

기후변화에 대한 남극 해양 저서동물의 보상기작 연구

Compensatory mechanisms of Antarctic marine benthic
animals in response to climate change



인하대학교 산학협력단

최종보고서										보안등급		
										일반[☒], 보안[]		
중앙행정기관명		해양수산부			사업명		사업명		남극활동 기반시설			
전문기관명(해당 시 작성)		해양수산과학기술진흥원			내역사업명 (해당 시 작성)				공동활용사업			
공고번호					총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)							
					연구개발과제번호							
기술 분류	국가과학기술표준분류	EH0605	30 %	EH0605	30 %	ND1002	40 %					
	해양수산과학기술분류	MEV0501	30 %	MEV0502	30 %	MBT0201	40 %					
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		국문										
		영문										
연구개발과제명		국문		기후변화에 대한 남극 해양 저서동물의 보상기작 연구								
		영문		Compensatory mechanisms of Antarctic marine benthic animals in response to climate change								
주관연구개발기관		기관명	인하대학교 산학협력단			사업자등록번호		121-82-10209				
		주소	(우)22212, 인천광역시 미추홀구 인하로 100 인하대학교 산학협력단			법인등록번호		120171-0003321				
연구책임자		성명	김태원			직위		부교수				
		연락처	직장전화	032-860-7714			휴대전화		010-8726-3070			
			전자우편	ktwon@inha.ac.kr			국가연구자번호		10160999			
연구개발기간		전체		2023. 05. 01 - 2025. 12. 31(2년 8개월)								
		단계 (해당 시 작성)	1단계	2023. 05. 01 - 2025. 12. 31(2년 8개월)								
연구개발비 (단위: 천원)		정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비	그 외 기관 등의 지원금 지방자치단체 기타()				합계			연구개발비 외 지원금	
		현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계		240,000	-	-	-	-	-	-	240,000	-	240,000	-
1단계	1년차	40,000	-	-	-	-	-	-	40,000	-	40,000	-
	2년차	100,000	-	-	-	-	-	-	100,000	-	100,000	-
	3년차	100,000	-	-	-	-	-	-	100,000	-	100,000	-
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)		기관명	책임자		직위		휴대전화		전자우편		비고	
											역할	
											기관유형	
연구개발담당자 실무담당자		성명	김수경			직위		팀원				
		연락처	직장전화	032-860-9272			휴대전화		-			
			전자우편	sk369@inha.ac.kr			국가연구자번호		-			

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2024년 1월 18일

연구책임자: 김 태 원

주관연구개발기관의 장: 김 주
공동연구개발기관의 장:
위탁연구개발기관의 장:



해양수산과학기술진흥원장 귀하

< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성합니다.

사업명				총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)			
내역사업명 (해당 시 작성)		남극활동 기반시설 공동활용사업		연구개발과제번호			
기술 분류	국가과학기술 표준분류	EH0605	30 %	EH0605	30 %	ND1002	40%
	부처기술분류 (해당 시 작성)	MEV0501	30 %	MEV0502	30 %	MBT0201	40%
총괄연구개발명 (해당 시 작성)							
연구개발과제명		기후변화에 대한 남극 해양 저서동물의 보상기작 연구					
전체 연구개발기간		2023.05.01. - 2025.12.31					
총 연구개발비		총 240,000 천원 (정부지원연구개발비: 240,000 천원, 기관부담연구개발비 : 천원, 지방자치단체: 천원, 그 외 지원금: 천원)					
연구개발단계		기초[☒] 응용[] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]		기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준() 종료시점 목표()	
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)							
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)							
연구개발 목표 및 내용	최종 목표		남극은 지구상에서 기후변화의 영향을 극심하게 받는 대표적인 지역임. 해양 저서동물은 타 생물군에 비해 이동성이 매우 낮기 때문에 기후변화 인자에 대한 반응 연구를 하기에 적합함. 또한, 극지 해양 저서동물은 기후변화에 대한 각자의 독특한 보상기작을 가지고 있을 것으로 예상됨. 본 연구에서는 ‘기후변화에 대한 극지 해양 저서동물은 보상기작을 가지고 있을 것’이라는 가설을 검증하기 위해 남극 해양 저서동물의 약 70%를 차지하는 복족류와 단각류의 외골격 표현형 변이와 단백질 발현량 및 유전자 변이를 통해 확인하고자 함. 현재까지 이를 보상기작의 지표로 사용한 연구는 전무함. 본 연구결과는 기후변화 인자에 영향을 받는 해양 저서동물의 보상기작을 파악할 뿐만 아니라, 해당 특성을 공학적, 산업적으로 활용할 수 있음.				
	전체 내용		○ 남극 해양 저서동물의 보상기작 연구 - 2019년 바톤반도에서 채집된 삿갓조개와 단각류 시료를 통해 표현형 변이 및 유전자 다양성 지표 생성 및 검증 - 배양실험: 기후변화로 인한 담수화를 재현한 해수에 삿갓조개 배양실험 진행 - 남극 해양 저서동물(삿갓조개, 단각류)을 통해 표현형 변이 및 유전자 다양성 지표 검증 • 삿갓조개(<i>Nacella concinna</i>): 패각 표현형 변이 및 단백질 발현 연구 • 단각류(<i>Gondogeneia antarctica</i>): 외골격 표현형 변이 및 유전자 변이 연구				
	1단계 (해당 시 작성)	목표	기후변화 인자 영향성 지표 생성 및 선행연구 조사				
	내용	○ 선행연구 조사 - 서남극 반도의 최신 기후 경향 분석 - 기후변화 인자에 대한 남극 해양 저서동물의 반응 연구 조사					

			○ 표현형 변이 지표 및 유전자 다양성 지표 생성 - 표현형 변이: 패각의 구조, 성분, 기계학적 특성 - 유전자 다양성: 유전자 마커 검출
		2단계 (해당 시 작성)	목표 기후변화 인자 영향성 검출 지표 검증 및 현장조사
			○ 표현형 변이 및 유전자 다양성 지표 검증 - 표현형 변이 분석 및 기후변화 인자와의 상관성 파악 - 유전자 다양성과의 상관성 파악 - 국내 연안 종을 대상으로 예비 배양실험 진행 ○ 남극 해양 저서동물 채집 및 배양실험 - 삿갓조개 및 단각류 채집 - 해양담수화와 산성화 조건에서 삿갓조개 배양
		3단계 (해당 시 작성)	목표 기후변화의 영향에 대한 남극 해양 저서동물의 보상기작 확인
			○ 삿갓조개의 보상기작 확인 - 단백질 발현 정도 - 패각의 표현형 변이 분석 - 과거 시료와 최근 시료의 표현형 변이 비교 ○ 단각류의 보상기작 확인 - 유전자 변이 검출 - 외골격의 표현형 변이 분석 ○ 표현형 변이 및 유전자 변이를 기후변화 인자와 비교

연구개발성과	○ 남극 해양 저서동물의 표현형 변이 지표 및 유전자 다양성 지표 생성 - 남극 삿갓조개 <i>Nacella concinna</i> 의 패각 계층구조 파악 - <i>N. concinna</i> 패각의 구성원소 파악 및 원소 함량 측정 - 남극 단각류 <i>Gondogeneia antarctica</i> 의 DNA 추출 및 마커 적합성 평가											
--------	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	○ 연구개발성과 활용계획 - 기후변화 인자에 대한 남극 해양 저서동물의 표현형 변이 및 유전자 다양성 지표 활용 - 남극 해양 저서동물의 유전자 데이터 베이스 구축 - 기후변화 인자에 대한 남극 해양 저서동물의 보상기작을 신소재 개발에 활용 ○ 기대 효과 - 남극 해양 저서동물의 기후변화 보상기작을 밝혀냄으로써 염분 및 pH 변동에 견딜 수 있는 새로운 소재 개발을 위한 원천 기술 확보 - 생체 모방을 통한 해저 및 육상 구조물을 유지 및 보수를 위한 기술을 개발함으로써 친환경 기술 선도국으로 발돋움 및 친환경 국가 이미지 제고											
---------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

연구개발성과의 비공개여부 및 사유												
-----------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설· 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물

연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입 기관	연구시설· 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호

국문핵심어 (5개 이내)	기후변화	보상기작	표현형 변이	유전자 다양성	해양 저서생물
영문핵심어 (5개 이내)	Climate change	Compensatory mechanism	Phenotype variation	Genetic diversity	Marine benthic animals

210mm×297mm[(백상지(80g/m²) 또는 중질지(80g/m²)]

목 차

1. 연구개발과제의 필요성	
1-1. 연구개발 개요	
1-2. 연구개발 대상의 국내외 현황	
1-3. 연구개발의 중요성	
1-4. 선행 연구 내용 및 결과	
1-5. 연구개발과제 및 대상기술의 중복성	
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	
2-1. 연구개발 목표 및 계획내용	
2-2. 연구개발 수행내용	
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	
3-1. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	
3-2. 연구수행 결과	
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	
4-1. 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용	
4-2. 자체 보완활동	
4-3. 연구개발 과정의 성실성	
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여정도	
5-1. 목표 달성도	
5-2. 관련 분야 기여도	
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	
6-1. 연구개발성과의 관리계획	
6-2. 연구개발성과의 활용 계획	
7. 기타 사항	
7-1. 연구시설·장비종합정보시스템 등록된 연구시설 장비 현황	
7-2. 연구시설·장비종합정보시스템 등록된 연구시설 장비 현황	
기타1. 별첨자료	
기타2. 참고문헌	

1. 연구개발과제의 필요성

1-1. 연구개발 개요

- 지구상에서 극지방은 기후변화에 가장 취약함(Kim et al., 2021; Lim et al., 2014). 서남극반도 북쪽에 위치한 마리안소만은 해양성 기후로 인해 빙상 변화에 취약하며(Moon et al., 2015; Ruckamp et al., 2011), 1956년부터 2017년까지 빙하가 약 1.9 km 후퇴함(Ha et al., 2019; Moon et al., 2015).
- 빙하 후퇴로 인한 용융수 증가는 마리안소만 일대의 수온, 염분, pH 등의 물성을 바꿔 연안 생태계를 교란시킴(Moon et al., 2015). 또한 마리안소만은 해저 암층에 의해 내측, 중간, 외측 세 부분으로 나뉘며, 이로 인해 소만 내부의 해수 순환 뿐만 아니라 맥스웰만과 해수 교환이 제한적임(Ha et al., 2019; Yoo et al., 2015). 따라서 여름철 빙하 용융으로 인해 소만의 내측과 외측의 수온, 염분 등의 물성 차이가 큼(Kim et al., 2021; Bascur et al., 2020).
- 현재 기후변화에 대한 극지 생물의 반응 연구는 활발히 진행되고 있으나(Barnes & Peck, 2008; Ramaho et al., 2016; Saba et al., 2012; Schoenrock et al., 2015) 용융수 유입으로 인해 낮아진 염분 및 pH의 복합 효과에 대한 극지 생물 반응 연구는 부족한 실정임(Manno et al., 2012; Park et al., 2020; Sin et al., 2020). 최근 대서양, 칠레, 벨기에, 호주 및 뉴질랜드 연안 등에서 서식하는 일부 패각을 갖는 생물들이 기후변화에 대한 보상기작(compensatory mechanism)을 가지고 있다고 보고됐으나(Cross et al., 2018; Grenier et al., 2020; Leung et al., 2017, 2020; Telesca et al., 2020), 남극 생물을 대상으로 진행한 연구는 매우 부족함(Cross et al., 2019; Telesca et al., 2019).
- 본 연구에서는 마리안소만 내측에서 외측까지 채집한 삿갓조개(*Nacella concinna*)와 단각류(*Gondogeneia antarctica*)의 유전자 분석 및 표현형 변이 분석을 진행함. 이는 빙하 용융수 유입으로 인한 소만 내측과 외측의 물성 차이가 해양 저서동물에게 미치는 영향을 확인할 수 있으며, 해당 생물의 기후변화 인자에 대한 보상기작을 확인할 수 있음.
- 위 연구를 통해 남극 해양 저서동물의 기후변화에 대한 대응 기작을 유전자 다양성 및 표현형 변이를 통해 밝혀내고자 함.



그림 1 기본 개념도

- 용도 및 적용 분야
 - 용도: 자연모사 및 신소재 원천 기술 활용
 - 적용 분야: 친환경 신물질 개발 및 건설, 재료 공학 등의 공학 학문과의 연계 연구 가능

1-2. 연구개발 대상의 국내외 현황

○ 국내 현황

- 국내 과학기술 지식인프라 ScienceON, RISS 사이트에 2023년 4월 2일을 기준으로 “남극”, “기후변화”, “해양 저서동물”을 검색했을 때 학위 논문 2건 검색됨. 내용은 아래와 같음.
- 환경 변화 정도가 증가함에 따라 저서성 규조류와 대형저서동물의 다양성이 일정하게 유지되는지, 어떤 종이 그러한 환경에 저항성을 갖고 있는지, 그리고 저서동물의 적응 기작이 무엇인지 규명함(배한나, 2021).
- 빙하후퇴 이후 거대저서동물 군집의 변화, 빙하가 후퇴하는 지역의 거대저서동물 분포를 지표하는 분류군 및 관련 환경 요인, 빙하후퇴에 따른 남극 우전종 중 하나인 멍게의 섭식 양상의 변화를 통해 빙하후퇴한 남극 연안 피요르드만에서 거대저서동물 군집의 구조와 기능을 조사함(김동우, 2022).
- 위 키워드 3개에 "집단 유전학", "보상기작" 키워드를 추가하여 검색했을 때 관련 논문 없음.

○ 국외 현황

- Scopus 사이트에 2023년 4월 2일을 기준으로 “Antarctic”, “climate change”, “benthic animals”를 검색했을 때 1건의 논문이 검색되었으며, 세계적으로 많이 연구되지 않은 실정임. 관련 논문 내용은 아래와 같음.
- 기후변화로 인한 해빙 감소는 남극 저서동물의 먹이인 식물플랑크톤의 대발생을 유발함. 해빙 감소와 식물플랑크톤 증가에 대한 남극 대륙붕 저서동물의 성장 반응에 대해 조사함(Barnes, 2015).
- 위 키워드 3개에 "compensatory mechanism", "population genetic"를 추가하여 검색했을 때 관련 연구 없음.

1-3. 연구개발의 필요성

○ 연구개발의 시급성

- 마리아나소만은 해양성 기후로 인해 온난화로 인한 빙상 변화에 취약함(Moon et al., 2015; Rückamp et al., 2011). 마리아나소만이 위치한 킹조지섬의 약 90% 이상이 빙하로 덮여 있으며(Ha et al., 2019; Moon et al., 2015; Rückamp et al., 2011), 현재와 같은 속도로 온난화가 지속 되면 2060년에는 빙하가 없어질 것으로 예상됨(Lee et al., 2008). 연안의 저서동물들은 염분과 pH가 낮은 빙하 용융수 유입으로 인한 물성 변화와 물리적 변화에 매우 취약함(Chelchowski et al., 2022; Moon et al., 2015). 또한, 남극 단각류(*Gondogeneia antarctica*)와 삿갓조개(*Nacella concinna*)와 같은 남극 저서동물은 이동성이 낮아 환경 스트레스에 취약하기 때문에(Moon et al., 2015) 염분과 pH 변동이 남극 저서동물에게 미치는 영향 연구가 필요함.

○ 연구개발의 중요성

- 현재 극지 생물을 대상으로 한 해양 온난화와 산성화 연구는 활발히 진행되고 있음. 그러나, 해양 담수화와 산성화의 복합 작용이 극지 생물에게 미치는 영향 연구는 미비함. 특히, 기후변화 인자에 대한 극지방에 서식하는 해양 저서동물의 보상기작을 유전자 및 표현형 변이를 통해 분석한 연구 사례가 전무함. 따라서 본 연구에서는 해양 담수화와 산성화에 대한 남극 해양 저서동물의 취약성 혹은 저항성을 단기간의 실험실 배양실험 및 과거 시료를 활용하여 다년간의 남극 해양 저서동물의 유전자 다양성 분석 및 패각 분석을 통해 확인하고자 함. 본 연구는 기후변화 인자에 따른 해수 물성 변화에 대한 해양 동물의 보상기작 연구를 선도할 수 있을 뿐만 아니라 다년간의 남극 해양 저서동물의 유전자 다양성을 비교함으로써 유전자 다양성과 기후변화의 상관성을 보고하는 최초의 연구가 될 수 있을 것으로 예상됨.

- 본 연구는 시료 확보를 위해 남극 세종기지 입소가 필수적임. 또한, 분석에 필요한 고가의 분석 기기를 인하대학교 표준분석원에 보유하고 있어 산·학·연 공동연구가 필요함.
-

1-4. 선행 연구 내용 및 결과

○ 기후변화가 해양 저서동물들에게 미치는 영향 연구

- 해양 담수화로 인해 긴털모래옆새우(*Haustorioides koreanus*)는 저염분 조건에서 먹이 도달하는데 더 오랜 시간이 걸리는 결과를 야기했으며, 이는 낮은 염분으로 인해 단각류의 화학 감지 능력이 손상됨을 의미함. 따라서 단각류의 생존에 위협이 될 수 있음(Park et al., 2021).
- 해양 담수화와 산성화로 인해 남극 단각류(*Gondogeneia antarctica*)는 저염분 조건에서 공식 행동이 증가하고 pH 7.6에서 사망률이 증가하는 등 생리적으로 영향을 받음(Park et al., 2020).
- 남극 삿갓조개(*Nacella concinna*)는 저염분 조건에서 건강도가 유의하게 감소했으며, 저염분과 낮은 pH에 패각 표면이 부식됨(Sin et al., 2020).

○ 해양 동물의 탄산칼슘 보호 외피 분석 연구

- 심해 열수 갑각류(*Austinograea rodriguezensis*)의 외골격 특성 분석(Cho et al., 2020): 심해 열수구에 서식하는 갑각류인 *A. rodriguezensis* 외골격의 구조, 성분, 기계학적 특성을 분석하여 연안종에 비해 우수한 외골격 특성을 가졌음을 보고함.
- 심해 열수 갑각류(*Austinograea* sp.)와 연안 게(*Charybdis japonica*)의 외골격 특성 비교(Cho et al., 2022): 인도양 심해열수분출공 서식 게(*Austinograea* sp.)는 유전적으로 거리가 비교적 가까운 연안종인 민꽃게(*Charybdis japonica*)와 외골격 특성 비교 분석 결과, 열 안정성이 높고 기계학적 특성이 우수한 외골격을 형성하고 있었으며 이는 극한 환경의 서식지에 적응하여 나타난 표현형의 변이 가능성을 보고함.

○ 탄산칼슘 골격을 지닌 남극 해양 저서동물의 방어 기작 연구

- 장기간의 남극 큰띠조개(*Laternula elliptica*) 패각 분석 연구(위탁연구과제: '기후변화 복합 인자가 남극 해양저서동물에게 미치는 영향'): 1995년부터 2018년까지 마리아나소만에서 채집한 남극 큰띠조개 패각의 구조(부식도, 두께), 성분(구성원소, 구성물질), 기계학적 특성(경도, 탄성도)을 평면 및 단면(각피, 각주층, 진주층)으로 분석하고 기후변화 관련 인자(기온, SST, SSS, Chl-a, 해수의 pCO₂)와의 상관성을 확인하여 남극 큰띠조개가 기후변화에 대응하여 생존할 수 있는 방어 기작이 있음을 보고함.

○ 남극 단각류의 형태 동정 선행 연구(위탁연구과제: '해양산성화와 담수화가 남극 해양무척추동물의 행동 및 생리에 미치는 영향 연구')

- 2018년 12월~2019년 2월 기간동안 채집지의 물성 측정과 극지 무척추동물, 단각류를 총 6,735개체 이상 채집하였고, 형태학적으로 4종(*Gondogeneia antarctica*, *Cheirimonon femoratus*, *Orchomenella* sp., *Bovallia gigantea*)를 분류하여 보고함.

○ 달랑게 집단유전학 분석

- 동아시아(한국, 대만, 일본)에 서식하는 해양보호생물, 달랑게(*Ocypode stimpsoni*)의 집단유전학 분석을 수행하며 Mitochondrial DNA와 nuclear DNA 서열에 기반한 집단간의 지리적 연결성을 규명하는 연구 결과를 도출함.
-

1-5. 연구개발과제 및 대상기술의 중복성

- 기후변화가 극지 생물에게 미치는 영향에 대한 연구는 있으나, 극지 해양 저서동물 대상으로 기후 변화에 대한 보상기작을 규명하는 연구는 진행된 바 없음. 또한 본 연구 결과는 응용 가능성이 매우 높음(특히 및 기술 개발의 기초자료로 활용 가능).

부처명	사업명	과제명	연구개발기관	연구책임자
해양수산부	극지연구소운영지원	서남극해 온난화에 따른 탄소흡수력 변동 및 생태계 반응 연구	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	박지수
해양수산부	극지연구소운영지원	급속한 빙하 감소에 따른 세종과학기지 기반 연안해양[수층-저층] 생태계 적응과 영향 평가	극지연구소	하선용
해양수산부	극지연구소운영지원	온난화로 인한 극지 서식환경 변화와 생물 적응진화 연구	극지연구소	김상희
해양수산부	극지 및 대양과학연구	남극해 해양보호구역의 생태계 구조 및 기능 연구	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	김정훈
과학기술정보통신부	국제인력연구교류	남극 미소무척추동물 군집 분석과 환경 간 상관관계 분석	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	김상희
해양수산부	극지연구소운영지원	남극반도 연안해양시스템 변화 2050 전망 연구	극지연구소	안인영
과학기술정보통신부	개인기초연구	기후변화에 따른 남극 Polynya의 물질순환규명을 위한 비교 Meta-Omics연구	한국지질자원연구원	김소정
교육과학기술부	극지연구소 연구운영비지원	남극 킹조지섬의 생물 다양성과 생태계 변화 연구	극지연구소	최한구

극지연구소

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

2-1. 연구개발 목표 및 계획내용

연구개발 목표	기후변화 인자가 남극 해양 저서동물에게 미치는 영향성 지표 생성 및 선행 연구 조사
---------	--

세부 연구개발 목표	세부 연구개발 내용 및 범위	연구비(천원)	수행기관
기후변화 인자가 남극 해양 저서동물에게 미치는 영향성 지표 검출	○ 선행연구 조사 - 서남극 반도의 최신 기후 경향 분석 - 기후변화 인자에 대한 남극 해양 저서동물들의 반응 연구 조사 ○ 기후변화 인자에 따른 남극 해양 저서동물의 표현형 변이 및 유전자 다양성 지표 생성 - 삿갓조개(<i>Nacella concinna</i>) 패각의 표현형 변이 지표 설정 - 단각류(<i>Gondogeneia antarctica</i>) 유전자 마커 검출	40,000	인하대학교

연구개발내용 및 범위 상세기술
1. 선행연구 조사 ○ 서남극 반도의 최신 기후 경향 분석 - 산업혁명 이후 지난 200년간 서남극은 빠르게 온난화됨. 그러나 선행연구에 따르면 1998/1999년을 기점으로 서남극 반도 일부 지역에서 약한 정도의 냉각(cooling)이 관찰되고 있다고 보고함. 이처럼 남극 세종과학기지 인근의 환경은 기후변화에 매우 민감하게 반응하고 있음. ○ 기후변화 인자에 대한 남극 해양 저서동물의 반응 연구 - 해양 온난화, 담수화, 산성화 등 기후변화와 관련된 남극 해양 저서동물(복족류 및 갑각류) 연구 경향성 파악 - 기후변화 복합 인자가 남극 복족류 패각의 표현형(구조, 성분, 기계학적 특성)에 미치는 영향 확인 - 기후변화 복합 인자가 남극 갑각류 유전자에 미치는 영향 연구 조사 2. 기후변화 인자에 따른 남극 해양 저서동물의 표현형 변이 및 유전자 다양성 지표 생성 ○ 삿갓조개(<i>Nacella concinna</i>) 패각(shell)의 표현형 지표 생성 - 시료 준비 및 선정 (1) 2019년 바톤반도에서 채집된 삿갓조개 패각 5개 이상 분석 (2) 시료는 다음과 같은 기준으로 선정함. • 각장이 유사한 삿갓조개 패각(± 0.5 cm) • 석회조류가 부착되지 않은 삿갓조개 패각 - 패각 전처리 (1) 패각을 실험수로 세척 후, 상온에서 완전히 건조시킴. (2) 삿갓조개 패각을 1 cm x 1 cm 크기로 3개 절단함. (3) 절단한 패각은 다음과 같은 분석에 사용함. • 패각의 표면 손상 정도 분석 • 미세구조 분석 • 패각 단면 분석: 패각을 epoxy resin에 충전시킨 후 0.05 μm까지 연마하여 분석에 사용함. - 패각 분석 (1) 패각의 구조, 성분, 기계학적 특성을 분석함. • 패각의 표면 손상도 및 구조 분석 주사전사현미경(SEM: Scanning Electron Microscope)을 사용하여 표면과 단면의 이미지를 획득하

여 패각 표면의 손상도(부식, 금 등)와 미세구조를 확인하고 패각을 이루는 각 층의 두께를 측정함. 저배율부터 고배율까지 높여가며 관찰함.

▷ 부식도: 문셀 컬러 시스템에 따른 밝은 부분을 부식의 지표로 사용하여 greyscale의 상위 36%를 부식으로 정의. ImageJ로 greyscale을 계산하여 다음과 같은 식을 이용해 산출함.

$$Dissolution = \frac{bright\ area}{total\ shell\ area} \times 100$$

▷ 각 층의 두께: ImageJ를 이용해 3번 반복 측정

- 성분 분석

에너지 분산 X선 분광분석기(EDX: Energy Dispersive X-ray)를 이용해 패각의 층별 구성원소(C, O, Na, Mg, Al, Si, Cl, Ca 등)의 함량(At %)을 분석함.

- 기계학적 특성 분석

미소경도기(Nanoindenter)를 이용해 패각의 경도(hardness, GPa) 및 탄성도(reduced modulus, GPa)를 측정함.

○ 단각류(*Gondogeneia antarctica*) 유전자 마커 검출

- 시료 준비 및 선정

(1) 2019년 바톤반도에서 채집된 단각류 유전자 분석

(2) 대상종은 세종과학기지 인근 조간대의 우점종인 *Gondogeneia antarctica*로 선정함.

- 유전자 분석

(1) 2019년 바톤반도에서 채집된 시료를 Qiagen DNA kit로 근육 조직에서 DNA 추출(집단별 5개체 이상)

(2) *Gondogeneia antarctica*를 대상 유전자 마커는 전무하기 때문에 갑각류에 주로 사용되는 HCO 2198, LC0 1490 마커 테스트 후, 목(order)은 다르나 해당 종과 동일한 단각류에 해당되는 옆새우종에서 사용된 Mitochondrial 마커인 CO 1a-H, CO 1-Gf 마커 테스트 예정(Meyran J.C. et al., 2002).

2-2. 연구개발 수행내용

1. 선행연구 조사

○ 서남극 반도의 기후변화 연구 최신 경향 파악을 위한 선행연구 조사 내용은 다음과 같음[첨부 1].

○ 서남극 반도의 최신 기후변화 경향 분석

- 서남극 반도 애들레이드섬 1997 - 2017년의 해양생물학적 시계열의 조사를 통해 여름 동안은 기온이 영하를 초과하고 겨울에는 약 20℃ 까지 떨어짐을 확인했음. 심해는 약 1℃로 이 열의 일부는 해빙 면적이 낮은 겨울에 대기로 방출될 수 있으며 심해층의 깊은 혼합과 대기-해양 플렉스를 지속시킴(Venables et al., 2023).

- 서남극 반도의 남극해안해류의 강화와 forcing location으로부터 멀리 떨어진 지표수 특성의 변화 외에도 모든 빙봉의 기초 녹는 속도는 서남극반도의 섭동에 따라 증가함. CM106 강제 시나리오를 바탕으로 모델실험은 담수의 이상현상이 빙봉 앞의 바다를 총화하고 빙봉 구멍으로의 열전달을 향상시킴을 보여줌. 또한 평균 기초 용융 속도는 담수 유입량과 비례하여 약 20% 증가하였음(Flexas et al., 2022).

- 서남극반도 대륙붕의 자율계류를 통해 대기-해상 CO₂ 플렉스의 새로운 관찰을 함. 서남극반도가 여름에는 대기 이산화탄소의 흡수원 역할을 하고 가을, 겨울에는 대기평형으로 다시 돌아감. 2018년 1~3월 사이의 개방수역의 여름 기온은 2℃를 초과하고 6~10월은 -1.8℃로 안정되며, 가스배출은 해빙 형성으로 인해 완전히 억제되었음(Shadwick et al., 2021).

○ 기후변화에 대한 남극 해양 저서동물의 반응 연구

- 남극 성게 *Sterechinus neumayeri*는 1, 3, 5 °C 중 높은 온도에서 장기 배양 시 사망률(20%)이 낮아졌고, 행동 및 생식 전 지수의 유의한 차이는 없었음. 22주 배양 후 남극 성게의 산소 섭취량은 온도 및 시간과 온도의 상호작용의 큰 영향을 받았고, 섭취율은 온도에 관계없이 증가하다가 16주차 이후로 안정화됐고, 관찰된 적응 기작은 세포 기계 재구성을 포함함. 또한 전사체 분석을 통해 해양 온난화에 노출된 후 발현되는 655개의 유전자를 식별할 수 있었음(Détrée et al., 2023).

- 해양 산성화로 인해 낮은 pH에서의 남극 이매패류(*Aequiyoldia eightsii*)의 분자 반응은 열충격 단백질과 튜불린은 상향 조절되었고, 글루코스 탈수소효소 및 트리메틸리신 다이옥시게나제는 하향 조절됨. 또한 해초강(*Cnemidocarpa verrucosa* sp.)은 낮은 pH에서 면역 체계와 항산화 반응에 관여하는 유전자의 상향조절이 일어남(Servetto et al., 2023).
- 온도 상승으로 인해 남극 요각류(*Tigriopus kingse Jongensis*)의 발달이 가속화 되고 전체 자손이 증가했음. 또한 지방산 분석 결과, 높은 온도는 다중불포화지방산(PUFA)비율을 감소시켰으나, 포화지방산(SFA)의 비율은 증가시켰음. 다른 PUFA 비율은 감소했으나 도코사헥사엔산(DPA)과 도코사펜타엔산(DHA)은 증가하였음(Yoon et al., 2023).

2. 기후변화 인자에 따른 남극 해양 저서동물의 표현형 변이 및 유전자 다양성 지표 생성

○ 삿갓조개(*Nacella concinna*) 패각(shell)의 표현형 지표 생성

- 인하대학교 해양동물학연구실에서는 총 135개의 삿갓조개 패각을 보유하고 있음. Cho et al.(2022)의 현장 연구에서 사용된 패각 90개 중 각장이 31.3 ± 0.1 mm인 시료를 54개체 선정함.
- SEM과 EDX를 이용해 패각의 미세구조 및 구성원소를 확인함[그림 2].

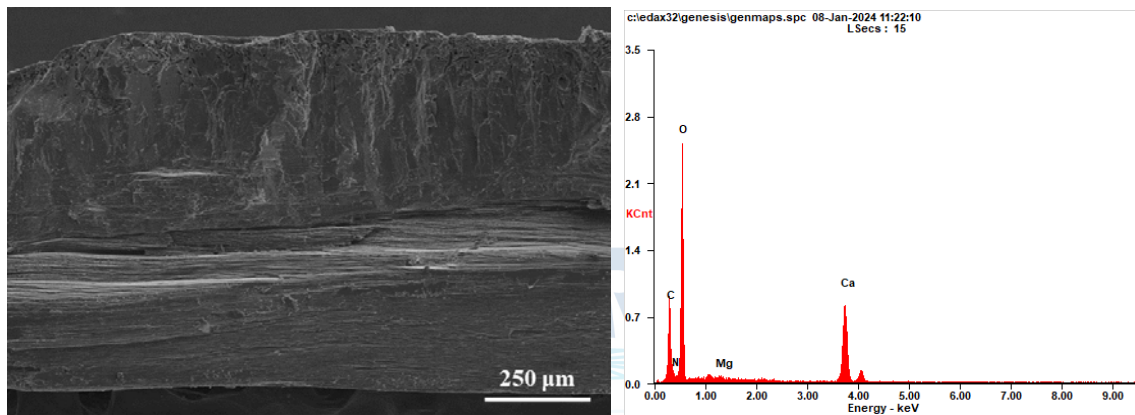


그림 2 삿갓조개 패각 단면의 SEM 이미지 및 구성원소

○ 단각류(*Gondogeneia antarctica*) 유전자 마커 검출

- 2019년 바톤반도에서 채집된 6개의 위치에서 집단별 5개체 이상 DNA를 추출함 (Qiagen DNA kit로 다리 근육 조직에서 DNA 추출).
- 갑각류에 주로 사용되는 HCO 2198, LCO 1490 와 단각류 유전자 분석에서 사용된 ChelF1, ChelR1을 사용하여 마커 테스트를 진행하였음[표 1].

표 1 마커테스트에 사용된 primer 정보

마커	시퀀스 (5'-3')	참고문헌
LCO1490	GGT CAA CAA ATC ATA AAG ATA TTG G	Folmer et al., 1994
HCO2198	TAA ACT TCA GGG TGA CCA AAA AAT CA	Folmer et al., 1994
ChelF1	TAC TCT ACT AAT CAT AAA GAC ATT GG	Barret and Hebert 2005
ChelR1	CCT CCT CCT GAA GGG TCA AAA AAT GA	Barret and Hebert 2005

- 프라이머(LCO1490와 HCO2198)를 사용한 선행연구에서의 PCR 변성(denaturation), 결합(annealing), 신장(elongation)을 기반하여 DNA에 원하는 타겟 서열(프라이머)이 붙을 수 있는 과정인 결합(annealing)단계에 시간과 온도에 대한 변동을 주며 실험을 수행함.
- 단각류 유전자 분석을 수행한 선행 연구(Tomikawa et al., 2017)을 참고하여 LCO1490와 HCO2198 프라이머를 사용함. 선행연구의 PCR 조건대로 유전자 서열 증폭 실험을 수행하였고 Annealing 온도를 40° C, 42° C, 44° C 로 다르게 설정하여 수행하였음[표 2].

표 2 단각류 유전자 분석을 수행한 선행 연구(Tomikawa et al., 2017)에서의 PCR 조건

마커	단계	온도	지속 시간
LCOI1490	Initial activation step	94°C	7 min
HCO2198	3-step cycling (35 cycles)		
	Denaturation	94°C	45 s
	Annealing	40-44°C	1 min
	Extension	72°C	1 min
	Final extension	72°C	7 min

- LCOI1490와 HCO2198 프라이머 사용하여 연구자가 유전자 분석을 진행했었던 PCR 조건을 기반으로 PCR을 수행하였음[표 3].

표 3 갑각류 유전자 분석을 수행한 선행 연구(투고 준비중)에서의 PCR 조건

마커	단계	온도	지속 시간
LCOI1490	Initial activation step	95°C	5 min
HCO2198	3-step cycling (35 cycles)		
	Denaturation	94°C	50 s
	Annealing	45°C	70 s
	Extension	72°C	1 min
	Final extension	72°C	10 min

- LCOI1490와 HCO2198 프라이머를 제작한 저자 논문(Folmer et al., 1994)에서의 PCR 조건대로 유전자 서열 증폭 실험을 수행하였고 Annealing 온도를 40° C, 45° C, 50° C 로 다르게 설정하여 수행하였음[표 4].

표 4 프라이머를 제작한 저자 논문(Folmer et al., 1994)에서의 PCR 조건

마커	단계	온도	지속 시간
LCOI1490	Initial activation step	94°C	7 min
HCO2198	3-step cycling (35 cycles)		
	Denaturation	95°C	1 min
	Annealing	40-50°C	1 min
	Extension	72°C	30 sec
	Final extension	72°C	7 min

- CheIF1와 CheIR1 프라이머를 사용한 저자 논문(Meyran J.C. et al., 2002)에서의 PCR 조건대로 유전자 서열 증폭 실험을 수행하였고 Annealing 온도를 45° C, 50° C, 55° C 로 다르게 설정하여 수행하였음[표 5].

표 5 프라이머를 사용한 저자 논문(Meyran J.C. et al., 2002)에서의 PCR 조건

마커	단계	온도	지속 시간
ChelF1	Initial activation step	96°C	7 min
ChelR1	3-step cycling (25 cycles)		
	Denaturation	96°C	30 s
	Annealing	45-55°C	30 s
	Extension	60°C	4 min
	Final extension	60°C	7 min



3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

3-1. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

○ 성과명

- 성과명 1: 선행연구 조사
- 성과명 2: 삿갓조개(*Nacella concinna*) 패각(sehl)의 계층구조와 성분

○ 성과 내용

- 성과 내용 1: 서남극 반도의 기후 경향에 대한 36건의 최신 논문과 기후변화 인자에 대한 남극 해양 저서동물의 반응 연구에 대한 24건의 논문을 조사하여, 정량적 성과 목표로 설정한 총 50건 이상의 선행 논문 조사를 달성함.
- 성과 내용 2: 남극 삿갓조개의 패각은 구과상 구조(spherulitic structure)의 각주층과 엽리 구조(foliated structure)의 진주층을 보이며, C, N, O, Ca로 이루어짐.

○ 기대 효과

- 남극 해양저서동물의 유전자 데이터 베이스 구축에 활용 가능
- 기후변화에 대한 생물 지표 개발에 활용 가능

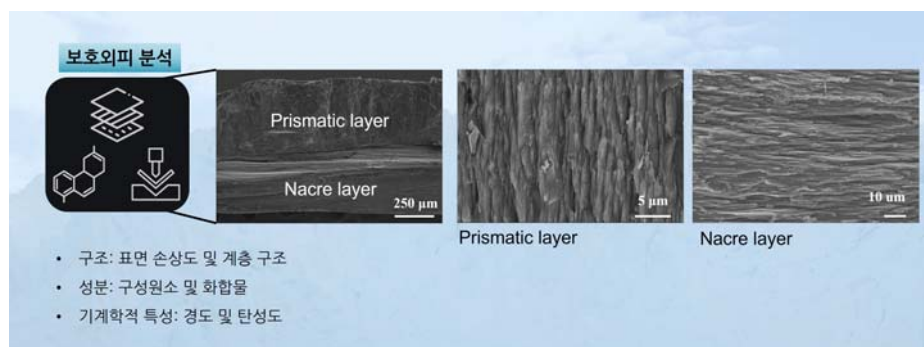


그림 3 연구실적 모식도

극지연구소

3-2. 연구수행 결과

1) 정성적 연구개발성과

- 기후변화 인자에 따른 남극 해양 저서동물의 표현형 변이 및 유전자 다양성 지표 생성
 - 석회조류가 있는 삿갓조개 *Nacella concinna* 패각과 없는 패각의 구조와 구성성분을 확인함.
 - 삿갓조개는 4개의 층(각피, 각주층, 진주층, myostracum)으로 이루어져 있다고 보고되었으나, 각피와 myostracum은 확인하지 못함[그림 4].

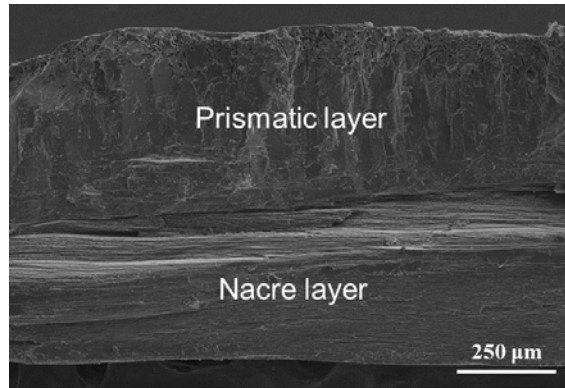


그림 4 남극 삿갓조개 *Nacella concinna* 패각 단면

- 각주층은 구과상 구조(spherulitic structure)로 이루어져 있으며, 진주층은 엽리 구조(foliated structure)로 이루어짐[그림 5].

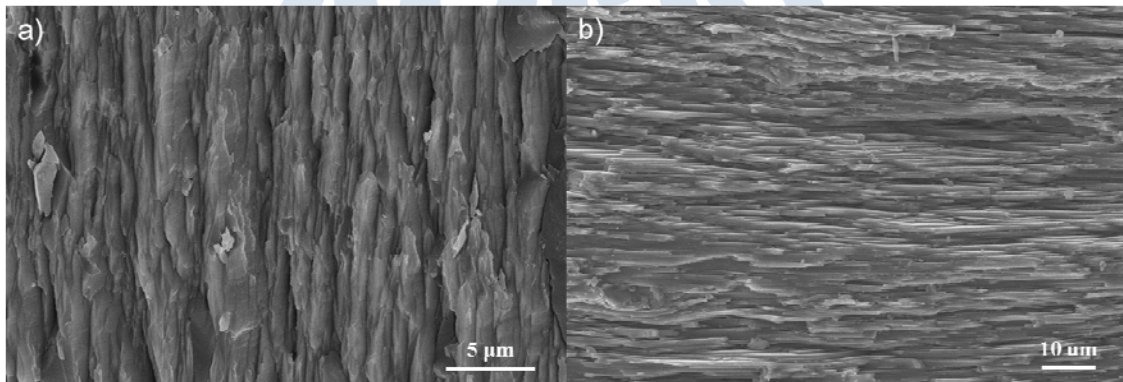


그림 5 *N. concinna*의 패각 구조. a) 각주층(prismatic layer), b) 진주층(nacre layer)

- *N. concinna* 패각의 C, N, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ca의 함량을 확인한 결과, C, N, O, Ca를 제외한 나머지 성분들은 1% 미만으로 아주 극소량 함유됨. 각주층과 진주층의 성분 함량은 차이나지 않음[그림 6]. 추후 분석시 C, N, O, Ca의 함량만 측정할 예정임.

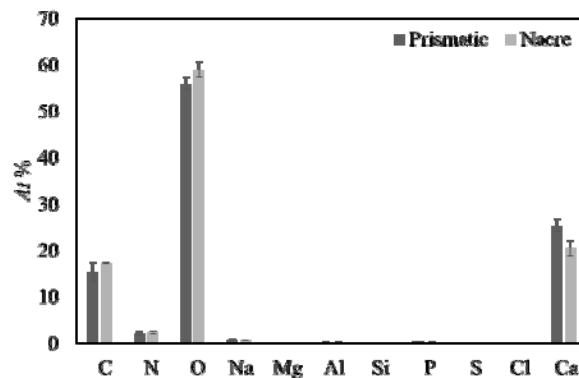


그림 6 각주층 및 진주층의 구성원소

- 대상으로 선정된 단각류(*Gondogeneia antarctica*)의 6개 집단 (총 97개체) 대상 DNA 추출 완료하였음[그림 7].

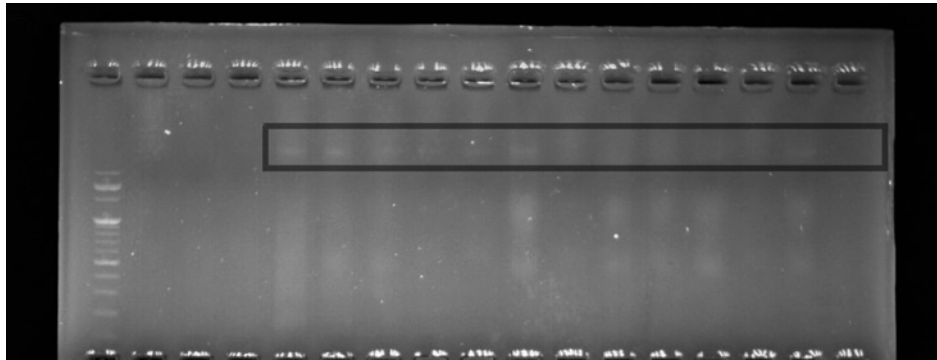


그림 7 DNA 추출 후 전기영동 결과 일부

- *Gondogeneia antarctica* 의 여러 조건의 PCR test 후, 1~1.5% 아가로스 젤에서 전기영동(100V, 20분)으로 PCR 결과를 1차적으로 확인하였음[그림 8].
- 선행 연구(Tomikawa et al., 2017) 조건의 전기영동 결과를 확인하여 시퀀싱을 의뢰함. 그러나 사용 불가능한 것으로 판단하여 다른 조건의 PCR을 진행이 필요함을 확인하였음[그림 8a].
- 테스트한 여러 PCR 조건의 전기영동 결과를 확인하여 multiband가 확인되거나 뚜렷하게 보이지 않는 결과는 시퀀싱 의뢰를 진행하지 않았음[그림 8c-d].
- 전기영동 결과, 명확하게 나온 시퀀싱 의뢰를 진행하였고, 유전자 서열 결과 발송을 대기하고 있음[그림 8e].

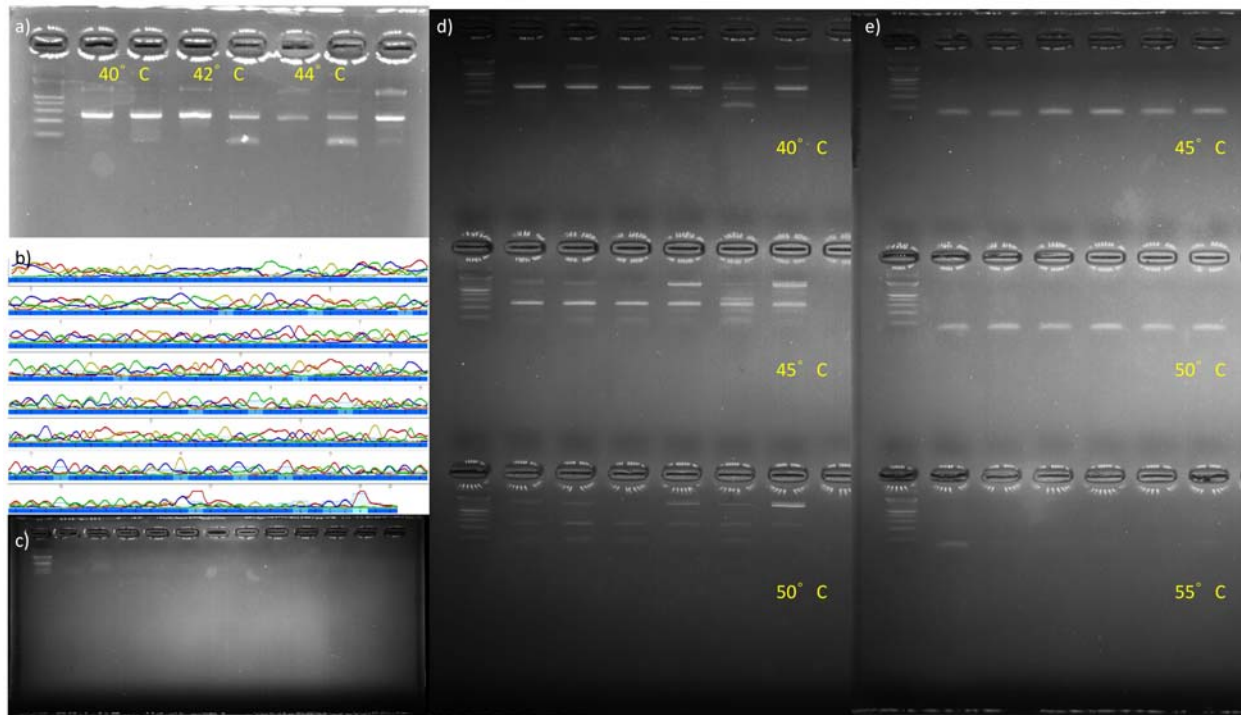


그림 8 PCR 이후 전기영동 및 시퀀싱 결과. a) 선행 연구(Tomikawa et al., 2017) 조건의 전기영동 결과, b) a)의 샘플을 시퀀싱 의뢰하여 받은 결과, c) 갑각류 유전자 분석을 수행한 선행 연구(투고 준비중) 조건의 전기영동 결과, d) 프라이머를 제작한 저자 논문(Folmer et al., 1994) 조건의 전기영동 결과, e) 프라이머를 사용한 저자 논문(Meyran J.C. et al., 2002) 조건의 전기영동 결과

2) 정량적 연구개발성과

(1) 단계별 성과지표 및 목표치

성과지표명		단계	1단계(23~25)	n단계(yy~yy)	계	가중치(%)
전담기관 등록·기탁지표	논문(SCIE/비SCIE)		3		3	80
	특허(출원/특허)		1		1	20
	보고서원문					
	연구시설·장비					
	기술요약정보					
	생명자원 중 생명정보					
	소프트웨어					
	표준					
	생명자원 중 생물자원					
	화합물					
연구개발과제 특성 반영 지표	신품종					
계			4		4	100

(2) 연차별 성과지표 및 목표치

구분	성과목표	성과지표	목표치	가중치 (퍼센트)	설정근거	평가기준 (측정산식 등)
최종목표	기후변화에 대한 남극 해양 저서동물의 보상기작 규명	논문 3건, 특허 1건	100	50	- 기후변화에 대한 남극 해양 저서동물의 보상기작 규명	SCI 상위 20% 저널에 출판
				50	- 기후변화 인자에 대한 단각류(<i>G. antarctica</i>)의 보상기작	
1차년도 (2023년)	기후변화 인자가 남극 해양저서 동물에게 미치는 영향성 지표 생성	서남극 반도의 기후변화 연구 최신 경향 파악 (선행연구 조사)	60건 이상	40	- 서남극 반도의 기후변화 이해 - 기후변화에 대한 남극 저서 동물의 반응 이해	각 항목별 20건 이상
		삿갓조개 패각 표현형 변이 지표 설정	5개체	30	- 남극 삿갓조개 패각의 특성 이해	구조 성분 기계학적 특성
		단각류 유전자 마커 검출	24개의 집단 (집단별 5개체)	30	- 유전자 분석을 위한 마커 선정	집단별 CO1 마커 테스트 결과

3) 성능지표 및 측정방법(해당시 작성)

(1) 결과물의 성능지표

평가 항목 (주요성능 ¹⁾)	단위	전체 항목에서 차지하는 비중 ²⁾ (%)	세계 최고수준 보유국/보유기관	연구개발 전 국내 수준	연구개발 목표치		목표 설정 근거
			성능수준	성능수준	1단계(yy~yy)	n단계(yy~yy)	

* 1) 정밀도, 인장강도, 내충격성, 작동전압, 응답시간 등 기술적 성능판단기준이 되는 것을 의미합니다.

* 2) 비중은 각 구성성능 사양의 최종목표에 대한 상대적 중요도를 말하며 합계는 100%이어야 합니다.

☐ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율

☐ 신기술 지정

번호	명칭	출원일	고시일	보호 기간	지정 번호

☐ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증 기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증 번호		

☐ 표준화

○ 국내표준

번호	인증구분 ¹⁾	인증여부 ²⁾	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류 ³⁾	제안/인증일자

- * 1」 한국산업규격(KS) 표준, 단체규격 등에서 해당하는 사항을 기재합니다.
* 2」 제안 또는 인증 중 해당하는 사항을 기재합니다.
* 3」 신규 또는 개정 중 해당하는 사항을 기재합니다.

○ 국제표준

번호	표준화단계구분 ¹⁾	표준명	표준기구명 ²⁾	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식 ³⁾	제안자	표준화 번호	제안일자

- * 1」 국제표준 단계 중 신규 작업항목 제안(NP), 국제표준초안(WD), 위원회안(CD), 국제표준안(DIS), 최종국제표준안(FDIS), 국제표준(IS) 중 해당하는 사항을 기재합니다.
* 2」 국제표준화기구(ISO), 국제전기기술위원회(IEC), 공동기술위원회1(JTC1) 중 해당하는 사항을 기재합니다.
* 3」 국제표준(IS), 기술시방서(TS), 기술보고서(TR), 공개활용규격(PAS), 기타 중 해당하는 사항을 기재합니다.

[경제적 성과]

☐ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작 업체명	설치 장소	이용 분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

☐ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황

- * 내부 자금, 신용 대출, 담보 대출, 투자 유치, 기타 등

☐ 사업화 투자실적

번호	추가 연구개발 투자	설비 투자	기타 투자	합계	투자 자금 성격*

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식 ¹⁾	사업화 형태 ²⁾	지역 ³⁾	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

- * 1) 기술이전 또는 자기실시
* 2) 신제품 개발, 기존 제품 개선, 신공정 개발, 기존 공정 개선 등
* 3) 국내 또는 국외

□ 매출 실적(누적)

사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
		국내(천원)	국외(달러)		
합계					

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)		현재까지	3년 후	5년 후
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내			
		국외			
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획					
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)		현재	3년 후	5년 후
	수출				

□ 고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)		합계
			yyyy년	yyyy년	
합계					

□ 고용 효과

구분			고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력	
		생산인력	
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

□ 비용 절감(누적)

순번	사업화명	발생연도	산정 방법	비용 절감액(천원)
합계				

☐ 경제적 파급 효과

(단위: 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수)	기타
해당 연도							
기대 목표							

☐ 산업 지원(기술지도)

순번	내용	기간	참석 대상	장소	인원

☐ 기술 무역

(단위: 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	기 징수액	총 계약액	해당 연도 징수액	향후 예정액	수출/ 수입

[사회적 성과]

☐ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

☐ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

☐ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구 분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

☐ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타

☐ 산업 기술 인력 양성

번호	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

☐ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비

□ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	뉴스 보도	경인매일 등 8건	인하대 조봉호, 서해인 생태 국제학술대회서 최우수상	2023.08.10.~11.

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
1	수상	최우수 구두발표상	우수 구두발표자 포상	구두 발표자	2023.07.20.	The 10th East Asian Federation of Ecological Societies (EAFES)

[인프라 성과]

□ 연구시설·장비

구축기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

* 「과학기술기본법 시행령」 제42조제4항제2호에 따른 연구시설·장비 종합정보시스템을 의미합니다.

[그 밖의 성과](해당 시 작성합니다)

4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성합니다)

5) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
○ 선행연구조사	○ 선행연구 50건 이상 조사	○ 100
○ 기후변화 인자 영향성 지표 생성	- 서남극 반도의 최신 기후 경향: 35건	- 50
	- 기후변화 인자에 대한 남극 해양 저서동물의 반응 연구: 27건	- 50
	○ 기후변화 인자 영향성 지표 생성	○ 40
	- 삿갓조개 패각의 표현형	- 10
	- 단각류(<i>Gondogeneia antarctica</i>)의 유전자 마커 검출의 97개체 대상 DNA 추출	- 30

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성합니다)

4-1. 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

- 삿갓조개(*Nacella concinna*) 패각(shell)의 표현형 지표 생성
 - *N. concinna* 패각은 다층구조로 이루어져 있어 본 연구팀이 기존에 사용했던 방법으로 패각을 절단할 수 없음. 패각의 손상을 최소화시킬 수 있는 방법을 3가지 고안하는데 오랜 시간이 소모됨. 고안한 방법은 다음과 같음.
 - (1) 집속이온빔 전자현미경(Focused Ion Beam): 주사전자현미경(SEM)에 이온가공(밀링 또는 증착) 기능이 추가된 장비로 시료 절단면의 손상이 적으나 비용이 높음.
 - (2) 로터리 톨 세트: 다양한 톨로 절단, 조각 등이 가능하나, 기기 숙련도가 필요함.
 - (3) 저속정밀절단기: 상대적으로 큰 크기의 시료를 정밀하게 절단 가능함.
- 단각류(*Gondogeneia antarctica*)의 유전자 마커 검출
 - 연구자가 기존에 진행했던 연구는 갑각류 유전자 연구로 근연종간의 유전자 분석 정보가 비교적으로 많았음. 그러나 대상종으로 선정한 *Gondogeneia* 속에 대한 유전적으로 밝혀진 지금까지의 정보는 총 3개 데이터로 해당 종에 대한 연구가 거의 전무한 실정임.
 - 연구자가 처음 분석하는 단각류 연구를 위해 동일한 과의 유전 관련 선행연구의 PCR 조건과 프라이머(HCO 2198, LCO 1490 set와 ChelF1, ChelR1 set)를 동일하게 사용하였고, 전기영동을 통해 1차적으로 3개의 PCR 조건을 선정할 수 있었음. 그러나 시퀀싱 결과에서 noise 한 결과(반응 안됨)를 확인하여 서열 획득에 어려움이 있었던 것으로 확인됨.
 - 해당 원인으로는 DNA 추출 시, 미생물의 DNA가 함께 추출되어 PCR 과정에서 증폭되었을 가능성 혹은 시퀀싱 과정에서 primer가 바뀐 상태로 시퀀싱이 진행되었을 가능성이 있다고 판단됨. 따라서 미생물 DNA 증폭이 되지 않을 primer의 변경 및 개발이 필요할 것으로 생각됨.

4-2. 자체 보완활동

- 삿갓조개(*Nacella concinna*) 패각(shell)의 표현형 지표 생성
 - 비용과 패각 손상도를 고려하여 패각 절단 방법을 2월 중에 확정할 예정임. 3월에 삿갓조개 패각 5개의 구조, 성분, 기계학적 특성을 분석하여 표현형 지표를 생성할 예정임. 이를 바탕으로 2차년도 연구 목표인 '삿갓조개 패각 표현형 변이 지표 검증'을 6월 중에 마무리할 수 있을 것으로 예상됨.
- 단각류(*Gondogeneia antarctica*)의 유전자 마커 검출
 - 마커 개발 전, 형태 정보를 기반한 종 동정이 현재 완료되었고, 유전자 정보를 기반한 종 동정이 추가적으로 필요하기 때문에 미토콘드리아의 다른 locus (12S rRNA, 16S rRNA)를 활용하여 동일종의 미토콘드리아 게놈 정보인 JN827386(Genbank number)와 매칭하여 유전자 분석(유전학적 종 동정)을 실시할 예정임.
 - 향후 단각류의 유전자 분석을 위한 지표 선정 계획은 다음과 같음. 유전학적 종 동정 후, 희망하는 미토콘드리아 CO1 서열 연구를 위한 미토콘드리아 DNA의 보존된 부분을 기반으로 primer를 새로 만들어 권장 Tm조건에서 6개 집단에 5개씩 시퀀싱 결과를 확인할 계획임. 해당 계획은 2차년도 6월 이내에 목표하여 마커 검출 수행을 완료할 예정임.

4-3. 연구개발 과정의 성실성

- 삿갓조개(*Nacella concinna*) 패각(shell)의 표현형 지표 생성
 - 5개의 연구 사이트(빙벽, 마리안소만, 세종기지 앞, 팽귄마을, 해표마을)의 물성 데이터를 정리 및 분석을 진행함.
 - 남극 삿갓조개 패각 분석을 위해 *N. concinna*의 생태 등 관련 연구 16건을 조사함.
 - 삿갓조개 패각을 절단 후 손상이 적은 조각을 선별하여, SEM을 이용해 계층구조를 확인하고, EDX로 패각의 구성원소를 조사함.
- 단각류(*Gondogeneia antarctica*)의 유전자 마커 검출
 - 현재까지 97개체를 대상으로 DNA를 추출하였고, PCR 각 순서에 대한 변성(denaturation), 결합(annealing), 신장(elongation) 온도의 6가지 프로토콜을 만들었고, 당초 계획이었던 2개의 마커를 사용했음.

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

5-1. 목표 달성도

- 본 연구의 1차년도 목표인 ‘선행연구 조사’를 100 % 달성함.
 - 이를 위해 서남극 반도의 최신 기후 경향 분석 조사 및 기후변화 인자에 대한 남극 해양 저서동물의 반응 연구 조사를 완료하였음.
 - 1차년도 목표인 ‘기후변화 인자에 따른 남극 해양 저서동물의 표현형 변이 및 유전자 다양성 지표 생성’을 40% 달성함.
 - 삿갓조개(*Nacella concinna*) 패각의 표현형 변이 지표를 설정하기 위해 패각의 계층구조를 확인하고 구성원소 함량을 측정함.
 - 2019년 채집된 선행연구 단각류(*Gondogeneia antarctica*) 시료를 이용하여 24개의 집단별 mitochondrial COI 마커 테스트를 진행하려고 했으나 총 120개체 분석의 고비용 발생으로 인하여 채집된 위치의 내부와 외부로 나누어 대표적으로 6 집단 대상으로 변경하여 갑각류에 주로 사용되는 mitochondrial COI 마커인 HCO 2198, LCO 1490 마커 테스트가 진행 중임.
-

5-2. 관련 분야 기여도

- 남극 삿갓조개 *Nacella concinna*의 패각 구조에 대해 보고된 바가 있으나(Lomovasky et al., 2020), 구성성분에 대한 것은 없음. 본 연구에서는 남극 삿갓조개 패각의 계층구조와 더불어 구성성분을 분석함으로써 삿갓조개의 생태학적 측면에서 패각 특성의 중요성에 큰 기여를 할 수 있음.
 - 대상으로 선정된 단각류 *Gondogeneia antarctica*의 유전자 서열이 National Center for Biotechnology Information (NCBI)에 mitochondrial COI 서열이 거의 전무하기 때문에 실험 결과를 통해 논문 출판 시 다량의 기초과학 연구 정보 정립이 가능함.
-



6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

6-1. 연구개발성과의 관리계획

- 기후변화에 영향을 받는 이동성이 낮은 남극 저서동물의 외골격 특성 및 유전적 다양성에 대한 연구는 기초과학에 매우 중요한 인자로 배양실험을 통해 산성화와 담수화에 대한 파급력이 있는 연구가 될 것으로 예상됨.

6-2. 연구개발성과의 활용 계획

- 국외논문 3건: 김다인 & 서혜인
- 특허출원 1건: 서혜인
- 인력 양성: 장효진(석사), 김다인(박사), 서혜인(박사)
- 성과홍보: 김다인 & 서혜인
- 포상 및 수상실적: 김다인 & 서혜인

< 연구개발성과 활용계획표 >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)			연구개발 종료 후 5년 이내
국외논문	SCIE		3
	비SCIE		
	계		3
국내논문	SCIE		
	비SCIE		
	계		
특허출원	국내		1
	국외		
	계		1
특허등록	국내		
	국외		
	계		
인력양성	학사		
	석사		1
	박사		2
	계		3
사업화	상품출시		
	기술이전		
	공정개발		
제품개발	시제품개발		
비임상시험 실시			
임상시험 실시 (IND 승인)	의약품	1상	
		2상	
		3상	
	의료기기		
진료지침개발			
신의료기술개발			
성과홍보			1
포상 및 수상실적			1
정성적 성과 주요 내용			

3) 연구성과의 보안등급

- 본 과제는 보안등급이 ‘일반’ 으로 해당사항 없음.

7. 기타사항

7-1. 연구시설·장비종합정보시스템 등록된 연구시설 장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치장소)	ZEUS장비 등록 번호

7-2. 연구시설·장비종합정보시스템 등록된 연구시설 장비 현황

☐ 해당 사항 없음.

< 별첨 자료 >

중앙행정기관 요구사항	별첨 자료
1. 연구개발 성과 증빙 자료	1) 연구개발 성과 증빙서류 2)

< 참고 문헌 >

1. Barnes, D. K., & Peck, L. S. (2008). Vulnerability of Antarctic shelf biodiversity to predicted regional warming. *Climate Research*, 37(2-3), 149-163.
2. Barnes, D. K. A. (2015). Antarctic sea ice losses drive gains in benthic carbon drawdown. *Current Biology*, 25(18), R789-R790.
3. Bascur, M., Muñoz-Ramírez, C., Román-González, A., Sheen, K., Barnes, D. K., Sands, C. J., ... & Urzúa, Á. (2020). The influence of glacial melt and retreat on the nutritional condition of the bivalve *Nuculana inaequisculpta* (Protobranchia: Nuculanidae) in the West Antarctic Peninsula. *Plos one*, 15(5), e0233513.
4. Chelchowski, M., Balazy, P., Grzelak, K., Grzelak, L., Kędra, M., Legezynska, J., & Kuklinski, P. (2022). Vertical zonation of benthic invertebrates in the intertidal zone of Antarctica (Admiralty Bay, King George Island). *Antarctic Science*, 34(1), 29-44.
5. Cho, B., Kim, D., & Kim, T. (2022). Exceptional properties of hyper-resistant armor of a hydrothermal vent crab. *Scientific Reports*, 12(1), 11816.
6. Cho B, Kim D, Bae H, Kim T. Unique Characteristics of the Exoskeleton of Bythograeid Crab, *Austinograea rodriguezensis* in the Indian Ocean Hydrothermal Vent (Onnuri Vent Field). *Integr Comp Biol*. 2020 Jul 1;60(1):24-32.
7. Cross, E. L., Harper, E. M., & Peck, L. S. (2018). A 120-year record of resilience to environmental change in brachiopods. *Global Change Biology*, 24(6), 2262-2271.
8. Cross, E. L., Harper, E. M., & Peck, L. S. (2019). Thicker shells compensate extensive dissolution in brachiopods under future ocean acidification. *Environmental science & technology*, 53(9), 5016-5026.
9. Détrée, C., Navarro, J. M., Figueroa, A., & Cardenas, L. (2023). Acclimation of the Antarctic sea urchin *Sterechinus neumayeri* to warmer temperatures involves a modulation of cellular machinery. *Marine Environmental Research*, 188, 105979.

10. Yoon, D. S., Choi, H., Sayed, A. E. D. H., Shin, K. H., Yim, J. H., Kim, S., ... & Lee, J. S. (2023). Effects of temperature and starvation on life history traits and fatty acid profiles of the Antarctic copepod *Tigriopus kingsejongensis*. *Regional Studies in Marine Science*, 57, 102743.
11. Doyle, S. R., Momo, F. R., Brêthes, J. C., & Ferreyra, G. A. (2012). Metabolic rate and food availability of the Antarctic amphipod *Gondogeneia antarctica* (Chevreux 1906): seasonal variation in allometric scaling and temperature dependence. *Polar biology*, 35, 413–424.
12. Flexas, M. M., Thompson, A. F., Schodlok, M. P., Zhang, H., & Speer, K. (2022). Antarctic Peninsula warming triggers enhanced basal melt rates throughout West Antarctica. *Science advances*, 8(31), eabj9134.
13. Folmer, O., Black, M., Hoeh, W., Lutz, R., & Vrijenhoek, A. R. (1994). DNA primers for amplification of mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I from diverse metazoan invertebrates. *Mol. Mar. Biol. Biotechnol.*
14. González, K., Gaitán-Espitia, J., Font, A., Cárdenas, C. A., & González-Aravena, M. (2016). Expression pattern of heat shock proteins during acute thermal stress in the Antarctic sea urchin, *Sterechinus neumayeri*. *Revista chilena de historia natural*, 89(1), 1–9.
15. Grenier, C., Román, R., Duarte, C., Navarro, J. M., Rodríguez-Navarro, A. B., & Ramajo, L. (2020). The combined effects of salinity and pH on shell biomineralization of the edible mussel *Mytilus chilensis*. *Environmental Pollution*, 263, 114555.
16. Ha, S. Y., Ahn, I. Y., Moon, H. W., Choi, B., & Shin, K. H. (2019). Tight trophic association between benthic diatom blooms and shallow-water megabenthic communities in a rapidly deglaciated Antarctic fjord. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 218, 258–267.
17. Kim, B. K., Jeon, M., Joo, H. M., Kim, T. W., Park, S. J., Park, J., & Ha, S. Y. (2021). Impact of freshwater discharge on the carbon uptake rate of phytoplankton during summer (January–February 2019) in Marian Cove, King George Island, Antarctica. *Frontiers in Marine Science*, 8, 725173.
18. Leung, J. Y., Chen, Y., Nagelkerken, I., Zhang, S., Xie, Z., & Connell, S. D. (2020). Calcifiers can adjust shell building at the nanoscale to resist ocean acidification. *Small*, 16(37), 2003186.
19. Lim, H. S., Park, Y., Lee, J. Y., & Yoon, H. I. (2014). Geochemical characteristics of meltwater and pondwater on Barton and Weaver peninsulas of King George Island, West Antarctica. *Geochemical Journal*, 48(4), 409–422.
20. Liu, X., Wang, L., Li, S., Huo, Y., He, P., & Zhang, Z. (2015). Quantitative distribution and functional groups of intertidal macrofaunal assemblages in Fildes Peninsula, King George Island, South Shetland Islands, Southern Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 99(1–2), 284–291.
21. Lomovasky, B. J., de Aranzamendi, M. C., & Abele, D. (2020). Shorter but thicker:

- analysis of internal growth bands in shells of intertidal vs. subtidal Antarctic limpets, *Nacella concinna*, reflects their environmental adaptation. *Polar Biology*, 43, 131–141.
22. Manno, C., Morata, N., & Primicerio, R. (2012). *Limacina retroversa*'s response to combined effects of ocean acidification and sea water freshening. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 113, 163–171.
 23. Meyran, J. C., Gielly, L., & Taberlet, P. (1998). Environmental calcium and mitochondrial DNA polymorphism among local populations of *Gammarus fossarum* (Crustacea, Amphipoda). *Molecular Ecology*, 7(10), 1391–1400.
 24. Moon, H. W., Hussin, W. M. R. W., Kim, H. C., & Ahn, I. Y. (2015). The impacts of climate change on Antarctic nearshore mega–epifaunal benthic assemblages in a glacial fjord on King George Island: responses and implications. *Ecological Indicators*, 57, 280–292.
 25. Park, S., Ahn, I. Y., Sin, E., Shim, J., & Kim, T. (2020). Ocean freshening and acidification differentially influence mortality and behavior of the Antarctic amphipod *Gondogeneia antarctica*. *Marine environmental research*, 154, 104847.
 26. Park, S., Im, J., Lee, J., & Kim, T. W. (2021). Ocean freshening adversely affects the food detection ability of the gammarid amphipod *Haustorioides koreanus*. *Marine and Freshwater Research*, 72(7), 1045–1052.
 27. Ramajo, L., Marbà, N., Prado, L., Peron, S., Lardies, M. A., Rodriguez-Navarro, A. B., ... & Duarte, C. M. (2016). Biomineralization changes with food supply confer juvenile scallops (*Argopecten purpuratus*) resistance to ocean acidification. *Global Change Biology*, 22(6), 2025–2037.
 28. Rückamp, M., Braun, M., Suckro, S., & Blindow, N. (2011). Observed glacial changes on the King George Island ice cap, Antarctica, in the last decade. *Global and Planetary Change*, 79(1–2), 99–109.
 29. Saba, G. K., Schofield, O., Torres, J. J., Ombres, E. H., & Steinberg, D. K. (2012). Increased feeding and nutrient excretion of adult Antarctic krill, *Euphausia superba*, exposed to enhanced carbon dioxide (CO₂). *PLoS one*, 7(12), e52224.
 30. Schoenrock, K. M., Schram, J. B., Amsler, C. D., McClintock, J. B., & Angus, R. A. (2015). Climate change impacts on overstory *Desmarestia* spp. from the western Antarctic Peninsula. *Marine Biology*, 162, 377–389.
 31. Servetto, N., Ruiz, M. B., Martínez, M., Harms, L., de Aranzamendi, M. C., Alurralde, G., ... & Sahade, R. (2023). Molecular responses to ocean acidification in an Antarctic bivalve and an ascidian. *Science of The Total Environment*, 903, 166577.
 32. Shadwick, E. H., De Meo, O. A., Schroeter, S., Arroyo, M. C., Martinson, D. G., & Ducklow, H. (2021). Sea ice suppression of CO₂ outgassing in the West Antarctic Peninsula: Implications for the evolving Southern Ocean Carbon Sink. *Geophysical Research Letters*, 48(11), e2020GL091835.
 33. Sin, E., Ahn, I. Y., Park, S., & Kim, T. (2020). Effects of low pH and low salinity

- induced by meltwater inflow on the behavior and physical condition of the Antarctic limpet, *Nacella concinna*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(10), 822.
34. Tomikawa, K., Kyono, M., Kuribayashi, K., & Nakano, T. (2017). The enigmatic groundwater amphipod *Awacaris kawasawai* revisited: synonymisation of the genus *Sternomoera*, with molecular phylogenetic analyses of *Awacaris* and *Sternomoera* species (Crustacea: Amphipoda: Pontogeneiidae). *Invertebrate Systematics*, 31(2), 125–140.
 35. Vaughan, D. G., Marshall, G. J., Connolley, W. M., Parkinson, C., Mulvaney, R., Hodgson, D. A., ... & Turner, J. (2003). Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. *Climatic change*, 60, 243–274.
 36. Venables, H., Meredith, M. P., Hendry, K. R., Ten Hoopen, P., Peat, H., Chapman, A., ... & Clarke, A. (2023). Sustained year-round oceanographic measurements from Rothera Research Station, Antarctica, 1997–2017. *Scientific Data*, 10(1), 265.
 37. Yoo, K. C., Lee, M. K., Yoon, H. I., Lee, Y. I., & Kang, C. Y. (2015). Hydrography of Marian Cove, King George Island, West Antarctica: implications for ice-proximal sedimentation during summer. *Antarctic Science*, 27(2), 185–196.
 38. 김동우. "Changes in the structure and function of the nearshore benthic fauna communities in a rapidly deglaciating Antarctic fjord Marian Cove, King George Island, the West Antarctic Peninsula." 국내박사학위논문 서울대학교 대학원, 2022. 서울
 39. 배한나. "Community structures and responses of benthic diatoms and macrozoobenthos to the various harsh environments." 국내박사학위논문 서울대학교 대학원, 2021. 서울

[뒷면지]

주 의

1. 이 보고서는 해양수산부에서 시행한 남극활동 기반시설 공동활용사업 기후변화에 대한 남극 해양 저서동물의 보상기작 연구 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 해양수산부(해양수산과학기술진흥원)에서 시행한 남극활동 기반시설 공동활용사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.

