www.kopri.re.kr



남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측기술 개발 위한 기획연구

2024.12.

KOPRI 극지연구소

BSPE24510-093-12

남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발 위한 기획연구

(PE24510)

Study on Forecast of Antarctic Sea-Ice Trends

2024.12.31.

극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발 위한 기획연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2024. 12. 31.

연 구 책 임 자 : 황 유 나

참 여 연 구 원 : 진경, 이원상, 이춘기, 윤숙영, 최태진, 김주홍, 전상윤, 나지성, 이지연, 이현주, Clare Eyrs

보고서 초록

<table>
<tr><td>과제관리번호</td><td>PE00000</td><td>해당단계
연구기간</td><td>2024.03.01.
~2024.12.31</td><td>단계 구분</td><td>(1단계)/(총1단계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">정책·지원과제</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">정책·지원과제</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>중 과 제 명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부(단위)과제명</td><td colspan="4">남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발 위한 기획연구</td></tr>
<tr><td>연구책임자</td><td>황유나</td><td>해당단계
참여연구원수</td><td>총 : 12 명
내부 : 12 명
외부 : 0 명</td><td>해당단계
연구비</td><td>정부: 25,000 천원
기업: 천원
계: 25,000 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속부서명</td><td colspan="2">극지연구소 정책협력부</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="5">연구기관명 : 연구책임자 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약</td><td>보고서면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">○ 급격한 남극 해빙면적 축소는 기후변화의 가장 최신 영향으로, 국내외 영향 및 파급효과를 고려하여 구체적 대응 계획 수립이 필요. 특히 남극해의 급격한 온난화 상황에서 체계적인 과학활동 지원 위해 필요한 쇄빙선 항로와 장보고기지 비행기 이착륙 계획·확보, 그리고 「기후·기후변화 감시 및 예측 등에 관한 법률」('24.10.25 시행)의 남극 해빙 계절예측 생산·서비스 위해 남극 해빙 예측시스템 구축이 시급
○ 남극해 급격한 온난화에 따른 남극 해빙 융해 프로세스 규명 및 국제협력 기반 AI 적용 남극 해빙 장기예측시스템 개발과 계절예측 자료 생산함으로써 기후변화 대응 역량 강화로 인류 현안 이슈 해결에 기여하는 것이 본 연구 기획의 목표
○ 국제협력 기반 효율적 개발 전략으로 남극 해빙 예측기술 선도국과의 격차를 단기간에 해소하고 예측역량 증진 필요. 뿐만 아니라 국제 남극 해빙 계절 예측 프로그램(SIPN South) 공식 참여 및 국외 협력 기관들과 국제협력 네트워크 구축·운영으로 공신력 및 국제 리더쉽 획득
○ 남극 남극 해빙의 생성·성장·융해 특성 및 장보고 기지 부근 테라노바만의 급격한 융빙 프로세스 이해를 통해 남극 해빙 변화를 사전에 장기 예측하고 고해상도 계절예측 자료 생산으로 이어지기 위하여 남극 해빙 관측체계 구축, 남극 해빙 예측시스템 개발, AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산이 유기적으로 연계되어 수행되어야 함
○ 국제워크샵 개최를 통해 형성된 남극 해빙 예측 국제협력 네트워크를 유지하고, 장보고기지 테라노바만 해빙 관측 자료를 국제협력연구에 제공하고 다른 남극 지역 관측자료를 제공받는 국제 공동연구 협약에 따른 국가별 관측 의무이행을 실행하기 위해서는 '25년 신규사업으로 추진 필요</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">해빙, 남극해 온난화, 남극 해빙 예측시스템, 국제공동연구, AI기법 기반, 계절예측</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Sea ice, Southern ocean warming, Antarcitc sea ice prediction system, global collaborative research, AI-based technology, seasonal prediction</td></tr>
</table>

CONTENTS

기획연구 사업 체크리스트

요약문

제1장 사업개요 1

제1절 사업추진 배경 및 필요성 3
제2절 사업 추진 근거 및 경위 10
제3절 사업 기획 추진 체계 15

제2장 남극 해빙 예측분야 대내외 환경분석 21

제1절 국외 정책동향 23
제2절 국내 정책동향 28
제4절 요약 및 시사점 30

제3장 기술수준 분석 33

제1절 극지연구 기술수준 분석 35
제2절 특허 기술추세 분석 41
제3절 논문 분석 49
제4절 결과 및 시사점 50

제4장 사업 기본 방향 및 전략 51

제1절 사업 추진방향 53
제2절 사업의 차별성 55
제3절 사업 비전 및 목표 57

제5장 전략과제 및 핵심기술 도출 ····· 63

제1절 기술수요조사 ····· 65
제2절 전략과제 선정 ····· 68
제3절 총괄기술 로드맵 ····· 69
제4절 기대효과 ····· 101

제6장 전략과제별 세부 추진 계획 ····· 111

제1절 남극 해빙 관측체계 구축 ····· 113
제2절 남극 해빙 장기예측시스템 개발 ····· 146
제3절 AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산체계 ····· 176

제7장 소요예산 ····· 225

제1절 전체사업 소요예산 ····· 227

제8장 타당성 분석 및 기대효과 ····· 235

제1절 정책적 타당성 ····· 237
제2절 경제적 타당성 ····· 247

첨부 1. 전문가 자문 반영 현황 ····· 263
첨부 2. 참고자료 ····· 269
첨부 3. 과제제안요청서 ····· 323
첨부 4. 참고문헌 ····· 329

그림 목차

[그림 1] 연도별 6~10월 남극 해빙 면적 및 2023년 9월 연 최고 해빙면적 최소 기록 ····· 3
[그림 2] 성층권 오존 활동과 연관된 남극 해빙 변동성 연구 ····· 5
[그림 3] 남극 해빙 유실에 따른 영향 모식도 ····· 6
[그림 4] NSIDC 자료 기반 2023년 7월 남극 해빙 면적(좌) 및 2023년 8월까지 월별 해빙면적 ····· 7
[그림 5] IPCC 6차 종합보고서 지구시스템모델들의 남극 해빙 모의성능 관측과 비교 ····· 7
[그림 6] CMIP6 지구시스템 모델의 남극 해빙 재현 및 전망 결과 ····· 8
[그림 7] CMIP6 지구시스템 모델의 남극 해빙 재현 및 전망 결과 ····· 8
[그림 8] 브레멘대학교의 남극 해빙 원격탐사 모니터링 ····· 8
[그림 9] 2015년 12월 18일 남극 유빙에 좌초되어 아라온호에 의해 구조된 한국 원양어선 썬스타호 ····· 9
[그림 10] SIPN South 프로젝트의 해빙예측 결과 ····· 11
[그림 11] 해빙 예측모델 국제워크샵 포스터 ····· 16
[그림 12] 해빙 예측모델 국제워크샵 기사 ····· 16
[그림 13] 해빙 예측모델 국제워크샵 어젠다 ····· 17
[그림 14] 장보고 기지 부근 해빙 위 비행기 이착륙장 전경 ····· 18
[그림 15] 기지준공 이후 처음 발생한 '22년 장보고기지 앞 해빙 유실 ····· 19
[그림 16] 남극 해빙 관측기술 개발 및 현장관측 위한 국제협력연구 ····· 24
[그림 17] 프랑스에서 출간된 남극 고착빙에 대한 최신 연구결과 ····· 25
[그림 18] 캐나다 지구시스템-해빙모델 활용한 현업 남극 해빙 계절예측 시스템 ····· 25
[그림 19] 노르웨이 AI 활용한 해빙모델 개선 기술 개발 ····· 26
[그림 20] 이탈리아 AI 활용한 해빙 예측기술 개발 ····· 26
[그림 21] 황제펭귄 ····· 30
[그림 22] 남극반도 부근 해빙 감소 지역 ····· 30
[그림 23] 남극 해빙 면적이 펭귄 번식활동에 미치는 영향 ····· 30
[그림 24] 해빙의 얼음-반사도 효과 ····· 31
[그림 25] 해빙이 빙붕의 용융을 저지하는 메커니즘 ····· 31
[그림 26] 2021년 북극항로에서의 좌초사건 ····· 31
[그림 27] 남극 유빙수역에서 아라온호의 구조 활동 ····· 31
[그림 28] 글로벌 연구지형도에서 극지연구 영역 (KISTI, 2021) ····· 35
[그림 29] 극지영역 전체 문헌 연구지형도 ····· 36
[그림 30] 해빙 및 기후변화 예측 관련 키워드의 시계열 추이 ····· 36
[그림 31] 남극지역명 기반 연구지형도 ····· 37
[그림 32] 극지연구 유망연구영역 ····· 38
[그림 33] 키워드 클러스터 맵 ····· 39
[그림 34] 워드클라우드 결과 ····· 40
[그림 35] 연구범위 및 목표 ····· 58
[그림 36] 연구내용 ····· 58
[그림 37] 연구 내용에 따른 남극 해빙 예측 기술 분야 국제협력계획 ····· 84
[그림 38] 해빙 예측모델 국제워크샵 홍보자료 ····· 88
[그림 39] 언론 보도(위) 및 미국기상학회보 게재(아래) ····· 88
[그림 40] R&R과 연계, "부처 R&D"와 "기관고유사업" 구분 기준 ····· 98
[그림 41] LIONESS 국제협력연구 모식도 ····· 106
[그림 42] 미국국립빙설데이터센터에 발표한 남극해빙의 연도별 최소면적 ····· 115

[그림 43] PIPERS 해빙 생성과 진화 과제 관측 모식도 ····· 117
[그림 44] EM-Bird 장비의 해빙두께 관측 원리 ····· 117
[그림 45] 2001년부터 2022년까지 북극에서 수행된 EM-Bird 항공 해빙두께 탐사라인 ····· 118
[그림 46] 미국에서 개발하여 활용중인 대기-해양-해빙 종합 관측 UAV ····· 118
[그림 47] 난센빙붕 인근 Manuela 기상관측소의 바람 시계열 기록과 계류장비에서 관측된 염분변동 ····· 119
[그림 48] 아라온 ANA14B 항차에서 수행된 ASPeCt 관측 정점 ····· 120
[그림 49] 아라온 ANA12B 항차에서 수행한 씰태깅으로부터 획득된 해빙해역의 수온염분 ····· 120
[그림 50] 남극 해빙 관측체계 구축 모식도 ····· 124
[그림 51] 2023년 3월 9일 중앙일보 기사 발췌 ····· 130
[그림 52] 2023년 7월 17일 데일리포스트 기사 발췌 ····· 130
[그림 53] 해빙 생성 과정 단계별 예시 사진 ····· 134
[그림 54] MODIS 인공위성 자료로부터 산출된 2000년부터 2018년까지의 평균 정착빙 분포 ····· 140
[그림 55] 겨울철 정착빙-해양-대기 상호 작용에 대한 개념도 ····· 140
[그림 56] 고착빙산-정착빙-해빙-해양-대기 상호작용 규명을 위한 위성/현장 관측 개념도 ····· 142
[그림 57] CMIP6 멤버에서 채용한 해빙 모델의 비율 ····· 149
[그림 58] CMIP 모델들의 남극 해빙 면적 재현 성능 ····· 150
[그림 59] CMIP6 모델에서 재현한 1979-2014년 평균 남극 해빙 면적 ····· 150
[그림 60] 해빙모델 모수 최적화를 위한 실험 설계 ····· 151
[그림 61] 해빙 모델의 주요 파라미터에 대한 남극 해빙 면적 모의 민감도 ····· 152
[그림 62] 지구시스템 예측에 있어 계절-1년-10년규모 예측의 특성. ····· 165
[그림 63] 독일 AWI에서 운영중인 AWI-CM3 기반 해빙예측시스템의 운영 방식 ····· 167
[그림 64] ESMF NUOPC를 활용한 접합모델기반 예측시스템의 플로우차트 ····· 167
[그림 65] SubX 프로젝트에 참여한 모델들의 NAO 예측성 ····· 168
[그림 66] CHFP 에 참여한 모델과 활용수의 연도별 변화 ····· 169
[그림 67] DCPP 참여모델의 다중모델앙상블에 기반한 연도별 예측성의 평가와 초기화의 영향 ····· 169
[그림 68] 기상청 계절예측시스템 GloSea6의 구성요소 및 예측체계 특성 ····· 170
[그림 69] CS2 기반 SIT 산출물과 각종 현장관측자료 기반 SIT 관측값과의 비교 ····· 177
[그림 70] Decision trees 기반의 리드 탐지 방법을 활용하여 산출된 북극 해빙 두께 ····· 178
[그림 71] IS2와 CS2 freeboard 및 snow depth의 월별 composite 결과 ····· 179
[그림 72] FSD 그래프 및 FSD 기울기와 SIC 간의 상관성 그래프 ····· 180
[그림 73] AR, MLP, LSTM 기법을 사용하여 예측한 SIC 결과 지도 ····· 181
[그림 74] 딥러닝 기반 SIE 예측 결과와 SIPN 데이터셋과의 비교 ····· 181
[그림 75] 융합 모델의 연도별 12개월 평균 RMSE 지도 ····· 182
[그림 76] RMSE 기준 ANN과 LSTM의 계절별 예측 결과 비교 ····· 183
[그림 77] 2012년 9월에 대한 SIC와 SIC anomaly, CNN 모델의 결과와 오차 지도 ····· 184
[그림 78] 북극 해역별로 분리된 계절별 SIE 예측 가능성 평가 및 lead time에 따른 차이 ····· 185
[그림 79] SICNet의 MAE 차이에 대한 시공간 비교 분석 ····· 186
[그림 80] InSAR 기법을 활용한 테라노바 만 주변의 정착해빙의 2010년 12월부터 2012년 1월까지의 시간 변화 탐지 결과 ····· 187
[그림 81] Sentinel-2 이미지 상에서의 ICESat-2의 이동경로 및 photon height에 따른 융빙호 탐지 결과 ····· 188
[그림 82] 본 연구에서 제시하는 핵심 연구 방향성 ····· 189
[그림 83] 최신 해빙모델 및 AI기술 기반 계절예측 모델 개발 연구 목표 ····· 190
[그림 84] AI기술 기반 계절예측 기법 고도화 및 남극 해빙 특성 분석 알고리즘 개발 ····· 190
[그림 85] AI기술 기반 남극 해빙 계절 예측 모델 개발 및 고도화 연구 흐름도 ····· 193
[그림 86] 303 국내외 협력 방안 ····· 193
[그림 87] 최근 6년간 (2017-2023) SIPN South 참가 그룹 및 제출된 예측 자료의 수 ····· 216

[그림 88] 2023년의 2월의 Southen Ocean 지역의 SIPN South 모델간의 해빙 면적 예측 비교 ····· 218
[그림 89] 2023년 SIPN 남극 해빙 면적 예측의 예측 결과 및 참가 그룹 ····· 219
[그림 90] 2021년 SIPN 연구팀별 북극 해빙 면적 예측 결과. 빨간색 점선은 극지 연구소의 예측값 ····· 219
[그림 91] 본 과제에서 개발된 산출물 기반 SIPN 자료 생산 ····· 221
[그림 92] 동 사업의 경제적 효과 산출 구조 ····· 247
[그림 93] 북극해 선박사고현황 2011-2020 ····· 248
[그림 94] R&R과 연계, “부처 R&D”와 “기관고유사업” 구분 기준 ····· 278
[그림 95] 극지역 온난화가 초래하는 국가·사회 문제 해결 역할 內 FAST 과제 위치 ····· 279
[그림 96] 남극 해빙 변화가 원격상관을 통해 중국 8월 강수에 영향을 미침 ····· 288
[그림 97] 남극 해빙 면적이 동아시아 및 북미 기후에 큰 영향을 미침 ····· 288
[그림 98] 남극 해빙 경향성의 최근 변화 원인 분석 ····· 288
[그림 99] 남극이 녹아 우리나라 온난화를 야기하는 원격상관 연구 ····· 288
[그림 100] SIPN South 웹사이트 ····· 289
[그림 101] 2022-23년 계절예측 상호비교 결과 ····· 289
[그림 102] 해빙 예측모델 국제워크샵 결과 미국기상학회보紙 게재 ····· 290
[그림 103] 해빙 예측모델 국제워크샵 홍보자료 ····· 290
[그림 104] IPCC 6차보고서에 수록된 남극 해빙 현황 및 미래전망 ····· 290
[그림 105] 딥러닝 적용한 엘니뇨 장기예측 ····· 292
[그림 106] 딥러닝을 적용한 계절내진동 예측 개선 ····· 292
[그림 107] 딥러닝 적용한 엘니뇨 예측성 연구 ····· 292
[그림 108] 딥러닝 적용한 서태평양 강수 예측 ····· 292
[그림 109] 딥러닝 기반 예측자료 공간해상도 다운스케일링 기술 개발 ····· 292
[그림 110] 수치모델과 위성자료 통합 산불 딥러닝 모델 개발 ····· 292
[그림 111] 국제협력 기반 현장관측으로부터 계절예측 자료 생산까지 흐름도 ····· 298
[그림 112] 연구내용 및 시기별 국제협력 연구 ····· 298
[그림 113] 해빙 예측모델 국제워크샵 홍보자료 ····· 306
[그림 114] 언론 보도(위) 및 미국기상학회보 게재(아래) ····· 306
[그림 115] SIPN South 사이트 ····· 311
[그림 116] SIPN South에서 게재된 자료 예시 ····· 311
[그림 117] 남극 해빙 월평균 면적 ····· 312
[그림 118] 남극 해빙 연평균 면적 변화 ····· 312
[그림 119] 장보고 기지 부근 해빙 위 비행기 이착륙장 전경 ····· 313
[그림 120] 기지준공 이후 처음 발생한 ‘22년 장보고기지 앞 해빙 유실 ····· 313
[그림 121] 황제펭귄 ····· 314
[그림 122] 남극반도 부근 해빙 감소 지역 ····· 314
[그림 123] 남극 해빙 면적이 펭귄 번식활동에 미치는 영향 ····· 314
[그림 124] 해빙의 얼음-반사도 효과 ····· 315
[그림 125] 해빙이 빙붕의 용융을 저지하는 메커니즘 ····· 315
[그림 126] 2021년 북극항로에서의 좌초사건 ····· 315
[그림 127] 남극 유빙수역에서 아라온호의 구조 활동 ····· 315

표 목차

[표 1] 국가별 남극 해빙 및 북극 해빙 관련 주요 정책 비교 ····· 27
[표 2] 기술수요조사 제안기술목록 ····· 65
[표 3] 우선순위 검토항목 및 가중치 ····· 66
[표 4] 분과별 반영 현황 ····· 67
[표 5] 극지연구소 R&R 주요역할 ····· 97
[표 6] 공모형 국가 R&D 및 기관고유사업 비교 ····· 97
[표 7] 연구문제 해결 로드맵 ····· 125
[표 8] 연구문제 해결 로드맵 ····· 125
[표 9] 연구문제 해결 로드맵 ····· 125
[표 10] 연구문제 해결 로드맵 ····· 125
[표 11] 기술 로드맵 ····· 126
[표 12] 현장탐사계획 ····· 126
[표 13] 인력 ····· 127
[표 14] 자원내용×연도별 시간 절감기간 평균 ····· 127
[표 15] 연구문제 해결 로드맵 ····· 135
[표 16] 연구문제 해결 로드맵 ····· 135
[표 17] 기술 로드맵 ····· 135
[표 18] 현장탐사계획 ····· 136
[표 19] 인력 ····· 137
[표 20] 자원내용×연도별 시간 절감기간 평균 ····· 137
[표 21] 연구문제 해결 로드맵 ····· 143
[표 22] 연구문제 해결 로드맵 ····· 143
[표 23] 기술 로드맵 ····· 143
[표 24] 현장탐사계획 ····· 144
[표 25] 인력 ····· 144
[표 26] 자원내용×연도별 시간 절감기간 평균 ····· 145
[표 27] 연구문제 해결 로드맵 ····· 155
[표 28] 인력 ····· 156
[표 29] 자원내용×연도별 시간 절감기간 평균 ····· 156
[표 30] 연구문제 해결 로드맵 ····· 161
[표 31] 기술 로드맵 ····· 161
[표 32] 인력 ····· 162
[표 33] 자원내용×연도별 시간 절감기간 평균 ····· 162
[표 34] 연구문제 해결 로드맵 ····· 173
[표 35] 기술 로드맵 ····· 173
[표 36] 인력 ····· 174
[표 37] 자원내용×연도별 시간 절감기간 평균 ····· 174
[표 38] 연구문제 해결 로드맵 ····· 192
[표 39] 기술 로드맵 ····· 192
[표 40] 인력 ····· 194
[표 41] 자원내용×연도별 시간 절감기간 평균 ····· 194
[표 42] 연구문제 해결 로드맵 ····· 198

[표 43] 연구문제 해결 로드맵 ····· 198
[표 44] 기술 로드맵 ····· 199
[표 45] 인력 ····· 200
[표 46] 지원내용×연도별 시간 절감기간 평균 ····· 200
[표 47] 연구문제 해결 로드맵 ····· 207
[표 48] 연구문제 해결 로드맵 ····· 207
[표 49] 연구문제 해결 로드맵 ····· 207
[표 50] 기술 로드맵 ····· 208
[표 51] 현장탐사계획 ····· 208
[표 52] 인력 ····· 209
[표 53] 지원내용×연도별 시간 절감기간 평균 ····· 209
[표 54] 연구문제 해결 로드맵 ····· 213
[표 55] 기술 로드맵 ····· 214
[표 56] 인력 ····· 215
[표 57] 지원내용×연도별 시간 절감기간 평균 ····· 215
[표 58] 연구문제 해결 로드맵 ····· 222
[표 59] 기술 로드맵 ····· 222
[표 60] 인력 ····· 223
[표 61] 지원내용×연도별 시간 절감기간 평균 ····· 223
[표 62] 남극해 입어 승인 척 수 ····· 250
[표 63] 국내 선박사고 건 수 ····· 251
[표 64] 국내 원양어선 통계 ····· 251
[표 65] 수확량 확대에 따른 부가가치 증가 효과 ····· 255
[표 66] 어선 조업용 에너지 저감 효과 추정결과 ····· 257
[표 67] 원양어선 척당 어로원가 현황 ····· 258
[표 68] 어선 조업용 에너지 저감 효과 추정결과 ····· 258
[표 69] 연구자 시간비용 저감 효과 추정결과 ····· 260
[표 70] 남극기지 연간 상주인원 ····· 261
[표 71] 극지연구소 R&R 주요역할 ····· 277
[표 72] 공모형 국가 R&D 및 기관고유사업 비교 ····· 277

기획연구 사업 체크리스트

항목	질 문	답	답변근거 및 자료
1	사업목적이 명확하며 추진근거가 있는가?	예	ㅇ「해양수산과학기술육성법」제8조, 제2차 해양수산과학기술육성 기본계획, 제1차 극지활동 진흥 기본계획, 제4차 남극연구활동진흥기본계획 등 ㅇ 극지역 중심의 기후변화 현안대응형 연구사업 개발에 투자 강화하고자 하는 해양수산부 R&D 중점 투자방향에 부합
2	중앙정부가 해야 하는 일인가?	예	ㅇ 「기후·기후변화 감시 및 예측 등에 관한 법률」('24.10.25 시행) 기반 해양수산부 주도 남극 해빙 계절예측 생산 및 대국민 서비스 위해 필수적 ㅇ 남극 해빙 예측은 극지연구거점 확보에 필수적인 정부 지원의 시급성이 인정되는 **해양수산 전략기술** ㅇ 극지 개척을 통한 국가 과학영토 확대 위한 극지 등 미개척 영역에 대한 탐사기술 개발과 접근성 증대 및 활용에 부합하며, **12대 국가전략기술에 포함되는 우주항공·해양 기술**인 동시에 인공지능(AI) 활용 기술로 중앙정부의 지원 필요
3	재정지출이 효율적인가?	예	ㅇ 기후변화 현안대응형 연구사업으로 재정지원 필요 ㅇ 국제협력 기반 지역빙하 현장탐사 투자로 (i) 관측기술 개발 시간 단축, (ii) 해빙 관측 전문인력 양성, (iii) 남극 다른 지역 자료 확보 등 효율적 관측자료 습득·활용이 가능하므로 재정지출이 효율적이라고 판단 ㅇ 극심한 해운경기 침체로 민간 부문이 동 사업을 자발적으로 추진할 수 있는 여력이 없으며 신시장 진출을 위한 위험도 감소가 필요
4	다른 사업과 중복 또는 유사하게 사업이 설계되지 않았는가?	예	ㅇ (기존과제) 기후변화에 따른 **남극 빙상**의 급격한 융해 원인 규명 및 전 지구 **해수면 상승** 기여도 예측기술 개발 ㅇ (신규과제) 첨단 현장 관측기술 및 AI 적용 모델기술 기반 **남극 해빙** 예측시스템 개발

항목	질 문	답	답변근거 및 자료
5	사업의 타당성을 객관적으로 검증하는 절차를 거쳤는가?	**예**	ㅇ 총 사업비 360억원으로 예비타당성조사 해당사항 없음 ㅇ 기획연구를 통한 연구사업 도출로 사전계획 평가 수행 및 정책적 타당성, 사회적 형평성 등을 종합 검토하는 절차를 거침
6	현재의 사업방식이 가장 효율적인가?	**예**	ㅇ 남극 현장탐사 및 국제공동 네트워크 주도·참여 등 사업의 핵심 내용이 극지연구소의 인프라 활용에 의존하고 있어 사업 구조상 직접 사업 수행이 효율적
7	현재 추진해야 할 시급성이 있는가?	**예**	ㅇ 급격한 남극 해빙면적 축소는 ①지구 반사도 감소로 이어져 온난화를 가속화시키며, ②생태계 파괴로 이어지고, ③남극 과학활동 안정성을 저해하고, ④유빙에 의한 선박 좌초 및 고파고에 의한 연안 인프라 훼손 등 재난 야기**극 해빙 계절예측 생산 및 대국민 서비스** 위해 필수적 ㅇ 국외에서는 이미 12개국 22개 기관에서 남극 해빙 계절예측이 수행되고 있으며 첨단 AI 기반 예측시스템 개발 또한 활발해 해빙 예측 선진 기관들로부터의 기술 전수·확보 최적기이며, 확보된 국제협력 의향서를 기반으로 **상호협력 약속의무** 이행이 필요 ㅇ 국내 최초로 전 세계 기상·기후 관측·예측을 총괄하는 세계기상기구(WMO)/세계날씨연구프로그램(WWRP)의 공식 지원 프로젝트 지위 획득
8	사업여건은 성숙되어 있는가?	**예**	ㅇ 해양수산기후변화대응R&D로드맵('21) 수립 등 해수부 주도 적극적인 해양 기후변화 대응이 가시화되고 있는 상황에서 제정된 극지활동진흥법('21)에 의거한 제1차 극지활동 진흥 기본계획('22)에서 강조하는 남·북극 미지의 영역 탐사 확대 및 국제공동연구 기반으로 기후문제 해결 주도에 부합하는 사업 ㅇ 제2차 해양수산과학기술육성 기본계획('23)의 10대 해양수산 전략기술 중 극지연구거점 확보에 필수적인 극지예측 기술로 투자가 필수불가결한 상황

항목	질 문	답	답변근거 및 자료
9	투입비용 대비 효과성은 높은가?	**예**	○ '22년 11월 장보고기지 앞 해빙 조기 소실로 인한 해빙하역 불가로 2년 이상의 사업계획 연장 및 50억 이상의 추가 재원 투입 등의 피해가 발생하였으며, 남극해 급격한 온난화가 지속된다면 유사한 추가 피해가 속출할 것 ○ 신규사업 예산 투입으로 위와 같은 재난 대응 비용의 절감 기대
10	재원조달계획이 구체적으로 마련되어 있는가?	**예**	○ 국가재정운용계획에 미반영되어 있으나, ○ 신규사업 소요재원이 연차별 부처의 지출한도 내에 있음
11	집행계획이 세부적으로 마련되어 있는가?	**예**	○ 전문가로 구성된 기획연구를 통한 구체적인 실행계획을 마련하였으며, ○ 기획연구를 통한 로드맵을 확보 하였음 ○ 또한 환경분석 및 경제성분석을 수행·분석하여 사업계획을 세부적으로 마련하였음
12	집행가능성이 높은가?	**예**	○ 국정과제 41 및 99와 연계되어 집행 가능성을 확보함 ○ 예산 설계서를 통한 예산 규모 산정으로 이월·불용 발생 가능성이 낮음
13	민간투자사업 방식으로 추진하는 것이 적합한가?	**아니오**	○ 사업의 핵심 내용이 극지연구소의 인프라 활용에 의존하고 있어 사업 구조상 직접 사업 수행이 효율
14	국고보조사업의 경우 부정수급 방지대책이 구체적으로 마련되어 있는가?	**적용 불가**	○ 국고보조사업이 아니므로 해당사항 없음

[요 약]

본 기획 연구의 목적은 「남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발사업」을 위한 추진체계를 제안하고 최종 목적 달성을 위한 중점 추진 연구를 발굴하기 위함이다.

급격한 남극 해빙면적 축소는 2022년 말부터 글로벌 이슈로 떠오른 기후변화의 가장 최신 영향으로, 이전까지 남극 해빙은 지구 온난화에 민감하게 반응하지 않는 것으로 알려져 왔으며 2021년 출간된 IPCC 6차 보고서에서도 온난화가 심화되는 미래에도 남극 해빙의 증감은 불확실하다고 전망되었다. 예기치 못한 기후 위기에 대응하고자 ‘23년 6월 핀란드 헬싱키에서 개최된 남극조약협의당사국회의(ATCM)에서는 남극 해빙 프로세스에 대한 집단적 지식 함양 위한 국제공동연구 설계 등 남극해 온난화와 해빙 유실에 대응하기 위한 긴급 연구 필요성을 강조하는 성명이 발표되었다. 그러나 남극의 제한된 접근성과 극한 환경으로 인한 관측자료 부족이 남극 해빙에 대한 지식 미비 및 예측모델 성능 저하로 이어져 왔으며, 현재 지구시스템 모델들의 남극 해빙 미래전망 신뢰도는 매우 낮다고 평가되고 있다. 따라서 해빙 소실현황 분석 및 원인 파악을 위한 현장 탐사 및 극지 인프라 투입을 통하여 해빙 변화의 다양한 시공간적 변동성에 대한 이해가 우선되어야 하며, 급격한 해빙 유실의 원인과 전 세계 기후에 미치는 잠재적 영향에 대한 연구 또한 필요하다.

이에 국제협력 기반 현장 관측을 통해 남극해 급격한 온난화에 따른 남극 해빙 융해 프로세스를 규명하고, 획득한 자료를 활용하여 AI 적용 모델기술 기반 남극 해빙 장기예측시스템 개발 및 계절예측 자료 생산하고자 한다. 이를 통해 남극 해빙 융해 프로세스 규명하고 AI 기반 남극 해빙 계절예측 생산역량을 제고하고 해빙모델 예측 정확도 향상시키는 데에 기여하는 연구를 중점과제로 선정하였다. 이에 앞서 면밀한 정책적 분석과 경제성 분석을 통해 연구개발의 당위성을 제시하였으며, 최종연구목표 달성을 위한 가설을 설정하고 이를 검증하기 위한 과학적 질문을 도출하였다. 또한 중점과제의 성공적인 수행을 위하여 국내 및 국제협력 연구 방안을 제시하였다.

국내 남극 해빙 관측 및 예측 관련 분야에의 투자 및 인력양성은 미비한 반면 국외에서는 관측기기 개발, 현장탐사, 해빙 모델 개발 및 지구시스템 모델과 결합하여 계절예측 자료 생산 등에 장기적인 투자가 이루어져 왔기 때문에, 선도국과의 격차를 단기간에 해소하기 위해 효율적 남극 해빙 예측 기술 개발 전략 필요하다. 국내 취약한 남극 해빙 탐사기술에 관해서는 국제협력을 통한 보완 및 핵심기술 전문인력 양성을 진행하여 선도 그룹에 도달하는 장기적 전략이 필요하다. 국외에서는 이미 12개국 22개

기관에서 남극 해빙 계절예측이 수행되고 있으며 첨단 AI 기반 예측시스템 개발 또한 활발해 해빙 예측 선진 기관들로부터의 기술 전수·확보 최적기라고 할 수 있다.

본 연구의 효율적이며 성공적 수행을 위해 연구기획위원회 및 국내외 자문위원회를 운영하였다. 연구기획위원회에는 남극 해빙 관측체계 구축, 남극 해빙 장기예측시스템 개발, AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산체계 과학 분과를 구성하여 전문가 의견을 수렴하였다. 각 분과별로 전문가 회의 및 워크샵을 통해 가설 제시와 세부 과학적 질문을 도출하였으며, 과학적 질문을 해결하기 위한 연구·현장탐사 계획 및 추진 로드맵을 제시하였다. 또한 예산, 실현 가능성, 기술수준, 최종목표와의 연관성, 국제공동연구 가능성 등의 요인을 종합적으로 고려하여 연구 우선순위를 도출하였고, 총괄 로드맵 작성을 위한 자료로 활용하였다. 이를 기반으로 전 세계 기상·기후 관측·예측을 총괄하는 세계기상기구(WMO)/세계날씨연구프로그램(WWRP)의 공식 지원 프로젝트 지위를 획득하고, 벨기에(SIPN South 국제협력 리더쉽), 캐나다, 프랑스, 이탈리아, EU, 중국, 호주, 미국 등 8개국 12개 기관으로부터 협력의향서를 접수하여 해빙 예측·관측분야 선진 기관들로부터 효율적인 기술 전수 및 확보가 가능한 연구 사업의 국제협력 기틀을 마련하였다.

기획 연구가 실행될 경우 남극 연구의 글로벌R&D플래그쉽 연구 사업으로 우리나라 주도 남극 해빙 예측모델링 국제협력 네트워크 구축·운영하고 다양한 국제 공동연구를 수행하며, 이를 기반으로 선도국 수준 남극 해빙 관측망을 구축·운영하며 남극 해빙 관측자료를 확보하고, 첨단 남극 해빙 예측시스템 개발로 남극 해빙 예측역량 및 성능을 함양하고, 남극 해빙 계절예측 1~3개월 전망 정보를 생산하고 서비스할 수 있을 것이다. 이러한 예측 정보는 남극해 운항 선박 최적 항로 계획 수립 및 어선의 안전한 조업과 어장 예측에 도움을 주고, 남극 해빙 유실에 기인한 해양 및 연안 재난 시나리오 제공으로 해양 재난안전 관리체계 구축에 일조하며, 쇄빙선 항로 및 기지 비행기 이착륙 중장기 계획 수립으로 체계적인 남극 과학활동 지원 및 확대에도 이바지할 것이다. 뿐만 아니라 SIPN South에 우수한 남극 해빙 예측자료를 제공하고 남극해 쇄빙선 운항 국가 및 외국 과학기지에 유용한 예측자료를 전파함으로써 실질적인 극지연구 선도국 지위를 획득할 수 있을 것으로 기대한다.

[Summary]

This strategic plan proposes a framework for implementing the "Project Forecast of Antarctic Sea Ice Trend (FAST)" and to identify priority research areas for achieving the final goal.

The rapid reduction of Antarctic sea ice area has emerged as the most recent impact of climate change since late 2022, previously thought to be less responsive to global warming. Even in the face of worsening warming, the increase or decrease of Antarctic sea ice remains uncertain, as indicated in the IPCC Sixth Assessment Report published in 2021. Recognizing the urgent need to address unforeseen climate crises, a statement emphasizing the necessity for urgent research on Antarctic warming and sea ice loss was issued at the Antarctic Treaty Consultative Meeting (ATCM) held in Helsinki, Finland in June 2023. However, due to limited access to Antarctica and the scarcity of observational data caused by its extreme environment, there has been insufficient knowledge and a decline in predictive model performance regarding Antarctic sea ice. Currently, the reliability of Antarctic sea ice projections by Earth system models is evaluated as very low. Therefore, it is imperative to first understand the diverse spatiotemporal variations in sea ice change through on-site investigations and the deployment of polar infrastructure to analyze the status of sea ice loss and identify its causes. Additionally, research on the causes of rapid sea ice loss and its potential impacts on global climate is also necessary.

To achieve this, it is proposed to elucidate the rapid Antarctic sea ice melting process through international cooperation-based field observations and to develop an Antarctic sea ice long-term prediction system based on AI technology, utilizing the acquired data to produce seasonal prediction information. The research focuses on enhancing the understanding of the Antarctic sea ice melting process and improving the capability of AI-based Antarctic sea ice seasonal prediction, thereby contributing to the enhancement of sea ice model prediction accuracy. Prior to this, the justification for research and development was presented through detailed policy and economic analyses, hypotheses were established for achieving the final research goal, and scientific questions for verification were derived. In addition, research proposals for domestic and international cooperation were presented to ensure the successful implementation of the key tasks.

While investments and human resource development in the field of Antarctic sea ice observation and prediction in South Korea are insufficient, long-term investments have been made in overseas countries, including the development of observation instruments, field surveys, sea ice model development, and the production of seasonal prediction data, in combination with Earth system models. Therefore, an efficient strategy for developing Antarctic sea ice prediction technology is necessary to bridge the gap with leading countries in a short period. Regarding the vulnerability of domestic Antarctic sea ice exploration technology, a long-term strategy is needed to complement it through international cooperation and to cultivate core technical experts to reach the leading group. Currently, seasonal predictions of Antarctic sea ice are being conducted by 12 countries and 22 institutions worldwide, with active development of advanced AI-based prediction systems, which can be considered as the optimal period for technology transfer and acquisition from advanced institutions in sea ice prediction and observation fields.

To ensure efficient implementation, a research planning committee and domestic/international advisory committees were formed. Scientific subgroups under the research planning committee were tasked with constructing an Antarctic sea ice observation system, developing a long-term prediction system, and creating AI-based seasonal prediction data. They conducted expert meetings, workshops, and field investigations to derive hypotheses and research plans. Factors like budget, feasibility, and international cooperation were considered to set research priorities. Official support from the World Meteorological Organization and cooperation from 8 countries and 12 institutions were secured, facilitating technology transfer and acquisition for advanced research in sea ice prediction and observation.

Executing the planning research will establish an international cooperation network for Antarctic sea ice prediction, led by South Korea. This initiative will foster various joint research projects and enable the creation of a country-level observation network, ensuring robust data collection. Advanced prediction systems will enhance forecasting capabilities, aiding in planning optimal shipping routes and safeguarding fishing vessels. Moreover, it will support the expansion of Antarctic scientific activities and bolster South Korea's position as a leader in polar research.

제1장 사업개요

제1절 사업추진 배경 및 필요성
제2절 사업추진 근거 및 경위
제3절 사업 기획 추진 체계

제1절 사업추진 배경 및 필요성

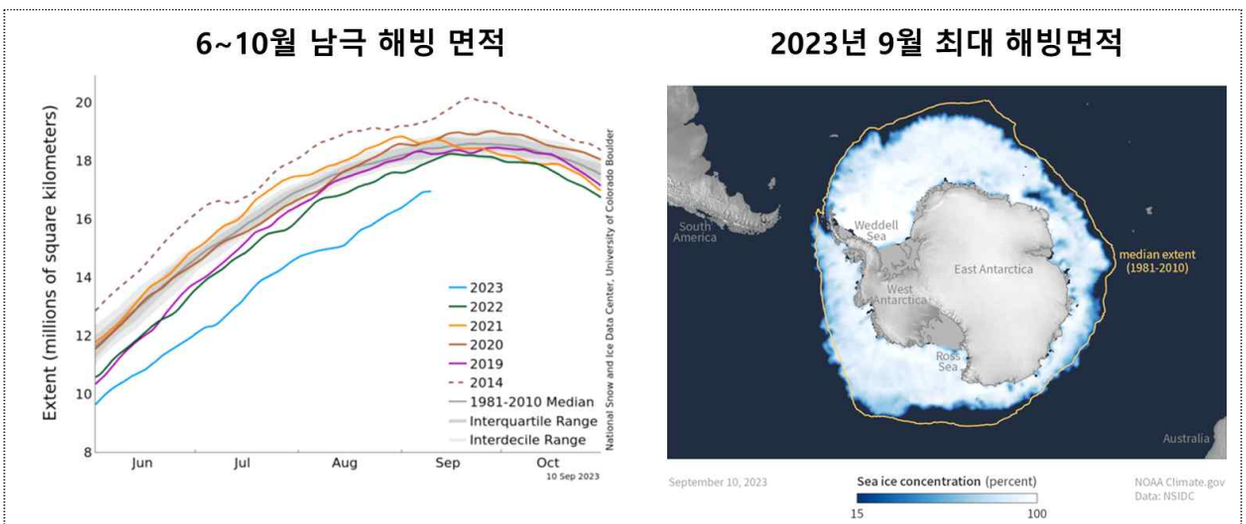
1. 연구개발의 경제·사회·기술적 필요성

가 배 경

□ 2023년 7월은 174년 인류의 관측 역사상 가장 더운 달로 기록되어 기록적 폭염, 산불, 집중호우 등 전 세계에서 다양한 극한 기상재해가 발행하였으며, 특히 이전까지 지구 온난화에 뚜렷한 경향성을 보이지 않았던 남극 해빙(바다 얼음·海氷) 면적이 전례없이 축소하여 경종을 울리고 있음

○ 지구 온난화로 인한 북극 해빙 감소추세는 오랜 기간동안 매우 뚜렷한 반면, 남극 해빙은 내부 변동성의 진폭이 크고 장기 감소 추세가 나타나지 않아 남극 해빙 예측에 대한 시급성이 적다고 평가되어 옴

○ 그러나 남극 해빙은 2016년 이후 분명한 감소 추세로 전환되어 올해 45년 관측 역사상 최저를 기록 7월 해빙 면적이 평균보다 아르헨티나 국토 크기만큼 축소하고, 남반구 겨울인 9월 연 최고 해빙 면적이 역대 최소 기록



[그림 1] 연도별 6~10월 남극 해빙 면적 및 2023년 9월 연 최고 해빙면적 최소 기록 (출처: 미국 국립 빙설자료센터)

○ 남극 해빙 면적의 변화는 남극 탐사선 및 어선의 항로에 큰 영향을 줄 수 있으며, 극지연구소 또한 예년보다 이른 장보고 기지 주변 해빙두께 감소로 비행기를 활용한 입남극이 축소되어 연구 활동에 커다란 차질을 빚고 있음

○ 남빙양의 기록적인 해빙 면적 감소가 야기할 수 있는 다양한 형태의 잠재적 재난(유빙에 의한 선박 좌초, 고파고에 의한 연안 기반인프라 훼손 등) 대응을 위해 정확한 예측 도구 개발 필요성이 증대

- 최근 남극 해빙 유실 속도가 빨라지면서 서식지가 축소된 황제펭귄이 적응하지 못하고 번식 활동에 심각한 방해를 받아 가 되어 금세기말 준멸종 직면할 것이라는 최신 연구결과 (Fretwell et al., 2023)가 발표되었으며, 예년보다 이른 장보고 기지 주변 해빙두께 감소로 비행기를 활용한 입남극이 축소되어 연구 활동에 커다란 차질을 빚고 있음

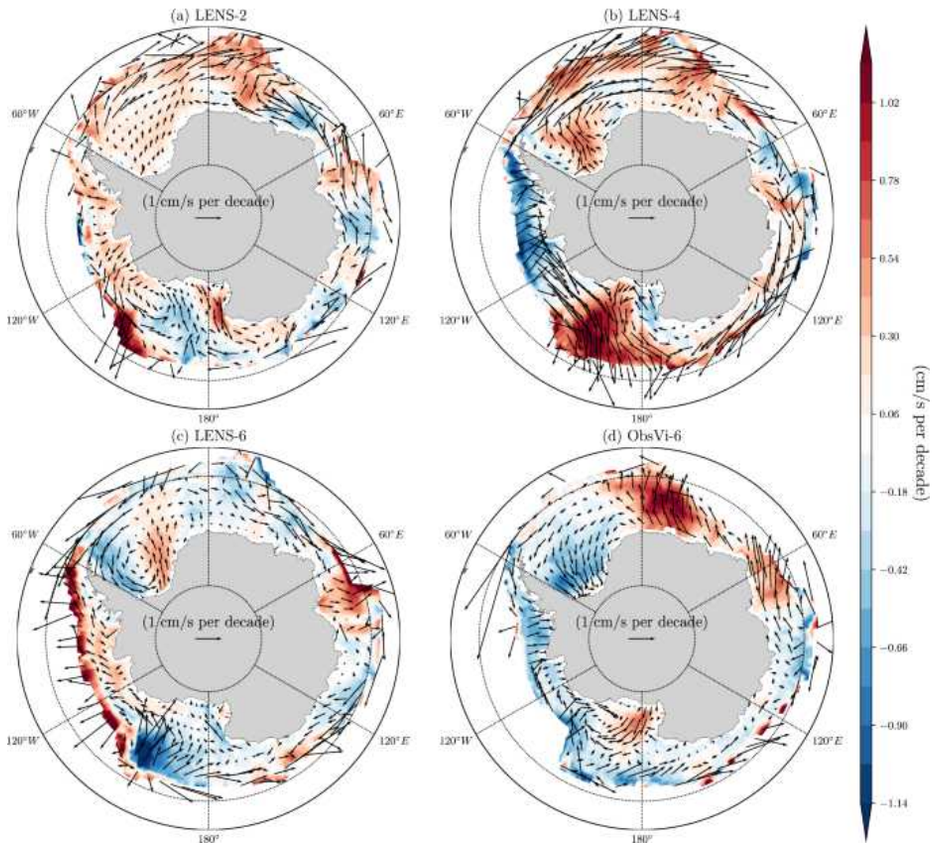
- 지구 온난화 심화로 인한 남극해의 급격한 온난화 상황에서 남극 과학할동 지원 및 확대를 위해 쇄빙선 항로와 장보고기지 주변 비행기 이착륙 시기 계획 및 확보를 위해 초단기 및 중장기 남극 해빙 예측시스템 필요성 증대

나 과학적 측면

- 지구 온난화로 인한 북극 해빙 감소추세는 오랜 기간동안 매우 뚜렷한 반면, 남극 해빙은 내부 변동성의 진폭이 크고 장기 감소 추세가 나타나지 않아 남극 해빙 관측 및 예측에 대한 시급성이 적다고 평가되어 왔음. 그러나 2016년 이후 분명한 감소 추세로 전환되어 올해에는 45년 관측 역사상 최저를 기록하여 7월 해빙 면적이 평균보다 아르헨티나 국토 크기만큼 줄어들었음

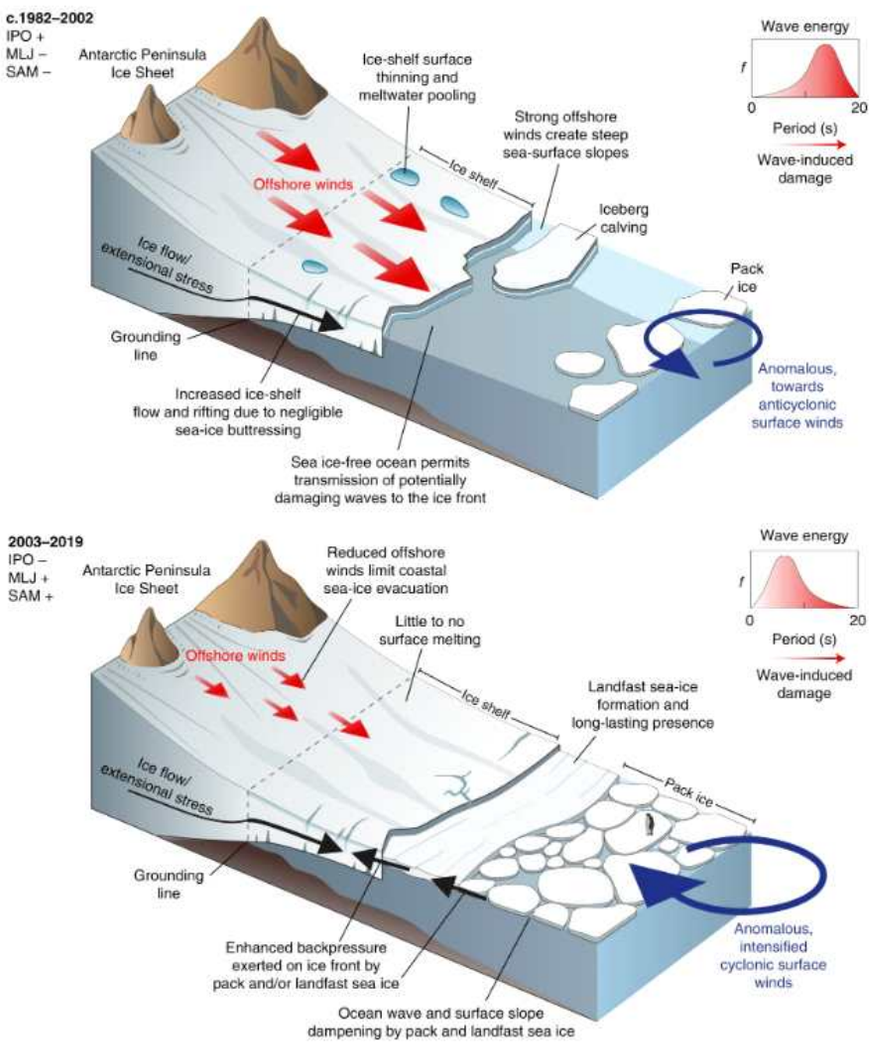
- 지구 온난화 심화로 인한 남극해의 급격한 온난화 상황에서 남극 과학할동 지원 및 확대를 위해 쇄빙선 항로와 기지 주변 비행기 이착륙 계획 수립을 위해 중장기 남극 해빙 예측시스템 필요성 증대하고 있으며, 단기간 집중관측 효율성 제고를 위해서는 남극 해빙 초단기 예측 또한 중요

- 대부분 육지로 둘러싸인 해양 분지인 북극과 달리 남극은 바다로 둘러싸인 대륙이며, 이러한 서로 다른 지형이 해빙 특성에 영향을 미치고 있어 남극 해빙의 특성에 대한 이해가 필요. 제한된 접근성 및 극한 환경에 기인한 현장 관측자료의 부족은 남극 해빙 특성에 대한 이해 부족과 예측모델 성능 저하로 이어져 왔음



[그림 2] 성층권 오존 활동과 연관된 남극 해빙 변동성 연구 (Sun et al. 2021)

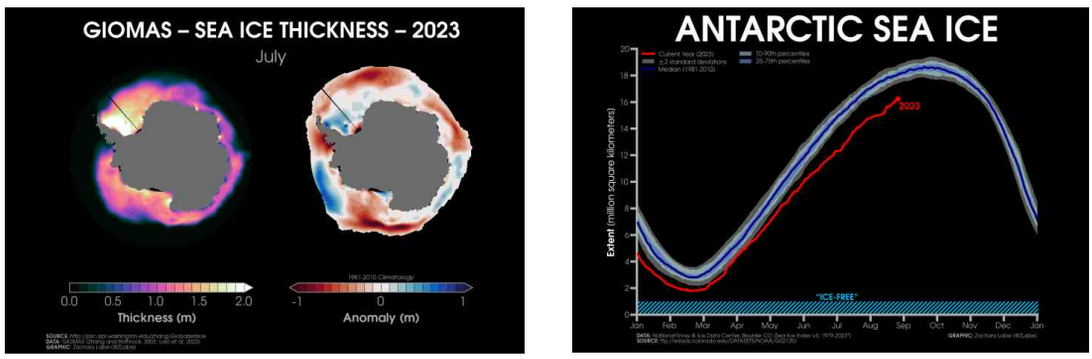
- 남극 해빙에 영향을 미치는 대기 및 해양 환경, 성층권 오존, 원격상관 등 다양한 예측성의 소스에 대한 이해가 필요
- 기후 예측은 관측 자료 획득, 관측자료 전처리 및 초기조건 자료동화, 물리 기반 수치 모델 개발 및 예측 수행으로 이루어 지는 전통적인 방식에서, 최근 AI 기반 예측, 모델에 AI 기법 부분적 적용, 양자컴퓨팅 활용 가능성 타진 등 새로운 기술 도입과 적용이 매우 활발하게 이루어지고 있는 분야임



[그림 3] 남극 해빙 유실에 따른 영향 모식도 (Christie et al. 2022)

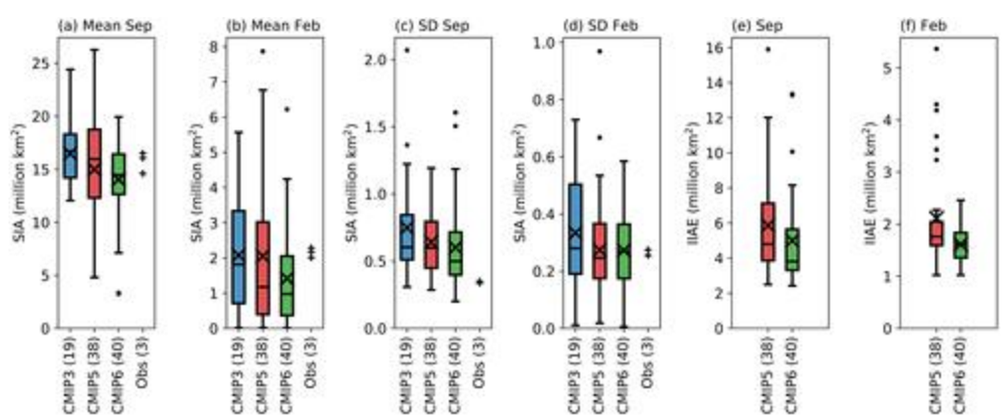
다 기술적 측면

- 현재까지 인공위성 원격탐사를 통하여 남극 해빙 모니터링이 활발히 수행되고 있으며, 이를 통해 남극 해빙 유실 현황 및 양상이 분석됨. 하지만 현장 관측 부족 및 기술적 한계로 인하여 남극 해빙 증감의 경년 변동 특성 및 이를 야기하는 메커니즘에 대한 이해는 부족한 실정임

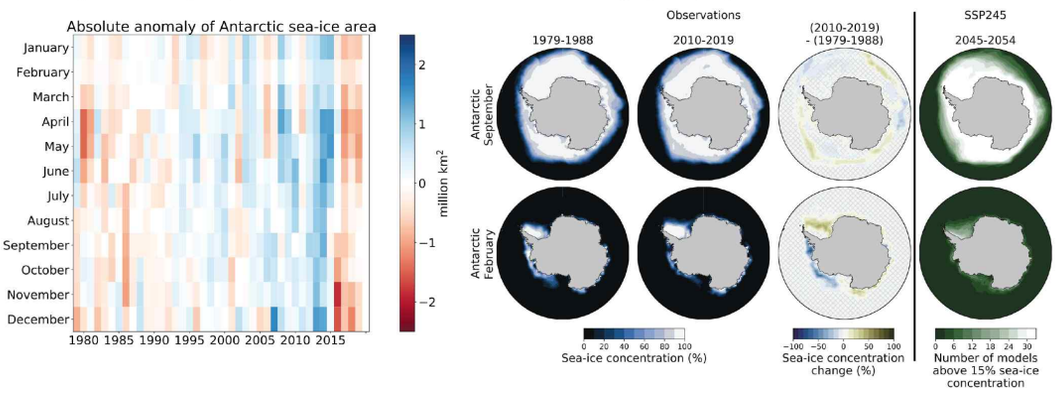


[그림 4] NSIDC 자료 기반 2023년 7월 남극 해빙 면적(좌) 및 2023년 8월까지 월별 해빙면적(우), 그림 출처: https://zacklabe.com

남극 해빙의 현장 관측자료 부족은 남극 해빙의 특성 및 생성·변화·소멸 메커니즘 이해 부족으로 이어져 수치모델 기반의 예측 시스템 정확도 향상을 저해하는 요소로 작용하고 있음. IPCC 6차 평가보고서에서도 지구시스템 모델들이 관측된 해빙 계절 순환의 일부 요소를 성공적으로 포착했지만 여름철 최소 해빙 면적을 과소평가하고 있으며, 모델은 모든 시나리오에서 21세기의 해빙 손실을 전망하지만 온난화를 과대모의하여 결과적으로 전망의 신뢰도가 낮은 것으로 평가함

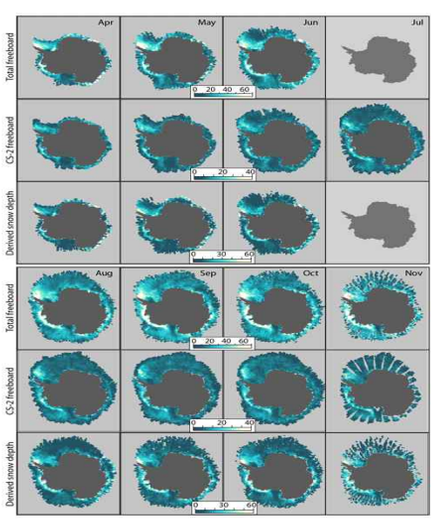


[그림 5] IPCC 6차 종합보고서 지구시스템모델들의 남극 해빙 모의성능 관측과 비교(Roach et al. 2020)

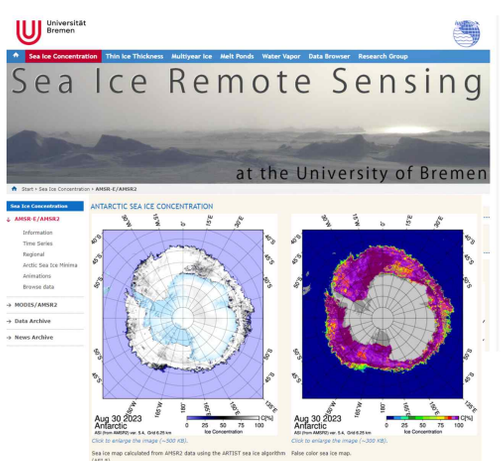


[그림 6] CMIP6 지구시스템 모델의 남극 해빙 재현 및 전망 결과(IPCC 6차 종합보고서 그림 9.15, 2021)

우리 쇄빙선 아라온의 경우 남극 항해 시 미국 국립 빙설자료센터(NSIDC, https://nsidc.org) 및 독일 브레맨대학교 자료 웹사이트 https://seaice.uni-bremen.de/sea-ice-concentration/amsre-amsr2) 의 해빙 원격탐사 관측자료를 주로 참조하고 있어, 중장기 및 초단기 남극 해빙 예측자료 확보를 통해 보다 안정적인 남극 과학활동 사전 계획 수립 및 효과적인 실시간 대응체계 구축 필요



[그림 7] NSIDC의 남극 해빙 원격탐사 모니터링



[그림 8] 브레멘대학교의 남극 해빙 원격탐사 모니터링

라 경제·산업적 측면

- 남극 해빙 면적의 변화는 남극 탐사선 및 어선의 항로에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 보다 정확한 중장기 및 초단기 예측 결과를 산출하고 제공하는 것의 경제적 효과 존재함

- 남극 해빙의 소멸은 반사도의 감소로 지구 온난화를 가속화시킬 뿐만 아니라, 어장에 큰 영향을 주는 주변 생태계의 변화 및 해수면 상승을 유발시키는 빙붕·빙상의 융빙 가속화로 이어질 수 있음. 따라서 남극 해빙의 미래를 예측하는 것은 급격한 환경 변화에 따른 사회 변화와 경제적 파급 효과에 선제 대응하는 것으로 향후 전세계 경제, 산업 구조 개편에 중요한 자료로 사용됨



[그림 9] 2015년 12월 18일 남극 유빙에 좌초되어 아라온호에 의해 구조된 한국 원양어선 썬스타호

마 사회·문화적 측면

- 지구온난화의 영향으로 급변하는 극지에 대한 국민적 관심사가 높아지고 있으며, 세계 10위권의 경제 규모인 우리나라의 위상에 맞는 인류현안 문제 해결을 위한 극지에서의 과학연구 수행을 통한 국가위상 제고 노력이 필요함

- 특히 2015년 파리기후협약 이후 신기후체제 대응 및 2050 탄소중립 달성이 강조되고 있는 현시점에서 지구 온난화에 대응하는 남극 해빙 예측기술 개발 연구 수행은 글로벌 국가 이미지 제고에 크게 기여할 뿐만 아니라, 나아가 외국 극지기관에 유용한 해빙 예측자료를 제공함으로써 실질적인 극지연구 선도국으로서의 지위를 획득할 수 있을 것으로 기대됨

제2절 사업추진 근거 및 경위

1. 국내

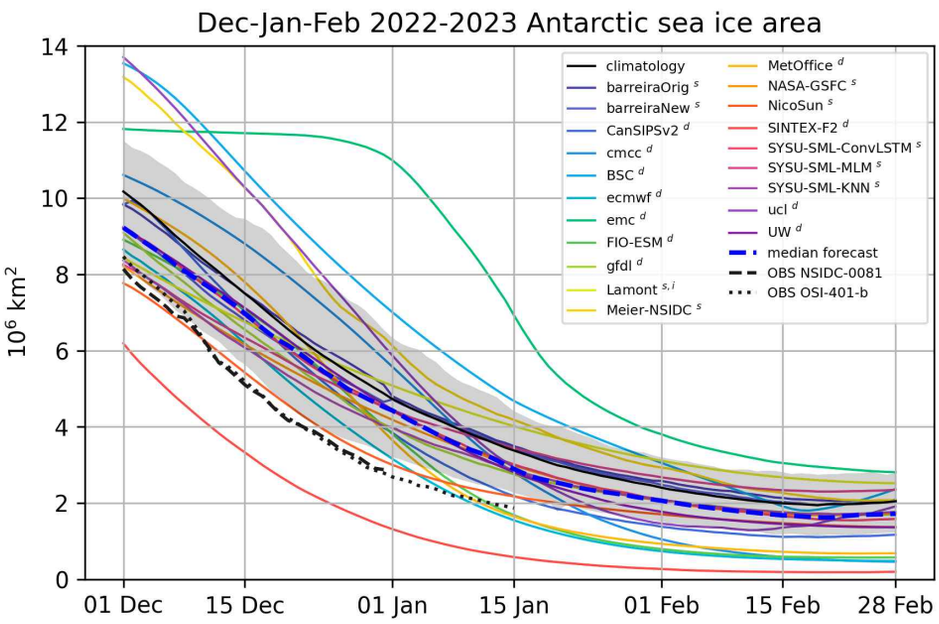
- 국내에서는 해빙모델 개발 및 개선 연구를 수행하는 기관은 없으며, 기상청(영국기상청의 UKESM 모델 기반 K-ACE 지구시스템 모델로 개선) 및 해양과학기술원(미국 GFDL의 CM 모델 기반 KIOST-ESM 개발하여 활용)에서 각각 기존 선진국의 지구시스템모델을 도입하여 일부 개선하여 활용하고 있는 지구시스템모델의 일환으로 해빙모델 모듈이 포함되어 있음
- 대다수의 대학 및 연구기관에서는 미국 및 유럽의 커뮤니티 지구시스템모델 미국 NCAR CESM, GFDL CM, GEOMAR Kiel Climate Model 등 주로 활용
- 국내 현 기술상태의 취약성 뚜렷

2. 국외 연구개발 현황

- YOPP-SH의 일환으로 2017년에 시작된 SIPN South(남부 해빙 예측 네트워크) 프로젝트에서 22개 그룹이 참여한 통계 및 역학적 모델 기반 남극 해빙 여름철 계절예측 상호비교연구가 수행되었으며, 그 결과 단일모델보다 다중모델 앙상블 평균의 예측 성능이 더 우수하며 기계학습을 포함하는 경험적 통계모델이 지구시스템모델 등의 역학모델 예측 성능보다 더 우수하다고 요약하여 발표(Massonnet et al. 2023)

3. 국내외 주요 동향

- 남극 해빙 유실 가속화에 따라 국내외 남극 해빙 관측 및 예측 연구다 보다 활발하게 진행될 것으로 전망
- SCAR, IPCC 등 주요 국제연구 협력에서 남극 해빙 관련 주제가 핵심 이슈 중 하나로 다루어질 것으로 사료됨



[그림 10] SIPN South 프로젝트의 해빙예측 결과

4. 동향 기반 도출된 시사점

- 남극 해빙 관측 관련 국내 전문가가 전무하여 국내 육성 필요
- 남극 해빙 관측 및 예측기술 개발 인력 부족으로 효율적 남극 해빙 예측기술 개발 전략 필요
- 급변하는 예측기술 개발 추세 현황을 분석하여 최적의 남극 해빙 예측기술 개발방향 설정 필요
- 국외에서 개발되어 널리 활용되고 있는 해빙 관측장비는 국내 연구개발 대신 국제협력을 통한 기술도입을 통해 입수하고 교육 및 노하우 전수가 가능할 것으로 전망함
- 국내 개발과 국외 기술도입 간 상호 비교를 통한 경제성을 기획과제를 통해 면밀히 분석하여 연구수행에 적용 필요
- 남극 해빙 관측 관련 극한지 인프라 운영에 필요한, 극지공학, 극한지 장비 제작과 운영 등에 산업체와의 협력 연구를 지속적으로 추진하여야 하며, 국내의 극한지 관련 사업을 선도할 필요가 있음
- 특히 관측장비 개발에 있어서는 연구사업 착수 시점부터 참여하여 기술 개발 및 극지 현장 운영을 통하여 안정적 운영능력이 검증되어야 할 것

5. 기획과제 지원근거 및 추진경위

가 관계법령

□ 「해양수산과학기술육성법」 제8조

○ 해양수산부장관은 해양수산과학기술 연구개발 과제를 선정하고, 해양수산과학기술 연구개발사업 및 전문인력 양성사업 추진

□ 「해양수산발전기본법」 제17조 및 제20조

○ 정부는 해양과학조사계획을 수립하고 해양에 대한 과학조사 및 관측 실시

○ 남북극 해양과학기지 설치 및 해양 조사·연구 활성화에 필요한 지원계획 수립

□ 「극지활동진흥법」 제8조 및 제12조

○ 국가는 극지 관련 연구개발 촉진 및 활성화를 위해 연구개발사업 지원

○ 극지활동을 위한 국제협력 촉진 위해 외국과 정보교환, 기술협력, 공동 조사·연구 등의 활동을 추진하거나 지원

□ 「남극활동 및 환경보호에 관한 법률」 제17조 및 제21조

○ 남극환경모니터링 및 남극연구활동진흥기본계획의 수립·시행

○ 국제협력 촉진 위해 외국과 정보교환, 기술협력, 공동조사·연구 추진·지원

나 정부정책

□ 「해양수산기후변화대응R&D 강화 로드맵」('21~)

○ 기후변화 진단·예측으로 국민 체감도 높은 정보 생산·제공 및 기후변화 적응·리스크 예방 위해 재해 해양수산 기후변화 K-방어시스템 구축

□ 「제4차 남극 연구활동 진흥 기본계획」('22~'26)

- 미래 기후변화 대응 역량 강화 및 국제협력 이슈 주도로 거버넌스 입지 확대

「새 정부 국정과제」('22.7)

- 41. 해양영토 수호 및 지속가능한 해양 관리 - 해양영토 수호·확장
- 99. 국격에 걸맞은 글로벌 중추국가 역할 강화 - 기후변화·탄소중립 외교 강화

「제1차 극지활동 진흥 기본계획」('23~'27)

- 남·북극 미지영역 탐사 확대 및 국제공동연구 기반 기후문제 해결 주도

「제5차 과학기술기본계획」('23~'27)

- 전략3 과학기술 기반 국가적 현안해결 및 미래대응 - 추진과제 3-7 우주·해양·극지 개척을 통한 과학영토 확대
- 12대 국가전략기술 - ⑥우주항공·해양 기술, ⑨인공지능(AI) 활용 기술

「제2차 해양수산과학기술육성 기본계획」('23~'27)

- 10대 해양수산 전략기술인 ⑨극지연구거점 확보에 필수적인 예측기술

다 기획 경과

『국가기후변화적응대책』 수립

- 우리나라는 기후변화로 인한 피해를 최소화하고 국민의 안전과 재산을 보호하기 위해 『저탄소녹색성장 기본법』(48항) 및 동법 시행령(38항)에 따라 5년마다 관계부처합동으로 추진

「제3차 국가 기후변화 적응대책」('21~'25)

- (정책②)감시·예측 및 평가 강화 위한 극지 감시정보 생산 및 확대로 기후변화 감시역량 강화

「제3차 국가 기후변화 적응 강화대책」('23~'25)

○ 과학기술 혁신을 통한 기후위기 대응과 新시장 선점을 위한 3대 전략 - 전략2. 기후변화 적응을 위한 기후변화 감시·예측 기술 개발

(환경변화) 온난화에 뚜렷한 경향성을 보이지 않았던 남극 해빙면적이 급격히 줄어 '23년 관측 역사상 최저값 기록

○ 전례없는 남극 해빙면적 축소는 장보고기지 주변 해빙두께 감소로 이어져 비행기 해빙활주로 유실 및 쇄빙선 해빙하역 불가로 남극 연구활동 축소와 기지 건설자재 보급 차질* 발생

* '22년 장보고기지 하역 불가로 사업비용 약 50억 증액 및 사업기간 2년 연장

(기획경과) 『남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발 위한 기획연구』 완료('24.03)

○ 연구기획위원회(남극 해빙 관측/해빙 모델링 및 예측/AI기술 적용 3개 분과로 구성)에 20여 명 산·학·연 전문가 참여, 국제·국내 자문위원회 운영, 전문가 설문 및 경제성 평가 수행

- 세분화된 체계로 구성하여 각계 다양한 전문가 의견수렴

○ 해빙 예측·관측분야 선진 기관들로부터 협력방안 협의 협력의향서 접수

- 벨기에(SIPN South 국제협력 리더쉽), 캐나다, 프랑스, 이탈리아, EU, 중국(예측분야), 호주, 미국(관측분야) 등 8개국 9개 기관으로부터 의향서 접수로 효율적인 기술 전수 및 연구협력 기반 확보 가능 및 상호협력 약속의무 이행 필요

제3절 사업 기획 추진 체계

1. 연구기획위원회 구성

가 구성 배경

(기후변화 파급력) 급격한 남극 해빙면적 축소는 기후변화의 가장 최신 영향으로 이에 대한 구체적 대응 계획 수립이 필요

- '23년 6월 핀란드 헬싱키에서 개최된 남극조약협의당사국회의(ATCM)에서 최근 극적인 남극 해빙 축소 경향에 대응하기 위한 연구와 관측 역량 강화 시급성 논의
- 제한된 접근성과 극한 환경으로 인한 관측자료 부족이 남극 해빙에 대한 지식 미비 및 예측모델 성능 저하로 연계. 선도국과의 격차를 단기간에 해소 위해 효율적 남극 해빙 예측 기술 개발 전략으로 예측역량 증진 필요

(남극 과학활동 지원) 남극해 온난화가 가속화되는 상황에서 체계적인 남극 과학활동 지원 및 확대를 위해 필요한 쇄빙선 항로와 장보고기지* 비행기 이착륙 계획을 마련하기 위해 남극 해빙 장기(3개월~6개월 등) 예측시스템 구축 시급

- 장보고기지 인근 해빙의 중요성 : 장보고기지 앞 해빙은 기지 보급을 위한 비행기 이착륙 활주로, 연구선 하역장소 및 물범 등 극지 생물 관측 장소로 활용되어 일정량의 해빙 유지 유무가 매우 중요 (해빙 소실되어 하역 불가 시 경제적 손실 발생)

(국제협력 네트워크 구축·선도) 해빙 관측·예측분야 8개 선도국 9개 연구기관으로부터 확보된 국제협력 의향서를 기반으로 상호협력 약속의무 이행 필요

- 국내 남극 해빙 관련 분야의 투자 및 인력양성 미비한 상황
- 영국, 호주, EU, 캐나다, 프랑스, 이탈리아, 중국, 벨기에(계절예측 국제협력 주관) 등남극 해빙 관측분야 3개 선진 기관들로부터 첨단 관측기술 전수 및 공동관측 수행, 예측분야 6개 선진 기관들의 최신 모델링 기술 확보 및 인적자원 상호교류, 그리고 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 주도적 구축·운영
- '23년 10월 '해빙 예측모델 국제워크샵' 국내 개최를 통해 해외석학 10여 명 등 국내외 전문가 40여 명이 해빙 예측모델 개발 현황과 미래 방향 논의를 진행했으며, 이 결과를 국제학술지 '미국기상학회보(BAMS)'에 게재함으로 국제협력 네트워크 구축 기틀 마련

나 국제협력 경과 및 향후 계획: 해빙 예측모델 국제워크샵 개최

■ 빠르게 시급성이 강조되고 있는 극지역 해빙 예측 기술 분야에서 국내 연구 역량을 향상하고, 학문 후속세대 양성 및 지속가능한 협력 네트워크 구축 위해 이 분야 국외 석학을 초빙하여 기술교류회 개최

○ 최근 남빙양의 기록적인 해빙 면적 감소('23년 9월 10일 연 최고 면적 16.96 제곱킬로미터로 관측 사상 역대 최소 9월 면적 기록)는 다양한 형태의 재난(예, 고파고에 의한 연안 기반인프라 훼손, 유빙에 의한 선박 좌초 등)으로 연결되고 있어 정확한 예측 도구 개발 필요성이 증대되고 있으나, 국내 연구 수준은 여전히 추격 단계

○ 8개국 40여 명의 국내외 전문가 참여해 '23년 10월 24-26일 3일간 진행



[그림 11] 해빙 예측모델 국제워크샵 포스터



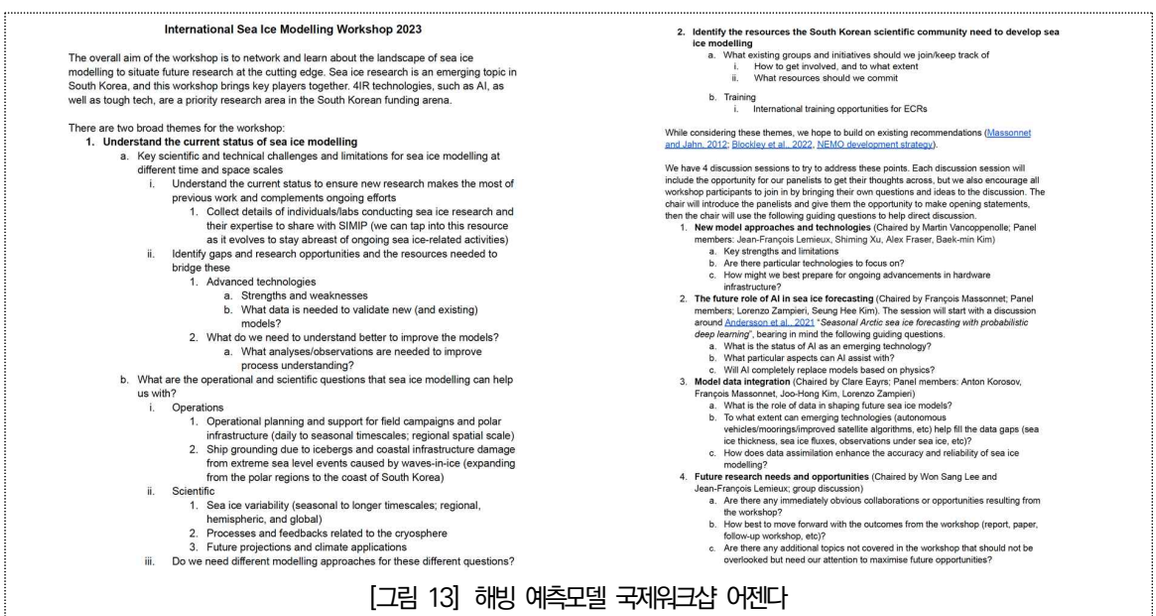
[그림 12] 해빙 예측모델 국제워크샵 기사

■ 해빙 예측 관련 국제 기술 현황 공유 및 공동연구 분야 발굴

○ 새로운 모델링 기술, 해빙 예측 모델에 AI 적용, 관측자료-모델 통합, 그리고 향후 공동연구 주제 및 방향에 대한 발표와 논의 진행

- 새로운 모델링 기술: 해빙의 고차원 역학적 프로세스 구현 성능 제고, 고성능 컴퓨팅 환경에서 고해상도 이산요소모델과 지구시스템모델 결합 가능성, 파도-얼음 상호작용 고려, 빙상-해빙 상호작용 구현 등이 미래 해빙 모델링 발전 방향

- 해빙 예측 모델에 AI 적용: 최근* 입력자료 처리 및 모델 구동 등 다양한 해빙 모델링 단계에서 AI 적용 연구 결과가 출간되어 미래 해빙 모델링 도구로서의 잠재력 확인. AI 기반 보다 효율적이고 저렴한 예측 시스템 구축 가능하며, 한국 연구자들의 AI 전문지식 수준이 높음
- 2019년 9월 아이슬란드에서 개최된 해빙 모델링 커뮤티티 회의에는 해빙 연구에 AI 적용한 사례가 한 건도 없었으나(Blockley 외, 2020, 미국기상학회회보), 현재 다수의 연구 결과가 다양한 학회 및 저널에서 발표되고 있음
- 관측자료-모델 통합: 관측 자료 수집이 모델 성능 향상에 중요할 뿐만 아니라, 모델 결과가 핵심적 관측 지점 선별에 기여. AI 기반 자료동화 및 AI-물리모델 결합이 관측자료-모델 통합 기반 해빙 예측성 제고를 이끌 것
- 향후 공동연구 주제 및 방향: 남극 해빙의 경우 자료 부족이 예측기술격차 극복의 가장 큰 장애물이며, 인력교류 프로그램, 모델링 실습 워크숍 등 국제공동연구 활성화 기반 지식 교류 및 해빙 모델링 저변 확대 또한 필요



International Sea Ice Modelling Workshop 2023

The overall aim of the workshop is to network and learn about the landscape of sea ice modelling to situate future research at the cutting edge. Sea ice research is an emerging topic in South Korea, and this workshop brings key players together. 4IR technologies, such as AI, as well as tough tech, are a priority research area in the South Korean funding arena.

There are two broad themes for the workshop:

1. **Understand the current status of sea ice modelling**
   - a. Key scientific and technical challenges and limitations for sea ice modelling at different time and space scales
     - i. Understand the current status to ensure new research makes the most of previous work and complements ongoing efforts
       1. Collect details of individuals/labs conducting sea ice research and their expertise to share with SIMIP (we can tap into this resource as it evolves to stay abreast of ongoing sea ice-related activities)
     - ii. Identify gaps and research opportunities and the resources needed to bridge these
       1. Advanced technologies
          - a. Strengths and weaknesses
          - b. What data is needed to validate new (and existing) models?
       2. What do we need to understand better to improve the models?
          - a. What analyses/observations are needed to improve process understanding?
   - b. What are the operational and scientific questions that sea ice modelling can help us with?
     - i. Operations
       1. Operational planning and support for field campaigns and polar infrastructure (daily to seasonal timescales; regional spatial scale)
       2. Ship grounding due to icebergs and coastal infrastructure damage from extreme sea level events caused by waves-in-ice (expanding from the polar regions to the coast of South Korea)
     - ii. Scientific
       1. Sea ice variability (seasonal to longer timescales; regional, hemispheric, and global)
       2. Processes and feedbacks related to the cryosphere
       3. Future projections and climate applications
     - iii. Do we need different modelling approaches for these different questions?

2. **Identify the resources the South Korean scientific community need to develop sea ice modelling**
   - a. What existing groups and initiatives should we join/keep track of
     - i. How to get involved, and to what extent
     - ii. What resources should we commit
   - b. Training
     - i. International training opportunities for ECRs

While considering these themes, we hope to build on existing recommendations (Massonnet and Jahn, 2012; Blockley et al., 2022, NEMO development strategy).

We have 4 discussion sessions to try to address these points. Each discussion session will include the opportunity for our panelists to get their thoughts across, but we also encourage all workshop participants to join in by bringing their own questions and ideas to the discussion. The chair will introduce the panelists and give them the opportunity to make opening statements, then the chair will use the following guiding questions to help direct discussion.

1. **New model approaches and technologies** (Chaired by Martin Vancoppenolle; Panel members: Jean-François Lemieux, Shiming Xu, Alex Fraser, Baek-min Kim)
   - a. Key strengths and limitations
   - b. Are there particular technologies to focus on?
   - c. How might we best prepare for ongoing advancements in hardware infrastructure?
2. **The future role of AI in sea ice forecasting** (Chaired by François Massonnet; Panel members; Lorenzo Zampieri, Seung Hee Kim). The session will start with a discussion around Anderson et al., 2021 "*Seasonal Arctic sea ice forecasting with probabilistic deep learning*", bearing in mind the following guiding questions.
   - a. What is the status of AI as an emerging technology?
   - b. What particular aspects can AI assist with?
   - c. Will AI completely replace models based on physics?
3. **Model data integration** (Chaired by Clare Eayrs; Panel members: Anton Korosov, François Massonnet, Joo-Hong Kim, Lorenzo Zampieri)
   - a. What is the role of data in shaping future sea ice models?
   - b. To what extent can emerging technologies (autonomous vehicles/moorings/improved satellite algorithms, etc) help fill the data gaps (sea ice thickness, sea ice fluxes, observations under sea ice, etc)?
   - c. How does data assimilation enhance the accuracy and reliability of sea ice modelling?
4. **Future research needs and opportunities** (Chaired by Won Sang Lee and Jean-François Lemieux; group discussion)
   - a. Are there any immediately obvious collaborations or opportunities resulting from the workshop?
   - b. How best to move forward with the outcomes from the workshop (report, paper, follow-up workshop, etc)?
   - c. Are there any additional topics not covered in the workshop that should not be overlooked but need our attention to maximise future opportunities?

[그림 13] 해빙 예측모델 국제워크샵 어젠다

시사점 및 향후 계획

- 우리나라 남극 해빙 예측 모델링 분야 개척을 위해서는 현장 관측 기술 및 자료 확보, AI 전문가 참여, 국제공동연구 기반 해빙 예측 모델링 전문가 양성이 필요
- 해빙 모델링 분야 선도국 국외 전문가들은 모델링 기술·노하우 전수와 관측 인프라·자료 공유를 교환하며, 상호 인력교류 및 실습교육 개최 등 상보적 국제공동연구 협약 및 수행에 동의
- 국외 전문가들이 신규과제 기반 극지연구소 주도로 구축될 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크에 적극적으로 참여 의향 표출
- 해당 워크숍에서 논의된 해빙 예측 모델링 현황 및 계획들은 국제학술지에 백서 형태로 출간(Clare et al. 2024)

다 남극해 급격한 온난화에 따른 장보고 기지 피해 상황

남극해 급격한 온난화에 따른 해빙 유실- ’22년 이후 전례없는 남극 해빙(바다 얼음·海氷) 면적 축소

- 남극 해빙은 내부 변동성의 진폭이 크고 장기 감소 추세가 나타나지 않아 지구 온난화의 영향을 받지 않는다고 알려져 왔으며, 2021년 발간된 IPCC 6차 보고서에서도 미래 온난화가 진행되더라도 남극 해빙 면적이 줄어들 것인지는 불확실하다고 보고
- 그러나 2016년 이후 남극 해빙 면적이 분명한 감소 추세로 전환, 특히 2022년부터 지구 온난화 심화와 함께 남극 해빙 유실 또한 가속화되어 2023년에는 45년 관측 역사상 최저 기록

장보고 기지 인근 해빙 유실

- 장보고기지 앞 해빙은 기지 보급을 위한 비행기 이착륙 활주로, 연구선 하역장소 및 물범 등 극지 생물 관측장소로 활용되어 일정량의 해빙 유지가 중요
- 전례없는 남극 해빙면적 축소는 장보고기지 주변 해빙두께 감소로 이어져 비행기 해빙활주로 유실 및 쇄빙선 해빙하역 불가로 남극 연구활동 축소와 기지 건설자재 보급 차질 발생
- 예년보다 이른 장보고 기지 주변 해빙두께 감소로 비행기를 활용한 입남극이 축소되어 연구 활동에 커다란 차질을 빚고 있음



[그림 14] 장보고 기지 부근 해빙 위 비행기 이착륙장 전경

- ‘22년 10월 장보고 기지 해빙 활주로 폐쇄로 하계탐사를 위한 입남극 축소, ‘22년 11월 28일 6시간만에 장보고기지 앞 해빙이 완전히 녹아 장보고기지 하역 불가
- 건설자재 하역 불가로 사업비용 약 50억 증액 및 사업기간 2년 연장 피해 발생



('21.12 / 기존) 아라온 호 활용 장보고기지 해빙하역 모습 | ('21.12.15.) 기지 앞 바다 전경 해빙 유지 ☞ 해빙하역이 가능 | ('22.11.28.) 기지 앞 바다 전경 해빙 완전 소실 ☞ 해빙하역 불가

[그림 15] 기지준공 이후 처음 발생한 '22년 장보고기지 앞 해빙 유실

■ 남극 해빙 장기예측 현황

- 우리 쇄빙선 아라온의 경우 장기계획(3~6개월) 수립 및 과학적 항로 예측을 위해 활용하고 있는 장기예측 자료가 전무
- 남극 항해 시 미국 국립빙설자료센터(NSIDC) 및 독일 브레맨대학교의 해빙 원격탐사 실시간 모니터링 자료를 주로 참조, 중장기 남극 해빙 예측자료 확보 통해 보다 안정적인 남극 과학활동 사전 계획수립 및 효과적인 실시간 대응체계 구축 필요

라 신규사업 기획 방향

■ 남극 해빙 특성에 적합한 관측기술 획득 및 관측역량 개발방향 설정 그리고 남극 해빙 예측기술 개발로 국내 남극 해빙 관측 및 예측 역량 확보

■ 해빙 탐사기술 개발로 해빙 프로세스에 대한 이해를 제고하여 모델 성능 개선 및 관련된 지구시스템 메커니즘의 이해로 이어져 과학 발전에 이바지

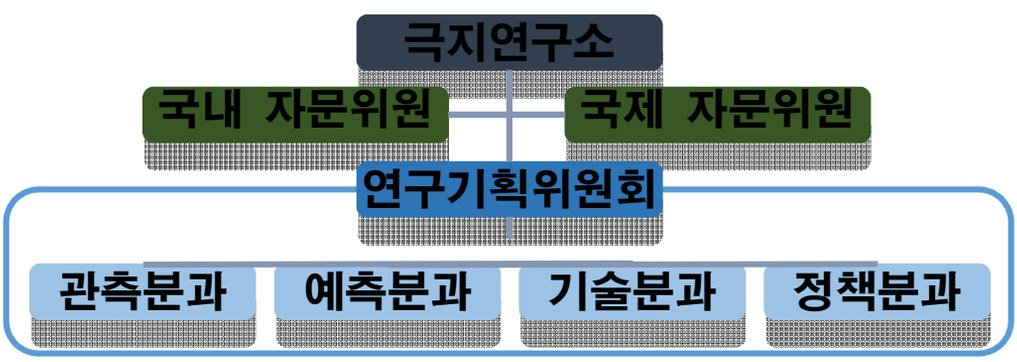
■ 해빙 예측 결과 산출된 미래 전망이 해빙환경과 연관된 생태계의 변화 등 관련 연구의 기초 자료로 활용되어 다양한 수월성있는 연구성과 산출 가능

■ 국내외 유용한 남극 해빙 예측자료를 제공함으로써 연구소의 파급력을 증대시키고 극지연구 선도국으로서의 위상 제고

■ 남극 탐사선 최적 항로 계획 수립 및 어선의 안전한 조업에 기여함으로써 경제적 손실 위험을 저감하고 남극 탐사 및 어업 관련 산업 부흥에 기여

마 기획연구단 역할 및 구성

- (역할) 다양한 산·학·연 기관의 연구수요 및 의견을 수렴하고, 분과별 실질적 검토를 통한 타당성 및 활용체계 마련 등 논리 보강
- (구성) 자문기구로서 국내·국제자문위원회, 분야별 연구, 정책, 기술지원, 홍보방안 등을 검토하는 연구기획위원회로 구성
  - (자문위원회) 실무분과 요청 사항에 대한 자문
  - (연구기획위원회) 남극 해빙 관측체계 구축(관측), 남극 해빙 예측시스템 개발(예측), AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산(기술), 그리고 정책 및 협력의 4개 분과로 나누어 분과별 수요기반 연구내용과 방법론 도출 및 운영·자문위원회 요청 사항에 대한 검토



바 추진 경과

- 국내 산·학·연 해빙 관련 전문가들의 관련 지식, 노하우 및 비전 반영
- 남극 해빙 관측 및 예측 관련 국제연구 참여 연구원들의 경험, 수행 중인 과제 내용, 향후 계획 등 분석 및 반영
- 관측 및 예측에 새로운 기술 도입 트렌드 분석
- 극지 연구소 내에서 파급력이 크고 수월성 있는 연구성과 도출이 가능한 남극 해빙관련 이슈 및 분야 도출
- 국내·외 협력연구 방향 및 전략 마련

Korea Polar Research Institute

남극해 급격한 온난화 대응
남극 해빙 예측기술 개발
위한 기획연구

제2장 남극 해빙 예측분야 대내외 환경분석

제1절 국외 주요 동향
제2절 국내 주요 동향
제3절 요약 및 시사점

제1절 국외 주요 동향

1. 남극 해빙 관측 및 예측 관련 연구 동향

- 남극 해빙은 지구 기후 상태의 매우 민감한 지표이며, 최근 전례없는 속도로 축소 경향이 탐지된 이후 대응연구 기획 추세

가 국제기구

- IPCC(기후변화에 관한 정부간 협의체) - 2021년 출간된 6차 평가보고서에서 현재 지구시스템모델들이 여름철 최소 남극 해빙 면적을 과소모의하며, 미래 시나리오에서 21세기의 해빙 손실을 전망하지만 온난화를 과대모의 하고 있어 결과적으로 남극 해빙 미래전망의 신뢰도가 낮다고 평가

- SCAR(남극연구과학위원회)/ASPeCt(남극 해빙 프로세스와 기후 관련 전문가 그룹) - '23년 6월 남극조약협의당사국회의(Antarctic Treaty Consultative Meeting, ATCM)에서 최근 극적인 남극 해빙 축소 경향에 대응하기 위한 연구와 관측 역량 강화 시급성 주창

- SCAR 및 SOOS 산하 남극 해빙 관측 분야 국제공동연구 활발히 진행 중이며 자료 공유 또한 활성화

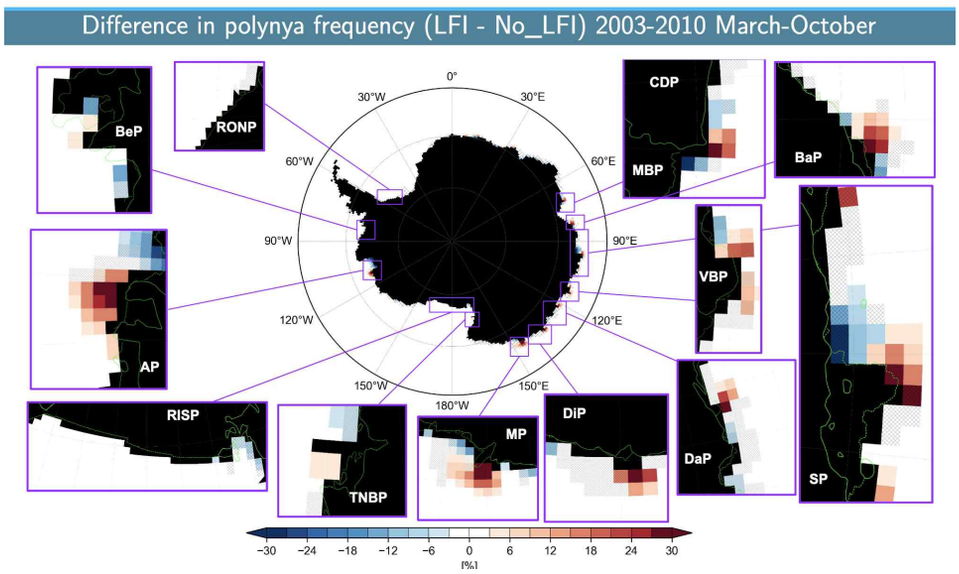
- SIPN South 프로젝트 - 남반구 극지예측의 해(YOPP-SH) 국제협력연구 일환으로 2017년 시작된 남부 해빙예측 네트워크(Sea Ice Prediction Network South)는 분기별 12개국 22개 기관의 남극 해빙 예측자료 상호비교
  - 단일모델보다 다중모델 앙상블 평균의 예측 성능이 더 우수하며, AI를 포함하는 경험적 통계모델이 역학모델 예측 성능보다 더 우수하다고 요약하여 국제학술지 해양과학 프론티어스에 발표('23)



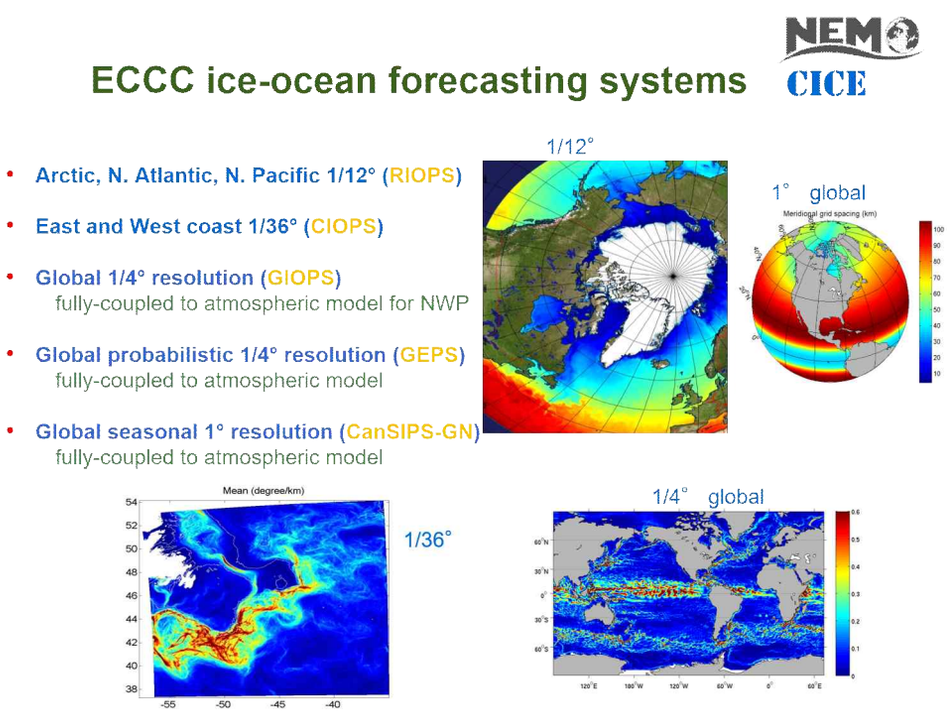
[그림 16] 남극 해빙 관측기술 개발 및 현장관측 위한 국제협력연구

나 국가별 동향

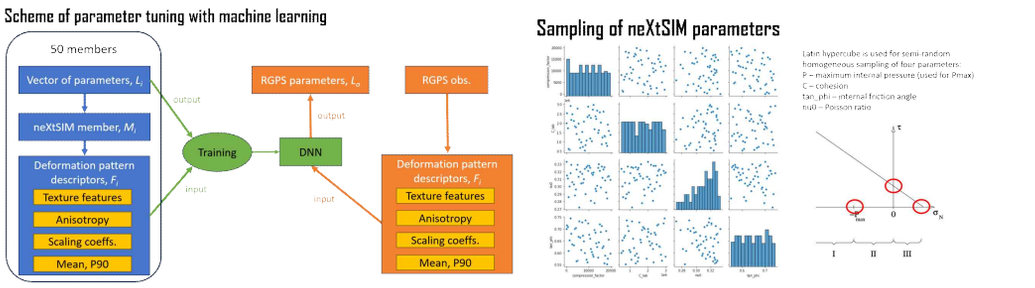
- (프랑스) 해빙모델 개발 및 지구시스템모델과 결합 연구 수행 - SI3 해빙 모델을 현장 관측자료와 비교검증을 통해 집중적으로 개발·개선하여 다수의 지구시스템모델 구성요소로 결합
- (캐나다) 해빙모델 개발 및 지구시스템모델과 결합하여 계절예측 자료 생산 - CICE 해빙 모델을 개발·개선하고 연계된 자료동화 시스템 구축으로 지구시스템모델 계절예측 자료 성능 제고로 이어지도록 개발
- (중국) 초고해상도 해빙모델 개발 및 이를 활용한 기후변화 연구 수행 - 고성능 전산자원을 토대로 북미에서 개발된 CICE 해빙모델을 도입하여 지구시스템 모델에 접합 후 2km 격자 초고해상도 버전으로 기후변화 연구
- (노르웨이, 이탈리아) AI 기술을 적용하여 남극 해빙 예측연구 수행 - 자료동화 기법을 응용하여 AI 기술로 해빙 모델 오차 개선 및 예측에 응용
- (호주) ASPeCt에 주도적으로 참여하여 해빙 관측자료 수집·분석 - 해빙 관측기기 개발 및 현장 관측 분야 선도적 연구 수행



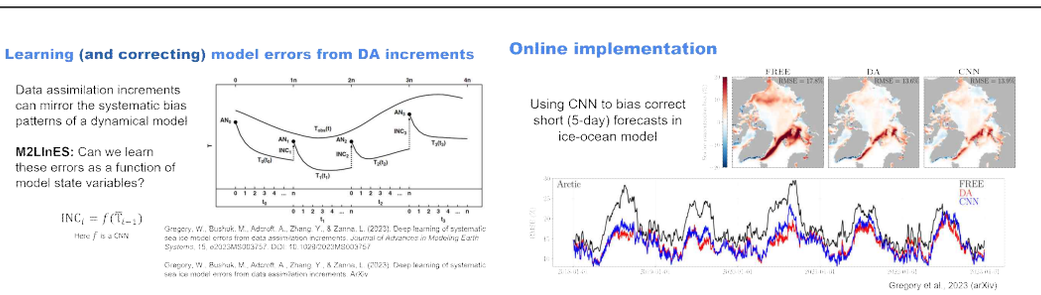
[그림 17] 프랑스에서 출간된 남극 고착빙에 대한 최신 연구결과



[그림 18] 캐나다 지구시스템-해빙모델 활용한 현업 남극 해빙 계절예측 시스템



[그림 19] 노르웨이 AI 활용한 해빙모델 개선 기술 개발



[그림 20] 이탈리아 AI 활용한 해빙 예측기술 개발

다 시사점

- 극지연구 선도국은 해빙 관측기기 개발·적용 및 해빙 모델 개발·개선 분야 투자·노력을 지속하여 극지 해빙 프로세스 이해 및 예측성 제고
- 국제협력연구를 통해 해빙 관측 및 모델링 분야 노하우 및 기술전수 가능한 우호적 파트너쉽 가능
- 현장관측자료 제공·교환 및 연구인력 상호교류 등 상보적 관계 추진이 이상적

2. 남극 해빙 관련 정책 동향

가 정책 동향

- 남극 관련 기후변화에 대한 국민 불안감을 해소하는 동시에 국가 남극 과학영토 확장·유지를 위한 정책 마련 및 예산 투자 동향 뚜렷

[표 1] 국가별 남극 해빙 및 북극 해빙 관련 주요 정책 비교

	남극 해빙 관련정책	북극 해빙 관련 정책
미국	▪ 극지해양과학 연구에 연평균 5,000억원 투자하여 남극 과학연구 및 인프라 유지·지원	▪ 북극 중요성 안보적 관점에서 정책수립
중국	▪ 제 14차 5개년계획('21-'25)에 극지탐사를 전략 과학기술로 선정, 연 7% 이상 국가 R&D 투자 확대	▪ 북극 에너지·항로 확보 측면에서 북극 해빙 연구 지원
러시아	▪ 러시아 남극 연구활동계획('18-'22) 수립 및 탐사예산 확대	▪ 북극권 개발 및 영향력 강화 위해 항만인프라·선박 등에 38조원 투자 ▪ 군사적, 제도적 입지 강화 추진
일본	▪ 제6차 과학기술 혁신 기본계획('21-'25) 수립하여 남극지역 관측사업 43억엔 투입	▪ 북극종합연구('21-'24) 프로젝트에 500억원 투입
독일	▪ 지구의 지속가능성 관점에서 남극의 기후변화 영향 연구	▪ 북극 환경변화 종합 관측 위한 MoSAiC 프로젝트('19-'20) 선도
영국	▪ 남극조사 운영 전략('20-'25) 수립하고, 약 1조원을 투자하여 남극연구 인프라 투자 확대	▪ 북극지역 방어전략 수립으로 군사적 입지 강화 추진

나 시사점

- 북극은 항로·에너지 등 경제적 이익을 선점 위한 정책이 대세인 반면, 남극은 과학 연구와 환경보전에 초점
- 현재까지 해빙 유실 관련 정책 수립 및 예산 투입은 장기간 감소 추세가 뚜렷한 북극 해빙에 집중되어 있으며, 북극항로·에너지 등 경제적 이익을 선점하여 북극 지역 영향력 확보하기 위한 국가 목표와 부합
- 최근 남극 해빙 유실 가속화에 따라 국제적으로 남극 해빙 관측 및 예측 관련 정책 마련 및 예산 투입이 보다 활발하게 진행될 것으로 전망

제2절 국내 주요 동향

1. 연구 동향

가 해빙 관측 및 예측모델 개발 현황

- 국내에서는 해빙모델 개발 및 개선 연구를 수행하는 기관은 없으며, 기상청 및 해양과학기술원에서 각각 기존 선진국의 지구시스템모델을 도입하여 일부 개선하여 활용하고 있는 지구시스템모델의 일환으로 해빙모델 모듈이 포함되어 있으나 관련 전문가는 부족
  - 기상청은 영국기상청의 UKESM 모델 기반 K-ACE 지구시스템 모델로 개발
  - 해양과학시술원은 미국 GFDL의 CM 모델 기반 KIOST-ESM 개발
    - 지자체·공공기관의 수요를 반영한 디바이스 개발 후 시범사업 추진

- 대다수의 대학 및 연구기관에서는 미국 및 유럽의 커뮤니티 지구시스템모델 또는 지역기후모델을 도입하여 해빙 관련 연구를 수행 중
  - 미국 NCAR CESM, GFDL CM, GEOMAR Kiel Climate Model 등의 지구시스템모델이 주로 활용되고 있음
  - COAWST, ROMS-WRF 접합모형 등 지역 기후모델 활용

나 시사점

- 국내 남극 해빙 관련 분야의 투자 및 인력양성 미비한 상황
- 남극 해빙 관측 관련 국내 전문가가 전무하여 국내 육성 필요
- 남극 해빙 예측 관련 개발 인력 부족 현황을 고려하여 선도국과의 격차를 단시간에 해소하기 위한 효율적 남극 해빙 예측기술 개발 전략 필요
- 급변하는 예측기술 개발 추세 현황을 분석하여 최적의 남극 해빙 예측기술 개발방향 설정 필요

2. 해빙 관측 및 예측모델 개발 관련 정책 동향

가 기후변화와 남극 해빙

■ 기후변화 감시역량 강화를 위한 기후변화 감시·예측 기술 개발 지원

- 제3차 국가 기후변화 적응대책('21~'25)
- 해양수산 기후변화 대응 R&D 강화 로드맵('21.01)
- 제1차 기후변화 대응 기술개발 기본계획('23~'32)

■ 과학·해양영토 확대 위한 기술 개발 전략적 지원

- 윤석열정부 120대 국정과제('22.7)
- 제5차 과학기술기본계획('23~'27)
- 제2차 해양수산과학기술육성 기본계획('23~'27)

■ AI 기술을 주요 국가전략기술로 육성 지원

- 제5차 과학기술기본계획('23~'27)

■ 기후문제 해결 위한 국제협력 이슈 주도 지원

- 윤석열정부 120대 국정과제('22.7)
- 제1차 극지활동 진흥 기본계획('23~'27)

나 시사점

■ 심화된 지구 온난화 상황 하에서 자연과 인간에 대한 전방위적인 재난발생 및 기후문제 대응을 위한 다양한 정부 정책 발표

■ 급격한 남극 해빙면적 축소는 기후변화의 가장 최신 영향으로 전지구적인 파급력을 고려할 때 이에 대한 구체적인 대응 계획이 수립되어야 함

- 남극 해빙 면적은 이전까지 지구 온난화에 뚜렷한 경향성을 보이지 않다가 2016년 이후 축소 추세가 나타나기 시작하여 2023년 전례없이 감소하였음

제3절 요약 및 시사점

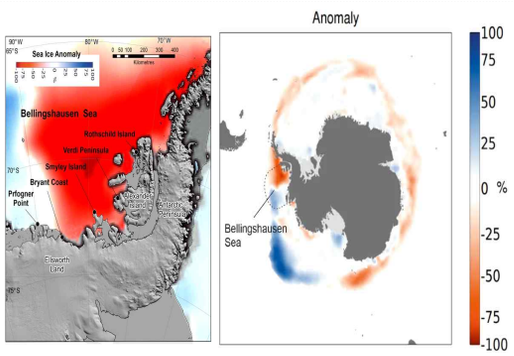
1. 남극 해빙 유실에 따른 전지구적 영향 및 잠재적 이슈

남극 해빙 유실에 따른 생태계 파괴 보고

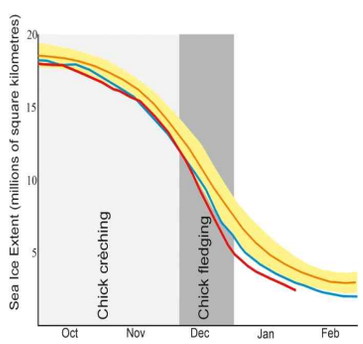
- 최근 남극 해빙 유실 속도가 빨라지면서 서식지가 축소된 황제펭귄이 적응하지 못하고 번식 활동에 심각한 방해를 받아 금세기말 준멸종 직면할 것이라는 최신 연구결과 발표
  - 영국남극연구소(BAS)의 피터 프렛웰 박사 연구팀이 2023년 8월 과학저널 〈커뮤니케이션 지구와 환경〉 게재



[그림 21] 황제펭귄



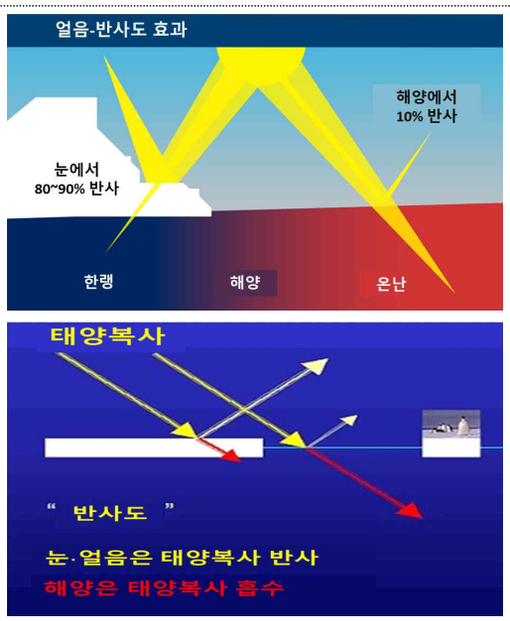
[그림 22] 남극반도 부근 해빙 감소 지역



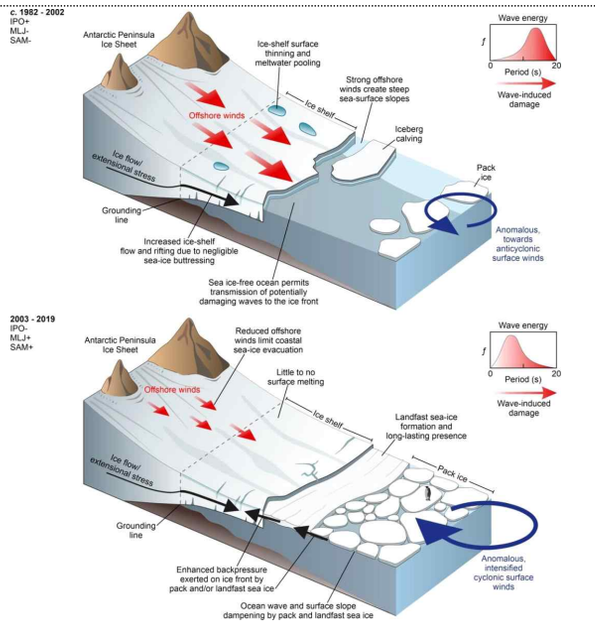
[그림 23] 남극 해빙 면적이 펭귄 번식활동에 미치는 영향

해빙 유실이 기후변화 가속화 촉발 가능

- 남극 해빙의 소멸은 반사도의 감소로 지구 온난화를 가속화 시키며, 해빙-빙상을 연결하는 고착빙의 소실은 해수면 상승을 유발시키는 빙붕·빙상의 융빙 가속화로 이어질 수 있음
  - 얼음은 바다보다 반사도가 크기 때문에 해빙 유실은 지구의 태양복사 흡수 증가로 이어져 온난화 가속화
  - 바다 위의 얼음 해빙이 녹아도 해수면 상승으로 이어지지 않지만, 해빙의 증가가 빙붕이 바다로 흘러내리는 것을 막아 해수면 상승을 늦춘다는 최신 연구(크리스티 외 2022 네이처 지오사이언스紙 게재)



[그림 24] 해빙의 얼음-반사도 효과

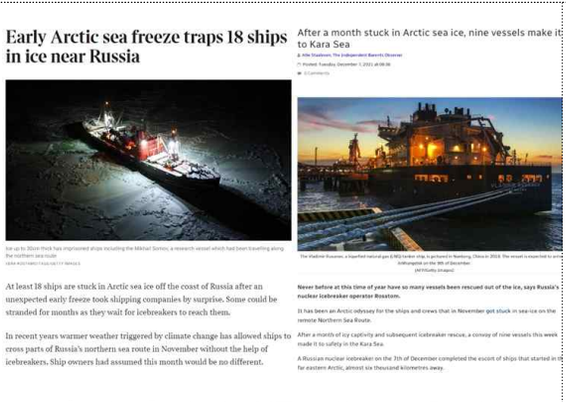


[그림 25] 해빙이 빙붕의 용융을 저지하는 메커니즘

방재 위한 해빙 예측시스템의 필요성

예측 및 대응체계를 갖추지 못한 채 남극항로가 열리면 결빙·유빙에 의한 선박 좌초 위험 커짐

- 북극해 해빙 감소에 의한 북극항로 확장 이후 2021년 11월 갑작스러운 한파에 인한 결빙으로 18척 이상 선박이 러시아 연안에서 좌초
- 우리 쇄빙선 아라온호도 2015년과 2020년 각각 남극해 유빙 수역에서 좌초된 우리나라 원양어선 구조



[그림 26] 2021년 북극항로에서의 좌초사건



[그림 27] 남극 유빙수역에서 아라온호의 구조 활동

국가/민간	사례내용
국제기구	▪ (동향) 남극 해빙은 지구 기후 상태의 매우 민감한 지표이며, 최근 전례없는 속도로 축소 경향이 탐지된 이후 대응연구 기획 추세 ▪ 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) - 2021년 출간된 6차 평가보고서에서 현재 지구시스템 모델들이 여름철 최소 남극 해빙 면적을 과소 모의하며, 모든 미래 시나리오에서 21세기의 해빙 손실을 전망하지만 온난화를 과대모의 하고 있어 결과적으로 남극 해빙 미래전망의 신뢰도가 낮다고 평가 ▪ 남극연구과학위원회(SCAR) 남극 해빙 프로세스와 기후 관련 전문가 그룹(ASPeCt) 및 남빙양관측시스템 그룹(SOOS) - 남극 해빙 프로세스에 대한 집단적 지식 함양을 위한 국제협력 연구 설계 등 기후 변화 대응 남극 보호 위한 긴급 연구 필요성 강조
국제공동연구	▪ 남반구 극지예측의 해(YOPP-SH) 국제협력연구 일환으로 2017년 시작된 국제 남극 해빙예측 네트워크 SIPN South 프로젝트는 분기별 12개국 22개 기관의 남극 해빙 계절예측 자료 상호비교 - 단일모델보다 다중모델 앙상블 평균의 예측 성능이 더 우수하며, AI를 포함하는 경험적 통계모델이 역학모델 예측 성능보다 더 우수하다고 요약하여 국제학술지 해양과학 프론티어스에 발표('23.05)
미국	▪ 국립설빙자료센터(NSIDC)에서 위성자료를 통합하여 남극 해빙 모니터링 정보 제공하고 있으나 북극 해빙 자료에 비해 제한적 ▪ IPCC 보고서 위한 국가 지구시스템 모델에 포함되는 해빙 모듈 및 초고해상도 미래격자체계에 적합한 해빙 모델 개발 꾸준히 지원 ▪ UAV, AUV, 플롯 등 활용하는 무인 해빙 관측기술 개발 활발
영국	▪ 파고부이 등 해빙 관측기술 개발 및 SOOS, ASPeCt 등 남극 해빙 관련 국제협력 관측활동 선도 및 참여 활발
캐나다	▪ 해빙모델 개발 및 지구시스템모델과 결합하여 계절예측 자료 생산 - CICE 해빙 모델을 개발·개선하고 연계된 자료동화 시스템 구축으로 지구시스템모델 계절예측 자료 성능 제고로 이어지도록 개발
중국	▪ 초고해상도 해빙모델 개발 및 이를 활용한 기후변화 연구 수행 - 고성능 전산자원을 토대로 CICE 해빙모델을 도입하여 지구시스템 모델에 접합 후 2km 격자 초고해상도 버전으로 기후변화 연구
프랑스	▪ 해빙모델 개발 및 지구시스템모델과 결합 연구 수행 - SI3 해빙 모델을 현장 관측자료와 비교검증을 통해 집중적으로 개발·개선하여 다수의 지구시스템모델 구성요소로 결합
이탈리아	▪ 자료동화 기법을 응용하여 AI 기술로 해빙 모델 오차 개선 및 예측에 응용남극 해빙 예측연구 수행
호주	▪ 해빙 관측기기 개발 및 현장 관측 분야 선도적 연구 수행 및 ASPeCt에 주도적으로 참여하여 해빙 관측자료 수집·분석
민간	▪ 국내 남극 해빙예측 관련 분야에의 투자 및 인력양성 미비 - 남극 해빙 관측 관련 국내 전문가가 전무하여 국내 육성 필요 - 기상청 및 해양과학기술원에서 각각 기존 선진국의 지구시스템모델을 도입하여 일부 개선하여 활용하고 있는 지구시스템모델의 일환으로 해빙모델 모듈이 포함되어 있으나 관련 전문가는 부족 - 대다수 대학 및 연구기관에서는 미국 및 유럽의 커뮤니티 지구시스템모델 또는 지역 기후모델을 도입하여 해빙 관련 연구 수행 중
시사점	▪ 극지연구 선도국은 해빙 관측기기 개발·활용 및 해빙 모델 개발·개선 분야 투자를 지속해 극지 해빙 프로세스 이해 및 예측성 제고 - **국제협력연구**를 통해 해빙 관측 및 모델링 분야 노하우 및 기술전수 가능한 **우호적 파트너쉽 가능** - 현장 관측자료 제공·교환 및 연구인력 상호교류 등 **상보적 관계 추진**이 이상적

제3장 기술수준 분석

제1절 극지연구 기술수준 분석
제2절 특허 기술추세 분석
제3절 논문 분석
제4절 결론 및 시사점

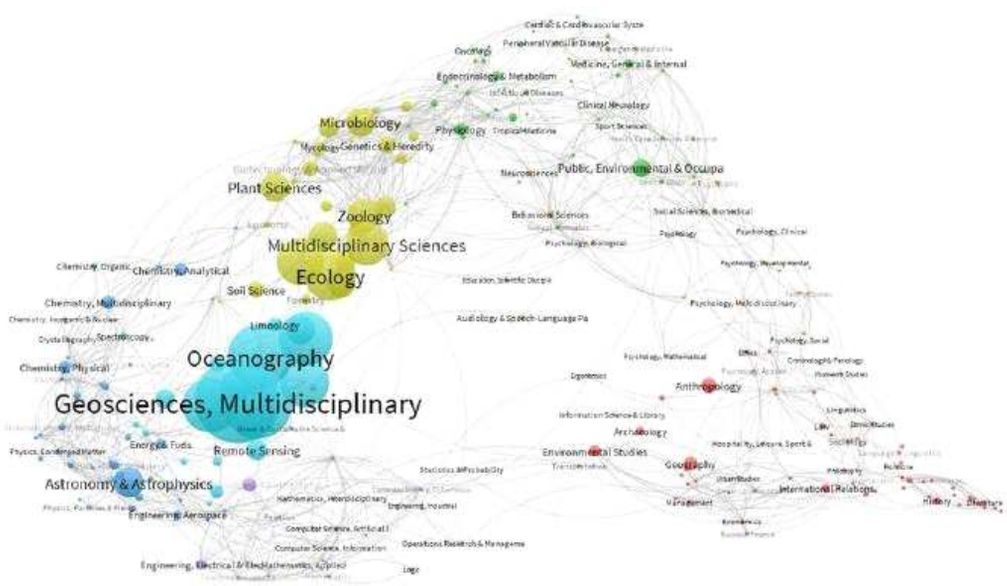
제1절 극지연구 기술수준 분석

1. 극지연구 글로벌 수준 분석

가 기후변화 연구의 최적지이자 자원경쟁의 각축장으로서 극지

■ 기후변화 연구의 최적지이자 글로벌 자원경쟁 심화로 인해 극지 연구에 대한 관심이 꾸준히 증가하고 있으며, 극지연구의 중요성이 더욱 커지면서 남극과 북극에 대한 영향력 확대를 위한 국가 간 경쟁이 치열

- 그러나 남극을 제외한 북극연구 프로젝트는 건수와 펀딩규모에 있어서 글로벌 전체 펀딩의 1% 수준인 것으로 나타났으나 우리나라 극지연구 투자는 남극과 북극을 포함하여 2020년 0.48%에 불과
- 극지분야 204개 클러스터(세부 연구주제 혹은 연구영역) 연구지형도는 아래와 같으며, 노드크기는 클러스터별 문헌 수 비중에 비례하여 표현함. 204개 클러스터는 크게 대기, 환경·사회, 생물·생태계, 해양, 지구 5개 거시영역으로 구분하여 분석

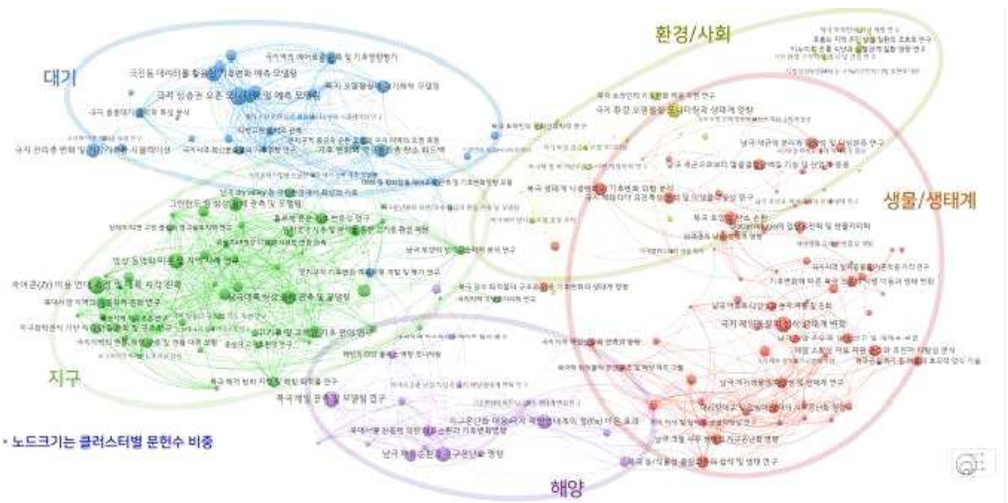


[그림 28] 글로벌 연구지형도에서 극지연구 영역 (KISTI, 2021)

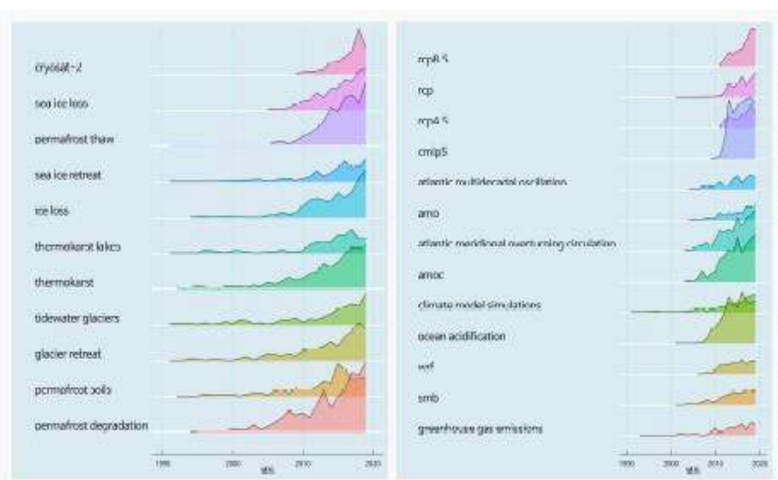
- 그 결과 극지분연구 키워드에 대해 전체 출현빈도에서 최근 5년(2015~2019)의 빈도가 50%를 상회하는 키워드 중에서 급상승 키워드 분석 결과 지구온난화에 따른 해빙, 극지 미생물 유전체 분석, 기후변화 예측 3개 그룹이 두드러짐

전체 키워드 기반 극지분야 글로벌 연구지형도

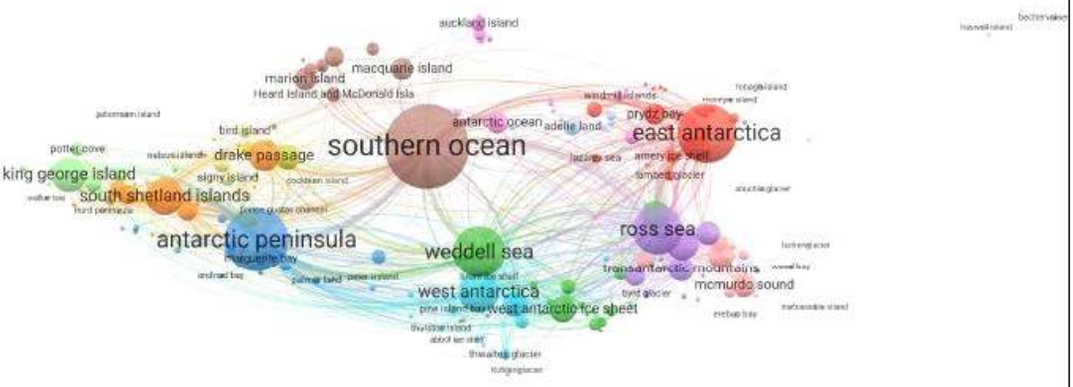
- 남극 지역은 남극반도와 동남극대륙, 웨들해와 로스해에서 많은 연구가 수행
- 덴마크 노르웨이 캐나다 핀란드 러시아는 북극 연구 비중이 높으며, 뉴질랜드, 호주, 이탈리아, 스페인은 남극 비중이 높게 나타남. 한극은 남극과 북극의 연구비중이 비슷한 것으로 나타남. 극지연구 선도기관 중 호주 AAD와 영국 BAS는 남극 지역연구 비중이 높으며, 노르웨이 NPI, 러시아 AARI, 미국 NOAA는 북극 지역연구 비중이 높게 나타남.



[그림 29] 극지영역 전체 문헌 연구지형도



[그림 30] 해빙 및 기후변화 예측 관련 키워드의 시계열 추이



[그림 31] 남극지역명 기반 연구지형도

극지연구소 연구 성과 특성 분석 (Clarivate professional Service, 2024)

- 지구과학 분야의 논문이 농업, 환경 및 생태와 함께 큰 비중을 차지하고 있음.
- 지구과학 분야는 2013년부터 고인용 논문의 증가와 함께 분야별 영향력 지수가 상승 중. 최근 10년가 고인용 논문 생산성은 줄어들고 있는 경향.
- 해양학, 기상학 및 대기과학은 노문 수 뿐만 아니라 고인용 논문 비율 및 분야별 영향력 지수 등에서 전반적으로 우수한 성과를 보임. 꾸준한 연구 성과와 함께 높은 국제 공저율을 보이며 상위 저널 투고율이 높음.
- 연구활동이 활발하며 영향력이 높은 주제는 해양학, 기상학, 대기과학으로 국제 공저 비율이 국내 공저 비율의 두 배를 넘으며 국제 협력을 통한 연구가 활발함. 국제 협력에 의해 배출되는 논문들이 대체로 높은 영향력을 보임.
- 기후 변화 주제는 국제 공저율이 100%로 국제적인 연구 협력이 활발히 진행되고 있으며 분야별 영향력 지수와 상위 10% 논문 비율이 높음. 연구 확대와 협력 강화를 통해 추가적인 영향력 향상이 가능할 것으로 전망.

나 극지분야 유망연구영역 도출 결과

극지연구 유망연구영역 도출을 위한 선별 기준에 따라 유망성 탐지 지표를 종합하여 33개의 유망 연구영역을 도출한 결과, 극지지역 온난화 장기 기후변화 예측 및 모델링이 두 번째 유망한 주제로 도출

연번	cluster_id	클러스터명	논문 수	유망성 종합값
1	1183	원격영상 데이터를 활용한 극지지역 매핑	123	0.685
2	1033	극지지역 온난화 장기 기후변화 예측 및 모델링	2,179	0.679
3	1026	기후 변화와 영구동토층 탄소 피드백	2,260	0.575
4	1072	그린란드 등 빙상 융해 관측 및 모델링	2,401	0.570
5	1085	남극대륙 빙상 융해 관측 및 모델링	2,388	0.530
6	1182	환경 DNA와 메타바코딩 기반 극지생태계 모니터링	113	0.510
7	1009	북극 생태계 식생변화의 기후변화 위험 분석	1,882	0.504
8	1011	극지 박테리아 유전특성 분석 및 미생물다양성 연구	1,689	0.487
9	1052	기후변화로 인한 극지지역 용존유기물 변동 측정	1,068	0.475
10	1084	지구온난화에 따른 베링해의 해양생태계 변화	1,245	0.475
11	1241	기후변화에 따른 남극반도 생태계 변화 연구	195	0.463
12	1063	극지지역 가스하이드레이트 탐사 연구	817	0.456
13	1059	남극진동과 남반구 기후변화 시뮬레이션	1,767	0.454
14	1034	해수면 변동 예측 연구	1,549	0.450
15	1013	극지역의 에어로졸 관측 및 기후영향평가	1,539	0.441

[그림 32] 극지연구 유망연구영역

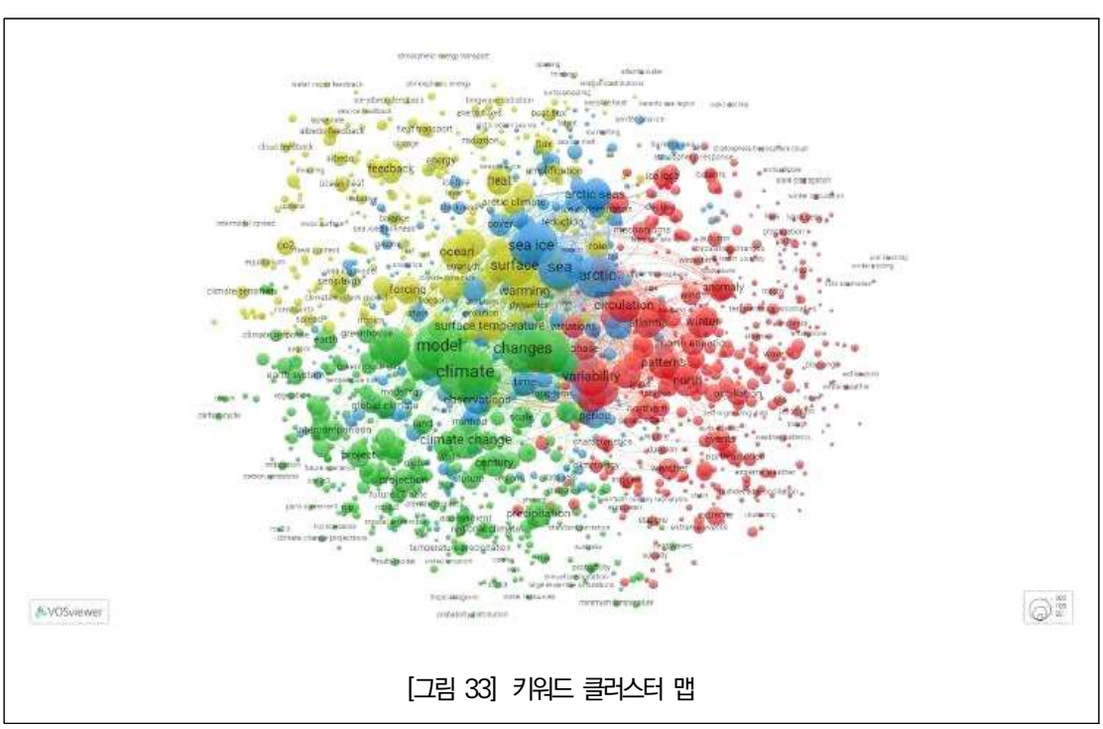
다 극지지역 온난화 장기 기후변화 예측 및 모델링

- 극지는 기후변화에 따른 반응이 매우 빠르고 민감하게 나타나는 지역으로 지구의 기후변화를 감지하고 예측하기 위한 최적지임 지구 온난화에 . 대한 장기적인 예측 및 모델링으로 기후변화가 지구환경에 미치는 영향을 연구

- 극지지역 온난화 장기 기후변화 예측 및 모델링 클러스터의 유망성 탐지 지표 산출 결과, 신규성이 204개 클러스터 중에 가장 높고, 성장성, 응집성도 높은 수준임. 딥러닝 모형에서 성장가능성이 높은 것으로 예측됨. 또한, KOPRI의 영향력은 높은 편임.
- 극지지역 온난화 장기 기후변화 예측 및 모델링 클러스터를 구성하는 논문 수는 2,179편임. 2005년 이후 연평균증가율 33.1%로 논문 수가 점차 증가하고 있음.
- 유엔기후변화협약에 의한 교토의정서 발효(2005년)나 파리협약(2015년) 등 지구온난화에 대응한 기후변화의 감시·예측 활동이 강화된 결과가 반영된 것으로 보임.
- 해당 클러스터에서 분류가 수록된 논문은 2,101건이며, Meteorology & Atmospheric Sciences(64.16%), Geosciences, Multidisciplinary(25.18%), Environmental Sciences(9.90%), Oceanography(5.85%)등의 분야가 해당 클러스터에 분포함
- 기후변화의 예측과 모델링을 위한 기상학과 대기과학, 지질 및 환경과학 기반 및 응용기술이 요구됨.
- NOAA(9.04%), AWI(5.74%), NIPR(1.56%), KOPRI(1.38%) 순으로 해당 클러스터의 연구를 수행

하는 것으로 나타남.

- 미국 NOAA는 우주기상 예측 및 예보 프로그램 등 다양한기후변화 프로젝트에 막대한 예산을 투입하여 관련 연구를 수행하고 있으며, 기후변화에 관한 정부간협의체(IPCC) 등 국제기구와의 협력활동도 활발한 편임. 장기 기후변화 예측 및 모델링 연구분야에서 KOPRI의 활동은 저조한 것으로 나타남.
- 주요 벤치마킹 기관 중에 AWI, BAS, NOAA, NIIPR, NPI 등이 우수모형을 보임.
- PRIC을 제외한 벤치마킹 기관 모두 Top10% 구간에 분포하고 있어 극지지역 온난화 장기 기후변화 예측 및 모델링 연구에서 벤치마킹 기관들의 영향력이 큰 것으로 보임.
- KOPRI는 전 구간에 걸쳐 분포하고 있으며, Top10% 구간의 비율이 가장 높은 우수모형을 보임.
- 해당 클러스터에서 논문 수 기반의 활동도 지수는 NIPR, NOAA, AARI, PRIC, KOPRI가 전체평균(0.5) 이상이며, 매력도 지수는 NIPR, NOAA, KOPRI가 전체평균(0.5)을 상회함. KOPRI는 해당 영역에서 활동이 활발하고 영향력 측면에서도 높은 수준을 보임.
- 해당 클러스터 내의 분석대상 키워드는 개이며 8,410 , 이 가운데 키워드 매핑에 사용한 키워드는 11회 이상 출현한 1,503개임. VOSviewer 해상력 1.0, 최소 클러스터 구성키워드 50개인 경우, 극지지역 온난화 장기 기후변화 예측 및 모델링 클러스터는 4개의 영역으로 나뉨.
- 극지지역 온난화 장기 기후변화 예측 및 모델링 클러스터의 키워드를 워드클라우드로 보인 결과, reanalysis, cmip5, ensemble, intercomparison, sea ice loss, earth system models 등이 주요 키워드로 나타남.
- 기후변화 장기 예측에 소요되는 해빙 감소(sea ice loss) 등의 재분석자료(reanalysis)의 수집/분석과 CMIP5 기후모델, 지구시스템모델, 앙상블 모델 등 다양한 모델링 기법이 요구되는 연구분야임.



[그림 33] 키워드 클러스터 맵



[그림 34] 워드클라우드 결과

제2절 특허 기술수준 분석

1. 해빙 관련 특허 기술수준 분석

가 해빙과 남북극 해빙 키워드로 국내외 특허 분석 결과

해빙(sea ice) 관련 특허



북극 해빙(arctic sea ice) 관련 특허



국내 특허

출원번호	발명의명칭	발명의명칭(영문)	출원일자
1020140193446	북극해 해빙 면적비 예측 시스템 및 예측 방법	SYSTEM AND METHOD FOR PREDICTING ARCTIC SEA ICE CONCENTRATION	2014.12.30
1020150016834	통계적 확률 예측 기반의 북극해 해빙 면적비 예측 시스템 및 예측 방법	SYSTEM AND METHOD FOR PREDICTING ARCTIC SEA ICE CONCENTRATION BASED ON STOCHASTIC PREDICTION	2015.02.03
1020170074871	북극항로의 중기 빙상정보 실시간 예측방법	Real-Time Mid-Term Prediction Method Of Sea-Ice Information In Arctic Sea Route	2017.06.14
1020220022328	인공지능 기반의 북극 해빙 예측 방법 및 장치	METHOD AND APPARATUS FOR PREDICTING SEA ICE OF ARCTIC BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE	2022.02.21
2020100010668	빙해선박의 얼음부착 방지장치	Apparatus for prohibiting ice sticking at arctic sea vessel	2010.10.18
1020190052838	실 극지해역에서의 빙저항 계측 시스템	SYSTEM FOR MEASURING ICE RESISTANCE IN REAL SEA OF ARCTIC REGION	2019.05.07
1020150061293	북극해빙농도 통계예측 방법 및 시스템	ARTIC SEA ICE STATISTICAL PREDICTION METHOD AND SYSTEM	2015.04.30
1020190030912	극지운항선박의 빙저항 감소를 위한 온수분사장치	APPARATUS OF INJECTING HEATED WATER FOR REDUCING ICE RESISTANCE IN ARCTIC VESSEL	2019.03.19

1020200125380	극지운항선박의 씨체스트 파이프 막힘방지 장치 및 이를 구비한 선박	ANTI-BLOCKING APPARATUS FOR SEA CHEST PIPE OF ARCTIC VESSEL AND VESSEL INCLUDING THE SAME	2020.09.28
1020140192038	극지용 선박의 냉각수 제어시스템	COOLING WATER CONTROL SYSTEM OF ARCTIC VESSEL	2014.12.29
1020120094749	태양 광 발전을 이용한 빙해 선박	ARCTIC SEA VESSEL USING SOLAR PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION	2012.08.29
1020090076387	배의 물속 및 물위 몸체를 연결하기 위한 북극의 무거운-톤수의 운반체 및 얼음-내성의 파일론	ARCTIC HEAVY-TONNAGE CARRIER AND ICE-RESISTANT PYLON FOR CONNECTING THE SHIP UNDERWATER AND ABOVE-WATER BODIES	2009.08.18
1020117028499	부유 빙해 선박용 계류 시스템	MOORING SYSTEM FOR FLOATING ARCTIC VESSEL	2010.02.02
1020190011006	냉각수 제어 시스템을 갖는 극지용 선박 및 상기 극지용 선박에서의 냉각수 제어 방법	ARCTIC VESSEL HAVING COOLING WATER CONTROL SYSTEM AND METHOD FOR CONTROLING COOLING WATER IN THE ARCTIC VESSEL	2019.01.29
1020220145975	극지 운항 선박의 통합 상태 모니터링 시스템 및 방법	INTEGRATED CONDITION MONITORING SYSTEM AND METHOD FOR ICE-GOING VESSELS	2022.11.04
1020157032064	극지의 신축형 이동식 해양 시추 유닛	ARCTIC TELESCOPING MOBILE OFFSHORE DRILLING UNIT	2014.03.18
1020100109292	북극 해양에서 분리한 지질 고생산 미세조류 클라미도모나스 세포주 및 이의 용도	Microalgae Chlamydomonas strain high-producing lipid isolated from arctic ocean and uses thereof	2010.11.04
1020130156567	선박 폐열을 이용한 빙해 방한 시스템을 구비한 선박	Winterization for ice classes vessel using waste heat of vessel system	2013.12.16
1020130002313	북극 해양에서 분리한 전분 및 지질 고생산 미세조류 클로렐라 세포주 및 이의 용도	Microalgae Chlorella strain high-producing starch and lipid isolated from arctic ocean and uses thereof	2013.01.09
1020130158636	선박 폐열을 이용한 간접 열교환 장치를 통한 빙해 방한용 유기 랭킨 사이클 시스템을 구비한 선박	A vessel equipping Organic rankine cycle system for ice classes winterization via indirect heat transfer of waste heat in a ship	2013.12.18
1020080114430	박리성 도료를 이용한 내빙도료 도장 방법	PAINTING METHOD OF ICE RESISTANT PAINT USING PEELABLE COATING	2008.11.18
1020190111905	쇄빙선	ICE BREAKER	2019.09.10
1020137022610	극지 생산 타워를 갖는 해저 생산 시스템	SUBSEA PRODUCTION SYSTEM HAVING ARCTIC PRODUCTION TOWER	2011.12.20
1020167004510	연안 및 북극해 연안 영역에서의 파이프라인 매설	PIPELINE BURIAL IN OFFSHORE AND ARCTIC OFFSHORE REGIONS	2014.07.01
1020190179408	극지환경용 동적위치유지 모형시험 시스템	Dynamic positioning model test system for polar environments	2019.12.31
1020160115889	플라보박테리움(Flavobacterium) ASB3-3 균주, 이를 통한 엑소폴리사카라이드(Exopolysaccharide, EPS) 및 이의 생산방법 및 이를 포함하는 항동결용 조성물	Flavobacterium sp. ASB3-3, EPS produced from the ASB3-3, and method for production of the EPS and composition of cryoprotectant	2016.09.08
1020247005477	로봇식 요리용 키친에서의 음식 준비를 위한 방법 및 시스템	METHODS AND SYSTEMS FOR FOOD PREPARATION IN A ROBOTIC COOKING KITCHEN	2015.02.20
1020157026331	아연-유도 균열에 저항성인 강판 및 이의 제조 방법	Steel plate resistant to zinc-induced crack and manufacturing method therefor	2014.03.05
1020180093631	지표면 알베도를 사용하지 않는 지표면 흡수 단파복사 산출 방법 및 장치	Method and Apparatus for Absorbed Shortwave Radiation Calculation Without Using Surface Albedo	2018.08.10
1020167022615	로봇식 요리용 키친에서의 음식 준비를 위한 방법 및 시스템	METHODS AND SYSTEMS FOR FOOD PREPARATION IN A ROBOTIC COOKING KITCHEN	2015.02.20
2020140000101	구명보트 진수장치	LAUNCHING DEVICE OF LIFEBOAT	2014.01.06

1020197001708	베리 및 과일 재료를 생활성 분획으로 전환시키는 열수 공정	HYDROTHERMAL PROCESS FOR CONVERTING BERRY AND FRUIT MATERIALS TO BIOACTIVE FRACTIONS	2017.06.15
1020197021520	식물 재료를 항균 활성을 보유하는 식물 추출물로 전환시키는 방법	PROCESS FOR CONVERTING PLANT MATERIALS TO PLANT EXTRACTS HAVING ANTIMICROBIAL ACTIVITY	2017.12.20
1020167030216	재구성된 식물 물질 및 이의 패키징, 래핑 및 식품 용구용 용도	RECONSTITUTED PLANT MATERIAL AND ITS USE FOR PACKAGING, WRAPPING AND FOOD APPLIANCES	2015.03.27
1020017005561	해양 케이슨 구조물	Offshore Caisson	1999.09.30
1020227007320	2차 대사산물의 생산을 위한 마리노모나스 EF1 및 로도코커스 EF1	MARINOMONAS EF1 AND RHODOCOCCUS EF1 FOR THE PRODUCTION OF SECONDARY METABOLITES	2020.07.28
1020130031889	변이서열을 포함하는 결빙방지 단백질 및 그 용도	Antifreeze protein with mutation and its use	2013.03.26
1020090045921	밸러스트 탱크 히팅 장치 및 방법	BALLAST TANK HEATING APPARATUS AND SAME METHOD	2009.05.26
1020027012682	신규 화장품, 퍼스널 케어, 클리닝제, 및 생체활성 유리를포함하는 영양 보충 조성물 및 이의 제조방법과 용법	NEW COSMETIC, PERSONAL CARE, CLEANING AGENT, ANDNUTRITIONAL SUPPLEMENT COMPOSITIONS COMPRISINGBIOACTIVE GLASS AND METHODS OF MAKING AND USING THESAME	2001.03.27
1020080084628	구명보트 장치	Lifesaving Boat Apparatus	2008.08.28

국외 특허

출원번호	발명의명칭	출원번호	출원일자
02921444	Processes for removing salts and other soluble substances from sea water (바닷물로 부터의 염과 다른 녹는 물질을 제거하기 위한 과정)	02921444	1956.10.12
03431735	POWERPLANTS AND WATER SUPPLY SYSTEM THEREFOR WITHIN THE ETERNAL ICE (영원한 얼음 안에 있는 추진기관과 그 급수 시스템)	03431735	1964.10.05
03139054	Method and apparatus for de-icing submaring snorkels (submaring 잠수용 플라스틱 관을 디아이스하기 위한 방법과 장치)	03139054	1960.10.19
03267416	Ice profiling sonar system (얼음 프로파일링 수중 음파 탐지 시스템)	03267416	1964.02.25
03572273	APPARATUS FOR BREAKING A LAYER OF ICE ON A BODY OF WATER BY REPETITIVE COMBUSTIVE EXPLOSIONS (반복적 연소 폭발로 수역 위의 얼음의 층을 깨기 위한 장치)	03572273	1969.08.06
03370432	Ice protective sleeve for pilings (쌓기를 위한 Ice 보호 슬리브)	03370432	1965.08.03
RE028332	No english title	RE028332	1973.10.25
03563041	OFF-SHORE SHIP MOORING INSTALLATION (역외 선박 계선소 설치)	03563041	1969.03.14
03520358	SUBSEA PRODUCTION SYSTEM (해저 생산 시스템)	03520358	1967.06.29
01541820	Machine for working uppers over lasts (lasts 위의 작동하는 상부를 위한 기계)	01541820	1920.06.24
03391734	Subsea production satellite (해저의 생산 위성)	03391734	1966.01.19
03401746	Subsea production satellite system (해저의 생산 위성 시스템)	03401746	1965.12.10
03122720	Target range and material analyzer system (목표 범위와 재료 분석기 시스템)	03122720	1961.06.02
RE027745	No english title	RE027745	1971.04.09
03552903	SUBSEA PRODUCTION SATELLITE (해저의 생산 위성)	03552903	1968.06.28

03502046	METHOD OF TRANSPORTING AND STORING LARGE QUANTITIES OF WATER (많은 양의 물을 운반하고 저장하는 방법)	03502046	1968.05.06
03469627	SUBSEA PRODUCTION SYSTEM (해저 생산 시스템)	03469627	1967.06.29
03454083	FAIL-SAFE SUBSEA FLUID TRANSPORTATION SYSTEM (이중 안전장치 해저의 유체 운송 시스템)	03454083	1967.06.29
01903074	Meter (계량기)	01903074	1929.04.06
02738655	No english title	02738655	
03217791	Means for maintaining perma-frost foundations (영구 동토층 파운데아션을 유지하기 위한 수단)	03217791	1964.07.30
02859457	Life rafts (구명 뗏목)	02859457	1955.07.05
03262364	Periscope (잠망경)	03262364	1961.05.04
03444570	WET-DRY SURVIVAL SUIT (습건 생존 슈트)	03444570	1966.04.18
02866881	Temperature controlled electrically heated window and window wiper system (온도 전기적으로 가열된 윈도우 제어되고 윈도우 와이퍼 시스템)	02866881	1955.12.19
01369260	Manufacture of bellows-tongue overshoes (bellows-tongue 오버슈즈의 제조)	01369260	1919.04.14
01501053	Machine for shaping uppers over lasts (lasts 위의 쉐이핑 상부를 위한 기계)	01501053	1919.06.13
02447373	Oil burner system comprising a vaporizing block (vaporizing 블록을 포함하는 오일 버어너 시스템)	02447373	1944.05.27
02852593	Electrolytic battery assembly (전해질 배터리 어셈블리)	02852593	1955.05.13
02662043	Thermally insulated building structures, including panels (패널을 포함하는 열적으로 절연된 건물 구조)	02662043	1951.05.08
02630300	ICE WORTHY JACK-UP DRILLING UNIT WITH GAS AGITATED ICE PREVENTION (가스 여기된 얼음방지를 가진 ICE 훌륭한 잭업 천공 유닛)	11775899.5	02630300
03036380	PIPELINE BURIAL IN OFFSHORE AND ARCTIC OFFSHORE REGIONS (국외의 및 북극 국외의 영역에 있는 파이프 라인 매립식)	14742117.6	03036380
02192260	RISER DISCONNECT AND SUPPORT MECHANISM (라이저 미접속과 지지 메카니즘)	09177235.0	02192260
02527880	Declination Compensation for Seismic Surveys (지진 조사를 위한 편각 보정)	12168832.9	02527880
02517570	Methods and feed compositions for masking of fish semiochemicals (피쉬 신호 물질의 마스킹을 위한 방법과 사료 조성물)	12172547.7	02517570
04276070	METHOD OF PRODUCING A SOLID METAL CARBONATE HYDRATE (고체 금속 카보네이트 수화물을 생산하는 방법)	23170489.1	04276070
03645380	CONTINUOUS VERTICAL TUBULAR HANDLING AND HOISTING BUOYANT STRUCTURE (연속적인 수직의 관형 핸들링과 권상 부양성 구조)	18824157.4	03645380
02947970	METHOD AND APPARATUS FOR CONTROLLING ELECTRICAL POWER USAGE BASED ON EXACT SUN ELEVATION ANGLE AND MEASURED GEOGRAPHICAL LOCATION (정확한 태양 고도각과 측정된 지리적인 위치를 근거로 한 전원 사용을 방제하기 위한 방법과 장치)	15168312.5	02947970
03415710	SHOCK WAVE GENERATOR USING AN EXPLOSIVE PELLET (폭발 펠릿을 이용하는 쇼크파 제너레이터)	18180064.0	03415710
02984280	APPARATUSES AND METHODS FOR GENERATING SHOCK WAVES FOR USE IN THE ENERGY INDUSTRY (에너지 공업에 사용되는 쇼크파를 생성하기 위한 장치와 방법)	14782283.7	02984280

02404930	Glucanases, nucleic acids encoding them and methods for making and using them (글루카나제, 그들을 만들고 이용하기 위한 그들과 방법을 암호화하는 핵산)	11176109.4	02404930
03153580	ALDOLASES, NUCLEIC ACIDS ENCODING THEM AND METHODS FOR MAKING AND USING THEM (알돌라아제, 그들을 만들고 이용하기 위한 그들과 방법을 암호화하는 핵산)	16199751.5	03153580
02865750	Transferases and oxidoreductases, nucleic acids encoding them and methods for making and using them (트랜스페라제와 산화 환원 효소, 그들을 만들고 이용하기 위한 그들과 방법을 암호화하는 핵산)	14194469.4	02865750
02412020	SLIP CHIP DEVICE AND METHODS (슬립 칩 장치와 방법)	10756714.1	02412020
01641910	GLUCANASES, NUCLEIC ACIDS ENCODING THEM AND METHODS FOR MAKING AND USING THEM (글루카나제, 그들을 만들고 이용하기 위한 그들과 방법을 암호화하는 핵산)	04777548.1	01641910
02305820	Xylanases, nucleic acids encoding them and methods for making and using them (자이라네이즈, 그들을 만들고 이용하기 위한 그들과 방법을 암호화하는 핵산)	10179307.3	02305820
03036160	METHODS FOR RECOVERING WASTE ENERGY FROM BLEED AIR DUCTS (블리드 에어 덕트로부터 폐 에너지를 복구하기 위한 방법)	14741452.8	03036160
02444490	Cellulolytic enzymes, nucleic acids encoding them and methods for making and using them (섬유소 분해의 효소, 그들을 만들고 이용하기 위한 그들과 방법을 암호화하는 핵산)	11007478.8	02444490
02420570	Arabinofuranosidase enzymes, nucleic acids encoding them and methods for making and using them (아라비노푸라노시데이즈 효소, 그들을 만들고 이용하기 위한 그들과 방법을 암호화하는 핵산)	11007477.0	02420570
22112686 2010112686	빙도제조 장치ICE ISLAND MANUFACTURING EQUIPMENT	20307959 2008307959	22112686 2010112686
17282361 2005282361	동력 산출 장치POWER PRODUCING DEVICE	14383071 2002383071	17282361 2005282361
17291782 2005291782	SAR에 의한 빙후추정 방법ICE THICKNESS ESTIMATION METHOD BY SAR	16103987 2004103987	17291782 2005291782
17265733 2005265733	SAR에 의한 빙후추정 방법ICE THICKNESS ESTIMATION METHOD BY SAR	16081712 2004081712	17265733 2005265733
06504432 1994504432	원격빙후측정 방법(measuring method), 원격얼음 강도 측정 방법, 원격 측정(remote sounding) 방법, 원격빙후측정 장치, 원격얼음 강도 측정 장치 및 원격 측정(remote sounding)체REMOTE ICE THICKNESS MEASURING METHOD, REMOTE ICE HARDNESS MEASURING METHOD, REMOTE MEASURING METHOD, REMOTE ICE THICKNESS MEASURING DEVICE, REMOTE ICE HARDNESS MEASURING DEVICE, AND REMOTE MEASURING BODY	26254285 2014254285	28114516 2016114516
16348265 2004348265	METHOD, PROGRAM AND APPARATUS FOR PERFORMING SIMULATION OF VARIATION IN OIL	15142392 2003142392	16348265 2004348265
16500404 2004500404	생물 활성 유리를 포함한 신규 화장품, 보디 케어, 세제 및 영양보충 조성물 및 제조 방법 및 그 사용null	13570224 2001570224	16500404 2004500404
21543534 2009543534	대기 전기 에너지(electric energy)를 추출하기 위한 전력 변환(power conversion)기null	21518422 2009518422	21543534 2009543534
07308480 1995308480	연소 기관이 실시간 성능 예측 방법 및 실시간 성능 예측 프로그램ACTUAL TIME PERFORMANCE PREDICT METHOD AND ACTUAL TIME PERFORMANCE PREDICT PROGRAM OF COMBUSTION ENGINE	31064402 2019064402	32165341 2020165341

남극(Antarctic sea ice) 해빙 관련 특허



국내		해외특허		ScienceON 바로가기		IP-NAVI 바로가기	
특허실용:	14	미국:	5	논문:	985,864	판례:	-
디자인:	0	유럽:	10	저널:	1,041	분쟁:	-
상표:	-	일본:	9	전체:	986,905	전체:	-
전체검색 결과: 986,943							

국내 특허

출원번호	발명의명칭	발명의명칭(영문)	출원일자
1020080060392	키토세로스 네오그래실 유래 얼음-결합 단백질 유전자, 그유전자를 포함하는 재조합 벡터 및 그 유전자로 암호화된단백질	Ice-binding protein gene derived from Chaetoceros neogracile, recombinant vector comprising the gene, and protein encoded by the gene	2008.06.25
1020070111279	결빙방지물질을 생산하는 피라미모나스 속 극지 미세조류	Antarctic microalgae Pyramimonas genus producing antifreezing molecules	2007.11.02
1020060001585	결빙방지용 포로사이라 속 극지 미세조류	Antarctic microalgae Porosira genus for anti-freezing	2006.01.06
1020040066587	결빙방지용 프라질라리옵시스 속 극지 미세조류	Antarctic microalgae Fragilariopsis genus forantifreezing	2004.08.24
1020160115889	플라보박테리움(Flavobacterium) ASB3-3 균주, 이를 통한 엑소폴리사카라이드(Exopolysaccharide, EPS) 및 이의 생산방법 및 이를 포함하는 항동결용 조성물	Flavobacterium sp. ASB3-3, EPS produced from the ASB3-3, and method for production of the EPS and composition of cryoprotectant	2016.09.08
1020090005600	슈도모나스 플루오르센스 BM07 균주로부터 획득한 중금속 흡착용 조성물	Composition of Heavy-Metal Adsorbing Exobiopolymer from Pseudomonas fluorescens BM07	2009.01.22
1020180000845	락토바실러스 살리바리우스 DJ-sa-01 균주 및 이를 포함하는 면역 증강용 조성물	Lactobacillus salivarius DJ-sa-01 strain and composition for immune enhancement comprising the same	2018.01.03
1020200090444	크로세이박터 아틀란티쿠스 유래 지질분해효소	Lipase from Croceibacter atlanticus	2020.07.21
1020180119954	크로세이박터 아틀란티쿠스 유래 지질분해효소	Lipase from Croceibacter atlanticus	2018.10.08
1020100066823	규조류 특이적인 프라이머, 이를 포함하는 규조류 검출용 PCR 증폭 키트 및 이를 이용한 규조류 검출 방법	Diatom specific primers, PCR amplification kit for detecting the diatom comprising the same and method for detecting the diatom using the same	2010.07.12
1020227007320	2차 대사산물의 생산을 위한 마리노모나스 EF1 및 로도코커스 EF1	MARINOMONAS EF1 AND RHODOCOCCUS EF1 FOR THE PRODUCTION OF SECONDARY METABOLITES	2020.07.28
1020130031889	변이서열을 포함하는 결빙방지 단백질 및 그 용도	Antifreeze protein with mutation and its use	2013.03.26
1020007012954	트리테르펜 조성물	Triterpene compositions	1999.05.19
1020037006732	트리테르펜 조성물에 의한 NF-κB의	Inhibition of NF-κB by triterpene compositions	2001.11.19

국외 특허

출원번호	발명의명칭	출원번호	출원일자
02921444	Processes for removing salts and other soluble substances from sea water (바닷물로 부터의 염과 다른 녹는 물질을 제거하기 위한 과정)	02921444	1956.10.12
03122720	Target range and material analyzer system (목표 범위와 재료 분석기 시스템)	03122720	1961.06.02
03502046	METHOD OF TRANSPORTING AND STORING LARGE QUANTITIES OF WATER (많은 양의 물을 운반하고 저장하는 방법)	03502046	1968.05.06
03444570	WET-DRY SURVIVAL SUIT (습건 생존 슈트)	03444570	1966.04.18
02866881	Temperature controlled electrically heated window and window wiper system (온도 전기적으로 가열된 윈도우 제어되고 윈도우 와이퍼 시스템)	02866881	1955.12.19
04276070	METHOD OF PRODUCING A SOLID METAL CARBONATE HYDRATE (고체 금속 카보네이트 수화물을 생산하는 방법)	23170489.1	04276070
02947970	METHOD AND APPARATUS FOR CONTROLLING ELECTRICAL POWER USAGE BASED ON EXACT SUN ELEVATION ANGLE AND MEASURED GEOGRAPHICAL LOCATION (정확한 태양 고도각과 측정된 지리적인 위치를 근거로 한 전원 사용을 방제하기 위한 방법과 장치)	15168312.5	02947970
02684960	Expression vector for a secretion and detection system (분비와 검출계를 위한 발현 백터)	12005108.1	02684960
02194140	Process for the production of fine chemicals (정밀 화학 물질의 생산을 위한 과정)	09156777.6	02194140
02756090	PRODUCTION OF ODD CHAIN FATTY ACID DERIVATIVES IN RECOMBINANT MICROBIAL CELLS (재조합형 미생물 균체에 있는 홀수의 사슬 지방산 유도체의 생산)	12709480.3	02756090
03119800	GLYCOPEPTIDE DERIVATIVES FOR THE PRESERVATION AND PROTECTION OF BIOLOGICAL MATERIALS AND MICROORGANISMS (생물학적인 소재와 마이크로 오거니즘의 보호와 보호를 위한 글리코펩티드 유도체)	15711716.9	03119800
02141240	Plants that can tolerate herbicides by bypassing the metabolic route (신진 대사 경로를 파이패스시킴으로써 제초제를 수인할 수 있는 플랜트)	09167432.5	02141240
02179660	Process for the heterotrophic production of microbial products with high concentrations of omega-3 highly unsaturated fatty acids (omega-3의 고농도를 가진 미생물 생성물의 헤테로트로픽 생산을 위한 과정은 고도로 지방산을 비포화 상태가 힝다)	09177335.8	02179660
02160460	HYDROCARBON-PRODUCING GENES AND METHODS OF THEIR USE (탄화수소 제조 유전자와 그들 사용의 방법)	08769538.3	02160460
01330530	Process to provide HPPD inhibitor herbicide tolerant plants through bypassing HPPD metabolic pathway. (HPPD 대사 경로를 파이패스시키는 것을 통하여 HPPD 억제제 제초제 내성 식물을 제공하기 위한 과정.)	01983651.9	01330530
17291782 2005291782	SAR에 의한 빙후추정 방법ICE THICKNESS ESTIMATION METHOD BY SAR	16103987 2004103987	17291782 2005291782
17265733 2005265733	SAR에 의한 빙후추정 방법ICE THICKNESS ESTIMATION METHOD BY SAR	16081712 2004081712	17265733 2005265733
06504432 1994504432	원격빙후측정 방법(measuring method), 원격얼음 강도 측정 방법, 원격 측정(remote sounding) 방법, 원격빙후측정 장치, 원격얼음 강도 측정 장치 및 원격 측정(remote sounding)체REMOTE ICE THICKNESS MEASURING METHOD, REMOTE ICE HARDNESS MEASURING METHOD, REMOTE MEASURING METHOD, REMOTE ICE THICKNESS MEASURING DEVICE, REMOTE ICE HARDNESS MEASURING DEVICE, AND REMOTE MEASURING BODY	26254285 2014254285	28114516 2016114516
16517131 2004517131	트리테르펜(triterpene) 조성물에 의한 NF-$_K$B의 억제null	14555753 2002555753	16517131 2004517131
21541761 2009541761	고분해능(high resolution) NMR 분광법에 따르는 초저자장에서 등 핵성 J-커플링(distributor shaft coupling)의 측정null	21517062 2009517062	21541761 2009541761

14516679 2002516679	유리하게 조절된 특정 성분의 제시량을 포함한 카탈로그(catalogue)화 핵산 라이브러리의 구축 및 사용null	12552062 2000552062	14516679 2002516679
35542492 2023542492	면역원성 조성물 및 그 사용null	35514721 2023514721	35542492 2023542492
35526423 2023526423	면역원성 조성물 및 그 사용null	34570514 2022570514	35526423 2023526423
24531211 2012531211	계통 발생 분석을 위한 방법 및 시스템null	24517804 2012517804	24531211 2012531211

남극 해빙 관련 특허

- 해외 검색엔진에서는 “sea ice” 키워드로 10만 건 이상의 특허가 검색되며, “Arctic sea ice”는 15,644건, “Arctic sea ice”는 6,271건 검색됨
- 2000년대 이후 급격한 증가 추세를 보임

제3절 논문 분석

1. 해빙 관련 논문 분석

가 해빙과 남북극 해빙 키워드로 국내외 논문 분석 결과

■ 키워드 트렌드 분석 결과 “sea ice”는 자연과학-지구과학 분야에서 가장 많이 연구되고 있음



키워드	학술논문	학위논문	연구보고서
해빙	714	475	43
북극 해빙	147	43	13
남극 해빙	50	25	3
sea ice	57,279	339	51
Arctic sea ice	20,528	110	23
Antarctic sea ice	12,428	56	13

■ 국외 검색엔진 기반 분석

○ 학술논문, 저서 및 학회 프로시딩 등 문헌 포함한 결과

키워드	영어 학술문헌
sea ice	3,470,000
Arctic sea ice	1,230,000
Antarctic sea ice	877,000

제4절 결론 및 시사점

- 해빙 연구의 역사는 오래되었으나 북극 해빙에 대한 연구논문 출간 및 특허 출원 등이 남극 해빙에 비해 현저히 높은 것으로 분석
- 남극 해빙과 관련한 연구는 기초연구 및 응용개발 전 영역에 있어서 논문 게재가 꾸준히 증가하고 있으며, 논문 게재 수에 비해 특허 건수가 매우 작아 기초연구가 활발하게 진행되고 있는 것으로 나타남
- 응용개발 보다는 기초연구 중심의 연구개발을 통해 논문 경쟁력 강화 노력이 필요하고 활발한 국제공동연구도 필요
- 남극 해빙 변동성 문제는 전지구적인 문제로서 국제적인 공동연구가 활발한 분야로 유럽, 미국 등 선진국들과의 적극적인 교류를 통해 연구역량 강화필요
- 극지연구소, 아라온 등 탐사 인프라의 적극적인 활용 및 연계를 통한 연구개발 및 국제협력 추진 필요

제4장 사업개요

제1절 사업 추진방향
제2절 사업의 차별성
제3절 사업 비전 및 목표

제1절 사업 추진방향

1. 사업 추진 방향 설정

가 사업의 목적

- 남극해 급격한 온난화에 따른 남극 해빙 융해 프로세스 규명 및 국제협력 기반 AI 적용 남극 해빙 장기예측시스템 개발과 계절예측 자료 생산

나 사업의 시급성

- 급격한 남극 해빙면적 축소는 기후변화의 가장 최신 영향
- 체계적인 남극 과학활동 지원·확대* 및 연관된 사회·경제적 파급효과 전망 위해 남극 해빙 장기 (3-6개월) 예측시스템 구축이 시급
  - 장보고기지 앞 해빙은 기지 보급을 위한 비행기 이착륙 활주로, 연구선 하역장소 및 극지 생물 관측장소로 활용되어 해빙 소실시 경제적 손실 발생('22년 장보고기지 하역 불가로 사업비용 약 50억 증액 및 사업기간 2년 연장)

- 해빙 예측 선진 기관들로부터의 기술 전수·확보 최적기*이며, 확보된 국제협력 의향서를 기반으로 상호협력 약속의무 이행**이 필요
  - 이미 12개국 22개 기관에서 남극 해빙 계절예측이 수행되고 있으며 첨단 AI 기반 예측시스템 개발 또한 활발
  - 3개 남극 해빙 관측 선도국 및 5개 해빙 모델링 선도국과의 협력연구 및 SIPN South 국제협력연구 참여 조건 마련

- 제한된 접근성과 극한 환경으로 인한 관측자료 부족이 남극 해빙에 대한 지식 미비 및 예측모델 성능 저하로 연계되고 있어, 선도국과의 격차 해소 위해 남극 해빙 예측 역량 증진 필수적

다 정부 지원 필요성

(정책부합성) 제안 과제는 “국가 과학영토 확대 위한 극지 등 미개척 영역에 대한 탐사 기술 개발과 접근성 증대 및 활용”(제5차 과학기술기본계획,’23~’27)에 부합하며, 12대 국가전략기술에 포함되는 우주항공·해양 기술 개발에 해당

- ‘국정과제 41. 해양영토 수호 및 지속가능한 해양 관리’ 및 ‘국정과제 99. 국격에 걸맞은 글로벌 중추국가 역할 강화 - 기후변화·탄소중립 외교 강화’ 와 연계

(극지연구 거점 확보) 장보고기지 주변 쇄빙선 항로와 기지 비행기 이착륙 중장기 계획을 수립하여 안전하고 체계적인 탐사 지원 등 극지연구거점 확보 위해 필수적인 기술

- 극지연구거점은 「제2차 해양수산과학기술육성 기본계획(‘23~’27)」의 10대 해양수산 전략기술

(R&D 적절성) 극지역 중심의 기후변화 현안대응형 연구사업 개발*에 투자 강화하고자 하는 해양수산부 R&D 중점 투자방향에 부합

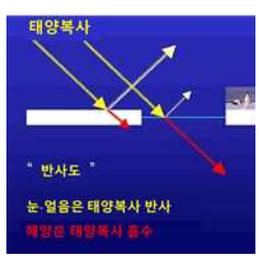
- 「제1차 기후변화 대응 기술개발 기본계획(‘23~’32)」에서 과학기술 혁신을 통한 기후위기 대응과 新시장 선점을 위한 3대 전략 중 기후변화 적응을 위한 기후변화 감시·예측 기술에 해당

제2절 사업의 차별성

1. 기존 사업과의 차별성

가 급격한 남극 빙상 용융에 따른 근미래 전지구 해수면 상승 예측기술 개발

- (사업기간 및 예산) `23년~`31년/428.5억원
- (연구목표) 기후변화에 따른 남극 빙상의 급격한 융해 원인 규명과 이에 따른 전지구 해수면 상승 기여도 예측기술 개발
- (연구내용) 남극 빙권종합관측망* 고도화 및 남극 빙상-해수면 변동 예측
- 남극 해빙 현장 관측은 포함되지 않음

구분	기존 연구	신규 과제
과제명	▪ 급격한 남극 빙상 용융에 따른 근미래 전지구 해수면 상승 예측기술 개발	▪ 남극해 급격한 온난화 대응남극 해빙 예측 기술 개발
연구 목적	▪ 기후변화에 따른 남극 빙상의 급격한 융해 원인 규명 및 전 지구 해수면 상승 기여도 예측기술 개발 *빙상: 지면(땅) 위 넓은 면적을 덮고 있는 거대한 얼음	▪ 첨단 현장 관측기술 및 AI 적용 모델기술 기반 남극 해빙 예측시스템 개발 *해빙(海氷, sea-ice): 바닷물이 얼어서 생긴 얼음
연구 내용	▪ 전남극 빙상모델링 시스템 자체구축 및 해수면 변동 예측 ▪ 빙붕-해양 모니터링 및 빙붕 안정도 연구 ▪ 빙상-지각 상호작용 기반 빙상 손실 및 해수면 변동 예측	▪ 남극 해빙 관측체계 구축 기반 남극 해빙 특성 및 용융 프로세스 규명 ▪ 남극 해빙 예측시스템 개발 ▪ AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산 및 SIPN South 공식 참여
주요 성과물	▪ 남극 육·해상 관측범위 확대 및 남극 정보 175건 확보로 남극 대륙 빙상거동모델 성능개선 ▪ IPCC 단계별(탄소중립/저탄소/고탄소) 시나리오에 따른 근미래(2030/50) 및 먼미래(2100) 남극 빙상-해수면 변동 예측 시나리오 생산역량 제고 ▪ 해수면 예측 정확도 향상 ▪ 우리나라 주도 국제협력 연구 수행 및 국제공동연구 참여 ▪ 빙상모델 상호비교연구(ISMIP7) 공식 참여	▪ 남극 해빙 관측자료 확보 및 선도국 수준 남극 해빙 관측망 구축·운영 ▪ 첨단 남극 해빙 예측시스템 개발로 남극 해빙 예측역량 및 성능 함양 ▪ AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 정기 생산 ▪ 계절예측 인터랙티브 가시화 시스템 ▪ 우리나라 주도 남극 해빙 예측모델링 국제협력 네트워크 구축·운영 및 국제공동연구 수행 ▪ 국제 남극 해빙 계절 예측 프로그램 SIPN South에 공식 참여
연구 범위		 ▪ 해빙은 녹아도 해수면에 영향이 없지만, 지구 반사도 감소시켜 온난화 가속화 함

구분	기존 연구	신규 과제
차별성	▪ (탐사요소) 남극 빙상 거동 관련 정보에서, 남극 해빙 프로세스 관련 정보 확보 *** 기존 연구에 남극 해빙 현장 관측은 포함되지 않음** ▪ (개발내용) 전남극 빙상 거동 모델링 기반 해수면 변동 예측 시스템에서, 지구시스템모델-해빙 모델링 기반 남극 해빙 예측 시스템 개발 ▪ (연구성과) 2300년까지 기후 전망을 산출하는 ISMIP7에 공식 참여에서, 계절 예측자료를 산출하는 SIPN South 공식 참여	
기대 효과	▪ 全 지구 해수면 상승 예측 정확도 향상을 통한 남극發 해수면 상승 재난 대응력 제고 ▪ 우리나라가 주도하는 국제협력연구 수행 및 연구성과 확대 통해 국제사회 영향력 유지·확보 ▪ 해수면 상승에 따른 미래 발생 가능한 피해비용 예방 및 방벽설치 방어비용 절감편익, 방벽설치 시점 단축에 따른 편익 기대	▪ 국내 남극 해빙 관측 및 중장기 예측 역량 확보 그리고 해양 안전체계 구축 ▪ 보다 체계적인 남극 과학활동 지원 및 확대 ▪ SIPN South 공식 참여 및 국제협력 네트워크 구축·운영으로 공신력 및 국제 리더쉽 획득 ▪ 선박운항 탄소발자국을 줄이고 인명과 경제적 손실 위험을 저감하여 관련 산업 부흥에 기여

기존「급격한 남극 빙상 용융에 따른 근미래 전지구 해수면 상승 예측기술 개발」은 남극 빙상 거동 관련 정보 기반 해수면 상승 기여도 예측기술 개발이 목표, 반면 본 사업은 기존 연구에 포함되지 않는 남극 해빙 프로세스 관련 정보 확보 및 남극 해빙 계절예측 자료 생산이 목표임

제3절 사업 비전 및 목표

1. 비전

- (국내) 남극 해빙 현장관측 기술 확보 및 예측자료 자체 생산으로 지구시스템 메커니즘에 대한 이해 증진 및 국가 기후변화 대응기술력 제고와 해양재난 예측정확도 향상에 기여
- (국외) 우리나라가 주도하는 국제협력연구 수행 및 유용한 남극 해빙 계절예측 자료 전파를 통해 국제사회 영향력 확보
- 남극 탐사선 최적 항로 계획 수립 및 어선의 안전 조업에 기여, 선박 운항 탄소발자국 및 인명과 경제적 손실 위험 저감하여 관련 산업 부흥에 기여

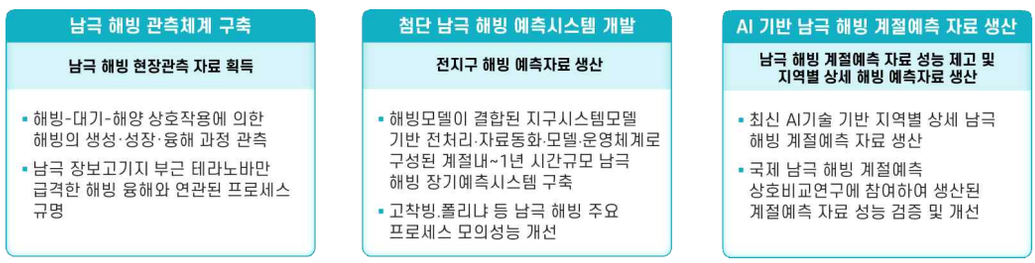
2. 목표

- 남극해 급격한 온난화에 따른 남극 해빙 융해 프로세스 규명 및 국제협력 기반 AI 적용 남극 해빙 장기예측시스템 개발과 계절예측 자료 생산
- (양적성과) ① 남극 해빙 관측체계 구축 및 남극 정보 100건 확보로 남극 해빙모델 성능개선 ② 3개월마다 AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산 ③ 장보고기지 테라노바만 상세 해빙 예측자료 산출 및 인터랙티브 가시화 시스템 구축 ④ 국제협력 연구 1건 주도(남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축·운영) 및 11건 참여
- (질적성과) ① AI 기반 남극 해빙 계절예측 생산역량 제고(기술수준 Level 1→Level 4 향상) ② 해빙모델 예측 정확도 향상(예측 오차 30% 감소) ③ 10개국 22개 기관 참여하는 국제 남극 해빙 계절예측 프로그램 SIPN South에 공식 참여

3. 사업의 범위

- (남극 해빙 관측체계 구축) 글로벌 협력 기반 남극 해빙 현장 관측기술 획득·수행 및 예측 능력 향상에 필수불가결한 정보 획득
- (남극 해빙 예측시스템 개발) 지구시스템-해빙모델 결합 남극 해빙 예측시스템 개발 및 현장 관측자료 기반 개선 및 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축 및 운영

(AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산) 최신 AI기술 기반 지역별 상세 남극 해빙 계절예측 자료 생산체계 구축 및 정기 산출 및 SIPN South 공식 참여(계절예측 자료 분기별 정기 제출)



[그림 35] 연구범위 및 목표



[그림 36] 연구내용

4. 현재 기술수준 및 향후모습

관련 기술 현황 목록 및 기술 수준 표시

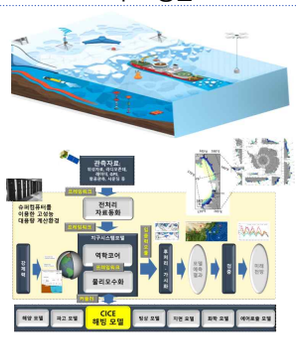
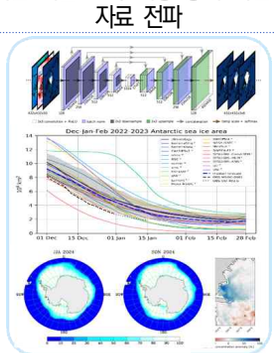
구분	기술분야	선진기관	선진수준	국내수준	목표수준
남극 해빙 관측체계 구축	남극 해빙 직접 관측기술	WHOI(미)	●●●●○	●○○○○	●●●○○
	폴리냐 생성·소멸 과정 관측	SCRIPPS(미) AAP(호)	●●●●○	●○○○○	●●●○○
	해빙 상·하부 관측기술	LEDO(미) AWI(독)	●●●●○	●○○○○	●●●○○
남극 해빙 예측시스템 개발	해빙모델링	EC(캐) IPSL(프)	●●●●○	●○○○○	●●●○○
	계절예측 시스템 구축	ECMWF(EU)	●●●●●	●●○○○	●●●○○
	전처리 및 자료동화	ECMWF(EU)	●●●●●	●●○○○	●●●○○
AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	딥러닝 기반 하이브리드 예측	Oxford Univ.(영)	●●●●○	●●●●○	●●●●●
	AI 기반 해빙 계절예측 자료 생산	EMCC(이)	●●●●○	●○○○○	●●●●○
	AI 기반 자료동화	ECMWF(EU)	●●●●○	●●○○○	●●●●○
	남극 해빙의 전지구적 영향 연구	Columbia Univ. (미)	●●●●○	●○○○○	●●●○○

관련 핵심 기술 및 기술 수준 조사

구분	기술분야	국내 수준('24)	선진국 수준	선진기관
남극 해빙 관측체계 구축		남극 해빙 직접관측 경험 부족	국가별 특화된 고도의 남극 해빙 현장 관측기술 보유, 국내 기술/장비 활용, 관측/운영/분석이 가능한 단계	
	남극 해빙 직접 관측기술	〈Level 1〉 남극 해빙 직접관측 경험 전무	〈Level 4〉 파고부이, 얼음질량균형부이, ApRES 등 장비 직접개발/관측/분석	WHOI(미)
	폴리냐 생성·소멸 과정 관측	〈Level 1〉 외국 장비 도입/시험 단계	〈Level 4〉AXCTD, 표층부이 관측/분석 및 국제 ASPeCT 관측 프로토콜 주도	SCRIPPS(미) AAP(호)
	해빙 상·하부 관측기술	〈Level 1〉 외국 장비 도입/시험 단계	〈Level 4〉UAV, 플롯, LIDAR, 해빙코어 등 장비 직접개발/관측/분석	LEDO(미) AWI(독)
남극 해빙 예측시스템 개발		외국모델 도입/운영 단계	해빙 예측시스템 자체 개발/운영 단계	
	해빙모델링	〈Level 1〉 외국에서 개발된 해빙 모델 도입 단계	〈Level 4〉해빙모델 자체개발 및 활용	EC(캐) IPSL(프)
	계절예측 시스템 구축	〈Level 2〉 외국에서 개발된 계절예측 시스템 도입·운영 단계	〈Level 5〉 해빙모듈이 포함된 지구시스템 모델로 계절예측 수행 단계	ECMWF(EU)
	전처리 및 자료동화	〈Level 2〉 저해상도 지구시스템 모델 위한 전처리 및 자료동화 시스템 도입/개선 운영 단계	〈Level 5〉 전처리 및 자료동화 시스템 개발/운영 단계	ECMWF(EU)
AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산		AI 기반 계절예측 적용 원천기술 확보 단계	AI 기반 계절예측 자료 생산 단계	
	딥러닝 기반 하이브리드 예측	〈Level 4〉 엘니뇨 등 계절예측 위한 딥러닝 기반 하이브리드 예측시스템 개발/운영	〈Level 4〉 계절예측 위한 딥러닝 기반 하이브리드 예측시스템 개발/운영	Oxford Univ.(영)
	AI 기반 해빙 계절예측 자료 생산	〈Level 1〉 남극 해빙 계절예측 자료 생산 전무	〈Level 4〉저해상도 남극 해빙 계절예측 자료 분기별 생산	EMCC(이)
	AI 기반 자료동화	〈Level 2〉 북극해빙 계절예측 위한 AI 기반 자료동화 시스템 개발 중	〈Level 4〉저해상도 남극 해빙 계절예측 위한 AI 기반 자료동화 시스템 개발/운영	ECMWF(EU)
	남극 해빙의 전지구적 영향 연구	〈Level 1〉 기후변동성에 따른 남극 해빙의 변화 분야 부문만 연구	〈Level 4〉 다양한 시간규모의 남극 해빙의 전지구적 영향 연구 활발	Columbia Univ.(미)

기존·신규과제 기술 개선수준 및 향후모습 비교

핵심항목	현재 수준(모습)	R&D 수행시 개선수준(모습)		향후 수준(모습)
		'25년 수준	목표수준	
	~'24	'25	'25~'30	'31~(종료이후)
남극 해빙 관측체계 구축	〈Level 0〉 ▪ 국내에서 시도된 바 없음 ▪ 미국, 호주 등 선도국에서 ASPeCT 국제공동 해빙관측 수행 중	〈Level 0→1〉 ▪ 국제협력 기반 해빙 위 관측 및 해빙 상하부 관측 수행 - 정선자료: 20정점 - 시계열: 2개소 확보 - 국제협력 3건	〈Level 1→3〉 ▪ 남극 해빙 관측망 운영 및 국제협력 관측 프로그램 참여 - 정선자료: 100정점 - 시계열: 4개소 확보 - 국제협력 2건 ▪ 남극 장보고기지 부근 테라노바만 급격한 해빙 융해와 연관된 프로세스 규명	〈Level 4〉 ▪ 남극 해빙 관측기술 전파로 남극연구 수월성 획득
남극 해빙 예측시스템 개발	〈Level 1〉 ▪ 지구시스템 모델 운용 및 단위모듈 개발·개선	〈Level 1→2〉 ▪ 지구시스템-해빙모델 결합 예측시스템 개발 - 국제협력 6건	〈Level 2→3〉 ▪ 전처리·자료동화·모델·운영 체계로 구성된 계절내~1년 시간규모 남극 해빙 장기예측시스템 구축 ▪ 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축 및 운영 - 국제협력 1건 주도	〈Level 4〉 ▪ 남극 해빙 장기예측시스템 성능제고 및 활용연구 분야 확대 ▪ 주도적 남극 해빙 모델링 분야 국제협력 네트워크 운영
AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	〈Level 1〉 ▪ 국내 AI 적용 기후예측 단위원천기술 ▪ 국외 SIPN South(12개국 22개 기관) 남극 해빙 계절예측	〈Level 1→2〉 ▪ 지구시스템-해빙모델 기반 하이브리드 예측시스템 개발 및 AI 기법 적용	〈Level 2→4〉 ▪ AI기술 기반 지역별 상세 남극 해빙 계절예측 자료 생산 ▪ SIPN South 참여 자료 생산	〈Level 5〉 ▪ 테라노바만 상세 남극 해빙 계절예측 자료 제공으로 남극 선도국 지위 확보

상세 내역	과거 연구성과 ⇨	현재 수준 ⇨	향후 모습
기술 수준	남극 해빙 관측 지원 인프라 및 예측시스템 적용 가능한 단위원천기술	남극 해빙 현장관측 자료 획득 및 AI 기반 남극 해빙 계절예측자료 생산	全남극 해빙 상세 계절예측자료 생산
운용 방식	국외 위성기반 실시간 모니터링 자료	AI기술 기반 남극 해빙 상세 계절예측 자료 생산	AI기술 기반 남극 해빙 상세 계절예측 자료 전파
그림	 ('21.12.15.) 기지 앞 바다 전경 해빙 유지 ☞ 해빙하역 가능  ('22.11.28.) 기지 앞 바다 전경 해빙 완전 소실 ☞ 해빙하역 불가		
적용 대상	남극 장보고기지 부근 테라노바만 해빙	남극 장보고기지 부근 테라노바만 해빙	全남극 주변 해빙
파급 효과	남극 해빙 융해에 의한 탐사활동 축소 인지	SIPN South 상호비교에서 우수성능 입증	남극 해빙 상세 계절예측 자료 전파로 선도국 지위 획득

제5장 전략과제 및 핵심기술 도출

제1절 기술수요조사
제2절 전략과제 선정
제3절 총괄기술 로드맵
제4절 국제협력 필요성 및 프로젝트 추진체계
제5절 기대효과

제1절 기술수요조사

1. 수요조사



- (추진방향) 3개 분과별 주요 추진 방향에 따른 수요조사 실시
- (기술수요조사) 기술수요조사 사전검토 우선순위 검토
  - 남극 해빙 관측체계 구축
  - 남극 해빙 예측시스템 개발
  - AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산

[표 2] 기술수요조사 제안기술목록

연번	분과	제안기술명
1	남극 해빙 관측체계 구축	남극 폴리냐 지역에서 해빙 생성율을 조절하는 요인 분석 연구
2	남극 해빙 관측체계 구축	테라노바만 폴리냐 생성 및 소멸과정 관측
3	남극 해빙 관측체계 구축	해빙 하부 관측 기반 해빙 용융률 도출
4	남극 해빙 관측체계 구축	해빙 용융 기작과 연관된 지역 및 원격 대기-해양 메커니즘 연구
5	남극 해빙 관측체계 구축	테라노바만 대기-해양 및 해빙-대기 상호작용의 계절적 특성 연구
6	남극 해빙 관측체계 구축	고착빙 관측 수집, 생산 및 분석 기술 개발
7	남극 해빙 관측체계 구축	온난화에 따른 해양순환 변화가 해빙 면적에 미치는 영향 연구
8	남극 해빙 관측체계 구축	테라노바만 관측자료 수집 및 분석 기반 3차원 해빙-대기-해양 구조 규명
9	남극 해빙 관측체계 구축	해빙-대기-해양 경계층 구조 이해 및 모델링
10	남극 해빙 관측체계 구축	해빙과 빙붕 융빙수의 상호작용 및 판얼음 생성 메커니즘 이해
11	남극 해빙 관측체계 구축	해빙 면적 감소에 따른 연안 폴리냐 활동성 변화 규명
12	남극 해빙 관측체계 구축	고착빙산 관측 기술 개발 및 고착빙산-고착빙 상호 프로세스 이해
13	남극 해빙 관측체계 구축	해빙-대기-해양 상호작용에 의한 해빙의 성장·융해 과정 이해
14	남극 해빙 관측체계 구축	남빙양의 해빙 지역의 대기-해양 플럭스 관측
15	남극 해빙 관측체계 구축	로스해 다년빙 관측 및 용융 프로세스 규명
16	남극 해빙 관측체계 구축	AUV 활용 해빙 하부 용융 메커니즘 관측 연구
17	남극 해빙 관측체계 구축	폴리냐 변동성의 특성 및 기후변화와의 상관관계 규명
18	남극 해빙 예측시스템 개발	남극 해빙의 장기 변동성 이해 및 다른 기후인자와의 관련성 분석

19	남극 해빙 예측시스템 개발	남극 연안 고착빙 분포의 모델 재현 성능 개선
20	남극 해빙 예측시스템 개발	해빙 예측시스템 특성 분석 기술 개발
21	남극 해빙 예측시스템 개발	전처리-자료동화-예측-후처리 자동화 체계 구축 기술 개발
22	남극 해빙 예측시스템 개발	예측결과 통계적 분석 및 가시화 기술 개발
23	남극 해빙 예측시스템 개발	원격상관 및 해빙 특성 활용 계절예측 모델 고도화
24	남극 해빙 예측시스템 개발	해빙 통계모델 개발 및 물리모델과 성능 비교
25	남극 해빙 예측시스템 개발	남극 해빙 초단기 예보시스템 구축
26	남극 해빙 예측시스템 개발	남극 해빙 계절내/계절 예측 시스템 구축 및 예측성의 특성 평가
27	남극 해빙 예측시스템 개발	해빙모델의 복사 및 지표속 매개변수 개선 연구
28	AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	비격자 관측을 처리할 수 있는 딥러닝 기법 개발
29	AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	해빙모델 성능 개선 및 해빙 변동제어 프로세스 이해 기반 예측성능 고도화
30	AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	남극 해빙 면적과 부피의 계절 주기 및 경년 변동성 에측을 결정하는 주요 물리과정과 매개변수 규명
31	AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	하이브리드 예측모델 개발
32	AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	AI 기반 남극 해빙 자료동화 시스템 개발
33	AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	SIPN South 참여한 수치모델 및 AI기반 해빙 계절예측 모델 성능 분석
34	AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	봄철 해빙 두께 결정 프로세스 이해 기반 해빙 두께 예측기술 개발
35	AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	딥러닝 기반 남극 해빙 예측 모듈 개발
36	AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	딥러닝 기반 지역별 해빙 예측 상세화 시스템 구축
37	AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	다중모델앙상블 기반 지역별 남극 해빙 예측자료 생산

2. 사전검토

사전검토를 통해, 접수된 수요조사의 분야 적정성 및 중복성 검토

- 해당 분야에 부합하지 않은 기술수요는 타 분야로 분류

기초·공공 연구 성격에 부합하게 검토항목 및 가중치 설정

- 사업목적 부합성, 사업목표 기여도, 제안내용 기술성, 제안내용 신규성, 성과 활용성을 고려하여 우선순위 검토 후 항목 설정
- 각 검토항목의 가중치를 산출하기 위하여 AHP 분석 실시

[표 3] 우선순위 검토항목 및 가중치

기준	가중치	정의
사업목적 부합성	0.3063	이슈와 문제를 해결할 수 있는 과학기술적 대안인지
사업목표 기여도	0.1640	본 사업 목표 달성에 기여할 수 있는지
제안내용 기술성	0.2897	제안된 연구개발내용이 구체적인지
제안내용 신규성	0.1088	기존 연구개발과제와의 차별성이 있는지 신규성이 있는 내용인지
성과 활용성	0.1311	연구 성과가 산업 또는 공공 분야에 활용되거나 극지 분야 중 다른 분야에 확산될 수 있는지

3. 우선순위 검토

분야별 3인이 검토항목에 따라 우선순위 검토(제안자 제외)

[표 4] 분과별 반영 현황

분과별	검토건수 (빈도, %)	반영 (빈도, %)	미반영 (빈도, %)
남극 해빙 관측체계 구축	17(100%)	14(82%)	3(18%)
남극 해빙 예측시스템 개발	10(100%)	7(70%)	3(30%)
AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	10(100%)	8(80%)	2(20%)
합계	37(100%)	21(62%)	13(38%)

제2절 전략과제 선정

1. 남극 해빙 관측체계 구축

2. 남극 해빙 예측시스템 개발

3. AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산

제3절 총괄기술 로드맵

1. 중점 투자 및 기술분야

분야	세부내용	핵심분야
남극 해빙 관측체계 구축	첨단 현장 관측기술 기반 남극 해빙 관측체계 구축	해빙 위 관측장비 설치 및 관측
		대기·해양 관측자료 기반 테라노바만 폴리냐 생성·소멸 과정 관측
		아라온 기반 라이다, ASPeCT 관측 및 국제협력 기반 UAV 활용 해빙 관측
	남극 해빙 관측망 운영 및 국제협력 관측 프로그램 참여	해빙-대기-해양 상호작용에 의한 해빙의 생성·성장·융해 과정 관측
		해빙 하부 관측 기반 해빙 용융률 도출
		다양한 해빙 표층 관측 기반 해빙 생성·성장·융해 과정 특성 이해
	급격한 남극 해빙 용융 프로세스 규명	3차원 해빙-대기-해양 구조 분석
		위성자료 기반 고착빙산-해빙 상호작용 분석 남극-전지구 기후변화 개념모형 도출
	남극 해빙 용융에 영향을 미치는 지역 및 원격 메커니즘 연구	해빙 용융 기작과 연관된 지역 및 원격 대기-해양 메커니즘 연구
		테라노바만 폴리냐 및 고착빙을 포함하는해빙-대기-해양 상호작용 특성 및 예측성 규명
남극 해빙 장기예측시스템 개발	지구시스템-해빙모델 결합 남극 해빙 예측시스템 구축	CICE 해빙모델 기반 지구시스템-해빙모델 결합 남극 해빙 예측시스템 구축
		해빙모델 성능 비교평가 및 해빙모델 안정화
		남극 고착빙 분포의 모델 재현·예측 성능 개선
	남극 해빙 예측시스템 개선 및 최적화	개발된 남극 해빙 예측시스템 개선 및 장기예측 성능 최적화
		해양순환 및 해빙 재현 성능 평가, 해빙 변동 제어 프로세스 도출 및 예측성능 고도화
		남극 연안 고착빙 분포의 모델 재현 성능 검증
	해빙 계절예측 전처리 및 자료동화 시스템 구축	결합 자료동화 위한 해빙-대기-해양 관측자료 전처리시스템 구축
		해빙-대기-해양 결합자료동화 시스템 개발
	해빙 계절예측 전처리 및 자료동화 시스템 성능개선	실시간 관측자료 수집 체계 구축 및 운용
		신규 관측자료 확장 및 활용 동화기법 개발
	남극 해빙 예측시스템 운영체계 개발	전처리-자료동화-예측 후처리 자동화 체계 개발
		예측시스템의 과거 재예측실험을 통한 성능 진단 및 개선
		예측성의 원천 연구 기반 10년규모 장기 남극 해빙 예측시스템 구축
	남극 해빙 예측시스템 운영체계 개선 및 최적화	예측결과 검증 및 가시화 도구 개발
		개별 사례 재예측 실험을 통한 남극 지역 기후시스템 이해도 제고 및 예측시스템 개선
		10년규모 장기 남극 해빙 예측시스템 성능 개선
AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산체계	최신 해빙모델 및 AI기술 기반계절예측 자료 생산 체계 구축	역학 예측 모형 구조적 오차 파악
		딥러닝 기반 남극 해빙 예측 모형 구축
		최신 AI기술 기반 계절예측 모델 개발 및 해빙 특성 분석
	계절예측 자료 생산 체계 성능개선	하이브리드 예측시스템 개발
		지역별 해빙 예측 상세화 시스템 구축
		원격상관 및 해빙 특성 활용 계절예측 모델 고도화
	AI 기반 예측시스템 자료동화 기법 개발 및 개선	부분 컨볼루션 딥러닝 기반 남극 해빙 면적 자료 동화 시스템 개발
		AI 기반 다채널 위성/실측 자료 동화 시스템 개발
		AI 기반 남극 해빙 재분석장 생산·검증및 초기장 생산기법 개발
		AI 기반 남극 해빙 초기장 생산 및해빙 두께 동화 효과 연구
	남극 해빙의 전지구적 영향 이해 기반 남극 해빙 계절예측 개선 방향 도출	남극 해빙 영향 원격상관 연구
		남극 폴리냐 발생 메커니즘 및 주요 기후 모드와의 관련성 연구
		남극 해빙 변동의 전지구적 영향 연구
		남극 해빙 및 폴리냐의 변동성 변화 및 예측모형 모의 진단 및 개선
	SIPN South 참여	SIPN South 다중모델 계절예측 자료 및 기법 비교
		SIPN South 참여 자료 생산

2. 연구 개발 주요 내용

가 남극 해빙 관측체계 구축

- 글로벌 협력 기반 남극 해빙 현장 관측기술 획득·수행 및 예측 능력 향상에 필수불가결한 정보 획득
- 국외 선도 연구기관과 협력 기반 남극 첨단 해빙 관측기술 도입 및 현장 관측 수행으로 예측 향상에 필요한 양질의 자료 획득
  - 쇄빙선 활용 동남극(장보고 기지 부근 포함, 매년) 및 서남극(매 2년) 연안 해양탐사
- 남극 해빙의 생성·성장·융해 특성 및 장보고 기지 부근 테라노바만의 급격한 융빙 프로세스와 이에 영향을 미치는 지역·원격 메커니즘 규명

나 남극 해빙 예측시스템 개발

- 지구시스템-해빙모델 결합 남극 해빙 예측시스템 개발 및 현장 관측자료 기반 개선
- 지구시스템-해빙모델 결합 기반 전처리 및 자료동화 시스템에 운영체계를 갖춘 남극 해빙 예측시스템 구축·개선·최적화
  - 국제협력 기반 해빙모델에서 고착빙, 폴리냐 등 남극 해빙 주요 프로세스 모의성능 개선. 고착빙(Landfast Ice)은 육지에 붙어있는 해빙, 폴리냐(Polynya)는 해빙으로 둘러싸인 호수 같은 공간
- 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축 및 운영

다 AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산

- 최신 AI기술 기반 지역별 상세 남극 해빙 계절예측 자료 생산체계 구축 및 정기 산출
- AI 기반 남극 해빙 예측시스템 자료동화 기법 및 해빙모델에 AI 기법 응용기술 개발
- 최신 해빙모델 및 AI기술 기반 장보고 기지 부근 테라노바만 상세 계절예측 자료 생산체계 구축 및 성능 개선

- SIPN South 공식 참여(계절예측 자료 분기별 정기 제출)
- 첨단 인터랙티브 가시화 시스템 구축 및 운영으로 남극 해빙 계절예측 정보 제공

3. 연구 개발 성과

가 성과 지표

성과지표명	목표치						측정방법
	'25	'26	'27	'28	'29	'30	
남극 정보 확보 달성도	10	30	50	70	90	100	기술개발로드맵에 따라 계획된 연차별 실적치는 표 1에 따라 연도별로 산정
남극 해빙 장기예측시스템 개발 및 해빙모델 예측 정확도 향상 달성도	10	30	50	70	90	100	기술개발로드맵에 따라 계획된 연차별 실적치는 표 2에 따라 연도별로 산정
AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산 달성도	5	20	40	60	80	100	기술개발로드맵에 따라 계획된 연차별 실적치는 표 3에 따라 연도별로 산정
남극해 급격한 온난화에 따른 남극 해빙 융해 프로세스 관련 연구 결과 달성도	5	20	40	60	80	100	기술개발로드맵에 따라 계획된 연차별 실적치는 표 4에 따라 연도별로 산정

성과목표 (최종성과물)	성과지표	목표치	비고 (설정근거, 평가기준 등)
남극 정보 확보	해빙 위 탐사	관측거점 자료 획득 (30 개소 이상)	- 장보고기지 부근 테라노바만 - 파고부이, IMB부이, 마스터 관측 3개소/년 - 해빙하부 용융량(ApRES) 관측 3개소/년 - 탐사보고서 및 KPDC 자료 업로드 확인
	해빙 하부 및 폴리냐 해양 물리 관측	정선자료 100 정점 이상 획득	- 해빙-해양 상호작용 규명에 필수적인 해양물리 관측자료 획득 - 테라노바만 지역 탐사(최소 4시즌 탐사 수행) - CTD·플롯·해빙코어 자료 등 획득
		시계열 계류 장비 5 정점 이상	- 빙붕-해양 상호작용 규명에 필수적인 해양물리 연속자료 획득(최소 1개월) - 표층부이 자료 등
		항공탐사 자료 획득	- UAV 관측 2회 이상 AXCTD 자료 획득
	국제협력	12건 이상	- 국제협력연구 1건 선도 - 국외 연구기관과 공동연구 수행 (LOI, LOA, MOU 등) - 국외 연구기관과 인력교류(파견·유치·국제워크샵 개최)
남극 해빙 장기예측시스템 개발 및 해빙모델 예측 정확도 향상	남극 해빙 장기예측시스템 개발	남극 해빙을 포함한 전지구 기후 25km 해상도로 예측 출력변수 2개 이상	- 관측자료 기반 모의 성능을 재분석자료와 비교평가 남극 주변 기후 모의성능 분석
	해빙모델 성능 개선	예측오차 30% 감소	- 인공위성 관측자료 기준 모델의 해빙면적 모의 성능을 규준모델 실험 대비 비교평가 (관측된 입력자료 활용하여 기존 모델과 비교)
	가시화 툴 구축	모델 결과 가시화 툴	수치모델 결과 인터렉티브 가시화 툴 개발 및 운영 여부
AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	해빙 계절예측 자료 생산	10km 해상도로 예측, 출력변수 2개 이상	- 3개월마다 AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산
	국제 남극 해빙 계절예측 프로그램 공식 참여	출력변수 2개 이상/SIPN South 참여	- 관측자료 기반 해빙 모의 성능을 SIPN South 결과와 비교평가 분기별 SIPN South에 계절예측 자료 제출 여부
	국내협력 및 성과확산	5건 이상	- 국내 심포지엄·포럼·워크샵 개최 - 계절예측자료 뉴스레터 생산
남극해 급격한 온난화에 따른 남극 해빙 융해 프로세스 관련 연구	SCIE 논문게재	30 편 이상	- 논문 총 30편 이상 게재하되, 아래의 논문들을 포함하여 성과물 제출 · NSC 급(자매지 포함) 논문 1편 · 국제공동저술 논문 5편 · 현장 관측자료 활용 논문 5편 · 수치모델 예측 논문 3편 · mrnIF* 70이상 SCI(E)급 논문 5편 * mrnIF: 표준화된순위보정영향력지수(Modified Rank Normalized Impact Factor) 순위보정지수의 최소값을 0, 최대값을 100으로 표준화한 것으로 지수 값이 큰 저널일수록 해당분야 내에서 위상이 높은 저널임

남극 정보 확보 달성도

연도	연도별 달성계획	측정방법	실적인정	누적실적
2025	해빙 위 탐사	관측거점 3개소 이상	4%	10%
	해빙 하부 및 폴리냐 해양물리관측	정선자료 10정점 이상	3%	
	국제협력	2건 이상	3%	
2026	해빙 위 탐사	관측거점 6개소 이상	8%	30%
	해빙 하부 및 폴리냐 해양물리관측	정선자료 20정점 이상, 시계열 자료 1정점 이상, 항공탐사 1건 이상	8%	
	국제협력	2건 이상	4%	
2027	해빙 위 탐사	관측거점 6개소 이상	8%	50%
	해빙 하부 및 폴리냐 해양물리관측	정선자료 20정점 이상, 시계열 자료 1정점 이상	8%	
	국제협력	2건 이상	4%	
2028	해빙 위 탐사	관측거점 6개소 이상	8%	70%
	해빙 하부 및 폴리냐 해양물리관측	정선자료 20정점 이상, 시계열 자료 1정점 이상, 항공탐사 1건 이상	8%	
	국제협력	2건 이상	4%	
2029	해빙 위 탐사	관측거점 6개소 이상	8%	90%
	해빙 하부 및 폴리냐 해양물리관측	정선자료 20정점 이상, 시계열 자료 1정점 이상	8%	
	국제협력	2건 이상	4%	
2030	해빙 위 탐사	관측거점 3개소 이상	4%	100%
	해빙 하부 및 폴리냐 해양물리관측	정선자료 10정점 이상, 시계열 자료 1정점 이상	3%	
	국제협력	2건 이상	3%	

남극 해빙 장기예측시스템 개발 및 해빙모델 예측 정확도 향상 달성도

연도	연도별 달성계획	측정방법	실적인정	누적실적
2025	남극 해빙 장기예측시스템 개발	프레임워크 구축 여부	4%	10%
	해빙모델 성능 개선	해빙모델 입력자료 개선 여부	6%	
	가시화 툴 구축	-	0%	
2026	남극 해빙 장기예측시스템 개발	관측거점 6개소 이상	8%	30%
	해빙모델 성능 개선	해빙모델 초기화 개선 여부	12%	
	가시화 툴 구축	-	0%	
2027	남극 해빙 장기예측시스템 개발	관측거점 6개소 이상	8%	50%
	해빙모델 성능 개선	해빙모델 물리과정 개선 여부	8%	
	가시화 툴 구축	인터렉티브 가시화 툴 초기버전 구축여부	4%	
2028	남극 해빙 장기예측시스템 개발	관측거점 6개소 이상	8%	70%
	해빙모델 성능 개선	예측오차 10% 감소	8%	
	가시화 툴 구축	인터렉티브 가시화 툴 개선여부	4%	
2029	남극 해빙 장기예측시스템 개발	남극 해빙을 포함한 전지구 기후 25km 해상도 예측 결과 출력변수 2개 이상	8%	90%
	해빙모델 성능 개선	예측오차 20% 감소	8%	
	가시화 툴 구축	인터렉티브 가시화 툴 개선여부	4%	
2030	남극 해빙 장기예측시스템 개발	남극 해빙을 포함한 전지구 기후 25km 해상도 예측 결과 출력변수 2개 이상	4%	100%
	해빙모델 성능 개선	예측오차 30% 감소	3%	
	가시화 툴 구축	인터렉티브 가시화 툴 구축완료 여부	3%	

AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산 달성도

연도	연도별 달성계획	측정방법	실적인정	누적실적
2025	해빙 계절예측 자료 생산	하이브리드 예측시스템 개발 사전준비	2%	5%
	국제 남극 해빙 계절예측 프로그램 공식 참여	SIPN South 다중모델 계절예측 자료 입수	2%	
	국내협력 및 성과확산	1건 이상	1%	
2026	해빙 계절예측 자료 생산	딥러닝 기반 남극 해빙 예측모형 개발	5%	20%
	국제 남극 해빙 계절예측 프로그램 공식 참여	SIPN South 다중모델 계절예측 자료 기법 비교	5%	
	국내협력 및 성과확산	1건 이상	5%	
2027	해빙 계절예측 자료 생산	최신 AI기술 기반 계절예측 모델 개발 여부	10%	40%
	국제 남극 해빙 계절예측 프로그램 공식 참여	SIPN South 다중모델 계절예측 자료 성능 분석	5%	
	국내협력 및 성과확산	1건 이상	5%	
2028	해빙 계절예측 자료 생산	10km 해상도로 예측, 출력변수 2개 이상	10%	60%
	국제 남극 해빙 계절예측 프로그램 공식 참여	출력변수 2개 이상/SIPN South 참여	5%	
	국내협력 및 성과확산	1건 이상	5%	
2029	해빙 계절예측 자료 생산	10km 해상도로 예측, 출력변수 2개 이상	10%	80%
	국제 남극 해빙 계절예측 프로그램 공식 참여	출력변수 2개 이상/SIPN South 참여	5%	
	국내협력 및 성과확산	1건 이상	5%	
2030	해빙 계절예측 자료 생산	10km 해상도로 예측, 출력변수 2개 이상	10%	100%
	국제 남극 해빙 계절예측 프로그램 공식 참여	출력변수 2개 이상/SIPN South 참여	5%	
	국내협력 및 성과확산	1건 이상	5%	

남극해 급격한 온난화에 따른 남극 해빙 융해 프로세스 관련 연구 달성도

연도	연도별 달성계획	측정방법	실적인정	누적실적
2025	- 남극 해빙 종합관측 및 정보 확보 - 남극 해빙 예측시스템 구성 모듈 개발 - SIPN South 자료 입수	논문 2편 이상	5%	5%
2026	- 위성자료 기반 고착빙산-해빙 상호작용 분석 - 현장 관측자료 기반 해빙 생성·성장·융해 과정 관측 - 남극 해빙 예측시스템 구축 - AI 기반 남극 해빙 예측 모형 구축 - SIPN South 기법 분석 - 남극 해빙 원격상관 연구	논문 4편 이상	15%	20%
2027	- 관측자료 기반 해빙-대기-해양 상호작용 분석 - 급격한 남극 해빙 용융 프로세스 이해 - AI 기반 계절예측 모델 개발 - AI 기반 예측시스템 자료동화 기법 개발 - 남극 해빙 및 폴리냐 발생 메커니즘 및 주요 기후 모드와의 관련성 연구	논문 6편 이상	20%	40%
2028	- 관측자료 기반 해빙 생성·성장·융해 과정 분석 - 해빙 생성·성장·융해 과정 특성 분석 - 남극 고착빙 분포 모델 재현·예측 성능 개선 - 하이브리드 예측시스템 개발 - 남극 해빙 변동의 전지구적 영향 연구	논문 6편 이상	20%	60%
2029	- 해빙 하부 관측 기반 해빙 용융률 도출 - 해빙 용융 기작과 연관된 지역 및 원격 메커니즘 연구 - 10년규모 장기 남극 해빙 예측성의 원천 연구 - 지역별 해빙 예측 상세화 시스템 구축 - 남극 해빙 및 폴리냐의 변동성 변화 연구	논문 6편 이상	20%	80%
2030	- 해빙 용융 기작과 연관된 지역 및 원격 메커니즘 연구 - 개별 사례 재예측 실험 통한 남극 지역 기후시스템 이해도 제고 및 예측시스템 개선 - AI 기반 계절예측 모델 고도화 - SIPN South 참여 자료 생산 - 남극 해빙 예측모형 모의성능 진단 및 개선	논문 6편 이상 (NSC 급 논문 1편)	20%	100%

나 성과물

- (남극 해빙 관측체계 구축) 남극 해빙 관측기술 및 예측 모델 성능 향상에 필요한 현장 관측자료 확보* 기반 급격한 남극 해빙 용융 프로세스 규명

  * 남극 해빙 정선·시계열 관측자료 100건 이상 확보, 선도국 수준 남극 해빙 관측망 구축·운영

- (남극 해빙 예측시스템 개발) 지구시스템-해빙모델 결합 남극 해빙 예측시스템, 전처리 및 자료동화 시스템, 예측시스템 운영체계 개발 및 해빙모델에서 고착빙·폴리냐 등 남극 해빙의 주요 프로세스 모의성능 향상

  * 첨단 남극 해빙 예측시스템 개발 및 정량적 성능 개선(해빙모델 예측 정확도 향상(예측 오차 30% 감소)으로 예측역량 함양

- (AI 기반 계절예측 자료 생산) 최신 해빙모델 및 AI 기반 해빙 예측시스템 성능 제고 기술 개발*, 계절예측 자료 생산체계 구축 및 3개월 간격으로 상세 해빙 계절예측(3~6개월 예측) 자료 정기 산출**

  * AI기반 남극 해빙 계절예측 생산역량 제고(기술수준 Level 1→Level 4 향상)

  ** 장보고기지 테라노바만 상세 해빙 예측자료 산출 및 인터랙티브 가시화 시스템 구축

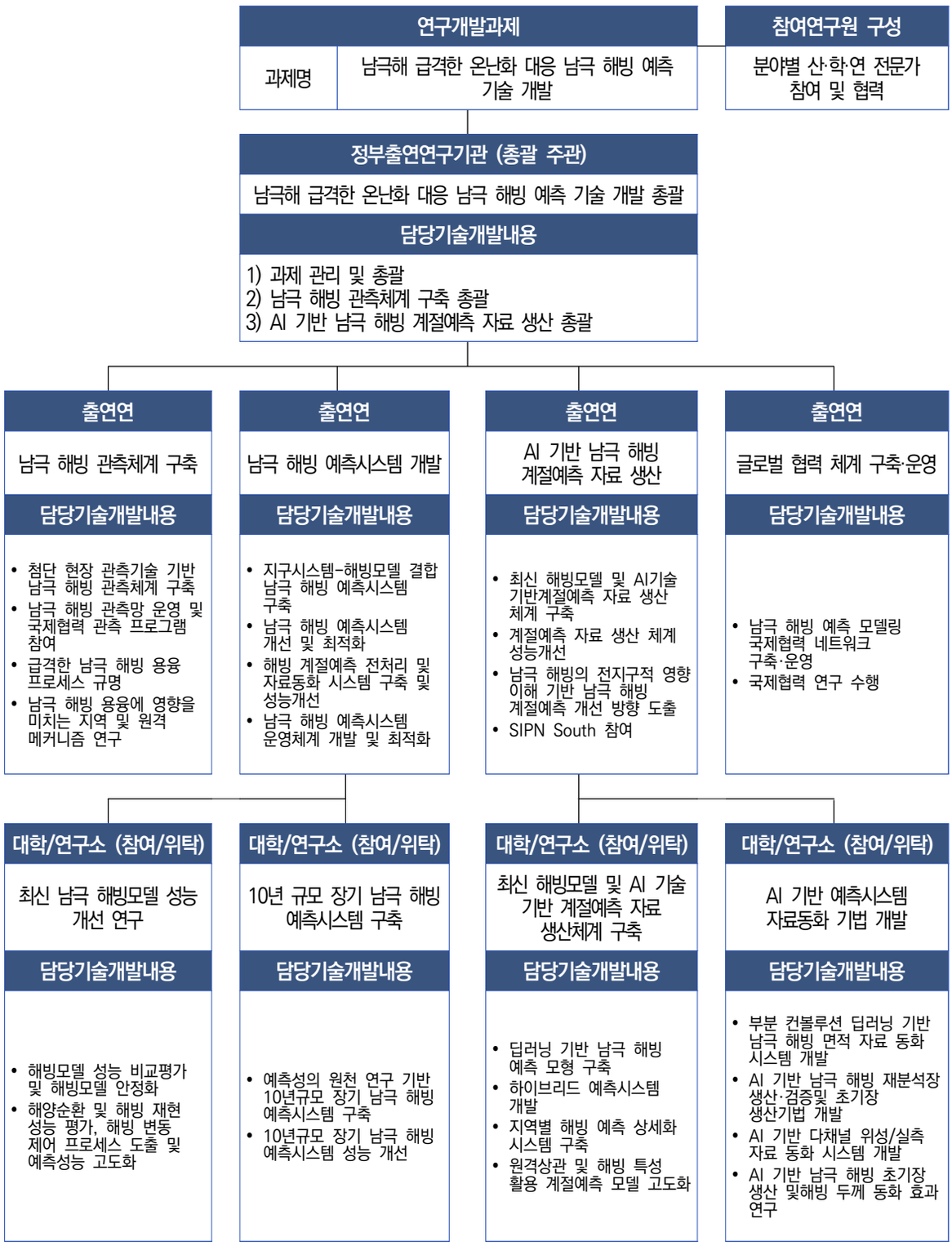
- (글로벌 협력 활용 및 강화) 국제협력연구를 통해 해빙 관측 및 모델링 분야 노하우 및 기술전수 위해 현장 관측자료 제공·교환 및 연구인력 상호교류 등 상보적 관계 기반 남극 해빙 관측·예측 분야 양자* 및 다자 국제협력연구 참여** 및 주도***

  * 국제협력 연구 11건 이상 참여 (국제협력의향서 9건 접수)

  ** 10개국 22개 기관 참여하는 국제 남극 해빙 계절예측 프로그램 SIPN South에 공식 참여, ASPeCT 국제관측네트워크 참여 등

  *** 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축·운영 1건 주도

4. 추진 체계


연구개발과제
과제명
남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발
참여연구원 구성
분야별 산·학·연 전문가 참여 및 협력
정부출연연구기관 (총괄 주관)
남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발 총괄
담당기술개발내용
1) 과제 관리 및 총괄
2) 남극 해빙 관측체계 구축 총괄
3) AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산 총괄
출연연
남극 해빙 관측체계 구축
담당기술개발내용
• 첨단 현장 관측기술 기반 남극 해빙 관측체계 구축
• 남극 해빙 관측망 운영 및 국제협력 관측 프로그램 참여
• 급격한 남극 해빙 용융 프로세스 규명
• 남극 해빙 용융에 영향을 미치는 지역 및 원격 메커니즘 연구
출연연
남극 해빙 예측시스템 개발
담당기술개발내용
• 지구시스템-해빙모델 결합 남극 해빙 예측시스템 구축
• 남극 해빙 예측시스템 개선 및 최적화
• 해빙 계절예측 전처리 및 자료동화 시스템 구축 및 성능개선
• 남극 해빙 예측시스템 운영체계 개발 및 최적화
출연연
AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산
담당기술개발내용
• 최신 해빙모델 및 AI기술 기반계절예측 자료 생산 체계 구축
• 계절예측 자료 생산 체계 성능개선
• 남극 해빙의 전지구적 영향 이해 기반 남극 해빙 계절예측 개선 방향 도출
• SIPN South 참여
출연연
글로벌 협력 체계 구축·운영
담당기술개발내용
• 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축·운영
• 국제협력 연구 수행
대학/연구소 (참여/위탁)
최신 남극 해빙모델 성능 개선 연구
담당기술개발내용
• 해빙모델 성능 비교평가 및 해빙모델 안정화
• 해양순환 및 해빙 재현성능 평가, 해빙 변동 제어 프로세스 도출 및 예측성능 고도화
대학/연구소 (참여/위탁)
10년 규모 장기 남극 해빙 예측시스템 구축
담당기술개발내용
• 예측성의 원천 연구 기반 10년규모 장기 남극 해빙 예측시스템 구축
• 10년규모 장기 남극 해빙 예측시스템 성능 개선
대학/연구소 (참여/위탁)
최신 해빙모델 및 AI 기술 기반 계절예측 자료 생산체계 구축
담당기술개발내용
• 딥러닝 기반 남극 해빙 예측 모형 구축
• 하이브리드 예측시스템 개발
• 지역별 해빙 예측 상세화 시스템 구축
• 원격상관 및 해빙 특성 활용 계절예측 모델 고도화
대학/연구소 (참여/위탁)
AI 기반 예측시스템 자료동화 기법 개발
담당기술개발내용
• 부분 컨볼루션 딥러닝 기반 남극 해빙 면적 자료 동화 시스템 개발
• AI 기반 남극 해빙 재분석장 생산·검증및 초기장 생산기법 개발
• AI 기반 다채널 위성/실측 자료 동화 시스템 개발
• AI 기반 남극 해빙 초기장 생산 및해빙 두께 동화 효과 연구

5. 추진 방식

- 본 사업은 해양수산부, 해양수산과학기술진흥원, 주관·참여기관 등 추진 주체간 유기적인 협력을 통해 연구개발을 진행
- 해양수산부(총괄): 사업의 총괄기획 및 정책과의 연계성 등을 종합적으로 검토하며, 관련규정에 의거하여 해당업무를 수행
- 해양수산과학기술진흥원(전문기관): 연구개발사업의 기획·평가·관리를 전담하며, 위원회 등을 운영하며 전문적·효율적으로 사업 운영
- 연구기관: 극지 관련 연구개발, 도출 기술 활용, 연구개발과제의 성과보고 및 확산 등 수행

6. 로드맵

(단위 : 백만원)

세부과제	세부내용	'25	'26	'27	'28	'29	'30	소 계
남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발	남극 해빙 관측체계 구축	1,600	1,600	1,700	1,500	1,400	1,400	12,000
		첨단 현장 관측기술 기반 남극 해빙 관측체계 구축			남극 해빙 관측망 운영 및 국제협력 관측 프로그램 참여			
		500	500	500	500	400	400	
		급격한 남극 해빙 용융 프로세스 규명			남극 해빙 용융에 영향을 미치는 지역 및 원격 메커니즘 연구			
	남극 해빙 예측시스템 개발	800	900	900	900	800	800	12,200
		지구시스템-해빙모델 결합 남극 해빙 예측시스템 구축			남극 해빙 예측시스템 개선 및 최적화			
		600	600	600	600	500	500	
		해빙 계절예측 전처리 및 자료동화 시스템 구축			해빙 계절예측 전처리 및 자료동화 시스템 성능개선			
		700	700	700	600	500	500	
		남극 해빙 예측시스템 운영체계 개발			남극 해빙 예측시스템 운영체계 개선 및 최적화			
	AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	700	700	800	700	700	700	11,800
		최신 해빙모델 및 AI기술 기반 계절예측 자료 생산 체계 구축			계절예측 자료 생산 체계 성능개선			
		700	700	700	600	600	600	
		AI 기반 예측시스템 자료동화 기법 개발			AI 기반 예측시스템 자료동화 기법 개선			
		400	400	400	400	400	400	
		남극 해빙의 전지구적 영향 이해 기반 남극 해빙 계절예측 개선방향 도출			남극 해빙 계절예측 개선			
		200	200	200	200	200	200	
		SIPN South 다중모델 계절예측 자료 및 기법 비교			SIPN South 공식 참여			

7. 연도별 사업 추진 계획

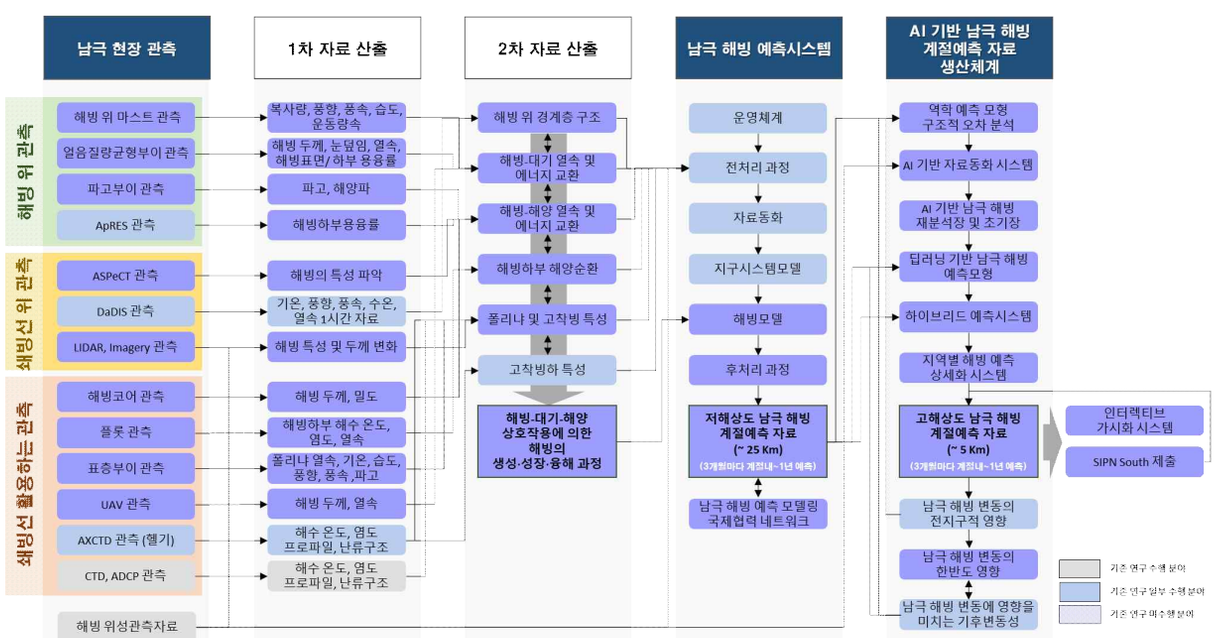
(단위 : 억원)

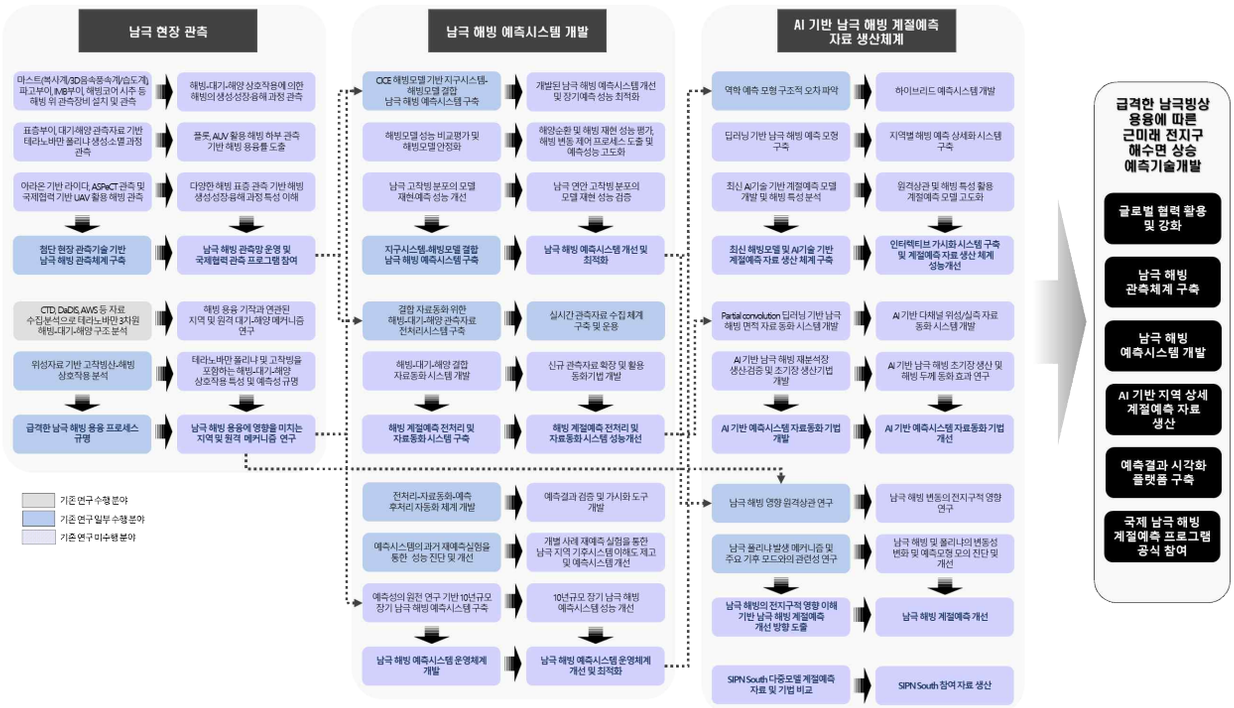
내역사업명	구분	'25	'26	'27	'28	'29	'30	합계
남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발	국비	62.00	63.00	65.00	60.00	55.00	55.00	360
	지방비	-	-	-	-	-		-
	민자	-	-	-	-	-		-
합계	국비	62.00	63.00	65.00	60.00	55.00	55.00	360
	지방비	-	-	-	-	-		-
	민자	-	-	-	-	-		-
	계	62.00	63.00	65.00	60.00	55.00	55.00	360

8. 재원 조달 방법

■ 총사업비: 360억원 규모 국비로 구성

9. 구성요소 간 유기적 체계 모식도





10. 도출된 과제 체크리스트

항목	질 문	답	답변근거 및 자료
1	사업목적이 명확하며 추진근거가 있는가?	예	▪ 「해양수산과학기술육성법」제8조, 제2차 해양수산과학기술육성 기본계획, 제1차 극지활동 진흥 기본계획, 제4차 남극연구활동진흥기본계획 등 ▪ 극지역 중심의 기후변화 현안대응형 연구사업 개발에 투자 강화하고자 하는 해양수산부 R&D 중점 투자방향에 부합
2	중앙정부가 해야 하는 일인가?	예	▪ 남극 해빙 예측은 극지연구거점 확보에 필수적인 정부 지원의 시급성이 인정되는 해양수산 전략기술 ▪ 극지 개척을 통한 국가 과학영토 확대 위한 극지 등 미개척 영역에 대한 탐사기술 개발과 접근성 증대 및 활용에 부합하며, 12대 국가전략기술에 포함되는 우주항공·해양 기술인 동시에 인공지능(AI) 활용 기술로 중앙정부의 지원 필요
3	재정지출이 효율적인가?	예	▪ 기후변화 현안대응형 연구사업으로 재정지원 필요 ▪ 국제협력 기반 지역빙하 현장탐사 투자로 (i) 관측기술 개발 시간 단축, (ii) 해빙 관측 전문인력 양성, (iii) 남극 다른 지역 자료 확보 등 효율적 관측자료 습득·활용이 가능하므로 재정지출이 효율적이라고 판단 ▪ 극심한 해운경기 침체로 민간 부문이 동 사업을 자발적으로 추진할 수 있는 여력이 없으며 신시장 진출을 위한 위험도 감소가 필요
4	다른 사업과 중복 또는 유사하게 사업이 설계되지 않았는가?	예	▪ (기존과제) 기후변화에 따른 남극 빙상의 급격한 융해 원인 규명 및 전 지구 해수면 상승 기여도 예측기술 개발 ▪ (신규과제) 첨단 현장 관측기술 및 AI 적용 모델기술 기반 남극 해빙 예측시스템 개발

항목	질 문	답	답변근거 및 자료
5	사업의 타당성을 객관적으로 검증하는 절차를 거쳤는가?	예	▪ 총 사업비 360억원으로 예비타당성조사 해당사항 없음 ▪ 기획연구를 통한 연구사업 도출로 사전계획 평가 수행 및 정책적 타당성, 사회적 형평성 등을 종합 검토하는 절차를 거침 (3월 최종보고서 도출 예정)
6	현재의 사업방식이 가장 효율적인가?	예	▪ 남극 현장탐사 및 국제공동 네트워크 주도·참여 등 사업의 핵심 내용이 극지연구소의 인프라 활용에 의존하고 있어 사업 구조상 직접 사업 수행이 효율적
7	현재 추진해야 할 시급성이 있는가?	예	▪ 최근 남극해의 급격한 온난화 상황에서 체계적인 남극 과학활동 지원 및 확대를 위해 필요한 쇄빙선 항로와 장보고기지 비행기 이착륙 계획·확보 위해 남극 해빙 예측시스템 구축이 시급 ▪ 국외에서는 이미 12개국 22개 기관에서 남극 해빙 계절예측이 수행되고 있으며 첨단 AI 기반 예측시스템 개발 또한 활발해 해빙 예측 선진 기관들로부터의 기술 전수·확보 최적기이며, 확보된 국제협력 의향서를 기반으로 상호협력 약속의무 이행이 필요
8	사업여건은 성숙되어 있는가?	예	▪ 해양수산기후변화대응R&D로드맵('21) 수립 등 해수부 주도 적극적인 해양 기후변화 대응이 가시화되고 있는 상황에서 제정된 극지활동진흥법('21)에 의거한 제1차 극지활동 진흥 기본계획('22)에서 강조하는 남·북극 미지의 영역 탐사 확대 및 국제공동연구 기반으로 기후문제 해결 주도에 부합하는 사업 ▪ 제2차 해양수산과학기술육성 기본계획('23)의 10대 해양수산 전략기술 중 극지연구거점 확보에 필수적인 극지예측 기술로 투자가 필수불가결한 상황
9	투입비용 대비 효과성은 높은가?	예	▪ '22년 11월 장보고기지 앞 해빙 조기 소실로 인한 해빙하역 불가로 2년 이상의 사업계획 연장 및 50억 이상의 추가 재원 투입 등의 피해가 발생하였으며, 남극해 급격한 온난화가 지속된다면 유사한 추가 피해가 속출할 것 ▪ 신규사업 예산 투입으로 위와 같은 재난 대응 비용의 절감 기대
10	재원조달계획이 구체적으로 마련되어 있는가?	예	▪ 국가재정운용계획에 미반영되어 있으나, ▪ 신규사업 소요재원이 연차별 부처의 지출한도 내에 있음
11	집행계획이 세부적으로 마련되어 있는가?	예	▪ 전문가로 구성된 기획연구를 통한 구체적인 실행계획을 마련하였으며, ▪ 기획연구를 통한 로드맵을 확보 하였음 ▪ 또한 환경분석 및 경제성분석을 수행·분석하여 사업계획을 세부적으로 마련하였음
12	집행가능성이 높은가?	예	▪ 국정과제 41 및 99와 연계되어 집행 가능성을 확보함 ▪ 예산 설계서를 통한 예산 규모 산정으로 이월·불용 발생 가능성이 낮음
13	민간투자사업 방식으로 추진하는 것이 적합한가?	아니오	▪ 사업의 핵심 내용이 극지연구소의 인프라 활용에 의존하고 있어 사업 구조상 직접 사업 수행이 효율
14	국고보조사업의 경우 부정수급 방지대책이 구체적으로 마련되어 있는가?	적용 불가	▪ 국고보조사업이 아니므로 해당사항 없음

11. 도출된 과제 인포그래픽



12. 과제 요약 설명

사업제목	사업 설명 요약
1. 남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발  FAST Forecast of Antarctic Sea-Ice Trend	▪ (사업 목적) 기남극해 급격한 온난화에 따른 남극 해빙 융해 프로세스 규명 및 AI 적용 모델기술 기반 남극 해빙 장기예측시스템 개발과 계절예측 자료 생산 ▪ (사업비) 360억(국비 기준), 25년 62억 ▪ (최종 성과물) (양적성과) ① 남극 해빙 관측체계 구축 및 남극 정보 100건 확보로 남극 해빙모델 성능개선 ② 3개월마다 AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산 ③ 장보고기지 테라노바만 상세 해빙 예측자료 산출 및 인터랙티브 가시화 시스템 구축 ④ 국제협력 연구 1건 주도(남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축·운영) 및 11건 참여 (질적성과) ① AI 기반 남극 해빙 계절예측 생산역량 제고(기술수준 Level 1→Level 4 향상) ② 해빙모델 예측 정확도 향상(예측 오차 30% 감소) ③ 10개국 22개 기관 참여하는 국제 남극 해빙 계절예측 프로그램 SIPN South에 공식 참여 ▪ (활용성) 안전한 남극 탐사활동 지원, 남극 해빙 현장관측 기술 확보 및 예측자료 자체 생산으로 국가 기후변화 대응기술력 제고 및 해양재난 예측정확도 향상, 신뢰도 높은 남극 해빙 계절예측 자료 전파로 국제사회 영향력 확보, 선박 운항 탄소발자국 및 인명과 경제적 손실 위험 저감 ▪ ('25년 개발 내용) 남남극 해빙 관측체계 구축(21억), 남극 해빙 예측시스템 개발(21억), AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산(20억) 등

13. 국제협력 기반 남극 해빙 예측 기술 개발 계획

(국내 전문인력 육성) 국내 관련분야 투자 및 인력양성 미비하여 남극 해빙 관측 및 예측 관련 국내 전문가 제한적

- 남극 해빙 관측분야 국내 전문가가 전무하여 국내 육성 절실
- 국내 해빙모델 개발 및 개선 연구를 수행하는 기관은 없으며, 기상청 및 해양과학기술원에서 각각 기존 선진국의 지구시스템모델을 도입·개선하여 활용하고 있는 예측시스템의 일환으로 해빙모델 모듈이 포함되어 있으나 관련 전문가는 부족
- 대다수 대학 및 연구기관에서는 미국 및 유럽의 커뮤니티 지구시스템모델을 도입하여 해빙 관련 연구를 수행 중으로 국내 연구 수준은 여전히 추격 단계
- 국외에서는 이미 12개국 22개기관에서 남극 해빙 계절예측이 수행되고 있으며 첨단의 AI 기반 예측시스템 개발 또한 활발하여 해빙예측 선진 기관들로부터의 기술전수·확보 최적기

(개발 효율성 제고) 남극 해빙 관측 및 예측분야 학문 후속세대 양성 및 지속가능한 협력 네트워크 구축 필요

- 국제적으로 고도화된 지구시스템 예측모델 개발이 진행되고 있으나, 극한 환경으로 인한 관측자료 부족 문제에 기인한 지식의 간극으로 남극 예측 성능 향상은 더디게 진행
- 남극 해빙 관측 및 예측기술 선도국과 기술격차 해소 및 국내 개발 인력 부족을 극복하기 위하여 국제 공동연구 기반 국외전문가와 국내 신진연구자를 연계하는 효율적 남극 해빙 예측기술 개발 전략 필요
- 실질적 성과 산출 위해서는 선도국의 기술 및 노하우를 습득하고 우리의 현장 관측자료, 인프라 그리고 연구인력을 공유하는 상보적 협력관계 구축 및 국제협력 의향서 또는 MOU 기반 상호협력 약속의무 체결 필요

(AI 기반 첨단 기법 도입) 다른 지역에 비해 예측성이 낮은 남극 지역은 AI 활용 기반 획기적인 기술 발전 가능성이 열려 있음

- 양자 및 다자 국제공동연구 참여 및 국제 네트워크 구축·운영으로 급변하는 예측기술 개발 추세의 최신 현황을 분석하여 최적의 남극 해빙 예측기술 개발방향 적시에 설정 및 적용 필요
- 기존 통계모델 또는 수치모델 기반의 계절예측 시스템으로부터 최근 진화하고 있는 AI-물리모델 통합기법 개발 및 예측시스템 자료동화에 AI 기법 적용 등 예측성 제고에 효과적인 첨단 기술 트렌드 습득 및 반영

(국제적 공신력 획득) 국제 남극 해빙 계절 예측 프로그램 공식 참여 및 국외 협력 기관들과 국제협력 네트워크 구축·운영으로 공신력 및 국제 리더쉽 획득

- 현재 12개국 22개 기관이 참여하고 있는 국제 남극 해빙 계절 예측 프로그램 SIPN South에 공식 참여함으로써 산출된 예측 자료의 성능 검증 및 국제적 공신력 획득
- 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축·운영으로 공동연구 활성화 및 국제 리더쉽 획득

국제협력 연구목표 및 내용



[그림 37] 연구 내용에 따른 남극 해빙 예측 기술 분야 국제협력계획

◎ 남극 해빙 예측시스템 개발 및 남극 해빙 예측 모델링 국제네트워크 구축·운영

- 선도국과 국제공동연구 기반 남극 해빙모델 구축
- 국제공동연구 기반 해빙모델에 AI 기법 응용기술 개발
- 모델 개선에 필수적인 현장 관측자료 제공 및 연구개발 인력 상호교류
- 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축·운영으로 현장 관측자료 공유 및 글로벌 협력 기반 해빙 모델 성능 제고 선도
- KOPRI 남극 해빙 예측시스템 최적화 및 성능 고도화

◎ 남극 해빙 계절예측 국제 상호비교연구 참여

- SIPN South 다중모델 계절 예측자료 및 예측기법 기반 KOPRI 남극 해빙 예측시스템 개선
- SIPN South 공식 참여하여 분기별 계절예측 자료 제출로 성능 검증 및 국제적 공신력 획득

◎ 남극 해빙 국제협력 관측 프로그램 참여

- 국외 선도 연구기관과 협력 기반 남극 첨단 해빙 관측기술 도입으로 남극 해빙 현장관측 수행 및 정선자료와 시계열 자료 획득

- 국제협력 관측프로그램 참여 및 획득자료 공유·교환

활용방안

남극 해빙 관측 및 예측 역량 확보

- 남극 해빙 특성에 적합한 관측기술 획득 및 관측역량 개발방향 설정 그리고 남극 해빙 예측기술 개발 로드맵 제시

남극 해빙 관측기술 및 현장 관측자료 확보

- 해빙 탐사기술 및 획득한 자료는 해빙 프로세스에 대한 이해를 제고하여 모델 성능 개선 및 관련된 지구시스템 메커니즘의 이해로 이어져 과학 발전에 이바지할 것

남극 해빙 예측시스템 기반 남극 해빙 계절예측 자료 산출

- 남극 탐사선 최적 항로 계획 수립 및 기지 주변 항공수송 시기 결정 등 체계적인 남극 과학활동 지원 및 대응체계 구축 가능
- 선제적 항로 계획을 가능하게 하여 선박의 탄소배출을 경감시키고 어선의 안전한 조업에 일조하여 관련 산업 부흥에 기여
- 해빙환경과 연관된 생태계의 변화 등 관련 연구의 기초 자료로 활용되어 다양한 수월성 있는 연구성과 산출의 초석이 될 것

예상성과

우리나라가 주도하는 남극 해빙 예측모델링 국제협력 네트워크 구축·운영 및 국제공동연구 10건 이상 수행

- 남극 해빙 예측분야 국제공동연구 활성화에 기여 및 국제 리더쉽 획득

첨단 남극 해빙 예측시스템 개발 및 성능 개선

- 국제협력 기반 개발 효율성 제고 및 최첨단 기법 도입

선도국 수준 남극 해빙 관측망 구축·운영

- 남극 해빙 관측역량 함양 및 양질의 관측 자료 획득·공유

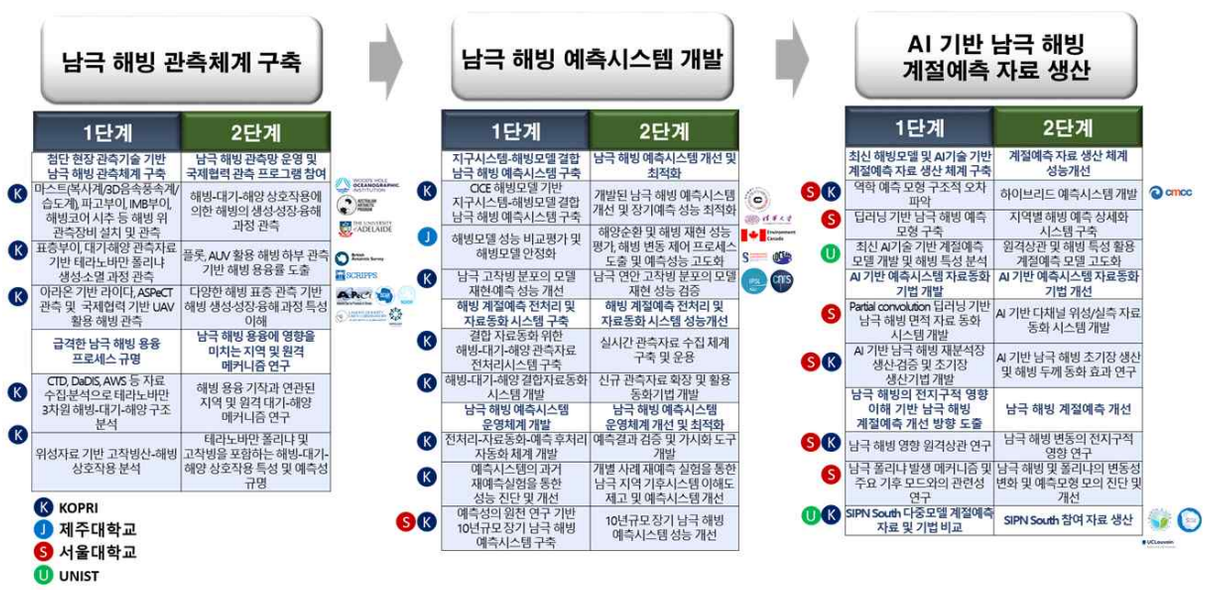
우리나라 남극 해빙 예측역량 및 예측 성능 제고

- 세계 수준의 연구성과 산출

연구 내용 및 시기별 국제협력 연구



연구 세부내용별 국제협력 기관



관측·예측 세부연구 분야별 협력 예정인 선도 국외기관



순번	국가	기관	담당 연구원	공동연구 역할	
				외국	우리나라
1	국제협력 /벨기에	SIPN South /루뱅대학교(UCL)	François Massonnet	SIPN South 주관 및 예측자료 제공	계절예측자료 SIPN South 제출
2	캐나다	캐나다 환경기후변화부 (EC)	Jean-François Lemieux	CICE 해빙모델 구축 및 개선	현장 관측자료 및 인력교류
3	프랑스	피에르-시몬 라플라스 연구원 해양학-기후연구소 (IPSL)	Martin Vancoppenolle	해빙모델 역학·물리과정 개선	현장 관측자료 및 인력교류
4	이탈리아	유럽-지중해 기후변화센터 (CMCC)	Lorenzo Zampieri	해빙모델에 AI 기법 응용	AI 경험 및 노하우, 현장 관측자료 및 인력교류
5	EU	유럽중장기예보센터 (ECMWF)	Peter Bechtold	해빙 계절예측 시스템 구축	현장 관측자료 및 인력교류
6	중국	칭화대학교 (TU)	Shiming Xu	CICE 초고해상도 적용기법	현장 관측자료 및 인력교류
7	호주	호주남극프로그램 (AAP)	Petra Heil	해빙 현장 관측 기술 및 APSeCt 자료 공유	현장 관측 인프라 및 자료 공유
8	미국	우즈홀 해양연구소 (WHOI)	Ted Maksym	해빙 부표 관측 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
9	호주	애들레이드대학교 (UoA)	Luke Bennetts	해빙 파고부표 관측 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
10	호주	켄터베리 대학교	Wolfgang Rack	UAV 활용 관측기술	현장 관측 인프라 및 자료 공유
11	미국	스크립스해양연구소	Jamin Greenbaum	XCTD 활용 관측기술	현장 관측자료 및 인력교류
12	미국	라몬 도허티 지구관측소(LDEO)	Chris Zappa	UAV 활용 관측기술	현장 관측 인프라 및 자료 공유
13	미국	뉴욕대학교 (NYU)	David Holland	해빙 위 마스터 구성 및 관측 기술	현장 관측자료 및 인력교류
14	영국	영국남극연구소(BAS)	Siobhan Johnson	해빙 시료채취 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
15	독일	알프레드 베게너 극지해양연구소(AWI)I	Christian Haas	UAV 활용 관측기술	현장 관측 인프라 및 자료 공유

14. 해빙 예측모델 국제워크샵 개최('23.10)

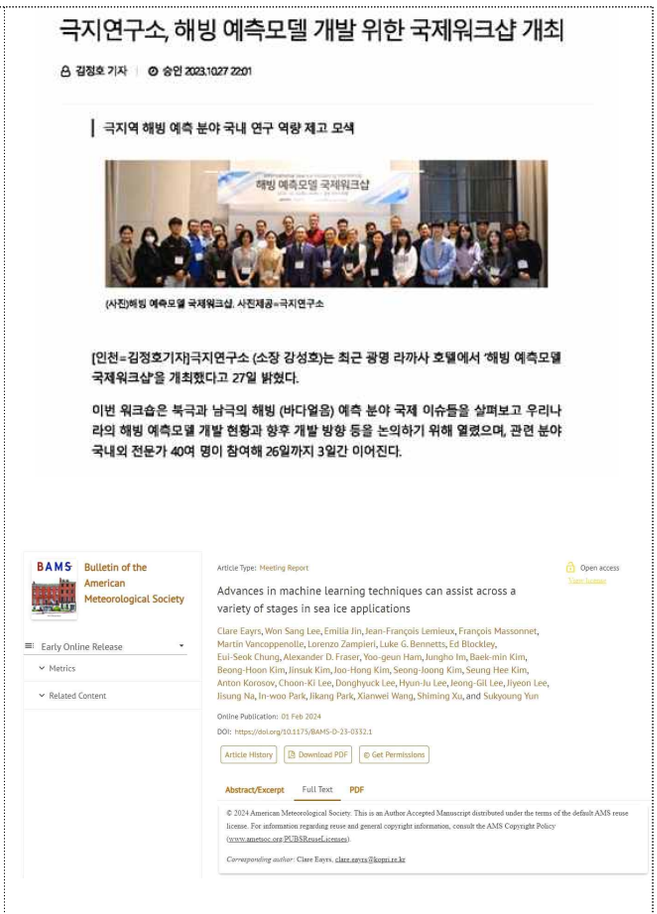
국내에서 처음으로 해빙 예측모델 국제워크샵 개최

- '23년 10월 광명 라까사호텔에서 해외석학 10여 명 등을 포함8개국 국내외 전문가 40여 명이 해빙 예측모델 개발 현황과 미래 방향 관련 심도깊은 논의를 3일 간 진행
  - 새로운 해빙 모델 기술, 해빙 모델링에서 AI 역할, 모델-관측 결합 활용, 필요한 미래 연구 분야 주제로 발표와 토론 진행

- 국제워크샵 개최 결과를 저명한 국제학술지 '미국기상학회보(BAMS)'에 게재
  ⇒ 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축 기틀 마련



[그림 38] 해빙 예측모델 국제워크샵 홍보자료



[그림 39] 언론 보도(위) 및 미국기상학회보 게재(아래)

국제워크샵 주요 내용 및 논의 결과

- 최근 급격한 해빙 유실의 원인과 전 세계 기후에 미치는 잠재적 영향에 대한 연구가 절실, 특히 해빙 소실현황 분석 및 원인 파악을 위한 현장 탐사 및 극지 인프라 투입을 통하여 해빙

변화의 다양한 시공간적 변동성에 대한 이해 필요

- 국가별 기술 격차 좁히고 협력 증진을 위해 우리나라에서 해빙 예측 모델링 국제 워크샵을 격년 주기로 개최하는 방안 논의

주제	주요 논의 내용
새로운 해빙 모델 기술	ㅇ 이산요소 모델 활용 및 고성능 컴퓨팅 지원 ㅇ 취성 레올로지, 고차원 이류 등 방향의 연속모델 개선 ㅇ 파고-해빙 상호작용 모델링 및 지구시스템 모델에서의 도입 ㅇ 빙하-해빙 상호작용 이해에 기반한 고착빙 모의성능 개선 ㅇ GPU 활용가능성
해빙 모델링에서 AI 역할	ㅇ 2020년대 이전 AI에 대한 논의 자체가 없었으나 현재 매우 빠르게 발전 중인 분야 ㅇ 물리기반 모델과 AI 기법 결합 적용 가능성 풍부 ㅇ 저비용 및 물리모델의 샘플 개수 한계 극복 가능 ㅇ 효과적인 적용 위해 여전히 더 많은 관측 자료 필요
모델-관측 결합 활용	ㅇ 모델 활용 관측위치 결정 필요 ㅇ 새로운 위성관측자료 자료동화 기반 활용 중요 ㅇ 현장 관측자료 기반 해빙 모델 강제력 개선 ㅇ 눈두께 등 새로운 관측 변수 획득 및 저비용·소형화 등 관측기술 발달이 모델 개선에 이바지 ㅇ AI기반 딥러닝 기법-모델 결합을 모델-관측 결합에 활용 가능 ㅇ 모델 산출 변수와 관측 변수의 일관성 필요
필요한 미래 연구 분야	ㅇ 남극 해빙 모델 성능 저하는 현장 관측자료 부족에 기인 ㅇ 연구원 교환 프로그램 및 해빙 모델 실습 워크샵 개최 등으로 모델링 기술 정보 공유 및 협업 촉진 필요 ㅇ 한국의 해빙 모델링 분야 진출 및 북미·유럽 선도국들과의 기술 격차 극복을 위해 격년주기 해빙 모델링 워크샵 개최 등 해빙 모델링 분야 연구자들의 교류 플랫폼 구축·운영 필요 ㅇ **한국이 앞서 나아가고 있는 AI 적용 계절예측 분야** 전문성 강화 및 해빙 모델링 분야 응용이 해빙 예측의 격차 해소 견인의 열쇠

15. 국외기관 국제협력 의향서

신규과제 국제협력 관련 증빙

- 벨기에(SIPN South 국제협력 리더쉽), 캐나다, 프랑스, 이탈리아, EU, 중국, 호주, 미국 등 9개 기관으로부터 의향서 접수
- 해빙 예측·관측분야 선진 기관들로부터 효율적인 기술 전수 및 확보 가능 그리고 상호협력 약속의무 이행이 필요

순번	국가	기관	담당 연구원	공동연구 역할	
				외국	우리나라
1	국제협력/벨기에	SIPN South/루뱅대학교	François Massonnet	SIPN South 주관 및 예측자료 제공	계절예측자료 SIPN South 제출
2	캐나다	캐나다 환경기후변화부	Jean-François Lemieux	CICE 해빙모델 구축 및 개선	현장 관측자료 및 인력교류
3	프랑스	피에르-시몬 라플라스 연구원 해양학-기후연구소	Martin Vancoppenolle	해빙모델 역학·물리과정 개선	현장 관측자료 및 인력교류
4	이탈리아	유럽-지중해 기후변화센터	Lorenzo Zampieri	해빙모델에 AI 기법 응용	AI 경험 및 노하우, 현장 관측자료 및 인력교류
5	EU	유럽중장기예보센터	Peter Bechtold	해빙 계절예측 시스템 구축	현장 관측자료 및 인력교류
6	중국	칭화대학교	Shiming Xu	CICE 초고해상도 적용기법	현장 관측자료 및 인력교류
7	호주	호주남극프로그램(AAP)	Petra Heil	해빙 현장 관측 기술 및 APSeCt 자료 공유	현장 관측 인프라 및 자료 공유
8	미국	우즈홀 해양연구소	Ted Maksym	해빙 부표 관측 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
9	호주	애들레이드대학교	Luke Bennetts	해빙 파고부표 관측 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유

UCLouvain
Earth and Life Institute (ELI)

Louvain-la-Neuve, November 28, 2023

Dr. Emilia Kyung Jin,
Principal Research Scientist
Division of Glacial Environment research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Re: 'Letter of Intent' for KOPRI participation in SIPN South

Dear Emilia Kyung Jin,

Having learned about KOPRI's new project to establish an Antarctic sea ice seasonal prediction system, I am writing this letter with the expectation that KOPRI will be able to participate and contribute to SIPN South.

Antarctic sea ice forecasts have garnered increasing attention in recent years, particularly in light of the record lows observed in February 2022 and 2023. As Antarctica emerges as a climate change hotspot, polar tourism surges, and scientific expeditions persist in exploring this remote continent, there is a growing demand for the ability to predict sea ice conditions weeks or months in advance. Driven by recent research uncovering the physical mechanisms of Antarctic sea ice predictability and the significant changes in sea ice extent observed in recent years, the Southern Sea Ice Prediction Network (SIPN South) project was launched in 2017. The SIPN South project coordinates forecasts of Antarctic sea ice conditions from spring to summer each year, facilitating robust assessments, intercomparisons, and guiding the future development of polar forecast systems. More information can be obtained in Massonnet et al. (2023).

We currently utilize data from 22 unique contributors across five continents who have collectively provided more than 3000 individual predictions of sea ice extent and concentration. SIPN South operates as a collaborative community project hosted on a shared public repository. The forecast and validation data used by SIPN South are made publicly available in near real-time for further use by the polar research community and, ultimately, policy makers.

We sincerely welcome KOPRI's participation in this extensive international collaborative research by developing its own Antarctic sea ice prediction system. We are eager to assist KOPRI in building a prediction system more efficiently and rapidly, drawing upon our proactive experience and diverse expertise. Additionally, by sharing the multi-model ensemble and spread of Antarctic sea ice season forecast data, we aim to objectively verify KOPRI's system performance and help set a direction for improving predictability.

Thank you for initiating this collaboration. We look forward to continued and expanded research collaboration between SIPN South and KOPRI in the field of Antarctic sea ice seasonal forecasting.

Sincerely,

François Massonnet

Reference : Massonnet, F., Barreira, S., Barthélemy, A., Bilbao, R., Blanchard-Wrigglesworth, E., Blockley, E., Brennwich, D. H., Bushuk, M., Dong, X., Goessling, H. F., Hobbs, W., Iovino, D., Lee, W.-S., Li, C., Meier, W. N., Merryfield, W. J., Moreno-Chamarro, E., Morioka, Y., Li, X., … Yuan, X. (2023). SIPN South: Six years of coordinated seasonal Antarctic sea ice predictions. *Frontiers in Marine Science*, *10*. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1148899

LOUVAIN-LA-NEUVE | BRUXELLES - WOLUWE | MONS | TOURNAI | BRUXELLES SAINT-GILLES | CHARLEROI
Croix du Sud, 2 bte L7.05.05, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique
Tél. +32 (0)10 47 23 74 – fax +32 (0)10 47 88 98 – president-eli@uclouvain.be – www.uclouvain.be/eli

〈 1. 벨기에 〉

150 1871 | 2021

Montréal, 30 November 2023

Dr. Emilia Kyung Jin,
Principal Research Scientist
Division of Glacial Environment research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Subject:

Letter of intent for ECCC-KOPRI collaboration on Antarctic Sea Ice Prediction System Development

Dear Emilia,

I was very pleased to learn about KOPRI's initiative to establish an Antarctic sea ice seasonal prediction system. Collaborating on the challenging subject of Antarctic sea ice seasonal prediction presents an excellent opportunity to cultivate a new partnership between ECCC and KOPRI in the field of sea ice modeling.

ECCC has a rich history and extensive expertise in sea ice model development, with the sea ice model being a vital component of our regional and global prediction systems. Enhancing the performance of forecasting systems to accurately predict sea ice conditions in the Antarctic region stands as an important milestone for both ECCC and KOPRI.

Considering this, we are eager to support KOPRI in developing an Antarctic sea ice seasonal prediction system, drawing upon our experience and expertise in the field of sea ice forecasting. In return, we kindly request access to KOPRI's Antarctic sea ice observation data to enhance the refinement of our model. Our shared objective is to foster research exchange and facilitate knowledge transfer through interactions among young researchers.

We express our gratitude to you for spearheading this collaboration. There are high expectations for the continued and expanded research cooperation between our organizations in the field of sea ice modeling.

Sincerely,

Jean-François Lemieux
Research Scientist
Meteorological Research Division
Environment and Climate Change Canada
2121 route Transcanadienne
Dorval, Québec, H9P 1J3

Environnement et Changement climatique Canada | Environment and Climate Change Canada

Canada

〈 2. 캐나다 〉

LOCEAN | CNRS | IPSL | SORBONNE UNIVERSITÉ

+33 1 44 27 35 80
martin.vancoppenolle@locean-ipsl.upmc.fr

Directeur de Recherches CNRS
Head of NEMO R&D team
Sorbonne Université
Laboratoire d'Océanographie et du Climat
Institut Pierre-Simon Laplace
4 Place Jussieu
75252 Paris CEDEX 05

Dr. Emilia Kyung Jing
Principal Research Scientist
Division of Glacial Environment research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Re: 'Letter of Intent' for LOCEAN-IPSL-KOPRI collaboration on Antarctic Sea Ice Modeling

Lille, le 28 novembre 2023

Dear Emilia,

Upon learning about KOPRI's new project to establish an Antarctic sea ice seasonal prediction system, I was excited about the prospect of forging a new partnership between LOCEAN-IPSL and KOPRI within the realm of Antarctic sea ice modeling.

LOCEAN-IPSL has a rich history and expertise in the field of ocean modelling, including sea ice, and their role in the Earth System, testified by the in-house development of the NEMO ocean model and of its sea ice component SI3. Given rapid sea ice changes upon warming, better understanding sea ice and improving its representation in Earth System Models is one of our main activities and potentially helpful for better sea ice seasonal predictions, of highest interest to KOPRI.

The scientific community is suffering from drastic resource limitations on a global scale for development activities, in particular on Antarctic sea ice modelling. This is why we are keen to actively support KOPRI in the development of Antarctic sea ice modelling activities, leveraging our extensive experience and expertise in the field of sea ice modeling. We hope that KOPRI's will contribute new knowledge and expertise by improving understanding of sea ice and developing new code and acquiring Antarctic sea ice observation data for the scientific community. Furthermore, this could lead to various research cooperation opportunities, such as joint seminars and reciprocal exchange visits.

We thank you for initiating this collaboration. We eagerly anticipate sustained research collaboration between our institutions in the field of sea ice modeling.

Sincerely,
Dr. Martin Vancoppenolle

〈 3. 프랑스 〉

Dr. Lorenzo Zampieri
Junior Scientist
Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici
Viale Carlo Berti Pichat, 6/2
40127, Bologna (BO), Italy
e-mail: lorenzo.zampieri@cmcc.it

Dr. Emilia Kyung Jin,
Principal Research Scientist
Division of Glacial Environment Research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Letter of Intent for CMCC – KOPRI Collaboration on Application of AI Techniques for Sea Ice Predictions

Dear Emilia Kyung Jin,

I am writing this letter with great excitement and anticipation of a new partnership, having learned about KOPRI's new project to establish an Antarctic sea ice seasonal prediction system. I am eager to explore the potential collaboration between the Euro-Mediterranean Center on Climate Change (CMCC) and the Korean Polar Research Institute (KOPRI) in the field of sea ice modeling utilizing Artificial Intelligence (AI).

CMCC is dedicated to improving numerical models for polar regions, aiming to comprehend the evolution of the climate system across timescales. Our focus includes the development and testing of state-of-the-art dynamic and thermodynamic sea-ice models on both structured and unstructured grids; the data assimilation of sea ice observations for improved sea ice reanalyses and forecasts; and the investigation of sea ice states in seasonal to decadal predictions and climate projections. Notably, our recent efforts have centered on improving sea ice models through the integration of AI techniques.

In light of the swift changes in the current climate, it is clear that adopting advanced techniques to accurately simulate and predict sea ice evolution is a shared objective of both CMCC and KOPRI. In this context, we express our willingness to actively support KOPRI's development of Antarctic sea ice models by leveraging our experience and expertise in the field of sea ice modeling. In exchange, we propose sharing KOPRI's field observation data and collaborating on joint research endeavors aimed at enhancing AI-based sea ice models.

Thank you for initiating this collaboration. We enthusiastically anticipate sustained and expanded research collaboration between our institutions in the field of sea ice research.

Sincerely,

Dr. Lorenzo Zampieri

FONDAZIONE CMCC
Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici
Sede Legale e Amministrativa: Via Marco Biagi n. 5 73100 LECCE - Italy
Tel. +39 0832 1902411 www.cmcc.it
N. REA 251549 - N. 39 Registro Persone Giuridiche Fondo di Dotazione Euro 662.000,00 i.v. P.I. e C.F. 03873750750
codice destinatario ACTKBBZ

〈 4. 이탈리아 〉

Peter Bechtold
Principal Scientist Earth System Modelling Section
European Centre for Medium-Range Weather Forecast
Reading, UK | Bologna, Italy | **Bonn, Germany**
e: peter.bechtold@ecmwf.int
w: ecmwf.int

Dr. Emilia Kyung Jin
Division of Glacial Environment research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Re: 'Letter of Intent' for ECMWF-KOPRI collaboration on Antarctic Sea Ice Prediction System Development

Bonn, 27.11.2023

Dear Emilia Kyung Jin

I was delighted to learn about KOPRI's plans to establish a seasonal prediction system for the Antarctic sea-ice. Collaborating in the challenging topic of Antarctic sea-ice seasonal prediction presents an excellent opportunity to strengthen our longstanding partnership in the realm of extended range weather forecasting using coupled earth system models.

Given the increasing need to enhance the performance of ECMWF's polar component in the forecast models, the timing of our collaboration with KOPRI on Antarctic sea-ice is particularly welcome. The current unmistakable decline in Antarctic sea-ice, exacerbated by global warming, underscores the urgency of refining the sea ice model within the Earth System Model to enhance predictability in the Antarctic region. This represents a significant milestone for both KOPRI and ECMWF.

Our ECMWF group is committed to expediting the development of a next-generation extended and seasonal-range forecast system. This entails refining the data assimilation system, elevating model resolution and physical process performance, and incorporating AI to enhance overall model performance. Leveraging our proficiency in these forecast systems, we eagerly anticipate partnering with KOPRI in developing their Antarctic sea-ice seasonal predictions. In return, we request access to KOPRI's Antarctic sea-ice field observation data to enhance the refinement of our models. Our mutual objective is to foster research exchange and facilitate the transfer of knowledge through interactions among young researchers.

In conclusion, I extend my gratitude to you for spearheading this collaboration. There are high expectations for the continued and expanded research cooperation between our two organizations in the field of sea ice seasonal prediction.

Yours Sincerely

Peter Bechtold

〈 5. EU 〉

Shiming Xu
Associate Professor
Department of Earth System Science
Tsinghua University, Beijing, China
Contact Information: +86-010-62772750
e-mail: xusm@tsinghua.edu.cn

Dr. Emilia Kyung Jin,
Principal Research Scientist
Division of Glacial Environment research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Re: 'Letter of Intent' for Tsinghua Univ.-KOPRI collaboration on Antarctic Sea Ice Modeling

Dear Emilia Kyung Jin

Having become aware of KOPRI's innovative project aimed at establishing an Antarctic sea ice seasonal prediction system, I am genuinely excited about the potential for a new collaboration between Tsinghua University and KOPRI in the field of Antarctic sea ice modeling.

Tsinghua University is recognized for its distinguished expertise in ultra-high-resolution sea ice modeling technology, particularly within the Earth System Model. It is apparent that aligning these advanced models to accurately reproduce and predict sea ice represents a crucial and shared objective for both organizations, particularly given the rapid changes observed in our current climate.

In this context, we are eager to contribute our wealth of experience and expertise in sea ice modeling to actively support and collaborate on the development of KOPRI's Antarctic sea ice model. In return, we kindly request access to KOPRI's Antarctic sea ice observation data to further evaluate and improve our sea ice and coupled models. Additionally, we propose the establishment of various research cooperation opportunities, including joint seminars, the exchange of young researchers, and reciprocal visits.

We extend our sincere appreciation for initiating this collaboration. We eagerly look forward to the prospect of continued and expanded research collaboration between our esteemed institutions in the specialized field of sea ice modeling.

Sincerely,

Shiming Xu

〈 6. 중국 〉

Dr Petra Heil
Co-Chair; ASPeCt/SCAR
Australian Antarctic Division &
Australian Antarctic Program Partnership
University of Tasmania
Hobart 7001, Australia
T: +61 448 732 011
E: petra.heil@utas.edu.au

Dr. Emilia Kyung Jin,
Principal Research Scientist
Division of Glacial Environment research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Re: 'Letter of Intent' for AAD-KOPRI collaboration on Observations of Antarctic Sea Ice

Dear Dr Emilia Kyung Jin

I have learned about KOPRI's project for developing an Antarctic sea-ice season prediction system, sparking my enthusiasm for a collaboration between the Australia Antarctic Division (AAD) and KOPRI with focus on Antarctic sea-ice observation.

AAD possesses a rich history and a team of experts in sea ice's role in the Earth system, sea-ice processes, and sea-ice model development. My research covers various aspects of sea-ice science, including coupled ocean/ice/atmosphere modeling, fieldwork, autonomous instrumentation, and remote sensing. I am a Co_Chair of APSeCt, the SCAR Expert Group for Antarctic Sea-Ice Processes.

Given the rapid climate changes, it is evident that conducting more sea-ice observations for accurate reproduction and prediction is a shared goal for KOPRI and AAD. We aim to actively support KOPRI's Antarctic ocean observation syste-development, leveraging our extensive experience. We propose sharing APSeCt data and request our participation in KOPRI's Antarctic field exploration, sharing the acquired data. Additionally, we suggest establishing research cooperation through joint seminars and mutual exchange visits.

Thank you for initiating this collaboration. We eagerly anticipate continued and expanded research collaboration between our institutions in Antarctic sea ice studies.

Sincerely,

Petra Heil

〈 7. 호주 〉

WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTION

Jan 3, 2024

Dr. Emilia Kyung Jin,
Principal Research Scientist
Division of Glacial Environment research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

RE: Letter of Intent for Woods Hole Oceanographic Institution-KOPRI collaboration on Observation of Antarctic Sea Ice

Dear Emilia Kyung Jin,

I am pleased to learn of KOPRI's new project for developing an Antarctic sea ice seasonal prediction system and am excited about the potential collaboration between sea ice and Antarctic scientists at Woods Hole Oceanographic Institution and KOPRI in Antarctic sea ice observations.

Our institution has a strong team of experts in Southern Ocean sea ice observations and modelling. Personally, I have been involved in a range of research on Antarctic sea ice for nearly 30 years, including sea ice and polar climate, ice–atmosphere-ocean interactions, observations and modelling of sea ice properties and processes, and sea ice thickness distribution (both in situ and by satellite), and remote sensing of sea ice. In particular, I am interested in enhancing sea ice observational capability in the Antarctic through the use of autonomous vehicles under ice and autonomous drifting platforms. I have participated in nearly twenty expeditions to the Antarctic and Arctic. I believe my experience in. Further, WHOI has recently expanded our polar sea ice group with expertise complentary to my own. This includes a recent hire, Maddie Smith, with expertise in wave-ice-ocean interaction and sea ice – solar radiation interactions. We have also close collaborations with mescoscale modelling expertise at WHOI.

Given the recent dramatic, rapid changes in Antarctic sea ice, and potential for significant societally relevant impacts on Antarctic ecosystems, climate, and sea level rise through accelerated ice-shelf loss, it is evident that building capacity for accurate seasonal prediction of sea ice in the Antarctic is essential. The need for improved understanding and more widespread observations to improve this capability is particulary evident as the recent change suggests a change in behaviour of the Antarctic sea ice system. KOPRI and researchers at the Woods Hole Oceanographic Institution share the goal of conducting more sea ice observations for accurate prediction. Leveraging our experience, we actively support the development of KOPRI's Antarctic sea ice observation system including ice mass buoys. We propose accompanying KOPRI on field expeditions, conducting explorations together, and sharing the acquired data. This collaboration can also leverage funded research programs at WHOI to understand drivers and impacts of Antarctic sea ice variability, and planned and proposed future expeditions within the US and with my own international collaborations. Additionally, we

suggest establishing research cooperation through joint seminars and mutual exchange visits. My institution has various funding mechanisms to help support these kind of collaborations.

Thank you for initiating this collaboration. We eagerly anticipate continued and expanded research collaboration between our institutions in Antarctic sea ice research.

Sincerely,

Ted Maksym
Associate Scientist w/ Tenure
266 Woods Hole Rd, MS12
Woods Hole, MA 02543
508-289-3428 tmaksym@whoi.edu

〈 8. 미국 〉

THE UNIVERSITY of ADELAIDE

Luke Bennetts
The University of Adelaide
Adelaide, South Australia
5005 Australia
Tel: 83133143
e-mail: luke.bennetts@adelaide.edu.au

Dr. Emilia Kyung Jin,
Principal Research Scientist
Division of Glacial Environment research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Re: 'Letter of Intent' for The University of Adelaide-KOPRI collaboration on Observation of Antarctic Sea Ice

Dear Emilia Kyung Jin

I learned about KOPRI's new project for developing an Antarctic sea ice season prediction system and am excited about the potential partnership between the University of Adelaide and KOPRI in Antarctic sea ice observation.

As an expert in studying waves associated with sea ice in Southern Ocean, I recognize the urgency of conducting more observations of waves through sea ice for accurate predictions, aligning with a crucial shared goal for both KOPRI and the University of Adelaide in the face of rapid climate changes.

In light of this, we aim to actively support the development of KOPRI's Antarctic ocean observation system, drawing upon our rich experience and expertise in sea ice observations. Our plan includes sharing observation techniques using wave buoys, and in return, we request your participation in KOPRI's Antarctic exploration and data sharing. Additionally, we propose various research cooperation opportunities, such as joint seminars and mutual exchange visits.

Thank you for initiating this collaboration. We eagerly anticipate continued and expanded research collaboration between our institutions in the field of Antarctic sea ice.

Thank you.

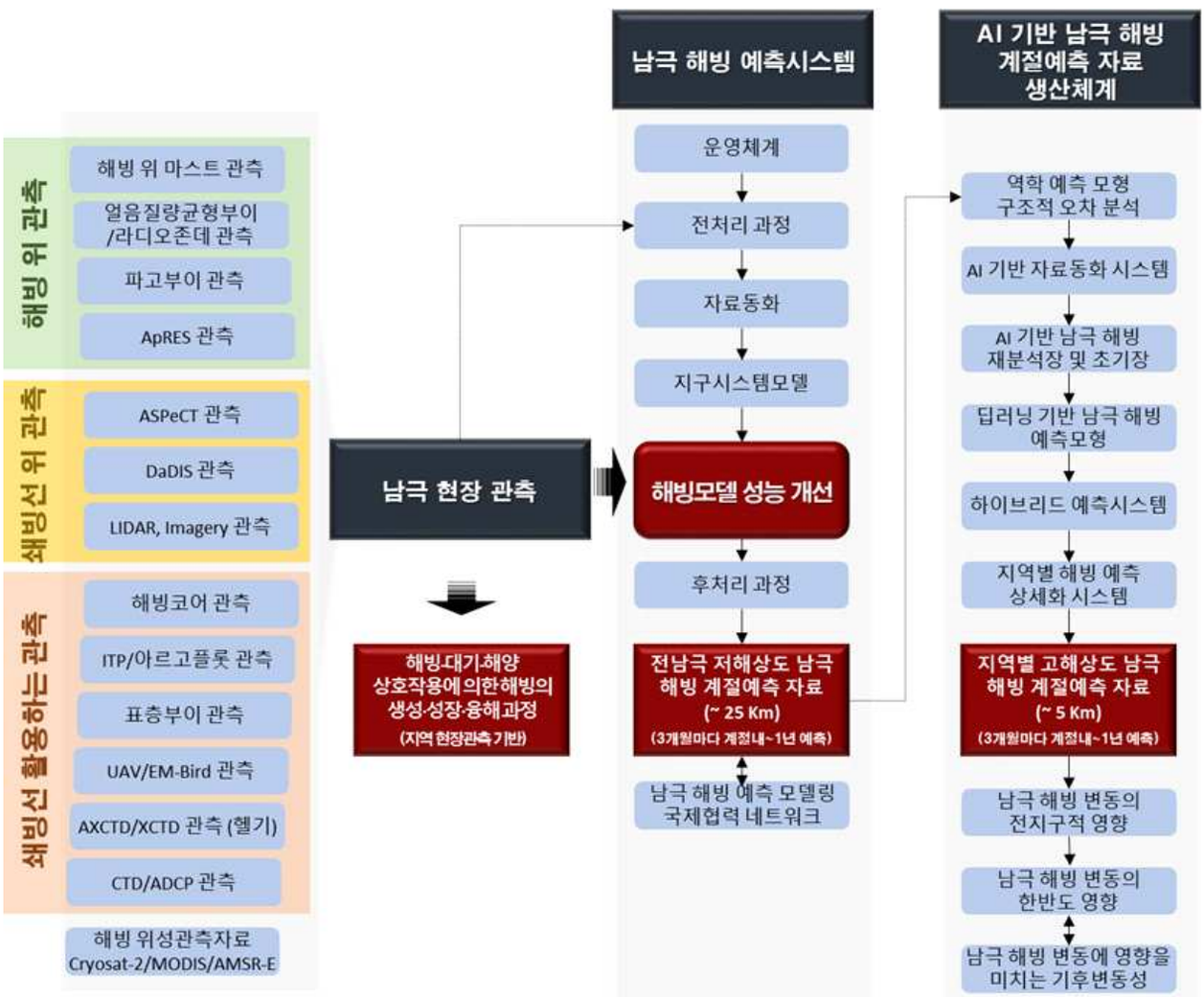
Sincerely,

Luke Bennetts

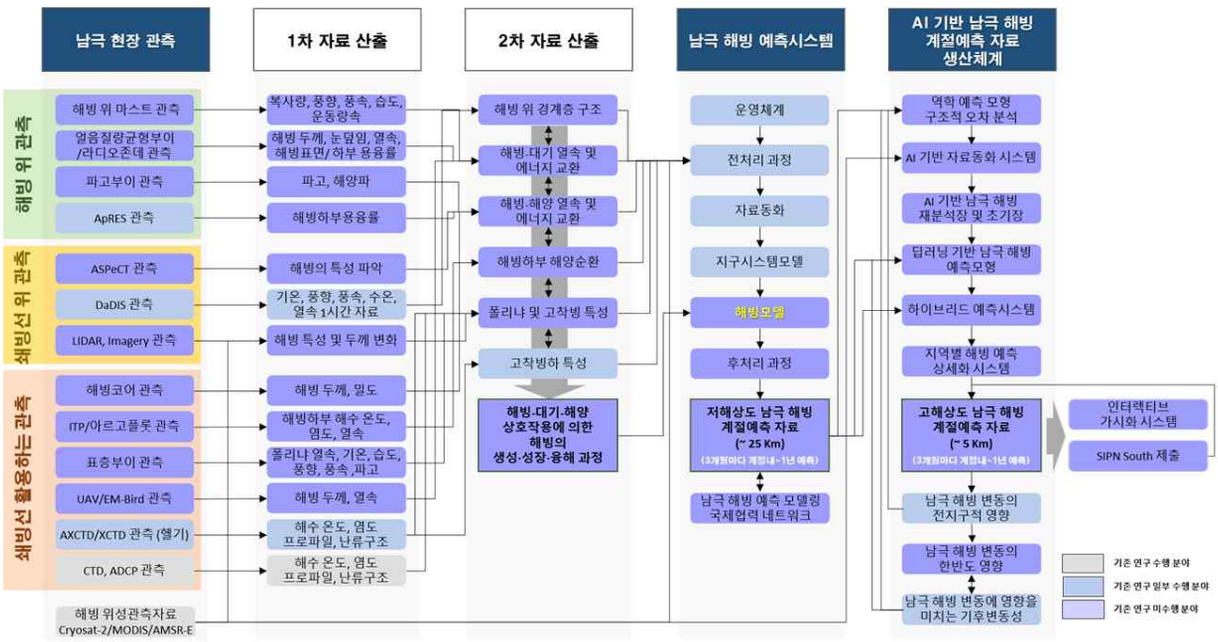
〈 9. 호주 〉

16. R&D 최종목표 도출 위한 연구체계 구성

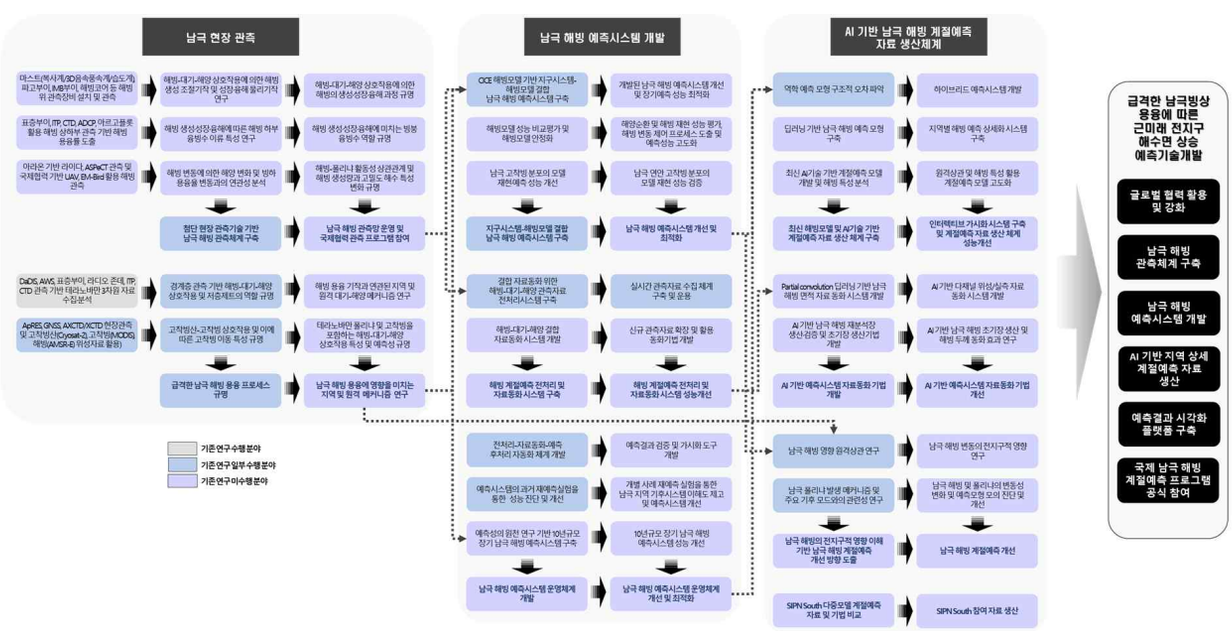
R&D 최종목표 도출 위한 연구체계 흐름도



현장관측으로부터 계절예측 자료 생산까지 흐름도



연구주제별 R&D 최종목표 도출 흐름도



17. 극지분야 공모형 R&D 사업 종합적 관리 방안

극지 분야 연구개발 기본방향

◎ 해양수산과학기술 육성 기본계획, 남·북극 기본계획*과 극지연구소 R&R을 통해 차별화·연계가 가능하도록 체계적으로 관리

* 제4차 남극 연구활동 진흥 기본계획('22~'26), 북극활동 진흥 기본계획('18~'22)

[표 5] 극지연구소 R&R 주요역할('20.3)

상위역할 1. 기후변화에 의한 극지 환경 변화 감시와 원인 규명	주요역할 1-1	극지형성 메커니즘 규명 및 과거환경 복원 통한 환경 영향 진단
	주요역할 1-2	기후변화에 의한 남북극 환경생태계 변화감시
상위역할 2. 극지역 온난화가 초래하는 국가 사회문제 해결	주요역할 2-1	남북극의 기상·기후변화 진단 및 한반도 영향예측 정보제공
	주요역할 2-2	북극 해빙 및 남극 빙상 변동 관측 감시
상위역할 3. 극지연구 신성장 동력 및 실용화 성과 창출	주요역할 3-1	극지적용 신기술 개발 및 활용성 고도화
	주요역할 3-2	극지연구 성과의 사회 환원을 위한 공공이익 창출
상위역할 4. 극지 미답지(과학 영토) 개척 및 탐사기술 개발	주요역할 4-1	미답지 진출 및 신연구영역 개척
	주요역할 4-2	극지활동 안전 시스템 및 인프라 플랫폼 활용 역량 강화

◎ 국가 R&D와 기관고유사업의 특성에 부합하는 과제를 적극 발굴하고, 사업간 유기적인 연계를 통해 국민이 체감할 수 있는 성과 창출

[표 6] 공모형 국가 R&D 및 기관고유사업 비교

구 분	공모형 국가 R&D 사업	기관고유사업
연구대상	▪ 극지 분야의 문제·이슈에 부합한 목적기초 연구로서 정책 달성을 위한 목적 연구 – 기후변화, 자원활용, 국내외 아젠다(CAOFA 협정, CCAMLR 대응 등) 대응 – 북극권 국가와의 국제협력을 통해 북극이사회 정식옵서버 국가로서 과학외교 기여 ▪ 국가 사회문제 해결 연구로서 극지역 융빙에 의한 해수면 변동 예측 연구 ▪ 극지 생물자원 활용기술(의약품, 신소재 개발 등)의 기술이전 단계 연구	▪ 장기적인 환경·생태계 관측 및 분석, 데이터 축적과 파일럿 (SEED) 성격의 이슈 발굴 ▪ 기상재해 예측을 위한 파일럿 단계의 과제 ▪ 극지 생물자원 활용기술(의약품, 신소재 개발 등) 개발을 위한 극지역 시료 확보, 분류 등의 기초 단계 연구 ▪ 남극 내륙 및 북그린란드 진출 과제
개발단계	▪ 목적 기초 단계 ▪ 바이오, 신기술 분야 TRL 3~6 또는 기술이전 단계	▪ 기초 단계

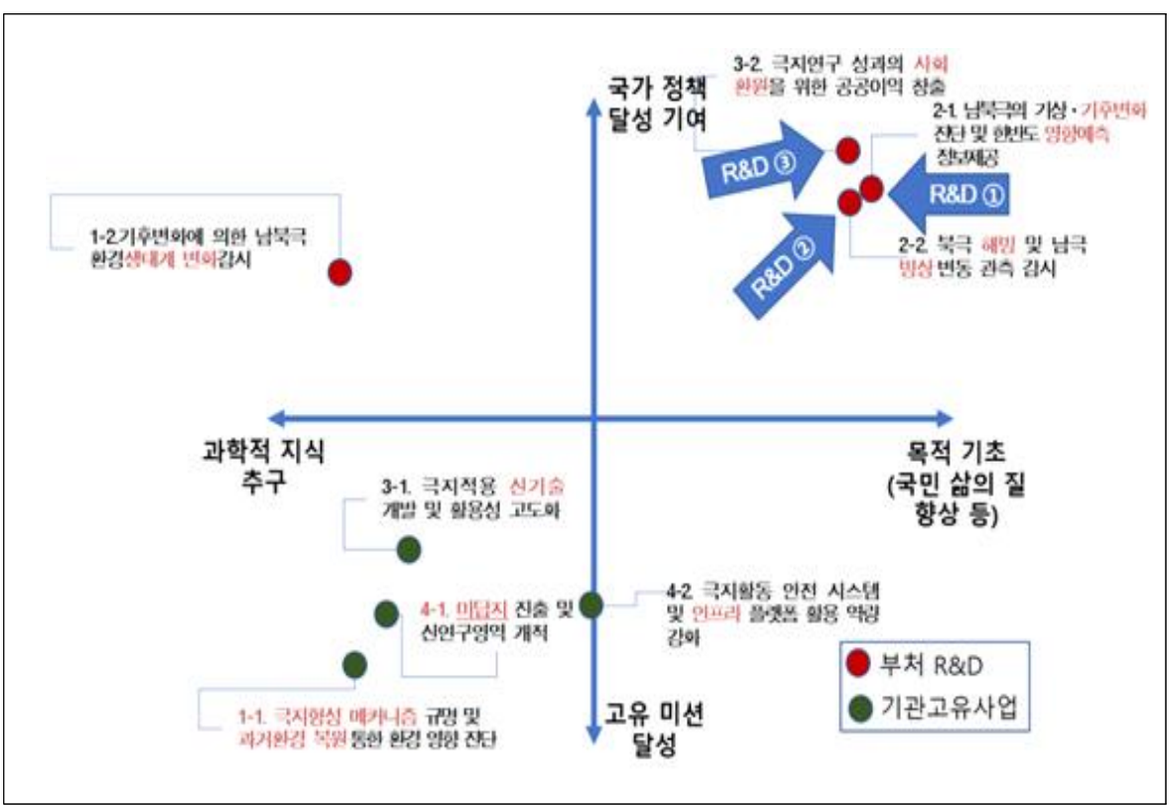
■ (국가 R&D vs 기관고유) 극지연구소 기관고유사업과 연계 및 구분될 수 있도록 ① 국가·국제 아젠다, ② 실용화 연구 연계로 연구내용 차별화하여 각 사업간 R&R 확립

○ 기후변화, 해양 환경보호 등 주요 국제 아젠다(CAOFA 협정, CCAMLR 대응 등)와 해양·극지 분야의 문제·이슈 해결에 부합한 목적형 기초연구는 국가 R&D 사업으로 추진

○ 극지 생물을 활용하여 특허·기술이전 등 실용적 연구성과를 창출하는 실용화 연구(TRL 3~5의 응용연구) 국가 R&D 사업으로 수행

- 기관 고유 사업을 통해 수집·확보된 기초 데이터를 바탕으로 산업화 또는 개발단계 연구로 연계·발전

* 극지 유전자원 활용 기술개발 사업 사례와 같이 기존 연구에서 확보한 기술을 바탕으로 항생·항치매 물질 개발 등 실용화·상용화 연구로 연계·발전



[그림 40] [참고] R&R과 연계, "부처 R&D"와 "기관고유사업" 구분 기준

해당사업 공모형 국가 R&D 적합성

‘남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발’ 사업은 극지 분야 시급한 이슈를 해결하기 위한 목적연구

- 극지역 중심의 기후변화 현안대응형 연구사업 개발에 투자 강화하고자 하는 해양수산부 R&D 중점 투자방향에 부합
- “국가 과학영토 확대 위한 극지 등 미개척 영역에 대한 탐사기술 개발과 접근성 증대 및 활용”(제5차 과학기술기본계획,’23~’27)에 부합하며, 12대 국가전략기술에 포함되는 우주항공·해양 기술 개발에 해당
  * ‘국정과제 41. 해양영토 수호 및 지속가능한 해양 관리’ 및 ‘국정과제 99. 국격에 걸맞은 글로벌 중추국가 역할 강화 - 기후변화·탄소중립 외교 강화’ 와 연계

全남극을 대상으로 관측·예측·연구하도록 기획되어 스펙트럼이 넓음

- 지구시스템모델을 활용하는 국내 대학·기관은 다양하고 풀이 넓으며, 이 중 지구시스템모델 내의 해빙모듈에 특히 전문성이 있으면 참여 가능
- R&D 산출물인 해빙 예측 기술이 전남극을 대상으로 할 뿐만 아니라, 남극 해빙 생성·성장·융해 프로세스, 모델링 및 AI기법 기반 예측 기술, 남극 해빙 계절예측 자료 등의 활용도 또한 광범위하여 수혜 주체 다양
- 남극 내 필요한 지역으로 상세화 가능한 기술로 개발하는 사례*를 구현함으로써 향후 남극 다양한 지역의 상세화 기술 및 자료 제공 확장성 내포
  * 장보고기지 테라노바만 상세 해빙 예측자료 산출

별첨 극지(연) 과제 수행 현황

과제 수행 현황

구 분	과제수	연구 지역	과 제 명	비 고
과기부 R&D 사업	1	환북극 동토	· 북극권 육상-대기-연안 환경 변화 대응 및 활용기술 개발(~'24)	국제협력
해수부 R&D 사업	8	북극해 남극해	· 북극해 온난화-해양생태계 변화 감시 및 미래전망 연구(~'26) · 북극해 해저지질 조사 및 해저환경 변화 연구(~'26) · 로스해 해양보호구역의 보존조치 이행에 따른 생태계 변화 연구(~'26) · 극지 유래 생물자원을 활용한 항생제 후보물질 개발(~'24) · 극지 지의류 유래 치매치료제 실용화 연구(~'24) · 극한지 관측 및 정보처리 기술개발(~'25) · 차세대 쇄빙연구선 건조사업(~'26) · 급격한 남극 빙상 용융에 따른 근미래 전지구 해수면 상승 예측기술 개발(~'31)	국제협력, 국제의무이행, 실용화, 다부처 협력
기관 고유 사업	5	북극	· 과거 온난기의 서남극 빙상 후퇴 및 해양 순환 변화 연구 · 지구시스템모델 기반 북극-한반도 통합 재해기상 예측 시스템의 개발 및 활용 · 북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구 · 고환경 및 동물 진화 연구를 통한 북그린란드 미답지 진출 · 얼음의 미세구조 특성연구를 통한 저온 정화기술 및 환경/에너지 신소재 개발	장기 환경·생태계 관측, 파일럿 단계, 기술 개발의 기초 단계
	10	남극	· 남극권 맨틀활동과 지체구조진화 연구 · 국제심부빙하시추 네트워크를 활용한 대기-빙상 상호작용의 자연적·인위적 특성 규명 · 오로라 발생과 극지 고층대기 변동성과의 상관관계규명 · 서남극해 온난화에 따른 탄소흡수력 변동 및 생태계 반응 연구 · 온난화로 인한 극지 서식환경 변화와 생물 적응진화 연구 · 환경변화에 따른 남극 육상생물의 생리생태 반응 규명 · 남극 기후 환경 변화 이해와 전지구 영향 평가 · 포스트 극지유전체 프로젝트; 극지 유용유전자 발굴을 위한 기능유전체 연구 · 남극내륙 연구거점 구축과 기지 후보지 선정을 위한 빙원탐사 · 남극 David 빙하 빙저호 지구물리 탐사기술 및 열수시추 기술개발	장기 환경·생태계 관측, 파일럿 단계, 기술 개발의 기초 단계

제4절 국제협력 필요성 및 프로젝트 추진체계

1. 국가간 협력 필요성

국가간 협력 필요성

(국내 전문인력 육성) 국내 관련분야 투자 및 인력양성 미비하여 남극 해빙 관측 및 예측 관련 국내 전문가 제한적

- 남극 해빙 관측분야 국내 전문가가 전무하여 국내 육성 절실
- 국내 해빙모델 개발 및 개선 연구를 수행하는 기관은 없으며, 대다수 대학 및 연구기관에서는 미국 및 유럽의 커뮤니티 지구시스템모델을 도입하여 해빙 관련 연구를 수행 중으로 국내 연구 수준은 여전히 추격 단계
  ※ 기상청 및 해양과학기술원에서 각각 기존 선진국의 지구시스템모델을 도입·개선하여 활용하고 있는 예측시스템의 일환으로 해빙모델 모듈이 포함되어 있으나 관련 전문가는 부족

- 국외에서는 이미 12개국 22개기관에서 남극 해빙 계절예측이 수행되고 있으며 첨단의 AI 기반 예측시스템 개발 또한 활발하여 해빙예측 선진 기관들로부터의 기술전수·확보 최적기
  ※ 남반구 극지예측의 해(YOPP-SH) 국제협력연구 일환으로 2017년 시작된 남부 해빙예측 네트워크(Sea Ice Prediction Network South)는 분기별 남극 해빙 예측자료 수집 및 상호비교

(개발 효율성 제고) 남극 해빙 관측 및 예측분야 학문 후속세대 양성 및 지속가능한 협력 네트워크 구축 필요

- 국제적으로 고도화된 지구시스템 예측모델 개발이 진행되고 있으나, 제한된 접근성과 극한 환경으로 인한 관측자료 부족이 남극 해빙에 대한 지식 미비 및 예측모델 성능 저하로 연계
- 선도국과의 격차를 단기간에 해소 위해 효율적 남극 해빙 예측 기술 개발 전략으로 예측역량 증진 필요
- 실질적 성과 산출 위해서는 선도국의 기술 및 노하우를 습득하고 우리의 현장 관측자료, 인프라 그리고 연구인력을 공유하는 상보적 협력관계 구축 및 국제협력 의향서 또는 MOU 기반 상호협력 약속의무 체결 필요

(AI 기반 첨단 기법 도입) 다른 지역에 비해 예측성이 낮은 남극 지역은 AI 활용 기반 획기적인 기술 발전 가능성이 열려 있음

- 국제공동연구 참여 및 국제 네트워크 구축·운영으로 급변하는 예측기술 개발 추세의 최신 현황을 분석하여 최적의 남극 해빙 예측기술 개발방향 적시에 설정 및 적용 필요
  ※ SIPN South는 단일모델보다 다중모델 앙상블 평균의 남극 해빙 계절예측 성능이 더 우수하며, AI를 포함하는 경험적 통계모델이 역학모델 성능보다 더 우수하다고 요약하여 국제학술지

해양과학 프론티어스에 발표('23.05)

- 최근 진화하고 있는 AI-물리모델 통합기법 개발 및 예측시스템 자료동화에 AI 기법 적용 등 예측성 제고에 효과적인 첨단 기술 트렌드 습득 및 반영

○ (국제적 공신력 획득) 국제 남극 해빙 계절 예측 프로그램 공식 참여 및 국외 협력 기관들과 국제협력 네트워크 구축·운영으로 공신력 및 국제 리더쉽 획득

- 현재 12개국 22개 기관이 참여하고 있는 국제 남극 해빙 계절 예측 프로그램 SIPN South에 공식 참여함으로써 산출된 예측 자료의 성능 검증 및 국제적 공신력 획득
- 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축·운영으로 공동연구 활성화 및 국제 리더쉽 획득

※ 과제 기획을 위해 해빙 예측모델 국제워크샵('23년 10월 24-26일)을 개최하였으며, 8개국 해빙 예측 전문가 그룹과 해빙 예측 관련 국제 기술 현황 및 공동연구를 논의하고 향후 우리나라 주도의 정기 네트워크 운영 논의

2. 국가간 협력 추진상황

국가간 협력 의향서 접수 (붙임 참조)

○ 벨기에(SIPN South 국제협력 리더쉽), 캐나다, 프랑스, 이탈리아, EU, 중국, 호주, 미국 등 9개 기관으로부터 의향서 접수

○ 해빙 예측·관측분야 선진 기관들로부터 효율적인 기술 전수 및 확보 가능 그리고 상호협력 약속의무 이행 필요

○ 국제 프로젝트 Antarctica InSync와의 협력, WMO/WWRP의 공식 지원, 그리고 7개 기관과 협력의향서 교환 논의 중(③의 표 참고)

순번	국가	기관	담당 연구원	공동연구 역할	
				외국	우리나라
1	국제협력/벨기에	SIPN South/루뱅대학교	François Massonnet	SIPN South 주관 및 예측자료 제공	계절예측자료 SIPN South 제출
2	캐나다	캐나다 환경기후변화부	Jean-François Lemieux	CICE 해빙모델 구축 및 개선	현장 관측자료 및 인력교류
3	프랑스	피에르-시몬 라플라스 연구원 해양학-기후연구소	Martin Vancoppenolle	해빙모델 역학·물리과정 개선	현장 관측자료 및 인력교류
4	이탈리아	유럽-지중해 기후변화센터	Lorenzo Zampieri	해빙모델에 AI 기법 응용	AI 경험 및 노하우, 현장 관측자료 및 인력교류
5	EU	유럽중장기예보센터	Peter Bechtold	해빙 계절예측 시스템 구축	현장 관측자료 및 인력교류
6	중국	칭화대학교	Shiming Xu	CICE 초고해상도 적용기법	현장 관측자료 및 인력교류
7	호주	호주남극프로그램(AAP)	Petra Heil	해빙 현장 관측 기술 및 APSeCt 자료 공유	현장 관측 인프라 및 자료 공유
8	미국	우즈홀 해양연구소	Ted Maksym	해빙 부표 관측 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
9	호주	애들레이드대학교	Luke Bennetts	해빙 파고부표 관측 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유

3. 프로젝트 참여주체 및 역할 분담 방안

남극 해빙 모델링 및 예측분야 공동연구, 국제협력 활동 참여, 국제협력 네트워크 구축·운영

남극 해빙 계절예측 모델링 분야 선도국과 공동연구

- 남극 해빙 예측 모델링 분야 선도국인 캐나다, 프랑스, 이태리, EU, 중국 해빙 모델 그룹과 국제공동연구 수행으로 KOPRI 남극 해빙 예측시스템 구축 및 개선
- 협력 기관들과 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축 및 운영으로 공동연구 활성화 및 리더쉽 획득 도모

※ 2023년 10월 24-26일 극지연구소에서 주최한 해빙 예측모델 국제워크샵에 참여한 8개국 해빙 예측모델 전문가 그룹 기반 격년주기 오프라인 미팅 논의

남극 해빙 계절 예측 국제협력 활동에 참여

- 국제 남극 해빙 계절 예측 프로그램 SIPN South*과의 협력 기반 다중모델 계절 예측자료 및 기법을 실시간으로 입수하여 KOPRI 예측시스템 개선

※ 국제 남부 해빙 예측 네트워크(Sea Ice Prediction Network South)를 이끌고 있는 벨기에 루뱅대학교 François Massonnet 교수와 협력 예정

- 국제 남극 해빙 계절 예측 프로그램 SIPN South에 공식 참여

남극 해빙 관측분야 공동연구, 국제협력 활동 참여, 국제기구 공인

국외 선도 연구기관과 협력 기반 남극 첨단 해빙 관측기술 도입 및 공동 관측

- 남극 해빙 관측 분야 선도국인 호주, 영국, 미국 관측 그룹으로부터 첨단 관측기기 전수 및 현장 관측 협력연구 수행

  ※ UAV, 파고부이, 해빙부이, 해빙 위 마스터, 해빙코어, ITP, AXCTD/XCTD 등

남극 해빙 관측기술 개발 및 자료 획득을 위해 국제협력 프로그램에 참여하여 자료 공유·교환

- 국제 남극 해빙-기후 협력 프로그램 ASPeCt, 국제협력 프로그램 SHARC, 국제 남극 해빙 관측망 NECKLACE 에 참여

  ※ SCAR Antarctic Sea Ice and Climate(ASPeCT), Southern Hemisphere Antarctic Research Collaborative(SHARC) 프로젝트, 남빙양관측시스템(SOOS) Network for the collection of knowledge on melt of Antartic ice shelves(NECKLACE), SCAR Antarctic Sea Ice and Climate(ASPeCT) 등

독일 AWI가 주도하는 남극 관측 동기화 위한 국제 과학과 인프라(Antarctic InSync)과제와 협력

- 남극 인프라 공유 기반 상보적 관측 및 관측자료 공유

  ※ 독일 알프레드 베게너 연구소(AWI)가 주도하는 UN OCEAN DECADES 프로그램인 Antarctic InSync(International Science & Infrastructure for Synchronous Observation, '24~'30) 과제와 협력 논의 중

WMO/WWRP가 지원하는 공식 프로젝트 지위 획득

- WMO/WWRP 산하 극지 결합분석 및 서비스 프로그램(PCAPS)의 목표 남극 예측 향상에 부합하는 과제로서 공식 프로젝트 지위(endorsement) 획득(심의 중)

  ※ 수치모델 활용 기반 극지역 예측성 제고를 목표로 하는 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO) 세계날씨연구프로그램(World Weather Research Programme, WWRP)의 극지 결합분석 및 서비스 프로그램(Polar Coupled Analysis and Prediction for Services , PCAPS) ('24~'28)

순번	국가	기관	담당 연구원	공동연구 역할	
				외국	우리나라
1	국제협력/벨기에	SIPN South/루뱅대학교(UCL)	François Massonnet	SIPN South 주관 및 예측자료 제공	계절예측자료 SIPN South 제출
2	캐나다	캐나다 환경기후변화부 (EC)	Jean-François Lemieux	CICE 해빙모델 구축 및 개선	현장 관측자료 및 인력교류
3	프랑스	피에르-시몬 라플라스 연구원 해양학-기후연구소 (IPSL)	Martin Vancoppenolle	해빙모델 역학·물리과정 개선	현장 관측자료 및 인력교류
4	이탈리아	유럽-지중해 기후변화센터 (CMCC)	Lorenzo Zampieri	해빙모델에 AI 기법 응용	AI 경험 및 노하우, 현장 관측자료 및 인력교류
5	EU	유럽중장기예보센터 (ECMWF)	Peter Bechtold	해빙 계절예측 시스템 구축	현장 관측자료 및 인력교류
6	중국	칭화대학교 (TU)	Shiming Xu	CICE 초고해상도 적용기법	현장 관측자료 및 인력교류
7	호주	호주남극프로그램 (AAP)	Petra Heil	해빙 현장 관측 기술 및 APSeCt 자료 공유	현장 관측 인프라 및 자료 공유
8	미국	우즈홀 해양연구소 (WHOI)	Ted Maksym	해빙 부표 관측 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
9	호주	애들레이드대학교 (UoA)	Luke Bennetts	해빙 파고부표 관측 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
10	호주	켄터베리 대학교	Wolfgang Rack	UAV EM-Bird 활용 관측기술	현장 관측 인프라 및 자료 공유
11	미국	스크립스해양연구소	Jamin Greenbaum	AXCTD/XCTD 및 ITP 활용 관측기술	현장 관측자료 및 인력교류
12	미국	라몬 도허티 지구관측소(LDEO)	Chris Zappa	UAV 활용 관측기술	현장 관측 인프라 및 자료 공유
13	미국	뉴욕대학교 (NYU)	David Holland	해빙 위 마스터 구성 및 관측 기술	현장 관측자료 및 인력교류
14	영국	영국남극연구소(BAS)	Siobhan Johnson	해빙코어 시료채취 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
15	독일	알프레드 베게너 극지해양연구소(AWI)I	Christian Haas	UAV 활용 관측기술	현장 관측 인프라 및 자료 공유
16	호주	호주해양남극연구소	Alex Fraser	통합적 환남극 해빙 자료	자료 활용한 고착빙 메커니즘 연구
17	독일	알프레드 베게너 극지해양연구소(AWI)I	Stefanie Arndt Alex Haumann	OCEAN DECADES 프로젝트인 남극 관측 동기화 위한 국제 과학과 인프라(Antarctic InSync) 프로젝트 수행 및 인프라와 자료 공유	FAST 수행 및 현장 관측 인프라 및 자료 공유
18	국제협력	세계기상기구(WMO/세계날씨연구프로그램(WWRP)/극지결합분석 및 서비스 프로그램(PCAPS)	Daniela Liggett	프로젝트 지원	프로젝트 수행

4. 유사 글로벌 공동연구·협력 사례

남극 빙권 국제공동관측 네트워크(LIONESS)

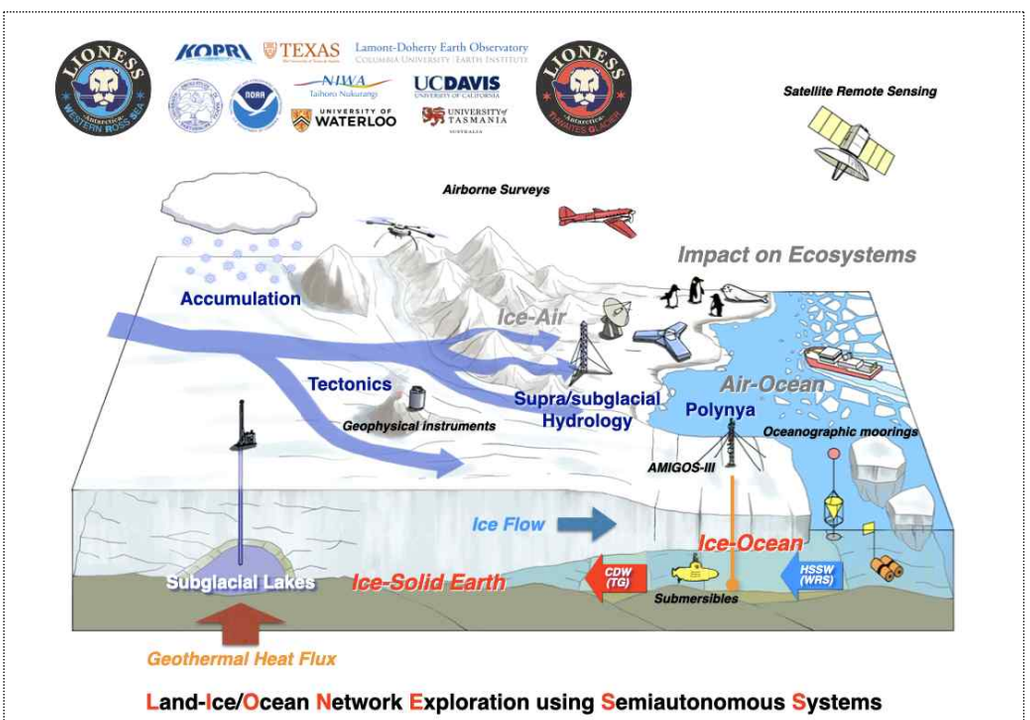
○ 극지연구소 주도 세계최고 수준의 6개국 12개 기관 협력 다학제 빙권 국제공동관측망

- 해수부 R&D '장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측' 과제('14~'18)를 통해 육상·해양 다학제 극지 빙권변화 감시 관측망 남극 빙권 국제공동관측 네트워크(LIONESS) 구축·운영
- 공동 현장 관측 및 자료 공유를 위해 매년 공동워크샵 개최

※ 미·영 스웨이츠 빙하 연구(ITGC), 전남극 빙상 가장자리 관측망(RINGS), 국제 남빙양 관측망(SOOS), 국제 극지-지구 관측망(POLENET), 호주 남극 연구 프로그램(ACEAS) 등 다른 국제협력 프로그램과 협업 및 교류

- 성공적으로 구축·운영되어 이후 '서남극 스웨이트 빙하 돌발붕괴 기작규명 및 해수면 상승 영향 연구'('19~'23) 및 '급격한 남극 빙상 용융에 따른 근미래 전지구 해수면 상승 예측기술 개발'('23~'31) 과제로 승계되어 확장 운영 중

※ 동남극 로스해(LIONESS-WRS) 및 서남극 스웨이츠 빙하(LIONESS-TG)에서 공동 관측 수행



[그림 41] LIONESS 국제협력연구 모식도

5. 협력 관련 규정 마련 방안

국제협력 형태별 관리 계획

형태	국가	기관	관리 방안
다자간 국제공동연구 참여	다자간 국제협력	SIPN South /루뱅대학교(UCL)	과제 3년차부터 분기별 계절예측자료 제출
양자 협력	캐나다	캐나다 환경기후변화부 (EC)	협력의향서 교환 또는 MOU 체결,, 매해 공동연구 계획 및 결과를 연차보고서에 포함하여 제출
	프랑스	피에르-시몬 라플라스 연구원 해양학-기후연구소 (IPSL)	
	이탈리아	유럽-지중해 기후변화센터 (CMCC)	
	EU	유럽중장기예보센터 (ECMWF)	
	중국	칭화대학교 (TU)	
	호주	호주남극프로그램 (AAP)	
	미국	우즈홀 해양연구소 (WHOI)	
	호주	애들레이드대학교 (UoA)	
	호주	켄터베리 대학교	
	미국	스크립스해양연구소	
	미국	라몬 도허티 지구관측소(LDEO)	
	미국	뉴욕대학교 (NYU)	
	영국	영국남극연구소(BAS)	
	독일	알프레드 베게너 극지해양연구소(AWI)I	
	호주	호주해양남극연구소	
프로젝트 간 협력	독일	알프레드 베게너 극지해양연구소(AWI)I Antarctica InSync 프로젝트	협력의향서 교환 및 정기 회의 개최
국제기구 공식 지지	다자간 국제협력	세계기상기구(WMO/세계날씨연구프로그램(WWRP)/극지 결합분석 및 서비스 프로그램(PCAPS)	공식 지지공문 획득 및 국제기구에 정기 보고
다자간 국제협력 네트워크 구축 및 운영	8개국 10개기관 이상		격년주기 워크숍 개최 및 개최보고서 제출

제5절 기대효과

1. 기대 효과

- (안전한 남극 탐사활동) 쇄빙선 항로 및 기지 비행기 이착륙 중장기 계획 수립으로 체계적인 남극 과학활동 지원 및 확대 가능
- (기후예측 역량 증진) 국내 남극 해빙 현장관측 기술 확보 및 예측자료 자체 생산으로 지구시스템 메커니즘에 대한 이해 증진* 및 국가 기후변화 대응 기술력 제고에 기여

  * 남극 해빙 면적 축소는 지구 반사도 감소로 온난화를 가속화시키며 해수면 상승을 유발하는 빙붕·빙상 융빙 가속화로 이어질 수 있음

- (탄소배출 저감 및 어업활동 활성화) 남극 탐사선 최적 항로 계획 수립 및 어선의 안전한 조업과 어장 예측에 도움

  * 남극 해빙 유실은 어장에 큰 영향을 주는 생태계 파괴 등으로 이어지게 되므로 예측에 경제적 효과 및 잠재적 수요 막대

- (해양 안전체계 구축) 남극 해빙 유실에 기인한 해양 및 연안 재난* 시나리오 제공으로 해양재난 예측정확도 제고에 일조

  * 유빙에 의한 선박 좌초 및 고파고에 의한 연안 기반인프라 훼손 등

- (극지연구 선도국 지위 획득) 국제 상호비교연구 SIPN South에 공식 참여하여 우수한 남극 해빙 계절예측 자료를 제공하고, 쇄빙선 운항 국가 및 장보고 기지 주변 국가 등 외국 극지기관에 유용한 해빙 예측자료 전파*

  * 현재 우리 쇄빙선 아라온은 항로 결정에 미국 국립빙설자료센터(NSIDC) 및 독일 브레맨대학교의 해빙 원격탐사 실시간 모니터링 자료를 주로 참조

2. 파급 효과

(과학/기술적 파급효과)

- 국내 남극 해빙 관측 및 중장기 예측 역량 확보
- 남극 해빙 현장관측 기술 확보 및 예측자료 자체 생산으로 지구시스템 메커니즘에 대한 이해 증진* 및 국가 기후변화 대응기술력 제고에 기여
  * 남극 해빙 면적 축소는 지구 반사도 감소로 온난화를 가속화시키며 해수면 상승을 유발하는 빙붕·빙상 융빙 가속화로 이어질 수 있음
- 남극 해빙 예측성 향상으로 남극 해빙 유실에 기인한 해양재난* 예측정확도 제고에 일조 및 해양수산 신성장 분야 선도기술 개발에 기여할 수 있는 해빙 장기예측 원천자료 제공
  * 유빙에 의한 선박 좌초 및 고파고에 의한 연안 기반인프라 훼손 등

(경제/사회적 파급효과)

- 해양 안전체계 구축에 기여 및 국제 양자·다자 협력연구 추진·참여로 과학기술 지도력 확보와 기후변화 대응분야 국제 의제 선도
- 거대재난 및 복합재난 대응 위한 예측체계에 원천자료로 제공하여 재난안전관리 체계 구축에 기여
- 지구온난화의 영향으로 급변하는 극지에 대한 국민적 관심사가 높아지고 있으며, 세계 10위권의 경제 규모인 우리나라의 위상에 맞는 인류현안 문제 해결을 위한 극지에서의 과학연구 수행을 통한 국가위상 제고
- 신기후체제 대응 및 2050 탄소중립 달성이 강조되고 있는 현시점에서 지구 온난화에 대응하는 남극 해빙 예측기술 개발 연구 수행은 글로벌 국가 이미지 제고에 크게 기여할 뿐만 아니라, 나아가 외국 극지기관에 유용한 해빙 예측자료를 제공함으로써 실질적인 극지연구 선도국으로서의 지위를 획득할 수 있을 것으로 기대됨
- 남극 해빙 예측기술 획득은 해빙 유실에 기인한 급격한 환경 변화에 따른 사회 변화와 경제적 파급 효과에 선제 대응하는 것으로 향후 전세계 경제, 산업 구조 개편에 중요한 자료로 사용될 수 있음
- 남극 해빙 유실은 남극 탐사선 및 어선 항로에 지대한 영향을 미칠 뿐만 아니라 어장에 큰 영향을 주는 주변 생태계 파괴 등으로 이어지게 되므로 남극 해빙 예측에 경제적 효과 및 잠재적 수요 막대함
- 남극 탐사선 최적 항로 계획 수립 및 어선의 안전한 조업에 기여함으로써 선박의 탄소배출을 경감시키고 경제적 손실 위험을 저감하여 관련 산업 부흥에 기여
- 해빙 유실에 기인하는 기후재난 관련 재난안전 관리 체계 구축 및 재난 각본 개발 등 미래위험 관리 등 기후위기 대응력 제고에 일조함으로써 경제적 피해 저감에 이바지
- 향후 심각한 침수가 예상되는 국내 연안지역 재해대응정책 수립과 국가 기후변화 대응 정책 검증을 위한 명확한 과학적 근거를 제공하여 대형 재난관련 대국민 불안요소 해소

Korea Polar Research Institute

남극해 급격한 온난화 대응
남극 해빙 예측기술 개발
위한 기획연구

제6장 전략과제별 세부 추진계획

제1절 남극 해빙 관측체게 구축
제2절 남극 해빙 예측시스템 개발
제3절 AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산

제1절 남극 해빙 관측체계 구축

과제 1 해빙 위 관측 기반 해빙의 생성·성장·융해 과정 관측

1. 과제개요

가 과학적 질문

■ 분과 가설

- 남극해의 급격한 온난화로 융빙수의 유출, 해수 물성변화, 대기 온도 상승이 진행되고 이로인한 해빙의 생성 시기, 생성율, 해빙의 물성, 융해 시기와 융해율이 변화함
- 해빙의 생성과 융해율의 변화로 해빙면적과 분포가 변화하고 이로 인한 알베도 및 해양순환 변화가 전남극 환경변화를 야기할 수 있음
- 해양에서 대기로 열이 전달되는 폴리냐에서 저층제트가 형성될 때 대기안정도를 약화시켜 연직 연전달을 증가시키고 해빙의 형성 및 이류에 큰 영향을 미칠 것
- 해빙이 녹은 융빙수에 의해 해빙 하부 해양이 성층되었을 때, 해빙 융빙수의 이류 정도에 따라 해빙의 용융이 결정될 것
- 빙붕 융빙수에 의해 해빙 하부 판얼음(platelet ice)이 발달할 때, 그 생성량을 정확하게 관측하는 것이 유의미함

■ 과학적 질문

- 변화하는 남극환경에서 해양과 대기 상호작용에 의한 남극해빙의 생성, 성장, 용융율은 어떻게 변할 것인가?
- 저층제트는 해양-대기 경계층의 열전달과 구조 그리고 해빙 생성에 어떤 영향을 미치는가
- 해빙 융빙수가 이류되는 메커니즘과 그로 인한 해빙 용융과의 상관관계는 무엇인가
- 빙붕 융빙수가 용승하여 해빙 하부에 도달할 때 platelet ice의 생성량을 결정하는 메커니즘은 무엇인가

나 연구의 필요성

■ 정밀 관측 기반 현장자료 활용을 통한 모델의 불확실성 최소화 필요

- 현재 해빙예측모델은 최근의 해빙변화를 정확하게 재현하지 못하고 있으며 특히 남극의 경우 관측자료의 부족으로 해빙의 생성과 융해 과정이 밝혀지지 않아 모델개발의 저해요인으로 작용하고 있음
- 특히 해빙이 생성되는 겨울철에는 남극해역에 접근이 어려워 생성과정이 명확하게 밝혀지지 않아 무인장기관측이 필수적임
- 융빙수가 해빙의 생성을 촉진할 것으로 예측되나 따뜻해진 해양과 대기에 의한 융해도 가속화될 것으로 예측되기 때문에 현장 관측을 통한 해빙의 생성, 성장과 융해과정 규명이 필요

일반적으로 대기안정도가 큰 안정경계층에서 형성되는 저층제트는 난류 및 쉬어가 강해지면서 혼합을 강화하지만 지표면 주변 강한 음의 열속으로 인해 안정도가 매우 높은 지표면까지 영향을 주지 못한다고 알려져 있으나 (Egerer et al., 2023), 남극 폴리냐와 같이 해양으로부터 양의 열속이 발달하는 경우 저층제트의 쉬어가 지표면까지 영향을 줄 수 있을 것(Heinemann et al., 2021)이라 생각되며 따라서 운동량 및 열, 습도의 이류가 더욱 활발하게 되면 해빙 형성 및 이류에 큰 영향을 줄 것으로 생각됨

- 대기-해양 경계층은 대기경계층의 모멘텀 및 열, 습도 flux를 기반으로 모수화되기 때문에 각 flux를 정확하게 구현하는 것이 대기 모델 모수화의 핵심이며 해빙 형성률에 가장 중요한 요소지만, 대기-해양 경계층 및 해양 표층 바로 위 (ex. 1m)를 직접 관측하는 것이 매우 도전적이기 때문에 관측 값이 없어 모델의 불확실성이 큰 상황

남극 해빙 아래 해양 순환 및 해빙-해양 경계층에서의 관측은 관측 장비가 해빙에 갇혀 유실되는 경우가 많고 시공간적 특성을 관측하는 것이 매우 어렵기 때문에 선행연구가 매우 드뭄. 정밀 관측이 가능하다면, 표층으로 용승하는 따뜻한 수괴의 형성 메커니즘, 해빙 융빙수의 거동과 해빙 용융률 간의 상관관계 도출을 통해 해빙 형성 및 용융 모델의 정확도를 개선할 수 있을 것으로 기대됨 (Crews et al., 2022).

- Ice tethered profiler(ITP, 얼음테더프로파일러) (Krishfield et al., 2007)의 경우 해빙을 기반으로 관측 장비를 설치하고 관측된 결과를 실시간으로 위성으로 전송받기 때문에 계절변동성과 같은 시공간적 특성을 도출할 수 있을 것으로 기대되며 프로파일링을 통해 변화하는 해빙-해양 경계층의 구조를 관찰할 수 있을 것으로 기대됨.

빙붕 끝단 주변에서 녹은 융빙수는 강한 부력으로 빙붕 하부를 따라 흘러나오게 될 때 (Na et al., 2022), 강하게 용승하면서 생성되어 있는 해빙 하부에 추가적인 결빙이 발생하기 때문에 해빙의 분포와 두께에 영향을 미치지만, 남극 해빙 하부 연직프로파일 및 해빙-해양 경계층에 대한 관측이 드물기 때문에 연구가 매우 어려움.

다 연구의 시급성

- 당초 남극은 북극과는 달리 지구온난화에도 해빙의 뚜렷한 감소세가 나타나지 않았으나 2017년부터 연속적으로 해빙이 감소하여 2023년 사상 최소 면적을 기록함



[그림 42] 미국국립빙설데이터센터에 발표한 남극해빙의 연도별 최소면적

- 남극 해빙의 소멸은 빙붕 안정도를 저하시켜 빙상 시스템에 급격한 변화를 야기할 수 있음
- 해빙의 감소는 남극탐사나 조업기회의 확대로 이어지나 정확한 예측체계가 없으면 해빙 지역에 진입한 선박의 좌초 위험으로 기회를 활용하기 어려움
- IPCC6차 보고서에서 사용된 거의 모든 모델은 1979년에서 2018년 사이의 해빙 추세를 재현하지 못하고 있어(Roach et al., 2020) 예측 정확도 향상을 위한 현장관측과 해빙프로세스 연구가 필수적
- 남극 저층수가 형성되는 지역 중 하나인 로스해에서의 해빙 변동성이 자연변동성보다는 anthropogenic한 영향이 더 크며 지구온난화로 인해 그 영향이 더욱 커질 것으로 예상 (Yuan et al., 2017)

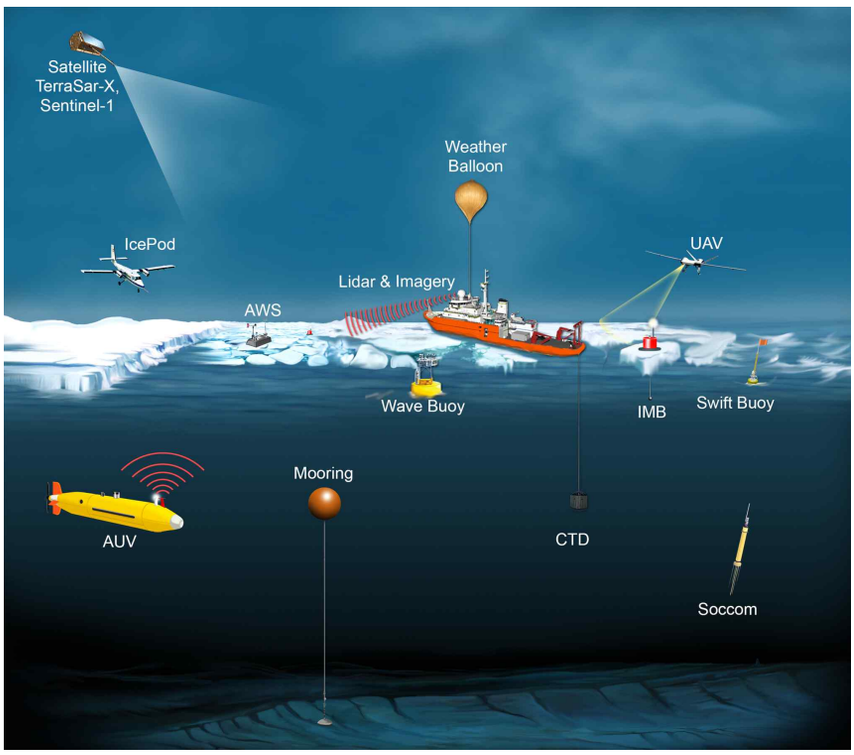
라 최종목표와의 연계성

- 해빙이 형성되는 해양, 대기 환경 조건과 형성된 해빙의 물성과 두께, 해빙의 용융 및 소멸을 관측하여 프로세스를 규명하는 것은 해빙 모델을 개선하여 보다 정확한 예측시스템을 만드는데에 필수적
  - 최종 목표를 달성하기 위해 관측 기반 물리기작 이해 증진 및 경계조건 정밀화에 기인하여 종합적으로 해빙예측모델 시스템이 현상을 보다 현실적으로 구현하도록 개선하는 것이 핵심 연구
  - 해빙 생성 및 용융 기작을 규명함으로써 해빙 모델에 포함된 모수화를 개선하는데 큰 역할을 할 것으로 기대

- 해빙 모델의 성능을 비교 평가할 때 해빙의 용융률에 대한 검증 자료로써 활용될 수 있으며 또한 다양한 시나리오에서의 해빙 성능을 모의할 때 시나리오를 구성할 수 있는 기초 자료로써 활용 가능

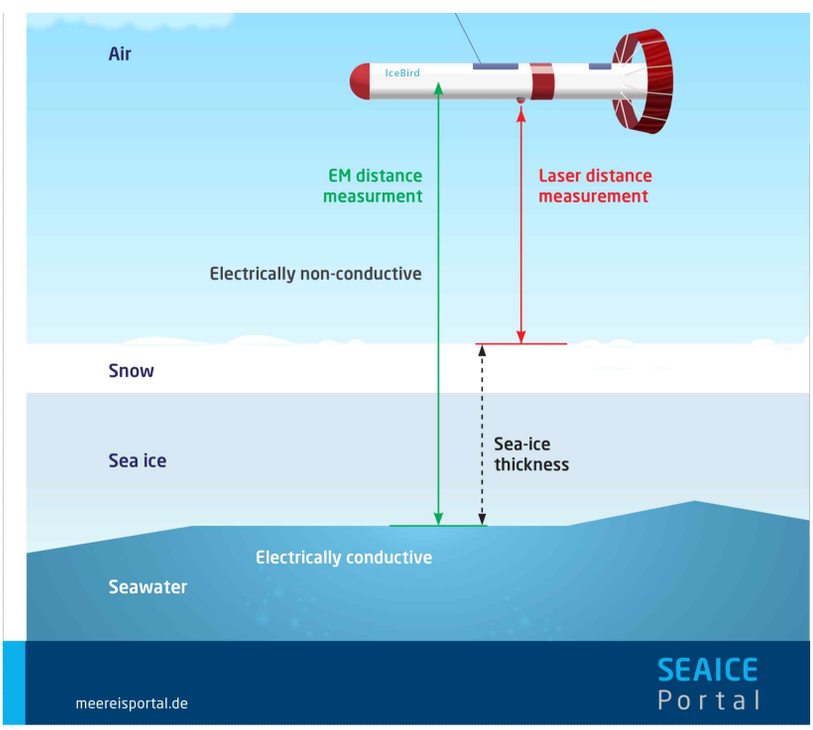
마 국내외 동향분석 및 시사점

- 국외 동향분석
  - 미국 NSIDC에서는 위성관측을 바탕으로 환산한 해빙의 분포와 두께에 대한 정보를 제공하고 있음
  - PIPERS(Polynyas, Ice Production, and seasonal Evolution in the Ross Sea) 사업: 로스해에서의 해빙생성과정을 이해하기 위한 대기/얼음/해양/생지하학 상호작용 연구 프로젝트가 2015-2019년까지 수행됨. 해빙의 생성을 관측하기 위하여 로스해 폴리냐에서 남극의 가을시즌인 2017년 4월과 5월에 무인 유인 관측을 수행하여 2017년의 얼음 확장이 지연된 물리기작을 규명함

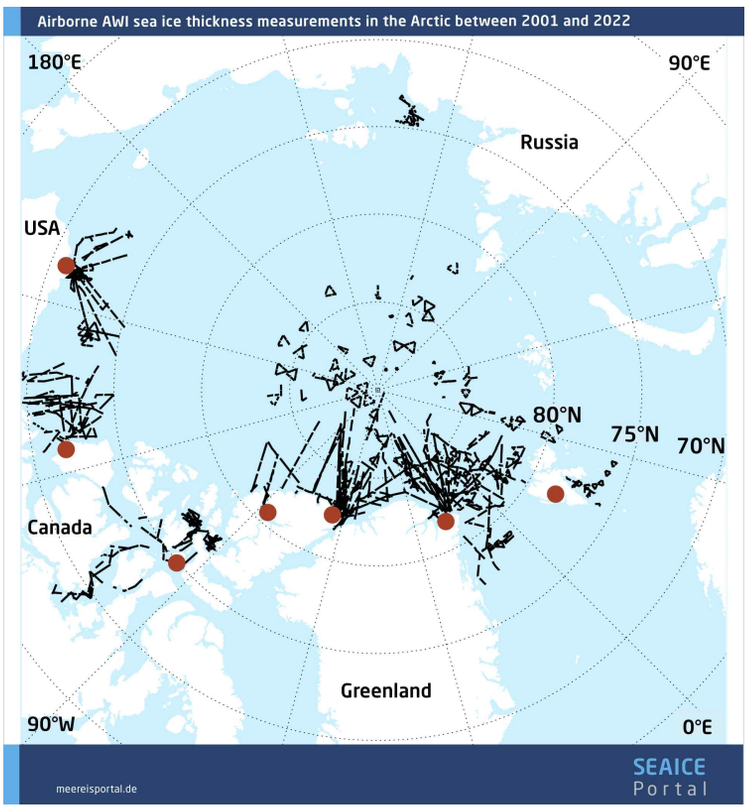


[그림 43] PIPERS 해빙 생성과 진화 과제 관측 모식도 (Ackley et al., 2020)

◎ 독일 AWI 연구소에서 해빙의 두께를 헬기나 항공기로 관측할 수 있는 EM-Bird 장비를 개발, 북극에서 20년 넘게 해빙두께 정밀 탐사 수행



[그림 44] EM-Bird 장비의 해빙두께 관측 원리



[그림 45] 2001년부터 2022년까지 북극에서 수행된 EM-Bird 항공 해빙두께 탐사라인

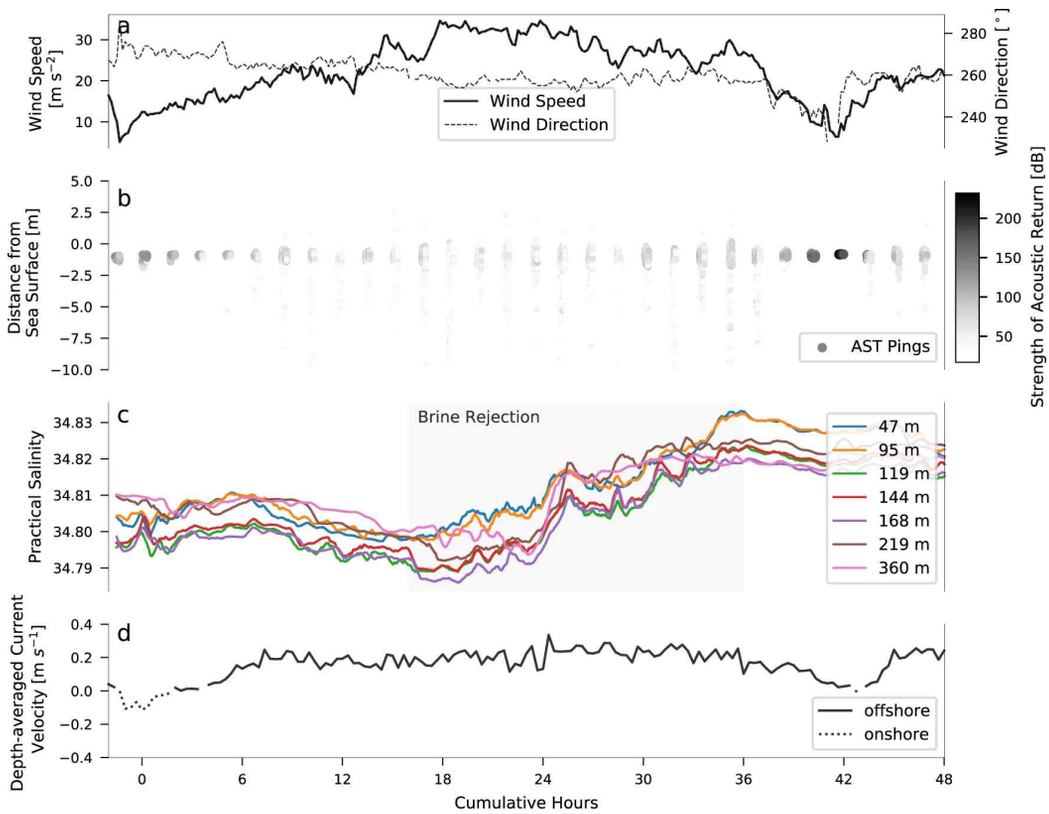
- 뉴질랜드에서 2024/25 남극 로스해 EM-Bird 해빙 탐사를 위한 프로젝트('23~'25)에 착수함
- 미국에서 다양한 페이로드(infrared and visible broadband imaging, hyperspectral NIR/VNIR imaging, longwave and shortwave broadband radiative fluxes, meteorological fluxes (momentum, sensible, latent, aerosol)가 달린 배에서 운용가능한 UAV를 개발, 이를 활용하여 북극해 대기-해양-해빙 프로세스 연구 수행 (Zappa et al., 2020)



[그림 46] 미국에서 개발하여 활용중인 대기-해양-해빙 종합 관측 UAV (Zappa et al., 2020)

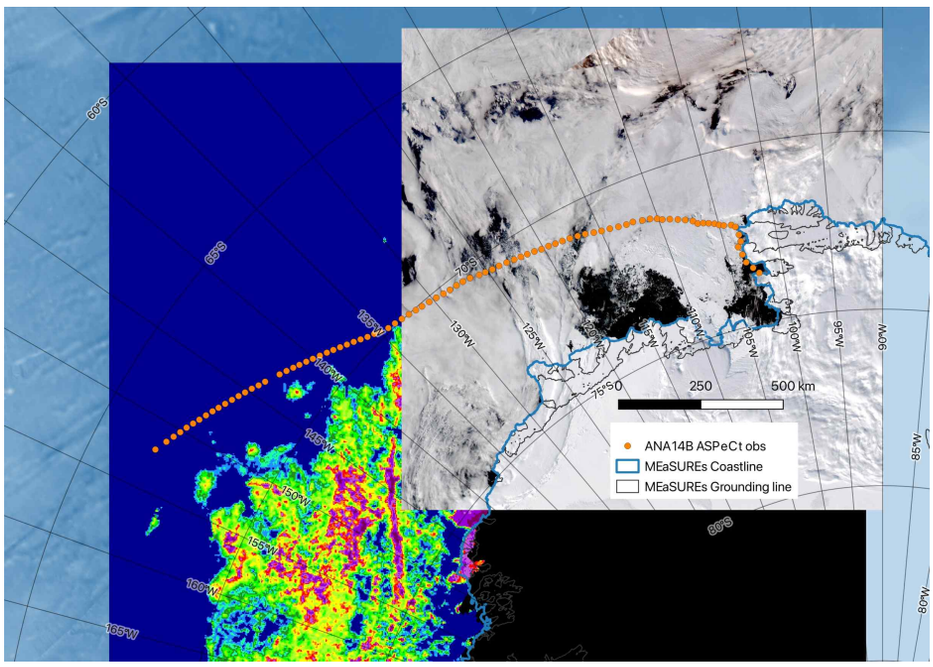
국내 동향분석

- 미국 콜럼비아 대와 협력 테라노바만 난센빙벽 전면에 촘촘한 간격으로 센서가 분포된 계류장비를 설치 운영, 해빙 생성에 의해 형성되는 염분 이동을 관측하여 해빙이 활발하게 형성되는 조건과 이로인한 해수물성 변화를 규명 (Unna et al., 2024)



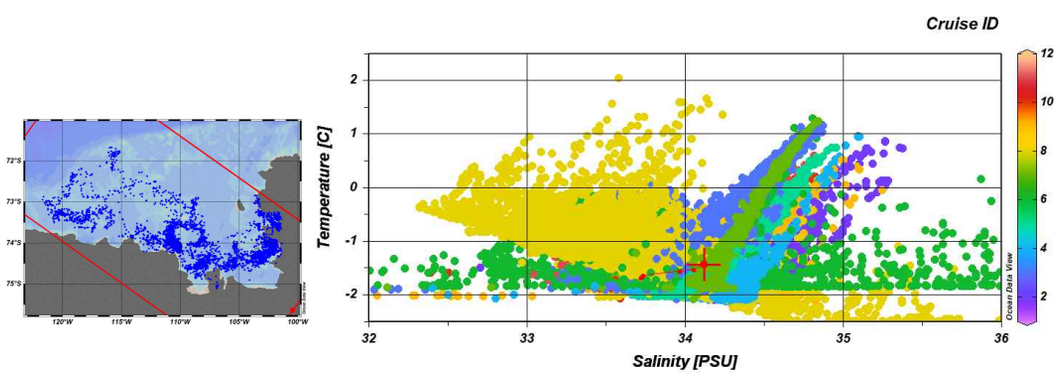
[그림 47] 난센빙붕 인근 Manuela 기상관측소의 바람 시계열 기록과 계류장비에서 관측된 염분변동. 높은 풍속이 유지되는 시기에 염분이 상승하는 것을 볼 수 있음 (Una et al., 2024)

- 2023/24 아라온 아문젠해 항차(ANA14B)에서 ASPeCt(Antarctic Sea Ice Processes &Climate) 해빙 특성 관측 수행



[그림 48] 아라온 ANA14B 항차에서 수행된 ASPeCt 관측 정점

- 2021/22 아라온 아문젠해 탐사(ANA12B)에서 물범에 해수의 온도 염분을 측정할 수 있는 장비를 부착하여 해빙지역에서 수온염분 관측자료 획득



[그림 49] 아라온 ANA12B 항차에서 수행한 씰태깅으로부터 획득된 해빙해역의 수온염분

문제점 및 시사점

- 해빙의 밀도와 분포 예측을 위한 관측은 항로개척의 필요성을 바탕으로 북극에서는 활발하게 수행되었으나 남극에서의 활동은 미비하였음. 또한 해빙이 주로 생성되는 남극의 가을 시즌에는 접근이 어려워 제한적인 관측만이 이루어짐. 이로 인하여 남극해빙의 예측이 남극 빙권 변화 예측과 남극 활동 안전에 있어 매우 중요한 주제임에도 불구하고 기술수준이 매우 뒤쳐져 있음
- 남극해양환경변화는 여러지역에서 관측되어왔으나 해빙 연구에 필요한 해양-대기-해빙 종합 관측은 일부지역에서만 제한적으로만 이루어짐

2. 핵심과제 연구개발내용

가 과학적 질문

- (분과가설) 남극해의 급격한 온난화로 융빙수의 유출, 해수 물성변화, 대기 온도 상승이 진행되고 이로 인해 해빙의 생성 시기, 생성율, 해빙의 물성, 융해 시기와 융해율이 변화함
- (질문) 변화하는 남극환경에서 해양과 대기 상호작용에 의한 남극해빙의 생성, 성장, 용융율은 어떻게 변할 것인가?
- (분과가설) 해양에서 대기로 열이 전달되는 폴리냐에서 저층제트가 형성될 때 대기안정도를 약화시켜 연직 연전달을 증가시키고 해빙의 형성 및 이류에 큰 영향을 미칠 것
- (질문) 저층제트는 해양-대기 경계층의 열전달과 구조 그리고 해빙 생성에 어떤 영향을 미치는가?
- (분과가설) 해빙이 녹은 융빙수에 의해 해빙 하부 해양이 성층되었을 때, 해빙 융빙수의 이류 정도에 따라 해빙의 용융이 결정될 것
- (질문) 해빙 융빙수가 이류되는 메커니즘과 그로 인한 해빙 용융과의 상관관계는 무엇인가?
- (분과가설) 빙붕 융빙수에 의해 해빙 하부 판얼음층이 발달할 때, 그 생성량을 정확하게 관측 가능
- (질문) 빙붕 융빙수가 용승하여 해빙 하부에 도달할 때 판얼음의 생성량을 결정하는 메커니즘은 무엇인가

나 연구 목표

- (목표 1) 해빙-대기-해양 상호작용에 의한 해빙의 생성·성장·융해 과정 관측
- 남극 현장 무인 유인 관측을 통해 남극 해빙의 생성, 성장, 융해 과정과 물리기작을 규명하고 남극 해빙예측모델 정확도 향상에 필요한 자료 제공
- 여름철 남극 폴리냐 지역에 2.4m 높이 표층 대기 부이(풍속/풍향/파고/온습도/해수 온도/염도/해류 속도)를 1개월 이상 운용하고 회수하여 대기-해양 경계층에서의 상호작용의 시간 변화를 획득
- 아라온 탐사에서 집중적인 존데 관측을 통해 대기경계층의 구조를 파악하고 대기-해양 경계층 모수화 모델 검증
- 해양-대기 커플링 모델과 in situ 관측 자료를 토대로 모델 실험 진행 및 해빙 생성량의 모델과 관측 비교검증
- 대기-해양 커플링 고해상도 난류 모델을 통해 대기경계층 및 대기-해양 경계층의 flux 변화에 의한 해빙 생성 및 용융 과정 모델링
- Ice tethered profiler(ITP)를 폴리냐 지역에 형성된 다년해빙에 설치하고 800m 깊이의 프로파일링을 1일 주기로 관측을 수행하여 해빙-해양 경계층의 특성과 온도와 염도의 연직 프로파일 획득
- 해빙 하부 연직 프로파일 분석을 통해 해빙 하부 깊이 별 수괴 분석 및 성층 및 안정도 평가 및 해빙-해양 경계층의 온도 및 염도의 시간 변화 관측
- (목표 2) 남극 장보고기지 부근 테라노바만 급격한 해빙 융해와 연관된 프로세스 규명
- 남극 현장 무인 유인 관측을 통해 남극 해빙의 생성, 성장, 융해 과정과 물리기작을 규명하고 남극 해빙예측모델 정확도 향상에 필요한 자료 제공
- 해빙 하부 해양관측을 통해 빙붕으로부터 나온 융빙수의 비율과 해빙의 성장간의 상관관계 도출
- 고해상도 난류 모델을 통해 빙붕으로부터 나오는 융빙수를 모사하고 융빙수에 의해 변화하는 표층 수온 및 염도 변화가 해빙 생성에 미치는 영향 연구

다 핵심 연구 주제

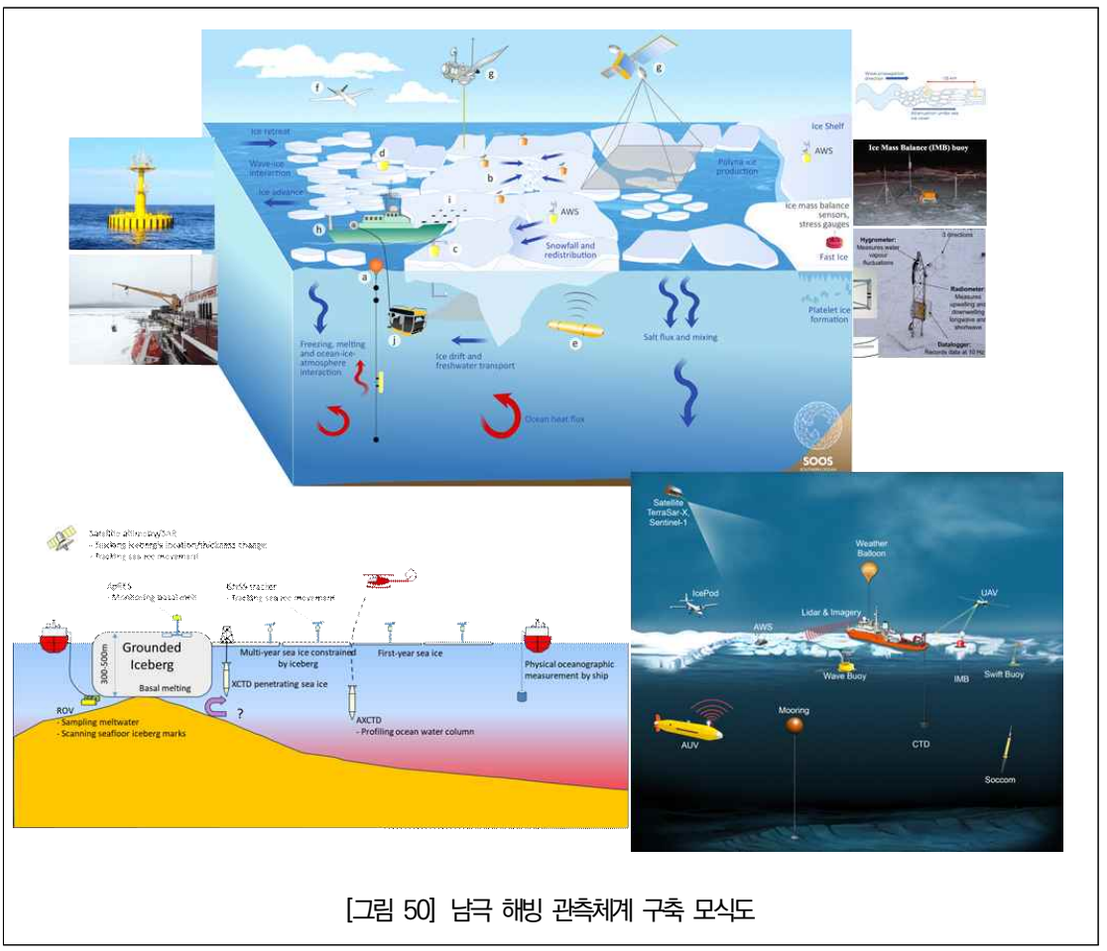
- 해빙-대기-해양 상호작용에 의한 해빙의 생성·성장·융해 과정 관측
  - 마스트(복사계/3D음속풍속계/습도계), 파고부이, IMB부이, 해빙코어 시추 등 해빙 위 관측장비 설치 및 관측
  - 표층부이, 대기·해양 관측자료 기반 테라노바만 폴리냐 생성·소멸 과정 관측 및 플롯, AUV 활용 해빙 하부 관측 기반 해빙 용융률 도출
  - 아라온 기반 라이다, ASPeCT 관측 및 국제협력 기반 UAV 활용 해빙 관측으로 다양한 해빙 표층 관측 기반 해빙 생성·성장·융해 과정 특성 이해

- (해빙 생성과정 규명) 해빙이 활발하게 생성되는 폴리냐 지역을 중심으로 해양-대기-해빙 종합 관측 자료 획득, 해빙 생성율을 조절하는 기작 규명
- (해빙 성장과 융해과정 규명) 원격/항공/현장 관측을 통한 향상된 정확도의 해빙 두께와 해빙의 구조를 관측하고 해빙 성장과 융해 과정의 특성을 이해함
- (저층제트와 해빙 생성과의 상관관계) 존데를 통해 관측한 저층제트의 특성과 대기경계층의 변화양상, 대기-해양 상호작용의 시간 변화 비교 분석을 통해 저층제트와 해빙 생성과의 상관관계 연구
- (해양-대기 경계층의 특성 규명) 해양-대기 경계층 및 해양 표면 주변 연직 속도 및 온도, 습도의 시간변화를 통해 flux를 계산하고 이를 기반으로 해빙 모델 개발 및 해빙 생성률 비교 검증
- (폴리냐 지형과 활강풍간의 상관관계) 존데 관측과 AWS, DaDis 관측의 분석을 통해 대기경계층의 구조 변화 연구
- 급격한 남극 해빙 용융 프로세스 규명
  - 테라노바만 CTD, DaDIS, AWS 등 자료 수집·분석으로 3차원 해빙-대기-해양 구조 분석
  - 위성자료 기반 고착빙산-해빙 상호작용 분석

- (융빙수의 용승과 해빙 생성) 빙붕으로부터 나오는 융빙수의 분포와 해빙의 성장과의 상관관계 연구
- (해빙 융빙수의 거동과 해빙 용융과의 관계) 해빙 융빙수의 두께 및 구조 그리고 거동에 따라 변화하는 해빙 용융률

- (표층 수괴에 따른 해빙 계절 변동성 관찰) 표층에 형성되는 수괴의 특성에 따라 해빙의 생성, 성장, 융해 과정 모니터링

- 남극 해빙 용융에 영향을 미치는 지역 및 원격 메커니즘 연구
  - 테라노바만 폴리냐 및 고착빙을 포함하는해빙-대기-해양 상호작용 특성 및 예측성 규명



[그림 50] 남극 해빙 관측체계 구축 모식도

라 기대효과

- 최신 관측기반 현장 관측을 통해 해빙의 생성, 성장, 융해 과정의 물리기작을 규명하고 급격한 온난화가 진행되면서 남극지역의 융빙수의 유출, 해수 물성, 대기 온도 변화가 해빙에 미칠 영향을 규명, 해빙 예측모델 정확도 향상에 기여함

3. 추진 계획

가 연차별 로드맵

연구문제 해결 로드맵

[표 7] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	남극 폴리냐 지역에서 해빙 생성율을 조절하는 요인은 무엇인가?						▪ 관측장비 설치 및 현장탐사를 통해 관측 기반 남극 해빙 생성기작 연구체계 구축 ▪ 해빙-대기-해양 상호작용에 의한 해빙의 생성 조절기작 규명
해양/해빙/대기 관측 기반 해빙생성과정 규명	폴리냐지역 해양/해빙/대기 관측장비 설치 및 열교환 과정 관측을 위한 현장 탐사 수행			관측기반 해빙의 생성 조건 및 생성율 조절기작 규명			

[표 8] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	해빙 융빙수가 이류되는 메커니즘과 그로 인한 해빙 용융과의 상관관계는 무엇인가						▪ 다년 해빙에 Ice tethered profiler를 설치하고 1일에 한번 프로파일링 관측 수행 ▪ 해빙 성장률 또는 용융률과 해빙 하부 해양 구조와의 상관관계 연구
해빙 위 직접관측	다년 해빙에 Ice tethered profiler 설치 및 프로파일링 수행			해빙-해양 경계층 특성 및 해빙 하부 해양 구조 규명			

[표 9] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	빙붕 융빙수가 용승하여 해빙 하부에 도달할 때 platelet ice의 생성량을 결정하는 메커니즘은 무엇인가						▪ 해빙 하부 해양 관측을 통한 수괴 분류 ▪ 융빙수가 해빙 하부에 도달할 때 해빙의 성장률의 추이 관찰
해빙 위 직접관측	다년 해빙에 Ice tethered profiler 설치 및 프로파일링 수행			해빙-해양 경계층 특성 및 해빙 하부 해양 구조 규명			

[표 10] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	해빙-대기-해양 상호작용에 의한 해빙의 성장·융해 과정 이해가 가능한가?						▪ 해빙 위 관측장비 설치와 현장탐사를 통해 해빙의 성장 융해과정을 관측 ▪ 해빙 성장 융해과정 물리기작 규명
해빙의 진화과정 이해	해빙파고부이, 플로트, 태깅 등 시계열관측과 항공탐사 수행			해빙의 성장·융해 과정과 물리기작 규명			

기술 로드맵

[표 11] 기술 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
폴라 아르고 Float	해수 온도 염분 장기 시계열 변동 자료 확보			해빙 생성, 성장, 용융에의 해양물성 영향 평가 기술			▪ 해빙 생성/성장/용융에 영향을 미치는 환경요소와 해빙을 직접관측하는 기술 확보 ▪ 해빙/해양/대기 상호작용 규명을 위한 자료 확보
물범 태깅	해빙 지역 수온,염분, 해빙 위 대기온도 측정이 가능한 장비 개발			해빙지역 해역의 수온,염분과 해빙 상부 대기 온도 자료 확보			
해빙파고부이	해빙 경로 추적 및 해양외력 스트레스 관측기술			해빙의 이동 경로와 해양 외력에 의한 분리과정 규명 기술			
항공탐사 (EM-Bird)	항공기반 해빙 두께 및 구조 정밀 관측기술			위성 관측자료와 통합 고해상도 해빙 두께 관측기술			
UAV	해양대기 열교환 정밀 관측 기술			해양-대기-해빙 상호작용을 통한 해빙 생성 발달 프로세스 기술			

나 현장 탐사 계획

[표 12] 현장탐사계획

연차	1	2	3	4	5	6	종합
Polar 아르고 Float	장비 구축	투입	투입	투입	투입		▪ 투입 후 위성으로 자료 수신
물범 태깅	장비개발	장비 테스트	현장 탐사	현장 탐사	현장 탐사	현장 탐사	▪ 세종기지/아문젠/로스해 현장 관측 수행
해빙파고부이	장비구축	설치	설치	설치	설치		▪ 남극 늦여름/가을 시기에 이동항차 경로상에서 해빙 파고부이 설치, 위성으로 자료 획득
ASPeCt	현장관측	현장 관측	현장 관측	현장 관측	현장 관측	현장 관측	▪ 해빙지역 이동항차 중 관측 수행
EM-Bird			현장 탐사	현장 탐사			▪ AWI/뉴질랜드와 공동연구를 통한 현장탐사 수행
UAV			현장 탐사				▪ 미국 콜롬비아대학과 공동연구를 통한 현장탐사 수행
표층부이	테라노바만		테라노바만		테라노바만		▪ 12월~1월 1개월 운용 및 회수
존데 관측	테라노바만		테라노바만		테라노바만		▪ 연구항차 기간 1일 2회 존데 관측
Ice tethered profiler	테라노바만		테라노바만		테라노바만		▪ 1차년도 다년해빙에 설치 후 2년마다 유지보수

다 국내외 협력연구방안

- (독일 AWI, 뉴질랜드 Caterbury 대학) EM-Bird 장비 활용 해빙 두께 및 구조 관측
- (호주 Adelaide 대학) 해빙파고부이 관측 및 해빙의 이동 및 깨짐 기작 공동연구
- (영국 Saint-Andrews 대학, 프랑스 CNRS) 해양 대기 동시 관측을 위한 물범 태깅 장비 개발
- (미국 LDEO) UAV 활용 대기 해양 열교환 종합정밀관측 협력
- (SCRIPPS, WHOI) 남극 해빙 타겟 Ice Tethered Profiler 관측 공동 개발 및 자문
- (NIWA) 대기-해양 경계층의 관측 및 자료 분석

라 인력 및 투입예산

- 인력

[표 13] 인력

(단위:명)

연차	1	2	3	4	5	6	평균
인력	8	8	8	8	8	8	

- 투입예산

[표 14] 지원내용×연도별 시간 절감기간 평균

(단위:백만)

연차	1	2	3	4	5	6	합계
인건비							
직접비							
간접비							
합계							

주요 장비 및 현장 탐사 소요 추정예산	
아르고 Float	30백만원/개 * 3개/시즌 * 4시즌 = 360백만원
해빙파고부이	0.6백만원/개 * 15개/시즌 * 4시즌 = 36백만원
물범 태깅	대기해양관측 태깅장비 개발비용: 100백만원 현장 테스트: 100백만원 장비구축: 20백만원/개*5개*4시즌 = 400백만원

EM-Bird	장비임차 및 탐사 비용: 150백만원/시즌 * 2시즌 = 300백만원
UAV 탐사	장비임차 및 탐사 비용: 400백만원/시즌 * 1시즌 = 400백만원
표층부이 시스템	60
Moored CTD	100
ADCP profiler	100
풍향/풍속/온습도계	40
Ice tethered profiler system	200
Acoustic releaser	40
라디오존데	60
합계	1,696백만원

과제 2 다학제 관측 플랫폼 구축을 통한 해빙 변동 및 영향 연구

1. 과제개요

가 과학적 질문

분과 가설

- 직접적인 지구 온난화 영향과 최근 남극 빙하 용융의 급격한 증가가 연안 해빙 환경 변화를 야기하고 있으며, 이는 연안 폴리냐 및 해양 순환 변화를 유도하여 빙하 용융 속도를 조절할 수 있음

과학적 질문

- 최근 급격해진 기후변화 영향으로 발생한 남극 해빙 면적의 감소가 해양 순환을 강화시켜 남극 빙하 용융을 가속화시키는가?
- 최근 급격해진 기후변화 영향으로 발생한 남극 해빙 면적의 감소가 연안 폴리냐 활동성을 강화시키는가?

나 연구의 필요성

남극해 다학제 관측 플랫폼 구축의 필요성

- 기후변화가 급격해짐에 따라 남극해도 매우 민감하게 반응하고 있으며, 반응 과정 역시 매우 복잡하여 향후 기후변화 대응 능력 향상을 위한 국제협력 기반 다학제 관측 플랫폼 구축 필요성 증대
- 최근 전 세계를 비롯하여 한반도와 한반도 주변에서 자주 발생하고 있는 극한 기상 현상들은 남극해 연구가 국제적인 이슈로 시급하게 수행되어야 함을 증명

해빙 변동 및 영향 연구의 필요성

- 북극 해빙 면적과 달리 남극 해빙의 면적은 그동안 뚜렷한 감소 경향이 관측되지 않았으나 최근 급격해진 기후 변화 영향으로 해빙 면적 감소 현상이 남극해에서 자주 보고되고 있음
  - 해빙 면적 감소에 의한 표층 응력(surface stress) 및 해양-대기 상호작용 변화와 그에 따른 해양 환경 및 순환 변화 규명 필요
- 남극 해빙 면적의 감소로 남극 연안에 두께가 두껍고 오래된 해빙보다는 얇고 갓 생성된 해빙(fast

ice) 분포가 증가해 연안 폴리냐(Polynya; 남극 연안에서 해빙이 외해로 밀려나가 형성) 발달 가능성이 높아짐

- 남극 연안 폴리냐는 남극의 '해빙 생산 공장'으로 기후변화에 따른 남극 반응 예측 정확도 향상을 위해서는 해빙 특성 변화에 따른 남극 연안 폴리냐의 활동성 및 변동성 규명 필요

다 연구의 시급성

극한 기상 현상 발생 빈도의 현저한 증가

- 최근 극한 기상 현상 빈도의 현저한 증가로 기후변화에 대한 국민의 관심도가 높아지고 있으며, 그 심각성에 대해서도 높은 공감대 형성
- 기후변화에 따른 반응이 가장 민감하고 빠르게 발생하고 있는 남극해 관측 연구의 필요성 증대
- 극한 해양 환경 관측 기술 전문가 양성과 관측 및 연구 인프라 확충을 통한 기후변화 대응 능력 강화 필요성 증대


사회 : 환경

The JoongAng

목숨 앗아간 전세계 이상기후…한국 겨울도 냉탕·온탕 오갔다 왜

부산에 호우주의보가 내려진 지난 1월 13일 오전 도심 하천인 연제구·동래구 온천천 시민공원 일대가 불어난 물에 잠겨 있다. 연합뉴스

[그림 51] 2023년 3월 9일 중앙일보 기사 발췌


THE DAILYPOST

Global News Media Channel

외신이 바라본 한국의 역대급 수마..."동아시아 기후위기"

ⓒ데일리포스트=이미지 제공/소방청

[그림 52] 2023년 7월 17일 데일리포스트 기사 발췌

최근 남극 해빙 면적 감소 현상에 대한 보고는 지속되고 있으나(Turner et al. 2020; Eayrs et al., 2021; Turner et al., 2022; Wang et al., 2022; Purich and Doddridge, 2023), 현장 관측의 한계로 해빙 면적의 감소가 남극해 순환, 폴리냐 발달, 빙하 용융 등에 미치는 영향에 대한 이해 부족

라 최종목표와의 연계성

다학제 관측 플랫폼을 구축하여 해빙 변동과 그 영향을 규명하는 것은 남극 해빙 생애 규명 및 해빙 장기 변화 예측 정확도 향상의 핵심 요소

- 국제협력을 통한 다학제 해빙 환경 관측 플랫폼을 구축하고 현장 관측 자료를 정기적으로 확보 축적함으로써 AI적용 및 남극 해빙의 계절과 장기 변동 예측 시스템 성능 향상에 기여하는 것이 핵심 연구

마 국내외 동향분석 및 시사점

국외 동향분석

- IPCC AR6 종합 보고서(2023) 발표
  - 2100년까지 지구 표면 온도가 최대 4.4℃까지 오를 것으로 전망되면서 2030년까지 온실가스 감축을 위한 투자를 6배 이상 늘려야 한다고 경고
  - 남북극 해빙은 최근들어 감소하고 있으며, 전지구 해수면 상승률 예측에 있어 남극 용융이 가지는 불확실성이 크다는 점을 제안하여 남극 관측 연구의 중요성을 강조
  - 기후변화와 관련해 안토니우 구테흐스 유엔 사무총장은 "'지구 온난화' 시대가 끝나고 '끓는 지구(Global boiling)' 시대가 시작됐다"며 강하게 경고

- (미국, 영국) 전지구 해수면 상승에 큰 잠재력을 지닌 서남극 스웨이츠 빙하 모니터링 및 연구를 위한 ITGC-TG 연구 프로젝트 진행
  - 미국 국립과학재단(NSF, National Science Foundation)과 영국 환경과학연구위원회(NERC, Natural Environmental Research Council)에서는 미래의 급격한 해수면 변동이 스웨이츠 빙하를 중심으로 촉발될 것이라는 연구 결과에 따라 순수 연구비 250~300억 규모의 대규모 협력 프로젝트 구성
  - 남극 빙하의 소실과 해수면 상승의 영향에 대한 상관관계를 규명하기 위해 스웨이트 빙하에 의한 해수면 상승의 영향을 수십 년 혹은 그 이상의 규모에서 정교하게 예측하기 위함
  - 기존 연구 기간은 2018년부터 2023까지 총 5년이었으나 과제 수행 과정 및 결과의 우수성을 인정받아 2025년까지 연장하여 수행중

- (뉴질랜드) 기후, 빙권, 대기, 육상 및 해안 생태계, 남극해 보존 및 자원관리 등 3개 총괄 연구 분야 선정 및 추진
  - 로스 빙붕 근처에 위치한 스콧 베이스를 기반으로 로스 빙붕 및 로스해 대륙붕 해역

해양-대기-빙상 시스템 연구 수행

- (호주) 4대 테마 '기후 프로세스 및 변화', '육지 및 근해 생태시스템', '남빙양 환경시스템', '프론티어 과학'을 주제로 연구 과제 추진중이며 대외 개방으로 우수 연구프로그램 유치
- (일본) '남극으로부터 다가오는 지구시스템 변동'을 주제로, 남극-지구 대기 시스템, 대기-빙상-해양의 상호작용, 남극 고환경 복원을 3대 분야로 설정

국내 동향분석

- 극지연구소 주관 해양수산부 R&D '급격한 남극 빙상 용융에 따른 근미래 전지구 해수면 상승 예측기술 개발(K-NOW)' 착수
  - 기후변화에 따른 남극 빙상의 급격한 융해 원인 규명과 이에 따른 전지구 해수면 상승 기여도 예측기술 개발을 최종 목표
  - 해당 과제에서는 선박 기반의 해양-빙붕 간 상호작용 관측 및 남극 대륙 캠프 관측을 주로 수행

- 해양수산부는 2000년 NOAA(미국해양대기청)와 해양과학 기술협력 협약(JPA, Joint Project Agreement) 체결하고 한미 해양과학 기술협력을 진행 중이며 2023년 극지 패널(Polar panel)을 추가하여 협력 범위를 확대
  - 극지 패널 내에서 SOUND(Southern Ocean UNDerwater studies of climate impacts) 프로젝트 추진
  - SOUND 프로젝트의 세부 협력 주제로 4가지 협력 연구('Listening to climate change', 'Observing the Southern Ocean in a warming world', 'Krill and pelagic species monitoring in MPAs', 'Investigating offshore geological hazards') 진행

문제점 및 시사점

- 현재 진행 중인 국내외 남극 연구 과제 대부분은 남극 용융 및 해수면 상승이 주요 키워드이기 때문에 '다학제 관측 기반 남극 해빙 변동 및 영향' 연구는 국제적 선도 연구가 될 가능성이 높음
- 미국에서 보유하고 있는 북극 관측 노하우 및 인프라를 남극에서 활용하기 위해서는 타 국가에서 매칭펀드를 확보하는 것이 선행되어야 하며, 해당 연구 및 과제가 적합한 시작점이 될 수 있을 것으로 판단
- 본 연구 및 과제를 통해 다학제 첨단 해빙 관측 플랫폼을 성공적으로 구성할 경우, 해당 플랫폼을 활용한 타 국가와의 추가적인 극지 공동 연구 과제 개발과 국제협력 강화 및 확대 가능

2. 핵심과제 연구개발내용

가 과학적 질문

- (분과가설) 직접적인 지구 온난화 영향과 최근 남극 빙하 용융의 급격한 증가가 연안 해빙 환경 변화를 야기하고 있으며, 이는 연안 폴리냐 및 해양 순환 변화를 유도하여 빙하 용융 속도를 조절할 수 있음
- (질문) 최근 급격해진 기후변화 영향으로 발생한 남극 해빙 면적의 감소가 해양 순환을 강화시켜 남극 빙하 용융을 가속화시키는가?
- (질문) 최근 급격해진 기후변화 영향으로 발생한 남극 해빙 면적의 감소가 연안 폴리냐 활동성을 강화시키는가?

나 연구 목표

- 국제 협력 기반의 다학제 남극 관측 플랫폼 구축을 통한 해빙 생애 관측 및 영향 규명
  - 다학제 남극 해빙 관측을 통한 남극 해빙 생성-발달-융해 프로세스를 확인
  - 남극 해빙 특성 변화가 야기하는 해양 순환, 폴리냐 변동 등을 규명하고, 나아가 해당 변화들이 빙하 용융에 미치는 영향 파악

다 핵심 연구 주제

- 다학제 관측 플랫폼 구축
  - 해빙 변동을 파악하기 위한 관측 요소를 종합·정리하고 국제협력을 바탕으로 각 관측 요소별 극지 관측 테스트 및 운영 노하우 축적
  - 축적된 운영 노하우를 바탕으로 해빙 변동 모니터링을 위한 해양-대기-위성-무인요소로 구성된 다학제 관측 플랫폼을 구축
- 해빙 생애 규명
  - 해양-대기-위성-무인 종합 관측을 통한 남극 해빙의 생성, 발달, 융해 단계별 특성과 프로세스 규명



[그림 53] 해빙 생성 과정 단계별 예시 사진

- 해빙 영향 이해
  - 해양-대기-위성-무인 종합 관측을 통해 해빙의 생성, 발달, 융해 과정에 따른 해양의 변화를 파악하고 빙하 용융 속도 조절 기작을 규명
  - 해양-대기-위성-무인 종합 관측을 통해 해빙의 생성, 발달, 융해 과정에 따른 폴리냐 활동성의 변화를 파악하고 해빙 생성량 변화와 고밀도 해수 생성 변동 규명

라 기대효과

- 다학제 관측을 기반으로 남극 해빙 변동 현황 및 그 영향에 대한 종합적 이해도 향상
- 관측 자료 축적을 통한 계절 및 장기 해빙 변화 예측 시스템 및 AI 적용 성능 향상
- 극지 최적화 첨단 해양 관측 기술 개발 및 시스템 구축을 통한 극지 변화 모니터링 능력과 기후변화 대응 능력 향상
- 국제 남극 관측 협력 네트워크 강화 및 전세계 해빙 관측 및 연구에 대한 선도적 지위 획득
- 국내 극지 및 해빙 관측 전문가 양성

3. 추진 계획

가 연차별 로드맵

연구문제 해결 로드맵

[표 15] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	최근 급격해진 기후변화 영향으로 발생한 남극 해빙 면적의 감소가 해양 순환을 강화시켜 남극 빙하 용융을 가속화시키는가?						▪ 남극 연안 해빙 변동 모니터링 ▪ 해빙 변동에 의한 해양 변화를 파악하고 빙하 용융율 변동과의 연관성 규명
다학제 관측 플랫폼 구축 및 해빙 발달 해역 모니터링	관측 요소별 테스트 및 다학제 관측 플랫폼 구축			관측 플랫폼 유지·운용 및 해빙 발달 해역 정기 모니터링			

[표 16] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	최근 급격해진 기후변화 영향으로 발생한 남극 해빙 면적의 감소가 연안 폴리냐 활동성을 강화시키는가?						▪ 남극 연안 해빙 변동 모니터링 ▪ 해빙 변동에 의한 폴리냐 활동성 변화를 파악하고 해빙 생성량 및 고밀도 해수 특성 변화 규명
다학제 관측 플랫폼 구축 및 해빙 발달 해역 모니터링	관측 요소별 테스트 및 다학제 관측 플랫폼 구축			관측 플랫폼 유지·운용 및 해빙 발달 해역 정기 모니터링			

기술 로드맵

[표 17] 기술 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
무인 항공기	기지 기반 무인항공기 관측 시스템 구축			극지 최적화 운용, 자료 품질관리 기술 보완 및 개선			▪ 해빙 발달 해역 종합 관측 ▪ 다학제 관측 자료 품질관리 기술 보완 및 개선
아르고 플롯트	극지 아르고 플롯트 설치 및 극지 최적화 운용 기술 개발			극지 최적화 운용, 자료 품질관리 기술 보완 및 개선			
해양 계류선	해양 계류선 설치 및 극지 최적화 운용 기술 개발			극지 최적화 운용, 자료 품질관리 기술 보완 및 개선			
물범부착관측	물범 부착 관측 수행 및 부착 센서 개발			극지 최적화 관측 수행 및 관측 변수별 품질관리 기술 개발 및 개선			
AXCTD	AXCTD 관측 수행 및 극지 최적화 운용 기술 개발			극지 최적화 관측 수행 및 자료 품질관리 기술 보완 및 개선			

나 현장탐사계획

[표 18] 현장탐사계획

연차	1	2	3	4	5	6	종합
무인 항공기	기지 테스트	기지 테스트	해빙 관측	해빙 관측	해빙 관측	해빙 관측	▪ 해빙 발달 해역 직접관측
아르고 플롯트	2기 설치	보완·유지	2기 추가 설치	보완·유지	2기 추가 설치	보완·유지	▪ 해빙 발달 해역 직접관측
해양 계류선	1기 설치	회수 및 재계류	회수 및 재계류	1기 추가 설치	회수 및 재계류	회수 및 재계류	▪ 해빙 발달 해역 직접관측
물범부착관측	해빙 관측	해빙 관측	해빙 관측	해빙 관측	해빙 관측	해빙 관측	▪ 해빙 발달 해역 직접관측
AXCTD	기지 테스트	기지 테스트	해빙 관측	해빙 관측	해빙 관측	해빙 관측	▪ 해빙 발달 해역 직접관측

다 국내외 협력연구방안

■ 남극 해빙 변동 규명을 위한 관측 요소로 '해양', '대기', '위성', '무인'을 구성하고 아래와 같은 목표 설정

- (해양) 해양 계류선, 플로트, 해양포유류 부착 관측, 항공기 기반 CTD 관측을 통해 해빙 발달 해역에서의 해수 특성 시공간 변화를 파악
- (대기) 무인 항공기 및 위성 관측을 통해 해빙 발달 해역에서 발생하는 해양-대기 상호작용과 해빙 생성 과정을 규명
- (위성) 고해상도 위성 이미지를 통해 해빙 변동 모습을 파악하고 원격 탐사 자료와 현장 관측 자료 간 상호 비교를 통해 원격 탐사 자료 알고리즘 개선 및 원격 탐사 자료 활용도 증대
- (무인) 무인 항공기 관측을 통해 해양-대기 상호작용을 규명하고 무인 항공기 관측 센서 개발 및 관측 방법 개선 & 해양포유류 부착 관측을 통해 해빙 발달 해역에서의 해수 특성 시공간 변화를 파악하고 해양포유류 부착 센서 개발 및 관측 기술 고도화
- 각 요소별 국제 협력 기관 및 연구자 매칭

■ (해양) 뉴질랜드 NIWA 해양계류선, 미국 Scripps AXCTD, 호주 IMOS & Sims 해양포유류 부착 관측

- (대기) 미국 LDEO 무인항공기(UAV) 관측, 미국 NOAA 원격탐사
- (위성) 미국 NOAA 원격탐사
- (무인) 미국 LDEO 무인항공기(UAV) 관측, 호주 IMOS & Sims 해양포유류 부착 관측
- 국제협력 그룹과의 활발한 교류를 통한 극지 첨단 해양관측 기술 교육 및 전문가 양성 활동 수행

라 인력 및 투입예산

인력

[표 19] 인력

(단위:명)

연차	1	2	3	4	5	6	평균
인력	6	6	6	6	6	6	6

투입예산

[표 20] 지원내용×연도별 시간 절감기간 평균

(단위:백만)

연차	1	2	3	4	5	6	합계
인건비	60	60	70	70	80	80	420
직접비	400	400	400	400	400	400	2,400
간접비	138	138	141	141	144	144	846
합계	598	598	611	661	624	624	3,666

주요 장비 및 현장 탐사 소요 추정예산	
무인항공기(국제협력기반)	600
극지용 아르고 플롯트	500
물범 부착 센서	200
해양 계류선 구성 및 설치	500
AXCTD	200
합계	2,000

과제 3 위성/현장자료 기반 고착빙산-해빙-대기-해양 상호작용 연구

1. 과제개요

가 과학적 질문

□ 분과 가설

○ 고착빙산-해빙 상호작용

- 최근 남극 빙상 붕괴로 인한 고착빙산(grounded iceberg)의 증가는 주위에 형성되는 정착빙(fact sea ice)을 증가시켜 다년빙(multi-year sea ice) 및 일년빙(first-year sea ice)의 발달에 중요한 영향을 미침

□ 과학적 질문

○ 고착빙산 주위에 형성되는 정착빙은 주변 다년빙/일년빙의 분포에 어떠한 영향을 미치는가?

○ 고착빙산과 그 주위에 형성되는 정착빙은 어떤 상호작용을 하는가?

나 연구의 필요성

□ 고착빙산과 이로 인한 정착빙은 주위 해빙의 생성-성장-융해 과정의 복잡성을 증가시킴

○ 고착빙산은 해빙 형성에 있어 경계조건으로서의 역할을 하지만, 시간에 따라 고착 빙산의 분포가 달라지기 때문에 해빙의 장기 예측을 위하여 고착빙산과 해빙의 상호작용에 대한 연구가 반드시 필요함

○ 최근 기후변화에 따른 남극 빙붕의 붕괴는 고착빙산의 증가를 야기할 수 있으며, 이로 인한 해빙분포의 변화는 장기적인 해빙 예측에 중요한 변수로 작용할 수 있음

○ 최근 가장 큰 주목을 받고 있는 스웨이트 빙하 등 급격한 변화를 겪고 있는 서남극 아문젠 해역과 동남극의 일부 해역에서는 고착빙산에 의한 정착빙이 상존하고 있어 빙상-빙붕-고착빙산-정착빙-해빙에 이르는 일련의 상호 작용에 대한 연구가 필요함

다 연구의 시급성

□ 지구 온난화 영향 하에서 남극 빙붕의 붕괴가 급격히 진행되고 있으며, 이로 인한 남극 주변 빙산의 발생이 증가하여 정착빙의 범위가 증가할 것으로 추정되어(Massom and

Stammerjohn, 2010), 고착 빙산의 영향 규명은 해빙의 단기 예측에도 중요한 변수가 될 것으로 추정됨

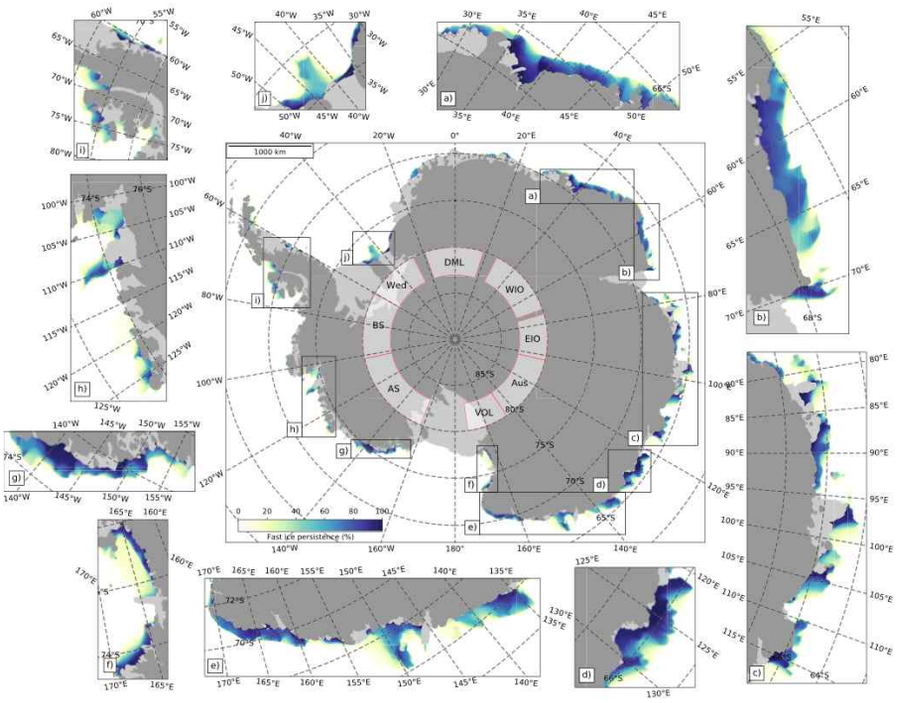
- 최근 과거 정착빙의 범위에 대한 고해상도 분포도 산출(Fraser et al., 2020)을 통해 정착빙에 대한 고착 빙산의 영향이 연구되고 있으나(Fraser et al., 2021), 2016년을 전후한 남극 해빙의 급격한 변화에 대한 영향은 연구되지 않아 추가적인 연구가 필요한 실정임

라 최종목표와의 연계성

- 고착 해빙은 해빙 예측 모델의 경계조건의 역할을 하며, 최근 급격히 변화하는 빙붕의 붕괴와 함께, 시간에 따른 경계조건의 변화를 야기하므로, 고착 해빙 및 이로 인한 정착빙의 모니터링 및 그 역할에 대한 규명은 해빙 예측 모델의 정교화에 기여함

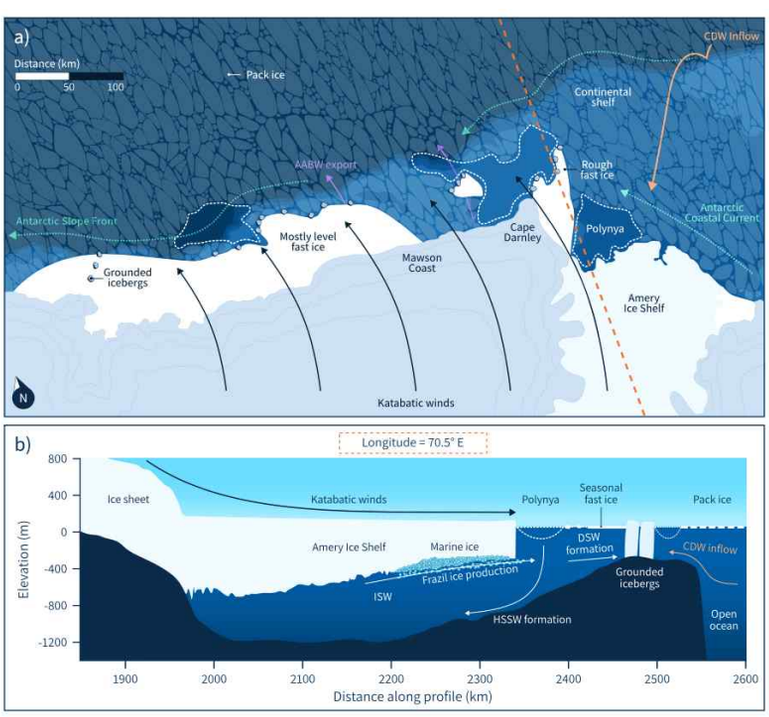
마 국내외 동향분석 및 시사점

- 국외 동향분석
  - Massom and Stammerjohn(2010)은 남극 해빙의 변화에 대한 과거 연구를 정리하였는데, 이 논문의 일부에서 정착빙에 대한 연구에 대하여 해설하면서, 향후 기후변화에 따라 증가하는 고착해빙으로 인해 일부 지역에서 정착빙이 증가할 수 있음을 제시함
  - 최근 MODIS 인공위성 영상을 이용한 2000년부터 2018년까지의 고해상도 정착빙 분포 자료가 생산되어 연구에 활용되고 있음(Fraser et al., 2021)



[그림 54] MODIS 인공위성 자료로부터 산출된 2000년부터 2018년까지의 평균 정착빙 분포 (Fraser et al., 2023)

- Faser et al. (2023)은 최신 정착빙 및 정착빙-해양-대기 상호 작용 연구에 대한 요약을 제공하고 있으며, 가끔씩 발생하는 고착빙산의 변동이 지역적인 정착빙 분포에 매우 큰 영향을 미쳐 중장기 정착빙 예측을 어렵게 하는 요소임을 제시함



[그림 55] 겨울철 정착빙-해양-대기 상호 작용에 대한 개념도 (남극 Mawson Coast/Prydz Bay 지역의 예)

국내 동향분석

- 국내에서는 극지연구소, 강원대학교, 울산과학기술원 등에서 인공위성 SAR 영상을 활용한 정착빙 탐지 연구가 활발히 진행되고 있음(Han et al., 2015; Han and Lee, 2018;Kim et al., 2020;Kim and Han, 2022)

문제점 및 시사점

- 고착빙산은 주변에 정착빙을 형성하여 해빙분포 전반에 영향을 주고 있으나, 고착빙산의 분포는 매우 불규칙하거나 비정기적인 측면이 있어 중장기적인 해빙 예측에 어려움을 야기하는 요소
- 기후변화에 따른 빙산 생성의 증가로 인하여 고착빙산의 증가가 예상됨
- 고착빙산의 이동/고착에 대한 연구가 미진하여 모델링에 어려움이 있어 고착빙산 및 주변 정착빙의 상호작용에 대한 연구 필요

2. 핵심과제 연구개발내용

가 과학적 질문

- (분과가설) 최근 남극 빙상 붕괴로 인한 고착빙산(grounded iceberg)의 증가는 주위에 형성되는 정착빙(fact sea ice)을 증가시켜 다년빙(multi-year sea ice) 및 일년빙(first-year sea ice)의 발달에 중요한 영향을 미침
- (질문) 고착빙산 주위에 형성되는 정착빙은 주변 다년빙/일년빙의 분포에 어떠한 영향을 미치는가? 고착빙산과 그 주위에 형성되는 정착빙은 어떤 상호작용을 하는가?

나 연구 목표

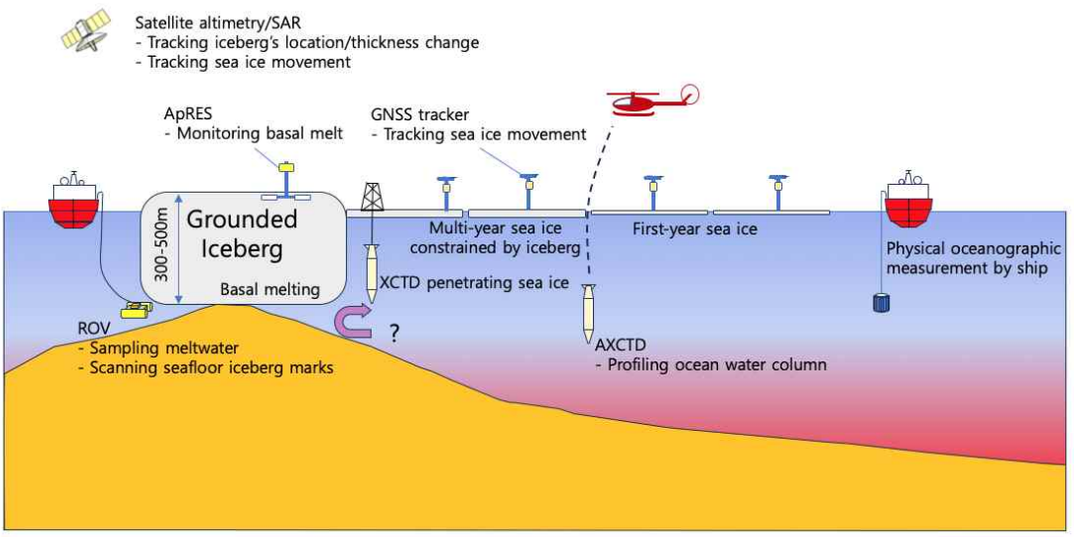
- 시간에 따른 고착빙산 분포 및 정착빙 분포를 산출하여 고착빙산/정착빙/해빙간의 상호작용 규명

다 핵심 연구 주제

- (고착 빙산 분포 파악) Cryosat-2 인공위성 고도계 자료를 이용하여 고착 빙산 분포의

연변화 산출

- (고착 빙산 정밀 모니터링) GNSS/ApRES 현장관측를 이용한 고착 빙산의 이동을 모니터링하여 고착빙산의 이동/고착에 미치는 영향 파악
- (고착 빙산-정착빙-해빙 분포 상관관계 파악) 고착 빙산 분포와 정착빙 분포의 상관성 분석을 통한 고착빙산-해빙-대기-해양 상호 작용 규명



[그림 56] 고착빙산-정착빙-해빙-해양-대기 상호작용 규명을 위한 위성/현장 관측 개념도

라 기대효과

- 고착 빙산 분포 파악을 통하여 정착빙 생성을 예측하고 남극 해빙 예측의 정확도 향상

3. 추진 계획

가 연차별 로드맵

연구문제 해결 로드맵

[표 21] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	고착빙산의 증감은 주위에 형성되는 정착빙은 주변 다년빙/일년빙의 분포에 어떠한 영향을 미치는가?						▪ 인공위성 고도계 자료를 이용한 전남극 고착빙산 분포 파악 ▪ 위성 자료 활용 고착빙산/정착빙/해빙 상호작용 규명
인공위성 원격탐사 자료 기반	Cryosat-2 자료를 이용한 연도별 고착빙산 탐지			고착빙산(Cryosat-2)/정착빙(MODIS)/해빙(AMSR-E) 위성자료 활용 상관관계 규명			

[표 22] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	고착빙산과 그 주위에 형성되는 정착빙은 어떤 상호작용을 하는가?						▪ 고착빙산과 정착빙의 변화를 모니터링하는 관측 기법 개발 및 대표지역 관측 ▪ 현장 관측 자료를 이용한 인공위성 원격탐사 자료 검증
고착빙산/해빙 위 직접관측	ApRES/GNSS를 이용한 고착빙산 하부용융 및 정착빙 이동 관측			고착빙산 주변 XCTD/AXCTD 관측을 통한 빙산-해빙-해양 상호작용 관측			

기술 로드맵

[표 23] 기술 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
고착빙산 하부용융 및 이동속도 관측	고착 빙산에 대한 ApRES 관측 수행 드론 투하 GNSS 관측 장비 개발 및 활용			AXCTD 혹은 정착빙/해빙위 시추공을 통한 XCTD 관측 기술 활용			▪ 고착빙산/정착빙의 직접관측 기술 및 자료 확보

나 현장탐사계획

[표 24] 현장탐사계획

연차	1	2	3	4	5	6	종합
고착빙산 하부용융 및 이동속도 관측		ApRES/ GNSS 관측	XCTD/A XCTD 해양관측	ApRES/ GNSS 관측	XCTD/A XCTD 해양관측		▪ 고착빙산/정착빙 위 직접관측

다 국내외 협력연구방안

- (영국 BAS) 고착 빙산 하부의 용융을 모니터링하는 ApRES 기술 자문
- (호주 University of Tasmania) MODIS 활용 정착빙 탐지 기술 및 자료 자문
- (강원대학교) SAR 영상 활용 정착빙 탐지 기술 자문
- (미국 UCSD) AXCTD 관측 기술 자문

라 인력 및 투입예산

- 인력

[표 25] 인력

(단위:명)

연차	1	2	3	4	5	6	평균
인력	3	3	3	3	3	3	

투입예산

[표 26] 지원내용×연도별 시간 절감기간 평균

(단위:백만)

연차	1	2	3	4	5	6	합계
인건비							
직접비							
간접비							
합계							

주요 장비 및 현장 탐사 소요 추정예산	
고착빙산 하부 용융량(ApRES) 관측	30 백만원/년
드론 GNSS 모니터링 시스템 개발 및 활용	20 백만원/년
AXCTD/XCTD 관측	30 백만원/년
합계	80 백만원/년

제2절 남극 해빙 장기예측시스템 개발

과제 1 해빙 모델의 재현 성능 평가 및 최적화

1. 과제개요

가 연구의 개요

남극 지역과 남극해의 역할과 중요성

- 남극해는 세계 해양 표면적의 33%를 차지하며, 남극해 특유의 순환은 대기와 내부 해양 사이의 효율적인 특성 교환을 가능하게 함으로써, 인위적인 열과 탄소의 해양 흡수에 중요한 역할을 함 (Frolicher et al., 2015; Roemmich et al., 2015)
- 지구의 주요 열 흡수원 중 하나인 남극은 남반구와 전반적인 기후 시스템에서 중요한 역할을 하며 (Mayewski et al., 2009), 대기 및 해양 순환과 지구 에너지 수송에 중대한 영향을 미침 (King & Turner, 1997)
- 남극해는 태평양, 대서양, 인도양을 직접 연결하는 대양으로 지구 기후, 생지화학 순환 및 생태계 기능에 매우 중요한 해역 (Talley, 2011)

남극 해빙의 특성 및 지구시스템 내의 역할

- 남극 대륙은 연중 얼음으로 덮여 있고 해빙으로 둘러싸여 있어 기후 변동성과 변화에 기여할 수 있는 잠재력이 크며 (Bintanja et al., 2013), 남극해의 해빙은 경계가 되는 육지가 없이 바다로 확장되기 때문에 해빙 면적은 강한 경년 변동성을 가짐 (King & Turner, 1997)
- 남극의 해빙 면적은 연중 최대치가 최소치의 6배에 육박하며, 이는 지표면 구성 요소 중 가장 큰 계절 변화를 가지는 변수 (Comiso, 2010; Roach et al., 2020)
- 남반구 고위도 지역의 주요 변수인 해빙은 상층 해양에 형성됨으로써 반사도를 증가시키고 해양과 대기 사이의 열, 수증기 및 운동량 교환에 큰 영향을 미침 (Doscher et al., 2014; Turner et al., 2017; Vihma et al., 2014)
- 또한 해빙의 용융 및 빙결에 의한 해양 염분 변화를 야기하여, 전 지구 해양 순환의 하부 축을 구성하는 남극 저층수에 영향을 미침 (Ohshima et al., 2013; Kitade et al., 2014; Haumann et al., 2016)
- 해빙의 계절 변화는 상부 해양의 밀도 구조에 강한 영향을 미치며 (Aagaard & Carmack, 1989; Goosse & Fichefet, 1999), 해빙 형성 과정에서 만들어지는 표층의 고밀도 해수는 침강을 통해 연직 혼합을 강화시키는 역할을 하고 반대로 해빙 용융으로 인한 표층의 저염수 분포는 연직 밀도 성층을 강화하여 혼합을 제한

- 해빙은 다양한 극지 생물에게 서식지를 제공함으로써 남극 생태계의 중요한 역할을 하며 (Atkinson et al., 2004; Croxall et al., 2002), 해양의 생산성과 탄소 순환에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 (Vancopenolle et al., 2013) 남극 대륙의 생지화학적 과정에 필수적 (Meyer et al., 2017; Jenouvrier et al., 2021)

나 연구의 필요성

기후 변화와 극지 해빙의 변동성

- 최근 수십 년간의 기후 변화에 따른 온난화로 인해 북극 해빙 면적의 상당한 감소가 나타났으며, 극지방 해양 환경에 대한 관심을 불러일으킴 (Cavalieri et al., 2003; Serreze & Stroeve, 2015)
- 해빙 손실은 지구 온난화와 관련하여 지구 표면에서 가장 눈에 띄는 대규모 변화 중 하나이며 그 영향은 북극 지역에 국한되지 않고 원격·지연 상관 등의 형태로 중위도 이하 지역에서도 보고됨
- 반면, 남극해의 온난화 상황에도 불구하고 남극 해빙 면적은 오히려 2010년대 중반까지 약 30년에 걸쳐 느리지만 뚜렷한 증가 추세를 보임 (Parkinson & DiGirolamo, 2016; Comiso et al., 2017)

남극 해빙의 특성 및 급격한 추세 변화

- 지구 온난화 시나리오에서 해빙이 녹을 것이라는 일반적인 개념에서 어긋나는 현상이 나타남: King (2014)의 연구에서 제시한 남극 역설 (Antarctic paradox)
- 남극 해빙 면적은 장기간의 점진적 증가 추세를 보이다가 2017년 초 급격하게 감소하였으며 (Parkinson, 2019), 이후 매년 낮은 해빙 면적이 유지되다가 2022년, 2023년 2월에 연이어 최저치를 기록 (Raphael & Handcock, 2022; Wang et al., 2022; Liu et al., 2023)
- 최근의 남극 해빙 면적의 급격한 감소는 남극 해양 시스템에 더 심각한 변화를 야기 할 수 있음 (Eayrs et al., 2021)

남극 해빙 예측의 중요성과 어려움

- 해빙의 거동을 분석하여 이해도를 높이고 예측 능력을 향상하려는 노력은 기후 변화와 극지 생태계의 반응에 대한 예측을 개선하고 극지에서 증가하는 인간 활동에 대한 과제를 해결하는 데 매우 중요
- 기후 변화의 핫스팟인 남극 대륙 및 남극해에서 해빙의 상태를 몇 주에서 몇 달 전에 미리 예측하는 역량에 대한 수요가 증가하는 반면, 지난 10여 년 동안 해빙의 역할이나 모델링에 대한 연구는 주로 북극해 해빙에 초점을 맞춤
- 남극해는 북극해와 달리 3개 대양으로 개방되어 있어 해빙의 거동 및 확장이 상대적으로 자유롭기 때문에 바람과 해류 패턴의 경년 변동에 민감한 특징을 보임

다 연구의 시급성

최근 남극 해빙의 변화

- 2016년 이후 급격한 해빙 범위의 감소가 발생한 이후, 평년 수준으로 회복하지 못하고 낮은 해빙 면적을 연이어 기록하고 있음 (Raphael & Handcock, 2022; Wang et al., 2022; Liu et al., 2023)
- 해빙은 기후 변화의 지표 중 하나이며, 얼음-알베도 피드백을 통해 기후 섭동을 증폭시키기 때문에, 지구 온난화의 증폭이 현실로 다가옴
- 태양 복사에너지의 반사하는 역할을 하던 해빙의 급격한 감소로 인해 해양으로의 단파복사 유입이 증가하면 더 많은 얼음이 소실되고 결과적으로 복사열이 더 많이 흡수되는 양의 되먹임 작용이 발생
- 또한, 해빙 손실은 대기와 해양 사이의 열과 수증기 교환이 활발해질 수 있으며, 이로 인한 기후의 반응은 장기간에 걸쳐 어떻게 나타날지 단언하기 어려움

라 최종목표와의 연계성

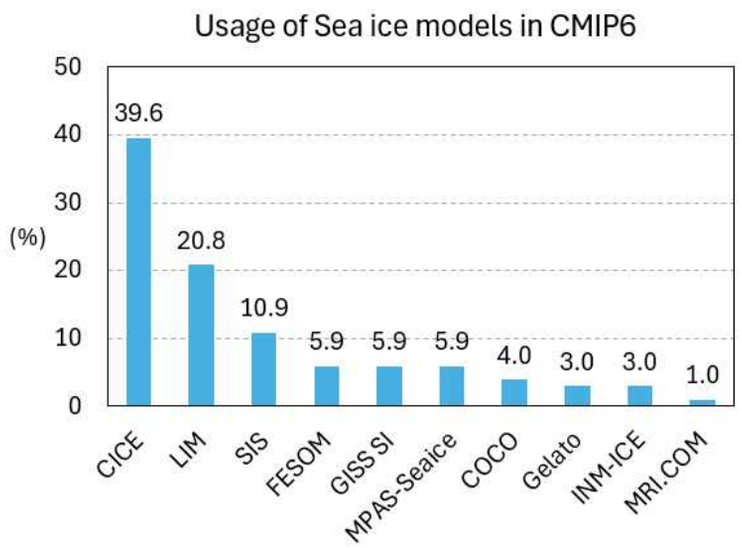
- 최근 남극 해빙의 변화 규모와 피드백을 통한 잠재적 영향을 고려할 때, 남극 해빙을 선행하는 계절에 미리 예측하는 시스템을 개발함으로써 최근의 변화를 야기하는 메커니즘을 이해하는 데 도움이 될 것으로 기대됨
- 남극 해빙의 변동성에 영향을 미치는 요인을 조사하고 예측 모델에 적용 및 평가하여 모의 성능을 높여 신뢰할 수 있는 예측 모델을 구축하는데 기여하고자 함

마 국내외 동향분석 및 시사점

국외 동향분석

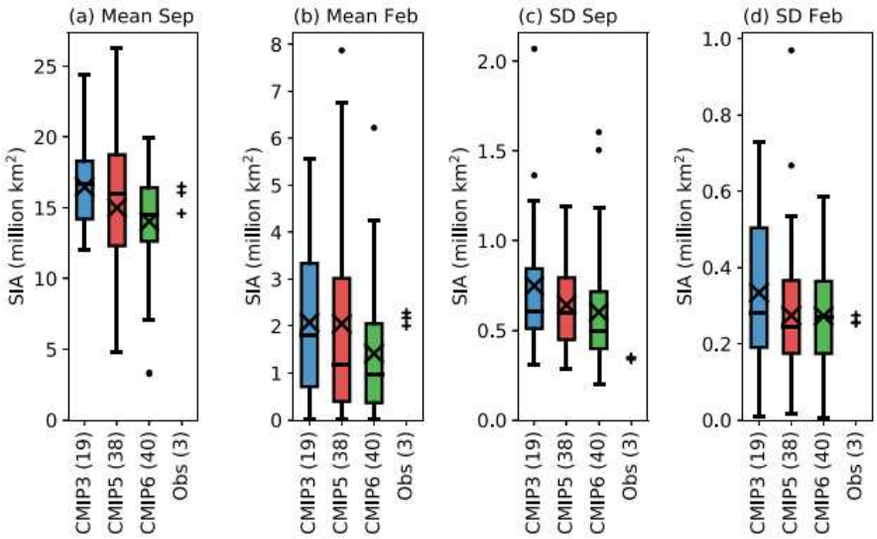
- 현재 세계적으로 널리 사용되고 있는 해빙 수치모델은 대표적으로 미국 Los Alamos National Laboratory (LANL)에서 개발한 Community Ice CodE (CICE) 모델과 벨기에 루뱅 가톨릭대학교에서 개발한 Louvain-la-Neuve Sea Ice Model (LIM)이 있음

- World Climate Research Program (WCRP) CMIP6에 포함된 모델들이 채용하고 있는 해빙 모델을 조사한 결과, 상위 2개 모델의 채용 비율이 월등히 높으며, CICE를 채용한 모델이 39.6%, LIM을 채용한 모델의 비중이 20.8%로 나타남 (그림 1)

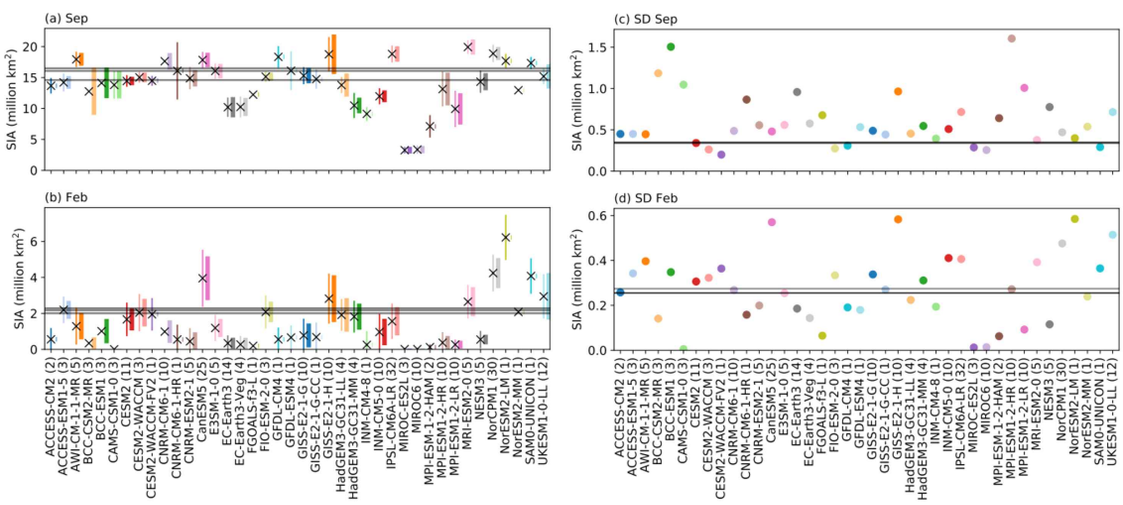


[그림 57] CMIP6 멤버에서 채용한 해빙 모델의 비율

- 이외에도 Finite-Element/volume Sea ice-Ocean Model (FESOM), Goddard Institute for Space Studies (GISS)에서 개발한 해빙 모델, Model for Prediction Across Scales (MPAS) 해빙 모델, Center for Climate System Research (CCSR)에서 개발한 CCSR Ocean Component Model (COCO), Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)에서 개발한 SIS (Sea Ice Simulator) 등의 해빙 수치모델이 세계 각지에서 결합모델 또는 지구시스템 모델의 구성 요소로 활용되고 있음
- CMIP6 자료가 배포된 이후, Roach et al.(2020)에 의하여 남극 해빙 모의 성능에 대한 평가가 이루어졌으며, CMIP5에 비하여 남극 해빙 면적 재현 성능이 전반적으로 개선된 결과를 보였으나 (그림 2), 일부 모델에서 평균적인 계절 분포와 상이한 결과를 보였고, 특히 여름철 해빙 면적 모의에서 모델 간의 편차가 큼 (그림 3)



[그림 58] CMIP 모델들의 남극 해빙 면적 재현 성능 (Roach et al., 2020)

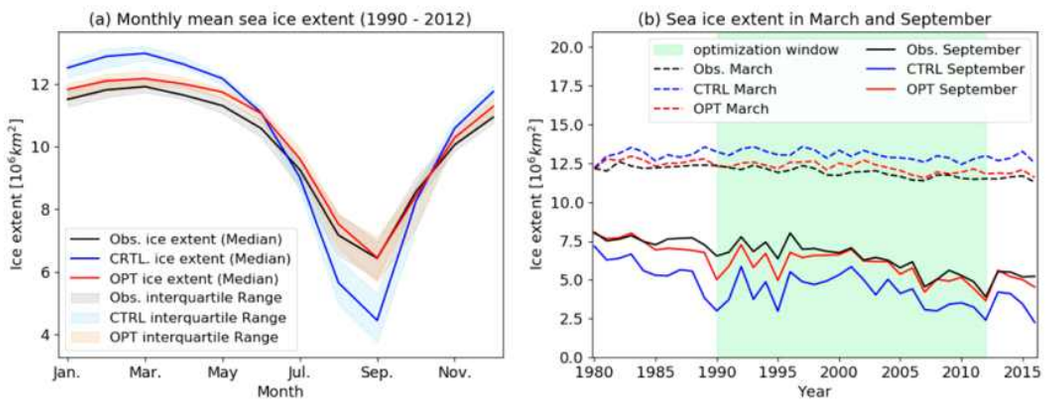


[그림 59] CMIP6 모델에서 재현한 1979-2014년 평균 남극 해빙 면적
(Roach et al., 2020; 회색 수평선은 3종의 관측자료 결과)

- 최근의 CICE 컨소시엄 보고서에 의하면 모델 개선을 위한 노력이 지속적으로 이루어지고 있으며, 특히 해빙 역학과 열역학 과정 개선, 자료동화 방안 업그레이드, 해빙 유동학의 계산과정 개선 등의 사항이 기록 관리되고 있음
- CICE 모델은 세계 여러 기관에서 사용되고 있으므로 사용자 커뮤니티가 활성화되어 있고 다양한 계산 환경과 옵션에 대한 소프트웨어 공학적 측면의 지원 및 소통 또한 활발하게 이루어지고 있음
- LIM3는 광범위한 해상도와 복잡성으로 기후에서 지역 연구에 이르기까지 다양한 구성에서 사용할 수 있도록 개선된 버전으로, 특히 얼음 두께 분포와 염분 프로세스 표현 부분이 개선됨 (Vancopenolle et al., 2009)
- 해빙 모델 성능 확보를 위한 튜닝에는 대표적으로 응력 계수, 열전달 계수, 얼음 반사도, 눈 반사도

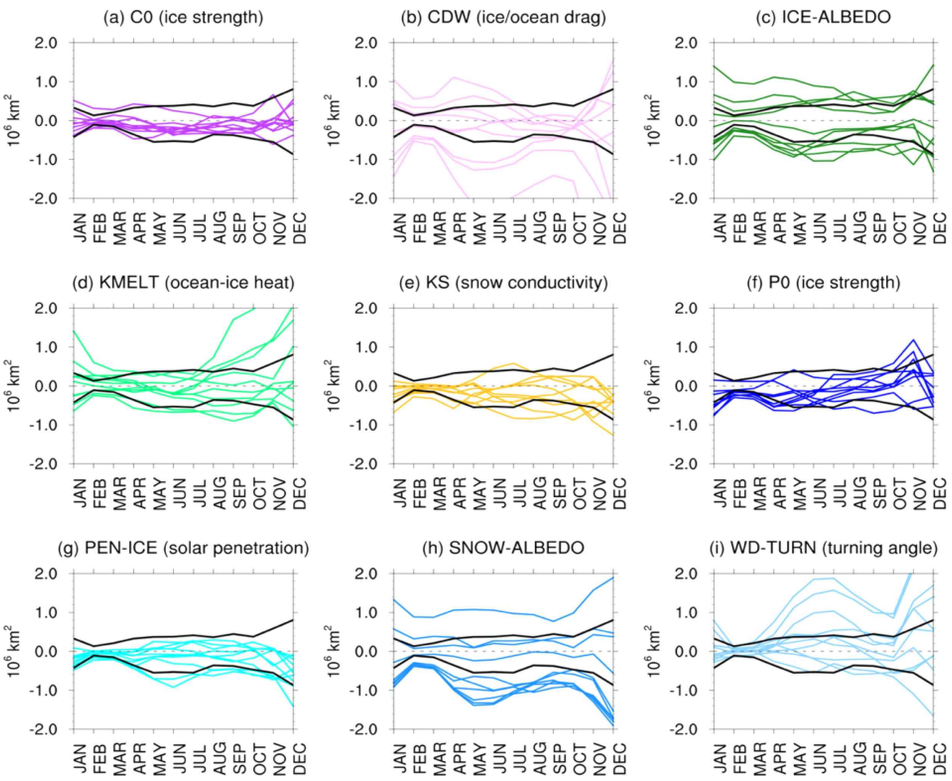
등 모수의 최적화 방안이 사용되며, 이들을 각각 조정하거나 구성을 달리하여 현실적인 해빙 분포를 얻기 위한 연구가 수행됨 (Juricke et al. 2013; Massonnet et al. 2014; Brankart et al. 2015)

- Sumata et al.(2019)은 Alfred Wegener Institute (AWI)에서 개발한 북대서양-북극해 해양-해빙 모델의 주요 모수들에 대하여 유전 알고리즘을 이용한 최적화 실험을 수행하였으며, 북극 해빙 모의 성능이 40% 가량 개선된 결과를 제시 (그림 4)



[그림 60] 해빙모델 모수 최적화를 위한 실험 설계 (Sumata et al., 2019)

- GFDL의 기후모델 내 SIS 해빙 모델 모수들의 민감도를 평가한 Schroeter & Sandery(2022)에 의하면 눈과 얼음의 반사도, 바람에 대한 해빙의 회전각, 해빙 기저면과 해양 간 열속의 변화에 남극 해빙 면적이 민감하게 반응 (그림 5)
- 모수에 대한 민감도는 특히 해빙이 축소하는 온난 계절에 크게 나타났으며, 후속 실험 대상으로 얼음의 강도, 눈의 열 전도율, 해빙/해양 응력 계수 등을 제시



[그림 61] 해빙 모델의 주요 파라미터에 대한 남극 해빙 면적 모의 민감도 (Schroeter & Sandery, 2022)

- Xu et al.(2021)은 CICE4 모델이 결합된 CESM2를 이용하여 고해상도 모델 개발을 시도하였으며, 해빙의 EVP 유동학 시스템의 수렴 현상이 현실적인 해빙 모의에 중요한 역할을 한다는 결과를 제시함

국내 동향분석

- 국내에서 수행된 연구는 해빙 변수 자체의 예측과 활용보다는 해빙으로 인한 동아시아 또는 한반도 기상·기후의 영향 및 변화에 초점을 두었기 때문에 대부분 북극 해빙에 관한 연구가 차지해 왔으며, 남극 해빙 예측을 목적으로 수행된 연구는 찾아보기 어려움
- 일부 연구기관 및 대학교에서 북극 해빙의 용융 추세가 동아시아 기후에 미치는 영향을 중심으로 수행된 바 있으며, 모델링 혹은 인공지능 기법을 이용한 북극 해빙 예측, 위성 관측을 활용한 해빙과 빙하 탐지 기술 개발을 목적으로 수행된 과제는 있음
- 최근 국내 관련분야 학술대회 발표 주제를 살펴보면 해빙을 다루는 연구가 늘어나고 있으나 남극 해빙 예측 성능 확보를 목표로 하는 연구는 찾기 어려움
- 현재 국내에서 이루어지고 있는 해빙에 관한 연구는 지구시스템 모델 또는 기후모델을 도입하는 단계에서 해빙의 동역학 과정 및 물리 과정 분석을 다루는 연구와 해빙의 변화로 인한 동아시아 또는 한반도의 극한 기상 현상·기후 변화를 분석하는 연구, 크게 두 가지로 나눌 수 있음

문제점 및 시사점

- 지구 시스템에서 해빙의 중요성은 익히 알려져 있으며, 국외에서 다양한 해빙 수치모델이 지난 수십년간 개발 및 개선되어 왔음
- 한편, 남극 해빙의 예측 성능 확보를 목적으로 하는 국내 연구는 매우 부족한 실정임
- 최근까지의 세계적으로 다양한 해빙 모델의 남극 해빙 재현성 평가를 다룬 연구를 보면 아직 모의 성능이 충분히 만족스럽지 않다고 판단되며, 이는 해빙 모델링 성능 확보의 어려움을 보여줌과 동시에 아직 개선의 여지가 있음을 시사함

2. 핵심과제 연구개발내용

가 연구 목표

- (목표 1) 해빙모델의 구축 및 기후학적 시공간 분포 모의 성능 검증
- (목표 2) 남극 해빙 예측 시스템에서의 해빙 물리과정에 따른 기후의 시공간 분포 모의 조사
- (목표 3) 남극 해빙의 계절내 예측을 위한 해빙 모델 최적화 방안 제시 및 예측 성능 고도화

나 핵심 연구 주제

- 해빙 모델의 구축 및 기후학적 시공간 분포 모의 성능 검증
  - 해빙 모델들의 일반적인 모의 성능 및 특성에 대한 선행 연구 조사
  - 해빙 모델링 사례를 기반으로 재현성 및 모의 성능 평가
  - 해빙 모델의 기후학적 시공간 분포 모의 진단 및 파라미터 민감도 파악
- 남극 해빙 예측 시스템에서의 해빙 물리과정에 따른 기후의 시공간 분포 모의 조사
  - 해빙 모델의 계산과정 수행 형태 및 모듈 연결 구조 파악
  - 모델 내 주요 매개변수가 해빙 계산에 적용되는 과정 분석
  - 복사 및 해빙의 역학적·열역학적 특성에 영향을 주는 매개변수 조사
  - 개별적인 모수가 해빙 분포에 미치는 영향 정리
  - 구축된 남극 해빙 예측시스템의 해빙의 기후 모의 시공간 특성 비교 분석 및 민감도 실험

- 남극 해빙의 계절내 예측을 위한 해빙 모델 최적화 방안 제시 및 예측 성능 고도화
  - 개발한 남극 해빙 모델의 과거 및 현재 재현 성능 분석
  - 해빙의 주요 변동 특성에 대한 재현성 평가
  - 해빙의 빙결 및 용융 프로세스에 기여하는 요소의 조사
  - 해빙 변동과 관련된 대기·해양 내부 변동성 분석
  - 구축된 예측 시스템의 시공간 기후장 모의 특성 분석 및 최적화 방안 제시
  - 해빙 물리과정과 관련한 남극해 계절내 규모 기후에 미치는 영향 분석

다 기대효과

- (목표 1) 일반적으로 사용되고 있는 주요 해빙 모델들의 특성을 조사하여, 본 과제에서 개발하고자 하는 지구시스템 모델에 적용하기에 적합한 해빙 모델 선정을 선정하는 데 있어 참고 자료를 제공
- (목표 2) 해빙 모델 내의 주요 계산과정의 수행 형태와 모듈의 연결 구조 및 옵션 설정으로 조정 가능한 경험적 모수들이 해빙 계산에 미치는 영향을 조사함으로써, 향후 해빙 모의 성능 개선을 위한 실험 진행 시 효율적인 방안을 제시
- (목표 3) 본 연구를 통해 개발한 남극 해빙 모델의 생산자료를 분석하여, 실제로 알려진 변동 특성의 모의 성능을 평가하여 예측 성능 개선으로 연결될 수 있도록 기여

3. 추진 계획

가 연차별 로드맵

[표 27] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	남극 해빙 면적과 부피의 계절 주기 및 경년 변동성 예측을 결정하는 주요 물리과정과 매개변수는 무엇인가?						▪ 해빙 모델의 기후학적 시공간 분포 모의 진단 및 매개변수 민감도 파악 ▪ 구축된 예측 시스템의 시공간 기후장 모의 특성 분석 및 최적화 방안 제시 ▪ 해빙 면적과 부피에 대한 복사, 열역학, 역학 매개변수들의 민감도 파악 ▪ 해빙 모델의 최적화에 기여할 수 있는 매개변수의 우선 순위 제시
남극해빙예측 시스템 개발	해빙모델 성능 비교평가 및 해빙모델 안정화			해양순환 및 해빙 재현성능 평가, 해빙 변동제어 프로세스 도출 및 예측성능 고도화			

나 현장탐사계획

다 국내외 협력연구방안

- (캐나다 EC, 프랑스 IPSL) 해빙 모델 구축 및 해빙 모델의 열역학 및 역학 물리과정 개선 관련 기술 자문
- 해빙 모델링 선도국의 전문가들과의 상호방문 및 공동워크숍 등 연구교류 기회 창출을 통하여 국제 네트워크를 구축하고, 관련 최신정보 습득 및 전문인력 개발을 위한 교육 기회로 적극 활용하여 보다 체계적으로 국내 해빙 모델링 인력 양성을 도모하고 선도국들과의 기술 격차 극복

라 인력 및 투입예산

인력

[표 28] 인력

(단위:명)

연차	1	2	3	4	5	6	평균
인력	3	4	4	4	4	4	

투입예산

[표 29] 지원내용×연도별 시간 절감기간 평균

(단위:백만)

연차	1	2	3	4	5	6	합계
인건비	100	140	140	140	140	140	800
직접비	140	100	100	100	100	100	640
간접비	60	60	60	60	60	60	360
합계	300	300	300	300	300	300	1,800

과제 2 남극 연안해빙(고착빙) 분포의 모델 재현/예측 성능 개선

1. 과제개요

가 과학적 질문

분과 가설

- 해빙모델링
  - 남극 대륙의 연안해빙(고착빙, landfast sea ice 또는 fast ice)은 외해의 유동성이 큰 해빙과 역학적으로 구분되어 있는데, 해빙모델에서 이러한 해빙의 분포 변화를 재현하는 기초 성능은 개발되는 남극 해빙 예측시스템에서 대륙 인접 내해 지역의 해빙 예측에 중대한 영향력을 가질 수 있음
- 남극 연안은 해빙이 육지에 고정된 고착빙 해역과 바다가 열려 있는 폴리냐(polynya) 해역으로 구분
  - ※ 고착빙: 육지에 부착되어 바람이나 해류에 의한 이동이 거의 없는 해빙으로 겨울에는 대륙과 빙붕 주변으로 대부분 나타나고 여름에는 만(灣) 지역에 나타남
  - ※ 폴리냐: 해빙 구역 안쪽에서 바다가 열린 곳으로 지역적인 고온수의 용승에 의해 얼음이 녹아 뚫리거나 지향성이 강한 바람(예: 남극 활강풍)에 의해 밀려나면서 생성

과학적 질문

- 남극 해빙 예측시스템에 탑재되는 해빙모델의 연안해빙 분포 변화의 재현, 예측 성능의 결정 요소는 무엇이며 어떻게 개선할 수 있는가?

나 연구의 필요성

해빙모델의 고착빙 분포 변화 재현 성능 개선을 통한 장보고 기지 주변 해빙 예측의 불확실성 최소화 필요

- 현재 해빙모델의 남극 해빙예측은 주로 외해 확장역에 대한 예측 성능 보고가 주로 이루어지고 있고, 장보고 기지가 위치한 로스해는 웨델해에 비해 낮은 수준(Bushuk et al., 2021; Payne et al., 2022)에 있으며, 로스해 연안해빙의 재현 및 예측 성능에 대해서는 연구된 바가 없음

다 연구의 시급성

- 위성 관측이 시작된 1970년대 후반 이후 2010년대 중반까지 증가 경향을 보이던 남극 해빙면적은 최근 웨델해, 로스해, 인도양 인접 동남극 해역을 중심으로 일어난 급격한 감소에 의해 감소 경향으로 급격한 역전이 일어나고 있음
- 이러한 변화는 대륙 연안에 건설된 기지 기반 연구활동에도 큰 영향을 주고 있어, 역학 모델을 이용한 남극 해빙예측에 있어 외해의 해빙 확장역 분포 뿐만 아니라 연안해빙의 분포와 계절변화 예측의 중요성도 높아지고 있음

라 최종목표와의 연계성

- 남극 해빙의 면적, 두께, 유동 등을 예측하는 남극 해빙 예측시스템의 연안해빙 예측 불확실성을 평가하고 성능 개선 방안 도출 및 적용하는 것은 해빙 계절예측의 기지 주변 현장 연구활동 지원 효용성 제고와 연계됨
  - 관측 기반의 연안해빙 예측 성능 평가와 개선을 통해 남극 해빙 예측시스템의 예측 불확실성의 최소화함

마 국내외 동향분석 및 시사점

- 국외 동향분석
  - NASA의 Terra와 Aqua 위성에 탑재된 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 센서 기반으로 2000-2018년 기간의 환남극 고착빙 데이터가 생산되어 분포, 장기 경향 및 변동성에 대한 관측 기반 이해가 심화되고 있음 (Fraser et al., 2021)
  - 유럽의 NEMO-LIM 해양-해빙 접합모델에 Lemieux et al. (2015, 2016)에서 개발된 얼음의 인장강도(tensile strength)와 해저에 접지된 빙산에 대한 모수화 개념을 도입한 고착빙 모델링을 통해 동남극 토튼빙하(Totten Glacier) 지역의 고착빙 형성과 해양-빙붕에의 영향이 연구됨 (Van Achter et al., 2022)
  - 미국 LANL(Los Alamos National Laboratory)을 중심으로 결성된 CICE 컨소시움에서 개발하는 해빙모델 CICE 버전 6에는 확률적 해저 접지 모수화를 고착빙 모수화에 도입하였음
  - 중국은 중산기지가 있는 동남극 프리즈만(Prydz Bay)의 고착빙 예측시스템을 2017-18년 하계 시즌부터 운영하여 쇄빙연구선 설룡호의 현장 연구지원에 활용하고 있음 (Zhao et al., 2020)

- 알래스카 포기아일랜드만(Foggy Island Bay)의 해빙 도로 운영 안전성 확보를 위해 고착빙 계절예측시스템이 구축됨 (Bienick et al., 2022)

■ 국내 동향분석

- 국내에서는 고착빙에 대한 모델 기반 연구는 수행된 바가 없으나 고해상도 위성 영상 기반의 남극 고착빙 모니터링 연구가 활발히 진행되었음 (Kim et al., 2015; Kim et al., 2020; Han and Lee, 2018)

■ 문제점 및 시사점

- 최근 남극 해빙의 급격한 감소에 동반된 남극 연안의 고착빙의 감소는 기지 활동에 있어 해빙 위를 육지처럼 활용하는데 위협이 되고 있고, 빙붕 구역에서는 해빙의 감소는 빙붕 하부 유입수에 영향을 주어 빙상 감소 예측의 불확실성 요소로 작동하기 때문에 그 중요성이 부각되고 있으나 이에 대한 국내 연구 및 국제 교류가 전무한 실정으로 선진국 대비 기술 수준이 낙후되어 있음

2. 핵심과제 연구개발내용

가 과학적 질문

■ (분과가설) 해빙모델에서 남극 연안 고착빙의 분포 변화를 재현하는 기초 성능은 개발되는 남극 해빙 예측시스템에서 대륙 인접 내해 지역의 해빙 예측에 중대한 영향력을 가질 수 있음

■ (질문) 남극 해빙 예측시스템에 탑재되는 해빙모델의 연안해빙 분포 변화의 재현, 예측 성능의 결정 요소는 무엇이며 어떻게 개선할 수 있는가?

나 연구 목표

■ 남극 해빙 예측시스템에 탑재되는 해빙모델의 연안 고착빙 모의 성능을 검증하고 개선점을 도출, 적용함으로써 남극 해빙 예측시스템의 연안 예측 정확도 제고

다 핵심 연구 주제

■ (남극 연안 고착빙 데이터 연장 생산 체계 구축) 해빙모델의 남극 연안 고착빙 재현 성

능 검증을 위한 기존 위성 기반 데이터 수집과 최신 데이터 연장 생산 체계 구축을 수행하고, 이를 활용한 연안 고착빙 분포 및 변화 경향 분석

- (남극 연안 고착빙 분포의 모델 재현 성능 검증) 독립형(standalone) 해빙모델과 해빙-해양 결합 모델 실험 기반으로 검증하고 결합에 따른 재현 성능 차이 비교 검증
- (남극 연안 고착빙 분포의 모델 재현 성능 개선) 결합 모델의 모의 성능 개선안을 도출하고 성능 최적화에 적용함
- (남극 해빙 예측시스템의 연안 고착빙 분포 예측 성능 검증) 남극 연안 고착빙 해역의 상세 계절예측 성능을 평가하고 해역별 연안 고착빙 예측 성능 결정 인자를 판별함

라 기대효과

- 해빙모델의 남극 연안 고착빙 재현 성능을 평가하고 개선하여 기지 주변의 해빙 분포 변화 예측 기반의 연구활동 계획 수립의 불확실성 최소화
- 연안 고착빙에 의해 영향을 받는 빙붕 하부 유입수의 모의 성능 향상과 그에 따른 빙상 감소 예측의 불확실성 감소 기대

3. 추진 계획

가 연차별 로드맵

연구문제 해결 로드맵

[표 30] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	남극 해빙 예측시스템에 탑재되는 해빙모델의 연안해빙 분포 변화의 재현, 예측 성능의 결정 요소는 무엇이며 어떻게 개선할 수 있는가?						▪ 모델 검증 기준 위성 고착빙 관측 수집, 분석 및 연장 생산 체계 수립 ▪ 남극 연안 고착빙 분포의 모델 재현 성능 검증 및 개선 ▪ 남극 해빙 예측시스템의 연안 고착빙 분포 예측 평가
남극 연안해빙(고착빙) 분포의 모델 재현/예측 성능 개선	남극 연안 고착빙 분포의 모델 재현 성능 검증			남극 연안 고착빙 분포의 모델 재현 성능 개선			

기술 로드맵

[표 31] 기술 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
고착빙 관측 수집, 생산 및 분석	남극 연안 고착빙 관측자료 생산 기술			관측자료의 기후통계적 분석 기술			▪ 고착빙 관측 수집, 생산 및 분석 기술 ▪ 고착빙의 모델 재현/예측 성능 평가 기술
고착빙의 모델 재현/예측 성능 평가	해빙모델의 남극 연안 고착빙 분포 산출 기술			예측결과의 분석 및 관측기반 평가 기술			

나 현장탐사계획

다 국내외 협력연구방안

- (호주 남극해양연구소, 울산과학기술원) 위성 기반 남극 연안 고착빙 관측자료 연장 생산 기술 도입
- (캐나다 환경기후변화부) 해빙모델의 고착빙 모수화 기술 자문

라 인력 및 투입예산

- 인력

[표 32] 인력

(단위:명)

연차	1	2	3	4	5	6	평균
인력	3	3	3	3	3	3	3

- 투입예산

[표 33] 지원내용×연도별 시간 절감기간 평균

(단위:백만)

연차	1	2	3	4	5	6	합계
인건비	100	100	100	100	100	100	600
직접비	140	140	140	140	140	140	840
간접비	60	60	60	60	60	60	360
합계	300	300	300	300	300	300	1,800

과제 3 남극 해빙 예측시스템 운영체계 개발

1. 과제개요

가 과학적 질문

분과 가설

- 자료 전처리, 동화, 예측, 후처리 과정을 수행하는 예측체계의 구축 및 활용은 남극 해빙 예측시스템의 다양한 시간규모의 예측 수행과 예측성 향상에 기여할 수 있음
- 동일한 실험 규약으로 수행된 다양한 예측시스템의 예측 결과의 비교는 개별 해빙예측시스템의 특성 파악과 성능 향상에 기여할 수 있음

과학적 질문

- 남극 해빙 예측시스템에서 예측된 남극 해빙 과거 재예측 결과는 타 예측시스템의 결과와 비교하여 어떤 특성을 보이며 예측성 향상을 위해서는 예측시스템의 어느 구성 요소의 개선이 필요한가?

나 연구의 필요성

예측시스템 운영체계 개발

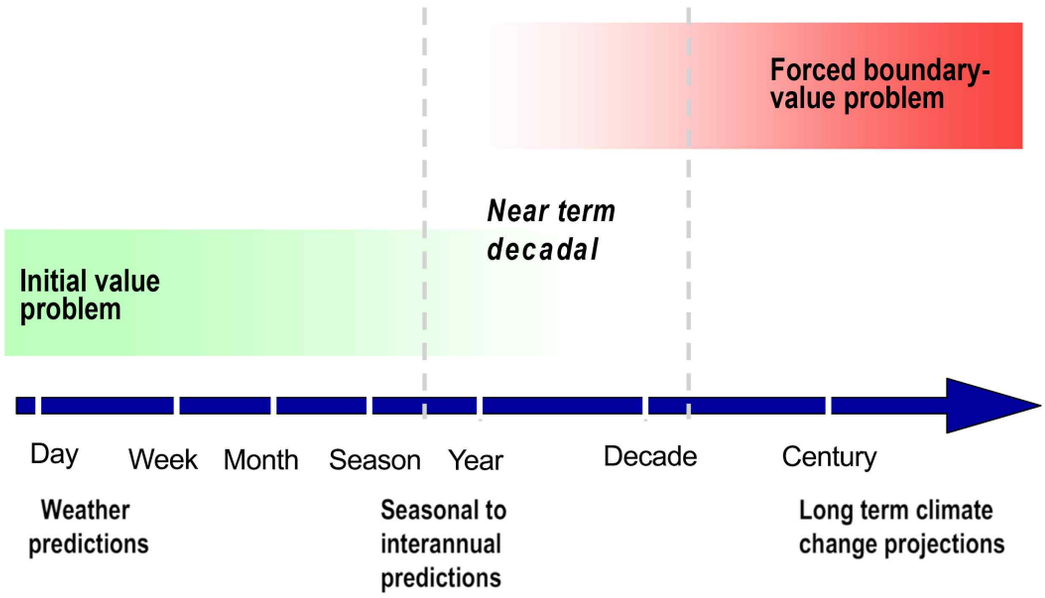
- 장기 해빙 예측에 대한 과학적 및 사회경제적 관심이 증가함에 따라 안정적이고 정확도 높은 해빙 예측시스템 구축의 필요성이 증대되고 있음 (Jung et al., 2016).
- 장기 해빙예측에서도 위성 관측 해빙 분포 (sea-ice concentration) 자료 등을 활용한 정확한 초기조건의 생산 중요성이 지속적으로 강조되고 있으며, 또한 CryoSat-2, SMOS, ICESat-2와 같은 최근 위성에서 관측된 해빙 두께 (sea-ice thickness) 자료의 동화가 해빙 예측 정확도가 크게 향상된 연구 결과가 보고 되고 있음 (Blockley et al., 2018; Liu et al., 2019; Mu et al., 2019; Yang et al., 2014)
- 최근 위성 해빙 관측 기술의 발달과 산출물 종류의 증가 따라 해빙예측시스템에서 신규 관측자료의 신속한 활용이 강조되고 있으며, 이에 따라 해빙예측시스템의 초기화 과정의 유연성과 안정성의 확보의 필요성이 제기되고 있음.
- 미국, 유럽, 독일 등 기후예측 분야의 선진국에서는 해빙의 계절규모 예측을 위하여 지구시스템모델링을 활용하여 관측자료의 전처리, 초기화, 역학모델 예측, 성능 평가 과정을 총괄하는 예측시스템을 구축, 운영하고 있음 (Massonnet et al, 2023; Zhu et al., 2023; Johnson et

al., 2019; Mu et al., 2021)

- 지구시스템모델링 프레임워크 (Earth System Modeling Framework; ESMF) 등 지구시스템모델링 프레임워크 등에서도 기존 지구시스템모델, 접합모델, 기후모델 들의 안정적 개발 및 운영환경의 제공을 위해 개발되었던 프레임워크를 예측시스템의 개발 및 운영에 확장하기 위한 프레임워크의 확장 시도가 진행되고 있으며, 이를 활용한 지구시스템모델의 예측시스템으로의 확장과 안정성에 대한 연구가 진행되고 있음 (Bauer et al., 2021)
- 남극 해빙 예측의 주기적 운영과 지속적인 예측성의 향상을 위하여 체계적인 예측시스템의 구축이 필수적임. 또한 DART, ESMF NUOPC 등 단기 및 중장기 예측을 위해 개발되어 활용가능한 여러 예측체계 구축을 지원하는 기술을 평가하고 활용하여 유연성과 안정성이 확보된 예측시스템 구축이 필요함

과거 재예측 실험 수행 및 예측 성능 비교 평가

- 동일한 조건에서 수행된 다양한 모델들의 결과를 상호 비교하는 모델링간 상호 비교 연구 (Modeling Intercomparison project; MIP)는 개별 모형의 성능에 대한 종합적인 평가가 가능하게 하였고, 이를 통해 파악된 모델의 구조적 문제들의 개선을 용이하게 함 (Randall et al, 2007).
- 접합모델간 상호 비교 연구 (Coupled Model Intercomparison Project; CMIP)은 이러한 MIP의 대표적인 사례이며, 이 프로젝트를 통해 현재 기후, 미래 기후에 대한 동일한 강제력 조건하에 수행된 여러 모델링 결과들은 현재, 미래 기후에 대한 신뢰도 높은 모의 결과를 제공하여 기후변화에 대한 정부간 협의체 (Intergovernmental Panel On Climate Change; IPCC)의 기후변화 보고서에 활용되었으며, 또한 개별 모델의 성능개선에도 활용된 바 있음.
- 마찬가지로, 계절내부터 10년규모의 예측 결과 역시 동일 기간에 대한 과거 예측결과의 상호비교를 통해 개별 예측시스템의 예측 특성을 파악하고 다중모델앙상블을 통해 예측성을 향상시키려는 Subseasonal Experiment (SubX; Pegion et al., 2019), Climate-System Historical Forecast Project (CHFP; Tompkins et al., 2017), Decadal Climate Prediction Project (DCPP; Boer et al., 2016) 등의 다양한 시도가 진행중임



[그림 62] 지구시스템 예측에 있어 계절-1년-10년규모 예측의 특성. 출처: Boer et al., 2016

- 남극 해빙의 계절규모 예측 역시 이러한 다중예측시스템간의 예측 결과의 상호 비교를 통해 예측성을 향상시키려는 시도가 진행중이나 (Sea Ice Prediction Network South; SIPN South; Massonnet et al., 2023), 비교적 최근인 2017년부터 수행되기 시작하여 타 예측변수 및 타 지역에 비하여 상대적으로 자료가 부족한 실정임
- 이러한 선진 기관의 예측성 향상을 위한 접근 방법을 따라 남극 해빙의 계절-년 규모의 예측성 향상을 역시 대상 시간규모의 다중 예측결과와의 상호비교를 통해 예측 성능을 평가하고 이를 통한 예측성의 향상이 필수적임

다 연구의 시급성

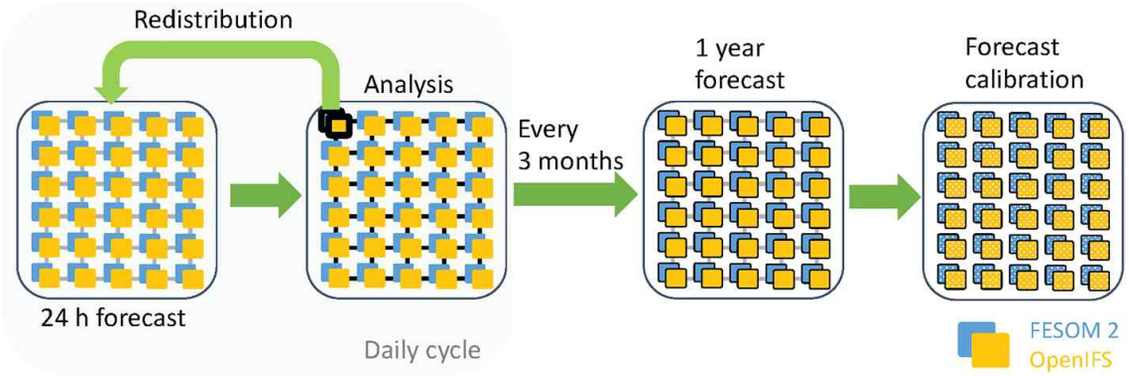
- 남극 해빙의 계절에서 십년규모까지 다양한 시간규모의 신뢰도 높은 예측 자료 생산과 예측정확도의 지속적인 향상 도모를 위해서는 자료 전처리, 동화, 예측, 후처리 과정을 수행하는 예측체계의 개발을 통해 정기적 예측, 결과 분석, 개선을 위한 기반의 구축이 선행되어야 함
- 타 예측시스템의 예측 결과와 동일 조건에서 수행된 남극 해빙 예측 실험 결과의 상호 비교가 예측시스템의 예측성 향상에 기여하는 정도를 고려할 때 해빙의 다양한 시간규모의 과거 재예측실험의 수행과 타 결과와의 상호비교 연구가 시급히 수행되어야 함

라 최종목표와의 연계성

- 남극해 지역의 급격한 온난화에 따른 환경변화를 고려한 남극 해빙 예측 기술의 성공적 개발을 위해서는 각 구성 기술의 개발 과정을 안정적으로 지원할 수 있는 예측 체계의 개발이 선행 및 병행되어야 하며, 이를 통한 지속적인 과거 재예측실험의 수행과 결과의 상호비교를 통해 예측성 향상을 도모해야함
  - 예측시스템의 안정적 기반 구축과 과거 재예측실험이 제공하는 예측성 향상 기여도는 남극 예측 기술 개발을 위해 남극해의 급격한 온난화에 따른 예측 환경의 변화에 유연하고 안정적인 대응을 가능하게 함

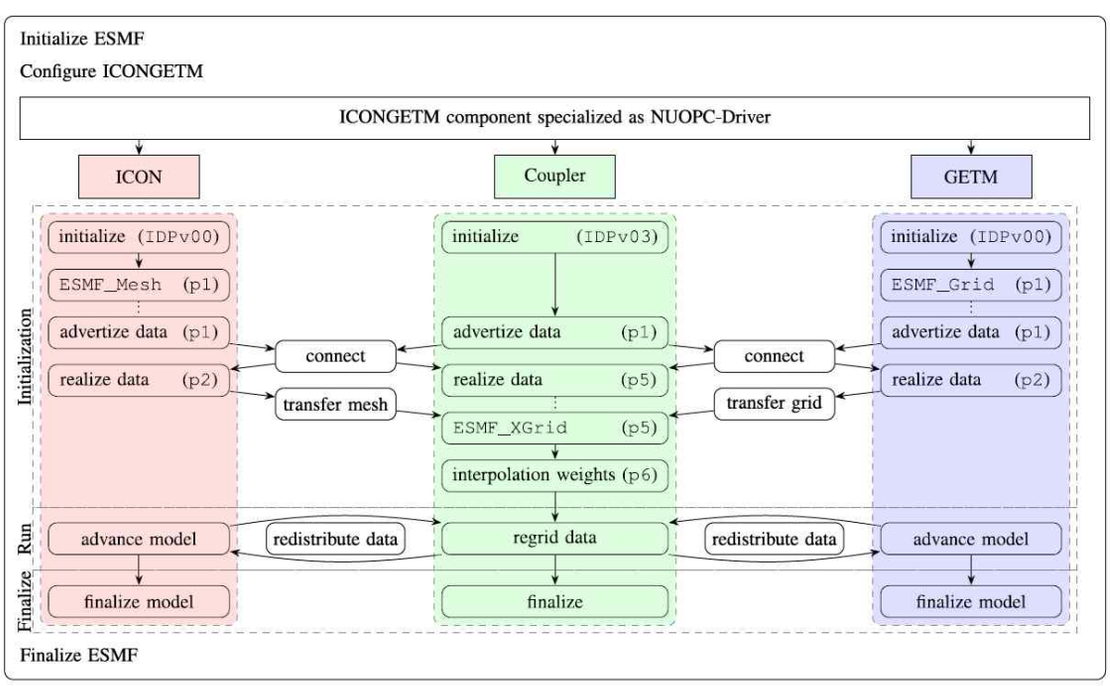
마 국내외 동향분석 및 시사점

- 국외 동향분석
  - 극지역 기상/기후규모의 예측 및 현상 연구에는 빙권을 포함하는 극지역 기후시스템의 복잡성으로 인해 지구시스템모델 활용의 중요성이 지속적으로 강조되어 왔으며, 해빙 예측 역시 이러한 지구시스템모델의 활용이 보편적임.
  - WMO 및 기상 분야 선진국들의 2020년-2030년간의 주요 중장기 전략으로 기상, 기후 재난에 대한 대비 강화를 위한 지구시스템모델 기반 기술을 활용한 전지구 이음새없는예측(seamless prediction) 시스템 구축을 주요 목표로 설정하고 있음
  - 유럽중기예보센터 (European Center for Medium-Range Weather Forecast; ECMWF)에서는 2019년 계절예측시스템을 IFS, NEMO, LIM2로 구성된 SEAS5 (fifth generation seasonal forecast system)으로 업데이트하면서 기존 SEAS4에서 제공하지 않던 해빙관련 산출물의 계절규모 예측결과의 제공을 시작하였음 (Johnson et al., 2019)
  - 독일 Alfred Wegener Institute (AWI)에서는 접합기후모형 AWI-CM3을 활용한 남북극 해빙 예측시스템을 구축, 운영하고 있으며, 이 시스템에서는 독자 해양모델인 FESOM2과 유한요소법 기반 해빙모델인 FESIM이 접합되어 있음 (Mu et al., 2022)



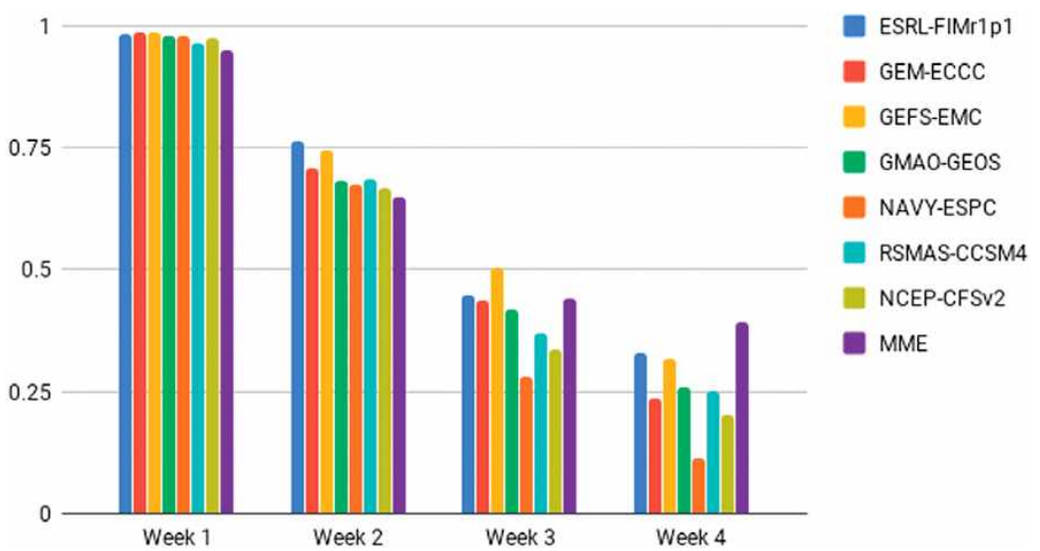
[그림 63] 독일 AWI에서 운영중인 AWI-CM3 기반 해빙예측시스템의 운영 방식. 출처: Mu et al., 2023

- 미국 국립해양대기청 (National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA)에서는 NOAA Unified Forecast System (UFS)를 활용하여 북극해빙예측시스템을 구축하고 계절내 규모 해빙 예측장의 생산과 제공을 시작하였음 (Zhu et al., 2023)
- ESMF는 예측모델링 시스템의 발전을 위하여 National Unified Operational Prediction Capability; NUOPC)를 해군, NOAA, 공군과 함께 협력 개발하고 있음. 이러한 NUOPC 파트너쉽을 통해 예측모델링 시스템을 보다 쉽게 공동으로 구축할 수 있도록 모델 구축의 표준 방법인 공통 모델 아키텍처 개발을 진행중임.\
- 독일 라이프니츠 연구소에서는 ESMF NUOPC를 활용하여 ICON-GETM 접합 지역규모 예측시스템을 구축하고 발틱해 지역의 해안 특성 변화 예측에 활용 중임 (Bauer et al, 2021)



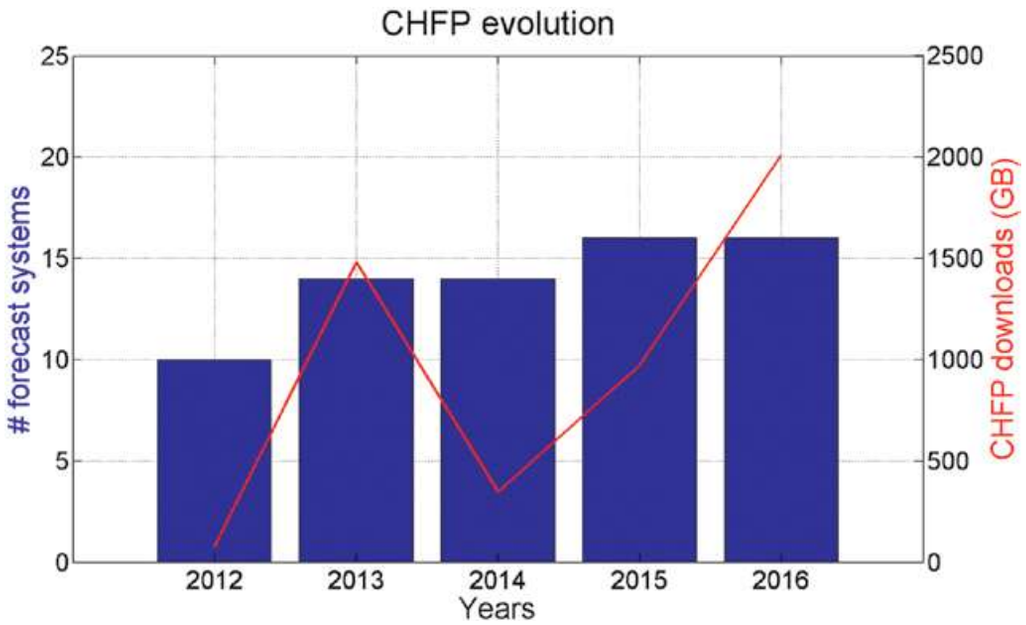
[그림 64] ESMF NUOPC를 활용한 접합모델기반 예측시스템의 플로우차트. 출처: Bauer et al. 2021

- 미국 국립대기과학연구소 (National Center for Atmospheric Research; NCAR)에서는 지구시스템모델의 구성모델의 자료동화과정을 돕는 범용 자료동화 테스트베드인 Data Assimilation Research Testbed (DART; Anderson et al., 2009)를 개발, 배포 중에 있으며, 이를 활용하여 전구대기모형인 CAM과 지역대기모형인 WRF와 결합된 자료동화 시스템을 구축하였음
- 미국 University of Washington, NCAR, 스페인 슈퍼컴퓨팅 센터에서는 공동으로 DART를 활용한 해빙모델의 자료동화 시스템을 개발하고 관측자료의 예측성능 영향 연구에 활용한 바 있음 (Zhang et al., 2018)
- 미국의 7개 예측 기관은 공동으로 계절내규모의 예측성 향상을 위해 계절내규모 예측실험 규약을 정의하고 17년간의 과거 재예측 실험을 수행하고 예측성의 상호 비교평가를 수행하였음 (Subseason Experiment; SubX; Pegion et al., 2019),



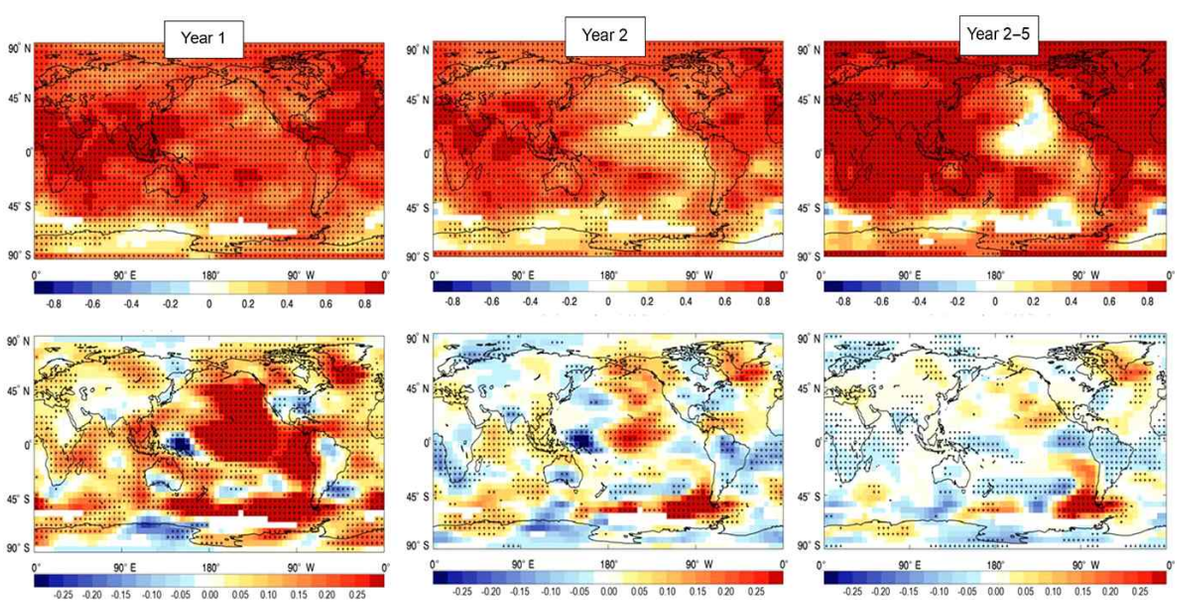
[그림 65] SubX 프로젝트에 참여한 모델들의 NAO 예측성. 출처: Pegion et al., 2019

- 계절예측을 운영하는 세계 각 기관들의 계절규모의 재예측 결과의 상호비교를 통해 예측성을 개선하려는 목적으로 진행된 Climate-System Historical Forecast Project (CHFP)는 참여모델이 지속적 증가하였으며, 활용성 역시 지속적으로 증가하였음 (Tompkins et al., 2017)



[그림 66] CHFP 에 참여한 모델과 활용수의 연도별 변화. 출처: Tompkins et al., 2017

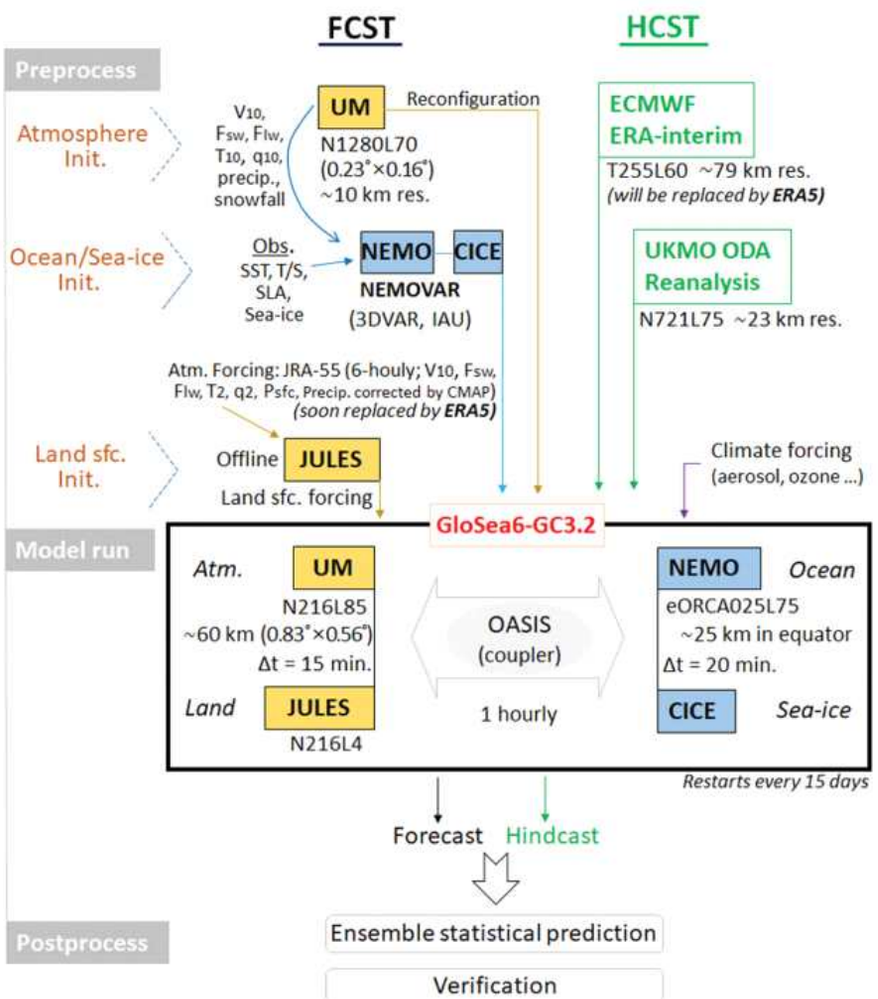
- 남극 해빙의 계절규모의 예측성의 향상을 위하여 SIPN South 프로젝트가 2017년부터 시작되어 지속되고 있으며, 22개 기관의 역학 및 통계모델 기반의 해빙 면적과 농도 자료 예측자료를 수집, 비교평가를 수행하고 있음 (Massonnet et al., 2023)
- CMIP6에서는 계절부터 10년내 규모의 예측성을 상호 비교 평가하는 Decadal Climate Prediction Project (DCPP)가 진행되고 있으며 다양한 Tier 실험군을 통해 다양한 기후요소의 계절-1년-10년규모 예측성에의 영향 평가가 진행중임 (Boer et al., 2016)



[그림 67] DCPP 참여모델의 다중모델앙상블에 기반한 연도별 예측성의 평가와 초기화의 영향. 출처: Boer et al., 2016

국내 동향분석

- 차세대 수치예보모델개발사업단에서는 1단계에 개발된 전지구일기예측모델 KIM을 활용한 1달 이내의 연장 중기 예측시스템을 구축하면서 해양-해빙 모델의 접합모델을 개발하고 있음.
- 한국해양과학기술원에서는 MOM5에 기반한 북태평양 고수온예측시스템을 개발, 운영중이나 북태평양 지역에 제한적으로 운영되어 북극 및 남극지역의 해빙예측장은 생산하고 있지 않음.
- 기상청에서는 영국 기상청의 UM 기반의 GloSea6 계절예측시스템을 구축하고 NEMO-CICE 기반의 해빙 계절예측 결과를 생산하고 있음 (김혜리 외, 2021)



[그림 68] 기상청 계절예측시스템 GloSea6의 구성요소 및 예측체계 특성. 출처: 김혜리 외, 2021

문제점 및 시사점

- 국외 기관에서는 해빙 등의 예측을 위한 지구시스템모델 기반 예측시스템 개발을 위하여 ESMF, DART 등의 범용 모델링 체계 구축 도구들을 활용하여 안정성을 확보하고 있음.

○ 국외의 여러 예측 수행기관 및 모델링센터들은 자체 예측시스템에 기반한 과거 재예측실험을 통해 개별 예측시스템 성능 확인과 개선을 도모하고 있으며, 또한 예측 자료의 공유를 통해 다중모델 방법에 기반한 계절 예측의 전반적인 정확도 향상을 도모하고 있으나 국내의 경우 이러한 노력이 부족한 실정임.

2. 핵심과제 연구개발내용

가 과학적 질문

- (분과가설) 자료 전처리, 동화, 예측, 후처리 과정을 수행하는 예측체계의 구축 및 활용은 남극 해빙 예측시스템의 다양한 시간규모의 예측 수행과 예측성 향상에 기여할 수 있으며 동일한 실험 규약으로 수행된 다양한 예측시스템의 예측 결과의 비교는 개별 해빙예측시스템의 특성 파악과 성능 향상에 기여할 수 있음
- (질문) 구축된 예측시스템으로 예측된 남극 해빙 과거 재예측 결과는 타 예측시스템의 예측결과와 비교하여 어떤 특성을 보이며 예측성 향상을 위해서는 예측시스템의 어느 구성요소의 개선이 필요한가?

나 연구 목표

- 계절-1년-십년 규모의 남극지역 해빙 예측의 전처리-자료동화-예측-후처리 과정의 통합 수행이 가능한 예측체계 구축
- 구축된 예측시스템을 활용한 남극 해빙의 계절-연규모-십년규모의 과거 재예측 실험을 통한 예측시스템의 성능 진단 및 개선

다 핵심 연구 주제

- (남극 해빙예측 체계 개발) 계절-1년-십년 규모의 남극지역 해빙 예측의 전처리-자료동화-예측-후처리 과정의 통합 수행이 가능한 예측체계 구축을 통한 남극 해빙예측시스템 개발 과정 및 운영의 안정성 확보

- (과거 재예측실험 수행 및 성능 진단) 국제 공동 예측 프로토콜을 활용한 남극해빙의 과거 재예측실험 수행과 타 예측결과와의 상호 비교를 통한 예측시스템의 성능 진단 및 개선

라 기대효과

- 자료 전처리, 동화, 예측, 후처리 과정을 수행하는 예측체계의 구축 및 활용은 남극 해빙 예측시스템의 다양한 시간규모의 예측 수행과 예측성 향상에 기여
- 동일한 실험 규약으로 수행된 다양한 예측시스템의 예측 결과의 비교는 개별 해빙예측시스템의 특성 파악과 성능 향상에 기여

3. 추진 계획

가 연차별 로드맵

연구문제 해결 로드맵

[표 34] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	남극 해빙 예측시스템에서 예측된 남극 해빙 과거 재예측 결과는 타 예측시스템의 결과와 비교하여 어떤 특성을 보이며 예측성 향상을 위해서는 예측시스템의 어느 구성 요소의 개선이 필요한가?						▪ 전처리-자료동화-예측 후처리 자동화 체계 개발 ▪ 예측시스템의 과거 재예측실험을 통한 성능 진단 및 개선 ▪ 예측결과 검증 및 가시화 도구 개발 ▪ 개별 사례 재예측 실험을 통한 남극 지역 기후시스템 이해도 제고 및 예측시스템 개선
남극 해빙 예측시스템 운영체계 개발	전처리-자료동화-예측 후처리 자동화 체계 개발			예측결과 검증 및 가시화 도구 개발			
재예측실험 기반 예측시스템 성능 개선	예측시스템의 과거 재예측실험을 통한 성능 진단 및 개선			개별 사례 재예측 실험을 통한 남극 지역 기후시스템 이해도 제고 및 예측시스템 개선			

기술 로드맵

[표 35] 기술 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
남극 해빙 예측시스템 운영체계 개발	전처리-자료동화-예측-후처리 자동화 체계 구축 기술			예측결과 통계적 분석 및 가시화 기술			▪ 전처리-자료동화-예측 후처리 자동화 체계 개발 ▪ 예측시스템의 과거 재예측실험을 통한 성능 진단 및 개선 ▪ 예측결과 검증 및 가시화 도구 개발 ▪ 개별 사례 재예측 실험을 통한 남극 지역 기후시스템 이해도 제고 및 예측시스템 개선
재예측실험 기반 예측시스템 성능 개선	해빙예측 상호비교 프로토콜 기반 재예측실험 및 예측시스템 특성 분석 기술			개별사례 재현 및 예측시스템 특성 분석 기술			

나 현장탐사계획

- 없음

다 국내외 협력연구방안

- (미국 NCAR) CICE-DART 구성 관련 기술 자문
- 해외 해빙모델링 전문가들과의 상호방문 및 공동워크숍 등 연구교류 기회 창출을 통하여 국제 네트워크를 구축하고, 관련 최신정보 습득 및 전문인력 개발을 위한 교육기회로 적극 활용하여 체계적인 국내 해빙예측 관련 인력 양성 도모

라 인력 및 투입예산

- 인력

[표 36] 인력

(단위:명)

연차	1	2	3	4	5	6	평균
인력	4	4	4	4	4	4	4

- 투입예산

[표 37] 지원내용×연도별 시간 절감기간 평균

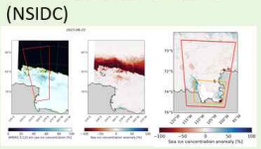
(단위:백만)

연차	1	2	3	4	5	6	합계
인건비	175	175	175	175	140	140	980
직접비	250	250	250	250	200	200	1,400
간접비	75	75	75	75	60	60	420
합계	500	500	500	500	400	400	2,800
주요 장비 및 현장 탐사 소요 추정예산							
예측시스템 자동화체계 개발용 고성능 클러스터							600
예측결과 저장용 초대용량 네트워크 스토리지							400
합계							1,000

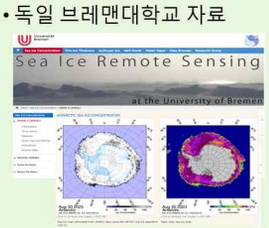
과제 4 지구시스템-해빙모델 결합 남극 해빙 예측시스템 구축

모니터링 (실황)

- 해빙 원격탐사 관측자료
- 미국 국립 빙설자료센터 (NSIDC)

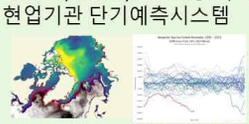


- 독일 브레맨대학교 자료



초단기예측 (~10일)

- ECMWF, NOAA/NSIDC 등 국외 현업기관 단기예측시스템



- 기상청 해양기상정보포털

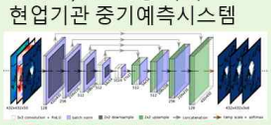


- KIOST 운용해양예보 시스템 (KOOS)



중장기예측 (10일~12개월)

- ECMWF, NOAA 등 국외 현업기관 중기예측시스템



: 북극 해빙 예측에 딥러닝 등 첨단기술 적용 (Andersson *et al.* 2021)

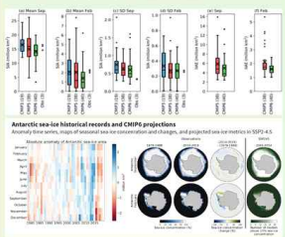
- SIPN South(남부 해빙 예측 네트워크) 프로젝트



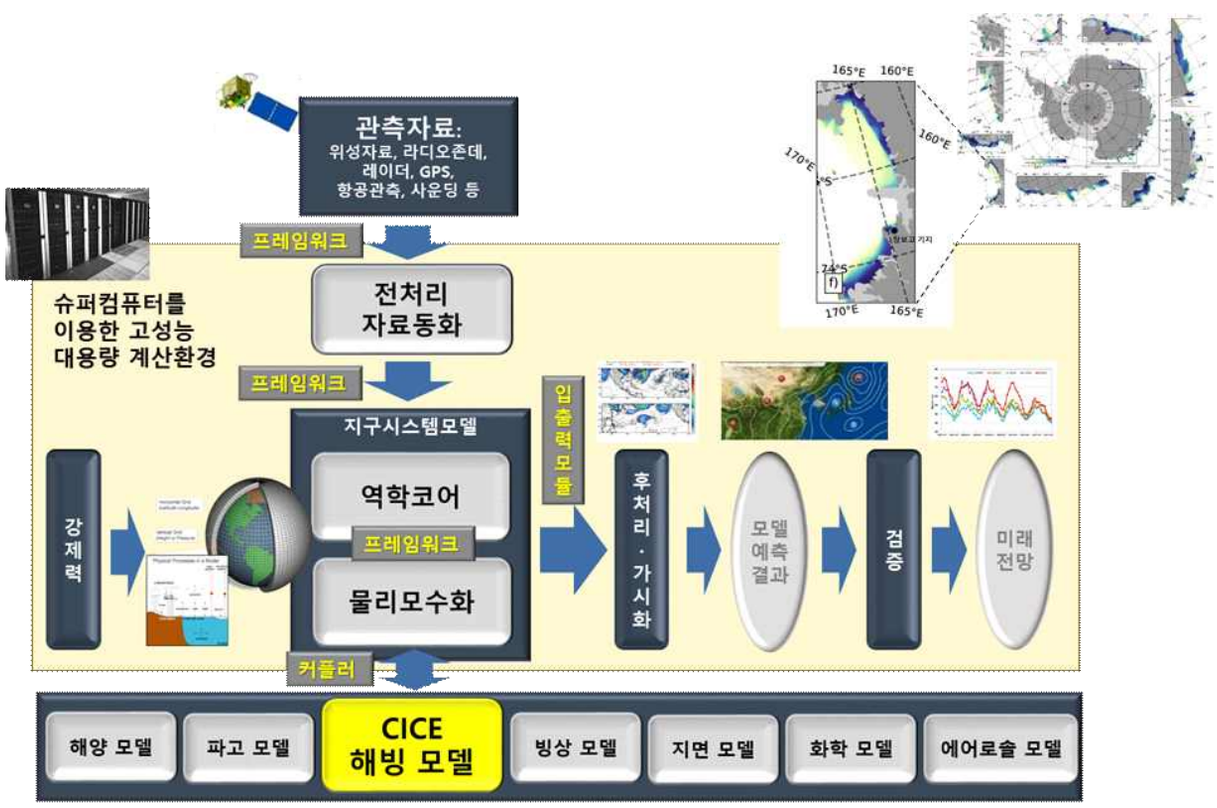
- 지구시스템모델 기반 북극-한반도 통합 재해기상 예측 시스템(KPOPS-Earth)

미래전망 (수년~수백년)

- IPCC 지구시스템모델



- 기상청은 영국기상청의 UKESM 모델 기반 K-ACE 지구시스템 모델로 IPCC 참여
- KIOST는 미국 GFDL의 CM 모델 기반 KIOST-ESM 개발하여 IPCC에 참여



제3절 AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산

과제 1 AI기술 기반 계절예측 자료 생산 체계 구축 및 고도화

1. 과제개요

가 과학적 질문

□ 분과 가설

○ 해빙은 해빙 농도, 해빙 영역, 고착빙 및 유빙의 비율, 리드 및 융빙호와 같이 매우 다양한 특성을 가지고 있으며, 이 특성들은 계절에 따라서 다른 경향을 보임. AI기술을 활용하여 다양한 해빙 특성 예측을 예측할 수 있으며, 역학 모델과 함께 활용되어 시너지를 낼 수 있음.

□ 과학적 질문

○ 최신 AI 기술을 활용하여 남극의 해빙 농도, 해빙 영역과 같은 해빙 특성의 계절 예측이 가능한가?

나 연구의 필요성

□ 최신 AI 기술을 통한 계절에 따른 남극 해빙 특성 예측 필요

○ 최근 급격한 온난화에 따른 남극의 해빙면적의 축소가 매우 뚜렷하며, 이에 따른 해빙 농도 (SIC; Sea Ice Concentration), 해빙 면적 (SIE; Sea Ice Extent) 등의 해빙 특성들 또한 매우 급격하게 변화하고 있음.

○ 해빙 특성들은 온난화 및 해빙의 소멸과 밀접한 관련이 있기 때문에, 해빙 특성들을 예측하는 것은 매우 중요함. 이러한 해빙의 특성은 melting season과 frozing season에 따라서 크게 다를 수 있기 때문에 해빙 특성들을 예측하는 데에 있어서 계절의 변화도 고려되어야 함.

○ 최신 해빙 예측 모델들은 AI기술을 활용하여 좋은 성능을 보이고 있으나, 이는 북극 지역에 해당하며, 남극 지역에서의 AI기술 기반 해빙 특성 예측 모델은 연구들이 비교적 부족한 상황임.

다 연구의 시급성

□ 지구 온난화 영향 아래에서 남극 지역 해빙의 융빙은 빙상붕괴와 같이 급격한 전 지구

해수면 상승을 초래할 수 있는 잠재적 위험 요소임.

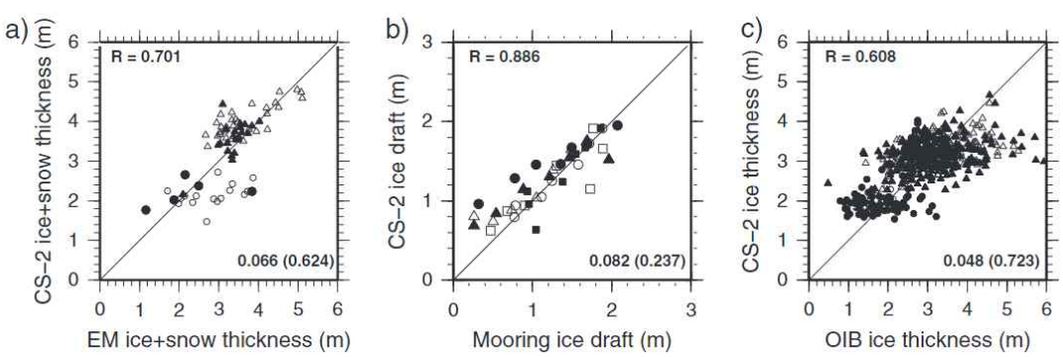
- 남극 해빙 농도 및 면적의 축소는 지구반사도를 감소시키며, 이는 지구의 열흡수를 증가시켜 해빙의 융빙을 가속화 하는 악순환을 반복함.

라 최종목표와의 연계성

- 남극 해빙 특성의 계절예측은 급격한 온난화에 변화하는 지구 환경 모니터링에 있어 필수적임.
  - 최신 해빙모델 및 AI기술들을 활용함으로써 지구 시스템 메커니즘에 대한 이해 증진 및 국가 기후변화 대응 기술력 제고에 기여할 수 있음.
  - 남극 탐사선 최적 항로 계획 수립 및 남극 해빙 유실에 기인한 해양 재난 시나리오 제공으로 해양 재난 예측 정확도 제고에 일조

마 국내외 동향분석 및 시사점

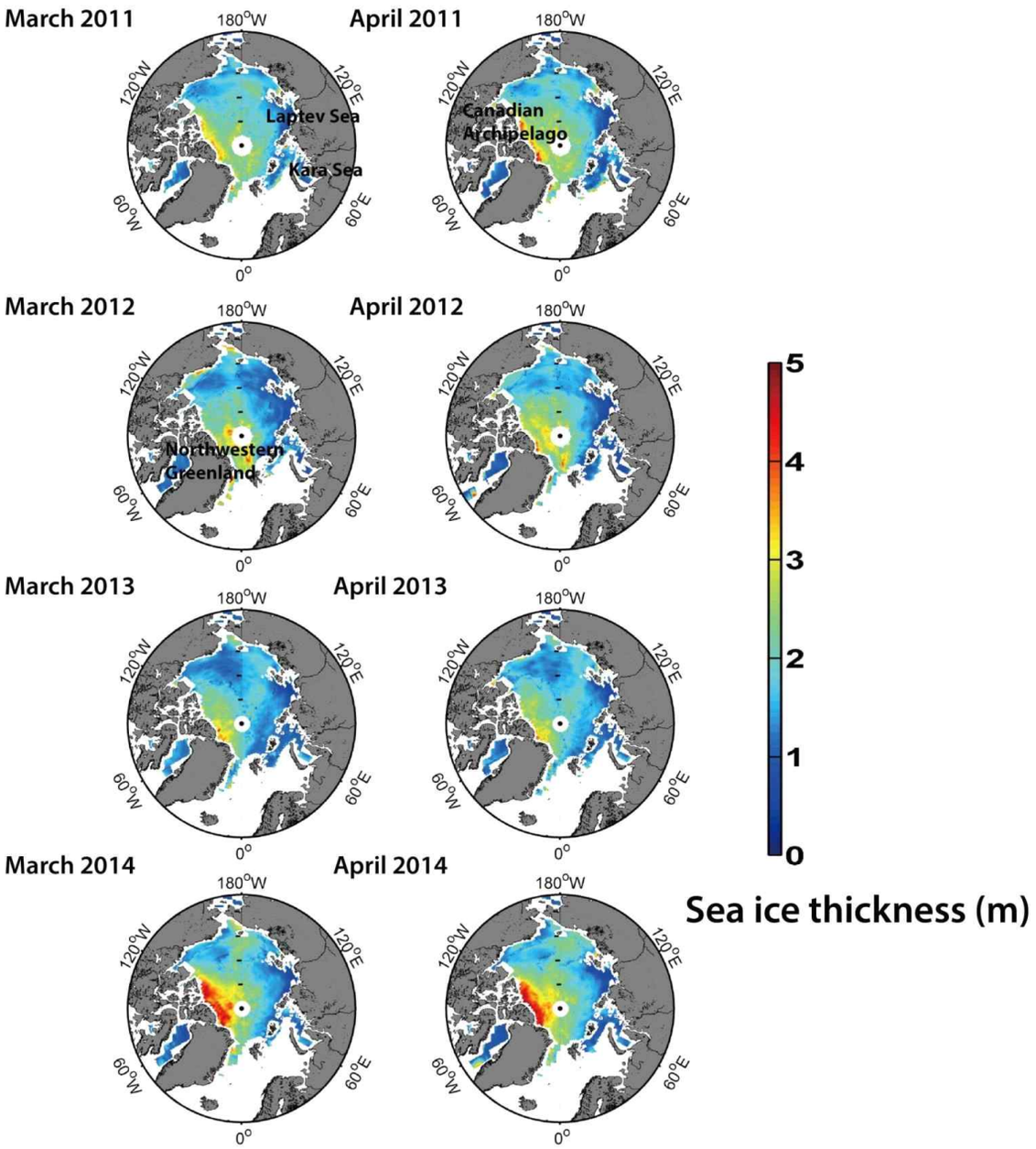
- 국외 동향분석
  - 해빙 특성 연구
    - Laxon et al. (2013)은 CryoSat-2 (CS2) 자료를 이용하여 sea ice thickness (SIT) 및 sea ice volume을 추정하는 연구를 수행함. Sea ice vlolume은 SIT로부터 역산되어 추정되었으며, SIT 결과물은 ICESat 기반의 SIT 산출물과 비교됨. Upward looking sonar (ULS)와 같은 현장관측 자료도 활용하여 검증한 결과 상당히 좋은 성능을 보였음 (그림 1).



[그림 69] CS2 기반 SIT 산출물과 각종 현장관측자료 기반 SIT 관측값과의 비교

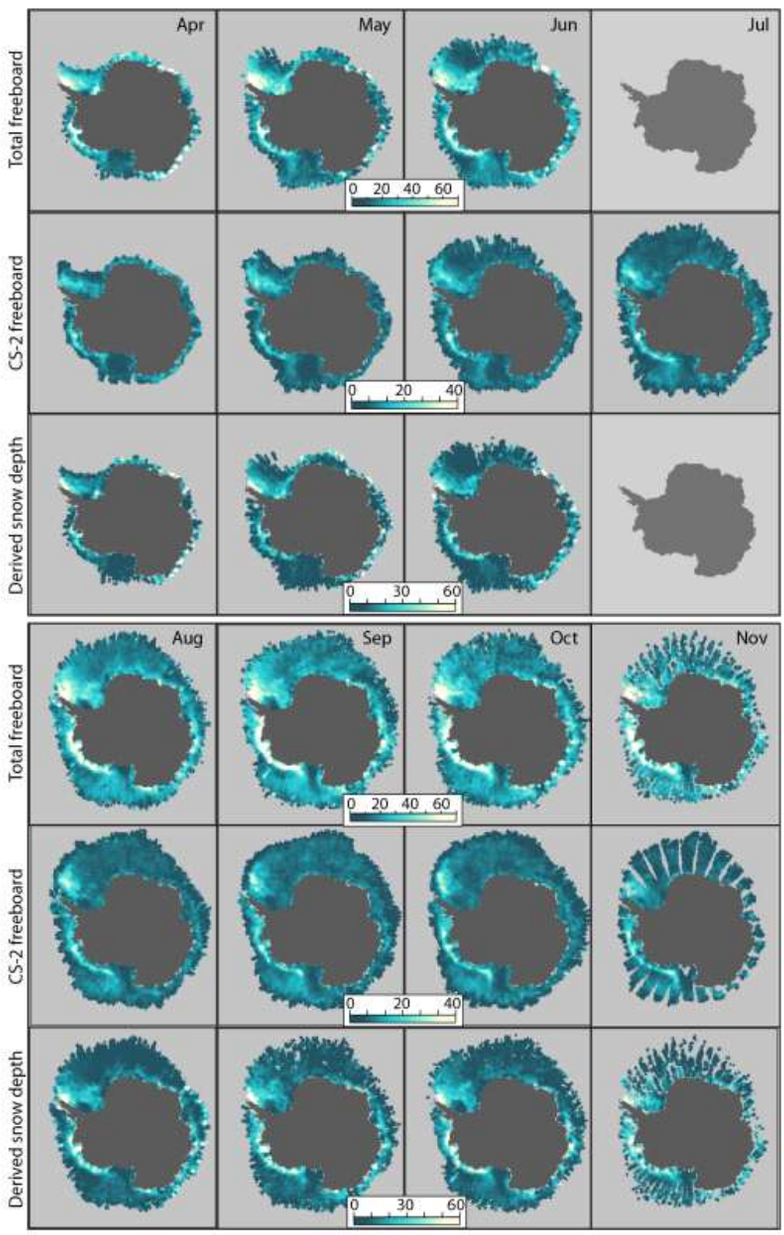
    - Lee et al. (2016)은 다양한 북극 리드의 특성을 반영하기 위해 moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS)영상으로 리드를 파악하였음. 2011-2014년 3,4월의 리드의 특성을 반영할 수 있는 5개의 변수 (STD; Stack Standard Deviation, SS; Stack Skewness, SK; Stack Kurtosis, PP; Pulse Peakiness, Backscatter sigma-0)를 각각

리드, 해빙, 해양에 대해서 추출하여 훈련자료를 생성함. 기계학습 기법인 decision tree와 random forest (RF)를 사용하여 리드를 탐지하고 2011-2014년 3,4월의 북극 해빙 프리보드와 두께를 추정함 (그림 2).



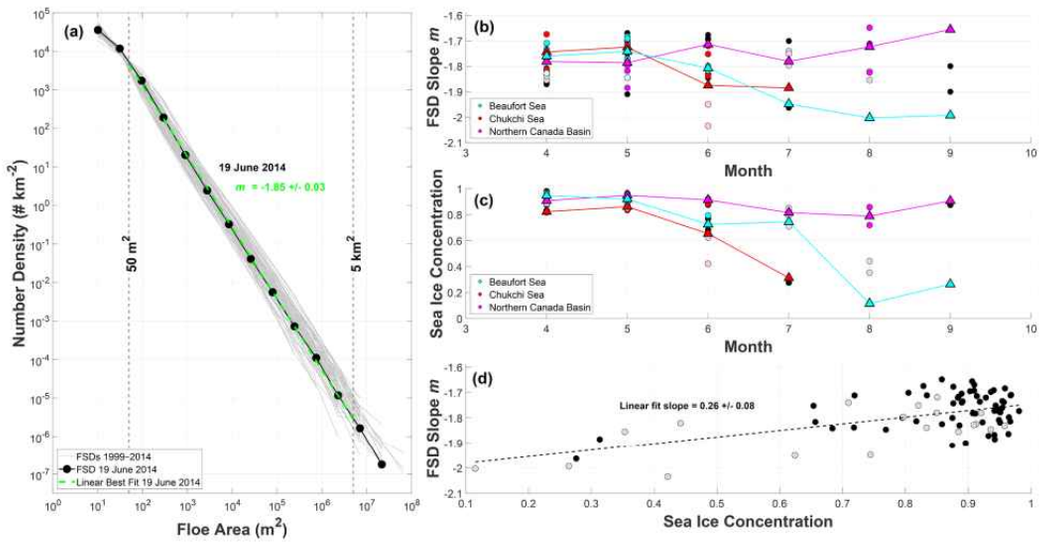
[그림 70] Decision trees 기반의 리드 탐지 방법을 활용하여 산출된 북극 해빙 두께 (Lee et al., 2016).

- Kacimi and Kwok (2020)은 남극 해역에서의 ICESat-2 (IS2)와 CS2 위성을 활용하여 freeboard, snow depth, SIT를 추정하였음. IS2의 snow depth에 영향을 받지 않고 해수면 위의 얼음의 두께를 측정할 수 있는 특징과, CS2의 해수면 위의 눈을 포함한 얼음의 두께를 측정할 수 있는 특징을 활용하여 snow depth와 freeboard, 그리고 SIT를 산출하였음. 또한 계산된 SIT를 활용하여 ice volume도 계산해냈음 (그림 3).



[그림 71] IS2와 CS2 freeboard 및 snow depth의 월별 composite 결과

- Denton and Timmermans (2022)는 고해상도 광학위성을 활용하여 캐나다 Basin 해역에서의 유빙 크기 분포 (FSD; Floe Size Distribution)를 추정하였음. FSD는 특정 범위의 해역 내에서 유빙의 크기와 개수간의 상관관계를 나타내며, 그 관계는 멱함수의 형태로 표현됨. 이 멱함수는 50m2를 기준으로 기울기가 크게 바뀌는 지점이 존재하며, 월별 기울기와 월별 SIC 사이의 상관성도 분석하였음 (그림 4). 해역별 비교를 위해 캐나다 Basin 해역에 더하여 Beaufort 해역과 Chuckchi 해역과 비교하였음. 모든 해역들에서 FSD의 기울기와 SIC가 비슷한 계절 패턴을 보이고 있는 것을 확인할 수 있으며, Beaufort 해역과 Chuckchi 해역의 경우 FSD의 기울기가 감소함과 동시에 SIC도 함께 감소하지만, 캐나다 Basin 해역은 FSD의 기울기와 SIC의 변화가 크지 않은 것을 확인할 수 있음. 이처럼 거리상 비교적 가까운 해역임에도 불구하고 서로 다른 해빙 특성을 가질 수 있음.



[그림 72] FSD 그래프 및 FSD 기울기와 SIC 간의 상관성 그래프

◎ 해빙 특성 예측

- Chi and Kim. (2017)은 national snow ice data center (NSIDC)에서 제공하는 SIC 자료와 딥러닝 기법을 활용하여 SIC 예측을 수행하였음. NSIDC에서 제공하는 SIC 자료는 25km의 공간해상도를 지니고 있으며, 해당 연구에서는 1978년부터 2015년까지의 데이터를 사용하였음. 딥러닝 기법으로는 multilayer perceptron (MLP)와 long and short-term memory (LSTM) 기법을 사용하였으며, autoregressive (AR) 모델도 같이 비교되었음. 그 중 1978년부터 2014년까지의 자료는 딥러닝의 훈련용 데이터 셋으로, 2015년의 자료는 검증 데이터 셋으로 사용되었음. 월별로 root mean square error (RMSE)를 비교해 보았을 때 MLP는 6~19%, LSTM은 6~15%의 RMSE를 나타냈음 (그림 5). 계절로 비교할 경우 두 모델 모두 겨울철에 비해 여름철에 더 높은 RMSE를 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 이는 SIE에서도 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있음. SIE 측면에서 sea ice prediction network (SIPN)의 데이터들과 비교해 보았을 때, 평균치보다 조금 더 높은 예측 결과를 확인할 수 있음 (그림 6).

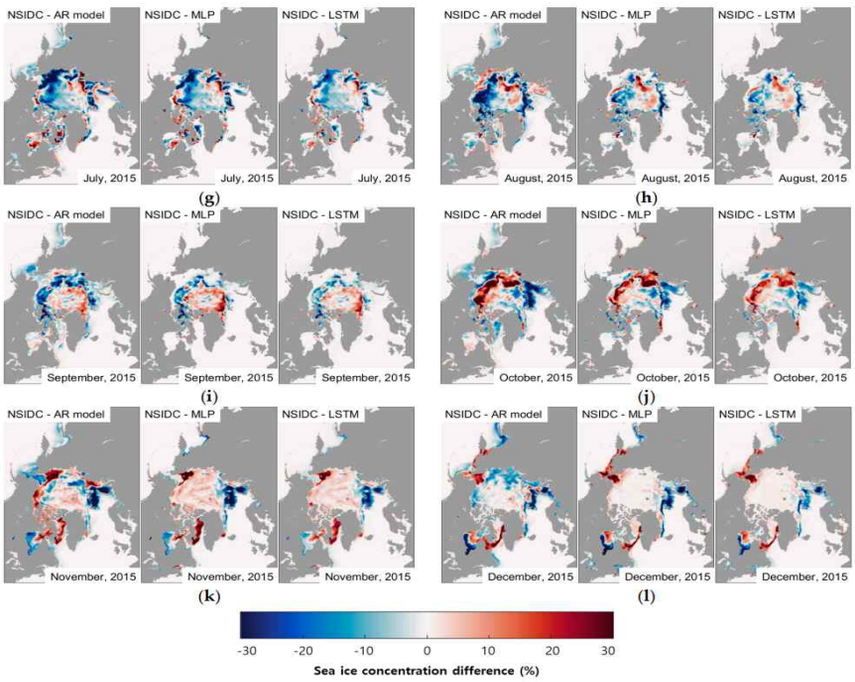


Figure 8. Monthly residual comparisons between the actual and three predicted SICs: (**a**) January; (**b**) February; (**c**) March; (**d**) April; (**e**) May; (**f**) June; (**g**) July; (**h**) August; (**i**) September; (**j**) October; (**k**) November; (**l**) December.

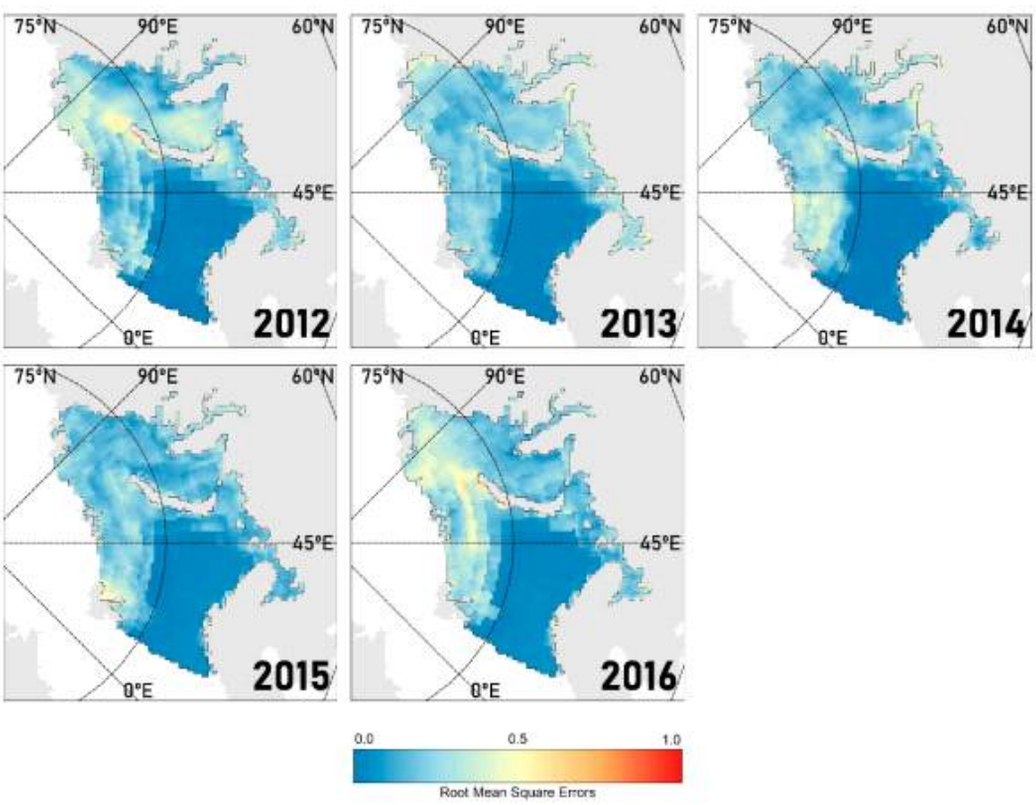
[그림 73] AR, MLP, LSTM 기법을 사용하여 예측한 SIC 결과 지도
(출처 : Chi and Kim. 2017)



Figure 9. Distribution of Arctic Outlook values (August report) for September 2015 extent. (This figure is adapted from the Sea Ice Prediction Network (SIPN) and modified by adding our results.).

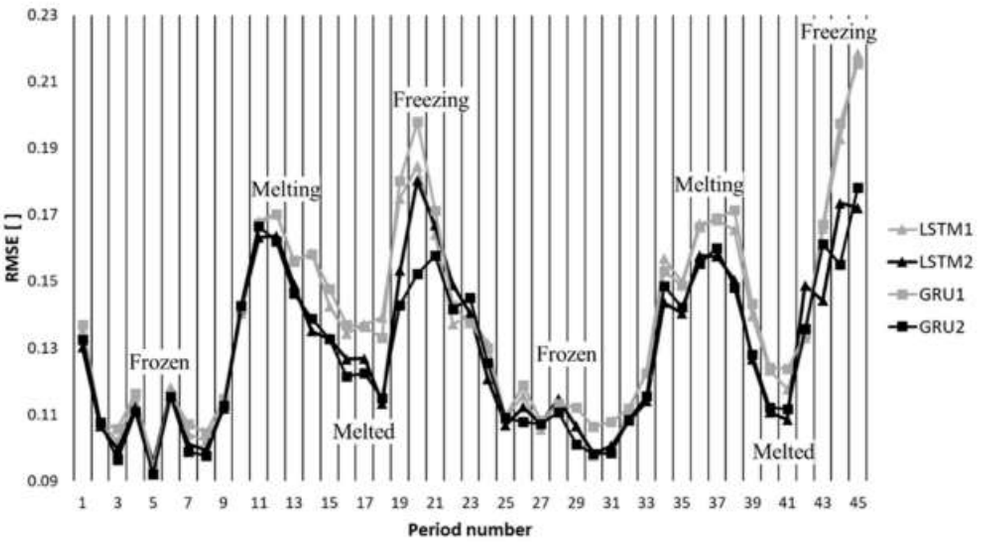
[그림 74] 딥러닝 기반 SIE 예측 결과와 SIPN 데이터셋과의 비교
(출처 : Chi and Kim. 2017)

- Kim et al. (2018)은 Kara 해역과 Barents 해역에 대하여 climate data record (CDR)와 위성자료를 사용하여 bayesian model averaging(BMA), multi linear regression (MLR), MLP를 융합한 모델을 통해 SIC 예측을 수행하였음. Regional climate model (RCM) 데이터들과 비교되었으며, 상관계수 측면에서 0.888, RMSE 측면에서 약 0.4%의 높은 성능을 확인할 수 있음 (그림 7). 하지만 해당 연구는 상대적으로 해빙의 움직임이 덜한 해역에서의 실험이기 때문에 해빙의 움직임이 강한 Beaufort 해역 혹은 Chuckchi 해역 등에 대해서도 검증이 필요할 것으로 사료됨. 또한 겨울철과 여름철이 모두 혼합되어 비교되었기 때문에 해당 계절들을 분리한 뒤에 분석도 동반되어야 할 것으로 보임.



[그림 75] 융합 모델의 연도별 12개월 평균 RMSE 지도

- Choi et al. (2019)은 NSIDC를 통해 special sensor microwave/imager (SSM/I), special sensor microwave imager/sounder (SSMIS), advanced microwave scanning radiometer for EOS (AMSR-E)와 advanced microwave scanning radiometer 2 (AMSR2)의 밝기 온도 값들을 취득한 뒤에 artifical neural netwrok (ANN) 기법을 활용하여 SIC 단기예측을 수행하였음. 2주 예측 결과 ANN의 대조군인 LSTM보다 좋은 성능을 보였으며, 기간을 melting, melted, freezing, frozen의 네 개의 계절로 나누었을 때 melting과 freezing처럼 해빙이 급격하게 변화하는 구간에서 상대적으로 떨어지는 성능을 보임 (그림 8).



[그림 76] RMSE 기준 ANN과 LSTM의 계절별 예측 결과 비교

- Kim et al. (2020)은 NSIDC에서 제공하는 SIC 자료와 convolutional neural network (CNN)를 사용하여 SIC 월별 예측을 수행하였음. Anomaly correlation coefficient (ACC) 측면에서 0.98, normalized RMSE (nRMSE) 측면에서 18.64%의 좋은 성능을 보였음 (그림 9). 입력자료 중에서 SIC자료는 얼음이 두텁게 있는 지역에서 모델에 대한 기여도가 높았으며, sea surface temperature (SST)를 비롯한 기상학적 변수들은 marginal ice zone (MIZ)에서의 예측 성능에 기여하는 것을 확인할 수 있음. 또한 sea ice outlook (SIO) 커뮤니티에서 공유하는 북극지역의 9월 평균 SIE와 비교하였을 때 굉장히 비슷한 결과를 나타냄. 하지만 2012년과 같이 해빙의 면적이 급격하게 감소한 해의 경우 상대적으로 높은 오차를 보여 해당 부분에서 예측 보완에 대한 고민이 필요함.

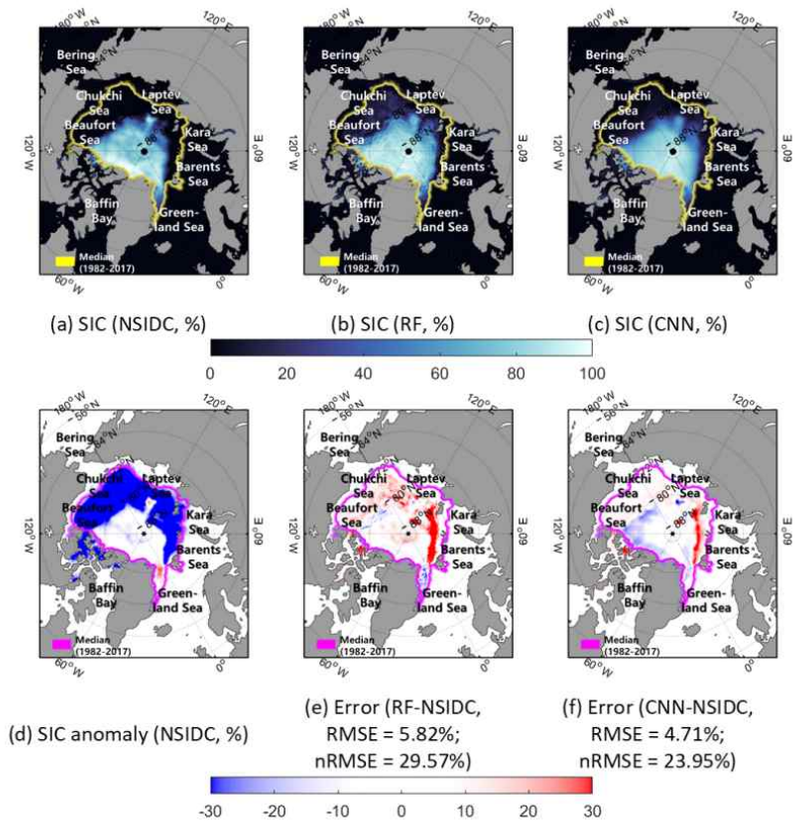
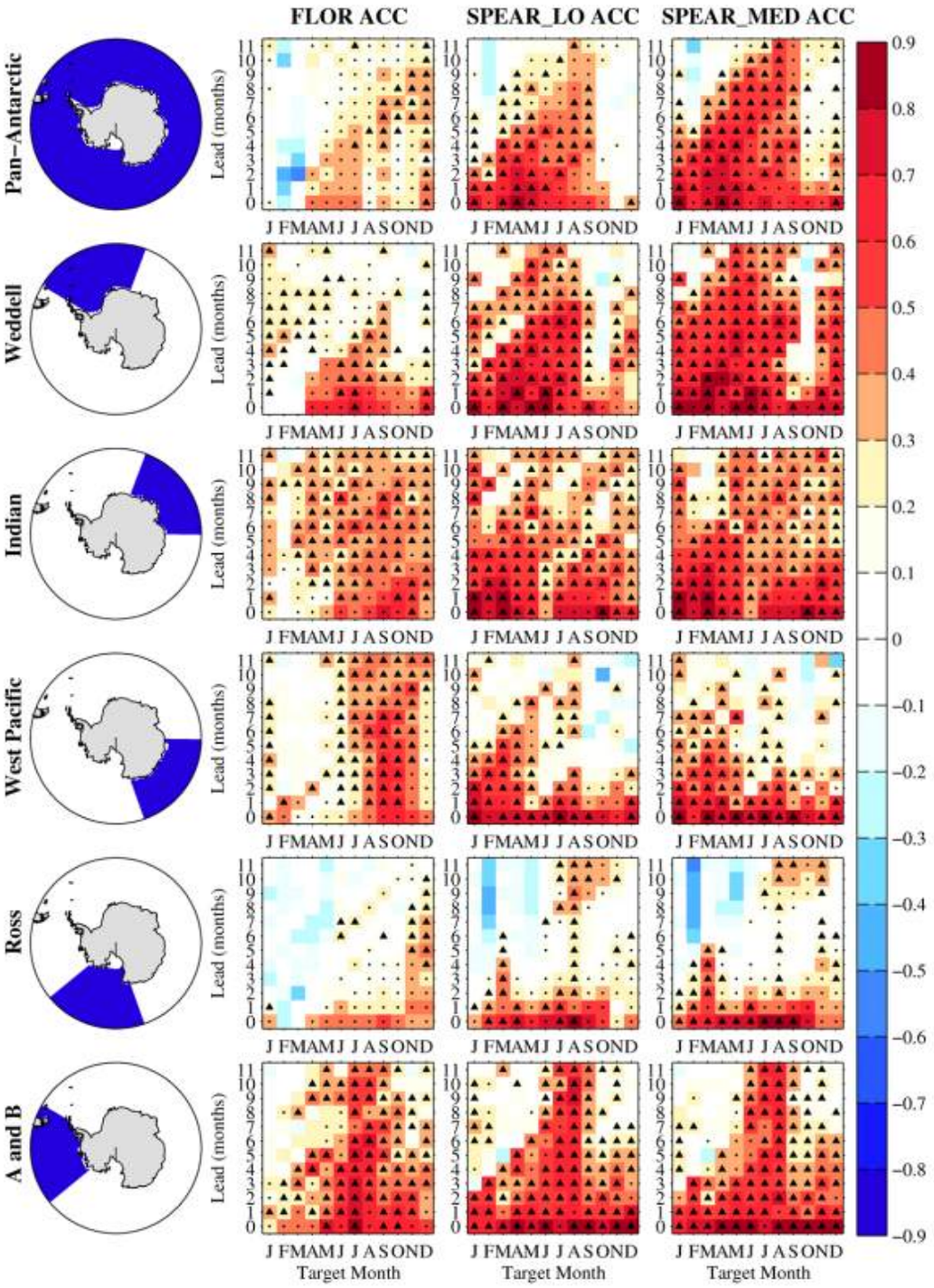


Figure 9. The actual SIC **(a)**, predicted SICs **(b–c)**, SIC anomaly **(d)**, and errors between predicted and the actual SICs **(e–f)** in September 2012.

[그림 77] 2012년 9월에 대한 SIC와 SIC anomaly, CNN 모델의 결과와 오차 지도.

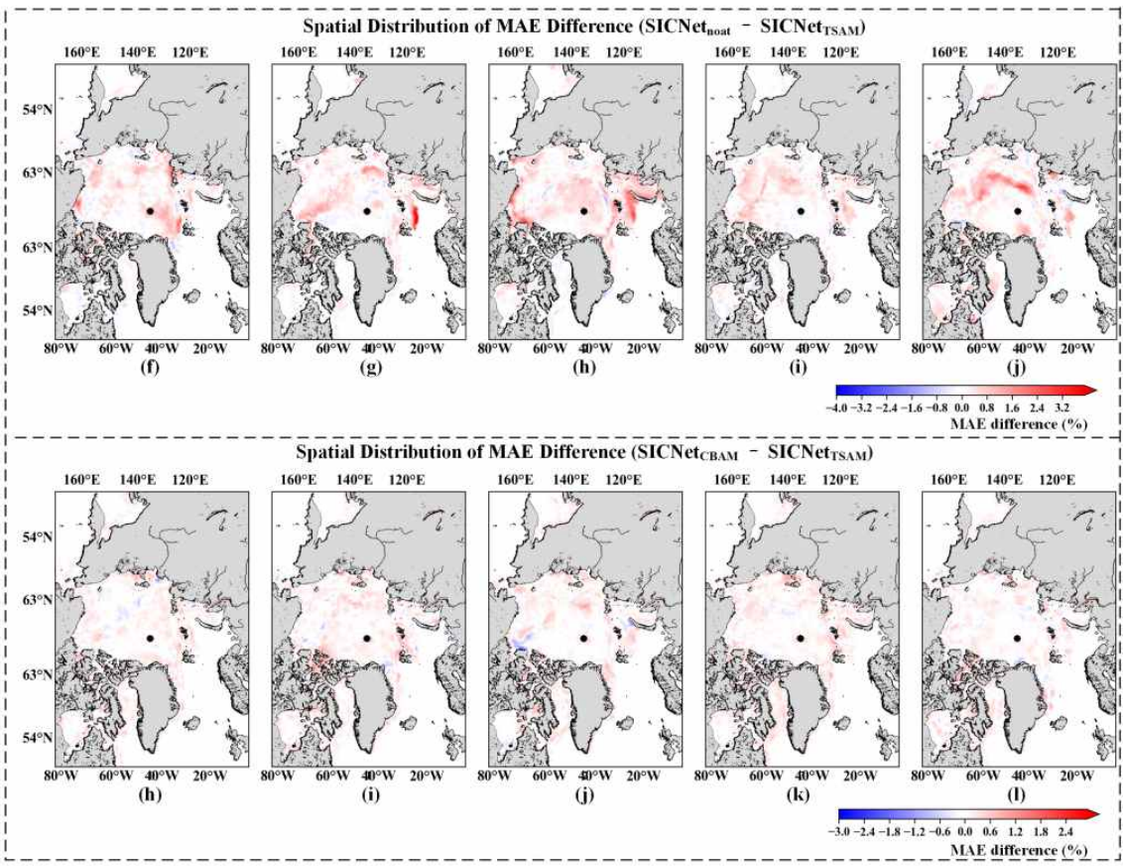
- Bushuk et al. (2021)은 남극 전역에 대해서 Weddell, Ross, Indian 등의 세부 해역으로 나눈 뒤에 각 해역별 SIE, SIT 및 여러 역학모델과의 상관관계를 분석하여 계절예측 및 예측 가능성을 확인하였음 (그림 10). 겨울철 Weddell 해역의 SIE 예측은 11개월까지, 여름철은 9개월까지 예측이 가능할 것으로 사료되며, 남극 해역에서의 해빙 특성 계절예측이 가능할 것으로 판단됨.



[그림 78] 북극 해역별로 분리된 계절별 SIE 예측 가능성 평가 및 lead time에 따른 차이

- REN et al. (2022)은 NSIDC의 SIC를 입력자료로 활용하고, CNN과 residual CNN (ResNet)을 활용하여 SIC를 주단위로 예측하는 SICNet을 개발하였음. 개발된 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 CNN과 LSTM 기반의 SIC 예측모델과의 비교를 수행하였음. 9월 기준 SICNet이 MAE 측면에서 1.83%, CNN, LSTM은 각각 2.50%, 2.42%를 보여 SICNet이 보다 좋은 성능을 보였음. 앞선 Kim et al. (2020)과 다르게 해역별로 오차의

패턴이 다르지 않고 비슷한 것을 확인하였음 (그림 11).

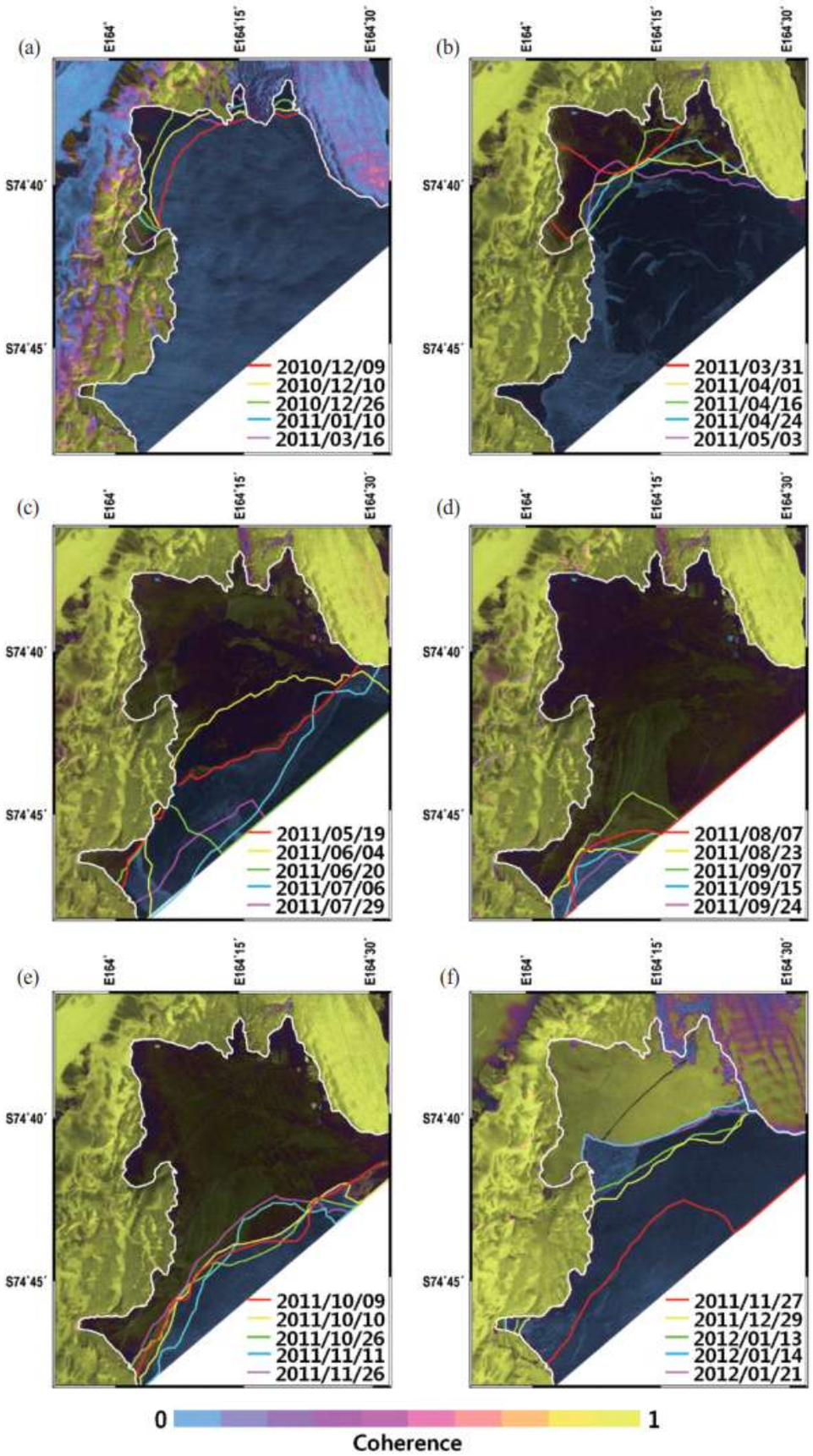


[그림 79] SICNet의 MAE 차이에 대한 시공간 비교 분석

국내 동향분석

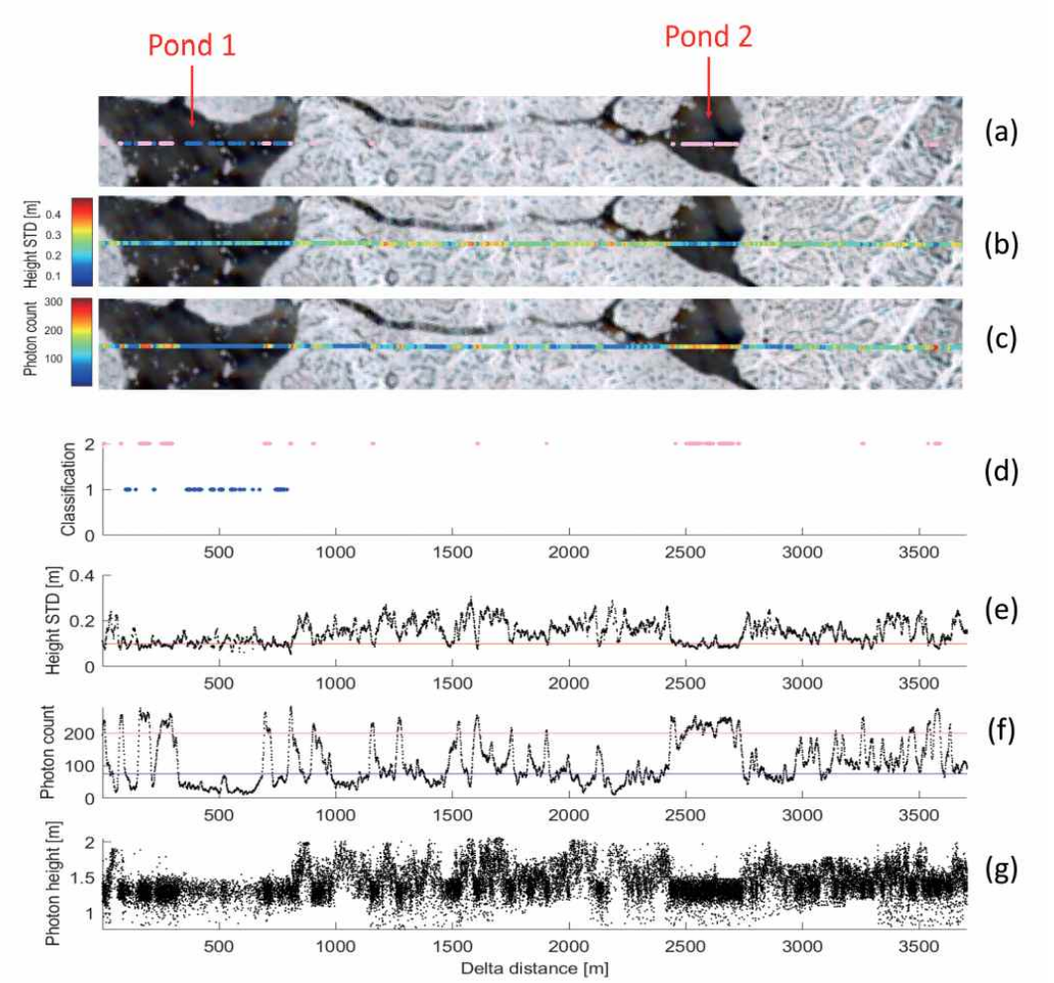
해빙 특성 연구

- 한향선 외 (2015)는 synthetic aperture radar (SAR) 영상을 활용한 interferometric SAR (InSAR)기법을 사용하여 장보고 기지 인근 테라노바 만의 정착해빙에 대한 2011년 연간 변화를 분석하였음. 테라노바 만의 정착해빙 면적은 3월 이후 증가하여 7월의 최대치를 나타냈고 10월부터 감소하는 것이 확인됨 (그림12). 해빙의 면적은 기온의 증감과 약 2개월의 시간차를 가지는 역의 상관관계를 보였으며, 풍속과는 매우 낮은 상관관계를 보임.



[그림 80] InSAR 기법을 활용한 테라노바 만 주변의 정착해빙의 2010년 12월부터 2012년 1월까지의 시간 변화 탐지 결과

- 한대현 외 (2021)는 ICESat-2 고도계 자료를 활용하여 여름철 북극의 융빙호를 탐지 하였음. ICESat-2의 level 2 산출물 중 하나인 photon height 자료를 기반으로 여러 개의 필터를 적용하여 융빙호를 구분하였음. Sentinel-2 광학위성 영상과 비교 분석하여 융빙호로 탐지된 부분이 실제로 융빙호에 해당하는 지에 대한 평가도 동반되었음 (그림13). 하지만 특정 몇 개의 케이스들에 대해서만 검증이 이루어졌기 때문에 알고리즘의 일반화를 위해서는 추가적인 검증이 필요할 것으로 사료됨.



[그림 81] Sentinel-2 이미지 상에서의 ICESat-2의 이동경로 및 photon height에 따른 융빙호 탐지 결과

문제점 및 시사점

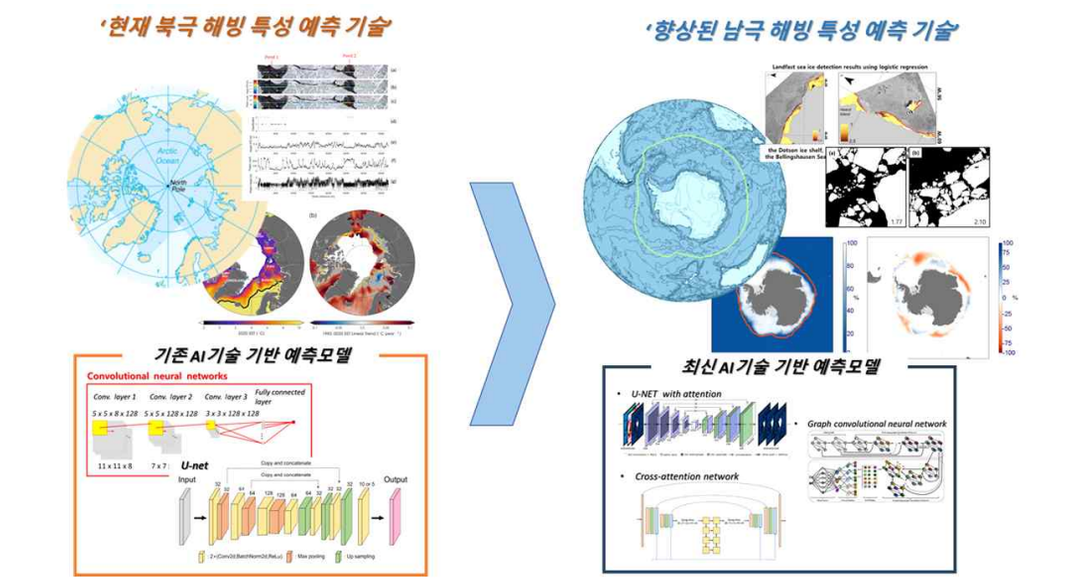
- 남극 지역 해빙 특성들에 대하여 계절예측의 가능성에 대한 평가가 이루어져 왔고, 일정 수준의 성능을 보여주었으나, 아직 계절예측에 대한 연구는 진행중인 상황임. 특히 AI기술 기반의 예측 연구들은 많이 수행되지 않았으며 국내에서의 해빙 특성 예측에 대한 연구는 매우 부족한 상황임.
- 대부분의 AI기술 기반 해빙 특성 예측 연구들은 북극해역에 치중되어 있기 때문에, 북극에서의 AI기술 기반 해빙 특성 예측 모델 개발을 남극 지역에 이식 적용하여 평가 및 분석이 필요할 것으로 사료됨.

2. 핵심과제 연구개발내용

가 과학적 질문

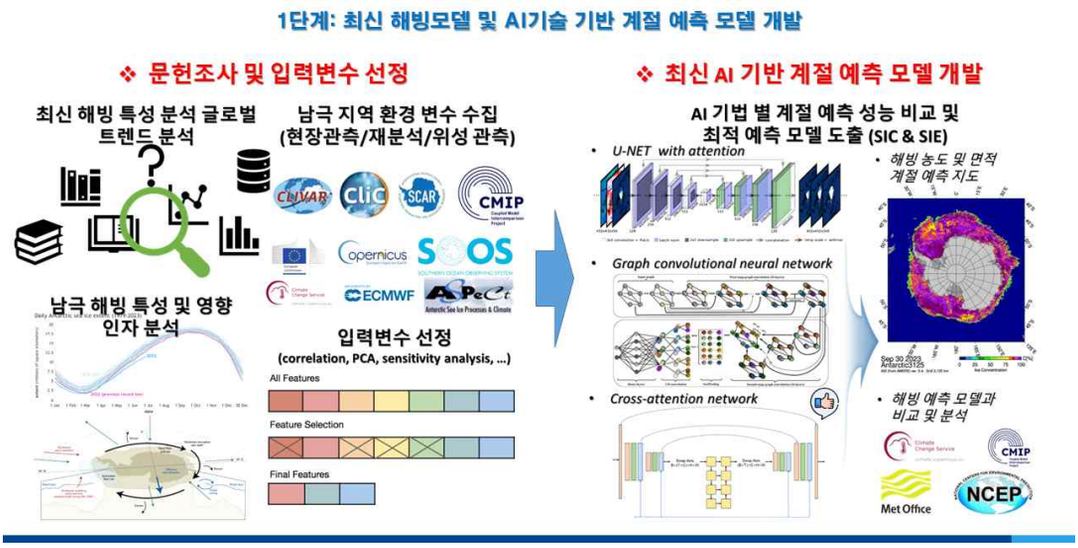
- (분과가설) 해빙은 해빙 농도, 해빙 영역, 고착빙 및 유빙의 비율, 리드 및 융빙호와 같이 매우 다양한 특성을 가지고 있으며, 이 특성들은 계절에 따라서 다른 경향을 보임. AI기술을 활용하여 다양한 해빙 특성 예측을 예측할 수 있으며, 역학 모델과 함께 활용되어 시너지를 낼 수 있음.
- (질문) 최신 AI 기술을 활용하여 남극의 해빙 농도, 해빙 영역과 같은 해빙 특성의 계절 예측이 가능한가?

나 연구 목표

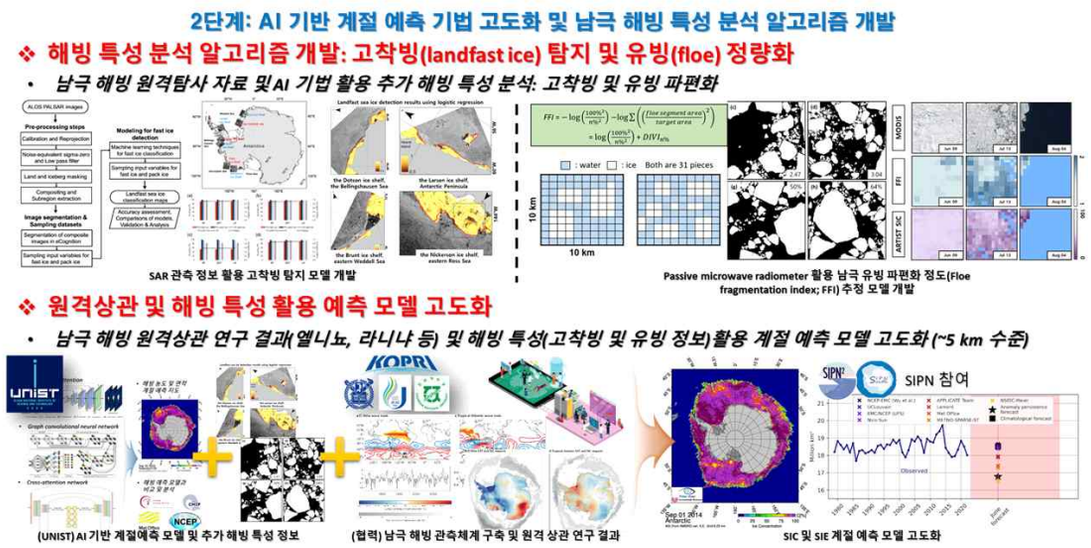


[그림 82] 본 연구에서 제시하는 핵심 연구 방향성

- (1단계) 역학 예측 모형의 구조적 오차를 파악하고, 최신 AI기술 기반 해빙 계절 예측 모델을 개발 (그림 15)
- (2단계) AI기반 해빙 예측 모델의 고도화 및 다른 기후변화 요소와의 상관성 분석 (그림 16)



[그림 83] 최신 해빙모델 및 AI기술 기반 계절예측 모델 개발 연구 목표 (1단계)



[그림 84] AI기술 기반 계절예측 기법 고도화 및 남극 해빙 특성 분석 알고리즘 개발 (2단계)

다 핵심 연구 주제

- (역학 예측 모형 구조적 오차 파악) 최신 해빙 특성 분석의 글로벌 트렌드를 분석하고, 남극지역의 현장관측. 재분석자료, 위성관측자료를 비롯한 환경변수를 수집. 역학 예측 모델을 군집 분석하여 지역별, 계절별, 사례별 공통된 오차 분석.

- (딥러닝 기반 남극 해빙 예측 모형 구축) 북극 해역에 기활용된 바 있는 ConvLSTM, U-NET 등의 딥러닝 기법을 남극 해빙 예측에 활용. 고착빙 및 유빙 비율과 같은 북극과 남극 해역의 구조적 차이 고려.

- (최신 AI기술 기반 계절예측 모델 개발 및 해빙 특성 분석) Attention 기법이 적용된 U-NET, Graph convolutional network (GCN)을 비롯한 최신 AI 기법 기반 계절 예측 모델 개발. AI 기법별 계절 예측 성능 비교 및 최적 예측 모델 도출 (SIC, SIE).
- (하이브리드 예측시스템 개발) 역학 예측 모형과 딥러닝 모델간의 앙상블을 통한 하이브리드 해빙 특성 예측 시스템 개발. 딥러닝 모델에 역학을 고려하는 physically constrained AI 모델 개발.
- (지역별 해빙 예측 상세화 시스템 구축) 남극 해역별 및 해빙 특성별 시공간 패턴분석 및 고착빙 탐지 및 유빙 정량화 등의 추가 해빙 특성 분석
- (원격상관 및 해빙 특성 활용 계절예측 모델 고도화) 남극 해빙 원격탐사 자료 및 추가 해빙 특성 (고착빙 및 유빙 파편화)에 AI 기법 적용. 남극 해빙 원격상관 연구 결과 (엘니뇨, 라니냐 등) 및 해빙 특성 활용 계절 예측 모델 고도화.

라 기대효과

- (기후예측 역량 증진) 남극 해빙 특성 예측자료 자체 생산으로 지구시스템 메커니즘에 대한 이해 증진 및 국가 기후변화 대응 기술력 향상에 기여.
- (탄소배출 저감 및 어업활동 활성화) 남극 탐사선 최적 항로 계획 수립 및 어선의 안전한 조업과 어장 예측에 도움.
- (해양 안전체계 구축) 남극 해빙 유실에 기인한 해양 및 연안 재난 시나리오 제공으로 해양재난 예측정확도 제고에 일조.

3. 추진 계획

가 연차별 로드맵

연구문제 해결 로드맵

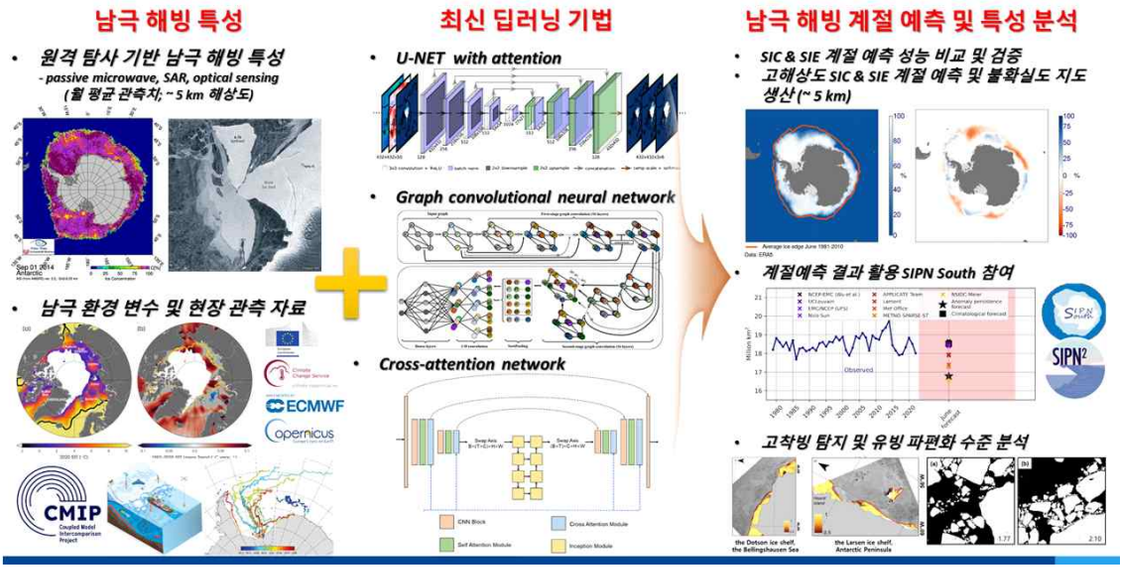
[표 38] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	최신 AI 기술을 활용하여 남극의 해빙 농도, 해빙 영역과 같은 해빙 특성의 계절 예측이 가능한가?						▪ 최신 해빙모델 및 AI기술 기반 계절예측 자료 생산 체계 구축 ▪ 계절예측 자료 생산 체계 성능개선
AI기술 기반 해빙 특성 예측	최신 해빙모델 및 AI기술 기반 계절예측 자료 생산 체계 구축			계절예측 자료 생산 체계 성능 개선			

기술 로드맵

[표 39] 기술 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
기존 해빙 특성 예측 모델 파악	역학 예측 모형 구조적 오차 파악			하이브리드 예측시스템 개발			▪ 최신 해빙모델 및 AI기술 기반 계절예측 자료 생산 체계 구축 ▪ 계절예측 자료 생산 체계 성능 개선 ▪ 역학 예측 모델 및 AI 기반 모델간의 오차 파악 ▪ 예측된 해빙 특성과 기후변화 인자들간의 상관성 분석
남극 해빙 예측 모델 구축 및 최적화	딥러닝 기반 남극 해빙 예측 모형 구축			지역별 해빙 예측 상세화 시스템 구축			
AI기술 기반 해빙 특성 예측 모델 개발 및 고도화	최신 AI기술 기반 계절예측 모델 개발 및 해빙 특성 분석			원격상관 및 해빙 특성 활용 계절예측 모델 고도화			

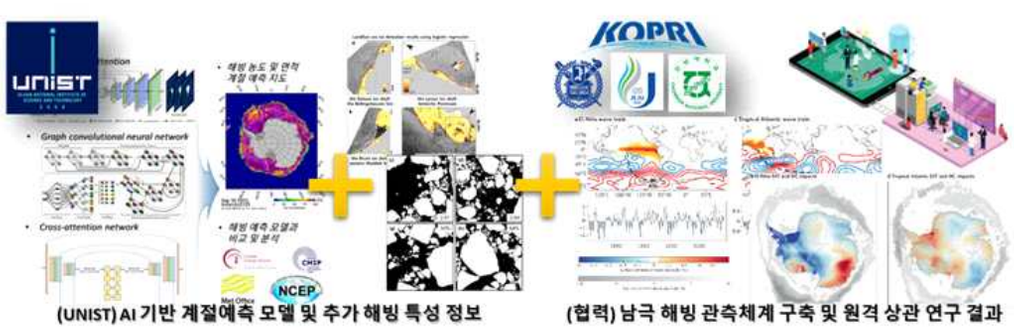


[그림 85] AI기술 기반 남극 해빙 계절 예측 모델 개발 및 고도화 연구 흐름도

나 현장탐사계획

다 국내외 협력연구방안

- (미국 Colorado 대학교) ICESat-2, SAR 등을 활용한 남극 해빙 특성 예측 연구 교류
- (강원대학교) 남극 해빙과 빙붕의 상관성에 관한 연구 자문
- (서울대학교) 역학모델 오차 분석 관련 연구 자문
- 국제학회 참석을 통한 국외 전문가와의 적극적인 교류 수행



[그림 86] 304 국내외 협력 방안

라 인력 및 투입예산

인력

[표 40] 인력

(단위:명)

연차	1	2	3	4	5	6	평균
인력	8	8	8	8	8	8	8

투입예산

[표 41] 지원내용×연도별 시간 절감기간 평균

(단위:백만)

연차	1	2	3	4	5	6	합계
인건비	275.051	275.051	314.344	275.051	275.051	275.051	1688.599
직접비	275.051	275.051	314.344	275.051	275.051	275.051	1688.599
간접비	149.898	149.898	171.312	275.051	149.898	149.898	922.802
합계	700	700	800	700	700	700	4300
주요 장비 및 현장 탐사 소요 추정예산							
AI 기술 개발용 서버 구축							337,919,800 (원)

과제 2 AI 기반 남극 해빙 자료 동화 기법 개발

1. 과제개요

가 과학적 질문

분과 가설

- 남극 해빙 변수의 중장기 예측을 위해서는 남극 빙상동역학모형의 해빙 변수 초기화 과정이 필수적임. 역학 모형 해빙 변수들이 딥러닝 기법을 활용하여 성공적으로 초기화된다면 역학 모형 기반 남극 빙붕 및 빙상 붕괴의 중장기 예측을 통해 급격한 온난화에 대응할 수 있는 기술이 확보될 수 있음.

과학적 질문

- 딥러닝 기반 남극 해빙 자료 동화 시스템은 역학모델의 변수간 균형을 고려하며 현실적으로 생성되는가?

나 연구의 필요성

딥러닝 기반 해빙 변수 자료 동화 기법의 필요성

- 빙상동역학모델을 이용한 중장기 예측을 위해서는 위성 및 실측의 정보가 반영된 해빙 변수들의 초기장 (initial condition) 이 필요함. 초기화 과정을 위한 자료 동화 기법은 역학모형에 기반하여 개발·운용되고 있으나, 과도한 컴퓨팅 자원 소모 및 운용 요구 시간으로 인해 개발이 정체되고 있음. 한편, 딥러닝 기법은 빠른 연산 속도와 예측 정확도를 보이며 기존의 역학모형을 대체해 나아가고 있어 (Bi et al., 2022), 딥러닝 기반의 자료 동화 시스템 개발의 필요성 역시 대두되고 있음 (Arcucci et al., 2021). 아직까지 자료 동화 연구에 적용된 바 없으나, Image inpainting 기법에 활용되는 딥러닝 기법들은 비격자 데이터를 격자화 할 수 있을 것으로 기대함 (Kadow et al., 2020).

다 연구의 시급성

- 최근 급격한 지구 온난화로 인해 남극은 상시 빙상붕괴의 위험성이 있으며, 이를 정확히 예측하지 못한다면 남극 기지 운용에 큰 위험 요소가 될 수 있음.
- 남극 해빙 면적 및 두께에 대한 초기장 생성 자료 동화 시스템이 없다면 개발된 빙상동역학모델을 예측 시스템으로 활용할 수 없음.

라 최종목표와의 연계성

- 빙상동역학 모델 시스템의 초기장을 생성할 수 있는 자료 동화 기법 개발은 역학 모형을 통한 남극 해빙 및 해수면 변동 중장기 예측 정확성 제고의 핵심 요소

마 국내외 동향분석 및 시사점

국외 동향분석

- 전지구지구시스템모형에 기반한 다수의 예측 모형 결과가 SIPN project 에 게시되고 있음 (Massonnet et al., 2023). 남극 해빙 면적 및 두께 예측 성능이 검증된 바 있음 (Bushuk et al., 2021). 남극평균 해빙 면적은 여름철예측 시작의 경우에 대해 11개월, 가을철 예측 시작의 경우에 대해 2개월 미래에 대해 유의미한 예측 성능을 가짐. 하지만, 어느 기관에서도 딥러닝 기반의 자료동화 시스템을 활용하고 있지 않음.

국내 동향분석

- 북극 해빙 면적 및 두께 예측은 중위도에의 원격 상관이 알려지면서 개발된 바 있으나, 남극 해빙 예측을 위한 초기화 시스템 개발은 국내에서 이루어진 바 없음.

문제점 및 시사점

- 국제적으로 활용되고 있는 전지구역학모형에 기반한 예측 시스템 구동은 많은 연산 자원을 요구함. 이로 인해 고해상도 모형에 대한 초기화 과정은 너징등 단순한 기법을 활용함. 이는 역학모형기반 초기화 기법이 개발되더라도 연산 자원의 한계로 활용되고 있지 못함을 의미함. 초기화 기법으로 활용되고 위해서는 빠른 구동이 가능한 자료 동화 기법의 개발이 시급함을 의미함.

2. 핵심과제 연구개발내용

가 과학적 질문

- (분과가설) 남극 해빙 변수의 중장기 예측을 위해서는 남극 빙상동역학모형의 해빙 변수 초기화 과정이 필수적임. 역학 모형 해빙 변수들이 딥러닝 기법을 활용하여 성공적으로 초기화된다면 역학 모형 기반 남극 빙붕 및 빙상 붕괴의 중장기 예측을 통해 급격한 온난화에 대응할 수 있음.
- (질문) 딥러닝 기반 남극 해빙 자료 동화 시스템은 역학모델의 변수간 균형을 고려하며 현실적으로 생성되는가?

나 연구 목표

- 딥러닝 기반의 남극 해빙 변수 자료 동화 시스템을 개발하여, 위성 및 현장 관측 자료를 활용한 빙상동역학모델의 초기장을 생산한다.

다 핵심 연구 주제

- (부분 컨볼루션 딥러닝 기반 비격자 관측 연산자 개발) 비격자 관측 자료를 처리할 수 있는 딥러닝 기법 개발 및 적용
- (생성형 딥러닝을 활용한 남극 해빙 면적 자료 동화 시스템 개발) Generative Adversarial Network (GAN) 혹은 Diffusion 딥러닝 기법을 활용한 남극 해빙 면적 자료 동화 시스템 개발
- (생성형 딥러닝을 활용한 남극 해빙 다변량 자료 동화 시스템 개발) Generative Adversarial Network (GAN) 혹은 Diffusion 딥러닝 기법을 활용한 남극 해빙 면적 및 두께 다변량 (multivariate) 자료 동화 시스템 개발
- (AI 기반 다채널 위성/실측 자료 동화 시스템 개발) 다채널 위성 자료 및 실측 자료를 동화할 수 있는 딥러닝 체계 개발

라 기대 효과

- 빙상동역학모델을 활용한 중장기 예측 시스템 개발에 기여
- 최신의 딥러닝 기법을 활용한 남극 대륙 및 전지구 기후 예측모델 정확도 향상에 기여

3. 추진 계획

가 연차별 로드맵

- 연구문제 해결 로드맵

[표 42] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	비격자 관측을 처리할 수 있는 딥러닝 기법을 개발할 수 있는가?						▪ 비격자 관측 처리 체계 구축 ▪ 다채널 위성/실측 자료 처리 체계 구축 ▪ 격자화된 관측 결과 비교 분석을 통한 성능 검증
시스템 개발	부분 컨볼루션 딥러닝 기반 비격자 관측 처리 체계 구축			AI 기반 다채널 위성/실측 자료 처리 체계 구축			

[표 43] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	딥러닝 기반 남극 해빙 자료 동화 시스템은 역학모델의 변수간 균형을 고려하며 현실적으로 생성되는가?						▪ 딥러닝 기반 남극 해빙 면적 및 해빙 두께 자료 동화 기법 개발
시스템 개발	딥러닝 기반 해빙 면적 자료 동화 시스템 구축			딥러닝 기반 해빙 변수 다변량 자료 동화 시스템 구축			

기술 로드맵

[표 44] 기술 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
딥러닝 기반 비격자 관측 처리 체계 구축	부분 컨볼루션 딥러닝 기법 적용			3D 컨볼루션 딥러닝 기법 적용			▪ 부분 컨볼루션, 3D 컨볼루션 기법을 통한 비격자 관측 처리 체계 구축 ▪ 생성형 딥러닝. Recurrent 딥러닝 기반 남극 해빙 자료 동화 기술 개발
딥러닝 기반 자료 동화 시스템 개발	생성형 딥러닝 기반 해빙 면적 동화 기술 개발			생성형 딥러닝 기반 다변량 자료 동화 기술 개발			

나 현장탐사계획

해당 사항 없음

다 국내외 협력연구방안

(MPI-Security and Privacy) 딥러닝 기법 개발 기술 자문

(한양대 인공지능융합대학원) 딥러닝 기법 개발 기술 자문

(NASA/GSFC) 해빙 자료 동화 개발 기술 자문

라 인력 및 투입예산

인력

[표 45] 인력

(단위:명)

연차	1	2	3	4	5	6	평균
인력	5	5	7	7	7	7	6.3

투입예산

[표 46] 지원내용×연도별 시간 절감기간 평균

(단위:백만)

연차	1	2	3	4	5	6	합계
인건비	140	140	140	180	180	180	960
직접비	180	180	180	140	140	140	960
간접비	80	80	80	80	80	80	480
합계	400	400	400	400	400	400	2,400

주요 장비 및 현장 탐사 소요 추정예산	
고성능 GPU (NVIDIA A100)	450백만원/6년
고성능 CPU cluster	120백만원/6년
레이드 디스크 어레이	90백만원/6년
합계	660백만원/6년

과제 3 남극 해빙 계절예측 개선 및 남극 해빙의 전지구적 영향 이해

1. 과제개요

가 과학적 질문

분과 가설

- 남극의 해빙 변동은 다양한 기후인자들에 영향을 받고, 이를 고려하여 남극 해빙의 예측성을 개선할 수 있다.
  - 대기 순환 패턴의 변화, 특히 남극진동(Antarctic Oscillation) 또는 남방진동(Southern Annular Mode, SAM)은 남극 해빙의 분포와 면적에 영향을 줌. SAM의 변화는 바람 패턴과 해양 순환에 변화를 가져와 해빙의 생성 및 분포에 영향을 준다고 알려짐.
  - 남극 주변의 해양 순환도 해빙 변동에 중요한 역할을 함. 예를 들어, 따뜻한 해류가 남극에 가까워지면 해빙이 녹을 수 있음.
  - 해수의 온도와 염분도는 해빙의 형성과 융해 과정에 영향을 미침. 일반적으로 차가운 저염분의 물은 해빙 형성을 촉진하는 반면, 따뜻하고 고염분의 물은 해빙의 융해를 가속화할 수 있음.
  - 테라노바만 봄철 해빙 계절 예측에 남극내륙에서 연안으로 부는 겨울철 바람이 중요한 역할을 함.
- 남극의 해빙 변동의 대기의 온도 구조 및 순환을 바꾸어 전지구 기후에 영향을 줄 수 있다.
  - 해빙의 분포는 극 전선의 위치와 강도에 영향을 줄 수 있음. 극 전선은 차가운 극지방 공기와 더 따뜻한 중위도 공기 사이의 경계를 형성하는데, 해빙 변동은 이 경계의 변화를 일으키고, 대기 순환 패턴, 특히 제트기류의 변화를 초래할 수 있음.
  - 남극 해빙의 변동은 해양과 대기 사이의 열과 수분 교환에도 영향을 미침. 해빙이 형성되거나 녹을 때, 이 과정은 대기 중의 습도와 온도, 그리고 구름 형성에 영향을 줄 수 있고, 이러한 변화는 다시 대기 순환에 영향을 미칠 수 있음.
  - 남극 해빙 변동에 의한 남극해 주변의 온도 구조변화는 대기 원격 상관을 통해 다양한 기후 현상에 영향을 줄 수 있음.

과학적 질문

- 남극의 해빙 변동은 예측 가능한가?
- 남극의 해빙 변동은 전지구에 어떠한 영향을 미치는가?
- 테라노바 만 해양-대기 및 해빙-대기 상호 작용의 계절별 특성은 무엇이며, 해빙 두께에 어떻게 영향을

미치는가?

- 봄철 해빙 두께에 영향을 미치는 요인은 무엇이며, 봄철 해빙의 상대적 두께에 대한 예단 인자로 사용 가능할까?

나 연구의 필요성

현재 역학모형의 한계 및 인공지능 예측의 필요성

- 현재의 역학 모형을 이용한 남극 해빙 계절 예측은 상당한 한계를 가지고 있음. 남극지역기후요소및 해빙 모형 모수화의부정확성에 근거한다고 알려짐.
- 딥러닝을이용한 남극 해빙 예측은 계절 규모에서 관측의 샘플링 이슈로 매우 도전적인 과제임
- 역학 모형과 딥러닝을결합한 하이브리드방식의 남극해빙예측 시스템 개발이 과도기 기간의 최적의 대안이 될 수 있음

남극 해빙과 다른 기후변동과의 상호작용을 이해하는 것은 전지구 기후변화에 매우 중요한 이슈임.

- 남극의 해빙은 지구온난화 뿐만 아니라, 남극해의 대기-해양 상호작용, 열대 기후 변동에 의한 원격상관등다양한 요소에 의해 영향을 받고 있음.
- 남극해빙예측의 정확도를 높이기 위해서는 다양한 기후요소의 영향을 정량적으로 평가하는 것이 매우 중요함.
- 남극의 해빙 감소는 따뜻한 해양의 열을 대기중으로 대량 방출시켜 대기 순환에 영향을 주고, 전지구기후에 영향을 줄 수 있음.
- 온난화 시기의 남극 해빙의 변동성이 더 커질 것으로 예상되며, 이에대한 전지구영향을 평가하는 것이 필요함.

테라노바 만 해빙 변동의 해양-대기 및 해빙-대기 상호작용 과정 이해를 통해 지역 해빙 예측의 불확실성 최소화 필요

- 현재 남극 기후모델은 높은 공간분해능에도 불구하고 관측자료 부족과 연안폴리냐의 가변적인 해빙 및 저층 대기 구조 예측 불확실성으로 대기-해양 상호작용 모의에 어려움이 존재함(Wenta & Cassano, 2020; Guest, 2021).

다 연구의 시급성

- 최근 남극 해빙의 변동성이 강하게 나타나면서, 남극 해빙 예측에 대한 필요성이 크게 강조되고 있음.
- 남극 해빙 면적은 지난 수십 년 동안 북극 해빙에 비해 큰 변화를 보이지 않았으나 2014년부터 2017년까지 급속도로 감소한 바가 있는데 이는 지난 30년 동안의 북극 해빙 소실량과 동일한 수준임(Parkinson, 2019). 또한 2023년에는 위성 관측이 시작된 1979년 이래 가장 낮은 해빙면적이 기록되어 남극 해빙의 변화가 본격적으로 발생하고 있는 것으로 보임
- 남극 해빙 특히, 봄과 여름철 해빙 감소는 황제 펭귄 등 남극의 생태계 및 빙붕 소멸과에도 중요하게 영향을 미침
- 뿐만 아니라, 2022년 겨울(7월) 남극장보고기지 앞 해빙이 깨어졌고, 그 해 봄철(10월) 해빙 두께가 상대적으로 얇아(〈 1.5 m) 해빙활주로의 정상적인 활용이 불가하여 남극 연구활동에 상당한 제약이 있었음
- 해빙 기반 황제 펭귄 군서지, 빙붕, 폴리냐 그리고 해빙활주로와 관련된 테라노바만 연안 해빙 변동성의 이해와 예측은 생태계 영향, 해수면 변동, 기후 변화 그리고 남극 연구를 위한 연구원 안전과 관련하여 시급하게 연구되어야 함
- 딥러닝 기법이 기후연구에 최근 들어 적극적으로 활용되면서 기존의 수치모형과의 예측성 비교연구가 활발하게 진행되고 있음. 남극 해빙에서 딥러닝 기법을 적용한 예측성 개선 연구가 선제적으로 이루어져야 함.

라 최종목표와의 연계성

- 빙하 질량 변동을 예측하는 빙상동역학 모델 시스템을 개선하는 것은 해수면 변동 예측 정확성 제고의 핵심 요소
  - 최종 목표를 달성하기 위해 관측 기반 물리기작 이해 증진 및 경계조건 정밀화에 기인하여 종합적으로 빙상동역학 모델 시스템이 빙권에서 일어나는 자연 현상을 보다 현실적으로 구현하도록 개선하는 것이 핵심 연구
- 지상·해상 관측 기반 해양-대기 및 해빙-대기 간 상호작용 이해는 남극에서 일어나고

있는 급격한 온난화에 따른 해빙 융해 프로세스 규명과 계절 예측 자료 생산에 필수적인 요소임

- 최종 목표를 달성하기 위해 대기 관측을 기반으로 해양-대기 및 해빙-대기 상호작용에 대한 연간 변동 특징을 밝혀 해빙 두께 변화에 미치는 영향을 조사하는 것이 핵심 연구

마 국내외 동향분석 및 시사점

국외 동향분석

- 남극 해빙 수치 모델링은 관측 데이터의 부족으로 예측 정확도가 낮으며, 특히 해빙에 대해 민감도가 높은 지상 기온 추정에 있어 해빙 위의 표면 열 유속과 관련된 지표면 복사 또는 난류 열 유속의 큰 오차가 주요 문제로 제기됨 (Valkonen et al., 2014; Liu et al., 2020)
- SIPN South 프로젝트는 계절별 남극 해빙 예측을 위한 협력 프로젝트로, 2017년 시작된 이후 지난 6년 동안 지속되었음. 이 프로젝트는 남극 해빙의 연간 및 월간 변동성을 이해하고 예측하는 데 중점을 두었음. 남극 해빙의 변동성을 예측하는 것은 남극 주변의 해양과 대기, 그리고 전 지구적 기후 시스템에 중대한 영향을 미칠 수 있다고 보고하고 있음. (Massonnet et al. 2023)
- 최근 연구에서는 딥러닝 방법을 사용하여 남극 해빙의 계절별 변동성을 예측하는 모델이 개발되어 논문으로 발표되었음. 이 모델은 2017년, 2022년, 그리고 2023년의 역사적인 여름 최저치를 정확하게 재현했으며, 유럽 중기 기상 예보 센터(ECMWF)의 예측보다 오차가 적었다고 보고하고 있음 (Dong et al. 2024).. 하지만 현업관점에서 남극 해빙 예측에 대한 예측성 검증이 좀 더 필요함.

국내 동향분석

- 북극 해빙에 대한 예측 연구는 최근 들어 국내에서 극지연구소 및 전남대에서 활발하게 진행되고 있었으나, 남극 해빙에 대한 국내 연구는 매우 제한적으로 진행되었음.
- 원격탐사기법을 활용한 테라노바만 연안 고착빙 모니터링이 수행되었으며 (Han & Lee 2018), 테라노바만 폴리냐 고염분 대륙붕수의 관측 및 모델링을 이용한 이 지역 수괴 순환이 조사됨 (Yoon et al., 2020; Kim et al., 2022)
- 남극 폴리냐에 대한 연구는 일부 개인 연구자가 진행한적이 있었으나, 해빙 예측성과 관련된 폴니냐 연구는 진행되지 못하였음.

문제점 및 시사점

- 남극 해빙 변동은 전지구 기후 변동 및 변화에 매우 중요한 요소이지만, 그 예측성에 대한 연구는 매우 부족한 실정임. 특히, 대부분의 기후모형이 남극 해빙을 제대로 모의하는데 문제점을 가지고

있음. 남극의 해빙이 다양한 시간규모의 변동성을 가지고 있기 때문에 예측성 연구도 이에 맞추어 진행될 필요가 있음. 특히, 국내는 이러한 연구가 매우 부족한 실정이기 때문에, 남극 해빙 예측에 대한 연구가 계획적으로 이루어질 필요가 있음.

- 최근 대두되는 남극의 급격한 해빙 소실로 인하여 해수면 상승 및 기후변화 예측 정확도 제고의 중요성이 강조되고 있으나, 그동안 관측 자료의 부족으로 수치 모델링의 정확도 개선이 어려웠으며, 특히 테라노바만 해빙 변동에 있어 대기강제력에 대한 조사가 국·내외적으로 부족한 실정이므로, 지상·선박에서의 종합적인 대기 관측을 기반으로 해빙 변동 과정을 이해한다면 이 지역 해빙 연구 기술을 국제적으로 선도할 수 있을 것으로 예상됨

2. 핵심과제 연구개발내용

가 과학적 질문

- (분과가설) 남극의 해빙 변동은 다양한 기후인자들에 영향을 받고, 이를 고려하여 남극 해빙의 예측성을 개선할 수 있다.
- (질문) 남극의 해빙 변동은 예측 가능한가?
- (분과가설) 남극의 해빙 변동의 대기의 온도 구조 및 순환을 바꾸어 전지구 기후에 영향을 줄 수 있다.
- (질문) 남극의 해빙 변동은 전지구에 어떠한 영향을 미치는가?
- (분과가설) 테라노바만 봄철 해빙 계절 예측에 남극내륙에서 연안으로 부는 겨울철 바람이 중요한 역할을 한다.
- (질문) 테라노바 만 해양-대기 및 해빙-대기 상호 작용의 계절별 특성은 무엇이며, 해빙 두께에 어떻게 영향을 미치는가? 봄철 해빙 두께에 영향을 미치는 요인은 무엇이며, 봄철 해빙의 상대적 두께에 대한 예단 인자로 사용 가능할까?

나 연구 목표

- 남극의 해빙 변동을 예측하기 위하여 역학모형과 딥러닝 모형을 결합한 하이브리드 방식의 남극해빙 예측 시스템을 개발한다.
- 남극 해빙 변동과 다양한 전지구 기후현상과의 상호작용을 이해하고, 남극 해빙 변동이

전지구 기후에 미치는 영향을 이해한다.

- 남극 해빙 예측 모델 모수화 향상을 위해 기상 및 지표면·해상 열 및 운동량 플럭스 관측 데이터를 확보하여 테라노바만 해양대기경계층 내 해양-대기 및 해빙-대기 상호작용의 연중 변화 이해에 따른 해빙 변동 프로세스 규명한다.

다 핵심 연구 주제

- (역학예측 모형 검증 및 개선) 기존의 계절 예측 역학 모형 (APCC, NMME 등)과 KOPRI 계절 예측 시스템의 예측성비교 검증. 역학 모형 예측의 계통적 오차 파악 및 오차의 원인 규명. 기후학적 요소와 해빙 물리과정요소의 기여를 정량적으로 평가-정량적 평가를 통한 KOPRI 예측모형의개선 방안 도출

- (딥러닝 기반 예측 모형 구축) KOPRI 모형의 장기 적분 결과에 기반한AI 남극 해빙 모형 개발. 이를 통해 기후요소와 남극 해빙의 관련성 도출. 모형 장기적분에기반한 AI 남극 해빙 모형의 transfer learning을 적용하여, 하이브리드남극해빙예측시스템을 개발. 하이브리드남극 해빙 예측 시스템 예측성검증 및 개선 방향 도출. 하이브리드남극 해빙 예측을 확장하여 지역해 해빙 변화를 상세예측할 수 있는 고해상도 남극 해빙예측 시스템 개발

- (남극 해빙과 기후 변동 모드와의 상호작용) 남극해 해빙 가능지역의 대기-해양 상호작용 및 이에 따른 해빙 변동성 연구. 남극해 해빙 변동의 주요 모드와 그에 영향을 주는 원격상관패턴 연구. 열대 태평양, 인도양, 대서양의 주요 기후모드들이 남극 해빙 변동에 미치는 영향 연구.

- (남극해 해빙-해양-대기 상호작용 및 폴리냐 역할) 남극 해빙 폴리냐 발생 메커니즘 및 주요 기후 변동들의 종합적 영향 분석. 기후예측 모형의 남극해빙폴리냐 모의 성능 분석 및 구조적 문제점 분석. 남극 해빙 폴리냐의 기후학적 영향 분석 및 기후변화 피드백 연구

- (대기 관측 자료 기반 해빙 변동 과정 규명) 남극장보고과학기지 주변 고착빙의 두께 및 수온, 해빙-대기 열 및 운동량 플럭스, 대기경계층 내 바람 및 기온 프로파일 관측을 통한 양질의 자료 확보, 관측 자료와 대기수치모델(Polar-WRF) 간의 비교, 관측 및 수치모델을 이용한 테라노바 만 해빙 변동에 영향을 미치는 주요 과정 규명

- (종관기상 및 기후모드 연관 분석) 테라노바 만 지역의 최근 기상 변화 및 해빙 면적 변동 추세를 분석하고 종관 기상 또는 대규모 기후 모드와의 연관성을 파악

라 기대효과

- 남극해빙의 예측성을 향상시키고, 해빙의 전지구 영향을 정량화하여 전지구 및 동아시아 기후변화 불확실성 감소
- 테라노바만 지역에서의 관측 기반 해양-대기 및 해빙-대기 상호작용 프로세스 규명은 지역적 해빙 예측 정확도 향상과 인프라 기반 현장 활동 인력의 안전 확보, 그리고 경제적 손실 최소화에 기여할 것으로 기대됨

3. 추진 계획

가 연차별 로드맵

- 연구문제 해결 로드맵

[표 47] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	남극 해빙 변동은 예측 가능한가?						▪ 남극 해빙 계절 변동 예측성 개선 ▪ 남극 해빙 모의 정확도 개선 및 예측시스템 구축
해빙 위 관측 기반 생성·성장·융해 과정 관측	역학 예측 검증 및 문제점 파악 딥러닝 기반 해빙 예측 시스템 구축			하이브리드 남극 해빙 예측 시스템 개발			

[표 48] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	남극의 해빙 변동은 전지구에 어떠한 영향을 미치는가?						▪ 남극 해빙 모형 변화 및 전지구 영향에 대한 개념 모델 개발
해빙 위 직접관측	남극 해빙과 기후변동모으와의 상호작용 연구			남극해 해빙-해양-대기 상호작용 및 폴리냐 역할			

[표 49] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	테라노바 만 해양-대기 및 해빙-대기 상호 작용의 계절별 특성은 무엇이며, 해빙 두께에 어떻게 영향을 미치는가? 봄철 해빙 두께에 영향을 미치는 요인은 무엇이며, 봄철 해빙의 상대적 두께에 대한 예단 인자로 사용 가능할까?						▪ 해빙 위 관측장비 설치 및 관측 기반 남극 해빙 관측체계 구축 ▪ 해빙-대기, 해양-대기 상호작용에 의한 해빙의 성·성장·융해 과정 이해 ▪ 해빙 두께 및 수온 측정
해빙 위 직접관측	해상 및 육상, 해빙 관측장비 설치 및 관측			해상 및 육상, 해빙 관측 수치모델 비교 및 메카니즘 규명			

기술 로드맵

[표 50] 기술 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
역학예측 모형 검증 및 개선	기존 예측 모형의 검증 및 구조적 오차 규명			기후학적 요소와 해빙 물리과정요소의 기여를 정량적으로 평가-정량적 평가를 통한 KOPRI 예측모형의개선 방안 도출			▪ 남극 해빙 예측성 향상 ▪ 남극 해빙 전지구 영향 규명
딥러닝 기반 예측 모형 구축	딥러닝 남극 해빙 모형 개발			하이브리드 남극 해빙 예측 모형 개발			
기후변동모드와의 상호작용	남극해 대기-해양 상호작용 및 해빙 변동성 연구			남극해 전지구 영향 연구			
해빙-해양-대기 상호작용 및 폴니냐 역할	남극 해빙 폴리냐 발생 메커니즘			폴리냐의 기후학적 영향 및 기후변화 피드백			
경계층 및 상층기상 관측 시스템	- 장보고기지 기반 연중 라디오 존데 관측						▪ 해양-대기, 해빙-대기 플럭스 직접관측 기술 및 자료 확보 ▪ 대기경계층 내 바람 및 온도 프로파일 연중 확보
플럭스 시스템	- 동계 기간 해빙-대기 열 및 운동량 플럭스 관측			- 쇄빙선 기반 해양-대기 열 및 운동량 플럭스 관측			

나 현장탐사계획

[표 51] 현장탐사계획

연차	1	2	3	4	5	6	종합
경계층 및 상층기상 관측 시스템	장보고기지	장보고기지	장보고기지	장보고기지	장보고기지	장보고기지	▪ 하계 현장 직접관측 ▪ 동계 기간 월동대 활용
플럭스 시스템	장보고기지	장보고기지	장보고기지	장보고기지	장보고기지	장보고기지	▪ 하계 현장 직접 관측 ▪ 동계 집중 관측 (2026년)

다 국내외 협력연구방안

(중국 NUIST) 딥러닝 기반 계절규모 남극 해빙 예측 모형 공동 개발 및 예측성 비교 평가

- 남극 해빙 모델링 전문가들과의 상호방문 및 공동워크숍 등 연구교류 기회 창출을 통하여 국제 네트워크를 구축하고, 관련 최신정보 습득 및 전문인력 개발을 위한 교육기회로 적극 활용하여, 보다 체계적으로 국내 해빙 전문가 양성

라 인력 및 투입예산

인력

[표 52] 인력

(단위:명)

연차	1	2	3	4	5	6	평균
인력	10	10	10	10	10	10	

투입예산

[표 53] 지원내용×연도별 시간 절감기간 평균

(단위:백만)

연차	1	2	3	4	5	6	합계
인건비	200	200	200	200	250	300	13.5
직접비	200	200	200	200	150	100	10.5
간접비	100	100	100	100	100	100	6
합계	500	500	500	500	500	500	30

주요 장비 및 현장 탐사 소요 추정예산	
고성능 클러스터	700
라디오 존데	1,752 (80만원/회x365일x6년)
플럭스 관측 시스템	210 (7천만원 x 3 set)
합계	2,662

과제 4 10년 규모 장기 남극 해빙 예측 시스템 구축 및 개선

1. 과제개요

가 과학적 질문

분과 가설

- 남극의 해빙의 경년 변동 뿐만 아니라 10년 규모의 남극 해빙은 예측 가능하다.
  - 10년 규모의 기후 예측은 외부강제력에 의한 기후변화 요소와 내부 변동의 긴 메모리를 통해 예측 가능하다.
  - 남극 및 남극해 지역은 기후변화의 시그널이 강하고, 내부 변동의 시간 규모가 길게 나타나는 지역으로, 다양한 예측 인자를 종합하여 남극 해빙의 예측성을 확보할 수 있다. .
  - 역학모형과 딥러닝 기반의 모형을 통해 10년 규모 남극해빙 예측성 평가가 가능할 수 있다. .

과학적 질문

- 10년 규모의 남극 해빙 장기 변동성은 예측 가능한가?

나 연구의 필요성

10년 규모 기후 예측의 중요성

- 기후 변화로 인한 극단적인 기상 현상의 빈도와 강도가 증가함에 따라, 이에 대비한 장기적인 위험 완화 전략이 필요함. 10년 규모의 예측은 홍수, 가뭄, 폭풍과 같은 기후 관련 재해의 잠재적 위험을 평가하고 대비 계획을 수립하는 데 도움을 줄 수 있음. .
- 농업, 수자원 관리, 에너지 생산과 같은 분야에서는 기후 변화에 따른 장기적인 자원 계획이 필요함. 10년 규모 예측은 이러한 자원들의 효율적 관리와 지속 가능한 사용을 위한 전략 수립에 도움을 줄 수 있음. 기후변화 적응 전략에 매우 필요한 기후정보를 제공할 수 있음.

남극 해빙의 장기 변동성의 중요성.

- 해빙은 대기와 해양 사이의 열, 기체, 운동량의 교환을 조절하는 핵심 역할을 함. 해빙의 변동성은 전 세계 열 수지에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 이는 인간 활동에 의한 온실가스 배출과 유사한 수준으로

기후에 영향을 줄 수 있고 전세계 기후 패턴에 영향을 미칠 수 있음. 따라서 해빙의 장기 변동은 전세계 기후변화에 매우 중요한 역할을 함.

- 남극 해양은 인간의 CO2 배출량 중 상당 부분을 흡수하는 주요 탄소 저장소임. 해빙과 관련된 폴리냐는 대기로부터 남극 해양 심층수로의 열 이전에 영향을 미치며, 이는 해양이 탄소와 열을 흡수하는 능력에 영향을 줄 수 있음. 해빙의 장기 변동성을은 남극 해양이 탄소와 열을 흡수하는 능력의 변화를 예측하는 데 필수적임.
- 해빙 생성과 해양 수온 및 염분의 상호 작용은 남극의 거대한 빙상의 안정성에 영향을 줄 수 있기 때문에, 해빙의 장기 변동은 빙상의 녹아내림과 해수면 상승의 속도를 예측하는 데 중요할 요소가 될 수 있음.

다 연구의 시급성

- 최근 탄소 중립이 중요한 이슈로 부각되면서, 해양의 탄소 흡수 능력에 대한 관심도 높아짐. 남극은 해양탄소순환에 가장 중요한 지역으로, 남극 해빙의 장기변동은 전지구 탄소순환에 미치는 영향이 커서, 해빙 변동과 관련된 물리 및 생지화학 인자의 장기 변동 연구가 시급함.
- 남극 해빙의 장기 변동은 전지구 기후에 영향을 주는 중요한 인자로 기후적응 정책 반영에 반드시 고려가 되야함.

라 최종목표와의 연계성

- 남극 해빙의 장기 변동 역학 및 모형 개발을 통해 다양한 시간규모의 남극 해빙 예측성 향상 도모

마 국내외 동향분석 및 시사점

- 국외 동향분석
  - DCPP (Decadal Climate Prediction Project)는 세계기후연구프로그램 (WCRP)중의 하나로 지속적으로 연구되어 왔음. 유수의 여러 기후연구 기관에서 기후모형을 이용한 10년 규모 기후 예측

비교 모델링을 설계하고 구성하여 예측자료를 생산하였음. 10년 기후 예측 가능성 연구와 10년 규모 기후 변동의 메커니즘에 대해서 연구되어 오고 있음.

- 남극 해빙의 10년 규모 예측성 연구는 국내 뿐만 아니라 해외에서도 거의 연구되지 않았음.

국내 동향분석

- 세계적으로 10년 규모 기후 예측에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데 반하여 우리나라에서는 매우 제한적으로 이루어지고 있음. 특히 남극해빙에 대한 연구는 전무함.

문제점 및 시사점

- 향후 10년의 기후변화 정보가 국가 정책에 활용될 수 있는 정보를 제공할 수 있기 때문에, WCRP에서 10년 규모 기후 예측에 프로젝트가 진행되 있고, 전세계적으로 활발하게 10년 예측성 연구가 진행되고 있으나 우리나라에서는 경년 예측 및 기후변화 전망에만 중점을 두어왔음. 특히 남극 해빙의 장기 예측성 평가는 매우 부족한 실정임.

2. 핵심과제 연구개발내용

가 과학적 질문

(분과가설) 남극의 해빙의 경년 변동 뿐만 아니라 10년 규모의 남극 해빙은 예측 가능하다.

(질문) 10년 규모의 남극 해빙 장기 변동성은 예측 가능한가?

나 연구 목표

남극의 해빙의 10년 이상 변동성의 메커니즘을 이해하고, 예측 가능성을 평가한다.

다 핵심 연구 주제

(10년 규모 해빙 장기 변동 메커니즘) 남극 해빙의 장기 변동성 분석 및 다른 기후인자

와의 관련성 분석. 남극해 깊은 바다 변동과 해빙 장기변동과의 관련성 분석. 남극해 해빙 장기 변동의 예측 가능인자 추출. 해빙 장기 변동과 남극해 열교환, 탄소 교환 변화 분석. 남극해 해양 생태와 해빙 장기변동과의 관련성 분석

- (남극해빙 10년 변동 예측 가능성) KOPRI 예측 모형 기반 10년 기후 예측성 실험 수행. 남극해빙 10년 변동 예측성 평가 및 구조적 오차 분석. 모형 장기적분에기반한 AI 남극 해빙 장기 변동 예측 모형 개발. 하이브리드남극 해빙 예측 시스템 예측성검증 및 개선 방향 도출.

라 기대효과

- 해빙 변동성을 더 잘 이해하고 예측할 수 있다면, 이는 기후 변화 대응 및 관련 정책 수립에 중요한 정보를 제공.

3. 추진 계획

가 연차별 로드맵

- 연구문제 해결 로드맵

[표 54] 연구문제 해결 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
과학적 질문	10년 규모의 남극 해빙 장기 변동성은 예측 가능한가?						▪ 남극 해빙 장기 변동 메커니즘 규명 ▪ 남극 해빙 장기 모형 예측시스템 구축
해빙 위 관측 기반 생성·성장·융해 과정 관측	남극 해빙의 장기 변동성 분석 및 메커니즘 규명			역학 모형 및 딥러닝 기방 남극해빙 장기 변동 예측모형 개발			

기술 로드맵

[표 55] 기술 로드맵

연차	1	2	3	4	5	6	종합
10년 규모 해빙 장기 변동 메커니즘	남극 해빙의 장기 변동성 분석 및 다른 기후인자와의 관련성 분석 남극해 깊은 바다 변동과 해빙 장기변동과의 관련성 분석			해빙 장기 변동과 남극해 열교환, 탄소 교환 변화 분석. 남극해 해양 생태와 해빙 장기변동과의 관련성 분석			▪ 남극 해빙 장기 변동 메커니즘 규명 ▪ 남극 해빙 장기 예측시스템 구축 및 예측성 향상
남극해빙 10년 변동 예측 가능성	남극해 해빙 장기 변동의 예측 가능인자 추출.			KOPRI 예측 모형 기반 10년 기후 예측성 실험 수행. 남극해빙 10년 변동 예측성 평가 및 구조적 오차 분석. 모형 장기적분에기반한 AI 남극 해빙 장기 변동 예측 모형 개발.			

나 현장탐사계획

다 국내외 협력연구방안

(중국 NUIST) 딥러닝 기반 남극 해빙 장기 예측 모형 공동 개발 및 예측성 비교 평가

남극 해빙 모델링 전문가들과의 상호방문 및 공동워크숍 등 연구교류 기회 창출을 통하여 국제 네트워크를 구축하고, 관련 최신정보 습득 및 전문인력 개발을 위한 교육기회로 적극 활용하여, 보다 체계적으로 국내 해빙 전문가 양성

라 인력 및 투입예산

인력

[표 56] 인력

(단위:명)

연차	1	2	3	4	5	6	평균
인력	10	10	10	10	10	10	

투입예산

[표 57] 지원내용×연도별 시간 절감기간 평균

(단위:백만)

연차	1	2	3	4	5	6	합계
인건비	200	200	200	200	250	300	13.5
직접비	200	200	200	200	150	100	10.5
간접비	100	100	100	100	100	100	6
합계	500	500	500	500	500	500	30
주요 장비 및 현장 탐사 소요 추정예산							
고성능 클러스터							700
합계							

과제 5 SIPN South 계절예측 기법 비교 및 참여 자료 생산

1. 과제개요

가 과제의 배경

Sea Ice Prediction Network (SIPN) South

SIPN South 프로젝트

- 해빙 변화를 모니터링하고 예측하는 것은 전 세계적으로 매우 중요한 연구 주제임.
- SIPN은 북극 해빙 계절 예측을 개선하기 위한 국제적인 전문가들의 협력 네트워크이며, 해빙 예측 및 예보에 대한 개선과 소통을 목표로 함.
- SIPN의 주요 활동 중 하나는 2008년부터 수행된 Sea Ice Outlook (SIO)임. SIO의 목표는 매년 9월의 최소 해빙 면적 (sea ice extent, SIE)을 추정하는 것이며, 해마다 세계적으로 다양한 국가 및 기관에서 예측한 자료가 수집되어 비교에 사용됨.
- SIPN South는 SIPN과 비슷한 목적을 가지며, 남극 해빙에 대한 해빙 예측을 목표로 함. SIPN South 프로젝트는 2017년부터 시작되었으며, 2023년까지 6년동안 남극 해빙 예측 결과들을 수집하여 비교 분석함.

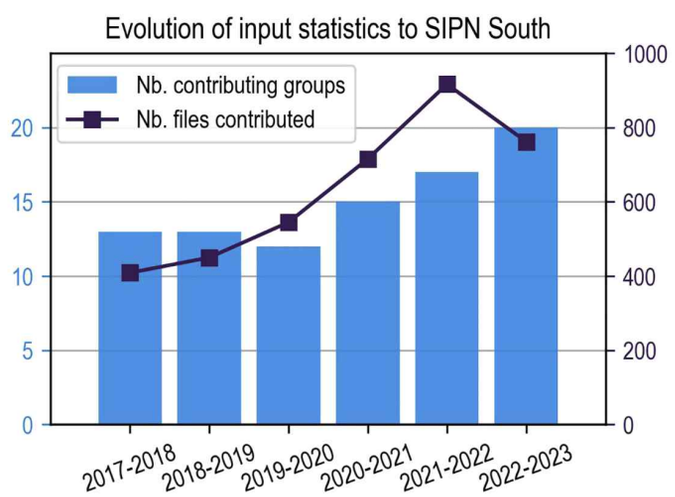


FIGURE 2
The number of individuals or groups that contributed forecasts to the SIPN South project for each of the austral summers since the beginning of the project (bars, left y-axis) and the total number of files contributed by all groups over the same period (line with squares, right y-axis).

[그림 87] 최근 6년간 (2017-2023) SIPN South 참가 그룹 및 제출된 예측 자료의 수 (Massonnet 등, 2023).

- SIPN South 목표
  - SIPN South 프로젝트는 다음의 목표를 가지고 있음.
    * 남극 해빙의 계절 예측 결과를 수집, 비교, 토론하고 SIPN과의 협력을 통한 북극 해빙 예측 결과와 비교.
    * 남극 해빙 상태에 대한 정보 제공 및 최근 발표된 연구 홍보.
    * 현재 진행 중인 관측 캠페인을 보고하고 다가오는 이벤트(회의, 워크숍, 웨비나 등)을 전파.
    * 극지 예측의 해(year of polar prediction, YOPP)의 특별 관측 기간에 대한 예측 일정 조율.

과학적 질문

- SIPN South 참여한 수치모델 및 AI기반 해빙 계절예측 모델간에는 어떤 차이점이 있으며, 예측 지역 및 기간에 따른 시스템적인 에러가 존재하는가?

나 연구의 필요성

SIPN South 참가 모델의 상호 비교를 통한 성능 분석

- 수치모델 및 AI기반 모델간의 구조적인 차이로 인해, 예측 결과에도 유의미한 차이가 존재할 것으로 예상됨.
- AI 기반 모델의 경우 전반적인 성능 지표는 좋을 수 있어도, 통계 기반 모델이기 때문에 극값 예측 성능이 취약할 수 있음.
- 기존 참가 모델들의 성능 분석을 통해 본 과제에서 개발되는 AI 기반 모델의 예측 성능 향상

SIPN South 참여를 통한 국내 남극 연구의 활발한 국제 협력

SIPN South 상호 비교를 통한 국내 개발 모델의 우수 성능 입증

다 연구의 시급성

SIPN은 국제적인 남극 해빙예측 네트워크이므로, 공식 참여는 국내 남극 연구 위상을 높이는데 큰 도움이 됨.

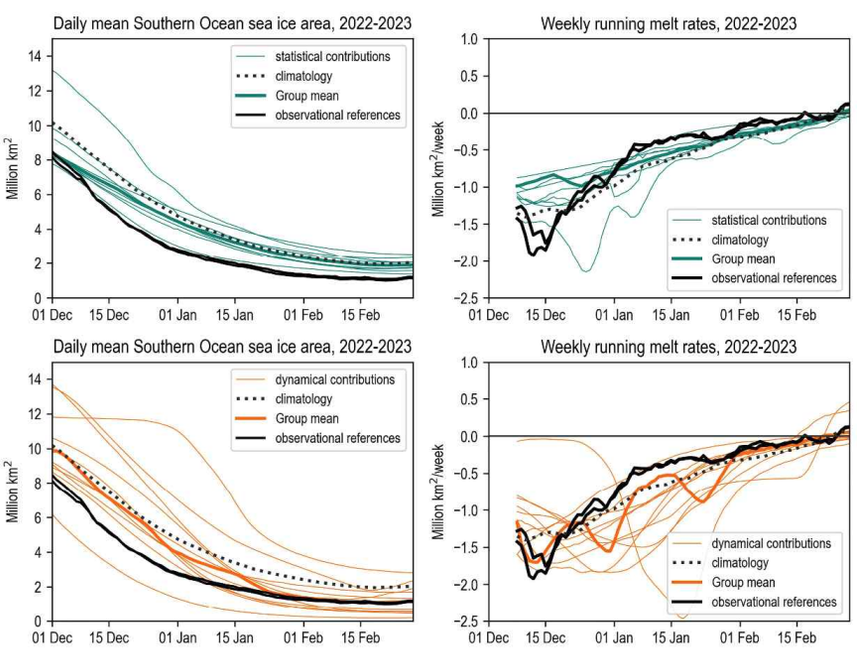
모델 성능을 객관적으로 비교할 수 있으며, 매년 실제 사례에 대한 분석을 수행하므로 연구 단계를 넘어 실용적으로 활용될 수 있음.

라 최종목표와의 연계성

- SIPN South 모델의 성능 비교를 통해 AI 기반 해빙 예측 모델 개발에 참고 자료로 활용될 수 있음.
- SIPN South 참가를 통해 표준화된 계절예측 자료 생산 가능.

마 국내외 동향분석 및 시사점

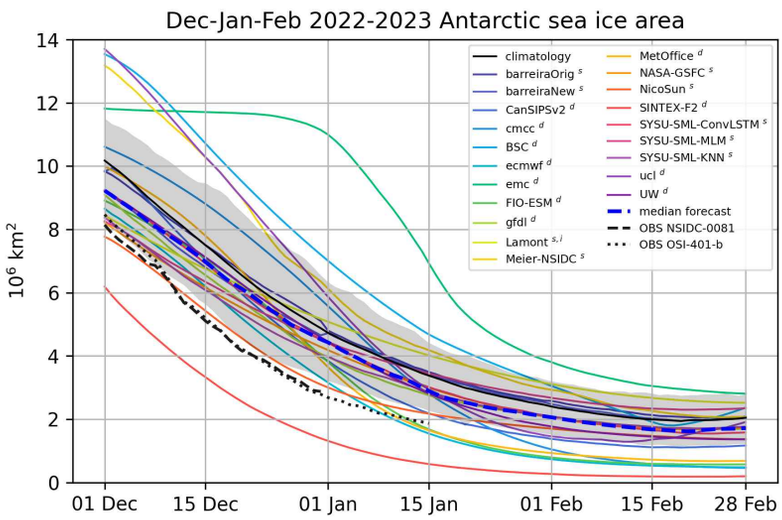
- 국외 동향분석
  - Massonnet 등 (2023)은 2017-2023년 동안의 SIPN 활동을 통한 6년간의 남극 해빙 예측 결과를 분석함. 초기 10개 그룹이었던 참가국은 2023년에는 20개로 증가하였으며, 최근 3년간 지속적인 증가 추세를 보임. 2023년 2월의 Southern Ocean 지역의 최소 사례에 대한 분석에서는, SIPN 그룹에 참가한 통계 및 AI 모델의 평균 예측 값은 실제 관측값보다 높은 전망치를 나타냈으며, 전반적으로 비슷한 패턴을 보였음. 반면에 역학 모델 군집에서는 통계 모델보다 다양한 분포를 보였음.



[그림 88] 2023년의 2월의 Southen Ocean 지역의 SIPN South 모델간의 해빙 면적 예측 비교 (Massonnet 등, 2023).

- SIPN South 참가 그룹의 국가로는 미국, 캐나다, 아르헨티나, 독일, 프랑스, 영국, 스페인, 벨기에,

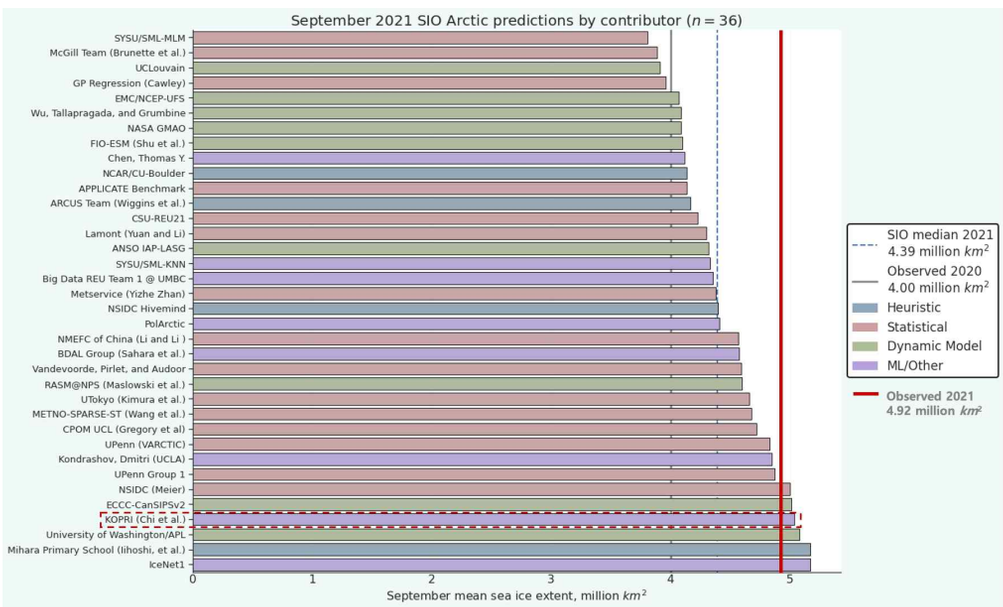
이탈리아, 유럽연합, 중국, 일본, 호주 등이 있음.



[그림 89] 2023년 SIPN 남극 해빙 면적 예측의 예측 결과 및 참가 그룹.

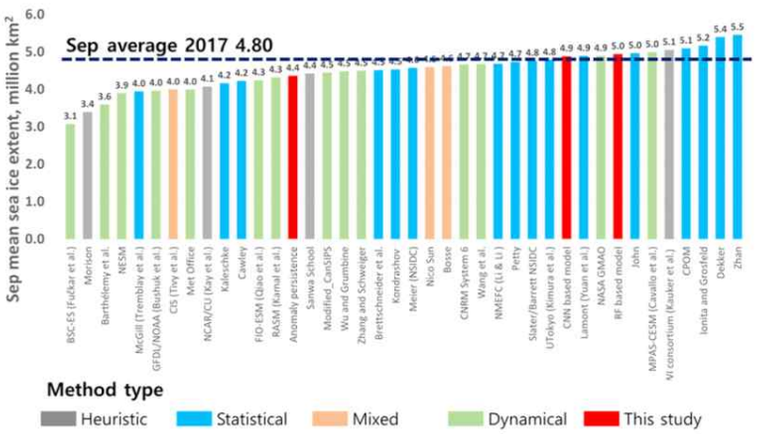
국내 동향분석

- 극지연구소는 SIPN에 2021년부터 첫 참여하였으며, 북극 해빙 면적 예측에서 36개 참가 팀 중 다섯 번째로 정확한 성능을 보였음. Chi et al. (2017)에서 개발된 딥러닝 기반 모델이 활용됨.



[그림 90] 2021년 SIPN 연구팀별 북극 해빙 면적 예측 결과. 빨간색 점선은 극지 연구소의 예측값. (출처: https://www.arcus.org/sipn/sea-ice-outlook)

- Kim et al. (2019)는 AI 기반 모델을 활용하여 북극 1개월 해빙 농도 예측 모델을 개발하였음. 2017년 북극 해빙 면적에 대하여 SIPN 모델과의 비교 시 실제 관측값과 매우 유사한 예측을 수행함.



(d) Distribution of SIOs for September 2017 extent (August report)

■ 문제점 및 시사점

- 국제적으로 남극 해빙 예측 연구는 북극에 비해 덜 주목받아왔음.
- 국내에서도 주로 북극 해빙 계절예측에 대한 연구들이 수행되었으며, 남극 해빙 예측에 대한 연구는 부족한 상황임.
- 따라서 본 과제를 통한 SIPN 공식 참여는 우리나라의 남극 해빙 예측 연구에 필수적인 역할을 할 것으로 기대함.

2. 핵심과제 연구개발내용

가 과학적 질문

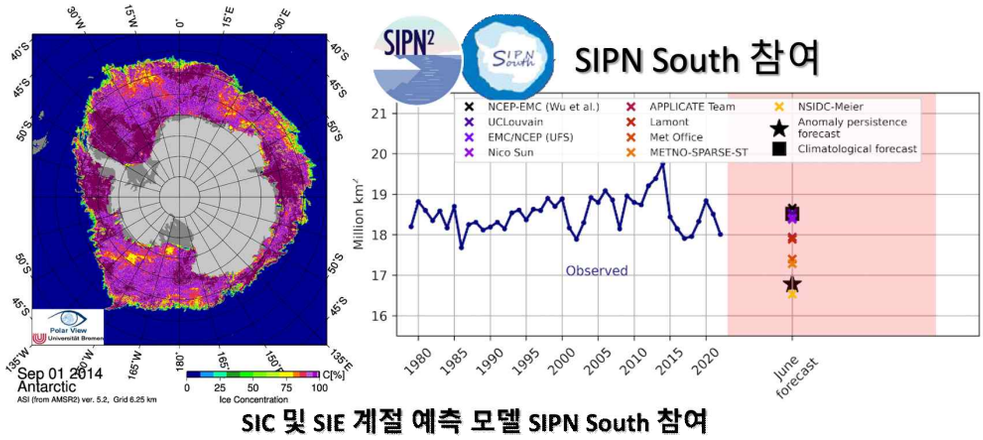
■ SIPN South 참여한 수치모델 및 AI기반 해빙 계절예측 모델간에는 어떤 차이점이 있으며, 예측 지역 및 기간에 따른 시스템적인 에러가 존재하는가?

나 연구 목표

■ SIPN South 참가 모델 성능 비교

- 현재 SIPN South에 참가하고 있는 모델들의 지역별, 기간별 심층 성능 비교
- 대표적인 남극 해빙 감소 사례에 대하여 역학모델 및 AI 모델간의 극값 모의 성능 분석

SIPN South 참여 자료 생산



[그림 91] 본 과제에서 개발된 산출물 기반 SIPN 자료 생산
[그림 92]

- 표준화된 자료 생산을 위해서 SIPN South 팀에서는 관련 코드를 제공하고 있음 (https://github.com/fmassonn/sipn-south-public?tab=readme-ov-file).
- 본 과제에서 개발되는 AI 기반 남극 해빙 계절예측 결과를 SIPN 표준에 맞게 자동으로 변환하는 모듈 개발.
- 과거 자료에 대하여 SIPN 표준에 따른 검증 및 시각화.

다 핵심 연구 주제

- SIPN South 예측 자료 수집 및 분석
- SIPN South 참여 자료 생산 모듈 개발
- 타 SIPN South 모델과의 성능 비교 및 시각화

라 기대효과

- SIPN South 참가 모델 비교를 통한 현행 연구 수준 파악
- 본 과제의 AI 기반 남극 해빙 계절예측 모델 개발에 기여
- SIPN South 공식 참여를 통한 국제 협력 연구 참여 및 주도

3. 추진 계획

가 연차별 로드맵

연구문제 해결 로드맵

[표 58] 연구문제 해결 로드맵

<table>
<tr><th>연차</th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>6</th><th>종합</th></tr>
<tr><td>과학적 질문</td><td colspan="6">SIPN South 참여한 수치모델 및 AI기반 해빙 계절예측 모델간에는 어떤 차이점이 있으며, 예측 지역 및 기간에 따른 시스템적인 에러가 존재하는가?</td><td rowspan="2">▪ SIPN 참가 모델의 공통적인 한계점 분석
▪ 하이브리드 모델 개발에 기여</td></tr>
<tr><td>SIPN South 모델 분석</td><td colspan="3">수치모델 및 AI기반 모델 군집별 결과 분석</td><td colspan="3">지역 및 기간별 시스템 에러 심층 분석</td></tr>
</table>

기술 로드맵

[표 59] 기술 로드맵

<table>
<tr><th>연차</th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>6</th><th>종합</th></tr>
<tr><td>SIPN South 참여 자료 생산</td><td colspan="3">SIPN South 모델 성능 비교 및 시각화 모듈 개발</td><td colspan="3">SIPN South 자료 생산 모듈 개발</td><td>▪ 해빙 위 직접관측 기술 및 자료 확보</td></tr>
</table>

나 현장탐사계획

다 국내외 협력연구방안

- (극지연구소) 국제 협력 활동 주체. SIPN South 참가를 위한 요구사항 및 협업 내용 논의.
- (벨기에 Louvain 대학교, SIPN 프로젝트 팀) SIPN South 프로젝트 담당 그룹. 참가 자료 생성 및 개선 방향에 대한 의견 공유.

라 인력 및 투입예산

인력

[표 60] 인력

(단위:명)

연차	1	2	3	4	5	6	평균
인력	8	8	8	8	8	8	8

투입예산

[표 61] 지원내용×연도별 시간 절감기간 평균

(단위:백만)

연차	1	2	3	4	5	6	합계
인건비	78.586	78.586	78.586	78.586	78.586	78.586	471.516
직접비	78.586	78.586	78.586	78.586	78.586	78.586	471.516
간접비	42.828	42.828	42.828	42.828	42.828	42.828	256.968
합계	200	200	200	200	200	200	1200
주요 장비 및 현장 탐사 소요 추정예산							
AI 기술 개발용 서버 구축							94,303,200 (원)

제7장 소요예산

제1절 전체사업 소요예산

제1절 전체사업 소요예산

1. 소요예산

가 전체사업 소요예산

■ 총사업비(사업기간): 360억원('25~'30)

◎ 현재 R&D 환경분석에 기반하여 6년 사업으로 소요예산 산정

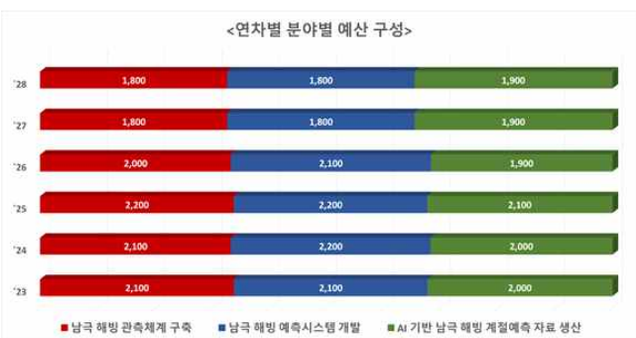
(단위: 백만원)

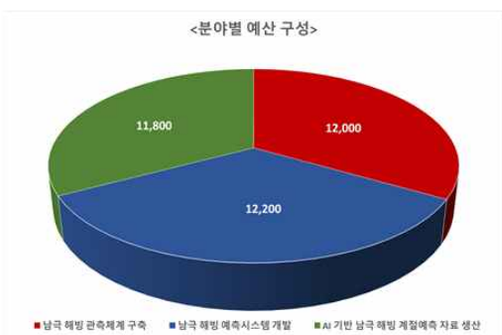
	'25년	'26년	'27년	'28년	'29년	'30년
총 합계	6,200	6,300	6,500	6,000	5,500	5,500

◎ 연차별 소요예산

(단위: 백만원)

		'25년	'26년	'27년	'28년	'29년	'30년
인건비	책임급	760	783	806	830	748	771
	선임급	600	618	637	656	675	696
	원급	1,100	1,133	1,167	929	900	927
	소계	2,460	2,534	2,610	2,415	2,324	2,394
직접비	연구장비·재료비	2,000	2,100	2,200	1,900	1,500	1,500
	이외 직접비	673	582	572	652	729	660
	소계	2,673	2,682	2,772	2,552	2,229	2,160
간접비		1,067	1,084	1,119	1,033	947	947
총 합계		6,200	6,300	6,500	6,000	5,500	5,500





연차별 분야별 소요예산

(단위: 백만원)

	'25년	'26년	'27년	'28년	'29년	'30년	계
남극 해빙 관측체계 구축	2,100	2,100	2,200	2,000	1,800	1.800	12,000
남극 해빙 예측시스템 개발	2,100	2,200	2,200	2,100	1,800	1,800	12,200
AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	2.000	2,000	2,100	1,900	1,900	1,900	11,800
총 합계	6,200	6,300	6,500	6,000	5,500	5,500	36,000

'25년 예산소요 내역

- 남극 해빙 관측체계 구축: 2,100백만원
- 남극 해빙 예측시스템 개발: 2,100백만원
- AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산: 2,000백만원

'25년 소요예산 세부내역

- 첨단 현장 관측기술 기반 남극 해빙 관측체계 구축: 1,600백만원
- 급격한 남극 해빙 용융 프로세스 규명: 500백만원
- 지구시스템-해빙모델 결합 남극 해빙 예측시스템 구축: 800백만원
- 해빙 계절예측 전처리 및 자료동화 시스템 구축: 600백만원
- 남극 해빙 예측시스템 운영체계 개발: 700백만원
- 최신 해빙모델 및 AI기술 기반 계절예측 자료 생산 체계 구축: 700백만원
- AI 기반 예측시스템 자료동화 기법 개발: 700백만원
- 남극 해빙의 전지구적 영향 이해 기반 남극 해빙 계절예측 개선 방향 도출: 400백만원
- SIPN South 다중모델 계절예측 자료 및 기법 비교: 200백만원

‘25년 예산소요 상세내역

구분	내 용	예산
남극 해빙 관측체계 구축	■ 첨단 현장 관측기술 기반 남극 해빙 관측체계 구축 - 해빙 위 관측장비 설치 및 관측 (마스트 50, 파고부이 230, IMB부이 100, 해빙코어 시추 20) - 테라노바만 폴리냐 생성·소멸 과정 관측 (표층부이 60, CTD 100, 해양유속계 100, 풍향풍속/온습고/파고계 40) - 아라온 기반 관측 및 UAV 활용 해빙 관측 (용선료 20, 라이다 100, ASPeCT 180, 국제협력 기반 UAV 운용 300, UAV 센서 300)	1,600
	■ 급격한 남극 해빙 용융 프로세스 규명 - 테라노바만 3차원 해빙-대기-해양 구조 분석 (CTD 200, DaDIS/AWS/GNSS 트래커 등 100) - 위성자료 기반 고착빙산-해빙 상호작용 분석 (XCTD 200)	500
소 계		2,100
남극 해빙 예측시스템 개발	■ 지구시스템-해빙모델 결합 남극 해빙 예측시스템 구축 - CICE 해빙모델 기반 지구시스템-해빙모델 결합 남극 해빙 예측시스템 구축 (200) - 해빙모델 성능 비교평가 및 해빙모델 안정화 (제주대 협업 150, 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축·운영 150) - 남극 고착빙 분포의 모델 재현·예측 성능 개선 (300)	800
	■ 해빙 계절예측 전처리 및 자료동화 시스템 구축 - 결합 자료동화 위한 해빙-대기-해양 관측자료 전처리시스템 구축 (200) - 해빙-대기-해양 결합자료동화 시스템 개발 (400)	600
	■ 남극 해빙 예측시스템 운영체계 개발 - 전처리-자료동화-예측 후처리 자동화 체계 개발 (분산 컴퓨팅 시스템 구축 290) - 예측시스템의 과거 재예측실험을 통한 성능 진단 및 개선 (대용량 스토리지 110, 재예측실험 100) - 예측성의 원천 연구 기반 10년규모 장기 남극 해빙 예측시스템 구축 (서울대 협업 100, 10년규모 장기 예측시스템 구축 100)	700
소 계		2,100
AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	■ 최신 해빙모델 및 AI기술 기반 계절예측 자료 생산 체계 구축 - 역학 예측 모형 구조적 오차 파악 (200) - 딥러닝 기반 남극 해빙 예측 모형 구축 (서울대 협업 200) - 최신 AI기술 기반 계절예측 모델 개발 및 해빙 특성 분석 (UNIST 협업 200, 해빙 특성 분석 100)	700
	■ AI 기반 예측시스템 자료동화 기법 개발 - 부분 컨볼루션 딥러닝 기반 남극 해빙 면적 자료동화 시스템 개발 (서울대 협업 150, 남극 해빙 면적자료 획득 및 분석 200) - AI기반 남극 해빙 재분석장 생산·검증 및 초기장 생산기법 개발 (서울대 협업 150, 재분석장 생산·검증 150)	700
	■ 남극 해빙의 전지구적 영향 이해 기반 남극 해빙 계절예측 개선방향 도출 - 남극 해빙 영향 원격상관 연구 (200) - 남극 폴리냐 발생 메커니즘 및 주요 기후 모드와의 관련성 연구 (서울대 협업 200)	400
	■ SIPN South 다중모델 계절예측 자료 및 기법 비교 - SIPN South 다중모델 계절예측 자료 및 기법 입수 및 비교분석 (200)	200
소 계		2,000
합 계		6,200

‘25~30년 세부 연구내용 및 연구비 소요내역

세부 연구내용 및 연구비 소요내역 (단위: 백만원)								
세부과제	세부내용	‘25	‘26	‘27	‘28	‘29	‘30	소 계
요구금액		6,200	6,300	6,500	6,000	5,500	5,500	36,000
남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발	남극 해빙 관측체계 구축	1,600	1,600	1,700	1,500	1,400	1,400	12,000
		첨단 현장 관측기술 기반 남극 해빙 관측체계 구축			남극 해빙 관측망 운영 및 국제협력 관측 프로그램 참여			
		400	400	450	400	400	400	
		마스트(복사계/3D음속풍속계/습도계), 파고부이, IMB부이, 해빙코어 시추 등 해빙 위 관측장비 설치 및 관측			해빙-대기-해양 상호작용에 의한 해빙의 생성·성장·융해 과정 관측			
		300	300	350	300	300	300	
		표층부이, 대기·해양 관측자료 기반 테라노바만 폴리냐 생성·소멸 과정 관측			플롯, AUV 활용 해빙 하부 관측 기반 해빙 용융률 도출			
		900	900	900	800	700	700	
		아라온 기반 라이다, ASPeCT 관측 및 국제협력 기반 UAV 활용 해빙 관측			다양한 해빙 표층 관측 기반 해빙 생성·성장·융해 과정 특성 이해			
		500	500	500	500	400	400	
		급격한 남극 해빙 용융 프로세스 규명			남극 해빙 용융에 영향을 미치는 지역 및 원격 메커니즘 연구			
		300	300	300	300	200	200	
		테라노바만 CTD, DaDIS, AWS 등 자료 수집·분석으로 3차원 해빙-대기-해양 구조 분석			해빙 용융 기작과 연관된 지역 및 원격 대기-해양 메커니즘 연구			
		200	200	200	200	200	200	
		위성자료 기반 고착빙산-해빙 상호작용 분석			테라노바만 폴리냐 및 고착빙을 포함하는 해빙-대기-해양 상호작용 특성 및 예측성 규명			
	남극 해빙 예측시스템 개발	800	900	900	900	800	800	12,200
		지구시스템-해빙모델 결합 남극 해빙 예측시스템 구축			남극 해빙 예측시스템 개선 및 최적화			
		200	300	300	300	200	200	
		CICE 해빙모델 기반 지구시스템-해빙모델 결합 남극 해빙 예측시스템 구축			개발된 남극 해빙 예측시스템 개선 및 장기예측 성능 최적화			
		300	300	300	300	300	300	
		해빙모델 성능 비교평가 및 해빙모델 안정화			해양순환 및 해빙 재현 성능 평가, 해빙 변동 제어 프로세스 도출 및 예측성능 고도화			
		300	300	300	300	300	300	
		남극 고착빙 분포의 모델 재현·예측 성능 개선			남극 연안 고착빙 분포의 모델 재현 성능 검증			
		600	600	600	600	500	500	
		해빙 계절예측 전처리 및 자료동화 시스템 구축			해빙 계절예측 전처리 및 자료동화 시스템 성능개선			
		200	200	200	200	200	200	
		결합 자료동화 위한 해빙-대기-해양 관측자료 전처리시스템 구축			실시간 관측자료 수집 체계 구축 및 운용			
		400	400	400	400	300	300	

		해빙-대기-해양 결합자료동화 시스템 개발			신규 관측자료 확장 및 활용 동화기법 개발			
		700	700	700	600	500	500	
		남극 해빙 예측시스템 운영체계 개발			남극 해빙 예측시스템 운영체계 개선 및 최적화			
		300	300	300	300	200	200	
		전처리-자료동화-예측 후처리 자동화 체계 개발			예측결과 검증 및 가시화 도구 개발			
		200	200	200	200	200	200	
		예측시스템의 과거 재예측실험을 통한 성능 진단 및 개선			개별 사례 재예측 실험을 통한 남극 지역 기후시스템 이해도 제고 및 예측시스템 개선			
		200	200	200	100	100	100	
		예측성의 원천 연구 기반 10년규모 장기 남극 해빙 예측시스템 구축			10년규모 장기 남극 해빙 예측시스템 성능 개선			
	AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	700	700	800	700	700	700	11,800
		최신 해빙모델 및 AI기술 기반 계절예측 자료 생산 체계 구축			계절예측 자료 생산 체계 성능개선			
		200	200	200	200	200	200	
		역학 예측 모형 구조적 오차 파악			하이브리드 예측시스템 개발			
		200	200	250	200	200	200	
		딥러닝 기반 남극 해빙 예측 모형 구축			지역별 해빙 예측 상세화 시스템 구축			
		300	300	350	300	300	300	
		최신 AI기술 기반 계절예측 모델 개발 및 해빙 특성 분석			원격상관 및 해빙 특성 활용 계절예측 모델 고도화			
		700	700	700	600	600	600	
		AI 기반 예측시스템 자료동화 기법 개발			AI 기반 예측시스템 자료동화 기법 개선			
		350	350	350	300	300	300	
		부분 컨볼루션 딥러닝 기반 남극 해빙 면적 자료 동화 시스템 개발			AI 기반 다채널 위성/실측 자료 동화 시스템 개발			
		350	350	350	300	300	300	
		AI 기반 남극 해빙 재분석장 생산·검증 및 초기장 생산기법 개발			AI 기반 남극 해빙 초기장 생산 및 해빙 두께 동화 효과 연구			
		400	400	400	400	400	400	
		남극 해빙의 전지구적 영향 이해 기반 남극 해빙 계절예측 개선 방향 도출			남극 해빙 계절예측 개선			
		200	200	200	200	200	200	
		남극 해빙 영향 원격상관 연구			남극 해빙 변동의 전지구적 영향 연구			
		200	200	200	200	200	200	
		남극 폴리냐 발생 메커니즘 및 주요 기후 모드와의 관련성 연구			남극 해빙 및 폴리냐의 변동성 변화 및 예측모형 모의 진단 및 개선			
		200	200	200	200	200	200	
		SIPN South 다중모델 계절예측 자료 및 기법 비교			SIPN South 참여 자료 생산			

‘25~30년 연구내용 및 연구비 소요내역 요약

(단위 : 백만원)

세부과제	세부내용	‘25	‘26	‘27	‘28	‘29	‘30	소 계
남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발	남극 해빙 관측체계 구축	1,600	1,600	1,700	1,500	1,400	1,400	12,000
		첨단 현장 관측기술 기반 남극 해빙 관측체계 구축			남극 해빙 관측망 운영 및 국제협력 관측 프로그램 참여			
		500	500	500	500	400	400	
		급격한 남극 해빙 용융 프로세스 규명			남극 해빙 용융에 영향을 미치는 지역 및 원격 메커니즘 연구			
	남극 해빙 예측시스템 개발	800	900	900	900	800	800	12,200
		지구시스템-해빙모델 결합 남극 해빙 예측시스템 구축			남극 해빙 예측시스템 개선 및 최적화			
		600	600	600	600	500	500	
		해빙 계절예측 전처리 및 자료동화 시스템 구축			해빙 계절예측 전처리 및 자료동화 시스템 성능개선			
		700	700	700	600	500	500	
		남극 해빙 예측시스템 운영체계 개발			남극 해빙 예측시스템 운영체계 개선 및 최적화			
	AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	700	700	800	700	700	700	11,800
		최신 해빙모델 및 AI기술 기반 계절예측 자료 생산 체계 구축			계절예측 자료 생산 체계 성능개선			
		700	700	700	600	600	600	
		AI 기반 예측시스템 자료동화 기법 개발			AI 기반 예측시스템 자료동화 기법 개선			
		400	400	400	400	400	400	
		남극 해빙의 전지구적 영향 이해 기반 남극 해빙 계절예측 개선방향 도출			남극 해빙 계절예측 개선			
		200	200	200	200	200	200	
		SIPN South 다중모델 계절예측 자료 및 기법 비교			SIPN South 공식 참여			

세부사업 산출내역

(단위: 백만원)

		‘25년	‘26년	‘27년	‘28년	‘29년	‘30년
인건비	책임급	760	783	806	830	748	771
	선임급	600	618	637	656	675	696
	원급	1,100	1,133	1,167	929	900	927
	소계	2,460	2,534	2,610	2,415	2,324	2,394
직접비	연구장비·재료비	2,000	2,100	2,200	1,900	1,500	1,500
	이외 직접비	673	582	572	652	729	660
	소계	2,673	2,682	2,772	2,552	2,229	2,160
간접비		1,067	1,084	1,119	1,033	947	947
총 합계		6,200	6,300	6,500	6,000	5,500	5,500

인력

- 총 소요인력(참여율 100%): 280명(연평규 47명)
- 총 소요인력(참여율 100%): 280명(연평규 47명)
- 연봉 기준 책임급 72, 선임급 55, 원급 37(단위: 백만), 연간 3% 상승률
- 상기단가는 계약예규 「예정가격 작성기준」 별표5의 학술연구용역 인건비 기준단가('24년)를 반영한 단가이며, 소수점 첫째자리에서 반올림한 금액임

(단위: 명)

	'25년	'26년	'27년	'28년	'29년	'30년	계
책임급	11	11	11	11	9	9	62
선임급	11	11	11	11	11	11	66
원급	29	29	29	23	21	21	152
총 합계	51	51	51	45	41	41	280

연구 분야별 투입인력

(단위: 명)

	'25년	'26년	'27년	'28년	'29년	'30년	계
남극 해빙 관측체계 구축	17	17	17	15	13	13	92
남극 해빙 예측시스템 개발	17	17	17	15	14	14	94
AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	17	17	17	15	14	14	94
총 합계	51	51	51	45	41	41	280

Korea Polar Research Institute

남극해 급격한 온난화 대응
남극 해빙 예측기술 개발
위한 기획연구

제8장 타당성 분석 및 기대효과

제1절 정책적 타당성 분석
제2절 경제적 타당성

제1절 정책적 타당성 분석

1. 상위계획과의 부합성

가 개요

「국정과제」('22.7)



- 41. 해양영토 수호 및 지속가능한 해양 관리 - 해양영토 수호·확장
- 99. 국격에 걸맞은 글로벌 중추국가 역할 강화 - 기후변화·탄소중립 외교 강화

해양수산과학기술육성법



- 제8조(연구개발사업등의 추진) ① 해양수산부장관은 기본계획을 효율적으로 추진하기 위하여 연도별·분야별 해양수산과학기술 연구개발 과제를 선정하고, 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 기관 또는 단체와 협약을 체결하여 해양수산과학기술 연구개발사업 및 전문인력 양성사업을 추진할 수 있다

해양수산발전기본법

- 제28조2(해양수산분야 신산업 개발의 지원) 정부는 해양수산분야의 신성장동력 창출 및 관련 산업의 육성을 위하여 필요한 시책을 마련하고, 이를 시행하여야 한다

「해양수산기후변화대응R&D 강화 로드맵」('21.11, 해수부)

- 기후변화 진단·예측으로 국민 체감도 높은 정보 생산·제공 및 기후변화 적응·리스크 예방 위해 재해 해양수산 기후변화 K-방어시스템 구축

「제2차 해양수산과학기술 육성 기본계획」('23~'27)





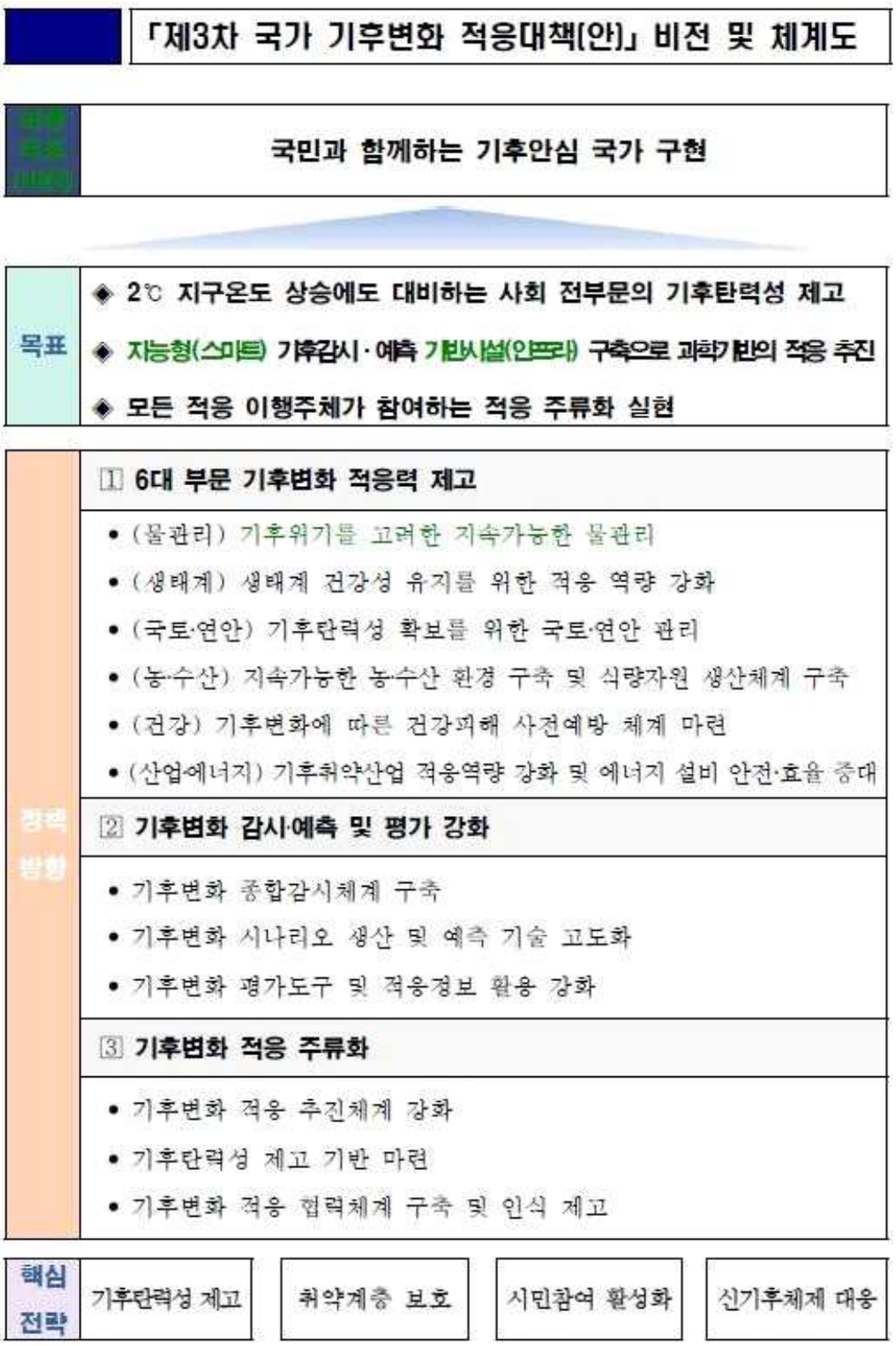
○ 정부 지원의 시급성, 경제·사회적 효과, 해양수산과학기술 정책 부합성, 국가안보, 기술확보 가능성이 높은 10대 해양수산 전략기술

- ⑨극지연구거점 확보에 필수적인 남극 해빙 예측 기술

「국가기후변화적응대책」

○ 우리나라는 기후변화로 인한 피해를 최소화하고 국민의 안전과 재산을 보호하기 위해 『저탄소녹색성장기본법』(48항) 및 동법 시행령(38항)에 따라 2011년부터 5년마다 관계부처합동으로 추진

「제3차 국가 기후변화 적응대책」('21~'25)



○ (정책②) 감시·예측 및 평가 강화 위해 서남극 지역 빙권의 장기 관측자료 확보와 기후변화 시나리오 생산 및 예측 고도화

극지활동 진흥법

- 제8조(연구개발 등의 지원) ① 국가는 극지 관련 연구개발을 촉진하기 위하여 필요한 시책을 수립하고 추진하여야 한다. ② 국가는 극지 관련 연구개발의 활성화를 위하여 대학 · 연구기관 · 기업 간의 협력 및 공동 연구개발 등의 사업을 예산의 범위에서 지원할 수 있다

「제4차 남극 연구활동 진흥 기본계획」('22~'26)



- 미래 기후변화 대응역량 강화 및 국제협력 이슈 주도로 거버넌스 입지 확대

「제1차 극지활동 진흥 기본계획」('23~'27)

2 비전 및 전략

비 전

국민을 위한 극지선도국가 : 미지를 향한 도전, 미래를 향한 도약

목 표

구 분	현 재	2027년	2032년
미지의 영역 진출	• 북극해 일부 공해 (척지해, 보퍼트해, 동시베리아해) • 남극 내륙진출로(路) 구축	• 차세대 쇄빙연구선 활용 북극점 탐사 • 남극 내륙기지 후보지 선정	• 아시아 최초 북극점 국제공동연구 주도 • 세계 6번째 남극내륙기지 구축('30)
기후변화 대응	• 북극발 한반도 기상변화 예측 정확도 최고선도국 대비 40% • 남극 스웨이트 빙하 질량 변화 및 해수면 변동 예측	• 북극발 한반도 기상변화 예측 정확도 최고선도국 대비 60% • 2050년 전지구 해수면 변동 예측 선도국 대비 70%	• 북극발 한반도 기상변화 정확도 최고선도국 대비 90% • 2050년 남극발 한반도 인근 해수면 상승 예측 선도국 대비 100% 이상('31)
극지 신산업 기반마련	• 쇄빙컨테이너선 개발 기획 • 항생제·치매치료제 물질 개발	• 친환경 쇄빙컨테이너선 건조 기술 확보('26) • 항생제·치매치료제 상용화 및 신규 의약물질 기술 개발	• 친환경 쇄빙컨테이너선 건조 및 북극항로 운항 • 신규 의약물질(항균, 면역기능 조절물질) 확보('29)

프런티어 과제

구 분	극지 프런티어 과제
미지의 영역 진출 프로젝트	• 차세대 쇄빙연구선을 활용한 북극점 공동연구 탐사('27) • 빙저호('25), 심부빙하 시추 기술 개발을('27)을 통한 지구의 과거 규명 • 세계 6번째 남극내륙기지 구축('30)
기후변화 대응 프로젝트	• 북극 전역 해빙 변화 실시간 관측을 위한 초소형위성 개발('25) • 남극 전역 빙상 용융에 따른 2050 전 지구 해수면 상승 시나리오 제시('27) • 대기-해양-해빙 통합모델 기반 북극발 한반도 재해기상 예측('27)
극지 신기술 선도 프로젝트	• 친환경 쇄빙컨테이너선 건조 기술 확보('26) • 북극 친환경 수소에너지 기반 탄소제로 연구인프라 조성('27) • 극지 생물자원 활용 신규 의약물질(항균·면역기능조절물질) 확보('29)

5대 추진 전략

❶ 남·북극 미지의 영역 탐사 확대
- 1.1 미지의 영역 개척을 통한 미래 연구 도전
- 1.2 지구 기후와 생태계 변화 비밀 규명
- 1.3 안전한 탐사 지원 기반 고도화

❷ 기후·환경 문제 해결 주도
- 2.1 기후 위기가 초래하는 재해 예측 기술 확보
- 2.2 극지 환경·자원 보호 역량 강화
- 2.3 극지 기후변화에 따른 생태계 변화 예측

❸ 국가 경제에 기여하는 극지 산업 기반 마련
- 3.1 신기술 기반 북극항로 운항 경쟁력 확보
- 3.2 극한지 특화 건설·장비·에너지 개발
- 3.3 지속가능한 극지 수산·생명자원 개발

❹ 다원적 국내외 협력생태계 조성
- 4.1 국가·사회적 협력 채널 구축
- 4.2 국가 간 양·다자 협력 확대
- 4.3 민-관 국제협력 다변화

❺ 참여하고 소통하는 극지활동 강화
- 5.1 첨단 인프라 공유 및 안전관리 확대
- 5.2 차세대 극지전문인재 육성
- 5.3 국민참여의 극지활동 동력기반 마련

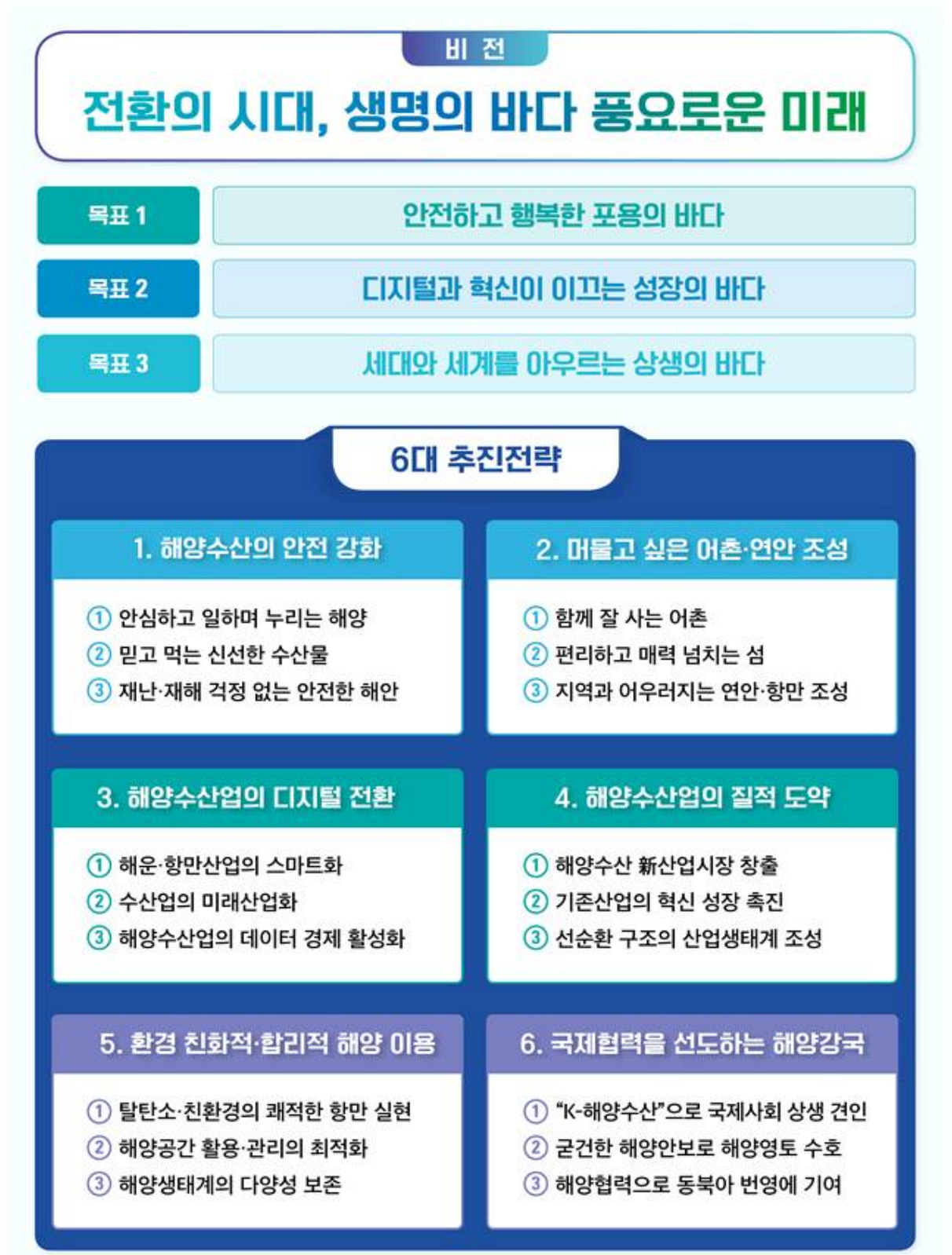
◎ 남·북극 미지영역 탐사 확대 및 국제공동연구 기반 기후문제 해결 주도

「제5차 과학기술기본계획」('23~'27)



- (전략3) 과학기술 기반 국가적 현안해결 및 미래대응
  - (추진과제 3-7) 우주·해양·극지 개척을 통한 과학영토 확대: 해양·극지 등 미개척 영역에 대한 탐사기술 개발과 접근성 증대 및 활용
- 12대 국가전략기술 - ⑥우주항공·해양 기술, ⑨인공지능(AI) 활용 기술

「제3차 해양수산발전기본계획」('21~'30)



「제4차 기후변화대응 해양수산부문 종합계획」('22~'26)

비전

해양수산 탄소중립 대전환과 기후위기 대비태세 완비

정책 목표

- [탄소중립] 2030년 해양수산분야 온실가스 배출량 70% 저감('18년 대비)
- [적응·예방] 연안·해양 기후재해로 인한 재산·인명 손실 최소화
- [이행·점검] 해양 기후위기 대응 정책의 국민 체감도 제고

추진 전략

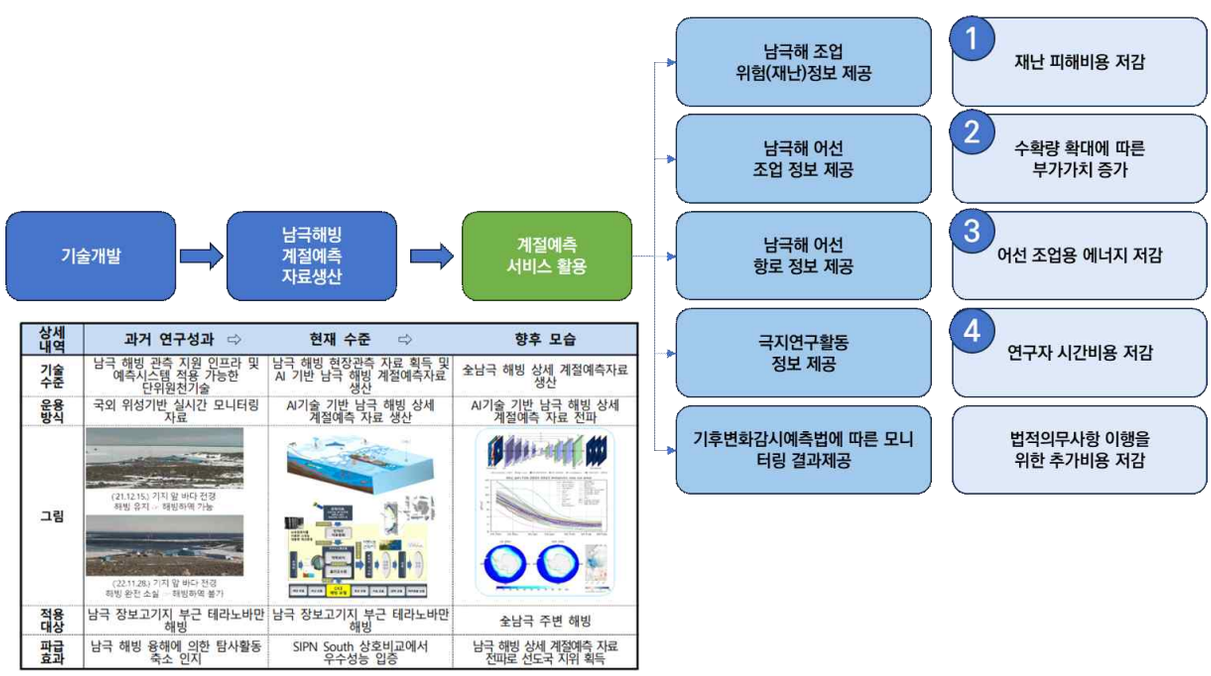
온실가스 배출 저감	▪ Port to Port 탄소중립 해운물류망 도입 ▪ 수산업 가치사슬의 단계별 저탄소 모델 제시 ▪ 온실가스 저감 관점의 해양폐기물 전주기 관리
온실가스 흡수 및 전환	▪ 블루카본 확충·관리분야 국제사회 선도 ▪ 해양에너지 및 CCS의 상용화 추진 ▪ 해양수산업 인프라 기반 신재생에너지·수소경제 확산
기후위기 선제적 대응	▪ 연안 기후재해의 선제적 예방체계 완비 ▪ 수산업의 기후위기 대응체계 공고화 ▪ 해양생태계 기후변화 영향 정밀 분석·대응 ▪ 해운·항만 기후위기 대응력 강화
기후위기대응 이행력 확보	▪ 데이터 기반의 해양 기후변화 관측·예측 ▪ 해양수산 온실가스 감축 실적 확보·관리 강화 ▪ 기후위기대응 협력적 거버넌스 구축

제2절 경제적 타당성 분석

1. 경제적 타당성 분석 개요

■ 동 사업은 남극해빙계절예측 자료를 생산하는 것을 주요목표로 설정하고 있으며 이러한 계절예측결과는 단기중기 예측서비스에 적용되어 다양한 경제적 효과로 이어질 것으로 기대됨

- 남극해 조업과 관련하여 계절예측 서비스 활용에 따라 급격한 해수면 변동을 파악하여 발생할 수 있는 어선좌초 등 재난피해비용을 저감할 수 있음
- 계절예측서비스는 남극해 조업에 필요한 정보를 제공하여 수확량 확대에 따른 부가가치 증가 효과를 산출할 수 있음
- 계절예측시스템은 남극해 항로정보를 제공하여 운항 시 소요되는 에너지 비용을 저감할 수 있음
- 예측정보는 연구자가 남극과학활동을 위해 남극을 방문하는데 소요되는 일정을 조정하여 시간비용 저감효과를 도출할 수 있음
- 단, 일반적으로 예비타당성 평가에서 활용되는 직접적인 편익은 산출하기 다소 한계가 있음으로 경제적 효과를 산출하여 제시함



[그림 93] 동 사업의 경제적 효과 산출 구조

2. 재난 피해비용 저감



가 극지방 선박사고

- 최근 북극해 해빙 감소에 의한 북극항로 확장이 오히려 해빙에 의한 선박 좌초 증가로 이어지는 사례 빈번히 발생
  - 온난화로 인한 북극항로의 확대 상황에서, 지구 온난화는 갑작스러운 한파의 발생 또한 증가시켜 선박 좌초로 이어질 수 있음
  - 2021년 11월 갑작스러운 한파로 인한 북극해 해빙 증가로 18척 이상의 선박이 러시아 연안에서 좌초
  - 해빙 지역에서 좌초된 선박들은 쇄빙선에 의해서만 구조될 수 있으며, 온난화로 인해 남극에서도 이러한 사고가 증가할 것
  - 예측 및 대응체계를 갖추지 못한 채 남극항로가 열리면 결빙·유빙에 의한 선박 좌초 위험 커짐

- 2021년 해운업에서 발생한 해상사고 3,000건 중 전소사고는 총 54건(약 2%)으로 2012년 이후 지속적인 감소세를 나타내고 있다고 밝힘

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total
기관계 고장	12	13	20	27	44	32	46	23	14	18	249
난파 및 좌초	9	9	10	14	6	11	9	8	6	8	89
화재 및 폭발	6	2	4	2	4	1	3	6	8	8	44
충돌	4	4	2		3	2	4	2	3	6	30
접촉	1	3	6	4	5	1	1		1	1	23
침몰	3	1	1	2		1		1	1	2	12
선체파손	2	1	2	1	1	2	2				11
노동쟁의						1					1
기타	2	6	5	5	6	4	6	4	8	15	61
Total	39	38	50	55	69	55	71	44	41	58	520

출처: Allianz Global Corporate & Specialty, *Safety and Shipping Review 2021*. p. 55.

[그림 94] 북극해 선박사고현황 2011-2020(14건 전손사고 포함)

- 영국 해상보험사들의 공동으로 설립한 JHC(Joint Hull Committee)에서 밝힌 북극해 선박 운항의 위험요인은 다음과 같음
  - △해빙과의 접촉(빙하 포함) △해빙에 의한 프로펠러, 방향타 및 기타 기계장치의 손상 △해도에 표시되지 않은 암초에 의한 좌초 △결빙(11-3월) △안개(6-7월이 가장 극심) △충돌 △멀리 떨어져있음
  - 발생하는 구조의 지연·부족 △안전항 항만에 대한 정보 부족이 있으며, △좋지 못한 해도 △부족한 수로도 및 기상 자료 △부족한 위성항법 정보 및 통신 문제가 있다고 설명

- 북극이사회(AC)가 발간한 '2009년 북극 해상운송 평가에 관한 보고서'에 따르면, "주요 북극 해상운송로의 상당한 부분에 대한 해도가 부족하며, 캐나다 북극해 제도 및 보퍼트해가 가장 심하고, 북부해항로(NSR) 상에 있는 카라(Kara)해, 랍테프(Laptev)해, 동시베리아해에서도 마찬가지다"고 밝히고 있음
  - 국제 해상보험업체인 AGCS(Allianz Global Corporate & Specialty)의 '2021년 해운안전보고서(Safety and Shipping Review 2021'에 따르면 2011년부터 2020년까지 10년간 북극권 해상에서 발생한 해상사고는 선박의 전손사고 14건을 포함해 총 520건의 해상사고가 보고되고 있음
  - 사고의 원인으로는 기계파손 및 고장 건수(249건)가 절반 가까운 비중을 차지했으며, 그 다음으로 난파 및 좌초에 의한 사고가 89건으로 많았음
  - 그 외 다른 사고요인으로는 화재 및 폭발, 충돌, 접촉사고, 그리고 침몰사고 등이 발생

- 이러한 선박사고는 전술한 바와 같이 해빙과 깊은 관련성을 가지고 있으며 본 기술개발사업을 통해 확보하게 되는 결과물인 계절예측서비스를 활용하면 선박사고의 위험성을 낮출 수 있음
  - 해빙예측시스템을 활용하여 단기계절예측정보가 제공되고, 이를 바탕으로 남극해를 운항하는 해양수송선, 조업어선이 극단적인 사고로 이어질 수 있는 피해를 예방함을 의미함

나 경제적 효과 추정

1 경제적 효과 산출방법

■ 계절예측서비스는 남극해 조업어선의 사고발생확률을 낮출 수 있는 정보로 의미를 가지며 정확도 향상과 피해저감율을 반영하여 피해비용 절감액이 산출가능함

선박재난 피해비용 절감 효과
= 연간 발생건수 × 선박건조금액 × 시스템 기여율

2 연간발생건 수 추정

■ 남극해에서 조업하는 어선은 남극해양생물자원보존위원회(이하 CCAMLR[1])의 승인을 받아 조업이 가능하며 2023년 기준 30척으로 보고되고 있음

[표 62] 남극해 입어 승인 척 수

국적	입어 승인 척 수	비고
한국	11	이빨고기 조업선 8, 크릴 조업선 3
우크라이나	6	-
러시아	4	-
영국	3	-
뉴지	3	-
중국	3	-
합계	30	-

■ 국내 선박사고 건 수는 선박 100척당 사고 발생건수가 2.77건이며 이를 남극해 조업어선 수에 적용하면 연간 0.55건의 발생확률이 추정가능함

○ 국내 선박사고 건 수는 연근해를 포함하여 원양어선의 사고까지 포괄하고 있는 것으로 남극해와 비교하여 운항조건이 양호하지만 발생하는 건 수이므로 0.55건을 적용하는 것은 무리가 없음

1) CCAMLR(Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources): 남극해 수역의 해양생물자원을 보존하고, 합리적으로 이용하기 위해 1982년에 설립된 국제기구로, 이빨고기류와 크릴류 등을 관리

[표 63] 국내 선박사고 건 수

구분	전체등록선박수	사고발생건수	선박100척당사고발생건수	사망실종자수
2017	95,309	2,582	2.71	145
2018	96,294	2,671	2.77	102
2019	97,623	2,971	3.04	98
2020	106,127	3,156	2.97	126
2021	108,022	2,720	2.52	120
2022	108,584	2,863	2.64	99
합계(평균)	611,959	16,963	2.77	690

※출처:국가통계포털, 해양사고 건 수

3 선박건조 금액 추정

■ 먼저 국내원양어선은 189척이며 200톤이상 1,600톤 미만에 집중되어 있으며 이를 중위값을 이용해 평균을 산출하면 508톤으로 집계됨

[표 64] 국내 원양어선 통계(2022년 12월 기준)

톤 수	계	200T 미만	200T~ 499T	500T~ 1,599T	1,600T~ 2,999T	3,000T~ 5,999T	6,000T~ 19,999T	20,000T이상 20,000T
척 수	189	-	127	41	18	2	1	-

■ 원양어선 건조비용은 통상 톤당 1,000만원 선[2]으로 산출하며 508톤 규모의 선박은 50.8억 원 규모임

○ 남극해에서 사고가 발생하는 경우 극한상황에 처한 것이므로 전소를 가정함

2) 선박건조비용은 선박에 따라 상당한 차이를 보이기 때문에 정확한 금액을 제시하는 것으로 다소 무리가 있으며 톤당 1,000만원은 원양산업협회 관계자의 인터뷰 결과에 따른 것이며 보도자료를 통해 확인 가능함(현대해양, 조선강국서 꽃피지 못한 원양어선, 2019.09.10.)

4 시스템 기여율

- 시스템 기여율은 선박사고를 사전에 대비할 수 있는 이유가 조업준비과정에서 어선정비, 선장의 역량, 어선의 상태 등 다양한 원인이 존재함으로 기술개발에 따른 기여율을 반영하기 위한 것임
  - 시스템 기여율은 동 사업의 목표인 해빙모델 예측 정확도 향상목표치인 예측 오차 30% 감소를 활용하여 30%를 적용하여 산출함

5 경제적 효과 산출결과

- 선박재난피해비용저감효과는 연간 8.38억 원으로 추정되었으며 이는 연간 발생하는 경제적 효과로 10년간 시스템이 구축되고 고도화되는 경우 83.8억 원 규모의 경제적 효과가 기대됨

선박재난 피해비용 저감 효과(연간 8.38억 원)
= 연간 발생건수(0.55건) × 선박건조금액(50.8억) × 시스템 기여율(30%).

3. 수확량 확대에 따른 부가가치 증가



가 계절예측 서비스 활용과 수확량

- 국제항로협회는 파고나 풍속 범위에 따라 어선의 출항 여부를 판단하게 되는데 급격한 남극해빙의 변화로 인하여 해빙모델을 통한 예측이 필요한 상황임
  - 본 기술개발사업은 해빙예측의 사각지대에 있는 남극해에서 조업 중인 어선에 최적화된 남극해 계절예측 데이터를 가공하여, 어업활동에 필요한 정보를 생산하고 제공하는 역할을 함
  - 어업의 수입과 직결되는 기상 및 수온에 따른 산란지 정보 분석이 가능하게 되면서 어획량이 증가할 것으로 기대됨

- 계절예측 서비스 활용에 따른 경제적 효과는 기상 및 기후정보를 활용하여 산업의 생산성 향상 효과를 의미하는 것이나 수산업을 특정하여 공표되고 있는 공식적인 연구결과는 부재한 상황임
  - 2021년 전남지역에서 기상 및 기후정보를 이용하여 생산자(어업인)에게 주요한 정보(수온, 염도, 산란기 등)를 제공하고 전남지역 매출액이 전년대비 120% 달성하였다는 보도자료는 존재함
  - 기상 및 기후 정보를 이용하여 조선업 등에서는 매년 상당한 비용을 절감하고 있다는 다수의 자료는 있으나 구체적인 수치는 확인하기 어려움
  - 또한 유통업, 식품업에서 예측자료를 활용하여 경영전략(주문수량예측, 재고예측 등) 수립에 활용하여 생산성 향상으로 이어진 사례는 있음
  - 어업분야는 기상 및 기후정보를 활용하여 피해저감은 있으나 생산성 향상으로 이어진 사례는 상대적으로 찾아보기 어려움

나 경제적 효과 추정

1 경제적 효과 산출방법

- 계절예측서비스는 남극해 조업 어선의 생산량 확대로 이어질 것으로 기대되며 이를 통해 '수확량 확대에 따른 부가가치 증가 효과'를 경제적 효과항목으로 설정함
  - 먼저 제약조건인 남극해 조업 허가 어선은 우리나라가 가장 많이 확보하고 있으며 기후변화에 따라 극지방 어류는 개체수가 증가하고 있다는 근거를 바탕으로 수확량이 쿼터제로 인하여 감소하지 않는다고 가정함
  - 계절예측서비스는 어선의 조업시점(출항 및 철수), 생태계 예측정보 활용에 따른 산란기 예측, 어류 이동 등의 정보로 이어져 어업 생산성을 높이는 것으로 설정
  - 시스템 기여율은 동 사업의 목표인 해빙모델 예측 정확도 향상목표치인 예측 오차 30% 감소를 활용하여 30%를 적용하여 산출함

수확량 확대에 따른 부가가치 증가 효과
= 연간 생산액 전망치의 증가분 × 시스템 기여율

- 연간 생산액 전망치는 원양어업 중 남극해에서 이루어지는 이빨고기, 남빙양크릴의 생산액 5년간 평균금액을 2031년 초기값으로 설정하고, 계절예측서비스에 따라 매년 5%씩 증가하는 것으로 가정하였음
  - 매년 5% 증가는 2017년에서 2021년까지 연평균증가율 6.48%보다 낮게 설정한 것이며 이는 상당히 보수적으로 설정한 수치임
  - 즉 자연적인 어획량 증가율보다 낮게 설정함으로 가정의 한계점을 극복하기 위한 것임

2 경제적 효과 산출결과

■ 수확량 확대에 따른 부가가치 증가 효과는 기술개발이 완료되고 계절예측서비스가 제공되는 2031년부터 2040년까지 180억 원 규모로 추정됨

[표 65] 수확량 확대에 따른 부가가치 증가 효과

(단위:백만원)

구분	이빨고기류(메로) 생산금액	남빙양크릴 생산금액	생산금액	생산금액증가분	시스템기여율 적용 경제적 효과
2017	74,159	20,990	95,149		
2018	71,764	22,427	94,191	-958	
2019	34,792	26,826	61,618	-32,573	
2020	72,917	27,944	100,861	39,243	
2021	93,725	28,610	122,335	21,474	
2022	75,543	23,272	98,815	-23,520	
2023	통계 공표 전				
2024					
2025	기술개발기간				
2026					
2027					
2028					
2029					
2030	70,483	25,012	95,495		
2031	74,008	26,262	100,270	4,775	1,432.42
2032	77,708	27,575	105,283	5,013	1,504.04
2033	81,593	28,954	110,547	5,264	1,579.25
2034	85,673	30,402	116,075	5,527	1,658.21
2035	89,957	31,922	121,878	5,804	1,741.12
2036	94,454	33,518	127,972	6,094	1,828.17
2037	99,177	35,194	134,371	6,399	1,919.58
2038	104,136	36,953	141,089	6,719	2,015.56
2039	109,343	38,801	148,144	7,054	2,116.34
2040	114,810	40,741	155,551	7,407	2,222.16
합계					18,016.86

4. 어선 조업용 에너지 저감



가 조업용 에너지 저감

- 계절예측 서비스는 남극해 어선 항로 정보를 제공하여 최적항로 서비스를 이용할 수 있으며 이에 따라 어선에 투입되는 연료비를 절감할 수 있음
  - 최적항로서비스는 해양기상환경 예측정보를 활용해 선박이 최적의 효율을 낼 수 있는 항로를 찾아주는 서비스를 의미

- 2021년 시작된 한국형 선박 최적항로 서비스[3]는 항로에 따라 선박의 연료비를 최대5~8%까지 절감할 수 있을 것으로 기대
  - 이에 따라 전 세계적 탄소저감 노력에 따른 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization) 온실가스 규제에도 효과적으로 대응이 가능할 것으로 기대
  - 이 서비스 이용 시 연료 절감율 5% 기준으로 연간 약 6만 톤(t)의 연료가 절감되어 약 23억 원(2백만 달러)의 비용 절감 효과*가 있는 것으로 제시
    * 미주 노선을 항해하는 컨테이너선(13,000 TEU 급) 1회 운항 기준
  - 또한, 외국기관에 기상 및 항로정보 서비스 구매를 위해 국내 해운회사가 정보 사용료로 지불하던 외화도 크게 줄일 수 있게 되음
  - 특히, 연료 소비 절감에 따른 총 선박 온실가스 배출량을 연간 약 59만 톤(2017년 우리나라 선박 온실가스 배출량 1,181만t의 5%) 감축이 가능

- 이러한 선박 최적항로서비스가 남극해 계절예측 자료 생산결과를 활용하여 남극해에 적용되는 경우 국내외 어선의 에너지 절감효과가 실현될 것으로 기대됨

3) 기상청, 한국형 최적항로 기상서비스, 선박 저탄소 해양시대 연다. 보도자료 2021. 11. 25.

나 경제적 효과 추정

1 경제적 효과 산출방법

- 남극해 선박 최적항로서비스는 '어선 조업용 에너지 저감' 효과로 항목을 설정하고, 어로원가 현황 중 연료비를 활용하여 산출함
  - 분석대상은 남극해에서 조업을 하고 있는 어선, 연구선(쇄빙선), 관광선(크루즈선)으로 설정함
  - 연료비는 국내 원양어선 통계조사의 척당 어로원가의 연료비를 활용하여 산출하며 남빙 이빨고기 어선에 해당하는 저연승 어선, 남빙양 크릴 조업에 사용되는 원양트롤 두 가지 어선의 연료비를 활용함
  - 국내 어선 수는 남극해양생물자원보존위원회(CCAMLR[4])의 승인을 받아 조업이 가능 어선 수를 적용
  - 절감율은 기상청의 최적항로 서비스 보도자료에 제시된 에너지 저감율 8%를 일괄적용하였음
  - 시스템 기여율은 동 사업의 목표인 해빙모델 예측 정확도 향상목표치인 예측 오차 30% 감소를 활용하여 30%를 적용하여 산출함

어선 조업용 에너지 저감 효과
= 연간 어로원가 중 연료비 × 국내 어선 수 × 절감율 × 시스템 기여율

2 경제적 효과 산출결과

[표 66] 어선 조업용 에너지 저감 효과 추정결과(단위:백만원)

내역	금액(천원)	추정금액(천원)
1-1.이동항해(MG): 33.09톤 x 843.47천원 x 69일 x 0.7 1-2.이동항해(LNG): 26.33톤 x 938.39천원 x 69일 x 0.3 점화유(MGO): 0.42톤 x 843.47천원 x 69일 x 0.3	1,866,864	6,664,992
2-1.연구항해(MG): 18.05톤 x 843.47천원 x 144일 x 0.7 2-2.연구항해(LNG): 14.36톤 x 938.39천원 x 144일 x 0.3 점화유(MGO): 0.23톤 x 843.47천원 x 144일 x 0.3	2,125,162	
3-1.쇄빙항해(MG): 45.7톤 x 843.47천원 x 36일 x 0.7 3-2.쇄빙항해(LNG): 37.685톤 x 938.39천원 x 36일 x 0.3 점화유(MGO): 0.62톤 x 843.47천원 x 36일 x 0.3	1,358,948	
4-1.정박(MG): 11.11톤 x 843.47천원 x 116일 x 0.7 4-2.정박(LNG): 9.33톤 x 938.39천원 x 116일 x 0.3 점화유(MGO): 0.23톤 x 843.47천원 x 116일 x 0.3	1,072,356	
5. 윤 활 유: 27,150천원 x (22/14) x 4회	170,657	
6. 항 공 유: 69,545리터 x 1,021원	71,005	

4) CCAMLR(Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources): 남극해 수역의 해양생물자원을 보존하고, 합리적으로 이용하기 위해 1982년에 설립된 국제기구로, 이빨고기류와 크릴류 등을 관리

■ 연구선(쇄빙선)은 연간 66.6억 원이 소요되는 것으로 산출되었으며 이는 아라온호의 이동항해와 연구항해를 모두 반영한 것임

■ 2023년 원양어업 실태조사의 원양어선 척당 어로원가에 따르면 연료비가 저연승 어선은 27.4%, 원양트롤 어선은 25.5%로 가장 많은 비중을 차지하고 있음

◎ 척당 어로원가는 원양어선이 연간 조업을 위해 투입되는 비용을 항목별로 산출한 결과임

[표 67] 원양어선 척당 어로원가 현황(2023년 기준)(단위:백만원)

어종	이빨고기류(메로):저연승		남빙양크릴:원양트롤	
구분	금액	비중	금액	비중
어구비	420	7.6%	108	0.9%
연료비	**1,516**	**27.4%**	**3,016**	**25.5%**
입어료	255	4.6%	1,098	9.3%
소모품비	358	6.5%	507	4.3%
주부식비	202	3.7%	215	1.8%
후생비	51	0.9%	50	0.4%
수리비	306	5.5%	555	4.7%
기타출어비	136	2.5%	835	7.0%
선원임금	1,099	19.9%	2,689	22.7%
공제료	320	5.8%	341	2.9%
판매비	595	10.8%	1,718	14.5%
조세공과	11	0.2%	33	0.3%
감가상각비	118	2.1%	640	5.4%
기타관리비	140	2.5%	40	0.3%
합계	5,527	100.0%	11,846	100.0%

※자료 : 국가통계포털, 2023년 원양어업 실태조사

■ 남극해 항해용 에너지 저감효과는 연간 11.7억 원 수준이며 10년간 117.2억 원의 경제적 효과가 도출되었음

◎ 어선 조업용 에너지 저감효과는 연간 5억 원 수준이며 10년간 50.8억 원의 경제적 효과가 도출되었음

◎ 연구선은 연간 1.6억원, 관광선은 연간 5억원 규모의 비용저감효과가 발생하는 것으로 산출되었음

[표 68] 어선 조업용 에너지 저감 효과 추정결과(단위:백만원)

구분	산식	이빨고기류 (메로):저연승	남빙양크릴: 원양트롤	연구선 (쇄빙선)	관광선
척당연료비	A	1,516	3,016	6,664	300
조업어선수	B	8	3	1	70
총 연료비	C=A×B	12,128	9,048	6,664	21,000
에너지 절감율(8%)	D=C×8%	291	217	533	1,680
시스템기여율(30%)	E=D×30%	3,638	2,714	160	504
효과 발생기간(10년)	F=E×10	11,722			

5. 연구자 시간비용 저감



가 연구자 시간비용 저감 효과

- 온난화에 뚜렷한 경향성을 보이지 않았던 남극 해빙면적이 급격히 줄어 '23년 관측 역사상 최저값 기록
  - 전례없는 남극 해빙면적 축소는 장보고기지 주변 해빙두께 감소로 이어져 비행기 해빙활주로 유실되어 비행기 활용한 하계탐사대 출입 불가능
  - 쇄빙선 해빙하역 불가로 남극 연구활동 축소와 기지 건설자재 보급 차질 발생 - 특히 기지 증축 사업비용 약 50억 증액 및 사업기간 2년 연장

- 연구자 시간비용 저감은 계절예측 서비스를 활용하여 남극기지에 출입을 위해 소요되는 비용을 절감하여 발생하는 효과를 의미
  - 예측시스템이 없어 해빙정보가 충분하지 않은 경우 남극 출입을 위한 시간비용이 발생함
  - 남극 출입은 비행기 또는 아라온 호를 활요하는 과정에서 갑작스런 이벤트가 발생하는 경우 출입을 대기해야 하는 경우가 발생함
  - 연구자가 계절예측정보 부재로 인하여 불필요하게 대기하게 되는 시간을 절감하여 발생하는 효과를 연구자 시간비용 저감효과로 산정

1 경제적 효과 산출방법

- 연구자 시간비용 저감은 남극 연구자 출입자 수, 대기시간, 시스템 기여율을 적용하여 산출함
  - 남극 연구자 출입자 수는 월드팩트북에서 제공하는 정보 중 여름 성수기와 겨울 수용인원을 기초로 하고 현재 극지연구소에서 남극을 출입하고 있는 통계를 활용하여 추정
  - 대기시간은 최근 발생한 대기시간인 15일을 일괄적용함
  - 시간비용은 학술연구용역단가를 일일기준으로 재산출하여 적용
  - 시스템 기여율은 동 사업의 목표인 해빙모델 예측 정확도 향상목표치인 예측 오차 30% 감소를 활용하여 30%를 적용하여 산출함

연구자 시간비용 저감
= 남극기지 출입자수 × 대기시간 × 일일시간비용 × 시스템 기여율

2 경제적 효과 산출결과

- 연구자 시간비용 저감효과는 연간 3.5억원 규모로 산출되었으며 경제적 효과 발생기간 10년을 적용하면 35.56억 원으로 추정됨
  - 남극에서 연구를 수행하고 있는 모든 국가의 출입인원인 3,667명을 대입하는 경우 연간 54.3억 원의 기대효과가 산출됨

[표 69] 연구자 시간비용 저감 효과 추정결과

항목	내용	비고
연간 출입인원	240명	극지연구소 내부자료
대기기간(일)	15일	2024년 대기시간
일일시간비용	329,326원	기획재정부 학술용역단가 책임연구원 인건비 기준
시스템기여율	30%	예측정확도
경제적 효과(연간)	355,671,982원	-
경제적 효과(10년간)	35.56억 원	-

[표 70] 남극기지 연간 상주인원

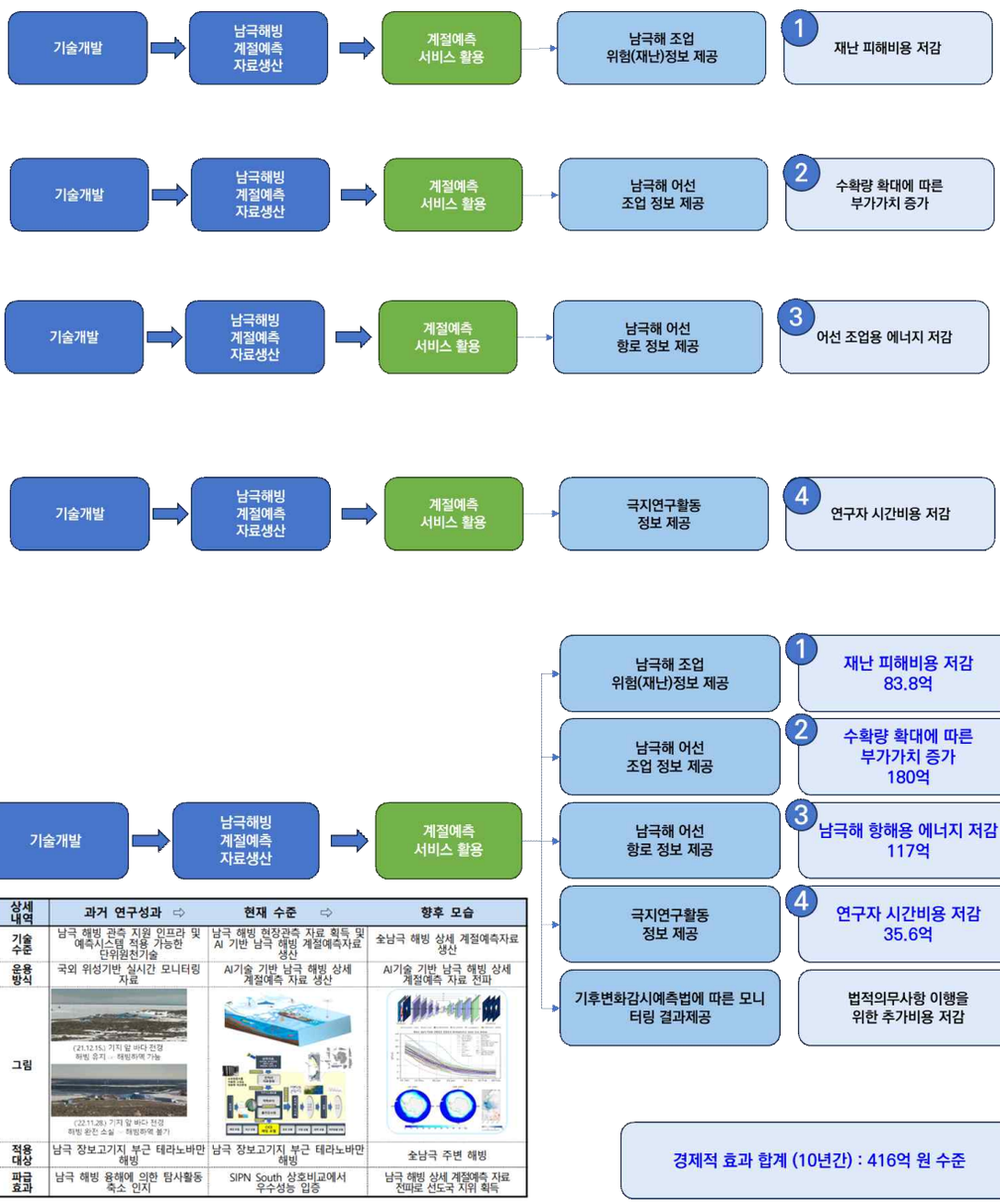
구분	여름성수기(12월~2월) 과학기지의 최대수용인원	겨울(6월~8월) 과학스테이션의최대수용인원	유출입 인원 추정치
미국	1,495	215	1,280
아르헨티나	425	221	204
칠레	375	114	261
영국	315	44	271
호주	238	52	186
러시아	211	125	86
중국	164	32	132
한국	158	25	133
이탈리아	150	-	150
프랑스	136	24	112
일본	130	40	90
뉴질랜드	85	11	74
남아프리카	80	15	65
스페인	79	-	79
인도	72	48	24
프랑스 및 이탈리아 공동	70	13	57
우루과이	66	8	58
브라질	64	15	49
노르웨이	60	7	53
독일	60	9	51
벨기에	55	-	55
폴란드	41	16	25
에콰도르	35	-	35
체코	32	-	32
페루	30	-	30
불가리아	25	-	25
핀란드	16	-	16
스웨덴	16	-	16
우크라이나	15	12	3
벨로루시	15	-	15
합계	4,713	1,046	3,667

※출처 : 월드팩트북(https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/antarctica/)

6. 경제적 효과 종합

■ 계절예측 서비스를 활용하여 발생하는 경제적 효과는 350억 원 규모로 산출되었음

○ 이는 국내 조업어선, 국내연구자 등으로 범위를 한정한 것으로 남극해 특성을 반영하여 조업 및 연구자를 국제수준으로 확대하는 경우 상당한 경제적 효과가 있을 것으로 기대됨



상세내역	과거 연구성과 ⇨	현재 수준 ⇨	향후 모습
기술수준	남극 해빙 관측 지원 인프라 및 예측시스템 적용 가능한 단위원천기술	남극 해빙 현장관측 자료 확득 및 AI 기반 남극 해빙 계절예측자료 생산	全남극 해빙 상세 계절예측자료
운용방식	국외 위성기반 실시간 모니터링 자료	AI기술 기반 남극 해빙 상세 계절예측 자료 생산	AI기술 기반 남극 해빙 상세 계절예측 자료 전파
그림	(21.12.15.) 기지 앞 바다 전경 해빙 유지 → 해빙하역 가능 (22.11.28.) 기지 앞 바다 전경 해빙 완전 소실 → 해빙하역 불가		
적용대상	남극 장보고기지 부근 테라노바만 해빙	남극 장보고기지 부근 테라노바만 해빙	全남극 주변 해빙
파급효과	남극 해빙 용해에 의한 탐사활동 축소 인지	SIPN South 상호비교에서 우수성능 입증	남극 해빙 상세 계절예측 자료 전파로 선도국 지위 확득

Korea Polar Research Institute

남극해 급격한 온난화 대응
남극 해빙 예측기술 개발
위한 기획연구

전문가 자문 반영 현황

사전컨설팅 주요 내용 및 보완 방향

전문가 자문 의견 및 반영 내용

1. 기관고유사업으로 하지 않고 국가 R&D로 추진하는 이유 제시

- **(정책부합성)** '24년 10월 시행될 「기후·기후변화 감시 및 예측 등에 관한 법률」 제8조 기후예측 정보의 생산에 해수부의 남극 해빙 1개월 전망 및 3개월 전망 생산 및 정보제공(기후예측 대상 기간을 1/3개월로 하는 기후예측 정보)이 포함되며, 이는 민간투자가 어려운 국가고유영역
- **(국민체감형 효용성)** 남극 해빙 예측시스템 개발 위해 단기 집중관측 및 시스템 구축에의 투자가 필요하며, 생산된 남극 해빙 기후전망 정보는 남극해 항로 재난 피해비용 저감, 운항에너지 저감, 어선 수확량 증대에 기여 등 경제적 효과 창출 가능
- **(시급성)** 급격한 남극 해빙면적 축소는 ①지구 반사도 감소로 이어져 온난화를 가속화시키며, ②해빙에 서식하는 펭귄 등 어장에 큰 영향을 주는 생태계 파괴로 이어지고, ③남극 과학활동 안정성을 저해하고, ④유빙에 의한 선박 좌초 및 고파고에 의한 연안 인프라 훼손 등 재난 야기
- **(국제의무)** 연구사업 중 최초로 전 세계 기상·기후 관측·예측을 총괄하는 세계기상기구(WMO)/세계날씨연구프로그램(WWRP)의 공식 지원 프로젝트 지위 획득 및 8개국 12개 기관으로부터 협력연구 의향서 접수로 상호협력 약속의무 이행 필요

2. AI 기반 예측시스템 목표 성능을 구체적으로 제시

- 지구시스템모델링 기반 계절예측 분야는 AI를 활용한 성능 증진이 AI 활용 초기부터 적용된 분야(함유근 외, 2019년 네이처紙 게재)
- 특히 사업 기획에 참여한 국내 연구진의 기술력이 세계 최고 수준
- 따라서, 제안사업에서 개발하는 남극 해빙 계절예측 목표수준 또한 선진국 수준과 동일하거나 상회할 것으로 설정

3. 남극 관련 기존 사업들의 성과를 정리해서 제시하여 본 사업의 차별성 부각 필요

- 지금까지 연구소의 남극해 과제 성과 정리하여 제시 (참고3 극지연구소의 남극해 과제 현황 및 성과)

4. 해외 선진국의 해빙 예측모델 및 연구결과를 활용하는 것이 아니라 독자적인 연구를 추진해야 하는 타당성

- 기존 활용되고 있는 외국 해빙 모델 기술수준은 남극 해빙 분야에서는 연구툴로 활용 가능한 정도
- 제한된 접근성과 극한 환경으로 인한 관측자료 부족이 남극 해빙에 대한 지식 미비 및 예측모델 성능 저하로 연계되어 왔음
- 제안사업에서 수행할 집중관측 기반 모델 성능 개선 등 계절예측 자료 실제 활용이 가능한 수준까지 성능 제고가 절실히 필요

5. 극지연구소 비전 및 역할 관련 남극해 급격한 온난화가 한반도에 미치는 연관성에 대한 연구가 사전에 이뤄져야 사업내용 및 추진의 타당성을 더욱 확보할 수 있을 것

- 남극 해빙면적 변화가 동아시아 여름 강수에 영향을 준다는 기존 연구들이 존재하며, 사업 기획에 참여한 국내 연구진은 다년간 남극 해빙 변동성 연구 및 남극-동아시아 원격상관 연구를 수행하여 경험과 전문성을 갖춤
- 기존 연구들 기반 '남극 해빙과 전지구 및 우리나라 원격상관 연구', 그리고 '남극 해빙 변동의 전지구 및 우리나라 영향 규명' 내용이 사업에 포함되어 남극 해빙-우리나라 기후 상관관계 규명이 제안사업의 주요한 성과로 도출될 것
- 따라서 제안사업은 극지연구소 역할과 책임(R&R) 중 '극지역 온난화가 초래하는 국가·사회문제 해결' 임무에 부합하며, 국가 정책(기후변화감시예측법) 달성에 기여하며 국민 삶의 질 향상(남극해 급격한 온난화가 한반도에 미치는 연관성 규명)을 도모하는, 단기 집중관측 및 예측시스템 구축에의 투자가 필수불가결한 R&D 사업

6. 기존 사업(특히 '급격한 남극 빙상 용융에 따른 근미래 전지구 해수면 상승 예측기술 개발')에서 남극 해빙을 포함하여 연구했는지 확인 필요

- 기존 사업(특히 '급격한 남극 빙상 용융에 따른 근미래 전지구 해수면 상승 예측기술 개발')은 2100년까지 IPCC 시나리오에 따른 해수면 상승 예측이 목적이기 때문에, 현장 관측의 경우 해수면 상승의 원인이 되는 육지 위 얼음(빙상과 빙붕) 모니터링에 초점을 맞추고 있어, 해수면 상승에 직접 기여하지 않는 해빙 관측은 수행되고 있지 않음
- 빙붕 용융 활동이 활발한 서남극의 경우 지역적으로 융빙수 유출이 해빙 증가로 이어짐
- 특히 남극해 해빙의 전례 없는 융해는 2022년 하반기 이후 국제적인 주목을 받기 시작한 기후변화의 최신 영향으로, '22년에 기획되어 '23년에 시작된 기존 사업에는 이러한 최신 동향을 반영하고 있지 못함

Korea Polar Research Institute

남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측기술 개발 위한 기획연구

참고자료

참고자료 목록

(1) 사업 추진을 위한 정부 발표대책, 중장기 계획 및 근거법령

(2) 기존·유사사업과의 차별성

(3) 극지연구소의 남극해 과제 현황 및 성과

(4) 극지분야 공모형 R&D 사업 종합적 관리 방안

(5) 극지연구소 역할과 책임(R&R)과의 연계

(6) 해당사업 국가 R&D 적합성

(7) 수정된 연차별 세부 로드맵 및 유기적 연구체계 모식도

(8) 남극 해빙과 우리나라 기후의 상관성

(9) 기존 해빙모델 기술 수준 및 한계

(10) AI 기술 개선목표 및 참여연구진 주요 성과

(11) 국제협력 필요성 및 프로젝트 추진체계

(12) 국제기구 및 국외기관 국제협력 의향서

(13) 해빙 예측모델 국제워크샵 개최('23.10)

(14) 남극 해빙 예측 기술의 필요성 및 국제협력으로 추진해야 할 근거

(15) 국제공동연구 추진에 있어 국내외 연구진 각각의 역할

(16) SIPN South 참여 조건 및 참여의 의의

(17) 남극해 급격한 온난화 대응 관련 현황분석

(18) 남극 해빙 유실에 따른 전지구적 영향 및 잠재적 이슈

(19) 사업 설명자료

(20) 사업 총괄 설명 도면

(21) 기술 개선수준 및 향후모습

(22) 최종성과물 및 기대효과

참고1 사업 추진을 위한 정부 발표대책, 중장기 계획 및 근거법령

「기후·기후변화 감시 및 예측 등에 관한 법률」('24.10.25 시행)

- 제8조(기후예측 정보의 생산) ④ 해양수산부장관은 극지의 환경 및 생태계에 관한 기후예측 정보를 생산하고, 정보통신망에 게재하는 등 적절한 방법을 통하여 국민에게 알려야 한다.
- '24년 10월 발표될 동 시행령에 해빙 1개월 전망(기후예측 대상 기간을 1개월로 하는 기후예측 정보) 및 3개월 전망(기후예측 대상 기간을 3개월로 하는 기후예측 정보) 포함

「국정과제」('22.7)

- 41. 해양영토 수호 및 지속가능한 해양 관리 - 해양영토 수호·확장
- 99. 국격에 걸맞은 글로벌 중추국가 역할 강화 - 기후변화·탄소중립 외교 강화

해양수산과학기술육성법

- 제8조(연구개발사업등의 추진) ① 해양수산부장관은 기본계획을 효율적으로 추진하기 위하여 연도별·분야별 해양수산과학기술 연구개발 과제를 선정하고, 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 기관 또는 단체와 협약을 체결하여 해양수산과학기술 연구개발사업 및 전문인력 양성사업을 추진할 수 있다

해양수산발전기본법

- 제28조2(해양수산분야 신산업 개발의 지원) 정부는 해양수산분야의 신성장동력 창출 및 관련 산업의 육성을 위하여 필요한 시책을 마련하고, 이를 시행하여야 한다

「해양수산기후변화대응R&D 강화 로드맵」('21.11, 해수부)

- 기후변화 진단·예측으로 국민 체감도 높은 정보 생산·제공 및 기후변화 적응·리스크 예방 위해 재해 해양수산 기후변화 K-방어시스템 구축

「제2차 해양수산과학기술 육성 기본계획」('23~'27)

- 정부 지원의 시급성, 경제·사회적 효과, 해양수산과학기술 정책 부합성, 국가안보, 기술확보 가능성이 높은 10대 해양수산 전략기술

  - ⑨극지연구거점 확보에 필수적인 남극 해빙 예측 기술

「국가기후변화적응대책」

- 우리나라는 기후변화로 인한 피해를 최소화하고 국민의 안전과 재산을 보호하기 위해 『저탄소녹색성장기본법』(48항) 및 동법 시행령(38항)에 따라 2011년부터 5년마다 관계부처합동으로 추진

「제3차 국가 기후변화 적응대책」('21~'25)

- (정책②) 감시·예측 및 평가 강화 위해 서남극 지역 빙권의 장기 관측자료 확보와 기후변화 시나리오 생산 및 예측 고도화

기후변화대응 기술개발 촉진법 ('22.12.11)

- 제1조(목적) 온실가스 감축과 기후변화 적응에 관한 기술의 연구기반을 조성하여 체계적으로 육성·발전시키고 국제사회와의 협력을 증진하여 기후변화대응과 관련하여 발생하는 문제에 대한 책임을 다하고 탄소중립 실현 및 국민경제 발전에 이바지하는 것
- 제8조(기술개발사업의 추진) ① 과학기술정보통신부장관, 관계 중앙행정기관의 장 및 지방자치단체의 장은 기본계획 및 시행계획에 따라 맡은 분야에 대한 기후변화대응 기술개발사업(이하 "기술개발사업"이라 한다)을 추진하고 이를 지원하기 위한 시책을 마련하여야 한다.

「제1차 기후변화대응 기술개발 기본계획」('23~'32)

- 과학기술 혁신을 통한 기후위기 대응과 新시장 선점을 위한 3대 전략 및 15대 세부전략 수립

- (전략2) 기후변화 적응
  - (2-4) 과학기술 기반 기후변화 감시·예측 및 영향평가
  - (2-5) 과학기술 기반 재난·재해 관리

극지활동 진흥법

- 제8조(연구개발 등의 지원) ① 국가는 극지 관련 연구개발을 촉진하기 위하여 필요한 시책을 수립하고 추진하여야 한다. ② 국가는 극지 관련 연구개발의 활성화를 위하여 대학·연구기관·기업 간의 협력 및 공동 연구개발 등의 사업을 예산의 범위에서 지원할 수 있다

「제4차 남극 연구활동 진흥 기본계획」('22~'26)

- 미래 기후변화 대응역량 강화 및 국제협력 이슈 주도로 거버넌스 입지 확대

「제1차 극지활동 진흥 기본계획」('23~'27)

- 남·북극 미지영역 탐사 확대 및 국제공동연구 기반 기후문제 해결 주도

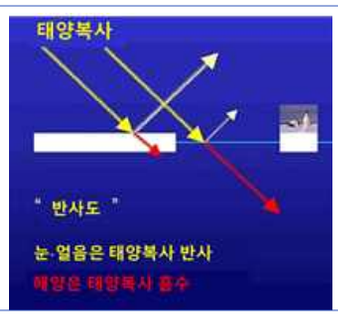
「제5차 과학기술기본계획」('23~'27)

- (전략3) 과학기술 기반 국가적 현안해결 및 미래대응
  - (추진과제 3-7) 우주·해양·극지 개척을 통한 과학영토 확대: 해양·극지 등 미개척 영역에 대한 탐사기술 개발과 접근성 증대 및 활용
- 12대 국가전략기술 - ⑥우주항공·해양 기술, ⑨인공지능(AI) 활용 기술

「기후·기후변화 감시 및 예측 등에 관한 법률」('24.10.25 시행)

- 제8조(기후예측 정보의 생산) ④ 해양수산부장관은 극지의 환경 및 생태계에 관한 기후예측 정보를 생산하고, 정보통신망에 게재하는 등 적절한 방법을 통하여 국민에게 알려야 한다.
  - '24년 10월 발표될 시행령에 해빙 1개월 전망(기후예측 대상 기간을 1개월로 하는 기후예측 정보) 및 3개월 전망(기후예측 대상 기간을 3개월로 하는 기후예측 정보) 이 포함될 예정

참고2 기존·유사사업과의 차별성

구분	기존 연구	신규 과제
과제명	▪ 급격한 남극 빙상 용융에 따른 근미래 전지구 해수면 상승 예측기술 개발	▪ 남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발
연구 목적	▪ 기후변화에 따른 남극 빙상의 급격한 융해 원인 규명 및 전 지구 해수면 상승 기여도 예측기술 개발 * 빙상: 지면(땅)의 넓은 면적에 얼음이 쌓여있는 층	▪ 첨단 현장 관측기술 및 AI 적용 모델기술 기반 남극 해빙 예측시스템 개발 * 해빙: 바닷물이 얼어서 생긴 얼음. 해빙은 물 위에 떠 있는 얼음으로, 해빙 융해가 해수면 상승으로 이어지지 않음
연구 내용	▪ 전남극 빙상모델링 시스템 자체구축 및 해수면 변동 예측 ▪ 빙붕-해양 모니터링 및 빙붕 안정도 연구 ▪ 빙상-지각 상호작용 기반 빙상 손실 및 해수면 변동 예측	▪ 남극 해빙 관측체계 구축 기반 남극 해빙 특성 및 용융 프로세스 규명 ▪ 남극 해빙 예측시스템 개발 ▪ AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산 및 SIPN South 공식 참여
주요 성과물	▪ 남극 육·해상 관측범위 확대 및 남극 정보 175건 확보로 남극 대륙 빙상거동모델 성능개선 ▪ IPCC 단계별(탄소중립/저탄소/고탄소) 시나리오에 따른 근미래(2030/50) 및 먼미래(2100) 남극 빙상-해수면 변동 예측 시나리오 생산역량 제고 ▪ 해수면 예측 정확도 향상 ▪ 우리나라 주도 국제협력 연구 수행 및 국제공동연구 참여 ▪ 빙상모델 상호비교연구(ISMIP7) 공식 참여	▪ 남극 해빙 관측자료 확보 및 선도국 수준 남극 해빙 관측망 구축·운영 ▪ 첨단 남극 해빙 예측시스템 개발로 남극 해빙 예측역량 및 성능 함양 ▪ AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 정기 생산 ▪ 계절예측 인터랙티브 가시화 시스템 ▪ 우리나라 주도 남극 해빙 예측모델링 국제협력 네트워크 구축·운영 및 국제공동연구 수행 ▪ 국제 남극 해빙 계절 예측 프로그램 SIPN South에 공식 참여
연구 범위		 해빙은 녹아도 해수면에 영향이 없지만, **지구 반사도 감소**시켜 온난화 가속화 함
차별성	▪ (탐사요소) 남극 빙상 거동 관련 정보에서, 남극 해빙 프로세스 관련 정보 확보 *** 기존 연구에 남극 해빙 현장 관측은 포함되지 않음** ▪ (개발내용) 전남극 빙상 거동 모델링 기반 해수면 변동 예측 시스템에서, 지구시스템모델-해빙 모델링 기반 남극 해빙 예측 시스템 개발 ▪ (연구성과) 2300년까지 기후 전망을 산출하는 ISMIP7에 공식 참여에서, 계절 예측자료를 산출하는 SIPN South 공식 참여	
기대 효과	▪ 全 지구 해수면 상승 예측 정확도 향상을 통한 남극發 해수면 상승 재난 대응력 제고 ▪ 우리나라가 주도하는 국제협력연구 수행 및 연구성과 확대 통해 국제사회 영향력 유지·확보 ▪ 해수면 상승에 따른 미래 발생 가능한 피해비용 예방 및 방벽설치 방어비용 절감편익, 방벽설치 시점 단축에 따른 편익 기대	▪ 국내 남극 해빙 관측 및 중장기 예측 역량 확보 그리고 해양 안전체계 구축 ▪ 보다 체계적인 남극 과학활동 지원 및 확대 ▪ SIPN South 공식 참여 및 국제협력 네트워크 구축·운영으로 공신력 및 국제 리더쉽 획득 ▪ 선박운항 탄소발자국을 줄이고 인명과 경제적 손실 위험을 저감하여 관련 산업 부흥에 기여

참고3 극지연구소의 남극해 과제 현황 및 성과

과제명	기간	성과
(기관고유사업)		
서남극해 온난화에 따른 탄소흡수력 변동 및 생태계 반응 연구	2020.01.01.~ 2025.12.31.	서남극해 물질순환 변동성과 해양생태계 반응 규명을 통한 남극 연안 해역 해양 먹이망 구조 예측
남극권 맨틀활동과 지체구조 진화 연구	2020.01.01.~ 2025.12.31.	남극 맨틀 특성과 화산활동 기록복원을 통한 질란디아-남극 맨틀과 남극 환경 간의 상호작용 규명
과거 온난기의 서남극 빙상 후퇴 및 해양 순환 변화 연구	2020.01.01.~ 2025.12.31.	국제공동 시추 프로그램 참여를 통한 과거 온난기의 서남극 빙상 변화가 해양에 미친 영향 규명
국제심부빙하시추 네트워크를 활용한 대기-빙상 상호작용의 자연적·인위적 특성 규명	2020.01.01.~ 2025.12.31.	국제공동 빙하코어 연구 기반 구축, 심부빙하 탐사 및 분석기술 확보를 통한 남북극 빙하코어 인류세 기록 복원과 기후·환경 변화 진단
남극 기후 환경 변화 이해와 전지구 영향 평가	2020.01.01.~ 2025.12.31.	빨라진 극소용돌이 붕괴에 의한 남극 여름 온난화 메커니즘 제시 등 남극 극한기상 특성 진단 및 수치모델 재현
남극 기후변화의 지역적 차이 원인 규명	2017.01.01.~ 2019.12.31.	남극 대기의 온난화 조절 요인과 특성을 분석하여 서남극이 동남극보다 더 빠르게 녹는 원인 규명
(해수부 R&D)		
급격한 남극 빙상 용융에 따른 근미래 전지구 해수면 상승 예측기술 개발	2023.04.01.~ 2031.05.31.	전 남극 빙상-해수면 예측 시나리오 산출을 통해 해수면 상승에 대한 정확한 예측으로 미래에 발생할 수 있는 사회적 피해 비용 절감
서남극 스웨이트 빙하 돌발붕괴의 기작규명 및 해수면 상승 영향 연구	2019.06.01.~ 2023.05.31.	남극에서 가장 빠르게 녹고 있는 서남극 스웨이트 빙하 융빙 메커니즘 규명 및 이에 따른 전지구 해수면 상승 기여도 산출

참고4 극지분야 공모형 R&D 사업 종합적 관리 방안

극지 분야 연구개발 기본방향

◎ 해양수산과학기술 육성 기본계획, 남·북극 기본계획*과 극지연구소 R&R을 통해 차별화·연계가 가능하도록 체계적으로 관리

* 제4차 남극 연구활동 진흥 기본계획('22~'26), 북극활동 진흥 기본계획('18~'22)

[표 71] 극지연구소 R&R 주요역할('20.3)

상위역할 1. 기후변화에 의한 극지 환경 변화 감시와 원인 규명	주요역할 1-1	극지형성 메커니즘 규명 및 과거환경 복원 통한 환경 영향 진단
	주요역할 1-2	기후변화에 의한 남북극 환경생태계 변화감시
상위역할 2. 극지역 온난화가 초래하는 국가 사회문제 해결	주요역할 2-1	남북극의 기상·기후변화 진단 및 한반도 영향예측 정보제공
	주요역할 2-2	북극 해빙 및 남극 빙상 변동 관측 감시
상위역할 3. 극지연구 신성장 동력 및 실용화 성과 창출	주요역할 3-1	극지적용 신기술 개발 및 활용성 고도화
	주요역할 3-2	극지연구 성과의 사회 환원을 위한 공공이익 창출
상위역할 4. 극지 미답지(과학 영토) 개척 및 탐사기술 개발	주요역할 4-1	미답지 진출 및 신연구영역 개척
	주요역할 4-2	극지활동 안전 시스템 및 인프라 플랫폼 활용 역량 강화

◎ 국가 R&D와 기관고유사업의 특성에 부합하는 과제를 적극 발굴하고, 사업간 유기적인 연계를 통해 국민이 체감할 수 있는 성과 창출

[표 72] 공모형 국가 R&D 및 기관고유사업 비교

구 분	공모형 국가 R&D 사업	기관고유사업
연구대상	▪ 극지 분야의 문제·이슈에 부합한 목적기초 연구로서 정책 달성을 위한 목적 연구 – 기후변화, 자원활용, 국내외 아젠다(CAOFA 협정, CCAMLR 대응 등) 대응 – 북극권 국가와의 국제협력을 통해 북극이사회 정식옵서버 국가로서 과학외교 기여 ▪ 국가 사회문제 해결 연구로서 남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발 연구 ▪ 극지 생물자원 활용기술(의약품, 신소재 개발 등)의 기술이전 단계 연구	▪ 장기적인 환경·생태계 관측 및 분석, 데이터 축적과 파일럿 (SEED) 성격의 이슈 발굴 ▪ 기상재해 예측을 위한 파일럿 단계의 과제 ▪ 극지 생물자원 활용기술(의약품, 신소재 개발 등) 개발을 위한 극지역 시료 확보, 분류 등의 기초 단계 연구 ▪ 남극 내륙 및 북그린란드 진출 과제
개발단계	• 목적 기초 단계 • 바이오, 신기술 분야 TRL 3~6 또는 기술이전 단계	• 기초 단계

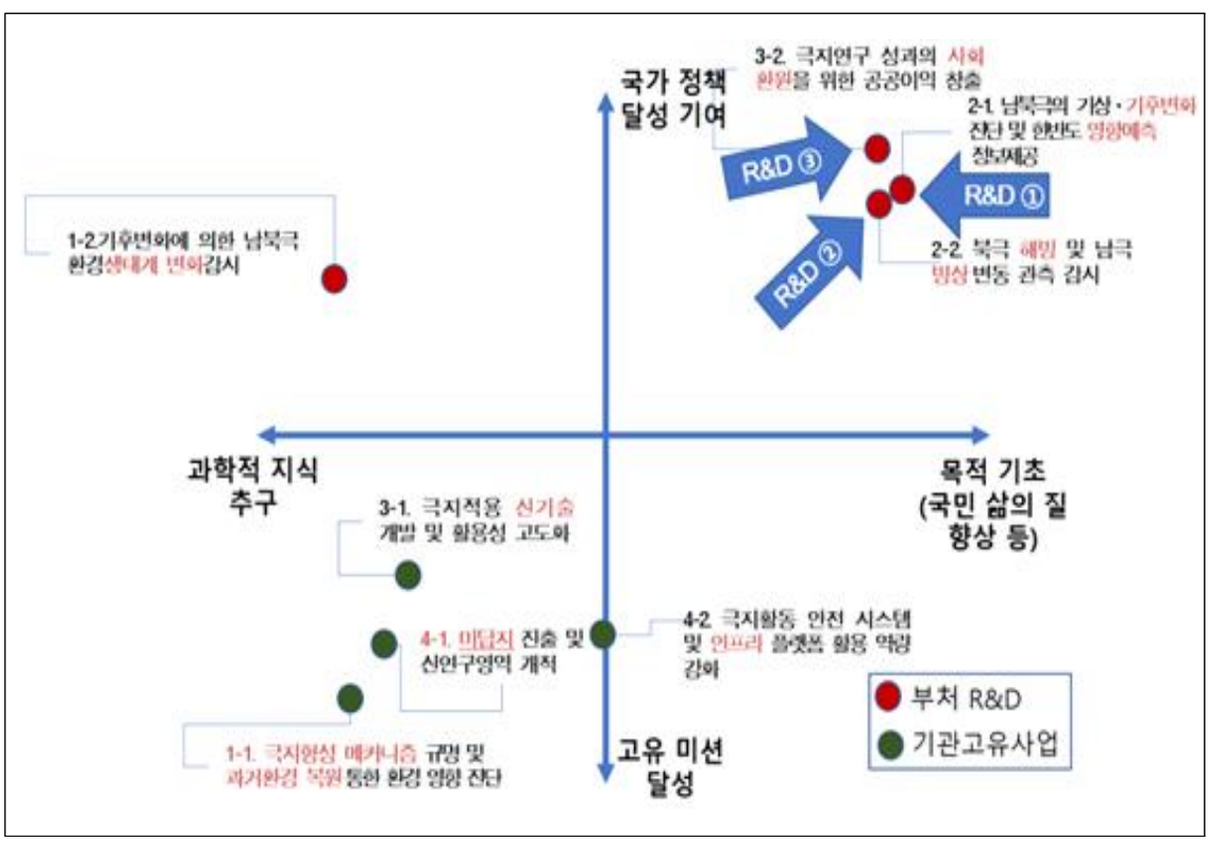
■ (국가 R&D vs 기관고유) 극지연구소 기관고유사업과 연계 및 구분될 수 있도록 ① 국가·국제 아젠다, ② 실용화 연구 연계로 연구내용 차별화하여 각 사업간 R&R 확립

○ 기후변화, 해양 환경보호 등 주요 국제 아젠다(CAOFA 협정, CCAMLR 대응 등)와 해양·극지 분야의 문제·이슈 해결에 부합한 목적형 기초연구는 국가 R&D 사업으로 추진

○ 극지 생물을 활용하여 특허·기술이전 등 실용적 연구성과를 창출하는 실용화 연구(TRL 3~5의 응용연구) 국가 R&D 사업으로 수행

- 기관 고유 사업을 통해 수집·확보된 기초 데이터를 바탕으로 산업화 또는 개발단계 연구로 연계·발전

* 극지 유전자원 활용 기술개발 사업 사례와 같이 기존 연구에서 확보한 기술을 바탕으로 항생·항치매 물질 개발 등 실용화·상용화 연구로 연계·발전



[그림 95] [참고] R&R과 연계, "부처 R&D"와 "기관고유사업" 구분 기준

참고5 극지연구소 역할과 책임(R&R)과의 연계

역할과 책임(R&R)



R&R 추진 기반 FAST 과제와의 연계성

- 2020년 수립된 극지연구소 R&R에서 제시된 4가지 상위 역할은 '기후변화에 의한 극지 환경 변화 감시와 원인규명', '극지역 온난화가 초래하는 국가·사회문제 해결', '극지연구 신성장 동력 및 실용화 성과 창출', 그리고 '미답지 진출 및 신연구영역 개척'임

  * 해양수산과학기술 육성을 위한 정책목표와 방향을 제시하기 위해 수립된 제2차 해양수산과학기술 육성 기본계획(2023~2027)에서도 극지연구소의 핵심 임무로 명시되어 있음

- FAST 과제는 남극 빙권의 해빙 관측 및 분석 기반 기후변화 대응을 위한 남극 관측·예측 기술 개발을 수행하므로 '극지역 온난화가 초래하는 국가·사회문제 해결' 임무에 부합하며 기후변화 예측 정확도 향상에 기여할 수 있음

R&R 상위역할	전략목표	성과목표	연구분야
Ⅱ. 극지역 온난화가 초래하는 국가 · 사회 문제 해결	2 기후변화 대응을 위한 극지 기후 관측·예측 기술 개발	2-2. 기후변화 예측 정확도 향상을 위한 빙권 관측 및 분석기술 개발	**연구분야 ①.** **북극 해빙** 위성 관측 자료 분석 기술 개발 **연구분야 ②.** 남극 빙상-**해수면 변동** 예측 체계 구축 **연구분야 ③.** 남극해 급격한 온난화 대응 **남극 해빙** 예측 기술 개발 (FAST)

[그림 96] 극지역 온난화가 초래하는 국가·사회 문제 해결 역할 內 FAST 과제 위치

참고6 해당 사업 국가 R&D 적합성

공모형 국가 R&D 적합성

○ '남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발' 사업은 극지 분야 시급한 이슈를 해결하기 위한 목적연구

- 극지역 중심의 기후변화 현안대응형 연구사업 개발에 투자 강화하고자 하는 해양수산부 R&D 중점 투자방향에 부합
- "국가 과학영토 확대 위한 극지 등 미개척 영역에 대한 탐사기술 개발과 접근성 증대 및 활용"(제5차 과학기술기본계획,'23~'27)에 부합하며, 12대 국가전략기술에 포함되는 우주항공·해양 기술 개발에 해당
  * '국정과제 41. 해양영토 수호 및 지속가능한 해양 관리' 및 '국정과제 99. 국격에 걸맞은 글로벌 중추국가 역할 강화 - 기후변화·탄소중립 외교 강화' 와 연계

○ 全남극을 대상으로 관측·예측·연구하도록 기획되어 스펙트럼이 넓음

- 지구시스템모델을 활용하는 국내 대학·기관은 다양하고 풀이 넓으며, 이 중 지구시스템모델 내의 해빙모듈에 특히 전문성이 있으면 참여 가능
- R&D 산출물인 해빙 예측 기술이 전남극을 대상으로 할 뿐만 아니라, 남극 해빙 생성·성장·융해 프로세스, 모델링 및 AI기법 기반 예측 기술, 남극 해빙 계절예측 자료 등의 활용도 또한 광범위하여 수혜 주체 다양
- 남극 내 필요한 지역으로 상세화 가능한 기술로 개발하는 사례*를 구현함으로써 향후 남극 다양한 지역의 상세화 기술 및 자료 제공 확장성 내포
  * 장보고기지 테라노바만 상세 해빙 예측자료 산출

시급성 및 필요성

○ (과학적 증거) 급격한 남극 해빙면적 축소는 기후변화의 가장 최신 영향으로 파급력이 상당하며, 대응을 위한 미래 예측역량 증진 필요

- 해빙 면적 축소는 지구 반사도 감소로 이어져 온난화를 가속화시키며, 해수면 상승을 유발하는 빙상 융빙을 촉발할 수 있고, 해빙에 서식하는 펭귄 등 생태계 파괴로 이어지고 있음
- 제한된 접근성과 극한 환경으로 인한 관측자료 부족이 남극 해빙에 대한 지식 미비 및 예측모델 성능 저하로 연계되고 있음

○ (국제 의무) 전 세계 기상·기후 관측·예측을 총괄하는 세계기상기구(WMO)/ 세계날씨연구프로그램(WWRP)의 공식 지원 프로젝트 지위 획득

- 해당 과제 활동이 WWRP 공식 웹사이트에 링크되고 뉴스레터에 실림으로써 전 세계적 홍보 효과 및 다른 국제 프로젝트들과 네트워킹·커뮤니케이션 증진 가능

◎ 벨기에(SIPN South 국제협력 리더쉽), 캐나다, 프랑스, 이탈리아, EU, 중국, 호주, 미국 등 12개 기관으로부터 의향서 접수(별첨1)

- 해빙 예측·관측분야 선진 기관들로부터 효율적인 기술 전수 및 확보 가능 그리고 상호협력 약속의무 이행 필요

최종 산출물의 효용성

◎ '24년 10월 발표될 「기후·기후변화 감시 및 예측 등에 관한 법률」 시행령에 해빙 1개월 전망(기후예측 대상 기간을 1개월로 하는 기후예측 정보) 및 3개월 전망 생산 및 정보제공이 포함될 예정

- 현재까지 국내 남극 해빙 전망 생산 기관 전무하며, 해당 과제의 성공적 수행으로 남극 해빙 장기 전망 생산 가능 (정책 부합성 제고)

□「기후·기후변화 감시 및 예측 등에 관한 법률」('24.10.25 시행)

◎ 제8조(기후예측 정보의 생산) ④ 해양수산부장관은 극지의 환경 및 생태계에 관한 기후예측 정보를 생산하고, 정보통신망에 게재하는 등 적절한 방법을 통하여 국민에게 알려야 한다.

◎ 남극 해빙 유실은 탐사 활동을 축소시킬 뿐만 아니라 어장에 큰 영향을 주는 생태계 파괴 등으로 이어므로 예측에 경제적 효과 막대

- SIPN South 공식 참여를 통해 획득할 수 있는 우수한 남극 해빙 계절예측 자료 인증은 외국 극지기관 및 선박 등에 유용한 해빙 예측자료 전파로 이어져 극지연구 선도국 위상 획득 가능

별첨1 국제기구 및 국외기관과의 국제협력

순번	국가	기관	담당 연구원	공동연구 역할	
				외국	우리나라
1	국제기구	세계기상기구(WMO/세계날씨연구프로그램(WWRP) 극지 결합분석 및 서비스 프로그램(PCAPS)	Daniela Liggett	공식 지원	활동 보고 및 홍보
2	다자간 국제협력 /벨기에	SIPN South /루뱅대학교(UCL)	François Massonnet	SIPN South 주관 및 예측자료 제공	계절예측자료 SIPN South 제출
3	캐나다	캐나다 환경기후변화부 (EC)	Jean-François Lemieux	CICE 해빙모델 구축 및 개선	현장 관측자료 및 인력교류
4	프랑스	피에르-시몬 라플라스 연구원 해양학-기후연구소 (IPSL)	Martin Vancoppenolle	해빙모델 역학·물리과정 개선	현장 관측자료 및 인력교류
5	이탈리아	유럽-지중해 기후변화센터 (CMCC)	Lorenzo Zampieri	해빙모델에 AI 기법 응용	AI 경험 및 노하우, 현장 관측자료 및 인력교류
6	EU	유럽중장기예보센터 (ECMWF)	Peter Bechtold	해빙 계절예측 시스템 구축	현장 관측자료 및 인력교류
7	중국	칭화대학교 (TU)	Shiming Xu	CICE 초고해상도 적용기법	현장 관측자료 및 인력교류
8	호주	호주남극프로그램 (AAP)	Petra Heil	해빙 현장 관측 기술 및 APSeCt 자료 공유	현장 관측 인프라 및 자료 공유
9	미국	우즈홀 해양연구소 (WHOI)	Ted Maksym	해빙 부표 관측 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
10	호주	애들레이드대학교 (UoA)	Luke Bennetts	해빙 파고부표 관측 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
11	미국	스크립스해양연구소	Jamin Greenbaum	AXCTD/XCTD 및 ITP 활용 관측기술	현장 관측자료 및 인력교류
12	미국	라몬 도허티 지구관측소(LDEO)	Chris Zappa	UAV 활용 관측기술	현장 관측 인프라 및 자료 공유
13	미국	뉴욕대학교 (NYU)	David Holland	해빙 위 마스터 구성 및 관측 기술	현장 관측자료 및 인력교류
14	호주	켄터베리 대학교	Wolfgang Rack	UAV EM-Bird 활용 관측기술	현장 관측 인프라 및 자료 공유
15	영국	영국남극연구소(BAS)	Siobhan Johnson	해빙코어 시료채취 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
16	독일	알프레드 베게너 극지해양연구소(AWI)I	Christian Haas	UAV 활용 관측기술	현장 관측 인프라 및 자료 공유
17	호주	호주해양남극연구소	Alex Fraser	통합적 환남극 해빙 자료	자료 활용한 고착빙 메커니즘 연구
18	다자간 국제협력 /독일	알프레드 베게너 극지해양연구소(AWI)I	Stefanie Arndt Alex Haumann	OCEAN DECADES 프로젝트인 남극 관측 동기화 위한 국제 과학과 인프라(Antarctic InSync) 프로젝트 수행 및 인프라와 자료 공유	FAST 수행 및 현장 관측 인프라 및 자료 공유

별첨2 극지연구소 과제 수행 현황

극지연구소 과제 수행 현황

구 분	과제수	연구 지역	과 제 명	비 고
과기부 R&D 사업	1	환북극 동토	· 북극권 육상-대기-연안 환경 변화 대응 및 활용기술 개발(~'24)	국제협력
해수부 R&D 사업	8	북극해 남극해	· 북극해 온난화-해양생태계 변화 감시 및 미래전망 연구(~'26) · 북극해 해저지질 조사 및 해저환경 변화 연구(~'26) · 로스해 해양보호구역의 보존조치 이행에 따른 생태계 변화 연구(~'26) · 극지 유래 생물자원을 활용한 항생제 후보물질 개발(~'24) · 극지 지의류 유래 치매치료제 실용화 연구(~'24) · 극한지 관측 및 정보처리 기술개발(~'25) · 차세대 쇄빙연구선 건조사업(~'26) · 급격한 남극 빙상 용융에 따른 근미래 전지구 해수면 상승 예측기술 개발(~'31)	국제협력, 국제의무이행, 실용화, 다부처 협력
기관 고유 사업	5	북극	· 과거 온난기의 서남극 빙상 후퇴 및 해양 순환 변화 연구 · 지구시스템모델 기반 북극-한반도 통합 재해기상 예측 시스템의 개발 및 활용 · 북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구 · 고환경 및 동물 진화 연구를 통한 북그린란드 미답지 진출 · 얼음의 미세구조 특성연구를 통한 저온 정화기술 및 환경/에너지 신소재 개발	장기 환경·생태계 관측, 파일럿 단계, 기술 개발의 기초 단계
	10	남극	· 남극권 맨틀활동과 지체구조진화 연구 · 국제심부빙하시추 네트워크를 활용한 대기-빙상 상호작용의 자연적·인위적 특성 규명 · 오로라 발생과 극지 고층대기 변동성과의 상관관계규명 · 서남극해 온난화에 따른 탄소흡수력 변동 및 생태계 반응 연구 · 온난화로 인한 극지 서식환경 변화와 생물 적응진화 연구 · 환경변화에 따른 남극 육상생물의 생리생태 반응 규명 · 남극 기후 환경 변화 이해와 전지구 영향 평가 · 포스트 극지유전체 프로젝트; 극지 유용유전자 발굴을 위한 기능유전체 연구 · 남극내륙 연구거점 구축과 기지 후보지 선정을 위한 빙원탐사 · 남극 David 빙하 빙저호 지구물리 탐사기술 및 열수시추 기술개발	장기 환경·생태계 관측, 파일럿 단계, 기술 개발의 기초 단계

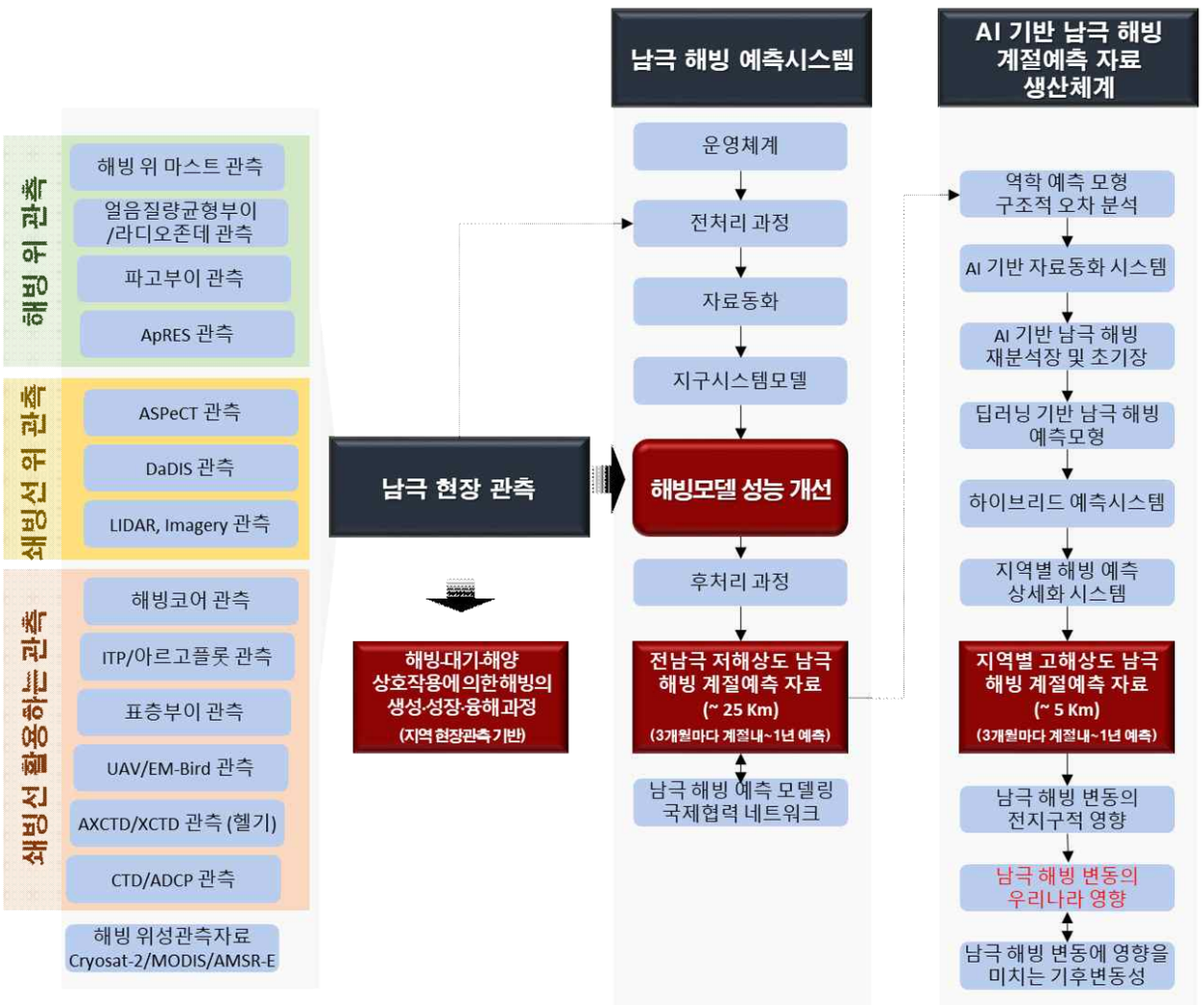
참고7 수정된 연차별 세부 로드맵 및 유기적 연구체계 모식도

남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발

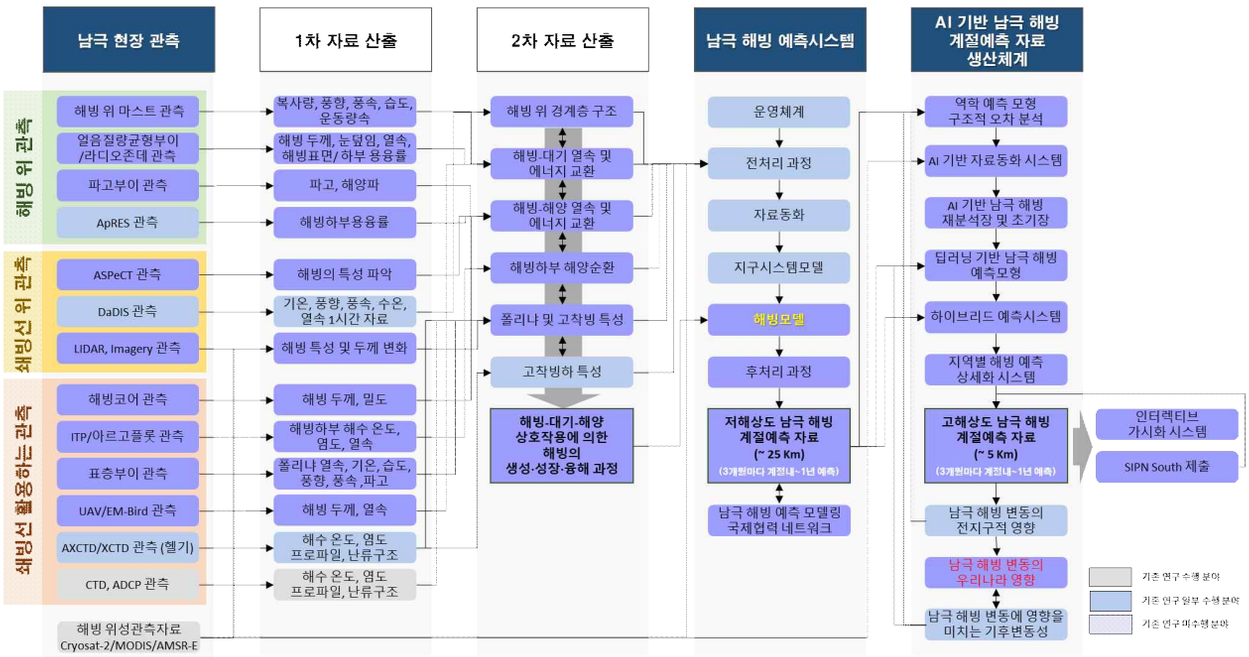
<table>
<tr><th colspan="9">세부 연구내용 및 연구비 소요내역 (단위: 백만원)</th></tr>
<tr><th>세부과제</th><th>세부내용</th><th>'25</th><th>'26</th><th>'27</th><th>'28</th><th>'29</th><th>'30</th><th>소 계</th></tr>
<tr><td>요구금액</td><td></td><td>6,200</td><td>6,300</td><td>6,500</td><td>6,000</td><td>5,500</td><td>5,500</td><td>36,000</td></tr>
<tr><td rowspan="16">남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발</td><td rowspan="16">남극 해빙 관측체계 구축</td><td>1,600</td><td>1,600</td><td>1,700</td><td>1,500</td><td>1,400</td><td>1,400</td><td rowspan="16">12,000</td></tr>
<tr><td colspan="3">첨단 현장 관측기술 기반
남극 해빙 관측체계 구축</td><td colspan="3">남극 해빙 관측망 운영 및
국제협력 관측 프로그램 참여</td></tr>
<tr><td>400</td><td>400</td><td>450</td><td>400</td><td>400</td><td>400</td></tr>
<tr><td colspan="3">해빙-대기-해양 상호작용에 의한 해빙 생성
조절기작 및 성장·융해 물리기작 연구</td><td colspan="3">해빙-대기-해양 상호작용에 의한 해빙의
생성·성장·융해 과정 규명</td></tr>
<tr><td colspan="6">마스트(복사계/3D음속풍속계/습도계), 파고부이, IMB부이, 해빙코어 등 해빙 위 관측장비 설치 및 관측</td></tr>
<tr><td>300</td><td>300</td><td>350</td><td>300</td><td>300</td><td>300</td></tr>
<tr><td colspan="3">해빙 생성·성장·융해에 따른 해빙 하부 융빙수
이류 특성 연구</td><td colspan="3">해빙 생성·성장·융해에 미치는 빙붕 융빙수 역할
규명</td></tr>
<tr><td colspan="6">표층부이, ITP, CTD, ADCP, 아르고플롯 활용 해빙 상하부 관측 기반 해빙 용융률 도출</td></tr>
<tr><td>900</td><td>900</td><td>900</td><td>800</td><td>700</td><td>700</td></tr>
<tr><td colspan="3">해빙 변동에 의한 해양 변화 및 빙하 용융율
변동과의 연관성 분석</td><td colspan="3">해빙-폴리냐 활동성 상관관계 및 해빙 생성량과
고밀도 해수 특성 변화 규명</td></tr>
<tr><td colspan="6">라온 기반 라이다, ASPeCT 관측 및 국제협력 기반 UAV, EM-Bird 활용 해빙 관측</td></tr>
<tr><td>500</td><td>500</td><td>500</td><td>500</td><td>400</td><td>400</td></tr>
<tr><td colspan="3">급격한 남극 해빙 용융 프로세스 규명</td><td colspan="3">남극 해빙 용융에 영향을 미치는
지역 및 원격 메커니즘 연구</td></tr>
<tr><td>300</td><td>300</td><td>300</td><td>300</td><td>200</td><td>200</td></tr>
<tr><td colspan="3">경계층 관측 기반 해빙-대기-해양 상호작용
및 저층제트의 역할 규명</td><td colspan="3">해빙 용융 기작과 연관된 지역 및 원격 대기-해양
메커니즘 연구</td></tr>
<tr><td colspan="6">DaDIS, AWS, 표층부이, 라디오 존데, ITP, CTD 관측 기반 테라노바만 3차원 자료 수집·분석</td></tr>
<tr><td>200</td><td>200</td><td>200</td><td>200</td><td>200</td><td>200</td></tr>
<tr><td colspan="3">고착빙산-고착빙 상호작용 분석</td><td colspan="3">고착빙산-고착빙 상호작용 및 이에 따른 고착빙
이동 특성 규명</td></tr>
<tr><td colspan="6">ApRES, GNSS, AXCTD/XCTD 현장관측 수행 및 고착빙산(Cryosat-2), 고착빙(MODIS),
해빙(AMSR-E) 위성자료 활용</td></tr>
<tr><td rowspan="8">남극 해빙 예측시스템 개발</td><td>800</td><td>900</td><td>900</td><td>900</td><td>800</td><td>800</td><td rowspan="8">12,200</td></tr>
<tr><td colspan="3">지구시스템-해빙모델 결합
남극 해빙 예측시스템 구축</td><td colspan="3">남극 해빙 예측시스템 개선 및 최적화</td></tr>
<tr><td>200</td><td>300</td><td>300</td><td>300</td><td>200</td><td>200</td></tr>
<tr><td colspan="3">CICE 해빙모델 기반 지구시스템-해빙모델 결합
남극 해빙 예측시스템 구축</td><td colspan="3">개발된 남극 해빙 예측시스템 개선
및 장기예측 성능 최적화</td></tr>
<tr><td>300</td><td>300</td><td>300</td><td>300</td><td>300</td><td>300</td></tr>
<tr><td colspan="3">해빙모델 성능 비교평가 및 해빙모델 안정화</td><td colspan="3">해양순환 및 해빙 재현 성능 평가, 해빙 변동 제어
프로세스 도출 및 예측성능 고도화</td></tr>
<tr><td>300</td><td>300</td><td>300</td><td>300</td><td>300</td><td>300</td></tr>
</table>

		남극 고착빙 분포의 모델 재현·예측 성능 개선			남극 연안 고착빙 분포의 모델 재현 성능 검증			
		600	600	600	600	500	500	
		해빙 계절예측 전처리 및 자료동화 시스템 구축			해빙 계절예측 전처리 및 자료동화 시스템 성능개선			
		200	200	200	200	200	200	
		결합 자료동화 위한 해빙-대기-해양 관측자료 전처리시스템 구축			실시간 관측자료 수집 체계 구축 및 운용			
		400	400	400	400	300	300	
		해빙-대기-해양 결합자료동화 시스템 개발			신규 관측자료 확장 및 활용 동화기법 개발			
		700	700	700	600	500	500	
		남극 해빙 예측시스템 운영체계 개발			남극 해빙 예측시스템 운영체계 개선 및 최적화			
		300	300	300	300	200	200	
		전처리-자료동화-예측 후처리 자동화 체계 개발			예측결과 검증 및 가시화 도구 개발			
		200	200	200	200	200	200	
		예측시스템의 과거 재예측실험을 통한 성능 진단 및 개선			개별 사례 재예측 실험을 통한 남극 지역 기후시스템 이해도 제고 및 예측시스템 개선			
		200	200	200	100	100	100	
		예측성의 원천 연구 기반 10년규모 장기 남극 해빙 예측시스템 구축			10년규모 장기 남극 해빙 예측시스템 성능 개선			
	AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	700	700	800	700	700	700	11,800
		최신 해빙모델 및 AI기술 기반 계절예측 자료 생산 체계 구축			계절예측 자료 생산 체계 성능개선			
		200	200	200	200	200	200	
		역학 예측 모형 구조적 오차 파악			하이브리드 예측시스템 개발			
		200	200	250	200	200	200	
		딥러닝 기반 남극 해빙 예측 모형 구축			지역별 해빙 예측 상세화 시스템 구축			
		300	300	350	300	300	300	
		최신 AI기술 기반 계절예측 모델 개발 및 해빙 특성 분석			원격상관 및 해빙 특성 활용 계절예측 모델 고도화			
		700	700	700	600	600	600	
		AI 기반 예측시스템 자료동화 기법 개발			AI 기반 예측시스템 자료동화 기법 개선			
		350	350	350	300	300	300	
		부분 컨볼루션 딥러닝 기반 남극 해빙 면적 자료 동화 시스템 개발			AI 기반 다채널 위성/실측 자료 동화 시스템 개발			
		350	350	350	300	300	300	
		AI 기반 남극 해빙 재분석장 생산·검증 및 초기장 생산기법 개발			AI 기반 남극 해빙 초기장 생산 및 해빙 두께 동화 효과 연구			
		400	400	400	400	400	400	
		남극 해빙의 전지구적 영향 이해 기반 남극 해빙 계절예측 개선 방향 도출			남극 해빙 계절예측 개선			
		200	200	200	200	200	200	
		남극 해빙과 전지구 및 우리나라 원격상관 연구			남극 해빙 변동의 전지구 및 우리나라 영향 규명			
		200	200	200	200	200	200	
		남극 폴리냐 발생 메커니즘 및 주요 기후 모드와의 관련성 연구			남극 해빙 및 폴리냐의 변동성 변화 및 예측모형 모의 진단 및 개선			
		200	200	200	200	200	200	
		SIPN South 다중모델 계절예측 자료 및 기법 비교			SIPN South 참여 자료 생산			

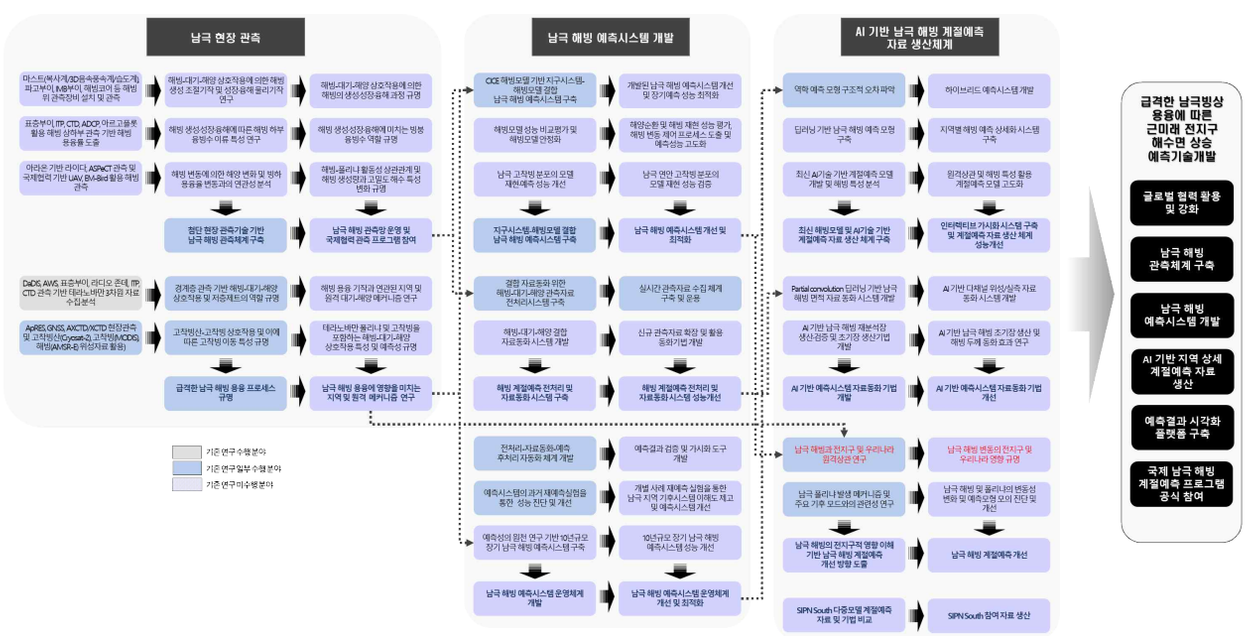
R&D 최종목표 도출 위한 연구체계 흐름도



현장관측으로부터 계절예측 자료 생산까지 흐름도

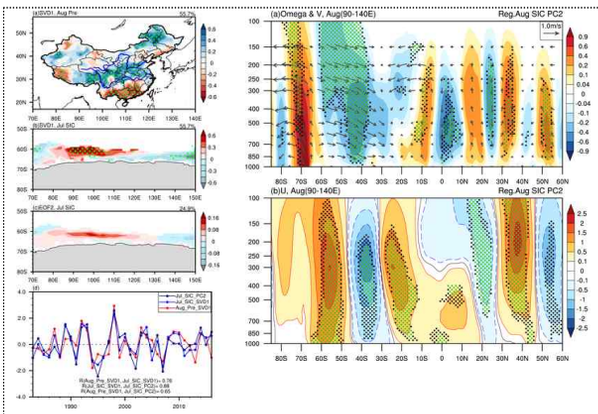


연구주제별 R&D 최종목표 도출 흐름도

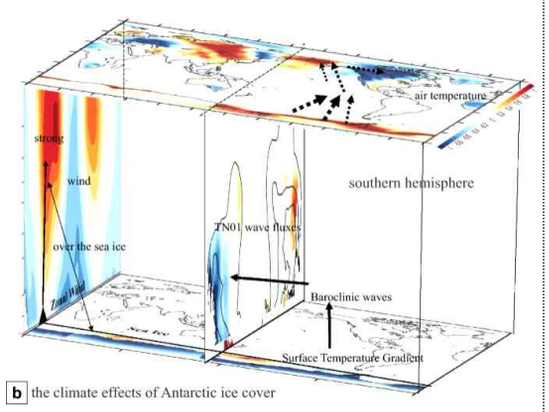


참고8 남극 해빙과 우리나라 기후의 상관성

- 남극 해빙 면적의 감소는 남극 지역 반사도 감소로 이어져 지역 온난화를 증폭시킬 뿐만 아니라 주변 대기·해양 순환을 변화시키고 나아가 동아시아를 포함하는 전지구 대기·해양에 영향을 미침
- 특히 남극 해빙 변동성이 동아시아 강수량에 영향을 미친다는 다수의 연구 존재

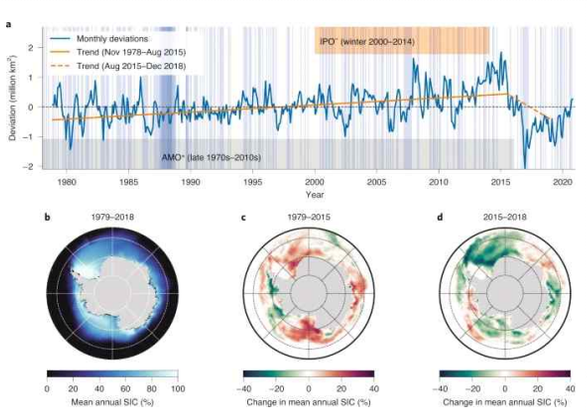


[그림 97] 남극 해빙 변화가 원격상관을 통해 중국 8월 강수에 영향을 미침(2024년 지구물리학연구紙 게재)

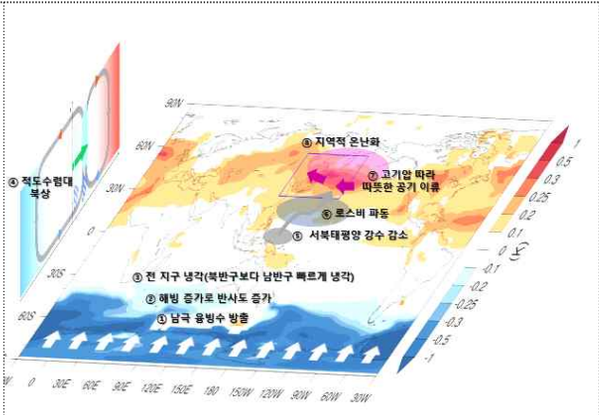


[그림 98] 남극 해빙 면적이 동아시아 및 북미 기후에 큰 영향을 미침 (2021년 기후역학紙 게재)

- 참여 연구진은 최근 남극 해빙 경향성 변화 원인 분석 및 미래 전망, 남극이 녹아 우리나라 온난화를 증폭시키는 원격상관 메커니즘 등 남극 해빙 관련 다양한 측면의 연구를 수행해 왔음



[그림 99] 남극 해빙 경향성의 최근 변화 원인 분석(2021년 네이처지오사이언스紙 게재)



[그림 100] 남극이 녹아 우리나라 온난화를 야기하는 원격상관 연구(2020년 지구물리학 연구회보紙 게재)

- 이러한 경험 및 전문성 기반 본 과제를 통해 남극 해빙과 전지구 및 우리나라 원격상관 연구를 수행하여 남극 해빙 변동의 전지구 및 우리나라 영향 규명을 목표로 함

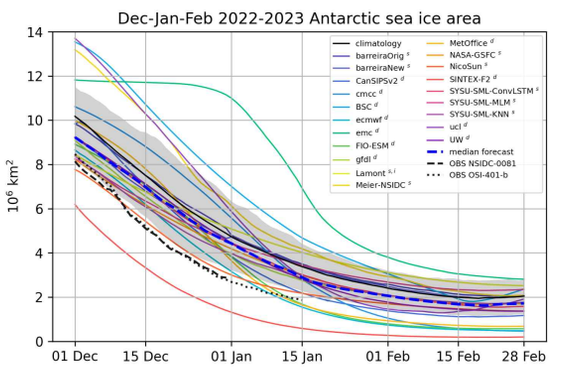
참고9 기존 해빙모델 기술 수준 및 한계

SIPN South 남극 해빙 계절예측 국제공동연구

- 남반구 극지예측의 해(YOPP-SH) 국제협력연구 일환으로 2017년 시작된 국제 남극 해빙예측 네트워크 프로젝트
- 해마다 3개월(12~2월) 남극 해빙면적 계절예측 자료 수집·분석하여 발표해 왔으며, 12개국 22개 기관에서 참여한 최근결과 논문게재
  - 각 기관으로부터 전남극 해빙면적 3개월 예측 결과를 텍스트파일로 받아 상호비교 예측 결과를 산출하기 때문에, 선박 항로 등에 활용할 수 있는 공간분포 자료 확보 불가능



[그림 101] SIPN South 웹사이트



[그림 102] 2022-23년 계절예측 상호비교 결과

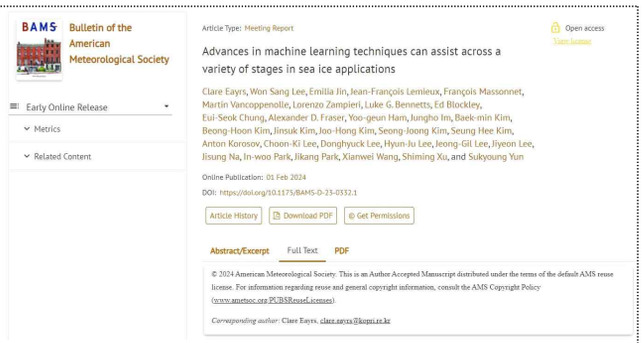
해빙 모델링 기술수준 현황

- 해빙 예측모델 국제워크샵('23년 10월)을 개최하여 해외석학 10여 명 등을 포함8개국 국내외 전문가 40여 명이 해빙 예측모델 개발 현황과 미래 방향 관련 심도깊은 논의를 3일 간 진행
- 해빙 모델링의 현황 기반 문제점 및 개선방향 논의
  - 현재 널리 활용되고 있는 해빙 모델에 파고-해빙 상호작용 등 중요한 프로세스 부재하며, 고착빙 발생·성장·소멸 등 재현성능 매우 저조
  - 최근 급격한 해빙 유실 원인파악 및 전지구적 영향 평가 위해 해빙 소실현황 분석 및 원인 파악을 위한 현장 탐사 및 극지 인프라 투입을 통하여 해빙 변화의 다양한 시공간적 변동성에 대한 이해 필요
  - 물리기반 해빙모델과 AI 기법 결합 적용 가능성이 풍부하나, 보다 효과적인 적용 위해서는 여전히 더 많은 관측 자료 필요
  - 모델 활용 관측위치 결정, 모델 산출 변수와 관측 변수의 일관성 확보, 현장 관측자료 기반 해빙 모델 강제력 개선, 새로운 관측 변수 획득 기반 해빙 모델 개선 등 모델-관측 결합 활용 제고 필요

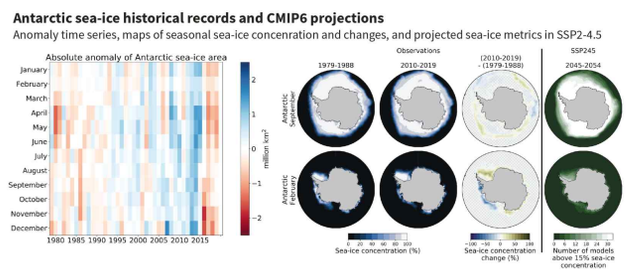
- 논의 결과를 요약하여 ’24년 3월 미국기상학회보紙에 게재
- 2021년 출간된 IPCC 6차 평가보고서에서는 남극 해빙 모델에서 산출된 남극 해빙 미래전망의 신뢰도가 낮다고 평가
  - 현재 지구시스템 모델들이 여름철 최소 남극 해빙 면적을 과소모의하며, 모든 미래 시나리오에서 21세기의 해빙 손실을 전망하지만 온난화를 과대모의 하는 경향 보임
  - 특히 지역규모에서 해빙 과정 모의성능이 부족하여 과거와 미래의 남극 해빙 진화에 대한 모델 시뮬레이션에 대한 신뢰도가 낮음



[그림 104] 해빙 예측모델 국제워크샵 홍보자료



[그림 103] 〈해빙 예측모델 국제워크샵 결과 미국기상학회보紙 게재(2024년 3월)〉



[그림 105] IPCC 6차보고서에 수록된 남극 해빙 현황 및 미래전망 (제1실무그룹보고서 그림번호 9.15)

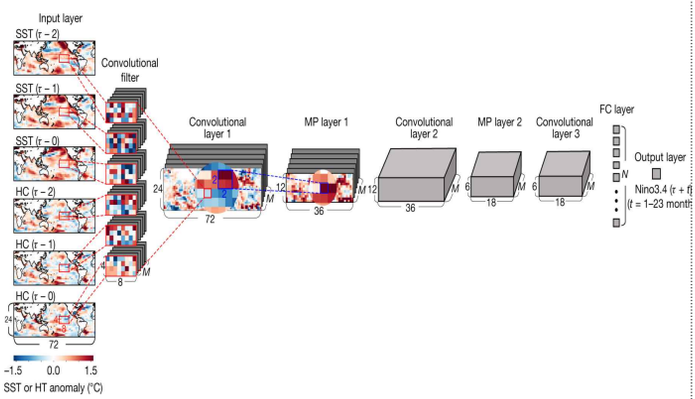
참고10 AI 기술 개선목표 및 참여연구진 주요 성과

관련 기술 현황 목록 및 기술 수준 표시

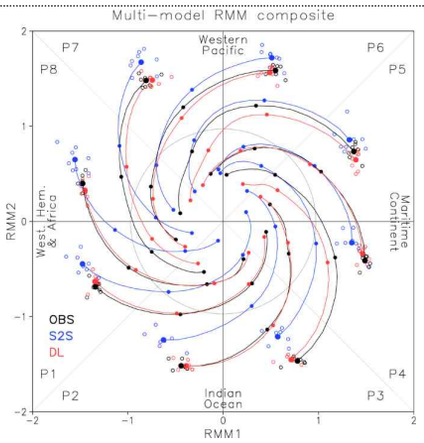
구분	기술분야	선진기관	선진수준	국내수준	목표수준
남극 해빙 관측체계 구축	남극 해빙 직접 관측기술	WHOI(미)	●●●●○	●○○○○	●●●○○
	폴리냐 생성·소멸 과정 관측	SCRIPPS(미) AAP(호)	●●●●○	●○○○○	●●●○○
	해빙 상·하부 관측기술	LEDO(미) AWI(독)	●●●●○	●○○○○	●●●○○
남극 해빙 예측시스템 개발	해빙모델링	EC(캐) IPSL(프)	●●●●○	●○○○○	●●●○○
	계절예측 시스템 구축	ECMWF(EU)	●●●●●	●●○○○	●●●○○
	전처리 및 자료동화	ECMWF(EU)	●●●●●	●●○○○	●●●○○
AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	딥러닝 기반 하이브리드 예측	Oxford Univ.(영)	●●●●○	●●●●○	●●●●●
	AI 기반 해빙 계절예측 자료 생산	EMCC(이)	●●●●○	●○○○○	●●●●○
	AI 기반 자료동화	ECMWF(EU)	●●●●○	●●○○○	●●●●○
	남극 해빙의 전지구적 영향 연구	Columbia Univ. (미)	●●●●○	●○○○○	●●●○○

국내 참여 연구진의 AI 관련 주요 성과

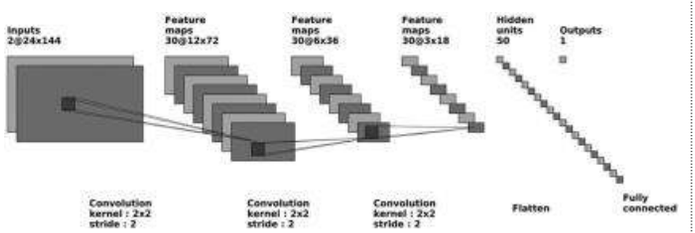
지구시스템모델링 기반 계절예측 분야에서 제한된 관측자료로 야기되는 예측성의 한계를 극복하기 위해 AI 기술 도입 연구 성과



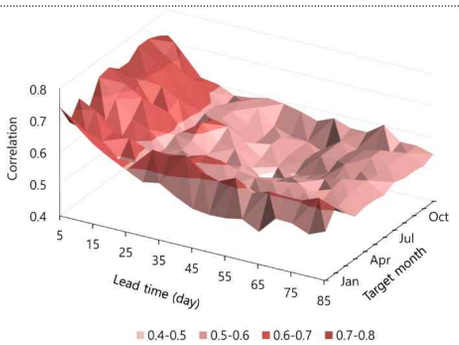
[그림 106] 딥러닝 적용한 엘니뇨 장기예측(2019년 네이처紙 게재)



[그림 107] 딥러닝을 적용한 계절내진동 예측 개선 (2021년 네이처커뮤니케이션즈紙 게재

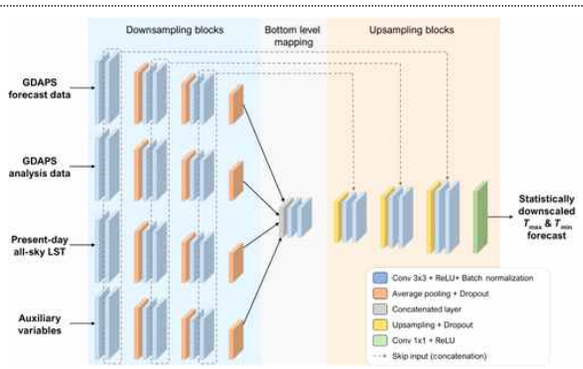


[그림 108] 딥러닝 적용한 엘니뇨 예측성 연구(2022년 지구시스템위한 인공지능紙 게재)

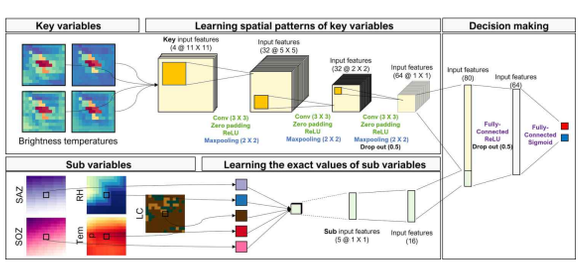


[그림 109] 딥러닝 적용한 서태평양 강수 예측 (2023년 NPJ기후와대기과학紙 게재)

예측성능 개선을 위해 AI 기술 도입하여 공간해상도 제고 기술 확보 및 수치모델-위성자료 통합기술 개발 연구 성과



[그림 110] 딥러닝 기반 예측자료 공간해상도 다운스케일링 기술 개발(2023년 영국왕립기상학회 계간紙 게재)



[그림 111] 수치모델과 위성자료 통합 산불 딥러닝 모델 개발 (2023년 환경원격탐사紙 게재)

참고11 국제협력 필요성 및 프로젝트 추진체계

1. 국가간 협력 필요성

남극 해빙 예측 기술 필요성

○ 급격한 남극 해빙면적 축소는 기후변화의 가장 최신 영향으로 파급력이 상당하며, 대응을 위한 미래 예측역량 증진 필요

- 해빙 면적 축소는 지구 반사도 감소로 이어져 온난화를 가속화시키며, 해수면 상승을 유발하는 빙상 융빙을 촉발할 수 있고, 해빙에 서식하는 펭귄 등 생태계 파괴로 이어지고 있음
- 제한된 접근성과 극한 환경으로 인한 관측자료 부족이 남극 해빙에 대한 지식 미비 및 예측모델 성능 저하로 연계되고 있음
  ※ 2021년 출간된 IPCC 6차 평가보고서에 현재 지구시스템 모델들의 남극 해빙 면적 모의 성능이 불충분하여 미래전망의 신뢰도가 낮다고 평가

국가간 협력 필요성

○ (국내 전문인력 육성) 국내 관련분야 투자 및 인력양성 미비하여 남극 해빙 관측 및 예측 관련 국내 전문가 제한적

- 남극 해빙 융해는 2022년 이후 이슈화된 기후 변화의 최신 영향으로, 국내 연구진이 관측을 수행한 바 없어 해빙 관측분야 국내 전문가가 전무하여 전문인력 육성이 절실
- 국내 해빙모델 개발 및 개선 연구를 수행하는 기관은 없으며, 대다수 대학 및 연구기관에서는 미국 및 유럽의 커뮤니티 지구시스템모델을 도입하여 해빙 관련 연구를 수행 중으로 국내 연구 수준은 여전히 추격 단계
  ※ 기상청 및 해양과학기술원에서 각각 기존 선진국의 지구시스템모델을 도입·개선하여 활용하고 있는 예측시스템의 일환으로 해빙모델 모듈이 포함되어 있으나 관련 전문가는 부족

- 국외에서는 이미 12개국 22개기관에서 남극 해빙 계절예측이 수행되고 있으며 첨단의 AI 기반 예측시스템 개발 또한 활발하여 해빙예측 선진 기관들로부터의 기술전수·확보 최적기
  ※ 남반구 극지예측의 해(YOPP-SH) 국제협력연구 일환으로 2017년 시작된 남부 해빙예측 네트워크(Sea Ice Prediction Network South)는 분기별 남극 해빙 예측자료 수집 및 상호비교

○ (개발 효율성 제고) 남극 해빙 관측 및 예측분야 학문 후속세대 양성 및 지속가능한 협력 네트워크 구축 필요

- 선도국과의 격차를 단기간에 해소 위해 효율적 남극 해빙 예측 기술 개발 전략으로 예측역량 증진 필요
- 실질적 성과 산출 위해서는 선도국의 기술 및 노하우를 습득하고 우리의 현장 인프라,

관측자료, 연구인력 공유 및 해빙 계절예측 자료 제공하는 상보적 협력관계 구축 및 국제협력 의향서 또는 MOU 기반 상호협력 약속의무 체결 필요

◎ (AI 기반 첨단 기법 도입) 다른 지역에 비해 예측성이 낮은 남극 지역은 AI 활용 기반 획기적인 기술 발전 가능성이 열려 있음

- 국제공동연구 참여 및 국제 네트워크 구축·운영으로 급변하는 예측기술 개발 추세의 최신 현황을 분석하여 최적의 남극 해빙 예측기술 개발방향 적시에 설정 및 적용 필요

※ SIPN South는 단일모델보다 다중모델 앙상블 평균의 남극 해빙 계절예측 성능이 더 우수하며, AI를 포함하는 경험적 통계모델이 역학모델 성능보다 더 우수하다고 요약하여 국제학술지 해양과학 프론티어스에 발표('23.05)

- 최근 진화하고 있는 AI-물리모델 통합기법 개발 및 예측시스템 자료동화에 AI 기법 적용 등 예측성 제고에 효과적인 첨단 기술 트렌드 습득 및 반영

◎ (국제적 공신력 획득) 국제 남극 해빙 계절 예측 프로그램 공식 참여 및 국외 협력 기관들과 국제협력 네트워크 구축·운영으로 공신력 및 국제 리더쉽 획득

- 현재 12개국 22개 기관이 참여하고 있는 국제 남극 해빙 계절 예측 프로그램 SIPN South에 공식 참여함으로써 산출된 예측 자료의 성능 검증 및 국제적 공신력 획득

※ SIPN South 참여 조건은 매해 12월 9일 남극 해빙면적 일평균 3개월 계절예측 자료(12월 1일부터 2월 28일까지) 필수 제출. 이외에 남극 해빙 10도 경도 간격 일평균 자료, 남극 해빙농도 일평균 자료, 남극 해빙두께 일평균 자료, 그리고 남극 해빙면적 월평균 자료 6개월 이상 예측 자료 등 추가 제출 가능

- 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축·운영으로 공동연구 활성화 및 국제 리더쉽 획득

※ 과제 기획을 위해 해빙 예측모델 국제워크샵('23년 10월 24-26일)을 개최하였으며, 8개국 해빙 예측 전문가 그룹과 해빙 예측 관련 국제 기술 현황 및 공동연구를 논의하고 향후 우리나라 주도의 정기 네트워크 운영 논의

2. 국가간 협력 추진상황

국가간 협력 의향서 접수 (붙임 참조)

- 전 세계 기상·기후 관측·예측을 총괄하는 세계기상기구(WMO)/세계날씨연구프로그램(WWRP)의 공식 지원 프로젝트 지위 획득
  - FAST 프로젝트 활동이 WWRP 공식 웹사이트에 링크되고 뉴스레터에 실림으로써 전 세계적 홍보효과 및 다른 국제 프로젝트들과 네트워킹·커뮤니케이션 증진 가능

- 벨기에(SIPN South 국제협력 리더쉽), 캐나다, 프랑스, 이탈리아, EU, 중국, 호주, 미국 등 10개 기관으로부터 의향서 접수
- 해빙 예측·관측분야 선진 기관들로부터 효율적인 기술 전수 및 확보 가능 그리고 상호협력 약속의무 이행 필요
- 국제 프로젝트 Antarctica InSync와의 협력, 그리고 6개 기관과 협력의향서 교환 논의 중(③의 표 참고)

순번	국가	기관	담당 연구원	공동연구 역할	
				외국	우리나라
1	국제기구	세계기상기구(WMO)/세계날씨연구프로그램(WWRP)	Estelle de Coning	공식 지원	활동 보고 및 홍보
2	국제협력/벨기에	SIPN South/루뱅대학교	François Massonnet	SIPN South 주관 및 예측자료 제공	계절예측자료 SIPN South 제출
3	캐나다	캐나다 환경기후변화부	Jean-François Lemieux	CICE 해빙모델 구축 및 개선	현장 관측자료 및 인력교류
4	프랑스	피에르-시몬 라플라스 연구원 해양학-기후연구소	Martin Vancoppenolle	해빙모델 역학·물리과정 개선	현장 관측자료 및 인력교류
5	이탈리아	유럽-지중해 기후변화센터	Lorenzo Zampieri	해빙모델에 AI 기법 응용	AI 경험 및 노하우, 현장 관측자료 및 인력교류
6	EU	유럽중장기예보센터	Peter Bechtold	해빙 계절예측 시스템 구축	현장 관측자료 및 인력교류
7	중국	칭화대학교	Shiming Xu	CICE 초고해상도 적용기법	현장 관측자료 및 인력교류
8	호주	호주남극프로그램(AAP)	Petra Heil	해빙 현장 관측 기술 및 APSeCt 자료 공유	현장 관측 인프라 및 자료 공유
9	미국	우즈홀 해양연구소	Ted Maksym	해빙 부표 관측 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
10	호주	애들레이드대학교	Luke Bennetts	해빙 파고부표 관측 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
11	미국	캘리포니아대학교 스크립스해양연구소	Jamin Greenbaum	AXCTD/XCTD 및 ITP 활용 관측기술	현장 관측 인프라 및 자료 공유

3. 프로젝트 참여주체 및 역할 분담 방안

남극 해빙 모델링 및 예측분야 공동연구, 국제협력 활동 참여, 국제협력 네트워크 구축·운영

남극 해빙 계절예측 모델링 분야 선도국과 공동연구

- 남극 해빙 예측 모델링 분야 선도국인 캐나다, 프랑스, 이태리, EU, 중국 해빙 모델 그룹과 국제공동연구 수행으로 KOPRI 남극 해빙 예측시스템 구축 및 개선
- 협력 기관들과 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축 및 운영으로 공동연구 활성화 및 리더쉽 획득 도모
  ※ 2023년 10월 24-26일 극지연구소에서 주최한 해빙 예측모델 국제워크샵에 참여한 8개국 해빙 예측모델 전문가 그룹 기반 격년주기 오프라인 미팅 논의

남극 해빙 계절 예측 국제협력 활동에 참여

- 국제 남극 해빙 계절 예측 프로그램 SIPN South*과의 협력 기반 다중모델 계절 예측자료 및 기법을 실시간으로 입수하여 KOPRI 예측시스템 개선
  ※ 국제 남부 해빙 예측 네트워크(Sea Ice Prediction Network South)를 이끌고 있는 벨기에 루뱅대학교 François Massonnet 교수와 협력 예정
- 국제 남극 해빙 계절 예측 프로그램 SIPN South에 공식 참여

남극 해빙 관측분야 공동연구, 국제협력 활동 참여, 국제기구 공인

세계기상기구(WMO)/세계날씨연구프로그램(WWRP)이 지원하는 공식 프로젝트 지위 획득

- WMO/WWRP 산하 극지 결합분석 및 서비스 프로그램(PCAPS)의 목표 남극 예측 향상에 부합하는 과제로서 공식 프로젝트 지위(endorsement) 획득
  ※ 수치모델 활용 기반 극지역 예측성 제고를 목표로 하는 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO) 세계날씨연구프로그램(World Weather Research Programme, WWRP)의 극지 결합분석 및 서비스 프로그램(Polar Coupled Analysis and Prediction for Services , PCAPS) ('24~'28)

국외 선도 연구기관과 협력 기반 남극 첨단 해빙 관측기술 도입 및 공동 관측

- 남극 해빙 관측 분야 선도국인 호주, 영국, 미국 관측 그룹으로부터 첨단 관측기기 전수 및 현장 관측 협력연구 수행
  ※ UAV, 파고부이, 해빙부이, 해빙 위 마스터, 해빙코어, ITP, AXCTD/XCTD 등

남극 해빙 관측기술 개발 및 자료 획득을 위해 국제협력 프로그램에 참여하여 자료 공유·교환

- 국제 남극 해빙-기후 협력 프로그램 ASPeCt, 국제협력 프로그램 SHARC, 국제 남극 해빙 관측망 NECKLACE 에 참여
  ※ SCAR Antarctic Sea Ice and Climate(ASPeCT), Southern Hemisphere Antarctic

Research Collaborative(SHARC) 프로젝트, 남빙양관측시스템(SOOS) Network for the collection of knowledge on melt of Antartic ice shelves(NECKLACE), SCAR Antarctic Sea Ice and Climate(ASPeCT) 등

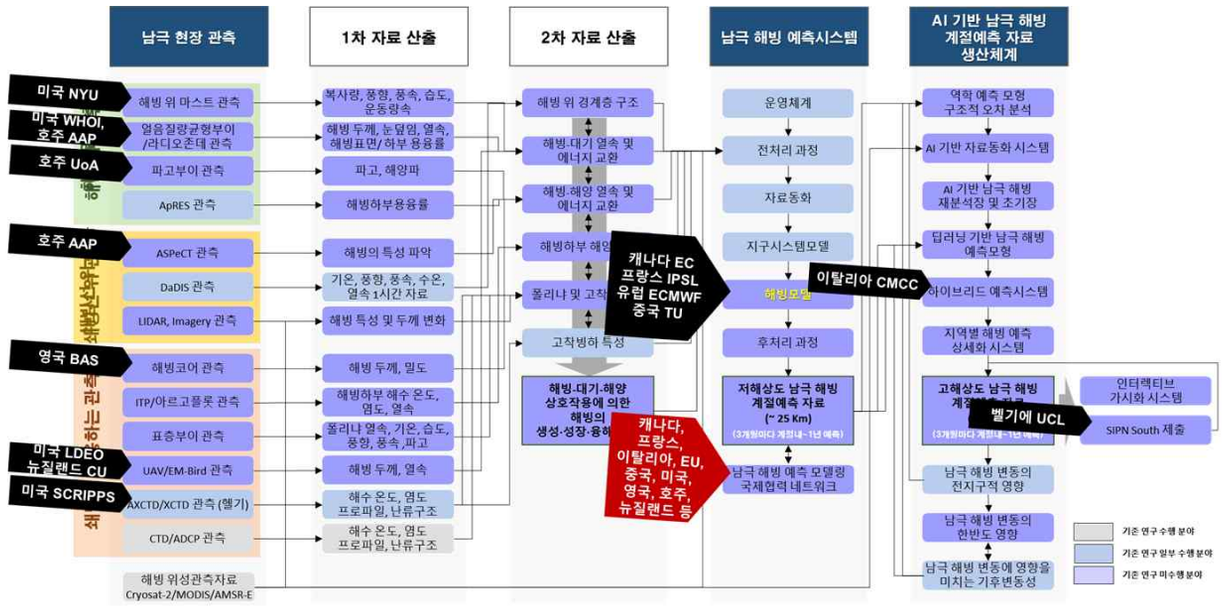
◎ 독일 AWI가 주도하는 남극 관측 동기화 위한 국제 과학과 인프라(Antarctic InSync)과제와 협력

- 남극 인프라 공유 기반 상보적 관측 및 관측자료 공유

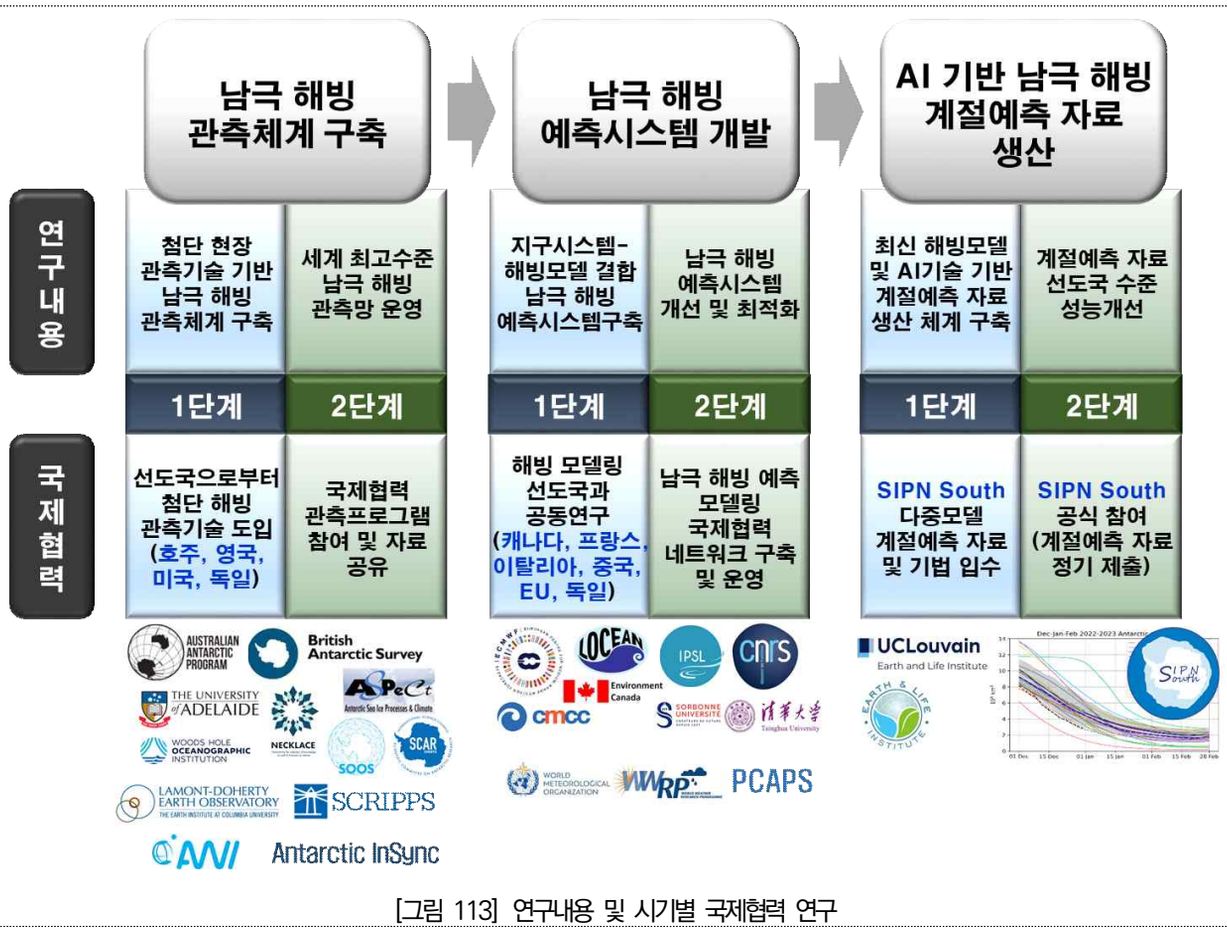
※ 독일 알프레드 베게너 연구소(AWI)가 주도하는 UN OCEAN DECADES 공식 지원 프로젝트 Antarctic InSync(International Science & Infrastructure for Synchronous Observation, '24~'30)와 협력 논의

- 급격한 남극 해빙 융해 원인과 결과 워킹그룹 공동 운영

순번	국가	기관	담당 연구원	공동연구 역할	
				외국	우리나라
1	국제협력	세계기상기구(WMO/세계날씨연구프로그램(WWRP)/극지 결합분석 및 서비스 프로그램(PCAPS)	Daniela Liggett	공식 지원	활동 보고 및 홍보
2	국제협력/벨기에	SIPN South/루뱅대학교(UCL)	François Massonnet	SIPN South 주관 및 예측자료 제공	계절예측자료 SIPN South 제출
3	캐나다	캐나다 환경기후변화부 (EC)	Jean-François Lemieux	CICE 해빙모델 구축 및 개선	현장 관측자료 및 인력교류
4	프랑스	피에르-시몬 라플라스 연구원 해양학-기후연구소 (IPSL)	Martin Vancoppenolle	해빙모델 역학·물리과정 개선	현장 관측자료 및 인력교류
5	이탈리아	유럽-지중해 기후변화센터 (CMCC)	Lorenzo Zampieri	해빙모델에 AI 기법 응용	AI 경험 및 노하우, 현장 관측자료 및 인력교류
6	EU	유럽중장기예보센터 (ECMWF)	Peter Bechtold	해빙 계절예측 시스템 구축	현장 관측자료 및 인력교류
7	중국	칭화대학교 (TU)	Shiming Xu	CICE 초고해상도 적용기법	현장 관측자료 및 인력교류
8	호주	호주남극프로그램 (AAP)	Petra Heil	해빙 현장 관측 기술 및 APSeCt 자료 공유	현장 관측 인프라 및 자료 공유
9	미국	우즈홀 해양연구소 (WHOI)	Ted Maksym	해빙 부표 관측 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
10	호주	애들레이드대학교 (UoA)	Luke Bennetts	해빙 파고부표 관측 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
11	미국	스크립스해양연구소	Jamin Greenbaum	AXCTD/XCTD 및 ITP 활용 관측기술	현장 관측자료 및 인력교류
12	호주	켄터베리 대학교	Wolfgang Rack	UAV EM-Bird 활용 관측기술	현장 관측 인프라 및 자료 공유
13	미국	라몬 도허티 지구관측소(LDEO)	Chris Zappa	UAV 활용 관측기술	현장 관측 인프라 및 자료 공유
14	미국	뉴욕대학교 (NYU)	David Holland	해빙 위 마스터 구성 및 관측 기술	현장 관측자료 및 인력교류
15	영국	영국남극연구소(BAS)	Siobhan Johnson	해빙코어 시료채취 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
16	독일	알프레드 베게너 극지해양연구소(AWI)I	Christian Haas	UAV 활용 관측기술	현장 관측 인프라 및 자료 공유
17	호주	호주해양남극연구소	Alex Fraser	통합적 환남극 해빙 자료	자료 활용한 고착빙 메커니즘 연구
18	독일	알프레드 베게너 극지해양연구소(AWI)I	Stefanie Arndt Alex Haumann	OCEAN DECADES 프로젝트인 남극 관측 동기화 위한 국제 과학과 인프라(Antarctic InSync) 프로젝트 수행 및 인프라와 자료 공유	FAST 수행 및 현장 관측 인프라 및 자료 공유



[그림 112] 국제협력 기반 현장관측으로부터 계절예측 자료 생산까지 흐름도



[그림 113] 연구내용 및 시기별 국제협력 연구

참고12 국제기구 및 국외기관 국제협력 의향서

신규과제 국제협력 관련 증빙

- 전 세계 기상·기후 관측·예측을 총괄하는 세계기상기구(WMO)/세계날씨연구프로그램(WWRP)의 공식 지원 프로젝트 지위 획득
- 벨기에(SIPN South 국제협력 리더쉽), 캐나다, 프랑스, 이탈리아, EU, 중국, 호주, 미국 등 12개 기관으로부터 의향서 접수
- 해빙 예측·관측분야 선진 기관들로부터 효율적인 기술 전수 및 확보 가능 그리고 상호협력 약속의무 이행이 필요

순번	국가	기관	담당 연구원	공동연구 역할	
				외국	우리나라
1	국제기구	세계기상기구(WMO)/세계날씨연구프로그램(WWRP)	Estelle de Coning	공식 지원	활동 보고 및 홍보
2	국제협력/벨기에	SIPN South/루뱅대학교	François Massonnet	SIPN South 주관 및 예측자료 제공	계절예측자료 SIPN South 제출
3	캐나다	캐나다 환경기후변화부	Jean-François Lemieux	CICE 해빙모델 구축 및 개선	현장 관측자료 및 인력교류
4	프랑스	피에르-시몬 라플라스 연구원 해양학-기후연구소	Martin Vancoppenolle	해빙모델 역학·물리과정 개선	현장 관측자료 및 인력교류
5	이탈리아	유럽-지중해 기후변화센터	Lorenzo Zampieri	해빙모델에 AI 기법 응용	AI 경험 및 노하우, 현장 관측자료 및 인력교류
6	EU	유럽중장기예보센터	Peter Bechtold	해빙 계절예측 시스템 구축	현장 관측자료 및 인력교류
7	중국	칭화대학교	Shiming Xu	CICE 초고해상도 적용기법	현장 관측자료 및 인력교류
8	호주	호주남극프로그램(AAP)	Petra Heil	해빙 현장 관측 기술 및 APSeCt 자료 공유	현장 관측 인프라 및 자료 공유
9	미국	우즈홀 해양연구소	Ted Maksym	해빙 부표 관측 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
10	호주	애들레이드대학교	Luke Bennetts	해빙 파고부표 관측 기술 전수	현장 관측 인프라 및 자료 공유
11	미국	캘리포니아대학교 스크립스해양연구소	Jamin Greenbaum	AXCTD/XCTD 및 ITP 활용 관측기술	현장 관측 인프라 및 자료 공유
12	미국				
13	미국				

WMO OMM

World Meteorological Organization
Organisation météorologique mondiale
Organización Meteorológica Mundial
Всемирная метеорологическая организация
المنظمة العالمية للأرصاد الجوية
世界气象组织

Secrétariat
7 bis, avenue de la Paix – Case postale 2300
CH 1211 Genève 2 – Suisse
Tél.: +41 (0) 22 730 81 11
Fax: +41 (0) 22 730 81 81
wmo@wmo.int – public.wmo.int

Our ref.: 05954/2024/SI/WWR

Dr Emilia Kyung Jin
Korea Polar Research Institute (KOPRI)
Republic of Korea
Email: jin@kopri.re.kr

Ref: 05954/2024 LS SI/WWR

10 April 2024

Subject: Endorsement of the Forecast of Antarctic Sea Ice Trend (FAST) project

Dear Dr Kyung Jin,

The Scientific Steering Committee (SSC) of the World Weather Research Programme (WWRP) has received your application seeking endorsement for the Forecast of Antarctic Sea Ice Trend (FAST) project.

Your project aims to identify the processes leading to the melting of Antarctic Sea ice due to warming through field observations and international collaborations, and to develop a long-term forecast system and generate seasonal forecasts of Antarctic Sea ice incorporating AI techniques.

This project aligns with the goals of the Polar Coupled Analysis and Prediction for Services (PCAPS) project of WWRP and was supported by their Steering Group for endorsement. It also contributes to the goal of WWRP to advance research of the Earth system on timescales from minutes to months and the AWAR^{3}E principle to make society aware of our science.

On behalf of the World Weather Research Programme SSC, we would like to express our endorsement of this project. We encourage you to contact the co-chairs of this project to raise awareness and encourage collaboration as relevant.

Endorsement by WWRP will benefit the proposer as follows:

- Provide an international framework for the research and the activities of the project, which can help to leverage additional support or funding for the project.
- Increase the visibility of the research activities of the project through the inclusion of links to the project's websites or activities in the WWRP website and e-newsletter.
- Enhance networking and communication through a better connection among the project's partners and the WWRP community.

For further information on endorsed projects regarding branding (the use of the WMO and WWRP logos) and acknowledgements, please refer to the WWRP Terms of Reference for Endorsed Projects.

Yours sincerely,

Dr Estelle de Coning
Head, World Weather Research Programme
Science and Innovation Department

Ref: 05954/2024 LS SI/WWR

〈 1. 세계기상기구(WMO)/세계날씨연구프로그램(WWRP) 〉

UCLouvain
Earth and Life Institute (ELI)

Louvain-la-Neuve, November 28, 2023

Dr. Emilia Kyung Jin,
Principal Research Scientist
Division of Glacial Environment research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Re: 'Letter of Intent' for KOPRI participation in SIPN South

Dear Emilia Kyung Jin,

Having learned about KOPRI's new project to establish an Antarctic sea ice seasonal prediction system, I am writing this letter with the expectation that KOPRI will be able to participate and contribute to SIPN South.

Antarctic sea ice forecasts have garnered increasing attention in recent years, particularly in light of the record lows observed in February 2022 and 2023. As Antarctica emerges as a climate change hotspot, polar tourism surges, and scientific expeditions persist in exploring this remote continent, there is a growing demand for the ability to predict sea ice conditions weeks or months in advance. Driven by recent research uncovering the physical mechanisms of Antarctic sea ice predictability and the significant changes in sea ice extent observed in recent years, the Southern Sea Ice Prediction Network (SIPN South) project was launched in 2017. The SIPN South project coordinates forecasts of Antarctic sea ice conditions from spring to summer each year, facilitating robust assessments, intercomparisons, and guiding the future development of polar forecast systems. More information can be obtained in Massonnet et al. (2023).

We currently utilize data from 22 unique contributors across five continents who have collectively provided more than 3000 individual predictions of sea ice extent and concentration. SIPN South operates as a collaborative community project hosted on a shared public repository. The forecast and validation data used by SIPN South are made publicly available in near real-time for further use by the polar research community and, ultimately, policy makers.

We sincerely welcome KOPRI's participation in this extensive international collaborative research by developing its own Antarctic sea ice prediction system. We are eager to assist KOPRI in building a prediction system more efficiently and rapidly, drawing upon our proactive experience and diverse expertise. Additionally, by sharing the multi-model ensemble and spread of Antarctic sea ice season forecast data, we aim to objectively verify KOPRI's system performance and help set a direction for improving predictability.

Thank you for initiating this collaboration. We look forward to continued and expanded research collaboration between SIPN South and KOPRI in the field of Antarctic sea ice seasonal forecasting.

Sincerely,

François Massonnet

Reference : Massonnet, F., Barreira, S., Barthélemy, A., Bilbao, R., Blanchard-Wrigglesworth, E., Blockley, E., Bromwich, D. H., Bushuk, M., Dong, X., Goessling, H. F., Hobbs, W., Iovino, D., Lee, W.-S., Li, C., Meier, W. N., Merryfield, W. J., Moreno-Chamarro, E., Motoka, Y., Li, X., . . . Yuan, X. (2023). SIPN South: Six years of coordinated seasonal Antarctic sea ice predictions. *Frontiers in Marine Science*, *10*. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1148899

LOUVAIN-LA-NEUVE | BRUXELLES - WOLUWE | MONS | TOURNAI | BRUXELLES - SAINT-GILLES | CHARLEROI
Croix du Sud, 2 bte L7.05.05, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique
Tél. +32 (0)10 47 23 74 - fax +32 (0)10 47 88 98 - president-eli@uclouvain.be - www.uclouvain.be/eli

〈 2. 벨기에 〉

Montréal, 30 November 2023

Dr. Emilia Kyung Jin,
Principal Research Scientist
Division of Glacial Environment research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Subject:

Letter of Intent for ECCC-KOPRI collaboration on Antarctic Sea Ice Prediction System Development

Dear Emilia,

I was very pleased to learn about KOPRI's initiative to establish an Antarctic sea ice seasonal prediction system. Collaborating on the challenging subject of Antarctic sea ice seasonal prediction presents an excellent opportunity to cultivate a new partnership between ECCC and KOPRI in the field of sea ice modeling.

ECCC has a rich history and extensive expertise in sea ice model development, with the sea ice model being a vital component of our regional and global prediction systems. Enhancing the performance of forecasting systems to accurately predict sea ice conditions in the Antarctic region stands as an important milestone for both ECCC and KOPRI.

Considering this, we are eager to support KOPRI in developing an Antarctic sea ice seasonal prediction system, drawing upon our experience and expertise in the field of sea ice forecasting. In return, we kindly request access to KOPRI's Antarctic sea ice observation data to enhance the refinement of our model. Our shared objective is to foster research exchange and facilitate knowledge transfer through interactions among young researchers.

We express our gratitude to you for spearheading this collaboration. There are high expectations for the continued and expanded research cooperation between our organizations in the field of sea ice modeling.

Sincerely,

Jean-François Lemieux
Research Scientist
Meteorological Research Division
Environment and Climate Change Canada
2121 route Transcanadienne
Dorval, Québec, H9P 1J3

Environnement et Changement climatique Canada | Environment and Climate Change Canada

Canada

〈 3. 캐나다 〉

+33 1 44 27 35 80
martin.vancoppenolle@locean-ipsl.upmc.fr

Directeur de Recherches CNRS
Head of NEMO R&D team
Sorbonne Université
Laboratoire d'Océanographie et du Climat
Institut Pierre-Simon Laplace
4 Place Jussieu
75252 Paris CEDEX 05

Dr. Emilia Kyung Jing
Principal Research Scientist
Division of Glacial Environment research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Re: 'Letter of Intent' for LOCEAN-IPSL-KOPRI collaboration on Antarctic Sea Ice Modeling

Lille, le 28 novembre 2023

Dear Emilia,

Upon learning about KOPRI's new project to establish an Antarctic sea ice seasonal prediction system, I was excited about the prospect of forging a new partnership between LOCEAN-IPSL and KOPRI within the realm of Antarctic sea ice modeling.

LOCEAN-IPSL has a rich history and expertise in the field of ocean modelling, including sea ice, and their role in the Earth System, testified by the in-house development of the NEMO ocean model and of its sea ice component SI3. Given rapid sea ice changes upon warming, better understanding sea ice and improving its representation in Earth System Models is one of our main activities and potentially helpful for better sea ice seasonal predictions, of highest interest to KOPRI.

The scientific community is suffering from drastic resource limitations on a global scale for development activities, in particular on Antarctic sea ice modelling. This is why we are keen to actively support KOPRI in the development of Antarctic sea ice modelling activities, leveraging our extensive experience and expertise in the field of sea ice modeling. We hope that KOPRI's will contribute new knowledge and expertise by improving understanding of sea ice and developing new code and acquiring Antarctic sea ice observation data for the scientific community. Furthermore, this could lead to various research cooperation opportunities, such as joint seminars and reciprocal exchange visits.

We thank you for initiating this collaboration. We eagerly anticipate sustained research collaboration between our institutions in the field of sea ice modeling.

Sincerely,
Dr. Martin Vancoppenolle

〈 4. 프랑스 〉

Dr. Lorenzo Zampieri
Junior Scientist
Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici
Viale Carlo Berti Pichat, 6/2
40127, Bologna (BO), Italy
e-mail: lorenzo.zampieri@cmcc.it

Dr. Emilia Kyung Jin,
Principal Research Scientist
Division of Glacial Environment Research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Letter of Intent for CMCC – KOPRI Collaboration on Application of AI Techniques for Sea Ice Predictions

Dear Emilia Kyung Jin,

I am writing this letter with great excitement and anticipation of a new partnership, having learned about KOPRI's new project to establish an Antarctic sea ice seasonal prediction system. I am eager to explore the potential collaboration between the Euro-Mediterranean Center on Climate Change (CMCC) and the Korean Polar Research Institute (KOPRI) in the field of sea ice modeling utilizing Artificial Intelligence (AI).

CMCC is dedicated to improving numerical models for polar regions, aiming to comprehend the evolution of the climate system across timescales. Our focus includes the development and testing of state-of-the-art dynamic and thermodynamic sea-ice models on both structured and unstructured grids; the data assimilation of sea ice observations for improved sea ice reanalyses and forecasts; and the investigation of sea ice states in seasonal to decadal predictions and climate projections. Notably, our recent efforts have centered on improving sea ice models through the integration of AI techniques.

In light of the swift changes in the current climate, it is clear that adopting advanced techniques to accurately simulate and predict sea ice evolution is a shared objective of both CMCC and KOPRI. In this context, we express our willingness to actively support KOPRI's development of Antarctic sea ice models by leveraging our experience and expertise in the field of sea ice modeling. In exchange, we propose sharing KOPRI's field observation data and collaborating on joint research endeavors aimed at enhancing AI-based sea ice models.

Thank you for initiating this collaboration. We enthusiastically anticipate sustained and expanded research collaboration between our institutions in the field of sea ice research.

Sincerely,

Dr. Lorenzo Zampieri

FONDAZIONE CMCC
Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici
Sede Legale e Amministrativa: Via Marco Biagi n. 5 73100 LECCE - Italy
Tel. +39 0832 1902411 www.cmcc.it
N. REA 251549 - N. 39 Registro Persone Giuridiche Fondo di Dotazione Euro 662.000,00 i.v. P.I. e C.F. 03873750750
codice destinatario ACTKBBZ

〈 5. 이탈리아 〉

Peter Bechtold
Principal Scientist Earth System Modelling Section
European Centre for Medium-Range Weather Forecast
Reading, UK | Bologna, Italy | **Bonn, Germany**
e: peter.bechtold@ecmwf.int
w: ecmwf.int

Dr. Emilia Kyung Jin
Division of Glacial Environment research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Re: 'Letter of Intent' for ECMWF-KOPRI collaboration on Antarctic Sea Ice Prediction System Development

Bonn, 27.11.2023

Dear Emilia Kyung Jin

I was delighted to learn about KOPRI's plans to establish a seasonal prediction system for the Antarctic sea-ice. Collaborating in the challenging topic of Antarctic sea-ice seasonal prediction presents an excellent opportunity to strengthen our longstanding partnership in the realm of extended range weather forecasting using coupled earth system models.

Given the increasing need to enhance the performance of ECMWF's polar component in the forecast models, the timing of our collaboration with KOPRI on Antarctic sea-ice is particularly welcome. The current unmistakable decline in Antarctic sea-ice, exacerbated by global warming, underscores the urgency of refining the sea ice model within the Earth System Model to enhance predictability in the Antarctic region. This represents a significant milestone for both KOPRI and ECMWF.

Our ECMWF group is committed to expediting the development of a next-generation extended and seasonal-range forecast system. This entails refining the data assimilation system, elevating model resolution and physical process performance, and incorporating AI to enhance overall model performance. Leveraging our proficiency in these forecast systems, we eagerly anticipate partnering with KOPRI in developing their Antarctic sea-ice seasonal predictions. In return, we request access to KOPRI's Antarctic sea-ice field observation data to enhance the refinement of our models. Our mutual objective is to foster research exchange and facilitate the transfer of knowledge through interactions among young researchers.

UK: (Headquarters) ECMWF, Shinfield Park, Shinfield Road, Reading, RG2 9AX, UK | Italy: ECMWF, Tecnopolo di Bologna, Via Stalingrado 84/3, 40128 Bologna, Italia | **Germany: ECMWF, Robert-Schuman-Platz 3, 53175 Bonn, Deutschland**
e: first.surname@ecmwf.int | w: www.ecmwf.int

In conclusion, I extend my gratitude to you for spearheading this collaboration. There are high expectations for the continued and expanded research cooperation between our two organizations in the field of sea ice seasonal prediction.

Yours Sincerely

Peter Bechtold

〈 6. EU 〉

Shiming Xu
Associate Professor
Department of Earth System Science
Tsinghua University, Beijing, China
Contact Information: +86-010-62772750
e-mail: xusm@tsinghua.edu.cn

Dr. Emilia Kyung Jin,
Principal Research Scientist
Division of Glacial Environment research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Re: 'Letter of Intent' for Tsinghua Univ.-KOPRI collaboration on Antarctic Sea Ice Modeling

Dear Emilia Kyung Jin

Having become aware of KOPRI's innovative project aimed at establishing an Antarctic sea ice seasonal prediction system, I am genuinely excited about the potential for a new collaboration between Tsinghua University and KOPRI in the field of Antarctic sea ice modeling.

Tsinghua University is recognized for its distinguished expertise in ultra-high-resolution sea ice modeling technology, particularly within the Earth System Model. It is apparent that aligning these advanced models to accurately reproduce and predict sea ice represents a crucial and shared objective for both organizations, particularly given the rapid changes observed in our current climate.

In this context, we are eager to contribute our wealth of experience and expertise in sea ice modeling to actively support and collaborate on the development of KOPRI's Antarctic sea ice model. In return, we kindly request access to KOPRI's Antarctic sea ice observation data to further evaluate and improve our sea ice and coupled models. Additionally, we propose the establishment of various research cooperation opportunities, including joint seminars, the exchange of young researchers, and reciprocal visits.

We extend our sincere appreciation for initiating this collaboration. We eagerly look forward to the prospect of continued and expanded research collaboration between our esteemed institutions in the specialized field of sea ice modeling.

Sincerely,

Shiming Xu

〈 7. 중국 〉

Australian Government
Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water
Australian Antarctic Division

AUSTRALIAN ANTARCTIC PROGRAM

ASPeCt
Antarctic Sea Ice Processes & Climate

Dr Petra Heil
Co-Chair; ASPeCt/SCAR
Australian Antarctic Division &
Australian Antarctic Program Partnership
University of Tasmania
Hobart 7001, Australia
T: +61 448 732 011
E: petra.heil@utas.edu.au

Dr. Emilia Kyung Jin,
Principal Research Scientist
Division of Glacial Environment research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Re: 'Letter of Intent' for AAD-KOPRI collaboration on Observations of Antarctic Sea Ice

Dear Dr Emilia Kyung Jin

I have learned about KOPRI's project for developing an Antarctic sea-ice season prediction system, sparking my enthusiasm for a collaboration between the Australia Antarctic Division (AAD) and KOPRI with focus on Antarctic sea-ice observation.

AAD possesses a rich history and a team of experts in sea ice's role in the Earth system, sea-ice processes, and sea-ice model development. My research covers various aspects of sea-ice science, including coupled ocean/ice/atmosphere modeling, fieldwork, autonomous instrumentation, and remote sensing. I am a Co_Chair of APSeCt, the SCAR Expert Group for Antarctic Sea-Ice Processes.

Given the rapid climate changes, it is evident that conducting more sea-ice observations for accurate reproduction and prediction is a shared goal for KOPRI and AAD. We aim to actively support KOPRI's Antarctic ocean observation syste- development, leveraging our extensive experience. We propose sharing APSeCt data and request our participation in KOPRI's Antarctic field exploration, sharing the acquired data. Additionally, we suggest establishing research cooperation through joint seminars and mutual exchange visits.

Thank you for initiating this collaboration. We eagerly anticipate continued and expanded research collaboration between our institutions in Antarctic sea ice studies.

Sincerely,

Petra Heil

〈 8. 호주 〉

WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTION

Jan 3, 2024

Dr. Emilia Kyung Jin,
Principal Research Scientist
Division of Glacial Environment research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

RE: Letter of Intent for Woods Hole Oceanographic Institution-KOPRI collaboration on Observation of Antarctic Sea Ice

Dear Emilia Kyung Jin,

I am pleased to learn of KOPRI's new project for developing an Antarctic sea ice seasonal prediction system and am excited about the potential collaboration between sea ice and Antarctic scientists at Woods Hole Oceanographic Institution and KOPRI in Antarctic sea ice observations.

Our institution has a strong team of experts in Southern Ocean sea ice observations and modelling. Personally, I have been involved in a range of research on Antarctic sea ice for nearly 30 years, including sea ice and polar climate, ice–atmosphere-ocean interactions, observations and modelling of sea ice properties and processes, and sea ice thickness distribution (both in situ and by satellite), and remote sensing of sea ice. In particular, I am interested in enhancing sea ice observational capability in the Antarctic through the use of autonomous vehicles under ice and autonomous drifting platforms. I have participated in nearly twenty expeditions to the Antarctic and Arctic. I believe my experience in. Further, WHOI has recently expanded our polar sea ice group with expertise complentary to my own. This includes a recent hire, Maddie Smith, with expertise in wave-ice-ocean interaction and sea ice – solar radiation interactions. We have also close collaborations with mescoscale modelling expertise at WHOI.

Given the recent dramatic, rapid changes in Antarctic sea ice, and potential for significant societally relevant impacts on Antarctic ecosystems, climate, and sea level rise through accelerated ice-shelf loss, it is evident that building capacity for accurate seasonal prediction of sea ice in the Antarctic is essential. The need for improved understanding and more widespread observations to improve this capability is particulary evident as the recent change suggests a change in behaviour of the Antarctic sea ice system. KOPRI and researchers at the Woods Hole Oceanographic Institution share the goal of conducting more sea ice observations for accurate prediction. Leveraging our experience, we actively support the development of KOPRI's Antarctic sea ice observation system including ice mass buoys. We propose accompanying KOPRI on field expeditions, conducting explorations together, and sharing the acquired data. This collaboration can also leverage funded research programs at WHOI to understand drivers and impacts of Antarctic sea ice variability, and planned and proposed future expeditions within the US and with my own international collaborations. Additionally, we

suggest establishing research cooperation through joint seminars and mutual exchange visits. My institution has various funding mechanisms to help support these kind of collaborations.

Thank you for initiating this collaboration. We eagerly anticipate continued and expanded research collaboration between our institutions in Antarctic sea ice research.

Sincerely,

Ted Maksym
Associate Scientist w/ Tenure
266 Woods Hole Rd, MS12
Woods Hole, MA 02543
508-289-3428 tmaksym@whoi.edu

〈 9. 미국 〉

Luke Bennetts
The University of Adelaide
Adelaide, South Australia
5005 Australia
Tel: 83133143
e-mail: luke.bennetts@adelaide.edu.au

Dr. Emilia Kyung Jin,
Principal Research Scientist
Division of Glacial Environment research
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Re: 'Letter of Intent' for The University of Adelaide-KOPRI collaboration on Observation of Antarctic Sea Ice

Dear Emilia Kyung Jin

I learned about KOPRI's new project for developing an Antarctic sea ice season prediction system and am excited about the potential partnership between the University of Adelaide and KOPRI in Antarctic sea ice observation.

As an expert in studying waves associated with sea ice in Southern Ocean, I recognize the urgency of conducting more observations of waves through sea ice for accurate predictions, aligning with a crucial shared goal for both KOPRI and the University of Adelaide in the face of rapid climate changes.

In light of this, we aim to actively support the development of KOPRI's Antarctic ocean observation system, drawing upon our rich experience and expertise in sea ice observations. Our plan includes sharing observation techniques using wave buoys, and in return, we request your participation in KOPRI's Antarctic exploration and data sharing. Additionally, we propose various research cooperation opportunities, such as joint seminars and mutual exchange visits.

Thank you for initiating this collaboration. We eagerly anticipate continued and expanded research collaboration between our institutions in the field of Antarctic sea ice.

Thank you.

Sincerely,

Luke Bennetts

〈 10. 호주 〉

UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO
UCSD
BERKELEY • DAVIS • IRVINE • LOS ANGELES • MERCED • RIVERSIDE • SAN DIEGO • SAN FRANCISCO
SANTA BARBARA • SANTA CRUZ
INSTITUTE OF GEOPHYSICS AND PLANETARY PHYSICS
SCRIPPS INSTITUTION OF OCEANOGRAPHY (0225)
9500 GILMAN DRIVE
LA JOLLA, CALIFORNIA 92093-0225
Dr. Jamin S. Greenbaum
Scripps Institution of Oceanography (SIO)
Phone: +1-512-779-5004
E-mail: jsg@ucsd.edu

Dr. Emilia Kyung Jin,
Director, Department of Policy & Partnership
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Re: 'Letter of Intent' for SIO-KOPRI collaboration on Observation of Antarctic Sea Ice

Dear Emilia Kyung Jin

I recently learned about KOPRI's proposed plan to develop an Antarctic sea ice seasonal prediction system and feel excited by the possibility that this could inspire a new collaboration between SIO and KOPRI related to Antarctic sea ice observations.

SIO has a rich history and a team of experts interested in Southern Ocean research, including sea ice observations. My research aims to characterize and understand dynamic Antarctic cryosphere-ocean interactions based on a combination of airborne geophysical observations and in-situ measurements enabled by airborne-deployed expendable ocean sensor such as Airborne eXpendable Conductivity, Temperature, Depth (AXCTD) sensor deployments. The vast majority of our AXCTD deployments occur in sea ice-infested areas and could therefore provide valuable oceanographic context for sea ice processes.

Before the backdrop of rapid climate chang, it is evident that both KOPRI and SIO share the goal of conducting enhanced programs of sea ice observations to enable accurate prediction. Leveraging our experience, we actively support the development of KOPRI's Antarctic sea ice observation system, including deployments of AXCTD sensors. I am proud that my research group has accompanied KOPRI on two previous expeditions to deploy AXCTD sensors near Thwaites Glacier and in the Western Ross Sea; we propose accompanying KOPRI on future field expeditions as well, to conduct explorations together and share the acquired data. Additionally, we suggest enhancing this research cooperation through joint seminars and a program supporting researcher exchange visits between our campuses.

Thank you for initiating this collaboration; we eagerly anticipate continued and expanded research collaborations between our institutions in Antarctic sea ice research.

Sincerely,

Jamin S. Greenbaum

Jamin Greenbaum, Ph.D.

〈 11. 미국 〉



David M Holland
New York University
6 Washington Place, Lab 103
New York, NY, 10003, USA
e-mail: david.holland@nyu.edu
tel: +1 (917) 520 8570

April 16, 2024

Dr. Emilia Kyung Jin,
Director, Department of Policy & Partnership
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

RE: 'Letter of Intent' for New York University-KOPRI collaboration on Observation of Antarctic Sea Ice

Dear Emilia Kyung Jin,

I recently learned about KOPRI's new project to develop an Antarctic sea ice seasonal prediction system. I am excited about the potential collaboration between NYU and KOPRI in Antarctic sea ice observations and computer modeling.

NYU, with its rich history and a team of experts, has been at the forefront of Southern Ocean sea ice observation. Our research, which focuses on computer modeling of the interaction of the Earth's ice with ocean waters, and the acquisition and implementation of observational data for model improvements, has provided us with unique insights and expertise in this field.

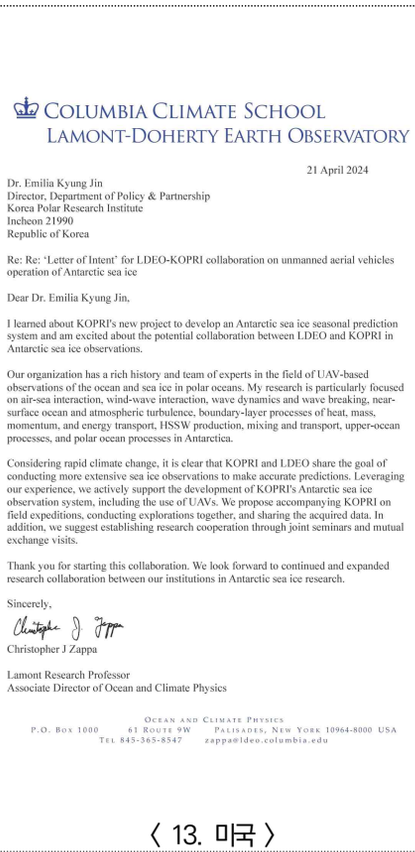
Given the rapid changes in Antarctic sea ice, it is clear that KOPRI and NYU share the goal of conducting more sea ice observations for more accurate predictions. Leveraging our experience, we would like to actively support the development of KOPRI's Antarctic sea ice observation system, including installing comprehensive instruments on sea ice targeting boundary-layer processes of heat, mass, momentum, and energy transport. We propose accompanying KOPRI on field expeditions, conducting explorations together, and sharing the acquired data. Additionally, we suggest establishing research cooperation through joint seminars and mutual exchange visits.

Thank you for initiating this collaboration. I personally am very excited about the potential of our joint efforts in Antarctic sea ice research. We eagerly anticipate continued and expanded research collaboration between our institutions.

Sincerely,

David M Holland
Professor of Mathematics and Environmental Science
Director of Environmental Fluid Dynamics Laboratory (EFDL)
New York University

〈 12. 미국 〉



COLUMBIA CLIMATE SCHOOL
LAMONT-DOHERTY EARTH OBSERVATORY

21 April 2024

Dr. Emilia Kyung Jin
Director, Department of Policy & Partnership
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990
Republic of Korea

Re: Re: 'Letter of Intent' for LDEO-KOPRI collaboration on unmanned aerial vehicles operation of Antarctic sea ice

Dear Dr. Emilia Kyung Jin,

I learned about KOPRI's new project to develop an Antarctic sea ice seasonal prediction system and am excited about the potential collaboration between LDEO and KOPRI in Antarctic sea ice observations.

Our organization has a rich history and team of experts in the field of UAV-based observations of the ocean and sea ice in polar oceans. My research is particularly focused on air-sea interaction, wind-wave interaction, wave dynamics and wave breaking, near-surface ocean and atmospheric turbulence, boundary-layer processes of heat, mass, momentum, and energy transport, HSSW production, mixing and transport, upper-ocean processes, and polar ocean processes in Antarctica.

Considering rapid climate change, it is clear that KOPRI and LDEO share the goal of conducting more extensive sea ice observations to make accurate predictions. Leveraging our experience, we actively support the development of KOPRI's Antarctic sea ice observation system, including the use of UAVs. We propose accompanying KOPRI on field expeditions, conducting explorations together, and sharing the acquired data. In addition, we suggest establishing research cooperation through joint seminars and mutual exchange visits.

Thank you for starting this collaboration. We look forward to continued and expanded research collaboration between our institutions in Antarctic sea ice research.

Sincerely,

Christopher J Zappa

Lamont Research Professor
Associate Director of Ocean and Climate Physics

Ocean and Climate Physics
P.O. Box 1000 61 Route 9W Palisades, New York 10964-8000 USA
Tel 845-365-8547 zappa@ldeo.columbia.edu

〈 13. 미국 〉

참고13 해빙 예측모델 국제워크샵 개최('23.10)

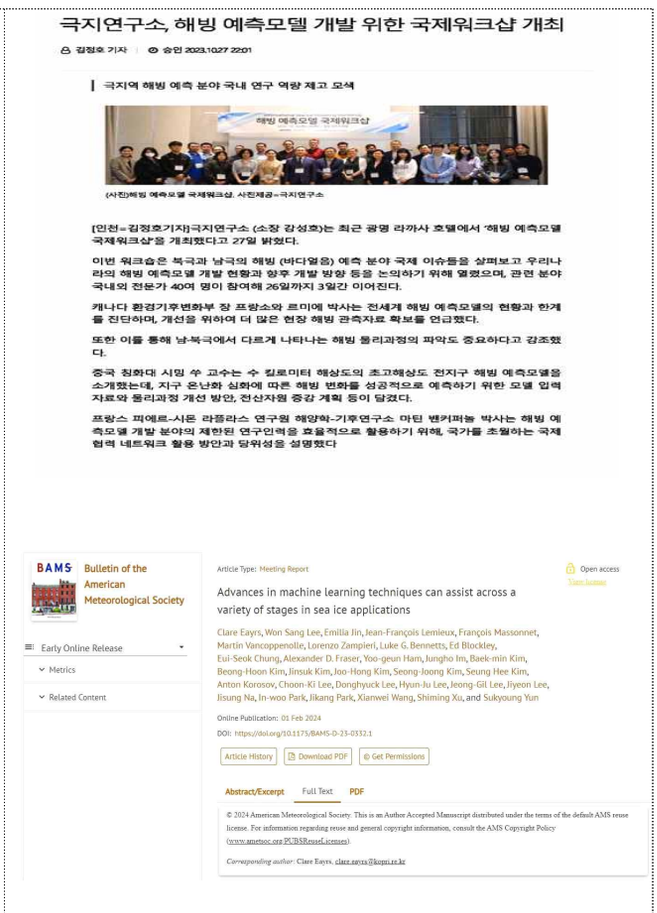
국내에서 처음으로 해빙 예측모델 국제워크샵 개최

- '23년 10월 광명 라까사호텔에서 해외석학 10여 명 등을 포함8개국 국내외 전문가 40여 명이 해빙 예측모델 개발 현황과 미래 방향 관련 심도깊은 논의를 3일 간 진행
  - 새로운 해빙 모델 기술, 해빙 모델링에서 AI 역할, 모델-관측 결합 활용, 필요한 미래 연구 분야 주제로 발표와 토론 진행

- 국제워크샵 개최 결과를 저명한 국제학술지 '미국기상학회보(BAMS)'에 게재
  ⇒ 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축 기틀 마련



[그림 114] 해빙 예측모델 국제워크샵 홍보자료


극지연구소, 해빙 예측모델 개발 위한 국제워크샵 개최

김정호 기자 | 승인 2023.10.27 22:01

극지역 해빙 예측 분야 국내 연구 역량 제고 모색

(사진)해빙 예측모델 국제워크샵. 사진제공=극지연구소

[인천=김정호기자]극지연구소 (소장 강성호)는 최근 광명 라까사 호텔에서 '해빙 예측모델 국제워크샵'을 개최했다고 27일 밝혔다.

이번 워크숍은 북극과 남극의 해빙 (바다얼음) 예측 분야 국제 이슈들을 살펴보고 우리나라의 해빙 예측모델 개발 현황과 향후 개발 방향 등을 논의하기 위해 열렸으며, 관련 분야 국내외 전문가 40여 명이 참여해 26일까지 3일간 이어진다.

캐나다 환경기후변화부 장 프랑소와 르미에 박사는 전세계 해빙 예측모델의 현황과 한계를 진단하며, 개선을 위하여 더 많은 현장 해빙 관측자료 확보를 언급했다.

또한 이를 통해 남·북극에서 다르게 나타나는 해빙 물리과정의 파악도 중요하다고 강조했다.

중국 칭하대 시밍 쑤 교수는 수 킬로미터 해상도의 초고해상도 전지구 해빙 예측모델을 소개했는데, 지구 온난화 심화에 따른 해빙 변화를 성공적으로 예측하기 위한 모델 입력 자료와 물리과정 개선 방안, 전산자원 증강 계획 등이 담겼다.

프랑스 피에르-시몬 라플라스 연구원 해양학-기후연구소 마틴 밴커펀놀 박사는 해빙 예측모델 개발 분야의 제한된 연구인력을 효율적으로 활용하기 위해, 국가를 초월하는 국제협력 네트워크 활용 방안과 당위성을 설명했다

[그림 115] 언론 보도(위) 및 미국기상학회보 게재(아래)

국제워크샵 주요 내용 및 논의 결과

- 최근 급격한 해빙 유실의 원인과 전 세계 기후에 미치는 잠재적 영향에 대한 연구가 절실, 특히 해빙 소실현황 분석 및 원인 파악을 위한 현장 탐사 및 극지 인프라 투입을 통하여 해빙

변화의 다양한 시공간적 변동성에 대한 이해 필요

- 국가별 기술 격차 좁히고 협력 증진을 위해 우리나라에서 해빙 예측 모델링 국제 워크샵을 격년 주기로 개최하는 방안 논의

주제	주요 논의 내용
새로운 해빙 모델 기술	▪ 이산요소 모델 활용 및 고성능 컴퓨팅 지원 ▪ 취성 레올로지, 고차원 이류 등 방향의 연속모델 개선 ▪ 파고-해빙 상호작용 모델링 및 지구시스템 모델에서의 도입 ▪ 빙하-해빙 상호작용 이해에 기반한 고착빙 모의성능 개선 ▪ GPU 활용가능성
해빙 모델링에서 AI 역할	▪ 2020년대 이전 AI에 대한 논의 자체가 없었으나 현재 매우 빠르게 발전 중인 분야 ▪ 물리기반 모델과 AI 기법 결합 적용 가능성 풍부 ▪ 저비용 및 물리모델의 샘플 개수 한계 극복 가능 ▪ 효과적인 적용 위해 여전히 더 많은 관측 자료 필요
모델-관측 결합 활용	▪ 모델 활용 관측위치 결정 필요 ▪ 새로운 위성관측자료 자료동화 기반 활용 중요 ▪ 현장 관측자료 기반 해빙 모델 강제력 개선 ▪ 눈두께 등 새로운 관측 변수 획득 및 저비용·소형화 등 관측기술 발달이 모델 개선에 이바지 ▪ AI기반 딥러닝 기법-모델 결합을 모델-관측 결합에 활용 가능 ▪ 모델 산출 변수와 관측 변수의 일관성 필요
필요한 미래 연구 분야	▪ 남극 해빙 모델 성능 저하는 현장 관측자료 부족에 기인 ▪ 연구원 교환 프로그램 및 해빙 모델 실습 워크샵 개최 등으로 모델링 기술 정보 공유 및 협업 촉진 필요 ▪ 한국의 해빙 모델링 분야 진출 및 북미·유럽 선도국들과의 기술 격차 극복을 위해 격년주기 해빙 모델링 워크샵 개최 등 해빙 모델링 분야 연구자들의 교류 플랫폼 구축·운영 필요 ▪ 한국이 앞서 나아가고 있는 AI 적용 계절예측 분야 전문성 강화 및 해빙 모델링 분야 응용이 해빙 예측의 격차 해소 견인의 열쇠

참고14 남극 해빙 예측 기술의 필요성 및 국제협력으로 추진해야 할 근거

남극 해빙 예측 기술 필요성

○ 급격한 남극 해빙면적 축소는 기후변화의 가장 최신 영향으로 파급력이 상당하며, 대응을 위한 미래 예측역량 증진 필요

- 해빙 면적 축소는 지구 반사도 감소로 이어져 온난화를 가속화시키며, 해수면 상승을 유발하는 빙상 융빙을 촉발할 수 있고, 해빙에 서식하는 펭귄 등 생태계 파괴로 이어지고 있음
- 제한된 접근성과 극한 환경으로 인한 관측자료 부족이 남극 해빙에 대한 지식 미비 및 예측모델 성능 저하로 연계되고 있음
  ※ 2021년 출간된 IPCC 6차 평가보고서에 현재 지구시스템 모델들의 남극 해빙 면적 모의 성능이 불충분하여 미래전망의 신뢰도가 낮다고 평가

국가간 협력 필요성

○ (국내 전문인력 육성) 국내 관련분야 투자 및 인력양성 미비하여 남극 해빙 관측 및 예측 관련 국내 전문가 제한적

- 남극 해빙 융해는 2022년 이후 이슈화된 기후 변화의 최신 영향으로, 국내 연구진이 관측을 수행한 바 없어 해빙 관측분야 국내 전문가가 전무하여 전문인력 육성이 절실
- 국내 해빙모델 개발 및 개선 연구를 수행하는 기관은 없으며, 대다수 대학 및 연구기관에서는 미국 및 유럽의 커뮤니티 지구시스템모델을 도입하여 해빙 관련 연구를 수행 중으로 국내 연구 수준은 여전히 추격 단계
  ※ 기상청 및 해양과학기술원에서 각각 기존 선진국의 지구시스템모델을 도입·개선하여 활용하고 있는 예측시스템의 일환으로 해빙모델 모듈이 포함되어 있으나 관련 전문가는 부족
- 국외에서는 이미 12개국 22개기관에서 남극 해빙 계절예측이 수행되고 있으며 첨단의 AI 기반 예측시스템 개발 또한 활발하여 해빙예측 선진 기관들로부터의 기술전수·확보 최적기
  ※ 남반구 극지예측의 해(YOPP-SH) 국제협력연구 일환으로 2017년 시작된 남부 해빙예측 네트워크(Sea Ice Prediction Network South)는 분기별 남극 해빙 예측자료 수집 및 상호비교

○ (개발 효율성 제고) 남극 해빙 관측 및 예측분야 학문 후속세대 양성 및 지속가능한 협력 네트워크 구축 필요

- 선도국과의 격차를 단기간에 해소 위해 효율적 남극 해빙 예측 기술 개발 전략으로 예측역량 증진 필요
- 실질적 성과 산출 위해서는 선도국의 기술 및 노하우를 습득하고 우리의 현장 인프라, 관측자료, 연구인력 공유 및 해빙 계절예측 자료 제공하는 상보적 협력관계 구축

◎ (AI 기반 첨단 기법 도입) 다른 지역에 비해 예측성이 낮은 남극 지역은 AI 활용 기반 획기적인 기술 발전 가능성이 열려 있음

- 국제공동연구 참여 및 국제 네트워크 구축·운영으로 급변하는 예측기술 개발 추세의 최신 현황을 분석하여 최적의 남극 해빙 예측기술 개발방향 적시에 설정 및 적용 필요
  ※ SIPN South는 단일모델보다 다중모델 앙상블 평균의 남극 해빙 계절예측 성능이 더 우수하며, AI를 포함하는 경험적 통계모델이 역학모델 성능보다 더 우수하다고 요약하여 국제학술지 해양과학 프론티어스에 발표('23.05)
- 최근 진화하고 있는 AI-물리모델 통합기법 개발 및 예측시스템 자료동화에 AI 기법 적용 등 예측성 제고에 효과적인 첨단 기술 트렌드 습득 및 반영

◎ (국제적 공신력 획득) 국제 남극 해빙 계절 예측 프로그램 공식 참여 및 국외 협력 기관들과 국제협력 네트워크 구축·운영으로 공신력 및 국제 리더쉽 획득

- 현재 12개국 22개 기관이 참여하고 있는 국제 남극 해빙 계절 예측 프로그램 SIPN South에 공식 참여함으로써 산출된 예측 자료의 성능 검증 및 국제적 공신력 획득
- 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축·운영으로 공동연구 활성화 및 국제 리더쉽 획득
  ※ 과제 기획을 위해 해빙 예측모델 국제워크샵('23년 10월 24-26일)을 개최하였으며, 8개국 해빙 예측 전문가 그룹과 해빙 예측 관련 국제 기술 현황 및 공동연구를 논의하고 향후 우리나라 주도의 정기 네트워크 운영 논의

참고15 국제공동연구 추진에 있어 국내외 연구진 각각의 역할

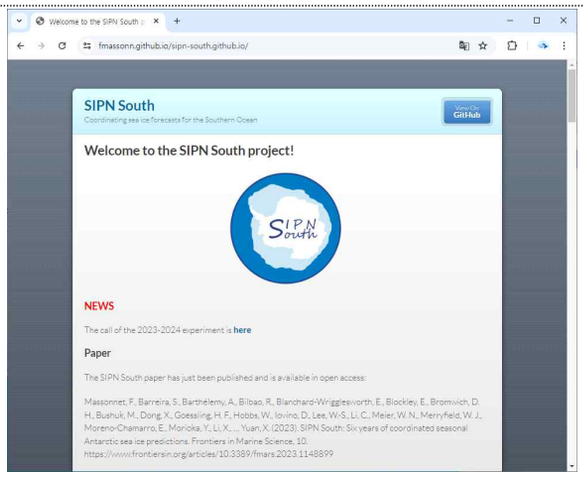
연구내용	국가	기관	공동연구 역할			
			외국		우리나라	
남극 현장 관측	호주	호주남극프로그램 (AAP)	해빙 현장 관측 기술 및 APSeCt 자료 공유	해빙 전문 관측장비 관측기술과 노하우 인력교류	현장 관측 인프라 및 자료 공유	현장 인프라 제공 연구인력 투입 관측수행 및 관측자료 획득 인력교류
	미국	우즈홀 해양연구소 (WHOI)	해빙 부표 관측 기술 전수		현장 관측 인프라 및 자료 공유	
	호주	애들레이드대학교 (UoA)	해빙 파고부표 관측 기술 전수		현장 관측 인프라 및 자료 공유	
	미국	뉴욕대학교 (NYU)	해빙 위 마스터 구성 및 관측 기술		현장 관측자료 및 인력교류	
	영국	영국남극연구소(BAS)	해빙코어 시료채취 기술 전수		현장 관측 인프라 및 자료 공유	
	미국	스크립스해양연구소	AXCTD/XCTD 및 ITP 활용 관측기술		현장 관측자료 및 인력교류	
	호주	켄터베리 대학교	UAV EM-Bird 활용 관측기술	전문 관측장비 관측기술과 노하우 공동 관측수행	현장 관측 인프라 및 자료 공유	현장 인프라 제공 연구인력 투입 공동 관측수행 및 관측자료 획득
	미국	라몬 도허티 지구관측소(LDEO)	UAV 활용 관측기술		현장 관측 인프라 및 자료 공유	
	독일	알프레드 베게너 극지해양연구소(AWI)I	UAV 활용 관측기술		현장 관측 인프라 및 자료 공유	
	독일	알프레드 베게너 극지해양연구소(AWI)I	OCEAN DECADES 프로젝트인 남극 관측 동기화 위한 국제 과학과 인프라(Antarctic InSync) 프로젝트 수행 및 인프라와 자료 공유	외국 공동활용 가능한 인프라 관측자료	FAST 수행 및 현장 관측 인프라 및 자료 공유	공동활용 가능한 인프라 관측자료
남극 해빙 예측 시스템 개발	캐나다	캐나다 환경기후변화부 (EC)	CICE 해빙모델 구축 및 개선	해빙모델 개선 경험 및 노하우 인력교류	현장 관측자료 및 인력교류	남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축·운영 모델 개선에 유용한 해빙 관측자료 개발된 AI 기법 인력교류
	프랑스	피에르-시몬 라플라스 연구원 해양학-기후연구소 (IPSL)	해빙모델 역학·물리과정 개선		현장 관측자료 및 인력교류	
	EU	유럽중장기예보센터 (ECMWF)	해빙 계절예측 시스템 구축		현장 관측자료 및 인력교류	
	중국	칭화대학교 (TU)	CICE 초고해상도 적용기법		현장 관측자료 및 인력교류	
AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	호주	호주해양남극연구소	통합적 환남극 고착빙 자료	통합적 환남극 고착빙 자료	자료 활용한 고착빙 메커니즘 연구	제공된 자료 기반 연구 결과
	이탈리아	유럽-지중해 기후변화센터 (CMCC)	해빙모델에 AI 기법 응용	개발된 AI 기법	AI 경험 및 노하우, 현장 관측자료 및 인력교류	개발된 AI 기법
	국제협력 /벨기에	SIPN South /루뱅대학교(UCL)	SIPN South 주관 및 예측자료 제공	축적된 다중모델 계절예측자료	계절예측자료 SIPN South 제출	생산된 계절예측자료 제출
전체 프로젝트	국제협력	세계기상기구(WMO/세계날씨연구프로그램(WWRP)/극지 결합분석 및 서비스 프로그램(PCAPS)	공식 지원	공식 웹사이트에 링크 뉴스레터에 소식 게재	활동 보고 및 홍보	프로젝트 활동 보고 및 홍보

참고16 SIPN South 참여 조건 및 참여의 의의

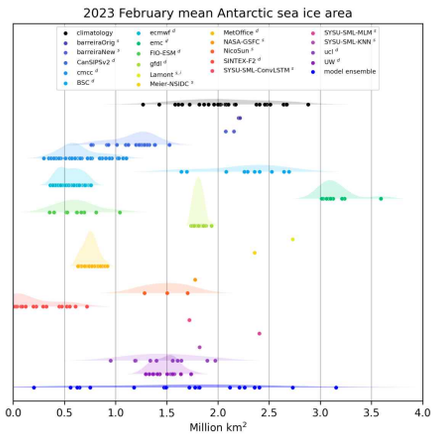
SIPN South(남부 해빙예측 네트워크) 참여 조건

남반구 극지예측의 해(YOPP-SH) 국제협력연구 일환으로 2017년 시작된 남극 해빙 계절예측 상호비교연구

- 12개국 22개기관 남극 해빙 계절예측 상호비교결과 산출·웹게재
  ※ https://fmassonn.github.io/sipn-south.github.io



[그림 116] SIPN South 사이트



[그림 117] SIPN South에서 게재된 자료 예시

- 매해 12월 9일 남극 해빙면적 일평균 3개월 계절예측 자료(12월 1일부터 2월 28일까지) 필수 제출
  ※ 이외에 남극 해빙 10도 경도 간격 일평균 자료, 남극 해빙농도 일평균 자료, 남극 해빙두께 일평균 자료, 그리고 남극 해빙면적 월평균 자료 6개월 이상 예측 자료 등 추가 제출 가능

SIPN South와의 협력을 통해 확보 가능한 기술

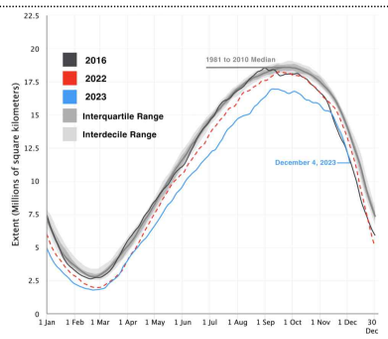
- 1단계: 현재까지 축적된 다중모델 계절예측 자료 입수하여 해빙모델 및 예측시스템 개발 과정에서 모델 성능 평가 자료로 활용
- 2단계: 공식 참여함으로써 산출된 예측 자료의 성능 검증 및 국제적 공신력 획득
- SIPN South 공식 참여를 통해 획득할 수 있는 우수한 남극 해빙 계절예측 자료 인증은 외국 극지기관에 유용한 해빙 예측자료 전파로 이어져 극지연구 선도국 위상 획득 가능
  ※ 특히 장보고기지 테라노바만 부근 AI 기반 남극 해빙 계절예측 상세자료는 인근 이태리 및 중국기지 연구 및 보급에 유용하게 활용될 수 있음

참고17 남극해 급격한 온난화 대응 관련 현황분석

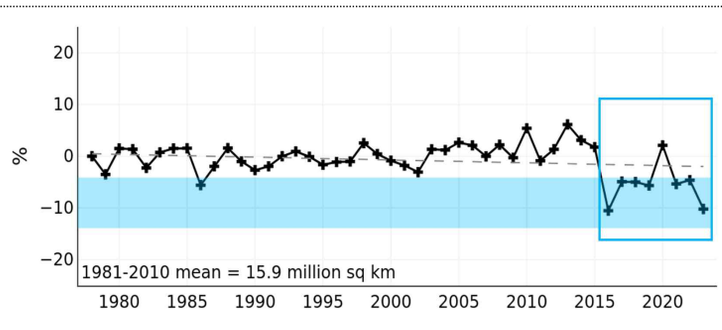
남극해 급격한 온난화에 따른 해빙 유실

’22년 이후 전례없는 남극 해빙(바다 얼음·海氷) 면적 축소

- 남극 해빙은 내부 변동성의 진폭이 크고 장기 감소 추세가 나타나지 않아 지구 온난화의 영향을 받지 않는다고 알려져 왔으며, 2021년 발간된 IPCC 6차 보고서에서도 미래 온난화가 진행되더라도 남극 해빙 면적이 줄어들 것인지는 불확실하다고 보고
- 그러나 2016년 이후 남극 해빙 면적이 분명한 감소 추세로 전환, 특히 2022년부터 지구 온난화 심화와 함께 남극 해빙 유실 또한 가속화되어 2023년에는 45년 관측 역사상 최저 기록



[그림 118] 남극 해빙 월평균 면적



[그림 119] 남극 해빙 연평균 면적 변화

장보고 기지 인근 해빙 유실

장보고기지 앞 해빙은 기지 보급을 위한 비행기 이착륙 활주로, 연구선 하역장소 및 물범 등 극지 생물 관측장소로 활용되어 일정량의 해빙 유지가 중요

- 전례없는 남극 해빙면적 축소는 장보고기지 주변 해빙두께 감소로 이어져 비행기 해빙활주로 유실 및 쇄빙선 해빙하역 불가로 남극 연구활동 축소와 기지 건설자재 보급 차질 발생
- 예년보다 이른 장보고 기지 주변 해빙두께 감소로 비행기를 활용한 입남극이 축소되어 연구활동에 커다란 차질을 빚고 있음

  * ‘22년 장보고 기지 해빙 활주로 폐쇄로 하계탐사를 위한 입남극 축소



[그림 120] 장보고 기지 부근 해빙 위 비행기 이착륙장 전경

- '22년 11월 28일 6시간만에 장보고기지 앞 해빙이 완전히 녹아 장보고기지 하역 불가
  * 건설자재 하역 불가로 사업비용 약 50억 증액 및 사업기간 2년 연장 피해 발생



('21.12 / 기존) 아라온 호 활용 장보고기지 해빙하역 모습 | ('21.12.15.) 기지 앞 바다 전경 해빙 유지 ☞ 해빙하역이 가능 | ('22.11.28.) 기지 앞 바다 전경 해빙 완전 소실 ☞ 해빙하역 불가

[그림 121] 기지준공 이후 처음 발생한 '22년 장보고기지 앞 해빙 유실

남극 해빙 장기예측 현황

○ 우리 쇄빙선 아라온의 경우 장기계획(3~6개월) 수립 및 과학적 항로 예측을 위해 활용하고 있는 장기예측 자료가 전무

- 남극 항해 시 미국 국립빙설자료센터(NSIDC) 및 독일 브레맨대학교의 해빙 원격탐사 실시간 모니터링 자료를 주로 참조, 중장기 남극 해빙 예측자료 확보 통해 보다 안정적인 남극 과학활동 사전 계획수립 및 효과적인 실시간 대응체계 구축 필요

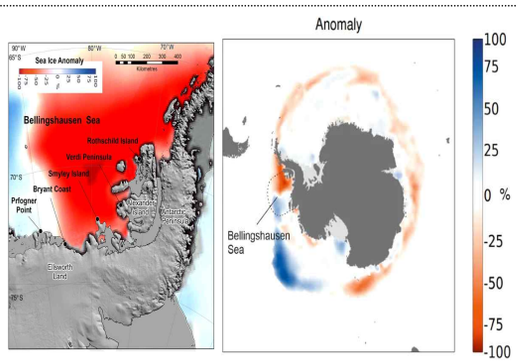
참고18 남극 해빙 유실에 따른 전지구적 영향 및 잠재적 이슈

남극 해빙 유실에 따른 생태계 파괴 보고

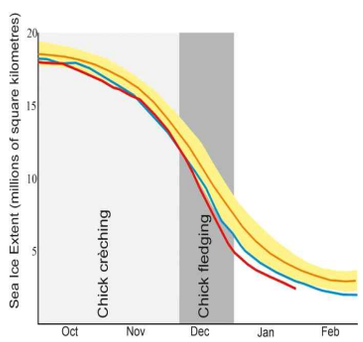
- 최근 남극 해빙 유실 속도가 빨라지면서 서식지가 축소된 황제펭귄이 적응하지 못하고 번식 활동에 심각한 방해를 받아 금세기말 준멸종 직면할 것이라는 최신 연구결과 발표
  - 영국남극연구소(BAS)의 피터 프렛웰 박사 연구팀이 2023년 8월 과학저널 〈커뮤니케이션 지구와 환경〉 게재



[그림 122] 황제펭귄



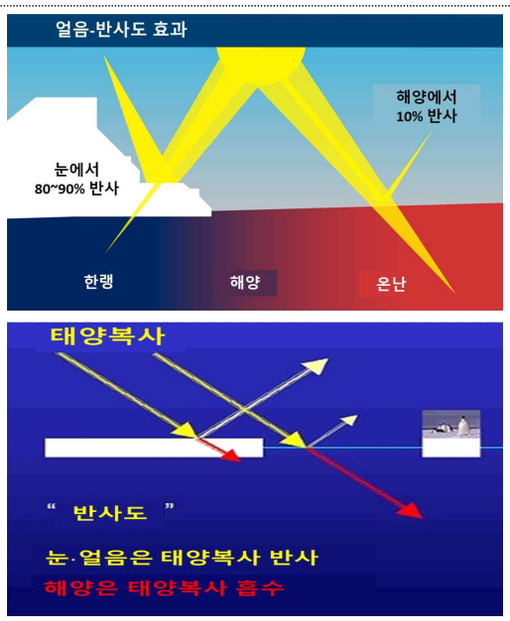
[그림 123] 남극반도 부근 해빙 감소 지역



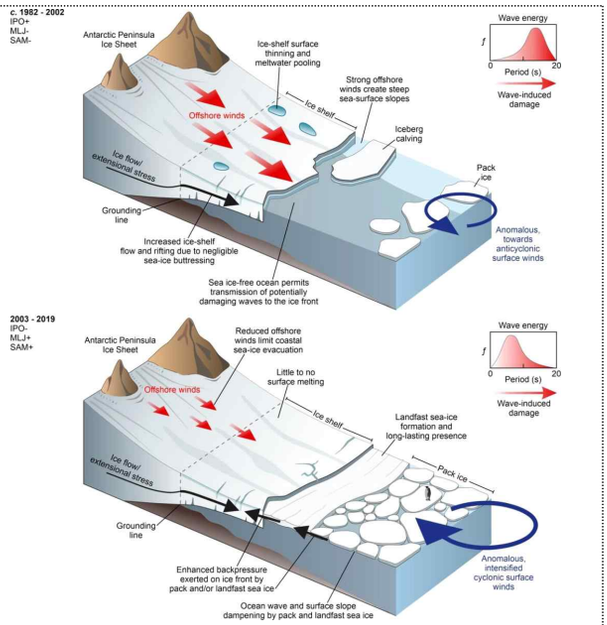
[그림 124] 남극 해빙 면적이 펭귄 번식활동에 미치는 영향

해빙 유실이 기후변화 가속화 촉발 가능

- 남극 해빙의 소멸은 반사도의 감소로 지구 온난화를 가속화 시키며, 해빙-빙상을 연결하는 고착빙의 소실은 해수면 상승을 유발시키는 빙붕·빙상의 융빙 가속화로 이어질 수 있음
  - 얼음은 바다보다 반사도가 크기 때문에 해빙 유실은 지구의 태양복사 흡수 증가로 이어져 온난화 가속화
  - 바다 위의 얼음 해빙이 녹아도 해수면 상승으로 이어지지 않지만, 해빙의 증가가 빙붕이 바다로 흘러내리는 것을 막아 해수면 상승 늦춘다는 최신 연구(크리스티 외 2022 네이처 지오사이언스紙 게재)



[그림 125] 해빙의 얼음-반사도 효과

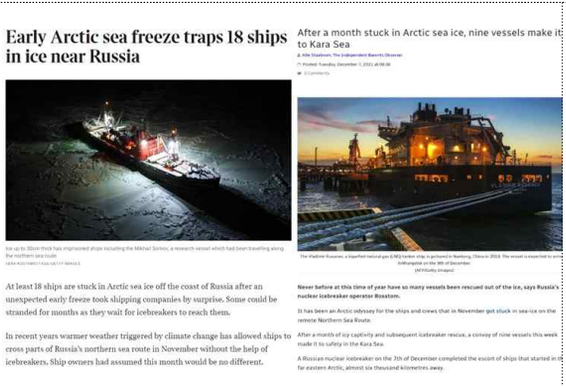


[그림 126] 해빙이 빙붕의 용융을 저지하는 메커니즘

방재 위한 해빙 예측시스템의 필요성

예측 및 대응체계를 갖추지 못한 채 남극항로가 열리면 결빙·유빙에 의한 선박 좌초 위험 커짐

- 북극해 해빙 감소에 의한 북극항로 확장 이후 2021년 11월 갑작스러운 한파에 인한 결빙으로 18척 이상 선박이 러시아 연안에서 좌초
- 우리 쇄빙선 아라온호도 2015년과 2020년 각각 남극해 유빙 수역에서 좌초된 우리나라 원양어선 구조



[그림 127] 2021년 북극항로에서의 좌초사건



[그림 128] 남극 유빙수역에서 아라온호의 구조 활동

참고19 사업 설명자료

내역사업	사업 설명 요약
1. 남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발 	▪ (사업 목적) 기남극해 급격한 온난화에 따른 남극 해빙 융해 프로세스 규명 및 AI 적용 모델기술 기반 남극 해빙 장기예측시스템 개발과 계절예측 자료 생산 ▪ (사업비) 360억(국비 기준), 25년 62억 ▪ (최종 성과물) (양적성과) ① 남극 해빙 관측체계 구축 및 남극 정보 100건 확보로 남극 해빙모델 성능개선 ② 3개월마다 AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산 ③ 장보고기지 테라노바만 상세 해빙 예측자료 산출 및 인터랙티브 가시화 시스템 구축 ④ 국제협력 연구 1건 주도(남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축·운영) 및 11건 참여 (질적성과) ① AI 기반 남극 해빙 계절예측 생산역량 제고(기술수준 Level 1→Level 4 향상) ② 해빙모델 예측 정확도 향상(예측 오차 30% 감소) ③ 10개국 22개 기관 참여하는 국제 남극 해빙 계절예측 프로그램 SIPN South에 공식 참여 ▪ (활용성) 안전한 남극 탐사활동 지원, 남극 해빙 현장관측 기술 확보 및 예측자료 자체 생산으로 국가 기후변화 대응기술력 제고 및 해양재난 예측정확도 향상, 신뢰도 높은 남극 해빙 계절예측 자료 전파로 국제사회 영향력 확보, 선박 운항 탄소발자국 및 인명과 경제적 손실 위험 저감 ▪ ('25년 개발 내용) 남남극 해빙 관측체계 구축(21억), 남극 해빙 예측시스템 개발(21억), AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산(20억) 등

참고20 사업 총괄 설명 도면

해양수산부

남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발

KOPRI 극지연구소

배경: 2023년 전례없는 남극 해빙 면적 축소 → 남극 탐사활동에 차질 야기



이슈: 예측 및 대응체계를 갖추지 못한 채 남극항로가 열리면 결빙 · 유빙에 의한 선박 좌초 위험 커짐



남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발 연구 내용

① 남극 해빙 **관측체계 구축** 및 급격한 남극 해빙 용융 프로세스 규명

② 전처리·자료동화·모델·운영체계로 구성된 **첨단 남극 해빙 예측시스템** 개발

③ 최신 해빙모델 및 **AI 기반 해빙 계절예측 자료 생산체계** 구축 및 산출



④ **연구 효율성 제고 위해** 남극 해빙 관측·예측분야 선도국과 공동연구 수행 및 우리나라 주도 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축 및 운영

⑤ **산출된 계절예측자료 성능 검증 및 수월성 확보 위해** 국제 남극 해빙 계절예측 프로그램 **SIPN South**(12개국 22개 기관 참여 중) 공식 참여

최종 성과 목표

- 남극 해빙 관측체계 구축
- 남극 해빙 예측시스템 개발
- AI 기반 지역 상세 계절예측 자료 생산
- 예측결과 시각화 플랫폼 구축
- 글로벌 협력 활용 및 강화

기대효과

- 안전한 남극 탐사 활동
- 기후 예측 역량 증진
- 탄소배출 저감 및 어업활동 활성화
- 해양 안전체계 구축
- 극지연구 선도국 지위 획득

참고21 기술 개선수준 및 향후모습

관련 기술 현황 목록 및 기술 수준 표시

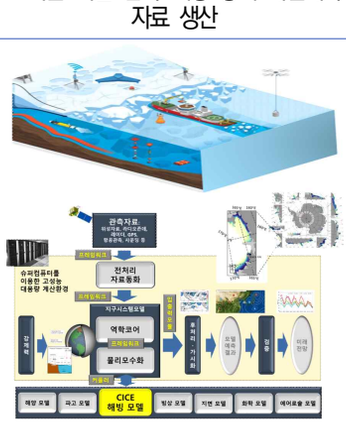
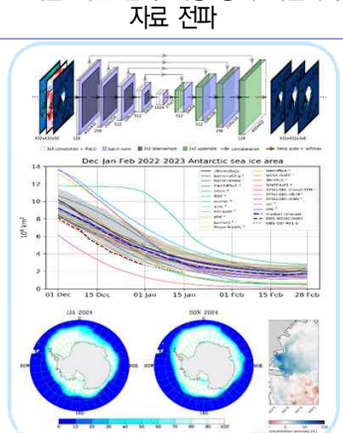
구분	기술분야	선진기관	선진수준	국내수준	목표수준
남극 해빙 관측체계 구축	남극 해빙 직접 관측기술	WHOI(미)	●●●●○	●○○○○	●●●○○
	폴리냐 생성·소멸 과정 관측	SCRIPPS(미) AAP(호)	●●●●○	●○○○○	●●●○○
	해빙 상·하부 관측기술	LEDO(미) AWI(독)	●●●●○	●○○○○	●●●○○
남극 해빙 예측시스템 개발	해빙모델링	EC(캐) IPSL(프)	●●●●○	●○○○○	●●●○○
	계절예측 시스템 구축	ECMWF(EU)	●●●●●	●●○○○	●●●○○
	전처리 및 자료동화	ECMWF(EU)	●●●●●	●●○○○	●●●○○
AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	딥러닝 기반 하이브리드 예측	Oxford Univ.(영)	●●●●○	●●●●○	●●●●●
	AI 기반 해빙 계절예측 자료 생산	EMCC(이)	●●●●○	●○○○○	●●●●○
	AI 기반 자료동화	ECMWF(EU)	●●●●○	●●○○○	●●●●○
	남극 해빙의 전지구적 영향 연구	Columbia Univ. (미)	●●●●○	●○○○○	●●●○○

관련 핵심 기술 및 기술 수준 조사

구분	기술분야	국내 수준('24)	선진국 수준	선진기관
남극 해빙 관측체계 구축		남극 해빙 직접관측 경험 부족	국가별 특화된 고도의 남극 해빙 현장 관측기술 보유, 국내 기술/장비 활용, 관측/운영/분석이 가능한 단계	
	남극 해빙 직접 관측기술	〈Level 1〉 남극 해빙 직접관측 경험 전무	〈Level 4〉 파고부이, 얼음질량균형부이, ApRES 등 장비 직접개발/관측/분석	WHOI(미)
	폴리냐 생성·소멸 과정 관측	〈Level 1〉 외국 장비 도입/시험 단계	〈Level 4〉AXCTD, 표층부이 관측/분석 및 국제 ASPeCT 관측 프로토콜 주도	SCRIPPS(미) AAP(호)
	해빙 상·하부 관측기술	〈Level 1〉 외국 장비 도입/시험 단계	〈Level 4〉UAV, 플롯, LIDAR, 해빙코어 등 장비 직접개발/관측/분석	LEDO(미) AWI(독)
남극 해빙 예측시스템 개발		외국모델 도입/운영 단계	해빙 예측시스템 자체 개발/운영 단계	
	해빙모델링	〈Level 1〉 외국에서 개발된 해빙 모델 도입 단계	〈Level 4〉해빙모델 자체개발 및 활용	EC(캐) IPSL(프)
	계절예측 시스템 구축	〈Level 2〉 외국에서 개발된 계절예측 시스템 도입·운영 단계	〈Level 5〉 해빙모듈이 포함된 지구시스템 모델로 계절예측 수행 단계	ECMWF(EU)
	전처리 및 자료동화	〈Level 2〉 저해상도 지구시스템 모델 위한 전처리 및 자료동화 시스템 도입/개선 운영 단계	〈Level 5〉 전처리 및 자료동화 시스템 개발/운영 단계	ECMWF(EU)
AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산		AI 기반 계절예측 적용 원천기술 확보 단계	AI 기반 계절예측 자료 생산 단계	
	딥러닝 기반 하이브리드 예측	〈Level 4〉 엘니뇨 등 계절예측 위한 딥러닝 기반 하이브리드 예측시스템 개발/운영	〈Level 4〉 계절예측 위한 딥러닝 기반 하이브리드 예측시스템 개발/운영	Oxford Univ.(영)
	AI 기반 해빙 계절예측 자료 생산	〈Level 1〉 남극 해빙 계절예측 자료 생산 전무	〈Level 4〉저해상도 남극 해빙 계절예측 자료 분기별 생산	EMCC(이)
	AI 기반 자료동화	〈Level 2〉 북극해빙 계절예측 위한 AI 기반 자료동화 시스템 개발 중	〈Level 4〉저해상도 남극 해빙 계절예측 위한 AI 기반 자료동화 시스템 개발/운영	ECMWF(EU)
	남극 해빙의 전지구적 영향 연구	〈Level 1〉 기후변동성에 따른 남극 해빙의 변화 분야 부문만 연구	〈Level 4〉 다양한 시간규모의 남극 해빙의 전지구적 영향 연구 활발	Columbia Univ.(미)

기존·신규과제 기술 개선수준 및 향후모습 비교

핵심항목	현재 수준(모습)	R&D 수행시 개선수준(모습)		향후 수준(모습)
		'25년 수준	목표수준	
	~'24	'25	'25~'30	'31~(종료이후)
남극 해빙 관측체계 구축	〈Level 0〉 ■ 국내에서 시도된 바 없음 ■ 미국, 호주 등 선도국에서 ASPeCT 국제공동 해빙관측 수행 중	〈Level 0→1〉 ■ 국제협력 기반 해빙 위관측 및 해빙 상하부 관측 수행 - 정선자료: 20정점 - 시계열: 2개소 확보 - 국제협력 3건	〈Level 1→3〉 ■ 남극 해빙 관측망 운영 및 국제협력 관측 프로그램 참여 - 정선자료: 100정점 - 시계열: 4개소 확보 - 국제협력 2건 ■ 남극 장보고기지 부근 테라노바만 급격한 해빙 융해와 연관된 프로세스 규명	〈Level 4〉 ■ 남극 해빙 관측기술 전파로 남극연구 수월성 획득
남극 해빙 예측시스템 개발	〈Level 1〉 ■ 지구시스템 모델 운용 및 단위모듈 개발·개선	〈Level 1→2〉 ■ 지구시스템-해빙모델 결합 예측시스템 개발 - 국제협력 6건	〈Level 2→3〉 ■ 전처리·자료동화·모델·운영체계로 구성된 계절내~1년 시간규모 남극 해빙 장기예측시스템 구축 ■ 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축 및 운영 - 국제협력 1건 주도	〈Level 4〉 ■ 남극 해빙 장기예측시스템 성능제고 및 활용 연구 분야 확대 ■ 주도적 남극 해빙 모델링 분야 국제협력 네트워크 운영
AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	〈Level 1〉 ■ 국내 AI 적용 기후예측 단위원천기술 ■ 국외 SIPN South(12개국 22개 기관) 남극 해빙 계절예측	〈Level 1→2〉 ■ 지구시스템-해빙모델 기반 하이브리드 예측시스템 개발 및 AI 기법 적용	〈Level 2→4〉 ■ AI기술 기반 지역별 상세 남극 해빙 계절예측 자료 생산 ■ SIPN South 참여 자료 생산	〈Level 5〉 ■ 테라노바만 상세 남극 해빙 계절예측 자료 제공으로 남극 선도국 지위 확보

상세 내역	과거 연구성과 ⇨	현재 수준 ⇨	향후 모습
기술 수준	남극 해빙 관측 지원 인프라 및 예측시스템 적용 가능한 단위원천기술	남극 해빙 현장관측 자료 획득 및 AI 기반 남극 해빙 계절예측자료 생산	全남극 해빙 상세 계절예측자료 생산
운용 방식	국외 위성기반 실시간 모니터링 자료	AI기술 기반 남극 해빙 상세 계절예측 자료 생산	AI기술 기반 남극 해빙 상세 계절예측 자료 전파
그림	 ('21.12.15.) 기지 앞 바다 전경 해빙 유지 ☞ 해빙하역 가능  ('22.11.28.) 기지 앞 바다 전경 해빙 완전 소실 ☞ 해빙하역 불가		
적용 대상	남극 장보고기지 부근 테라노바만 해빙	남극 장보고기지 부근 테라노바만 해빙	全남극 주변 해빙
파급 효과	남극 해빙 융해에 의한 탐사활동 축소 인지	SIPN South 상호비교에서 우수성능 입증	남극 해빙 상세 계절예측 자료 전파로 선도국 지위 획득

참고22 최종성과물 및 기대효과

최종성과물

- (남극 해빙 관측체계 구축) 남극 해빙 관측기술 및 예측 모델 성능 향상에 필요한 현장 관측자료 확보* 기반 급격한 남극 해빙 용융 프로세스 규명
  * 남극 해빙 정선·시계열 관측자료 100건 이상 확보, 선도국 수준 남극 해빙 관측망 구축·운영

- (남극 해빙 예측시스템 개발) 지구시스템-해빙모델 결합 남극 해빙 예측시스템, 전처리 및 자료동화 시스템, 예측시스템 운영체계 개발 및 해빙모델에서 고착빙·폴리냐 등 남극 해빙의 주요 프로세스 모의성능 향상
  * 첨단 남극 해빙 예측시스템 개발 및 정량적 성능 개선(해빙모델 예측 정확도 향상(예측 오차 30% 감소)으로 예측역량 함양

- (AI 기반 계절예측 자료 생산) 최신 해빙모델 및 AI 기반 해빙 예측시스템 성능 제고 기술 개발*, 계절예측 자료 생산체계 구축 및 3개월 간격으로 상세 해빙 계절예측(3~6개월 예측) 자료 정기 산출**
  * AI기반 남극 해빙 계절예측 생산역량 제고(기술수준 Level 1→Level 4 향상)
  ** 장보고기지 테라노바만 상세 해빙 예측자료 산출 및 인터랙티브 가시화 시스템 구축

- (글로벌 협력 활용 및 강화) 국제협력연구를 통해 해빙 관측 및 모델링 분야 노하우 및 기술전수 위해 현장 관측자료 제공·교환 및 연구인력 상호교류 등 상보적 관계 기반 남극 해빙 관측·예측 분야 양자* 및 다자 국제협력연구 참여** 및 주도***
  * 국제협력 연구 11건 이상 참여 (국제협력의향서 9건 접수)
  ** 10개국 22개 기관 참여하는 국제 남극 해빙 계절예측 프로그램 SIPN South에 공식 참여, ASPeCT 국제관측네트워크 참여 등
  *** 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축·운영 1건 주도

기대효과

- (안전한 남극 탐사활동) 쇄빙선 항로 및 기지 비행기 이착륙 중장기 계획 수립으로 체계적인 남극 과학활동 지원 및 확대 가능

- (기후예측 역량 증진) 국내 남극 해빙 현장관측 기술 확보 및 예측자료 자체 생산으로 지구시스템 메커니즘에 대한 이해 증진* 및 국가 기후변화 대응 기술력 제고에 기여
  * 남극 해빙 면적 축소는 지구 반사도 감소로 온난화를 가속화시키며 해수면 상승을 유발하는 빙붕·빙상 융빙 가속화로 이어질 수 있음

- (탄소배출 저감 및 어업활동 활성화) 남극 탐사선 최적 항로 계획 수립 및 어선의 안전한 조업과 어장 예측에 도움

* 남극 해빙 유실은 어장에 큰 영향을 주는 생태계 파괴 등으로 이어지게 되므로 예측에 경제적 효과 및 잠재적 수요 막대

◎ (해양 안전체계 구축) 남극 해빙 유실에 기인한 해양 및 연안 재난* 시나리오 제공으로 해양재난 예측정확도 제고에 일조

* 유빙에 의한 선박 좌초 및 고파고에 의한 연안 기반인프라 훼손 등

◎ (극지연구 선도국 지위 획득) 국제 상호비교연구 SIPN South에 공식 참여하여 우수한 남극 해빙 계절예측 자료를 제공하고, 쇄빙선 운항 국가 및 장보고 기지 주변 국가 등 외국 극지기관에 유용한 해빙 예측자료 전파*

* 현재 우리 쇄빙선 아라온은 항로 결정에 미국 국립빙설자료센터(NSIDC) 및 독일 브레맨 대학교의 해빙 원격탐사 실시간 모니터링 자료를 주로 참조

Korea Polar Research Institute

남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측기술 개발 위한 기획연구

과제제안요청서(RFP)

과제제안요구서(RFP)

중앙행정기관명	해양수산부	사업명	남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발사업
전문기관명	해양수산과학기술진흥원	내역사업명	남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발사업
공모방식	지정공모	보안등급	일반과제
연구개발과제명	남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발사업		
전체 연구개발기간 (당해연도)	'25.4 ~ '30.12 이내 ('25.4 ~ '25.12)	총 정부지원연구개발비 (당해연도)	360억원 이내 ('25년 62억원 이내)
단계 연구개발기간	(1단계) '25.4 ~ '27.12 (2단계) '28.1 ~ '30.12		
주관연구개발기관 유형	제한 없음	필수 참여기관 유형	제한 없음
연구개발단계	기초	정부납부기술료 징수 여부	징수
해양수산과학기술 분류	· 극지해양과학 – 극지/해양기초과학 – 극지해양(POS0101) · 극지해양과학 – 극지/해양기초과학 – 극지대기/기후(POS0104) · 극지해양과학 – 극지/해양기초과학 – 달리 분류되지 않는(POS0106)		

1. 사업 추진배경 및 필요성

□ 급격한 남극 해빙면적 축소는 기후변화의 가장 최신 영으로 구체적 대응 계획 수립이 절실

- ㅇ 남극 해빙면적 축소는 지구 반사도를 감소시켜 온난화를 가속화하며, 어장에 큰 영향 주는 생태계 파괴로 이어짐
- ㅇ 남극 과학활동 안정성을 저해하고, 유빙에 의한 선박좌초 및 고파고의 연안 인프라 훼손 등 재난 야기
- ㅇ 기후변화감시예측법 제8조 기반 남극 해빙 3개월 전망 생산 및 정보제공 필요

2. 제안요구내용

1) 최종목표

□ 남극해 급격한 온난화에 따른 남극 해빙 융해 프로세스 규명 및 AI 적용 모델 기술 기반 남극 해빙 장기예측시스템 개발과 계절예측 자료 생산

- ㅇ 남극 해빙 관측자료 확보 및 선도국 수준 남극 해빙 관측망 구축·운영
- ㅇ AI 적용 모델기술 기반 첨단 남극 해빙 예측시스템 개발
- ㅇ 남극 해빙 계절예측 1~3개월 전망 정보 생산 및 제공
- ㅇ SIPN South 공식 참여(계절예측 자료 정기 제출)
- ㅇ 우리나라 주도 남극 해빙 예측모델링 국제협력 네트워크 구축·운영 및 WMO/WWRP 공식 지원 프로젝트로서 국제공동연구 수행

2) 최종 연구개발성과물

□ 남극 정보 확보

- ㅇ 해빙 탐사를 위한 관측 거점 자료 획득 30개소
- ㅇ 해빙 항공탐사 2번이상 수행 획득
- ㅇ 정선자료 100정점 이상 획득

□ 남극 해빙 계절예측 자료 생산

- ㅇ 남극 해빙 장기예측시스템 개발(25km 해상도로 예측 출력변수 2개 이상)
- ㅇ 해빙 계절예측 자료 생산(5km 해상도로 예측, 출력변수 2개 이상)
- ㅇ 장보고기지 테라노바만 상세 해빙 예측자료 산출 및 인터랙티브 가시화 시스템

3) 주요 성과지표

성과목표 (최종성과물)	성과지표	목표치	비고 (설정근거, 평가기준 등)
남극 정보 확보	해빙 위 탐사	관측거점 자료 획득 (30 개소 이상)	- 장보고기지 부근 테라노바만 - 파고부이, IMB부이, 마스터 관측 3개소/년 - 해빙하부 용융량(ApRES) 관측 3개소/년 - 탐사보고서 및 KPDC 자료 업로드 확인
	해빙 하부 및 폴리냐 해양 물리 관측	정선자료 100 정점 이상 획득	- 해빙-해양 상호작용 규명에 필수적인 해양물리 관측자료 획득 - 테라노바만 지역 탐사(최소 4시즌 탐사 수행) - CTD·플롯·해빙코어 자료 등 획득
		시계열 계류 장비 5 정점 이상	- 빙붕-해양 상호작용 규명에 필수적인 해양물리 연속자료 획득(최소 1개월) - 표층부이 자료 등
		항공탐사 자료 획득	- UAV 관측 2회 이상 - AXCTD 자료 획득
	국제협력	12건 이상	- 국제협력연구 1건 선도 - 국외 연구기관과 공동연구 수행 (LOI, LOA, MOU 등) - 국외 연구기관과 인력교류(파견·유치·국제워크샵 개최)
남극 해빙 장기예측시스템 개발 및 해빙모델 예측 정확도 향상	남극 해빙 장기예측시스템 개발	남극 해빙을 포함한 전지구 기후 25km 해상도로 예측 출력변수 2개 이상	- 관측자료 기반 모의 성능을 재분석자료와 비교평가 - 남극 주변 기후 모의성능 분석
	해빙모델 성능 개선	예측오차 30% 감소	- 인공위성 관측자료 기준 모델의 해빙면적 모의 성능을 규준모델 실험 대비 비교평가 (관측된 입력자료 활용하여 기존 모델과 비교)
	가시화 툴 구축	모델 결과 가시화 툴	- 수치모델 결과 인터렉티브 가시화 툴 개발 및 운영 여부
AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산	해빙 계절예측 자료 생산	10km 해상도로 예측, 출력변수 2개 이상	- 3개월마다 AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산
	국제 남극 해빙 계절예측 프로그램 공식 참여	출력변수 2개 이상/SIPN South 참여	- 관측자료 기반 해빙 모의 성능을 SIPN South 결과와 비교평가 - 분기별 SIPN South에 계절예측 자료 제출 여부
	국내협력 및 성과확산	5건 이상	- 국내 심포지엄·포럼·워크샵 개최 - 계절예측자료 뉴스레터 생산
남극해 급격한	SCIE 논문게재	30 편 이상	- 논문 총 30편 이상 게재하되, 아래의 논문들을

온난화에 따른 남극 해빙 융해 프로세스 관련 연구			포함하여 성과물 제출 · NSC 급(자매지 포함) 논문 1편 · 국제공동저술 논문 5편 · 현장 관측자료 활용 논문 5편 · 수치모델 예측 논문 3편 · mrnIF* 70이상 SCI(E)급 논문 5편 * mrnIF: 표준화된순위보정영향력지수(Modified Rank Normalized Impact Factor) 순위보정지수의 최소값을 0, 최대값을 100으로 표준화한 것으로 지수 값이 큰 저널일수록 해당분야 내에서 위상이 높은 저널임

4) 주요 연구개발내용 및 범위

□ (남극 해빙 관측체계 구축) 글로벌 협력 기반 남극 해빙 현장 관측기술 획득·수행 및 남극 정보 획득

- ㅇ 국외 선도 연구기관과 협력 기반 남극 첨단 해빙 관측기술 도입 및 현장 관측 수행으로 예측 향상에 필요한 양질의 자료 획득
- ㅇ 남극 해빙의 생성·성장·융해 특성 및 장보고 기지 부근 테라노바만의 급격한 융빙 프로세스와 이에 영향을 미치는 지역·원격 메커니즘 규명

□ (남극 해빙 예측시스템 개발) 지구시스템-해빙모델 결합 남극 해빙 예측시스템 개발 및 현장 관측자료 기반 개선

- ㅇ 지구시스템-해빙모델 결합 기반 전처리 및 자료동화 시스템에 운영체계를 갖춘 남극 해빙 예측시스템 구축·개선·최적화
- ㅇ 남극 해빙 예측 모델링 국제협력 네트워크 구축 및 운영

□ (AI 기반 남극 해빙 계절예측 자료 생산) 최신 AI기술 기반 지역별 상세 남극 해빙 계절예측 자료 생산체계 구축 및 정기 산출

- ㅇ AI 기반 남극 해빙 예측시스템 자료동화 기법 및 모델 AI 기법 응용기술 개발
- ㅇ 최신 해빙모델 및 AI기술 기반 장보고 기지 부근 테라노바만 상세 계절예측 자료 생산체계 구축 및 성능 개선
- ㅇ SIPN South 공식 참여(계절예측 자료 정기 제출) 및 세계기상기구(WMO)/세계날씨연구프로그램(WWRP) 공식 지원 프로젝트 활동(보고 및 홍보)

5) 기타 조건

□ 본 연구에서 구축된 연구 인프라는 공동 활용을 기본으로 함

□ 중기예산(안) 참고

정부지원 연구개발비 (단위: 백만원)	1단계			2단계		
	1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차
42,850	6,200	6,300	6,500	6,000	5,500	5,500

Korea Polar Research Institute

남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측기술 개발 위한 기획연구

참고문헌

참고문헌

Aagaard, K. A., and Carmack, E. (1989). The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 94, 14485-14498.

Ackley, S. F., Stammerjohn, S., Maksym, T., Smith, M., Cassano, J., Guest, P., Parno, J. (2020). Sea-ice production and air/ice/ocean/biogeochemistry interactions in the Ross Sea during the PIPERS 2017 autumn field campaign. Annals of Glaciology, 61(82), 181–195. doi:10.1017/aog.2020.31

Anderson, J., Hoar, T., Raeder, K., Liu, H., Collins, N., Torn, R., & Avellano, A. (2009). The Data Assimilation Research Testbed: A Community Facility. Bulletin of the American Meteorological Society, 90(9), 1283-1296.

Arcucci, R., Zhu, J., Hu, S., & Guo, Y. K. (2021). Deep data assimilation: integrating deep learning with data assimilation. Applied Sciences, 11(3), 1114.

Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E., and Rothery, P. (2004). Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature*, 432, 100-103.

Bateson, A. W., Feltham, D. L., Schröder, D., Hosekova, L., Ridley, J. K., & Aksenov, Y. (2020). Impact of sea ice floe size distribution on seasonal fragmentation and melt of Arctic sea ice. The Cryosphere, 14(2), 403-428.

Bauer, T. P., Holtermann, P., Heinold, B., Radtke, H., Knoth, O., & Klingbeil, K., (2021). ICONGETM v1.0 – flexible NUOPC-driven two-way coupling via ESMF exchange grids between the unstructured-grid atmosphere model ICON and the structured-grid coastal ocean model GETM, Geoscientific Model Development, 14, 4843–4863

Bi, K., Xie, L., Zhang, H., Chen, X., Gu, X., & Tian, Q. (2022). Pangu-weather: A 3d high-resolution model for fast and accurate global weather forecast. arXiv preprint arXiv:2211.02556.

Bieniek, P. A., Eicken, H., Jin, M., Mahoney, A. R., Jones, J., & Bhatt, U. S. (2022). Seasonal forecasting of landfast ice in Foggy Island Bay, Alaska in support of ice road operations. Cold Regions Science and Technology, 201, 103618.

Bintanja, R., van Oldenborgh, G. J., Drijfhout, S. S., Wouters, B., and Katsman, C. A. (2013). Important role for ocean warming and increased ice-shelf melt in Antarctic sea-ice expansion. *Nat. Geosci.* 6 (5), 376-379. doi:10.1038/ngeo1767

Blockley, E. W., Peterson, K. A., & Blockley, E. (2018). Improving Met Office seasonal predictions of Arctic sea ice using assimilation of CryoSat-2 thickness.

The Cryosphere, 12(11), 3419–3438

Brankart, J. M., Candille, G., Garnier, F., Calone, C., Melet, A., Bouttier, P. A., et al. (2015). A generic approach to explicit simulation of uncertainty in the NEMO ocean model. *Geoscientific Model Development*, 8, 1285-1297.

Bushuk, M., Winton, M., Haumann, F. A., Delworth, T., Lu, F., Zhang, Y., ... & Zeng, F. (2021). Seasonal prediction and predictability of regional Antarctic sea ice. Journal of Climate, 34(15), 6207-6233.

Bushuk, M., Winton, M., Haumann, F. A., Delworth, T., Lu, F., Zhang, Y., ... & Zeng, F. (2021). Seasonal prediction and predictability of regional Antarctic sea ice. Journal of Climate, 34(15), 6207-6233.

Bushuk, M., Winton, M., Haumann, F. A., Delworth, T., Lu, F., Zhang, Y., et al. (2021). Seasonal prediction and predictability of regional Antarctic sea ice. Journal of Climate, 34(15), 6207-6233.

Cavalieri, D.J., Parkinson, C.L., Vinnikov, K.Y., 2003. 30-Year satellite record reveals contrasting Arctic and Antarctic sea ice variability. *Geophysical Research Letters* 30 (18), 1970.

Chi, J., & Kim, H. C. (2017). Prediction of arctic sea ice concentration using a fully data driven deep neural network. Remote Sensing, 9(12), 1305.

Chi, J., Kim, H. C., Lee, S., & Crawford, M. M. (2019). Deep learning based retrieval algorithm for Arctic sea ice concentration from AMSR2 passive microwave and MODIS optical data. Remote Sensing of Environment, 231, 111204.

Choi, M., De Silva, L. W. A., & Yamaguchi, H. (2019). Artificial neural network for the short-term prediction of arctic sea ice concentration. Remote Sensing, 11(9), 1071.

Christie, F.D.W., Benham, T.J., Batchelor, C.L. et al. (2022). Antarctic ice-shelf advance driven by anomalous atmospheric and sea-ice circulation. Nature Geoscience, 15, 356–362. https://doi.org/10.1038/s41561-022-00938-x

Comiso, J. C. (2010). Variability and trends of the global sea ice cover. In D. N. Thomas, G. S. Diekman (2nd Eds.), *Sea ice* (2, 205-246). Wiley-Blackwell.

Comiso, J. C., Cavalieri, D. J., & Markus, T. (2003). Sea ice concentration, ice temperature, and snow depth using AMSR-E data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(2), 243-252.

Comiso, J. C., Gersten, R. A., Stock, L. V., Turner, J., Perez, G. J., and Cho, K. (2017). Positive trend in the antarctic Sea Ice cover and associated changes in surface temperature. *J. Clim.* 30 (6), 2251-2267. doi:10.1175/jcli-d-16-0408.1

Crews, L., Lee, C. M., Rainville, L., & Thomson, J. (2022). Direct observations of the role of lateral advection of sea ice meltwater in the onset of autumn

freeze up. Journal of Geophysical Research: Oceans, 127(2), e2021JC017775.

Croxall, J. P., Trathan, P. N., and Murphy, E. J. (2002). Environmental change and Antarctic seabird populations. *Science*, 297, 1510-1514.

Denton, A. A., & Timmermans, M. L. (2022). Characterizing the sea-ice floe size distribution in the Canada Basin from high-resolution optical satellite imagery. The Cryosphere, 16(5), 1563-1578.

Doscher, R., Vihma, T., and Maksimovich, E. (2014). Recent advances in understanding the Arctic climate system state and change from a sea ice perspective: a review. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 13571-13600.

Dumont, D. (2022). Marginal ice zone dynamics: history, definitions and research perspectives. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 380(2235), 20210253.

Eayrs, C., Li, X., Raphael M.N., & Holland D.M. (2021). Rapid decline in Antarctic sea ice in recent years hints at future change. Nature Geoscience, 14, 460–464

Eayrs, C., Li, X., Raphael, M. N., and Holland, D. M. (2021). Rapid decline in Antarctic sea ice in recent years hints at future change. *Nat. Geosci.* 14, 1-5. doi: 10.1038/s41561-021-00768-3

Egerer, U., Siebert, H., Hellmuth, O., and Sorensen, L. L.: The role of a low-level jet for stirring the stable atmospheric surface layer in the Arctic, EGUsphere [preprint], https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-567, 2023.

Fraser, A. D., Massom, R. A., Handcock, M. S., Reid, P., Ohshima, K. I., Raphael, M. N., et al. (2021). Eighteen-year record of circum-Antarctic landfast sea ice distribution allows detailed baseline characterisation and reveals trends and variability. The Cryosphere, 15(11), 5061-5077. https://doi.org/10.5194/tc-15-5061-2021

Fraser, A. D., Massom, R. A., Handcock, M. S., Reid, P., Ohshima, K. I., Raphael, M. N., et al. (2021). Eighteen-year record of circum-Antarctic landfast-sea-ice distribution allows detailed baseline characterisation and reveals trends and variability. The Cryosphere, 15(11), 5061-5077.

Fraser, A. D., Massom, R. A., Ohshima, K. I., Willmes, S., Kappes, P. J., Cartwright, J., & Porter-Smith, R. (2020). High-resolution mapping of circum-Antarctic landfast sea ice distribution, 2000-2018. Earth System Science Data, 12(4), 2987-2999. https://doi.org/10.5194/essd-12-2987-2020

Fraser, A. D., Wongpan, P., Langhorne, P. J., Klekociuk, A. R., Kusahara, K., Lannuzel, D., ... & Wienecke, B. (2023). Antarctic landfast sea ice: A review of its physics, biogeochemistry and ecology. Reviews of Geophysics, 61(2),

e2022RG000770.

Fraser, A. D., Wongpan, P., Langhorne, P. J., Klekociuk, A. R., Kusahara, K., Lannuzel, D., et al. (2023). Antarctic landfast sea ice: A review of its physics, biogeochemistry and ecology. Reviews of Geophysics, 61, e2022RG000770. https:// doi.org/10.1029/2022RG000770

Fretwell, P.T., Boutet, A. & Ratcliffe, N. Record low 2022 Antarctic sea ice led to catastrophic breeding failure of emperor penguins. Commun Earth Environ 4, 273 (2023). https://doi.org/10.1038/s43247-023-00927-x

Frolicher, Tl L., Sarmiento, J. L., Paynter, D. J., Dunne, J. P., Krasting, J. P., and Winton, M. (2015). Dominance of the Southern Ocean in anthropogenic carbon and heat uptake in CMIP5 models. *Journal of Climate*, 28, 862-886.

Goosse, H., and Fichefet, T. (1999). Importance of ice-ocean interactions for the global ocean circulation: A model study. *Journal of Geophysical Research Ocean*, 104, 23337-23355.

Guest, P. S. (2021). Inside katabatic winds over the Terra Nova Bay polynya: 1. Atmospheric jet and surface conditions. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126(20), e2021JD034902.

Han, H., & Lee, H. (2018). Glacial and tidal strain of landfast sea ice in Terra Nova Bay, East Antarctica, observed by interferometric SAR techniques. Remote Sensing of Environment, 209, 41-51.

Han, H., & Lee, H. (2018). Glacial and tidal strain of landfast sea ice in Terra Nova Bay, East Antarctica, observed by interferometric SAR techniques. Remote sensing of environment, 209, 41-51.

Han, H., Kim, J. I., Hyun, C. U., Kim, S. H., Park, J. W., Kwon, Y. J., ... & Kim, H. C. (2020). Surface roughness signatures of summer arctic snow-covered sea ice in X-band dual-polarimetric SAR. GIScience & Remote Sensing, 57(5), 650-669.

Han, H., Kim, Y., Jin, H., Lee, H., 2015, Analysis of annual variability of landfast sea ice near Jangbogo Antarctic stationusing InSAR coherence images, Korean Journal of Remote Sensing, 31(6), 501-512 (in Korean with English abstract).

Han, H., Lee, H., 2018, Glacial and tidal strain of landfast sea ice in Terra Nova Bay, East Antarctica, observed by interfero-metric SAR techniques, Remote Sensing of Environment, 209, 41-51.

Han, H., Lee, S., Kim, H. C., & Kim, M. (2021). Retrieval of summer sea ice concentration in the Pacific Arctic Ocean from AMSR2 observations and numerical weather data using random forest regression. Remote Sensing, 13(12), 2283.

Haumann, F. A., Gruber, N., Munnich, M., Frenger, I., and Kern, S. (2016). Sea-ice transport driving Southern Ocean salinity and its recent trends. *Nature* 537 (7618), 89-92. doi:10.1038/nature19101

Heinemann, G., & Zentek, R. (2021). A Model-Based Climatology of Low-Level Jets in the Weddell Sea Region of the Antarctic. Atmosphere, 12(12), 1635.

Horvat, C., Tziperman, E., & Campin, J. M. (2016). Interaction of sea ice floe size, ocean eddies, and sea ice melting. Geophysical Research Letters, 43(15), 8083-8090.

Jenouvrier, S., Che-Castaldo, J., Wolf, S., Holland, M., Labrousse, S., LaRue, M., et al. (2021). The call of the emperor penguin: Legal responses to species threatened by climate change. *Glob. Chang. Biol.* 27 (20), 5008-5029. doi:10.1111/gcb.15806

Johnson, S. J., Stockdale, T. N., Ferranti, L., Balmaseda, M. A., Molteni, F., Magnusson, L., Tietsche, S., Decremer, D., Weisheimer, A., Balsamo, G., Keeley, S. P. E., Mogensen, K., Zuo, H., & Monge-Sanz, B. M. (2019). SEAS5: the new ECMWF seasonal forecast system, Geoscientific Model Development, 12, 1087–1117

Jung, T., Gordon, N. D., Bauer, P., Bromwich, D. H., Chevallier, M., Day, J. J., & co-authors (2016), Advancing polar prediction capabilities on daily to seasonal time scales. Bulletin of the American Meteorological Society, 97(9), 1631–1647

Juricke, S., Goessling, H. F., and Jung, T. (2013). Potential sea ice predictability and the role of stochastic sea ice strength perturbations. *Geophysical Research Letters*, 41, 8396-8403.

Kacimi, S., & Kwok, R. (2020). The Antarctic sea ice cover from ICESat-2 and CryoSat-2: freeboard, snow depth, and ice thickness. The Cryosphere, 14(12), 4453-4474.

Kadow, C., Hall, D. M., & Ulbrich, U. (2020). Artificial intelligence reconstructs missing climate information. Nature Geoscience, 13(6), 408-413.

Karvonen, J. (2017). Baltic sea ice concentration estimation using SENTINEL-1 SAR and AMSR2 microwave radiometer data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55(5), 2871-2883.

Kim, J., Kim, K., Cho, J., Kang, Y. Q., Yoon, H. J., & Lee, Y. W. (2018). Satellite-based prediction of Arctic sea ice concentration using a deep neural network with multi-model ensemble. Remote Sensing, 11(1), 19.

Kim, M. Kim, H.-C., Im, J., Lee, S., & Han, H. (2020). Object-based landfast sea ice detection over West Antarctica using time series ALOS PALSAR data. Remote Sensing of Environment, 242, 111782.

Kim, M., Im, J., Han, H., Kim, J., Lee, S., Shin, M., & Kim, H.-C. (2015). Landfast sea ice monitoring using multisensor fusion in the Antarctic. GIScience & Remote Sensing, 52(2), 239-256.

Kim, M., Kim, H.C., Im, J., Lee, S., Han, H., 2020, Object-based landfast sea ice detection over West Antarctica usingtime series ALOS PALSAR data, Remote Sensing of Environment, 242, 111782.

Kim, T., Jin, E. K., Na, J. S., Lee, C. K., Lee, W. S., & Moon, J. H. (2022). Numerical simulation of ocean-ice shelf interaction: Water mass circulation in the Terra Nova Bay, Antarctica. Ocean and Polar Research, 44(4), 269-285.

Kim, Y. J., Kim, H. C., Han, D., Lee, S., & Im, J. (2020). Prediction of monthly Arctic sea ice concentrations using satellite and reanalysis data based on convolutional neural networks. The Cryosphere, 14(3), 1083-1104.

King, J. (2014). Climate science: A resolution of the antarctic paradox. *Nature* 505 (7484), 491-492. doi:10.1038/505491a

King, J., and Turner, J. (1997). *Antarctic meteorology and climatology* (cambridge atmospheric and space science series). Cambridge: Cambridge University Press.

Kitade, Y., Shimada, K., Tamura, T., Williams, G. D., Aoki, S., Fukamachi, Y., et al. (2014). Antarctic bottom water production from the vincennes bay polynya, East Antarctica. *Geophys. Res. Lett.* 41 (10), 3528-3534. doi:10.1002/ 2014gl059971

Krishfield, R., J. Toole, A. Proshutinsky & M.-L. Timmermans, (2008). Automated Ice-Tethered Profilers for seawater observations under pack ice in all seasons. J. Atmos. Ocean. Tech., 25, 2091-2095.

Laxon, S. W., Giles, K. A., Ridout, A. L., Wingham, D. J., Willatt, R., Cullen, R., ... & Davidson, M. (2013). CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume. Geophysical Research Letters, 40(4), 732-737.

Lee, S., Im, J., Kim, J., Kim, M., Shin, M., Kim, H. C., & Quackenbush, L. J. (2016). Arctic sea ice thickness estimation from CryoSat-2 satellite data using machine learning-based lead detection. Remote Sensing, 8(9), 698.

Lemieux, J.-F., Dupont, F., Blain, P., Roy, F., Smith, G. C., & Flato, G. M. (2016). Improving the simulation of landfast ice by combining tensile strength and a parameterization for grounded ridges. Journal of Geophysical Research: Oceans, 121, 7354-7368.

Lemieux, J.-F., Tremblay, L. B., Dupont, F., Plante, M., Smith, G. C., & Dumont, D. (2015), A basal stress parameterization for modeling landfast ice. Journal of Geophysical Research: Oceans, 120, 3157-3173.

Lewis, N. S., Koenig, L., Grant, G., Gallaher, D., Schaefer, K., Thompson, J., & Campbell, G. G. (2019). Sea ice detection from persistent single-channel

shortwave infrared satellite data. Ecological Informatics, 52, 139-149.

Li, M., Liu, J., Qu, M., Zhang, Z., & Liang, X. (2022). An Analysis of Arctic Sea Ice Leads Retrieved from AMSR-E/AMSR2. Remote Sensing, 14(4), 969.

Liu, C., Gao, Z., Yang, Q., Han, B., Wang, H., Hao, G., ... & Li, Y. (2020). Measurements of turbulence transfer in the near-surface layer over the Antarctic sea-ice surface from April through November in 2016. Annals of Glaciology, 61(82), 12-23.

Liu, J., Chen, Z., Hu, Y., Zhang, Y., Ding, Y., Cheng, X., et al. (2019). Towards reliable arctic sea ice prediction using multivariate data assimilation., Science Bulletin, 64(1), 63–72

Liu, J., Zhu, Z., and Chen, D. (2023). Lowest Antarctic sea ice record broken for the second year in a row. *Ocean-Land-Atmosphere. Res.* 0 (ja). doi: 10.34133/olar.0007

Massom, R. A., & Stammerjohn, S. E. (2010). Antarctic sea ice change and variability-Physical and ecological implications. Polar Science, 4(2), 149-186. https://doi.org/10.1016/j.polar.2010.05.001

Massonnet, F., Barreira, S., Barthélemy, A., Bilbao, R., Blanchard-Wrigglesworth, E., Blockley, E., Bromwich, D. H., Bushuk, M., Dong, X., Goessling, H. F., Hobbs, W., Iovino, D., Lee, W.-S., Li, C., Meier, W. N., Merryfield, W. J., Moreno-Chamarro, E., Morioka, Y., Li, X., … Yuan, X. (2023). SIPN South: Six years of coordinated seasonal Antarctic sea ice predictions. Frontiers in Marine Science, 10. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2023.1148899

Massonnet, F., Goosse, H., Fichefet, T., and Counillon, F. (2014). Calibration of sea ice dynamic parameters in an ocean-sea ice model using an ensemble Kalman filter. *Journal of Geophysical Research Ocean*, 119, 4168-4184.

Mayewski, P. A., Meredith, M. P., Summerhayes, C. P., Turner, J., Worby, A., Barrett, P. J., et al. (2009). State of the antarctic and southern ocean climate system. *Rev. Geophys.* 47 (1). doi:10.1029/2007rg000231

Meyer, B., Freier, U., Grimm, V., Groeneveld, J., Hunt, B. P. V., Kerwath, S., et al. (2017). The winter pack-ice zone provides a sheltered but food-poor habitat for larval Antarctic krill. *Nat. Ecol. Evol.* 1 (12), 1853-1861. doi:10.1038/s41559-017-0368-3

Miller, U. K., Zappa, C. J., Gordon, A. L., Yoon, S.-T., Stevens, C., & Lee, W. S. (2024). High Salinity Shelf Water production rates in Terra Nova Bay, Ross Sea from high-resolution salinity observations. Nature Communications, 15(1), 373. doi:10.1038/s41467-023-43880-1

Mu, L., Liang, X., Yang, Q., Liu, J., & Zheng, F. (2019). Arctic ice ocean prediction

system: Evaluating sea-ice forecasts during xuelong's first trans-arctic passage in summer 2017. Journal of Glaciology, 65(253), 813–821

Na, J. S., Kim, T., Jin, E. K., Yoon, S. T., Lee, W. S., Yun, S., & Lee, J. (2022). Large-eddy simulations of the ice-shelf–ocean boundary layer near the ice front of Nansen Ice Shelf, Antarctica. The Cryosphere, 16(9), 3451-3468.

Notz, D., & Community, S. I. M. I. P. (2020). Arctic sea ice in CMIP6. Geophysical Research Letters, 47(10), e2019GL086749.

Ohshima, K. I., Fukamachi, Y., Williams, G. D., Nihashi, S., Roquet, F., Kitade, Y., et al. (2013). Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya. *Nat. Geosci.* 6 (3), 235-240. doi:10.1038/ngeo1738

Parkinson, C. L. (2019). A 40-y record reveals gradual Antarctic sea ice increases followed by decreases at rates far exceeding the rates seen in the Arctic. Proceedings of the National Academy of Sciences, 116(29), 14414-14423.

Parkinson, C. L. (2019). A 40-y record reveals gradual Antarctic sea-ice increases followed by decreases at rates far exceeding the rates seen in the Arctic. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 116 (29), 14414-14423. doi:10.1073/pnas.1906556116

Parkinson, C. L., and DiGirolamo, N. E. (2016). New visualizations highlight new information on the contrasting Arctic and Antarctic sea-ice trends since the late 1970s. *Remote Sens. Environ.* 183, 198-204. doi:10.1016/j.rse.2016.05.020

Payne, G., Martin, J., Monahan, A., & Sigmond, M. (2022). Seasonal predictions of regional and pan-Antarctic sea ice with a dynamical forecast system. (Victoria, British Columbia, Canada).

Pegion, K., Kirtman, B. P., Becker, E., Collins, D. C., LaJoie, E., Burgman, R., Bell, R., DelSole, T., Min, D., Zhu, Y., Li, W., Sinsky, E., Guan, H., Gottschalck, J., Metzger, E. J., Barton, N. P., Achuthavarier, D., Marshak, J., Koster, R. D., Lin, H., Gagnon, N., Bell, M., Tippett, M. K., Robertson, A. W., Sun, S., Benjamin, S. G., Green, B. W., Bleck, R., & Kim, H. (2019). The Subseasonal Experiment (SubX): A Multimodel Subseasonal Prediction Experiment. Bulletin of the American Meteorological Society, 100(10), 2043-2060.

Pollard, D., & DeConto, R. M. (2012). Description of a hybrid ice sheet-shelf model, and application to Antarctica. Geoscientific Model Development, 5, 1273–1295.

Purich, A., & Doddridge, E.W. (2023). Record low Antarctic sea ice coverage indicates a new sea ice state. Communications earth and environment, 4, 314

Randall, D.A., R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichefet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi and K.E. Taylor, 2007:

Cilmate Models and Their Evaluation. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller(eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Raphael, M. N., and Handcock, M. S. (2022). A new record minimum for Antarctic sea ice. *Nat. Rev. Earth Environ.* 3, 1-2. doi: 10.1038/s43017-022-00281-0

Ren, Y., Li, X., & Zhang, W. (2022). A data-driven deep learning model for weekly sea ice concentration prediction of the pan-arctic during the melting season. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60, 1-19.

Roach, L. A., Dorr, J., Holmes, C. R., Massonnet, F., Blockley, E. W., Notz, D., et al. (2020). Antarctic Sea Ice Area in CMIP6. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL086729.

Roach, L. A., Dörr, J., Holmes, C. R., Massonnet, F., Blockley, E. W., Notz, D., et al. (2020). Antarctic sea ice area in CMIP6. Geophysical Research Letters, 47, e2019GL086729. https://doi.org/10.1029/2019GL086729

Roemmich, D., Church, J., Gilson, J., Monselesan, D., Sutton, P., and Wijffels, S. (2015). Unabated planetary warming and its ocean structure since 2006. *Nature Climate Change*, 5, 240-245.

Rösel, A., Kaleschke, L., & Birnbaum, G. (2012). Melt ponds on Arctic sea ice determined from MODIS satellite data using an artificial neural network. The cryosphere, 6(2), 431-446.

Schroeter, S., and Sandery, P. A. (2022). Large-ensemble analysis of Antarctic sea ice model sensitivity to parameter uncertainty. *Ocean Modelling*, 177, 102090.

Serreze, M. C., and Stroeve, J. (2015). Arctic sea-ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 373, 20140159. doi:10. 1098/rsta.2014.0159

Steele, M. (1992). Sea ice melting and floe geometry in a simple ice-ocean model. Journal of Geophysical Research: Oceans, 97(C11), 17729-17738.

Sumata, H., Kauker, F., Karcher, M., and Gerdes, R. (2019). Covariance of Optimal Parameters of an Arctic Sea Ice-Ocean Model. *Monthly Weather Review*, 147, 2579-2602.

Sun, S., Eisenman, I. Observed Antarctic sea ice expansion reproduced in a climate model after correcting biases in sea ice drift velocity. Nat Commun 12, 1060 (2021). https://doi.org/10.1038/s41467-021-21412-z

Talley, L. D., Pickard, G. L., Emery, W. J., Swift, J. H. (2011). *Descriptive Physical*

Oceanography: An Introduction (Sixth Edition), Elsevier, Boston, 560 pp.

Tompkins, A. M., Ortiz De Zárate, M. I., Saurral, R. I., Vera, C., Saulo, C., Merryfield, W. J., Sigmond, M., Lee, W., Baehr, J., Braun, A., Butler, A., Déqué, M., Doblas-Reyes, F. J., Gordon, M., Scaife, A. A., Imada, Y., Ishii, M., Ose, T., Kirtman, B., Kumar, A., Müller, W. A., Pirani, A., Stockdale, T., Rixen, M., & Yasuda, T. (2017). The Climate-System Historical Forecast Project: Providing Open Access to Seasonal Forecast Ensembles from Centers around the Globe. Bulletin of the American Meteorological Society, 98(11), 2293-2301

Tsamados, M., Feltham, D., Petty, A., Schroeder, D., & Flocco, D. (2015). Processes controlling surface, bottom and lateral melt of Arctic sea ice in a state of the art sea ice model. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 373(2052), 20140167.

Turner, J., Guarino, M.V., Arnatt, J., Jena, B., Marshall, G.J., Phillips, T., Bajish, C.C., Clem, K., Wang, Z., Andersson, T., Murphy, E.J., & Cavanagh, R. (2020). Recent decrease of summer sea ice in the Weddell Sea, Antarctica. Geophysical Research Letter, 47(11), 1-11

Turner, J., Holmes, C., Harrison, T.C., Phillips, T., Jena, B., Reeves-Francois, T., Fogt, R., Thomas, E.R., & Bajish, C.C. (2022). Record low Antarctic sea ice cover in February 2022. Geophysical Research Letter, 49(12), 1-11

Turner, J., Phillips, T., Marshall, G. J., Hosking, J. S., Pope, J. O., Bracegirdle, T. J., et al. (2017). Unprecedented springtime retreat of Antarctic sea-ice in 2016. *Geophys. Res. Lett.* 44 (13), 6868-6875. doi:10.1002/2017gl073656

Valkonen, T., Vihma, T., Johansson, M. M., & Launiainen, J. (2014). Atmosphere–sea ice interaction in early summer in the Antarctic: Evaluation and challenges of a regional atmospheric model. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 140(682), 1536-1551.

Van Achter, G., Fichefet, T., Goosse, H., Pelletier, C., Sterlin, J., Huot, P.-V., Lemieux, J.-F., Fraser, A. D., Haubner, K., & Porter-Smith, R. (2022). Modelling landfast sea ice and its influence on ocean–ice interactions in the area of the Totten Glacier, East Antarctica. Ocean Modelling, 169, 101920.

Vancopenolle, M., Fichefet, T., Goosse, H., Bouillon, S., Madec, G., Maqueda, M. A. M. (2009). Simulating the mass balance and salinity of Arctic and Antarctic sea ice. 1. Model description and validation. *Ocean Modelling*, 27, 33-53.

Vancopenolle, M., Meiners, K. M., Michel, C., Bopp, L., Brabant, F., Carnat, G., et al. (2013). Role of sea ice in global biogeochemical cycles: emerging views and challenges. *Quaternary Science Reviews*, 79, 207-230.

Vihma, T., Pirazzini, R., Fer, I., Renfrew, I. A., Sedlar, J., Tjernstrom, M., et al.

(2014). Advances in understanding and parameterization of small-scale physical processes in the marine Arctic climate system: a review. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 9403-9450.

Wang, J., Luo, H., Yang, Q., Liu, J., Yu, L., Shi, Q., & Han, B. (2022). An unprecedented record low Antarctic sea-ice extent during austral summer 2022. Advances in Atmospheric Sciences, 39, 1591-1597

Wang, J., Luo, H., Yang, Q., Liu, J., Yu, L., Shi, Q., et al. (2022). An unprecedented record low Antarctic Sea-ice extent during austral summer 2022. *Adv. Atmospheric. Sci.* 39, 1591-1597. doi: 10.1007/s00376-022-2087-1

Wenta, M., & Cassano, J. J. (2020). The atmospheric boundary layer and surface conditions during katabatic wind events over the Terra Nova bay Polynya, Remote Sens., 12, 4160.

Xiaoran Dong et al, Deep Learning Shows Promise for Seasonal Prediction of Antarctic Sea Ice in a Rapid Decline Scenario, Advances in Atmospheric Sciences (2024). DOI: 10.1007/s00376-024-3380-y

Xu, S., Ma, J., Zhou, L., Zhang, Y., Liu, J., and Wang, B. (2021). Comparison of sea ice kinematics at different resolutions modeled with a grid hierarchy in the Community Earth System Model. *Geoscientific Model Development*, 14, 603-628.

Yang, Q., Losa, S. N., Losch, M., Tian-Kunze, X., Nerger, L., Liu, J., et al. (2014). Assimilating SMOS sea ice thickness into a coupled ice-ocean model using a local SEIK filter. Journal of Geophysical Research, 119(10), 6680–6692

Yoon, S. T., Lee, W. S., Stevens, C., Jendersie, S., Nam, S., Yun, S., ... & Lee, J. (2020). Variability in high-salinity shelf water production in the Terra Nova Bay polynya, Antarctica. Ocean Science, 16(2), 373-388.

Yuan, N., Ding, M., Ludescher, J., & Bunde, A. (2017). Increase of the Antarctic Sea Ice Extent is highly significant only in the Ross Sea. Scientific reports, 7(1), 41096.

Zappa, C. J., Brown, S. M., Laxague, N. J. M., Dhakal, T., Harris, R. A., Farber, A. M., & Subramaniam, A. (2020). Using Ship-Deployed High-Endurance Unmanned Aerial Vehicles for the Study of Ocean Surface and Atmospheric Boundary Layer Processes. Frontiers in Marine Science, 6. doi:10.3389/fmars.2019.00777

Zhang, Y., Bitz, C. M., Anderson, J. L., Collins, N., Hendricks, J., Hoar, T., Raeder, K., & Massonnet, F. (2018). Insights on Sea Ice Data Assimilation from Perfect Model Observing System Simulation Experiments. Journal of Climate, 31(15), 5911-5926

Zhao, J., Cheng, B., Vihma, T., Heil, P., Hui, F., Shu, Q., Zhang, L., & Yang, Q.

(2020). Fast Ice Prediction System (FIPS) for land-fast sea ice at Prydz Bay, East Antarctica: an operational service for CHINARE. Annals of Glaciology, 61(83), 271-283.

Zhu, J., Wang, W., Liu, Y., Kumar, A., & DeWitt, D. (2023). Advances in seasonal predictions of Arctic sea ice with NOAA UFS. Geophysical Research Letters, 50, e2022GL102392.

김혜리, 이조한, 현유경, 황승언, (2021), 기상청 기후예측시스템(GloSea6) - Part 1: 운영 체계 및 개선사항, 대기, 31(3), 341-359

한대현, 김영준, 정시훈, 심성문, 김우혁, 장은나, ... & 김현철. (2021). ICESat-2 고도계 자료를 활용한 여름철 북극 융빙호 탐지. Korean Journal of Remote Sensing, 37(5-1), 1177-1186.

한향선, 김연춘, 진효림, & 이훈열. (2015). InSAR 긴밀도 영상을 이용한 남극 장보고기지인근 정착해빙의 연간 변화 분석. Korean Journal of Remote Sensing, 31(6), 501-512.

2021 극지연구 성과 분석 및 미래 극지연구 도출 (KISTI, 2021)

극지연구소 연구 성과 및 영향력 분석 2023 (Clarivate Professionsal Service, 2024)