포함하는, 먹이망 핵심생물 중심의 종합적인 정보를 구축하고 생태계 건강성과 복원력을 예측하고자 함

○ 최종성과물

- **극지바이옴 지식허브** (Knowledge Hub for Polar Biome) 구축: 극지 생물다양성, 먹이망 핵심생물종 군집정보, 유전정보를 포함하는 생물, 생태환경 장기 관측자료 제공
- **BL2** (생물안전 2등급 (Biosafety Level 2) 구축: 동토층 유래 병원성 미생물 및 감염성

물질 등의 위험성 평가, 동물매개 전파가능성, 유해균의 신속한 검출기법 확립, 마이크로바이옴 기반 극지 생물 건강성 지표 제시

- 캠패빙하 2050년 거동 장기예측모형(1건), 장보고만 해빙 2030년 거동모형(1건), 장보고만 특화 연안생태모형 1-D (1건)구축: 모형 3건 종합으로 얼음환경변화와 연안생태계 간 상호반응 예측
- AI기반 수중영상분석법 개발: 수중드론과 AI 기반 종식별 분석기법 접목으로 관측기술 고도화
- BLUE-Belt: 뉴질랜드/이태리/영국/칠레/북극이사회의 협력연구를 통해 국제 연구 네트워크 공고



2) 성과 목표

가) 1단계 성과목표(2020.01.01. ~ 2022.12.31)

- (제1세부) 장보고만 연안 환경요인과 주요 생태특성조사, 서식환경요인과 생태계반응 연구, 연안 생태계에 대한 해빙과 빙하 영향평가
- (제2세부) 극지물범의 서식환경, 포획기술 습득, 행동자료를 통한 해저환경 관측자료 구축, 물범의 극한지 적응행동의 생태적 기작 규명
- (제3세부) 북극권 서식 유해 미생물 분석 방법 확립 및 탐색 미생물의 병원성 검증 기반 마련, 환 북극권 유해 미생물의 정확한 위험성 평가를 위한 국내외 전문가 그룹 연구 네트워크 확립

나) 2단계 성과목표(2023.01.01. ~ 2025.12.31)

- 캠벨빙하와 장보고만 해빙을 테스트베드로 구축하여 남극 전체에서 발생 중인 급격한 Ice loss가 야기하는 연안생태계 교란, 생물소실/멸종과 이동/복원 과정을 이해하는 표본 제시
- 급격한 해빙과 캠벨빙하 소실, 담수 유입, 물질순환 등 서식지 환경변화에 따른 먹이망 핵심종들의 변화와 손실, 섭식방식, 행동방식 등의 통합적 생물센서스 구축
- 유해성 병원균 분포 및 기작 규명을 통한 위험성 평가 및 대비로 극지역 고유생물들의 건강성, 동물매개 전파, 인간사회 전파 가능성을 사전 점검하고 대비

나 연차별 연구목표 및 내용

1) 1단계 연차별 연구목표 및 내용

구분	년도	성과목표	연구내용
1차년도	2020	극지역 서식환경 관측기술 고도화	-위성관측 (캠벨빙하, 장보고만 해빙) 정보 -포획 및 태깅 기술 매뉴얼 작성 및 신규 개발 장비 테스트 -해양환경장기관측 및 생태계모형실험 -DB 구축
		서식환경 변화에 대한 생물 적응기작 규명	-주요생물 적응기작 -물범의 행동 및 생활사에 따른 생리 변화 연구를 위한 시료 수집 -유해 미생물 유전정보 탐색 방법 비교 분석 -북극권 환경 시료 대상 유해 미생물(바이러스 포함)의 유전정보 탐색 -잠재적 병원성 추정 미생물 분리 및 동정
		공동연구 네트워크 및 기술협력	-남극 해빙환경 관측 장비 개조/개발 -체계적이고 종합적인 유해 미생물 탐색 및 위험성 평가를 위한 전문가 자문 그룹 구성
2차년도	2021	극지역 서식환경 관측기술 고도화	-위성관측 (캠벨빙하, 장보고만 해빙) 정보 -물범 행동자료 DB구축(깊이별 염도, 수온 등) -해양환경장기관측 및 생태계모형실험 -DB 구축
		서식환경 변화에 대한 생물 적응기작 규명	-주요생물 적응기작 -물범의 행동 및 생활사에 따른 생리 변화 연구를 위한 시료 수집 -물범 개체별 조직 시료 분석을 통한 생명자원 특성 분석 -환경 시료 내 바이러스의 탐색 -북극권 환경 시료 대상 유해 미생물의 유전정보 탐색 -잠재적 병원성 추정 미생물 생리특성 정보 및 유전체 확보
		공동연구 네트워크 및 기술협력	-남극 해빙환경 관측 장비 개조/개발 -전문가 자문 그룹 워크샵 개최
3차년도	2022	극지역 서식환경 관측기술 고도화	-위성관측 (캠벨빙하, 장보고만 해빙) 정보 -물범 행동자료 DB구축(깊이별 염도, 수온 등), 행동권 관측 지도 -해양환경장기관측 및 생태계모형실험 -DB 구축
		서식환경 변화에 대한 생물 적응기작 규명	-주요생물 적응기작 -물범의 행동 및 생활사에 따른 생리 변화 연구를 위한 시료 수집 -북극권 환경 시료 내 잠재적 유해 미생물의 종 목록 및 분포도 작성 -북극권 환경 시료 대상 감염성 미생물의 유전정보 탐색 -잠재적 병원성 추정 미생물의 병원성 관련 유전자 분포 확인-병원성 파악을 위한 생리특성 및 분자적 특성 분석
		공동연구 네트워크 및 기술협력	-남극 해빙환경 관측 장비 개조/개발 -한-러 및 국내외 전문가 그룹 워크샵 개최

2) 2단계 연차별 연구목표 및 내용

구분	년도	성과목표	연구내용
1차년도	2023	1.얼음환경 변화와 생태계 영향 예측을 위한 테스트베드 구축	○ 캠벨빙하와 테라노바만 해빙의 시계열 변동성 분석 ○ 얼음환경 변화 연속 관측 ○ 장보고만 연안생태계 모형 구축
		2.극지생물 통합 센서스 구축	○ 1차 생산력 (해빙/해양 미세조류, 해조류) 변동 추적
			○ 물범 행동자료와 실측자료 비교 ○ 해빙 분포변화에 따른 남극도독갈매기의 취식영역 변동
			○ 정점 별 우점 저서생물 군집 조사 ○ 남극가리비 개체군 조사 및 유전적 다양성 평가
			○ 남극은어(자치어) 먹이선호도평가
			○ 생물관측기술 고도화
2차년도	2024	3.환경변화에 따른 유해 미생물 분포 및 기작 규명	○ 유해 미생물 분포 분석 ○ 동토층 내 바이러스의 광역 규모 분포 및 잠재적 병원성 파악 ○ 잠재적 미생물 유해인자 분포 조사
			○ 미생물의 병원성 분석 ○ 잠재적 유해미생물 군주 확보 ○ 극지유래 식물병원균의 병원성 분석
			○ 국제사회 협력 및 기여 ○ One Arctic One Health 주관 미국 페어뱅크스대 협력 강화 행사참여 및 지속가능 워킹그룹(SDWG) 사무국 자료 공유
		1. 얼음환경 변화와 생태계 영향 예측을 위한 테스트베드 구축	○ 캠벨빙하와 테라노바만 해빙의 시계열 변동성 분석 ○ 얼음환경 변화 연속 관측 ○ 장보고만 연안생태계 모형 구축
			○ 1차 생산력 (해빙/해양 미세조류, 해조류) 변동 추적
			○ 해빙 분포변화에 따른 남극도독갈매기의 취식영역 변동
3차년도	2025	2. 극지생물 통합 센서스 구축	○ 연도별 우점 저서생물군집 분석 기반 변동성 분석 ○ 분자마커 기반 남극가리비 개체군 평가
			○ 남극은어(자치어) 먹이선호도 평가
			○ 생물관측기술 고도화
		3. 환경변화에 따른 유해 미생물 분포 및 기작 규명	○ 유해 미생물 분포 분석 ○ 동토층 내 바이러스의 광역 규모 분포 및 잠재적 병원성 파악 ○ 잠재적 미생물 유해인자 분포 조사
			○ 미생물의 병원성 분석 ○ 잠재적 유해미생물 군주 및 유전체확보 ○ 극지유래 식물병원균의 병원성 분석
			○ 국제사회 협력 및 기여 ○ One Arctic One Health 사업 주도 중인 미국 외 북극이사회 회원국가(캐나다 또는 핀란드)와 협력논의 및 지속가능 워킹그룹(SDWG) 사무국에 자료 공유
3차년도	2025	1. 얼음환경 변화와 생태계 영향 예측을 위한 테스트베드 구축	○ 캠벨빙하와 테라노바만 해빙의 시계열 변동성 분석 ○ 얼음환경 변화 연속 관측 ○ 장보고만 연안생태계 모형 구축
		2. 극지생물 통합 센서스 구축	○ 1차 생산력 (해빙/해양 미세조류, 해조류) 변동 추적
			○ 3개년간 해빙 분포변화에 따른 남극도독갈매기의 취식영역 변동 분석

			○ 해역 별 우점 저서생물군집 개념모델 수립
			○ 남극가리비 유효개체군크기 산정 및 구조 변동 평가
			○ 남극은어(자치어) 먹이선호도 평가
			○ 생물관측기술 고도화
		3. 환경변화에 따른 유해 미생물 분포 및 기작 규명	○ 유해 미생물 분포 분석
			○ 동토층 내 바이러스의 광역 규모 분포 및 잠재적 병원성 파악
			○ 잠재적 미생물 유해인자 분포 조
			○ 미생물의 병원성 분석
			○ 잠재적 유해미생물 군주 확보
			○ 극지 유래 식물병원균의 병원성 분석
	○ 국제사회 협력 및 기여		
	○ One Arctic One Health 사업 관련 미국 외 북극이사회 회원국(캐나다, 핀란드)와 실질협력 및벤치마킹과 및 지속가능 워킹그룹(SDWG) 사무국에 자료공유		



제 2 장 국내외 기술개발 현황

제1절 기술동향 분석

1. 국외 기술, 산업동향

가 동남극 지역 장기 생태계 관측 연구 동향

- 뉴질랜드는 INTERACT 프로그램을 통해 남극연안생태계에 대한 장기 연구 수행
- 이태리는 테라노바만에서 연체동물(조개류), 환형동물, 은어와 같은 특정 해양저서생물 개체군들을 대상으로 장기 연구 수행
- 미국 PAL-LTER은 1970년대 시작하여 1) 연내와 연간 변이의 생태학적 결과에 중점을 둔 물리적 강제력(태양복사, 대기, 해빙)에 대한 조사, 2) 2차 생산자(krill, salp)와 소비자(펭귄)의 생활사 매개변수의 조사, 3) 군집구조와 탄소 플럭스(미생물, 플랑크톤)를 중심으로한 생물학적 과정들에 대한 조사, 4) 환경변수와 관련된 생태계 과정들과 연관된 물리/화학/생물학적 모델링. MCM-LTER은 1992년 시작하여 기상학, 빙하, 토양, 호소학(Limnology), 분자생물학(생물다양성), 생태계모델링 등의 연구가 진행되고 있음
- 영국 BioBAS는 기후변화에 따라 종다양성이 어떻게 변할 것인지에 대한 연구를 연안을 중심으로 수행중이며, 종료시기가 2,286년인 RaTS (Rothera Time Series)과제의 일환으로 향후 생태계가 어떻게 반응할 지에 대한 연구를 수행중
- 각 국은 자국의 과학기지를 기반으로 입지환경 조건에 따른 다양한 지표와 기준, 방법으로 환경 요인과 생태계 관측을 진행해오고 있으며, 공통되는 관측항목에 대한 자료 공유로 남극지역의 기후변화 해석을 위해 노력하고 있음

나 로스해 해양보호구역 지정 관련 기초 환경/생태 조사 및 보존조치 확립 과제 수행 중

- 로스해 해양보호구역 연구 및 관리를 위한 장기 연구프로젝트 기획(2020-2026, 뉴질랜드)
- 로스해 해양보호구역의 보존조치(CM 91-05 및 부속서) 제정(CCAMLR)
- 한국, 중국, 이태리 공동으로 인익스프레서블 섬의 남극특별보호구역 지정 추진에 따른 관리계획서 초안 마련(ATCM-CEP 2019, CCAMLR & SC-CAMLR 2019)

다 각 국의 기지를 중심으로 진행되는 다양한 장기 모니터링 프로그램에도 불구하고, 연속적인 장기 관측이 진행되지 않아서 연구 결과 해석에 한계를 나타냄

라 8개의 북극권 국가 [미국, 캐나다, 덴마크, 아이슬란드, 노르웨이, 스웨덴, 핀란드, 러시아]가 참여하고 있는 북극위원회는 워킹그룹인 SDWG를 통해 북극권 지역에서의 전염병 발생 현황 및 S. pneumoniae, H. influenza, Neisseria meningitidis 및 groups A and B streptococci와 같은 병원균 확산을 최우선으로 모니터링하고, 해당 자료를 공유하여, 궁극적으로 이들을 예방하기 위한 다학제 프로젝트를 수행 중

2. 국내 기술, 산업동향

가 본 연구팀이 장보고과학기지 건설 이후 장보고기지 모니터링 연구와 장기생태 연구를 통해 해양 물리·화학 환경요인(해수 온도, 염분, 용존산소, pCO₂, pH, 영양염 등)과 연안 해양생태계 핵심 생물요소(chl-a, 남극도독갈매기 개체군, 물범, 남극가리비 개체군과 저서생물 군집 구조)에 대한 장기 연속 관측 자료를 축적하고 있음 (극지연구소 유일)

- 지난 5년간 한·뉴·이태리 3국 공동 관측 platform을 Cape Evans, Cape Armitage, Mario Zuccelli St., Gondwana St., Jang Bogo St.에 구축하고 공동 운영하며, 공동 수중 탐사 조사를 진행
- 6년 동안 장보고기지 주변 해역에서 저서생물 군집 구조에 대한 장기적, 연속적, 체계적 자료를 구축하고 있으며, 다양한 환경 교란 현상에 비교적 빠르게 반응하여 군집 구조가 변화하고 있음. 예를 들면 30년 전 장보고기지 주변 해역에서 진행된 남극가리비 개체군 연구 결과와 비교했을 때, 현재 개체군의 크기와 성장률이 감소

나 또한 본 연구팀은 SCAR 생명과학분야의 생태계 관측 관련 Expert group인 ANTOS (Antarctic Nearshore and Terrestrial Observing System) 프로그램에서 연안관측 data를

담당하고 있으며 2단계 ANTOS 프로젝트의 co-chiar를 제안받음

다 인공위성 원격탐사 자료를 이용하여 장보고기지 인근 빙하와 해빙의 변동 특성은 2010~2012년 기간에만 수행되었고 빙하와 해빙 변화가 주변 연안 해양생태환경에 미치는 영향은 종합적으로 연구된 바 없음

- 캠벨빙하설 (Campbell Glacier Tongue, CGT)의 단기 관측(2011년 1~11월) 분석 결과 산출된 기저면 용융속도가 그대로 유지된다면 40년 후면 CGT의 두께가 절반으로 낮아질 것으로 예측(Han and Lee 2015, 극지연 해빙예측사업단)

라 로스해 해양보호구역에서 생태계 구조 및 기능 연구 수행 중(2017-2022)

- 원격탐사기법으로 로스해 전반의 해양환경변화 모니터링
- 북빅토리아랜드 연안의 먹이망 구조 및 생태계 내 유기탄소순환 분석
- 크릴의존성 아델리펭귄의 번식생태 및 취식영역 파악

마 극지역에 존재하는 바이러스 및 항생제 내성 유전자 탐색 연구 (극지연구소 주도)

- 남극세종과학기지 주변에 서식하는 펭귄으로부터 신종의 아데노바이러스 유전체를 보고 하였으나(Lee et al, 2016), 해당 연구는 특정 지역에서 단발성으로 보고된 사례로, 이들의 남극 생태계 내 분포 및 영향에 대한 지속적인 연구는 이루어지고 있지 않음
- 남극장보고과학기지 주변 토양의 미생물 군집 모니터링을 위한 연구 수행 과정에서 항생제 내성 유전자의 분포에 관한 연구 결과를 보고한 바 있으나 (Wang et al, 2016), 이들의 분포가 병원성 미생물에 미치는 영향 등을 밝히기 위한 후속 연구는 전무함
- 북극 알래스카 동토층 내 유해 바이러스 존재 여부를 메타지놈 기반으로 탐색하여, 인체에 해를 끼칠 만한 바이러스의 미검출을 보고함. 하지만 본 연구는 사람의 왕래가 거의 없는 지역에서 수행된 사례로, 유해 미생물의 탐색을 위해 오래전 동물의 사체가 쌓인 곳이나 식물 병원균이 나타났던 지역으로의 연구 지역 변화가 필요함을 제안함. 하지만, 연구의 효율성 및 집중화를 위해 해당 연구 주제는 이후 연구에서 제외하기로 하여 추가 연구가 이루어지지 않음 [과제명:‘환북극 동토층 환경변화 분석을 통한 미래 예측 및 유용물질 응용 기술 개발’세부 과제‘북극권 동토층 생태계의 변화 분석 기술개발 (과제번호: 2016M1A5 A1901770) 보고서 발췌]

바 환경부 주관 한반도 상수원 대상 기후변화대응 유해 미생물 연구

- 상수원 [한강, 금강, 주양호, 낙동강, 소양호]에서 유해 미생물 감시기법 개발[2010년~2013년] 및 유해 미생물 모니터링 [2013년~2016년] 수행
- 3년의 연구수행 결과 제시 및 수인성 유해 미생물 모니터링을 통해 장기적인 연구 필요성 제안

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 연구개발의 수행 내용 및 결과

1. 세부연구목표 1. 얼음환경 변화와 생태계 영향 예측을 위한 테스트베드 구축
가 연구내용 1-1. 장보고만 주변 연구영역 확장 및 연안 빙권 위성정보 고도화

○ 빙권 변동성 장기 자료 확보 및 분석

- Google Earth Engine을 활용한 Campbell Glacier Tongue와 Drygalski Ice Tongue의 면적 변화량 모니터링 기간을 Sentinel-1 SAR IW와 EW 자료를 기반으로 2023년부터 2025년까지 확장함
- Campbell Glacier Tongue는 2023년부터 2025년 3월까지 매월 면적 변화량을 계산하였음. 2023년 말에 최소 면적을 기록 후 부분적인 증감(calving)이 관측됨
- 2016~2020년 사이에 큰 calving이 발생했던 과거 기록이 있으며, 2025년 말에 유사한 규모의 calving 발생 가능성이 존재함. 다만 이전 calving 이후에는 면적이 빠르게 rebound 되는 경향이 있었으나, 2021년 이후부터는 평균적으로 면적 변화가 크지 않음. 따라서 2025년 대규모 calving 발생 여부는 지속적인 관측이 필요함
- Drygalski Ice Tongue는 SAR 영상 획득이 연속적이지 않았음. Sentinel-1의 IW와 EW 모드 영상 모두를 사용하였으나 2024년 1월과 2025년 1월 면적 정보만 업데이트가 가능하였음. 2021년 calving으로 면적 감소가 있었으며, 이후 점차 면적이 회복되어 2016년 수준까지 rebound됨. 영상 자료의 부족으로 인해 면적 변화의 세부 경향 분석에는 한계가 존재함

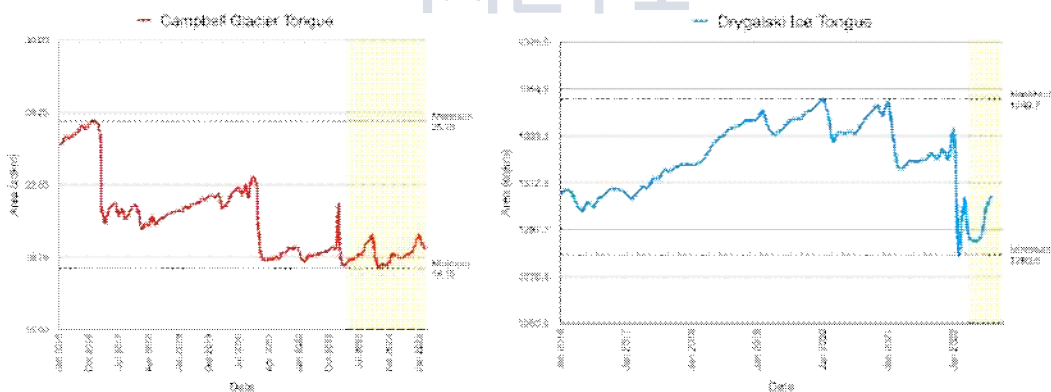


그림 1. 업데이트된 Campbell Glacier Tongue와 Drygalski Ice Tongue의 면적 변화량

○ 상관관계, 인과관계 분석을 한 장보고만 주변 변동성 장기 예측

- 3차년도 연구는 테라노바만 지역의 정착면적 변화에 영향을 미치는 환경 요인을 연장된 시계열 자료를 활용하여 규명하고자 하였음. 구체적인 목표는 아래와 같음
 - 폴리나 (polynya) 활동, 근지표 기온, 바람 동역학의 영향 정량화
 - 선형 및 비선형 모델링 접근 방식 비교
 - 시차 및 간접적인 영향 구조 식별
 - 해석 가능한 머신러닝 모델 개발 및 예측 수행
- 데이터 및 데이터 전처리

- 총 분석 기간 : 2003 ~ 2018년 (월 단위)
- 종속변수 : 테라노바만 폴리나 면적, 장보고기지 및 마누엘라 AWS 지점과 가장 가까운 ERA-5 지표 기온(skin temperature) 및 바람 성분 (u10, v10)
- 모든 변수에 대해 STL 분해 (LOESS 기반 계절-추세 분해)를 수행하여 계절성과 추세를 단기적 변동성에 집중하기 위해 잔차 (residual)만을 분석에 활용함

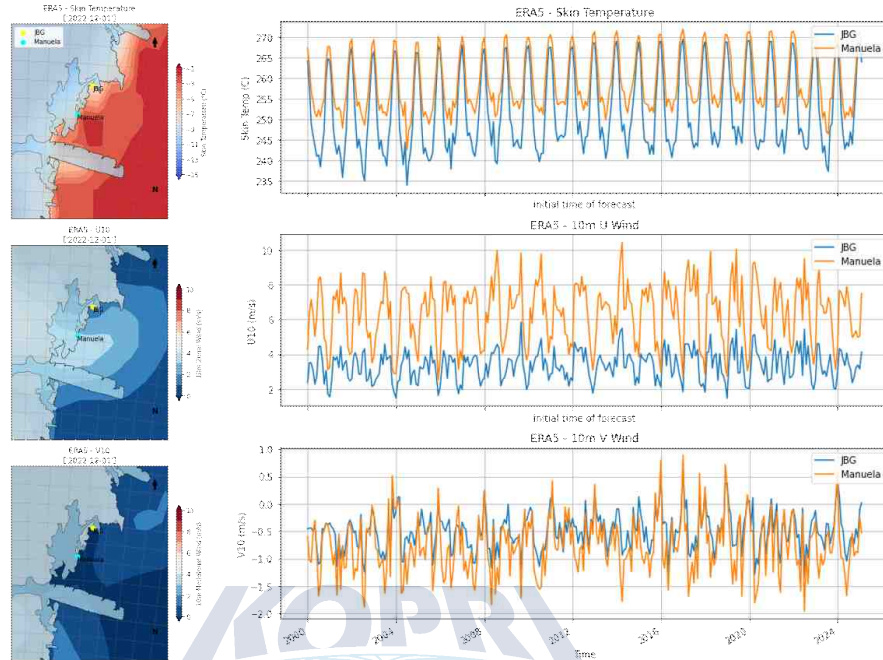


그림 2. 확보된 ERA-5 지표 기온 및 바람 성분. 장보고기지 및 마누엘라 AWS 위치와 가장 가까운 픽셀 값을 사용함

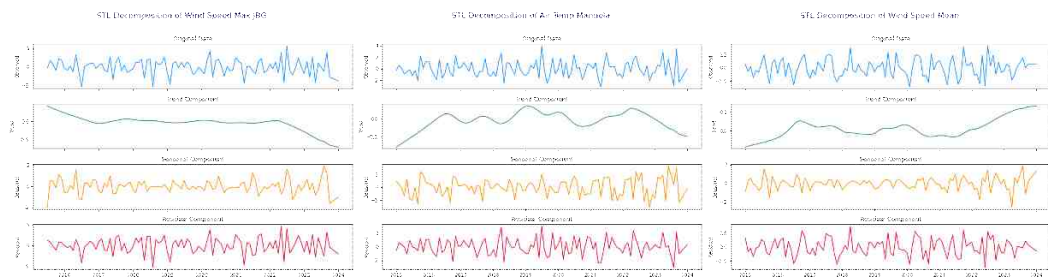


그림 3. STL 분해를 수행한 계절성, 추세, 잔차

- 예를 들어 폴리나 면적의 경우 STL 분해 결과 매우 뚜렷한 계절성을 보였으며, 장기적으로 완만한 추세 변화를 나타냄. 이를 제거하였을 경우 복잡한 고주파 잔차 구조를 보이는 것을 확인함. 이러한 고주파 잔차 구조는 단기 이상치 분석을 위한 잔차 사용의 타당성을 뒷받침함 (그림 3)
- Pearson 상관 분석을 통해 환경 요인 간 유사성을 분석한 결과 동일 지점 내 바람 성분 간 강한 상관 관계가 있으며, 장보고기지와 마누엘라 AWS 지점 사이에 기온 또한 높은 유사성을 갖는 것을 확인함. 이러한 높은 상관성은 ERA-5의 낮은 공간해상도로 인하여 발생하는 것으로 의심이 되기 때문에 PCA 성분 분석을 통하여 차원을 축소하고 다중공선성 완화하여 주요 패턴만을 사용하고자 하였음. 정착빙

과 타 변수들 간에는 약상 상관관계가 관측됨

- 주성분 분석을 통해 확보된 총 4개의 변수(정착빙 면적, 폴리냐 면적, 바람, 표면 온도)를 활용하여 VAR 선형 모델을 구축. 그 결과 정착빙의 자기회귀 효과가 매우 강하며 (fastice_resid_lag : 1 계수 ~ 0.65), 그 외 변수들은 유의한 영향을 끼치지 못하는 것을 확인함. 결론적으로 선형 구조 하에서는 교차 변수 간 의존성은 미미한 것으로 고려됨
- Granger 인과성 검정 또한 선형 관점에서는 어떤 환경 변수도 정착빙 변화를 유의미하게 예측하지 못함을 확인함

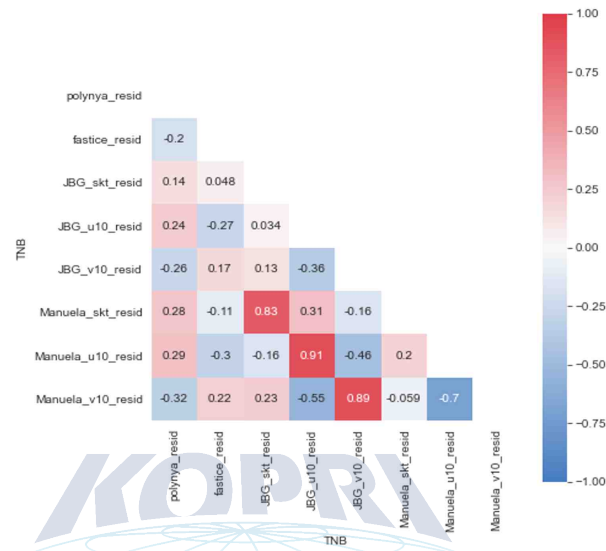


그림 4. 변수 간 상관 관계도

- 따라서 복잡하고 비선형적인 관계를 효과적으로 모델링이 가능한 XGBoost 회귀 알고리즘을 주요 모델링 기법으로 채택함. 정착빙 추정을 위한 입력변수로는 폴리냐 면적과 ERA5 재분석 데이터에서 추출한 6개의 대기 변수 (장보고 기지와 마누엘라 AWS의 표면 온도, 10m 바람 성분)를 사용함. 예측 변수의 1개월부터 5개월 전 시차(time-lagged) 변수가 피쳐 엔지니어링을 통해 포함되어 총 42개의 예측 변수를 구성함
- 모델의 훈련은 학습기간은 2003년부터 2015년, 테스트/평가 기간은 2015~2017년 12월으로 설정하였으며, 모델의 성능을 최적화하기 위해 하이퍼파라미터 튜닝 프로세스가 수행됨. 이는 2017년 12월까지 처리된 데이터의 초기 80% 구간에서 진행함
- 시차를 포함하여 학습된 모델은 2018년 1월부터 2022년 12월까지의 정착빙 면적을 롤링 예측(Rolling Prediction)하는데 사용함. 예측 기간 동안에는 실제 정착빙 면적 값은 미지수로 간주됨
- 모델의 성능 지표로 훈련 세트는 RMSE: 356.72 sqkm, R2: 0.54, MAPE: 23.62%였으며, 검증 세트 기준 R2: 0.57, RMSE = 345.10 sqkm, MAPE = 23.09%를 나타냄. 이는 시차를 포함하지 않은 모델(No-Lag model)의 성능(R2: 0.38) 대비 상당히 향상된 결과이며, 이는 정착빙 역학에서 시차 기반의 비선형적 시간 의존성이

중요함을 시사함

- 학습 모델의 결과의 해석 가능성을 확보하고 변수들의 기여도를 파악하기 위해 SHAP(SHapley Additive exPlanations)을 활용함. SHAP분석은 기본 값(학습 데이터 세트에 대한 평균 모델 결과값)으로부터 산출된 모델 결과를 최종 모델 결과로 산출하는 것에 대한 변수들의 공헌도를 나타냄(그림 4)
- SHAP분석 결과 시차를 포함한 모델에서 1개월 시차를 가진 마누엘라 AWS 표면 온도가 가장 큰 예측 인자임을 나타냈으며, 그 다음은 2개월 시차를 가진 마누엘레 AWS의 동서 방향 바람으로 확인됨. 시차 변수의 도입은 시간 메모리 효과를 포착하며 과거의 대기 상태가 현재의 정착빙 상태에 지속적인 영향을 미치는 것으로 판단됨. 또한 현재 월의 폴리냐 면적은 정착빙 예측에 유의미한 예측 인자이며 작은 폴리냐 면적은 정착빙 면적 증가에 기여하는 것으로 나타남

SHAP Dependence Plots for Top 5 Features

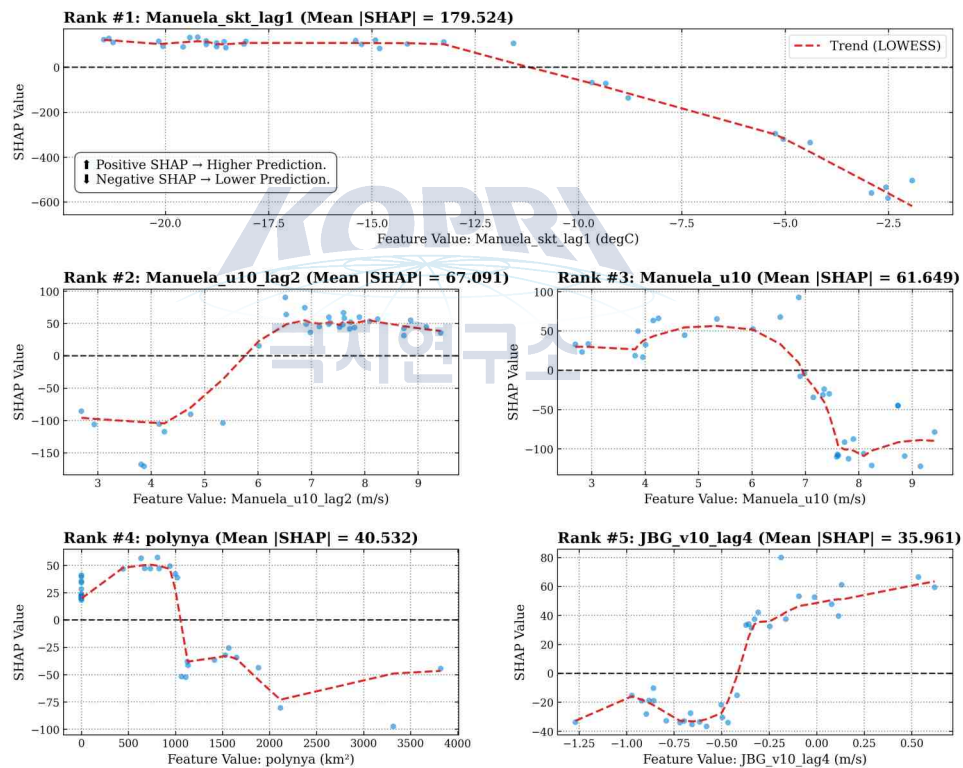


그림 5. SHAP 분석 결과

- 본 연구에서는 훈련된 XGBoost 모델을 사용하여 롤링 예측(Rolling Prediction)을 수행하였으며, 2018년 1월부터 2022년 12월까지의 정착빙 면적을 추정함. 이 예측 결과는 모델이 정착빙 관측 데이터가 없는 기간 동안에도 연속적인 예측 가능성을 보이는 것을 입증함. 예측의 불확실성은 1,000회 독립적인 훈련 실행의 결과를 집계하여 표준 편차로 추정 및 제시함

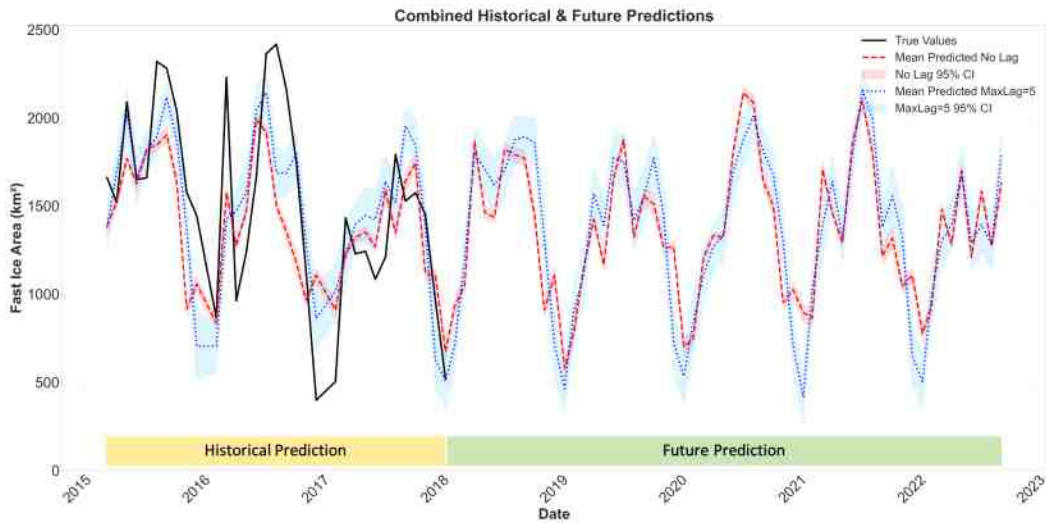


그림 6. XGBoost 모델을 활용하여 예측한 정착빙 면적

나 연구내용 1-2. 얼음환경변화 연속관측

○ 해양, 해빙, 빙하 기초 자료 장기관측 및 획득 (해양코어, 연안환경 물리화학 자료)

- 장보고기지 주변 해양조사

- 아라온을 이용하여 2025년 1월14일 12시간동안 장보고기지를 중심으로 테라노바만 북쪽해역 19개 정점 조사 (ANA15B-JLTER) (그림 7)

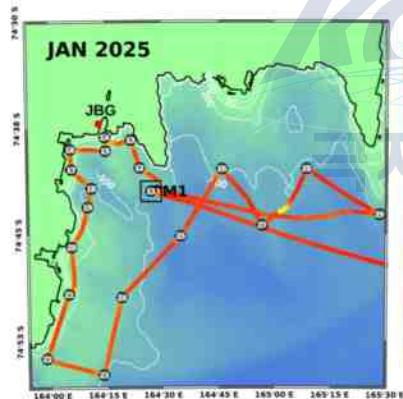


그림 7. ANA15B-JLTER관측해역과 정점. 장보고기지를 중심으로 서쪽해안선을 따라 2개 라인과 Cape Washington 까지 동서방향으로 2개 라인 정점을 정하여 장보고기지 해양환경 특성 조사에 이용

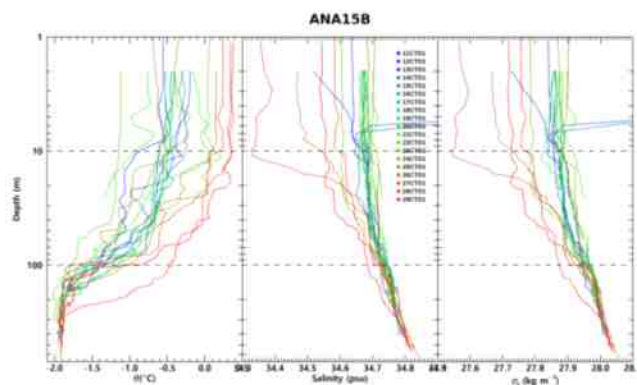


그림 8. 19개 정점의 수온, 염분, 밀도 수직분포

- 19개 정점관측을 중심으로 장보고기지 해양환경을 보면 테라노바만 서쪽 해안을 따라 수온이 낮고 염분이 높은 저온고염수가 수심 약 100 m 상부를 차지하며 캠벨빙하에서 Cape Washington 까지 테라노바만 북부는 상대적으로 수온이 높고 염

분이 낮은 고온저염수가 혼합층에 존재 (그림 8)

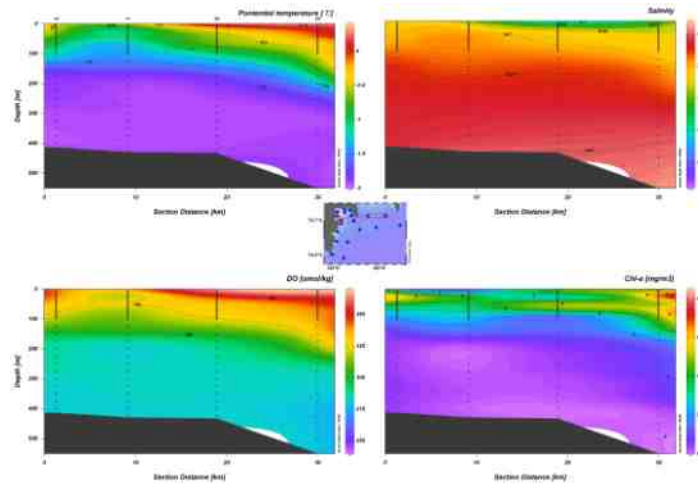


그림 9. 수온, 염분, 용존산소, 엽록소의 정점 18, 11, 26, 28을
있는 북쪽라인 분포도

- 장보고기지를 중심으로 수괴가 나뉜 이유는 난센빙붕으로 내려오는 강력한 katabatic wind로 만들어진 저온고염의 수괴가 시계방향으로 돌면서 서쪽 연안을 따라 북으로 상승하며 캠벨빙하 해역까지 흘러오다 막혀 머물다가 Cape Washington이 있는 곳으로 흐르면서 태양복사열로 더워지면서 빙하와 해빙을 녹여 고온저염수로 변하는 것으로 예측
- 캠벨빙하와 Cape Washington을 잇는 테라노바만 북쪽라인을 보면 표층에서 서쪽에 저온고염수가 동쪽에 고온저염수가 분포함을 볼수 있으며, 그보다 아래에 있는 정점 20-25-27-29를 잇는 라인에서도 이보다 더 심한 대조를 보임 (그림 9)
- 이로 미루어 장보고 기지 연안환경은 난센빙붕에서 Katabatic wind 로 만들어진 저온고염수의 영향을 받은 해역에 있다고 볼 수 있는데, 그림 10에 보인 바와 같이 남쪽에서 북쪽으로 가면서 혼합층 수온이 점진적으로 증가하며, 그에 따라 생물활성이 증가하여 엽록소가 높아지고 용존산소도 증가함을 볼 수 있음

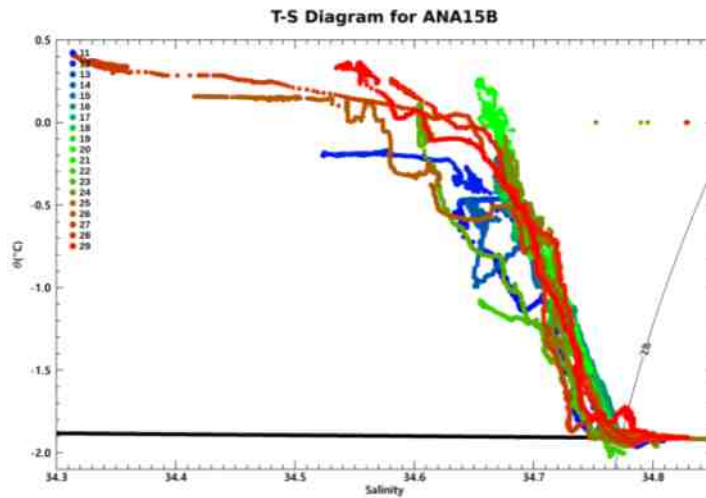


그림 10. 수온-염분 상관도

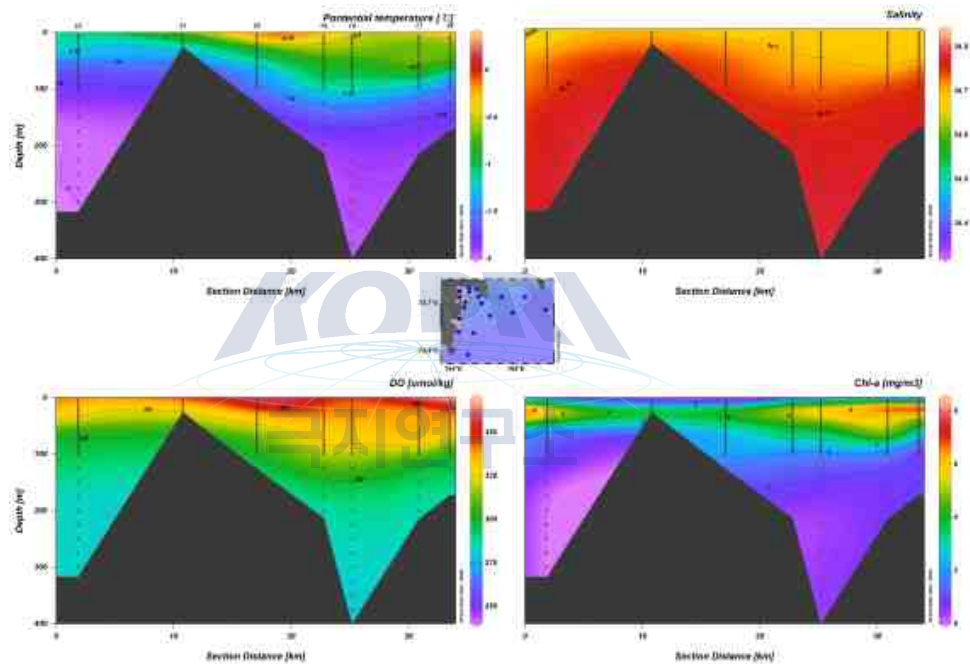


그림 11. 테라노바만 서쪽 연안을 따라 수온, 염분, 용존산소, 엽록소 분포도

- 해양수괴를 구분하는 수온-염분 상관도 (T-S diagram)를 보면 표층의 고온저염수와 심층의 저온고염수로 뚜렷히 양분되며 중간에 이들 end-member 점이 지대가 유지됨 (그림 11)
- 수온 0도와 염분 34.66을 중심으로 한 혼합층수와 결빙온도인 -1.9도 염분 34.77을 중심으로 한 저층수사이 혼합이 이루어지고 있으며, 저층수에는 겨울철 해빙형성과정에서 만들어진 염분증가로 결빙온도를 따라서 34.83 까지 증가함을 볼 수 있으며 표층에서는 여름 해빙 용해로 매우 작은 수온증가와 급작스런 염분감소를 볼 수 있음
- 장보고기지 해양 물리환경과 생태환경 연변동
 - 장보고기지 동쪽 연안에 있는 집수조에 설치한 해양환경 모니터링 시스템을 이용하여 취수구에서 끌어드린 수온과 염분 등의 물리환경 지시항목과 용존산소, pH,

pCO₂, 엽록소, CDOM, 탁도 등의 생태환경 지시항목들을 연속 관측

- 2025년 1월 기지를 방문하여 집수조의 열악한 환경에서 측정하던 모니터링 시스템을 해안으로 약 20 m 정도 근접한 펌프동으로 이동(그림 12)



그림 12. 해양환경모니터링 시스템이 있던 집수조와 새로 이동한 해양관측동과 장비 설치 전경

- 해양물성 연변화

- 수년간 해양환경 모니터링 시스템의 관리부실로 인한 염분센서 오작동으로 2024년에 획득한 자료에서 신뢰할 만한 자료는 2024년 초에 한정되었음
- 최저염분이 보통 2월에 관측되는 것에 반해 2024년에는 1월 중순 육지에서 녹은 눈의 영향으로 최저 염분이 관측되어 1월에 32.2 의 월평균 가장 낮은 값이 관측되었으며 6월과 7월의 제한된 자료이긴 하나 가장 높은 33.2 염분이 관측되어 예년과 비슷한 경향은 보이나 절대값이 약 1 정도 작아 전도도 센서에 문제가 있음을 암시함

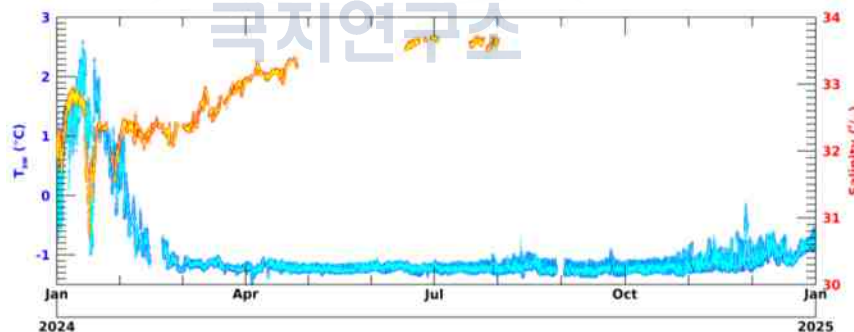


그림 13. 2024년 장보고 기지 앞바다 수온과 염분변화

- 수온은 예년처럼 1월에 높으나 염분과 마찬가지로 1월 중순 육지에서 기원한 용설수로 인해 평균수온 약 1도로, 이전 해에 비해 약 0.6도 정도 낮으며, 일반적으로 해빙이 녹으면서 12월부터 수온이 상승하기 시작하는데 2024년에는 그 증가 정도가 0.4도로 미미함
- 여름철 고온저염수와 겨울철 저온고염수의 뚜렷한 변화는 태양에너지 유입의 유무와 (modified) Circumpolar Deep Water (CDW) 영향 유무에 기인하는데, 여름철 강한 태양에너지로 녹은 해빙과 빙하로 육지와 맞닿은 장보고기지 주변 해역이 저염화되며 대기로 노출된 표층수의 수온이 증가하여 고온저염수가 형성되며 가을이 되면서 태양에너지 감소로 기온이 급격히 하강하면서 수온도 낮아져 해빙이 형성

되면서 brine rejection에 의해 저온고염화가 진행되고 CDW의 계속적인 유입으로 고염화는 다음 여름까지 진행됨

- 해양생태환경 변화

- 2024년 8월에 보정기체가 소진되어 기기 보정이 불가하게 되면서 신뢰할만한 자료 획득에 실패. 대기 이산화탄소는 1월에서 7월까지 418 ppm에서 422 ppm 으로 약 4 ppm 증가로, 2024년 전지구 평균 증가속도인 3.58 ppm을 초과하였는데, 이는 주기적인 장비관리 부실과 거의 10년 동안 장비개선이 전무함에 기인한 것으로 추정

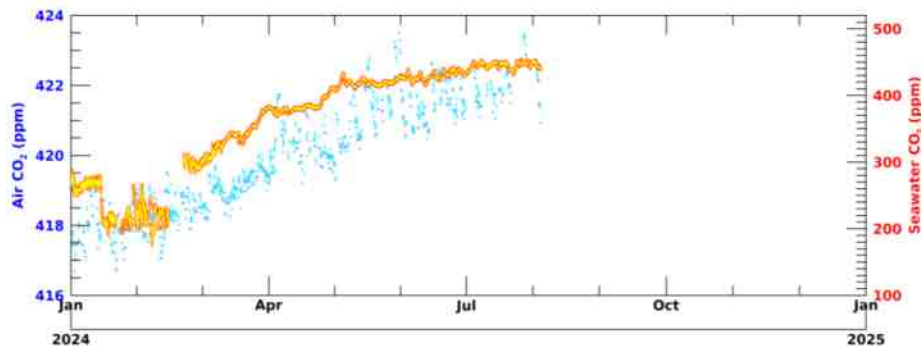


그림 14. 2024년 해양과 대기 이산화탄소 농도 변화

- 해양 이산화탄소 농도는 2월에 월평균 최저농도인 214 ppm을 기록하였으며 5월에 최고 농도인 406 ppm을 기록하여 6월 이후 동계시즌에도 해양 이산화탄소 증가가 진행 중으로 판단되는데, 일반적으로 최고 농도가 생물활동이 왕성하게 시작되기 이전인 9월 또는 10월에 관측되는데 2023년의 경우 증가량 (동계pCO2 - 하계 pCO2)도 약 300 ppm 에 달해 2024년 약 190 ppm (5월 pCO2 - 2월 pCO2)에 비해 월등히 높음

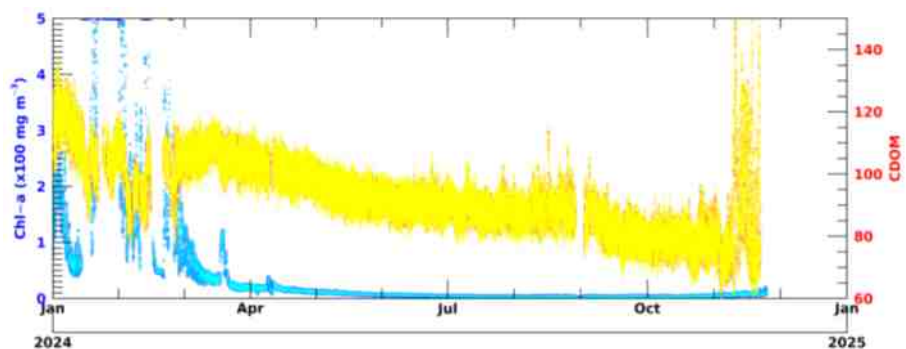


그림 15. 2024년 엽록소 (Chl-a)와 발광용존유기물 (CDOM)의 연변화

- 엽록소 (Fluorescence) 는 예년과 마찬가지로 2024년에도 1월과 2월에 높게 관측되었지만 절대값은 대체적으로 낮음
- 여름철 Chl-a bloom이 육지에서 유입되는 용설수가 관측된 1월 하순에 일어나 육지에서 유입되는 담수에 있는 철분이 이러한 bloom을 일으키는 기폭제 역할을 한 것으로 추측(그림 15)

- CDOM 이 보통 3월 이후 초봄 bloom 이 일어나기 전까지 일정한 값으로 유지하는데 2024년에는 그림 15에 보여주듯 11월 초까지 점진적으로 감소하는 경향을 보여 예년과 다른 겨울철 생태환경이 관측되는데, 박테리아 등 미생물에 의한 분해속도가 증가했거나 CDOM 의 유입원이 감소하였을 것으로 추측됨
- 탁도는 육지에서 유입되는 용설수 또는 해양에서 번성하는 식물 플랑크톤에 의해 좌우되는데, 그림 16에 보인 장보고 기지 연안 탁도는 엽록소 경향과 매우 유사하여 식물플랑크톤 영향을 주로 받았을 것으로 예상하지만 1월 중순에 관측된 저온저염수가 탁도 피크와 유사한 시기여서 육상기원수의 영향을 완전히 배제할 수 없음
- 탁도가 여름철에 높고 겨울에 낮은 이유에 해빙의 역할을 배제할 수 없는데, 해빙이 완전히 덮혀있는 경우 탁도에 영향을 미칠 수 있는 입자유입이 완전히 차단됨

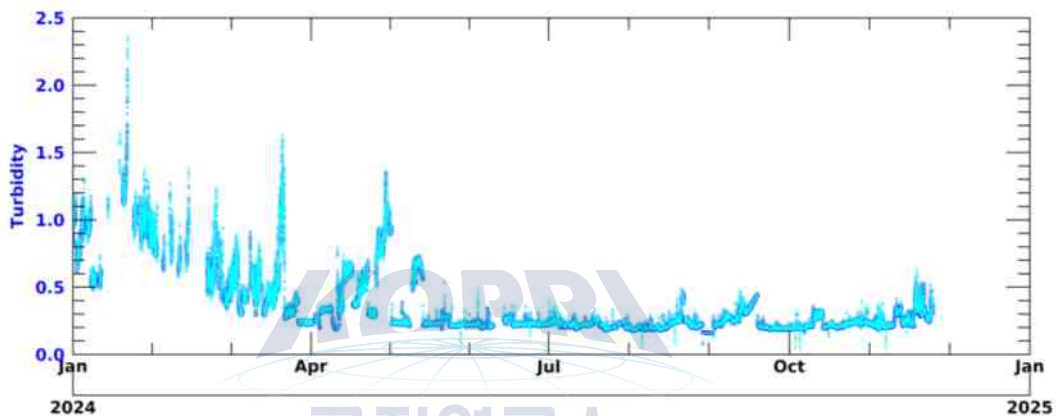


그림 16. 2024년 장보고기지 연안 탁도 (Turbidity)

- 24/25 시즌 해빙코어 확보

- 24년 12월 장보고만 해빙위 3개 정점 ($74^{\circ} 37' 39.64''$ S, $164^{\circ} 14' 50.60''$ E / $74^{\circ} 37' 56.19''$ S, $164^{\circ} 14' 42.82''$ E / $74^{\circ} 38' 12.54''$ S, $164^{\circ} 14' 34.80''$ E)에서 해빙코어 3 set 확보 (그림 17)
- 장보고만 해빙의 공간적 변동성을 감안하여 약 500m 이격된 3개의 정점 선정
- 모든 정점에서 약 2.7m의 해빙과 더불어 코어 말단부위의 해빙미세조류 확보
- 장보고만의 얼음생태계 이해를 위해 해빙 아래 존재하는 platelet ice 확보
- 채집된 해빙 코어의 엽록소, 염분, 종조성, HPLC 분석 예정 (25. 하반기)



그림 17. 해빙코어 정점 및 해빙코어 시추작업

- 저서 계류 바이오로거 데이터 확보 및 운용

- 장보고과학기지 인근 해양환경 모니터링을 위해 장보고 기지와 독일 곤드와나 기지 인근 연안 각각 수심 15m와 20m에 2기의 바이오로거 운용 중 (장보고 바이오로거: 74°37' 39.38" S, 164°14' 38.98" E, 곤드와나 바이오로거: 74°38' 16.32" S, 164°13' 49.53" E)
- 장보고 바이오로거는 2017년 2월 10일부터 2022년 12월 6일까지 수온, 염분농도, 클로로필 a 항목에 대해 6개년 연속자료 확보 중이며, 2024년 12월 27일 점검 및 데이터 백업을 위한 회수 실시하였으나 기기 연결 실패로 뉴질랜드 기술팀과 원인 점검 중 (PAR 센서에 기록된 수온데이터 확보 완료; 그림 18)
- 곤드와나에 계류 중이던 바이오로거를 검교정을 위한 반출 계획을 취소하고 장보고 바이오로거로 대체하여 현장 재설치 완료(그림 18)
- 곤드와나 바이오로거는 2019년 2월 25일부터 2024년 12월 10일까지 수온, 염분농도, 클로로필 a, 광합성 유효방사(PAR), 탁도 항목에 대해 6개년 연속자료 확보중이며 (그림 19), 2024년 12월부터 신규바이오로거로 교체 설치하여 데이터 수집 중 (그림 19)
- 장보고와 곤드와나 바이오로거 모두에서 남극 여름동안 (주로 7월에서 9월 사이) 염분농도의 감소를 보이고 있으며, 이에 대한 가설 및 해석을 위해 추가적인 데이터 확보 예정 (그림 18, 19)

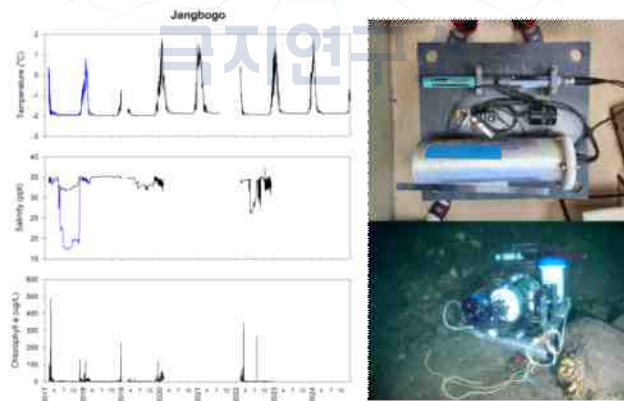


그림 18. 장보고 바이오로거 시계열 데이터 (좌), 기기 오류로 인한 검교정 대상 바이오로거 (우-상), 그리고 곤드와나에 계류중이던 바이오로거를 장보고 바이오로거를 대신하여 설치 (우-하)

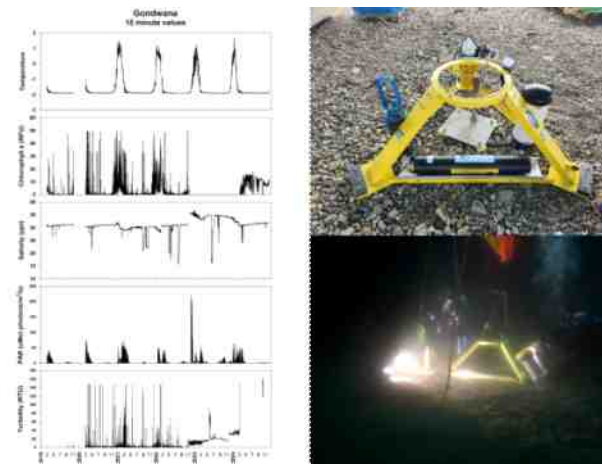


그림 19. 곤드와나 바이오로거 시계열 데이터 (좌), 교체 설치 준비중인 바이오로거 (우-상), 그리고 수중 20m에 신규 설치된 바이오로거 (우-하)

- 해빙 내 해빙 미세조류 종조성

- 곤드와나 기지 11월 해빙 미세조류는 대부분 규조류에 의하여 우점하여 나타남. 가장 우점한 종은 *Fragilariopsis* spp. 종으로 대부분은 부서진 형태로 존재하였으나 전체 해빙미세조류 중 30% 이상을 차지하였음 (표 1)

표 1. 곤드와나 기지 해빙 미세조류의 우점종과 우점율

Bottom Ice core (11월)	우점종	우점율
	<i>Fragilariopsis</i> spp.	31.3%
	<i>Navicula</i> spp.	25.9%
	<i>Entomoneis</i> spp.	23.4%
	pico-plankton (2-0.2)	15.7%

- 곤드와나 기지와 장보고기지 주변의 해빙 미세조류의 우점종 비교 분석 진행중

다 연구내용 1-3. 장보고만 연안생태계 모형 구축

○ 테라노바만 연안 해양-해빙 생태계 통합 모형 개발

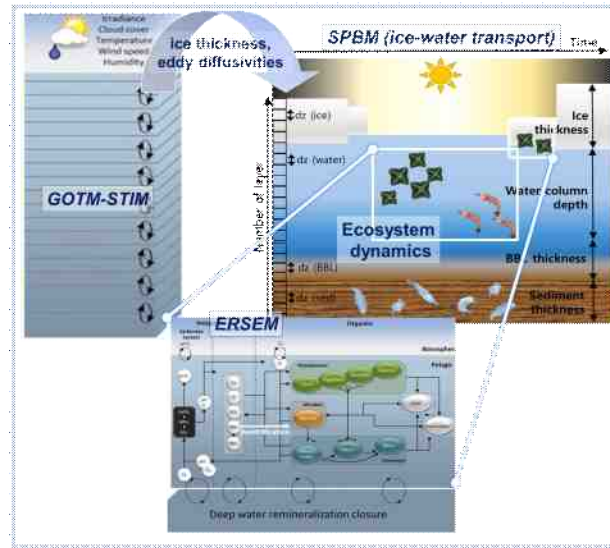


그림 20. 본 연구의 모델 구현 및 SPBM 수직 격자 구조. 모델의 실행은 GOTM-STIM 모형에서 제공되는 강제력 자료를 사용하여 수리학적 시나리오를 제공

- 남극 테라노바만 연안 생태계를 정밀하게 이해하고자, 본 연구에서는 해빙과 그 아래 수층 및 해저생태계 간의 연계를 모의할 수 있는 1차원 수직 생지화학모형 (SPBM: Sympagic-Pelagic-Benthic Model)을 개발하였으며 (그림 20), 이 모형은 해빙 내 생물 활동부터 수층, 저층 퇴적물에 이르는 전 생지화학 과정을 유기적으로 통합함으로써, 극지 해빙 환경에 특화된 생태계 동력학을 재현
- 모형 구성요소:
 - 물리 환경 재현: 해수의 수직 혼합 및 난류 구조는 GOTM (General Ocean Turbulence Model)을 통해 구현되었으며, 해빙의 생성과 성장 과정은 STIM (Simple Thermodynamic Ice Model)을 통해 모의
 - 생지화학 모델 연동: 수층 생태계는 ERSEM (European Regional Seas Ecosystem Model)을, 해저 산화환원 반응은 BROM (Bottom RedOx Model)을 각각 기반으로 하며, 이 두 모델 간 연계를 위해 FABM (Framework for Aquatic Biogeochemical Models)을 적용
 - 해빙 생성 알고리즘: STIM 모형에서는 해수 온도가 해빙점(T_f , -1.86°C) 아래로 떨어질 때 해빙이 형성되며, Stefan 방정식을 기반으로 해빙의 성장을 계산하였으며, 이 과정에서 해빙 표면 온도(T_{ice})는 대기와 해빙 간 열평형 조건하에서 도출
 - 해빙 일차생산자의 생리학적 반응을 정밀하게 모의하기 위해, 광합성 반응 곡선 (P-I curve)과 온도 민감도를 반영한 매개변수들이 적용하였으며, 해빙 생물은 극한의 저광 조건에 적응되어 있기 때문에, 초기 광합성률(α)과 광저해 계수(β)는 수층 생물 대비 높게 설정되었고, Q10 값 또한 기능군별로 차등 적용됨(해빙 생물:

1.06, 수층 생물: 2.0) (그림 21)

- 모형 결과와 관측치 비교 및 평가

- 개발된 SPBM 모형의 타당성을 검증하기 위해, 모사결과를 기존 문헌 자료 (Fransson et al., 2011) 및 장보고만 근해에서 수집된 실제 해빙 관측자료와 비교 (표 2)
- 대부분의 생지화학 변수들은 관측 범위 내에 있었으며, 특히 질산염, 규산염, 용존 무기탄소(DIC), 알칼리도(TA) 등의 분포는 대체로 현실적인 수준으로 재현되었지만, 수층 인산염 농도는 다소 과대 모의되는 경향을 보임

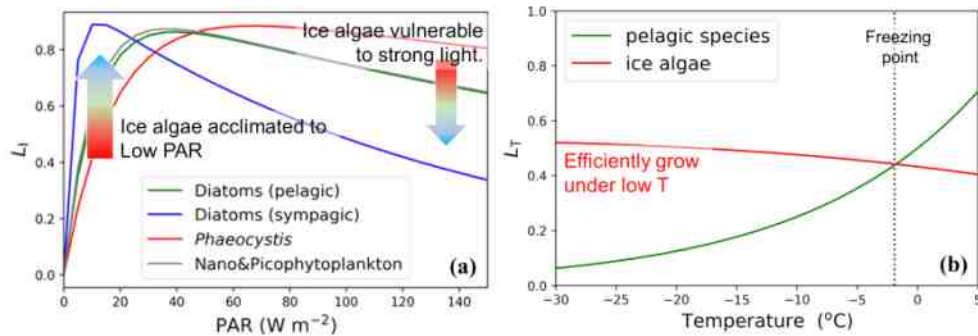


그림 21. 본 모형 내에서 각 일차생산자 기능군의 (a)광 제한(L_i) 및 (b)온도 제한(L_T) 인자 곡선

표 2. 과거 남극 연안에서의 해빙 관측 문헌 자료와 본 모형 결과 비교. 문헌 자료는 Fransson et al. (2011) 에서 발췌

	변수	규산염 (μM)	인산염 (μM)	질산염 (μM)	입자 유기탄소 (μM)	용존 무기탄소 (μM)	총 알칼리도 (μM)	Chl- a ($mg m^{-3}$)	해빙 두께 (cm)
해빙	관측	0-27	0-2.4	0-8.7	30-621	83-769	123-800	0.8-61	110-290
	모형	11 $\pm$ 3	0.24 $\pm$ 0.12	2.8 $\pm$ 1.3	2 $\pm$ 6	295 $\pm$ 70	321 $\pm$ 74	0.4 $\pm$ 1.0	12-120
수층	관측	37-85	0.7-1.9	16-31	2-35	2125-2282	2275-2368	0.3-8.7	
	모형	86 $\pm$ 4	2.6 $\pm$ 0.7	29 $\pm$ 7	8 $\pm$ 58	2155 $\pm$ 32	2322 $\pm$ 15	1.1 $\pm$ 2.5	

- 또한 모형 시뮬레이션 결과를 장보고만 근처에서 채집해 온 해빙 측정 결과와도 직접 비교해 보기 위해(그림 21), 해빙의 깊이에 따른 여러 변수들의 수직 분포를 모형 결과와 함께 겹쳐서 표현
- 해빙 두께의 경우, 11월 중순 채집된 해빙이 약 1.1m였으며, STIM 모형이 이와 유사한 수준의 두께를 잘 모사함
- 해빙 내 염분 농도는, 모형에서는 pore water(해빙 내 액상 수로)의 염분을 반영하기 때문에 실제 해빙 전체 부피 기준 염분과는 다소 차이를 보였으며, 향후 비교가 가능하도록 적절한 환산법 개발이 요구됨
- DIC 및 TA는 해빙 전층에 걸쳐 일정한 농도 경향을 잘 따르나, 해빙 바닥층에서

의 급격한 농도 증가 현상은 재현되지 못함

- 질산염을 포함한 일부 영양염은 관측상 C자 형태의 수직 농도 구조를 가지나, 모형에서는 뚜렷한 층별 차이가 없이 평탄한 분포를 보임. 이는 해빙 하부에서의 생물활동이나 농축 현상 반영이 부족한 것으로 해석되며, 향후 모형 개선이 필요함

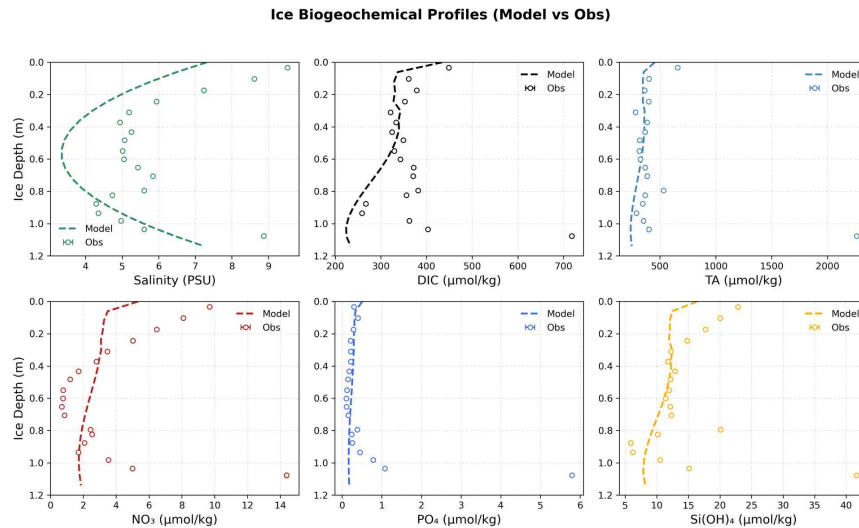


그림 22. 모형(실선)과 관측(점)을 통해 얻은 해빙 내 여러 변수들의 분포 결과 비교. 해빙 채집은 11월 중순 경 장보고만 근처에서 이루어짐

- 향후 모형 개선 방안

- 해빙 생물의 수직 분포 및 생리학적 특성에 대한 문헌 조사 강화
- 해빙의 미세 구조 및 물리-화학적 특성 (예: brine volume, porosity) 반영
- 염분 및 영양염의 수직 농도 차이 보정을 위한 파라미터 재조정
- 정량적 검증을 위한 장보고만 다년간 관측자료와의 정합성 분석

=> 이러한 개선을 통해, 남극 연안 생태계에 대한 이해를 더욱 심화하고, 향후 기후 변화에 따른 해빙-해양 생태계 반응 예측에도 활용 가능할 것으로 기대

2. 세부연구목표 2. 극지생물 통합 센서스 구축

가 연구내용 2-1. 1차생산력 변동추적 (해빙/해양 미세조류, 해조류)

○ 해빙/해양 미세조류 자료 확보 및 연간 변동성 파악

- 해빙 기반 플랑크톤, 미세조류, platelet ice 채집

- 장보고만 해빙위 3개 정점 (74°37' 39.64" S, 164°14' 50.60" E / 74°37' 56.19" S, 164°14' 42.82" E / 74°38' 12.54" S, 164°14' 34.80" E; 그림 23)에서 해빙코어 시추시 해빙 말단에 분포하는 해빙 미세조류 시료 확보 (그림 23; φ100mm × 100mm)
- 해빙기반 얼음 생태계 이해를 위한 기초 시료로 해빙아래 존재하는 platelet ice 시료를 해빙코어 시추와 SCUBA 다이빙시 확보 (그림 23)
- 해빙기반 플랑크톤의 채집을 위해 SCUBA 다이빙을 실시하였으며 해빙하 platelet

ice에 서식하는 다량의 플랑크톤 시료 확보 (그림 24)



그림 23. 해빙미세조류 채집을 위한 해빙코어 정점 (좌), 해빙 코어 말단 해빙미세조류 (중간, 우)



그림 24. 해빙 아래 존재하는 platelet ice층 (좌), SCUBA 다이빙을 통해 채집된 platelet ice (중간), 그리고 platelet ice 조각 (우)



그림 25. 해빙기반 플랑크톤 채집을 위한 SCUBA 다이빙 (좌), platelet ice 중 아래 서식하는 플랑크톤 (중간), 그리고 platelet ice와 함께 채집된 플랑크톤 (우)

- 해조류 군집조사

- 곤드와나 기지 인근 정점 (74°38'16.32"S, 164°13'49.53"E)에서 관찰된 해조류는 홍조류 4종 (*Phyllophora antarctica*, crustose coralline algae, *Iridaea* sp.)
- 해조류가 우점하는 수심 8m에 설치한 수평라인 20m를 영상으로 촬영한 후 1m 간격으로 가상의 방형구 (50cm×50cm)를 설정하고 방형구 내 해조류 피도 (coverage) 분석 (그림 25)
- 이 지역 해조류 군집은 발달된 암반에 *P. antarctica* (평균피도 58.75%, 상대출현빈도 100%) 개체군이 발달, 암반위에 도포된 무절석회조류 (crustose coralline algae, 평균피도 14.00%, 상대출현빈도 100%)는 분홍빛으로 매우 건강한 상태로 판단됨
- *Iridaea* sp. (평균피도 1.65%, 상대출현빈도 40%)는 상대적으로 매우 낮은 피도를

나타냄

- 콘드와나 인근 암반에 분포하는 해조류 군집의 연간 변동양상은 2023-24 시즌 대비 2024-25의 *P. antarctica*는 약 15%, 무절설회조류는 약 7% 감소하는 것으로 나타났으나 (그림 26우) 통계학적으로 유의미한 차이는 아님
- 20일 늦게 (2023년 11월 21일 vs. 2024년 12월 11일) 조사된 *P. antarctica* 피도의 감소는 해조류의 생활사에 따른 발달양상의 차이에 가장 큰 요인이 광량 (2023년 해빙 1.1m vs. 2024년 해빙 2.7m)에 기반하는 것으로 판단되며 향후 해조류의 광합성력 측정을 통한 정밀한 분석이 요구됨

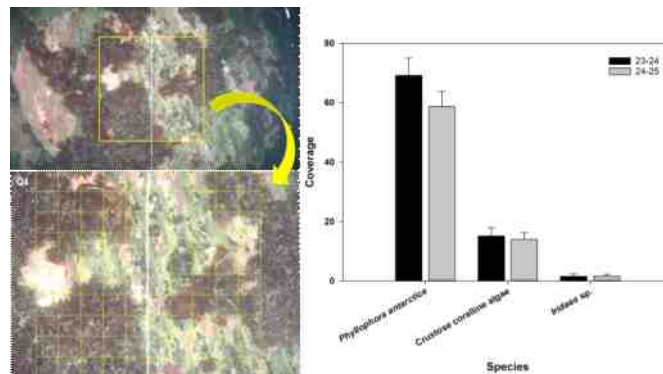


그림 26. 해조류 우점군집에 설치한 수평라인 영상과 가상의 방형구 이미지 (좌), 해조류 피도의 연간 비교 (우)

나 연구내용 2-2. 포식자 행동,반응, 적응기작

○ 해빙 분포변화에 따른 남극도독갈매기의 먹이원 변동

- 유조 혈액 시료 안정성 동위원소 분석을 통한 연간 및 지역 간 먹이원 비교
 - 주변 환경 변화에 따른 남극도독갈매기의 먹이 이용 특성을 파악하기 위해 2021/22, 2022/23, 2023/24, 2024/25 번식기 동안 케이프할렛(Cape Hallett), 인익스프레스블섬(Inexpressible Island), 장보고기지(Jangbogo station) 인근 등 3개 번식지에서 육추기 유조 혈액의 안정성 동위원소 분석
 - 연간 또는 번식지역에 따른 남극도독갈매기 유조의 탄소 및 질소 동위원소 값 차이를 검증하기 위해 분산분석(ANOVA) 수행
 - 번식지역에 따른 혈액 동위원소 값의 차이는 2021/22 번식기에는 나타나지 않았으나, 2022/23 번식기에는 유의미한 차이를 보임. 인익스프레스블 섬의 남극도독갈매기 유조가 다른 지역에 비해 탄소값이 높아 원양성 먹이원에 의존하는 것으로 나타남. 또한, 장보고기지 인근, 인익스프레스블 섬, 케이프할렛 순서로 질소값이 낮게 나타나 지역에 따라 먹이의 영양단계가 달랐던 것으로 추정 (표 3, 그림 27).
 - 번식 시기에 따른 혈액 동위원소는 케이프할렛과 장보고기지 인근 두 지역에서 탄소값 차이가 나타나지 않았으나, 질소값에서 차이 확인. 케이프할렛에서는 2021/22 번식기에 2022/23 번식기에 비해 더 높은 영양단계의 먹이를 이용한 반면, 장보고기지 인근에서는 2022/23 번식기에 더 높은 영양단계를 이용한 것으로 나타남 (표

3, 그림 28, 29). 또한 2023/24 번식기와 2024/25 번식기에는 장보고기지 주변의 비교적 높은 질소 및 탄소 값이 확인되어 이전과 다른 먹이원을 사용한 것으로 추정됨 (표 3, 그림 29).

표 3. 지역 및 번식기에 따른 남극도둑갈매기 유조의 연도별 안정성 동위원소값 (average $\pm$ SD)

	2021/22	2022/23	2023/24	2024/25
Inexpressible Island				
n		13		
$\delta^{13}\text{C}$ (‰)		-23.67 ± 0.66		
$\delta^{15}\text{N}$ (‰)		12.01 ± 0.54		
Jangbogo Station				
n	51	20	25	10
$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	-25.63 ± 0.50	-25.46 ± 0.27	-24.89 ± 0.46	-24.85 ± 0.33
$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	11.55 ± 2.16	13.78 ± 0.57	14.11 ± 0.24	14.23 ± 0.19
Cape Hallett				
n	9	33		
$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	-25.64 ± 0.11	-25.42 ± 0.35		
$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	12.88 ± 1.07	10.08 ± 0.51		

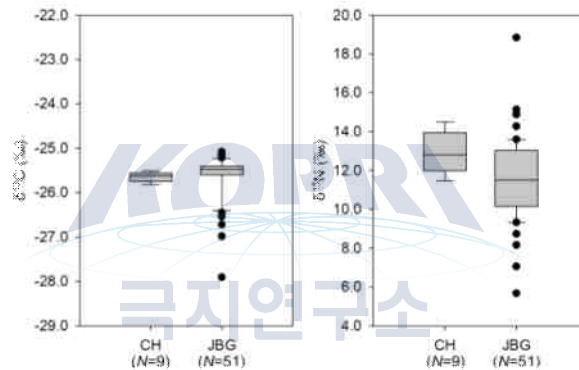


그림 27. 2021/22 번식지에 따른 남극도둑갈매기 유조의 혈액 안정성 동위원소 탄소 (좌) 및 질소 (우) 값 비교 (CH: 케이프할렛, JBG: 장보고기지 인근)

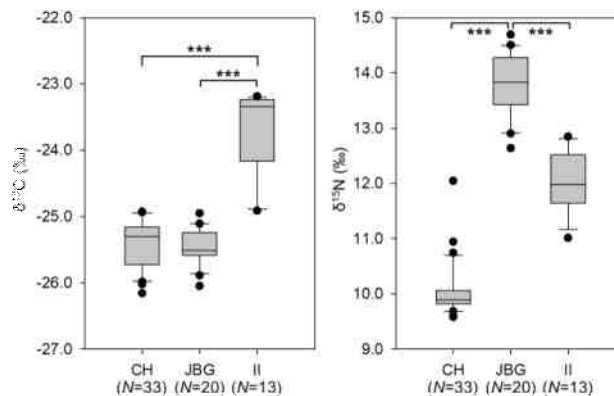


그림 28. 2022/23년 번식지에 따른 남극도둑갈매기 유조의 혈액 안정성 동위원소 탄소 (좌) 및 질소 (우) 값 비교(CH: 케이프할렛, JBG: 장보고기지 인근, II: 인익스프레시블 섬)

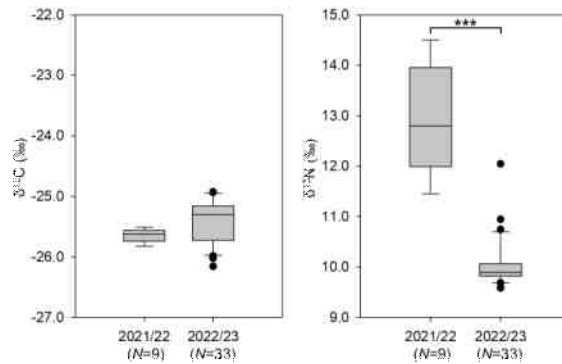


그림 29. 케이프할렛 남극도독갈매기 유조의 연간 혈액 안정성 동위원소 탄소 (좌) 및 질소 (우) 값 비교

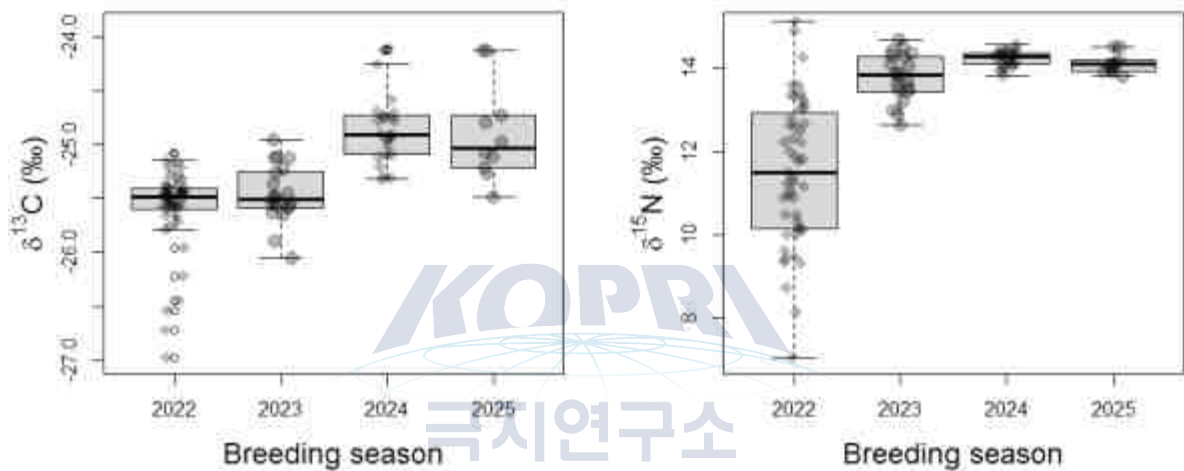


그림 30. 장보고기지 인근 남극도독갈매기 유조의 연간 혈액 안정성 동위원소 탄소 (좌) 및 질소 (우) 값 비교.

- 각 지역과 번식기별로 남극도독갈매기의 잠재적 먹이원의 취식 기여율 분석을 Stable Isotope Mixing Models (MixSIA Model)로 수행하였음. 잠재적 먹이원인 아이스크릴, 남극크릴, 남극은암치, 아텔리펭귄, 황제펭귄, 웨델물범의 동위원소 값은 Hong (2021)과 Calizza et al. (2021), Pinkerton et al. (2013), Rumolo et al. (2020)의 값을 (표 4), Trophic Enrichment Factor(TEF)는 큰도독갈매기의 TEF 값인 $\Delta^{13}\text{C}=1.1\text{‰}$, $\Delta^{15}\text{N}=2.8\text{‰}$ 을 모델에 적용하였음 (Bearhop et al. 2002)
- 남극도독갈매기 유조는 2021/22 번식기에는 두 번식지에서 모두 펭귄 유조와 알에 의존하는 것으로 확인되었으나 (그림 31), 2022/23 번식기에는 케이프할렛에서는 크릴 의존성이 높게 나타남. 인익스프레시블 섬에서는 펭귄 유조 의존성이 높게 나타난 반면 장보고기지 인근에서는 다양한 먹이원을 이용하는 것으로 확인됨 (그림 32). 이는 케이프할렛에서는 펭귄 내장의 크릴을 주로 2차 취식하고, 인익스프레시블 섬에서는 펭귄 조직을 취식한 것으로 추정됨. 장보고기지 인근에서는 주변 환경변화에 따라 이용하는 먹이원이 크게 변하는 것으로 예상
- 남극도독갈매기 유조는 두 번식지 모두 번식기에 따라 잠재적 먹이원의 취식 기여

도가 변화하였으며 (그림 33, 34), 이는 주변 해빙 변화에 따른 가용 먹이자원의 변화와 연관된 것으로 보임

표 4. 북빅토리아랜드 연안에서 번식하는 남극도독갈매기의 번식지역에 따른 잠재적 먹이원 및 안정성 동위원소 값 (CH: 케이프할렛, JBG: 장보고기지, II: 인익스프레시블 섬)

Food sources	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	CH	JBG	II	Reference
Antarctic Krill	-27.41 ± 0.57	3.65 ± 0.58	O	X	X	Hong et al. 2021
Ice Krill	-24.52 ± 0.77	6.12 ± 0.51	X	O	O	Hong et al. 2021
Fish	-24.79 ± 0.97	10.48 ± 0.89	O	O	O	This study
Antarctic Silverfish	-25.00 ± 0.80	10.30 ± 0.80	O	O	O	Pinkerton et al. 2013
Emerald Rockcod	-23.25 ± 0.67	11.77 ± 0.21	O	O	O	This study
Adélie Penguin	-25.80 ± 0.23	7.10 ± 0.33	O	O	O	Calizza et al. 2021
Adélie Penguin Egg	-27.50 ± 0.33	9.20 ± 1.11	O	O	O	Calizza et al. 2021
Emperor Penguin	-25.00 ± 0.75	13.40 ± 0.43	O	O	X	Calizza et al. 2021
Emperor Penguin Egg	-28.30 ± 0.65	12.3 ± 1.10	O	O	X	Calizza et al. 2021
Weddell Seal	-21.30 ± 0.70	15.70 ± 0.60	O	O	O	Rumolo et al. 2020

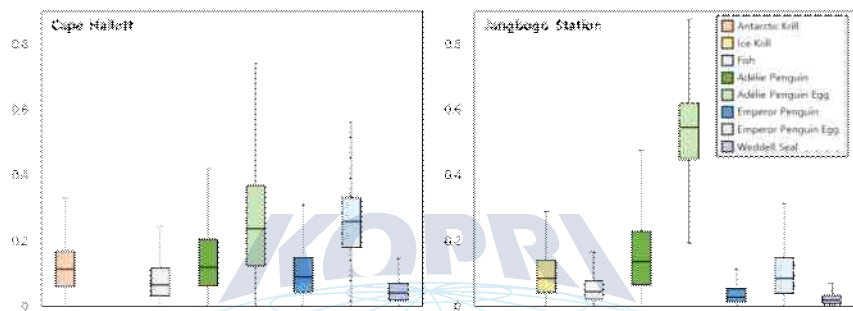


그림 31. 2021/22년 지역에 따른 남극도독갈매기 유조의 먹이원 기여도 비교

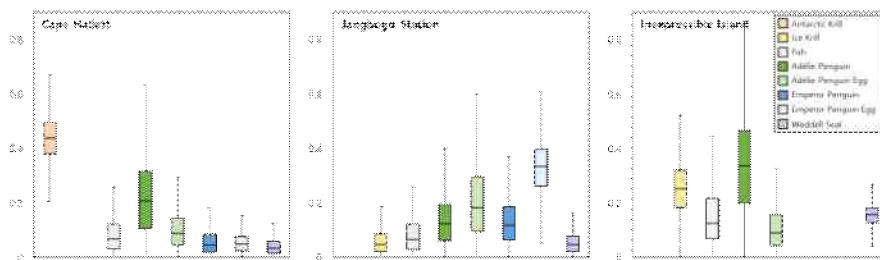


그림 32. 2022/23년 지역에 따른 남극도독갈매기 유조의 먹이원 기여도 비교

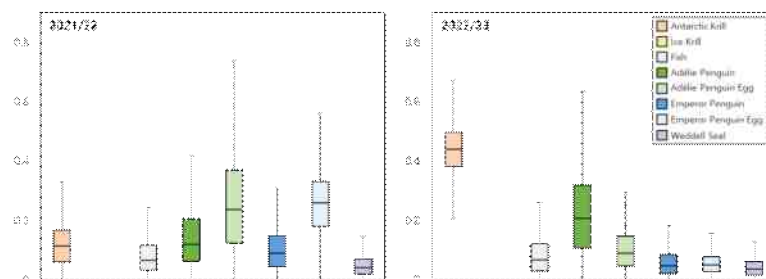


그림 33. 케이프할렛의 번식기에 따른 남극도독갈매기 유조의 먹이원 기여도 비교

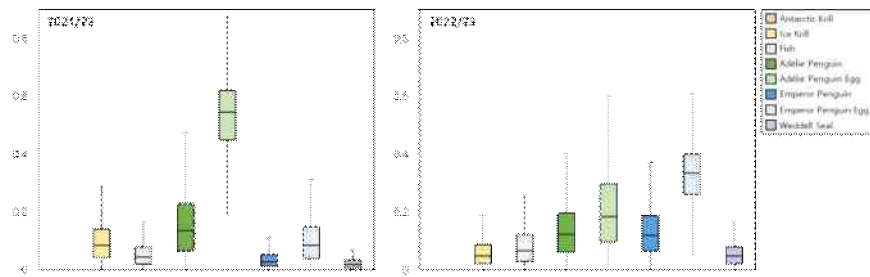


그림 34. 장보고기지 인근의 번식기에 따른 남극도독갈매기 유조의 먹이원 기여도 비교

- 장보고기지 인근에서 번식하는 남극도독갈매기 유조의 안정성 동위원소 값과 번식 성공율을 함께 비교하였을 때, 질소 동위원소가 낮은 연도에 번식성공율이 낮은 경향이 관찰됨 (표 5)
- 각 번식기의 육추초기 (12월 말) 해빙 상황과 비교해 보았을 때 번식성공율이 낮았던 2017/18 번식기와 2021/22 번식기에 해빙이 비교적 넓게 펼쳐져 있었음 (표 5). 반면, 해빙이 일찍 사라진 2022/23, 2024/25의 번식성공율이 높았음

표 5. 보고기지 주변에 서식하는 남극도독갈매기 유조의 연도별 안정성 동위원소값 및 번식 지표

Breeding season	2015/16	2016/17	2017/18	2021/22	2022/23	2023/24	2024/25
n	42	50	20	51	20	25	10
δ13C (‰)	-25.02 ± 0.63	-25.00 ± 0.52	-24.90 ± 0.60	-25.63 ± 0.50	-25.46 ± 0.27	-24.89 ± 0.46	-24.85 ± 0.33
δ15N (‰)	13.16 ± 0.58	13.19 ± 0.60	12.23 ± 0.49	11.55 ± 2.16	13.78 ± 0.57	14.11 ± 0.24	14.23 ± 0.19
Clutch size	1.98 ± 0.12a	1.85 ± 0.36ab	1.73 ± 0.45b	1.77 ± 0.42b	1.70 ± 0.47b	1.74 ± 0.44b	1.83 ± 0.38ab
Breeding success (%)	39	34.6	10.7	17.3	31.79	17.4	42.5
Sea Ice Concentration (%)	3.2	2.8	4.5	8.8	0	1.8	0

- 장보고기지 인근 남극도독갈매기 먹이원 이용 종합 분석

- 남극도독갈매기의 먹이원 이용 분석을 위해 2021/22 번식기부터 2024/25 번식기까지 바이오로거를 이용한 취식지 분석, 둥지 모니터링 카메라 설치를 통한 유조 급이 먹이 분석, 유조의 토사물 분석, 성조 및 유조의 혈액 동위원소 분석 수행
- 2021/22 포란기 동안 장보고기지 인근에서 번식하는 남극도독갈매기 성조 6개체를 추적하였을 때 3개체(50%)는 먼 해양으로 이동하여 취식하는 것이 관찰되었으며, 4개체(66%)가 황제펭귄 번식지로 이동한 것이 확인되었고 모든 개체(100%)가 웨델물범의 번식지인 주변 해빙에서 시간을 보낸 것으로 나타남 (그림 35)

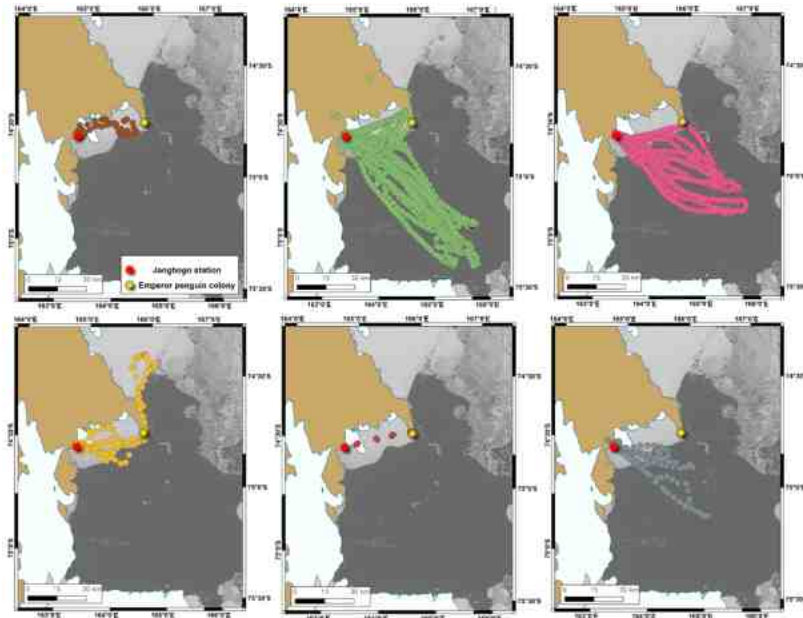


그림 35. 2021/22 포란기 동안 추적된 남극도독갈매기 6개체의 취식이동 경로. 번식지인 장보고기지 인근은 붉은별로, 주변 황제펭귄 번식지는 노란별로 표시

- 동일 지역에서 육추기 동안 등지에 설치한 모니터링 카메라 이미지 분석결과 유조에게 주로 남극은암치, 남극대구류 등의 어류를 공급하였으며, 펭귄 유조와 물범 내장을 먹이는 것도 확인됨 (그림 36)

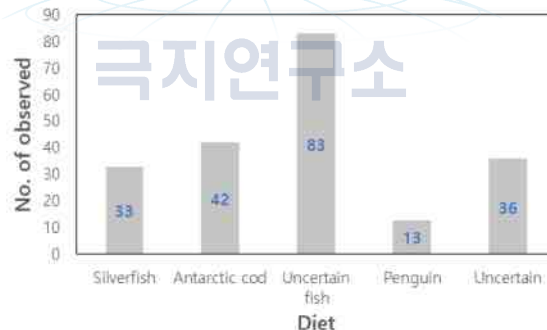


그림 36. 등지 모니터링 카메라에 확인된 남극도독갈매기의 먹이원별 유조 급이 횟수

- 유조의 토사물 분석 시 지역에 따라 토사물의 종류가 크게 다르게 확인되었으며, 케이프할렛과 케이프워싱턴(Cape Washington), 인익스프레스블 섬에서는 아델리펭귄 내장 조직과 아델리펭귄 위내용물 위주의 먹이 확인. 특히 황제펭귄 번식지 주변인 케이프워싱턴에서는 오징어 먹이 확인. 반면, 장보고기지 주변에서는 물고기 위주의 토사물 확인
- 2021/22 포란기 남극도독갈매기의 혈액 동위원소 분석을 통해 지역별 먹이원을 확인하였을 때, 케이프할렛과 인익스프레스블섬에서는 아델리펭귄 유조와 알을 주로 이용. 케이프워싱턴에서는 물고기와 황제펭귄 알을 이용하는 것이 확인됨. 반면, 장보고기지에서서는 다양한 먹이원을 이용하면서 웨델물범 조직 취식 비율이 다른 지

역에 비해 높았음 (그림 37)

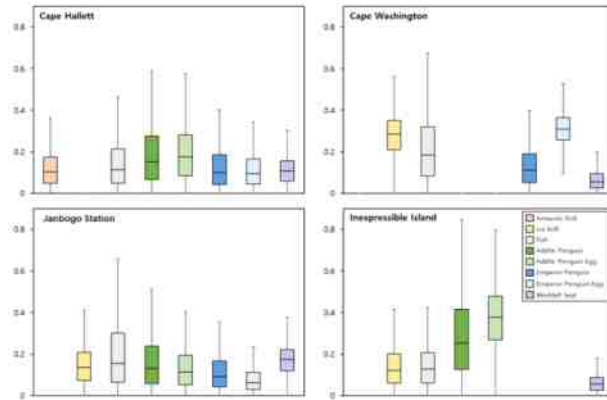


그림 37. 지역별 남극도독갈매기 성조의 잠재적 먹이원의 취식기여도

- 다양한 방법으로 확인한 결과를 종합하여 남극도독갈매기의 먹이원 이용을 분석하였을 때, 남극도독갈매기는 기존에 알려진 것과 같이 주변 환경에 따라 기회주의적 포식을 하는 것으로 보임
 - 번식 지역의 주변 환경에 적응하여 아델리펭귄 번식지 주변에서는 아델리펭귄 유조와 알, 위내용물을 주요 먹이원으로 이용하며, 새끼에게도 동일한 먹이를 제공하는 것으로 보임. 황제펭귄 번식지 주변에서는 황제펭귄 위내용물로 추정되는 오징어류의 공급 확인
 - 장보고기지 인근에서 남극도독갈매기는 주변 해빙에서 번식하는 웨델물범의 사체나 태반, 혹은 황제펭귄 번식지까지 이동하여 취식하거나 해양에서 물고기를 사냥하는 등 다양한 취식 전략을 활용하는 것으로 보임
 - 번식지 주변 환경에 따라서 먹이 이용이 크게 변화하는 것으로 보이며, 특히 번식기 동안 주변 해빙 상황에 따라 먹이가 변화하면서 번식 성공율에도 영향을 주는 것으로 추정
 - 2021/22 번식기 케이프할렛은 높은 해빙 밀도로 인해 아델리펭귄의 번식성공율이 낮았으며, 때문에 남극도독갈매기들이 번식을 포기한 펭귄 알을 많이 이용할 수 있었을 것으로 보임. 반면, 2022/23 번식기 동안은 먹이가 풍부하였고, 때문에 남극도독갈매기는 펭귄 유조 사체의 위 내용물을 주 먹이로 사용할 수 있었을 것으로 추정 (kim et al. 2025)
 - 장보고기지 주변에서 번식하는 남극도독갈매기는 포란기 동안 성조는 주변에서 번식하는 웨델물범의 태반 등을 주로 이용하다 육추기에는 펭귄과 물고기 위주의 먹이를 제공하는 것으로 보임. 그러나 해빙 환경의 변화에 따라 매년 이용하는 먹이가 크게 변화하며, 펭귄과 물범 등 높은 영양단계의 먹이를 충분히 확보할 수 없는 환경에서 번식 성공율이 크게 감소하는 것으로 추정
- 웨델물범의 잠수 및 이동 행동을 활용한 해양환경 관측
- 해양환경 자료 수집을 위한 웨델물범 포획과 보정 및 CTD

- 해양환경 자료 수집을 위한 CTD 바이오로거는 Sea Mammal Research Unit (SMRU, Scottish Oceans Institute, University of St Andrews, UK)의 Argos CTD (10.5×7×4 cm, 545g)를 사용(표 6). 바이오로거는 부착전에 SMRU의 Tag Config (Version 213)을 이용하여 activation하여 standby mode로 설정하고, 포획 후 전원을 작동하여 부착
- 웨델물범에 CTD 바이오로거(biologger) 부착을 위하여 털갈이 시기를 고려하여, 2024년, 2025년 2월 남극 장보고과학기지 인근 Campbell Glacier Ice Tongue에 분포하는 웨델물범 9개체(2024년 5개체 : 암컷 3, 수컷 2, 2025년 4개체 : 암컷 2, 수컷 2)를 포획하여 CTD 부착
- 웨델물범의 성체 크기는 체장이 2.5m, 체중이 400kg 이상 (Perrin et al., 2009)으로 이와 유사하게 보이는 개체를 선별하여 포획 시 육안상 확인되는 몸길이를 바탕으로 체중을 유추하여 마취제(Zoleti 60, Virbac, Sydney, Australia; 1:1 Tiletamine:Zolazepam) 용량을 결정. 마취제 투여 양은 웨델물범에게 가해질 부정적인 영향을 고려하여 상대적으로 적은 양 (Phelan and Green, 1992; 0.3 - 1.1mg/kg, IM)을 blow pipe (Teledart, Germany, Remote injection blowpipe KitB16) 및 dart-syringes (Teledart, Germany, dart-syringes 5ml and injection needles 60mm)를 이용하여 근육에 주사하였음. 이후 10-20분 경과 후 마취 여부를 확인하고 마취가 되었다고 판단되면 개체의 안정을 위하여 head bag을 씌워 시야를 제한하여 보정 (그림 38)
- CTD 바이오로거의 부착은 웨델물범이 숨쉬기 위하여 물밖으로 나오는 행동에 따른 원활한 자료 수집과 움직임으로 인한 탈락을 고려하여 등이 아닌 이마 뒤 정수리 부분에 부착하였음. 웨델물범의 정수리 부분과 부착 CTD의 바닥면에 일정량의 에폭시(Devcon 14270, 5 Minute Epoxy)를 도포 후 해당 면들을 맞닿게 붙여 에폭시가 경화될 때까지 바이오로거를 조사자가 직접 보정 및 부착. 부착 이후 개체와 일정 거리를 유지하고 마취에서 깰 때까지 지속적으로 상태를 확인한 후 방사 (그림 38)
- 부착된 바이오로거에는 웨델물범이 잠수하고 이동하는 지역의 CTD 자료와 개체별 이동 특성, 잠수 특성이 기록되며, CLS Argos 위성망을 통해 해당 자료가 수신되어 SMRU Data Portal을 통해 확인할 수 있음

표 6. SMRU 부착 CTD 센서 정보

CTD Sensor	Range	Accuracy	Resolution
Temperature	-5°C to 35°C	± 0.005°C	0.001°C
Conductivity	0 to 80mS/cm	± 0.01mS/cm	0.002mS/cm
Pressure (Depth)	0 to 2000dBar	± 2dBar	0.05dBar



그림 38. 웨델물범 포획 및 CTD 부착 과정

- 부착된 CTD 바이오로거를 통하여 전송되는 해양환경 및 잠수특성 자료 확보
 - 장보고과학기지 인근 Campbell Glacier Ice Tongue에서 CTD를 부착한 웨델물범 9개체 데이터 수신 종료(표 7)
 - Arogs location level을 정확도가 낮은 A, B, Z class와 1500m 이상의 error를 제외하기 위하여 1 class 이상으로 필터링하여 제작(그림 39)
 - CTD에 기록된 웨델물범의 위치 데이터에 따른 활동 반경은 개체마다 다양하게 나타났으며, KR245 (239860)가 S 71.974, E 173.566 (Class 3, 2024-04-17, 12:40:51 GMT)로 최저위도의 위치를, KR238 (239858)가 S 77.44495, E 168.98671 (Class 2, 2024-06-07, 09:38:50 GMT)로 최고위도를 기록(그림 39)
 - 웨델물범의 CTD 바이오로거 부착 후 개체별 이동 거리는 KR206이 3660.47km로 가장 먼 거리를 이동한 것으로 나타났으며, 다음으로 3013.73km (KR238), 2453.64km (KR245), 1628.42km (KR448), 그리고 KR450이 577.41km로 가장 적은 거리를 이동한 것으로 확인. 개체별 평균 이동 속도는 먼거리를 이동하는 개체가 높게 확인 되었음(거리가 에 비례하는 것으로 확인 (표 7))
 - 웨델물범의 CTD 부착 개체별 각각의 전체 이동 거리, 평균 이동 속도, 잠수횟수, 잠수 시간, 잠수 깊이, 표층유영시간을 확인결과, 성체 암컷의 이동 거리는 성체 수컷보다 더 먼 거리를 이동하는 것으로 보이나, 이에 대한 명확한 해석을 위하여 더 많은 개체들을 대상으로 자료 수집 및 비교 분석 필요(표 8)

표 7. 부착 웨델물범 생태 및 CTD 데이터 수신 정보

개체번호	Ptt 번호	연령	성별	체장(cm)	로거 부착일	수신 종료일	수신일
KR233	239856	성체	수컷	282	20240213 15:30	20240219 18:43	7
KR206	239857	성체	암컷	230	20240217 16:50	20240917 10:25	214
KR238	239858	성체	암컷	234	20240222 16:10	20241102 18:19	255
KR244	239859	성체	수컷	233	20240226 13:30	20240911 05:16	199
KR245	239860	성체	암컷	200	20240226 14:40	20240627 09:08	123
KR445	239861	성체	암컷	252	20250203 12:00	20250724 07:14	172
KR448	239862	성체	수컷	225	20250203 14:30	20251002 06:25	242
KR450	239863	성체	암컷	200	20250203 16:00	20250401 18:40	58
KR449	239864	성체	수컷	220	20250203 15:20	20250405 13:15	62

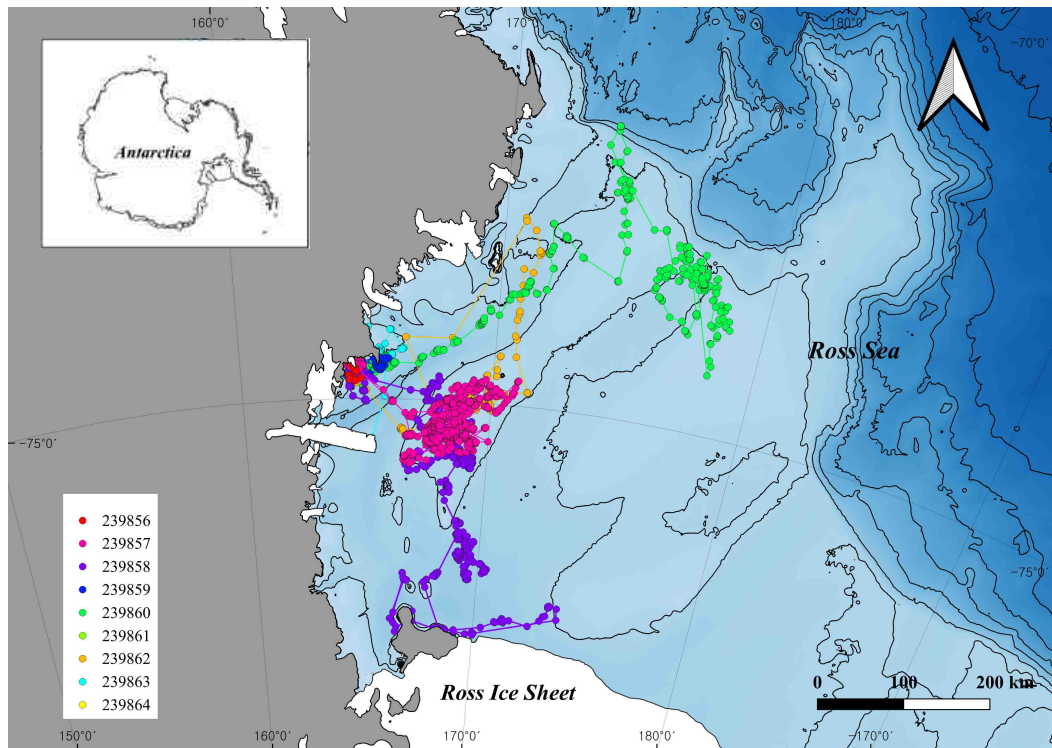


그림 39. 웨델물범 개체별 이동 영역(Argos location level 1 class 이상)

표 8. CTD 바이오로거 기록 GPS 및 TDR 데이터에 따른 이동 및 잠수 특성

개체번호	거리(km)	속도(km/day)	잠수횟수	잠수 시간(s)	잠수 깊이(m)	표층유영시간(s)
KR233	83.91	11.99	18	524.89 ± 495.04	94.94 ± 106.43	183.83 ± 120.98
KR206	3660.47	17.11	1349	512.24 ± 456.19	135.34 ± 144.86	179.50 ± 131.79
KR238	3013.73	11.82	1272	459.61 ± 399.86	138.94 ± 156.03	143.74 ± 112.63
KR244	672.00	3.38	320	451.75 ± 341.35	155.83 ± 135.61	231.15 ± 141.91
KR245	2453.64	19.95	755	343.22 ± 301.03	117.78 ± 144.33	124.64 ± 112.01
KR445	619.50	3.60	362	478.06 ± 562.03	119.87 ± 162.56	205.11 ± 147.02
KR448	1628.42	6.73	708	396.68 ± 345.93	117.14 ± 101.57	126.97 ± 118.33
KR450	577.41	9.96	30	670.40 ± 485.94	234.50 ± 206.16	176.90 ± 99.25
KR449	624.49	5.23	466	310.88 ± 359.66	101.75 ± 136.96	154.42 ± 136.26

- 웨델물범에 부착된 CTD 위치 및 잠수 정보를 이용한 취식영역도 작성
 - CTD 바이오로거에 기록된 이동 특성과 잠수 특성을 바탕으로 취식영역도 (foraging area) 작성을 위하여 최대 잠수 수심 50m 이상인 자료를 필터링 하여 추출 (Foster-Dyer et al., 2024)
 - 추출된 잠수데이터의 위도 및 경도 자료를 활용하여 취식영역도를 분석하고자 Kernel Density Estimation의 Utilization Distribution 95, 75, 50%의 분포도 제작
 - 주요 취식영역을 나타내는 First Passage Time (FPT)이 가장 높은 지역이 취식영역도를 잘 설명하는 Kernel Density Estimation의 Utilization Distribution 75%와 일치율이 높은 것으로 확인되었으며(Goetz et al., 2023), Kernel Density Estimation의 Utilization Distribution 면적은 50%에서 10,607.57 km², 75%에서

28,894.20 km², 95%에서 94,768.77km²로 확인 (그림 40)

- 장보고기지 인근에서 부착된 웨델물범의 주요 취식영역은 CTD 부착 이후 이주 전까지 장보고기지 인근의 Campbell glacier Ice Tongue의 Ice Sheet 아래에서 주로 취식을 하는 것으로 확인하였으며, 이주 이후 Continental shelf, break, slope 부근의 취식지 활용이 크게 나타나며 그 중 Crary Bank의 활용이 높게 관찰

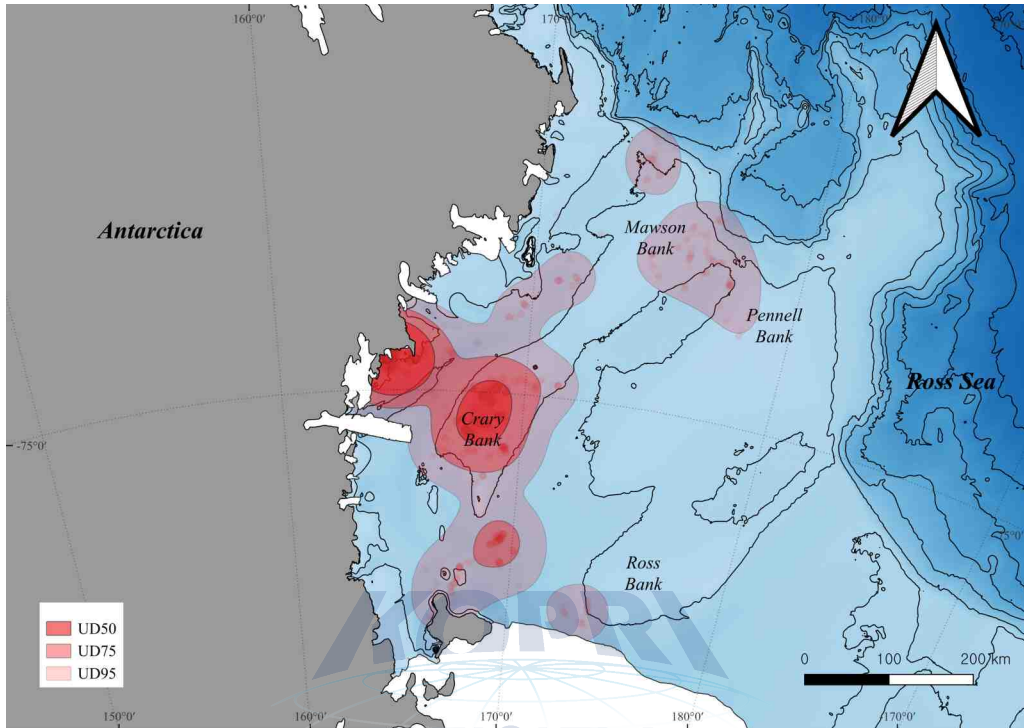


그림 40. CTD 부착 웨델물범 9개체의 취식영역도 (Kernel density Estimation, Utilization Distribution 95, 75, 50%) 및 수심 자료 (GEBCO2024) 비교

- 웨델물범에 부착된 CTD 바이오로거를 통하여 전송되는 해양환경 자료 시각화
 - 웨델물범 잠수 시 바이오로거의 wet/dry sensor가 해수와 반응하면서 CTD 센서를 통해 수심별 해양환경자료 기록
 - CTD 바이오로거로부터 수신된 해양환경자료인 Conductivity (Salinity), Temperature, Depth (Pressure)는 Ocean Data View (Version 5.7.2)를 이용하여 시각화 (그림 41)
 - 이후 Temperature 자료를 Potential Temperature로 보정 후 Potential Temperature (Ø, °C) - Salinity (psu) diagram (T-S Diagram), 표층 수온 및 염분, 거리별 수온 및 염분 자료 시각화 (그림 42, 43)
 - 도출된 자료로부터 정점별 T-S diagram의 point, 수심별 수온 및 염분 자료를 데이터베이스화하여 기본 데이터 확보

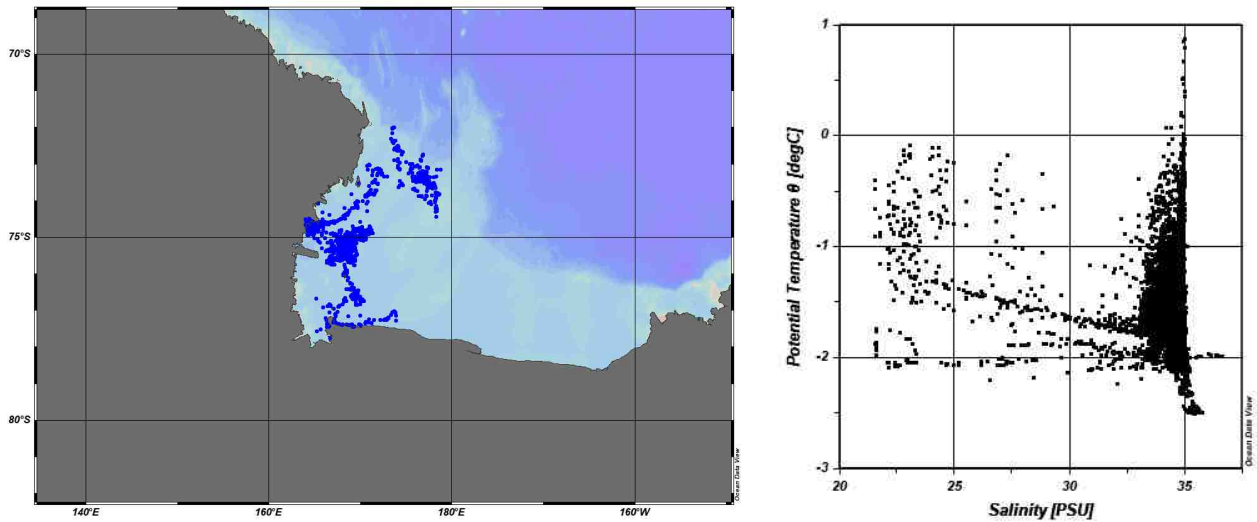


그림 41. CTD 기록 정점 및 정점별 Potential Temperature (θ , °C) - Salinity (psu) diagram (T-S Diagram)

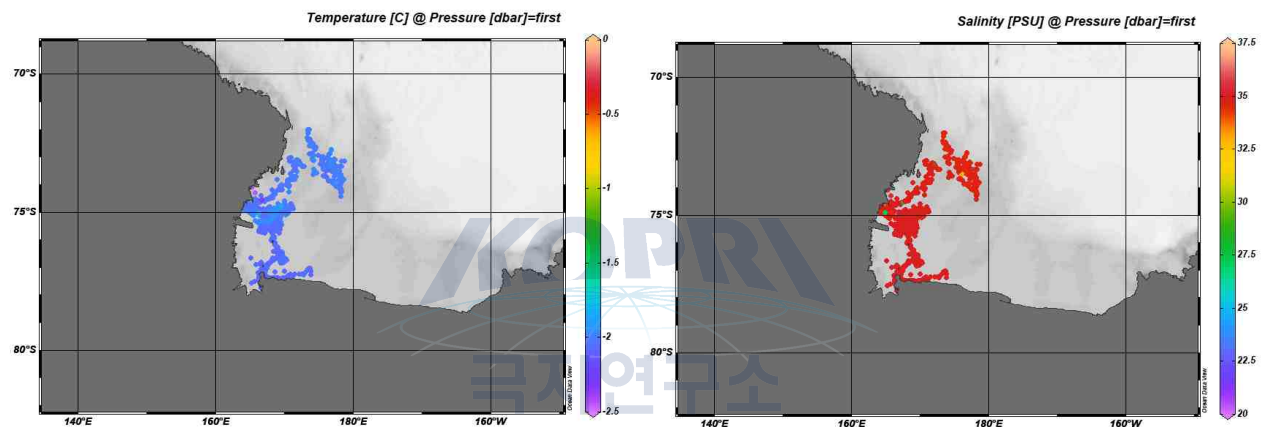


그림 42. CTD 기록 정점별 표층 수온(°C) 및 염분(psu)

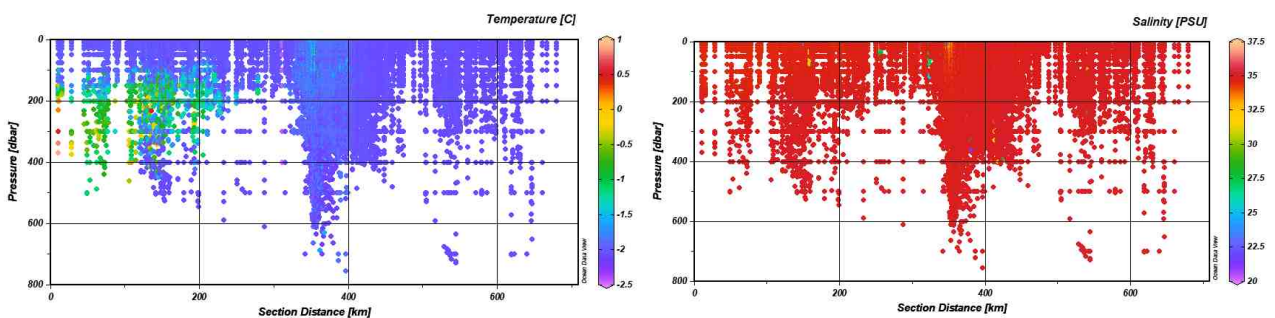


그림 43. CTD 기록 거리 및 수심별 수온(°C) 및 염분(psu)

- 웨델물범에 부착된 CTD 바이오로거를 통하여 획득한 해양환경 자료 분석
 - 시각화된 기본 데이터 중 수온 및 염분 값의 이상 수치 보정을 위하여 통계적 기준에 따라 IQR 방식을 통해 사분위 범위 이상치 경계를 설정하여 제거 및 보정
 - 보정 데이터의 특성을 파악하고 수온과 염분에 따라 수괴를 구분하기 위하여 smoothing 기법인 Moving Average, Loess Smoothing, Savitzky-Golay를 적용 (Bashmachnikov et al., 2004)

- 이후 본 연구에서 도출된 웨델물범의 주요 행동반경 내 정점별 Seal-CTD Profile의 T-S diagram을 reference인 남극 Ross Sea CTD Profile의 T-S diagram과 비교하여 정점별 수괴의 해양 물리학적 자료를 바탕으로 해류의 영향권을 파악하고 특성을 시각화(Wang et al., 2024) (그림 44)
- 해류의 영향권 및 특성 분석 결과, 대기 조건과 얼음 용해에 노출되어 낮은 염분과 온도의 생물학적 반응이 활발한 수괴인 Antarctic Surface Water (AASW) 확인. 그리고 Continental shelf의 34.7psu 이상의 높은 염분과 -1.8°C 정도의 차가운 온도가 특징인 수괴 High Salinity Shelf Water (HSSW) 확인. 이로부터 용승(upwelling)에 의해 해빙 아래에서 냉각 및 염분화에 의해 형성되는 -1.9°C 내외의 차가운 온도와 34.5psu 이상의 염분을 가진 수괴인 Ice Shelf Water (ISW) 확인.
- 또한, Continental shelf의 HSSW가 shelf break 및 slope를 거치며 해저층수의 다른 수괴와 혼합되어 생성된 염분과 온도가 다양한 수괴인 Modified Shelf Water (MSW) 확인. 마지막으로 0°C 이상의 온도와 약 34.5psu의 염분으로 남극 대륙으로 열 운반하는 데 중요한 역할을 하며 빙붕이 녹는 데 영향을 미치는 따뜻하고 염분이 높은 수괴인 Circumpolar Deep Water (CDW)가 SW (Shelf Water)와 같은 다른 수괴와 함께 만나서 형성되는 약 $-1.0^{\circ}\text{C} - 0.3^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위와 34.5 - 34.6psu의 염분 범위를 가진 수괴 Modified Circumpolar Deep Water (mCDW) 확인
- 본 연구에서 확인된 대표적인 5개의 수괴 Antarctic Surface Water (AASW)와 High Salinity Shelf Water (HSSW), Ice Shelf Water (ISW), Modified Circumpolar Deep Water (mCDW), Modified Shelf Water (MSW)의 공간분포 시각화 (그림 45)
- 본 자료는 추후 해양 환경의 수괴 및 물리 특성 파악을 위한 자료로 활용 기대

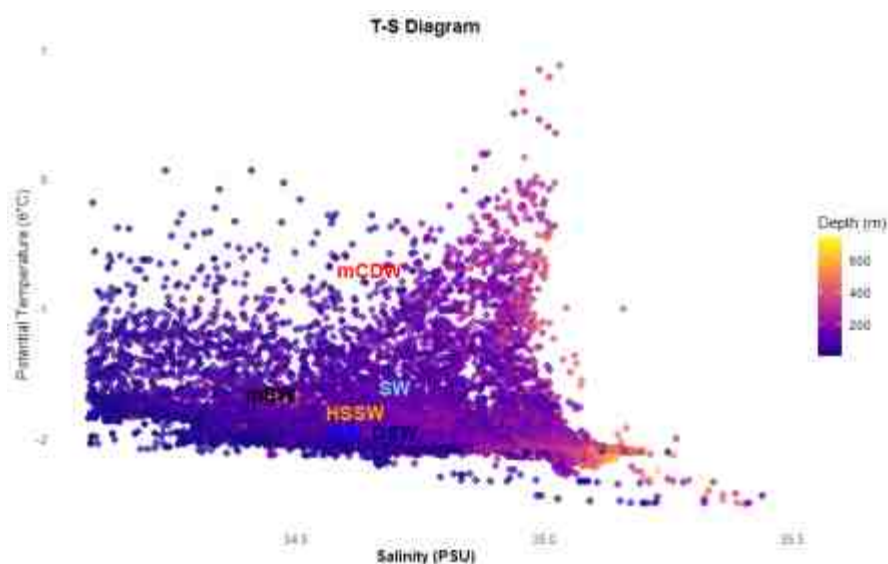


그림 44. 웨델물범 CTD profiles의 T-S Diagram. SW: Shelf Water, mSW: Modified Shelf Water, HSSW: High Salinity Shelf Water, ISW: Ice Shelf Water, DSW: Dense Shelf Water, mCDW: Modified Circumpolar Deep Water

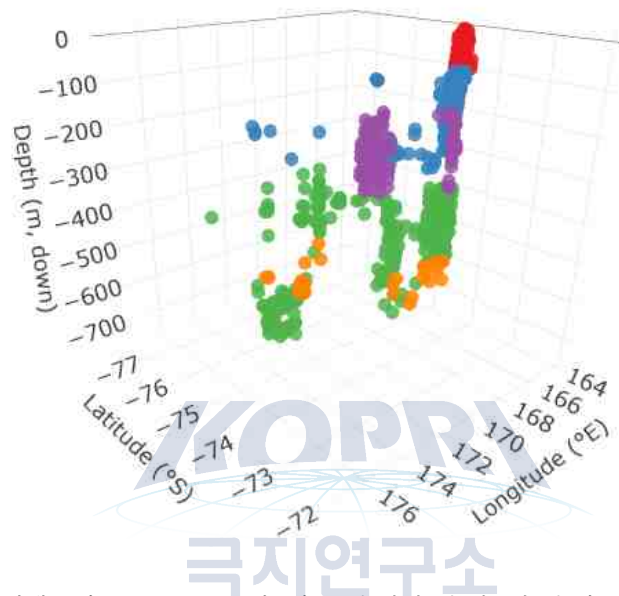
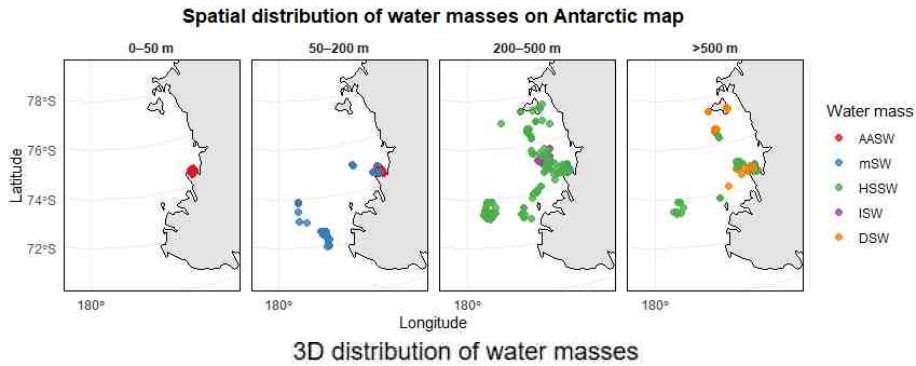


그림 45. 웨델물범 CTD profiles에 따른 수괴의 수직 및 수평 공간 분포. AASW: Antarctic Surface Water, mSW: Modified Shelf Water, HSSW: High Salinity Shelf Water, ISW: Ice Shelf Water, DSW: Dense Shelf Water

다 연구내용 2-3. 생물 관측기술 고도화

- 해빙영향권 내 저서생물군집 구조 변동에 대한 개념모델 수립
 - 해빙 영향 해역 및 연도별 환경요인 자료 확보 및 분석
 - 해빙 영향에 의한 생태계 변동을 파악하기 위해 2017년부터 장보고기지, 독일의 Gondwana기지, 뉴질랜드의 Cape Evans기지에서 관측한 수온, 염분, Chlorophyll a 자료 확보하여 시계열 분석 실시 (그림 46)
 - 사업이 마무리되는 2025년까지 물리적 요인에 대한 자료를 확보하여 수온 및 염도 변동 폭을 조사하여 해빙과의 연관성을 분석할 계획이며, 해빙 영향권 해역 내 환경 요인 변동 양상을 과학적으로 규명할 수 있는 자료를 구축하고자 함

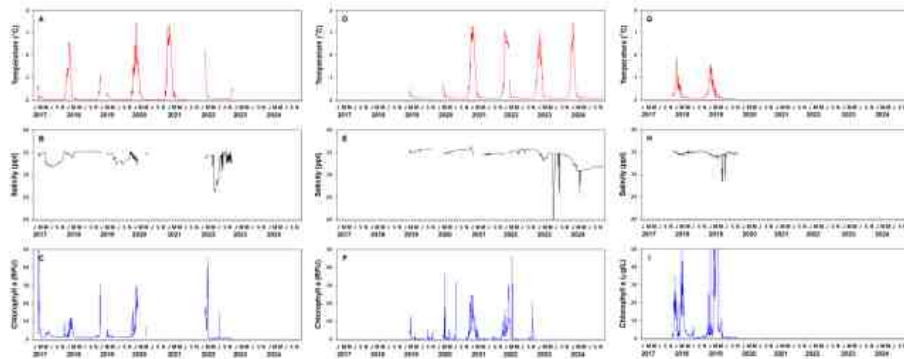


그림 46. 장보고기지(A, B and C), 독일의 Gondwana기지(D, E and F), 뉴질랜드의 Cape Evans기지(G, H and I)에서 측적된 물리적 요인(수온, 염분, Chlorophyll a)

- 테라노바만 내 저서생물군집 제 군집지수 파악

- 2024년 12월과 2025년 1월에 장보고기지 부두앞과 독일의 Gondwana기지에서 촬영자료를 통해 저서생물군집구조 파악을 위해 피도 분석을 실시하고 있음
- 또한, 환경 요인과의 연관성 파악을 통해 환경 요인과의 변화가 군집구조에 미치는 영향을 파악하기 위해 Primer program을 이용하여 다양도 지수(H'), 풍부도 지수(R), 우점도 지수(D) 및 균등도 지수(J)를 평가하고 있음
- 장보고기지 부두앞 저서군집의 풍부도 지수(R), 균등도 지수(J)와 다양도 지수(H')는 주변의 교란 현상에 의해서 지속적으로 영향을 받는 것으로 나타났음. 예를 들어, 2022년은 해빙의 영향으로 규조류 피도의 증가로 관찰되어 이들 지수가 다소 낮은 것으로 관찰되었음(그림 47)
- 본 연구팀의 군집 환경요인 특성 파악 관련 제생태지수 분석 결과, 해빙 영향권 해역별 교란의 특성에 따라 저서생물 군집 간 차이가 확인됨. 이는 해빙 영향권 해역별 교란의 강도와 빈도 차이에 의한 것으로 판단됨

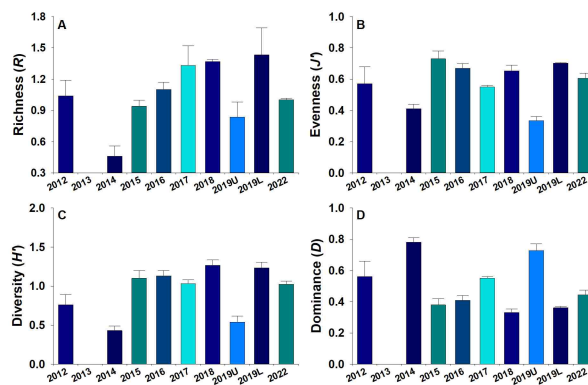


그림 47. 장보고기지 연구 정점에서 저서생물군집의 제생태지수(2012-2022). 풍부도 지수(A), 균등도 지수(B), 종다양성 지수(C), 우점도 지수(D)

- 해빙 영향권 내 저서생물군집 구조 변동에 대한 개념모델 수립

- 현재 확보된 저서생물군집(장보고기지, 독일의 Gondwana기지, 뉴질랜드 Cape Evans기지와 이태리 Mario Zuccelli기지)자료를 기반으로 군집구조가 어떻게 형성

되고 연속적으로 변화하는지를 개념모델화 할 계획임

- 세 연구 정점(장보고기지, 독일의 Gondwana기지, 뉴질랜드 Cape Evans기지)에서 저서생물군집과 환경요인과의 연관성을 분석하기 위해서 R프로그램을 활용하여 정준대응분석(Canonical Correspondence analysis, CCA)을 실시함

표 9. 연구 정점에서 추출한 환경자료

Environmental parameter	JBS-2018	JBS-2019	Gondwana	Cape Evans
Maximum daily seawater temperature (°C)	0.63	0.63	1.30	0.63
Minimum daily seawater temperature (°C)	-1.99	-1.99	-1.91	-1.99
Annual daily seawater temperature (°C)	-1.70	-1.71	-1.42	-1.70
Maximum daily salinity (PSU)	35.27	35.33	36.38	35.27
Minimum daily salinity (PSU)	31.59	33.55	34.42	31.59
Annual daily salinity (PSU)	33.48	35.01	35.44	33.48
Maximum chlorophyll <i>a</i> (µg/L)	21.54	31.31	36.34	21.54
Minimum chlorophyll <i>a</i> (µg/L)	0.98	0.79	0.05	0.98
Annual daily chlorophyll <i>a</i> (µg/L)	2.77	2.28	2.72	2.77
Sediment (%)	11.79	28.84	8.91	39.36
Rock (%)	0.00	0.00	0.00	0.42

- 저서생물군집으로부터 분석된 정준대응분석 결과는 CCA-1(X축)이 총 분산의 77.4%, CCA-2(Y축)가 총 분산의 16.0%를 설명하여 총 93.4%의 높은 설명력을 나타냄(그림 48)
- 장보고기지에서 저서생물군집은 자포동물과 해면동물 등이 우점하고 있지만, 뉴질랜드 Cape Evans에서 군집은 홍조류와 극피동물이 우점도가 높아서 두 군집 간에 큰 차이를 보였음. 독일 곤드와나기지 연구 정점은 규조류가 군집을 우점하는 것으로 확인됨
- 각 군집에 대한 환경요인 중 설명력이 높은 X축과 평행하게 sediment와 rock이 배열하였으며, 이는 평가된 환경요인 중 sediment와 rock에 따라 군집이 더 뚜렷하게 달라지는 것으로 평가됨
- 수온과 염분 및 chlorophyll *a*의 농도 중 연구 정점에 따라 Maximum daily seawater temperature, Annual daily seawater temperature, Maximum chlorophyll *a*, Minimum daily salinity 등이 유의한 차이를 보임
- 조사된 연구정점은 환경요인 및 저서군집의 특성이 각 연구 정점별로 뚜렷하게 구분되는 특징을 가지므로, 장기적인 모니터링을 통하여 각 연구 정점별로 연도별 분석을 통하여 수온이나 염분 변화 등에 반응하는 군집의 반응 패턴을 추가적으로 분석할 수 있을 것으로 판단됨

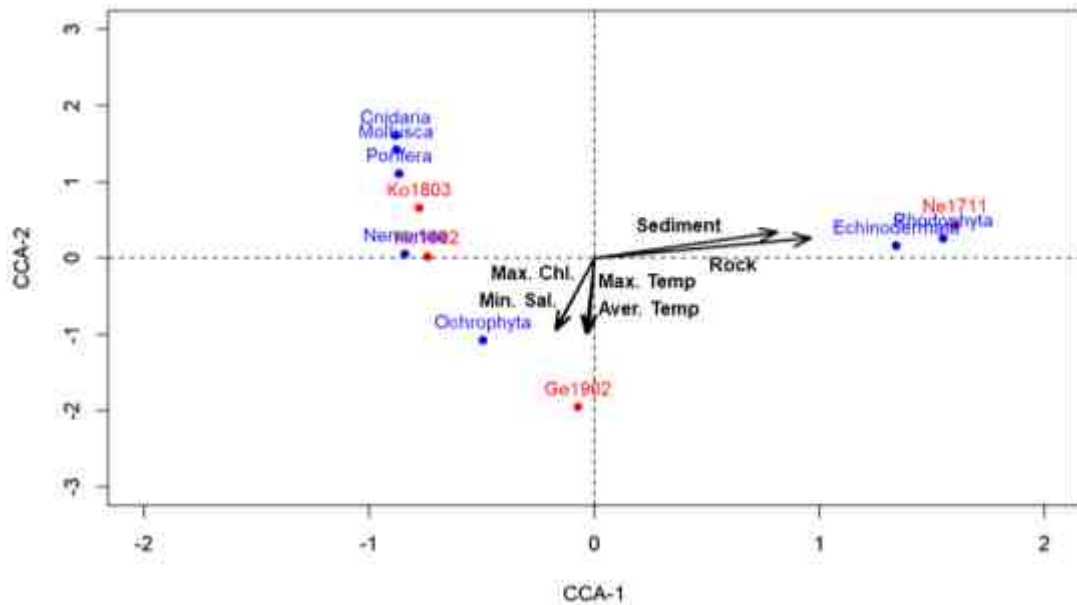


그림 48. 공동연구해역으로부터 분석한 정준대응분석 결과

○ 장보고기지 및 곤드와나 연구 정점

- 장보고기지 정점 저서무척추동물상

- 저서무척추동물상 조사를 위하여 수심 12m부터 22m에 이르는 20m 수직라인을 2개 설치하고 영상촬영
- 영상내 수직라인에 표시된 마커를 기준으로 1m 간격으로 가상의 방형구 (50cm × 50cm) 를 설정하고 서식하는 저서무척추동물의 개체수를 파악 (표 10)

표 10. 장보고기지 정점 저서무척추동물 밀도 (ind./m²)

Rank	Species	Taxon	Line 1	Line 2
1	<i>Sphaerotylus antarcticus</i>	Porifera	19.2	20.4
2	<i>Alcyonium antarcticum</i>	Cnidaria	7.6	11.0
3	<i>Adamussium colbecki</i>	Mollusca	8.6	5.6
4	<i>Polymastia invaginata</i>	Porifera	6.8	6.0
5	<i>Homaxinella balfourensis</i>	Porifera	3.0	3.2
6	<i>Clavularia frankliniana</i>	Cnidaria	2.6	5.8
7	<i>Sterechinus neumayeri</i>	Echinodermata	2.2	0.4
8	<i>Inflatella belli</i>	Porifera	1.8	1.2
9	<i>Ophiosparte gigas</i>	Echinodermata	1.4	3.6
10	<i>Displasterias brucei</i>	Echinodermata	1.2	1.2
11	<i>Laternula elliptica</i>	Mollusca	0.8	1.6
12	<i>Parborlasia corrugatus</i>	Nemertina	0.6	0.2
13	<i>Odontaster validus</i>	Echinodermata	0.2	0.6
14	<i>Neobuccinum eatoni</i>	Mollusca	0.2	0.8
15	<i>Trematomus</i> sp.	Chordata	0.0	0.2

- 총 15종의 무척추동물이 출현하였으며, 최우점종은 해면동물 *Sphaerotylus antarcticus*가 약 20군체/m² 서식하고, 자포동물 *Alcyonium antarcticum*는 약 9군체/m², 연체동물 *Adamussium colbecki*는 약 7개체/m², 해면동물 *Polymastia invaginata*는 약 6군체/m²가 서식 (그림 49)

- 곤드와나 정점 저서무척추동물상

- 저서무척추동물상 조사를 위하여 수심 8m, 13m, 18m에 각각 20m 길이의 수평라인을 설치하고 영상촬영
- 영상내 수직라인에 표시된 마커를 기준으로 1m 간격으로 가상의 방형구 (50cm × 50cm) 를 설정하고 서식하는 저서무척추동물의 개체수를 파악 (표 11)
- 총 9종의 무척추동물이 출현하였으며, 최우점종은 극피동물 *Sterechinus neumayeri*가 약 17개체/m² 서식하고, 극피동물 *Odontaster validus*는 약 14개체/m², 연체동물 *Laternula elliptica*는 약 2개체/m²가 서식 (그림 49)



그림 49. 장보고기지 정점 우점종 *Sphaerotylus antarcticus*와 *Alcyonium antarcticum* (좌), 곤드와나 정점 우점종 *Sterechinus neumayeri*와 *Odontaster validus* (우)

표 11. 곤드와나 정점 저서무척추동물 밀도 (ind./m²)

Rank	Species	Taxon	Density (ind./m ²)		
			18m	13m	8m
1	<i>Sterechinus neumayeri</i>	Echinodermata	30.6	13.2	7.8
2	<i>Odontaster validus</i>	Echinodermata	20.6	12.8	7.2
3	<i>Laternula elliptica</i>	Mollusca	4.0	1.2	0.0
4	<i>Ophionotus victoriae</i>	Echinodermata	0.4	0.4	0.0
5	<i>Neobuccinum eatoni</i>	Mollusca	0.4	0.0	0.0
6	<i>Trematomus sp.</i>	Chordata	0.4	0.2	0.0
7	<i>Clavularia frankliniana</i>	Cnidaria	0.4	0.2	0.0
8	<i>Ophiosparte gigas</i>	Echinodermata	0.2	0.2	0.0
9	<i>Displasterias brucei</i>	Echinodermata	0.2	0.8	0.4

- 연구 정점간 군집 비교

- 장보고기지 정점의 저질구조는 수심 22m까지 기반암이 발달되어 있으며 22m이상 수심에서는 연성저질 (clay)로 구성되어 있으며 수심 10m부터 22m까지는 급한 경사를 이루고 있으며 경성저질에 부유물질의 침적이 두드러진 형태
- 곤드와나 정점의 저질구조는 수심 20m까지 기반암이 발달되어 있으며 20m이상 수심에서는 연성저질 (sand)로 구성되어 있으며 수심 20m까지의 기반암의 경사는 장보고기지 정점에 비해 다소 완만하며 부유물질의 침적이 없는 경성저질이 노출된 형태
- 장보고기지와 곤드와나 정점에서는 각각 15종과 9종의 무척추동물이 출현하였으며 다양성지수의 모든 항목에서 장보고기지 정점이 높은 수준을 보임 (표 12)
- 두 정점간 두드러진 차이점은 연체동물 *A. colbecki*의 서식유무와 곤드와나 정점에서의 극피동물 *S. neumayeri*와 *O. validus*의 극우점으로 나타남
- 장보고기지 정점에서 나타나는 해면동물, 자포동물, 그리고 연체동물 (*A. colbecki*)

은 대표적인 여과 섭식자로서 수층 내 부유물질에 포함된 영양물질을 먹이원으로 이용하고 있으며 상대적으로 낮은 수준의 부유물질의 침착이 이루어지는 곤드와나 정점에서는 부유물질에 의존하지 않고 잡식성인 극피동물이 주로 서식

- 장보고기지과 곤드와나 정점의 환경적 차이에 기인하는 군집 구성의 차이를 추후 면밀한 분석이 필요하며, 빙하에서 기인하는 부유물질이 직접적으로 영향을 주는 장보고기지 정점의 경우 지속적인 모니터링을 통해 온난화에 따른 연안 서식처 변화의 관찰이 필요함

표 12. 장보고기지과 곤드와나 연구 정점에 나타난 무척추동물의 다양도 지수 및 유사도

Diversity index	Gondwana	Jangbogo
Total species (N)	9	15
Richness (d)	2.271	3.433
Evenness (J)	0.484	0.770
Diversity (H')	1.064	2.085
Similarity (%)	26.793	

○ 남극가리비

- 남극가리비 개체군의 유전자 자료를 통한 유효개체군크기 추정 및 생태적 상태 평가
 - 유효성이 검증된 MtDNA (12S rRNA, 16S rRNA)와 7개의 microsatellite 마커를 이용하여 각 해역별(다른 해역 시료가 확보될 경우), 연도별, 연령별 개체군 당 20~30개체 남극가리비 시료의 genomic DNA를 확보하고 유전적 다양성 평가
 - MtDNA를 이용한 유전적 다양성은 ARLEQUIN (Excoffier and Lischer 2010) 프로그램을 이용해 단상형 수(number of haplotypes; NH), 단상형 풍부도(haplotype richness; HR), 고유단상형(private haplotypes), 단상형 다양성, 염기서열 다양성의 수치를 계산하여 평가하고, 인구통계학 분석(Tajima's D , Fu's F_S , mismatch distribution)을 통해 과거 개체군의 크기 변동 양상 추정
 - Microsatellite를 이용한 유전적 다양성은 ARLEQUIN, FSTAT (Goudet 2001), GENEPOP (Rousset 2008), BOTTLENECK ver. 1.2.02 (Piry et al. 1999) 프로그램을 이용해 평균 대립유전자 수(average number of alleles across loci; N_A), 관측 이형접합도(observed heterozygosity; H_O), 예측 이형접합도(expected heterozygosity; H_E), 근친교배 계수, microsatellite 진화의 two-phase mutation model (TPM) 기반 개체군의 병목현상(bottleneck) 유무를 검증하여 현재 남극가리비 개체군의 생태적 상태 평가 (표 13)
 - 연관비평형(linkage disequilibrium; LD) 방법을 적용하여 NeESTIMATOR v2.01 (Do et al. 2014) 소프트웨어를 이용해서 남극가리비 개체군 유효개체군 크기(contemporary effective population size; N_e)를 산출 (표 13)
 - 장보고기지 인근 해역에서 채집된 남극가리비 개체군의 연령별 유전적 다양성 분석 결과, 미성숙 개체군(young)의 $N_A=11.43$, $P_A=25$ 개, $H_O=0.7032$, $H_E=0.9063$, $F_{IS}=0.2281$, HWE $P<0.001$, 성숙 개체군(mature)의 $N_A=12.43$, $P_A=32$ 개, $H_O=0.6120$,

$H_E=0.8884$, $F_{IS}=0.3171$, HWE $P<0.001$ 로 확인되어 각 연령별 유전적 다양성이 유사하게 나타남(표 13)

- 남극가리비 전체 개체군을 대상 인구통계학 분석 결과 Tajima's $D=-1.831$, $P=0.011$, Fu's $F_S=-1.790$, $P=0.016$ 으로 확인되었고, mismatch distribution 분석 결과 한쪽으로 편향된 단봉형태(skewed unimodal)로 과거 개체군 크기 급감 후 최근 개체군 크기가 팽창(population expansion)하였음을 시사함(표 13, 그림 50)
- 분석 결과, 남극가리비 전체 개체군은 비교적 높은 수준의 유전적 다양성을 유지하고 있으며(표 12), 병목현상 분석에서도 L-shaped 분포 양상이 확인되어 최근 급격한 개체군 감소 가능성은 낮은 것으로 판단됨(표 13)

표 13. 남극가리비 개체군의 연령별 7개 microsatellites 유전적 다양성 및 개체군 병목현상 수치 분석 결과

Age group	N	N _A	PA	H _E	H _O	F _S	HWE P-values	Median of N _e
Young	15	11.43	25	0.9063	0.7032	0.2281	<0.0001	∞ (9.4~∞)
Mature	28	12.43	32	0.8884	0.6120	0.3171	<0.0001	127.8 (13.6~∞)
Total	43	16.00	-	0.8974	0.6455	0.2836	<0.0001	∞ (81.7~∞)

N	Demographic history				Bottleneck distribution shape
	Tajima's D	P-value	Fu's F _S	P-value	
43	-1.831	0.011	-1.790	0.016	Normal L-shaped distribution

N: Number of individuals analyzed; N_A: Number of alleles; PA: Private allele; H_E: Expected heterozygosity; H_O: Observed heterozygosity; F_S: inbreeding coefficient, HWE: P values for multilocus tests for Hardy-Weinberg Equilibrium; N_e: Effective population size

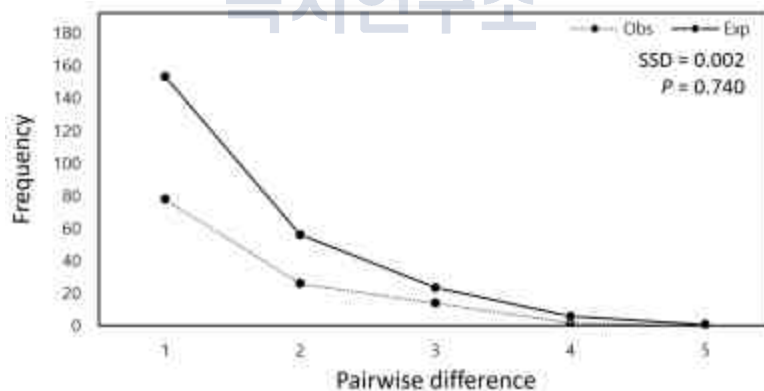


그림 50. 남극가리비 전체 개체군 대상 mismatch distribution 분석 결과

- 서로 다른 시·공간적 개체군 시료 확보를 통해 유전적 분화도(genetic differentiation) 및 유전적 구조(genetic structure) 분석을 수행하여 해역별 남극가리비 개체군의 생태적 안정성 및 유전적 구조의 시간적 변화유무 평가 (그림 50)
- Microsatellites 마커는 STRUCTURE (Pritchard et al. 2000) 프로그램을 이용하여 individual-based Bayesian 개체군 할당 분석을 수행하고, GENETIX (Belkhir et al. 2004) 프로그램으로 개체 간 유전적 관계 정보를 이용하여 PCoA (principal coordinates analysis) 분석 수행(그림 51, 52)
- STRUCTURE 분석 결과, 연도별 및 연령별 개체군 모두 K=2로 확인되어 두 개의

유전적 구조를 가지는 것으로 나타남(그림 51). 2018년 개체군(N= 22)과 2019년 개체군(N= 21) 간 유전적 분화도(F_{ST})는 0.0097, $p=0.0015$ 로 두 개체군 간 통계적으로 유의한 유전적 분화를 나타냄. 이러한 결과는 2018년, 2019년 가리비 시료 개체군간 유전적 차이 존재 가능성을 의미함

- 미성숙 개체군(Young)과 성숙 개체군(Mature) 간 유전적 분화도(F_{ST})는 - 0.0044, $p=0.0139$ 로 나타나 미성숙 개체군과 성숙 개체군 간 유전적 분화가 존재하지 않으며, 이는 두 그룹 간 유전적 차이가 거의 없음을 보여줌
- 남극가리비 개체군의 연도별 및 연령별 개체군의 PCoA (principal coordinates analysis) 분석 결과 2018년과 2019년 개체군 간의 유전적 차이가 존재함을 확인함(그림 52). 특히, 2019년 개체군이 2018년 개체군에 비해 더 분산된 양상을 보이며, 이는 2019년 개체군의 유전적 변이가 상대적으로 더 높음을 의미함. 미성숙(young) 개체군과 성숙(mature) 개체군 간에는 유사한 유전적 구조를 공유하고 있음을 나타냄
- 본 연구진에서 수행한 분석 결과에 따르면 총 43개체[2018 (N = 22) 및 2019 (N = 21); Young (N = 15) 및 Mature (N = 28)] 개체를 대상으로 7개 microsatellite 마커 기반의 유전적 다양성 및 유효개체군 크기(N_e)를 분석하였으며, 이를 통해 남극가리비 개체군의 현 생태·유전적 상태에 대한 기초 정보를 확보하였음

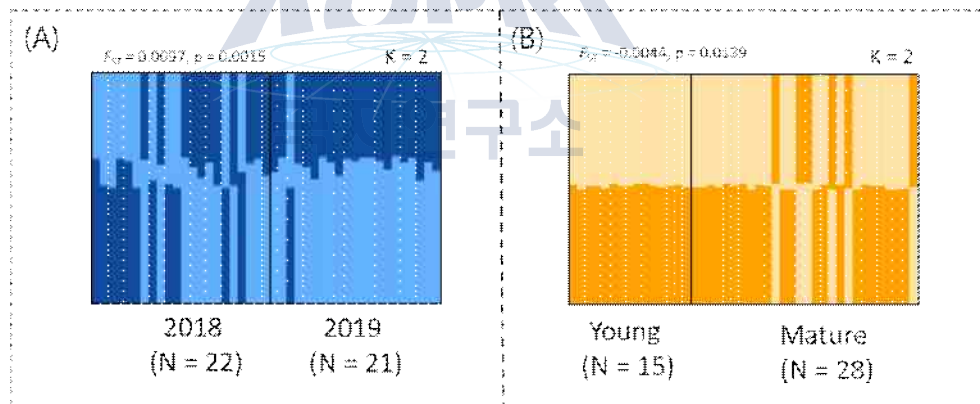


그림 51. STRUTURE 프로그램을 이용한 남극가리비 연도별 및 연령별 개체군의 유전적 구조. (A) 남극가리비 연도별 개체군(2018년 집단 N=22, 2019년 집단 N=21), (B) 남극가리비 연령별 개체군(미성숙 개체군 Young N=15, 성숙 개체군 Mature N=28)

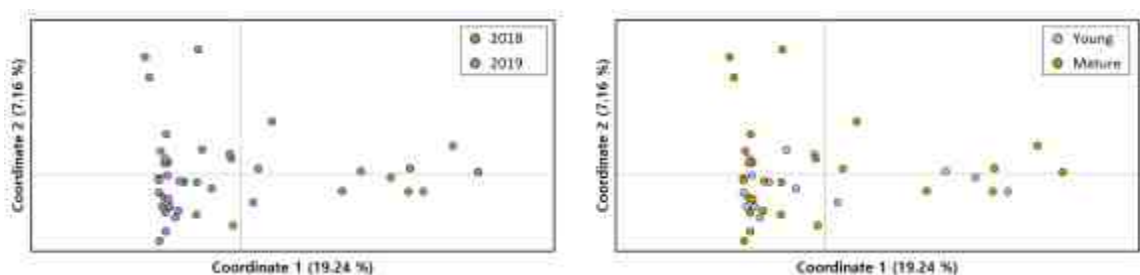


그림 52. 남극가리비 연도별(A) 및 연령별(B) 개체군에 대한 microsatellite PCoA (principal coordinates analysis) 분석 결과

- 또한, 남극가리비의 계통학적 위치를 규명하고자, 1차년도에 확보한 미토콘드리아

DNA (mtDNA) 전장유전체 데이터를 활용하여 동일 과(family: Pectinidae) 내의 계통수를 구축하고, 분류학적 독립성과 유연관계를 평가하였음

- 12개의 미토콘드리아 단백질 코딩 유전자(protein-coding genes, PCGs)와 3개의 리보솜 RNA (rRNA) 유전자를 기반으로 총 6,706 bp 길이의 서열을 연결(concatenated)하여 계통분석을 수행함
- Pectinidae 12종의 경우 상동유전자의 염기서열 정보를 GenBank 데이터베이스에서 확보하였으며, 각 유전자의 서열 정렬은 Geneious Prime® (Biomatters Ltd., New Zealand) 프로그램의 다중 정렬 기능을 기본 설정값으로 사용하여 수행함
- 근린결합법(Neighbor-Joining, NJ) 분석(Saitou and Nei, 1987)을 MEGA v12 (Kumar et al., 2024) 프로그램에서 수행하였으며, Tamura - Nei 거리 모형 (Tamura and Nei, 1993)을 사용하였고, 1,000회 반복 검증(bootstrap; Felsenstein, 1985)을 수행함
- 최대우도법(Maximum Likelihood, ML) 분석을 위해 jModelTest v2.1.10 프로그램을 이용하여 Akaike 정보 기준(Akaike Information Criterion, AIC)에 따라 최적 모델로 TVM+F+I+G4를 선정하였음. ML 계통수는 IQ-TREE v2.4.0 (Minh et al., 2020)을 사용하여 구축하였으며, ultrafast bootstrap (UFBS) 방식으로 1,000회 반복 검증 하였음 (Hoang et al., 2018)
- 남극가리비는 *Argopecten*, *Chlamys*, *Mimachlamys*, *Mizuhopecten* 등의 계통군(clade)과 명확히 분리되었으며, *Mimachlamys varia* (NC_061741)와 가장 가까운 유연관계를 나타냈고, 이에 대한 bootstrap 지지도는 NJ/ML 분석에서 각각 96/100으로 매우 높았음. 이는 남극가리비가 Pectinidae 내에서 독자적인 진화 경로를 거친 분류군임을 시사함 (그림 53)

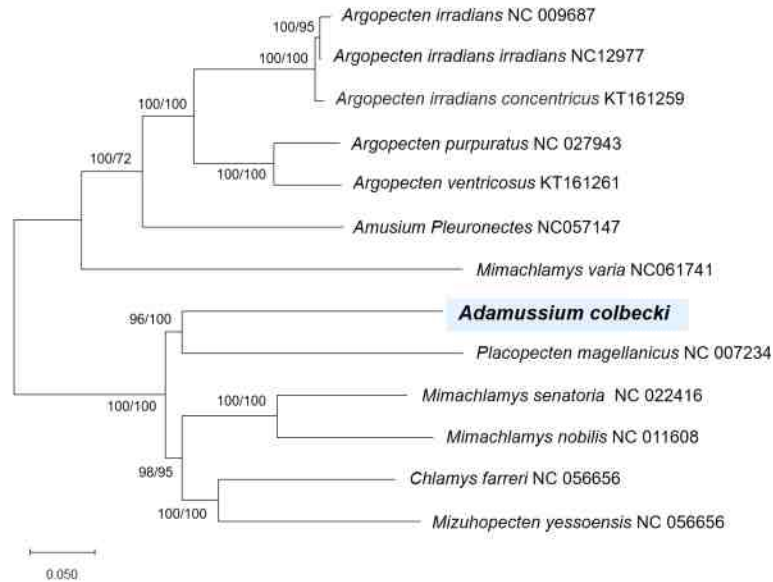


그림 53. 남극가리비(*Adamussium colbecki*)를 포함한 Pectinidae 13종을 대상으로 mtDNA 유전체 정보를 활용한 NJ 및 ML 계통수(음영 표시: 본 연구 대상 종). Node 에 표기된 숫자는 각각 NJ (왼쪽) 및 ML (오른쪽) 분석의 bootstrap 지지도를 나타냄

- 현재 분석은 제한된 시료 수를 기반으로 수행되었기 때문에 향후 분석 가능한 시료의 DNA 추가 확보 시, 유전적 다양성 지표 및 N_e 추정값의 정확도 향상과 개체군의 유전적 구조에 대한 인구통계학적 검정력과 생태적 해석의 신뢰도 또한 실질적으로 향상될 수 있을 것으로 기대됨
- Getino Mamet 등(2021)은 남반구 연안의 이매패류를 대상으로 한 연구에서, 유전적 다양성과 유효개체군 크기의 정밀한 추정을 위해서 시간적 및 공간적 샘플링 범위의 확대가 필수적임을 강조하였으며, 이에 따라 후속 연구에서는 시기별, 해역별로 확장된 시료 확보를 기반으로 한 시·공간 유전적 구조 분석과 함께 개체군 크기 추이, 번식률, 생존률 등과 같은 생태학적 자료와의 통합 분석이 수행되어야 함
- 본 연구에서 개발 및 적용한 유전자 마커 기반 분석 결과와 더불어 이러한 통합적 접근은 남극 가리비 개체군의 종합적인 생태·유전적 현황을 파악하는 데 기여하고 향후 장기적인 모니터링 체계 구축 및 효과적인 개체군 관리를 위한 과학적 기초 자료를 제공

○ 온난화 모사 수중열판실험 구축

- 영국 남극연구소에서 실험 중인 수중 열판실험장비를 제공받아 heated plated 설치를 위한 준비작업 완료 (2025년 1월 NZ 기술자 2인과 실험장비 장보고기지 도착)
- 기계, 전기 월동대원들의 협조 하에 외부 설비(전원장치, 수중케이블 등) 콘트롤 박스 적합 장소와 시설 구축 준비안전 점검 완료
- 장보고기지 부둣가에서 캠벨빙하 방향 수중 100m, 15m 깊이 설치장소를 결정하고, 콘트롤박스에서 수중까지 전기선 설치 경로와 제반 고려사항들 정리

- 2025/26 하계시즌에 안정적인 전기 공급을 테스트 후 0, +1, +2도 열판 실험장비를 설치 예정



그림 54. 영국 남극연구소 제공으로 장보고기지에 도착한 온난화 모사 열판 수중실험 장비 (위), 수중 현장에 운영 중인 열판수중실험 장비 예시 (아래)

○ AI 기반 저서생물 동정 및 군집 자동분석기술 개발

- Google Earth Engine을 활용
- 광범위한 시간, 규모와 비용 문제를 해결을 위해 저서생태 분석에 인공지능 기술 접목 시도
 - 수중방형구 영상 처리 분석 베타버전 완성 후 2년간 예산 부족으로 중단 상태이며 6기 신규과제 2단계에 다윈화 통합생태모델로 개발 (카이랩 소프트웨어 개발업체 협력 중)

3. 세부연구목표 3. 환경변화에 따른 유해 미생물 분포 및 기작 규명

가 연구내용 3-1. 유해 미생물 분포 분석

○ 동토 지역 화재발생에 따른 바이러스 변동성 조사

- 알래스카 동토 지역 중 최근 5년 이내 화재가 발생했던 두 지역(툰드라, 침엽수림)을 선정하여 메타지놈 분석을 통해 화재 발생에 따른 바이러스 분포 및 변동성 조사를 수행 (그림 55)
- 메타지놈 기반으로 재조립된 contigs 중에서 viral contigs만을 선택적으로 검출한 뒤 중복 서열 및 낮은 순도의 서열을 제거한 결과, 최종적으로 7,601개의 고순도 viral contigs가 얻어짐. 통계적으로 유의하지는 않았지만, 침엽수림 사이트에 비해 툰드라 사이트에서 약 1.5배 더 많은 viral contigs가 검출됨(그림 55)
- 화재 발생 여부에 따른 바이러스 군집 구조 변화를 살펴본 결과 툰드라와 침엽수림 간 군집 구조 차이는 확연히 드러났으나(PERMANOVA, pseudo-F=2.6, $P<0.01$), 각 바이옴에서 화재 발생에 따른 군집 구조 차이는 보이지 않음($P>0.05$, 그림 56).

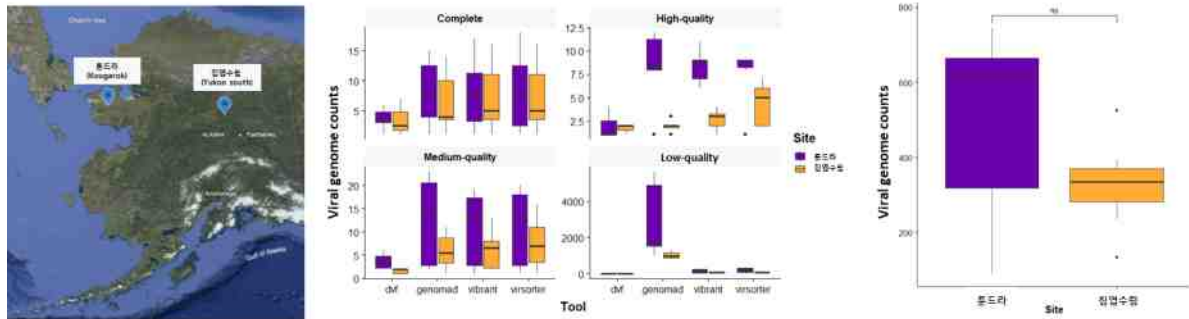


그림 55. 알래스카 동토 화재발생지역에서 획득된 viral contigs 요약 및 QC 결과. (좌) 사이트맵, (우) 획득된 viral contigs의 바이옴별 숫자 비교

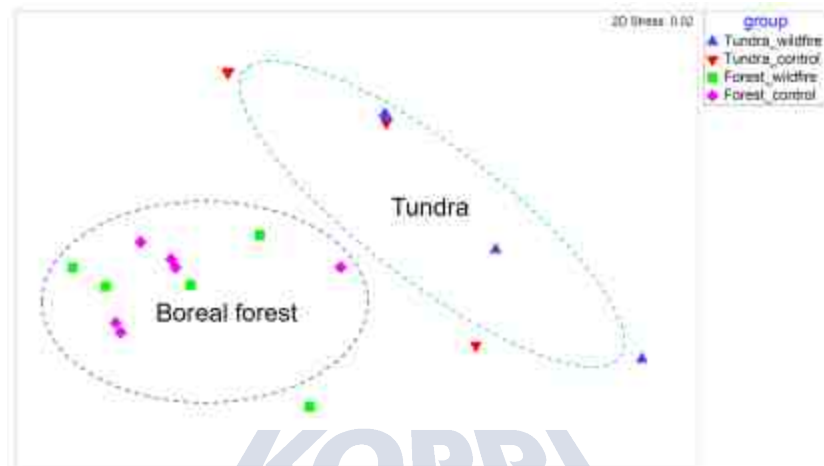


그림 56. 알래스카 동토 화재 발생에 따른 바이옴 별(툰드라, 침엽수림) 군집 구조 변화

- 동토 지역 화재발생에 따른 잠재적 유해인자 분포 변화 조사
 - 바이러스 분석에 사용된 동일한 메타지놈 데이터를 기반으로 잠재적 유해인자 분포 변화를 조사함. 재조립된 contig들을 대상으로 virulence factor database (VFDB)에서 확인되는 잠재적 유해인자 유전자 서열의 존재를 확인. 그 결과 화재가 발생하지 않은 툰드라 지역 평균 1,164개, 침엽수림 평균 1,186개의 유해인자 유전자 서열이 확인됨. 반면, 화재 발생 지역에서는 툰드라 1,217개, 침엽수림 1,718개의 유해인자 유전자 서열이 확인됨. 특히 침엽수림 지역에서 화재 이후 유해인자 유전자의 상대 풍부도가 통계적으로 유의미하게 증가한 것이 관찰됨(그림 57)

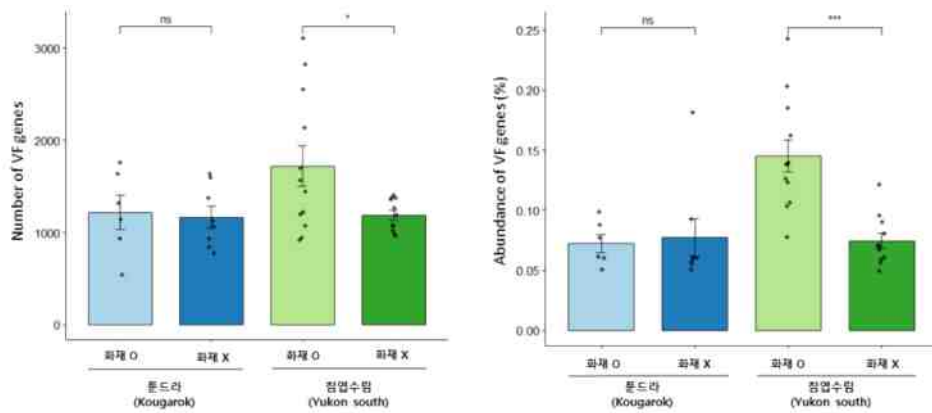


그림 57. 동토 지역 화재발생에 따른 유해인자 변동 분석 결과

- 유해인자 카테고리별 화재 발생 여부에 따른 검출된 유해인자 유전자 개수를 비교한 결과, 침엽수림에서 통계적으로 유의미한 변화가 확인됨. 반면, 툰드라에는 증감 패턴은 비슷하게 나타났으나 유의미한 변화가 확인되지 않음. 침엽수림의 경우 Effector delivery system, Motility, Nutritional/Metabolic factor, Biofilm, Antimicrobial activity/Competitive advantage 카테고리의 유해인자 유전자 개수가 화재 발생에 의해 증가한 반면 Stress survival에 포함된 유전자는 화재 발생에 의해 감소(그림 58)

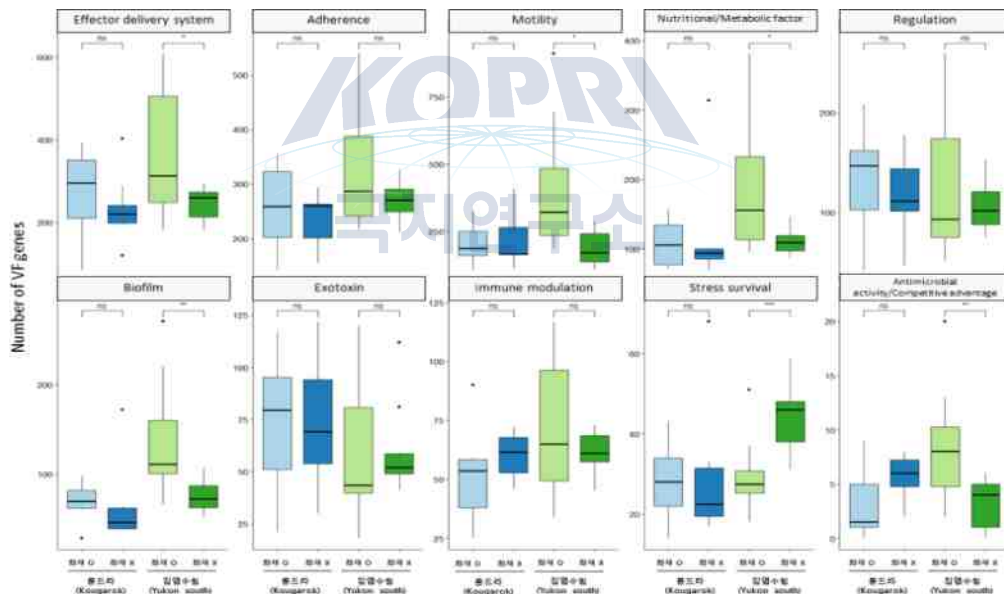


그림 58. 동토 지역 화재발생에 따른 유해인자 카테고리별 변동 분석 결과

- 유전자 레벨에서 화재 발생에 의한 영향을 비교한 결과, 전체적으로 Flagella (motility), pyoverdine (nutritional/metabolic factor), HSL-1 (effector delivery system), alginate (biofilm) 유전자의 비율이 높게 나타남. 동시에 이 유해인자 유전자들은 화재 발생에 따라 침엽수림과 툰드라 지역에서 모두 증가하는 경향을 보임. 그러나 침엽수림 지역에서만 통계적으로 유의미한 차이가 확인됨(그림 59)
- 종합적으로 볼 때, 화재 발생 이후 침엽수림에서 유해인자가 증가한 것은 기존 생태계가 급격히 붕괴되고 새로운 토양 생태계가 재형성되는 과정에서 생물들 간 경쟁이 더욱 치열해졌음을 반영하는 것으로 해석됨. 반면, 툰드라에서는 화재의 영향이 상대

적으로 적었거나, 외부 교란에 대한 저항성이 더 높은 특성이 나타난 결과로 볼 수 있음. 또한, 화재 이후 바이러스 군집 구조의 뚜렷한 변화는 두 바이옴 모두에서 관찰되지 않았기에, 현재의 자료만으로는 화재가 토양 바이러스에 미치는 영향을 단정하기 어려움

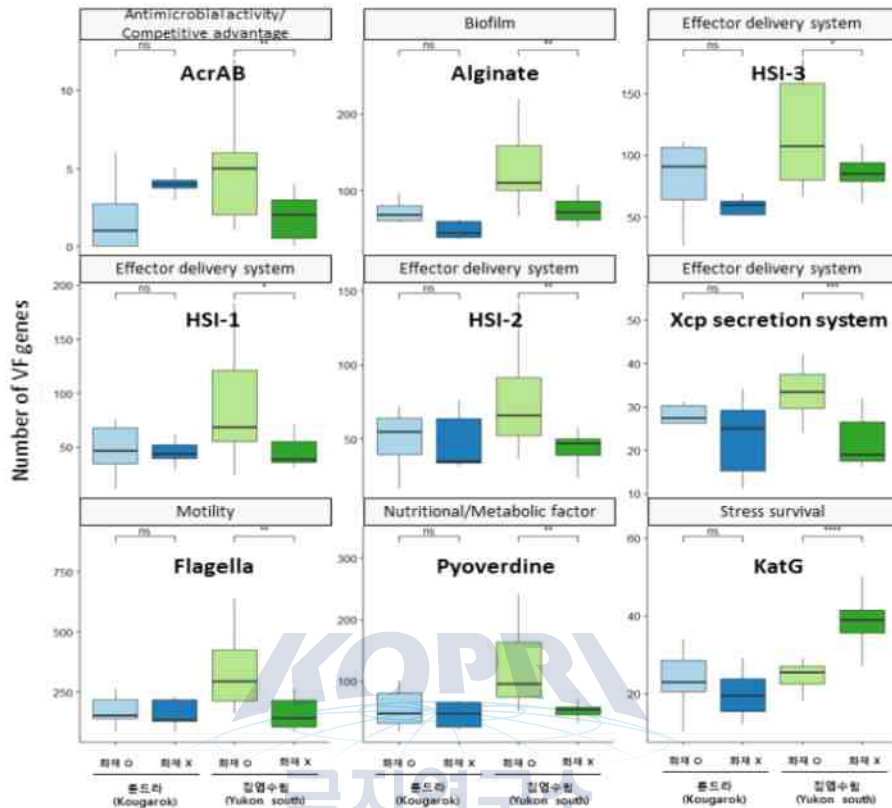


그림 59. 동토 지역 화재 발생에 따라 변동성이 나타나는 유해인자 유전자

○ 유해 유전자 분포도 작성을 위한 자료 수집

- 메타유전체 기반으로 환북극권내 유해 유전자 (병원성 유전자 및 항생자 내성 유전자) 분석을 위해 공개 DB로부터 651개의 메타유전체 확보 및 quality control 후 병원성인자데이터베이스(VFDB)와 비교분석하여 시료내 병원성인자 유전자 존재 유무와 구성 분석 (그림 60)

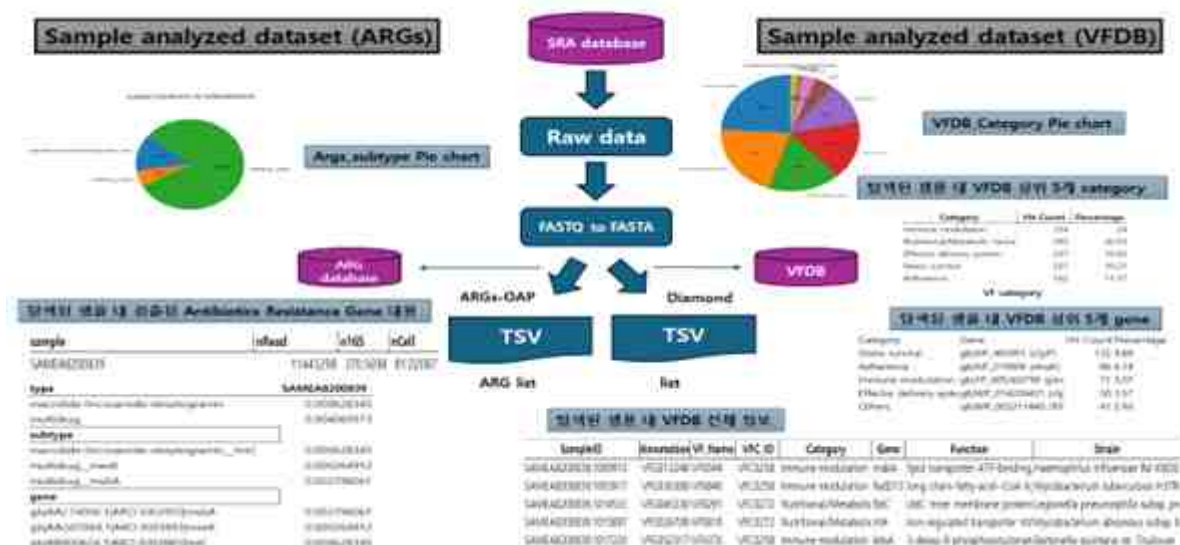


그림 60. 메타유전체내 병원성 인자 유전자 및 항생제 내성 유전자 존재 분석 파이프라인

- 전체 시료 중 우세하게 나타난 병원성 유전자 및 항생 내성 유전자 분석 수행. 총 651개의 환복극균 시료 전체를 분석하여, 이 지역에 분포하는 VF와 ARG의 전반적인 경향성을 확인함(그림 61)
- 전체 시료에서 검출된 VF들을 기능별로 분류했을 때 Immune modulation 관련 유전자 그룹이 약 29%로 가장 높은 비율을 차지했으며 이는 북극 환경의 미생물들이 숙주의 면역 체계를 회피하거나 조절하는 능력을 중요한 생존 전략으로 사용하고 있는 것으로 추정할 수 있음. 그 뒤를 이어 Nutritional/Metabolic factor와 Adherence 관련 유전자들이 각각 23%, 12%로 높게 나타났음. 전체 시료의 ARG를 내성 계열(Type)별로 분석한 결과, 특정 계열에 대한 뚜렷한 우세 없이 다양한 종류의 내성 유전자들이 비교적 고르게 분포하는 것을 확인하였음. 가장 높은 비율을 차지한 것은 multidrug 유전자로 약 20%였으며, 그 외에 aminoglycoside, polymyxin, beta-lactam 등 여러 계열의 내성 유전자들이 각각 10% 내외의 유사한 비율로 나타남



그림 61. 전체 시료의 총합 데이터로부터 우점하는 VF category 및 ARG subtype 상위 10개

나 연구내용 3-2. 미생물의 병원성 분석

○ 식물병원성 균주 탐색 및 배양체 확보

- 알래스카 유기질 토양에서 용혈작용을 나타내는 100개의 세균 균주들을 분리함
- 이들 균주들의 배양체를 대상으로 skim milk을 포함하는 고체배지를 이용하여 단백

질분해활성(유력 병원성 인자)을 검증함. 감자괴경에 세균 현탁액(OD600 = 0.3~0.5)을 접종한 후, 적절한 습도와 광조건에서 병징이 나타날 때까지 유지함. 최종적으로 감자괴경에 무름증세를 나타내는 잠재적 유해세균(12개 균주)들을 확보함 (그림 62)

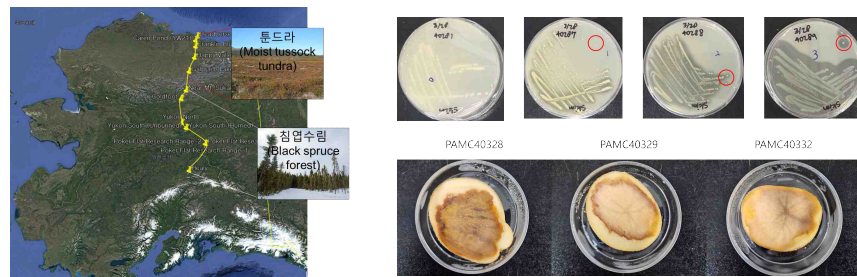


그림 62. 토양 샘플링 사이트(좌)에서 분리한 잠재적 유해미생물의 단백질분해활성과 감자괴경 무름증세 검증 결과(우)

- 잠재적 식물병원균으로 추정되는 10개 세균의 순수배양체를 선별하였고, 16S rRNA 유전자 염기서열에 기반하여 동정한 결과, 모두 *Pseudomonas* spp.로 분류되었음 (*P. antarctica*, *P. fildesensis*, *P. canadensis*, *P. yamanorum*). 강한 무름증세를 유발하는 PAMC 40328, PAMC 40329, PAMC 40332 균주 포함하여 10개 균주를 대상으로 8 종류 항생제에 대한 감수성과 내성을 테스트한 결과, 전반적으로 tetracycline, meropenem, rifampin에 대해 감수성을 나타내었고, 나머지 5 종류 항생제에 대해서는 강한 내성을 나타내었음 (그림 63). 이 결과는 이들 잠재적 식물병원성 균주들이 동일 환경 내 다른 미생물군과의 공간과 먹이 경쟁에서도 유리한 위치를 차지할 수 있음을 의미함

No.	Sample name	Scientific name	Hemolytic type				Potato soft-rot type			Enzyme activity	
			α	β	γ	other	WSR	SD	No	Protein	
PAMC 40244	CP-A-2	<i>Pseudomonas</i> CP025624_s		+			+			3	
PAMC 40249	YN-A-8	<i>Pseudomonas</i> CP025624_s		+			+			3	
PAMC 40251	YN-A-6	<i>Pseudomonas</i> CP025624_s		+			+			3	
PAMC 40253	CP-P-1	<i>Pseudomonas antarctica</i>		+			+			3	
PAMC 40277	YN-A-1	<i>Pseudomonas</i> CP025624_s		+			+			3	
PAMC 40287	FB(20)-A-2	<i>Pseudomonas fildesensis</i>	+				+			1	
PAMC 40289	CP-P-9	<i>Pseudomonas antarctica</i>					+			3	
PAMC 40328	HL-A-1*	<i>Pseudomonas canadensis</i>		+			+			3	
PAMC 40329	HL-A-2*	<i>Pseudomonas yamanorum</i>		+			+			3	
PAMC 40330	HL-A-3*	<i>Pseudomonas canadensis</i>		+			+			3	
PAMC 40332	HL-A-5*	<i>Pseudomonas yamanorum</i>		+			+			3	
PAMC 40339	GL-P-1*	<i>Pseudomonas canadensis</i>			+		+			3	

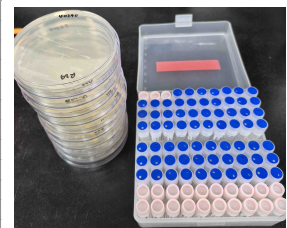


그림 63. 감자괴경 무름증세를 나타내는 후보 식물병원균 목록과 보관 중인 배양체

- 감자무름증세를 유발하는 세균의 식물병원성 탐색
 - 북그린란드 토양에서 분리한 *Pseudomonas* sp. G2-4 균주는 강력한 단백질 분해활성 활성을 가지고 있으며, 5도부터 25도에 이르는 다양한 온도 범위에서 생존이 가능한 동시에 감자무름병을 유발하였음
 - 세균성 무름병원균의 발병기작을 연구하기 위해, 외분비성 효소 생산을 유도하는 조건에서 G2-4 균주를 배양하였음. 이를 위해 감자괴경 조각을 탄소원으로 포함한 최소배지를 사용하며, 저온에서 5일간 배양하였으며, 배양 후 상등액을 3 kDa ~ 100 kDa cut-off membrane을 이용하여 분획 및 10배 농축하였음. 농축한 효소용액을 skim milk 고체배지와 감자괴경에 접종하여 단백질분해활성과 감자무름증세를 관찰함으로써 병원성과의 관련성 분석 진행 중

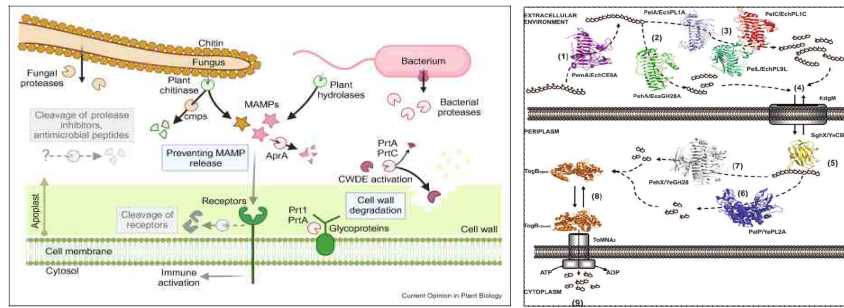


그림 66. 식물병원성 미생물이 식물 아포플라스트(apoplast)에 분비하는 단백질 분해효소의 역할(좌) 및 펙틴 분해 및 수송 관련 효소유전자(우)

○ 남극식물 곰팡이병 유도 곰팡이의 유전체 분석을 통한 병증 유도 매커니즘 분석

- 남극식물 곰팡이병 유도 곰팡이인 *Varicosporium* sp.의 전사체 분석을 통해 식물세포벽분해효소(Plant Cell Wall Degradation Enzyme, PCWDE) 중, GH28, CE8 family 효소가 *Varicosporium* sp.의 식물 침투 이후 매우 높은 수준으로 발현되는 것을 확인함
- CAZy database 기반으로 하여 *Varicosporium* sp. 과발현 PCWDE의 세부 기능 조사한 결과, 이들은 식물 세포벽 구성 성분인 펙틴 사슬의 메틸기를 에스터화 및 가수분해를 통해 세포벽을 분해하는 효소로 알려짐
- KEGG pathway 기반 분석 및 문헌 조사를 통해 해당 효소들이 대표적인 병원성 진균인 *Magnaporthe oryzae*의 병원성에 직접적으로 관여하는 오탄당과 글루쿠론산 상호전환 과정에 기여함을 확인(그림 67)

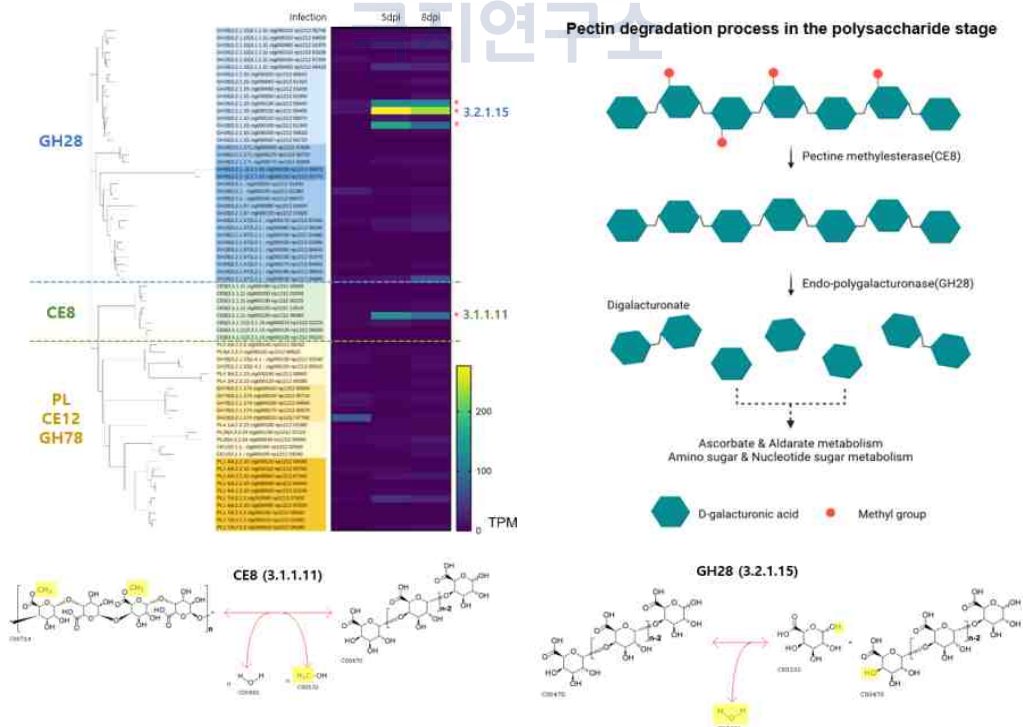


그림 67. *Varicosporium* sp.의 PCWDE 발현 변화 및 세포벽 분해 과정 모식도

- 진균 병원성 발현 PCWDE는 *Varicosporium* sp.의 병원성 표현형이 경감되는 저온 조건에서도 고온 조건과 유사한 패턴으로 발현됨. *Varicosporium* sp.의 병원성을 유

도하는 인자는 저온에서도 발현되나 다른 요인으로 인해 병증이 지연 혹은 억제될 가능성이 높음

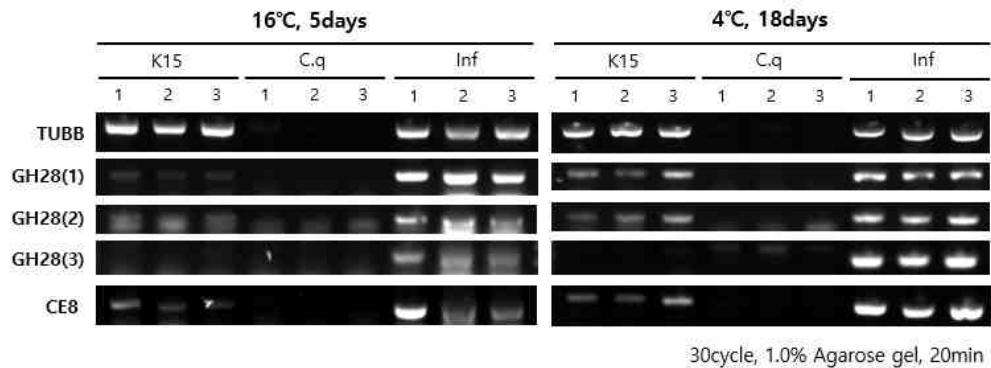


그림 68. *Varicosporium* sp.의 고온 및 저온 조건 PCWE 발현 양상

- 머신러닝 기반 프로그램인 EffectorP 및 전사체 분석 결과를 통해 진균 이펙터 후보 유전자를 선별하였음. 이들 중 60개의 진균 이펙터 후보 유전자에 대해 in planta 과사 유도 실험 진행 중. 현재 14개의 유전자 클로닝 및 6개에 대해 담배 잎에 접종 완료. 그러나 담배의 숙주반응성 문제로 인해 숙주식물 변경 필요.
- 유전체정보 기반 이차대사산물 생합성 클러스터 예측 프로그램인 antismash-fungi를 이용하여 *Varicosporium* sp. 이차대사산물 생성 관련 gene cluster 예측. 해당 분석을 통해 *Varicosporium* sp. 은 대표적 진균 독성 물질인 아플라톡신, 그라밀린A, B과 식물 성장 억제 물질인 멜레인 생합성 유전자 등의 gene cluster를 보유하고 있음을 확인 (그림 69)

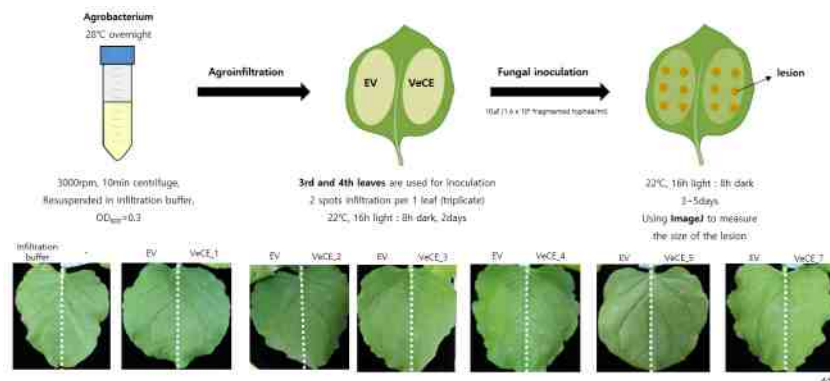


그림 69. Effector 단백질의 진균 병원성 연관성 확인을 위한 과사유도 실험

- 현재 *Varicosporium* sp. 의 독성대사물질 탐색을 위해 식물세포 처리 전후에 대한 비타겟 대사체 예비 분석을 통해 독성물질 리스트 확인 완료

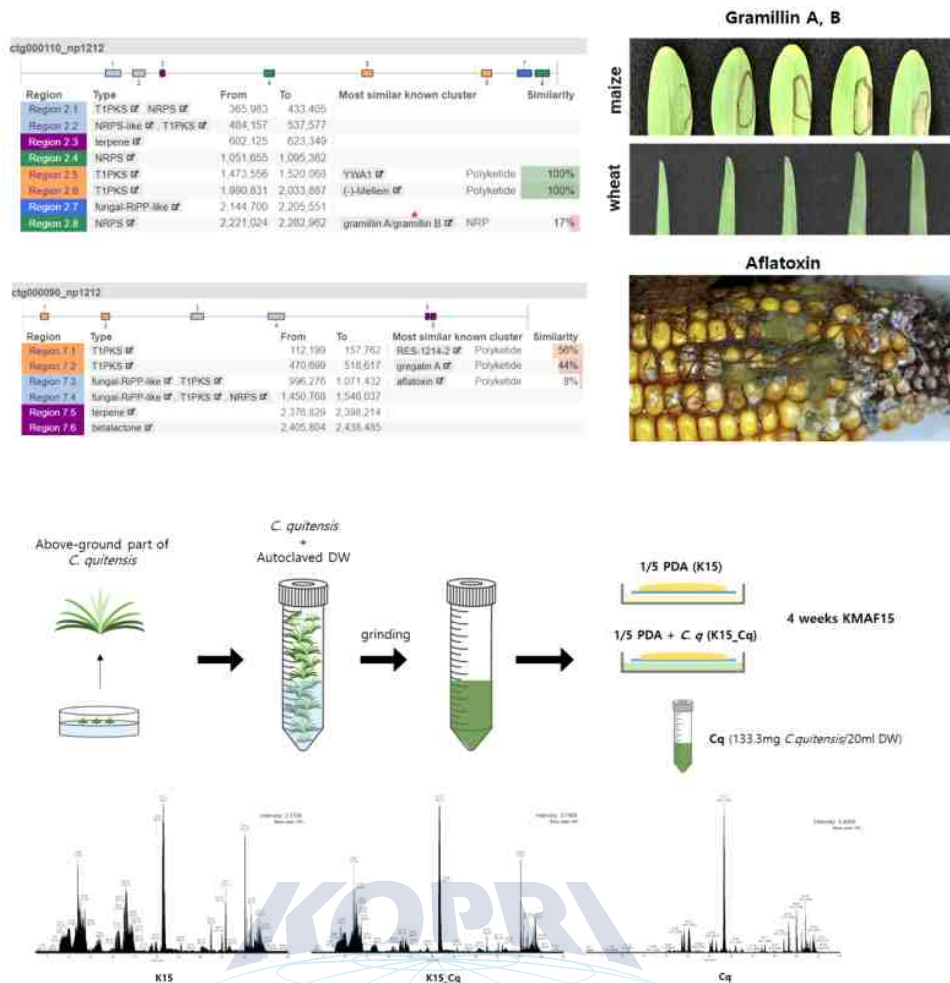


그림 70. *Varicosporium* sp. 이차대사산물 생합성 유전자 클러스터 분석 (위) 및 식물접촉 전후의 비표적 대사체 분석 실험 (아래)

- *Bacillus mycoides*의 온도별 전사체 분석을 통한 온도별 병증 유도 및 조절 메커니즘 분석
 - 기 확인한 *Bacillus mycoides* PAMC 29538의 온도에 따른 용혈작용 변화에 대한 분자적인 메커니즘 확인을 위해 전사체 분석 수행중. 이를 위해 *Bacillus mycoides* PAMC 29538을 각각 10도, 20도, 및 30도에서 배양하면서, 성장 단계별로 전사체 분석용 시료를 준비함. 전사체 분석을 위한 시료 준비시, 세포와 상등액의 용혈작용을 확인한 결과, 20도의 세포와 상등액에서 가장 높은 용혈작용을 보임 (그림 71). 10도의 경우, 용혈 작용이 5일 이후 나타나지만, 37도에서보다 더 높은 용혈 작용을 보였고, 상등액이 세포보다 더 높은 용혈작용을 보임. 반면, 37도에서는 10도와 반대의 양상을 보임

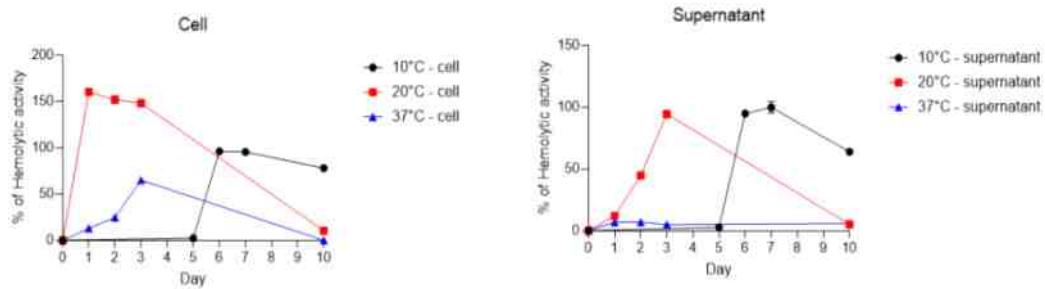


그림 71. *Bacillus mycoides* PAMC 29538 세포 및 상등액의 온도에 따른 용혈작용

- 전사체 분석을 위한 RNA 추출 결과, 37도의 경우 전사체 분석을 위한 RNA 농도가 낮음. 이를 제외하고 10도 [Day 5,6,7,10]과 20도 [Day 1,2,3, 10]에서 배양한 시료의 전사체를 확보 완료함(표 및 KPDC 등록)

표 14. *Bacillus mycoides* PAMC 29538의 온도에 따른 전사체

Temperature(℃)	Sample name	Total base pair (bp)	Number of total reads	Number of filtered reads
20	day1-20C-1	3680726774	24375674	23886362
	day1-20C-2	2102234080	13922080	13579186
	day1-20C-3	3674240418	24332718	23795874
	day2-20C-1	2084502150	13804650	13416646
	day2-20C-2	2049804766	13574866	13180016
	day2-20C-3	3684261382	24399082	23822630
	day3-20C-1	3658649064	24229464	23646744
	day3-20C-2	2094818772	13872972	13460290
	day3-20C-3	3693071024	24457424	23848624
	day10-20C-1	3656505468	24215268	23662076
	day10-20C-2	3664643764	24269164	23677100
	day10-20C-3	3660652834	24242734	23641262
10	day5-10C-1	2228140900	14755900	14351004
	day5-10C-2	3657669980	24222980	23683562
	day5-10C-3	3682494682	24387382	23834314
	day6-10C-1	3682467804	24387204	23835814
	day6-10C-2	3697892152	24489352	23917586
	day6-10C-3	3654535220	24202220	23621582
	day7-10C-1	2061341468	13651268	13275920
	day7-10C-2	2117462128	14022928	13615634
	day7-10C-3	2193203124	14524524	14116788
	day10-10C-1	3695048520	24470520	23873960
	day10-10C-2	3661782616	24250216	23688616
	day10-10C-3	3669904906	24304006	23734558

- 균주의 배양 10도와 20도에서 뚜렷하게 구분되는 전사체의 발현이 확인됨 (그림 72)

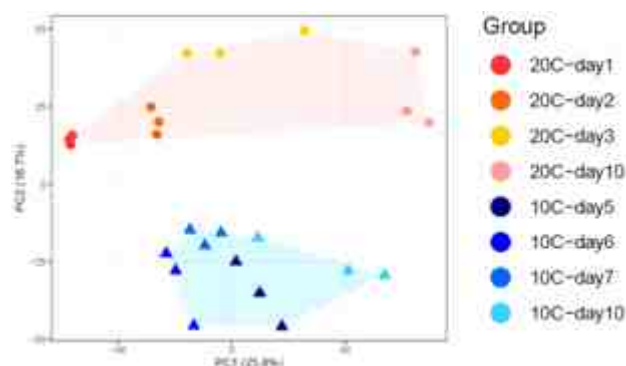


그림72. *Bacillus mycoides* PAMC 29538의 온도별 전사체 비교

- 발현된 병원성 인자 중, 성장 온도와 관계없이 용혈작용에 관여하는 Nhe, 단백질분해 효소를 인코딩하는 immune inhibitor A metalloprotease 및 collagenase의 발현량이 가장 높았음. 특히, 용혈작용에 관여하는 Nhe, Hbl 유전자와 단백질 분해효소를 코딩하는 colA 유전자의 발현이 mid-log 또는 정체가 초기에 두드러짐 (표).

표 15. 병원성 인자의 온도 및 성장 시기별 발현 차이

Category	Gene	Protein	10°C log ₂ FC				20°C log ₂ FC			
			day0day5	day1day5	day1day7	day1day8	day2day5	day3day5	day1day8	day1day9
Adhesin	gpaA	Bacterial-binding protein	0.35	0.16	-0.25	-0.42	-0.12	0.01	-1.00	-1.03
	gpaL	chaperon HspL	-0.15	0.39	0.38	0.01	0.41	1.56	0.76	-0.81
	gpaH	immunoglobulin A	-0.54	-0.28	0.14	0.42	0.70	0.78	1.13	0.33
	gpa	Little adhesin protein Lsp	0.96	1.23	-0.84	-2.06	0.70	0.78	-2.84	-1.29
	gpaA	type I glycosylated phosphatidylethanolamine	0.52	0.23	-1.08	-1.29	1.22	1.21	-1.10	-1.32
Invasion	gpaA	type I glycosylated phosphatidylethanolamine	-0.42	0.20	0.18	0.01	0.97	2.78	2.23	-0.98
	gpaH	DCP-400 domain-containing protein	0.88	0.39	0.95	-0.38	-0.49	3.32	-2.74	-0.96
	gpaH	DCP-400 domain-containing protein	-0.14	-0.17	-0.40	-0.23	-0.04	-0.34	-0.77	-0.45
	gpaH	protein-coding protein PgaH	-0.07	-0.71	-1.18	0.47	1.22	0.64	0.21	0.35
	gpaH	beta-mannosidase (exopolysaccharide)	0.28	0.01	-0.80	-0.84	-0.40	-0.23	-1.05	-0.78
Toxin	gpaH	lipoteichoic acid	0.18	0.27	-0.23	-0.80	-0.17	4.13	3.07	-1.08
	gpaH	immune inhibitor A	-0.84	-0.27	-2.08	-2.54	0.90	1.92	2.88	0.08
	gpaH	immune inhibitor A	-0.50	0.36	1.38	1.02	2.98	1.98	1.80	-0.18
	gpaH	immune inhibitor A metalloprotease	0.12	0.68	0.41	-0.27	1.78	2.28	2.96	-0.30
	gpaH	collagenase	0.38	1.25	0.07	-1.18	1.08	1.40	0.39	-1.03
Toxin	gpaH	collagenase	0.90	0.83	-0.06	-0.88	0.17	-0.79	-0.14	0.85
	gpaH	DCP family toxin protein	0.10	0.39	0.14	-0.21	0.78	1.08	0.80	-0.24
	gpaH	type III secretion domain-containing protein	0.23	0.84	0.21	0.71	0.80	-0.89	-2.00	-1.12
	gpaH	thermostable family protein	0.28	0.10	-0.89	-0.89	-0.40	-1.06	-2.28	-0.84
	gpaH	thermostable family protein	0.08	0.82	0.79	-0.14	-0.58	2.04	1.07	-0.87
Toxin	gpaH	fibronectin III-binding component precursor	0.56	0.60	-0.45	-1.06	1.64	1.10	-0.01	-1.12
	gpaH	fibronectin III-binding component L2	0.34	0.32	-0.89	-1.22	0.88	1.20	-0.71	-1.80
	gpaH	fibronectin III-binding component L1	0.26	0.52	-0.47	-1.10	1.00	1.38	-0.07	-1.84
	gpaH	serine/threonine protease A	0.10	-0.42	-1.09	-0.67	1.30	0.78	-0.84	-1.40
	gpaH	serine/threonine protease B	0.17	0.80	-0.40	-0.79	1.24	1.93	0.53	-1.40
Toxin	gpaH	serine/threonine protease C	0.90	0.68	-0.04	-0.71	1.33	2.08	0.58	-1.87
	gpaH	phosphatidylethanolamine	-0.40	-1.29	-0.84	0.81	0.80	0.90	0.12	-0.79
	gpaH	ThiA family RNA methyltransferase	0.18	0.32	-0.67	-0.40	-0.12	-0.25	-1.29	-1.03
	gpaH	hemolysin III family protein	-0.42	-0.86	-0.26	0.89	0.23	0.01	0.74	1.20
	gpaH	hemolysin III family protein	1.70	0.32	-0.87	-0.87	-1.40	-1.08	1.84	1.20
Toxin	gpaH	cellulose carbonic anhydrase	-0.34	1.01	-1.79	-2.74	-0.71	-1.79	1.56	-1.87
	gpaH	cellulose carbonic anhydrase	-0.79	1.38	-1.29	0.11	1.79	1.28	0.89	-0.98
	gpaH	crystal protein	0.80	0.80	0.26	0.26	0.23	0.08	1.84	0.31
	gpaH	crystal protein (CrpA)	0.10	0.12	0.49	0.37	-0.19	0.08	1.84	0.88
	gpaH	crystal protein (CrpB)	-0.38	-0.22	0.10	0.31	0.18	1.03	1.84	0.31
Toxin	gpaH	crystal protein (CrpC)	0.10	0.78	0.21	0.55	-0.68	-0.71	0.20	0.88
	gpaH	crystal protein (CrpD)	0.31	-0.17	-0.62	-0.47	-0.78	-2.01	1.36	-0.10
	gpaH	phosphatidylethanolamine	0.17	0.18	-0.89	-0.87	0.84	0.88	-0.40	1.18
	gpaH	phosphatidylethanolamine	0.33	0.66	-0.45	-0.91	1.87	1.38	0.44	-1.40

○ *Bacillus mycoides* 동물 병원성의 기작 분석을 위한 동물 실험 진행

- 기존 결과에서 *B. mycoides* PAMC 29538이 oral gavage를 통해 감염됐을 때, 생쥐에서 저체온증과 같은 급성 쇼크 현상이 관찰됨 (그림 73)

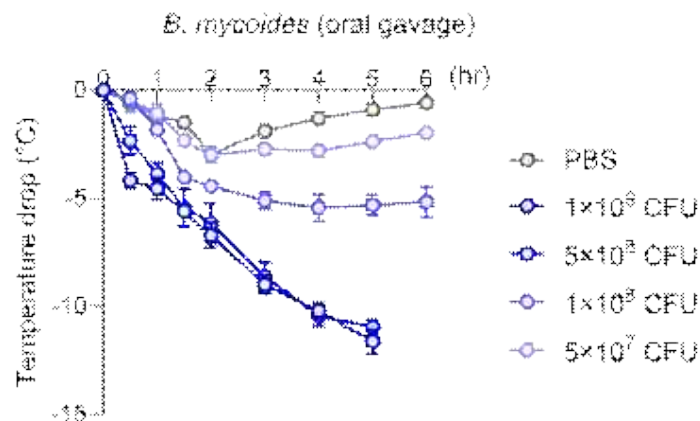


그림 73. C57BL/6J에 *B. mycoides*를 CFU별로 oral gavage를 통해 감염시킨 뒤의 6시간 동안 1시간 간격으로 체온 측정을 한 결과. CFU가 높을수록 체온은 급격하게 떨어지고, 낮게 감염시킬수록 체온이 덜 떨어지거나 회복함을 확인함

- Mast cell은 혈관 주변에 존재하며 혈압 조절에 관여하는 면역세포임. 이러한 mast

cell이 급격하게 활성화되면, 아나필락시스가 발생하는데, 이러한 증상은 주로 저혈압 및 저체온증을 동반하게 됨

- *B. mycoides* PAMC 29538에 감염된 생쥐는 알레르기성 아나필락시스와 같이 단시간(대략 30분 이내)에 발생하지는 않았지만, 6시간 동안 저체온증 증상이 단계적으로 발생하였기 때문에, mast cell과의 연관성을 검증하기 위해 mast cell deficient 생쥐 (c-KitW-sh/W-sh)와 wild-type 생쥐와의 표현형 비교 실험을 진행함
- 대조군(WT littermate control) 생쥐에서 발생한 저체온증 증상은 mast cell deficient (Wsh/Wsh) 생쥐에서 낮게 발생하고 있음을 관찰함 (그림 74). 즉, 1×10^8 CFU로 감염을 시킨 상황에서 Wsh/Wsh의 쇼크성 저체온증 현상이 상대적으로 WT에 비해 적게 발생하였음. 또한, CFU를 5×10^7 혹은 1×10^7 로 낮추었을 때는, 저체온증의 차이가 좀 더 분명하게 드러남.
- *B. mycoides* PAMC 29538이 mast cell을 통해 저체온증과 같은 패혈성 쇼크 증상을 유발하는 결과는 장 상피세포에서 발생하는 집중적 괴사 현상이 mast cell 활성화 및 이로 인한 저체온증으로 연결되는 고리일 것으로 생각됨. 추후 이와 관련된 체계적인 pathophysiological mechanism 규명 연구가 필요함

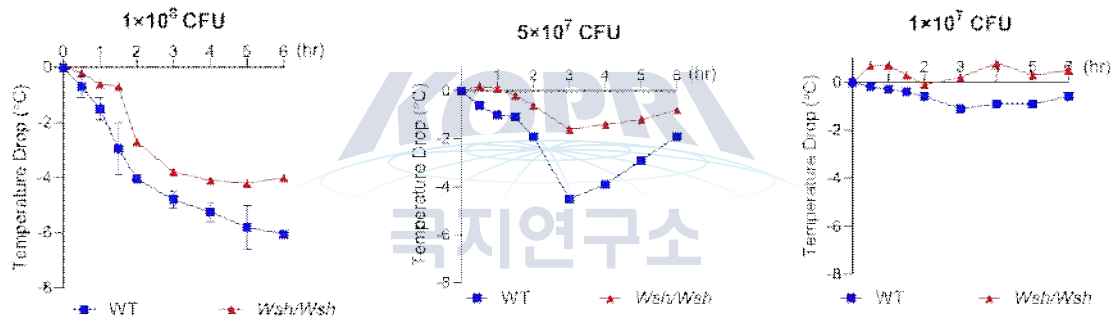


그림 74. 대조군 생쥐(wild type littermate)와 mast cell deficient 생쥐(KitW-sh/W-sh)에게 *B. mycoides*를 CFU 별로 oral gavage 감염시키고 측정한 체온

다 연구내용 3-3. 국제사회 협력 및 기여

- One Arctic One Health 사업 관련 미국 등 북극이사회 회원국과 실질협력 및 벤치마킹
 - 북극이사회 지속가능 워킹그룹(SDWG)의 ‘One Arctic One Health’ 프로젝트를 주도하는 미국 알래스카 페어뱅크스대학의 Center for One Health Research와 7월 현장에서 협력 연구 수행



그림 75. 알래스카 UAF 대학과의 연구 협력 논의 및 공동 현장 연구

- 핀란드 Oulu대학 Arctic Health연구그룹과 연구협력 추진을 위한 협의 추진 및 성과 자료 공유



그림 76. 핀란드 Oulu 대학 연구진과 온라인 회의 장면

- 그린란드 누크에 ICC(이누이트환북극이사회) 그린란드 지부 방문 및 Sofia Geisier 사무국장 면담, 본 과제 연구현황 및 자료 공유 진행
- 지속가능 워킹그룹(SDWG) 사무국에 자료공유
 - 러시아-우크라이나 전쟁으로 인한, 북극이사회 지속가능 워킹그룹(SDWG) 활동 중단으로, 해당 연구 계획을 국제북극과학위원회(International Arctic Science Committee; IASC)와 공유하는 것으로 2024년에 변경함
 - 2025 ASSW 회의에서 IASC 참가 및 북극권 국가 8개국을 포함한 회원국 24개국의 자연/인문사회 과학자, 북극원주민, 정부관계자, 젊은과학자 등을 대상으로 과제 소개 (그림 77)



그림 77. ASSW 회의 참석 및 협력 논의

4. 종합모식도

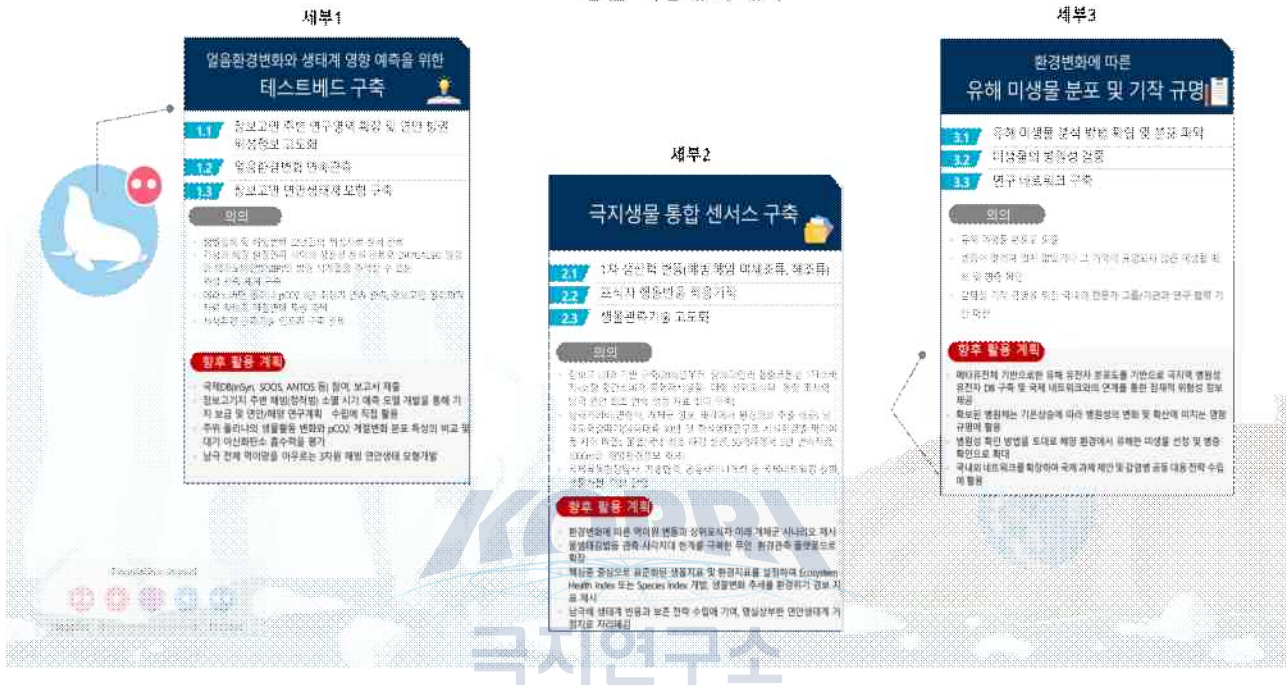
가 6년 달성내용과 의의 및 향후 연구 내용

- 기후온난화로 인한 빙권 약화와 연안 환경 변화는 남극 생태계 전반의 구조와 기능을 동시에 변화시키는 핵심 요인임. 본 연구는 이러한 변화가 서식환경 - 생물반응 - 위험성으로 이어지는 연속적 과정임을 이해하고 각 세부를 하나의 통합 체계로 구성함. 먼저 장보고만을 중심으로 연안·빙권 변동을 정량적으로 추적하는 테스트베드를 구축하여 환경 변화의 실측 기반을 마련하고, 이를 토대로 1차 생산자부터 동물플랑크톤·저서생물·상위포식자로 이어지는 생물 반응의 변동성과 적응 양상을 통합 센서스로 파악하고자 하였으며, 이렇게 확보된 환경 - 생물 자료는 다시 유해 미생물의 확산 가

능성, 병원성 발현 조건, 지역사회 노출 위험을 평가하는 세부3 연구로 연결되어, 변화의 '결과'가 어떤 위해 요인으로 현실화될 수 있는지를 규명하고자 하였음. 세부1, 2, 3은 각각의 목표를 가지면서도, 환경 변화의 원인 분석 → 생태계 반응 진단 → 위해성 평가로 이어지는 하나로 통합되는 분석 구조를 형성하여, 남극 연안 생태계 변화에 대한 예측과 대응 전략 수립을 위한 통합적 연구 기반을 구축하고자 노력함.

○

온난화로 인한 극지 서식환경 변화와 생물 적응진화 연구



제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제1절 연차별 목표달성도

1. 정량적 연구성과

가 정량적 연구성과
(2020 과제통합 전)

년도 (과제연차)	성과목표	지표	목표치(A)	달성(B)	가중치(C)	평가기준	달성도(%)	
							(D=B/A)	(D*A)
1세부 2020 (1차년도)	해빙과 캠벨빙하 변동 영향 파악과 정량화	캠벨빙하 면적 위성관측정보 구축 건수	7건 이상 (2014~2020 년 연간 면적 위성정보 구축)	7건	10	-캠벨빙하 탐지 위성지도 및 정량적 면적 산출 자료 -KPDC등록여부	100	10
		캠벨빙하 속도 산출정보 구축 건수	7건 이상 (2014~2020 년 연간 이동속도 위성정보 구축)	7건	10	-위성영상 분석기반 캠벨빙하 이동속도 지도	100	10
	빙하-해양-해 빙 상호 반응 연구를 위한 연안 환경 변화 관측	생태계 모형실험	0-D 모형 이용한 논문발표1건	1건	10	-조사한 모형제시와 모형실험 결과 발표 -KPDC등록여부	100	10
		연속관측 (수온, 염분, pCO ₂ , 무기탄소, 영양염)	연속관측, 하계집중관측 1건	1년 관측치 분석	15	-관측자료 제시	100	15
	환경변화에 대한 생태계 반응	주요 먹이원의 변화 추적	1건	1	5	-모니터링카메라 기반 상위포식자 먹이원 이미지 획득	100	5
		해조류 및 해양 미세조류 DB 구축	2건	2	10	-KPDC등록여부	100	10
		주요생물 반응	저서생물군집 1건	1	10	-획득 자료제시	100	10
	국제공동 관측장비 고도화	남극해빙환경 관측 기술	3D 수중영상분석 법 1건	1	10	3D 분석법 개발	100	10
	논문 및 학회	mrnIF 80이상	1	1	10	개재건수 (과제 기여율고려)	100	10
		mrnIF 40이상 80미만	1	2	10		100	20
	계				100	-	-	100
2세부 2020 (1차년도)	포획 및 태깅 기술 습득	기술 매뉴얼 작성	1건	1건	30	-극지물범연구 안내서 출간	100	30
		언론홍보	1건	22건	10	-연구활동 소개 기사 작성 여부	100	10
	물범 잠수행동 관측 시스템 장비 테스트	기기별 관측 기능 테스트 및 신규 개발 장비의 적용	1건	3건	20	-기기 세부사양 테스트 결과표	100	20
	논문	논문	1건	1건	10	-mrnIF 40이상 80미만 1편	100	10
	남극 테라노바 만 현장 조사를 통한 시료 수집	혈액 시료	3건	4건	10	-시료 여부 (개체 당 1건)	100	10
		털 시료	3건	3건	10	-시료 여부 (개체 당 1건)	100	10

		번식 관련 시료(태반 포함)	3건	5건	10	-시료 여부 (개체 당 1건)	100	10
	논문	mrnIF 80이상		1건		-초과달성	-	
		mrnIF 40이상 80미만		1건				100
	계				100			100
3세부 2020 (1차년도)	북극권 유해 미생물 분석 방법 확립 및 탐색	유해 미생물 탐색 방법 확립	1건	1	20	- 바이러스 유전정보 확보 건수 (1건)	100	20
		유해 미생물 분포도 작성	유해 미생물 정보 20건	22건	50	- 환경 시료 내 유해 미생물 탐색 건수(20건) - KPDC 등록	100	50
	미생물의 병원성 검증 기반 마련	병원성 검증용 미생물 확보	미생물 50점	279점	10	- 미생물 확보 및 생리특성 분석 건수 (50점)	100	10
	연구 네트워크 구축	전문가 그룹 구성	1건	1	-	- 전문가 그룹: 유해 미생물 평가 및 분석을 위한 전문가 그룹 구성 (1건)	100	10
	과학의 대중화	홍보	2건	5	20	- 홍보 자료 배포 또는 대중 강연	100	20
	논문	논문	-			- 연구 개시 년도로 논문 자료 확보에 집중		
	계				100	-	-	100

(2020 과제통합 후)

년도 (과제연차)	성과목표	지표	목표치(A)	달성(B)	가중치 %(C)	평가기준	달성도(%)	
							(D=B/A)	(D*A)
2021 (2차년도)	극지역 서식환경 관측기술 고도화	위성관측 (캠벨빙하, 장보고만 해빙) 정보	장보고기지 주변 폴리나 탐지 위성지도 8건 이상	8건	3	-장보고만 폴리나 탐지 위성지도 -KPDC 등록	100	3
			장보고기지 연안 해빙 탐지 위성지도 8건 이상	8건	3	-위성영상 분석기반 정착해빙 탐지 위성지도 -KPDC 등록	100	3
		연속관측 (수온,염분,pCO2, 무기탄소,영양염)	연속관측, 하계집중관측		3	-관측자료 제시 -KPDC 등록	100	3
			관측장비 준비 구입장비 실험실 시험(일차생 산)	1	3	-실험자료	100	3
		생태계 모형실험	0-D 모형 준비	1건	3	-모형결과 제시	100	3
		DB 구축	-저서점점통 합환경정보 1건 -물범 태깅 DB 구축(깊이 별 염도, 수온 등) 총 7건	물범 태깅 DB 구축 총 23건	10	-KPDC 등록 -개체 당 1건	100	10
	서식환경 변화에 대한	주요생물 적응기작 (해빙조류, skua,	-먹이망 조사 1건		2	-상위포식자(물범, skua) 먹이원 분석	100	2

	생물 적응기작 규명	은어, 남극가리비)	-서식지/정점 별 생물군집 2건 이상		10	-해빙 조류 군집분석 -가리비연령별 군집구조 -남극은어 시료확보 및 유전정보 분석 중	100	10
		물범 잠수 및 번식 행동 기반 생명자원 특성 분석	조직 시료 9건/ (혈액, 털, 번식 관련 시료 각 3건)	조직시료 37건(혈액 4건, 털 29건, 태반 및 양수 4건)	10	-조직 샘플 확보 -KPDC 등록여부(개체 당 1건)	100	10
		물범 잠수 및 번식 행동 기반 생명자원 특성 분석	1건	1건	5	-물범 생태 관련 주요 유전자 부위 -KPDC 등록발굴 여부	100	5
		유해 미생물 탐색 및 미생물의 병원성 검증	유해미생물 탐색 방법 확립 (3건)/ 유해미생물 분포도 작성 (40건) 및 병원성 미생물 및 유전체 확보 (각 2건)	유해미생물 탐색 방법 확립 (7건) -유해미생물 분포 분석 (73건) - 병원성 미생물 및 유전체 확보 (각 3건)	10	-바이러스 유전정보 확보 건수 (3건) ○ 환경 시료 내 감염성 미생물의 유전정보 탐색 건수 (40건) - KPDC 등록 ○ 1차년도에 확보한 50점 중, 병원성 검증용 세균 및 유전체 각 2점	100	10
	공동연구 네트워크 및 기술협력	남극해빙환경 관측 장비 개조/개발	실측 1건		3	-Ice platelet map 작성 -관측 실시	100	3
		해양포유류 국제그룹 공식참여	1건	1건	2	- 국제그룹 참여 1건,	100	2
		워크샵 개최	1건	전문가 워크샵 개최 (1)	3	워크샵 개최1건	100	3
	논문	mrnIF 80이상	3편	3	20	논문 4편 출판	100	20
		mrnIF 40이상 80미만	2편	1	5	논문 1편 출판	50	5
		기타성과 (mrnIF 40미만)		3		3편 출판		
	과학의 대중화	홍보	3건		5		100	5
	계				100	-	-	100
2022 (3차년도)	극지역 서식환경 관측기술 고도화	위성관측 (캠벨빙하, 장보고만 해빙) 정보	14건이상	14	6	-캠벨빙하 면적과 이동속도 지도 -장보고만 주변 폴리나 탐지 위성지도와 정착해빙지도	100	6
		연속관측 (수온,염분,pCO2, 무기탄소,영양염)	연속관측, 하계집중관측	3	6	관측자료 제시 -KPDC등록여부	100	6
		생태계 모형실험	0-D 모형 1건	1	3	-모형결과 제시	100	3
		DB 구축	-물범 태깅 DB 구축(깊이별 염도, 수온 등) 총 8건 -물범 행동권 관측 지도 총15건	18	10	-위성영상분석 결과물(지도) -KPDC등록여부 -물범 태깅 자료 DB 구축 및 행동구너 지도 작성(개체 당 1건)	100	10

	서식환경 변화에 대한 생물 적응기작 규명	주요생물 적응기작 (해빙조류, skua, 은어, 남극가리비)	3건	3	12	-남극도독갈매기 취식영역도 작성 -저서생물군집구조 연간변동 분석 -남극가리비의 성장식 제시	100	12
		물범의 행동 및 생활사에 따른 생리 변화 연구를 위한 시료 수집	조직 시료 12건/ (혈액, 털, 번식 관련 시료 각 4건)	158	10	-조직 샘플 확보 여부(개체 당 1건)	100	10
		물범 심해잠수 행동 관련 서식지 특성 지도 작성	1건	1	5	-물범 심해잠수 행동 관련 서식지 특성 지도 작성 여부	100	5
		유해 미생물 탐색 및 미생물의 병원성 검증	유해 바이러스 탐색(1건)/ 유해미생물(4 0건) 분포도 작성 (1건)/ 병원성 유전자 분포 및 생리특성 (각 2건)	41	10	-바이러스 유전정보 확보 건수 (1건) -환경 시료 내 감염성 미생물의 유전정보 탐색 건수 (40건) -KPDC 등록 -1차년도에 확보한 50점 중, 병원성 검증용 미생물 및 유전체 각 2점	91	9.1
	공동연구 네트워크 및 기술협력	남극해빙환경 관측 장비 개조/개발	heated plate 수증장비 1건	1	3	-대형 해조류 생산성, In-situ 온도반응실험 -장비 개조 및 설치	-하계활 동 축소로 시설 구축으로 대체(승 인완료)	3
		워크샵 개최 및 남극현장 공동탐사	워크샵 2건/ 공동탐사1건		5	-국제공동: 한-러 워크샵 개최 (1건) -전문가 그룹: 국내외 전문가 그룹 워크샵 개최 (1건) -남극현장탐사 (1건)	-한-러 워크샵은 취소 (승인완 료)	5
	논문	mrnIF 80이상	6편	6	20	논문 달성	100	20
		mrnIF 40이상 80미만	4편	2	5	논문 달성	50	2.5
		기 타성과(mrnIF 40미만)		3				
	과학의 대중화	홍보	3건	3	5	-홍보 자료 배포 또는 대중 강연	100	5
	계					-		96.6
2023 (2차년도)	1. 얼음환경 변화와 생태계 영향 예측을 위한 테스트 베드 구축	1-1. 장 보고만 주변 연구영역 확장 및 연안 빙권 위성정보 고도화	2건	2	10	- 테라노바만 주변 빙권변화 장기 시계열 자료 (2 건) - KPDC 등록	1	10
		1-2.얼음환경변 화 연속관측	3건	3건	5	- 관측자료 제시 - KPDC 등록	1	5
		1-3. 장 보고만 연안생태계 모 형 구축	1-D 모형 1건	1건	5	- 모형과 관측자료 비교	1	5
	2. 극지생물 통합 센서스 구축	2-1.1차생 산력 변동추적 (해빙 /해양 미세조 류, 해조류)	6건	6	15	- 해빙코어, 해조류 군집, 1차생산량 정보 매년 1건	1	15
		2-2.포식자 행 동,반응, 적응 기작	3건	3	15	- 남극도독갈매기 먹이원 분석 여 부 - 저서생물군집 개 념모델 0 - 은어, 남극가리비 개체군 동향 예 측	1	10

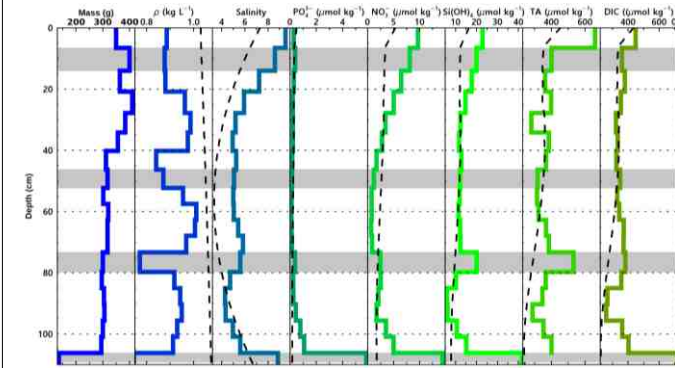
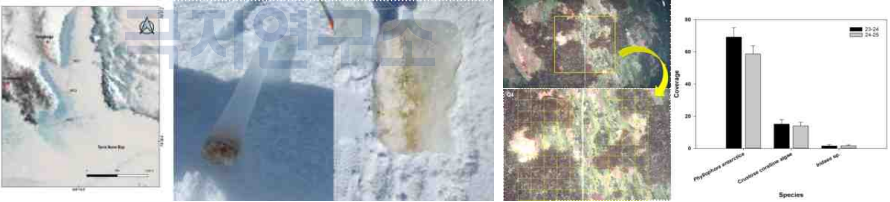
		2-3. 생물 관측 기술 고도화	3	2	5	- AI기반 군집분석 기술 - In vivo 온난화 수중 실험 - 생산량 연중 측정계류장비	1	15
	3. 환경변화에 따른 유해 미생물 분포 및 기작 규명	3-1. 유해 미생물 분포 분석	유전정보 6건	17	15	- 병원성 유전 정보 자료	1	15
		3-2. 미생물의 병원성 분석	배양체 10점 병원성 분석4건	배양체 11점 병원성 분석4건	10	- 확보한 배양체 확보 자료 - 병원성 분석 자료	1	10
		3-3. 국제사회 협력 및 기여	국제기구 자료 공유 1건	국제기구 자료 공유 1건	5	- 협력 건수	1	5
	논문	mrnIF 80이상	3편	5편 (초과달성)	5	- 게재건수 - (과제 기여율 고려)	1	5
		mrnIF 40이상 80미만		0*	5	- 논문 게재승인 여부	1	5
		mrnIF 40 이하	2편	5편		- 추가달성		
	과학의 대중화	학회/홍보	3	6	5	- 홍보자료 제작 배포, 언론 홍보, 대중강연, 전시회 등	-	5
	계							
	* mrnIF40이상 80미만 논문이 0편이나, mrnIF80 이상 2편 초과 달성 및 mrnIF40 이하 기타 논문 5편을 고려해 합산 평가				100			100
2024 (2차년도)	1. 얼음환경 변화와 생태계 영향 예측을 위한 테스트 베드 구축	1-1. 장보고만 주변 연구영역 확장 및 연안 빙권 위성정보 고도화	3건	3	10	- 시계열 자료 간 상관관계 비교분석 (2건) - 빙권 변동성 단기 예측	100	10
		1-2. 얼음환경변화 연속관측	2건 이상	2	5	- 계류기, 바이오로거, 장보고 기지 장기관측 정점자료 - 장기계류가 가능한 배터리로 업그레이드 (기술 논의 필요) - KPDC 등록	100	5
		1-3. 장보고만 연안 생태계 모형 구축	1-D 모형 1건	1	5	- 모형과 해빙코어 분석 자료 비교 분석	100	5
	2. 극지생물 통합 센서스 구축	2-1. 1차생산력 변동추적 (해빙/해양 미세조류, 해조류)	2건	2	15	- 해빙조류 광합성효율, - 해빙플랑크톤 확보	100	15
		2-2. 포식자 행동, 반응, 적응기작	1건	1	10	- 취식영역도 작성 여부 - 저서생물군집 분석 1건 - 남극가리비 개체군 (1건) (이태리 시료은행 동결시료로 대체)	100	10
		2-3. 생물 관측기술 고도화	1건	1	10	- In vivo 온난화 수중실험 (25년 수행으로 순연 달성)	100	10
	3. 환경변화에 따른 유해 미생물 분포 및 기작 규명	3-1. 유해 미생물 분포 분석	유전정보 6건	6	15	- 연속 동토의 광역 규모 동토 바이러스 분포 분석 1건 - 환경시료 및	100	15

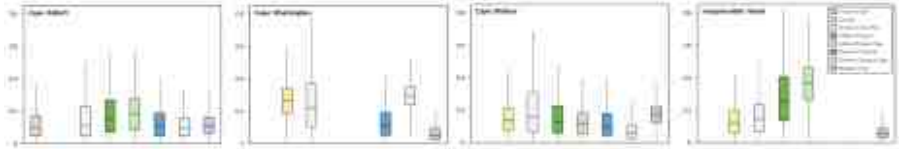
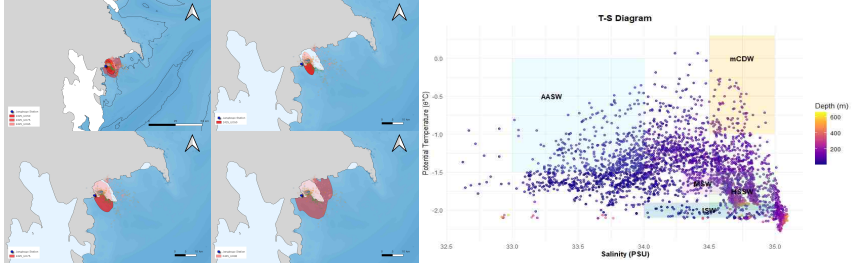
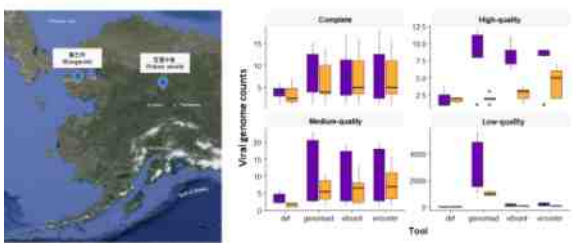
						동물시료 내 유해인자 분포 조사 5건		
		3-2. 미생물의 병원성 분석	배양체 10점 병원성 분석4건	14	10	- 유전체 분석 (1건) - 식물병원성분석 2건 - 환경변화에 따른 동물병원성 생리 특성 분석 1건 및 동물실험 조건 탐색 1건	100	10
		3-3. 국제사회 협력 및 기여	국제기구 자료 공유 1건	1	5	- One Arctic One Health 사업 주도 북극이사회 회원국 간협력논의 - 지속가능 워킹그룹(SDWG) 사무국에 자료 공유 (1건)	100	5
	논문	mrnIF 80이상	4편	2	5	- 게재건수 - (과제 기여율 고려)	50	2.5
		mrnIF 40이상 80미만	2편	2	5	- 논문 게재승인 여부	75	2.5
		mrnIF 40이하		2		- 논문 4편	초과성과	
		특허		2		- 특허 2건		
	과학의 대중화	학회/홍보	3	>10	5	- 홍보자료 제작 배포, 언론 홍보, 대중강연, 전시회등	100	5
		계						96.3
2025 (3차년도)	1. 얼음환경 변화와 생태계 영향 예측을 위한 테스트 베드 구축	1-1. 장보고만 주변 연구영역 확장 및 연안 빙권 위성정보 고도화	1건	5	10	- 빙권 변동성 장기 예측 (1건)	100	10
		1-2. 얼음환경변화 연속관측	2건 이상	7	5	- 계류기, 바이오로거, 장보고기지 장기관측 정점 자료 각 1건 - KPDC 등록	100	5
		1-3. 장보고만 연안 생태계 모형 구축	1-D 모형 1건	1	5	- 논문	100	5
	2. 극지생물 통합 센서스 구축	2-1. 1차생산력 변동추적 (해빙/해양 미세조류, 해조류)	2건	3	15	- 해빙코어, 해빙플랑크톤 시료 확보 (2건) - 해조류 군집분석 (1건)	100	15
		2-2. 포식자 행동,반응, 적응기작	1건	4	10	- 남극도독갈매기 먹이원 분석(1건) - 저서생물군집 개념모델 (1건) - 유효개체군 크기와 구조 제시 (1건)	100	10
		2-3. 생물 관측기술 고도화	1건	1	10	- 생산량 연중 측정계류장비	100	10
	3.	3-1. 유해	유전정보 6건	6	15	- 동토 화재 발생에 따른 바이러	100	15

	환경변화에 따른 유해 미생물 분포 및 기작 규명	미생물 분포 분석				스 변동성 자료 1건 - 환경 시료 및 동물 시료 내 유해인자 분포조사 6건		
		3-2. 미생물의 병원성 분석	병원성 분석 4건	4	10	- 식물 병원성 분석 3건 - 동물 병원성균 주 선정 및 시험 1건	100	10
		3-3. 국제사회 협력 및 기여	국제기구 자료 공유 1건	1	5	- One Arctic, One Health 사업 관련 미국 외 북극 이사회 회원국 (캐나다, 핀란드) 와 실질협력 및 벤치마킹 - 지속가능 워킹 그룹(SDWG) 사무국에 자료공유 1건	100	5
	논문	mrnIF 80이상	4	7	5	- 게재건수 - (과제 기여율)	100	5
		mrnIF 40이상 80미만	4	4	5	- 논문 게재승인 여부	100	5
		기타성과 mrnIF 40이하		5		- 논문, 특허 등		
	과학의 대중화	학회/홍보	3	20	5	- 홍보자료 제작 배포, 언론 홍보, 대중강연, 전시회등	100	5
계								100

나 증빙자료

성과목표	성과지표 / 평가기준 / 목표	세부내역
[성과목표]	[성과지표] 1-1. 장보고만 주변 연구영역 확장 및 연안 빙권 위성정보 고도화 [평가기준] -빙권변동성 장기예측 [목표] 1건	달성도: 100 % (목표치 1건 / 달성치 5건) 2003년부터 2025까지 장보고만 및 연안빙권 위성정보 고도화 완료 - 장보고만 주변 캠펠빙설/드라이갈스키빙설 시계열 데이터 1건 - ERA-5 재분석장 자료를 이용한 2003년~2025년 환경변수 시계열 데이터 1건 - 계절성/추세성 분석을 통한 머신러닝 학습용 장기관측 데이터 1건 - 정착빙, 폴리나, 표면온도, 풍속 간 상관 관계 분석도 1건 - 비선형 머신러닝 기법을 활용한 정착빙 예측 모델 1건 2025년 미국지구물리학회(AGU) 구두발표 등록 완료 - 논문 게재승인 대기(final decision)  그림. 두 빙하의 면적 변화 (좌), 모델 예측 정착빙 시계열 면적(우)
	[성과지표] 1-2. 연속관측 [평가기준] 계류기, 바이오로거, 정점관측자료 [목표] 2건 이상	달성도: 100 % (목표치 2건 / 달성치 7건) 2019년부터 6년 이상 장보고만 연안물리화학 데이터 연속 확보 중 - 수중 20M 수중바이오로거 1건, 수중 저서정점 영상자료 5건, 수중 20M ADCP/WLR(유속, 조위 연속측정기) 1건, 총 7건 확보 - 장보고기지가 접한 테라노바만의 대기 CO2 흡수량평가 - KPDC 등록 3건 완료, 1건 예정

		 그림. 환경자료 관측을 위해 수중에 설치한 장비들
	[성과지표] 1-3. 장보고만 연안생태계 모형 구축 [평가기준] 해빙과 해양생태계 모형접합 [목표] 1건	달성도: 100 % (목표치 1건 / 달성치 1건) ○ 해빙, 수층 및 해저 생태계 간 연계를 모의할 수 있는 1차원 수직 생지화학 모형(SPBM: Sympagic-Pelagic-Benthic Model)을 개발 1건 - 해빙 관측 문헌자료와 본 연구에서 개발한 모형 결과 비교를 통해 재보정 및 정확성 개선 진행 ○ 해빙생태계인자 (영양염, 무기탄소, 총알카리도, 이산화탄소 등) 모형화 ○ KPDC 등록 2건 등록 완료, 논문출판 1건 완료  그림. 장보고기지 연안에서 채집한 해빙코어의 질량, 밀도, 염분, 인산염, 질산염, 규산염, 총알카리도, 용존 무기탄소 분포. 점선이 1-D 해빙모형 결과이며 회색라인은 해빙이 깨진 깊이임. 깨진 부분에서 밀도가 낮아짐을 확인
	[성과지표] 2-1. 1차생산력 변동 추적 [평가기준] -해빙코어,플랑크톤 시료 확보 - 조류 군집분석 [목표] 2건	달성도: 100 % (목표치 2건 / 달성치 3건) ○ 2년 연속 해빙코어 (2.7m x 3개) 및 해빙플랑크톤 시료 확보 (2건) ○ 해조류 우점 군집 자료(방형구, 영상) 확보와 연간 변동 분석 완료 1건 ○ KPDC 등록 1건 예정, 2025년 한국해양학회 춘계학술대회 구두발표 완료 ○ 논문 투고 예정  그림. 해빙코어와 플랑크톤 시료(좌), 해조류 우점군집의 연간 피도 비교(우)
	[성과지표] 2-2. 포식자 행동,반응, 적응기작 [평가기준] -먹이원 분석, 서생물군집 개념모델, 개체군 분석 [목표] 1건	달성도: 100% (목표치 1건 / 달성치 4건) ○ 2021년부터 2025년까지 주변 환경에 따른 남극도독갈매기 먹이원 분석 (1건) - 장보고 인근 남극도독갈매기 유조의 연간 먹이원 변화 확인 - 번식지 환경에 따른 남극도독갈매기 성조의 먹이원 차이 확인 ○ 2020년부터 2025년까지 웨델물범을 활용하여 해양환경 자료 획득 및 분석 (1건) - 웨델물범에 CTD 바이오로거 부착을 통한 지속적으로 물범의 이동 및 잠수 자료와 해양환경 자료를 획득하여 데이터베이스 구축 및 분석 수행 - 국제 해양포유류 관측 네트워크에 참여함으로써 국제해양관측 그룹 자료 기여 ○ 저서생물군집 개념모델 (1건) - 세 연구 정점(장보고기지, 독일의 Gondwana기지, 뉴질랜드 Cape Evans기지)에서 저서생물군집과 환경요인과의 연관성을 정준대응분석법(Canonical Correspondence analysis, CCA)으로 분석 결과. 수온과 염도 변동이 저서생물군집의 변화를 야기함을 확인 ○ 유효개체군 크기와 구조 제시 (1건) - Microsatellite를 이용 남극가리비 개체군의 유효개체군 크기(N_e), 개체군의 연도별, 연령별 유전자 구조 분석, 유전적 다양성, 개체군 병목현상 분석 수행 - 남극가리비 개체군 대상 유전자 분석 결과 양호한 유효개체군 크기(81.7~∞)

		와 높은 유전적 다양성이 확인 ○ KPDC 등록 2건  그림. 번식지별 남극도독갈매기 먹이원 기여율  그림. 웨델물범의 취식영역도와 CTD profiles의 T-S Diagram
	[성과지표] 2-3. 생물 관측기술 고도화 [평가기준] 생산량 연중 측정 계류장비운용 [목표] 1건	달성도: 100% (목표치 1건 / 달성치 1건) ○ 영국/뉴질랜드와 협력연구 중인 온난화 모사 수중 열판실험장비를 영국 남극 연구소로부터 제공받아 장보고기지 도착 완료 - 2025년 1월 NZ 기술자 2인이 장보고기지 현장 방문, 본 연구팀, 월동대 협조 하에 heated plates 수중 설치를 위한 제반작업 완료 - 2025/26 하계시즌에 안정적인 전기 공급을 테스트 후 0, +1, +2도 열판 실험장비 설치 예정(뉴질랜드 연구자 현장방문 후 공동연구 수행예정. 2026년 2월)  그림. 영국 남극연구소 제공으로 장보고기지에 도착한 온난화 모사 열판수중실험 장비 (위), 수중 현장에 운영 중인 열판수중실험 장비 예시 (아래)
	[성과지표] 3-1. 유해 미생물 분포 분석 [평가기준] 분포조사 및 분포 분석 [목표] 6건	달성도: 100 % (목표치 6건/ 달성치 6건) ○ 동토 화재 발생에 따른 바이러스 변동성 자료 1건 - 고해상도알래스카 동토 화재 발생 지역의 토양 메타지놈 데이터에서 바이러스 서열을 추출하여 동토 화재 발생에 따른 바이러스 변동성 조사 완료 ○ 환경시료 및 동물 시료 내 유해인자 분포 조사 4건 - 동토 화재 발생 지역의 토양 시료에서 유해인자 분포 조사 완료 ○ 유해 유전자 분포도 작성을 위한 자료 수집 (총 651건) 및 분석 완료 (1건) ○ KPDC 등록 2건 완료  그림. 알래스카에서 획득한 바이러스 유전체 품질 분포

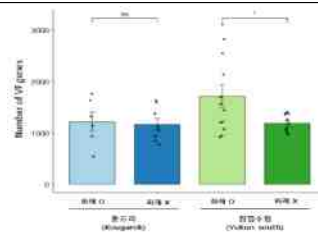


그림. 동토 화재 발생 지역의 유
해인자 분포



그림. 지도 상 마커를 클릭하였을 때 나타나는 각 샘플 별 유해 유전자 [좌] Google map을 이용한 시료별 병원성 유전자 분포 [우]

달성도: 100 % (목표치 4건/ 달성치 4건)

- 고분자단백질 분해활성과 용혈작용을 나타내는 잠재적 유해미생물 배양체 확보(12점) 및 식물병원성 검증(3건)
- 식물병원성 세균 균주의 전장유전체(6건) 비교분석 및 잠재적 유해인자 (extracellular proteinase 등) 검출 & 검증 1건
 - 식물병원성 진균의 병원성유도 후보유전자 60개 선별, 현재 후보 유전자 10종 담배잎에 대한 병증 검증 완료
 - 식물병원성 진균 이차대사물질 생합성 유전경로에 대한 in silico 분석 완료 및 식물 접종 전후 LC-MS 기반 비표적 대사체 예비분석 완료
 - 동물병원성 세균의 온도에 따른 전사체 확보 및 분석 완료 (1건)
 - 동물 실험 수행 완료 (1건)
- KPDC 등록 1건 완료

[성과지표]
3-2.
미생물의
병원성 분석

[평가기준]
 - 식물 병원성
 - 분식 3건
 - 동물 병원성
 - 주선정 균시
 - 협1건

[목표]
병원성 분석
4건

[illegible]

그림. 북극권 지역 토양에서 확보한 식물병(감자무름증세) 원인균 목록

Examen type	Geno
Examennummer	R018, R02F, R03C, R04B, R05E
Examenjaar	2000-1, 2000-2, 2001
Examenjaar	2000-3, 2001-3, 2002-1, 2002-2

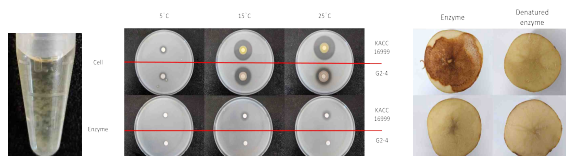


그림. 식물병(감자무름증세) 유발 관련 잠재적 유해인자
선발 목록(좌) 및 유해성 검증(우)

		그림. <i>Bacillus mycoides</i> PAMC 29538의 온도에 따른 전사체 [좌: 온도 및 성장 시기에 따른 전사체 발현 차이, 우: 온도별 병원성 유전자 발현]
	[성과지표] 3-3. 국제사회 협력 및 기여 [평가기준] 국제기구자료 공유 1건 [목표] 1건	달성도: 100 % (목표치 2건/ 달성치 2건) - One Arctic One Health 사업 관련 미국등 북극이사회 회원국과 실질협력 및 벤치마킹 - 북극이사회 SDWG의 One Arctic One Health 프로젝트를 주도하는 ‘미국 알래스카 페어뱅크스대학의 Center for One Health Research와 7월 현장 연구에서 협력 연구 진행 - 핀란드 및 그린란드의 Arctic Health연구그룹 및 원주민 관련 그룹과 연구성과 공유 및 협력 추진 - 지속가능 워킹그룹(SDWG) 사무국에 자료공유 1건 - 러시아-우크라이나 전쟁으로 인한, 북극이사회 지속가능 워킹그룹(SDWG) 활동 중단으로 해당 연구 계획을 국제북극과학위원회와 공유하는 것으로 2024년에 변경함 2025 ASSW 회의에서 IASC(국제 북극과학위원회: International Arctic Science Committee) 참가 및 북극권 국가 8개국을 포함한 회원국 24개국의 자연/인문사회 과학자, 북극원주민, 정부관계자, 젊은과학자 등을 대상으로 과제 소개 그림. ASSW 회의 참석 및 협력 논의(2025. 4월)
	[성과지표] 4-1. 논문 [평가기준] mrnIF 80이상 편수 [목표] 4편 (달성 7편)	달성도: 100% 달성 (목표치 4건/ 달성치 7건. 추가로 심사중 1건, 투고예정 4건) 출판완료 - Jung Han Young et al. (2025) An architecting binder derived from Antarctic red algae to accelerate sulfur redox kinetics in Li-S batteries, <i>Material Today</i> (mrnIF 96.57. PE24140) - Kim Dockyu et al. (2025) Potential risks of bacterial plant pathogens from thawing permafrost in the Alaskan tundra. <i>Ecotoxicology and Environmental Safety</i> (mrnIF 92.381. PE24140, PN24012) - Kim Jinhyun et al. (2025) Methane trapping in permafrost soils: a biogeochemical dataset across the Alaskan boreal-Arctic gradient. <i>Scientific Data</i>, (mrnIF 88.718. PE24140, PN24012, PN24110) - Lee Sook Young et al. (2025) Detection of human enteric viral genes in a non-native winter crane fly, <i>Trichocera maculipennis</i> (Diptera) in the sewage treatment facilities in Antarctic stations, <i>Parasite & Vector</i> (mrnIF 96.428, PE24140, PE24170) - Lee Sook Young et al. (2025) Genetic evidence of active circulation and evolution of diverse penguin siadenoviruses in Antarctica based on Partial DNA sequences, <i>Transboundary and Emerging Diseases</i> (mrnIF 90.00, PE24140,

		PE24170) 6. Park KM and Jo EA et al. Ciliate assemblage succession in glacier retreat areas of King George Island, Antarctica: Effects of kelp gull activity, Marine Environmental Research (mrnlF 89.9 ,PE25140) 7. Kim SH et al. Fast ice variability near Jang Bogo station, East Antarctica: Insights from remote sensing and environmental data in Victoria land, New Zealand. Journal of Geology and Geophysics (mrnlF 83.33, PE25140), [게재승인 (2025.12.03.)] ○ 심사중 1. Choi et al. Plant growth-promoting bacteria within Antarctic moss <i>Sanionia uncinata</i> fairy rings as potential facilitator of primary succession of the Antarctic terrestrial ecosystems. BMC plant biology (mrnlF 88.235, PE25130, PE25140), [minor revision] ○ 투고예정 1. Morphometric relationships of Antarctic scallop <i>Adamussium colbecki</i> in Terra Nova Bay, Antarctica (Estuarine, Coastal and Shelf Science (mrnlF 83.3, PE25140) 2. Spatial Patterns of Methane Storage and Microbial Methane Cycling in Alaskan Boreal-Arctic Permafrost Regions. Global Change Biology. (mrnlF 100, PN24012, PE24140, PN24110) 3. Thermal Regulation of plant disease by <i>Psychrotrophic endophytic</i> fungus Isolated from Antarctic Vascular Plants. Current Biology (mrnlF 98.148, PE25140) 4. Fatty acid composition changes of <i>Micractinium simplissimum</i> response to wide-range temperature. Journal of Applied Phycology (mrnlF 88.983, PE25140, PN25030)
		증빙자료 - 논문 PDF파일 제출
	[성과지표] 4-2. 논문 [평가기준] mrnlF 40이상 80미만 편수 [목표] 4편 (달성 4편)	달성도: 100% (목표치 4건/ 달성치 4건, 심사중 3건, 투고예정 1건) ○ 출판완료 1. Chae Hyunsik et al., (2025) Morphology and molecular characterization of a new Chloroidium (Trebouxiophyceae, Chlorophyta) species isolated from lichen in Antarctica. Phycological Research (mrnlF 52.45, PE24130, PE24140) 2. Kim Mi Seon et al. Comparative assessment of preservation methods for major nutrients in polar seawater, Marine Chemistry (mrnlF 78.125, PE25140) 3. Muhammad et al. <i>Rhodococcus aromatolycus</i> sp. nov., an o-xylene degrading bacterium from crude oil-contaminated soil, with comparative genomic evidence for the reclassification of <i>Rhodococcus jostii</i> RHA1, PloS ONE (mrnlF 73.333) [게재 승인(2025.11.04) 후 proof 진행 중] 4. Shin SC et al. (2025) Draft genome and de novo transcriptome assembly of the Antarctic marine flatworm <i>Obrimoposthia wandeli</i>, BMC Genomic Data, (mrnlF 50.785, PE25140) [게재 승인 (2025.11.19)] ○ 심사중 1. Kim Jihee et al. Regional variations in the diet of the South Polar Skua (<i>Stercorarius maccormicki</i>) in the Ross Sea region, Antarctica. PloS ONE (mrnlF 73.333) [심사중-minor revision] 2. Complete mitochondrial genome and microsatellite marker development of the Antarctic scallop (<i>Adamussium colbecki</i>) for its population genetics analysis. PloS ONE (mrnlF 73.333) [심사중] 3. Oh Younggeun et al. Linking Early Diving Proficiency from Maternal Behavior Adjustment in Weddell Seals: Insights from Mother-Pup Pairs at Terra Nova Bay, Ross Sea, Antarctica. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology (mrnlF 58.8, PE25140) [심사중] ○ 투고예정 1. Temperature-Dependent Pathogenicity of <i>Bacillus mycoides</i> from Siberian Tundra Active Layer Soils. Virulence (mrnlF 79.558, PE25140)
		증빙자료 - 논문 PDF파일 제출

	[기타성과] 4-3. 기타 논문 및 특허	기타성과 (달성치 5건, 심사중 1건, 투고예정 1건) ○ 출판완료 1. So Jeongha et al. (2025) Characterization and Expression Analysis of Fatty Acid Desaturase Genes in Arctic <i>Chlamydomonas</i> sp. KNM0029C. Korean Journal of Microbiology (KCI 등재지, PE25140) 2. Kim Youmin et al. (2025). First report of bumblefoot in the south polar skua (<i>Stercorarius maccormicki</i>). Antarctic Science, 37(1), 67-68. (mrnIF 22.886 PE24140, PG24040) 3. Jeon Jehyun et al. Refining the genome of alkylbenzene-degradaing <i>Rhodococcus</i> sp. DK17 and comparative analysis with genomes of its deletion mutants. Microbiology Resource Announcements, e01134-24. (mrnIF 6.25, PE25140) 4. Kim Dockyu et al. (2025). Genome analysis of Arctic soft rot bacterial pathogens and comparative analysis with a Korean isolate. Korean Journal of Microbiology (학술등재지, PE25140) 5. Woo Sungho et al. (2025). Characterization of a potato soft rot <i>Pseudomonas</i> strain and its potential threat to Greenland farmlands. Research in Plant Disease (학술등재지, PE25140) ○ 심사중 1. 서현교 · 박종관, 우리나라 북극항로 정책의 역사와 시사점, 한국-시베리아 연구 (KCI 인문사회분야 등재지), [2025년 12월 31일자 발간지 기준 논문 심사 중] ○ 투고예정 1. Report on tail malformation of Weddell seal from Terra Nova Bay, Antarctica, Austral Ecology (mrnIF 33.673, PE25140) 증빙자료 - 논문 PDF파일 제출
	[성과지표] 5. 홍보/학회 [평가기준] 연구결과 홍보 [목표] 3건	달성도 : 100% (목표치 3건/ 달성치 20건) ○ 학술대회 발표 1. 한국생태학회 정기학술대회. 2025년 3월 20일-21일. 대전. 기후변화에 의한 극지 식물병 발생 기작 연구. 포스터발표. 발표자: 최희원 외. (flashtalk 선정 및 우수포스터 수상) 2. 한국생태학회 학술발표대회. 2025년 3월 20-21일. 대전. Regional variations in the diets of South Polar Skua (<i>Stercorarius maccormicki</i>) in the Ross Sea, Antarctica. 포스터발표, 발표자: 김지희 등 3. 2025년 한국식물병리학회 정기학술대회. 2025년 4월 23일-25일. 전남 여수시. Characterization of a <i>Pseudomonas</i> sp. strain as a potential risk for potato soft rot in Greenland farmlands, 포스터발표, 발표자: 우성호 외 4. 2025년 한국해양학회 한국춘계학술대회. 2025년 5월 7일-8일. 부산벡스코. Strong atmospheric CO2 uptake in the Terra Nova Bay Polynya, Ross Sea: Evidenced from long-term observation and summer shipboard pCO2 surveys. 구두발표. 발표자: 이태식 5. 16th International Congress of Protistology 2025. 2025년 6월 22일-27일. 서울 성균관대학교. Characterization of novel species candidates of the genus <i>Chloromonas</i> from Antarctica: focus on freezing stress responses. 포스터발표. 발표자: 이남주 외 6. 16th International Congress of Protistology 2025. 2025년 6월 22일-27일. 서울 성균관대학교. Delayed macroalgal succession in a rapidly deglaciating Antarctic Cove: Persistent environmental barriers in Marian Cove, King George Island. 포

	스터발표. 발표자: 고영욱 외 7. 16th International Congress of Protistology 2025. 2025년 6월 22일-27일. 서울 성균관대학교. Characterization of Antarctic Sphaerocystis strains from distinct terrestrial microhabitats. 포스터발표. 발표자: 배준서 외 8. 16th International Congress of Protistology 2025. 2025년 6월 22일-27일. 서울 성균관대학교. Physiological responses of freezing-thawing condition of Tritostichococcus strains isolated from Antarctic snow fields. 포스터발표. 발표자: 소정하 외 9. 16th International Congress of Protistology 2025. 2025년 6월 22일-27일. 서울 성균관대학교. Community structure and dominant taxa of Antarctic snow algae in Barton Peninsula. 포스터발표. 발표자: 조성미 외 10. Federation of European Microbiological Societies 2025. 2025년 7월 14일-17일. 이탈리아. Potential pathogenicity of <i>Bacillus mycoides</i> strains from active layer soils in Siberian tundra. 포스터발표, 발표자: 이영미 11. 2025 International Symposium and the 39th Annual Meeting of the Korean Society of Phycology. 2025년 10월 16일-17일. 서울대학교 시흥캠퍼스, Survival strategies and biotechnological potential of Antarctic snow algae. 특별세션 구두발표 (초청자), 발표자: 조성미 12. 2025 International Symposium and the 39th Annual Meeting of the Korean Society of Phycology. 2025년 10월 16일-17일. 서울대학교 시흥캠퍼스, Ecological roles and substrate preferences of Antarctic macroalgae: Community structure and inerspecific affinities in Maxwell Bay. 구두발표, 발표자: 고영욱 13. 2025 International Symposium and the 39th Annual Meeting of the Korean Society of Phycology. 2025년 10월 16일-17일. 서울대학교 시흥캠퍼스, Temperature-dependent growth and heat shock protein responses of Antarctic snow algae. 포스터발표, 발표자: 소정하 14. 2025 International Symposium and the 39th Annual Meeting of the Korean Society of Phycology. 2025년 10월 16일-17일. 서울대학교 시흥캠퍼스, Taxonomic revision of the order Oscillatoriales (Cyanobacteria) with the establishment of Anagnostidinemataceae fam. nov., 구두발표, 발표자: 이남주 15. The 2025 KSPP Fall International Conference. 2025년 10월 21일-24일. 경주 K-호텔, Identification and characterization of a potato soft-rot <i>Pseudomonas</i> strain and its potential agricultural risk in Arctic cold regions. 포스터발표, 발표자: 임정민 16. 한국식물학회. 2025년 10월 29일-31일. 강릉 세인트존스 호텔. Shifts in the ecological roles of Antarctic endophytic fungi in response to warming. Taxonomy, Evolution and Ecology 세션 구두발표 (초청연사). 발표자: 이정은 16. 2025 Annual Conference of Korean Society of Plant Biologists. 2025년 10월 29일-31일. 강릉 세인트존스 17. 2025년도 한국해양학회 추계학술대회. 2025년 11월 12일-14일. 광주 김대중 컨벤션센터. Estimating annual primary production in the Amunsen Sea polynya. 포스터발표, 발표자: 김미선 18. AGU25 (American Geophysical Union). 2025년 12월 15일-19일. 미국 뉴올리언스. 테라노바만 정착빙 시공간 변화 연구 결과 발표, 포스터발표, 발표자 : 김승희 ○ 홍보활동 2건 1. 언론홍보 1건 2. 대중강연 1건
--	---

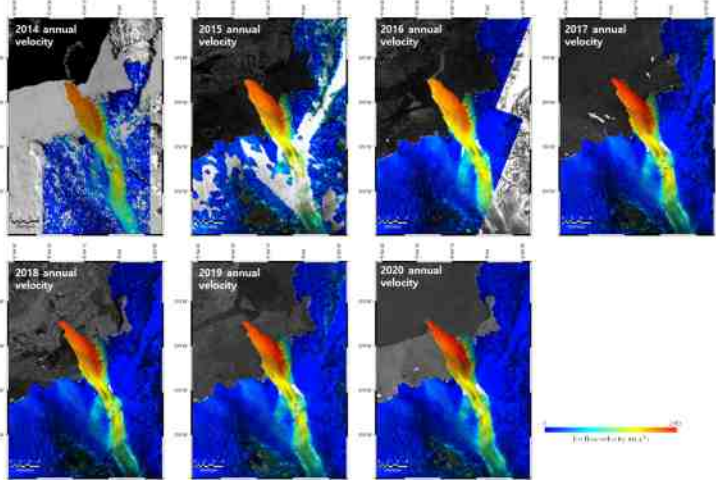
		증빙자료 - 논문 PDF파일 제출
--	--	--------------------

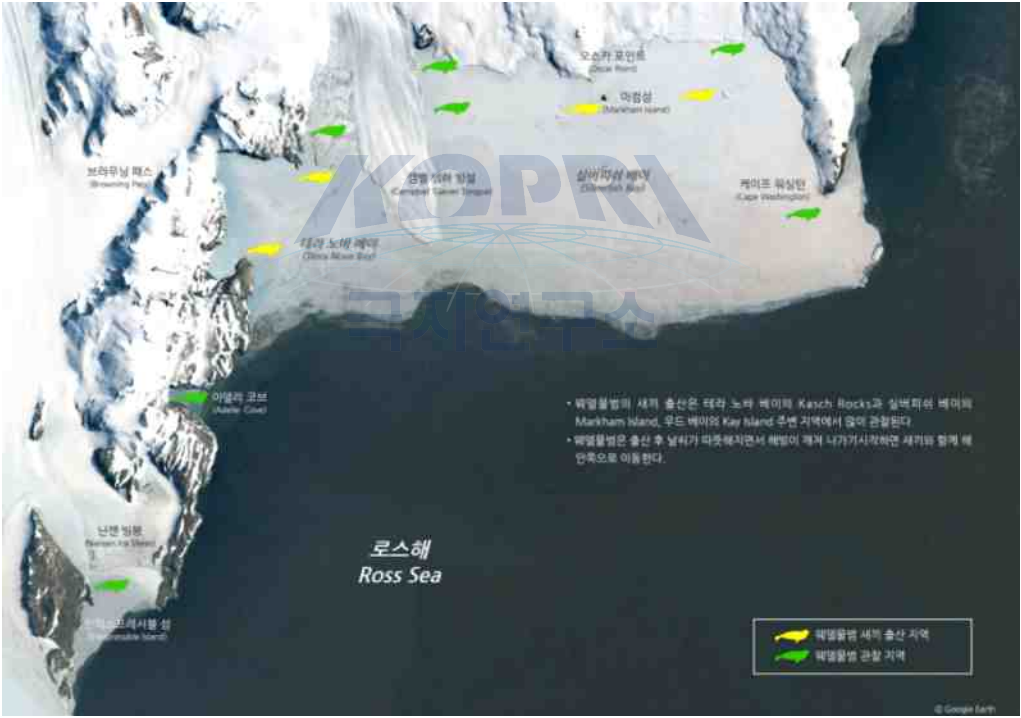
2. KPDC 등록 이행실적

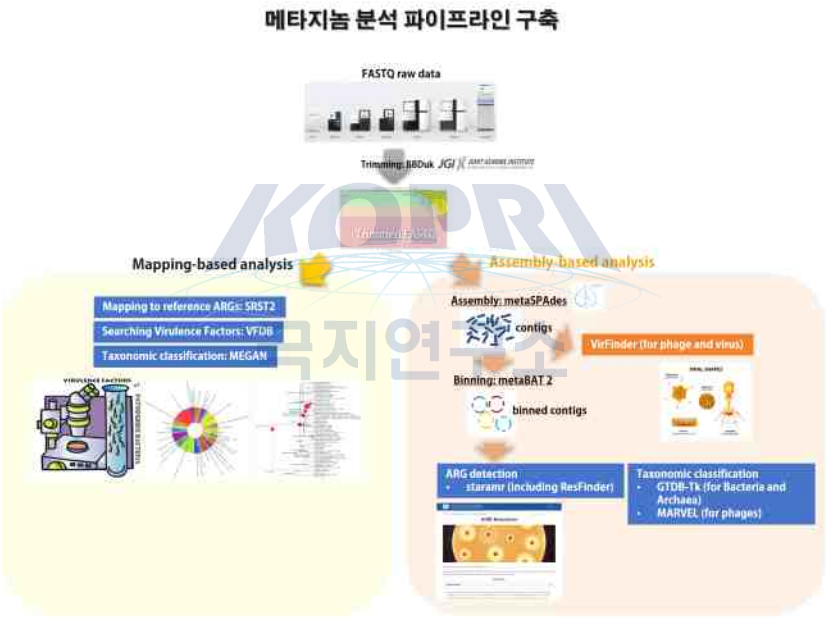
데이터 이름1)	메타데이터 ID2)	메타데이터 제목3)	원시데이터 등록여부4)
(신규) 웨델물범 CTD 자료	KOPRI-KPDC-00002795	Seal-CTD profiles in the Terra Nova Bay, Ross Sea (2025)	등록
장보고 해빙미세조류	0001	Vertical variation of sea Ice algae biomass in the Jangbogo Station, 2024	등록 예정
저서생물 군집 종목록 및 생태지수 자료 1	KOPRI-KPDC-00002768	Species list of benthic animals in Ross Sea, Antarctica (2024)	등록
저서생물 군집 종목록 및 생태지수 자료 2	KOPRI-KPDC-00002772	Benthic invertebrate abundance across the 13-22 m depth range at Jangbogo site (2024)	등록
저서생물 군집 종목록 및 생태지수 자료 3	KOPRI-KPDC-00002771	Variation in benthic invertebrate density by depth at Gondwana site (2024)	등록
(신규)저서생물 군집 종목록 및 생태지수 자료	KOPRI-KPDC-00002767	Gondwana biollogger data (2024)	등록
현장관측	0001	ANA15B Hydrocastrng observation of CTD in the Terra Nova Bay in 2025	등록
연속관측	0002	Continuous monitoring of pCO2 and its relevant parameters in the coast of the Jang Bogo Station, Antarctica, in 2024	등록
Varicosporium sp. effector candidates	KOPRI-KPDC-00002793	Genomic data of effector candidates for the Antarctic fungus Varicosporium sp.	등록
Varicosporium sp. CAZyme candidates	KOPRI-KPDC-00002794	Genomic data of CAZyme candidates for the Antarctic fungus Varicosporium sp.	등록
Bacillus mycoides PAMC 29538 전사체	KOPRI-KPDC-00002813	Transcriptomic analysis of Bacillus mycoides PAMC 29538	등록
남극도독갈매기 안정성 동위원소 데이터(2023-2025)		Carbon and Nitrogen Stable Isotope value of South polar skua at Ross Sea	등록 예정
원시데이터 등록률5)			100%

제2절 대표적 우수성과

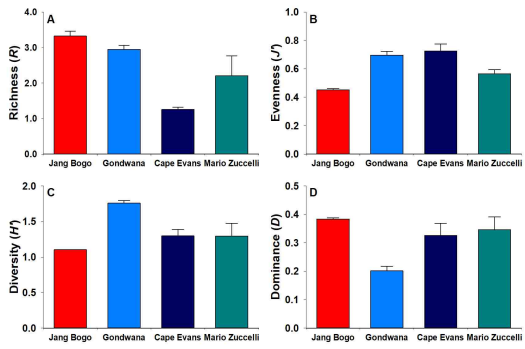
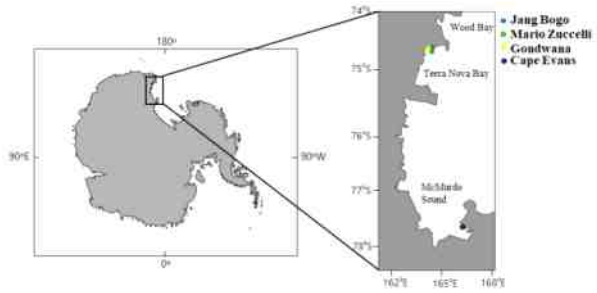
1. 1단계 1차년도 (2020년)

(2020년_1세부 통합전) 우수성과 - 1.	캠벨 빙하설 면적 및 이동속도의 시계열 변화(2014년~2020년) 규명
성과 내용	○ 캠벨 빙하설 면적과 이동속도 고해상도 위성정보 시계열 구축 - 고해상도 인공위성 영상(Landsat-8 및 Sentinel-1 SAR) 분석을 통해 2014년부터 2020년까지의 캠벨 빙하설 면적 및 연간 이동속도에 대한 위성정보 구축 - 캠벨 빙하설 이동속도 공간정보를 100 m급의 고해상도로 구축 ○ 2014년 이후 캠벨 빙하설의 면적 및 이동속도 변동성 분석 완료 - 캠벨 빙하설 면적은 겨울철에 증가하고 여름철에 감소하는 계절적 패턴을 보였으며, 2014년 이후 약 6.5%의 면적 감소가 확인 - 캠벨 빙하의 이동속도는 2014년 ~240 m/yr에서 2020년 ~262 m/yr로 증가하였으며, 계절적 변화는 10 m/yr 내외로 크지 않은 것으로 분석됨
성과의 우수성	○ 캠벨 빙하설 면적과 이동속도에 대한 세계 최초의 시계열 변동 자료 구축 - 현재까지 캠벨 빙하설의 면적과 이동속도에 대해 시계열 변동 정보를 구축, 제공하는 기관은 없으며, 본 연구에서 세계 최초로 관련 정보를 구축함 - 미국항공우주국(NASA)에서 남극 빙하의 연간 흐름속도를 제공하고 있으나 수백 m~1 km 공간해상도로 제공하고 있어 폭이 5 km 내외인 캠벨 빙하의 연구에 부적합하며, 본 연구에서 구축한 100 m급 공간해상도의 흐름속도 위성정보가 우수하다고 할 수 있음 ○ 장보고기지 연안생태 환경변화의 비교군 공간정보 확보 - 장보고기지 주변 연안환경에 영향을 줄 수 있는 캠벨 빙하설의 면적과 이동속도에 대한 시공간 변동정보를 구축함으로써 연안생태 환경변화 연구에 필요한 비교군 공간정보를 확보함
	 그림. 캠벨 빙하의 2014~2020년 연간 흐름속도 위성정보
증빙자료	○ 한향선, 김진영, 김태욱, 김현수, 홍지훈, 김상희, 인공위성 SAR 영상으로 분석된 동남극 Campbell 빙하설의 25년간 변화, 2020 추계지질과학연합학술대회, 2020년 10월 27~29일, 온라인학술대회 ○ KPDC 등록

(2020년_2세부 통합전) 우수성과 - 2.	<극지 물범 연구 안내서> 출간
성과 내용	○ 물범 포획 및 태깅 기술을 담은 매뉴얼 - 2020년 10월 30일 발간 - 극지연구소 출판사 ○ 주요 극지 물범과 동물의 생태 소개 및 현장 조사 방법 안내 - 남극 장보고 기지, 세종 기지, 북극 다산 기지 인근 물범 분포 - 현장 포획, 마취, 태깅에 관한 프로토콜 포함
성과의 우수성	○ 국내 유일 극지 물범 연구 안내서 - 국내 관련 연구 기관에 배포 ○ 장기적 물범 생태 연구를 위한 기반 마련 - 물범 생태 지식에 대한 홍보 - 연구 윤리에 관한 안내서
 그림. 장보고 기지 인근 웨델물범 번식 기록 및 분포도(<극지 물범 연구 안내서> 40페이지)	
증빙자료	○ <극지 물범 연구 안내서> 표지 ○ ISBN 등록번호

(2020년 3세부 통합전) 우수성과 - 3.	메타유전체로부터 유해 미생물 분석 파이프라인 구축
성과 내용	○ 메타유전체로부터 유해 미생물 분석 파이프라인 구축 - 시퀀싱 데이터를 이용하여 항생제 저항성 유전자, 병원성 유전자, virus등을 한번에 검출할 수 있는 파이프라인을 구축함 - 시퀀싱 데이터를 바로 이용하는 방법과 assembly를 통한 contig를 이용한 방법을 모두 사용하여 병원성 관련 부분을 검색함
성과의 우수성	○ 분석파이프라인으로 다양한 병원성 요인을 파악함 - 병원성 유전자를 확인하는 프로그램, virus를 확인하는 프로그램, 항생제 저항성을 확인하는 프로그램 중 인지도가 높은 프로그램을 하나의 분석파이프라인으로 구성함 - 간단한 분석파이프라인 메타지놈의 유해성 미생물을 전반적으로 확인 가능함
메타지놈 분석 파이프라인 구축  그림. 메타지놈 분석 파이프라인 모식도	
증빙자료	○ 분석을 위해 구축된 파이프라인 코드 (SimpleARG.sh)

2. 1단계 2차년도 (2021년)

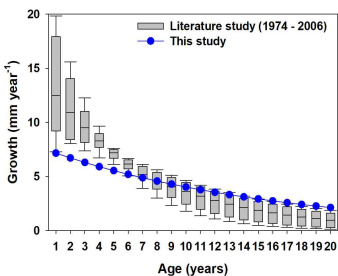
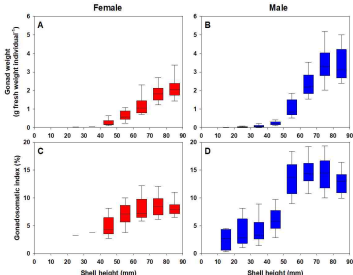
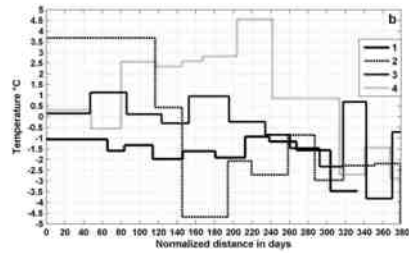
(2021년) 우수성과 -1.	로스해 해역별 4정점 저서생물군집 통합정보 구축
성과 내용	○ 국제공동연구 해역별 저서생물 및 환경특성 관련 자료 확보 - 수중탐사를 통해 로스해에 위치한 뉴질랜드의 Cape Evans, 이탈리아의 Mario Zuccelli, 독일의 Gondwana, 장보고 4정점 군집촬영 및 환경요인 측정 자료를 수집하였으며, 이를 기반으로 각 저서생물 군집의 특성을 파악 - 연구해역 별 환경요인 중 클로로필a와 수온은 해빙의 영향을 받는 12월부터 이듬해 3 - 5월까지 큰 변동을 나타내며, 장소와 연도에 따라 변동 폭이 다르게 나타났으며, 염분농도는 장보고기지에서 연도별 변동, Cape Evans와 Gondwana에서는 이벤트성 변동이 확인됨. 이러한 조사정점 별 특이적 환경요인의 변동은 본 연구해역이 해빙의 영향을 강하게 받는 것을 의미하며, 장소와 연도에 따라 기지별 환경 특성 변동의 강도가 달라지는 것을 의미함 ○ 해빙영향권 국제공동연구 해역별 저서생물 군집 특성 분석 완료 - 4개 정점 국제공동연구 해역에서 총 26종의 저서생물 확인하였고 해면동물이 9종으로 가장 종다양성이 높았고, 극피동물 5종, 자포동물 3종, 연체동물, 유형동물, 태형동물, 환형동물, 절지동물 각 1종이 출현함. 해조류는 총 4종이 출현하였으며 규조류 2종, 홍조류 2종이 확인됨 - 각 조사정점별 출현종 및 우점종, 출현 생물의 피도는 크게 다른 것으로 확인되었으며, 14종의 저서생물이 총 49.5%의 피도를 보인 독일 Gondwana 조사정점에서 다양도지수가 1.76 ± 0.04로 가장 높게 나타났으며, 총 저서생물 피도가 낮았던 장보고기지와 출현종수가 낮게 나타난 뉴질랜드 Cape Evans, 특정종의 우점현상이 강하게 나타난 이탈리아 Mario Zuccelli 등 3개 정점에서는 다양도지수가 1.30이하로 독일 Gondwana 조사정점과 유의한 차이를 보임
성과의 우수성	○ 해빙영향권 국제공동연구 해역 별 연안 저서생물군집 특성 파악 - 처음으로 로스해 4정점 별 종구성, 출현양상 및 생태지수를 도출. 지역별 저우점 특성과 분포양상이 특이적으로 나타났으며, 이는 각 지역 군집의 서식 환경이 상이하며, 기후변화에 따른 해빙의 영향도 각각 다르게 나타날 수 있음을 의미
 그림. 해빙영향권 연구해역별 출현 저서생물군집의 제생태지수. 풍부도 지수(A), 균등도 지수(B), 종다양성 지수(C), 우점도 지수(D)	 그림. 연안생태계 저서생물군집 연구장소
증빙자료	○ 논문출판완료 - Choi Sun Kyeong et al., (2023) The dynamics of growth and maturation age in the scallop <i>Adamussium colbecki</i> in Tera Nova Bay, Antarctica, Estuarine, Coastal and Self Science (mrnIF 83.3) ○ KPDC 등록 완료

(2021년) 우수성과 - 2.	물범을 활용한 CTD 장비 태깅 한국 최초 성공 및 국제 네트워크 그룹 공식 참여
성과 내용	○ 테라노바만에 서식하는 웨델물범과 개잡이물범의 CTD 태깅 성공 - 2020년도에 준비한 마취 및 포획 기술을 활용하여 물범 태깅 시스템 구축 - 정수리 및 등 부위에 부착한 CTD 센서를 부착하여 아르고스 위성으로 신호 송수신 - 물범 잠수 깊이, 이동경로 및 염도와 수온 등의 해양물리자료 확보
성과의 우수성	○ 장보고 기지 인근 테라노바만 웨델물범과 개잡이물범의 CTD 태깅 최초 시도 - OCG-12 미팅에 결과 보고(웨델물범 총 23개체) - 국제 해양포유류 관측 네트워크(AniBOS)를 통한 국제 해양관측 그룹에 자료 기여 - 남극 해양 관측연구팀들과의 자료 공유를 통한 공동 연구발판 마련
	그림. 2021년 2월~6월까지 획득된 해양포유류 CTD 관측 위치 및 이동경로 지도 그림. 2021년 5월 18일~20일 OCG-12 미팅에서 보고된 해양포유류 관측 네트워크(AniBOS)에 소개된 웨델물범 CTD 자료
증빙자료	○ Twelve Observation Coordinating Group Meeting, The Global Ocean Observing System) (2021년 5월 18일~20일, 화상회의, OCG-12 Meeting) ○ KPDC 등록 완료

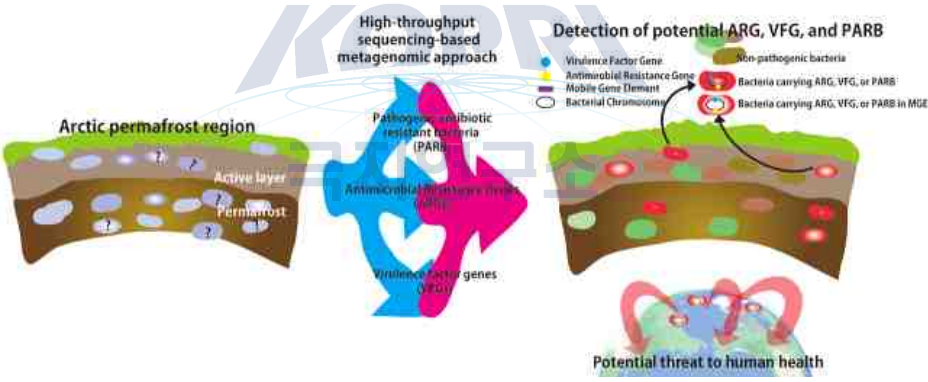
(2021년) 우수성과 - 3.	극지식물체 병증 샘플에서 15종의 진균을 분리 및 동정
성과 내용	○ 남극 식물병원진균 분리 및 계통 동정 - 남극개미자리 병증 조직에서 진균 15종 분리 · 동정 ○ 병원성 및 온도 반응 분석 - 병원성 검정 결과, 9종이 남극개미자리에 병증 유도 - 14종은 온도 상승에 따라 생장 촉진 ○ 유전체 확보 - 병원성 강한 <i>Helotiales</i> sp. (KMAF15) 균주 선별 - Long-read sequencing 통해 약 54Mb 전장 유전체 확보
성과의 우수성	○ 극지 병원균 분리 및 병원성 검증의 선도적 시도 - 극지 환경에서 직접 병징 식물체로부터 병원성 진균을 체계적으로 분리 · 동정하고, 이를 숙주식물 병리학적 검정과 연계 ○ 기후변화 생물반응 연구의 모델 사례로서의 가치 - 남극 식물병원진균의 기후 반응성 (온도별 생장 반응)을 비교 ○ 유전체 기반 병원균 연구 인프라 구축 - <i>Helotiales</i> sp. 균주의 전장 유전체 확보는 극지 병원성균에 대한 병원성 유전자, 온도감응 유전자, 2차대사산물 cluster 등, 극지 병원균의 진화 및 적응 메커니즘을 해석할 수 있는 핵심 자료
Figure 1: Growth area (mm²) of 15 fungal strains (KMAF1 to KMAF15) at 4°C (blue bars) and 16°C (grey bars). The chart shows that growth is significantly higher at 16°C for most strains, with KMAF1 and KMAF2 showing the highest growth areas at 16°C (around 2500 mm²).	
증빙자료	○ 분리된 strain 유전체 정보 KPDC 등록 완료 (KOPRI-KPDC-00001788, Genome information of pathogenic fungi isolated from diseased plants identified in KGI, Antarctic Peninsula)

그림. 남극개미자리로부터 식물병원성 진균 분리, 분리된 진균의 온도별 생장 및 병원성 테스트

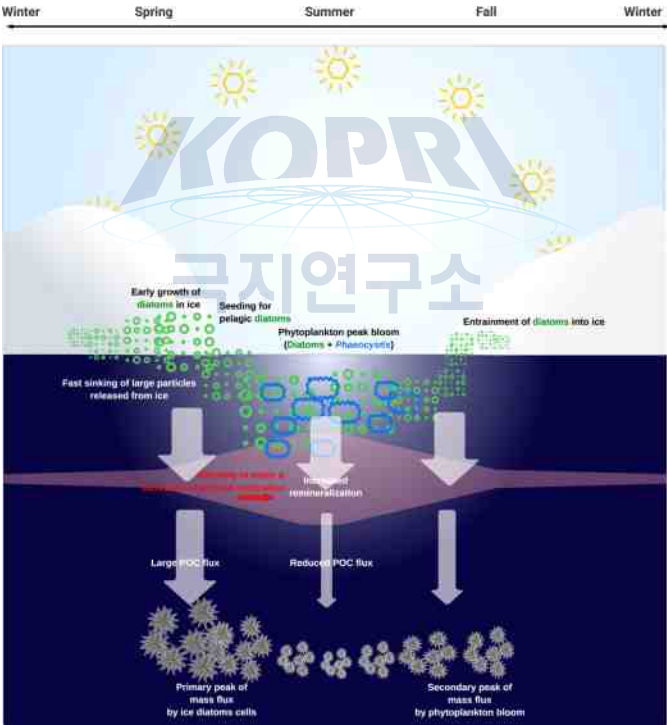
3. 1단계 3차년도 (2022년)

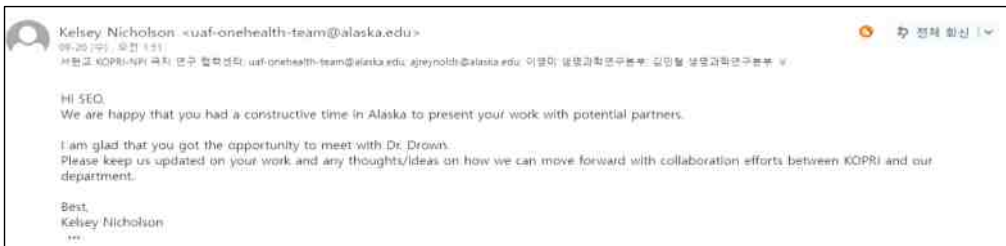
(2022년) 우수성과 - 1.	남극 남극가리비의 초기 연령 성장 지연 현상과 패각 기반 환경 변동 특성 규명
성과 내용	○ 남극 남극가리비 최종 성장식 기반 초기 연령기의 성장 지연 현상 확인 - 본 연구의 확인 결과, 6세 미만에서 남극가리비의 각고는 5.2 ~ 7.2 mm year⁻¹ 성장하여 다른 연구 결과와 비교하여 뚜렷한 성장 저하 현상이 나타남 ○ 장보고기지 남극가리비의 성숙 및 산란 참여 시기 2~3년 지연 확인 - 생식소 무게 및 생식소 중량 지수(Gonadosomatic index, GSI)는 암가리비 40mm 이상, 수가리비 50mm 이상에서 뚜렷하게 증가하는 것으로 확인 - 기존 연구 결과에서 제시된 성숙 연령은 6~7세로 추정되었으나, 본 연구에서는 초기 연령의 성장의 저하로 성숙 연령이 약 9세에 달하는 것으로 확인 ○ 장보고기지 남극가리비 기반 과거 환경 변동 특성 규명 - 본 연구에서 조사된 장보고기지 남극가리비의 산소동위원소($\delta^{18}O$) 값의 범위 2.76 ~ 4.44 ‰로 확인되었으며, 평균 3.91 ± 0.04 ‰로 나타남 - 남극가리비의 산소동위원소 분석값은 각령으로부터 약 60mm까지는 3.22 ‰에서 4.40 ‰로 변동폭이 상대적으로 적은 것으로 확인되었으나, 60mm 이후부터는 2.76 ‰부터 4.44 ‰까지 비교적 더 크게 변동 - 남극가리비로부터 추정된 수온의 변동성은 60mm 이후에 나타났으며 해당 크기 이후 성장선이 7개로 분석된 것을 볼 때, 2010년대 초 이후부터 해당 해역의 수온 변동이 더 심화되고 있는 것으로 판단됨
성과의 우수성	○ 장보고기지 기반 남극가리비의 성장 특성 규명 - 과거 연구 결과에 비교 결과 성장이 지속적으로 낮아지고 있으며 이는 기후변화와 연관된 것으로 추정됨 - 어린 개체의 낮은 성장률과 성 성숙의 지연은 번식에 영향을 주고, 이는 장보고기지 남극가리비의 개체군 성장에 부정적인 영향을 미칠 수 있음을 확인 ○ 남극가리비 기반 장보고기지 주변 해역 중장기 수온 변동 특성 확인 - 20년생 남극가리비 산소동위원소 분석 기반 수온 변동 추정에서 최근 7년간 기록된 패각 내 동위원소 분석 결과의 극값이 더 심화되고 있는 것으로 나타났으며, 이는 2010년대 초 이후부터 수온 변동성이 더 심화되고 있는 것을 시사함
 그림. 남극가리비 기존 연구와의 연령별 성장 비교	 그림. 생식소 무게 및 생식소 중량 지수. 암가리비(좌), 수가리비(우)  그림. 남극가리비의 산소동위원소 결과로 추정된 수온과 실제 수온 (Trevisiol et al. 2013)
증빙자료	○ 논문 - Age structure of Antarctic scallop <i>Adamussium colbecki</i> (Smith, 1902) in Tera Nova Bay, Antarctica (Estuarine, Coastal and Shelf Science) 게재 ○ 학술대회발표 - Age structure and morphological characteristics of Antarctic scallop <i>Adamussium colbecki</i> (Smith, 1902) in Tera Nova Bay, Antarctica. 구두발표. The Second International Conference on Biodiversity, Ecology and Conservation of Marine Ecosystems (BeCOME 2022). 2022.01.03 - Population dynamics of Antarctic scallop <i>Adamussium colbecki</i> (Smith, 1902) in Tera Nova Bay, Antarctica. 구두발표. 2022년 한국환경생물학회 정기학술대회. 2022.10.20

(2022년) 우수성과 -2.	테라노바만 웨델물범 CTD 자료 최초 획득 및 국제 포유류 관측 네트워크 보고
성과 내용	○ 2021년과 2022년 장보고 기지 앞 테라노바만에서 부착한 웨델물범 CTD 자료 연속 관측 성공 - 2021년 2~3월 웨델물범 23개체 부착 및 신호 획득 성공 - 2022년 2~3월 웨델물범 18개체 부착 및 신호 획득 성공 ○ 물범 CTD 관측 자료의 품질 관리 방안 구축 - 획득한 자료를 활용한 기존 품질 관리 방법 적용 및 테스트 - 자료 품질 관리 전략 제안 ○ 획득한 자료를 통한 국제 포유류 관측 네트워크 기여 및 결과 보고 - 합동관측단(Observations Coordination Group, OCG) 12차, 13차 회의에 관측 결과 보고 - 국제 포유류 관측 네트워크(AniBOS) 공식 참여
성과의 우수성	○ 테라노바만 지역 최초 물범 CTD 태깅 및 연속 관측 성공 - 기존 해외 연구진들이 미국 맥머도, 뉴질랜드 스콧 기지에서 부착한 사례들이 있었으나 장보고 기지 기반 테라노바만에서 국내 연구진의 기술을 활용해 물범 CTD 태깅을 처음 시도하였음 ○ 물범 포획 및 마취 기술 확보 - 해양 포유류 연구를 위한 마약류학술자 허가 및 교육 이수 - 남극 물범 마취약 주입 및 방사 등의 기술 확보 - 미국, 영국, 호주 등의 연구진들과 협력을 통한 핸들링 방법 및 태깅 방법 습득 ○ 국제 관측 네트워크 참여를 통한 CTD 태깅 분야 국제 공동연구 수행 - 관측 자료를 활용한 국제 공유 통합 자료 시스템 구축 기여
그림. 2021년 2월~6월 테라노바만 웨델물범 CTC 부착 개체 23마리의 이동경로 (Yoon and Lee 2021, Ocean and Polar Research)	
증빙자료	그림. 2022년 2월~9월 테라노바만 웨델물범 CTD 부착 기기(n=18)에서 얻어진 수온(위), 염분(아래 오른쪽), 잠수 위치(아래 왼쪽)를 나타낸 분포도 ○ 해양포유류 부착 CTD 관측 자료의 품질 관리 방법에 관한 고찰 및 사례 연구 (논문 발표, Ocean and Polar Research, 2021년 12월) ○ 12th, 13th Observation Coordination Group meeting (2021년 5월 18일~20일, 2022년 5월 31일~6월 3일, 온라인 회의)

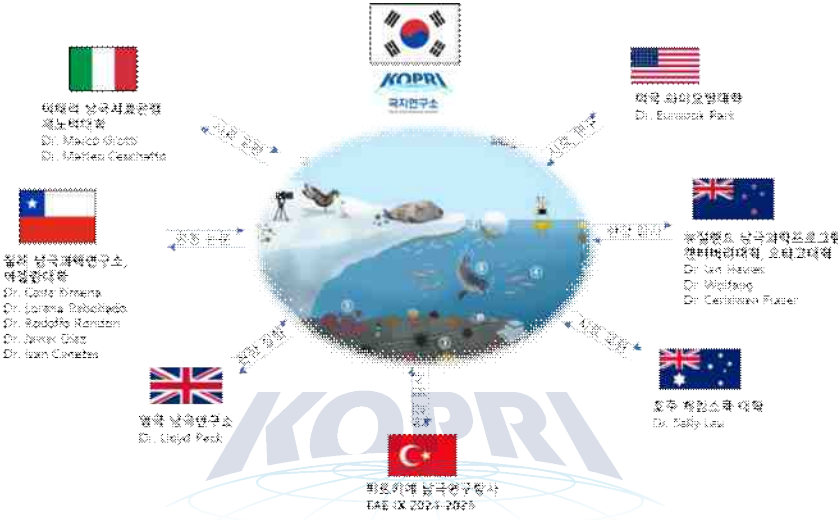
(2022년) 우수성과 - 3.	알래스카 영구동토층의 환경유전체로부터 유해 미생물 유전 정보 탐색
성과 내용	○ 메타유전체 기반 유해 미생물 유전자 분석 파이프라인을 활용한 유해 유전자 정보 탐색 결과를 Environmental Pollution (mrnIF=91.941)에 게재함 ○ 북극의 활성층 및 영구동토층에서 18개의 항생제 계열, 70개의 종류의 서로 다른 항생제 내성 유전자와 38개의 발병인자를 가진 599개의 발병인자 유전자를 탐지하였음. 그중 항생제 내성 유전자를 운반할 수 있는 이동유전자요소 (Mobile gene elements)를 가진 항생제 내성 유전자 8개를 발견함 ○ 토양 깊이의 따른 유해 유전자의 풍부도를 RNA 분석에 사용되는 TPM (transcripts per million) 값으로 계산해본 결과 토양 하층이 토양 표층에 비해 TPM 값이 낮음을 확인함 ○ 항생제 내성 유전자와 발병인자의 유사도 분포 비교를 통해 본 연구에서 밝혀진 영구동토층의 항생제 내성유전자와 발병인자 유전자는 기존과 다른 새로운 유전자라는 것을 유추할 수 있었음
성과의 우수성	○ 본 연구결과는 북극 영구동토층의 항생제 내성 유전자와 발병인자 유전자의 특징과 분포에 대한 이해를 제공하며 북극 영구동토층은 이들 유전자에 대한 잠재적인 서식지가 될 수 있음을 확인하였음 ○ 지구온난화로 인해 북극 영구동토층의 해빙으로 이러한 유전자가 다른 지역으로 전파된다면 인류의 건강에 새로운 위협이 될 수 있음을 시사함
	 그림. 메타유전체 접근 방법을 이용한 북극 영구동토층 내 병원성 및 항생제 내성유전자 분석의 중요성
증빙자료	○ 논문게재 완료 - Kim et al (2022) Characterization of antimicrobial resistance genes and virulence factor genes in an Arctic permafrost region revealed by metagenomics/ Environmental pollution (mrnIF 91.941)

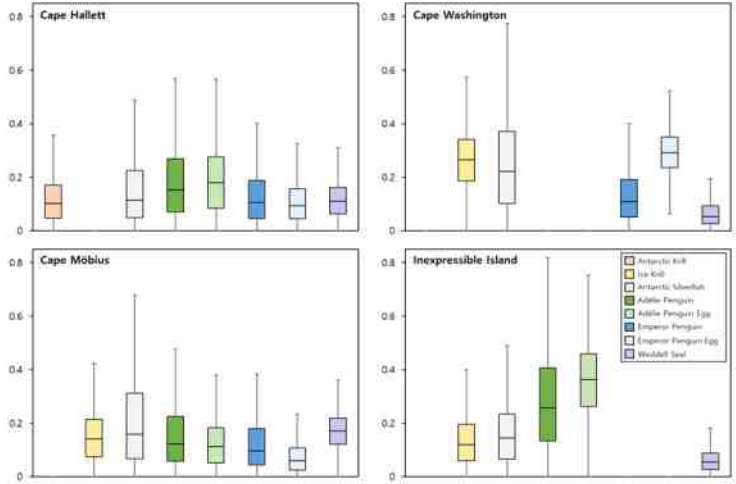
4. 2단계 1차년도 (2023년)

(2023년) 우수성과 -1.	해양-해빙 1-D 모형을 이용한 해빙생태계 중요성 규명
성과 내용	○ 해양-해빙 1-D 모형 구축 - SPBM 해빙모형 구축 ○ 생태계 모형 (ERSEM) 접합 - 해빙내부 생태계와 해양 생태계 모듈에 접합 ○ 극지 해양생태계에서 해빙생태계의 중요성 규명 - sediment trap 으로 남극 폴리냐의 초봄 식물플랑크톤 번성이 보고됨 - 여러 가지 가설로 원인 추측 - SPBM-ERSEM 해양-해빙 모형을 이용하여 해빙 생태계로 인한 초봄 해양 식물플랑크톤 번성 밝힘
성과의 우수성	○ 국내 최초로 해양-해빙 생태 모형 구축 ○ 극지 해양생태계에서 미치는 해빙의 중요성을 모형을 이용하여 처음으로 규명
	 The diagram illustrates the seasonal cycle of the sea-ice ecosystem model. It shows a timeline from Winter to Spring, Summer, Fall, and back to Winter. Key processes include: Early growth of diatoms in ice, Seeding for pelagic diatoms, Phytoplankton peak bloom (Diatoms + Phaeocysts), Entrainment of diatoms into ice, Fast sinking of large particles released from ice, Melting of ice and release of particles, Increased remineralization, Large POC flux, Reduced POC flux, Primary peak of mass flux by ice diatoms cells, and Secondary peak of mass flux by phytoplankton bloom. The KOPRI logo and '극지연구소' (Polar Research Institute) are prominently displayed. 그림. 해양-해빙 생태 모형
증빙자료	○ 논문 - Potential impact of the sea-ice ecosystem to the polar seas biogeochemistry, Frontiers in Marine Sciences, (mrnIF 92.38, 2023년 7월 21일)

(2023년) 우수성과 - 3.	우리나라의 북극이사회 ‘One Arctic One Health’ 사업참여 초석 마련
성과 내용	○ 한국-미국 간 ‘One Arctic One Health’ 사업 관련 양자협력 기반 구축 - One Arctic One health 사업은 북극이사회(북극권 8개국 정부간 포럼) 워킹그룹 중 하나인 SDWG의 주요사업으로, 팬더믹 등으로 국제적인 관심이 높은 사업임. - 동 사업은 북극이사회 8개국 중 미국, 캐나다, 핀란드가 공동 주도하고 있으며, 이중 미국이 사실상 주도, 특히 미국 내에서 동 사업 주도기관인 알래스카 페어뱅크스대학교 원 헬스연구센터(Center for One Health Research)를 방문하여 극지연 연구팀과 동 연구센터 관계자들과 양자회의 개최 (9.11.) - 이 양자회의에서 극지연 연구팀은 동 연구센터 Arleigh J.Reynold소장 등 관계자 대상으로 소내 유해미생물 연구사업 현황 및 유해미생물 사업이 제1차 극지활동진흥기본계획 내 핵심사업으로 포함 등의 정책적 중요성을 소개 - Assessment for the potential risks of the pathogenic microbes in a changing Arctic (발표자 이영미) - The Korea's Arctic Policy and KOPRI's research project on Hazardous microbes with the Policy (발표자 서현교) - 또한 관련 연구자인 바이오 분야 Devin Drown 교수와 면담(9.12)을 통해 향후 동물 분변을 포함한 환경시료 공유 등의 실질적 협력 방안 논의 등
성과의 우수성	○ 미국 알래스카 페어뱅크스대학교 원헬스연구센터와 양자협력 기반 마련 - 향후 한미 컨퍼런스 개최, 시료/데이터 교환 등 실질적 협력을 위한 기반 마련 - 9월 양자협의 이후, 이메일을 통해 향후 양자협력을 위한 계획수립 및 업무추진 등을 제안받음(아래 증빙자료 메일 참조 → 향후 실질협력을 이어나가기로 합의) ○ 북극이사회 One Arctic One Health 사업 주도기관과의 협력을 통해 우리나라의 북극이사회의 해당사업 정식 참여국으로 진입을 위한 초석 마련 - 향후 양자간 컨퍼런스, 시료/데이터 공유, 논문 공동게재 등 실질적 협력활동 제안 및 활동을 통해 우리나라가 One Arctic One Health 사업에 직접적 참여 및 활동을 통해, 북극 이슈 해결에 직접 기여할 수 있는 기반 구축 - 우리나라의 북극이사회 One Arctic One Health 사업 참여를 통해 과학외교 확대 및 국가위상 제고에 기여할 수 있는 초석 마련
 그림. 극지연-미국 알래스카페어뱅크스대 원헬스연구센터 간 양자협의	
증빙자료	

5. 2단계 2차년도 (2024년)

(2024년) 우수성과 - 1.		남극 생물 중심 다국적 네트워킹 구축	
성과 내용	○ 남극 해양 생물 다양성 연구의 다국적 네트워킹 강화 - 동남극 해양생물 최다 및 서식환경 관측 장기 연속자료 최다 확보		
성과의 우수성	○ 본 과제는 생물과 서식지 환경 현장 관측 연구로, 현장 투입 등 제한적 인프라 상황 연속 발생으로 목표 달성에 어려움이 큼. 대처방안으로 국제협력의 확장, 실제적인 공동연구 구축을 목표로, 남극 연구를 선도하고 있는 다국적 네트워킹 을 강화하였고 팔목할 만한 성과를 거두고 있음		
			
- (성과) 7건 국제 연구 활동, 국제공동연구 논문 4편 작성, SCAR OSC 2024 학회 세션 좌장 수행			
국가	성격	활동	
뉴질랜드	인프라활용	'24/25년 입남극 비행편 확보	
칠레	인프라활용	'24년 1월 연구선 Betanzos 공동 항해	
튀르키예	인프라활용	'25년 1월 공동 연구항해 조사	
이태리	남극 시료 공유	'24년 11월 MOU 협약 관련 회의 및 시료 교환	
영국	공동 현장 연구	'25년 1월 BAS 열판 수증 실험 공동 수행	
뉴질랜드	국가연구과제 파트너	'25년 2월 NZ 국가과제 2단계 회의 참석 (NZ 경비지원)	
칠레	칠레 정부 과제 공동수행	'23년 Grant FOVI220036 수행(Co-PI) 수행, 연장을 위해 '24년 9월 FONDECYT 프로그램 제출(Co-PI)	
증빙자료	○ 국제 연구활동 - SCAR OSC 2024 학회 세션 [남극생물 다양성과 외래종 추적] 좌장 - 칠레와 공동으로 SCAR에 “남극생물 다양성과 외래종 추적 “working group을 준비 ○ 논문 (국제공동) - Tamara Contador, Sanghee Kim et al., (2024). When ice and sea are not barriers for flies: first report of <i>Trichocera maculipennis</i> (Diptera) in South America. Insect Conservation and Diversity (mrnIF90.74, Grant FOVI220036*) - Benitez, H. A., Sanghee Kim et al., (2024). An outsider on the Antarctic Peninsula: A new record of the non-native moth <i>Plodia interpunctella</i> (Lepidoptera: Pyralidae). Ecology and Evolution (mrnIF55.67, Grant FOVI220036*) - Gemma Marie Brett, Sanghee Kim et al., (submitted) Ice shelf water- influenced fast ice and sub ice platelet layer thickness distribution beside the Campbell ice tongue in Terra Nova Bay, Antarctica, Journal of Geophysical Research: Oceans (mrnIF85.93, 국제공동연구) - Hugo Bentez, Sanghee Kim et al., (submitted) First record of <i>Psychoda albipennis</i> (Zetterstedt, 1850) in King George Island: A new non-native species with high invasive potential, Fontiers in Insect Science (mrnIF84.26, 국제공동연구)		

(2024년) 우수성과 - 2.	남극 북빅토리아지역 남극도독갈매기의 첫 취식 생태연구
성과 내용	○ 북빅토리아랜드 서식 남극도독갈매기의 지역별 잠재 먹이원 취식 비율 분석 - Inexpressible Island, Cape Mobius, Cape Washington, Cape Hallett 4개 지역에서 번식하는 남극도독갈매기 성조의 혈액시료 수집, 안정성 동위원소로 잠재 먹이원과 취식 비율을 분석 - (결과) 4개 번식지에서 포란기 남극도독갈매기의 주요 먹이는 남극은암치, Cape Hallett과 Inexpressible Island에서는 아델리펭귄, Cape Washington에서는 황제펭귄 알으로 확인되어, 주변 펭귄 번식지에 크게 의존하는 것으로 추정 - 반면에 장보고기지 인근(Cape Mobius) 번식지의 경우, 펭귄 번식지와 떨어져 있어서 다양한 먹이원을 이용하는 것으로 추정됨
성과의 우수성	○ 최근 30년 내 남극 북빅토리아지역 남극도독갈매기의 첫 취식 생태 연구 - 남극도독갈매기의 먹이원 연구는 남극 반도 지역에 주로 집중, 남극대륙 내 연구는 로스섬의 펭귄 번식지에 한정되어 왔고 반면에, 북빅토리아랜드 지역 연구는 최근 30년간 Edmonson Point에서만 번식생태 연구만 수행 - 본 결과는 북빅토리아랜드 남극도독갈매기의 먹이원, 생태활동에 대한 첫 연구 결과로 최상위 포식자의 생태계 내 역할을 파악할 수 있음 ○ 해양환경에 따라 남극도독갈매기의 이용 먹이 종류와 비율이 변화하므로, 취식생태 모니터링을 통해 기후변화에 의한 생태계 변화를 파악하고자 함
 그림. 모니터링카메라에 포착된 남극도독갈매기의 먹이급여 모습(좌), 유조의 토사물 분석결과 펭귄 내장, 물고기 등 확인  그림. 지역별 남극도독갈매기 성조의 잠재적 먹이원의 취식기여도	
증빙자료	○ 남극도독갈매기 안정성 동위원소 데이터 KPDC 업로드 - Kim Jihee et al. Regional variations in the diet of the South Polar Skua (<i>Stercorarius maccormicki</i>) in the Ross Sea region, Antarctica. PloS ONE (mrnlF 73.333) [심사중-minor revision]

(2024년) 우수성과 - 3.	러시아 토양 유래 <i>Bacillus mycoides</i> 균주의 온도에 따른 유해성 및 동물에서의 유해성 확인
성과 내용	○ 환경유래 <i>Bacillus</i> 속 균주의 온도에 따른 병원성 차이 및 동물 실험을 통한 병원성 검증 - 러시아 토양 시료를 10도에 배양하여 분리배양한 <i>Bacillus mycoides</i> PAMC 29538의 온도에 따른 용혈작용 차이를 확인함 - 또한 <i>Bacillus mycoides</i> PAMC 29538의 생쥐의 사망 및 장 출혈, 저체온증을 유발하는 것을 확인함
성과의 우수성	○ 북극 토양 유래 세균의 잠재적 위험성 규명 - 최근 환경에서 유래한 세균의 잠재적인 유해성에 대한 우려가 증가하고 있지만, 환경 변화에 따른 병원성 확인 및 검증 연구는 아직 부족한 실정 - 본 연구는 기후변화에 민감한 러시아 토양에서 분리한 <i>Bacillus mycoides</i> 균주가 온도 변화에 민감하게 반응하며, 동물 감염 실험을 통해 높은 치사율을 나타내는 것을 확인함 - 또한, 용혈 작용이 온도에 따라 달라지는 것을 검증함으로써, 자연 환경에 존재하는 유해 미생물이 환경 변화에 따라 그 병원성이 달라질 수 있음을 규명함 - 이러한 결과는 향후 환경 변화에 따른 세균성 질병의 잠재적인 위험성을 평가하는 데 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단됨
증빙자료	○ 온도에 따른 유해성 변화의 분자적 기작을 transcriptome 분석을 통해 확인한 후, 논문 작성 중 (Temperature-Dependent Pathogenicity of <i>Bacillus mycoides</i> from Siberian Tundra Active Layer Soils. Virulence, 2025)

6. 2단계 3차년도 (2025년)

(2025년) 우수성과 - 1.	시계열 기반 머신러닝 분석을 통한 남극 정착빙 예측 모델 개발
성과 내용	○ 2003년부터 2018년까지의 월 단위 시계열 데이터를 분석하여 남극 장보고기지 주변 정착빙 면적 변화에 영향을 미치는 주요 환경 요인을 규명함 ○ 선형(VAR)과 비선형(XGBoost)모델을 비교하고, 비선형 예측 모델이 정착빙 변동성 설명에 더 효과적임을 확인함 ○ 시차 정보와 SHAP기반 변수 해석을 통해 물리적 메커니즘에 대한 정량적 통찰을 확보함
성과의 우수성	○ 비선형 모델(XGBoost)이 기존 선형 시계열 모델(VAR)에 비해 약 54%의 설명력을 보이며 예측 정확도가 향상됨 ○ SHAP분석을 통해 정착빙의 자기회귀적 특성이 가장 중요한 변수임을 확인하였으며 바람 및 폴리나 면적의 시차 효과를 정량적으로 해석함 ○ 기후 시스템 내 잠재적 비선형성과 상호작용을 반영한 예측 모델로 극지 해빙 연구 및 기후 예측의 고도화에 기여할 수 있음
그림. XGBoost를 활용한 장보고기지 앞 정착빙 면적 예측 결과	
증빙자료	○ 롤링 예측과 추가적인 분석을 진행하여 New Zealand Journal of Geology and Geophysics (NZJGG) 스페셜 이슈 (Past, Present, and Future of the Antarctic Continent: Research Activities in Victoria Land, Antarctica) 게재 확정 ○ Kim et al., (2025). Quantifying the Relative Impact of Atmospheric Variables and Polynya Dynamics on Fast Ice in Terra Nova Bay, Antarctica. <i>New Zealand Journal of Geology and Geophysics</i>. [게재승인 (2025.12.03.)]

(2025년) 우수성과 - 2.	물범의 잠수 및 이동 행동을 활용한 해양환경 관측
성과 내용	○ 해양환경 자료 수집을 위한 웨델물범 포획과 보정 및 CTD 부착 - 2025년 2월 남극 장보고과학기지 인근 Campbell Glacier Ice Tongue에 분포하는 웨델물범 4개체(암컷 2, 수컷 2) 마취 및 포획을 통해 CTD 부착 - 웨델물범의 이동 및 잠수 특성과 함께 CTD 환경자료 바이오로거에 기록, Argos 위성망을 통해 데이터 수신, SMRU Data Portal을 통해 확인 - 획득된 웨델물범의 이동 경로 및 잠수 깊이 등의 자료와 CTD 해양 환경 자료 분석 - 이를 바탕으로 취식영역도, CTD profiles (T-S Diagram 및 수괴 공간 분포) 확인
성과의 우수성	○ 장보고 기지 인근 테라노바만 서식 웨델물범 CTD 부착 및 데이터 수신 연속 연구 수행 - 장보고 기지 인근 테라노바만에 서식하는 웨델물범의 취식영역도와 주변 환경 CTD profiles (T-S Diagram 및 수괴 공간 분포) 확인
T-S Diagram Antarctica Jangbogo Station 2425_UD60 2425_UD75 2425_UD85 그림. 웨델물범 CTD profiles의 T-S Diagram 그림. 2025년 2월 웨델물범 관측 위치, 이동 경로 및 취식영역도	
증빙자료	○ KPDC 등록 완료

(2025년) 우수성과 - 3	알래스카 영구동토층의 해동 시 식물병원성 세균의 잠재적 위험
성과 내용	○ 알래스카 툰드라 토양을 활동층(A), 전이층(T), 영구동결층(P)으로 구분하여 영구동토층 해빙을 모사한 4℃에서 90일간의 토양배양 실험 수행 ○ 배양 후, 세균의 풍부도와 군집구조 변화를 조사하고, 휴면 상태였던 잠재적 식물병원성 세균의 재활성화와 병원성 유무를 테스트 ○ 세균의 풍부도는 해빙 후 T층과 P층에서 뚜렷하게 증가했는데, 이들 층에서는 세균군집 구조 역시 크게 변화했으며, 기존에 영구동토에서 우점했던 세균은 감소하는 현상 발견 ○ 특히, 해빙된 T층과 P층에서 새롭게 발견한 단백질분해활성의 <i>Pseudomonas</i> 속 세균 균주들의 감자무름병원성을 검증
성과의 우수성	○ 지구온난화로 인한 영구동토층 해빙이 미생물 군집에 미치는 영향, 특히 북극 생태계에서 휴면 상태의 식물병원균 부활의 가능성과 잠재적 위험을 보고함 ○ 본 연구는 북극 지역의 영구 동토층 해빙과 관련된 환경적 위험성을 강조하며, 휴면 상태의 식물병원체로 인한 미래 병발병 가능성을 경고함
	그림. (A) 알래스카 지역에서 채취한 영구동토 토양 코어와 (B) 본 연구를 위해 디자인한 토양코어 인공배양용 챔버 사진 그림. 영구동토 전이층(T)과 영구동결층(P) 해동 시, 증식한 세균의 식물병원성 검증과 층위별 분포 변화
증빙자료	○ 논문 - 김덕규, 김민철, 우성호, 남성진, 명누리, 김웅빈, 이영미. Potential risks of bacterial plant pathogens from thawing permafrost in the Alaskan tundra. <i>Ecotoxicology and Environmental Safety</i> (mrnIF 92.4)

제3절 기타 성과

1. 인력지원 성과

지원 총인원	지원 대상 (학위별, 취득자)				성별		지역별		
	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	대전	기타지역
2	1	1				2	1	1	

○ 달성실적 상세내용(의의, 기대효과 등)

- 2025년 박사학위 졸업 (김미선 연수생, 충남대학교)
- 2025년 석사학위 졸업 (소정하 UST협동연구생)

2. 국제화/협력 성과

가 국내·외 공동 연구협력 실적(위탁연구 제외)

연구협력 파트너	수행형태	연구협력 내용(목표)	수행 결과 및 우수성
○ 영국 BAS(British Antarctic survey)/ 뉴질랜드 ASP (Antarctic Science Platform)	공동/협동	○ 온난화 모사 수중열판실험장치를 위한 현장연구	○ 뉴질랜드 연구팀이 장보고만 현장 방문 (장비 제공, 및 운송), 설치 환경 현장 답사 및 자문 - 해수온도 상승에 따른 천이과정 기록
○ 이태리 제노바대학 (Mastteo Zucchelli)	공동/협동	○ 테라노바만 1차생산자 군집 조사	○ 마리오쥬켈리/장보고기지 담수화 필터를 이용한 1차생산자 시료 확보 및 분석 - 월별 필터 확보로 시계열 자료 획득 및 정량화 가능
○ 뉴질랜드 오타고대학 Ceridwen Fraser	공동/협동	○ 저서생물 군집, 지리분포	○ 동서 해역 비교를 위해 단각류 GBS 공동 분석 완료 후 논문 작성 중
○ 뉴질랜드 와이카토대학 Ian Hawes	공동/협동	○ 수중관측장비 개조/개발	○ SCAR Antos 관측장비 표준화, 남극 연안 맞춤 수중저서환경 시계열 관측장비 고도화
○ 다국적협력 (칠레/우루과이/중국/러시아/폴란드)	공동/협동	○ 서남극 침입 육상/해양 외래종 국제공동조사	○ 시료 교환, 환경 DNA 분석
○ Dr. Carla Ximena (칠레, INACH)	공동/협동	○ 칠레 연구과제(남극 생물다양성과 외래종 유입조사) 공동 수행	○ 칠레정부과제ANID (공동PI) 후속 과제 제출(2025. 8월) - SCAR working group 제안 준비
○ Dr. Lorena Rebolledo (칠레, INACH)	공동연구	○ 남극 해수 온도 변화 관측	○ 2024년 1월 세종기지 연안에 해수온도 관측 (heat-wave) 장비 계류 (세종기지를 관측지점으로 추가 선정 추진) 계속
○ Dr. Eunsook Park: 와이오밍 주립대학교 (미국)	공동	○ 식물병원성 곰팡이의 병증유도기작 연구 협의	○ KMAF11 병원균에 대해 머신러닝 기법을 활용한 이펙터 예측 분석

◦ Dr. Devin Drown (University of Alasak, Fairbanks)	공동/협동	◦ 현장 연구 협력 및 분석 자 료 공유	◦ 2025년 7월 현장 연구 시료 처 리 및 기확보 자료 공유 및 공 동 해석
◦ Dr. Matthew Davey, (영국, SAMS)	공동	◦ 설조류 대사체 연구 협의	◦ 남극 설조류 대사체와 환경 요 인간 상관관계 분석 논의

3. 기타 성과

가 국제공동 논문 출판

- Tamara Contador, Sanghee Kim et al., (2024). When ice and sea are not barriers for flies: first report of *Trichocera maculipennis* (Diptera) in South America. *Insect Conservation and Diversity* (**mrnIF90.74**, Grant FOVI220036*)
- Hugo Benitez, Sanghee Kim et al., (2024). An outsider on the Antarctic Peninsula: A new record of the non native moth *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae). *Ecology and Evolution* (**mrnIF55.67**, Grant FOVI220036*)
- Jordan Hernandez-Martelo, Sanghee Kim et al. (2024) Uncharted territory: the arrival of *Psychoda albipennis* (Zetterstedt, 1850) (Diptera: psychodidae) in Maritime Antarctica, *Frontiers in Insect Science* (**mrnIF84.26**, Grant FOVI220036*)
- Jordan Hernandez-Martelo, Sanghee Kim et al. (2025) Evolving to invade: Using geometric morphometrics to assess wing shape variation in the Antarctic non-native fly *Trichocera maculipennis*. *Zoologischer Anzeiger* (**mrnIF67.40**, 국제공동연구)
- Gemma Marie Brett, Sanghee Kim et al., (2025) Ice shelf water-influenced fast ice and sub-ice platelet layer near the Campbell ice tongue, Terra Nova Bay. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (**mrnIF85.93**, 국제공동연구)
- Lee Sook Young et al. (2025) Detection of human enteric viral genes in a non-native winter crane fly, *Trichocera maculipennis* (Diptera) in the sewage treatment facilities in Antarctic stations, *Parasite & Vector* (**mrnIF 81.481**, PE24140, PE24170, Grant FOVI220036*)
- Hugo Bentez, Sanghee Kim et al. (심사 중) First record of *Psychoda albipennis* (Zetterstedt, 1850) in King George Island: A new non-native species with high invasive potential, *Fontiers in Insect Science* (**mrnIF84.26**, Grant FOVI220036*)

* Grant FOVI220036: 본 과제 참여연구원이 칠레 남극연구소와 CO-PI로 수행한 칠레 정부연구과제번호. 본 과제 정량성과에는 미포함

나 국제공동 프로포잘 신청

- 2025-ANID-Chilean Government, under the thematic area of Antarctic Science 에 <POLYCLIM - Polysaccharides from Antarctic Microbes as Biomarkers for Climate Change> 주제로 Dr. Lorena of INACH, Dr. Aparna Banerjee of the Universidad Autónoma de Chile 공동 연구계획서 제출 완료 (2025년 8월)

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제1절 향후 연구 방향

1. 장보고과학기지 주변 연안/빙하/위성 통합자료 다년간 구축으로 연안생태 대표성 확보

- 2003년~2025, 22년간 캠벨빙하 및 해빙 변화와 관측 가능한 기상 및 해양 환경인자 사이의 상관성 분석 완료. **장보고기지 주변 해빙(정착빙) 소멸 시기 예측 모델 개발**을 통해 기지 보급 및 연안, 해양 연구 계획 수립에 활용
- DRYGALSKI 빙설과 테라노바만(TNBP)의 빙권 시계열을 장기간 추적할 수 있는 위성 관측 체계구축 완료. 이를 기반으로, **남극 연안 해빙-빙하-폴리나 복합계의 장기 변동성을 조기 탐지하고 예측**할 수 있는 고도화된 통합 플랫폼 개발로 확장하고자 함
- 2017 - 2024년 7년 이상 장보고기지에서 테라노바만 폴리나 표층수의 pCO₂ 변동 특성을 연속 측정, 봄과 여름 수온증가에도 불구하고 강한 생물 활동으로 1차생산이 증가하면 해수 pCO₂ 가 급속히 감소, 반면 가을과 겨울이 되면서 해빙면적 증가와 태양에너지 감소로 생물활동이 급격히 떨어지면서 pCO₂ 증가하여 대기보다 높은 과포화로 대기로 방출하는 역할을 함. 이를 이용하여 향후 **남극대륙 주위 폴리나의 생물활동 변화와 pCO₂ 계절변화 분포 특성의 비교 및 대기 이산화탄소 흡수력을 평가**하고자 함
- 장보고기지 하계기간 수행으로 최장 연속 관측에 성공, 다음 단계에서는 테라노바만 폴리나가 남극 심층수 기원지임을 감안하여 관측해역을 **장보고기지 연안에서 테라노바만 폴리나 전체로 확장**하여 남극심층수로 유입되는 탄소량 추정으로 확대 연구할 계획모니터링 체계 구축에 기여

2. 남극 연안생물과 서식지 정보 연속 자료 최다 확보로 국제협력 토대 마련

- 2019년부터 장보고만의 플랑크톤성 1차소비자-소형 중간소비자-중형 저서생물- 대형 상위포식자를 아우르는 **통합적 조사와 서식환경의 물리환경 변수자료와 영상자료를 7년 연속 확보**, 이는 남극 연안 최초 연속 정점 자료 최다 구축으로 의의가 큼. 핵심종 중심으로 표준화된 생물지표 및 환경지표를 설정하여 Ecosystem Health Index 또는 Species Index 개발, **생물변화 추세를 환경위기 경보 지표로 제시하고자 함**. 예를 들면 핵심 중간소비자의 개체수 급감은 전체 먹이망 에너지 효율 저하로 이어지고, 이를 정량화 하여 크릴 산란지와 상위포식자(물범, 황제펭귄) 번식율에 미치는 영향을 예측할 수 있음
- 남극도독갈매기의 취식 생태 연구 중 남극대륙에서 최근 30년 내 첫 연구로, **기후변화로 인한 극지 환경 변화에 따른 상위포식자의 미래 개체군 시나리오 기반 자료를 제공**하였으며, 다음단계는 배설물 NGS 분석을 포함한 다차원의 먹이원 연구를 통해, 환경에 따른 먹이 이용 변화 및 미래 개체군 취식 적응 전략 분석 및 제시
- 국내에서 처음으로 물범 대상 CTD 바이오로거 부착에 성공하였으며, 현재까지 총 50개체에 부착한 장비로부터 위성을 통해 자료가 겨울까지 송수신되는 것을 확인. **극한 환경에 서식하는 물범의 장기생태 모니터링 기반 구축 및 적용 가능한 연구 기법 정립을 정립**함. 물범 태깅기법으로 기존에 획득하기 어려웠던 1000m급 **해양환경자료를 5년간 연속적으로 확보**하였으며, 이와 같은 관측 자료는 빙하 용융 및 해양 물리환경 변화 대응 등 변화하는 극지 생태계의 환경과 구성원의 적응에 대한 정확한 감지와 미래에 대한 예측을 위한 생물지표로 활용 가능
- 남극 해양생태계 특성인 해빙의 역할을 1차원 모형으로 분석한 결과를 토대로 향후에는 환경정보와 남극 먹이망에서 크릴부터 고래, 물범등 최상위 포식자까지 생물정보를 포함하는 3차원 생태계 모형으로 개발하고자 함
- 수중탐사기술과 계류장비 바이오로거, 국제공동연구(이태리와 1차생산자, 뉴질랜드와 장비기술개발, 영국과 온난화모사실험, 미국과 로스해 해면군집조사 등)를 수행하였고, 남극과학위원회 (SCAR) 워킹그룹 ANTOS의 연안데이터를 담당하는 등 국제협력 네트워크 기반을 다졌으며, 다음 단계에서는 국제공동연구과제 개발과 주도적인 국제회의 주최를 계획 중

3. 기후변화 시대의 극지방 신·재출현 병원체 감시에 대한 선제적 대응 기반 구축

- 기후변화로 인한 극지 생태계 변화로 기존에 비활성 상태로 존재하던 병원성 유전자 활성화 또는 새로운 병원체로 진화할 가능성이 존재. 이러한 변화에 주목하여 극지방 유해 미생물을 인류 건강에 영향을 끼칠 감염병의 새로운 원천으로 인식하고, 이들의 출현 원인과 활성화 조건 규명 필요. 더불어 자연계에서 실제로 발생하는 생태·진화적 변화와 연구자 및 연구자가 구축한 실험·모델·해석 체계가 미치는 영향을 명확히 구분함으로써, 과도한 일반화나 해석 편향을 방지하고, 과학적 근거에 기반한 정책 및 대응 전략 마련 필요. 또한, 인간의 건강이 환경 및 동식물의 건강과 상호 연결되었음을 강조하는 원헬스(one health) 개념적 접근을 위해 다양한 분야의 전문가 그룹을 통합하여 유해 유전자의 분포, 환경 유래 미생물의 병원성과 기작을 분석하고, 동식물 실험, 정교화된 환경 스트레스 요인 실험 등 다양한 방법을 통해 활성화 조건 및 환경변화에 따른 병증 변화에 대한 통합적인 규명
- 극지방 병원성 유전자의 단순 분포 확인 및 병증 확인을 넘어, 병증 유발 기작, 감염병 유발 잠재적 가능성, 확산 가능성등을 종합적으로 고려한 다중 위험도 평가체계 개발. 특히, 전장 유전체와 기능 유전체를 통합하여 유해성 예측에 필요한 마커 유전자를 도출하고, 이를 기반으로 기후변화 시나리오에 따른 유해성 변화 예측 모델을 수립하여 향후 극지 및 중위도 지역간의 감염병 확산을 연계하여 분석할 수 있는 기반 마련. 또한, 위험성 기반 집중 모니터링 지역을 선정하고, 유해 미생물에 대한 치료 및 대처 방법 마련
- 북극이사회 회원국 및 유관 국제기구와의 협력 및 공동연구를 바탕으로, 본 연구 성과를 북극 감염병 모니터링 정책, 환경 변화 대응 전략등과 연계하여 발전시켜 북극이사회 지속가능위킹그룹(sdwg)등 국제 협력 플랫폼에 과학적 근거를 제공. 극지역 유래 유해 미생물에 대한 정보 공유 하여 공동 대응 전략 수립에 활용

제2절 성과 활용 계획

1. 남극 연안생태계 장기생태연구 (LTER) 자리매김

가 연안 환경 관측 시스템 고도화

- 캠벨빙하 및 테라노바만 해빙 변화의 시계열 분석 및 예측모델 구축 결과를 바탕으로, 남극 연안의 정착해빙 및 폴리냐를 매개로 한 연안-해양생태계 장기변화 모니터링 체계 구축에 기여
- 장보고기지에서 장기관측한 pCO₂ 자료를 이용하여 테라노바만 폴리냐의 대기 이산화탄소 흡수력을 바탕으로 남빙양에서 남극폴리냐의 대기 이산화탄소 흡수력을 확대 평가하고 이를 기반으로 미래 기후변화 정확도에 기여
- 장보고기지 주변의 빙하·해빙·폴리냐-기상-해양 물리자료를 통합한 장기 관측체계를 기반으로 국제 극지 생태계 연구 커뮤니티(SCAR, SOOS 등) 내 공동연구 핵심 자료로 활용
- 캠벨빙하 및 테라노바만 해빙 변화의 시계열 분석 및 예측모델 구축 결과를 바탕으로, 남극 연안의 정착해빙 및 폴리냐를 매개로 한 연안-해양생태계 장기변화 모니터링 체계 구축에 기여
- 빙붕 하부, 깊은 수심 등 기존 관측 사각지대에서 잠수 수심이 깊은 해양포유류를 플랫폼으로 활용한 CTD 로거 기술은 연구선 중심의 CTD 관측 한계를 보완하고 극지 해양물리 환경 정보를 확보할 수 있어, 비용 효율성과 기술 적용성 측면에서 무인 관측 기술로 확장 가능
- 웨텔물범을 활용하여 장기적으로 수온 및 염분 변화와 수괴 분포 해수 순환 구조 등 해양 환경을 관측하고 자료를 축적하여 기후변화가 해양생태계와 환경변화에 미치는 생태계 예측 모델의 정밀도 향상과 더불어 다른 지역과의 비교를 위한 기후변화시나리오 마련에 활용
- 국제 해양포유류 관측 네트워크(AniBOS)에 참여하고 합동관측단(Observations Coordination Group, OCG) 회의에도 관측 결과를 보고하는 등 장기적으로 국제해양관측 그룹에 참여하여, 지속적인 과학적 기여 및 국제적인 연구 지위 획득

- 해빙과 해양환경의 단기 예측정보는 남극기지 운영계획(보급, 탐사, 연구 등)에 실질적으로 적용 가능한 과학적 의사결정 도구로 활용
- 7년간의 실관측으로 확보한 생물, 생태 정보는 단순한 생물 목록도를 넘어서 예측, 관리, 보호, 교육 모든 범위에서 실질적인 핵심 자료를 제공, 특히 기후변화 대응 생태기반정책과 국제DB (EnSync, SOOS, CCAMLR 등)에 연계하여 기후변화 시나리오 모델 구축에 활용실질적으로 적용 가능한 과학적 의사결정 도구로 활용

나 장기 연안 생물·생태계 모니터링 체계화

- 기후변화가 남극도독갈매기의 개체군 감소에 미치는 영향 제시를 통한 대중들의 기후변화 관련 인식 고취와 더불어 극지 환경 변화의 심각성과 경각심 제고 및 신속한 대응 방안 마련을 위한 과학적 근거 제공. 또한 번식지 환경 변화가 남극 상위포식자의 취식 생태에 미치는 영향을 분석하여 상위포식자의 환경 적응 전략 및 미래 개체군 예측을 위한 기반 자료로 활용
- 성공적으로 개발한 해양-해빙 1차원 생태계 모형을 해빙 아래 얼음층까지 포함하는 해양-판얼음-해빙 3차원 생태모형으로 확대, 개발하여 남극해 얼음환경 변화가 향후 생태계에 미치는 영향을 평가
- 해양-해빙 1차원 모형을 확대 발전시켜 해양-해빙 생태계와 최고 포식자를 포함하는 먹이망 모형을 접합한 모형 개발로 기후변화로 인한 남극 생태계 반응과 보존전략 수립에 이용
- 본 연구를 통해 빙하, 해빙, 연안 (육상과 해양의 접점)을 아우르는 통합 정보와 기술 인프라를 바탕으로 다학제적 장기 모니터링 체계 구축, 국내외 산학연 협력을 통해 차세대 극지 생물 연구 인력을 양성하고, 남극 먹이망을 설명하는 디지털 교육자료 개발, 홍보 활용해 장보고과학기지를 명실상부한 해양생태계 거점지로 자리매김 함
- 남극 수산자원의 변동성 자료 확보를 통해 자원 활용을 위한 자료를 제공하고 기후변화 대응 극지방 연안생태계 차세대 전문연구인력 육성
- 남극조약협약당사국회의(ATCM-CEP)에서 관장하는 남극특별보호구역 관리를 위한 장기적인 생태 모니터링과 과학적 활동 요구에 따라 장보고기지 주변 남극특별보호구역 173번과 178번의 관리계획서 개정 시 연구결과 제공 및 관련문건 제출을 통한 국제기구에 과학적 기여

2. 극지방 유해 미생물의 환경변화에 따른 유해성 평가 및 대응에 활용

- 본 연구를 통해 확립한 메타유전체 기반 병원성 유전자 분석 파이프라인과 극지역 유해 유전자 분포도를 바탕으로, 극지 유해 유전자 데이터베이스(DB) 구축할 예정. 해당 DB는 전문가 집단 및 일반 대중이 활용할 수 있도록 공개하며 국제 감염병 감시 네트워크와 연계하여, 기후변화에 따라 잠재적으로 위협이 될 수 있는 병원성 유전자의 확산 경로 예측과 조기 경보 체계 마련에 기여할 예정. 또한, 확립된 분석 방법을 전 지구적 규모로 확장하여 기후변화와 연계된 병원성 유전자의 분포 및 전파 양상 예측 모델 개발할 계획. 또한 확인된 병증 유발 기작과 유해성 정보와 연계하여, 고위험 지역 선별, 대응 전략(예: 우선 모니터링 지역 선정, 유효 항생제 후보 제안 등)에 활용될 예정
- 극지역에서 확보한 동식물 병원성 미생물의 병증 유발을 실험적으로 검증함으로써, 이들 미생물이 극한 환경내에서 잠재적으로 갖는 유해성을 실증함. 이러한 결과를 기반으로 기후변화에 따른 유해 미생물의 병원성 발현 양상 및 확산 가능성 검증 예정. 또한 확보된 유해 미생물의 전장 유전체를 비교 분석하여 공통 병원성 인자 도출하고, 이를 기반으로 북극권에서의 식물 병해(예: 세균성 무름병)**의 발생 및 확산을 예측하는 유전자 기반 바이오마커 개발을 추진할 예정. 이는 기후변화로 인한 병해충 리스크 평가 및 관리 전략 수립에 과학적 근거로 활용 예정
- 본 연구 수행기간 동안 미국을 포함한 북극이사회 회원국 및 국내외 전문가들과 협력 네트워크를 구축함. 이를 기반으로 북극이사회 회원국들과의 협력을 확대하고, 향후 북극이사회 지속가능워킹그룹(SDWG)에 본 연구 결과를 바탕으로 한 과제 제안 및 주도할 계획. 또한 국내 감시체계를 위한 극지-국내를 연계한‘One health’협의체를 구성하고, 감염병 대응에 대한 인식 고취 예정

제3절 기타사항

1. 향후 연구 결과를 통해 기여 가능한 관련 정책

- ▷ 극지활동진흥기본계획 (2023~2027)
 - 전략 2. 기후·환경 문제 해결 주도 [2.3] 극지 기후변화에 따른 생태계 변화 예측
- ▷ 제5차 과학기술 기본계획
 - 전략 3. 과학기술 기반 국가적 현안 해결 및 미래 대응 [3-3] 100세 시대 과학기술 기반 국민건강 증진 및 [3-4] 미래위험 대응 및 안전사회 구현
- ▷ 12대 국가전략기술 (2023~2027)
 - 전략기술 5. 첨단바이오 감염병 백신·치료
- ▷ 제4차 기후변화대응 해양수산부문 종합계획('22-'26)
 - 전략 4. [중점추진과제 3] 기후위기 대응 협력 거버넌스 구축
- ▷ 탄소중립 녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획(2023)
 - 전략 4. 기후위기 적응과 국제사회를 주도하는 능동적인 탄소중립 [과제 10] '적응주체가 모두 함께 협력하는 기후위기 적응 기반 구축
- ▷ 극지연구소 R&R
 - 상위역할 2. 극지역 온난화가 초래하는 국가 사회문제 해결
- ▷ 기타 국제 정책
 - 북극이사회 SDWG의 보건의슈 대응 “One Arctic One Health” 및 남극 SCAR의 Horizon Scan의 80가지 질문 중 “질병 및 병원체



제 6 장 참고문헌

- Belkhir K, Borsa P, Chikhi L, Raufaste N, Bonhomme F (2004) GENETIX 4.05. Population Genetics Software for Windows TM, University of Montpellier.
- Do C, Waples RS, Peel D, Macbeth G, Tillett BJ, Ovenden JR (2014) NeEstimator v2: re-implementation of software for the estimation of contemporary effective population size (N_e) from genetic data. *Molecular Ecology Resources*, 14, 209-214.
- Excoffier L, Lischer HE (2010) Arlequin suite ver 3.5: a new series of programs to perform population genetics analyses under Linux and Windows. *Molecular Ecology Resources*, 10, 564-567.
- Felsenstein J (1985) Confidence limits on phylogenies: an approach using the bootstrap. *Evolution*, 39(4), 783-791.
- Getino Mamet LN, Soria G, Munguía Vega A (2021) Multiple-scale processes shape the population genetics of Tehuelche scallop, *Aequipecten tehuelchus*, in Northern Patagonia. *Fisheries Research*, 240, 105971.
- Goudet J (2001) FSTAT, a program to estimate and test gene diversities and fixation indices, version 2.9.3. [Http://www2.unil.ch/popgen/softwares/fstat.htm](http://www2.unil.ch/popgen/softwares/fstat.htm).
- Hoang DT, Chernomor O, Von Haeseler A, Minh BQ, Vinh, LS (2018) UFBoot2: improving the ultrafast bootstrap approximation. *Molecular Biology and Evolution*, 35(2), 518-522.
- Kumar S, Stecher G, Suleski M, Sanderford M, Sharma S, Tamura K (2024) MEGA12: Molecular Evolutionary Genetic Analysis version 12 for adaptive and green computing. *Molecular Biology and Evolution*, 41(12), msae263.
- Minh BQ, Schmidt HA, Chernomor O, Schrempf D, Woodhams MD, Von Haeseler A, Lanfear R (2020) IQ-TREE 2: new models and efficient methods for phylogenetic inference in the genomic era. *Molecular Biology and Evolution*, 37(5), 1530-1534.
- Piry S, Luikart G, Cornuet J-M (1999) BOTTLENECK: a program for detecting recent effective population size reductions from allele data frequencies. *Journal of Heredity*, 90, 502-503.
- Pritchard JK, Stephens M, Donnelly P (2000) Inference of population structure using multilocus genotype data. *Genetics*, 155, 945-959.
- Rousset F (2008) Genepop'007: a complete re-implementation of the genepop software for Windows and Linux. *Molecular Ecology Resources*, 8, 103-106.
- Saitou N, Nei M (1987) The neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees. *Molecular Biology and Evolution*, 4(4), 406-425.
- Tamura K, Nei M (1993) Estimation of the number of nucleotide substitutions in the control region of mitochondrial DNA in humans and chimpanzees. *Molecular Biology and Evolution*, 10(3), 512-526.
- Perrin, W. F., Würsig, B., & Thewissen, J. G. M. (Eds.). (2009). *Encyclopedia of marine mammals*. Academic Press.
- Phelan, J. R., & Green, K. (1992). Chemical Restraint of Weddell Seals (*Leptonychotes weddellii*) with a combination of tiletamine and zolazepam. *Journal of Wildlife Diseases*, 28(2), 230-235.
- Foster-Dyer, R. T., Goetz, K. T., Iwata, T., Holser, R. R., Michael, S. A., Pritchard, C., Childerhouse, S., Costa, D. P., Ainley, D. G., Pinkerton, M. H., & LaRue, M. A. (2024). Prey targeted by lactating Weddell seals (*Leptonychotes weddellii*) in Erebus Bay, Antarctica. *Polar Biology*, 47(11), 1187-1202.
- Goetz, K. T., Dinniman, M. S., Hückstädt, L. A., Robinson, P. W., Shero, M. R., Burns, J. M., Hofmann, E. E., Stammerjohn, S. E., Hazen, E. L., Ainley, D. G. & Costa, D. P. (2023). Seasonal habitat preference and foraging behaviour of post-moult Weddell seals in the western Ross Sea. *Royal Society Open Science*, 10(1), 220500.
- Bashmachnikov, I. L., Lafon, V. M., & Martins, A. M. (2004, November). SST stationary anomalies in the Azores region. In *Remote Sensing of the Ocean and Sea Ice 2004* (Vol. 5569, pp. 148-155). SPIE.
- Wang, C., Zhang, Z., Zhong, Y., & Zhou, M. (2024). A Model Study of Buoyancy Driven Cross-Isobath

Transport Over the Ross Sea Continental Shelf Break. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 129(1), e2023JC020078.

- Bearhop, S., Waldron, S., Votier, S. C., & Furness, R. W. (2002). Factors that influence assimilation rates and fractionation of nitrogen and carbon stable isotopes in avian blood and feathers. *Physiological and biochemical zoology*, 75(5), 451-458.
- Hong, S. Y., Gal, J. K., Lee, B. Y., Son, W. J., Jung, J. W., La, H. S., ... & Ha, S. Y. (2021). Regional differences in the diets of adélie and emperor penguins in the ross sea, Antarctica. *Animals*, 11(9), 2681.
- Pinkerton, M. H., Forman, J., Bury, S. J., Brown, J., Horn, P., & O'Driscoll, R. L. (2013). Diet and trophic niche of Antarctic silverfish *Pleuragramma antarcticum* in the Ross Sea, Antarctica. *Journal of fish biology*, 82(1), 141-164.
- Calizza, E., Signa, G., Rossi, L., Vizzini, S., Careddu, G., Tramati, C. D., ... & Costantini, M. L. (2021). Trace elements and stable isotopes in penguin chicks and eggs: a baseline for monitoring the Ross Sea MPA and trophic transfer studies. *Marine Pollution Bulletin*, 170, 112667.
- Rumolo, P., Zappes, I. A., Fabiani, A., Barra, M., Rakaj, A., Palozzi, R., & Allegrucci, G. (2020). The diet of Weddell seals (*Leptonychotes weddellii*) in Terra Nova Bay using stable isotope analysis. *The European Zoological Journal*, 87(1), 94-104.
- Kim, Y., Kim, J. U., Oh, Y., Park, J., Lee, K., Kim, H. C., & Kim, J. H. (2025). Adaptive foraging strategies of Adélie penguins in the Ross Sea Region: balancing chick feeding and body condition in changing marine environments. *Marine Biology*, 172(1), 1-15.



뒷 면

(국내 과제용)

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.