

빙하 속 과거와 미래를 읽는 열쇠, 빙하투과레이더 기술

이주한 극지연구소 미래기술센터

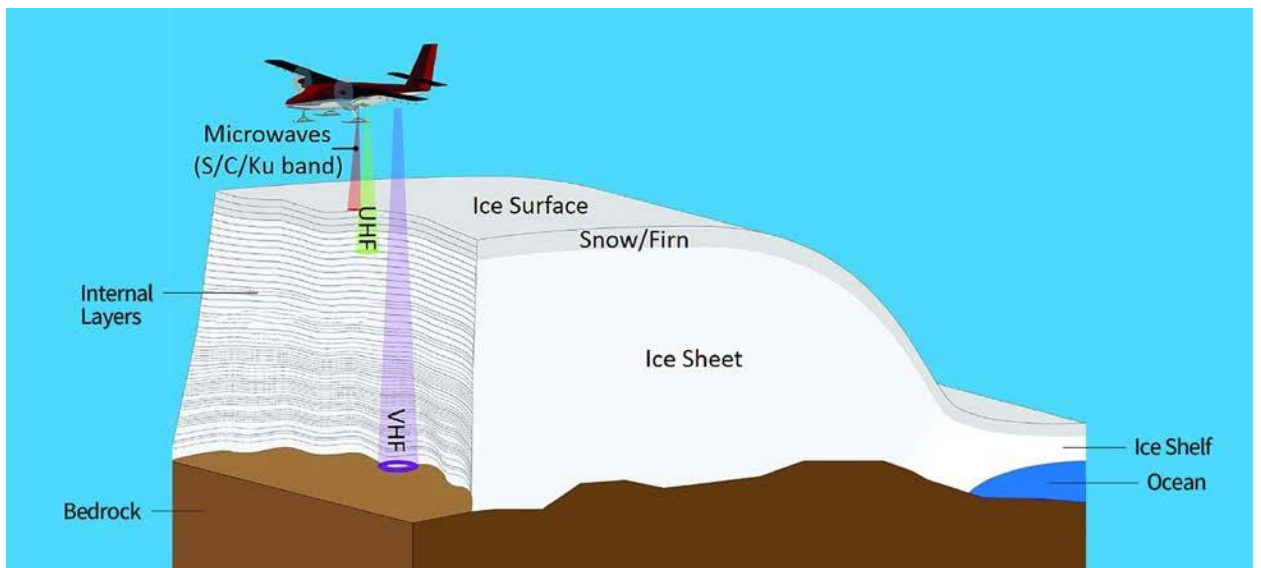
남극의 빙하 내부에는 지구의 기후변화를 이해하는 데 필수적인 과거의 기후 기록이 보존되어 있다. 빙하를 연구하는 방법 중 하나인 빙하투과레이더(Ice Penetrating Radar, IPR) 기술은 빙하의 두께와 하부 지형을 탐사하여 빙하 이동 및 변화, 이상적인 심부 빙하 시추 후보지와 빙저호 등의 위치 선정과 관련된 중요한 데이터를 제공한다. 우리나라도 최근 개발한 IPR을 이용하여 심부 빙하 시추 후보지 선정을 위한 연구를 진행하고 있으며, 연구 결과물인 데이터를 BEDMAP 국제 협력 프로젝트를 통해 공유하고 있다. IPR 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 남극기지로 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

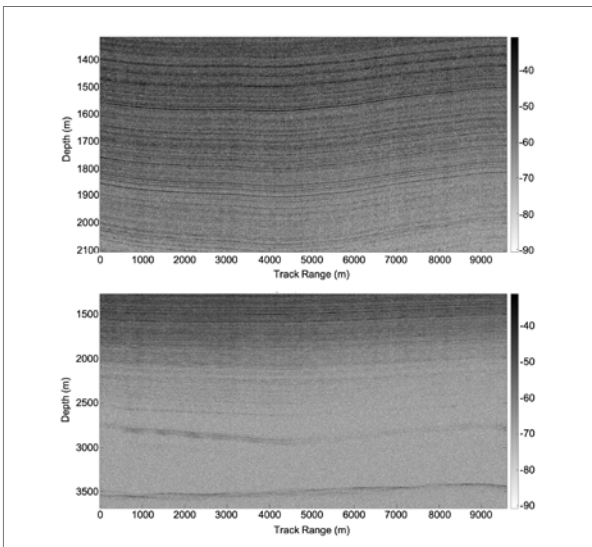
Sounder(CARDS) 시스템은 빙하의 내부 구조와 기저 지형을 더 정밀하게 분석할 수 있게 했다. 또한 GPS 기술의 발전으로 위치 정확도가 크게 향상되어 더욱 정확한 데이터를 바탕으로 빙하와 기후변화를 연구할 수 있게 되었다.

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.

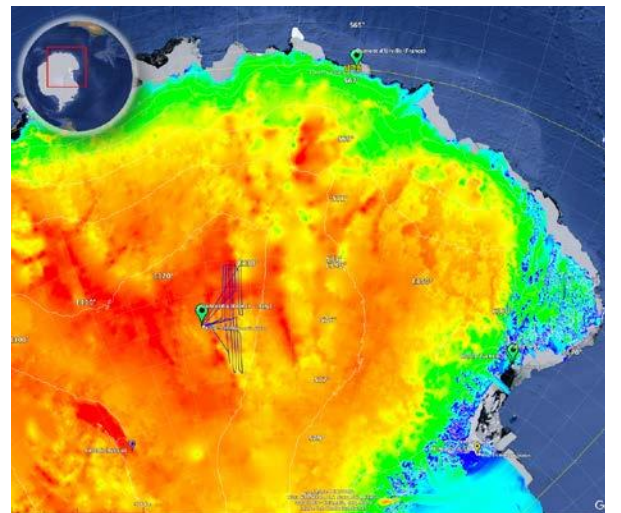
남극 IPR 연구를 위한 국제 협력

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 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)

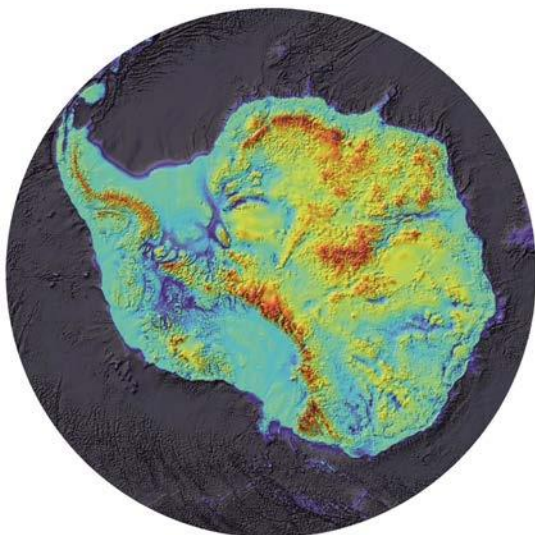


[그림 4] 2023~2024년 IPR을 이용하여 남극 내륙 심부 빙하 시추 후보지 선정을 위한 탐사 위치도. 탐사의 위치는 BEDMAP2의 결과에서 빙하의 깊이가 비교적 깊은 곳(그림에서 붉은색 지역)을 중심으로 탐사하였다. 탐사 결과는 그림 4와 같이 나타났으며 2024~2025년 시즌 추가 탐사로 심부 빙하 시추 후보지를 추천할 계획이다.

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 추정의 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 건너낸 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.