

	남극 천문관측 연구모듈 개발	↑ 7cm ↓ 남극 천문관측 연구모듈 개발 Development of the Antarctic Astronomical Observation Research Module  한국천문연구원 ↓ 7cm ↑
--	--	--

(16 포인트 고딕체)

↑ 주 의 7cm (편집 순서8) ↓

한국천문연구원

↑
5cm
↓

남극 천문관측 연구모듈 개발

Development of
the Antarctic Astronomical Observation Research Module

한국천문연구원



제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극내륙 연구거점 구축과 기지 후보지 선정을 위한 빙원탐사” 사업의 위탁연구 “남극 천문관측 연구모듈 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 이 강 현

위탁연구기관명 : 한국천문연구원

위탁연구책임자 : 정종균

위탁참여연구원 : 이충욱

위탁참여연구원 : 이동주

한국천문연구원 : 양희수(공동연구)

보고서 초록

위탁연구과제명	남극 천문관측 연구모듈 개발				
위탁연구책임자	정종균	해당단계 참여연구원수	3	해당단계 연구비	300,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	한국천문연구원 우주항법측지센터		참여기업명	해당없음	
국제공동연구	상대국명 : 해당없음		상대국연구기관명 : 해당없음		
요 약				보고서 면수	60
○ 한국천문연구원 “남극 천문관측 연구모듈 개발” 과제는 「제4차 남극연구활동진흥 기본계획」 및 「제1차 극지활동 진흥 기본계획」에 따른 세계 6번째 남극내륙 기지 구축을 위한 극지연구소 “남극 내륙 연구거점 구축과 기지 후보지 선정을 위한 빙원탐사” 과제의 일환으로 수행되었다. ○ 본 위탁연구는 남극내륙 고원과 같은 극한 환경에서 장기간 무인 운용이 가능한 이동식 천문·우주환경 연구모듈을 개발하고, 실제 남극 현장 설치 및 시험 운용을 통해 기술적 타당성을 검증하는 것을 목표로 수행되었다. ○ 이를 위해 10ft 컨테이너 기반의 모듈형 관측소를 설계·제작하고, 태양광과 풍력 발전을 결합한 에너지 자립형 전력·배터리 시스템을 구축하여 저전력 관측 장비 기반의 무인 관측 인프라를 구축하였다. ○ 우리나라 최초로 남극 낮·밤 천문시상 관측을 수행하여, 해발 1,000m의 남극내륙 진출로 베이스캠프에서 백야 기간 동안 약 2.0" 수준의 낮 천문시상 조건을 실측으로 확인하였으며, 태양 영상 기반의 낮 기상 산출 알고리즘을 개발하였다. ○ 본 연구 성과는 향후 극지연구소의 남극내륙 천문·우주환경 연구거점 구축, 극한환경 무인관측 기술 고도화, 국제 공동연구 확대를 위한 핵심 기초자료로 활용될 수 있다.					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	남극내륙, 천문관측 연구모듈, 무인 관측소, 에너지 자립, 천문시상			
	영 어	Antarctic Inland, Astronomical Research Module, Unmanned Observatory, Energy Independence, Astronomical Seeing			

요 약 문

I. 남극 천문관측 연구모듈 개발

본 연구는 남극내륙 고원과 같은 극한 환경에서 장기간 무인 운용이 가능한 천문·우주환경 관측을 수행하기 위해 이동식 모듈형 연구 플랫폼을 개발하고, 실제 남극 현장 적용을 통해 기술적 타당성과 운용가능성을 검증하는 것을 목표로 한다.

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 목적

남극내륙 고원의 우수한 천문시상 및 독특한 우주환경 특성을 정량적으로 규명하고, 이를 지속적으로 관측할 수 있는 에너지 자립형 무인 천문관측 연구모듈을 개발·구축하는 데 목적이 있다.

2. 필요성

남극내륙은 대기 난류가 적고 전리층·오로라 활동이 활발하여 천문·우주환경 연구에 최적의 조건을 제공하지만, 혹한·극야 등으로 인해 상시 인력 투입이 어렵다. 따라서 무인·자율 운용이 가능한 관측 인프라 구축이 필수적이며, 남극기반 위성항법 성능 분석 및 향후 남극내륙 연구거점 구축을 위한 실측 자료 확보가 요구된다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 최종목표

- 남극내륙 고원 환경에서 운용 가능한 이동식 천문·우주환경 무인관측 연구모듈 개발
- 천문시상, 태양관측에 대한 실측 자료 확보

2. 상세목표

- 태양광·풍력 기반 에너지 자립형 관측 모듈 설계·제작 및 현장 시험
- 낮·밤 천문시상 관측 장비 구축 및 기상 산출 알고리즘 개발
- 태양영상분광 자료 획득 및 GNSS 산출전략 작성

IV. 연구개발결과

10ft 컨테이너 기반의 이동식 무인 천문관측 연구모듈을 제작하고 남극 현장에 설치하여 시험 운용을 완료하였다. 우리나라 최초의 남극 낮 천문시상 자료를 확보하였으며, 해발 1,000m 남극내륙 진출로 베이스 캠프에서 낮 동안 약 1.6" 수준의 기상 조건을 확인하였다. 또한 남극에서 최초로 태양영상분광 관측을 수행하여 국내보다 품질이 좋은 분광 자료를 확인하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구 성과는 향후 남극내륙 천문·우주환경 연구거점 구축 타당성 검토를 위한 핵심 기초자료로 활용될 수 있으며, 극한환경 에너지 자립형 무인관측 기술의 고도화 연구에 기여할 것으로 기대된다. 또한 국제 남극 공동연구 및 우주환경 감시 체계 구축을 위한 기반 자료로 활용될 예정이다.

S U M M A R Y

I. Development of the Antarctic Astronomical Observation Research Module

This study aims to develop a mobile, modular research platform capable of long-term unmanned operation for astronomical and space environment observations in the Antarctic inland plateau, and to verify its technical feasibility and operational reliability through on-site deployment in Antarctica.

II. Purpose and Necessity of R&D

1. Objectives

The objective is to characterize the astronomical seeing and unique space environment of the Antarctic inland plateau, and to develop an energy self-sufficient unmanned astronomical observation research module capable of continuous monitoring.

2. Necessity

The Antarctic inland provides optimal conditions for astronomical and space environment research due to low atmospheric turbulence and active ionospheric and auroral phenomena. However, continuous human presence is severely limited by extreme cold and polar night conditions. Therefore, unmanned and autonomously operated observation infrastructure is essential, and in situ data are required to evaluate GNSS performance and support future Antarctic inland research hubs.

III. Contents and Extent of R&D

1. Final Objects

- Development of a mobile unmanned astronomical and space environment observations research module operable in the Antarctic inland plateau environment
- Acquisition of in observational data on astronomical seeing and solar observations

2. Detailed Objectives

- Design, fabrication, and field testing of an module based on solar and wind power systems
- Deployment of astronomical seeing observation instruments and seeing estimation algorithms
- Acquisition of solar spectroscopic data and establishment of GNSS data processing strategies

IV. R&D Results

A 10-ft container mobile unmanned astronomical observation module was fabricated and successfully tested in the Antarctic environment. The first daytime seeing data in Antarctica were obtained in Korea, confirming seeing conditions of $\sim 0.5''$ at the Antarctic inland basecamp (alt=1,000 km). In addition, solar imaging spectroscopic observations were conducted in Antarctica for the first time, demonstrating higher-quality spectral data than those obtained at domestic observation sites.

V. Application Plans of R&D Results

The results can serve as core foundational data establishing astronomical and space environment research hubs in the Antarctic inland. Furthermore, they are expected to contribute to the advancement of energy self-sufficient unmanned observation technologies for extreme environments and to support international Antarctic collaboration research and space environment monitoring system.

목 차

제 1 장 서론	8
1. 연구개발의 목적	8
2. 연구개발의 필요성	9
3. 연구개발의 범위	10
제 2 장 국내외 기술개발 현황	12
1. 국내 기술개발 현황	12
2. 국외 기술개발 현황	17
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	20
1. 무인모듈형 관측 플랫폼 개발	20
2. 극야 천문시상 관측 연구	32
3. 백야 천문시상 관측 연구	41
4. 남극 태양영상분광관측 실험 및 관측환경 검증	46
5. 남극 GNSS 연구	51
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	56
1. 연구개발목표 및 달성도	56
2. 대외 기여도	57
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	58
제 6 장 연구개발 과정에서 수집한 해외과학기술정보	59
제 7 장 참고문헌	60

제 1 장 서론

1. 연구개발의 목적

본 연구의 목적은 극지연구소의 남극내륙기지 건설 및 운영을 위한 예비 조사 대응과 수립을 지원하기 위하여, 남극내륙 고원 지역과 같은 극한 환경에서도 안정적으로 운용 가능한 이동식·무인형 천문·우주환경 관측모듈을 개발·구축하고, 이를 실제 현장에 적용하여 기술적·과학적 타당성을 실증하는데 있다.

남극내륙 고원은 낮은 대기 난류와 얇은 대기 경계층, 매우 낮은 수증기량 등으로 인해 지구상에서 가장 우수한 천문 관측 환경을 보유한 지역으로 평가되고 있다(Lawrence et al., 2004; Saunders et al., 2009). 동시에 이 지역은 심부빙하 시추, 우주환경 및 천체물리 관측, 극한지 공학기술 검증 등 다양한 분야의 다학제 융합연구 수행을 위한 핵심 전략 거점으로서의 잠재력을 지니고 있다. 그러나 접근성의 한계, 물류 및 인력 운용의 제약 등으로 인해 현재까지는 실측 기반의 체계적인 남극내륙 관측 인프라 구축이 이루어지지 못한 상황이다.

이에 본 연구에서는 모듈화·이동식·무인·원격 운용 개념을 적용한 관측 플랫폼을 구축하고, 이를 활용하여 천문시상 특성, 전리층 및 우주환경, GNSS 및 전파환경, 빙상 움직임, 태양 및 고층대기 관측 등 남극 내륙기지 입지 타당성 평가와 향후 연구 활용성 판단에 필수적인 핵심 관측 요소를 통합적으로 확보하고자 한다.

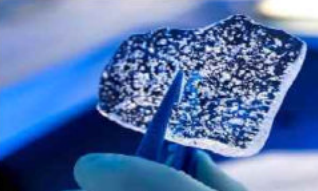
본 연구를 통해 확보되는 관측 자료와 운영 실증 결과는 남극내륙 연구 적합성 평가, 남극내륙기지 후보지 선정, 기지 설계 조건 도출, 운영·보급·에너지 자립 개념 검증 등 남극내륙 기지 건설을 위한 기술적·과학적 근거 자료로 활용될 것이다. 나아가 남극내륙에서의 다학제 융합연구 수행 역량을 선진국 수준으로 도약시키기 위한 핵심 기초 자료를 제공하는 것을 궁극적인 목표로 한다.



[남극 인프라 현황 및 내륙기지 후보지]

□ [기술선도] 3대 거점 기반, 미개척 분야 세계 최고수준 기술 개발

< 남극 내륙연구 3대 연구 거점 >

▶ 3대 연구거점 기반 미답연구 기술수준 혁신을 통한 내륙 연구 'BIG 7 국가 도약'		
심부빙하	블루아이스	천문·우주 관측
세계 최고 수준 시추 기술 개발 (3,000m, 100만년 기후 복원)	과거(30만년) 온실기체 농도 복원	우주환경-기후변화 관계 규명 (오로라 관측 세계최고 수준 달성)
		
1,000m 깊이 이상의 빙하로, 과거 기후를 구성하는 물질을 추출하여 분석·복원	빙하가 이동하면서 산맥과 같은 지형학적인 장애물을 만나 하부의 빙하가 표면으로 솟아오르면서 생성	남극내륙은 고도가 높고(평균 3,000m) 대기 수분과 오염 물질, 관측방해요소가 적은 최적의 천문·우주 관측지역
⇒ 과거 기후변화와 미래 변화 예측 비교·분석을 통한 예측 정확도 제고	⇒ 대규모 시추작업 없이도 과거 온실가스 농도를 복원 가능	⇒ 천문·우주환경 관측역량 도약과 극지기술·우주산업 융합 기반 마련

[제4차 남극연구활동 진흥 기본계획 상의 천문·우주관측 거점]

2. 연구개발의 필요성

○ 남극내륙 연구환경의 전략적 중요성 증대

남극내륙 고원은 극도로 건조하고 안정된 대기 조건, 얇은 대기 경계층, 낮은 대기 난류 특성을 바탕으로 지구상에서 가장 우수한 천문·우주환경 관측 여건을 제공하는 지역으로 평가되고 있다. 이러한 환경은 장기간 태양 관측, THz 관측을 통한 원시별 및 성간물질 연구, 미시중력렌즈 기반 외계행성 관측, 전리층 및 우주환경 변화 분석 등 차세대 천문·우주과학 연구 수행에 최적의 조건을 제공한다. 이에 따라 남극내륙은 단순한 극지 연구 대상 지역을 넘어, 미래 천문·우주과학 분야의 핵심 인프라 입지로 주목받고 있다.

이와 같은 전략적 중요성에 따라 미국, 유럽, 중국, 일본 등 주요 극지 선진국들은 남극내륙 기지를 중심으로 천문관측, 심부빙하 시추, 극한지 공학기술 실증 등 다학제 융합연구를 체계적으로 확대하고 있으며, 남극내륙 기지는 국가 과학기술 경쟁력을 좌우하는 핵심 전략 자산으로 자리매김하고 있다.

○ 국가 위상에 부합하는 남극내륙 연구 인프라 구축 필요

대한민국은 세종과학기지와 장보고과학기지를 기반으로 남극 연안 및 해양 연구 역량을 지속적으로 확대해 왔으며, 최근에는 K-루트 확보와 내륙 진출을 통해 남극내륙 연구로의 단계적 확장을 추진하고 있다. 특히 「제4차 남극연구활동진흥 기본계획(2022~2026)」과 「제1차 극지활동 진흥 기본계획(2023~2027)」에서는 세계 6번째 남극내륙기지 건설을 중장기 국가 목표로 명시하고 있다.

그러나 남극내륙기지 건설은 대규모 예산 투입과 장기간의 국내외 협력이 수반되는 국가 전략 사업으로, 실측 자료에 기반한 입지 타당성 검증과 단계적 기술 실증이 선행되지 않을 경우 예비타당성 조사 단계에서 구조적인 한계를 가질 수 밖에 없다. 따라서 본격적인 내륙기지

건설 이전에 소규모·이동식·무인 관측 인프라를 활용한 선행 실증 연구가 반드시 요구된다.

또한 남극 내륙은 지자기 극에 위치하여 전리층 교란과 오로라 활동이 빈번하게 발생하는 지역으로, 이는 GNSS 신호 감쇄 및 위치 정확도 저하를 유발할 수 있다. 향후 남극 과학기지 운영, 극지 항법, 위성 기반 관측 임무의 안정적인 수행을 위해서는 남극내륙 환경에서의 GNSS 전파 특성에 대한 실측 기반 분석이 필수적이다.

한편, 남극내륙은 상시 인력 투입과 에너지 공급이 극도로 제한되는 지역으로, 기존 유인 관측소 중심의 운영 방식에는 근본적인 한계가 존재한다. 이에 따라 무인·원격 운용이 가능하고 에너지 자립형으로 설계된 관측 인프라에 대한 기술 검증이 선행되어야 한다. 본 연구는 이러한 요구에 대응하여 모듈형 무인 관측소 개념을 도입하고, 남극내륙 적용 가능성을 단계적으로 검증한다는 점에서 높은 필요성을 갖는다.

○ 실측 기반 자료 부족과 단계적 검증의 필요성

현재 남극내륙 지역에 대한 국내 연구활동은 일부 탐사 및 제한적인 단기 관측에 국한되어 있으며, 장기간 연속 관측을 통한 천문·우주환경 특성 자료는 충분히 확보되지 못한 상황이다. 특히 천문시상 특성, 전리층 변동성, GNSS 전파환경, 빙상 이동 특성 등은 내륙기지 후보지 선정과 연구 활용성 판단에 필수적인 요소임에도 불구하고, 실측 기반 자료 부족으로 인해 정량적 평가에 한계가 존재한다.

이에 따라 본 연구에서 개발·구축하는 이동식·무인형 천문·우주환경 관측모듈은 남극내륙 환경에서의 장기 자율운용 가능성을 검증함과 동시에, 내륙기지 설계·운영·보급·에너지 자립 개념을 단계적으로 검증할 수 있는 핵심 실증 수단으로 기능한다.

○ 남극내륙기지 건설 수립을 위한 핵심 기초자료 확보

본 연구를 통해 확보되는 관측자료와 운영 실증 결과는 남극내륙 기지 입지에 대한 적합성 평가, 연구분야별 활용 가능성 분석, 기지 규모 및 모듈화 설계 조건 도출, 운영·보급·환경영향 최소화 전략 수립 등 남극내륙 기지 건설 수립을 위한 필수 기초자료로 활용될 것이다.

나아가, 이는 극지연구소 남극내륙기지 타당성 조사 대응을 위한 과학적·기술적 근거 자료로서의 역할을 수행함과 동시에, 향후 천문·우주환경·극한지 공학 분야의 국내외 공동연구 확대와 대한민국 극지연구 위상 제고에 기여할 것으로 기대된다.

3. 연구개발의 범위

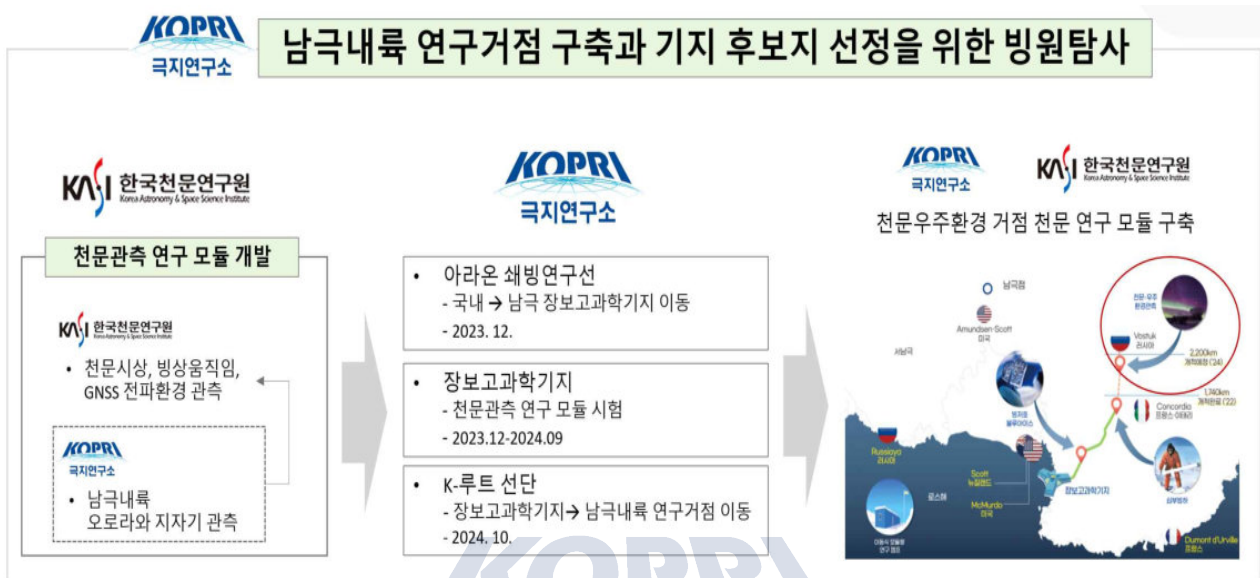
본 연구는 남극내륙 천문·우주환경 연구거점 구축을 위한 사전 단계 연구로서, 남극내륙 고원 지역의 극한 환경에서 적용 가능한 관측 인프라의 기술적·과학적 타당성을 검증하는 것을 목적으로 하며, 다음의 연구범위를 포함한다.

첫째, 남극내륙 환경 적용을 고려한 이동식·무인형 천문·우주환경 관측모듈의 설계 및 제작을 수행한다. 이를 위해 관측모듈의 구조 설계, 단열 및 내환경 설계, 태양광 및 풍력을 결합한 에너지 자립형 전력 공급 시스템을 설계·구축함으로써 남극내륙 극한 환경에서의 장기 무인 운용 가능성을 검증한다.

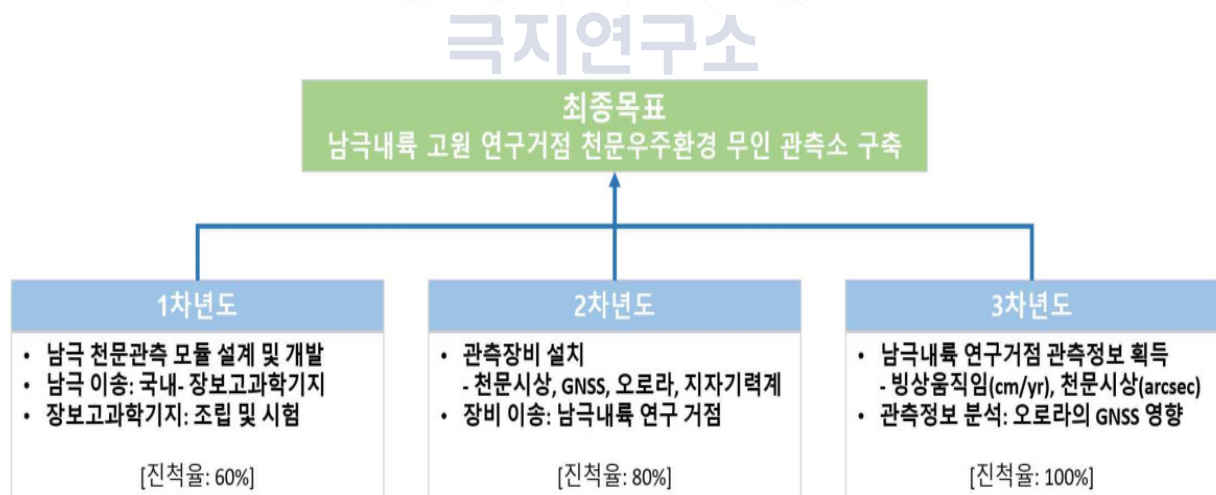
둘째, 천문시상 관측 시스템, 태양 영상분광 관측 시스템, GNSS 상시관측 시스템을 구축하여 남극내륙의 천문 관측 환경과 전파 환경을 실측한다. 주야간 천문시상 관측을 통한 대기 안정도 평가, 태양 영상 및 분광 관측을 통한 태양활동 및 고층대기 변동성 분석, GNSS 상시관측

자료수집 및 처리 전략 수립을 통해 남극내륙 환경 특성을 정량적으로 분석할 수 있는 기초 관측 자료를 확보한다.

셋째, 본 연구를 통해 확보된 관측 결과와 운영 실증 성과를 종합하여 남극내륙 천문·우주 환경 연구거점 구축 가능성을 평가하고, 향후 내륙기지 후보지 선정과 기초 설계에 활용 가능한 기초 자료를 제공한다. 아울러 장기 관측소 구축, 다중 관측 모듈 확장, 국제 공동연구 수행으로의 단계적 확장이 가능한 연구 기반을 마련한다.



[수행체계에 따른 연구개발 범위]



[2023년 당시 연차별 연구개발 범위]

- 장보고과학기지 상황과 기관의 일정 조정으로 남극내륙 고원(2003)에서 남극내륙 진출로 베이스캠프(2024.11)로 설치 및 관측지 등의 변경되어 일부 연구내용은 변경됨
- 남극내륙 고원 관측장비 설치 및 실험은 장보고과학기지 및 남극내륙 진출로 베이스캠프에서 수행
- 당초 남극내륙 고원 설치 및 실험은 추후 관련 과제 또는 협력으로 추진 예정

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1. 국내 기술개발 현황

○ 남극 관측 인프라 및 운용 환경

우리나라는 세종과학기지와 장보고과학기지의 장기 운영 경험을 바탕으로 극지 환경에서의 관측 수행 능력과 함께, 관측 장비의 반입·설치·운용에 대한 실질적인 기술과 노하우를 지속적으로 축적해 왔다. 특히 쇄빙 연구선 아라온호의 안정적 운용을 통해 남극 해안 접근, 대형 관측 장비 및 컨테이너 모듈 수송, 현장 지원 체계가 체계적으로 구축되었으며, 이를 기반으로 해안 기지를 중심으로 한 극지 관측 인프라는 비교적 성숙 단계에 도달한 것으로 평가된다.

반면, 남극내륙 고원 지역은 해안 기지와는 근본적으로 상이한 물류 및 운용 환경을 가진다. 내륙 지역은 아라온호를 통한 직접 접근이 불가능하며, 장보고과학기지를 거점으로 K-루트(Korea Route)와 같은 육상 진출로를 따라 썰매 선단과 특수 설상 장비를 이용하여 단계적으로 접근해야 한다. 이 과정은 이동 기간이 장기화되고 기상 조건과 빙상 상태에 크게 의존하며, 연중 접근 가능한 기간이 극히 제한된다는 구조적 제약을 가진다. 또한 내륙 수송 과정에서 장비 중량과 부피에 대한 제약이 크기 때문에, 기존 해안 기지 중심의 대형·고정형 관측 인프라는 그대로 적용하기 어렵다.

또한 남극내륙 고원은 상시 전력 공급망과 통신 인프라가 구축되지 않는 지역으로, 해안 기지에서 활용 가능한 디젤 발전 기반의 전력 시스템이나 유·무선 통신을 포함한 상시 지원 체계를 그대로 적용하기 어렵다. 여기에 극야 기간의 장기 지속과 영하 수십 도에 이르는 극저온 환경은 유인 상주형 인프라의 구축과 유지에 큰 제약 요소로 작용한다. 이러한 조건에서는 인력 상주를 전제로 한 관측소 운영 방식이 안전성, 비용 효율성, 지속성 측면에서 모두 한계가 명확하다.

이와 같은 이유로 남극내륙 고원에서는 무인·원격 운용이 가능하고, 외부 보급에 대한 의존도를 최소화한 에너지 자립형 관측 플랫폼 기술이 핵심 요구사항으로 제시된다. 즉, 제한된 내륙 진출 기회와 장기화된 보급 주기, 현장 인력 투입 최소화라는 조건하에서 관측 장비, 전력 시스템, 제어·운영 체계가 하나의 통합된 무인 시스템으로 설계·운용될 필요가 있다. 아울러 관측 장비의 모듈화와 표준화를 통해 수송 효율성을 높이고, 향후 다수의 관측 모듈을 확장 가능한 구조를 확보하는 것이 중요하다.

본 과제가 지향하는 이동식·모듈형 무인 관측소 개념은 이러한 아라온호 기반 해안 접근과 K-루트 기반 내륙 진출이라는 우리나라 남극 운용 여건을 종합적으로 고려한 현실적 기술 대안이다. 특히 소형·경량화된 관측 모듈과 에너지 자립형 전력 시스템, 원격 감시 및 제어 기술을 결합함으로써 남극내륙 환경에서의 단계적 기술 검증이 가능하다는 점에서, 향후 남극내륙 연구거점 구축을 위한 핵심 선행 단계 기술로서 중요한 의미를 가진다. 이는 국내 극지 연구 인프라를 해안 중심에서 내륙으로 확장하기 위한 실질적인 기술적 교두보 역할을 수행할 것으로 기대된다.



[2021년 극지연구소 남극내륙 고원 진출로(K-루트, 총 연장 약1740km) 개척 모습]

○ 무인모듈형 관측 플랫폼 기술

국내에서는 최근 들어 남극 환경에서의 장기 무인 운용을 목표로 하는 모듈형 관측소 개념이 점진적으로 도입·실증되는 단계에 있다. 극지연구소는 남극 현장에서의 인력 투입 최소화 및 관측 연속성 확보를 목적으로 KAGO (KOPRI Autonomous Geophysical Observatory)와 같은 무인 관측모듈을 설치·운영한 바 있으며, 이를 통해 극지 환경에서의 무인 관측 가능성과 원격 데이터 수집 체계에 대한 기초적인 운용 경험을 축적하였다. KAGO는 지구물리 및 우주환경 관측을 중심으로 한 고정형 무인 관측소로서, 극저온·강풍·적설 등 극한 환경 조건에서도 센서 운용과 자료 확보가 가능함을 실증한 국내 대표적인 선행 사례로 평가된다.

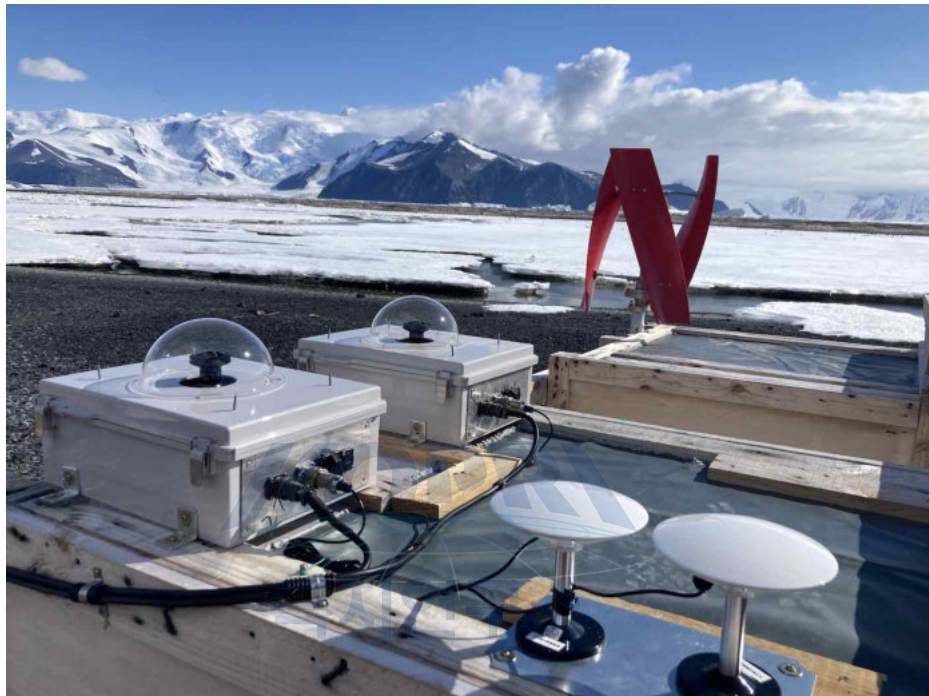
이러한 KAGO 운영 경험은 극지 환경에서의 센서 신뢰성 확보, 및 제한된 현장 접근 조건에서의 유지·관리 전략 수립 측면에서 중요한 기술적 기반을 제공하였다. 특히 장보고과학기지 인근 펭귄 연구지인 Cape Hallett와 같이 인력 상주가 어려운 환경에서 관측 연속성을 유지할 수 있다는 점은 향후 남극내륙 연구 인프라 확장을 위한 필수 전제 조건으로서의 의미를 가진다.

다만 기존 KAGO와 같은 무인 관측모듈은 주로 특정 관측 목적에 최적화된 고정형 구조를 기반으로 하며, 남극내륙 고원과 같이 접근성과 보급이 극도로 제한된 환경에서의 이동성, 확장성, 에너지 자립성 측면에서는 추가적인 기술 검증이 필요한 단계로 남아 있다. 특히 내륙 진출을 전제로 할 경우, 관측소는 육상 수송 여건에 부합하는 규격과 중량을 가져야 하며, 설치 이후 장기간 외부 개입 없이 안정적으로 운용될 수 있는 통합 설계가 요구된다.

본 과제에서는 이러한 국내 기술 축적 흐름을 바탕으로 이동성, 자립성, 그리고 확장성을 강화한 모듈형 무인 관측소 개념을 실제 남극 환경에 적용하여 실증하였다. 구체적으로 10ft 컨테이너 기반의 이동식 모듈을 채택하여 내륙 수송 가능성을 확보하고 고단열 구조 설계와 함께 태양광과 풍력 기반 전력 공급 시스템 및 배터리 저장 장치를 통합한 에너지

자립형 무인 관측모듈을 제작·구축하였다. 이를 통해 상시 전력 및 통신 인프라가 없는 환경에서도 관측 장비의 지속 운용이 가능함을 검증하고 실제 현장 운용 시험을 통해 극지 환경 적용성과 시스템 안정성을 평가하였다.

이와 같이 본 과제는 기존 KAGO와 같은 국내 무인 관측소 운영 경험을 계승하면서도 남극내륙 고원 적용을 염두에 둔 이동식·모듈형·에너지 자립형 관측 플랫폼으로 개념을 확장하였다는 점에서 차별성을 가진다. 이는 국내 극지 관측 기술이 단순 무인화 단계를 넘어 내륙 고원 장기 관측과 연구거점 구축을 지향하는 실증 단계로 진입했음을 보여주는 사례로 평가될 수 있다.



[극지연구소 무인관측모듈(KAGO)이 남극 Cape Hallett 연구캠프에 설치된 모습]

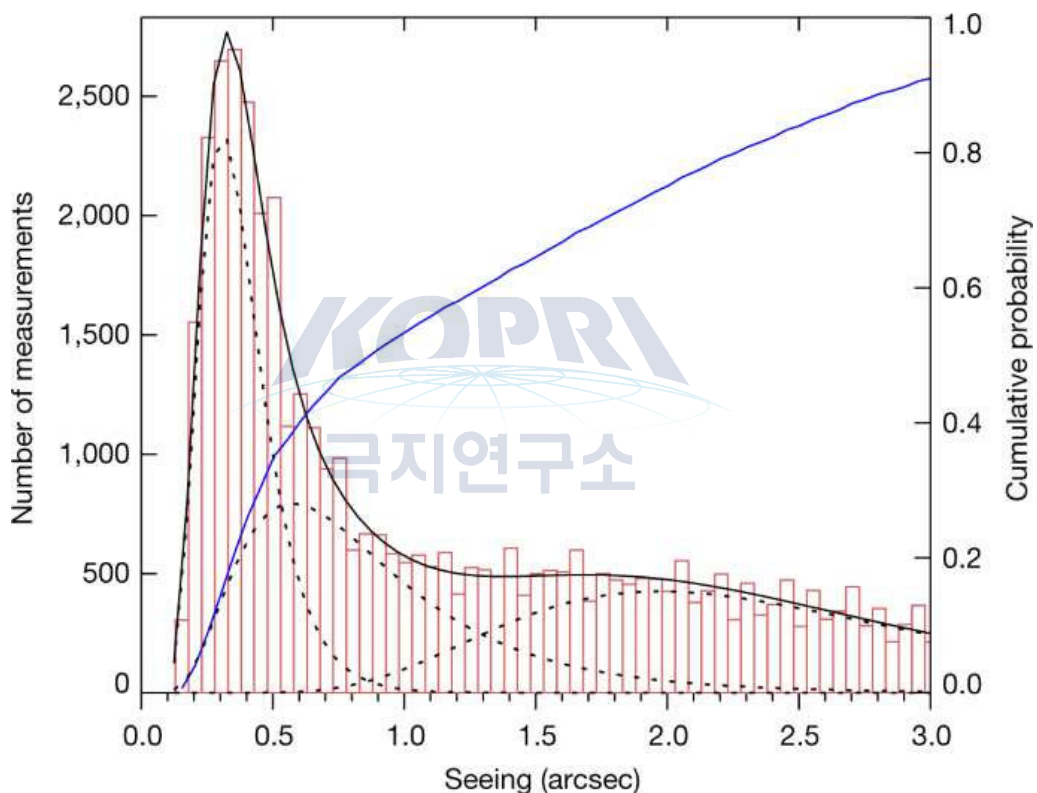


[극지연구소 남극내륙 우주기상 무인 관측소 전경]

○ 천문시상 관측분석 기술

국내에서는 현재까지 남극 환경에서 천문시상을 직접 관측·산출한 사례가 공식적으로 보고된 바 없으며, 주야를 포함한 연속 천문시상 관측 체계가 구축·운영된 사례 또한 확인되지 않았다. 특히 극야와 백야가 반복되는 극지 환경 특성을 고려한 자동화된 기상 관측 기술과 무인원격 운영을 전제로 한 장기 관측 시스템은 국내 기술 축적이 매우 제한적인 상황이다.

이에 반해 해외에서는 남극내륙 고원 지역인 Dome-C와 Dome-A를 중심으로 남극 고원의 대기 안정성과 우수한 천문시상 조건을 실측 자료로 규명한 연구들이 수행되어 왔다. 이들 연구는 DIMM (Differential Image Motion Monitors), MASS (Multi-Aperture Scintillation Sensor)와 같은 전문 기상 측정 장비를 활용하여 남극 고원의 얇은 경계층과 낮은 대기 난류 특성을 분석하였으며, 그 결과는 ‘Nature’와 같은 국제 최고 수준 학술지에 게재되면서 남극 고원이 세계 최고 수준의 지상 천문 관측 후보지임을 학술적으로 입증하였다.



[Dome-A에서 측정한 천문시상 결과, (출처: Nature 2020)]

그러나 이러한 해외 선행 연구들은 주로 단기 또는 집중 캠페인 형태로 수행되었으며, 특정 연구 장비를 활용한 전문 관측팀 중심의 현장 실험적 접근이 대부분이었다. 또한 관측 대상은 야간 별 영상을 기반으로 한 기상 추정에 국한되어 있어, 극지 환경에서의 주야 연속 관측 체계나 낮 기상 관측, 그리고 이를 장기간 무인·원격으로 운영하기 위한 시스템적 접근은 상대적으로 제한적이다. 특히 장기 무인 운용을 고려한 전력 관리, 열 안정성, 자동 데이터 품질 관리 등 운용 기술에 대한 검증 사례는 충분하지 않다.

본 과제에서는 이러한 해외 연구 성과를 학술적 기준점으로 삼되, 남극 환경에서의 지속적·자동화된 주야 천문시상 관측 체계 구축이라는 관점에서 차별화된 접근을 시도하였다. 이를 위해 다음과 같은 핵심 사항을 추진하였다.

- 낮 시간 태양 영상 기반의 천문시상 산출 기법 적용
- 밤 기상 관측을 위한 저전력·극저온 대응형 망원경 설계제작
- 국내에서 제어 가능한 원격 관측 운용 체계 구축

특히 낮 기상 관측은 일반적인 야간 별 기상 추정과 달리, 태양 영상의 가장자리(limb) 변형 등 영상 특성을 활용해야 대기 난류 효과를 추정하는 관측분석 방법이다. 본 과제에서는 이러한 태양 영상 기반 기상 산출 기법을 극지 환경에서 적용함으로써, 기존 야간 중심 기상 관측의 한계를 보완하고 백야 기간을 포함한 연중 연속 기상 평가 가능성을 확보하였다.

이와 같이 본 과제는 국내 최초로 남극 환경에서 주야 연속 천문시상 관측을 목표로 한 무인원격 운용 체계를 실제로 구축·운용하였다는 점에서 차별성을 가진다. 이는 남극내륙 고원의 천문 관측 잠재력에 대한 보다 현실적인 평가를 가능하게 할 뿐만 아니라, 향후 장기 천문 관측소 구축 시 요구되는 관측·운용 기준과 시스템 설계 방향을 제시하는 데 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

○ GNSS 상시관측 및 전리층 분석 기술

국내 GNSS 기술은 그동안 중·저위도 지역을 중심으로 측지 및 항법 응용 역량이 축적되어 왔으나, 남극과 같은 고위도 극한 환경에서는 전파 전파경로(radio propagation path)와 전리층 구조가 중·저위도와 현저히 상이하여 기존 자료처리 전략에는 구조적 한계가 존재한다. 특히 극지 환경에서는 다음과 같은 특성이 복합적으로 작용하여 GNSS 신호 품질 저하를 유발한다.

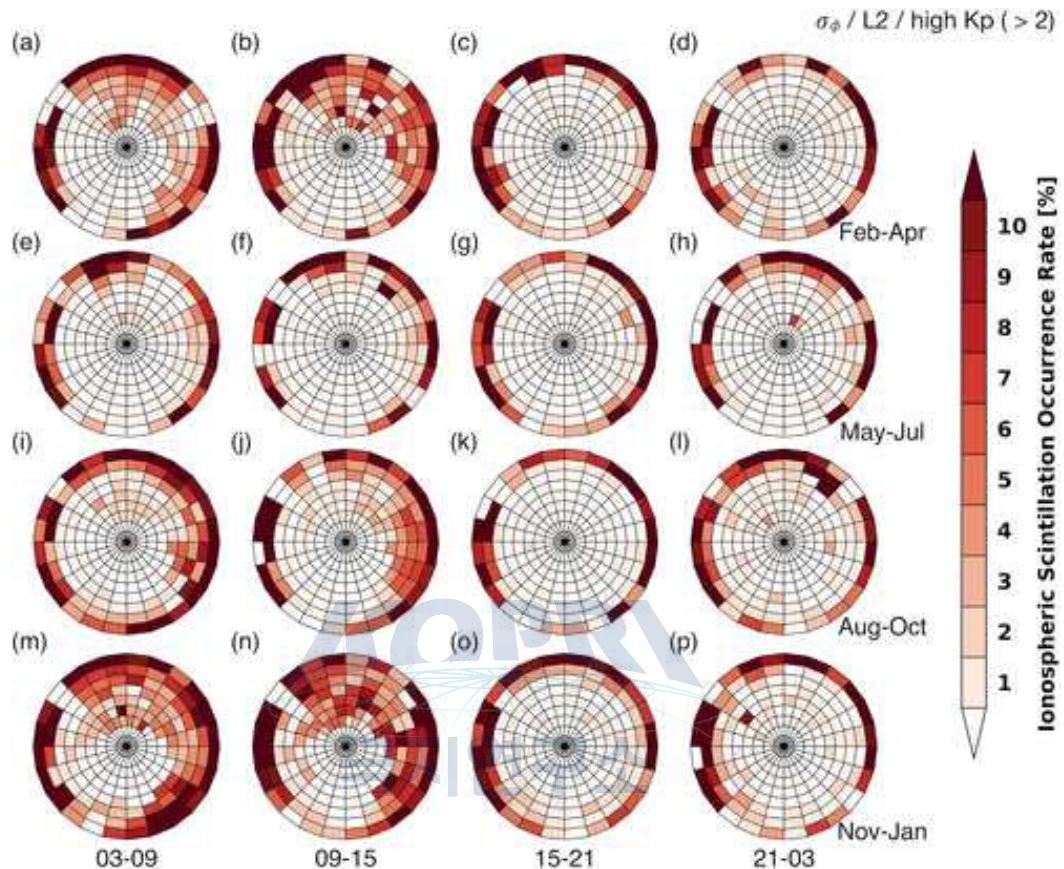
- 낮은 위성 고도에 따른 긴 전파 경로(slan path)
- 빙설 표면 반사에 따른 다중경로(multipath) 영향
- 오로라 및 전리층 불규칙 구조에 따른 GNSS 신호 위상·진폭 왜곡과 신호 추적 손실

이러한 특성으로 인해 극지 환경에서는 일반적인 GNSS 성능 평가 지표만으로는 관측 환경을 충분히 설명하기 어렵고, 전리층·자기권 환경과 연계된 종합적인 관측·분석 체계 구축이 필수적으로 요구된다.

이와 관련하여 국내에서는 국토지리정보원이 장보고과학기지에 설치한 GNSS 상시관측소 자료를 활용하여, 한국천문연구원 남극 고위도 전리층 신틸레이션 특성에 대한 체계적인 연구를 수행한 바 있다. 해당 연구에서는 GNSS 신호의 위상 및 진폭 신틸레이션 지수(σ_ϕ , S_4)를 약 2년간 통계적으로 분석하여, 전리층 신틸레이션이 계절 변화, 지자기 활동 수준, 자기지역시(magnetic local time, MLT), 신호 주파수에 강하게 의존함을 정량적으로 규명하였다. 특히 극관 패치(polar patch), 극관 경계(cusp), 오로라 타원대(auroral oval), 그리고 소규모 자기장 정렬 전류(field-aligned current, FAC)가 GNSS 신호 품질 저하의 주요 물리적 원인임을 제시함으로써, 극지 GNSS 관측 연구의 기초 자료를 제공하였다.

그러나 이러한 기존 연구는 장보고과학기지라는 단일 해안 기지 기반의 GNSS 상시관측 자료 분석에 초점을 두고 있어, 남극내륙 고원과 같이 접근성·전력·통신 인프라가 극도로 제한된 환경에서의 GNSS 관측 인프라 구축 및 장기 무인 운용 가능성에 대한 실증적 검증에는 한계가 존재한다. 또한 관측 대상 역시 기존 상시관측소 자료에 국한되어, 내륙 고원 환경으로 관측 범위를 확장하거나 공간적 분포 특성을 분석하는 데에는 제약이 있었다.

본 과제에서는 이러한 국내 선행 연구 성과를 기반으로 남극내륙 고원 환경에 적용 가능한 GNSS 상시관측 체계 구축과 자료분석 전략을 수립하는 것을 목표로 하였다. 이는 향후 남극내륙기지 구축 및 극지 항법·위치기반 서비스 안정성 확보를 위한 핵심 기초 자료를 제공할 것으로 기대된다. 나아가 극지 우주환경 변화와 GNSS 성능 간의 연계 분석, 그리고 극지 환경에 특화된 GNSS 성능 평가 및 오차 저감 기술 개발로의 확장 가능성을 제시한다.



[장보고과학기지(2017-2018) GNSS 신틸레이션 발생 분포(출처: Hong et al., JGR, 2020)]

2. 국외 기술개발 현황

○ 무인모듈형 관측 플랫폼 기술

국외에서는 남극내륙 고원과 같이 연중 인력 상주가 사실상 불가능한 극한 환경을 대상으로, 전력·열관리·통신·제어 기능을 통합한 자율형 관측 플랫폼이 비교적 이른 시기부터 체계적으로 개발·실증되어 왔다. 남극 고원은 극저온, 극진조, 장기간 극야, 보급 주기의 극단적 제한이라는 특성을 동시에 지니고 있어, 기존 유인 관측소나 단순 자동 관측 장비로는 안정적인 장기 관측이 어렵다. 이에 따라 국외 선진 극지 연구기관들은 관측 장비 자체의 성능 향상뿐만 아니라, 무인 장기 운용을 전제로 한 시스템 공학적 접근을 핵심 전략으로 채택해 왔다.

호주 뉴사우스웨일즈대학교(UNSW)를 중심으로 개발된 PLATO(PLATeau Observatory) 플랫폼이 있다. PLATO는 남극 Dome A 고원에 설치되어 연중 무인 운용을 목표로 설계된 자립형 관측 플랫폼으로, 태양광 및 보조 전력원을 활용한 자체 전력 생산, 극저온 환경을 고려한 열관리 시스템, 위성통신 기반의 원격제어 및 데이터 전송 기능을 통합한 구조를 갖는다.

특히 PLATO는 단일 관측 장비가 아닌, 다수의 천문·우주환경 관측 장비를 하나의 공통 플랫폼 위에 탑재·운용할 수 있도록 설계되어, 남극내륙 고원에서의 장기 안정 운용 가능성을 실증한 최초의 사례로 평가된다(Burton et al., 2015).

이후 개발된 PLATO-A 등 후속 플랫폼에서는 이러한 개념이 한 단계 더 확장되어, 완전 로봇 기반 자율 운용을 목표로 설정하였다. 관측 장비의 재부팅, 상태 진단, 전력 분배 최적화, 통신 장애 발생 시 데이터 저장 및 지연 전송 전략 등 고도화된 자율 운영 기능이 단계적으로 추가되었으며, 이는 남극내륙 고원에서의 관측 플랫폼이 단순한 무인 관측소를 넘어 자율 시스템으로 진화하고 있음을 보여주는 사례로 평가된다.

이러한 국외 기술 동향을 종합하면, 남극내륙 무인 관측 플랫폼은 다음과 같은 공통된 방향으로 발전하고 있음을 확인할 수 있다. 첫째, 연 1회 또는 그 이하로 제한되는 보급 주기를 전제로 하여, 현장 유지보수 없이 장기간 운용 가능한 고신뢰성 설계가 핵심 요구 사항으로 자리 잡고 있다. 둘째, 극저온·강풍·저습 환경이라는 복합적 환경 스트레스를 고려하여, 전력·열·구조제어 요소를 개별적으로 설계하는 것이 아니라 통합 시스템 관점에서 최적화하는 접근이 일반화되고 있다. 셋째, 위성통신 지연 및 단절 가능성을 상수로 두고, 원격 제어 실패 상황에서도 시스템이 자율적으로 안전 모드로 전환·복구될 수 있는 운용 복원력이 강조되고 있다.

이러한 국외 사례들은 남극내륙 고원 적용을 지향하는 국내 관측모듈 개발에 있어 중요한 비교 기준과 기술적 지향점을 제공한다. 특히 본 연구에서 개발·실증한 이동식 무인형 천문·우주환경 관측모듈은 PLATO 계열 플랫폼과 유사하게 에너지 자립, 무인 원격 운용, 극한 환경 대응을 핵심 설계 개념으로 채택하였다는 점에서 국제적 기술 흐름과의 정합성을 가진다. 동시에 컨테이너 기반 이동식 구조를 채택함으로써 국내 남극내륙 진출 여건(K-루트 기반 수송, 단계적 기지 구축)에 보다 현실적으로 대응할 수 있는 차별성을 갖는다.



[중국 곤륜기지에 설치된 PLATO-A Dome A 로봇 관측소]

○ 천문관측(시상, 광학, 적외선) 및 사이트 테스트 기술

국외에서는 남극 고원을 세계 최고 수준의 지상 관측 후보지로 정량화하기 위해 Dome C (Concordia 기지) 및 Dome A(Kulun Station, 곤륜기지) 등에서 천문시상, 대기 난류, 적외선 배경복사에 대한 관측 기반의 사이트 테스트가 수행되어 왔다. Dome C에서는 DIMM 기반의 기상 측정 등 사이트 테스트 결과가 축적되었고, 남극 고원의 대기 특성을 실측 자료로 분석한 연구들이 보고되어 왔다.

또한 중국은 Dome A에서는 AST3 (Antarctic Survey Telescopes)와 같은 소구경 광학 관측 장비를 전개하여 장기 관측을 수행해 왔으며, 이는 극저온 환경에서의 광학계·구동부·원격 제어·열설계 최적화 등 남극형 망원경 시스템 공학의 중요한 사례로 축적되고 있다. 최근에는 곤륜 기지에서의 근적외선 관측 장비 확장과 관련한 발표보도가 있으며, 남극 고원의 적외선 파장 영역 관측 잠재력 활용을 위한 장비 개발이 이어지고 있다.

정리하면 국외는 (1) Dome C 중심의 대기시상 정량화(천문 환경 시험), (2) Dome A 중심의 자율 플랫폼 망원경 전개(장기 관측 실증)로 기술 축적이 진행되어 왔고, 국내는 이를 참조하여 무인·원격·연속관측 체계의 현장 실증을 강화하는 전략이 요구된다.



[Dome A 천문관측 사이트, 출처: Chinese Academy of Science 홈페이지]

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1. 무인모듈형 관측 플랫폼 개발

○ 배경

남극내륙 고원은 낮은 수증기량과 우수한 대기 안정성, 장기간 지속되는 극야 환경으로 인해 우주망원경에 필적하는 세계 최고 수준의 지상 천문 관측지로 평가받고 있다. 이러한 환경은 고해상도 천문 관측뿐만 아니라 우주환경, 전리층, 태양 활동 및 극지 전파환경 연구를 동시에 수행할 수 있는 전략적 연구 입지로서 국제적인 주목을 받고 있다.

그러나 남극내륙 지역은 해안 기지와 달리 접근성이 극히 제한되고, 장기간 보급이 어려우며, 인력 상주에 따른 안전 위험이 매우 크다는 한계가 존재한다. 이로 기존의 유인 관측소 중심의 관측 장비 설치 및 장기 운영 방식은 남극내륙 고원 환경에 적용하는 데 기술적인 제약이 존재해 왔다.

이에 본 연구에서는 남극내륙 고원의 극한 환경에서도 장기간 안정적으로 운용 가능한 천문 및 우주기상 관측을 지원하기 위해, 고신뢰성 자율 운용이 가능한 에너지 자립형 이동식 관측 플랫폼을 개발하였다.

본 연구에서 개발한 관측 플랫폼은 남극내륙 환경에서 장기간 운용이 가능하도록 설계된 모듈형 천문·우주환경 관측 플랫폼으로, 극지연구소 내륙 탐사 선단의 수송 규격에 적합한 10ft 표준 ISO 컨테이너 기반 이동식 모듈로 제작되었다. 플랫폼은 극저온 강풍, 백야·극야 조건에서도 안정적인 운용이 가능하도록 단열, 전력, 구조 설계를 종합적으로 최적화하였다.

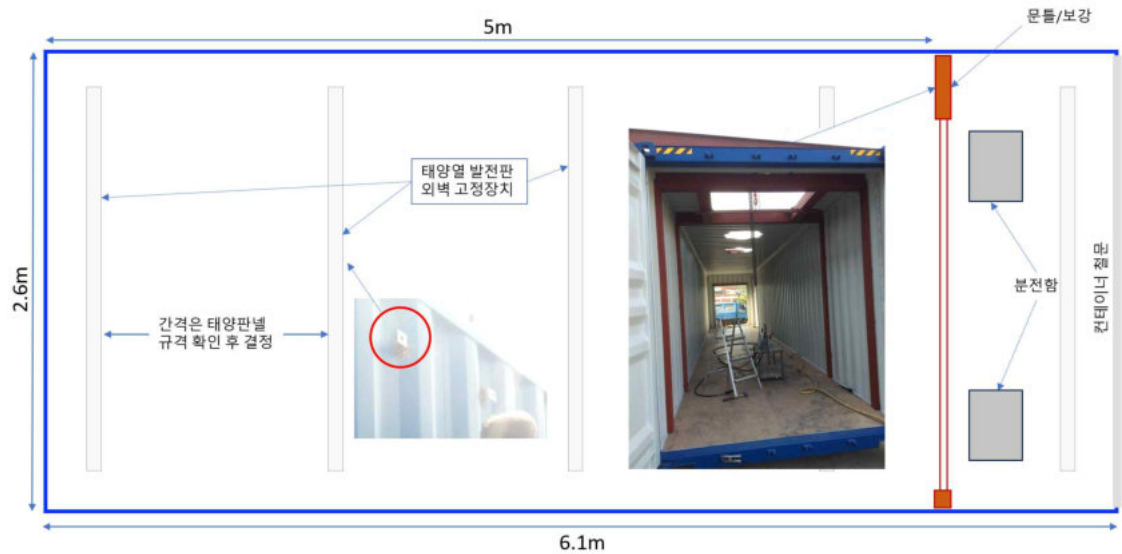
○ 관측 모듈 사양 및 구조

이동식 관측 모듈은 남극내륙 육상 수송 여건과 무인 운용 요구사항을 동시에 충족하기 위해 컴팩트한 크기와 높은 구조적 강도를 갖춘 10피트 표준 ISO 컨테이너를 기반으로 제작되었다. 이러한 모듈형 설계는 제한된 수송 능력 하에서도 원격 남극내륙 지역으로의 효율적인 배치가 가능하며, 설치 이후에는 장기간 무인 운용이 가능하도록 하는 것을 목표로 한다.

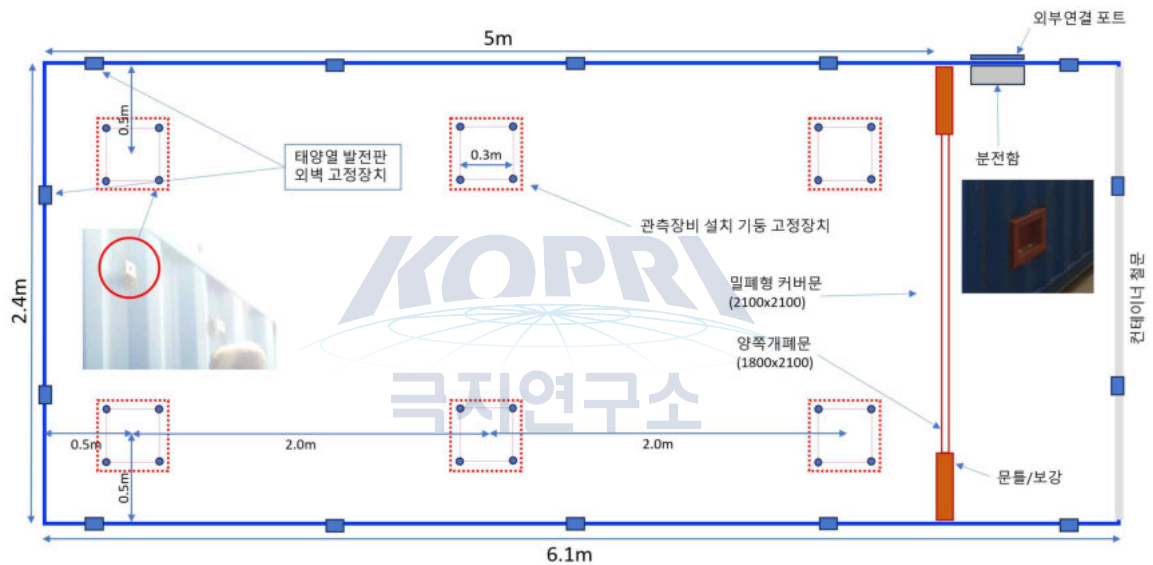
모듈은 100mm의 압출법 발포 폴리스티렌(XPS) 단열 패널을 적용하며, 극야 기간 외기 온도가 -60°C 이하의 환경에서도 내부 열 손실을 효과적으로 저감하도록 설계되었다. 내부 공간은 출입구 영역과 관측 장비가 설치되는 구역을 분리하는 내부 격벽을 설치하여 열적으로 독립된 관측실을 구성하여 관측 장비의 온도 안정성을 확보하였다. 또한 태양 복사열에 의한 빙상-모듈 간 열전도를 줄이기 위해 모듈 하부에는 목재 받침 구조를 적용하여 지면과의 직접 접촉을 최소화하도록 하여, 빙설 용해로 인한 구조물 안정성 저하를 방지하도록 하였다.

지붕 구조는 GNSS 안테나, 전천 오로라 카메라, 시상(seeing) 모니터 망원경 등 최대 6종의 소형 과학 관측 장비를 탑재할 수 있도록 마운트를 설계되었다. 내부 마감은 방수 합판을 사용하여 수분 유입을 최소화하였으며, 외부 표면은 약 $100\mu\text{m}$ 두께의 내후성 코팅으로 마감하였다. 모듈 외부에는 과학적 목적을 나타내는 맞춤형 엠블럼을 부착하고 상부 패널은 드론 등을 이용한 공중 식별이 가능하도록 시각적으로 최적화되었다.

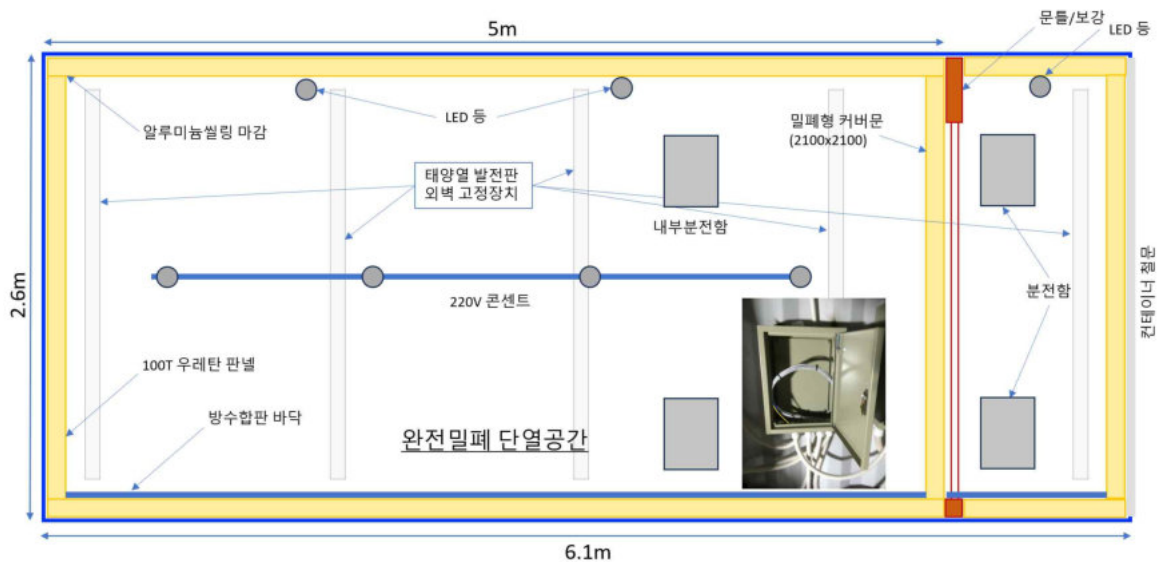
본 모듈은 2023년 10월 26일 아라온호에 적재되어 광양항에서 장보고과학기지로 이송되었으며, 이후 2024년에 해발 약 1,000m에 위치한 남극내륙 진출 베이스캠프에 설치되었다.



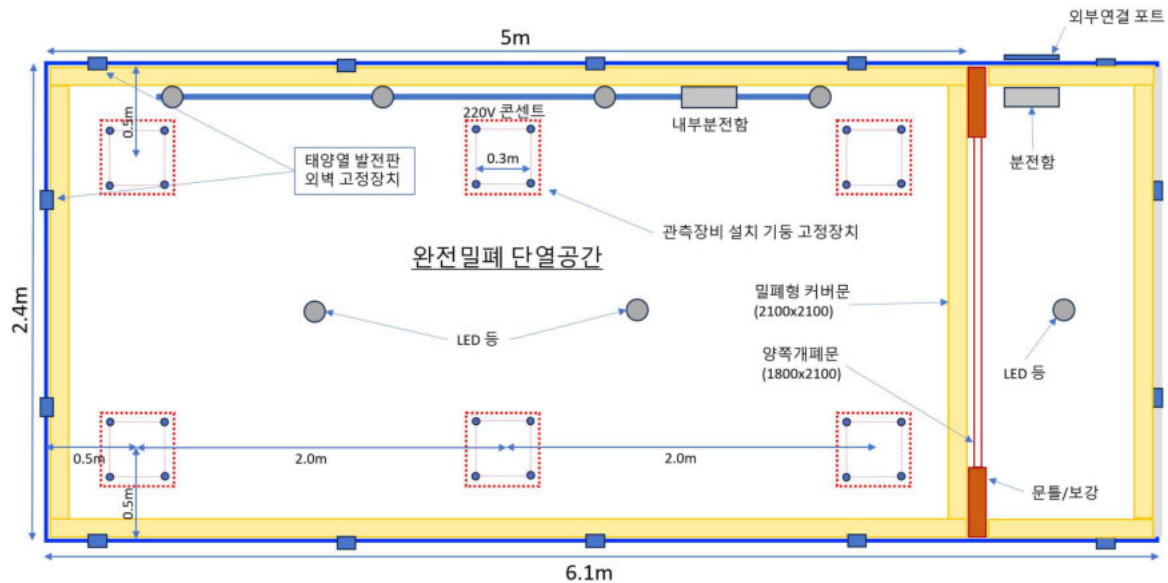
[천문우주환경 관측모듈 내부 보강 구조 모습 및 태양광 패널 부착 지지대]



[천문우주환경 관측모듈 지붕에 6개의 관측장비 설치하도록 설계]



[천문우주환경 관측모듈 벽면에 220V 콘센트 설치 설계]



[천문우주환경 관측모듈 비상시 외부연결 포트로 내연 발전기 전기 입력]



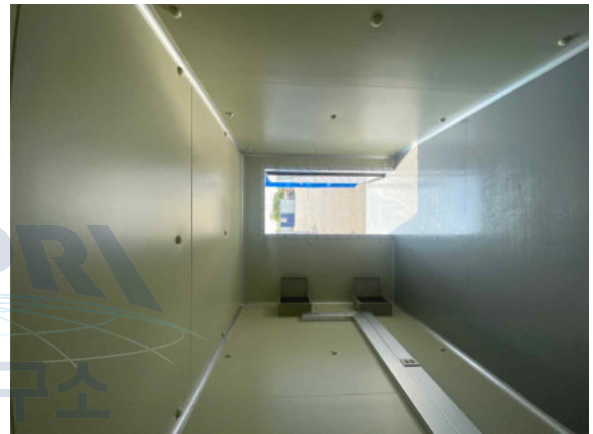
[남극에서 컨테이너 목적 디자인 도안 및 도색번호]



[남극에서 항공촬영에도 식별 가능한 디자인 도안 및 도색번호]



[천문우주환경 관측모듈 단열 및 구조보강 제작 모습]



[천문우주환경 관측모듈 격문 및 관측실 밀폐 모습]



[2023.10~2024.11 정보과학기지에 조립되어 운영된 천문우주환경 관측모듈]

○ 전력 시스템

이동식 관측 모듈의 전력 시스템은 남극내륙 고원의 극한 환경에서도 연중 지속적인 자율 운용이 가능하도록 설계되었다. 이를 위해 태양광-풍력-배터리를 결합한 하이브리드 전력 구조를 채택하였다. 모든 전력원은 중앙 전력 분배반을 통해 관리되며, 필요 시 보조 디젤 발전기를 연결할 수 있도록 외부 입력 전원 포트를 포함하고 있다. 본 전력 시스템은 저온 환경에서의 신뢰성, 효율성, 유지보수성을 핵심 설계 목표로 한다.

백야 기간에는 하루 약 24시간 태양 복사가 가능하므로, 주 전력원으로 결정질 실리콘 태양광 패널을 적용하였다. SCM 150 W 태양광 패널 6장을 모듈의 양 측면 벽에 각 3장씩 장착하였다. 남극내륙은 여름철이라고 하더라도 태양 고도가 낮기 때문에 벽면에 밀착 설치하였다. 하루 10시간의 유효 일사량을 가정할 경우 약 9.0 kWh의 전력 생산이 가능하다. 각 패널의 크기는 1,306mm×660mm×40 mm, 중량은 10.44 kg이다. 이는 GNSS, 오로라 카메라, 자력계 등 주요 관측 장비 운용에 충분한 수준이다.

최대 3개월에 이르는 극야 기간 동안의 완전한 일조량 부재를 보완하기 위해 풍력 발전 시스템을 병행 적용하였다. 남극 고원에서 지속적으로 발생하는 표면풍을 활용하기 위해 수직축 풍력 터빈(Lev150 Extreme 모델)을 관측 모듈 지붕에 설치하였다. 해당 터빈은 직경 270mm, 높이 918mm, 중량 13kg이며, 풍속 5-35m/s 범위에서 작동한다. 기준 풍속 8 m/s 에서 하루 10시간 운용 시 약 240 Wh의 전력을 생산할 수 있다.

태양광 및 풍력으로 생산된 전력은 AGM(Absorbent Glass Mat) 딥사이클 배터리(PVX 1040T 모델)로 구성된 2개의 배터리 모듈에 저장된다. 각 모듈은 12 V, 104 Ah 셀 6개를 병렬 구성하여 약 7.2 kWh의 저장 용량을 갖는다. 이중 모듈 구성은 운용 중복성과 장시간 자율 운용 능력을 동시에 확보하여, 에너지 입력이 제한적인 상황에서도 안정적인 전력 공급을 가능하게 한다.

극저온 환경에서 일반적으로 발생하는 배터리 성능 저하를 완화하기 위해 배터리 모듈은 단열된 관측 모듈 내부에 설치하였다. 별도의 능동 가열 장치 없이 구조물의 열용량과 밀폐된 단열 환경을 활용한 수동 열 조절 방식을 적용하였다. 이를 통해 추가적인 에너지 소비 없이도 배터리 효율과 수명을 유지할 수 있도록 설계하였다.

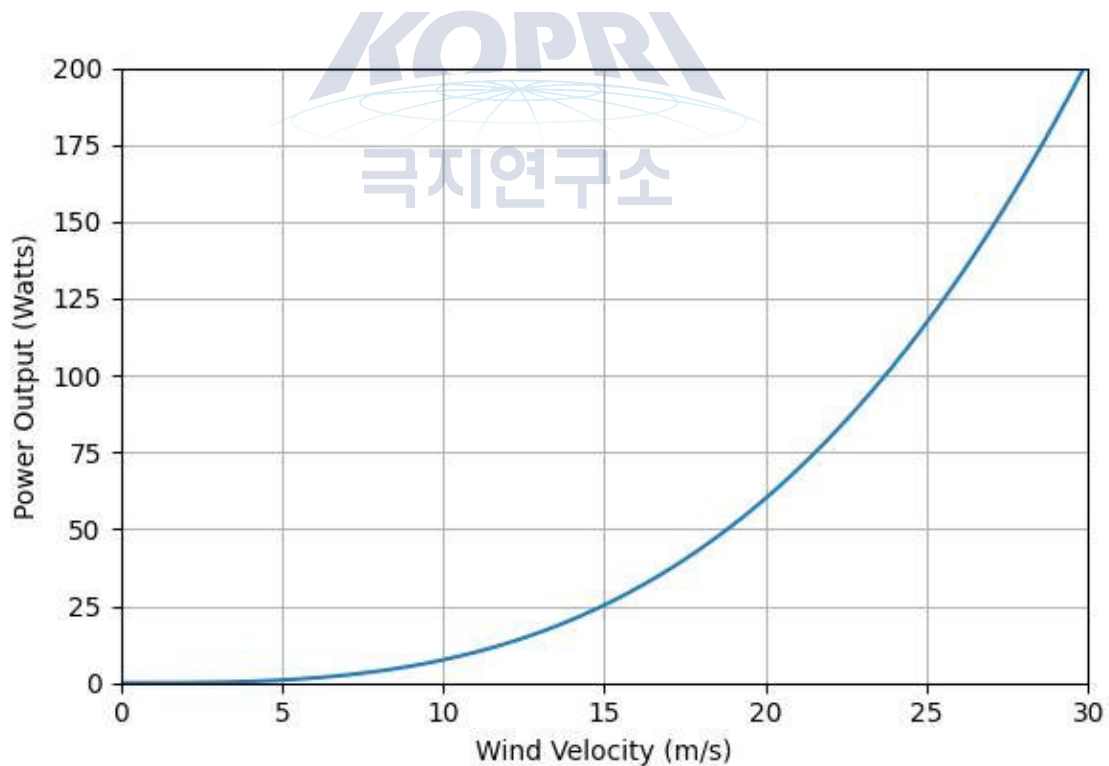
모듈 내부에는 220 V 교류 전원 콘센트를 설치하여 온도 민감도가 높은 과학 관측 장비의 안정적인 운용을 지원한다. 전력 시스템 배치는 남극 현장 유지보수 작업 시의 안전성, 접근성, 신뢰성을 고려하여 최적화되었다.

○ 현장 설치 및 운용 결과

개발된 이동식 관측 모듈은 2024년 장보고과학기지에서 조립 및 시험 운용을 거친 후 남극내륙 진출로 베이스캠프로 이동·설치되었다. 현장 시험 결과, 극한 환경에서도 모듈의 구조적 안정성과 전력 시스템의 기본 성능이 확인되었으며, 무인 원격 관측 및 상태 모니터링이 가능함을 확인하였다. 다만, 극저온 환경에서의 배터리 효율 저하와 과잉 발전 시 태양광 패널 열화 가능성이 확인되어 향후 히터 연계 부하 제어 및 배터리 하우징 개선이 필요함을 도출하였다.

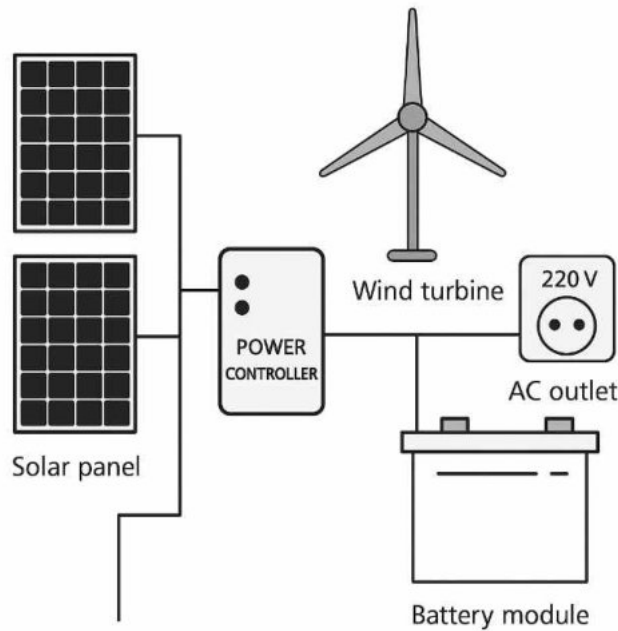
[남극 내륙 이동식 관측소 태양광 패널, 풍력 터빈, 배터리 모듈의 모델명과 주요 기술 사양]

Component	Model	Specification
Solar Panel	SCM 150W	- Type: Crystalline silicon - Power Output: 150 W per day - Dimensions: 1,306 mm '660 mm '40 mm - Weight: 10.44 kg - Installation: 6 panels (3 per side wall) - Estimated Output: ~9.0 kWh/day (10 hr exposure)
Wind Turbine	Lev 150 Extreme	- Type: Vertical-axis wind turbine - Dimensions: F270 mm 'H 918 mm - Weight: 13 kg - Operating Wind Speed: 5-35 m/s - Output: ~240 Wh/day (at 8 m/s wind for 10 hr)
Battery Module	PVX 1040T (AGM)	- Type: Absorbent Glass Mat (AGM), deep cycle - Configuration: 12 V, 104 Ah '6 cells - Capacity: ~7.2 kWh per module - Total Modules: 2



[풍속에 따른 풍력 발전 출력 특성]

풍속 증가에 따라 풍력 발전 출력이 비선형적으로 증가하는 특성을 나타낸 것으로 출력은 풍속의 세제곱에 비례하여 증가한다. (Lev 150 Extreme 매뉴얼 발췌)



[이동식 관측소 전력 시스템 개략도]

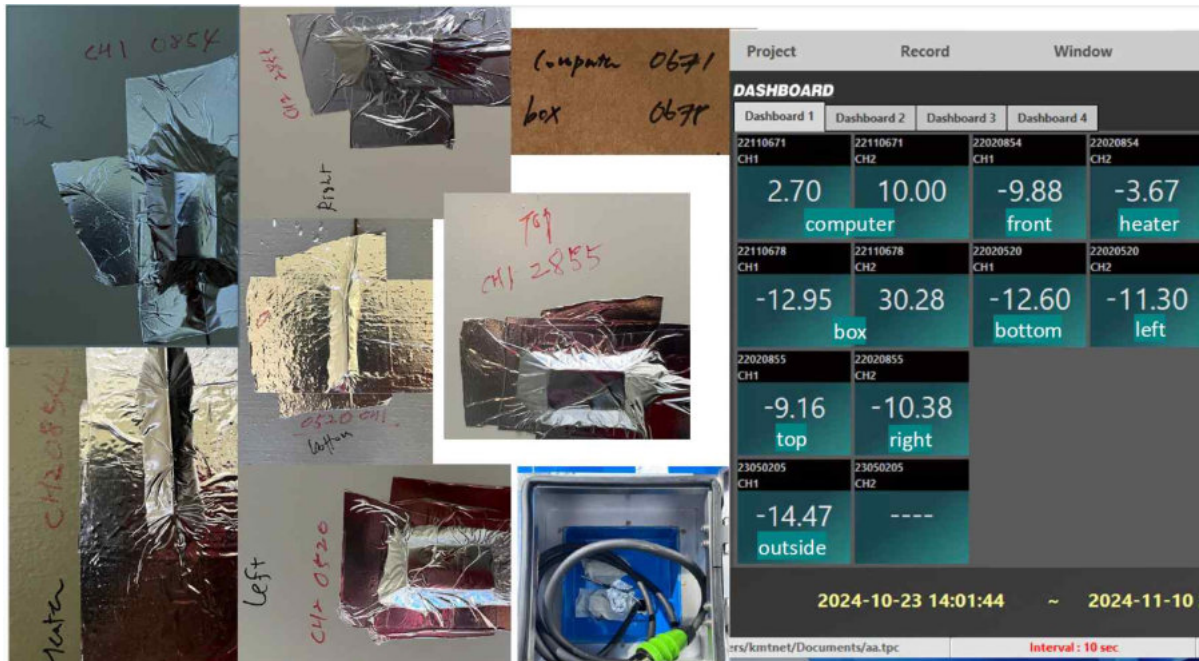
남극 내륙 관측소에 적용된 통합 하이브리드 전력 구조. 태양광 패널과 풍력 터빈에서 생산된 전력은 중앙 전력 제어 장치로 전달되며, 해당 장치는 입력 전력을 조절하고 배터리 저장 모듈로의 에너지 분배를 관리하며 비상 또는 보조 전원 사용을 위해 220 V 교류(AC) 전원 출력이 포함되어 있다.

○ 남극내륙 천문·우주관측모듈 온도 습도 실증 결과 분석

남극내륙 진출로 베이스캠프(110 데포)에 설치된 이동식·무인형 천문·우주관측 모듈을 대상으로 극한 환경에서의 운용 안정성을 검증하기 위하여 모듈 내부 및 외부의 온도와 상대습도 변화를 장기간 측정·분석하였다. 특히 본 절에서는 외부 환경, 컨테이너 내부 공간, 컴퓨터 하우징의 내·외부 온도, 그리고 내부 열 발생 요소(dummy load)의 역할을 종합적으로 고려하여 실증 결과를 해석한다.

[KASI 남극 천문우주탐사 모듈 온도 측정에 사용한 온도센서 제원 및 위치]

구분	모델명	온도 프로브 종류	측정범위 (오차)	설치 위치
OUT	175H1	NTC	-20 ~ +55℃ (±0.4℃)	모듈 전설
IN	175H1	NTC	-20 ~ +55℃ (±0.4℃)	모듈 단열 내부
Computer	UA10	MEMS	-40 ~ +80℃ (±0.2℃)	컴퓨터 USB 포트
Box	UA10	MEMS	-40 ~ +80℃ (±0.2℃)	플라스틱 박스
Front	UA11-T	T-type 3m	-100 ~ +300℃ (±0.4℃)	건인고리쪽 전면 벽
Heater	UA11-T	T-type 3m	-100 ~ +300℃ (±0.4℃)	Dummy load 위쪽
Bottom	UA11-T	T-type 3m	-100 ~ +300℃ (±0.4℃)	모듈 내부 바닥
Left	UA11-T	T-type 3m	-100 ~ +300℃ (±0.4℃)	모듈 내부 왼쪽벽
Top	UA11-T	T-type 3m	-100 ~ +300℃ (±0.4℃)	모듈 내부 천정
Right	UA11-T	T-type 3m	-100 ~ +300℃ (±0.4℃)	모듈 내부 오른쪽벽
Outside	UA13	PT-100 3m	-200 ~ +300℃ (±0.3℃)	모듈 외부



[모듈 내부 벽면에 설치한 온도센서 및 온도 모니터링]

- 컴퓨터 하우징 및 컴퓨터 온·습도 변화 특성 분석

남극내륙 진출로 베이스캠프에 설치된 천문·우주관측 모듈의 무인 장기 운용 가능성을 검증하기 위하여, 컴퓨터 하우징 내부와 컴퓨터 USB 포트 위치에서 온도 및 상대습도를 장기간 동안 연속 관측하였다. 본 관측은 2024년 11월부터 2025년 11월까지 약 1년간 수행되었으며, 계절 변화에 따른 내부 열·습도 환경 특성과 컴퓨터 발열 및 하우징 보호 효과를 중심으로 실증 결과를 분석하였다.

아래 그림에서 제시된 시계열 자료에서 빨간색은 컴퓨터 USB 포트 온도, 파란색은 컴퓨터 하우징 내부 온도, 노란색은 컴퓨터 USB 포트 상대습도, 초록색은 컴퓨터 하우징 내부 상대습도를 각각 나타낸다. 관측 결과, 컴퓨터 USB 포트 온도는 연중 지속적으로 컴퓨터 하우징 내부 온도보다 높은 값을 유지하는 경향을 보였다. 이는 컴퓨터의 상시 운용에 따른 내부 발열이 USB 포트 위치에 직접적으로 반영된 결과로 해석된다. 여름철(12-2월) USB 포트 온도는 대체로 +15~+25℃ 범위에서 유지되었으며, 겨울철(6-8월)에는 온도가 하강하였으나 약 -20℃ 내외 수준에서 유지되었다. 이러한 결과는 외기 온도가 -50℃ 수준까지 하강하는 남극내륙 극한 환경에서도 컴퓨터 내부 전자장비가 완전 동결 상태에 이르지 않고 일정 수준의 열환경을 유지하고 있음을 보여준다.

컴퓨터 하우징 내부 온도는 연중 USB 포트 온도보다 낮은 값을 나타냈으며, 특히 겨울철에는 -30℃ 이하로 하강하는 구간도 관측되었다. 그럼에도 불구하고 남극내륙의 극저온 외기 조건을 고려할 때, 하우징 내부 온도는 외기 대비 완화된 수준에서 유지되었다고 평가할 수 있다. USB 포트 온도와 하우징 내부 온도 사이에 연중 지속적으로 관측되는 약 10~20℃ 수준의 온도 차이는 전자장비 발열이 하우징 내부에서 국부적으로 축적되고 있음을 시사한다. 이는 컴퓨터 하우징이 단순한 물리적 보호 구조를 넘어 전자장비 주변의 국부 열환경을 완충하는 2차적 열관리 구조로 기능하고 있음을 의미한다.

컴퓨터 USB 포트 인근의 상대습도는 연중 대체로 15~30% 범위에서 유지되었다. 계절 변화에 따른 변동은 존재하였으나, 겨울철에도 급격한 습도 상승은 관측되지 않았다. 이는 컴퓨터

발열에 의해 공기가 지속적으로 건조해지는 효과가 작용한 결과로 해석된다. 컴퓨터 하우스 내부 상대습도는 USB 포트 인근보다 항상 낮거나 유사한 수준을 보였으며, 연중 10~20% 수준의 매우 건조한 환경을 유지하였다. 특히 겨울철에도 상대습도가 급상승하지 않고 안정적으로 유지된 점은 결로 및 성에 형성 위험이 매우 낮음을 의미한다. 온도가 하강하는 겨울철로 갈수록 절대습도가 감소함에 따라, 저온 환경에서도 상대습도가 급증하는 현상은 관측되지 않았다. 결과적으로 컴퓨터 하우스 내부에서는 저온-저습 환경이 동시에 유지되어 전자장비의 장기 무인 운용에 매우 유리한 조건이 형성된 것으로 판단된다.

시계열 그래프 초반부터 관측되는 일시적인 온습도 급격한 상승은 센서 설치 과정에서 발생한 영향으로 해석된다. 이후 구간에서는 계절 변화에 따른 안정적인 반복 패턴이 형성되었다.

- 겨울철 풍력 변동과 Dummy Load (히터) 인근 온도 주기성의 연관성

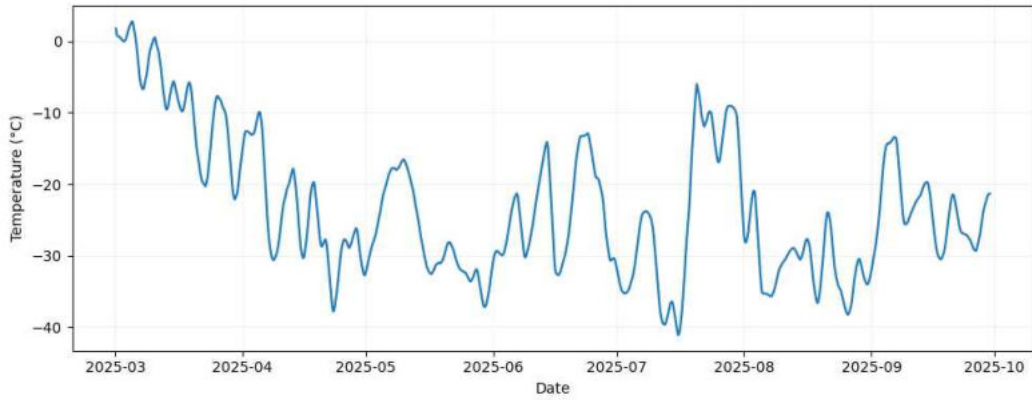
겨울철(극야 기간) 남극내륙 진출로 베이스캠프에서 설치된 무인 관측모듈의 dummy load (히터) 인근 온도센서 자료를 분석한 결과, 내부 온도에서 수일에서 수주 규모의 주기적인 상승·하강 패턴이 반복적으로 관측되었다. 이러한 주기성은 여름철이나 계절 전이기보다 겨울철에 더욱 명확하게 나타났으며, 이는 태양광 발전이 배제된 환경에서 풍력 자원의 변동성이 dummy load 열발생을 지배적으로 제어한 결과로 해석된다.

겨울철 남극내륙은 극야로 인해 태양광 발전이 불가능하며 전력 생산은 풍력 발전에 의존한다. 이 조건에서 dummy load의 작동 여부와 열 발생 강도는 풍력 자원의 시간적 변동성과 밀접하게 연관될 수 있다. 풍속이 낮은 기간에는 풍력 발전량이 제한되어 배터리 충전이 우선적으로 이루어지고, dummy load는 거의 작동하지 않거나 최소 수준으로 유지된다. 반면, 강풍이 지속되는 구간에서는 풍력 발전량이 급격히 증가하여 배터리 충전 상태가 상한값에 도달하게 되고, 이로 인해 초과 전력이 dummy load를 통해 열로 발산된다.

이러한 전력 흐름 특성으로 인해 겨울철 dummy load 인근 온도 센서에서는 풍속 증가 시기에 대응하는 온도 상승이 반복적으로 관측되며, 풍속이 약화되는 구간에서는 dummy load 열발생이 감소함에 따라 온도가 다시 하강하는 패턴이 형성된 것으로 해석될 수 있다. 결과적으로 dummy load 인근 온도 시계열에 나타난 주기적 변동은 단순한 열 제어 이상 현상이 아니라, 모듈 설치 지점의 풍력 변동성이 전력 생산과 잉여 전력 소진 과정을 거쳐 열환에 반영된 결과로 해석된다.

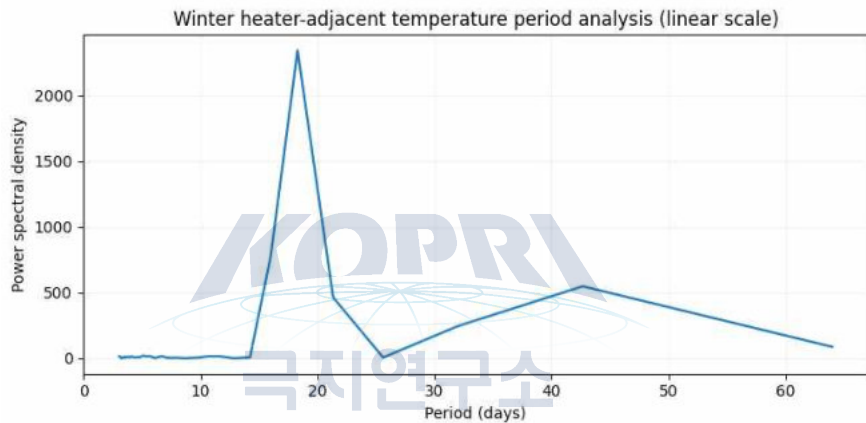
또한 남극내륙 겨울철 풍력 자원은 수일에서 수주 규모의 기상 패턴에 따라 강약이 반복되는 특성을 보이는 것으로 알려져 있으며, 이러한 풍속 변동의 시간 규모는 dummy load 인근 온도에서 관측된 주기 길이와도 정성적으로 일치한다. 이는 겨울철 내부 온도 주기성이 히터 제어 알고리즘의 단순한 반복 동작에 기인한 것이 아니라, 외부 기상 조건(풍력) - 전력 생산 - 배터리 충전 - dummy load 열 발생으로 이어지는 연쇄적인 에너지 흐름에 의해 형성된 정상적인 시스템 응답임을 의미한다.

즉, 겨울철 dummy load 인근에서 관측된 주기적인 온도 변화는 모듈이 설치된 남극내륙 지역의 풍력 자원 변동성과 직접적으로 연관된 현상으로 판단된다. 강풍 구간에서는 풍력 발전량 증가에 따라 dummy load 열발생이 활성화되어 내부 온도가 상승하고, 약풍 구간에서는 열발생이 감소하며 온도가 하강하는 반복 패턴이 형성된다. 이러한 결과는 dummy load가 겨울철에 단순한 잉여 전력 소진 장치를 넘어 풍력 기반 전력 시스템과 연동되어 내부 열환경 안정화에 기여하는 능동적 요소로 기능하고 있음을 실증적으로 보여준다.



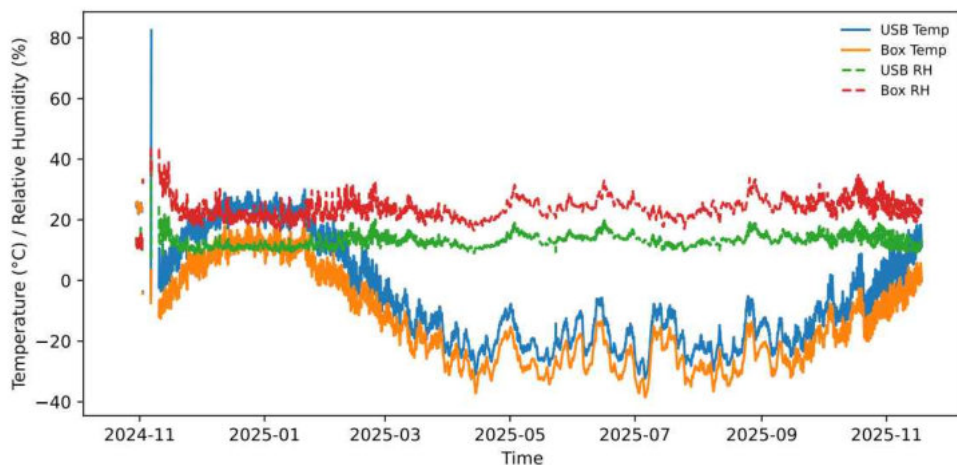
[겨울철 히터(dummy load) 인근 온도 변화]

남극내륙에 설치된 무인 관측모듈에서 겨울철(3-9월) 온도 변화. 수일에서 수주 규모의 반복적인 온도 상승·하강 패턴을 보이며, 이는 모듈 설치 지점의 풍속 변동에 따른 풍력 발전량 변화가 배터리 충전 및 잉여 전력 소진 과정을 거쳐 dummy load 열발생으로 반영된 결과로 해석됨. 이러한 주기적 온도 변동은 겨울철에도 풍력-전력-열이 연계도니 무인 관측모듈 운용 체계가 정상적으로 작동하고 있음을 보여준다.



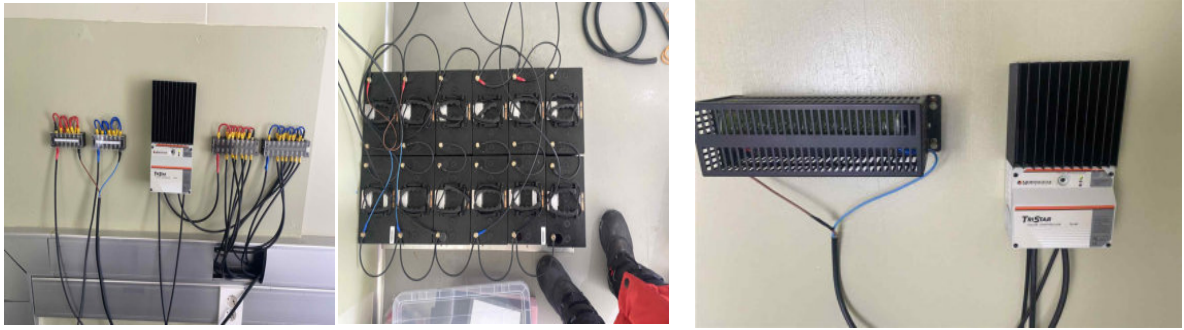
[겨울철 히터(dummy load) 인근 온도의 주기분석 결과]

겨울철(3-9월) 남극내륙 무인 관측모듈에서 dummy load(히터) 인근에 설치된 온도센서로 관측한 온도 변화 주기 분석 결과. 약 2-3(16-21일)주 규모의 주기 성분이 가장 지배적으로 나타났으며, 약 1-1.5개월(30-45일) 규모의 중장기적 성분도 함께 확인되었다.



[2024.11-2025.11 기간 동안 천문-우주관측 모듈 내부 컴퓨터 및 하우스 내부 온습도 월별 변화]

빨간색: 컴퓨터 USB 포트 온도, 파란색: 컴퓨터 하우스 내부 온도, 노란색: 컴퓨터 USB 포트 상대습도, 초록색: 컴퓨터 하우스 내부 상대습도. 극한 외기 환경에서도 컴퓨터 발열과 하우스 보호에 의해 내부 온도가 완화되고 상대습도는 연중 낮은 수준으로 안정적으로 유지되어 결로 및 성에 발생 위험이 매우 낮다고 판단됨



[(좌) 천문우주관측 모듈 태양광-풍력 발전 배전 시스템과 배터리 모듈, (우) Dummy load(히터)]

- 무인 관측모듈 내부 온도 변화 특성 분석

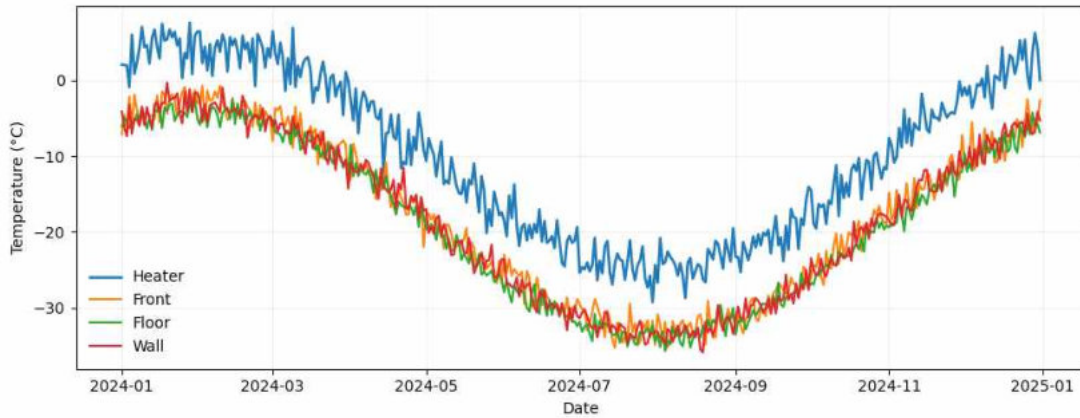
아래 그림은 남극내륙에 설치된 무인 관측모듈 내부에서 관측된 일평균 온도의 시간적 변화를 나타낸 것이다. 파란색 선은 dummy load(히터) 근방 온도를 빨간색, 초록색, 주황색 선은 각각 모듈 내부 전면, 바닥, 벽면에서 측정된 온도를 의미한다. 시간축은 날짜이며, 단기적인 변동을 제거하기 위해 일평균 자료를 사용하였다.

그림에서 확인할 수 있듯이, dummy load 근방 온도는 계절 변화에 따라 뚜렷한 연주기적 변동 특성을 보인다. 여름철에는 상대적으로 높은 온도를 유지하며, 겨울철로 갈수록 점진적인 하강 경향을 나타낸다. 이에 따라 모듈 내부 전면, 바닥, 벽면 온도 역시 히터 근방 온도의 변화에 동조된 장주기 변동을 보였으며, 모듈 내부 각 지점 사이의 온도 차이는 전반적으로 제한된 범위 내에서 유지되었다.

특히 히터 근방과 내부 전면, 바닥, 벽면 사이의 온도 차이는 존재하지만, 계절 전반에 걸쳐 급격한 공간적 온도 편차는 관측되지 않았다. 이는 dummy load에서 공급된 열이 모듈 내부 공간 전반으로 효과적으로 전달·분산되고 있음을 의미하며, 내부 공기 순환과 구조체의 열전도 및 열관성 효과가 결합되어 국부적인 과열 또는 과냉 영역이 형성되지 않고 있음을 보여준다.

겨울철 최저 온도 구간에서도 내부 전면, 바닥, 벽면 온도는 비교적 유사한 수준을 유지하며 동조된 변화를 나타냈다. 이는 외기 온도가 극저온으로 하강하는 조건에서도 모듈 내부의 열환경이 급격히 붕괴되지 않고 열공급원과 단열 구조에 의해 안정적으로 제어되고 있음을 시사한다. 내부 각 지점의 온도 곡선이 서로 평행한 형태로 변화하는 점은 모듈 구조체가 외부 환경 변화에 대해 효과적인 열 완충 역할을 보여주는 중요한 지표이다.

종합적으로, 본 그림에 나타난 내부 온도 변화 특성은 남극내륙 극한 환경에서도 무인 관측모듈이 비교적 균일하고 안정적인 내부 열환경을 유지할 수 있음을 실증적으로 입증한다. Dummy load를 중심으로한 열공급, 컨테이너형 구조체의 단열 성능, 그리고 내부 열 분산 특성이 복합적으로 작용하여 장기간 무인 운용에 적합한 열적 안정성이 확보되었음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 향후 남극내륙 고원을 대상으로 한 무인 천문·우주환경 관측모듈 설계 및 열관리 전략의 타당성을 뒷받침하는 핵심적인 실증 자료로 평가된다.



[남극내륙 무인 관측모듈 내부 일평균 온도 변화]

남극내륙에 설치된 무인 관측모듈 내부에서 관측된 일평균 온도의 시간 변화. 파란색 선은 dummy load(히터) 근방 온도, 빨간색·초록색·주황색 선은 각각 모듈 내부 전면, 바닥, 벽면에서 측정된 온도를 의미한다. 각 지점 간 온도 차이가 작게 유지되어 모듈 내의 열 분포 성능이 효과적으로 작동하고 있음을 확인하였다.

- 모듈 외부 및 내부 표면 온도 변화 특성 분석

아래 그림은 관측 기간 동안 남극내륙에 설치된 무인 관측모듈의 컨테이너 외부 벽면과 내부 천정 및 벽면에서 관측된 일평균 온도의 시간적 변화를 나타낸 것이다. 파란색 선은 컨테이너 외부 벽면 온도를, 초록색과 노란색 선은 각각 모듈 내부 벽면의 온도를 의미한다. 계절적 열환경 특성을 분석하기 위해 일평균 자료를 사용하였다.

관측 결과, 컨테이너 외부 벽면 온도는 최저 약 -50°C 에서 최고 약 $+25^{\circ}\text{C}$ 범위까지 매우 큰 변동폭을 보였다. 남극내륙 지역의 기후 특성상 여름철에도 실제 외기 온도는 대부분 영하를 유지하는 점을 고려할 때, 외부 표면 온도가 $+25^{\circ}\text{C}$ 수준까지 상승한 현상은 실제 대기 온도를 반영한 결과라기보다는 외부 구조물 표면의 열적 응답으로 해석하는 것이 타당하다. 남극내륙은 대기 수증기량이 매우 낮고, 여름철에는 장시간에 가까운 태양 복사가 지속되며, 풍속이 약한 조건에서는 대류에 의한 냉각 효과가 제한된다. 이러한 환경에서는 금속 재질의 컨테이너 외벽이 태양복사를 효과적으로 흡수하여 외기 온도와 무관하게 표면 온도가 급격히 상승할 수 있다. 따라서 본 그림에서 나타난 고온 구간은 실제 외기 온도가 아니라, 태양복사 및 구조물 축열에 의해 가열된 외벽 표면 및 센서 하우징의 온도를 반영한 값으로 해석된다.

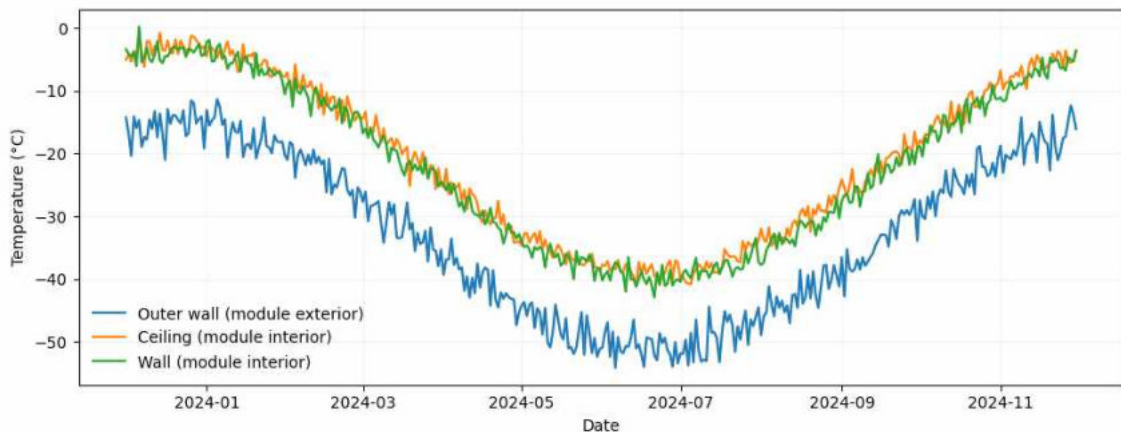
이와 같은 외부 벽면 온도 자료는 남극내륙의 절대적인 기상 조건을 직접적으로 나타내기 보다는 관측모듈 외부 구조물이 실제 운용 과정에서 경험하는 열적 부하(thermal load)의 크기와 변동 특성을 평가하는 데 유용한 지표로 활용될 수 있다. 특히 외부 표면이 여름철 단기간 고온에 노출될 수 있음을 보여줌으로써 구조체 재질 선택 및 표면 마감, 센서 설치 위치 설계의 중요성을 시사한다.

반면, 모듈 내부 천정과 벽면에서 관측된 온도는 외부 변면 온도 변화에 비해 전반적으로 훨씬 완만한 변화를 나타냈다. 내부 표면 온도는 외부 벽면에서 관측된 급격한 고온 및 극저온 변동에도 불구하고 상대적으로 제한된 범위 내에서 유지되었으며, 계절 변화에 따른 장주기적 경향만을 따라가는 양상을 보였다. 이는 컨테이너 구조체의 단열 성능과 열관성 효과가 외부 열환경 변화를 효과적으로 완충하고 있음을 의미한다.

특히 내부 천정과 내부 벽면 온도는 서로 매우 유사한 변화 양상을 보였으며, 이는 내부 구조체 전반에 걸쳐 열이 비교적 균일하게 분포되고 있음을 보여준다. 외부 벽면에서 발생한

급격한 열적 자극이 내부 공간으로 직접 전달되지 않고, 구조체 및 단열층을 거치며 단계적으로 감소되고 있음을 확인할 수 있다.

종합적으로, 남극내륙과 같은 극한 환경에서도 컨테이너형 무인 관측모듈이 외부의 극심한 열적 부하를 효과적으로 차단·완충하여 내부 표면 온도를 안정적으로 유지할 수 있음을 실증적으로 보여준다. 외부 벽면에서 -50℃에서 +25℃에 이르는 극단적인 온도 변동이 관측되었음에도 불구하고, 내부 천정과 벽면 온도는 상대적으로 완만한 변화를 유지하였으며, 이는 무인 관측모듈의 열설계 및 단열 구조가 장기 운용 환경에서 충분한 열적 안정성을 제공함을 입증하는 중요한 결과로 평가된다.



[남극내륙 무인 관측모듈 외부 및 내부 표면의 일평균 온도 변화]

남극내륙에 설치된 무인 관측모듈의 외부 벽면과 내부 벽면에서 관측된 일평균 온도의 시간적 변화이다. 파란색은 외부 벽면 온도를, 초록색과 노란색은 각 모듈 내부 천정과 벽면의 온도를 의미한다. 외부 벽면 온도의 변화에 비해 내부의 온도 변화는 완만하여 모듈 구조체의 열 완충 및 단열 성능이 효과적으로 작동하고 있음을 보여준다.

극지연구소

2. 극야 천문시상 관측 연구

○ 남극 천문시상 망원경 설계 및 알고리즘 개발

남극내륙 고원 이동식 천문·우주환경 무인 관측소의 핵심 관측 요소인 천문시상 관측을 위한 남극성 관측 시스템의 개념 설계, 시작품 제작 및 실증 시험을 단계적으로 수행하였다. 특히 평균 기온이 약 -60℃에 이르는 남극내륙 고원 환경에서 망원경 구동부의 결빙 위험과 전력 공급 제약을 최소화하기 위한 무구동, 저전력 관측 개념의 타당성 검증에 중점을 두었다.

우선, 남극내륙 고원은 천문시상 관측을 위한 남극성(Sigma Octantis) 관측 시스템 시작품은 실제 남극 환경에 적용하기에 앞서, 남반구에 위치한 칠레 쉐로 톨로(Cerro Tololo) 천문대에서 모의 실험을 통해 성능 검증을 수행하였다. 해당 실험은 남극내륙 고원과 유사하게 남극성을 관측할 수 있는 지리적 조건을 활용하여, 관측 개념의 실현 가능성을 확인하는 데 목적이 있다.

본 연구에서는 낮 시간에 태양과 달을 이용하여 관측 시스템을 캘리브레이션한 후 밤에 남극성을 추적할 수 있는 관측 알고리즘을 사용하였다. 사용된 S/W는 주간에도 관측 가능한 태양 또는 달의 위치를 기준으로 망원경의 방위각과 고도각을 정밀 보정한 후, 천체역학 계산을 통해 남극성의 위치로 망원경을 이동시키는 기능을 수행한다. 이를 통해 향후 남극내륙 고원에서 하계 백야 기간에 망원경을 미리 세팅하고, 동계 극야 기간 동안에는 구동부를 사용하지 않은 상태로 천문시상 관측을 수행하는 것이 가능하다. 이러한 방식은 망원경 구동부의 결빙 위험을 근본적으로

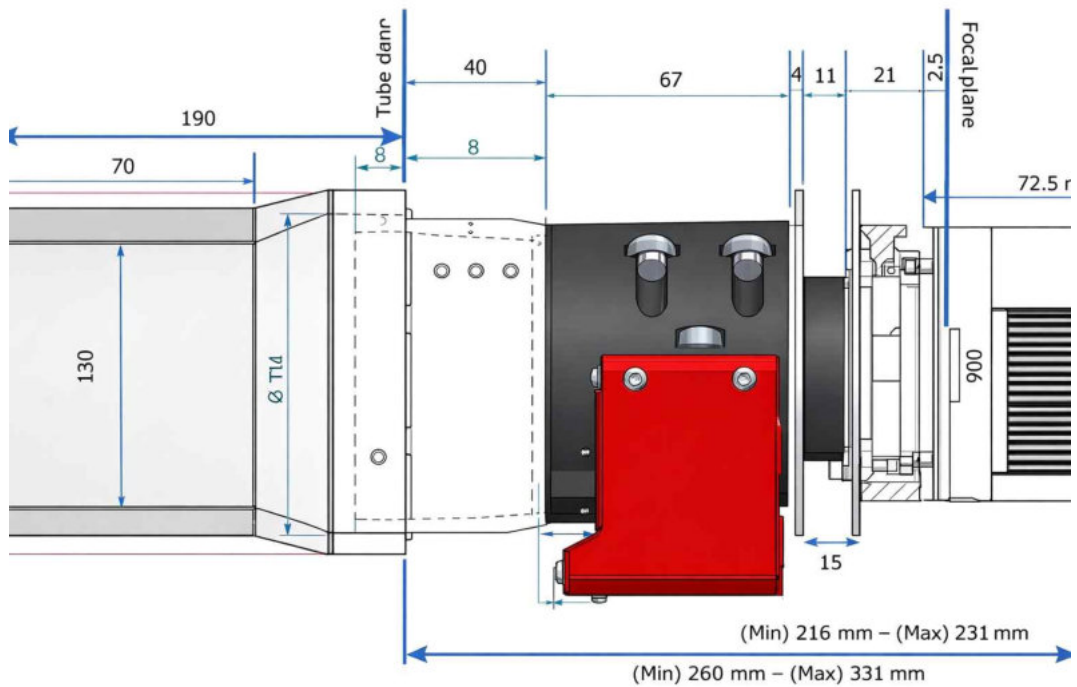
회피할 수 있을 뿐만 아니라, 전력 소모량을 크게 줄일 수 있는 장점을 가진다. 또한 인력이 상주하지 않는 극야 기간 동안에도 24시간 연속 천문시상 관측이 가능하다는 점에서 무인 장기 운용에 매우 적합한 관측 전략으로 평가된다.

남극성 시상 측정을 위한 기존 상용 광학계를 개조하여 실험에 적합한 시스템으로 구축하였다. 시상 관측에 적합하도록 초점 거리 조정을 포함한 광학계 설계를 진행하였으며, 관측 시스템 전체의 치수 측정 및 배치 설계를 수행하였다. 특히 M42 연장튜브를 적용한 광학 구성에 대해 각 부품 간 거리 설계와 실제 연결 상태를 고려한 실측 검증을 수행하였고, 이를 통해 남극성 시상 관측에 적합한 광학 정렬 조건을 확립하였다. 또한 M42 연장튜브 자체에 대한 설계도 수행하여 연장 적용 시 신속한 조립과 안정적인 초점 유지를 가능하도록 하였다.

남극내륙 고원에서는 전력 공급이 극히 제한적일 것으로 예상됨에 따라, 관측 시스템 소비전력 시뮬레이션을 수행하여 저전력 설계를 검증하였다. 망원경, 카메라, 제어용 PC를 포함한 전체 관측 시스템의 소비전력을 분석한 결과, 최대 소비전력은 약 20W 수준이었으며, 이는 남극내륙 고원 무인 관측 환경에서 적용 가능한 전력 버짓 범위 내에 해당한다. 이러한 저전력 설계는 태양광-풍력 기반 하이브리드 전력 시스템과의 연계를 고려할 때, 장기 무인 운용 가능성을 크게 향상시키는 요소로 작용한다.

설계 완료 후에는 천문시상 망원경 시작품에 대한 시험 관측을 수행하였다. 시험 관측에는 망원경 카메라 성능과 초점 제어 안정성을 중점적으로 점검하였으며, 한국천문연구원 대전 본원에서 수행한 천문시상 시험 관측 결과 평균 시상값은 약 1.2" 로 측정되었다. 이는 관측 시스템이 천문시상 측정에 충분한 성능을 확보하고 있음을 보여주는 결과이다. 남극내륙 고원의 경우 한국에 비해 에어로졸 밀도와 대기 수증기량이 현저히 낮을 것으로 예상되므로 본 시험 관측 결과보다 더 우수한 시상 조건이 확보될 가능성이 높다.

본 연구로 남극내륙 고원 천문시상 관측을 위한 남극성 관측 시스템의 설계-제작-소프트웨어 구성-저전력 검증-시험관측에 이르는 전 과정을 자체 기술로 성공적으로 수행하였다. 특히 구동부 사용을 최소화한 관측 개념과 저전력 설계, 그리고 극야 기간 무인 연속 관측이 가능한 운용 전략은 향후 남극내륙 고원 이동식 천문·우주환경 무인 관측소 구축을 위한 핵심 기술적 기반으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

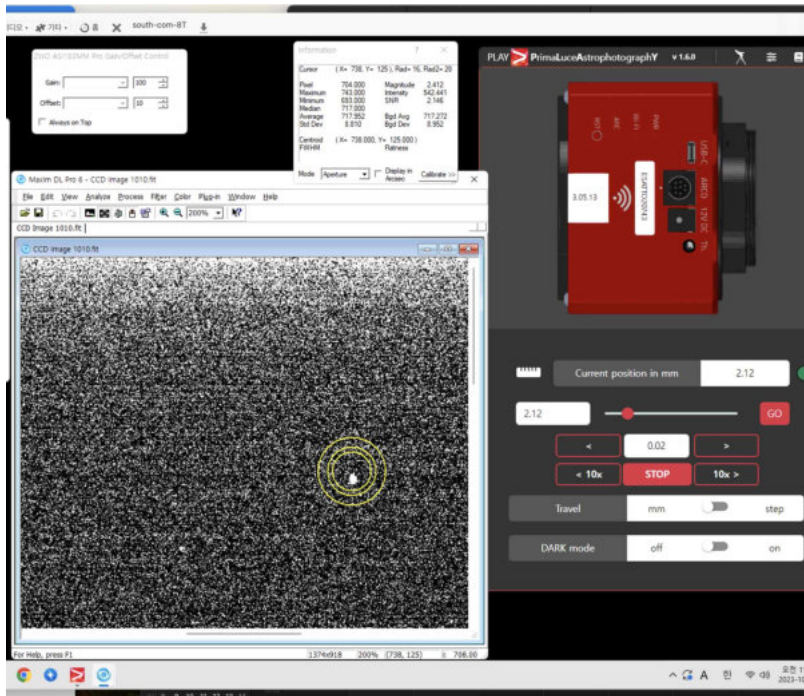


[남극 천문시상 관측 망원경 설계도면]



[천문시상 망원경 소비전력 시험]

남극내륙은 전력 사용량이 제한될 것으로 예상되어 저전력 설계 후 망원경 및 제어 컴퓨터의 소비전력을 시험하여 최대 20W 전력소모가 있는 것으로 확인하였다.



[한국천문연구원 대전본원 및 칠레 세로 토를로에서의 천문시상 망원경 시제품 시험관측]

○ 장보고과학기지 극야 천문시상 원격 관측

남극 장보고과학기지에서의 실제 천문 관측 환경을 정량적으로 규명하기 위하여 현장 실측 자료에 기반한 원격 천문시상 측정을 수행하고 그 특성을 분석하는 것으로 목표로 한다. 특히 향후 남극내륙 고원 환경에서의 장기 무인 관측 가능성을 고려하여, 고가의 천문 시상 측정 장비에 의존하지 않고도 적용 가능한 간이 광학 관측 시스템 기반 천문시상 기법의 실증적으로 검증하였다.

천문시상(astronomical seeing)은 지구 대기 난류로 인해 천체 영상이 흐려지는 정도를 나타내는 핵심 지표로, 지상 천문 관측의 해상도를 결정하는 가장 중요한 요소이다. 남극 지역은 낮은 대기 수증기량과 얇은 대기 난류층 특성으로 인해 우수한 천문시상 조건을 제공하는 것으로 알려져 있으나, 남극 장보고과학기지에서의 실제 시상 특성은 지금까지 체계적으로 규명된 바가 없다. 이에 본 연구에서는 장보고과학기지에서 획득한 실제 관측 데이터를 바탕으로 해당 지역의 천문시상 환경을 정량적으로 평가하고 그 특성을 분석하였다.

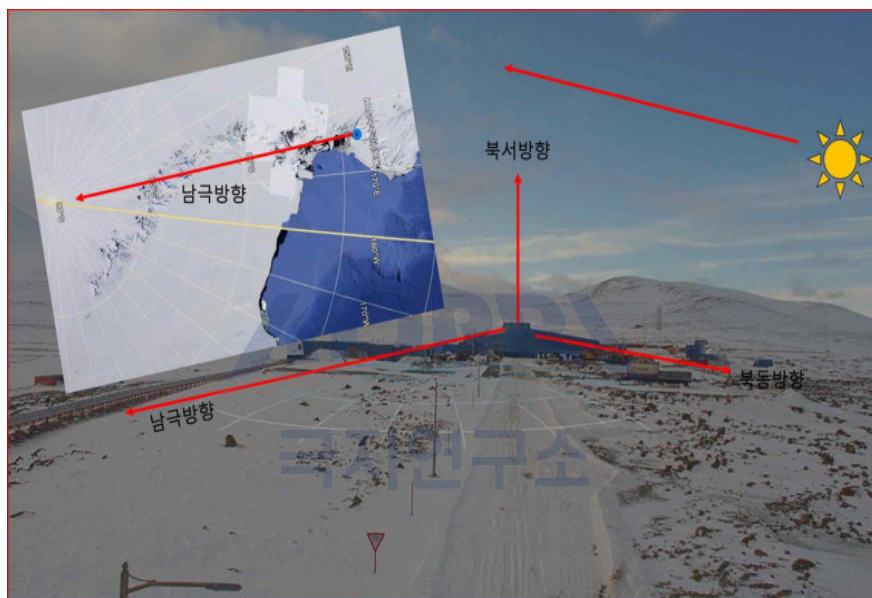
관측 시스템은 2023-2024년 하계에 설치 후에는 망원경 자동·원격 추적 관측을 위한 정렬 및 포인팅 시험을 수행하였다. 백야 환경에서는 별 관측이 제한되는 점을 고려하여, 태양을 이용한 망원경 조준을 통해 천체 좌표계를 설정한 후 남십자성의 천체 좌표로 전환하여 망원경을 이동시켰다. 이후 구동부를 고정한 상태에서 극야 환경에서도 안정적인 천문시상 관측이 가능함을 검증하였다. 또한 장보고과학기지 본관 통신 안테나를 활용한 초점 조정 시험과 방위각 및 남십자성 추적 관측을 통해 포커서 및 구동부의 안정성을 확인하였다.

실제 천문시상 관측은 2024년 3월 6일 12:00에 수행되었으며, 장보고과학기지에서 측정된 천문시상 값은 약 2.2" 로 나타났다. 이 값은 중국, 일본, 이탈리아 등이 남극내륙 고원(해발 약 3,000~4,000m)에서 보고한 천문시상 값(약 0.5")에 비해 상대적으로 큰 수치이다. 이러한 차이는 장보고과학기지가 해안에 위치한 기지로서 해발 고도가 낮고, 백야/극야기 온·습도·대기난류 및 대기 경계층 특성이 남극내륙 고원과 크게 다르기 때문으로 해석된다.

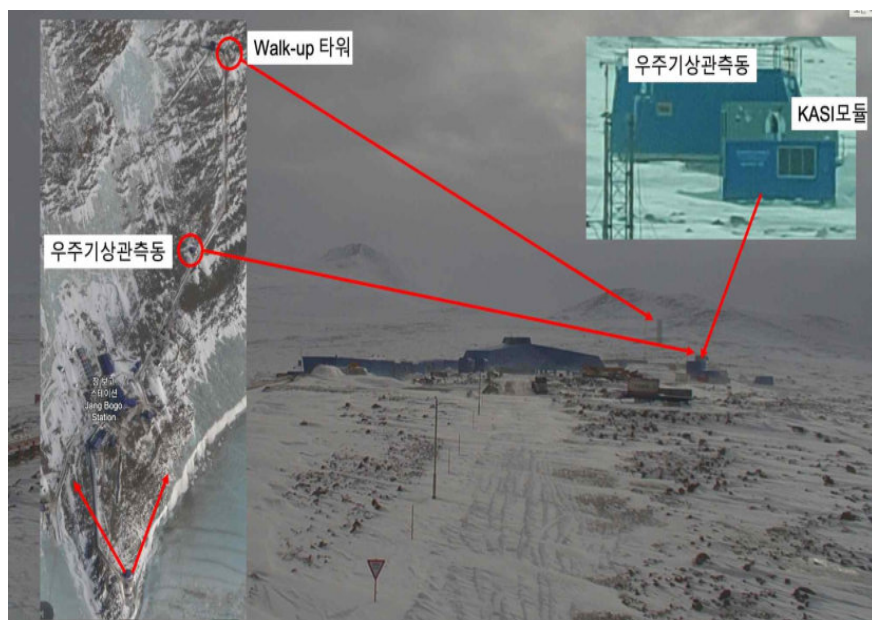
즉, 계절과 해발 고도에 따른 대기 밀도와 수증기량 차이, 그리고 대기 교란 정도의 차이가 천문시상에 직접적인 영향을 미친 결과로 판단된다.

따라서 본 연구에서 장보고과학기지에서 획득한 천문시상 관측 결과는 남극내륙 고원 관측 환경을 보수적으로 가정한 기준 자료로 활용될 수 있으며, 해발 3,000m 이상 남극내륙 고원 천문·우주환경 연구거점에서 동일한 관측 시스템을 적용할 경우 본 시험 관측 결과보다 훨씬 우수한 천문시상 조건이 확보될 것으로 기대된다.

특히 본 연구에서는 한국천문연구원 대전 본원에서 장보고과학기지에 설치된 천문시상 망원경을 원격으로 제어하여 천문시상 관측에 성공함으로써 남극 현장에 인력이 상주하지 않는 조건에서도 원격·무인 천문시상 관측이 가능함을 실증하였다. 이는 향후 남극내륙 고원 극야 기간 동안 장기 무인 천문 관측을 수행하기 위한 핵심 기술적 기반을 확보한 중요한 성과로 평가된다.



[천문시상 망원경의 별 자동·원격 추적을 위해 장보고과학기지 방위각 정렬]

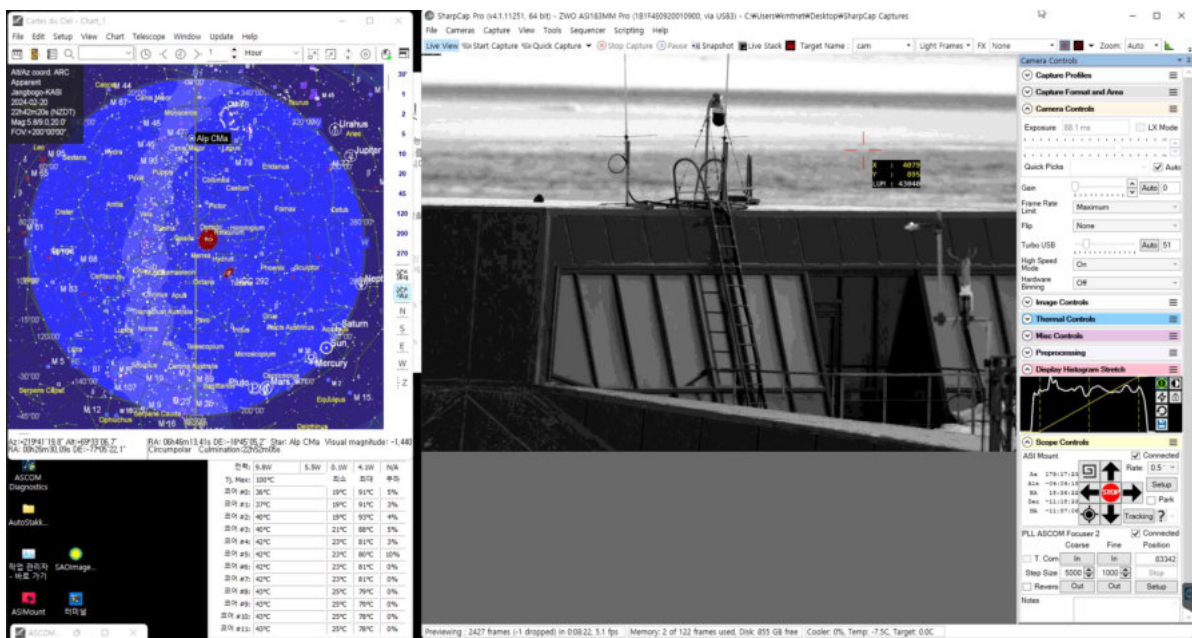


[천문시상 망원경의 별 자동·원격 추적을 위해 장보고과학기지 지리적 위치 정렬]

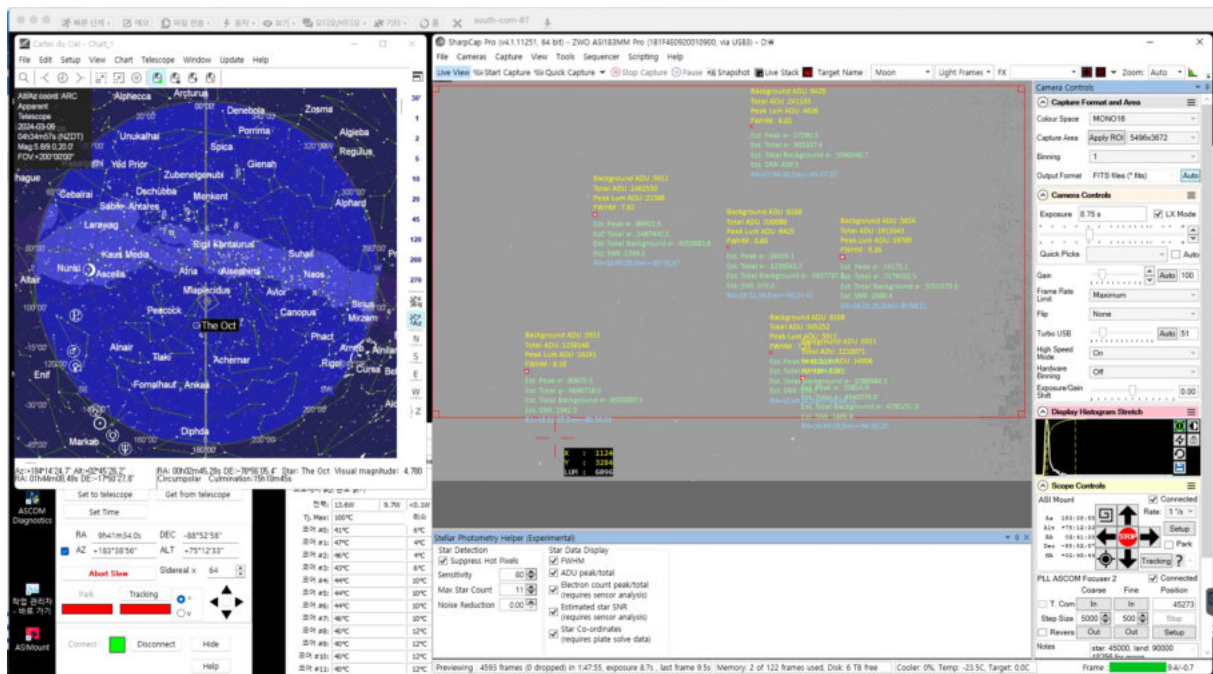


[장보고과학기지 천문시상 망원경 남십자성]

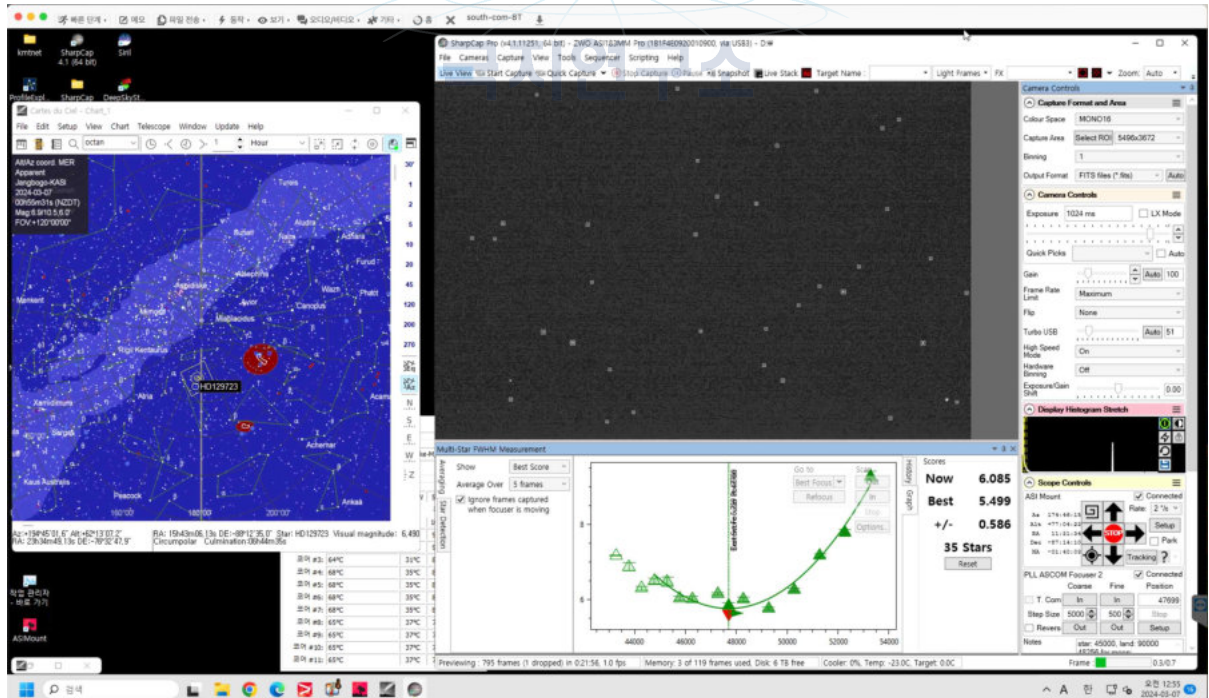
2023-2024년 백야 동안 태양을 추적하여 망원경을 조준 후 태양의 천체좌표(적경, 적위)를 결정하고, 천문시상 관측을 위해 천체좌표로 남십자성 추적한 후 구동부를 고정하여 극야 동안 천문시상 무인 측정



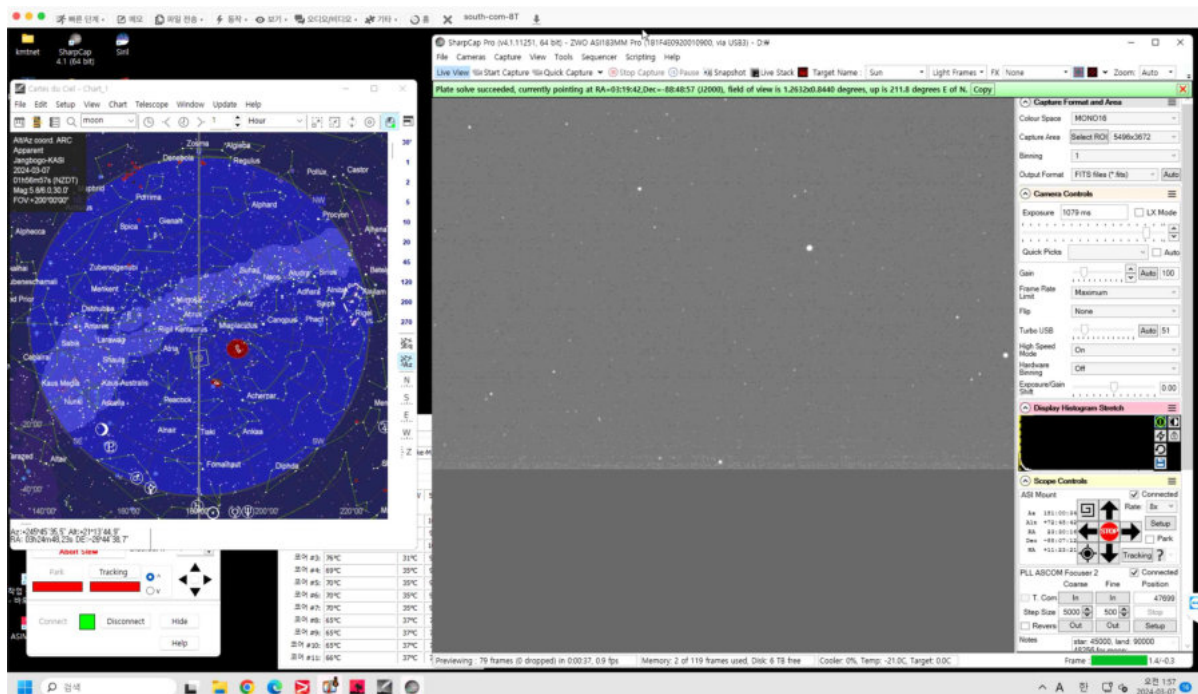
[천문시상 망원경 초점을 조절을 위한 장보고과학기지 본관 통신 안테나 조준]



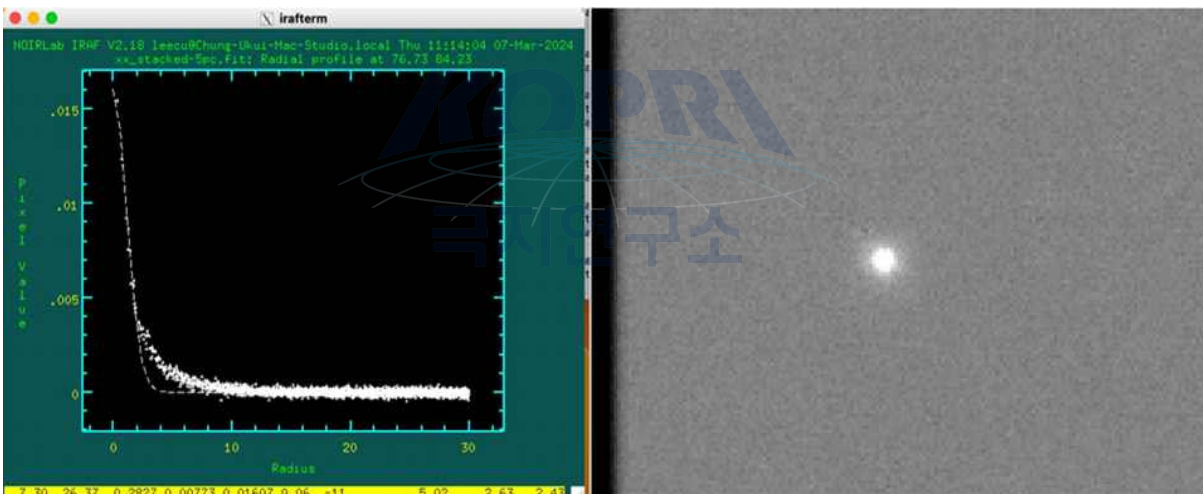
[천문시상 망원경 남십자성 조준 구동부 시험]



[천문시상 망원경의 남십자성 위치 입력]



[천문시상 망원경의 남십자성 추적 관측 성공 화면]



[2024년 3월 7일 11시 14분, 남극 장보고과학기지에서 측정한 천문시상 관측 결과. 천문시상은 2.2" 으로 측정]

○ 천문시상 측정 알고리즘

관측은 장보고과학기지에 임시 설치된 천문우주환경 관측 모듈의 광학 관측 시스템을 이용하여 수행되었다. 관측 시스템은 소구경 광학 망원경과 고속 CMOS 카메라로 구성되었으며, 매우 짧은 노출 시간과 높은 프레임률을 통해 대기 난류의 순간적인 변동을 포착할 수 있도록 설계되었다.

대기 난류의 영향을 통계적으로 분석하기 위하여 Lucky Imaging 기법을 적용하였다. Lucky Imaging은 짧은 노출 시간으로 다수의 영상을 획득한 후, 상대적으로 대기 왜곡이 적은 일부 프레임을 선택하여 영상 품질을 분석하는 방법이다. 이 기법은 대기 난류가 시간적으로 변동한다는 특성을 이용하여 난류 영향이 최소화된 순간의 영상을 활용하여 시상 특성을 추정할 수 있다. 관측 과정에서 수천에서 수만 장 규모의 연속 영상이 획득되었으며, 각 영상은 후처리 과정에서 화질 지표(FWHM 등)를 기준으로 정렬 및 분류되었다.

- Fried Parameter를 이용한 시상 이론

대기 난류에 의한 영상 왜곡은 Fried parameter, τ_0 로 대표된다. Fried parameter는 대기 난류로 인해 위상 왜곡이 1 라디안 이하로 유지되는 유효 개구 크기를 의미하며, 대기의 광학적 안정성을 나타내는 핵심 지표이다. 자연 시상(natural seeing)은 Fried parameter를 이용하여 다음과 같이 근사적으로 표현된다.

$$\epsilon \approx 1.22 \frac{\lambda}{\tau_0}$$

여기서

- ϵ = 시상(arcsec)
- λ = 관측 파장(m)
- τ_0 = Fried parameter(m)

이 식은 대기 난류에 의해 제한되는 각해상도의 하한 값을 나타내며, τ_0 가 클수록 대기가 안정적이고 시상이 우수함을 의미한다. 본 실험에서는 가시광 영역의 대표 파장인 $\lambda = 550\text{nm}$ 를 기준으로 평가하였다.

- Lucky Imaging 확률 모델

Fried(1977)는 대기 난류 조건에서 특정 품질 이상의 short-exposure 영상이 획득될 확률을 다음과 같이 제시하였다.

$$P \approx 5.6 \exp \left[-0.1557 \left(\frac{D}{\tau_0} \right)^2 \right]$$

여기서

- P = 특정 품질 이상의 lucky image 획득 확률
- D = 망원경 구경 직경
- τ_0 = Fried parameter

이 식은 망원경 구경이 커질수록, 또는 대기 난류가 강해질수록(즉, τ_0 가 작아질수록) 고품질 영상을 얻을 확률이 급격히 감소함을 의미한다. 따라서 lucky imaging을 이용한 시상 분석에서는 망원경 구경, 샘플링 조건, 그리고 프레임 선택 비율이 중요한 변수로 작용한다.

- 관측 결과 및 정량 분석

획득된 영상 데이터에 대해 프레임 품질에 따른 통계적 분석을 수행한 결과 상위 5% 수준의 우수 프레임에서는 비교적 날카로운 영상 중심부(sharp core)가 형성되는 것이 확인되었다. 이는 대기 난류의 영향이 순간적으로 감소한 상태에서 관측이 이루어졌음을 의미한다. 해당 프레임들의 FWHM 값을 기반으로 Fried parameter를 역산한 결과 장보고과학기술기에서의 τ_0 값은 약 50 mm 수준으로 산출되었다. 이를 시상 식에 대입하면 다음과 같다.

$$\epsilon \approx 1.22 \times \frac{550 \times 10^{-9}}{0.05} \approx 2.73 \text{ arcsec}$$

이는 장보고과학기지에서 자연 시상이 약 2.7~2.8 arcsec 수준임을 의미한다. 한편, 프레임 선택 비율을 확대하여(예: 상위 90%) 분석한 경우 영상의 확산 폭이 증가하는 경향이 나타났으며, 이는 대기 난류뿐만 아니라 망원경 구경과 광학계 해상도 한계가 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 영상의 중심부는 주로 대기 난류 특성(τ_0)에 의해 결정되는 반면, 주변부의 흐려진 영역은 망원경 구경 D 와 회전 한계의 영향을 받는다.

- 관측 결과 및 정량 분석

장보고과학기지의 시상 값은 남극내륙 고원에서 보고된 sub-arcsec 수준의 시상과 비교할 때 다소 큰 값이다. 이는 장보고과학기지가 해안에 위치하고 지면 경계층(boundary layer)의 영향을 상대적으로 크게 받기 때문으로 판단된다. 특히 관측 고도가 낮고, 주변 지형과 구조물에 의해 발생하는 국지적 난류가 시상에 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 그럼에도 불구하고 본 연구의 결과는 다음과 같은 중요한 의미를 가진다.

첫째, 장보고과학기지에서 수행한 최초의 천문시상 연구결과이다.

둘째, 고가의 전문 시상 측정 장비 없이도 간이 광학 시스템과 lucky imaging 기법을 활용하여 극지 환경에서 시상 평가가 가능함을 실증하였다.

셋째, 본 연구에서 적용한 방법론은 향후 남극내륙 고원 지역에 설치될 무인 천문관측 플랫폼의 관측환경 사전 평가에 직접적으로 활용될 수 있다.

- 관측 결과 및 정량 분석

본 연구 결과는 남극내륙 지역에서의 천문 관측 인프라 구축을 위한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 향후 다음과 같은 확장이 가능하다.

- 관측 고도 상승을 통한 경계층 영향 분리 연구
- 계절별·기상 조건별 장기 시상 통계 연구
- 무인 이동식 관측 플랫폼과 연계한 다지점 시상 관측
- 광학·적외선·THz 관측을 위한 최적 관측지 선정 자료 활용

이를 통해 남극을 활용한 차세대 지상 천문 관측 전략 수립에 중요한 과학적 근거를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 백야 천문시상 관측 연구

천문 시상(astronomical seeing)은 일반적으로 야간 관측을 기준으로 논의되어 왔으며, 낮 시간대의 시상은 태양 복사에 의한 지표 가열과 대기 대류로 인해 관측 조건이 불리하다고 인식되어 왔다. 특히 중·저위도 지역에서는 낮 동안 강한 열 대류와 난류 발달로 인해 광학적 시상이 급격히 악화되는 것이 일반적이다.

그러나 남극은 지구 상에서 매우 특수한 대기·복사 환경을 갖는 지역으로, 낮 시간대에도 태양 고도가 낮고 지표면 에너지 수지가 제한적이며, 대기층의 구조가 중위도 지역과 근본적으로 다르다. 이러한 특성으로 인해 남극에서는 낮 시간대에도 상대적으로 안정적인 대기 상태가 유지될 가능성이 제기되어 왔다.

본 연구에서는 이러한 가설을 실증적으로 검증하기 위하여 남극 장보고과학기지(해발 ~ 40m)와

남극내륙 진출로 베이스캠프(해발 약 1,000m)에서 태양 관측을 이용한 낮 시상(daytime seeing) 측정을 수행하였다. 이는 남극 지역에서의 연중 관측 가능성 평가와 함께 향후 태양 관측 및 무인 천문관측 플랫폼의 상시 운용 가능성을 검증하기 위한 핵심 연구이다.

○ 태양영상 기반의 낮 시상 측정 원리 및 방법

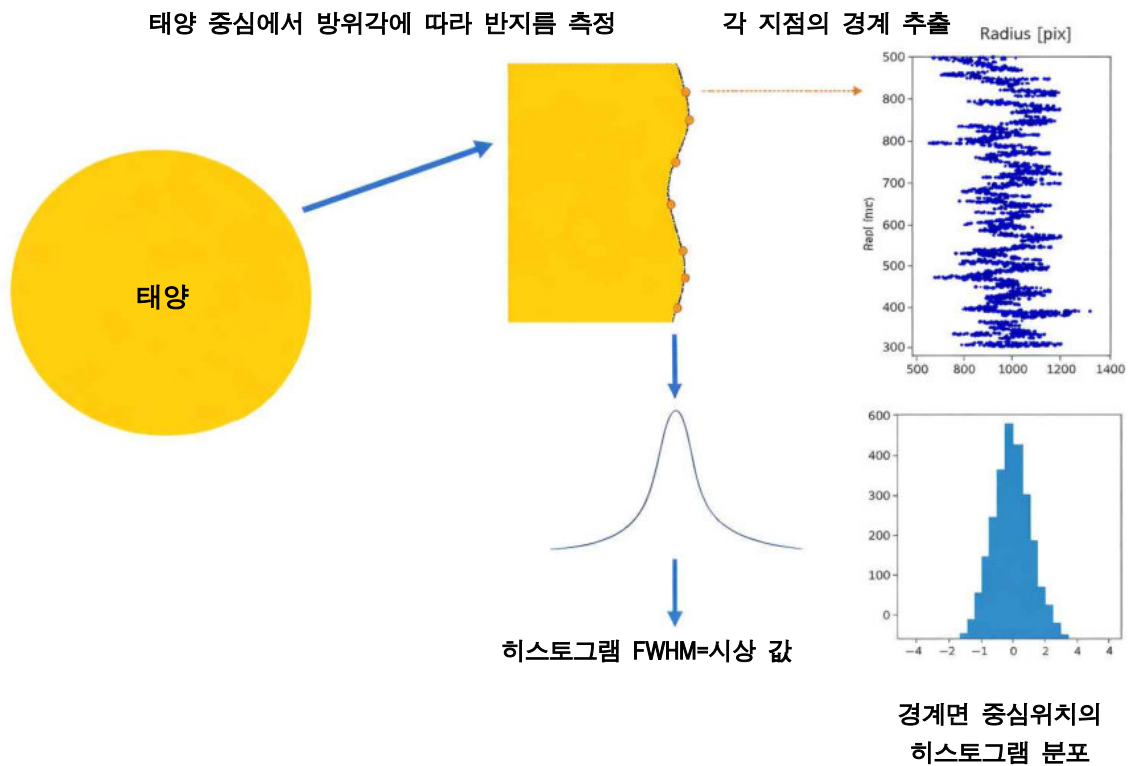
남극의 백야 조건에서도 천문시상을 정량적으로 산출하기 위하여 태양 원반 영상을 이용한 단노출 시상 추출 알고리즘을 적용하였다. 태양은 충분히 밝고 넓은 각지름을 가지므로 매우 짧은 노출 시간에서도 높은 신호 대 잡음비를 확보할 수 있으며, 이는 낮 시간 대기 난류의 순간적인 영향을 분석하는 데 적합한 관측 대상이다.

낮 시상 추출은 먼저 약 1ms 이하의 매우 짧은 노출 시간으로 태양 원반 영상을 반복적으로 획득하는 단계에서 시작된다. 이러한 단노출 영상은 대기 난류로 인한 영상 왜곡을 평균화하지 않고 순간적인 굴절률 변동 효과를 그대로 보존하므로 시상 분석에 유리하다.

획득된 태양 영상에 대해 태양 원반의 중심을 기준으로 좌표계를 정의한다. 각 방위각에 대해 태양 원반의 경계(edge) 위치를 반지름 방향으로 추출한다. 이때 추출된 경계 위치는 대기 난류에 의해 미세하게 흔들리며, 이러한 반지름 방향 변동은 시상에 직접적으로 대응하는 물리량이 된다. 방위각 전 구간에 대해 경계 위치를 반복적으로 추출함으로써 태양 원반 전체에 대한 경계 위치 분포를 확보한다.

이후 추출된 경계 위치들의 반지름 분포를 이용하여 히스토그램을 구성하고 해당 분포의 폭을 정량적으로 분석하였다. 경계 위치 히스토그램은 대기 난류에 의한 영상 흔들림이 통계적으로 누적된 결과를 나타내며, 이 분포의 폭은 시상의 크기를 반영한다. 본 연구에서는 히스토그램의 FWHM 값을 시상 지표로 정의하였다. 히스토그램의 FWHM은 관측 파장과 광학계 배율을 고려하여 각초(arcsec) 단위의 시상 값으로 환산되며, 이를 통해 낮 시간대 천문시상을 정량적으로 산출하였다.

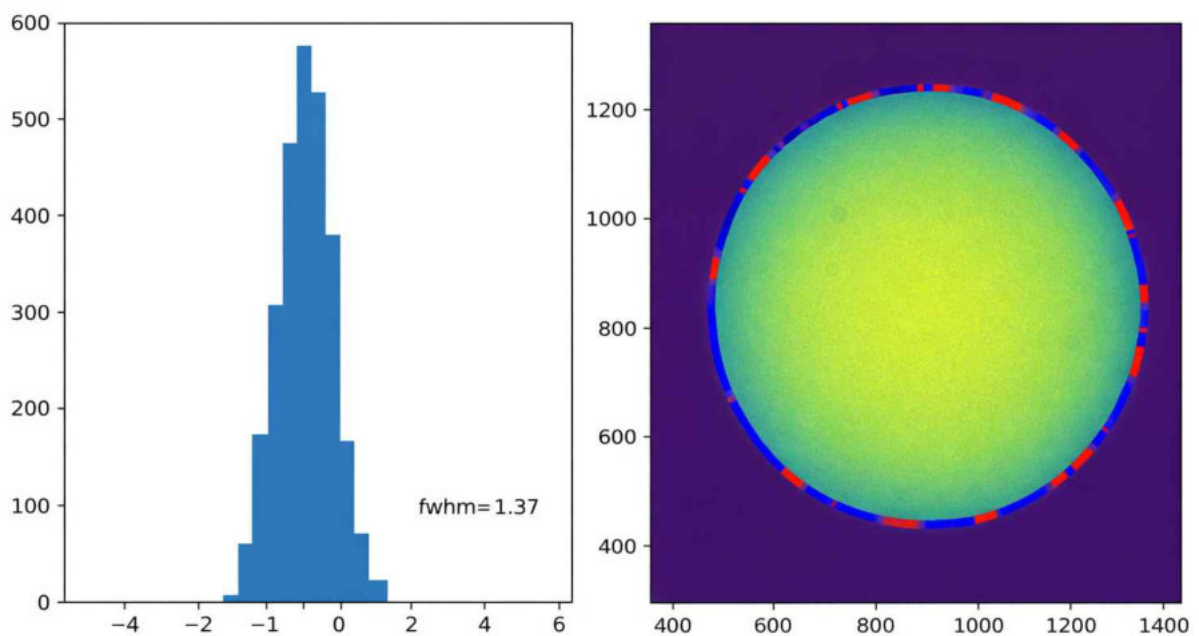
본 알고리즘은 복잡한 파면 센서나 대형 광학 장비 없이도 비교적 단순한 관측 시스템으로 낮 시상을 추출할 수 있다는 장점이 있으며, 특히 백야가 지속되는 남극 환경에서 연중 시상 모니터링을 수행할 수 있는 실용적인 방법으로 활용 가능하다. 본 연구에서 적용한 태양 기반 낮 시상 추출 알고리즘은 남극 지역의 대기 안정성을 정량적으로 평가하는 핵심 도구로서, 향후 태양 관측, 천문 관측지 평가, 무인 관측 시스템 설계에 중요한 기초 자료를 제공한다.



[낮 기상 추출 알고리즘 개념도]

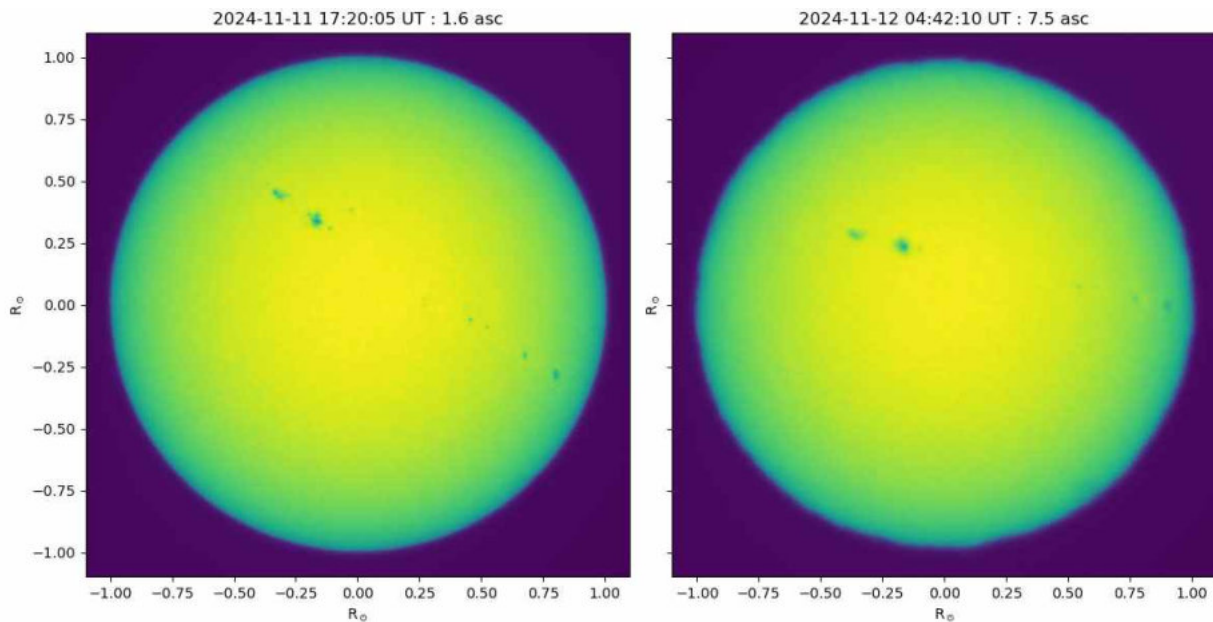
매우 짧은 노출 시간(약 1ms)으로 획득한 태양 원반 영상으로부터 태양 중심 기준의 극좌표계로 변환한 후, 방위각 방향으로 태양 원반 경계 위치를 산출한다. 추출된 경계 위치의 반지름 분포를 히스토그램으로 구성하고, 해당 분포의 FWHM을 산출하여 낮 천문시상 값을 정량적으로 계산한다.

극지연구소
2020-10-08T15:24:31



[태양 원반 관측을 이용한 낮 천문시상 측정 예시]

좌측은 태양 원반 경계(edge) 위치 변동으로부터 추출된 반지름 분포의 히스토그램으로 분포의 FWHM을 이용하여 천문시상 값을 산출하였다. 우측은 동일 시각에 획득된 태양 원반 영상으로 태양 원반 경계에서 기상 분석에 사용된 지점들이 표시되어 있다. 매우 짧은 노출 시간으로 촬영된 태양 영상의 경계 흔들림은 대기 난류에 의한 기상 효과를 반영한다.



[남극내륙에서 기상 측정을 위해 촬영한 태양 광구 영상. (좌) 1.6" (우) 7.5"]

○ 관측 수행 및 데이터 획득

낮 기상 관측은 2024년 10월 말부터 11월 중순까지 수행되었으며, 장보고과학기지과 남극 내륙 진출로 베이스캠프에서 각각 연속 관측이 이루어졌다. 관측은 약 2-3초 간격으로 24 시간 연속 촬영하는 방식으로 수행되어, 태양 고도 변화에 따른 기상의 시간적 변화를 분석할 수 있는 충분한 데이터가 확보되었다.

장보고과학기지에서는 주로 해안과 인접한 환경의 영향을 받는 조건에서 관측이 수행되었으며, 남극내륙 진출로 베이스캠프에서는 상대적으로 고도가 높고 주변 지형의 영향이 제한된 조건에서 관측이 이루어졌다. 두 관측 지점 모두 해안과 비교적 가까워 표면풍과 저고도 경계층 난류의 영향을 받을 수 있는 환경이지만 고도 차이에 따른 대기 구조의 차이가 기상에 반영될 것으로 예상되었다.



[2024년 장보고과학기지 내에서의 태양 낮 기상 측정 및 분광관측]

○ 낮 기상 관측 결과

관측 데이터 분석 결과, 장보고과학기지와 남극내륙 진출로 베이스캠프에서 뚜렷한 낮 기상 차이가 확인되었다.

장보고과학기지(해발 약 40m)에서는 태양 고도가 상대적으로 높은 낮 시간대 중 약 2-3시간 동안 약 2.0 arcsec 수준의 낮 기상이 관측되었으며, 이후 태양 고도 변화와 함께 기상이 점진적으로 악화되는 경향을 보였다. 이는 해안 인접 지역에서 발생하는 표면풍과 저고도 경계층 난류의 영향을 반영한 결과로 해석된다.

반면, 남극내륙 진출로 베이스캠프(해발 약 1,000m)에서는 약 1.6" 수준의 낮 기상이 비교적 긴 시간 동안 안정적으로 유지되는 것이 확인되었다. 이는 동일한 낮 조건에서도 고도가 높아질수록 대기 하층의 난류 영향이 감소하고 보다 안정적인 대기 상태가 형성됨을 실증적으로 보여주는 결과이다.

○ 결과 해석 및 물리적 의미

낮 기상은 대기 난류의 강도를 나타내는 Fried parameter, τ_0 와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\epsilon \approx 1.22 \frac{\lambda}{\tau_0}$$

여기서 ϵ 는 기상(arcsec)기상, λ 는 관측 파장이다. 기상 값이 작다는 것은 곧 τ_0 가 상대적으로 크다는 것을 의미하며, 이는 대기 난류가 억제되어 있음을 의미한다. 본 연구에서 남극내륙 진출로 베이스캠프에서 더 우수한 낮 기상이 관측된 것은 고도가 증가함에 따라 표면 경계층의 영향이 감소하고 난류 에너지가 상층으로 전달되기 전에 소산된 것으로 해석된다. 이는 기존에 보고된 남극내륙 고원(해발 3,000~4,000m) 지역의 우수한 기상 특성과도 일관된 결과이다. 남극내륙 진출로에서 관측된 높은 기상 값은 태양 복사에 따른 대기 경계층 두께의 증가 및 국지적 표면풍의 변화로 판단된다.

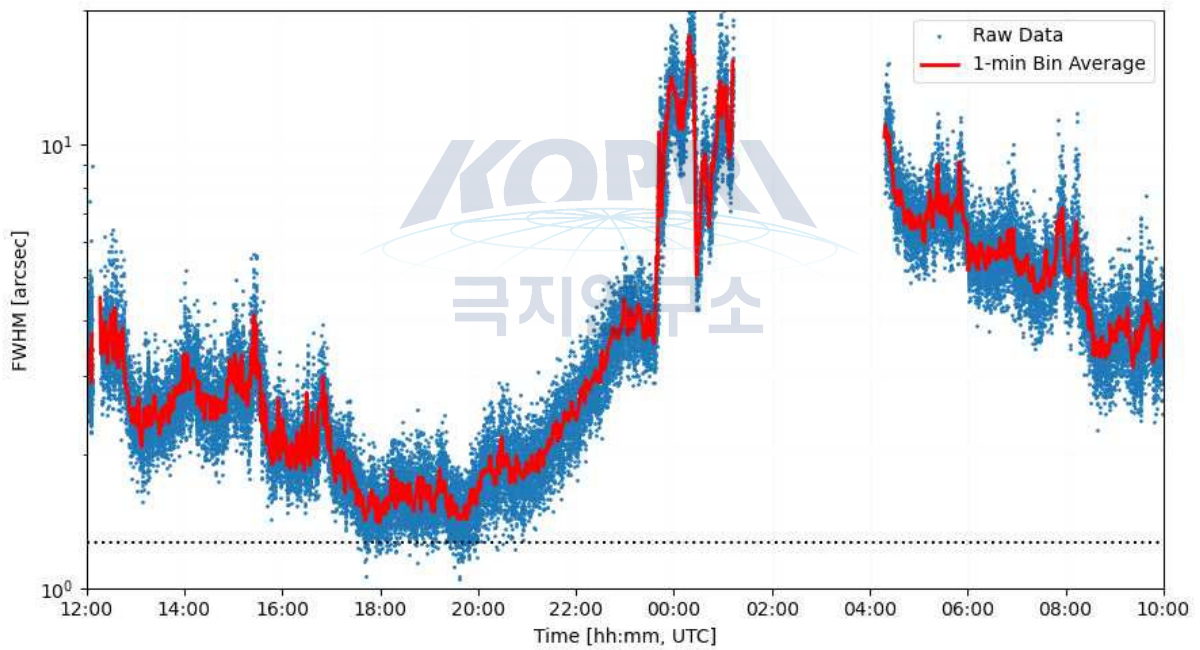
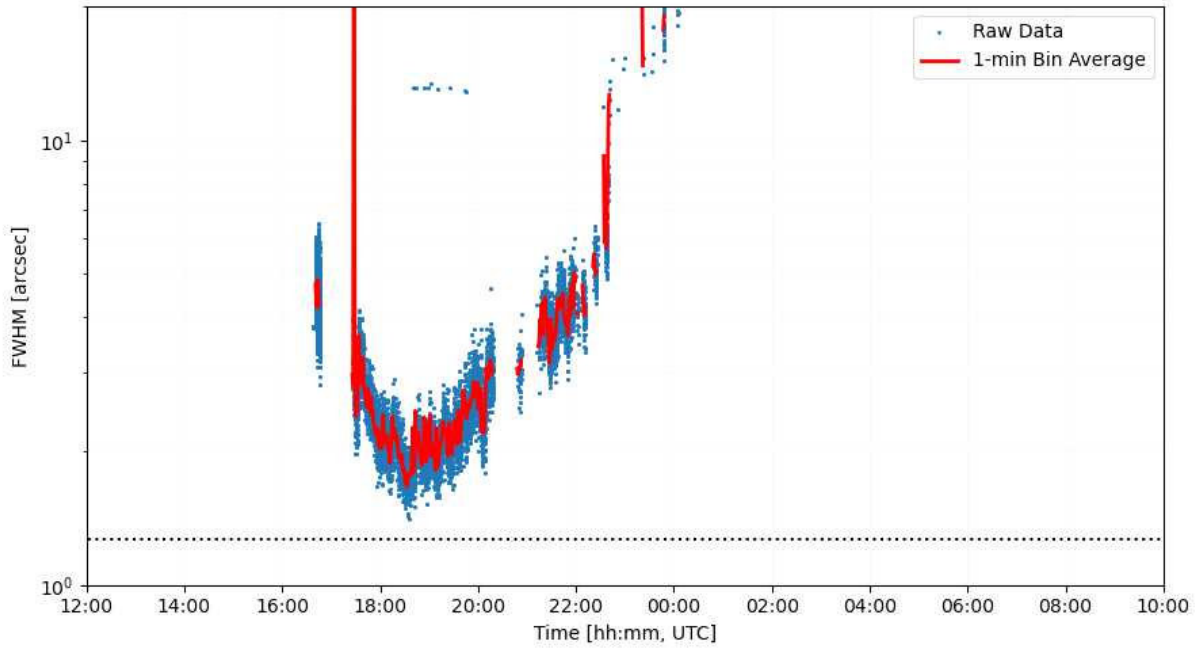
○ 연구의 의의 및 향후 활용

본 연구는 다음과 같은 중요한 시사점을 제공한다.

첫째, 남극에서는 태양이 떠 있는 백야 조건에서도 천문기상 측정이 가능하며, 중·저위도 지역과는 본질적으로 다른 대기 특성을 보임을 실측 자료를 통해 입증하였다.

둘째, 해발 고도가 증가함에 따라 낮 기상이 개선됨을 확인함으로써, 향후 해발 3,000m 이상 남극내륙 고지대가 세계 최고 수준의 천문 관측 환경을 제공할 수 있음을 뒷받침하는 실증적 근거를 제시하였다.

셋째, 낮 기상 측정 결과는 태양 관측, 태양영상분광망원경 운용, 그리고 연중 무인 천문 관측 플랫폼 설계에 직접적으로 활용될 수 있다. 특히 본 연구에서 수행한 백야 천문기상 관측은 남극을 단순한 극야 관측지가 아닌, 연중·주야간 통합 천문 관측이 가능한 독특한 지상 실험실로 확장할 수 있는 가능성을 실증적으로 제시한다는 점에서 의의를 가진다.



[2024년 장보고과학기지(11월 3일, 위)와 남극내륙 진출로 베이스캠프(11월 11일)에서의 시상 측정 결과
 점선은 장비의 한계 해상도, 장보고과학기지 시상값은 며칠에 걸쳐서 비슷한 양상의 시상값을 얻을 수 있었다. 남극내륙 진출로 베이스캠프에서는 시간상의 한계로 한 세트의 데이터를 확보하였다.

4. 남극 태양영상분광관측 실험 및 관측환경 검증

태양은 지구 대기 및 우주환경 변화의 주요 에너지원으로, 태양 활동의 시간적·공간적 변화는 지구 고층대기, 전리권, 우주기상 현상에 직접적인 영향을 미친다. 특히 태양 채층(chromosphere)에서 발생하는 플레어, 필라멘트, 국지적 속도장 변화 등은 태양-지구 연결성을 이해하는 데 핵심적인 물리 정보를 제공한다. 이러한 현상을 정밀하게 관측하기 위해서는 높은 공간 분해능과 분광 분해능을 동시에 확보할 수 있는 태양영상분광관측(Solar Imaging Spectroscopy)이 필수적이다.

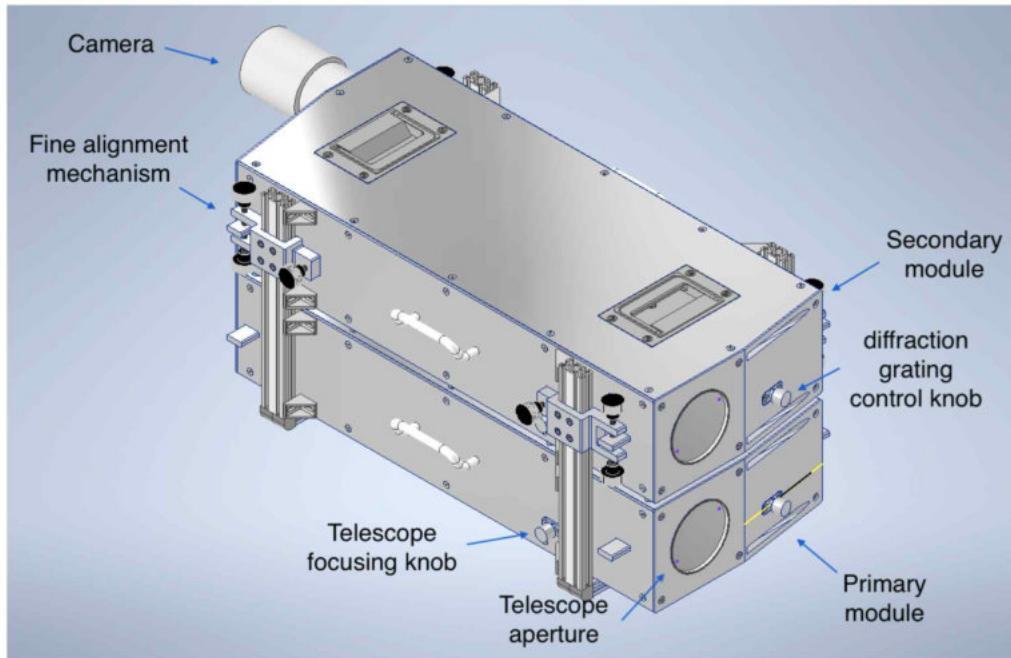
남극은 낮은 수증기량과 청정한 대기 조건을 갖춘 지구상에서 매우 특수한 관측 환경을 제공한다. 특히 대기 중 수증기 흡수선이 현저히 약해 태양 스펙트럼에서 미세한 분광 구조를 보다 명확하게 분리하여 분석할 수 있으며, 이는 중·저위도 지역과 차별화되는 남극 관측 환경의 핵심적인 장점이다. 본 연구에서는 이러한 남극 대기 환경의 특성을 활용하여, 남극 환경에 최적화된 태양영상분광망원경을 이용한 현장 관측 실험을 수행하고, 장비 성능과 운용 가능성을 종합적으로 검증하였다.

○ 시스템 구성 및 설계 개요

본 연구에 사용된 태양영상분광망원경은 미국 Big Bear Solar Observatory 및 유럽 태양영상분광망원경의 설계를 참고하되, 남극의 극한 환경에 적합하도록 구조적·기계적 요소를 수정하여 개발되었다. 전체 시스템은 약 18kg의 경량 구조로 설계되어 항공 이송이 가능하도록 하였으며, 극저온 환경에서도 취급 및 설치가 용이하도록 견고한 손잡이 구조와 단순화된 기계 설계를 적용하였다. 관측 파장대역은 태양 채층 연구에 핵심적인 $H\alpha$ (656.28 nm)로 설정하였으며, 태양 전영역(full-disk)을 관측할 수 있도록 광학계가 구성되었다. 분광 분해능은 $R \approx 38,000$ 으로 설정되어, 채층 스펙트럼의 중심선 및 날개 구조를 정밀하게 분석할 수 있도록 하였다. 공간 분해능은 스캔 방향 약 2", 슬릿 방향 약 3"로 설계되었으며, 데이터 획득 간격은 2.5분 이하로 설정되어 시간 변화에 따른 태양 채층 구조의 진화를 추적할 수 있다. 한 세트의 3차원 분광 데이터 큐브 용량은 ~3.7 GB이다. 이러한 시스템 구성은 태양 채층의 미세 구조와 동역학적 변화를 영상 정보와 분광 정보 형태로 동시에 분석할 수 있도록 설계된 것이다.

[태양영상분광망원경 사양]

사양	값
관측시야(FOV)	Full-disk (태양 전영역)
관측 파장대역	$H\alpha$ (656.28 nm)
공간 분해능	2 "(스캔방향), 3 "(슬릿방향)
분광 분해능 (R)	38,000
데이터 획득 간격	2.5분이하
데이터 사이즈	3.7GB/3D cube
무게	18kg



[남극 태양영상분광망원경 설계도]

○ 현장 설치 및 관측 수행

태양영상분광망원경은 항공편을 이용해 남극으로 이송되었으며, 장보고과학기지에 도착 후 천문우주탐사 모듈 옥상에 설치되었다. 마운트로는 ZWO AM5가 사용되었고, 관측 제어는 한국천문연구원이 자체 개발한 제어 시스템을 적용하였다. 다만, 현장 환경과 장비 간의 호환성 문제로 초기 약 2일간 구동 안정화를 위한 디버깅 작업이 수행되었다.

설치 이후 약 하루 이상 시험 관측을 수행하며 태양 분광 데이터가 획득되어 실제 남극 환경에서 태양분광망원경이 정상적으로 동작함을 확인하였다. 그러나 관측 과정에서 남극 특유의 급격한 기온 변화로 인해 망원경 광학계와 분광기 포커스가 시간에 따라 변동하는 현상이 관찰되었다. 이는 극한 환경에서 장시간 안정적인 태양 분광 관측을 위해서는 자동 포커싱 유지 장치와 온도 변화에 대한 능동적 보상 메커니즘이 필수적임을 시사한다.



[2024년 11월 2일 남극 태양영상분광망원경 구동을 위한 현장 디버깅 장면]

○ 관측 결과 및 데이터 특성

장보고과학기지에서 관측된 태양 상분광 데이터 분석 결과, 남극 대기 환경의 특성이 분광 관측에 매우 유리하게 작용함이 확인되었다. 특히 남극은 지구상에서 가장 건조한 지역으로, 관측된 스펙트럼에서는 중·저위도 지역에서 흔히 나타나는 강한 수증기(H_2O) 흡수선이 현저히 약하게 나타났다. 이론 인해 태양 스펙트럼의 중심선과 날개 구조가 상대적으로 왜곡 없이 분리되어 관측되었으며, 이는 태양 채층 분광 구조를 정밀하게 분석하는 데 있어 중요한 장점으로 작용하였다. 이러한 결과는 남극이 태양 분광 관측에 있어 지구상에서 매우 우수한 관측 환경을 실측 자료를 통해 정량적·정성적으로 입증하는 사례라 할 수 있다.

2024년 11월 7일 수행된 관측에서는 남극 장보고과학기지에 설치된 태양영상분광망원경을 이용하여 H_α 파장대에 대한 태양 전영역(full disk) 관측이 이루어졌으며, 태양 채층의 대표적인 분광 및 영상 구조가 안정적으로 획득되었다. 관측된 태양 영상에서는 흑점, 필라멘트, 밝은 영역 등 채층 및 광구 기원의 주요 구조가 확인되었으며, 이는 관측 당시 태양 활동 상태를 반영하는 결과이다. 특히 영상 전반에 걸쳐 명암 대비가 안정적으로 유지되어, 남극 관측 환경에서 확보된 영상 데이터의 품질이 매우 양호함을 확인할 수 있다.

동일한 관측 자료에 대해 AI 기반 영상 처리 기법을 적용한 결과, 태양 채층 구조가 더욱 선명하게 강조되었으며, 흑점과 필라멘트와 같은 미세 구조의 공간적 분포가 보다 명확하게 드러났다. 이는 남극에서 획득된 태양 영상이 단순한 관측 자료에 그치지 않고, 후처리 기법과 결합될 경우 태양 활동 영역의 구조적 특성과 진화를 보다 효과적으로 분석할 수 있음을 보여준다. 이러한 접근은 향후 자동화된 태양 활동 감시 및 장기 모니터링 체계 구축에도 활용 가능성이 높다.

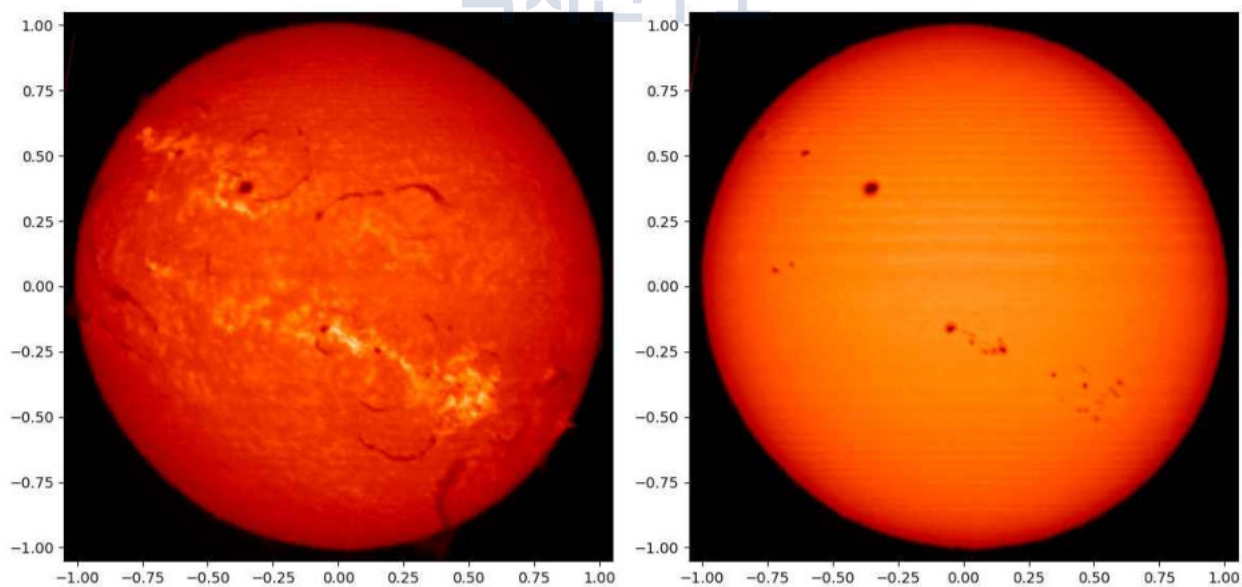
태양영상분광 관측을 통해 획득된 분광 데이터는 태양 채층의 온도 구조, 시선 방향 속도 변화에 따른 속도장 분석, 그리고 국지적 활동 현상을 정량적으로 분석하는 데 활용될 수 있음이 확인되었다. 특히 H_α 중심선과 날개 구조가 비교적 명확하게 분리되어 관측됨에 따라, 도플러 이동 분석을 통한 채층 플라스마의 운동 특성 연구로의 가능성도 제시된다. 또한 남극의 낮은 수증기 환경으로 인해 태양 스펙트럼과 지구 대기 분광 신호를 비교적 명확하게 구분할 수 있어 태양 분광 자료를 활용한 대기 분광 연구와의 연계 가능성도 함께 제시된다.

시험 관측 기간 동안 확보된 전체 태양영상분광 데이터의 용량은 약 4TB이다. 현재 해당 자료에 대해서는 스펙트럼 정밀 보정, 선 중심 이동 분석, 채층 구조 분류 등 추가적인 정밀 분석이 진행 중이다. 이러한 데이터는 향후 태양물리 연구의 기초 자료로 활용될 뿐만 아니라, 남극 환경에서의 태양 관측 가능성을 장기적으로 평가하는 데에도 중요한 기준 자료를 활용될 수 있다.

요약하면, 본 관측 결과는 남극 장보고과학기지가 태양영상분광관측을 수행하기에 충분한 관측 환경과 기술적 여건을 갖추고 있음을 실증적으로 보여준다. 특히 낮은 대기 수증기량과 안정적인 관측 조건은 태양 채층 분광 연구에 있어 중·저위도 관측소와 차별화되는 강점을 제공하며, 향후 장기적인 태양 관측, 무인 태양 관측 시스템 구축, 그리고 태양-지구 연계 연구를 위한 전략적 관측 거점으로서의 확장 가능성을 뒷받침하는 중요한 근거로 평가된다.



[2024년 11월 7일, 장보고과학기지 태양영상분광 관측]



[2024년 11월 7일 남극 장보고과학기지에서 태양영상분광망원경으로 관측한 태양 (좌) H_{α} 영상 및 (우)광구 영상]

○ 관측 한계 및 개선 필요 사항

본 연구를 통해 남극 태양영상분광관측의 가능성을 실증하였으나, 동시에 몇 가지 기술적·환경적 한계도 도출되었다.

- 남극 여름철의 급격한 온도 변화로 인한 광학계 및 분광기 포커스 불안정
- 강한 표면풍 조건에서의 장비 설치 및 장시간 관측의 어려움
- 남극내륙 베이스캠프 이동 후 강풍으로 인한 태양영상분광관측 수행 불가

이러한 한계는 향후 남극내륙 환경에 최적화된 태양 분광 관측 시스템을 개발하기 위해 반드시 개선되어야 할 요소로 판단된다.

○ 연구의 의의 및 활용 가능성

본 태양영상분광관측 실험은 다음과 같은 중요한 의의를 가진다.

첫째, 남극에서 태양영상분광관측이 실제로 가능함을 현장 실험을 통해 최초로 검증하였다.

둘째, 남극의 낮은 수증기 환경이 태양 분광 관측에 실질적인 이점을 제공함을 실측 데이터로 확인하였다.

셋째, 본 연구 결과는 향후 남극내륙 고원에서 태양 관측소 구축 및 무인 태양 관측 플랫폼 개발을 위한 기술적 기준 자료로 활용될 수 있다.

특히 낮 기상 측정 결과와 결합할 경우, 남극은 태양 관측과 야간 천문 관측을 동시에 수행할 수 있는 연중 다천체 관측 환경으로 발전할 수 있음을 시사한다.

5. 남극 GNSS 연구

남극내륙 천문우주환경 연구거점 구축을 위한 핵심 인프라로서, 본 연구에서는 GNSS 상시관측소 시스템을 설계·구축하고 그 운용 가능성을 검증하였다. GNSS 상시관측소는 남극 빙상 움직임을 정밀하게 모니터링하고, 극지 환경에서의 전리권 교란 및 위성항법 신호 특성을 장기적으로 분석하기 위한 기반 관측 시스템이다. 특히 천문 관측 장비의 기준 좌표 유지와 장기적인 위치 안정성 확보를 위해 GNSS 관측은 필수적인 요소로 기능한다.

GNSS 수신기 및 안테나는 2025년 12월 설치를 목표로 하여, 남극내륙 천문우주환경 연구거점에 위치한 관측소 모듈에 설치될 예정이었다. 그러나 장보고과학기지 수선 공사와 남극내륙 진출 일정 변경으로 향후 연구거점 구축 후 다시 설치될 예정이다. 해당 시스템은 다중위성·다중주파수 신호를 동시에 수신할 수 있는 GNSS 기준국용 다중채널 수신기와 다중위성 신호 수신용 GNSS 안테나로 구성되며, 남극과 같은 극한 환경에서도 장기간 안정적인 상시 운용이 가능하도록 설계되었다.

설치 예정인 GNSS 수신기는 크기 약 $80 \times 58.4 \times 45\text{mm}$, 무게 약 235g의 소형·경량 장비로 제한된 공간의 무인 관측 모듈 내에서도 효율적으로 설치 및 운용이 가능하다. 수신기의 운영 온도 범위는 -20°C 에서 $+55^{\circ}\text{C}$ 로 설정되어 있으며, 극지 환경에서의 저온 조건에서도 안정적인 데이터 수집이 가능하도록 고려되었다. GNSS 안테나는 -60°C 에서 $+85^{\circ}\text{C}$ 까지의 넓은 온도 범위에서 동작할 수 있도록 설계되었으며 남극내륙의 극저온 환경과 급격한 기상 변화에도 대응할 수 있다.

GNSS 상시관측의 주요 운영 목적은 남극내륙 천문·우주환경 연구거점 주변 빙상의 장기적인

움직임을 정밀하게 모니터링하는 것이다. 이를 통해 빙상의 이동 속도와 방향을 정량적으로 산출하고, 천문 관측 장비의 기준 좌표를 지속적으로 보정함으로써 관측 자료의 장기적 신뢰성을 확보할 수 있다. 또한 GNSS 관측 자료는 남극 고위도 지역에서 빈번하게 발생하는 전리권 교란과 오로라 활동에 따른 GNSS 신호 변동을 분석하는 데 활용되어, 위성항법 신호 품질 저하 원인 규명과 신호 안정성 평가에 중요한 정보를 제공한다.

본 연구에서 제시한 GNSS 상시관측소는 남극내륙 고원 연구거점에서 천문시상, 태양우주 환경 관측 시스템과 동일한 천문·우주환경 관측소 모듈 내에 설치되어 통합 운용될 예정이다. 이러한 통합 운용 구조는 GNSS 자료와 천문·우주환경 관측 자료를 상호 연계 분석할 수 있는 기반을 제공하며, 남극내륙 연구거점을 지상 천문 관측과 우주환경 연구가 결합된 종합 관측 플랫폼으로 발전시키는 데 기여할 것으로 기대된다.

결론을 말하면, 본 GNSS 상시관측소 시스템은 향후 남극내륙 고원 연구거점 구축 및 국가 차원의 극지 GNSS 관측 네트워크 확장에 핵심적인 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

○ GNSS 빙상 움직임 자료처리 전략

본 연구는 남극내륙 고원 지역에 천문·우주환경 연구거점이 구축되거나 상시 관측 기지가 확보되는 것을 전제로, 극지 환경에서의 빙상 움직임을 정밀하게 파악하고 이를 연구 인프라의 안정적 운영과 연구탐사 활동의 안전 확보에 활용하기 위한 GNSS 기반 자료처리 전략을 수립하는 것으로 목적으로 한다. 특히 남극내륙은 장기간 인력 상주가 제한되고 환경 변화에 대한 직접적인 관측이 어려운 지역으로 빙상 이동에 대한 지속적이고 정량적인 관측은 기지 운영을 위한 기초 자료로서 필수적인 요소이다.

천문관측 장비는 장기간 동일한 기준 좌표를 유지해야 하며, 관측소 위치의 미세한 변화는 고정밀 천문관측 결과에 직접적인 영향을 미친다. 남극내륙 고원에서는 빙상 흐름에 따라 관측소 자체가 연가 mm~cm 수준으로 이동할 가능성이 있으므로, 이러한 위치 변화를 정밀하게 추적·보정하지 않을 경우 관측 자료의 절대적 정확도와 장기적 일관성이 저하될 수 있다. 이에 따라 GNSS 관측을 통해 관측소 위치 변화를 지속적으로 모니터링 하고, 이를 천문관측 장비의 기준 좌표 유지에 활용하고자 한다.

이를 위해 GNSS 기준국 설치 이후 최소 3년 이상의 연속 관측을 통한 장기 시계열 자료 확보 및 안정적인 자료 품질을 위한 오차보정 자료처리 전략이 필요하다. 관측에는 다중 주파수 GNSS 수신기와 안테나를 사용하며, 자료 샘플링 간격을 30초 이하로 설정하여 빙상 이동에 따른 미세한 위치 변화를 고해상도로 모니터링한다. 수집된 원시 관측자료는 loss of lock, outlier, cycle slip 등의 신호 품질 점검을 수행한 후 국제 표준 형식인 RINEX 3.xx 포맷으로 변환한 후 후속 정밀 자료 분석에 활용된다.

GNSS 관측 자료의 좌표 해석은 국제지구기준좌표계(ITRF2020)를 기준으로 수행한다. 이를 통해 남극내륙 관측소의 위치 정보를 글로벌 기준 좌표계와 일관되게 연결함으로써, 장기적인 위치 변화 분석뿐만 아니라 InSAR, 위성 고도계 등 외부 관측자료와의 비교·검증이 가능하도록 한다. 이러한 기준 좌표계 설정은 빙상 이동에 따른 mm/yr 수준의 변위를 정량적으로 산출하기 위한 필수 절차이다.

GNSS 자료 처리는 정밀 단독측위(Precise Point Positioning, PPP) Kinematic 기법을 적용하여 수행한다. PPP 기법에서 관측 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$P_r^s(t) = \rho_r^s(t) + c(\delta t_r - \delta t_s) + T_r(t) + I_r^s(t) + \epsilon_P$$

$$\Phi_r^s(t) = \rho_r^s(t) + c(\delta t_r - \delta t_s) + T_r(t) + I_r^s(t) + \lambda N_r^s + \epsilon_\Phi$$

여기서

- $\rho_r^s(t)$ = 위성-수신기 간 의사거리(pseudorange),
- $\delta t_r, \delta t_s$ = 수신기 및 위성 시계 오차
- $T_r(t)$ = 대류권 지연
- $I_r^s(t)$ = 대류권 지연
- $N_r^s(t)$ = 대류권 지연
- λ = 반송파 파장
- $\epsilon_P, \epsilon_\Phi$ = 관측 잡음

를 의미한다.

위성 궤도 및 시계 오차 보정에는 IGS(International GNSS Service)에서 제공하는 최종 정밀 궤도 및 시계 해를 적용하여 위성 관련 오차를 최소화한다. PPP Kinematic 기법은 기준국 간 상대측위가 어려운 남극내륙 환경에서도 단일 관측소만으로 안정적인 정밀 위치 산출이 가능하다는 장점을 가지며, 빙상과 함께 이동하는 관측소의 위치 변화를 연속적으로 추적하는 데 적합하다.

PPP Static과 Kinematic 자료처리 방식의 차이는 좌표 상태 벡터의 시간적 처리 방식에 있다. 이를 수식으로 표현하는 다음과 같다.

$$x(t) = \begin{cases} x_0 & \text{PPP Static} \\ x(t_k) & \text{PPP Kinematic} \end{cases}$$

즉, PPP Static에서는 좌표가 관측 기간 동안 상수로 추정되는 반면, PPP Kinematic에서는 각 epoch t_k 마다 좌표가 추정된다. 남극 환경에서는 빙상의 연속적인 이동 특성을 고려하여 PPP Kinematic 해를 산출하되, 후처리 단계에서 장기 시계열 분석을 통해 평균 이동 속도를 안정적으로 추정하는 전략을 고려할 필요가 있다.

정밀 위치 산출 과정에서는 남극내륙 환경에 특화된 오차 모델링과 보정 전략을 수립해야 한다. 전리층 지연 효과는 다중주파수 관측자료를 활용하여 제거한다. 고위도 특성상 GNSS 위성의 고도가 낮아 나타나는 빙상에 의한 신호 반사로 발생하는 다중경로 오차를 회피하기 위해 남극 다중경로 오차 관측모델에 의한 보정이 필요하다. 이러한 모델링 및 관측자료 선택 전략은 오로라 활동과 전리권 교란이 빈번한 남극 고위도 환경에서 GNSS 관측 신뢰도 확보에 매우 중요하다.

후처리 단계에서는 장기 시계열 분석을 통해 남극내륙 빙상의 이동 속도를 정량적으로 산출한다. 연속 관측 자료를 기반으로 시간에 따른 위치 변화를 분석함으로써 빙상의 평균 이동 속도와 방향을 mm/yr 수준으로 평가하도록 한다. 또한 계절적 변화에 따른 주기 신호와 일시적인 이상 신호를 탐지·분리하여 순수한 빙상 이동 성분을 보다 정확하게 추정하도록 한다. 아울러 오로라 활동과 전리권 교란이 GNSS 신호에 미치는 영향을 잡음

분석을 통해 평가함으로써 극지 GNSS 관측 자료의 특성을 종합적으로 이해하고자 한다.

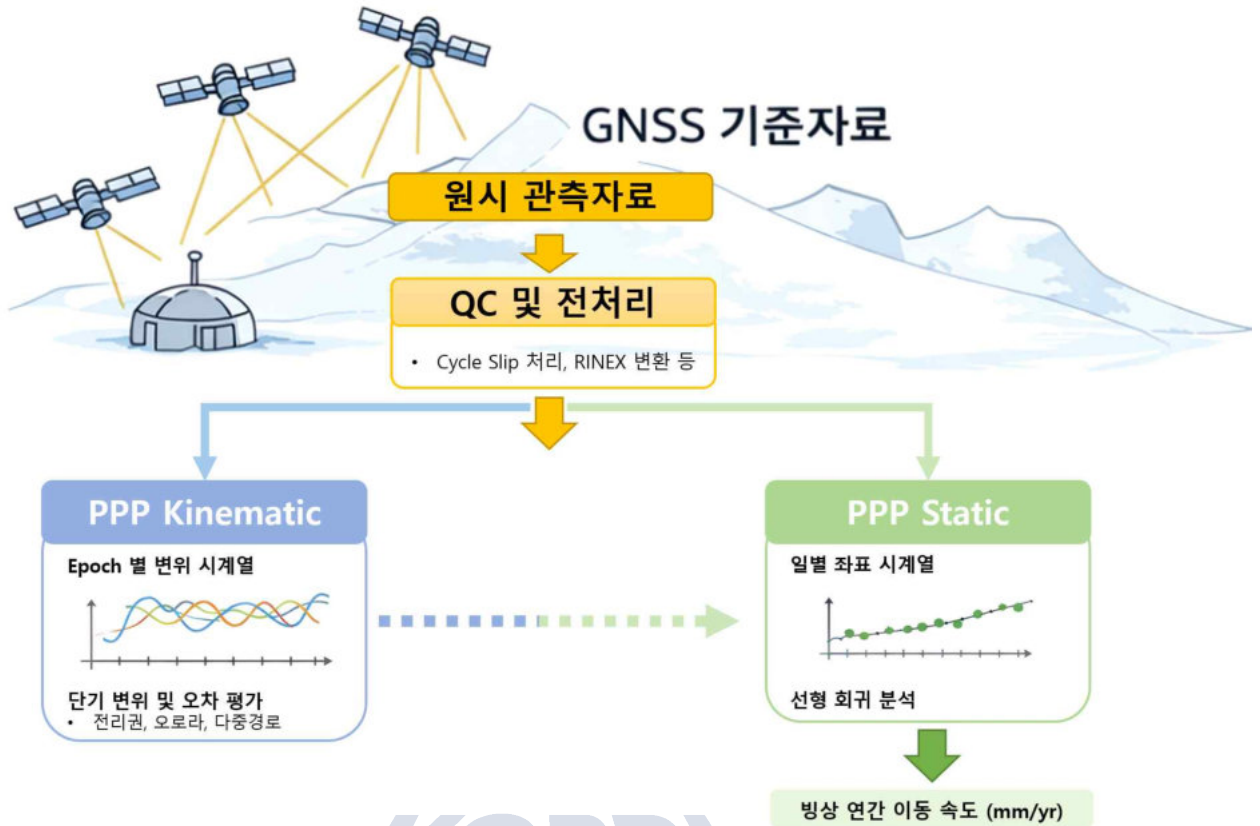
마지막으로, GNSS 관측을 통해 산출된 빙상 이동 결과는 InSAR 및 ICESat-2 위성 고도계 자료와의 비교·평가를 통해 검증하도록 한다. 서로 다른 관측 원리를 기반으로 한 위성 자료와의 상호 비교를 통해 GNSS 기반 빙상 이동 추정 결과의 신뢰도를 평가하며, 이를 통해 남극내륙 연구거점에서 수행되는 GNSS 관측의 과학적 타당성과 활용 가능성을 확인하도록 한다. 이러한 비교·평가 절차는 향후 남극 빙상 변화 연구와 천문·우주환경 관측소의 기준 좌표 유지 전략 수립에 중요한 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[PPP Static과 PPP Kinematic 자료처리 전략]

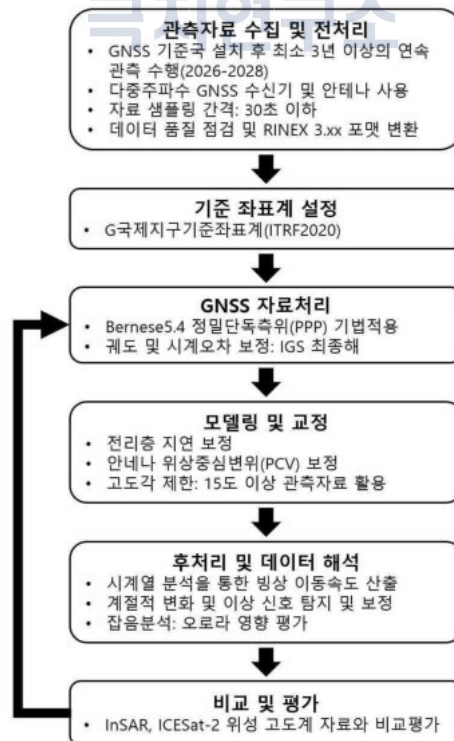
구분	PPP Static	PPP Kinematic
기본개념	일 평균 위치 계산	관측되는 순간마다 위치 계산
위치변화	관측 기간 동안 움직이지 않는다고 가정	관측 중에도 계속 움직일 수 있다고 가정
안정성	외부 영향이 평균되어 상대적 안정성 높음	순간적 환경 영향으로 변동성 더 높음
이동속도	연간 이동 속도(mm/yr)에 적합	변화 양상 파악에 적합
오로라	하루 평균으로 처리되어 영향 완화	영향이 직접 반영
결과 해석	장기 이동 속도 산출에 유리	단기 변화 탐지에 유리
오로라	오로라 활동이 있어도 일 평균으로 완화	오로라 등의 교란이 시계열 잡음으로 반영
남극활용	빙상 연간 이동 속도 산출	빙상 단기 변화, K-루트 경로 위치 결정

[빙상 이동 mm/yr 정밀도 달성을 위한 Error budget 완화 전략]

오차원	오차 완화 전략
궤도/시계	IGS 최종해 사용
기준계	모든 남극 GNSS 자료처리에 ITRF2020 고정 적용
전리권	다중주파수 사용, 교란구간 제외, 오로라 오차 완화 모델 적용
대류권	대기보정 모델 사용
안테나 특성	안테나 PCV 보정값 적용, 초코링 안테나 사용
다중경로	빙상 반사 신호 제거를 위한 다중경로 모델 필요
낮음 고도 위성	고위도 특성상 위성의 고도가 대부분 낮음 다중항법위성 관측
사이클슬립	전처리 제거
적설/결빙	안테나 돔 결빙 방지 시설 필요
지구물리 모델	IERS 모델로 고정
시각동기	수신기 및 안테나 전원 및 온도 유지



[남극 빙상이동(mm/yr) 분석을 위한 GNSS 자료처리 전략 개념도]



[남극 GNSS 빙상이동 산출 자료처리 순서도]

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

1. 연구개발목표 및 달성도

성과목표	세부목표	달성 주요내용	달성도(%)
1. 남극내륙 고원 이동식 무인 천문·우주환경 관측소 구축	남극내륙 고원 이동식 모듈형 천문우주환경 관측소 구축	- 10ft 컨테이너 기반 이동식 천문·우주환경 관측모듈 설계·제작 - 태양광·풍력·배터리 기반 에너지 자립형 전력시스템 통합 구축 - 남극내륙 진출로 베이스캠프 설치 및 시험운영(1년)	100%
	천문시상 측정장비 개발 및 GNSS 상시관측소 전략수립	- 저전력 천문시상 관측 시스템 구축 - GNSS 상시관측 및 자료처리 전략 수립 - 극야 기간 무인·원격 기반 자동 관측 체계 설계 및 개발 - 백야 천문시상 관측 알고리즘 개발	100%
2. 남극내륙 고원 빙상 움직임, 천문시상 및 전파교란 특성 파악	남극내륙 빙상 움직임 자료 확보 전략	- 남극내륙 진출로 베이스캠프 GNSS 설치 및 자료 축적(2024~) - 3년 이상 장기 관측을 통해 빙상 이동 특성 분석을 위한 자료 체계 구축	100%
	남극내륙 고원 천문시상 자료 확보 및 분석	- 국내 최초 주·야간 연속 천문시상 관측 수행 - 백야 태양영상 기반 낮 기상 산출 및 분석 - 극야 무인원격 천문시상 관측자료 확보 및 분석	100%
	남극내륙 고원 GNSS 신틸레이션 현황 분석	- 남극 계절 및 지자기 활동 조건에 따른 GNSS 신호 위상 및 진폭 변동 특성 분석 - 이를 통해 남극내륙 전파환경 기초 특성 파악	100%
3. 남극내륙 고원 오로라 발생에 따른 위성항법 신호감쇄 파악	남극 GNSS 전파신호 간섭 원인 제시	- 남극에서 위성항법 신호 감쇄 원인 제시	100%

※ 주요 연구내용 변경 사항

- 2023년도 남극 장보고과학기지의 제한된 수용 인원 에 따른 우선순위 조정으로, 본 과제에서 계획되었던 장비 운용 시험이 차기 연도로 이월됨에 따라 남극내륙 고원 관측소 구축 일정이 연기되고 위치도 남극내륙 진출로 베이스캠프로 변경됨(2024년 말도 구축, 1년 시험 후 2025-2026년 자료획득 및 분석)
- 대과제에서 목표한 남극내륙 고원(해발 3,000m 이상) 기지 구축이 연기됨에 따라 향후 기관 간 협조 강화를 통해 연구개발의 연속성과 일관성을 유지하고자 함

2. 대외 기여도

본 연구는 남극내륙 고원이라는 극한 환경을 대상으로 이동식·무인형 천문·우주환경 관측모듈을 실제로 구축·운용하고, 실측 자료를 확보함으로써 국가 차원의 극지 연구 인프라 확장과 과학기술 경쟁력 제고에 다음과 같이 실질적으로 기여하였다.

○ 국가 남극내륙기지 구축 정책의 과학적·기술적 근거 제공

남극내륙은 세계 최고 수준의 천문·우주환경 관측 후보지로 국제적으로 주목받고 있으나, 국내에서는 실측 자료 부족으로 내륙기지 건설을 위한 과학적 타당성 검토에 한계가 있었다. 본 연구는 이동식·무인 관측모듈을 남극내륙 진출로 베이스캠프에 설치하여 천문시상, 전리층 전파환경, GNSS 관측자료를 실증적으로 확보함으로써, 「제4차 남극연구활동진흥 기본계획(2022~2026)」과 「제1차 극지활동 진흥 기본계획(2023~2027)」 그리고 향후 내륙기지 후보지 평가·설계·운영 전략 수립에 직접 활용 가능한 핵심 기초자료를 제공하였다.

○ 국내 최초의 남극 주·야간 천문시상 실측 자료 확보 및 학술적 기여

본 연구를 통해 백야 조건에서 태양 영상 기반의 낮 시상 관측을 성공적으로 수행하였으며, 최고 약 1.6" 수준의 낮 천문시상 조건을 실측으로 확인하였다. 이는 국내에서 최초로 수행된 남극 낮 시상 관측 사례로서, 향후 남극내륙 고원 천문관측의 학술적 잠재력을 정량적으로 제시하는 기준 자료로 활용될 수 있다. 또한 기존 해외 연구가 극야 관측에 극한되었던 한계를 넘는다는 점에서 국제적 학술적 가치가 높다.

○ 극지 환경에 특화된 무인·에너지 자립형 관측 인프라 기술 실증

태양광-풍력-배터리를 결합한 하이브리드 전력 시스템과 단일 컨테이너 구조를 적용하여 외부 전력 인프라가 없는 환경에서도 장기간 무인 운용이 가능함을 현장 시험으로 검증하였다. 이는 향후 천문·우주환경 관측뿐만 아니라 극지 지구물리, 기상, 우주기상 등 다양한 분야에서 활용 가능한 공통 플랫폼 기술로 확장될 수 있으며, 국내 극한환경 무인 관측 기술의 성숙도를 한 단계 끌어올리는 데 기여하였다.

○ 남극 고위도 GNSS 전파환경 이해 및 위성항법 성능 평가에 기여

남극내륙 및 고위도 환경에서 GNSS 신호전력 지수를 이용한 오로라 및 전리층 불규칙 구조가 위성항법 신호 감쇄와 품질 저하에 미치는 영향을 정량적으로 제시하였다. 이는 향후 남북극 항법, 극지 과학기지 운영, 위성 기반 관측 임무 수행 시 GNSS 성능 저하 요인 분석과 보정 전략 수립을 위한 기초 자료로 활용 가능하다.

○ 국제 극지·천문·우주환경 공동연구 확대를 위한 기반 마련

본 연구 성과는 Dome A, Dome C 등 해외 남극 고원 관측 사례와 직접 비교 가능한 실측 자료를 제공함으로써, 향후 국제 공동연구 기획 및 협력 확대의 출발점으로 활용될 수 있다. 특히 무인 모듈형 관측소 개념은 국제 극지 연구 커뮤니티에서 공통적으로 요구되는 기술 방향과 부합하며, 우리나라의 남극내륙 연구 역량과 기술적 신뢰도를 제고하는데 기여하였다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 연구를 통해 개발·실증된 남극내륙 이동식 천문·우주환경 관측모듈과 주·야간 천문시상 및 태양영상 분광 관측 결과는 향후 남극내륙 연구거점 구축과 극지 고층대기 및 우주기상 국가 연구 인프라 확충을 위한 핵심 기반 성과로 다음과 같이 활용될 수 있다.

○ 남극내륙 연구거점 구축 및 입지 타당성 검증 활용

본 연구에서 실증한 10ft 컨테이너 기반 이동식 무인 관측모듈, 에너지 자립형 전력 시스템, 원격·무인 운용 기술은 남극내륙 고원과 같은 극한 환경에서도 장기 운용이 가능함을 현장 시험을 통해 검증하였다. 이를 통해 확보된 운용 자료와 기술 사양은 향후 극지연구소가 추진 중인 남극내륙기지 후보지 선정, 기지 규모 및 모듈화 설계 조건 도출, 운영·보급·에너지 자립 개념 수립을 위한 과학적·공학적 근거 자료로 활용된다.

특히 본 연구에서 확보한 남극 천문시상 실측 자료와 낮 기상 관측 알고리즘은 남극내륙 고원의 천문·우주환경 연구 적합성을 정량적으로 평가할 수 있는 최초의 국내 실측 근거로서 향후 남극내륙 천문관측 거점 구축 타당성 검토에 핵심적으로 기여한다.

○ 극지 고층대기 및 우주기상 관측 인프라로의 확장 활용

극지연구소의 오로라-고층대기 상관관계 규명 연구의 선행 연구로 직접 활용될 수 있다. 본 과제에서 검증된 무인 관측 플랫폼 기술, 저전력 GNSS 및 태양 관측 운용 경험, 극한지 전력·열관리 설계 개념은 극지연구소가 계획 중인 KAAGO(무인관측소) 구축, K-루트 및 남극내륙 관측망 확장, 장기 무인 지상관측시스템 운영의 기술적 기반으로 활용된다.

또한 본 연구에서 수행된 태양영상분광 관측 실험은 우주환경 변화에 따른 극지역 고층대기 반응을 위한 태양 플레어 등의 이벤트, 위성항법 영향 평가 및 GNSS 오로라 저감 모델 연구에 직접적으로 연계될 수 있다.

○ 국제 공동연구 및 극지 데이터 협력 활용

본 연구를 통해 확보된 관측 자료와 운영 실증 결과는 국제적으로 관측 공백 상태에 가까운 남극내륙 우주기상·천문 관측 데이터로서 학술적 가치를 가진다. 이는 향후 SCAR, COMNAP 등 국제 극지 연구 네트워크 및 해외 연구기관과의 공동 분석 연구, 데이터 상호 비교, 국제 관측 체계 연계를 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

아울러 장기적으로는 남극 장보고과학기지-K-루트-남극내륙으로 이어지는 관측망을 기반으로 한 남반구 우주기상 감시 체계 구축에 기여함으로써 우리나라의 극지 연구 위상 제고에 활용될 수 있다.

○ 학술 연구, 교육, 공공 활용 확산

본 연구 결과는 천문, 우주기상, 극지 고층대기, 극한지 공학 분야로의 학술논문, 후속 연구 과제 기획, 전문인력 양성 및 훈련에 활용될 수 있으며, 남극 현장 관측 이미지 및 기상, 태양 관측 자료는 대국민 과학문화 콘텐츠, 극지 우주기상 교육 자료, 홍보 콘텐츠로 확장 활용이 가능하다.

제 6 장 연구개발 과정에서 수집한 해외과학기술정보

○ Western Sydney University 천문관측 모듈

호주 Western Sydney University의 컨테이너 기반 이동형 천문관측 모듈은 본 위탁과제에서 수행한 10ft 컨테이너 기반 남극 천문·우주환경 관측모듈과 개발 철학과 시스템 구성에서 유사하다. Western Sydney University 천문관측 모듈은 관측 시에는 광하계 및 센서의 시야를 확보하도록 상부를 개방하고 비관측 시에는 장비를 외기에 노출시키지 않기 위해 모듈 내부 보호하는 개념이 적용되었다. 이러한 메커니즘은 남극 현장에서 장기간 무인 운용 시 반복되는 적설, 착빙, 비산, 극저온에 따른 기계부 구동 저하 등 운용 리스크를 줄이는 방향의 설계 대안으로 이해되며, 우리 모듈에서도 관측 성능 확보와 장비 보호 및 유지관리 최소화를 함께 만족시키기 위한 구조 개선 검토 근거로 활용될 수 있다.



[2025년 호주 Western Sydney University 천문관측 모듈 망원경 관측 시연 모습]

제 7 장 참고문헌

- Burton, M. G., Yang, J., & Ichikawa, T., Astronomy from the high Antarctic Plateau, *PKAS*, **30**, 611-616(2015). <https://dx.doi.org/10.5303/PKAS.2015.30.2.611>
- Hong, J. S., Chung, J.-K., Kim, Y. H., Park, J., Kwon, H.-J., Kim, J.-H., Choi, J.-M., Kwak, Y.-S., Characteristics of ionospheric irregularities using GNSS scintillation indices measured at Jang Bogo Station, Antarctica (74.62S, 164.22E), *Space Weather*, **18**, e2020SW002536. <https://doi.org/10.1029/2020SW002536>Received
- Lawrence, J. S., Ashley, M. C. B., Tokovinin, A., & Travouillon, T., Exceptional astronomical seeing conditions above Dome C in Antarctica, *Nature*, **431**, 278-281(2004). <https://doi.org/10.1038/nature02929>
- Saunders, W., Lawrence, J. S., Storey, J. W., Ashley, M. C. B., Kato, S., Minnis, P., Winker, D. M., Liu, G., & Kulesa, C., Where is the best site on Earth? Domes A, B, C and F, and Ridges A and B, *Publication of the Astronomical Society of the Pacific*, **121**, 976-992(2009)





1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.