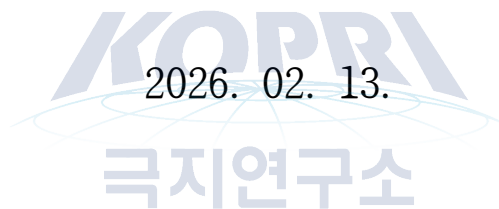


고층대기 대기광 간섭계 원시자료 분석 기술 개발

Development of airglow interferometric raw data analysis
technique for upper atmospheric research



극 지 연 구 소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “고층대기 대기광 원시자료 분석 기술 개발”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2026. 02.



연구책임자 : 이 창 섭
참여연구원 : 지 건 화
“ : 김 정 한
“ : 권 혁 진
“ : 김 지 은
“ : 이 지 희
“ : 김 은 솔
“ : 권 종 우
“ : 함 영 배
“ : 조 유 진

보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간	2023.03.01. ~2025.12.31	단계 구분	1단계 / 1단계
연구사업명	중 사 업 명	주요사업			
	세부사업명	주요사업			
연구과제명	중 과 제 명				
	세부(단위)과제명	고층대기 대기광 간섭계 원시자료 분석 기술 개발			
연구책임자	이 창 섭	해당단계 참여연구원수	총 : 10 명 내부 : 명 외부 : 명	해당단계 연구비	정부: 280,000 천원 기업: 천원 계: 280,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 해양대기연구본부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
○ 전천 이미지를 활용한 유효 FPI 자료 분류 기법 개발 - 전천카메라 가시광 이미지를 활용하여 이미지 내 별의 개수를 자동으로 추출해 FPI 관측에 적합한 맑은 하늘 조건을 객관적으로 판별 - 기존 적외선 cloud sensor기반 날씨 판별 불확실성을 보완하는 실질적인 대안으로서, FPI 자료 선별 자동화에 기여 - 전천 이미지의 대량 처리를 위해 사전 학습된 CNN 모델을 활용한 맑음/흐림 이진 분류 기법 구축 - 주관적 임계값 설정 없이 이미지 패턴을 종합적으로 학습함으로써, 장기·상시 관측 FPI 자료의 객관적 품질 관리 체계 구축 가능성을 제시 ○ 소형 전천카메라 개발 및 활용 - FPI 유효 자료 선별 전용으로 저전력·광시야 소형 전천카메라를 개발 및 검증 - 무인·독립 전원 환경에서 특화되어 기상/오로라 등의 안정적 관측이 가능하여 극지 내륙 및 원격 관측 거점에서의 기상 정보 수집과 FPI 자료 품질 관리에 활용 가능 ○ 630 nm FPI 원시자료 분석 기술 개발 - 레이저 간섭이미지를 이용한 중심 탐색, 원 피팅, 동일 면적 중심 환 분할을 통한 2차원 간섭 이미지를 안정적인 1차원 스펙트럼으로 변환 - 개선된 방법의 보간 기법을 적용하여 이상치를 제거하고, 이미지 중심 이동을 보정하여 시간 가변적인 기기함수를 정밀 추정 - 보간된 기기함수를 고정하여 630 nm 대기광 스펙트럼을 역산함으로써 시선방향 바람과 온도를 산출하고, 피팅 오차 및 보정 오차를 반영한 불확실도 평가 체계를 구축 - Kiruna, 보현산 FPI 자료 적용 결과, 지자기 위도 및 우주환경 변화에 따른 열권 바람 특성을 합리적으로 분석 및 해석하여 분석 기술의 신뢰성을 검증					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	페브리-페로 간섭계, 고층대기, 열권, 오로라, 극지			
	영 어	Fabry-Perot Interferometer, Upper atmosphere, Thermosphere, Aurora, Polar region			

요 약 문

I. 제 목

고층대기 대기광 간접계 원시자료 분석 기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 열권-전리권은 태양복사-태양풍-자기권 전류와 중성대기 운동이 강하게 결합되는 영역으로 매우 복잡한 물리 과정이 발생함
- 열권 밀도 변화와 전리권 교란은 위성 항력 증가에 의한 궤도 붕괴, 위성통신 오류 등 실질적 사회·경제적 피해를 유발함
- FPI는 고층대기 중성 바람과 온도를 동시에 측정하는 유일한 지상 광학 장비로, 열권-전리권 연계 연구의 핵심 관측 수단임
- 광학 관측은 구름, 오로라, 광학기기 특성 등 내·외부 요인에 민감하여, 자동 처리 결과만으로는 자료 신뢰성 확보에 한계가 있음
- FPI 원시자료 기반 직접 분석은 기기 상태 감시, 자료 품질 평가, 이상 상황의 신속 대응을 가능하게 하며, 장기적으로 지상 관측 역량 확대와 지상 관측망 구성을 위해 필요함

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 기존 날씨 정보의 간접적인 추출의 한계를 극복하고 보다 정확한 기상 정보 제공을 위한 전천 이미지 자동 분류 시스템 개발
- 저전력, 극한 환경에서 기상, 오로라 등의 지속적 관측에 최적화되고 FPI 원시자료의 품질 평가를 위한 소형 전천카메라 개발
- 캘리브레이션 레이저 이미지를 활용한 광학기기의 시간에 따른 상태 변화를 추적하여 높은 정확도의 바람과 온도 산출을 위한 FPI 630 nm 대기광 자료 분석 기술 개발

IV. 연구개발결과

- 전천 이미지를 활용한 유효 FPI 자료 분류 기법 개발 (별 개수 기반 + 딥러닝 기반)
 - 전천카메라 가시광 이미지를 활용하여 FPI 관측에 적합한 맑은 하늘 조건을 자동으로 판별하는 유효 자료 분류 기법을 개발
 - 별 개수 기반 기법에서는 binning, 오로라 억제 흑백 변환, 주파수 해석 및 형태학적 처리를 결합하여 맑음·흐림 조건을 효과적으로 구분
 - 두 기법의 비교 결과, 딥러닝 방식이 더 많은 유효 대기광 자료를 선별하여 장기·대용량 FPI 관측 자료의 객관적 품질 관리 가능성을 제시
- 소형 전천카메라 개발 및 활용
 - FPI 원시자료 품질 평가 전용으로 저전력·광시야(180°) 소형 전천카메라를 개발하여, 극지 및 고립 환경에서도 무인 운용이 가능하도록 설계
 - 균일 광원 시험을 통해 비네팅 및 파장별 감쇄 특성을 정량화하여, 구름과 오로라와 같은 광범위 발광 현상을 안정적으로 관측할 수 있음을 확인
 - 개발된 카메라는 FPI 관측과 병행 운용되어, 관측 시점의 기상 및 오로라 정보를 직접 제공함으로써 FPI 유효 자료 선별과 품질 평가에 활용
 - 본 연구 수행 기간 남극 현장 설치 사례를 통해 원격·저전력 관측 거점에서의 실용성과 확장 가능성을 실증
- FPI 630 nm 원시자료 분석 기술 개발
 - 레이저 간섭이미지를 활용한 중심 탐색, 동일 면적 동심 환 분할, annular summation을 통해 2차원 간섭 이미지를 안정적인 1차원 스펙트럼으로 변환하는 분석 절차를 확립
 - Airy 함수 기반 레이저 전방모델과 단계적 비선형 피팅을 통해 시간 가변적인 기기함수를 정밀 추정하고, 이를 대기광 분석에 적용
 - 기기함수를 고정한 상태에서 630 nm 대기광 스펙트럼을 역산하여 열권 중성 바람과 온도를 산출하고, 피팅·보정 오차를 포함한 불확실도 평가 체계를 구축
 - Kiruna, Resolute Bay, 보현산 FPI 자료 적용을 통해 분석 기술의 신뢰성과 물리적 타당성을 검증

V. 연구개발결과의 활용계획

- 소형 전천카메라와 자동 날씨·오로라 분류 프로그램을 결합하여 미답지역 관측망 구축에 활용 가능
- 전천 이미지 기반 유효 자료 선별과 FPI 원시자료 분석 연계로, 관측 직후 장비 상태와 자료 품질 상시 점검 체계 구축 가능
- 개발된 FPI 원시자료 분석 프로그램을 타 연구기관 FPI 설치·초기 운영 부담 절감으로 조기 성과 창출 가능
- FPI 원시자료 분석 기술 표준화 및 공유를 통해 다수 관측소 간 연계 운영 용이하게 하고, 2기 이상 FPI 관측망 구축으로 열권 물리량의 시공간 해상도 향상



S U M M A R Y

I. Title

Development of airglow interferometric raw data analysis technique for upper atmospheric research

II. Purpose and Necessity of the Study

- The thermosphere-ionosphere is a highly coupled region driven by solar radiation, solar wind, magnetospheric currents, and neutral dynamics
- Variations in thermospheric density and ionospheric disturbances directly impact satellite drag, orbital decay, and communication/navigation systems
- FPI is the only ground-based optical instrument capable of simultaneously measuring thermospheric neutral winds and temperatures
- Optical observations are sensitive to clouds, aurora, and instrumental effects, limiting the reliability of fully automated processing
- Direct raw data analysis is essential for instrument monitoring, data quality control, rapid anomaly detection, and long-term observation network expansion

III. Contents and Scope of the Study

- Development of an automatic all-sky image classification system to improve weather condition assessment for FPI observations
- Development of a low-power, compact all-sky camera optimized for extreme environments and FPI raw data quality evaluation
- Development of 630-nm FPI airglow analysis techniques using calibration laser images to track time-varying instrument characteristics and improve wind/temperature retrieval accuracy

IV. Results of the Study

- All-sky-Image-Based valid FPI data classification
 - Developed automatic classification of sky conditions suitable for FPI observations using visible all-sky images
 - Implemented a star-count-based method combining binning, aurora suppression, frequency-domain filtering, and morphological processing
 - Introduced a deep-learning-based (CNN) classification method to enhance objectivity and robustness
 - Deep-learning results demonstrate improved selection of valid airglow data for long-term, large-volume FPI observations
- Development of a compact All-sky Camera
 - Developed a low-power, 180° wide-FOV compact all-sky camera enabling unmanned operation in polar and isolated regions
 - Quantified vignetting and wavelength-dependent attenuation through uniform light source tests
 - Operated the camera alongside FPI to provide direct weather and auroral condition information for data quality assessment
 - Field deployment in Antarctica confirmed feasibility for distributed, low-power observation sites
- Development of 630-nm FPI raw data analysis techniques
 - Established procedures for fringe center detection, equal-area annular segmentation, and annular summation to generate 1-D spectra
 - Precisely estimated time-varying instrument functions using an Airy-function-based laser forward model and staged nonlinear fitting
 - Retrieved thermospheric neutral winds and temperatures from 630-nm airglow spectra with quantified uncertainty estimates
 - Validated the analysis framework using FPI data from Kiruna, Resolute Bay, and Mt. Bohyun.

V. Further Application of the Study

- Application of the compact all-sky camera and automatic classification software to

- observation networks in previously inaccessible regions
- Integration of all-sky-based data selection with FPI analysis for continuous monitoring of instrument status and data quality.
 - Use of the developed analysis software to reduce operational burden and accelerate research initiation at other FPI sites
 - Standardization and sharing of analysis techniques to enable coordinated multi-site FPI operations and improved spatiotemporal resolution of thermospheric measurements



C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction	12
Section 1. 1 Background and Purpose of the Study	12
Section 1. 2 Necessity of the Study	18
Chapter 2 Method of the Study	22
Section 2. 1 Automated selection of valid airglow data	22
Section 2. 2 Raw data analysis of 630 nm airglow emission	23
Chapter 3 Results of the Study	26
Section 2. 1 Development of automated selection techniques for valid airglow data	26
Section 2. 2 Development of FPI 630-nm raw data analysis techniques	41
Chapter 4 Summary and Conclusions	58
Chapter 5 Applications	59
Chapter 6 References	60

목 차

제 1 장 서론	12
제 1절 연구의 배경 및 목적	12
제 2절 연구의 필요성	18
제 2 장 연구 방법	22
제 1절 대기광 유효 자료 선별 자동화 기법	22
제 2절 630 nm 대기광 원시 자료 분석	23
제 3 장 연구수행 내용 및 결과	26
제 1절 대기광 유효 자료 선별 자동화 기법 개발	26
제 2절 630 nm 대기광 원시 자료 분석 기술 개발	41
제 4 장 요약 및 결론	58
제 5 장 연구결과의 활용계획	59
제 6 장 참고문헌	60

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경 및 목적

지구 대기는 고도에 따라 다양한 층으로 구분되며, 약 80-90 km 고도 이상의 열권(thermosphere)부터는 태양의 X선 또는 극자외선(Extreme Ultra Violet, EUV)와 같은 강한 복사에 의해 중성 상태의 기체가 이온화되거나 가열되어 매우 복잡한 물리적 특성을 가진다. 중성 대기의 부분적인 이온화는 전리권(ionosphere)이라는 전자기학적 특성을 가지는 대기층을 생성하면서 열권-전리권은 대기권과 우주 공간이 만나는 경계이면서 **지구 대기와 우주를 연결하는 다리** 역할을 한다. 이 영역에서는 중성 대기의 운동(바람)과 이온화된 플라스마 간의 마찰, 전자기력 상호작용이 활발하여 독특한 현상이 발생한다. 예를 들어 태양에서 오는 대전 입자(태양풍)들이 지구 자기장과 상호작용하여 고위도 전리권으로 흘러들어 오면, 대기 원자 또는 분자들과 충돌하며 **오로라**를 발생시킨다. 오로라는 초록색이나 붉은색 또는 자주색의 커튼 형태로 밤하늘을 수놓는 극지방의 발광 현상으로, 고층대기(약 100~300 km 고도)에서 일어나는 입자-대기 상호작용의 직접적인 증거이다. 다시 말해, **오로라 현상은 지구 대기가 태양-지구 우주환경(space environment)과 연결되어 있다는 것을 보여주는 자연적인 지표**이다. 이러한 극지 열권-전리권의 역동적 현상은 지구 자기권과 대기의 에너지 전달 과정을 이해하는 중요한 단서를 제공한다.

한편 열권-전리권은 지구대기 상층부이면서 동시에 우주환경의 일부이므로, **이 영역의 변화는 인공위성 운영과 통신환경에 직접적인 영향을 미친다**. 예를 들어 전리권 밀도의 급격한 변화는 GPS와 위성통신 신호의 굴절이나 산란 등을 일으켜 정밀도와 신뢰성이 떨어지고 잡음이 증가한다. 또한 열권의 대기 밀도는 인공위성 궤도에 항력(drag)을 제공하는데, 태양 폭풍 등에 의해 열권이 가열·팽창하면 평소보다 밀도가 높아져 저궤도 위성(Low Earth Orbit, LEO)의 궤도가 갑자기 낮아지고 수명이 단축될 수 있다. **위성 시대** 초기에는 군사·과학 목적의 위성 위주였으나, 오늘날 전 세계적으로 수천 기에 달하는 위성이 운영되며 우리의 일상과 경제, 안보에 필수적인 역할을 하고 있다. 이에 따라 **위성 자산을 우주환경 변화로부터 보호하고 지속가능한 우주 이용을 보장하기 위한 선제적인 노력이 필요**해졌다.

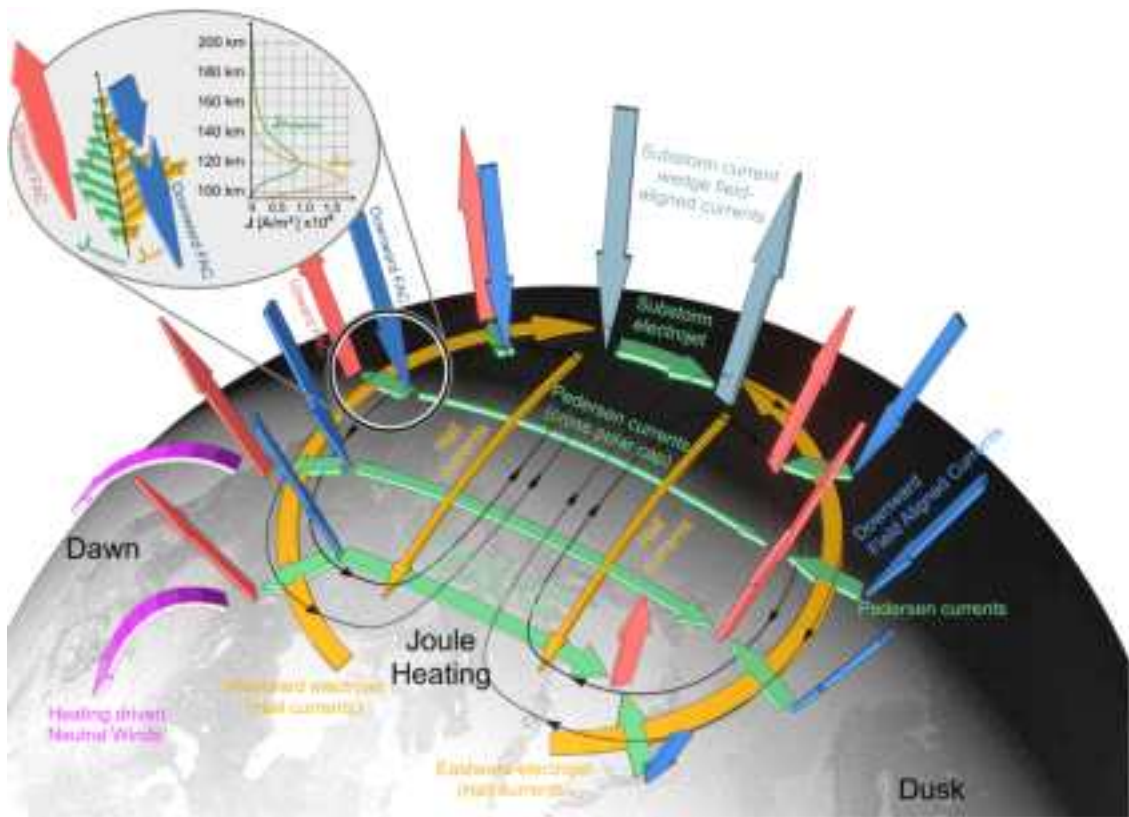


그림 1 고위도에서 자기장과 나란한 연자기력 전류(field-aligned currents)가 플라즈마-중성 상호작용이 최대가 되는 고도 범위에서 수직(자기장에 수직) 전류를 통해 폐회로를 형성함에 따라 줄(Joule) 가열이 발생하고, 이는 이후 저위도에서 중성 바람과 밀도 분포를 변화시킨다. Hall 전류와 Pedersen 전류로 구성된 수직 전류의 연결 구조는 전지구 순환모델(Global Circulation Model) 결과를 바탕으로 그림의 좌측 상단에 제시되어 있음(Sarris et al., 2022).

열권-전리권 구간은 지구 대기권과 우주 공간의 경계 영역으로서, 대류권·성층권 등 하부대기에서부터 전파되는 중력과, 대기조석과 등의 아래로부터의 영향과 태양풍, 자기권 전류계 등의 위로부터의 영향을 동시에 받는 매우 복잡한 시스템이다. 학계에서는 2000년대 들어 전층 대기(whole atmosphere) 개념 하에 저층대기의 기상 현상이 전리권-열권의 변화에 까지 파급됨이 밝혀지면서, **지상 기상과 우주기상의 연결성**에 주목해왔다. 예를 들어 강력한 열대권의 대류 활동이나 태풍과 같은 열대성 저기압은 중력파를 발생시켜 성층권, 중간권을 거쳐 열권까지 에너지를 전달하고, 극지방의 오로라 전류는 저층대기의 순환을 교란시키는 등 **대기의 수직 연계성(vertical coupling)** 현상이 보고되었다. 이런 맥락에서 SCOSTEP 등의 국제 협력 프로그램을 통해 **태양-지구계 변동성**에 대한 거시적 연구가 진행되어왔으며, 미국 NASA도 **고층대기를 중점 연구주제**로 선정하여 2020년대 중반부터 우주환경 관측위성 다중체계(DYNAMIC, GDC 등)를 준비하고 있다.

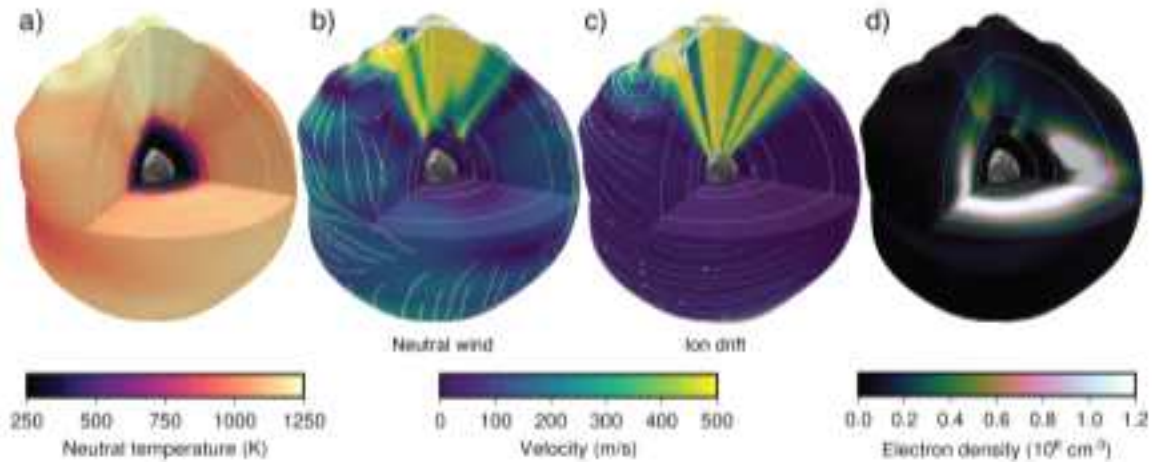


그림 2 WACCM-X 모델로부터 산출된 주요 대기/전리권 변수들의 개요: (a) 중성 대기 온도, (b) 중성 바람의 크기 및 유선(streamlines), (c) 이온 운동의 크기 및 유선, (d) 전자 밀도. 모델 출력은 대규모 우주환경 사건인 2015년 대규모 지자기 폭풍을 모의한 결과로, 2015년 3월 17일 18:00 UTC에 해당하는 시점에서 상층으로부터의 강한 외부 강제력이 작용하던 동안의 대기 상태를 보여준다. 수직 구조를 강조하기 위해 모델의 압력준위 지위고도(geopotential height)는 실제보다 50배 확대하여 표시 (Palmroth et al. 2020).

이렇듯 극지역 열권-전리권은 여러 학문 분야가 교차하는 연구대상으로, 열역학, 유체역학, 전자기학, 플라스마 물리가 모두 적용된다. 과학적으로 풀리지 않은 핵심 질문들도 많다. 예컨대, “극지 열권에서는 중성 대기와 전리 플라스마 사이의 운동량/에너지 교환이 얼마나 효율적으로 일어나는가“, “지자기 폭풍 등 자기권을 통해 유입된 에너지가 열권에 마찰열(Joule heating)로 얼마나 축적되는가“, “고층대기의 장기 변화(예: 열권 수축 현상)가 지구기후 변화와 어떤 관련이 있는가“ 등이 그것이다. 이러한 질문에 답하기 위해서는 해당 영역에 대한 집중적인 관측과 데이터 축적이 필수적이다. 그러나 100~300 km 고도에서는 인공위성의 궤도운영이 어려울 만큼 높은 대기 저항이 존재하고, 기구나 항공기로는 도달할 수 없는 높이이기 때문에, 현재까지도 이 영역의 현장(in-situ) 관측 자료는 극도로 부족한 실정이다. 과거 1970년대에 미 NASA의 Atmosphere Explorer 위성들이 일부 저고도(150 km 안팎) 탐사를 했으나 제한적이었고, 이후 수십 년 간 직접 관측 공백이 있었다. 그 사이 열권-전리권은 지구온난화 등으로 밀도가 감소하는 “열권 한랭화(cooling)” 추세를 보이는 등 장기 변화가 진행되었으나 정량적 파악이 미흡하다. 최근에서야 유럽우주국(ESA)이 Daedalus라는 저고도 열권-전리권 탐사용 위성 임무를 계획하고 있고, 미국도 MAVEN 화성 탐사선의 대기 돌입 자료를 통해 기술을 축적하는 등 준비를 시작한 단계다.

결국 극지역 열권-전리권 연구를 진전시키기 위해서는 지속적인 관측 데이터의 확보가 열쇠다. 국제사회는 우주기상 예측 및 지구환경 변화 이해를 위한 필수 퍼즐 조각으로 열권-전리권 데이터를 인식하고 있으며, 학계에서도 선행 연구들을 통해 열권-전리권 연구가 “전체 지구 시스템 이해의 빠진 환(missing link)”임을 강조하고 있다. 예를 들어 Sarris et al. (2023)은 열권-전리권에서의 플라스마-중성입자 상호작용이 전리권 전류, 대기상승현상, 대

기탈출 등에 미치는 영향을 정리하며, 이를 규명할 초점 과학질문(focused science questions)들에 답하기 위해 **정교한 현장 관측**이 시급하다고 결론지었다. 또한 극지방 열권-전리권은 우주 기원 에너지 유입의 주요 관문이므로 이 지역의 관측으로 태양을 비롯한 우주환경 격변현상이 고층대기에 끼치는 영향을 직접 파악할 수 있고, 향후 이를 통해 **우주환경 변동에 대한 예측의 정확도 향상**도 기대된다. 요약하면, 극지역 열권-전리권 연구는 **학술적으로나 실용적으로 큰 필요성을 지닌다**. 이에 대한 투자와 연구는 우주과학의 미개척 분야를 개척함과 동시에, 지구환경 변화와 우주활동 안전보장에 기여하는 이중의 효과가 있을 것이다.

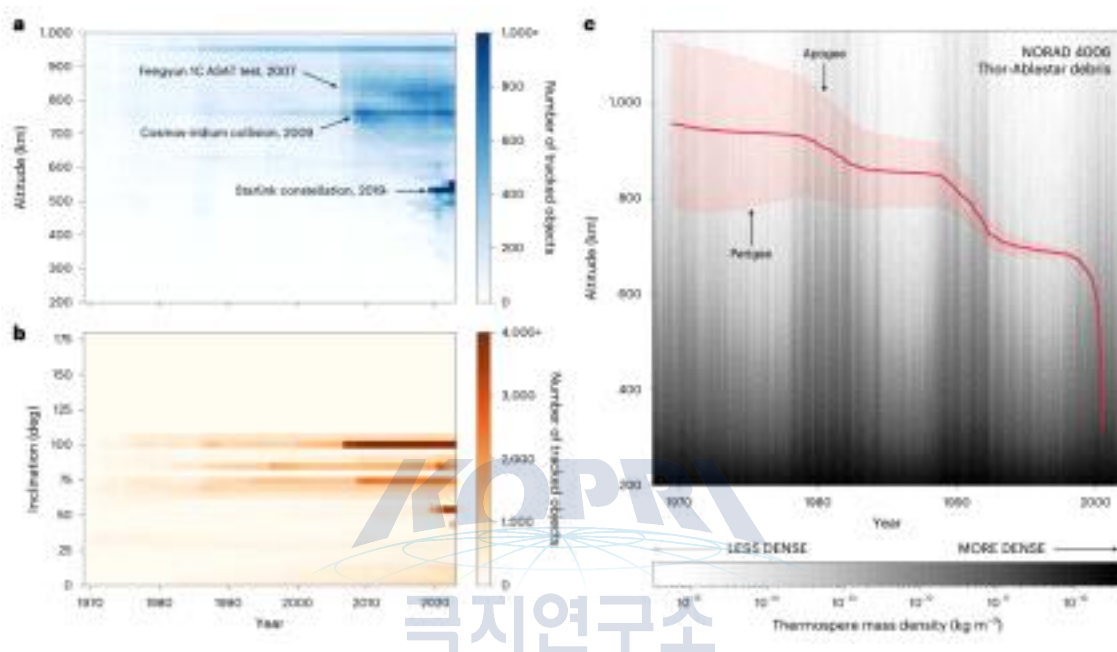


그림 3 궤도 잔해의 증가와 수명 주기. (a) 궤도 평균 고도와 연도별로 추적된 물체(>10 cm) 수. 현재의 궤도 잔해 환경은 주로 2007년과 2009년의 두 차례 파편화 사건에 기인하며, 이로 인한 기존 잔해들은 수십 년간 저궤도(LEO) 운용에 위협이 됨. (b) 경사각과 연도별 추적 물체 수로, (a)와 동일한 파편화 사건의 영향이 확인됨. (c) 열권 질량 밀도를 배경으로 한 NORAD 4006(Thor-Ablestar 잔해)의 궤적은 항력에 의한 궤도 감쇠율이 크게 변동하며, 주로 11년 태양주기에 영향을 받음을 보여줌. 붉은 음영은 근지점과 원지점 고도를 나타냄 (Parker et al., 2025).

21세기 현대사회에서 **인공위성은 통신, 방송, 내비게이션, 기상예보, 지구관측, 국방 등 핵심 인프라**로 자리잡고 있다. 전 세계 운용 중인 위성은 수천 기에 달하며, 우주개발 초기와 달리 민간 상업위성 비중도 크게 늘었다. 이에 따라 **위성 시스템은 태양 활동에 따른 우주환경 변화에 더욱 민감해진 상황**이다. 태양 표면의 폭발현상인 플레어(flare)나 코로나 질량 방출(CME)로 방출된 고에너지 입자와 플라스마 구름이 지구에 도달하면, 지구 자기권을 교란하여 전리권 전류와 전자밀도 변화를 일으키고, 열권 가열을 통해 대기 밀도를 급격히 증대시킨다. 이를 **지자기 폭풍(geomagnetic storm)** 현상이라 하며, 강도에 따라 인공위성에 다양한 악영향을 준다. 지자기 폭풍은 위성의 고도 감시제어 시스템을 오작동시키거나 전력 시스템에 충격을 가하여 기능 마비를 초래할 수 있고, 전리권 폭풍은 위성 신호 지연이

나 GPS 좌표 오류를 일으켜 위성에 의존하는 통신/항법 시설에 경제적 손실을 가져올 수 있다. 가장 직접적인 영향은 **저궤도 위성의 궤도 붕괴 위험**이다. 2022년 2월 발생한 중간 규모의 지자기 폭풍 때 SpaceX가 막 발사한 소형위성 49기 중 38기가 단 몇 시간~수일 내 대기권으로 추락해 소실된 사례는 업계에 큰 경각심을 주었다. 평소 같으면 안전했을 고도였지만, 폭풍으로 **열권 대기밀도가 평소보다 50% 이상 증가**하여 위성에 작용하는 항력이 급격히 커졌고, 궤도상승 기동을 채 시작하기도 전에 궤도 이탈이 진행된 것이다. 이 사건은 상대적으로 “약한” 폭풍에도 다수의 신형 위성이 손실될 수 있음을 보여주었고, **정교한 우주환경 감시 및 경보 시스템**의 필요성을 부각시켰다.

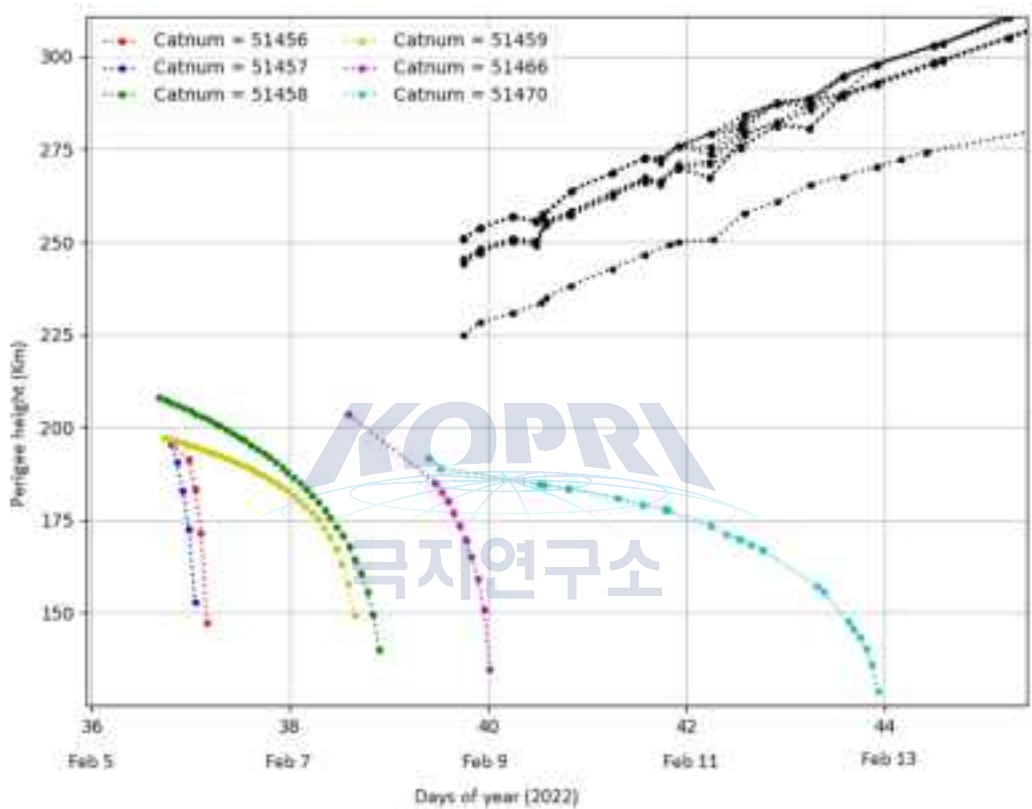


그림 4 2022년 발사된 모든 스타링크 위성의 근지점 고도 변화. 서로 다른 색으로 표시된 위성들은 월 초반에 발사되었으나 대기 저항 증가로 인해 궤도가 붕괴됨. 앞선 위성들과 유사한 사고를 방지하기 위해 더 높은 고도로 발사된 월 후반 배치의 일부 위성들은 검정색 점선으로 표시됨 (Ahmad et al., 2025).

현재 각국의 우주기관들은 **우주환경 모니터링**과 **우주기상 예보**를 위한 전문 조직을 운영 중이다. 미국의 NOAA 산하 우주기상예측센터(SWPC, <https://www.swpc.noaa.gov>), 유럽의 ESA Space Weather Office(<https://swe.ssa.esa.int>), 일본의 NICT 우주환경정보실(<https://swc.nict.go.jp/en/>) 등이 실시간 태양 활동 관측위성 자료와 지상자기장, 전리권 자료 등을 분석하여 우주기상 상황을 감시하고 있다. 우리나라도 2024년 개청된 우주항공청 주도로 우주환경센터(<https://spaceweather.kasa.go.kr>)를 통해 국가 차원의 서비스를 시작했다. 이처럼 **우주환경 감시**는 국제적으로 표준화·상시화되어 가고 있으며, 이는 우리 문명이 인공위성 등 **우주 기반기술에 크게 의존**하게 된 시대적 흐름에 따른 결과이다. 특히 통신

위성, 항법위성 신호 없이는 범국제적인 규모의 금융 거래부터 교통 시스템까지 막대한 혼란이 발생할 수 있기에, 우주환경 정보를 조기에 확보하여 사전 대응하는 것은 각국 정책 입안자들의 중요 과제로 부상했다. 예를 들어 우주환경 예보를 통해 위성운영자들은 폭풍 기간에 위성의 민감한 기능을 일시 정지시키거나, 궤도 변경을 조정하는 등의 예방 조치를 취할 수 있다. 항공 분야에서도 극지방을 경유하는 항공로를 폭풍 시에 우회하도록 계획을 변경해, 항법신호 오류나 항공기 승무원의 방사선 피폭 등 안전사고를 미연에 방지한다. 이렇듯 우주환경 감시체계 강화는 우주 인프라를 보호하고 사회경제적 손실을 줄이는 안전망이라고 할 수 있다. 더욱이, 최근 연구는 지구온난화에 따른 열권의 냉각/수축으로 대기밀도가 감소하면서 위성의 수명은 길어지지만, 그 결과 궤도 상에 우주쓰레기들이 자연적으로 사라지는 속도도 느려져 장기적으로 충돌 위험이 누적될 가능성을 제기한다. 이는 우주환경의 지속가능성을 보장하는 관리 측면에서도 정교한 모니터링과 연구가 필요함을 시사한다.



제 2 절 연구의 필요성

우주환경과 열권의 상호작용을 연구하려면 **열권의 중성바람과 온도**를 정확히 측정하는 것이 핵심이다. 그러나 100~300 km 고도의 중성대기 움직임을 직접 측정할 수 있는 수단은 제한적이다. 높은 대기 밀도로 인한 항력으로 위성은 고도 300 km 이하에서 오래 머무르기 어렵고, 레이더는 주로 플라스마를 대상으로 하는 관측으로 전자밀도나 플라스마 운동 속도는 측정할 수 있으나 중성바람 정보를 제공할 수 없다. 이에 수십 년 전부터 개발되어 활용되어 온 대표적인 기법이 **지상 광학 관측**이다. 고층대기에서는 산소 원자나 수소, 질소 분자가 태양복사나 고에너지 입자와의 충돌에 의해 들뜬 뒤 특정 파장의 대기광(airglow)을 방출하는데, 그 빛을 지상에서 분광 분석하면 대기광을 방출한 원자 또는 분자의 움직임과 온도를 추정할 수 있다. 특히 페브리-페로 간섭계(Fabry-Perot Interferometer, FPI)는 이런 미약한 대기광의 파장 변화를 정밀하게 측정하기 위한 도구로, 1899년 Charles Fabry와 Alfred Perot이 고안한 이후 다양한 분야에 응용되어 왔다. 지상천문학자들은 20세기 중반부터 FPI를 이용해 **고층대기 대기광의 도플러 효과**를 측정함으로써 바람속도를 구하는 실험을 시작했다. 1980년대 Hernandez 등이 관련 기술을 체계적으로 정리하면서 FPI는 고층대기 중성 바람과 온도 측정의 표준적인 도구로 자리매김했다. 오늘날까지 미국, 캐나다, 일본, 인도, 중국 등 여러 나라에서 수십 개 지상관측소에 FPI를 설치하여 전 세계적인 관측 네트워크를 구축해왔다.

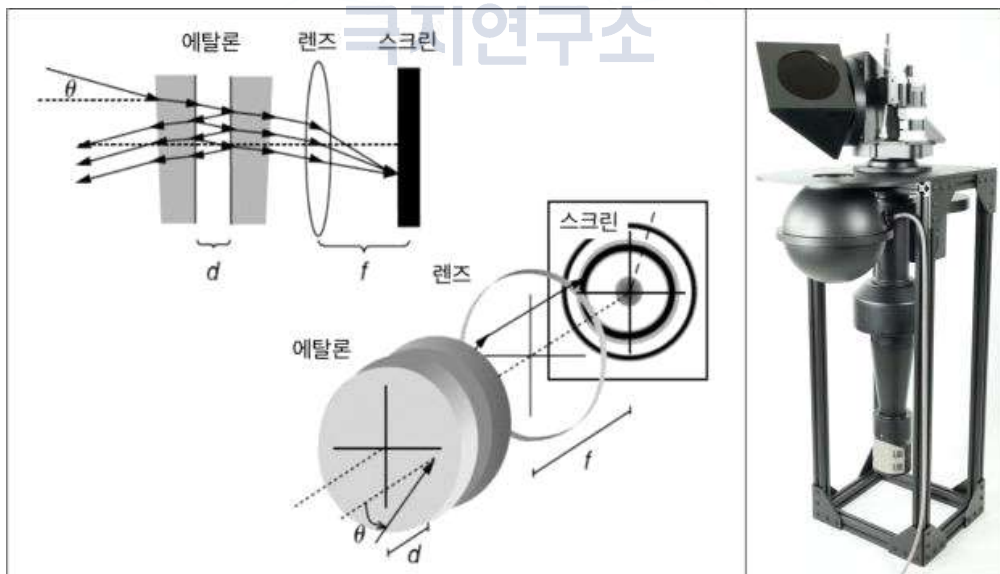


그림 5 (왼쪽) FPI의 광학 구조(에탈론-렌즈-스크린). 단파장의 빛이 θ 의 각도로 에탈론에 입사해 에탈론 내부에 무수히 많은 반사와 투과가 일어나고 에탈론을 통과한 빛이 렌즈를 통해 스크린에 투영되면 동심원 모양의 간섭 무늬가 생성됨. (오른쪽) Keo Scientific Ltd.의 FPI 광학부.

FPI의 원리는 **빛의 간섭현상을 이용한 정밀한 파장 측정**이다. 두 장의 평행한 반투명 거울(에탈론, etalon) 사이에 빛을 여러 번 왕복시켜 간섭 무늬를 형성하면, 아주 작은 파장 차

이도 밝은 무늬 위치의 변화를 통해 감지할 수 있다. 예를 들어 열권의 대표적 대기광인 산소 630.0 nm 적색선(OI 6300 Å)이 정지한 대기에서는 정확히 그 파장으로 나오지만, 대기가 관측자 방향으로 이동해 오면 도플러 효과로 약간 짧은 파장으로 관측된다. 그 미세한 파장 차이를 FPI로 측정하여 바람의 선속도(radial velocity)를 구하고, 여러 방위각의 하늘을 순차적으로 관측해 **두 방향(예: 북-남, 동-서) 바람 성분**을 추산한다. 또한 간섭무늬의 선평(line width)을 분석하면 빛을 낸 원자들의 열운동 속도를 알 수 있어, 고층대기 기온(입자의 운동에너지)을 산출할 수 있다. 정리하면 **FPI는 고층대기의 중성 바람과 온도를 동시에 측정**할 수 있는 유일한 광학 장비다. 이는 위성의 가속도계나 레이저 산란 등을 통해 간접 추정하는 방법들에 비해 상대적으로 **직접적이고 정확도가 높은 중성대기 동역학 측정법**으로 인정받고 있다.

다만 광학 관측은 **야간에 구름이 없고 대기 투명도가 좋을 때**로 제한되며, 오로라 등 강한 발광 현상이 있으면 상대적으로 약한 대기광 측정이 방해받는 한계가 있다. 그럼에도 불구하고 FPI로 얻은 중성대기 바람 자료는 고층대기 모델을 검증하거나 열권-전리권 연계 연구에 없어서는 안 될 핵심 자료로 쓰인다. 특히 고위도에서는 **전리권 전류에 의해 유도된 바람(플라스마-중성대기 상호작용)**, 대기 조석파의 전파 등을 연구하기 위해 지상 기반 FPI를 활용한 장기간 열권 관측이 필요하지만, 지리적인 접근성 한계로 인한 유지·관리의 어려움과 높은 비용 등으로 제한된 지역에서만 자료 수집이 이루어져왔다.

우리나라는 해양과학기술원 부설 극지연구소에 의해 극지역 고층대기 연구를 선도하기 위해 북극권과 남극권에 각각 고층대기 관측 장비를 구축해왔다. 2014년과 2017년에 남극장 보고과학기지와 남극세종과학기지에 각각 FPI를 설치한데 이어, **2016년에는 북극 스웨덴 Kiruna 근교의 Esrange 우주센터에 FPI를 설치**하였다. Kiruna는 스웨덴 최북단에 위치한 고위도 지역(북위 67.9°)으로, 오로라 관측과 우주과학 연구로 유명한 거점이다. 극지연구소는 Esrange 우주센터와 협력하여, 극지 **고층대기 동역학의 시공간 변화 연구** 프로젝트의 일환으로 해당 위치에 FPI를 운용하기 시작했다. 선택된 지역은 북극권에 속하면서도 비교적 관측 환경이 양호하고 기존 과학인프라(로켓발사장 등)가 있어 장기 지상관측과 캠페인 형식의 일회성 관측 간 결합된 효과를 기대할 수 있다. **Kiruna FPI의 설치 목적은 크게 두 가지였다. 첫째, 극지역 열권의 장주기 변화 파악**이다. 다년간 지속 관측을 통해 극지역 열권 중성바람과 온도의 계절변화, 태양주기 영향, 기후변화 추세 등을 데이터베이스화함으로써 극지역 열권 물리량의 장기 변화를 연구하려는 것이다. 둘째는 **극지 대기권-전리권 상호작용 규명**이다. 동시기 운영되는 EISCAT 레이더(전리권 관측)나 자기장 측정과 FPI 중성대기 바람 데이터를 종합해, 오로라 전류에 의한 대기 가속, 고층대기의 파동 전파, 국지적 에너지 수송과 같은 과정을 상세히 분석하고자 했다. 특히 **북극-남극 conjugate 지점 간 동시관측**을 통해, 남북극 고층대기 거동의 공통점과 차이점을 밝히는 노력도 계획되었다.

FPI를 포함한 과학장비를 **안정적으로 운영**하고 신뢰성 있는 자료를 확보하려면, 관측으로

얻어진 원시(raw) 자료를 연구팀이 직접 확인하고 처리하는 과정이 필수적이다. Kiruna FPI는 일반적인 FPI와 같이 관측 원시 자료가 CCD 카메라로 촬영된 원형의 간섭 무늬 이미지 형태로 저장된다. 이 이미지에서 밝은 띠의 위치 패턴을 추출하여 도플러 이동량을 계산하면 바람속도가 나오는데, 만약 간섭무늬가 흐릿해지거나 중심이탈 등의 이상이 있으면 계산값이 부정확해질 수 있다. **장비 제조사나 일반 소프트웨어에서 제공하는 자동처리 결과만 믿고 그대로 활용한다면** 이런 미묘한 오류를 간과할 우려가 있다. 따라서 연구진이 원시 간섭계 이미지를 직접 분석하고 품질을 검증해야 관측자료의 신뢰도를 담보할 수 있다. 구체적으로, 원시 자료를 독자 분석함으로써 얻는 이점은 다음과 같다.

첫째, **간섭계 광학계 상태 모니터링**이 가능하다. 원시 간섭무늬의 선명도, 대칭성, 대비 등을 살펴보면 광학계 내 에탈론 간격 변화, 검출기 초점 이상 여부를 감지할 수 있다. 예를 들어 원시 자료의 간섭 무늬 중심이 화면에서 벗어나면 에탈론 평행도 조정이 필요함을 뜻하며 에탈론 간격의 시간에 따른 변화는 FPI 내부 또는 주변의 온도 불안정이나 에탈론 자체의 문제에 대한 가능성을 의심할 수 있다. 연구자가 이 정보를 빠르게 인지하면, 원격으로 혹은 현지 점검 요청을 통해 **장비 상태를 직접 확인**하여 최상의 상태를 유지할 수 있다. 둘째, **관측자료의 품질 평가와 보정**을 세밀하게 수행할 수 있다. 대기 광학관측 자료는 구름, 달빛, 오로라 등 외부 요인의 영향으로 노이즈가 섞이기 쉽다. 원시 이미지 자료를 직접 보면 다양한 외적 요인에 의해 FPI 자료의 질이 저하된 순간을 골라내 **해당 시각 데이터를 제외하는 등 자료 정제(cleaning)** 과정 등을 진행할 수 있다. 또한 별도의 **캘리브레이션(calibration)** 자료를 적용해 시시각각 변하는 CCD 온도 노이즈나 배경광 오차를 보정하는 일도 재처리 과정에서 이루어질 수 있다. 이는 자동 산출된 중성대기 바람 자료에 남아 있을지 모르는 편차를 줄여, **보다 정확한 최종 물리량을** 확보하게 해준다. 셋째, **이상현상에 대한 신속 대응**이 가능하다. 만약 관측 중간에 간섭무늬가 사라지거나 갑자기 형태가 바뀌는 등 특이한 상황이 발생하면, 실시간 원시 자료 체크를 통해 곧바로 문제를 파악하고 원인을 진단할 수 있다. 간혹 광학부나 CCD 센서의 오류로 간섭 이미지에 줄무늬 패턴 또는 간섭 이미지의 초점이 흐려지는 현상 등 변화가 나타나는 경우가 있을 수 있다. 이러한 **실시간 모니터링 체계**를 갖추면 현지 운영팀과 연락하여 즉각 필요한 조치를 취해 문제 해결이나 필요한 대응에 대한 정보를 신속하게 얻을 수 있다.

요약하면, FPI 원시 자료의 독자적 분석은 관측의 **정확도 확보**와 **신뢰성 향상**을 위해 반드시 필요하다. 이는 단순히 데이터를 얻는 것을 넘어, 자료에 내재된 오차 요인과 장비의 물리적 한계 또는 문제를 식별하고 이해하는 과정이기도 하다. 원시 자료 해석에 직접 참여해야만 관측 결과의 의미를 올바르게 해석할 수 있고, 필요한 경우 **자료처리 알고리즘을 개선**하거나 **장비 설정을 조정**하는 등 피드백도 줄 수 있다. 장기적으로는 이러한 능력이 축적되어야 새로운 관측기를 개발하거나 국내에 추가 관측망을 구축할 때 **완전한 기술 자립**이 가능해진다. 가령 극지연구소는 Kiruna FPI 데이터를 처리하며 얻은 노하우를 바탕으로, 추후 차세대 간섭계 시스템 설계 시 요구되는 **해상도, 안정도 사양**을 도출하기 위한 사

용자 피드백을 적극적으로 제공하고 있다. 따라서 안정적 극지 고층대기 관측을 위해서는 연구팀 자체 데이터 분석 역량을 지속 강화해야 하며, 이는 곧 얻어진 관측 자료에 대한 최고의 활용 가치를 보장하는 길이다.



제 2 장 연구 방법

본 연구에서는 FPI 간섭계 원시 자료 분석 기술 개발을 위하여 원시 자료의 질을 결정하는 기상 및 오로라 현상 등에 대한 정보를 효과적으로 기록하기 위한 소형 전천 카메라를 직접 개발, 제작한다. 전천 이미지의 형태로 기록된 자료로부터 기상조건을 자동적으로 추출하는 기법을 개발하여 다수의 간섭계 자료에서 구름 등에 의한 날씨 영향을 받지 않은 열권에서 발생하는 유효 대기광 자료를 빠르고 정확하게 선별하는데 활용하고자 한다. 간섭계의 원시 자료는 고층대기의 대기광 발광 원자의 물리적 특성을 담고 있어 이로부터 도플러 정보를 최종적으로 추출해 고층대기 중성대기 바람과 온도 등의 정보를 추정하기 위해 다양한 이미지 처리 과정과 모델링 등의 기법이 도입되어야 한다.

제 1 절 대기광 유효 자료 선별 자동화 기법 개발

전천카메라는 하늘의 넓은 영역을 단일 이미지로 생성하여 대기광, 오로라 등의 공간 정보를 제공하는 매우 중요한 자료지만, 장기간 상시 관측 환경에서는 모든 이미지를 사람이 직접 판별하는 것이 사실상 불가능하다. 따라서 전천 이미지로부터 객관적이고 자동화된 날씨 판별 기준을 도출하는 것이 핵심 과제가 된다. 별을 이용한 날씨 판별 기법은 매우 단순하면서도 물리적으로 명확한 가정에서 출발한다.

맑은 밤하늘일수록 전천 이미지에서 포착되는 별의 개수는 많고, 구름이나 오로라 등이 존재할수록 포착되는 별의 개수는 감소한다.

즉, 전천 이미지에서 별을 신뢰성 있게 검출하고 그 개수를 정량화할 수 있다면, 이를 맑음/흐림 판단의 핵심 지표로 활용할 수 있다는 접근이다. 이 방법은 모델 학습에 의존하지 않으며, 각 처리 단계가 물리적 의미를 명확히 갖는다는 점에서 객관적 해석 가능성이 높다.

별의 개수 기반 방법은 다음과 같은 순차적 처리 흐름으로 구성된다. 각 단계는 서로 독립적이기보다는, 이전 단계의 불확실성을 다음 단계에서 보완하도록 설계되어 있다.

1. 입력 영상의 크기 및 채널 정보 간소화
2. 오로라 영향 최소화를 고려한 흑백 영상 생성
3. 주파수 영역 기반 고주파 성분 추출
4. 형태학적 영상 처리로 대규모 구조 억제
5. 영상 양자화 및 별 후보 영역 추출
6. 별 개수 산출 및 날씨 판단 지표로 활용

딥러닝 기반 방법은 앞선 규칙 기반 접근과 달리, 별, 구름, 오로라 하늘 밝기 패턴 등 다양한 요소를 개별적으로 분리하지 않는다. 대신, 전천 이미지 전체를 내재된 통계적·공간적 패턴을 학습하여 맑음/흐림을 직접 분류한다. 즉, 판단 기준을 사람이 명시적으로 설계하는 것이 아닌, 라벨링된 데이터로부터 모델이 스스로 판별 기준을 형성하도록 하는 방식이다.

본 연구에서는 합성곱 신경망(CNN) 계열 중에서도 Residual Network-18(ResNet-18) 구조를 사용하였다. ResNet은 잔차 연결(residual connection)을 통해 깊은 네트워크에서도 학습 안정성을 확보하고 과적합 및 기울기 소실 문제를 완화하는 장점을 가진다. 특히, 본 연구에서는 ImageNet 데이터셋으로 사전 학습된(pre-trained) ResNet-18을 사용하였다. 이는 제한된 학습 데이터 환경에서도 높은 일반화 성능이 확보되고 저수준 특징(경계, 무늬) 학습을 재활용 가능하다는 점에서 전천 이미지 분류에 적합한 전략이다.

딥러닝 모델 학습을 위해 약 7만 장 규모의 가시광 전천 이미지를 수집하고, 이를 clear/cloudy 이진 기준으로 수동 라벨링하였다. 라벨링 과정은 모델 성능에 직접 영향을 미치므로, 일관된 기준과 다수 샘플 기반 판단을 통해 신뢰도를 확보하였다.

모델 학습은 에포크(epoch) 단위로 진행되며, 각 에포크 동안 여러 배치(batch)에서 계산된 손실 함수(loss)를 평균하여 running loss를 산출한다. 학습 완료 후에는 검증 데이터셋을 이용해 분류 정확도를 산출함으로써 모델의 일반화 성능을 평가한다.

딥러닝 기반 방법은 다음과 같은 특징을 가진다.

- ◇ 별 개수, 오로라 여부 등 개별 요소를 명시적으로 정의할 필요가 없음
- ◇ 인간의 주관적 기준이나 임계값 설정에 대한 의존도 감소
- ◇ 복합적 패턴(부분 구름, 희미한 오로라 등)에 대한 적응력 우수

반면, 판단 근거가 명시적으로 드러나지 않는다는 점에서 해석 가능성은 낮은 편이며, 데이터셋 품질에 대한 의존도가 높다.

제 2 절 630 nm 대기광 원시 자료 분석 기술 개발

FPI는 대기광의 발광원인 산소 원자의 도플러 이동과 선폭을 측정함으로써, 관측 방향에 따른 중성 대기 바람과 온도를 정량적으로 산출할 수 있는 핵심 관측 장비이다. 그러나 FPI 관측 자료는 본질적으로 2차원 간섭무늬 형태의 원시 이미지로 획득되며, 이로부터 물리량을 추출하기 위해서는 정교한 전처리, 기기 보정, 물리 기반 전방 모델(forward model), 그리고 비선형 역산(inversion) 과정이 필수적으로 요구된다.

본 연구에서는 레이저 간섭 이미지를 이용하여 중심을 추정한다. 먼저 이미지 전체에서 밝기가 높은 영역을 백분위 기반 임계값으로 분리하고, 이미지 중심에서 크게 벗어나 있는 가장자리 영역을 제외하여 유효 분석 영역을 설정한다. 이후 이진화된 이미지에 대해 연결 요소에 대한 레이블을 지정해 개별 간섭 링 후보들을 분리하고, 픽셀 수가 충분히 큰 링만을 선택함으로써 노이즈나 부분 링의 영향을 최소화한다.

각 링에 대해 원형 피팅을 수행하여 중심과 반지름을 계산하며, 여러 레이저 관측이 다른 시각에 걸쳐 존재하는 경우, 얻어진 중심 좌표들의 시간에 따른 변화를 보간(interpolation)하여 중심을 시간 함수로 모델링하고, 특정 시각의 주임 좌표를 연속적으로 계산할 수 있도록 한다.

중심이 결정되면, 2차원 간섭 이미지를 1차원 스펙트럼으로 변환하는 단계를 수행한다. 이를 위해 이미지 내 완전한 원을 포함하는 최대 반경을 기준으로 전체 영역을 동일 면적을 갖는 N개의 동심 환(annulus)으로 분할한다. 환 내부 픽셀 밝기 값에 포함될 수 있는 노이즈나 이상치를 제거하기 위해 각 환의 밝기 표준편차의 3배를 넘어서는 픽셀을 제거하는 3σ 클리핑을 반복 적용한다.

레이저 관측은 단일 파장의 간섭무늬를 제공하므로, 이를 통해 FPI의 기기 특성을 정밀하게 추정할 수 있다. 본 연구에서는 Airy 함수에 기반한 레이저 프린지(fringe) 전방 모델을 구성하고 역산 과정은 비선형 최소제곱 문제로 설정한다. 수렴 안정성을 확보하기 위해 단계적 최적화 전략이 사용된다. 먼저 기하학적으로 추정 가능한 파라미터를 고정하거나 제한적으로 조정하고, 이후 점진적으로 더 많은 파라미터를 자유화하여 최종 해에 접근한다.

실제 대기광 이미지 분석 단계에서는, 앞서 얻은 1차원 스펙트럼과 레이저로부터 보정된 기기 파라미터를 결합하여 대기광 프린지를 모델링한다. 대기광 스펙트럼은 도플러 이동된 중심 파장과 도플러 확장된 가우시안 선폭을 갖는 방출선과 연속 배경 성분의 합으로 표현된다. 이 스펙트럼은 기기 응답 함수와의 컨볼루션(Convolution)을 통해 관측 프린지로 변환된다.

효율적인 구현을 위해 각 파장 성분이 만드는 레이저 프린지를 미리 계산하여 컨볼루션 행렬을 구성하고, 이 행렬과 스펙트럼의 곱으로 관측 프린지를 재현한다. 대기광 역산 역시 단계적 최소제곱 방식으로 수행되며, 도플러 중심 파장은 격자 탐색을 통해 초기값을 설정한 후, 온도, 대기광 세기, 배경 성분들과 함께 동시에 추정된다.

역산된 도플러 중심 파장은 광속을 이용해 시선방향 바람 속도로 변환된다. 이때 피팅 과정에서 얻어진 파장 불확실도는 속도 불확실도로 직접 전파된다. 레이저를 통해 에탈론 간격

의 시간적 변동으로 인한 추가적인 보정 오차가 계산되며, 이는 레이저 간격 변화의 곡률을 기반으로 추정되어 최종 속도 오차에 합성된다.

최종적으로 각 대기광 관측 시각에 대해 시선방향 바람, 온도, 대기광 밝기, 배경 성분과 이들의 불확실도가 정리되며, 관측 방향 정보와 함께 결과가 구조체에 저장된다. 이 결과는 이후 여러 방향의 시선방향 속도를 결합하여 수평 바람 성분을 복원하거나, 시간 평균 및 통계 분석을 수행하는 데 사용될 수 있다.



제 3 장 연구수행 내용 및 결과

본 연구에서는 전천 이미지 상의 별 수 활용과 머신러닝 기법을 동시에 활용하여 다량의 대기광 유효 자료를 효과적으로 선별하는 방법을 제시하였고, 간접계 자료 선별의 기준이 되는 기상 상태 감시를 위한 소형 전천 카메라 개발을 병행하였다. 선별된 맑은 날씨의 간접계 자료는 약 250 km 고도의 층에 존재하는 산소 원자로부터 발생하는 대기광 630 nm 파장의 대기광 원시 자료 분석을 위해 활용되었다. 머신러닝 기법에 활용된 전천이미지를 기준으로 남극장보고과학기지 FPI 바람 자료를 분류하였고, 이는 남극 극관 지역 열권 바람의 통계적 특성 규명 연구에 활용되었다. 630 nm 대기광 원시 자료 분석 기술로 분석된 결과는 기존 NCAR/HAO에서 보유한 독립적인 분석 프로그램의 결과와 비교하여 검증하였다. 당초 본 연구의 성과 목표 중 하나인 732 nm 대기광 원시 자료 분석 기술 개발은 630 nm 원시 자료 대비 현저하게 낮은 대기광의 신호잡음비와 OH 대기광의 contamination 문제 등 기술적인 문제로 인해 연구 수행 기간 동안 기술 개발의 완료 단계에 이르지 못하였다.

제 1 절 대기광 유효 자료 선별 자동화 기법 개발

앞선 장에서 언급했던 바와 같이, 광학 관측장비인 FPI는 날씨 조건에 따라 관측자료의 신뢰도가 크게 영향을 받게 된다. 따라서 FPI 자료를 사용하기에 앞서 날씨 조건이 양호하여 관측자료의 신뢰도를 보장할 수 있는 기간을 파악하는 것이 매우 중요하다. 통상적으로 FPI는 날씨를 가늠할 수 있는 추가 장비를 함께 설치하여 활용하는데, 가령 NCAR FPI 시스템의 경우에는 적외선 관측을 통해 운량을 가늠할 수 있는 장비인 Cloud detector를 설치하고 이 정보를 통해 FPI 관측치가 유효한 날을 선별하게 된다. Cloud detector를 활용하는 방식 외에도 전천카메라 자료를 활용하는 방식도 있는데, 전자의 경우에는 적외선 관측치에 따라 자동적으로 분류된 flag가 주어지나, Cloud detector의 관리가 미흡한 경우 flag를 신뢰할 수 없게되어 자료 선별의 기준으로 사용할 수 없게 된다. 반면 후자인 전천카메라를 활용하는 방식은 자료가 이미지 형태로 주어지기 때문에 대기의 상태를 사용자가 시각적으로 명확하게 확인할 수 있는 장점이 있다. 이번 연구에서는 기존 적외선을 활용한 간접적인 날씨 정보에 의존해 왔던 FPI 자료 분류의 부정확성을 개선하고자 전천카메라 이미지 자료를 효과적으로 활용하여 날씨 정보를 추출하는 방법을 개발하였다.

1. 전천 이미지 내 별의 수를 기반으로 한 날씨 정보 추출

전천카메라 자료를 활용하는 방식에는 치명적인 단점이 있는데, 기 개발된 별도의 전천카메라 분석 도구가 없는 경우 사용자가 모든 이미지를 직접 살펴보며 날씨 조건이 양호한 시점을 선별해야 한다는 점이다. 장비의 운영이 Campaign 방식으로 운영되어 제한적인 기간에 대해서만 관측이 이루어지는 경우에는 문제가 없을 수 있으나, Kiruna FPI처럼 상시/장

기 관측 목적에 있어서는 전천카메라를 관측 유효 기간 선별 목적으로 사용하기 위해서는 별도의 전천카메라 분석 도구의 개발이 필수적으로 요구된다. 본 절에서는 Kiruna FPI 자료 활용을 위해 필수적으로 요구되는 날씨 판별을 위한 전천카메라 자료 분석 기술 개발에 관한 내용을 기술하도록 한다.

가. 착안점 및 기술 개발 방향

날씨 판별을 위한 전천카메라 자료 분석 기술 개발은 다음과 같은 매우 단순한 사실에 착안하여 진행하였다.



그림 6 Kiruna 전천카메라 관측 결과물 예시(왼쪽: 맑은 하늘, 오른쪽: 흐린 하늘)

그림 6은 Kiruna에 설치된 전천카메라 관측 결과의 예시로써, 날씨가 맑은 경우와 날씨가 흐린 경우 하늘에서 보이는 별의 개수에 차이가 있음을 알 수 있다. 기술 개발은 바로 이 점에 착안하여, 이미지에서 별을 포착하고 각각의 이미지에서 포착된 별의 총 개수를 이용하여 날씨의 맑고 흐림을 구분하는 것을 목표로 하였다.

나. 기술 개발 내용

(1) 입력 자료 간소화

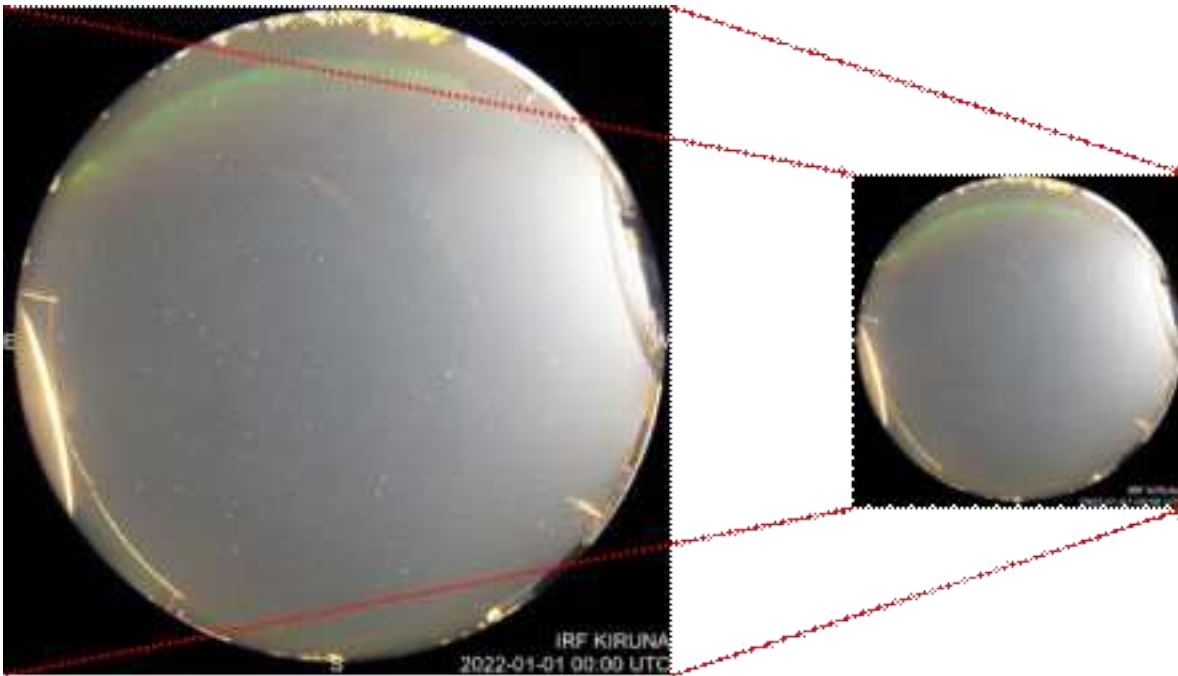


그림 7 2×2 binning을 이용한 이미지 축소의 예시

Kiruna 전천카메라 이미지 원시 자료의 픽셀 크기는 924×924 로 큰 편은 아니나, 대량의 자료처리를 수행하여야 하기에 분석에 필요한 시간 또한 줄일 필요가 있다. 이를 위해 입력된 자료는 그림 8과 같이 2×2 binning을 활용하여 924×924 의 절반인 462×462 로 줄이는 작업을 가장 먼저 수행하게 된다. 크기를 절반으로 줄인다고 하였으나, 이는 각각 가로, 세로 기준으로 픽셀 수의 감소를 의미하며, 실제 이미지의 전체 픽셀 수는 2×2 binning 후 1/4로 감소하게 된다. 이를 통해 분석 속도의 향상 뿐만 아니라, 노이즈 감소 효과 또한 얻어진다. 노이즈 감소 효과의 경우 Kiruna 전천카메라 자료에 중요하게 작용하는데, Kiruna 전천카메라 자료의 경우 무손실 압축포맷이 아닌 손실 압축포맷인 jpeg을 사용하고 있다. 즉 무손실 압축포맷 (예: png) 대비 노이즈가 많은 자료이며, 따라서 2×2 binning 과정에서 발생하는 노이즈 감소 효과는 이후 자료 처리에도 유리하게 작용한다.

Kiruna 전천카메라 원시 이미지자료는 컬러 이미지로써, R,G,B 각각의 3개의 채널의 밝기 정보가 각 픽셀마다 저장되어있다. 앞선 2×2 binning에 더불어 R, G, B 3개의 채널 정보를 1개의 정보로 전환, 즉 컬러 이미지의 흑백 이미지로의 변환 과정 또한 적용되었다. 가장 간단한 방식은 각각의 R, G, B 밝기 값의 평균 값을 사용하는 것이다. 이 외에도 실제 영상 처리 분야에서는 목적에 따라 R, G, B 각각의 채널에 서로 다른 가중치를 적용하여 흑백으로 변환하는 방식을 많이 사용한다. Kiruna 전천카메라의 경우 2020년 8월 17일 새로운 시스템으로 교체 되었는데, 이전 시스템에서는 R, G, B 밝기 값의 평균 값을 사용하는 방식으로 변환된 흑백 이미지로부터 별을 포착하는데 큰 무리가 없었으나, 새로 변경된 시스템에서는 오로라가 발생하여 이미지에 찍히는 경우, 이 이미지로부터 포착되는 별의 갯수가 줄어드는 어려움이 발생하였다. 따라서 단순히 R, G, B 밝기 값의 평균 값을 사용하여 흑백으로 변환하는 것이 아닌, 여러번의 시행착오를 통해 본 기술 개발에 가장 적합한 방식을

찾아내었으며, 이는 다음과 같다.

원시 이미지의 R-채널과 B-채널의 밝기를 비교하고, 이 중 R-채널의 밝기가 B-채널의 밝기보다 큰 곳의 위치를 기록한 flag 이미지(0과 1로만 구성됨)를 생성한다. 그리고 앞서 생성한 flag 이미지와 완전히 대비되는 flag 이미지를 추가적으로 생성하는데, 이는 앞선 flag 이미지에 배타적 논리합 연산자인 XOR를 통해 쉽게 얻어낼 수 있다. 이 두 flag 이미지는 각각 그림 8의 (b), (c)와 같다. 그리고 이 두 flag 이미지에 원시 이미지를 각각 곱하고, 이 두 이미지를 분석에 활용한다.

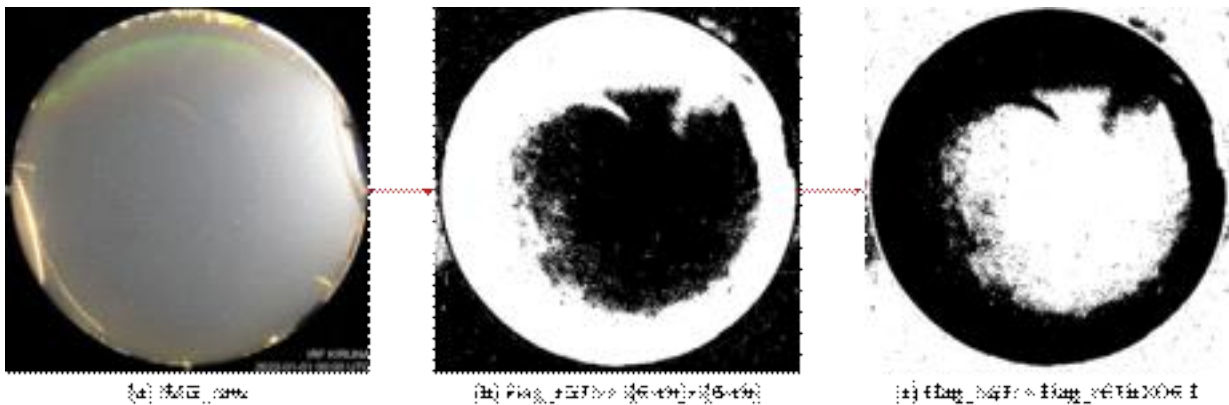


그림 8 원시 이미지(a)를 흑백 이미지로 변환하기 위해 생성한 두 flag 이미지 (b, c)

이렇게 생성한 흑백 이미지는 오로라가 이미지에 존재하는 경우에도 별이 효과적으로 포착되도록 하며, 그렇지 않은 다른 조건에서는 부정적인 영향이 거의 없는 것으로 경험적으로 확인이 되었다. 그림 9는 단순한 밝기 평균 방식과 앞서 기술한 방식으로 생성한 흑백 이미지의 차이를 보여준다. 그림에서 붉은 타원으로 표시한 위치에서 오로라가 존재하는데, 단순 평균을 취하는 방식으로 얻은 흑백 이미지인 (b)의 경우 이것이 그대로 나타난 반면, 두 flag 이미지를 통해 생성한 흑백 이미지인 c의 경우 오로라의 밝은 부분이 잘 억제된 것이 확인된다. 주목할만한 점은 오로라가 밝게 포착된 위치 (붉은 타원 위치) 외에는 (b)와 (c)에 거의 차이가 없다는 점이다. 이것은 (c) 방식의 흑백 이미지가 오로지 오로라를 억제하는데 효과적임을 보여준다.

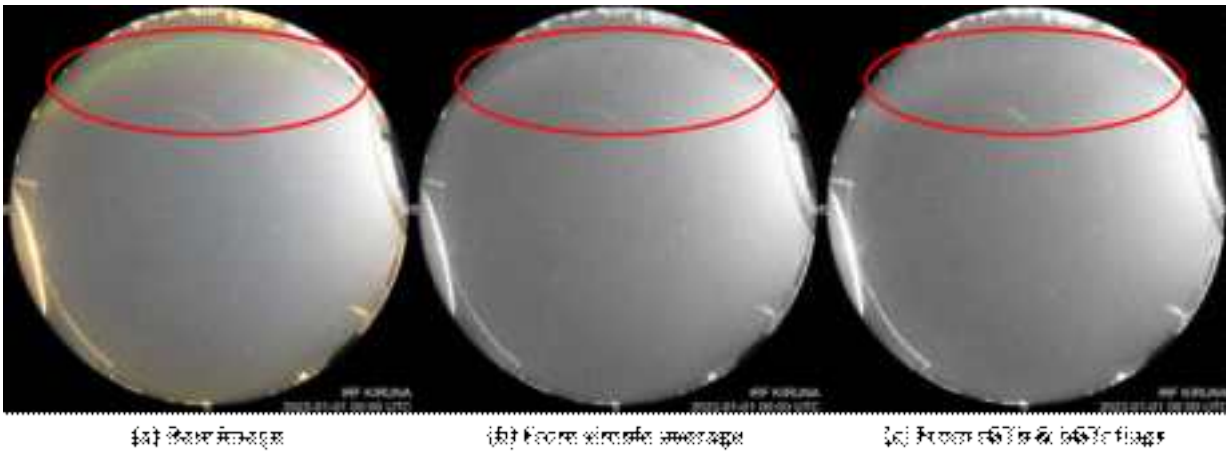


그림 9 (a) 원본 이미지, (b) 단순한 R, G, B 채널의 평균을 이용해 생성한 흑백 이미지, (c) 본 연구에서 사용한 두 flag 이미지를 사용하는 방식을 통해 생성한 흑백 이미지

(2) 이미지 주파수 해석

이미지상에서 별은 작은 점 형태로 나타나게 되며, 이는 주파수 도메인에서 고주파 성분에 해당된다. 따라서 이미지 상에서 저주파 성분은 제거하고 고주파 성분만 남길 수 있다면 별빛을 포착해내기 수월해진다. 이러한 작업은 푸리에 변환 (Fourier transform)을 통해 쉽게 진행할 수 있다. 그림 8의 두 플래그 이미지 (b, c)를 적용한 이미지에 푸리에 변환을 적용한 이미지는 그림 10과 같다.

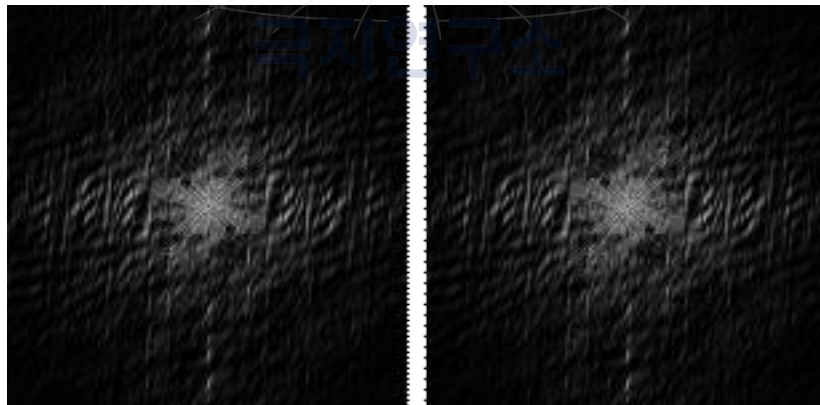


그림 10 두 flag 이미지를 적용한 이미지의 푸리에 변환 결과

그림 10은 이미지의 주파수 도메인 상에서의 세기에 해당한다. 도메인의 축은 이미지 중앙에 위치하며, 따라서 이미지 중앙에 가까울수록 저주파 성분에 해당하며 이미지 중앙에서 멀어질수록 점차 고주파성분에 해당한다. 고주파 성분만 남기기 위해서는 푸리에 변환 결과인 그림 10에 masking window를 적용한 후 이를 역푸리에 변환을 실시하면 된다.

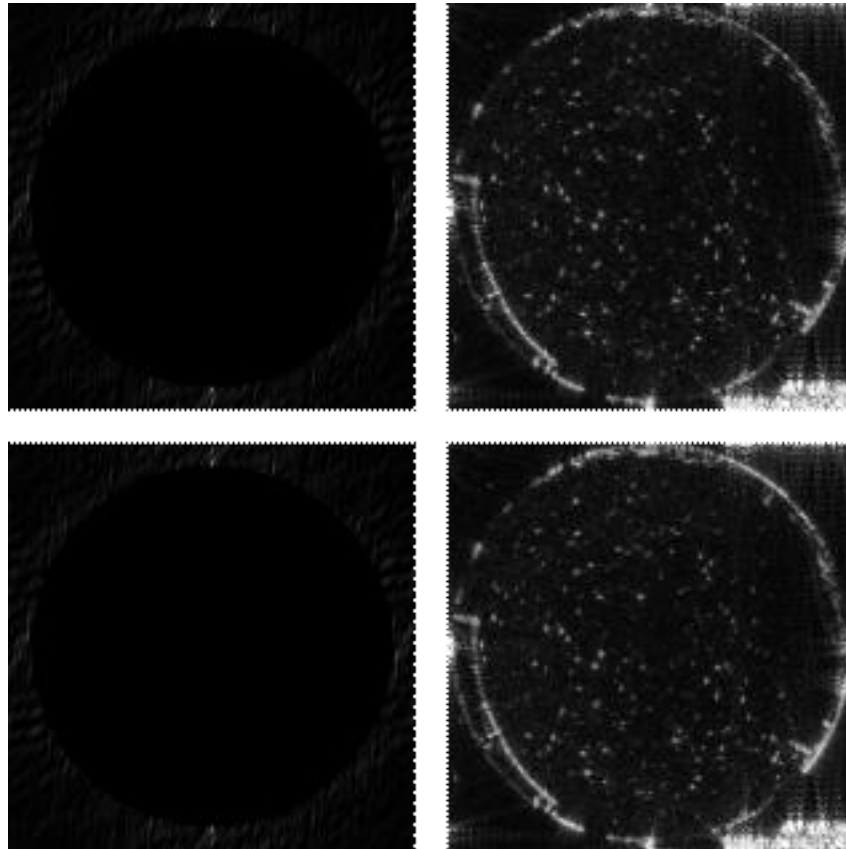


그림 11 (좌측) 푸리에 변환 결과에 masking window를 적용한 결과,
(우측) masking window를 적용한 뒤 역푸리에 변환을 적용한 결과

그림 11은 푸리에 변환 결과에 masking window를 적용한 결과 및 이것에 역푸리에 변환을 적용한 결과를 보여준다. masking window는 0과 1로만 구성된 원형 window를 사용하였으며, 원의 크기는 이미지 크기 (461 픽셀)의 8/9에 해당한다. 역푸리에 변환을 결과를 보면 별의 위치에 해당되는 곳을 생각되는 위치에 밝기가 잘 남아있다. 별의 위치 뿐만 아니라 전천 이미지 외곽 부분에도 밝은 부분이 남아있는데, 이는 전천 이미지 외곽 경계부 및 저고도 영역에 포착된 주변 지형/지물 또한 고주파 성분에 해당하기 때문이다.

(3) 형태학적 처리 및 이미지 양자화

고주파 성분만 남은 이미지에서는 동일한 형태에서의 밝기가 여러 픽셀의 그룹으로 쪼개져 있을 수 있다. 이는 주로 오로라와 같은 대규모 구조에 대해 발생하게 되는데, 만약 이를 고려하지 않고 빛을 포착하는 작업을 진행하게 되면 과도하게 많은 위치가 별로 포착될 수 있다. 따라서 이를 막기위해 형태학적 이미지 처리(Morphological image processing)를 적용하는 방식을 사용하였다.

먼저 형태학적 이미지 처리를 사용하기 위해서는 기본이 되는 형태를 정의해야한다. 기본 형태로는 마름모 형태의 구조를 사용하였으며, 이를 배열로 표현하면 $[[0,1,0],[1,1,1],[0,1,0]]$ 이 된다. 이를 기본 구조로 하여 형태학적 이미지 처리 함수 중 DILATE 함수를 사용하였다. DILATE 함수의 경우 기본 구조에 기반하여 입력된 이미지의 형태를 확장하는 작업을

수행한다. 이는 오로라가 발생한 위치에서 포착된 밝은 형태들을 하나로 병합하는 효과를 만들어내게 된다.

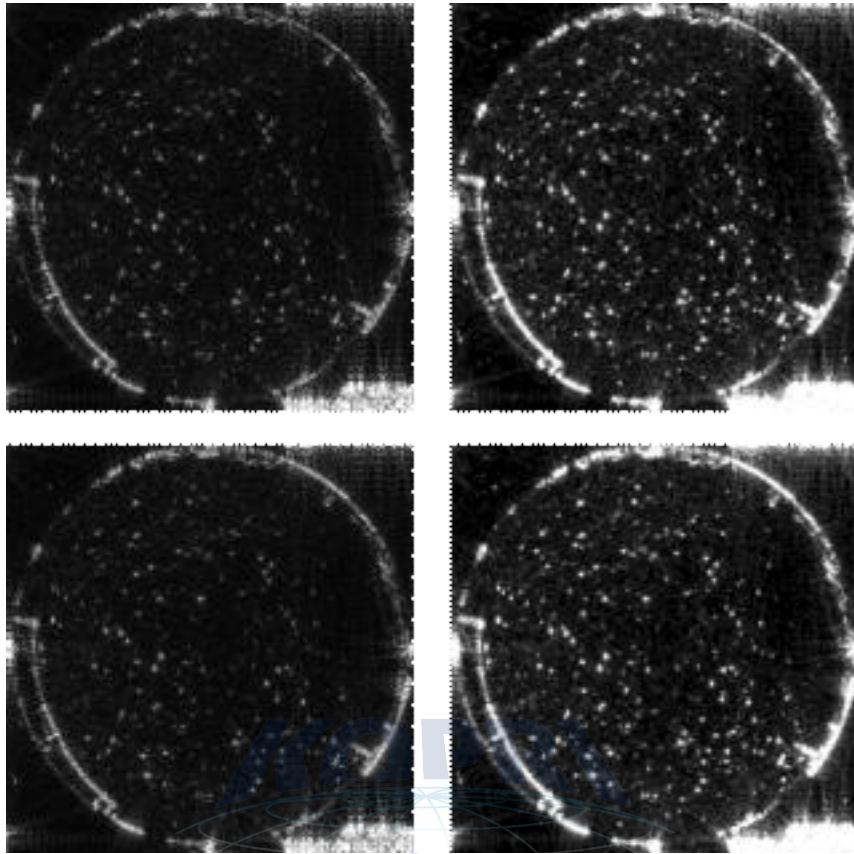


그림 12 역푸리에 변환 결과에 형태학적 이미지 처리를 적용하기 전 (왼쪽) 및 형태학적 이미지 처리를 적용한 결과 (오른쪽)

그림 12는 형태학적 이미지 처리를 적용한 결과를 보여준다. 형태학적 이미지 처리 기법을 적용한 후 이미지에 나타난 형태들이 확장된 것을 확인할 수 있다. 형태학적 이미지 처리가 이루어지고나면 최종적으로 이미지가 0과 1로만 구성되도록 양자화하는 작업을 거치게 된다. 양자화의 과정은 다음과 같다.

- (가) 0보다 크고 1보다 작은 상수 (R) 설정
- (나) 이미지 각 픽셀의 밝기를 순차 정렬
- (다) 전체 픽셀 중 하위 $R \times 100\%$ 의 값을 0으로 하고 나머지는 1로 함

그림 13은 이미지의 양자화 결과를 보여준다. 상단 행의 경우 두 flag (rGTb, bGTr) 이미지 중 rGTb flag 이미지가 적용된 결과에 해당하고 하단 행의 경우 bGTr flag 이미지가 적용된 결과이다. 양자화를 위해 rGTb 및 bGTr flag 이미지에 대한 R 값은 각각 0.95 및 0.992가 사용되었다. 또한 이미지의 외곽부는 별빛에 의한 고주파 성분이 아닌 주변 지형/지물에 의한 고주파 성분이 남아있기에, 양자화 결과는 원의 크기가 이미지 픽셀 크기의 7/9에 해당하는 영역에 대해서만 결과물이 있도록 masking window를 적용하였다. 이 두 최종 양자

화 결과를 병합하고, 병합된 이미지에서 값이 1인 영역들의 개수를 통해 별 개수를 포착하게 된다. bGTr flag 이미지가 적용된 이미지에서는 양자화 후 남아있는 것이 거의 없는데, 이것은 의도된 것이다. bGTr flag 이미지가 적용된 이미지는 오로지 오로라가 발생했을 때만 결과물이 포착되도록 설정되어 있다. 오로라가 발생했을 때의 양자화 결과 예시는 그림 14와 같다.

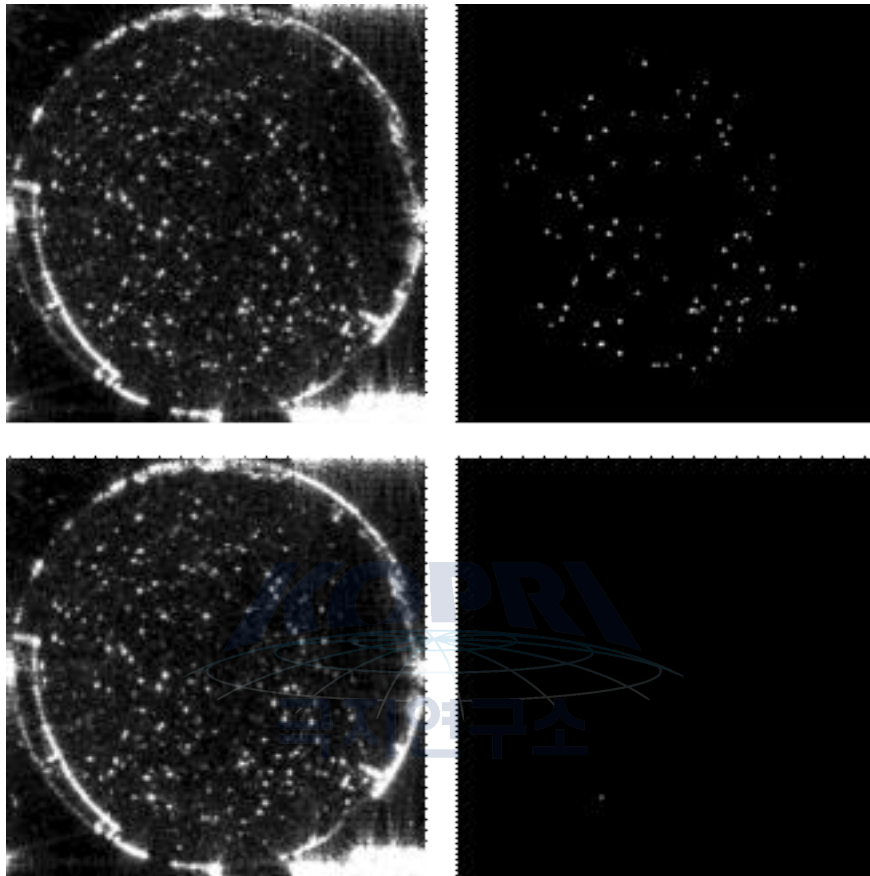


그림 13 이미지 양자화 전 (왼쪽) 및 이미지 양자화 후 (오른쪽) 결과

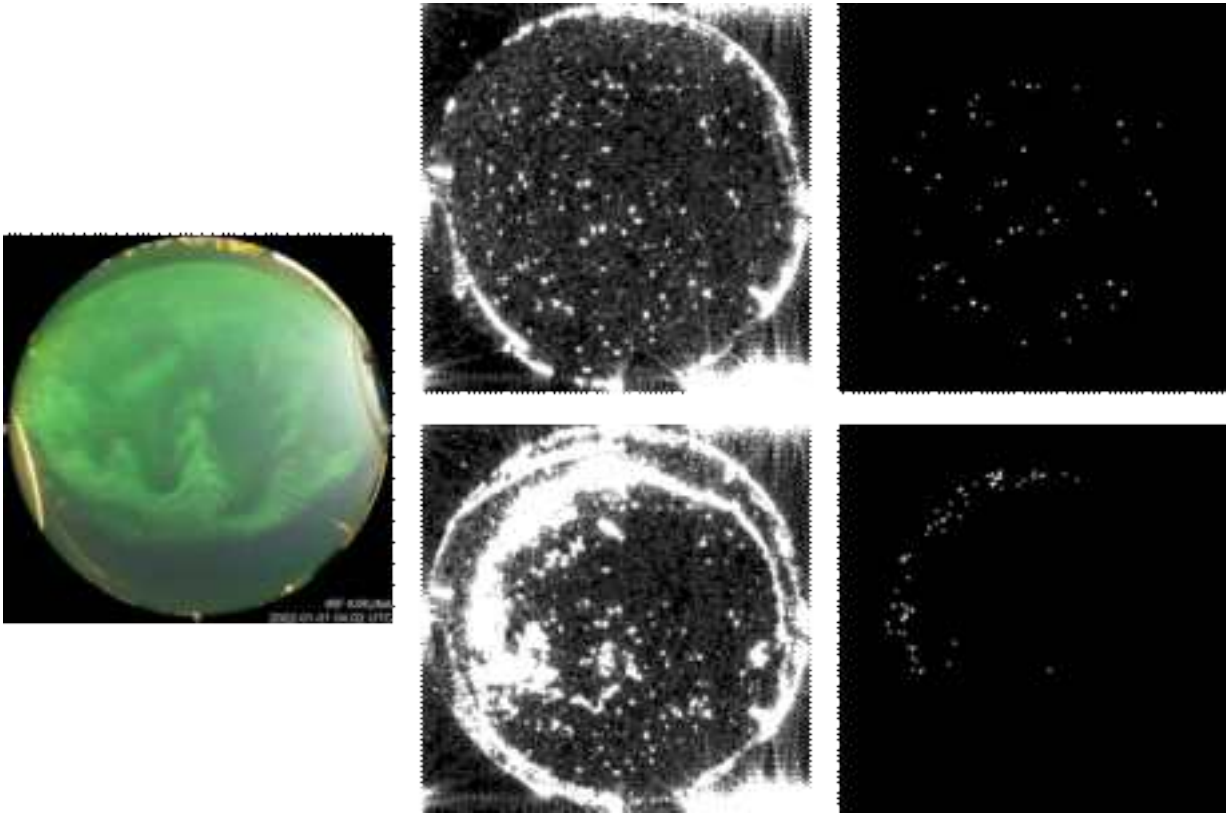


그림 14 오로라가 발생한 이미지(첫번째 열)에 대한 형태학적 이미지 처리 결과 (두번째 열) 및 최종 양자화 결과 (세번째 열)

다. 최종 결과

그림 15은 최종 개발된 전천카메라 이미지 분석 프로그램의 분석 결과 예시를 보여준다. 예시로 설정한 2022년 1월 1일의 경우, 맑은 하늘, 흐린 하늘, 오로라가 발생한 하늘 모두를 포함하고 있는 날로써, 개발된 프로그램 결과를 한눈에 보여주기 좋은 시점에 해당한다. 그림의 좌측 최상단 열은 각각의 이미지에서 포착된 별의 갯수를 나타내며, 좌측 두번째 및 세번째 열은 개별 이미지의 남북 및 동서방향의 정보를 하나로 이어붙인 keogram에 해당한다. 맑은 하늘 조건에서 별 개수는 높은 숫자를 보이며, 흐린 하늘 조건이 되면 별 갯수가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

개발된 분석 프로그램은 최종적으로 잘 작동하는 것으로 보인다. 하지만 개발된 분석 프로그램을 관측 조건이 다르고 다른 하드웨어 스펙을 가진 장비에서 얻어진 이미지에 적용하려면 상당한 최적화 과정이 요구된다. 최근 다양한 분야에서 인공지능 (Artificial Intelligence, AI)를 활용한 자료 분석이 활발하게 이루어지고 있으며, 그 성능 또한 상당히 신뢰할만한 결과를 보여주고 있다. 본 분석 프로그램은 이러한 최신 기법을 적용한 것이 아닌 고전적인 이미지 처리 기법을 활용하였기에, AI를 활용한 새로운 분석 기술 또한 개발할 필요가 있다.

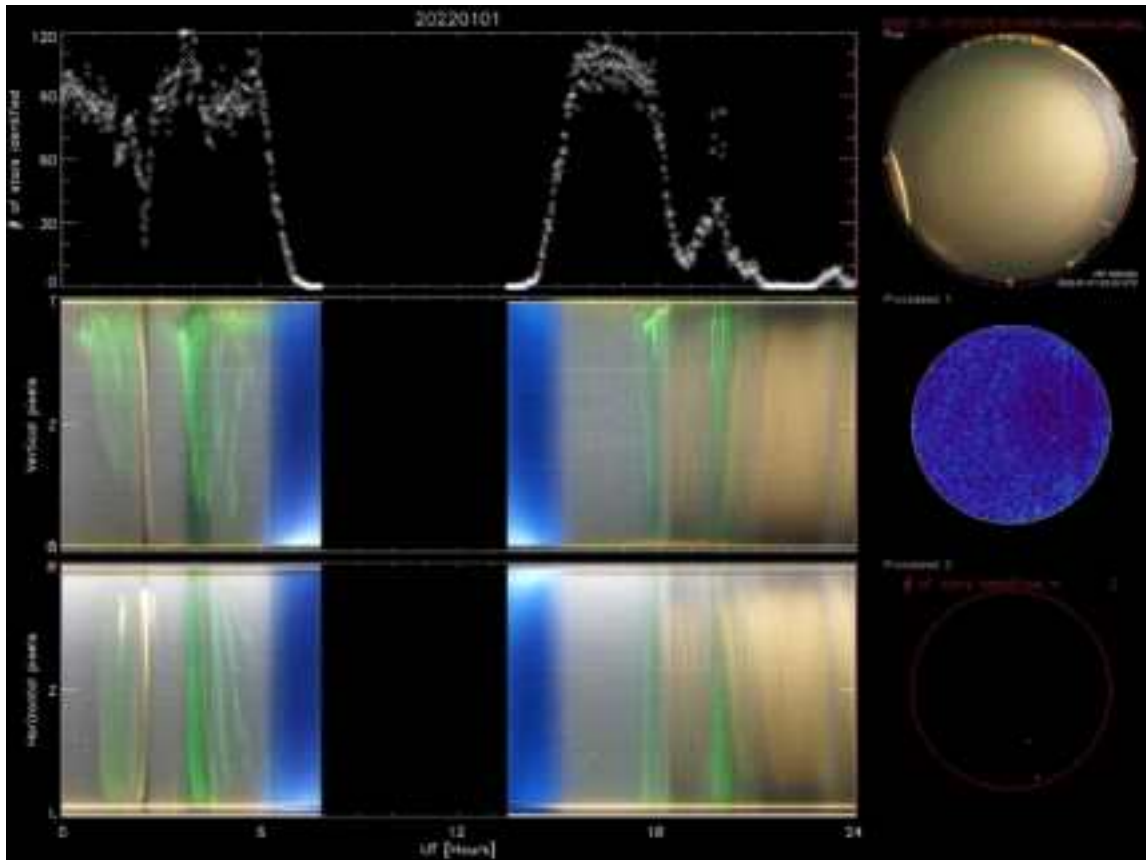


그림 15 최종 개발된 전천카메라 이미지 분석 프로그램의 분석 결과 예시

2. 딥러닝을 활용한 전천 이미지의 날씨 정보 추출

다수의 전천 이미지 데이터를 효율적으로 처리하기 위해서는 딥러닝 기법을 활용하는 것이 효과적이다. 본 연구에서는 대기광 유효 자료 선별을 목적으로, 이미지 분류 분야에서 널리 활용되는 딥러닝 구조 중 하나인 합성곱 신경망(Convolutional Neural Network, CNN)을 선택했고, CNN 기반 모델 중에서도 8개의 층으로 구성된 Residual Network-18 (ResNet-18)을 사용했다. 모델의 성능을 향상시키기 위해서는 대량의 학습 데이터를 확보하여 학습시키는 것이 가장 이상적이다. 그러나 양질의 데이터셋을 구축하는 과정에는 상당한 시간과 노력이 요구된다. 이러한 한계를 보완하기 위해 비교적 소량의 학습 데이터 환경에서도 높은 성능을 기대할 수 있는 사전 학습된(pre-trained) ResNet-18 모델을 사용하였다. 해당 모델은 대규모 이미지 데이터베이스인 ImageNet의 데이터셋을 이용해 사전 학습(pre-training)이 된 것으로, 이를 기반으로 본 연구의 목적에 맞게 추가 학습을 진행하였다.

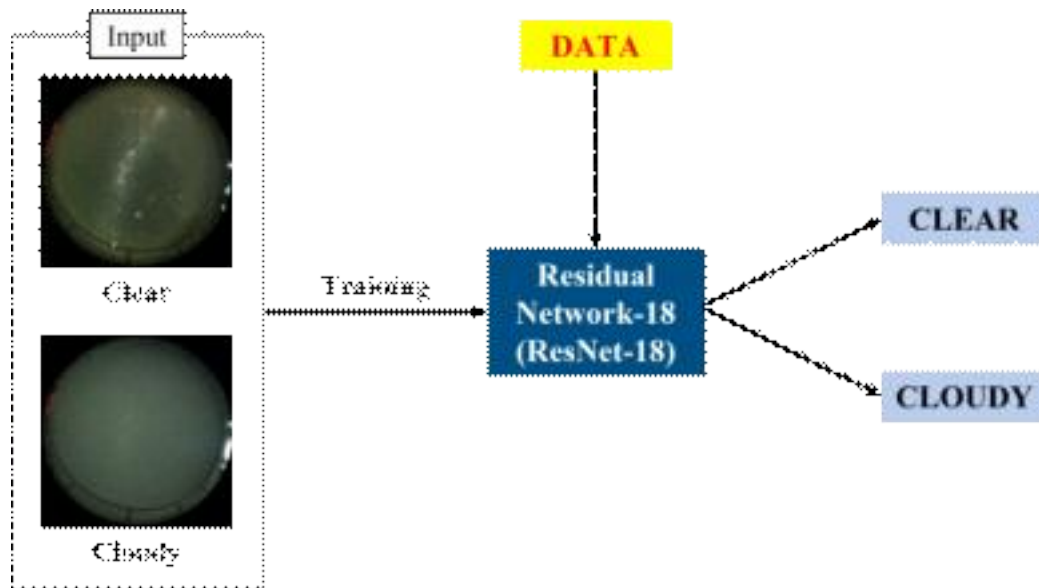


그림 16 유효 이미지 선별 과정

2020년에 장보고 기지에서 수집된 약 7만 장의 가시광 이미지를 clear / cloudy의 이진 분류 기준으로 분류 및 라벨링 하여 데이터셋을 구축하였다. 라벨링된 데이터 중 80%는 학습용 데이터셋 (train dataset)으로, 나머지 20%는 검증용 데이터셋 (validation dataset)으로 구분 하여 모델 학습 및 성능 평가에 활용하였다.

에포크(epoch) 동안 여러 배치에서 계산된 loss 값을 평균하여 running loss를 산출하였으며, 이를 통해 에포크 단위에서의 학습 진행 상태와 수렴 여부를 평가하였다. 즉, 모델은 배치 단위로 파라미터를 업데이트하고, running loss를 통해 학습 성능을 분석하였다.

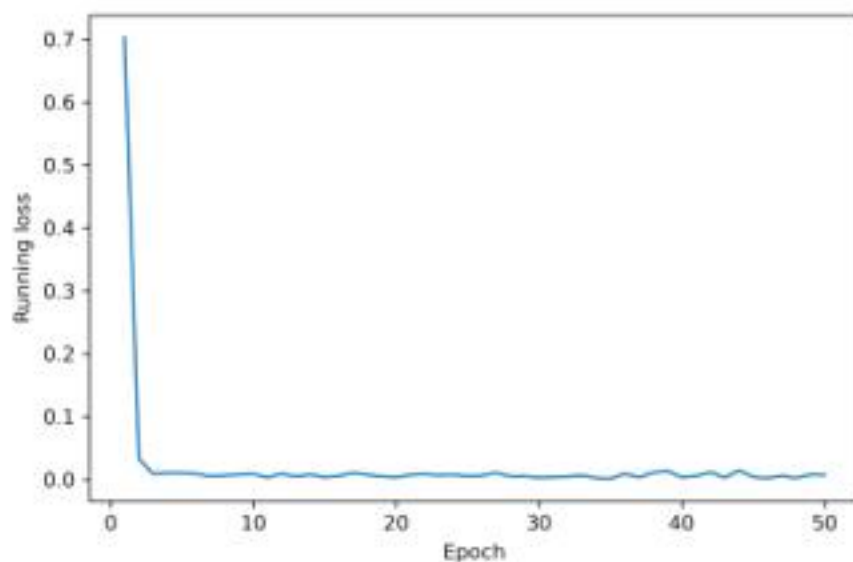


그림 17 에포크 별 Running loss

그림 17은 각 에포크(epoch)마다 계산된 running loss를 기반으로, 학습 회차에 따른 running loss의 변화를 나타낸 것이다. Running loss가 1에 가까울수록 딥러닝 모델의 예측 결과와

실제 라벨 차이가 크며, 0에 가까울수록 두 값 간의 차이가 감소함을 의미한다. 에포크에 따른 running loss의 변화를 살펴보면, 초기 에포크 이후로 손실 값이 급격히 감소한 뒤 0에 근접한 값을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 이는 학습 회차가 증가함에 따라 모델의 예측 결과가 실제 라벨에 점차 근접하여, 예측 오차가 효과적으로 감소하였음을 의미한다.

모델 성능에 대한 정량적 평가를 위해 검증용 데이터셋을 활용하여 모델의 분류 정확도를 산출하였다. 그 결과, 모델의 정확도는 97.8%로 나타났으며, 이는 모델이 맑은 날/ 흐린 날 이미지를 높은 신뢰도로 분류할 수 있음을 의미한다.

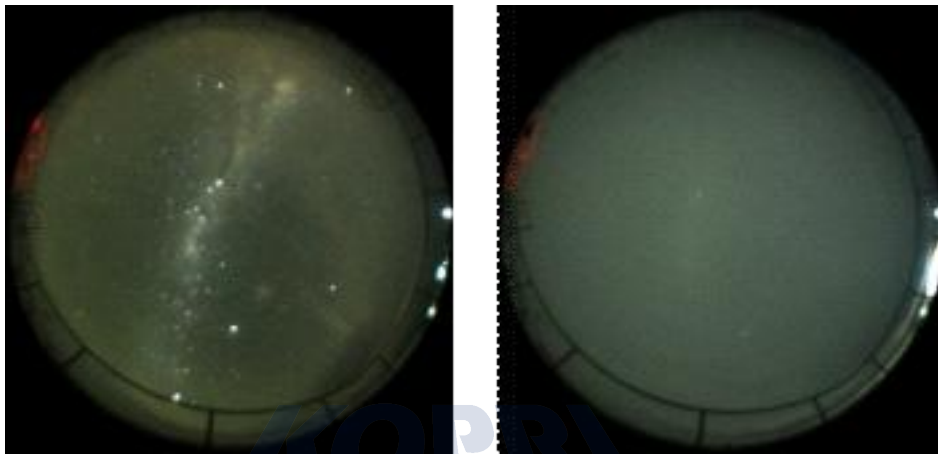


그림 18 모델 결과 예시 (왼쪽 : 맑은 날, 오른쪽 : 흐린 날)

딥러닝 모델과 기존의 별의 개수를 기준으로 유효 데이터를 분류한 결과를 비교한 결과, 딥러닝 모델이 기존 방법에 비해 더 많은 양의 유효 데이터를 분류한 것으로 확인되었다. 이는 주관적인 기준에 기반한 별의 개수 방식이 일부 유효 데이터를 누락했을 가능성을 시사한다. 반면, 딥러닝 모델은 데이터의 패턴과 특성을 종합적으로 학습함으로써 기존 방법에서 분류되지 않았던 유효 데이터를 보다 효과적으로 보완한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 딥러닝 기반 분류 방식이 유효 데이터 선별 과정에서 객관성과 신뢰성을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

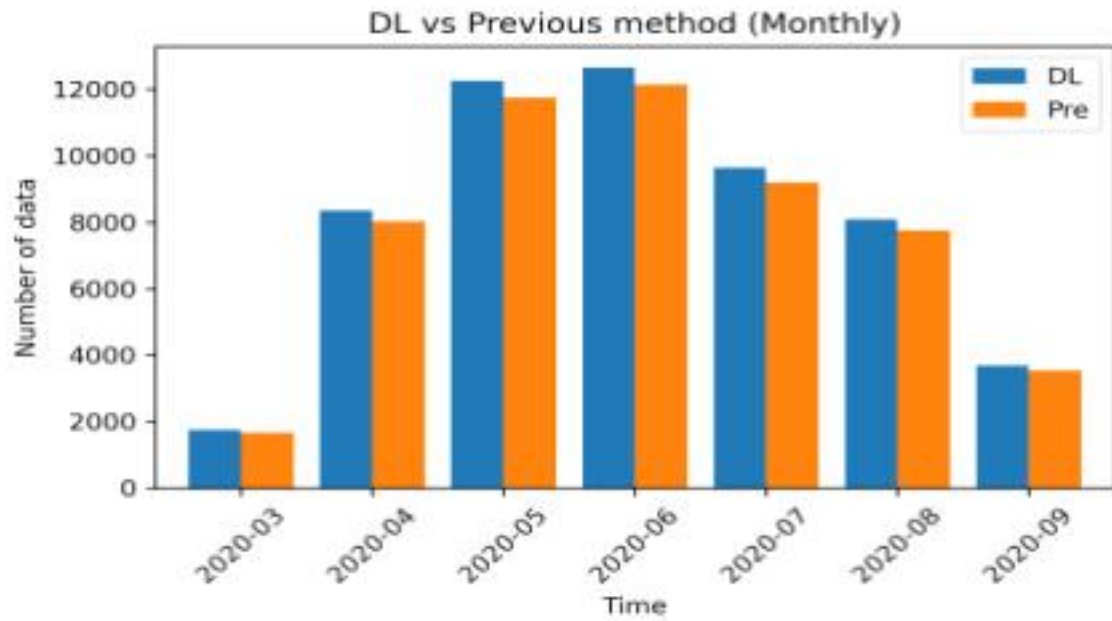


그림 19 딥러닝 모델과 기존 방법의 유효 데이터 분류 결과 예시 (2020년)

3. 고층대기 대기광 유효 자료 선별을 위한 소형 카메라 개발

앞서 다룬 FPI 원시 자료의 질을 보장하기 위해 날씨 정보를 추출하는 두 접근 방법 모두 전천카메라 이미지를 활용한 것이었다. 따라서 FPI의 원시 자료 분석 이전에 선행되어야 하는 유효 자료 선별 과정에는 전천카메라 이미지가 반드시 필요하다. 그동안 FPI가 설치되어 운영되어온 남북극 인프라에는 대기광 및 오로라를 관측하기 위한 용도로 전천카메라가 이미 사전에 설치되어 자료를 축적해오고 있었으나, 모든 FPI 관측소에 맑고 흐린 날 분류 목적을 위해 높은 성능의 전천카메라를 도입할 수 없기에 FPI 원시 자료 선별 전용의 소형 카메라 개발이 필요하게 되었다. 본 연구에서는 오로라 정보와 날씨 정보를 모두 검출할 수 있는 저전력의 광시야 전천카메라 개발을 통해 FPI 원시 자료에 직접적인 영향을 줄 수 있는 구름, 오로라에 대한 정보를 관측을 통해 얻음으로써 고품질의 FPI 자료를 신속하고 정확하게 분류할 수 있도록 하였다.

표 1 기상 및 오로라 활동 감시를 위한 소형 카메라의 렌즈와 센서 주요 제원

소형 카메라	주요 사양
렌즈	크기: 지름 57 × 길이 52 mm 초점거리: 2.7 mm 아이리스 범위: F1.8-F16 시야각: 180 degree 마운트 타입: C 최소 초점거리: 0.2 m
센서	이미지센서: Sony IMX174 해상도: 1936 × 1216 픽셀사이즈: 5.86 μm 양자 효율: 77% 렌즈 센서 포맷: 11.3 × 7.1 mm

초기 개발된 소형 카메라를 현장에서 운영하기 이전에 2023년 10월 광학기기 전문 제작 회사인 Keo Scientific 사에 방문하여 균일 광원을 활용한 카메라 광학 성능 시험을 수행하였다. 전천 이미지에서 오로라와 구름 모두 이미지 중앙에서부터 가장자리까지 이르는 넓은 면적에 분포하는 경우가 많으므로 관측 대상 밝기의 정량적인 정보를 이미지 상의 위치에 따른 왜곡 없이 기록하기 위해서는 별도의 사전 실험 과정이 필요하다. 보통의 렌즈는 파장에 따라 다른 굴절률로 광 경로의 차이를 만들어내므로 두 종류 (HeNe - 적색 파장, 산소 - 푸른색 파장)의 균일 광원을 이미지 중심에서 일정 간격을 두고 동일한 관측 조건에서 측정하여 소형 카메라의 광학적 특성을 먼저 파악하였다.

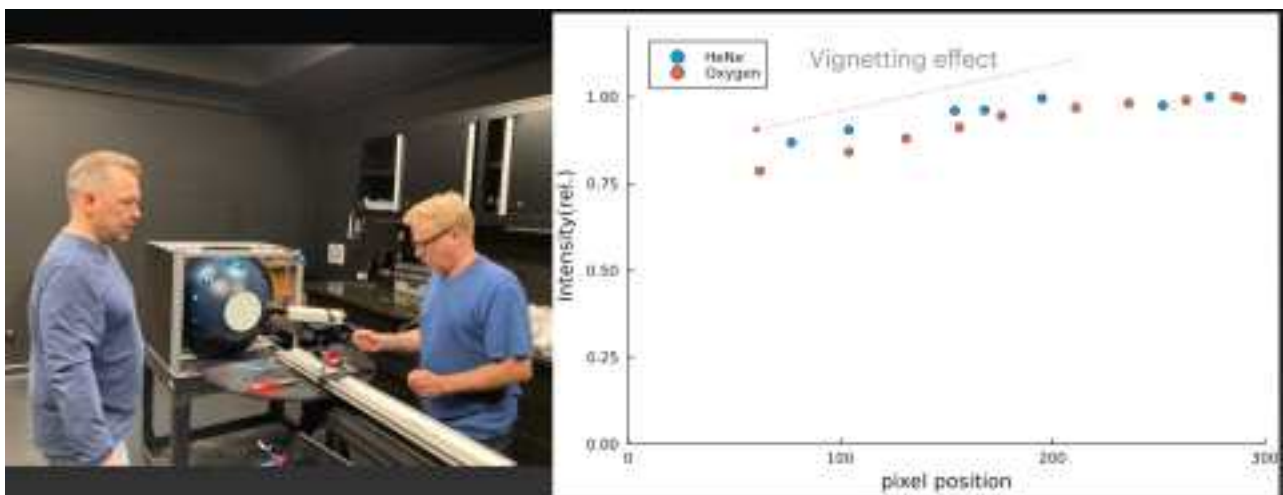


그림 20 Keo Scientific사에서 수행된 소형 카메라 광학 실험 준비(왼쪽), 두 광원(HeNe, Oxygen)에 대한 소형 전천 카메라의 빛의 입사각에 따른 광학 성능 변화 실험 결과(오른쪽).

두 광원을 활용해 여러 입사각에 따른 밝기 변화를 관찰한 결과, 이미지 중심에서 약 30% 멀어지면서 렌즈를 투과하는 빛의 양이 감소하기 시작해 가장 가장자리 부분에서 최대 약 22% 까지 감소한 것을 확인하였다. 이러한 이미지 가장자리로 갈수록 강해지는 빛의 감쇄

현상을 비네팅 효과(Vignetting effect)라고 하며 이러한 비네팅 효과는 렌즈를 통과하는 빛의 파장에 따라 그 세기가 달라진다. 이번 실험에서 확인한 바와 같이 상대적으로 파장이 짧은 산소 광원의 빛의 세기가 적색 파장의 빛인 HeNe 레이저 광원에 비해 이미지 중심에서 가까운 영역에서부터 빛의 감쇄가 시작되어 이미지 중심으로부터의 거리에 따라 보다 빠르게 빛의 세기 감소가 가파르게 일어났다.

이번 실험을 통해 본 연구에서 개발된 소형 전천카메라의 광학 성능이 간섭계의 유효 자료 선별을 위한 날씨 정보 추출에 매우 적합한 성능을 가지고 있으며 향후 별도의 상시 전원 공급이 불가능한 환경에서 날씨뿐만 아니라 오로라 현상 등을 직접 관측하는데 적합하다는 결론을 얻었다. 이는 남극 내륙 환경 또는 북반구 고위도의 격리된 지역에서 태양광 또는 풍력 발전과 같은 소규모 독자적인 전력 시스템에만 의존하여 기상 및 오로라 관측에 활용할 수 있다는 장점을 가지고 있으며, 수백에서 수천 km의 수평 거리의 규모를 가지는 오로라를 동시 관측하기 위해 무인으로 운영 가능한 소규모 관측소에서 활용할 수 있다. 이러한 가능성을 실제 확인하고 기존의 단일 관측소에서는 불가능했던 오로라의 고도 추정을 위해 본 연구에서 개발한 소형 오로라 카메라를 남극장보고과학기지 이남 약 30 km 거리의 아델리 펭귄 서식지인 인익스프레서블 섬 내 캠프에 소형 오로라 카메라를 설치하여, 관측 자료 수집을 시작하였다. 비록 본 연구가 2025년 12월 31일 종료됨으로 인하여 실제 오로라 관측 이미지 자료를 연구 기간 내에 활용할 수는 없었으나, 인익스프레서블 섬의 오로라 카메라는 연구 수행으로 개발된 소형 전천 카메라가 매우 넓은 범위에서 활용될 수 있음을 보여주는 하나의 사례가 될 수 있을 것이며, 실제 남극월동기지 외에 남극 내륙으로 진출을 위한 사전 관측 수행과 같은 과정에서 저전력을 요구하는 무인 관측 거점에서 매우 의미있는 기상 및 오로라 관측 자료를 제공할 수 있다.

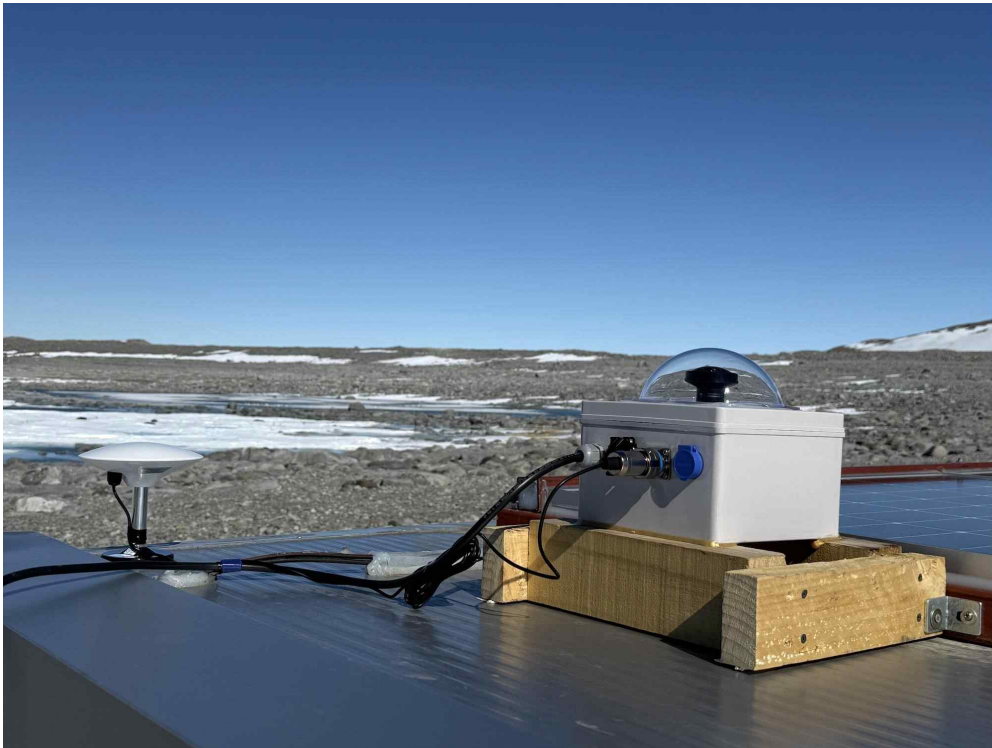


그림 21 남극장보고과학기지 이남 약 30 km에 오로라 고도 추정 연구에 활용하기 위해 설치된 소형 오로라 전천 카메라. 본 연구의 종료 직전인 2025년 12월 29일 설치 완료.

제 2 절 630 nm 대기광 원시 자료 분석 기술 개발

FPI는 열권의 바람과 온도를 동시에 측정할 수 있는 유일한 광학 장비로 현재 극지연구소는 남반구 고위도 지역에는 세종과학기지과 장보고과학기지에서, 북반구 고위도 지역에서는 스발바드 Longyearbyen과 스웨덴 키루나 ESRANGE 우주 센터에서 열권 관측에 활용하고 있다. 본 연구에서는 630 nm 대기광을 관측해 해당 대기광의 최대 방출 고도에서의 대기광원인 산소 원자의 이동 속도인 바람과 온도를 추정하는 전체 과정에 대한 분석 프로그램을 제작하는 것을 목적으로 하였다.

FPI는 band-pass filter를 이용해 단파장 빛(약 1 nm)만을 통과시켜 에탈론 내에서 간섭 무늬를 생성해 CCD에 2차원 이미지를 기록하는 방식으로 관측을 수행한다. 이때 빛의 간섭 현상에 영향을 줄 수 있는 FPI의 광학기기적 특성(에탈론의 코팅의 비균질성, 에탈론 패널 간격 변화, 에탈론 패널의 편평도 등)은 시간에 따라 미세하게 변화하며 대기광 간섭이미지의 분석에 잡음으로 작용하므로 이를 보정하기 위해 HeNe 캘리브레이션 레이저를 활용한 간섭이미지를 대기광 관측 중간에 주기적으로 수집해야 한다.

1. HeNe 켈리브레이션 레이저를 활용한 기기합수 추정

FPI의 간섭이미지로는 궁극적으로 대기광원의 시선방향(관측자와 광원의 방향)에 대한 상대적인 운동으로 발생하는 도플러 이동(Doppler shift)에 대한 정보를 추출해 고층대기 중성대기 바람을 제공하므로 간섭이미지에 대한 기본적인 이미지 처리 과정이 필요하다. 가장 우선 수행되어야 하는 것은 켈리브레이션 레이저 이미지를 활용해 간섭이미지의 중심을 찾고 중심으로부터 다양한 반경을 가지는 동심원 패턴이 동일 면적을 가지도록 영역을 분할하는 것이다.

CCD에 기록된 간섭이미지는 (512 픽셀, 512 픽셀) 크기의 정사각형 모양을 가지므로 모든 방향에 대해서 동심원의 개수가 다르다. 예를 들어 중심으로부터 상대적으로 거리가 큰 모서리 방향에는 보다 많은 동심원이 존재하지만, 중심에서 이미지의 각 변으로 향하는 방향에는 사용할 수 있는 동심원의 수가 크게 감소한다. 또한 이미지의 중심 추정 과정은 이미지 가장자리 부분, 비정상적 반사 등에 매우 취약하므로 이미지의 최대 한계선을 설정하고 그 범위 내에 있는 이미지만을 이후 처리 과정에서 활용해야 한다.

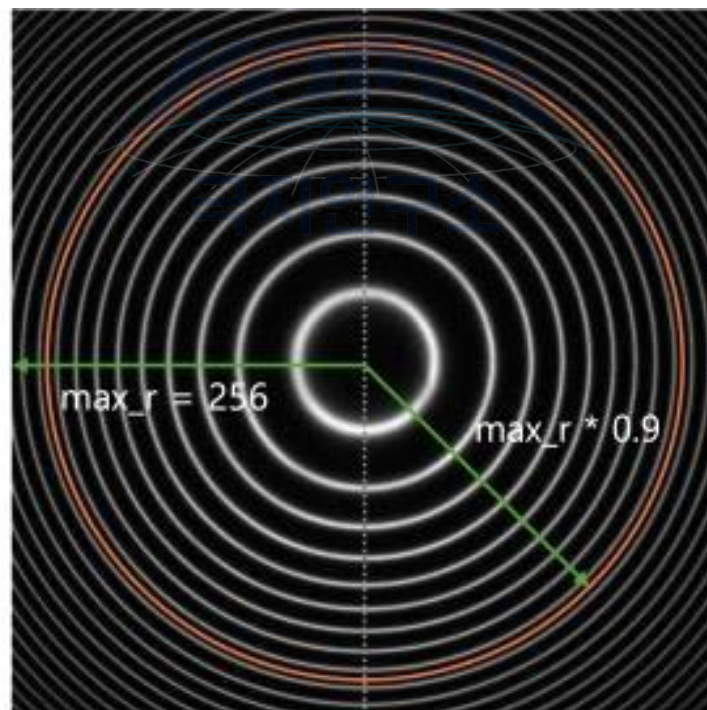


그림 22 간섭이미지를 배경으로 이미지 중심 탐색을 위해 사용할 이미지 크기 상한 (전체 이미지 크기의 90%) 표시. 본 연구에서는 전체 이미지의 80%를 상한으로 사용.

처리에 사용할 이미지의 최대 크기를 한정 한 후, 간섭이미지 밝기의 특정 값을 임계값으로 지정하여 이를 기준으로 동심원을 구분하는 이미지 마스킹 과정을 수행한다. 이때 이미지 내 픽셀 밝기 분포에서 상위 30% 이상을 가지는 픽셀 위치를 간섭무늬가 있는 것으로 인식

하도록 하여 1로, 그 외의 영역은 0으로 치환하였다.

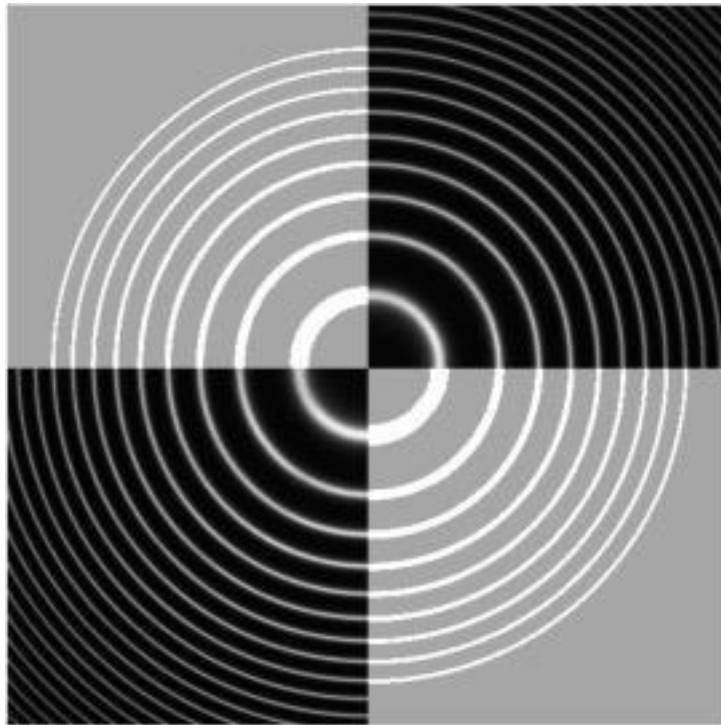


그림 23 원본 간섭이미지(1, 3 사분면)의 전체 픽셀 밝기 분포에서 상위 30% 밝기 값보다 큰 영역을 1로 그 외 영역을 0으로 치환한 이미지(2, 4 사분면)

0과 1로 이진화된 마스킹 이미지는 1로 구성된 동심원들을 반경에 따라 서로 다르게 구분하기 위한 연결 성분 레이블링 과정에 사용된다. 이때 동심원을 구성하는 픽셀의 연결성은 픽셀의 상하좌우 4개의 성분에 대한 인접 여부를 기준으로 판단한다. 이러한 연결 성분 레이블링 과정은 처음 이미지의 열(column)을 증가시키면서 픽셀을 스캔하여 1을 가지는 픽셀을 만나면 이웃 레이블이 있는지 파악 후 없다면 새로운 레이블을 할당하고 여러 레이블이 있으면 하나를 할당하고 기존의 레이블과 동일한 동심원으로 취급한다. 이후 2차 스캔을 이미지의 행(row)이 증가하는 방향으로 수행 후 각 레이블이 차지하는 픽셀 수가 100 이상인지 확인하여 일정 면적을 충족하지 못하는 동심원은 잡음, 핫 픽셀, 우주선(cosmic ray) 등으로 판단하여 이후 분석에서 제외한다.

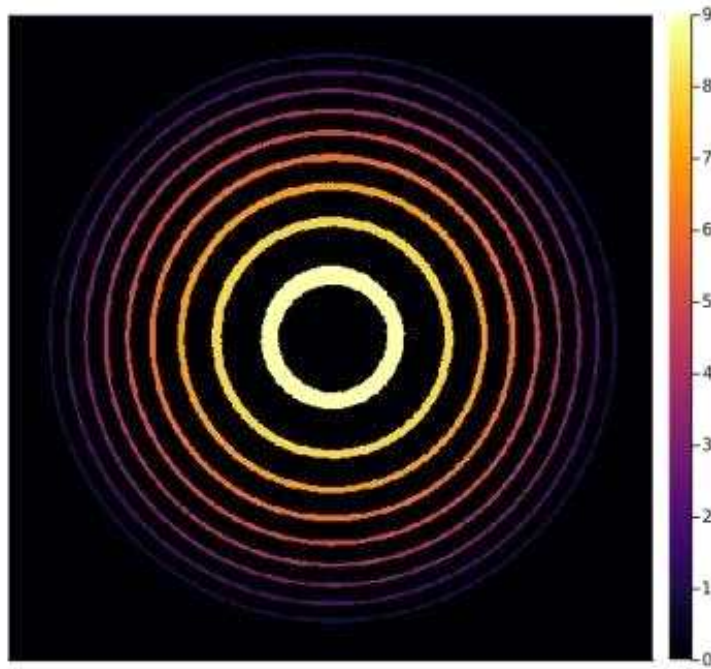


그림 24 마스크 이미지에 연결 성분 레이블링 과정을 통해 얻은 9개의 동심원 이미지. 반경이 큰 동심원인 0부터 점차 반경이 커지면서 레이블이 1씩 증가함.

다음으로 각 연결 성분(각 동심원)에 속한 픽셀의 좌표를 모아 각 개별 동심원에 대해 원(circle)을 이용한 피팅(fitting) 과정이 필요하다. 원 피팅은 대수적(algebraic) 방법과 기하학적(geometric) 방법을 모두 사용하는데, 대수적인 원 피팅이 정확도는 낮으나 빠르므로 원의 중심과 반지름의 초기값을 검색하는데 사용된다. 대수적 원 피팅의 기본 원리와 계산 과정은 아래와 같다.

원의 방정식을 일반화한 형태는,

$$x^2 + y^2 + Ax + By + C = 0$$

이 방정식의 미지수를 원의 중심과 반지름에 대해 정리하면,

$$x_0 = -\frac{A}{2}, y_0 = -\frac{B}{2}, R = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 - C}$$

대수적 피팅은 각 동심원을 구성하는 픽셀 위치에서의 방정식 잔차를 최소화 하는 방향으로 진행된다.

$$\min_{A,B,C} \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C)^2$$

위 방정식을 이미지의 각 픽셀에 대해 정리하면,

$$Ax_i + By_i + C \approx -(x_i^2 + y_i^2)$$

위 방정식을 아래와 같이 $Ax = b$ 형태의 행렬 방정식을 구성하여 최소제곱의 해를 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 \\ \vdots \\ x_N^2 + y_N^2 \end{bmatrix}$$

위와 같은 대수적 원 피팅은 매우 빠르고 초기값이 필요하지 않아 구현이 단순하고 안정적이므로 많은 동심원을 처리해야 하는 상황에서 유리하다는 장점이 있으나, 최소화하는 오차가 기하학적 거리가 아니며 반지름이 큰 동심원일수록 오차 민감도가 커지는 단점을 가지고 있어, 계산의 효율성을 위해 동심원의 중심과 반지름에 대한 초기값 추정하는 단계에서만 활용하고 보다 정확한 값은 기하학적 피팅을 이용해 계산한다.

기하학적 원 피팅은 동심원을 구성하는 각 점에서 원까지의 실제 거리 오차를 최소화한다.

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - R$$

이는 아래와 같은 비선형 최소제곱(non-linear least squares) 문제로 해결할 수 있다.

$$\min_{x_0, y_0, R} \sum_{i=1}^N d_i^2$$

초기값으로 앞서 대수적 피팅으로 얻은 결과를 사용하고 반복 최적화를 통해 수렴하는 최적의 해(x_0, y_0, R)를 도출한다. 이러한 기하학적 피팅의 장점은 물리적으로 의미있는 오차 최소화를 수행할 수 있으며 동심원의 분포가 불균일해도 안정적인 중심 추정이 가능하다.

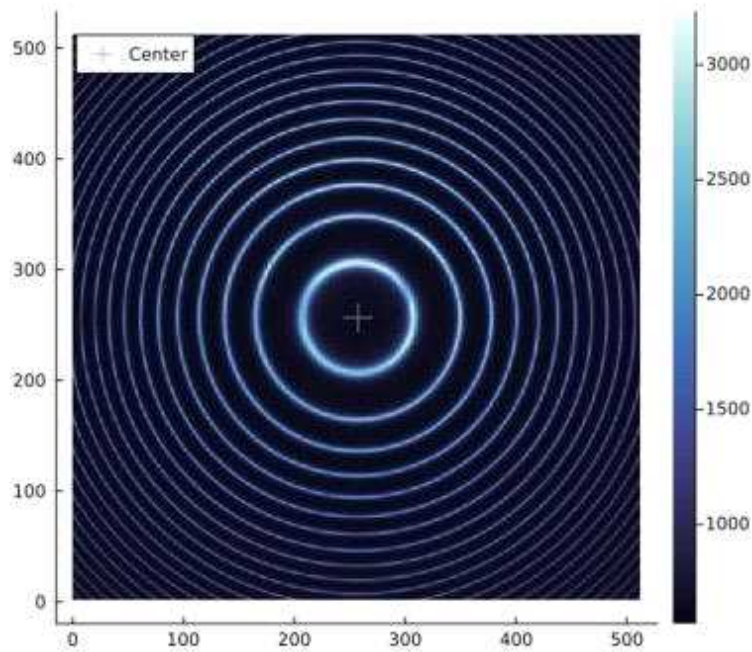


그림 25 기하학적 원 피팅을 HeNe 캘리브레이션 레이저 이미지에 적용해 찾은 동심원의 중심. “+” 기호로 중심을 표시.

레이저 간섭 이미지를 이용한 중심 추정이 완료되면, 중심을 기준으로 1차원 스펙트럼 생성에 필요한 동일 면적의 환(annulus) 영역으로 분할해야 한다. 이는 FPI의 간섭 이미지는 2차원이지만 물리적으로 독립적인 정보는 FPI로 입사하는 빛의 입사각 하나뿐이다. 즉, 입사각의 변화에 따라 FPI의 이미지 상에 기록되는 동심원의 크기가 달라진다.

간섭 이미지 상에서 동일한 반경에 있는 모든 픽셀은 동일한 입사각과 간섭 차수, 그리고 파장 정보를 가진다. 이때 동일 면적으로 환들을 나누는 이유는 단순히 반경 간격을 동일하게 나눌 경우, 바깥쪽 환은 안쪽 환에 비해 보다 많은 픽셀 수를 가지므로 보다 큰 신호 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)를 가지므로 환의 반경에 따라 노이즈 특성이 달라지는 문제가 존재한다. 이를 해소하여 각 환의 밝기 정보에 대한 신뢰도를 동일하게 만들면 향후 1차원 스펙트럼을 생성하는 과정에서 스펙트럼 개별요소에 대해 동등한 통계적 가중치를 부여할 수 있다.

간섭 이미지의 가장자리 반경(r_{edge})을 이용해 분할할 환의 면적을 아래와 같이 계산할 수 있다. 본 연구에서는 분할 동일 면적 환의 수(N)를 500으로 지정하였다.

$$A = \frac{\pi \cdot r_{edge}^2}{N}$$

반복문 내에서 동심원의 외경(r_o)을 균일 환 면적(A)과 내경(r_i)을 이용해 아래와 같이 결정한다.

$$r_o = \sqrt{\frac{A}{\pi} + r_i^2}$$

위에서 결정된 외경은 다음 인접한 환의 외경 계산을 위해 내경으로 대체되어 사용되고 위 계산은 총 환 개수만큼 반복되어 진행된다. 이러한 과정을 통해 반경이 증가할수록 환의 폭은 점점 얇아지며 환의 기준 반경은 내경과 외경의 평균값으로 정의된다.

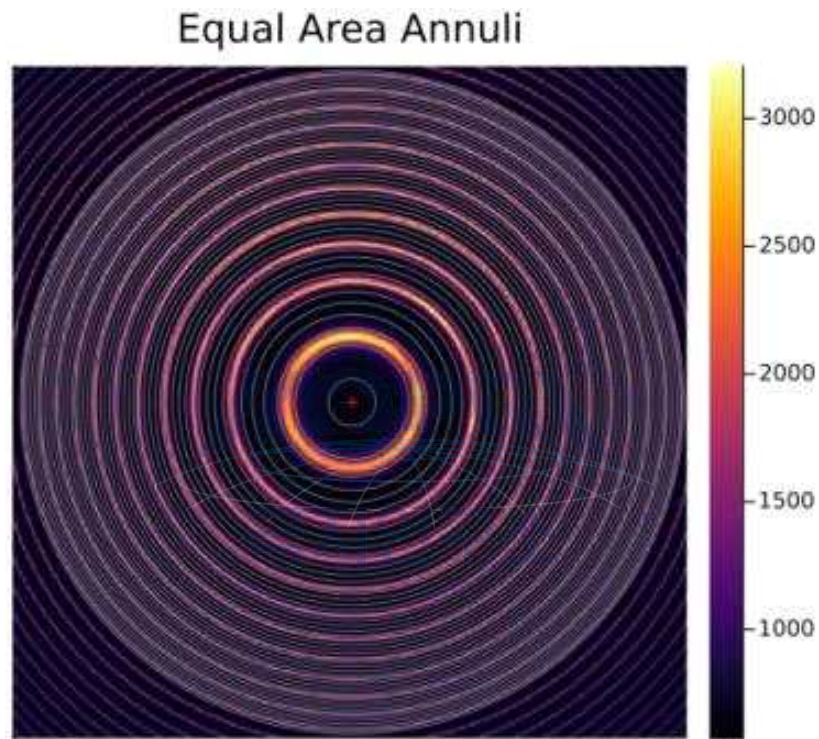


그림 26 HeNe 캘리브레이션 레이저 이미지 위에 동일 면적 환을 함께 표현한 플롯. 실제 분할된 동일 면적 환은 500개이나 시각적으로 구분하기 쉽도록 환의 일부만 표현함.

앞서 기술된 과정을 통해 2차원 FPI 간섭 이미지에서 동일 면적을 갖을 환을 추출해내면, 동일 반경(동일 광학 조건)에 해당하는 픽셀들을 묶어 평균화함으로써, 동심원의 형태는 유지하면서 픽셀 잡음과 국소적인 결함을 줄일 수 있다.

Annular summation이라 하는 이러한 방법의 핵심 아이디어는 다음과 같다. FPI의 간섭 무늬인 동심원은 대체로 반경에 의해 위상이 결정된다. 따라서 특정 반경을 갖는 하나의 환에 포함된 픽셀들은 거의 동일한 광학 경로차를 공유한다고 볼 수 있으므로 같은 환 내 픽셀들을 평균하면 동일 물리량의 반복적인 관측이 되고, 무작위 잡음은 평균화로 감소하며, 환의 방향 패턴은 보존된다. 여기서 annular summation에 의한 잡음 감소의 정량적 의미를

추가로 기술하면, 하나의 환에 유효 픽셀이 N_i 개 있고, 각 픽셀 밝기 측정에 독립 무작위 잡음이 표준편차 σ_i 로 존재한다고 하면, 평균의 표준오차는

$$\sigma_{L,i} = \frac{\sigma_i}{\sqrt{N_i}}$$

즉, 동일 반경 환 내부의 픽셀을 많이 포함할수록 평균값의 불확실도는 $1/\sqrt{N}$ 으로 감소한다. 이 때문에 동일 면적 환을 사용하는 것이 매우 중요하다. 각 반경 내 환에 포함된 픽셀 수에 큰 차이가 있다면 반경에 따른 불확실도가 크게 달라져 피팅이 불안정해질 수 있다.

각 환의 평균은 다수 픽셀 평균이므로 일반적으로 안정적이지만, 핫 픽셀이나 우주선에 의한 단발성 스파이크 등 희소하지만 큰 이상치(outlier)가 평균을 왜곡할 수 있다. 따라서 환 내 픽셀 밝기 분포에서 3σ (표준편차 3배) 밖의 픽셀들을 반복적으로 제거할 필요가 있다.

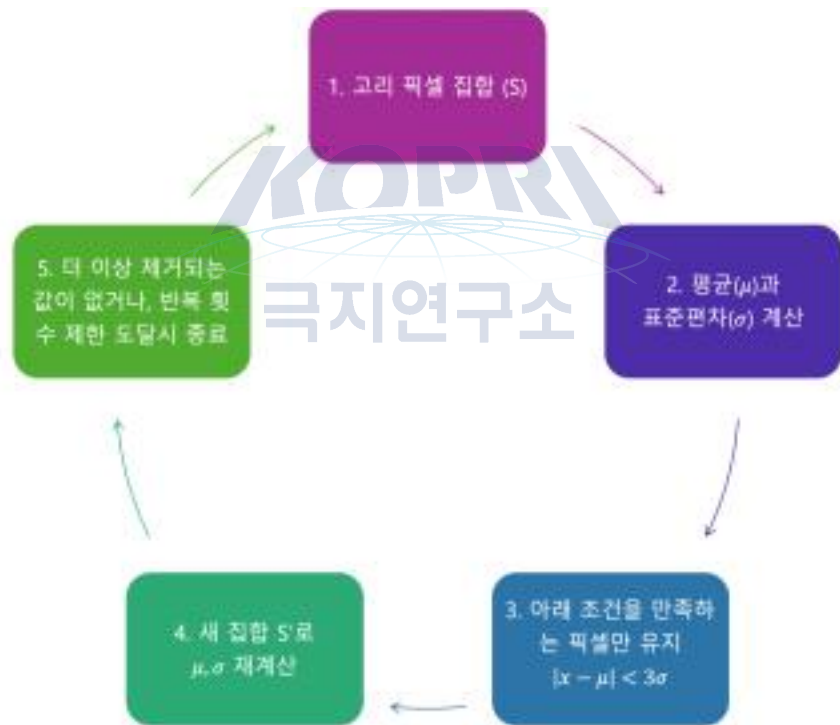


그림 27 각 환 내 픽셀 밝기 분포에서 평균과 표준편차를 활용해 이상치를 반복적으로 제거하는 과정

위 과정을 통해 선별된 환들을 평균하고 이들의 표준오차를 아래와 같이 계산한다. 여기서 $N_i = |S_{\text{valid}}|$ 이다.

$$\sigma_{L,i} = \frac{\text{std}(S_{\text{valid}})}{\sqrt{N_i}}$$

Annular summation 결과인 평균 밝기는 환의 평균 반경(r_i)의 함수로 오차($\sigma_{L,i}$)와 함께 기록되며, 이러한 1차원 스펙트럼은 레이저 간섭 무늬의 주기성과 위상 정보를 담고 있어, FPI의 광학적 성능과 한계를 정의하기 위한 정보를 갖는 기기 함수(Instrument function) 추정을 통해 이후 대기광 간섭 이미지 분석을 위한 캘리브레이션에 직접적으로 사용된다.

FPI 자료 처리에서 간섭 이미지의 중심 좌표는 동심 환 정의와 동심원 피팅 정확도를 좌우하는 핵심 파라미터이다. 그러나 중심 좌표는 FPI 운영 과정에서 광학계 열적 변화, 에탈론 갭, 에탈론 정렬 상태 변화 등의 영향으로 시간에 따라 점진적인 변화를 보인다.

레이저 캘리브레이션 이미지를 이용해 간섭 이미지의 중심을 추정하지만, 레이저 이미지와 실제 대기광 이미지는 서로 다른 시점에 수집되므로 특정 레이저 이미지로부터 얻은 이미지 중심 값을 대기광 이미지에 직접 이용할 수 없다. 이에 따라 레이저 중심 추정치의 시계열로부터 시간에 대한 함수 형태의 중심 모델

$$c_x(t), c_y(t)$$

을 구성하고, 대기광 이미지의 수집 시각에서의 중심 좌표를 보간하여 환 추출 및 동심원 피팅에 적용한다. 이 과정은 annular summation에서 동일 반경 범위에서의 정확한 정의를 보장하고, 동심원 대비 감소 및 파라미터 추정 편향을 방지하기 위한 필수 단계이다.

기존 레이저 중심 시계열에 대해 전역 다항식(global polynomial)을 적용하는 방식은 구현이 간단하다는 장점을 가지고 있으나, 다음과 같은 여러 구조적 한계를 가진다.

◇ 고차 다항식 문제

레이저 데이터 수에 비례하여 차수를 증가시키는 경우, 고차 다항식이 불가피

◇ Runge 진동(Runge oscillation)

데이터 간 시간 간격이 불균일한 경우, 고차 다항식은 관측 구간의 끝단이나 데이터가 성긴 구간에서 비물리적인 진동을 유발할 수 있다.

◇ 잡음 민감도 및 과적합

레이저 중심 추정치는 이미지 품질, 간섭무늬 선명도, 검출 알고리즘에 따른 미세 잡음을 포함한다. 고차 다항식은 이러한 작은 변동까지 실제 중심 이동으로 해석하여 과적합되는 경향이 있다.

◇ 수치적 불안정성

시간 변수가 큰 스케일(예: 누적 초)일 경우, 고차 항 t^n 이 매우 커지면서 계수 추정 과정에 있어 수치적인 불안정성이 증가한다.

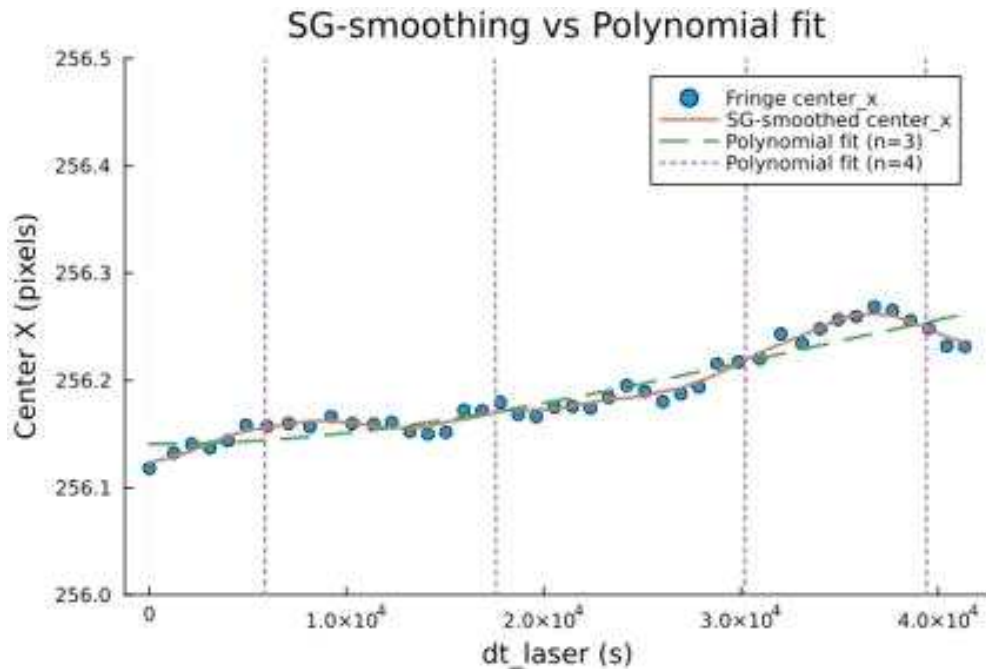


그림 28 전역 다항식을 활용한 레이저 중심 좌표 피팅 결과. 다항식의 고차항의 차수가 3(초록색 파선)에서 4(마젠타 점선)로 증가함에 따라 피팅의 안정성이 극히 불량해지면서 피팅 정확도가 0으로 수렴.

위와 같은 이유로, 전역 다항식 피팅은 장시간 운용 자료나 시간적으로 불균일한 샘플링 조건에서 안정적인 중심 보간 방법으로 적합하지 않다. 본 연구에서는 중심 좌표의 시간 변화가 물리적으로 완만한 드리프트(slow drift)라는 점에 주목하여, 전역 피팅 대신 Savitzky-Golay(SG) smoothing을 중심 모델링 기법으로 채택하였다. SG 기법은 슬라이딩 윈도우(sliding window) 내에서 저차 다항식을 국소적으로 적합(local polynomial regression)하는 방식으로, 다음과 같은 특성을 가진다.

- ◇ 국소 구간에서만 다항식을 적용하므로 전역 진동(Runge)이 발생하지 않음
- ◇ 고주파 잡음을 효과적으로 제거하면서도 저주파의 실제 드리프트 성분은 보존
- ◇ 시간 스케일이 크거나 데이터 간격이 불균일한 경우에도 수치적으로 안정적

SG 기법을 활용한 중심 좌표 모델링은 레이저 이미지로부터 추정된 중심 좌표 시계열을 구성하고 고정된 윈도우 길이와 저차 다항식 차수를 사용해 각 시간 주변 국소 구간에 대해 다항 회귀 분석을 수행하여 잡음이 제거된 중심 시계열을 획득한다.

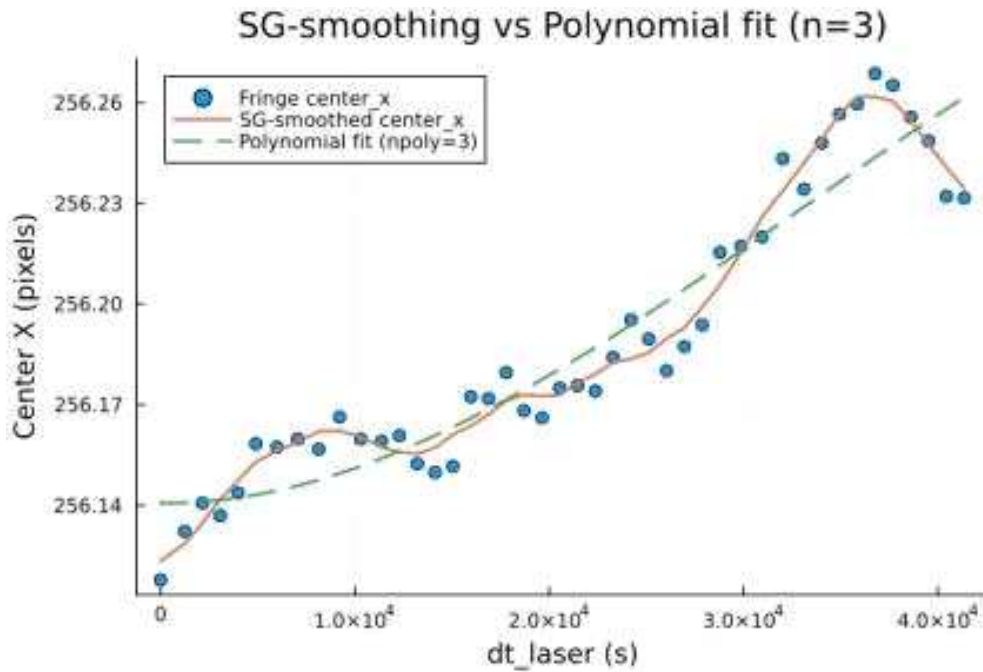


그림 29 기존 전역 3차 다항식과 SG-smoothing 기법을 활용한 레이저 중심 좌표 피팅 비교 결과. 전역 다항식 피팅 대비 SG-smoothing 기법이 짧은 시간에 대한 중심 좌표 변화를 잘 추적하고 관측의 시작과 끝 지점에서의 이미지 중심 변화의 오차가 크게 감소함.

FPI 캘리브레이션 레이저의 프린지 전방 모델은 대기광 역산에 필요한 기기함수(Instrument function) 파라미터를 시간별로 추정하는 것이다. 기존 표준적인 간섭무늬 형성 함수인 Airy 함수는 CCD/광학 비네팅 등으로 주변부로 갈수록 평균 밝기가 달라지는 효과를 고려하지 않는다. 이를 보정하기 위하여 아래와 같은 이미지의 반경에 따른 밝기 변화를 추정하기 위한 2차 다항식 모델을 도입해야 한다.

$$1 + a_1x + a_2x^2$$

다음으로 에탈론 반사율 R로부터 finesse 항

$$F = \frac{4R}{(1-R)^2}$$

을 계산하고, 입사각은 $\theta = \arctan(ar)$ 로 두며, 간섭 차수에는 해당하는 항 $m = (2nt/\lambda)\cos\theta$ 를 구성한다. 이때 t는 에탈론 갭, a는 반경-입사각 변환을 규정하는 스케일, λ는 레이저 파장, n은 굴절률이다. 최종 프린지 형상은 아래와 같이 구성된다.

$$FF \cdot \frac{I}{1 + F\sin^2(\pi m)} + B$$

여기서 I 는 신호 진폭, B 는 배경이다. 여기에 더해, 관측기기의 정확산 효과를 반경에 따라 변하는 가우시안 블러(Gaussian blur)로 모델링하기 위해

$$b = b_0 + b_1 \cos(\pi x) + b_2 \sin(\pi x)$$

형태의 블러 폭을 정의하고, 이를 이용해 각 반경 위치에서 가중 평균을 수행하여 블러가 적용된 모델 출력을 생성한다.

레이저 피팅을 수행하기 전 초기값을 합리적으로 설정하는 절차가 포함된다. α 는 픽셀 크기와 초점거리, 그리고 CCD binning 정보를 이용해 기하학적으로 계산하여 초기값으로 두고, 프린지의 진폭 I 와 배경 B 는 레이저 스펙트럼의 최대-최소 범위 및 최소값으로부터 빠르게 초기 추정한다. 에탈론 갭 t 는 비선형 피팅에서 가장 민감하고, 잘못 추정하면 자유 분광범위(Free Spectral Range, FSR) 단위로 점프할 수 있으므로, 코드에서는 본 피팅에 들어가기 전에 grid search를 수행한다. 구체적으로 이전 레이저에서 얻은 t (첫 수행에서는 통상적인 값) 주변에서 후보 t 들을 일정 간격으로 생성하고, 각 후보에 대해 레이저 전방모델로 만든 프린지와 관측 스펙트럼 간 상관(correlation)을 계산한 뒤, 상관이 최대가 되는 t 를 초기값으로 선택한다. 이 과정은 단순하지만 매우 실용적이며, 이후 최소제곱 수렴을 안정화하고 FSR 점프 가능성을 낮춘다.

표 2 레이저 프린지 전방모델을 구성하는 파라미터와 코드 내 계산 과정에서의 변경 여부, 그리고 일반적으로 사용되는 각 파라미터의 수치

매개변수	설명	변경 여부	일반적인 값
λ	레이저 파장	고정	632.8 nm
n	굴절률	고정	1
R	반사도	변경	0.8
t	에탈론 갭(gap)	변경	15 mm
α	확대 상수	변경	8.5×10^{-5}
I_0	평균 강도	변경	1000 count
I_1	강도 감쇄량 (1차항)	변경	-0.1
I_2	강도 감쇄량 (2차항)	변경	0.005
σ_0	스펙트럼 평균 확산(blur)량	변경	0.8 pixels
σ_1	확산량 sine 성분	변경	0.1 pixels
σ_2	확산량 cosine 성분	변경	-0.05 pixels
B	CCD 편향(bias)	변경	300 counts

이후 레이저의 비선형 최소제곱 역산이 수행된다. 코드의 특징은 한 번에 모든 파라미터를 풀지 않고, 단계적으로 “변수로 둘 파라미터 그룹”을 늘려가며 순차적으로 피팅하는 방식이다. 예를 들어 먼저 α 만 풀어 기하 스케일을 맞춘 뒤, t 와 α 를 함께 풀어 프린지 위상을 안정화하고, 그 다음 I , B 를 조정해 진폭과 배경을 정렬하며, 이후 R 을 조정해 finesse(스펙트럼 진폭의 예리함)를 맞춘다. 마지막으로 t , α , I , B , R , a_1 , a_2 등을 동시에 풀어 세부 형상을 맞추고, blur 파라미터 b_0 , b_1 , b_2 까지 포함해 최종 적합을 수행한다. 각 레이저 이

미지에 대한 피팅 결과는 저장되며, 적합 품질은 reduced chi-square로 기록된다.

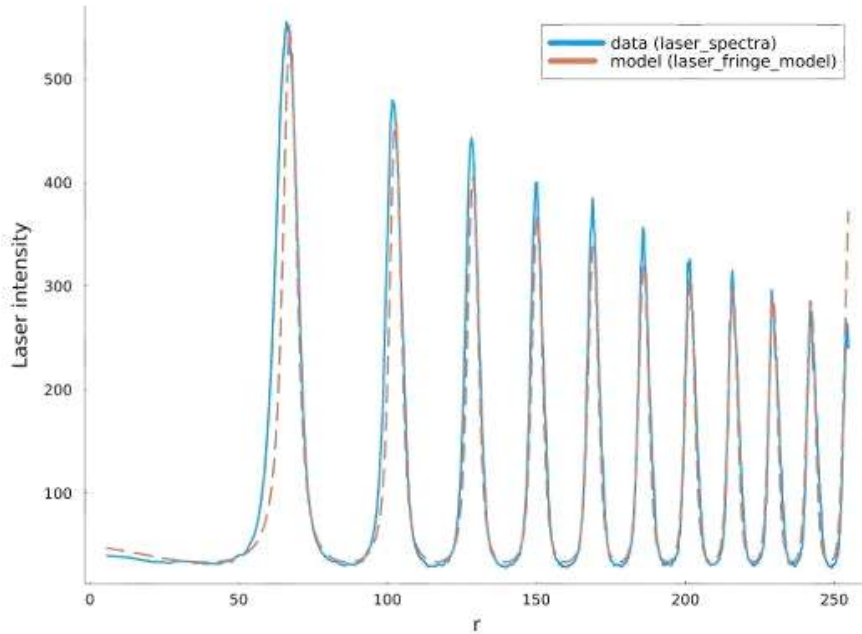


그림 30 캘리브레이션 레이저의 1차원 스펙트럼(파란색 실선)과 레이저 프링지 전방모델 결과(주황색 파선) 비교

2. 기기함수를 활용한 630 nm 대기광 도플러 정보 추정

레이저 피팅이 완료되면, 추정된 기기 파라미터들을 시간에 따른 함수로 만들어 대기광 이미지 역산에 사용할 준비를 한다. 이를 위해 레이저 관측 시각을 첫 레이저 시각 기준 초(second) 단위로 변환하고, 각 파라미터에 대해 시간-파라미터 자료쌍을 구성한다. 보간은 기본적으로 선형 또는 스플라인으로 설정 가능하며, 파라미터의 추정 오차(표준오차)를 가중치로 활용해 신뢰도가 높은 시점의 추정이 더 크게 반영되도록 한다. 특히 에탈론 갭 t 는 지나치게 요동치지 않도록 오차를 인위적으로 키워(가중치를 낮춰) 더 부드럽게 보간되도록 유도한다. 스플라인이 실패하면 선형 보간으로, 선형도 실패하면 상수 보간으로 전환하는 구조를 갖추어, 레이저 자료 수가 적거나 불완전한 날에도 분석 파이프라인이 완전히 중단되지 않도록 설계되어 있다. 이렇게 생성된 시간 보간 함수들이 별도의 파라미터에 저장되며, 이후 각 대기광 관측 시각마다 호출되어 기기 파라미터가 자동으로 주입된다.

$$Y(\lambda) = Y_{bg} + Y_{lin} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_c}{\Delta\lambda} \right)^2 \right\}$$

다음 단계는 대기광 이미지의 역산이다. 대기광 역시 레이저와 동일하게 annular summation을 통해 1차원 반경 스펙트럼으로 변환한 뒤, 위의 식과 같이 대기광의 원천 스펙트럼을

포함하는 대기광 전방모델과 비교하여 역산한다. 중요한 점은 대기광 역산에서는 기기 파라미터를 새로 추정하지 않고, 앞서 레이저로 추정·보간한 값을 “고정된 기기함수”로 사용한다는 것이다. 즉 각 대기광 관측 시각에 대해 레이저 보간함수로부터의 기기함수 파라미터의 값을 가져와 대기광 파라미터 객체에 넣고 모두 고정한 뒤, 대기광 스펙트럼 자체의 파라미터만 추정한다.

표 3 대기광 프린지 전방 모델을 구성하는 파라미터와 의미

매개변수	설명
B	CCD 편향
Y_{bg}	배경 하늘 밝기강도
Y_{line}	대기광 강도
λ_c	대기광 중심 파장 (line center)
$\Delta\lambda$	대기광 파장 선폭 (linewidth)

대기광 전방모델은 대기광 스펙트럼, $Y(\lambda)$ 를 파라미터화하고 이를 기기함수, $\tilde{A}$ 와 컨볼루션하여 관측될 1차원 프린지를 생성하며 다음과 같은 형태를 가진다.

$$S(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{A}(r, \lambda) Y(\lambda) d\lambda + B$$

스펙트럼은 선 중심파장 λ_c (도플러 이동), 도플러 온도 T(선폭), 대기광 세기(skyI), 배경 밝기(skyB), CCD 바이어스(ccdB) 등을 포함하여 가우시안 방출선과 배경 성분의 합으로 구성된다. 여기서 T가 커질수록 선폭이 T에 비례하여 넓어지고, λ_c 가 변하면 선 중심이 이동한다. 대기광 전방모델의 구현에서 중요한 계산 효율화 장치는 컨볼루션 행렬 A의 사전 계산이다. 코드에서는 중심파장 λ_0 주변에서 몇 개의 FSR 범위에 해당하는 파장 격자 벡터를 정의하고, 각 파장 격자점에 대해 “특정 파장으로 단색광이 들어왔을 때의 기기 응답”을 레이저 전방모델로 계산하여 A의 열(column)에 채운다. 이렇게 하면 대기광 프린지는 “A · A · (대기광 스펙트럼 벡터)”의 선형 결합으로 빠르게 계산될 수 있으며, 비선형성은 대기광 스펙트럼 벡터가 λ_c 와 T에 의해 변하는 부분에 집중된다.

대기광 역산에서도 초기값 설정과 격자 검색이 포함된다. skyI, skyB, ccdB는 관측 스펙트럼의 최대-최소 범위 및 최소값을 이용해 초기값을 잡고, 가장 중요한 선 중심파장 λ_c 는 최소 제곱 전에 격자 검색으로 초기값을 안정화한다. 이때 탐색 폭은 현재 기기 파라미터(특히 t)로부터 계산한 FSR을 기준으로 설정되며, 이전 대기광에서 얻은 λ_c 주변에서 후보들을 생성하고, 각 후보에 대해 전방모델 프린지와 관측 스펙트럼의 상관을 계산하여 최댓값의 후보를 시작점으로 삼는다. 이 과정은 레이저 단계의 t 격자 검색과 동일한 접근으로, 비선형 피팅을 안정화하고 스펙트럼 중심이 불연속적으로 점프하는 현상을 억제한다.

본격적인 대기광 최소제곱 피팅 역시 단계적으로 진행된다. 먼저 skyI만 조정해 신호 크기를 맞추고, 다음으로 ccdB를 포함하여 오프셋을 정렬한 뒤, skyB까지 포함하여 연속배경을 보정한다. 마지막 단계에서 skyI, ccdB, skyB와 함께 λ_c 및 T를 동시에 추정하여 도플러 이동과 선폭을 결정한다. 또한 전방모델에 포함된 blur나 경계 처리로 인해 스펙트럼 양 끝에서 모델 오차가 커질 수 있으므로, 코드에서는 분석 구간의 시작/끝 일부 샘플에 대해 σ 를 인위적으로 크게 만들어(가중치를 낮춰) 피팅이 중앙의 유효 정보에 의해 주도되도록 한다. 피팅이 실패하거나 오차 추정이 불가능한 경우에는 결과값을 NaN으로 두고 오차를 무한대로 설정하여 후처리에서 자동 배제가 가능하도록 한다.

대기광 피팅 결과가 얻어지면, 최종 산출인 바람과 온도를 계산한다. 온도는 피팅된 T 값을 그대로 사용하며, 그 표준오차가 온도 불확실도로 기록된다. 바람은 피팅된 중심파장 λ_c 를 이용해 도플러 속도로 변환한다. 변환식은

$$v = c \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_0} - 1 \right)$$

이며, 양의 값은 관측기에서 멀어지는 방향을 의미한다. 바람의 피팅 기반 오차는 λ_c 의 표준오차를 동일 변환으로 속도 오차로 전파하여 계산하며, $\sigma_{v,fit} = c\sigma_{\lambda_c}/\lambda_0$ 로 저장된다.

레이저를 사용할 경우에는 바람 오차에 두 가지 추가 요소가 합성된다. 첫째, 레이저로 추정한 에탈론 갭 t의 불확실도가 대기광 λ_c 추정에 체계적으로 영향을 줄 수 있으므로, 레이저 gap의 대표 오차를 이용해 σ_{λ_c} 에 추가 항을 더한 뒤 속도 오차로 반영한다. 둘째, 레이저 관측 시점 사이에서 gap이 시간적으로 곡률을 가지며 변할 경우 “그 시각의 gap을 정확히 알고 있지 못한 데서 오는 보정 오차”가 발생할 수 있으므로, 레이저 gap 시계열의 곡률 기반 proxy를 계산해 대기광 관측 시각에 보간하여 calibration error $\sigma_{v,cal}$ 로 산정한다. 최종 시선방향 바람 오차는 아래와 같이,

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{v,fit}^2 + \sigma_{v,cal}^2}$$

로 합성되어 저장된다.

앞서 기술된 방법으로 분석된 다산기지 FPI 630 nm 대기광 자료는 독립적인 방법으로 분석된 기존 분석 프로그램의 결과와 FPI의 관측 방향 별로 비교하여 매우 높은 상관관계를 보이는 것을 확인하였다. 이는 기존 FPI 분석 소프트웨어가 시간에 대한 광학기기의 물리적 상태 변화를 무시하고 매일 관측되는 모든 대기광 관측 자료에 대해 단 하나의 캘리브레이션 레이저를 사용한다는 매우 큰 차이를 감안한다면 분석 결과의 신뢰성이 높다고 판단할

수 있다.

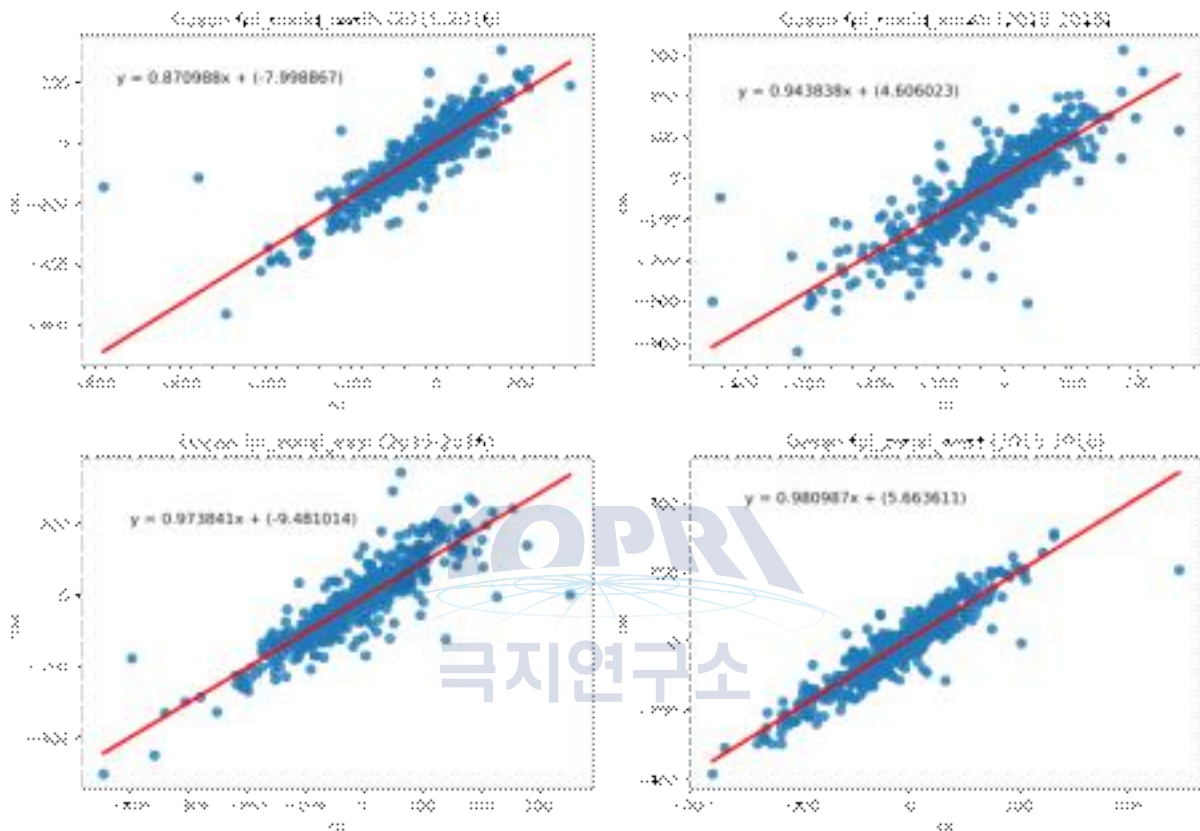


그림 31 다산기지 FPI의 630 nm 원시자료 분석 비교 결과. 본 연구에서 개발된 분석 프로그램으로 산출된 중성대기 바람이 y축, NCAR/HAO의 분석 프로그램에서 제공한 바람이 x축에 표현됨. FPI의 관측 방향에 따라 좌상-북쪽, 우상-남쪽, 좌하-동쪽, 우하-서쪽 으로 구분함

본 연구에서 개발된 분석 기술을 활용한 Kiruna FPI의 열권 바람 결과는 별도의 북반구 고위도 지역인 Resolute Bay FPI 관측 자료와 비교하여 북반구 고위도 지역의 지자기 위도에 따른 지자기 활동(geomagnetic activity)에 따라 열권 바람 특성이 어떻게 시간에 따라 달라지는 지 등에 대한 연구 자료로 활용되었고, 비교 결과 극관 지역인 Resolute Bay와 비교하여 Kiruna의 위치가 오로라 타원체의 경계 부근에 걸쳐짐에 따라 우주환경 변화에 따른 매우 복잡한 열권의 물리적 특성을 가지고 있음을 확인하였다. 이는 열권-전리권 상호작용뿐만 아니라 자기권 기원 전자기 에너지 유입에 의한 고위도 지역의 전류 형성 등 다양한 요소가 복합적으로 존재하면서 발생하는 것으로 추정된다.

극지역을 통해 유입되는 우주환경 영향은 대기 시스템 내 물질과 에너지의 흐름으로 인하

여 그 파급 효과는 중저위도로 전파되므로 이러한 영향을 연구하기 위해 한국천문연구원에서는 보현산 천문대에 FPI를 신규로 도입하였다. 본 연구에서 개발된 FPI 분석 프로그램은 천문연구원 FPI 원시자료 분석에서 양질의 분석 결과를 제시하였고, 특히 초록색 대기광인 557.7 nm 대기광의 분석 결과에서도 좋은 성능을 발휘하여 인접한 계룡대 유성레이더로 관측된 중성대기 바람 결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다.

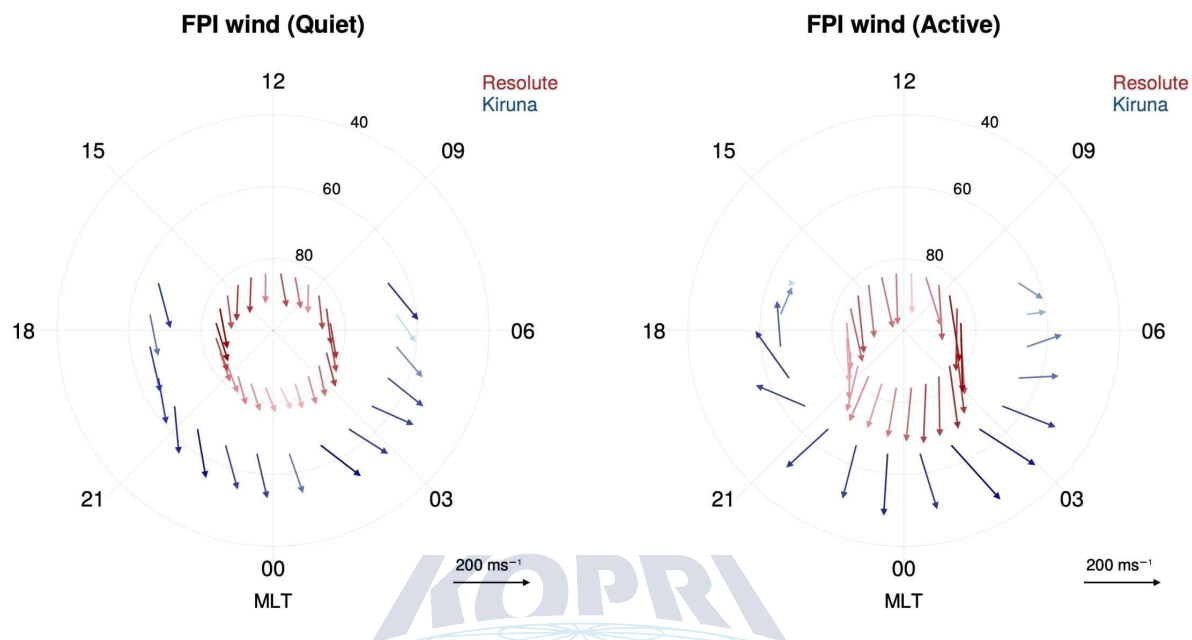


그림 32 지자기 활동이 고요할 때(왼쪽)와 지자기 활동이 활발할 때(오른쪽) Kiruna와 Resolute Bay FPI로 관측한 열권 바람의 지자기 지방시에 따른 변화. Resolute Bay 와 비교해 Kiruna의 지자기 활동에 따른 열권 바람의 변화폭이 매우 큼

제 4 장 요약 및 결론

본 연구는 열권-전리권 영역에서 발생하는 복합적인 태양-지구 상호작용과 그로 인한 우주환경 변화를 보다 정확히 이해하기 위해, 고층대기 대기광 Fabry-Perot Interferometer(FPI) 원시자료를 직접 분석할 수 있는 통합 기술을 개발하는 것을 목표로 수행되었다. 열권-전리권은 위성 항력 증가, 통신·항법 오류 등 실질적인 사회·경제적 영향을 유발하는 핵심 영역임에도 불구하고, 직접 관측 자료가 부족하고 광학 관측은 기상·오로라·기기 특성에 민감하다는 한계를 가진다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 전천카메라 가시광 이미지를 활용한 자동 유효 자료 분류 기법을 개발하고, 별 개수 기반 방식과 딥러닝 기반 분류 방식을 병행하여 장기·대용량 FPI 관측 자료의 객관적 품질 관리 체계를 확립하였다. 또한 극지 및 고립 환경에서도 운용 가능한 저전력 소형 전천카메라를 개발·실증함으로써, FPI 관측 시점의 기상 및 오로라 정보를 직접 제공할 수 있는 기반을 마련하였다.

아울러 본 연구는 캘리브레이션 레이저 간섭이미지를 활용하여 FPI 광학계의 시간 가변적 특성을 정밀하게 추적하고, 이를 반영한 630 nm 대기광 원시자료 분석 파이프라인을 구축하였다. 간섭이미지 중심 탐색, 동일 면적 동심 환 분할, annular summation, Airy 함수 기반 전방모델 피팅을 통해 안정적인 1차원 스펙트럼을 생성하고, 이를 역산하여 열권 중성바람과 온도를 정량적으로 산출하는 분석 체계를 확립하였다. 개발된 기술은 Kiruna, 보현산 FPI 자료에 적용되어 신뢰성과 물리적 타당성이 검증되었으며, 분석 기술의 표준화와 공유를 통해 다수 관측소 간 연계 운영 및 관측망 확장의 가능성도 확인되었다. 732 nm 대기광의 원시자료는 630 nm 대비 대기광 밝기가 매우 낮아 신호잡음비가 저조하고 OH 대기광이 혼입되어 스펙트럼 정보 정량화가 불가하였다. 이는 향후 전용 필터 또는 고민감도 센서 채용 등을 활용한 원시자료 질 개선을 통해 추가 분석 시도가 가능할 것으로 판단한다.

본 연구를 통해 전천 이미지 기반 유효 자료 선별, 소형 전천카메라를 활용한 관측 환경 감시, 그리고 FPI 원시자료 분석 기술을 구현함으로써, 극지 고층대기 관측의 신뢰성과 활용도를 실질적으로 향상시켰다. 이는 향후 극한지·무인 관측망 구축과 다중 FPI 연계 관측을 통한 열권-전리권 연구의 고도화뿐만 아니라, 우주환경 감시 및 우주기상 예측 정확도 향상에도 기여할 수 있는 핵심 기반 기술로 활용될 수 있을 것이다.

제 5 장 연구결과와 활용계획

- 소형 전천카메라와 자동 날씨 분류 프로그램을 통해 상시 발전기가 없는 환경에서의 무인 관측소로서 날씨 및 오로라 현상 등의 관측을 자동으로 수행할 수 있으므로 미답 지역 기상 관측 또는 관측망 구축을 통한 연계 관측 수행에 활용 가능하다.
- 간접계 원시 자료 접근성 개선을 통한 즉각적인 장비 및 관측 상태 감시 체계 확립으로 자료 신뢰도와 운영 비용 등의 개선에 활용할 수 있다.
- FPI는 장비 도입 자체부터 운영 과정에서의 분석 체계 구축과 품질관리 경험 축적이 매우 중요하므로 타 연구 기관의 장비 설치 후 검증된 분석 프로그램을 활용하여 빠른 연구 개시가 가능하다.
- FPI 관측의 한계 중 하나는 단일 지점 관측만으로 열권 바람장의 공간구조를 충분히 규명하기 어렵다는 점으로 원시 자료 분석 기술 표준화와 공유로 관측 네트워크 구축을 보다 용이하게하여 2기 이상의 FPI 동시 운영을 통한 개선된 시공간 해상도의 열권 물리량 측정이 가능하다.
- 분석 완료된 Kiruna, KHO(Longyearbyen) FPI의 열권 바람 자료는 태양 및 지자기 활동 등에 따른 위도별 열권 바람의 특성을 이해하는데 기여할 수 있으며, 지상 자력계 관측망, 위성 자료와 연계하여 열권-전리권의 물리적 상호작용에 대한 주제로 후속 연구 성과 창출에 활용할 계획이다.



□ 참고문헌

- [1] T. Sarris *et al.*, “Plasma-neutral in the lower thermosphere-ionosphere: The need for in-situ measurements to address focused questions,” *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, vol. 9, 1063190, 2022, doi: 10.3389/fspas.2022.1063190.
- [2] European Space Agency (ESA), *Report for Assessment: Earth Explorer 10 Candidate Mission Daedalus*, ESA-EOPSM-DAED-RP-3793, 138 pp., Noordwijk, The Netherlands, 2020.
- [3] N. Ahmad, L. O. M. M. Kilowasid, H. Fakhurroja *et al.*, “How geomagnetic storms affect the loss of Starlink satellites in February 2022?,” *Earth, Planets and Space*, vol. 77, p. 2, 2025, doi: 10.1186/s40623-024-02124-2.
- [4] M. Palmroth *et al.*, “Lower-thermosphere-ionosphere (LTI) quantities: Current status of measuring techniques and models,” *Annales Geophysicae*, vol. 39, pp. 189–237, 2021, doi: 10.5194/angeo-39-189-2021.
- [5] W. E. Parker, M. K. Brown, and R. Linares, “Greenhouse gases reduce the satellite carrying capacity of low Earth orbit,” *Nature Sustainability*, vol. 8, pp. 363–372, 2025, doi: 10.1038/s41893-025-01512-0.
- [6] NASA, “NASA funds study of proposals to investigate space weather systems,” *NASA News Release*, Jun. 11, 2024.
Available: <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-funds-study-of-proposals-to-investigate-space-weather-systems/>
- [7] KEOS Scientific, “Arinae Fabry-Perot Interferometer.”
Available: <https://keoscientific.com/products/arinae-fpi/>
- [8] B. J. Harding, T. W. Gehrels, and J. J. Makela, “Nonlinear regression method for estimating neutral wind and temperature from Fabry-Perot interferometer data,” *Applied Optics*, vol. 53, no. 4, pp. 666–668, 2014, doi: 10.1364/AO.53.000666.
- [9] A. Aruliah, M. Förster, R. Hood, I. McWhirter, and E. Doornbos, “Comparing high-latitude thermospheric winds from Fabry-Perot interferometer (FPI) and CHAMP accelerometer measurements,” *Annales Geophysicae*, vol. 37, pp. 1095–1120, 2019, doi: 10.5194/angeo-37-1095-2019.
- [10] H. Xu, K. Shiokawa, S. Oyama *et al.*, “High-latitude thermospheric wind study using a Fabry-Perot interferometer at Tromsø in Norway: Averages and variations during quiet times,” *Earth, Planets and Space*, vol. 71, p. 110, 2019, doi: 10.1186/s40623-019-1093-8.

- [11] Q. Wu, T. L. Killeen, S. C. Solomon, D. J. McEwen, and W. Guo, "All Sky Camera and Fabry-Perot Interferometer observations in the northern polar cap," *Ocean and Polar Research*, vol. 24, no. 3, pp. 237-247, 2002, doi: 10.4217/OPR.2002.24.3.237.
- [12] C. Lee, G. Jee, H. Kam, Q. Wu, Y.-B. Ham, Y. H. Kim, and J.-H. Kim, "A comparison of Fabry-Perot interferometer and meteor radar wind measurements near the polar mesopause region," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 126, e2020JA028802, 2021, doi: 10.1029/2020JA028802.
- [13] NASA, 꺿eospace Dynamics Constellation (GDC) Science and Technology Definition Team Final Report, 2024.
Available: <https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/05/gdc-stdt-report-final.pdf>





(국내 과제용)

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

