

수질중 잔류유기오염물질 검출을 위한 초분광영상(HSI) 이용

이승민¹ · 이정엽¹ · 백경희¹ · 최종우² · 김윤석^{1†}

¹K-water 수질분석연구센터, ²국립환경과학원 환경기반연구부 환경측정분석센터

Hyperspectral Imaging (HSI) Application for Detection of Organic Compounds in Water

Seung-min Lee¹, Jeong-yeop Lee¹, Kyung-hee Baek¹, Jong-Woo Choi², and Yun S. Kim^{1†}

¹Water Analysis and Research Center of K-water Institute, K-water, Daejeon 306-711, Korea

²Environmental Measurement & Analysis Center, Environmental Infrastructure, Research Department, National Institute of Environmental Research, Environmental Research Complex, Incheon 404-708, Korea

Received August 14, 2012/Revised September 25, 2012/Accepted September 30, 2012

Hyperspectral sensor can confirm more exact material property because spectrum bandwidth is more details than multispectral sensor. Actually, it is not many reported previously, measurement of climate change, vegetation and ecology environment using hyperspectral sensor based on satellite, airborne and fixed ground are used in the world. However, water quality management using hyperspectral imaging system is limited and temporary. Therefore it is not enough data library to apply management of water environment with hyperspectral sensor. In this study, water quality analysis methods using hyperspectral sensor based on principle of NIR, FT-IR and Raman spectroscopy to apply analysis organic compounds in water were described. This study will provide good information for many applications to control water quality of river and treatment water.

Key words: Hyperspectral imaging, Remote sensing, Organic compounds, Water quality, Water environment

1. 서 론

환경, 지리, 산림, 농업 등 여러 분야에서 나타나는 자료는 현장에서 도구 또는 기기를 이용하여 정확하게 측정하는 것이 가장 좋은 자료 취득 방식이다. 하지만 대규모 지역을 대상으로 하는 경우 또는 직접 접근하기 어려운 경우 원거리에서 대상지역의 자료를 취득할 수밖에 없다. 이러한 한계점을 극복하기 위하여 영상자료를 토대로 해석하는 방법이 연구되었으며, 재료공학 기술의 발달과 더불어 광학기기를 이용한 측광 및 분광 기술이 급격히 발전하고 있다. 이 기술은 초기에 단순 가시 영상을 토대로 한정된 분야에 이용되었지만, 센서 기술의 급속한 발달로 인하여 고해상도 뿐 아니라 우리 눈으로 보지 못하는 적외선 영역의 영상까지 획득

가능하게 되었으며, 데이터를 해석하여 활용하는 단계에 이르렀다. 이렇게 빛을 파장별로 나누어서 측정하는 센서가 분광센서이며, 다중분광(multispectral)센서에서 초분광(hyperspectral)센서로 발전하였다. 초분광센서를 이용한 국내 연구사례는 많지 않다. 따라서 용어에 대한 정의 자체도 제각각인 경우가 많다. ‘Hyperspectral’이라는 용어도 여러 논문에서 초분광, 극다중분광, 세분광, 고분광 등 각기 다른 용어로 번역되어 쓰이고 있는 상태이다. 용어의 혼란을 줄이기 위하여 본 연구에서는 문헌자료에서 가장 빈번하게 사용하는 ‘초분광’이라는 용어로 사용하였다.

다중분광센서는 10여개 미만의 한정된 파장 범위에 대한 스펙트럼을 표현하는 분광기이며, 초분광센서는 다중분광보다 파장 범위를 세분화하여 연속적인 스펙

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: +82-(0)42-629-2042, Fax: +82-(0)2-629-2079, E-mail: yunskim@kwater.or.kr

트림을 표현하는 분광기이다. 이와는 별도로 고해상도 분광(high resolution spectral)센서는 주로 위성에 탑재되는 분광기로서 일반적으로 위성탑재시 공간해상도 1 m 미만의 해상도를 가지는 분광기를 말한다.

초분광영상(HSI-hyperspectral imaging)을 이용하여 연구한 사례는 다중분광센서 보다 많지 않다. 산림 및 식생 분포 관련하여, Goodenough *et al.*(2003)은 수중 분포를 분류하였고,¹⁾ Zarco Tejada *et al.*(2001)은 숲에서 수중간 클로로필 농도 관계를 분석하였다.²⁾ 대기과학 분야에서는 Gelpi C. G(2000)가 대기 중의 수분 함량에 대하여 연구하였다.³⁾ 수질오염 지표 물질 분석 관련, Kallio *et al.*(2003)은 수중의 chlorophyll-a 검출에 대한 연구를 진행하였으며,⁴⁾ Koponen *et al.*(2002)은 투명도 및 탁도, chlorophyll-a의 관계에 대하여 연구 하였다.⁵⁾ 호소수의 수질관리를 위해 HSI를 적용하여 chlorophyll-a, phycocyanin, total suspended matter (TSM), 그리고 투명도를 추정하였다(Song *et al.*, 2012).⁶⁾ 도시 지역 토지 이용도에 관한 연구도 존재한다. Herold *et al.*(2003)은 도시지역의 토지 피복 분류에 관한 연구를 진행하였으며,⁷⁾ Ben Dor *et al.*(2001)은 도시 특성에 따른 라이브러리를 구축하였다.⁸⁾

초분광센서를 이용한 연구들은 거의 2000년대 이후부터 진행되기 시작하였으며, 그 분야는 산림 및 대기 분야로 국한하여 발전되었다. 물환경 분야는 조류, 부유물질 정도로 항목이 극히 제한적이어서 이러한 항목은 대략적인 지표로 활용은 가능하나, 세부적인 유기화합물 등의 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 초분광센서를 수 환경 분야에서 특별히 잔류성 유기오염물질 등 유기화합물의 적용에 대하여 검토하였다. 초분광센서로 유기화합물을 정성 및 정량분석이 가능하게 되면 센서를 활용한 분석의 장점인 실시간 모니터링이 가능하게 되어 분석에 소요되는 시간 및 비용이 절감되고, 유해물질 유입 시 즉각 대처가 가능하며, 비점 및 점오염의 수질관리가 가능하고, 광역적인 모니터링을 통하여 유역별, 국가별, 더 나아가 전 지구적인 장기 수질 예측 모델을 마련하는데 큰 도움이 될 것이다.

본 총설에서는 초분광센서의 원리에 대한 개요 및 활용 현황을 서술하고, 수중에 함유된 유기화합물에 대한 HSI 적용성을 검토하였으며, 이를 토대로 추후 연구의 기반으로 활용하였으면 한다.

2. 초분광센서의 개요

2.1. 분광영상센서의 개발

광학영상센서의 개발에 있어 4가지 해상력이 고려된다. 공간해상력, 분광해상력, 방사해상력, 주기해상력이 그것이다. 공간해상력(spatial resolution)은 센서로 측정 가능한 두 물체 사이의 최소각, 직선간 측정간격을 말하며, 분광해상력(spectral resolution)은 분광기나 분광 신호에서 파장을 분리할 수 있는 능력을 말한다. 방사해상도(radiometric resolution)는 센서가 수집한 값이 얼마나 많은 정보를 포함하고 있는지를 보여주는 척도이며, 주기해상력(temporal resolution)은 센서가 특정 지역의 화상을 얼마나 자주 기록하는가를 나타낸다. 광학영상센서의 개발은 지난 30년 동안 공간해상도 및 방사해상도 위주로 개발되어 왔으나, 2000년대 들어서 분광해상도 측면에서의 기술 진전이 이루어지고 있다.⁹⁾

기 개발된 다중분광영상(multispectral imaging)은 주로 10여개 미만의 한정된 파장구간에서 지표면으로부터 반사 또는 방출되는 복사에너지를 감지한 결과이며, 이는 다양한 종류의 지표물 및 지표현상의 완전한 분광 특성을 표현하는 데에 한계가 있다. 지질, 식생, 암석, 물 등 복잡하게 구성되어 있는 지표물의 생물리 화학적 특성과 관련된 보다 정확한 정보를 추출하기 위해서는 지표물의 완전한 분광정보가 요구되며, 이러한 필요성에 따라 초분광영상 기술의 개발이 시작되었다.

1970년대부터 미국 항공우주국(NASA)에서 초분광영상센서(hyperspectral imaging sensor) 개발이 시작되었으며, 1983년 NASA 제트추진연구소(Jet Propulsion Lab-JPL)에서 항공기탑재 초분광영상센서인 Airborne Imaging Spectrometer(AVIRIS)가 개발되면서 초분광영상에 대한 본격적인 연구가 시작되었다고 할 수 있다. AVIRIS와 함께 미국 및 유럽의 여러 나라에서 항공기 탑재 초분광센서들이 개발 되었으며, 2000년에는 초분광 영상센서를 탑재한 인공위성이 성공리에 발사 되었다.

Table 1에서는 상용화 된 초분광센서의 종류를 보여 준다. 현재 고성능 디지털 이미지 및 반도체 분야의 국제적 리더 기업인 Dalsa^(TM)(캐나다)가 초분광 센서 분야에 독보적인 기술을 가지며, 그 외 오스트레일리아, 이스라엘, 캐나다, 핀란드 등에서 2000년 전후부터 개발시관 중이다.

초분광영상센서는 기존의 다중분광영상 보다 스펙트

Table 1. Primary hyperspectral scanners

Country	Company	References
USA	Microimages	5
Australia	Integrated Spectronics	4
Israel	Green Vision Systems	10
Canada	Dalsa	11
Canada	ITRES Research Limited	12
Finland	Specim	1
Japan	KLV, Sumitomo	13
Korea	DSC	14

럼 대역폭이 세밀하여 연속적인 스펙트럼을 표시할 수 있기 때문에, 더욱 세밀한 물질별 특성 차이를 확인할 수 있다. 다중분광센서는 수개의 파장 대역을 가진 센서로 이루어져 있어 하나의 점(pixel)에서 추출할 수 있는 스펙트럼은 단지 몇 개의 축에 불과하다. 이것은 연속적인 데이터가 아니므로 특정한 물질 또는 현상의 경향성을 파악하는 데에 한계가 있다. 하지만 초분광센서는 수백개(현재 상용화 된 장비는 110개~230개)의 세분화된 파장 영역(2 nm~10 nm)을 이용하여 수백개의 점을 이은 하나의 스펙트럼을 그릴 수 있다.

2.2. 초분광센서 영상을 이용한 데이터 처리 기법

초분광센서로 획득한 이미지의 처리는 자료압축부터 이루어진다. 초분광센서는 수백개의 파장대역이 나누어져 있기 때문에 일반 RGB(Red-Green-Blue)영상자료에 비하여 그 밴드 수 만큼의 이미지가 더 포함된다고 할 수 있다. 따라서 분광특성을 최대한 유지하면서 자료 용량을 줄이는 방향으로 개발되고 있다. 또한 단순하게 용량을 줄이는 외에도 주성분분석(PCA, principle component analysis) 등의 기법으로 밴드 수를 줄이거나 강조 기법 등을 적용하는 사례도 있다.¹⁵⁾

그리고 신호대잡음비(SNR, signal-to-noise ratio)의 개선을 위한 처리과정이 있다. 초분광센서는 좁은 파장폭 때문에 다중분광센서보다 영상의 질이 떨어져서 낮은 SNR을 가지고 있기 때문에, 이를 개선하는 방향으로 처리가 이루어진다.¹⁶⁾

또한 위성이나 항공기를 이용한 초분광 영상의 경우, 대기에 의한 분광반사값(spectral reflectance)의 변질이 해석에 가장 큰 요인으로 작용한다. 따라서 대기 보정을 위한 모델링 기법도 제시되고 있다.¹⁷⁾

3. 초분광센서의 활용분야

3.1. 활용 방법

3.1.1. 위성 탑재 센서를 이용한 이미지 취득

위성 탑재 센서는 초분광센서로 측정 가능한 전지구적인 기후, 자원, 식생, 생태, 그리고 환경 등을 신속하고 광범위하게 관측 가능한 장점이 있다. 하지만 현재 위성에 탑재된 초분광센서는 극히 제한적인 범위에서 사용되고 있다. 그 이유는 초분광센서는 아직까지 고해상도의 이미지를 취득하는 데 한계가 있으며, 해상도의 한계는 분해능을 저하시키는 요인이 되기 때문이다. 따라서 현재 위성에 탑재된 초분광 센서는 연구 및 시험용으로 국한되며, 실시간 모니터링 및 감시 기능은 거의 지원되지 않는 상태이다. 미국 항공 우주국의 EO-1 위성의 Hyperion 센서 또한 초분광영상을 전송하고 있으나, 실시간으로 데이터를 획득하지 못하는 상태이며, 유럽 우주국에서 2001년에 발사한 PROBA 위성의 CHRIS(Compact High Resolution Imaging Spectrometer) 센서 역시 연구목적적인 관계로 데이터 획득에 제한이 있는 상태이다. 그리고 미 국방부에서 발사한 MightySAT 위성에 FTHSI(Fourier Transform Hyperspectral Imaging)센서가 탑재되어 있으나 국방 용도로 일반인의 접근이 제한되어 있는 상태이다. 하지만 차후 초분광센서 기술의 발달로 분광해상도가 높아지며, SNR이 높아져 상업적인 부가가치가 고평가되게 되면, 민간 주도 하 위성 탑재 또는 전국가적인 사업이 활발히 이루어 질 것으로 보인다.¹⁾

3.1.2. 항공기를 이용한 이미지 취득

현재 가장 많이 활용되고 있는 분야이다. 위성탑재 센서에 비하여 유지관리가 용이하고, 광역적인 지역 중 원하는 부분만 선택적으로 스캔 가능하다는 장점이 있다. 항공기 탑재 센서는 해당 지역을 스캔함과 동시에 항공기의 위치를 여러 위성의 GPS 신호를 이용하여 파악하고, 항공기의 롤링 및 피칭에 대한 데이터 보정을 위하여 관성항법장치(IMU)가 항공기의 자세값을 동시에 기록하도록 구성되어 있다.

AVIRIS는 초분광원격탐사 기술을 이끌고 있는 가장 중요한 센서의 하나이다. 미국 NASA JPL에서 1983년 개발된 Airborne Imaging Spectrometer를 개량하여 1987년에 출시된 센서이다. AVIRIS는 다양한 연구분야에서 널리 활용되고 있다.¹⁾

위성탑재가 가능한 분광분해능이 높은 초분광센서가

출시되기 전까지는 초분광센서 활용분야는 주로 항공기 탑재에 의존될 것이다.

3.1.2. 지상 고정형을 이용한 이미지 취득

지상 고정용 초분광센서는 데이터 취득 범위가 좁은 단점이 있으나, 그만큼 미세한 부분의 특징을 잡아낼 수 있다. 지상용 초분광센서는 주로 가스누출, 약품감지 등의 화학적 분석 및 특정 식물의 감지 등에 활용되고 있다.¹⁸⁾

본 논문에서 서술하고자 하는 유기화합물을 함유한 물의 성분 분석에는 지상 고정용 초분광센서가 활용도가 높을 것이다. AISA社의 Specim 장비는 항공기 탑재 용도로 사용되기도 하나 지상 고정용으로도 많이 활용된다. 렌즈를 이용한 이미지 획득 외에도 광섬유를 부착하여 Lab scale 규모의 물질 특성을 한꺼번에 분석 가능하며, 다수의 물질에 대한 스펙트럼을 라이브러리화 하면 수중에 미량으로 존재하는 유기화합물의 분석도 가능할 것으로 보인다.

3.2. 활용분야

이미 서론에서 간략하게 서술한 바와 같이 초분광센서는 각 물질이 가지는 스펙트럼 특성을 이용한 센서이므로 다방면으로 활용도가 높다. 광물 분포를 파악하거나, 암석 종류의 구분 등 지질분야에 활용되고,¹⁸⁾ 식물의 생화학적 구성인자들(클로로필, 탄소, 질소, 리그닌 등)의 추정이 가능하며,¹⁹⁾ 산림자원의 식생분류,²⁰⁾ 도시지역의 인공물 분류,²¹⁾ 군사목적의 위장막 등 업체된 지형지물의 탐사,¹⁸⁾ 해안선 지형의 특성 탐사,²²⁾ 농작물의 생육 활성도 및 병충해 피해 현황 파악²³⁾ 등 응용분야는 실로 무궁무진하다 할 수 있다. 이러한 사례들은 이미 1990년대 초반에 다중분광센서를 이용한 연구가 상당히 이루어져 있다. 하지만, 기존의 다중분광센서를 이용한 연구 분야 보다 초분광 센서는 방대한 데이터를 가진 이미지를 획득 가능하게 되어, 기초

자료 생산 및 데이터베이스 구축 부분에서 획기적인 변화가 이루어지고 있다. 이러한 데이터베이스 구축은 초분광센서가 새로운 연구 분야에 적용될 수 있다는 점에서 매우 중요하다고 판단된다. Table 2는 현재 활용되고 있는 연구 분야를 나타내고 있다.

4. 초분광센서를 이용한 물환경 적용 분야

몇몇 업체에서 초분광센서를 개발하고 있지만, 수환경 분야는 개발 초기단계 및 라이브러리 구축 부족 등으로 사업 분야가 한정적이며 연구 또한 한시적이다. 기존에 추진되었던 대부분의 사업들도 대부분 다중분광센서를 이용하여 연구하였으며, 초분광센서에 대한 실용화 사업은 더욱 찾기 힘들다. 유효한 사례를 Table 3에 나타내었다. 먼저 다양한 분야에서 활용하도록 미국 정부기관 주도 하에서 라이브러리 구축 사업 중이며, 초분광센서 개발 업체에서는 물환경 분야에 있어 chlorophyll-a, oil&grease, turbidity, 그리고 suspended solid 항목 정도의 라이브러리를 구축 하여 시장 진출 중에 있다.

4.1. Chlorophyll-a 측정

수역에서의 분광반사도를 측정할 결과에 의하면, 수면에 도달하는 태양광의 스펙트럼은 300 nm~2000 nm이며, 이 중에서 400 nm~700 nm의 가시광 영역이 전체 복사량의 약 50%를 차지하고 있다고 알려져 있다. 특히 가시광 영역의 녹색 파장인 500 nm 부근에서 스펙트럼 값이 가장 높게 나타난다. 수질인자별 분광반사도 분석결과를 살펴보면 chlorophyll의 농도가 높은 수면에서는 주로 녹색파장대인 520 nm 부근에서 반사율이 높으며, 이를 이용하여 chlorophyll의 농도를 유추해 낼 수 있다.²⁵⁾

4.2. SS

부유물질의 반사도를 농도가 높은 수면과 낮은 수면

Table 2. Application branch of hyperspectral sensor²⁴⁾

분 야	종 류
Atmosphere	water vapor, cloud properties, aerosols
Ecology	chlorophyll, leaf water, cellulose, pigments, lignin
Geology	mineral and soil types
Coastal Waters	chlorophyll, phytoplankton, dissolved organic materials, suspended sediments
Snow/Ice	snow cover fraction, grainsize, melting
Biomass Burning	subpixel temperatures, smoke
Commercial	mineral exploration, agriculture and forest production

Table 3. Example of research and business using hyperspectral sensor

Institute	Title	etc	
NASA	ASTER (Advanced Spaceborne Therman Emission and Reflection Radiometer) Spectral library	2400 items DB (9 items in Water)	
USGS	USGS (The United States Geological Survey) Spectral Library	500 items DB	HSI
Hanjin	beach line monitoring project	beach line monitoring	
Korea Environmental Corporation	chlorophyll-a monitoring in Daecheong Lake	-	
K-water	airborne remote sensing for water management in Hapcheon Dam	temporary research project in 1994	Multispectral Imaging
National Fisheries Research & Development Agency	temp. monitoring	providing information on Web	
Chunju Univ.	river water monitoring using satellite	-	

을 비교한 결과, 800 nm에서 반사율의 차이가 나타남을 알 수 있다. 주로 근적외선에 해당되는 밴드들이 탁수의 분석에 적용된다. 투명도는 수중 부유물이나 chlorophyll 등과 같은 수질인자들의 농도에 따라 결정되어 지는데, 550 nm에서 높은 반사율을 보인다고 알려져 있다.¹⁰⁾

4.3. Oil & Grease

Oil & Grease 물질은 300 nm~450 nm 영역에서 물과 뚜렷한 분광학적 차이를 보인다. 이를 이용하여 원유 누출 시 실시간 모니터링을 통한 신속한 조치 및 확산 속도, 방향 등을 고려한 효율적인 방제가 가능하다.²⁶⁾

4.4. 해역의 수질분석 지표 및 수온 분석

한국근해의 위성관측 정보는 해양 및 어업활동에 다각적으로 활용될 수 있다. 현재 국립수산진흥원에서는 NOAA, GMS, SeaWIFS, MODIS, OCM 위성자료의 실시간 수신분석시스템을 운영하고 있다.

위성 정보는 한국 근해의 주요 어장을 탐색하는데 필수적이며, 정기적으로 발간하는 ‘해양속보자료, 주간해황예보, 근해해황정보’를 통해 모니터링 할 수 있다.

매년 한국 남해 연근해를 중심으로 발생하여 막대한 어업피해를 초래하는 적조(red tide)의 초기발생 및 분포를 규명, 예측할 수 있는 정보로도 응용될 수 있고, 동해 연안에서 매년 하계에 나타나 양식장과 연안 조업활동에 피해를 유발하는 냉수대(cold water)의 발생 및 변동성을 파악하기 위한 정보로도 활용되고 있다. 또한 해양의 식물플랑크톤 량의 정량화에도 응용하고 있다.

5. 초분광센서의 수질분야 활용 전망

상기에 기술하였던 사례들과 같이 초분광센서는 지질, 광물탐사, 식생분포, 군사 등의 여러 영역에서 초분광센서가 광범위하게 적용되고 있다. 초분광센서는 위성에 탑재하여 실시간으로 탐사가 가능하며, 이를 모델링 기법에 적용함으로써 유역 관리 및 예측을 단시간 내에 효율적으로 수행할 수 있다.

그러나 지질 및 생태 등 타 분야에 비해 특성에 따른 스펙트럼 라이브러리 구축이 부족한 분야가 바로 수질분석 분야이다. 상기에 서술한 바와 같이 수질분석 분야에서는 현재 chlorophyll-a, SS, 탁도, oil & grease 항목 정도만 검출 가능한 수준이며, 이 또한 다중분광센서에 의해서 수십 mg/L~수백 µg/L 정도의 비교적 높은 농도를 측정 하였다. 현재 이 정도의 수준으로는 수질에 대한 세밀한 분석이 불가능하며, 단지 참고용 지표로만 활용하는 데에 그칠 것이다. 따라서 화학물질의 분광학적 특징을 파악하고, 이를 토대로 초분광센서 기반 수중의 유기화합물 분석에 대한 적용성은 적극 활용되기 위해서 연구개발 되어야 한다.

5.1. 유기물 분석

적외선 영역을 흡수하는 각 분자는 그 분자만의 독특한 흡수 스펙트럼을 가지며, 이것을 비교함으로써 성분 분석이 가능하다. 스펙트럼 이미지는 x축은 wave-number(파수)를 나타내고, y축은 투광도(적외선이 시료에 투과된 정도)를 나타낸다. 적외선을 시료에 주사하면 시료에 존재하는 각각의 결합구조에서 특정 영역의 적외선을 흡수한다. 이 흡수된 정도에 따라 피크가 나

타나게 된다. 이 피크를 database와 비교하면 해당 결합구조를 확인할 수 있다. 유기화합물 분석 시 사용 가능한 방법들은 NIR, FT-IR, Raman 분광법이 있다.

5.1.1. 근적외 분광법(NIR)

유기물의 분석에는 오래전부터 근적외선분광법(near-infrared spectroscopy)을 이용 해 왔다. 현재 국내의 농업, 제약, 산업체 등 실용적인 분야에의 사용이 증가하고 있다. 근적외선 분광법은 근적외선의 흡광도가 낮고 에너지가 중적외선보다 높기 때문에 투과도(transmission)가 높아 시료의 두께에 큰 영향 없이 스펙트럼 측정이 가능하며, 과거 중적외선에서 사용된 시료들을 전처리 없이 분석 하였다. 액상시료일 경우 투과도를 이용하여 근적외선 전 대역에서 사용 가능하며, 경로길이(path length)는 보통 1 mm~20 mm 정도로 사용한다.

또 다른 장점은 스펙트럼의 반복 및 재현성이 매우 우수하다는 점이다. 근적외선 분광기 내부의 구성요소(단색화장치, 검출기)는 광섬유 통신의 발달에 의하여 그 성능이 매우 안정적이다. 광섬유 통신은 근적외선을 사용하기 때문에 이와 관계된 구성요소 기술의 발달이 반복 재현성이 우수한 근적외선 분광기를 만들 수 있도록 큰 역할을 해 왔다.²⁷⁾

5.1.2. 프리에 변환 적외선 분광기(FT-IR)

프리에 변환 적외선 분광기(FT-IR)는 일반적인 적외선분광기와는 다르게 간섭계가 부착되어 있다. 적외선 광원은 빛살 분할기에 의해 두 부분으로 나누어지고, 빛의 한 부분은 고정 거울, 다른 한 부분은 이동 거울로 이동한다. 이동거울이 조금씩 이동함에 따라서 고정 거울에서 반사된 빛과 비교하여 상이 약간 어긋나게 되며, 이로 인해 간섭무늬가 발생하게 된다. 이것을 시료에 조사하여 나타나는 신호의 세기를 Fourier 변환(fourier transformation)이라고 하는 수학적 조작을 통하여 진동수 영역으로 전환하여 분석하는 원리이다.

FT-IR 분광기는 시료(고체, 액체, 기체)에 적외선을 흡수시키거나 투과 시켜서 정성분석과 정량분석을 수행하는 장치이다. 이러한 분석과정을 통하여 화합물의 분자 구조와 분자 결합에 관한 기본적인 정보를 얻을 수 있다. 또한, 검출기를 emission port, PbSe, MCT 등을 구비하면 근적외선 영역($13,300\text{ cm}^{-1}\sim 4,000\text{ cm}^{-1}$), 중간적외선영역($4,000\text{ cm}^{-1}\sim 400\text{ cm}^{-1}$) 그리고 원적외선영역($400\text{ cm}^{-1}\sim 10\text{ cm}^{-1}$)의 측정이 가능하다. 각종 고체

및 액체 시료, 유기화합물질의 구조 분석에 활발히 사용되고 있다.²⁸⁾

5.1.3. 라만(Raman) 분광법

라만(Raman) 분광학은 인도의 물리학자 C. V. Raman이 단색광의 빛을 쪼여준 액체 시료로부터 입사된 단색광과 다른 파장의 빛이 산란되는 현상을 1928년 최초로 관찰 하여 보고한 이래로 분광학 기술로 개발 되었다. 라만 분광법은 진동운동을 하고 있는 분자에 단색광의 입사광을 쪼여줄 때 그 분자가 가지는 진동자들이 입사광의 에너지를 자신이 진동하는 에너지만큼 흡수, 방출, 또는 아무 변화 없이 그대로 통과시켜 입사광의 에너지와는 다른 3가지 형태의 빛을 내놓게 되는데 이것이 라만산란현상의 기본이 되고 있다. 산란 중 라만 분광법에서 가장 많이 사용하는 분야는 Stokes 산란인데 Stokes밴드의 위치로부터는 진동모드의 에너지를, 밴드의 크기로 부터는 분자들의 양을 측정할 수 있기 때문에 라만 스펙트럼을 얻음으로써 그 시료의 특성과 분자구조를 규명할 수 있는 것이다.

라만 분광법은 진동기의 분석, 고분자물질, 바이러스 등의 분석에 사용되며, 무기물 분석에도 사용된다. 최근에는 여러 종류의 시료가 혼합되어 존재할 때 시료들의 공간적 분포는 라만 회상을 통하여 파악 가능한 라만 회상 시스템(Raman imaging system)도 사용되고 있다.²⁹⁾

5.2. 무기물 및 중금속 분석

중금속 및 무기물 또한 NIR 및 Visible-NIR 영역을 이용한다. NIR을 이용하여, 1100 nm, 2500 nm 영역에서 담수 퇴적물의 Cd, Cu, Zn, Pb, Ni, Mn, Fe 등의 중금속을 분석 가능하다고 알려져 있다. 하지만 대부분의 실험 결과가 mg/L 또는 수백 $\mu\text{g/L}$ 정도로 검출하는데 불과하여 ppt 단위의 검출은 아직 미지수이다.³⁰⁾

그리고 토양 중 CaCO_3 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O 등의 물질을 VNIR (400 nm~1100 nm) 영역에서 정성/정량 분석하였다.³¹⁾

5.3. 초분광센서를 이용한 유기화합물 분석 검토

과거 연구 자료들은 다중분광센서를 이용하여 제한적인 파장 내에서만 연구가 이루어졌다. 또한 초분광센서를 이용하여 유기화합물의 분석에 관한 연구는 부족한 실정이다. 최근에, 초분광 센서를 이용한 연구는 해외 및 국내 전반에 걸쳐 활발히 진행되고 있으나, 수질

분야에 있어서는 chlorophyll-a, 탁도, SS, 수온, 유역환경 변화 정도의 항목에 한해 매우 한정적인 분야에만 적용되고 있다.

대부분의 상용화 된 초분광센서는 390 nm~2500 nm 영역대의 이미지를 촬영 가능하다. 따라서 NIR, FT-IR, Raman 분광법 등에서 사용하는 파장 대역대와 중복되는 대역이 있으므로, 초분광센서를 이용한 유기화합물 분석도 이용할 수 있을 것이다. 여기서는 원격탐사에 대한 연구결과는 부족하므로 구체적 논술을 피하고자 한다.

Table 4는 분자의 구조 중 진동기별 NIR 흡수 파장대를 나타낸다. NIR영역을 이용하여 구조분석을 실시하는 방법들은 대부분 2000 nm 이상의 영역을 사용하나, 표에서 보는 바와 같이, 800 nm 영역에서부터 각 분자 구조에 따른 진동기가 흡수하는 특유의 파장이 존재하는 것을 알 수 있다. 따라서 특정 대역의 파장을 흡수하는 성질을 이용하면 다양한 물질에 대해 실시간으로 정성정량 분석이 가능할 것으로 예상된다. 유기물 및 구조 분석 등에 이미 적외선 분광광도법이 활용되고 있으나, 초분광센서를 이용하여 유기물 분석이 가능하게 되면, 영양염류 등도 광역적으로 신속하게 파악하여 부영양화에 사전대처 할 수 있으며, 더욱 세분화된 라이브러리를 구축하게 된다면, 환경호르몬이나 생태독성물질, 맛냄새 물질과 같은 미량 독성물질 및 심미적 물질 등도 실시간으로 원격탐사 모니터링이 가능하게 되므로 그 활용 분야는 무한하다 할 수 있다.

다만 해결하여야 할 과제는, 자연환경상의 유기화합물을 분석 시에 환경 조건별로 스펙트럼의 차이를 어떻게 보정하여야 할 것인가 하는 문제와, 환경유해물질의 경우 극소량의 농도로 존재하는 경우가 일반적이기 때문에, 극 미량인 단위($\mu\text{g/L}$)까지 검출 하여야 하는 문제이다. 예를 들어, HSI는 480 nm~490 nm 영역에서 대체로 맑은 수역의 수심을 30 m까지 ± 2 m 오차 이내에서 분석 가능하다고 알려져 있다. 그러나 이 수중에는 상당히 많은 혼합물들이 존재하며, 때에 따라서 탁수가 유입되는 등의 변수가 상당수 존재한다. 또한 pg/L 단위의 극미량 물질에 대한 스펙트럼 intensity 값의 변화를 확인할 수 있어야 한다.

적외선 영역에서 수중의 특정 물질을 탐지할 시에 가장 측정에 방해가 되는 것은 탁도이다. 탁수는 청정수에 비하여 근본적으로 반사율이 높아 Lab scale 실험 시 나타난 스펙트럼과 전혀 다른 양상을 나타낼 수 있으며, $\mu\text{g/L}$ 이하 단위의 극미량 물질을 분석하는 데에

치명적인 오류가 될 수 있다. 따라서 HSI를 이용한 미량 유기화합물의 분석에 대한 증거가 아직 불충분하다.

SS에 의한 값의 오류를 최소화하기 위해서는 SS의 농도에 따른 특정 유기화합물의 스펙트럼 값의 변화를 라이브러리화 하여야 할 것이다. 이러한 실험 데이터가 장기적으로 축적되면 모델링 또는 보정식으로 도출이 가능할 것으로 전망된다. 더 나아가 이러한 제한사항은 소프트웨어적인 영상 필터링 및 스펙트럼 값의 분해능 향상을 통하여 극복하여야 할 것이다. 사실 자연계에서 HSI를 이용하여 분석하려면 이러한 방해물질의 필터링이 매우 중요하다 할 수 있다. 따라서 SS에 따른 보정 값을 잘 구축하여 놓으면 수환경 분야 유해물질 분석에 매우 유용한 자료가 될 것이다.

초분광센서를 이용한 유기물 분석은 분석시간 절약 및 광범위한 영역에서 실시간으로 분석 가능한 장점이 있으므로, 라이브러리가 잘 구축된다면 실험실 규모의 분석에서 적외선 분광기를 이용한 분석을 대체할 수 있을 것으로 추정되며, 각종 유기화합물에 기인한 오염물질의 분포도 작성 및 유입 예측 모델링 등에 다양하게 사용되어, 수질관리에 있어 획기적 편의를 제공할 것으로 추측한다.

6. 결 론

측광 및 분광 기술이 발달함에 따라 고해상도 뿐 아니라 영상을 이용한 데이터 처리까지 활용하는 단계에 이르렀다. 환경, 지리, 산림, 농업 등 여러 분야에서 데이터는 현장에서 각각의 도구나 기기를 이용하여 정확하게 측정하는 것이 분석을 위한 가장 좋은 자료 취득 방식이지만, 때때로 대규모 지역을 대상으로 하는 경우 또는 직접 접근하기 어려운 경우 원격지에서 대상지역의 자료를 취득할 수밖에 없다. 따라서 직접 접촉하지 않고 얻어진 다수의 자료를 다양한 분석기법에 이용 가능한 초분광센서의 적용성에 대한 연구 이전에 최근의 동향 및 광역적 물관리 및 수질분석 분야에의 적용 사례들 및 연구 자료를 소개하였다. 그러나 수환경 분야 적용에 있어서 스펙트럼 라이브러리 구축이 부족한 상태이므로 화학물질의 분광학적 특징을 파악하고, 이를 토대로 초분광센서 기반 수중의 유기화합물 분석에 대한 적용성을 검토하였다.

NIR 및 FT-IR, Raman 분광법을 이용한 유기화합물의 분광학적 특성을 파악한 연구사례를 중심으로 문헌 연구를 진행한 결과, 분자의 구조 중 진동기별 NIR 흡

Table 4. Location of absorption bands and corresponding vibration modes in the near-infrared region³²⁾

파장 (nm)	Vibration Mode	Structure	파장 (nm)	Vibration Mode	Structure
806	N-H str. third overtone	RNH ₃	1528	O-H str. first overtone (intramol H-bond)	starch
808	2xN-H str.+2xN-H def.+2xC-N str	RNHR	1530	N-H str. first overtone	RNH ₂
815	N-H str. third overtone	RNHR	1533	C-H str. first overtone	C=H
832	2xN-H str.+2xN-H def.+2xC-N str	RNHE	1540	O-H str. first overtone (intramol H-bond)	starch
840	3xC-H str.+2xC-C str	benzene	1570	N-H str. first overtone	-CONH-
874	C-H str. third overtone	benzene	1580	O-H str. first overtone	starch, glucose
880	C-H str. third overtone	CHCl ₃	1620	C-H str. first overtone	=CH ₃
900	C-H str. third overtone	CH ₃	1645	C-H str. first overtone	R-CH-CH
910	C-H str. third overtone	protein	1660	C-H str. first overtone	cis-RCH=CHR
913	C-H str. third overtone	CH ₃	1685	C-H str. first overtone	aromatic
928	C-H str. third overtone	Oil	1695	C-H str. first overtone	CH ₃
938	C-H str. third overtone	CH ₃	1705	C-H str. first overtone	CH ₃
970	C-H str. third overtone	ROH, H ₂ O	1725	C-H str. first overtone	CH ₂
990	C-H str. third overtone	starch	1740	S-H str. first overtone	-SH
1000	C-H str. third overtone	ArOH	1765	C-H str. first overtone	CH ₂
1015	2C-H str.+3xC-H def.	CH ₃	1780	C-H str. first overtone	cellulose
1020	2C-H str.+3xC-H def.	protein	1820	O-H str.+2C-H str.	cellulose
1020	N-H str. second overtone	ArNH ₃	1900	O-H str.+2C-H str.	starch
1030	N-H str. second overtone	RNH ₃	1908	O-H str. first overtone	POH
1037	2xC-H str.+2xC-H def. (CH ₂) _m	Oil	1920	C=O str. second overtone	CONH
1053	2xC-H str.+2xC-H def. (CH ₂) _m	CH ₃	1940	O-H str.+O-H def C=O str.	H ₂ O
1060	N-H str. second overtone	RNH ₃	1950	second overtone	-CO ₂ R
1080	2C-H str.+2C-C str.	benzene	1960	N-H asym.str.+amideII	CONH ₂
1097	2C-H str.+2C-C str.	cyclopropane	1980	N-H asym.str.+amideII	protein
1143	C-H str. second overtone	aromatic	2000	2+O-H def.+C-H def.	starch
1152	C-H str. second overtone	CH ₃	2000	N-H sym.str.+amideII	CONH ₃ , CONHR
1170	C-H str. second overtone	HC=CH	2030	C=O str. second overtone	
1195	C-H str. second overtone	CH ₃	2050	N-H sym.str.+amideII	protein
1215	C-H str. second overtone	CH ₃	2050	N-H asym.str.+amideII	CONH ₂
1225	C-H str. second overtone	CH ₃	2080	O-H str.+O-H def.	FOH, sucrose
1360	2C-H str.+2C-H def.	CH ₃	2100	2+O-H def.+C-H def.	starch
1395	2C-H str.+2C-H def.	CH ₃	2110	N-H sym.str.+amideII	CONH ₂ , CONHR
1410	O-H str. first overtone	ROH	2132	N-H str.+C=O str.	amide acid
1415	2C-H str.+2C-H def.	CH ₂	2140	=CH str.+C=C str.	HC=CH
1417	2C-H str.+2C-H def.	aromatic	2150	2amideI+amideIII	CONH ₃
1420	O-H str. first overtone	ArOH	2160	2amideI+amideIII	CONHR
1430	N-H str. first overtone	CONH ₃	2180	2amideI+amideIII	protein
1440	O-H str. first overtone	sucrose	2190	CH ₂ asym str+C-str.	HC=CH
1440	2C-H str.+2C-H def.	CH	2200	C-H str.+C=O str.	-CHO
1446	2C-H str.+2C-H def.	aromatic	2242	O-H str.+O-H def.	amide acid
1450	O-H str. first overtone	starch, H ₂ O	2252	O-H str.+O-H def.	starch
1460	N-H str. first overtone	CONH ₂	2276	O-H str.+C-C str.	starch
1471	-H str. first overtone	CONHR	2280	C-H str.+C-H def.	CH ₂
1480	O-H str. first overtone	glucose	2294	N-H str.+C=O str.	amid acid
1483	N-H str. first overtone	CONH ₂	2310	C-H str.+C-H def.	CH ₂
1490	N-H str. first overtone	CONHR	2323	C-H str.+C-H def.	CH ₂
1490	N-H str. first overtone (intramol H-bond)	CONH ₂	2336	C-H str.+C-H def.	cellulose
1490	O-H str. first overtone (intramol H-bond)	cellulose	2347	CH ₂ sym.str.+ CH ₂ def.	HC=CHCH ₂
1492	N-H str. first overtone	ArNH ₃	2352	C-H def. second overtone	cellulose
1500	N-H str. first overtone	NH	2380	C-H def. second overtone	ROH
1510	N-H str. first overtone	protein	2461	C-H str.+C-H str.	starch
1520	O-H str. first overtone	CONH ₂	2488	C-H str.+C-H str.	starch
1520	N-H str. first overtone	ROH	2500	C-H str.+C-H str.	starch

수 파장대가 일정하게 나타나는 특성을 이용해, 800 nm 영역에서 부터 유기화합물의 구조를 파악할 수 있고, 이를 통하여 정성분석이 가능한 것으로 판단되었다. 따라서 자연환경 조건별 동일 유기화합물의 스펙트럼 차이를 보정하는 기술 및 극소량 화합물의 검출가능 여부 등에 대한 추가 조사를 시행하여, 수질분야의 더욱 세분화된 라이브러리를 구축하게 된다면, 환경호르몬이나 생태독성물질, 맛냄새 물질과 같은 미량 독성물질 및 심미적 물질 등도 실시간으로 모니터링이 가능할 것이다.

참고문헌

1. Goodenough, D.G., A.Dyk, K.O.Niemann, J. S. Pearlman, H. Chen, T. Han, M. Murdoch, and C. West. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **2003**, 41, 1321-1331.
2. Zarco Tejada, P.J., J.R. Miller, T.L. Noland, G.H. Mohammed, and P.H. Sampson. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **2001**, 39, 1491-1507.
3. Gelpi, C.C. *Remote Sensing of Environment*, **2000**, 74, 414-421.
4. Kallio, K., S. Koponen, and J. Pulliainen. *International Journal of Remote Sensing*, **2003**, 24, 3771-3790.
5. Koponen, S., J. Pulliainen, K. Kallio, and M. Hallikainen. *Remote Sensing of Environment*, **2002**, 79, 51-59.
6. Kaishan Song, Lin Lia, Lenore P. Tedesco, Shuai Li, Nicolas A. Clercin, Bob E. Hall, Zuchuan Li, Kun Shi. *Science of The Total Environment*, **2012**, 426, 220-232.
7. Herold, M., D. A. Roberts, M. E. Gardner, and P. E. *Remote Sensing of Environment*, **2004**, 91, 304-319.
8. Ben-Dor, E., N. Levin, and H. Saaroni. *Israel International Journal of Remote Sensing*, **2001**, 22, 2193-2218.
9. S.H. Kim, K.S. Lee. *Korean Journal of Remote Sensing*, **2005**, 21, 341-369.
10. Verdin, J. *Pohtogramm, Eng. Remote Sens*, **1985**, 51, 343-353.
11. K.E. Kim, T.S. Lee. *The journal of GIS Association of Korea*, **1994**, 2, 65-74.
12. Jang D.H., and G. H. Jo, 1998, "The Development of water quality Monitoring System and its Application Using Satellite Image data". *Int. Symposium on Remote Sensing & The Second KOMPSAT OSMI Workshop*.
13. E. Ben-Dor, A. Banin. **1993**, Department of Soil and Water Sciences, Faculty of Agriculture, Hebrew University of Jerusalem, Rehovot, Israel.
14. Paul Williams, Paul Geladi, Glen Fox, Marena Manley. *Analytica Chimica Acta*, **2009**, 653, 121-130.
15. Green, A. A., M. Bernam, P. Switzer, and M. D. Graig. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **1998**, 26, 65-74.
16. Van der Meer, F. and V. Kato. *International Journal of Remote Sensing*, **2002**, 23, 5087-5094.
17. Biggar, S.F, K.K. Thome, and W. Wisniewski. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **2003**, 41, 1174-1179.
18. Inflection of airborne hyperspectral remote sensing, Dongsan Corporation, **2012**.
19. Mary E. Martin, John D. Aber. *Ecological Applications*, **1987**, 7, 431-443.
20. Asner, G.P., M.M.C. Bustamante, and A. R. *Central Anazon, Remote Sensing of Environment*, **2003**, 87, 507-520.
21. A. Brook, E. Ben-Dor, R. Richter. *Hyperspectral Workshop*, **2010**.
22. Presentation report of coastline reference, Hanjin information telecom, **2011**.
23. Specim imaging Ltd. Homepage, <http://www.specim.fi/applications/remote-sensing.html>.
24. University of Texas at Austin center for space research homepage, <http://www.csr.utexas.edu/>
25. George, D. G., Hewitt, D. P. *Proceedings of the NERC symposium on airborne remote sensing 1990(18 December, held at BGS)*, **1990**, 193-201.
26. Camilla Brekke, Anne H.S. Solberg, *Remote Sensing of Environment*, **2005**, 95, 1-13.
27. A.A. Gowen, C.P. O'Donnell, P.J. Cullen, G. Downey, J.M. Frias. *Trends in Food Science & Technology*, **2007**, 18, 590-598.
28. Griffiths, P. de Hasseth, J.A. "Fourier Transform Infrared Spectrometry". 2nd edition, **2007**, Wiley-Blackwell, USA.
29. R. Salzer, G. Steiner, H. H. Mantsch, J. Mansfield, E. N. Lewis, *Journal of Analytical Chemistry*, **2000**, 366, 712-726.
30. H.W. Lee, C. S. Kong, H.S. Park, H.J. Ko. *The Journal of Korean Society of Crop Science*, **2005**, 50, 140-141.
31. Eunyoung Choe, Freek van der Meer, Frank van Ruitenbeek, Harald van der Werff, Boudewijn de Smeth, Kyoung-Woong Kim, *Remote Sensing of Environment*, **2008**, 112, 3222-3233.
32. D.A. Burns and E.W. Ciurczak. "Handbook of Near Infrared Analysis", **1992**, Marcel Dekker Inc., New York, USA.