

표지(주요사업)

(뒷면)	(측면)	(앞면)
(16 포인트 고딕체) 주 의 ↑ 15cm ↓	P E 2 4 3 2 0 극지 무인기 초분광 지표 반사도 정밀도 개선을 위한 방사도 평가 연구 한국해양연구원 부설극지연구소 ↑ 3cm ↓	BSPE24320-051-12 (14포인트 중고딕체) ↑ 5cm ↓ 극지 무인기 초분광 지표 반사도 정밀도 개선을 위한 방사도 평가 연구 (20 포인트 중고딕체) Radiometric assessment for enhancing accuracy of surface reflectance of UAV hyperspectral data acquired from polar regions (16 포인트 신명조체) ↑ 5cm ↓ 2025. 05. 09. (16 포인트 신명조체) 한국해양과학기술원 부설극지연구소 (17 포인트 명조계열) ↑ 4cm ↓

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “극지 무인기 초분광 지표 반사도 정밀도 개선을 위한 방사도 평가 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2025. 05. 09.



연구책임자 : 정 용 식

참여연구원(내부) : 김 현 철, 이 성 재

참여연구원(외부) : 김 종 민, 서 민 지

보고서 초록

과제관리번호	PE24320	해당단계 연구기간	2024.03.01. ~2025.02.28.	단계 구분	1단계 / 1단계	
연구사업명	중 사 업 명	연구·정책지원사업 (2020년 이후)				
	세부사업명	신진연구원 지원과제				
연구과제명	중 과 제 명					
	세부(단위)과제명	극지 무인기 초분광 지표 반사도 정밀도 개선을 위한 방사도 평가 연구				
연구책임자	정용식	해당단계 참여연구원수	총 : 5 명 내부 : 3 명 외부 : 2 명	해당단계 연구비	정부: 30,000천원 기업: 0천원 계: 30,000천원	
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 원격탐사방권정보센터		참여기업명			
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :			
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)					보고서 면수	53
○ 극지 환경에서 지상 기준 표적 없이 UAV 기반 초분광영상으로부터 지표 반사도 산출이 가능한 방사 보정 모델 개발 ○ 다양한 태양고도·비행조건을 반영한 6개 환경 기반 영상 수집 및 방사휘도(Radiance) - 반사도(Reflectance) 정합 데이터셋 구축 ○ 선형(Linear Regression(LR), Partial Linear Square Regression(PLSR)), 비선형(Random Forest Regression(RF), Gradient Boosted Regression(GB)) 회귀 모델 기반 방사 보정 알고리즘 개발 및 성능 비교 수행 ○ GB 모델은 RMSE=0.002, R²=0.999, SAM=0.003로 전 지표에서 최우수 성능 기록 ○ SWIR(단파적외선) 포함 전 대역 반사도 예측 성능 입증을 통해 극지 맞춤형 방사 보정 기법의 실현 가능성 실증 ○ 파장대별 보정 성능 비교 및 정성적 스펙트럼 해석을 통해, 환경-파장-모델 간 보정 특성 차이 규명						
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	방사 보정, 초분광 자료, 무인기, 지표 반사도, 지상 기준 표적				
	영 어	Radiometric correction, Hyperspectral data, UAV, Surface reflectance, Ground reference target				

요 약 문

I. 제 목

극지 무인기 초분광 지표 반사도 정밀도 개선을 위한 방사도 평가 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 최근 소형 무인기 탐사는 탄력적 저고도 비행을 통한 초고해상도 지표 공간 정보획득 및 다중센서 탑재 능력으로 현장 조사의 효율성을 제공함
- 일반적으로 수요가 많은 무인기 카메라 사진측량 기술력에 비해, 무인기 초분광 센서 정보 활용 기술력은 자료의 획득 및 처리의 복잡성에 의한 활용 확장성 한계를 지님
- 무인기 초분광 자료의 획득 목적은 안정적인 지표 반사도 정보 추출에 있으나, 촬영 지역 내 지상 표적을 설치하고, 후처리를 통해 반사도 자료가 얻어져야만 하는 과정의 복잡성과 경제적 비용을 동반함
- 특히 극지 및 오지 대상 무인기 현장 조사 활동 시 발생하는 접근성의 제약을 대상으로, 기존 무인기 초분광 활용 과정의 복잡성은 적합하지 않음
- 무인기 초분광 센서 자료는 자료 품질에 민감하게 영향을 미치는 비행고도/속도, 태양고도, 날씨 등과 같은 비행환경요인들을 고려하여, 일관적 지표 반사도 추출이 이루어져야 하지만, 극지의 날씨 변화의 큰 편차 환경이 활용 가능성의 제약을 발생시킴
- 따라서 극지 및 오지 대상 무인기 초분광 탐사 활용을 위해, 지상 표적에 의존하지 않고 다양한 비행환경조건에 상호호환적 지표 반사도 생산 방법 제안의 노력이 요구됨
- 이와 같은 지표 반사도 생산을 위해 기본적으로 다양한 비행환경조건 내 방사적 분포의 규명은 필수조건이지만, 상대적으로 극지 환경 대상 평가는 매우 드뭄
- 본 연구개발에서는 다양한 환경 케이스의 비행 조건을 대표하는 초분광 영상자료를 수집하고, 방사적 활용 가능성 평가의 수행에 궁극적 목표를 가짐
- 평가 결과는 편차가 큰 비행 환경 조건에서도 상호호환적으로 적용할 수 있는 지표 반사도 변환 알고리즘 개발을 위한 기초 자료로써 이용될 수 있으며, 극지-오지 대상 무인기 초분광 탐사의 편리성 및 일관성을 제공할 수 있는 맞춤형 원천 기술력으로써 활용 기대됨

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 무인기 초분광 센서 기반 촬영 영상자료 수집
 - 극지를 포함한 다양한 환경에서 취득된 무인기 초분광 영상자료 수집
 - 다양화 확보: 날씨, 태양 위치, 지리적위치, 비행고도, 비행속도, 센서촬영속도, 센서노출량 등 무인기 비행 및 영상 취득 환경 조건

- 영상처리를 통한 지표 반사도 획득
 - 노이즈제거, 기하/정사보정 등의 영상 전처리 수행
 - 영상 방사휘도(Radiance)에서 지표 반사도(Reflectance)로 변환할 수 있는 방사 보정 모델 구축을 위한 데이터셋 구축
- 밴드별 통계분석
 - 방사 보정 알고리즘 성능 비교 평가
 - 최적 방사 보정 모델 오차 검증 평가

IV. 연구개발결과

- 전처리 완료 초분광 영상자료 구축
 - 노이즈제거, 기하/정사보정 등 영상 전처리 반영된 초분광 영상자료 데이터셋
- 방사 보정 모델 성능 분석
 - 방사 보정 알고리즘 모델의 성능 지표 비교 분석 결과
- 최적 방사 보정 알고리즘 오차 검증
 - 검증용 초분광 영상 대상 반사도 변환 결과 성능 지표 비교 분석 검증 결과

V. 연구개발결과의 활용계획

- 기술적 측면
 - 극지 무인기 초분광 데이터에 대해 지상 표적 없이도 반사율 보정이 가능한 모델 개발 기반을 확보함
 - 기존 연구에서 주로 다루던 가시광-근적외선(VNIR) 영역을 넘어 단파적외선(SWIR) 영역에서도 안정적인 반사율 추정 가능성을 확인함
 - 지질, 식생, 농업, 해양, 토양 등 다양한 자연환경 분야에 적용가능한 범용 기술력 확보
 - 항공 및 위성 초분광 영상에의 보정기법 확장 가능성을 평가함으로써 멀티플랫폼 활용 기반을 마련함
 - 극지 전용 및 범용 보정 알고리즘 및 모델 개발을 위한 실증 기반과 방향성 제시
- 경제산업적 측면
 - 현장 조사 비용 대비 고효율을 실현하는 무인기 기반 조사 모델을 통해 자원, 환경, 생명 분야의 조사 패러다임을 개선함
 - 국내 무인기 기반 초분광 데이터 활용도를 제고하고, 부가가치 창출 기반 마련
 - 기술이전 및 상용화를 통한 무인기 기반 산업 활성화에 기여할 수 있는 원천기술로 기능함

목 차

제 1 장 서론	8
제 1 절 연구개발의 목적	8
제 2 절 연구개발의 필요성	8
제 2 장 국내외 기술개발 현황	12
제 1 절 국내기술개발 현황	12
제 2 절 국외기술개발 현황	12
제 3 절 현 기술상태의 취약성	12
제 4 절 앞으로의 기술 전망	14
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	16
제 1 절 무인기 초분광 센서 기반 촬영 영상자료 수집	16
제 2 절 영상처리를 통한 지표 반사도 획득	25
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	50
제 1 절 연구개발목표 달성도	50
제 2 절 대외기여도	50
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	51
제 1 절 기대성과	51
제 2 절 활용방안	51
제 6 장 참고문헌	53
부 록(붙임: 신규 KPDC 자료 등록)	55

표 차 례

표 1 Corning microHSI™ 425 SHARK 초분광 이미징 센서 스펙 및 M600무인기 장착 운용 예시 이미지	17
표 2 활용 초분광 영상자료 무인기 비행-촬영 세부 조건과 획득 지역 정보	18
표 3 활용 무인기 초분광 영상자료 Solar geometry 및 날씨 환경 정보 요약	19
표 4 MNF 최적 밴드 선택 결과 요약표	29
표 5 구축 모델별 전반 평균 성능 지표 비교(1차 지표)	36
표 6 클래스별 예측 반사도 스펙트럼과 실측 반사도 간의 스펙트럼 각도 유사도 (SAM, radian 단위, 1차 지표)	36
표 7 구축 모델별 성능 비교 요약	43
표 8 구축한 4개 방사 보정 알고리즘 모델 검증 결과('검증용__1' 데이터셋 기준 반사도 변환 결과 성능 평가)	44
표 9 연구개발목표 달성도	50



그림 차례

그림 1 지상 표적 기반 전통적 방사 보정 예시	9
그림 2 초분광 센서 푸쉬브룸(라인스캐닝) 촬영 방식과 획득 자료의 3차원 형태를 설명하는 모식도 ...	16
그림 3 취득된 무인기 초분광 영상자료의 트루컬러 출력 모습 및 취득된 영상 방사휘도 픽셀 값 분포 예시(축구장 인조잔디 및 빨간색-녹색 방사보정용 지상 표적(타겟)): 2022.10.24. 대한	
민국 인천 극지연구소 운동장 촬영자료	22
그림 4 G8T 지상 표적(레퍼런스 타겟)의 종류, 모습, ASD 분광기로 측정한 실측 반사도 정보	24
그림 5 본 연구개발 처리 흐름도	26
그림 6 MNF 전진 변환 결과 예시: Env_3 자료 MNF 처리 후 Eigen Value 분포	27
그림 7 MNF 변환(전진, Forward) 처리 후 주요 통계 정보 기반 밴드 선택 결과	28
그림 8 MNF 전진 - 역변환 후 노이즈 저감 효과 예시 (image radiance in VNIR-SWIR region)	29
그림 9 Direct Georeferencing 기반의 Orthorectification 처리 결과 예시 영상(2022.10.24. 대한	
민국 인천 극지연구소 운동장 촬영자료)	30
그림 10 각각 서로 다른 환경을 대표하는 초분광 영상으로부터 추출한 6개 영상 지상 표적 대	
상 방사휘도 스펙트럼 값 분포(총 450개 밴드 영역으로 재구성, VNIR-SWIR 파장대)	31
그림 11 구축된 LR 기반 예측 회귀식 모습: 각 밴드별로 450개 독립변수 기반 지표 반사도	
값 선형 회귀식 정리	33
그림 12 본 연구개발에서 활용한 모델 성능 평가 지표의 수식	35
그림 13 클래스별(6개 지상표적타겟) 실측치 대비 분광 유사도 값 분포 비교(SAM 값 기준: 0에 가까울수록 스펙트럼 형태 유사도가 높았음을 의미)	37
그림 14 LR 모델 기반 6개 클래스 대상 평균 스펙트럼 비교(실측 vs. 예측): 위에서 아래로	
왼쪽 열 12%, 36%, 84%; 오른쪽 열 Red, Green, Blue (3개 파장대역 구분됨: Visible(가시	
광)/Near-Infrared(근적외)/Shortwave-Infrared(단파적외))	39
그림 15 PLSR 모델 기반 6개 클래스 대상 평균 스펙트럼 비교(실측 vs. 예측): 위에서 아래	
로 왼쪽 열 12%, 36%, 84%; 오른쪽 열 Red, Green, Blue (3개 파장대역 구분됨: Visible(가	
시광)/Near-Infrared(근적외)/Shortwave-Infrared(단파적외))	40
그림 16 RF 모델 기반 6개 클래스 대상 평균 스펙트럼 비교(실측 vs. 예측): 위에서 아래로	
왼쪽 열 12%, 36%, 84%; 오른쪽 열 Red, Green, Blue (3개 파장대역 구분됨: Visible(가시	
광)/Near-Infrared(근적외)/Shortwave-Infrared(단파적외))	41
그림 17 GB 모델 기반 6개 클래스 대상 평균 스펙트럼 비교(실측 vs. 예측): 위에서 아래로	
왼쪽 열 12%, 36%, 84%; 오른쪽 열 Red, Green, Blue (3개 파장대역 구분됨: Visible(가시	
광)/Near-Infrared(근적외)/Shortwave-Infrared(단파적외))	42
그림 18 LR, PLSR, RF, GB 보정 알고리즘 6개 클래스 대상 평균 스펙트럼 비교(실측 vs. 예	
측): 위에서 아래로 왼쪽 열 12%, 36%, 84%; 오른쪽 열 Red, Blue, Green (3개 파장대역 구	
분됨: Visible(가시광)/Near-Infrared(근적외)/Shortwave-Infrared(단파적외))	46
그림 19 2022.08.22. Alaska 영상자료 기반 전통적 방식의 반사도 변환 결과(~1400, 1900nm	
영역 대기 영향으로 인한 Bad bands로써 정보 유실) 및 GB 보정 알고리즘 적용 결과 반사도	
정보(SWIR 전구간 분광 정보 예측 복원) 비교 예시	49

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목적

- 본 연구개발은 다양한 극지 환경 케이스의 비행 조건을 대표하는 초분광 영상자료를 수집하고 방사보정을 수행하여, 변환된 지표 반사도 자료를 통해 극지 환경에 적응할 수 있는 방사보정 활용 가능성을 평가하고자 하는데 목적을 가짐

제 2 절 연구개발의 필요성

- 최근 소형 무인기 탐사는 탄력적 저고도 비행을 통한 초고해상도 지표 공간 정보획득 및 다중센서 탑재 능력으로 현장 조사의 효율성을 제공함
- 일반적으로 수요가 많은 무인기 카메라 사진측량 기술력에 비해, 무인기 초분광 센서 정보 활용 기술력은 자료의 획득 및 처리의 복잡성에 의한 활용 확장성 한계를 지님
- 무인기 초분광 자료의 획득 목적은 안정적인 지표 반사도 정보 추출에 있으나, 촬영 지역 내 지상 표적을 설치하고, 후처리를 통해 반사도 자료가 얻어져야만 하는 과정의 복잡성과 경제적 비용을 동반함
- 특히 극지 및 오지 대상 무인기 현장 조사 활동 시 발생하는 접근성의 제약을 대상으로, 기존 무인기 초분광 활용 과정의 복잡성은 적합하지 않음
- 무인기 초분광 센서 자료는 자료 품질에 민감하게 영향을 미치는 비행고도/속도, 태양고도, 날씨 등과 같은 비행환경요인들을 고려하여, 일관적 지표 반사도 추출이 이루어져야 하지만, 극지의 날씨 변화의 큰 편차 환경이 활용 가능성의 제약을 발생시킴
- 다시 말해서, 극지의 낮은 태양고도환경에 의한 계절별 일조시간의 극단적 변화가 방사 강도에 높은 변동성을 부여하며, 단파적외선 영역의 신호강도가 약하여 정보 추출이 어렵고, 눈과 얼음 표면의 강한 반사 특성은 인접 지역 신호 간섭 현상에 영향을 줌
- 그러므로 기존 지상 표적 기반 보정 방식의 중위도 기반 방사 보정 모델은 극지 환경에서 적합성이 저하되며, 다양한 극지 환경 조건에 최적화된 스펙트럼 보정이 가능한(태양 위치에 따른 일사-조도 환경 변화 영향을 고려한) 지표 반사도 데이터 복원 및 생산 기술이 필요
- 이와 같은 지표 반사도 생산을 위해 기본적으로 다양한 비행환경조건 내 방사적 분포의 규명은 필수조건이지만, 상대적으로 극지 환경 대상 평가는 매우 드물게 수행되었으므로, 향후 선제적 첨단 기술의 선점을 위한 기초기술자료를 확보함으로써 주체적 대비가 필요함

1. 기술적 측면

- 2010년대를 기점으로 소형 무인기 비행 자세제어의 고도화된 기술력 상용-대중화에 따라 지질, 식생, 농업, 해양, 생태, 건축, 도시 등 전 세부 전문 분야에서의 무인기 기술력 활용 수요가 폭발적으로 증가한 바 있음
- 대부분 무인기의 활용 수요는 고정밀 사진측량에 초점을 맞추고 있으며, 저고도 다중 경로 비행 및 고밀도의 Oblique 각도 사진 획득 기술을 기반으로 mm~cm급 초고해상도의 2차/3차원 정사영상 및 수치표면모델(Digital surface model, DSM) 제작에 탁월한 기술적 성능이 검증된 바 있음
- 고정밀 사진측량의 수요 증가에 따라 위치 정확도 증가, 처리 속도의 증가, 복잡성의 단순화 등의 대응 기술력이 빠르게 발전 한 바 있으며, 기술력 고도화-안정화 단계에 진입함
- 상대적으로 무인기 초분광 자료의 활용은 수요가 한정적이긴 하나, 안정적이고 일관된 반사도 자료 산출이 폭발적 활용 가능성을 결정짓는 주요 요인임에도 불구하고, 지상 표적 기반 (Ground reference target) 전통적인 방사 보정 방법이 반사도 변환 후처리 기술로써 다소 의존적임

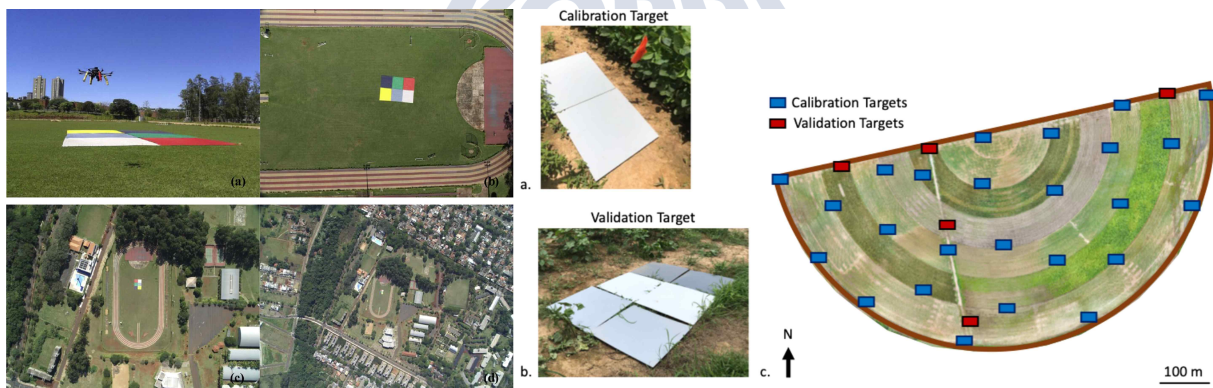


그림 1 지상 표적 기반 전통적 방사 보정 예시

- 촬영 영역 안에 지상 표적이 존재해야만 하는 기존의 전통적 방사 보정 방법은 평야, 농지 등 지형 고도의 변화가 크지 않은 경우, 즉, 현장 사이트의 접근성 제약이 적은 경우를 대상으로 효과를 발휘할 수 있으나, 극지와 같은 극한 오지 환경에서 지상 표적 기반의 지표 반사도 자료 생산은 적절한 접근 방법으로 여겨질 수 없음
- 무인기 초분광 자료 기반 지표 반사도 값의 주기적-시계열적 연속자료생산 및 활용을 지향할 시, 서로 다른 태양고도, 비행고도, 날씨, 계절 등 분광학적 민감성 및 환경적 영향 요인들을 고려한 방사 보정을 통해 변환된 반사도 값의 일관성 수준을 평가하고, 극지-오지 전용 맞춤형 기술력 개선을 위한 시도가 필수적임
- 다양한 환경요인들을 고려한 초분광 방사 보정 알고리즘 개발은 기대할 수 있는 일정 수준의 지표 반사도 획득에 대한 안정성을 제공할 뿐만 아니라, 현장 접근성에 한계를 가지는

지역 대상의 무인기 원격탐사 연구 및 기초-응용과학 자료 생산을 위한 과학기술력으로써 활용될 수 있음

2. 경제·산업적 측면

- 극지 대상의 현장 조사는 인력, 비용 등 상당한 경제적 소비를 요구하며, 무인기 원격탐사 기반 자료 취득 및 활용을 통해 저비용 대비 고효율성의 장점을 제공할 수 있음
- 무인기 초분광 센서의 활용은 기존 기초과학 분야에서 현장 포인트 자료에 의존하여, 중광역적 분포도 구축에 요구되는 시간적-비용적 요인의 단축을 극대화할 수 있는 대체 자료로써 이점을 제공함
- 안정적인 초분광 자료의 산출이 지질, 농업, 식생, 환경, 재해 등 주요 경제-산업 분야에서 모니터링 효율성 향상 기회를 제공해줄 수 있을 기반 기회 제공의 충분한 잠재성을 가지고 있음에도 불구하고, 기존 방사 보정 방법의 한계점에 대한 인식이 부족한 상황임
- 무인기 반사도 자료 산출 및 획득의 편리성/가용성/효율성의 검증 평가를 통해 다양한 세부 연구 분야 영역에서 활용 가능성 도모 및 수요 증진 유도가 요구됨
- 초분광 자료는 빅데이터 분석에 가공될 수 있는 유용자료로써 적용될 수 있으며, 위성산출물의 분광 품질 검증자료로써 위성 운용의 경제성 확보와 관련 산업 육성에 이바지할 수 있음

극지연구소

3. 과학적 측면

- 일반적으로 초분광 자료는 가시광-근적외-단파적외선 파장영역을 거쳐 발현되는 대상물질의 반사 신호에 해당하며, 대상물질의 동정(Identification)과 환경변화요인에 의한 반응성(Sensitivity) 분석에 효과적으로 이용될 수 있음 (Jeong et al., 2016; Jeong et al., 2018)
- 다시 말해서, 초분광 반사도 정보는 물질 고유의 물성 특성(Inherent property)으로 반영되는 결과에 해당함으로 외부환경요인 변화에 따라 대상 물질의 화학적-물리적 특성 변화가 생겼을 시, 이를 감지하는데 효과를 제공할 수 있으므로 ‘관측’ 및 ‘모니터링’과 같은 연속성이 요구되는 대상 지역 연구에 있어 연속적 변화의 근거를 마련할 수 있는 주요 자료로써 적용될 수 있음
- 무인기 탐사를 통해 획득한 초고해상도 초분광 자료의 반사도 분포는 물질 동정 기반의 정밀 2차원-3차원 공간 분류도 산출에 효과적이므로, 지질, 생명, 환경 등 기초과학 분야의 공간적 연구영역 확대에 이바지할 수 있음
- PRISMA, EnMap, HISUI, EMIT과 같은 위성 초분광 자료 및 HyMap, AVIRIS 항공 초분광 자료의 검증자료로써 이용 시, 고고도 원격탐사 모니터링의 정확성 향상 시도할 수 있으며, 다중공간 해상도 정보 융합 기반의 관점 분석 해석 기회 제공할 수 있음

- 저고도 무인기 비행으로부터 고해상도의 초분광 자료 취득 시 지표의 BRDF(Bidirectional reflectance distribution function) 및 지표의 Micro Shading 효과에 의한 오류의 정밀 정량 평가 시도할 수 있음

4. 사회·문화적 측면

- 무인기 초분광 자료의 획득과 활용 연구 활동을 위해서 국내 연구기관 중 극지연구소의 경우 적합한 환경 및 제원을 지니고 있으며, 국내뿐만 아니라 극지 지역의 방사 보정 결과의 교차검증 가능성을 지니고 있으므로, 기존 무인기 활용도 폭의 인식을 넓게 개선하고 새로운 분석 가능 영역의 확장 유도에 효과적일 수 있을 것으로 판단됨
- 초분광 자료는 정보가 지닌 유용성 및 희귀성 때문에, 데이터 시대에 매우 주목받는 자료 중 하나이지만, 자료 취득의 어려움으로 대중적 활용에 한계를 지님
- 무인기 초분광 자료의 방사 보정 방법의 개발을 통해 사용자의 편리성 및 유용성을 개선하고 활용 수요의 증가를 위한 노력이 요구되는 시점임
- 무인기 초분광 자료의 활용도 향상을 통해 국내뿐만 아니라 국제 연구 홍보 및 네트워크 구축/강화를 위한 효과적인 연구적 제안 요소로 활용될 수 있음



제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내기술개발 현황

- 국내 초분광 자료의 접근은 녹조, 하천 탁도, 산림 병충해, 농업 작물 대상으로 연구개발 과제가 진행된 바 있음
- 국립농업과학원, 농촌진흥청, 국립환경과학원, 한국건설기술연구원 및 국내 대학에서 수행한 바 있으나, 초기 연구 적용 단계에 해당하며, 현재까지 안정적 분광정보 제공을 위한 범용적 초분광영상자료의 반사도 변환 기술개발은 시도된 바 없음

제 2 절 국외기술개발 현황

- Köppl et al. (2021)과 Banerjee et al. (2020)은 무인기 초분광 자료 획득 시 초분광 자료의 반사도 산출 시 영향을 미칠 수 있는 환경적 요인을 날씨-구름 및 무인기 tilting 각도 변화에 따른 irradiance의 일관성을 보정하고자 하는 실험적 방법을 다룬 바 있음 (가시광-근적외선 대상)
- Crusiol et al. (2022)는 비행고도와 illumination 상태에 따른 영향을 고려한 반사도 보정 방법을 제시하는 연구 결과를 발표한 바 있음 (가시광-근적외선 대상)
- Hakala et al. (2018), Suomalainen et al. (2021), Oliveira et al. (2024a)는 grass, canopy, forest 대상 무인기 초분광 자료의 직접적 반사도 산출을 위한 다양한 irradiance, tilt 조건에서의 실험 및 방법을 제안 한 바 있음 (가시광-근적외선-단파적외선 일부 대상)
- Oliveira et al. 2024b와 Oliveira et al. 2024c는 토양 단면도 대상으로 초분광 영상자료기반의 기계학습 분류를 통해 세분화된 토양 유기 탄소 정보를 성공적으로 구분해 낸 바 있음
- Garzonio et al. (2017) Solar 환경에 따라 무인기 초분광 자료의 반사도 변환 결과 불균질성에 대하여 보고한 바 있음

제 3 절 현 기술상태의 취약성

- 일관성 있는 정확한 반사도 값 제공의 여부는 초분광 자료 기반 시계열 분석 결과의 신뢰도에 직접적 영향을 줄 수 있는 요인이지만, 무인기 초분광 자료획득에 대한 시도가 이루어진 지 기간이 오래되지 않았을 뿐만 아니라, 자료 품질이 가지는 한계에 대한 인식이 대중

적으로 부족할 수 있는 시기임

- 국제 연구개발과제 기반의 초분광 자료의 경우 종합적 자료 산출에 해당함으로, 가공정보의 마지막 단계에 자료의 표준화 단계를 거쳐야 하며, 해당 부분에서 반사도 정확성을 얼마나 확보할 수 있을지는 현재까지는 확인된 바 없음
- 국내 연구개발과제의 경우 획득한 반사도 품질에 대한 검증이 이루어진 사례는 매우 드물며, 지표 반사도 값의 검증이 누락된 사례적 연구라는 한계를 지님
- 기 국내 연구개발과제들의 경우 일관된 반사도 보정 방법에 대한 제시 부분이 다소 한계점으로 여겨질 수 있으며, 안정적 지표 반사도 정보의 방법 제시가 한정적 수요 및 활용도-비용을 증가시킬 수 있는 여지로써 작용 될 수 있음
- 세부 분야별로 기존 지상 표적 기반 반사도 보정 방법에 대해 반드시 개선-극복되어야만 하는 한계점으로써 여겨지지 않는 경우도 존재함(e.g. 현장 지상 표적 설치 접근 용이한 경우)
- 기존 사례의 경우 대부분 가시광-근적외선 영역(일부 단파적외선, ~1700 nm 대역까지)까지의 초분광 자료 처리를 대상으로 하고 있으나, 극지, 지질 등 관측 대상 객체의 범위가 더 다양하며 종합적 관측이 필요한 경우 단파적외선 영역(~2500 nm)의 정보가 물질 동정에 있어 키(key) 단서를 제공함으로 획득하고자 하는 영역 자체에 도전적인 측면이 존재함
- 대부분 반사도 변환과 관련된 기존 연구사례가 가지는 문제 제기는 전통적 방법에서의 효과 극대화에 초점을 맞추고 있으나, 다양한 환경 적용 시 활용 가능성(e.g. 극지/극한 환경)에 대한 실험 및 평가 사례 없음
- 무인기 초분광 반사도 변환 방법이 지역적/지리적 상호호환적 성격을 가지기 위해서 센서 반응 광량에 직접적인 영향을 줄 수 있는 비행고도 및 태양고도조건 요인이 실험 변수로써 고려 되어야 함에도, 관련 한계 기반 혹은 관련 개선을 위한 실험 사례가 드물
- 무인기 촬영 영상 영역 내에 반드시 지상 표적이 위치해야만 하는 소비적 현장 활동이 발생시키는 시간적, 비용적, 인적 요소에 대해서, 표적의 존재 없이 획득할 수 있는 반사도 일관성/정확성의 수준 확보에 대한 알고리즘 개선이 가져다줄 수 있는 효과는 특히, 극지 혹은 오지 탐사 시 크게 효과적일 수 있으나 관련 사례 매우 드물
- Köppl et al. (2021)의 경우 push-broom 초분광 센서를 사용하고자 하는 본 연구제안서의 의도와는 유사하나 irradiance의 안정적인 표준화에 주요 초점을 맞추고 있으며, 1회의 광역적 임무 비행으로부터 얻은 당일의 환경 조건 내에서 비행시간에 따라 촬영 라인 간격 간 차이 날 수 있는 irradiance의 편차에 주목하였음
- Crusiol et al. (2022)는 비행고도 및 illumination 변화가 반사도 산출에 영향을 미치는 요인으로 고려하고자 하는 본 연구제안서의 의도와 유사하나 실험 케이스의 샘플 수가 적고, 초분광 센서가 아닌 다분광 카메라 센서 플랫폼 자료를 대상으로 하고 있음

- 더불어 두 유사 연구사례의 경우 가시광-근적외선 영역까지의 파장대역을 대상으로 하고 있으며, 본 연구개발에서는 물질 동정에 필수적인 가시광-근적외-단파적외선(400-2500 nm)에 해당하는 초분광 전 파장대역을 대상으로 함
- Hakala et al. (2018), Suomalainen et al. (2021), Oliverira et al. (2023), Oliveira et al. (2024a), Oliveira et al. (2024b) 사례의 경우 체계적인 실험셋을 기반으로 한 직접적 반사도 획득의 결과를 제시한 바 있으나, 다른 사례와 마찬가지로 가시광선-근적외선 영역이 주요 대역이며 활용의 목적 자체가 식생, 농업, 토양에 한정된 중저위도 지역 케이스 연구에 해당함
- 단파적외선 영역은 본래 원격탐사 센서로부터 반사 신호의 취득 시, 다른 파장대역에 비해 상대적으로 반사 에너지가 적게 들어오는 영역이며, 따라서 해당 영역의 안정된 반사도 정보 취득 목적은 다소 도전적이라 할 수 있음

제 4 절 앞으로의 기술 전망

1. 초분광 자료 기반의 무인기 탐사 자료 획득 및 모니터링 수요 증가

- 초분광 자료는 딥러닝 및 빅데이터 국제 저널 논문 및 학술대회에서 예측유용자료로써 지속해서 활용 시도가 높아지고 있으나, 여전히 자료획득 과정의 어려움이 존재하며, 후 처리된 자료의 신뢰도 등의 한계 존재함
- 인공지능 및 빅데이터 분야에서 초분광 데이터 자료의 깊이(band depth)는 예측 및 분류에 매우 효과적인 데이터셋으로 활용할 수 있으므로, 원격탐사적 주제도 산출을 위한 활용 수요는 계속 증가할 것으로 전망
- 무인기 활용의 폭발적 증가는 향후 초분광 자료의 활용 수요의 증가에 결정적 역할을 제공할 수 있는 정보 플랫폼으로써 적용될 수 있음
- 성공적인 초분광 자료획득 결과의 발표를 통해 활용 기술력의 관심 및 수요가 정부 부처뿐 아니라 타 세부 연구 분야에서도 증가할 것으로 예상됨
- 무인기 초분광 탐사의 극지 적용의 원활함을 불러올 수 있으며, 국가적 극지 과학 연구영역의 확대에 일조할 것으로 예상됨

2. 다중고도-센서 공간 정보 기반의 특정 대상 관측 모니터링 수요 증가

- 다중고도 플랫폼 자료의 획득과 이중-다중 영상들 간 이격을 표준화시키는 일련의 과정에 걸리는 시간, 비용 등의 제원이 크기 때문에 거대 국제 프로젝트가 아니고서는 당위성을 찾기 어려웠음(예: NASA ABOVE를 중심으로 다중고도-센서 공간 정보 기반의 극지(북극 육상환경, 알래스카-캐나다 북부지역) 모니터링 국제 연구사업)
- 무인기 자료의 경우 지상 관측 센서와 더불어, 저고도 대표 플랫폼 중 하나로써 유용하게

이용될 수 있으며, 지상 표적 없이 지역/위치/환경요인변화 요인에 호환적인 반사도 보정 방법의 적용은 시간적-인적-비용적 절감 효과를 제공할 뿐만 아니라, 식생, 지질, 빙하, 하천 등 특정 요인의 지속적/주기적 모니터링 업무 수행 시 부담 절감에 따른 수요 증가 기대됨



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 무인기 초분광 센서 기반 촬영 영상자료 수집

- 본 연구개발에 적용된 초분광영상은 Corning microHSI™ 425 SHARK 초분광 이미징 (Hyperspectral Imaging) 센서를 통해 현장에서 직접 획득되었으며, 무인기는 DJI사 Matrice 600(M600) 모델을 기반으로 함
- 본 연구개발에서는 다양한 지리적, 환경적 조건을 대표하는 총 6개의 무인기 초분광 영상 획득 사례를 수집하여 활용하였으며, 획득 자료 정보는 표 2와 3에 요약되어 제공되었음
- 각 자료들은 알래스카 카운실 극지연구소 AWS 사이트(Council, Alaska, US), 대한민국 인천 송도 극지연구소 운동장, 남극 세종기지 일대 주변(KGL09/16, King George Island, Antarctica)에서 취득되었으며, 남북극-중위도-온대 환경을 모두 포괄하고 있어, 환경 다양성 측면에서 우수한 기초자료에 해당함
- 즉, 다시 말해서 다양한 극지 환경을 대표하는 태양의 기하학적 위치를 고려한 조도/일사 변화의 높은 분산도 및 날씨 조건 영향을 고려한 데이터셋으로써, 모델 구축 시 이와 같은 환경에 의한 방사적 손실과 영향을 복원할 수 있는 보정 능력의 성능 여부가 판단될 수 있음
- 수집된 초분광 영상자료는 VNIR-SWIR 파장대역을 총 450개의 스펙트럴 밴드로 구성하고 있으며, 푸쉬브룸(Pushbroom), 즉 Flight Direction에 수직 방향의 Line Scanning 방식으로 촬영된 후 Hypercube set 형태로 획득됨

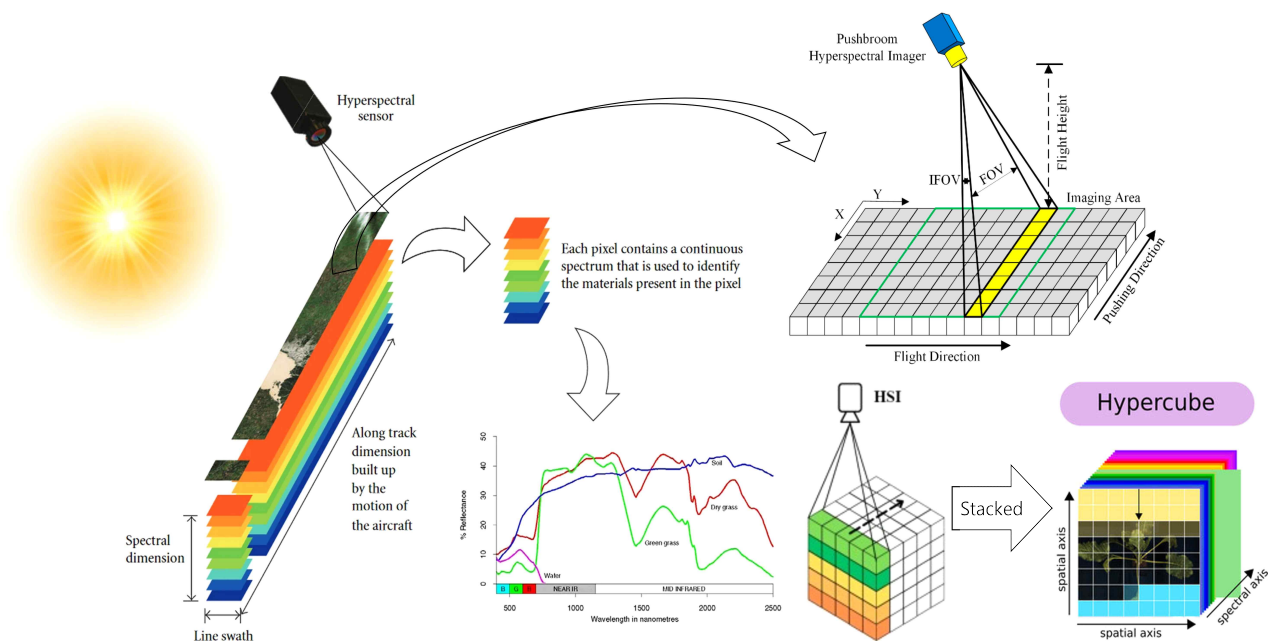


그림 2 초분광 센서 푸쉬브룸(라인스캐닝) 촬영 방식과 획득 자료의 3차원 형태를 설명하는 모식도

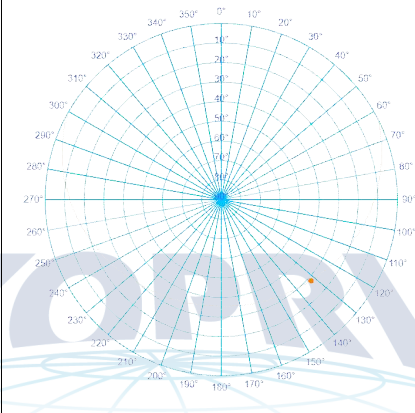
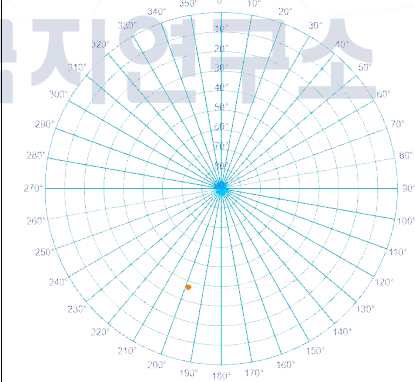
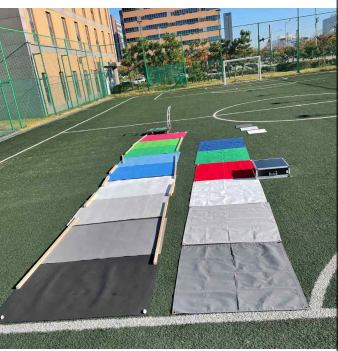
표 1 Corning microHSI™ 425 SHARK 초분광 이미징 센서 스펙 및 M600무인기 장착 운용 예시 이미지

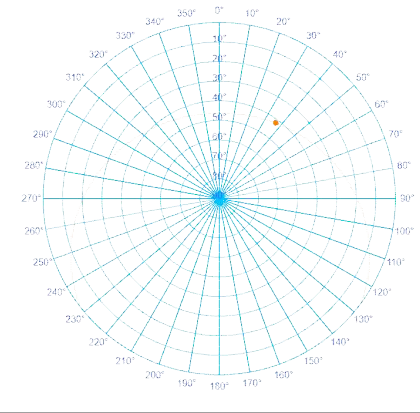
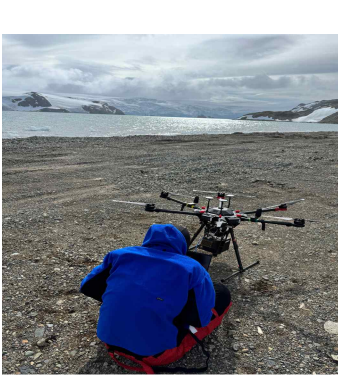
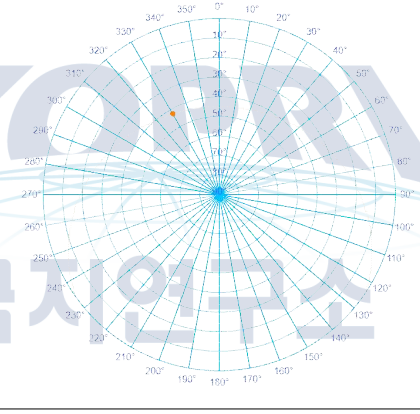
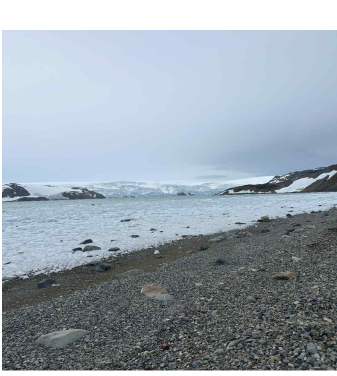
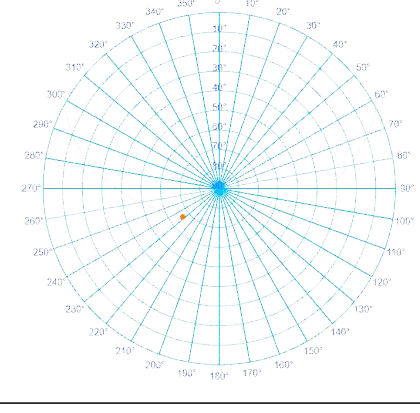
항목	내용	센서 이미지 1
분광 범위	400nm ~ 2,500nm (가시광근적외선단파적외선 포함)	
분광 해상도	8nm 이하 (FWHM 기준)	
분광 밴드 수	450개 밴드	
공간 해상도 (픽셀)	640 (스캔 라인 기준)	
픽셀 크기	15 μm $\times$ 15 μm	
렌즈 초점 거리	25mm	
렌즈 조리개값 (f#)	f/3.3	
프레임 속도	최대 125 Hz	
다이내믹 레인지	16비트	
센서 무게	약 3.0kg	
크기 (센서 본체)	23.9cm $\times$ 12.4cm $\times$ 11.9cm (약 9.4in $\times$ 4.9in $\times$ 4.7in)	
소비 전력	약 30W	
동작 전압	12~16V DC	
작동 온도 범위	5°C ~ 40°C	
보관 온도 범위	0°C ~ 60°C	
허용 습도 범위	10~90% (결로 없음)	
주요 활용 분야	농업, 가스 탐지, 광산 탐사 등	

표 2 활용 초분광 영상자료 무인기 비행-촬영 세부 조건과 획득 지역 정보

No	Environ ment	Target area	Target area	ID	Location	Location	Time zone	Acquisition time (UTC)	S/N	Frame rate	Exposure	Data type	Value type	Number of bands	Flight velocity (m/s)	Flight altitude (m)
1	Env__1	Council	Alaska, US	202208222 008510010 01__00000 006__visS WIR.hsi	64°50'40.4 1"N, 163°42'35. 09"W	64.844558, -163.709747	-8	2022.08.22 20:08:51	59	104.0 Hz	9600 us	Float	Image radiance	450	~3	40-60
2	Env__2	KOPRI	Incheon, Rep. of Korea	202210240 634510010 01__00000 000__visS WIR.hsi	37°22'0.97 "N, 126°38'44. 51"E	37.366936, 126.645697	9	2022.10.24 06:34:51	59	104.0 Hz	9600 us	Float	Image radiance	450	~3	40-50
3	Env__3	KGL09	Great King Sejong Station, Antarctica	202402031 420100010 01__00000 000__visS WIR.hsi	62°13'13.3 2"S, 58°46'24.4 4"W	-62.220367, -58.773456	-4	2024.02.03 14:20:10	59	104.0 Hz	9600 us	Float	Image radiance	450	~2	60-80
4	Env__4	KGL16	Great King Sejong Station, Antarctica	202402071 730440010 01__00000 008__visS WIR.hsi	62°13'27.2 2"S, 58°47'15.4 1"W	-62.224228, -58.787614	-4	2024.02.07 17:40:59	59	52.0 Hz	19200 us	Float	Image radiance	450	~2	60-80
5	Env__5	KOPRI	Incheon, Rep. of Korea	202407110 456330010 01__00000 000__visS WIR.hsi	37°22'0.97 "N, 126°38'44. 51"E	37.366936, 126.645697	9	2024.07.11. 04:56:33	59	125.0 Hz	8000 us	Float	Image radiance	450	~10	100-120
6	검증__1	Council	Alaska, US	202208212 030570010 01__00000 000__visS WIR.hsi	64°50'40.4 1"N, 163°42'35. 09"W	64.844558, -163.709747	-8	2022.08.21 20:30:57	59	104.0 Hz	9600 us	Float	Image radiance	450	~3	40-60

표 3 활용 무인기 초분광 영상자료 Solar geometry 및 날씨 환경 정보 요약

Environ ment	Acquisition time (UTC)	Time zone	Target area	Solar Zenith (°)	Solar Elevation (°)	Solar Azimuth (°)	Solar position (geometry)	Examples (weather condition & ground targets)	
Env_1	2022.08.22 20:08:51	-8	Alaska	60.54	29.46	131.32			
Env_2	2022.10.24 06:34:51	9	KOPRI	52.02	37.98	199.54			

Env_3	2024.02.03 14:20:10	-4	KGL09	49.02	40.98	35.48			
Env_4	2024.02.07 17:40:59	-4	KGL16	48.97	41.03	330.63			
Env_5	2024.07.11 04:56:33	9	KOPRI	23.04	66.96	235.54			

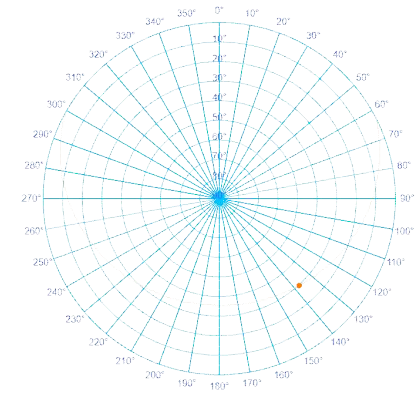
검증_1	2022.08.21 20:30:57	-8	Alaska	59.00	31.00	136.70		
------	------------------------	----	--------	-------	-------	--------	--	---



그림 3 취득된 무인기 초분광 영상자료의 트루컬러 출력 모습 및 취득된 영상 방사휘도 픽셀값 분포 예시(축구장 인조잔디 및 빨간색-녹색 방사보정용 지상 표적(타겟)): 2022.10.24. 대한민국 인천 극지연구소 운동장 촬영자료

- 수집자료는 과거 연구개발에서 획득했던 자료가 대부분이며, Env_5 자료만 본 연구개발기간에 국내 케이스의 대표 자료로써 신규로 획득한 자료에 해당함
- 모든 촬영은 주간 시간대 광량이 확보되는 조건에서(수동형) 이루어졌으며, 무인기 미션플랜 기반의 비행 촬영을 통해 영상 취득함
- Corning 센서에서 자료 취득 시, 기본적으로 Dark Current 제거를 통한 Digital Number(DN)를 방사휘도(Radiance)로 변환 처리를 적용하였으며, 헤더 파일을 포함한 Line 촬영자료들의 누적 영상 데이터의 형태로 저장된 자료를 활용하였음
- 현장에서 무인기 비행 기반 영상 촬영 시, 현장에서 설치한 보정용 지상 타겟을 포함 할 수 있도록 비행경로가 고려되었으며, 해당 지상 표적은 미국 Group Eight Technology(G8T, <https://www.group8tech.com>)사의 Type 822 모델 (2.4m x 3.6m) 6개 지상 섬유질의 표본 표적을 사용하였음
- 6개의 지상 표적(레퍼런스 타겟)은 VNIR-SWIR 영역 내에서 충분히 넓은 반사도 분산도를 커버하는 정보 고려하여 이를 모두 포함하는 대표성을 지니고자 종류가 선별 설정되었으며, ASD사 분광기(Spectrometers)를 통해 총 2회씩 촬영하여 획득한 반사도 정보를 평균하여 본 연구개발에서 활용하였음
- G8T 6종 표적 반사율 특성: 12%(저반사율), 36%(중반사율), 84%(고반사율), Red, Green, Blue
- 표 2에 요약된 각 촬영자료들의 무인기의 속도 분포는 약 2-10m/s, 고도는 40-120m 수준의 다양한 비행 조건을 반영하고 있으며, 태양의 고도(Solar Elevation Angle), 천정각(Solar Zenith Angle), 방위각(Solar Azimuth) 등 다양한 일사 환경 조건의 분산성이 충분

히 확보된 자료에 해당함

- 남극 세종기지(KGL09/16, Env__3, Env__4)에서 취득된 영상의 경우, 태양고도가 약 41° , 천정각은 약 49° , 방위각은 35.48° 또는 330.63° 로 기록되었으며, 촬영 당시 대부분 흐린 날씨와 높은 구름 커버리지, 그리고 저광량 환경을 대표함
- 반면, 대한민국 인천 송도 KOPRI 부지(Env__2, Env__5, 검증__1)의 경우, 상대적으로 쾌청한 일사 조건에서 촬영되었으며, 특히 2024년 7월 11일 촬영된 Env__5 자료는 태양고도 66.96° , 천정각 23.04° 로 매우 양호한 광량 조건의 환경을 지시함



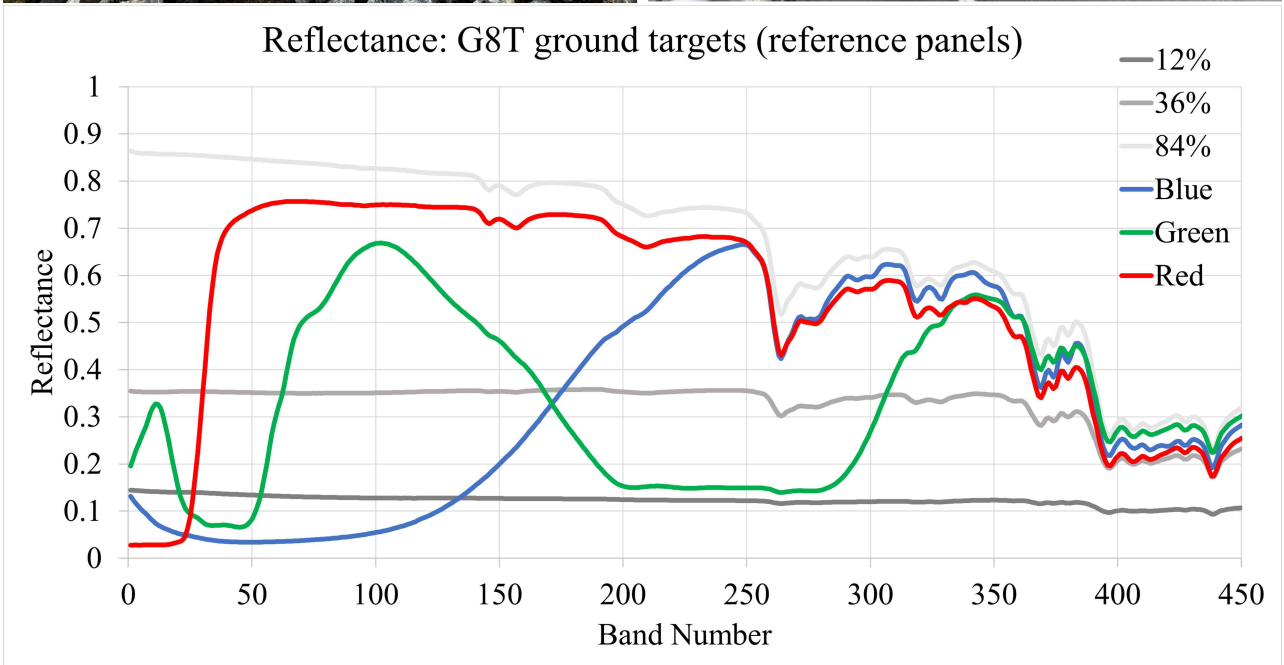
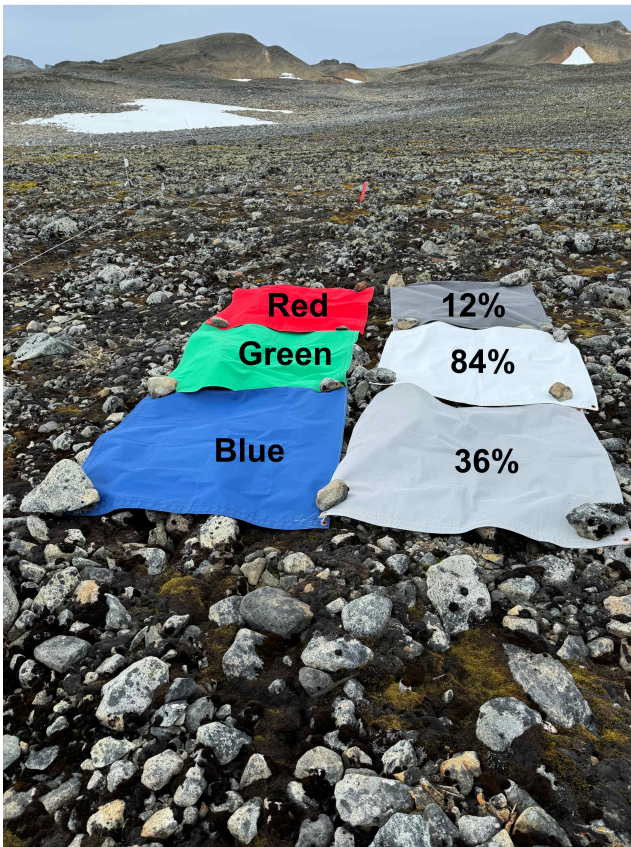


그림 4 G8T 지상 표적(레퍼런스 타겟)의 종류, 모습, ASD 분광기로 측정한 실측 반사도 정보

- 이는 평균 이상 일사 조건에서의 센서 응답 특성을 반영하는 데 효과적이며, 비행고도도 100 - 120m로 비교적 높은 편에 속하여 영상 스케일 변화의 적용성도 포함하고 있음
- 알래스카 카운실(Env_1) 자료의 경우, 촬영 당시의 태양고도는 29.46°, 천정각은 60.54°로 다소 낮은 고도에서 수광이 이루어지는 환경에 해당하며, 대체로 맑으나 구름이 산발적으로 존재하는 복합적 기상 조건에 해당함

- 따라서 이 지역의 자료는 중위도 북 고위도 경계 환경에서의 일사 조건을 대표하는 사례로써, 본 연구개발에서 평가하고자 하는 방사 보정 효과가 일사량 편차 및 흐림-맑음 간 전이 조건에 얼마나 안정적으로 반응할 수 있는지를 검토할 수 있는 실험 환경을 제공함
- 본 수집자료들은 단순히 영상 획득 시점의 다중 환경 조건뿐 아니라, 세부적으로 무인기 비행 속도, 고도, 노출 시간, 프레임 레이트 등의 기기 수집 조건까지도 지역별로 다른 설정값이 반영되어 있으므로, 결과적으로 이와 같은 자료 기반의 방사 보정 모델이 구축된다면, 다양한 일사-기상-비행 조건 환경 간 상호 호환할 수 있는 통합적 보정 기능(Correction)을 제공할 수 있음을 지시한다고 할 수 있음
- 따라서 본 연구개발에서 수행하고자 하는 극지 포함 다양한 환경 적응 가능 초분광 지표 반사도 정밀도 개선을 위한 방사도 정보의 활용 가능성을 평가하는데 매우 적합한 데이터 셋으로 판단됨



제 2 절 영상처리를 통한 지표 반사도 획득

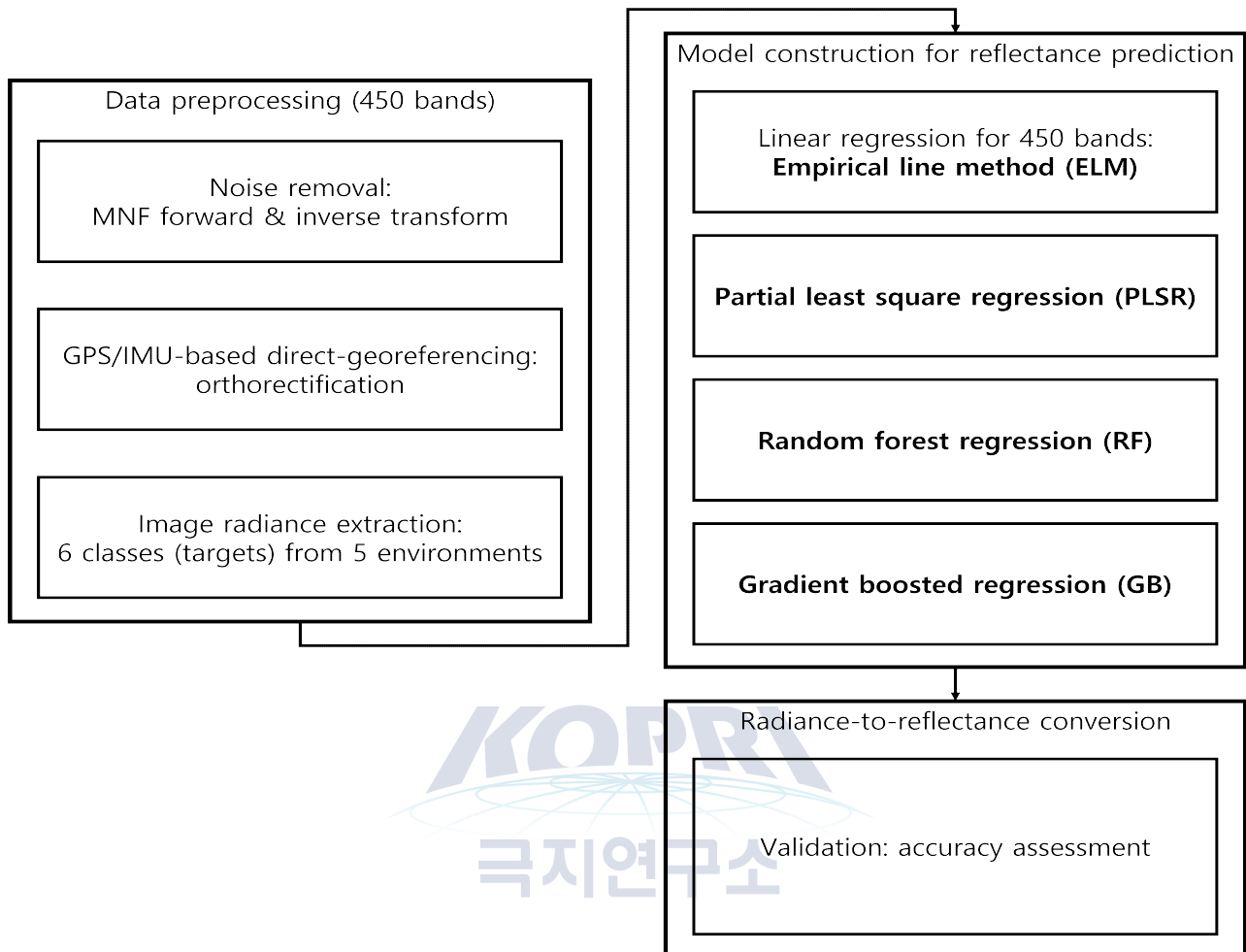


그림 5 본 연구개발 처리 흐름도

1. 영상 전처리 수행: 노이즈 제거, 기하/정사 보정 및 방사 보정 모델링용 데이터셋 구축

- 총 6개의 환경으로부터 취득된 초분광영상자료는 촬영 환경에 따라 Env_1 ~ Env_5와 검증용__1로 구분되며, 이들 자료를 대상으로 일관된 영상 전처리가 적용 수행되었음
- 영상 전처리는 크게 노이즈 제거, 기하보정, 영상 내 G8T 지상 표적 기반 영상 방사휘도 값 추출을 통한 모델링용 데이터셋 구축으로 진행되었으며, 동일 지상 표적 6종의 ASD 분광기 측정 데이터를 참조값으로 대응 활용함
- 현장에서 취득한 초분광 영상자료는 비행고도 이하 대기층 내 CO₂, -OH, H₂O 등의 성분과 센서 고유의 전자적 잡음에 의해 신호 대비 잡음 비(SNR)가 열악한 경우가 많으며, 특히 극지 환경에서는 이러한 잡음(노이즈) 영향이 더욱 두드러지게 나타남
- 따라서 적절하게 노이즈 성분만 제거하고, 유용한 분광정보를 보존할 수 있는 전처리 과정이 필수적임

- 초분광 영상의 노이즈 제거를 위해 Minimum Noise Fraction (MNF) 변환을 적용함
- MNF 처리 결과에 따라 영상처리 데이터셋 구축의 품질에 영향을 미칠 수 있어 전진 및 역변환 처리를 위한 충분한 검토와 논리적 근거가 요구됨
- 총 6개 환경에서 취득된 (Env 1 ~ 5, 검증용__1) Radiance 영상을 대상으로 MNF 전처리 과정을 표준화하여 일괄 적용하였음
- MNF 변환은 1) Forward(전진) 변환 (원본 - MNF): 2) Eigen band 선택 3) Inverse (역) 변환 3단계로 구성됨
- MNF Forward 변환은 초분광 영상 데이터의 노이즈 공분산 행렬(Noise Covariance Matrix)을 추정하기 위해 공간적 차분법을 활용하며, 수평/수직 방향 이웃(인접) 픽셀 간 차분을 계산하여 노이즈 특성을 정량화하여 추정할 수 있음
- 다시 말해서, 다차원의 스펙트럴 밴드 간 상관관계를 기반으로 고유값(Eigen value)을 계산하여 각 밴드의 정보량과 노이즈 기여도를 차원 축소를 통해 정량적으로 분석하는 방식이며, 밴드 간 공분산 행렬을 통해 고유 벡터 및 Eigen value을 도출하고, 각 MNF Eigen value가 설명하는 누적 분산 기여도(Cumulative Explained Variance)를 산출함

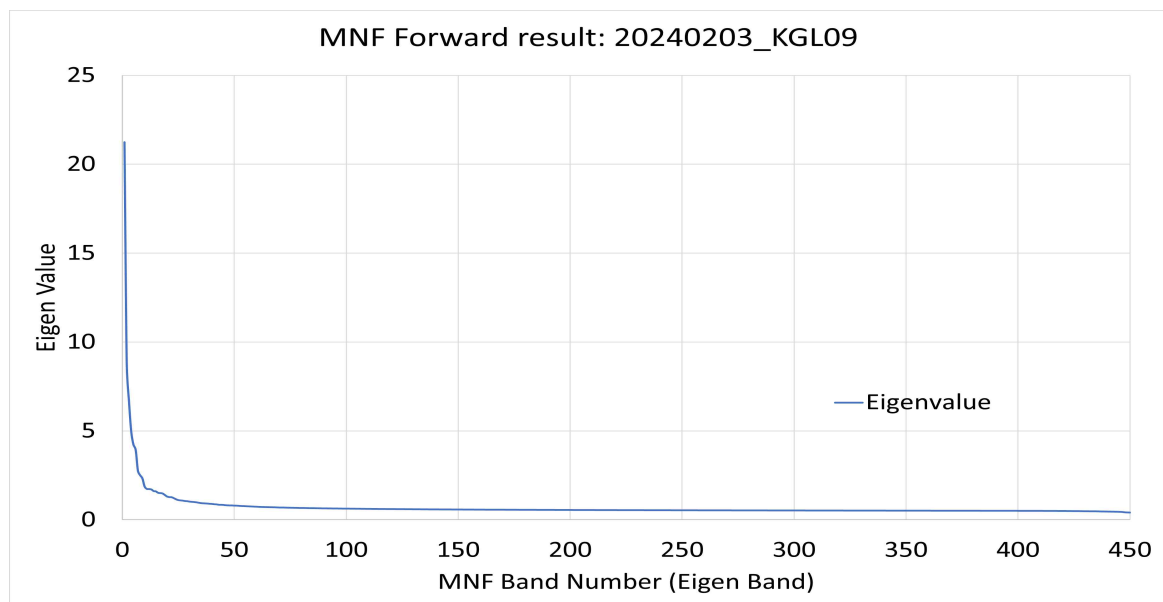


그림 6 MNF 전진 변환 결과 예시: Env__3 자료 MNF 처리 후 Eigen Value 분포

- 총 450개 Eigen value중 가장 많은 유용분광정보를 포함하면서 노이즈 신호를 제거할 수 있는 임계값(MNF 성분 번호, 밴드)을 선정하기 위하여, 누적 분산 기여도 외에 Eigen value 곡선 분포도를 통해 통계적으로 분석한 Elbow 값, 2차 미분 값, 감소율, 로그 스케일 변곡점, SNB 임계값을 고려하여 환경별 초분광영상자료의 최종 밴드 수를 선정함
- 밴드 선택을 위한 대표 통계값 분석의 기준은 다음과 같음:
 - 엘보우(Elbow) 포인트: 고유값 곡선의 2차 미분 절대값이 최대가 되는 지점
 - 안정화 포인트: 고유값 감소율이 3.0% 이하로 안정화되는 지점

- SNR 임계값 지점: 신호대잡음비가 10dB 이상인 마지막 밴드
- 분산 변화 지점: 분산 증가율이 크게 감소하는 지점

○ 각 통계 기준값들의 중앙값(median)을 고려하고, 대중적으로 알려진 20-30 개수 사이의 밴드 구간 내에서의 선택 조건을 기반으로 최종 밴드 수 선택이 수행됨

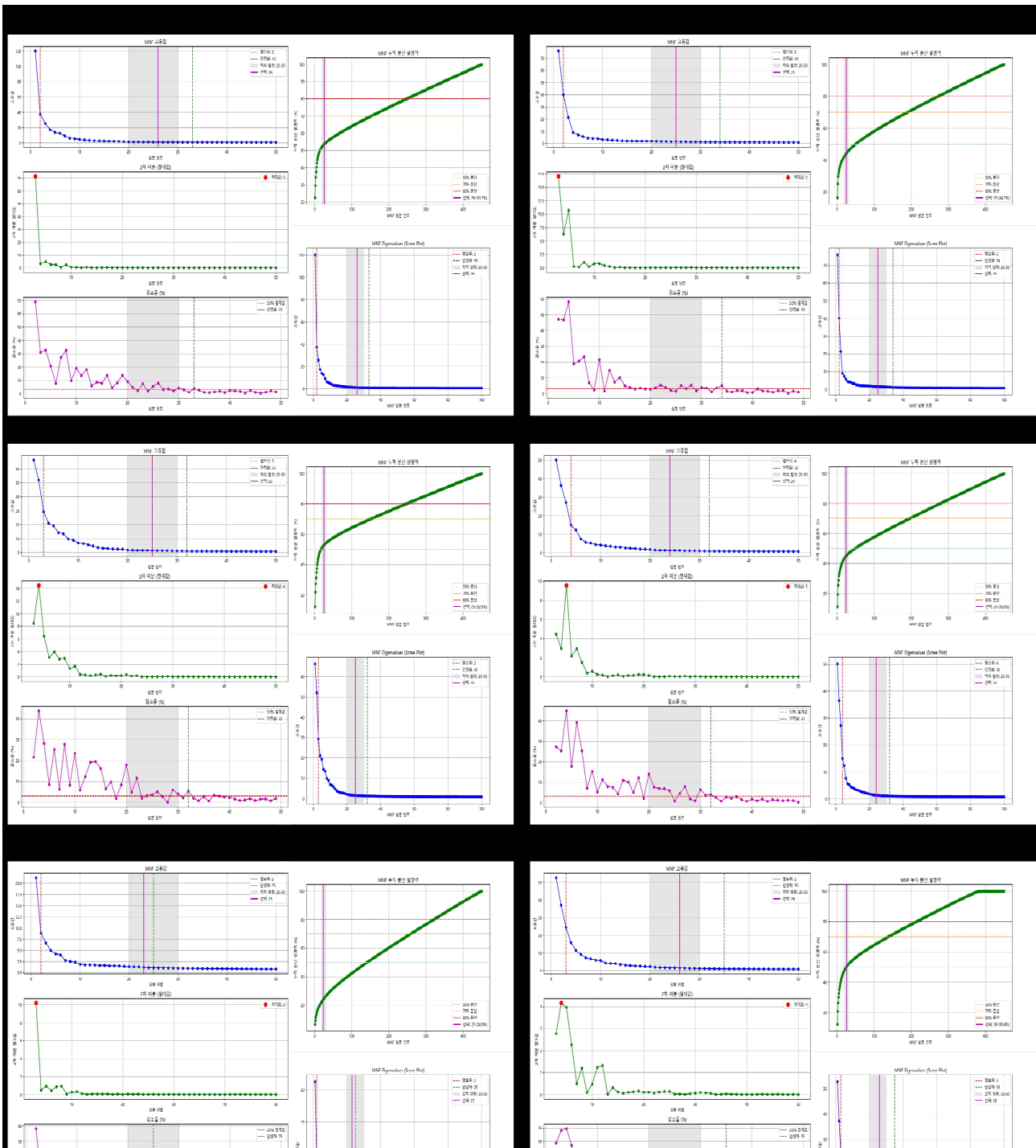


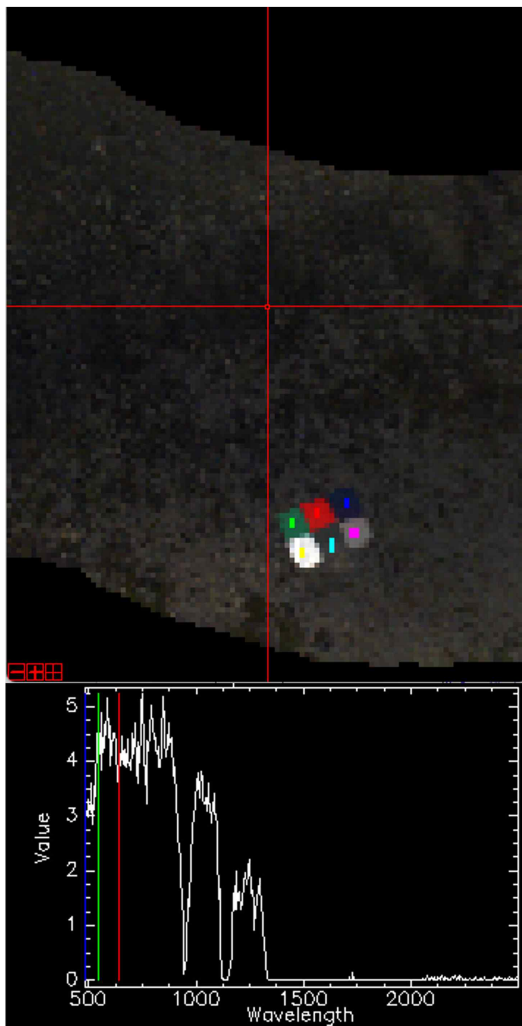
그림 7 MNF 변환(전진, Forward) 처리 후 주요 통계 정보 기반 밴드 선택 결과

표 4 MNF 최적 밴드 선택 결과 요약표

환경ID	선택 밴드 수	선택 방식	엘보우 포인트	안정화 포인트	SNR 임계값	분산 변화 지점	누적 분산 설명력	상위 3개 밴드 누적 분산 기여도
Env_1	26개	combined	2	33	9	9	53.72%	22.56%, 7.00%, 4.82%
Env_2	25개	combined	3	32	12	12	52.85%	12.31%, 9.65%, 5.43%
Env_3	23개	combined	2	25	4	6	24.01%	6.47%, 2.70%, 2.03%
Env_4	25개	combined	2	34	6	6	44.24%	16.39%, 8.66%, 4.61%
Env_5	24개	combined	4	32	8	8	45.02%	11.28%, 8.20%, 6.12%
검증용_1	26개	combined	3	35	390	10	50.37%	12.12%, 8.57%, 5.65%

- 전처리 대상 영상 데이터셋 6개에 대해 평균 25~27개의 MNF 밴드가 선택되었으며, 이는 원본 450개 밴드의 약 6% 수준이나, 선택된 밴드들은 전체 데이터 분산의 70%~75%를 설명하며, 정보 보존과 노이즈 제거 간 최적 균형점으로 도출되었음
- 선택된 밴드만을 사용하여 원본 데이터 공간으로 Inverse 역변환하여 자료 복원함
- 역변환된 복원 영상은 원본과 동일한 밴드 차원 수(450)와 공간 해상도를 유지하면서 노이즈 정보는 저감한 효과를 제공함

노이즈 제거 전 영상



노이즈 제거 후 영상

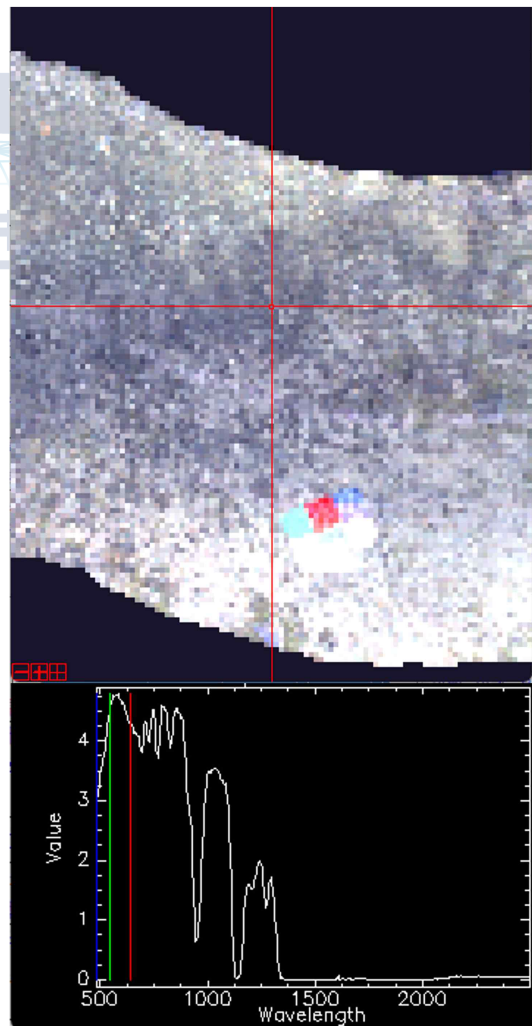
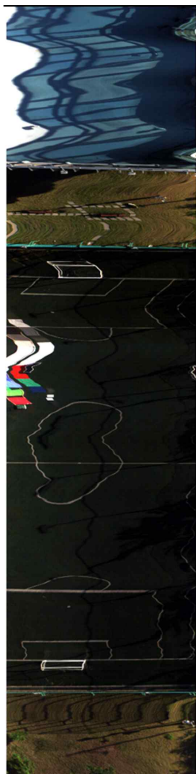


그림 8 MNF 전진 - 역변환 후 노이즈 저감 효과 예시 (image radiance in VNIR-SWIR region)

- 기하/정사보정은 극지연구소 PIP 연구과제(과제번호: PE22910, 극지 무인비행 관측을 위한 다중센서 검보정/융합 기술 개발)를 통해 개발된 고정밀 위치추정 기법을 적용하였음
- GPS/IMU 기반의 Direct Georeferencing을 통해 Pushbroom 센서 영상에 대한 정밀한 지리 좌표 보정이 수행됨
- Direct Georeferencing과정은 DEM(Digital Elevation Model) 기반의 지표 표면 보정을 포함한 정사영상화(Orthorectification)로 확장되며, 이에 따라 센서 시점 기하 왜곡이 제거된 고정밀 정사 영상 산출이 가능하다는 장점을 제공함
- 본 과정은 Pushbroom 라인마다 개별 EOP를 적용해 Line-by-Line Orthorectification을 수행하였으며, 지상기준좌표계(UTM-WGS84) 기반의 정확한 위치 보정이 이루어짐
- 본 기법은 무인기 플랫폼에 탑재된 고정밀 GNSS 및 관성센서(IMU)로부터 얻어진 위치/자세 정보(외부표정요소, EOP)와, 센서 위치 보정에 필요한 Boresight angle 및 Lever-arm offset을 함께 고려한 Direct Sensor Model을 기반으로 함
- 특히 Pushbroom 라인 스캔 구조를 고려하여 촬영 시각별(Time stamp, UTM time) 보간된 외부표정요소(Time-Synchronized EOP)를 생성하였으며, 각 라인 단위로 지표 투영이 가능하도록 구성되어 효과적으로 영상의 기하보정을 수행하였음

기하보정전



기하보정후: UTM 좌표계

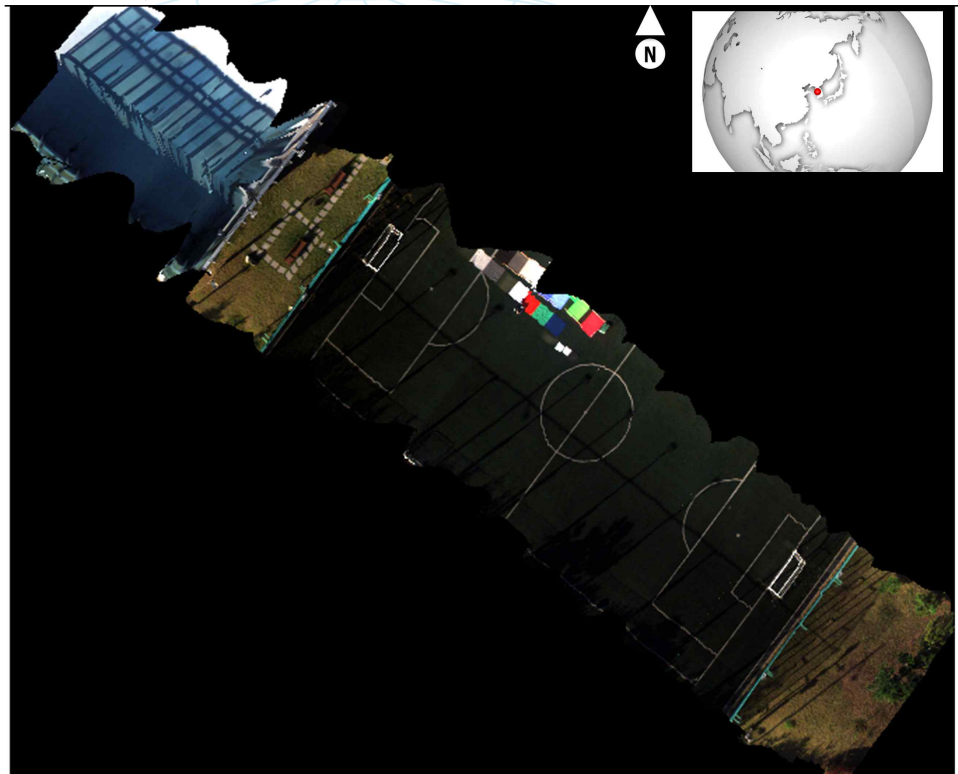


그림 9 Direct Georeferencing 기반의 Orthorectification 처리 결과 예시 영상(2022.10.24. 대한민국 인천 극지연구소 운동장 촬영자료)

- 전처리 수행 후 각 대표 환경(Env_1 ~ Env_5) 영상 내에서 육안으로 감지 가능한 6개

지상 표적의 방사휘도 스펙트럼을 영상 내 Region of Interest (ROI) 픽셀을 설정하고 이들의 평균값을 기반으로 클래스(class) 정보로써 추출하였음

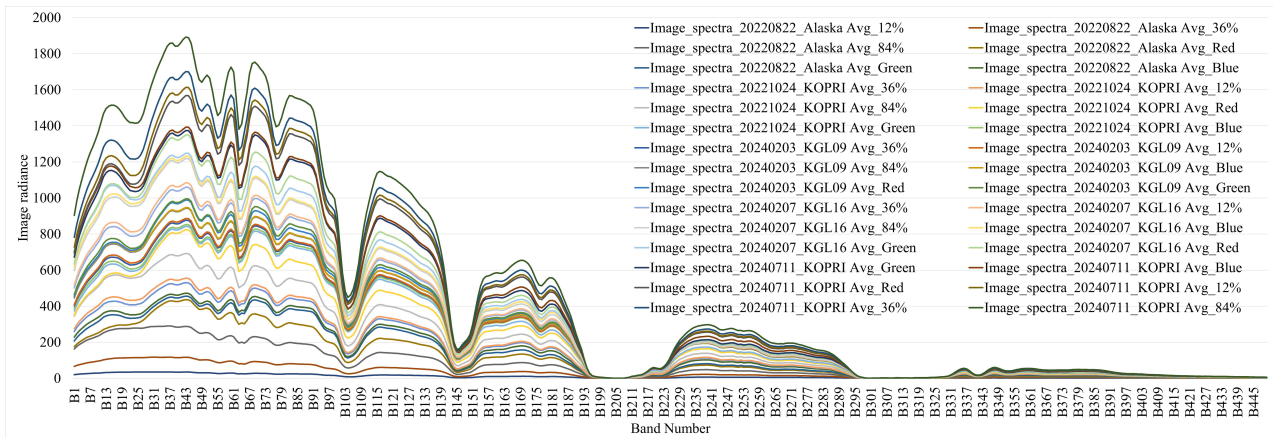


그림 10 각각 서로 다른 환경을 대표하는 초분광 영상으로부터 추출한 6개 영상 지상 표적 대상 방사휘도 스펙트럼 값 분포(총 450개 밴드 영역으로 재구성, VNIR-SWIR 파장대)

- 추출된 영상 방사휘도 스펙트럼 정보는 6개 지상 표적의 실측 반사도 스펙트럼과 각각 대응하여, 방사 보정 모델 구축을 위한 데이터셋으로 가공되었음
- 구축된 Radiance-Reflectance 대응 데이터는 총 5개 환경 × 6개 표적 × 450개 밴드로 구성된 구조적 매트릭스를 형성하며, 이후 방사 보정 모델 알고리즘 학습 입력 자료로 활용됨

2. 밴드별 통계분석: 반사도 변환을 위한 방사 보정 모델 구축과 성능 평가 및 검증

2.1. 방사 보정 모델 구축

- 전처리를 통해 위 단계에서 구축된 데이터셋을 활용하여 총 4종의 γ -방사 보정 모델을 설계하였으며, 각각의 모델은 영상 내 방사휘도(Image Radiance)를 지표 반사도(Surface Reflectance)로 변환하기 위한 예측 알고리즘임(6종 ASD 분광기 측정 데이터 참조값 기준)
- 입력 데이터 구조: 5개 환경 × 6개 표적 × 450개 밴드 = 13,500개 데이터 포인트
- 모델별 입출력 관계:
 - LR: 밴드별 독립 선형 회귀식, 450개 회귀식 구성
 - PLSR: 다변량 분석 차원 축소, 15개 주성분(latent components) 활용
 - RF: 트리 수 100개, 깊이 15, 최소 샘플 수 2로 설정
 - GB: 트리 수 100개, 학습률 0.1, 깊이 5로 설정
- 적용된 회귀 기반 모델의 설명:
 - 1) Linear Regression (LR) - Empirical Line Method (ELM) 기반
 - 기준 표적의 실측 반사도와 영상 방사휘도 간 선형 관계 가정
 - 각 밴드별 독립적인 선형 회귀식 도출
 - 표적의 분광 특성과 영상 내 방사휘도를 직접 연결하는 전통적 방법

- 모델 단순성 대비 각 밴드별 독립 변환으로 스펙트럼 연속성 보존 가능

2) Partial Least Squares Regression (PLSR)

- 고차원 데이터의 다중공선성 문제 해결을 위한 차원 축소 기반 선형 회귀 기법
- 입력(방사휘도)과 출력(반사도) 간 공분산 최대화하는 잠재 변수 추출
- Cross-validation 통해 최적 잠재 성분 수(15개, latent component) 결정
- 데이터 핵심 구조 유지하며 과적합 방지하는 균형점 제공

3) Random Forest Regression (RF)

- 다수 결정 트리 앙상블하여 예측 정확도와 안정성 확보
- 부트스트랩 샘플링된 데이터 서브셋으로 개별 트리 학습
- 비선형 관계 포착 및 특성 간 상호작용 자동 모델링 가능
- 밴드 간 복잡한 관계와 환경적 요인의 비선형 영향 학습 가능

4) Gradient Boosted Regression (GB)

- 학습기(결정 트리)를 순차적으로 학습시켜 이전 모델 오차 점진적 보정
- 각 단계에서 이전 모델 오차 감소 방향으로 새 학습기 추가
- 다양한 손실 함수 최적화 가능한 유연한 앙상블 기법
- 밴드별 특성과 스펙트럼 연속성 동시 고려 가능한 알고리즘(비선형 관계 모델 효과적)

○ 본 연구개발에서 LR은 영상 내 지상 기준 표적들의 실제 반사도(Reference Reflectance)와 영상 내 방사휘도(Radiance) 값을 1:1 대응시켜 밴드별 선형 회귀를 수행하여 진행되었음

○ 즉, 영상 내 6개 표적의 측정된 반사도(Reference Spectrum)와 영상 상의 방사휘도(Radiance)를 450개 밴드를 활용해 밴드별로 선형 회귀하여, 보정계수를 산출하고, 이를 임의의 방사휘도 영상에 적용하여 LR 모델로 보정된 반사도 값을 추정할 수 있음

○ 본 연구개발에서는 LR을 기반으로 한 보정계수 산출을 위해 각 환경(Env_1~Env_5) 내 6개 영상 기준 표적 클래스의 방사휘도와 실측 반사도 간의 밴드별 선형 회귀식을 도출하였으며, 기본 선형 회귀 수식(formula)은 다음과 k같이 정의됨:

$$- \text{Reflectance}(band_i) = a_i \times \text{Radiance}(band_i) + b_i$$

($i = 1 \sim 450$ 이고, $a_i =$ 기울기, $b_i =$ 절편은 각각 $band_i$ 에 대해 계산됨)

○ 회귀식을 통해 생성된 총 450개의 보정계수 쌍은 Excel 기반의 매트릭스로 저장되었으며, 이를 이용하여 검증용 방사휘도 영상 각 픽셀에 대해 밴드별 보정식이 적용되어 반사도 영상으로 변환되었음

1	Equation
2	B1_pred = -0.017191*B1 + -0.010795*B2 + -0.003251*B3 + 0.006198*B4 + 0.005370*B5 + 0.007740*B6 + 0.008849*B7 +
3	B2_pred = -0.017297*B1 + -0.010989*B2 + -0.003451*B3 + 0.005860*B4 + 0.005137*B5 + 0.007451*B6 + 0.008509*B7 +
4	B3_pred = -0.017389*B1 + -0.011155*B2 + -0.003619*B3 + 0.005561*B4 + 0.004928*B5 + 0.007183*B6 + 0.008188*B7 +
5	B4_pred = -0.017491*B1 + -0.011323*B2 + -0.003783*B3 + 0.005282*B4 + 0.004735*B5 + 0.006937*B6 + 0.007894*B7 +
6	B5_pred = -0.017597*B1 + -0.011490*B2 + -0.003945*B3 + 0.005023*B4 + 0.004557*B5 + 0.006715*B6 + 0.007631*B7 +
7	B6_pred = -0.017680*B1 + -0.011624*B2 + -0.004074*B3 + 0.004802*B4 + 0.004404*B5 + 0.006518*B6 + 0.007393*B7 +
8	B7_pred = -0.017788*B1 + -0.011792*B2 + -0.004236*B3 + 0.004545*B4 + 0.004227*B5 + 0.006296*B6 + 0.007128*B7 +
9	B8_pred = -0.017899*B1 + -0.011969*B2 + -0.004406*B3 + 0.004263*B4 + 0.004035*B5 + 0.006049*B6 + 0.006830*B7 +
10	B9_pred = -0.018018*B1 + -0.012160*B2 + -0.004594*B3 + 0.003958*B4 + 0.003827*B5 + 0.005786*B6 + 0.006515*B7 +
11	B10_pred = -0.018105*B1 + -0.012301*B2 + -0.004729*B3 + 0.003723*B4 + 0.003664*B5 + 0.005577*B6 + 0.006262*B7 +
12	B11_pred = -0.018185*B1 + -0.012418*B2 + -0.004838*B3 + 0.003564*B4 + 0.003554*B5 + 0.005446*B6 + 0.006115*B7 +
13	B12_pred = -0.018218*B1 + -0.012461*B2 + -0.004875*B3 + 0.003528*B4 + 0.003528*B5 + 0.005426*B6 + 0.006105*B7 +
14	B13_pred = -0.018237*B1 + -0.012473*B2 + -0.004879*B3 + 0.003585*B4 + 0.003566*B5 + 0.005502*B6 + 0.006224*B7 +
15	B14_pred = -0.018207*B1 + -0.012410*B2 + -0.004809*B3 + 0.003766*B4 + 0.003687*B5 + 0.005685*B6 + 0.006476*B7 +
16	B15_pred = -0.018158*B1 + -0.012314*B2 + -0.004707*B3 + 0.004024*B4 + 0.003862*B5 + 0.005945*B6 + 0.006830*B7 +
17	B16_pred = -0.018086*B1 + -0.012187*B2 + -0.004575*B3 + 0.004345*B4 + 0.004079*B5 + 0.006266*B6 + 0.007263*B7 +
18	B17_pred = -0.018011*B1 + -0.012055*B2 + -0.004441*B3 + 0.004681*B4 + 0.004305*B5 + 0.006602*B6 + 0.007719*B7 +
19	B18_pred = -0.017926*B1 + -0.011920*B2 + -0.004307*B3 + 0.005010*B4 + 0.004526*B5 + 0.006929*B6 + 0.008164*B7 +
20	B19_pred = -0.017837*B1 + -0.011783*B2 + -0.004173*B3 + 0.005336*B4 + 0.004745*B5 + 0.007251*B6 + 0.008602*B7 +
21	B20_pred = -0.017756*B1 + -0.011660*B2 + -0.004053*B3 + 0.005634*B4 + 0.004945*B5 + 0.007547*B6 + 0.009006*B7 +
22	B21_pred = -0.017671*B1 + -0.011539*B2 + -0.003939*B3 + 0.005899*B4 + 0.005122*B5 + 0.007806*B6 + 0.009356*B7 +

그림 11 구축된 LR 기반 예측 회귀식 모습: 각 밴드별로 450개 독립변수 기반 지표 반사도 값 선형 회귀식 정리

- 본 연구개발에서 PLSR은 초분광 영상처럼 수백 개의 밴드를 가진 고차원 데이터에서 다중 공선성(multicollinearity) 문제가 발생할 때 효과적으로 대응할 수 있는 대표적인 선형 회귀 기법으로써 적용되었음(Lim et al., 2019)
- 초분광 데이터는 인접 밴드 간 상관성이 매우 높으며, 다중공선성이 고려되지 않는 전통 회귀 모델(LR 등) 사용 시 예측 불안정성, 과적합 등 통계적 오류 발생할 수 있는 것으로 알려진 바 있음
- 본 연구개발에서 PLSR은 입력(방사휘도, Radiance)과 출력(반사도, Reflectance) 간의 공분산 구조를 최대화하는 잠재 성분(Latent Components)을 생성하고, 이 성분을 기반으로 회귀 모델을 구성함으로써 정보 압축 및 예측 안정성을 동시에 확보하였음
- 총 450개 5개 데이터셋 모든 Radiance 밴드를 입력변수로, 클래스 평균 Reflectance를 출력변수로 하여 모델을 학습함
- PLSR의 최적 잠재 성분 수(Latent Components) 수를 1~20까지 변화시키며 Cross-validation 기반 성능 평가(RMSE, SAM 등)를 수행하여 최적의 잠재 성분 수를 선택하여 적용하였음(15 = Latent Components)
- 학습된 PLSR 모델을 검증용 영상에 적용하여 반사도 영상으로 변환하였음
- 본 연구개발에서 RF는 450개 초분광 밴드의 방사휘도(Radiance)를 입력으로 활용하여 반사도(Reflectance) 예측 모델로 구축되었음
- 전체 환경(Env__1~Env__5)조건에서 공통적으로 사용되는 6개 기준 표적 클래스의 평균

반사도를 타겟으로 설정함

- 모델은 다변량 회귀 구성 기반으로 설계되었으며, 트리 개수($n_estimators=100$), 최대깊이 ($max_depth=15$) 등 교차검증과정을 통해 최적의 주요 하이퍼파라미터를 결정함
- 최종 학습된 RF 모델을 사용하여 검증용 방사휘도 영상을 입력으로 각 픽셀 별 450 밴드의 반사도를 추정하여 변환 수행함
- GB 모델 구축은 450개 밴드 반사휘도를 입력 변수로, 클래스별 평균 반사도를 타겟으로 학습을 수행하여 진행됨
- GB는 다양한 손실 함수를 최적화할 수 있는 유연한 구조를 가지고 있다는 장점을 가지고 있으며, 밴드별-환경별 독립적인 예측 모델을 구축하여 환경 특성을 반영함
- 학습률, 트리 수, 최대 깊이 등 하이퍼파라미터를 조정하여 모델의 복잡도와 성능을 조절함 ($n_estimators=100$, $learning_rate=0.1$, $max_depth=5$ 로 설정)
- GB 모델은 이전 모델의 오차를 보정하는 방식으로(오차에 대해 경사 하강법을 사용해 모델 개선) 학습됨으로 높은 예측 정확도를 기대하고 적용되었음
- 구축한 GB 모델 기반 반사도 정보는 전체 검증용 영상 픽셀에 대해 배치 방식으로 추론 과정을 적용하여 획득함
- 본 연구개발에서 방사도 평가를 위한 모델 성능의 평가는 크게 1차, 2차 과정을 통해 수행됨
- 모델 성능 평가:
 - 모델 성능 평가(RMSE, MAE 등)는 학습 데이터에 기반하여 수행되었으며, 이는 모델 구조의 방사 보정 문제 적합성을 검토하기 위한 1차 지표로 활용함
 - 실질적인 보정 성능 평가-검증(2차)은, 학습된 모델을 실제 영상에 적용한 후 산출된 반사도 영상과 기준 스펙트럼 간의 형태적 유사성 등의 지표를 중심으로 검토함
 - 즉, '검증용__1' 데이터셋에 각 모델을 적용하여 획득한 예측 변환 영상 내 6개 지상 표적(Class)의 반사도 추정값을 추출하여, 실측 반사도 대비 파장대별 분포 특성 및 SAM 기반 성능 비교 평가를 수행함(2.2 섹션)
- 다시 말해서, 본 연구에서는 일반화 성능보다 구조의 타당성과 실제 적용 가능성에 중점을 두고 평가를 진행함
- 모델의 성능 평가는 다음의 대표 지표를 통해 수행되었으며, 모델 간 비교 분석에 활용되었음
 - RMSE (Root Mean Square Error): 예측값과 실제값 간의 평균 제곱 오차의 제곱근으로 값이 작을수록 예측 정확도가 높음을 의미
 - MAE (Mean Absolute Error): 예측값과 실제값 간 절대 오차의 평균이며, RMSE와 유사하나 이상값(outlier)에 덜 민감한 지표

- R^2 (Determination Coefficient): 모델이 전체 분산을 설명하는 비율로 1에 가까울수록 설명력이 높음
- MAPE (Mean Absolute Percentage Error) : 백분율 오차의 평균의미, 단위에 무관하게 비교 가능
- Explained Variance(설명된 분산): 모델이 데이터의 분산을 설명하는 정도로, 1에 가까울수록 데이터의 변동성을 잘 포착함을 의미(0 이하면 모델 설명력이 매우 낮음을 의미)
- SAM (Spectral Angle Mapper, unit: radian/degree) : 예측 스펙트럼과 실측 스펙트럼 간의 각도(라디안 단위), 0에 가까울수록 스펙트럼 유사성 높음

$$\text{RMSE:} \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

$$\text{MAE:} \quad \text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

$$R^2: \quad R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

$$\text{MAPE:} \quad \text{MAPE} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|$$

$$\text{SAM:} \quad \text{SAM} = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{y} \cdot \vec{\hat{y}}}{\|\vec{y}\| \|\vec{\hat{y}}\|} \right)$$

그림 12 본 연구개발에서 활용한 모델 성능 평가 지표의 수식

- y_i (실측값, True value): 각 i 번째 샘플에서의 실제 참값(ground truth) 혹은 관측된 반사도(Reflectance): 실험 또는 센서 기반 측정을 통해 수집된 값
- $\hat{y}_i$ (예측값, Predicted value): 학습된 방사보정 모델(LR, PLSR, CNN 등)을 통해 예측된 i 번째 반사도 값; 모델 성능 평가는 이 값과 y_i 간의 차이를 기반으로 수행됨
- n (샘플 개수, Number of samples): 전체 평가에 사용된 총 데이터 포인트 수 (예: 모든 표적 × 환경 조합의 수)
- $\bar{y}$ (실측값 평균, Mean of true values): 전체 실측값의 평균, $\bar{y} = (1/n) \sum y_i$ (R^2 계산 시 기준 값으로 활용됨 (분산의 기준 중심값))
- $\|\vec{y}\|, \|\vec{\hat{y}}\|$ (벡터 크기, Vector magnitude): SAM에서 사용되며, 전체 스펙트럼 벡터의 크기

를 나타냄, $\|y\| = \sqrt{(\sum y_i^2)}$ (스펙트럼 간 각도 계산 시 정규화를 위해 사용됨)

- $y \rightarrow \hat{y}$ (벡터 내적, Dot product): SAM 계산에서 실측 스펙트럼 벡터와 예측 스펙트럼 벡터 간의 내적: 벡터 방향의 유사성을 측정하는 데 활용됨
- SAM 단위 (radian): SAM은 예측 스펙트럼과 실측 스펙트럼 간의 각도를 라디안 (radian) 단위로 표현하며, 값이 0에 가까울수록 두 스펙트럼이 유사하다(spectral similarity)는 것을 의미하며, 1에 가까울수록 불일치를 의미

표 5 구축 모델별 전반 평균 성능 지표 비교(1차 지표)

Model	RMSE	MAE	R ²	MAPE(%)	Explained Variance	SAM(rad.)
LinearRegression	0.074	0.040	0.819	17.679	0.823	0.053
PLSRegression	0.052	0.037	0.930	20.043	0.930	0.090
RandomForest	0.077	0.060	0.842	26.418	0.843	0.099
Gradient Boosting	0.002	0.001	0.999	0.443	0.999	0.003

표 6 클래스별 예측 반사도 스펙트럼과 실측 반사도 간의 스펙트럼 각도 유사도 (SAM, radian 단위, 1차 지표)

Class	LR	PLSR	RF	GB
12percent	0.010	0.144	0.174	0.002
36percent	0.015	0.047	0.047	0.001
84percent	0.006	0.015	0.021	0.002
Blue	0.043	0.037	0.094	0.002
Green	0.057	0.027	0.100	0.001
Red	0.029	0.020	0.034	0.000

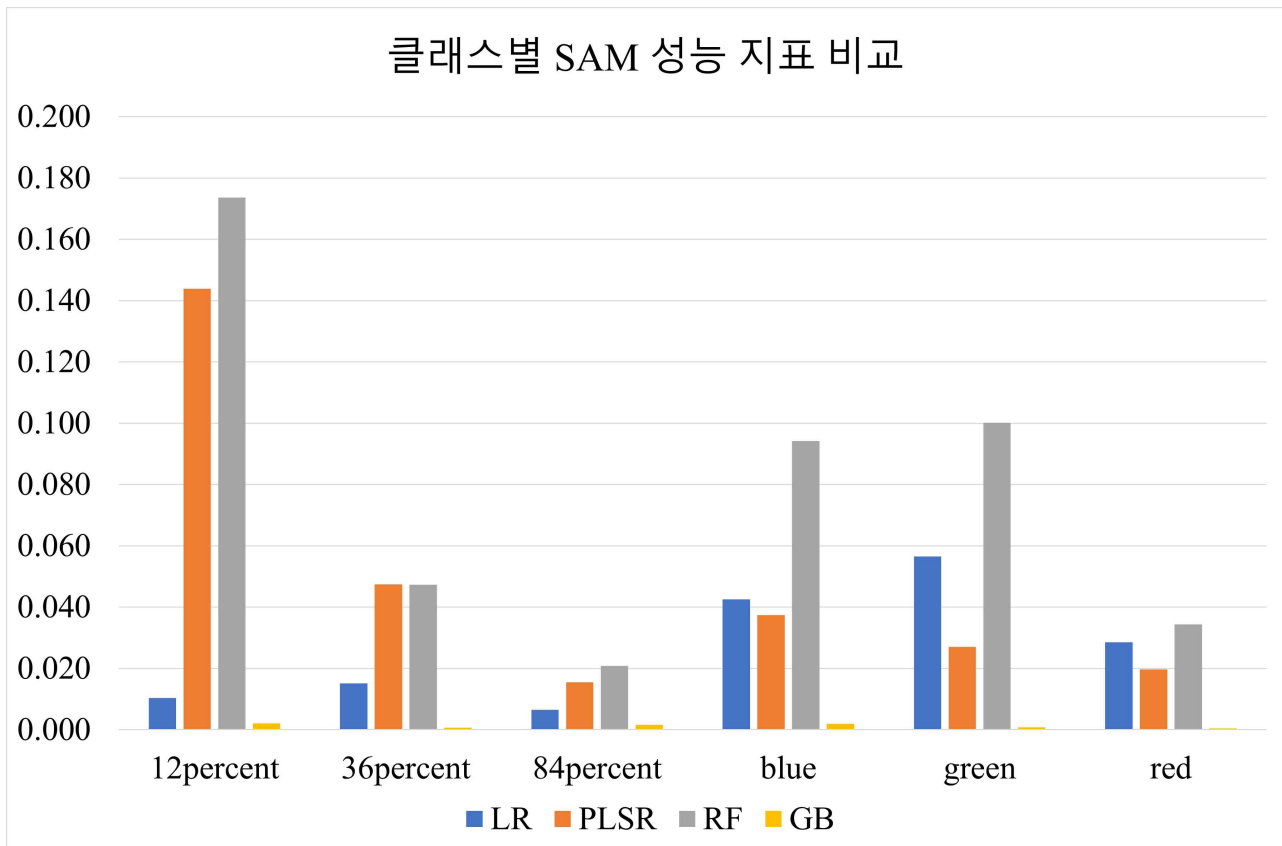


그림 13 클래스별(6개 지상표적타겟) 실측치 대비 분광 유사도 값 분포 비교(SAM 값 기준: 0에 가까울수록 스펙트럼 형태 유사도가 높았음을 의미)

- 표 5와 6에 모델별 1차 전반 성능 평가 결과를 제공함
- GB 모델이 모든 평가지표에서 우수한 성능을 기록함
 - 순차적 오차 보정 방식이 다양한 반사 특성을 가진 표적에 보편적으로 적합함을 보여줌
 - RMSE 0.002, MAE 0.001 결과는 타 모델 대비 25~77배 낮은 수준
 - R^2 및 EV 1에 가까운 값
 - MAPE 0.043% 및 SAM 0.003 rad. 값이 최소로 스펙트럼 형태와 절대 수치 예측이 탁월하였음
 - 전 표적 클래스에서 0.002 rad. 이하의 최소의 SAM 값 수준을 기록(가장 우수함)
 - 특히 Red(0.000), 36%(0.001), Green(0.001) 클래스에서 예측스펙트럼 제공에 탁월한 성능을 보였음
- PLSR은 선형 기반 모델 중 상대적 우수성 입증
 - RMSE(0.052)와 R^2 (0.930) 지표에서 LR 대비 우수
 - 차원 축소를 통한 다중공선성 해결 효과 확인됨
 - SAM(0.090) 값은 LR보다 높아 스펙트럼 형태 보존 측면에서는 제한적
 - PLSR은 유색 표적 클래스의 예측에 상대적 우수성 보였음
 - Green(0.027), Red(0.020), Blue(0.037) 클래스에서 LR 대비 우수한 SAM 성능
 - 그러나 12%(0.144) 클래스에서 취약점 보임

- LR은 단순 모델임에도 준수한 스펙트럼 유사도 성능
 - SAM(0.053 rad.)이 RF(0.099)와 PLSR(0.090)보다 우수하여 스펙트럼 형태 보존 능력이 상대적으로 효과적임을 입증
 - LR은 저반사율 표적 클래스에서 스펙트럼 형태 예측에 상대적 강점 보임
 - 12%(0.010), 84%(0.006) 등 저반사율 표적에서 PLSR, RF 대비 SAM 값 우수
 - 반면 Green(0.057) 클래스에서는 상대적 취약점 노출
 - 밴드별 독립 회귀 방식이 특정 반사율 범위에서 효과적으로 작동했음을 보여줌
- RF는 다른 모델 대비 제한적 성능
 - RMSE(0.077) 수준이 가장 높고, MAPE(26.418%)도 최고치로 정확도 한계 노출된 것으로 판단됨
 - 상대적으로 높은 SAM 값을 기록하고 있으며, 특히 12%(0.174), Green(0.100) 클래스에서 취약성이 확인됨
 - 병렬적으로 무작위 주입되는 트리 학습 구조의 RF가 이전 트리의 오차를 보정하는 방식으로 순차적 주입하는 학습구조의 GB보다 특정 스펙트럼 패턴 재현 측면에서 제한적일 수 있음을 보여줌
- 그림 14~17는 각 모델이 예측한 반사도 평균 스펙트럼과 실제 반사도 평균값을 비교한 그래프로, 6개 클래스에 대해 SAM 값을 함께 표기하여 작성되었으며, 표 5, 6 모델 성능을 시각적으로 증빙 및 확인하기 위해 제시됨
- 밴드 넘버에 대응하는 파장대역은 크게 3개 영역으로 구분됨
 - 가시광선 영역(Visible): B1~B95 (480~900nm)
 - 근적외선 영역(Near-Infrared): B96~B205 (900~1400nm)
 - 단파적외선 영역(Shortwave-Infrared): B206~B450 (1400~2500nm)
- 평가 지표인 SAM은 벡터 방향의 유사성만 고려하며, 벡터의 크기(스케일)에는 영향을 받지 않기 때문에, 0에 가까움이 지시하는 바는 전체 스펙트럼의 패턴이 거의 같은 방향, 즉, 형태의 일치에 가까움을 지시함
- 즉, 예측 벡터와 실측 벡터가 서로 모양은 비슷하지만 크기의 차이가 있는 경우 SAM은 낮고 RMSE 값은 큰 경우가 발생하며, SAM 지표값만으로 살펴볼 수 없었던 한계를 보완한 인사이트 제공이 가능함



그림 14 LR 모델 기반 6개 클래스 대상 평균 스펙트럼 비교(실측 vs. 예측): 위에서 아래로 왼쪽 열 12%, 36%, 84%; 오른쪽 열 Red, Green, Blue (3개 파장대역 구분됨: Visible(가시광)/Near-Infrared(근적외)/Shortwave-Infrared(단파적외))



그림 15 PLSR모델 기반 6개 클래스 대상 평균 스펙트럼 비교(실측 vs. 예측): 위에서 아래로 왼쪽 열 12%, 36%, 84%; 오른쪽 열 Red, Green, Blue (3개 파장대역 구분됨: Visible(가시광)/Near-Infrared(근적외)/Shortwave-Infrared(단파적외))



그림 16 RF 모델 기반 6개 클래스 대상 평균 스펙트럼 비교(실측 vs. 예측): 위에서 아래로 왼쪽 열 12%, 36%, 84%; 오른쪽 열 Red, Green, Blue (3개 파장대역 구분됨: Visible(가시광)/Near-Infrared(근적외)/Shortwave-Infrared(단파적외))



그림 17 GB 모델 기반 6개 클래스 대상 평균 스펙트럼 비교(실측 vs. 예측): 위에서 아래로 왼쪽 열 12%, 36%, 84%; 오른쪽 열 Red, Green, Blue (3개 파장대역 구분됨: Visible(가시광)/Near-Infrared(근적외)/Shortwave-Infrared(단파적외))

- GB 모델의 우수한 성능과 대응하여, 가시광-근적외-단파적외선 영역에 걸쳐 모든 표적 클래스의 예측 반사도 벡터 스펙트럼이 형태/크기 매우 일치성을 보이는 것이 확인됨
- LR 모델은 전반적으로 모든 클래스에서 다소 실측 스펙트럼과 유사한 형태를 유지하였으며, 벡터의 크기와 방향 모두 일정 수준 이상 정합 되는 양상이 확인됨
- 모든 클래스 비교하여, 상대적으로 SAM 값이 크게 나타나는 Green 클래스의 분광 예측 스펙트럼을 살펴보면, 가시광-근적외선-단파적외선 영역에서 스펙트럼 형태적 유사성이 나타나지만(낮은 SAM 값 수준), 벡터의 크기의 오차(RMSE)가 반영되어 반사도 값 수준을 과소 혹은 과대 추정하는 패턴의 모습이 확인됨
- PLSR모델의 예측 스펙트럼 벡터의 분포는 Red, Green, Blue 클래스에서 다소 우수한 예측 스펙트럼의 패턴이 나타나는 것이 확인되며, 상대적으로 12%와 36%에서 전 파장대 영역을 걸쳐 분광 형태/크기의 오차 및 불일치성의 패턴이 잘 확인됨
- RF는 모든 클래스 전반적으로 예측 반사도 스펙트럼의 형태와 크기에서 다른 모델 결과에 비해 오차로 인한 불일치가 전 파장대역을 걸쳐 존재하는 것이 확인됨
- 특히 12% 파장대역 전반에서 두드러지는 과대 추정의 오류가 두드러지는 것으로 확인됨
- 결과적으로 모델별 클래스에 따른 분광 정보 예측 정확도의 편차가 성능 지표에 대응적으로 잘 드러나는 것을 확인할 수 있으며, 1차 성능 지표의 비교를 통해 GB와 LR이 전반적인 유사 스펙트럼 예측 정보 제공에 있어 유용할 것으로 판단됨

표 7 구축 모델별 성능 비교 요약

모델	주요 특성	강점	약점	파장대별 성능	환경별 성능
GB	순차적 오차 보정	- 모든 반사율 범위 우수 - RMSE 0.002, SAM 0.003	계산 복잡도 높음	- 가시광선: 매우 우수 - 근적외선: 최우수 - 단파적외선: 유일 복원	모든 환경(저태양고도/남극) 안정적
RF	병렬 트리 앙상블	- Green, Red 클래스 우수 - RMSE 0.078	저반사율 과대 추정	- 가시광선: 양호 - 근적외선: 우수 - 단파적외선: 불안정	저태양고도/남극 환경 불안정
PLSR	차원 축소 회귀	- 유색 표적 우수 - RMSE 0.052	선형성 가정 한계	- 가시광선: 중간 - 근적외선: 중간 - 단파적외선: 취약	환경 간 변동성 큼
LR	밴드별 선형 회귀	- 저반사율 우수 - SAM 0.053	고반사율 포화현상	- 가시광선: 우수 - 근적외선: 중간 - 단파적외선: 취약	중위도/고태양고도 환경 양호

- 정리하면, GB 모델은 순차적 오차 보정 메커니즘으로 복잡한 비선형 대기-지표 상호작용을 효과적으로 포착함(평균 RMSE 0.031, SAM 0.071)
- 선형 모델(LR, PLSR)은 저반사율 표적(12%, 36%)에서는 효과적이거나, 환경 조건 변화(태양고도, 구름)에 민감하게 반응하여 성능 불안정성을 보이며, 특히 고반사율(84%) 영역에서 포화현상으로 RMSE 0.217까지 급증

- RF는 양상불 특성으로 중간 수준의 성능(RMSE 0.078)을 보이나, 희소 데이터 조건인 극지 환경에서 병렬 트리 구조의 특성상 불안정성을 보이며, 특히 저반사율 클래스에서 과대 추정 경향이 뚜렷함
- 파장대역별 모델 성능 분석 결과, 가시광선 영역에서는 모델 간 성능 차이가 적으나(LR, GB 모두 우수), 근적외선에서는 GB 우위, 단파적외선에서는 GB만 신뢰성 있는 정보 제공 가능함을 정량적으로 입증함
- 극지 환경(저태양고도, 높은 알베도) 조건에서는 GB 모델만이 안정적 성능을 유지하였으며, 이는 남극 데이터셋(KGL09/16)에서 특히 두드러져, 향후 극지 맞춤형 방사보정 모델 개발 시 GB 기반 알고리즘이 가장 적합함을 의미함
- 추후 각 모델별 예측 정확도에 영향을 미칠 수 있었던 환경별 요인이 무엇으로부터 기인하였는지, 각 데이터셋의 추가/제외의 반복적-기본 모델 성능 비교를 통해, 실제 어떤 환경 요인이 예측에 있어 가장 민감하게 영향력을 발휘하였는지에 대한 검토가 요구됨

2.2. 방사 보정 알고리즘 검증

- 앞서 1차 성능 지표의 결과는 학습 데이터에 활용된 자료의 평균값을 가지고 산출한 평가 결과이기 때문에, 성능 지표값의 과대 평가 가능성이 높음
- 따라서 각 구축 모델을 통한 방사 보정 알고리즘이 실제 임의의 방사휘도 영상을 획득하였을 때, 실질적인 활용 가능성의 검증이 매우 요구됨
- ‘검증용_1’ 데이터셋에 각 모델을 적용하여 획득한 예측 반사도 영상 내 6개 지상 표적(Class)의 반사도 추정값의 실측 반사도 대비 예측의 우수성을 모델 알고리즘별로 성능 평가 수행한 결과를 표 7에 정리 제공함
- GB의 경우 모델을 적용한 예측 반사도 영상의 스펙트럼 잡음을 줄이기 위해 12 width kernel filter로 스펙트럼 스무딩 처리 후 진행하여 결과에 활용함
- 정량적 성능 지표는 1차 모델 성능 지표와 동일한 지표값으로 평가함

표 8 구축한 4개 방사 보정 알고리즘 모델 검증 결과(‘검증용_1’ 데이터셋 기준 반사도 변환 결과 성능 평가)

Model	Class	RMSE	MAE	MAPE (%)	SAM (rad)
LR	12percent	0.016	0.013	10.475	0.121
LR	36percent	0.020	0.017	5.381	0.050
LR	84percent	0.217	0.206	33.608	0.100
LR	Blue	0.071	0.067	41.727	0.105
LR	Green	0.095	0.084	36.769	0.225
LR	Red	0.126	0.097	24.331	0.185
Average		0.091	0.081	25.382	0.131
PLSR	12percent	0.076	0.060	50.661	0.274
PLSR	36percent	0.128	0.112	31.605	0.111

PLSR	84percent	0.221	0.203	33,318	0.123
PLSR	Blue	0.151	0.137	78,866	0.084
PLSR	Green	0.127	0.094	53,853	0.266
PLSR	Red	0.266	0.257	104,014	0.124
Average		0.162	0.144	58,719	0.164
RF	12percent	0.124	0.107	91,129	0.281
RF	36percent	0.148	0.138	40,077	0.078
RF	84percent	0.060	0.055	8,121	0.022
RF	Blue	0.079	0.068	46,002	0.132
RF	Green	0.030	0.026	11,500	0.075
RF	Red	0.026	0.022	13,705	0.039
Average		0.078	0.070	35,089	0.105
GB_smooth	12percent	0.051	0.042	35,925	0.183
GB_smooth	36percent	0.046	0.031	9,629	0.102
GB_smooth	84percent	0.016	0.014	2,250	0.016
GB_smooth	Blue	0.022	0.018	15,099	0.053
GB_smooth	Green	0.026	0.023	7,040	0.032
GB_smooth	Red	0.022	0.017	11,768	0.037
Average		0.031	0.024	13,618	0.071





그림 18 LR, PLSR, RF, GB 보정 알고리즘 6개 클래스 대상 평균 스펙트럼 비교(실측 vs. 예측): 위에서 아래로 왼쪽 열 12%, 36%, 84%;
오른쪽 열 Red, Blue, Green (3개 파장대역 구분됨: Visible(가시광)/Near-Infrared(근적외)/Shortwave-Infrared(단파적외))

○ GB 알고리즘 모델 검증 결과

- 평균 RMSE 0.031, MAE 0.024, MAPE 13.618%, SAM 0.071으로 전체 알고리즘 중 최우수 성능을 보여줌
- 84% 반사도 클래스에서 RMSE 0.016, MAPE 2.250%, SAM 0.016 수준으로 우수한 정확도 제공함
- 모든 분광 밴드에서 RMSE 0.026 이하 MAPE 15.099% 이하로 안정적 성능 유지함
- 스펙트럼 그래프에서 실측 스펙트럼의 흡수/반사 패턴이 전반적으로 모든 클래스의 단파적외선에서 정밀하게 재현되는 성능 보임
- 12%, 36% 반사도 클래스(낮은 반사도 지표면 환경)에서 LR 모델보다 높은 RMSE 기록하였으며, 스펙트럼 형태/크기 유사성에서도 부분적 한계 확인됨

○ RF 알고리즘 모델 검증 결과

- RMSE 0.078, MAE 0.070, MAPE 35.089%, SAM 0.105 rad으로 GB_smooth 다음 성능 우수성 제공함
- Green 클래스(RMSE 0.030)와 Red 클래스(RMSE 0.026)에서 우수한 성능보였으며, NIR 영역에서 반사도 형태/크기를 가장 정확하게 추정하는 것으로 판단됨
- 84% 반사도 클래스에서 RMSE 0.060, MAPE 8.121%, SAM 0.022으로 GB 다음으로 우수한 정확도 제공하였으나, 12%, 36% 반사도 클래스에서는 RMSE 0.124~0.148로 높은 상대적 오차 보임
- 12%, 36% 반사도 클래스 스펙트럼 형태/크기 유사성에서도 한계 확인됨
- 평균적으로는 GB 다음으로 우수한 정확성이 나타났으나, 클래스별 성능 편차는 다소 GB에 비해 크게 나타나는 불안정성 확인됨

○ LR 알고리즘 모델 검증 결과

- 평균 RMSE 0.091, MAE 0.081, MAPE 25.382%, SAM 0.131으로 중간 수준의 성능이 나타남
- 12% 반사도 클래스에서 RMSE 0.016, MAE 0.013으로 가장 우수한 성능 보였음
- 36% 반사도 클래스에서도 MAPE 5.381%로 매우 낮은 상대 오차 성능 보임
- 84% 반사도 클래스에서는 RMSE 0.217, MAPE 33.608%로 성능 급격히 저하를 보임
- 84% 반사도 클래스의 예측 스펙트럼은 1~250 밴드넘버 영역(가시광-근적외-단파적외선 영역)에서 전형적인 Saturation 패턴 보임
- 그 외 다소 전반 클래스의 가시광 영역에서는 양호한 예측 스펙트럼 추정 성능을 보였으나, 전반적으로 근적외-단파적외선(NIR/SWIR) 영역에서 형태/크기가 GB에 상대적으로 불안정함

○ PLSR 알고리즘 모델 검증 결과

- 평균 RMSE 0.162, MAE 0.144, MAPE 58.719%, SAM 0.164으로 가장 저조한 성능 보임
- Red와 Blue 클래스에서 MAPE 104.014%, MAPE 78.866%로 저조한 성능 두드러짐
- 스펙트럼 예측 반사도 대부분 클래스에서 과대 추정 경향 뚜렷하게 나타남

- 84% 및 Red 클래스의 가시광-근적외 영역에서 LR과 마찬가지로 전형적인 Saturation 패턴 확인됨
- SAM 평균값이 4개 모델 중 가장 높으며, 스펙트럼 예측 분포의 형태 정합도에서도 취약성이 나타남
- 공통적으로 선형 모델인 LR과 PLSR 모델에서 낮은 반사도 영역에서 상대적으로 더 우수한 반사도 예측 성능을 보였으나, 84% 영역에서 Saturation에 의한 오류로 정확도 저하되는 현상이 확인되었으며, 앙상블 비모수 모델 접근방법 기반의 GB와 RF는 반대로 낮은 반사도 영역 12%, 36%에서 한계가 나타나는 양상이 확인됨
- 전반적으로 검증 평가에서는 1차 성능 모델 비교 평가 결과와 비교하여, 앙상블 모델인 GB와 RF에서 안정성을 보였으며, GB 모델 알고리즘의 방사 보정을 통한 반사도 개선의 안정성이 가장 높은 것으로 판단됨

2.3. 요약 및 정리

- 본 연구개발은 다양한 극지 및 중위도 환경에서 수집된 무인기 초분광 영상자료를 바탕으로, 지상 표적 없이도 안정적인 지표 반사도 추정이 가능한 방사 보정 알고리즘의 구조적 타당성과 실제 적용 가능성을 실증하는 데 목적을 두고 있음
- 본 연구개발은 모델의 일반화보다, 회귀 기반 방사 보정 구조의 실질적 타당성과 적용 가능성에 초점을 두었으며, 이는 기존 전통적 방사 보정 접근과의 명확한 차별점을 지님
- 총 4종의 회귀 모델(LR, PLSR, RF, GB)을 동일한 데이터셋 기반으로 학습하고, 다양한 정량 지표(RMSE, MAE, MAPE, R^2 , SAM 등)와 스펙트럼 유사도 비교를 통해 모델별 방사 보정 성능을 다각도로 평가함
- GB 모델은 가장 높은 정확도와 스펙트럼 유사성을 확보하며, 비선형 회귀 기반 자동화 방사 보정 알고리즘의 가능성을 입증함
- 특히 본 연구는 전통적으로 'Bad Band'로 간주되던 SWIR 파장 영역(1400nm, 1900nm 포함)까지 정밀한 반사도 예측에 성공하며, VNIR - SWIR 전 대역에 걸친 초분광 방사 보정의 실질 적용 가능성을 보여주었음 (Hennessy et al., 2020; Griffin and Burke, 2003)

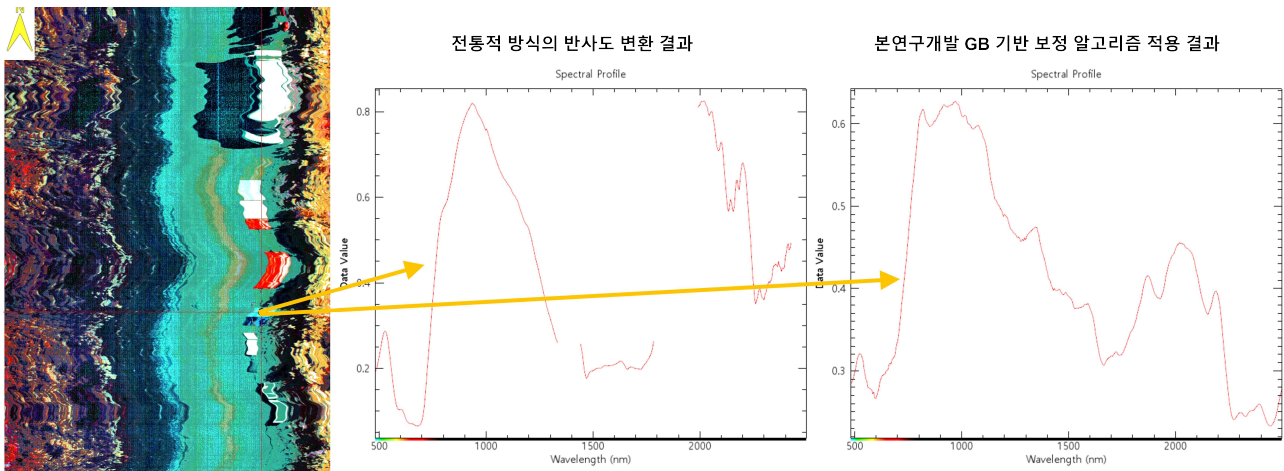


그림 19 2022.08.22, Alaska 영상자료 기반 전통적 방식의 반사도 변환 결과(~1400, 1900nm 영역 대기 영향으로 인한 Bad bands로써 정보 유실) 및 GB 보정 알고리즘 적용 결과 반사도 정보(SWIR 전구간 분광 정보 예측 복원) 비교 예시

- 이는 극지와 같이 현장 제약이 큰 환경에서도 지표 반사도 데이터의 자동화 생산 기반을 제공하며, 복잡한 분광 반응을 포함하는 극지·오지 환경에서의 실질적인 활용 가능성을 확인한 중요한 성과로 평가될 수 있음
- 종합적으로 본 연구의 과학적·기술적 기여는 다음과 같음:
 - 지상 표적 미설치 기반 방사 보정 기술 검증: 극지·오지 지역의 무인기 원격탐사에서 경제적·운영적 제약을 획기적으로 감소시킬 수 있음
 - SWIR 대역 포함 전체 분광 범위 활용 가능성 실증: 2500nm 까지 포함된 고해상도 스펙트럼 데이터 보정 가능성을 확보
 - 다중 환경 요소에 대한 보정 안정성 확보: 다양한 태양고도, 비행조건, 일사조건 변화 속에서도 보정 성능 유지
 - 회귀 모델 기반 방사 보정 알고리즘의 실용적 비교 평가: 전통적 선형 회귀부터 비모수 기반 비선형 모델까지 포괄적으로 성능 검증
- 향후 연구에서는 더 다양한 환경 케이스와 파장 민감도에 대응 가능한 훈련데이터의 확보, 딥러닝 기반 예측 알고리즘 도입, 비행/태양 조건에 따른 범용적 적용을 위한 보정식 구축이 필요할 것으로 판단:
 - 범용 모델 개발을 위한 신규 환경 추가 데이터셋 확장(규모): 최소 20개 환경 조건 포함 필요함
 - 태양고도 15°~70°(저/중/고), 구름(맑음/부분/흐림), 기온(저/중/고) 및 비행고도 30~150m 균등 포함하는 샘플링 설계 요구됨
- 결과적으로, 본 연구개발은 무인기 초분광 방사 보정 기술의 표준화 가능성과 고비용 구조 극복을 위한 자동화 기술 기반 정립에 핵심적인 기술 자료를 제공할 수 있으며, 향후 극지 환경을 포함한 글로벌 수준의 초분광 관측 기반 고정확도 보정 시스템 구현에 기여할 수 있는 선도적 연구성과로서 의의가 크다고 할 수 있음

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도

표 9 연구개발목표 달성도

구분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위	연구 비중 (%)	달성도 (%)
1차년도 (2024-2025)	○ 무인기 초분광 센서 기반 촬영 영상자료 수집 ○ 영상처리를 통한 지표 반사도 획득 ○ 방사적 평가 수행	- 극지-국내 비행 환경 조건별 영상자료 수집	30	100
		- 기하보정 및 반사도 보정 처리	30	100
		- 밴드별(파장대별) 통계분석	30	100
		- 신규 KPDC 자료 등록(붙임참고)	10	100

제 2 절 대외기여도

- 국내 최초로 극지 환경에 적용 가능한 방사 보정을 통한 반사도 영상자료 획득을 위한 평가를 진행함으로써 추후 다양한 극지역을 중심으로 획득된 초분광 무인기 탐사 자료 사용에 적용할 수 있는 근본적인 기술 자료로써 활용 기여할 것으로 기대함
- 본 연구개발단계는 개념 및 기초 정립을 위한 자료획득 및 실험적-통계적 관계 평가로써, 추후 추가적인 환경 요인들이 반영된 자료가 누적되어, 다양한 환경 반영할 수 있는 범용적 무인기 초분광 반사도 변환 알고리즘을 개발하여 국내외 선진 기술력을 확보하는 데 기여할 것으로 기대함
- 본 연구개발을 기반으로 추후 기술 고도화 및 안정화 이룩 시, 국내 유일의 무인기 초분광 활용 가능 과학연구기관으로써 타부처 연구개발사업에 적극 참여할 수 있는 역량을 보유하는 데 기여할 것으로 기대함

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 기대성과

1. 기술적 측면

- 극지 무인기 초분광 자료 대상 지상 표적 의존 없는 반사도 정보 추출 모델 개발을 위한 기초 자료 확보
- 기존 사례로부터 주로 다루어졌었던 가시광-근적외선 영역뿐만 아니라, 단파적외선 영역에서의 안정적인 반사도 정보획득 가능성 기회 창출
- 지질, 식생, 농업, 해양, 토양, 생태 등 자연과학 분야 전반에 적용할 수 있는 기초 기술력 확보
- 인공위성-항공 플랫폼 획득 자료 대상 초분광 방사적 검보정 활용 가능성 평가 기회 창출
- 극지 맞춤형 및 범용적 반사도 보정 모델-알고리즘 개발 가능성 기회 창출

2. 경제 산업적 측면

- 현장 조사 시 저비용 대비 고효율성의 무인기 활용 효과 극대화 제공
- 국내 무인기 초분광 탐사 활용도 증대를 위한 부가가치 창출 유도
- 기술이전을 통한 무인기 탐사 관련 산업 발전 기여

제 2 절 활용방안

1. 극지환경 맞춤형 무인기 초분광 지표 반사도 보정 모델 개발

- 그린란드 대륙빙하 용융 지역 일대 지질-자원-토양-식생-퇴적물 등 육상환경변화 모니터링 활용
- 남극세종기지 바톤 반도 지표 환경 변화 관측 활용
- 북극다산기지, 알래스카, 캐나다 북서부 일대 지표 환경 변화 관측 활용

2. 범용적 무인기 초분광 지표 반사도 보정 모델 개발

- 데이터 누적을 통한 극지역-중저위도 지역 상호 호환 가능 유니버설 반사도 보정 모델 개발을 위한 후속 연구의 원천기술로 활용

3. 무인기 현장 탐사의 저비용 대비 고효율성 효과 극대화

- 극지방 현장 포인트 기반 조사를 위해 기존에 투입되던 인력, 비용, 시간 대비 넓은 영역의

지표 탐사 맵핑 주제도 제작 지원에 활용

- 거점 연구 지역(예: 세종과학기지, 그린란드) 대상 현장 무인비행관제시스템 구축을 통해 (예: DJI DOCK2/3) 비행에 적합한 환경에서 무인화된 자동 비행을 수행하고, 웹서버 클라우드 전송 자료에 전처리 자동화 시스템을 탑재하여, 장기간의 자료를 누적함으로써 고정밀 시계열적 지표 특성 변화 분석의 연구개발에 활용
- 무인기 초분광 자료를 실측값으로 PRISAM, Hyperion, Hymap, Landsat, Sentinel, ASTER 등등 위성자료와의 분광학적 연계를 통한 공간적 맵핑 영역 확장에 활용

4. 논문/특허 등록 및 기술이전을 통한 무인기 산업 발전 기여

- 극지 초분광 무인기 탐사 기술력의 선제적 점유 확보를 통해, 국내 주요 무인기 활용 산업 분야에 극한 환경 지역 전용 무인기체 및 센서 개발의 관심을 유도하여, 신규 사업화 시장의 관심 증진 유도를 위한 레퍼런스로 활용



제 6 장 참고문헌

1. Jeong, Y., Yu, J., Wang, L., & Shin, J. H. (2018). Spectral responses of As and Pb contamination in tailings of a hydrothermal ore deposit: A case study of Samgwang mine, South Korea. *Remote Sensing*, 10(11), 1830.
2. Jeong, Y., Yu, J., Koh, S. M., Heo, C. H., & Lee, J. (2016). Spectral characteristics of minerals associated with skarn deposits: a case study of Weondong skarn deposit, South Korea. *Geosciences Journal*, 20, 167-182.
3. Köppl, C. J., Malureanu, R., Dam-Hansen, C., Wang, S., Jin, H., Barchiesi, S., ... & Garcia, M. (2021). Hyperspectral reflectance measurements from UAS under intermittent clouds: Correcting irradiance measurements for sensor tilt. *Remote Sensing of Environment*, 267, 112719.
4. Banerjee, B. P., Raval, S., & Cullen, P. J. (2020). UAV-hyperspectral imaging of spectrally complex environments. *International Journal of Remote Sensing*, 41(11), 4136-4159.
5. Crusiol, L. G. T., Sun, L., Sun, Z., Chen, R., Wu, Y., Ma, J., & Song, C. (2022). In-season monitoring of maize leaf water content using ground-based and UAV-based hyperspectral data. *Sustainability*, 14(15), 9039.
6. Hakala, T., Markelin, L., Honkavaara, E., Scott, B., Theocharous, T., Nevalainen, O., ... & Fox, N. (2018). Direct reflectance measurements from drones: Sensor absolute radiometric calibration and system tests for forest reflectance characterization. *Sensors*, 18(5), 1417.
7. Suomalainen, J., Oliveira, R. A., Hakala, T., Koivumäki, N., Markelin, L., Näsi, R., & Honkavaara, E. (2021). Direct reflectance transformation methodology for drone-based hyperspectral imaging. *Remote Sensing of Environment*, 266, 112691.
8. Oliveira, R. A., Näsi, R., Korhonen, P., Mustonen, A., Niemeläinen, O., Koivumäki, N., ... & Honkavaara, E. (2024a). High-precision estimation of grass quality and quantity using UAS-based VNIR and SWIR hyperspectral cameras and machine learning. *Precision Agriculture*, 25(1), 186-220.
9. Oliveira, K. M., Gonçalves, J. V. F., Falcioni, R., de Oliveira, C. A., da Silva Haubert, D. D. F., Mendonça, W. A., ... & Nanni, M. R. (2024b). Classification of soil horizons based on VisNIR and SWIR hyperspectral images and machine learning models. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 36, 101362.
10. Oliveira, K. M. D., Gonçalves, J. V. F., Furlanetto, R. H., Oliveira, C. A. D., Mendonça,

- W. A., Haubert, D. D. F. D. S., ... & Nanni, M. R. (2024c). Predicting particle size and soil organic carbon of soil profiles using VIS-NIR-SWIR hyperspectral imaging and machine learning models. *Remote Sensing*, 16(16), 2869.
11. Garzonio, R., Di Mauro, B., Colombo, R., & Cogliati, S. (2017). Surface reflectance and sun-induced fluorescence spectroscopy measurements using a small hyperspectral UAS. *Remote Sensing*, 9(5), 472.
 12. Lim, J., Yu, J., Wang, L., Jeong, Y., & Shin, J. H. (2019). Heavy metal contamination index using spectral variables for white precipitates induced by acid mine drainage: A case study of Soro Creek, South Korea. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(7), 4870-4888.
 13. Hennessy, A., Clarke, K., & Lewis, M. (2020). Hyperspectral classification of plants: A review of waveband selection generalisability. *Remote Sensing*, 12(1), 113.
 14. Griffin, M. K., & Burke, H. H. K. (2003). Compensation of hyperspectral data for atmospheric effects. *Lincoln laboratory journal*, 14(1), 29-54.



부록(붙임: 신규 KPDC 자료 등록)

연번	제목	ID	파일명	파일크기
1	Preprocessed Hyperspectral UAV Imagery for Radiometric Correction in Polar Environments	KOPRI-KPDC -00002792	01_KOPRI_UAV_hyperspectral_data_20220822_alaska_noise_removal	2.55 Gb
			01_KOPRI_UAV_hyperspectral_data_20220822_alaska_noise_removal.hdr	29.64 Kb
			02_KOPRI_UAV_hyperspectral_data_20221024_KOPRI_noise_removal	3.12 Gb
			02_KOPRI_UAV_hyperspectral_data_20221024_KOPRI_noise_removal.hdr	29.19 Kb
			03_KOPRI_UAV_hyperspectral_data_20240203_KGL09_noise_removal	603.65 Mb
			03_KOPRI_UAV_hyperspectral_data_20240203_KGL09_noise_removal.hdr	28.74 Kb
			04_KOPRI_UAV_hyperspectral_data_20240207_KGL16_noise_removal	4.61 Gb
			04_KOPRI_UAV_hyperspectral_data_20240207_KGL16_noise_removal.hdr	23.12 Kb
			05_KOPRI_UAV_hyperspectral_data_20240711_KOPRI_noise_removal	749.95 Mb
			05_KOPRI_UAV_hyperspectral_data_20240711_KOPRI_noise_removal.hdr	4.46 Mb

2) UAV-based Hyperspectral Imaging surface survey in Polar regions	내 내장소프트웨어 평가
2) Test Acquisition of UAV-based Hyperspectral Imagery for Radiometric Calibration in Ground Surface Exploration	데이터 공유 시스템 검토
	데이터 분석확장서 평가
	정보서

Entry ID

Science Keyword
EARTH SCIENCE > SPECTRAL/ENGINEERING > INFRARED WAVELENGTHS > INFRARED IMAGING

ISO Topic
Imagery/Basic Maps/Earth Cover

Personnel
Yongsik Jeong (yongsik@copr.nesr.go.kr)

Project
P20230701_00321 영남권기초환경지리정보서비스도량형도정확도향상을위한영남권영토정보조사사업

Research period
2022-08-22 - 2022-08-22
2022-10-24 - 2022-10-24
2024-02-03 - 2024-02-03

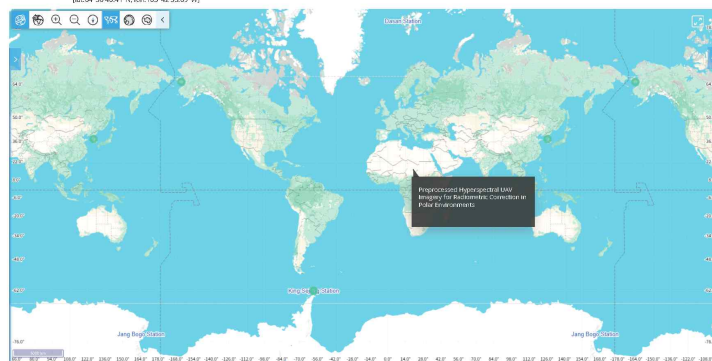
2024-02-07 - 2024-02-07

Location

CONTINENT > NORTH AMERICA > UNITED STATES OF AMERICA > ALASKA > coastal
CONTINENT > ANTARCTICA > ANTARCTIC PENINSULA > RIGL
CONTINENT > ASIA > EASTERN ASIA > SOUTH KOREA > Incheon

Citation
이 보고서(보류)는 국지연구소에서 수행한 연구사건 #245200에서 획득된 데이터(KCPRI-KSPC-00002750)가 사용되었습니다.

Spatial Coverage : [lat:37°22'1.18"N, lon:126°38'44.44"E]
[lat:62°13'13.32"S, lon:58°46'24.44"W]
[lat:62°13'27.22"S, lon:58°47'15.41"W]
[lat:64°50'40.41"N, lon:163°42'35.09"E]

[illegible]

데이터 공유를 신청하시고 승인이 완료되면 데이터 파일을 다운로드 할 수 있습니다.



뒷 면

주 의

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