

## 초분광 원격탐사의 특성, 처리기법 및 활용 현황

김선희 · 이규성<sup>†</sup> · 마정림 · 국민정

인하대학교 지리정보공학과

### Current Status of Hyperspectral Remote Sensing: Principle, Data Processing Techniques, and Applications

Sun-Hwa Kim, Kyu-Sung Lee<sup>†</sup>, Jung-Rim Ma, and Min-Jung Kook

Department of Geoinformatic Engineering, Inha University

**Abstract :** Hyperspectral images have emerged as a new and promising remote sensing data that can overcome the limitations of existing optical image data. This study was designed to provide a comprehensive review on definition, data processing methods, and applications of hyperspectral data. Various types of airborne, spaceborne, and field hyperspectral image sensors were surveyed from the available literatures and internet search. To understand the current status of hyperspectral remote sensing technology and research development, we collected several hundreds research papers from international journals (IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, International Journal of Remote Sensing, Remote Sensing of Environment and AVIRIS Workshop Proceedings), and categorized them by sensor types, data processing techniques, and applications. Although several hyperspectral sensors have been developing, AVIRIS has been a primary data source that the most hyperspectral remote sensing researches were relied on. Since hyperspectral data have very large data volume with many spectral bands, several data processing techniques that are particularly oriented to hyperspectral data have been developed. Although atmospheric correction, spectral mixture analysis, and spectral feature extraction are among those processing techniques, they are still in experimental stage and need further refinement until the fully operational adaptation. Geology and mineral exploration were major application in early stage of hyperspectral sensing because of the distinct spectral features of rock and minerals that could be easily observed with hyperspectral data. The applications of hyperspectral sensing have been expanding to vegetation, water resources, and military areas where the multispectral sensing was not very effective to extract necessary information.

**Key Words :** hyperspectral sensing, imaging spectroscopy, spectral library, spectral mixture analysis, feature extraction, application.

**요약 :** 이 연구는 새로운 광학원격탐사 자료로 대두되고 있는 초분광영상의 기본적 특성과 용어에 관한 정의를 검토하고, 지금까지 초분광영상과 관련된 주요 처리기법 및 활용분야를 광범위하게 검토하여 국내에서 초분광영상 기술의 활용을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다. 먼저 문헌자료와 인터넷 검색을 통하여 항

2005년 7월 25일 접수 ; 2005년 8월 23일 수리.

<sup>†</sup> 교신저자: 이규성(ksung@inha.ac.kr)

공기 및 위성탑재 센서와 지상용 카메라 등 현존하는 초분광센서의 종류 및 특성을 제시하였다. 초분광영상과 관련된 연구 현황을 분석하기 위하여 원격탐사와 관련된 주요 국제학술지와 초분광영상 관련 학술발표회에서 발표된 논문들을 선정하여 센서별, 영상처리기법별, 주요 활용분야별로 나누어 정리하였다. 현재 항공기 및 위성 탑재 초분광영상 센서의 종류가 증가하고 있는 추세지만, 지금까지 초분광영상과 관련된 연구의 주된 부분은 미국 항공우주국에서 개발된 AVIRIS영상자료를 토대로 하고 있다. 기존의 다중분광영상에 보다 많은 분광밴드를 가진 초분광영상의 특성을 최대한 이용할 수 있는 영상처리기법이 개발되고 있다. 대기 보정, 분광혼합분석, 특징추출 등이 초분광영상처리와 관련된 중요한 분야로 대두되고 있으나, 아직까지 보편적인 초분광영상 처리기술로 자리 잡기까지는 보다 많은 연구가 필요한 실정이다. 초분광영상이 가지고 있는 분광특성 정보를 최대한 이용하기에 적합한 암석 및 광물탐사가 초기의 주된 활용분야였으나, 식물의 물리화학적 정보 추출, 수질, 군용목표물 탐지 등 초분광영상의 활용은 기존의 다중분광영상의 한계를 극복하는 측면에서 확대될 전망이다.

## 1. 서 론

광학영상자료의 특성은 다양한 해상도(공간해상도, 복사해상도, 분광해상도)의 개념으로 설명될 수 있다. 지난 30년 동안 광학영상센서의 개발은 주로 공간해상도(spatial resolution)와 복사해상도(radiometric resolution)를 향상시키는 방향으로 추진되어 왔다. Landsat 및 NOAA 위성에 탑재되었던 초기의 다중분광센서에서 출발하여 최근 공간해상도를 1m 내외까지 향상시킨 상업용 고해상도 다중분광센서까지 발전되어 왔으나, 분광해상도(spectral resolution) 측면에서 영상센서의 기술 진전은 상대적으로 미미하였다.

다중분광영상은 주로 10여개 미만의 한정된 파장구간에서 지표면으로부터 반사 또는 방출되는 복사에너지를 감지한 결과이나, 다양한 종류의 지표물 및 지표현상의 완전한 분광특성을 표현하는 데에는 한계가 있다. 지질, 식생, 암석, 물 등 복잡하게 구성되어 있는 지표물의 생물리화학적 특성과 관련된 보다 정확한 정보를 추출하기 위해서는 지표물의 완전한 분광정보가 요구되며, 이러한 필요성에 따라 초분광영상 기술의 개발이 시작되었다. 1970년대부터 미국 항공우주국(NASA)에서 초분광영상 센서 개발이 시작되었으며, 1983년 NASA 제트추진연구소(Jet Propulsion Lab-JPL)에서 항공기탑재 초분광영상센서인 Airborne Imaging Spectrometer(AIS)가 개발되었다. 이어서 1987년 AIS의 성능이 개량된 Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS)가 개발되면서 초분광영상에 대한 본격적인 연

구가 시작되었다고 할 수 있다. AVIRIS와 함께 미국 및 유럽의 여러 나라에서 항공기 탑재 초분광센서들이 개발되었으며, 2000년에는 초분광영상센서를 탑재한 인공위성이 성공리에 발사되었다.

초분광영상센서의 개발과 함께 초분광영상자료의 처리와 관련된 기술 개발에도 많은 연구가 수행되고 있다. 초분광영상자료는 기존의 다중분광영상자료와 달리 수많은 분광밴드를 가지고 있기 때문에 자료량이 방대하고 영상자료로부터 추출하고자 하는 정보의 종류 및 특성이 다를 수 있으므로, 기존의 영상처리 기법과는 다른 새로운 형태의 영상처리 기술 개발이 활발히 진행되고 있다(Landgrebe, 2001). 본 논문의 목적은 최근 국내에 소개되기 시작한 초분광영상과 관련된 용어, 기본적인 특성, 센서의 종류, 활용사례, 영상처리 기법 등을 포괄적으로 정리하여 국내에서 초분광영상 기술의 활용을 위한 기반자료를 제공하고자 한다.

## 2. 초분광영상의 특징 및 정의

초분광영상은 분광밴드가 많고(many), 연속적이고(continuous), 파장폭이 좁은(narrow) 세 가지 특징으로 정의될 수 있다. Fig. 1을 통하여 초분광영상과 다중분광영상의 차이점을 쉽게 관찰할 수 있는데, 그림에 나타나는 자료는 동일한 농지에서 촬영된 Landsat ETM+ 영상과 AVIRIS영상에서 추출된 농작물의 분광반사값을 보여주고 있다. Landsat ETM+ 영상의 분광

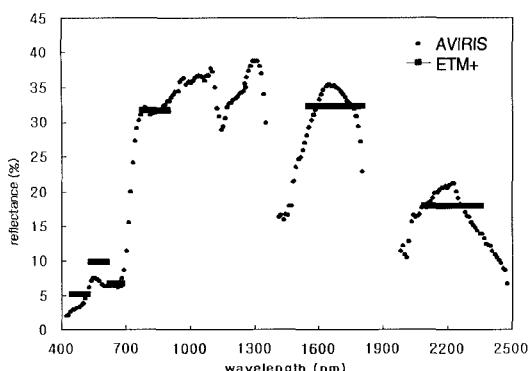


Fig. 1. Image spectra derived from AVIRIS hyperspectral data as compared to Landsat ETM+ multispectral data over the same agricultural cropland.

반사값은 6개의 이격된 파장밴드에서 얻어진 반면, AVIRIS에서는 400~2,500nm의 파장영역에서 약 10nm의 파장폭을 갖는 224개의 연속적인 밴드에서 추출된 분광반사값을 보여주고 있다. 초분광영상의 특징은 다음과 같은 초분광영상의 정의에서 살펴볼 수 있다.

"The acquisition of images in hundreds of registered, contiguous spectral bands such that for each element of an image it is possible to derive a complete reflectance spectrum(Goetz, 1991)."

"Imaging Spectroscopy is the acquisition of images where for each spatial resolution element in the image a spectrum of the energy arriving at the sensor is measured(JPL, 2005)."

초분광영상의 정의는 영상을 구성하는 각 화소에 해당하는 지표물의 완전한 분광특성곡선(spectral reflectance curve)을 얻을 수 있는 자료라고 할 수 있다. 지난 100여 년 동안 화학, 생물학, 천문학 등에서 대상물체의 특성을 구명하기 위한 수단으로 분광계(spectrometer, spectro-radiometer)를 사용해 왔고, 원격탐사 분야에서도 실험실이나 야외에서 다양한 지표물의 분광반사곡선을 측정하기 위하여 분광계를 사용하고 있다. 분광계가 하나의 물체에서 하나의 분광곡선을 측정할 수 있는 반면에 초분광영상은 영상을 구성하는 모든 화소마다 분광특성곡선을 얻을 수 있으며, 이를 이용하여 각 화소에 해당하는 목표물과 관련된 정보를 추출하는 데 사용된다. 이와 같은 이유로 초분광원격탐사

(hyperspectral remote sensing)의 정식명칭은 영상분광측정(imaging spectroscopy, imaging spectrometry)으로 출발하였다(Van der Meer and Jong, 2002).

초분광영상과 같이 새로운 기술이 도입될 때마다 이와 관련된 우리말의 기술용어가 분야에 따라서 매우 다르게 통용되고 있는 실정이다. 원격탐사용어에 대한 전반적인 표준화 작업이 관련 학계에서 추진되고 있으나 새롭게 등장하는 기술용어를 적절한 우리말로 변환하는 작업은 신중한 접근이 요구된다. 이미 언급했듯이 초분광원격탐사는 'imaging spectroscopy' 란 용어로 먼저 출발하였으며, 별칭으로 hyperspectral image, hyperspectral remote sensing란 용어가 함께 사용되고 있다. 국내에서는 imaging spectroscopy란 용어는 상대적으로 사용 빈도가 낮았고 hyperspectral image 또는 hyperpectral remote sensing이 보다 널리 통용되고 있다. 'hyperspectral image' 가 국내에 소개된 이래 다양한 용어로 표기되고 있는데, 'hyperspectral' 을 번역한 몇 가지 예를 든다면 초분광(超分光), 극다중분광(極多重分光), 세분광(細分光), 고분광(高分光) 등을 들 수 있다. 'hyper' 란 접두사가 '과도한, 이상적으로 많은' 이란 뜻을 감안한다면 초분광(超分光)이 가장 적합한 용어로 판단된다. 물론 '극다중분광' 도 기존의 다중분광(multispectral)을 뛰어 넘는 의미에서 사용될 수 있으나 가능한 간단한 용어를 사용하는 원칙에 따라 초분광이 보다 적합하다고 생각된다. '고분광'이나 '세분광'은 분광밴드가 많고 세분되어 있는 특성을 감안한다면 어느 정도 타당성 있는 용어가 될 수 있으나, hyperspectral의 부분적인 의미만을 나타내는 듯한 인상을 줄 수 있다. 따라서 imaging spectroscopy(영상분광측정) 보다 hyperpectral의 용어를 널리 사용하는 우리 실정을 감안하여 '초분광원격탐사' 또는 '초분광영상' 이 보다 적합한 우리 용어로 사용되길 바란다.

### 3. 초분광영상 센서의 종류와 특성

#### 1) 항공기 탑재 초분광센서

현재 활용되는 초분광영상의 대부분은 항공기탑재센서에 의존하고 있으며, 이는 초분광영상 센서가 위성

에 탑재되어 운영될 만큼 기술 및 활용측면에서 충분한 기반을 갖추지 못하고 있음을 의미한다. Table 1은 현재 까지 개발되어 사용되고 있는 대표적인 항공기 탑재 초분광센서의 종류와 그 특징을 보여주고 있다.

AVIRIS는 초분광원격탐사 기술을 이끌고 있는 가장 중요한 센서의 하나로 꼽을 수 있다. 미국 NASA JPL에서 1983년 개발된 초분광센서인 Airborne Imaging Spectrometer(AIS)를 개량하여 1987년에 소개된 센서로서 400~2,500nm 파장구간에서 총 224개의 밴드로 영상을 촬영한다. AVIRIS는 매년 다양한 활용분야에 적용될 수 있는 여러 지역을 설정하여 영상을 촬영하여 공급하고 있으며, 현재까지 센서 검보정, 영상 전처리,

지질학 및 광물탐사, 생태, 환경, 해양, 대기 등 다양한 목적의 연구에 사용되고 있다. 특히 1988년부터 지금까지 매년 AVIRIS Workshop을 개최하여 AVIRIS 자료 처리 기법 및 활용과 관련된 연구결과를 함께 나누는 자리리를 마련하고 있다.

AVIRIS를 중심으로 한 초분광영상의 최신 연구의 동향을 살펴보자 2000년부터 2003년까지 최근 4년 동안 AVIRIS Workshop에서 발표된 162편의 논문에 대하여 주제별로 정리하였다(Table 2). AVIRIS 센서는 초기부터 매년 실험 결과를 바탕으로 센서의 성능을 개선하였으며, 그에 따른 복사보정(radiometric calibration) 기법에 관련된 논문들이 많이 발표되어 왔었다. 그러나

Table 1. Primary airborne hyperspectral scanners.

Sensor	AVIRIS	Hymap	HYDICE	CASI 2	AISA
Operated by	USA JPL	Australia	USA NRL	Canada	Specim(USA)
Scan type	Across	Across	Across	Across	Along
Number of bands	224	126	210	288	244
Bandwidth (nm)	10	10-20	7.6 16	1.9	2.9
Wavelength range (nm)	400-2500	450-2500	400-2500	400-1000	400-970
SNR	500:1	> 500:1	217/107/40	480:1	1.41-1.02m
Spatial resolution	20m/3m	3-10m	0.75-3m	0.5-10m	39.7°, 29.9°
FOV	30°	30-65°	8.94°	37.8°	39.5°

Table 2. Categorization of papers presented during recent AVIRIS Workshops (2000~2003).

Category/Year	2000	2001	2002	2003	Total	
Image processing	Radiometric correction	8	5	2	1	16
	Atmospheric correction	7	5	6	6	24
	Data compression	3	1	1		5
	Spectral mixture analysis	5	5	3	1	14
	Feature extraction	10	2	3	1	16
	Spectral feature fitting	2	1	1		4
	Spectral classification	4	11	8	4	27
Sub-total		39	30	24	13	106
Application	Geology, mineral	4	6	8	4	22
	Vegetation	12	10	7	4	33
	Water quality	3	3	8	5	19
	Chlorophyl		1	4	2	7
	Atmosphere	1	4	1	2	8
	Others	3	1	3	3	10
Sub-total		23	25	31	20	99

최근에는 센서의 기능 향상이 상당 부분 완료되었기 때문에 이와 관련된 논문 수는 점차 감소하고 있는 추세다. 대기보정은 초분광 영상처리에서 매우 중요한 부분이므로 최근까지 비교적 중요하게 다루어지고 있으며, 정보 추출을 위한 밴드 선정기법과 분광특성을 이용한 영상분류기법에 관련된 논문들이 주로 발표되어지고 있다. 초분광영상의 활용과 관련하여 AVIRIS Workshop 초기에는 지질이나 광물탐사가 주된 분야였으나, 최근에는 지질분야는 감소하는 추세이며, 대신 식물, 생태, 대기, 수질과 관련된 논문이 증가하고 있음을 볼 수 있다.

AVIRIS를 제외한 다른 항공기 탑재 초분광영상 센서로 1989년 상업용으로 개발되어 세계 여러 나라에서 사용되고 있는 CASI(Compact Airborne Spectrographic Imager)가 있다. CASI는 400~870nm 파장 구간에서 총 288개 밴드의 영상을 제공된다. 또 다른 상업용 초분광센서로서 HyMap(Hyperspectral Mapper), AISA(Airborne Imaging Spectrometer for Applications) 등이 있다. 미국 해사연구소(NRL)에서 군사용 목적으로 개발된 HYDICE는 현재 군사용 이외에 민간용 촬영이 제한적으로 시도되고 있으며, 이밖에도 캐나다원격탐사센터에서 지질탐사용으로 개발된 SFSI 등이 있다. 항공기 탑재 초분광센서는 1990년대부터 민간분야에서 상업용으로 활발히 개발되어 오고 있으며, 본격적인 위성탐재 센서가 없는 현실을 감안하면 초분광영상의 획득 및 활용은 당분간 항공기탑재 센서에 의존될 전망이다.

## 2) 위성탐재 초분광영상 센서

항공기탑재 센서와 달리 현재 인공위성에 영상을 공급하는 초분광센서는 많지 않다. 1988년 소형위성에 탑재되었던 HSI(hyperspectral imager)는 위성의 실패로 끝났으며, 2000년에 비로소 지구궤도에서 초분광영상 을 얻을 수 있게 되었다(Table 3). 미국 항공우주국의 소형위성을 이용한 지구관측사업의 하나로 발사된 EO-1 위성에 탑재된 Hyperion 센서로부터 초분광영상이 공급되고 있으나, 실험위성의 특성상 영상촬영이 주기적으로 이루어지지 않고 있다. 이밖에 유럽우주국에서 2001년 10월에 발사한 PROBA 위성에 CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrometer) 센서가 탑재되어 초분광영상을 촬영하고 있으나, 이 역시 실험위성인 관계로 매우 제한된 영상을 획득하고 있다. CHRIS는 가시광선과 근적외선 파장영역에서 5 가지 촬영모드를 선택적으로 운영할 수 있으며, 농업용 촬영모드에서 최대 62개 밴드로 촬영이 가능하다. 미국방부에서 2000년 군사목적으로 발사한 MightySAT 2.1위성에 FTHSI(Fourier Transform Hyperspectral Imaging) 센서가 탑재되어 약 145개 밴드의 영상을 촬영하고 있으나, 군용이므로 일반에 공급이 극히 제한되어 있다. 이밖에도 미국과 유럽에서 민간 및 군사 목적의 초분광 위성 영상 획득을 위한 프로그램을 준비하고 있으며 향후 초분광 위성영상의 공급이 확대될 전망이다.

영상 촬영이나 공급이 제한되어 있는 CHRIS나

Table 3. Spaceborne hyperspectral sensors.

Sensors	Hyperion	CHRIS	FTHSI
Satellite	EO-1	PROBA	MightySAT(Sindri)
Operation	US NASA	ESA	US DoD
Scan type	Along	Along/Across	-
Launch	2000. 11. 21	2001. 10. 22	2000. 07. 19
Altitude	705km	600km	575km
Number of bands	242	5 selectable modes(upto 62 bands)	256
Bandwidth(nm)	10	6-33	-
Wavelength range(nm)	400-2500	410-1050	450-1050
SNR	100:1(VNIR)	200:1	-
Spatial resolution	30m	17-34m	0.5m-1km
Swath	7.5*100km	14km	145km

FTHSI와 달리 Hyperion는 비록 주기적인 촬영은 아니지만, 지구 전 지역을 대상으로 공급되는 초분광 위성영상이라고 할 수 있다(<http://edcwww.cr.usgs.gov>). Hyperion이 탑재된 EO-1위성은 Landsat 7호 위성과 동일 궤도에서 약 1분 차이로 영상을 촬영하고 있다. 약 350~2500nm 파장구간에서 모두 242개 밴드 영상이 촬영되며, 각 밴드는 약 10nm의 파장폭을 가지고 있다. AVIRIS와 같은 항공기탑재 초분광영상과 달리 Hyperion영상은 상대적 신호대잡음비(SNR)가 떨어지기 때문에 영상의 질이 상대적으로 낮다. Hyperion영상은 전 세계적으로 공급되는 위성탑재 초분광영상으로서 최근 자료처리 및 여러 분야의 활용을 위한 연구에 사용이 증가하고 있는 자료이다. 특히 동일궤도에서 얻어지는 Landsat ETM+나 EO-1위성에 함께 탑재된 ALI와 같은 다중분광영상과 Hyperion영상을 비교하여 초분광 영상의 높은 분광해상도의 효과를 비교 분석하는 연구가 발표되고 있다(Goodenough 등, 2003; Pu 등, 2005).

### 3) 지상용 초분광 카메라

비록 순수 원격탐사용 센서로 볼 수 없지만, 특정 약품 감지 등 실험 목적으로 개발된 지상 초분광카메라가 제품화되어 있다. 이와 같은 지상용 초분광 카메라는 대략 400~900nm의 구간에서 초분광영상을 촬영할 수 있으며, 이동이 용이하도록 소형으로 제작되어 있다. 지상용 초분광 카메라는 주로 가스 누출 및 약품 감지와 같은 화학적 분석, 대마초와 같은 특정 식물의 탐지, 그리고 위장막 검출같은 군사 목적으로 활용되고 있다.

Fig. 2는 지상용 초분광 카메라의 하나인 SOC-700을



Fig. 2. Portable hyperspectral camera (SOC-700), which can obtain 120 spectral band images from the wavelength region of 400 to 900 nm.

보여주고 있는 데, 이 카메라는 400~900nm 파장구간에서 120개 밴드의 초분광영상을 촬영할 수 있다 (<http://www.surfaceoptics.com>). 지상용 초분광 카메라에서 촬영된 영상은 정확한 분광반사곡선을 얻기 위한 절대적인 복사보정처리가 어렵지만, 분광계(spectrometer)와 함께 초분광 원격탐사영상을 비교분석하기 위한 참조자료로 사용될 수 있다.

## 4. 초분광 원격탐사 연구현황 분석

초분광 원격탐사와 관련된 연구 현황을 포괄적으로 파악하기 위하여, 원격탐사와 관련된 세 가지 주요 국제 학술지를 선정하여 초분광관련 논문들을 검색하고 각각의 논문을 주제별로 나누어 보았다. 각 학술지별로 검색 기간을 달리 하였지만, 1990년 초부터 2004년까지 총 248편의 초분광 원격탐사와 관련된 논문들이 검색되었으며, 각 논문은 사용된 센서의 종류, 영상처리기법, 활용분야에 따라 구분하였다(Table 4). Remote Sensing of Environment(RSE)에서는 1994년부터 2004년까지 총 106편 논문이 검색되었으며, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing(IGRS)에서는 1988년부터 2004년까지 총 103편의 논문이 검색되었으며, International Journal of Remote Sensing(IJRS)에서는 1997년부터 2004년까지 총 39편 논문이 검색되었다. RSE와 IJRS에서는 초분광영상의 활용과 자료처리에 관련된 논문이 비슷한 비율로 발표되었으나, IGRS에서는 초분광영상의 활용보다는 영상처리기법과 관련된 논문이 많은 비중을 차지하고 있다. Table 4에 표시된 논문 수는 센서, 처리기법, 활용분야의 세 가지로 크게 구분되었으나, 논문에 따라 두 개 이상의 주제가 동시에 포함되는 경우가 있었기 때문에 논문수의 총합은 일치하지 않는다.

이미 앞에서 언급하였듯이 AVIRIS자료를 이용한 논문이 다른 자료에 비하여 월등히 많았으며, 그 뒤를 이어 Hyperion, HyMap, HYDICE 순으로 나타났다. 이는 연구에 사용될 수 있는 초분광영상의 종류가 매우 제한적임을 나타내며, 향후 초분광 위성영상의 공급이 확대되기 전에는 이러한 추세가 계속되리라 판단된다. 영

Table 4. Number of hyperseptral remote sensing papers (obtained from three international journals) categorized by sensor, data processing, and applications.

Category		Journals			Total
		RSE(106)	ITGRS(103)	IJRS(39)	
Sensor type	AVIRIS	55	49	16	120
	Hyperion	3	23	1	27
	HyMap	11	5	5	21
	HYDICE	1	18	1	20
	others	45	23	16	84
Sub-total		115	118	39	272
Data processing	Radiometric/atmospheric correction	11	17	7	35
	Data compression and display	1	16	0	17
	Spectral mixture analysis	10	15	5	30
	Spectral matching	14	3	4	21
	Feature selection/extraction	8	17	4	29
	Classification	4	23	7	34
	Others	47	19	9	75
Sub-total		95	110	36	241
Application	Geology	22	2	12	36
	Vegetation	48	17	11	76
	Urban	1	2	1	4
	Hydrology	7	1	4	12
	Atmosphere	2	3	0	5
	Others	7	6	3	16
Sub-total		87	31	31	149

상처리 기법과 관련된 연구 동향은 기존의 다중분광영상 처리와 구분되는 초분광영상 고유의 처리기법에 해당하는 논문들은 주를 이루고 있다. 특히 초분광영상으로부터 완전한 분광반사곡선을 얻기 위한 복사보정 및 대기보정의 논문이 큰 비중을 차지하고 있으며, 분광혼합분석(spectral mixture analysis)과 분광특성정합(spectral matching) 기법이 많이 연구되고 있음을 볼 수 있다. 초분광영상의 활용과 관련된 연구 동향은 초분광영상이 소개되기 시작했던 1990년대 이전에는 주로 지질 및 광물탐사 분야가 주를 이루었으나, 본 연구에서 조사된 논문들의 시점에는 식생분야의 활용이 50% 이상을 차지할 정도로 활용이 증가하고 있다. 이는 앞에서 언급된 AVIRIS Workshop에서 발표된 논문들을 검토한 결과와 비슷한 경향을 보여주고 있다.

## 5. 초분광영상 처리 기법

다중분광영상과 달리 초분광영상은 수백 개 밴드의 대용량 자료이며 영상에서 정보를 획득하는 과정이 다른 것으로, 기존의 다중분광영상에 적용되던 처리기법과 다른 형태의 자료처리과정이 요구된다. 수백 개 밴드의 초분광영상에서 각 화소 위치의 분광특성을 추출하기 위해서는 대기보정과 같은 전처리 과정이 매우 중요하며, 각 화소의 분광특성을 이용하여 특정 목표물을 추출하거나 영상을 분류하는 기법 또한 다른 접근이 요구된다. 본 장에서는 초분광영상에 적용되고 있는 주요 영상처리기법들에 대한 개략적인 소개와 아울러 관련된 연구사례를 요약하고자 한다.

### 1) 자료압축(data compression)

자료량이 상대적으로 큰 초분광영상에 기존의 영상 처리기법을 그대로 적용하는데 여러 가지 문제점이 발

생될 수 있기 때문에 초분광영상자료를 위한 특정 압축기법이 필요하다(Kaewpijit 등, 2003). 초분광영상에 적용되는 자료 압축기법들은 크게 자료량을 줄이기 위한 압축기법과 특정 정보를 추출하기 위하여 자료변환과정을 수행하는 압축기법으로 나눌 수 있다(Table 5). 먼저 초분광영상의 전체 자료량을 줄이기 위한 압축기법들은 기존 신호 및 영상처리에 사용되었던 압축기법들을 변형한 것으로 볼 수 있으며, 압축알고리즘의 개발은 자료량을 줄이면서 초분광영상이 가지고 있는 분광특성에 관련된 정보를 최대한 유지하는 방향으로 개발되고 있다. 이와 같이 초분광영상의 자료량을 줄이는 데 중점을 두어 개발된 압축 기법으로 DPCM(differential pulse code modulation)이 있는 데, 이 방법은 일반 영상에 많이 적용되는 JPEG과 비슷한 방식으로, 압축하였을 때 정보의 손실이 거의 없고 인접 밴드간 상관관계가 높은 초분광영상에서 매우 높은 압축효과를 나타내고 있다(Aiazzi 등, 2001). 반면에 상대적으로 정보손실을 감수하는 압축기법으로 VQ(vector quantization)이 발표되었는데, 이 방법은 압축률이 가장 높으며 방법이 단순하다(Van der Meer and Kato, 2002; Zarco-Tejada 등, 2003). VQ 기법은 초분광영상에서 각 밴드별 화소값인 반사율을 파장에 대한 함수의 형태인 벡터로 표현하여 적용한 기법이라 할 수 있다.

단순히 자료량을 축소하고자 하는 압축기법 이외에 초분광영상에서 원하는 특정 정보만을 추출하고자 개발된 자료변환을 이용한 압축기법이 있다. 이 기법들은 대부분 직교함수(orthogonal function)을 통한 변환기법들로, 영상압축 효과뿐 만 아니라 초분광영상에 있는 노이

즈 탐지와도 관련된 기법들이다. 주성분분석(Principle Component Analysis-PCA)은 원격탐사 영상처리의 초기부터 널리 사용되어 온 변환기법의 하나로 밴드 수를 줄이거나 영상강조 기법으로 적용되어 왔으나, 대기흡수 밴드를 포함하여 노이즈가 심한 초분광영상의 압축기법으로 적절치 않다고 알려져 있다(Green 등, 1988). PCA 변환 기법의 단점을 보완한 압축기법으로 MNF (maximum noise fraction) 변환 기법이 있는데, 이는 NAPC(noise adjusted principal components) 기법이라고도 한다(Green 등, 1988). 이 방법은 밴드별 노이즈의 분산(variance)을 계산 후 이를 기준으로 하여 노이즈 효과가 제거된 밴드별 고유의 분산을 최대화하는 방향으로 변환된다. 물론 이 방법도 노이즈의 분산과 공분산값 추정에 어려움이 있으며, 이러한 과정을 보완하는 새로운 영상변환기법들이 소개되고 있다(Chang and Du, 1999). 그 밖에 wavelet 변환 기법을 통한 압축기법과 선형혼합분석(LMA)을 이용한 새로운 압축기법들이 제시되고 있다(Kaewpijit 등, 2003; Chang and Du, 1999).

## 2) 복사보정(radiometric correction)

영상의 질을 평가하는 척도로 신호대잡음비(signal-to-noise ratio - SNR)는 매우 중요한 기준이 된다. 초분광영상자료는 좁은 파장폭에 기인하여 기존의 다중분광자료보다 영상의 질이 떨어져서 상대적으로 낮은 SNR을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 초분광영상자료의 상대적 질을 나타내기 위한 SNR 추정 방법에 대한 논문들이 발표되었다. 초분광영상의 상대적 SNR의 추정은 영상의 기본 통계값(평균, 표준편차)를 이용하는

Table 5. Selected studies related to hyperspectral data compression.

Compression methods	Data	Authors
Empirical Orthogonal functions(EOF) and Transform encoding	AVIRIS	Hoffman and Johnson (1994)
Vector Quantization(VQ)	AVIRIS	Ryan and Arnold (1997)
Differential Pulse Code Modulation(DPCM)	AVIRIS	Aiazzi 등(2001)
Linear Mixture Analysis(LMA)	AVIRIS, HYDICE	Du and Chang (2004)
Wavelet	AVIRIS	Kaewpijit 등(2003)
Trellis Coded Quantization(TCQ)	AVIRIS	Abousleman 등 (1995)
Interference and noise adjusted PCA(INAPCA)	HYDICE	Chang and Du (1999)
3-D fuzzy prediction	AVIRIS	Aiazzi 등(1999)

Table 6. Selected studies related to radiometric calibration of hyperspectral data.

Method	Data	Authors
Noise filtering	VIFIS	Gu 등(1999)
Nugget Variance	AVIRIS	Atkinson(1997)
Geostatistic method(Notch filtering & semivariogram)	AVIRIS	Curran and Dungan(1989)
Empirical Orthogonal Function(EOF)	AVIRIS	Hoffman and Johnson(1994)
MNF	Hyperion	Datt 등(2003)
Smile correction	Hyperion	Goodenough 등(2003)
RBVC(Reflectance based vicarious calibration)	Probe, CASI	Secker 등(2001)
Quality assurance and stability reference(QUASAR)	AVIRIS, CASI	Teillet 등(2001)

방법과 semivariogram을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다(Van der Meer and Jong, 2002; Curran and Dungan, 1989). 먼저 영상에서 변이가 적은 동일한 피복으로 이루어진 지역에 포함되는 화소값의 평균과 표준편차의 비를 상대적 SNR로 하거나 또는 전체 영상을 임의의 일정 크기로 나누어 각 구간 내의 평균과 표준편차를 이용하는 방법이 있다.

초분광영상의 SNR을 추정하는 연구 외에 복사보정과 관련된 연구로는 각 센서별 광학적 특성과 연관된 복사보정 처리과정을 다른 연구들이 있으며, 밴드별 분광반응도(spectral responsivity) 측정, 밴드별 유효 파장폭 결정 등이 주된 주제다. 비교적 최근 발사된 초분광 위성영상인 Hyperion 자료는 항공 초분광영상자료에 비하여 센서 수준의 복사보정처리가 미흡하여 영상의 질이 상대적으로 떨어지므로, 이 영상의 광학적 왜곡현상을 보정하기 위한 처리 기법들이 개발되고 있다(Goodenough 등, 2003). Table 6은 초분광영상과 관련된 기본적 복사보정 처리와 관련하여 발표된 논문들이다.

### 3) 대기효과 보정(atmospheric correction)

초분광영상에서 얻을 수 있는 가장 중요한 정보는 각 화소에 해당하는 지표물의 연속적인 분광반사값(spectral reflectance)이라 할 수 있다. 현재 초분광영상은 대부분 센서에서 감지된 복사량(radiance)으로 표현된 자료로 제공되고 있다. 초분광영상으로부터 각 지표물의 정확한 분광반사 특성을 밝히기 위해서는 무엇보다 먼저 radiance값에서 대기에 의한 영향을 제거하

여 순수한 표면반사율로 변환하는 대기효과 보정이 우선되어야 한다. 현지 분광측정값을 이용한 상대적 대기보정 방법도 제시되고 있으나(Biggar 등, 2003), 초분광영상의 대기효과 보정은 대기복사전달모델에 의하여 대기입자에 의한 산란 및 흡수량을 추정하여 센서에서 감지된 복사량으로부터 직접 가감하는 절대적 대기보정 방법이 주를 이루고 있다. 초분광영상의 대기보정을 위하여 사용되는 주된 대기복사전달 모델은 MODTRAN과 S6 모델이 있다. 초분광영상의 대기효과 보정을 위하여 공공 및 상업용 프로그램들이 개발되고 있는데, 이들 프로그램은 대부분 이러한 대기복사전달모델을 기반으로 하고 있다.

대기복사전달모델을 이용한 직접적인 대기보정에서는 태양과 촬영지점간의 기하관계, 표준 대기모델, 에어로졸 유형 등 기본적인 인자가 입력되어야 하며, 초분광영상의 정확한 대기효과 보정을 위해서는 영상촬영시점의 대기 상태와 관련된 자료가 수반되어야 한다. 기존의 다중분광자료와 달리 초분광자료는 영상자료로부터 대기 보정에 필요한 대기관련 자료를 직접 획득할 수 있는 장점이 있다. 특히 초분광영상의 특정 밴드(가령 940nm, 1,140nm)에서 영상획득 시점의 대기 수증기량의 공간적 분포를 직접 얻으므로 보다 정확한 대기 흡수 및 산란량을 추정할 수 있다. 대기 수증기량 외에도 초분광영상으로부터 대기보정에 필요한 가시거리, 표면기압 등의 인자들을 추정하는 방법론이 제시되었다(Sanders 등, 2001). Table 7은 초분광영상에 적용되는 대기효과 보정에 관련된 연구 사례를 나열하고 있다.

Table 7. Selected studies related to atmospheric correction of hyperspectral data.

Method	Data used	Authors
MODTRAN	HyMap, DAIS	Richter and Schlapfer(2002)
MODTRAN and ATREM	AVIRIS, Hyperion	Goetz 등(2003)
MODTRAN and Correlated K gaseous absorption model using Field spectrum data	AVIRIS Hyperion	Gu 등(1999) Bigger 등(2003)
Autonomous Atmospheric Compensation(AAC)	SEBASS	Gu 등(2000)
Surface Prior Information Reflectance Estimation(SPIRE)	HYDICE	Viggh and Staelin(2003)
Multiple scattering76 calculation & k distribution	Hyperion	Cairns 등(2003)
PROSPECT, GeoSAIL, MODTRAN4	HyMap	Verhoef and Bach(2003)
Empirical Line(EL) on HATCH correction	AVIRIS	Ben Dor 등(2004)
Atmospheric Pre Corrected Differential absorption(APDA), Non Linear Least Squares Fit(NLLSSF)	HYDICE	Sanders 등(2001)
Spectrum matched technique	AVIRIS, Hyperion	Gao 등 (2004)

#### 4) 분광 혼합 분석(spectral mixture analysis)

항공기 탑재 혹은 위성 탑재 광학 센서는 고유의 공간해상도에 해당하는 일정 면적의 지표면을 촬영하며, 이 지표면은 동질의 단일 물질로 구성되기 있기 보다는 두 가지 이상의 물질로 구성된 혼합체의 성격을 가지고 있는 경우가 많다. 이로 인하여 광학영상을 구성하는 각 화소값은 해당공간에 포함된 두 가지 이상의 지표물의 반사에너지가 정량적으로 혼합된 결과로 볼 수 있다 (Keshava and Mustard, 2002). 이러한 혼합화소를 분석하기 위해, 분광혼합분석(spectral mixture analysis)이라는 개념이 제시되었다. 분광혼합분석 기법은 각 화소에 포함되어 있는 여러 지표물의 고유한 분광반사특성을 이용하여 각 화소를 구성하는 여러 지표물의 점유비율(fraction)을 해석하는 기법이다. 이때 각 화소를 이루고 있는 단일의 순수한 지표물을 endmember라 하며, 각 화소는 여러 endmember의 구성비율(fraction)의 합으로 나타낼 수 있다. 이러한 분광혼합분석 기법은 화학분야에서 분광측정(spectroscopy)에 적용되던 기법으로, 원격탐사 분야에서는 많은 파장대의 분광정보를 제공하는 초분광영상 자료가 제공되면서 본격적으로 연구되기 시작하였다. 분광혼합분석 기법은 그 자체가 영상분류기법으로도 사용되며, 다양한 지표물의 특성 및 현상과 관련된 정보를 추출하기 위한 처리과정으로 인식되어 사용되고 있다.

분광혼합분석은 영상에 해당하는 지표면이 여러 물질들로 구성되어 있으며, 각 물질들은 분광적으로 고유한 특징을 가지고 있다는 가정에서 시작된다. 이러한 분광혼합분석 기법은 각 구성성분의 분광신호의 상호 영향의 유무에 따라 선형 분광혼합기법과 비선형 분광혼합기법으로 나뉜다. 선형 분광혼합기법은 화소를 구성하는 각 endmember의 분광 신호가 독립적으로, 상호 간섭 없이 한 화소값은 각 endmember들의 선형조합으로 나타난다고 간주하는 기법이다. 이에 비해 비선형 분광혼합기법은 각 endmember의 분광 신호가 서로 영향(multiscattering)을 주어, 화소값은 endmember들의 비선형 조합으로 보다 복잡하게 표현되어진다.

다음은 선형 분광혼합 기법의 기본식으로 다음 식 (1)로 표현되어진다.

$$X_s = H\beta_s + \eta_s \quad (1)$$

식 1에서  $X_s$ 는 해당 파장대에 각 화소가 나타내는 반사율(reflectance)이고,  $H$ 는 endmember의 고유반사값에 해당하는 행렬이며,  $\beta_s$ 는 화소에서 endmember별 구성비(fraction)을 의미한다. 마지막으로  $\eta_s$ 은 오차값을 나타낸다. 선형 분광혼합기법은 두 가지 제약조건을 가지는데, 우선 각 물질의 구성비율은 항상 0 이상의 값을 가져야하며, 그 구성비율의 합은 항상 1이어야 한다. 또한 endmember의 수는 영상의 분광밴드 수의 이하여야 한다. 이러한 선형 혼합기법은 가정에서 각 endmember의

분광신호가 독립적이라고 정의하였으나, 특정 지표물들, 예를 들어 광물이나 식물의 수관층에서는 이러한 가정이 맞지 않는다고 알려져 있다(Roberts 등, 1993). 이러한 지표물에서는 endmember의 분광특성이 서로 영향을 끼치기 때문에 선형 혼합기법보다 비선형 혼합기법이 보다 적합할 수 있다(Hapke, 1981 & 1993). 비선형 혼합기법이 원격탐사 분야에 널리 사용되지 못한 이유에는 수식이 복잡하며, 혼합물의 입자 크기와, 구성 배치, 변화된 상태 등에 따른 분광신호들의 상호 영향 관계를 충분히 이해하고 있지 못하기 때문이며, 이러한 문제는 향후 분광혼합분석의 주요 연구 방향이 될 수 있다.

초분광영상에 적용되는 분광혼합 분석기법의 처리과정은 크게 다음과 같은 세 단계로 볼 수 있다(Keshava and Mustard, 2002). 첫 번째로 보다 효과적인 영상처리와 영상의 노이즈를 제거하기 위해 초분광영상의 수많은 분광정보를 줄이는 과정으로, 대표적으로 주성분분석(PCA)과 MNF변환 기법들이 있다. 두 번째 단계는 영상의 혼합화소에 포함되는 endmember의 종류와 각 endmember의 분광신호를 정의하는 과정으로, 분광화소기법에서 매우 중요한 과정이다. 마지막 단계는 혼합화소에 대한 각 endmember의 구성비율을 추정하는 분광분해(spectral unmixing) 과정이다. 분광혼합분석의 세 과정 중 endmember 선정이 가장 중요한 단계가 될 수 있는데, 영상에서 직접 endmember를 선택하는 방법과 야외나 실험실에서 직접 endmember의 분광신호를 측정하거나 분광라이브러리를 사용하여 해당하는 endmember의 분광신호를 얻는 방법이 있다. 후자의 경우, spectrometer로 측정할 때 영상과 같은 기상상태와 광 조건에서 측정되어야 하는 제약점이 있기 때문에 영상에서 직접 endmember를 선정하는 경우가 많다.

초분광영상에서 직접 endmember를 선정하는 기법으로는 MEST(Manual endmember selection tool), PPI(Pure Pixel Index), N-FINDER, IEA(Iterative Error Analysis), ORASIS(Optical Real time Adaptive Spectral Identification System), CCA(Convex Cone Analysis), AMEE(Automated Morphological Endmember Extraction), SAA(Simulated Annealing Algorithm)이 있다(Lu 등, 2004). PPI(Pure Pixel Index)는 상대적으로 ‘순수한

(pure)’ 한 픽셀을 찾아 순수성이 높은 것을 endmember로 정하는 것이며 초분광영상에서 일반적으로 많이 쓰인다. PPI는 밴드 좌표공간의 원점으로부터 밖을 향해 퍼지는 임의의 방향성을 시험하는 것으로 모든 스펙트럼의 포인트는 고유 벡터쪽으로 투영되어야 하고 이때 최적의 스펙트럼이 나타나게 된다. N-FINDER는 최대 자료량을 기준으로 endmember를 정하는 것으로 원 영상에서 MNF를 사용하여 밴드 수를 감소시킨 후 화소를 무작위로 추출하여 각 밴드를 축으로 하는 분광공간에서 분광 스펙트럼을 화면 출력한다. 이 출력된 스펙트럼에서 어떤 화소가 endmember로 정해져서 자료량이 증가했다면 그 화소는 endmember가 되며 이 과정은 화소가 더 이상 endmember가 되지 않을 때까지, 즉 자료량이 증가하지 않을 때까지 계속된다. CCA는 영상에서 표본지역의 분광상관행렬에서 초기 벡터를 찾고 endmember의 초기값과 일치하는 초기벡터를 선택하는 것이다(Ifarraguerri and Chang, 1999).

Matched filtering 기법은 전체 영상을 대상으로 모든 endmember의 구성비로 분해하는 것이 아니라, 혼합신호로부터 분석자가 원하는 목표물을 탐지하는 기법이다. 이 기법은 전기공학분야에서 매우 잘 알려진 신호처리기법으로, 여러 신호가 혼합된 신호에서 분석자가 원하는 신호를 탐지하는데 매우 유용하게 사용된 기법이다. 혼합신호를 대상신호와 배경신호로 나누어 배경신호를 최대로 억압하면서 대상신호를 강조하는  $q$ 를 개발하는 방식으로 최근 초분광영상의 분광특성 정합기법에 사용되었다. 초분광영상에서 Matched filtering 기법을 적용하는데 있어, 대상 신호는 기준 스펙트럼이 되며 혼합신호를 대상신호와 배경신호로 나눠 매핑하는 방식이다. Matched filtering에서  $q$ 는 다음 식으로 산출되어 초분광영상에 곱해지게 된다.

$$q = \frac{1}{\sigma(b^T)^{1/2}} b^T \quad (2)$$

( $b$ : 기준 스펙트럼의 벡터,  $\sigma$ : 기준 스펙트럼의 표준편차)

하지만 이러한 matched filtering 기법은 신호처리에 있어서는 최적의 결과를 나타내지만, 초분광영상에 적용에는 최적의 결과를 제시하지 못하고 있다. 이는 matched filtering 기법의 적용에 사용된 기본 가정이

신호처리에서는 정확히 성립되나 영상에서는 성립되는 데 약간의 문제가 발생되기 때문이다. 따라서 초분광영상에 맞는 새로운 matched filtering기법인, MTMF(mixture tuned matched filtering)이 제시되었다. MTMF기법은 기존 선형분광혼합기법과 matched filtering기법의 장점만을 살린 혼합기법으로, 배경신호에 대한 정보가 없어도 사용 가능하다. 이 기법은 기존의 Matched filtering 기법들에 비해 매우 높은 정확도를 제공한다(Williams and Hunt, 2002).

Matched filtering과 유사한 기법으로 Farrand와 Harsanyi(1997)에 의해 개발된 CEM(constrained energy minimizing)가 있다. 이 기법은 배경신호는 최소화하고 대상신호를 최대화하는 벡터  $w$ 를 결정하는 기법으로 영상전체에 대한 대상물의 함유량 정보를 제공하게 된다(Van der Meer and Jong, 2002).

### 5) 분광특성 정합(spectral matching)

초분광영상의 등장과 함께 단순한 피복분류 단계에서 벗어나, 보다 정확한 지표물의 종류 및 혼합 정도와 관련된 정보를 추출하는 연구가 활발히 진행되었다. 특히 초기 초분광영상의 활용과 관련된 연구에서는 대상 지역을 구성하고 있는 특정 광물의 종류 및 함유량을 정확히 측정하기 위한 분광적 분석 기법들이 제시되었다.

분광특성 정합(spectral matching)은 기존에 알려져 있는 대상물체의 기준 분광반사값을 이용하여 초분광영상에서 얻어지는 반사값과의 분광특성 유사성을 분석하여, 초분광영상의 각 화소에 대한 대상물체의 종류 및 함유량 등을 정의하는 방법이다. 분광특성 정합은 기준 분광반사곡선과 초분광영상의 반사곡선간의 유사도를 측정하는 방법에 따라 다양한 기법이 제시되고 있다(Table 9).

#### (1) Spectral Distance Similarity (SDS) 기법

대상 스펙트럼과 기준 스펙트럼간의 분광적 거리를 유사성 척도로 사용하여, 거리가 가까울수록 유사하다는 가정으로 수행되는 방법으로, 여러 거리 척도들이 제시되었으나, 일반적으로 직선거리(euclidean distance)가 사용된다.

#### (2) Spectral Correlation Similarity(SCS) 기법

대상 스펙트럼과 기준 스펙트럼을 각각 벡터로 가정한 후, 이 벡터간의 분광적 상관계수를 유사성 척도로 사용한다.

$$\rho = \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n (t_i - \mu_t)(r_i - \mu_r) \right] \quad (3)$$

( $\rho$ : 상관계수,  $t$ : 분석하고자 하는 대상 스펙트럼,  $r$ : 기준 스펙트럼,  $\mu$ : 평균,  $\sigma$ : 표준편차)

Table 8. Selected studies related to spectral mixture analysis.

Method	Data used	Authors
Auto MCU	AVIRIS	Asner and Heidebrecht(2002)
Linear Spectral Mixture Analysis (LSMA)	-	Lu 등(2004)
Bundle unmixing	AVIRIS	Bateson 등(2000)
Generalized likelihood ration test and LMM	HYDICE	Manolakis 등(2001)
Independent Component Analysis (ICA) based Linear Spectral random mixture Analysis	AVIRIS	Chang 등(2002)
Wavelet	HYDICE	Bruce 등(2001)
Gibbs based algorithm	HYDICE	Rand and Keenan(2001)
Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis	AVIRIS	Roberts 등(1993)
AutoMCU	TM	Asner 등(2003)
Mixture Tuned Matched Filtering(MTMF)	AVIRIS	Williams and Hunt(2002)
Matched filtering	AVIRIS, HyMap	Chabrilat 등(2002)
Constrained Energy Minimization(CEM)	HYDICE	Resmini 등(1997)

### (3) Spectral Angle Similarity (SAM)

SCS와 마찬가지로 두 스펙트럼을 벡터로 가정한 후 이 벡터간의 각도를 이용하여 유사성을 나타내는 데, 두 벡터가 이루는 각도가 작을수록 두 스펙트럼이 유사하다 판정한다.

$$\alpha = \arccos \left[ \frac{\sum_{i=1}^n t_i r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n r_i^2}} \right] \quad (4)$$

### (4) Spectral Similarity Value (SSV)

위의 SDS기법과 SCS기법을 합친 방법으로, 두 스펙트럼에서 나타나는 반사값과 스펙트럼의 모양의 유사함을 모두 포함하는 개념이라 할 수 있다.

$$SSV = \sqrt{Ed^2 + (1 - \rho)^2} \quad (5)$$

( $Ed$ : 두 스펙트럼간의 Euclidian distance,  $\rho$ : 두 스펙트럼간의 상관계수)

### (5) Least Squares fitting 기법

분광반사 스펙트럼을 이용하여 특정 대상을 정의하는데 가장 효과적인 방법은, 대상물이 특정 파장구간에서 급격히 흡수되는 분광특성을 이용하는 방법이다. 이러한 분광 흡수 밴드를 이용하여 기준 스펙트럼과 대상 스펙트럼과의 유사성을 제시하는 방법으로 최소자승정합(least squares fitting) 기법이 제시되었다. 이 기법을 이용하여 미국 국립지질조사원(USGS)에서는 Tetracorder라는 프로그램을 초분광영상 분석에 사용하고 있다.

### (6) Cross Correlogram Spectral Matching(CCSM)

Van der Meer와 Bakker(1997)가 개발한 기법으로, 초분광영상의 스펙트럼과 기준 스펙터럼과의 cross

correlation를 이용한 새로운 분광매칭기법이다. 기준 스펙트럼과 대상 스펙트럼을 매칭 위치를 이동해 나가면서 아래 수식과 같이 cross correlation값을 계산한다. 이렇게 계산된 상관계수값에 대한 평균제곱근오차(RMSE)를 계산하여 정합 정도를 분석한다(Van der Meer and Jong, 2002).

$$r_m = \frac{n\sum \lambda_r \lambda_t - \sum \lambda_r \sum \lambda_t}{\sqrt{[n\sum \lambda_r^2 - (\sum \lambda_r)^2][n\sum \lambda_t^2 - (\sum \lambda_t)^2]}} \quad (6)$$

( $n$ : 밴드수,  $m$ : matching 위치,  $\lambda_t$ : 대상 스펙트럼,  $\lambda_r$ : 기준 스펙트럼)

## 6) 특징 선택 및 추출(feature selection and extraction)

수백 개 이상의 연속적 밴드를 가진 초분광영상은 기존 다중분광영상에 비해 보다 완전한 분광 특성을 얻을 수 있게 하였다. 하지만 이러한 초분광영상은 연속적인 인접 밴드간의 높은 상관관계에 따라 정보의 중복율이 높으며, 대용량의 정보로 인해 처리와 분석에 많은 문제가 발생한다. 이에 수많은 분광정보 중에 연구목적에 맞는 특정 분광정보 혹은 분광밴드를 선택하여 사용하는 과정이 필수적으로 수행되어야 한다. 이와 같은 수많은 분광정보에서 원하는 특정 정보만을 추출하는 과정을 특징추출(feature extraction)과정이라 한다. 특징 추출기법은 밴드 선택(band selection) 혹은 특징 선택(feature selection)과 함께 사용된다. 개념적으로 살펴보면 밴드 선택은 수 백 개의 분광 밴드 중 목적에 맞는 밴드만을 선택하거나, 특정 분광 변환기법을 통해 원하는 분광정보만을 나타내는 변환된 분광밴드들을 제작하는 과정이다. 이해 위해 특징추출은 밴드 선택 과정을 포함하는 보다 광범위한 개념으로 영상으로부터 패턴

Table 9. Selected studies related to spectral matching of hyperspectral data.

Method	Data used	Primary target	Authors
Cross Correlogram Spectral Matching(CCSM)	AVIRIS	Rock type	Van der Meer(2000)
SAM	MAIS	Rock(Ni-Cu)	Van der Meer 등(1997)
Tetracorder	Hyperion	Mineral discrimination	Hubbard 등(2003)
Continuum removal and least squares fitting method	AVIRIS	Vegetation type	Kokaly 등(2003)
Non-linear & linear least squares spectrum matching techniques	AVIRIS	Vegetation moisture	Gao and Goetz(1995)

Table 10. Selected studies related to feature/band selection of hyperspectral data.

Method	Data used	Application	Authors
Binary string	AVIRIS	Algorithm development	Serpico and Bruzzone(2001)
Spatial Autocorrelation Ratio	AVIRIS	Comparison of feature selection methods	Warner 등(1999)
Bhattacharyya Distance	AVIRIS	Urban cover classification	Herold 등(2004)
Backpropagation neural network(BNN)	HyMap	Grass condition	Mutanga and Skidmore(2004)
Spatial autocorrelation analysis	AVIRIS	Algorithm development	Warner and Shank(1997)
Endmember Average Root Mean Square error(EAR)	AVIRIS	Tree species classification	Dennison and Roberts(2003)

인식기에 사용될 분광특징 및 자료를 추출하는 과정을 의미한다. 특히 초분광영상처리에서는 이러한 특징추출 과정이 패턴인식에 사용하기 위한 차원감소 과정으로 간주되기도 한다. 특징추출 기술은 초기에는 이미 일반 영상 자료 또는 다차원의 패턴인식문제에서 사용되어 오던 기술을 초분광자료에 적용하여 그 성능을 비교 분석하는 작업부터 시작하여 초분광 영상처리에 적합하도록 기존의 알고리즘을 변형시키거나 새로운 알고리즘을 개발하는데 주안점을 두고 진행하고 있다. 하지만 위성 또는 항공 촬영된 초분광영상자료의 공급이 충분치 않은 이유로 이와 관련된 연구는 아직 초기단계라 할 수 있다.

초분광영상에서 밴드 선택은 매우 중요한 처리과정이 될 수 있으며, 이와 관련하여 다양한 방법이 제시되고 있으나, 아직까지 일반화된 방법은 미흡하다고 할 수 있다. 가장 보편적으로 생각할 수 있는 방법은 밴드간의 상관관계를 이용한 방법으로, 상관관계가 낮은 밴드들을 선택하여 사용하는 것이다. 또한 도시피복 분류를 위한 최적의 밴드를 선택하기 위해 Bhattacharyya 거리나 Jeffreys Matusita 거리를 사용하거나, 영상의 표준편차와 entropy로 밴드지수(Band Index)를 구하고 이를 이용하여 밴드를 선택하는 방법이 있다(Herold 등, 2003; Jiang 등, 2004). 이 외에도 Table 10과 같이 독립성분분석(Independent Component Analysis)을 사용하여 선택하는 방법도 있으며, 최근에는 공간자기상관(Spatial Autocorrelation) 분석을 이용하여 밴드를 선택하는 방법이 많이 사용되고 있다(Warner 등, 1999).

초분광영상에 적용된 특징추출(feature extraction) 기법에는 PCA(Principal Component Analysis),

DBFE(Decision Boundary Feature Extraction), Spectral Shape Analysis(SSA) 등이 있다. 초분광 영상의 수 많은 밴드를 효과적으로 줄이면서 특징 추출을 하기 위해 개발된 방법이 결정경계 특징추출(DBFE, Decision Boundary Feature Extraction)이다. 결정 경계 특징추출은 원 데이터로부터 얻을 수 있는 분류 정확도와 동일한 분류 정확도를 얻기 위한 특징 벡터는 분류기(classifier)가 정의하는 결정경계에 대한 수직벡터로 구할 수 있다는 것이다. 즉, 클래스간의 결정경계로부터 패턴 분류에 필요한 정보를 제공하는 특징을 추출하는 방법이다(Benediktsson 등, 1995). 다른 feature extraction 방법으로 Spectral Shape Analysis(SSA)는 물체의 고유한 흡수물질과 분광패턴의 결합에 따라 나타나는 분광곡선을 이용한 것으로 이 분광곡선의 최대점이나 최하점을 보고 특징을 추출하는 방법이다(Launeau 등, 2004). 특징추출 및 특징선택은 초분광 영상자료의 처리과정에 있어서 가장 중요한 기법 중 하나이나, 현재 연구되고 있는 많은 기법들이 보편적인 처리과정으로 사용되기 까지는 많은 검정과정이 필요할 것이다. 특히 초분광영상을 이용한 특정 정보획득에 있어서 활용분야에 따라 특징추출과정 또한 달라질 수 있기 때문에 기존의 영상분류정확도 지향적인 특징추출과는 다른 접근이 요구된다. Table 11은 현재까지 제시된 주요 특징추출 방법을 열거하고 있다.

## 7) 초분광영상 분류(hyperspectral image classification)

초분광영상이 제시되면서 기존에 다중분광영상에서 다루었던 영상분류에 대한 새로운 정의가 필요하게 되

Table 11. Selected studies related to feature extraction of hyperspectral data.

Method	Data used	Authors
Decision Boundary Feature Extraction	AVIRIS	Benediktsson 등(1995)
Top-down algorithm & Bottom-up algorithm	AVIRIS	Kumar 등(2001)
Spectral Shape Analysis(SSA)	AVIRIS, HyMap	Launeau 등(2004)
Continuum removal method	AVIRIS	Galvao 등(2003)
PCA	AVIRIS	Chabrilat 등(2000)
Posteriori Least Squared Orthogonal Subspace Projection(LSOSP)	Field spectrometer data	Tu 등(1997)
Noise Subspace Projection(NSP)	AVIRIS	Tu 등(1998)
Leave-One-Out Covariance Estimator(LOOC) and Bayesian LOOC(BLOOC)	-	Kuo and Langrebe(2002)
Genetic Algorithm based Selective PCA(GA-SPCA)	RDACS/A 3	Yao and Tian(2003)
Projection Pursuit(PP)	AVIRIS	Jimenez and Landgrebe(1999)
Convex Cone Analysis(CCA)	HYDICE	Ifarraguerri and Chang(1999)

었다. 즉, 영상의 모든 영역을 정해진 등급으로 분류(classification)하는 의미뿐만 아니라, 특정 대상물만은 탐지(target detection)하거나 인식(material identification)하는 개념까지 확장되고 있다. 분류란 각 화소에 대해 분류 등급을 정의하는 것이며, 대상물을 탐지는 분석자가 이미 알고 있는 대상물을 찾는 과정으로 영상의 각 화소에 대해 대상물 여부를 정의하는 것이다(Shaw and Manolakis, 2002). 인식(identification)은 분석자가 영상으로부터 탐지의 대상물을 모르는 상태에서 각 화소에 해당되는 물질의 종류를 정의하는 것이다(Shippert, 2004).

초분광영상에서는 일반적으로 분류 전에 모든 분광 밴드를 사용하기 보다는 이를 변환하여 차원 감소시킨 후 분류기법에 적용시킨다. 또한 특정 연구들에서는 효과적인 분류를 위해 앞장에서 언급한 특징 추출 기법들이 적용되는 경우도 있다(Ben-Dor 등, 2001; Kruse 등, 2003). 초분광영상의 분류기법은 크게 기존에 다중 분광영상에 적용되었던 기존의 분류기법들을 그대로 적용한 경우와 초분광영상에 맞는 분류 기법들이 새롭게 제시된 경우로 나눌 수 있다. 기존에 사용된 분류 방법으로는 최소거리법(Minimum Distance), 최대우도법(Maximum Likelihood)과 같은 통계적 분류 기법과 통계적 변수를 사용하지 않는 인공신경망(Neural Network)기법들이 적용되었다(Benediktsson 등, 1995; Ustin and Xiao, 2001; Goodenough 등,

2003). 이러한 분류 알고리즘에 대한 구체적인 설명은 본 논문에서는 별도의 언급은 생략한다. 초분광영상에 적용된 비교적 새로운 분류기법으로는 분광각도분류(Spectral Angle Mapper)기법과 MTMF 기법을 포함한 분광화소분석기법(unmixing)을 이용한 분류기법이 있다(Yang 등, 1999; Ben Dor 등, 2001).

분광각도분류(SAM)기법은 공간상에서 거리 개념으로 유사성을 판단하는 것이 아니라 분류될 미지의 화소와 각 분류등급 화소가 이루는 각도로서 유사성을 판단하는 기법이다. 유사성 판단은 아래의 식 9와 같이 분류 클래스  $t$ 와 입력 화소  $P$ 가 이루는 벡터로 계산되며 이 때 입력 화소  $p$ 와 분류 클래스  $t$ 가 이루는 각도  $\alpha$ 는 아래의 식 7과 같다.

$$\alpha = \cos^{-1} \left[ \frac{\langle \vec{t}, \vec{p} \rangle}{\|\vec{t}\| \cdot \|\vec{p}\|} \right] \quad (7)$$

이 때 각의 크기  $\alpha$ 가 작을수록 유사성이 높다는 것을 의미한다. 실제 cosine의 값이 0~1사이에 존재하기 때문에 이 값을 직접 사용해도 무방하며, 이 경우엔 처리 시간이 단축되는 장점이 있다. 그러므로 cosine값을 직접 사용하는 경우에는 값이 1에 가까울수록 유사성이 높음을 의미한다(Yang 등, 1999). 따라서 SAM 분류기법은 영상의 각각 화소의 분광 스펙트럼은 각 분류 등급의 스펙트럼과 분류각( $\alpha$ )를 계산하여 가장 작은 각으로 계산되는 분류 등급과 가장 유사하다고 고려되어, 그 분류 등급으로 정의하는 분류기법이다.

분광혼합분석을 이용한 분류기법은 혼합화소분석 결과 얻어지는 각 구성 물질(endmember)의 비율을 이용하는 데, 이를 위해서는 특정 구성비율의 일정값에 따라 각 화소를 정의하여야 한다. 분석자가 구성비율이 가장 큰 endmember로서 각 화소를 분류하는 경우가 있으며, 최대 구성값과 일정값이 이상이라는 조건을 함께 만족해야 하는 경우도 있을 수 있다. 즉, 혼합화소분석 결과인 구성비율(fraction)에 대한 적절한 threshold기법이 적용되어 하나의 구성 물질로 정의되어진다(Asner 등, 2003).

초분광영상의 분류를 위하여 Table 12에 나열된 것과 같이 기존 디지털영상처리나 패턴인식 분야에서 적용되었던 다양한 영상분류기법들이 시험적으로 적용되었으나, 아직까지 그 분류결과가 기존 패턴인식에서 적용된 결과만큼 효과적이지 못한 실정이다. 초분광영상의 풍부한 분광정보를 효과적으로 이용하여 정확한 분류결과를 산출할 수 있는 최적의 분류기법의 개발이 진행 중이다.

## 8) 분광 라이브러리(spectral library)

초분광영상에서 얻어지는 각 화소단위의 분광반사특성을 이용하여 각 화소에 해당하는 지표물의 분류, 인식, 탐지를 위한 방법의 하나로 이미 우리가 알고 있는 다양한 지표물의 분광반사곡선과 비교하는 방법을 생각할 수 있다. 이와 같이 초분광영상을 해석하기 위한 기본 자료로서 실험실이나 야외에서 측정된 다양한 종류의 지표물의 분광반사값을 보유할 필요가 있다. 분광측정기를 이용한 측정기술을 이용하여 미국과 유럽의 국가기관을 중심으로 분광반사특성 곡선을 데이터베이스화한 분광라이브러리(spectral library)가 구축되었다(Table 13).

위에 열거된 분광 라이브러리외에도 여러 나라 및 기관에서 나름대로의 목적에 적합한 분광라이브러리를 구축하고 있다. 초기에 구축된 분광 라이브러리는 암석 및 광물질 위주로 측정되었으나 현재는 비교적 다양한 지표물의 측정이 시도되었다. 또한 분광반사 측정 시 측정기기의 종류를 다양하게 하여 측정기기별 비교가 가능

Table 12. Selected studies related to the classification of hyperspectral data.

Method	Data used	Target	Authors
Cluster-Space Classification(CSC)	AVIRIS	Vegetation type	Jia and Richard (2002)
Neural Network	AVIRIS	Rock type	Benediktsson 등(1995)
MTMF	CASI	Urban cover type	Ben-Dor 등(2001)
Co Occurrence Segmentation(COS)	AISA	Forest and non-forest	Pekkarinen(2002)
Back-propagation Neural Network(BPN) & SAM	AVIRIS	Mineral	Yang 등(1999)
Supervised Maximumlikelihood	AVIRIS	Vegetation type	Ustin and Xiao (2001)
Hybrid Decision Tree Classifier	-	Algorithm development	Kim and Landgrebe (1991)
Causal RX detector-Linearly Constrained Maximum Variance(LCMV)	AVIRIS, HYDICE	Algorithm development	Chang and Chiang (2002)
Quadratic Mixture Classifier	-	Algorithm development	Kuo and Landgrebe(2002)
Filter-vectors method	AVIRIS, HYDICE	Algorithm development	Chang(2002)
Adaptive Resampling Strategy for Error-Prone Exemplars (ARESEPE)	Probe2	Algorithm development	Bachmann(2003)
Smoothed Estimated Reliability Measure(SERM)	HyMap, Probe2	Algorithm development	Bachmann 등(2003)
Linear Discriminant Analysis(LDA)	HYDICE	Algorithm development	Chang and Ren (2000)
Progressive two class decision classifier(pTCDC)	AVIRIS	Algorithm development	Jia and Richards (1998)
Stepwise Discriminate Analysis (SDA)	AVIRIS	Soil type	Palacios-Orueta and Ustin(1996)

Table 13. Primary spectral libraries of the earth surface materials.

Library	Institute	No. of spectra	Spectrometer used	Targets measured				
				mineral	rock	plant	artificial material	water
USGS Digital Spectral library	USGS	496	Beckman, ASD 외 2개	O	O	O	O	O
JHU Spectral library	John Hopkins Univ.	617	GER, FTIR	O	O	O	O	O
JPL Spectral library	NASA JPL	160	Beckman	O	X	X	X	X
ASTER Spectral library	NASA JPL	2,000	Beckman, ASD 외 3개	O	O	O	O	O
IGCP-264 Spectral library	IGCP	130	Beckman, GER 외 2개	O	X	O	X	X

하게 하였으며, 인공물의 경우 구성성분을 다양하게 하여 측정하였다. 특정 분광 라이브러리를 이용한 연구로서 Schmid 등(2004)은 스페인의 높지 지역의 변화를 탐지하기 위하여 높지 상태에 따른 다양한 지표물의 분광반사값을 현지에서 측정하여 자체적인 분광 라이브러리를 구축하여 초분광영상에 적용하였다. Drake 등 (1999)은 미국 Nevada 지역의 기본적인 토지피복을 분류하기 위해 AVIRIS 영상과 함께 기준 분광자료로서 JPL과 IGCP의 분광 라이브러리를 사용하였다. 식물, 토양, 암석 등 자연적 조건이 다른 지역에서 지표물의 분광반사특성은 다르게 나타나기 마련이다. 그 동안 우리나라의 원격탐사 분야에서 가장 먼저 연구가 수행되었어야 함에도 불구하고 비교적 소홀히 다루어진 분야가 실험실이나 야외에서의 분광측정에 관한 연구라 할 수 있다. 이제 새롭게 등장하고 있는 초분광영상자료의 해석을 위한 용도뿐만 아니라, 다양한 종류의 광학영상 자료의 분석과 활용을 위하여 자국의 지표특성을 감안한 표준의 분광라이브러리 구축이 시급한 시점이다.

## 6. 초분광영상 자료의 활용 분야

초분광영상 자료는 기존의 다중분광자료에서 얻을 수 없었던 정보 추출과 관련된 새로운 활용분야의 개발이 기대된다. 위장된 군 시설과 같은 목표물의 탐지는 군사적 목적으로 시도된 초분광영상의 초기 활용분야라

할 수 있으며, 항공기 탑재 초분광영상자료의 초기 활용분야는 광물자원의 분포를 파악하거나 암석종류 구분 등 지질분야가 주를 이루고 있다. 식생분야에서는 식물의 생화학적 구성 인자들(클로로필, 탄소량, 질소량, 리그닌 등)의 추정에 많은 연구가 수행되고 있으며 더 나아가 식물에 나타나는 각종 스트레스들의 탐지가 시도되고 있다. 또한 초분광영상을 이용한 클로로필양의 추정과 관련된 수질 모니터링이나, 도시지역에서 각종 인공물의 분류 등 그 활용분야가 확대되고 있다.

그러나 초분광영상의 활용가능성이 다양한 분야에서 연구되고 있으나, 대부분의 연구에서 항공기 탑재 AVIRIS 초분광영상이 주를 이루고 있으며, 지역적으로도 북미 위주의 영상에 국한된 경우가 많다. 최근 Hyperion이나 CHRIS와 같은 위성 초분광영상의 공급이 확대되고 있으나, AVIRIS 영상에 비하여 노이즈가 많고 촬영지역 및 빈도에 제한이 있어 그 활용이 미미한 상태이다. 향후 공간해상도와 광학적 질이 개선된 위성 탑재 초분광센서의 개발과 함께, 초분광영상 활용을 위한 연구 계속 확대될 전망이다.

### 1) 지질 및 광물 탐지

초기 초분광센서의 개발 목적의 한 부분을 차지했던 분야로, 현재까지 초분광영상의 활용이 가장 성공적으로 이루어진 분야이다. 초분광영상을 이용한 지질 및 광물 탐지 분야는, 중적외선 파장구간에서 나타나는 암석 및 광물의 구성 성분에 따른 분광적 차이를 잘 이용한

Table 14. Selected hyperspectral studies related to the geology and mineral exploitation.

Contents	Study area	Data used	Methods	Authors
Rock type estimation model	USA, Cuprite	AVIRIS	A fuzzy geological outcrop model	Van der Meer(2003)
Rock type classification	Spain, Los Santos	PIMA II field spectrometer	BAA, WPA, ADAC	Van der Meer and Kato(2002)
Rock type classification	Italia, Madagascar	AVIRIS, MIVIS	spectral feature matching	Longhi 등(2001)
AVIRIS vs. Hyperion	USA, Cuprite	AVIRIS, Hyperion	AIG	Kruse 등(2003)
Soil Moisture	-	Cary 5E Spectrophotometer	Soil Moisture Gaussian Model(SMGM)	Whiting 등(2004)
Soil salination	-	HyMap, DAIS	spectral mixture analysis	Metternicht and Zinck(2003)
Hydrothermal alteration mineral mapping	USA, California Bodie	AVIRIS	SAM, Tricorder spectral matching	Crosta 등(1998)
Rock type classification	USA, Mormon Mesa	SEBASS	thermal sensing	Kirkland 등(2002)
Sand types	USA, Mojave Desert	AVIRIS	-	Okin and Painter(2004)

결과라 할 수 있다. 암석 및 광물을 구성하는 화학물질의 분광 흡수 밴드가 좁은 중적외선 파장구간에서 잘 나타나고 있고, 초분광영상에서 이러한 흡수 밴드의 탐지가 용이하기 때문이다. 현재 구축된 대부분의 분광라이브러리에서 주된 분광반사측정 자료는 암석 및 광물에 관한 것이다.

그러나, 이러한 지질 및 광물 탐지 연구사례들은 미국을 중심으로 암석과 광물이 지표면에 잘 드러난 특정 지역에서만 연구가 계속적으로 이루어 진 것을 알 수 있다. 이에 비해 국내를 비롯한 타 지역에서는 아직까지 그 활용 가능성이 제대로 검증되지 않고 있는 데, 이는 앞에서 언급한 초분광영상자료의 획득이 어려운 점도 있고 또한 암석이나 광물의 표층에 노출된 상태가 드물기 때문이라 할 수 있다. Table 14는 지질 및 광물탐사에 초분광영상 을 활용한 연구 사례들을 지역별, 사용자료별, 그리고 분석 방법 등으로 구분하여 나열하고 있다.

## 2) 식생

현재 식생분야는 지질 및 광물 분야와 함께 초분광영상의 활용이 가장 많이 이루어지고 있는 분야이다. 기존 다중분광영상에서 얻기 어려운 자세한 수종 분류, 엽면 적지수 및 엽량 등 추정, 가뭄 및 병충해 등 각종 스트레스에 의한 식물의 생화학적 변화를 탐지하는 연구가 주

를 이루고 있다(Table 15). 식물의 생물리적 특성과 관련된 분석을 위하여 초분광영상 밴드를 조합한 다양한 식생지수들이 개발되고 있으며, 식물의 화학적 구성성분과 관련된 특정 밴드를 밝히는 연구가 중점적으로 진행되고 있다. 그러나 식물의 경우 잎, 식물개체, 수관총, 군락 등 구조적 특성에 따라 분광특성이 매우 다르게 나타나므로 일정한 분광특성이 기초한 암석 및 광물과는 다른 형태의 초분광영상 분석기법이 필요할 것이다.

## 3) 대기

초분광영상의 대기보정 과정에서 언급하였듯이, 초분광영상은 기존 다중분광영상에 비해서 영상 촬영 시점의 대기와 관련된 정보를 직접 얻을 수 있다는 장점이 있다. 수많은 분광 밴드 중 특정 밴드에서 대기 중 수분 함유량이나 가시거리와 같은 정보를 추정할 수 있기 때문이다. 대기와 관련된 초분광영상의 활용 연구중 많은 부분은 초분광영상의 대기보정과 관련하여 함께 진행되었다고 할 수 있다. Table 16은 구름 지역이나 대기 중 수증기를 비롯한 가스 함유량을 추정하는 관련 연구를 보여주고 있다.

## 4) 수질

CZCS나 SeaWiFs와 같이 해양관측 센서의 중요한

Table 15. Selected hyperspectral studies related to the vegetation.

Contents	Study area	Data used	Methods	Authors
tree species classification	Canada	Hyperion, ALI, ETM+	Maximum likelihood classification	Goodenough 등(2003)
crown closure	USA	AVIRIS, CASI	SMA	Gong 등(1994)
forest gap mapping	UK	CASI	PCA, GIS	Blackburn and Milton(1997)
forest biomass	France	DAIS 7915	relationship with field measurement	Jong 등(2003)
forest LAI	Argentina	AVIRIS	relationship with field measurement	Pu 등(2003)
leaf water contents	Canada	AVIRIS	Grow Index	Niemann 등(2002)
Crop disease(Orange rust)	Australia	Hyperion	Disease-Water Stress Index	Apan 등(2004)
Coniferous nutrient estimation	USA	PSD1000 spectrometer	relationship with field measurement	Gong 등(2002)
Savanna annual change	USA	AVIRIS	LSMA(Linear Spectral Mixture Analysis)	Garcia and Ustin(2001)
forest nitrogen	USA	AVIRIS, Hyperion	relationship with field measurement	Smith 등(2003)
fuel moisture	USA	AVIRIS, Hyperion	SMA, vegetation index	Roberts 등(2003)
forest chlorophyll	Canada	CASI	Red-edge	Zarco Tejada 등(2001)
subarctic lichens	Sweden	GER-3700	relationship with field measurement	Rees 등(2004)
Salt marsh vegetation	Italia	MIVIS, GER-1500	relationship with field measurement	Silvestri 등(2002)
forest clearcut	Brazil	TM	texture analysis, AutoMCU	Asner 등(2003)
biophysical parameter of forest	UK, France	AVIRIS	PROSPECT+SAIL Model	Jacquemoud 등(1995)
forest fire	USA	AVIRIS	Composite Burn Index(CBI)	Wagtendonk 등(2004)
forest fire monitoring	USA	AVIRIS	Spectral Mixture Analysis	Riano 등(2002)

Table 16. Selected hyperspectral studies related to the atmosphere.

Contents	Study area	Data used	Methods	Authors
cloud detection	Central America	AVIRIS, TIMS	Cross Correlation	Feind and Welch(1995)
cloud reflectance	-	AVIRIS, MODIS	-	Gao 등(2002)
gas estimation	USA, Cuprite	AVIRIS	Joint Reflectance and Gas Estimation	Marion R. 등(2004)
atmospheric moisture content	USA, Santa Barbara	AVIRIS	Band Ratio(CIBR), Differential Absorption(APDA)	Gelpi C. G.(2000)

특징은 좁은 파장영역에서 나타나는 클로로필 흡수밴드를 포함하고 있으며, 이를 이용하여 해색 및 수질과 관련된 분야에 활용되고 있다. 초분광영상에서도 마찬가지로 뛰어난 분광해상도를 이용하여 클로로필, 플랑크톤, 용존유기물, 토사부유물 등 물속의 다양한 물체에 의하여 나타날 수 있는 분광반사특성을 분석할 잠재력이 높다. 또한 수질과 관련된 원격탐사에서 대기보정 및

광학보정과 같은 전처리과정이 매우 정확하게 수행되어야 함에도 불구하고 다중분광영상에서는 이러한 처리가 어려운 근원적 한계가 있었지만, 초분광영상에서는 이러한 전처리가 비교적 정확하게 수행될 수 있다는 장점이 있다. Table 17은 수질과 관련된 초분광영상자료의 활용과 관련된 연구사례를 보여주고 있다.

Table 17. Selected hyperspectral studies related to the water.

Contents	Study area	Data used	Methods	Authors
chlorophyll-a detection	Finland	AISA	reflectance of red & NIR	Kallio 등(2003)
coastal water quality	Australia, Moreton bay	Hyperion	Atmospheric & Hydro-optical RTM	Brando and Dekker(2003)
plankton absorption spectra	USA, Baja California	Field spectrometer	Quasi Analytical Algorithm (QAA)	Lee and Carder(2004)
Secchi depth, turbidity, chlorophyll-a	Finland	AISA	relationship with In-situ measurement	Koponen 등(2002)
water quality	German, Mecklenburg Lake	CASI, HyMap	relationship with In-situ measurement	Thiemann and Kaufmann (2002)
Chlorophyll a and Pheophytin(CHL)	Netherlands	AVIRIS	Biooptical model	Hoogenboom 등(1998)
classification of coral, algae, and sand	-	AVIRIS, AAHIS	spectro-radiometer measurements	Hochberg and Atkinson (2003)

Table 18. Selected hyperspectral studies related to the urban area.

Contents	Study area	Data used	Methods	Authors
Urban cover types	USA, Santa Barbara	AVIRIS	spectral matching with field measurements	Herold 등(2003)
Spectral library of urban features	Israel, Tel Aviv	CASI	MTMF with field measurements	Ben Dor 등(2001)

## 5) 도시

도시 지역은 매우 다양한 종류의 피복이 분포하고, 그 공간적 규모와 구성 상태가 매우 복잡하기 때문에 높은 분광해상도와 공간해상도가 함께 요구된다. 특히 도시 피복물 중 인공물의 경우 콘크리트나 아스팔트와 같은 비교적 동일한 화학 물질로 구성된 경우 초분광영상 을 이용한 탐지가 가능하며, 건물의 지붕재료 및 패인트의 경우도 초분광영상을 이용하여 그 종류의 분류와 탐지가 매우 효과적으로 수행되었다(Table 18). 도시 피복물의 경우 사회자본시설로 주기적이면서 계속적인 모니터링이 필요한데, 이를 초분광영상의 활용으로 보다 효과적으로 수행할 수 있을 것이다. 하지만, 복잡한 시설물의 구조로 인해 높은 공간해상도를 요구하는 제약점으로 현재 이 분야에 대한 활용은 높은 공간해상도의 항공탑재 초분광영상만을 대상으로 진행되고 있다. 국내의 경우, 초분광영상의 활용에 앞서 다양한 도시피복물에 대한 지상 분광 측정자료의 구축이 우선시 되어진다.

## 7. 결 론

다양한 지표물의 종류와 상태에 따라 분광반사특성은 다르게 나타나며, 광학원격탐사에서 지표물에 관련된 정보의 획득은 주로 분광특성에 의존되어 왔다. 그러나 넓은 파장폭을 가진 다중분광밴드 영상으로부터 지표물의 완전한 분광반사특성을 얻는 데에는 한계가 있다. 초분광영상은 기존의 다중분광영상이 가지고 있는 한계를 극복한 자료로서, 영상을 구성하는 화소 단위마다 완전한 분광반사곡선을 얻을 수 있으며 이를 이용한 정보획득 가능성을 향상시킨 새로운 원격탐사자료로 대두되고 있다. 초분광영상 센서는 지상용 카메라와 항공기 및 인공위성탑재 주사기에 이르기까지 다양한 사양으로 개발되고 있으며, 영상자료의 공급 또한 전 세계적으로 확대되고 있다. 현재 항공기 탑재 초분광센서가 없는 국내에서 초분광영상자료의 획득은 미국의 Hyperion이나 유럽의 CHRIS와 같은 위성탑재 초분광

센서에 의존할 수밖에 없는 상황이지만, 초분광영상의 활용 잠재력을 감안한다면 자료해석과 정보획득을 위한 제반 처리기술 개발이 시급한 실정이다.

국내에서 초분광영상자료의 해석을 위한 가장 기본적인 토대는 한반도 지역의 토양, 식생, 지질자원, 토지 이용 등 제반 환경조건에 따라 다양하게 분포하는 지표물의 분광반사특성에 관한 충분한 자료가 구비되어야 한다. 이러한 기본 자료는 결국 실험실이나 야외에서 분광측정기(spectro-radiometer)를 이용한 실험연구를 통하여 측정될 수 있지만, 그 동안 국내 원격탐사 연구에서 이 분야의 연구가 상대적으로 소홀하게 다루어져 왔다. 야외나 실험실에서의 분광반사 측정은 사용되는 기기의 종류, 광조건, 표본의 종류 및 상태에 따라 매우 민감하게 나타날 수 있으므로 측정 방법에 대한 기술적 검토와 표준 방안의 마련이 필요하다. 또한 다양한 분석 자에 의하여 측정되는 분광반사곡선 자료를 과학적으로 통합하여 공유할 수 있는 표준적인 데이터베이스를 구축하여야 할 것이다. 이러한 분광특성 데이터베이스는 분광라이브러리(spectral library)의 형태로 초분광영상의 해석뿐만 아니라 광학원격탐사에서 가장 기본적인 자료로 활용될 수 있기 때문에 국가적인 사업으로 추진 할 필요가 있다.

초분광영상은 아주 많은 연속적 분광밴드로 이루어진 자료이므로, 다중분광영상에 적용하였던 기존 영상 처리기법들을 그대로 적용하는데 어려움이 많다. 초분광영상을 위한 새로운 영상처리기법들이 발표되고 있으나, 많은 경우 기존의 신호처리 분야에서 사용되었던 기법들을 실험적으로 초분광영상에 적용하는 실험적인 접근이며 아직까지 보편적으로 널리 사용되는 기법들은 부족한 실정이다. 초분광영상자료의 해석을 위한 처리기법은 초분광영상만이 가지고 있는 특성을 최대한 활용할 수 있는 이용 측면에서 개발되어야 한다. 이제 초기 단계라 할 수 있는 초분광영상 처리기법의 현실을 감안한다면, 성급한 활용보다는 초분광영상에서 추출될 수 있는 정보의 종류 및 특성을 분석하고, 그에 적합한 처리기법 개발이 순차적으로 이루어져야 할 것이다.

## 사사

본 연구는 한국과학기술원 영상정보특화센터를 통한 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Abousleman, G. P., M. W. Marcellin, and B. R Hunt, 1995. Compression of hyperspectral imagery using the 3-D DCT and Hybrid DPCM/DCT, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(1): 26-34.
- Aiaazzi, B., P. Alba, L. Alparone, and S. Baronti, 1999. Lossless Compression of Multi/Hyper-Spectral Imagery Based on a 3-D Fuzzy Prediction, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(5): 2287-2294.
- Aiaazzi, B., L. Alparone, and S. Baronti, 2001. Near Lossless compression of 3-D optical data *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(11): 2547-2557.
- Apan, A., A. Held, S. Phinn, and J. Markley, 2004. Detecting sugarcane 'orange rust' disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 25(2): 489-498.
- Asner, G. P. and K. B. Heidebrecht, 2002. Spectral unmixing of vegetation, soil and dry carbon cover in arid regions: comparing multispectral and hyperspectral observations, *International Journal of Remote Sensing*, 23(19): 3939-3958.
- Asner, G. P. and K. B. Heidebrecht, 2003. Imaging spectroscopy for desertification studies: comparing AVIRIS and EO-1 Hyperion in Argentina Drylands, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1283-1296.

- Asner, G. P., M. M. C. Bustamante, and A. R. Townsend, 2003. Scale dependence of biophysical structure in deforested areas bordering the Tapao National Forest, Central Amazon, *Remote Sensing of Environment*, 87: 507-520.
- Atkinson, P. M., 1997. On estimating measurement error in remotely sensed images with the variogram, *International Journal of Remote Sensing*, 18(14): 3075-3084.
- Bachmann, C. M., 2003. Improving the performance of classifiers in High dimensional remote sensing applications: An adaptive resampling strategy for error prone example, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(9): 2101-2112.
- Bachmann, C. M., M. H. Bettenhausen, and R. A. Fusina, 2003. A Credit Assignment Approach to fusing Classifiers of Multiseason Hyperspectral Imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11): 2488-2499.
- Bateson, C. A., G. P. Asner, and C. A. Wessman, 2000. Endmember Bundles: A New Approach to incorporating endmember variability into spectral mixture analysis, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2): 1083-1094.
- Ben-Dor, E., N. Levin, and H. Saaroni, 2001. A spectral based recognition of the urban environment using the visible and near infrared spectral region. A case study over Tel Aviv, *Israel International Journal of Remote Sensing*, 22(11): 2193-2218.
- Ben-Dor, E., B. Kindel, and A. F. H. Goetz, 2004. Quality assessment of several methods to recover surface reflectance using synthetic imaging spectroscopy data, *Remote Sensing of Environment*, 90: 389-404.
- Benediktsson, J. I., J. R. Sveinsson, and K. Arnason, 1995. Classification and Feature Extraction of AVIRIS Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(5): 1194-1205.
- Biggar, S. F., K. J. Thome, and W. Wisniewski, 2003. Vicarious radiometric calibration of EO-1 sensors by reference to High-reflectance ground targets, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1174-1179.
- Blackburn, G. A. and E. J. Milton., 1997. An ecological survey of deciduous woodlands using airborne remote sensing and geographical information system(GIS), *International Journal of Remote Sensing*, 18(9): 1919-1935.
- Brando, V. E. and A. G. Dekker, 2003. Satellite Hyperspectral Remote Sensing of Estimating Estuarine and Coastal Water Quality, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1378-1387.
- Bruce, L. M., C. Morgan, and S. Larsen, 2001. Automated Detection of subpixel hyperspectral targets with continuous and discrete wavelet transforms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(10): 2217-2226.
- Cairns, B., B. E. Carlson, R. Ing., A. A. Lacis, and V. Oinas, 2003. Atmospheric Correction and Its Application to an Analysis of hyperion Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1232-1244.
- Chabrillat, S., P. C. Pinet, G. Ceulneer, P. E. Johnson, and J. F. Mustard, 2000. Ronda peridotite massif: methodology for its geological mapping and lithological discrimination from airborne hyperspectral data, *International Journal of Remote Sensing*, 21(12): 2363-2388.
- Chabrillat, S., A. F. H. Goetz, L. Krosley, and H. W. Olsen, 2002. Use of hyperspectral images in

- the identification and mapping of expansive clay soils and the role of spatial resolution, *Remote Sensing of Environment*, 82: 431-445.
- Chang, C. I. and O. Du, 1999. Interference and Noise Adjusted principal components analysis, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(5): 2387-2396.
- Chang, C. I. and H. Ren, 2000. An Experiment-Based Quantitative and Comparative Analysis of Target Detection and Image Classification Algorithm for Hyperspectral Imagery, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2): 1044-1063.
- Chang, C. I., S. S. Chiang, J. A Smith, and K. W. Ginsberg, 2002. Linear Spectral Random Mixture Analysis for Hyperspectral Imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(2): 375-392.
- Chang, C. I., 2002. Target Signature constrained mixed pixel classification for hyperspectral imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(5): 1065-1081.
- Chang C. I., Ren H., and Chiang S. S., 2001. Real-time processing algorithms for target detection and classification in hyperspectral imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(4): 760-768.
- Crosta, A. P., C. Sabine, and J. V. Taranik, 1998. Hydrothermal Alteration Mapping at bodie, California, Using AVIRIS hyperspectral data, *Remote Sensing of Environment*, 65: 309-319.
- Curran, P. J. and J. L. Dungan, 1989. Estimation of Signal to Noise: Anew procedure applied to AVIRIS data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27(5): 620-628.
- Datt, B., T. R. McVicar, T. G. Van Niel, D. L. B. Jupp, and J. S. Pearlman, 2003. Preprocessing EO-1 Hyperion Hyperspectral data to Support the Application of Agricultural Indexs, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1246-1259.
- Dennison, P. E. and D. A. Roberts, 2003. The effects of vegetation phenology on endmember selection and species mapping in southern California chaparral, *Remote Sensing of Environment*, 87: 295-309.
- Drake, N. A., S. Mackin, and J. J. Settle, 1999. Mapping vegetation, soils, and geology in semiarid shrublands using spectral matching and mixture modeling of SWIR AVIRIS iamgery, *Remote Sensing of Environment*, 68: 12-25.
- Du, Q. and C. I. Chang, 2004. Linear Mixture Analysis based compression for hyperspectral image Analysis, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(4): 875-891.
- Farrand, W. H. and J. C. Harsanyi, 1997. Mapping the distribution of mine tailings in the Coeur d'Alene River Valley, Idaho through the use of a Constrained Energy Minimization technique, *Remote Sensing of the Environment*, 59: 64-76.
- Feind, R. E. and R. M. WELCH, 1995. Cloud fraction and cloud shadow property retrievals from coregistered TIMS and AVIRIS imagery: the use of cloud morphology for registration, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(1): 172-184.
- Gao, B. C. and A. F. H. Goetz, 1995. Retrieval of Equivalent Water Thickness and Information Related to Biochemical Components of Vegetation Canopies from AVIRIS Data, *Remote Sensing of Environment*, 52: 155-162.
- Gao, B. C., P. Yang, W. Han, R. R. Li, and W. J. Wiscombe, 2002. An algorithm using visible and 1.38m channels to retrieve cirrus cloud reflectances from aircraft and satellite data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote*

- Sensing, 40(8): 1659-1668.
- Gao, B. C., M. J. Montes, and C. O. Davis, 2004. Refinement of wavelength calibrations of hyperspectral imaging data using a spectrum matching technique, *Remote Sensing of Environment*, 90: 424-433.
- Goodenough, D. G., A. Dyk, K. O. Niemann, J. S. Pearlman, H. Chen, T. Han, M. Murdoch, and C. West, 2003. Processing hyperion and ALI for Forest Classification, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1321-1331.
- Galvao, L. S., W. P. Filho, M. M. Abdon, E. M. M. L. Novo, J. S. V. Silva, and F. J. Ponzoni, 2003. Spectral reflectance characterization of shallow lakes from the Brazilian Pantanal wetlands with field and airborne hyperspectral data, *International Journal of Remote Sensing*, 24(21): 4093-4112.
- Garcia, M. and S. L. Ustin, 2001. Detection of Interannual Vegetation Responses to Climatic Variability using AVIRIS data in a coastal savanna in California, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(7): 1480-1490.
- Gelpi, C. C., 2000. Removing Path Scattered Radiance from Over ocean spectrometer Images for Water vapor estimation, *Remote Sensing of Environment*, 74: 414-421.
- Goetz A. F. H., 1991. Imaging spectrometry for studying Earth, Air, Fire and Water, *EARSel Advances in Remote Sensing*, 1: 3-15.
- Goetz, A. F. H., B. C. Kinde , M. Ferri, and Z. Qu, 2003. HATCH: Results from simulated radiances, AVIRIS and Hyperion, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1215-1222.
- Gong, P., J. R. Miller, and M. Spanner, 1994. Forest canopy closure from classification and spectral unmixing of scene components multisensor evaluation of an open canopy, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(5): 1067-1080.
- Gong, P., R. Pu, and R. C. Heald, 2002. Analysis of in situ hyperspectral data for nutrient estimation of giant sequoia, *International Journal of Remote Sensing*, 23(9): 1827-1850.
- Green, A. A., M. Berman, P. Switzer, and M. D. Graig, 1998. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(1): 65-74.
- Gu, D., A. R. Gillespie, A. B. Kahle, and F. D. Palluconi, 2000. Autonomous Atmospheric Compensation(AAC) of High Resolution Hyperspectral thermal infrared remote sensing imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(6): 2557-2570.
- Gu, Y., J. M. Anderson, and J. G. C. Monk, 1999. An approach to the spectral and radiometric calibration of the VIFIS system, *International Journal of Remote Sensing*, 20(3): 535-548.
- Hapke, B., 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy 1. Theory, *J. Geophys. Res.*, 86: 3039-3054.
- Hapke, B., 1993. Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy, Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press.
- Herold, M., D. A. Roberts, M. E. Gardner, and P. E. Dennison, 2004. Spectrometry for urban area remote sensing-development and analysis of a spectral library from 350 to 2400nm, *Remote Sensing of Environment*, 91: 304-319.
- Hoffman, R. N. and D. W. Johnson, 1994. Application of EOF's to Multispectral Imagery: Data Compression and Noise Detection for AVIRIS, *IEEE Transactions on*

- Geoscience and Remote Sensing*, 32(1): 25-34.
- Hochberg, E. J. and M. J. Atkinson, 2003. Capabilities of remote sensors to classify coral, algae, and sand as pure and mixed spectra, *Remote Sensing of Environment*, 85: 174-189.
- Hoogenboom, H. J., A. G. Dekker, and I. A. Althuis, 1998. Simulation of AVIRIS Sensitivity for Detecting Chlorophyll over Coastal and Inland Waters, *Remote Sensing of Environment*, 65: 333-340.
- Hubbard, B. E., J. K. Crowley, and D. R. Zimbelman, 2003. Comparative Alteration Mineral Mapping Using Visible to Shortwave Infrared(0.4~2.5 $\mu$ m) Hyperion, ALI, and ASTER Imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1401-1410.
- Ifarraguerri, A. and C. I. Chang, 1999. Multispectral and Hyperspectral Image Analysis with Convex Cones, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(2): 756-770.
- Ingram, P. M. and A. H. Muse, 2001. Sensitivity of Iterative Spectrally Smooth Temperature/Emissivity Separation to algorithmic assumptions and measurement noise, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(10): 2158-2167.
- Jacquemoud, S., F. Baret, B. Andrieu, F. M. Danson, and K. Jaggard, 1995. Extraction of Vegetation Biophysical Parameters by Inversion of the PROSPECT+ SAIL models on Sugar beet canopy reflectance data. Application to TM and AVIRIS sensors, *Remote Sensing of Environment*, 52: 163-172.
- Jia, X. and J. A. Richards, 1998. Progressive two class decision classifier for optimization class discriminations, *Remote Sensing of Environment*, 63: 289-297.
- Jia, X. and J. A. Richards, 2002. Cluster Space Representation for Hyperspectral Data Classification, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(3): 593-598.
- Jiang, X., L. Tang, and C. Wang, 2004. Spectral characteristics and feature selection of hyperspectral remote sensing data, *International Journal of Remote Sensing*, 25(1): 51-59.
- Jimenez, L. O. and D. A. Landgrebe, 1999. Hyperspectral Data Analysis and supervised feature reduction via projection pursuit, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(6): 2653-2667.
- Jong, S. M., E. J. Pebesma, and B. Lacaze, 2003. Above ground biomass assessment of Mediterranean forests using airborne imaging spectrometry: the DAIS Peyne experiment, *International Journal of Remote Sensing*, 24(7): 1505-1520.
- JPL, 2005. NASA JPL Homepage (<http://aviris.jpl.nasa.gov>).
- Kaewpijij, S., J. Le Moigne, and T. El Ghazawi, 2003. Automatic Reduction of Hyperspectral Imagery Using Wavelet Spectral Analysis, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4): 863-871.
- Kallio, K., S. Koponen, and J. Pulliainen, 2003. Feasibility of airborne imaging spectrometry for lake monitoring a case study of spatial chlorophyll a distribution in two, *International Journal of Remote Sensing*, 24(19): 3771-3790.
- Keshava, N. and J. F. Mustard, 2002, Spectral Unmixing, *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(1): 44-57.
- Kim, B. Y. and D. A. Landgrebe, 1991. Hierarchical classifier design in high dimensional, numerous class cases, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29(4): 518-528.
- Kirkland, L., K. Herr, E. Keim, P. Adams, J.

- Salisbury, J. Hackwell, and A. Treiman, 2002. First use of an airborne thermal infrared hyperspectral scanner for compositional mapping, *Remote Sensing of Environment*, 80: 447-459.
- Kokaly, R. F., D. G. Despain, R. N. Clark, and K. E. Livo, 2003. Mapping vegetation in yellowstone national park using spectral feature analysis of AVIRIS data, *Remote Sensing of Environment*, 84: 437-456.
- Koponen, S., J. Pulliainen, K. Kallio, and M. Hallikainen, 2002. Lake water Quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data, *Remote Sensing of Environment*, 79: 51-59.
- Kruse, F. A., J. W. Boardman, and J. F. Huntington, 2003. Comparison of Airborne hyperspectral Data and EO-1 Hyperion for Mineral Mapping, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1388-1400
- Kumar, S., J. Ghosh, and M. M. Crawford, 2001. Best bases feature extraction algorithms for classification of hyperspectral data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(7): 1368-1379.
- Kuo, B. C. and D. A. Landgrebe, 2002. A Covariance estimator for small sample size classification problems and its application to feature extraction, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(4): 814-81.
- Landgrebe D., 2001. Analysis of Multispectral and Hyperspectral Image Data, John Wiley & Sons, 2001.
- Launaeau, P., J. Girardeau, C. Sotin, and J. M. Tubia, 2004. Comparison between field measurements and airborne visible and infrared mapping spectrometry(AVIRIS and HyMap) of the Ronda peridotite massif (south west Spain), *International Joural of Remote Sensing*, 25(14): 2773-2792.
- Lee, Z. P. and K. L. Carder, 2004. Absorption spectrum of phytoplankton pigments derived from hyperspectral remote sensing reflectance, *Remote Sensing of Environment*, 89: 361-368.
- Longhi, I., M. Sgavetti, R. Chiari, and C. Mazzoli, 2001. Spectral analysis and classification of metamorphic rocks from laboratory reflectance spectra in the 0.4-2.5 interval: a tool for hyperspectral data interpretation, *International Journal of Remote Sensing*, 22(18): 3763-3782.
- Lu, D., P. Mausel, E. Brondizio, and E. Moran, 2004. Change Detection techniques, *International Journal of Remote Sensing*, 25(12): 2365-2407.
- Manolakis, D., C. Siracusa, and G. Shaw, 2001. Hyperspectral Subpixel Target Detection Using the Linear Mixing Model, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(7): 1392-1409.
- Marion, R., R. Michel, and C. Faye, 2004. Measuring Trace Gases in Plumes From Hyperspectral Remotely Sensed data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(4): 854-864.
- Metternicht, G. I. and J. A. Zinck, 2003. Remote Sensing of soil salinity: potentials and constraints, *Remote Sensing of Environment*, 85: 1-20.
- Mutanga, O. and A. K. Skidmore, 2004. Integrating imaging spectroscopy and neural networks to map grass uality in the Kruger National Park, South Afria, *Remote Sensing of Environment*, 90: 104-115.
- Niemann, K. O., D. G. Goodenough, and A. S. Bhogal, 2002. Remote Sensing of relative moisture status in old growth Douglas fir, *International Journal of Remote Sensing*, 23(2): 395-400.

- Okin, G. S. and T. H. Painter, 2004. Effect of grain size on remotely sensed spectral reflectance of sandy desert surfaces, *Remote Sensing of Environment*, 89: 272-280.
- Palacios Orueta, A. and S. L. Ustin, 1996. Multicariate statistical classification of soil spectra, *Remote Sensing of Environment*, 57: 108-118.
- Pekkarinen, A., 2002. A method for the segmentation of very high spatial resolution images of forested landscapes, *International Journal of Remote Sensing*, 23(14): 2817-2836.
- Pu, R., Gong P., and G. S. Biging, 2003. Simple calibration of AVIRIS data and LAI mapping of forest plantation in southern argentina, *International Journal of Remote Sensing*, 24(23): 4699-4714.
- Pu, R., Q. Yu, P. Gong, and G. S. Biging, 2005. EO-1 Hyperion, ALI and Landsat 7 ETM+ data comparison for estimating forest crown closure and leaf area index, *International Journal of Remote Sensing*, 26(3): 457-474.
- Rand, R. S. and D. M. Keenan, 2001. A spectral mixture process conditioned by gibbs based partitioning, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(7): 1421-1434.
- Rees, W. G., O. V. Tutubalina, and E. I. Golubeva, 2004. Reflectance spectra of subarctic lichens between 400 and 2400 nm, *Remote Sensing of Environment*, 90: 281-292.
- Resmini, R. F., M. E. Kappus, W. S. Sldrich, J. C. Haranyi, and M. Anderson, 1997. Mineral mapping withhyperspectral Digital Imagery Collection Experiment (HYDICE) sensor data at Cuprite, Nevada, U.S.A. *International Journal of Remote Sensing*, 18(7): 1553-1570.
- Riano, D., E. Chuvieco, S. Ustin, R. Zomer, P. Dennison, D. Roberts, and J. Salas, 2002. Asessment of vegetation regeneration after fire through multitemporal analysis of AVIRIS images in the Santa Monica Mountains, *Remote Sensing of Environment*, 79: 60-71.
- Richter, R. and D. Schlapfer, 2002. Geo atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 2: atmospheric .topographic correction, *International Journal of Remote Sensing*, 23(13): 2631-2649.
- Roberts, D. A., M. O. Smith, and J. B. Adams, 1993. Green vegetation, nonphotosynthetic vegetation, and soils in AVIRIS data, *Remote Sensing of Environment*, 44: 255-269.
- Roberts, D. A., P. E. Dennison, M. E. Gardner, Y. Hetzel, S. L. Ustin, and C. T. Lee, 2003. Evaluation of the Potential of Hyperion for Fire Danger Assessment by Comparison to the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1297-1310.
- Ryan, M. J. and J. F. Arnold, 1997. The lossless compression of AVIRIS images by vector quantization, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3): 546-550.
- Sanders, L. C., J. R. Schott, and R. Raqueno, 2001. A VNIR/SWIR atmospheric correction algorithm for hyperspectral imagery with adjacency effect, *Remote Sensing of Environment*, 78: 252-263.
- Schmid, T., M. Koch, J. Gumuzzio, and P. M. Mather, 2004. A spectral library for a semi arid wetland and its application to studies of wetland degradation using hyperspectral and multispectral data, *International Journal of Remote Sensing*, 25(13): 2485-2496.
- Secker, J., K. Staenz, R. P. Gauthier, and P. Budkewitsch, 2001. Vicarious calibration of airborne hyperspectral sensors in operational environments, *Remote Sensing of Environment*, 76: 81-92.

- Serpico, S. B. and L. Bruzzone, 2001. Anew search algorithm for feature selection in hyperspectral remote sensing images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(7): 1360-1367.
- Shaw, G. and D. Manolakis, 2002, Singal Processing for Hyperspectral Image Exploitation, *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(1): 12-16.
- Shippert, P., 2004. Why Use Hyperspectral Imagery?, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(4): 377-380.
- Silvestri, S., M. Marani, J. Settle, F. Benvenuto, and A. Marani, 2002. Salt marsh vegetation radiometry data analysis and scaling, *Remote Sensing of Environment*, 80: 473-482.
- Smith, M. L., M. E. Martin, L. Plourde, and S. V. Ollinger, 2003. Analysis of Hyperspectral data for estimation of temperate forest canopy nitrogen concentration: comparison Between an Airborne(AVIRIS) and a space borne(Hyperion) Senor, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1332-1337.
- Teillet, P. M., G. Fedosejevs, R. P. Gauthier, N. T. O'Neill, K. J. Thome, S. F. Biggar, H. Ripley, and A. Meygret, 2001. A generalized approach to the vicarious calibration of multiple Earth observation sensors using hyperspectral data, *Remote Sensing of Environment*, 77: 304-327.
- Thiemann, S. and H. Kaufmann, 2002. Lake water quality monitoring using hyperspectral airborne data a semiempirical multisensor and multitemporal approach for the Mecklenburg Lake Distric, *Germany Remote Sensing of Environment*, 81: 228-237.
- Tu, T. M., C. H. Chen, and C. I. Chang, 1997. A Posteriori Least Squares Orthogonal Subspace projection approach to Desired signature extraction and detection, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(1): 127-139.
- Tu, T. M., C. H. Chen, J. L. Wu, and C. I. Chang, 1998. A Fast Two stage classification method for high dimensional remote sensing data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(1): 182-191.
- Ustin, S. L. and Q. F. Xiao, 2001. Mapping successional boreal forests in interior central Alaska, *International Journal of Remote Sensing*, 22(6): 1779-1797
- Van der Meer, F., F. Lihui, and J. Bodechtel, 1997. MAIS imaging spectrometer data analysis for Ni Cu prospecting in ultramafic rocks of the Jinchuan group, *China International Journal of Remote Sensing*, 18(13): 2743-2761.
- Van der Meer, F., 2000. Spectral curve shape matching with a continuum removed CCSM algorithm, *International Journal of Remote Sensing*, 21(16): 3179-3185.
- Van der Meer, F. and V. Kato, 2002. Developing a schematic petrogenetic transect for a contact aureole using field spectrometry; a case study in Los Santos, Salamanca Province, central western Spain, *International Journal of Remote Sensing*, 23(23): 5087-5094.
- Van der Meer, F., 2003. Bayesian inversion of imaging spectrometer data using a fuzzy geological outcrop model, *International Journal of Remote Sensing*, 24(22): 4301-4310
- Verhoef, W. and H. Bach, 2003. Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmosphere radiative transfer models, *Remote Sensing of Environment*, 87: 23-41.
- Viggh, H. E. M. and D. H. Staelin, 2003. Spatial surface prior infomation reflectance estimation (SPIRE) algorithm, *IEEE Transactions on*

- Geoscience and Remote Sensing, 41(11): 2424-2435.
- Wagtendonk, J. W., R. R. Root, and C. H. Key, 2004. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity, *Remote Sensing of Environment*, 92: 397-408.
- Warner, T. A. and M. C. Shank, 1997. Spatial Autocorrelation Analysis of Hyperspectral Imagery for Feature Selection, *Remote Sensing of Environment*, 60: 58-70.
- Warner, T. A., K. Steinmaus, and H. Foote, 1999. An evaluation of spatial autocorrelation feature selection, *International Journal of Remote Sensing*, 20(8): 1601-1616.
- Whiting, M. L., L. Li, and S. L. Ustin, 2004. Predicting water content using Gaussian model on soil spectra, *Remote Sensing of Environment*, 89: 535-552.
- Williams, A. P. and Jr R. E. Hunt, 2002. Estimation of leafy spurge cover from hyperspectral imagery using mixture tuned matched filtering, *Remote Sensing of Environment*, 82: 446-456.
- Yang, H., F. Van der Meer, W. Bakke, and Z. J. Tan, A back propagation neural network for mineralogical mapping from AVIRIS data, 1999. *International Journal of Remote Sensing*, 20(1): 97-110.
- Yao, H. and L. Tian, 2003. A genetic algorithm based selective principal component analysis (GA SPCA) method for high dimensional data feature extraction, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1469-1478.
- Zarco Tejada, P. J., J. R. Miller, T. L. Noland, G. H. Mohammed, and P. H. Sampson, 2001. Scaling up and model inversion methods with narrowband optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(7): 1491-1507.
- Zarco Tejada, P. J., J. C. Pushnik, S. Dobrowskui, and S. L. Ustin, 2003. Steady state chlorophyll a fluorescence detection from canopy derivatice reflectance and double peak red edge effects, *Remote Sensing of Environment*, 84: 283-294.