과제번호 : NRF-2022R2A1A1080925

“극지 빅데이터 연계 ‘미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발’ 기획 연구” 최종보고서 (A Planning Study on Development of K-Polar Basic Science and Technology for Future Climate Change related to Polar Big Data)

연구기관 : 건국대학교
연구책임자 : 이승호

2023. 05. 19.

과 학 기 술 정 보 통 신 부

안 내 문

본 연구보고서에 기재된 내용들은 연구책임자의 개인적 견해이며 과학기술정보통신부의 공식견해가 아님을 알려드립니다.

과학기술정보통신부 장관 이 종 호

※ 본 보고서의 글자 폰트는, '과학기술분야 연구기획과제 운영관리지침'('23.01)에 근거하여, 문화체육관광부의 세종대왕기념사업회에서 지정하는 문체부 폰트를 사용하였음.

제 출 문

과 학 기 술 정 보 통 신 부 장 관 귀하

본 보고서를 “극지 빅데이터 연계 ‘미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발’ 기획 연구”의 최종보고서로 제출합니다.

2023. 05. 19.

연구기관명 : 건국대학교
연구책임자 : 이승호
연 구 원 : 이규태
(이상 강릉원주대학교)
연 구 원 : 임수정
(이상 건국대학교)
연 구 원 : 정창훈
(이상 경인여자대학교)
연 구 원 : 채남이
(이상 고려대학교)
연 구 원 : 박기홍
(이상 광주과학기술원)
연 구 원 : 이홍금
(이상 국가생존기술연구회)
연 구 원 : 김민철, 김연태, 김유진,
김정한, 김정현, 김한우,
남성진, 남승일, 도학원,
박근보, 박기태, 박상종,
박지연, 손영주, 신승철,

윤영준, 이방용, 이유경,
이준혁, 장광철, 장지이,
정지영, 지건화, 최태진
(이상 극지연구소)
연 구 원 : 우승범
(이상 인하대학교)
연 구 원 : 홍성진
(이상 충남대학교)
연 구 원 : 권세윤
(이상 포항공과대학교)
연구수요조사 : 김진석
(이상 날리지웍스)

※ 연구기관 및 연구책임자, 연구원은 실제 연구에 참여한 기관 및 자의 명의임.
참여기관 및 동일기관 내 참여자는 가나다순임.

요 약 문

과제번호	NRF-2022R2A1A1080925	연구기간	2022년 06월 13일 ~ 2023년 03월 31일
과제명	(한글) “극지 빅데이터 연계 ‘미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발’ 기획연구” (영문) A Planning Study on Development of K-Polar Basic Science and Technology for Future Climate Change related to Polar Big Data		

연구책임자 (주관연구기관)	이승호 (건국대학교)	참 여 연구원 수	34명	연구비	60,000천원

요약

■ **목 적**

○ 극지(북극)의 중요성을 평가하고, 현재까지의 **북극권에서의 과학활동 추진 경과 및 성과 분석**

○ 극지에서 지속적인 장기 관측을 통해 **기후·환경변화 빅데이터 DB 구축·활용 기반 마련**

○ 미래 기후·환경 위기대응을 위한 북극(남극 고층대기 영역 포함-북극과 남극의 연계) 연구/정책 패러다임 변화에 따른 『극지기초원천기술개발사업』의 **과학적 수행 근거 제공과 플랫폼 구축 등 중장기(최소 6년 이상) 계획 제안**

※ 현재 수행 중인 『극지기초원천기술개발사업』(‘24년 일몰)의 방향, 성과를 검토하여 승계·보완 및 연속적인 연구 수행을 위한 선제적 중장기 로드맵 제시

■ **내용 및 범위**

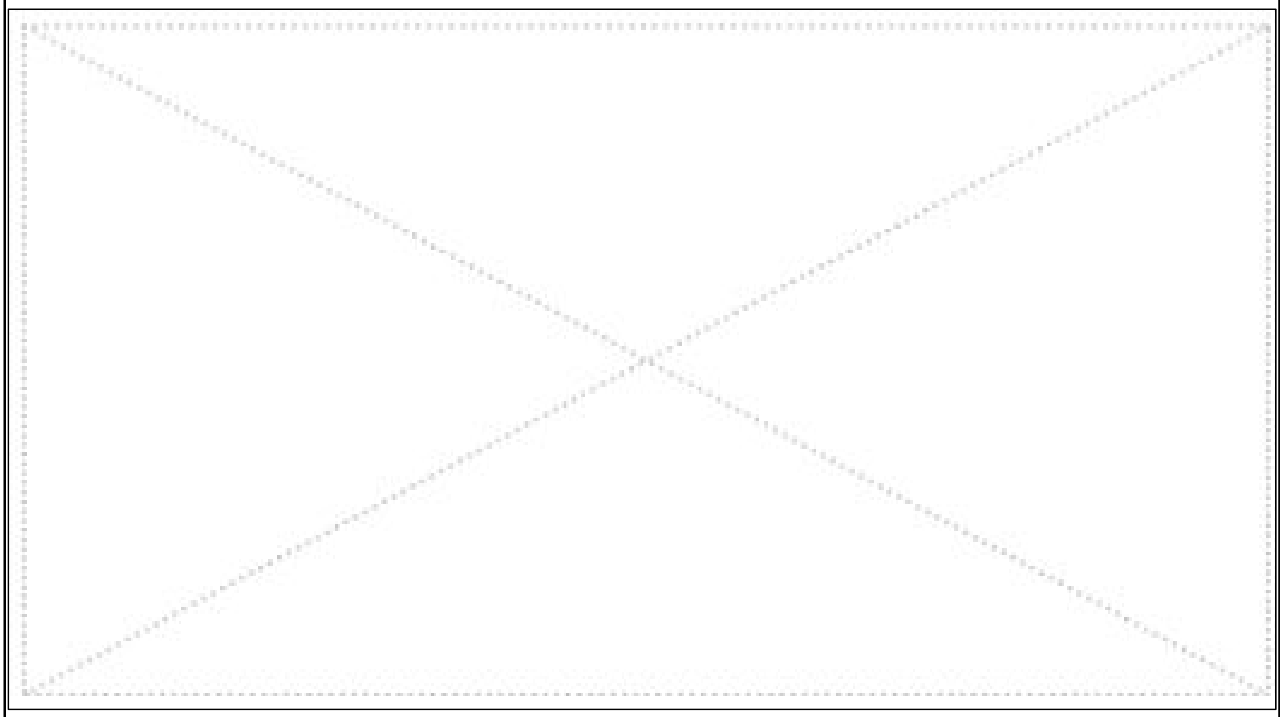
- **극지연구의 중요성에 대한 과학적 근거 제공**(극지 환경변화에 대한 빅데이터 확보 및 분석을 통한 현상 진단과 미래 변화 예측에 필요한 과학적 근거 마련)
- **연구 성과 분석 및 발전방안 제시**(극지기초원천기술개발사업 수행 결과 분석)
- **기후변화 빅데이터 구축 및 활용기반 수월성 연구 추진 방안 제시**(극지 미답 영역 대상 첨단 과학기술 적용과 장기 현장 관측 기반 극지 기후·환경변화 빅데이터 연계 방안)
- **극지연구를 통해 확보된 과학정보의 관련성·활용성 강화 방안 마련**(극지 기후·환경변화 대응 강화를 위한 방안 마련)
- **남·북극 주요이슈 해결을 통한 국제적 위상 강화 방안 마련(**북극이사회 모든 국가(기존 협력 국가 외 스웨덴·핀란드 추가)와의 확대 협력체계 강화 방안)
- 정부 R&D 사업으로서의 **ESG 기반 수행 방안 및 핵심 연구주제 도출, 후속사업의 구체적 연구 목표, 내용 및 범위 제시**

< 기획연구를 통해 도출한 전략주제 및 세부주제 제안 >

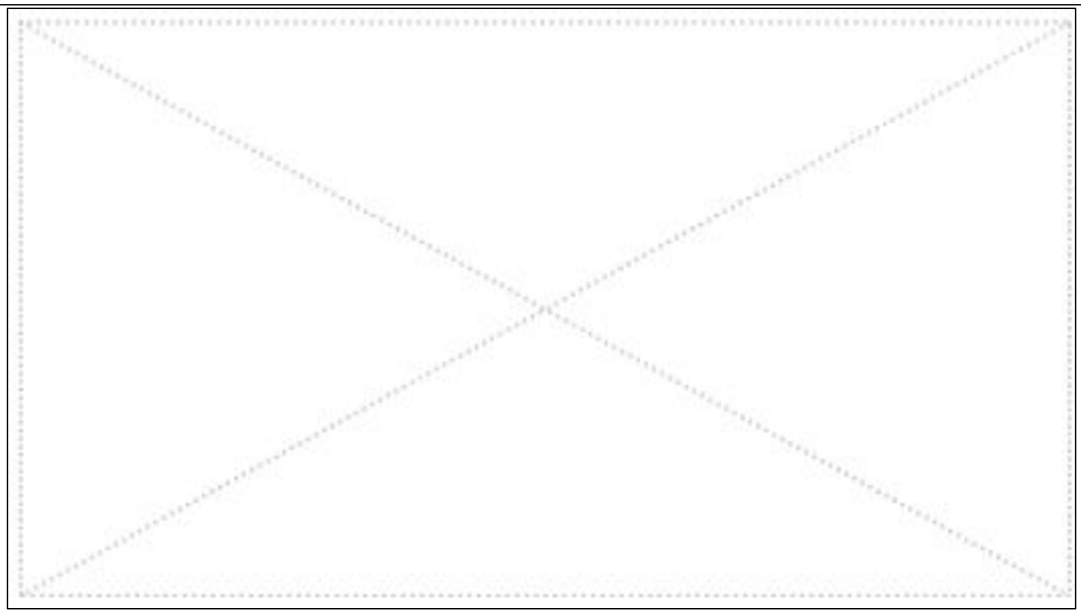
(전략-I) 장기 모니터링과 데이터 축적 및 현상 규명
○ (I-1) 극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악
○ (I-2) 북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가
(전략-II) 과거 기후·환경변화 이해와 미래 예측
○ (II-1) 북극권 동토와 주변 연안지역 과거 기후·환경변화 특성 파악
○ (II-2) 북극권 기후·환경변화에 대한 피드백 규명
(전략-III) 기후위기 대응과 인간사회 영향 파악
○ (III-1) 온실기체 바이오 전환기술 개발
○ (III-2) 북극권 지역사회 기후변화 영향 분석

■ **주요 기획방향**

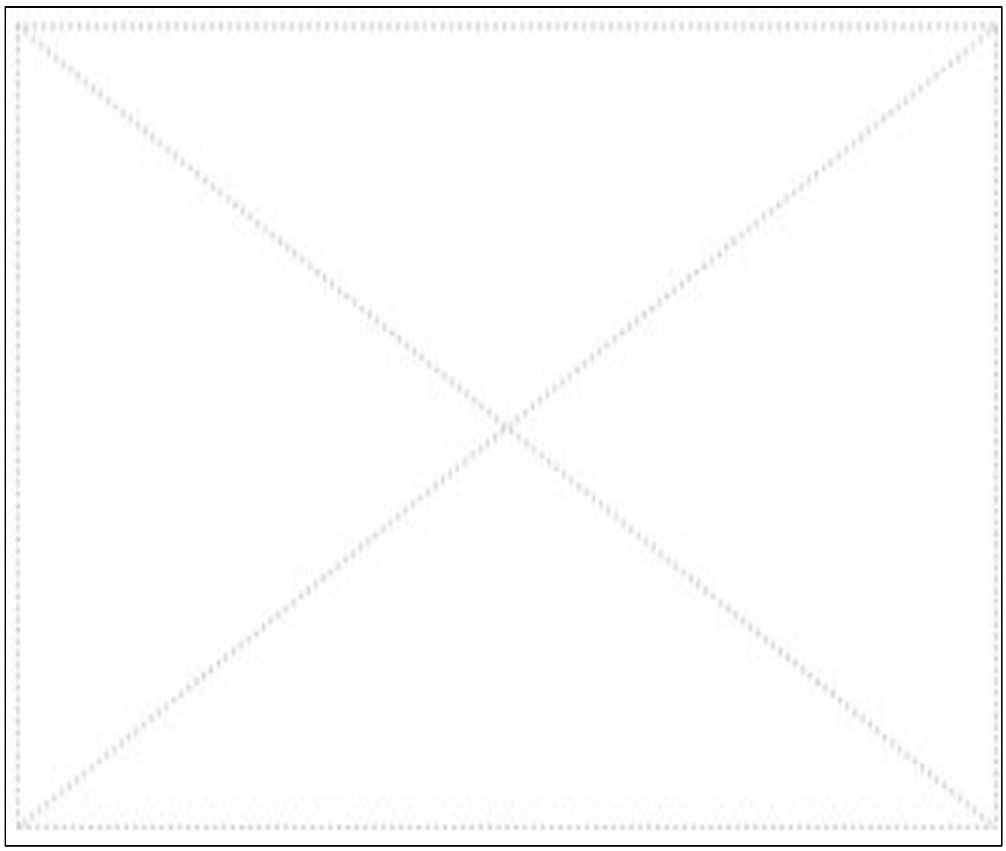
- 과기정통부 극지기초원천기술개발사업의 선행 연구 성과분석 및 기존 연구와의 연계성을 갖는 **보다 혁신적인 추진방안 제시**
  - 극지 미답 영역에서 **첨단 과학기술을 적용하고,** 장기간 현장 관측 기반의 극지 **기후변화 빅데이터와 연계된 수월성 높은 연구 추진 프레임 구축 방안 제시**
  - 급격하게 진행되고 있는 지구온난화에 의한 **극지 기후·환경변화 대응 방안 마련**
- 북극이사회 정식옵서버 국가로서의 “책임 있는 파트너 역할” 수행 및 북극권에서 과학연구를 통한 **국제적 위상 강화 방안 마련**
- 제시된 RFP 기반 **후속사업에 대한 과학적 연구목표, 지역 선정 및 내용 등 구체적 추진방안 도출**



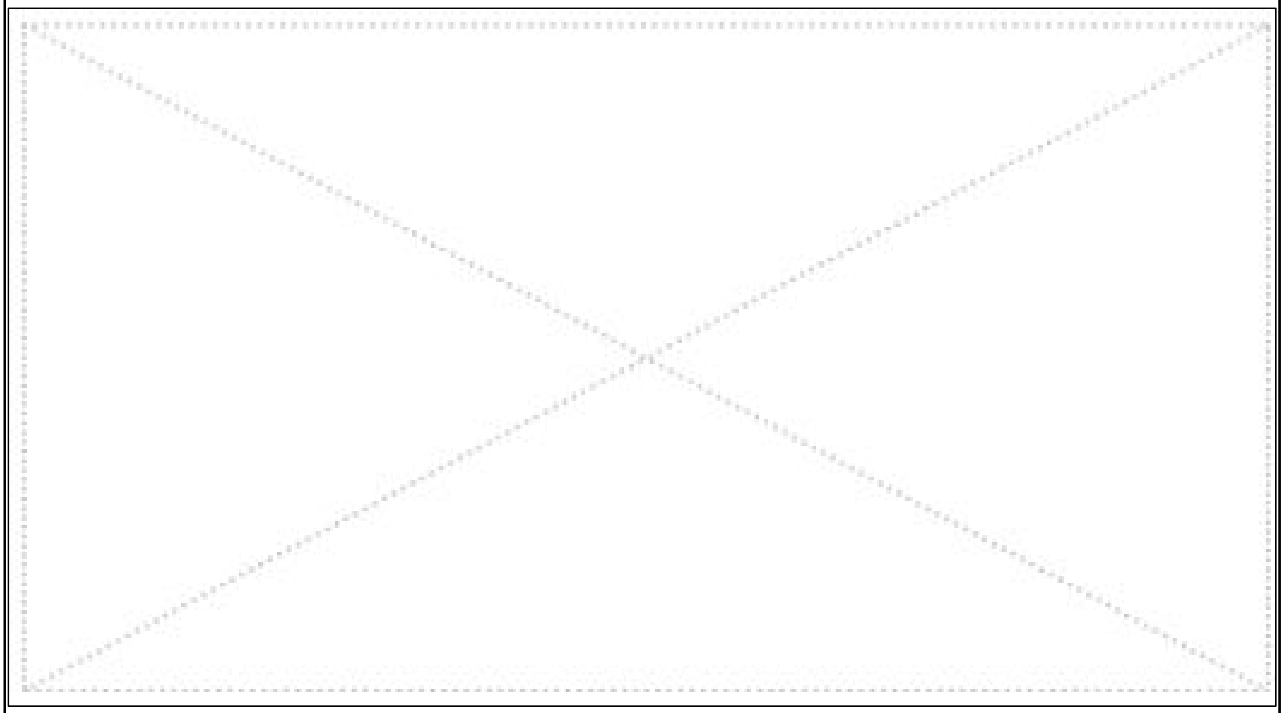
(환북극 관측거점 및 주변에서의 ET/BT/IT 기술 등 활용 환경관측시스템과 빅데이터 DB 구축 개념도 : 극지는 특성상, 인간의 접근이 자유롭지 않고, 가혹한 환경으로 인해 환경을 측정하기 위한 측정시스템의 설치와 운영이 매우 어렵기 때문에, 현존하는 과학기술적 기술을 접목하여 환경관측시스템을 개발-설치-운영하여 환경인자 빅데이터 확보가 필수적임)



(발굴 전략주제의 국제협력체계 및 ESG 개념과의 부합성(과학활동의 성과-이익에 대한 선순환 구조) : 북극에서의 과학활동 및 거버넌스를 주도하는 북극이사회에서 제시하는 최근의 추세를 고려하여 본 기획연구 과제의 전략주제를 도출하였으며, 관측거점 등의 운영을 통해 환경인자 빅데이터를 확보하고, 최근의 ESG 개념과 연계시켜 정부 R&D 과제로서의 역할을 수행할 수 있는 선순환 구조를 반영하였음)



(전략 및 세부주제 간의 연계성 및 자료확보-활용에 대한 모식도 : 극지 대기-육상(동토/생태)-연안 영역을 대상으로 지구온난화에 대한 기후환경변화의 모니터링과 환경인자 확보/분석 및 각 요소들간의 연관성과 중위도에 미치는 영향 파악을 주 내용으로 주제 도출함. 또한 극지역에서 확보할 수 있고 인간 삶의 질적 향상에 필요한 유용물질 발굴과 환경변화에 따른 지역사회에의 영향 분석을 전략주제로 도출함)



(본 기획연구에서 도출한 전략주제별 세부주제의 주요 업무 및 역할 : 전략주제의 분류 핵심은, 본 사업에서 추구하는 ESG 과학경영 기법에 부합되도록 환경(Environmental Research), 사회(Social), 그리고 거버넌스(Governance) 분야로 구분 – 모니터링과 관측/분석 및 현상 규명을 주로 수행하는 주제, 과거 기후·환경변화 이해와 미래 예측 연구 등 북극권에서의 기후·환경변화와 직접적으로 관련을 갖고 수행하는 2개의 전략주제를 환경연구분야로 구분/북극 유래 유용물질 응용기술개발, 북극권 지역사회 영향 파악 등 북극권 온난화에 의한 기후·환경변화와 간접적으로 활용할 수 있고 영향받는, 즉 인간 삶의 질적 수준에 영향을 줄 수 있는 내용을 사회적 연구 분야에서 1개의 전략주제로 구분/북극권에서 국내·외 과학기술 활동 및 정책 등을 고려하여, 상기 연구의 효율적 수행과 결과적인 기여도 제고 측면에서 구분함)

비공개 사유	없음	비공개 기간	없음

목 차

제1장 기획연구 개요 ····· 1

1. 추진배경 및 필요성 ····· 3

1.1. 추진배경 및 극지 중요성 ····· 3

1.2. 사업기획의 필요성 ····· 8

2. 목표 및 내용 ····· 24

2.1. 목표 설정 ····· 24

2.2. 기획 추진 방향 ····· 25

2.3. 기획 내용 및 범위 ····· 26

3. 기획연구 추진체계 ····· 37

3.1. 추진체계 ····· 37

3.2. 추진전략 및 방법 ····· 38

제2장 환경분석 및 시사점 ····· 41

1. 극지 정책 동향 ····· 43

1.1. 국제 극지 정책 ····· 43

1.2. 국내 극지 정책 ····· 63

2. 극지 연구동향 ····· 69

2.1. 국외 연구동향 ····· 69

2.2. 국내 연구동향 ····· 78

3. 선행사업 성과분석 ····· 83

3.1. 극지기초원천기술개발사업(선행사업) 분석 ····· 83

3.2. 극지기초원천기술개발사업(선행사업) 과제의 대표성과 ····· 85

3.3. 극지기초원천기술개발사업(선행사업) 과제의 정량성과 분석 ··· 92

4. 수요조사 시행과 결과 ····· 97

4.1. 수요조사 개요 ····· 97

4.2. 수요조사 결과 ····· 99

5. 이슈도출(시사점) 및 분석 ····· 107

5.1. 이슈도출의 개념 ····· 107

5.2. 극지 연구/정책 패러다임의 변화와 SWOT 분석 ····· 110

제3장 전략주제 추진방향 및 비전 ····· 115
1. 전략주제 설정 ····· 117
2. 전략주제의 수행 목적 및 범위 ····· 121
3. 미래 추진 방향(비전) ····· 130
3.1. 방향 및 비전 ····· 130
3.2. 사업 목표 구체화 ····· 131

제4장 전략주제 도출 및 총괄기술 로드맵 ····· 137
1. 전략주제 개요 ····· 139
2. 총괄기술 로드맵 ····· 141
2.1. 기술총괄 ····· 141
2.2. 전략별 기술 로드맵 ····· 145
3. 기대성과 및 활용방안 ····· 151
3.1. 기대성과 ····· 151
3.2. 활용방안 ····· 152

제5장 전략별 주요 내용 ····· 155
1. (전략-I) 장기 모니터링과 데이터 축적 및 현상 규명 ·· 157
1.1. 연구 필요성 및 목표 ····· 157
1.2. 연구개요 ····· 162
1.3. 세부주제별 연구목표 및 내용(범위) ····· 164
1.4. 유사과제 비교 ····· 166
1.5. 연도별 연구목표 및 내용 ····· 167
1.6. 연구개발 위험요인 및 대응방안 ····· 169
1.7. 개발기술의 적용분야 ····· 169
2. (전략-II) 과거 기후·환경변화 이해와 미래 예측 ····· 172
2.1. 연구 필요성 및 목표 ····· 172
2.2. 연구개요 ····· 177
2.3. 세부주제별 연구목표 및 내용(범위) ····· 178
2.4. 유사과제 비교 ····· 181
2.5. 연도별 연구목표 및 내용 ····· 182

2.6. 연구개발 위험요인 및 대응방안 ····· 184
2.7. 개발기술의 적용분야 ····· 184
3. (전략-III) 기후위기 대응과 인간사회 영향 파악 ····· 186
3.1. 연구 필요성 및 목표 ····· 186
3.2. 연구개요 ····· 189
3.3. 세부주제별 연구목표 및 내용(범위) ····· 190
3.4. 유사과제 비교 ····· 192
3.5. 연도별 연구목표 및 내용 ····· 193
3.6. 연구개발 위험요인 및 대응방안 ····· 195
3.7. 개발기술의 적용분야 ····· 195

(부록) 특이사항 및 참고사항 ····· 197
1. (특이사항) 국고지원 및 지속적 수행 필요성 ····· 199
2. (참고사항) 소요예산/인력 세부 내역 ····· 202
2.1. 소요예산 산출과정 ····· 202
2.2. 소요예산 ····· 202
2.3. 재원조달방안 ····· 207
2.4. 소요인력 산출근거 ····· 208

(첨부-1) 참여자 소통회의 내역 ····· 211
(첨부-2) 중간보고서 검토의견에 대한 수정·보완 대비표 217
(첨부-3) 최종보고서(초안) 검토의견에 대한 수정·보완 대비표 ····· 224
(증빙-1) 중간보고서 검토의견서 접수 내역 ····· 229
(증빙-2) 최종보고서 검토의견서 접수 내역 ····· 242
(붙임-1) 최종평가 세부 평가의견 ····· 251
(붙임-2) 최종평가 수정·보완 요구사항 반영내역 ···· 253

제1장 기획연구 개요

1 추진배경 및 필요성

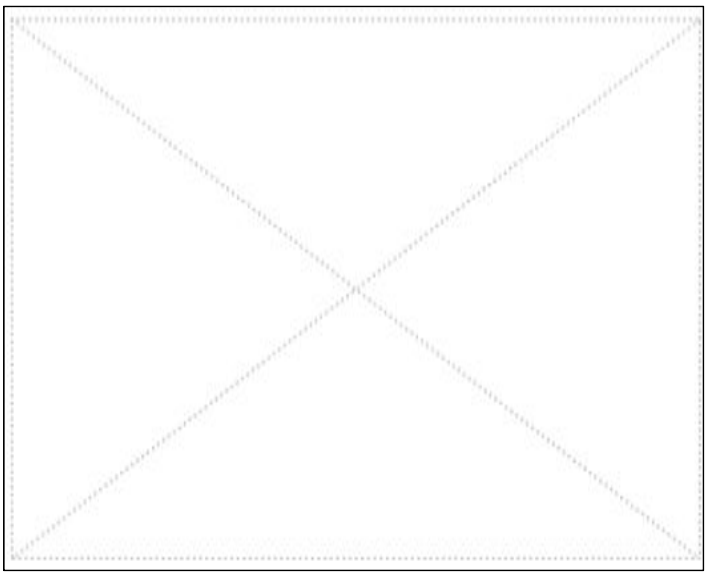
1.1. 추진배경 및 극지 중요성

<추진 배경>

▪ **(지구(극지)의 기후·환경변화와 국제 거버넌스 변화)**

○ 극지, 특히 북극의 급속한 가열화(해빙(海氷) 감소, 빙하 및 동토층 융해(融解), 생태계 변화 등)에 따른 기후[1]변화가 북극권은 물론 전지구 기후환경에 영향을 미침. 이러한 급격한 기후변화 현상 파악과 대응 문제는 IPCC(Inter-governmental Panel on Climate Change; 기후변화에 관한 정부간 협의체)에서 주요 이슈로서 지속적 모니터링, 정보 공유 확대 및 긴밀한 국제 협력체제 강화가 요구됨.

○ 또한, WCRP(World Climate Research Programme, 세계기후연구프로그램)를 시작으로, 지구환경변화(GEC, Global Environmental Change) 관련 국제연구프로그램인 IGBP(International Geosphere-Biosphere Program, 국제지권·생물권연구프로그램), DIVERSITAS(International Programme of Biodiversity Science, 국제생물다양성과학연구프로그램) 및 IHDP(International Human Dimensions Programme, 국제인간차원연구프로그램)를 통합·승계하는 새로운 프로그램으로 2012년 UN지속가능회의(Rio+20)에서 탄생한 "미래지구(Future Earth)"는 지구환경변화에 대한 30년 이상의 국제적인 연구프로그램으로 추진되고 있음[2].



[미래지구 관련 세계적 프로그램의 흐름도, 출처 : https://futureearth.org]

- "미래지구"의 개념은, 인간의 활동과 지구시스템의 변화가 지역 또는 전지구적 환경의 변화를 유발하여 인류의 번영을 저해한다는 개념에서 도입되었으며, "미래지구"는 인류의 번영을 지속가능하게 하기 위한 패러다임 변환과 그 해법들을 찾기 위한 국제연구프로그램임[2].

※ “미래지구” 프로그램의 질문과 의제, 그리고 추구하는 해답의 요지
- 지구환경은 왜 변하는가, 그리고 어떻게 변하고 있는가? (관찰/관측과 분석 개념)
- 지구환경변화는 인간의 번영과 삶의 다양성에 어떻게 영향을 미치는가? (피드백 개념)
- 인간은 어떻게 지구환경변화에 따른 위험과 취약성을 완화하고 변화에 대한 회복력을 강화시킬 수 있는가? (분석과 예측 개념)
- 인류의 번영과 공정한 미래를 어떻게 만들어 낼 수 있는가? (예측과 미래 대응 개념)

이와 같은 질문들을 기초로 “미래지구”는 세 개의 연구의제 설정
- 역동하는 지구(Dynamic Planet)
- 지구지속가능발전(Global Sustainable development)
- 지속가능성으로의 전환(Transformations towards Sustainability)

▪ **(경과)** 위와 같은 예시로서의 국제적 질문과 답을 얻고자 하는 노력과 극지역에서 실제 일어나고 있는 급속한 환경변화에 대해, 정부(과학기술정보통신부, 당시 교육과학기술부)에서는 미래 북극의 과학적/정책적/외교적 측면에서의 중요성이 부각될 것을 사전에 대비하여, 2010년 『극지기초원천기술개발사업』을 기획하여 현재까지 수행하고 있음.

○ 『극지기초원천기술개발사업』은 과학기술정보통신부와 외교부의 지원을 받아 연구 수행 주관기관인 극지연구소를 중심으로, 북극이사회 국가들과 연구 협정을 체결하고, 국내외 전문연구팀과 함께 환북극 동토지역에 6개 관측거점(미국, 캐나다, 노르웨이, 그린란드, 아이슬란드, 러시아) 확보, 스발바르 피오르드(fjord) 현장조사 등 정밀측정시스템 구축, 환경인자[3] 빅데이터 DB[4] 확보와 특성 분석 및 미래 대응 연구를 수행해오면서, 북극 동토 연구의 선구자 역할을 담당해옴.

○ 본 사업의 추구 개념은 상기한 “미래지구” 프로그램과 IPCC 보고서에서 경고하고 있는 지구온난화 영향이 극지역의 대기/동토/빙하/생태계 등에서 매우 직접적으로 나타나므로 보다 정확한 현재를 진단하고 미래를 예측한다는 점에서 미래 지향적이라고 할 수 있음.

○ 그러나 현재 수행 중인 『극지기초원천기술개발사업』은 ‘24년에 일몰 예정이어서, 기존 사업의 방향, 성과를 검토하여 승계·보완 및 지속시킬 수 있는 사전 기획을 통해 중장기 연구수행 로드맵의 제시 필요

▪ **(목적)**

○ 본 기획 연구에서는 극지(북극)의 중요성 등을 재인식하고, 현재까지 **북극권에서의 과학연구 활동 추진 경과 및 성과를 분석하고,**

○ 극지 장기 관측을 통한 **기후·환경변화 빅데이터 DB 구축·활용 기반 마련,**

○ 미래 기후·환경 위기에 관한 북극(남극 고층대기 영역 포함-북극과 남극의 연계) 연구/정책 패러다임 변화에 대응하는 『극지기초원천기술개발사업』의 **과학적 근거 제공 가능한 플랫폼 구축 등 중장기(최소 6년 이상) 계획을 제안**하고자 함.

1) 기후(氣候, climate)는 특정 장소에서 해마다 되풀이되는 보편적인 대기의 종합적인 상태를 말하며, 장기간의 대기현상을 종합한 대기-수계-지표면계의 아주 느리게 변화하는 양상(樣相)임. 기후는 계속하여 변동하기 때문에 최근 30년 사이의 평균값으로 현재 기후의 기준을 삼는다(기상용어사전-KMA (https://data.kma.go.kr/). 따라서, 장기간에 걸친 기간(대체로 수십 년 또는 그 이상) 동안 지속되면서, 기후의 평균 상태나 그 변동 속에서 통계적으로 의미 있는 변동을 일컫는 기후변화를 연구하고자 할 때는 필히 **최소한 30년 이상의 지속적인 관찰과 관측 등의 모니터링이 필요함**(https://www.gihoo.or.kr/).

[참고] 지원 근거

▪ **법적근거**

○ **「극지활동진흥법('21.10)」** 제1조(목적) "이 법은 극지의 지속가능한 발전과 체계적인 **극지활동의 육성·지원에 필요한 사항**을 규정---(이하생략)", 제4조(국가의 책무) : "**국가는 기후변화·자원고갈 등의 인류 공통의 문제를 해결**하기 위하여 **노력**하여야 한다."

▪ **관련 정책**

○ **「극지과학미래발전전략('20.11)」(14회 과학기술관계장관회의)**

– 추진과제 1-1. 국가·사회 현안 해결 등 **국민체감형 연구 확대**(환북극 관측거점 구축) 등

○ **「2050 북극활동 전략('21.11)」(국무회의 보고)**

○ **「제1차 극지활동진흥기본계획('22.11)」(관계부처 합동)**

– 전략1(남북극 미지의 영역 탐사 확대; 1-1 미지의 영역 개척, 1-2 지구 기후와 생태계 변화 비밀 규명)의 주요 추진 과제(**북극 고위도 육상 연구, 기후복원**), 전략2(기후환경 문제 해결 주도; 2-2 극지환경·자원 보호 역량 강화)의 주요 추진 과제(**(북극) 해양·육상 환경변화 예측 시나리오 생산 등**)

○ **「제5차 과학기술기본계획('22.12)」(과기부/국가과학기술자문회의)**

– **"과학기술혁신이 선도하는 담대한 미래"를 비전**으로, **△ 국가 연구개발 전략성 강화, △ 민간 중심 과학기술 혁신 생태계 조성, △ 과학기술 기반 국가적 현안 해결** 등을 목적으로 함

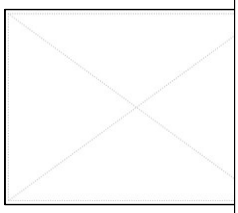
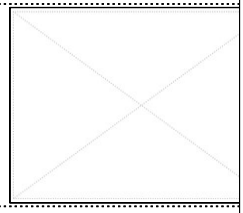
✓ **12대 국가전략기술제시** : ①반도체·디스플레이, ②이차전지, ③첨단 모빌리티, ④차세대 원자력, ⑤첨단 바이오, **⑥우주항공·해양(해양·극지 등 미개척 영역에 대한 탐사기술개발과 접근성 증대 및 활용에 노력),** ⑦수소, ⑧사이버보안, ⑨인공지능, ⑩차세대 통신, ⑪첨단로봇·제조, ⑫양자

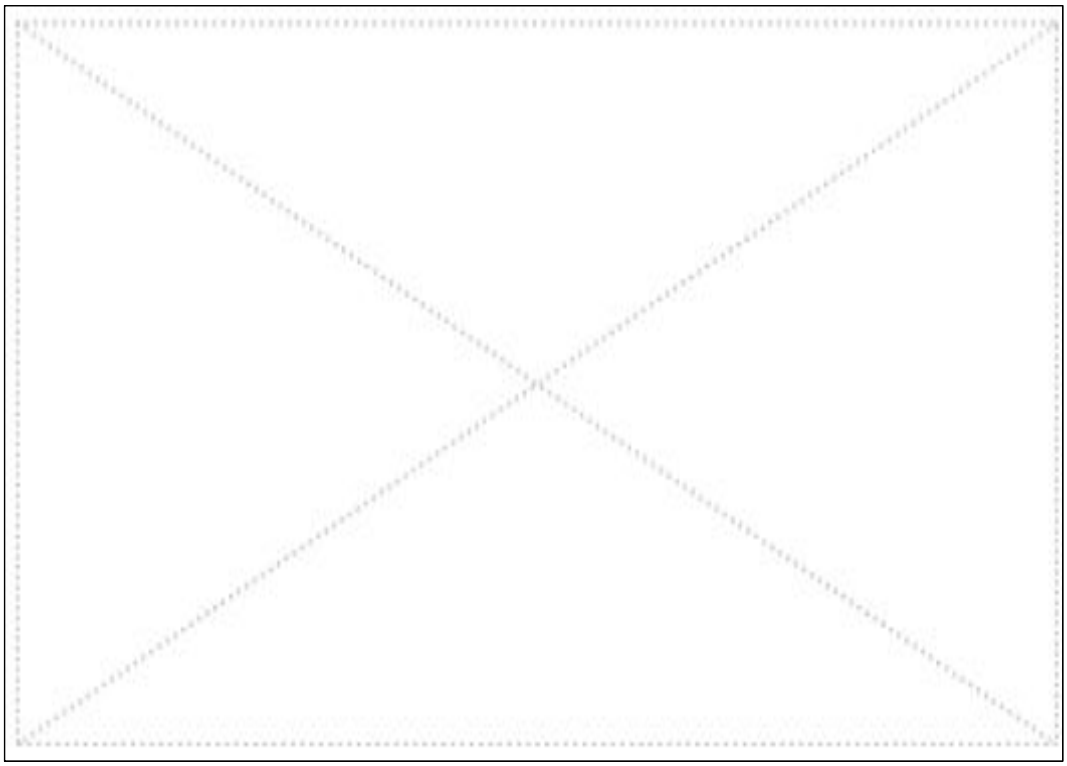
▪ **(과기정통부 수행 당위성) 거대과학 연구개발의 통합 수행**

○ 과기정통부에서 수행하는 글로벌 현안 이슈인 기후변화 관련 유일한 **거대 극지 국책 R&D 사업으로서, 극지관련 환경연구개발의 미션 반영** (계속 수행 필요)

○ 북극 연구의 경우, 북극이사회(Arctic Council)[5] 국가와의 국제협력을 통하여 확보한 **관측거점 및 점진적 지평 확대**를 통해 **글로벌 이슈에 대응**하는 **국제공동연구 수행 강화** 필요

※ 극지 개관

북극권	○ 유라시아와 북미대륙의 영구동토층(permafrost)의 북위 66.5도 이북 지역과 이로 둘러싸인 북극해(한반도의 약 60배)로 구성 ○ 북극해에는 2~3m 두께의 해빙(海氷) 존재 ○ 북극이사회 8개 회원국 및 한국, 영국, 독일, 프랑스, 이탈리아, 중국, 일본 등 옵서버 국가가 연구 활동 수행	
남극권	○ 남극해 및 이로 둘러싸인 거대한 대륙(한반도의 약 62배)으로 구성 ○ 남극대륙에는 평균 2,400m 두께의 빙상 존재 ○ 29개 남극조약협의당사국에서 남극권 40개의 상주기지 및 43개의 하계기지 운영(COMNAP[6], 2022)	



※ 극지연구의 중요성과 국가 기여도

● **중요성(민간 투자가 어려운 국가차원에서의 고유 영역이면서, 전 지구에 미치는 환경적 영향이 매우 큼)**

▪ 전 지구적인 온난화[7] 등 기후위기로 인한 뉴노멀 기상이변 현상 등의 글로벌 이슈 해결을 위한 환경변화 관측 및 DB 축적과 분석 필요

– 급변하는 극지 기후·환경변화에 대한 정밀한 관측과 자체 분석 및 미래 대응 필수

▪ 국제 극지과학 거버넌스 내 영향력 확보 및 국가 위상강화 필요

– 지속적 과학연구 활동과 세계최고 수준의 연구 성과 창출 및 국제적 의무 수행 필요

▪ 북극 현안 대응능력 제고, 국제사회 기여 및 극지과학 성과 도출을 통한 기후변화 대응 역량 강화를 위한 지속적 극지 연구활동 수행
– 선진국으로서의 대외 국가위상 및 국민 삶의 질 향상과 자긍심 제고

● **기여도(글로벌 이슈 대응 국가경쟁력 확보)**
▪ 극지 유·무형의 자원(관측데이터, 시료, 실질적 생물활용 자원 등)과 정보(극지역의 기후·환경변화 관련 각종 정보) 선점으로 북극권에 대한 대한민국의 전략적 영향력 확대에 기여
– 미래 국익 창출 강화를 위해 극지 탐사와 연구를 통한 유·무형 자원 정보 선점 필요
▪ 글로벌 이슈 해결 동참을 통한 국제사회에서의 '책임완수형 신뢰가능한 파트너'(우리나라는 북극이사회 정식옵서버[8]('13.05 지위 획득), 남극조약협의당사국('89.10 지위 획득))로서의 신뢰 유지와 국격 제고에 기여
– 대한민국을 넘어선 세계 속 선진국가로서의 글로벌 이슈 공동해결을 위한 능동적인 동참을 통한 북극연구활동 역량 강화에 기여
– 극지 환경변화 연구를 통한 국가와 국민의 안정성 확보에 기여
▪ 극지 정보 활용을 통한 전 지구적 이상기상(폭염, 슈퍼태풍, 한파, 가뭄, 홍수 등) 예측 역량 강화로 국가 발전과 국민의 안전 및 삶의 질적 향상 보호와 국민 자긍심 제고
– 우리나라를 포함한 중·저위도 지역은 극지역에서의 급변하는 기후·환경변화와 직간접적으로 매우 관련성이 높게 평가되고 있으므로, 최근 돌발적이고 다발적인 폭염과 가뭄, 태풍 및 집중호우, 겨울철 극한의 한파 등의 기상현상을 분석하고 예측하기 위해서는 극지역에서의 정확한 자료 확보와 DB 구축, 이에 대한 정보 활용이 매우 중요함

---

2) 한국과학기술한림원, 2015. "미래지구 (Future Earth)"와 국제 과학계의 최근 동향.

3) 환경인자(Environmental Factor) (기후영향동인 Climatic Impact-Drivers; CID): 평균, 극한 등 기후상태의 정보로서, 인간사회 및 생태계에 영향을 주는 35개 인자로 구성(IPCC AR6 보고서). 본 사업에서는 북극권에서의 급속한 환경변화에 따른 대기-생태-동토의 상태 측정을 위한 필수 요소(환경인자 확보의 필요성 : 북극권 환경변화 인지⇒정보 수집(환경인자)과 처리⇒환경변화진단과 특성분석 ⇒변화의 양/음 되먹임(feedback) 결과 도출과정에서의 기본적이고 필수적임).

4) 극지연구소 한국극지데이터센터(KPDC; Korea Polar Data Center-남북극에서 수행하는 대한민국의 과학연구를 통해 획득된 모든 유무형의 다양한 형태의 데이터를 관리하는 센터) 기반 국내 최초 환북극(Circum-Arctic) 동토지역에서의 환경인자(environmental factors; 본 사업에서는 IPCC에서의 CID 개념과 동일하게 사용함) 빅데이터 DB 구축('11~'21). 본 사업에서의 빅데이터는 북극권 관측거점기반의 정밀측정 시스템을 통해 획득되는 기온, 습도, 기압, 풍향/풍속, 복사에너지, 블랙카본, 구름응결핵, 식물생태, 동토(토양온도, 토양수분, 함수비), 토양(탄소, 질소, 무기태질소, 용존무기물 등), 이산화탄소, 메탄, DMS 등 시공간적 환경인자 세트로서, DB로 구축된다. 이는 북극 현장의 자연현상 관찰과 관측 및 분석, 미래 예측 모델링을 위해 매우 필수적인 요소로 활용된다.

5) 북극의 환경보존 및 지속가능한 개발을 목적으로 북극 관련 정책을 논의하기 위해 창설한 정부간 협의기구로, 1996년 설립(8개 북극권 국가, 12개 비북극권 국가로 구성)

6) Council of Managers of National Antarctic Programs (COMNAP)(https://www.comnap.aq); 31 countries members and 6 countries observers.

7) IPCC AR6 WGI('21.08), 현재의 기후상태를 보면, 인간 영향에 의한 온난화는 명백한 사실이며, 광범위하고 빠르게 변화하고 있고, 최근의 변화의 규모와 상태는 수세기~수천 년에 걸쳐 전례없는 변화로서, 전 지구에 걸쳐 모든 지역에서 극한현상(호우, 폭염, 해양열파 증가 등)에 영향을 미치고 있다고 보고됨.

8) 북극연안 8개국으로 구성된 북극이사회 국가 이외에 국가로서, 북극이사회의 모든 회의에 참석할 수 있는 권한을 갖고 북극권 개발에도 참여할 수 있다. 현재 정식옵서버 국가는 한·중·일 등 13개 국가가 있다.

1.2. 사업기획의 필요성

1.2.1. 극지의 중요성 증가 및 국내·외 극지 거버넌스 대응안 마련 필요

■ 극지는, 청정지역인 만큼 전 지구적 환경변화에 매우 민감한 지역이며, 지구온난화에 따른 환경변화*가 가장 빠르게 일어나고 그 영향이 증폭되어 발생하고 있음. 동시에 전 지구적 기후변화에 미치는 파급효과가 가중[9]되고 있어서, 해당 영역에서의 변화 감지 및 모니터링의 최적지로서 평가됨. 따라서 지속적인 현장 모니터링을 통한 데이터 확보(최소한 30년 정도의 지속성 유지 필요)와 이에 대한 특성 분석과 데이터를 활용한 미래 예측 등 관련 연구를 위한 안정적인 인적·물적 자원의 투자가 매우 중요함.

* 산업화 이전 시기(1850~1900) 대비 최근 10년(2011~2020)은 1.09℃ 상승[6], 전 지구적 온도 상승으로 인한 기후변화는 심각한 이상 징후 발생 및 다양한 형태의 글로벌 환경변화 초래
* 북극 해빙 감소(10년마다 약 4%) 및 동토층 융해로 인한 기후시스템의 불안정으로 ① 북반구 한파 초래, ② 생태계 변화 유발, ③ 지구 에너지 균형이나 대기순환 영향으로 중·저위도 지역에 폭설, 한파, 폭염 및 초대형 태풍발생 초래
* 북극의 겨울 평균 기온은 지난 50년간 약 10~15℃ 상승(1970년대 초에 비해 북극해 얼음의 두께도 약 30% 이상 줄어들고, 북극지역의 해양에서 열과 염분의 분포 변화 극심) - 최근 발표한 논문[10]에 따르면, 지난 20년 동안 북극의 온난화 속도가 전 지구 평균의 4배에 이르며, 북극이 지구 평균보다 2배 빨리 온난화되고 있다는 기존 예측을 뛰어넘었음
* 최근 수십 년간 지구온난화로 극지의 빙권 면적은 급속히 감소하고 있으며, 온도의 급상승으로 영구동토층이 융해되고 이산화탄소 및 메탄가스의 대규모 방출을 야기하는 등 지구의 기후변화 위기가 훨씬 빠른 속도로 인류에게 다가오고 있음[11]

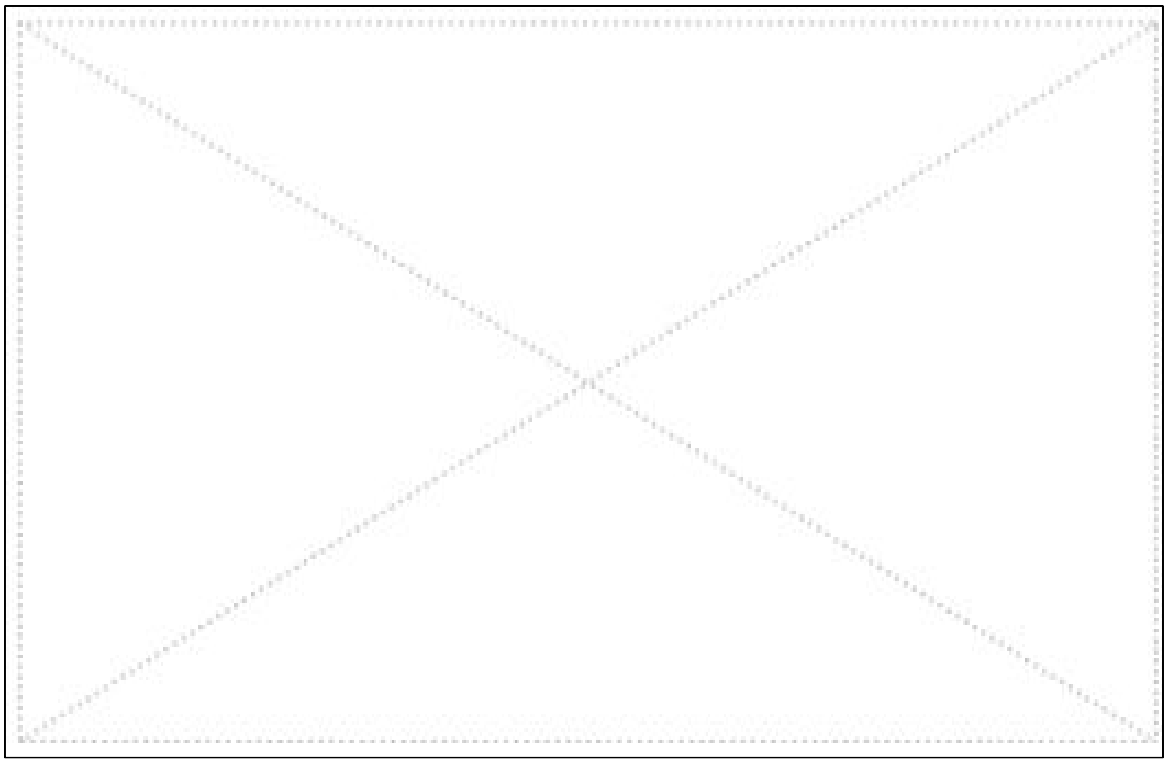
- 북극 영구동토층(연중 기온이 0℃ 이하인 땅)이 예상보다 70년이나 빨리 녹고 있고, 동토층이 녹으면서 열을 가두는 다량의 온실기체(메탄, 이산화탄소 등)가 방출되어 기후피드백 효과*로 지구온난화 가속화 우려

  * 기후변화에 따라 지구촌 곳곳에서 심각한 이상기상 징후가 발생. 초강력 태풍, 국지적 돌풍, 극단적 가뭄 및 해수면 상승으로 인한 저지대 침수 등의 자연 재앙이 극단적으로 나타나 인간 생활에 더욱 큰 피해를 초래하고 있음

9) 극지 빙하 및 영구동토층(permafrost)의 급격한 융해와 가파른 온도 상승(0.3℃/10년)으로 대규모 온실기체 방출에 의한 지구온난화의 가속화를 경고(IPCC; 기후변화에 관한 정부간 협의체) 6차 보고서('21.08)와 해양과 빙권 특별보고서('19))

10) 한겨레(2022.07.15.)(출처 : Petr Chylek, et al., 2022, Annual Mean Arctic Amplification 1970-2020: Observed and Simulated by CMIP6 Climate Models. GRL, vol. 49(13), https://doi.org/10.1029/2022GL099371

11) The Conversation, 2022, Thawing permafrost is roiling the Arctic landscape, driven by a hidden world of changes beneath the surface as the climate warms



[연속-불연속 영구동토층의 전이 지대의 연직단면도][12)]

- 전 지구 평균 온도 1.5~2.5℃ 상승 시 동식물의 20~30%가 멸종하며 생물 다양성과 생태계에 돌이킬 수 없는 영향을 경고(IPCC 4차 보고서, 2007[13)])
- 지구평균 온도 상승을 1.5℃로 제한하면 2℃ 상승에 비해 일부 기후변화 위험을 예방할 수 있음을 강조함(IPCC 특별보고서, Global warming 1.5℃, 2018[14)])
- 미국 국립해양대기청(NOAA)은, 2006년 이래로 매년 발표하는 '북극보고카드(Arctic Report Card)'에서 지구온난화로 인한 북극의 변화를 추적하면서 특히 북극의 온난화가 지구온난화보다 더 빠르게 진행되는 북극 증폭 현상에 주목함.[15)] 북극 증폭 현상은 북극의 온난화가 다른 지역의 온난화보다 더 빠르게 진행되는 현상을 의미함[16)]

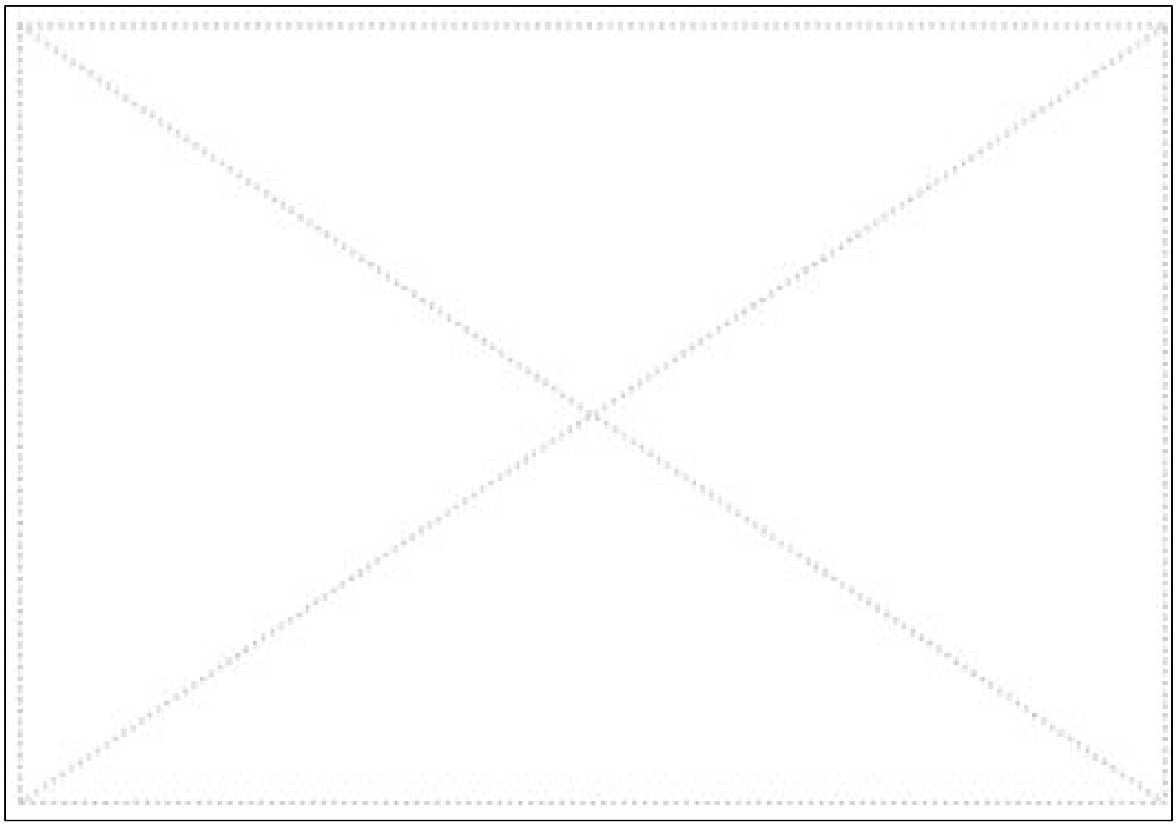
12) https://sites.google.com/site/dynamicplanet1234/periglacial-environment

13) IPCC, 2007: Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A.Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 976 pp.

14) IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. MoufoumI-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.

15) NOAA, Arctic Report Card, https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2021/ArtMID/8022/ArticleID/948/ Surface-Air-Temperature

16) Nature(2019), 'Arctic amplification is caused by seI-ice loss under increasing CO2', https://www.nature.com/ articles/ s41467-018-07954-9



[10년 동안의 전 지구 일별 평균 이산화탄소의 변화 추세[17)]]

The figure shows daily averaged CO_2 from four GML Atmospheric Baseline observatories; Barrow, Alaska (in blue), Mauna Loa, Hawaii (in red), American Samoa (in green), and South Pole, Antarctica (in yellow). The thick black lines represent the average of the smoothed seasonal curves and the smoothed, de-seasonalized curves for each of the records. These lines are a very good estimate of the global average levels of CO_2.

17) NOAA Earth System Research Laboratories, 20220715. https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gl_trend.html

[30년 동안의 북극권 육상과 전 지구 기상관측소에서 측정한
평균 연 지상기온의 anomaly[18)]]

The figure shows mean annual SAT anomalies (in °C) for weather stations located on Arctic lands, 60–90° N (red line), and globally (blue line) for the 1900–2021 period (n=122 years). Each temperature time series is shown with respect to their 1981–2010 mean. Source: CRUTEM5 SAT data are obtained from the Climate Research Unit (University of East Anglia) and Met Office.

- 위 그림에서는, 1900~2021년의 북극권 육상(빨간색)과 전지구(파란색)의 지상온도 이상 징후 수치를 기록한 자료. 2000년 이후 북극의 이상 징후(연평균 지상기온이 평균 연간온도(1981~2010년의 평균)에서 얼마나 벗어나는가를 보여주는 수치)가 눈에 띄는 상승세를 보여주고 있음 (NOAA, 2022)[16)]

18) NOAA Earth System Research Laboratories, 20220715. https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gl_trend.html

■ 기후시스템의 피드백 연구 결과

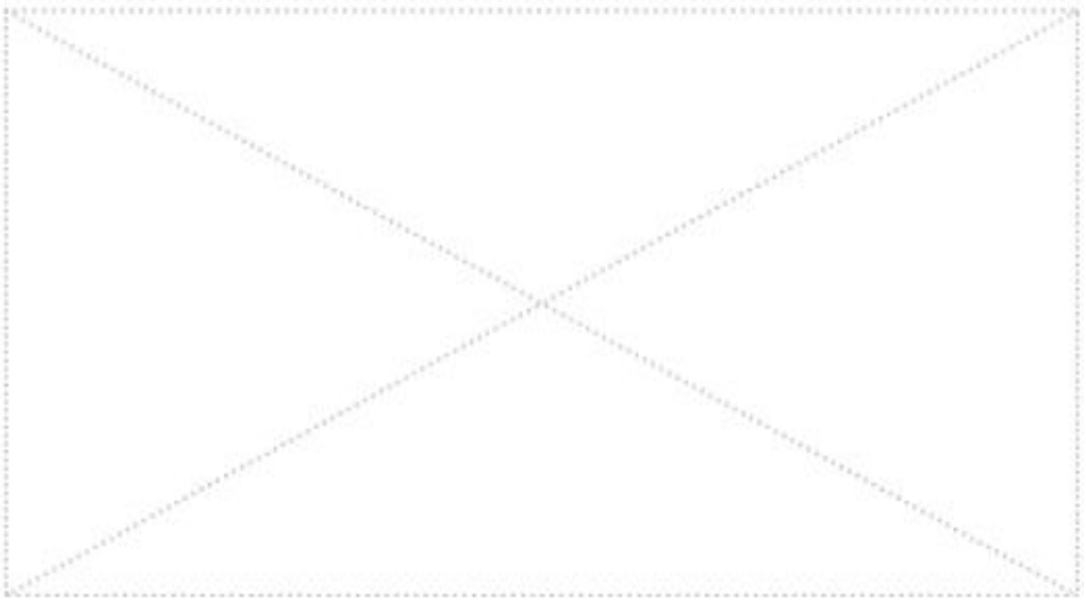
• ERA-Interim 재분석 자료를 이용하여 기후요소별(알베도, 기온 감률, 수증기 및 구름) 북극권과 중위도 및 한반도 지역의 피드백 반응도 분석함[19)]

[기후요소별 북극권과 중위도 및 한반도 피드백($Wm^{-2}K^{-1}$) 분포.
해빙 농도가 높은 기간과 낮은 기간에 대한 (a)알베도, (b) 기온 감률,
(c)수증기, (d) 구름 피드백]

• 아래 그림은 시베리아 고기압이 강화된 사례에 대하여 각 기후요소들의 피드백 기여도를 나타냄. 즉 시베리아 고기압 강화시기에 남부 시베리아 지역은 온도가 -3.13K의 하강하였고 그에 대한 잠열과 지표면 특성들의 기여도는 각각 0.26K와 0.71K 이었음. 또한 현열, 수증기, 구름, 대기 순환, 그리고 알베도 요소들에 의한 피드백은 각각 -1.26K, -0.60K, -1.00K, -1.13K, -0.09K 이었음[20)]

19) Hwang, J., Choi, Y. S., Su, H., and Jiang, J. H. (2020). Invariabilty of Arctic Top-of-Atmosphere Radiative Response to Surface Temperature Changes. Earth and Space Science, 7(11), e2020EA001316

20) Park, T. W., Jeong, J. H., Deng, Y., Zhou, R. and Cai, M. (2015). Quantitative decomposition of radiative and non-radiative contributions to temperature anomalies related to siberian high variability. Climate Dynamics, 45, 1207-1217.



[시베리아 고기압 강화시기에 남부 시베리아 지역의 온도 편차에 대한 각 기후요소들의 피드백 기여도]

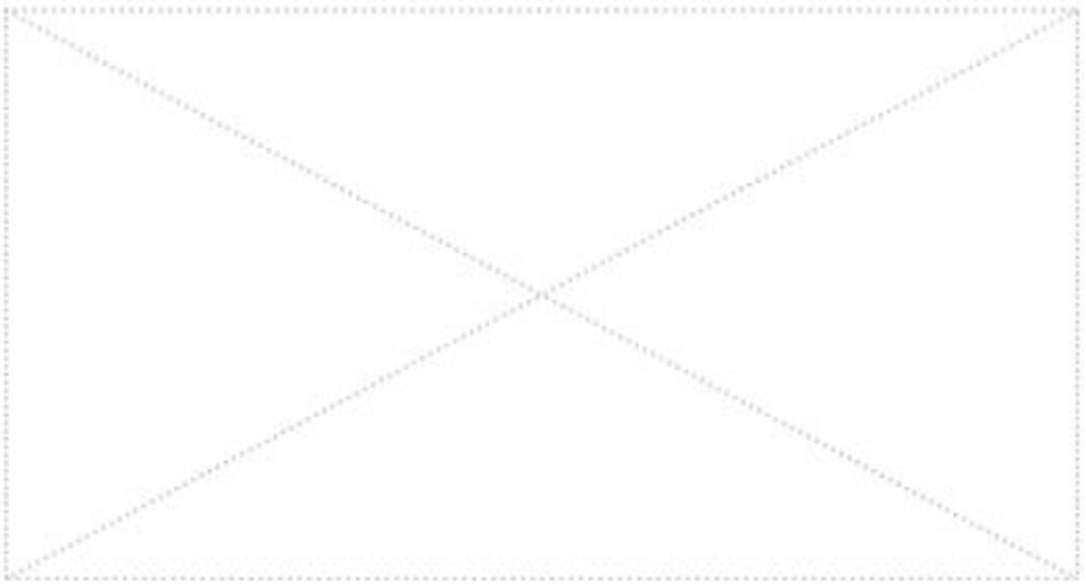
■ 북극권과 동아시아 지역의 기후변화의 연계성

- 아시아의 온난화 영향 때문에 극지방으로 수송되는 열과 수분은 겨울철 BKS(Barents-Kara Seas)의 기온 상승에 22% 피드백 기여도를 나타내고 있음이 모델 계산 결과로 나타남 (아시아의 열과 습기가 북극권으로 수송되어 해빙과 알베도에 영향을 미쳐 온난화를 증폭시킴)[21)]
- 최근 전 세계를 대상으로 하는 다양한 고기후 연구는 지역적인 경계를 벗어나 기후변화가 먼 지역까지 서로 연결되어 있다는 연구가 많이 발표되어왔다. 특히 북극권 북대서양의 기후와 동아시아 몬순 기후와 연관성이 있다는 연구는 매우 주목할 만함(Liu et al., 2013, Nature Geoscience)[22)]. 북대서양 기후와 해양 조건은 북극환경과 밀접한 관계를 가지기 때문에 이러한 해석은 북극환경의 변화가 한반도를 비롯한 동아시아 기후와 서로 연동한다는 의미를 가짐
- 또한, 동아시아 몬순기후의 강도는 한반도의 기후에 결정적인 영향을 미치며, 이는 대한민국의 경제와 사회에 지대한 영향을 주고 있음. 여름 몬순의 강도(summer monsoon intensity)가 높아지면 강수량이 증가하고 돌발적인 폭우의 빈도가 증가하여 홍수가 일어날 확률을 높이고, 겨울 몬순의 강도가 높아지면 가뭄이 오랫동안 지속되어 산불의 위험이 증가함. 즉, 넓은 의미에서 보면 북극환경의 변화가 우리 국가의 경제와 사회에 큰 영향을 줄 수 있음. 하지만 이제까지 국내의 연구는 북극환경과 한반도의 기후관계에 대한 연관성을 대상으로 하는 연구는 활발하게 이루어지지 않은 상태임. 따라서 북극환경의 현재 및 과거 변화에 대한

21) Xie et al., 2023, Enhanced Asian warming increases Arctic amplification.Environ. Res. Lett. 18, 034041.

22) Liu et al., 2013, Links between the East Asian monsoon and North Atlantic climate during the 8,200 year event. Nature Geoscience 6, 117-120.

연구와 한반도의 기후와의 상관관계를 밝히는 여러 형태의 축적된 빅데이터 분석은 대한민국의 경제에도 큰 영향을 줄 수 있을 것으로 생각됨

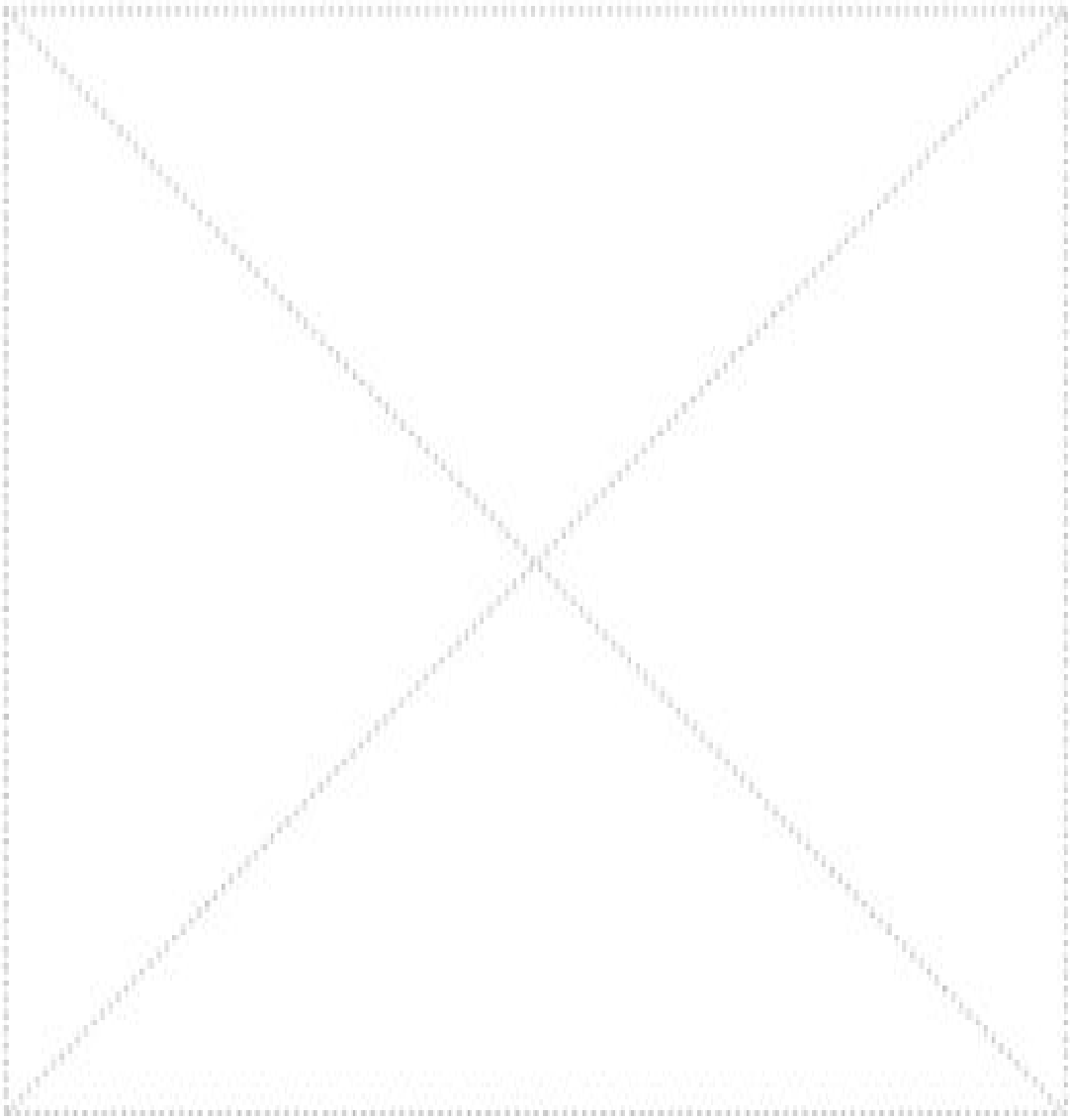


[관측과 모델링에 따른 온난화 패턴]

[BKS 온난화의 계절성과 아시아 온난화의 기여도]

- 온실기체 영향으로 지구 평균기온이 상승하고 있으나 최근 중위도 지역의 겨울철 한파 영향이 증가하고 있음 (겨울철 북극의 온난화 때문에 동아시아 지역에서 이상 저온 현상이 다수 발생하여 상록수와 낙엽수 생산지수가 감소하고 봄의 시작일이 지연되는 현상 발생)[23)]

23) Kim et al., 2022, Arctic warming-induced cold damage to East Asian terrestrial ecosystems, COMMUNICATIONS EARTH & ENVIRONMENT, 3(16), https://doi.org/10.1038/s43247-022-00343-7



[BKS 온도 변동성과 관련 원격상관성(teleconnection)]

■ 국제사회에서의 북극권 글로벌 이슈 대응 프로그램 강화와 이행

- 북극이사회(Arctic Council)[24]의 WG(Working Group)와 TF(Task Force) 구성하여 임무* 수행

  * 대기/해양/생태계 등 지속적 모니터링과 평가, 환경오염에 대한 예방과 감소 및 제거, 동식물 보존, 북극권의 지속가능한 개발 및 원주민의 활동 보호와 강화, 인프라의 활용성 제고 등 다양한 접근과 실질적 이행 임무로 구성되어 있음

- 극지는 국가 차원의 투자와 지원이 필요한 고유 영역임에도, 선진국인 우리나라는 선진국이면서 북극이사회의 정식옵서버* 국가라는 국격에 비해 투자가 매우 부족한 실정으로, 국가 위상에 맞는 극지활동을 위해 정부 R&D 사업을 통한 전 지구적 기후변화에 대한 책임 역할 강화 및 정립 필요(ESG 개념 반영)

  * 북극이사회 의사규칙(Rule of Procedure)에 따라, 옵서버 국가들은 가입 이후 4년마다 옵서버 지위 유지에 대한 관심 표명*과 북극권에서의 적극적인 활동을 통해 자격 유지 가능(북극이사회, 스발바르조약, NySMAC(니알슨과학운영자회의), AMAP(북극모니터링평가프로그램), IASC(International Arctic Science Committee, 국제북극과학위원회) 등 국제적인 거버넌스에서의 적극적인 과학기술적 활동과 국제정보교류 활동 지속성 유지를 통한 우리나라 국격 제고)

□ IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 특별 보고서

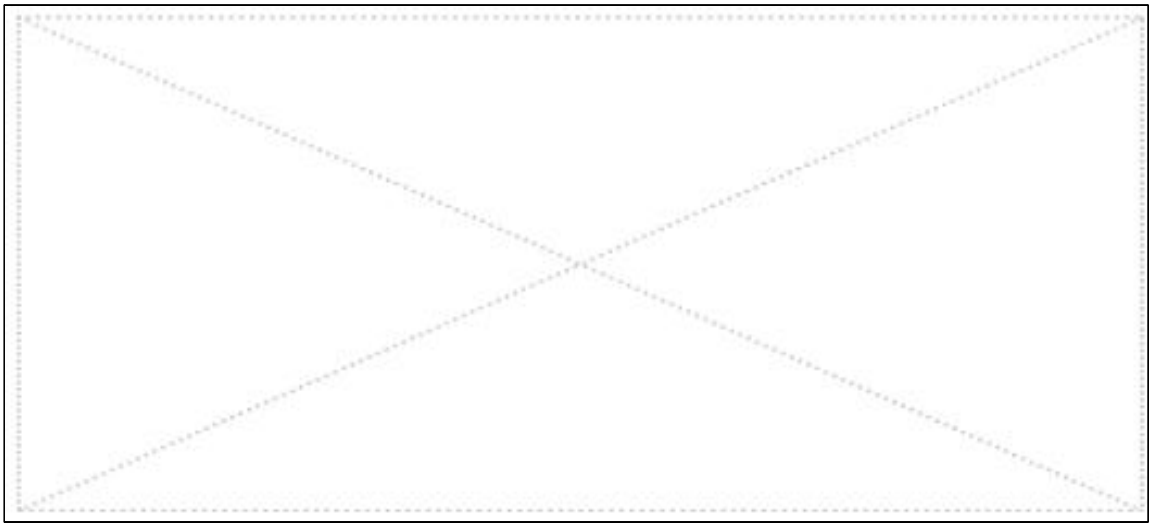
○ (추진배경) IPCC는 기후변화와 관련된 전 지구적 위험을 평가하고 국제적 대책을 마련하기 위해 세계기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)이 공동으로 설립한 유엔 산하 국제협의체로서, 인간의 활동이 기후변화에 미치는 영향을 평가하고, 국제적인 대책을 마련하기 위해 설립

- 전 세계 해수 온도 상승과 빙하, 해빙 등 해양에서 발생하는 기후변화의 영향을 받지 않을 지역은 없으며, 해양에서 발생하고 있는 기후변화로 인한 해수면 상승으로 2050년까지 10억 명의 사람들이 영향을 받게 될 것으로 예상
- 2019년 모나코 몬테카를로에서 열린 제51회 '기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)' 총회에서 회원국들은 '해양 및 빙권 특별 보고서'를 채택

○ (주요내용) 바다와 눈과 얼음으로 뒤덮인 지역의 급박한 환경변화는 기후위기가 가장 극적으로 나타나고 있는 지역이며, 획기적인 방법을 통해 기후가 안정화되더라도 바다와 빙하 지역에서 이미 일어나고 있는 환경변화를 멈출 수도 돌이킬 수도 없다는 사실에 대한 위협을 경고하였음

- 그러나 온실기체의 획기적인 감축을 통해서 최악의 위기는 피할 수 있고, 목표한 만큼 온실기체가 감축되면 인간과 자연은 환경에 적응할 수 있는 시간을 확보할 수 있을 것을 전망함
- UN사무총장 안토니오 구테헤스는 이번 기후정상회담에서 온실기체 다배출 국가들의 최악의 상황을 피할 수 있는 1.5℃ 목표 달성에 부합하는 전 세계 기후 행동은 여전히 요원한 실정임

24) 북극의 환경보존 및 지속가능한 개발을 목적으로 북극 관련 정책을 논의하기 위해 창설한 정부간 협의기구로, 1996년 설립(8개 북극권 국가, 12개 비북극권 국가로 구성)



[기후시스템 구성요소들의 과정 및 상호작용][18)]

북극 얼음의 깨어진 균형은 '되먹임 효과(Feedback effect)'*에 따라 더욱 빠르게 악화될 전망.[25)]
* 되먹임 효과란 기후시스템에 존재하는 과정들 사이에서 최초 과정의 결과가 두 번째 과정에 변화를 촉발하고 이 과정이 다시 최초의 과정에 번갈아 영향을 미칠 때, 이러한 상호작용 메커니즘을 의미

- 극지기초원천기술개발사업에서의 ESG(환경; Environmental / 사회; Social / 지배구조; Governance) 경영기법에 대한 적극적인 반영 추진
  - ESG는 당초 기업활동에서 과거 재무적 성과만을 판단하던 관점에서 벗어나 기업이 환경문제, 사회문제 등에 관심을 갖고 지속가능성을 제고해야한다는 경영철학으로부터 출발
  - 따라서, 정부 R&D로 수행되는 지구 환경변화 연구 관련 과학기술 분야에서도, 그 개념을 적용하여 글로벌 이슈 문제 해결에 기여 가능성이 충분하다고 판단되어 본 연구에서도 이에 ESG 기법을 적용함

■ 『극지활동진흥법』('21.04 제정 및 '21.10 시행)과 『제5차 과학기술기본계획』('21.08 국가과학기술자문회의 수립방향(안) 심의 확정, '22.11 대국민 공청회), 『2050 북극활동 전략』('21.11 국무회의 보고), 『제1차 극지활동진흥 기본계획』('22.11 관계부처 합동 발표)에 대한 필수적 연계 연구 및 의무적 활동 수행 필요

- 글로벌 기후변화와 극지의 전략적 가치 증가에 따른 국가 차원의 법안 시행 및 방향성 제시에 근거하여, 극지에서 체계적이며 수월성 높은 R&D 연구사업 수행 기반 구축과 K-type Polar Science & Technology* 확립을 위한 중장기 계획 도출 필요

25) 기상청 홈페이지, 기후변화감시용어집 해설, http://www.climate.go.kr/home/10_wiki/index.php/기후시스템

* 우리나라는 비극지권의 중위도 지역에 위치하고 있지만 지구온난화가 가속화되면서 북극해 해빙이 감소함에 따라 북극권에서의 환경변화와 밀접한 관련이 있는 것으로 밝혀지고 있으므로 우리나라 실정에 맞는 글로벌 이슈에 대해 효율적이며 체계적인 대응을 위한 한국형 극지과학기술의 개발과 적용 및 연구수행 시스템 확립 필요

■ 북극이사회 「북극모니터링평가프로그램」(AMAP[26], 2021) 핵심 현황 및 IPCC 제6차 보고서[27]에서 제시한 국제 동향에 대한 자발적 대응방안과 추진계획 수립 필요

- IPCC 제6차 보고서 및 해양, 빙권 특별 보고서 등에서 북극 동토층의 융해-대기 순환의 변화에 대한 대응과 빅데이터 확보 및 지속적인 환경 모니터링 확대 주장, 모든 유형의 기후모델에 영구동토층의 변화를 주목할 것을 강조
- 빙하 및 영구동토층 융해 등 급격한 환경변화에 따른 북극 생태계 변화, 전 지구적인 영향 증폭 등을 우려하는 핵심 현황 보고서 발간을 통해 글로벌 이슈 대응을 위한 국제 공조체제 구축 강화

1.2.2. 미래 지향적 전략 수립 필요(극지 연구 패러다임 변화 대응)

■ 포스트 팬데믹 시대 및 미래를 대비하여 우리나라와 밀접한 기후·환경 변화의 지속적인 모니터링과 대응을 위한, 북극이사회 8개 국가(미국, 캐나다, 러시아, 노르웨이, 덴마크(그린란드), 아이슬란드, 스웨덴, 핀란드)와 북극권에서의 지속적인 공동연구 네트워크 유지 및 강화 필요

■ 극지 가열화에 따른 지구 환경변화 파급성의 지속적 감시와 영향평가 필요

- 극지역에서 발생되는 급속한 환경변화는, 더 이상 극지방만의 문제가 아닌 한반도를 포함한 전 지구 기후시스템(지구의 기권/수권/지권/생물권/빙권, 여기에 최근에는 인간활동 영역 포함)에 영향을 미쳐, 극지연구의 중요성 강조는 물론 각국에서의 관심 증폭 및 연구투자 확대

■ 기후변화 등 인류 공동의 현안을 해결하기 위한 극지 과학연구를 촉진하고, 실질적인 국제협력 체계를 구축하기 위한 전략을 주도하여 중장기적으로 향후 극지 지역에서의 발언권과 영향력 증대를 위한 미래 지향적 연구 전략 수립과 지속적인 시행 필요

- 최근 우리나라를 포함한 동아시아와 북미, 유럽 지역에서의 극단적인 기상이변 현상*은 지구온난화에 의한 극지의 해빙 및 빙하 감소 등과 관련성이 큰 것으로 나타났으며, 극지 연구에 대한 집중적인 투자 필요

---

26) Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP)은 1991년 북극환경보호전략의 감시 및 평가를 수행하기 위해 설립되고, 1996년 북극이사회 설립과 함께 워킹그룹으로 발족

27) IPCC(International Panel on Climate Change) sixth Assessment Report-Climate Change 2021-The Physical Science Basis; Summary for Policymakers, 42pp.

* 북극해의 융빙(融氷) 및 동토층의 융해(融解) 가속화는 최근 한반도뿐만 아니라 지구 곳곳에서 급증하고 있는 극단적인 기상 현상들(한파/폭설로 인한 항공 마비, 기록적 폭염 및 슈퍼태풍, 가뭄, 산불, 홍수, 만년설 붕괴 등)의 직접적 원인으로 밝혀짐

1.2.3. **과학적 근거 및 기술적 한계 극복방안 마련 필요**(전 지구적 기후·환경변화 대응)

■ 지구온난화에 따른 기상이변 현상이 특히 남·북극에서 증폭되어 나타나고 전 지구적으로 그 영향이 확대되어, 이에 대한 원인 규명과 대책 마련을 위하여 극지에 대한 전 세계적인 관심이 증대되고 있음

- 주요 선진국은 글로벌 기후변화 문제 대응을 위해 극지와 지구환경과의 관계를 극지정책 비전에 포함, 극지환경 보호 및 자원개발에 정책적 우선순위 부여

■ 급격한 북극 기후·환경변화와 전 지구 간 상호작용에 대한 미답 영역에서 지속적인 과학적 빅데이터의 축적과 광역적 해석 필요

■ 극한기후와 북극의 지역적 특성상 대규모 인적·물적 인프라가 필요하며, 기초응용과학 종합실험의 장*으로서의 통합적 접근 필요

* 북극에서의 기초응용과학의 예
- 극지역에서의 평균 기온과 한파의 강도, 강수량의 변화, 해빙의 면적, 시베리아 고기압과 알류산 저기압, 식물의 생장 등 급변하는 환경에 대한 평가
- 극지 과학기술의 접목을 통한 파급효과 규명, 유용 물질의 발굴, 자원활용기술 개발
- 극한지 특성에 맞는 융복합 과학기술의 접근 인프라 확보와 4차 산업형 빅데이터 기술 개발 등

■ 기후의 현재 상태와 미래 가능성, 기후의 위험평가와 지역적 채택을 위한 정부차원[28]의 기후정보 확보와 미래 기후변화 통제 강화 노력 필요

■ 기후변화 등 인류 공동의 현안을 해결하기 위한 지구적 환경변화의 원인 규명과 미래 예측을 위한 과학연구 강화 필요

- 극지역에서 발생되는 급속한 환경변화는 더 이상 극지방의 문제가 아닌 한반도를 포함한 전지구 기후시스템에 영향을 미쳐, 환경변화에 대한 지속적이며 첨단기술이 적용된 모니터링과 분석 등 극지연구의 중요성 증대

28) 제5차 과학기술기본계획에서의 전략3(생존) 『인류와 국가의 생존보장을 위한 국제 현안 해결』의 「위기 예측·대응·회복력 강화」 실현 노력 필요

1.2.4. **구체적·효율적 방안 강구 필요**(북극권 국가와 지속적인 연구활동 수행 및 과학외교 강화)

■ 북극이사회 국가 및 정식옵서버[29] 국가들이 자국 주도로 수립한 북극정책에 대응하기 위한 한국형 방안 마련의 근거 제시 필요

■ 북극권 국가들과의 국제협력과 인류공영을 위한 국제공동연구 확대 및 강화를 통해 우리나라의 국격 제고와 국익 확보 필요

■ 국내의 우수한 연구 역량을 활용해 극지과학 분야 연구력 강화를 위한 지속적 극지 연구 활동 수행 방안 마련 필요

■ 우리나라가 남극조약협의당사국, 북극이사회 정식옵서버 국가로서의 국제적 의무 수행 및 극지 현안 대응능력 강화 필요

- 기후변화 등 인류 공동의 현안을 해결하기 위한 극지 과학연구를 촉진하고, 실질적인 국제협력 체계를 구축하기 위한 전략을 주도하여 중장기적으로 향후 극지 지역에서의 발언권과 영향력 증대 필요

  – 최근 우리나라를 포함한 동아시아와 북미, 유럽 지역에서 한파, 폭설, 폭염 등 극단적인 기상이변 현상은 지구온난화에 의한 극지의 해빙 및 빙하 감소 등과 관련성이 큰 것으로 나타났으며, 극지 환경변화 관찰과 관측 및 연구에 대한 집중적인 투자 필요

  – 기후변화 등 인류 공동의 현안을 해결하기 위한 지구적인 환경변화의 원인 규명과 미래 예측을 위한 과학연구 촉진 필요

■ 최적화된 정부 R&D 사업으로서의 역할 수행을 고려한 ESG 개념의 연구 내용 도출

- 환경(Environmental): 급변하는 극지역 환경변화(육상(동토, 생태)–대기–연안 등)에 대한 지속적인 현상 모니터링 및 심도있는 고찰(극지 빅데이터 활용 경향 분석과 미래 대응 방안 도출)을 통해 우리나라 환경과의 관련성과 대응에 필요한 연구가 되도록 함
- 사회(Social): 극지 기후변화와 한반도의 연관성을 파악하고, 미래 환경 예측에 필요한 정확한 정보 제공 방안 제시로 우리나라 경제사회 활동에 보탬이 될 수 있도록 함
- 지배구조(Governance): 국가 차원에서 수행된 극지 연구 결과를 정책에 반영하여, 국제사회의 패러다임 변화에 대응하고 전 인류의 공공이익을 위한 국가로서의 역할 확대 및 국익 제고 방안의 내용으로 도출하고자 함

---

29) 북극연안 8개국으로 구성된 북극이사회 국가 이외에 국가로서, 북극이사회의 모든 회의에 참석할 수 있는 권한을 갖고 북극권 개발에도 참여할 수 있다. 현재 정식옵서버 국가는 한·중·일 등 13개 국가가 있다.

* 이 기획연구에서 도출할 전략과 세부 주제는 모두, 극지기초원천기술개발사업의 기본적 특성이라고 할 수 있는 DNA, 즉 D(data) / N(network) / A(availability, assessment, analysis) 및 ESG 특성을 고려하여 기획됨

1.2.5. 주요 기획연구 방향

■ 국내 유일의 북극권 동토지역의 관측거점을 확보한 과기정통부 극지기초원천기술개발사업의 선행 연구에 대한 성과분석 및 장기적 기후환경의 트렌드 분석을 위한 끊임없는 연계성을 지니며, 광역적인 대표성과 획기적인 성과 창출을 위한 차별성 있는 새로운 추진방안 제시

- 극지 미답 영역을 대상으로 첨단 과학기술 적용과 장기간 현장 관측 기반 극지 기후변화 빅데이터를 연계한 수월성 높은 연구추진 프레임 구축 방안 제시
- 극지 기후·환경변화에 대응하기 위한 극지 과학정보의 연관성·가용성 강화 및 획득되는 각종 데이터의 지역적 대표성을 확보하는 방안 마련
- 기존 사업의 일몰('24)에 따라, 극지역에서의 환경변화에 대한 모니터링의 연속성 유지와 유용한 빅데이터 확보 및 AI 등 최신 기술을 통한 지속적인 트렌드 분석, 미래 예측 및 대응을 위한 정부 R&D 사업으로서의 발전 방안 기획
- 본 기획에서는, 우리나라와 지리적으로 가까운 북극권 동토지역과 주변 연안 및 남극-북극 간의 고층대기 영역에서의 대척점(conjugation points) 등 연구 분야에 대해서 중장기적으로 필요한 내용을 중점적으로 제시하고 정부 R&D 사업으로서의 정부 정책 결정자를 위한 정책 제안서 및 대국민을 위한 홍보 전략서 등의 역할 제시

■ 북극이사회 정식옵서버 국가('13.05)로서의 "책임있는 파트너 역할" 수행의 일환인 북극권에서의 활발한 과학연구활동과 이를 통한 과학적 근거 제공 및 옵서버 국가로서의 지위 유지 필수(북극권에서 국제적 위상 강화 방안 마련과 남극 환경과의 연관성 연구 도출)

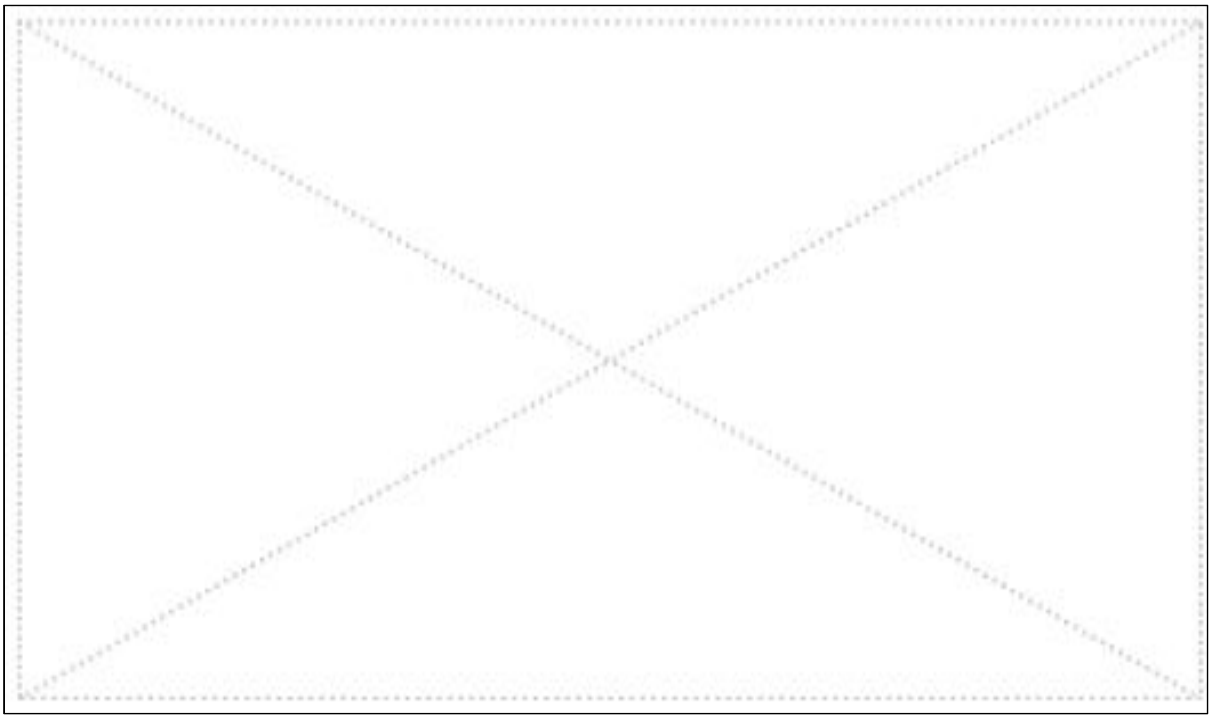
- RFP 예시를 준수하여, 사업의 구체적 과학적 연구 목표, 지역 선정 및 내용 추진방안 도출, 남극조약협의당사국('89.10)으로서 국제적 의무 수행 및 극지 현안 대응능력 강화 방안 도출
- 우리나라를 포함한 전 지구적 기후변화와 관련 주요 이슈에 적극 대응하고, 새로운 기회영역 선점을 위해 극지역 통합 연구 지속 방안 제시

- 극지역에서 육상-대기-빙권 변화를 통합하여 비교 관측이 가능한 보다 구체적인 자료는 아직까지 부족한 상황

- 따라서 미래예측 정확도 향상을 위한 관측을 비롯한 잠재적인 자원개발과 미래 지속가능한 활용을 위해서는 과학적 선행 연구를 통해 발전적이며 연계될 수 있는 기술개발 필요

※ 북극은 남극과 달리, 북극해를 둘러싼 북극권 국가의 영유권이 주장되고 있어, 원활한 연구수행을 위해서는 과학적·외교적 국제협력과 양자 협력 국가 간의 지속적 노력이 필수적임

※ 정부와 출연(연)과의 긴밀하고 지속적인 노력을 통해 북극이사회 국가와 양자 협력 체결, 세계적 연구 수행(정부 R&D 사업으로는 혁신적 아이디어 발굴, 시행과 외교적 성과 창출)의 절차와 체계를 가져야 함



[본 사업에서 추구하는 과거-현재-미래 탐구의 순차 계획]

※ 극지에서의, 독특하면서 전 지구적으로 연결되어 있는 기후·환경변화에 대한 과거의 자료를 **탐사/분석**하고, 정밀한 데이터를 확보하기 위한 각종 정밀측정 시스템의 인프라를 **설치/운영**하여 현재 상태를 **측정/조사**하며, 이러한 현장 관측 자료와 위성 자료를 활용하여 접목시킴으로써 미래를 **예측/대응**할 수 있는 체계를 갖추고자 함. 또한 북극권 유래 **유용물질의 발굴과 활용성 제고**, 북극권에서의 온난화 및 기후·환경변화로 야기되는 동토층의 융해 영향 등과 관련된 **지역사회의 인간활동에 대한 영향을 파악**하고자 함

*** 연구수행 종합 체계 :**

- ✓ 동토지역에서의 **대기-육상(동토·생태)-피오르드·연안** 등 3차원적 공간 대상으로 지구온난화에 의한 기후환경변화를 감지/관찰/관측하고, 과거-현재-미래의 시간적 변화 분석 및 미래 예측과 대응안 마련을 주 목적으로 함
- ✓ 이를 위해, 지중에서의 지열변화(**공학적 개념**), 미생물 거동 ⇒ 지표에 영향/동토 메탄 거동 측정/생태계 등 지표 환경변화 측정(**환경생태학적 개념**)/토양 유기탄소화합물의 분해 관련 효소 활성 및 생화학적 기능분석(**생명공학적 개념**) ⇒ 대기환경 변화(**대기과학, 기후학적 개념**)/연안환경 변화(**고기후·환경학적 개념**) 측정 : 빅데이터 환경인자 확보, 분석(USN 적용, **AI/딥러닝 등 전자통신 개념**)
- ✓ 자료전송(**원격 데이터 전송기술 적**용) ⇒ 자료 저장/분석/현상 진단과 미래 예측 분야에 자료 제공(**시뮬레이션 개념 적용**) 등의 체계로 구성하고자 함

※ 아울러 본 사업에서 다루는 현상 진단을 위해서는 "북극권"이라는 특수 영역에서 필수적인 국제공동연구를 통해 대기/동토/생태/연안 등의 분야에 대한 자료확보가 매우 중요하고, 글로벌 이슈 대응이라는 전 세계적인 목표 달성에 동참하는 노력을 제시하고자 함(단, 부처 사업의 특성상, 육상(동토/생태)에 인접한 피오르드·연안은 포함하되 해양 분야는 제외함)

※ 북극 지역의 영구동토에 대한 모니터링도 매주 중요함. 특히 북극권 영구동토 지역에는 엄청난 양의 가스하이드레이트가 매장되어 있을 것으로 추정되며, 지구온난화의 결과로 메탄가스와 결합되어 있는 물분자라 유리되고 있다는 것은 잘 알려져 있는 사실임. 메탄가스는 이산화탄소보다 대기중에서 농도는 낮지만 온실기체로서 지구온난화에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있고, 극지방의 빙하에서 채취한 지난 수십만 년 동안의 이산화탄소와 메탄가스의 양이 정확히 같은 경향으로 변화하고 있는 것도 이를 반증하고 있음. 따라서 영구동토 지역에서 발생하는 메탄가스의 양을 정확히 이해하는 것은 매우 중요한 모니터링의 한 항목이라 할 수 있음

※ 한반도는 지정학적으로 전 지구적 기후변화에 가장 민감한 변화를 보여주는 지역임. 물론 극지방도 큰 변화를 보여주기는 하지만 극지방과 열대지역은 지구온난화가 일어나더라도 한대기후와 열대기후를 그대로 유지한 채로 평균기온의 변화에 의한 여러 현상이 발생할 것임. 하지만 온대기후에 속하는 한반도 지역은 지구온난화가 일어나면 아열대기후로 바뀌게 되면서 육상과 해양에 매우 큰 환경변화를 실제로 수반하게 되어 이에 따른 경제 및 사회적 변화를 피할 수가 없음. 따라서 이러한 한반도의 기후에 대한 예측을 위해서 극지역에 대한 여러 연구를 수행하는 것은 국익차원에서도 매우 중요함

2 목표 및 내용

2.1. 목표 설정

▣ 기획연구 목표의 대전제
■■ (중장기 추진계획안 마련) 극지기초원천기술개발사업(~'24) 일몰 연계하여, 선제적이고 지속적인 사업을 위한 기획 ■ 기획연구를 통해, 현재 수행 중인 극지기초원천기술개발사업의 성과를 확대 계승할 수 있는 체계적 후속 연구사업의 중장기(최소 6년) 로드맵 제시 • 기존 기초·원천 R&D 사업의 지속적인 연구개발사업 추진을 위한 R&D 기획 • 극지기초원천기술개발사업 추진에 필요한 주요 글로벌 이슈 분석 및 연구개발내용 도출 • 과기정통부에서 수행하는 글로벌 현안 이슈인 기후변화 관련 유일한 **거대 극지 국책 R&D 사업으로서, 극지관련 환경연구개발의 미션 반영**(극지역에서의 글로벌 이슈 감시와 결과 확보를 위한 지속적 연구활동 수행 필요) • 북극 연구의 경우, 북극이사회(Arctic Council) 국가와의 국제협력을 통하여 확보한 **관측거점 및 점진적 지평 확대**를 통해 **글로벌 이슈에 대응**하는 **국제공동연구 수행 강화** 필요 ■ 극지 장기 관측을 통한 기후변화 빅데이터 DB 및 플랫폼 구축·활용 기반 제시

2.1.1. 과학적 근거 제공(기후변화 연구에 최적화된 극지 Super Site에서의 빅데이터 확보 및 분석을 통한 현상 진단과 미래 변화 예측에 필수)

■ **(극지 환경변화 평가 방안 도출)** 지속적인 관측거점의 정상적 운영 및 연구영역의 확대를 통한 정밀 모니터링과 빅데이터 확보 및 자료분석, 피드백 평가 (미래 예측) 방안 등

- 급변하는 북극의 기후·환경변화 현상 파악 및 관련 자료획득
- 과학기술 등의 접근을 통한 온난화 현상 등 규명 및 기술개발

■ **(과학기술 수준 제고 방안 도출)** 남·북극 미답영역 대상 첨단 과학기술 적용과 국제적 수월성 있는 연구성과 도출 및 K-type Polar Science 위상 제고(IPCC 보고서 작성 참여 등) 방안 등

- 북극권에서의 급격한 기후·환경변화 영향 파악과 남·북극 고층대기 현상 비교, 이를 통한 시공간에서의 4차원적 현상 이해와 변화 특성 규명 연구 추가
- IPCC 제6차 평가보고서에서 경고한, 특히 북극에서의 급변하는 환경변화에 대한 대응안을 마련하고, 한반도를 비롯한 전 지구에 미치는 영향평가 수행 방안 도출

2.1.2. 국내·국제 사회에서의 기여 방안 도출(극지 장기 관측 연구 기반)

■ **(과학정보의 연관성·가용성 강화 방안 도출)** 북극권 환경변화에 대한 과학기술 측면에서 ESG(환경/사회/거버넌스) 개념 도입으로 선도적 정부 R&D 사업 수행

■ **(국제사회에서 지속적 선도적 역할 수행 방안 도출)** 북극권 국제 거버넌스에서 우리나라 과학기술·외교 활동 및 역량 강화 방안 도출(필요에 따라 남극권까지 확대 적용)

- 환북극 동토 기반 관측거점의 확대(현재 6개 ⇒ 8개; 스웨덴, 핀란드 추가)로 북극이사회 모든 국가들과 공동연구 역량 제고 방안 도출, 남극과 북극의 고층 대기 현상에 따른 기후변화 요소 비교 강화
- 국가 간 양자-다자 회의, 북극과학장관 회의, 북극이사회에서 추진하는 주요 글로벌 주요이슈 대응 동참 및 국가 위상 제고 방안 모색
- 북극이사회 국가의 영역인 북극권에서, 정식옵서버 국가인 우리나라가 북극이사회 국가와의 지속적인 협력과 조율 및 상호활동을 통한 지속가능한 개발과 원주민 보호 및 환경보호 등의 공동문제 해결 도모

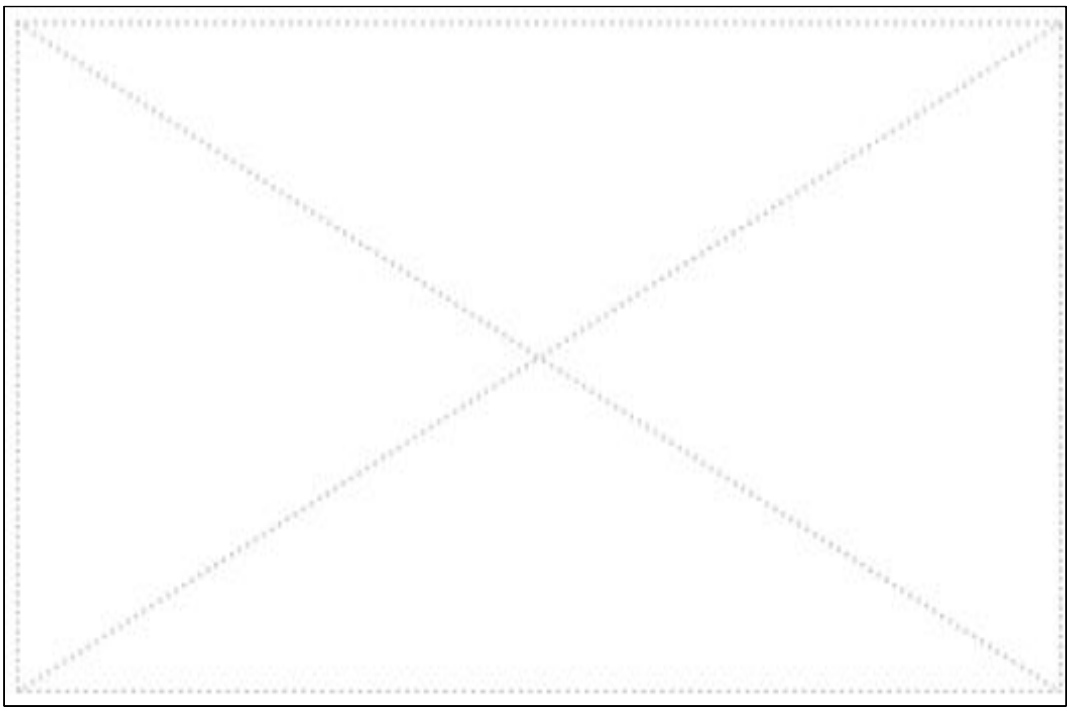
2.2. 기획 추진 방향

■ 원천·공공 또는 환경 성격의 연구사업으로 설계하되, 후속사업으로서의 연계성 확보 및 기관 고유사업 또는 타 정부 R&D 사업과의 차별성 유지

- 기후변화 등 글로벌 이슈에서의 극지 중요성 증가, 기존사업 일몰도래 등에 따라, 극지 분야의 국제적 핵심현황(참고) 및 환경 분석·문제이슈 도출
- 환경분석·문제이슈 도출에 따른 글로벌 이슈와 관련된 본 사업의 비전과 목표, 추진전략(연구분야 등)을 도출 및 기존사업과의 차별성 방안 검토
- 기술수요조사, 선행기술조사 등을 감안하여 시급성과 정부지원의 필요성이 높은 세부주제와 연구내용 도출
- 세부주제의 내용과 범위에 적합한 효율적인 사업 추진체계 등을 수립하고, 과학기술정보통신부 연구개발사업 추진을 위한 관리방안 수립
- 사업의 필요성에 맞는 성과 창출을 위하여, 성과지표(KPI)를 도전적으로 계량화하고, 사업수행의 효율성을 확보하기 위해 작업분할구조(WBS; Work Breakdown Structure)를 체계화시킴은 물론 기대효과 및 파급효과를 구체화하여 국가 정책 및 글로벌 이슈와의 연계성 강화 도모

2.3. 기획 내용 및 범위

▣ 기획연구 내용 및 범위 설정의 대전제적 고려 사항



■■ 극지 관련 주요 이슈(지속적 극지연구의 필요성)

■ 극지환경의 급격한 변화와 원인의 불확실성

- 극지는 기후시스템(기권/지권/수권/빙권/생물권)을 모두 갖춘 소지구적 영역으로서, 인간활동 증가와 더불어 지구온난화에 따른 변화가 가장 극심하고, 전 지구에 미치는 파급효과가 가중되고 있으나, 아직 현장 모니터링과 과학적 자료 및 연구 미흡

■ 급격한 동토층의 융해에 의한 생태계 변화 가속화

- 북극의 급격한 기후·환경변화에 따른 특이현상(슈퍼 폭염 및 태풍, 한파, 산불, 홍수, 가뭄 등) 빈도와 강도 증폭으로 지구 생태계와 인간 삶에 악영향 확대

■ 북극 연안국가의 국방, 외교, 환경, 자원 및 영유권 분쟁 등으로 인한 국제적 갈등

- 북극이사회 국가 및 옵서버 국가들의 자국 이익을 위한 북극정책 수립 및 발표

■ 급격한 기후변화 글로벌 이슈 대응을 위한 국제 공조체제 미흡

- 광범위한 극지역에서 기후변화 조사/분석/평가 등을 위한 국제적 협력 강조

2.3.1. 성과 분석 및 발전방안 제시(과기정통부 극지기초원천기술개발사업 수행 결과 분석)

■ 선행 연구에 대한 성과분석

- 연구 활동 및 과학정보 확보, 학술적 우수성과 창출, 산업화 기반 마련 성과, 성과 홍보활동 등 분석 및 정부 정책 반영 등 SWOT 분석을 통한 극지 연구/정책 패러다임의 변화 파악

■ 기 수행 사업과의 차별성 비교

- '해양-육상-대기 탄소순환시스템 연구'사업* 등 탄소 관련 사업과의 중복성 검토(RFP 제안 사항)

* 대부분 극지역이 아닌 한반도 영역을 대상으로 수행하므로, 극지기초원천기술개발사업과의 차별성은 명확하게 구분되며, 중복성은 없는 것으로 판단됨

□ **사업명 : 해양-육상-대기 탄소순환시스템 연구사업**[30]

□ **사업목적**

○ 국가 기후변화대응 능력 향상을 위한 해양-육상-대기 상호공간에서의 이산화탄소 거동 및 이로 인한 현상파악을 위한 기초연구 수행

- 지구온난화로 인한 해양 수온 상승에 따른 온실기체 저장능력 변화 관찰 및 한반도 기후변화 예측을 위한 이해 기반 마련

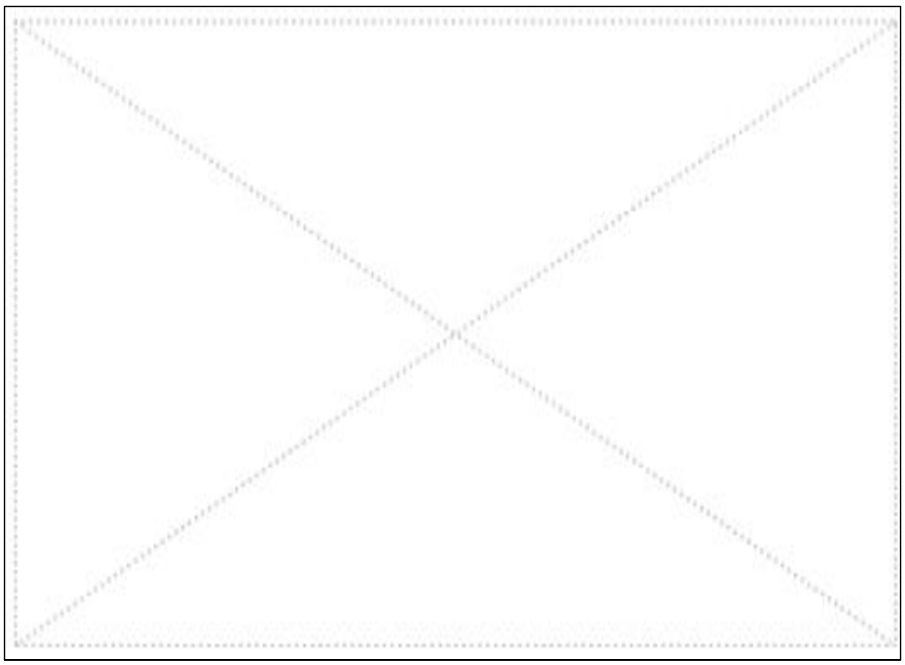
※ ①현상진단, ②이해, ③분석, ④대응 4개 분야

No.	분야	연구방법	RFP 번호	RFP명
1	현상 진단	관측	2021-탄소순환시스템-01	한반도 해양-대기-육상 탄소순환 연구 (목표 : 한반도와 주변 해양(황해, 동해, 남해(또는 동중국해))의 상호 탄소순환 기작 규명)
2		관측	2022-에너지환경-21	탄소 저장능력에 영향을 미치는 질소·인 순환 연구 (목표 : 한반도와 주변 해양(황해, 동해, 남해, 동중국해)의 탄소 저장능력에 영향을 미치는 질소·인 순환과정 진단)
3	이해	모형	2021-탄소순환시스템-02	동아시아 기후-탄소순환 상호작용 이해 (목표 : 우리나라 주변의 육상 및 해양의 탄소 저장량 및 육상-해양 탄소 교환량의 변동성에 영향을 주는 기후 인자들의 이해)
4	분석	관측	2022-에너지환경-22	해양-대기 생지화학 물질 순환 및 해양 생태계 변화 분석 (목표 : 관측 기반 북서태평양에서의 해양-대기 물질 교환 특성 및 하위영양 단계 생태계, 생지화학적 변화 특성 분석)
5		모형	2022-에너지환경-23	신기후 체제 한반도 탄소 순환-물 순환 상호작용 진단 및 예측 (목표 : 한반도 육상 및 해양 탄소 순환-물 순환 피드백 과정의 주요 조절인자를 진단하고 신기후 체제 미래 변화를 예측)
6	대응	관측 -모형 결과 연계	2022-에너지환경-24	한반도 해양-육상-대기 탄소 수지 종합분석 및 탄소중립 연계 정책 개발 (목표 : 한반도 해양-대기-육상의 자연적 탄소순환 진단 및 이해를 바탕으로 인위적 탄소 감축 시나리오와 결합된 종합적 탄소 수지 정량화 분석 및 탄소중립 연계 정책 개발)

※ 총 6개 RFP 중 2022년도 지원 대상은 4개 RFP

□ 2022년도 신규과제 추진분야

분 야		RFP	내 용
현상 진단	질소 및 인 순환의 정량적 규명을 통한 한반도 인근해역 탄소저장 능력의 변동 파악	2022 -에너지 환경 -21	- 한반도 인근해역에서 질소와 인 순환 변동이 탄소 저장 능력에 미치는 영향 - 육상 탄소 저장 능력 및 육상 기원 탄소의 해양 내부 거동(fate) 파악 - 한반도 해양-대기-육상 통합 시스템 내 탄소 및 질소의 고정, 보유, 순환 메커니즘 규명을 통한 해양생태계 내 이산화탄소 고정 및 보유 효율 극대화 메커니즘 규명
분석	육상 및 해양의 물리 화학적 변화에 의한 탄소 환경변화에 따른 해양 생태계 변화연구	2022 -에너지 환경 -22	- 지구온난화 환경에서의 해양 생지화학-기후 상호작용 연구 - 변화하는 기후와 대기-해양 탄소교환의 변화 - 육상 및 해양의 물리화학적 변화에 의한 탄소환경변화에 따른 해양생태계 변화연구
	기후시스템 내부의 탄소중심 상호작용 및 피드백과정 변화진단 및 메커니즘 파악	2022 -에너지 환경 -23	- 탄소순환 변화에 기인한 동아시아 지역 물순환 변화 연구 - 탄소 순환 피드백의 주요 조절자 파악 및 물리과정 특성 연구 - 해양 탄소순환 모델링 및 미래 변화 예측 연구
대응	탄소순환 이해를 통한 신기후체제의 한반도 기후변화 대응 시나리오 도출	2022 -에너지 환경 - 24	- 신기후 체제에서 동아시아 지역 탄소순환에 기반한 한반도 미래 특성 변화 및 불확실성 연구 - 해양생태 모델링 기반 기후공학 연구



[해양-육상-대기 탄소순환시스템 연구과제별 관계도][22)]

30) 출처 : 과학기술정보통신부 공고 제 2022 - 0537호(2022년도 해양-육상-대기 탄소순환시스템 연구사업 신규과제 공모, '22.05.04)

※ 극지기초원천기술개발사업

□ 본 기획연구 사업 : 극지기초원천기술개발사업

* “해양-육상-대기 탄소순환시스템 연구사업” 과의 차별성 : 대부분 한반도 영역을 대상으로 수행하는 ‘해양-육상-대기 탄소순환시스템 연구사업’과는 방법론에서는 비슷하나, RFP 상의 연구대상 지역, 내용 및 범위, 방법론, 결과 적용 등에서 분명한 차별성을 갖고 있음

□ 목표

- 급변하는 북극권 변화에서의 물리적, 환경적 핵심 현상 지속적 감지와 특성 분석 및 영향 평가
- 북극의 변화, 회복력, 기후변화 적응에 대한 한국형 프레임워크 시스템 구성 및 협력과 지식 공유 기반 마련

□ 사업목적 및 추구하는 내용

① (극지 이해와 평가) 극지환경 지속 모니터링을 위한 관측거점 활용, 빅데이터 확보 및 분석, 정보 격차 해소, 피드백 평가(미래 예측),

② (과학기술 수준 제고) 국제적이며 다학제적인 수월성 연구성과 창출 및 K-Science 위상 제고,

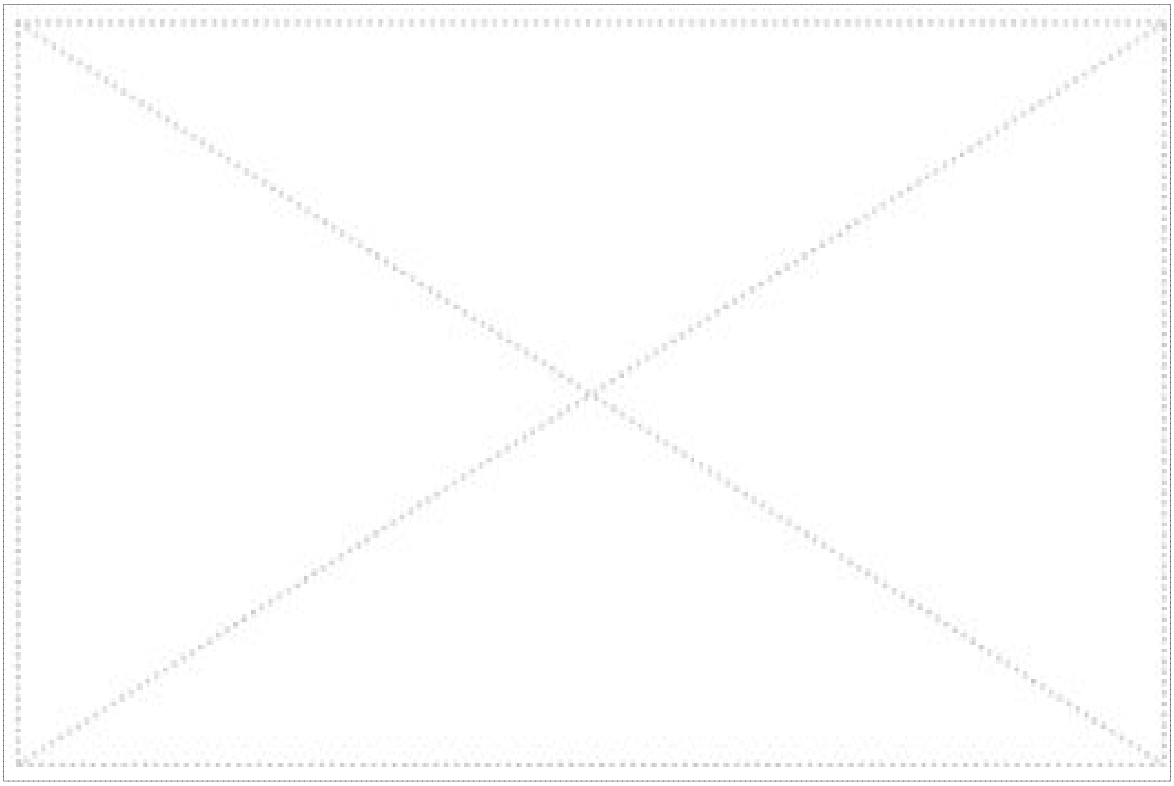
③ (과학정보의 연관성과 가용성 강화) 북극권 환경변화에 대한 과학기술 측면에서의 ESG (환경/사회/거버넌스) 개념 도입으로 최적화된 정부 R&D 사업수행, 극지확보 데이터의 유용성과 활용성 제고를 위한 정밀화 작업과 이를 통한 수혜자를 위한 제공 등

④ (국제사회에서의 지속적 역할 수행) 국제사회에서의 글로벌 이슈 대응 동참 및 국격 향상에 기여

- 북반구 기후변화에 북극지역의 영향 분석
- 극지 기후자료를 포함한 북반구 전체의 빅데이터 구축으로 정확한 기후변화 분석 및 예측의 핵심 자료 확보

※ 즉, 극지의 생태와 지질 및 대기 환경의 정밀관측 자료를 기존의 북반구 전체 자료와 동화하여 북반구 전체의 빅데이터를 쉽게 이해할 수 있도록 가시화하여 이를 근거로 극지 포함 북반구 전체의 기후변화를 예측하고 분석할 수 있음

- 동토 기반 극지 기후 정밀 모니터링 빅데이터 확보 및 분석
- 지구규모 기후변화에서 극지기후 변동성이 미치는 영향력 평가
- 극지(북극) 환경변화 정밀 모니터링 및 빅데이터 구축을 통한 지구규모 기후변화에서 기후 변동성이 미치는 영향력 평가
- 전지구 환경변화 진단과 예측을 위한 극지 기반 Super Site 구축 및 빅데이터 확보
- 극지 저층/고층대기, 육상, 생태 환경 변화 정밀관측 및 예측기술 개발을 통해 기후위기 대응 방안 제시
- 북극 온난화 증폭 현상의 핵심인 육상 동토 지역의 토양-대기-생태-연안 환경에 대한 입체적 감시 데이터 획득, 지구환경변화 현황 신속 제공, 미래 예측자료를 생산하여 기후변화 대응에 활용



[본 사업에서 중장기적으로 추구하는 북극권 연구영역; 북극권 대기-동토-생태-연안 (거점 2개 추가) 및 기후변화와 관련된 북극 Gate Way를 대상으로 현장 조사, 자료 분석과 미래 예측, 대응하는 프로젝트로 강화]

2.3.2. 수월성 연구 추진 프레임 구축 방안 제시(극지 미답 영역 대상 첨단 과학기술 적용과 장기 현장 관측 기반 극지 기후·환경변화 빅데이터* 연계)

* 2009년 극지해양기초원천기술개발, 2021년 극지기초원천기술개발 데이터 연계를 통한 장기 극지 빅데이터 DB

■ 극지역에서 적용 가능한 첨단 시스템(HW/SW)의 개발 방안 제시

■ 극지환경 지속 모니터링을 위한 관측거점 활용, 빅데이터 확보 및 분석, 정보 격차 해소, 피드백 등 극지 이해와 평가안 도출

■ 국제적이며 다학제적인 수월성 연구성과 창출 및 K-Arctic Science 위상 제고 방안 제시

■ 빅데이터 DB 활용에 대한 연구수요조사를 통한 빅데이터 연계 수월성 연구추진 프레임 구축 방안 제시(빅데이터 DB 연계 성과 고도화 방안 마련)

- 최근에는 극지 환경변화 양상을 정확히 파악하기 위해 국제적인 데이터 네트워크가 강화되는 추세가 나타나고 있음
- 극지역에서 10년 이상의 장기적인 다양한 환경인자 데이터는 그 희소성으로 인해 높은 가치를 갖고 있기 때문에 국제적 데이터 네트워크에서 편입하기 용이함. 따라서 장기 관측자료의 현황과 가치를 평가하고 편입 가능한 국제적 연구 네트워크의 종류와 편입 로드맵을 제시함

2.3.3. 극지 과학정보의 연관성·가용성 강화 방안 마련(극지 기후·환경변화에 대응)

■ 북극지역-중위도 간 기후·환경변화 연관성 분석을 위한 극지 과학정보 활용 방안 도출

■ 미래 예측과 대응에 활용될 수 있는 실질적 정보 확보를 위해 모델링에 필요한 환경인자 모색과 신규 영역(북극 Gate Way 또는 남극 고층영역 등)에서의 연구 방향 도출

■ 북극권 관측거점에서 획득되는 기후·환경변화 관련 과학적 정보의 가용성 극대화 방안 제시

- 북극권 환경변화에 대한 과학기술 측면에서의 ESG(환경/사회/거버넌스) 개념을 도입하여, 임무형 최적화된 정부 R&D 사업 수행

2.3.4. 남·북극에서의 국제적 위상 강화 방안 마련

■ 북극이사회 모든 국가(기존 협력 6개 국가 외 스웨덴·핀란드 추가)와의 확대 협력체계 강화

- 북극이사회 전체 8개국과 공동연구 수행(우리나라의 정식옵서버 입지 강화)
- 북극 관측거점(8개), 북극해 Gateway 영역 등 연구영역 확대 방안 제시
- 협력 국가들과의 실질적 공동 조사/탐사 방법 및 로드맵 도출

■ 북극이사회 운영 프로그램과의 관측자료 공유 강화

- 북극이사회가 운영하는 북극모니터링평가프로그램(AMAP), 지속가능개발워킹그룹(Sustainable Development Working Group, SDWG), 북극동식물보전(Conservation of Arctic Flora and Fauna, CAFF) 등 워킹그룹과의 협력으로, 본 과제 도출 주제의 하나인 동토-대기 정밀 모니터링 프로그램과의 자료 공유를 통한 국제공동연구 시너지 창출 방안 마련

- 북극이사회 국가와 국제북극과학위원회(IASC)의 북극 모니터링 운영과 관측 자료의 지속적 공동활용을 위한 국제네트워크인 지속북극관측네트워크(SAON, Sustaining Arctic Observing Networks)에의 참여와 기여를 위한 국제 공동연구 프로그램 개발

■ 남극과 북극 연계 고층대기 현상의 기후변화 영향 연구 확대 방안 제시

- 극지 태양활동과 고층대기-대기중력파-저층대기-중위도 기후·환경변화의 피드백 연구 확대 방안 도출

2.3.5. RFP를 준수한 후속사업의 구체적 연구 목표, 내용 도출

■ 정부 R&D 사업으로서의 ESG 구분 수행 방안 및 핵심 연구주제 도출

■ AMAP 2021 및 IPCC 제6차 평가보고서('21)에서 제시하는 주제와의 연계성 고려한 국제적 우수 연구수행 방안 도출

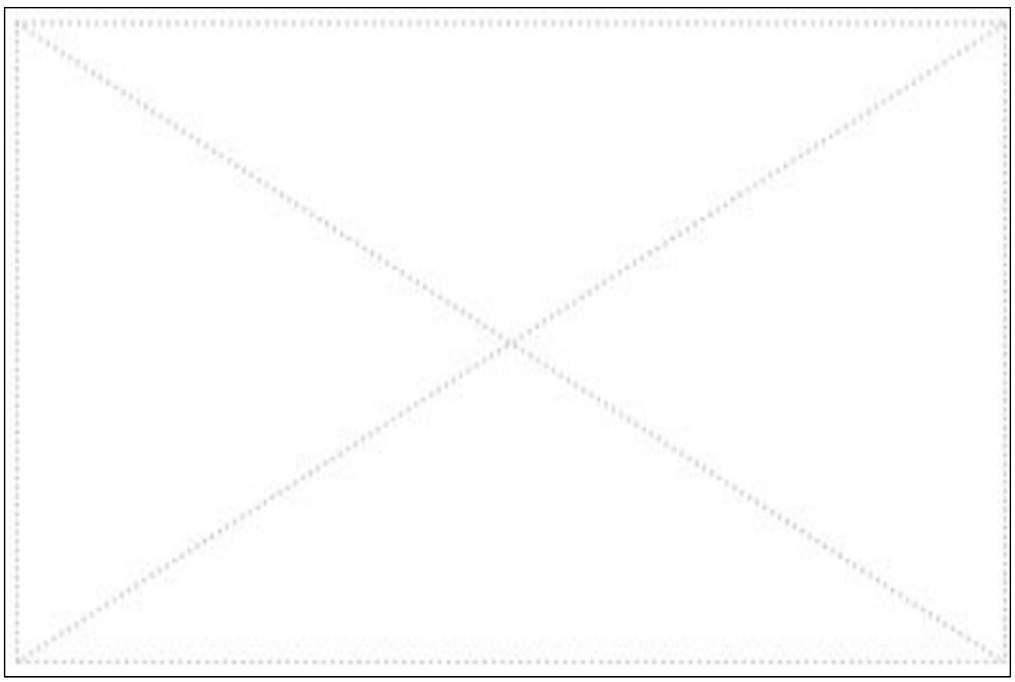
2.3.6. 기획범위

※ 극지 분야의 주요 글로벌 이슈와 관련된 연구활동 기반으로 사업기획 범위 설정

- 글로벌 이슈를 통해 발굴된 주요 키워드인 기후변화, 자원활용, 미답지역 탐사, 국가·국제 Agenda를 중심으로 주요 연구내용(로드맵)을 설정
  - 이는 극지연구소 기관고유사업 또는 타부처 R&D 사업과의 차별적이면서 연계성을 가지며 시너지 효과를 얻을 수 있도록 주요내용 및 로드맵 도출
  - 남·북극 기본계획, 2050 극지비전, 극지 분야 국제정책 동향, 국제북극과학위원회(IASC), 남극과학연구위원회(SCAR) 등을 제시된 활동을 지원하기 위한 과학연구 활동을 발굴
- 연구분야는 선행사업의 연구분야 및 지역을 감안하되, 글로벌 이슈에 따른 추가 연구분야를 도출
  - 선행사업의 성격에 따라 기초·원천 성격의 연구로 추진하되, 기술수준에 필요한 경우 주요 연구내용에 포함
- ① '미답지역', ② '국가·국제 agenda'에 따라 기관고유사업과 차별화
  - 미답 지역의 조사·탐사라는 관점으로 보면, 본 사업과 기관고유사업이 같은 관점에서 수행이 가능하나, 극지연구소에서 운영·관리하는 남북극과학기지 이외에 환북극 동토지역 관측거점 및 주변, 연안 등 기타 지역을 중심으로 구분
  - Agenda 설정 가능 분야는 정부 지원의 필요성이 인정되므로 본 기획에서 포함하고,

– 기타 Agenda 설정이 어려운 장기간 연구가 필요한 과제는 본 사업 기획에 포함은 시킬 수 있으되, 극지역 현장 또는 인원 및 예산 등을 고려하여 실질적 수행 여부를 판단함. 아울러 국내외 연구자를 대상으로 한 수요조사를 통해 접수된 주제와 내용에 대해서도 이러한 조건을 고려하여 선별 반영함

※ 연구영역과 연구내용 등의 확대 계획

북 극	As – Is	• 북극이사회 6개 국가 (스웨덴, 핀란드 제외)와 공동연구 수행 • 북극다산과학기지 인근 및 북극 관측거점 (6개)
	To – Be	• 북극이사회 8개 국가 전체(스웨덴, 핀란드 포함)와 공동연구 수행 (대한민국의 옵서버 입지 강화) • 북극 관측거점 (8개), 러시아 북동시베리아, 북극 gate way 영역, 남극 고층대기 영역 ※ 과학적/환경적 정보 및 근거자료 획득 확대, 폭넓은 현상 파악과 분석 기능 고도화, 미래 대응 강화
		

※ 기획연구를 통한 ESG 구분 수행 방안 계획

- 4차 산업혁명과 디지털 전환의 가속 등으로 기업활동에 친환경(탄소저감, E), 사회적 책임 경영과 공헌(S), 투명한 지배구조(G) 개선 방식 적용으로, 지속가능한 발전 추구 의미-기업의 이익 추구로부터 인간과 사회 공헌의 역할 변화 강조
- 환경(E)은 기후변화 영향, 사업장 환경오염물질 저감, 친환경 제품 개발과 같은 요소가 포함되며,
- 사회(S)의 경우 인적 자원 관리, 산업안전, 하도급 거래, 제품/서비스의 안전성, 공정 경쟁 등이 포함,
- 지배구조(G)는 주주 권리, 이사회 구성과 활동, 감사제도, 배당과 같은 요소가 이에 해당

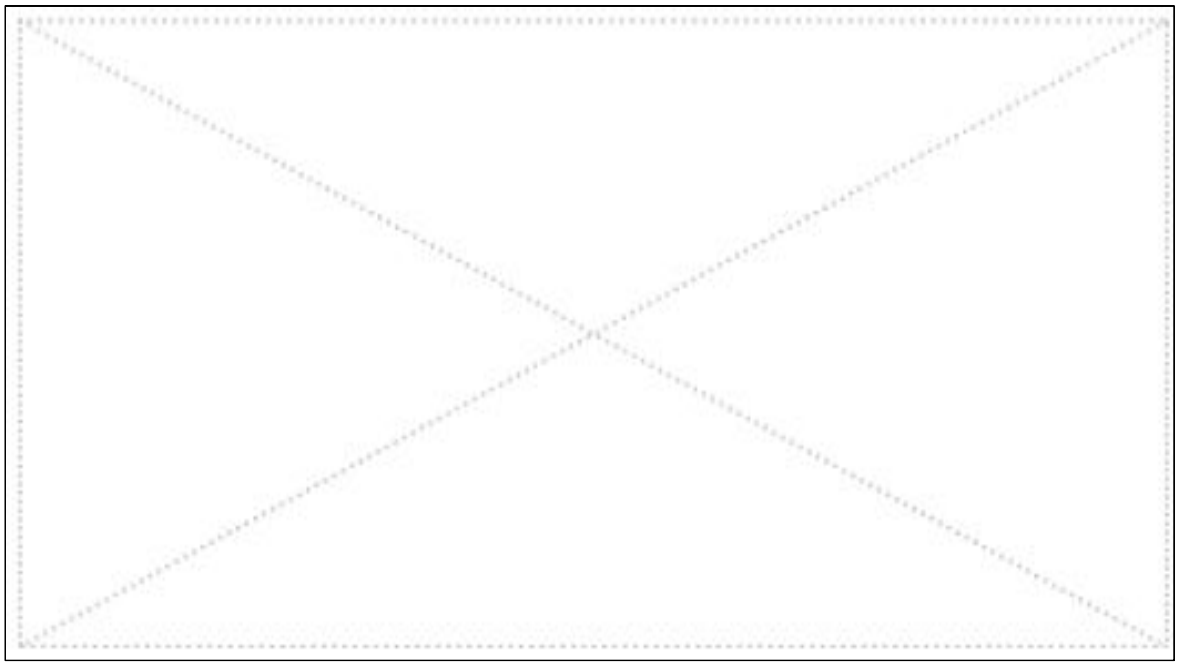
- 급변하는 북극권에서의 환경변화(육상(동토, 생태)-대기-고환경 등)에 대해 지속적인 현상 모니터링 및 심도 깊은 고찰(**환경**)을 통해, 전 지구적인 환경과 우리나라와의 연관성 파악 및 예측(**사회**)하고, 정부 차원에서의 연구 수행 결과에 대한 정책 반영 및 지속적 투자와 국제사회에서의 국익 제고 등(**지배구조**)에 최적화된 정부 R&D로서의 역할 수행 필요
- [정부 R&D로서의 ESG 구분]

환경(Environmental)	사회(Social)	지배구조(Governance)
북극권에서의 환경변화(육상, 대기, 고환경 등) 관측 및 분석	북극권 환경변화가 중위도(우리나라)에 미치는 영향 및 인간 삶에의 파급 효과	정부 투자 방향 정립, 국제사회에서의 역할 수립 - 국내 : 극지활동진흥법 - 국외 : AMAP 등

As-Is	To-Be
환경적(과학기술적) 측면 (ENVIRONMENTAL)	
◆ 북극 환경변화에 대한 전지구적 파급효과 관심과 이해 시도와 점진적 강화 ◆ 북극 해빙(海氷)으로 인한 북극해 접근성 제한 ◆ 지구온도 상승률 1.5℃ 이내로 억제하기 위한 탄소중립 목표 연도를 2050로 설정	◆ 2035년 북극 여름철 해빙(海氷) 완전 소멸과 동토 해동(解凍) 가속화에 따른 북극 연구 우선순위 변화 ◆ AMAP 2021과 IPCC(기후변화에 관한 정부간 협의체) 제6차 보고서에 의거, 급속한 북극 환경변화에 대한 과학기술적/환경적 연구 강화 필요 ◆ 지속적 모니터링과 정밀한 분석, 미래 대응 강화 및 AI/IoT 활용 도입 연구전략 강화
사회적(공공성) 측면 (SOCIAL)	
◆ 극지(북극)에 관한 정부와 국민의 관심 태동 ◆ COVID-19 팬데믹 이전 시기로서, 과제수행을 위한 북극 연구지역 접근성 원활	◆ 극지역 기후변화로 인한 전 지구적 파급효과 가속으로 환경변화에 대한 관심 폭발 ◆ 포스트 팬데믹 시기에 대두될 연구환경의 변화에 효율적으로 대응하기 위하여, 현지 연구 네트워크와의 긴밀한 협조체제 강화
국내외 거버넌스 측면 (GOVERNANCE)	
◆ 북극 개방 정책 (예: 1987년 무르만스크 선언)의 당위성에 대비하여, 현실적으로 자국 영토 내에서의 공동연구에 대한 폐쇄성이 강해지는 경향 있음	◆ 과학기술 패권시대, 4차 산업혁명 주제(지식 정보화 시대) 강화 – 빅데이터 확보와 활용 무기화 ◆ 북극권 국가들의 자국 영토 내에서의 국제 공동연구 개방정책 후퇴 가속화 예상 ◆ 북극 영토주권 국가 내에서의 양자 간 현장연구 기회 확보와 전략적 접근방식의 전환 모색

신규 사업의 독창성의 예

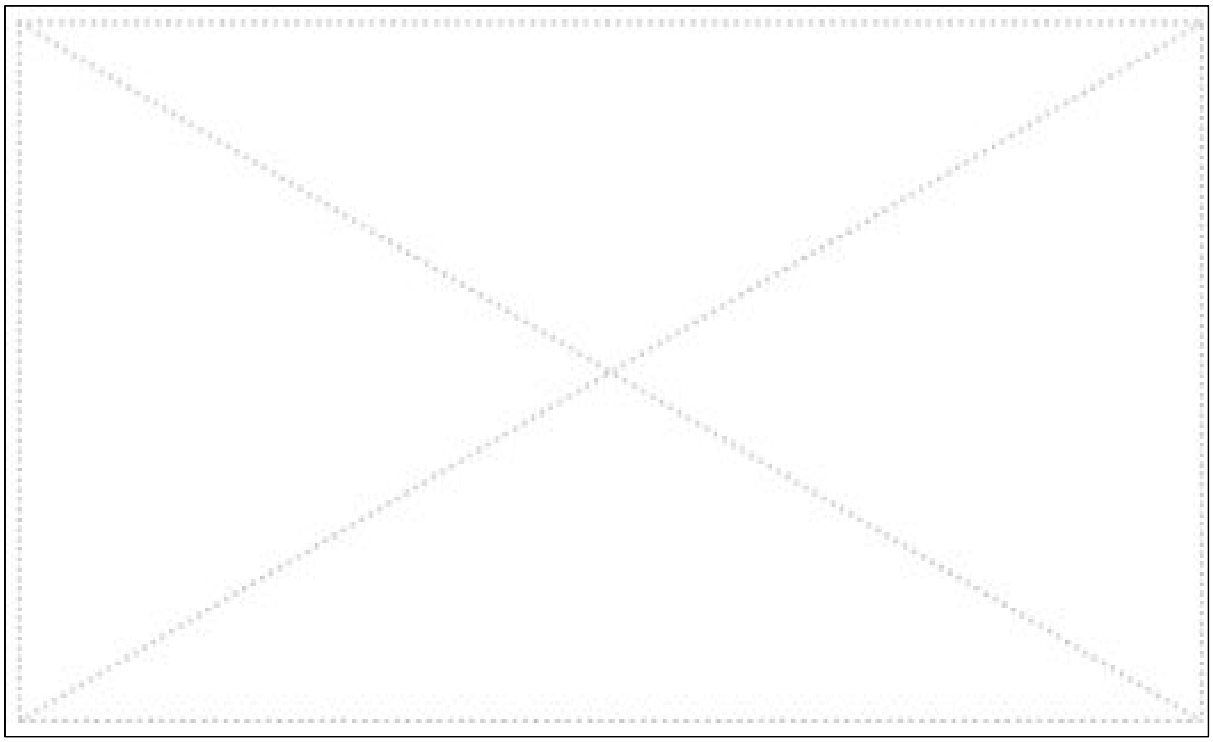
선행 사업 ('21~'24)	• 환북극 6개 관측거점 기반 대기-육상(동토, 생태) 환경변화 측정, 분석 및 북극 스발바르 기후환경 취약성과 회복력 이해 • 북극 유래 유용물질의 활용방안 도출 • 전지구적 기후변화에 따른 특이사항 분석 및 중위도와의 연계성 파악
신규 사업 ('25~'30)	• 환북극 관측거점의 추가 확보(스웨덴, 핀란드 추가로 모든 북극이사회 국가 내 동토지역에 8개 관측거점 확보)-이를 통한 보다 확대된 영역에서의 기후환경변화 연구 수행 가능해짐 • 북극권 동토 및 연안 등 주변 지역 과거 기후환경 시스템 이해와 남극과 북극을 연계하는 고층대기 분야에서의 비교 연구 추가 • 북극 관문(gateway)을 추가로 연구 영역으로 포함시켜 기후환경변화 분석 및 예측에 관한 다양성과 정밀성 확보
특이사항 (혁신성, 차별성, 창의성, 발전성)	베링기아(알래스카+시베리아) 지역, 스웨덴, 핀란드 및 남극 등 연구거점 영역 확대와 이를 통한 자료의 대표성 강화
	알래스카 및 러시아 동시베리아 동토 지역 융해호 연구 등 영역 확대
	북극권 대서양(스발바르/그린란드)과 태평양(시베리아/알래스카) 관문(gateway) 지역의 과거 기후환경 변화 비교 연구



[근미래 극지기초원천기술개발사업의 임무 계획 방안 : 본 사업의 정부 R&D 라는 특성상 극지 환경에 대한 관찰/관측 데이터 확보와 분석, 사업 수행을 통한 사회적 영향성 제시, 그리고 국내외 정책적 미션에 맞는 구조로 수행함]

3 기획연구 추진체계

3.1. 추진체계



[본 기획연구의 수행 체계도]

(1단계) 위탁수행기관인 건국대학교(기획연구 주관기관)를 중심으로, 국내 전문연구그룹 선정을 통해 필요성, 내용, 전략 주제 등 중간보고서 도출(착수일로부터 종료일까지의 일정상 절반이 되는 시점에 마무리)

(2단계) 이와 더불어 국내 전문가로 구성된 자문위원회로 하여금 중간보고서에 대한 검토의견 수렴과 전문기관의 용역 병행 수행을 통한 수요조사 시행(착수일로부터 종료일까지의 일정상 절반이 되는 시점에 중간보고회 시행 - 자문의견 수렴 및 수요조사 시행하는 것으로 대체)

(3단계) 2단계에서의 내용을 반영한 최종보고서(초안) 작성

(4단계) 기획연구 종료일 이전 15일 정도에 최종보고서(초안)에 대한 최종보고회 수행

(5단계) 최종보고회 이후 평가위원의 의견 수렴 반영하여 2개월('23년 5월말) 이내 최종보고서 제출

3.2. 추진전략 및 방법

3.2.1. 기획보고서 작성과 자문위원회 가동(학·연·산 전문가의 참여)

- **기획보고서 작성**: 극지 기후변화 관련 현장 모니터링 및 자료 획득과 분석 경험 보유 전문가 ⇒ RFP에서 주어진 각 항목별 심층 내용 기술
- **자문위원회 구성 및 활용**: RFP 항목에 대한 보고서 내용 기술 자문 및 중간, 최종 검토(최소 2회 이상 위원회 개최)

  – 본 사업은 '기초원천연구'*로 구분할 수 있어, 학연 중심의 전문가를 선정

  * 국가연구개발사업 표준 성과지표(4차)에 따라, 현재 또는 미래에 광범위한 응용을 목적으로 문제해결의 근본원리 및 창의적 지식창출 연구는 '기초연구(목적기초형)'으로 구분

  – 다만, 탐사기술의 고도화, 생물자원의 활용 등 관점에서의 문제이슈 도출 및 관련 분야에의 응용을 고려하기 위하여 산업체 전문가도 일부 참여
- **관계자 보고회 개최**: 착수회의/중간보고회/최종보고회 등을 통해 최적의 기획 연구 결과물 확보(연계적 타당성/창의성/수월성 등)

  – 위탁수행기관(책임자 및 핵심 참여연구원 등) 중심으로 착수회의 진행

  – 위탁수행기관(책임자 및 핵심 참여연구원 등)/과학기술정보통신부(담당관)/한국연구재단 담당자 간 중간보고회 및 최종보고회 개최(총 2회)

  ※ 결과적으로, 부처 및 발주처 사정에 따라 중간보고회는 별도 시행하지 않고 계획서에 의거한 자문위원회 구성으로 자문의견 접수하였으며, 최종보고회는 정부 부처 및 발주처 담당관과 자문위원, 오픈이노베이션 책임자 등을 대상으로 주관기관(건국대학교)과 핵심참여자가 온/오프 하이브리드 형태로 참여하여 시행하였음(세부내역 증빙 참조)

3.2.2. 극지관련 자료 수집 및 연구 수요조사 수행

- 국내 전문 컨설팅 전문가 그룹과의 협력을 통한 극지 관련 자료 수집과 유사 연구자 대상 수요조사 및 내용 반영

[참고] 북극기후변화의 6대 핵심 현황(AMAP 보고서 2021)

1) 급변하는 북극변화의 물리적 추진요인들 증폭
- 핵심 지시자들: 기온, 강수, 적설, 해빙 두께와 면적, 동토 융해 등

2) 북극에서의 극한 특이현상의 빈도와 강도의 증대
- 주요 내용: 해빙 감소, 그린란드 빙붕 융해, 산불 등

3) 기후변화에 의한 북극 사회에의 주요한 영향력 확대
- 주요 내용: 북극 사회-특히 원주민 사회-에서의 생활과 식량 위기, 안전과 건강과 경제에 미치는 영향 가중

4) 북극 생태계의 급속한 변화와 변형 경험 확대
- 주요 내용: 급속한 빙권 변화가 북극 전역에 걸친 생태계에 영향 가중

5) 북극 환경변화의 전지구적 영향 증폭
- 주요 내용: 해수면 상승, 기회/위험, 신 북극항로 개척, 온실기체 농도 영향과 피드백, 북극과 중위도 사이 연결성 강화 및 다변적 영향 등

6) 최신의 기후모델의 지속적인 북극 온난화 예측 경고
- 주요 내용: CMIP6(Coupled Global Climate Model Projections)의 최신 산출 내용 주목(북극의 연평균 기온은 2100년까지 3.3~10℃ 상승)

[참고] IPCC 제6차 평가보고서 핵심 현황

- **현재 기후상태:** 분명하고 광범위하고 빠르게 변화(해수면 상승, 강수변화, 북극 해빙 및 동토층 융해, 극한 기상 등)
- **가능한 미래 기후:** 근미래(~2040년) 1.5℃ 온난화 도달, 21세기 말(~2100년)까지 최고 3.3~5.7℃ 도달
- **리스크 평가와 지역 적응을 위한 기후정보:** 기후영향동인(Climatic Impact - Drivers: CID) 및 환경요인 파악과 전망
- **미래 기후변화 억제:** 온난화 억제를 위한 탄소배출량 제한, 기타 온실기체 감축 필요

제2장 환경분석 및 시사점

1 극지 정책 동향

1.1. 국제 극지 정책

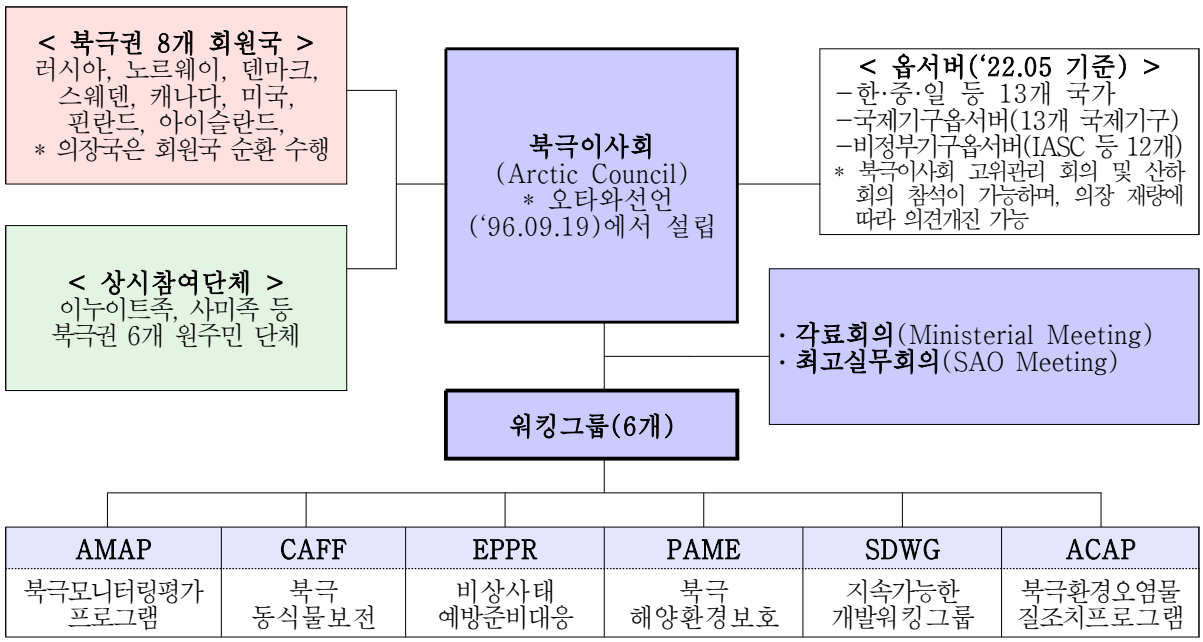
1.1.1. 극지관련 국제기구 정책 동향

– 극지관련 국제기구인 남극조약협의당사국회의와 북극이사회 등에서 주요 현안이 논의되며 전 세계 국가의 정책활동에 많은 영향을 미치고 있음

■ 북극이사회(Arctic Council, AC)

- **(개요)** 북극이사회(Arctic Council)는 북극권의 지속가능한 개발과 환경보호를 비롯한 공공의 문제에 있어 각국 원주민 공동체의 참여 아래 모든 북극 연안국의 협력, 조율, 상호활동 도모가 목적임
- 북극이사회 조직과 운영

[북극이사회 조직 구성] ※ 자료출처 : 외교부(MOFA)



※ 한국은 2008년 잠정옵서버 활동을 시작으로 2013년 정식옵서버 지위를 획득하면서 본격적인 북극해 진출을 위한 교두보 마련

※ 옵서버는 2013년부터 4년마다 자격이 갱신되며, 이사회에서는 옵서버 국가의 북극권 활동과 기여도를 평가하여 옵서버 자격을 재심사

✓ 북극 2~3년 주기로 열리는 AC 장관회의를 통해 결정된 프로젝트 및 프로그램을 6개 워킹그룹이 집행하여 세부목표를 달성하며, 북극권 모니터링, 평가 정책제안을 위한 과학연구를 수행국가 차원의 대규모 극지연구 및 개발활동 투자 추진

• 주요 성과

✓ 북극비전 마련, 각료선언문 도출 등을 통해 협의체로서의 입지 확보
✓ 북극기후변화 보고서, 생물다양성 평가 보고서, 북극해운평가 보고서 등 독자적 진단체계 구축
✓ 워킹그룹 성공적 운영과 상설사무국 설치를 통한 중장기 활동 기반 마련
✓ 수색구조협정, 해양유류오염대응협정, 북극과학협력협정 체결 등 의사결정 확대

• 주요 정책

✓ 북극모니터링평가프로그램(Arctic Monitoring and Assessment Programme, AMAP) : 오염과 기후변화에 관한 북극 지역의 지위를 감시 및 평가. 그 수준과 경향, 경로와 과정 그리고 생태계와 인간에 대한 효과를 문서화하여 정부에 의한 고려사항에 대한 관련 위협을 줄이려는 행동을 제안, 건전한 과학적 기초에서 정책관련 평가를 하며, 정책과 의사결정과정을 알림

– 현재 중점 문제 : 북극 빙권 변화, 북극해 산성화, 단기 기후 요인(블랙 카본, 대류권 오존 및 메탄)이 북극 기후에 미치는 영향

– 모니터링 프로그램 : 'AMAP 동향 및 영향 모니터링 프로그램'은 주로 지속적인 국내 및 국제 모니터링 및 연구 활동과 AMAP 국가 이행 계획을 기반으로 함. 환북극 생물다양성 모니터링 프로그램(CBMP, Circumpolar Biodiversity Monitoring Programme)과 협력하고 보완하며, 이 두 프로그램 모두 SAON에서의 이니셔티브에 기여

✓ 북극동식물보존(CAFF) : 과학과 정책의 인터페이스로 감시(Monitoring), 평가(Assessment), 전문가 그룹(Expert Group) 활동을 기반으로 함

– 모니터링 : 환북극 생물다양성 모니터링 프로그램은 해양, 담수, 육상 및 해안과 같은 주요 북극 생태계를 중심. 북극 생물다양성 데이터 서비스를 통한 데이터 관리. 주제는 기후변화, 생태계 기반 접근, 생물다양성의 주류화

– CBMP 전략 계획(2021–2025)은 과학자, 정부, 원주민 단체 및 보존 단체의 국제 네트워크로, 주요 북극 생태계를 중심으로 기존 모니터링 역량을 활용하여 북극 생물 자원의 모니터링 조정과 통합 강화

✓ 비상사태예방대응(Emergency Prevention, Preparedness and Response, EPPR) : 북극에서 환경적 비상사태에 대한 다양한 예방, 준비 그리고 대응 최고 사례에 대한 정보를 교환하고, 안내 개발과 위험평가방법론, 대응 활동과 훈련을 포함하기 위한 프로젝트 수행

✓ 북극해양환경보호(Protection of the Arctic Marine Environment, PAME) : 북극 해양의 안전 증진 및 해양 인프라 건설, 북극 인류와 환경보호를 목표로 함

✓ 지속가능개발워킹그룹(Sustainable Development Working Group, SDWG)

: “북극의 인류를 위한 개발”이라는 명제 하에 환북극 지역사회의 정신적 건강 복지 개선, 기후변화에 대한 적응력을 제고하고, 전통적 & 지역적 지식 기반을 지원하는 것을 우선순위로 함

✓ 북극환경오염물질조치프로그램(Arctic Contaminants Action Programme, ACAP) : 오염원 배출을 줄이고자 하는 국가적 행동을 장려하기 위한 기작을 강화하고 지원하는 역할

✓ 북극과학협력 강화 협정(Agreement on Enhancing International Arctic Scientific Cooperation) 서명, 체결 : 북극이사회 각료회의(‘17.05, 미국 알래스카)에서, 북극에 대한 과학지식 개발에서 효율성과 효과성을 증진하기 위한 과학활동 협력 강화 목적으로 체결. 북극 연구현장 접근 촉진과 과학 데이터 공개 및 데이터에 대한 접근성 강화와 공유 노력/전문인력 교류와 장비, 시료 샘플의 반출입 촉진 등의 내용으로 구성[26)]

✓ 북극 레질리언스 행동 프레임워크(Arctic Resilience Action Framework, ARAF) 채택 : 2011년 북극레질리언스보고 프로젝트는 스웨덴이 의장국일 때 시작되었으며 ARAF는 북극이사회 각료회의(‘17.05, 미국 알래스카)에서 채택. ARAF는 북극이사회에서 레질리언스 행동에 대한 지침과 우선 순위를 제공하고 지속적으로 우선 순위를 논의할 수 있는 플랫폼의 역할로 매 2년 마다 북극이사회 각료회의에서 리뷰를 받으며 지속가능개발워킹그룹이 주도함

- 4개의 우선 순위 : i) 북극에서의 위험과 레질리언스 분석 및 이해, ii) 레질리언스 및 적응 능력 구축, iii) 정책, 기획 및 협력을 통한 레질리언스 구현, iv) 위험 감소 및 레질리언스 구축을 위한 투자
- 레질리언스 이니셔티브 운영 : 북극이사회 6개의 워킹그룹은 생태계 또는 커뮤니티의 레질리언스를 지원하는 다양한 이니셔티브의 틀은 능력 배양, 연구와 혁신, 의사 결정과 관리 및 이행의 개선 등 세 가지 카테고리를 사용. AMAP을 비롯한 북극이사회 각 워킹그룹 계획을 포함하여 북극 생물다양성 평가 활동, 북극 습지 레질리언스와 관리 등의 이니셔티브 수행

레질리언스와 기후적응은 밀접하게 연결되어 있으며 효과적으로 기후적응 조치를 실행하게 되면 레질리언스를 구축할 수 있고 또한 레질리언스를 증가시키는 행동으로 적응 능력은 향상될 수 있음. 북극의 사회 및 생태 시스템은 다른 지역보다 더 밀접하게 연결되어 있는데, 북극의 변화를 이해하고 적응 및 레질리언스 전략을 구현하기 위해서는 사회-생태 시스템의 연결을 고려하는 게 중요[31)]

✓ ‘레이캬비크 선언문(Reykavik Declaration)’ 채택 : 북극이사회 각료회의(‘21.05, 아이슬란드 레이캬비크)에서 각료회의 사상 처음으로 ‘전략계획(Arctic Council Strategic Plan 2021 to 2030)’ 발표. 북극기후/건강하고 회복가능한(resilient) 북극생태계/건강한 북극 해양환경/지속가능한 사회발전/지속가능한 경제발전/지식 개발과 소통 강화/북극이사회 강화 등 7가지 전략목표 설정[32)]

31) 참고자료 : Arctic Council(2017). Arctic Resilience Action Framework. https://oaarchive.arctiIII- council.org/handle/11374/2019

■ 국제북극과학위원회(International Arctic Science Committee, IASC)

- (개요) IASC는 북극해 및 주변지역을 대상으로 연구 활동을 고무·장려할 목적으로 설립된 비정부간 국제기구로, 1990년 북극이사회 회원국 8개 국가의 과학자들이 조직하여 1991년부터 활동 재개
- (역할) IASC는 북극과학을 전 지구적으로 확대·발전시키기 위하여 연구프로그램을 계획하고 발전시키는데 기여하며, 연구 촉진을 위해 전문가 네트워크를 조직하고 행정적인 지원을 추진함
- (프로그램) 대표 연구프로그램으로서, SWIPA(Climate Change and Cryosphere and Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic), SAON(Sustaining Arctic Observing Networks), ISAC(International Study of Arctic Change) 등이 있음
- (회원국) 한국*, 캐나다, 중국, 덴마크, 핀란드, 프랑스, 독일, 아이슬란드, 이탈리아, 일본, 네덜란드, 노르웨이, 폴란드, 러시아, 스페인, 스웨덴, 스위스, 영국, 미국, 인도 등 (* 한국은 2002.04.25.에 지위 획득)
- 과학 활동은 5개의 워킹그룹(Working Group : Terrestrial, Cryosphere, Marine (AOSB), Atmosphere, Social and Human Working Group)이 중심이 되어 활동

■ 니알슨과학운영자회의(Ny Ålesund Science Managers Committee, NySMAC)

- (개요) 우리나라 북극다산과학기지가 위치한 노르웨이 니알슨과학기지촌에 기지를 보유한 국가 및 기관간 연구협력 및 조율을 위해 1994년 설립
- (역할) 니알슨 지역 내 협력강화, 환경보호, 인프라 활용, 연구기획 및 공동연구 관련 정보 교류와 조율, 분야별 니알슨 대표 연구프로그램(flagship program) 진흥 등
- 북극다산과학기지 운영에 필수적인 국제회의로서, 우리나라가 니알슨과학기지촌에서 연구를 수행할 수 있는 권리와 책임을 갖고 있음
- (구성) 니알슨과학기지촌 내 과학프로그램 운영 중인 11개 국가 18개 회원 기관, 노르웨이 Kings Bay 등 옵서버 4개 기관 참여(노르웨이 극지연구소(NPI)가 사무국 기능 수행 중)

■ 지속북극관측네트워크(Sustaining Arctic Observing Networks, SAON)

- (개요) 북극이사회와 북극과학위원회가 공동으로 북극 모니터링과 데이터 공동사용을 지속가능하게 지원하고자 구성한 국제간 네트워크로 2007년 AMAP 프로그램의 중점사업으로 시작됨
- (역할) 북극 모니터링과 관측자료의 지속적인 공동활용을 지원/독려하기 위해, 북극자료위원회(Arctic Data Committee, ADC)와 관측네트워크위원회 (Committee on Observations and Networks, CON)를 구성하여 국가 간 북극 연구 네트워크를 지원함

32) 서현교, 2021, 홍미진진 북극전략, 지식노마드, 202pp.

- ADC과 CON 두 위원회는 사용자들의 북극 관측 자료에 대한 자유롭고 제한 없는 접근성을 제공하고, 북극의 변화를 지속적으로 모니터링하기 위한 정책적 논의와 과학적 정보 공유의 장을 제공하고 있음

■ 데이터 관리와 공유

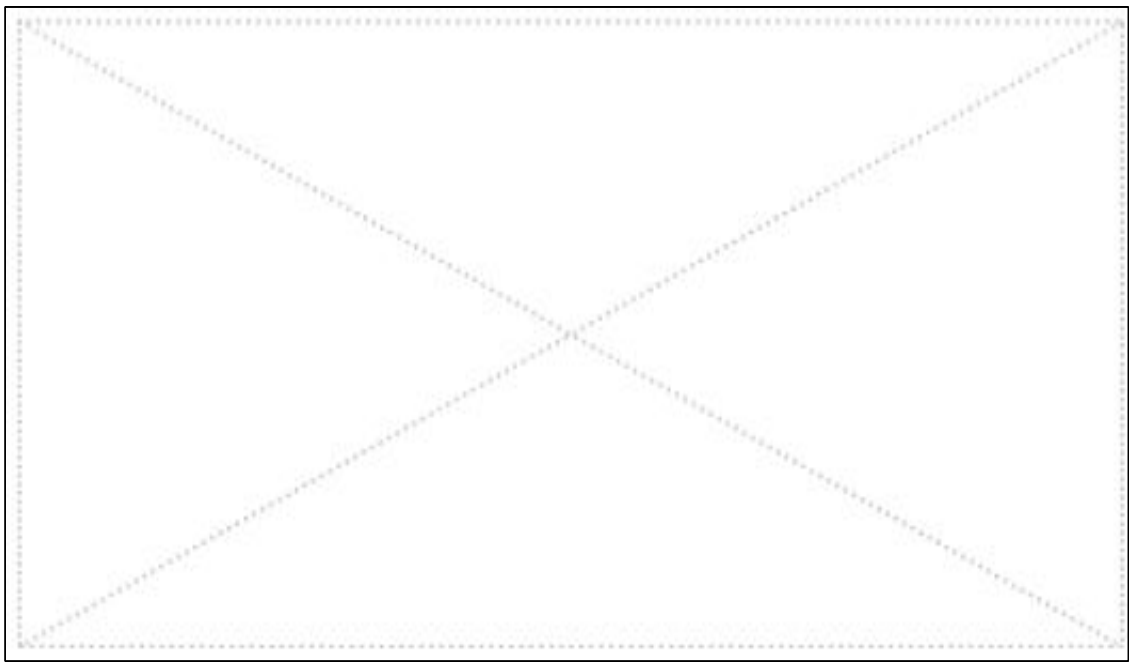
- 극지에서 획득되는 데이터는 기후변화에 따른 이상기후 연구(예를 들면, 극지 블랙카본이 대기 기온을 더 증가시켜 북극 얼음을 녹이고, 해수면이 올라가는 과정과 그에 따른 이상 기후 현상 등)와 가장 오염되지 않은 지역의 자료를 얻는다는 의미에서 우리나라 온실기체 배출(세계기상기구(WMO)에서는 남극을 기준하여 온실기체의 전지구 농도를 산출)을 이해하기에 가장 적합함

- 특히 극지 데이터가 향후 기후예보와 기상예보에 사용될 가능성을 미루어 볼 때, 극지의 관측자료 확보는 필수적임 (ECMWF의 경우 이미 화학자료를 기상기후 예보 모델이 추가하여 정확도 향상) – 이를 위해 최대한 많은 자료를 고품질로 확보하는 것이 중요하다고 판단되며 자원과 인력을 추가하는 것이 중요함. 아울러 빅데이터 DB는 굉장히 중요한 개념으로 우리나라 자료의 사용처가 넓어지고, 이를 통해 리더그룹으로 도약할 수 있는 중요한 기회임

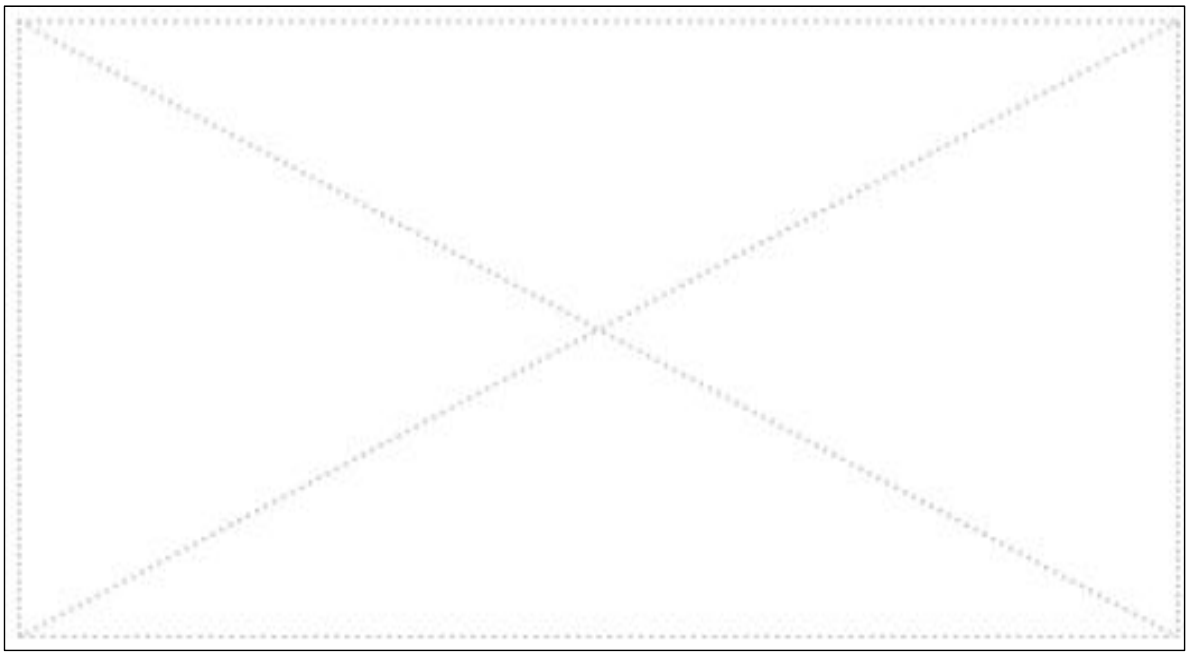
- 따라서, 극지역에서 획득되는 환경인자의 빅데이터는, 극지연구소에서 공식적으로 운영하는 한국극지데이터센터(Korea Polar Data Center, KPDC)(극지에서 획득되는 모든 데이터를 종합 관리, 국제 극지 관련 데이터 관리 시스템과 연계)에 의무적으로 등록하고 관리되고 있음. 이는 과학연구 활용을 촉진하는 동시에 연구 커뮤니티와의 연결을 강화하기 위한 관련 데이터 세트의 제공, 사용 및 보존을 위해 신뢰할 수 있는 과학 데이터 서비스를 조정 및 지원하는 체계의 일환임

- 한편, 남극과학위원회와 북극과학위원회가 참여하는 ISC의 데이터 관리 기구인 World Data System(WDS)과 연계하여, 다양한 범위에 걸쳐 품질이 보장된 과학 데이터 및 데이터 서비스, 제품 및 정보에 대한 장기적인 관리와 보편적이고 공평한 액세스를 촉진함으로써 이 비전을 지원하고 있음

- 자연, 건강, 사회 과학 및 인문학 분야의 학과. WDS는 과학 연구를 촉진하는 동시에 연구 커뮤니티와의 연결을 강화하기 위해 관련 데이터 세트의 제공, 사용 및 보존을 위해 신뢰할 수 있는 과학 데이터 서비스를 조정하고 지원함

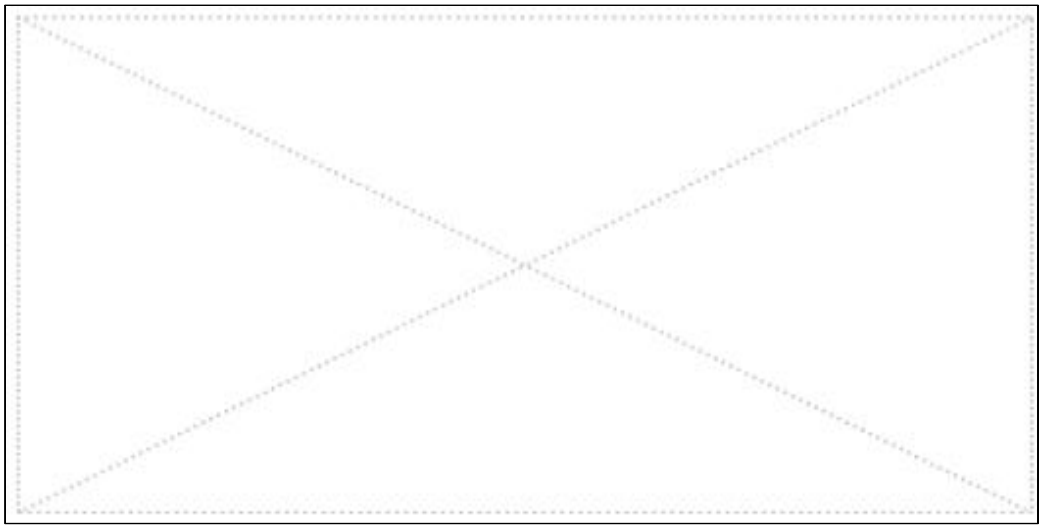


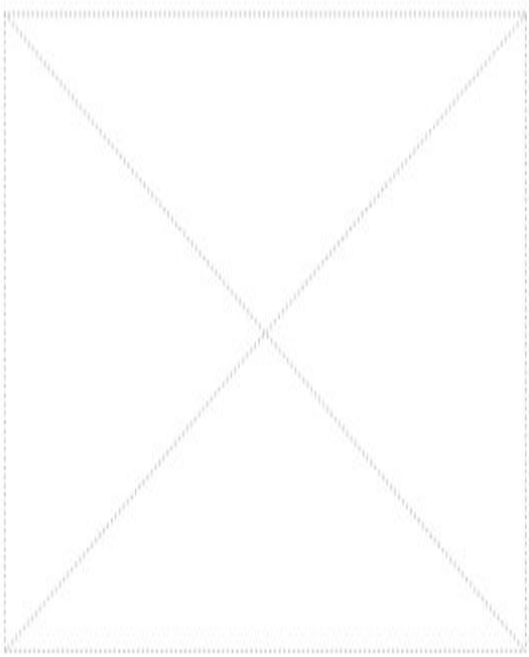
[출처 : 한국극지데이터센터(kpdc.kopri.re.kr/about/intro), 2022.12]



[출처 : 극지연구소 데이터관리실의 한국극지데이터센터(kpdc.kopri.re.kr/about/intro) 자료의 국내외 연계 계획, 2023.04]

[출처 : World Data System(https://worlddatasystem.org), 2022.10 ; WDS is AN INTERDISCIPLINARY BODY OF THE INTERNATIONAL SCIENCE COUNCIL (ISC)]





[한국극지데이터센터의 국제데이터관리 기구와의 연계성 및 자료 수집, 관리, 배포, 활용 체계도]

■ 남극조약협의당사국회의(Antarctic Treaty Consultative Meeting, ATCM)

- 남극조약협의당사국회의(ATCM)는 남극조약체제(Antarctic Treaty System, ATS)의 전반적 사항에 대한 유일한 정부간 의사결정기구로 남극관련 정보교환 및 공동관심사 협의 및 남극조약의 원칙·목적 증진을 위한 조치(Measures)의 작성 및 권고를 목적으로 함
- 구성은 총회, 법제도작업반, 환경보호위원회, 과학/운영/관광작업반이 있고, 협의당사국(Antarctic Treaty Consultative Parties, ATCP : 남극에서 기지를 운영하거나 과학활동을 하는 직접활동국가)(* 한국은 1986년 11월 28일 가입)
- 매년 회의를 개최하며 주요 아젠다는 남극지역의 환경보호(특별보호구역지정 채택, 추가 부속서 성안 및 채택, 관광 안전 등) 과학·연구활동(기지운영, 국제과학협력 및 성과) 등
- 최근 주요 이슈로는 남극조약환경보호의정서 제6부속서(남극지역 내 사고로 인한 환경비상상태 발생 시 원상회복을 위한 배상책임 문제에 대해 규정), 생물자원탐사(Biological Prospecting: 남극에서의 생물자원 이용 및 개발 논의), 관광(남극관광을 위한 선박의 안전운항을 위한 조치논의), 외래종 도입 차단과 정착방지, 무인기(UAV) 안전(가이드라인 제정 움직임) 등

■ 남극연구과학위원회(Scientific Committee on Antarctic Research, SCAR)

- 국제과학위원회(ISC: International Science Council) 산하 민간학술기구로 현재 31개국(한국은 KOPRI 참가)과 9개 학술연합이 회원국 지위
- 남극조약협의당사국회의(ATCM)와 협력 및 남극 과학연구에 대한 자문기구로서 역할 수행, 남극 관련된 주요 과학 이슈 규명
- SCAR에서의 연구는 각 분야별 상설 그룹으로 나뉘어 활동 및 회의 진행 지구과학 분야 상설과학그룹(SSG-GS), 생물과학 분야 상설과학그룹(SSG-LS), 물리과학 분야 상설과학그룹(SSG-PS), 남극데이터관리 상설그룹(SIII-ADM), 남극지리정보 상설그룹(SIII-AGI), 남극조약시스템 상설그룹(SIII-ATS), 재정 상설그룹(Standing Committee on Finance)
- SCAR는 향후 20년간 우선해야 할 남극연구 6대 분야와 80개 과제를 담은 '남극연구 중장기 비전(Horizon Scan)'*을 발표(2014)

[* 남극연구 중장기 비전 Horizon Scan]

6대 연구 분야	주요 내용 (발췌)
남극 대기·해양이 지구 전체에 미치는 영향	• 대기와 해양, 빙권의 상호작용 • 대기 중 오존층 회복과 온실기체 농도의 전 지구적 영향 • 남극해 열순환과 기후변화의 영향
남극 빙하와 해수면 높이	• 급격한 남극해 빙상의 해빙 원인 • 빙상 기저층의 상태와 빙상의 이동·형성과의 관계
남극얼음 아래 지각 변동	• 빙상에 대한 지각의 반응 • 남극대륙의 지각과 맨틀의 구조 • 대륙판의 생성과 균열 역사 규명
남극에서의 우주 관측	• 태양풍 발생에 따라 유입되는 고에너지 입자의 이해 • 빙저호 연구를 통한 목성, 토성의 위성 환경 추측 • 운석을 이용한 태양계 형성과 우주생물학 연구
남극 생물의 진화와 생태	• 남극 생물의 진화 과정 규명 • 변화하는 남극 생태계 관찰 및 변화 원인 규명 • 환경변화에 민감한 생물종 규명
남극에서의 인간 영향 및 저감방안	• 현재 남극 출입 규제의 효과 • 국제정책이 남극 방문 동기형성에 미치는 영향 • 남극 생태계의 현재와 미래 가치 및 보존방안

1.1.2. 주요국의 극지 정책 동향

■ 미국

- **(개요)** 남·북극 리더십과 영향력 유지·강화
- **(북극 연구방향)**
  - 미국은 극지연구의 리더십과 영향력을 강화하기 위해 국가 차원의 전략을 수립하고, 바이든 행정부 출범('21.1) 이후 북극협력 관련 정책적 관심도 증가, 양자협력 내실화 위한 환경 조성됨
  - 기후변화 대응, 환경보전에 대해 전향적 자세 유지, 북극연구와 안보관리 강화 추세 : 북극해 안보, 기후변화 대응, 자원 개발 중요성, 원주민 역할, 국제협력의 중요성 등을 강조하며 북극에 대한 영향력 강화에 예산 집중
  - 2010년을 전후하여 북극해 관련 이슈의 적극적 관여 및 국가적 이익을 위한 국가 전략과 구체적인 실행계획 수립, '북극지역정책(Arctic Regional Policy, '09)'*을 비롯해 미국 '북극지역 안보전략('21.1, 국토안보부)' 등의 북극정책을 내놓고 있음

    * 주변국들과의 북극권 경쟁에 대응하기 위해 최초로 자국을 '북극해 국가(Arctic Nation)'로 규정(2008)

  - 북극이 주는 기회와 위기 속에서 주도적으로 대응하고 국제적 지위 강화를 위해 안보 및 책임 있는 개발, 국제협력을 주요 전략으로 하는 「북극권 국가전략(National Strategy for the Arctic Region)」 발표(2013)
  - 북극연구 5개년 계획(Arctic Research Plan: 2022~2026)」을 수립하여 연방기관의 북극연구 프로그램을 개발하고 보조금 지원 및 관리를 위한 가이드라인 제시

[미국의 북극 5개년 연구계획][33]

주요정책 동인	웰빙 스튜어드십 보안 북극-지구시스템
우선순위	지역사회의 회복력 및 건강 북극시스템 상호작용 지속가능한 경제와 생태 위험 관리 및 위험 완화
기본활동	데이터 관리 교육훈련 및 역량강화 모니터링, 관찰, 모델링 및 예측 참여 연구 및 연구에 대한 원주민 리더십 기술 적용 및 혁신

- 조 바이든 행정부가 북극권 특사 임명(기존의 북극권 조정관직을 격상, “미국의 이익과 북극권 동맹 및 파트너와의 협력 증진”)[34]
- 연구개발 계획 뿐 아니라 북극권 활동에 따른 환경오염과 원주민 피해 예방 내용을 포함한 ‘북극 연구수행 원칙(Principles for the Conduct of Research In the Arctic)’을 마련
- ‘2021 북극평가보고서(Arctic Report Card)’ 발표(NOAA, ‘21.12) : 북극은 더 따뜻해지고 눈보다 비가 오는 곳으로 변화하고 있으며, 이의 영향은 북극 시스템 전반에서 나타나고 있다고 보고, 북극에서의 기후변화 현상이 집중호우와 산사태 등으로 인간의 삶에도 점차 위협이 되고 있다고 강조하면서 이러한 위협을 파악하기 위한 국제사회의 협력 촉구

• **(남극 연구방향)**

- 남극의 평화적 이용을 주도하면서 개별국가에 의한 영유권 주장에 강하게 반대하는 한편, 남극에 대한 실질적인 연구를 통해 남극조약 관련 회의에서 자국의 위상과 영향력 확대
- NSF-OPP에서 남극지역과 생태계 이해, 전 지구에 미치는 영향, 남극 고층대기와 우주연구 기반 활용을 목표로 연구사업 지원 및 인프라 운영
- 국립과학재단(NSF-PLR)에서 극지와 생태계 이해, 전 지구에 미치는 영향, 극지 고층대기와 우주연구 기반 활용 등 다양한 분야의 연구사업을 조정·관리하고 실제 연구는 미국 내 대학과 연구기관에서 수행

■ 영국

• **(개요)** 북극지역에서의 높은 협력과 낮은 긴장 유지 노력, 북극지역에서의 안보 및 안정 보전 강화[35]

• **(북극 연구방향)**

1) 파트너십 및 협력 :

- 영국은 북극이사회 옵서버 국가로서의 북극이사회에서의 역할 이행
- 다자간 포럼에 대한 참여 및 협력 강화

---

33) 출처 : ARCTIC RESEARCH PLAN 2022~2026(2021.12, The IARPC (Interagency Arctic Research Policy Committee)). IARPC was established by the Arctic Research and Policy Act of 1984 (ARPA) to facilitate coordination and cooperation in Arctic research. Now a subcommittee of the National Science and Technology Council (NSTC), IARPC plays a critical role in enhancing scientific monitoring and advancing Arctic research through the coordination of Federal agencies as well as domestic and international collaborators. Every five years, IARPC is required by law (ARPA) “to prepare and execute an Arctic Research Plan in coordination with the U.S. Arctic Research Commission, the Governor of the State of Alaska, residents of the Arctic, the private sector, and public interest groups.” The Arctic Research Plan 2022~2026 is the third plan since IARPC became a subcommittee of the NSTC and builds from the successes and communities of practice established by previous plans. It seeks to integrate these communities and create cross-cutting foci which require a focused research effort.

34) 연합뉴스(‘22.08.27, 미국, ‘북극권 특사’ 신설…패권다툼 가열 속 중·러 견제)

35) 발췌 ; KOPRI의 극지정책아카이브(‘23.03)

2) 기후, 사람 및 환경 보호 :

- 기후 변화에 대해 연구하고, 북극 기후 안정성을 증진하기 위해 행동 강화
- 북극 원주민을 포함한 북극 지역 거주민의 이익, 견해, 권리 존중
- 북극 생물다양성을 보호하고, 환경 위협 대처 및 북극 해양 및 육상 자원의 지속가능한 관리를 위해 파트너와 협력
- 북극 과학의 선두주자로 지속적으로 활동하고 기후 변화의 전 세계적인 이해에 기여할 수 있는 연구를 포함하여 국제 협력 연구의 활동적인 파트너 수행

3) 안보 및 안정 보전 :

- 북극 안보 및 국제 질서에 대한 도전에 영국의 권리를 주장할 것이며, 국가 인프라 및 동맹국의 이익을 보호하는 등 북극 안보를 위해 활동
- 북극에서의 법적 틀(legal framework) 유지 및 건설적인 국제 협력 지지
- 영사 서비스를 통해 북극 지역에 있는 영국 국민 활동의 안전을 보장

4) 공동 번영 증진 :

- 지속가능하고 책임 있는 경제 개발을 통한 녹색 전환을 지원하여 북극 지역 번영과, 녹색운송 및 지속가능한 어업 등 영국 기업을 위한 경제적 기회 촉진

※ '22년 3월 영국 국방부의 북극전략 발표 요지

- 북극이 어떻게 변화하고 있는지와 더불어 북극권 내의 정부 및 비정부 행위자들의 활동에 대한 이해 향상
- 북대서양조약기구(NATO), 북부그룹(Northern Group), 원정군을 포함한 지역 연합국 및 파트너와 협력하여, 가능한 경우 모든 영역에 걸쳐 정책, 활동 및 역량 조정
- 북극에서의 훈련, 협력 및 작전을 포함하여 일관된 방위 태세, 주둔 및 관심 유지
- 북극 지역을 위해 연구 개발에 대한 투자를 포함한, 지속가능하고 현대화 되었으며 균형적인 국방 능력 개발

■ 독일 북극 정책(외교부)의 가이드라인 발표('19.08)[36]

- **(주요 내용)**
  - 지구온난화는 북극의 해빙을 감소시키며 북극을 경제적으로 이용할 수 있게 만들어주었음. 이로 인해 독일 연방정부는 북극 자원을 평화적·환경친화적·지속가능하도록 개발하는 것을 강조하고 있음. 이는 매우 높은 환경 기준과 환경 파괴에 대한 책임제를 확립하는 것을 포함하며, 북극해권 국가들과 북극이사회 회원국들의 역할이기도 함

36) 발췌 ; KOPRI의 극지정책아카이브('23.03)

- 독일 정부는 북극의 생태학적 민감성과 원주민들을 배려하는 것과 같은 북극의 특수성을 고려하여, 지속가능한 경제 개발을 위한 북극 정책을 강구하고 있음
- 독일의 높은 기술력과 환경기준으로 북극해 항로를 통과하는 국제 선박의 자유통행권을 확실시하기 위해 노력하고 있음
- 또한 북극의 독특한 환경, 생활환경, 생물학적 다양성을 보호하는 것을 최우선 과제로 여기고 있음
- 독일 연방정부는 북극 정책을 형성하는데 협력에 기초한 자유롭고 책임 있는 과학연구를 중요하게 인식하고 있음. 또한 북극과 관련된 기존의 국제 협약과 조약을 유념하고 있음. 유엔해양법협약(The United Nations Convention on the Law of the Sea), 해양오염방지협약(MARPOL 협약, The MARPOL Convention), 해양 환경 보호 및 생물학적 다양성에 관한 협약(The conventions for the protection of the marine environment and on biological diversity), 지역 협약(Regional agreements)은 이 점에서 특히 중요함. 그리고 북극 옵서버 지위를 통해 북극이사회에 대한 참여를 강화하고 협력하는 것을 목표로 함.
- 독일 정부는 적극적인 EU 북극 정책을 지원하고, EU의 공동 외교 및 안보 정책과 관련하여 북극 문제의 전략적 통합 및 수평적 일관성을 보장하기 위해 노력하고 있음. 이것은 환경 보호, 연구, 산업 및 기술, 에너지 및 원자재, 운송, 어업 분야에도 적용됨

■ 중국

- **(개요)** 국가 차원의 대규모 극지연구 및 개발활동 투자 추진
- **(북극 연구방향)**
  - 1990년대부터 과학연구를 목적으로 북극해 활동을 시작하여 최근 자원 개발 및 연구를 위한 전방위적 활동 진행
  - 2004년 북극 스발바르군도 스피츠베르겐섬 내 니알슨과학기지촌에 황하기지 개소(우리나라 2002년 북극다산기지 개소보다 2년 뒤)로 독자적인 육상 기반 북극연구 시작
  - 2007년부터 북극이사회 잠정옵서버로 활동, 2013년 우리나라와 함께 북극이사회 정식옵서버 지위 획득
  - 2012년부터 '북극권 인접국가(near-Arctic state)'라는 신조어와 '사용하기 위해 보존(To preserve it to use it)[37]'이라는 정책적 기조를 바탕으로

37) Solli, Per Erik et al.(2013), "Coming into the Cold: Asia's Arctic Interests," Polar Geography, Vol. 36, No.4, p. 258.

북극지역 개발을 둘러싼 경쟁에서 우위를 점하기 위해 북극외교에 주력

- 2018년 1월 중국정부 최초의 '북극정책백서'* 발간(중국의 국가부흥정책과 북극정책을 연동하는 전략 수행: 국제사회에서의 중국 국가위상 제고와 경제패권국으로의 정체성과 역할 정립)

* 기후변화 대응, 과학연구 및 탐사와 국제협력 등 기존 과학연구 외에 에너지와 광물자원 탐사나 개발, 친환경 관광자원 개발참여, 북극항로, 수산 등 경제활동 참여 및 기후변화 관련 북극해빙 변화 감시 등 연구와 인프라 투자를 통해 영향력을 꾸준히 확장하고 있음

- **(남극 연구방향)**
  - 남극활동을 국가적인 해양진출 전략의 차원에서 접근하고 있으며, 우주개발계획과 더불어 극지연구의 전략적 체계와 인프라 확충
  - 남극 2개 상주기지에 이어 2009년에 남극 쿤룬기지를 건설하고, 신규 쇄빙연구선(10,000톤급) 건조 추진 등 극지연구에 대규모 투자를 통하여 남·북극 영향력 증대
  - 남극 PANDA* 프로그램으로 해양-해빙-대기 상호작용, 빙붕과 해양의 순환작용, 기지 주변 종합 모니터링, 빙하탐사 분야 연구활동 역점

* PANDA(Program of Antarctic Nova Disciplines Aspects): Prydz Bay, Amery Ice Shelf and Dome A section 대상 다학제 간 탐사 프로그램

  - 극지해양과학, 극지생물과학, 극지고층대기 및 극지빙하로 구분하여 4개 연구프로그램 중심 극지 연구활동 추진

■ 일본

- **(개요)** 극지연구 및 정책 등에 전략적 투자와 연구 인프라 강화
- **(극지 연구방향)** 전 지구적 기후변화 연구와 환경관련 연구투자 비중을 확대하는 등 연구 활동에 대한 전략적 투자와 연구 인프라 확대*에 대한 관심 고조

* 아시아에서 가장 먼저 남극활동 수행(1912년 남극대륙 탐사, 1957년 남극기지(Syowa) 개설, 1959년 '남극조약' 원초 서명국, 1990년 국제북극과학위원회(IASC)에 가입/일본 극지연구소(NIPR, 1973년 개소) 내에 '북극환경연구센터' 출범, 1991년 니알슨과학기지촌에 북극기지(Raben) 개소(니알슨 내에 2019년 NIPR Observatory로 신축 이전), 2009년 쇄빙연구선 뉴시라세(12,500톤급)를 건조하여 남극탐사활동 지원업무와 연구 활동 수행[38]

38) 일본 NIPR(National Institute of Polar Research) https://www.nipr.ac.jp/english/outline/ numeral/03.html.

- 현장관측 기반 자료와 시료분석, 데이터 해석, 모델링을 통한 '지구과학', '환경과학', '태양계 및 행성과학 등의 우주과학' 등 종합지구시스템 공동연구 추진
- 2009년 잠정옵서버에 이어 2013년 북극이사회 정식옵서버 지위 획득 후, 북극연구에 대하여 북극권 정보수집, 자원 개발을 중심축으로 하는 국가 차원의 전략적 투자 확대
- 일본 문부과학성(MEXT)은 2015년부터 국가 주도 대형 북극연구사업인 ArCS 프로그램(지속가능한 북극을 위한 도전; Arctic Challenge for Sustainability) 주도 (NIPR, JAMSTEC, 홋카이도 대학 등이 공동으로 2020년까지 진행), 일본 '북극정책' 발표(기후변화 대응 연구개발/국제협력/지속가능 활용 등으로 구성). 이후 2020년에 ArCS II(Arctic Challenge for Sustainability II) 프로그램 발굴, 2020~2025년의 5년 단위사업(북극의 실질적 문제해결과 정책결정, 과학성과 창출 등) 수행 중
- 해양정책연구재단(OPRF[39])*에서는 '북극해의 지속가능한 이용을 위해 일본이 즉각적으로 수행해야 할 시책'을 발표하여 북극해 활용을 위한 정책방향 제시(2012)

* OPRF는 '일본북극해회의'를 조직하여 2년간의 북극정책 연구를 수행하였으며 행정조직, 선박, 항로 등 북극관련 전반을 포괄하는 9가지 분야에서 정책 제언

■ 러시아

- **(개요)** 북극해와 동토, 대륙붕 등 영역에서의 개발과 활용에 가장 적극적인 국가로, 국가정책에 따른 체계적이고 공격적인 북극해 활용 전략 추진

  ※ 러시아는 북극권 국가 중 가장 적극적으로 북극개발전략* 추진, 2007년 8월 북극점에 러시아 국기 설치

  * 2035 북극항로인프라개발계획('19.12 승인), 2035 러시아 북극정책 기본 원칙('20.3 승인), 2035 북극개발 및 국가안보전략[40]('20.10 승인)

  - 2021년 5월부터 2년간 북극이사회 의장국으로 활동

39) Ocean Policy Research Foundation, OPRF는 일본재단(Nippon Foundation)소속의 연구재단으로 민간 연구재단의 성격을 가지고 있으나, 주요 요직은 정부 고위관료 출신 인사가 포진하고 있으며 정부정책 수립에 관여함

40) 주러시아 대한민국 대사관(https://overseas.mofa.go.kr/ru-ko/brd/m_23122/view.do?seq=1346975).

러시아 정부는「북극정책원칙 2035」(3.5 발표)의 후속조치로 북극 관련 국가안보·경제·사회·과학기술·문화 등에 관한 「북극개발 및 국가안보전략 2035」 발표

(주요 내용)[23]
o (북극 개발 시 고려사항)
- 혹독한 기후·자연환경 및 기후변화
- 경제활동 및 생활 유지에 고비용 수반 및 인프라 미비 등 경제사회 제반 상황
- 북극항로의 지리적·역사적·경제적 중요성
- 북극 내 지정학적 갈등 발생 가능성 증가 등

o (도전 및 위협요소)
- (기후변화) 온난화
- (사회) 인구 감소와 삶의 질 수준 등 열악한 사회적 인프라
- (경제) 교통·물류 인프라 미비 등으로 기업 경쟁력 악화
- (북극항로) 항만·쇄빙선단 등 인프라 부족
- (군사안보) 전투태세 향상 필요 등

o (주요과제) 아래 분야별 주요 과제 선정 (아래 외에 지역별 주요 과제 제시)
- (사회발전) 보건의료 현대화, 교육, 원주민 문화 보전, 교통 인프라 개선 등
- (경제발전) 특별경제구역 지정, 민간 투자에 대한 국가 지원, 러시아산 장비·제품 활용도 제고, 수산·농업(온실재배)·임업 현대화 등
- (인프라) 북극항로 인근 해역 통합 인프라 발전, 북극항로 운항 선박 관리를 위한 해양작전본부 창설, 원자력 쇄빙선 건조, 국제통과운송 확대 등
- (환경보호) 특별자연보호구역 지정, 기후변화에 따른 경제활동·인프라 조정 등
- (국제협력) 북극을 평화·안정·상호호혜협력 지역으로 유지, 북극 연안국의 권리 및 국가이익 보호를 위해 북극 국가들과 협력, 2021-23년 북극이사회 의장국의 성공적 수임, 외국 자본·투자 유치를 위한 협력 등
- (군사안보) 작전환경 개선, 군 현대화, 군사기지·보급 인프라 정비 등

o (단계별 과제)
- (1단계: 2020~24년) 경제사회발전 가속화를 위한 메커니즘 조성
- (2단계: 2025~30년) 북극지역 경제활동 경쟁력 강화
- (3단계: 2031~35년) 대륙붕 개발, 북극항로 경쟁력 확보 및 국제 컨테이너 운송 기반 마련, 환경보호 등

• **(방향)**

- 해양 분야의 최상위 정책 전략인「2030 신해양독트린(2030 Maritime Doctrine of Russian Federation)」(2015)[41]의 기조하에 국가안보 차원에서 북극정책 시행
- 북극해, 태평양, 흑해, 인도양, 카스피해 등의 지역을 대상으로 해군력 증강과 훈련 강화
- 해양정책 중 북극해 관련 정책은 경제성이 부각되고 있는 북극항로 개발에 관한 사항을 주요 정책 추진방향으로 설정
- 북동항로 연안국가로 일찍이 항로 활용에 관심을 가져왔으며 항로에 대해 자국의 연안 관할권을 주장하는 등 북극항로 활용에 대비한 정책 마련
- 북극해 정책을 위한 기본원칙인 「2020 북극정책(Russian Federation Policy for the Arctic to 2020)」을 마련하여 정책적 목표와 함께 군사

41) 출처 : 2015년 해양환경안전학회 추계학술발표회, pp.174 - 176. (러시아 푸틴이 승인한 2030 신해양독트린(2015.07.26. 발표). '북극에서 남극까지'란 기치아래 "신해양독트린에 기초해 활동하는 러시아연방은 단호하고 순차적으로, 그리고 굳건히 세계 대양에서 그 지위를 강화할 예정"이라고 명시)

활동 강화와 영토 확장을 최우선순위로 설정

- 「2020 북극계획」에는 연안가스 수화물 개발, 대륙붕 경계 확장, 북극항로 활성화 및 통합관리 시스템 구축 등을 포함
- 「2020 북극개발전략(The Development Strategy of the Russian Arctic zone for the period up to the 2020)」을 수립하여 기초·응용연구 및 북극항로 개발을 중시하는 북극정책 추진체계 및 세부적 실행방안과 프로그램 마련
- 구체적인 발전방향 및 전략에 앞서, 러시아의 북극개발에 위협이 되는 요소들을 사회·경제적, 과학기술적 관점으로 구분하여 평가
- 북극항로청(NSR Administration)이 안전활동 강화 및 NSR 운항허가 주관
- 러시아 북극남극연구소(AARI)가 과학연구 수행 주관 : 1934년부터 북극권 해빙 모니터링/지도 제작 및 안전 정보제공 등
- 최근 6/15~6/18일에 개최된 러시아 상트 페테르부르크 국제경제포럼(SPIEF: St. Petersburg International Economic Forum)에서 러시아가 직면한 새로운 현실에 적응하고 지정학적인 이유로 인해 동쪽(아시아)으로 방향 전환을 하고 있음[42)]

■ 캐나다

- **(개요)** 북극해 개발 및 동토 영역을 통한 자국의 이익과 함께 환경보존과 원주민에 가장 많은 관심을 갖고 정책을 추진하는 나라로 개발과 보존의 균형적인 정책 수립
- **(방향)**
  - 「캐나다 북방전략(Canada's Northern Strategy)」 발표[43)]하여 북극지역에 대한 비전을 제시하고 그에 따른 정부의 활동과 계획 제시(2009)
  - 국가 전체 영토의 40%가 북극지역에 포함되며, 10만 명 이상의 북극 원주민이 고유의 삶의 방식을 유지하며 살아가고 있는 세계 최대의 북극권 국가로 북극환경보호와 책임 있는 자원개발 강조
  - 북극이사회 의장국 수행 시, 「북방전략」의 확산과 북극해에서 적극적인 외교정책을 추진하기 위해 「캐나다의 북극외교정책(Canada's Arctic Foreign Policy」 발표(2013)
  - '우리의 북극(Our North), 우리의 유산(Our Heritage), 우리의 미래(Our Future)'라는 슬로건 아래 북극지역에서의 정책 수립
- 2018년 CHARS(Canadian High Arctic Research Station)를 캠브리지베이에

42) 출처 : 영산대 북극물류연구소(2022년 6월호)-북극물류동향

43) 출처 ; The Polar Connection(https://polarconnection.org/profile/prpi/, 2022)캐나다가 북극 영유권을 강화하기 위한 전략으로서, 북극에 대한 기득권 선점을 노린 이해당사국들 간 경쟁이 치열해지고 있는 가운데 캐나다 로렌스 캐논 외무장관 등은 기자회견을 열고 캐나다의 북방 전략인 우리 북극(our north), 우리 유산(our heritage), 우리 미래(our future)란 제목의 보고서를 발표(2009.07). 보고서는 캐나다의 북극 비전과 대규모 투자 계획 등이 담겨 있으며 영유권과 사회경제 개발, 환경 보호와 지배력 강화 등이 캐나다 북방전략의 4대 핵심 개념 제시

건설, 운영하고 있으며, 북극권에서의 대기-동토-생태계 등 분야에서의 환경 변화 연구를 집중 투자하고 있음

- 「북방전략」의 핵심은 북극해 국가로서의 자부심을 고취시킴과 동시에 북극 협력 파트너들(원주민 포함)과의 긴밀한 협력관계 강조

• 캐나다 북극지역인 누나부트준주에서 연구를 수행하기 위해서 Nunavut Research Institute에 영어와 원주민어로 된 연구지원서를 제출 후, 연구 허가를 받고 진행

[캐나다 「북방전략」의 4대 세부전략][44]

4대 전략	실행계획	주요 활동 및 성과
북극 주권행사	• 북극지역에서 캐나다의 책임과 리더십 강조	• 정기적인 영토방위(감시·순찰)업무 수행 • 북극해의 안전한 활용과 해상교통관리를 위해 정보 제공을 목적으로 3,500백만 달러 투자
북극환경보호	• 해양오염방지 법안 강화 • 폐광 시설을 정리	• 북부지역에 청정에너지 기술개발·보급을 위해 8백만 달러 투자 • 자연환경을 보존, 야생동물 보호를 목적으로 5백만 달러 투자
북극경제 및 사회개발 촉진	• 자원개발을 위한 제도 개선 • 원주민의 경제활동 참여	• 풍부한 자원을 개발하고 활용하기 위한 규제 체제를 개선, 민간투자 진입장벽 완화 • 북극지역의 경제를 활성화하고 거주민의 경제적 참여 기회를 확대하기 위해 8천만 달러 투자
북극지역의 자치행정 개선	• 원주민과의 갈등관계 청산 • 원주민 자치권 보장을 하는 효율적인 국가 지배체제 구축	• 1950년대 원주민 강제 이주정책에 대한 총리의 사과와 함께 원주민들의 존재와 가치 존중 • 전체 영토의 1/5에 해당하는 누나부트준주에 토지 및 자원관리권한 이양

■ 제3차 북극과학장관회의('21.05, 일본에서 개최, EC와 27개국 및 북극 원주민 조직 참여)[45]

• **(개요)** 북극지역에서의 높은 협력과 낮은 긴장 유지 노력, 북극지역에서의 안보 및 안정 보전 강화

• **(북극에서의 국제 연구와 미래 협력 발전 강화)**

1) 과학 요약

(1) 테마 ① **관찰**: 관찰 네트워크 구현, 데이터 공유

- 통합 북극 관측 시스템으로의 진전
- 다양한 환경 구성 요소의 관찰 및 모니터링
- 위성 및 신기술 관찰
- 데이터 관리

44) 출처 : 캐나다 북방전략(http://www.northernstrategy.gc.ca)
45) 발췌 ; KOPRI의 극지정책아카이브('23.03)

(2) 테마 ② **이해**: 이러한 변화의 전지구적 영향에 대한 북극 환경 및 사회 시스템의 이해 및 예측 능력 향상
- 기후 및 기상 예측 강화
- 얼음 이해
- 에코시스템 이해
- 북극 환경의 오염 이해
- 북극 사회 이해
- 인간을 포함한 에코시스템 구성 요소 간의 연계성 이해

(3) 테마 ③ **응답**: 지속 가능한 개발 운영, 취약점 및 복원력 평가, 지식 적용
- 환경 변화 영향 및 식품 보안
- 인간의 건강에 미치는 영향
- 거버넌스 및 윤리
- 산업 발전과 사회경제적 문제

(4) 테마 ④ **강화**: 역량 구축, 교육, 네트워킹 및 복원력을 통한 차세대 준비
- 협업, 조정, 과학 역량 및 네트워킹
- 회의
- 교육, 훈련 및 지원
- 자원, 자금
- 로컬 프로젝트
- 인프라 및 데이터

2) 공동성명

(1) 관찰 네트워크 구현, 데이터 공유 관찰
- 장기적 조치: 대기권, 극저온권 추적에 필수적인 기존 장기 관측 프로그램의 강화 및 협력 장려 등
- 단기적 조치: SAON 작업 강화, 새로운 기술 개발, 북극 배치 촉진, 기술 혁신 발전 공유 등

(2) 이러한 변화의 전지구적 영향에 대한 북극 환경 및 사회 시스템의 이해 및 예측 능력 향상
- 장기적 조치: 기후 변화 완화 및 적응을 포함한 대응 계획 수립, 기후 변화에 대한 연구 및 공동 생산 장려 등
- 단기적 조치: 국제 활동의 성공을 기반으로 한 데이터 분석과 합성 촉진, 북극 변화와 관련된 위험 고지 등

(3) 지속 가능한 개발 운영, 취약점 및 복원력 평가, 지식 적용
- 장기적 조치: 북극 이사회 실무그룹과 전문가 그룹, 세계기상기구(WMO), 유엔환경계획(UNEP), IPCC, IPBES, 국제해양기구(IMO), 국제해양위원회(IOC) 및 기타 중요한 과학적 평가를 생성하는 그룹과의 지속적 협업 장려
- 단기적 조치: 기후 변화에 대한 대응을 지원하는 혁신 및 기술 프로젝

트의 개발·확장 장려, 북극 기후변화 위험 지원 연구 육성 등

(4) 역량 구축, 교육, 네트워킹 및 복원력을 통한 차세대 준비

- 장기적 조치: 초기 북극 연구자, 전문가 및 원주민을 채용·유지하기 위한 전략 개발, 관료적 장벽을 줄이고 북극과 비북극 국가 간 연구 및 교육 시설의 접근성을 높이는 다자간 합의 개발과 적용 장려 등
- 단기적 조치: 현장 관측소 및 선박 기반 연구에 다국적 참여 장려, APECS 및 PEI와 협력하여 북극 전략 커뮤니케이션 개발 장려 등

3) 향후 방향

(1) **관찰:** 원격지 및 접근이 어려운 지역에 자율 관찰 플랫폼을 일상적으로 구축하기 위한 추가적인 노력 필요, 지역사회 중심 연구 강화 등

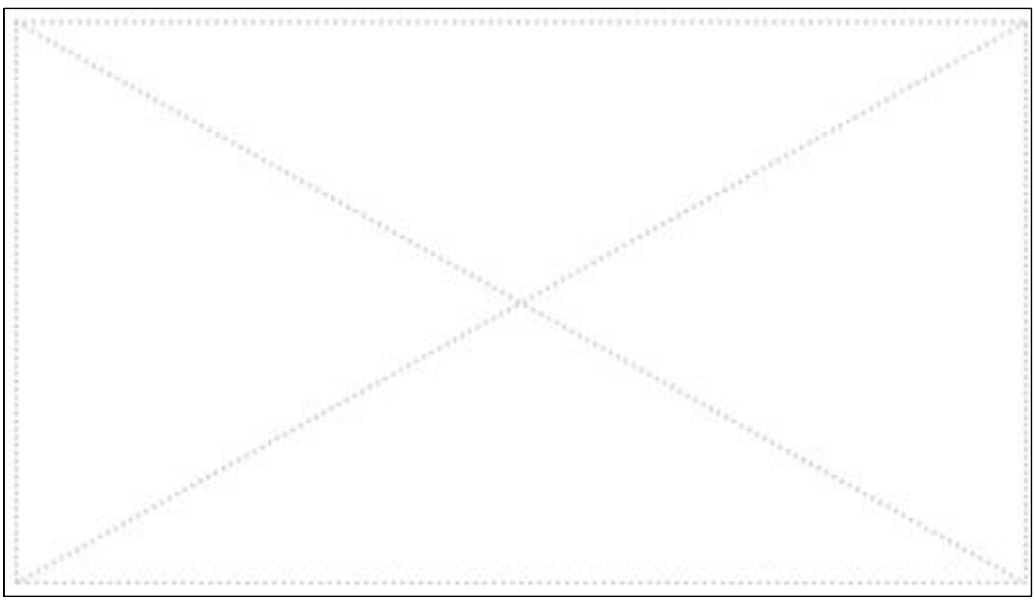
(2) **데이터:** 데이터 커뮤니티 구축, 교육 및 훈련, 조정, 참여 확대를 지원하고, 기존의 효과적인 이니셔티브 간 인터페이스 구축 촉진 등

(3) **연구 계획:** 빙하, 빙상, 해빙 및 영구 동토층이 북극 지역사회에 미치는 영향 조사, 기후 변화 시나리오와 연계된 연구 중심 위험 평가 개발 등

(4) **교육 및 지원**: PEI 및 APECS와 같은 최신 국제 네트워크의 안정성 강화, 국제 교육 및 훈련 기회 및 국제 북극 연구 원정 참가 지원, 조기 직업 연구자를 위한 지원 등

(5) **원주민 능력 개발**: 원주민 대상 문화적으로 적합한 학습 및 훈련 기회 지원, 과학자·과학 프로그램 관리자의 문화 교육 및 훈련 지원 등

(6) **국제적인 노력**: 북극 연구국 평가 및 기타 합성 및 조정 활동에서의 IASC의 노력 지원, IASSA, U북극, APECS, PEI 등의 조직에 대한 참여 촉진 등



[글로벌 극지활동 동향][46]

1.2. 국내 극지 정책

1.2.1. 과학기술 정책

■ 「제5차 과학기술기본계획(‘23~‘27)」(‘22.12)[47] 전략 수립과 방향

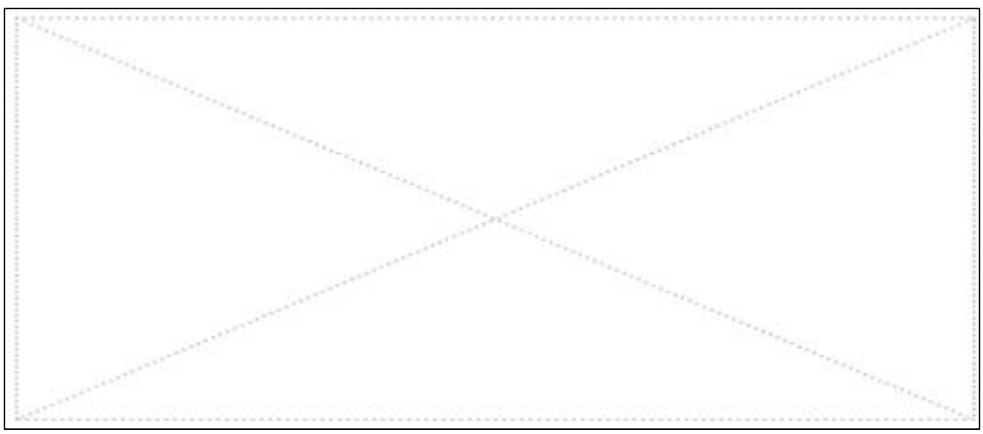
- (추진배경) 「제4차 과학기술기본계획(‘18~‘22)」의 종료시점이 임박함에 따라, 후속계획을 적시에 수립하기 위한 방향성 마련 필요
- (추진방향) 과학기술정보통신부는 ‘과학기술기본법 제7조(과학기술기본계획)’에 따라 대내외 환경 분석*을 통해 향후 5년간 국가 과학기술 정책방향을 제시하는 과학기술분야에서의 최상위 계획을 수립
  - 경제, 사회, 외교 등 세계 질서의 대전환이 예상되는 대변혁기에서 과학기술 혁신을 기반으로 대한민국의 미래 재설계

※ 기본계획을 수립하기 위한 과학기술계와 주변 환경의 현실 파악 및 반영[48]

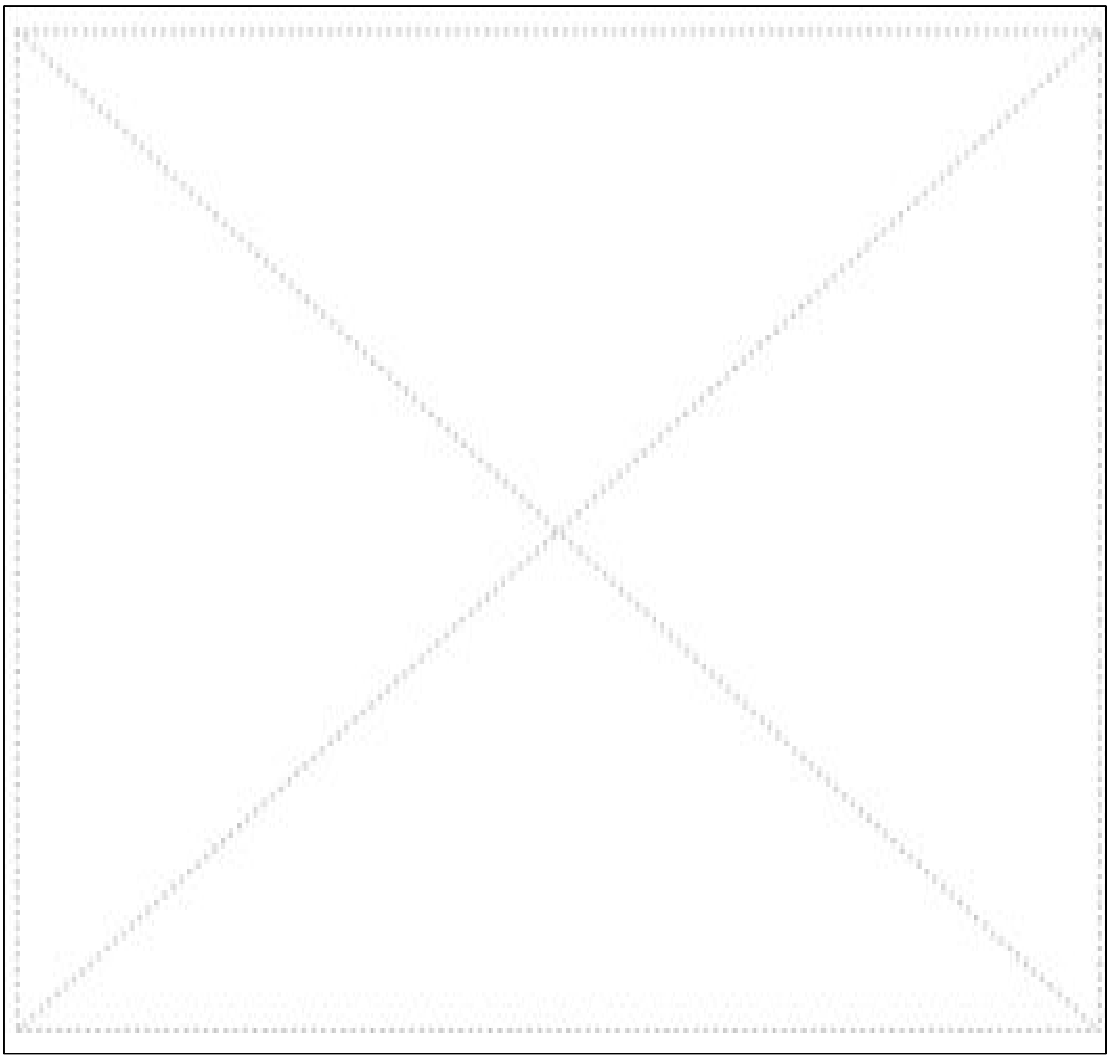
[분야별 현황 분석 및 미래 예측]

구분	현황 분석	미래 예측
기술	미·중 기술패권 경쟁 심화	우방국 중심 기술블록화, 기술규제 확대
경제	세계시장 지역화, 산업·일자리 격변	국가 간 격차 확대, 양극화 심화
사회	인구절벽시대 진입, 비대면생활 일상화	지역소멸 현실화, 사회적 갈등 확대
환경·안보	탄소중립 노력, 위기의 일상화	환경보전·위기대응을 위한 범세계적 노력

- (전략구성) 코로나19 이후 디지털 전환으로 인해 경제·사회 시스템 전반의 변화가 발생하였고, 기술패권·기후변화 등 글로벌 현안이 대두됨에 따라 이에 대해 미래 대응 과학기술기본계획의 전략[49]을 구성함



46) 제1차 극지활동진흥기본계획(2023~‘27) 요약 설명자료(‘23.03.16, 극지연구소 정책개발실)
47) 과학기술 기반 혁신정책 추진을 위한 「제5차 과학기술기본계획(‘23~‘27)」 수립방향(안), 국가과학기술자문회의 의안번호 제2호(‘21.08.18), 확정 발표(‘22.12)
48) 출처 : 제5차 과학기술기본계획(‘23~‘27) 수립방향
49) 출처 : 제5차 과학기술기본계획(‘23~‘27) 수립방향



[기본계획은 분야별 과학기술 혁신정책의 추진방향·성과목표·이행방안과
국가적 육성·보호가 필요한 국가전략기술분야 및 대응방향 제시로 구성됨]

※ 본 기획에서 다루는 핵심 주제들은 '전략3(생존): 인류와 국가의 생존보장을 위한 국제현안 해결'에서, 위기예측·대응·회복력 강화 및 우주해양 등 미지영역 개척과 신시장 창출을 중점적으로 추구하며, '전략4(혁신/도약)'과 매우 밀접하게 연계되어 있음

- **과학기술혁신체계(NIS) 고도화를 위한 국가 R&D 혁신정책[50] 추진방향**
  - 제5차 과학기술기본계획에서는 정책의 외연을 확장하여 기존 과학기술정책을 고도화함과 동시에, 국가 R&D 혁신방안의 국가혁신체계(National Innovation System, NIS 2.0) 개념을 바탕으로 국가·사회 전 분야 혁신방안 마련
  - 과학기술 진흥과 발전 중심의 과학기술 정책을 국가와 사회의 현안해결 중심으로 축 이동

50) 출처 : 제5차 과학기술기본계획('23~'27) 수립방향

[혁신정책과 기존 과기정책의 비교][39]

구분	기존 과학기술정책	과학기술 혁신정책
정책방향	과학기술 진흥·발전 중심	국가·사회 현안해결 중심
	지방과학기술 진흥을 위한 지역의 R&D 역량강화	지역소멸 문제에 대처하기 위한 과학기술 기반 지역자생력 강화
성과목표	양적 투입·산출 중심	정책의 질적 효과 중심
	기초연구 투자규모 2배 확대	R&D 투자 1억원 당 GDP 10억원 증가효과 창출
정책범위	R&D 위주 정책수단	R&D·비R&D를 포괄
	이공계 교육, 연구인력 지원	이공계 교육, 연구인력 지원 + 외국인 비자, 대학운영 혁신, 신규채용 조세 특례 등

1.2.2. 극지 정책

■ 제4차 남극연구활동진흥 기본계획(2022-2026)[51]

- (법적근거) 남극활동 및 환경보호에 관한 법률 제21조 및 동법 시행령 제26조

■ **남극활동 및 환경보호에 관한 법률 제21조**

① 정부는 남극에 관한 연구활동의 진흥을 위하여 5년마다 다음 각 호의 사항*이 포함된 남극연구활동진흥기본계획을 수립하여야 한다.

* 남극연구활동 추진 목표, 연구재원, 환경보호연구, 인력 육성, 과학기지와 시설물 설치·운영, 첨단연구장비의 개발 등

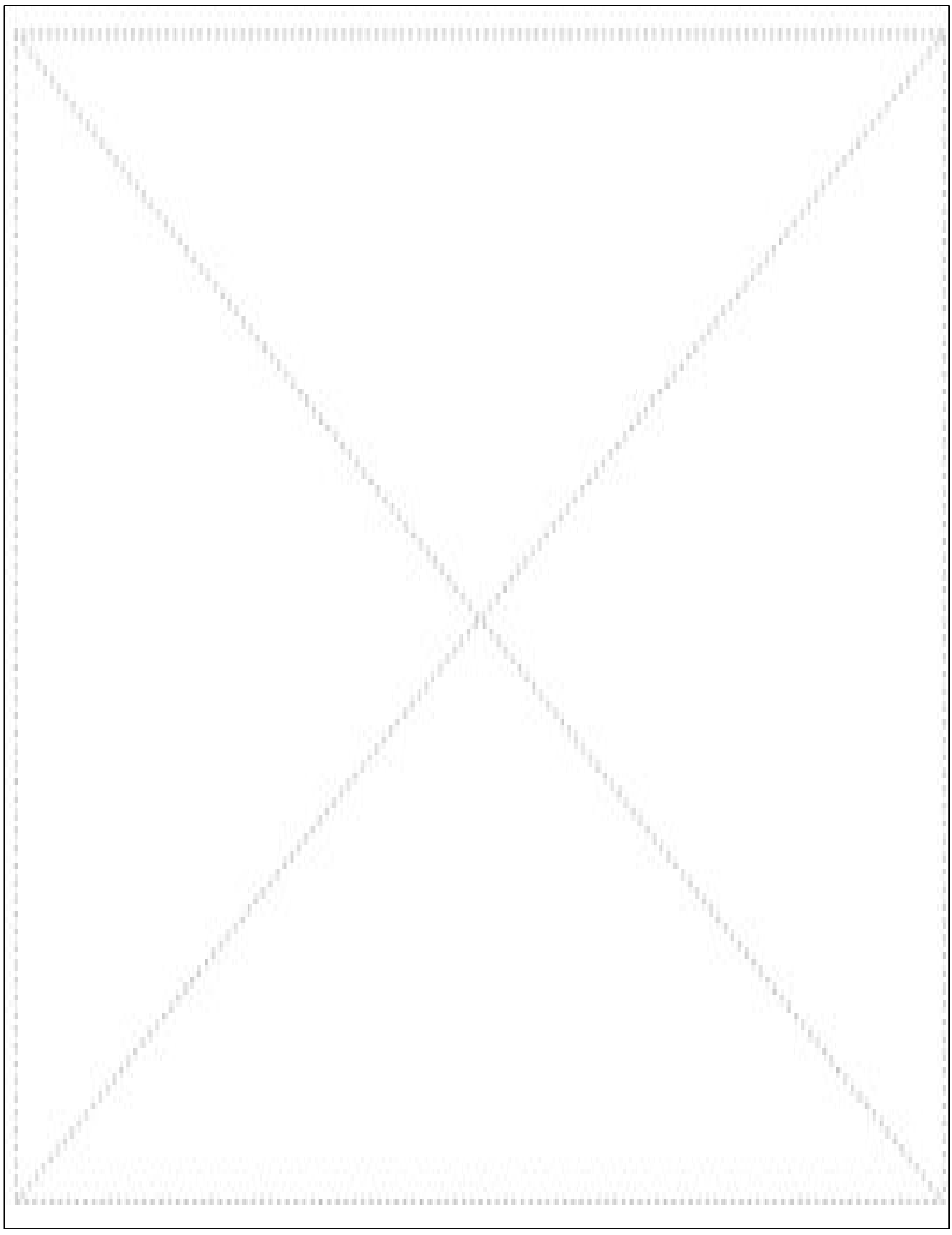
■ **남극활동 및 환경보호에 관한 법률 시행령 제26조**

① 해양수산부장관은 법 제21조제1항에 따라 관계 중앙행정기관의 장의 의견을 들어 5년마다 남극연구활동진흥기본계획을 수립하여야 한다.

- (주요내용) 정부는 『①핵심 연구인프라 확보 ②남극 연구역량 강화 ③남극 거버넌스 입지 확대』라는 3대 전략을 수립하고 이를 구체화한 8개 세부 추진과제를 제시함

※ 여기에서 본 극지기초원천기술개발사업 관련하여, '기후변화'와 '환경·생태보전'이라는 중점 주제의 현안 해결형 연구 역량 강화를 위해서, 남극지역에서의 고-저층 대기환경변화가 북극지역 및 중위도 지역과 어떻게 상관성이 있는지 고찰, 반영할 것임

51) 출처 : 관계부처 합동으로 발표('22.04)한 '제4차 남극연구활동진흥 기본계획' 자료



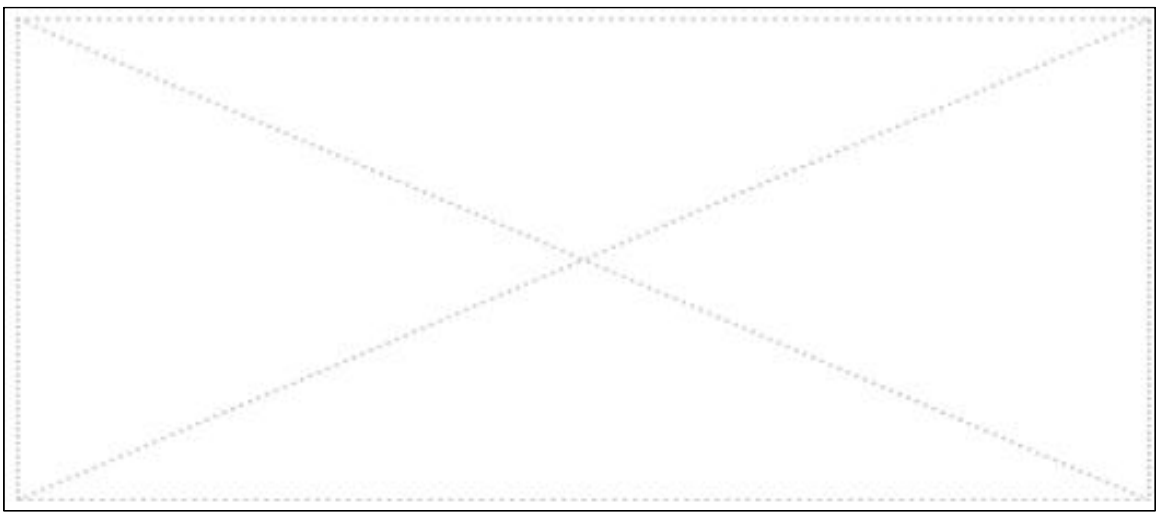
* 출처 : 관계부처 합동으로 발표(‘22.04)한 ’제4차 남극연구활동진흥 기본계획‘ 자료

■ 극지활동진흥법(2021.04.13. 제정, 10.14. 시행)

- **(목적)** 북극권 개발 수요 증가와 환경 변화에 대응해 우리 기업의 비즈니스 진출과 과학연구 확대위한 역량을 강화하는 新북극정책 마련필요. 이에, 이 법은 극지(極地)의 지속가능한 발전과 체계적인 극지활동의 육성·지원에 필요한 사항을 규정함으로써 국가경제의 발전과 국민의 삶의 질 향상을 도모하고, 국제사회에서 인류 공통의 문제 해결에 이바지함을 목적으로 함

> ▪ **극지활동진흥법 제6조**
> ① 해양수산부장관은 극지활동의 진흥을 위하여 중앙행정기관의 장과 협의하여 극지활동진흥 기본계획을 5년마다 수립하여야 한다. 이 경우 기본계획 중 남극의 연구활동 진흥에 관한 사항은 「남극활동 및 환경보호에 관한 법률」 제21조에 따른 남극 연구활동진흥기본계획과 연계되어야 한다.

- **(기본이념)** "①극지활동은 인류 공동의 이익에 적합하고 생태적·문화적·경제적 가치가 조화롭게 공존할 수 있도록 종합적인 관점에서 이루어져야 한다. ②극지활동은 극지환경의 보전과 조화·균형을 이루며, 극지의 지속가능한 발전에 부합하도록 미래지향적인 관점에서 이루어져야 한다."

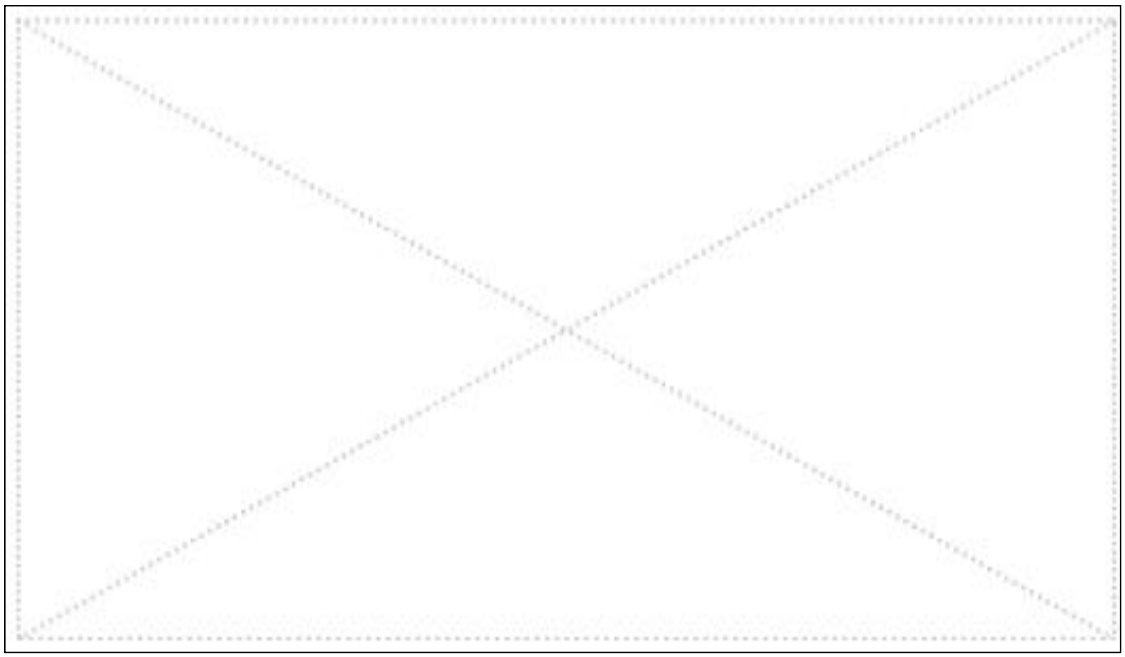


[제1차 극지활동진흥기본계획('23~'27)의 개념][52]

- **(주요 내용)** 연구개발, 전문인력 양성, 경제활동 진흥, 기반시설 설치 운영, 정보시스템 구축 등 극지활동 활성화 추진
  - (연구개발) 연구개발 촉진을 위한 시책을 수립하고, 산·학·연 협동연구, 국제공동연구 기술협력 활성화 등을 위한 지원
  - (인력양성) 극지활동 진흥에 필요한 극지연구 및 지원 전문인력을 양성하고 이를 효율적으로 활용하기 위하여 필요한 시책을 수립
  - (경제활동 진흥) 북극항로 개척 등 북극에서의 경제활동 진흥을 위한 시책을 수립하고 추진

52) 출처 : 제1차 극지활동 진흥 기본계획('23~'27), 극지 e야기 KPOPS(해양수산부-한국해양과학기술원부설 극지연구소) (https://www.koreapolarportal.or.kr/)

- (인프라) 극지 과학기지, 쇄빙연구선, 항공기 등 극지활동에 필요한 기반 시설을 설치하거나 확보하여 운영
- (정보시스템 구축) 극지 및 극지활동 관련 정보를 체계적으로 관리할 수 있는 통합정보시스템 구축·운영
- (환경보호 안전관리) 극지환경을 보호하고, 극지 사고의 예방과 사고발생 시 신속한 대응 등을 위한 안전관리체계 마련



[제1차 극지활동진흥기본계획의 5대 추진 전략 및 과제][53]

■ 2050 극지 비전

- **(추진배경)** 2018년 12월 우리나라의 지난 40년간의 극지활동과 정책성과 바탕으로 향후 30년의 극지 정책의 방향을 제시할 '2050 극지비전' 수립
- **(주요정책 방향)**
  - **기후변화를 예측하고 대응하는 극지연구 실현**
  - 극지에서의 기회를 극대화하는 극지경제 창출
  - **신뢰받는 극지협력 파트너로서의 위상 확보**
- **(추진전략)**
  - **기후변화에 선제적으로 대응하는 극지정책 추진**
  - 극지를 통한 새로운 에너지·자원 확보 노력
  - 새로운 성장동력으로서 극지 미래신산업 활성화
  - 극지연구 혁신 및 실용화 성과 창출
  - **국제사회의 극지환경 보전 노력에 적극 참여**
  - 교류 확대를 통한 북극 진출 교두보 확보
  - 남극 제3기지, 북극 제2기지 건설 등 정책역량 강화

53) 제1차 극지활동진흥기본계획(2023~'27) 요약 설명자료('23.03.16, 극지연구소 정책개발실)

2 극지 연구동향

2.1. 국외 연구동향

2.1.1. 글로벌 이슈 고찰

■ IPCC 제6차 보고서 중 제1워킹그룹의 보고서[54]에서 동토의 중요성 강조

- 워킹그룹 I (WG I, 자연과학적 근거, 2021년 8월) 보고서 및 2022년 발표한 워킹그룹 II (WG II, 기후변화 영향, 적응과 취약성 및 워킹그룹 III (WG III, 기후변화 완화) 자료 분석
- AR6 WGI의 목차 중 극지와 관련된 주요 챕터는, 다음과 같음
  - Summary for Policymakers : 2022년 5월 주요 부분 제출
  - Chapter 9: Ocean, cryosphere and sea level change
  - Chapter 12: Climate change information for regional impact and for risk assessment
  - Atlas
- AR6에서 중요하게 다루고 있는 극지역의 동토
  - 전 지구 영구동토의 변화에 대한 평가를 활용하고 보다 구체적으로 모델 평가 및 예측을 다루면서 기후시스템의 요소로서의 영구동토층의 물리적 측면에 중점을 두고 있음
  - 현재 전 지구 영구동토층의 면적은 약 22 ± 3 × 106 ㎢임(Gruber, 2012[55]). 영구동토층은 북반구 땅의 약 15%와 북반구 북쪽의 빙하가 없는 땅의 50% 이상을 덮고 있음(Zhang *et al.*, 1999[56]; Gruber, 2012; Obu *et al.*, 2019[57])
  - 20세기 전반부, 북부 영구동토층 지역의 약 20%가 취약한 열카르스트[58] 형성(Olefeldt *et al.,* 2016[59])이 기후변화에 대응하여 대규모 영구동토층을 더 빠르게 황폐화시킬 수 있음
  - 지역 영향 및 위험 평가를 위한 기후변화 정보[42] 정리 제시

54) IPCC sixth Assessment Report Working Group 1 (Climate Change 2021: The Physical Science Basis).

55) Gruber, S., 2012: Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation. The Cryosphere, 6, 221-233, doi:10.5194/tIII-6-221-2012.

56) Zhang, T., R.G. Barry, K. Knowles, J.A. Heginbottom, and J. Brown, 1999: Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere. Polar Geography, 23(2), 132-154, doi:10.1080/10889379909377670.

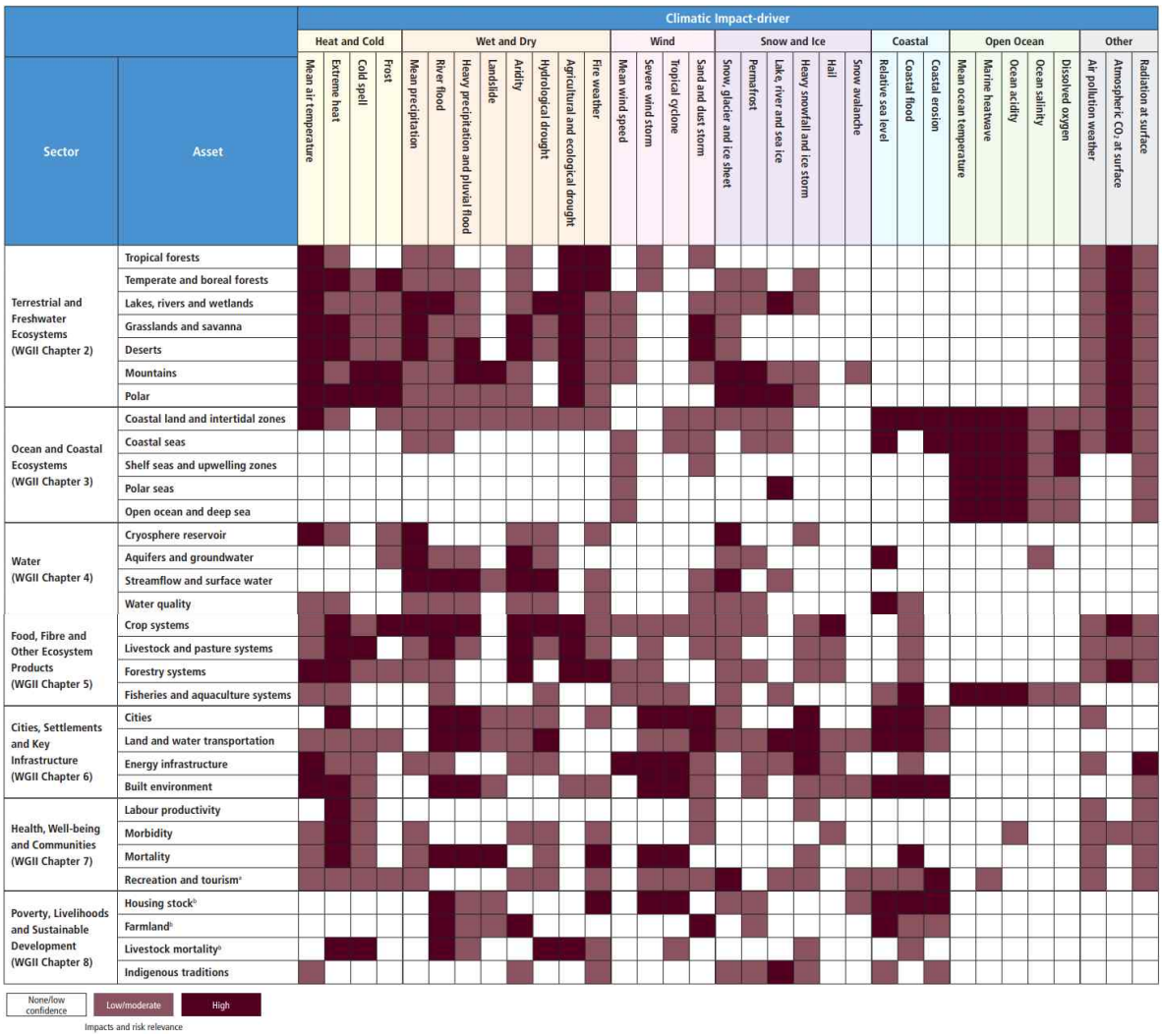
57) Obu, J. et al., 2019: Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000-2016 at 1 km2 scale. Earth-Science Reviews, 193, 299-316, doi:10.1016/j.earscirev.2019.04.023.

58) Thermokarst Process by which characteristic landforms result from thawing of ice-rich permafrost or melting of massive ice (IPA, 2005; Multi-language Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms. International Permafrost Association (IPA), 159 pp.

59) Olefeldt, D. et al., 2016: Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes. Nature Communications, 7, doi:10.1038/ncomms13043

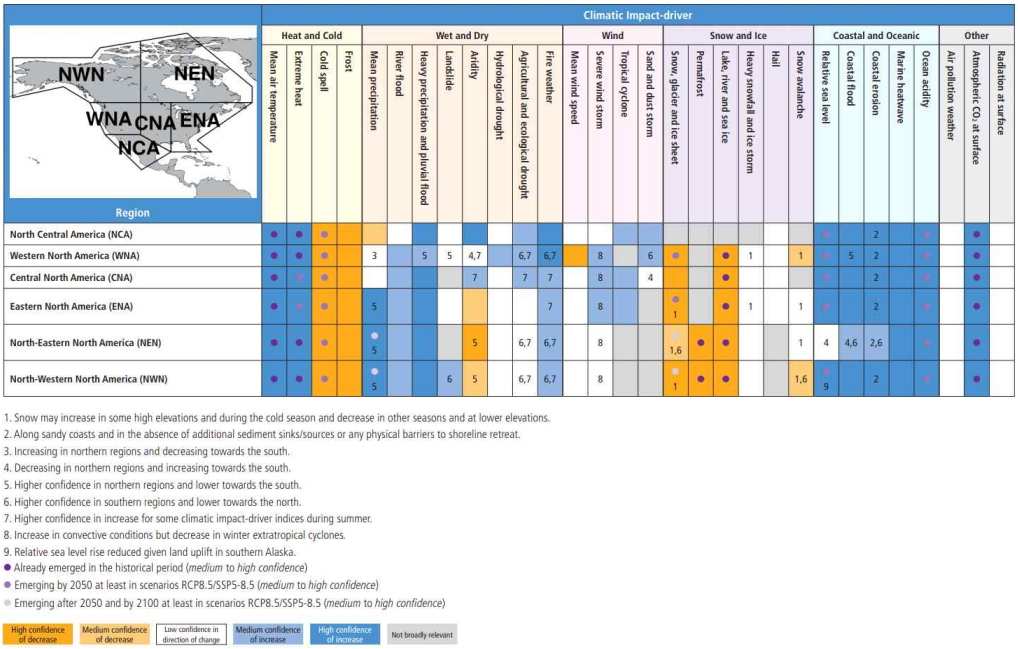
[각 섹터별 Climatic impact-drivers(CID, 기후영향동인)][42)]

Sectors	Climatic impact-drivers(CID, 기후영향동인)	
Heat and cold	Mean air temperature Extreme heat Cold spells Frost	평균 기온 극 고온 한파 서리
Wet and dry	Mean precipitation River flood Heavy precipitation and pluvial flood pluvial Land slide Aridity Hydrological drought Agricultural and ecological drought Fire weather	평균 강수량 강 홍수 호우 산사태 건조 수문학적 가뭄 농업 및 생태적 가뭄 화재 날씨
Wind	Mean wind speed Severe wind storm Tropical cyclone Sand and dust storm	평균풍속 강한 바람 폭풍 열대성 저기압 모래와 먼지폭풍
Snow and ice	Snow, glacier and ice sheet Permafrost Lake, river and sea Ice Heavy snow fall and ice storm Hail Snow avalanche	눈, 빙하, 빙상 영구동토층 호수, 강 해빙 폭설과 얼음폭풍 빗발 눈사태
Coastal	Relative sea level Coastal flood Coastal erosion	상대 해수면 해안홍수 해안침식
Oceanic	Mean ocean temperature Marien heat wave Ocean acidity Ocean salinity Dissolved oxygen	평균 해양 온도 해양 폭염 해양 산성도 해양 염분 용존산소
기타	Air pollution weather Atmospheric CO_2 at surface Radiation at surface	대기오염 날씨 지표면 대기중 이산화탄소 지표복사



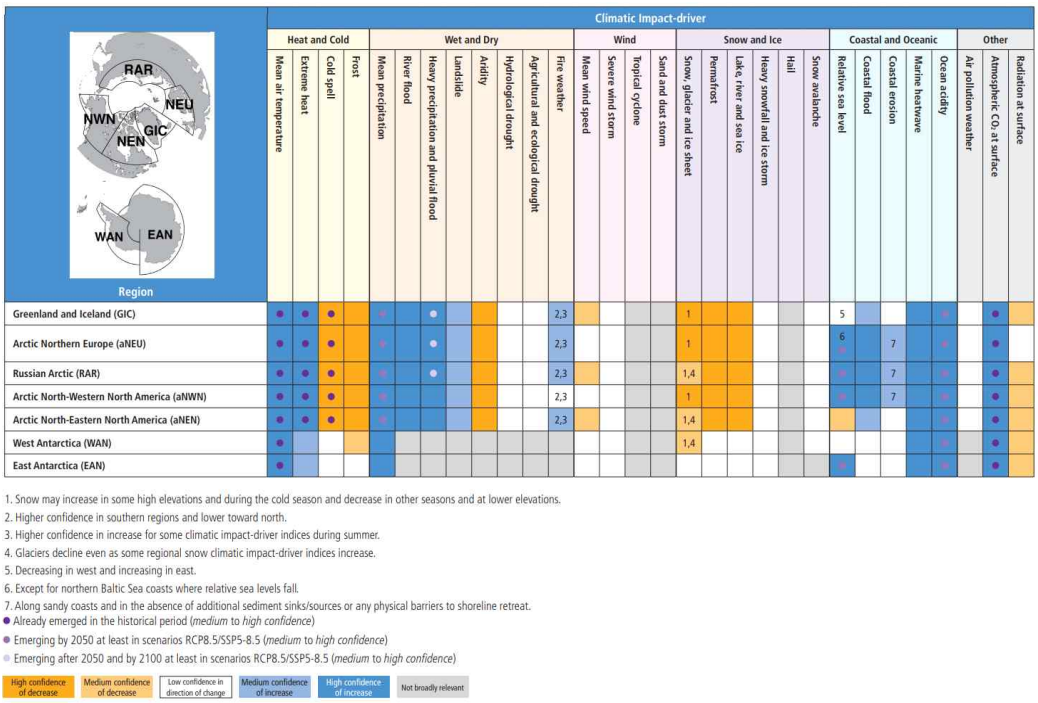
[주요 Climatic impact-drivers(CID, 기후영향동인)][42)]

<많은 연구 및 응용 프로그램에서 최소한 중간 신뢰도로 평가된 주요 부문별 카테고리 범주에 대한 주요 기후영향동인(및 강도, 빈도, 기간, 시기 및 공간 범위의 각 변화)의 관련성을 표에 나타내었다. '높은 관련성'은 카테고리와의 직접적인 연결에 대해 가장 두드러지고 널리 연구된 기후 영향 동인을 나타내며, 낮은 관련성은 약한 연결과 덜 일반적으로 연구되는 운전 행동을 나타낸다. 위험과 기회의 특정 수준은 WGII에서 평가된 지역 위험, 취약성 및 노출의 특성 변화에 따라 다르다.>



[북아메리카에서의 중요 CID][42)]

<각 AR6 지역 내에서 RCP4.5, SSP2-4.5, SRES A1B 이상의 시나리오에 대한 세기 중반의 총체적 특성 변화를 나타내는 북미의 기후 영향 동인의 예상 변화 방향은 해수면 상승과 무관한 CID의 경우 2℃에서 2.4℃ 사이의 지구온난화 수준에 대략 해당된다.>



[극지 육상 CID][42)]

<각 AR6 지역 내 시나리오 RCP4.5, SSP2-4.5, SRES A1B 이상에 대해 극지방의 기후 영향 동인의 예상 변화 방향에 대한 신뢰는 해수면 상승과 무관한 CID의 경우 2℃ ~ 2.4℃ 사이의 지구 온난화 수준에 대략 해당된다. NEU, NEN 및 NWN의 북극 부분은 위의 유럽 및 북미 섹션에서 평가된 전체 AR6 지역과 다르다.>

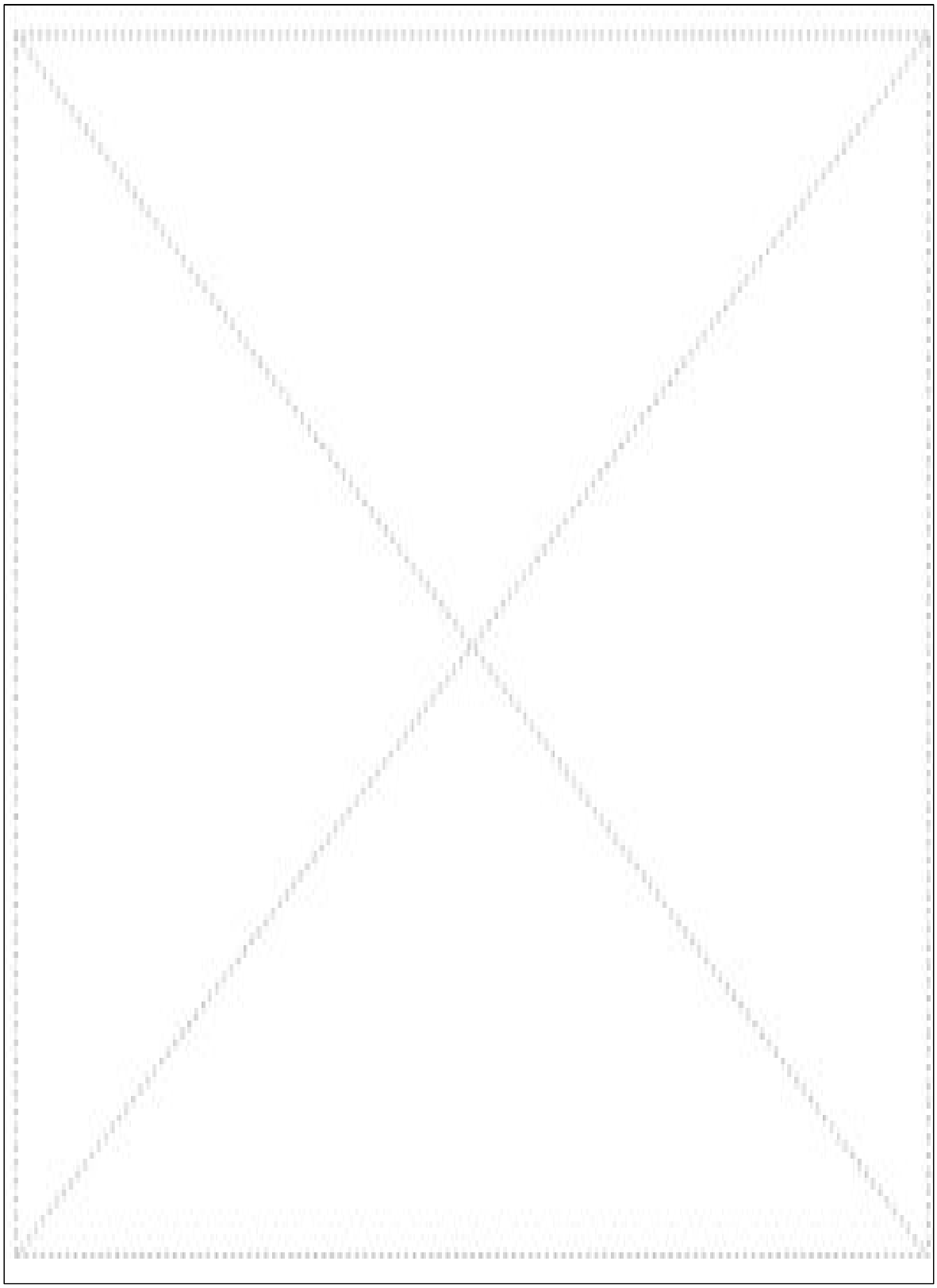
2.1.2. 주요 연구 주제 고찰

■ 국가별 극지 주요연구 키워드

본 기획에서 도출하고 핵심 전략으로 선정하는 주제들의 신뢰성을 확보하기 위해서, 국내 및 해외 주요국의 극지관련 기관에서 발간된 주요 연구주제 관련 최신 논문들을 분석하고 국가별 관련 연구 키워드를 추출하여 상위 11개의 결과 도출(국가별 극지 주요연구 키워드 표 참조)[60]한 결과를 살펴보았음

- 아래 표에서, 전체적으로 남·북극에서의 기후변화 연구의 비율이 높음을 알 수 있음. 이에 본 기획연구에서는, 우리나라 북극연구의 핵심 주제 선정과 매우 밀접하고, 또한 기존 연구 수행 내용과도 상관성이 높다고 판단되는, 국가별 주요 극지연구 키워드를 참고하여, 향후 북극권 육상-대기-연안 등 영역에서의 전략 주제 도출에 참고하였음
- 한편, KOPRI-KISTI(2021)[61]에 의하면, 극지 영역 전체 문헌 집합에서 집합 Web of Science 분류가 부여된 총 174,275건에 대해 전체 Web of Science 기반 지형도를 기반 맵으로 활용하여 겹치기 맵을 형성하였을 때, 상위분야는 압도적으로 지구/환경 영역에 속한 분야이며, 그 뒤로 바이오 영역의 분류가 많이 분포하고 있음을 보고함

60) '글로벌 이슈대응 극지 연구개발사업 기획 연구'(2019.11, 과학기술정보통신부, 해양수산부)
61) KOPRI-KISTI, 2021. '극지연구 성과 분석 및 미래 극지연구 도출'



[본 기획연구에서 전략 주제 도출을 위해 참고한 우리나라 극지연구의 시사점과 전략방향 – 다양한 전략 및 주제 중에서 본 기획연구와 관련된 방향을 노란색으로 표시함][48)]

[국가별 극지 주요연구 키워드 정리][62]

국가별 극지 주요연구 키워드

주요연구키워드(전체)	빈도	비율(%)
antarctica	12	1.674
climate change	9	1.255
remote sensing	6	0.837
southern ocean	6	0.837
ice	4	0.558
sea ice	4	0.558
x-ray crystallography	4	0.558
aerosol	3	0.418
amundsen sea	3	0.418
antarctic ocean	3	0.418
antarctic peninsula	3	0.418

주요연구키워드(한국)	빈도	비율(%)
climate change	4	1.190
remote sensing	4	1.190
x-ray crystallography	4	1.190
sea ice concentration	3	0.893
aerosol	2	0.595
amundsen sea	2	0.595
amundsen sea polynya	2	0.595
antarctic	2	0.595
antifreeze protein	2	0.595
arctic sea ice	2	0.595
arctic warming	2	0.595

주요연구키워드(호주)	빈도	비율(%)
climate change	2	3.125
invasive species	2	3.125
taxonomy	2	3.125
adsorption isotherms	1	1.563
alien species	1	1.563
antarctic conservation biogeographic regions	1	1.563
antarctic marine biodiversity	1	1.563
antarctic specially protected areas	1	1.563
antarctica	1	1.563
banzare bank	1	1.563
barcode gap	1	1.563

주요연구키워드(영국)	빈도	비율(%)
feeding ecology	2	4.762
seabird	2	4.762
southern ocean	2	4.762
balaenoptera physalus	1	2.381
baleen whale	1	2.381
calanoid copepods	1	2.381
climate change	1	2.381
conservation	1	2.381
cosmic rays	1	2.381
discovery investigations	1	2.381
dna	1	2.381

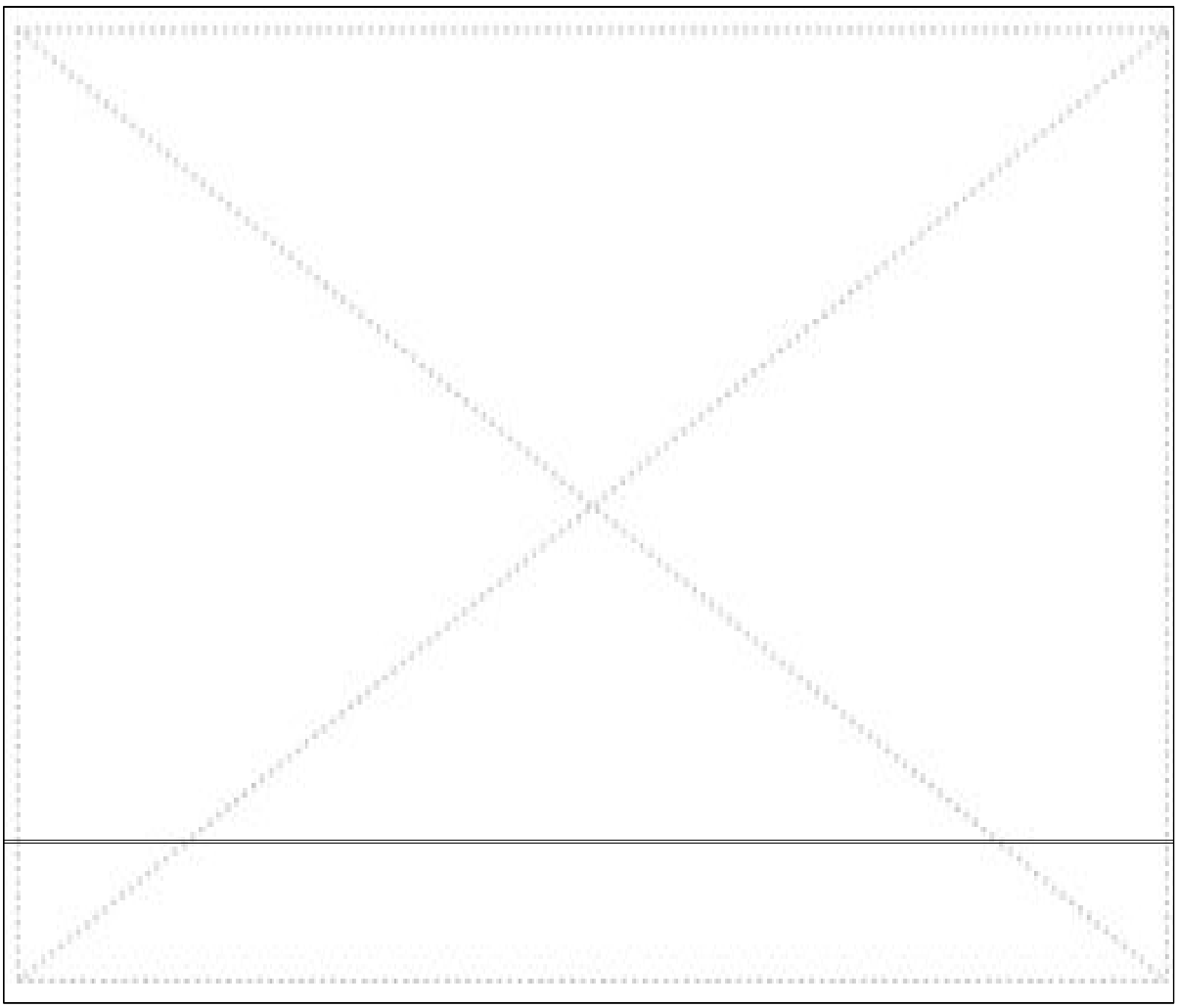
주요연구키워드(독일)	빈도	비율(%)
aerosol	1	1.299
africa	1	1.299
air pollution	1	1.299
antarctic ocean	1	1.299
aragonite	1	1.299
arctic coastal erosion	1	1.299
arctic haze	1	1.299
arctic sea ice	1	1.299
arctic system	1	1.299
atmospheric inversion	1	1.299
atomic force microscopy	1	1.299

주요연구키워드(일본)	빈도	비율(%)
air drilling	1	2.632
ambient noise variability	1	2.632
antarctica	1	2.632
arctic	1	2.632
bedmap 2 bedrock topography	1	2.632
chukchi sea	1	2.632
dissolved	1	2.632
energy balance	1	2.632
fuzzy analytic network process	1	2.632

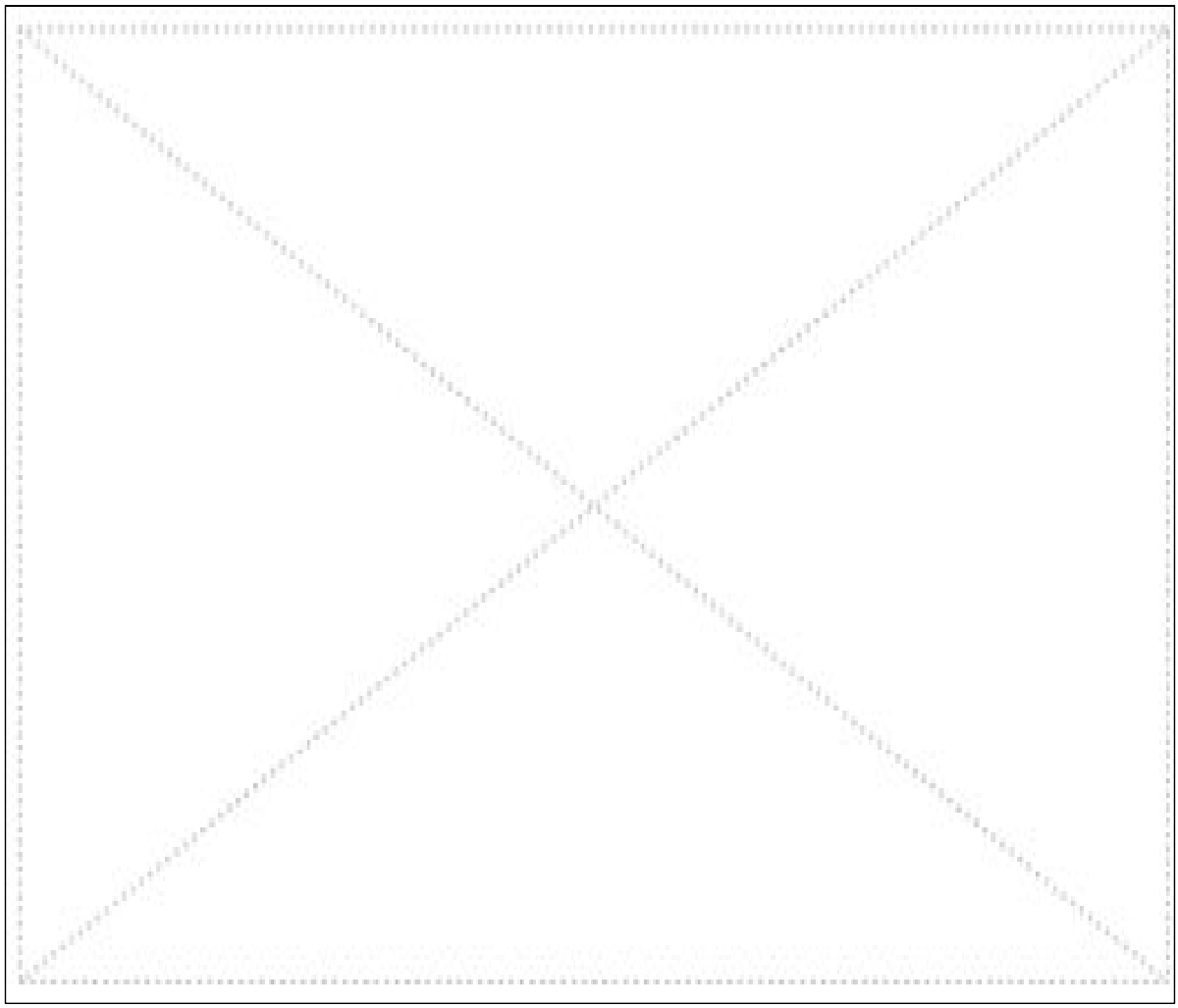
주요연구키워드(러시아)	빈도	비율(%)
barents sea	2	4.651
biomass	2	4.651
stock	2	4.651
zooplankton	2	4.651
antarctic peninsula	1	2.326
antarctica	1	2.326
arctic	1	2.326
argentine Islands	1	2.326
benthos	1	2.326
billefjord	1	2.326
bottom sediments	1	2.326

주요연구키워드(SCAR)	빈도	비율(%)
antarctica	8	6.838
cosmic background radiation	3	2.564
polarization	3	2.564
antarctic ocean	2	1.709
climate change	2	1.709
hydrothermal vent	2	1.709
methods	2	1.709
new species	2	1.709
phylogenetic analysis	2	1.709
ross sea	2	1.709
sediment thickness	2	1.709

62) '글로벌 이슈대응 극지 연구개발사업 기획 연구'(2019.11, 과학기술정보통신부, 해양수산부)



[극지연구 문헌집합에서 상위 10개국의 Web of Science 주요 분야별 비중(1/2)][49)]



[극지연구 문헌집합에서 상위 10개국의 Web of Science 주요 분야별 비중(2/2)][49)]

※ 우리나라는 10개국 기준으로 전 세계 평균에 비해 전반적으로 바이오 영역이 두드러지게 높은 비중을 보임, 미생물학이 전체 평균 1.74%보다 훨씬 높은 7.69%, 생화학 및 분자생물학 분야도 2.54%의 비중으로 전체 평균 0.66%에 비해 높음[49)]

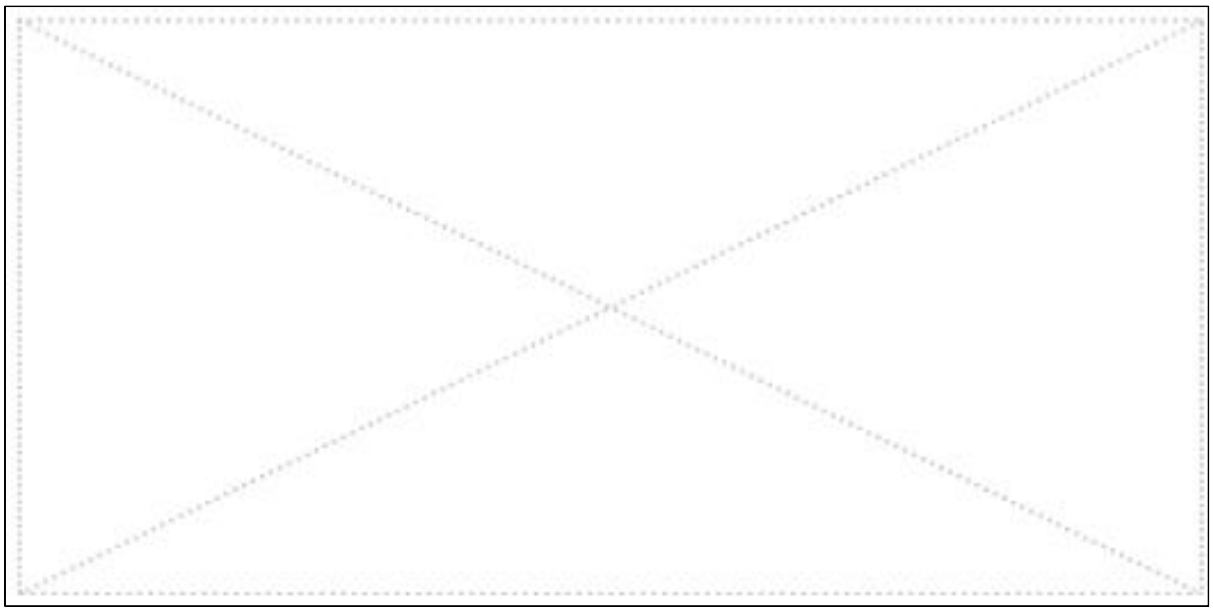
2.2. 국내 연구동향

■ 국내 극지 관련 연구

- 남·북극과학기지와 쇄빙연구선 아라온호를 운영하며 극지의 최전선에서 기후변화 진단과 영향 파악 및 응용연구를 수행하는, 우리나라 유일의 극지전문 연구기관인 '극지연구소'에서 주관하여 담당하고 있음

■ 극지연구소 극지연구

△ 기후변화에 의한 극지 환경변화 감시와 원인 규명,
△ 극지역 온난화가 초래하는 국가 사회문제 해결,
△ 극지연구 신성장 동력 및 실용화 성과 창출,
△ 극지 미답지(과학영토) 개척 및 탐사기술 개발의 R&R의 상위역할을 설정('20.03)하고, 국내외의 산·학·연 전문연구자들과 함께 극지의 기후시스템 및 해양-빙권 관련 기술을 활발하게 연구하고 있음



[극지연구소의 역할 및 R&R의 상위역할][63]

■ 극지연구소의 연구사업

- 기관고유사업, 국가연구개발사업, 일반수탁사업 등 연구개발사업 뿐만 아니라 '국내 학·연 극지연구진흥프로그램(PAP)', '국내 산·연 극지연구진흥프로그램(PIP)'을 통해 대학 및 산업계와의 연구를 진행하고 있음. 여기에서는 그 중 주요사업, 국가연구개발사업에 대해서 간략히 살펴보았음

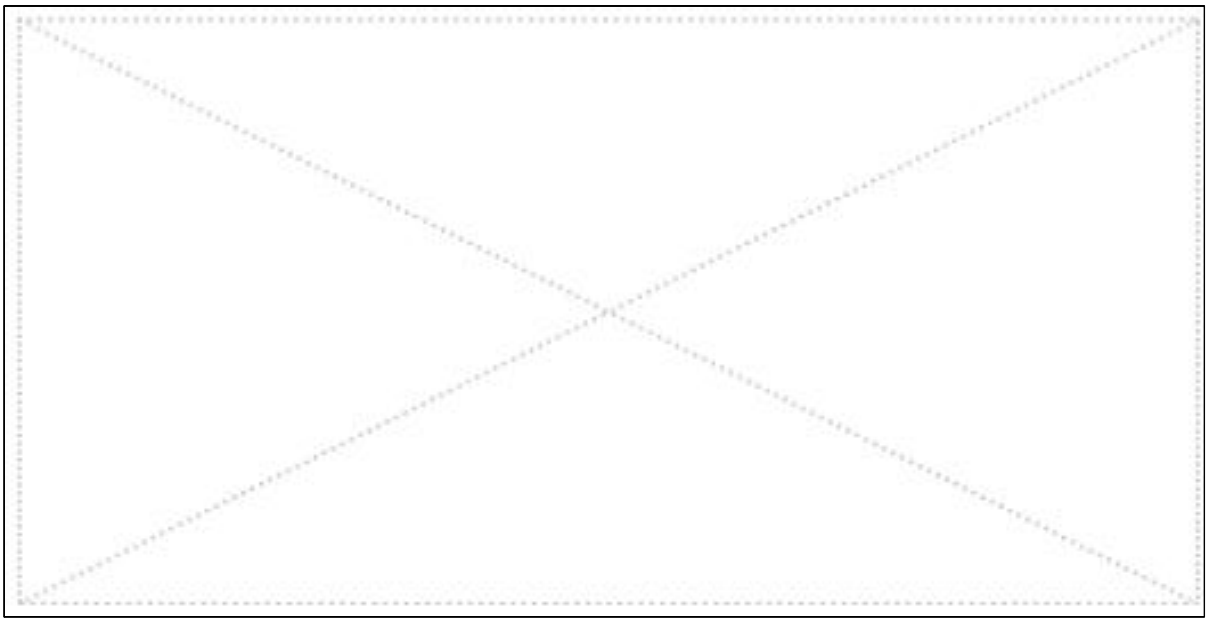
63) 출처 : 극지연구소 R&R(2020.3)

[극지 주요사업 및 국가연구개발사업][64]

구분	항목	주요내용
주요사업	기관 고유 사업	남극 기후·환경변화 이해와 전지구 영향평가
		오로라 발생과 극지 고층대기 교란 및 기후변동성과의 상관관계 규명
		과거 온난기의 서남극 빙상 후퇴 및 해양 순환변화 연구
		국제 심부빙하시추 네트워크를 활용한 대기-빙상 상호작용의 자연적·인위적 특성 규명
		남극권 맨틀활동과 지체구조진화 연구
		서남극해 온난화에 따른 탄소흡수력 변동 및 생태계 반응 연구
		온난화로 인한 극지 서식환경 변화와 생물의 적응진화 연구
		북극 해양·해빙 변화에 기인한 북극과 한반도의 재해 기상현상 모델링시스템의 개발 및 활용
		북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구
		얼음의 미세구조 특성연구를 통한 저온 정화기술 및 환경/에너지 신소재 개발
		포스트 극지유전체 프로젝트: 극지 유용유전자 발굴을 위한 기능 유전체 연구
		극지 바이오신소재 상용화 구축 사업
		남극내륙연구를 위한 내륙진출루트 개척과 지원시스템 구축
		남극 David 빙하 빙저호 지구물리 탐사기술 및 열수 시추 기술 개발
		고환경 및 동물진화 연구를 통한 북그린란드 미답지 진출
		환경변화에 따른 남극 육상생물의 생리생태 반응 규명
국가연구개발사업		극지 유래 생물자원을 활용한 항생제 후보물질 개발(해수부)(~2024)
		서남극 스웨이트 빙하 돌발붕괴의 기작규명 및 해수면 상승 영향 연구 (해수부)(~2023)
		북극해 해저지질 조사 및 해저환경 변화 연구(해수부)(~2024)
		북극해 온난화-해양생태계 변화 감시 및 미래전망 연구(해수부)(~2026)
		북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발(과기부)(~2024)

- 한편, KISTI(한국과학기술정보연구원)가 개발한 node-split 방식과 라이덴 클러스터링 알고리즘을 적용하여, 극지분야의 세부 연구주제 또는 연구영역을 살펴보기 위해, 소수 전문가의 주관적 판단을 배제하고 극지분야 전체 문헌에서 204개의 클러스터를 도출한 연구지형도에서 극지분야는 대기, 환경·사회, 생물·생태계, 해양, 지구의 5개 거시영역으로 구성되어 있음[65]

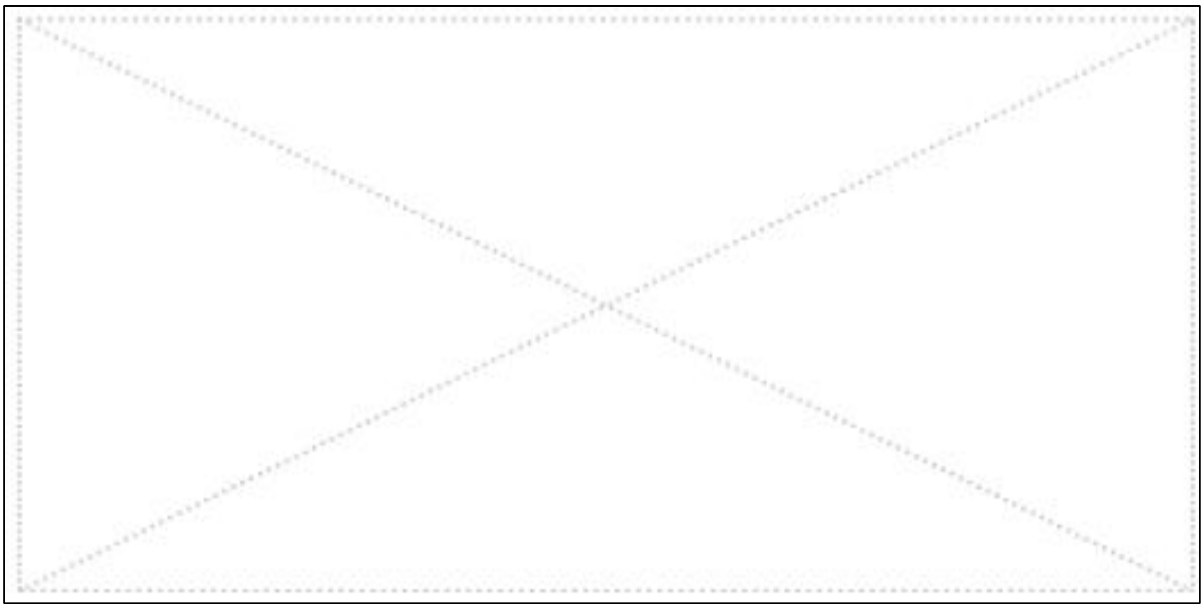
64) 출처 : 극지연구소 연보(2021)(2021 Annual Report of Korea Polar Research Institute)(2022.04)
65) KOPRI-KISTI, 2021. 극지연구 성과 분석 및 미래 극지연구 도출



[극지영역 전체 문헌 연구지형도][53)]

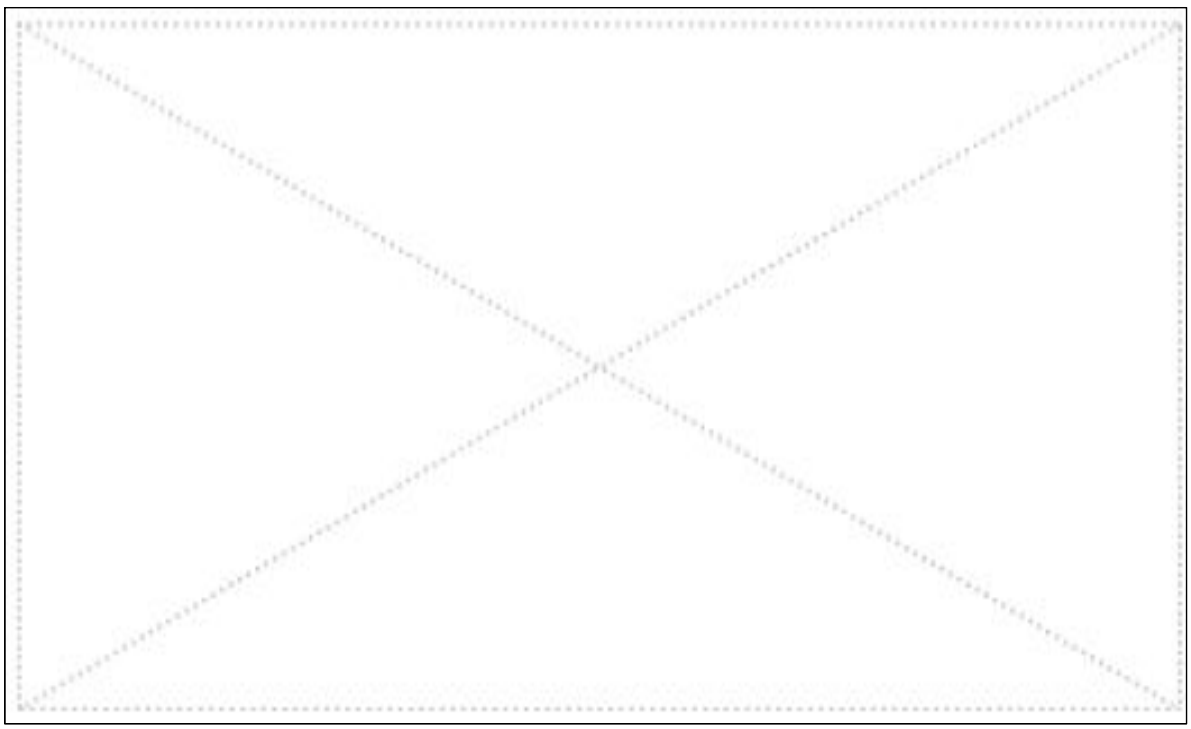
■ 극지연구소 과기부(한국연구재단)의 정부 R&D 사업

- 현재 극지연구소에서는, 과기부(한국연구재단)의 정부 R&D 사업으로서, 북극지역의 육상권에서 급변하는 대기(기상)-동토-생태계 등 환경에 대한 정밀한 측정자료 확보와 분석 등의 연구를 위해, 북극이사회 8개 국가 중 6개 국가에 관측거점(미국 알래스카, 캐나다 캠브리지 베이, 노르웨이 스발바르, 그린란드 노르드, 아이슬란드 스토르호피이, 러시아 바라노바)을 확보하고 기상·대기·생태환경에 대한 장기 모니터링을 수행하여 환경변화를 분석하고, 북극 환경변화 시뮬레이션을 통해 북극의 변화가 장기적으로 우리나라 환경에 어떤 영향을 미칠지 파악하는 등의 극지기초원천기술개발사업을 수행 중('21.04~'24.12.31)임
- 아래 그림은 극지영역 연구지형도를 바탕으로 2010년대(2010~2019년) 기준 KOPRI(극지연구소)의 극지분야 세부 연구영역별 논문 수(양적 지표, 노드 크기)와 세부 연구영역별 Top 10% 논문 비중(수월성 등 질적 지표, 노드 색상)을 동시에 보여주는데, 이것으로 KOPRI의 상대적 강점을 확인하였음[53)]



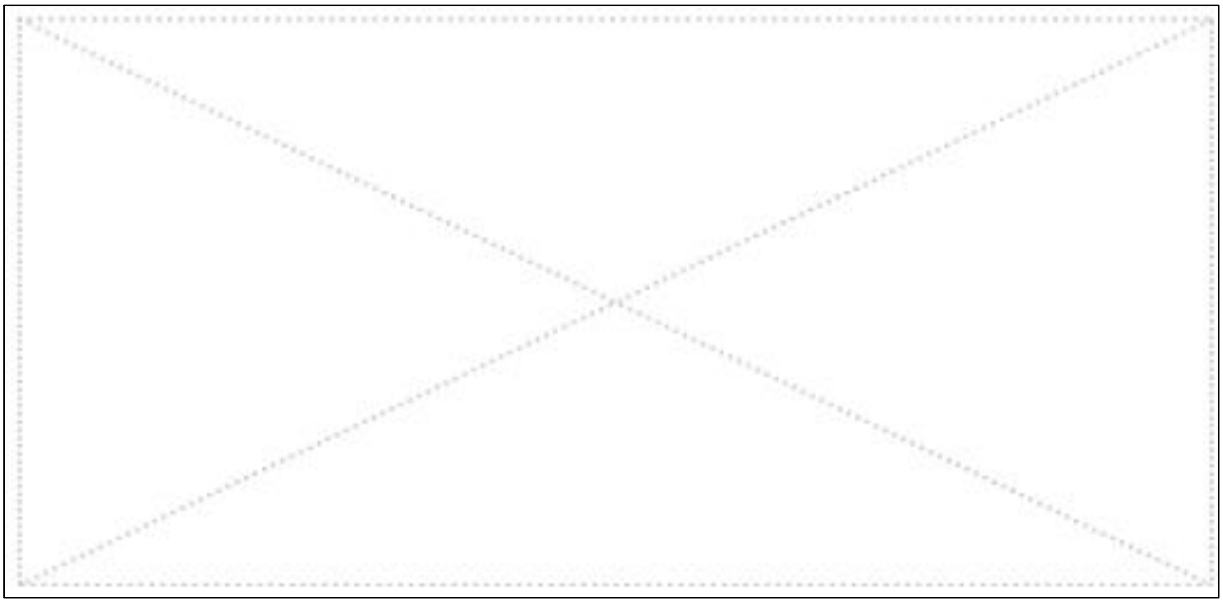
[극지영역 전체 문헌 연구지형도에서 KOPRI의 위치][53)]

※ 북극지역명 기반 연구지형도를 보면, 그린란드, 노르웨이 스발바르, 바렌츠해, 베링해 등이 주요 연구대상 지역으로 나타났고, 이 영역에서 많은 연구가 수행되고 있음을 파악할 수 있음[53)]. 덴마크, 노르웨이, 캐나다, 핀란드, 러시아는 북극 연구 비중이 높으며, 한국은 남·북의 연구비중이 비슷한 것으로 나타남



[북극지역명 기반 연구지형도][53)]

- 또한, KOPRI-KISTI에서 극지분야 유망 연구영역을 도출[53]하였는데, 극지 연구 전체문헌 연구지형도 상의 개별 영역 클러스터 별로 성장추이를 이용한 부상성(emergingness) 지표분석, 딥러닝 기반 성장성 예측모형(실험), 지식 통합과 확산 관점의 다양성(융합도) 추이, 클러스터 성장의 30년 장기 시계열 예측 분석으로 결과를 얻었음. 그 결과로서 다음과 같이 33개의 유망 연구 영역이 제시되었음



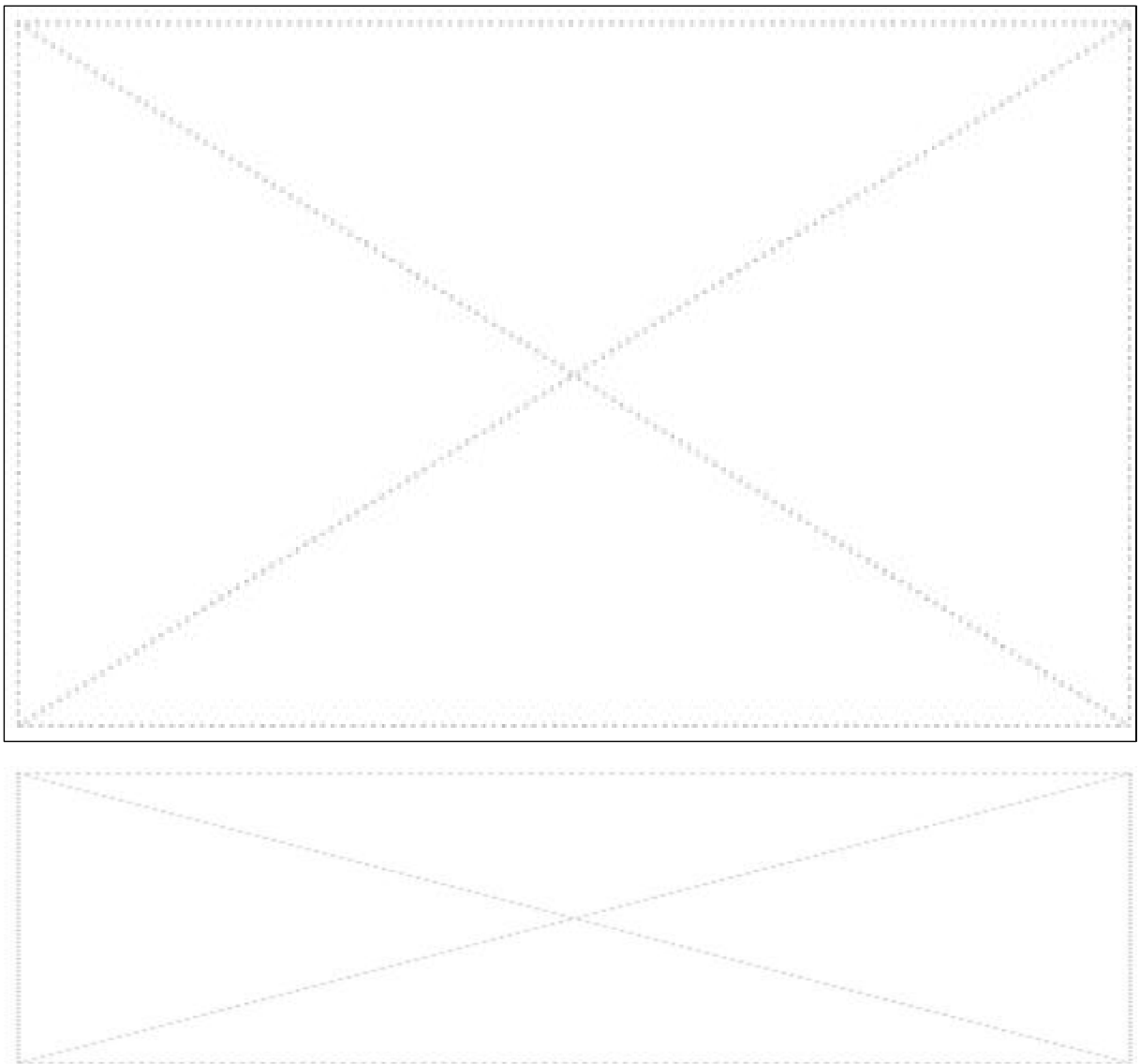
[극지 유망 연구영역 33개 선별 결과][53]

< 「극지 유망 연구영역 33선」 은 대기영역 6개(기후변화 예측/모델링/시뮬레이션 관련 주제와 에어로졸 및 구름 특성이 기후변화에 미치는 영향 연구 등 포함), 생물·생태계영역 8개(극지 생태계 식생변화 관찰/분석/기후변화의 위험성 분석 및 극지 미생물 관련 연구 등 포함. 극한환경 미생물의 유용성과 산업적 응용가능성 주제가 급부상), 지질·빙하영역 10개(빙하 융해, 해수면 상승, 해안 침식, 영구동토층의 변화 관련 주제 및 극지역 매핑 기술 포함), 해양영역 9개(해류순환의 변동, 연어류 등 해양생태계 변화 연구 등 주로 포함)가 선정되었고, 환경·사회영역의 클러스터는 33선에 포함되지 않음>

3 선행사업 성과분석

3.1. 극지기초원천기술개발사업(선행사업) 분석

- **(현황)** 극지기초원천기술개발사업('24년 일몰)에서 2021년 4월부터 현재까지 총괄 1개, 세부 5개로 구성되어 연구개발과제 진행 중임
  - 내역사업별 과제 공모방식의 형태로 수행 및 다양한 연구분야가 참여할 수 있도록 추진



[선행사업(현재 수행과제)의 체계(위) 및 프로세스 종합 개요(아래)]

- **(전략적 수행)** 총괄 로드맵에서 북극권에서의 급격한 환경변화 진단과 미래 예측 및 대응기술 개발 주제의 방향과 분명한 목적 선정, 북극이사회 국가 내 동토지역 관측거점 유지와 관리 및 국제공동연구 수행, 지속적인 환경인자 DB 구축 등의 근본적인 사항은 장기적인 트렌드 분석을 위해 유지하되, 기관 고유사업 또는 타 국가연구개발사업과의 차별성과 중복성을 배제함

  – 기관경영성과 종합평가에서, 제4차 과학기술 기본계획('17.12)의 '미래도전 과학기술 역량 확충/혁신활성화 과학기술생태계 조성/과학기술 행복한 사회 구현 등'과 제2차 북극활동진흥기본계획('18.07)에서의 '북극 거버넌스 확대/북극 현안대응 주도/정책 추진역량 강화 등' 주요 정책을 반영하여 기술하고 있고, 비북극권 국가이면서 북극연구 후발 주자인 우리나라가 세계 유일의 6개 북극권 국가와의 독자적 국제공동연구망 구축(관측거점 및 환경변화 측정시스템 등 인프라 구축)*에 대한 '우수' 평점을 받음

  * 본 과제는 세계 유일의 환북극 6개 동토지역(미국, 캐나다, 노르웨이, 그린란드, 아이슬란드, 러시아)에 관측거점 운영 및 환경인자(기상, 이산화탄소/메탄 플럭스, 블랙카본 농도, 에어로졸, 냉각가스, 식생지수, 토양물리/화학적 특성, 토양미생물 특성, 토양미생물 유전체 등) 확보와 정밀측정시스템 구축의 우수성을 인정받아, 2021년 국가 R&D 사업 평가에서 '우수' 평가를 받음. 또한 2022년도 과학기술정보통신부의 부처통합 '2022년도 기후변화대응 대표기술 10선'에 선정됨

  – 북극권에서의 급속한 환경변화에 따른 글로벌 이슈 해결을 위한 과학기술적·사회적 전략 연구 추진

[선행과제 주요내용 및 활용방안]

과제명(기간)	주요내용	활용방안
북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발 ('21~'24)	북극이사회 6개 국가 내 동토지역에 6개의 관측거점 운영 등을 기반으로, 1) 북극권 육상지역의 급격한 기후환경 변화(관측)가 초래하는 중위도 지역 영향 평가(피드백), 2) 북극권 육상-대기 상호작용 연구(관측/분석)를 통한 미래 기후·환경변화 예측 및 대응 제시(대응), 3) 환북극권 동토 환경 미생물로부터 난분해 유기물질 분해 효소 개발(산업화 조성)으로 구성됨	북극권 환경변화의 추이 분석과 지구적 기후변화에 미치는 영향 규명과 미래 예측 및 대응 기술 개발 성과 창출에 활용

• **(지원근거)**

◇ 법적근거
- 제4차 국가과학기술기본계획('17.12)
  - 미래도전 과학기술 역량 확충/혁신활성화 과학기술생태계 조성/과학기술 행복한 사회 구현 등
- 제2차 북극활동진흥기본계획('18.02)
  - 북극 거버넌스 확대/북극 현안대응 주도/정책 추진역량 강화 등
- 극지활동진흥법('21.10)
  - 극지활동을 육성·지원하여 극지의 지속가능한 발전과 인류 공통문제해결을 선도하고, 국가경제 발전 및 국익 제고에 이바지

◇ 기획근거
- '극한지 기초원천 연구개발 전략 수립연구'('17.11, 한국연구재단)
- '글로벌 이슈대응 극지연구개발사업 기획 연구'('19.11, 과기부/해수부)

3.2. 극지기초원천기술개발사업(선행사업) 과제의 대표성과

• **(제시기간)** : 2016.05～2022.12

• **(관련과제)**

- ① 총괄과제명 : 환북극 동토층 환경변화 분석을 통한 미래 예측 및 유용물질 응용 기술 개발, 2016.05～2021.03(1~2단계)
- ② 총괄과제명 : 북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발, 2021.04～2022.12(1단계)

■ 추진경과 및 주요성과[66]

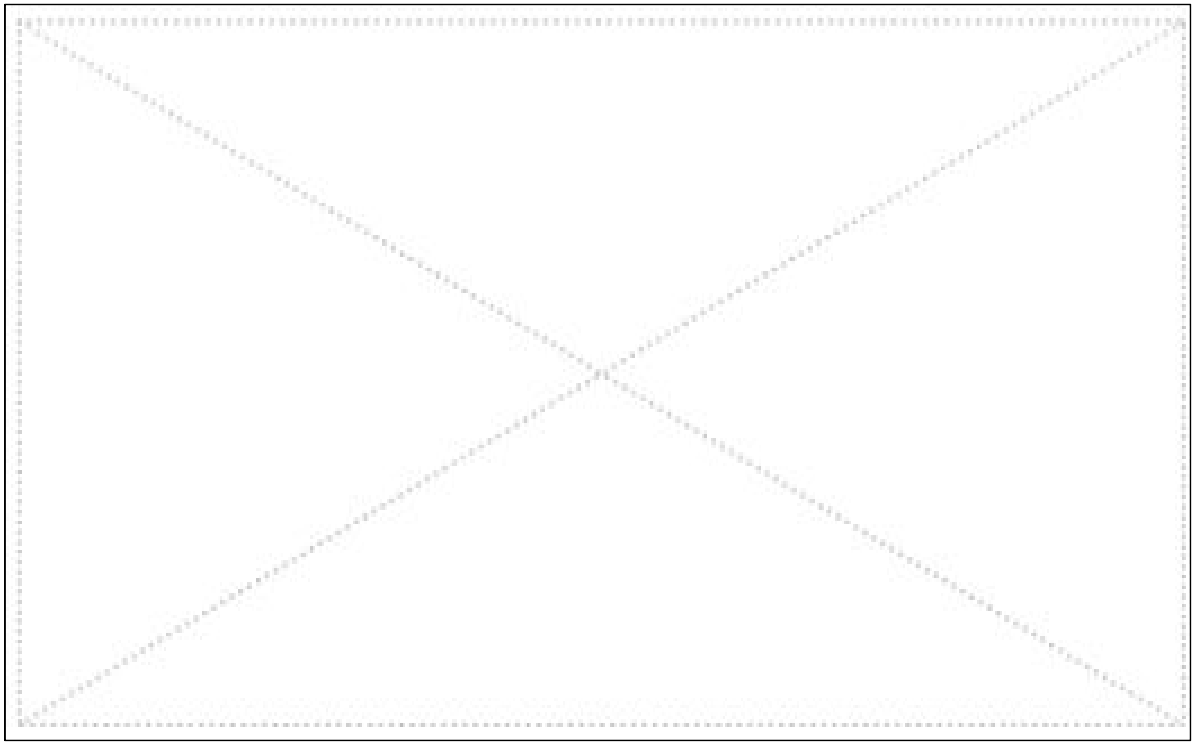
• **(목적)**

- 급변하는 북극권에서의 기후변화 정밀 모니터링과 중위도 파급효과 피드백 규명
- 북극이사회 옵서버 국가로서의 역할 이행 및 미래 지향적 국제 북극공동 연구 및 외교 활동 강화
- 북극권 환경 보호와 지속가능한 개발을 위한 국제사회 노력에 기여함으로써 북극권에서 우리나라의 입지와 위상 강화, 국익제고

※ 세계 최초로 1개 국가가 북극이사회 국가 양자간(한국-북극이사회 6개 각국 간 개별 협력) 공동연구 체제 및 네트워크 구축(환북극 관측거점 6개* 설치 운영 및 스발바르 지형변화 탐사 수행)

* 미국(알래스카), 캐나다(캠브리지베이), 노르웨이(스발바르), 덴마크(그린란드), 아이슬란드(스토르호퇴이), 러시아(바라노바) 국가 내 동토지역 관측거점 기반, 북극 동토층 환경 조사

66) 각 사업의 연차 또는 단계보고서(과기부/한국연구재단 제출)



[환북극 6개 관측거점 위치와 주요 정밀측정시스템]

• **(주요성과 및 분석)**

'16.05 ~ '21.03 **연구도약 주기** **(선행 과제)** (거점 확대 및 환경인자 빅데이터 DB 구축과 특성 분석) (미래창조과학부/ 과학기술부 지원 - 외교부 협조)	▣ 북극이사회 6개 국가와 연구협약 체결 완료 및 관측거점 확보와 기후변화 관련 모니터링 시스템 구축/운영(계속) - 미국, 캐나다, 노르웨이, 덴마크(그린란드), 아이슬란드, 러시아 동토지역에 관측거점 확보 및 정밀측정시스템 구축/정상 가동 ※ 세계 최초로 단일 비북극 국가가 북극이사회 국가 양자간(한국 - 북극이사회 6개 각 국간 개별 협력) 공동연구 체제 및 네트워크 구축으로 북극연구의 table setter 및 pioneer 역할 수행 ※ 현재까지 1개 국가가 북극이사회 국가와 다각적인 환경변화 관측거점 확보하고 공동연구를 수행하는 국가는 대한민국 이외에 전무함 ※ 북극이사회 정식옵서버 국가 자격 유지를 위한 북극 과학활동 근거로 1차 평가('17.03), 2차 평가('21.03)*에 활용 * 4년마다 옵서버 국가 지위 평가용 리뷰보고서 제출 필수 (미래부/과기부 ⇒ 외교부 ⇒ 북극이사회) ▣ 관측거점 기반 모니터링과 DB 구축 지속 및 특성 연구 - 기후변화, 대기, 생태계, 고환경, 유용생물자원 등 환경인자 빅데이터 DB 구축(1~2단계 누적 23건) 및 특성 연구 ※ 정부 R&D(과기부) 극지기초원천기술개발사업의 일환으로 북극 연구 및 국제 네트워크 구축, 북극에서의 수월적 과학적 성과 창출
▣ 분석 : - 지난 5년간 논문의 질적 우수성은 정부 R&D 평균에 비해 우수하며, 국제적으로도 옵서버 국가로서의 당당한 과학기술 경쟁력 향상에 기여 - 분야별 :5년간 SCI급 논문 전체 119편 중 대기 분야 40편(약 34%), 생태/응용생물분야 30편(약 25%), 고환경/지화학분야 29편(약 24%) 창출 - 환경인자 활용 : KPDC에 등재한 빅데이터 DB 활용하여 학술활동 및 자료 분석 결과 창출	

‘21.04 ~ ‘24.12 **미래 대응 초기 주기** **(‘22년 현재 수행 중)** (환경인자 빅데이터 DB 활용 및 고도화 성장 주기) (과학기술부 지원 – 외교부 협조)	▣ 6개 관측거점 기반 급변하는 북극권에서의 기후변화 정밀 모니터링과 특성 규명 – 북극 동토층 관측거점 유지 및 육상–대기–고환경 변화에 대한 정밀 모니터링과 미래 예측, 북극이사회 국가와의 지속가능한 과학연구 협력 창출 ※ 환북극 환경변화 정보 DB화를 통한 빅데이터 생성, 기후변화 진단 및 미래 예측, 북극이사회 국가와의 연구 협력 및 정보 공유 지속, 북극의 기후변화와 중저위도 지역 간 상관관계 규명 및 미래 대응 연구 등 ▣ 미래 지향적 국제 북극 공동 연구 역량 축적 ※ 북극이사회 모든 국가(핀란드, 스웨덴 추가, 8개국)와의 국제공동연구 수행 및 거점 추가 확보를 위한 방안 모색(향후 2025년부터 본격적으로 수행 예정) ▣ 북극이사회 정식옵서버 국가로서의 역할 이행과 외교 활동 측면 지원 강화 ※ 북극이사회 정식옵서버 국가 자격 유지를 위한 북극 과학활동을 근거로 3차 평가(‘25.03 예정)에 활용 대응
▣ 분석 : – 본 주기는 2단계로 구성되며, 1단계(‘21.04~‘22.12)에 총 37편의 논문 게재(평균 mrnIF 76.646, 상위 20% 이내 논문 21편), 극지 동토층 환경인자 확보(누적 54건) 및 Smart Polar Platform 구축 등의 성과 창출하여, 국제적으로도 옵서버 국가로서의 당당한 과학기술 경쟁력 향상에 기여 ※ 확보된 환경인자는 한국극지데이터센터(KPDC)에 등재하였으며, 이러한 빅데이터 DB 활용하여 학술활동 및 자료 분석 결과 창출함 – 이외에, 1단계 동안, 국내 특허출원 3건, 학술발표(국내 32건, 국제 35건; 발표 수행 8건), 인재양성(석사 2명, 박사 7명), 과학기술 언론홍보(KBS 등 6건), 플럭스교환 알고리즘 2건 등의 성과를 창출함	

– 선행연구의 연도별 대표 세부성과 (논문, 특허 등)

환경인자 DB를 활용한 과학기술적 대표성과 **(mrnIF 85 이상, 특허, 기술개발, 인프라 구축 등)**	
게재년도	**내 용**
2022.01~2022.12 (SCI 논문 총 22건, mrnIF 평균 75.643, IF 평균 6.631)	• 세부과제–1에서 2차년도에 목표한 아래 각 주제들의 목표는, 100% 달성함 – 환북극 6개 관측거점 기존 관측시스템 가동(자료 수득률 평균 80%) 최적화 등(100% 달성) – 거점별 온실기체 모니터링, 관측시스템 고도화 및 알고리즘 개발 등(100% 달성) – 신규 에어로졸 관측 플랫폼 구축 완료, 북극 에어로졸 분자 특성 시계열 자료 확보 및 분석 등(100% 달성) – 모니터링 시스템 원격 및 에너지 하베스팅 기술 고도화, 이동 및 고정 관측 가능용 극지환경인자 관측용 복합센서 장치 확보 등(특허출원 완료) – SCI급 논문 5편 게재 및 환경인자 22건 DB 구축 등(100% 달성) • 세부과제–2에서 2차년도에 목표한 아래 각 주제들의 목표는, 100% 달성함 – 호기 조건에서 유기물 분해 대사–온실기체 발생 변화 연구 (100%) – 온실기체 연관 호기성 미생물 5종 동정 (100%) (RFP 제시성과)

	– 동토 미생물 군집–온실기체 배출 상관관계 규명 (SCI1편) (100%) – SCI급 논문 5편 게재 및 환경인자 9건 DB 구축 등(100% 달성) • 세부과제–3에서 2차년도에 목표한 아래 각 주제들의 목표는, 100% 달성함 – 노르웨이, 한국, 스웨덴, 독일이 참여한 CRYOCARB 프로그램과 4개국 공동탐사수행(GC 6점 및 MUC 시추코어 13점 등 총 19개, 부시료 990점 확보) (100%) – 기후환경복원 프록시 활용 저해상도 퇴적물 분석완료 (콩스, 비데, 햄버그북타코어 퇴적물 내 다중 프록시 분석 4건 이상 완료) (100%) – 유기–다매체 시료 87건, 무기–부시료 223건 분석 완료 및 학회 발표 3건) (100%) – 피오르드/연안 유동모델(FVCOM) 구축 완료 (100%) – SCI급 논문 6편 게재 및 환경인자 누적 3건 DB 구축 등 (100% 달성) • 세부과제–4에서 2차년도에 목표한 아래 각 주제들의 목표는, 100% 달성함 – 발굴 효소의 생화학적 특성 연구 (특허출원 2건) – 신규 또는 기존의 환경시료전처리를 통한 미생물 유전체 라이브러리 확보(2×10^4fosmidclone 이상) 5.1×10^4 fosmidclone 확보 (100%) – 미생물 유전체로부터 난분해유기 물질(리그닌, 오일류, 플라스틱 등) 분해 효소 유전자 발굴 (2종 이상, GenBank 또는 KPDC 등록)–유전자 정보 20종 등록(100%) – SCI급 논문 7편 게재 및 특허출원 2건 등(100% 달성) • 세부과제–5에서 2차년도에 목표한 아래 각 주제들의 목표는, 100% 달성함 – 북극권 과거 및 현재 기후·환경변화 연계성 분석 – 관측–라그랑지안 케적 모델을 이용한 북극권과 중위도의 기후 변화 영향 분석 – 극소용돌이 거동과 기후변화 수치모델링 등(100% 달성)
2021.04～2021.12 (SCI 논문 총 15건, mrnIF 평균 77.649, IF 평균 5.952)	• 세부과제–1에서 1차년도에 목표한 아래 각 주제들의 목표는, COVID–19의 확산 지속으로 인하여 부분별로 어려움이 많았음에도 불구하고 전체적으로 100% 달성함 – 환북극 6개 관측거점 기존 관측시스템 가동(자료 수득률 77%~99%) 최적화 및 거점별 2021년 기상인자 DB 5건(KPDC 등재) – 거점별 온실기체 모니터링 시스템 진단 및 관측 시스템 고도화 계획 작성(100% 달성) – 신규 에어로졸 관측 플랫폼 설계 및 필수 관측 장비 구성 완료 (신규 플랫폼 구성에 대한 요약서 작성), 북극 에어로졸 분자 특성 시계열 자료 및 에어로졸 인자 DB 1건(KPDC 등재)(100% 달성) – 환경인자 획득 센서 취득부, 위성 통신 모듈, 게이트웨이 이중화 (데이터 손실 최소화 가능)(특허출원 완료), 센싱 인자 DB 4건 달성(100% 달성, 특허출원 1건) • 세부과제–2의 1차년도 연구 목표 100% 달성

	– 차년도 현장 연구 수행을 위한 기반 구축을 가장 큰 목표로 삼았음. COVID-19 확산으로 인한 어려움 속에서도 거점별 북극 현장을 방문하여 2차년도 연구 수행을 위한 기반 마련, 플럭스 측정용 장비 구축 및 사전 테스트 완료 – 노르웨이 강설량 모사 실험구에서는 공동연구를 통해 토양 시료 채취, 세균 및 진균 군집 분석 수행 완료 – 북극 동토 미생물의 대사 기작 규명을 위한 혐기 조건 하 실내 토양 배양 및 결과 분석 완료 – 온실기체 연관 혐기성 미생물 10종 유전체 재구성 – 동토 미생물 군집-온실기체 배출 상관관계 규명 논문 1편 – 미답지 탐사를 위한 문헌조사, 캐나다 POLAR와 협의 • 세부과제-3에서 계획한 총 5개의 주요 연구 목표는 모두 성공적으로 수행되며 연구목표 100% 달성함 – '노르웨이 지질연구소(NGU) 협업 코어 퇴적물 부시료 확보' 및 기초적인 분석 자료를 획득함으로써 Plan-B 목표 달성. – 유기질소 분석(54점), 입도 활용 5가지 end-member 모델링(410점) 구분, 표층퇴적물 XRD 광물분석(61점) 등 다양한 자료 분석 수행, 유기분자생체지표 분석 인프라 구축 완료 – 'pristine 환경 및 인간 활동 거점 환경 영향 연구 지역 선정' 완료 – 표층 퇴적물 내 유기독성물질 조성 분석(41점) 및 코어 퇴적물 4점에 대한 수은 농도 분석(93점) 등 계획된 목표 달성 – 스발바르 연안해역의 유동 자료 수집 및 분석, 지형 자료를 토대로 스발바르 연안 지형에 대한 FVCOM의 비구조 삼각격자 구성 • 세부과제-4에서는, 북극 유래 미생물의 유전체 라이브러리 제작 3건 획득하여 약 9×10^4 fosmid clone을 확보함으로서 전년도 목표인 5×10^4 fosmid clone의 약 2배의 유전자를 확보하는 등 정량 및 정성적 연구개발 목표 100% 달성함 – 난분해성 물질인 오일류를 분해할 수 있는 기능성 효소유전자를 가지는 4개의 clone을 KPDC 등록 (4건) – 저온 활성 효소 PbSI와 PsEst3의 구조 및 활성 정보를 확보함 – 효소 PbSI의 구조분석 논문을 Biochemical and Biophysical Research Communications 저널에 논문 게재함 • 세부과제-5에서는, 기존 연구목표에 맞춰 연구를 수행하였고 모든 일정에 맞춰 목표 100% 달성함 – 북극권 과거 및 현재 기후·환경변화가 중위도에 미치는 영향 평가 – 기후 모델 기능 향상을 위한 복사모수화 과정 개선 – 라그랑지안 수치모델을 이용한 북극권 소용돌이의 중위도 기후 영향분석 중 – 수치모델 복사모수화 과정을 개선 및 SCI 논문 발간
2020.01~2021.03 (SCI 논문 총 26건, mrnIF 평균 73.529, IF 평균 3.720)	• 미국 알래스카와 러시아 시베리아 북쪽에 이르는 북극해 상공에서 검출되는 극초미세먼지 거동 규명 * Shipborne observations reveal contrasting Arctic marine, Arctic terrestrial and Pacific marine aerosol properties, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 박지연 등, 2020, mrnIF 91.034(언론홍보: 동아사이언스('20.07.15) 등) • 북극 스발바르 제플린 관측소에서 관측한 대기 신입자 형성 특성 규명

	* Atmospheric new particle formation characteristics in the Arctic as measured at Mount Zeppelin Svalbard from 2016 to 2018, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 이해범 등, 2020, mrnIF 91.034 • 식물 광합성 계절변동 설명 최적화 모델 개발 * An optimality-based model explains seasonal variation in C3 plant photosynthetic capacity, *GLOBAL CHANGE BIOLOGY,* Chongya Jiang, 류영렬 등, 2020, mrnIF 100 • 북극지역에서의 토탄 모스의 촉매 열분해에서 산화제로서의 CO2 거동 파악 * Using CO2 as an Oxidant in the Catalytic Pyrolysis of Peat Moss from the North Polar Region, *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, 이태우, 홍진규 등, 2020, mrnIF 94.697 • 여름철 북극 툰드라에서 극지 WRF의 육상-대기 프로세스 평가 * Evaluation of land-atmosphere processes of the Polar WRF in the summertime Arctic tundra, *ATMOSPHERIC RESEARCH*, 김대휘, 김현미 등, mrnIF 86.957
2019.01~2019.12 (SCI 논문 총 24건, mrnIF 평균 79.337, IF 평균 5.404)	• 하천유기물질에 강한 영향을 받는 북극 1차 에어로졸 생산 관련 파악 * Arctic primary aerosol production strongly influenced by riverine organic matter, E*NVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, 2019, 박지연 등, mrnIF 94.697 • 북극 에어로졸의 화학적 조성에 대한 생물유전체의 영향규명 * Influence of biogenic organics on the chemical composition of Arctic aerosols, *Global Biogeochemical Cycles*, JH Choi, 장은호 등, 2019, mrnIF 93.467 • 툰드라 생태계에서 생태계의 호흡에 대한 오래된 토양의 탄소 기여도 규명 * Drainage enhances modern soil carbon contribution but reduces old soil carbon contribution to ecosystem respiration in tundra ecosystems, *Global Change Biology*, 권민정 등, mrnIF 98.400 • 북부 영구 동토층 전역에서 관측된 겨울철 CO_2 대규모 손실과 미래 배출 전망 제시 * Large loss of CO_2 in winter observed across the northern permafrost region, *Nature Climate Change,* Suan M. Natali, Yongwon Kim, 이방용 *등,* mrnIF 100 • 북극 툰드라의 초목 녹지 변화에 대한 영구 동토층 반응 파악 * Permafrost response to vegetation greenness variation in the Arctic Tundra through positive feedback in surface air temperature and snow cover, *ERL*, Zhan Wang, Yeonjoo Kim 등, mrnIF 95.294
2018.01~2018.12 (SCI 논문 총 15건, mrnIF 평균 74.216, IF 평균 4.073)	• 동토 토양의 pH가 미생물 군집을 지배하는 요인 최초 규명 * Soil pH mediates the balance between stochastic and deterministic assembly of bacteria, *ISME Journal,* Binu Mani Tripathi 등, 2018, mrnIF 97.561 • 극지역 대기복사투과모델과 MODIS 대기 자료와 지상자료 데이터 관계 규명 * MODIS-derived global land products of shortwave radiation and diffuse and total photosynthetically active radiation at 5 km resolution from 2000, *Remote Sensing of Environment*, 류영렬 등, 2018, mrnIF 97.727 • 북극 스발바르에서 관측한 DMS 농도변화 자료 활용, 특성 규명

	* Atmospheric DMS in the Arctic Ocean and its relation to phytoplankton biomass, *Global Biogeochemical Cycles,* 박기태 등, 2018, mrnIF 96.410 • 혐기성 메탄 산화의 생지화학적 증거 제시 * Biogeochemical evidence of anaerobic methane oxidation on active submarine mud volcanoes on the continental slope of the Canadian Beaufort Sea, Biogeosciences, 이동헌, 김정현 등, 2018, mrnIF 85.641 ❖ 환경스트레스 내성 단백질의 돌연변이형 개발 (북극식물 유래 CaDHN의 돌연변이형 개발로 산업용 효모의 활용가치성 증가시킴, 특허출원-10-2018-0145825, 김한우 외, 2018)(별도 제출)
2017.01~2017.12 (SCI 논문 총 11건, mrnIF 평균 70.110, IF 평균 3.409)	• 북극대기 입자 형성에 기여하는 생물군의 역할을 세계 최초 관측적으로 증명 * Observational evidence for the formation of ocean DMS-derived aerosols during Arctic phytoplankton blooms, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 박기태 등, 2017, mrnIF 92.9 • 북극 해빙의 면적과 입자 형성 및 구름응결핵의 상호연관성 규명 * Arctic sea ice melt leads to atmospheric new particle formation, *Scientific Reports*, M. Dall Osto, 윤영준 등, 2017, mrnIF 85.714 • 북극 니알슨에서 LIBS를 이용한 토양과 대기중 입자의 성분분석 * Elemental composition of Arctic soils and aerosols in Ny-Alesund measured using laser-induced breakdown spectroscopy, *Spectrochimica Acta Part B,* 김기백 등, mrnIF 85.000 • 남극에서의 에어로졸 입자 물리적 특성의 계절 변화(북극 에어로졸과의 비교 연구) * Seasonal variations in physical characteristics of aerosol particles at the King Sejong Station, Antarctic Peninsula, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 김재석 등, 2017, mrnIF 91.765
2016.05~2016.12 (SCI 논문 총 10건, mrnIF 평균 76.380, IF 평균 3.839)	• 미국 알래스카 툰드라 생태계에서의 FD를 이용한 토양 탄소 플럭스 측정, 특성 최초 규명 * Continuous measurement of soil carbon efflux with Forced Diffusion (FD) chambers in a tundra ecosystem of Alaska, *Sci. of the Total Environ.*, Yongwon Kim, 박상종 등, 2016, rmIF 91.2 • 알래스카 토양분석을 통한 영구동토 활동층에서의 온실기체 거동 특성 제시 * Trapped Greenhouse Gases in the Permafrost Active Layer: Preliminary Results for Methane Peaks in Vertical Profiles of Frozen Alaskan Soil Cores, *PERMAFROST AND PERIGLACIAL PROCESSES*, Eunji Byun, Yongwon Kim 등, 2016, mrnIF 91.30 • 알래스카 툰드라 지역에서의 토양의 pH, 미네랄, 탄소 간의 상관관계 제시 * Relationships Among pH, Minerals, and Carbon in Soils from Tundra to Boreal Forest Across Alaska, *Ecosystems*, 2016, Satoru Hobara, Yongwon Kim, 이방용 등, mrnIF 87.81 • 위성과 현장 관측자료를 활용한 알래스카에서의 위도별 툰드라 식생 특성 제시

	* Latitudinal gradient of spruce forest understory and tundra phenology in Alaska as observed from satellite and ground-based data, *Remote Sensing of Environment*, Hideki Kobayashi, Yongwon Kim 등, 2016, mrnIF 100 • HT MALDI-QTaG방법을 활용한 다량의 샘플 동시 처리 및 질병의 임상 진단과 모니터링을 위한 바이오 의약품의 개발과 유효성 확인 방안 제시 * A MALDI-MS-based quantitative glycoprofiling method on a 96-well plate platform, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 김경진, 김윤곤 등 9명, 2016, mrnIF 90.6

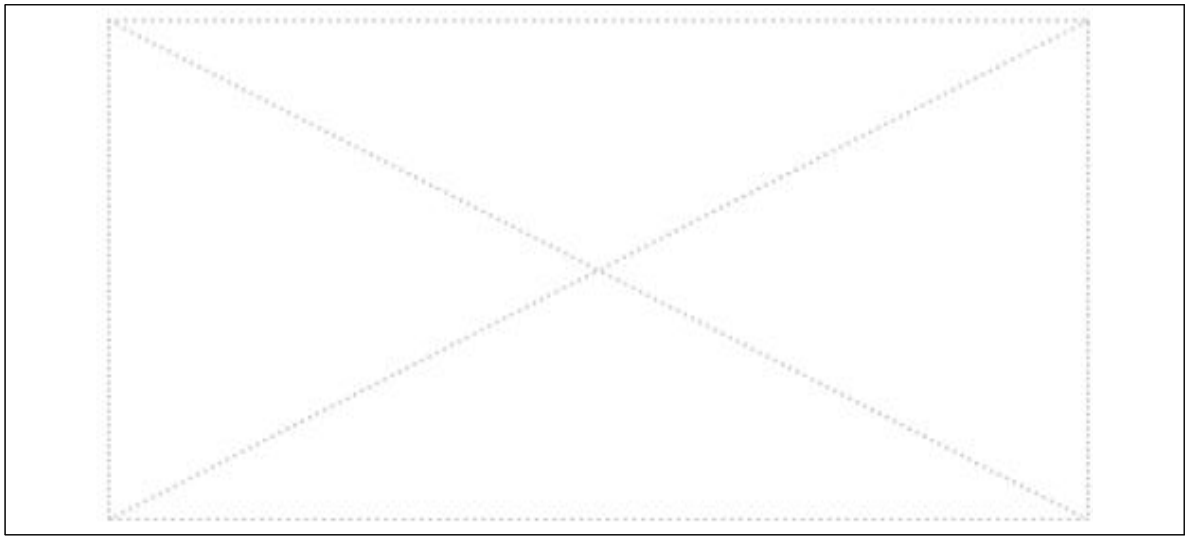
3.3. 극지기초원천기술개발사업(선행사업) 과제의 정량성과 분석

■ 연도별 SCI 논문 정량성과 향상

- 과학적 성과 우수성을 판단할 수 있는 연도별 SCI 논문 성과는 지속적으로 향상되고 있으며, '16년도 발표 논문 성과 10건에 비하여 '22년도는 22건으로 연평균성장률 14%로 증가함
- 과제 수행기간 중 가장 높은 성과를 보이는 기간은 '19년도 24건, '20년도 26건이며, '18년도 대비 '19년도 성과는 1.6배 증가하였음
- '21년은 15건으로 '18년도 수준으로 감소하였는데, '19년 말에 발생한 코로나19의 여파로 '20년도부터 북극 현지 출장을 하지 못하는 등 북극현장 연구 수행의 어려움으로 인한 성과 저하로 이어졌고, 또한 연구 착수가 '21년 4월 27일부터 시작되어 약 8개월의 짧은 수행기간 때문으로 사료됨
- '22년도 성과는 '19년 이전보다 높은 성과를 보이면서 코로나19로 인하여 하락된 연구환경에서 점차 회복하고 있음
- 극지연구는 남·북극 현장 방문을 통하여 데이터 확보 등이 중요한데, 코로나19와 같은 글로벌 규모의 재난형 질병이 발생하면 현장 방문이 어려워서 단기간 성과 창출에 많은 영향을 받으며 실제 성과 창출률 하락이 예상됨

[본 과제 선행사업의 연도별 SCI 논문 발표 성과]

연도	'16년	'17년	'18년	'19년	'20년	'21년	'22년	합계
SCI 건수	10	11	15	24	26	15	22	101

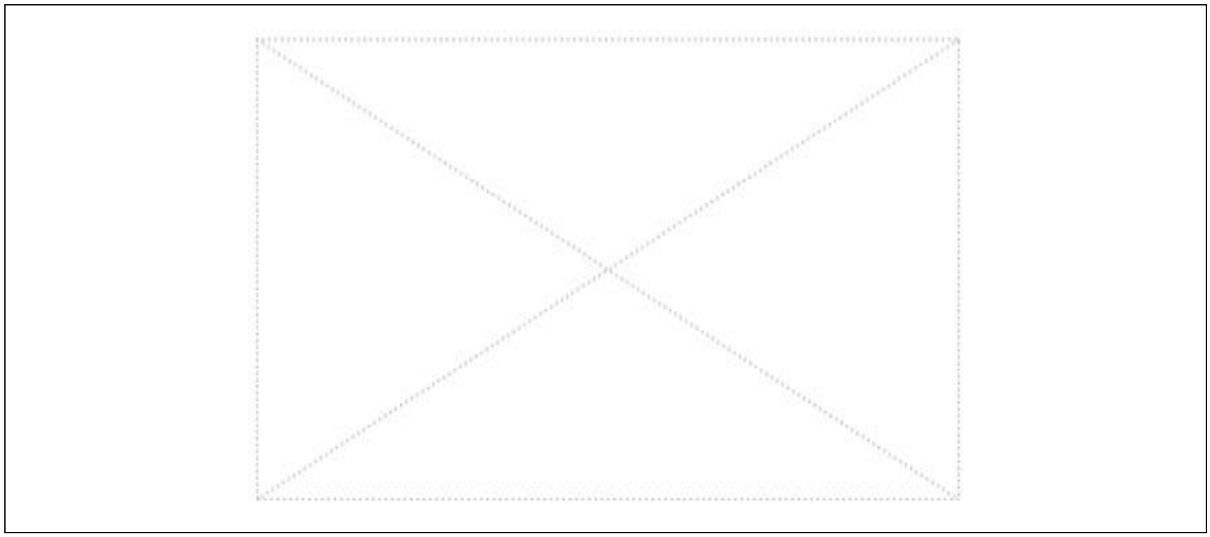


[본 사업 선행과제의 연도별 SCI 논문 발표 성과]

- 국가 전체 SCIE 논문 성과는 ‘16년에서 ‘20년동안 4.49%로 증가하였는데 비하여, 본 과제 선행사업의 동 기간동안 연평균성장률은 26.98%로 6배 이상 높은 증가율을 보이고 있음
- 또한, ‘16년 대비 ‘20년 연평균성장률을 비교하면, 국가 전체 성장률은 4.49%, 기초단계는 3.76%인데 비하여, 본 과제 선행사업은 26.98%로 높은 성과를 창출하고 있음
- 본 사업의 선행과제는 응용, 개발단계와 다른 기초연구의 특성을 갖고 있는데, 국가전체 기초단계 논문 성과에 비교하여 높은 우수성을 보이고 있음
- 극지분야는 초기 연구거점이 확보되기까지 어려움이 있으나, 연구거점 구축 후 다양한 연구활동을 수행하면서 연구성과가 국가전체 연구성과에 비교하여 높은 우수성을 보이고 있음
- 사업 초기에 비하여 사업 후반부에 논문의 양적 성과가 높아지는 것은, 초기 연구거점 확보와 연구데이터 축적에 시간이 소요되었기 때문으로 판단됨

[최근 5년간 국가전체 및 본 사업 선행과제의 SCI 논문 발표 건 수]

구분	‘16년	‘17년	‘18년	‘19년	‘20년	연평균성장률
국가 전체	37,385	39,032	41,143	41,919	44,563	4.49%
국가 기초단계	25,443	25,951	27,551	27,702	29,487	3.76%
본 사업 선행과제	10	11	15	24	26	26.98%



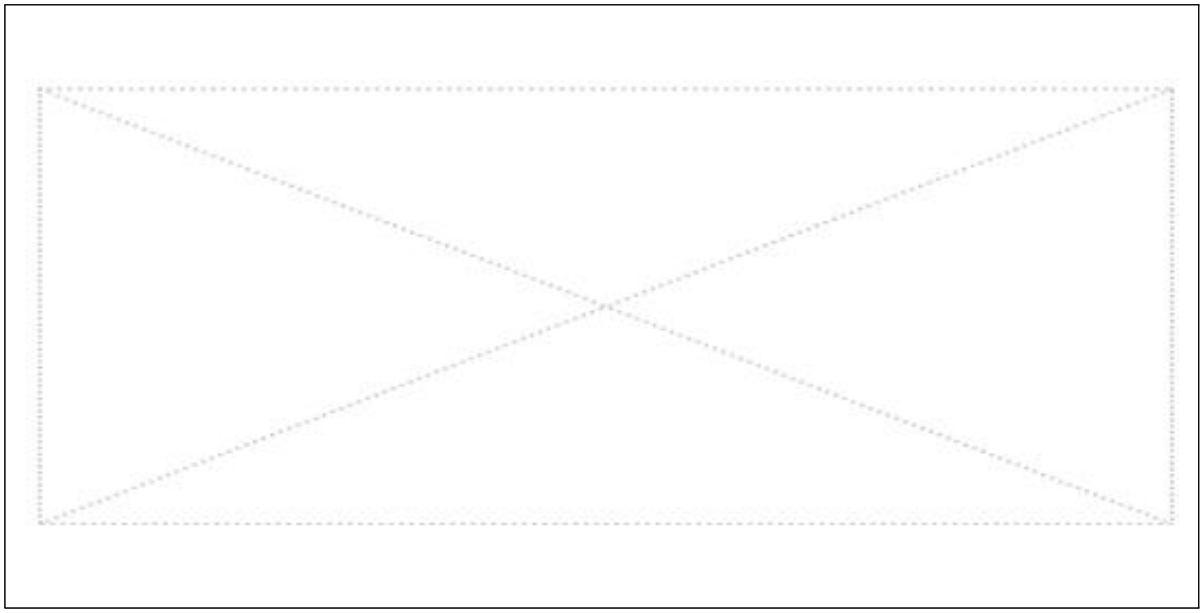
[최근 5년간 국가전체 대비 본 사업 선행과제의 SCI 논문 성장률 비교]

■ 연도별 mrnIF 성과의 우수성 유지

- mrnIF(표준화된 순위 보정 영향력 지수)는 과학기술 분야간 논문 지수를 표준화하기 위하여 보정된 지수로 해당분야에서 학술지가 차지하는 위상을 나타내는 지표임
- 해당 학술지의 학문 분야 내 Impact Factor 순위를 0~100점으로 표준화한 값으로 지수 값이 높을수록 해당 분야 내 위상이 높음을 의미함
- mrnIF가 높다는 것은 상위 저널에 투고하는 논문이 많다는 것으로 과학적 성과의 우수성을 간접적으로 확인할 수 있음
- 본 과제 시작 초기부터 7년간 mrnIF 평균 75.27로 우수한 학술지에 게재하고 있으며, 성과도 지속적으로 유지하고 있고, '19년도는 79.34로 가장 높은 성과를 보이고 있음
- '17년부터 '19년까지 mrnIF 값이 지속적으로 향상되고 있었으나, 코로나19 발생 후에는 감소하는 경향이 있었음
- '16년도 논문 양적 성과가 낮음에도 질적우수성을 나타내는 mrnIF는 높은 우수성을 보인 것은, 본 과제 수행 초기부터 질적우수성을 확보하기 위한 연구진의 노력이 있었음을 확인할 수 있음

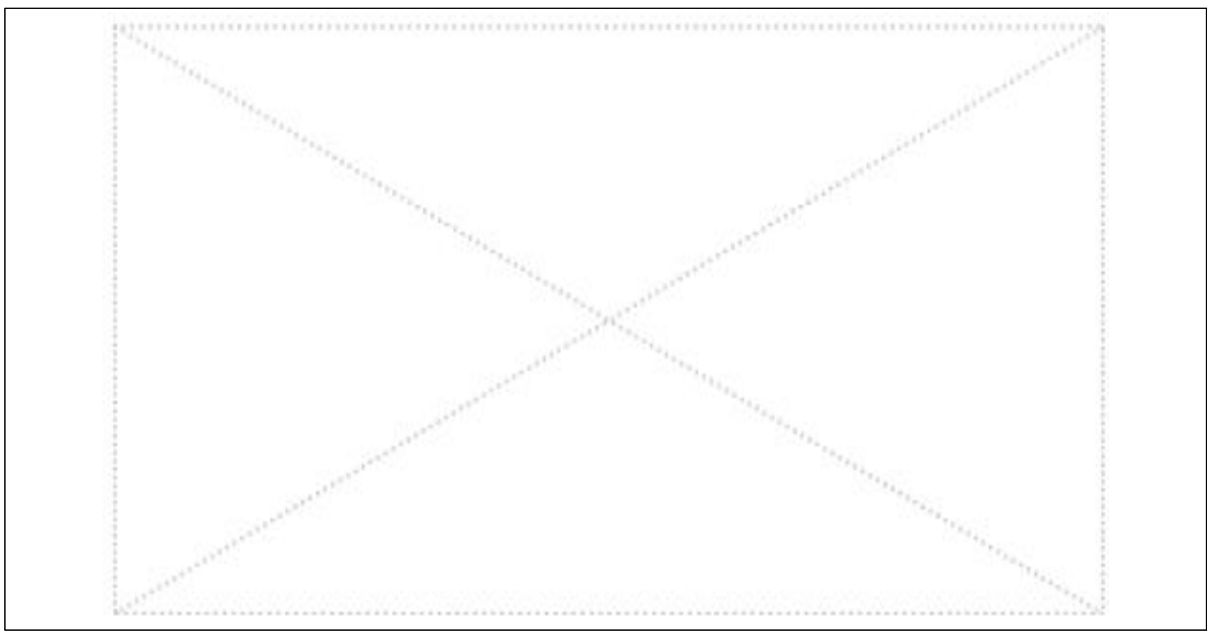
[본 사업 선행과제의 연도별 mrnIF 성과]

연도	'16년	'17년	'18년	'19년	'20년	'21년	'22년	평균
mrnIF	76.38	70.11	74.22	79.34	73.53	77.65	75.64	75.27



[본 사업 선행과제의 연도별 mrnIF 성과]

- 국가 전체 mrnIF 값과 비교하였을 때, 매년도 10 이상의 차이로 높은 질적 우수성을 보이고 있음
- '19년도는 국가 전체 mrnIF 값에 비교하여 가장 많은 14.09의 격차를 보이며 성과가 높아지다가, 코로나19 상황인 '20년도에는 7.69로 줄어들었는데, 이는 극지 현장 출장이 어려워지면서 성과가 낮아지는 것으로 파악됨
- 국가 전체 mrnIF 값은 '19년도 65.25 대비 '20년도에 65.84로 소폭 향상되었는데, 실험실 등에서 수행하는 연구는, 코로나19와 같은 전 세계적 재난 상황임에도 관측 거점에서의 현장조사에 비해 다소 영향을 덜 받았던 것으로 판단됨



[최근 5년간 국가 전체 대비 본 사업 선행과제의 mrnIF 비교]

[최근 5년간 국가 전체 대비 본 사업 선행과제와의 mrnIF 차이 비교]

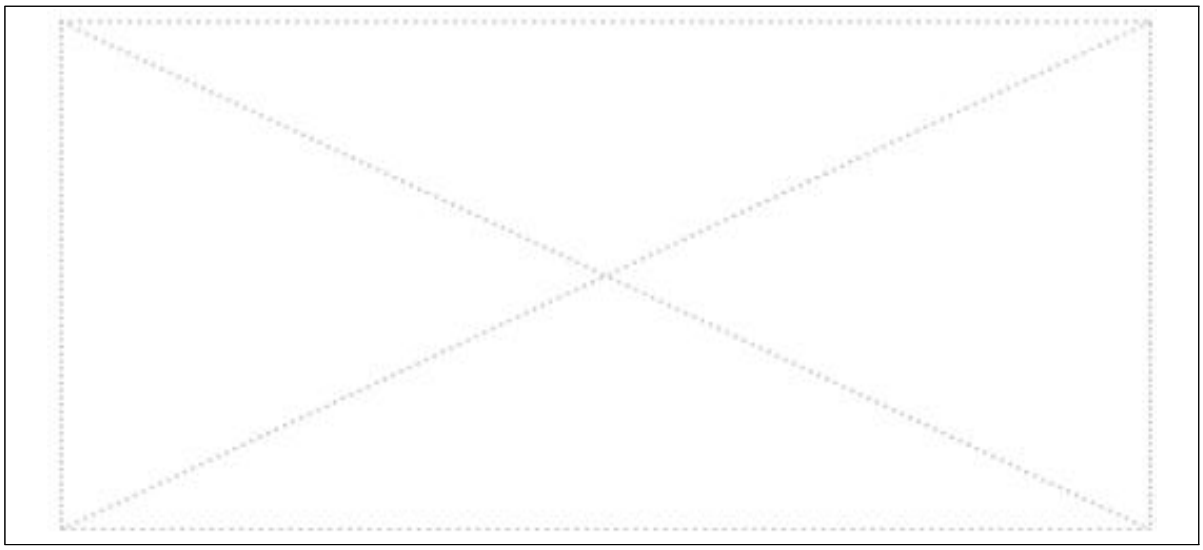
구분	‘16년	‘17년	‘18년	‘19년	‘20년	평균
국가 전체	63.54	64.01	63.83	65.25	65.84	64.49
본 사업 선행과제	76.38	70.11	74.22	79.34	73.53	74.71
차이	12.84	6.10	10.39	14.09	7.69	10.22

■ 연도별 IF 성과의 우수성 유지

- IF(Impact Factor)는 학술지의 영향력과 수준을 평가하는 지표로, 발표한 학술지의 상대적 중요도를 파악할 수 있으며, 수치가 높을수록 신뢰할 수 있는 학술지를 의미함
- IF는 분야 간 논문 수 등이 달라서 수치로 단순하게 평가할 수 없으며, 극지연구의 경우 장기간 소요되고, 전 세계적으로 연구자 수가 적어서 타 분야에 비하여 IF값이 낮게 나타남
- 기초과학의 경우에는 논문을 출간하는 시간이 많아지고, 장기간 우수하게 평가를 받아도 IF 값이 낮은 경우가 있음
- 연도별 IF값을 보면, ‘17년 3.409에서 ‘19년 5.404로 상승하다가, 코로나19 상황 이후 ‘20년에는 3.720으로 감소한 이후 ‘22년에 가장 높은 6.631로 우수한 성과가 창출된 것으로 분석됨

[본 사업 선행과제의 연도별 논문 IF 성과]

연도	‘16년	‘17년	‘18년	‘19년	‘20년	‘21년	‘22년	평균
IF	3.84	3.419	4.07	5.40	3.72	5.92	6.63	4.71



[본 사업 선행과제의 연도별 논문 IF 성과]

4 수요조사 시행과 결과

4.1. 수요조사 개요

■ 수요조사 추진 배경

- ‘극지기초원천기술개발사업’은 과학기술정보통신부/한국연구재단의 지원을 받아 수행(~‘24년 일몰)되고 있으며, 동 사업의 일몰 후 추진하기 위한 후속사업을 준비 중임
- 극지역은 지구온난화와 관련하여 급변하는 연구 가능한 지역으로, 기후·환경 변화에 대한 관측, 분석, 평가 및 예측 등의 연구활동을 수행할 수 있음
- 주관연구기관인 건국대학교에서는 후속 기획연구를 통하여 북극 등 극지에서 수행할 수 있는 연구에 대한 수요 조사를 기획에 반영함
- 후속 기획연구에서는, 2025년부터 중장기(5년~10년)로 수행할 극지 R&D 활동으로 북극이사회 등 국제사회 의무활동 수행 및 북극 현안 대응능력 강화를 포함하고자 함
- 극지연구는 단기간 데이터 확보, 분석 등으로 연구성과 창출이 어려우며, 현장 자료 확보를 위한 연구거점을 기반으로 연구활동을 수행해야 하는 특성이 있으므로, 타 분야 수요조사와 차별화되는 성격이 있음

■ 유사 기초단계 연구 수요조사서 비교를 통하여 수요조사서 항목 도출

- 수요조사서는 수요조사 응답자의 일반사항 및 제안 과제의 구체적인 내용을 작성하도록 하는 연구내용에 대한 작성을 포함하고 있음
  - 일반사항은 제안주제명, 제안하는 연구주제의 연구 분야, 연구 지역 및 제안하는 연구자의 인적사항 등을 포함하고 있음
  - 수요조사서의 연구내용에는 연구배경과 필요성, 국내외 연구개발 동향, 연구목표, 연구내용 및 범위, 연구 추진체계, 기존연구와 차별성, 예상 성과 및 활용방안, 연구비와 수행기간 등을 포함함
- 연구분야 구분은 극지 동토/대기 관측과 육상생태계 변화 및 북극과거 기후 이해 등 7개 분야로 구성하여 포함하고 있음

[극지연구 수요조사를 위한 분야 구분]

분야 구분	비고
극지 동토/대기 관측	
육상생태계 변화	
북극 과거 기후 이해	
온실기체 생전환 기술	
북극권 및 중위권 대기 모델링	
북극 원주민 이해	
극지기반 응용/활용 기술	
기타	

- 연구 조사 지역은 북극연구 활동의 접근성과 조사된 데이터의 중요성 등을 고려하여 미국 알래스카, 캐나다, 아이슬란드 등 북극권 접근을 고려한 국가와 북극연안 등을 대상으로 포함함

[극지연구 수요조사를 위한 지역 구분]

지역 구분	비고
미국 알래스카	
캐나다	
아이슬란드	
노르웨이 스발바르	
러시아	
그린란드	
스웨덴/핀란드	
북극 연안	
기타	

■ 수요조사서 연구내용 주요 항목

- 연구배경과 필요성에는 해당 주제를 추진해야 하는 이유, 주제의 중요성 및 정부 지원 필요성 등을 작성하도록 함
- 국내·외 연구개발 동향에는 제안하는 주제에 대하여 선진 극지연구 국가들이 정책적으로 지원하고 있는 상황과 향후 전망 등을 제시하고, 추진과제의 추진 필요성을 뒷받침할 수 있는 자료 등을 제시함
- 연구목표는 간략하게 연구의 내용을 포함하도록 하며, 이미지, 표 등을 사용하지 않고 정량적으로 목표치를 제시할 수 있도록 작성함
- 연구내용 및 범위는 일반항목에서 요청하고 있는 연구분야와 연구 지역을 고려하여 연구기간 동안 수행할 세부 내용 등을 포함하여 기재하도록 요청함
- 연구 추진체계에서는 세부주제 내용별로 산, 학, 연 등 추진 주체간 역할 등을 고려하여 역할분담하고, 필요시 도식화하여 제시하도록 함
- 기존 연구와 차별성에서는 기존 유사연구에서 제기될 수 있는 중복성에 대한 이슈를 해결할 수 있도록 차별화되는 내용을 기재함

- 예상성과 및 활용방안에는 제안하는 연구를 추진하고, 성공적으로 수행하였을 때, 예상하는 대표성과, 예상 달성 시점의 성과와 과학기술적, 사회경제적 활용 방안 등을 포함함
- 총사업비와 수행기간에서는 제안 연구기간 동안 소요되는 총 연구비와 전체 사업기간을 제시하도록 요청함

[수요조사서 연구내용 항목 제시]

항목 구분		내용 작성
연구 배경과 필요성		
국내/외 연구개발 동향		
연구 목표		
연구 내용 및 범위		
연구 추진체계		
기존 연구와의 차별성		
예상 성과 및 활용방안		
연구 규모	총 사업비	
	총 수행기간	

■ 수요조사 대상, 기간 및 방법

- 수요조사는 '극지 빅데이터 연계 미래 기후변화대응 극지기초원천기술 개발사업 수요조사'로 하여 기획과제명을 포함하도록 하여 수요조사 실시함
- 수요조사 대상은 극지연구를 경험한 연구자가 많지 않음을 고려하여 주요 학회를 대상으로 수요조사 실시함

– 주요 조사대상 학회는 대한지리학회, 한국기상학회, 한국대기환경학회, 한국환경생물학회 및 한국환경생태학회를 대상으로 조사 실시

- 수요조사 기간은 극지연구 등에 대한 이해를 높일 수 있는 기간이 필요하다고 판단되어 2022년 8월 22일부터 9월 23일까지 약 1개월 기간 동안 실시함
- 수요조사 방법은 온라인으로 직접 연구내용 입력이 가능하도록 하는 방법과 수요조사서를 직접 작성 후 이메일로 접수하는 방법을 실시함

4.2. 수요조사 결과

■ 수요조사 응답 현황 분석

- 수요조사 응답은 총 22건이며, 대학이 11건, 연구계에서 10건 및 학회로 응답한 연구자가 1건임

– 극지연구는 극지역 현장에서 정밀 측정시스템 설치 운영 및 시설물 관리를 통한 시료, 데이터 등을 확보해야 하는 현장연구가 필수이므로 타분야 연구에 비하여 인프라 구축과 관리, 연구 참여 난이도가 높은 편임

– 수요조사 응답자들도 극지현장에서 데이터 확보 등을 수행해야 하므로 현장경험을 통한 연구의 연구주제 등을 제안한 것으로 분석됨

[수요조사 응답 현황]

– 연구분야별 응답은 제안 연구주제에서 단일분야 응답이 9건, 2개 분야 이상의 복수 응답이 13건으로 극지연구의 융복합 연구 특성이 반영됨

• 단일분야로는 '육상생태계 변화'에서 3건으로 가장 많은 수요를 보였고, '극지 동토/대기 관측'과 '북극 과거 기후 이해'가 각각 2건을 응답하였고, '북극 원주민 이해'와 '북극권 및 중위권 대기 모델링'이 각각 1건으로 응답함

[수요조사 중 단일분야 응답 주제]

[제안 주제 중 단일분야 선택 주제]

제안 주제명	단일분야 선택
아시아–북극 해상관측 기반 블랙카본 조사, 특성분석	극지 동토/대기 관측
극지 수계–대기 중 유기물 분자단위 특성 분석	극지 동토/대기 관측
대사체 자료의 신경망 기계학습과 초분광 영상을 통한 북극권 툰드라 식물의 환경 스트레스 판정	육상생태계 변화
빅데이터를 활용한 북극 토양 피복도 변화	육상생태계 변화
북극 영구동토층 변화에 따른 탄소 순환 변화 연구	육상생태계 변화
과거프록시 데이타–모델 비교 연구	북극 과거 기후 이해
극지 고기후 복원을 통한 생태계 물질순환 진단 및 예측	북극 과거 기후 이해
북극 원주민 공동체의 지명 부여와 문화유산 구성, 기후 환경 변화로 인한 원주민의 지명 변화 및 문화(생활양식, 의례, 축제 등) 변동	북극 원주민 이해
대기화학모델링을 이용한 북극권 및 한반도 미세먼지 상호 영향성 연구	북극권 및 중위권 대기 모델링

- 2개 분야에 연계되는 응답은 6건으로 ‘육상생태계 변화’와 ‘북극 과거기후 이해’가 2건을 응답하였고, ‘육상생태계 변화’와 ‘극지 동토/대기 관측’, ‘북극 과거기후 이해’와 ‘극지 동토/대기 관측’, ‘극지 동토/대기관측’과 ‘극지기반 응용/활용기술’, ‘극지기반응용/활용기술’과 ‘북극 원주민 이해’가 각각 연계됨

[극지 수요조사 중 2개 분야 연계 주제]

[제안 주제 중 2개 분야 연계된 주제]

제안 주제명	2개 분야 선택
영구동토층 토양(과거-현재) 내 메탄 생성 및 제거 연구	육상생태계 변화 북극 과거 기후 이해
극지 환경변화 모니터링 및 예측 플랫폼 개발	극지 동토/대기 관측 육상생태계 변화
시베리아 산불기원 물질 대기수송이 북극해 탄소고정과 해빙 융해 가속화에 미치는 영향 연구	극지 동토/대기 관측 북극 과거 기후 이해
과거 기후 변화에 따른 연안 환경 변화 복원	육상생태계 변화 북극 과거 기후 이해
딥러닝 기법을 이용한 극지 대기 내 초미세입자 발생 예측 시스템 개발	극지 동토/대기 관측 극지기반 응용/활용 기술
북극권 지역사회의 기후변화에 따른 영향 및 이누이트 생활상 변화에 미치는 영향 분석	북극 원주민 이해 극지기반 응용/활용 기술

- 3개 분야에 연계되는 연구주제는 7건으로 상대적으로 높게 응답하고 있는데, 극지연구는 극지역에서 함께 연계되는 주제를 수행하기 쉬운 특성이 반영된 것으로 보여짐
- 극지연구 중에서 ‘극지 동토/대기 관측’과 ‘육상생태계 변화’ 및 ‘북극 과거기후 이해’ 및 ‘극지기반 응용/활용기술’ 등이 상호 연계되면서 융복합 연구활동을 수행할 수 있을 것으로 제안됨

[극지 수요조사 중 3개 이상 분야 연계 주제]

[제안 주제 중 3개 분야 이상 연계된 주제]

제안 주제명	3개 분야 이상 선택
미래 기후변화 대응 방향을 투영하는 과거 및 현재 극지 기후환경 변화 파악 연구	극지 동토/대기 관측 북극 과거 기후 이해 북극권 및 중위권 대기 모델링
위성 사진을 이용한 북극 생태계 천이 조사	극지 동토/대기 관측 육상생태계 변화 북극 과거 기후 이해
극지-타이가-한반도 사이 시공간적 원격상관에 관한 연구	극지 동토/대기 관측 육상생태계 변화 북극 과거 기후 이해 북극권 및 중위권 대기 모델링
기후변화에 따른 북극 육상기원 탄소 유입 기록 복원 연구	극지 동토/대기 관측 육상생태계 변화 북극 과거 기후 이해
다차원 원격탐사 자료를 이용한 동토 지형 및 생태계 변화 모니터링	극지 동토/대기 관측 육상생태계 변화 극지기반 응용/활용 기술
영구동토층 환경미생물을 이용한 메탄 이용 바이오 기술개발	육상생태계 변화 온실기체 생전환 기술 극지기반 응용/활용 기술
북극지역의 사회, 문화, 공간 연구	북극 원주민 이해 극지기반 응용/활용 기술 북극지역의 사회공간적 변화

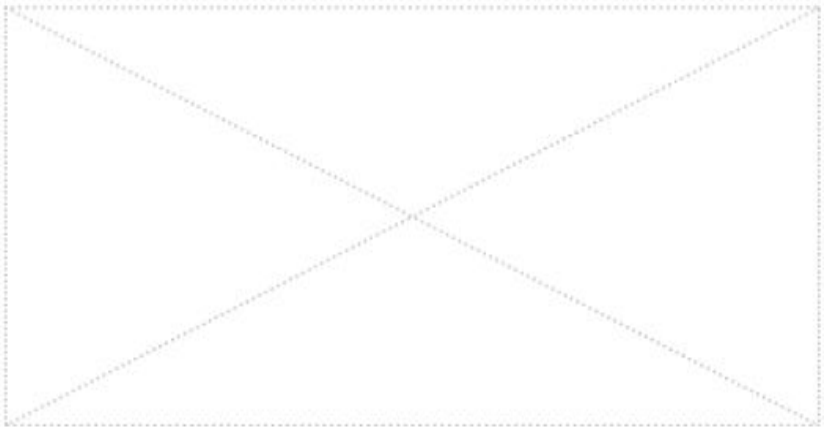
- 연구분야별 주요 키워드는 분야별로 주제와 연계되어 도출되었으며, 극지역의 특성을 반영한 기후변화와 생태계변화, 과거기후, 모델링, 온실기체와 원주민 및 응용 등을 고려하여 도출됨

[연구분야별 수요조사에서 도출된 주요 핵심어]

분야	핵심어
극지 동토/대기 관측	기후환경 모니터링, 계절별 대기, 토양, 해양 변화, 극지 에어로졸 생성원인, 기후변화 원인 물질 모니터링, 블랙카본관측, 특성, 육상-해양 탄소순환, 산불기원 에어로졸 영향
육상생태계 변화	토양생태계 변화, 탄소배출 기여도, 동토층유기물-메탄 순환기작, 식물 대사체변화, 스트레스, 생태계 식생 변화, 천이 정도, 북극 토양 피복도, 극지 타이가 지역 지표 변화
북극 과거 기후 이해	과거환경 변화 복원, 과거 수온프록시, 퇴적코어 활용 기후환경 복원, 과거 탄소기원 방출량, 고기후복원 생태계 물질 순환, 과거 기후와 육상 탄소 유입 변동
북극권 및 중위권 대기 모델링	북극권-대기 해양모델링, 극지 타이가-한반도 모델링, 북극권-한반도 미세먼지 상호 영향성
북극 원주민 이해	원주민 지명 변화, 문화유산, 원주민 지정학적 위상, 원주민 직면 문제, 기후변화와 원주민 삶 변화
온실기체 생전환	환경미생물 이용, 생촉매효소 이용
극지기반 응용/활용	메탄 이용 바이오 기술, 광학 및 레이더, 다중센서 원격탐사

■ 수요조사 연구수행 지역별 수요

- 조사지역은 미국 알래스카 12건, 노르웨이 스발바르와 북극 연안이 각각 11건, 캐나다 10건 및 아이슬란드 7건으로 응답됨(총 22건에서 중복 지역 포함하여 계상)
- 또한, 러시아 6건, 그린란드 5건, 스웨덴/핀란드가 3건을 응답함



[연구수행 지역별 수요]

- 지역별 연계는 미국 알래스카와 노르웨이 스발바르 및 캐나다 연계 주제가 9건, 8건으로 많았으며, 미국과 아이슬란드 연계는 6건으로 조사됨
- 북극 연안은 11건의 연구 수요가 있지만, 특정 국가 또는 지역에 집중되기 보다는 상대적으로 유사하게 응답하고 있음

미국 알래스카	노르웨이 스발바르	북극연안

[주요 지역별 연계 지역 현황]

■ 수요조사 연구 과제 규모 현황

- 연구과제 규모는 최대 450억 원에서 최소 3억 원 규모로 제안되었으며, 평균 52억 원의 규모로 조사됨(단, 관측거점 등 현장에서의 인프라 구축과 관리 비용은 포함되지 않은 것으로 분석됨)
- 연구기간은 최대 8년에서 최소 3년으로 평균 5.3년의 기간으로 조사되었는데, 북극 현장 데이터 확보 등 기간이 필요함이 반영된 것으로 보여짐

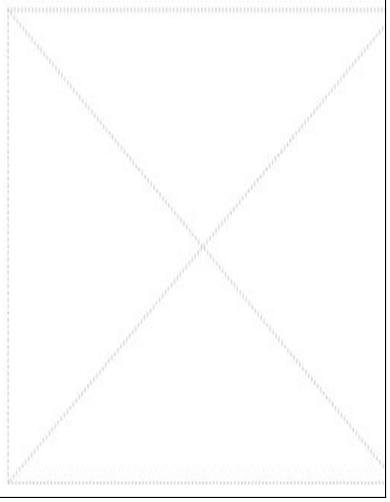
– 제안 과제 중에서 최대 액수인 450억 원 과제는 본 기획과제의 규모보다 커서 실질적인 제안으로 활용하기 어려운 측면이 있는 것으로 분석됨

– 국가연구개발사업에서 총액 500억 원 이상은 예비타당성 조사를 거쳐야 하므로 500억 원 이하 규모는 본 기획에서 최대 가능한 규모임

- 연평균 연구비 규모는 최대 75억 원에서 최소 연평균 0.6억 원이며, 평균 연구비는 8.6억 원으로 조사됨

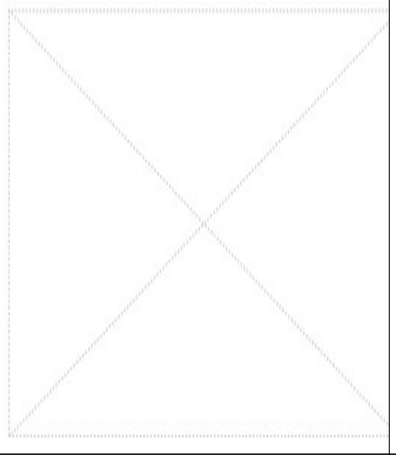
– 연평균 최대 연구비는 정부연구개발사업의 규정 등을 고려할 때 연구비 확보 가능성이 부족하며, 최소 연구비는 현장 출장 및 자료 확보 등을 고려하였을 때, 실질적인 연구활동 수행이 어려울 것으로 판단되나, 이는 기 확보된 시료 또는 타 연구팀에서 확보한 시료 등을 활용하여 연구에 참여할 수 있는 가능성 있을 것으로 사료됨

– 최대 연구비 연평균 75억 원은 현재 수행 과제 규모를 고려하였을 때, 연구 예산이 대폭 확대되어야 하는데, 정부 지원으로 확대하기는 한계가 있고, 기초과학의 특성상 민간 기업체에서 연구비를 지원하면서 참여하기 어려우므로 응용, 개발 및 상용화 단계 연구와 차별화하여 재원확보가 필요함

전체 연구비(억 원)	전체 연구기간(년)	연평균 연구비(억 원)
		

[제안된 연구과제 규모]

- 제안된 연구과제 중에서 반영이 어려운 450억 원 과제를 제외하고 최대 규모는 120억 원이며, 최소 규모는 동일한 3억 원, 평균 연구비는 30.7억 원으로 조사됨
- 연구기간의 최대 8년, 최소 3년 및 평균 5.3년은 최대 8년에서 최소 3년으로 평균 5.3년의 기간으로 변경되지 않았음
- 450억 원 제안 과제를 제외하고, 연평균 연구비 규모는 최대 20억 원에서 최소 0.6억 원이며, 평균 5.2억 원의 연구비로 제안됨

전체 연구비(억 원)	전체 연구기간(년)	연평균 연구비(억 원)
		

[제안된 연구과제 규모 중 450억 원 제외 현황]

■ 제안된 과제의 활용방안

- 극지 육상(동토, 생태), 대기, 연안 관측 등 연구의 성과로 기후변화 시나리오 기초자료 제공, 지역 기후모델링 재현시기 확대, 지구온난화 연계 메탄 방출 변동량 예측 및 전지구 기후변화 모델 정교화, 예측 기여 등에 포함하여 전략주제 도출함
- 육상생태계 변화 연구를 통하여 북극 생물다양성 보전에 기여하며, 기후변화에 따른 시기별 생태계 변화를 파악하고, 유기물 기원별 거동 연구기반을 구축하고, 기후 재난에 따른 생태계 물질순환 변화 예측 가능성에 활용할 수 있음
- 북극 과거 기후환경 복원을 기반으로 미래기후 예측에 기여하기 위해, 중장기 기후환경 복원자료 확보 및 활용에 기여 가능함
- 북극 원주민 이해 연구를 통하여 지역 원주민 문화 변화 영향 조사와 지역 원주민 생활, 문화 등 이해 확대 가능하여, 전략주제 도출함
- 공통적으로 북극 관련 국제기구 활동 강화와 북극 연구인력 양성에 기여하고, 북극 국제 공동연구 기반 조성 및 새로운 연구주제 개척에 기여에 할 수 있음
- 극지연구는 구축된 연구현장의 자연환경 특성에 따라 연구의 주제, 내용 등을 반영할 수 있으며, 조사된 연구수요도 기존 연구 거점을 고려하여 연구활동 계획에 반영하도록 함
- 또한 연구수요조사 내용 중 일부는 기획연구진의 내용과 유사, 중복되어 반영하고 있으며, 예산, 연구환경 등을 고려하여 협력을 활성화할 수 있는 내용 중심으로 반영하여 기획함
- 다만, 본 수요조사에 응하고 제시된 주제 중 상당 부분은 이미 본 기획연구에 참여하는 연구자들로부터 도출된 주제와 유사, 중복성이 있어서 기존 기획연구 주제와 융합하여 수행할 수 있으나, 별도의 특수한 주제로 수행되어야 가능할 듯한 분야는 소요예산, 연구지역, 연구기간 등을 고려하여 반영 여부를 판단하여 제시함

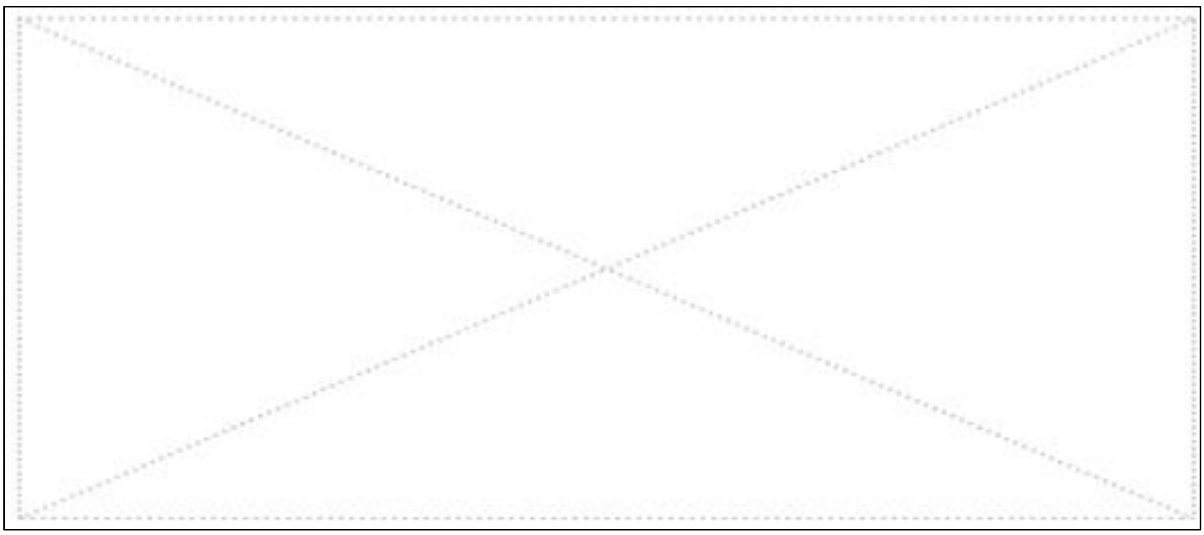
5 이슈도출(시사점) 및 분석

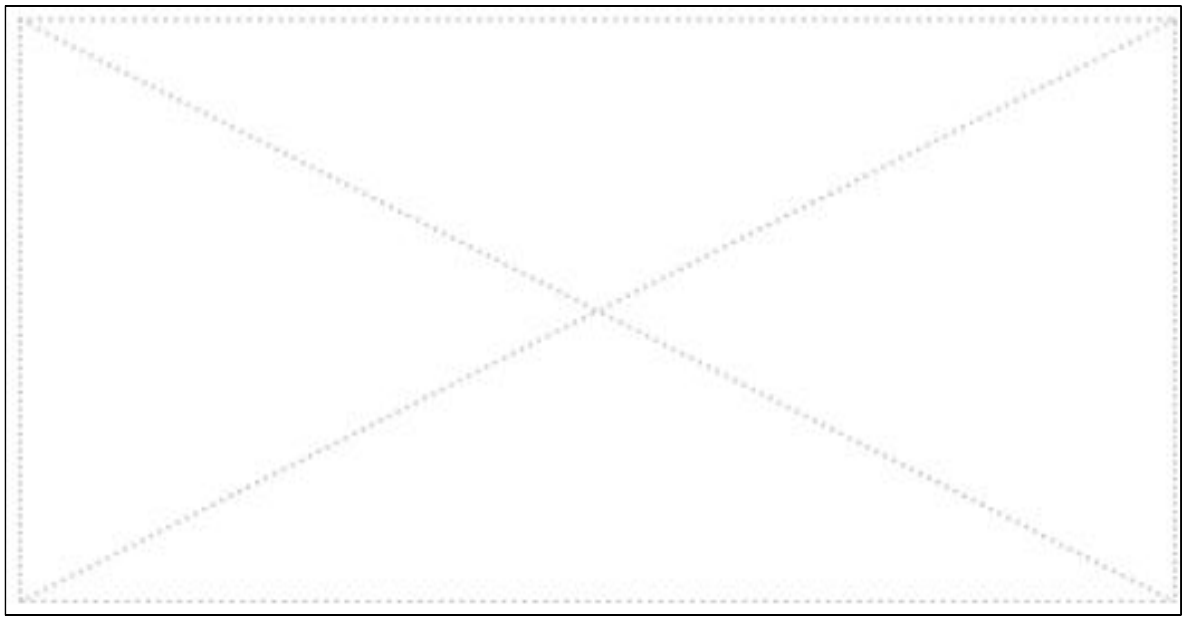
5.1. 이슈도출의 개념

본 기획연구에서는 최근의 극지 연구 및 활동에 대한 국내외 동향조사, 성과분석 등에 기반하여 미래 지향적 극지과학활동 강화를 위한 주요 이슈를 도출하였음

■ 극지 과학활동 및 평가 지속의 절대적 필요성

- **(기후·환경변화 현상 규명과 예측)** 기후변화의 정밀 진단과 미래 환경변화에 대응하기 위한 과학연구 활동 지속 및 강화 필요(**환경적 미션**)
  - 지구온난화에 의한 북극의 급격한 기후·환경변화 현상 및 영향 파악 시급
  - 북극권에서의 변화 감지와 한반도 영향 예측 대응 활동 강화 필요
- **(미래가치 창조)** 극지역 극한 환경을 극복하는 기술 개발과 저온 특성, 미개척 생물자원을 활용한 미래 가치 창출의 신성장 동력 확보(**사회적 미션**)
  - 문제해결형 실용화기술에 대한 과학기술 등의 접근을 통한 현상 규명 및 기술개발 강화 필요
- **(인프라와 네트워킹 강화)** 북극 연구영역확대와 인프라 확충 및 국내외 협연 네트워킹 강화 필요(**사회적 미션**)
  - 극지연구 지평 확대 특성에 맞는 융복합과학기술 적용, 인프라 확보 및 4차 산업형 빅데이터 확보와 지능정보확산 필요
- **(국가역할 및 이익제고)** 북극권 국제거버넌스에서 국가차원의 대한민국 역할 이행과 국익제고 필요(**외교적-거버넌스 미션**)
  - 북극이사회 정식옵서버 국가로서의 북극권의 지속가능한 개발과 환경보호를 비롯한 공공문제 동참과 국익 제고 필요





[북극권의 글로벌 이슈(과학/정치·외교/사회적 접근 필요성)]

[주요 이슈별 시사점 분석]

구분			주요 이슈	시사점
정책동향	국내	과학기술정책	국가 R&D 혁신역량 극대화	혁신역량 극대화를 위한 과학기술 생태계 조성 및 혁신주체 역량강화
		극지정책	극지연구 지평확대	기후변화, 생태계 보존 등 국제현안과 관련된 극지연구 지평확대 및 지원기반 선진화
	해외	남극연구 과학위원회	남극연구 연계 및 기반강화	남극대륙에서의 관측 등 고품질의 남극연구를 선제적이고 협력적으로 강화 및 확대
		북극이사회	북극환경보호 및 지속가능한 개발	급변하는 극지역의 환경변화 이해 제고 및 예측 연구 수행
연구동향	국내	한국	극지연구 과학기술 역량강화	글로벌 이슈 해결을 위해 국제협력을 통한 지구환경변화 대응과 우리나라 과학기술정책 제언, 국제기구 및 선진연구기관과 협력 강화 추진
	해외	미국	남북극 리더십과 영향력 유지강화	바이든 행정부 출범 후, 특히 북극에 대한 과학적/안보적 영향력 강화에 예산 집중
		영국	극지연구 선도국가 위상유지	글로벌 이슈와 과학간 연계강화 남극조사소 중심으로 극지에 대한 연구경쟁력 강화
		일본	전략적 투자와 연구 인프라 강화	기후변화 관련 연구활동 및 인프라 확대 북극 정보수집, 자원개발 등 국가차원의 투자 확대
		중국	국가 차원의 대규모 투자 추진	대규모 인프라 투자 통한 극지 영향력 강화 4개 프로그램 중심 극지 활동 (해양/생물/대기/빙하)
		독일	기초원천연구 등 과학연구 활동강화	기초과학 투자 강화 및 극지생태계 연구 중심 추진 연구용 쇄빙선 중 가장 큰 규모의 쇄빙선 건조중
		러시아	북극권 중심의 극지연구 활동수행	'2020 북극계획'을 수립하면서, 최근 남극보다는 북극 이슈 중심의 연구활동 집중
		프랑스	기후변화와 환경연구에 집중	양자 및 다자간 협력체제 활용한 극지연구 수행 남극내륙 중심의 빙하코어 시추, 천체관측 등 수행
		이탈리아	극지 과학영향력 확대	'15년 북극전략 발표하며, 니알슨 기지촌에 관측 플랫폼 운영을 비롯, 다양한 연구프로그램 수행
		캐나다	개발과 보존의 균형정책 추진	북극해 개발을 통해 자국의 이익과 함께 환경보존과 원주민에 많은 관심을 갖고 정책 추진

■ 정부 R&D 사업으로서의 명분과 실리 개발 필요성

• (신규 사업의 명제와 추진 방향) 과거를 통해 극지를 배우고, 현재를 이해하여 (관측과 분석/평가), 미래를 위한 활용과 진단(예측)한다 !

✓ **(관측과 분석)** : 극지에서 우선 반응하는 급격한 환경변화의 증상이 어떠한지? / 어떠한 변화들이 지속적으로, 어떤 규모로 일어나고 있는지?
✓ **(평가)** : 그 증상과 변화의 특성은 무엇인지? 그러한 변화들에 의해 극지와 중위도 공간 규모의 기후·환경은 어떻게 영향을 주고받고 있는지?
✓ **(활용과 예측)** : 환경변화에 따른 동토 융해로 발생하는 반대급부의 생명공학적 활용성은 무엇이 있는지? / 향후 인간과 생태계가 어떠한 생활상을 보일 것이며, 어떠한 방향으로 변화할 것인지? / 정부 R&D 사업으로서의 국가이익 제고 등 거버넌스 측면에서 어떻게 활용될 것인지?
등에 대해 중점적으로 탐구할 필요가 있음

■ 정책동향 조사, 선행사업 성과분석 및 수요조사 등을 기반으로 극지과학 활동 연구기반 측면과 투자효율성 측면 및 극지연구 경쟁력 강화 측면에서 접근함

• 극지과학활동 연구기반 측면
– 극지과학활동 생태계 구축의 기반이 되는 극지 관측거점 및 기후·환경변화 현상을 측정하기 위한 연구장비와 인프라 등을 안정적으로 운영하고 연속 지원
– 극지 기후·환경변화 관측데이터 등을 지속적으로 누적하여 기후·환경변화 연구개발 활동을 안정적으로 수행 가능할 수 있도록 데이터 연속성 확보
– 비북극권 국가가 극지에서 연구개발 활동을 수행하기 위하여 구축한 국제협력 네트워크 활용 가능

• 기초과학 투자효율성 측면
– 선행사업 일몰 후, 후속사업 연계를 통하여 기존 구축한 관측거점 및 인프라 등 극지 기초과학 연구활동 강화
– 연구거점별 다양한 극지과학 연구활동을 동시에 수행하여 관측거점 활용의 효용성 강화
– 극지과학연구는 단기간 성과창출이 가능한 연구가 아닌 장기연구 성과가 중요하며 장기지속성 관점에서 접근 필요

• 극지연구 경쟁력 강화 측면
– 북극권 국가 대비 부족한 연구인프라를 보유하고 있지만, 우수한 연구성과를 기반으로 극지연구 경쟁력 확보

- 극지 기후과학 분야에서 한반도 기후 영향 연계와 전지구급 기후 영향으로 확대되면서 극지연구 범위와 영향력 확대
- 극지연구의 소규모 접근 한계에서 대규모 국가관점 접근으로 극지연구 경쟁력 확보

[극지연구 이슈 3가지 관점]

구분	세부 내용
극지연구기반 측면	극지활동 생태계 기반이 되는 극지연구 거점 안정적 연계
	극지 기후환경 연구데이터의 연속성 확보
	북극권 국가 등 국제협력 네트워크 구축
극지과학 투자효율성 측면	기 투입한 연구거점, 인프라의 효율성 제고
	연구거점별 다양한 연구활동 수행을 통하여 연구효율성 강화
	장기지속성 관점에서 연구활동 강화
극지연구 경쟁력 강화 측면	우수 연구성과 기반 극지연구 경쟁력 확보
	극지역에서 전지구급으로 연구범위, 영향력 확대
	극지개별연구자에서 국가관점 통합 접근

5.2. 극지 연구/정책 패러다임의 변화와 SWOT 분석

5.2.1. 패러다임의 변화

- 기존 극지(북극)연구의 패러다임은 “천연의 과학실험장, 국지적 현상연구, 자원개발이 제한되어 있고 열악한 환경으로 인한 접근성의 어려움, 극지에 대한 비영토적 개념”이었음
- 그러나, 앞으로 다가올 최소 근미래(약 10년) 동안의 패러다임은 “지구온난화와 극지역에서의 급변하는 기후·환경변화의 글로벌 이슈 대응에 동참하는 필수적 과학활동 이행, 지속적인 현장 모니터링과 분석, 부존자원의 개발가능성과 동참, 북극권 국가 또는 비북극권 국가(옵서버 국가) 등이 참여하는 글로벌 이슈에 국가적 역량 집중”이라는 새로운 패러다임이 적용될 것으로 전망됨
- 이러한 변화는 인간과 생태계의 영위 지속성, 산업사회의 유지 또는 발전성, 개발가능한 자원의 활용성 등에 필연적인 요소로서 이해됨

국가위상 증대와 실질적 이익 확보를 위한 과학활동/변화감시/국제공조 강조
– 환경(과학기술적) 측면(Environmental) /사회적(공공성) 측면(Social)/
거버넌스 측면(Governance) –

5.2.2. SWOT 분석

강점 (Strength)

- 북극이사회 국가 동토지역 관측거점 보유, 운영
- 환북극 동토 환경변화 측정시스템 가동 및 환경인자 빅데이터 DB 구축, 연구 경쟁력 보유
- 극지기초원천기술개발사업 국내외 협력 네트워크 구축(북극이사회 국가 극지연구기관 및 산·학·연)

약점 (Weakness)

- 광범위한 북극 동토지역에서의 정밀 모니터링 시스템의 미흡, 인프라 부족 및 대표성 미흡
- COVID-19와 같은 팬데믹 상황 발생 시, 북극 현장 조사 기회 축소
- 극지연구 및 기술 관련 전문인력 Pool 부족

기회 (Opportunity)

- 극지연구/정책 활성화, 고도화를 위한 법적 지원 체제 마련(『극지활동진흥법』 제정과 시행)
- 국제적으로 북극 빙권 기후변화에 대한 정밀 모니터링-자료확보 및 분석-피드백 평가 중요성 강조(AMAP, IPCC 등)

※ 북극 기후변화 증폭에 따른 한반도 기상이변 등 기후변화에 대한 정부와 국민적 관심 증대 보상연구 필요

위협 (Threat)

- 북극권 기후변화에 따른 한반도 이상기후 빈도와 강도 증폭
- 극지기초원천기술개발사업의 종료 임박 (~ '24)
- 북극 국제규범 강화 및 주요국의 독점적 지위 요구 확대와 폐쇄성 강조

위에서 언급한 새로운 패러다임에 부합될만한 연구주제를 도출하기 위하여, 현재의 극지(북극)연구의 SWOT 분석을 하였음

- (SO전략) 북극권 국가의 동토지역 관측거점과 연구환경 측정시스템, 빅데이터 DB 및 네트워크에 기반하여 극지연구 우수성과 창출로 극지연구 활성화 기여
- (ST전략) 극지연구 거점 및 DB 등에 기반하여 한반도 이상기후 예측 정확도 기여와 기존 선행사업 연계 및 협력 강화
- (WO전략) 광범위한 연구인프라 미흡에 따른 연구데이터 부족을 극지분야 관심 고조와 중요성에 기반하여 연구거점 등 확대와 현장조사 역량 강화
- (WT전략) 미흡한 북극 현장연구 역량을 강화하기 위하여 기존 선행사업 종료 후 후속사업 연계와 한반도 기후를 연계하는 예측 등 활용성 연구 강화

- 우리가 갖고 있는 강점 중에서 가장 핵심적인 것은 연구할 수 있는 북극이사회 동토지역에 관측거점을 갖고 있고 빅데이터 DB 확보 및 연구 경쟁력을 갖고 있다는 것임. 이는 극지를 기반으로 하는 과학활동에서 가장 중요한 요소라고 사료됨. 또한 국내·외적인 법적 및 거버넌스 측면에서의 지원체제와 국제동향과도 일치하는 기회 요소를 갖고 있음
- 다만, 아직까지 선진국에 비해 연구기간이 짧고, 연구비 규모도 상대적으로 적으며, 폭넓은 북극권에서의 행동 반경이 한정되어 있고 접근성이 용이하지 않다는 약점이 있음, 아울러 급변하는 북극권에서의 기후변화가 인간이 충분히 대응할 만한 여유도 없이 가속화 내지는 증폭되고 있고, 점차적으로 북극권 국가들의 독점적 지위가 확대되고 있으며, 이같은 연구활동의 제한이 있을 수 있다는 위협적 측면도 있어서, 필히 극복해야 하며 지속적으로 과학활동을 수행해야할 부분으로 남아 있음
- 이에 본 기획연구에서는 이러한 SWOT 분석을 근거로, 보다 과학적인 정보를 획득·분석하고 미래를 예견하며, 이를 통하여 국민의 삶의 질을 향상시키고 국가의 이익을 창출하는데 기여할 수 있도록 필수적이며 지속가능한 주제를 발굴하여 실현하고자 하였음
- 한편, 현재의 정부 R&D 사업으로서의 세부사업명이 “극지기초원천기술개발사업”으로 되어있어, 연구 수행과 관련된 실질적인 극지(북극)에서의 환경변화 관찰/측정/분석/예측 등의 활동에 부합되는 사업명으로의 변경이 필요함(국과위 전문위원회의 의견 반영). 이에 다음과 같이 제안함

구분	현행 (‘21~‘24)	향후 계획(제안) (‘25~‘30; 6개년)*	비고
부처사업명 (관련 부처)	거대과학연구 개발사업 (MSIT / NRF)	좌동	
세부사업명	해양극지기초원천 기술개발사업	극지환경연구개발사업	- 현재의 “해양극지”, “기초원천”로부터 “해양” 및 “기초원천”삭제 제안(국과위 공공우주전문위원회의 과제명 변경 검토요청에 따른 대응안 제시함) - ESG 개념을 적용하여, 정부 R&D 사업으로서의 타당성을 부각시킴 ※ 향후 또 다른 별도의 내역사업 발굴시를 대비한 상위개념의 사업명으로 활용
내역사업명	극지기초원천 기술개발사업	극지환경연구개발사업	광범위한 극지환경에서 동토영역(연중 0℃ 이하의 결빙 땅)으로 연구대상 영역의 구체화
총괄과제명	북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발	(1안) 현행 과제명 유지 * 자료분석 등의 지속성 유지를 위해 사용 가능	(장점) 선행 과제의 국내외 인지도 및 연속성 유지, 획득 자료의 추세분석 및 예측 활용에 용이 (단점) 선행과제와 신규과제와의 변별력 미흡
		(2안) 북극권 동토영역 환경변화 모니터링과 평가 및 대응 연구	(장점) 신규과제로서의 차별성있고, 선행과제와의 연계성이 보장되며, 글로벌 이슈에 대한 북극이사회의 AMAP 등에서 제시하는 활동에 대응되는 과제로 개명하여 국제 거버넌스 동참한다는 의미가 있음 (단점) 없음
		(3안) 극지 빅데이터 연계 미래 환경변화 대응 기술개발 (기획연구 제목)	(장점) 신규과제로서의 차별적 특성화 반영 (단점) 기획연구 제목으로서의 타당성은 충분히 있으나, 제안한 소요예산과 투입인력 규모에 비해 과도한 표현으로 인식될 수 있음

• **사업명 변경 제안 및 기존 연구 대비 차별성에 대한 부가 설명**

– 세부사업명(일몰관련 수정 제안) : <u>극지환경연구개발사업</u>

1) **'극지환경'의 정의 :** 극지의 모든 생물과 이들을 둘러싸고 있는 비생물적인 것을 포함한 자연의 상태(생태계 및 자연경관 포함)를 일컬음. 또한 **전 지구적인 종합환경(기후 시스템 : 기권/지권/수권/빙권/생물권과 인간)을 모두 갖춘 소 지구적 영역인 북극과 남극지역으로서, 지구온난화 영향이 가장 민감하게 반응**(海氷 감소, 동토 融解, 온실기체 방출, 에너지 수지와 알베도 변화, 기후변화, 해류순환 변화 등의 기후·환경 변화가 감지되고 있음)

2) **극지환경의 정의/여건/문제점 등에 따른 기술개발요소, 성과지표들과 매칭 필요성 :**

- 지구온난화와 이로 인한 급격한 극지환경, 특히 동토지역*에서의 변화에 대한 **관찰/관측과 빅데이터 구축 필요성 증폭**
- 비북극권 국가로서 북극환경 이슈에 대응하는 국가 차원의 R&D를 운영함으로서, **북극이사회 정식옵서버 회원으로서의 의무 이행과 국제사회에의 기여 필수**
- 극지환경연구(기술)개발은, 북극과 남극을 포함하는 영역에서 인간활동 또는 자연적 원인에 의해 상호영향을 미치며 장·단기적인 변화를 보이는 **극지환경에서 특히, 동토, 대기, 육상생태 등 영역에 대해 집중적이며 지속적인 정밀 감시와 예측을 목표로 함(ET/BT/IT 관련 기술개발 현장적용–정밀 환경인자 획득률 제고)**
- 연구 성과로서 극지환경변화 빅데이터 구축과 정책적 활용도, 국제사회에의 기여, 대국민 홍보 등의 지표를 제시함으로써 **국가차원의 지구규모 환경변화 대응 능력 제고**

3) **선행사업 대비 공공데이터로서의 공유 및 활용도 제고 강화 필요 :**

- 현재의 연구데이터관리계획(DMP)에서 한국극지데이터센터(KPDC)는 물론, SIOS (Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System; 스발바르 통합 북극 지구관측시스템)* 및 PANGAEA(국제과학협의회(International Science Council) 내 World Data System에 소속된 지구환경과학분야 거대 데이터센터) **등을 추가하여** 메타데이터 등록 인증, 제시(국제공인 데이터 운영시스템에 데이터를 추가로 제공하여 개방성 강화 계획임)

* 현재 전 지구 영구동토층의 면적은 약 $22 \pm 3 \times 10^6$ ㎢ 임(Gruber, 2012[67]). 영구동토층은 북반구 땅의 약 15%와 북반구 북쪽의 빙하가 없는 땅의 50% 이상 분포

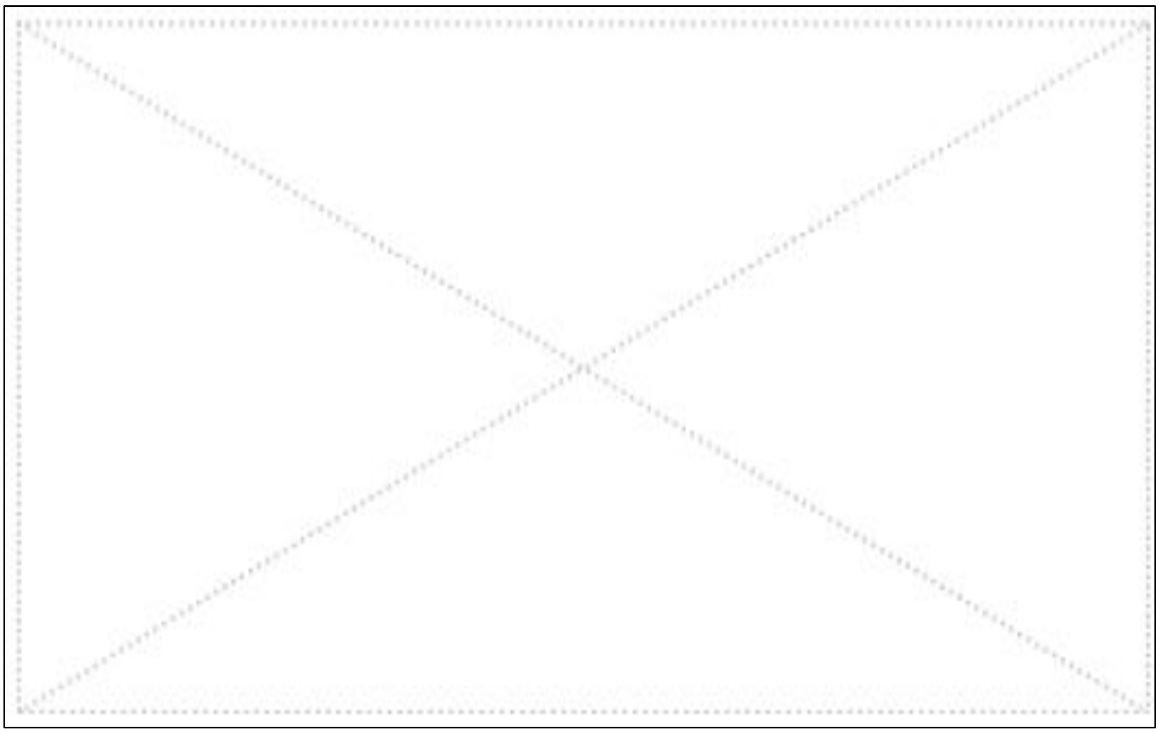
67) Gruber, S., 2012: Derivation and analysis of a high–resolution estimate of global permafrost zonation. The Cryosphere, 6, 221–233, doi:10.5194/tIII–6–221–2012.

제3장 전략주제 추진방향 및 비전

1 전략주제 설정

□ 국내외 이슈 중심으로 시급성에 따른 목적 기반의 연구개발 추진을 위한 전략주제 도출

○ 기후·환경변화, 자원활용, 미답지역 탐사, 국내·외 Agenda 등에 부합하도록 연구개발 내용 도출



[국내 정부정책 동향 및 국제 거버넌스 체제에서의 참고 가능한 Agenda]

- 국내에서는 범정부 차원에서의 극지활동 육성과 국가경제 발전 및 국익 제고에 이바지할 수 있도록 극지활동을 법제화하고 전략을 수립하는 등의 국가 차원의 정책을 수립하였고,
- 국제적으로도 북극에서의 급변하는 기후·환경변화에 대한 지속적 감시와 정보 확보, 예측과 대응안 마련 등의 발빠른 행동 양식을 발표하고 있음
- 본 기획연구에서는 국내·외적인 추세를 근거로 “관측과 분석/평가/예측 및 지역사회의 영향 평가”라는 틀에서, 빅데이터와 연계한 미래지향적으로 각 전략주제와 세부 내용을 도출하였음

□ 북극이사회 등의 국제적 의무활동 수행 및 북극 현안 대응능력 강화를 위한 전략주제 발굴

○ 국내·외의 우수한 연구역량을 가진 인재를 활용해, 극지과학 분야 강화를 위한 지속적 극지 연구활동 수행 방안 제시

○ 북극이사회 옵서버 국가로서 국제사회의 글로벌 이슈 대응에 대한 과학활동에 동참하고 함께 해결해 나갈 수 있는 주제 도출

□ **또한, 북극권 국가들간의 연구영역에서의 중복성이나 차별성, 국내·외 정책과 거버넌스 방향, 그리고 우리의 인적 연구역량과 재원투입 가능성 및 RFP에서 제시한 연구내용 및 범위 등을 고려하여 설정함**

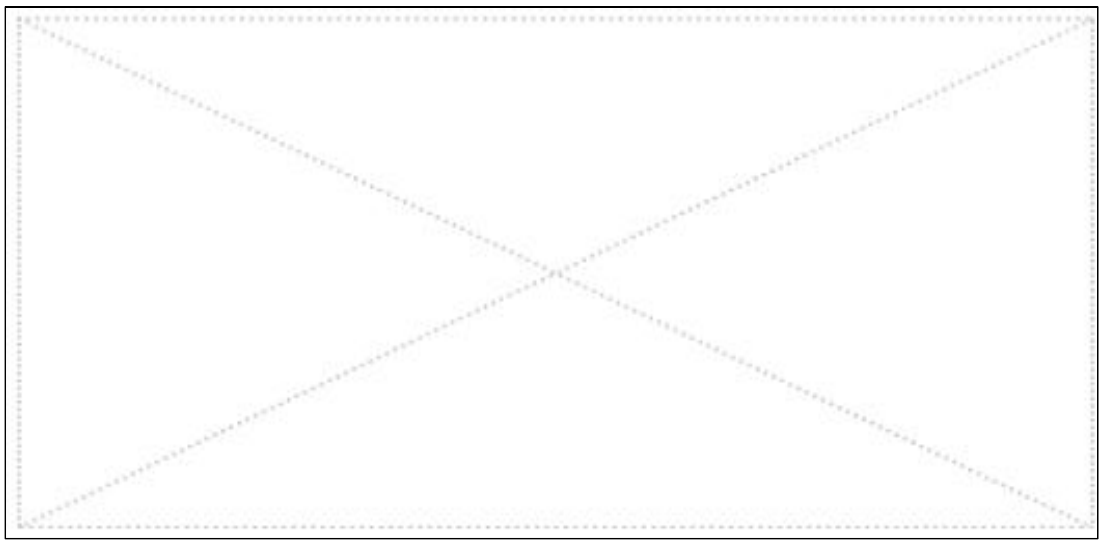
○ 선행 사업 성과 연계, **빅데이터 활용 DB 구축 등 성과 고도화 방안** 유지

○ 극지 미답 영역 대상 **첨단 과학기술 적용**과 장기 현장 관측 기반 극지 기후변화 **빅데이터* 연계 수월성 연구 추진 프레임** 구축

○ 극지 기후환경변화에 대응하기 위한 극지 과학정보의 **연관성·가용성 강화** 방안 마련

○ 북극이사회 역할 수행 및 북극에서의 **국제적 위상 강화 (스웨덴, 핀란드 포함 북극이사회 모든 국가와의 확대 협력체계 강화)**

□ 1) 동토지역의 육상-대기영역, 생태계영역 등에서의 장기모니터링과 빅데이터 축적 및 현상 규명, 2) 동토 및 주변 연안지역에서의 과거 기후·환경변화 이해도 향상, 미래 기후변화 예측 방안 수립, 3) 극한환경에서의 기후위기 대응을 위한 미생물의 유용성과 응용성, 그리고 환경변화에 따른 인간활동의 영향 파악 등의 전략주제를 설정하고, 그 세부적인 내용을 도출하였음



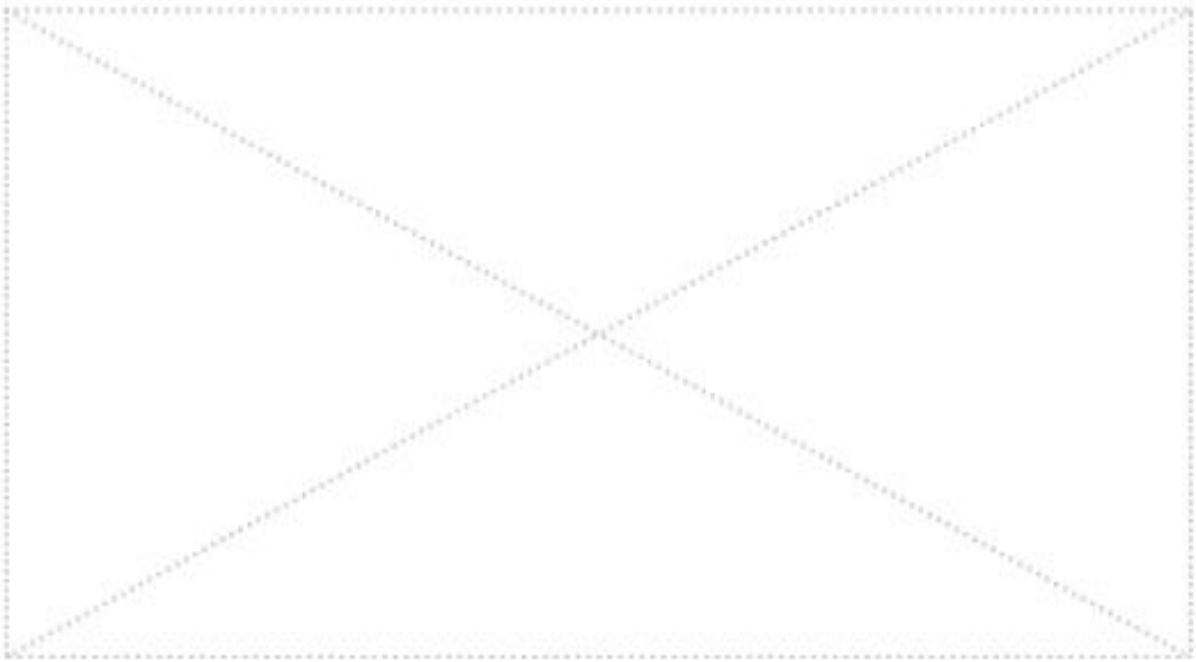
[본 기획연구에서 구상하는 연구내용의 구도 - 전략주제간 핵심 내용과 연계성 : 전략주제-I(파란색), 전략주제-II(초록색), 전략주제-III(주황색) 간의 수행임무 및 상호연계성]

* 전략주제-세부주제별 주요이슈 및 연구내용 도출

전략	분야	주요 이슈	주요 연구내용
(전략-I) 장기 모니터링과 데이터 축적 및 현상 규명	(I-1) 극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악	① 북극의 급격한 온난화에 따른, 북극지역과 한반도를 포함한 중위도 지역의 미세먼지 역학의 상호 연관성을 규명하기 위하여 북극 대기 중 미세먼지 정량적 DB 구축 필요성 제기 ② 전지구적 탄소 농도 변화에 대응하여 우리 사회의 대응 로드맵을 수립하기 위해서, 북극권 에너지-탄소 장기 광역 데이터의 생산이 필요하며. 효율성을 담보하기 위해 AIoT 기술의 개발과 적용 필요 ③ 북극 기후시스템의 변화는 우주환경에까지 영향을 미칠 수 있으며, 태양 및 우주환경 변화의 상호 연관성 제시 필요	1. 북극 미세먼지 물리화학 특성 빅데이터DB 구축 및 거동연구 2. 북극권 육상 에너지·탄소 수지에 관한 장기 광역 데이터 생산 및 기후변화에 따른 북극권 육상 장기 에너지·탄소 수지평가 3. 극지(남·북극) 저층대기의 물리·화학적 변화가 고층대기 역학적 변화에 미치는 영향 연구
	(I-2) 북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가	① 기후변화 조건에서 다양한 동토붕괴 요인과 현상이 다르게 나타남 ② 북극 생태계의 변화는 북극의 기후에 영향을 미치고, 이는 궁극적으로 중위도 지역에 영향을 미치므로, 북극 동토층 생태계의 기후변화에 대한 취약성 평가 필요 ③ 북극 동토층 환경인자, 식물, 미생물을 포괄한 전반적인 모니터링을 통해 수집된 빅데이터 활용 북극 동토층 생태계 변화에 대한 종합적 전망 필요	1. 장기 생태모니터링 프로그램 고도화 및 빅데이터 DB 축적 2. 다양한 북극 동토 생태계 붕괴/변화 지역에서의 토양 생태계 변화 이해 및 취약성 평가 3. 북극 동토층의 장기생태계 모니터링 데이터와 확대된 공간적 데이터를 활용한 동토층 붕괴에 따른 생태계 변화 전망
(전략-II) 과거 기후·환경 변화 이해와 미래 예측	(II-1) 북극권 동토와 주변 연안지역 과거 기후·환경변화 특성 파악	① 최근 지구온난화로 인한 급격한 빙하후퇴에 의한 북극 동토로부터 연안 지역으로 유입되는 퇴적물, 유기물, 영양염 및 오염물질 등(이하 물질)의 급격한 증가 ② 급격한 물질 유입은 연안 환경뿐 아니라, 해류 등을 통한 물질순환을 통해 궁극적으로 북극 전 지역에 환경변화를 유발하며 사회적 문제 초래 ③ 이에 대한 예측 및 대응 전략의 단기적인 관측 데이터의 의존성 해소를 위한, 기후·환경변화 프록시를 활용한 중장	1. 북극권 동토(알래스카 및 동시베리아) 및 주변 연안지역(프람 및 베링해협) 국제공동탐사연구 추진을 위한 인프라 구축 및 확대 2. 다중 프록시 기술 기반 동토 융해호 및 피오르드 코어퇴적물 활용 중장기적 과거 기후환경 복원 3. 과거 기후환경 복원을 기반으로 기후변화에 따른 북극 동토 및 주변 연안지역 물질 거동 양상 및 기작 파악 4. 북극권 대기-해양 모델링

		기적인 북극권 과거 복원자료 확보 필수 ④ 북극권 대기-해양 모델링을 이용한 과거 기후환경 변화 패턴의 정확한 진단으로, 미래 기후변화에 의한 북극권 환경 예측의 토대 마련 시급	구축을 통한, 과거 기후환경 변화에 따른 북극 동토 및 주변 연안지역 물질 거동 및 영향력 파악
	(II-2) 북극권 기후·환경변화에 대한 피드백 규명	① 북극 동토지역 및 중위도의 급격한 기후변화 연계 증폭 ② IPCC 보고서에 근거한 동아시아와 한반도 기후변화 상세 분석 필요 ③ 빅데이터 환경인자 DB 분석 및 연계성 중요도 평가	1. 환경 빅데이터(기상/기후와 환경 요소의 지상 및 위성 관측 자료 등)와 지역기후모델 및 전구모델 결과를 이용한 북극 동토지역과 중위도의 상세기후 분석 2. 한반도와 동아시아 및 북극 동토지역의 상세 기후변화 및 상호 피드백 규명
(전략-III) 기후위기 대응과 인간사회 영향 파악	(III-1) 온실기체 바이오 전환기술 개발	① 셰일가스의 추출과정에서 발생되는 메탄가스의 전환기술 개발 ② 미국 에너지 고등연구계획국 주도로 수행되는 REMOTE (Reducing Emission using Methanotrophic Organisms for Transportation Energy) 프로그램을 통해 660억 원 규모의 연구비를 투자해 C1 전환 원천기술 개발 추세 ③ 북미지역 셰일가스 개발의 영향으로 메탄 전환 바이오기술에 대한 관심 증대	1. 동토층 유래 생명자원의 다양성 확보와 온실기체 대사 관련 유전체 분석 2. 온실기체 전환소재의 활성 기작 규명을 통한 바이오 전환 기술 개발 3. 친환경 기술개발을 통한 바이오연료와 바이오 화학물질 생산을 위한 생명소재 확보
	(III-2) 북극권 지역사회 기후변화 영향 분석	① 북극권의 급격한 기후변화로 지역사회 영향 확대 ② 기후변화 취약지역 및 취약계층 분석과 대응 필요	1. 북극권 지역사회의 기후변화 영향 파악 2. 북극권 문화에 대한 종합적 이해

2 전략주제의 수행 목적 및 범위



■ 목적

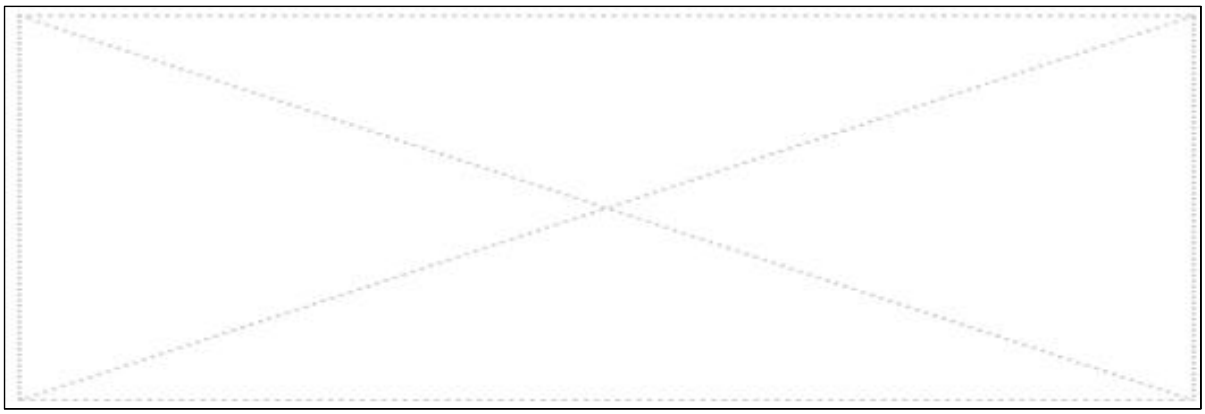
- 글로벌 기후·환경변화에 가장 민감 지역인 극지 중심의 육상-대기-빙권 통합 연구개발을 통한 글로벌 이슈 대응 연구 활성화
  - 지구 온난화로 극지역 대기, 동토, 빙권 등에서의 환경적 상황 변화가 급격하게 변함에 따라 복합적으로 발생하는 글로벌 환경이슈에 대비하기 위하여 육상-대기-빙권의 통합적 차원의 환경 연구
  - 극지 중심의 최적의 탐사 지역과 탐사기술 우선순위 선정
- 기확보된 또는 향후 확보될 환경인자 등 극지역 빅데이터의 정밀 분석과 이를 연계한 미래 예측 기술개발 연구

■ 범위

- 본 사업은 글로벌 이슈 대응에 필요한 극지 현장에서의 관측과 특성 규명 등 기후·환경변화 연구 수행 및 미래 예측 시나리오를 제시하기 위함으로서, 사업의 범위는 아래와 같이 예시함
  - 연구목표 달성을 위해 가장 먼저 해결해야 할 과학적 시사점 도출 및 문제 해결을 위한 중점 주제 탐색
  - 극지역에서 발생하는 대기영역과 생물·생태계영역 및 동토영역 등에서의 현상에 대한 장기 모니터링과 빅데이터 확보, 분석

- 육상과 연안지역에서의 과거 기후환경 복원 및 모델링
- 극지 미생물의 유용성 제고, 기후변화 예측과 대응, 그리고 환경변화에 따른 인간활동의 영향성 파악 등의 전략주제 도출
- IPCC 등 국내외에서 제시하는 극지 현상에 대한 중위도 지역 상관서의 미래예측 모델의 불확실성을 해결하기 위한 중장기 관측시스템 구축 및 미래 예측 시나리오 제시

※ 연구수행 flow chart (예시)



■ 사업주제 발굴 및 제안 사유

6대 세부주제	주제 제안 사유
1 극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악	- 가속화되는 극지기후 변화에 대한 입체적 모니터링 및 환경인자 빅데이터 DB 지속적인 축적과 환경변화 특성 파악 필요 - 극지 대기(고·저층)의 물리 현상 감시 및 상호작용 이해를 통해 전지구적 기후변화 기작 이해 필요 - 한반도 탄소중립과 미세먼지 저감 정책수립의 기초 자료 빅데이터 DB 구축 및 영향성 평가 필요 ※ 포괄적 북극 환경변화 파악을 위한 연구 영역 (시베리아/알래스카 광역 동토지역/남극 고층) 확대 및 첨단 관측기술 개발과 적용 필요
2 북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가	- 북극의 현재/미래의 기후·환경변화 조건에서 다양한 동토 붕괴 요인이 존재하고, 동토 붕괴/변화 현상이 다르게 나타남 - 북극 생태계의 변화는 북극의 기후에 영향을 미치고, 이는 궁극적으로 중위도 지역에 영향을 미치므로, 북극 동토층 생태계의 기후변화에 대한 취약성 평가 필요 - 북극 동토층 환경인자, 식물, 미생물을 포괄한 전반적인 모니터링을 통해 수집된 빅데이터를 활용한 북극 동토층 생태계 변화에 대한 종합적 전망 필요
3 북극권 동토와 주변 연안지역 과거 기후·환경변화 특성 파악	- 최근 지구 가열화에 따른 북극권 동토 및 주변 연안지역 환경변화에 대한 중장기적 예측 및 대응 필요 - 지구 가열화에 의한 대응을 위해, 다중 프록시 적용 기술을 활용한 동토 및 주변 연안지역의 과거 중장기적 기후환경 변화 복원 필요 - 북극권 동토 및 주변 연안지역의 과거 기후환경 변화에 따른 물질 거동 기작 파악과 영향력 평가 필요
4 북극권 기후·환경변화에 대한 피드백 규명	– '피드백 규명' 이란?: 북극권 기후변화 예측 및 분석결과가 중위도와 한반도에 미치는 영향을 규명하기 위한 것 – 즉, 북극권의 기후변화에 따른 알베도, 기온감률, 수증기, 구름 등을 통하여 대순환(대기/해양), 지역적인 순환, 지면과정 및 열(현열/잠열) 전달 등의 기후요소 분석을 통하여 중위도와 한반도에 미치는 피드백 영향을 규명하고자 함 – 그 결과로서 북반구와 중위도 및 한반도의 상세 기후시스템 피드백 자료 구축 - 북극 동토지역의 급격한 변화와 중위도의 기후변화 피드백 시나리오 제시 및 기후변화 대응능력 제고 - 북극 동토지역 환경 빅데이터를 활용한 한반도를 포함한 중위도 지역의 영향 평가 - 빅데이터 환경인자 DB 분석(딥러닝, AI 기법 활용) 및 연계성에 대한 중요도 평가
5 온실기체 바이오 전환기술 개발	- 지구 가열화의 주요 온실기체인 메탄은 이산화탄소 대비 25배 이상의 온실효과를 가짐 - 동토층에서 자연생태적으로 생산되는 메탄은 메탄생성미생물군(Methanogens)과 메탄사용(산화) 미생물군(Methanotrophs)에 의해 생산, 배출, 사용의 순환이 이루어짐 - 동토층 환경미생물에 의한 온실기체 대사과정 연구를 통하여 대기 온실기체 순환 기작을 이해하고 활용가능한 바이오기술(BT) 개발 필요 - 온실기체 감축(저감) 기술로서 동토층 미생물 유전체를 이용한 친환경 바이오 전환기술을 개발하기 위하여 극지 생명자원 소재 발굴
6 북극권 지역사회 기후변화 영향 분석	- 북극권의 급격한 기후변화로 지역사회 영향 확대 - 기후변화 취약지역 및 취약계층 분석과 대응 필요

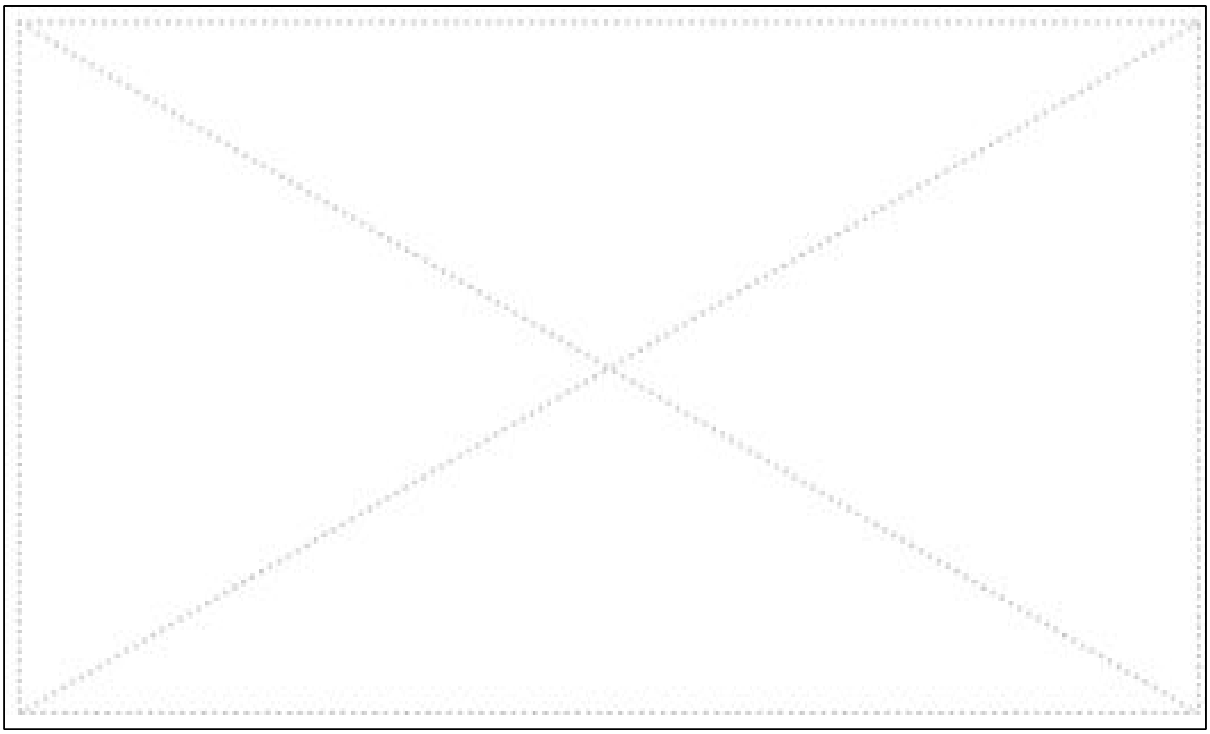
■ 본 사업의 차별성

• 선행사업과의 차별성

선행 사업과 신규 사업(계획)과의 차별성

구분	선행사업 (~2024: As-Is)	신규 사업(향후 연구) (2025~: To-Be)
목표	북극권 육상-대기-고환경 기후변화 진단 및 예측	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발'
특성	· 급변하는 북극권 환경변화 파악 및 예측에 중점 · 환경인자 빅데이터 확보 및 분석 · 북극이사회 정식옵서버 지위 유지에 근거활동 제공 ※ 연구 영역의 제한성(6개 관측거점 기반)으로 인한, 과학적 대표성 자료 확보에 한계 부존	• 기후변화 연구에 최적화된 극지 Super Site에서의 빅데이터[68] 확보 및 분석을 통한 현상 진단과 미래 변화 예측의 과학적 근거 제공 • ESG(환경/사회/거버넌스) 개념과 레질리언스 방향 도입으로 효율적 글로벌 이슈 대응과 대국민 서비스 및 국격 향상 기여 - (기후변화 진단과 예측 강화) 환경적(E) 미션 - (인프라와 네트워킹 강화) 사회적(S) 미션 - (국가 역할 및 이익 제고) 정책적(G) 미션 ※ 과학적 대표성 자료 추가 확보 및 국내·외적 근거 제시 강화는 물론, 연구의 ESG적 미션 수행을 통해 Quantum Jump-Up 할 수 있는 단계로 확대 발전
세부 주제	· 북극 동토-대기 종합 모니터링 및 상호관계 규명 · 북극 생태계 변화 특성 파악 · 북극 과거 장·단주기 특성 파악 · 북극 유래 생명자원활용 연구 · 북극권-중위도 기후연계성 평가와 예측	• 극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악(대기 분야는 기존의 북극 저층대기에 남극 고층대기 영역까지 추가 확대하여 기술함) • 북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가 • 북극권 동토와 주변 연안지역 과거 기후·환경변화 특성 파악 • 빅데이터 분석 및 북극권 기후·환경변화에 대한 피드백 규명 • 온실기체 바이오 전환기술 개발을 위한 북극 동토층 생명자원 발굴 • 북극권 지역사회 기후변화 영향 파악
대상 지역	· 북극이사회국가 8개국 중 6개국 관측거점 및 스발바르 피오르드 연안	• 북극이사회 8개 전 회원국 전체 (2개 거점 추가) • 북극관문·시베리아 등 동토 연구지역 확대 • 극지에서 남극 고층대기 영역 추가
거점 분포도		

68) 극지 빅데이터: 극지역에서 지속적인 모니터링관찰/관측)을 통해 확보되는 환경인자(기후영향동인, CID; Climatic Impact Drivers)의 다양한 데이터로서, 이에 대한 누적 DB 분석, 모델링 결과 등임



[ESG 기반 극지 과학활동의 지평확대 및 북극권 환경변화 종합 감시와 평가 차별화]

■ 세부주제별 기존/향후 연구의 차별성

세부주제	기존 연구	향후 연구
(I-1) 극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악	○ (연구목적) – 북극 동토-대기환경 기반 종합모니터링 및 상호작용 규명 ○ (연구 분야) – 관측 거점의 에너지-탄소 순환 모니터링 – 북극 동토 대기 에어로졸 특성 연속관측 ○ (지역) – 미국 알래스카 놈, 그린란드, 캐나다 캠브리지베이, 노르웨이 스발바르 ○ (성과물) – 북극 동토 기반 연구 거점 확보 및 운영 – 북극 동토 물리 특성 변화 연속관측 자료	○ (연구목적) – 극지 동토-대기 간 상호작용 정밀 모니터링 프로그램 운영 및 빅데이터 DB 구축과 특성 파악 ○ (연구 분야) – 북극 동토 대기구성물질의 기후 상관성 평가 – 북극 동토-대기 다중규모 에너지·탄소 교환 모니터링 및 빅데이터 DB 구축 – 북극 환경인자 관측용 AIoT 기반 광역 무인 관측 기술개발 – 극지 고층대기 영역에서의 기후변화 관련성 연구(추가) ○ (지역) – 기 구축된 관측거점 (미국 알래스카, 그린란드, 캐나다, 노르웨이 스발바르, 아이슬란드, 러시아) 외에 스웨덴, 핀란드 지역 거점 영역 확대(북극이사회 8개국 모든 영역 활용) – 남극 세종/장보고과학기지 기반 고층대기 영역 ○ (예상 성과물) – 북극 동토대기 구성 물질 및 에너지 교환 정밀 모니터링 빅데이터 DB 구축 및 활용 – 북극 환경인자 빅데이터 DB 공동 활용 국제 공동연구 수행으로 북극 변화연구의 선도적 지위 확보

		– 극지 고층대기와 중·저층대기와의 연계성 및 기후변동/변화성 파악
(I-2) 북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가	○ (연구목적) – 기후변화에 의한 북극 동토 생태계의 구조, 기능 및 생지화학적 순환 변화 규명 ○ (연구 분야) – 강설량 변화에 의한 식생, 토양유기물, 미생물 특성, 이산화탄소 플럭스 변화 모니터링 ○ (지역) – 알래스카 카운실, 캐나다 캠브리지 베이 거점 ○ (성과물) – 강설량 변화에 대한 툰드라 생태계별 반응 이해 – 동토 내 미생물 대사 기작 및 생지화학적 특성 규명	○ (연구목적) – 다양한 동토 변화 현장에서의 토양 생태계 변화 이해 및 전망 ○ (연구 분야) – 북극 다양한 동토 변화 조건에서 토양 환경인자, 식물, 미생물 변화 관측, 원격 탐사 활용, 빅데이터 DB를 활용한 육상 생태계 모델링 적용 ○ (지역) – 기 구축된 관측거점 이외 노르웨이, 스웨덴, 핀란드, 알래스카 내 과학연구 지평 확장 ○ (예상 성과물) – 동토층 변화에 따른 종합적 생태계 변화 전망 결과 도출 – 국제모니터링 네트워크와 장기생태모니터링 자료 공유 및 활용 논문 성과
(II-1) 북극권 동토와 주변 연안지역 과거 기후·환경변화 특성 파악	○ (연구목적) – 북극 스발바르 피오르드 탐사, 지형 관측정점 확보 및 분석 체계 구축 – 마지막 해빙기 이후의 기후·환경 변화 기록 복원 – 딕슨 피오르드 지형 변이 (취약성) 도면 작성 ○ (연구분야) – 고기후, 퇴적학 ○ (지역) – 스발바르 피오르드 ○ (성과물) – 한-노 국제공동 스발바르 피오르드 탐사 수행(2016, 2017, 2019, 2022 총 4회)을 통한 해저지층·지형 자료 및 코어퇴적물 시료 확보 – 노르웨이 트롬소 북극대학 (UiT)과의 MoU 체결을 통한 분석·장비 인프라 공동 활용 – 다중 프록시 기반 최대 빙하기 이후 딕슨, 우드, 비데 피오르드 등 다양한 스발바르 피오르드 마지막 최대 빙하기 이후 빙하거동 복원 – 멀티빔 및 SBP자료 기반 영거드라이아스 이후 빙하 활동에 의한 스토르 피오르드 주변 빙하지형 변화 기록 복원 – 노르웨이 아북극 및 북극 스발바르 피오르드 국제공동 해저 심부시추를 위한 시추제안서 공동제출 – 딕슨 피오르드 상부 점이지대 취약성 분석 및 지질 특성화 도면 작성	○ (연구목적) – 동북극권 프람해협 주변(스발바르 및 그린란드) 피오르드 국제공동탐사연구 기반 확대 – 서북극권 베링해협 주변 (알래스카 및 시베리아) 동토 융해호 국제공동탐사연구 인프라 구축 – 융해호 및 피오르드 코어퇴적물을 활용한 홀로세 이후의 기후환경 복원 – 과거 기후환경 재현을 위한 북극권 대기-해양 모델링 시스템 구축 ○ (연구분야) -고기후, 퇴적학, 호수학, 지화학, 환경화학, 과거 기후모델링 ○ (지역) – 스발바르, 그린란드, 알래스카, 시베리아 ○ (예상 성과물) – 스발바르 및 그린란드 피오르드 국제공동탐사를 통한 해저지층 자료 및 코어퇴적물 시료 확보 – 알래스카 및 시베리아 동토 융해호 국제공동연구 인프라 확보 – 피오르드 및 융해호 내 기초 환경인자 자료 확보 – 피오르드 및 융해호 내 다양한 환경시료(퇴적물, 토양, 부유입자, 대기, 물, 스노우팩 등) 확보 – 피오르드 및 융해호 기후환경 복원을 위한 프록시 개발 – 피오르드 및 융해호 기후환경 복원 기록 확보 – 북극권 대기-해양 모델링 구축 – 북극권 대기-해양 모델링을 통한 과거-현재 기후환경 재현

		– 과거 다중 프록시 복원 데이터–모델 비교
(II–2) 북극권 기후·환경변화에 대한 피드백 규명	(연구목적) – 북극권 육상과 중위도를 연계한 기후변화 분석과 예측 및 대응방안 제시 ○ (연구분야) – 기상/기후 ○ (지역) – 북극권 육상 및 중위도 ○ (성과물) – SCI 논문 및 북극권과 중위도 기후변화 예측 시나리오 제시	○ (연구목적) – 환경 빅데이터(기상/기후와 환경 요소의 지상 및 위성 관측자료 등)와 지역기후모형을 접목하여 북극권 동토지역과 중위도의 상세 기후변동 및 피드백 규명 –한반도와 동아시아 지역의 상세기후변화 분석 및 예측 ○ (연구분야) – 기상기후 ○ (지역) – 공간 상세화된 북극권 동토지역 및 중위도 ○ (예상 성과물) – SCI 논문 및 북극권 동토지역과 중위도 기후변화 피드백 시나리오 개발/개선, 미래 평가 – 빅데이터 DB 분석 및 연계성 평가
(III–1) 온실기체 바이오 전환기술 개발	○ (연구목적) – 환경정화와 바이오 화학산업에 활용성이 우수한 난분해 유기 물질 분해 효소 발굴 및 활성기작 규명 ○ (연구분야) – 환북극권 환경미생물 유전체 확보 및 기능성 탐색을 위한 유전체 라이브러리 제작 – 고기능성 가수분해 효소의 단백질 구조분석 및 활성기작 이해 ○ (지역) – 알래스카, 노르웨이 스발바르 지역 ○ (성과물) – 환경미생물 유전체 라이브러리를 통한 유용성 분석 – 지식재산권 확보를 위한 특허등록	○ (연구목적) – 동토층 생명자원의 다양성 확보 및 바이오기반의 온실기체 전환기술 개발 ○ (연구분야) – 북극 동토층 환경 특이적 생명자원의 유전체 분석 – 온실기체 관련 대사체 분석 및 활용 기술 개발 연구 – 온실기체의 바이오전환 핵심 소재 개발 ○ (지역) – 알래스카, 노르웨이 스발바르 지역 ○ (성과물) – 북극 동토층 유래 유전자원 확보 – 지식재산권 확보를 위한 특허등록 및 산업화 기여 가능한 기반 마련
(III–2) 북극권 지역사회 기후변화 영향 분석	기 수행연구 없음	○ (연구목적) – 북극 지역사회의 기후변화 및 영향 파악 – 북극에 대한 이해도 향상 – 북극 지역사회와의 협력체계 구축 및 북극이사회 내 국가경쟁력 제고 ○ (연구분야) – 기후 ○ (지역) – 북극권 관측거점 인근의 지역 원주민(이누이트 등) 사회 다수 ○ (예상 성과물) – 과학적·인문사회적 논문 창출 – 기후변화·영향 표준설문지 생산, 분석

[참고] 극지 동토영역 환경변화 연구(극지기초원천기술개발사업)에의 ESG 적용 가능성

<table>
<tr><th>구 분</th><th colspan="8">핵심어</th></tr>
<tr><td rowspan="3">환경
(Environ-mental)

현재
(~2024)</td><td colspan="8">• 급변하는 북극권 환경변화에 대한 지속적 근접 모니터링(관측거점)
• 북극-중위도 간 기후변화 영향력 파악 및 미래 예측</td></tr>
<tr><td>북극권 감시 (관측/DB)</td><td colspan="6">북극권 육상-대기-고환경 기후변화 진단 및 예측 (관측/분석/회복력/모델링)</td><td>북극 물질 활용 (산업화)</td></tr>
<tr><td>- 북극 동토지역 관측거점
- 모니터링
- 환경인자
- 국제공동탐사</td><td>- 온실기체
- 에어로졸
- 나노입자/물리화학적특징
- 광학특성/흡습성장/크기분포
- 기후변화 감시물질
- 대기조성</td><td>- 기후·환경변화 피드백/수치모델(특이기상)
- 미래예측
- 대기질모델
- 배출량/자료동화
- 장단기변동
- 재분석자료
- 생물리기작모델</td><td>- 탄소거동
- 식생변화/순생태교환·교환량
- 에디공분산/플럭스
- 초고분해능 질량분석</td><td>- 북극 기후변화
- 동토층 생태계
- 토양 유기물 분해
- 강설량 변화
- 생지화학적 순환
- 토양기체 플럭스
- 초고분해능 질량분석</td><td>- 다중 프록시
- 인류 영향력
- 안정동위원소
- 코어 퇴적물
- 입자추적
- 유동모델</td><td>- 환경변화 물질순환과 반응
- 유기물 분해기작
- 다매체 분포
- 오염물질 거동</td><td>- 동토 마이크로바이옴
- 다중 오믹스
- 생물정화
- 미세 플라스틱
- 북극 미생물</td></tr>
<tr><td rowspan="3">환경
(Environ-mental)

미래
(2025~2030)</td><td colspan="8">• 북극권 환경변화에 대한 과학적/사회적/경제적인 도전 강화와 유용 정보 획득
• 북극 기후변화의 정보 격차 해소 및 연관성과 가용성 개선
• 북극 과학정보의 획득과 분석을 통한 국가 정책 의사결정 기초자료 제공</td></tr>
<tr><td>북극권 감시 (관측/DB)</td><td colspan="6">극지 동토영역에서의 모니터링, 평가 및 대응 연구 (관측/분석/회복력/예측)</td><td>북극 물질 활용 (산업화)</td></tr>
<tr><td>• 북극 동토지역 관측거점
• 모니터링
• 환인자
• 국제공동탐사</td><td>• 미세먼지
• 구름형성
• 극지오염
• 북극 동토기반 빅데이터 DB 구축 및 활용, 특성 규명
• 북극 동토 슈퍼사이트</td><td>• 기후·환경변화 피드백/수치모델 (특이기상)
• 미래예측
• 대기질 모델
• 배출량/자료동화
• 장단기 변동
• 재분석 자료
• 생물리 기작모델</td><td>• 탄소 수지 정밀 관측 표준화
• 북극 육상권 에너지-탄소 수지 빅테이터 위험요소 맵핑 시스템</td><td>• 장기생태모니터링
• 북동토층 붕괴
• 토양유의 기물후 기변화 취약성
• 동토 생물 미의 탄소 대사
• 토양유기탄소 모델링</td><td>• 북극 gateway
• 스발바르
• 그린란드
• 시베리아
• 알래스카
• 피오르드
• 융해호
• 다중 프록시
• 코어 퇴적물
• 물질거동
• 과거 대기-해양 모델링</td><td>• 저/고층 대기간 물질 교환
• 첨단기법활용 원시 육상-해양 간 유기물 교환
• 고위도-중위도 간 오염물질 수송</td><td>• 온실기체, 이산화탄소 전환 효소
• 메탄 산화미생물
• 미생물체
• 메탄 산화 효소
• 바이오전환기술</td></tr>
<tr><td colspan="9"></td></tr>
<tr><td>사회
(Social)

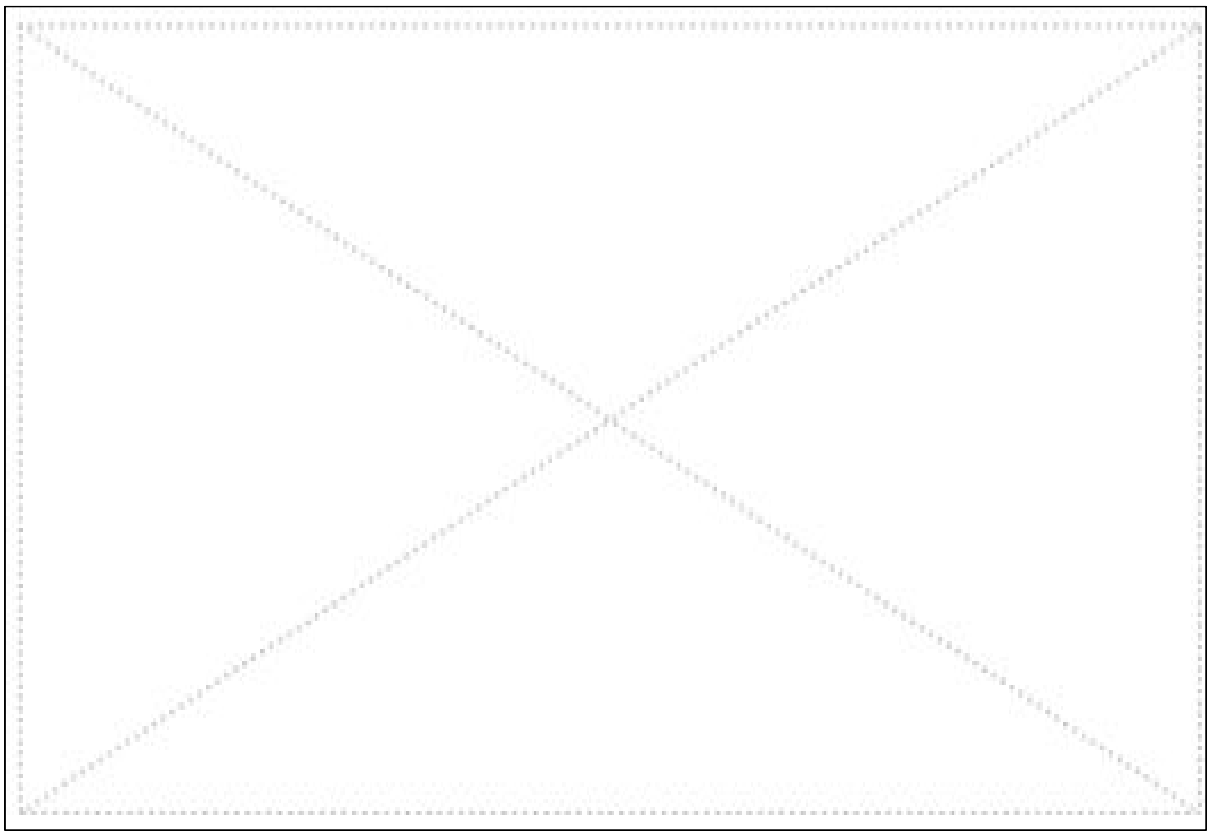
현재
(~2024)</td><td colspan="8">• 북극권 환경변화에 대한 우리나라 파급효과(폭염, 한파 등) 등 발생 지속
• 정부, 국민적 기후변화 인식 증폭 및 정책 수립과 알권리 수요 증대
• 환경적 빅데이터 확보와 분석을 통한 인간 삶과 인프라 등에 파급 효과</td></tr>
<tr><td>사회
(Social)

미래
(2025~2030)</td><td colspan="8">• 북극권 환경변화에 대한 우리나라 파급효과(폭염, 한파, 아열대화 등) 등 증폭
• 정부, 국민적 기후변화 인식 가중 및 정부의 정책 수립과 반영 강화
• 빅데이터의 AI 분석과 예측 정확성 강화 요구 예상
• 국제사회에서 온실기체 배출량 감축목표를 제시하고 이행 (저감기술의 필요성)
• 연구기획단계부터 원주민과 소통하며 연구 과제 구상
• 북극 지역사회 기후변화 영향 파악</td></tr>
</table>

지배 구조 (Gover-nance) 현재 (~2024)	■ 국내 : 점차 극지에 대한 중요성 인식 강화 지원 확대 추세임 • 극지활동진흥법 적용(2021.03 제정, '21.10 시행) : 기후변화, 자원확보 등 극지의 전략적 가치 증가에 따른 국가차원의 체계적 수립 기반 마련 - (제4조 국가의 책무) 국가는 외국 및 국제기구와 맺은 극지 관련 국제조약을 준수하고, 극지의 평화적 이용과 극지 관련 국제협력을 증진하며, 기후변화·자원고갈 등의 인류 공통의 문제를 해결하기 위하여 노력하여야 한다) - (제6조 극지활동진흥기본계획 및 극지활동진흥시행계획의 수립·시행) - (제8조 연구개발 등의 지원) • 제5차 과학기술기본계획 ■ 국외 : 북극이사회(Arctic Council) AMAP(Arctic Monitoring and Assessment Program), SCAR, IPCC AR6 등 지속
지배 구조 (Gover-nance) 미래 (2025~2030)	■ 국내 : 극지에 대한 관심과 과학기술 및 외교적 활동 지원 강화해야 할 것으로 사료됨 • 극지활동진흥법 적용(2021.03 제정, '21.10 시행) • 2050 북극활동 전략(2021.11) • 제5차 과학기술기본계획(2022.11) ■ 국외 : 북극이사회(Arctic Council) AMAP(Arctic Monitoring and Assessment Program), SCAR, IPCC AR6 등 지속 가능성 있으나, 북극권에서는 점차 북극 영토개념, 자원확보 및 국가 안보 측면에서 북극이사회 국가별로 강화된 전략과 정책을 적용할 것으로 분석됨

3 미래 추진 방향(비전)

3.1. 방향 및 비전



- 총괄적으로 본 과제에서 향후 추구하는 목표는,
  - 기후환경변화에 관한 최적화된 연구 수행이 가능한 북극이라는 Super Site에서의 과학기술적 정보 획득과 분석,
  - 기후변화라는 인류 당면문제 극복에 필요한 열쇠를 확보하고,
  - 북극권의 국제 거버넌스에서 국가차원의 우리나라 역할 강화 등을 최종목표로 설정

- 이러한 목표를 달성하기 위해,
  - 1) 급변하는 극지 기후·환경변화의 이해와 파급효과 및 우리나라에 미치는 영향 평가,
  - 2) 극지역에서의 DB 분석과 평가를 통한 수월적 성과 창출과 아울러 우리나라의 과학기술 역량을 보다 향상시킬 수 있는 극지역에서의 K-사이언스 제고,
  - 3) 근래 부각되고 있는 환경(Environment)/사회(Social)/거버넌스(Governance)라는 ESG 개념을 본 사업에 접목시켜 정부 R&D 사업으로서의 투자효과와 사회적 영향 및 국내외 정책 등의 최적화된 가용성 강화,
  - 4) 극지역에서의 기후·환경변화는 전 세계적인 중요한 이슈이며 우리나라에서도 심각하게 파급되고 있으므로, 이러한 글로벌 이슈 대응에 동참하고 나아가 국격을 향상시킬 수 있는 국제적 역할을 지속한다는 과학/기술/정책활동의 방향을 갖고 추진토록 함

- 이를 통하여, 정량/정성적으로 수월성 있는 연구성과를 창출하고, 지속적으로 미래 예측과 대응 방안을 제시하여 인류 삶의 질적 강화에 기여하며, 북극이라는 접근성이 어려운 지역에 인프라 확충과 자료 개방 등을 통해 차세대 극지활용 역량 강화에 보탬이 연구를 수행함. 또한 좁은 한반도 영역을 벗어난 극지연구의 지평을 확대시킴으로서 국제적으로도 과학기술의 연구 경쟁력 강화 및 정책활동에 이바지하고자 함
- 아울러, 글로벌 이슈에 대응하는 환북극 동토 지역에서의 환경변화 이해와 유용 생물자원 확보 및 중위도 환경변화 미래 예측과 대응 방안을 제시함으로서, 자료의 활용성을 제고하고, 기후변화 특성에 대해 보다 폭넓은 이해를 하는 등 미래 신성장 동력 확보 등에 활용될 수 있도록 노력함

3.2. 사업 목표 구체화

■ 극지 분야 연구역량 강화(통합성과 - 핵심성과지표(KPI)의 도전적 설정)

* 연구역량 목표 구체화에 따른 주요성과 창출 예시

목표	설명	주요성과
논문 성과의 질적 우수성	표준화된 순위보정영향력지수(mrnIF)를 기반한 우수한 논문 성과 창출	SCI급 우수 논문(상위 20% 이내) 창출
빅데이터 환경인자 DB 확보 및 질적 우수성	지구온난화에 의한 극지역 기후·환경변화 현상 및 영향 파악을 위해 필수적인 환경인자 DB 지속 확보	극지 현장에서의 Originality, Locality를 갖는 양질의 데이터 확보

o (추진계획-1) 수집자료를 유관기관·이해관계자까지 개방하는 체계구축

⇒ 현재 데이터 축적을 목적으로 하는 단순 성과지표 “극지 동토층 환경인자 확보율”에서 한국극지데이터센터(KPDC)의 접근성과 큐레이터 기능 강화 등 공유 및 확산 노력을 통해 활용도 평가 지표로 구체화

예) 본 사업 내외 연구자의 KPDC 데이터 활용건수, 국제공인 데이터 운영시스템에 데이터를 제공·등록 건수

o (추진계획-2) 주요 성과지표의 구체화 및 논문의 질적수준 목표 상향 조정

⇒ 지표를 ① 과학·기술적 성과, ② 경제·사회적 성과, ③ 인프라적 성과 등으로 세분화하여 근거를 구체화하고 연구성과의 수월성 제고

⇒ 표준화된 순위보정영향력지수(mrnIF)에서의 해당 목표를 구간별로 추가 세분화하여 변별력 강화

■ 글로벌 현안 대응 연구(개별성과)

* 극지 정보 및 정책에 따른 주요성과 창출 예시

목표	설명	주요성과
극지 분야 정보 확보	북극이사회 국가 내 극지 분야 정보의 확보 및 국내 과학/외교적 방향 설정 활용 등	관측 DB, 예측 모델 결과, 대응방안 설정에 필수자료 제시
극지 정책 현안 기여	2050 북극활동전략('21.11), 극지활동진흥법('21.10), 제5차 과학기술기본계획('22.11) 및 AMAP 2021 보고서, IPCC AR6('21.08) 등 국내외 극지 관련 정책에 기여한 연구내용	정책 기여 연구

[참고] 성과지표 강화 방안(종합 예시)

<table>
<tr><th colspan="3">현재의 핵심성과지표(KPI) (AS-IS)('21~'24)</th><th colspan="3">향후 핵심성과지표(KPI) 추진계획(안) (To-Be)('25~'30)</th></tr>
<tr><th>지표 분류</th><th>성과지표</th><th>산출방식 및 내용</th><th>지표 분류</th><th>성과지표</th><th>산출방식 및 내용</th></tr>
<tr>
<td>-</td>
<td>표준화된 순위보정 영향력 지수 (mrnIF)</td>
<td>•측정산식 : SCI논문 건당 표준화된 순위보정영향력지수(mrnIF) 산술평균
•측정방법 및 시기 : 연 1회 (연구재단 성과관리시스템 및 NTIS성과 조사)
<table>
<tr><td>시기</td><td>'21</td><td>'22</td><td>'23</td><td>'24</td></tr>
<tr><td>평균목표</td><td>68.87</td><td>70.59</td><td>72.31</td><td>74.03</td></tr>
<tr><td>실적</td><td>77.65</td><td>75.64</td><td></td><td></td></tr>
</table>
</td>
<td>과학적 지표</td>
<td>(수정보완)

표준화된 순위보정 영향력 지수
<u>(mrnIF 평균)</u></td>
<td>•측정산식 : SCI논문 건당 표준화된 순위보정영향력지수(mrnIF) 산술평균
•측정방법 및 시기 : 연 1회 (연구재단 성과관리시스템 및 NTIS성과 조사)
<table>
<tr><td colspan="2">시기</td><td>'25</td><td>'26</td><td>'27</td><td>'28</td><td>'29</td><td>'30</td></tr>
<tr><td rowspan="2">① 목표 (mrnIF≥90)</td><td>편수</td><td>2</td><td>4</td><td>4</td><td>5</td><td>5</td><td>6</td></tr>
<tr><td>평균</td><td>91.5</td><td>91.6</td><td>91.8</td><td>91.9</td><td>92.0</td><td>92.2</td></tr>
<tr><td colspan="2">① 실적(평균)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">② 목표 (80≤mrnIF<90)</td><td>편수</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>4</td><td>4</td><td>5</td></tr>
<tr><td>평균</td><td>81.3</td><td>81.8</td><td>82.0</td><td>82.2</td><td>82.5</td><td>83.0</td></tr>
<tr><td colspan="2">② 실적(평균)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>
▣ (차별성-지표강화 사유) 연구수행 결과에 대한 우수 SCI급 논문의 수준을 좀더 세분화하여 제시하고, 전체적으로 mrnIF의 질적 향상을 도모함(극지 현장상황 또는 팬데믹 발생 등에 따라 변경가능성 있음)
※ 목표 구간별 연도별로 제시한 논문 편수 및 mrnIF 평균값은, 선행사업 성과를 분석하여 상향 제시함

[참고] 현재('21~'24) 연구사업의 mrnIF 목표 설정을 기준하였을 때, 향후 연도별 게재 전체 논문에 대한 mrnIF 평균목표
<table>
<tr><td>시기</td><td>'25</td><td>'26</td><td>'27</td><td>'28</td><td>'29</td><td>'30</td></tr>
<tr><td>평균목표</td><td>74.5</td><td>74.8</td><td>75.5</td><td>75.6</td><td>75.8</td><td>76.0</td></tr>
<tr><td>실적</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>
</td>
</tr>
<tr>
<td>-</td>
<td>극지 동토층 환경 인자 확보율 (%, 누적 건수)</td>
<td>•극지 동토층 환경인자 확보율 : 인자확보율 산출식=[연도별 환경인자 확보 건수/환경인자 확보 전체 건수('24년 목표치)] *100
<table>
<tr><td>시기</td><td>'21</td><td>'22</td><td>'23</td><td>'24</td></tr>
<tr><td>누적목표 (건)</td><td>6</td><td>12</td><td>17</td><td>23</td></tr>
<tr><td>실적 (건)</td><td>16</td><td>54</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>인자확보율 (%)</td><td>25</td><td>50</td><td>75</td><td>100</td></tr>
</table>
•측정방법 및 시기 : 연 1회(연구재단 성과관리시스템, 한국극지데이터센터(KPDC) 등)</td>
<td>인프라 지표</td>
<td>(수정보완/추가)

극지 동토층 환경인자 확보율(%, 누적건수) 및
<u>측정시스템 가동률</u></td>
<td>•극지 동토층 환경인자 확보율 : 인자확보율 산출식=[연도별 환경인자 확보 건수/환경인자 확보 전체 건수('30년 목표치)] *100
<table>
<tr><td>시기</td><td>'25</td><td>'26</td><td>'27</td><td>'28</td><td>'29</td><td>'30</td></tr>
<tr><td>누적목표 (건)</td><td>11</td><td>21</td><td>35</td><td>53</td><td>60</td><td>70</td></tr>
<tr><td>실적 (건)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>인자확보율 (%)</td><td>15</td><td>30</td><td>50</td><td>75</td><td>85</td><td>100</td></tr>
</table>
•측정시스템의 가동률 : 가동률 산출식=[연도별 실제 작동시간/연도별 측정시스템 예상 가동시간] * 100
<table>
<tr><td>시기</td><td>'25</td><td>'26</td><td>'27</td><td>'28</td><td>'29</td><td>'30</td></tr>
<tr><td>목표 (%)</td><td>80</td><td>80</td><td>80</td><td>80</td><td>80</td><td>80</td></tr>
<tr><td>실적 (%)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>
</td>
</tr>
</table>

<table>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td>－대기, 토양, 생태 등 분야 환경인자 확보 목표치 : 한국극지데이터센터(KPDC)에 메타데이터 등록 인증, 제시</td>
<td></td>
<td><u>(%)</u></td>
<td>•측정방법 및 시기 : 연 1회(연구재단 성과관리시스템, 한국극지데이터센터(KPDC) 등)
－대기, 토양, 생태 등 분야 환경인자 확보 목표치 : 한국극지데이터센터(KPDC)는 물론, <u>SIOS/PANGAEA 등을 추가하여</u> 메타데이터 등록 인증, 제시
－대기구성물질, 이산화탄소, 메탄, 토양온/습도 등 환경인자를 확보하기 위해서는 정밀 측정시스템의 최적 가동이 필수이므로, 이에 대한 성공률을 판단하기 위함. 실제 자료 수득률과도 연계되므로, 신규 지표로 선정하고 함

▣ (차별성－지표강화 사유) 기존 KPDC 이외에 SIOS (Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System; 스발바르 통합 북극 지구관측시스템)* 및 PANGAEA(국제과학협의회(International Science Council)** 내 World Data System에 소속된 지구환경과학분야 거대 데이터센터) 등 국제공인 데이터 운영시스템에 데이터를 추가로 제공하여 개방성 강화 계획임. 또한 북극권 각 관측거점 등에서의 측정시스템 운영 상태를 추가하여, 최적화하고자 함(극지 현장상황 또는 팬데믹 발생 등에 따라 영향을 많이 받으므로 변경가능성 있음)
* SIOS : 노르웨이 스발바르 군도 지역을 대상으로 하는 “스발바르 통합 북극 지구관측시스템”으로, 스발바르 군도 및 주변에 구축된 기상관측(weather station－기온, 습도, 기압 등), 빙설관측(snow stations) 등 다양한 관측/연구 인프라시스템을 구축하여 스발바르 기후환경변화의 장기적인 관측을 위한 국제공동관측시스템
** PANGAEA : 극지연구소에서 생산되는 극지 고환경 분야 데이터는 판게아를 통해 국제적으로 공유되며 국내외 공동연구의 단초를 제공하고 있음</td>
</tr>
<tr>
<td>－</td>
<td>환북극 환경 인자 관측 분석 Smart Polar Platform 구축 공정률 (%)</td>
<td>•Smart Polar Platform <u>구축 공정률</u> : 구축 공정률 산출식=[’24년 최종 구축 완료 대비 연도별 제작품 및 기술에 개발에 대한 공정률]
<table>
<tr><td>시기</td><td>’21</td><td>’22</td><td>’23</td><td>’24</td></tr>
<tr><td>개발기술</td><td>－</td><td>①</td><td>②</td><td>③</td></tr>
<tr><td>누적 공정률 목표 (%)</td><td>－</td><td>30</td><td>70</td><td>100</td></tr>
<tr><td>실적 (%)</td><td>－</td><td>55</td><td></td><td></td></tr>
</table>
•측정방법 및 시기 : 연 1회(개발한 제작품 및 기술에 대한 전문가 평가, 결과 데이터는 한국극지데이터센터(KPDC)에 등재)</td>
<td>인프라 지표</td>
<td>(수정보완)

환북극 환경인자 관측분석 Smart Polar Platform <u>운영률(%, 누적건수)</u></td>
<td>•Smart Polar Platform(SPP) <u>SPP 운영률</u> : [‘24년에 개발된 SPP를 고도화하여 향후 ‘25 ~‘30년 기간 중에 SPP 구축 지역 확대(예, 캐나다, 그린란드, 알래스카 종단 추가 등) 운영하며 양질의 데이터를 실시간으로 제공하는 구축을 완료하고 설치/운영하는 건수로 산출함. 이는 실제 플랫폼 가동을 통해 정확하고 빠른 환경변화 감지 및 활용도 제고를 위해 필수적인 지표임. 환경인자와도 매우 밀접한 관련 있는 기술 수준의 평가 지표임] (SPP 운영률 산출식=[지역별 설치 건수/누적 목표 설치 건수(‘30년 목표치)] *100
<table>
<tr><td>시기</td><td>‘25</td><td>‘26</td><td>‘27</td><td>‘28</td><td>‘29</td><td>‘30</td></tr>
<tr><td>누적목표 (건)</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr>
<tr><td>SPP 운영률 (%)</td><td>17</td><td>33</td><td>50</td><td>67</td><td>83</td><td>100</td></tr>
<tr><td>실적 (건, %)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>
•측정방법 및 시기 : 연 1회(SPP 설치/운영 지역에서의 데이터 산출 건은 전문가 평가, 결과 데이터는 한국극지데이터센터(KPDC)에 등재)

▣ (차별성－지표강화 사유) SPP는 다양한 극지역에서 무인으로 효율적으로 환경인자 확보하고 관측데이터를 인공위성을 통해 실시간 제공이 가능하며 관측 주기/범위 등을 양방향 통신을 통해 제어/관</td>
</tr>
</table>

<table>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>측/분석하는 기술임. 이러한 기술적 배경을 통해 다양한 극지 지역에서 효율적인 데이터 확보 및 관측데이터를 실시간으로 제공하여 여러 지역에서의 북극 환경변화를 지속적이며 안정적으로 관측하고 빠르게 감지할 수 있어 필수적인 지표로 지속적으로 관리하고자 함 (극지 현장상황 또는 팬데믹 발생 등에 따라 영향을 많이 받으므로 변경가능성 있음)</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td>사회적 기여 지표</td><td>(신규추가)

북극이사회 옵서버 국가 과학활동 제공 및 국제활동</td><td>•측정산식 : 옵서버 국가로서의 대한민국 북극권 과학활동 제시(연도별 건수로 산정)
•측정방법 및 시기 : 연 1회 (연구재단 성과관리시스템 및 NTIS성과 조사)
<table>
<tr><td>시기</td><td>‘25</td><td>‘26</td><td>‘27</td><td>‘28</td><td>‘29</td><td>‘30</td></tr>
<tr><td>목표 (건)</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr>
<tr><td>실적 (건)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>달성률 (%)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>
▣ (차별성-지표강화 사유) 대한민국은 2013년 5월 북극이사회 옵서버 국가로서의 지위를 확보하고 매년 북극권에서의 과학활동을 통해 북극이사회 국가로부터 인정받아 옵서버 국가로서의 지위를 유지하고 있음. 이에 대해 본 사업은 옵서버 국가로서의 의무적 과학활동에 대한 근거 자료를 제시하고 있는바, 이에 대한 정책적 지표로 설정하여 평가하는 것이 바람직함</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td>사회적 기여 지표</td><td>(신규추가)

대국민 홍보 및 과학기술 대중화</td><td>•측정산식 : ① 메이저급 또는 일반 언론 홍보 건수에 대한 점수 (∑(4.0*메이저급 주요언론사+1*일반언론 건수)의 달성율 (%) 및 ② 대중 강연 건수를 제시하고 그 달성률로 산정
•측정방법 및 시기 : 연 1회 (연구재단 성과관리시스템 및 NTIS성과 조사)
<table>
<tr><td colspan="2">시기</td><td>‘25</td><td>‘26</td><td>‘27</td><td>‘28</td><td>‘29</td><td>‘30</td></tr>
<tr><td rowspan="3">①
언론
홍보</td><td>목표(점수)</td><td>10</td><td>10</td><td>10</td><td>10</td><td>10</td><td>10</td></tr>
<tr><td>실적(합계)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>달성률 (%)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">②
대중
강연</td><td>목표(건수)</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td></tr>
<tr><td>실적(건수)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>달성률 (%)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>
▣ (차별성-지표강화 사유) 본 사업은 국가 R&D로서, 그 결과에 따라 국가적인 글로벌 이슈 대응 노력과 국익 제고는 물론 국민적 자긍성 고취와도 매우 밀접한 관련성이 있으므로, 국민적 알권리를 해소시킴과 동시에 전 지구적인 기후환경변화에 대한 인식을 고취시킬 필요가 있어 지표로 설정함</td></tr>
</table>

제4장
전략주제 도출 및 총괄기술 로드맵

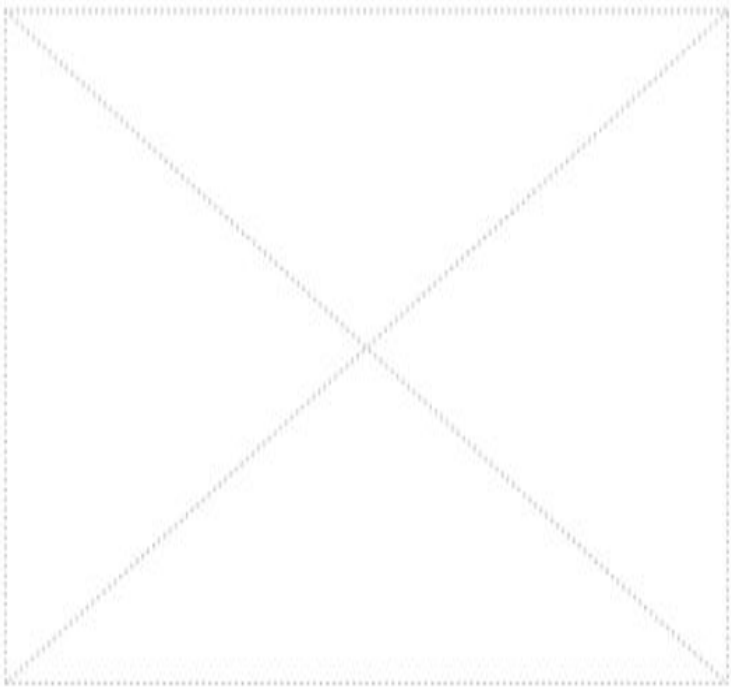
1 전략주제 개요

전략주제	세부주제	핵심분야	기간
(전략-I) 장기 모니터링과 데이터 축적 및 현상 규명	(I-1) 극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악	• 북극 대기 중 미세먼지 거동 감시 프로그램 고도화	1단계 (2025 ~2027)
		• 북극 주요 동토 지역 에너지탄소순환 장기 모니터링 고도화	
		• 극지 저층대기 화학적 변화로 인한 고층대기 역학적 변화 감시	
		• AIoT 극지 환경인자 수집 광역적 센서 네트워크 기술개발	
		• 북극 대기 중 자연적, 인위적 미세먼지 감시 프로그램 고도화	2단계 (2028 ~2030)
		• 북극 육상동토 에너지탄소순환 장기 변동성 평가	
		• 극지 저층대기 화학적 변화로 인한 고층대기 역학적 변화 기작 규명	
		• AIoT Polar Platform 운용	
	(I-2) 북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가	• 온도, 식생, 지형 등의 다양한 동토 붕괴/변화에 따른 동토 생태계 특성 변화 이해	1단계 (2025 ~2027)
		• 북극 동토층 기후변화 모사 실험 현장에서 장기생태모니터링 수행	
		• 확대된 국제 공동연구 기반 확보	
		• 장기생태모니터링 프로그램 고도화	2단계 (2028 ~2030)
		• 북극 동토층 생태계의 기후변화 취약성 평가	
		• 축적된 동토 장기 생태모니터링 데이터를 활용한 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 변화 전망	
(전략-II) 과거 기후·환경변화 이해와 미래 예측	(II-1) 북극권 동토와 주변 연안지역 과거 기후·환경변화 특성 파악	• 피오르드 및 동토 융해호 국제공동탐사연구 기반 확대	1단계 (2025 ~2027)
		• 과거 동토 융해호 기후환경복원 기술개발 및 검증 연구	
		• 과거 북극권 기후환경 변화 대기-해양 모델링 연구 기반 구축	
		• 북극권 동토 융해호 과거 기후환경 복원 연구	2단계 (2028 ~2030)
		• 과거 기후환경 변화에 따른 북극권 동토 및 주변 연안지역 물질 거동 양상 파악	
		• 과거 프록시 복원 데이터-모델 비교를 통한, 북극권 동토 및 주변 연안지역 환경변화의 영향력 평가	
	(II-2) 북극권 기후·환경 변화에 대한 피드백 규명	• 북극권 동토지역과 중위도의 관측기반(에너지수지 분석)에 의한 기후변화 분석	1단계 (2025 ~2027)
		• 상세 기후모델을 이용한 지표 및 기후 특성 분석	
		• 환경 빅데이터와 지역기후모델을 이용한 북극권과 중위도의 상세 기후변화 분석	
		• 환경 빅데이터 분석과 연계한 북극권 동토지역과 중위도의 기후변화 피드백 규명	2단계 (2028 ~2030)
		• 북극권 동토지역과 중위도 빅데이터와 딥러닝 기반의 지역별 미래기후 예측 및 대응방안 구축	

전략주제	세부주제	핵심분야	기간
(전략-III) 기후위기 대응과 인간사회 영향 파악	(III-1) 온실기체 바이오 전환기술 개발	• 북극 동토층 토양 유래의 환경유전체 라이브러리 구축	1단계 (2025 ~2027)
		• NGS기반의 환경유전체 분석을 통한 유전자원 확보	
		• 동토 환경 특이적 온실기체 대사 관련 유전자 구축	
		• 온실기체 대사관련 생물소재의 활성기작에 대한 특성 분석	2단계 (2028 ~2030)
		• 생명공학기술을 이용한 메탄산화 제어 기술 연구	
		• 온실기체 바이오 전환 개발을 통한 생물소재 관련연구	
	(III-2) 북극권 지역사회 기후변화 영향 분석	• 관측거점 중심의 북극권 지역사회 특성 이해 및 연구기반 구축	1단계 (2025 ~2027)
		• 북극권 지역사회의 기후변화에 대한 인식 현황분석	
		• 북극권 지역사회의 기후변화 영향 분석	
		• 지역사회 간 기후변화 인식 비교분석 및 협력체계 구축	2단계 (2028 ~2030)
		• 북극권 지역사회와의 연구내용 공유 및 북극권 문화에 대한 종합적 이해	

2 총괄기술 로드맵

2.1. 기술총괄

핵심어 도출


예상 Output 및 가치

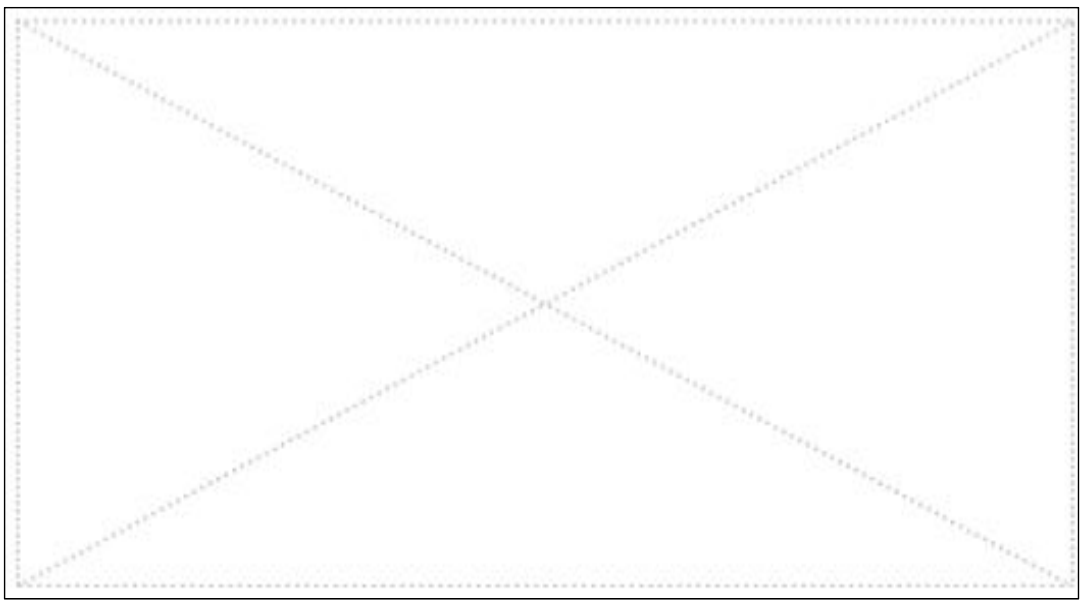
[전략(세부)주제 발굴을 위한 핵심 keywords 분석과 예상되는 Output과 가치 창출 : 국내외 연구동향, 수요조사 및 자문의견 중 가장 많이 언급되는 핵심어 도출]

■ 사업 수행관련 핵심어 선정

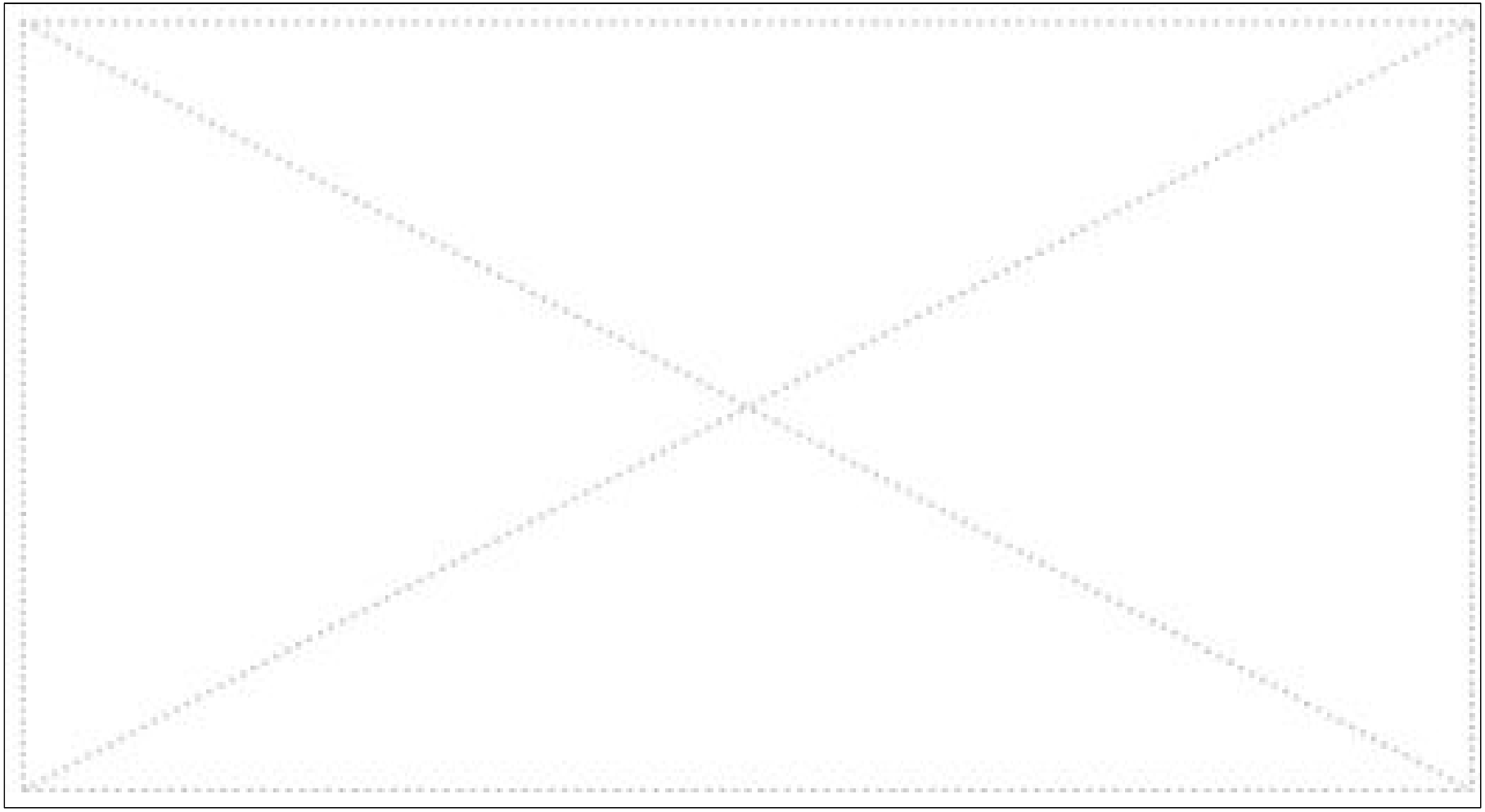
- 북극권에서 국내·외 과학기술 활동 및 정책 등을 고려하여, 상기 핵심어로 제시함
  - 환북극권 관측거점(기존 6개, 추가 2개)을 기반으로 육상(동토, 생태)-대기-연안 영역에서의 기후·환경 변화에 대한 관측/분석 및 미래 예측 등 필요 핵심어 제시
  - 그 중에서 가장 중요하다고 판단되는, 북극권/동토-대기-생태/관측거점/과거-현재-미래/기후·환경/모니터링/빅데이터/AIoT플랫폼/한반도/중위도/북극 지역사회/AC 옵서버 등을 골자로 하는 주요 핵심어를 근거로, 각 전략주제와 세부주제의 내용과 범위를 제시함

■ 전략주제별 특성 및 연계성

- 전략주제의 분류 핵심은, 본 사업에서 추구하는 ESG 과학경영 기법에 부합되도록 환경(Environmental Research), 사회(Social), 그리고 거버넌스(Governance) 분야로 구분하였음
- 모니터링과 관측/분석 및 현상 규명을 주로 수행하는 주제, 과거 기후·환경변화 이해와 미래 예측 연구 등 북극권에서의 기후·환경변화와 직접적으로 관련을 갖고 수행하는 2개의 전략주제를 환경연구분야로 구분함
- 또한, 북극 유래 유용물질 응용기술개발, 북극권 지역사회 영향 파악 등 북극권 온난화에 의한 기후·환경변화와 간접적으로 활용할 수 있고 영향받는, 즉 인간 삶의 질적 수준에 영향을 줄 수 있는 내용을 사회적 연구 분야에서 1개의 전략주제로 구분함
- 북극권에서 국내·외 과학기술 활동 및 정책 등을 고려하여, 상기 연구의 효율적 수행과 결과적인 기여도 제고 측면에서 구분함



[본 기획연구에서 도출한 전략주제별 세부주제의 주요 업무 및 역할]



[본 기획연구에서 도출한 전략주제별 세부주제의 연차별 수행 내용 등]

※ 단, 상기 로드맵은 실제 시행 과정에서 기간, 내용 및 범위 등 변경가능성 있음

2.2. 전략별 기술 로드맵

2.2.1. (전략-I) 장기 모니터링과 데이터 축적 및 현상 규명

■ (I-1) 극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악 기술 로드맵

- **핵심성과**
  - 북극 동토 기반 미세먼지 모니터링 프로그램 고도화로 환북극 미세먼지의 광역-연속 빅데이터 DB 확보
  - 북극권 육상 탄소순환 장기 변동성 평가
  - 동토 융해에 따른 툰드라 탄소순환의 특성 분석
  - 극지 저층대기 화학적 변화로 인한 고층대기 역학적 변화 감시 시스템 구축 및 물리적 기작 규명
  - 극지 환경변화 감지 및 가시화를 위한 실시간 광역적 AIoT Polar Platform 개발 운용
- **활용방안**
  - 미세먼지 DB를 활용한 북극 동토 기후 시스템간의 피드백에 관한 가설 제공 및 정량화로 미래 기후패턴 예측 정확도 제고
  - 북극권 나노입자 빅데이터 구축과 기계학습을 통한 나노입자생성 예측 모델 개발
  - 북극 기후변화가 북극권 육상 탄소수지에 미치는 영향 평가
  - 북극 기후변화가 북극 육상 물수지에 미치는 영향 평가
  - 남·북극 비교연구를 통해 북극 동토 환경변화에 의한 고층대기 영향 파악

■ (I-2) 북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가 기술 로드맵

- **핵심성과**
  - 기후변화 모사 연구 사이트의 장기생태모니터링을 통한 생태계 변화 자료 확보, DB 축적, 공유를 통한 국제 네트워크 그룹과 논문 성과 창출
  - 지역적/기후적 특성 및 붕괴/변화 양상이 서로 다른 다양한 동토 환경 간 비교연구를 통해 동토층 붕괴에 따른 광역 규모의 토양 생태계 반응 연구 결과 제시
  - 기후 변화에 대한 북극 동토층 생태계의 취약성 평가 결과 제시
  - 장기생태모니터링의 실측 데이터 활용 및 토양 유기탄소 모델링 결과 적용을 통한 미래 북극 동토 생태계 변화 전망
  - 북극권 국가들과의 긴밀한 연구협력을 통해, 우리나라의 북극 연구에 대한 기여도를 인지시킬 수 있음
- **활용방안**
  - 동토층 붕괴에 따른 생태계 구성 요소들의 반응을 종합적으로 모니터링하여, 기후변화에 따른 북극 동토 생태계 변화 체계적 평가 가능
  - 영구동토층 내 토양 탄소 변화 연구를 통하여, 기후 변화 양상을 더욱 정확하게 예측할 수 있는 탄탄한 기반 자료로 활용 가능
  - 기후변화에 취약한 토양 유기물에 대한 정밀 연구를 통해 극지 생태계 탄소 수지 보정 및 지역적 또는 전 지구적 모델의 입력자료 및 검증 자료로 활용
  - 장기생태모니터링 결과 공유를 통한 북극권 과학 네트워크 기여
  - 기후변화에 의한 극지 생태계 변화 기작 규명을 통해 국내 아고산지대 생태계 변화를 보다 정확히 이해·판단하여 향후 보존을 위한 대책 수립용 과학적 자료로 활용

2.2.2. (전략-II) 과거 기후· 환경변화 이해와 미래 예측

■ (II-1) 북극권 동토와 주변 연안지역 과거 기후·환경변화 특성 파악 기술 로드맵

- **핵심성과**
  - (북극 환경변화 규명) 지구온난화로 인한 북극권 동토 환경변화를 연구할 수 있는 융해호 연구 기반 구축
  - (미래 변화 예측 강화) 미래 기후변화를 예측하는 기후모델을 검증할 수 있는 과거 장기 기후환경 복원자료 확보 및 과거 데이터-모델 비교연구 기반 구축
  - (북극권 물질순환 모델링 구축) 북극해 연안지역의 복잡한 해저 지형 및 기후변화 특성을 고려하여 기후-유동 및 관련된 물질순환 기작을 재현 및 분석할 수 있는 고해상도의 대기-해양 수치모델링 기반 구축
  - (북극 동토권과 주변 연안지역 간 상호연계성 규명) 과거부터 현재까지 지속적인 빙하 감소 및 동토 융해로 인한 북극 연안으로의 급격한 물질 유입 증가가 미치는 영향 파악
  - (기후변화 대응 전략 강화) 기후변화로 인한 환경변화 문제들에 대응할 수 있는 전략 기획 구성과 관련 과거 기후환경 재현을 통한 대응 방안 마련
- **활용방안**
  - (과거 기후 모델링 연구 확대 기여) 북극 피오르드 및 동토 융해호에서 획득한 중장기 과거 기후환경 복원자료 활용
  - (극지 연구에 대한 이해도 증진 기여) 극지환경에서의 과거 수치모델 결과들은 중앙정부, 지방자치단체, 산학연의 연구자 및 대국민 대상으로 과거 기후환경 변화 이해도 증진에 활용
  - (극지 데이터 접근성 및 활용성 향상) 과거 기후환경 복원 및 수치모델링 결과 등을 한국극지데이터센터(KPDC), 스발바르 통합 북극 지구

관측시스템)(SIOS :Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System) 등 극지데이터센터에 제공함으로써, 극지환경 정보의 접근성 향상 및 타 연구기관과의 연구협력 가능성 제고

- (북극권 원격상관 기작에 대한 이해) 북극권과 중위도 사이의 주요 통로 역할을 하는 프람해협을 기준으로 발생하는 고위도와 중위도 지방 사이의 기후-해양 상호작용에 대한 이해도 증가를 통해 전지구적인 기후변동 시나리오의 근거자료로 활용
- (국제 극지연구협업 추진 기여) 개발된 과거 수치모델 기술은 국내의 여타 극지 연구사례에 활용 가능하며, 비용 대비 효용성이 커 극지환경에 대한 대중 인식증진과 홍보활동에 활용

■ (II-2) 북극권 기후·환경변화에 대한 피드백 규명 기술 로드맵

- **핵심성과**
  - 북극권 동토 및 중위도를 포함한 전 지구에 대한 선진국 수준의 기후변화 분석 및 예측 기술 확보
  - 한반도와 동아시아의 상세기후변화 예측 및 대응 기술 확보
  - 환경 빅데이터 DB 구축, 딥러닝 분석 및 극지-한반도 기후변화 연계성 파악
- **활용방안**
  - 북극권 지표 환경변화와 중위도 기후변화의 상호작용 분석 기술 확보 및 타분야(해양, 농업, 토지이용, 신재생에너지) 기술개발 활용
  - 광역기후변화 감시 및 평가 기술을 확보함으로써 기후변화 영향 평가 및 대응 기술 선진화 활용
  - 대기조성물질 관련 상세 시공간 빅데이터에 의한 기후예측모델의 정확성 향상 및 검증을 위한 기술개발 자료 활용

2.2.3. (전략-III) 기후위기 대응과 인간사회 영향 파악

■ (III-1) 온실기체 바이오 전환기술 개발 기술 로드맵

- **핵심성과**
  - 북극 동토층 유래 온실기체 전환 생명자원 및 유전체 정보 확보
  - 환경 특이적 대사체 분석을 통한 새로운 생물소재 개발
  - 온실기체의 생물학적 대사기작 기반의 바이오전환기술 확보
  - 기후변화에 대응하기 위한 온실기체 저감기술 확보
- **활용방안**
  - 동토 환경 유래의 생명자원 및 유전정보를 생명공학 관련 기술개발을 위한 생물소재로서 활용
  - 발굴된 신규 생명자원과 메탄산화 생물소재 기반의 응용 기술에 대한 특허 등록을 통하여 지식재산권 확보
  - 온실기체의 바이오전환기술의 상업화를 통하여 기후변화 대응 기술로 활용

■ (III-2) 북극권 지역사회 기후변화 영향 분석 기술 로드맵

- **핵심성과**
  - 북극지역의 기후변화·영향에 대한 정확한 이해를 통하여 기후변화가 인류사회에 미칠 영향의 심각성을 홍보하여 기후변화 대응·완화 정책의 대중적 관심 및 참여도 향상
  - 북극권 지역사회 내에서 사회과학적 연구를 통하여 북극 원주민의 삶을 이해하고 문화를 국내외에 소개하여 우리나라의 극지연구 지평 확장
- **활용방안**
  - 북극권 지역사회의 사례분석을 통하여 북극 지역사회에서 기후변화·영향에 대한 이론 확립 및 지역적 확장을 위한 기초자료로 활용
  - 기후변화 및 영향에 대한 표준조사지 개발과 연구거점 중심의 조사 바탕 연구 확장 필요성 제시 및 공감대 형성하여 추후 '북극이사회' 등을 통한 체계적이고 지속적이며 광범위한 조사 제안
  - 북극권 지역사회와의 공감대 형성을 바탕으로 현실적용 가능하며 지속가능한 기후변화 대응·완화 정책 수립에 기여 및 북극이사회 내 우리나라의 입지와 역량 강화
  - 북극 지역사회 특성, 원주민 문화 등을 포함한 북극권의 종합적 이해를 위한 대중적 교육 자료로 활용

3 기대성과 및 활용방안

3.1. 기대성과

■ **과학기술적 기대성과**

- **(환경변화 규명 연구사업 수행 기초자료 효과)** 지구온난화로 인한 북극권에서의 대기, 빙하, 동토, 생태계 및 연안 등 급격한 환경변화 현상 지속적 감시 및 대응 방안 제시
- **(미래 변화 예측 강화 방안 도출 기여)** 급변하는 북극권에서의 환경변화 자료 확보와 분석을 통한 한반도 및 전 지구 규모의 환경변화에 미치는 직·간접적인 영향 진단 및 미래 예측 강화에 기여
- **(글로벌 이슈 대응 연구를 통한 국가위상 제고 방안 제시)** 급변하는 북극권의 기후변화에 따른 한반도를 비롯한 북반구에 대한 파급효과를 선제적으로 규명함으로써, 북극 연구를 통해 대응이 필요한 주요 글로벌 이슈 선도
- **(환경 및 기후 변화 대응을 위한 과학적 위상 정립)** 인간의 삶과 직결되는 기후/환경 분야에 폭넓게 응용할 수 있으며, 광역 기후변화에 대해 정밀 감시하고 영향을 평가할 수 있는 핵심 기술 확보

■ **사회적 기대성과**

- **(우리나라 정부 R&D 사업 투자 우수성 확보 및 국가적 극지연구 역량 제고의 기초자료 효과)** 북극권은 지역적 특성(접근성, 각국 주권 행사, 활용성 등)에 따라, 개별 연구기관이 아닌 우리나라 정부 차원(과기부, 외교부 등)의 부처 간의 협조와 국제 네트워크 가동을 통한 역량 강화에 기여
- **(2050 탄소중립 목표 달성을 위한 기초자료 효과)** 북극 동토 기반 탄소수지 빅데이터 확보 및 기후변화대응 원천기술 기반 정보 축적

■ **외교적 기대성과**

- **북극권 국가들과의 양자-다자간 협력연구 강화할 수 있는 근거로 활용**
  - **(북극권 국가들과의 과기공동위 의제 제안)** 미국 등 8개 북극이사회 국가들과의 과기공동위 또는 연구재단 협력센터 기반 과학기술 협력 심화에 기여
- **북극이사회 정식옵서버 국가로서의 역할 이행 지속을 위한 기초자료 제시**
  - **(우리나라의 역할과 책임성 명확화에 기여)** 북극이사회(Arctic Council)의 목적인, “지속가능한 개발과 환경보호를 비롯한 공동문제에 있어 몇몇 원주민 공동체의 참여 아래 모든 북극 연안국의 협력, 조율, 상호활동 도모”에 대한 민국 역할 기여

– **(북극에서의 과학적 활동의 근거자료로 제시)** 북극이사회 의사규칙(Rule of Procedure)에 따라, 옵서버 국가들은 가입 이후 4년마다 옵서버 지위유지 평가에 대비하여, 대한민국도 지속적인 관심 표명과 과학 활동 및 북극권에서의 적극적인 활동 필요

3.2. 활용방안

■ **북극 동토 기반 관측 영역 및 공동연구 네트워크의 확대를 통한 과학적 근거의 대표성 확보 정부 R&D 사업 발굴에 활용**

- **(동토 관측 및 연구영역 확대)** 북극이사회 8개 전 회원국(기존 관측거점 운영 6개국 외 스웨덴과 핀란드 추가)과의 양자 간 북극 기후변화 공동 대응 기반 구축
  - 관측 영역(동시베리아, 알래스카 등 동토 지역 및 남극 추가 포함) 대상 super site 선정 및 동토변화에 대한 집중적인 장기 모니터링 프로그램 개발 및 운영
- **(운영 효율화 및 네트워크 강화)** 동토 시료 현장 분석을 위한 현지 실험실 구축–운영 확대 및 현지 밀착형 연구 네트워크 구축
  - 북극과학장관회의 및 북극이사회에서 강조하는 원주민과의 협력 확대 정책 수요 충족, 현지 연구 시스템 확대 및 북극권 변화 감지와 보호를 위한 국제 협력 네트워크 강화
- **(북극권 활용을 위한 선제적 기반 마련)** 향후 물류수송 및 자원개발 등 북극권 활용을 위한 북극권 비즈니스 모델 도출 등 선제적 대응기반 마련

■ **극지 기후환경변화 빅데이터 축적과 한반도 기후 및 환경변화 예측 정확성 제고 연구의 참고자료로 활용**

- **(빅데이터 확보와 활용 강화)** 관측거점 및 동토 광역 관측망을 활용한 동토 환경변화 빅데이터(대기–토양–생태–연안 등에서 환경에 영향을 받거나 주는 인자에 대해서 정밀 측정시스템 가동 관측과 시료채취) 확보 및 향후 IPCC 활동(논문 등 보고서 기여) 등 자료의 공동 활용 극대화
  - 미해결 지구시스템의 영구동토층 융해에 대한 영향성 파악 제고
- **(한반도 영향성과 역할 제고)** 동토 지역의 탄소순환, 미세먼지 등 환경인자 빅데이터 축적 및 분석으로, 2050년 탄소중립과 한반도 미세먼지 저감정책 수립의 기초자료 제공 및 활용성 제고
  - 동토층 융해로 인한 북극의 피드백 순환과정의 정밀 분석과 한반도 영향성 제고

- **(피드백 시나리오 제공)** 북극 동토-대기 간 온실기체, 열에너지 및 미세먼지 순환과정 장기 모니터링 자료의 분석과 정량화 등으로 한반도를 포함한 중위도 지역에 미치는 북극권 환경변화의 영향평가 및 위도 간 기후 변화의 피드백 시나리오 제공
- **(파생 연구자료 활용)** 빅데이터에 기반한 극지환경 감시 기술은 한반도를 포함한 주변 지역의 기상, 해양, 농업, 토지이용 분야에 직간접적으로 활용
- **(예측 모델링 성능 개선)** 빅데이터 기반의 시공간적 해상도를 가지는 대기조성 물질에 관한 변화 특성 자료는 예측 모델 개발 또는 개선할 수 있는 기반 기술로써 활용 가능
- **(공공 기술 개발 향상)** 빅데이터 분석 기술의 미래 관측 센서 설계 기반기술 및 관련 소프트웨어 개발을 위한 시너지 효과 창출 및 과학적 자료에 근거한 공공 서비스 활용

■ **'新성장 4.0 전략'('22.12 관계부처 합동)에 부응하는 참고자료로 활용**

- **(초일류국가 도약을 위한 기후변화 대응 및 미래기술 확보 등 도전과제 해결)** 지속적이면서 기존 과제 해결을 위한 구체적인 프로젝트 추진에 활용
- **(극지 빅데이터 확보 및 분석 기술혁신을 통한 일상 속 체감 가능한 성장 제고)** AI·데이터 활용도의 세계최고 수준으로 개척, 기후변화에 따른 국가적/사회적 약자 불편 해소에 활용
- **(기후·환경변화 관측/분석/예측 등 첨단기술의 선제적 확보와 고도화)** 수십년 또는 수백년간 지속될 수 있는 글로벌 기후·환경변화 이슈에 대한 선제적이고 종합적인 대응 및 기술가치의 고도화로 국가경쟁력 강화와 미래성장동력 창출에 활용

제5장 전략별 주요 내용

1 (전략-I) 장기 모니터링과 데이터 축적 및 현상 규명

1.1. 연구 필요성 및 목표

1.1.1. 연구추진 필요성

구분	중점사항	핵심이슈	연구 방향성 도출
정책적 필요성	북극 미세먼지 특성 파악	• 북극 대기중 미세먼지의 크기별 생성-성장-기후적 영향에 관한 정량적 DB 구축 필요성이 제기됨	환북극 미세먼지 모니터링 프로그램 선진화를 통한 미세먼지의 기후적 역할 및 중위도 지역과의 상호 연관성 규명 북극권 육상 에너지·탄소수지에 관한 장기 광역 데이터 생산 기후변화에 따른 북극권 육상 장기 에너지·탄소수지 평가에 기반을 둔 전지구 탄소 수지에서의 동토의 역할 규명 및 동토 안정성 평가에 기여
	국제적 탄소배출 협의 과학적 근거 제공	• 전지구적 탄소배출 감축 노력을 평가하기 위한 거대한 탄소 배출원으로 지목되는 북극 육상 동토의 역할에 대한 과학적 근거 필요	
	북극 기후변화와 우주기상의 상관성 파악	• 북극 기후환경 변화와 태양 및 우주환경 변화의 상호 연관성 근거 제시	
	장기생태모니터링	• 비북극권 국가가 북극권 국가에서 장기 생태모니터링을 통한 데이터 축적 및 연구 활동의 지속은 우리나라의 인지도 향상 및 북극 연구에 대한 진심과 성의, 국제 공동 이슈에 대한 우리나라의 기여를 부각할 수 있음	
사회적 필요성	북반부 미세먼지 거동 연구	• 북극의 급격한 온난화에 따른, 북극 대기와 한반도를 포함한 중위도 지역의 미세먼지 역학의 상호 연관성 연구 필요성이 제기됨	
	탄소넷제로 사회 실현을 위한 로드맵 필요	• 전지구적 탄소 농도 변화에 대응하여 우리 사회의 대응 로드맵 수립 필요	
	극지 동토 환경 변화 빅데이터 구축을 위한 AIoT 기술 접목	• AIoT 기술을 활용해 극지 관측 데이터를 쉽고 체계적으로 수집, 교환, 분석할 수 있으므로 연구 생산성과 효율성을 높일 수 있음	
	기후변화와 우주기상의 사회적 인식 재고	• 북극 기후시스템의 변화는 지구 대기를 넘어 우주환경에까지 영향을 미칠 수 있음	
	북극 동토층 취약성 평가	• 북극 생태계의 변화는 북극의 기후에 영향을 미치고, 이는 궁극적으로 중위도 지역에 영향을 미치므로, 북극 동토층 생태계의 기후변화에 대한 취약성 평가 필요	
기술적 필요성	미세먼지 모니터링 프로그램의 고도화	• 환북극 동토 지역과 북극해 연안지역을 아우르는 광역에서 미세먼지 정밀 모니터링 프로그램 개발과 확충의 필요성이 제기됨	
	정량적인 광역 고해상도 에너지·탄소 플럭스 데이터 필요	• 무인 연속 거점 환경인자관측시스템 표준화 및 영역 확대 • 현장 실측자료와 위성-모형 자료 매칭을 통해 장기간 광역 자료를 생산하여 과학적 분석 및 예측 능력 제고	
	AIoT 기술의 현장 적용으로 동토 모니터링의 효율성 확보	• AIoT 기술을 접목하여 과학적 발견을 증대하고 새로운 연구개발의 기회를 발굴할 수 있음	
	극지 저층-고층대기 변화 감시 시스템 구축	• 북극 동토층 융융과 대기 화학적 변화, 그리고 고층대기 역학적 변화 감시 및 수치모델 모의실험을 통한 상관관계 규명	
	다양한 동토 붕괴/변화 지역에서의 데이터 확보	• 지역적/기후적 특성 및 붕괴 양상이 다른 동토 환경 간 비교 연구 및 공간적으로 확대된 영역에서의 연구 필요	

1.1.2. 정책적 필요성

- **북극 대기중 미세먼지의 크기별 생성-성장-기후적 영향에 관한 정량적 DB 구축**
  - 극지 미세먼지 변화 글로벌 연구를 통한 국제 협력체계 구축 및 기후변화 대응 국가적 위상강화
  - 북극 이사회 옵서버 국가('13.5)로서의 정부 정책('북극정책 기본계획' 등)에 대한 자발적, 선제적 업무 수행
  - 북극권 미세먼지 빅데이터 구축을 통해 미세먼지 농도, 나노입자 생성, 구름 생성 예측 등의 예측 능력 향상 기술 개발이 필요함
- **국제적 탄소배출 협의 과학적 근거 제공**
  - 전지구적 탄소배출 감축 노력을 평가하기 위한 과학적 근거 필요
- **북극 기후변화와 우주기상의 상관성 파악**
  - 기후변화의 영향 범위는 지구 대기뿐만 아니라 우주환경에까지 미침
  - 기후변화의 원인으로 태양활동 등 자연변동성의 영향 파악
- **AIoT 기술의 작용과 활용으로 빅데이터 DB 구축의 효율성 제고**
  - 미래 인간 활동의 생태계 적응 및 환경변화에 대한 위험을 완화 방법의 선택에 따라 21세기 전반에 걸쳐 나타날 기후변화 위험이 달라질 것이고 (Pachauri et al., 2014[69]) 이를 대처하기 위해 AIoT를 이용한 장기 모니터링 및 데이터를 축적 확보 미래의 기후변화 대응에 반드시 필요함
  - 따라서 AIoT를 이용한 장기 모니터링 및 데이터 축적 확보는 미래 기후변화의 위험과 지속적인 인간 활동에 대한 적응의 기회이며 인간 활동이 전지구적 기후시스템에 미치는 영향(고유 시스템에 대한 위협, 극한 기상현상, 전 지구적 영향 등), 발생 확률, 발생 시기, 위험 수준을 평가하여 환경변화의 저감 능력을 증가시켜 정책 결정자를 위한 기본 자료를 제공할 필요가 있음
- **기후변화 국제 공동 이슈에 대한 대한민국의 기여도 향상**
  - 비북극권 국가가 북극권 국가에서 장기 생태모니터링을 통한 데이터 축적 및 연구 활동의 지속은 우리나라의 인지도 향상 및 북극 연구에 대한 진심과 성의, 국제 공동 이슈에 대한 우리나라의 기여를 부각할 수 있음

69) Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q. D., Dasqupta, P., Dubash, N. K., Edenhofer, O., Elgizouli, I., Field, C. B., Forster, P., Friedlingstein, P., Fuglestvedt, J., Gomez-Echeverri, L., Hallegatte, S., ... van Ypersele, J-P. (2014). Climate change 2014 synthesis report. contribution of working groups I, II, and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. http://www.mendeley.com/research/climate-change-2014-synthesis-report-contribution-working-groups-i-ii-iii-fifth-assessment-report-in-20

1.1.3. 사회적 필요성

- **북극의 급격한 온난화에 따른, 북극 대기와 한반도를 포함한 중위도 지역의 미세먼지 역학의 상호 연관성 연구**
  - 극지 미세연구의 전지구적 영향분석을 통한 기후변화 대응 역량 강화
  - 북극 환경변화로 인한 대기 안정도 변화가 중위도 대기질에 미치는 영향 파악
  - 미래의 미세먼지의 거동 및 변화 특성 예측 능력 향상이 필요함
- **탄소넷제로 사회 실현을 위한 로드맵 필요**
  - 전지구적 탄소 농도 변화에 대응하여 우리 사회의 대응 로드맵 수립 필요
- **기후변화와 우주기상의 사회적 인식 제고**
  - 전지구적 기후변화의 주요 요인 중 하나인 온실기체 증가는 우주환경의 일부인 고층대기 온도변화와 역학적 변화의 원인이 됨
  - 태양활동변화에 의한 고에너지 입자는 지구 대기로 유입되어 대기 화학적 변화를 일으키는 등 자연변동성 요인 중 하나임
  - 이와 같이 기후변화와 우주환경 변화는 밀접한 상관성을 가짐
- **급격한 기후변화를 AIoT 장기 모니터링 데이터에 기반하여 사회적 문제 해결**
  - 기후변화에 중 지구의 기온 상승 정도를 산업화 이전 수준과 비교하여 2℃ 이내로 안정화시키기 위해서는 즉각적이면서도 근본적으로 BAU (business as usual)에서 벗어나야 하며 또한, 우리가 관련 조치를 늦춘다면, 미래에 감당해야 할 경제 및 사회 문제와 비용은 더욱 증가할 것(Pachauri et al., 2014)[70]이므로 이를 극복하기 위해서는 전지구적 기후변화에 대해 AIoT를 이용한 장기 모니터링이 필요함
  - 거버넌스의 계획과 이행은 사회적 가치 및 목표나 위험에 대한 사회적 인식에 따라 크게 달라짐. 의사결정 과정에서는 관심사, 상황, 사회-문화적 배경 및 요구가 다양하다는 것을 인식하는 것이 바람직함
  - 또한 기후변화에서 해당 지역에 고유하게 존재하는 토착, 지방 및 전통 지식 체계와 사례를 고려해야 하지만, 이러한 지식들은 기존의 기후변화 저감 노력에 꾸준히 반영되어오지 못했음(Pachauri et al., 2014). 따라서 기후변화에 대한 지식을 AIoT 장기 모니터링 데이터에 기반하여 효율성을 높이는 것이 필요함

70) Pachauri, R.K., Meyer, L.A., et al., Eds. (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC 2014, Geneva, 151.

- **북극 동토층 변화가 비북극권 지역에 미치는 영향에 대한 과학적 이해 제고 및 북극권 공동체에 과학적 기여**
  - 북극의 기후와 생태계 변화는 중위도 지역의 기후에 영향을 미치므로, 북극 동토층의 기후변화에 대한 취약성 평가는 동토-기후변화 피드백에 대한 이해도를 높일 수 있음
  - 북극 동토층 환경인자, 식물, 동물, 미생물을 포괄한 전반적인 모니터링은 북극 원주민 및 지역 주민들의 경험과 지식을 활용할 수 있고, 북극 이해당사자들에게 유용한 환경변화 정보 제공 가능

1.1.4. 기술적 필요성

- **환북극 동토 지역과 북극해 연안지역을 아우르는 광역에서 미세먼지 정밀 모니터링 프로그램 개발 및 확충**
  - 미세먼지의 거동 및 특성 관련 국제 협력 및 공동연구를 통한 연구 위상 강화
  - 장기간 현장연구를 통해 구축한 국제협력체계 강화 및 대기환경 분석기술 고도화 필요
  - 극지환경재현이 가능한 모사실험실 구축 및 이를 통한 극지미세먼지 발생 프로세스 규명
  - 미세먼지 모니터링 결과를 빅데이터화 하고 인공지능을 활용한 미세먼지 농도 예측 기술 개발이 필요함
- **정량적인 광역 고해상도 에너지·탄소 플럭스 데이터 필요**
  - 거점 환경인자관측시스템 표준화 및 영역 확대
  - 거점에서의 지상 측정자료 기반으로 위성자료 오차 보정 및 북극권 광역 데이터 생산에 필요한 위성산출물 개발
  - 현장 실측자료와 위성-모형 자료 매칭을 통해 장기간 광역 자료를 생산하여 과학적 분석 및 예측 능력제고
- **북극 저층-고층대기 변화 감시 시스템 구축과 지속 가동**
  - 북극 동토층 용융에 의한 메탄, 이산화탄소 등 온실기체 증가는 고층대기로 이동하여 대기화학적 변화와 함께 역학적 변화의 요인이 됨
  - 북극 지역에서의 중간권-열권 온도 및 바람 감시 시스템을 구축하여 온실기체 증가와 대기 역학적 변화의 상관성 파악
  - 북극 온실기체 및 역학적 변화의 상관성 수치모델 모의실험

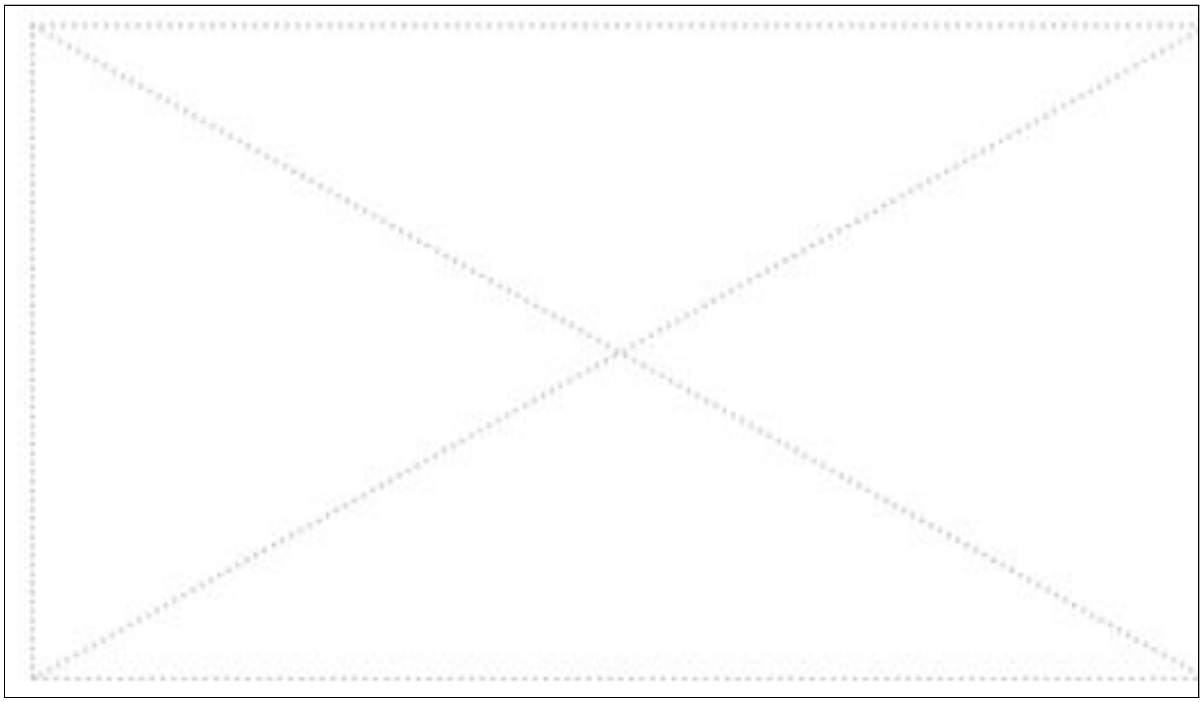
• **극지 과학기술의 선점**

- 최근 IoT 기술은 AI(인공지능)와 결합하며 그 가치가 상승하고 있고 사물 간의 연결 위주로 활용되던 기존의 IoT 기술이 각 사물이 스스로 지능을 가지고 인지, 판단, 대응하고 더 나아가 학습 등 지능화되는 방향으로 발전하고 있음. AIoT 기술을 극지 연구에 활용하여 환경인자 수집, 관리, 분석, 예측에 활용하게 되면 관측 데이터를 체계적으로 관리하는 것을 넘어 연구자가 미처 분석하지 못하는 또 다른 가치를 발견할 수 있을 것임. 또한 연구자가 수행하는 기계적인 작업을 지능형 플랫폼이 지원하여 연구자는 새로운 연구개발에 집중하게 됨
- AI 기술로 강화된 IoT 장치 및 인프라로 표현되는 AIoT 기술을 극지 연구에 활용하게 되면 관측 데이터를 쉽고 체계적으로 수집, 교환, 분석할 수 있으므로 연구 생산성과 효율성을 높일 수 있어 AIoT 기술이 필요함
- 데이터를 연구자간 쉽고 빠르게 공유함으로써 연구에 투자되는 시간과 비용을 절약하여 경제적 이점을 실현하기 위해 필요함
- 4차 산업 시대에 사이버 보안, 클라우드 컴퓨팅, 에지 컴퓨팅, 모바일 기술, 사물 지능 통신, 3D 프린팅, 고급 로봇 공학, 빅데이터, IoT, RFID 기술, 인지 컴퓨팅과 같은 기술을 극지연구에 쉽게 접목 가능하게 되어 극지 과학기술의 선점에 반드시 필요함

• **다양한 동토 붕괴/변화 지역에서의 데이터 확보**

- 동토층 붕괴는 북반구 여러 지역에서 광범위하게 일어나는 현상임에도 불구하고 그동안 포인트 관측 중심의 지엽적인 연구만 주로 수행되어 넓은 범위의 관측 데이터가 턱없이 부족한 실정임. 또한, 동토가 위치한 지역적/기후적 특성에 따라 동토층 붕괴 양상이 상이하고 이에 따른 생태계 반응이 이질적이므로 보다 다양한 사례에 대한 연구가 필요함
- AIoT Polar Platform에서 표현된 지능의 정의는 크게 환경인자를 관측하기 위한 하드웨어장치에 내장되는 알고리즘과 관측 데이터를 분석하고 향후 예측하기 위한 인공지능으로 구분됨
- 하드웨어장치에 내장되는 알고리즘은 관측되는 데이터와 소비전력 패턴을 분석하여 측정주기, 보고주기 등을 자체결정 또는 연구자가 설정하는 패턴에 따라 자동 동작하는 등의 알고리즘임. 기후변화를 분석하고 예측하기 위한 인공지능은 이전 연구에서 장기간 관측된 다양한 시계열 데이터를 사용하여 CNN, RNN, LSTM 등으로 학습된 알고리즘으로 실시간으로 새롭게 관측되는 데이터를 기반으로 향후 변화를 예측함

1.2. 연구개요



- (정의) 지구온난화 현상으로 인해 동토에서 추가 발생되는 다양한 기후변화 요인물질이 북극 환경(동토/대기/생태/연안 영역) 및 더 나아가 중위권 기후변화에 미치는 상호 영향을 관찰하는 연구에 자료 제공 등
- (목적) 동토 및 대기 변화의 관찰을 통한 빅데이터 DB 구축과 특성을 규명함과 동시에 중위권 기후변화 대응 시나리오 수립에 필요한 정밀데이터 제공, 북극 환경변화에 따른 기후재해에 효과적으로 대응하는데 기반 조성
- (목표) 미세먼지의 물리-화학적 성질 파악을 위한 연속적인 모니터링과 DB 고도화 및 특성 분석, 북극 육상권의 에너지/탄소순환 장기 DB 구축과 특성 분석, 육상 생태계 장기 모니터링과 특성 이해 등
- 연구방향

핵심이슈	전략주제	연구방향성(정의)	핵심분야
북극 대기중 미세먼지의 크기별 생성-성장이 기후적으로 어떠한 영향을 미치는가? 전지구적 탄소배출 감축 노력을 평가하기 위한	극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악	북극 미세먼지 물리-화학-광학 특성 빅데이터 확보 및 기후적 영향 정량화	• 극지 동토-저층·고층대기 간 상호작용 모니터링 프로그램 운영 및 빅데이터 DB 구축, 환경인자의 특성 규명(관측거점의 종합적 운영) • 북극 동토 및 연안 지역 기반 미세먼지 관측 프로그램의 선진화 및 빅데이터 확보 • 북극 대기중 미세먼지의 생성-성장-구름형성-기후적 영향의 정량화 (미세먼지의 직간접 복사영향 파악)

거대한 탄소 배출원으로 지목되는 북극 육상 동토의 과학적인 역할은 무엇인가? 북극 기후환경 변화와 태양 및 우주환경 변화의 상호 연관성이 무엇일 수 있는가?			• 미세먼지 생성-성장-이동의 물리적 화학적 재현으로 중위도 지역과의 상호성 규명 • 국제협력을 강화를 통한 미세먼지 DB 구축 수월성 확보 및 극지미세먼지 DB 국제 공유 • 극지환경모사실험 및 딥러닝 기법을 활용하여 극지 미세먼지 발생 기작, 유기성분의 역할 규명
		동토거점 실측자료와 위성-모형 자료를 결합하여 북극권 육상동토에서의 장기 에너지·탄소 자료를 생산하고 변동성을 이해	• 동토거점 현장관측자료와 위성-모형 자료를 격자규모에서 스케일링 매치 • 격자규모 거점 자료 생산 기술을 적용해 북극권 육상동토에서의 장기 광역 에너지·탄소수지 자료 생산 • 북극권 육상동토에서의 장기 광역 에너지·탄소 수지 변동성 이해
		기후변화에 따른 북극권 육상 장기 에너지·탄소수지평가에 기반한 전지구 탄소 수지에서의 동토의 역할 규명 및 동토 안정성 평가에 기여	
		극지 저층대기 화학적 변화에 의한 고층대기 역학적 변화 감시 시스템 구축 및 물리적 기작 규명	• 북극 스웨덴 키루나에서의 지상 관측시스템 운영을 통하 중간권-열권 온도 및 바람 상시 모니터링 시스템 구축 • 북극 대기 화학적/역학적 변화 상관성 수치모델 모의실험 체계 구축 • 남극에서의 기존 연구를 토대로 북극 저층-고층대기 비교 연구 확대를 통한 북극 동토층 변화 영향 파악(남극연구는 기관고유사업으로 기 수행 중)
		북극환경변화 감지 및 가시화를 위한 실시간 광역적 AIoT Polar Platform 운용	• 북극 환경인자 수집 광역적 센서 네트워크 기술 개발 • AIoT Polar Platform 시각화 및 data management 시스템 개발
지구온난화에 따른 북극권 육상 동토와 생태계의 변화는 어떠하며, 미래에는 어떻게 변화할 것인가?	북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가	북극 동토층 생태계 취약성 평가 및 모델링을 통한 기후변화에 의한 동토 생태계 변화 전망	• 장기 생태모니터링 프로그램 고도화 및 빅데이터 DB 축적 • 북극 동토 생태계 기후변화 취약성 평가 • 장기모니터링 데이터 활용을 통한 동토층 붕괴에 따른 생태계 변화 전망

1.3. 세부주제별 연구목표 및 내용(범위)

1.3.1. (I-1) 극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악

연구목표	극지 동토-저층·고층대기 간 상호작용 모니터링 프로그램 운영 및 빅데이터 DB 구축, 환경인자의 특성 규명(관측거점의 종합적 운영)
주요내용	가. 북극대기 중 미세먼지의 생성-성장-구름 형성-기후 영향 평가를 위한 모니터링 프로그램 고도화 * 북극 동토 거점 기반 미세먼지 물리-화학 특성 장기 관측 빅데이터 확보 * 북극 해양 생물군, 海氷, 동토의 환경변화 등이 북극 대기 중 미세먼지 생성과 성장에 미치는 영향 평가 나. 북극권 육상 탄소순환 장기 변동성 평가 * 지표에너지수지-활동층 물리적 특성 이해를 위한 동토거점 환경인자관측시스템 고도화 * 대표 동토거점 현장관측시스템을 위성-모형 격자규모로 확대 구축 다. 극지 저층-고층대기 간 화학적/역학적 상호작용 연구 * 북극 동토층 융해 시 발생되는 온실기체 증가 등에 따른 저층-고층대기 역학적 변화 감시 시스템 구축 * 스웨덴 키루나에서 페브리-페로 간섭계, 유성레이더 등 지상 관측을 통한 북극 중간권-열권 바람 및 온도 장기 자료확보(남극 자료와 비교, 특성 규명) 라. AIoT 지능형 극지 환경인자 수집 광역적 센서 네트워크 기술개발 * 극지 환경인자 광역적 센서 광역적 능동형 센서 시스템 개발 * 극지 환경인자 수집 센서 네트워크 모듈 기술개발 * 광역관측(수백 km), 데이터기반 관측시스템, 저궤도 위성을 활용한 IoT/CPS 관측시스템 * AIoT Polar Platform 구축 및 운영 * CNN, RNN, LSTM 등 기계학습을 활용한 극지환경인자 데이터 분석, 예측, 직관적 시각화 기술 개발
기대효과	- 북극권 기후변동에 따른 육상 생태계 에너지·탄소수지 반응을 이해하고 미래 변화 예측에 기여할 수 있음 - AIoT 기술을 극지연구에 활용하여 환경인자 수집, 관리, 분석, 예측에 활용

1.3.2. (I-2) 북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가

연구목표	급변하는 동토 환경에서의 토양 생태계 변화 이해 및 영향 평가
주요내용	가. 기후변화로 인한 급격한 동토 생태계 변화 이해 및 현황 파악 - 장기 기후변화(온도, 강설 등) 모사 실험구에서 환경과 생물 인자의 변화 지속적 모니터링 및 변화 추이 분석 - 국제 공동연구를 통한 다양한 동토층 변화(예: 녹지 확대, 수문 변화, 동토 지형 변화, 화재 발생 등) 환경 현황 파악 - 동토층 붕괴 현장에서 토양 생태환경 조건, 생태계 구성 인자 및 상호작용 변화에 대한 포괄적 연구 나. 북극 동토층 생태계 취약성 평가 및 모델링을 통한 기후변화에 의한 동토 생태계 변화 전망 - 원격탐사 기술을 활용한 생태계 모니터링 프로그램 고도화 - 동토 생태계 취약성 평가를 위한 자료 수집 및 장기생태모니터링 지역에서의 동토 생태계의 기후변화 취약성 평가 수행 - 기축적된 빅데이터 활용을 통한 토양 생태계 모델 적용 및 향후 동토층 변화에 따른 동토 생태계 변화 전망
기대효과	- 다양한 동토층 변화에 의한 북극 동토층 육상 생태계 반응 이해 - 미래 기후변화에 의한 동토 생태계 변화 예측 모델 검증 실측 자료 확보

1.4. 유사과제 비교

본 기획연구의 세부주제	기존 관련 세부과제명	차별성	비고
(I-1) 극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악	• 북극 동토-대기환경 기반 종합모니터링 및 상호작용 규명	• 북극 미세먼지 모니터링 프로그램 제고 • 북극 미세먼지의 1차, 2차 생성 및 성장 과정 정밀 관측과 물리적 재현으로 급격한 북극 기후변화에 영향을 미치는 미세먼지의 기여도 평가 • 극지환경모사를 통한 미세먼지 발생 프로세스 연구강화 • 북극 미세먼지의 자연적-인위적 기여도 평가 • 대기중 탄소입자의 관측 및 모델링을 활용한 시공간적 분포 특성 분석	• 기종 모니터링 프로그램의 확충으로 북극 미세먼지 빅데이터 확보 및 활용
	• 북극 동토-대기환경 기반 종합모니터링 및 상호작용 규명	• 기존의 환경인자 측정은 한 지점에 국한되었으나 신규 과제에서는 km 규모의 영역으로 관측시스템 영역을 확대하여 위성 및 모형의 격자 자료와의 비교검증 및 최적화에 적합함 • 기존 토양 환경인자 측정은 지표에서 수 cm 이내였으나 활동층 전체를 대상으로 함 • 정밀한 과학적 증거 확보 • 관측시스템의 지능화로 새로운 과학적 증거 확보 가능 • 기존의 제한된 공간과 단순 표본 관측 방식에서 탈피 생태계 변화에 대한 광역적 수집 가능	• 기존 환경인자관측시스템을 표준화하고 일부 거점의 관측영역을 확대 예정 • 기존 관측시스템에 AI 접목 및 휴대성 강화로 환경인자 취득 및 해석 용이, 효율적 통합관리 가능
(I-2) 북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가	• 기후변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 변화 이해	• 다양한 동토 변화 현장 연구를 통한 연구지역 확장 • 장기생태모니터링 기법의 고도화 • 모니터링으로 확보된 실측 데이터를 활용한 모델 적용을 통해 북극 동토층 붕괴에 따른 육상 생태계 변화 전망	• 다양한 동토 환경변화 지역에서의 데이터 확보

1.5. 연도별 연구목표 및 내용

1.5.1. (I-1) 극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악

구분	1단계			2단계		
	1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차
연도별 연구목표	• 북극 동토 대기 연속 정밀 모니터링	• 극지 동토-저층·고층 대기 상호 작용 감시	• 동토 기반 거점 추가 확보 및 운영	• 동토-기후 시스템 간 상호 작용 분석	• 동토 대기 물리 특성 빅데이터 DB 구축	• 동토 기반빅데이터 DB 활용 극지 기후시스템 간 상호작용 분석
연도별 연구내용	• 스발바르 기반 미세먼지 물리-화학 특성 연속관측 • 스발바르 대기중 나노입자 농도 및 크기분포 연속관측 • 거점별 대기-온실기체-식생-토양 인자 관측시스템 표준화 설계 • 북극 대기 중간권-열권 감시 시스템 구축을 위한 사전 연구 • 북극 스발바르-키루나 지역에서의 중간권-열권 관측용 페브리-페로 간섭계 운영 기술 개발 • AIoT 센서 복합 모듈 시스템 개발 • 극지 지능형 플럭스 시스템 개발 및 관리를 위한 토양 시추기 장비 설계 • 극지 시추 및 극한지 토양조사 장비 시작품 제작	• 이동 플랫폼을 활용한 스발바르/아이슬랜드 기반 미세먼지 집중관측 캠페인 실시 (I) • 동토-해빙환경 변화 모사 장치 구축 • 핵심 거점 환경인자관측 시스템을 위성-모형 격자규모로 확대 설치 • 스웨덴 키루나 중간권 및 열권 하부 바람-온도 상시 모니터링 • 극지 환경인자 관측, 관리, 분석 및 예측을 위한 AIoT 플랫폼 개발 및 구축	• 이동 플랫폼을 활용한 스발바르/아이슬랜드 기반 미세먼지 집중관측 캠페인 실시 (II) • 스발바르/아이슬랜드 기반 대기중 나노입자 농도 및 크기분포 연속관측 (II) • 표준화된 환경인자관측 시스템 전체 거점 고도화 실시 • 북극 중간권-열권 역학적 변화 감시를 위한 상시 모니터링 시스템 구축 완료 • AIoT 극지환경인자 통합센서 네트워크 모듈 개발 • 동토지반의 열수리역학적 거동 및 특성 분석	• 급격한 북극지역의 기후변화가 북극 대기 미세먼지의 특성에 미치는 영향 평가 • 북극권 나노입자, 미세먼지 빅데이터 구축 • 격자규모 환경인자관측 자료와 위성-모형 자료 스케일 매칭 • 북극 중간권-열권 역학적 변화 감시를 위한 상시 모니터링 시스템 • 기계학습을 통한 극지환경인자 데이터 분석, 예측 및 시각화 기술개발	• 북극 대기중 미세먼지의 물리-화학 특성 변화가 대기 광학 특성에 미치는 영향 평가 • 북극권 미세먼지 농도 예측 모델 개발 (인공지능기술활용) • 거점 스케일매칭 기법에 바탕한 북극 육상권 전체 에너지·탄소 수지 40년 데이터베이스 생산 • 북극 중간권-열권 역학적 변화 감시를 위한 상시 모니터링 시스템을 통한 장기 관측 • 기계학습을 통한 극지환경인자 데이터 분석, 예측 및 시각화 기술개발	• 북극 미세먼지의 특성 변화가 중위도의 미세먼지 거동에 미치는 영향 평가 • 동토-해빙 환경변화가 미세먼지 발생에 미치는 영향 평가 • 북극권 육상 40년 에너지·탄소수지 DB활용 시공간적 변동성 평가 • 극지 저층-고층대기 변화의 상관성 수치모델 모의실험 결과 검증 • 위험요인(hazard) 및 취약성 맵핑 시스템 개발
연도별 주요성과물	• 논문 2건 • 국제협력 1건 • 빅데이터 2건 • 표준 환경인자관측 시스템 구성도	• 논문 3건 • 국제협력 1건 • 빅데이터 2건 • 거점 환경인자관측 시스템 1차 고도화 • 특허출원 1건	• 논문 3건 • 국제협력 1건 • 빅데이터 2건 • 거점 환경인자관측 시스템 고도화 완료 • 특허등록 1건	• 논문 4건 • 국제협력 1건 • 빅데이터 3건 • 실측자료 기반 위성-모형 격자자료 최적화 방안 도출 • 특허출원 1건	• 논문 4건 • 국제협력 1건 • 빅데이터 3건 • 북극권 육상 에너지·탄소 수지 40년 격자자료 • 특허등록 1건	• 논문 4건 • 국제협력 1건 • 빅데이터 3건 • 북극권 육상 에너지·탄소수지 장기변동성 특성 분석결과 • 전지구 탄소 수지에서의 동토의 역할 규명 및 동토 안정성 평가 결과

1.5.2. (I-2) 북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가

구분	1단계			2단계		
	1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차
연도별 연구목표	• 국제공동연구 기반 구축 및 장기기후변화 모사 실험구 모니터링 수행	• 북극 동토층 온도 변화에 따른 생태계 반응 및 기작 이해	• 급격한 동토 지형/수문 변화 지역에서의 생태계 변화 이해	• 동토 화재 발생지역에서 생태계 변화 이해	• 동토 생태계의 기후변화 취약성 평가	• 동토층 붕괴에 따른 북극 동토 생태계 변화 전망
연도별 연구내용	• 장기 기후변화 모사 실험 사이트에서 동토 생태계 환경/생물인자 지속적 모니터링 • 새로운 장기기후변화 모사 실험구에서 국제 공동연구 • 동토층 붕괴/변화 현황 자료 수집	• 동토 지형변화 또는 수문 변화 연구지에서 생태계 인자 변화 연구 • 기후 인자 변화에 따른 동토 생태계 환경-생물 인자간 상호관계 연구	• 동토 화재 발생에 따른 생태계 변화 연구 • 동토 지형 또는 수문 변화에 의한 생태계 환경-생물 인자간 상호관계 연구	• 원격탐사 기술을 활용한 생태계 모니터링 프로그램 고도화 • 동토 화재에 의한 생태계 환경-생물 인자간 상호관계 연구 • 동토 생태계 변화 모델링에 활용할 자료 확보	• 모니터링/수집 자료를 기반으로 동토 육상 생태계의 기후변화 취약성 평가 • 온도 증가 모사에 따른 동토 내 식물, 동물, 미생물 및 생지화학적 순환 변화 이해	• 동토 생태계 변화에 의한 생태계 환경-생물 인자간 상호관계 종합적 규명 • 생태계 모델링을 통한 동토층 붕괴 유형별 생태계 반응 전망
연도별 주요성과물	• 스웨덴과의 국제 공동연구 기반 확보 • 장기생태모니터링 사이트 환경 자료 및 시료 확보	• 동토 지형/수문변화 사이트 현장 탐사 및 환경 시료 확보 • 장기생태모니터링 사이트 시료 분석 및 자료확보	• 동토 화재 발생 사이트 현장 탐사 및 환경 시료 확보 • 동토 지형/수문 변화 사이트 시료 분석 및 자료확보	• 동토 화재 발생 사이트 시료 분석 및 자료 확보 • 고도화된 생태계 모니터링 프로그램	• 동토 생태계 취약성 지수 도출 • 온도 변화에 따른 생태계 반응 변화 모식도	• 동토층 변화에 따른 종합적 생태계 변화 전망 결과 도출 • 국제모니터링 네트워크와 장기생태모니터링 자료 공유 및 활용

1.6. 연구개발 위험요인 및 대응방안

세부주제	위험요인	대응방안
(I-1) 극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악	• 북극 동토지역의 대부분을 차지하는 러시아와의 협력 지속 가능성 예측이 불투명	• 러시아측 공동연구 네트워크와의 지속적인 정보 및 인력 교환 프로그램 운영으로 러시아 동토지역의 접근성 확보 • 러시아 북극남극연구소, 지방정부와의 지속적인 의사소통으로 중앙정부로부터의 연구허가에 관한 공동 노력
	• 저궤도 위성을 이용한 연구 항목 존재로 저궤도 위성의 남북극권 서비스 불가 가능성 있음	• 기존의 이리듐 등의 통신 위성 연구로 대체할 수 있으나 추가 비용 발생
	• IoT 플랫폼 개발 및 운영, 유지, 보수의 불확실성과 신뢰성 보장	• 통신 장치, 센서 인터페이스 장치, 게이트웨이, 전원 장치 등 하드웨어 장치, 임베디드 소프트웨어 개발, 유무선 센서네트워크 구축, IoT 서버구축, 빅데이터처리, CNN, RNN, LSTM 등 기계학습 알고리즘 등 AIoT 플랫폼 개발은 시행착오를 최소화하기 위해 경험이 풍부한 외부 전문 업체를 활용하여 용역을 통해 개발. 실증 및 시스템의 구조 설계, 장치의 개선점, 문제점 파악과 수집 데이터 분석은 자체적으로 추진함.
(I-2) 북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가	• 급격한 동토 붕괴지역 현장 관측 시 지반 붕괴 등으로 인한 안전사고 및 측정 장비 훼손 가능성	• 동토 붕괴 현장별 안전 대책 (위험요인 파악, 안전요원 파견 등) 및 측정 시스템 보완책(실시간 감시 시스템 등) 마련

1.7. 개발기술의 적용분야

1.7.1. (I-1) 극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악

■ 북극 대기중 미세먼지 정밀 관측 프로그램 고도화 및 생성-성장-구름 형성 연구

- **북극 동토 기반, 쇄빙연구선을 활용한 미세먼지 빅데이터 확보**
  - 세계적으로 선도하는 북극 미세먼지의 물리-화학-광학 특성 빅데이터 확보로 국제공동연구의 효율성 제고
  - 이동식 관측 플랫폼을 활용한 국제공동 미세먼지 집중 캠페인 실시로 다양한 환경에서의 관측 및 자료 분석 노하우 축적 및 빅데이터의 시-공간 적용 확대
- **극지환경모사실 구축을 통한 동토-해빙 변화가 미세먼지 발생에 미치는 영향 연구**
  - 동토-해빙 환경을 모사할 수 있는 저온 실험실 구축을 통한 환경변화 모사 연구 수행
  - 현장관측자료와 모사실험자료 병합을 통한 미세먼지 발생 프로세스 연구 강화
- **관측거점 (북극 스발바르, 아이슬란드 등) 기반 나노입자생성 빅데이터 확보**
  - 북극권 대기 중 (초)미세먼지 생성 원인 규명에 공헌
  - 빅데이터와 기계학습을 활용하여 북극권 대기중 나노입자 생성 예측에 기여

■ 북극 육상 동토지역 에너지·탄소 장기 데이터베이스 활용

• 주요 동토거점 기반 위성-모델 격자규모 장기 에너지·탄소순환 장기 변동성 규명

- 북극 육상 주요 동토거점에서 km 격자 규모의 에너지·탄소순환 장기 데이터베이스를 활용해 기후모형의 동토권 모델링 검증에 활용
- 주요 동토거점 격자규모 에너지·탄소 장기 데이터베이스를 활용해 위성 자료 검증 및 산출 알고리즘 개발에 활용
- 북극 육상 탄소순환 변동성을 정량적 규명하여 북극권 육상 범위에서 대기 탄소 수지에 미치는 역할 파악
- 광역 장기 데이터베이스를 기반으로 기후변화시 동토환경 변화가 현실적으로 반영된 대기 중 온실기체 농도 변화 경로 및 기후변화 시뮬레이션에 활용

■ 극지 저층대기 화학적 변화로 인한 고층대기 역학적 변화 감시 및 물리적 기작 이해

• 북극 중간권 및 열권의 역학적 변화 감시를 위한 상시 모니터링 시스템 구축

- 스웨덴 키루나에 중간권 및 열권 하부 바람/온도 상시 모니터링을 위한 유성 레이더 설치 운영
- 북극 고층대기 바람 및 온도 관측자료의 지속 생산

• 극지 저층-고층대기 간 상호작용 이해를 위한 수치모델 모의실험 체계 구축

- 북극 저층대기 화학적 변화에 의한 고층대기 역학적 변화 이해
- 북극 저층-고층대기 간 에너지 전달과정에서 대기 파동의 전파 특성 및 역할 규명
- 저층-고층대기 간 상호작용의 남극과 북극의 차이점 규명

■ 극지환경변화 감지 및 가시화를 위한 실시간 AIoT Polar Platform 개발 및 운용

• AIoT 극지 환경인자 수집 광역적 센서 네트워크 기술 개발

- 방대하게 수집되는 관측 데이터를 체계적이고, 효율적으로 관리할 수 있어야 할 뿐만 아니라, 모든 연구자에게 공유 가능함으로 새로운 가치의 극지 과학 연구 도출 가능
- 4차 산업혁명 시작과 함께 전 사회 전반의 변화에 동조하여 극지 연구에서도 환경 변화 예측에 CPS 플랫폼 및 AI 관련 기술 도입 가능
- 극지 특성에 맞는 융복합 과학기술 적용을 위한 인프라 확보 및 4차 산업형 빅데이터 확보와 지식정보 확산 가능으로 인한 ET (Environmental Technology, 환경기술), IT (Information Technology, 정보기술), BT (Bio Technology, 생명공학기술) 분야 적용 가능

• AIoT Polar Platform 운용

- 극지의 AIoT 개발로 인한 전지구적 기후시스템에 미치는 영향, 극한 기상현상, 발생 확률, 발생 시기, 위험 수준을 평가하여 환경변화의 저감 능력을 증가시켜 정책 결정자를 위한 기본 자료 제공 가능
- AIoT 기술의 신뢰성 있는 자료 확보를 통해 극지 미래예측에 대한 효율적 분석이 가능 및 사회적 이슈에 대응 가능
- 극지 빅데이터를 활용한 신산업 및 서비스 개발을 비롯한 자연 환경과 IoT 융합 기술의 확보로 동토-생태-대기-모델 연구 분야 적용 가능

1.7.2. (I-2) 북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가

■ 국내 아고산지대 생태계 보존 대책 수립용 자료로 활용

- **기후변화에 의한 극지 생태계 변화 기작 규명을 통한, 국내 아고산지대 생태계 적용**
  - 장기생태모니터링 자료와 극지 생태계 변화 기작 연구는 기후변화에 취약한 국내 아고산지대 생태계의 보존 대책 수립을 위한 기초자료로 활용 가능

■ 북극 동토 탄소변화 예측을 위한 기본 자료로 활용

- **북극 동토 탄소-기후 피드백 모델링을 위한 기본 자료 활용**
  - 기후변화 조건에서 동토층의 생태 환경변화, 특히 탄소변화 관련 장기축적 빅데이터는 북극 기후에 미치는 피드백의 영향을 평가할 수 있는 핵심 자료로 활용 가능함
  - 기후 변화에 대한 동토 생태계 취약성 평가 결과와 미생물의 탄소 대사 기작에 대한 이해를 통해 탄소-기후 피드백 모델링 정확도 향상에 기여

※ 권역별 빅데이터 구축 방안 및 활용 가능성 (요약)

관측거점/권역	빅데이터 종류	구축방안	활용	비고
알래스카 (미국)	• 극지역 동토-대기간 탄소 및 에너지 순환 • 북극 동토 특성 및 식생 정보	• 현장 정밀 모니터링 프로그램 운영 및 실시간 AIoT Polar Platform 적용과 활용 • 하계 기간 중 집중 동토 생태계 특성 모니터링 현장 연구 수행	• 육상권 대기 탄소 순환 평가 • 대기 중 온실기체 농도 변화 경로 및 기후변화 시뮬레이션에 활용	
캐브리지베이 (캐나다)	• 북극 동토 대기 오염물질 장기관측 자료 • 극지역 동토-대기간 탄소 및 에너지 순환	• 현장 오염물질 연속 모니터링 • 에너지, 탄소 순환 집중 관측 • 습지를 포함한 동토의 온실기체 방출 연속모니터링	• 북극 오염물질 (블랙카본)의 국지적 방출과 장기 수송 영향 평가 • 대기 중 온실기체 농도 변화 시뮬레이션에 활용	
스발바르 (노르웨이)	• 미세먼지 및 구름의 물리-화학 특성 • 동토 및 해양 방출 미량 기체	• 대기중 입자 형성-성장-구름형성 및 광학 특성 연속관측 • 공동연구기관의 제플린 관측소 장기 모니터링 자료와의 비교 검증 및 공동활용	• 미세먼지 형성-성장 과정이 대기 복사 전달과정에 미치는 기후적 영향 평가에 활용 • 동토-해양 변동성과 대기 미량기체의 상관성 수치 재현에 활용	
그린란드 (덴마크)	• 극지역 물질 거동 • 동토-대기간 탄소 및 에너지 순환	• 기상요소 연속 관측 및 동토-대기간 에너지 순환 정밀 모니터링	• 대기 중 온실기체 농도 변화 경로 및 기후변화 시뮬레이션에 활용	
스토르호페이 (아이슬란드)	• 동토 및 해양 방출 미량 기체 • 동토대기입자의 물리-화학 특성	• 해양 및 동토 방출 황 성분 미량기체 연속/하계집중 관측 • 이동식 관측 플랫폼을 활용한 국제공동 캠페인 실시	• 단일 입자의 물리-화학 특성 수치 재현의 기초자료로 활용 • 동토-해양 변동성과 대기 미량기체의 상관성 수치 재현에 활용	
바라노바 (러시아)	• 동토 대기 오염물질 장기 관측 자료 • 극지역 동토-대기간 탄소 및 에너지 순환	• 현장 오염물질 (블랙카본) 연속 모니터링 • 에너지, 탄소 순환 집중 관측 • 습지를 포함한 동토의 온실기체 방출 연속모니터링	• 알래스카-시베리아 지역의 산불 등 자연적 재해로 인한 북극 기후의 장기변동성 평가에 활용 • 대기 중 온실기체 농도 변화 경로 및 기후변화 시뮬레이션에 활용	2023년 현재 잠정 중단
키루나 (스웨덴)	• 북극 고층대기 (중간권, 열권) 물리 특성 자료	• 북극 고층대기의 바람 및 온도 연속 • 유성레이더 등 고층대기 역학 현상 정밀 모니터링	• 북극 저층대기의 화학 성질 변화에 의한 고층대기의 변동성 이해에 활용 • 북극 대기 파동의 전파 특성 규명에 활용	거점 추가 대상 지역
소단킬라 (핀란드)	• 동토(토양/생태 특성 집중 관측 자료 • 북극 중간권과 열권의 물리 특성 자료	• 하계 기간중 집중 생태 및 토양 특성 모니터링 현장 연구 수행 • 북극 고층대기의 바람 및 온도 연속 관측 시스템 구축과 자료확보	• 동토 토양의 변동성이 메탄, 이산화탄소 등 온실 기체 순환에 미치는 장기영향 평가에 활용 • 북극 대기 파동의 전파 특성 규명에 활용	거점 추가 대상 지역

2 (전략-II) 과거 기후·환경변화 이해와 미래 예측

2.1. 연구 필요성 및 목표

2.1.1. 연구추진 필요성

구분	중점사항	핵심이슈	연구 방향성 도출
정책적 필요성	• 극지 과학연구역량 강화	• SIOS에 우리나라가 2022년에 가입함에 따른 스발바르 지역 내 우리나라의 극지 과학연구역량 강화 필요	북극권 동토 및 주변 연안지역 과거 기후환경 복원 연구
	• 미래 기후변화에 따른 사회적 비용 산출 필요	• 과거 기후환경 복원을 통한 극지 환경변동에 따른 기후 재난(산불, 폭염, 폭설, 가뭄 및 슈퍼태풍 등)의 사회적 비용 산출을 하는데 과학적 진단과 정보 필요	
	• 탄소중립 실현을 위한 미래 전략 제시 필요	• 탄소중립 실현을 위하여, 과거 기후환경 복원 기반의 미래 기후·환경변화 패턴 분석을 통한 정책적 방향성 제시 필요	
	• 유엔 국제 미나마타 수은 협약 유효성 평가를 위한 기초자료 제시 필요	• 수은 배출원이 없는 극지방에서의 과거 및 현재 수은 검출은 국제 미나마타 수은 협약의 유효성을 평가할 때 중요한 베이스라인 환경으로 작용할 것으로 예측	
	• 극지환경 이해도 증진과 사회적 공감대 형성	• 과거 수치모델 자료를 대국민 홍보자료로써 활용하여 민간, 연구자, 정책 의사결정자들의 극지환경 해양 자원의 이해도 증진과 사회 전반에 걸친 극지환경 관리의 공감대 형성 필요	
사회적 필요성	• 급격한 피오르드 환경변화	• 프람해협 지역의 스발바르 및 그린란드 피오르드는 해수면 상승, 조수 빙하 및 해빙 감소에 의한 급격한 환경변화를 겪고 있음	
	• 극지 연안 환경으로 유입되는 오염물질 평가	• 극지환경 변화에 의한 동토층 내 중금속 및 유기오염물질의 해양 환경 유입 감시 및 생태계 영향 예측 필요	
	• 극지 연안 환경 보존	• 극지 연안환경 보존을 위한 여러 가지 방안들의 효율을 정량적으로 예측, 분석하여 투자대비 효과를 사전 비교, 검토함으로써 경제적인 극지환경 개발 및 보존 방안 수립을 위한 기초자료 확보 필요	
기술적 필요성	• 국제공동연구 확장	• 그린란드 피오르드, 알래스카 및 시베리아 융해호 연구인프라 부재로 국제공동연구 기반 구축 필요	
	• 장기적 과거 기후환경 복원 연구의 스테이션 구축 및 연구 결과의 통합관리	• 기후변화에 따른 북극 스발바르 군도의 환경변화는 국내의 하구역 및 연안 생태계의 환경 특성과 유사한 측면을 갖기 때문에 향후 극심한 기후변화에 따른 한반도 생태계 연구에 필요한 근거 자료로서 선제적으로 제시할 수 있음 • 기후환경 프록시 개발을 통해 과거 기후·환경변화에 따른 생태계 변동을 진단하고 이를 바탕으로 한 미래 생태계 예측 모델 구축에 있어 기반 자료확보 및 통합관리 필요 • 미래 예측 모델의 정확도 개선을 위하여 지속적인 현지 모니터링과 과거 기후환경복원에 기반한 빅데이터의 유기적이고 통합적인 관리 필요	
	• 과거 기후변화에 따른 생태계 변화 이해 증진	• 신뢰성 있는 과거 기후환경 복원을 통한, 기후변화에 따른 생태환경 변화 이해 강화	
	• 실험 연구를 통한 과거 데이터 이해 증진	• 실험 연구를 위한 챔버 설계, 제작 및 방향성을 제시함에 따라 과거 복원기록을 보다 구체적으로 해석하는 데 이바지할 수 있을 것으로 기대	
	• 북극권 환경변화 대응기술 개발	• 북극 해역에 적합한 수치모델을 구축하여 미래 극지환경에서의 유동, 퇴적물, 오염물, 유기물질 변화를 사전 예측하고 과학적이고 합리적인 대안을 세우기 위한 기반 기술 확보 필요	

정책적 필요성	• 북극 동토지역과 중위도의 상세기후변화 및 피드백 분석	• 북극 동토지역과 중위도의 기후변화 피드백 분석결과에 따라 한반도 기후변화 대응책의 과학적 근거자료 마련	북극 동토지역과 중위도 기후변화 피드백 분석을 통한 미래 환경변화 예측 및 대응 방안 수립
사회적 필요성	• 기후변화 및 환경변화 대응계획	• 미래의 기후 및 환경 변화에 대한 선제적 대응을 위한 시행계획 수립 필수	
	• 전 세계 탄소중립 계획에 따른 기후변화 대응 방안 수립	• IPCC AR6와 1.5℃ 보고서 등 전 세계 탄소중립 계획에 따른 북극 동토지역과 중위도의 기후변화 대응방안 수립	
기술적 필요성	• 지역기후모델 구축	• 기후는 여러 기상요소 및 환경의 장기적 변화에 의한 것으로써 다가오는 기후변화를 예측하고 대응할 수 있는 상세 수치모델 구축 필수	
	• 빅데이터 DB 구축 및 인공지능 기법 활용	• 과학기술 중장기 로드맵의 기후변화 대응 분야 후속연구 추진을 위하여 환경 빅데이터 DB (지상 및 위성 관측자료) 구축 및 인공지능 기술 기반의 지역 기후예측 및 영향분석 모델 개발	

2.1.2. 정책적 필요성

- **극지 과학연구역량 강화**

  – 북극이사회 영구옵서버 지위 유지, 북극이사회 활동 강화 및 기후변화 대응연구 확대를 위해 다산기지가 위치한 스발바르 연구사업 강화 필요

  – 급격한 지구온난화에 가장 민감한 북극 관문에 위치한 스발바르 및 그린란드는 지구의 기후변화 시스템이 상반된 특징을 보이는 동시에 상호작용하는 중요한 거점으로써 현재 진행되고 있는 기후변화 영향과 정확한 미래 예측자료를 얻기 위해 각축전을 벌이고 있어 선점 연구 필요

  – 전 세계 28개국이 참여하는 국제 공동 북극 환경정보 수집 체계인 SIOS에 우리나라가 2022년에 가입함에 따른 스발바르 지역 내 우리나라의 경제활동 및 극지 과학연구역량 강화 필요

- **극지 기후변화에 따른 사회적 비용 산출**

  – 극지의 고기후 복원을 통하여 미래 극지환경의 변화 양상을 예측하고, 이를 기반으로 한 극지 환경변동에 따른 기후 재난(산불, 폭염, 폭우, 폭설, 가뭄 및 슈퍼태풍 등)의 사회적 비용을 산출하는데 과학적 진단과 정보 필요

- **탄소중립을 위한 미래 전략 제시**

  – 국제사회의 공동 아젠다인 탄소중립 실현을 위하여, 과거 기후 복원 기반의 미래 기후변화 파악 및 이를 기반으로 한 한 탄소중립 정책의 방향성과 구체적 실천 전략에 대한 과학적 정보 필요

• **유엔 국제 미나마타 수은 협약 유효성 평가를 위한 기초자료 제시**

– 2017년에 도입된 국제 미나마타 수은 협약은 인위적인 수은 배출을 저감하여 생태계 및 인류 수은 노출을 방지하고자 함이며, 인위적인 배출원이 없는 극지방에서의 수은을 포함한 다양한 중금속의 과거 및 현재 기록 복원은 협약의 유효성 평가에 있어 핵심적인 기초자료로 활용될 수 있음

• **북극권 기후변화에 대한 피드백 규명**

– 기후변화는 인간이 살아가는 중요한 환경이므로 정부는 기후변화를 예측하고 대응방안을 구출할 의무가 있음

– 지구대기 중에서 북극권은 저위도 지역과 비교하여 면적이 적고 동토지역이 많기 때문에 기후변화에 민감하고 또한 국가 기후변화 대응을 위한 중요한 자료로 사용될 수 있기 때문에 북극 동토지역과 한반도를 포함한 중위도 및 동아시아와의 피드백을 명확하게 분석해야할 필요성이 제기됨

• **극지환경 이해도 증진과 사회적 공감대 형성**

– 과거 극지환경 정보의 접근성 향상과 타 연구기관과의 2차적인 정보공유를 통한 중앙정부, 지방자치단체, 산학연의 연구자와 국민의 이해도 증진이 필요

– 극지환경 이슈들에 관하여 대중들을 대상으로 공감대 형성과 홍보활동을 위해, 과거 기후변화 메커니즘 이해와 발생 가능 영향들의 평가에 필요한 과학적인 근거자료 요구되고 있음

2.1.3. 사회적 필요성

• **급격한 연안 환경변화**

– 현 기후변화는 인간 활동에 기인하며, 우리는 광범위한 기후변화 영향으로부터 더 발전하고 지속 가능한 미래를 만들어 나갈 수 있는 대응 전략 마련 및 대안 제시 필요

– 지구온난화에 의해 따뜻한 북대서양 해수의 북극해 유입이 증가하면서 프람해협 지역의 그린란드 및 스발바르 군도 피오르드는 빙하후퇴에 의한 융빙수 유입 증가에 의한 해수면 상승 및 해빙 감소에 의한 갯벌 형성 등 급격한 환경변화를 겪고 있음

– 지구온난화에 따른 스발바르 군도 및 그린란드 내 피오르드의 연안 침식 및 퇴적환경변화가 가속화되고 있고, 이에 따른 원주민과 거주민의 안전 및 경제활동에 미치는 파장이 확대되고 있음

- 지구온난화에 의한 북극해 해빙 감소로 북극권에서의 지리 및 정치학적 이해관계가 급변하고 있어 향후 북동항로가 열릴 때 경제적 활동의 교두보 역할을 할 북극 기후변화 및 관련 연구강화 필요
- 동토층 내 매장된 유기오염물질(예: 석탄 광산)의 연안 유입 감시(PAHs 등 마커 이용) 및 이로 인한 생태계 영향 규명 필요

• **극지 연안환경 보존**

- 북극 극지역생물자원, 생태계 연구 및 전 지구적 환경보존을 위한 국제적 규제가 강화되면서 선진국을 중심으로 환경문제를 이용한 자국의 이익을 확보하기 위한 노력이 증대되고 있음

• **기후변화 및 환경변화 대응계획**

- 기후와 환경은 밀접한 것으로써 그 나라의 여러 산업과 국민 삶의 질 결정의 중요한 요소이기 때문에 정확한 예측을 통하여 대응계획을 수립하는 것은 선택이 아니라 필수임

2.1.4. 기술적 필요성

• **국제 공동탐사연구 확장**

- 최근 극지방의 급격한 온난화로 인한 중위도 지역의 이상 현상 발생 등으로 극지방과 중·저위도의 상호작용 연구를 위한 국제 공동탐사연구 인프라 구축 및 강화 필요
- 북극권 연안 환경변화를 장기적으로 관측하고, 수집된 정보를 분석하여 그린란드 연안 연구의 국제 공동연구 공조 체제 구축 필요
- 알래스카 및 시베리아 융해호 국제 공동연구 인프라 구축 필요

• **과거 기후환경 복원에 대한 장기 연구 스테이션 구축 및 성과 통합관리 필요**

- 북극 스발바르 군도는 한반도의 연안과 하구역 생태계와 유사한 특성을 보여서, 극심한 기후변화에 따른 북극 생태계 변동 연구는 기후변화에 따른 국내 생태계 변동 연구의 방향성을 제시하는 데 필요한 요소임
- 과거 기후환경 프록시 개발을 통해 과거 기후환경 변화에 따른 생태계 변동(오염원 거동 및 물질순환)을 진단하고 이를 바탕으로 한 미래 생태계 예측 모델 구축을 위한 기반 자료확보 및 통합관리가 필요한 시점
- 모델의 정확도를 개선하기 위하여 과거 기후환경 복원 연구지역의 장기적인 모니터링과 축적된 연구 성과물의 유기적인 통합관리 필요

• **실험 연구를 통한 과거 데이터 이해 증진**

– 과거프록시 개발 및 활용을 통해 복원된 과거 자료의 구체적인 해석은 실험 연구를 통해 향상될 수 있을 것으로 기대됨. 특히, 실험 연구에 요구되는 장비 제작, 설계 및 이에 대한 과학적인 방향성은 과거 환경 및 기후를 설명하는데 향후 다른 지역에서도 기술 활용이 가능할 것으로 예상됨

• **북극권 환경변화 대응 기술개발**

– 기후변화로 인한 북극 연안으로부터의 물질 유입은 북극해 전체 영역의 유동, 퇴적물, 수질·생태 환경변화와 밀접하게 연결되어 있으나, 기후변화와 관련된 북극해와 연안 프로세스 간 상호작용에 대한 모델링은 초기 단계임

– 북극권 주변에서 발생하는 해양–기후학적인 변동이 한반도를 포함한 중위도 권역까지 큰 영향을 미칠 수 있으므로, 과거–현재–미래 기후에 대한 정확한 수치모델링 기술을 확보하기 위하여, 고해상도 북극권 대기–해양 모델링 시스템 구축이 필요함

– 북극권 주변의 육상 유입 프로세스와 이와 관련된 생지화학 프로세스들을 모의할 수 있는 생태–화학 모델링 시스템 구축이 필요함

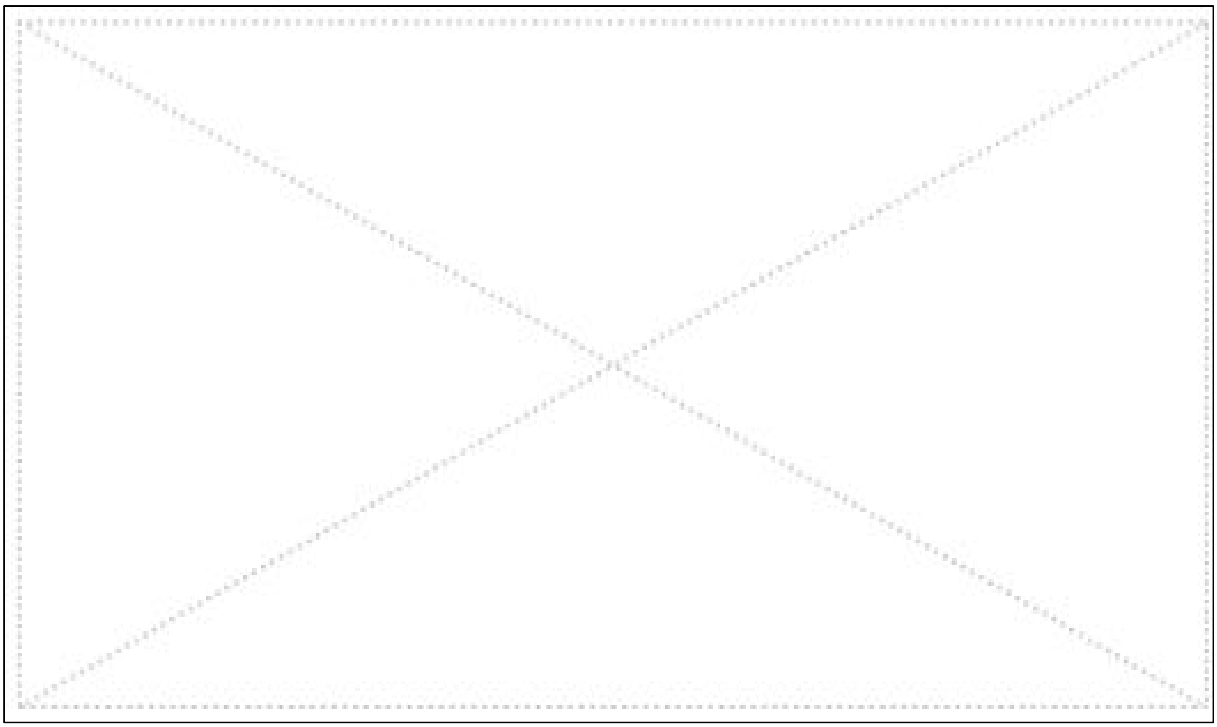
• **지역기후모델 구축**

– 기후는 기상요소뿐만 아니라 지표면 및 태양에너지 변화 등이 복잡하게 조합되어 장기적으로 나타나는 현상이기 때문에 이들의 변화를 정확하게 평가하기 위해서는 수학적 및 물리적으로 표시된 수치모델 구축이 핵심이며 특히 전구 모델보다는 상세한 지역모델이 특정지역의 기후변화 분석 및 예측에 효과적임

• **빅데이터 DB 구축 및 인공지능 기법 활용**

– 기후변화를 평가분석하고 수치모델의 입력자료 및 검증자료로 활용하기 위하여 환경 빅데이터(기상기후 및 환경요소들의 지상과 위성관측 및 모델재분석 자료 집합) 확보는 필수적이고 이들 자료를 3차원 시공간으로 빅데이터 DB 구축하는 것은 많은 시간과 노력 및 예산이 요구됨. 그리고 이와 같이 구축된 광범위한 자료를 분석 및 평가하기 위해서는 인공지능 기법 개발이 필요

2.2. 연구개요



- (정의) 북극권 동토 및 주변 연안지역의 과거 기후·환경변화 연구와 더불어 지구온난화 현상으로 인해 동토에서 추가 발생되는 다양한 기후변화 요인 물질이 북극 환경(동토/대기/생태/연안 영역) 및 더 나아가 중위권 기후변화와 관련되기 때문에 북극 동토지역과 중위도의 기후변화뿐만 아니라 이들 지역의 상세기후 연관성 및 피드백 규명 연구
- (목적) 과거 북반구 동토층 변화가 북극 연안 환경에 미친 영향 파악, 북극 환경변화에 따른 기후재해에 효과적으로 대응하고, 동토 및 대기 변화 분석을 위하여 이들 지역의 환경 빅데이터(기상기후 및 환경 요소들의 지상과 위성 관측 자료 집합)를 구축하여 기후변화 및 피드백 상세 분석
- (목표) 미래 예측 기후모델의 신뢰도 향상을 위한 검증 연구에 활용할 수 있는 과거 장기 기후환경 복원 기록 제공, 북극권과 한반도를 포함한 중위권의 기후 예측 정확도 향상 및 상호 피드백 분석

• 연구방향

핵심이슈	세부주제	연구방향성(정의)	핵심분야
과거 온난화 시기의 북극 동토와 주변 연안 환경변화의 연계성을 과거 복원기록을 통해 현재 진행되는 기후변화 현상을 이해할 수 있으며 미래 대응에 활용할 수 있는가?	북극 동토 및 주변 연안지역 과거 기후·환경변화 특성 파악	• 과거 북극 프람해협 지역의 기후환경 변화가 북극 동토 지역에 미치는 영향 파악 • 과거 북극 동토층 변화가 피오르드·연안 환경 물질순환에 미친 영향 파악 • 과거 북극 동토층 변화에 의한 물질 거동이 북극 피오르드·연안 생태계에 미친 영향력 평가	• 북극 동토 융해호 및 피오르드에서의 과거 기후환경 프록시 개발 및 검증 연구 • 북극 동토 융해호 및 피오르드 코어퇴적물을 활용한 과거 기후환경 복원 연구 • 북극 동토 융해호 및 피오르드·연안지역의 과거 물질순환 연구 • 북극권 과거 대기-해양 수치모델링 연구 • 과거 프록시 데이터-모델 비교 연구
북극권에서의 변화가 한반도를 포함한 중위권 기후에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 피드백 연구가 가능한가?	북극권 기후·환경변화에 대한 피드백 규명	• 환경 빅데이터와 지역기후모델 및 전구모델 결과를 이용한 북극권 육상과 중위도의 상세기후 연계성 분석	• 환경 빅데이터 (기상기후 및 환경요소들의 지상과 위성관측 및 모델재분석 자료 집합) 구축 • 상세한 지역기후모델링 및 예측 연구 • 북극권-한반도 연계성 분석 및 기후예측 개선점 도출
		• 한반도와 동아시아 및 북극 동토지역의 상세기후변화 및 상호 피드백 규명	• 북극 동토지역과 중위도의 기후변화 연관성 및 피드백 분석 • 얼음-알베도피드백, 복사피드백, 역학피드백 등 기후피드백 분석

2.3. 세부주제별 연구목표 및 내용(범위)

2.3.1. (II-1) 북극권 동토와 주변 연안지역 과거 기후·환경변화 특성 파악

연구목표	북극권 동토 및 주변 연안지역 과거 기후환경 복원 연구
주요내용	가. 국제 공동탐사연구 네트워크 강화 • 프람해협 주변 그린란드 피오르드 연구를 위한 국제공동탐사연구 기반 구축 • 프람해협 주변 스발바르 피오르드 연구 지속성 확보를 위한 한-노르웨이 공동탐사연구 기반 확대 • 베링해협 주변 미국 알래스카 동토 융해호 연구를 위한 한-미 연구기반 구축 • 베링해협 주변 러시아 동시베리아 동토 융해호 연구를 위한 한-러 공동연구기반 구축 • 과거 대기-해양 모델링을 위한 한-미-독 국제공동탐사연구기반 구축

	• 북극권 피오르드·연안환경 기초 데이터 확보를 위한 한–노르웨이–덴마크–미국 공동연구 기반 확대 나. 과거 기후환경 복원 • 동토 융해호 연구에 활용할 수 있는 과거 기후환경 지시자 개발 및 검증 • 베링해협 주변 동토 융해호 환경시료 분석을 통한 과거 기후환경 변화 복원 • 프람해협 주변 피오르드·연안 환경시료 분석을 통한 과거 북극 연안 기후환경 변화 복원 다. 과거 프록시 데이터–모델 비교 연구 기반 구축 • 전지구적 및 북극권 과거 대기–해양 모델링 시스템 구축 • 과거 온난화 시기 및 현재 시뮬레이션 수행을 통한 모델 데이터 확보
기대효과	• 국제공동탐사연구 네트워크 강화를 통한 북극권 연구 최신 동향 파악 및 노하우 교류 • 동토 융해호 과거 기후환경 지시자 활용 기술 확보 • 장기적으로 복원된 과거 기후환경 자료 기반 고환경 수치모델링의 신뢰성 확보 • 과거 온난화 시기 기후환경에서의 오염물 거동 및 물질순환에 관한 정보 제공 • 과거 기후환경 복원 및 생태계 영향 진단 정보 기반의 현단계 극지환경의 건강성 파악 및 미래 환경 예측 자료 제공 • 과거 북극 피오르드·연안 생지화학적 물질순환 재현이 가능한 대기–해양 수치모델링 구축 • 과거 기후·환경변화에 따른 장기적인 기상 및 해양환경 데이터 구축

2.3.2. (II-2) 북극권 기후·환경변화에 대한 피드백 규명

연구목표	북극 동토지역과 중위도의 기후변화 피드백 분석 및 대응방안 도출
주요내용	가. 환경 빅데이터(기상, 기후 및 환경자료의 지상과 위성 관측자료 및 모델 재분석자료) 구축을 통한 기후변화 영향요인 종합 분석 • 환경 빅데이터를 이용한 북극권 동토지역과 중위도지역의 에너지수지 및 기후변화 연구 • 북극진동, 동아시아 계절몬순 등 대규모 중장기 기후변동성과 대기질(미세먼지, 오존 등) 변화 관련 연구사례 조사 • 기후요소와 대기질 측정자료를 이용한 기후변화 영향 분석 • 얼음-알베도피드백, 복사피드백, 역학피드백 등 기후피드백 분석 나. 지역기후모델을 이용한 북극 동토지역과 중위도 및 한반도 기후변화 모의 분석 • 지역기후모델기반 지표특성 정보 분석 및 구축 • 북극 동토지역과 중위도의 기후 상관성 분석 및 시나리오(SSP 시나리오)에 의한 기후 모의 • 북극 동토지역과 한반도를 포함한 중위도의 기후변화와 피드백 규명 • 북극권-한반도 연계성 분석 및 기후예측 개선점 도출 다. 북극 동토지역과 중위도의 기후변화 관련 빅데이터와 인공지능 기반의 지역별 상관성 및 미래 전망 분석 • 빅데이터와 딥러닝 기법을 이용한 주요 대기오염물질 (미세먼지(PM10, PM2.5), 오존(O_3), 아황산가스(SO_2), 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO_2) 등)과 기후요소의 장기 변화 경향 파악 • 신기후체제(post-2020)에서 대기오염물질의 변화에 따른 북극 기후변화 영향에 관한 피드백 전망
기대효과	• (지역기후모델 구축 및 가동) 북극권과 중위도의 기후변화 분석 결과의 국내 산업 활용 • (기후 및 환경변화 대응을 위한 과학적 위상 정립) 인간의 삶과 직결되는 기후/환경 분야에 폭넓게 응용할 수 있고, 광역 기후변화 패턴을 보다 자세하게 감시 평가할 수 있는 기술을 보유함으로서 대기환경 및 기후변화 영향평가에 적용시킬 수 있는 핵심 기술 확보 • (파생 연구자료 활용) 빅데이터에 기반한 극지 환경 감시 기술은 한반도를 포함한 주변 지역의 기상, 해양, 농업, 토지이용 분야에 직간접적으로 활용 • (기후모델 성능 개선) 빅데이터 기반의 상세 시공간 해상도 자료는 기후모델을 개발 또는 검증자료로 활용 • (공공 기술 개발 향상) 빅데이터 분석 기술은 미래 관측 센서 설계 기반기술 및 관련 소프트웨어 개발을 위한 시너지 효과 창출과 과학적 자료에 근거한 공공 서비스 활용

2.4. 유사과제 비교

본 기획연구의 세부주제	기존 관련 세부과제명	차별성	비고
(II-1) 북극권 동토 및 주변 연안지역 과거 기후환경 변화 특성 파악	북극 스발바르 기후환경 취약성과 회복력 이해	• 기존 스발바르 중심 연구에서, 그린란드 및 베링기아 (알래스카+시베리아) 지역으로 연구거점 영역 확대 • 기존 피오르드 퇴적물 대상 연구에서, 동토 융해호 퇴적물 등 연구대상 확대 • 미국, 러시아 등 국제공동탐사연구 대상 확대 • 북극권 대서양(스발바르/그린란드)과 태평양(시베리아/알래스카) 관문 (gateway) 지역의 과거 및 현재 인간간섭에 의한 기후환경 변화 비교연구 수행	미국 알래스카 및 러시아 동시베리아 동토 융해호 연구를 위한 연구 기반 구축
(II-2) 북극권 기후·환경 변화에 대한 피드백 규명	관측과 모델 기반 북극권의 육상과 중위도의 기후 연계성에 대한 예측분석과 예측 및 대응방안 제시	• 기상기후 및 환경 빅데이터 분석 및 이를 이용한 북극권 동토지역과 중위도의 상세 기후변화와 상호 피드백 분석 개발 • 지역기후모델 개발 및 인공지능 기법 활용에 의한 북극권 동토지역과 한반도를 포함한 중위도의 기후변화 예측 정확도 향상 및 대응계획 개선 • 지상 및 위성관측자료를 이용한 기후변화 예측결과 비교 분석 및 평가 •	환경 빅데이터와 지역상세 기후모델 구축

2.5. 연도별 연구목표 및 내용

2.5.1. (II-1) 북극권 동토 및 주변 연안지역 과거 기후환경 변화 특성 파악

구분	1단계			2단계		
	1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차
연도별 연구목표	• 과거 기후환경 복원연구를 위한 국제 공동연구 기반 구축	• 과거 기후환경 프록시 개발 및 검증	• 과거 기후환경 프록시 및 모델링 기반 과거 기후환경 복원	• 과거 프람해협 지역과 베링해협 주변 동토환경 변화와의 연계성 파악	• 과거 북극 동토층 변화가 연안환경 물질순환에 미친 영향 파악	• 과거 온난한 시기 동토층 변화에 의한 물질 거동이 북극연안 생태계에 미친 영향 파악
연도별 연구내용	• 그린란드 피오르드 및 알래스카 동토 융해호 국제공동연구 기반 구축 • 스발바르 피오르드 국제공동 현장 탐사 및 현장 자료 수집 • 융해 동토층 및 주변 연한지역의 주요 기후환경인자 파악 • 과거 대기-해양 모델 연구를 위한 국제공동 연구 기반 구축	• 그린란드 피오르드 국제공동 현장 탐사 및 현장 자료 수집 • 스발바르 피오르드 환경 시료 분석 • 과거 대기-해양 모델 시스템 구축 • 과거 대기-해양모델 신뢰성 확보를 위한 파라미터 테스트	• 그린란드 피오르드 환경시료 분석 • 알래스카 동토 융해호 탐사 및 현장 자료 수집 • 피오르드 및 융해호 과거 기후환경 복원 자료 취합 • 과거 대기-해양 모델링 수행	• 러시아 동토 융해호 관련 자료 수집 • 피오르드 현장 탐사 및 알래스카 동토 융해호 환경 시료 분석 • 피오르드 및 융해호 과거 기후환경 복원 취합 자료 분석 • 과거 프록시 데이터-모델 비교기반 기후 변동 특성 분석	• 러시아 동토 융해호 예비조사 • 피오르드 현장 탐사 및 환경 시료 분석 • 과거 기후환경-물질순환 모델링 수행 • 과거 오염물질 거동 및 물질순환 변동 분석	• 러시아 동토 융해호 탐사 및 현장 자료 수집 • 융해호 및 피오르드 환경 시료 분석 • 과거 기후환경-생태계 모델링 수행 • 과거-현재 동토층 오염물질 거동 및 물질순환 변동에 따른 연안 생태계 영향 인자 분석
연도별 주요성과물	• 그린란드 피오르드 및 알래스카 동토 융해호 국제 공동연구 기반 확보 • 과거 기후모델 국제공동연구 기반 확보 • 스발바르 피오르드 현장 탐사 자료 및 환경 시료 확보 • 국제협력 2건	• 그린란드 피오르드 현장탐사 자료 및 환경 시료 확보 • 과거 대기-해양 모델링 연구 기반 확보 • 논문 1건 • 국제협력 1건 • 데이터 2건	• 알래스카 동토 융해호 현장탐사 자료 및 환경시료 확보 • 과거 대기-해양 모델링 테스트 자료 확보 • 논문 1건 • 데이터 2건	• 피오르드 및 융해호에서의 과거 기후환경 복원자료 확보 • 과거프록시 데이터-모델 비교 자료 확보 • 논문 2건 • 데이터 2건	• 피오르드 및 융해호 환경시료 분석 자료 확보 • 과거 기후변화와 연계된 물질순환 모델링 연구 기반 확보 • 논문 2건 • 데이터 2건	• 러시아 동토 융해호 현장탐사 자료 및 환경시료 확보 • 과거 기후변화와 연계된 연안 생태계 모델링 연구 기반 확보 • 논문 3건 • 데이터 2건

2.5.2. (II-2) 북극권 기후·환경변화에 대한 피드백 규명

구분	1단계			2단계		
	1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차
연도별 연구목표	• 북극 동토지역과 중위도의 빅데이터 구축 및 활용 방안 개발	• 환경 빅데이터를 활용한 북극권 기후 및 환경변화 분석	• 빅데이터기반 북극 동토지역과 중위도의 기후변화 상세 규명	• 인공지능 기반의 북반구와 중위도 환경 빅데이터 분석 기술 구축	• 인공지능기반 북극 동토지역과 중위도의 기후변화 원인 및 피드백 규명	• 북극권의 기후변화에 따른 한반도와 중위도의 기후변화 대응방안 개선
연도별 연구내용	• 북극권의 환경 빅데이터(지상, 위성관측 및 모델재분석자료 등) 수집 • 환경 빅데이터 활용 북반구 지표 및 대기환경 특성 변화 분석 • 상세지역기후 모델의 초기입력자료 (지형고도,지표 이용도 등) 수집	• 북극권 환경빅데이터 기반 기상 및 대기질 분석 • 북극권 동토지역과 중위도의 기후변화 (에너지수지 등) 분석 • 상세지역기후 모델 구축 및 반응도 분석 •	• 상세지역기후 모델과 지표 및 대기 환경 변화 분석 • 북극권 동토지역과 중위도의 상세 기후변화 분석 • 북극권-한반도 연계성 분석 및 지역기후예측 개선점 도출	• 기후변화에 따른 기후피드백 (얼음-알베도, 복사, 역학) 분석 • 상세지역기후 모델 수행 • 북반구 환경 빅데이터 및 인공지능 분석방안 구축에 따른 기후변화 피드백 분석	• 지역기후모델 기반 북극 동토지역과 중위도 기후변화 시나리오 생산 • 기후변화에 따른 기후피드백 상세 규명 • 인공지능 기법을 이용한 기후요소의 장기 변화 경향 분석	• 대기오염물질 변화에 따른 북극권 기후변화 영향 및 피드백 분석 • 북극권 환경변화에 따른 지역모델기반 한반도와 중위도의 기후변화 대응방안 분석 및 개선
연도별 주요성과물	• 논문 게재 2건 • 환경빅데이터 수집	• 논문게재 2건 • 환경빅데이터 분석연구기반 구축 • 지역기후모델 구축 및 초기입력자료 확보	• 논문게재 2건 • 지역기후모델 기반 기후변화 시나리오 확보	• 논문게재 2건 • 인공지능기반 북반구 환경 빅데이터 분석기술 확보	• 논문게재 2건 • 지역기후모델 기반 기후변화 시나리오 개선	• 논문게재 2건 • 한반도의 기후변화 대응방안 개선책 제시

2.6. 연구개발 위험요인 및 대응방안

세부주제	위험요인	대응방안
(II-1) 북극권 동토 및 주변 연안지역 과거 기후·환경변화 특성 파악	• 지정학적 요인 등 국제정세 변화로 인한 시베리아 융해호 연구 기반 확보 지연	• 캐나다 동토 융해호 연구 기반 확보로 대응
	• 코로나19 상황과 같은 팬데믹 발생에 따른 연안 현장 관측 자료 확보 지연	• 코로나 백신접종 완료자 기준, 최소 인력 활용으로 자료 수집의 불연속성에 대응
	• 랜섬웨어 및 바이러스 감염 등으로 인한 데이터 손실	• 대용량 저장 시스템 확보를 통한 주기적인 자료 백업으로 대응
(II-2) 북극권 기후·환경변화에 대한 피드백 규명	• 검증 자료 확보 방안의 문제점	• BSRN 및 관련 국제전문 기관과의 협력을 통해 관련 자료 공동활용

2.7. 개발기술의 적용분야

2.7.1. (II-1) 북극권 동토 및 주변 연안지역 과거 기후·환경변화 특성 파악

■ **과거 기후환경 프록시**

- 개발한 과거 기후환경 프록시는 다른 지역 호소 및 피오르드 환경 복원 연구에 활용 가능
- 과거 기후환경 변동에 따른 호소 생태계 변동 파악 연구에 활용 가능

■ **과거 기후 모델링**

- 구축한 북극권 과거 지역기후모델은 다양한 지질학적 시기 모델링에 활용 가능
- 과거 지역기후모델을 기반으로 현재 진행되고 있는 상태를 진단하고, 미래의 생태계 변동을 예측하는 기초자료 제공 가능
- 북극 동토층 붕괴 및 피오르드·연안 침식에 따른 재해 취약지역 파악 및 대응 체계 구축에 필요한 기초자료 제공 가능

■ **고기후 환경에서의 오염원 거동 및 물질순환 연구**

- **과거 극한 기후에서의 오염원 거동 및 물질순환 파악**
  - 과거 극한 기후에서의 동토층/융해호 내 축적된 오염물질의 거동을 파악함으로써, 오늘날 기후 재난(가뭄, 산불, 폭염, 폭설, 한파 및 슈퍼태풍 등)에 따른 오염원의 거동/물질순환의 변동 및 그에 따른 생태계 영향력 평가에 활용 가능

■ 과거 기후환경 인자 빅데이터 구축 및 활용

- 과거 지역기후모델링을 통해 북극권을 아우르는 광범위한 기후환경 인자를 확보함으로써, 과거 기후환경 프록시를 활용해 획득한 국부적인 기후환경 복원자료와의 데이터-모델 비교 연구 수행

2.7.2. (II-2) 북극권 기후·환경변화에 대한 피드백 규명

■ 국가정책

- 급변하는 기후변화는 국민의 삶과 국가발전의 중요한 문제이기 때문에 한반도의 국가 정책결정 뿐만 아니라 국제사회(IPCC와 북극권 연안국 등)와 보조 및 협력을 위한 중요 기술 및 자료로 활용

■ 경제 및 산업정책

- 기후변화는 경제분야에 기술, 자본, 서비스 및 노동시장 등 다양한 영향을 미침. 특히 기후변화는 자원활용이 제한되고 국제협약과 정책 및 규제로 인하여 비용증가에 중요하게 영향을 미치기 때문에 정확한 기후변화 예측자료는 경제와 산업정책 결정의 중요한 자료로 활용
- 또한 기후변화는 에너지 문제와도 직결되기 때문에 자발적 감축 기여(NDC, Nationally Determined Contribution) 상향 조정에 맞춰 정부는 신재생 에너지 발전 비중을 2030년 40%까지 늘리기로 방침을 정하면서 우리나라의 에너지 산업과 연관 정책이 중대 전환점을 맞게 됐으며 이러한 정부의 에너지 정책은 정확한 기후변화 예측자료가 중요하게 활용

■ 환경 빅데이터(II-2) 구축 방안 및 활용 가능성 (요약)

빅데이터 종류	구축 방안(변수)	활용	비고
지상관측	• 전구 기상관측망 자료(NOAA GHCNM, NCEP/NCAR GDASOBS (DS461)) • AERONET 에어로졸 특성 관측자료 • BSRN 복사관측망 자료	- 과거 기후변화 및 환경특성 분석 - 위성자료 분석 및 비교 - 과거 사례 모의 결과 및 시나리오 모델 검증	
위성관측	• MODIS 에어로졸, 구름, 반사도, NDVI, 산불, 지표면온도 등 관측자료 • CERES 복사관측 자료 • 위성기반 sea-ice 관측자료 • AURA 오존, UVI, NO2 대기질 자료	- 최근 기후변화 분석 및 모니터링 - 대기 중 기상, 대기질, 복사환경 등 분석 - 모델 결과 분석의 비교 및 검증	
모델 재분석	• ERA5 재분석자료 • NCEP/NCAR FNL 재분석자료 • CAMS 대기질 분석자료	- 모델 실험 입력자료 - 3차원적 기상 및 대기질 분석 - 기상수치모델과 기후모델 비교 평가 및 검증	
기후 시나리오	• CMIP5, CMIP6 월평균 기온 • CCSM, CESM 월평균 변수별 자료 • RCP4.5/8.5(CESM), SSP245/585 (앙상블자료) 자료	- 과거 및 미래 기후변화 분석 - 지역모델 및 지역기후 상세화의 입력자료	
기후 시나리오 기반 근미래 예측자료	• RCP4.5/8.5(CCSM), SSP245/585 (앙상블자료)기반 극지-한반도 근미래 예측자료 (자체 생산)	- 근미래에 대한 상세한 기상 및 기후 분석 - 기후변화에 따른 미래 대응의 기초자료로 활용	

3 (전략-III) 기후위기 대응과 인간사회 영향 파악

3.1. 연구 필요성 및 목표

3.1.1. 연구추진 필요성

구분	중점사항	핵심이슈	연구 방향성 도출
정책적 필요성	• 지구온난화 탈피 정책으로 온실기체 감축	• 온실기체 감축을 위해 운송용 대체 연료로서 재생이 가능한 바이오연료 비중을 확대	동토층 미생물을 이용한 온실기체 전환 기술 개발
사회적 필요성	• 북극 동토층의 생명자원을 이용한 친환경 바이오기술 개발	• 석유화학공정에 의존하는 국내 화학산업 구조를 재생 가능한 바이오매스로부터 고부가가치의 유용 화학소재 생산이 가능한 산업구조로의 전환이 필요한 제반 기술이 요구됨	
기술적 필요성	• 온실기체의 바이오전환 소재로서 활용	• 메탄가스는 셰일가스, 매립가스, 부생가스 등의 주성분이며, 매우 값싸고 풍부한 가스자원으로 화학적 산화공정 뿐만 아니라 바이오 공정을 통하여 유용 화학물질 생산이 가능함	
정책적 필요성	• 북극이사회 정식옵서버로서 핵심 역할 이행	• 북극권 환경 및 원주민 보호, 지속가능한 개발 등의 달성	북극권 지역사회 기후변화 영향 파악
	• '2050 극지비전' 달성	• 지역사회와의 교류 확대 및 신뢰 구축	
사회적 필요성	• 기후변화에 대한 • 인권적 접근	• 지역적으로 불균등한 기후변화 및 영향에 대한 이해 • 기후변화 취약지역 및 취약계층의 영향에 대한 정확한 파악	
기술적 필요성	• 사회과학적 연구영역 확장	• 북극권 지역사회의 기후변화에 대한 체계적이고 지속적인 연구	
	• 북극권 지역사회 협력체계 구축	• 북극권 내 안정적·지속적 연구 활동을 위한 협력체계 필요	

3.1.2. 정책적 필요성

- **국제사회의 저탄소 경제 전환의 일환으로 2050년 탄소중립 비전에 동참 (문진영 등 대외경제정책연구원 연구보고서 "국제사회의 온실기체 감축 목표 상향과 한국의 대응방안" 2020)**
  - EU는 2050년까지 역내 탄소중립을 실현하기 위한 유럽 그린딜 추진을 위해 산업, 발전, 자원순환, 수송 등 분야별 행동계획을 수립
  - 최근 한국판 뉴딜의 일환으로 그린뉴딜의 비전을 제시하였으며, 2050년까지의 탄소중립 비전에 동참
  - 화석연료 기반의 생산기술을 가진 경제주체는 재생에너지 기반의 생산기술을 가진 경제주체에 비해 상대적으로 낮은 탄소세율을 선호

- **북극이사회 정식옵서버로서 핵심 역할 이행**
  - 기후변화 등 위협 발생과 북극에 대한 전지구적 관심 증가에 대한 북극권 환경 및 원주민 보호, 지속가능한 개발 등을 목적으로 한 북극이사회의 정식옵서버로서 원주민 공동체 지원 등 책임과 의무 수행 필요 및 북극 지역사회의 기후변화·영향에 대한 실태와 북극 원주민의 생활양식에 대한 종합적 이해 필요
- **2050 극지비전 달성을 위한 단계적 목표 이행**
  - 2018년 수립된 '2050극지비전'에 따르면 인류 공동의 유산인 북극의 고유한 사회·문화 전통유지를 위해 북극 원주민 등 지역사회와 교류를 확대하고 신뢰를 구축하는 것을 주요 비전으로 하고 있으며, 이를 달성하기 위하여 북극권 기후변화 및 북극권 지역사회에 대한 이해가 반드시 필요

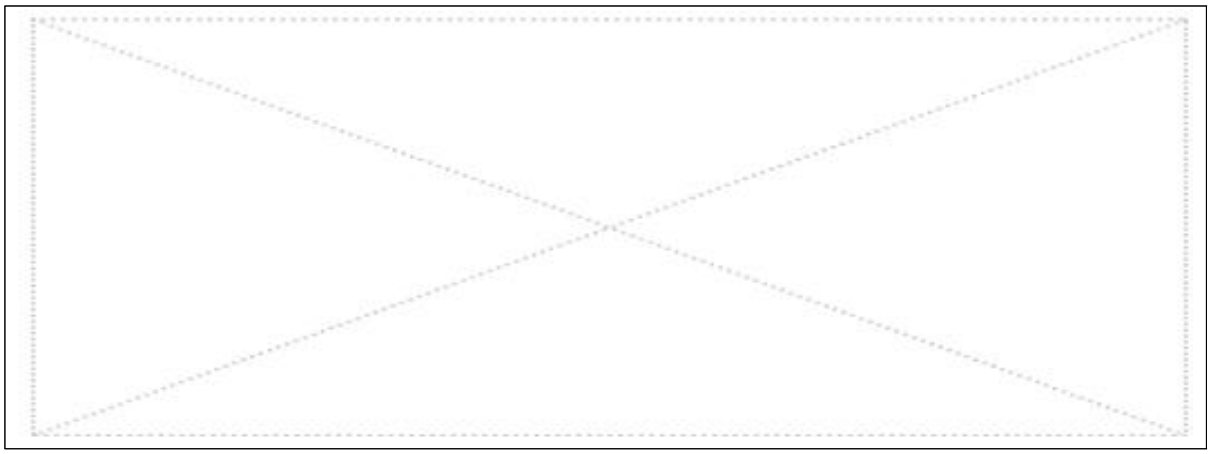
3.1.3. 사회적 필요성

- **기후변화 대응을 위하여 저탄소 기술 혁신과 탄소중립 목표를 실현하기 위해 필요한 과제들을 제시해야 함**
  - 유엔 정부 간 기후협약패널(IPCC) 등의 온난화와 관련한 메탄에 대한 규제는 매우 엄격함
  - 화석연료 의존도가 높아 탄소 배출 규제에 취약한 산업의 저탄소 전환 노력을 지원해야 함
  - 글로벌 기업들은 자체적인 탄소중립 목표 또는 재생에너지 사용 목표를 달성하기 위해 관련 투자를 확대하고 있으며, 기존의 비즈니스 모델을 저탄소 경제 패러다임에 맞게 변경 또는 신규 발굴해 나감
- **기후변화 문제에 대한 인권적 접근**
  - 북극권 지역사회의 기후변화에 대한 기여도는 낮은 반면, 기후변화의 진행 정도 및 영향이 심각하여, 불균등하게 발생하는 기후변화와 기후변화 취약 지역·취약계층에 미치는 기후변화영향 대한 정확한 이해 필요
  - 지속가능하며 정의로운 발전을 위한 북극 지역사회의 기후변화 인식 파악 필요

3.1.4. 기술적 필요성

- **메탄가스를 이용한 메탄올의 산업적 생산은 원유를 대체할 수 있는 탄화수소 제조 원료로서 생산이 가능하며, 다양한 석유화학 대체 물질의 전구체로 활용됨**
  - 메탄의 메탄올 전환은 고온/고압 상태 하에서 산업적으로 인위적 생산이 이뤄지고 있으나, 자연계에서는 메탄산화(자화)균에 의한 대사촉매에 의해 발생됨. 메탄가스는 최근 개발이 활발히 진행 중인 셰일가스의 주성분으로 수송에 용이한 메탄올로의 전환이 중요 이슈로 부각됨
  - 메탄가스의 고부가가치 산물로의 전환을 위해서 액상의 화합물로 전환하고자 하는 노력이 지속적으로 이루어지고 있으며, 액상화의 대표적인 화합물인 메탄올 생산을 위하여 화학공정으로 합성 생산되고 있으나, 높은 공정비용과 안정성 등의 많은 문제를 가지고 있음. 이에 따라, 환경보전적이며 안정적이고 경제적인 메탄-메탄올 바이오전환기술에 대한 연구가 필요함
- **사회과학적 연구영역 확장**
  - 북극권 기후변화에 대한 체계적이고 지속적인 사회과학적 연구 필요성 및 북극 지역사회의 기후변화영향 연구결과의 일반화를 통하여 기후변화와 인류 생활조건의 변화, 영향 등을 연구하는 방법론 구축 필요
  - 기후변화 및 영향에 대한 종합적이고 장기적인 조사는 극히 드묾. UNDP와 옥스포드 대학에서 2021년 발표한 조사결과가 있으나, 글로벌 기후변화에 대한 일반적인 조사임. 극지는 기후변화가 가장 빠르고 극심하게 일어나는 지역으로, 지역 주민들의 기후변화와 그로 인한 영향에 대한 인식, 의견 등을 조사할 필요가 있음
- **북극권 지역사회 협력체계 구축**
  - 북극 현장에서의 연구 및 기타 활동을 위해서는 다양한 북극권 지역사회의 협조와 허가가 필수적임. 원주민 집단 등 북극권 지역사회와의 협력체계가 구축된 이후의 북극권 활동은 효과적 성과 도출이 가능하며 시간과 비용의 절감을 가능케 함

3.2. 연구개요



- (정의) 북극 동토층에서의 메탄가스의 자연발생과 소멸 작용은 생태계 반응에 의한 것이며, 생물의 생체 내에서 메탄대사에 관여하는 유전자원을 활용하여 메탄의 전환 및 에너지 자원화를 위한 생명공학 기술개발과 더불어 극심한 기후변화가 탐지되고 있는 북극권 지역사회의 기후변화 및 영향을 파악하는 연구 등 미래 활용성 제고와 인간사회 영향성 파악 등
- (목적) 동토층에 존재하는 특유의 다양한 온실기체 대사의 유전체를 분석하고 온실기체 활용기술의 핵심인 전환효소의 특성과 활성기작을 규명함으로서 동토층 생명자원의 활용 가치성 확보, 전지구 평균보다 4배 이상 빠른 속도로 기후가 변화하는 북극권 내 지역사회가 실제 체감하는 기후변화 현황 및 영향 정도를 정확히 파악하고, 기후변화 완화·대응 정책의 방향성 제시
- (목표) 동토층 유래의 온실기체 전환 생물소재의 활성기작 연구 등을 통하여 기후위기 대응기술 개발, 기후변화·영향 조사를 위한 표준 설문조사지 구성 및 효과적인 기후변화 완화·대응 정책을 위한 지역사회의 인식 조사자료 제공
- 연구방향

핵심이슈	전략과제	연구방향성(정의)	핵심분야
지구온난화 유발 온실기체를 활용하고 감축하기 위해서 필요한 바이오기술(BT)은?	온실기체의 바이오 전환기술 개발	북극 동토층 생명자원 유래의 온실기체 대사의 특성과 활성기작 규명을 통한 메탄 바이오전환기술 개발	• 동토층 환경 특이적 메탄대사 생명자원의 발굴 및 유전자원 확보를 위하여 환경유전체 분석 • 온실기체 전환 활성기작에 대한 특성 분석 연구 • 북극 환경미생물 소재 개발을 통한 온실기체 바이오전환 기술연구

기후변화가 급격히 일어나고 있는 북극권 지역사회 내 기후변화 영향과 대응방안은?	북극권 지역사회 기후변화 영향 분석	기후변화·영향 설문조사지를 활용한 북극권 지역사회의 기후변화 및 영향 파악	• 관측거점 중심의 북극권 지역사회 특성 이해 • 북극권 지역사회의 기후변화 및 영향에 대한 인식 파악 • 북극권 지역사회와의 협력체계 구축

3.3. 세부주제별 연구목표 및 내용(범위)

3.3.1. (III-1) 온실기체 바이오 전환기술 개발

연구목표	동토층 생명자원 유래의 온실기체 관련 생물소재개발을 통한 바이오전환 기술 연구
주요내용	가. 북극 동토층의 환경 특이적인 생명자원의 유전체 분석 • 동토층 환경시료에서 메탄대사 생명자원 탐색 및 발굴 • NGS 기반의 유전체 분석기술을 통한 온실기체 생촉매 대사회로 관여 유전자 분석 및 확보 • 환경유전체(metagenome) 분석을 통한 메탄산화 및 메탄대사 관련유전자의 다양성 확보 나. 북극 동토층 유래 생물학적 온실기체 대사의 활성기작 규명 • 극지 토양의 환경유전체 정보 및 유전체 라이브러리로부터 고기능성 온실기체 대사회로 효소의 유전자원 확보 • 온실기체 관련 생물소재의 생산 및 확보 • 메탄대사 핵심 소재의 분자구조 분석 • 생촉매 활성기작 규명을 위한 반응모델 구축 • 반응 특이성과 생촉매 역학에 대한 생화학적 특성 분석 다. 메탄의 바이오전환기술 개발 • 생촉매 활성 및 생화학적 특성 변화에 따른 바이오전환 수율 개선 • 메탄-부가가치물질의 바이오전환 균주 구축을 위한 유전자 조작 기술 적용
기대효과	온실기체를 이용한 바이오전환기술은 바이오 연료 및 부가가치의 화학 물질의 생산이 가능하며, 친환경기술로서 온난화에 의한 기후변화 예방에 기여

3.3.2. (III-2) 북극권 지역사회 기후변화 영향 분석

연구목표	북극권 원주민 지역사회 중심의 기후변화 및 영향 분석
주요내용	가. 관측거점 중심의 북극권 원주민 지역사회 특성 이해 • 관측거점 중심의 연구대상 지역사회 선정 • 북극권 지역사회의 지역성 파악 (인구, 지리, 역사, 사회, 문화 등) • 의, 식, 주 등 원주민 생활양식을 중심으로 북극권 문화에 대한 종합적 이해 • 북극권 원주민 지역사회 현장조사를 위한 연구기반 구축 나. 북극권 원주민 지역사회의 기후변화 및 영향에 대한 인식 분석 • 기후변화 및 영향 실태 파악을 위한 표준 설문조사 구성 • 북극권 지역사회의 기후변화에 대한 인식 조사 및 분석 • 북극권 지역사회의 기후변화영향에 대한 인식 조사 및 분석 • 북극권 지역사회 간 기후변화·영향 인식 비교분석 수행 다. 북극권 원주민 지역사회와의 협력체계 구축 • 북극권 지역사회와의 연구내용 공유 • 북극권 지역사회 연구협력 MOU 체결 등 안정적 협력체계 구축
기대효과	북극권 원주민 지역사회의 기후변화 현황 파악 및 기후변화 대응·완화를 위한 방향성 제시

3.4. 유사과제 비교

본 기획연구의 세부주제	기존 관련 세부과제명	차별성	비고
(III-1) 온실기체 바이오 전환기술 개발	환북극권 동토 환경 미생물로부터 난분해 유기 물질 분해 효소 개발	• 동토층 환경에서 생물생태계에 의해 메탄의 생성과 이용(자화)이 활발히 이루어지는 자연생태적 현상을 착안하여 극지 유래 유용한 메탄대사 유전자원 발굴을 위하여 환경 특이적이며 다양성을 가지는 메탄대사 생명자원 및 소재를 확보하고 생화학적 특성을 규명 • 미생물의 온실기체 대사회로와 관련된 생리 및 분자생화학적 연구를 통하여 온실기체 바이오전환 분야에서 활용성이 우수한 극지 생물소재 개발	바이오 기반의 온실기체 전환기술 개발
(III-2) 북극권 지역사회 기후변화 영향 분석	기 유사과제 없음	• 급변하는 북극권에서의 기후·환경변화에 따른 지역사회 및 인간사회의 영향성 파악을 위한 새로운 주제임(국제사회에서의 북극 원주민에 관한 생활변화와 이로 인한 타지역으로의 전파에 대해 모니터링 필요성 강조하고 있음)	

3.5. 연도별 연구목표 및 내용

3.5.1. (III-1) 온실기체 바이오 전환기술 개발

구분	1단계			2단계		
	1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차
연도별 연구목표	• 북극 동토층 토양 유래의 메탄대사 생명자원 탐색	• 환경유전체 라이브러리를 통한 유전자원 발굴	• 메탄올 대사경로 특성 분석	• 기능성 생물소재의 활성기작 규명	• 메탄 대사회로 제어기술 개발	• 메탄 바이오전환의 최적화
연도별 연구내용	• 북극 동토층 토양시료 확보 • 유사 효소의 활성 비교 검정을 위한 대조군 확보 • 효소 활성 데이터의 표준화	• 동토층 시료의 환경유전체 순수분리 및 정제 • NGS 기반의 미생물 및 메타게놈 유전체 분석	• 미생물 유전체 정보를 활용한 대사경로 분석 • 메탄산화 대사관련 생물소재 확보	• X 선 결정학 기반의 단백질 구조 해석 • 단백질 구조 기반의 활성기작 규명	• 분자구조 기반의 합리적 디자인을 통한 기능성 개선 • 메탄 대사회로 관련 효소와 상관관계에 대한 분석	• 유전자 가위 시스템을 위한 벡터 구축 • 메탄 바이오전환 균주의 형질전환 최적화 조건 확립
연도별 주요성과물	• 동토층 유래 메탄산화 미생물 생명자원 확보미생물 및 효소의 활성에 대한 표준화 데이터 확보	• 신규 메탄산화 효소 생물소재 확보 (10종 이상)미래 연구기술개발에 활용이 가능한 유전자원 정보 및 생물자원 확보 • 생물정보 및 자원의 KPDC 등록 10종 이상	• 메탄산화 대사 관련 유전자 확보 (5종 이상)효소의 생화학적 특성 정보 확보 • 논문 1건 • 특허 출원 1건	• 단백질의 분자 구조정보 확보 (2종 이상)분자 구조 기반의 분자생화학적 특성 자료 확보 • 논문 1건 • 특허 출원 1건	• 기존 효소의 개량형 효소 단백질의 제작을 통한 고활성 효소 생산 • 논문 1건 • 특허 출원 1건	• 대사공학 기반의 산업용 균주 개량을 위한 유전자원 확보메탄 바이오전환 균주 시스템 확보

3.5.2. (III-2) 북극권 지역사회 기후변화 영향 분석

구분	1단계			2단계		
	1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차
연도별 연구목표	• 관측거점 중심의 북극권 원주민 지역사회 특성 이해 및 협력체계 구축 기반 마련	• 북극권 원주민 지역사회에서 기후변화 영향 실태 파악 및 내용 분석	• 북극권 원주민 지역사회에서 기후변화 및 영향에 대한 인식 이해	• 원주민 지역사회 간 기후변화 인식 비교(Ⅰ)	• 원주민 지역사회 간 기후변화 인식 비교(Ⅱ)	• 북극권 원주민 지역사회와의 연구내용 공유 및 협력체계 구축 • 북극권 문화에 대한 종합적 이해
연도별 연구내용	• 관측거점 중심의 연구대상 지역사회 선정 • 연구대상 지역사회의 특성 파악 (인구, 역사, 사회, 문화, 생계 등) • 지역사회와의 협력체계 구축기반 마련 • 기후변화 및 영향 실태 파악을 위한 설문조사 내용 구성	• 기후변화 및 영향 실태 파악을 위한 설문조사 내용 구성 • 북극권 지역사회 현장 답사 및 설문조사 수행 (알래스카, 캐나다 북극권) • 설문조사 내용 분석	• 북극권 지역사회 현장 답사 및 설문조사 수행 (그린란드, 노르웨이 북극권) • 설문조사 내용 분석	• 북극권 지역사회 현장답사 및 설문조사 수행(러시아) • 설문조사 내용분석 • 북극권 지역사회 간 기후변화 인식 비교분석 수행	• 북극권 지역사회 간 기후변화 영향 인식 비교분석 수행	• 북극권 지역사회와 연구결과 공유 • 연구활동 협력 MOU 체결 등 북극권 지역사회와 협력체계 구축 • 북극권 문화 및 기후변화 현황에 대한 종합적 이해 및 사회적 확산
연도별 주요성과물	• Super Site 중심 북극권 사회과학 연구거점 기반 구축 • 북극권 지역사회와 라포(Rapport) 형성	• 북극권 지역사회 대상 기후변화 및 영향 파악을 위한 표준 설문조사지 개발 • 논문 게재	• 논문 게재 • 지역별 기후변화 및 영향에 대한 설문조사 결과 확보	• 논문 게재 • 지역별 기후변화 및 영향에 대한 설문조사 결과 확보	• 논문 게재 • 북극권 문화 이해 및 연구결과 확산을 위한 대중 대상 강연자료 개발	• 논문 게재 • 북극권 연구활동을 위한 지역사회와 연구 협력 관계 구축 • 북극권 원주민 지역사회와 공동 연구 결과 세미나 개최

3.6. 연구개발 위험요인 및 대응방안

세부주제	위험요인	대응방안
(III-1) 온실기체 바이오 전환기술 개발	• 북극지역 기반의 생명자원(유전자원) 활용에 따른 지식재산권 문제 발생	• 나고야의정서 비준국 이외의 북극 동토지역에서 생물자원을 탐색 및 발굴함으로써 법적 분쟁의 소지를 예방함
(III-2) 북극권 지역사회 기후변화 영향 분석	• 국제정세의 영향 • 원주민 지역주민과의 관계	• 연구지역 조정(대안지역 선정) • 단계적 접근 및 사전 유대관계(친밀감) 형성

3.7. 개발기술의 적용분야

3.7.1. (III-1) 온실기체 바이오 전환기술 개발

■ 온실기체 대사 관련 생물소재 개발 기술

• **온실기체-부가가치 물질의 바이오전환기술 개발**

– 환경미생물 유전체로부터 온실기체 전환 효소의 유전자 데이터베이스(DB)를 구축하고, 유용성이 우수한 효소 유전자의 지식재산권 확보를 위하여 자체 및 공동연구에 활용함

– 메탄으로부터 바이오공정을 이용하여 상업적 유용성이 우수한 알코올, 유기산, 바이오폴리머 등을 제조하는 데 활용할 수 있음

■ 극지 유래의 생명자원으로부터 유용 생물소재의 발굴 기술

• **극지 환경미생물 유전체로부터 고활성 생물소재 탐색**

– 환경미생물 유전체 DB에서 발굴된 온실기체 전환 효소 유전자의 단백질 발현을 통하여 효소 단백질의 생화학적 특성 규명연구 및 활용기술을 개발함

– 대사 공학을 기반으로 하는 다양한 바이오공정에서 실질적인 구현을 가속화할 수 있는 핵심기반으로 활용될 수 있음

3.7.2. (III-2) 북극권 지역사회 기후변화 영향 분석

■ 북극권 관련 국가적 역량 확보

- **인류 번영 및 공정한 발전을 위한 연구활동 강화**
  - 연구활동 기반 확충: 자연과학 중심의 극지학에서 모든 학문 분야를 아우르는 종합학문으로서의 '극지학'으로 발전하는 데 기초 마련
  - 한국에서 거의 이루어지지 않은 이누이트 등 원주민에 대한 인문·사회과학적 연구를 통해 극지의 연구 지평 확장 및 인문사회과학 분야 중요성 인식
  - 그동안 극지연구에서 간과하였던 혹한의 극지에서 삶을 영유하고 있는 원주민 지역사회 이해를 위한 기초연구를 수행하여, 극지에 관련된 다양한 원주민 지역사회 정보를 제공함과 동시에, 현지의 문화와 삶을 이해하는 노하우 제공
  - 기후변화와 극지 삶의 변화, 기후변화와 강제적 이주의 특성과 문제점, 기후변화에 따른 원주민 지역사회와 문화적 변화 등에 대한 다양한 빅데이터 구축
- **북극권 원주민 지역사회 이해**
  - 주요 이해관계집단이자 북극이사회 상시참여단체로도 참여하고 있는 원주민과의 협력관계를 구축하여 적극적, 안정적 북극정책 참여 및 북극이사회 내 입지 강화
  - 북극 원주민 분야 연구 등에서의 국제적 경쟁 우위 선점 및 선도적 역할 수행
  - 연구 성과 확산을 통한 극지 기후변화에 의한 원주민 생활 방식과 터전 변화 및 생존 위협 문제 등 관심 대중화

■ 기후변화·영향 표준 설문지 개발

- 북극 지역사회 대상 사회과학적 연구 시도 및 방법론 개발
- 연구결과의 일반화를 통한 인류 생활조건의 변화 등 연구방법론 구축
- 기후변화로 인한 북극 원주민 지역사회의 생활상 변화를 해석하고, 극지의 다수의 사례 간 비교연구를 통한 "극지 기후변화 이론" 정립
- 현장 관측거점 외에 다양한 지역에서 지속적인 조사가 이루어지도록 '북극이사회' 등에 제안하여 북극권 지역 내 연구범위 확장 및 시공간적 비교 연구 추진
- 북극권뿐만 아니라 우리나라를 비롯한 중위도 지역의 기후변화 영향을 예측에 활용

(부록) 특이사항 및 참고사항

(소요예산/인력 등 세부내역(종합))

1 (특이사항) 국고지원 및 지속적 수행 필요성

□ **(과학기술정보통신부 수행 당위성)** 기초원천 분야 연구개발의 통합 수행

○ **과학기술정보통신부에서 수행하는 유일한 극지 분야 정부 R&D 사업**으로서의 부합성과 대표적 임무를 고려, 계속 지원 필요

* (국정 과제) 기초원천(또는 과학기술적 환경 관련) 분야 연구개발은 과학기술정보통신부에서 통합 수행 필요

○ 남극과 북극의 극지는 기후시스템을 모두 갖춘 소지구적 영역이며 지구 환경 변화 감지와 미래 환경변화 연구의 최전선이자 최적지이며, 특히 북극의 급격한 기후·환경변화에 따라 지구 생태계와 인간 삶에 악영향이 확대되고 있어, 과학연구 자료획득 및 지속적인 환경 모니터링을 위한 현장 조사가 매우 중요함. 더욱이 북극 동토층의 융해로 인한 전 지구적 생태계 붕괴 및 인간 삶의 질 저하 가중시킴

□ **(정부 지원 지속 당위성)** 국제사회에서의 국격 제고 및 신뢰성 유지 필요

○ **특히 북극연구의 경우,** 우리나라가 북극이사회 정식옵서버 국가로서, 북극 연안 8개국(북극이사회) 국가와의 국제협력을 통하여 확보한 관측거점* 및 그 주변 영역을 기반으로 글로벌 이슈에 대응하는 국제공동연구** 수행이 필수적이며, 국가적인 사업의 중단과 이로 인한 연구 단절이 있을 경우, 국제사회에서의 역할 불이행으로 신뢰성 격감 우려(급기야는 정식옵서버 국가로서의 지위 유지에 어려움 초래 가능성이 예상됨)

* 미국('11), 캐나다('12), 노르웨이(스발바르)('12), 그린란드(덴마크)('15), 아이슬란드('16), 러시아('16) 등 6개 거점

** 미국(알래스카 카운실 거점, 알래스카페어뱅크스대학(UAF)/국제북극연구센터(IARC)와 협연), 캐나다(캠브리지베이 거점, 극지지식청(PKC)과 협연), 노르웨이(스발바르 거점, 극지연구소(NPI)와 협연), 덴마크(그린란드 노르드 거점, 덴마크 Aarhus 대학과 협연), 아이슬란드(스토르호퇴이 거점, 아이슬란드대학교(UoI), 아이슬란드 기상청과 협연), 러시아(바라노바 거점, 북극남극연구소(AARI) 등과 협연)

□ (전체 사업개요 및 지속성 유지에 대한 부가설명)

○ (극지연구사업 추진 개요)

– 『극지기초원천기술개발사업』은 수행 주체인 우리나라 유일의 극지연구 전문연구기관인 극지연구소를 중심으로, 과기부의 인적·물적 지원과 외교부의 국제외교적 지원을 받아, 북극이사회* 국가들과 국가 차원에서의 연구 협정을 체결하고, 환북극 동토지역에 6개 관측거점** 확보와 정밀측정시스템 구축, 환경인자*** 빅데이터 DB 확보, 특성 분석 및 미래 대응 연구 수행 (우리나라 최초의 유일한 북극 동토 연구의 table setter 및 pioneer 역할 담당)

* **미국, 캐나다, 노르웨이, 덴마크, 아이슬란드, 러시아, 스웨덴, 핀란드 등 북극권 국가 8개국**으로서 운영, 1993년 누크(Nuuk) 선언(북극환경보호 11개 행동강령을 구체화한 선언), 1996년 3월 이누비크 선언(북극이사회 결성을 위한 노력하겠다는 내용과 '지속가능한 개발 및 활용' 대책본부 활동 등을 발표한 선언)을 거쳐, 1996년 9월 오타와 선언으로 설립(목적 : 북극권의 지속가능한 개발과 환경보호를 비롯한 공공의 문제에 있어 각국 원주민 공동체의 참여 아래 모든 북극 연안국의 협력, 조율, 상호활동 도모)

** 미국, 캐나다, 노르웨이, 덴마크(그린란드), 아이슬란드, 러시아 등 6개 북극이사회 국가 동토층에 설치한 연구 사이트 및 정밀측정시스템 등 종합 패키지(대기 – 동토(생태/지표/지중)–연안 등의 종합적 연구대상을 특성화하여 북극권 환경변화에 따른 물질이동 중점 연구 수행)

*** 북극권에서의 급속한 기후변화에 따른 대기–생태–동토 영역에서의 반응 인자(북극권 환경변화 감시 → 정보 수집(환경인자)과 처리 → 환경변화 진단과 특성분석 → 변화의 양/음 되먹임(positive/negative feedback) 결과 도출과정에서의 기본적이고 필수적임)

○ (주요 내용) 국내 유일의 북극이사회 중심 **환북극 동토층 지역 기후환경 변화 연구 수행, 북극이사회 국가와의 과학기술활동 협연 및 글로벌 이슈 대응 국제공동연구 수행**

– 환북극 동토층 6개 관측거점 활용, ① **북극권 미래 환경 변화 예측** 및 ② 북극권 환경변화가 **중위도에 초래하는 지역 영향 평가**

※ 그러나 현재 수행 중인 『극지기초원천기술개발사업』은 '24년에 일몰 예정이어서, 기존 사업의 방향, 성과를 검토하여 **승계·보완 및 연계시킬 수 있도록 일몰 연장 또는 선제적 기획을 통해 중장기 로드맵의 지속 수행이 반드시 필요함**

※ 연구수행 중단(일몰 등) 또는 예산 **미확보 시, 북극이사회 국가들과의 국제 공동연구 수행능력 저하** 및 '극지활동진흥법'('21.10월 제정) 및 '2050 북극활동 전략'('21.11 국무회의 보고)에 명시된 북극권 과학연구 활동의 **불연속성 발생 예상**

○ (지속적 수행 필요성) 극지 기후환경의 변화 정밀 진단과 미래 환경변화에 대응하기 위한 지속적인 과학연구 활동 강화 필요(민간 투자가 어려운 국가차원의 고유 영역에서의 글로벌 이슈 대응 국가경쟁력 확보)

※ **과기정통부에서 수행하는 우리나라에서의 유일한 극지 분야 R&D 사업**으로, **'기초원천 분야 R&D 수행'과 글로벌 이슈 대응을 위해, 출연(연) 사업이 아닌 국가연구개발사업으로서 국제사회에서의 우리나라 미션을 고려, 계속 지원 필요**(국정

과제 : 기초원천 분야 연구개발은 과학기술총괄부처에서 통합 수행 필요)

※ **특히 본 과제에서의 북극연구의 경우,** 대부분 북극이사회 국가의 영유권이 행사되고 있는 북극의 동토지역 및 대륙붕의 영역에서의 과학적 연구활동이 수행되고 있으므로, 상대 국가와의 글로벌 이슈 대응 활동(급격한 기후·환경변화에 따라 지구 생태계와 인간 삶에 미치는 영향 파악 등)을 위해서는 **필히 상호 수준에 맞는 국가연구개발사업(정부 R&D 사업)으로 수행되어야 국가이익을 담보할 수 있음**

* 북극은 남극과 달리, 북극이사회 국가의 영유권이 행사되는 영역으로서 출연(연) 단독 사업으로 진입이 불가한 상황임. 현재 본 사업은 북극이사회 국가와의 국가적 차원에서의 연구협약을 체결(통상 5년 단위, 특이사항 없을 경우 자동 갱신 연장 형태임)하고 상대국 영역에서의 측정시스템 설치 운영과 함께 과학연구활동을 수행하고 있음

※ 연구 지원의 중단 또는 일몰 시, 6개 관측거점 기반 육상(동토, 생태)-대기-연안 영역에서의 환경인자 DB 확보의 불연속성 발생 및 옵서버 국가로서의 과학활동 미션 중단

※ **우리나라의 북극이사회 정식옵서버 자격('13.05 획득) 상실 시* 향후 자격 재획득이 어렵고, 이사회 내 발언권 약화** 및 한·중·일 동북아 3개국 간 **북극 진출 경쟁에서의 낙오** 예상

* 운영 중인 거점의 폐쇄는 물론, 그동안 축적된 빅데이터 환경인자 **DB의 유명무실화**와 함께 북극이사회 정식옵서버 국가로서의 **지위 유지 불가** 및 **국제공동연구 차질로 국가 신뢰도 추락과 향후 북극권 동토 진출에 역량 확보 불가 예상**

2 (참고사항) 소요예산/인력 세부 내역

2.1. 소요예산 산출과정

■ 세부주제별 관련분야 참여연구 그룹별 전문가가 세부기술 개요서를 작성하고, 기술개발 내용에 따라 유사과제 규모 분석을 통해 소요예산 규모 산출

- 세부주제별 연구비: 세부기술개발 유형 및 내용에 따른 유사과제 분석을 통해 연구개발비 산정
  - 산정된 세부기술별 소요예산 규모는 전문가 회의를 통해 적정성을 검토하여 조정 가능
  - 또한, 각 세부주제별로 극지 현장조사에 필요한 기장비 구입 및 유지비, 국내외 소요경비 및 위탁연구비, 조사와 분석에 필요한 재료비 등을 감안하여 배정함(단, 각 소요예산에 포함되어있는 인건비와 간접비(총액의 약 35% 규모) 등은 현재 수행하고 있는 기존 사업을 기준하여 반영하였으나, 연도별로 변경 가능성 있음)

2.2 소요예산

2.2.1. 사업의 총 사업비 (456억 원; 국고 456억 원)

- 사업기간 : 2025.01 ~ 2030.12(6년)
- 사업비 규모 : **총 456억 원(195쪽 수정안 참조)**
  - (전략-I)사업은 264.5억 원(세부주제-1은 206억 원, 세부주제-2는 58.5억 원)
  - (전략-II)사업은 124.5억 원(세부주제-1은 90억 원, 세부주제-2는 34.5억 원)
  - (전략-III)사업은 67억 원(세부주제-1은 49억 원, 세부주제-2는 18억 원)을 각각 투입

* 연구개발 전략/세부주제별 투입 예산(안)(단위 : 억원)

전략주제	연구개발 세부주제	예산	합계
(전략-I) 장기 모니터링과 데이터 축적 및 현상 규명	(I-1) 극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악	206	264.5
	(I-2) 북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가	58.5	

전략주제	연구개발 세부주제	예산	합계
(전략-II) 과거 기후·환경 변화 이해와 미래 예측	(II-1) 북극권 동토와 주변 연안지역 과거 기후·환경변화 특성 파악	90	124.5
	(II-2) 북극권 기후·환경변화에 대한 피드백 규명	34.5	
(전략-III) 기후위기 대응과 인간사회 영향 파악	(III-1) 온실기체 바이오 전환기술 개발	49	67
	(III-2) 북극권 지역사회 기후변화 영향 분석	18	
합계		456	

2.2.2. 전략주제별 단계(연차)별 소요예산 세부내역

■ 전략주제 종합 소요 예산

(단위 : 억원)

전략주제	1단계			2단계			합계
	1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차	
(전략-I) 장기 모니터링과 데이터 축적 및 현상 규명	43.5	44.5	44.5	44	44	44	264.5
(전략-II) 과거 기후·환경변화 이해와 미래 예측	20.5	20.5	20.5	21	21	21	124.5
(전략-III) 기후위기 대응과 인간사회 영향 파악	12	11	11	11	11	11	67
합 계	76	76	76	76	76	76	456

■ (전략-I) 장기 모니터링과 데이터 축적 및 현상 규명

- 투자규모 및 장비구축, 인력계획

– 투자규모

(단위 : 억원)

세부주제	1단계			2단계			합계
	1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차	
(I-1) 극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악	34	34	34	34	34	34	204
(I-2) 북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가	9.5	9.5	9.5	10	10	10	58.5
합계(1+2)	43.5	43.5	43.5	44	44	44	262.5

- 연도별 주요장비 및 소요예산 내역(연차별 투자규모에 포함)

(단위 : 억원)

세부주제	주요장비명	1단계			2단계			합계
		1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차	
(I-1) 극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악	구름 응결핵 계수기	1.2				1.2		2.4
	미세먼지 크기 분포 관측기(SMPS)					1.0	1.0	2
	초미세먼지 크기분포 관측기(nano-SMPS)					1.0	1.0	2
	초미세먼지 다단 포집기(nano-MOUDI)		1.0					1
	실시간 미세먼지 이온 분석기				2.0			2
	*실시간 미량가스 질량분석기***		2**	2**				4
	레이저기반 가스 분석기						2.0	2
	열탈착 기반 저농도 가스 분석기						1.0	1
	실시간 질소(탄소)동위원소 분석기					2.0		2
	*고해상도 미세먼지 질량분석기***	2.7**	2.0**	2.0**				6.7
	오비트랩 고분해등 질량분석기				6.0			6
	탄소 분석기						1.0	1
	가스 분석기						1.0	1
	단일 입자 검댕 분석기					3.0		3
	대기 환경인자 관측시스템(기상/플럭스/복사)	3.0	2.0	3.0	2.0	3.0	2.0	15
	동토-토양 환경인자 관측시스템(AIoT)	2.0	2.0	2.0	1.0		1.0	8
	*유성 레이더***	1.0	1.5**	1.5**				4
	소계	**9.9**	**10.5**	**10.5**	**11**	**11.2**	**10**	**63.1**
(I-2) 북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가	GC auto sampler		0.5					0.5
	다기능형광흡광기		0.7					0.7
	Isotopic gas analyzer	1.6						1.6
	소계	**1.6**	**1.2**					**2.8**
합계(1+2)		**11.5**	**11.7**	**10.5**	**11**	**11.2**	**10**	**65.9**

**분할구매

[참고] 연도별 주요장비 및 용도 내역

세부주제	장비명	주요용도
(I-1) 극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악	구름 응결핵 계수기	대기중 구름응결핵으로 성장하는 미세먼지 수농도 연속관측
	미세먼지 크기 분포 관측기 (SMPS)	대기중 지름 10 nm 이상 미세먼지 크기 분포 관측
	초미세먼지 크기분포 관측기 (nano-SMPS)	대기중 지름 2.5 nm 이상 미세먼지 크기 분포 관측
	초미세먼지 다단 포집기 (nano-MOUDI)	미세먼지 화학 특성 분석을 위한 대기중 지름 nm 크기 미세먼지의 크기별 포집
	실시간 미세먼지 이온 분석기	대기 중 미세먼지의 주요 이온성분 실시간 분석
	실시간 미량가스 질량분석기	대기 중 저농도 (ppt 수준) 미량 기체 농도 변화 실시간 분석
	레이저기반 가스 분석기	대기 중 황 또는 질소 성분을 포함하는 가스 성분을 실시간 분석
	열 탈착 기반 저농도 가스 분석기	저온흡착, 고온탈착 방식을 활용한 저농도 기후가스 분석 장치
	실시간 질소(탄소)동위원소 분석기	대기 중 질소(산소) 산화물의 동위원소 비율 분석
	고해상도 미세먼지 질량분석기	대기 중 미세먼지의 화학적 성분 실시간 분석
	오비트랩 고분해능 질량분석기	용액 속 입자의 분자 구조 분석
	탄소 분석기	대기 중 미세먼지 탄소 성분 분석
	가스 분석기	대기 중 오존 및 이산화황 모니터링
	단일 입자 검댕 분석기	대기 중 검댕 입자 실시간 분석
	대기 환경인자 관측시스템(기상/플럭스/복사)	환경인자(기상/플럭스/순복사)를 측정하고 이에 필요한 전원 및 통신 기능이 결합된 시스템
	동토-토양 환경인자 관측시스템(AIoT)	동토 및 토양 환경 인자를 측정하고 이에 필요한 전원 및 통신 기능이 결합된 시스템 및 실내 모사 시험 시스템
	유성 레이더	중간권 및 열권하부 바람, 온도 상시 모니터링 시스템
(I-2) 북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가	기체 크로마토 그래피 오토 샘플러	기체 시료 분석에서 시료 자동 로딩
	다기능형광흡광기	용존유기물 특성 분석
	기체 동위원소 분석기	동토 인큐베이션 실험 시 δ13C 메탄, 이산화탄소 농도 변화 측정용

■ (전략-II) 과거 기후·환경변화 이해와 미래 예측

• 투자규모 및 장비구축, 인력계획

- 투자규모

(단위 : 억원)

세부주제	1단계			2단계			합계
	1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차	
(II-1) 북극권 동토와 주변 연안지역 과거 기후·환경변화 특성 파악	15	15	15	15	15	15	90
(II-2) 북극권 기후·환경변화에 대한 피드백 규명	5.5	5.5	5.5	6	6	6	34.5
합계(1+2)	**20.5**	**20.5**	**20.5**	**21**	**21**	**21**	**124.5**

- 연도별 주요장비 및 소요예산 내역(연차별 투자규모에 포함)

(단위 : 억원)

세부주제	주요장비명	1단계			2단계			합계
		1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차	
(II-1) 북극권 동토와 주변 연안지역 과거 기후환경 변화 특성 파악	MSCL**	3	2					5
	GCxGC	2						2
	*GC-IRMS***			3	2			5
	Surface area		1					1
	Pycnometer		1					1
	Sediment trap & sensor				2	2		4
	AWS & Image recording system		1					1
	HPLC prep.			2				2
	병렬 클러스터 시스템	1	1	1	1	2	2	8
소계		6	6	6	5	4	2	29
(II-2) 북극권 기후·환경변화에 대한 피드백 규명	병렬 클러스터 시스템	1	1	1	1			4
	고용량 스토리지			0.5	0.5	0.5	0.5	2
소계		1	1	1.5	1.5	0.5	0.5	6
합계(1+2)		**7**	**7**	**7.5**	**6.5**	**4.5**	**2.5**	**35**

**분할구매

(참고) 연도별 주요장비 및 용도 내역

세부주제	장비명	주요용도
(II-1) 북극권 동토와 주변 연안지역 과거 기후·환경변화 특성 파악	MSCL	퇴적물 코어 로깅장비
	GCxGC	퇴적물내 바이오마커 분석
	GC-IRMS	퇴적물내 바이오마커 동위원소 분석
	Surface area	퇴적물 분석
	Pycnometer	퇴적물 전밀도 분석
	Sediment trap	융해호 내 장기간 부유퇴적물 포집
	AWS & Image recording system	피오르드 기상변화 관측 및 영상촬영장비
	HPLC prep.	특정 유기물 연대 측정을 위한 전처리 장비
	병렬 클러스터 시스템	모델링 수행 및 자료 분석 처리
(II-2) 북극권 기후·환경변화에 대한 피드백 규명	병렬 클러스터 시스템	지역기후모델 구동, 예측시나리오 개발 및 분석
	고용량 스토리지	환경 빅데이터 및 예측시나리오 저장

■ (전략-III) 기후위기 대응과 인간사회 영향 파악

• 투자규모 및 장비구축, 인력계획

- 투자규모

(단위 : 억원)

세부주제	1단계			2단계			합계
	1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차	
(III-1) 온실기체 바이오 전환기술 개발	9	8	8	8	8	8	49
(III-2) 북극권 지역사회 기후변화 영향 분석	3	3	3	3	3	3	18
합계(1+2)	12	11	11	11	11	11	67

- 연도별 주요장비 및 소요예산 내역(연차별 투자규모에 포함)

(단위 : 억원)

세부주제	주요장비명	1단계			2단계			합계
		1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차	
III-1) 온실기체 바이오 전환기술 개발	FPLC (단백질 분리 정제 기기)	4	-	-	-	-	-	4
(III-2) 북극권 지역사회 기후변화 영향 분석	-	-	-	-	-	-	-	-	-
합계(1+2)		4	-	-	-	-	-	4

(참고) 연도별 주요장비 및 용도 내역

세부주제	장비명	주요용도
III-1) 온실기체 바이오 전환기술 개발	FPLC (단백질 분리 정제 기기)	목적 단백질의 순수 분리를 위한 장비
(III-2) 북극권 지역사회 기후변화 영향 분석	-	-

2.3. 재원조달방안

■ 본 사업은 100%의 국고사업으로 정부(과학기술정보통신부)에서 전액 재원 투입함

2.4. 소요인력 산출근거

2.4.1. 소요인력 산출근거

■ 총 소요인력: 약 415명(연평균 약 70명)

- 책임급(책임연구원/교수/부교수/연구위원 등 박사급) 139명,
- 선임급(선임연구원/조교수 등 박사급) 126명,
- 원급(연구보조원(석사/학사 등)) 150명

* 연구개발 전략주제별 투입인력(안)

전략주제	인력	합계(명)	
(전략-I) 장기 모니터링과 데이터 축적 및 현상 규명	책임급	64	172
	선임급	52	
	원급	56	
(전략-II) 과거 기후·환경변화 이해와 미래 예측	책임급	45	141
	선임급	44	
	원급	52	
(전략-III) 기후위기 대응과 인간사회 영향 파악	책임급	30	102
	선임급	30	
	원급	42	
합계		415	

2.4.2. 전략주제별 세부주제별 소요인력 세부 산출근거

(전략-I) 장기 모니터링과 데이터 축적 및 현상 규명

- 연도별 인력계획

세부주제	구분	1단계			2단계			합계 (명)
		1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차	
(I-1) 극지 대기-동토의 물리적 변화 감지와 특성 파악	책임급	5	5	6	6	7	8	37
	선임급	3	3	4	4	5	6	25
	원급	3	3	3	4	5	5	23
	소계	11	11	13	14	17	19	85

(I-2) 북극 동토층 붕괴에 따른 토양 생태계 영향 평가	책임급	4	4	4	5	5	5	27
	선임급	4	4	4	5	5	5	27
	원급	5	5	5	6	6	6	33
	소계	13	13	13	16	16	16	87
합계(1+2)		24	24	26	30	33	35	172

※ 투자 규모 및 연구 내용에 따라 변경가능성 있고, 직급 등은 상황에 따라 달라질 수 있음

- **(전략-II) 과거 기후·환경변화 이해와 미래 예측**

  - 연도별 인력계획

세부주제	구분	1단계			2단계			합계 (명)
		1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차	
(II-1) 북극권 동토와 주변 연안지역 과거 기후·환경변화 특성 파악	책임급	3	3	3	4	4	4	21
	선임급	4	4	4	5	5	5	27
	원급	5	5	5	6	6	6	33
	소계	12	12	12	15	15	15	81
(II-2) 북극권 기후·환경변화에 대한 피드백 규명	책임급	4	4	4	4	4	4	24
	선임급	2	3	3	3	3	3	17
	원급	4	3	3	3	3	3	19
	소계	10	10	10	10	10	10	60
합계(1+2)		22	22	22	25	25	25	141

※ 투자 규모 및 연구 내용에 따라 변경가능성 있고, 직급 등은 상황에 따라 달라질 수 있음

- **(전략-III) 기후위기 대응과 인간사회 영향 파악**

  - 연도별 인력계획

세부주제	구분	1단계			2단계			합계 (명)
		1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차	
(III-1) 온실기체 바이오 전환기술 개발	책임급	4	4	4	4	4	4	24
	선임급	3	3	3	3	3	3	18
	원급	5	5	5	5	5	5	30
	소계	12	12	12	12	12	12	72
(III-2) 북극권 지역사회 기후변화 영향 분석	책임급	1	1	1	1	1	1	6
	선임급	2	2	2	2	2	2	12
	원급	2	2	2	2	2	2	12
	소계	5	5	5	5	5	5	30
합계(1+2)		17	17	17	17	17	17	102

※ 투자 규모 및 연구 내용에 따라 변경가능성 있고, 직급 등은 상황에 따라 달라질 수 있음

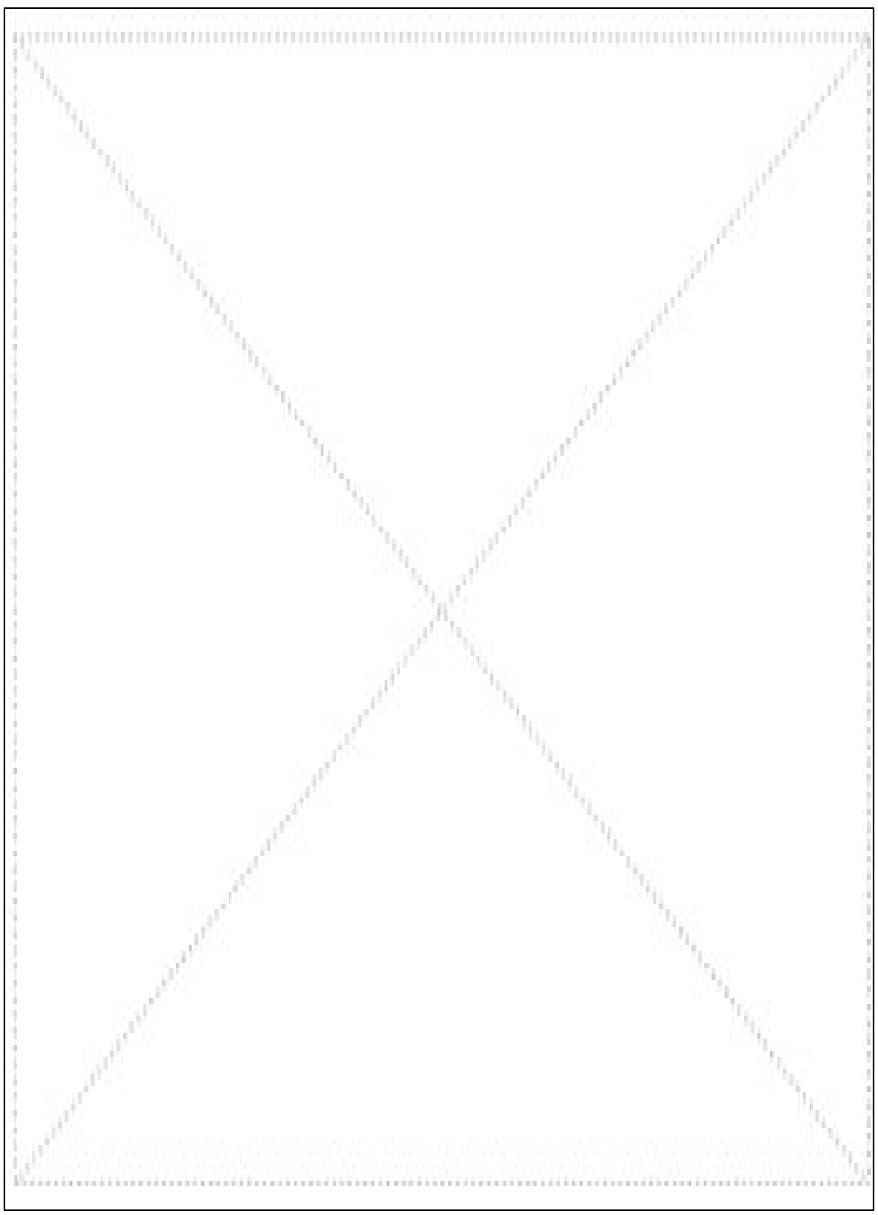
첨부-1 참여자 소통회의 내역

1. 참여연구자 워크샵 개최(RFP 및 기획연구 계획서에 근거함)

가. 1차 워크샵

- 일시 및 장소 : 2022.06.23., 문경 서울대병원 인재원
- 참여자 : 주관기관(건국대학교) 책임자 및 핵심 참여연구원 등
- 내용 : 착수회의 겸, 기획연구 과제에 대한 전체적인 내용 안내 및 추진 계획(수요조사 및 전문가 자문의견 수렴 방안 등) 등 논의

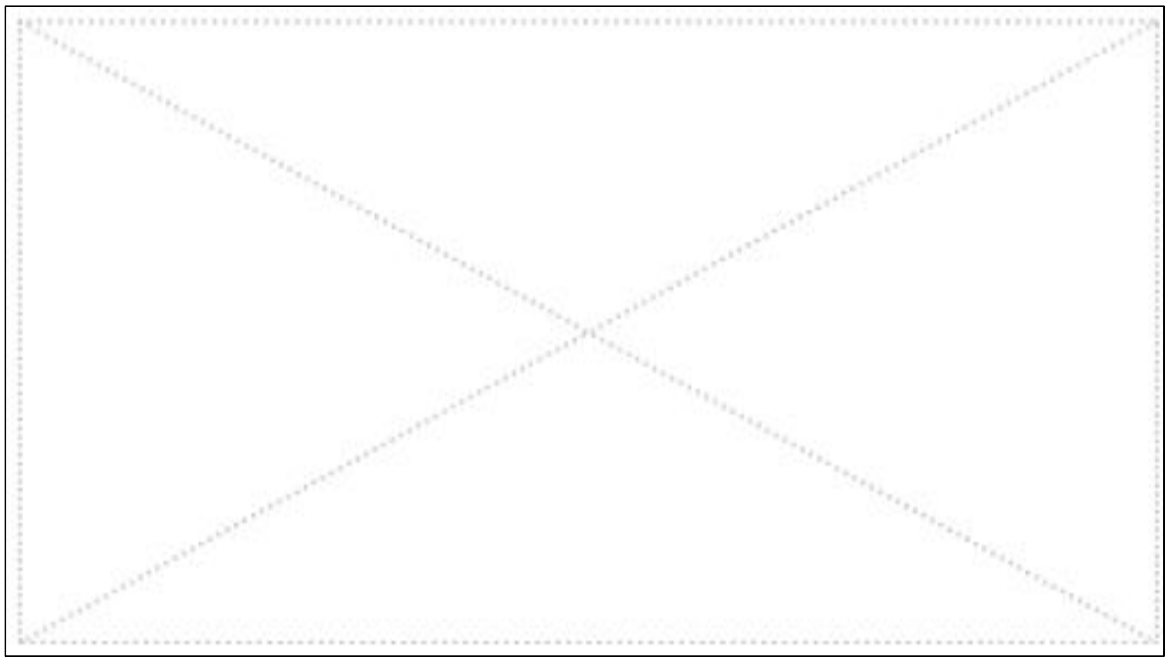
※ 수요조사 시행



[착수회의 겸 1차 워크샵 표지]

나. 2차 워크샵

- 일시 및 장소 : 2022.12.02., 극지연구소
- 참여자 : 주관기관(건국대학교)/주최(극지연구소) 책임자 및 핵심 참여연구원, 외부 전문가(강릉원주대학교, 차세대융합기술연구원, 한양대학교, 한국건설기술연구원), 기획과제 연구수요조사기관(날리지웍스) 등
- 내용 :
  - 기획연구 중간보고서의 수정보완본(외부 자문위원 의견 ; 검토의견서 증빙-1 참조) 반영 등을 대상으로 전체적인 내용 검토 및 의견 수렴
  - 각 전략주제별, 세부주제별 수정보완 내용 및 진척 사항 발표, 논의
  - 외부 전문가의 본 보고서 및 내용에 대한 검토의견과 제안사항 등 발표
  - 기타 향후 진행할 최종보고서(안) 작성 및 관련 사항 등에 대해 종합 논의



[2차 워크샵 표지]

2. 중간보고서(안) 제출 및 보고회 개최 건 등 핵심자 간담회

- 일시 및 장소 : 2022.09.30., 건국대학교 과학관
- 참여자 : 주관기관(건국대학교) 책임자 및 핵심 참여연구원, 기획과제 연구 수요조사기관(날리지웍스) 등
- 내용 :
  - 수행 내용 및 추진 일정 점검
  - RFP 내용에 근거한 목차구성 및 내용 표기 등 토의
  - 중간보고서에 대한 자문위원 활동 동의 확인 및 자문 의견 요청 공문 발송 등
  - 외부 수요조사 관련한 대상 선정 및 실무진 구성 등 논의

※ 과기정통부(한국연구재단)의 승인으로, 별도의 중간보고회없이 기획연구 계획서에 의거하여, 자문위원 구성 및 자문 의견서 수렴('22.10.17~10.24)하여 중간보고서에 반영토록 함(이에, 중간보고회로 대체)

※ [서식] 연구기획과제 중간보고서 검토의견서(양식)

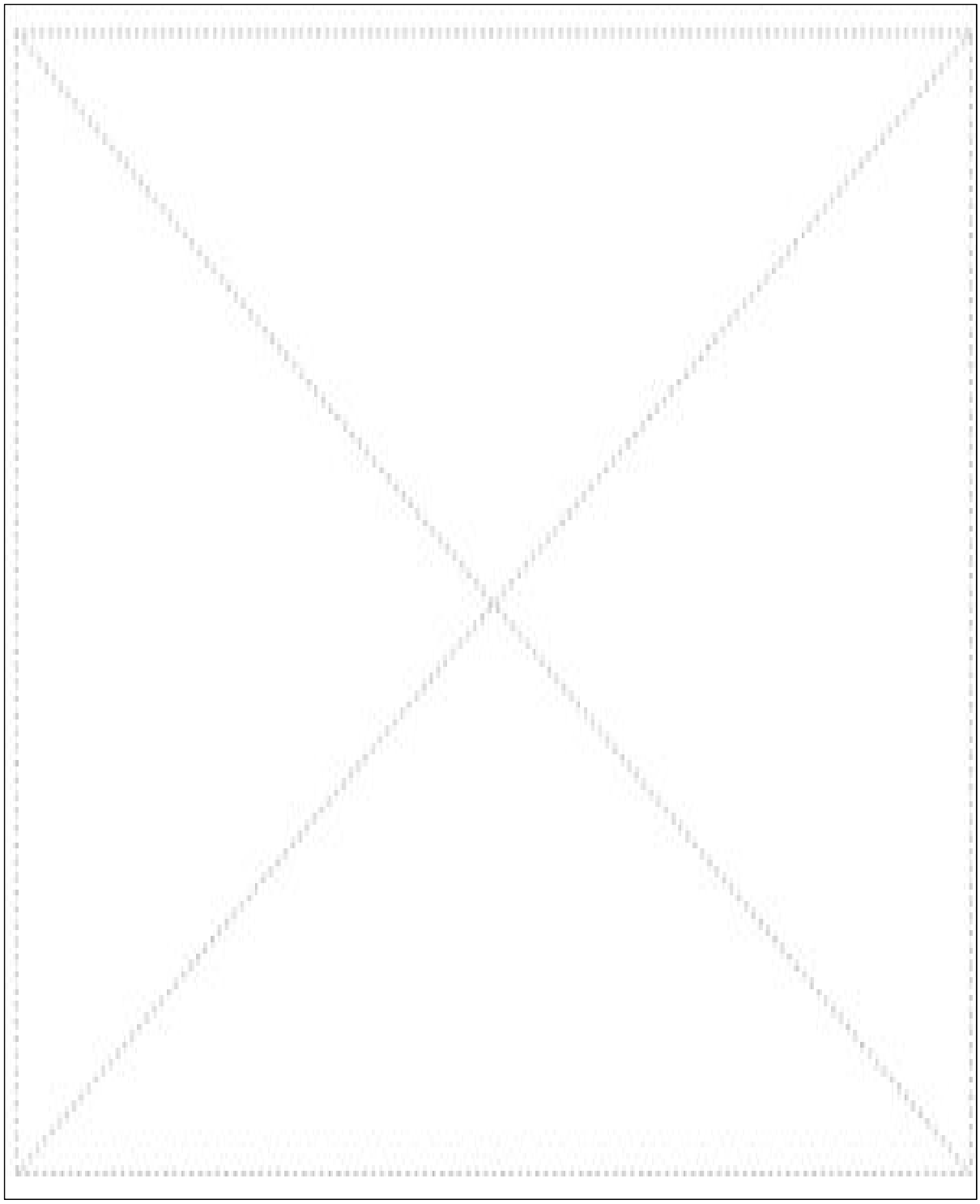
연구기획과제 중간보고서 검토의견서

기획과제명	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발' 기획 연구			
연구책임자	**소속**	건국대학교		
	성명	이승호		
연 구 기 간	2022.06.13. ~ 2023.02.12.(8개월)		**연구용역비**	60,000천원
검 토 결 과				
종합 검토의견	**필요시 별지사용**			
**** 기타의견(과제수행에 도움이 될 내용 등을 기술, 필요시 별지사용) ****				

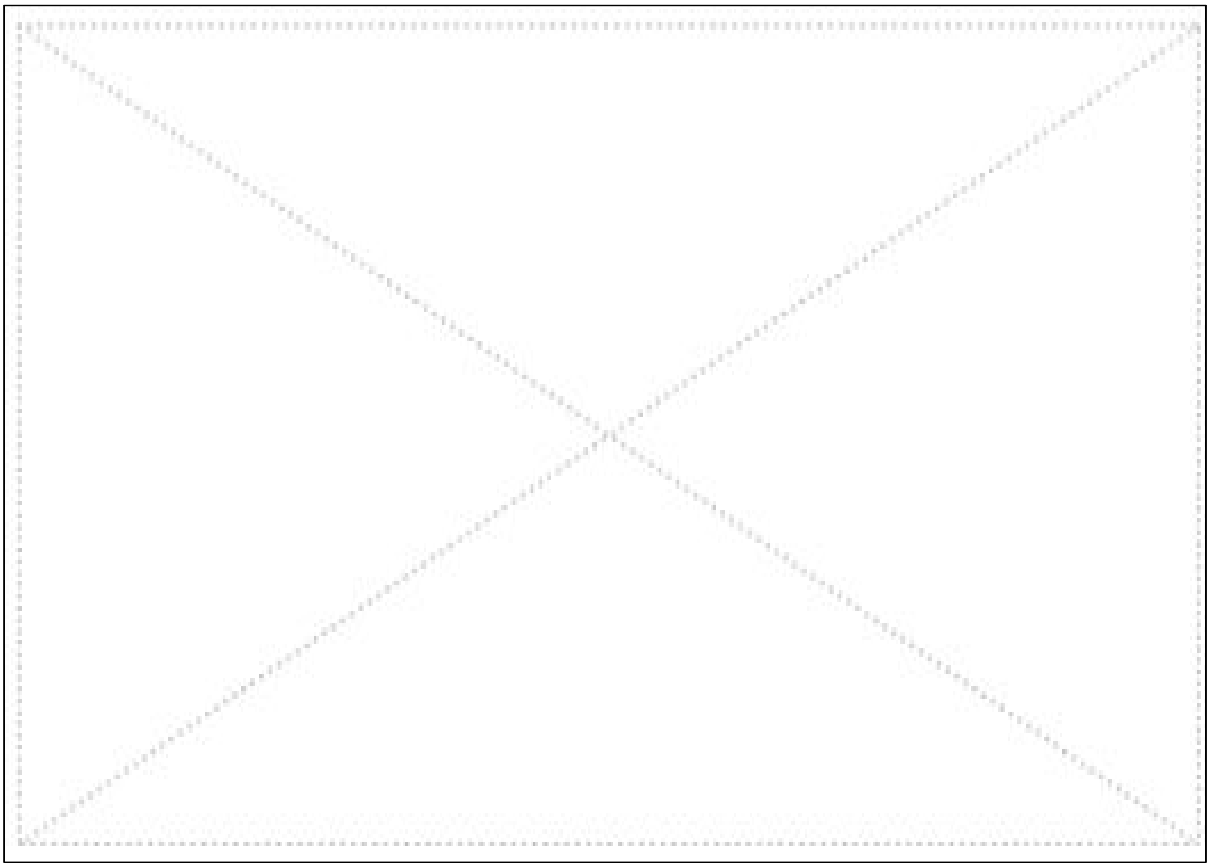
3. 최종보고서(초안) 검토 등 핵심자 간담회

- 일시 및 장소 : 2023.01.18., 극지연구소 세미나실
- 참여자 : 주관기관(건국대학교) 책임자 및 핵심 참여연구원, 기획과제 연구 수요조사기관(날리지웍스) 등
- 내용 :
  - 중간보고서(수요조사 및 검토의견서 등 반영, 제반 내용 수정보완 등) 검토
  - RFP에 근거한 충분한 내용 반영 여부 검토
  - 향후 업무 진행 및 최종보고회(2월 또는 3월 예상) 대응 방안 등 논의

※ 과기정통부(한국연구재단)의 일정에 따라 기획연구 과제 수행 기간 연장(당초 '23.02.12에서 '23.03.31까지로 연장)



[착수회의 겸 1차 워크샵에서 결정된 수요조사 시행에 대한 요청 공문]



[수요조사 시행에 대한 수요조사서 양식]

4. 최종보고서(초안) 제출 관련 등 핵심자 간담회

- 일시 및 장소 : 2023.01.25., 건국대학교
- 참여자 : 주관기관(건국대학교) 책임자 및 핵심 참여연구원
- 내용 :
  - 최종보고서(초안) 제출 전, 마지막 검토회의(내용 등 전체 점검)

5. 최종보고회 시행

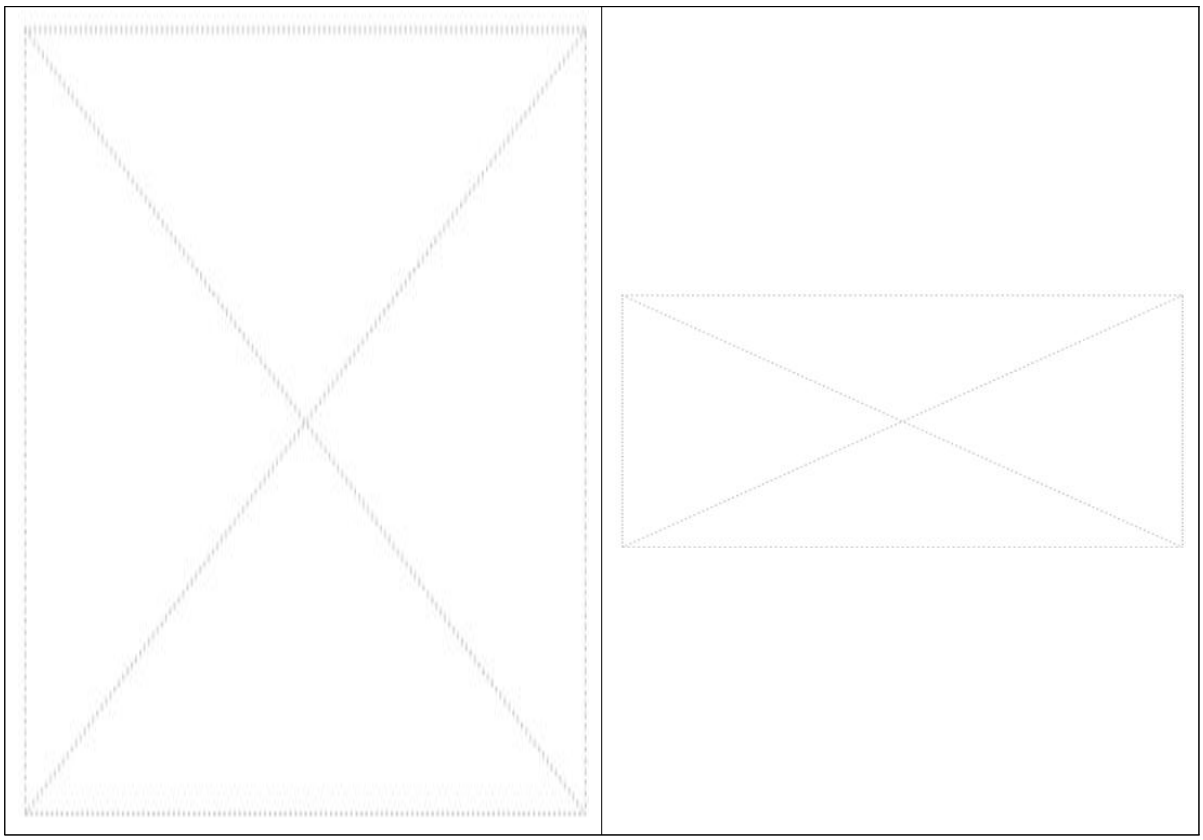
- 일시 및 장소 : 2023.03.17., 극지연구소
- 참여자 : 정부담당자(과기정통부/한국연구재단), 주관기관(건국대학교) 책임자 및 핵심 참여연구원, 과제 자문위원, 오픈이노베이션 과제 책임자 등
- 내용 :
  - 최종보고서(초안)에 대한 전체 내용 발표, 자문위원 의견 수렴 및 정부담당자의 보고서에 대한 검토의견 제안
  - 최종보고서(초안)에 대한 자문위원 의견 접수('23.03.15~03.21)

6. 최종보고서(초안) 평가 시행

- 일시 및 장소 : 2023.03.17.~04.12, 과기정통부/한국연구재단 시행
- 참여자 : 정부담당자(과기정통부/한국연구재단) 시행 최종보고서(초안) 평가위원
- 내용 :
  - 최종보고서(초안)에 대한 전체 내용 평가(평가결과 평균 70점 이상으로 발간 승인 받음)(관련 : 한국연구재단 공공기술단-10562('23.04.12))
  - 수정·보완된 최종보고서 제출 및 접수 안내(~'23.05.31까지)

※ 평가의견에 대한 수정·보완 작업 및 최종 마무리 검토회의('23.05.09, 극지연구소; 주관기관 책임자 및 핵심참여자 의견수렴), 최종보고서 제출(05.19)

  - 연구비 사용실적보고서 제출 및 접수 안내(~'23.06.31)



첨부-2

중간보고서 검토의견에 대한 수정·보완 대비표

구분	자문의견 (수정 및 보완사항)	수정 및 보완 내용	해당 페이지	비고
우수한 점	이번 “빅데이터를 이용한 미래 기후변화 대응관한 기획과제” 는 매우 필요한 연구로 짜임새 있는 과제구성이라고 생각되어짐. 선행연구를 통해 축척된 데이터를 바탕으로 더욱 심도 있게 범위를 넓힌 연구이며 좀 더 구체적 실행방안 등을 제시하며 차별성을 두었고 미래에 극지에 대한 꼭 필요한 연구 내용을 담고 있어 중요성이 강조됨	해당사항 없음		
	전체적으로 제안요청서(RFP)에 맞춰 연구내용이 항목별로 빠짐없이 잘 기술되어 있음. 중간보고서임을 감안할 때 선행사업 성과분석, 연구아이템 수요조사에서 장비내역이나 예산 등 상세하고 구체적으로 조사/분석이 잘 이루어져 있어 향후 최종보고서 작성이나 실제 연구과제 추진 시 풍부한 백업 자료로 활용 가능할 것으로 판단됨	해당사항 없음		
	기획과제 RFP에서 요구한 내용을 충실히 수행하고 있는 것으로 사료됨. 향후 극지 관련 연구 주제로 타당하다고 판단되는 과제를 도출한 것으로 판단함. 중간보고서라 아직 내용이 일관성 있게 잘 구성되지는 않았으나, 최종보고서는 짜임새 있고, 일관성 있게 기술될 것으로 기대함	해당사항 없음		
미흡한 점	기획과제 RFP에 제시한 수요조사를 수행하고 이를 반영하여 과제를 도출한 것으로 기술되어 있으나, 제시한 세부과제에 수요조사의 결과가 어떻게 반영되었는지는 명확하지 않음. 따라서, 제시한 세부과제 별로 수요조사 결과와의 연관성을 기술할 필요가 있음	취합된 연구수요 내용 중 전략-I 주제와 중복되거나 관련성이 있는 연구주제들을 선별하여 제5장의 전략사업별 연구내용에 포함시킴. 해당 수요조사 과제는 (12.‘극지 수계-대기 중 유기물 분자 단위 특성 분석’, 14. ‘딥러닝 기법을 이용한 극지 대기 내 초미세입자 발생 예측 시스템 개발’, 15. ‘대기화학모델링을 이용한 북극권 및 한반도 미세먼지 상호 영향성 연구’, 17.‘ 블랙카본 단일입자 기반 정밀관측자료 산출’, 19.‘시베리아 산불기원 물질 대기수송이 북극해 탄소고정과 해빙 융해 가속화에 미치는 영향 연구’등임	p. 157~171	
		(II-1) 『주제 제안 사유』에 ‘수요조사 결과를 반영하였음’을 명시함(동토 붕괴 요인 연구 등)	p. 119, 123	

		(II-2) 수요조사의 “북극권 및 중위권 대기 모델링” 분야의 수요조사를 반영하여 북극권과 한반도를 포함한 지역기후모델링을 통한 시나리오 개발 반영	p. 120~123, 131, 139, 142, 143, 148, 153, 176, 177~178, 180~183	
		(III-1) 수요조사의 “극지기반 응용/활용 기술” 등 3개 분야와 관련된 제안주제를 반영하여 메탄 이용 바이오 기술개발 연구를 반영	p. 128, 143, 188~190, 192~193,	
	제시한 세부과제 별로 예산, 필요 연구원 수 등을 제시했는데, 연구원 수를 출연연구소 직급체계(책임, 선임 등)에 맞춰 기술하였기 때문에 모든 세부과제를 극지연구소가 수행하는 것으로 간주하기 쉬움. 세부과제별로 수행하는 것이 타당한 것으로 판단되는 연구기관을 대략적으로 명시하는 것이 바람직해보임	본 기획연구는 전체적인 연구 수행 내용을 기반으로 작성되는 것이므로, 특정한 연구기관을 명시하지 않았음 이 부분은 향후 본 기획연구를 근거로 실질적인 proposal 작성 단계에서 언급되는 것이 옳을 듯함	코멘트	
		책임급/선임급/원급 용어는 그대로 사용하되, 해당 직급별 대학 등 기관에서의 등급을 포함하여 제시함	p. 206	
	현재 지구표면 전체에서 일어나는 지구온난화 현상의 영향과 극지환경과의 관계를 구체적으로 언급하지 못하고 있음. 최근의 연구에 의하면 극지환경의 변화로 인해 전 지구 해류순환은 물론이고 우리나라가 영향을 받는 동아시아 몬순기후의 영향까지 서로 연계되어 밀접한 영향을 받는 것으로 알려져 있음. 따라서 극지연구가 실제로 한반도 주변에 일어날 기후변화와 많은 관계가 있다는 것을 부각할 필요가 있음	극지연구의 중요성에 관한 부연 설명 요구로 이해되어 해당문구 반영함	p. 7~8 코멘트 (본 기획연구에서는 해양영역을 제외한 극지역 비해양 영역에서만 주제발굴 필수)	
		(II-2)기후변화(기후피드백) 관련 얼음-알베도피드백, 복사피드백, 역학피드백 등의 기여도 분석 및 한반도 특이기상 영향을 분석하고 기후예측의 개선점 도출 반영 추가	p. 178, 180, 183	
	다양한 자료를 통합하는 프레임에 대한 고민이 더 추가되었으면 함. 많은 관측을 수행하고 자료를 확보하고 분석을 하겠지만 이러한 자료를 통합하고 좀 더 의미있는 결론을 도출할 수 있는 프레임에 대한 고민이 추가되었으면 함. 현재 상태로는 각기 관측이 독립적으로만 운영되고 자료의 공유 등은 데이터 포털 등을 활용한다고 되어 있음	총괄적 방향과 비전 및 목표 구체화 측면에서 보완함. 전체주제의 개념도에서 각 전략에서 생산되는 빅데이터를 포함하는 결과물들이 각 전략과제에 어떻게 사용되고 기여하는지 개념적으로 설명함	p. 117~118, 124, 127, 128~131, 143	
		각 세부주제 간의 유기적인 관련성을 보완하여 제시하였음	p. 142~143, 177	
	북극 기후 변화 관측시스템으로 능동형, 지능형, AIoT 시스템의 다양한 용어를 보고서에서 사용하고 있으나 사용하는 용어에	최적의 시스템 개발, 구축, 운영을 위해 AIoT 시스템으로 용어를 정의하고 보고서에 반영함	p. 115, 139, 142 157~159, 161~164,	

	따라 구조 및 설계가 상이해질 수 있음. 따라서, 세부 연구과제의 목표 및 내용 수행에 필요한 시스템 요구사항을 보다 정확히 정의, 도출하고 이에 부합하는 최적의 시스템을 개발, 구축, 운영하는 것이 연구기간, 예산 측면에서 효과적임		169~171	
	AIoT의 도입에 대한 정책적·사회적·기술적 측면에서의 필요성에 대해 포괄적으로 설명되어 있으나 기후변화 대응 기술개발에서 요구되는 지능의 정의, 인공지능의 생성 방법에 대한 구체적인 내용이 결여되어 보임	기후변화 대응 및 기술개발에서 요구되는 지능의 정의, 인공지능의 생성 방법에 대한 내용을 추가함	p. 153, 161	
조정/권고 사항	이 보고서는 극지의 연구가 필요한 배경과 연구의 기대효과에 대해서 상당히 잘 기술되어 있으나, 대부분의 내용은 현재의 기상 및 기후변화에 대한 인지와 모니터링에 많은 부분을 할애하고 있음. 현재의 환경변화에 대한 모니터링은 현재 지구환경변화를 이해하는데 효과적이나 앞으로의 기후변화를 예측하는데 한계가 있을 것임	본 보고서는 환북극 관측거점을 활용하여 과거와 현재 진행되고 있는 북극 동토지역의 환경변화를 정밀하게 모니터링-복원하고 동토-대기 상호작용 프로세스를 이해하여 기후모델에 반영함으로서 미래기후변화에 대한 보다 정확한 시나리오를 제공하는데 주목적이 있음. 특히 본 기획연구에서 제시하는 미래 예측 분야는, 전지구 스케일의 장기기후변화 예측이라는 개념이 아니라, 북극권 기후변화가 중위도에 미치는 피드백 구명으로 기후예측의 정확도 향상에 목적이 있는 scope로 제시함	코멘트	
		(II-1) 본 기획과제에서는 현재의 기상 및 기후변화 모니터링 뿐만 아니라(전략 -I), 과거 극지환경 정밀 복원 및 미래 예측(전략-II), 그리고 미래 활용성 제고 등(전략-III)가 계획되어 있음. 과거 기후환경 복원 자료는 미래 기후 예측에 사용되는 기후모델 검증에 사용할 수 있음	코멘트 및 p. 142~143, 169~194	
		(II-2) 북극권 및 중위도 기후변화 시나리오 개발 및 분석을 위하여 지역기후모델을 구축하고 기후변화(기후피드백)관련 기후피드백 분석 및 기후예측의 개선점 도출	p. 180	
	연구기획의 필요성과 극지 연구의 중요성은 깊이 이해되나, 기획과제의 제목이 “극지 빅데이터 연계 미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발 기획인 바 “모니터링 및 빅데이터 DB구축” 과 “극지기초원천 기술개발” 부분의 약간의 balancing이 필요해 보임 139 페이지를 보면 DB 구축 과제인가에 대한 질문이 나올 만함	“극지기초원천기술개발” 이라는 주제 또는 용어에 대해서, 현재 국과위 전문위나 과기부, 연구재단에서도 어떻게 수정할까를 고민 중에 있으므로, 향후 변경 가능성있으므로, 당장은 굳이 변경할 필요는 없을 듯함. 다만, 내용의 전략주제간의 균형 부분에서는, 급변하는 극지역에서의 기후·환경변화에 대한 관측/분석, 평가, 예측 및 활용이라는 기본적 컨셉은 유지하고 있다고 사료됨	코멘트	

		당초 중간보고서의 139 페이지의 개념도는, 전략주제-I에서 지향하는 (1) 장기 모니터링과 (2) 데이터 축적 방안 확보라는 목적 달성을 위한 기획 제안이었음. 이에 수정 최종보고서(안)에서는 총괄적으로 지향하는 전체를 다시 제시함	p. 141~146	
	”극지기초원천기술 개발“에서 극지기초원천기술이라는 부분이 빅데이터 DB인 건지, 혹은 극지를 위한 신규 방법론을 제시하는 건지 아니면 극지기초원천 기술 발굴을 위한 DB구축인지에 대한 고민이 필요해 보임 ”위와 같은 연구들이 국내 연구, 혹은 사회, 산업 등에 미치는 가시적인 영향과 이점은 무엇인가?“ 에 대한 부분이 있어 그 부분도 고민이 필요해 보임	상동		
	극지 인근 지역에 기록되어 있는 퇴적물과 빙하의 기록을 복원하여 지난 수백 만 년간 일어난 과거의 전 지구적 기후변화의 변화를 복원하고, 이를 활용하여 현재 지구온난화에 의해 일어나고 있는 돌발적인 기후변화의 미래를 예측하는 연구가 필요하다는 것을 강조할 필요가 있음. 이러한 분야에 대한 연구가 이 보고서에 일부 포함이 되어 있으나, 그 비중이 너무 낮음. 이러한 연구 분야에 대한 중요성과 그 비중을 높일 필요가 있음	(II-1, 2) 지구온난화에 따른 미래 예측에 있어 과거 기후환경 복원 연구의 중요성에 대해 추가적으로 명시함	p. 172~179, 182~185	
	기획보고서에서 제공하는 전체 그림은 굉장히 넓은 범위이고 의욕적임 하지만 실제 관측의 가능성 등에 대한 고려는 부족해 보입니다. 가령 알라스카의 경우 배로우(Barrow) (Dept. of Energy) ARM 에서 미국 에너지부 집중 관측소를 몇 년째 운영해오고 있음. 만일 가능하다면 여기와 중첩되지 않는 관측이 좋을텐데 그러한 내용이 포함되어 있지는 않습니다. 그리고 러시아의 경우는 허가, 캐나다의 경우 역시 연방정부외에도 각 부족들과도 협의가 되어야 함	러시아와의 공동연구 및 연구허가 관련하여 ‘러시아 북극남극연구소, 지방정부와의 지속적인 의사소통으로 중앙정부로부터의 연구허가에 관한 공동 노력’ 문구를 추가함	p. 169	
		알래스카의 경우, 배로우 지역이 아닌 카운실(Council) 지점이 주 관측대상이라, 중첩성 없다고 사료되며, 카운실 거점에서는 2011년부터 UAF/IARC와의 연구협력 체결을 통한 공동연구를 수행 중임 캐나다의 경우, 누나부트주에서 연구를 하기 위해서는 NRI (Nunavut Research Institute)로부터 연구허가를 받아야 하며, 이미 매년 관련 기관과의 협력을 통해 공동연구 기반이 조성되어 있음.	코멘트	
	전지구적인 변화와 극지의 관계에 대한 연결 가령 탄소순환만을 고려했을 때 극지가 차지하는 비중은 그리 높지 않을 수도 있음. 하지만 다양한 되먹임 작용을 통해서만 전지구적으로 중요한 인자로 작용하기 때문	북극은 다양한 피드백 과정을 통해 전지구 평균보다 2~4배나 빠른 온난화를 보이고 있음 그로인한 중요한 미래 기후변화 이슈는 인간활동에 의한 이산화탄소 배출 감소와 함께 동토에	코멘트 p. 34, 109, 118~120, 122~128,	

	에 이를 고려하지 않으면 앞서 언급한대로 부분적인 관측자료의 수집을 넘어서지 못하지 않을까 걱정됩니다. 전지구적인 변화에 대한 연결 부분을 추가할 것을 부탁함	포함된 유기물 분해에 따른 이산화탄소, 메탄 등의 온실기체 방출로 인한 양의 기후피드백의 크기이기 때문에 북극 동토 탄소 순환 연구는 매우 중요함 현장 관측 연구는 탄소 순환뿐만 아니라 에너지 수지 변동 등 지표에서의 피드백에 대한 연구도 아울러 수행될 예정이며, 이 결과들은 위성 및 모델링 연구에서 활용될 예정임 한편, 우리나라와 북서태평양 영역을 대상으로 '해양-대기-탄수순환시스템' 연구가 수행되고 있으므로, 본 기획에서는 이것과의 중복성을 피하기 위하여 극지역만을 대상으로 하였고, 향후 해당 연구와의 자료 공유 등의 협력을 고려하고 있음	131, 140~143	
	IoT 플랫홈 개발은 표준 혹은 사실상(de facto) 표준에 근거하여 개발되어야 운영, 유지, 보수에 유리하며 이 분야 개발경험이 있는 전문업체만이 신뢰성을 보장할 수 있음 – 예산에는 주로 고정밀 측정장비 위주로 편성되어 보이므로 관련 하드웨어 및 소프트웨어 개발용역비가 예산에 반영될 필요가 있음	통신 장치, 센서 인터페이스 장치, 게이트웨이, 전원 장치 등 하드웨어 장치, 임베디드 소프트웨어 개발, 유무선 센서네트워크 구축, IoT 서버구축, 빅데이터처리, CNN, RNN, LSTM 등 기계학습 알고리즘 등 AIoT 플랫폼 개발은 시행착오를 최소화하기 위해 경험이 풍부한 외부 전문업체를 활용하여 용역을 통해 개발. 실증 및 시스템의 구조 설계, 장치의 개선점, 문제점 파악과 수집 데이터 분석은 자체적으로 추진하며 용역비 예산은 고려할 예정임	p. 161, 164, 167, 169~171	
	극지에 대한 이해를 위해 여러 관측장비가 도입된 점에 대해 훌륭한 비전이라고 생각하나(p148), 가능하다면, 메탄과 이산화탄소의 농도, 그 항목의 동위원소 분석(14C 필요), 플럭스 분석 등이 함께 이루어진다면 향후 모델링 등 활용 및 유저가 넓어질 것으로 판단됨	정확한 대기 중 이산화탄소와 메탄 농도 관측은 잘 갖추어진 인프라 기반의 GAW 프로그램을 통해 이미 잘 모니터링되고 있어 대기 중 배경 농도는 GAW 자료를 활용하면 될 것으로 보임. 식생 규모의 동위 원소 분석은 일부 거점에서 전략I(I-2)에서 수행될 예정이며, 생태계 규모의 플럭스 자료와 함께 식생 및 토양에 의한 탄소 순환 해석에 활용될 예정임	코멘트	
	기획연구인 만큼 향후 추진할 연구개발 내용이나 미래 기후변화 대응 등을 위한 극지 빅데이터 연구에 대한 포괄적 개념 수준의 방향 제시가 중요함. 이에 따라, 현재 전략 주제별로 너무 상세히 기술되어 있는 등 세부 연구내용이나 장비내역, 예산과 같이 매우 상세한 내용은 부록 수준으로 처리하고, 극지 빅데이터 구축 및 활용 등 향후 극지 연구에 대한 추진방향, 연구개념 등 보다 큰 틀에서 먼저 포괄적 개념 정리가 보완될 필요가 있음	의견 반영하여 장비와 예산 등 내용은 부록 부분으로 조치하였음 빅데이터 연계 항목에 대해서는 모델링 항목 또는 별도의 항목으로 예시하였음	p. 203~205 p. 139, 168~169, 176~181	

	특히, 요약문에는 일반인(예:국민)도 쉽게 어떤 내용인지 감을 잡을 수 있도록 많은 사람이 공감할 수 있는 필요성과 효과 및 연구 개념 위주로 개념도나 도표 등으로 정리하여 제시하면 효과적일 것으로 판단됨	문구 및 개념 그림 등을 보완하였음	p. iii~iv	
	국내에서도 극지연구가 필요하다는 필요성과 극지연구의 성과가 어떻게 활용되고 어떤 효과가 있는지 즉, 연구 기획의 맨 앞단과 맨 뒷단에 대한 고민이 특히 많이 필요하며 그 근거를 매우 직관적이고 논리적*으로 제시할 필요가 있음 *(예시 1) 지난 30년간 극지환경 변화와 기후변화의 상관성, (예시 2) 극지 연구/수집 데이터 등의 지속적 중복, 데이터 연계 분석을 통한 시너지 효과 제시 필요	전략주제-II-2의 예측 주제에서 이 부분을 다루어질 수 있도록 제시함	p. 142, 176~181	
	필요성이나 효과 제시에 있어 수많은 작은 이유들 보다는 임팩트 있는 몇 가지 이유에 집중해서 제시하는 게 효과적일 수 있으며, 이 부분에 대해 기획연구에서 특히 많은 고민이 필요할 것으로 판단됨 (예시)'극지는 기후변화 연구의 최적지' → 공감만 된다면 매우 좋은 문구임. '기후변화'는 국민 대부분 알고 있는 일반론임. 그러나 극지가 기후변화 연구의 최적지라는 것은 일반론이 아님으로 일반인이 공감할 수 있도록 직관적 근거를 제시할 필요가 있으며, 이때 그림이나 소제목 등에 두드러지게 표현할 필요있음	해당내용 수정보완함. 일반인들도 쉽게 이해할 수 있도록 다각적으로 제시함(극지에서의 기후·환경변화가 어느 수준으로 일어나고 있고, 어떠한 영향을 미치고 있거나 향후 어떻게 미칠 수 있는가에 대한 연구의 필요성 등 언급함. 그리고 극지연구에 대한 국내외 정책과 거버넌스의 중요성을 강조함)	p. 7~14	
	극지기초원천기술개발사업 성과분석의 경우 지금까지 단순 성과분석 측면에서 조사/분석하였다면, 향후 극지연구 아이템 도출이나 지속할 필요가 있는 극지활동내용 도출, 극지 빅데이터 연구에 있어 구축/활용 측면에서 연계 가능한 데이터 도출 등의 관점에서 보다 구체적으로 분석 내용을 보완 정리하면 더욱 효과적일 것으로 판단됨	빅데이터 분석에 대한 내용을 전략주제-II(II-2)의 모델링 파트에서 이부분을 다룰 수 있기를 기획함	p. 135, 168~169, 172~176	
	과학적 연구를 중점 목표로 정하고 연구 논문으로 마무리되는 협의의 연구보다는 가급적 연구 결과가 산업적으로 활용될 수 있는 내용을 가능한 많이 도출하는 것이 바람직함	(III-1) 바이오기술 연구를 통한 온실기체 전환 및 저감기술 개발성과를 지식재산권 형태로 보호하고, 생명과학 산업에서 활용할 수 있는 다양한 북극 생명자원을 기후변화 대응 기술로 활용	p. 120, 123, 127, 128, 140, 189~190, 192~193	
	본 사업에서 사용하는 지상 기반 센서로부터 수집된 대기 데이터, 패턴 추출 혹은 예측에 여러 위성 정보가 어떻게 활용될 수 있는지? 위성 레이더에 의한 다양한 정보(대기, 해양, 빙권, 해수면 등)에 의한 기후 움직임을 모니터링 한 결과와 서로 비교할 수 있는지에 대한 내용이 있으면 추가하는 것이 어떤지?	(II-2)위성자료는 광역 환경데이터를 제공하며 지상자료는 국지적으로 가장 정확한 환경데이터를 제공함. 전략주제-II 계획에서는 다지점 지상관측과 위성자료를 결합해 장기 광역 정보를 산출하여 북극권 탄소순환 장기 변동성을 분석하는 계획이 포함되어 있음	p. 178, 180~181, 183	

		(II-2) 기후피드백 분석을 위해서는 최근까지 수집된 지상 및 위성 관측자료의 수집과 분석이 필요하며 이들 자료는 기후모델 평가 및 비교자료로 활용 가능하도록 보완함		
	신경망 혹은 딥 러닝 기반의 예측 알고리즘을 개발하기 위해서는 장기간의 데이터 축적이 필요하며 이러한 기법을 활용할 경우 어떠한 데이터를 사용해서 어떠한 환경인자의 변화를 예측할 것인가에 대한 구체적 연구내용의 기술이 필요해 보임	(II-2) 위성과 지상관측자료 및 딥러닝 기법을 이용하여 주요대기물질(미세먼지, 오존, 아황산가스, 일상화탄소, 이산화질소 등)의 장기변화 경향 파악 내용 보완함	p. 123, 148, 163, 180	

첨부-3

최종보고서(초안) 검토의견에 대한 수정 · 보완 대비표

구분	자문의견 (수정 및 보완사항)	수정 및 보완 내용	해당 페이지	비고
우수한 점	북극권 동토지역 기후환경 시스템을 이해하고 극지의 토양 생태계 탄소 배출에 대한 평가 연구, 극지 미생물의 탄소 순환이해, 그리고 극지 대기의 물리적 변화를 감지하며 특성을 이해하는 연구를 통한, 극지 미래 환경변화 예측 및 대응을 하는 것을 골자로 하는 이번 “극지 빅데이터 연계 미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발” 기획연구는 매우 필요한 연구로 짜임새 있는 과제구성이라고 생각되어짐.	해당사항 없음		
	현 기획연구에서는 현재까지의 북극권에서의 극지연구소를 중심으로한 과학연구활동 추진경과 및 성과를 분석하고, 극지 기후, 환경변화에 대한 빅데이터 데이터베이스를 구축하고 미래 활용기반을 마련할 수 있는 연구추진방안을 제시했으며 극지기초원천기술개발사업의 과학적 근거 제공 가능한 플랫폼 구축등 향후 중장기 정보활용 방향을 제시했으며 또한 극지에서의 환경이슈를 포함한 주요 이슈 해결을 통한 국제적 위상강화 방안 마련을 제시하였으며 마지막으로 현재 진행중인 극지기초원천기술개발사업의 성과를 커토하고 승계, 보완 및 연속적인 연구수행을 위한 선제적 로드맵을 제시를 하는등 향후 극지기초연구에 대한 전반적인 기획내용을 포함하고 있음.	해당사항 없음		
	기획연구의 목표와 내용에 맞추어 적절한 방향성을 잡아 기획되었으며, 기후변화 빅데이터와 플랫폼 구축을 위한 필요 항목들이 적절하게 반영되었음.	해당사항 없음		
	세 가지 전략 분야는 적절한 것으로 판단되고 첫, 번째 전략분야에 가장 큰 예산이 배분되는 것으로 제안한 것도 적절한 것으로 판단함	해당사항 없음		
	이 기획과제 연구결과는 전체적으로 극지연구에 대한 다양한 분야를 포함하고 극지 지역에 대한 연구방향을 잘 제시하고 있는 것으로 판단된다.	해당사항 없음		
	최종보고서에는 기획과제의 전체 요청에 맞게 충실히 작성된 것으로 판단됨	해당사항 없음		
	중간보고회에서 자문위원의 지적내용을 수정·보안 대비표를 통해 최종보고서에 상세하게 반영되었음을 확인	해당사항 없음		

	‘극지 빅데이터 연구에 대한 포괄적 개념 및 방향 제시’, ‘극지 전문가가 아닌 일반인도 공감할 수 있도록 필요성이나 효과 제시’ 등 많은 중간점검에서 제시된 의견을 대부분 보완하였으며, 극지 빅데이터 내용을 중심으로 전략주제 선정과 주제별 필요성과 목표, 연구내용이 체계적으로 정리되는 등 전반적으로 RFP의 취지와 의도를 잘 파악하고 이에 따라 기획연구가 충실히 진행된 것으로 판단됨 특히, 대표적으로 예상되는 미래 사회문제 중 하나인 기후·환경변화 대응을 극지 빅데이터 연구의 필요성으로 전면에 내세우고 그 이유와 논리를 제시하는 데 집중한 것이 매우 전문적이거나 마이너한 다른 이유들을 같은 비중으로 나열하여 제시하는 것보다 오히려 뻔하지만 거스를 수 없는 연구 필요성의 논리를 확보하였다고 생각됨 또한, 필요성이 확보된 만큼 향후 추진할 연구의 방향과 내용을 제시함에 있어 극지 관련 대내외적 환경분석이나 선행사업 분석 그리고 전문가 대상 수요조사 등이 잘 진행되었으며, 이를 기반으로 다각적 분석을 통해 전략 주제 설정과 주제별 목표와 내용을 도출하는 과정이 논리적이고 충실히 잘 수행되었다고 판단됨	해당사항 없음		
미흡한 점	약간의 모호한 단어“ 북극권 기후변화에 대한 피드백 규명” 등은 수정 혹은 설명이 필요해 보임	전략주제-II의 세부주제-2에서 답변(코멘트와 보완) - “피드백 규명”이란, 북극권 기후변화 예측 및 분석결과가 중위도와 한반도에 미치는 영향을 규명하기 위한것임 - 즉 북극권의 기후변화에 따른 알베도, 기온감률, 수증기, 구름 등을 통하여 대순환(대기/해양), 지역적인 순환, 지면과정 및 열(현열/잠열) 전달 등의 기후요소 분석을 통하여 중위도와 한반도에 미치는 피드백 영향을 규명하고자 함 - 그 결과로서 북반구와 중위도 및 한반도의 상세 기후시스템 피드백 자료 구축하고자 함	최종 보고서 p. 123에 추가함	
조정/권고	향후 이 기획보고서를 기반으로 실제 과제가 기획이 될 경우에 다음과 같은 사항에 대해서는 기획과제 연구진 뿐만 아니라 연구재단에서도 충분한 고려를 해주셨으면 함 1) 극지연구의 경우 극지연구소가 주도적으	총괄에서 답변(코멘트) 1) 현재 수행하고 있는 극지기초원천기술개발사업(내역사업명)에서도, 극지연구소이외에 국내 13개 대학, 3개	최종 보고서 p. 47~49에서 언급함	

사항	로 역할을 할 수 밖에 없다 하더라도 대학연구팀들에 대한 지원과 협력 구도는 반드시 고려되어야 함 2) 가령 다양한 인프라를 갖고 있는 극지연에서 관측 인프라의 구축과 운용을 통한 다양한 자료의 확보 및 공유를 담당하고 학계에서는 이러한 자료를 바탕으로 좀 더 도전적인 연구과제를 수행할 수 있도록 역할을 분담하도록 하는 방안도 고려해 볼 수 있음 빅데이터 DB의 구축이 데이터 메타데이터의 공유 뿐만아니라 실질적인 자료의 공유로 이어질 수 있도록 제도적인 장치가 필요함	출연연, 국외 극지연구 대학 및 기관 등에 연구비 지원과 자료 공유 및 인력 교류 등을 통해 협연하고 있음. 따라서 향후 기획연구를 통해 개발된 주제들에 대해서도 국내외 산·학·연과 긴밀한 협조로 진행될 것임 2) 1항에 덧붙여, 극지연구소에서 확보 운영 중인 환북극 관측거점을 기반으로 획득된 각종 환경인자는 한국극지데이터센터(Korea Polar Data Center; KPDC)에 의무적으로 등록하여, 자료를 필요로 하는 국내외 연구자의 열람이 가능하도록 운영하고 있음. 아울러 KPDC에 등록된 메타데이터는 물론 원시데이터를 필요로 할 경우, 정식 절차(신청서)를 통해 제공될 수 있도록 KPDC에서 운영하고 있음		
	이 기획과제에서 연구 배경과 목적을 정책입안자가 좀 더 이해하기 쉽게 풀어서 설명하면 더 바람직할 것으로 판단된다. 즉, 왜 대한민국에서 멀리 떨어진 극지의 연구를 수행해야 하며, 그 연구가 한반도에 미치는 영향이 무엇인지에 대한 설명이 추가된다면 아주 바람직할 것이다	총괄에서 답변(코멘트) – 극지는, 청정지역인 만큼 전 지구적 환경변화에 매우 민감한 지역이며, 지구온난화에 따른 환경변화*가 가장 빠르게 일어나고 그 영향이 증폭되어 발생하고 있음. 동시에 전 지구적 기후변화에 미치는 파급효과가 가중되고 있어서, 해당 영역에서의 변화 감지 및 모니터링의 최적지로서 평가됨. – 기후변화에 따라 지구촌 곳곳에서 심각한 이상기상 징후가 발생. 초강력 태풍, 국지적 돌풍, 극단적 가뭄 및 해수면 상승으로 인한 저지대 침수 등의 자연 재앙이 극단적으로 나타나 인간 생활에 더욱 큰 피해를 초래하고 있음 – 최근 우리나라를 포함한 동아시아와 북미, 유럽 지역에서의 극단적인 기상이변 현상은 지구온난화에 의한 극지의 해빙 및 빙하 감소 등과 관련성이 큰 것으로 나타났으며, 북극해의 융빙(融氷) 및 동토층의 융해(融解) 가속화는 최근 한반도뿐만 아니라 지구 곳곳에서 급증하고 있는 극단적인 기상 현상들(한파/폭설로 인한 항공 마비, 기록적 폭염 및 슈퍼태풍, 가뭄, 산불, 홍수, 만년설 붕	최종 보고서 p. 7~16 에서 언급함	

		괴 등)의 직접적 원인으로 밝혀짐		
	전략 분야 1을 구성하는 내용 중에 '구름'에 대한 장기 모니터링 및 구름의 역할에 대한 연구 등이 거의 언급되지 않은 것은 보완이 필요한 것으로 사료됨. 에어로졸 환경 변화에 따른 구름의 미세물리적, 광학적 역학적 성질의 변화는 기후변화의 주요 원인 중 하나이지만 그 이해도는 아직도 매우 낮은 상태임 특히 . 극 지역에 대해서는 그 이해도가 더 낮은 것으로 알려져 있으므로, 이에 대한 이해도를 높이는 노력이 절실히 요구됨. 이런 점을 반영하여 최종보고서를 보완할 것을 권고함	전략주제-I의 세부주제-1에서 답변(코멘트와 보완) -에어로졸의 생성-성장-구름형성-구름의 기후적 영향 평가 이해도는 특히 극지역에서 그 이해도가 매우 낮음. 본 기획연구의 주요 연구 주제어는 동토-대기간 기후 물질의 상호 교환 및 작용이며 기획 취지에 부합하도록 '미세먼지의 생성-성장-구름 응결핵 형성' 까지를 연구 대상으로 지정함 -구름을 대상으로 하는 물리특성 연구, 기후적 역할 평가는 극지연구소 자체적으로는 주요과제의 내용으로 수행중이며, 에어로졸-구름 연구의 종합 플랫폼인 북극 제플린 관측소에서 구름관련 모니터링이 수행되고 있음 - 관련하여, 본 과제에서 기획되는 미세먼지와 구름응결핵 특성, 그리고 국내외 공동연구 네트워크에서 생산하는 구름 물리-화학-광학 특성 자료들은 공동연구의 방식으로 상호 보완적으로 활용될 것이며, - 구름 연구는 연구 핵심 분야로 "북극 대기중 미세먼지의 생성-성장-구름 형성-기후적 영향의 정량화 (미세먼지의 직간접 복사영향 파악)"를 제시(최종보고서 162쪽)함으로서 강조되었음 - 위와 같은 공동연구를 통한 미세먼지의 생성-성장-구름응결핵 생성-구름형성등의 종합적인 연구는 기획안의 로드맵에서 국제공동캠페인 수행, 자료의 공동 분석, 미래예측을 위한 기후적 가설 제공 등의 방식으로 현실화 될 것임	최종 보고서 p. 145, 162~164 에서 언급함	
	이전 중간평가 자문에서 아래의 내용에 대한 고려를 자문했는데 반영이 되지는 않은 것 같음. 하지만 충분히 고려가 되어도 좋을 사항이라 다시 한번 고려해 볼 것을 권장함. - 실제 메탄대사제어 등에서 관련 단백질의 연구도 필수적이라 판단됨. 메탄 대사관련 단백질 및 단백질체 연구 등도 중요한 핵심분야가 될 수 있다고 판단됨. 그리고 유전체 및 단백질체 연구를 하고 축적되는	전략주제-III의 세부주제-1의 답변 - 본 연구내용인 온실기체 바이오 전환기술 개발과 관련된 의견으로서, 1단계 유전체 확보 및 분석을 통해서 도출된 메탄대사제어 관련 정보를 바탕으로 2단계에서는 메탄대사 효소 단백질에 대한 특성 및 개	최종 보고서 p. 149, 189~190, 192~193 에서 언급함	

	데이터는 데이터베이스화하여 정보화 시스템을 구축하는 연구도 필요할 것이라 생각됨	발연구를 중심으로 연구를 기획하였음. - 누적된 유전체 및 단백질체 연구정보는 극지연구소 DB인 한국극지데이터센터(Korea Polar Data Center; KPDC) 등록을 통하여 활용성을 제고하고자 함.		
	극지원천기술개발을 통한 극지 연구 기술만의 진보성, 당위성, 확장성 등 다양한 관점에서의 더 많은 수요조사들이 본 기획 이후에 반영이 되면 더욱 의미있는 기획이 될 것으로 사료됨 다만 전략주제와 주제별 목표가 최종 설정된 현 상태에서 수요조사 내용을 반영하면서 주제와 맞지 않는 내용까지 포함되진 않았는지 반대로 전략주제별 목표를 달성하기 위해 빠진 연구 내용은 없는지 이 부분만 한번 더 검토해보면 좋을 것 같다는 의견임	총괄에서 답변(코멘트) - 본 기획연구 과제에서는 극지연구 전문가가 참여하여 국내외 현황 및 실질적인 투입재원과 인력, 가동할 수 있는 기자재 등을 감안하여, 전략주제(세부주제)의 내용을 도출하였음. - 아울러 참여 전문가 이외의 극지연구 관심자의 의견을 수렴하기 위하여 수요조사를 실시하였으며, 접수된 수요조사에 대한 주제와 내용이 위에서 언급한 일련의 조건에 합당한지를 판단하여, 부분적으로 반영하였음. 즉, 최종보고서에서 언급한 전략(세부)주제의 타이틀과 내용은 최대한 연구수요에 응할 수 있도록 도출하였다고 볼 수 있음. - 중간보고서에 대한 자문의견에 대한 답변에서도 언급하였듯이, 취합된 연구수요 내용 중 전략-I 주제와 중복되거나 관련성이 있는 연구주제들을 선별하여 제5장의 전략사업별 연구내용에 포함시킴. - 해당 수요조사 과제는 (12.'극지 수계-대기 중 유기물 분자 단위 특성 분석', 14. '딥러닝 기법을 이용한 극지 대기 내 초미세입자 발생 예측 시스템 개발', 15. '대기화학모델링을 이용한 북극권 및 한반도 미세먼지 상호 영향성 연구', 17.' 블랙카본 단일입자 기반 정밀관측자료 산출', 19.'시베리아 산불기원 물질 대기수송이 북극해 탄소고정과 해빙 융해 가속화에 미치는 영향 연구' 등임	최종 보고서 p. 37, 163~176 에서 언급함	

증빙-1 | 중간보고서 검토의견서 접수 내역

연구기획과제 중간보고서 검토의견서 (1)

연구기획과제 중간보고서 검토의견서

기획과제명	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발' 기획 연구			
연구책임자	소속	건국대학교		
	성명	이승호		
연 구 기 간	2022.06.13. ~ 2023.02.12.(8개월)		연구용역비	60,000천원

검 토 결 과

종합 검토의견	필요시 별지사용

북극권 동토지역 기후환경 시스템을 이해하고 극지의 토양 생태계 탄소 배출에 대한 평가 연구, 극지 미생물의 탄소 순환이해, 그리고 극지 대기의 물리적 변화를 감지하며 특성을 이해하는 연구를 통한, 극지 미래 환경 변화 예측 및 대응을 하는 것을 골자로 하는 이번 "빅데이터를 이용한 미래 기후변화 대응관한 기획과제" 는 매우 필요한 연구로 짜임새 있는 과제구성이라고 생각되어짐. 선행연구를 통해 축척된 데이터를 바탕으로 더욱 심도 있게 범위를 넓힌 연구이며 좀 더 구체적 실행방안등을 제시하며 차별성을 두었고 미래에 극지에 대한 꼭 필요한 연구 내용을 담고 있어 중요성이 강조됨.

기획과제의 성공을 위해 좀더 세부적인 전략과제들도 다양한 전략에 맞추어 세부주제가 잘구성되어 있음. 연구분야중 전략3. C-2세부주제의 경우 북극권 기후변화에 대한 피드백 규명의 주제로 6가지의 핵심분야로 구성되어짐. 여기에 대한 의견은 6가지 주제가 모두 중요한 주제로 판단되어지나 대부분이 극지 생물의 메탄 대사관련 유전체 연구가 주된 주제이나 실제 메탄대사제어등에서 관련 단백질의 연구도 필수적이라 판단됨. 메탄 대사관련 단백질 및 단백질체 연구등도 중요한 핵심분야가 될 수 있다고 판단됨.
그리고 유전체 및 단백질체 연구를 하고 축적되는 데이터는 데이터베이스화 하여 정보화 시스템을 구축하는 연구도 필요할 것 이라 생각됨.

전제적으로 중요한 시기에 매우 필요한 연구를 체계적이고 구체적으로 잘 제시된 연구기획 과제라 생각됨.

** 기타의견(과제수행에 도움이 될 내용 등을 기술, 필요시 별지사용) *

검토자 소속	직위(직급)	성명

연구기획과제 중간보고서 검토의견서 (2)

연구기획과제 중간보고서 검토의견서

기획과제명	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발' 기획 연구			
연구책임자	소속	건국대학교		
	성명	이승호		
연 구 기 간	2022.06.13. ~ 2023.02.12.(8개월)		연구용역비	60,000천원

검 토 결 과	
종합 검토의견	필요시 별지사용

- 연구기획의 필요성과 극지 연구의 중요성은 깊이 이해되나, 기획과제의 제목이 "극지 빅데이터 연계 미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발 기획인 바 "모니터링 및 빅데이터 DB구축" 과 "극지기초원천 기술개발"부분의 약간의 balancing이 필요해 보임 139 페이지를 보면 DB 구축 과제인가에 대한 질문이 나올 만함.

- 위의 의견에 이어 "극지기초원천기술 개발"에서 극지기초원천기술이라는 부분이 빅데이터 DB인 건지, 혹은 극지를 위한 신규 방법론을 제시하는 건지 아니면 극지기초원천 기술 발굴을 위한 DB구축인지에 대한 고민이 필요해 보임.

- 아울러 많이 나올 만한 질문으로 "위와 같은 연구들이 국내 연구, 혹은 사회, 산업 등에 미치는 가시적인 영향과 잇점은 무엇인가?" 에 대한 부분이 있어 그 부분도 고민이 필요해 보임. .

**** 기타의견(과제수행에 도움이 될 내용 등을 기술, 필요시 별지사용) ****

검토자 소속	직위(직급)	성명

연구기획과제 중간보고서 검토의견서

기획과제명	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발' 기획 연구			
연구책임자	**소속**	건국대학교		
	성명	이승호		
연 구 기 간	2022.06.13. ~ 2023.02.12.(8개월)		**연구용역비**	60,000천원

검 토 결 과

종합 검토의견	**필요시 별지사용**

기획과제 RFP에서 요구한 내용을 충실히 수행하고 있는 것으로 사료됨. 향후 극지 관련 연구 주제로 타당하다고 판단되는 과제를 도출한 것으로 판단함. 중간보고서라 아직 내용이 일관성 있게 잘 구성되지는 않았으나, 최종보고서는 짜임새 있고, 일관성 있게 기술될 것으로 기대함.

보완할 점:
1. 기획과제 RFP에 제시한 수요조사를 수행하고 이를 반영하여 과제를 도출한 것으로 기술되어 있으나, 제시한 세부과제에 수요조사의 결과가 어떻게 반영되었는지는 명확하지 않음. 따라서, 제시한 세부과제 별로 수요조사 결과와의 연관성을 기술할 필요가 있음.
2. 제시한 세부과제 별로 예산, 필요 연구원 수 등을 제시했는데, 연구원 수를 출연연구소 직급체계(책임, 선임..)에 맞춰 기술하였기 때문에 모든 세부과제를 극지연구소가 수행하는 것으로 간주하기 쉬움. 세부과제 별로 수행하는 것이 타당한 것으로 판단되는 연구기관을 대략적으로 명시하는 것이 바람직해보임.

**** 기타의견(과제수행에 도움이 될 내용 등을 기술, 필요시 별지사용) ****

검토자 소속	직위(직급)	성명

연구기획과제 중간보고서 검토의견서

기획과제명	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발' 기획 연구			
연구책임자	**소속**	건국대학교		
	성명	이승호		
연 구 기 간	2022.06.13. ~ 2023.02.12.(8개월)		**연구용역비**	60,000천원

검 토 결 과

종합 검토의견 **필요시 별지사용**

이 보고서는 극지의 연구가 필요한 배경과 연구의 기대효과에 대해서 상당히 잘 기술되어 있으나, 대부분의 내용은 현재의 기상 및 기후변화에 대한 인지와 모니터링에 많은 부분을 할애하고 있음.

✓ 현재의 환경변화에 대한 모니터링은 현재 지구환경변화를 이해하는데 효과적이나 앞으로의 기후변화를 예측하는데 한계가 있을 것임.

✓ 전 지구적 기후변화에 가장 민감하게 반응해온 지역은 고위도의 북극과 남극지역임. 아울러 과거 지질학적인 기록을 보면 중위도에 위치한 한반도도 지구환경의 변화에 매우 민감하게 반응해온 지역에 속함.

✓ 이러한 사실은 과거 지구환경 변화의 기록을 복원하고. 이를 기후모델링 자료와 연계함으로써 어느 정도 한반도의 기후변화에 대한 반응을 이해할 수 있으나, 아직도 더 많은 조사와 이해가 필요한 부분이기도 함.

✓ 지구환경은 지난 수천만 년의 동안 많은 변화가 있었으며, 그중에서 가장 큰 원인이 장기적 및 돌발적(단기적)인 기후변화였음. 과거에는 지구온난화를 겪는 현재보다 더 지구 평균기온이 높고, 해수가 더 따뜻하고, 해수면이 더 높았던 기간도 존재했으며, 반대로 극지방의 빙하가 남부로 더 확장되어 지구 전체가 빙하로 덮였던 시기(Snowball Earth)도 보고되고 있음.

✓ 하지만 지구 표면의 기후변화는 그 변화하는 속도가 지금보다 상대적으로 매우 느리게 일어났기 때문에 대부분의 생태계는 지구환경의 변화, 즉 기후변화에 적응하면서 진화를 해오고 있었음.

✓ 지구온난화로 인해 지구의 환경이 급격히 변화하면서 인간이 예측하기 어려운 다양한 기상현상은 자연재해로 우리 사회에 영향을 주고 있음.

**** 기타의견(과제수행에 도움이 될 내용 등을 기술, 필요시 별지사용) ****

검토자 소속	직위(직급)	성명

(별지)

- ✓ 지구온난화는 인간이 사용한 화석연료로 인해 온실기체가 증가하면서 그 시작이 일어난 것으로 여겨지고 있음. 하지만 지난 산업혁명 이후 지구온난화가 일어나면서 극 지역의 빙하가 줄어들어서 알비도 효과가 약해지고, 극 지역 주변의 영구동토 지역에 영구동토의 융빙이 일어나면서 지층 내에 포함되어 있던 메탄가스의 방출로 인해 지구온난화는 급속이 더 가속될 것으로 우려되고 있음. 하지만 현재 IPCC 보고서나 다른 기후변화에 관한 논문들, 어느 자료도 앞으로 수십 년 내에 지구표면에서 일어날 기후변화를 정량적으로 예측하기는 어렵다고 우려하고 있는 것이 현실임.
- ✓ 현재 지구온난화로 인해 벌어지고 있는 자연재해를 포함한 지구환경의 변화는 현재 지구표면 변화의 모니터링만으로는 그 예측에 한계가 있음. 이러한 사실은 이제까지 여러차례 IPCC에 의해 발표된 보고서에 그 우려가 잘 기술되어 있으나, 이러한 사실이 우리나라는 물론이고 전 세계 정책입안자에 의해 제대로 인식되지 못하고 있음. 하지만 과거 지질학적인 시간대에 지구온난화와 수반된 급격한 기후변화의 결과는 극지방의 여러 인자(proxies)를 통해 학자들에 의해 어느 정도 파악되어 왔음.
- ✓ 지구온난화의 불확실한 미래를 정확히 예측하고 극복할 수 있는 방법 중의 하나가 극지역에 기록된 퇴적물과 빙하의 기록을 복원하여 전 지구적으로 일어난 돌발적 기후변화(abrupt climate changes)를 포함한 기후변화를 이해하여, 이를 미래의 기후에 적용시키는 것임.
- ✓ 이 보고서는 이러한 점에서 다음과 같은 내용에 대해 개선할 필요가 있음.
- ✓ 첫째로, 이 보고서는 현재 지구표면 전체에서 일어나는 지구온난화 현상의 영향과 극지환경과의 관계를 구체적으로 언급하지 못하고 있음. 최근의 연구에 의하면 극지환경의 변화로 인해 전 지구 해류순환은 물론이고 우리나라가 영향을 받는 동아시아 몬순기후의 영향까지 서로 연계되어 밀접한 영향을 받는 것으로 알려져 있음. 따라서 극지연구가 실제로 한반도 주변에 일어날 기후변화와 많은 관계가 있다는 것을 부각할 필요가 있음.
- ✓ 둘째로, 이 보고서는 극지 인근 지역에 기록되어 있는 퇴적물과 빙하의 기록을 복원하여 지난 수백 만 년 간 일어난 과거의 전 지구적 기후변화의 변화를 복원하고, 이를 활용하여 현재 지구온난화에 의해 일어나고 있는 돌발적인 기후변화의 미래를 예측하는 연구가 필요하다는 것을 강조할 필요가 있음.
- ✓ 셋째로, 이러한 분야에 대한 연구가 이 보고서에 일부 포함이 되어 있으나, 그 비중이 너무 낮음. 이러한 연구분야에 대한 중요성과 그 비중을 높일 필요가 있음.

연구기획과제 중간보고서 검토의견서

기획과제명	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발' 기획 연구			
연구책임자	**소속**	건국대학교		
	성명	이승호		
연 구 기 간	2022.06.13. ~ 2023.02.12.(8개월)		**연구용역비**	60,000천원
검 토 결 과				

종합 검토의견 **필요시 별지사용**

- 극지에서 얻을 수 있는 데이터는 규모와 종류에 상관없이 중요한 자료임에는 틀림없습니다. 그리고 이를 활용한 다양한 연구는 연구소 뿐만아니라 학계에서도 수행해야 하는 분야입니다.
- 기획보고서에서 제공하는 전체 그림은 굉장히 넓은 범위이고 의욕적입니다. 하지만, 실제 관측의 가능성 등에 대한 고려는 부족해 보입니다. 가령, 알라스카의 경우 배로우 (Barrow)에서 미국 에너지부 (Dept. of Energy) ARM 집중 관측소를 몇 년째 운영 해오고 있습니다. 만일 가능하다면 여기와 중첩되지 않는 관측이 좋을텐데 그러한 내용이 포함되어 있지는 않습니다. 그리고, 러시아의 경우는 허가, 캐나다의 경우 역시 연방정부외에도 각 부족들과도 협의가 되어야 합니다.
- 다양한 자료를 통합하는 프레임에 대한 고민이 더 추가되었으면 합니다. 많은 관측을 수행하고 자료를 확보하고 분석을 하겠지만 이러한 자료를 통합하고 좀 더 의미있는 결론을 도출할 수 있는 프레임에 대한 고민이 추가되었으면 합니다. 현재 상태로는 각기 관측이 독립적으로만 운영되고 자료의 공유 등은 데이터 포털등을 활용한다고 되어 있음
- 전지구적인 변화와 극지의 관계에 대한 연결: 가령, 탄소순환만을 고려했을 때 극지가 차지하는 비중은 그리 높지 않을 수도 있습니다. 하지만, 다양한 되먹임 작용을 통해 서만 전지구적으로 중요한 인자로 작용하기 때문에 이를 고려하지 않으면 앞서 언급 한대로 부분적인 관측자료의 수집을 넘어서지 못하지 않을까 걱정됩니다. 전지구적인 변화에 대한 연결 부분을 추가해주시길 부탁드립니다.

**** 기타의견(과제수행에 도움이 될 내용 등을 기술, 필요시 별지사용) ****

검토자 소속	직위(직급)	성명

연구기획과제 중간보고서 검토의견서

기획과제명	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발' 기획 연구			
연구책임자	**소속**	건국대학교		
	성명	이승호		
연 구 기 간	2022.06.13. ~ 2023.02.12.(8개월)		**연구용역비**	60,000천원

검 토 결 과

종합 검토의견	**필요시 별지사용**

□ 북극 기후 변화 관측시스템으로 능동형, 지능형, AIoT 시스템의 다양한 용어를 보고서에서 사용하고 있으나 사용하는 용어에 따라 구조 및 설계가 상이해질 수 있다. 따라서, 세부 연구과제의 목표 및 내용 수행에 필요한 시스템 요구사항을 보다 정확히 정의, 도출하고 이에 부합하는 최적의 시스템을 개발, 구축, 운영하는 것이 연구기간, 예산 측면에서 효과적임.

o IoT 플랫홈의 정의는 다양하고 중첩되게 사용되지만 그 역할은 다음을 포함할 수 있음.
- 엔드투엔드 플랫폼: 하드웨어와 소프트웨어, 커넥티비티, 보안, 그리고 수백만 개에 달하는 디바이스(센서노드)의 연결을 관리하기 위한 툴 등을 제공. 이는 OTA(무선) 펌웨어 업데이트, 디바이스 관리, 클라우드 연결, 이동통신 모뎀 등은 물론이고 수많은 디바이스를 온라인에 연결하고 모니터링하는 등 IoT 구현에 필요한 모든 관리 기능을 통합 제공.
- 커넥티비티 관리 플랫폼: WPAN, WLAN, LPWAN, 이동통신에 이르는 저전력, 저비용 커네티비티 관리 솔루션을 제공. 여기에는 커넥티비티 하드웨어, 다양한 네트워크, 데이터 라우팅 등의 기능이 포함될 수 있음.
- IoT 클라우드 플랫폼: 사용자의 복잡한 네트워크 스택 구축의 복잡성을 없애고, 백엔드 서비스와 기타 서비스를 제공해, 수백만 개의 동시 연결 디바이스를 모니터링하고 관리할 수 있는 기능을 제공.
- 데이터 플랫폼: 디바이스로부터 데이터를 수집하고 관리, 비주얼화하며, 데이터를 분석할 수 있도록 수많은 툴의 조합을 제공하는 플랫폼.

o IoT 플랫홈 개발은 표준 혹은 사실상(de facto) 표준에 근거하여 개발되어야 운영, 유지, 보수에 유리하며 이 분야 개발경험이 있는 전문업체만이 신뢰성을 보장할 수 있음.
- 예산에는 주로 고정밀 측정장비 위주로 편성되어 보이므로 관련 하드웨어 및 소프트웨어 개발용역비가 예산에 반영될 필요가 있음.

**** 기타의견(과제수행에 도움이 될 내용 등을 기술, 필요시 별지사용) ****

검토자 소속	직위(직급)	성명

(별지)

□ AIoT의 도입에 대한 정책적·사회적·기술적 측면에서의 필요성에 대해 포괄적으로 설명되어 있으나 기후변화 대응 기술개발에서 요구되는 지능의 정의, 인공지능의 생성 방법에 대한 구체적인 내용이 결여되어 보임.

o 참고로 AIoT Process는 개발하고자 하는 사물지능을 정의하는 것부터 출발하여 데이터를 획득하고 인공지능을 생성 및 탑재하는 총 10개의 스킬세트와 그에 대한 목표와 ITO(Input, Technique 및 Tool, Output) 및 케이스 스터디로 구성 (참고 : 사단법인 한국사물지능협회)

o 예를 들면 일기 예보는 풍속, 풍향, 지구 온난화 등과 같은 다양한 요인에 의존하므로 어려운 작업.

- 지난 몇 년 동안 다양한 딥 러닝 기반 일기 예보 모델이 제안되었으며 전통적으로 사용되는 예측 기술은 매우 매개변수적이어서 복잡
- Multilayer Perceptron, Jordan Recurrent Neural Network, Elman Recurrent Neural Network 등 기상 예보에 사용되는 딥러닝 기반 일기 예보 모델을 비교 분석

o 예를 들면 강우 예측은 특정 지역에 대한 기후 및 수문학적 변화의 영향을 평가하고 자연 재해 또는 일상 생활을 예측하는 데 필수적.

- LSTM(장단기 기억 네트워크), ANN(인공 신경망) 및 1차원 컨볼루션 신경망 LSTM(1D CNN-LSTM) 모델을 탐색하여 여러 리드 타임에 강우를 예측
- 15년 이상의 일일 기상 매개변수 데이터를 한 관측소에 대해 수집 - 강우 데이터는 비 없음, 약한 비, 보통에서 호우의 세 가지 등급으로 분류
- 1D CNN-LSTM 및 ANN의 성능이 LSTM과 유사한 반면 LSTM은 1~6일 리드 타임 동안 82%의 일관된 정확도로 강우를 예측하는 것으로 관찰

(별지)

□ 극지 환경에서 동작하는 IoT 기반 관측시스템은 고장시 즉시 수리가 불가능하므로 매우 높은 신뢰성 동작이 요구됨. 또한 운영 효율성 향상, 시스템 고장 관리 및 예측, 확장성 등을 고려하여 다음과 같은 기능을 갖는 지능형 IoT 시스템이 필요함.

o 운영 효율성 향상: AI와 결합된 기계 학습은 작동 조건을 예측하고 최상의 결과를 위해 조정해야 하는 요소를 도출할 수도 있음. 예를 들어 시스템 동작 환경을 최적화하거나 배터리로 동작하는 시스템의 수명 연장이 가능.

o 더 나은 위험 관리 시스템: AI와 IoT를 결합함으로써 광범위한 고장을 잘 탐지, 예측하여 자동화된 조치를 취할 수 있음. 예를 들어 중요 데이터 수집 장치인 경우 활성/대기의 이중화 구조로 운영하여 다운타임을 없앰.

o 사물 인터넷의 확장성 증가: AI 기반 IoT 에코시스템은 데이터를 한 장치에서 다른 장치로 전달하기 전에 분석하고 요약. 결과적으로 방대한 양의 데이터를 소화 가능한 청크로 압축하고 많은 IoT 장치를 연결할 수 있음. 엣지단 혹은 사물(센싱 노드)에서 학습, 추론 등의 수행으로 초고속으로 처리 (엣지 컴퓨팅)

o 계획되지 않은 다운타임 비용을 줄여 비용 절감: AI 지원 IoT를 활용하는 예측 유지 관리를 통해 장비 고장을 예측하고 일상적인 유지 관리 절차를 미리 예약할 수 있음. 결과적으로 다운타임의 부정적인 영향을 피할 수 있고, 유지 관리 계획에 소요되는 시간이 감소, 유지 관리 계획에 소요되는 시간을 줄이고, 장비의 가용성과 가동 시간은 증가, 유지 보수 비용은 낮아짐.

□ 과학적 연구를 중점 목표로 정하고 연구 논문으로 마무리되는 협의의 연구보다는 가급적 연구 결과가 산업적으로 활용될 수 있는 내용을 가능한 많이 도출하는 것이 바람직 함.

o 예로서 습도, 온도, 풍속 및 풍향 인자가 오존, PM2.5, 메탄, 이산화탄소 등과 같은 다양한 주요 대기 오염 물질의 이동, 생성 및 농도에 본질적으로 미치는 영향을 예측하는 인공지능 알고리즘 연구와 이에 필요한 데이터를 수집하기 위한 최적의 IoT 시스템 구축 등

- 이러한 연구 결과에는 특허출원이 포함되고
- 산업적 측면에서 기대효과 및 구체적 활용방안이 존재하면 바람직하고
- 관련 산업에 영향을 줄 수 있으면 최고의 성과임

□ 지구 온난화, 오염 및 기타 여러 요인으로 인해 환경은 놀라운 속도로 변화하고 있음. 현재 160개 이상의 기상 위성(INSAT, IRS, Landsat 8, SARAL, Oceans 2, RISAT2B 등)이 궤도에 있으며 매일 약 8천만 건의 관측이 발생.

o 본 사업에서 사용하는 지상 기반 센서로부터 수집된 대기 데이터, 패턴 추출 혹은 예측에 여러 위성 정보가 어떻게 활용될 수 있는지?
o 위성 레이더에 의한 다양한 정보(대기, 해양, 빙권, 해수면 등)에 의한 기후 움직임을 모니터링 한 결과와 서로 비교할 수 있는지에 대한 내용이 있으면 추가하는 것이 어떤지?

(별지)

□ IoT 플랫홈 (IoT 시스템 + 인공지능 알고리즘) 개발 일정 및 지역별 설치 계획을 연차별로 다음의 내용을 포함하여 하나의 그림으로 제시하면 좋겠음. (참고: 안산시 -IoT리빙랩)

o 다양한 데이터 수집 장치에 대한 IoT 네트워크 요구사항 수립
  - 네트워크 요구사항 : 네트워크 지연, 지연 지터, 패킷 손실율, 대역폭, 전송 주기, 노드 에너지 공급원, (상대적) 보안 등급 등

o 사용할 센서 (혹은 정밀 측정기)의 정확도 규정

o 요구사항을 만족하는 네트워크 설계

o 분석 혹은 예측에 사용할 도구는 수학적 알고리즘 혹은 인공지능인지?

□ 데이터 훈련 및 분류에 사용되는 기계 학습 방법은 SVM, 신경망 등과 같은 대부분의 전통적인 방법을 사용. (참고: KOPRI세미나)

o (A)IoT, climate change, (extreme) environment, big data 등의 검색어를 사용, 최근 논문 검색을 통한 연구 동향 분석이 필요해 보임

o 신경망 혹은 딥 러닝 기반의 예측 알고리즘을 개발하기 위해서는 장기간의 데이터 축적이 필요하며 이러한 기법을 활용할 경우 어떠한 데이터를 사용해서 어떠한 환경인자의 변화를 예측할 것인가에 대한 구체적 연구내용의 기술이 필요해 보임.
  - 예측 알고리즘이 센서노드, 엣지(게이트웨이 역할), 서버 등 어느 위치에 탑재되는 위치도 고려하여 시스템 설계가 이루어 져야 함

o 퍼지 기반 방법과 딥 러닝 접근 방식은 일부 연구 및 구현에서 사용되지만 빅 데이터 문제 또는 엄청난 계산 복잡성으로 어려움을 겪음

o 모니터링 및 제어 목적, 데이터 및 사용된 센서 유형에 관계없이 환경 문제를 해결하는데 사용할 수 있는 강력한 머신 러닝 접근 방식은 보고되지 않음

o 모든 데이터에서 작동할 수 있는 강력한 분류, 예측 및 예측 모델 세트를 설계

연구기획과제 중간보고서 검토의견서

기획과제명	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발' 기획 연구			
연구책임자	소속	건국대학교		
	성명	이승호		
연 구 기 간	2022.06.13. ~ 2023.02.12.(8개월)		연구용역비	60,000천원
검 토 결 과				
종합 검토의견	필요시 별지사용			
– 본 용역의 목적에서 언급했듯이, 극지는 민간의 투자가 어려운 국가 R&D의 영역으로 극지 과학분야 활성화를 위한 지속적 노력이 필요함. – 특히, 기후분야에 대한 연구의 필요성은 국내외 시기적으로 적절하다고 판단됨. – 본 중간보고서에서 제시한, 기권, 수권, 지권, 생물권, 빙권 등이 GCOS (Global Climate Observing System)의 핵심요소로, 올바른 방향으로 제시되고 있다고 판단됨. – GCOS에서 제시한 바와 같이 극지는 필수기후변화감시요소(Essntial Climate Variables)로 들어가있으며, Ice sheet and ice shelves, snow, glaciers, permafrost 등이 이에 해당되어 있음. – 또한 메탄 등의 경우 한번 배출되면 9년 정도로만 존재하기 때문에 현재 줄이면 우리 세대에 그 결과를 볼 수 있으나, 그 기원이 다양하기 때문에 복잡성이 존재함. – 근래 들어 기후피드백 효과(온실기체 때문에 기온이 올라가고 자연에 저장된 온실기체가 더욱 배출되어 더욱 기온이 올라가는 현상)에 대한 연구가 활발해 지고 있으며, 이중 열대우림과 Permafrost가 기후피드백 효과에 주요 지역으로 거론되고 있음. – 따라서 본 용역에서 제시한 주제들(특히 동토층 등)을 이행한다면, 한반도 뿐 아니라 국제사회에서의 주도적 역할을 할 수 있을 것으로 기대됨. – 극지에 대한 이해를 위해 여러 관측장비가 도입된 점에 대해 훌륭한 비전이라고 생각하나(p148), 가능하다면, 메탄과 이산화탄소의 농도, 그 항목의 동위원소 분석(14C 필요), 플럭스 분석 등이 함께 이루어 진다면 향후 모델링 등 활용 및 유저가 넓어질 것으로 판단됨			
** 기타의견(과제수행에 도움이 될 내용 등을 기술, 필요시 별지사용) **				

검토자 소속	직위(직급)	성명

연구기획과제 중간보고서 검토의견서

기획과제명	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발' 기획 연구			
연구책임자	**소속**	건국대학교		
	성명	이승호		
연 구 기 간	2022.06.13. ~ 2023.02.12.(8개월)		**연구용역비**	60,000천원
검 토 결 과				
종합 검토의견	**필요시 별지사용**			

전체적으로 **제안요청서(RFP)에 맞춰** 연구내용이 **항목별로 빠짐없이 잘 기술**되어 있음

중간보고서임을 감안할 때 선행사업 성과분석, 연구아이템 수요조사에서 장비내역이나 예산 등 상세하고 구체적으로 조사/분석이 잘 이루어져 있어 향후 최종보고서 작성이나 실제 연구과제 추진 시 풍부한 백업자료로 활용 가능할 것으로 판단됨

그럼에도 기획연구인 만큼 **향후 추진할 연구개발 내용이나** 미래 기후변화 대응 등을 위한 **극지 빅데이터 연구에 대한 포괄적 개념 수준의 방향 제시가 중요함**

이에 따라, 현재 전략주제별로 너무 상세히 기술되어 있는 등 세부 연구내용이나 장비내역, 예산과 같이 매우 상세한 내용은 부록 수준으로 처리하고, **극지 빅데이터 구축 및 활용 등 향후 극지연구에 대한 추진방향, 연구개념 등 보다 큰 틀에서 먼저 포괄적 개념 정리**가 보완될 필요가 있음

상세 내용은 포괄적 개념 정리에 대한 백업으로 제시한다면 매우 설득력 있는 기획연구 보고서가 될 것으로 판단됨

특히, **요약문에는** 일반인(예:국민)도 쉽게 어떤 내용인지 감을 잡을 수 있도록 많은 사람이 공감할 수 있는 필요성과 효과 및 **연구 개념 위주로 개념도나 도표 등으로 정리하여 제시**하면 효과적일 것으로 판단됨

**** 기타의견(과제수행에 도움이 될 내용 등을 기술, 필요시 별지사용) ****

극지연구의 최대 딜레마는 우리나라가 극지에 위치하지 않아 많은 극지연구가 국민 생활과 직접적으로 연관되어 보이지 않는다데 있다고 판단됨

따라서 국내에서도 **극지연구**가 필요하다는 **필요성과** 극지연구의 **성과가 어떻게 활용되고 어떤 효과가 있는지** 즉, 연구 기획의 맨 앞단과 맨 뒷단에 대한 **고민이 특히 많이 필요**하며 그 근거를 매우 직관적이고 논리적*으로 제시할 필요가 있음

*(예시 1) 지난 30년간 극지환경 변화와 기후변화의 상관성
(예시 2) 극지 연구/수집 데이터 등의 지속적 중복, 데이터 연계 분석을 통한 시너지 효과 제시

이때 필요성이나 효과 제시에 있어 수많은 작은 이유들 보다는 임팩트 있는 몇 가지 이유에 집중해서 제시하는 게 효과적일 수 있으며, 이 부분에 대해 **기획연구에서 특히 많은 고민이 필요할 것으로 판단됨**

(예시) **'극지는 기후변화 연구의 최적지'** → 공감만 된다면 매우 좋은 문구임
'기후변화'는 국민 대부분 알고 있는 일반론임. 그러나 극지가 기후변화 연구의 최적지라는 것은 일반론이 아님으로 일반인이 공감할 수 있도록 직관적 근거를 제시할 필요가 있으며, 이 때 그림이나 소제목 등에 두드러지게 표현 필요

극지기초원천기술개발사업 **성과분석의 경우** 지금까지 단순 성과분석 측면에서 조사/분석하였다면, 향후 극지연구 아이템 도출이나 지속할 필요가 있는 극지활동내용 도출, 극지 빅데이터 연구에 있어 구축/활용 측면에서 연계 가능한 데이터 도출 등의 관점에서 **보다 구체적으로 분석 내용을 보완 정리하면 더욱 효과적일 것**으로 판단됨

검토자 소속	직위(직급)	성명

증빙-2 | 최종보고서 검토의견서 접수 내역

[서식] 연구기획과제 최종보고서 검토의견서 (1)

연구기획과제 최종보고서 검토의견서

기획과제명	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발' 기획 연구			
연구책임자	소속	건국대학교		
	성명	이승호		
연 구 기 간	2022.06.13. ~ 2023.03.31.(9개월)		연구용역비	60,000천원

검 토 결 과

종합 검토의견	필요시 별지사용

북극권 동토지역 기후환경 시스템을 이해하고 극지의 토양 생태계 탄소 배출에 대한 평가 연구, 극지 미생물의 탄소 순환이해, 그리고 극지 대기의 물리적 변화를 감지하며 특성을 이해하는 연구를 통한, 극지 미래 환경 변화 예측 및 대응을 하는 것을 골자로 하는 이번 "극지 빅데이터 연계 미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발" 기획 연구는 매우 필요한 연구로 짜임새 있는 과제구성이라고 생각되어짐. 선행연구를 통해 축척된 데이터를 바탕으로 더욱 심도 있게 범위를 넓힌 연구이며 좀 더 구체적 실행 방안등을 제시하며 차별성을 두었고 미래에 극지에 대한 꼭 필요한 연구 내용을 담고 있어 중요성이 강조됨.
현 기획연구에서는 현재까지의 북극권에서의 극지연구소를 중심으로한 과학연구활동 추진 경과 및 성과를 분석하고, 극지 기후, 환경변화에 대한 빅데티터 데이터베이스를 구축하고 미래 활용 기반을 마련할 수 있는 연구추진방안을 제시했으며 극지기초원천 기술개발사업의 과학적 근거 제공 가능한 플랫폼 구축등 향후 중장기 정보활용 방향을 제시했으며 또한 극지에서의 환경이슈를 포함한 주요 이슈 해결을 통한 국제적 위상강화 방안 마련을 제시하였으며 마지막으로 현재 진행중인 극지기초원천기술개발사 업의 성과를 커토하고 승계, 보완 및 연속적인 연구수행을 위한 선제적 로드맵을 제시를 하는등 향후 극지기초연구에 대한 전반적인 기획내용을 포함하고 있음.
이전 중간평가 자문에서 아래의 내용에 대한 고려를 자문했는데 반영이 되지는 않은것 같음. 하지만 충분히 고려가 되어도 좋을 사항이라 다시 한번 고려해 볼 것을 권장 함.
"기획과제의 성공을 위해 좀더 세부적인 전략과제들도 다양한 전략에 맞추어 세부주제가 잘구성되어 있음. 연구분야중 전략3. C-2세부주제의 경우 북극권 기후변화에 대한 피드백 규명의 주제로 6가지의 핵심분야로 구성되어짐. 여기에 대한 의견은 6가지 주제가 모두 중요한 주제로 판단되어지나 대부분이 극지 생물의 메탄 대사관련 유전체 연구가 주된 주제이나 실제 메탄대사제어등에서 관련 단백질의 연구도 필수적이라 판단됨. 메탄 대사관련 단백질 및 단백질체 연구등도 중요한 핵심분야가 될 수 있다고 판단됨.
그리고 유전체 및 단백질체 연구를 하고 축적되는 데이터는 데이터베이스화 하여 정보화 시스템을 구축하는 연구도 필요할 것 이라 생각됨".

** 기타의견(과제수행에 도움이 될 내용 등을 기술, 필요시 별지사용) *

검토자 소속	직위(직급)	성명

연구기획과제 최종보고서 검토의견서 (2)

연구기획과제 최종보고서 검토의견서

기획과제명	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발' 기획 연구			
연구책임자	**소속**	건국대학교		
	성명	이승호		
연 구 기 간	2022.06.13. ~ 2023.03.31.(9개월)		**연구용역비**	60,000천원
검 토 결 과				
종합 검토의견	**필요시 별지사용**			
-기획연구의 목표와 내용에 맞추어 적절한 방향성을 잡아 기획되었으며, 기후변화 빅데이터와 플랫폼 구축을 위한 필요 항목들이 적절하게 반영되었음. - 약간의 모호한 단어" 북극권 기후변화에 대한 피드백 규명" 등은 수정 혹은 설명이 필요해 보임 - 본 기획 이후에 모니터링을 넘어서는 모니터링 데이타의 실질적인 활용이나, 극지 원천 기술 개발을 통한 극지 연구 기술만의 진보성, 당위성, 확장성 등 다양한 관점에서의 더 많은 수요조사들이 본 기획 이후에 반영이 되면 더욱 의미있는 기획이 될 것으로 사료됨.				
**** 기타의견(과제수행에 도움이 될 내용 등을 기술, 필요시 별지사용) ***				

검토자 소속	직위(직급)	성명

연구기획과제 최종보고서 검토의견서 (3)

연구기획과제 최종보고서 검토의견서

기획과제명	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발' 기획 연구			
연구책임자	소속	건국대학교		
	성명	이승호		
연 구 기 간	2022.06.13. ~ 2023.03.31.(9개월)		연구용역비	60,000천원

검 토 결 과	
종합 검토의견	필요시 별지사용

미래 기후변화 대응을 위한 극지기초원천기술을 개발하기 위해 고려해야 하는 다양한 분야를 면밀히 조사하고, 이를 바탕으로 세 가지의 전략 분야를 도출한 것으로 사료됨. 세 가지 전략 분야는 적절한 것으로 판단되고, 첫 번째 전략분야에 가장 큰 예산이 배분 되는 것으로 제안한 것도 적절한 것으로 판단함. 그러나 전략 분야 1을 구성하는 내용 중에 '구름'에 대한 장기 모니터링 및 구름의 역할에 대한 연구 등이 거의 언급되지 않은 것은 보완이 필요한 것으로 사료됨. 에어로졸 환경 변화에 따른 구름의 미세물리적, 광학적, 역학적 성질의 변화는 기후변화의 주요 원인 중 하나이지만, 그 이해도는 아직도 매우 낮은 상태임. 특히 극 지역에 대해서는 그 이해도가 더 낮은 것으로 알려져 있으므로, 이에 대한 이해도를 높이는 노력이 절실히 요구됨. 이런 점을 반영하여 최종보 고서를 보완할 것을 권고함.

** 기타의견(과제수행에 도움이 될 내용 등을 기술, 필요시 별지사용) *

검토자 소속	직위(직급)	성명

연구기획과제 최종보고서 검토의견서

기획과제명	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발' 기획 연구			
연구책임자	**소속**	건국대학교		
	성명	이승호		
연 구 기 간	2022.06.13. ~ 2023.03.31.(9개월)		**연구용역비**	60,000천원

검 토 결 과

종합 검토의견	**필요시 별지사용**

✓ 이 기획과제 연구결과는 전체적으로 극지연구에 대한 다양한 분야를 포함하고 극지 지역에 대한 연구방향을 잘 제시하고 있는 것으로 판단된다.

✓ 이 기획과제에서 연구 배경과 목적을 정책입안자가 좀 더 이해하기 쉽게 풀어서 설명하면 더 바람직할 것으로 판단된다. 즉, 왜 대한민국에서 멀리 떨어진 극지의 연구를 수행해야 하며, 그 연구가 한반도에 미치는 영향이 무엇인지에 대한 설명이 추가된다면 아주 바람직할 것이다.

✓ 최근 전 세계를 대상으로 하는 다양한 고기후 연구는 지역적인 경계를 벗어나 기후변화가 먼 지역까지 서로 연결되어 있다는 연구가 많이 발표되어왔다. 특히 북대서양의 기후와 동아시아몬순 기후와 연과성이 있다는 연구는 매우 주목할 만하다 (Liu et al., 2013, Nature Geoscience). 북대서양 기후와 해양 조건은 북극환경과 밀접한 관계를 가지기 때문에 이러한 해석은 북극환경의 변화가 한반도를 비롯한 동아시아 기후와 서로 연동한다는 의미를 가진다.

✓ 동아시아 몬순기후의 강도는 한반도의 기후에 결정적인 영향을 미치며, 이는 대한민국의 경제와 사회에 지대한 영향을 주고 있다. 여름몬순의 강도(summer monsoon intensity)가 높아지면 강수량이 증가하고 돌발적인 폭우의 빈도가 증가하여 홍수가 일어날 확률을 높이고, 겨울몬순의 강도가 높아지면 가뭄이 오랫동안 지속되어 산불의 위험이 증가한다. 즉, 넓은 의미에서 보면 북극환경의 변화가 우리 국가의 경제와 사회에 큰 영향을 줄 수 있다는 것이다. 하지만 이제까지 국내의 연구는 북극환경과 한반도의 기후관계에 대한 연관성을 대상으로 하는 연구는 활발하게 이루어지지 않은 상태이다. 따라서 이 북극환경의 현재 및 과거 변화에 대한 연구와 한반도의 기후와의 상관관계를 밝히는 여러 자료를 축적하는 빅데이터 자료분석은 대한민국의 경제에 큰 영향을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

(별지)

✓ 이 연구는 극지 지역 내에서 다양한 분야의 모니터링을 수행하고 있다. 이러한 모니터링의 결과와 한반도 내 육상 및 해양환경을 대상으로 하는 다양한 기후의 지시자(proxies)들과 생태계의 변화와의 연관관계를 비교하는 것도 매우 중요한 주제 중의 하나가 될 것으로 판단된다.

✓ 빙하의 크기 변화는 전세계 해수면변동에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 북극과 남극지역의 빙하크기 변화에 대한 고해상도 모니터링은 매우 중요한 의미를 가진다. 아울러 극지방의 빙하모니터링과 한반도 서해, 남해, 동해의 해수면의 변동에 대한 정밀모니터링을 수행한 결과를 직접 비교하는 것은 반드시 필요하다. 한반도는 지질학적인 의미로 볼 때 동해안이 지속적으로 융기되고 있는 것으로 추정되므로 상대적인 해수면의 변동과 이의 결과로 나타나는 해안선의 변화는 지역마다 서로 다르게 나타날 수 있다. 이러한 지역별 해수 면의 변동과 극지 빙하부피의 변화에 의해 예상되는 해수면의 변동과의 관계를 이해할 수 있어야, 한반도 지역별 해수면의 미래 변동에 대한 예측이 가능할 것이다. 앞으로 한반도 주변의 해수면의 상승을 정확히 예측하는 것은 매우 중요하다. 현재 한반도 해안을 중심으로 건설되어 있는 방파제나 제방은 현재의 해수면과 자연재해의 영향을 고려하여 설계된 것이므로, 앞으로의 미래를 정확히 예측할 수 없으면, 지속적으로 방대한 국가예산이 낭비될 수 있는 우려가 높다.

✓ 북극 지역의 영구동토에 대한 모니터링도 매주 중요하다. 특히 북극권 영구동토지역에는 엄청난 양의 가스하이드레이트가 매장되어 있을 것으로 추정된다. 지구온난화의 결과로 메탄가스와 결합되어 있는 물분자라 유리되고 있다는 것은 잘 알려져 있는 사실이다. 메탄가스는 이산화탄소보다 대기중에서 농도는 낮지만 온실기체로서 지구온난화에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 극지방의 빙하에서 채취한 지난 수십만 년 동안의 이산화탄소와 메탄가스의 양이 정확히 같은 경향으로 변화하고 있는 것도 이를 반증하고 있다. 따라서 영구동토 지역에서 발생하는 메탄가스의 양을 정확히 이해하는 것은 매우 중요한 모니터링의 한 항목이라 할 수 있다.

✓ 한반도는 지정학적으로 전 지구적 기후변화에 가장 민감한 변화를 보여주는 지역이다. 물론 극지방도 큰 변화를 보여주기는 하지만 극지방과 열대지역은 지구온난화가 일어나더라도 한대기후와 열대기후를 그대로 유지한 채로 평균기온의 변화에 의한 여러 현상이 발생할 것이다. 하지만 온대기후에 속하는 한반도 지역은 지구온난화가 일어나면 아열대기후로 바뀌게 되면서 육상과 해양에 매우 큰 환경변화를 실제로 수반하게 되어 이에 따른 경제및 사회적 변화를 피할 수가 없. 따라서 이러한 한반도의 기후에 대한 예측을 위해서 극지역에 대한 여러 연구를 수행하는 것은 국익차원에서도 매우 중요하다고 생각된다.

검토자 소속	직위(직급)	성명

연구기획과제 최종보고서 검토의견서

기획과제명	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발' 기획 연구			
연구책임자	**소속**	건국대학교		
	성명	이승호		
연 구 기 간	2022.06.13. ~ 2023.03.31.(9개월)		**연구용역비**	60,000천원

검 토 결 과	
종합 검토의견	**필요시 별지사용**

– 최종보고서에는 기획과제의 전체 요청에 맞게 충실히 작성된 것으로 판단됨
– 향후 이 기획보고서를 기반으로 실제 과제가 기획이 될 경우에 다음과 같은 사항에 대해서는 기획과제 연구진 뿐만 아니라 연구재단에서도 충분한 고려를 해주셨으면 함
1) 극지연구의 경우 극지연구소가 주도적으로 역할을 할 수밖에 없다하더라도 대학 연구팀들에 대한 지원과 협력 구도는 반드시 고려되어야 함
2) 가령, 다양한 인프라를 갖고 있는 극지연에서 관측 인프라의 구축과 운용을 통한 다양한 자료의 확보 및 공유를 담당하고 학계에서는 이러한 자료를 바탕으로 좀 더 도전적인 연구과제를 수행할 수 있도록 역할을 분담하도록 하는 방안도 고려해 볼 수 있음

– 빅데이터 DB의 구축이 데이터 메타데이터의 공유 뿐만아니라 실질적인 자료의 공유로 이어질 수 있도록 제도적인 장치가 필요함
1) 가령, 관측 후 5년이 지나면 데이터는 무조건 공개되어야 하며, 그 데이터의 사용자는 데이터에 부여된 DOI 등을 통해 적절한 인용을 하도록 하고 나아가서는 데이터를 관측/후처리한 연구자들과 공동연구를 수행할 수 있도록 하는 시스템이 정착되어야함

**** 기타의견(과제수행에 도움이 될 내용 등을 기술, 필요시 별지사용) ***

검토자 소속	직위(직급)	성명

연구기획과제 최종보고서 검토의견서 (6)

연구기획과제 최종보고서 검토의견서

기획과제명	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발' 기획 연구			
연구책임자	**소속**	건국대학교		
	성명	이승호		
연 구 기 간	2022.06.13. ~ 2023.03.31.(9개월)		**연구용역비**	60,000천원

검 토 결 과	
종합 검토의견	**필요시 별지사용**

o 중간보고회에서 자문위원의 지적내용을 수정·보안 대비표를 통해 최종보고서에 상세하게 반영되었음을 확인

o 북극 이사회 회원국과의 정책 및 연구활동 협력체계는 잘 작성되어 있으나 본 기획연구과제를 통해 구축할 기후관련 빅데이터 시스템에 대한 국제적인 공유방안이 구체적으로 제시되었으면 함
- 국외 운용중이거나 계획인 극지 기후변화 관측 시스템 및 데이터 분석을 통해 활용방안을 찾고
- 본 기획연구에서 신규 구축하려는 AIoT 시스템 및 데이터와 통합하여
- 최종적으로 KPDC에 빅데이터 시스템을 구축하여 국내외 연구자가 공유할 수 있는 프레임워크 제공에 대한 내용이 그림 형태로 포함되었으면 함

o 빅데이터를 활용한 기후변화 예측 및 대응 연구분야의 기술동향 및 추세에 대해 보다 상세한 예시가 포함되었으면 함
- 딥러닝 기반의 예측 시스템에서 기계학습에 필요한 long-term 입력 및 출력 데이터의 형태, CNN 모델 구조 등
- 본 기획연구를 통해 기대되는 예측시스템 성능에 대한 범위와 한계도 제시
- 본 기획과제가 수행될 경우 과학과 (인공지능)공학의 학제간 연구 도입이 요구

**** 기타의견(과제수행에 도움이 될 내용 등을 기술, 필요시 별지사용) ***

검토자 소속	직위(직급)	성명

연구기획과제 최종보고서 검토의견서 (7)

연구기획과제 최종보고서 검토의견서

기획과제명	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발' 기획 연구			
연구책임자	**소속**	건국대학교		
	성명	이승호		
연 구 기 간	2022.06.13. ~ 2023.03.31.(9개월)		**연구용역비**	60,000천원

검 토 결 과	
종합 검토의견	**필요시 별지사용**

– 극지데이터는 기후변화에 따른 이상기후 연구(예를 들면, 극지 블랙카본이 대기 기온을 더 증가시켜 북극 아이스를 녹이고, 해수면이 올라가는 과정과 그에 따른 이상 기후 현상 등)와 가장 오염되지 않은 지역의 자료를 얻는 다는 의미에서 우리나라 온실가스 배출(세계기상기구(WMO)에서는 남극을 기준하여 온실가스의 전지구 농도를 산출)을 이해하기에 가장 적합함.
– 이러한 이유로 이미 선진 국가는 극지연구에 투자를 아끼지 않고 있으며,
– 이번 기획 연구가 실제로 이행될 경우 우리나라가 선진국으로 도약하는 데 중요한 발판이 될 것으로 사료됨.
– 특히 극지데이터가 향후 기후예보와 기상예보에 사용될 가능성을 미루어 볼 때 극지의 관측자료 확보는 필수적임 (ECMWF의 경우 이미 화학자료를 기상기후 예보 모델이 추가하여 정확도 향상).
– 이를 위해 최대한 많은 자료를 고품질로 확보하는 것이 중요하다고 판단되며 자원과 인력을 추가하는 것이 중요함.
– 특히 빅데이터 DB는 굉장히 중요한 개념으로 우리나라 자료의 사용처가 넓어지고, 이를 통해 리더그룹으로 도약할 수 있는 중요한 기회임. 따라서 이번 기획연구를 통해 최대한 많은 고품질 자료가 확보되는 방향이 제시되길 희망함.

**** 기타의견(과제수행에 도움이 될 내용 등을 기술, 필요시 별지사용) ***

검토자 소속	직위(직급)	성명

연구기획과제 최종보고서 검토의견서 (8)

연구기획과제 최종보고서 검토의견서

기획과제명	극지 빅데이터 연계 '미래 기후변화 대응 극지기초원천기술개발' 기획 연구			
연구책임자	소속	건국대학교		
	성명	이승호		
연 구 기 간	2022.06.13. ~ 2023.03.31.(9개월)		연구용역비	60,000천원

검 토 결 과	
종합 검토의견	**필요시 별지사용**

○'극지 빅데이터 연구에 대한 포괄적 개념 및 방향 제시', '극지 전문가가 아닌 일반인도 공감할 수 있도록 필요성이나 효과 제시' 등 **많은 중간점검에서 제시된 의견을 대부분 보완**하였으며, 극지 빅데이터 내용을 중심으로 전략주제 선정과 주제별 필요성과 목표, 연구내용이 체계적으로 정리되는 등 **전반적으로 RFP의 취지와 의도를 잘 파악하고 이에 따라 기획연구가 충실히 진행된 것으로 판단**됨

○특히, 대표적으로 예상되는 미래 사회문제 중 하나인 기후·환경변화 대응을 극지 빅데이터 연구의 필요성으로 전면에 내세우고 그 이유와 논리를 제시하는 데 집중한 것이 매우 전문적이거나 마이너한 다른 이유들을 같은 비중으로 나열하여 제시하는 것보다 오히려 뻔하지만 거스를 수 없는 **연구 필요성의 논리를 확보**하였다고 생각됨

○또한, 필요성이 확보된 만큼 향후 추진할 연구의 방향과 내용을 제시함에 있어 극지 관련 대내외적 환경분석이나 선행사업 분석 그리고 전문가 대상 수요조사 등이잘 진행되었으며, 이를 기반으로 다각적 분석을 통해 **전략 주제 설정과 주제별 목표와 내용을 도출하는 과정이 논리적이고 충실히 잘 수행되었다고 판단**됨

○수요조사를 통해 각 분야의 전문가로부터 해당 분야의 연구 주제와 내용을 제시받아 전략 주제별 연구의 목표나 내용 설정에 활용함으로써 본 기획을 통해 제시되는 연구가 이상적이지만은 않은 **기본적인 현실성은 확보**하였다고 생각되며, 다만 **전략 주제와 주제별 목표가 최종 설정된 현 상태에서 수요조사 내용을 반영하면서 주제와 맞지 않는 내용까지 포함되진 않았는지 반대로 전략주제별 목표를 달성하기 위해 빠진 연구 내용은 없는지 이 부분만 한번더 검토해보면 좋을 것 같다는 의견**임

**** 기타의견(과제수행에 도움이 될 내용 등을 기술, 필요시 별지사용) ***

검토자 소속	직위(직급)	성명

붙임1 최종평가 세부 평가의견

평가자	수정·보완 요구사항	종합평가의견
위원A	• 별도 없음.	• 극지에서의 기후변화 관련하여 기존 연구의 연속성 유지와 신규 연구 주제를 잘 분석한 것으로 보임
위원B	• 기존 북극에서 수행한 연구결과들과의 차별성을 빨간색 글자로 구분하고자 하였지만, 좀 더 구체적으로 기존 연구의 연속성과 차별성을 구분하여 제시해주는 것이 필요함. 그리고, 기존 연구의 연속성이 필요한 이유에 대한 설명도 필요함.	• 본 연구과제를 통해 우리나라에서 현재까지 진행해 온 북극환경에서의 연구성과 및 효과가 잘 정리되어 있음. • 우리나라가 북극환경에서 기후변화 영향을 진단하는 연구를 수행해야 하는 필요성도 잘 정리되어 제시됨. • 본 연구과제에서 최종적으로 도출한 연구기획이 기존 선행연구와 어떠한 차별성이 있는지를 구조적으로 표현하고자 하였고, 위험성 분석도 실시됨. 따라서, 본 연구과제의 취지에 맞게, 향후 북극환경에서의 진행되어야 하는 연구내용들이 잘 도출되었다고 평가됨.
위원C	• RFP에 제시된 연구내용 및 범위에 대한 핵심 내용을 제시하기 위해 요약문에 3개의 모식도를 제공한 것으로 보임. • 따라서 각 모식도의 caption에 모식도 내용을 부연 설명하여 RFP 대비 기획과제의 주요 내용이 잘 드러날 수 있도록 제시할 필요가 있음. • 134 쪽의 모식도 또는 135 쪽의 TRM 등을 제시할 수도 있을 것으로 판단됨.	• 과제제안요구서의 연구 내용 및 범위에 부합하는 전략 주제 및 각 전략 주제별 세부 주제를 구체적이고 체계적으로 도출하여 제시하였음. • 2단계 6개년 사업 전반에 걸친 기술로드맵을 3개 전략 주제 및 6개 세부 주제에 대해 제시하고 연차별 주요 성과를 설정하였음. • 총 사업비, 단계 및 연차별 사업비는 제시된 사업 내용을 적절하게 반영하여 수립된 것으로 판단됨 • 중간보고서 검토의견을 충실히 반영하여 보고서를 수정 보완하였음.
위원D	• 다만 권역별로 제시한 연구 주제들에 대해 어떻게 빅데이터를 구축하고 또 활용이 가능할 수 있는지에 대해서는 아직 구체적인 전략이 명확히 제시 되어 있지 않음. 이에 대한 보완이 요구되는 것으로 사료됨. • 향후 첨단과학기술의 극지 연구에 활용을 위해서도 구체적인 전략과 아이디어가 필요한 것으로 사료됨.	• 극지 빅데이터 연계 미래 기후변화 대응 관련 기획과제 보고서를 검토 결과 국가 기초원천기술개발 연구로서 극지 북극권 연구의 필요성을 선행 연구 결과 분석과 향후 연구 전략을 충실히 담고 있다고 사료됨. • 특히 급격한 기후 변화가 진행되고 있는 북극환경에 대해 기권, 지권, 수권, 생물권, 빙권 등 권역별 주요 연구 주제를 도출하고 있으며 적절한 연구 방향과 전략을 제시하고 있음.
위원E	• 당초 과제제안요구서의 연구내용 및 범위에는 포함되어 있지 않았으나 본 기획과제의 내용 및 범위에 포함한 '남북극 주요이슈 해결을 통한 국제적 위상 강화 방안 마련'에 대한 내용이 실질적으로 기획과제에서 도출된 전략주제 및 총괄기술 로드맵에는 언급이 전혀 없이 북극 동토권 관련 내용으로만 기술되어 있	• 과제제안요구서에서 제시한 연구목표, 연구내용 및 범위에 상응하게 기획연구가 성실하게 진행되었으며, 최종보고서(초안)의 내용도 극지환경연구의 필요성과 당위성, 선행연구의 성과분석 등이 충실하게 기술되어 있음. 다만 기획과제명에 맞춰 제시된 연구내용과

평가자	수정·보완 요구사항	종합평가의견
	음. 타 부처 사업과 key words 중복성으로 본 기획과제 내용이 제약을 받는다는 것은 이해되는 측면이 있으므로 '남북극'은 '극지'로 용어를 통일하는 것이 기획과제의 목표와 내용에 부합할 것임. 만약 '남북극' 용어를 유지하고자 한다면 전략주제 및 총괄기술로드맵에도 상응하는 내용이 제시되어야 함. • 105페이지에 언급되어 있는 바와 같이 총괄사업명과 세부사업명의 변경은 필요한 것으로 보이며, 105페이지에서 제시된 3가지 안 중에서 선행연구의 연속성과 지속성을 근간으로 후속사업의 명확한 사업 목표 및 내용을 제시하고 북극권 연구의 국제적 표준을 제시하는 북극이사회의 AMAP에 대응하기 위해서는 2안이 적절하다는 의견을 제시함. 본 기획과제명인 3안의 경우, 사업명과 내용이 개념부터 일치하지 않는 경우임. 즉, '빅테이터' 용어는 기존에 가용한 데이터들의 집합에서 필요한 가치를 추출하고 분석하는 기술적 개념으로 사용되는 용어이지만 기획과제에서 제시하는 전략주제의 세부 내용을 보면 기존에 확보한 북극권 거점을 활용하여 DB를 구축하고 활용하겠다는 것임. 3안의 경우처럼 '빅테이터' 용어를 사용하기 위해서는 후속과제에서 생산되는 DB를 포함하여 기존의 데이터 및 타 국가들의 모든 연구결과들을 망라한 빅데이터를 활용하여 각 전략 주제별로 미래 예측 기술 개발을 수행하겠다는 연구 내용이 포함되어야 후속과제의 최종 목표로 제시될 '미래 기후 변화 예측' 기술 개발에 부합한다고 판단됨. 따라서 3안이 고려되기 위해서는 전략주제 별로 빅데이터 개념에 상응하는 연구내용이 구체적으로 제시되어야 할 것임. • 이와 관련하여 총괄사업명과 세부과제명 변경은 선행과제의 지속성과 후속과제의 필요성을 고려할 때 중요한 이슈이므로 105페이지에서 제기한 과제명 변경의 각 안에 대한 장단점을 구체적으로 제시하는 것이 필요함.	최종적으로 도출된 전략 주제별 내용의 연계성이 부족한 측면이 있으며 수정 또는 보완할 부분은 아래의 수정보완 요구사항을 참고하기 바람.

붙임2 최종평가 수정·보완 요구사항 반영내역

전문기관의 수정·보완요구사항	수정·보완요구사항 반영내용 요약	적용 페이지
1. 기존 북극에서 수행한 연구결과들과의 차별성을 빨간색 글자로 구분하고자 하였지만, 좀 더 구체적으로 기존 연구의 연속성과 차별성을 구분하여 제시해주는 것이 필요함. 그리고, 기존 연구의 연속성이 필요한 이유에 대한 설명도 필요함.	• 본 기획연구 과제의 RFP에서 요구하는 극지기초원천기술개발사업과 타사업(“해양-육상-대기 탄소순환시스템 연구사업”)과의 차별성에 대해서 기술하고 있음 • 아울러 본 보고서에 해당 페이지에 보완하여 설명하였으며, 신규 연구에서는 최근 과학기술활동에서도 적용해야 한다는 중론에 부합될 수 있도록 ESG 개념을 적용하여 세분화하여 기술하였음	p. 25~36, 112~114, 124~129, 199~201
2. RFP에 제시된 연구내용 및 범위에 대한 핵심 내용을 제시하기 위해 요약문에 3개의 모식도를 제공한 것으로 보임. · 따라서 각 모식도의 caption에 모식도 내용을 부연 설명하여 RFP 대비 기획과제의 주요 내용이 잘 드러날 수 있도록 제시할 필요가 있음. · 134 쪽의 모식도 또는 135 쪽의 TRM 등을 제시할 수도 있을 것으로 판단됨.	요약문 iv~vi 페이지에 부연 설명하고, 134페이지의 모식도를 요약문에 추가 제시함	요약문 p. iv~vi
3. 다만 권역별로 제시한 연구 주제들에 대해 어떻게 빅데이터를 구축하고 또 활용이 가능할 수 있는지에 대해서는 아직 구체적인 전략이 명확히 제시 되어 있지 않음. 이에 대한 보완이 요구되는 것으로 사료됨. · 향후 첨단과학기술의 극지 연구에 활용을 위해서도 구체적인 전략과 아이디어가 필요한 것으로 사료됨	• 관측거점 등을 활용하여 빅데이터를 확보-구축하고, 과학 및 정책에 활용하며 성과-이익에 대한 선순환 구조를 제시하였음 • 권역별 빅데이터 구축과 관리 방안 및 활용 가능성 등에 대해 표 제시와 내용 수정보완함 : (전략주제-I의 세부주제-1) : (전략주제-I의 세부주제-2) : (전략주제-II의 세부주제-1) : (전략주제-II의 세부주제-2) : (전략주제-III의 세부주제-1) • 연구주제별 환경데이터의 품질 및 접근성 확보를 위해World Data System과 같은 표준적인 데이터 관리체계의 기준을 준용하여, 첨단과학기술(빅데이터 분석, 인공지능 등 적용)에서 극지 환경데이터에 접근 및 활용이 용이하도록 전략을 기술하였음 • 한편, 각 세부주제별 구체적인 아이디어는 향후 본 사업 시행이 본격화될 경우 세부과제 계획서 작성 단계에서 제시할 수 있을 것으로 사료됨	p. v, 23, 47~50, 148, 152, 171, 185, 195

4. 당초 과제제안요구서의 연구내용 및 범위에는 포함되어 있지 않았으나 본 기획과제의 내용 및 범위에 포함한 '남북극 주요 이슈 해결을 통한 국제적 위상 강화 방안 마련'에 대한 내용이 실질적으로 기획과제에서 도출된 전략주제 및 총괄기술 로드맵에는 언급이 전혀 없이 북극 동토권 관련 내용으로만 기술되어 있음. 타 부처 사업과 key words 중복성으로 본 기획과제 내용이 제약을 받는다는 것은 이해되는 측면이 있으므로 '남북극'은 '극지'로 용어를 통일하는 것이 기획과제의 목표와 내용에 부합할 것임. 만약 '남북극' 용어를 유지하고자 한다면 전략주제 및 총괄기술 로드맵에도 상응하는 내용이 제시되어야 함. · 105페이지에 언급되어 있는 바와 같이 총괄사업명과 세부사업명의 변경은 필요한 것으로 보이며, 105페이지에서 제시된 3가지 안 중에서 선행연구의 연속성과 지속성을 근간으로 후속사업의 명확한 사업 목표 및 내용을 제시하고 북극권 연구의 국제적 표준을 제시하는 북극이사회의 AMAP에 대응하기 위해서는 2안이 적절하다는 의견을 제시함. 본 기획과제명인 3안의 경우, 사업명과 내용이 개념부터 일치하지 않는 경우임. 즉, '빅테이터' 용어는 기존에 가용한 데이터들의 집합에서 필요한 가치를 추출하고 분석하는 기술적 개념으로 사용되는 용어이지만 기획과제에서 제시하는 전략주제의 세부 내용을 보면 기존에 확보한 북극권 거점을 활용하여 DB를 구축하고 활용하겠다는 것임. 3안의 경우처럼 '빅테이터' 용어를 사용	(코멘트) • "남북극"의 용어를 최대한 "극지"로 통일하였으나, 기존 남극을 대상으로 극지연구소의 기관고유사업으로 수행 중인 고층대기 연구의 경우, 북극에서도 기후변화 관련 대척점 현상을 측정하고 비교 분석하는 의미에서 남극을 그대로 표현함 • 최종보고서(초안)의 105페이지(수정 최종보고서의 113페이지)에 제시한 표에서의 세부사업명-내역사업명-총괄과제명에 대한 현행과 향후 계획(안)에 대해서는, 현재 과기부/한국연구재단에서도 검토하고 있는 사항으로서, 이에 대한 기획연구 책임자 및 참여연구자들의 제안사항으로 기재한 것임. 다만, 현재 수행 중인 과제와 더불어 향후 추진하고자 하는 과제의 연계성 또는 국내외 과학기술적 및 거버넌스의 동향을 고려할 때, 평가의견(2안 추천-과제명 구체화 수정제시)이 적절하다고 판단됨	p. 24, 25, 29, 32~33, 113~114, 119, 125, 126, 139, 145, 163, 164

하기 위해서는 후속과제에서 생산되는 DB를 포함하여 기존의 데이터 및 타 국가들의 모든 연구결과들을 망라한 빅데이터를 활용하여 각 전략 주제별로 미래 예측 기술 개발을 수행하겠다는 연구 내용이 포함되어야 후속과제의 최종 목표로 제시될 '미래 기후 변화 예측' 기술 개발에 부합한다고 판단됨. 따라서 3안이 고려되기 위해서는 전략주제 별로 빅데이터 개념에 상응하는 연구내용이 구체적으로 제시되어야 할 것임. · 이와 관련하여 총괄사업명과 세부과제명 변경은 선행과제의 지속성과 후속과제의 필요성을 고려할 때 중요한 이슈이므로 105페이지에서 제기한 과제명 변경의 각 안에 대한 장단점을 구체적으로 제시하는 것이 필요함.		

(보고서 뒷면)

주 의

1. 이 보고서는 과학기술정보통신부에서 시행한 2022년 제1차 과학기술분야 연구기획과제 “극지 빅데이터 연계 ‘미래 기후변화 대응 극지기초원천기술 개발’ 기획 연구”의 최종보고서이다.

2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 과학기술정보통신부(한국연구재단)에서 시행한 연구기획과제의 결과임을 밝혀야 한다.