

총 설

## 초분광센서를 이용한 수질 분석의 적용성에 관한 연구

박연정 · 장현지 · 김윤석 · 백경희 · 이희숙<sup>†</sup>

K-water 연구원 수질분석연구센터

## A Research on the Applicability of Water Quality Analysis using the Hyperspectral Sensor

Yeon Jeong Park, Hyun Ji Jang, Yun S. Kim, Kyoung Hee Baik, and Hee Suk Lee<sup>†</sup>

Water Quality Research Center, K-water Institute, Daejeon, 306-711, Korea

Received September 1, 2014/Revised September 12, 2014/Accepted September 29, 2014

The Hyperspectral Imaging (HSI) technology is mainly used to investigate land coverage, mineral, forest, vegetation, and so on. Recently, the HSI technology is recognized as one of the promising technique to assess and monitor water quality in real-time. This study is designed to provide a review on HSI data processing methods, hyper-spectral sensors, and applications of water quality hyper-spectral data. In order to understand the status of hyper-spectral remote sensing technology and research development of water quality, we largely discuss multi-spectral and hyper-spectral sensing, the type of hyper-spectral sensor, data processing technology, research present condition on water quality items such as chlorophyll a, phytoplankton, total suspended solids, total phosphorus, total nitrogen. However, the obtained data on water quality by HSI system is still shortage to apply water pollutants monitoring. In addition, the HSI data of target water quality compounds dependent on physiological step of inherent optical property and specific property of water quality is significantly requiring. Although there are various obstacles on HSI technologies as useful method to assess water quality, the advantages of HSI to investigate water pollutants around broad area and monitor point-sources have been recognized in positively. The HSI is based on technology that provides high resolution; higher accuracy; high sensitivity compared the multi-spectral imaging. In this study, the applications of HSI sensors to water quality monitoring and novel water management in environment, and the possibility to apply HSI technology for monitoring water quality are investigated to researching related paper.

**Key words:** Hyperspectral sensor, Water quality, Analysis, Application.

### 1. 서 론

초분광센서 (Hyperspectral Sensor)는 입사되는 빛을 분광시켜 영상의 각 화소에 해당하는 지표물의 연속적이고 좁은 파장역으로 수십에서 수백 개의 분광 정보를 취득하므로 물질마다 존재하는 고유의 광학적 성질 및 물질의 흡수와 반사 특징을 분석함으로써 토지피복, 식생, 그리고 수질 등의 식별에 주로 이용된다.<sup>1)</sup> 이에 비해 다중분광영상은 대부분 10 개 미만의 한정된 파장 구간에서 지표면으로부터 반사 또는 방출되는 복사에

너지를 감지함으로써 초분광영상에 비해 특수한 분광 특성을 가진 물질들을 인식할 수 있는 충분한 해상도를 제공하는 것에는 한계가 있다. 하지만, 다중분광영상에서는 미세한 분광 정보 차이를 구분할 수 있지만 초분광영상의 경우 상관관계가 매우 높은 연속된 밴드들과 많은 밴드 수는 일반적으로 처리와 분석에 어려움이 있어 과거에 전통적으로 사용되던 선형 분광혼합 기법은 활용하기가 어렵다. 그래서 최근에는 비선형 분광혼합 기법이 제안되는 등 초분광영상에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>2-6)</sup>

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

초분광센서를 이용한 연구들은 최초의 항공 영상분광계인 AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer)의 활발한 연구를 시작으로 AISA (Airborne Imaging Spectrometer for Applications), CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager) 등의 다양한 초분광영상 기법에 대한 연구가 진행 중이다. 활용 분야는 온도, 에어로졸 등의 대기<sup>7,8)</sup>, 광물<sup>9-11)</sup>, 그리고 식생<sup>12,13)</sup> 등에 대하여 수행되고 있다.

기존의 수질 분석방법은 센서나 인력을 이용하여 물이 흐르고 있는 방향으로의 조사 등 일부 구간의 분석 결과를 바탕으로 전 구간에 대한 수질을 예측하였다. 하지만 초분광영상 기법을 이용하게 되면 폭발량 변화를 확인할 수 있는 면단위 측정이 가능하여 전 구간에 대한 수질을 모니터링할 수 있는 장점이 있다. 그 중 초분광센서로 조류와 관련된 항목을 정성 $\circledast$  분석이 가능하게 된다면 실시간으로 신속하게 조류 관련 수질 항목을 모니터링 할 수 있으므로 양질의 수자원 확보 및 안전한 수돗물 공급을 위한 체계적이고 통합적인 수질관리가 가능하게 된다. 또한 수질오염 항목에 대한 조기 감지도 가능하게 되어 수질 문제가 발생하였을 경우 대응이 빠르게 이루어질 수 있다.

본 연구는 문헌조사를 토대로 초분광센서의 원리, 개요 및 활용 현황을 서술하였고, 초분광센서를 이용하여 연구가 진행 중이거나 수행된 수질관련 항목에 대한 조사를 하였다. 특히 수질관련 항목 중 식물플랑크톤 모니터링을 위한 초분광 센서 적용성을 검토하였다.

## 2. 초분광영상 기법이란?

초분광영상은 대상체로부터 반사된 연속적인 수백 개의 분광 파장대의 분광밴드를 가지는 이미지를 의미한다. 다른 분광영상과 같이 초분광영상 또한 전자기 스펙트럼에서 정보를 처리하고 수집한다. 초분광영상을 활용하면 원하는 개체를 구별하는데 있어 각 개체의 성분을 식별하거나 프로세스를 검출하는 것으로 원하는 이미지의 각 픽셀에 대한 고유의 스펙트럼을 얻을 수 있다.

인간은 적색, 녹색, 청색 영역의 세 가지 밴드의 가시영역을 볼 수 있다. 초분광센서는 전자기 스펙트럼의 넓은 부분을 이용하여 개체를 구분하는데 그 범위는 가시영역 이상으로 확장이 가능하고 더 많은 밴드로 스펙트럼을 나눈다. 초분광영상에서 기록되는 스펙트럼은 높은 파장 해상도를 가지고 넓은 범위의 파장대를 처리하며 주어진 화면 내의 물질로부터 공간적 스펙트럼

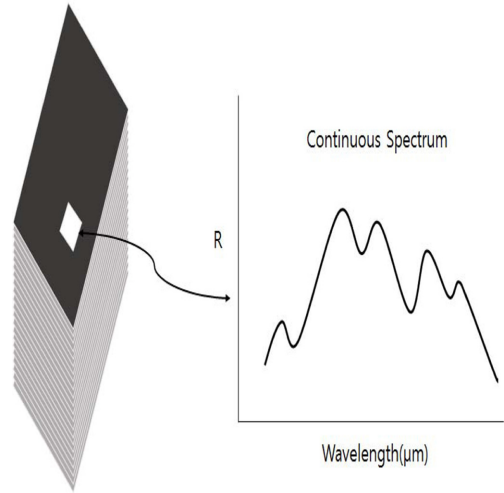


Fig. 1. Hyperspectral imaging technique.

정보가 포함되어 있다. 그러므로 각 픽셀은 각각의 스펙트럼 속성이 포함되어 있어 스펙트럼은 스캔된 개체를 구성하는 물질의 식별을 가능하게 한다.

초분광센서는 그 개체의 정보를 이미지의 형태로 확보가 가능하며, 각각의 개체는 스펙트럼 대역으로 알려진 전자기 스펙트럼의 범위에서 폭이 좁은 파장으로 나타난다. 스펙트럼 영상은 두 개의 공간적 차원과 하나의 스펙트럼 크기로 구성된 3차원  $(x, y, \lambda)$ 으로 나타난다.  $x$ 와  $y$ 는 그 장면의 공간적 2차원을 나타내고  $\lambda$ 는 스펙트럼 크기를 나타낸다. 2차원 (2-D) 검출기에서 각 화소에 스펙트럼 정보를 수집하여 초분광 큐브로 알려진 공간 및 스펙트럼 정보인 3차원 (3-D) 데이터를 형성한다.<sup>14)</sup> 이러한 프로세스로 천문학, 농업, 생물의학, 광물학, 그리고 물리학 등 여러 분야에서 초분광센서 및 처리 시스템을 구축할 수 있다 (Fig. 1).

## 3. 다중분광과의 차이점

분광영상은 측정방식, 밴드의 수, 그리고 파장 영역에 저장된 데이터의 연속성에 기초하여 초분광영상, 다중분광영상으로 나눌 수 있다. 초분광영상 기법은 가시영역, 근적외선, 중적외선, 그리고 열적외선 영역에 걸쳐 수집, 수백 개의 연속적인 밴드에서 이미지를 얻을 수 있는 반면 다중분광영상 기법은 가시영역과 중적외선 영역 내에서 보통 10 개 이하의 불연속적인 밴드에서 이미지를 얻을 수 있다. 초분광영상에서는 각 픽셀로부터 전체 스펙트럼이 추출될 수 있지만 다중분광영상은 데이터에 저장된 밴드가 분리된 형태이기 때문에

각각 픽셀에 해당하는 독립된 데이터를 생산한다.<sup>15,16)</sup>

다중분광영상과 초분광영상을 비교하여 옆면적지수 (Leaf Area Index, LAI)를 예측한 실험결과에서는 4개의 다양한 생물 군계 형태 내에서 밴드의 수가 중요하다는 결과가 도출되어 많은 밴드수가 존재하는 초분광영상을 활용한 데이터가 더 높은 결과와의 상관성을 보이는 것으로 나타났다.<sup>17)</sup> 또한 위성을 활용하여 해양색을 관찰하고 플랑크톤의 종을 동정하는 데 있어서는 다중분광영상보다 초분광영상이 더 효과적인 것을 확인할 수 있었다.<sup>18)</sup>

초분광영상은 높은 공간 및 스펙트럼 해상도 이미지를 확보할 수 있으나 이미지 획득을 위해 상당한 시간이 소요되고 상대적으로 오프라인 이미지 분석 절차가 복잡하다. 이에 비해 다중분광영상은 영상을 확보하는데 시간이 적게 소요되고 또한 영상을 처리하는 알고리즘이 간단하다.<sup>14)</sup>

## 4. 초분광 센서의 종류

### 4.1. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer)

MODIS는 1999년 후반에 Terra 위성에 탑재되었으며 지구 표면과 대기 하층에서 발생하는 전 지구적인 거동과 변형과정에 대한 정보를 획득하기 위해서 활용되고 있는 초분광센서이다. 대기 상층관련 정보, 해수면 온도 및 클로로필 a과 같은 해양 정보 및 지표면 변화, 지표면 온도 및 식생 특성 등과 같은 지표면 특성에 대한 관측이 가능하다. 705 km의 위성 고도로 아침 10시 30분 (Terra)과 오후 1시 30분(Aqua)에 지구 표면을 관측한다. 400-1440 nm 파장에서 총 36개 밴드에 대한 자료를 획득할 수 있다. 공간해상도 (Spatial resolution)는 250×250 m (밴드수, 1-2), 500×500 m (밴드수, 3-7) 및 1000×1000 m (밴드수, 8-36)이다.<sup>19)</sup>

### 4.2. AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer)

AVIRIS는 최초의 항공 영상분광계로서 미항공우주국인 JPL (Jet Propulsion Laboratory)에서 분광해상도나 공간해상도 측면에서 뛰어난 영상 자료를 획득하기 위해서 개발되었다. 원격탐사 영역에서 성능이 입증된 장비로 400-2500 nm 파장구간에서 10 nm 마다 224개의 밴드로 보정된 이미지를 제공하는 초분광 광학센서이다. 신호대잡음비 (Signal-to-noise ratio, SNR)

은 500:1이며 공간해상도 (Spatial resolution)는 20×20 m, 그리고 전체 시야각은 30°이다. AVIRIS는 북미, 유럽, 남미, 아르헨티나를 비행하며, 현재까지 센서 검보정, 영상 전처리, 지질학 및 광물탐사, 생태, 환경, 해양, 그리고 대기 등 다양한 목적의 연구에 활용되고 있다.<sup>20)</sup>

### 4.3. CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager)

CASI는 1954년 이후 활용되기 시작하였으며 캐나다에서의 항공과 항공우주사업의 예술, 과학, 기술, 응용의 발전에 기여하였다. 380-1050 nm 파장영역에서 최대 288개 밴드 영상이 제공된다. 신호대잡음비는 480:1이며 공간해상도는 0.5-10 m, 그리고 전체 시야각은 40°이다. 촬영방식은 횡방향의 고정된 폭을 가지고 촬영 대상지역을 쓸어가듯이 영상을 확보한다. 수질, 광물탐사, 습지, 그리고 숲 등의 정보를 얻기 위한 다양한 목적으로 활용되고 있다.

### 4.4. AISA (Airborne Imaging Spectrometer for Applications)

AISA EAGLE은 400-970 nm 파장영역에서 488개의 밴드 영상을 제공하고 Hawk의 경우에는 254개의 밴드를 제공한다. 신호대잡음비는 1250:1이며, 공간해상도 (Spatial resolution)는 39.7°, 29.9°, 그리고 전체 시야각 (Field Of View, FOV)는 39.5°이다. AISA 시스템은 LiDAR 데이터와 함께 결합하여 사용함으로써, 오일 유출, 홍수, 그리고 환경제어에 효율적으로 접근하기 위해 활용되고 있다.

## 5. 초분광영상 처리기법

어떤 물질 또는 개체를 초분광영상을 활용하여 측정하기 위해서는 그 물질이 어떤 파장대에서 분광학적으로 다른 물질과 구별되는지에 대한 조사가 수행되어야 하며, 또한 성장을 하는 물질이라면 생장별 고유 특성 조사도 함께 수반되어 영상에 대한 처리가 되어야 할 것이다. 활용성이 높은 물질 정보는 해당 물질의 특징과 가장 연관성이 높은 고유한 특징이 초분광 영상분석을 위한 정보처리에 활용되는 것이다.<sup>21)</sup> 영상을 촬영할 때 객체를 분석하기 위한 최소 공간해상도와 분광특성을 추출하는데 유용한 센서의 분광해상도를 고려하여 측정하고 대상 개체의 분광반사율을 취득하는 것

이 중요하다. 취득한 분광반사율을 이용하여 복사보정, 대기보정, 그리고 기하보정 과정을 거쳐 분광 라이브러리를 구축한다. 그 후, 특징추출 (Feature extraction) 과 분광혼합분석 (spectral mixture analysis)를 거쳐 초분광영상의 매핑이 이루어지며, 주요 영상처리기법은 다음과 같다.

### 5.1. 자료압축(Data compression) 및 보정(Correction)

초분광영상은 자료량이 상대적으로 크기 때문에 압축 기법이 필요하며,<sup>22)</sup> 자료 압축 기법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 자료량을 줄일 수 있는 방법으로 정보의 손실이 거의 없는 DPCM (differential pulse code modulator)와 상대적인 정보의 손실은 있으나 압축률이 가장 높은 VQ (Vector Quantization) 방법이 있다.<sup>23,24)</sup> Aiazzi *et al.* (2002)은 JPEG와 같은 손실이 거의 없는 DPCM 기법을 사용하였고 DPCM 인코더는 결과의 상황 정보 기반 산술 코딩 다음에 분류된 선형회귀 예측을 기반으로 자료압축을 시행하였다.<sup>25)</sup>

보정에는 복사보정 (radiometric correction)과 대기보정 (atmospheric correction) 등이 있다. 복사보정 (radiometric correction)은 신호대잡음비가 영상의 품질을 평가하는데 중요한 기준이 된다. 상대적 신호대잡음비의 추정에는 영상의 기본 통계값 (평균 또는 표준편차)를 이용하는 방법과 반분산도 (Semi variogram)을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다.<sup>26)</sup> 태양과 지구와의 거리, 지면에서 수직방향과 태양과의 이루는 각도 등을 이용하여 대기 상층의 반사율을 계산하여 보정한다. 대기 효과 보정은 정확한 분광반사 특성을 밝히기 위해서 복사량 값에서 대기에 의한 영향을 제거하여 순수한 표면 반사율로 변환하는 대기효과 보정이 우선되어야 하며 센서에서 감지한 복사량을 직접적으로 변형하는 절대적 대기보정방법이 사용되고 있다. 주된 대기 복사전달 모델은 MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission)과 S6 모델이 있다.<sup>27)</sup> Berk *et al.* (1998)은 AVIRIS 데이터를 MODTRAN 대기보정기법을 이용하여 구름과 에어로졸에 의한 산란을 보정하였다.<sup>28)</sup> 알고 있는 분광 반사율 자료를 이용하는 ELM (Empirical Line Calibration)기법 등이 있으며 시계열 초분광데이터를 분석하고자 할 때에는 상대방사 정규화 (relative radiometric normalization) 과정을 수행하여 보정을 실시한다.

### 5.2. 특징 추출(Feature extraction) 및 분광 혼합 분석(Spectral mixture analysis)

대용량의 자료를 빠르고 쉽게 처리하기 위해서 소프트웨어는 이미지화와 분류 위주로 발전해 왔다. 이미지 분류 과정 중의 하나는 특징 추출 (Feature Extraction)이다. 수많은 분광정보에서 원하는 특정 정보만을 추출하는 과정으로 수백 개의 분광밴드 중 목적에 맞는 밴드만을 선택하거나, 특정 분광 변환기법을 통해 원하는 분광정보만을 나타내는 변환된 분광밴드를 택하는 밴드 선택 (band selection)과 영상으로부터 인식기에 사용될 분광특징 및 자료를 추출하는 과정인 특징 선택 (feature selection)이 존재한다. 밴드 선택 (band selection)은 표준편차와 entropy로 밴드지수 (Band Index)를 구하고 이를 이용하여 밴드를 선택하며,<sup>29,30)</sup> 독립성분분석 (Independent Component Analysis), 공간 자기상관 (Spatial Autocorrelation)<sup>31)</sup> 등으로 이루어지며, 특징 선택은 PCA (Principal Component Analysis), 결정경계 특징추출 DBFE (Decision Boundary Feature Extraction),<sup>32)</sup> SSA (Spectral Shape Analysis)<sup>33)</sup>로 이루어진다.

지표면은 두 가지 이상의 물질로 구성된 상태로 존재하므로 각 화소에 포함되어 있는 여러 지표물의 고유한 분광반사특성을 이용하여 각 화소를 구성하는 여러 지표물의 점유비율을 해석하는 방법이 분광 혼합분석 (Spectral Mixture Analysis, SMA) 방법이다.<sup>21)</sup> 단일의 순수한 지표물로 이루어진 화소값을 endmember라 하며, 각 화소는 여러 endmember의 구성비율의 합으로 나타낼 수 있다. 이는 또한 선형 분광혼합기법과 비선형 분광혼합기법으로 나뉜다.

Endmember를 추출하기 위해서는 분광 라이브러리와 현장에서 측정한 분광계를 이용하고 순수물질이 어떤 것인지 또한 몇 개인지를 정의해 주어야 하며, 영상 내에 방해인자는 없다고 가정하여야 한다.

분광혼합 분석기법의 처리과정은 다음과 같이 크게 3단계로 나뉜다.<sup>27,34)</sup>

**1단계** 효과적인 영상처리와 영상의 노이즈를 제거하기 위해 초분광영상의 수많은 분광정보를 줄이는 방법으로 주성분 분석기법과 원하는 특정 정보만 추출하고자 개발된 자료변환을 이용한 MNF (Maximum Noise Fraction) 변환기법 (NAPC(Noise Adjusted Principal Components))이 있다. MNF 기법은 주성분 분석 기법의 단점을 보완하여 분산 (variance)을 계산 후 이를 기준으로 하여 노이즈 효과가 제거된 밴드별

고유의 분산을 최대화하는 방향으로 계산한 기법이다.<sup>35)</sup> Chang and Du (1999)은 HYDICE (HYperspectral Digital Imagery Collection Experiment) 데이터를 주 성분 분석기법으로 처리한 결과와 NAPC 기법으로 처리한 결과를 비교 분석하였다.<sup>36)</sup>

**2단계** 영상의 혼합화소에 포함되는 endmember의 종류와 각 endmember의 분광신호를 정의하며 가장 중요한 과정으로 영상에서 직접 endmember를 선택하는 방법과 야외나 실험실에서 직접 endmember의 분광신호를 측정하거나 분광 라이브러리를 사용하여 해당하는 endmember의 분광신호를 얻는 방법이 있다. endmember를 선정하는 기법<sup>37)</sup>에는 MEST (Manual Endmember Selecton Tool), PPI (Pure Pixel Index), N-FINDER, IEA (Iterative Error Analysis), ORASIS (Optical Real time Adaptative Spectral Identification System), MTMF (Mixture Tuned Matched Filtering), CCA (Convex Cone Analysis), AMEE (Automated Morphological Endmember Extraction), SAA (Simulated Annealing Algorithm) 등이 있다.

**3단계** 혼합화소에 대한 각 endmember의 점유 비율을 추정하는 분광분해 (Spectral unmixing)과정이다. 영상 내에 존재하는 endmember 수를 쓰고자 하는 자가 직접 정해줘야 하며, 한 화소 내에 점유된 endmember의 합은 1이 되어야 하고 음의 값을 가질 수 없다.

Parker and Hunt (2002)은 식생을 대상으로 초분광 원격탐사를 진행하였는데 AVIRIS 데이터를 분광 혼합분석 기법인 MTMF를 이용하여 전체 영역 중에서 잎이 무성한 식물의 비율을 추정하고 그 분포도를 매핑하였다.<sup>38)</sup> Ichino and Sklansky (1984)은 최적의 특징 선택 및 추출 방법을 찾기 위하여 Binary string 방법을 이용하였다.<sup>39)</sup>

### 5.3. 분광특성정합 (Spectral matching)

분광특성정합 (Spectral matching)은 영상의 각 화소와 기준 스펙트럼 간의 유사성을 측정하는 방법으로 기존에 알려져 있는 대상물체의 기준 분광반사값을 이용하여 초분광영상에서 얻어지는 반사값과의 분광특성 유사성을 분석하여 초분광영상의 각 화소에 대한 대상물체의 종류 및 함유량 등을 정의하는 방법이다. 이것으로 물질을 규정하고 특성을 파악한 뒤, 지도화하는 과정을 초분광영상 매핑 (Hyperspectral data mapping) 이라고 한다. 방법으로는 SDS (Spectral Distance Similarity), SCS (Spectral Correlation Similarity),

SAS (Spectral Angle Similarity), SSV (Spectral Similarity Value), LSF (Least Squared Fitting), CCSM (Cross Correlogram Spectral Matching), Spectral angel mapper, Spectral feature fitting 등의 기법이 있다.<sup>27)</sup> Hubbard *et al.* (2003)은 Hyperion과 ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer) 이미지의 스펙트럼 endmember를 식별하는데 Hyperion의 경우에는 연속 제거된 이미지와 라이브러리 스펙트럼 사이의 적합한 최소제곱 회귀기반을 계산한 Tetracorder 기법과 순수 픽셀 색인분석의 결합을 이용하였고, ASTER의 경우에는 밴드비율과 상대적인 밴드 이미지를 이용하였다.<sup>40)</sup> Gao and Goetz (1995)은 초목을 대상으로 한 AVIRIS 데이터의 양적인 분석을 위하여 1.0 와 1.6 범위 내에서 비선형과 선형 최소 제곱 스펙트럼 매칭 기술을 개발하였다.<sup>41)</sup>

## 6. 초분광센서를 이용한 수환경 적용 분야

### 6.1. 센서 종류별 수질분석 연구현황

초분광센서는 국내에서는 비교적 최근에 도입되었기 때문에 외국의 사례에 비해 국내에 적용된 사례와 연구는 한정적이다. 현재까지 원격탐사 연구내용을 분석해 보면 다중분광시스템을 이용한 논문이 가장 많았으며, 2010년에 발사된 천리안 해양관측 위성 (Goestationary Ocean Color Imager, GOCI)에 관한 연구가 많이 진행되었다. GOCI는 세계 최초로 정지궤도에서 해색을 관측할 수 있는 센서로 가시광선 영역과 근적외선 영역의 8개 밴드 (412, 490, 512, 555, 660, 680, 765, 875 nm)를 가지고 있다.

초분광영상을 이용한 논문은 약 10% 정도만 존재하여 아직까지 국내에서는 많은 연구가 이루어지지 않고 있으며, 그 중 수계와 관련된 논문은 MODIS를 이용한 입자성 유기탄소 (Particulate Organic Carbon, POC) 함량에 관한 연구, 클로로필 a연구와 AISA를 이용한 수질추정 테스트 (SS, TN, TP) 등의 연구 등 소수에 불과하였다. 초분광센서에는 여러 종류가 있으나 많이 이용되는 센서를 중심으로 국내·외에서 수행되어진 연구를 분석해보면 Table 1과 같다.

#### 6.1.1. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer)

MODIS는 대기 상층관련 정보, 지표면 변화, 지표면

온도 및 식생 특성 등과 같은 지표면 특성에 대한 관측뿐만 아니라 수환경 분야에서는 해수면 온도 및 클로로필 a와 같은 해양 정보도 관측이 가능하다.<sup>19)</sup> MODIS를 이용하여 수질을 조사한 연구가 10.2%로 수행되었으며, 주로 대기와 관련된 연구가 50.4%로 가장 많은 연구가 이루어졌고 두 번째로 식생이 17.1%로 이루어졌다. 그 외에는 지리분야 등으로 연구가 진행되었다.

Kim *et al.* (2013)은 MODIS 데이터를 이용하여 반분석 알고리즘을 기반으로 수질을 추정하기 위해 수질 투명도의 지표인 Secchi depth를 측정하였고<sup>42)</sup>, 김 등 (2007)은 해수표면온도 밴드를 함께 이용하여 우리나라 동해 및 남해 연안에 대규모로 발생하는 *Cochlodinium polykrikoides* 적조를 탐지하는 알고리즘을 제안하였고 이 알고리즘은 적조의 분광스펙트럼을 이용하여 필터링하였다.<sup>43)</sup> 정 등 (2002)은 MODIS 자료에서 방해인자인 구름을 제거한 후 해수면온도를 산출하고 MODIS PFSST (Passfinder Sea Surface Temperature) 알고리즘을 이용하여 정확도를 검사하였고<sup>44)</sup>, 오 등 (2011)은 MODIS, AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer), 그리고 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth)와 같은 분광계를 사용하여 해수면온도 합성기법을 제안하고 기존의 알고리즘과 비교하였다.<sup>45)</sup>

김 등 (2008), 오 · 윤 (2012)은 MODIS에서 제공하는 클로로필 a 정보와 667 nm의 밴드를 이용한 부유사 자료를 이용한 바탕으로 적조를 탐지하였고 이를 정확도 평가를 통해 시각적, 정량적으로 확인하였다.<sup>46,47)</sup> 최 등 (2011)은 MODIS 영상에 적색 파장대와 근적외선에 해당하는 두 가지 밴드 비율 및 세 가지 밴드 비율을 이용한 모델을 적용하여 클로로필 a의 농도를 추정하였다.<sup>48)</sup> 김 · 정 (2009)은 공간해상도가 각각 4×4 km와 9×9 km인 MODIS Aqua와 SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) 평균영상을 이용하여 허베이스피리트 유출 사고 전후 클로로필 a의 시공간변동을 분석하여 보여주었다.<sup>49)</sup>

녹조류에 대한 연구는 이 · 이 (2012)가 MODIS와 GOCI 영상자료를 이용하여 서해에서 발생한 부유성 녹조류의 분광반사값 특성을 알아보고 660 nm와 860 nm의 밴드비율을 이용하여 부유성 녹조지수를 분석하였다.<sup>50)</sup>

홍 등 (2011)은 MODIS Aqua 위성자료와 화학분석을 통해 측정한 POC 함량 자료를 원격반사도, 확산광 소산계수 등 MODIS Aqua 해석 위성 관측 자료와 비

교하여 POC 함량을 추정하였다.<sup>51)</sup> 488 nm와 555 nm의 분광반사값의 비율을 이용하여 추정한 POC값이 현장 값에 가장 근접하였다. 정 (2011)은 새만금 지역의 Landsat TM (Thematic Mapper) 과 ETM (Enhanced Thematic Mapper) 영상을 표층수온 추출 알고리즘을 적용하여 표층수온을 추출하고 MODIS 열적의 밴드 자료를 이용하여 해수온 공간 특성을 비교하였다.<sup>52)</sup> 서 등 (2002)은 MODIS 위성의 36 개 채널 중 공간해상도가 250 m, 500 m인 채널을 합성한 RGB 디지털 영상 자료를 이용하고<sup>53)</sup> 이 등 (2003)은 Terra/MODIS 데이터와 동중국해 북부해역의 현장 관측치를 이용하여 해수를 관찰하였다.<sup>54)</sup>

부유물질과 해수염분<sup>55)</sup>, 클로로필 a와 부유물질<sup>56)</sup>, 클로로필 a와 온도<sup>57)</sup>, 표층수온, 클로로필 a, 식물플랑크톤 종조성 자료 이용<sup>58)</sup>, 표층수온과 엽록소 연구<sup>59)</sup> 등 두 가지 이상의 수질항목을 조합하여 MODIS를 활용한 연구가 이루어졌음을 알 수 있었다.

#### 6.1.2. AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer)

AVIRIS를 이용하여 수질을 조사한 논문을 살펴보면 국내에서는 식생연구 및 추출방법에 대한 연구가 진행되었다.<sup>27,60-62)</sup> 또한 AVIRIS를 이용한 수질관련 연구로, Hoogenboom *et al.* (1998)은 AVIRIS 데이터에서 713 nm와 677 nm의 밴드비율을 이용한 bio-optical 모델을 이용하여 클로로필 a와 Pheophytin의 함을 추정하였고,<sup>63)</sup> Mustard (1993)은 장소에 따른 식물플랑크톤과 부유물질과 같은 광학활성물질을 측정한 AVIRIS 데이터를 이용하여 현장관측데이터와 비교하였다.<sup>64)</sup> 그리고 Carder *et al.* (1993)은 AVIRIS 데이터에서 415 nm에서의 흡수계수와 671 nm에서의 산란계수를 이용하여 용해성 물질과 입자성 물질을 추정하였다.<sup>65)</sup>

#### 6.1.3. CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager)

CASI는 Pushbroom 촬영방식으로서 횡방향의 고정된 폭을 가지고 촬영 대상지역을 쓸어가듯이 영상을 취득한다. 수질, 광물탐사, 습지, 그리고 숲 등의 정보를 얻기 위한 목적으로 주로 사용되고 있다. 국내에서 CASI를 이용한 연구는 2011-2012년 동안 서해 연안에 대해 초분광센서를 활용한 측량을 실시하여 해안선 성분에 대한 데이터베이스가 구축되었다. 또한 북한강과 남한강 일대의 클로로필 a, SS, DOM 등을 추출하여

초분광영상의 수질분석 적용 가능성을 검증하였으며, 광릉수목원에 대해서 잣나무림, 낙엽송림, 침엽수, 활엽수림 등이 구분되는 것을 확인하였다.<sup>66)</sup> 국내에서 CASI를 이용한 논문은 소수에 불과하였으며 그 중에 가장 많은 연구는 식생에 관한 연구였고 주로 적절한 밴드를 선택하기 위한 연구 등이 수행되었다.<sup>61,67)</sup>

#### 6.1.4. AISA (Airborne Imaging Spectrometer for Applications)

AISA EAGLE의 경우 400-970 nm 파장에서 488개의 밴드 영상을 제공한다. AISA를 이용한 연구는 식생 및 수질 등에 수행되었으며, 수질을 조사한 연구는 김 등 (2014)이 AISA EAGLE 초분광센서를 이용하여 취득한 데이터와 현장 관측데이터를 선형회귀분석을 통하여  $-24.847 + 0.013L_{560}$ 의 회귀식을 이용하여 부유물질 농도를 추정하여 그 활용가능성을 평가하였다.<sup>3,68,69)</sup>

### 6.2. 초분광센서를 이용한 수질항목별 연구현황

초분광센서를 활용한 원격탐사는 광학 활성물질의 농도와 같은 수질특성을 조사하는데 있어 활용성이 높은 방법이다. 분광 반사값과 수질특성의 관계를 모델링한 연구가 진행 중이며, 실제 초분광영상을 이용하여 내륙 수계의 영양상태를 파악하고 관리하는 빈도가 증가하고 있다. 몇 가지 방법들은 무기 퇴적물 입자, 클로로필 a, 유색 용존 유기물질, 투명도와 같은 수질항목과 스펙트럼의 상관성을 분석하는데 매우 유용하게 적용되고 있다. 현재 원격탐사에서 수질항목 측정을 위해 적용되는 방법은 이론적, 경험적, 반경험적 등 준분석적 (Semi-analytic) 방법들이다. 분석 알고리즘은 원격탐사 데이터로부터 수질항목을 유추하는 선형 또는 비선형 회귀곡선으로 개발되고 있으며, 현장 연구에 비해 초분광센서는 시·공간적 제약이 적고 여러 지점을 동

시에 모니터링 할 수 있다는 장점이 있다.

수질연구를 위한 초분광센서의 적용은 물질에서 반사된 방사선이 매우 좁은 파장대에서 기록된다는 점에서 다중분광센서에 비해 많은 장점이 있다. 이러한 방식은 대상의 미묘한 방사성 변화를 감지할 수 있고 이를 원격탐사 데이터로부터 정량화할 수도 있다. 따라서 초분광 원격탐사는 수계에서 클로로필 a와 같은 광학 활성 성분을 연구하는데 효과적이다. 수심, 식물플랑크톤의 농도, 유색 용존유기물 (CDOM(Colored Dissolved Organic Matter)), 그리고 비 조류입자 (NAP(Non Algal Particle)) 등 네 가지 항목은 보통 수출광량에 영향을 주는 대표적인 항목들로 알려져 있다.<sup>72)</sup> 이 스펙트럼의 특징을 분석을 통하여 수질의 특성을 알아낼 수 있다. Table 2는 수환경 분야와 관련된 초분광영상의 활용과 관련된 연구사례를 보여주고 있다.

#### 6.2.1. 클로로필 a

알고리즘을 평가할 때는 각 파장대에 해당하는 분광 반사값과 수질 데이터와의 관계를 선형회귀곡선으로 나타내어 상관계수 ( $R^2$ )나 평균 제곱근 편차 (Root Mean Square Error, RMSE)값을 이용한다. 수계에서 클로로필 a의 농도를 모니터링 하는 것은 수질의 부영양화를 관리하는데 있어 필수적인 항목이다. 클로로필 a는 조류의 바이오매스의 주요지표이고 수중에 존재하는 질소나 인의 가용성에 따라 달라진다. 클로로필 a의 경우 성공적인 추정모델은 CDOM과 부유물질의 흡수가 적은 적색 파장대에서의 분광 반사값을 사용해야 하는데 이는 이 물질들의 광학적 방해작용 때문이다. 즉 CDOM과 무기침전물은 청색 파장대에서 클로로필 a와 흡수특성이 겹치기 때문이다. Olmanson *et al.* (2013)는 705 nm : 620 nm 밴드비율을 이용한 모델이 추정한 클로로필 a의 농도와 실제 클로로필 a의 농도가 가

**Table 1.** Number of hyperspectral remote sensing papers categorized by sensor, data processing, and applications in Korea<sup>70,71)</sup>

Category	MODIS	AVIRIS	CASI	AISA
Application	Geology	31	-	-
	Vegetation	27	2	3
	Urban	3	-	1
	Hydrology	22	-	-
	Atmosphere	109	-	-
	Mix	2	-	-
	Others	12	2	1
	Total	216	4	5

\* 검색 키워드 : MODIS, AVIRIS, CASI, AISA

**Table 2.** Selected hyperspectral studies related to the water

Contents	Study area	Data used	Methods	References
Chlorophyll-a, turbidity, VSS, TSS	USA, Minnesota	ASIA	relationship with In-situ measurement	73)
Chlorophyll-a, TN, TP	USA, Florida	ENVI 4.5	reflectance ratio and three-band index	74)
depth, CDOM, NAP	France, Quiberon Peninsula	Hypex VNIR-1600	standard ML estimation method	72)
Chlorophyll-a, TSS, CDOM	USA, Chesapeake Bay	ASIA	relationship with In-situ measurement	75)
Chlorophyll-a, phycocyanin	Indiana, Indianapolis	Field spectrometer	semi-empirical algorithm	76)
Chlorophyll-a, turbidity, CDOM	USA, Florida	HICO	MERIS three-band model	77)
Chlorophyll-a	China, Shanghai	HJ-1A	reflectance of visible & NIR	78)
Chlorophyll-a, TSM, TP	China	HJ-1A	NTD 675 water classification method	79)
Chlorophyll-a	German, Berlin	RODIS, HyMAP	Spectral matching with field measurements	80)
phytoplankton species	Canada	UV spectrometer	bio-optical model	81)
classification of green, red, brown macroalgae and sand	Baltic Sea	GER1500 spectroradiometer	bio-optical model	82)
Cyanobacteria, Microcystin	UK, Loch Leven lake	ASIA, CASI-2	G05, G08 semi-analytical algorithms	83)
Cyanobacteria	Baltic Sea	Field spectrometer	Optical model	84)
water quality	Zimbabwe, Chivero lake	MERIS spectrometer	relationship with water constituents	85)
Chlorophyll-a, phycocyanin, TSM, SDD	USA, Morse Reservoir	ASIA	GA-PLS model	86)

장 강한 상관관계를 나타냄을 보여주었다.<sup>73)</sup> Fan(2014)는 식물플랑크톤의 700 nm에서의 후방산란 및 670 nm에서의 흡수 때문에 700 nm : 670 nm 밴드비율을 이용한 모델이 가장 강한 상관관계를 나타내었다.<sup>75)</sup>

### 6.2.2. 식물플랑크톤

식물플랑크톤의 종 구성과 분포는 지표수의 광학특성에 영향을 미치고 또한 광학특성의 계절적, 지역변화에 중요한 인자이다. 수계에 존재하는 클로로필 a의 농도는 식물플랑크톤의 흡수 및 산란계수에 영향을 끼치고 이는 분광반사값에 영향을 미친다. 또한 분광반사값은 식물플랑크톤 집합체의 구성과 색깔에 따라 달라진다. 주요 반사 피크의 차이는 식물플랑크톤에 의한 색깔의 차이와 밀접한 관련이 있다. Mao *et al.* (2010)에서는 갈색을 띠는 Bacillariophyta와 Haptophyta는 570 nm 주위에 반사피크가 나타났고 녹색을 띠는 Chlorophyta는 540 nm 주위에 반사피크가 나타났다.<sup>81)</sup>

### 6.2.3. 탁도, TSS (Total Suspended Solids)

부유물질은 지표수에서 가장 흔히 발생하는 오염인자이다. 부유물질은 전자기 스펙트럼의 가시 및 근적외선 영역과 비례하여 지표수에서의 복사조도를 증가시킨다. 탁도와 TSS 분석을 위한 모델은 적색 파장대에서의 클로로필 a와 청색 파장대에서의 CDOM의 흡수 특성을 피하고 700 nm의 산란피크나 근적외선과 녹색 파장대에서 밴드의 조합을 이용해야 한다. Olmanson *et al.* (2013)는 TSS와 705 nm에서의 분광반사값은 상관성이 있음을 보여주었고, 이 연구에서 사용한 모델은 클로로필 a의 흡수특성을 제외하고 700 nm에서의 부유물질의 흡수특성을 이용하였다.<sup>73)</sup> 또한 NVSS (Non Volatile Suspended Solids)의 경우에는 705 nm의 반사값이나 705 nm : 670 nm 밴드 비율 값과 상관관계 높음을 보여주었다. Keith *et al.* (2014)는 HICO (Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean) 이미지에서 646 nm의 분광반사값을 이용하였다.<sup>77)</sup>



#### 6.2.4. CDOM

CDOM은 주로 자외선이나 가시광 영역에서 빛을 흡수하고 빛의 감소나 스펙트럼의 품질을 제어하는데 중요한 역할을 한다. CDOM의 경우 클로로필 a와 부유물질이 방해물질로 작용해 분광 반사값에 영향을 끼치기 때문에 청색 파장대에서의 흡수특성을 사용하지 않는다. 대신 녹색 파장대와 적색 파장대 (>500 nm)에서의 반사율 비율을 이용하여 추정한다. Fan (2014)는 700 nm와 450 nm의 분광 반사값의 비율을 이용하였고<sup>75)</sup> Keith *et al.* (2014)는 HICO 이미지에서 670 nm와 490 nm의 분광 반사값의 비율을 이용하였다.<sup>77)</sup>

#### 6.2.5. 총인 (T-P) 및 총질소 (T-N)

총인 및 총질소는 수계에서 부영양화의 주요한 원인 인자이다. 총인, 총질소는 클로로필 a, TSS, 그리고 투명도와 같은 다른 수질인자들과 밀접한 상관성이 있기 때문에 그 인자들을 이용한 간접적인 추정방법을 이용한다. Abd-Elrahman *et al.* (2011)는 클로로필 a를 이용하여 총인 및 총질소의 농도를 추정하였다. 또한 700 nm 및 680 nm 의 밴드비율을 이용한 모델과 700 nm, 680 nm, 690 nm 의 세 개 밴드비율을 이용한 모델을 비교하여 모델의 정확도를 평가하기도 하였다.<sup>74)</sup> 그 결과 세 개의 밴드비율을 사용하였을 경우 가장 큰 상관관계를 보여 주었다. Sun *et al.* (2014)는 TSS의 관계를 이용하여 총인의 농도를 추정하였다. 총인의 농도를 예측하는 알고리즘은 부유물질이 민감한 스펙트럼 범위인 근적외선과 녹색 파장대를 이용하였다.<sup>79)</sup>

### 6.3. 초분광센서를 이용한 수질분야 활용사례 및 적용성 평가

국내·외 수질관리 분야에 초분광센서를 활용하여 원격탐사 기법을 적용하고자 하는 방법은 최근에 도입이 되고, 관심도가 높은 분야이다. 하지만, 수질 모니터링이나 예측을 위한 수질 항목에 대한 분광 라이브러리의 부재, 하천이나 호소를 대상으로 오염물질에 대한 분광 정보의 측정데이터의 부재, 그리고 센서를 활용한 수질 원격 모니터링 분야에 대한 기반 기술 개발 노력 부족 등으로 수질관리 분야의 적용 사례는 매우 미흡한 실정이다. 그러나 수 지점의 하천 수질 측정 자료가 전체 하천의 수질을 대표하는 것으로 여겨지는 것에 대한 문제점, 매년 발생하는 녹조 현상에 대한 전반적인 하천 수질 분석 및 예측을 위하여 항공사진이나 고해

상도 위성영상 등을 활용한 원격탐사 기법을 이용한 면단위의 광역 수질관리 체계 도입 요구의 증대 등으로 국내·외 기관에서 연구를 추진하고 있는 것으로 알려져 있다.<sup>87)</sup> 국가수질측정망에서 생산하는 조류 측정자료는 전체적인 조류의 발생이나 거동 기작 등을 과학적으로 분석하기에는 부족한 상황으로 광역 수체에서 발생하는 녹조 현상의 근본적인 원인 분석을 위하여 면단위의 측정자료가 필요하여 원격 모니터링을 도입하고자 연구를 진행하고 있으며, 이는 고정식 센서나 측정 인력을 통한 측정은 현실적으로 적용하기 힘든 상황으로 센서를 무인항공기 등에 탑재하여 항공 촬영한 자료를 활용하고자 시도를 하고 있는 것으로 알려져 있다. 또한, 조류 중에 대한 분광 특성을 구분하여 분광 라이브러리를 구축하고자 연구를 진행하고 있으며, 구축된 분광 라이브러리는 향후 현장 수질 자료를 분석하는데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.<sup>87)</sup> 따라서, 수질분석을 하고자 하는 대상 수체에 따라 항공용 또는 지상 설치용 초분광 영상기술을 활용하여 적용할 수 있을 것으로 생각되며, 분석하고자 하는 목적에 맞게 초분광센서를 활용하는 방안을 강구할 수 있을 것이다.

변화가 심하고 유속이 있는 수체의 효과적인 수질관리를 위해서는 객관적이고 신속하게 수질 자료를 확보할 수 있는 원격탐사 기법이 필수적이기는 하나, 센서나 비행체 등을 확보하는 초기비용의 발생, 모든 수체에 동일하게 적용할 수 있는 회귀모형은 불가능하므로 목적으로 하고자 하는 수체의 특성을 반영한 회귀 모형의 개발 등에는 시간이 필요할 것으로 사료된다. 추가적으로, 촬영된 초분광영상의 분석을 위해서는 기하보정, 복사보정, 그리고 대기보정 등이 필요하며, 전처리를 통해 실제 분석하고자 하는 대상체에서 복사되는 에너지량 정보를 파악하여야 한다. 초분광 원격탐사 기법을 수질에 적용하기 위해서는 위와 같은 여러 문제점 등을 보완하여야 하겠지만, 수체의 전체적인 수질분포를 파악함으로써 오염 경로의 사전 파악 및 대응이 가능하며 오염지역의 중점 수질관리가 가능할 것으로 사료되어 수질관리의 효율성이 증대되고 수질예보의 정확도 또한 향상될 것으로 기대된다.

## 7. 결 론

본 논문에서는 초분광영상의 정의, 다중분광영상과의 차이점, 초분광센서의 종류, 초분광자료의 처리기법, 그리고 수환경 적용 가능성에 대해 소개하였다. 초분광영

상을 이용한 연구는 환경, 지리, 산림, 그리고 농업 등 여러 분야에서 시도되었으나 대부분의 연구는 대기와 식생과 같은 거시적인 연구에 치우쳐 왔다. 하지만 최근 수질에 대한 관심이 증가하면서 수질 모니터링과 초분광영상을 활용한 원격탐사에 대한 연구를 접목한 연구결과가 발표되고 있다. 또한 다중분광영상을 활용하여 주로 수행되어왔던 클로로필 a 농도와 부유물질 등 다양한 수질 항목에 대한 연구가 초분광영상 기법을 활용하여 수행되고 있음을 알 수 있다. 초분광영상을 활용한 수질 분석의 장점은 실시간으로 대표성 있는 수질 정보를 확보할 수 있으며, 조기에 수질오염을 감지할 수 있어, 안전하고 깨끗한 수돗물을 공급하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

하지만, 수질 분야에서 초분광영상 기법을 활용한 수질 모니터링이 활성화되지 못하는 이유는 조사하고자 하는 물질에 대한 분광 라이브러리 자료의 부족, 기하 보정과 대기보정과 같은 전처리와 검 · 보정의 체계적 요구, 수질 매개변수들 간의 복잡한 상호작용의 이해, 경험식에서 사용되는 밴드들의 구성방법의 정확한 이해, 특정 물질에 적합한 적절한 공간해상도 및 분광해상도를 지니는 초분광센서의 결정 필요성 등으로 요약될 수 있다. 또한 수질 중에서 생리적 특성을 파악해야 하는 물질인 경우에는 생리적 단계에 따른 분광특성인 IOP (Inherent Optical Property)와 SIOP (Specific IOP)의 데이터베이스화도 부족하기 때문에 추후에 추가적인 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다. 또한 완벽한 반사도 모델 개발의 어려움, 같은 종간의 유사한 광특성, 환경에 따른 변동 등 초분광센서가 가지고 있는 한계는 존재하지만 대규모 지역의 전체를 관찰하고자 하는 경우와 접근이 어려운 경우 관찰이 가능한 장점이 있고 실시간으로 관찰이 가능하여 오염물질의 유입에 대한 조기 감지가 가능하고 조류발생 및 확산의 모델 자료로 활용할 수 있는 것에 의의가 있을 수 있다. 분석하고자 하는 물질에 대한 스펙트럼 라이브러리의 정밀도와 정확도가 높아진다면 초분광센서를 이용한 방법은 수질오염을 유발할 수 있는 물질을 모니터링하는 신속하고 효율적인 대안이 될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. 허아양, 최승원, 이재훈, 김태형, 박동조, “초분광 분해기의 광학계 설계 및 영상처리”, *한국군사과학기술학회지*, **2010**, 13(2), 328-335.
2. 지준화, “최대 부피 Simplex 기반의 Isomap을 위한 랜드마크 추출”, *대한원격탐사학회지*, **2013**, 29(5), 509-516.
3. 송아람, 장안진, 김용일, 최재완, “AISA 초분광 영상에 대한 Endmember 추출 알고리즘의 적용성 분석”, *대한원격탐사학회지*, **2013**, 29(5), 527-535.
4. J. McNeely, and G. Geiger, “K-Means Based Spatial Aggregation for Hyperspectral Compression”, *In Data Compression Conference (DCC)*, **2014**, 416.
5. M. Imani, and H. Ghassemian, “Feature extraction using partitioning of feature space for hyperspectral images classification”, *In Intelligent Systems (ICIS)*, **2014**, 1-5.
6. K. E. Themelis, A. A. Rontogiannis, and K. D. Koutroubas, “Semisupervised hyperspectral image unmixing using a variational Bayes algorithm”, *arXiv preprint arXiv*, **2014**, 1406, 4705.
7. R. Wright, P. Lucey, S. Crites, K. Horton, M. Wood, and H. Garbel, “BBM/EM design of the thermal hyperspectral imager: An instrument for remote sensing of earth's surface, atmosphere and ocean, from a microsatellite platform”, *Acta Astronautica*, **2013**, 87, 182-192.
8. G. J. Bellante, S. L. Powell, R. L. Lawrence, K. S. Repasky, and T. A. O. Dougher, “Aerial detection of a simulated CO2 leak from a geologic sequestration site using hyperspectral imagery”, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **2013**, 13, 124-137.
9. C. Jing, Y. Bokun, W. Runsheng, T. Feng, Z. Yingjun, L. Dechang, and W. Wei, “Regional-scale mineral mapping using ASTER VNIR/SWIR data and validation of reflectance and mineral map products using airborne hyperspectral CASI/SASI data”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **2014**, 33, 127-141.
10. M. Haest, T. Cudahy, A. Rodger, C. Laukamp, E. Martens, and M. Caccetta, “Unmixing the effects of vegetation in airborne hyperspectral mineral maps over the Rocklea Dome iron-rich palaeochannel system (Western Australia)”, *Remote Sensing of Environment*, **2013**, 129, 17-31.
11. G. R. Kodikara, T. Woldai, F. J. van Ruitenbeek, Z. Kuria, F. van der Meer, K. D. Shepherd, and G. J. van Hummel, “Hyperspectral remote sensing of evaporate minerals and associated sediments in Lake Magadi area, Kenya”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **2012**, 14(1), 22-32.
12. A. Lausch, M. Heurich, D. Gordalla, H. J. Dobner, S. Gwilym-Margianto, and C. Salbach, “Forecasting

- potential bark beetle outbreaks based on spruce forest vitality using hyperspectral remote-sensing techniques at different scales”, *Forest Ecology and Management*, **2013**, 308, 76-89.
13. J. Behmann, J. Steinrücken, and L. Plümer, “Detection of early plant stress responses in hyperspectral images”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **2014**, 93, 98-111.
  14. G. Lu, and B. Fei, “Medical hyperspectral imaging: a review”, *Journal of biomedical optics*, **2014**, 19(1), 1-23.
  15. M. Govender, K. Chetty, and H. Bulcock, “A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies”, *Water Sa*, **2007**, 33(2), 145-151.
  16. J. Qin, K. Chao, M. S. Kim, R. Lu, and T. F. Burks, “Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality”, *Journal of Food Engineering*, **2013**, 118(2), 157-171.
  17. K. S. Lee, W. B. Cohen, R. E. Kennedy, T. X. Maier-sperger, and S. T. Gower, “Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes”, *Remote Sensing of Environment*, **2004**, 91(3), 508-520.
  18. B. Lubac, H. Loisel, N. Guiselin, R. Astoreca, L. Felipe Artigas, and X. Mériaux, “Hyperspectral and multispectral ocean color inversions to detect *Phaeocystis globosa* blooms in coastal waters”, *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, **2008**, 113.
  19. MODIS, <http://modis.gsfc.nasa.gov>, August 2014.
  20. AVIRIS, <http://aviris.jpl.nasa.gov>, August 2014.
  21. M. Borengasser, W. S. Hungate, and R. Watkins, “Hyperspectral remote sensing: principles and applications”. **2010**, 1-119, Crc Publishing, USA.
  22. S. Kaewpijit, J. Le Moigne, and T. El-Ghazawi, “Automatic reduction of hyperspectral imagery using wavelet spectral analysis”, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, **2003**, 41(4), 863-871.
  23. F. Van Der Meer and V. Kato, “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*, **2002**, 23(23), 5087-5094.
  24. P. J. Zarco-Tejada, J. R. Miller, T. L. Noland, G. H. Mohammed, and P. H. Sampson, “Scaling-up and model inversion methods with narrowband optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data”, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, **2001**, 39(7), 1491-1507.
  25. B. Aiazzi, L. Alparone, and S. Baronti, “Near-lossless image compression by relaxation-labelled prediction”, *Signal Processing*, **2002**, 82(11), 1619-1631.
  26. P. J. Curran and J. L. Dungan, “Estimation of signal-to-noise: a new procedure applied to AVIRIS data”, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, **1989**, 27(5), 620-628.
  27. 김선화, 이규성, 마정림, 국민정, “초분광 원격탐사의 특성, 처리기법 및 활용 현황”, *대한원격탐사학회지*, **2005**, 21(4), 341-369.
  28. A. Berk, L. S. Bernstein, G. P. Anderson, P. K. Acharya, D. C. Robertson, J. H. Chetwynd, and S. M. Adler-Golden, “MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS”, *Remote Sensing of Environment*, **1998**, 65(3), 367-375.
  29. M. Herold, D. A. Roberts, M. E. Gardner, and P. E. Dennison, “Spectrometry for urban area remote sensing-Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm”, *Remote Sensing of Environment*, **2004**, 91(3), 304-319.
  30. X. Jiang, L. Tang, C. Wang, and C. Wang, “Spectral characteristics and feature selection of hyperspectral remote sensing data”, *International Journal of Remote Sensing*, **2004**, 25(1), 51-59.
  31. T. A. Warner, K. Steinmaus, and H. Foote, “An evaluation of spatial autocorrelation feature selection”, *International Journal of Remote Sensing*, **1999**, 20(8), 1601-1616.
  32. J. A. Benediktsson, J. R. Sveinsson, and K. Amason, “Classification and feature extraction of AVIRIS data”, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, **1995**, 33(5), 1194-1205.
  33. P. Launeau, J. Girardeau, C. Sotin, and J. M. Tubia, “Comparison between field measurements and airborne visible and infrared mapping spectrometry (AVIRIS and HyMap) of the Ronda peridotite massif (south-west Spain)”, *International Journal of Remote Sensing*, **2004**, 25(14), 2773-2792.
  34. M. Keshava and J. F. Mustard, “Spectral unmixing”, *Signal Processing Magazine, IEEE*, **2002**, 19(1), 44-57.
  35. A. A. Green, M. Berman, P. Switzer, and M. D. Craig, “A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal”, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, **1988**, 26(1), 65-74.
  36. C. I. Chang and Q. Du, “Interference and noise-adjusted principal components analysis”, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, **1999**, 37(5), 2387-2396.

37. D. Lu, P. Mausel, E. Brondizio, and E. Moran, "Change detection techniques", *International journal of remote sensing*, **2004**, 25(12), 2365-2401.
38. A. P. Williams and E. R. Hunt, "Estimation of leafy spurge cover from hyperspectral imagery using mixture tuned matched filtering" *Remote Sensing of Environment*, 2002, 82(2), 446-456.
39. M. Ichino and J. Sklansky, "Optimum feature selection by zero-one integer programming", *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, **1984**, 14(5), 737-746.
40. B. E. Hubbard, J. K. Crowley, and D. R. Zimbleman, "Comparative alteration mineral mapping using visible to shortwave infrared (0.4-2.4  $\mu\text{m}$ ) Hyperion, ALL, and ASTER imagery", *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, **2003**, 41(6), 1401-1410.
41. B. C. Gao and A. F. Goetz, "Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopies from AVIRIS data", *Remote sensing of environment*, **1995**, 52(3), 155-162.
42. S. H. Kim, C. S. Yang, and K. Ouchi, "Validation of the semi-analytical algorithm for estimating vertical underwater visibility using MODIS data in the waters around Korea", *Korean Journal of Remote Sensing*, **2013**, 29(6), 601-610.
43. 김용민, 변영기, 허용, 유기윤, "MODIS Level 2 Data 를 이용한 *Cochlodinium Polykrikoides* 적조 탐지", *대한토목학회논문집*, **2007**, 27(4D), 535-540.
44. 정주용, 안형환, 손은하, 서애숙, "Terra/MODIS 자료를 이용한 해수면온도 산출", *대기*, **2002**, 12(1), 173-176.
45. 오은경, 양찬수, "다중 위성 자료를 활용한 해수면온도 (SST) 합성기법 개발 연구", *해양환경안전학회지*, **2011**, 17(3), 197-202.
46. 김용민, 김형태, "2 단계 필터링 기반 적조 탐지 알고리즘에 관한 연구", *대한원격탐사학회지*, **2008**, 24(4), 325-331.
47. 오승열, 윤홍주, "MODIS/AQUA 를 이용한 적조탐지 연구", *한국전자통신학회 학술대회지*, **2012**, 6(2), 309-312.
48. 최은영, 이재운, 이재관, "고해상도 위성영상을 이용한 낙동강 유역의 클로로필 a 농도 추정", *대한원격탐사학회지*, **2011**, 27(5), 613-623.
49. 김상우, 정희동, "복합 위성을 이용한 허베이스피리트 유류오염해역 모니터링", *해양환경안전학회지*, **2009**, 15(4), 283-288.
50. 이권호, 이소현, "해색위성 원격탐사를 이용한 부유성 녹조 모니터링". *한국지리정보학회지*, **2012**, 15(3), 137-147.
51. 홍기훈, 안유환, 손영백, 유주형, 김창준, 양동범, 정창수, "MODIS 를 이용한 춘· 하계 동해 서남부 해역의 해수 중 입자성 유기탄소 함량 추정 알고리즘 개선", *대한원격탐사학회지*, **2011**, 27(2), 107-120.
52. 정종철, "Landsat TM 과 MODIS 영상을 이용한 새만금해역 표층수온 변화 탐지", *환경영향평가*, **2011**, 20(2), 199-205.
53. 서영상, 김복기, 이나경, 장이현, 황재동, 이용화, 오현주, "MODIS 해수색 위성 자료를 이용한 동중국해 turbid water 의 변동 모니터링", *한국수산과학회 공동학술발표요약집*, **2002**, 156-157.
54. 이나경, 서영상, 김영섭, "위성원격탐사에 의한 동중국해 재부상 부유사의 계절적 수평분포 특성", *한국지리정보학회지*, **2003**, 6(3), 151-161.
55. M. S. Wong, S. H. L. Kwan, J. K. Young, J. Nichol, L. Zhangging, and N. Emerson, "Modelling of Suspendid Solids and Sea Surface Salinity in Hong Kong using Aqua/MODIS Satellite Images", *Korean Journal of Remote Sensing*, **2007**, 23(3), 161-169.
56. 정종철, "MODIS에 의한 동중국해의 해양환경분석 기법", *남서울대학교 논문집*, **2009**, 15.
57. S. Oh and H. J. Yoon, "A Comparative Study for Red Tide Detection Methods Using GOCI and MODIS", *Korean Journal of Remote Sensing*, **2013**, 29(3), 331-335.
58. 손영백, 유주형, 노재훈, 주세중, 김상현, "남해와 동중국해에서 위성으로 추정된 표층수온 및 클로로필의 장기 변화", *Ocean and Polar Research*, **2012**, 34(2), 201-218.
59. 정종철, "태풍 매미에 따른 해양환경의 변화 관측 연구", *남서울대학교 논문집*, **2010**, 16.
60. 김광은, "초분광 영상자료의 Endmember 추출 속도 향상에 관한 연구 초분광 영상자료의 Endmember 추출 속도 향상에 관한 연구", *대한원격탐사학회지*, **2012**, 28(4), 347-355.
61. 이상범, "식생분석을 위한 고분광영상(Hyperspectral Image) 활용방안", *한국환경정책평가연구원 기초연구*, **2008**, 6.
62. 박선엽, "원격탐사 자료를 이용한 하와이 해안지역 식생 분류", *한국지역지리학회지*, **2006**, 12(4), 496-507.
63. H. J. Hoogenboom, A. G. Dekker, and I. A. Althuis, "Simulation of AVIRIS sensitivity for detecting chlorophyll over coastal and inland waters", *Remote Sensing of Environment*, **1998**, 65(3), 333-340.
64. J. F. Mustard, "Relationships of soil, grass, and bedrock over the Kaweah Serpentinite Melange through spectral mixture analysis of AVIRIS data", *Remote Sensing of Environment*, **2008**, 44(2), 293-308.
65. K. L. Carder, P. Reinersman, R. F. Chen, F. Muller-

- Karger, C. O. Davis, and M. Hamilton, "AVIRIS calibration and application in coastal oceanic environments", *Remote Sensing of Environment*, **1993**, 44(2), 205-216.
66. 위광재, "항공 초분광 센서의 소개 및 국내 적용사례에 대해 설명해주세요", *대한토목학회지*, **2013**, 61(4), 103-108.
67. 조형갑, 이규성, "침엽수종 분류를 위한 초분광영상과 다중분광영상의 비교", *대한원격탐사학회지*, **2014**, 30(1), 25-36.
68. 김태우, 신한섭, 서용철, "수질 매개변수 추정에 있어서 항공 초분광영상의 가용성 고찰", *대한원격탐사학회지*, **2014**, 30(1), 61-73.
69. 한유경, 김용일, 한동엽, 최재완, "SIFT 기법을 이용한 AISA Eagle 초분광센서의 모자이크영상 생성 SIFT 기법을 이용한 AISA Eagle 초분광센서의 모자이크영상 생성", **2013**, *한국측량학회지*, 31(2). 165-172.
70. 한국교육학술정보원, <http://www.riss.kr/imdex/do>, 2014년 8월.
71. 한국학술정보, <http://kiss.kstudy.com>, 2014년 8월.
72. S. Jay, and M. Guillaume, "A novel maximum likelihood based method for mapping depth and water quality from hyperspectral remote-sensing data", *Remote Sensing of Environment*, **2014**, 147, 121-132.
73. L. G. Olmanson, P. L. Brezonik, and M. E. Bauer, "Airborne hyperspectral remote sensing to assess spatial distribution of water quality characteristics in large rivers: The Mississippi River and its tributaries in Minnesota", *Remote Sensing of Environment*, **2013**, 130, 254-265.
74. A. Abd-Elrahman, M. Croxton, R. Pande-Chettri, G. S. Toor, S. Smith, and J. Hill, "In situ estimation of water quality parameters in freshwater aquaculture ponds using hyperspectral imaging system", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **2011**, 66(4), 463-472.
75. C. Fan, "Spectral analysis of water reflectance for hyperspectral remote sensing of water quality in Estuarine water", *Journal of Geoscience and Environment Protection*, **2014**, 2, 19-27.
76. K. Randolph, J. Wilson, L. Tedesco, L. Li, D. Pascual, and E. Soyeux, "Hyperspectral remote sensing of cyanobacteria in turbid productive water using optically active pigments, chlorophyll a and phycocyanin", *Remote Sensing of Environment*, **2008**, 112(11), 4009-4019.
77. D. J. Keith, B. A. Schaeffer, R. S. Lunetta, R. W. Gould Jr, K. Rocha, and D. J. Cobb, "Remote sensing of selected water-quality indicators with the hyperspectral imager for the coastal ocean (HICO) sensor", *International Journal of Remote Sensing*, **2014**, 35(9), 2927-2962.
78. L. Zhou, D. A. Roberts, W. Ma, H. Zhang, and L. Tang, "Estimation of higher chlorophylla concentrations using field spectral measurement and HJ-1A hyperspectral satellite data in Dianshan Lake, China", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **2014**, 88, 41-47.
79. D. Sun, Z. Qiu, Y. Li, K. Shi, and S. Gong, "Detection of Total Phosphorus Concentrations of Turbid Inland Waters Using a Remote Sensing Method", *Water, Air, & Soil Pollution*, **2014**, 225(5), 1-17.
80. R. M. Igamberdiev, G. Grenzdoerffer, R. Bill, H. Schubert, M. Bachmann, and B. Lennartz, "Determination of chlorophyll content of small water bodies (kettle holes) using hyperspectral airborne data", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **2011**, 13(6), 912-921.
81. Z. Mao, V. Stuart, D. Pan, J. Chen, F. Gong, H. Huang, and Q. Zhu, "Effects of phytoplankton species composition on absorption spectra and modeled hyperspectral reflectance", *Ecological Informatics*, **2010**, 5(5), 359-366.
82. E. Vahtmäe, T. Kutser, G. Martin, and J. Kotta, "Feasibility of hyperspectral remote sensing for mapping benthic macroalgal cover in turbid coastal waters—a Baltic Sea case study", *Remote Sensing of Environment*, **2006**, 101(3), 342-351.
83. P. D. Hunter, A. N. Tyler, L. Carvalho, G. A. Codd, and S. C. Maberly, "Hyperspectral remote sensing of cyanobacterial pigments as indicators for cell populations and toxins in eutrophic lakes", *Remote Sensing of Environment*, **2010**, 114(11), 2705-2718.
84. T. Kutser, L. Metsamaa, and A. G. Dekker, "Influence of the vertical distribution of cyanobacteria in the water column on the remote sensing signal. Estuarine", *Coastal and Shelf Science*, **2008**, 78(4), 649-654.
85. M. Chawira, T. Dube, and W. Gumindoga, "Remote sensing based water quality monitoring in Chivero and Manyame lakes of Zimbabwe", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **2013**, 66, 38-44.
86. K. Song, L. Li, L. P. Tedesco, S. Li, N. A. Clercin, B. E. Hall, and K. Shi, "Hyperspectral determination of eutrophication for a water supply source via genetic algorithm-partial least squares (GA-PLS) modeling", *Science of the Total Environment*, **2012**, 426, 220-232.
87. 이희숙, 박연정, 김윤석, 백경희, "초분광영상 센싱을 활용한 식물플랑크톤 모니터링 기법 연구", *대한환경공학회*, **2014**, 357.