



ISSN 2733-7529 (Print)  
ISSN 2733-7537 (Online)

# POLES & GLOBE

## 2024 극지와 세계



발행일: 2024년 12월  
발행처: 극지연구소 정책개발실 Tel. 032-770-8422  
주소: 인천광역시 연수구 송도미래로 26, 극지연구소 (www.kopri.re.kr)

Copyright© 2014 KOPRI, All rights reserved.  
Cover pages photo credit© KOPRI





## CONTENTS 목차

### 04 요약

#### Vol. 01

08 미래 북극 해빙과 탄소중립정책의 관계  
민승기 포항공과대학교

11 남극의 해빙 감소가 황제펭귄의 멸종위기를 재촉한다  
김정훈 극지연구소 생명과학연구본부

15 「기후변화감시예측법」 등의 제정·개정과 시사점  
현대호 한국법제연구원

#### Vol. 02

18 남극해 ‘잔물’ 생성 정밀 관측을 통한 전 지구 해양 변화 예측 능력 향상  
윤승태 경북대학교

22 극한환경 생존의 대명사, 완보동물을 통한 극지연구  
김지훈 극지연구소 빙하지각연구본부

25 아라온호, 성과와 미래  
김춘식 극지연구소 채빙선운영실

#### Vol. 03

29 빙하 속 과거와 미래를 읽는 열쇠, 빙하투과레이더 기술  
이주한 극지연구소 미래기술센터

32 인공지능(AI) 기반 기후변화 연구  
함유근 서울대학교 환경대학원

35 한국이 북극 민·관 포럼에 참석하는 이유  
정지훈 극지연구소 글로벌협력실

#### Vol. 04

38 지구온난화가 북극 툰드라 지역 탄소저장소에 미칠 영향  
정지영 극지연구소 생명과학연구본부

41 극지고층대기와 오로라, 우주날씨예보의 핵심!  
지건화 극지연구소 해양대기연구본부

44 인공지능(Artificial Intelligence) 시대, 극지연구에서의 활용 방안  
황유나 극지연구소 정책개발실

VOL. 01  
MARCH

08p 민승기 포항공과대학교  
**미래 북극 해빙과 탄소중립정책의 관계**

북극 해빙은 전 지구 기후 시스템의 상태를 나타내는 중요한 지시자 중 하나로, 미래에 다가올 변화를 정확히 예측하는 것은 기후변화의 영향 및 적응에 있어 매우 중요하다. 북극 해빙은 면적이 연중 최소인 9월을 기준으로 할 때 지난 수십 년 동안 절반으로 줄어들었다. 최근 연구에 따르면 대부분의 기후모델들이 관측보다 북극 해빙 감소를 작게 모의하고 있으며, 이러한 모델의 과소 모의를 고려할 경우에 미래 북극 해빙은 향후 온실가스 저배출 시나리오에서도 2050년대에 사라질 수 있다고 보고되었다. 또한 고배출 시나리오에서는 2030년대에 북극 해빙이 소멸할 수 있고, 2060년대에는 9월뿐만 아니라 여름철 수개월에 걸쳐 해빙이 없는 상태가 될 수 있음을 경고하였다. 아울러 북극 해빙이 더 빠르게 줄어들면 북극 온난화가 증폭되고 한반도가 속한 중위도 지역에 이상기후가 더 빈번해질 수 있다. 따라서 이러한 피해를 막기 위해서는 더욱 강력한 탄소저감 정책이 필요하다.

11p 김정훈 극지연구소 생명과학연구본부  
**남극의 해빙 감소가 황제펭귄의 멸종위기를 재촉한다**

황제펭귄은 번식을 위해 1년 중 9개월가량을 해빙 위에서 생활하는 종이다. 최근 들어 급격한 지구온난화로 남극에서 해빙이 감소하는 추세에 있으며 황제펭귄이 서식하는 일부 지역에서는 해빙의 유실로 번식에 실패하는 상황이 현실로 다가왔다. 온실가스 배출을 통제하지 못해 지구온난화가 가속된다면 2100년에는 황제펭귄의 약 81%가 사라지게 될 것이다. 파리기후변화협약(Paris Agreement)에 따라 온실가스 배출을 줄이고, 황제펭귄을 남극특별보호종으로 지정하려는 남극조약협약의당국회의 환경보호위원회(ATCM-CEP)의 노력에도 불구하고 일부 회원국들의 이해관계 충돌로 실질적인 환경보존에 대한 조치는 제자리걸음이다. 대한민국은 장보고과학기지를 거점으로 빅토리아랜드의 북부 연안에 있는 황제펭귄 번식지 세 곳에서 장기 모니터링을 수행 중이다. 우리나라의 황제펭귄 연구에 대한 역사는 짧지만 유의미한 결과가 도출되면 ATCM-CEP 및 CCAMLR 등의 국제기구에서 남극의 환경보존 이슈에 선도적으로 대응하고 꾸준한 과학 연구로 남극 환경보호에 실질적으로 기여할 수 있을 것이다.

15p 현대호 한국법제연구원  
**「기후변화감시예측법」 등의 제정·개정과 시사점**

지구상에서 사람들은 기상현상과 기후변화에 따른 자연생태계에 적응할 수밖에 없으며, 이를 위한 법제도로 「기상법」과 「기후변화감시예측법」이 있다. 「기상법」은 한반도에 거주하는 사람들에게 기상현상에 적응할 수 있도록 하는 동시에 「기후변화감시예측법」의 기후변화 감시·예측의 바탕이 된다. 「기후변화감시예측법」은 기후변화의 감시 및 예측을 통한 기후변화 적응을 넘어 「탄소중립기본법」에 따른 기후위기 대응도 지원하는 역할을 하는데, 여기서 기후위기 대응은 사람의 경제활동으로 인해 발생한 탄소의 감축을 의미한다. 「기후변화감시예측법」은 해양과 극지의 기후변화 감시 및 예측도 규정하고 있는데 「기상법」·「해양조사정보법」 및 「극지활동 진흥법」 등과의 관계에서 해석상 어려움이 예상되나, 올해 시행 예정인 「기후변화감시예측법」의 시행령(안)과 시행규칙(안)을 통하여 해소될 것으로 사료된다. 「기후변화감시예측법」과 같은 법 시행령 및 시행규칙의 제정은 기후변화 감시 및 예측에 관한 업무(해양과 극지 포함)를 안정적으로 수행할 수 있는 법제도 기반을 마련한 것으로 볼 수 있으며, 한반도 및 전 지구상에서 나타나는 기후위기 대응 지원도 기대된다. 또한 산림, 농업 등 분야별로 기후변화 감시 및 예측, 적응 등에 관한 법률의 제정 및 개정도 추진되고 있으며, 해양과 극지 분야도 분법될 가능성이 높다.

VOL. 02  
JUNE

18p 윤승태 경북대학교  
**남극해 '잔물' 생성 정밀 관측을 통한 전 지구 해양 변화 예측 능력 향상**

남극해에서는 지구상에서 가장 무거운 '잔물'인 고염대륙붕수가 생성된다. 이 해수는 전 지구 해양 순환의 핵심 중 하나인 남극저층수의 특성을 결정하는 '마중물' 같은 존재이다. 최근 급격해진 기후변화의 영향으로 표층에서 만들어지는 '잔물' 고염대륙붕수와 '잔물'의 영향을 받는 남극저층수의 특성 변화가 꾸준히 관측되고 활발하게 보고되고 있다. 지구상에서 가장 무거운 해수인 남극저층수의 특성 변화로 인해 무게(밀도)가 변하게 된다면 전 지구 해양 순환 변화 및 해수면 변동까지 초래할 수 있다. 따라서 전 지구 해양 순환 및 해수면 변동 예측 능력을 향상하기 위해서는 남극해 고염대륙붕수의 생성 기작과 과정을 면밀히 파악하는 것이 매우 중요하다. 하지만 남극의 극한 환경 조건으로 인해 현장 관측이 매우 제한적이었기 때문에 지금까지는 하계 선박 관측 자료에서 확인된 고염대륙붕수 특성 변화를 통해 간접적으로 해수의 생성 정도와 분포 특성 등을 규명해왔다. 그러나 최근 경북대학교, 극지연구소, 미국 컬럼비아대학교, 뉴질랜드 국립수문대기연구소 등으로 구성된 국제 공동연구팀은 도전적 관측 시도로 약 1년 동안 연속 모니터링에 성공하여 고염대륙붕수의 생성 과정을 상세히 규명하고, 정량적인 수치를 기반으로 고염대륙붕수 생성에 영향을 미치는 주요 요소들을 밝혀냈다. 겨울철 고염대륙붕수 생성 과정을 직접 관측하여 해수 생성량과 그 영향 요소를 정량적으로 제시한 것은 이번이 처음이며, 본 연구는 향후 전 지구 해양 순환 변화와 해수면 변동 예측 연구에 크게 기여할 것으로 기대한다.

22p 김지훈 극지연구소 빙하지각연구본부  
**극한환경 생존의 대명사, 완보동물을 통한 극지연구**

완보동물은 극한의 환경조건에서 살아남는 능력을 가졌지만 눈에 보이지 않을 정도로 크기가 작은 동물로 알려져 있다. 이러한 적응 능력을 토대로 전 세계 어디에서든 다양한 종이 발견되며, 특히 남극과 북극의 육상 생태계에서 주요 구성원으로 자리 잡고 있다. 극한의 조건에서 살아남는 생물의 대표 종으로 인식되는 완보동물은 동물계에서 종 수로 가장 큰 분류군인 탈피동물군에 속하는데, 이 분류군의 진화사를 밝히는 데 중요한 역할을 한다. 또한 잘 알려진 모델 종들을 이용해 실험한 결과, 상당수의 육상 완보동물이 열에 취약한 것으로 밝혀져 기후변화로 인한 극지 생태계의 충격과 변화를 알려주는 지표 역할도 할 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 생리학적, 생태학적, 진화생물학적 중요성에도 불구하고 국내에서는 한동안 연구 활동이 없었지만, 극지연구소가 그린란드의 완보동물 연구를 시작한 이래로 점차 세계적 수준의 연구 역량을 갖추어 가고 있다. 지속적인 연구를 통해 극지에서의 생물의 적응과 지구온난화에 따른 생태계의 변화, 그리고 동물 진화에 있어서 완보동물이 중요한 과학적 기여를 할 수 있으리라 기대한다.

25p 김춘식 극지연구소 쇄빙선운영실  
**아라온호, 성과와 미래**

아라온호는 우리나라 극지연구의 활동 범위 확장과 독자적인 연구 진행을 위해 건조된 아라온 쇄빙연구선으로 2009년 11월 2일 첫 항해를 시작해 지금까지 15년간 전 세계 바다를 누비고 있다. 총톤수는 7,507t으로 길이가 111m에 달한다. 항해 속력은 12노트(22.2km)로 결빙 지역에서 1m의 해빙을 시속 3노트(약 5.6km/h)의 속력으로 깨뜨리며 항해할 수 있는 국내 최초의 쇄빙연구선이다. 아라온호는 음향측심장치(Multi-beam echo sounder), 탄성파장비(Seismic system), 해수분석장비(CTD) 및 해저퇴적물채취장비를 비롯한 60여 종의 연구 장비를 장착하고 있다. 또한 15년 동안 남극과 북극 간 총 69만 마일을 오가며 “아라오나의 발견” 및 2023년 “남극 빙하 녹이는 바닷물 계절 변동성 최초 규명” 등 총 204건의 연구 활동을 지원하였다. 그뿐만 아니라 남극해에서는 조난 어선과 인명을 구조하여 “남극산타”라는 별명을 얻기도 했다. 아라온호는 남극과 북극에서 연구 활동을 지원하여 우리나라 극지연구의 위상 제고를 견인하는 핵심 인프라일 뿐만 아니라 차세대 쇄빙선이 인도되기 전까지 국내외 연구자들의 다양한 연구 수요를 수용하여 우수한 연구 성과가 도출될 수 있도록 지속적인 지원을 하고 있다. 지구온난화 현상으로 갈수록 어려워지는 극지에서의 남극과학기지 보급 업무를 성공적으로 지원하여 극지연구의 미래를 함께하고자 한다.

29p 이주한 극지연구소 미래기술센터

### 빙하 속 과거와 미래를 읽는 열쇠, 빙하투과레이더 기술

남극의 빙하 내부에는 지구의 기후변화를 이해하는 데 필수적인 과거의 기후 기록이 보존되어 있다. 빙하를 연구하는 방법 중 하나인 빙하투과레이더(Ice Penetrating Radar, IPR) 기술은 빙하의 두께와 하부 지형을 탐사하여 빙하 이동 및 변화, 이상적인 심부 빙하 시추 후보지와 빙저호 등의 위치 선정과 관련된 중요한 데이터를 제공한다. 우리나라도 최근 개발한 IPR을 이용하여 심부 빙하 시추 후보지 선정을 위한 연구를 진행하고 있으며, 연구 결과물인 데이터를 BEDMAP 국제 협력 프로젝트를 통해 공유하고 있다. IPR 기술은 또한 유로파와 엔셀라두스 등 태양계의 얼음 위성 탐사에도 적용될 예정이다. IPR 기술은 모든 빙하 연구의 기본이 되므로 지속적인 관심과 고찰이 필요하다. 이는 기후변화에 대한 보다 효과적인 대응 전략을 마련하고, 지구와 우주 환경에 대한 이해를 높이는 데 기여할 것이다.

32p 함유근 서울대학교 환경대학원

### 인공지능(AI) 기반 기후변화 연구

최근 AI 기법을 활용한 날씨예측 모형이 글로벌 IT기업들에 의해 개발되면서 전 지구 기상 및 기후 예측 성능은 최근 크게 향상되고 있다. 다수의 AI 기반 예측 모형들은 관측된 범위 내의 날씨 및 기후 변동에 대해서 매우 성공적인 추론을 한다는 사실이 증명되었다. 아직까지 완벽하지는 않지만 AI 기법이 단·중기 기상 및 기후 예측을 넘어 지금껏 관측되지 않은 새로운 기후 상태 하에서의 지구 시스템 특성 변화까지 예측하도록 진화하고 있다. AI를 기반으로 한 기후변화 연구는 기존 역학 모델에 기반한 기후변화 연구를 보완 및 대체할 수 있는 신기술이 될 것으로 기대된다. 아울러 AI 기반 연구는 과학기술을 토대로 제공받은 극한 기후 현상의 변화 패턴의 정량적 예측치를 통해 국가 정책 결정자가 기후변화 정책 수립의 우선순위를 결정하는 데 핵심적인 역할을 할 수 있는 기법으로 장기적인 관점에서 지속적인 지원이 필요하다.

35p 정지훈 극지연구소 글로벌협력실

### 한국이 북극 민·관 포럼에 참석하는 이유

북극씨클(Arctic Circle), 북극 프론티어(Arctic Frontiers) 등 북극 민·관 포럼은 폭넓은 북극권·비북극권 당사자에 언로(言路)를 제공하고, 북극의 오늘과 내일에 대한 담론을 생산하는 역할을 해왔다. 극지연구소 등 전문기관은 정부를 지원하여 비교적 초창기부터 이들 포럼에 참여하여 우리의 활동을 알리고 북극 담론 형성에 참여하고자 노력해왔다. 이 글에서는 북극씨클과 북극 프론티어를 중심으로 북극 민·관 포럼 성격과 의의를 알아보고, 극지연구소가 이들 민·관 포럼에 참여하여 달성코자 하는 목표, 그리고 지금까지 이들 북극 민·관 포럼에서 이루어낸 성과를 소개한다.

38p 정지영 극지연구소 생명과학연구본부

### 지구온난화가 북극 툰드라 지역 탄소저장소에 미칠 영향

최근 북극 지역 온난화는 전 지구 평균의 4배 가까이 빠르게 진행되고 있다. 툰드라 지역의 영구동토층에는 전 세계 토양 탄소의 약 25%가 저장되어 있어서 빠른 북극 온난화에 의한 온실기체 방출은 매우 큰 우려를 낳고 있다. 따라서 북극 툰드라 지역에서 기온 상승에 의한 토양 탄소 순환 변화의 정확한 이해가 필요하다. 1990년부터 기후변화가 툰드라 생태계에 미치는 영향을 이해하기 위해 세계 각지의 연구자들은 International Tundra Experiment(ITE)라는 연구 네트워크를 만들고 공통의 프로토콜을 이용하여 북극과 남극, 고산 지역을 포함하는 툰드라 지역에서 온도상승챔버(Open top chamber, OTC) 등을 설치한 후 육상 생태계의 식생, 토양 환경인자 등을 모니터링하고 있다. 최근 이 연구팀은 온도 상승 모사실험으로 획득한 생태계 호흡량 변화 데이터를 공유하여 메타 분석을 수행하였다. 그 결과 대기 온도가 1.4도 상승하면 생태계 호흡량이 평균 30% 증가되지만, 온도 상승에 따른 생태계 호흡량은 각 지역의 여러 토양 환경 특성에 따라 22%에서 38%까지 생태계 호흡량이 달라지는 것을 보여주었다. 본 연구는 북극 토양 환경 조건에 따라 기후 변화에 대한 민감도가 달라질 수 있음을 보여줌으로써 추후 어느 툰드라 지역의 온난화에 더 관심을 가져야 하고, 관리가 필요한 지역인지에 대한 가이드라인을 제시할 때 근거 자료로 활용이 가능할 것이다.

41p 지건화 극지연구소 해양대기연구본부

### 극지고층대기와 오로라, 우주날씨예보의 핵심!

과거에 “우주”는 SF 영화에서나 볼 수 있었던, 우리 삶과는 동떨어진 아주 먼 세계였다. 그러나 현대사회에서 우주는 이미 우리 실생활 깊숙이 침투해 있으며, 더 이상 우리 손에 닿지 않는 먼 세계의 공간이 아니다. 인공 위성을 활용한 대표적인 우주기술인 위성항법 시스템은 우리 실생활 곳곳에서 활용되고 있으며, 나아가 우주 여행, 우주탐사 등 우주는 인류에게 더욱 가까이 다가오고 있다. 따라서 우주환경의 “날씨”, 즉 우주기상 예측의 필요성이 급격히 대두되고 있으며, 전 세계 우주과학계에서는 이를 위한 다양한 과학적 노력이 진행되고 있다. 이 가운데 극지에서의 우주환경 관측은 우주기상 예측 모델 개발에 필요한 정보 확보 차원에서 가장 핵심적인 요소가 되고 있다. 극지 우주환경의 상징적인 현상인 오로라는 태양 에너지가 태양풍과 자기권을 거쳐 지구로 전달되는 과정에서 나타나는 것으로, 맨 눈으로 관측이 가능한 유일한 우주기상 현상이다. 극지 고층대기의 오로라 현상에 대한 이해는 우주기상 예측을 향한 첫걸음이다. 극지연구소 우주과학팀에서는 남북극에서의 오로라 관측 및 관련 우주환경 관측을 더욱 확대해 나갈 예정이다.

44p 황유나 극지연구소 정책개발실

### 인공지능(Artificial Intelligence) 시대, 극지연구에서의 활용 방안

Artificial Intelligence(인공지능, 이하 ‘AI’)는 인간의 지능적 행동을 모방하는 기술로 머신러닝, 딥러닝, 생성형 AI로 발전해 왔으며 2022년 ChatGPT의 출현으로 새로운 인공지능 시대를 맞이하게 된다. 많은 연구 기관에서는 AI 기술을 연구에 활용하며 연구 효율성을 향상시키고 혁신적인 연구 성과를 얻을 수 있었다. 하지만 AI 기술은 허위 정보 생성, 데이터 보안, 시스템 관리 등의 위험성이 있는 만큼 국제사회는 위험성을 낮춘 안전한 기술 확보를 위해 국제표준화와 국제 협력을 추진하고 있다. 극지연구 분야에서도 AI 기술의 효율성은 매우 높으며 많은 해외 연구기관에서 AI 기술을 활용한 극지연구를 진행하고 있다. 이에 극지연구소에서도 향후 보다 적극적인 AI 기술 활용에 대한 필요성이 제기되고 있다. 본 연구에서는 기존 연구 사례를 참고하여 비정형 데이터를 활용한 생태계 분석, 인프라 주요시설 유지 보수 및 운영 자동화, 국내외 정책 자료 분석 및 요약, 인사 채용 시 AI 기술을 활용한 연구 성과 및 문서 검증 등의 방안을 제시하고자 한다.

# 미래 북극 해빙과 탄소중립정책의 관계



민승기 포항공과대학교

북극 해빙은 전 지구 기후 시스템의 상태를 나타내는 중요한 지시자 중 하나로, 미래에 다가올 변화를 정확히 예측하는 것은 기후변화의 영향 및 적응에 있어 매우 중요하다. 북극 해빙은 면적이 연중 최소인 9월을 기준으로 할 때 지난 수십 년 동안 절반으로 줄어들었다. 최근 연구에 따르면 대부분의 기후모델들이 관측보다 북극 해빙 감소를 작게 모의하고 있으며, 이러한 모델의 과소 모의를 고려할 경우에 미래 북극 해빙은 향후 온실가스 저배출 시나리오에서도 2050년대에 사라질 수 있다고 보고되었다. 또한 고배출 시나리오에서는 2030년대에 북극 해빙이 소멸할 수 있고, 2060년대에는 9월뿐만 아니라 여름철 수개월에 걸쳐 해빙이 없는 상태가 될 수 있음을 경고하였다. 아울러 북극 해빙이 더 빠르게 줄어들면 북극 온난화가 증폭되고 한반도가 속한 중위도 지역에 이상기후가 더 빈번해질 수 있다. 따라서 이러한 피해를 막기 위해서는 더욱 강력한 탄소저감정책이 필요하다.

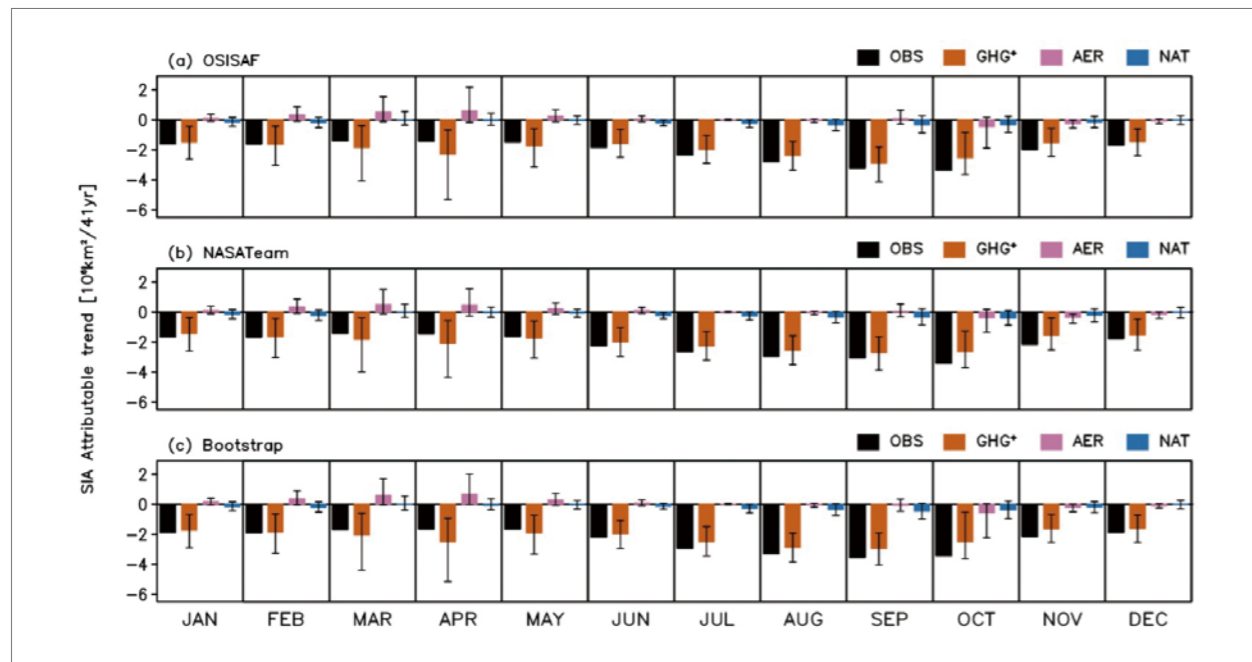
## 북극 해빙의 전 지구적 중요성

북극 해빙은 지표로 들어오는 태양복사에너지를 반사하고 해양에서 대기로 나가는 장파복사에너지를 차단하여 북극 지역을 차갑게 유지시킨다. 이러한 과정을 통해 북극 해빙은 전 지구 온도의 상승을 막아주는 '절연체' 역할을 하고 있다. 이러한 북극 해빙이 급격히 감소하게 되면 태양복사에너지가 더 많이 유입되면서 '북극 증폭'으로 알려진 북극 지역의 온난화 현상이 크게 증가할 것이며 이에 따라 북극권 지역뿐만 아니라 전 지구에 걸쳐 막대한 영향을 줄 수 있다. 위성 관측이 가능한 1979년부터 현재까지 북극 해빙 면적의 변화를 살펴보면, 전 계절에 걸쳐 그 면적이 감소하고 있다. 특히 여름철에 해당하는 8~10월에 매우 큰 폭으로 감소하고 있으며, 10년간 평균 약 12%씩 줄어들어 지난 40여 년간 50% 가까이 줄어든 것

으로 나타났다. 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 6차 평가보고서에 따르면, 북극 해빙은 과거 10년 기간(1979~1988) 대비 최근 10년 기간(2010~2019)에 해빙의 가장자리를 따라 크게 감소하였으며, 온실가스 배출을 급격히 줄이지 않으면 21세기 중반 이전에 연중 해빙이 가장 작은 9월을 기준으로 북극 해빙이 거의 소멸될 것으로 전망하였다.

## 북극 해빙 감소에 미치는 인위적 온실가스 증가의 영향

미래의 탄소 배출 경로에 따라 북극 해빙이 얼마나 빨리 감소할 것인지를 예측하기 위해서는 과거 관측에 나타난 북극 해빙 감소에 미치는 온실가스 증가의 기여를 정확히 파악하는 것이 중요하다. 기후에 미치는 인간 활동은 온실가스 증가뿐만 아니라 에어로졸 증가도 해당되기 때문에 에어로졸의 영향을 분리



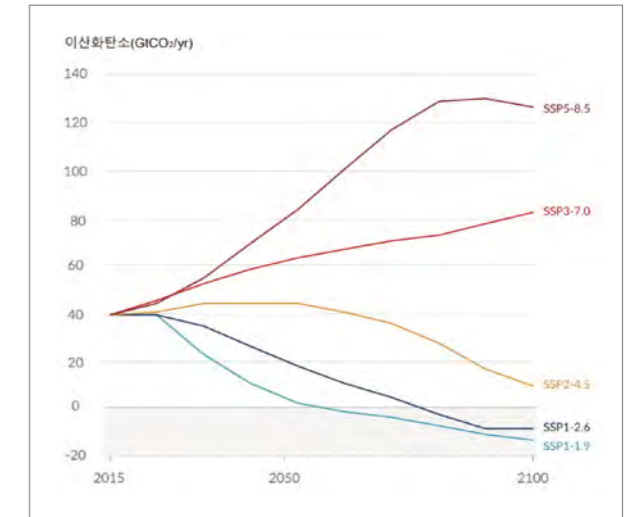
[그림 1] 세 위성 관측(OSISAF, NASATeam, Bootstrap)에 나타난 월별 북극 해빙 감소 추세(1979~2019)와 기후모델에서 예측한 외부강제력별 기여, 검증: 위성 관측 추세. 주황: 온실가스 강제력의 기여, 분홍: 에어로졸 강제력의 기여, 파랑: 자연 강제력(화산 및 태양활동)의 기여. 오차 막대는 강제력별 기여의 90% 신뢰구간을 나타냄. 가로축은 1월부터 12월까지 매월을 나타내며 세로축은 해당 월의 최근 41년간 북극 해빙 면적의 변화 크기(단위: 백만 km<sup>2</sup>)를 보여줌. (Kim et al. 2023)

하여 평가해야 하며, 자연적 요인에 해당하는 태양 및 화산 활동의 영향도 함께 고려해야 한다. 그림 1은 지난 41년간 (1979~2019) 월별 해빙 면적의 장기 추세 관측값과 기후모델 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 기후모델 결과들은 각각 온실가스, 에어로졸, 태양 및 화산활동의 관측 변화값을 입력하여 시뮬레이션한 결과이며, 이를 관측과 비교함으로써 북극 해빙 감소에 미치는 개별 요인들의 기여를 파악할 수 있다. 연중 모든 시기에 걸쳐 북극 해빙이 감소하고 있으며, 이러한 관측된 해빙 감소(검은색)의 대부분은 온실가스 증가(주황색)에 의한 것임을 확인할 수 있다. 온실가스의 영향력에 비해 에어로졸(분홍색)과 태양 및 화산활동(파란색)의 영향력은 매우 작게 나타났다. 또한 여름철을 중심으로 대부분 시기에 기후모델에서 예측한 북극 해빙 감소 추세가 실제 관측보다 작은 것을 볼 수 있는데 이는 기후모델이 실제 기후변화의 속도를 재현하지 못하고 있음을 뜻한다. 이러한 기후모델의 문제는 같은 기후모델을 이용한 미래 탄소 배출 시나리오에 따른 시뮬레이션 결과에서도 마찬가지로 나타날 수 있어 이러한 오차를 해결할 수 있는 연구가 필요하다.

## 탄소 배출 시나리오에 따른 북극 해빙의 변화

온실가스는 한 번 배출되면 평균적으로 100년 이상 대기 중에 머물면서 온실효과를 일으키는데, 장기간 체류하는 특성으로 인해 전 지구의 온난화 규모는 인류가 산업혁명 이후로 배출한 온실가스의 누적량에 비례하게 된다. 또한 전 지구 온도와 누적 배출량이 밀접한 관련성이 있다는 의미는 탄소중립인 '넷제로' 시점까지 지구온난화가 지속된다는 것이다. 현재 전 지구 탄소 배출량은 40 GtCO<sub>2</sub>/yr 정도이며, 향후 인류의 기후변화 대응에 따른 온실가스 배출 시나리오를 살펴보면, 고배출 시나리오(SSP5-8.5), 중배출 시나리오(SSP3-7.0, SSP2-4.5)와 저배출 시나리오(SSP1-2.6, SSP1-1.9)가 있다(그림 2). 여기서 SSP 시나리오는 IPCC 6차 평가보고서를 위해 개발된 공통사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathway)로서 2100년을 기준으로 복사강제력 강도와 함께 사회 경제적 구조 및 기후변화 완화 및 적응 노력에 따라 5개의 시나리오로 구분된다(표 1). 이 중 21세기 이내에 탄소중립 달성을 가정한 시나리오는

두 가지가 있다. 그중 SSP1-1.9는 2050년대 후반에, SSP1-2.6은 2070년경에 넷제로에 도달하고 그 이후에는 음의 배출을 가정한다. 또한 SSP1-1.9와 SSP1-2.6 시나리오는 21세기 후반에 파리협정의 목표 온도인 산업혁명 이전 대비 지구 온도 1.5도와 2도 증가에 각각 해당한다.

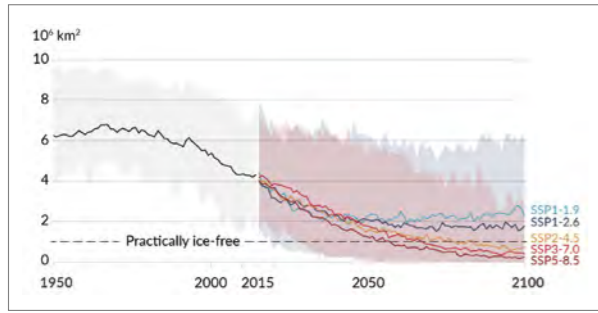


[그림 2] SSP 시나리오별 CO<sub>2</sub> 배출 시계열(IPCC 6차 보고서)

IPCC 6차 보고서에서 제시한 다섯 가지 탄소 배출 시나리오별 북극 해빙의 미래 전망을 살펴보면(그림 3), 연중 해빙 면적이 가장 작아지는 9월을 기준으로 중배출(SSP2-4.5, SSP3-7.0), 고배출(SSP5-8.5) 시나리오에서 2050~2070년대에 북극 해빙이 소멸할 것으로 보고되었다. 여기서 해빙 소멸의 기준은 100만 km<sup>2</sup>를 이용한다. 한편 저배출 시나리오인 SSP1-1.9와 SSP1-2.6에서는 북극 해빙이 남아 있을 것으로 예측되었고, 파리협정 목표인 1.5도와 2도까지만 증가하는 온난화를 달성한다면 북극 해빙 소멸을 막을 수 있음을 뜻한다(표 1). 하지만 이러한 전망은 위 그림 1에서 설명한 대로 기후모델들이 전반적으로 북극 해빙 감소를 실제보다 작게 예측하는 특성을 고려하지 않은 것으로 실제 북극 해빙은 더욱 빠르게 감소할 수 있다.

| 종류       | 설명   | 산업혁명 이전 대비 전 지구 온도 증가 (2081~2100) |
|----------|--|-----------------------------------|
| SSP1-1.9 | 화석연료 사용을 줄이고, 재생 가능 에너지와 효율적인 에너지 사용을 추진하는 경우로 파리협정 1.5도 목표에 상응함 | 1.4°C                             |
| SSP1-2.6 | 재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속가능한 경제성장을 이룰 것으로 가정하는 경우    | 1.8°C                             |
| SSP2-4.5 | 기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도가 중간 단계를 가정하는 경우                             | 2.7°C                             |
| SSP3-7.0 | 기후변화 완화 정책에 소극적이며 기술개발이 늦어 기후변화에 취약한 사회구조를 가정하는 경우               | 3.6°C                             |
| SSP5-8.5 | 산업기술의 빠른 발전에 중점을 두어 화석연료 사용이 많고 도시 위주의 무분별한 개발이 확대될 것으로 가정하는 경우  | 4.4°C                             |

[표 1] SSP 시나리오 구분(출처: 기상청 기후정보포털, IPCC 6차 보고서)



[그림 3] 탄소 배출 시나리오별 9월 북극 해빙 면적 미래 전망 (IPCC 6차 보고서). 가로 점선은 해빙 소멸의 기준인 100만 km²를 나타냄.

10년 빨라진 북극 해빙 소멸과 그 영향

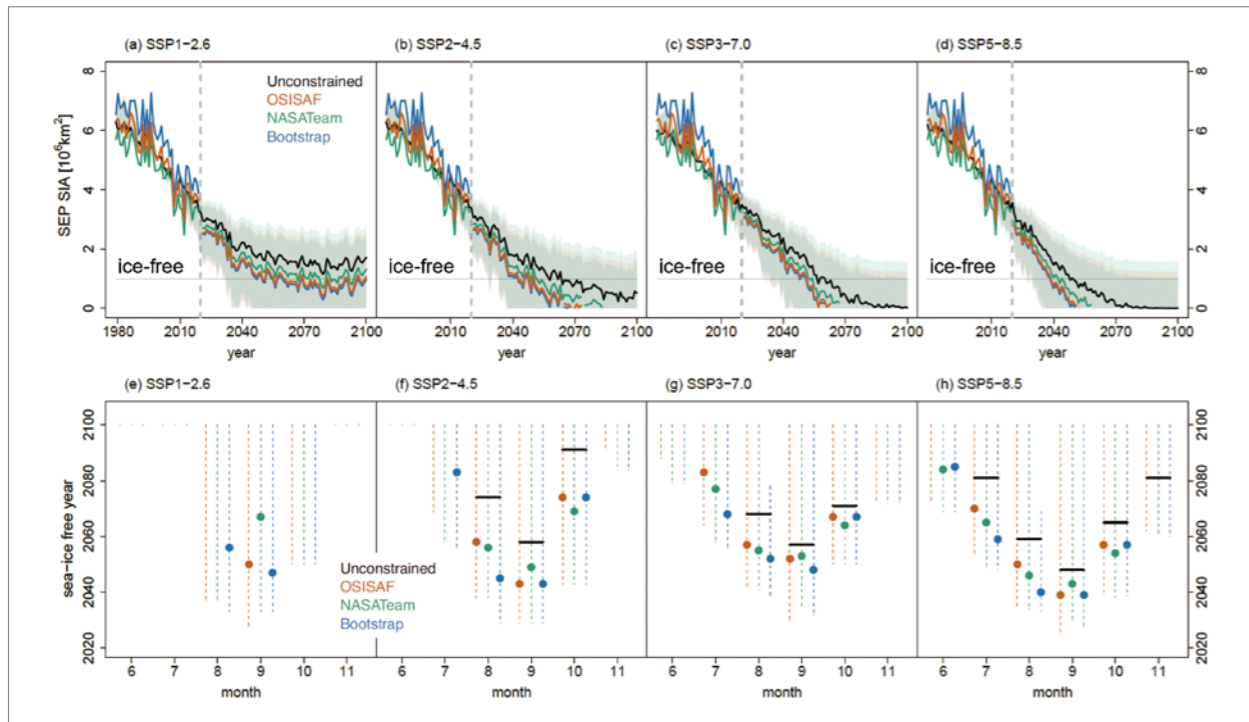
위에서 살펴본 바와 같이 대부분의 기후모델들이 온실가스 증가에 따른 북극 해빙 감소를 관측에 비해 작게 예측하고 있으며 이러한 모델의 특성을 고려하여 미래의 북극 해빙 전망을 새롭게 예측한 결과를 그림 4에 나타내었다. 기후 모델의 북극 해빙 감소 속도를 관측에 맞춰 조정한 결과, 온실가스 저배출 시나리오인 SSP1-2.6에서도 2050년대에 북극 해빙 감소가 나타남을 확인하였다. 또한 중배출(SSP2-4.5, SSP3-7.0), 고배출(SSP5-8.5) 시나리오에서도 기존의 전망보다 10년 정도 빠른 속도로 해빙이 감소하여 고배출 시나리오에서는 2030년대에 북극 해빙이 소멸할 수 있으며, 2060년대에는 여름철 전반(7~10월)에 걸쳐 해빙이 없는 상태가 지속될 것으로 나타났다.

이렇게 북극 해빙이 더 빠르게 줄어들면 검은 바다가 드러나면서 더 많은 에너지를 흡수하게 되어 북극 온난화가 증폭될 것이다. 북극 온난화 증폭이 강해지면 고위도와 저위도 간의

온도 차이가 줄면서 중위도의 대기순환이 요동치게 되며 이에 따라 폭염, 산불, 홍수 등 이상기후 현상이 더 강하고 빈번하게 나타날 수 있다. 또한 해빙이 없는 북극은 해운의 증가로 이어져 더 많은 온실가스 배출과 지역 환경 및 생태계를 파괴할 뿐만 아니라 그린란드 빙상과 영구동토층을 더욱 빠르게 녹여 해수면 상승과 지구온난화를 가속화할 것이다.

이러한 북극 해빙의 급격한 감소로 인한 전 지구적인 피해를 막기 위해서는 더욱 강력한 탄소저감정책이 요구된다. 1.5도 온난화 목표에 해당하는 SSP1-1.9 시나리오에서는 북극 해빙이 남아 있을 것으로 예상되며, 이는 늦어도 2050년대에는 탄소중립을 달성해야 함을 의미한다. 앞으로 보다 정확한 북극 해빙의 미래 전망과 그에 따른 분야별 영향을 평가하고 대응책을 마련하기 위해서는 빙권 지역에 대한 지속적이고 체계적인 관측, 대기-해양-지면-빙권 상호작용에 대한 포괄적인 이해, 그리고 이를 구현할 수 있는 기후모델링 연구가 필수적으로 요구된다. 이와 더불어 우리나라를 포함한 국가별 최신 탄소중립 경로를 실시간으로 반영한 탄소 배출 시나리오를 개발하고, 이를 활용한 북극 지역 기후변화 예측력 확보가 매우 중요한 시점이다.

1) 극 지역에서 온도 변화가 전 지구 평균보다 훨씬 크게 나타나는 현상을 의미한다. 북극 지역에서는 극 증폭의 결과로 온실가스 증가에 따른 온난화 현상이 지구 평균에 비해 두 배 이상 강하게 나타나고 있다.



[그림 4] 북극 해빙 면적의 미래 전망 시계열(위)과 북극 해빙 소멸 시점 전망(아래).  
검정: 원래 기후모델 결과, 컬러: 세 가지 위성 관측자료를 이용하여 기후모델의 미래 전망을 보정한 결과. (Kim et al. 2023)

남극의 해빙 감소가 황제펄귄의 멸종위기를 재촉한다

김정훈 극지연구소 생명과학연구본부

황제펄귄은 번식을 위해 1년 중 9개월가량을 해빙 위에서 생활하는 종이다. 최근 들어 급격한 지구온난화로 남극에서 해빙이 감소하는 추세에 있으며 황제펄귄이 서식하는 일부 지역에서는 해빙의 유실로 번식에 실패하는 상황이 현실로 다가왔다. 온실가스 배출을 통제하지 못해 지구온난화가 가속된다면 2100년에는 황제펄귄의 약 81%가 사라지게 될 것이다. 파리기후변화협약(Paris Agreement)에 따라 온실가스 배출을 줄이고, 황제펄귄을 남극특별보호종으로 지정하려는 남극조약협약당사국회의 환경보호위원회(ATCM-CEP)의 노력에도 불구하고 일부 회원국들의 이해관계 충돌로 실질적인 환경보존에 대한 조치는 제자리걸음이다. 대한민국의 장보고과학기지를 거점으로 빅토리아랜드의 북부 연안에 있는 황제펄귄 번식지 세 곳에서 장기 모니터링을 수행 중이다. 우리나라의 황제펄귄 연구에 대한 역사는 짧지만 유의미한 결과가 도출되면 ATCM-CEP 및 CCAMLR 등의 국제기구에서 남극의 환경보존 이슈에 선도적으로 대응하고 꾸준한 과학 연구로 남극 환경보존에 실질적으로 기여할 수 있을 것이다.

해빙에서 번식하는 황제펄귄

우리가 알고 있는 대부분의 펄귄들은 땅속에 굴을 파거나 땅 위에 돌을 쌓아 둥지를 짓고 번식한다. 그러나 임금펄귄(King Penguin)과 황제펄귄(Emperor Penguin)은 독특하게도 둥지를 짓지 않고 발등 위에 알을 낳아 품는 종이다. 특히 황제펄귄은 남극대륙의 해빙 위에서 번식하는 독특한 생활사를 보여준다(그림 2).

황제펄귄은 남극의 겨울이 시작되는 4월경에 번식을 위해 해빙 위로 이동한다. 5월경에는 구애 행동 및 교미를 하고, 암컷은 6~7월경에 수컷의 발등 위에 알 하나를 낳아 전달한 후 먹이 사냥을 위해 바다로 떠난다. 수컷들은 알이 부화할 때까지 약 70일 동안 알을 품는다. 알이 부화하는 8월경에 어미가 돌아와 새끼에게 먹이를 주고, 수컷이 육아를 교대하는 후 먹이 사냥을 떠난다. 9월에서 10월경에는 부모들이 해빙 위에서 새끼를 키워내며, 새끼들이 어느 정도 성장하여 먹이 요구량이 많아지는 10~11월경에는 부모 모두 먹이 사냥을 위해 바다로 나가 있는 시간이 많아지고 새끼들은 무리를 지어 해빙 위에 보육원을 형성하게 된다. 여름이 찾아오며 해빙이 소실되는 12월 즈음이면 어미뿐만 아니라 물속에서 헤엄칠 수 있을 정도로 성장한 새끼들이 번식지를 떠나기 시작한다. 이처럼 황제펄귄의 번식 여정은 해빙 위에서 시작하여 마무리된다.



[그림 1] 해빙 위에서 새끼를 키워내고 있는 황제펄귄

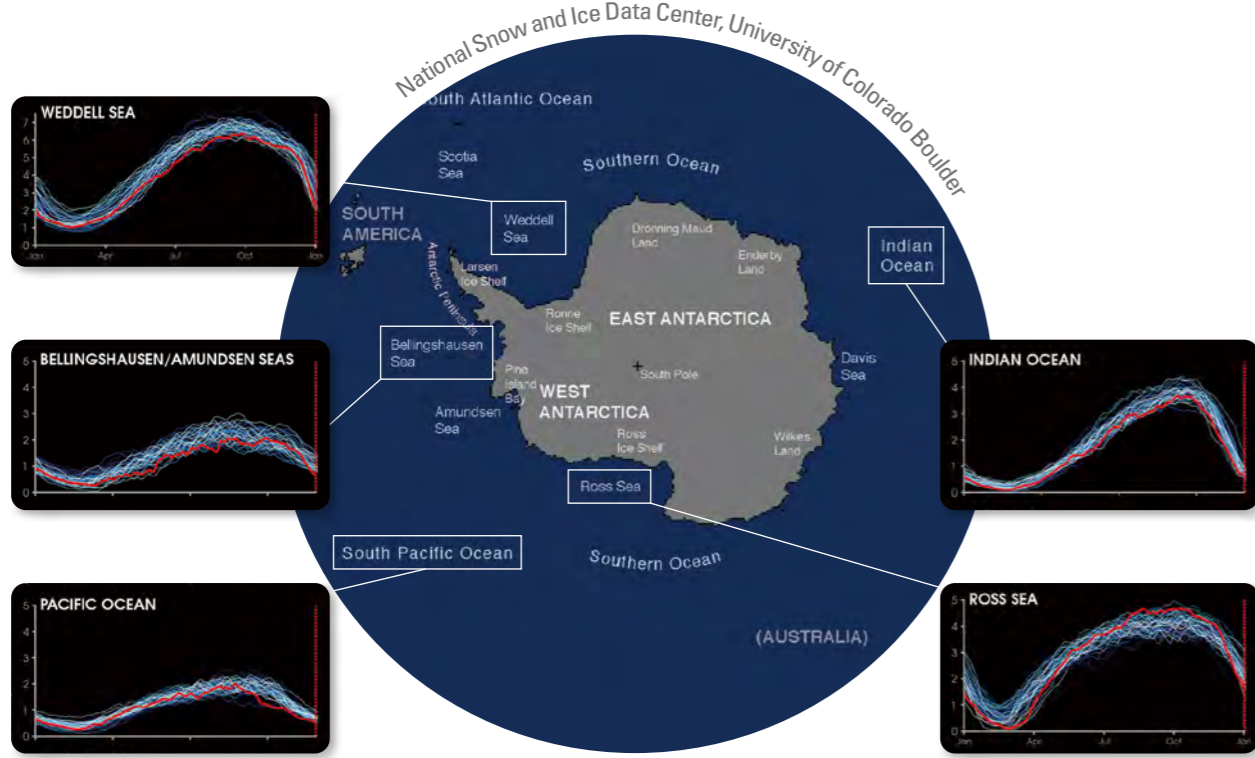
남극에서 해빙의 감소 추세

남극에서 해빙은 보통 겨울철인 9~10월에 면적이 약 1,800만~1,900만 km²(한반도 면적의 약 82~86배)로 가장 넓게 분포하고, 하계기간인 2월경에는 최소 면적인 약 300만 km²로 감소하는 주기를 보인다.

미국 국립설빙데이터센터(National Snow and Ice Data Center)의 자료에 의하면 해빙의 면적과 양이 급속도로 감소하는 북극해와는 달리 남극해에서는 지구온난화에도 불구하고 지난 40년 동안 안정적이었으며, 12월 관측자료에서는 오히려 10년마다 0.4%씩 면적이 증가하는 추세를 보였다. 그러나 2015년 이후로 이러한 증가 양상에 변화를 보이기 시작했다. 특히 2022년에는 해빙 면적이 급격히 감소하였는데 이 현상은 아문센해와 벨링스하우젠해에서 두드러지게 나타났다(그림 3). 해빙 면적의 감소는 황제펄귄의 번식지의 안정성을 위협하는 요인으로 작용하고 있다.



[그림 2] 해빙 위에서 번식하는 황제펄귄의 생활사  
(출처 : [https://en.wikipedia.org/wiki/Emperor\\_penguin](https://en.wikipedia.org/wiki/Emperor_penguin))



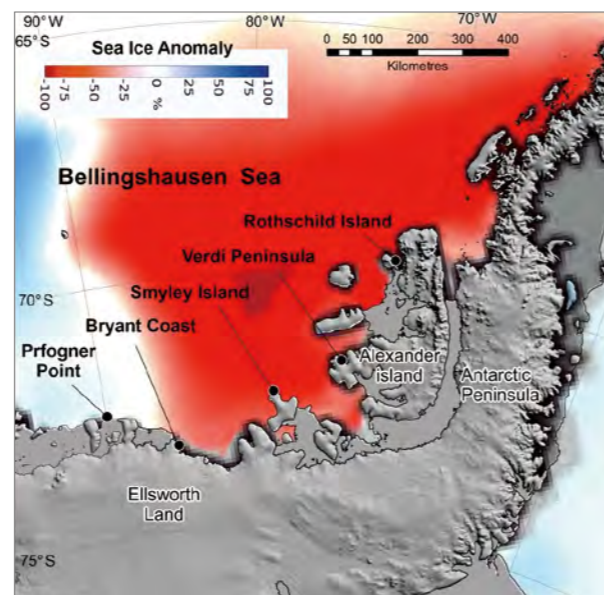
[그림 3] 2022년 남극해의 계절별-해역별 해빙 면적 변화. 붉은 선은 2022년 관측 자료(출처 : National Snow and Ice Data Center 자료 재구성)

**현실로 다가온 황제펭귄의 번식지 훼손**

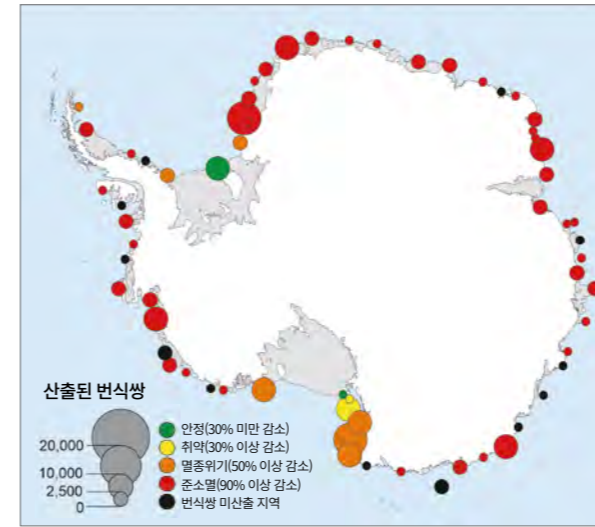
해빙의 유실로 인한 황제펭귄 번식지의 감소는 현실로 나타나기 시작했다. 2016년에 웨델해의 헬리만(Halley Bay)에 위치한 세계에서 두 번째로 큰 황제펭귄 번식지 (14,000~25,000쌍)가 통째로 사라지는 일이 발생했다. 2015년까지는 번식지로 사용되던 해빙이 안정적으로 유지되었으나 2016년 11월 17일에 촬영된 인공위성 영상에서는 해빙이 사라지고 바닷물로 채워진 모습을 볼 수 있다. 2016년에는 폭풍우가 몰아치는 이상기후가 이어지면서 황제펭귄 새끼가 털갈이를 하기 훨씬 전인 10월에 해빙이 유실되기 시작했다. 즉, 새끼들은 방수 기능이 없는 솜털로 덮여 있을 시기에 해빙이 깨져 나갔으니 수천 마리의 새끼들이 바다에 익사했을 것으로 추측하고 있다. 이 지역은 2016년 이래로 조사를 수행했던 3년 동안 번식지로서의 기능을 잃었으며, 남쪽으로 55km 떨어진 인근 도슨-램튼(Dawson-Lambton) 서식지에서는 펭귄 개체수가 약 10배 이상 증가하였는데 이는 헬리만에서 번식하던 개체들이 이주해 왔기 때문인 것으로 보인다(Fretwell & Trathan 2019). 기후변화가 펭귄 서식지를 점점 남쪽으로 밀어낼 수 있다는 것을 시사한다. 해빙 면적과 농도가 급격히 감소했던 2022년에 벨링스하우젠해에 소재하는 황제펭귄 번식지에서도 이상 징후가 나타났다(그림 4). 해당 수역의 황제펭귄 서식지 5곳 중 4곳에서 새끼가 다 자라기 전에 해빙이 유실되었기 때문에 번식에 실패하고 말았다(Fretwell 외 2023). 이는 해빙의 대규모 감소가 황제펭귄 번식지에만 나타나는 국소적인 현상이 아닌 남극 전반에 광범위하게 영향을 미치기 시작했음을 보여주는 최초의 사례라 할 수 있다.

**황제펭귄의 미래 예측**

현재까지 황제펭귄 번식지로 61개소가 알려져 있지만, 서식지 대부분이 환경변화에 취약한 것으로 평가되고 있다(Fretwell & Trathan 2020). 금세기 말까지 약 80%의 서식지에서 황제펭귄이 거의 사라지는 준소멸(Quasi - Extinct) 상황이 나타날 것으로 예상된다(그림 5). 2015년에 제정된 파리기후변화협약(Paris Agreement)의 주요 목표 중 하나는 지구온난화를 막기 위해 전 지구 기온 상승을 산업화 이전 평균 대비 2°C 이하로 유지하고 이상적으로는 1.5°C로 제한하는 것이다(UNFCCC 2015). Jenouvrier 등

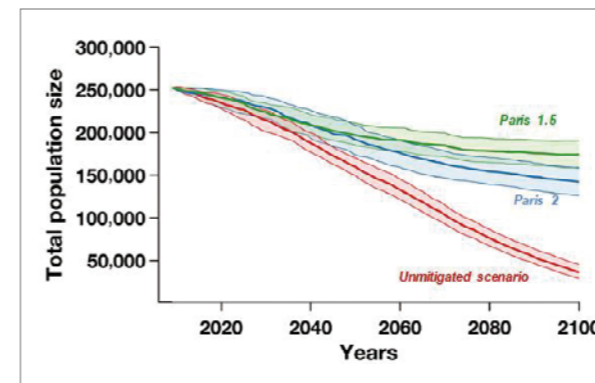


[그림 4] 벨링스하우젠해에 위치하는 황제펭귄 서식지와 2022년 11월의 해빙감소 현상-붉은색 지역(출처 : Fretwell et al. 2019)



[그림 5] Jenouvrier et al. (2019)의 모델 시나리오를 토대로 작성된 황제펭귄 번식지 위치, 규모 및 서식지 취약성 등급 (출처 : Fretwell & Trathan 2020)

(2019) 연구의 모델 시나리오에 의하면 온실가스 배출량을 줄이지 못해 지구온난화가 통제되지 않고 지속된다면 2100년에는 황제펭귄 서식지의 80%가 준소멸 위기에 처하게 되고 개체수의 81%가 감소할 것으로 예상된다(그림 6). 파리기후협약의 목표가 달성되어 기온 상승을 1.5°C로 유지한다면 서식지의 19%에서 준소멸 위기에 처하고 개체수의 31%가 감소하며, 2°C로 유지할 경우에는 서식지의 31%에서 준소멸 위기에 처하고 개체수의 44%가 감소할 것으로 예측된다(그림 6). 이는 현재 진행 중인 지구온난화로부터 황제펭귄의 감소 자체를 막을 수는 없지만 우리가 기후위기를 어떻게 관리하고 통제하느냐에 따라 이들을 멸종위기에 구할 수 있다는 가능성을 시사한다.



[그림 6] 다양한 기후 시나리오에서 예측한 2009년부터 2100년까지 전 세계 황제펭귄의 번식 쌍수 변동(출처 : Jenouvrier et al. 2019)

**남극특별보호종 지정을 위한 국제기구의 노력과 한계**

2021년 남극조약협약당사국회의 환경보호위원회(제43차 ATCM-제23차 CEP)에서는 남극과학연구위원회(SCAR)의 제안으로 기후변화에 취약한 황제펭귄의 개체군 감소 전망을 주목하여 해당 종을 남극특별보호종으로 지정하려는 논의가 시작되었다. 다음 해에 개최된 제44차 ATCM-제24차 CEP에서는

중국을 제외한 대다수의 당사국들이 본 안전에 대해 찬성하였다. 세계자연보전연맹(IUCN)이 발표하는 멸종위기 보고서인 적색목록(Red list) 범주에는 평가대상 분류군을 설정한 이후 특정 번식 개체군과 방문자 개체군에 대한 평가, 적색목록 기준을 적용하여 분류군의 지역 개체군을 대상으로 IUCN 예비범주 설정, 절멸 위험에 영향을 미칠 수 있는 지역 외부의 동종 개체군의 존재 여부 및 상태 조사 등의 단계를 거쳐 결정된다. 대다수 당사국들은 남극특별보호종 지정에 있어 IUCN 적색목록상의 취약종 또는 그 이상의 범주 조건 충족이 전제되는 것이 아님을 강조하고, SCAR가 제시한 황제펭귄의 감소 경향 예측을 토대로 남극조약과 환경보호의정서의 사전 예방적 조치 원칙에 따라 해당 종의 남극특별보호종 지정에 적극임을 강조했다. 그러나 중국은 지정 절차의 문제와 검증되지 않거나 특수한 사례를 제시하며 반대 입장을 표명하였다. 황제펭귄이 남극특별보호종으로 지정되면 이들의 번식지 및 광범위한 취식 지역까지 보호해야 하는 후속 조치 마련에 힘이 실리게 된다. 우리 정부대표단은 이러한 조치가 신규 해양보호구역(MPA) 설정의 당위성을 뒷받침하는 근거가 될 수 있기에 남극해양생물자원보존위원회(CCAMLR)에서 MPA의 확장 및 추가 설정에 부정적인 견해를 보이는 중국이 이를 사전에 차단하려는 의도가 있는 것으로 보고 있다. 이들 국제기구에서는 모든 사안이 만장일치로 결정되기 때문에 국제 정세 및 각국의 이해관계가 첨예하게 대립하는 상황에서는 건설적인 안전 조차도 합의 도출이 어려운 실정이다.

**대한민국의 황제펭귄 연구와 국제기구에 과학적 기여 현황**

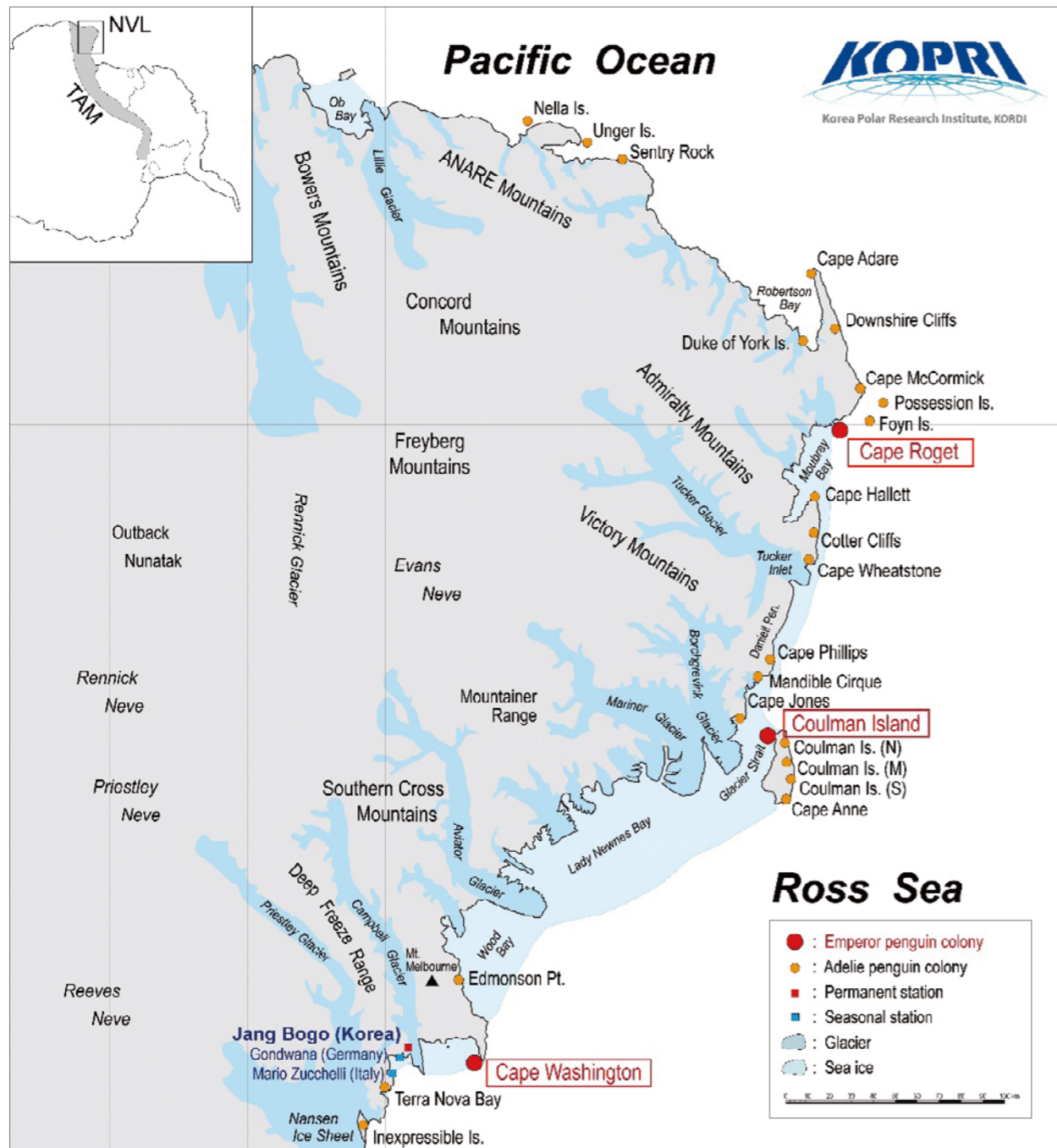
현장 조사 결과와 다양한 모델의 시나리오는 황제펭귄이 머지않아 지구온난화로 준소멸위기에 처할 것이라 경고하고 있다. 그러나 안타깝게도 남극의 환경과 생태계 보존을 이끌어야 할 ATCM-CEP나 CCAMLR 등의 국제기구에서 회원국들 간의 견해차로 합의가 도출되지 않아 실질적인 보존 조치나 지침 등 대응조치를 취하지 못하고 있다. 그럼에도 불구하고 우리나라를 포함한 대다수 국가의 과학자들은 지구온난화가 생태계에 미칠 영향을 예측하고 있으며 이를 해결하기 위한 연구와 모니터링을 묵묵히 수행하고 있다. 대한민국은 남극대륙에 장보고과학기지를 운영하고 있으며, 기지 인근 북빅토리아랜드 연안에는 케이프 워싱턴(Cape Washington), 콜먼섬(Coulman Island) 및 케이프 로제(Cape Roget) 등 3개 지역의 황제펭귄 번식지가 소재하고 있다(그림 7). Jenouvrier 등(2019)의 예측에 의하면 이 번식지들은 금세기 말까지 개체수의 50% 이상이 감소할 것으로 예측되는 멸종위기(Endangered)에 처한 지역으로 분류되고 있다. 장보고 과학기지가 건설된 이후 시작된 우리나라의 황제펭귄 모니터링 역사는 매우 짧지만, 극지연구소의 연구자들은 2014년 이래로 이들 서식지에서 개체수 변동과 번식지가 형성되는 해빙의 동태를 모니터링하고 있다. 아직까지 우리 조사지역에서는 황제펭귄 번식지의 훼손이나 급격한 개체수

감소는 나타나지 않고 있지만 최근 들어 로스해 연안의 해빙이 불안정하여 그 영향을 예의 주시하고 있다.

대한민국 정부대표단은 황제펭귄의 남극특별보호종 지정이 논의되는 제24차 CEP(제44차 ATCM)에 우리나라의 모니터링 자료를 정리한 문건을 제출한 바 있다. 만장일치의 합의가 도출되지 않아 그 의미가 퇴색되기는 했지만 우리나라는 황제펭귄의 멸종위기종 지정 찬성 의견 피력도 더불어 모니터링 자료 공유와 우리나라의 견해를 개선하는 방법으로 남극 생태계 보존에 기여하고 있다.

CCAMLR에서 채택을 추진 중인 ‘로스해 해양보호구역의 연구 및 모니터링 계획’ 초안에는 생태계의 주요 구성원으로서 황제펭귄 개체수 변동, 주요 먹이 종 및 취식 행동 조사가 명시되어 있다. 현재 극지연구소는 해양수산부가 지원하는 국가연구개발사업인 ‘로스해 해양보호구역의 보존 조치

이행에 따른 생태계 변화 연구(2022~2026)’의 하나로 이러한 연구들을 수행하고 있다. 정부대표단의 일원으로 참석하는 극지연구소의 연구진은 황제펭귄 모니터링에서 유의미한 결과도 도출되면 CCAMLR의 생태계모니터링관리작업반 및 과학위원회 등에 보고하고 관련 의제에 적극적으로 대응할 예정이다. 또한 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)에서도 지구 온난화 이슈 논의의 장에서 활약할 수 있는 기반을 마련할 계획이다. 대한민국이 국제기구에서 남극의 환경보전 이슈에 선도적으로 대응하고 과학적 기여로 국가 이미지를 제고하기 위해서는 정부 차원에서 장기 모니터링과 연구사업의 안정적인 지원이 필요하다. 국제사회에서 우리가 창출한 과학적 근거나 조사 자료 없이는 환경변화 이슈에 대응하고 국익과 관련된 대한민국의 목소리를 낼 수 없기 때문이다.



[그림 7] 대한민국 과학자들이 모니터링을 수행하고 있는 황제펭귄 번식지 케이프 워싱턴, 쿨먼섬 및 케이프 로제

## 「기후변화감시예측법」 등의 제정·개정과 시사점



현대호 한국법제연구원

지구상에서 사람들은 기상현상과 기후변화에 따른 자연생태계에 적응할 수밖에 없으며, 이를 위한 법제도로 「기상법」과 「기후변화감시예측법」이 있다. 「기상법」은 한반도에 거주하는 사람들에게 기상현상에 적응할 수 있도록 하는 동시에 「기후변화감시예측법」의 기후변화 감시·예측의 바탕이 된다. 「기후변화감시예측법」은 기후변화의 감시 및 예측을 통한 기후변화 적응을 넘어 「탄소중립기본법」에 따른 기후위기 대응도 지원하는 역할을 하는데, 여기서 기후위기 대응은 사람의 경제활동으로 인해 발생한 탄소의 감축을 의미한다.

「기후변화감시예측법」은 해양과 극지의 기후변화 감시 및 예측도 규정하고 있는데 「기상법」·「해양조사정보법」 및 「극지활동 진흥법」 등과의 관계에서 해석상 어려움이 예상되나, 올해 시행 예정인 「기후변화감시예측법」의 시행령(안)과 시행규칙(안)을 통하여 해소될 것으로 사료된다. 「기후변화감시예측법」과 같은 법 시행령 및 시행규칙의 제정은 기후변화 감시 및 예측에 관한 업무(해양과 극지 포함)를 안정적으로 수행할 수 있는 법제도 기반을 마련한 것으로 볼 수 있으며, 한반도 및 전 지구상에서 나타나는 기후위기 대응 지원도 기대된다. 또한 산림, 농업 등 분야별로 기후변화 감시 및 예측, 적응 등에 관한 법률의 제정 및 개정도 추진되고 있으며, 해양과 극지 분야도 분법될 가능성이 높다.

### 기후변화 위험과 관련 법제도

지구상에 존재하는 유기생명체는 기후변화에 따른 생태환경에 적응하여야 하며, 이를 위해 기상현상과 기후변화에 대한 과학적 관찰과 예견이 요구된다. 또한 고도화된 과학기술과 산업화로 쾌적한 생태환경이 조성되어 인류는 역사상 최고의 번영과 안락한 삶을 누리고 있다. 그렇지만 온실가스로 인한 기후변화 위험은 매우 짧은 시간에 큰 폭으로 발생하거나 그 영향이 광범위하여 재난으로 이어질 수 있으며, 기상현상과 기후변화에 관한 과학적인 관찰과 예견을 통하여 인류가 적응하지 못한다면 언제든지 멸종될 수 있다.

우리나라에서 도입한 법제도를 「기상현상 관측 및 예보」, 「기후변화 감시 및 예측」, 그리고 「기후위기 적응 및 대응」의 순서로 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 기상현상의 관측 및 예보는 「기상법」에 따라 이루어지며, 「기상법」의 기상현상 관측은 기후변화를 감시 및 예측하는 바탕이 된다<sup>1)</sup>. 다음으로, 기후변화의 감시 및 예측은 「기후·기후변화 감시 및 예측 등에 관한 법률」(이하 「기후변화감시예측법」이라 함)에 따라 이루어지며<sup>2)</sup>, 「기후변화감시예측법」은 기후변화 감시 및 예측 정보를 알리고 제공하여 기후변화에 적응할 수 있도록 하는 동시에 「탄소중립기본법」에 따른 기후위기 적응도 지원하는 역할을 한다. 마지막으로, 기후위기의 적응 및 대응은 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」(이하 「탄소중립기본법」이라 함)과 「기후변화대응 기술개발 촉진법」(이하 「기후기술법」이라 함)<sup>3)</sup>에 따라 이루어지며, 「탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률」, 「개발도상국 산림을 통한 온실가스 배출 감축 및 탄소축적 증진 지원에 관한 법률」 등을 비롯하여 산림, 농업 등 분야별로 새로운 법률의 제정·개정도 추진되고 있다.

최근 각국은 기상현상과 기후변화의 과학적인 관측과 예측에 따른 적응에만 머물지 아니하고 적극적으로 기후변화의 원인을

찾아 대응하고자 하는데, 그 대표적인 사례가 사람의 경제활동으로 발생하는 탄소를 감축하는 것이다.

### 「기상법」의 변천과 기상현상의 관측 및 예보

「기상법」은 기상현상<sup>4)</sup>의 관측 및 예보를 통하여 사람이 자연변화에 적응할 수 있도록 하며, 기후변화의 감시 및 예측, 기후위기의 적응 및 대응에 관한 모법(母法)으로의 지위를 차지한다. 「기상법」은 1961년에 제정된 「기상업무법」에서 출발하여 2005년 전부개정에서 명칭을 「기상법」으로 변경하였으며, 기후 분야의 업무에 관한 법적 근거를 마련하고 기상관측의 표준화를 위하여 「기상관측표준화법」을 제정하는 등 개정이 이루어졌다. 또한 2009년에는 「기상법」에서 분리되어 「기상산업진흥법」이 기상산업의 발전 기반을 조성하고 경쟁력 강화를 도모하기 위하여 제정되었으며, 2023년에는 「기후변화감시예측법」도 제정되었다. 향후에는 항공기상도 「기상법」에서 분리되어 「(가칭)항공기상법」<sup>5)</sup>으로 제정될 가능성이 크다.

한편 「기상법」은 해양기상의 관측 및 예보를 기상청의 업무로 규정하고 있는데, 여기서 ‘해양기상’은 해양 위의 대기과 해양의 상호작용으로 나타나는 기상현상을 의미하며(같은 법 제2조 제4호의2), 「기후변화감시예측법」의 해양 분야에서 기후변화 감시 및 예측과는 구분하여야 한다. 또한 「기상법」에서는 ‘기후’를 일정 기간 특정 지역에서의 기상현상의 평균상태로 정의하고 있으며(같은 법 제2조 제6호), 개정 전의 「기상법」에서는 기후변화 개념을 ‘인간 활동이나 자연적인 요인으로 기상현상이 평균상태를 벗어나 상당기간 지속되는 것을 말한다’고 가치중립적으로 정의하였는데(같은 법 제2조 제7호), 개정된 「기상법」<sup>6)</sup>에서는 기후변화 개념을 삭제하였다. 그럼에도 불구하고 「기상법」의 ‘기후변화’는 「탄소중립기본법」 제2조

제2호에 따른 기후변화 개념이 아니라 종전과 같은 개념으로 해석할 가능성이 크다.

**「탄소중립기본법」의 제정과 기후위기 적응·대응**

2021년에 제정된 「탄소중립기본법」은 「파리협정」에 따라 온실가스 감축 목표를 수립하고 이를 이행하기 위하여 탄소중립 사회로의 이행과 녹색성장의 추진을 위한 제도 및 기반을 마련하고자 하였다(같은 법 제1조 참조). 따라서 「탄소중립기본법」에서 ‘기후변화’, ‘기후위기’ 및 ‘기후위기 적응’ 등의 개념은 온실가스를 대상으로 정의하였으며, 이 법에서 ‘기후위기’는 기후변화가 극단적인 날씨뿐만 아니라 물 부족, 식량 부족, 해양산성화, 해수면 상승, 생태계 붕괴 등 인류 문명에 회복할 수 없는 위험을 초래하여 획기적인 온실가스 감축이 필요한 상태를 의미한다(같은 법 제2조 제2호). 이 법에서 기후위기 적응전략과 대응체계는 다음 [도표 1]과 같다.

**「기후변화감시예측법」의 제정 경과**

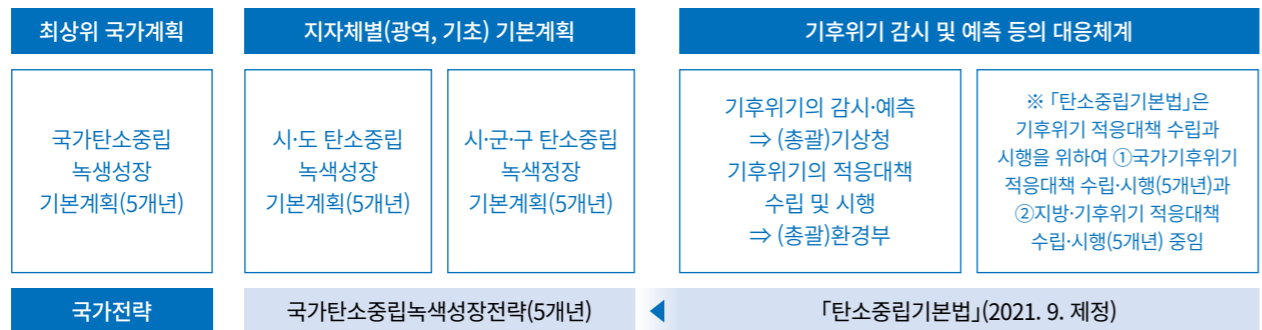
「기후변화감시예측법」은 2023. 10. 24.에 제정되어 2024. 10. 25.부터 시행할 예정이다. 이 법은 기후변화에 대한 과학적인 감시 및 예측에 필요한 사항을 정하여 기후변화로부터 생태계 및 기후체계를 보호하고 공공복리를 증진하는 것을 목적으로 한다(같은 법 제1조 참조). 이 법은 기후변화의 감시와 예측에 관한 기본적인 사항(「기상법」에서 기후 개념을 제외한 기후변화에 관한 모든 입법사항)을 「기상법」에서 분리하여 세부적으로 규정하고 추가적인 입법사항(기본계획, 기후변화교육사 등)을 포함해 제정하였다. 그런데 「기후변화감시예측법」은 국회의 심사 과정에서 두 가지의 다소 상이한 입법사항이 추가되었는데, 「탄소중립기본법」 제2조 제1호의 기후변화 개념을 차용한 것과 해양·극지 분야의 기후변화 감시 및 예측에 관한 입법사항을 규정한 것이 여기에 해당된다. 즉, 「기후변화감시예측법」은 개정 전의 「기상법」에 따른 기후변화 개념을 그대로 도입하지 아니하고 「탄소중립기본법」의 기후변화 개념을 차용하였는데, 이것은 「탄소중립기본법」을 과도하게 따른 결과이다(「기후변화감시예측법」 제2조 제2호의 기후변화 개념은 개정이 요구된다). 또한 「기후변화감시예측법」은 해양·극지 분야의 기후변화에 관한 사항을 규정하고 있는데, 제21대 국회에 계류 중인 「해양기후·해양기후변화

감시·예측 및 대응 등에 관한 법률안」(안병길 의원 대표발의, 이하 ‘해양기후변화법안’이라 함)의 일부를 반영한 결과이다.

**「기후변화감시예측법」의 해양·극지 분야에서 기후변화 감시 및 예측**

해양·극지 분야의 기후변화 감시 및 예측은 「기후변화감시예측법」에 따라 이루어지며, 「해양기후변화법안」은 제21대 국회 임기의 만료로 자동 폐기될 예정이다. 「기후변화감시예측법」에서 해양·극지 분야의 기후변화 감시 및 예측은 내용상으로 「기후변화감시예측법」과 긴밀한 관련성이 있으나, 법체계상으로는 2020년에 제정된 「해양조사와 해양정보활용에 관한 법률」(이하 ‘해양조사정보법’이라 함)과 2021년에 제정된 「극지활동 진흥법」 및 2020년에 제정된 「남극활동 및 환경보호에 관한 법률」(이하 ‘남극활동법’이라 함)이 보다 긴밀한 연관성을 가진다. 다시 말해서 「기후변화감시예측법」에 따른 해양과 극지 분야의 기후변화 감시 및 예측은 법체계상으로 다소 혼란스럽다. 왜냐하면 「해양조사정보법」에서는 해양관측 및 관측망의 구축·운영, 예측정보의 생산, 해양의 중장기 현상변화 연구를 실시하도록 규정하고 있고 해양예측정보를 해양정보에 포함시키고 있기 때문이다. 마찬가지로 극지 분야의 기후변화 감시 및 예측도 「극지활동 진흥법」 또는 「남극활동법」에서 규정할 수 있기 때문이다. 「극지활동 진흥법」은 기후변화로 극지 환경 및 자원의 관리·보전·개발·이용의 필요성이 점차 커지는 추세에 맞추어 극지활동을 체계적으로 육성·지원하고 국제사회에서 인류 공통의 문제 해결에 이바지하는 것을 목적으로 하고 있으며(같은 법 제1조 참조), 「남극활동법」도 남극활동으로부터 남극 환경을 보호하고 남극관련 과학기술 연구 등 남극활동을 촉진하려는 것을 목적으로 한다(같은 법 제1조 참조). 결과적으로 해양 분야는 「해양조사정보법」 등을 개정하여 반영하거나 「해양기후변화법안」처럼 별도 법률을 제정하는 방안도 고려할 수 있다. 극지 분야는 「극지활동 진흥법」 등을 개정하여 「기후변화감시예측법」의 기후변화 감시예측전문기관에서 수행하는 업무와 「극지활동 진흥법」 등에 따른 극지 연구를 함께 수행하는 전문연구기관 설립도 고려할 수 있다.

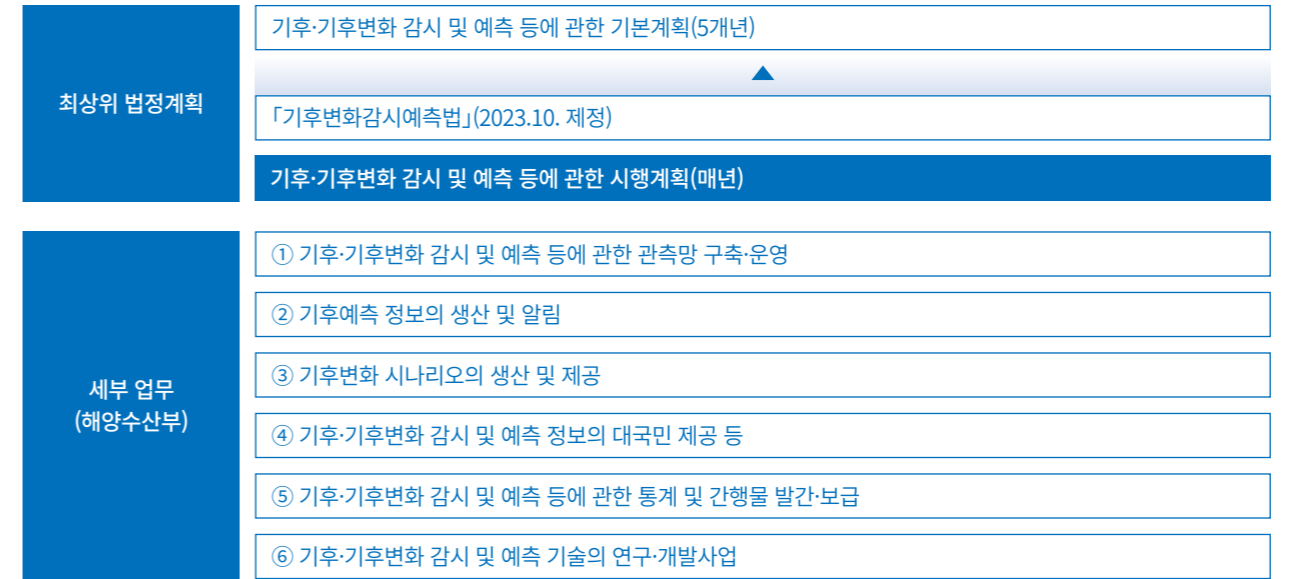
한편 「기후변화감시예측법」의 제정은 해양 및 극지의 기후변화 감시 및 예측에 관한 업무를 수행할 수 있는 법적 기반을



[도표 1] 기후위기 적응전략 및 대응체계

마련하여 한반도와 전 지구적인 기후변화 및 기후위기에 적응하고 대응을 지원할 수 있게 하였다. 즉, 해양 및 극지 분야의 기후변화 업무(기후관측과 지구대기감시)는 아래 [도표 2]에서 알 수 있듯이 ①기후·기후변화 감시 및 예측 등에 관한 관측망 구축·운영, ②기후예측 정보의 생산 및 알림, ③기후변화 시나리오의 생산, ④기후·기후변화 감시 및 예측 정보의 대국민 제공 등, ⑤기후·기후변화의 감시 및 예측 등에

관한 통계 및 간행물의 발간, ⑥기후·기후변화의 감시 및 예측 기술의 연구·개발 등으로 구체화되어 해양수산부 장관이 수행한다. 이들 업무 중 일부는 해양수산부 장관이 지정한 기후변화감시예측 연구를 수행하는 기관에 위탁 수행하도록 할 예정으로 이로써 인류는 이상기후 등으로 발생하는 생활환경의 악화 또는 생물 다양성의 저하 등에 적응할 수 있을 것으로 기대된다.



※ 기상청은 한반도와 전 지구 분야에서, 해양수산부는 해양과 극지에서 위의 세부 업무를 수행한다는 점에서 차이가 있으며, 기상청은 기후위기 감시 및 예측하는 총괄기관으로 「기후변화감시예측법」에 따라 ①지구대기 감시에 관한 품질관리, ②국가기후변화 표준 시나리오의 생산, ③기후위기 대응 관련 대책 지원을 위한 조사·연구, ④기후위기 대응 관련 대책 지원 등도 수행함

[도표 2] 기후변화 감시·예측 기본계획 등과 세부 업무

- 일정 기간 및 특정 지역의 기상현상 관측(기상관측)에 관한 누적 결과는 기후와 기후변화를 예측하는 자료가 되며, 기후변화 예측은 기후변화가 사람의 건강, 생활환경의 악화 또는 생물 다양성의 저하 등에 미치는 영향으로부터 사람에게 적용할 수 있게 하거나 또는 정부 등이 대응책을 마련하여 시행하는 데에 활용된다.
- 사람의 경제활동으로 인한 대기오염물질의 관측은 「대기환경보전법」에 따라 이루어진다.
- 2021년에 제정된 「기후기술법」은 온실가스 감축과 기후변화 적응에 관한 기술의 연구기반을 조성하여 체계적으로 기후변화 대응 기술개발의 육성·발전을 목적으로 하는 법률이며, 온실가스 감축을 통한 기후변화의 적응 및 대응을 목적으로 한다.
- 「기상법」에서 ‘기상현상’은 기상(氣象), 지상(地象), 수상(水象) 및 대기권 밖의 여러 현상이 기상, 지상 및 수상에 미치는 현상으로 정의하고 있으며(같은 법 제2조 제4호), 넓은 의미의 기상현상으로는 지진·해일·화산 등의 기상현상도 포함한다(「지진·지진해일·화산의 관측 및 경보에 관한 법률」 제2조 참조).
- 국회의 비준을 받은 「국제민간항공협약」과 달리 국제민간항공협약 부속서는 조약의 일부가 아니다. 따라서 국제민간항공협약 부속서에서 규정하고 있는 항공기상에 관하여 채택된 표준과 권고되는 방식은 국내법에 반영되어야 하며, 새로운 항공기(도심형 항공기 등) 운항과 저고도 비행 등에 관한 입법사항도 그러하다. 그렇지만 이들 입법사항을 모두 「기상법」에서 규정하기에는 법체계상 한계가 있다.
- 「기후변화감시예측법」 제정으로 개정된 「기상법」(2023. 2. 14., 일부개정)을 의미한다.
- 「탄소중립기본법」에서 ‘기후변화’란 사람의 활동으로 인하여 온실가스의 농도가 변함으로써 상당 기간 관찰되어 온 자연적인 기후변동에 추가적으로 일어나는 기후체계의 변화를 말한다(같은 법 제2조 제1호).
- 「탄소중립기본법」에서 ‘기후위기 적응’이란 기후위기에 대한 취약성을 줄이고 기후위기로 인한 건강피해와 자연재해에 대한 적응역량과 회복력을 높이는 등 현재 나타나고 있거나 미래에 나타날 것으로 예상되는 기후위기의 파급효과와 영향을 최소화 하거나 유익한 기회로 촉진하는 모든 활동을 말한다(같은 법 제2조 제11호).
- 「해양기후변화법안」은 우리나라가 대륙과 대양을 접한 반도국이라는 지정학적 위치에 있는 해양을 중심으로 이루어지는 기후변화를 감시하고 예측하여 해양산업에 미치는 영향과 연안 지역 주민의 피해를 저감하고 안전한 삶을 향유할 수 있도록 해양기후변화에 적극적으로 대응하는 것을 목적으로 한다.

# 남극해 '잔물' 생성 정밀 관측을 통한 전 지구 해양 변화 예측 능력 향상



윤승태 경북대학교

남극해에서는 지구상에서 가장 무거운 '잔물'인 고염대륙붕수가 생성된다. 이 해수는 전 지구 해양 순환의 핵심 중 하나인 남극 저층수의 특성을 결정하는 '마중물' 같은 존재이다. 최근 급격해진 기후변화의 영향으로 표층에서 만들어지는 '잔물' 고염대륙붕수와 '잔물'의 영향을 받는 남극저층수의 특성 변화가 꾸준히 관측되고 활발하게 보고되고 있다. 지구상에서 가장 무거운 해수인 남극 저층수의 특성 변화로 인해 무게(밀도)가 변하게 된다면 전 지구 해양 순환 변화 및 해수면 변동까지 초래할 수 있다. 따라서 전 지구 해양 순환 및 해수면 변동 예측 능력을 향상하기 위해서는 남극해 고염대륙붕수의 생성 기작과 과정을 면밀히 파악하는 것이 매우 중요하다. 하지만 남극의 극한 환경 조건으로 인해 현장 관측이 매우 제한적이었기 때문에 지금까지는 하계 선박 관측 자료에서 확인된 고염대륙붕수 특성 변화를 통해 간접적으로 해수의 생성 정도와 분포 특성 등을 규명해왔다. 그러나 최근 경북대학교, 극지연구소, 미국 컬럼비아대학교, 뉴질랜드 국립수문대기연구소 등으로 구성된 국제 공동연구팀은 도전적 관측 시도로 약 1년 동안 연속 모니터링에 성공하여 고염대륙붕수의 생성 과정을 상세히 규명하고, 정량적인 수치를 기반으로 고염대륙붕수 생성에 영향을 미치는 주요 요소들을 밝혀냈다. 겨울철 고염대륙붕수 생성 과정을 직접 관측하여 해수 생성량과 그 영향 요소를 정량적으로 제시한 것은 이번이 처음이며, 본 연구는 향후 전 지구 해양 순환 변화와 해수면 변동 예측 연구에 크게 기여할 것으로 기대한다.

## 남극해 남극저층수와 고염대륙붕수

최근 급격해진 기후변화 영향으로 표층에서부터 수심이 깊은 해양까지 전달되는 저온, 고염의 해수[그림 1] 특성이 큰 변화를 보이고 있으며, 이를 이해하기 위하여 남극해 연구가 활발히 진행되고 있다.

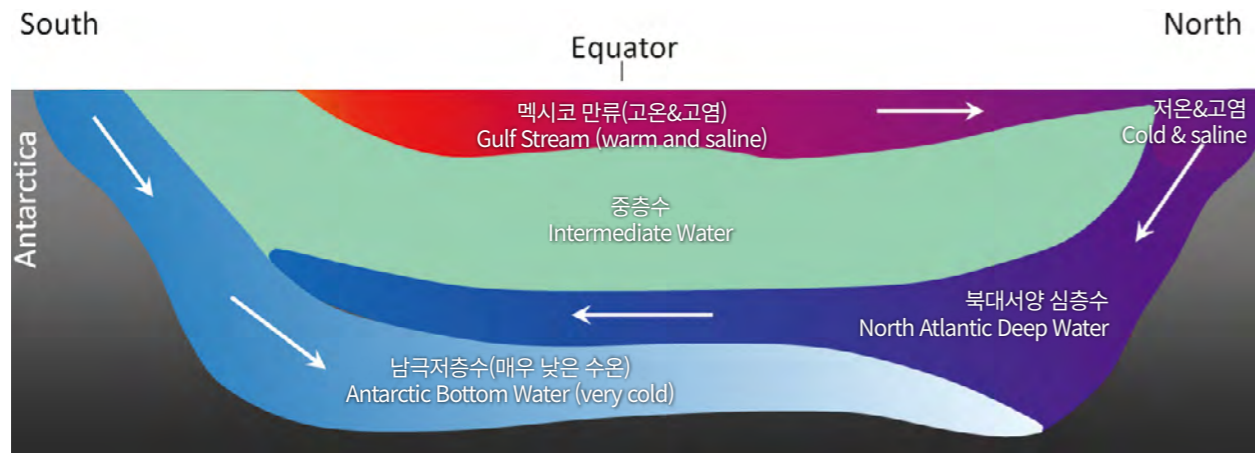
남극해의 해양 순환은 전 지구 기후와 해양 및 생지화학적 순환, 그리고 남극 용융 변화에 중대한 영향을 미치고, 특히 남극해에서 생성되는 남극저층수는 전 지구 해양 순환에서 가장 무거운 해수로 전 지구 해양 순환의 세기 결정에 주요한 역할을 한다. 또한 남극저층수의 물성 및 생성률 변화는 전 지구 해수면과 해수의 열량 변화에도 큰 영향을 미친다.

남극의 로스해는 웨델해와 더불어 남극저층수를 생성하는 대표적인 해양 중 하나로 남극저층수의 약 25%를 생성하는 곳이며, 로스해 연안 폴리냐(Polynya; 해빙이 없는 해양)에서

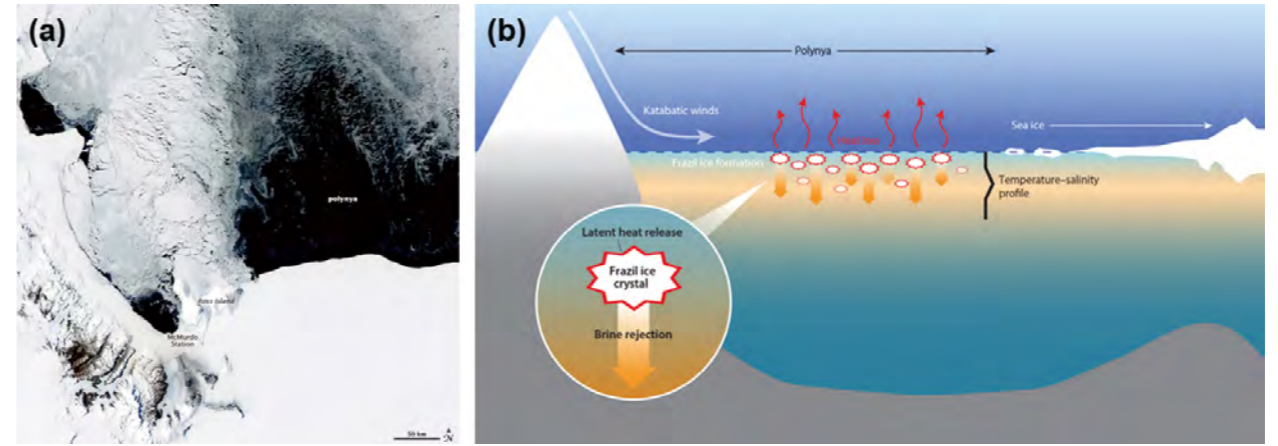
생성되는 고염대륙붕수가 남극저층수의 기원으로 알려져 있다. 기존 연구들에 따르면 고염대륙붕수는 남반구 겨울철 남극 대륙에서 발생하는 활강바람(Katabatic wind)에 의해 생성되며, 활강바람의 세기 및 지속 시간에 따라 해양-대기 간 열속 및 해빙(sea-ice) 생성량이 변화하고 그에 따라 고염대륙붕수의 특성도 결정된다. 그러나 관측 자료의 한계로 활강바람 세기, 폴리냐 발달 정도, 해빙 생성량, 고염대륙붕수 생성량 간의 정량적(Quantitative) 관계에 대해서는 밝혀진 바 없었다.

## 기후변화 영향에 따른 고염대륙붕수 특성 변화

최근 급격해진 기후변화에 따른 전 지구 해양 순환의 변동을 이해하기 위하여 로스해 고염대륙붕수 특성의 변화는 장기간 관측되어 왔다. 하계 기간 획득된 선박 관측 자료에 따르면 1950년대부터 2010년대까지는 기후변화 영향에 따른 서남극



[그림 1] 전지구 해양 순환 중 대서양 순환 모식도. 수심이 가장 깊은 곳에 남극저층수가 존재 (출처: Physical Geology book by Karla Panchuk and Steven Earle (2015))



[그림 2] (a) 남극해 로스해 연안에서 발달하는 폴리냐 위성 사진(출처: NASA) (b) 활강바람에 의한 고염대륙붕수 형성 모식도 (출처: Thompson 등(2020)의 figure 1)와 남극해 내 로스해의 위치 지도(출처: 윤(2022)의 figure 1)

아문센해 빙봉 용융 증가로 인해 얼음 녹은 물이 로스해로 흘러들어오면서 고염대륙붕수 염분이 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 이와 연계하여 남극저층수 염분 역시 감소하는 추세였고 미래 전 지구 열염 순환 세기의 약화 가능성도 함께 제기되었다. 그러나 2010년대 중반부터 고염대륙붕수 및 남극저층수 염분이 2000년대 초반과 유사한 수준으로 회복되었음이 새롭게 관측됨으로써 일명 '염분 재증가(Salinity rebound)' 현상이 보고되었다. 이는 2015~2018년에 유지되었던 전례 없는 대기 환경조건에 의한 것(서풍 강화 현상)으로, 아문센해에서 로스해로의 해빙 이동이 억제되면서 평년보다 로스해 연안 폴리냐 활동이 활발해졌기 때문이다. 이처럼 로스해 고염대륙붕수와 남극저층수의 특성은 최근 급격해진 기후변화에 매우 민감하게 반응하고 있다. 따라서 향후 기후변화에 따른 전 지구 해양 순환[그림 1] 변화 예측 능력을 향상하기 위해서는 고염대륙붕수의 염분 특성 변화뿐 아니라 고염대륙붕수 생성 기작 및 생성량에 대한 명확한 이해가 요구된다.

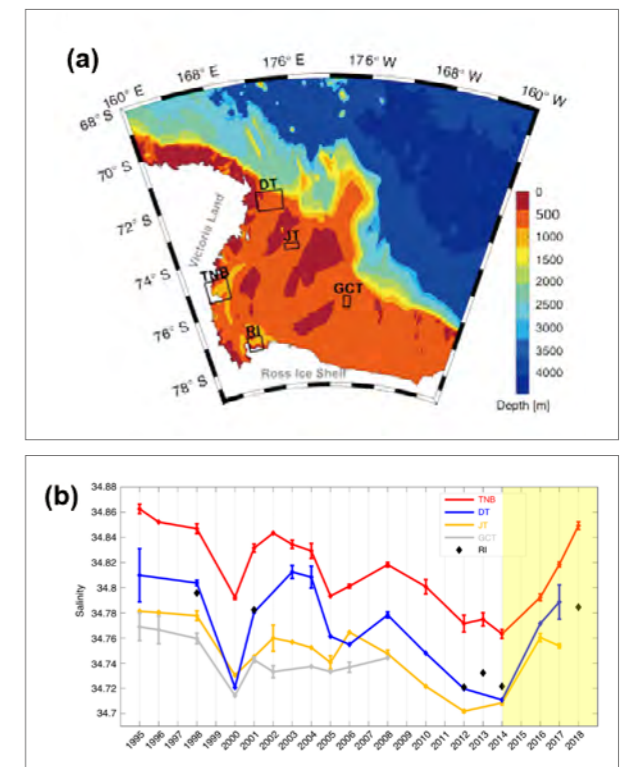
## 고염대륙붕수 생성 과정 및 기작 발견

로스해 서부의 테라노바만(Terra Nova Bay)은 연안 폴리냐가 발달하는 해역으로, 로스해 고염대륙붕수 중 약 33%가 테라노바만 폴리냐 활동으로 생성되는 것으로 알려져 있다. 따라서 고염대륙붕수 특성 및 생성량 변화를 명확히 파악하기 위해서는 겨울철 테라노바만 관측이 필수적이다. 하지만 겨울철 극한 환경조건에 따른 현장 관측의 한계로 그동안은 여름철 선박 기반 관측 자료나 해양 모델링 결과에 의존하여 고염대륙붕수의 생성과 특성 변화를 추정하였다. 이에 2017년 경북대학교, 극지연구소, 미국 컬럼비아대학교, 뉴질랜드 국립수문대기연구소 등으로 구성된 국제 공동연구팀은 겨울철 고염대륙붕수 생성 과정과 생성량을 직접 확인하기 위해 매우 도전적인 관측을 시도하였다.

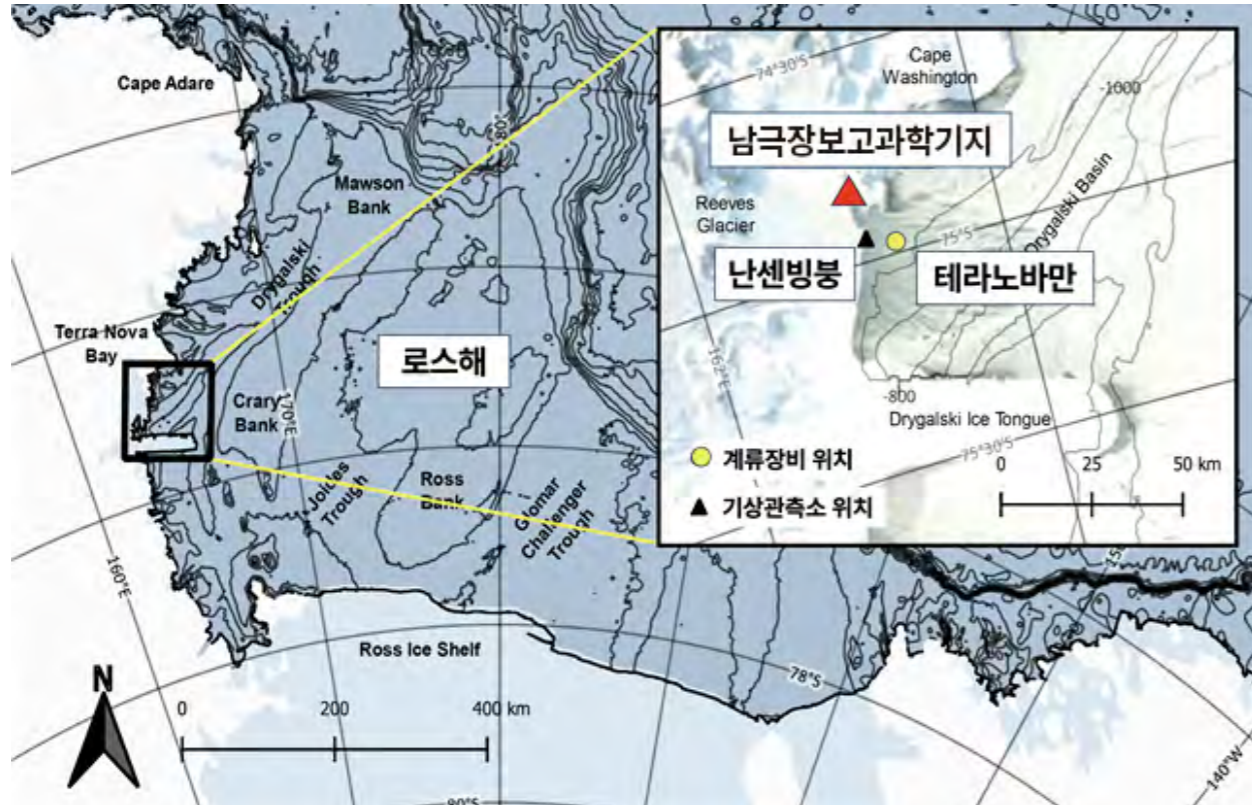
일반적으로 남극에서는 빙산을 피해 수심 400m 아래에 장비들을 설치하지만, 본 연구팀은 난센빙봉으로부터 불어오는 활강바람이 가장 집중적으로 영향을 미치는 위치를

파악하고 해당 위치의 수심 47~360m 구간에 정밀 관측망을 구성하였고, 1년 연속 관측에 성공해 고염대륙붕수 생성 과정을 직접 확인하였다.

또한 정밀 관측망을 통해 겨울철 난센빙봉에서 테라노바만으로 불어오는 활강바람에 의해 표층에 해빙이 생성되고 해빙 생성 과정에서 방출된 염(brine rejection)이 47m 수심의 염분부터 360m 수심의 염분까지 서서히 증가시키는 것을 직접 관측하였다. 또한 기존에는 겨울철 활강바람 이벤트가 발생하는 시기에 항상 표층 해빙 생성으로 염이 방출되어 고염대륙붕수가 생성되는 것으로 여겨졌으나 본 정밀 관측에서 활강바람 이벤트보다 폴리냐 면적의 확장이 고염대륙붕수 생성량 결정에 더 중요한 요소임을 확인하였다. 다시 말해,



[그림 3] (a) 로스해 대륙붕 해양 내 관측 자료 위치 (b) 로스해 대륙붕 해양 내 고염대륙붕수 염분의 최근 20년간 변화 (출처: Castagno 등(2019)의 figure 1, 2)



[그림 4] 남극 로스해 테라노바만 관측장비 설치 위치(노란색 원) (출처: Miller 등(2024)의 figure 1)

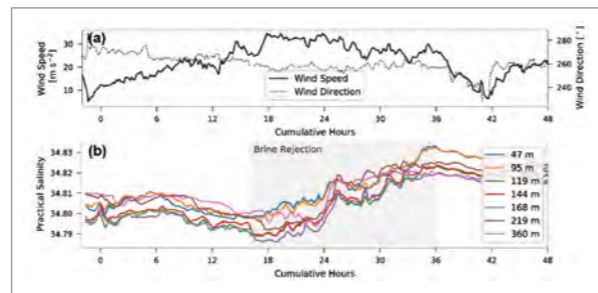
활강바람 이벤트가 발생하더라도 테라노바만 외해역에 발달한 두꺼운 얼음 등으로 인해 폴리냐가 넓게 확장되지 못한다면 고염대륙붕수 생성량은 크게 증가하지 않는다는 것을 의미한다.

정밀 관측 자료를 활용함으로써 궁극적으로 기존 연구들과 비교해 더욱 유의미한 고염대륙붕수 생성량 수치를 계산하였다. 또한 이를 기반으로 표층 순열속<sup>3)</sup> 자료를 활용하여 고염대륙붕수 생성량 추정식을 수정 및 개선하였다. 이어 연간 고염대륙붕수 생성량 변화도 기존 연구에 비해 작은 표준편차 범위로 재산출하여 고염대륙붕수 생성 과정, 생성 기작, 생성량 규명에 최종적으로 성공하였다.

**연구 중요성과 미래 고염대륙붕수 변화 전망**

본 연구팀은 세계 최초로 고염대륙붕수 생성 과정을 직접 관측하고, 이로써 고염대륙붕수 생성량 추정 방법을 개선하여 과거 연구들보다 정확한 고염대륙붕수 생성량을 도출했다는 점에서 큰 의의가 있다. 특히 국내 연구진이 관측 및 자료 분석에 참여해 해당 성과를 공동으로 이루어냈다는 점에서 향후 전 지구 해양 순환과 해수면 상승 예측 연구 등에서도 국내 연구진들의 활약이 기대된다.

본 연구에서 추정된 연간 고염대륙붕수 생성량 변화에 따르면 최근 10년간 염분 재증가 현상과 일치하게 테라노바만 고염대륙붕수 생성량도 2배 이상 증가했음이 확인되었다. 이는 기후변화 영향으로 예측되는 염분 감소 및 생성량 감소와는 반대되는 결과이며, 2018년 이후 확인되는 고염대륙붕수 생성량 증가는 2015~2018년에 유지되었던 전례 없는 대기

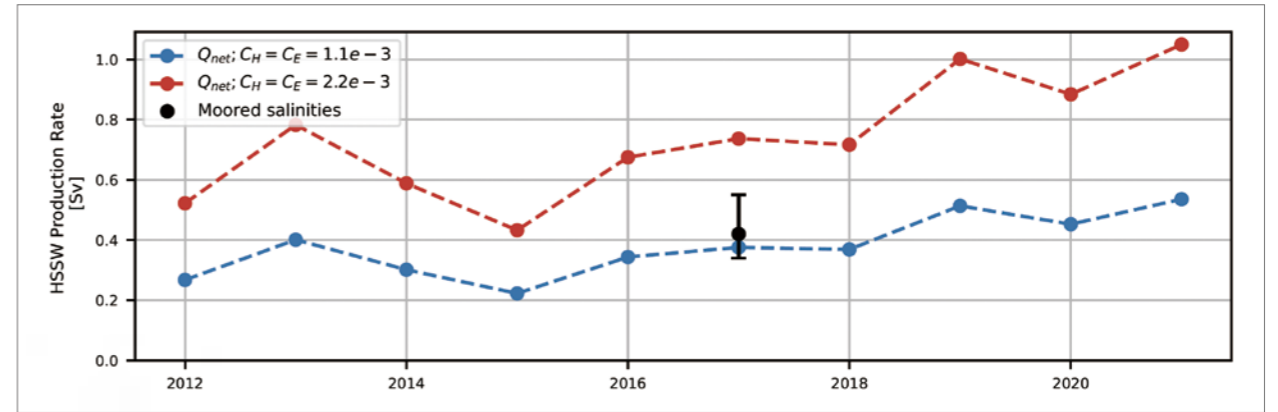


[그림 5] 겨울철 활강바람 이벤트와 염분 증가 관측 모습 (출처: Miller 등(2024)의 figure 3 일부 발췌)

| 연구 목록              | 활용 자료         | 추정 기간      | 테라노바만 고염대륙붕수 생성량*              |
|--------------------|---------------|------------|--------------------------------|
| Miller 등 (2024)    | 현장 정밀 관측      | 7~10월 2017 | 0.43 Sv; 95% 신뢰구간 [0.34, 0.55] |
| Miller 등 (2024)    | 매개변수화된 표층 순열속 | 2012~2021  | 0.38~0.74 Sv; 표준편차 [0.10~0.20] |
| Fusco 등 (2009)     | 매개변수화된 표층 순열속 | 1990~2006  | 1.2 Sv; 표준편차 [0.3]             |
| Jendersie 등 (2018) | 해양 모델 실험      | 해당 없음      | 0.28 Sv                        |

[표 1] 고염대륙붕수 생성량 추정 결과 비교 (출처: Miller 등(2024)의 Table 1)

\* 테라노바만 표층에서 추정 기간에 평균적으로 생성되는 고염대륙붕수 양을 의미함.  
 ※ 1Sv는 1초에 100만 m<sup>3</sup>의 해수가 수송되는 것을 의미하며, 1Sv는 아마존강 수송량의 약 5배임.



[그림 6] 2012년부터 2021년까지(10년) 표층 순열속 자료로 추정된 고염대륙붕수 생성량 연간 변동(빨강: 최대 추정치; 파랑: 최소 추정치) 및 정밀 관측을 통해 추정된 2017년 고염대륙붕수 생성량 수치(검은색 점; 검은색 선은 오차 구간) 비교(출처: Miller 등(2024)의 figure 5)

환경조건과도 관련이 없을 것으로 예상된다. 따라서 향후 테라노바만 고염대륙붕수가 남극저층수 특성 변동에 미치는 영향을 파악하고, 전 지구 해양 순환 및 해수면 상승 예측 능력을 향상하기 위해 테라노바만 폴리냐 해역 및 로스해 대륙붕 해역에서의 도전적인 관측이 꾸준히 시도되어야 할 것이다. 해당 목표를 달성하기 위해 국내에서는 지속적인 국제 협력형 연구과제의 기획 및 개발이 추진되어 안정적인 연구 지원 환경이 구축될 수 있기를 기대한다.

**※ 일러두기**

본고의 내용에는 해양수산부 ‘급격한 남극 빙상 용융에 따른 근미래 전 지구 해수면 상승 예측기술 개발’의 연구비 지원을 받아 수행된 연구 결과가 포함되어 있으며, 해당 연구 결과는 국제저명학술지 네이처커뮤니케이션즈紙에 2024년 1월 16일 게재됐다 (<https://doi.org/10.1038/s41467-023-43880-1>).

- 1) 남극저층수는 일반적으로 AABW(Antarctic Bottom Water)로 정의되며, 전 지구 해수 중 가장 무거운 해수이다.
- 2) 고염대륙붕수는 일반적으로 HSSW(High Salinity Shelf Water)로 정의되며, 남극 연안에서 생성되고 AABW의 마중물에 해당한다.
- 3) 순열속(Net heat flux)은 해양 표면에서 발생하는 해양-대기 간 열교환 양을 수치로 표현한 값(단위: Watt/m<sup>2</sup>)을 의미한다.

# 극한환경 생존의 대명사, 완보동물을 통한 극지연구



김지훈 극지연구소 빙하지각연구본부

완보동물은 극한의 환경조건에서 살아남는 능력을 가졌지만 눈에 보이지 않을 정도로 크기가 작은 동물로 알려져 있다. 이러한 적응 능력을 토대로 전 세계 어디에서든 다양한 종이 발견되며, 특히 남극과 북극의 육상 생태계에서 주요 구성원으로 자리 잡고 있다. 극한의 조건에서 살아남는 생물의 대표 종으로 인식되는 완보동물은 동물계에서 종 수로 가장 큰 분류군인 탈피동물군에 속하는데, 이 분류군의 진화사를 밝히는 데 중요한 역할을 한다. 또한 잘 알려진 모델 종들을 이용해 실험한 결과, 상당수의 육상 완보동물이 열에 취약한 것으로 밝혀져 기후변화로 인한 극지 생태계의 충격과 변화를 알려주는 지표 역할도 할 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 생리학적, 생태학적, 진화생물학적 중요성에도 불구하고 국내에서는 한동안 연구 활동이 없었지만, 극지연구소가 그린란드의 완보동물 연구를 시작한 이래로 점차 세계적 수준의 연구 역량을 갖추어 가고 있다. 지속적인 연구를 통해 극지에서의 생물의 적응과 지구온난화에 따른 생태계의 변화, 그리고 동물 진화에 있어서 완보동물이 중요한 과학적 기여를 할 수 있으리라 기대한다.

“우리들은 (달에) 완보동물이 생존했을 가능성이 있으며, 매우 높다고 믿는다.” -노바 스피박(Nova Spivack)

2019년 2월 21일 지구에서 출발한 이스라엘의 민간 달 착륙선 베레시트(Beresheet)는 두 달간의 긴 여행 끝에 마침내 달 궤도에 무사히 진입하였으며, 4월 12일 ‘고요의 바다’ 지역에 착륙을 시도하였다. 하지만 불운하게도 착륙 과정 중 엔진에 문제가 발생하며 베레시트는 달 표면에 추락하며 파괴되었다. 이 탐사는 실패로 끝나면서 아쉬움만 남기고 세간의 관심에서 점차 멀어지는 듯했다. 그런데 같은 해 8월 5일 아치미션 재단(Arch Mission Foundation) 의장 노바 스피박의 인터뷰가 세계 유수의 여러 언론을 통해 소개되며 베레시트가 다시 한번 화제의 중심에 서게 되었다. 베레시트 임무에 참가 하였던 아치미션 재단은 지구를 포함한 태양계 곳곳에 인간의 기록이 담긴 도서관을 세우는 것을 목표로 설립된 비영리 단체로, 베레시트 내부에 지구를 대표하는 동물로 선정된 완보동물 수천 마리를 넣었다고 전해진다. 이 단체의 대표인 노바 스피박이 베레시트 안에 실린 완보동물이 추락 과정에서 죽지 않고 살아남았을 가능성을 제기한 것이었고, 이 이야기는 ‘인간 활동에 의한 달 표면 오염이 옳은가?’에 대한 주제로까지 확장되기도 하였다. 이후 영국의 한 연구팀이 탄환 속에 완보동물을 넣고 쏘아보는 실험을 통해 아마도 완보동물이 베레시트의 추락 과정에서 모두 죽었을 것으로 추정된다는 실험

결과를 발표하면서 이 논란은 일단락되었다. 완보동물이 대체 어떤 동물이길래 달에서의 생존 가능성에 관한 이야기까지 나오는 것일까.

## 작고 느리지만 강한 동물, 완보동물

완보동물은 완보동물문(Phylum Tardigrada)에 속하는 동물로 4쌍의 다리를 가지고 있으며 다리 끝에 발톱이 있는 것이 특징이다. 길이가 0.1~1.2mm 정도이기 때문에 현미경으로 보아야 관찰이 가능하며, 현재까지 약 1,500여 종이 공식적으로 보고되었다. 몸길이가 1mm에 달하는 대형 육식완보동물인 *Milnesium tardigradum*을 이용한 실험에 따르면 이 동물은 한 시간에 평균 25mm 정도를 이동하였으며 최대 속도는 1166.4mm/h에 달했다고 한다. 이처럼 매우 천천히 걸어 다니기에 연구자들은 완보동물(緩步動物)이라는 이름을 붙였으며, 곰 같은 느낌 때문에 물곰(water bear)이라고도 부른다. 필름 형태의 아주 적은 양의 물만 있어도 살 수 있어 심해, 고산 지대, 극지에 이르기까지 지구상 거의 모든 환경에서 발견된다. 머리 안쪽에 한 쌍의 문침(stylet)을 가지고 있으며 먹이를 먹을 때 주로 이 침을 이용하여 먹이에 구멍을 뚫고 새어 나오는 세포액이나 체액을 먹는다. 완보동물은 일생에 걸쳐 여러 번의 탈피 과정을 겪기 때문에 탈피를 하는 무척추동물들의 모임인 탈피동물군(Ecdysozoa)<sup>9)</sup>에 속한다. 특히 그중에서도 거미나



[그림 1] 남극 완보동물 *Acutuncus antarcticus*의 활성상태와 가사상태에서의 형태 변화

곤충 같은 절지동물, 유조동물과 가까워 이들과 함께 범절지동물군(Panarthropoda)을 형성한다.

이렇게 작고 단순해 보이는 완보동물이 부각된 것은 이 동물이 가지고 있는 특별한 생존능력 때문이다. 완보동물은 주변 환경이 나빠지면 몸 안의 모든 신진대사를 멈추고 가사상태(cryptobiosis)에 들어간다. 이후 주변 환경이 개선되면 다시 활성상태로 돌아가 생명활동을 재개한다. 가사상태에 들어가는 능력은 바닷속에 사는 해양 완보동물에는 없고, 조간대나 육상에 서식하는 완보동물에만 있는 것으로 알려져 있다.

가사상태의 종류에는 현재까지 건조(anhydrobiosis), 삼투압 변화(osmobiosis), 동결(cryobiosis), 질식(anoxymbiosis), 화학물질(chemobiosis) 등 다섯 가지가 알려져 있다. 자극의 종류에 따라 가사상태로 들어가는 완보동물의 형태가 달라지는데, 예를 들어 산소 농도가 낮아져 질식 가사상태(anoxymbiosis)로 들어가는 완보동물은 몸이 부풀며 완전히 팽팽하게 퍼지는 데 반해 건조로 인한 가사상태(anhydrobiosis)는 눌린 아코디언처럼 몸이 완전히 쪼그라들게 된다. 이는 각각의 자극마다 각기 다른 유전자들이 발현하기 때문으로 생각된다. 다섯 가지의 가사상태 중 가장 유명하고 연구가 많이 된 것은 건조 가사상태이다. 주변의 물이 말라 없어지면 완보동물은 체내 수분의 95% 이상을 몸 밖으로 배출하여 몸을 수축시켜 부피가 활성상태의 10% 이하로 줄어들게 된다. 이 형태가 마치 술통(tun)과 유사하다고 하여 ‘통 상태(tun state)’라고 부른다. 통 상태로 들어간 완보동물은 일반적으로 동물이 살 수 없다고 생각되는 환경조건에서도 생존할 수 있게 된다. 건조 상태로 20년 이상, 151°C의 고온에서 15분, 영하 272°C에서 8시간, 진공에 가까운 저압, 대기압의 74,000배에 해당하는 고압, X선, 감마선, 자외선 등의 방사선, 유독한 유기용매 등 극악의 조건에서도 버텨내다가 물을 넣어주면 활성상태로 돌아가 다시 생명활동을 시작한다. 물이 계속 들어왔다 나갔다 하는 조건대에 서식하는 특정 종의 경우에는 수 초 안에 통 상태로 들어갈 정도로 가사상태 반응이 빠르게 일어나기도 한다.

이렇게 완벽해 보이는 건조 가사상태에도 약점이 존재한다. 자외선과 열이 바로 그 약점인데, 이것은 가사상태의 특징과 연관되어 있다. 가사상태에 들어가면 체내의 모든 반응이 멈추기 때문에 DNA 손상이나 단백질 변형에 대응하는 세포 내 수리기구도 모두 멈추게 된다. 가사상태 동안 자외선이나 열이 가해져 생기는 손상이 바로 회복되지 못하기 때문에 계속 누적되어 어느 수준을 넘어서면 더는 깨어나지 못하게 되는 것이다. 이 때문에 짧은 시간의 열이나 자외선 충격은 견뎌 내지만 가해지는 시간이 길어지면 죽음에 이르게 된다.

또 다른 유명한 가사상태로는 동결 가사상태(cryobiosis)가 있다. 주변에 물이 얼면 완보동물이 동결 가사상태에 들어가는데, 이 경우에는 동물의 형태가 활성상태와 거의 유사하거나 약간 찌그러지는 정도로 통 상태보다 덜 극적으로 변한다. 동결 가사상태와 관련된 가장 유명한 연구는 일본

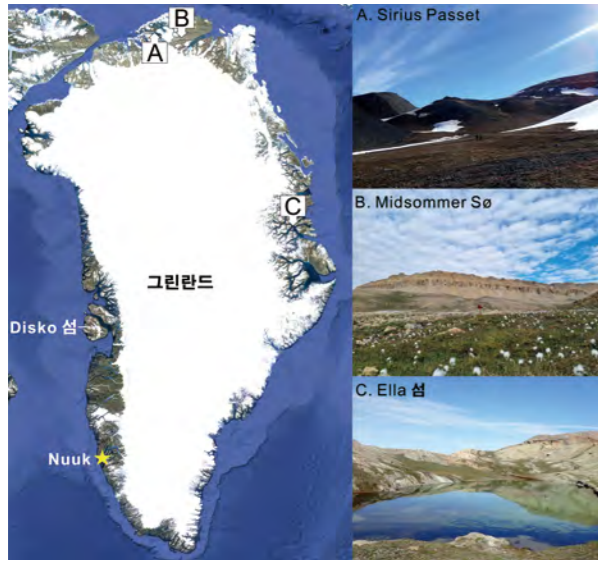
극지연구소(NIPR)에서 2015년 발표한 실험이다. 일본 연구자들은 1983년 남극 Dronning Maud Land에서 채집한 이끼 표본을 영하 20°C에서 30년간 냉동고에서 얼렸다가 2014년 꺼내 확인하였다. 이들은 해당 이끼 표본에서 *Acutuncus antarcticus*라는 완보동물의 성체 두 마리와 알 한 개를 무사히 깨우는 데 성공하였다. 아쉽게도 성체 한 마리는 사망할 때까지 알을 낳지 않았지만, 나머지 성체와 알은 번식에도 성공하여 현재까지 그 혈통이 세계 여러 실험실에 분양되어 살아 가고 있다.

## 극지 완보동물 연구의 중요성

극지 육상 완보동물 중 많은 종이 매우 뛰어난 건조 가사상태와 동결 가사상태 능력을 갖추고 있는 것으로 생각된다. 이 능력을 이용하여 가속하고 긴 극지의 겨울 동안 다른 동물들이 얼어 죽을 때 살아남아 버티다가 여름이 오면 다시 활성상태로 전환하여 모두 죽어 텅 빈 공간을 빠르게 점유하는 식의 전략을 사용한다. 육상 완보동물 중 상당히 많은 종류가 짝짓기 없이 자신과 똑같은 알을 낳는 처녀생식이라는 번식 방식을 택했기에(때문에 종 전체가 모두 암컷이다), 극지의 짧은 여름 동안에도 순식간에 종이 번성할 수 있다. 그 덕분에 육상 완보동물은 극지 육상 생태계에서 다양한 생태적 지위를 차지하며 매우 중요한 구성원이 되었다.

하지만 완보동물은 추위에 강한 것과 달리 상대적으로 열에 취약한 동물인 것으로 보인다. 코펜하겐대 연구팀은 덴마크에 서식하는 완보동물 *Ramazzottius varieornatus*을 이용하여 이 동물이 온도에 얼마나 강한지에 대한 생존도 실험을 하였다. 이 종은 여러 종류의 가사상태 능력이 매우 뛰어난 종임에도 불구하고, 활성상태의 완보동물 *Ramazzottius varieornatus*은 37.1°C에서 절반이 죽는 것으로 나타났다. 2022년 코펜하겐 최고온도는 35.6°C였는데 코펜하겐이 온난화로 조금만 더 따뜻해진다면 많은 완보동물이 죽게 될 것으로 예상된다. 극지 완보동물은 이보다 더 취약할 것이다. 앞서 언급한 남극종 *Acutuncus antarcticus*는 남극대륙 전역에 걸쳐 대부분의 해안가에 널리 서식하는 것으로 알려진 종으로, 실험실 내 배양 결과로는 25°C에서 전부 죽었다고 알려져 있다. 현재 남극대륙의 최고온도 기록은 2020년 아르헨티나의 남극기지인 Esperanza Station에서 관측된 18.3°C로, 치사 온도까지 얼마 남지 않은 것으로 보인다. 아직 실험 결과는 안 나왔지만 그린란드 서식 완보동물도 마찬가지로 일 것으로 생각된다. 따라서 극지 육상 완보동물 연구는 지구 온난화가 극지 생태계 파괴에 얼마나 영향을 주는지에 대한 지표로 활용될 수 있다.

또한 진화에 대한 연구를 통해 완보동물의 여러 특징에 대한 의문점을 해결할 수 있다. 앞서 이야기하였듯 완보동물은 절지동물, 유조동물과 함께 범절지동물군을 형성하고 있으며 이들은 5억 년 전 캄브리아기에 살던 엽족동물(Lobopodia)로부터 갈라져 나왔을 것으로 생각된다. 엽족동물은 여러



[그림 2] 극지연구소의 그린란드 완보동물 연구지역: Sirius Passet, Midsommer Sø, Ella Island

개의 몸통마디와 다리를 가진 벌레 형태의 해양동물로 그 크기가 1~10cm에 달했지만 전부 멸종하여 현재는 존재하지 않는다. 하지만 현생 완보동물은 소형화(miniaturization)<sup>3)</sup>를 거치며 그 크기가 엽족동물의 100분의 1로 줄어들고 호흡계, 순환계 관련 장기들을 잃어버렸다. 완보동물 진화 연구는 어떻게, 그리고 왜 조상보다 훨씬 작고 단순한 모습을 가지게 되었는지에 대한 실마리를 제공해 줄 수 있을 것이다. 여기에 더해 진화 연구는 해양 완보동물은 가지고 있지 않은 가사상태 능력을 육상 완보동물이 언제, 어떤 과정을 거치며 얻게 되었는지, 이를 통해 어떻게 육지로 올라올 수 있게 되었고, 어떤 경로로 극지로 퍼져나가 어떻게 적응하며 현재 극지역에서 번성하게 되었는지에 대한 궁금증도 풀어 줄 것이다.

### 극지 완보동물 연구 성과

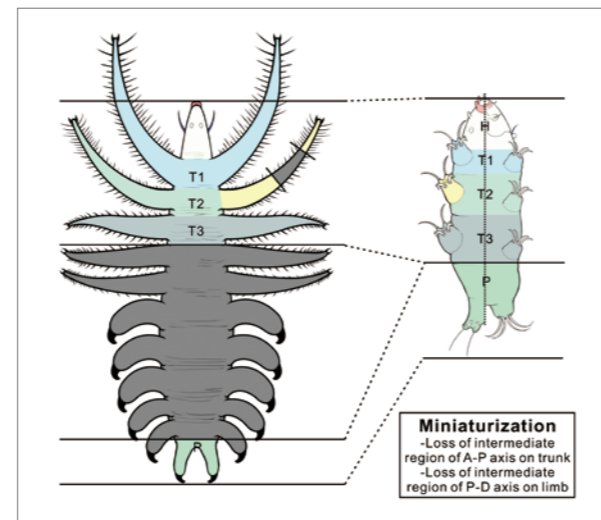
극지연구소는 남북극에 서식하는 육상 완보동물에 대한 다양성, 초기세구조, 생리, 진화 등 여러 방면에서 연구를 수행하고 있다. 서그린란드의 작은 섬인 Disko 섬에서만 현재까지 50종 이상의 완보동물이 서식하는 것으로 알려질 정도로 그린란드는 다양한 완보동물로 유명한 지역이다. 하지만 북/동그린란드는 서/남그린란드보다 접근이 어려워 연구가 거의 이루어지지 않은 실정이다. 특히 북그린란드는 완보동물의 마지막 연구가 1951년이었으며 그 후 60여 년간 연구가 전혀 없었다. 극지연구소는 2016년 캠프를 시작으로, 북그린란드 Sirius Passet, Midsommer Sø, 동그린란드의 Ella 섬 등지에서 현재까지 30종이 넘는 육상 완보동물을 채집하였으며 그중 많은 수는 현재까지 보고된 적 없는 신종으로 파악된다.

또한 극지연구소는 세계적인 캄브리아기 화석산지 북그린란드 Sirius Passet의 화석과 극지 완보동물을 포함한 엽족동물+범절지동물 형태 비교 연구를 통해 완보동물이 Luolishaniid라는 종류의 엽족동물과 가까우며 어떻게 현재와 같은 몸

기본구조를 가지게 되었는지를 밝혀내었다. 5억 년이라는 시간을 뛰어넘어 같은 공간에서 채집한 캄브리아기 화석과 현생 완보동물을 이용한 연구라는 점에서도 뜻깊은 연구이다. 남극세종과학기지 주변 환경에서도 다양한 완보동물 종이 파악되고 있으며, 이 중 일부 종은 실험실 내 배양이 성공적으로 이루어졌다. 이를 통해 신종 보고 및 새로운 초기세구조 관찰, 분류학적인 문제 제기 등이 이루어지기도 하였다.

### 향후 전망과 계획

앞서 서술하였듯 완보동물은 극지과학 분야에서 중요한 역할을 할 수 있는 동물이다. 캄브리아기 대폭발이라는 동물계의 대사건으로부터 현생동물이 어떻게 진화해 왔는지를 풀 수 있는 열쇠를 품고 있을 뿐만 아니라 극지의 가혹한 환경에 어떻게 적응하고 번식해왔는지, 또 갈수록 심각해지는 기후 변화에 생물들이 얼마나 심대한 타격을 입으며 어떤 반응을 보이는지를 알려줄 수 있다. 특히 북극 지역 중 최북단에 있는 육지인 북그린란드는 이러한 연구가 가능한 지역이면서 현재 극지연구소만이 지속적인 연구를 수행하고 있는 지역이기도 하다. 북그린란드 연구가 지속된다면 고생물학, 진화학, 생리학, 그리고 환경학 분야가 융합된 세계적인 연구가 이루어질 것으로 생각한다.



[그림 3] 2023년 PNAS에 게재된 캄브리아기 엽족동물과 현생 완보동물의 형태 비교를 통한 진화과정에 대한 그림(Kihm et al., 2023)

- 1) 탈피동물군(Ecdysozoa)은 탈피를 하는 무척추동물의 모임으로, 새예동물(Priapulida), 동문동물(Kinorhyncha), 동갑동물(Loricifera), 선형동물(Nematoda), 유선형동물(Nematomorpha), 절지동물(Arthropoda), 유조동물(Onychophora), 완보동물(Tardigrada)이 여기에 속한다.
- 2) 소형화는 동물의 몸길이가 일반적으로 1mm 이하로 작아지는 현상을 말한다. 완보동물뿐만 아니라 선형동물문, 윤형동물문, 동갑동물문, 복모동물문 등 동물계의 여러 문에서 나타나는 현상이지만 그 원인이나 메커니즘 등에 대해서는 아직 밝혀진 바가 적다.

## 아라온호, 성과와 미래

### 김춘식 극지연구소 쇄빙선운영실

아라온호는 우리나라 극지연구의 활동 범위 확장과 독자적인 연구 진행을 위해 건조된 아라온 쇄빙연구선으로 2009년 11월 2일 첫 항해를 시작해 지금까지 15년간 전 세계 바다를 누비고 있다. 총톤수는 7,507t으로 길이가 111m에 달한다. 항해 속력은 12노트(22.2km)로 결빙 지역에서 1m의 해빙을 시속 3노트(약 5.6km/h)의 속력으로 깨뜨리며 항해할 수 있는 국내 최초의 쇄빙연구선이다. 아라온호는 음향측심장치(Multi-beam echo sounder), 탄성파장비(Seismic system), 해수분석장비(CTD) 및 해저퇴적물채취장비를 비롯한 60여 종의 연구 장비를 장착하고 있다. 또한 15년 동안 남극과 북극 간 총 69만 마일을 오가며 “아라오나의 발견” 및 2023년 “남극 빙하 녹이는 바닷물 계절 변동성 최초 규명” 등 총 204건의 연구 활동을 지원하였다. 그뿐만 아니라 남극해에서는 조난 어선과 인명을 구조하여 “남극산타”라는 별명을 얻기도 했다. 아라온호는 남극과 북극에서 연구 활동을 지원하여 우리나라 극지연구의 위상 제고를 견인하는 핵심 인프라일 뿐만 아니라 차세대 쇄빙선이 인도되기 전까지 국내외 연구자들의 다양한 연구 수요를 수용하여 우수한 연구 성과가 도출될 수 있도록 지속적인 지원을 하고 있다. 지구온난화 현상으로 갈수록 어려워지는 극지역에서의 남극과학기지 보급 업무를 성공적으로 지원하여 극지연구의 미래를 함께하고자 한다.

### 극지에서 쇄빙연구선의 역할과 필요성

얼음을 깨고 항해하는 쇄빙연구선은 남극과 북극의 극지를 기반으로 연구 활동을 수행하는 과학자들에게 결빙 해역에서 연구 활동을 가능하게 하고, 남극과학기지에 연구 장비 운송 및 보급품을 전달하는 역할을 한다.

우리나라에 쇄빙연구선이 없었을 때의 극지 활동은 쇄빙연구선을 보유한 외국의 연구기관에 비싼 사용료를 지급하거나 그 기관의 연구 일정에 맞추어 승선해야 했으므로 해빙이 없는 곳이나 연구자가 원하는 연구 활동을 수행할 수 없었다. 우수한 연구 성과를 기대하기 위해서는 독자적 연구 활동은 물론 남극장보고과학기지 건설과 건설 후 기지 운영에 필요한 보급품을 전달하기 위해 쇄빙연구선이 필요하게 되었다.



### 쇄빙연구선의 건조

쇄빙연구선은 2003년 건조가 착수된 이후 2004년 한국해양연구원에서 개념 및 기본 설계를 추진하였으며, STX조선의 실시 설계 시행으로 2008년 1월 부산 한진중공업에서 건조 착공 후 국내 최초로 진수되었다. 마침내 2009년 11월 2일 취항식에서 선명을 “아라온호”라 명명함으로써 대한민국 최초이자 유일한 쇄빙연구선이 탄생하여 우리의 힘으로 운항할 준비를 완료하였다.

#### · 제원

총톤수는 7,507t으로 길이 111m, 폭 19m, 항해 속력은 12노트(22.2km)로 최고 16노트까지 달릴 수 있으며, 결빙 지역에서 1m의 해빙을 시속 3노트(약 5.6km/h)의 속력으로 깨뜨리며 항해할 수 있는 쇄빙 능력을 갖추고 있다. 한 번의 보급으로 70일간 약 2만 해리(약 3,700km)를 항해할 수 있고 승무원 25명과 연구원 60명이 탑승하여 총 85명이 정원이다.

#### · 탑재 연구 장비 및 연구 지원 능력

아라온호에는 음향측심장치(Multi-beam echo sounder), 탄성파장비(Seismic system), 해수분석장비(CTD) 및 해저퇴적물채취장비를 비롯한 60여 종의 연구 장비가 장착되어 남북극의 결빙 지역에서 전천후로 연구 활동 지원 업무를 수행한다.

#### · 특징

아라온호의 선수는 40mm의 저온 고장력 특수강으로 제작되어 있고, 특수강 외부에는 저온과 쇄빙 때 얼음 충격으로부터 선체를 일차적으로 보호하기 위하여 단단한 내빙 도료가 시공되어 있다. 앞부분 아래쪽에는 얼음을 자를 수 있는 아이스 나이프가 장착되어 있으며, 선미에 360도 회전이 가능한 프로펠러 2개가 장착되어 있다. 또한 선수에는 보조 프로펠러 2개가 장착되어 있으므로 결빙 지역에서 배의 조종을 쉽게

할 수 있도록 하여 쇄빙 중 얼음 속에 갇히면 빠르게 탈출할 수 있는 기능도 갖추고 있다. 아라온호의 쇄빙 원리는 강력한 추진기의 추진력을 이용하여 선체와 선수의 아이스 나이프가 얼음을 충돌하여 깨는 것과 충돌로 깨기 어려운 두꺼운 얼음은 아라온호가 얼음 위를 올라타 그 무게로 얼음을 깨는 것이다.

**운항 일정**

남극 항해는 10월 말에 출항하여 남극장보고과학기지의 보급 활동 및 남극에서의 연구 활동 지원을 수행하고 이듬해 4-5월에 다시 모항인 인천항에 귀항한다. 인천항에 돌아오면 시험항해로 아라온호 및 연구 장비를 최적의 환경으로 만든 후 북극 항해는 7월에 출항하여 9월 말에 인천항에 돌아온다.

**· 남북극 운항 항적도**

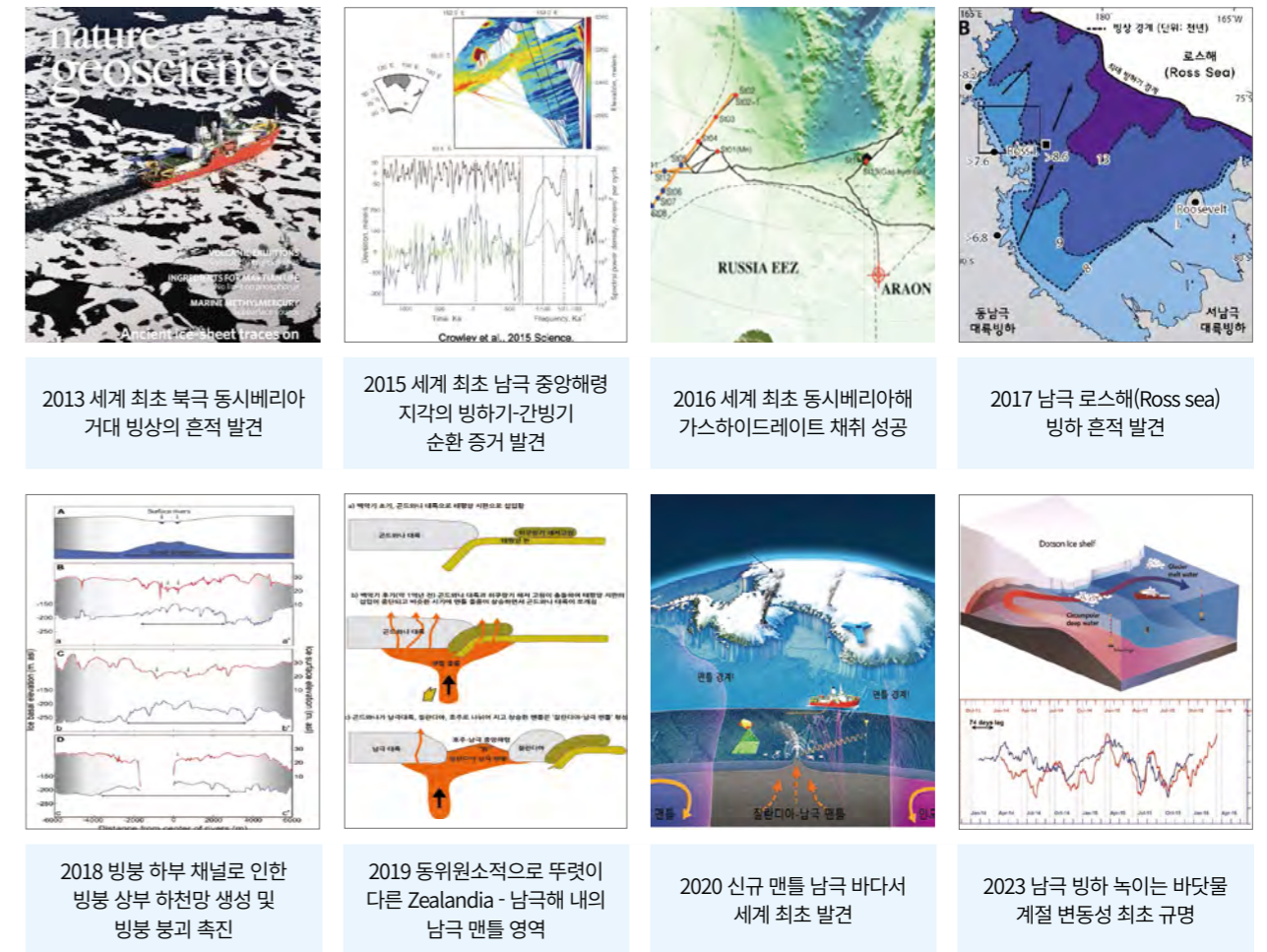
|    |    |    |     |     |      |
|----|----|----|-----|-----|------|
| 1월 | 2월 | 3월 | 4월  | 5월  | 6월   |
| 남극 |    |    |     |     | 유지보수 |
| 7월 | 8월 | 9월 | 10월 | 11월 | 12월  |
| 수리 | 북극 | 대기 | 남극  |     |      |

**실적 및 성과**

2009년 11월 첫 항해를 시작한 아라온호는 2009년 항해 4,600마일을 시작으로 쉼 없이 남극 15번과 북극 14번을 오가며 연평균 약 48,000마일, 15년 동안 약 69만 마일(약 127만 km)의 대장정 항해를 하였다.

**· 연구 성과**

69만 마일을 항해하며 연평균 약 13건의 연구 과제를 수행하는 등 15년 동안 총 204건의 연구 과제를 수행하였다. 204건의 연구 과제 중 대표적으로 2015년 남극 해저에서 신종 생명체 “아라오나의 발견” 및 2023년 “남극 빙하 녹이는 바닷물 계절 변동성 최초 규명” 등 우수한 성과를 도출함으로써 극지 연구에 커다란 양적, 질적 성장에 이바지하였다.



[표 1] 아라온호의 주요 연구 성과



[그림 1] 아라온호의 운항 항적도

**· 남극장보고과학기지 운영 및 남극 연구 활동 지원**

2014년에 대한민국 최초의 남극 대륙기지인 남극장보고과학기지 건설 사업을 지원하였으며, 이후 매년 장보고과학기지에 남극 항공유 약 600m³, 컨테이너 27TEU에 각종 연구 장비, 식자재, 생활용품이나 기지 유지 부족품을 보급해왔다. 또한 특수 중장비를 운송하여 대륙을 기반으로 하는 연구 활동을 지원하였다.

**· 연간 승선 인원**

극지연구소 연구원, 국내 산학연 연구원 및 해외 연구기관의 연구원을 포함하여 연평균 약 260명, 15년 누계 약 3,756명(국내 3,411명, 해외 345명)이 승선하여 남북극에서 연구 활동을 수행하였다.

**· 조난 선박과 인명의 구조 활동**

아라온호의 주요 임무는 결빙 지역에서의 연구·보급 활동을 지원하는 것과 남극에서 조업하는 어선이 남극 결빙 지역에서 선체 파공, 화재 및 긴급환자의 발생 등 위험에 빠졌을 때 신속하게 출동해 구조에 성공하여 “남극의 산타”로 불리며 남극에서의 대한민국의 입지와 영향력을 강화해 나가고 있다. 최근 2024년 1월에는 남극에서 조업 중인 우루과이 어선에서 응급환자가 발생하여 아라온호 선장, 아라온호에 승선 중인

선원과 극지의학회 소속 의사와의 협진으로 의료 및 의약품을 지원함으로써 환자가 모항에 무사히 도착할 수 있도록 하여 그간 남극에서 시행해 온 의료 협력 체계를 한 단계 격상시켰음을 확인하였다.

**아라온호의 도전**

극한 환경인 극지에서의 쇄빙연구선 운항은 해빙에의 갇힘, 화재 발생, 선체 파공 등 위험성과 고립성, 취약한 접근성에 노출되어 있다. 따라서 아라온호와 연구원의 안전을 지켜 내는 것은 매우 중요하다. 따라서 운영 연수의 증가로 노후화가 진행되는 연구 장비와 항해 장비의 성능을 유지하고, 위험성에 노출 빈도가 잦은 저온지역에서의 안전사고 예방을 위한 노력과 관심이 중요한 과제가 되고 있다.

코로나19로 쇄빙연구선인 아라온호는 새로운 난관에 직면했다. 바닷길과 하늘길이 중단된 남극과학기지는 유일한 남극 접근 수단이었던 아라온호를 활용하여 연구 활동 지원, 월동 연구대 교대 및 보급품 운송을 수행하여 초유의 무정박, 무보급 140일 항해를 성공적으로 수행하였다. 남극에 코로나19 전파를 차단하기 위한 절차와 경험은 앞으로 유사한 전염병이 창궐하였을 경우 이를 극복할 수 있다는 자신감과 함께 새로운 경험과 과제를 체득하기도 했다.

앞으로 쇄빙연구선에 대한 기대

대한민국의 유일한 쇄빙연구선인 아라온호는 2009년 취항 후 15년 동안 우수한 연구 성과를 거두는 데 큰 역할을 하였으며, 최근 신규 연구과제의 지속적인 증가와 외부 기관에서의 극지연구에 대한 관심이 높아짐에 따라 공동 활용의 기회를 제공함으로써 아라온호의 적정 운항 일수인 280일을 넘어 포화 단계에 이르게 되었다.

지구온난화 현상으로 발생하는 기후변화 원인 규명 등을 비롯한 다양한 극지연구에 대한 수요는 한 척의 쇄빙연구선으로 감당하기가 어렵게 되었다. 또한 제한된 운항 일정으로 연구과제의 지원, 보급 활동 등 남극의 산타로 역할을 수행하기에는 운항 안전 확보가 위협을 받게 됨에 따라 보다 쇄빙

능력이 강화된 대형 차세대 쇄빙선 건조가 필요하게 되었다. 친환경 선박으로 건조 추진 중인 차세대 쇄빙연구선은 강력한 쇄빙 능력으로 폭넓은 연구지역 항해와 극지 운항기간 연장 또한 가능하다. 아울러 아라온호와 역할 분담으로 보다 쉽게 연구 활동을 지원하고 안정적인 남극과학기지 보급 업무를 수행할 수 있어 극지 연구의 발전에 매진할 것이다.

2024년 5월, 아라온호는 15번째의 남극 항해를 완료하고 다시 모항으로 돌아왔다. 15번째의 성공적인 항해를 완료한 아라온호는 잠시 휴식한 후 개방과 협력으로 극지에서의 대한민국 영향력을 확장하고, 급변으로 예측 불가한 지구 환경 변화에 대응하기 위한 최일선 지원체제로 16번째의 역사적인 항해를 준비하고 있다.

| 일시          | 사고 선명 / 소속     | 구조 내용                              | 비고  |
|-------------|----------------|------------------------------------|---|
| 2011.12.15. | 스파르타호 / 러시아 어선 | 해빙과의 충돌로 파손된 어선과 선원 구조             |    |
| 2012.01.11. | 정우 2호 / 국내 어선  | 화재로부터 위험에 빠진 어선원 구조                |   |
| 2015.12.17. | 썬스타호 / 국내 어선   | 해빙에 갇힌 선박을 얼음이 없는 안전지대로 인도         |  |
| 2020.01.10. | 홍진호 / 국내 어선    | 조타기 고장으로 해빙에 항해가 불가한 선박을 안전지대까지 인도 |  |
| 2020.04.20. | ○성기업           | 코로나로 파푸아뉴기니에 고립된 어선원 수송            |  |
| 2024.01.25. | 우루과이 어선 환자     | 우루과이 어선에서 뇌졸중 응급환자 의료 및 의약품 지원     |  |

[표 2] 아라온호의 주요 구조 활동(출처: 극지연구소, 연합뉴스)

# 빙하 속 과거와 미래를 읽는 열쇠, 빙하투과레이더 기술

## 이주한 극지연구소 미래기술센터

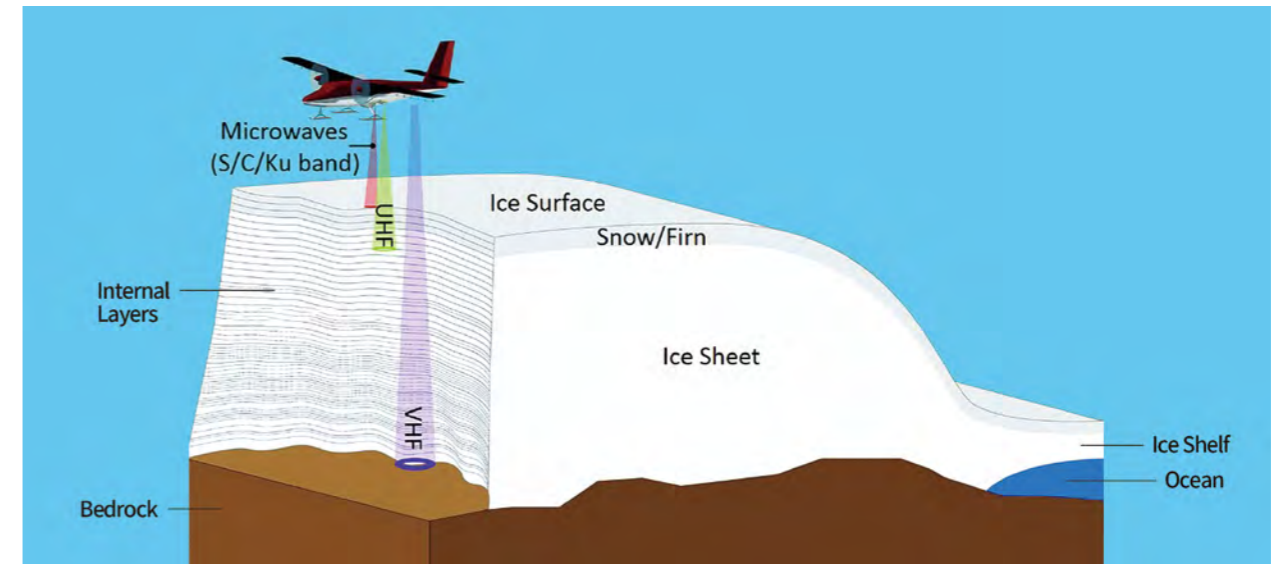
남극의 빙하 내부에는 지구의 기후변화를 이해하는 데 필수적인 과거의 기후 기록이 보존되어 있다. 빙하를 연구하는 방법 중 하나인 빙하투과레이더(Ice Penetrating Radar, IPR) 기술은 빙하의 두께와 하부 지형을 탐사하여 빙하 이동 및 변화, 이상적인 심부 빙하 시추 후보지와 빙저호 등의 위치 선정과 관련된 중요한 데이터를 제공한다. 우리나라도 최근 개발한 IPR을 이용하여 심부 빙하 시추 후보지 선정을 위한 연구를 진행하고 있으며, 연구 결과물인 데이터를 BEDMAP 국제 협력 프로젝트를 통해 공유하고 있다. IPR 기술은 또한 유로파와 엔셀라두스 등 태양계의 얼음 위성 탐사에도 적용될 예정이다. IPR 기술은 모든 빙하 연구의 기본이 되므로 지속적인 관심과 고찰이 필요하다. 이는 기후변화에 대한 보다 효과적인 대응 전략을 마련하고, 지구와 우주 환경에 대한 이해를 높이는 데 기여할 것이다.

남극은 지구상의 마지막 미개척지 중 하나로, 극한의 환경에서도 지구 기후 시스템의 중요한 정보를 품고 있다. 남극의 거대한 빙하층에는 백만 년 이상의 기후 데이터가 보존되어 있어, 과거의 환경 변화를 연구하고 미래를 예측할 수 있다. 이러한 연구를 가능하게 하는 주요 기술 중 하나가 빙하투과레이더(Ice Penetrating Radar, IPR)이다. 이 글에서는 IPR 기술이 어떻게 발전되어 왔고, 빙하를 통해 지구의 과거를 조명하고 미래를 예측하는 데 어떤 역할을 하는지 살펴보고자 한다.

### IPR 기술의 원리와 중요성

IPR은 고주파 레이더 신호를 이용해 빙하의 두께와 그 아래 지형을 탐사하는 기술이다. 방사된 레이더 신호는 빙하를 관통

하면서 물리적 특성이 다른 지점에서 반사되어 돌아오며, 이 신호의 시간을 측정해 빙하의 특성을 연구할 수 있다. IPR은 주로 빙하의 두께를 측정하는 데 사용되며, 빙하가 얼마나 두껍고 그 두께가 시간에 따라 어떻게 변하는지를 관찰할 수 있다. 또한 IPR은 빙하 내부의 층 구조를 분석하여 과거의 기후 조건을 연구할 수 있는 정보를 제공한다. 예를 들면, 깊이가 3,259m이며, 80만 년 이상의 기후 기록을 담고 있는 남극 돔 C 지역의 빙하코어 위치는 1993년과 1995년에 수행된 IPR 조사 결과를 토대로 선정되었다. 마지막으로, IPR은 빙하 아래의 지형을 매핑해 빙하가 어떻게 이동하고 있는지, 빙하 아래에 물이 흐르고 있는지, 빙저호가 존재하는지 등을 파악할 수 있어 빙하로 인한 해수면 변동이나 기후변화를 이해하는 데 중요한 정보를 제공한다.



[그림 1] IPR 탐사 모식도. 투과 깊이와 대상의 해상도에 따라 항공기에 장착된 다양한 주파수[S(2-4 GHz)/C(4-8 GHz)/Ku band(12-18 GHz), UHF(300-3,000 MHz), VHF(30-300 MHz)]가 사용되어 눈의 특성, 빙하의 두께, 하부 지형 등에 대한 정보를 연구한다. [그림: Rodríguez-Morales 등]

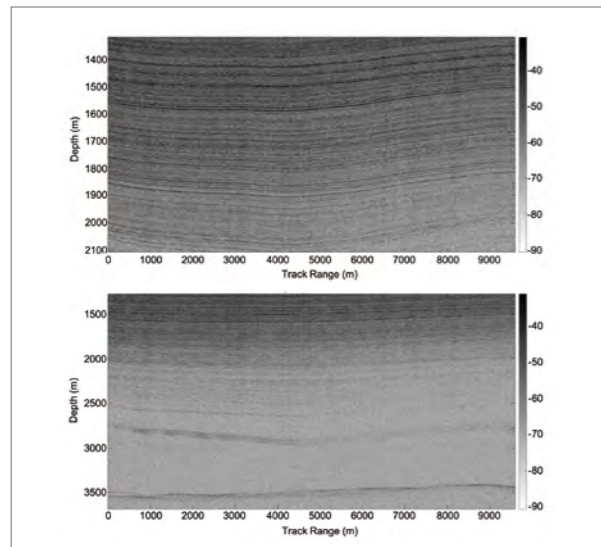


[그림 2] 극지연구소에서 개발한 IPR 안테나(양쪽 날개 아래 붉은색 박스)를 장착한 Basler 항공기

**남극 IPR 연구의 역사와 현재**

지난 세기 동안 과학기술의 발전과 함께 IPR 기술도 발전해 왔다. IPR의 역사는 1933년 남극 리버 아메리카 기지(초기 미국 남극기지 1958년까지 활용)에서 높은 주파수의 라디오 신호가 눈과 얼음을 투과한다는 사실이 처음 관찰되면서 시작되었다. 본격적인 기술 개발은 1957년 미군 연구원 Amory Waite가 440 MHz의 레이더 고도계를 사용해 극지 빙하 두께를 측정하면서 이루어졌다.

1963년 케임브리지대학 스코트 극지연구소(Scott Polar Research Institute, SPRI)의 Stan Evans는 VHF(30 - 300 MHz) 시스템을 개발해 빙하 두께를 측정했다. 이 기술은 미국, 영국 등 여러 연구기관에 의해 채택되어 그린란드와 남극의 빙하 아래 세계를 밝히는 데 기여했다. 1970년대에는 단파 펄스 레이더 시스템을 통해 빙하 내부 구조를 분석하고, 빙하 내부의 작은 유전율 변화, 화산 활동으로 생성된 층 구조, 얼음 내 기포의 크기와 형태 변화를 분석함으로써 기후 정보 해석에 기여할 수준으로 기술이 발전했다. 1980년대에는 온대 빙하에서의 흡수 손실을 줄이기 위한 저주파 시스템 등 특정 대상 탐사를 위한 특화된 시스템이 개발되었다. 1990년대 이후에는 디지털 데이터 수집과 신호 처리 기술이 발전하며 IPR 시스템이 더욱 정밀해졌다. 예를 들어, 미국 캔자스 대학교(KU)가 개발한 Coherent Antarctic Radar Depth



[그림 3] 2023~2024년 남극 내륙 IPR 탐사 결과 이미지, 깊이에 따라 반복되는 검은색 수평의 선 이미지는 빙하 층에서 나타나는 것으로 빙하 층이 잘 쌓여 있음을 보여주고 있다(위 그림). 빙하 기저면(약 3,500m)으로 추정되는 강한 반사면이 나타나고 있다.(아래 그림)

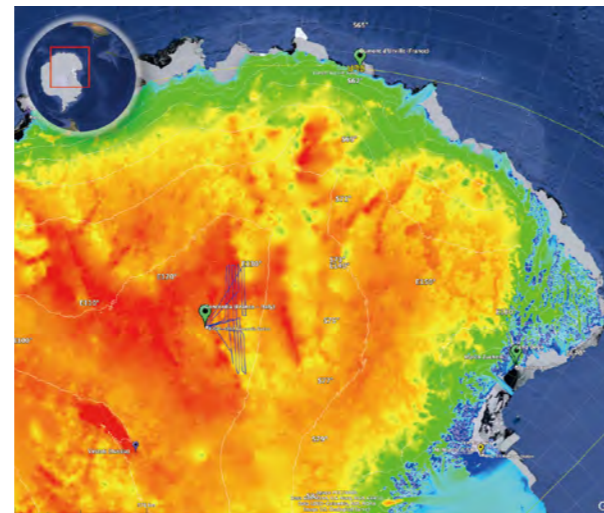
Sounder(CARDS) 시스템은 빙하의 내부 구조와 기저 지형을 더 정밀하게 분석할 수 있게 했다. 또한 GPS 기술의 발전으로 위치 정확도가 크게 향상되어 더욱 정확한 데이터를 바탕으로 빙하와 기후변화를 연구할 수 있게 되었다.

우리나라는 2015년 미국 텍사스대학교 지구물리학연구소(UTIG)와 공동으로 헬리콥터에 장착할 수 있는 IPR을 개발한 이후, 2023년에는 미국 앨라배마대학교(UA)와 4년간의 노력 끝에 경비행기에 장착할 수 있는 새로운 IPR을 개발하였다. 기존에는 60MHz 단펄스 레이더를 이용하여 탐사 심도가 깊었지만, 빙하 층간의 해상도가 매우 좋지 않았다. 이번에 새로 개발된 레이더는 UWB(초광대역) 주파수를 사용하여 탐사 깊이와 해상도를 동시에 향상시켜 세계 최고 수준의 IPR로 평가받고 있다. 2023년에는 남극 내륙 심부 빙하 시추 후보지에서 총 2,800km를 탐사하였으며, 확인된 빙하의 평균 두께는 3,000m 이상에 달했다. 이 탐사를 통해 그 기술력이 입증되었으며, 대한민국은 이제 빙하층뿐만 아니라, 빙하 기저 남극대륙의 구조와 빙저호의 유무까지 확인할 수 있는 새로운 길이 열렸다.

**남극 IPR 연구를 위한 국제 협력**

남극의 크기는 한반도의 약 62배에 달하며, 단일 국가가 모두 탐사하고 연구하기에는 거의 불가능한 규모이다. 따라서 남극은 국제 협력이 가장 잘 이루어지는 지역 중 하나이다. IPR 분야에서도 국제 협력이 활발히 진행되고 있다. 우리나라가 참여하고 있는 국제 협력은 BEDMAP, RINGS, BedMachine 등을 들 수 있다.

BEDMAP은 남극의 얼음 두께와 지형을 새롭게 지도화하고 데이터 세트를 제공하는 국제 협력 프로젝트이다. 이 프로젝트는 다양한 데이터(얼음 두께, 표면 고도 등)를 활용하여 과학자들이 남극의 지형을 더 잘 이해할 수 있도록 돕는다. 이전

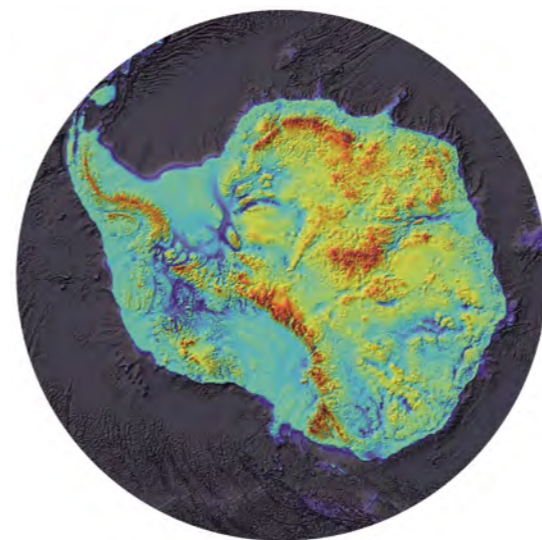


[그림 4] 2023~2024년 IPR을 이용하여 남극 내륙 심부 빙하 시추 후보지 선정을 위한 탐사 위치도. 탐사의 위치는 BEDMAP2의 결과에서 빙하의 깊이가 비교적 깊은 곳(그림에서 붉은색 지역)을 중심으로 탐사하였다. 탐사 결과는 그림 4와 같이 나타났으며 2024~2025년 시즌 추가 탐사로 심부 빙하 시추 후보지를 추천할 계획이다.

프로젝트인 BEDMAP1(2001)과 BEDMAP2(2013)는 남극 연구과학위원회(SCAR)의 지원을 받았으며, 얼음 두께와 지형의 지도를 제공하는 데 중요한 역할을 했다. BEDMAP2는 18 개국 36개 기관의 과학자들이 참여했으며, 지난 10년간 가장 많이 인용된 남극 연구 논문 중 하나가 되었다. BEDMAP3(2023) 프로젝트는 지난 60년간 축적된 데이터를 바탕으로 빙하 아래의 지형과 빙하 두께를 더욱 정밀하게 매핑하는 것을 목표로 하고 있다. 극지연구소도 이 프로젝트에 적극 참여하여 고해상도 레이더 데이터를 제공하고, 이를 통해 남극 빙하의 동태와 변화 패턴을 이해하는 데 큰 기여를 하고 있다.

BedMachine 프로젝트는 NASA의 MEaSUREs 프로그램의 하나로 남극의 지형과 수심 측량 데이터를 제공한다. 이 프로젝트는 질량 보존, 스트림라인 확산 등의 방법으로 남극의 지형 및 수심 지도를 작성한다. 데이터 세트에는 얼음 두께, 표면 고도, 얼음/바다/육지 경계, 얼음 두께 추정 오류, 각 방법이 사용된 위치를 나타내는 지도가 포함된다. 1970년 1월 1일부터 2019년 10월 1일까지의 데이터를 포함하며, 공간 해상도는 500m x 500m이다.

RINGS는 남극 빙상이 해안과 만나는 지역을 연구하는 프로젝트로, 이 지역은 남극과 글로벌 기후 시스템 간의 연관성을 이해하는 데 매우 중요하다. RINGS 프로젝트는 남극 빙상 가장 자리의 지형과 수심을 정확히 측정해 현재 빙하의 소멸을 추정하고, 미래 변화를 예측하는 데 필요한 데이터를 제공한다. 특히 남극 빙상과 해양, 육상이 만나는 접지선의 지형은 빙상의 안정성을 파악하는 중요한 요소로, 빙상이 바다로 흘러가는 양을 정확하게 추정하는 데 필수적이다. IPCC의 최근 보고서에 따르면, 빙상 가장자리에서의 빙하 두께 데이터 부족이 남극 빙상 방출 추정치의 주요 불확실성 중 하나로 지적되었다. 남극 전역의 빙상 가장자리의 보다 정확하고 완전한 지형 데이터는 빙상 모델의 정확성을 크게 향상시킬 것이다.



[그림 5] BEDMAP3 이미지, 남극의 빙하를 걷어낸 남극 지형

**IPR 연구의 도전과 전망**

IPR 연구는 고도의 기술적 요구와 높은 비용이 수반되는 어려운 과제이다. 남극과 같은 극한 환경에서의 연구는 물리적, 기술적 도전이 많다. 특히 남극의 낮은 온도와 강한 바람은 장비의 작동에 영향을 미치며, 데이터 수집과 분석에 추가적인 어려움을 초래할 수 있다. 또한 남극의 광활한 면적과 접근성 문제로 인해 연구팀은 장기간의 준비와 많은 자원이 필요하다. IPR은 오랜 기간 형성된 빙하의 내부 구조를 보여주는 중요한 정보를 제공하지만, 이를 정확하게 해석하는 것은 쉽지 않다. 빙하 내부의 다양한 층과 복잡한 지질 구조는 데이터 분석을 어렵게 만들 뿐만 아니라 정확한 결론을 도출하는 데 많은 시간과 노력도 필요하다. 현재의 IPR 기술은 높은 해상도와 충분한 탐사 깊이를 제공하지만 여전히 기술적 한계가 존재한다. 예를 들어, 매우 좁은 협곡과 같은 복잡한 지질 구조에서는 신호가 약해지거나 왜곡될 수 있다. 이러한 기술적 한계를 극복하기 위해 지속적인 새로운 장비와 기술 개발이 필요한 이유이다. IPR 기술의 발전과 함께 데이터 처리와 분석의 자동화가 더욱 중요해질 것이다. 빙하 탐사에서 수집된 방대한 데이터를 효과적으로 처리하고 분석하기 위해 최근 발전하고 있는 인공지능(AI) 알고리즘이 활용될 것이다. 이러한 기술은 데이터 해석의 정확성을 높이고, 연구의 효율성을 향상시켜 연구자들이 보다 빠르게 중요한 정보를 도출할 수 있게 할 것이다. IPR 기술은 다른 유형의 센서와 결합하여 더욱 풍부한 데이터를 제공할 수 있을 것이다. 예를 들어, 위성을 기반으로 한 레이더 데이터, 중력과 자력 같은 항공 지구물리 탐사 자료, 지상을 토대로 한 지질 조사 데이터, 항공 사진 등의 데이터를 융합하여 빙하와 그 아래 지형에 대한 종합적인 이해가 더욱 가능해질 것이다.

IPR 기술은 남극 연구에만 국한되지 않는다. 앞으로 IPR 기술은 태양계의 다른 천체, 특히 얼음으로 덮인 위성들에 대한 탐사에서도 중요한 역할을 할 것이다. 예를 들면, 목성의 위성 유로파(Europa)와 토성의 위성 엔셀라두스(Enceladus)의 표면 아래에 거대한 액체 바다가 존재할 가능성이 있어 외계 생명체의 존재 여부를 탐구하는 데 중요한 연구 대상이 될 수 있다. 유로파와 엔셀라두스의 표면 아래에 숨겨진 바다를 탐사하는 데 IPR 기술이 활용될 수 있을 것이다. NASA의 유로파 클리퍼(Europa Clipper) 미션은 유로파의 얼음 표면과 그 아래 바다를 탐사하기 위해 IPR 기술을 포함한 다양한 과학 장비를 탑재할 예정이다. 또한 카시니(Cassini) 탐사선이 이미 엔셀라두스의 남극 지역에서 물기둥을 발견한 바 있다. 엔셀라두스의 얼음 표면 아래에 있는 바다를 탐사하기 위한 후속 미션에서도 IPR 기술이 활용될 수 있다. 이러한 탐사는 외계 생명체 탐구 뿐만 아니라 태양계 내의 물과 얼음의 분포 및 기원을 이해하는 데 큰 기여를 할 것이다.

결론적으로 IPR은 빙하 연구를 통해 기후변화와 같은 인류의 미래에 직접적인 영향을 미치는 영역에서 중요한 단서를 제공할 뿐 아니라 우주 탐사의 미래를 여는 열쇠가 될 것이다.

# 인공지능(AI) 기반 기후변화 연구



함유근 서울대학교 환경대학원

최근 AI 기법을 활용한 날씨예측 모형이 글로벌 IT기업들에 의해 개발되면서 전 지구 기상 및 기후 예측 성능은 최근 크게 향상되고 있다. 다수의 AI 기반 예측 모형들은 관측된 범위 내의 날씨 및 기후 변동에 대해서 매우 성공적인 추론을 한다는 사실이 증명되었다. 아직까지 완벽하지는 않지만 AI 기법이 단-중기 기상 및 기후 예측을 넘어 지금껏 관측되지 않은 새로운 기후 상태 하에서의 지구 시스템 특성 변화까지 예측하도록 진화하고 있다. AI를 기반으로 한 기후변화 연구는 기존 역학 모델에 기반한 기후변화 연구를 보완 및 대체할 수 있는 신기술이 될 것으로 기대된다. 아울러 AI 기반 연구는 과학기술을 토대로 제공받은 극한 기후 현상의 변화 패턴의 정량적 예측치를 통해 국가 정책 결정자가 기후변화 정책 수립의 우선순위를 결정하는 데 핵심적인 역할을 할 수 있는 기법으로 장기적인 관점에서 지속적인 지원이 필요하다.

최근 AI(인공지능) 기술 개발이 활발해지면서 그 활용 범위가 확대되고 있다. AI(Artificial Intelligence)란 인간의 지능을 모방하거나 능가할 수 있는 기계를 만들기 위한 과학 및 기술의 분야를 총칭한다. 또한 기계가 학습하고 추론하며 문제를 해결하고, 의사 결정을 내리고, 자연어를 이해하며, 시각적 인식을 수행하는 등의 작업을 할 수 있도록 하는 것을 목표로 한다. 이러한 AI 기술은 최근 기상/날씨 예측 분야에까지 활용되면서 향후 기후변화 예측 정확도가 향상될 것으로 기대된다. GraphCast, Pangu-Weather, FourCastNet과 같은 인공지능 기반 전 지구 날씨 예측 모형의 개발은 기상 예측 성능을 한 단계 끌어올리는 데 있어 획기적인 성과를 이루고 있다. Google Deepmind사에서 개발한 GraphCast는 그래프 신경망을 활용해 지역적 기상 패턴의 복잡한 상호작용을 정밀하게 모델링하며, Huawei사의 Pangu-Weather와 상하이 AI Lab에서 개발된 'FengWu'는 Vision Transformer(ViT) 기법에 기반하여 기존 역학 모델들보다 높은 예측 정확도를 달성하고 있다. NVIDIA의 FourCastNet은 최근 업데이트된 두 번째 버전을 공개하여, 푸리에 변환(Fourier Transform) 기반의 뉴럴넷 시스템이 전통적인 수치 예보 모델보다 더 신속하고 정확한 예보를 제공할 수 있음을 보였다. 이러한 AI 기반 모델들은 기상 예측의 공간적 해상도를 크게 향상시키면서 극한 기상 현상의 조기 경보 능력을 강화하는 데 중요한 역할을 하고 있다. 가장 성능이 뛰어나다고 알려진 역학 모델 기반 예측 시스템을 보유하고 있는 유럽 중기 기상예보센터(ECMWF)조차도 이러한 흐름에 발맞추어 최근 '그래프 신경망'(Graph Neural Net)에 기반한 자체 AI 기반 기상 예측 모델인 Artificial Intelligence/Integrated Forecasting System(AIFS)을 발표하였다.

## 기상/기후 예측 연구에의 AI 기법 도입

기상 예측에 있어 성공적인 도입과 함께 기후 연구에도 AI 기법이 활발히 도입되고 있다. 합성곱 신경망 기법과 Vision Transformer 기반 예측 시스템은 엘니뇨 지수 예측 성능을

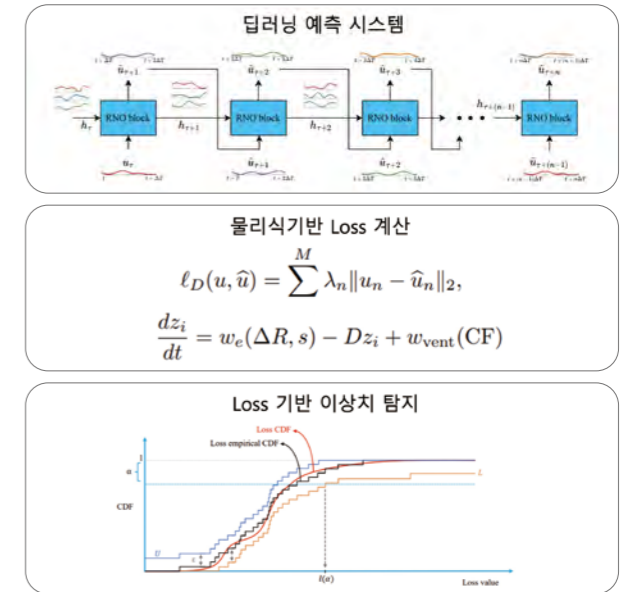
기존 1년 내외에서 18개월로 확장되었으며, multi-task 방식의 딥러닝 모형은 인도양 해수면 온도 예측 성능을 기존 3~4개월에서 7개월까지 확장됐다. 열대 해수면 온도 변동뿐 아니라 북극 해빙 예측 성능도 딥러닝 기반 통계 모형이 기존 역학 모형 기반 예측에 비해 유의하게 높은 성능을 보인다. 영국 Natural Environment Research Council(NERC)에서 개발한 U-Net 기반의 IceNet 예측 시스템은 25km 해상도의 해빙 면적 비율(Sea ice concentration) 데이터를 Open-water, Marginal ice, Full ice의 세 가지 카테고리로 나눈 카테고리 예측과 관련해 6개월 예측에서도 유의한 예측 성능을 보여 기존 역학 모형 예측이 2개월 예측에 대해서만 유의한 예측을 보이는 것에 비해 높은 성능을 보인다. 예측 성능의 향상은 선형 트렌드를 제거한 경우 해빙이 성장하는 시기인 10월~2월에 두드러지게 나타나지만 선형 트렌드를 포함한 경우에는 여름철에도 두드러지게 나타난다.

이처럼 기상 및 기후 예측에 AI 기반 예측 시스템이 큰 성공을 거두었지만 기후변화 연구에의 AI 기법 적용은 아직 걸음마 단계이다. 가장 큰 이유는 AI 기법들은 모두 기본적으로 통계 기법으로 학습 샘플이 존재하지 않아 학습하지 못한 상황에서는 일반화시키는 능력이 부족하기 때문이다. 즉, 기후변화 이후(약 2030~2050년 이후)의 기간에 대한 학습 샘플이 존재하지 않기 때문에 AI 기법들이 제대로 이를 학습할 수 없다는 것이다.

## 기후변화 연구에서 AI 기법 활용의 두 가지 개발 방향

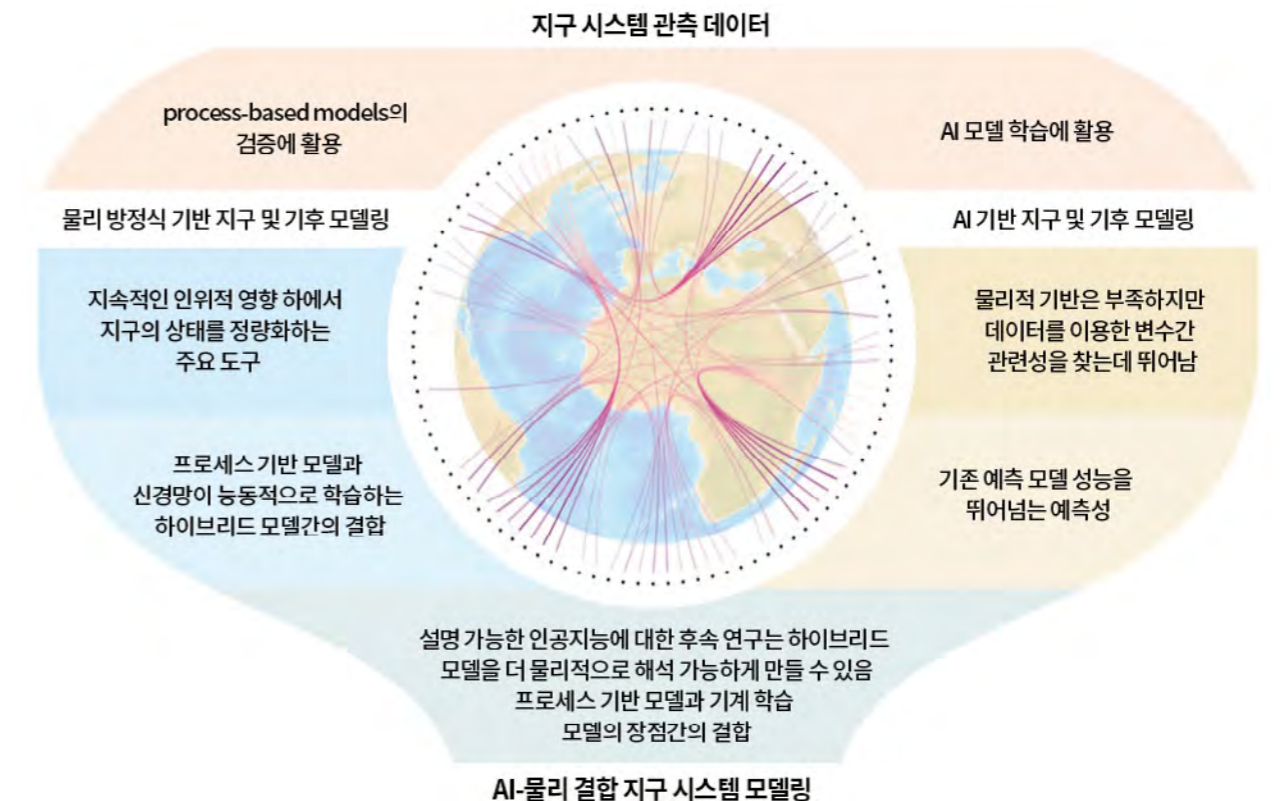
현재까지는 제한적이지만 두 가지 방향으로 연구가 이루어지고 있다. 첫째는 물리식에 기반하여 이상치를 탐지하는 것이다. AI 기반 모형들의 예측치가 기후변화 이전의 물리식에 만족하는 정도를 정량화하여 일정 수준 이하이면 기후변화로 인해 유의하게 영향을 받았다고 판단하는 식이다[1]. 이러한 방식으로 AI 기반 모형들이 비정상적이고 혼란스러운 동적 시스템의 진화에서 갑작스럽고 극적이며, 돌아올 수 없는 변화를 의미하는 기후 변화 변곡점(Tipping points) 예측에

활용되고 있다. 시스템의 변화를 함수 공간 간의 매핑을 학습하는 '순환 신경 연산자'(Recurrent Neural Operator: RNO)를 사용하여 학습한다. RNO를 변곡점 이전의 동적 과정만으로 훈련한 후 불확실성 기반 접근법을 사용하여 미래의 변곡점을 감지한다. 특히 보존된 양이나 편미분 방정식과 같은 물리적 제약에서 벗어나는 것을 모니터링하여 변곡점을 예측하는 대칭 예측(Conformal prediction) 프레임워크를 제안하여 이러한 급격한 변화를 예측할 때 엄격한 불확실성 측정을 가능하게 한다[그림1]. 이때 특정 물리식으로부터의 오차도 발생할 수 있지만, 기후변화 이전의 데이터에 대해서도 AI 기반 모형의 단순 예측 오차로 발생할 수 있기 때문에 물리식의 충족 정도에 대한 불확실성을 정량화하여 이를 넘어서는 경우에만 기후변화 변곡점에 다다랐다고 판단한다. 두 번째는 기후변화 시나리오에 기반한 역학 모형 데이터를 학습 샘플로 활용하는 방법이다. 가장 대표적인 연구 결과로는 지구 온난화로 인한 일 강수량의 특성 변화를 탐지하기 위해 합성곱 신경망 기반의 AI 기법을 활용한 것이다. AI 모델 학습을 위한 입력값으로 역학 모형의 과거 기간과 미래 기간, 총 1850년부터 2100년까지의 일 강수량의 전 지구 패턴을 사용하고, 출력값으로 연평균 전 지구 평균 지표 온도를 사용하였다. 이는 일 강수량과 지구 온난화 지표 간의 관련성을 갖는 딥러닝 모델을 구축한 것으로 이해할 수 있다. 딥러닝 모형 결과를



[그림 1] 기후변화 변곡점 예측 시스템의 예시. 딥러닝 예측 시스템의 예측값을 물리식 기반의 loss 함수에 적용하여 loss 값이 비이상적으로 커지는 경우 이상치를 탐지하는 방식으로, 본래의 시스템이라면 물리식 기반의 loss가 어느 정도의 범위 내 값을 가질 것으로 가정함

통해 전 지구 온도의 내부 변동성 상한을 초과하는 날은 1980년 이후 지속적으로 증가해 왔으며, 이는 지구 온난화가 일 강수량을 유의미하게 변화시켰음을 의미한다. 또한 설명 가능 인공지능 기법(explainable AI)을 통해 열대 동태평양과



[그림 2] ESM과 머신러닝을 결합하여 신경망 지구 시스템 모델링으로 나아가는 단계의 삽화. 왼쪽은 물리식이 결합된 하이브리드 AI 모델 개발을 의미하며, 오른쪽은 데이터 기반의 모델 개발 방향을 의미한다. Adapted from Irrgang et al.(2021)

미국 동부, 캐나다, 동아시아 지역에서 기상 시간 규모(10일 미만의 기간)의 강수 변동성 증가가 지구 온난화로 인해 가장 뚜렷하게 변화하는 강수장의 특징임을 규명하였다. 강수 변동성의 증가는 과거에 비해 비가 아예 오지 않는 날과 극한 강수가 발생하는 날 모두가 늘어나고 있음을 의미한다. 강수 변동성 증가는 입력장인 ‘강수’와 출력장인 ‘전 지구 평균 온도’ 간의 비선형 관련성이 있음을 의미하기 때문에 기존의 선형적인 기법으로는 탐지가 되지 않는다.

**AI 기법으로 극한 강수 현상이 지구 온난화 때문임을 규명**

최근 들어 극한 강수(혹은 폭우)의 발생 빈도는 전 세계적으로 늘어나고 그 강도 역시 증가하였으나 이러한 기상 재해의 증가가 기후변화로 인한 것인지는 명백히 밝혀진 바 없었다. 특히 지역적인 규모의 큰 자연적인 강수 변동으로 인해 상대적으로 짧은 기간의 강수 관측 데이터를 이용하여 기후변화가 극한 강수 발생 빈도 및 강도에 미치는 영향을 규명하는 것은 불가능하다고 여겨져 왔다. 그러나 이 연구를 통해 최근 증가하고 있는 극한 강수 현상이 지구 온난화로 인한 것임을 최초로 규명한 것이다. 본 연구에 제시된 결과와 방법론을 통해 전 세계적으로 기후변화 연구에도 AI 기법이 활발히 도입될 것으로 기대된다. AI 기법은 기존 기후변화 연구에 활용되던 기법으로 규명할 수 없었던 현상들을 새로이 규명할 수 있는 혁신적인 방법론이 될 것으로 기대하며, 이는 기후변화로 발생하는 복합적인 현상들의 변화를 이해하는 데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

앞에서 설명한 기후변화 연구에의 AI 기법 적용을 위한 두 가지 개발 방향은 물리식을 제약 조건으로 추가하여 물리적 방정식에 기반한 AI 기반 모형과 데이터를 가능한 한 많이 확보하여 순수 데이터 기반 AI 모형을 개발하는 AI 기반 모델링 개발의 두 가지 주요 방향과 일맥상통하는 바가 있다[그림 2].

AI 기법은 단·중기 기상 및 기후 예측을 넘어 지금껏 경험해 보지 못한 수십 년 이후의 지구 시스템 특성 변화까지 예측하도록 진화해가고 있다. AI 기법을 이용한 기후변화 연구는 기존의 기법들이 하지 못했던 기후변화로 유발되는 비선형 지구 시스템 특성 변화를 성공적으로 탐지하여 과학기술에 근거한 각종 극한 기후 현상의 변화 패턴의 정량적 예측치를 제공할 수 있다. 예를 들어 폭염과 폭우, 태풍과 해일 등의 다양한 복합이상현상의 발생 빈도 변화가 기후변화로 인한 것인지를 탐지할 수 있을 것으로 기대되며, 이를 통한 국가 차원의 사회, 경제적 피해 규모 예측으로 정책 결정자가 기후 변화 정책 수립의 우선순위를 결정하는 데 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다. 따라서 AI 기반 기후변화 연구에 대해 장기적인 관점의 지속적인 투자와 지원이 필요하다.

**Reference**

[1] Liu-Schiaffini, M., Singer, C. E., Kovachki, N., Schneider, T., Azizzadenesheli, K., & Anandkumar, A.(2023). Tipping point forecasting in non-stationary dynamics on function spaces. arXiv preprint arXiv:2308.08794.  
 [2] Irrgang, C., Boers, N., Sonnewald, M., Barnes, E. A., Kadow, C., Staneva, J., & Saynisch-Wagner, J.(2021). Towards neural Earth system modelling by integrating artificial intelligence in Earth system science. Nature Machine Intelligence, 3(8), 667-674.



# 한국이 북극 민·관 포럼에 참석하는 이유

정지훈 극지연구소 글로벌협력실

북극씨클(Arctic Circle), 북극 프론티어(Arctic Frontiers) 등 북극 민·관 포럼은 폭넓은 북극권·비북극권 당사자에 언론(言路)을 제공하고, 북극의 오늘과 내일에 대한 담론을 생산하는 역할을 해왔다. 극지연구소 등 전문기관은 정부를 지원하여 비교적 초창기부터 이들 포럼에 참여하여 우리의 활동을 알리고 북극 담론 형성에 참여하고자 노력해왔다. 이 글에서는 북극씨클과 북극 프론티어를 중심으로 북극 민·관 포럼 성격과 의의를 알아보고, 극지연구소가 이들 민·관 포럼에 참여하여 달성코자 하는 목표, 그리고 지금까지 이들 북극 민·관 포럼에서 이루어낸 성과를 소개한다.

북극씨클(Arctic Circle), 북극 프론티어(Arctic Frontiers) 등은 정부 대표뿐만 아니라 연구자, 원주민, 기업인 등 북극권·비북극권 당사자들이 모여 양방향으로 의견을 제시하고 청취할 수 있도록 운영되는 민·관 포럼이다. 정부 간(track 1), 민간(track 2)을 모두 아우르는 소위 ‘1.5 트랙 외교’의 공간이라는 의미에서 이들을 1.5 트랙 포럼이라고도 한다. 아래를 통해 이들 북극 민·관 포럼의 연원과 의미를 북극씨클과 북극 프론티어를 중심으로 알아본다. 극지연구소를 비롯한 한국 전문가들이 이들 민·관 포럼에 참여하여 무엇을 이루고자 하는지, 그리고 이들 북극 민·관 포럼 활동이 한국 북극활동에 어떤 유익을 주었는지를 살펴본다.

**북극 프론티어와 북극씨클**

북극 프론티어는 노르웨이 컨설팅 회사인 아크바플란니바(Akvaplan-niva)의 비영리 자회사인 북극 프론티어가 2007년부터 연초 트롬쇠에서 개최하는 연례 포럼으로 1.5 트랙 형태를 갖춘 북극회의의 시조 격이라 할 수 있다. 오늘날 북극씨클과 함께 북극권을 대표하는 양대 민·관 포럼이다. 북극권 및 비북극권 국가의 정부, 학계, 기업계, 언론계에서 매년 1,000명 이상이 등록하여 참여하는 것으로 알려져 있다. 2023년도 행사 참가자 중 유럽 국가 각료급 이상 5인이 포함되었다. 실제 청중의 다수를 이루는 그룹은 노르웨이를 중심으로 유럽 측 북극권에 거주하는 시민과 학생, 사미족을 포함한 원주민들이다. 최근 프로그램 구성을 살펴보면 주최 측의 담론은 노르웨이 국내 이해관계자와 유럽권(EU)을 주제로 하는 북극 논의가 주를 이루며, 이를 통해 결과적으로 지방정부 차원, 중앙정부 차원, 유럽 차원에서 노르웨이 및 주변 북극지역을 타깃으로 하는 정책 시너지 강화에 기여하는 것으로 보인다.

북극씨클은 아이슬란드의 비영리 단체인 북극씨클이 개최하는 연례 포럼으로 매년 10월 레이카비크에서 개최된다. 북극 의제를 다루는 민·관 회의 중 의제와 참석자 측면에서 개방적인 입장을 취하고 있고, 때문에 참석 인원이 가장 많다. 2023년도 회의에는 아이슬란드 총리뿐만 아니라 덴마크, 캐나다, UAE, 벨기에에서 장관급 인원을 포함한 2,000여 명이 참석하였다. 북극씨클이 북극권에서 가장 큰 민·관 포럼으로 자리 잡은

과정은 그림손(Olafur Grimsson) 의장을 빼놓고 설명하기 힘들다. 2013년 북극씨클 출범 당시 아이슬란드 대통령(1996~2016)으로 현재도 북극씨클 의장을 맡고 있는 그는 2010년도 전후로 북극에 집중된 전 세계적 관심과 수요를 미리 포착하고(비북극권을 포함하여) 누구나 참여해 한마디 개진할 수 있는 소위 ‘오픈 텐트(open-tent)’ 담론장을 산업화해냈다. 북극권·비북극권 국가를 아울러 북극을 다루는 고위급이 으레 모이는 연례 포럼의 지위를 획득하면서 아이슬란드는 인구와 경제규모상 북극권 안에서 상대적으로 낮은 지분을 극복하고 북극문제 소통의 장, 그리고 국제적 의제설정자(agenda setter)로서 스스로의 입지를 강화해냈다고 평가받는다.

**북극 민·관 포럼의 의의와 접근 전략**

이들 민·관 포럼은 북극 거버넌스에서 우리를 포함한 비북극권 파트너들이 북극 문제 대응에 참여할 공간을 만들었다는 점에서 흥미로운 특징을 갖고 있다. 북극권 국가들은 북극권 8개국과 원주민 상시참여단체로 구성되어 상대적으로 폐쇄적인 북극이사회를 통해 정부 차원의 북극권 주요 현안을 논의하는 구조를 유지해왔다. 북극이사회 옵서버의 발언권은 엄격히 제한되는 가운데 대안이 될 수 있는 북극권 국가와의 양자 협의 기회도 충분치 않아 북극 활동을 활발히 수행하는 비북극권 국가들의 의견 개진 수요를 충족시켜 주지 못하던 터였다. 이 가운데 이들 민·관 포럼은 북극권 현안 논의와 의사결정 간접 참여의 길을 비북극권 파트너들에게도 열어주었다. 참석자가 1,000명 이상이라는 의미는 해당 포럼에 참여함으로써 전 세계 정·관·학·연·원주민 북극 관계자 중 대부분과 대면할 수 있다. 또한 이렇게 낮은 의사소통 비용(communication cost)을 활용하여 우리 북극 활동을 소개하고 현안에 대한 의견을 제시하며, 우리 활동에 영향을 미치는 북극 전체 동향을 파악할 수 있다는 점에서 효과성과 효율성이 크다고 할 수 있다.

북극권의 상당 영역은 북극권 8개 국가의 영토와 영해, 배타적 경제수역(EEZ) 등을 포함한다. 이는 북극 거버넌스에서 북극권 국가의 주권의식과 더불어 비북극권 참여자에 대해 궁극적으로 의구심 또는 경계의식이 상존한다는 것을 의미한다.

따라서 비북극권 주체가 북극권 현안 논의에 참여하는 것을 보장하는 제도적 틀이 별도로 존재하지 않는 상태에서 어떻게 우리나라가 북극 내 활동 영역을 넓혀나가고 이 과정에서 북극권 국가의 인정과 양해를 얻어나가느냐가 관건이다. 한국은 모범적인 북극이사회 옵서버 활동은 물론 북극권 국가들과의 양자 협의회와 위·민·관 포럼에 적극적으로 참여해 왔다. 또한 한국은 ‘중앙 북극해 공해상 비규제 어업 방지 협정(CAOPA)’과 같이 북극에서 새로 만들어지는 규칙에 적극 참여하는 등 과학 활동을 중심으로 건설적 북극 파트너로서 인정 받으며 그 역할을 확대해나가고 있다.

극지연구소 등 기관 전문가들은 북극 민·관 포럼에 참여함으로써 기관 차원의 활동에도 기여하고 있다. 첫째, 우리 과학 연구 활동 기반 담론장 내 위상을 강화하고, 과학이 매개가 되는 북극 담론 형성에 주도적으로 참여한다. 둘째, 민·관 포럼 계기로 진행되는 과제/부서, 기관, 정부 차원 협의를 촉진한다. 셋째, 핵심 동향에 대한 국내 환류를 통해 전문가/기관 업무가 북극 내에서 더욱 활용될 수 있도록 한다. 북극 민·관 포럼 참석 결과는 다양한 형태로 한국 북극연구 전문가 그룹 내 공유 되도록 하고 있다.

특히 극지연구소는 북극 프론티어와 북극써클의 특징을 고려하여 결을 달리한 접근 전략을 적용하고 있다. 노르웨이권을 핵심 청중으로 삼고 프로그램 구성이 주최 측 중심으로 이루어



[그림 1] 2023년 북극써클 총회 전체 세션 공동주최

지는 북극 프론티어에서는 기 구성된 세션에 한국 연사/토론자를 진출시키는 것을 일차 목표로, 과학과 후속세대 양성 활동을 중심으로 우리나라의 북극활동을 핵심 청중에 적극적으로 알리는 데 역점을 두고 있다. 이에 반해 비북극권을 아우르는 핵심 청중과 오픈 콜(open call) 식의 세션 참여가 가능한 북극 써클에서는 CAOPA 등 우리가 주도할 수 있는 담론을 세션 형태로 만들어가는 작업을 지속하여, 과학을 기반으로 북극 현안에 대해 적극적이고 선도적인 목소리를 낸다는 전략을 갖고 있다. 아래 표는 이들 전략을 정리한 것이다.

**북극 민·관 포럼 참여 성과**

한국은 북극 프론티어와 북극써클이 처음 개최되었을 때부터 참여하고 이들 민·관 포럼을 북극활동의 매개로 적극 활용해 왔다. 우리나라는 매년 외교부 극지협력대표를 수석대표로 정부대표단을 꾸려 회의에 참석하여 북극에 대한 한국의 정책적 입장을 소개하고 북극권 이해관계자와 양방향으로 소통하는 계기로 활용했다.

이를 통해 한국 과학연구 활동이 소개되고 패널과 청중에 의해 높이 평가받는 세션을 개최하여 우리 북극 과학의 위상을 강화하였다. 특히 지정학적 어려움으로 그 성과가 조망받지 못했던 CAOPA의 의의와 한국의 역할을 북극써클 병렬 세션('22), 북극써클 전체 세션('23), 북극 프론티어 학술세션 기초발표('24) 등을 통해 효과적으로 소개하였다([그림 1], [그림 2] 참조).

또한 민·관 포럼을 계기로 우리의 우수 전문가/과제가 더 큰 무대에서 주목받을 수 있는 기회를 마련하였다. 북극써클 한국북극연구컨소시엄(KoARC) 병렬세션을 통해 친환경 섀빙컨테이너선 등 미래 융·복합 기획과제를 소개하였으며, 올해 북극 프론티어에서는 극지연구소-주한노르웨이대사관 공동으로 젊은 과학자를 민·관 포럼에 참관하게 하여 미래세대에 과학-정책 간 연계에 관한 영감을 줄 수 있었다. 2023년 극지연구소와 북극 프론티어 간 MOU가 체결됨에 따라 향후 우리 과학의 파급력을 높이는 새 협업 또한 기대된다.

북극써클(Arctic Circle), 북극 프론티어(Arctic Frontiers) 등 북극 민·관 포럼은 폭넓은 북극권·비북극권 당사자들에게

논의의 장을 제공하고, 북극의 오늘과 내일에 대한 담론을 생산하는 역할을 해왔다. 극지연구소 등 전문기관들은 정부를 지원하여 비교적 초창기부터 이들 포럼에 참여하여 우리의 활동을 알리고 북극 관련 건설적인 의견을 개진하는 데 기여해 왔다. 또한 그간의 축적된 활동을 기반으로 괄목할 성과도 보고 되고 있다. 앞으로도 한국이 지닌 미래지향적인 파트너십과 북극을 향한 비전이 실현되는 데 있어 이들 민·관 포럼의 참여가 유용한 매개가 될 것이다.



[그림 2] 2024년 북극 프론티어 활동 관련 언론 보도

| 구분                           | 북극 프론티어(노르웨이)   | 북극써클(아이슬란드)   |
|------------------------------|---|---|
| 주최 측 운영 목표                   | • 노르웨이 국내 및 유럽 민·정·관·학·원주민 논의 → 노르웨이 (중앙, 지방정부, 유럽 차원) 북극지역 정책시너지강화·확산  | • 북극권·비북극권 고위급 북극담론 여건 제공 → 북극 문제 소통의 장으로서 아이슬란드/ 북극써클입지 강화     |
| 핵심 청중(target audience)/참석 인원 | • 노르웨이 중심 북유럽 거주 시민, 학생, 원주민 등<br>• 유럽 각국급 이상 5인 포함 1,000명 규모(23년)  | • 북극권·비북극권 고위급 등 각계 전문가<br>• 국가수반급 4인 포함 2,000명 규모(22년)         |
| 극지연구소 대응/ 활용 중점              | • 과학/ 후속세대 양성 활동 중심으로 노르웨이/유럽 청중을 대상으로 '과학협력가능한 모범 옵서버국' 위상 구축<br>• 세션 연사/토론자 형태로 1차 진출 필요<br><br>* (공동) 정부 및 기관 차원 양자 협의 계기/통로로 활용 북극협력주관 준비 등과 연계 | • 과학연구 기반 제 북극 현안 의제 제시와 논의 선도<br>• CAOPA 등 주목받는 정책 세션 공동 개최 계속 |

[표 1] 북극 프론티어 및 북극써클의 특징을 고려한 접근 전략

# 지구온난화가 북극 툰드라 지역 탄소저장소에 미치는 영향



정지영 극지연구소 생명과학연구본부

최근 북극 지역 온난화는 전 지구 평균의 4배 가까이 빠르게 진행되고 있다. 툰드라 지역의 영구동토층에는 전 세계 토양 탄소의 약 25%가 저장되어 있어서 빠른 북극 온난화에 의한 온실기체 방출은 매우 큰 우려를 낳고 있다. 따라서 북극 툰드라 지역에서 기온 상승에 의한 토양 탄소 순환 변화의 정확한 이해가 필요하다. 1990년부터 기후변화가 툰드라 생태계에 미치는 영향을 이해하기 위해 세계 각지의 연구자들은 International Tundra Experiment(ITEX)라는 연구 네트워크를 만들고 공통의 프로토콜을 이용하여 북극과 남극, 고산 지역을 포함하는 툰드라 지역에서 온도상승챔버(Open top chamber, OTC) 등을 설치한 후 육상생태계의 식생, 토양 환경인자 등을 모니터링하고 있다. 최근 이 연구팀은 온도 상승 모사실험으로 획득한 생태계 호흡량 변화 데이터를 공유하여 메타 분석을 수행하였다. 그 결과 대기 온도가 1.4도 상승하면 생태계 호흡량이 평균 30% 증가되지만, 온도 상승에 따른 생태계 호흡량은 각 지역의 여러 토양 환경 특성에 따라 22%에서 38%까지 생태계 호흡량이 달라지는 것을 보여주었다. 본 연구는 북극 토양 환경 조건에 따라 기후변화에 대한 민감도가 달라질 수 있음을 보여줌으로써 추후 어느 툰드라 지역의 온난화에 더 관심을 가져야 하고, 관리가 필요한 지역인지에 대한 가이드라인을 제시할 때 근거 자료로 활용이 가능할 것이다.

## 영구동토층, 지구온난화 가속 '이산화탄소' 배출 시한폭탄

툰드라 지역은 러시아, 캐나다 북부, 북유럽, 알래스카, 일부 고지대 등에 위치한 수목한계선 이북 지역으로 땅이 얼어 키가 큰 나무가 자랄 수 없고, 키 작은 관목, 초본, 이끼 등이 주로 성장하는 영구동토층 지역이다[그림 1]. 북반구 대륙(육상) 면적의 1/4을 차지하고 있는 영구동토층은 전 세계 토양 탄소의 약 25%가 매장되어 있어 이 탄소가 대기 중으로 방출된다면 지구온난화는 더욱 가속화될 것이다. 최근 북극 온난화가 전 세계 온난화보다 최대 4배 가까이 빠르게 진행

되면서 영구동토층이 녹아 그 속에 저장되어 있던 유기물(탄소 함유)이 분해되어 탄소 배출이 급증하고 있다. 그래서 토양 탄소가 대기로 방출되는 것은 기후의 '시한폭탄'으로 불리고 있다. 영구동토층에 저장되어 있는 유기물은 그동안 낮은 온도와 때로는 산소가 부족한 조건 때문에 미생물의 분해 과정을 거치지 않아서 대부분의 유기물이 분해되기 쉬운 형태로 그대로 남아 있는데, 이는 영구동토층의 기후변화에 대한 민감성을 더 높이는 주요 요인이 되고 있다. 기온 상승이 탄소 방출량 증가를 야기하고, 늘어난 탄소가 다시 기온 상승을 부르는 '되먹임 효과'를 고려할 때 온도 변화에 민감한 영구동토층의 특성상 많은 양의 탄소를 저장하고 있는 북극에서 온난화로 인한 탄소 방출이 엄청나게 늘어날 수 있고, 이는 다시 온난화를 크게 가속화할 수 있는 악순환의 고리가 가능하다. 따라서 극지역에서 일어나는 온난화에 대한 결과와 전 지구적 영향을 명확히 규명하고 대응하기 위해 영구동토층에 얼마나 많은 탄소가 저장되어 있고, 얼마나 많은 탄소가 대기 중으로 방출될 것인가에 대한 정량화된 과학적 답변이 필요하다.

## 툰드라 연구자 간 국제적 네트워크 구축

지구온난화로 인한 툰드라 지역의 탄소 방출을 연구하려면 툰드라 지역 현장 연구가 필수적이다. 그런데 앞에서 설명한 바와 같이 그 면적이 너무 광활하다. 따라서 국제사회는 수십 년 전부터 연구팀을 만들어 협력 연구를 하고 있다. International Tundra Experiment(ITEX: <https://www.gvsu.edu/itex/>; 국제 툰드라 실험 그룹)은 1990년대부터 기후 변화에 따른 툰드라 지역의 육상생태계 변화, 특히 식물 군집 조성 및 성장 변화에 대한 관심에서 시작되어 자발적으로



[그림 1] 북극과 툰드라의 영역. 북반구 툰드라(수목한계선 안쪽) 지역과 지구물리학적 북극(66도 33분 이북 지역)을 나타내는 지도 출처: 지구 백과사전(Encyclopedia of Earth) [http://www.eoearth.org/files/145501\\_145600/145578/boundaries\\_of\\_the\\_arctic\\_large.jpg](http://www.eoearth.org/files/145501_145600/145578/boundaries_of_the_arctic_large.jpg) 이유경·정지영, “극지과학자가 들려주는 툰드라 이야기”, 지식노마드, 2015. p.16.에서 재인용



[그림 2] 북극 지역의 기온 상승에 의한 토양생태계 변화를 모니터링하기 위해서 ITEX 프로토콜에 따라 캐나다 케임브리지 베이 지역에 본 연구팀이 제작·설치한 온도상승챔버

구성된 국제 공동 연구 그룹이다. 몇몇 나라 연구자들이 실행위원회(Steering committee)를 구성하고 있고, 관심이 있는 주제에 따라 실행위원회 산하에 연구그룹을 구성하여 데이터 공유, 분석, 논문 작성 등을 하고 있다. 온도 상승에 대한 연구는 과거부터 현재까지 시간에 따라 변하는 온도 모니터링과 관련 환경, 생물 인자의 변화를 측정하는 방법도 있지만 장기간이 소요되고, 초기 모니터링 하지 않은 인자들은 변화를 유추하기가 어려운 한계가 있다. 따라서, 인위적으로 온도를 올리는 모사실험이 더 활용되고 있다. 이러한 온도 조작 실험을 통해 미래 툰드라 지역의 대기온도가 상승할 때 일어날 수 있는 생태계 변화 및 탄소 방출량의 변화 예측이 가능하다.

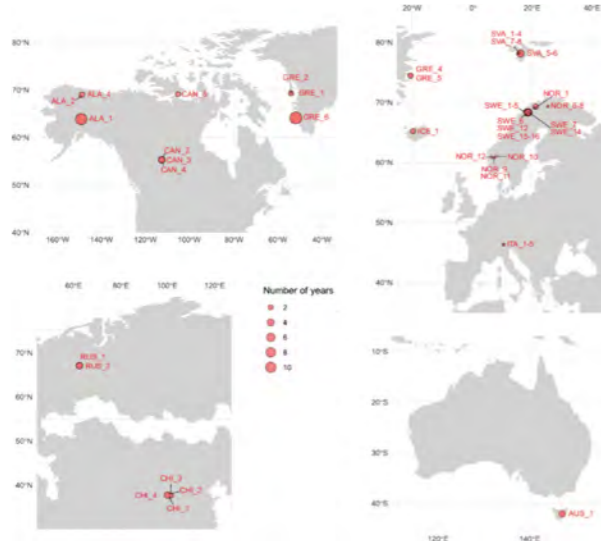
우리나라는 2012년부터 캐나다 케임브리지 베이에 온도 상승챔버(Open top chamber, OTC)를 설치하여 ITEX에 참여하고 있다. 이 국제 공동 연구팀의 가장 큰 관심은 기온 상승에 의한 생태계의 영향이므로 전 세계 극지와 고산 지역에 OTC를 설치하고 대기 온도를 높이는 실험을 진행하고 있다[그림 2]. OTC는 전기 없이 자연적으로 온도를 높일 수 있는 비닐하우스 형태의 챔버이며, 전력 공급이 원활하지 않은 극지역에서 주로 활용되고 있다. ITEX에서는 OTC 실험에 대한 공통의 프로토콜(OTC 사양, 측정 인자 등)을 만들어 연구자들에게 제공하고 있다.

ITEX에 참여하고 있는 연구자들은 극지역에서는 다른 지역과 달리 반복 실험이 힘들고, 잦은 주기로 데이터를 획득하는 것도 어려우며, 제한적 시기에만 데이터를 획득할 수 있다는 등 극지에서 데이터 획득의 어려움을 서로 잘 이해하고 있다. 이에 서로 데이터를 공유하여 메타 분석(여러 데이터를 종합하여 분석하는 방법)을 시도하는 것이 이러한 현장 연구의 제한성을

극복할 수 있는 방법으로 인식하고 있다. 그동안 ITEX 연구자들은 OTC에 의한 온도 상승이 식물의 성장을 증가시키고 성장 기간을 늘린다는 결과를 보여주었고, 식물 그룹 중에서 특히 넓은 잎 관목의 밀도와 지표에 덮고 있는 정도의 증가 등을 밝혔다. 또한 온도 상승은 온도 의존적인 토양 미생물의 활성에 영향을 주어 토양 유기물의 분해를 촉진한다는 여러 결과들을 보고하였다. 즉, 온도 상승은 식물 구조 및 생장과 생지화학적 순환에 영향을 미쳐 생태계의 구조와 기능에 변화를 야기하고, 육상생태계에 기대어 사는 동물, 인간 사회에도 영향을 미칠 수 있다. 현재까지 ITEX 연구자들은 Nature, PNAS, Ecology 등 우수 저널에 연구 결과를 종합하여 460편 이상의 논문을 공동 게재하였다.

## 온도 상승에 따른 툰드라 생태계 호흡량 증가

2020년에는 ITEX 네트워크 중 스웨덴 연구그룹이 주도하여 OTC에 의한 온도 상승으로 토양에서 방출되는 호흡량이 얼마나 달라지는지에 관한 데이터를 수집하였다. 이번 프로젝트에서 전 세계 16개국 76명의 과학자가 참여하여 28곳의 툰드라 지역에서 토양 호흡 및 환경 자료들을 수집하였고, 우리나라는 2012년부터 캐나다 케임브리지 베이 지역에서 획득한 자료를 공유하고 자료 분석, 논문 작성에 기여하였다 [그림 3]. 이 연구에서는 최소 1년부터 최장 25년 동안의 온도 상승에 의한 생태계 호흡량(식물 호흡량+토양미생물 호흡량) 변화를 관찰하였다. 그 결과 OTC를 설치한 곳은 기온이 평균 1.4도, 토양온도는 0.4도 상승하여 토양생태계에서 발생하는 탄소량이 평균 30%에서 최대 38%까지 증가함을 밝혀냈다 [그림 4]. 온도 상승에 따른 호흡량의 증가는 일반적으로 알려져



[그림 3] 극지역 온도 상승에 의한 생태계 호흡량 변화 측정 프로젝트에 참여한 연구 지역 지도(총 28곳)  
Maes, S.L. et al., 2024. Environmental drivers of increased ecosystem respiration in a warming tundra. Nature 629, 105-113.

있지만 이 연구의 특이점은 온도 상승의 영향이 토양 환경 인자(질소 농도 및 토양 산성도)에 따라 달라질 수 있음을 보여준 것이다. 토양 내 영양상태가 좋지 않은 지역에서 온도 상승에 의해 생태계 호흡량의 증가가 더 늘어났다. 이를 모델에 적용하였을 때 시베리아 동부, 서부와 캐나다 북극 군도의 영구동토층에서 온도 상승에 대해 매우 민감하게 반응할 수 있음을 예측해냈다.

생태계 호흡량 정량화는 많이 시도되었으나 온도 이외에

호흡량에 영향을 미치는 중요한 환경인자와 함께 해석하는 경우는 드물었기에 본 연구에서 토양 환경인자, 특히 토양의 영양상태에 따라 온도 상승에 따른 생태계 호흡량의 변이가 달라질 수 있다는 사실을 보여준 매우 의미 있는 시도였다. 이 연구 결과는 과학기술정보통신부 지원 ‘기후변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 변화 이해’ 연구과제 지원을 받아 수행되어 국제학술지인 『Nature』지에 2024년 5월 2일 게재되었다.

**툰드라 생태계 변화 시공간적 연구 확대 필요**

이 연구는 북극의 토양 환경 조건에 따른 기후변화에 대한 민감도, 반응 정도가 달라질 수 있음을 보여주었다. 즉, 토양 내 질소 함량이 적은 지역이 온도 상승에 민감하게 반응하는 지역이라고 할 수 있다. 그러나 예측값의 불확실성을 해소하기 위해 더욱 다양한 환경 조건을 고려하여 여러 북극 툰드라 지역에서의 추가 연구가 필요하다. 또한 대부분의 극지역에서는 주로 생육기 동안의 변화에 집중하고 있다. 그러나 북극에서 겨울철 온도 변화가 여름보다 훨씬 크다는 실측 데이터와 모델 예측 데이터를 고려할 때 1년(4계절) 내내 토양으로부터의 탄소 방출량에 대한 정량화 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것이다. 따라서 토양으로부터의 탄소 방출에 관한 연구는 향후 시공간적인 확장이라는 방향성을 가지고 진행되어야 정확한 자료를 기반으로 기후변화 대응이 가능할 것이다. 앞으로도 연구자들 간의 협력을 통해 다양한 연구 지역의 데이터를 취합하여 개개의 연구 결과를 보다 일반화할 수 있는 성과로 창출해낼 수 있기를 기대한다.

# 극지고층대기와 오로라, 우주날씨예보의 핵심!

지건화 극지연구소 해양대기연구본부

과거에 ‘우주’는 SF 영화에서나 볼 수 있었던, 우리 삶과는 동떨어진 아주 먼 세계였다. 그러나 현대사회에서 우주는 이미 우리 실생활 깊숙이 침투해 있으며, 더 이상 우리 손에 닿지 않는 먼 세계의 공간이 아니다. 인공위성을 활용한 대표적인 우주기술인 위성항법 시스템은 우리 실생활 곳곳에서 활용되고 있으며, 나아가 우주여행, 우주탐사 등 우주는 인류에게 더욱 가까이 다가오고 있다. 따라서 우주환경의 “날씨”, 즉 우주기상 예측의 필요성이 급격히 대두되고 있으며, 전 세계 우주과학계에서는 이를 위한 다양한 과학적 노력이 진행되고 있다. 이 가운데 극지에서의 우주환경 관측은 우주기상 예측 모델 개발에 필요한 정보 확보 차원에서 가장 핵심적인 요소가 되고 있다. 극지 우주환경의 상징적인 현상인 오로라는 태양 에너지가 태양풍과 자기권을 거쳐 지구로 전달되는 과정에서 나타나는 것으로, 맨 눈으로 관측이 가능한 유일한 우주기상 현상이다. 극지 고층대기의 오로라 현상에 대한 이해는 우주기상 예측을 향한 첫걸음이다. 극지연구소 우주과학팀에서는 남북극에서의 오로라 관측 및 관련 우주환경 관측을 더욱 확대해 나갈 예정이다.

**현대사회에서 ‘우주’란?**

과거에 우주(Near-Earth Space Environment 또는 Geospace Environment)는 SF 영화 또는 소설에서나 경험 할 수 있는, 우리 생활과는 무관한 아주 먼 세상의 이야기였다. 그러나 현대사회에서 우주는 이미 우리 실생활 깊숙이 침투해 들어와, 인공위성과 같은 우주기술이 없는 우리의 삶은 상상하기 어려워졌다. 우선 GPS와 같은 위성항법시스템(Global Navigation Satellite System: GNSS)은 자동차, 스마트폰, 컴퓨터(인터넷) 등에서 필수적인 요소이며, 우리 실생활에서 우주 활용의 대표적인 예이다. 또한 인공위성은 군사적 목적이나 기상예측 등 다양한 영역에서 광범위하게 활용되고 있으며, 위성통신은 방송, 항공, 비상 통신 등에서 없어서는 안 될 필수 통신 수단이 되었다. 최근에는 미국 기업인 스페이스엑스(SpaceX)의 스타링크(Starlink)와 같은 인터넷 서비스용 인공위성 사업이 시작되었다. 그러나 우주는 인공위성만을 위한 공간이 아니다. 우리나라를 포함한 세계 여러 나라에서 달, 화성, 금성 등에 대한 우주탐사 사업을 시작했으며, 스페이스엑스, 버진 갤럭틱, 블루 오리진, 보잉사 등 여러 민간기업에서 우주여행 상품을 계획 중이거나 이미 출시하고 있다. 나아가 우주는 생물, 바이오 및 의료 산업, 지질 등의 다양한 분야에서 인류에게 새로운 가치 창출의 기회를 제공하고 있다.

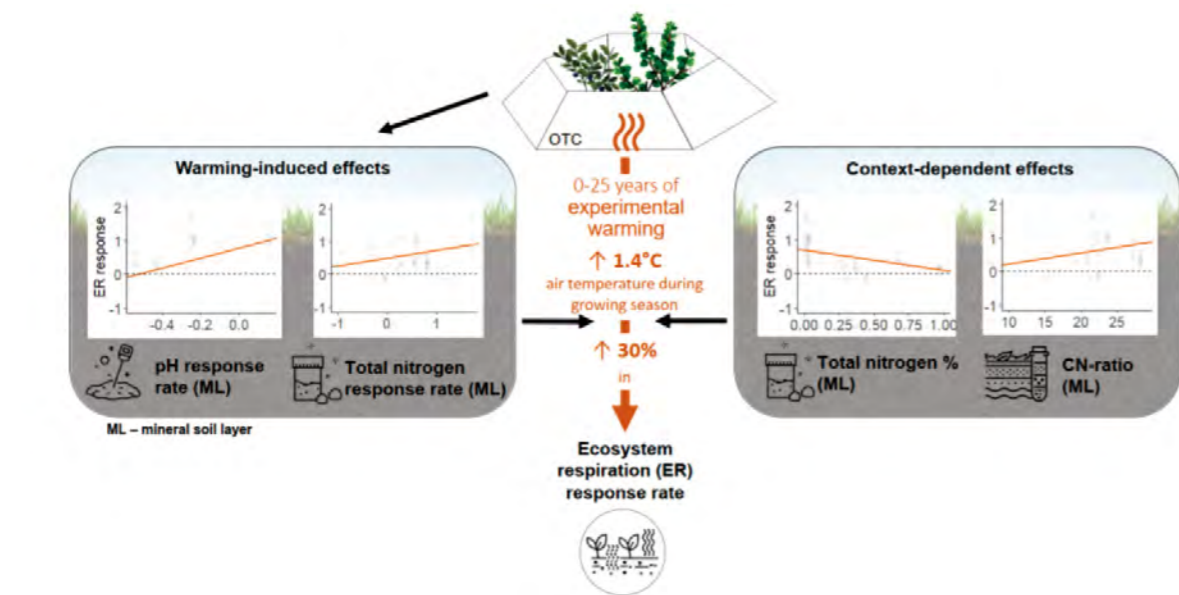
자주 발생하게 된다. 이때 태양에서는 엄청난 양의 에너지가 주로 태양풍(Solar wind)을 통해 태양계 전체로 분출되는데, 이 에너지가 지구에 도달하면 지구 주변의 우주환경이 크게 교란되어 다양한 형태의 변화가 일어난다. 예를 들면, 인공 위성이 상주하는 고층대기(Upper atmosphere) 밀도가 변하면 위성의 궤도 유지에 문제가 생길 수 있고, 태양에서 방출된 고에너지 입자에 의해 위성체의 표면에 전하가 축적 되면 위성체 내 전자기기에 문제가 발생할 수 있다. 고층대기 전리권(Ionosphere)의 갑작스러운 변화는 위성통신 장애를 일으켜 지상과의 통신을 두절시키고, 인공위성 추적 시스템에 문제를 일으켜 자칫 인공위성을 영원히 잃어버릴 수 있다. 또한 태양 고에너지 입자는 우주에서 활동하는 우주인이나 우주 여행자의 신체에 치명적인 손상을 가할 수 있다. 태양폭발로 인한 우주환경 변화의 영향은 우주에만 국한되지 않는다. 우주 환경 변화로 인한 급격한 전리권 변화는 지상 자기장 변화를 일으켜 지상에 설치되어 있는 송유관이나 송전시스템에 급격한 유도전류(Induced current)를 발생시킨다. 이와 같은 유도전류는 송유관의 노후화를 촉진시키고 송전시스템의 변압기에 치명적인 손상을 일으킬 수 있다. 따라서 이와 같은 우주기상으로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 지상에서의 날씨예보와 같은 우주기상 예측이 필수적이다.

**오로라 - 극지 하늘에 빛으로 수 놓인 태양의 흔적**

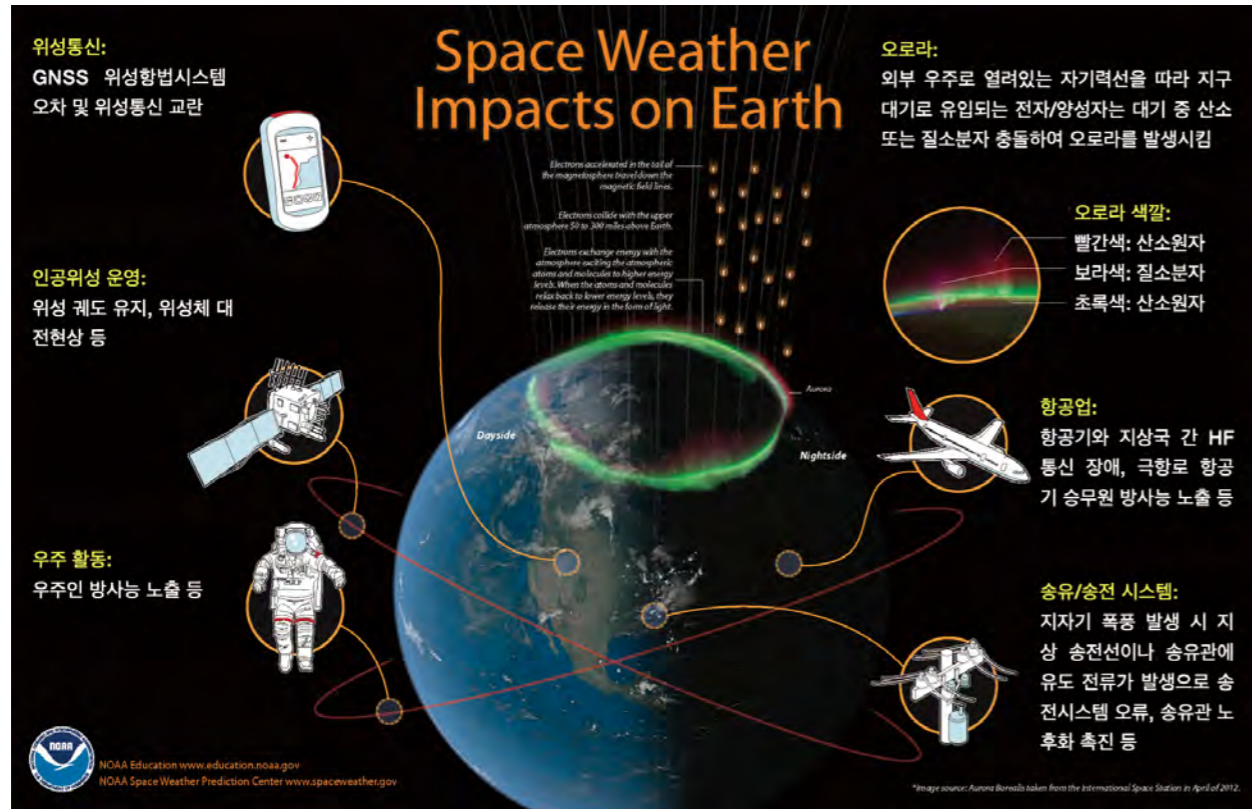
우주날씨 또는 우주기상의 주요 요인인 태양폭발이 발생하면 지구 주변 우주환경에는 다양한 측면에서 급격한 변화가 발생한다. 이와 같은 우주환경 교란 정도를 직접 눈으로 확인할 수 있는 유일한 현상이 바로 ‘오로라’이다. 오로라는 특별한 관측기기 없이도 우리 맨눈으로 직접 확인할 수 있는 우주 기상 현상이라는 측면에서 매우 특별하다. 그러면 오로라는 도대체 어떤 자연현상일까? 오로라는 극지 고층대기

**우주에도 날씨가 있다!**

우리 일상에서 날씨예보의 중요성은 두말할 필요도 없다. 인류의 활동영역이 우주로 확장된 현대사회에서는 지구의 날씨뿐만 아니라 ‘우주날씨’ 또는 우주기상(Space weather)의 예측이 필요하다. 예를 들면, 태양에서 흑점활동(Solar activity)이 활발해지면 태양 플레어(Flare)나 코로나 물질 대방출(Coronal Mass Ejection: CME)과 같은 태양폭발이



[그림 4] 온도상승철편에 의한 온도 상승을 야기한 토양 환경 조건의 변화가 생태계 호흡 변화에 미치는 영향(좌)과 지역별 토양 질소 함량이나 탄소대 질소 비율의 차이에 따른 생태계 호흡 변화 반응의 결과(우)  
Maes, S.L. et al., 2024. Environmental drivers of increased ecosystem respiration in a warming tundra. Graphical abstract. Nature 629, 105-113.



[그림 1] 우주환경, 고층대기, 그리고 지상에서 발생할 수 있는 다양한 우주기상 현상  
출처: 미국 우주기상예보센터(NOAA SWPC)

(약 90~1,000km)에서 발생하는 자연광이다. 지구는 자전축에 막대자석이 있을 때와 유사한 자기장을 갖고 있다. 이 지구 자기장의 자기력선은 극지에서만 자기권과 외부 우주로 열려 있고, 중위도와 적도지역에서의 대기는 지구자기장에 의해 둘러싸여 있는 모양새다. 한편 앞서 잠시 언급했던 것처럼, 태양에서는 태양풍이라고 하는 자기장과 플라스마 바람이 지구를 향해 끊임없이 불어오고 있다. 이 태양풍이 지구의 자기장과 만나면 자기권(Magnetosphere)이 형성되는데, 대부분의 영역에서 태양풍이 지구 대기로 직접 침투하는 것을 막아주는 역할을 하고 있다. 그러나 극지에서만은 지구 자기장의 자기력선이 외부 우주로 열려 있는 구조적 특성 때문에, 태양풍 플라스마의 일부가 직접 극지 고층 대기로 들어올 수 있다. 바로 이 태양풍 플라스마, 즉 전자와 양성자가 대기 중 산소원자나 질소분자와 충돌하는 과정에서 나오는 빛이 바로 오로라이다(자기권에 상주하고 있는 플라스마의 일부가 자기력선을 따라 들어오기도 한다.). 다시 말하면, 오로라는 태양폭발 에너지가 지구에 전달되는 과정에서 태양풍, 자기권, 그리고 극지 고층대기가 상호작용하는 과정에서 만들어지는 빛이다.

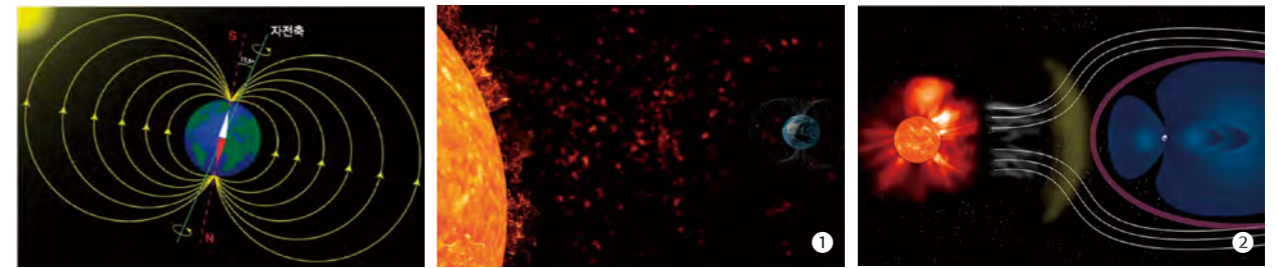
**오로라와 우주기상, 그리고 극지**

그러면 오로라(Aurora)는 앞서 언급한 우주기상과 어떤 관계가 있을까? 오로라는 맨눈으로 확인 가능한 유일한 우주 기상 현상 이외에도 중요한 의미를 갖고 있다. 왜냐하면 오로라는

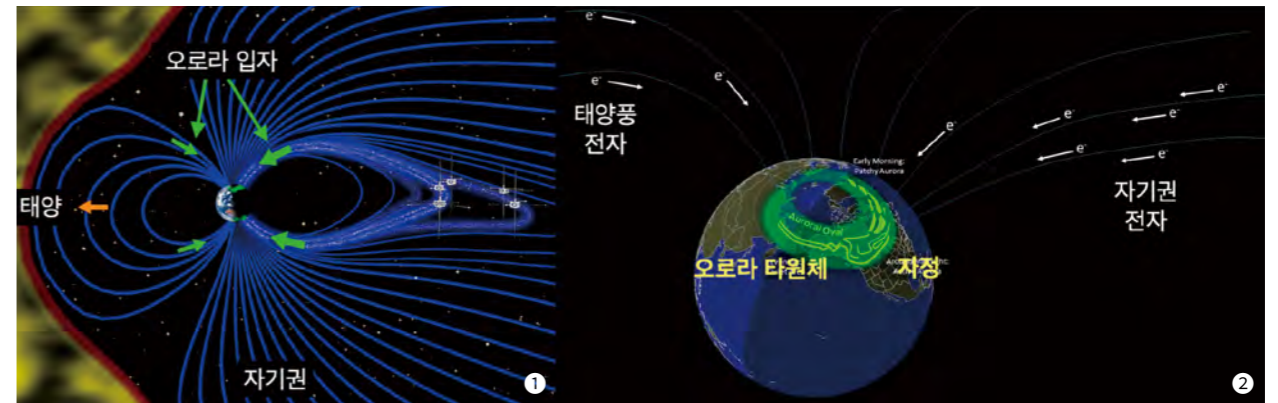
태양풍과 자기권, 그리고 지구 고층대기의 상호작용의 결과로 나타나는 매우 복잡한 우주기상 현상이기 때문이다. 더구나 이와 같은 상호작용의 결과는 단순히 오로라를 발생시키는 것만이 아니다. 오로라는 발생과 동시에 그 주변 전리권 및 열권 밀도와 온도, 바람 등 급격한 극지 고층대기 변화를 동반하며, 따라서 우주환경 변화를 가시적으로 보여주는 매우 중요한 우주환경 감시 수단을 제공한다. 또한 더욱 중요한 사실은 여러 가지 우주기상 현상을 일으키는 태양 에너지는 1차적으로 극지 고층대기를 통해서 지구로 전달된 후 열권 바람이나 전자기적 현상을 통해 중저위도까지 영향을 미치게 된다는 사실이다. 따라서 극지에서 오로라 관측과 더불어 수행되는 다양한 극지 고층대기 관측은 전 지구적 우주기상 예측 모델 개발을 위한 핵심적인 정보를 제공하는 데 매우 중요한 역할을 한다. 이와 같은 극지에서의 우주기상 관련 연구는 극지연구소가 우주기상 주관 기관인 우주항공청 소속 한국천문연구원, 우주환경연구센터 등과 함께 긴밀한 협력 하에 진행되고 있다.

**극지에서의 오로라 연구**

극지연구소에서의 오로라 연구는 2018년부터 남극 장보고 과학기지에서 오로라 관측용 전천 카메라(ASC: All Sky Camera)를 활용하여 처음 시작되었다. 이 관측을 통해 장보고 기지 상공 고층대기에서 발생하는 오로라에 대해 연구하고 있다. 그리고 2023년 초에는 녹색, 빨간색, 파란색의 필터가 장착된 전천 카메라가 추가로 설치되어 오로라의 파장대별

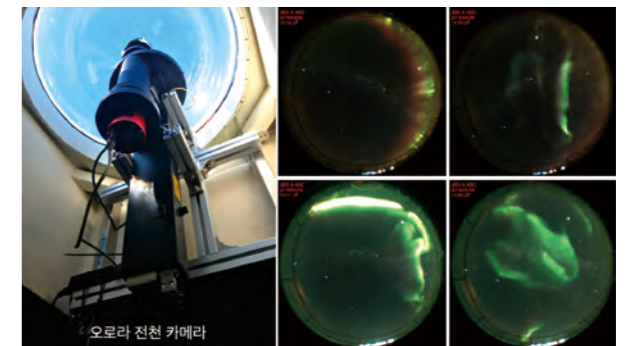


[그림 2] 태양 에너지가 지구로 전달되는 과정에서 핵심 요소인 지구자기장, 태양풍, 그리고 지구 자기권이 발생한다.  
출처: ① <https://www.phenomena.org/solarwind/> ② 유럽 우주국(ESA)

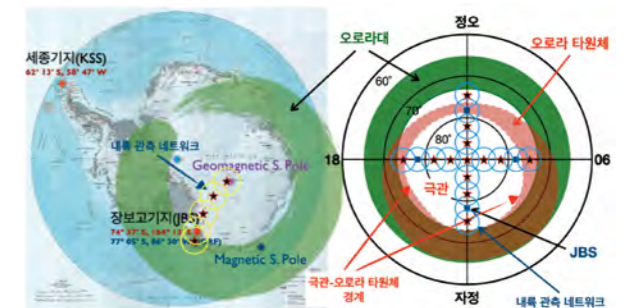


[그림 3] 극지 고층대기는 태양 에너지가 지구로 전달되는 핵심 관문  
출처: ① 미국 NASA ② 미국 우주기상예보센터(NOAA SWPC)

특성 연구가 가능하게 되었다. 이와 같은 오로라 전천 카메라 관측은 장보고기지에서 운영 중인 전리권 레이더, 열권 바람/온도 관측용 간섭계, 자기권 관측용 자력계 등의 관측과 함께 오로라와 극지 우주환경의 상관관계 연구에 활용되고 있다. 또한 현재 극지연구에서 남극 내륙 진출을 위해 추진 중인 K-루트를 활용하여, 장보고기지에서 자남극 주변의 내륙까지 오로라 및 전리권, 자기권 등의 극지 우주환경 관측 네트워크를 구축할 계획이다. 이를 통해 장보고기지가 위치한 오로라대-극관 경계 지역에서 자남극점 주변 극관 지역까지 오로라 관측을 확대하여 좀 더 확장된 형태의 오로라-우주기상 연구를 수행할 예정이다. 남극 장보고기지-내륙 간 지상 관측 네트워크 구축을 통한 극지 우주환경 관측은 북반구에 비해 매우 부족한 남반구 우주환경 관측자료 확보를 가능하게 하고, 나아가 최근 국제 우주과학계에서 적극적으로 추진되고 있는 극지 우주환경 위성관측 프로그램과 연계하여 활동한다면 우주기상예측 연구발전에 크게 기여할 수 있을 것이다.



[그림 4] 남극 장보고과학기지에서 운영되고 있는 오로라 관측용 전천 카메라와 관측된 오로라 이미지  
출처: 극지연구소 우주과학팀



[그림 5] 남극 장보고기지에서 자남극 주변 내륙 간 우주환경 관측 네트워크는 극관-오로라 타원체 경계에서부터 극관 중심까지 장보고 기지를 포함해서 5개의 관측사이트로 이루어져 있다. 우측 그림에서 '오로라 타원체' 안쪽 흰색 부분이 '극관' 지역이다. 자정, 정오, 06시, 18시에 5개의 관측사이트가 오로라 타원체와 극관을 기준으로 어떻게 분포하고 있는지를 보여준다.

# 인공지능(Artificial Intelligence) 시대, 극지연구에서의 활용 방안



## 황유나 극지연구소 정책개발실

Artificial Intelligence(인공지능, 이하 'AI')는 인간의 지능적 행동을 모방하는 기술로 머신러닝, 딥러닝, 생성형 AI로 발전해 왔으며 2022년 ChatGPT의 출현으로 새로운 인공지능 시대를 맞이하게 된다. 많은 연구기관에서는 AI 기술을 연구에 활용하며 연구 효율성을 향상시키고 혁신적인 연구 성과를 얻을 수 있었다. 하지만 AI 기술은 허위 정보 생성, 데이터 보안, 시스템 관리 등의 위험성이 있는 만큼 국제사회는 위험성을 낮춘 안전한 기술 확보를 위해 국제표준화와 국제 협력을 추진하고 있다. 극지연구 분야에서도 AI 기술의 효용성은 매우 높으며 많은 해외 연구기관에서 AI 기술을 활용한 극지연구를 진행하고 있다. 이에 극지연구소에서도 향후 보다 적극적인 AI 기술 활용에 대한 필요성이 제기되고 있다. 본 연구에서는 기존 연구 사례를 참고하여 비정형 데이터를 활용한 생태계 분석, 인프라 주요시설 유지 보수 및 운영 자동화, 국내외 정책 자료 분석 및 요약, 인사 채용 시 AI 기술을 활용한 연구 성과 및 문서 검증 등의 방안을 제시하고자 한다.

### 우리 사회, 이미 AI 시대로 전환 중

Artificial Intelligence(인공지능, 이하 'AI')는 컴퓨터 시스템이 인간의 지능적인 행동을 모방하거나 수행할 수 있도록 하는 기술이다. 이 기술에는 인간의 지능적 행동, 즉 학습, 추론, 문제 해결, 이해 등의 기능이 포함된다. 과거 AI는 SF영화-문학 속 로봇의 이미지가 주를 이루었지만 짧은 시간 내에 우리 삶을 바꾸는 계기로 인식되지는 못했다. 하지만 2016년 구글의 딥마인드 알파고(AlphaGo)가 이세돌 9단을 상대로 승리하며 AI의 잠재력과 가능성을 크게 인식시키며 이론적 개념을 넘어 실제로 인간의 능력을 뛰어넘을 수 있다는 것을 대중에게 보여 주었다. 그리고 2022년 '생성형 AI'(Generative AI) 모델을 기반으로 만들어진 ChatGPT가 대중에게 공개되며 바야흐로 대 인공지능 시대를 맞이하게 되었다. ChatGPT와 같이 생성형 AI를 기반으로 제공되는 서비스들은 복잡한 기술적 배경 없이도 쉽게 사용할 수 있어 사용자의

진입장벽이 낮아졌을 뿐만 아니라 여러 분야(텍스트, 이미지, 음악 등)에서 인간만이 가능하다고 여겨진 '창작 행위'를 대체하며 이용자 수가 폭발적으로 증가했다.

### 머신러닝, 딥러닝, 그리고 생성형 AI

AI 기술 중 가장 많이 거론되는 기술은 머신러닝(Machine Learning, ML), 딥러닝(Deep Learning, DL), 그리고 생성형 AI(Generative AI, Gen AI) 기술이다. 머신러닝은 AI 기술 중 하나로 기계(컴퓨터)가 다양한 알고리즘을 통해 데이터를 학습하고 패턴을 찾으며 그 결과를 기반으로 예측이나 결정을 내리는 기술이다. 프로그래밍을 하지 않더라도 SPSS\*, MATLAB\*\*과 같은 통계 프로그램 혹은 GUI\*\*\* 기반 머신러닝 툴 등으로 해당 기술을 활용할 수 있다. 딥러닝은 머신러닝의 하위 개념으로 머신러닝 알고리즘 중 하나인 인공신경망(Artificial Neural Networks)으로 만들어진

| AI 기술 종류                | 의의  | 대표적 사례 / 알고리즘             |
|-------------------------|---|---------------------------|
| 머신러닝 (Machine Learning) | • 프로그래밍 과정 없이도 활용 가능하며 구조화된 데이터를 활용해 패턴을 학습함  | 지도학습*, 비지도학습**, 강화학습***   |
| 딥러닝 (Deep Learning)     | • 머신러닝의 하위 분야로 AI의 핵심기술<br>• 2006년 기초개념 정립 이후 2010년대 급속하게 성장 (배경: GPU 등 컴퓨터 시스템 발전과 데이터의 증가)<br>• 여러 층을 가진 신경망 구조를 사용하여 데이터에서 자동으로 특징을 추출하고 복잡한 패턴을 학습함 | 알파고, 자율주행, Siri, AI 스피커 등 |
| 생성형 AI (Generative AI)  | • 딥러닝 하위 분야로 새로운 데이터 생성에 중점을 둠<br>• 기존 데이터를 학습하여 이용자의 요구에 따라 새로운 콘텐츠를 자동으로 생성   | ChatGPT, Deepfake, DALL-E |

[표 1] AI 기술 종류와 의의

\* 주어진 입력 데이터와 해당 출력 레이블(정답)을 기반으로 모델을 학습(회귀분석, 무작위 포레스트 등)

\*\* 입력 데이터만 가지고 패턴이나 구조를 학습(군집화, 차원 축소)

\*\*\* 에이전트가 환경과 상호작용하면서 보상을 최대화하는 방향으로 학습(로봇 제어, 자율 자동차 등)

기술이다. 인간의 뇌 구조를 모방한 인공신경망을 통해 데이터를 학습하며 스스로 특징을 추출하고 분류하여 결과를 도출한다. 대량의 데이터를 통해 특징을 자동으로 추출하는 만큼 데이터의 품질과 양이 매우 중요하며 이미지, 텍스트, 음성과 같이 비구조화되고 복잡한 데이터 처리에 효과적이다. CNN(Convolutional Neural Network)을 활용한 이미지 분석, RNN(Recurrent Neural Network)을 활용한 텍스트 분석, 그리고 음성 인식 및 분석 등이 대표적 딥러닝 모델로 구글 번역, 아마존의 알렉사 와 애플의 시리 등의 서비스로 구현되어 활용되고 있다. 딥러닝 기술 또한 R, 파이썬과 같은 프로그래밍 언어를 통해 활용될 수 있을 뿐만 아니라 Google, MS 등에서 운영하는 플랫폼을 통해 프로그래밍 없이도 이용할 수 있다.

생성형 AI는 딥러닝의 하위 개념으로 대규모 데이터를 학습하고 이를 기반으로 새로운 결과물을 '생성'한다. 기존 AI 기술이 데이터를 기반으로 예측하거나 분류하여 결과를 제공했다면 생성형 AI는 데이터를 찾아 학습하고 이를 토대로 능동적으로 결과물을 제시하는 것이다. 문서 작성부터 그림, 비디오 생성까지 가능한 생성형 AI 기술은 다양한 분야에서 활용되며 놀라운 성과를 보이고 있다. 생성형 AI 기술을 이용한 가장 대표적 사례로는 LLM(Large Language Models: 대규모 언어모델)을 통해 만들어진 ChatGPT가 있으며, 이외에도 GAN(Generative Adversarial Networks) 모델을 활용한

이미지 생성(딥페이크) 기술 등이 있다.

### 국내 출연(연), AI 기술 이미 도입

대다수 연구기관에서 AI 기술이 활용되고 있으며, 이 기술을 활용함으로써 기대되는 주요 장점은 연구의 혁신성과 효율성 향상이다. 대용량 데이터의 신속한 분석을 통해 예측 능력이 향상될 것으로 예상되며 기존에 시도하지 못한 혁신적인 분석 방법을 시도할 수 있을 것으로 기대한다. 또한 연구의 자동화로 인간의 개입이 최소화된 일관성 있는 데이터의 대량 생산이 가능해지고 연구자가 단순 작업에서 벗어나므로써 창의적 업무 시간을 확보할 수 있다. 마지막으로 데이터 공유에 AI를 활용함으로써 연구 데이터의 접근성과 활용 방안의 확장이 기대된다. 이 같은 AI 활용의 이점으로 인해 이미 많은 국내 출연기관에서는 AI 기술을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

하지만 AI 기술 활용에는 다음과 같은 위험성도 존재한다. 첫째, 허위 정보 생성의 위험성이다. 기존 데이터를 바탕으로 새로운 정보를 생성하는 과정에서 사실과 다른 허위 정보(Hallucination)가 발생할 수 있다. 둘째, 분석을 위해 대량의 데이터를 입력하는 과정에서 보안 정보의 유출 및 악용의 위험이 존재한다. 마지막으로, AI 기술은 블랙박스 모델과 같아서 결과는 알 수 있지만 도출 과정은 파악하기 어렵고, 대부분 범용 AI 기술을 이용하기 때문에 기관 차원에서 시스템을

| 기관                 | 기술 분류 |     |        | 연구 내용  |
|--------------------|-------|-----|--------|--|
|                    | 머신러닝  | 딥러닝 | 생성형 AI |  |
| 한국생산기술연구원 (KITECH) |       | ●   |        | CNN, Transformer 기술 응용, 의료용 카테터 형상 결함 검사시간을 5초 이내로 단축(기존 5분)   |
| 한국재료연구원 (KIMS)     | ●     |     |        | 미세 플라스틱의 분광 신호를 AI에게 학습하여 현장에서 고감도로 신속하게 검출  |
| 한국전기연구원 (KERI)     |       | ●   |        | 산업현장의 설비 및 공정 특성을 분석하여 AI 기반 기술 현장 적용  |
| 한국철도기술연구원 (KRRRI)  |       | ●   |        | AI 분석기술 적용 지하터널 피난 로봇 개발   |
| 한국기계연구원 (KIMM)     |       | ●   | ●      | 사용자의 명령을 이해하고 제조 작업 공정에서 로봇이 해야하는 작업 명령을 자동으로 생성하여 로봇 운용   |
| 한국전자통신연구원 (ETRI)   |       |     | ●      | 코알라(KOALA: 이미지 생성모델)* 및 코라바(Ko-LLaVa)** 개발<br>* 이미지 생성 모델 : 오픈AI의 DALL-E 3보다 5배 빠르게 이미지 생성<br>* 대화형 시각 언어 모델 : 생성형 인공지능과 시각지능 기술을 결합하여 문장 입력 시 그에 맞는 이미지를 제공 |
| 한국과학기술정보연구원(KISTI) |       |     | ●      | 한국 과학기술데이터에 특화된 언어모델(KONI)*을 개발, 출연(연)-중소기업-공공기관에서 활용<br>* 생성형 AI 모델(Kisti Open Natural Intelligence)  |
| 한국에너지기술연구원 (KIER)  | ●     | ●   |        | 현장에 방문하지 않고 데이터를 통해 태양광 패널 오염, 성능 저하 등을 판단   |
|                    |       |     | ●      | 연구행정 업무에 AI 기술 접목(신규인력 채용 시 성과 검증 등)   |
| 한국과학기술연구원 (KIST)   |       |     | ●      | 실시간 음향시뮬레이션 기술개발로 집속초음파 시뮬레이션 기술개발(뇌질환 치료)   |

[표 2] 국내 출연(연)의 AI 기술 활용 사례

완벽하게 관리하고 통제하는 데 어려움이 있다는 한계가 있다. 이러한 위험성을 낮추기 위해 국제사회는 정상회의 개최, AI 안전연구소 설립 등을 통해 AI 기술의 위험성을 줄이고 안전한 기술을 확보하기 위해 노력하고 있다.

**해외극지연구기관, AI 기술을 극지연구에 접목 중**

극지는 다학제 연구가 진행되고 기초·원천·복합 기술 등이 적용되는 분야로 AI 기술의 효용성이 매우 높다. 특히 기후 변화로 인한 영향 예측 연구의 중요성이 커짐에 따라 대규모 데이터를 처리하고 분석할 수 있는 AI 기술이 활발히 활용되고 있다. 영국 남극조사원(BAS)은 제46차 남극조약협약당사국회의(ATCM)에서 해양 작업의 최적화를 위해 AI 기술을 활용하여 항로, 연구 일정, 위험 인자들을 모두 고려한 해양 작업 시나리오를 자동으로 수립하는 사례를 보고하였으며, 호주 남극연구청(AAD)은 머신러닝을 이용하여 남극해 해양동물의 오디오 데이터를 분석해 연구에 활용하고 있으며 바닷새 개체수 조사에도 인공지능 카메라를 이용하고 있다. 미국 해양대기국(NOAA)은 항공에서 촬영된 북극 해빙 이미지에서 해양 포유류를 탐지하는 AI 모델을 개발했으며, 노르웨이 트롬소 대학교(UiT)에서는 현미경 이미지에서 미세 화석을 자동 탐지·분석하는 이미지 인식 모델을 개발했다. 또한 노르웨이는 AI가 북극의 미래에 어떤 기여를 할 지에 대한 백서(2022)를 발간한 바 있다.

극지연구소에서는 딥러닝 기술(CNN 알고리즘)을 활용하여 위성 데이터에서 해양, 해빙을 구분하고 해빙의 종류를 분류하는 연구를 진행하고 있다. 머신러닝 기술을 활용하여 해빙 두께 분석과 해양 수온 자료를 기반으로 광역을 구분하고, 광역별 시공간적 변동 특성에 따른 해양 환경의 반응을 분석하고자 한다. 이외에 남극빙원 내 숨겨진 크레바스 분석 연구를 통해 남극빙원에서의 안전한 현장활동 시 유용한 자료로 활용할 수 있다. 관측 이미지에서 오로라 데이터를 자동으로 분류하는 연구에도 AI 기술을 활용하고 있다. 이처럼 AI 기술을 활용한 극지연구소의 연구들은 대부분 초기 단계로 주로 이미지 분석 기술이 활용되는 수준이다. 타 연구기관들은 다양한 AI 기술의 활용으로 혁신적인 연구 결과를 도출하고 있는 만큼 극지연구소도 향후 적극적인 AI 기술의 도입과 활용이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

**연구선박 해양 연구활동 시나리오 구성 등에 AI 접목 제안**

현재 수행 중인 연구와 국내외 연구기관에서 수행 중인 AI 기술 활용 사례를 참고하여 연구, 인프라 운영, 정책, 행정지원 분야에서의 AI 기술 활용 방안을 제안하고자 한다. 첫 번째, 연구 분야에서는 비정형 데이터(음향, 비디오 등)를 활용한 생태계 분석, 생성형 AI 모델을 활용한 해빙 예측 모델 구축, 연구 선박의 해양 연구활동 시나리오 구성 등의 연구를 고려해볼 수 있다. 두 번째, 인프라 운영에서는 인프라 주요 시설의 유지 보수 및 운영 자동화와 위험 요소 진단 시스템 구축 등을

고려해 볼 수 있다. 특히 AI 기술을 활용하여 에너지의 효율적 관리를 통해 사용 연료를 절감하고 운영자의 위험 지역 접근을 줄임으로써 보다 안전한 인프라 운영에 기여할 것으로 기대된다. 정책 측면에서는 생성형 AI의 문건 분석, 요약 기술을 활용하여 극지 관련 주요 국제회의에서의 회의 안건 분석, 시기별 논의 주제 분석 등을 하여 회의 안건과 이슈 분석에 있어 시간을 단축해볼 수 있을 것으로 기대된다. 마지막으로 행정지원 분야에서는 생성형 AI를 활용한 연구보고서 작성 가이드라인을 구성하고(기획), 극지 보고서 및 논문자료 기반 대화형 검색 서비스 구축(데이터 관리) 등의 방안을 고려해볼 수 있다. 또한 인사 채용 분야는 AI의 업무 활용성이 가장 높을 것으로 예측되는 분야로 이미 한국에너지기술연구원(KIER)에서 신규 채용 과정에 AI 기술을 활용하여 실적 검증에 소요되는 인력과 시간을 획기적으로 단축한 바 있다.

| 분야  | AI 기술 활용 방안  |
|-----|--|
| 연구  | <ul style="list-style-type: none"> <li>비정형 데이터(음향, 비디오 등)를 활용한 생태계 분석</li> <li>생성형 AI 모델을 활용한 해빙 예측 모델 구축</li> <li>연구 선박의 해양 연구활동 시나리오 구성</li> </ul>                                       |
| 인프라 | <ul style="list-style-type: none"> <li>인프라 주요 시설의 유지 보수 및 운영 자동화</li> <li>위험요소 진단 시스템 구축</li> </ul>  |
| 행정  | <ul style="list-style-type: none"> <li>ATCM 제출문건 초기 분석</li> <li>시기별 국가남극프로그램운영자위원회(CONMAP) 논의 주제 분석</li> </ul>   |
| 정책  | <ul style="list-style-type: none"> <li>(기획) 생성형 AI 기술을 활용한 연구보고서 작성 가이드라인 구성</li> <li>(데이터관리) 극지 보고서 및 논문자료 기반 대화형 검색 서비스 구축</li> <li>(인사) 인사 채용 시 생성형 AI 기술을 활용한 성과 및 작성 문건 검증</li> </ul> |

[표 3] 극지연구 분야에 AI 기술 활용 방안

AI 기술은 위험성을 동반하고 있지만, 모든 분야에서 새로운 가능성을 열어주는 핵심 기술이다. 이미 AI 기술 활용은 큰 흐름으로서, 우리는 AI 기술의 활용 방안과 함께 잠재된 위험을 최소화하고 효과적인 결과를 도출할 수 있는 체계적인 시스템이 필요하다. 데이터 관리와 윤리적 기준 정립, 도출된 결과에 대한 반복적인 검토 등을 통해 AI 기술의 위험성을 낮춘다면 AI 기술 활용을 통해 극지연구의 새로운 발전을 가져올 수 있을 것이다.

\* Statistical Package for the Social Sciences (사회과학용 통계 분석 소프트웨어)  
 \*\* Matrix Laboratory (수치해석과 프로그래밍이 가능한 공학용 소프트웨어)  
 \*\*\* Graphic User Interface (사용자와의 상호작용을 위해 시각적 요소를 사용하는 인터페이스)

