

극지 분광라이브러리 구축을 위한
초분광원격탐사자료 획득 프로토콜 개발 연구
Development of hyperspectral remote sensing data
acquisition protocol for polar spectral library



한국해양과학기술원
부설극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “극지 분광라이브리리 구축을 위한 초분광원격탐사자료 획득 프로토콜 개발 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 12. 31

연구책임자 : 지준화



보고서 초록

과제관리번호	BSPE16410-132-13	해당단계 연구기간	2016.11.1 ~ 2017.10.31	단계 구분	(1단계)/(총1단계)
연구사업명	중 사업명				
	세부사업명	기본연구사업(신진연구자)			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	극지 분광라이브러리 구축을 위한 초분광원격탐사자료 획득 프로토콜 개발 연구			
연구책임자	지 준 화	해당단계 참여연구원수	총 : 1 명 내부 : 1 명 외부 : 0 명	해당단계 연구비	정부: 30,000 천원 기업: 천원 계: 30,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설 극지연구 구조 북극해빙예측사업단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
					34
<p>○ 연구개발의 목적 및 필요성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 목적: 향후 극지 분광라이브러리 구축을 위한 기반 기술 확보 - 필요성: 아직 개발되지 않은 극지 분광라이브러리를 구축하기 위한 분광정보 획득 및 전처리 프로토콜을 개발함으로써 향후 극지 분광라이브러리 구축의 표준을 마련하여 관련 연구를 선도 <p>○ 연구개발의 내용 및 범위</p> <ul style="list-style-type: none"> - 기존 분광라이브러리 구축 방법 및 극지역 사례 조사 - 지상 초분광영상 획득 및 전처리 방법 연구 - 초분광영상으로부터 분광정보 추출 및 정량적 분석 기법 연구 - 분광라이브러리와 초소형 분광측정기를 이용한 자동 분류 활용법 연구 <p>○ 연구개발결과</p> <ul style="list-style-type: none"> - 초분광 카메라를 이용하여 초분광영상 획득 프로토콜 정의 - 초분광영상 촬영 조건에 따른 다중 분광타겟과 대리보정 기법을 이용한 분광차이 보정 기법 개발 - 초소형 분광측정기를 이용한 분광라이브러리 구축 및 이를 활용한 자동 분류 기법 및 정확도 산출 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	원격탐사, 초분광영상, 분광라이브러리, 분광반사측정기, 분광학			
	영 어	Remote sensing, Hyperspectral image, Spectral library, Spectrometer, Spectroscopy			

요 약 문

I. 제 목

- 극지 분광라이브리리 구축을 위한 초분광원격탐사자료 획득 프로토콜 개발 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 목적

- 지상 초분광카메라를 이용한 초분광영상 획득 및 전처리 프로토콜을 개발함에 따라 향후 극지 분광라이브리리 구축을 위한 기반 기술 확보
- 초소형 분광반사측정기를 이용하여 구축된 분광라이브리리를 이용하여 현장조사에서 획득되는 분광정보에 대한 자동 분류 적용 가능성 검토

2. 필요성

- 광학원격탐사자료의 과학적 활용을 위해서는 위성 또는 항공기에서 원격탐사 자료를 획득과 거의 동시에 현장조사가 수반되어야 하나 극지역에서는 접근이 힘들고 비용이 크다는 한계점이 있음.
- 분광라이브리리는 이러한 현장조사의 한계점을 보완하여 광학원격탐사자료의 품질 향상 및 과학적 현상에 대한 이해에 큰 도움을 줌.
- 원격탐사 선진국인 미국을 중심으로 개발된 분광라이브리리는 중위도지역을 중심으로 구축되어 극지역 환경특성에 맞지 않음.
- 다수의 극지 원격탐사 연구그룹에서 극지 분광라이브리리의 필요성은 인지하나 본격적으로 시도되지 않음.
- 분광정보를 획득할 수 있는 여러 측정 장비 중 지상 초분광카메라를 이용하여 분광정보 획득 및 전처리에 대한 프로토콜을 개발함으로써 향후 극지 분광라이브리리 구축의 표준을 마련하고 관련 연구를 선도할 수 있음.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 기존 분광라이브리리 구축 방법 및 극지역 사례 조사
- 지상 초분광영상 획득 및 전처리 방법 연구
- 초분광영상으로부터 분광정보 추출 및 정량적 분석 기법 연구

- 분광라이브러리와 초소형 분광반사 측정기를 이용한 분광정보 자동 분류기법 연구

IV. 연구개발결과

- 지상 초분광카메라를 이용하여 초분광영상 획득 및 전처리 방법에 대한 프로토콜 제시를 통해, 초분광영상으로부터 정확한 분광신호값을 획득하는 방법을 제시
- 이를 이용하여 영상 기반 분광라이브러리 구축의 토대를 마련함
- 휴대용 분광반사측정기를 이용해 극지 식생, 암석에 대한 샘플 분광라이브러리를 구축하였고, 이를 이용하여 종 분류 가능성을 확인
- 향후 실제 연구 및 현장조사에서 분광라이브러리의 활용 가능성을 확인

V. 연구개발결과의 활용계획

- 향후 해빙, 지질, 식생에 대한 초분광영상 분석 연구에 활용
- 해빙의 종류, 암석/운석의 종류, 식생의 종류 및 환경인자에 따른 분광반사도에 관한 분광측정을 통해 극지 분광라이브러리 구축 및 관련 연구에 활용

극지연구소

S U M M A R Y

I. Subject

- Development of hyperspectral remote sensing data acquisition protocol for polar spectral library

II. Objectives and Necessities

1. Objectives

- To develop a protocol for polar spectral library using a terrestrial hyperspectral images.
- To assess a possibility of a spectral library developed using a small spectrometer in practice

2. Necessities

- To utilize optical remote sensing data for scientific purposes, field campaigns are required to evaluate the remote sensing data. However, the field campaigns are limited in the Polar regions due to high cost.
- Spectral library remedy this limitation and is used to improve data quality and plays an important role in data analysis.
- Spectral libraries were developed by some remote sensing research groups, but they are not suitable to the Polar regions.
- Many remote sensing researchers or groups know the importance of the Polar spectral library, but have not attempted yet.
- By developing a protocol for the Polar spectral library in this study, KOPRI can propose a standard and lead the related work in the future.

III. Contents and Scopes

- Literature reviews of the existing spectral libraries
- Development of hyperspectral image acquisitions using a terrestrial hyperspectral sensor and preprocessing techniques
- Extraction of the robust spectral information from hyperspectral images
- Study on automatic classification using spectral library and a small spectrometer

IV. Results

- Proposed a protocol of hyperspectral data acquisition and a vicarious calibration method for the extraction of the robust spectral signatures.
- Established the foundation of the Polar spectral library using hyperspectral images.
- Developed a sample spectral library using vegetation and rocks and evaluated the classification performance of the spectral library.
- Confirmed future possibility of applications of the spectral library in practice (e.g., fieldwork)

V. Application Plans

- Utilize hyperspectral remote sensing data to analyze characteristics of sea ice, vegetation and geology features.
- Measure spectral reflectances of various types of sea ice, rocks, meteorites and vegetation and extract spectral features related to environmental factors such as temperature, humidity, etc.



C O N T E N T S

Cover	I
Abstract	II
Summary (Korean)	III
Summary	V
Contents	VII
Contents (Korean)	IX
Chapter 1 Introduction	1
Section 1 Objectives	1
Section 2 Necessity	1
1. Technical necessity	2
2. Economic/Industrial necessity	2
3. Scientific necessity	2
Section 3 Contents and Scope	3
Chapter 2 Literature Review	4
Section 1 Spectral library in remote sensing research	4
Section 2 Polar spectral library	4
Chapter 3 Contents and Results	5
Section 1 Hyperspectral Remote Sensing and Spectral Library	5
1. Hyperspectral remote sensing	5
2. Spectral reflectance	7
3. Spectral library	8
4. Sensors for spectral library	9
Section 2 Development of a Protocol for Hyperspectral Data Acquisition	10
1. Configuration of imaging system	10
2. Raw hyperspectral data	11
3. Vicarious calibration	13
4. Experimental results	17
Section 3 Classification Performance of Spectral Library	22
1. Hand-Held spectrometer	22

2. Experimental design and results	23
Chapter 4 Achievements and Contributions	28
Section 1 Achievements	28
Section 2 Contributions	29
Chapter 5 Future Plans	30
Chapter 6 References	32



목 차

제출문	I
보고서 초록	II
요약문	III
영문요약문	V
영문목차	VII
목차	IX
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구개발의 목적	1
제 2 절 연구개발의 필요성	1
1. 기술적 필요성	2
2. 경제·산업적 필요성	2
3. 과학적 필요성	2
제 3 절 연구의 내용 및 범위	3
제 2 장 국내외 연구개발 현황	4
제 1 절 국내외 분광라이브러리 구축 사례	4
제 2 절 극지 분광라이브러리 구축 사례	4
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과	5
제 1 절 초분광 원격탐사 및 분광라이브러리	5
1. 초분광 원격탐사	5
2. 분광반사도	7
3. 분광라이브러리	8
4. 분광라이브러리 구축을 위한 분광센서	9
제 2 절 지상 초분광영상 획득 프로토콜 개발	10
1. 초분광영상 획득을 위한 스테이지 구성	10
2. 초기 획득 초분광영상	11
3. 대리보정	13
4. 실험결과	17
제 3 절 분광라이브러리를 이용한 분광정보 자동 분류기법 연구	22
1. 휴대용 분광반사 측정기	22

2. 실험 방법 및 결과.....	23
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도.....	28
제 1 절 목표달성도.....	28
제 2 절 관련분야에의 기여도.....	29
제 5 장 연구개발 결과 활용 계획.....	30
제 6 장 참고문헌.....	32



제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 목적

- 가. 지상 초분광카메라를 이용한 초분광영상 획득 및 전처리 프로토콜을 개발함에 따라 향후 극지 분광라이브러리 구축을 위한 기반 기술 확보.
- 나. 초소형 분광반사측정기를 이용하여 구축된 분광라이브를 이용하여 현장조사에서 획득되는 분광정보에 대한 자동 분류 적용 가능성 검토.

제 2 절 연구개발의 필요성

- 광학원격탐사자료의 과학적 활용을 위해서는 위성 또는 항공기에서 원격탐사자료를 획득과 거의 동시에 현장조사가 수반되어야 하나 극지역에서는 접근이 힘들고 비용이 크다는 한계점이 있음.
- 분광라이브러리¹는 이러한 현장조사의 한계점을 보완하여 광학원격탐사자료의 품질 향상 및 과학적 현상에 대한 이해에 큰 도움을 줌.
- 원격탐사 선진국인 미국을 중심으로 개발된 분광라이브러리는 중위도지역을 중심으로 구축되어 극지역 환경특성에 맞지 않음.
- 다수의 극지 원격탐사 연구그룹에서 극지 분광라이브러리의 필요성은 인지하나 본격적으로 시도되지 않음.
- 분광정보를 획득할 수 있는 여러 측정 장비 중 지상 초분광카메라를 이용하여 분광정보 획득 및 전처리에 대한 프로토콜을 개발함으로써 향후 극지 분광라이브러리 구축의 표준을 마련하고 관련 연구를 선도할 수 있음.

¹지상에 존재하는 모든 사물에는 사물마다 고유한 분광특성이 존재하며, 특정 과정대에서의 흡수특징들은 생물/물리/화학적인 현상과 깊은 연관이 있음. 분광라이브러리는 이러한 사물에 대한 고유한 분광특성과 흡수특징들을 측정하고 데이터베이스한 자료.

1. 기술적 필요성

- 가. 지상에 존재하는 모든 사물에는 고유한 분광특성을 가지며 고유한 파장대에서 보이는 분광흡수 특징은 지상 타겟의 생물학적/물리적/화학적 특징등과 깊은 연관이 있음.
- 나. 광학 원격탐사센서는 이러한 분광특성을 이미지화하여 기록하며 분석을 통해 연관된 분광특징과 관련된 인자들의 정량적인 분석에 이용이 됨.
- 다. 중위도 지역에 대해 식생, 광물, 인공구조물에 대한 분광특징을 기록한 분광라이브러리는 USGS등을 통해 구축이 되어있으나 극지역에 존재하는 식생, 광물, 해빙 등에 대한 자료는 구축되어 있지 않음.

2. 경제·산업적 필요성

- 가. 광학 원격탐사자료를 보다 효율적으로 사용하고 과학적으로 정확하게 이해하기 위해서는 원격탐사자료의 획득과 거의 동시에 수행되는 현장조사가 필요한데 이는 많은 인적, 물적 자원이 소모됨.
- 나. 분광라이브러리의 구축과 이해는 이러한 현장조사를 줄일 수 있으며, 특히 접근이 힘든 극지역에서는 경제적인 측면에서 큰 기여를 할 수 있음.

3. 과학적 필요성

- 가. 분광라이브러리의 구축과 고유한 분광특징의 파악을 통해 극지역에 존재하는 사물들의 분광학적 특징을 이해하기 위한 지표로 활용될 수 있으며, 분광/흡수 특징과 현상의 관계를 파악함으로써 극지역 피복을 정량화할 수 있는 자료로 활용 가능.

제 3 절 연구의 내용 및 범위

가. 기존 분광라이브리리 구축 방법 및 극지역 사례 조사

나. 지상 초분광영상 획득 및 전처리 방법 연구

다. 초분광영상으로부터 분광정보 추출 및 정량적 분석 기법 연구

라. 분광라이브리리와 초소형 분광반사 측정기를 이용한 분광정보 자동 분류기법 연구



제 2 장 국내외 연구개발 현황

제 1 절 국내외 분광라이브러리 구축 사례

- 가. 미국 지질조사국(United States Geological Survey: USGS), 미국 항공우주국 제트 추진연구소(Jet Propulsion Laboratory: JPL), 존스홉킨스대학교(Johns Hopkins University: JHU)에서는 실험실, 현장, 항공/위성영상 등을 활용해 광물, 토양, 식생, 인공물, 액체 등 다양한 지표물에 대한 분광특징을 측정하여 분광라이브러리를 구축.
- 나. NASA에서는 ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer)의 개발과정에 있어 통합한 분광 라이브러리를 발표, 약 2,000개 이상의 자연 물질과 인공물질에 대한 분광자료를 구축.
- 다. 국내에서는 한국지질자원연구원(KIGAM)에서 한반도에 분포하는 광물과 토양, 인공물, 식물에 대한 분광반사자료를 포함한 라이브러리 구축을 시도.
- 라. 인하대학교에서 식생 및 인공물에 대해 측정/구축방법 표준화 연구 및 데이터 구축.
- 마. 하지만, 각 분광라이브러리는 측정 장비에 따른 파장영역과 분광해상도가 다양하고 측정 방법, 속성정보 등이 표준화 되어 있지 않아 실제 활용에는 제약이 따름.

제 2 절 극지 분광라이브러리 구축 사례

- 가. 국내외 분광라이브러리의 경우 일반적으로 한반도 또는 중위도 지역에서 수집된 분광정보로 극지역 환경에서만 존재하는 대상물에 대한 정보 누락으로 인해 극지역에서의 분광정보 관련 연구에 직접적인 활용이 제한.
- 나. 극지역 자연환경에 적합한 분광라이브러리는 극지역 특유의 제한된 접근성, 높은 비용 등으로 인해 필요성은 있으나 아직 시도되지 않음.
- 다. Matharasi 등은 북극과 남극 일부 지역에서 가시광선-근적외선 영역대에서 휴대용 분광반사 측정기를 이용하여 부분적으로 분광측정을 수행하였으나, 이는 극히 제한적으로 진행되었음.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 초분광 원격탐사 및 분광라이브리

1. 초분광 원격탐사 (Hyperspectral remote sensing)

원격탐사(Remote sensing)는 원거리의 대상체에서 복사된 에너지를 직접적인 접촉 없이 원거리에서 측정하고 그 특성을 분석하는 기법이다. 원격탐사에 의한 분석은 모든 물체는 그 종류와 환경조건에 따라 서로 다른 신호를 반사한다는 전자파 특성에 기초한다. 초분광 원격탐사 (Hyperspectral remote sensing) 영상은 수개의 비 연속 밴드로 구성된 다중분광영상과 달리 수백개 이상의 연속된 밴드로 구성된 분광해상도가 매우 높은 영상으로 지표물의 완전한 분광특성을 획득할 수 있다는 장점을 가지고 있어 기존의 다중분광영상에 비해 지표물에 대해 보다 정량적인 분석을 가능하게한다. 최근 초분광영상의 수요가 증가하여 지도제작 목적 이외에도 농업, 의학, 군사 목적에 있어 기존 다중분광영상으로 감지가 어려운 사물의 특성을 탐지하는데 사용되고 있다. 그림 1은 다중분광 원격탐사 센서와 초분광 센서의 분광학적 분해 능력을 설명하며, 그림 2는 초분광 원격탐사영상의 3차원 이미지 큐브에 관한 예시이다.

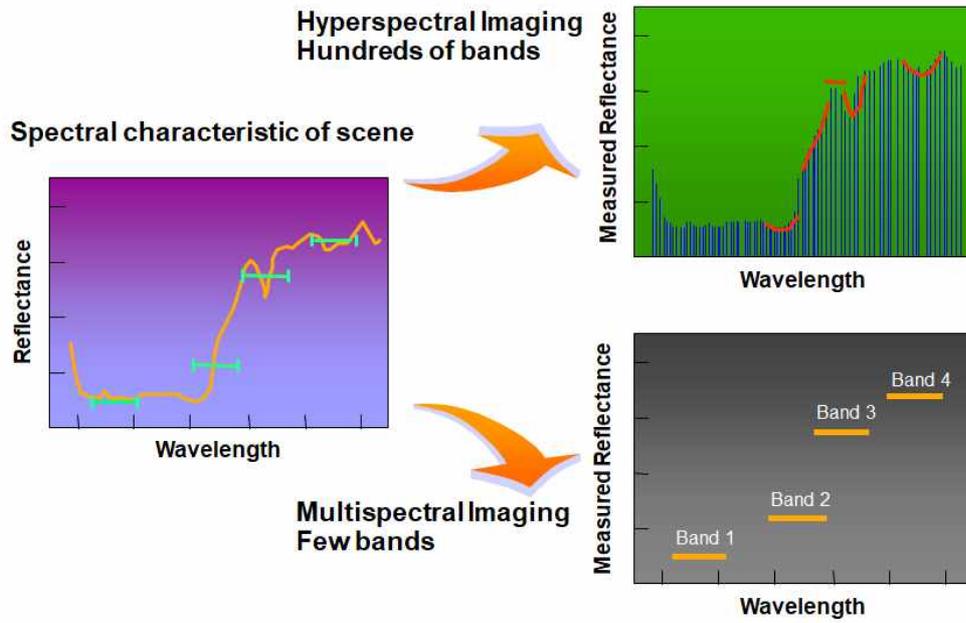


그림 1. 다중분광 원격탐사영상과 초분광 원격탐사영상의 분광학적 분해능력 차이.

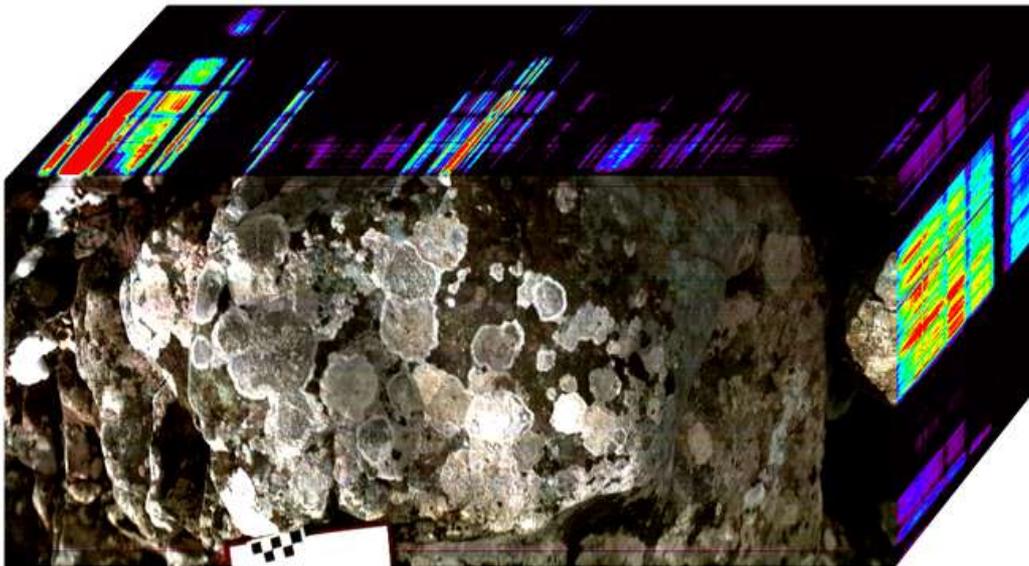


그림 2. 초분광 원격탐사영상의 3차원 이미지 큐브 (Z축: 분광밴드).

2. 분광반사도 (Spectral reflectance)

분광반사란 각 파장별로 지표면에 도달한 전자기에너지(Irradiance)에 대한 반사된 광량(Radiance)의 비율로 정의한다. 그러나 분광반사율은 입사광과 반사광의 측정 기하 조건에 따라 세분하여 정의할 수 있다. 특정 지표물의 반사특성을 가장 정확하게 설명할 수 있는 정의는 Bidirectional reflectance distribution function (BRDF)라 할 수 있다. BRDF는 수식 (1)과 같이 입사광과 반사광의 기하조건(방향)을 모두 고려한 개념적인 분광반사율이다. 여기서 ρ 는 반사율, θ 는 천정각, ϕ 는 방위각, i 와 r 은 각각 입사, 반사를 의미하고, L 은 복사휘도(radiance), E 는 복사조도(irradiance)를 의미한다.

$$BRDF = \rho(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \quad (1)$$

그러나 실제 분광반사율의 측정에 있어 입사광의 기하 조건을 정확히 측정하기 매우 어렵기 때문에 BRDF의 분모값을 얻기가 쉽지 않다. 따라서 원격탐사에서 특정 표면의 반사율 측정은 일반적으로 Bidirectional reflectance factor (BRF)를 측정한 결과이다. BRF는 모든 방향으로 빛이 고르게 완전히 반사되어 입사광 및 반사광이 방향에 관계없이 일정한 Lambertian 표면을 이용하여 측정하게 된다. 즉 Lambertian에 가까운 백색판에서 센서방향으로 반사된 광량(복사휘도)을 측정하고 측정할 대상물에서 반사되는 광량을 동일 조건에서 다시 측정하는 방법을 사용한다. 이렇게 측정된 값을 BRF라 정의하며 수식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$BRF = \frac{L_{target}}{L_{reference}} \quad (2)$$

본 연구를 비롯하여 원격탐사 분야에서 측정되는 분광 반사값은 실내 또는 야외에서 BRF를 측정한 결과를 지칭하는 경우가 많다.

3. 분광라이브러리 (Spectral library)

분광라이브러리는 지구에 존재하는 다양한 물질의 분광반사율 자료와 그에 대한 보조자료를 축적한 데이터베이스로 다양한 분야에서 물질의 종류와 특성을 분석하기 위한 참조자료로 사용되고 있다. 원격탐사 분야에서는 광학영상 자료와 연계하여 토지 피복의 종류와 속성을 분류하고 더 나아가 초분광영상의 정량적 해석에서도 중요한 역할을 하고 있다. 표1은 국내외 대표적인 분광라이브러리에 대한 정보이며, 그림 3은 분광라이브러리에 대한 예시를 보여준다.

표 1. 국내외 대표적인 분광라이브러리 정보

구축기관	개수	분광반사측정기 종류	측정 대상물				
			광물	토양	식생	인공물	액체
USGS	496	Beckman, ASD, AVIRIS 등	○	○	○	○	○
JHU	617	Beckman, Nicolet	○	○	○	○	○
JPL	160	Beckman	○	×	×	×	×
ASTER	2,000	USGS, JHU, JPL 통합	○	○	○	○	○
IGCP	130	Beckman 등	○	×	○	×	×
ICRAF	30,000	ASD	×	○	○	○	×
ASU	324	Nicolet	○	○	×	×	×
KIGAM	187	GER, ASD	○	×	○	○	×

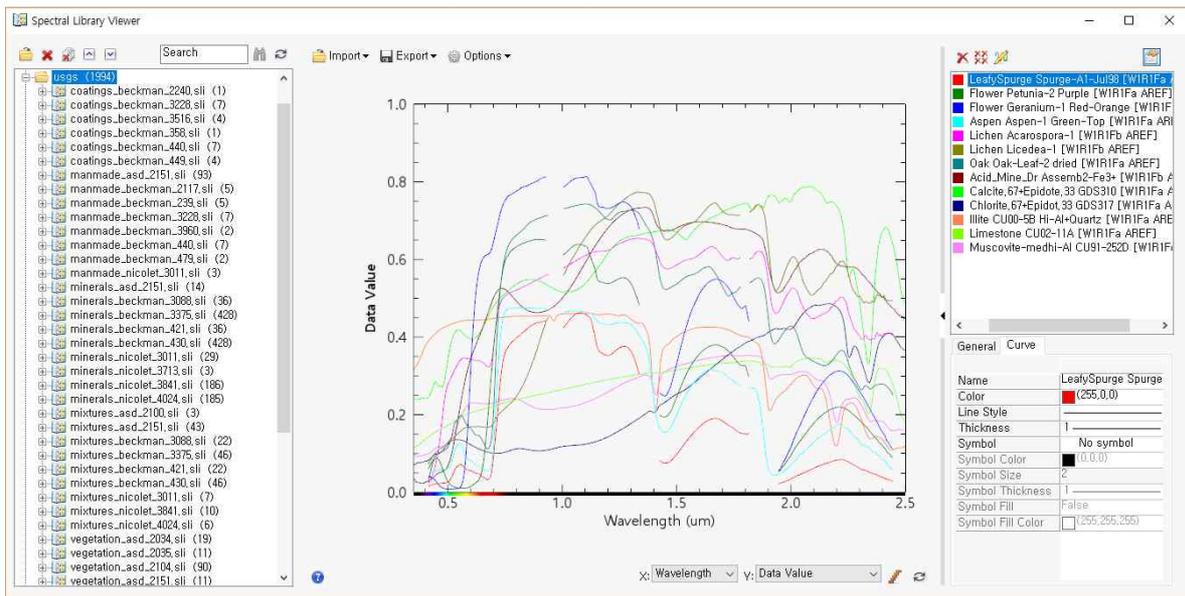


그림 3. USGS 분광라이브러리 예시

4. 분광라이브러리 구축을 위한 분광센서

본 연구에서 사용한 분광라이브러리 구축을 위한 분광센서는 1) Headwall Photonics 사의 Micro-Hyperspec Extended VNIR Imager와 2) Stratio 사의 초소형 분광반사측정기인 LinkSquare로 자세한 사양은 다음과 같다. Micro-Hyperspec Extended VNIR Imager는 push-broom 형태의 스캐너로 f/2.8 렌즈를 통해 들어온 빛을 500nm에서 1700nm의 파장대에서 약 8nm의 폭을 가진 144개의 분광밴드로 기록하게 된다. 300:1의 신호대잡음비를 가지고 14bit 범위의 디지털신호값으로 기록된다 (그림 4). LinkSquare는 450nm에서 1000nm 파장대에서 약 10nm의 분광해상도로 5mm x 5mm 크기의 센서면에 들어온 신호값을 기록한다 (그림 5).



그림 4. Headwall Photonics 사의 Micro-Hyperspec Extended VNIR Imager



그림 5. Stratio 사의 LinkSquare 초소형
분광반사 측정기

제 2 절 지상 초분광영상 획득 프로토콜 개발

1. 초분광영상 획득을 스테이지 구성

본 연구에서 사용된 초분광영상 시스템은 push-broom 방식의 센서로 영상의 기하학적 왜곡 방지와 항공기 또는 무인기에서 영상을 획득하는 방법을 재현하기 위하여 다음과 같이 1) 영상센서 횡 이동용 전동 스테이지, 2) 스테이지 속도 조절용 모션 컨트롤러, 3) 광량 조절을 위한 650와트 텡스텐 할로겐 조명, 4) 타겟 높낮이 조절 장치를 이용하여 영상 획득 스테이지를 구성하였다 (그림 6).



그림 6. 초분광영상 획득 스테이지 구성

2. 초기 획득 초분광영상

그림 7에서 보는것과 같이 초기 획득 영상은 영상을 구성하는 화소를 기록하는 detector들의 미세한 반응도도 차이로 인해 세로 줄무늬 현상이 매우 심하게 나타난다. 이는 보정용 white 및 dark target과 자체 소프트웨어를 이용하여 센서의 민감도 보정을 수행 가능하다 (그림 8). 수식 (3)은 자체 소프트웨어에서 초분광센서에 기록되는 radiance 값(L_0)을 white(L_W)와 dark(L_D) target의 radiance값을 이용하여 reflectance 값(ρ)으로 변환하는 식이다.

$$\rho = \frac{L_0 - L_D}{L_W - L_D} \quad (3)$$

하지만 ρ 는 상대적인 반사율 값으로 광원의 양 및 방향 등에 따라 편차가 심해 분광라이브러리 구축에 직접적으로 사용하기에는 무리가 따른다. 그림 9는 이러한 분광 편차를 보여주는 예로써, 어떠한 영상획득 환경 아래에서도 동일한 분광 반사율을 지닌 타겟에서 편차가 심한 다양한 형태의 분광정보가 획득되는 문제점을 보여준다.



그림 7. 초기 획득 초분광영상.

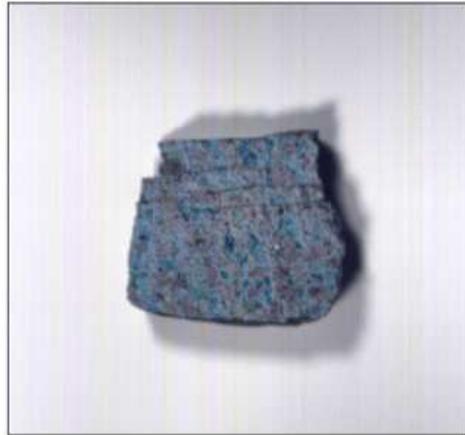


그림 8. 자체 보정 소프트웨어를 이용한 기본 보정된 초분광영상.

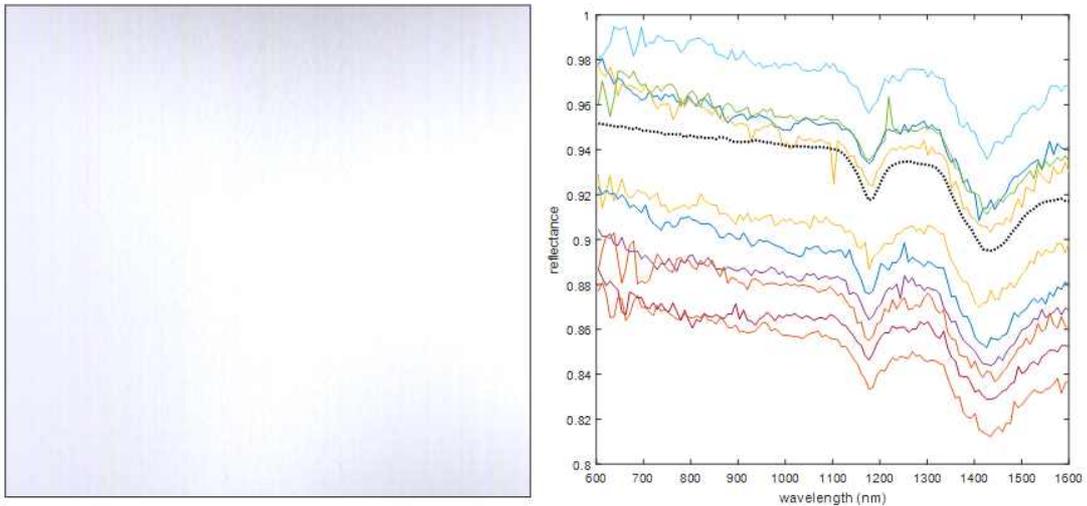


그림 9. 촬영환경에 따라 획득되는 분광정보의 편차.

본 연구에서는 초분광 이미징 센서를 지상에서 실험실 환경에서 운영을 하였다. 하지만, 세종기지 주변 등 야외에서도 향후 사용될 예정이다. 원격탐사 센서는 지상 타겟에서 반사되는 태양 복사에너지를 기록하는데, 특히 극지역의 경우 일반 중위도 지역보다 광량이 매우 낮다. 따라서 센서에 기록되는 태양 복사에너지가 낮아 노이즈가 심한 데이터를 얻게 된다. 그림 10은 실내 측정시 광량이 적은 극지 환경을 모사하기 위하여 할로겐 조명의 광량을 100%로 했을 경우와 30%로 낮춘 후 획득한 초분광 영상의 시각적 품질 차이를 보여준다.

그림 10에서 보듯이 초분광 영상의 품질이 시각적으로도 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 그림 11은 광량이 다른 두 초분광영상에서 동일한 픽셀에 해당하는 분광정보에 대한 비교 그래프로, 광량에 따라 분광정보간의 차이를 확인할 수 있다. 저 광량에서 획득된 영상은 일반적으로 광량이 풍부한 조건에서 획득된 영상보다 노이즈가 심한 것을 볼 수 있다. 또한 광량이 변하면서 전반적인 반사율 크기의 차이도 발생하였는데, 광량이 높다고 반사율값이 항상 높지 않다는 것을 그림 11의 sample spectrum 3에서 확인할 수 있다. 이처럼 광량이 변함으로써 획득되는 분광정보의 차이가 발생하며, 이는 일관적으로 수집되어 기록되어야 하는 분광라이브러리 구축에 있어 큰 방해 요인이 될 수 있다.

3. 대리 보정 (Vicarious calibration)

위성 원격탐사영상의 광학적 특성은 센서에 기록되는 화소값을 실제 지표물의 복사에너지 값인 복사에너지와 반사율로의 변환을 통하여 추정할 수 있다. 절대 복사보정은 영상에서 나타는 화소값과 태양의 복사에너지가 지표면의 물체에 반사되어 센서에 기록되는 에너지 값과의 관계를 통해서 알 수 있으며, 화소값과 센서에 도달하는 복사에너지 값의 관계는 다음 수식 (4)와 그림 10과 같이 간단한 선형 방정식으로 표현할 수 있다.

$$L = C_1 \times DN + C_2 \quad (4)$$

L : 센서에 기록되는 복사에너지 값
 DN : 영상에 나타는 화소값
 C_1 : gain 계수
 C_2 : offset 계수

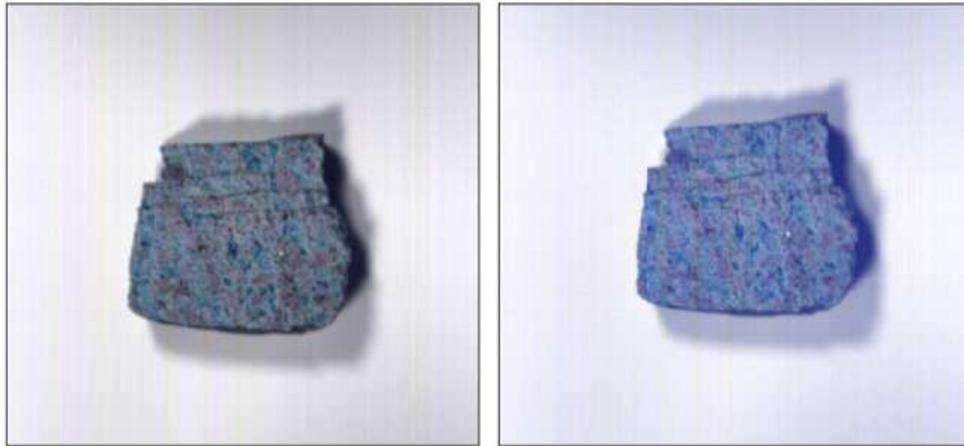


그림 10. 광량에 따른 획득되는 초분광 영상의 품질 차이 (좌) 광량 100%, (우) 광량 30%.

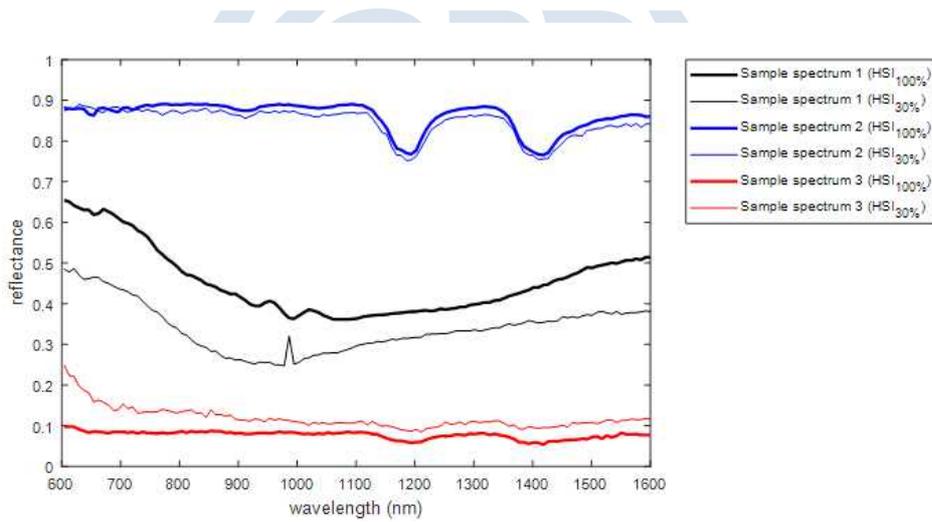


그림 11. 광량에 따라 획득되는 분광정보의 품질 차이.

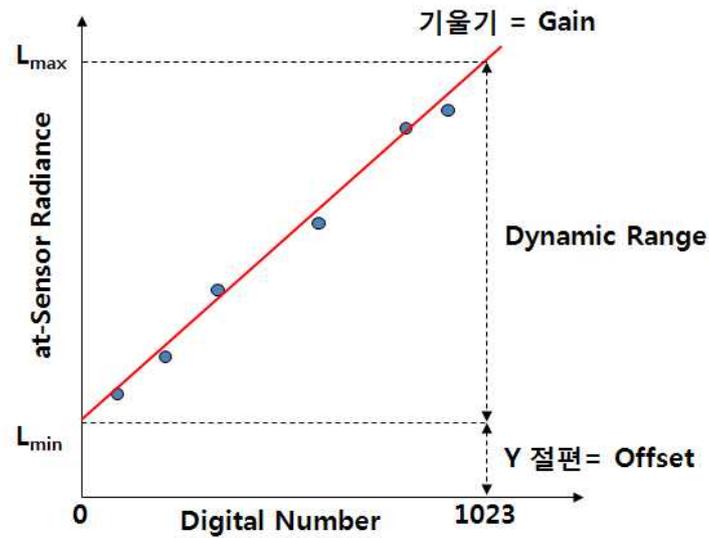


그림 12. 복사에너지와 화소값의 관계

이러한 방법은 위성영상이 획득되는 시간 전후로 지상에서 검보정용 타겟에 대한 분광반사율 측정을 통해 이루어지며, 전통적으로 위성 영상의 광학적 품질을 유지하고 관리하기 위해 사용되고 있다.

본 연구에서는 대리 보정 방법을 응용한 아래 수식 (5)와 실험실에서 보정이 완료된 여섯 개의 분광 타겟을 이용하여 초분광영상의 광학적 품질을 높이고자 하였다.

$$\rho_2 = C_1 \times \rho_1 + C_2 \quad (5)$$

수식 (5)에서 ρ_1 은 수식 (3)에서 자체 소프트웨어를 이용해 1차 보정된 분광 타겟의 반사율 값이고, ρ_2 는 실험실에서 측정된 분광 타겟의 반사율 값이며, C_1 과 C_2 보정 계수이다.

보정을 위해 사용된 타겟은 Labshpere사에서 제작한 Permaflect 라는 제품으로 열, 빛 등에 물리적으로 견고하며, 가시광선에서 적외선 파장대 (400-2500nm)에서 비교적 일정한 반사율을 보이는 물질로 코팅이 되어 있다. 본 연구에서 사용한 분광 타겟은 400-2500nm에서 94%, 80%, 50%, 18%, 10%, 5%의 일정한 반사율 값을 지니고 있다 (그림 13, 그림 14).

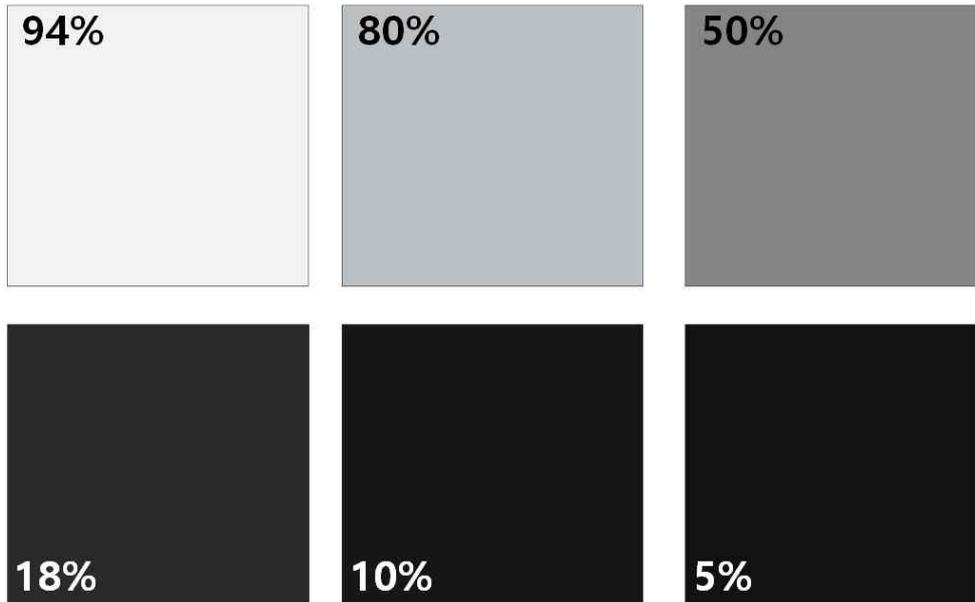


그림 13. 분광보정용 Permaflect 타겟.

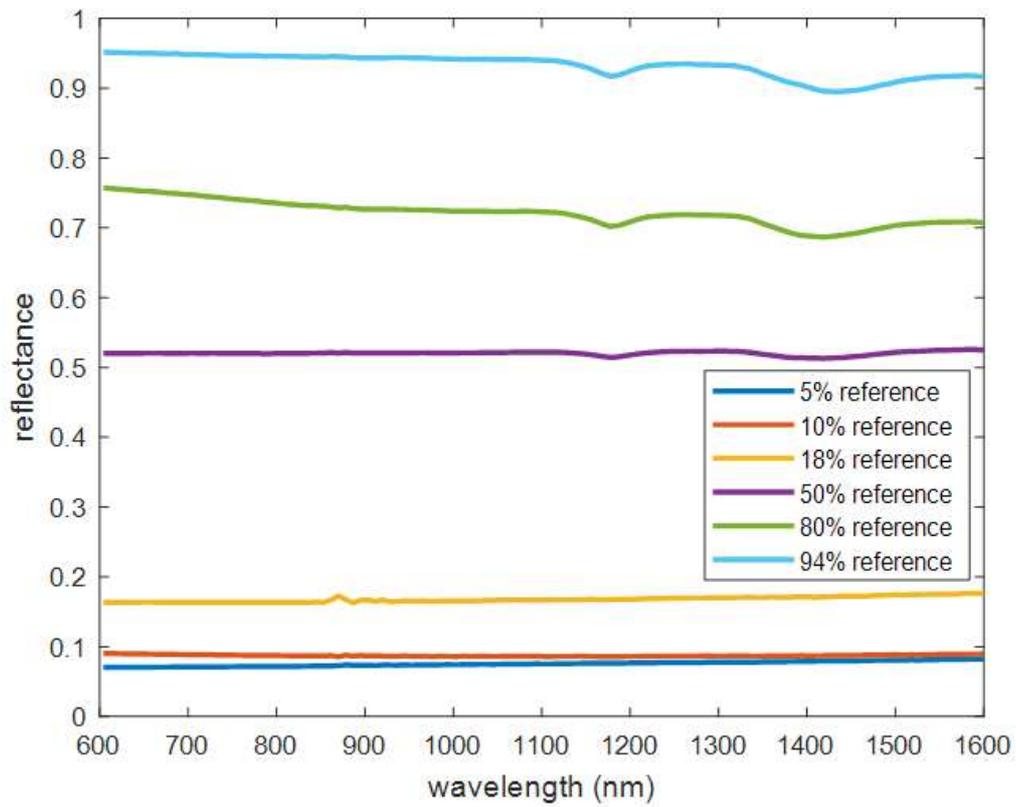


그림 14. 분광보정용 Permaflect 타겟의 분광곡선

4. 실험 결과

본 연구의 목적은 서로 다른 환경, 특히 광량이 다른 조건에서 획득된 초분광영상에서 정확한 분광정보를 획득하는 것이다. 이를 위해 그림 13의 여섯 개의 분광보정용 타겟과 대리보정식을 응용한 수식 (5)를 이용한 밴드별 선형 회귀식을 만들어 초분광영상의 분광학적 보정을 수행하였다. 그림 15는 870nm 파장대의 분광밴드에 해당하는 선형 회귀식이다. 그림 15(좌)는 광량을 100%로 했을 경우 보정식이며, 그림 15(우)는 극지 환경을 모사하여 광량을 30%로 줄였을 경우에 계산된 선형 회귀식이다. 각 그래프의 x축은 수식(3)을 통해 1차로 보정된 초분광영상에서 획득된 반사율 값이고, y축은 실험실에서 측정된 분광보정 타겟의 반사율 값이다. 1차적으로 보정된 초분광영상이므로 그림 15에서 보듯이 광량과 관계없이 비교적 선형 관계를 보여준다. 하지만 광량에 따라 선형 회귀식의 기울기 값 C_1 의 차이를 확인할 수 있다. 그림 16은 선형 회귀식의 평균 상관계수가 가장 좋은 밴드와 가장 나쁜 밴드에 대한 상관관계 영상이다. 역시 1차적으로 보정된 초분광영상을 사용하였으므로 모든 픽셀과 밴드에서 0.99이상의 상관관계를 보여준다.

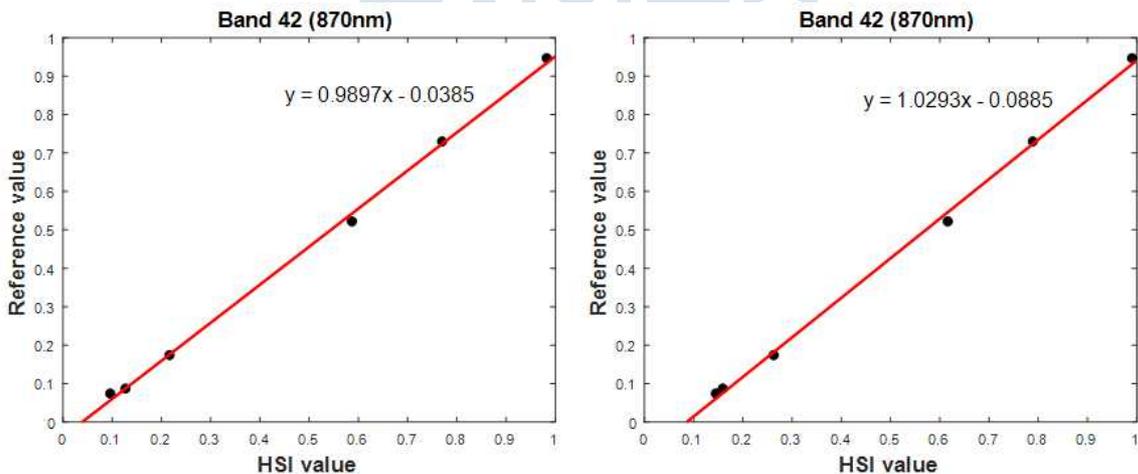


그림 15. 870nm 밴드에서 광량에 따라 계산된 분광보정을 위한 선형 회귀식 (좌) 광량 100%, (우) 광량 30%.

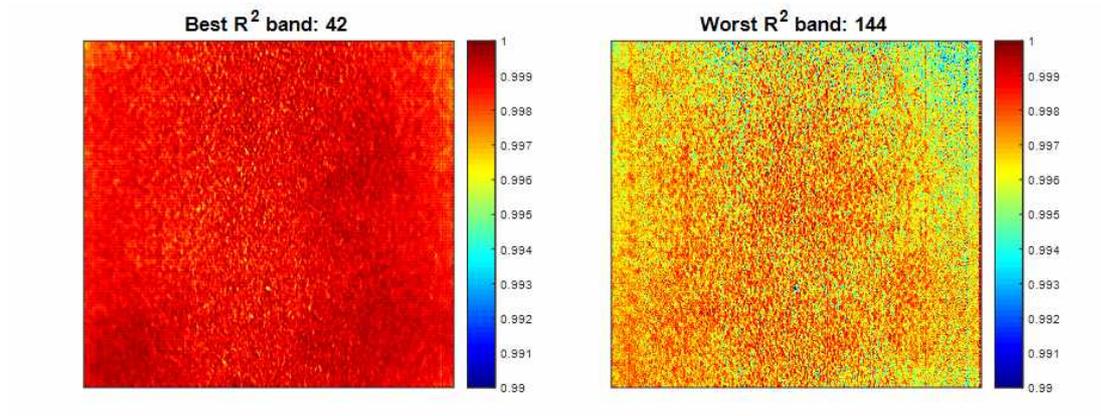


그림 16. 보정 선형 회귀식의 평균 상관관계가 가장 좋은 밴드(좌)와 가장 안좋은 밴드(우).

그림 17은 위에서 계산된 선형 보정식을 적용했을 경우 최종적으로 분광보정이 완료된 초분광영상이다. 그림 17의 비교에서 보듯이 분광타겟을 이용하여 분광보정을 수행했을 경우 광량과 관계없이 시각적으로 동일한 품질의 초분광영상을 얻을 수 있었다.



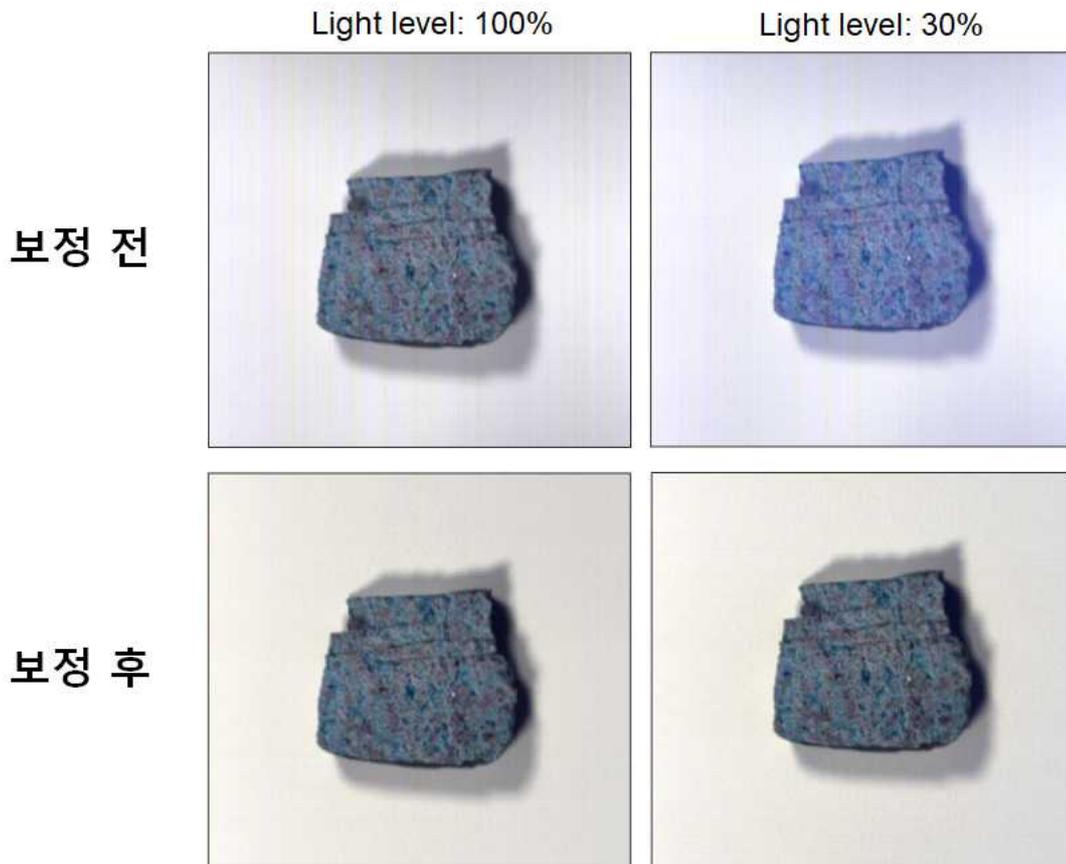


그림 17. 광량에 따른 분광보정 전 초분광영상(상)과 본 연구에서 제안한 분광보정식을 적용한 초분광영상(하)의 시각적 비교.

그림 18은 서로 다른 광량에서 획득된 초분광영상을 본 연구에서 제안한 보정식 적용한 후 동일한 샘플에 대한 분광곡선 비교이다. 그림 10에서 보듯이 보정 전에는 광량에 따라 같은 샘플 일지라도 획득되는 분광정보에 있어 큰 차이와 저 광량 조건에서 심한 노이즈를 보이지만 보정 후에는 거의 유사한 그리고 노이즈가 많이 완화된 분광곡선을 얻을 수 있다.

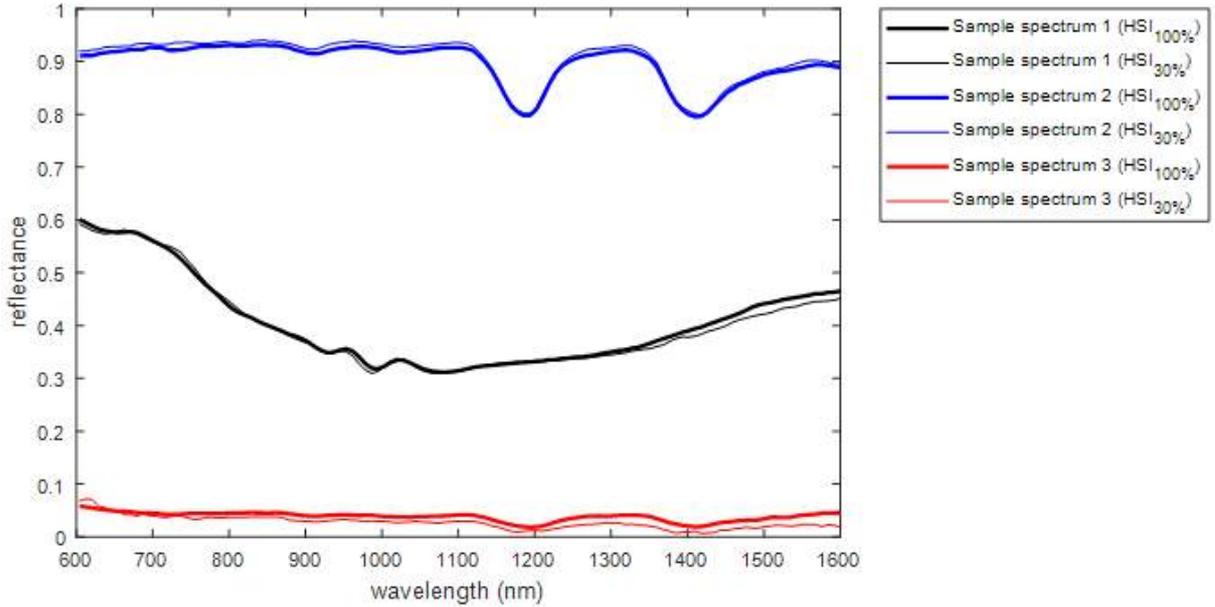


그림 18. 본 연구에서 제안한 분광 보정식을 적용한 후 다른 광량에서 획득된 초분광영상으로부터 추출된 동일 샘플에 대한 분광정보곡선 비교.

추출된 동일 샘플에 대한 분광정보곡선에 대해 분광 보정 전과 후의 정량적 정확도 비교를 Euclidean distance (수식 (6)), Spectral angle distance (수식 (7)), Normalized cross correlation (수식 (8))을 이용하여 수행하였다. Euclidean distance는 두 점 사이의 거리를 계산할 때 가장 일반적으로 사용이 되고, Spectral angle distance는 두 분광신호 값의 크기 보다는 분광신호의 전반적인 유사도에 대한 측정 방법으로 초분광 원격탐사자료의 분석이나 spectroscopy에서 주로 사용되고 있는 방법이다. Normalized cross correlation은 신호처리에서 정규화된 상호 연관성을 찾는 방식으로, 입력된 신호와 찾고자 하는 신호간의 선형적인 차이와 기하학적 유사도를 측정하는 방식이다.

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (6)$$

$$\theta(x, y) = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 \right)^{1/2}} \right) \quad (7)$$

$$r(x,y) = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (8)$$

위 수식에서 x 는 보정 전의 분광곡선, y 는 보정 후의 분광곡선, n 은 분광밴드의 개수, μ 는 분광곡선의 평균, σ 는 분광곡선의 표준편차이다. 표 2에서는 같은 샘플에 대해 보정 전과 후에 대한 분광곡선의 Euclidean distance (ED), Spectral angle distance (SAD), Normalized cross correlation (NCC)를 비교하였다.

표 2. 보정 전과 후 분광곡선의 정량적 유사도 비교

	샘플 1		샘플 2		샘플 3	
	보정 전	보정 후	보정 전	보정 후	보정 전	보정 후
ED	1.3279	0.0979	0.1979	0.1879	0.5089	0.1428
SAD	0.0852	0.0119	0.0101	0.0041	0.2790	0.1632
NCC	0.8846	0.9957	0.9723	0.9961	0.7053	0.8471

두 개의 분광곡선의 유사도가 높으면, Euclidean distance와 Spectral angle distance의 값은 작아지고, Normalized cross correlation의 경우 1에 가까운 값을 가진다. 표 2에서 보듯이 모든 분광정보 유사도 측정에서 보정 후에 유사도가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 보정 후 시각적인 품질 향상 뿐만 아니라 분광라이브리리 구축에 있어 매우 중요한 분광정보의 정량적 유사도 또한 개선됨을 확인할 수 있었다.

제 3 절 분광라이브리리를 이용한 분광정보 자동 분류기법 연구

1. 휴대용 분광반사 측정기

본 연구는 초소형 휴대용 분광반사 측정기를 이용하여 12종 타겟에 대한 분광정보를 반복 측정 하여 분광라이브리리를 구축하고, 새로운 분광정보 측정시 해당 분광정보를 분광라이브리리에서 자동으로 검색, 분류가 가능한지 테스트 해보았다.

일반적으로 분광측정시 사용되는 휴대용 분광반사측정기는 400nm에서 2,500nm 파장대에서 1nm 간격으로 분광정보를 획득하지만, 본 연구에서 사용된 Stratio사의 LinkSquare 분광반사 측정기는 450nm에서 1,000nm 파장대에서 약 10nm 간격으로 분광정보를 획득한다. 기록되는 파장대가 좁고 분광해상도가 10nm로 좁지만, 분광라이브리리의 활용 가능성을 테스트하는 본 연구에서는 충분하며, 10cm 크기에 50g 정도의 무게로 휴대성이 매우 좋아 향후 현장조사시에도 활용될 수 있을 것으로 판단되었다.

LinkSquare 분광측정기는 입사하는 빛을 발생하는 광원과 빛을 분광시키고 경로를 조정하는 광학계, 그리고 영상센서로 구성된다. 가시광선과 근적외선용으로 BULB와 LED 두 종류의 광원을 사용하며, 광학계는 파장별로 굴절률이 달라지는 빛의 특성을 이용하여 렌즈, 거울, 프리즘 등을 결합하여 구성된다. 그리고 5mm x 5mm 크기의 영상센서에서는 타겟으로부터 반사된 고유의 분광정보를 픽셀 형태로 기록하며 주요 제원은 표 3과 같다.

표 3. Stratio의 LinkSquare 제원

제조사	Stratio
제품명	LinkSquare
파장영역	450-1,000nm
크기	114mm x 23.9mm x 23.9mm
무게	57g
배터리 (사용횟수)	약 1000 회
배터리 (대기시간)	약 24시간

이처럼 LinkSquare는 태양 에너지가 없는 환경에서도 분광 측정이 가능하지만 일반적인 분광 반사측정기와는 다른 형태의 값이 기록된다는 한계점이 있다. 하지만,

LinkSquare 분광측정기는 기존 분광반사측정기와 달리 휴대가 용이하며, 스마트폰 어플리케이션과 함께 사용하면 측정된 데이터를 스마트폰을 이용하여 즉시 확인할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 따라서 이를 이용하여 분광정보 수집을 하고 이를 분광라이브러리를 구축한 후, 현장조사에서도 LinkSquare 분광측정기를 활용을 하면 현장에서의 활용 가치는 충분히 높다고 판단되어 본 연구에서 사용하였다.

2. 실험 방법 및 결과

본 연구에서는 극지에 존재하는 식물 6종과 암석 6종을 대상으로 LinkSquare를 이용하여 분광정보를 측정하였다 (표 4). 분광정보 측정시 동일 샘플 내에서도 서로 다른 상태를 가지고 있고 측정시 미세한 분광정보의 차이가 존재하여 동일 샘플내에서도 서로 다른 위치에서 약 30에서 60회 분광정보를 반복하여 측정하였다. 또한 좀 더 풍부한 분광라이브러리 데이터베이스 구축을 위하여 각 샘플에 대해 반복 측정된 분광정보를 랜덤 비율로 선형 혼합을 하여 분광라이브러리를 강화학습 시켰다. 분광정보의 선형 혼합은 다음 수식 (9)을 이용하여 수행 하였고 각 샘플별로 1,000개의 분광정보를 생산하여 라이브러리 구축에 사용하였다.

$$y = \sum_{i=1}^q a_i x_i \quad (9)$$

$$a_i \geq 0, \quad \forall a_i : 1 \leq i \leq q \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^q a_i = 1 \quad (11)$$

x 는 LinkSquare를 이용해 측정된 분광정보이고, q 는 반복측정 횟수로 30에서 60의 값을 가지며, a 는 분광정보의 선형 혼합을 위한 랜덤 비율 값이며, y 는 분광라이브러리 강화를 위해 생성된 가상 분광정보 값이다. 새롭게 생성된 분광정보의 정량화를 위해서 nonnegativity 조건 (수식 (10))과 sum-to-one 조건 (수식 (11))을 모두 만족시키켜 추가 분광정보를 생성하였다. 그림 19는 식생 6종에 대한 대표 분광곡선이며, 그림 20은 암석 6종에 대한 대표 분광곡선이다.

표 4. 측정된 타겟에 대한 정보

	이름	측정횟수
식생	Andreaea regularis	40
	Bryum pallescens	40
	Chorisodontium aciphyllum 1	50
	Chorisodontium aciphyllum 2	50
	Deschampsia antarctica	60
	Sanionia	30
암석	Basalt	30
	Gabbro	50
	Gneiss	40
	Rock (unknown)	60
	Schist	60
	Trachyte	40

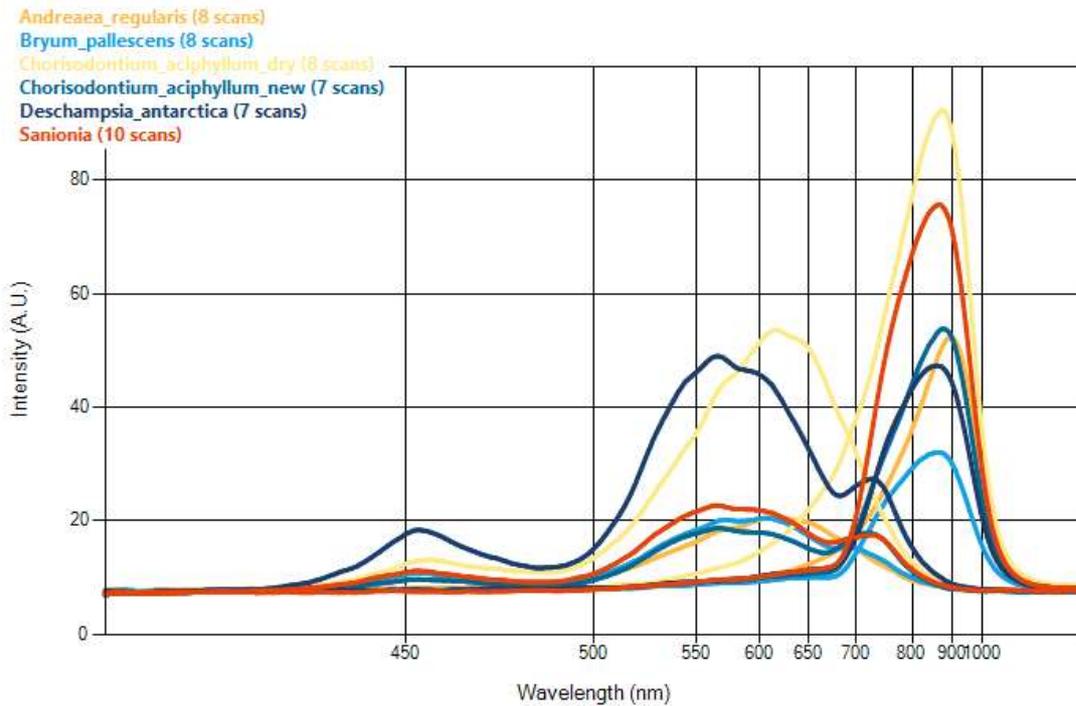


그림 19. 식생 6종에 대한 대표 분광정보곡선

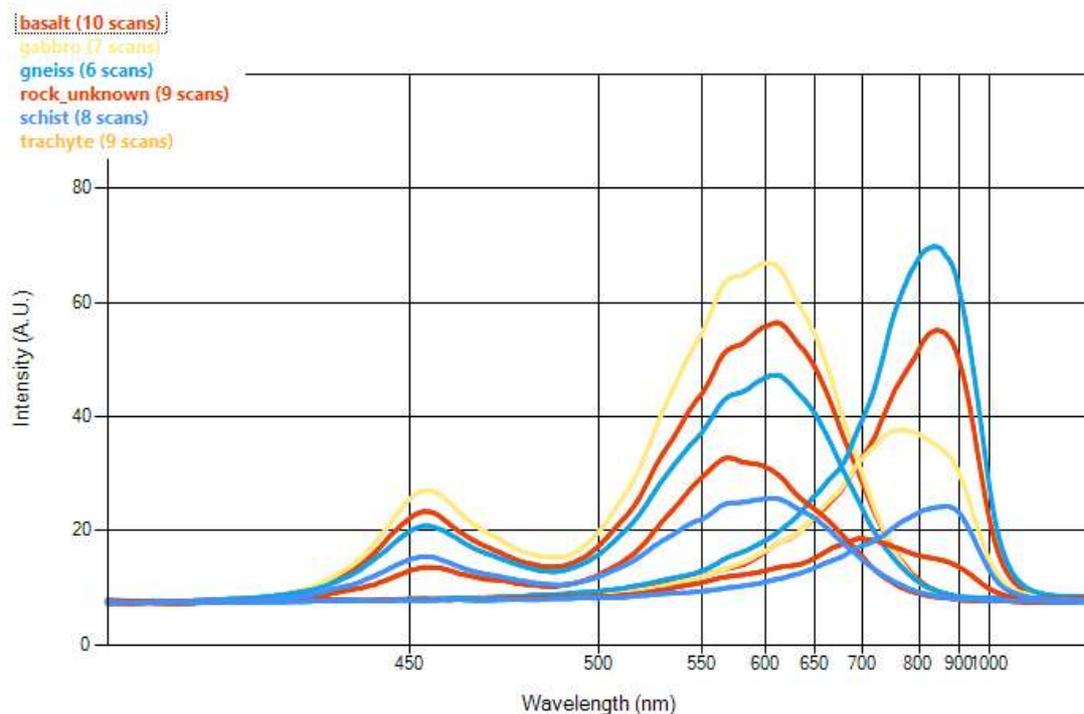


그림 20. 암석 6종에 대한 대표 분광정보곡선

분광라이브러리의 실제 현장조사에서 활용 가능성에 대한 검증을 하기 위하여 각 샘플별로 700개의 분광 데이터를 이용하여 분류모델 훈련 자료로 사용하였고, 나머지 300개 데이터를 분류 모델의 성능 검증에 사용하였다. 분류기는 Maximum likelihood, Support vector machine 등 다양한 종류가 있지만 분류기의 성능에 따른 효과를 최소화하기 위해 가장 간단한 분류기인 k -Nearest neighbor 분류기를 사용하였다. k -Nearest neighbor는 새로운 입력자료가 훈련자료 내에서 k 개의 가장 가까운 이웃 사이에서 가장 공통적인 항목에 할당되는 객체로 분류되는 방법으로 가장 간단한 기계학습 알고리즘에 속한다. 본 연구에서는 k 를 10으로 설정하여 새롭게 입력된 분광정보와 가장 가까운 10개의 분광정보가 속하는 클래스로 분류를 시도하였다. 표 5는 10-Nearest neighbor 분류 결과에 대한 Confusion matrix이다. 전체적인 분류 정확도는 약 98%정도를 보여주었다. 사용된 식생 및 암석 샘플들이 비교적 구분이 쉬운 종류인 점도 있지만 가장 간단한 분류기를 사용했고 450-1,000nm라는 좁은 파장대역을 사용하였음에도 불구하고 상당히 높은 분류 정확도를 보여주었다. 이는 분광라이브러리가 잘

구축되어 있으면 현장조사나 원격탐사영상 분석에서 타겟에 대한 지식이 부족하더라도 분광라이브러리를 이용하여 판독 및 분석이 가능하다는 것을 설명한다.



표 5. 분류 결과 Confusion matrix

	Andreaea	Bryum	Chorisodontium 1	Chorisodontium 2	Deschampsia	Sanionia	Basalt	Gabbro	Gneiss	Rock (unknown)	Schist	Trachyte
Andreaea	300	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Bryum	0	300	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0
Chorisodontium 1	0	0	300	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chorisodontium 2	0	0	0	297	1	0	0	0	0	0	0	0
Deschampsia	0	0	0	0	296	2	1	0	0	0	0	0
Sanionia	0	0	0	2	0	296	0	0	0	0	0	0
Basalt	0	0	0	0	2	0	296	0	0	0	3	4
Gabbro	0	0	0	0	0	0	0	297	0	0	0	0
Gneiss	0	0	0	0	0	0	0	0	296	0	7	2
Rock (unknown)	0	0	0	0	0	0	0	2	0	300	0	0
Schist	0	0	0	0	0	0	3	1	4	0	289	0
Trachyte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	294

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 목표달성도

○ 본 연구에서는 연구 개발 목표에 제시된 지상 초분광카메라를 이용하여 초분광영상 획득 및 전처리 프로토콜을 개발하여 초분광영상 기반 측정 환경에 영향이 적은 분광 정보 획득을 수행하였고, 초소형 분광반사 측정기를 이용하여 식생과 암석에 대한 분광 라이브러리 구축 후 향후 활용 가능성에 대한 정확도를 검증하였다.

○ 지상 초분광카메라를 이용한 분광정보 획득시 향후 원격탐사영상과 동일한 스케일에서 분석 가능하다는 장점이 있으나, 광량 등 초분광영상 획득 조건에 따라 획득된 분광정보의 차이가 심하다. 하지만 본 연구에서 제시한 다중 분광보정 타겟을 이용한 대리보정 시 광량에 따른 분광정보 차이를 최소화할 수 있었고, 극지 환경과 유사한 저광량 환경에서도 노이즈가 적은 영상을 획득하여, 고품질의 분광정보를 추출할 수 있었다.

○ 초소형 분광반사 측정기를 이용하여 구축된 분광라이브러리의 실제 활용 가능성에 대한 검증을 극지역 식생, 암석 샘플 12종을 이용하여 수행하였다. 사용된 분광반사 측정기의 경우 가시광선과 근적외선이라는 비교적 좁은 파장대의 분광정보만 기록하지만 측정된 12종 샘플에 대해서는 약 98%의 정확도로 분광 신호값을 분류할 수 있었다.

○ 이처럼 본 연구에서는 국제적으로도 아직 본격적으로 시도되지 않은 극지 분광정보 구축을 시도하였고, 실제 현장조사와 연구에서 향후 활용 가능성에 대해 확인 하였다.

제 2 절 관련분야에의 기여도

○ 본 연구에서는 지상 초분광카메라를 이용하여 초분광영상 획득부터 전처리에 관한 방법론을 제시하였고, 정량적으로 정확한 분광신호값을 안정적으로 획득하는 방법을 제시하였다.

○ 또한 휴대용 분광반사측정기를 이용해 구축한 분광라이브러리는 잘 구축되면 매우 높은 정확도로 극지역 사물의 종류와 상태를 구분할 수 있다는 사실을 확인하였고, 향후 극지 분광라이브러리 구축의 필요성을 제시하였다.



제 5 장 연구개발 결과 활용 계획

○ 본 과제를 통해 제시된 초분광영상 획득 프로토콜은 향후 휴대용 분광반사 측정기 도입과 함께 극지연구소내 주요과제에서 다음과 같이 활용될 계획이다 (그림 21).

○ “북극 해빙 위성관측을 위한 분석 기술 개발” 연구에서는 연안해빙과 북극항해에서 아이스캠프시 다양한 해빙 종류와 표면 상태에 따라 초분광영상 및 분광정보를 획득함으로써 해빙과 관련된 분광라이브러리 데이터를 구축할 예정이다.

○ “환경변화에 대한 킥조지섬 주요 육상생물의 생물반응 모델링기술 개발” 연구에서는 세종기지 주변 주요 식생 종류에 대한 분광정보 수집과 빛, 온도, 습도 등 환경인자에 따른 변하는 생물 반응도에 대한 분광 측정을 수행하여 분석 연구에 활용할 계획이다.

○ 중장기적인 활용 계획으로는 극지역 주요 식생, 암석 등에 대한 분광정보를 확대 수집하여 데이터베이스화 하고, 이를 소내외 연구진과 공동으로 수집하고 공유할 수 있는 체계를 마련하고자 한다.

○ 더 나아가 무인기 또는 헬기에 초분광카메라를 장착하여 남북극 기지 주변에 대한 초분광영상을 획득함으로써 각종 연구에 활용하는 방안을 마련할 예정이다.

단기 계획		중장기 계획
2018년	2019년	2020 - 2025년
<p>극지연구소 주요과제 내 세부연구 주제</p> <ul style="list-style-type: none"> - “북극 해빙 위성관측을 위한 분석 기술 개발” : 해빙 상태에 따른 분광정보 수집 - “환경변화에 대한 킥조지섬 주요 육상생물의 생물반응 모델링기술 개발” : 세종기지 주변 주요 식생종에 대한 분광정보 수집 : 환경인자 값에 따른 식생 분광정보 변화 수집 및 분석 		<p>Seed형 및 주요과제 수행</p> <ul style="list-style-type: none"> - 남북극 주요 식생, 암석 및 운석에 대한 분광정보 확대 수집 및 데이터베이스화 - 소내외 극지 분광정보 수집 및 공유체계 구축 : 웹사이트 등 공유 시스템 구축 - 휴대폰 또는 태블릿 용 어플리케이션 개발 및 활용을 통한 현장연구 지원 - 무인기 또는 헬기를 이용한 기지주변 초분광영상 구축 및 식생/암석 매핑

그림 21. 극지 분광라이브러리 개발 및 활용에 관한 로드맵.



제 6 장 참고문헌

- Adams, J.B., Smith, M.O., Johnson, P.E. Spectral mixture modeling – A new analysis of rock and soil types at the Viking Lander-1 Site. *J. Geophys. Res.* 1986, 91, 8098 - 8112.
- Baldrige, M., Hook, S.J., Grove, C.I., Rivera, G. The ASTER spectral library version 2.0. *Remote Sens. Env.* 2009, 113, 711 - 715.
- Chi, J., Crawford, M.M. Spectral unmixing-based crop residue estimation using hyperspectral remote sensing data: A case study at Purdue University. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sens.* 2014, 7, 2531 - 2539.
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Gallagher, A.J., King, T.V.V., Calvin, W.M. The U. S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1 (0.2 to 3.0 μm).
- Clark, R.N. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In *Manual of Remote Sensing, Volume 3*, 1999, pp. 3 - 58.
- Dingirard M., Slater, P.N. Calibration of space-multispectral imaging sensors: A review. *Remote Sens. Environ.* 1999, 68, 194 - 205.
- Goswami, S., Matharasi, K. Development of a web-based vegetation spectral library (VSL) for remote sensing research and applications. *PeerJ PrePrints*. 2015.
- Green, R.O., Pavri, B.E., Chrien, T.G. On-orbit radiometric and spectral calibration characteristics of EO-1 Hyperion derived with an underflight of AVIRIS and in situ measurements at Salar de Arizaro, Argentina. *IEEE Trans.Geosci. Remote Sens.* 2003, 41, 1194 - 1203.
- Habib, A., Han, Y., Xiong, W., He, F., Zhang, Z., Crawford, M. Automated ortho-rectification of UAV-based hyperspectral data over an agricultural field using frame RGB imagery. *Remote Sens.* 2016, 8.
- Habib, A., Xiong, W., He, F., H., Yang, L., Crawford, M. Improving orthorectification of UAV-Based push-broom scanner imagery using derived

- orthophotos from frame cameras. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sens.* 2017, 10, 262 - 276.
- Hruska, R., Mitchell, J., Anderson, M., Glenn, N.F. Radiometric and geometric analysis of hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle. *Remote Sens.* 2012, 4, 2736 - 2752.
- Karpouzli E., Malthus, T. The empirical line method for the atmospheric correction of IKONOS imagery. *Int. J. Remote Sens.* 2003, 24, 1143 - 1150.
- Keshava, N., Mustard, J.F. Spectral unmixing. *IEEE Signal Process. Mag.* 2002, 19, 44 - 57.
- Keshava, N. Distance metrics and band selection in hyperspectral processing with applications to material identification and spectral libraries. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2004, 42, 1552 - 1565.
- Lewis, J.P. Fast normalized cross-correlation. *Vision Int.* 1995, 10, 120-123.
- Martin, M.E., Aber, J.D. High spectral resolution remote sensing of forest canopy lignin, nitrogen, and ecosystem processes. *Ecol. Appl.* 1997, 7, 431 - 443.
- Matharasi, K., Goswami, S., Gamon, J., Vargas, S., Marin, R., Lin, D., Tweedie, C.E. Design and development of a spectral library for different vegetation and landcover types for Arctic, Antarctic and Chihuahua Desert ecosystem. Presented at the American Geophysical Union, Fall Meeting, 2008.
- Solomon, J., Rock, B. Imaging spectrometry for earth remote sensing. *Science* 1985, 228, 1147 - 1152.
- Segl, K., Guanter, L., Kaufmann, H., Schubert, J., Kaiser, S., Sang, B., Hofer, S. Simulation of spatial sensor characteristics in the context of the EnMAP Hyperspectral Mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2010, 48, 3046 - 3054.
- Slater, P.N., Biggar, S.F., Thome, K.J., Gellman, D.I., Spyak, P.R. Vicarious radiometric calibrations of EOS sensors. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 1996, 13, 349 - 359.

Smith, G.M., Milton, E.J. The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. Int. J. Remote Sen. 1999, 20, 2653 - 2662.

Thorne, K., Markham, B., Barker, P.S. Radiometric calibration of Landsat. Photogramm. Eng. Remote Sen. 1997.



주 의

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