

초분광 이미징 기술의 최근 연구 동향

Recent Progress in Hyperspectral Imaging Technology

서선일¹, 장성욱¹, 오지수¹, 주기남^{1,#}
Seon Ile Seo¹, Seongwook Jang¹, Jisoo Oh¹, and Ki-Nam Joo^{1,#}

¹ 조선대학교 광기술공학과 (Department of Photonic Engineering, Chosun University)
Corresponding Author / E-mail: knjoo@chosun.ac.kr, TEL: +82-62-230-7235
ORCID: 0000-0001-9484-2644

KEYWORDS: Hyperspectral imaging (초분광 이미징), Point scanning (점 주사), Line scanning (선 주사), Spectral scanning (스펙트럼 주사), Snapshot (스냅샷)

Hyperspectral imaging is a promising technology utilized in various fields, including physics, chemistry, and astrophysics. It can be categorized into point, line, and spectral scanning techniques based on the principle of obtaining hyperspectral cubes. Recently, snapshot hyperspectral imaging techniques have been developed to reduce acquisition time. This review introduces various types of hyperspectral imaging techniques, along with their basic principles and applications. Additionally, it discusses the advantages and disadvantages highlighted in recent research on hyperspectral imaging. This review aims to provide insight into the development of hyperspectral imaging techniques and their appropriate applications.

Manuscript received: April 8, 2025 / Revised: April 22, 2025 / Accepted: June 2, 2025

1. 서론

일반적으로 분광학(Spectroscopy)은 임의의 전자기파(Electromagnetic Wave)와 물질이 서로 상호작용할 때, 발생하는 광의 스펙트럼(Spectrum) 정보를 분석하는 학문으로, 특정 파장 대역에서 광이 흡수되고 방출되는 현상을 통해 물질의 화학적 조성, 물리적 특성, 분자 구조 등을 분석할 수 있다. 이러한 분광학에서는 대표적으로 프리즘(Prism) 및 회절 격자(Diffraction Grating)를 통해 광을 파장별로 분산시키고 측정하는 분광기(Spectrometer)가 널리 사용되고 있으며, 이때 응용 분야에 따라 사용하는 분광기의 파장 대역이 결정된다. 예를 들어, 자외선 대역(Ultraviolet Spectrum)의 광은 짧은 파장과 높은 에너지로 인해 일부 시편에서 높은 반사율을 가지고, 표면의 화학적 구조를 민감하게 변화시킬 수 있기 때문에, 자외선 대역의 분광기는 일반 조명에서 보이지 않는 물질의 분석이 가능하여 바이오[1], 법의학[2], 반도체 측정에 주로 사용된다[3]. 또한, 가시광 대역(Visible Spectrum)의 분광기는 색상을 직접 관찰할 수 있기 때문에, 토양 및 식생의 분석[4]과 생물 조직의 색상 변화를 분석하는 의료 분야에 주로 사용된다[5].

한편, 단파-적외선 대역(Short-wave Infrared Spectrum)의 분광기는 분자 결합 상태와 강하게 상호 작용하는 광의 특성을 이용하여[6], 식품의 품질[7] 및 지질학 분야에 주로 사용되고[8], 중파-적외선 대역(Mid-wave Infrared Spectrum)의 분광기는 온도 및 열 신호를 감지하는 열화상[9]과 화학 물질을 식별하는 용도로 사용된다[10]. 장파-적외선 대역(Long-wave Infrared Spectrum)의 분광기는 열탐지로 대상을 식별하는 군사 분야[11,12] 및 온도 변화를 통해 인체의 피부 상태나, 염증 또는 종양을 감지하는 의료 분야[13]와 별과 행성을 연구하는 천문학 분야에 주로 사용된다[14]. 이와 같이 분광기는 다양한 학문 및 산업 분야뿐만 아니라 일상 생활에서도 중추적인 역할을 하고 있으며, 현대 과학 기술 발전에 핵심적이다.

하지만 일반적인 분광기는 주로 광의 스펙트럼을 분석하는 것을 목표로 하기 때문에, 시편 또는 물체의 공간 정보를 획득하기에 한계를 가진다. 그래서 이러한 한계를 극복하기 위해, 스펙트럼 측정 기술과 공간 측정 기술을 결합한 분광 이미징(Spectroscopic Imaging) 기술이 개발되었다. 분광 이미징 기술은 측정 대상의 스펙트럼 정보를 2차원 배열(2D Array) 기반 검출기의

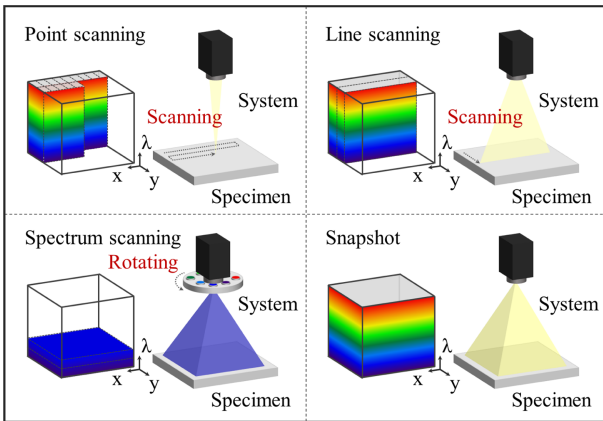


Fig. 1 Various data acquisition methods of hyperspectral imaging

각 픽셀(Pixel) 단위로 측정하여 스펙트럼 정보와 공간 정보를 동시에 획득한다. 특히 초분광 이미징(Hyperspectral Imaging) 기술은 수십 개 및 수백 개 이상의 스펙트럼 채널 수로 각 픽셀에 대한 공간상의 초분광 큐브(Hyperspectral Cube)를 구성하며, 이를 통해 측정 대상에 대해 높은 스펙트럼 분해능 및 공간 분해능으로 정밀한 측정이 가능하다. 이때, 초분광 큐브란 초분광 이미징 시스템에서 획득된 데이터를 통해 생성된 데이터 세트로 x, y축은 측정 대상의 공간 정보를 나타내고, z축은 스펙트럼 정보를 나타낸다[15,16].

초분광 이미징 기술에서 초분광 큐브는 일반적으로 Fig. 1과 같이 공간 주사(Spatial Scanning)와 스펙트럼 주사(Spectrum Scanning) 방식으로 획득된다. 공간 주사 방식은 x축과 y축의 공간 좌표를 따라 픽셀 별로 광을 주사하면서 광의 일정한 파장 대역을 분광하는 점 주사(Point Scanning)와 이를 확장한 선 주사(Line Scanning) 방식이 있다. 한편, 스펙트럼 주사 방식은 광의 단일 파장을 변화시키면서 측정되는 이미지로부터 초분광 큐브를 획득한다. 최근에는 기존 초분광 이미징 기술들의 한계를 극복하기 위해, 공간 및 스펙트럼 주사 없이 측정하는 스냅샷(Snapshot) 방식의 초분광 이미징 기술이 개발되었다. 그리고 이러한 초분광 이미징 기술 분야에서는 각각의 초분광 큐브 획득 방법들의 특징과 성능 및 한계를 개선한 연구들이 최근까지 지속적으로 진행되고 있다. 본 논문에서는 이러한 초분광 이미징 기술의 다양한 측정 방법의 특징을 정리하고, 각각의 방법들에 대한 최근 연구 및 기술 동향에 대해 소개한다.

2. 점 주사 방식의 초분광 이미징 기술

2.1 측정 원리

점 주사 방식의 초분광 이미징 기술은 단일 공간 위치에 해당하는 초분광 정보를 2차원 공간 주사로부터 초분광 큐브를 획득하는 방식으로, 일반적으로 Whisk-broom Scanning으로 널리 알려져 있으며[16], 원격 탐사 분야에서는 위성이 움직이는 방향과 수직 방향의 의미를 담아 Across-track Scanning으로

알려져 있다[17]. 일반적인 점 주사 방식의 초분광 이미징 시스템은 거울(Mirror)과 공간 주사를 위한 구동기, 결상 광학 소자(Imaging Optic), 단일 검출기(Point Detector)로 구성되며, 비교적 간단하게 설계가 가능하고, 회전 거울로부터 넓은 시야각(Field of View)을 가지며 스마일(Smile), 키스톤(Keystone)과 같은 이미지 왜곡이 발생하지 않는다[18,19]. 또한, 단일 검출기의 교정(Calibration)을 통해, 각 스펙트럼 채널 간의 안정적인 광량의 이미지를 획득할 수 있어, 공초점 현미경(Confocal Microscopy) 등과 결합되어 바이오 분야에 널리 활용된다[20]. 뿐만 아니라, 항공 분야에서는 스윙 거울(Swing Mirror)과 프리즘을 사용하여 비행 방향에 대한 수직 주사만으로 초분광 큐브를 획득할 수 있기 때문에, 높은 공간 및 스펙트럼 분해능으로 좁은 측정 영역에서 효율적인 이미지 획득이 가능하다[21]. 그러나 일반적인 점 주사 방식의 초분광 이미징 시스템은 2차원 공간 주사로 인해 초분광 큐브 획득 시간이 길고, 짧은 통합 시간(Integration Time)으로 인해 낮은 신호 대 잡음비(Signal-to-noise Ratio)와 기계적 움직임으로 인한 기하학적 왜곡이 발생하는 한계가 있다.

2.2 측정 속도 및 데이터 획득

2차원 공간 이미지를 한 번에 획득하는 방식인 스펙트럼 주사 방식과 스냅샷 방식의 초분광 이미징 기술은 2차원 공간 정보를 한 번에 획득하는 특징을 가지고 있어 고정된 시스템에서 널리 활용되지만, 동적인 시스템에서는 시스템의 움직임으로 인해 이미지의 공간 정보가 일부 변형되어 왜곡이 발생한다. 이러한 문제로 인해, 구동하는 시스템에서는 초기에 점 주사 방식의 초분광 이미징 기술을 주로 사용하였다. 하지만 공간 주사로 인해 초분광 큐브 획득 시간이 오래 걸리는 한계가 발생하였다. 이를 개선하기 위해, 디지털 마이크로미러 장치(Digital Micromirror Device, DMD)와 파장 분산 장치를 결합하여, 점 주사 방식에서도 효율적인 압축 센싱(Compressive Sensing) 기술을 적용한 초분광 이미징 시스템 연구가 진행되었다[22]. 이 방식은 일반적인 점 주사 방식처럼 각 점을 하나씩 스캔하지만, 각 픽셀의 스펙트럼 벡터에 대해 DMD와 압축 측정 행렬을 활용하고 광학적으로 수학 연산을 수행함으로써 적은 데이터만으로 전체 스펙트럼 정보를 획득한다. 이를 통해, 각 주사 지점마다 다양한 스펙트럼 정보를 압축하여 저장할 수 있어 기존 점 주사 방식의 공간적 제약을 극복하였고, 추가로 광 분할기와 다중 센서 배열을 사용하여 가시광 대역과 적외선 대역을 하나의 장치에서 동시에 획득하는 시스템이 개발되었다. 이러한 시스템을 통해 저장 용량과 데이터 처리 시간을 크게 줄일 수 있고, 실시간으로 높은 분해능의 이미지를 저장하고 전송해야 하는 원격 탐사에도 유리하게 적용되었다.

점 주사 방식의 초분광 이미징 기술은 일반적으로 외부 환경에서 조명 조건이 시간에 따라 변하면, 긴 주사 시간 동안 서로 다른 위치에서 다른 조건의 조명으로 인해 스펙트럼 왜곡이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 기존에는 참조 표면(Reference Surface)을 사용하여 조명 변화를 보정하는 단순 보정 방법(Naïve Method)이 제안되었지만, 이는 적용이 복잡하고

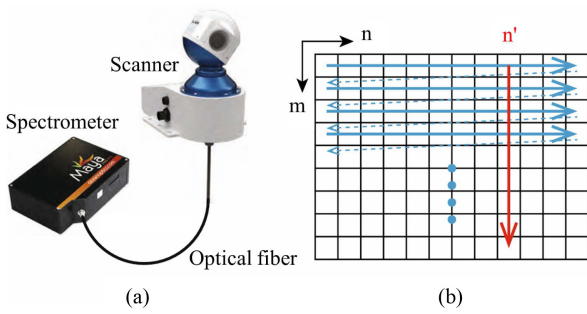


Fig. 2 Whisk-broom imaging system. (a) Overview of the system developed in this study and (b) Blue arrows illustrate the whisk-broom raster scanning for forming an image. The red arrow illustrates the extra single-column scan conducted in proposed method [24] (Adapted from Ref. 24 on the basis of OA)

실내의 환경에서 활용하기 어려운 한계를 가지고 있었다[23,24]. 이를 해결하기 위해, Fig. 2와 같이 기존의 공간 주사와 더불어 추가적인 단일 열 주사(Single-column Scan)를 통해 조명 변화를 직접 추정하고, 이를 기반으로 저차원 행렬 방법(Low-rank Matrix Method)을 사용해 조명 효과를 보정하는 방법이 제안되었다[24]. 그리고 이를 통해, 실제 프랑스 성당의 스테인드글라스와 같은 환경에서 조명 변화 보정 효과를 기존의 보정 방법과 비교하였다. 그 결과, 기존 방법은 일정한 조명 상태를 가정하여 시간적으로 변화하는 조명을 정확히 추정하지 못했지만, 제안된 방법은 추가 주사 데이터를 통해 조명 변화를 정량화하였으며, 이를 이미지에 적용하여 조명 변화로 인한 스펙트럼 왜곡을 기존의 방법 대비 약 2배만큼 감소시켜 자연스러운 이미지를 구현하였다.

2.3 기하학적 왜곡 보정

점 주사 방식의 초분광 이미징 기술은 비교적 간단한 광학 구성 때문에 항공기 및 위성과 같은 원격 센싱 시스템(Remote Sensing System)이라고 부르는 공중 플랫폼과 우주 플랫폼에서 주로 사용된다. 이때, 우주 플랫폼인 위성에 탑재된 초분광 이미징 시스템은 안정적인 비행 경로 및 모션으로 인해 2차원 다항 함수(Bivariate Polynomial)를 이용하여 측정되는 이미지의 기하학적 왜곡에 대한 보정이 비교적 쉽게 수행된다[25]. 하지만 대기 중의 공중 플랫폼에서는 항공기의 불규칙한 비행 경로와 복잡한 모션 변화로 인하여 획득된 초분광 큐브는 기하학적 왜곡이 발생하며, 왜곡된 이미지를 실제 지상 표면의 기하학적 형상과 일치시키기 위한 보정이 필요하다.

점 주사 방식의 초분광 이미징 기술에서는 시스템이 탑재된 플랫폼의 불규칙한 움직임과 다양한 모션 변화로 인하여 다양한 왜곡이 이미지에 포함되며, 이러한 기하학적 왜곡을 보정하기 위한 연구는 수십 년간 진행되어 왔다. 초분광 큐브를 획득하는 과정에서 발생하는 기하학적 왜곡으로는 파노라마 왜곡(Panoramic Distortion), 언더 스캔(Under Scan), 오버 스캔(Over Scan), S-형 왜곡(S-shape Distortion), 크랩 왜곡(Crab Distortion), 롤 왜곡(Roll Distortion), 피치 왜곡(Pitch Distortion), 기복 변위(Relief

Displacement) 등이 있으며, 이러한 오차 요인들은 측정 대상의 기하학적 형태와 스캔 속도, 위치 변화로 인해 발생한다[26]. 이러한 문제를 해결하기 위해, Minhe Ji와 John R. Jensen은 연속적인 구간별 기하학적 교정(Continuous Piecewise Geometric Rectification)인 비파라메트릭 접근법(Non-parametric Approaches)을 제안하였으며[25], Paul A. Pope와 Frank L. Scarpace는 파라메트릭 접근법(Parametric Approaches)인 이미지 간 매칭을 통한 매개변수 모델링(Parametric Modeling with Image-to-image Matching) 방법을 보고하였다[27]. 또한, Michael Breuer와 Jörg Albrecht는 비파라메트릭 접근법과 파라메트릭 접근법의 요소를 모두 포함한 방법인 혼합 접근법(Mixed Approaches)을 통해 상황에 맞는 유연한 기하 왜곡 보정 방법을 제시하였다[28].

비파라메트릭 접근법인 연속적인 구간별 기하학적 교정 방법은 왜곡된 이미지를 여러 개의 작은 이미지 조각으로 나누고 기준점(Ground Control Point, GCP)을 설정한다. 이후, 조각별로 다항식 모델을 각기 적용해 국부적으로 발생하는 왜곡을 정밀하게 보정하고, 이미지 조각 간의 경계를 연결하여 연속성을 유지하기 위한 앵커점(Anchor GCP)으로 보정된 모든 이미지 조각을 합쳐 최종 이미지를 생성한다. 그 결과, 기존의 방법들에 비해 분해능 향상과 이미지의 연속성이 유지됨을 보였다[25]. 하지만, 제안된 방법은 보정 정확도가 사용된 기준점과 앵커점 개수에 크게 의존하고, 동적인 플랫폼에서는 추가적인 정보들이 필요한 한계를 가진다.

한편, 파라메트릭 접근법인 이미지 간 매칭 방법은 광선 추적(Ray Tracing)을 통해 실제 궤적의 오차를 추정하고, 생성된 이미지와 참조 이미지인 정사 사진(Digital Orthophoto) 및 디지털 고도 모델(Digital Elevation Model)을 비교하여 두 이미지 간 유사도가 가장 높을 때의 상관 값(Correlation Value)을 선택한다. 이후 플랫폼의 위치와 모션을 나타내는 외부 방향 매개변수(Exterior Orientation Parameter)를 변경하며, 생성된 궤적 중에서 참조 이미지와 가장 잘 매칭되는 궤적을 선택하여 초기 궤적을 수정하고 이를 통해 플랫폼에서 획득된 이미지와 합성한다. 제안된 방법은 국부적인 왜곡 보정과 궤적 수정에서 높은 왜곡 보정 성능을 보여주었으나, 결과가 참조 이미지에 크게 의존하고, 모션 변화 보정의 한계로 인해 모든 상황에 완벽히 적용되기 어렵다는 단점을 가진다[27]. 또한, 정확도를 높이기 위해 많은 매개변수를 포함하여 계산 시간이 증가하므로, 추가적인 최적화 및 개선 연구가 진행되고 있다.

혼합 접근법은 측정된 외부 방향 매개변수와 가상 이미지 및 기준점 등의 기초 데이터를 통해 곡선 방정식(Collinearity Equation)에 기반하여 이미지 좌표를 계산한다. 그래서 계산된 좌표를 다항식과 기준점 좌표를 이용하여 이미지의 왜곡을 보정하고, 보간 알고리즘(Interpolation Algorithm)으로 정규 격자(Irregular Pattern)를 생성하여, 최종적인 정사영상(Orthoimage)을 획득한다[28].

앞서 설명한 점 주사 방식의 초분광 이미징 기술의 기하 왜곡 보정 방법들은 이상적인 상황을 가정하여 설정하는 보정 방법으로 실제로 움직임이 불규칙하고 복잡한 플랫폼에서는 적용하기

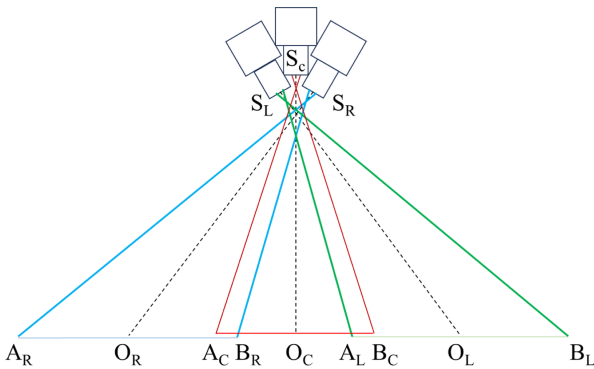


Fig. 3 Imaging principle of airborne wide swath and high-resolution hyperspectral imaging system [30] (Adapted from Ref. 30 on the basis of OA)

어려운 한계가 있다. 이를 개선하기 위해서 복잡한 플랫폼의 궤적을 추정 가능한 사진 측량(Photogrammetry)과 Gauss-markov 모델을 적용한 보정 방법이 제안되었으며, 이를 통해 서브 픽셀 수준의 약 0.5 픽셀의 높은 분해능을 달성하는 연구도 진행되었다[29].

3. 선 주사 방식의 초분광 이미징 기술

3.1 측정 원리

선 주사 방식의 초분광 이미징 기술은 시편 영역의 특정 선(Line) 부분을 측정한 이후, 한쪽 방향의 횡방향 주사를 통해 초분광 큐브를 획득한다. 일반적인 선 주사 방식의 이미징 시스템은 광원과 좁은 선형 영역에서 반사광을 감지하고 데이터를 수집하기 위한 Charge-coupled Device (CCD) 센서, 측정 시스템을 정밀하게 이동, 제어하는 모터 및 드라이버, 센서에서 수집된 데이터를 디지털로 변환하기 위한 아날로그 디지털 컨버터 회로(Analog-to-digital Converter), 그리고 데이터를 처리, 보정, 저장하는 데이터 분석 소프트웨어로 구성된다. CCD 센서를 통해 세밀한 공간 분해능을 제공하고, 한 번의 주사로 넓은 스펙트럼을 동시에 수집할 수 있어 스펙트럼 분해능이 높은 결과를 제공한다. 특히, 넓은 스펙트럼을 통해 정밀한 스펙트럼 분석이 가능하다. 또한, 연속적인 선 데이터를 수집할 수 있기 때문에 점 주사 방식보다 빠르게 초분광 큐브를 획득할 수 있어, 실시간 데이터 처리가 가능하고 빠른 분석이 필요한 응용 분야에 유리하다.

하지만 이러한 선 주사 방식의 초분광 이미징 기술은 선형의 데이터를 수집하기 때문에, 측정 영역이 CCD 센서 자체의 물리적 크기에 의해 제한되는 단점이 있다. 또한, 이미지에서 가로축 방향의 가장자리로 갈수록 스펙트럼 위치가 휘어지거나 비정상적으로 보이는 현상인 스마일 왜곡과 이미지의 중심부와 가장자리의 확대 비율이 달라져 사다리꼴 모양의 왜곡을 유발하는 키스톤 왜곡이 발생한다. 따라서 선 주사 방식의 초분광 이미징 시스템은 정밀하고 복잡한 광학 설계로 인해 일반적인 사용자나 연구자의 접근이 제한적이다.

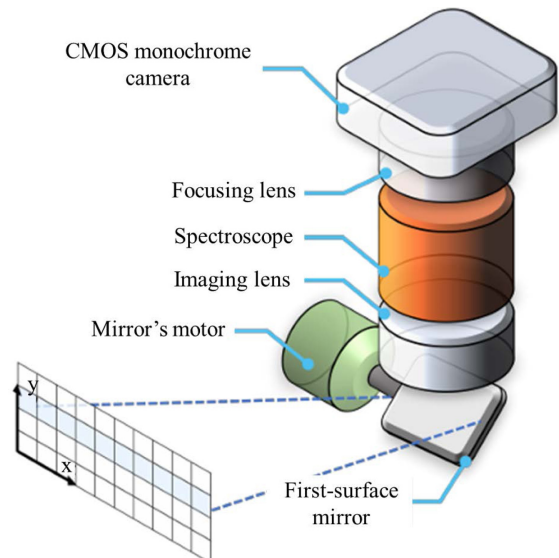


Fig. 4 Galvometer-based (galvo) mirror scanning hyperspectral imaging platform, where the mirror is placed at the very front-end of the platform [31] (Adapted from Ref. 31 on the basis of OA)

3.2 측정 영역 및 이미지 왜곡 보정

일반적인 선 주사 방식의 초분광 이미징 기술은 CCD 센서의 물리적인 크기로 인하여 넓은 영역을 측정하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 Fig. 3과 같이 여러 개의 CCD 센서를 결합하여 넓은 측정 영역을 확보하는 연구가 진행되었다[30]. 이를 통해 넓은 측정 영역과 높은 분해능을 동시에 달성하였고, 측정되는 이미지들 간의 정합 오차는 약 2 픽셀 이하로, 높은 정확도를 가졌으며 비용 및 측정 시간이 감소하였다.

한편, 선 주사 방식의 초분광 이미징 시스템은 센서 정렬이 불완전하거나 플랫폼이 흔들릴 경우, 스마일 및 키스톤 왜곡이 크게 발생하여 스펙트럼 및 기하학적 이미지의 정확도가 저해된다. 이를 개선하기 위해 Python의 데이터 처리 도구를 사용하여 왜곡을 측정하고 교정하는 방법에 대한 연구가 진행되었다 [19]. 그 결과 비교적 간단한 광학 구성과 소프트웨어만으로 왜곡을 정밀하게 측정할 수 있음을 증명하였으며, 왜곡 교정 후 이미지 품질이 크게 향상된 것을 확인할 수 있었다.

기존의 선 주사 방식의 초분광 시스템은 높은 비용과 복잡한 설계로 인해 실용적인 제약이 많다는 특징을 가지고 있다. 일반적인 상용 시스템은 고성능 CCD 센서, 정밀 구동 스테이지, Czerny-Turner 분광기, 전문화된 하드웨어, 알루미늄 프레임 구조물 등 고가의 부품을 사용한다. 이를 개선하기 위해, 고가의 상용 부품 대신 소비자용 부품과 오픈소스 플랫폼을 조합한 저비용 초분광 이미징 시스템이 제안되었다[31]. CCD 센서 대신 USB CMOS 카메라, 정밀 구동 스테이지 대신 갈바노(Galvano) 미러, 복잡한 분광기 대신 Gemstone-style Spectrometer, 전문화된 하드웨어 대신 아두이노와 디지털 아날로그 컨버터 회로, 알루미늄 프레임 대신 3D 프린팅 하우징이 사용되었다. 또한, 오픈소스 기반

Graphical User Interface (GUI)를 통해 프로그래밍 지식 없이도 실험 제어가 가능하며, Lucy-Richardson Deconvolution 알고리즘을 통해 y축 해상도를 보정할 수 있다. 이 보정 과정은 GUI에 포함되어 자동 수행되며, 결과는 RGB 이미지로 시각화되어 사용하기 쉽게 구성되었다. Fig. 4에서는 저비용 초분광 이미징 시스템의 전체 설계 구조 및 오픈소스 기반 소프트웨어 구성을 시각화한 그림이며, 이 구조는 광학적 왜곡 보정의 효율성과 알고리즘 기반 위치 정확도 개선을 향상시켰으며, 기존의 보정 방식보다 다양한 환경에서 안정적인 성능을 나타냄이 검증되었다.

3.3 선 주사 방식의 초분광 이미징 기술 응용

선 주사 방식의 초분광 이미징 기술은 전문 광학 분야 이외에, 일상 생활에서 접할 수 있는 식품의 오염, 품질 및 성분을 실시간으로 검사할 수 있는 시스템으로 활용이 가능하다. 그래서 이를 활용하여 식품 가공 라인에서 실시간 품질 관리 및 다양한 식품의 미세한 오염물질과 품질 저하 요인을 정확하게 감지하는 연구가 진행되었다[32]. 다른 연구에서는 선 주사 방식의 초분광 이미징 기술에 더하여, 형광 이미징 기술을 접목하여 사과와 불량과 분변 오염을 실시간으로 감지하는 기술을 개발하였으며, 사과뿐만 아니라 대량의 과일을 신속히 검사할 수 있어 식품 안전과 품질 보장이 개선된 연구도 진행되었다[33].

또한, 3차원 구조 분석을 위해서 구조화된 조명을 결합한 선 주사 방식의 초분광 이미징 기술을 통해 시편의 3차원 단층 이미지를 획득하는 기술이 제안되었다[34]. 이는 특히 세포나 조직 샘플 등 미세한 구조의 바이오 분야에서 높은 분해능의 스펙트럼 분석에 유리하여, 생명과학과 의학 분야에서 조직의 화학적 조성을 정밀하게 분석하는데 활용될 수 있다. 이외에도 고고학에 적용하여, 유물이나 벽화의 보이지 않는 층이나 손상을 감지하는 방법과 항공 분야의 원격 감지와 환경 모니터링 [35], 라만 기술을 접목시켜 식품 산업에서 감염 여부를 탐지하는 품질 관리 분야에도 적용되고 있다[36].

4. 스펙트럼 주사 방식의 초분광 이미징 기술

4.1 측정 원리

스펙트럼 주사 방식의 초분광 이미징 기술은 특정 파장에서 2차원 공간 이미지를 측정하고, 중심 파장을 순차적으로 변경하여 일련의 과정을 반복함으로써 초분광 큐브를 획득한다. 일반적인 스펙트럼 주사 방식의 초분광 이미징 시스템은 파장을 변화시키는 필터(Filter)와 2차원 검출기인 CCD 또는 CMOS 센서로 구성된다. 이 방식은 점 주사 또는 선 주사 방식과 달리, 공간 영역의 기계적 스캐닝 없이 전체 측정 영역의 2차원 공간 정보를 한 번에 획득할 수 있는 장점을 가진다. 또한, 점 주사 및 선 주사 방식의 초분광 이미징 기술은 해당 영역의 공간 주사가 완료된 후, 스펙트럼에서 분석된 초분광 큐브를 획득하기 때문에 실시간으로 이미지를 모니터링할 수 없는 반면에, 스펙트럼 주사 방식의 경우

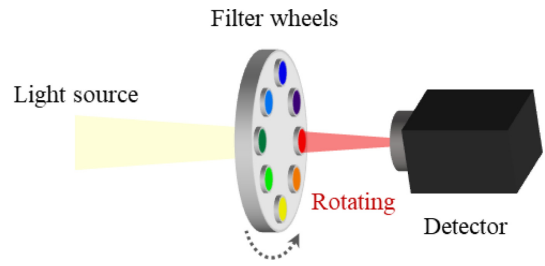


Fig. 5 Configuration of a filter wheel based-hyperspectral imaging system

특정 공간에 해당하는 이미지에 대하여 실시간으로 모니터링이 가능하며, 초점 조정 및 유지보수가 용이하다. 하지만, 공간 주사를 위한 구동부 대신 스펙트럼 주사를 위한 파장 가변 시스템이 필요하고, 2차원 검출기의 공간 해상도에 따라 측정 영역이 고정된다. 따라서, 좁은 영역의 특정 지형과 고정된 물체인 의료 [37], 생물학[5], 화학[38] 및 형광 이미징 분석에 주로 활용된다 [39]. 파장 가변 시스템으로는 필터 휠(Filter Wheel)에 부착된 간섭 필터(Interference Filter)와 액정 가변 필터(Liquid Crystal Tunable Filter, LCTF), 음향 광학 가변 필터(Acousto-optic Tunable Filter, AOTF)가 대표적으로 사용된다[40,41].

4.2 필터 휠 기반 파장 가변 시스템

Fig. 5는 스펙트럼 주사 방식의 초분광 이미징 시스템에 널리 활용되는 일반적인 필터 휠 기반 파장 가변 시스템을 나타낸다. 필터 휠에 간섭 필터들을 부착하고 간단한 기계적 구동으로 다양한 간섭 필터를 사용하여 파장을 변화시킨다[42]. 일반적인 RGB 카메라보다 색 구현성이 높지만, 스펙트럼 분해능은 액정 가변 필터와 음향 광학 가변 필터에 비해 낮으며, 사용된 필터의 개수와 대역폭에 따라 결정된다. 더불어, 기계적 구동에 의해 발생하는 기하학적 왜곡 보정이 필요하다. 필터 휠에 부착된 여러 필터는 두께, 굴절률, 정렬 상태가 각기 다르기 때문에, 색수차(Chromatic Aberration)와 기하학적 왜곡이 발생한다. 이를 해결하기 위해, 필터 특성과 정렬 문제를 수학적 모델링인 영역 기반 알고리즘 (Region-based Algorithm)과 전역 알고리즘(Global Algorithm)을 이용하여 개선한 연구가 진행되었다[43]. 또한, 빛의 간섭 원리를 이용한 간섭 필터와 넓은 시야각을 갖는 광각 렌즈를 조합하여 초분광 이미징 시스템을 설계한 연구도 진행되었다[44]. 추가로, 공간 주사 방식의 초분광 이미징 시스템에 비해, 필터 휠의 낮은 스펙트럼 분해능과 불연속적인 스펙트럼 정보를 개선하기 위해 이중 카메라 시스템을 기반으로 한 초분광 이미징 시스템 설계 및 이미지 재구성 연구도 진행되었다[45].

4.3 액정 가변 필터 기반 파장 가변 시스템

Lyot-Öhman 원리 기반 액정 가변 필터는 Fig. 6과 같이 액정 (Liquid Crystal) 소자와 편광기(Polarizer)로 구성되고[46], 전자기파를 통해 액정 요소의 배열을 조정하여 특정 파장을 선택적으로 투과시킨다[47,48]. 이를 이용한 초분광 이미징 시스템에서는 다층의

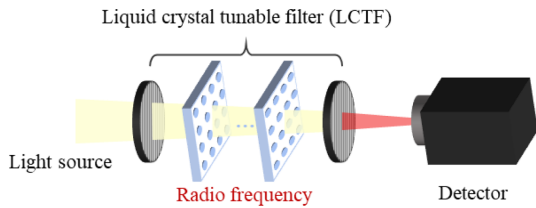


Fig. 6 Configuration of a LCTF based-hyperspectral imaging system

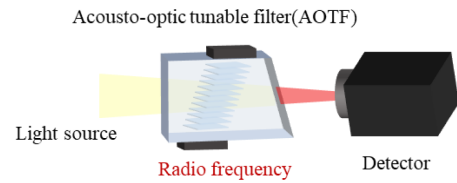


Fig. 7 Configuration of an AOTF based hyperspectral imaging system

편광기와 액정 소자를 쌓아 투과 대역폭을 좁혀 특정 파장 외의 빛을 차단하는 방법을 사용하여 이상적인 단일 파장과 비슷한 파장의 광을 투과시킬 수 있다[49]. 하지만 다층 편광기 통과로 인한 광 손실이 크고, 소자의 재료적 특성의 한계로 인하여 전체적인 초분광 이미징 시스템의 성능에 영향을 준다. 이러한 한계를 극복하기 위해 압축 센싱 기술을 공간 및 스펙트럼 영역에 모두 적용한 Code Aperture Tunable Filter (CATF) 시스템 연구가 진행되었다[50]. CATF 시스템을 이용하여 스펙트럼 영역에서는 LCTF의 대역폭 특성을 이용해 스펙트럼 정보를 압축하고, 공간 영역에서는 DMD를 통해 고해상도 공간 정보를 랜덤 변조하여 측정하였다. 이를 통해 기존 시스템보다 약 20배 적은 데이터로 동일한 분해능의 이미지를 생성하였고, 신호 대 잡음비는 기존 대비 약 6.32 dB 향상되었다.

4.4 음향 광학 가변 필터 기반 파장 가변 시스템

한편, Fig. 7과 같이 브래그 회절(Bragg Diffraction)과 압전 변환기(Piezo-electric Transducer)로 음향파를 생성시키는 음향 광학 가변 필터는 즉각적인 주파수 조정으로 고속으로 특정 파장 가변이 가능하며, 공선형(Collinear), 비공선형(Non-collinear)과 준 비공선형(Quasi-collinear)에 해당하는 3가지의 작동 모드로 다양한 분야에 적용이 가능하다[51,52]. 하지만 음향 광학 가변 필터 기반 파장 가변 시스템의 가용 파장 대역은 재료의 특성인 광학 투명성에 의해 제한되고, 재료의 상태와 회절 효율에 의해 시스템의 성능이 결정된다. 따라서, 음향 광학 가변 필터의 재료에 의한 스펙트럼 제한을 극복하여 넓은 파장 대역을 위해 새로운 광학 재료 개발과 가시광 대역에서 열 적외선(Thermal Infrared) 대역의 넓은 광학 투명성, 높은 이방성(Birefringence) 특징을 갖는 수은 할라이드(Mercurous Halides) 연구가 진행되고 있다[53]. 최근, 수은 할라이드를 이용하여 광대역 편광 소자인 월라톤 프리즘(Wollaston Prism) 개발이 진행되었고, 적외선 대역의 초분광 이미징을 위한 비공선형 시스템이 제안되었다[54,55]. 제안된 시스템으로부터 장파 적외선 대역에서 기존 음향 광학 가변 필터 시스템보다 3배 이상 향상된 스펙트럼 분해능을 달성하였고, 수은 할라이드의 높은 이방성과 투명성으로 기존 재질보다 약 20% 높은 회절 효율을 기록하였다.

5. 스냅샷 방식의 초분광 이미징 기술

5.1 초기 스냅샷 방식의 초분광 이미징 시스템

스냅샷 방식의 초분광 이미징 기술은 측정하는 전체 영역의

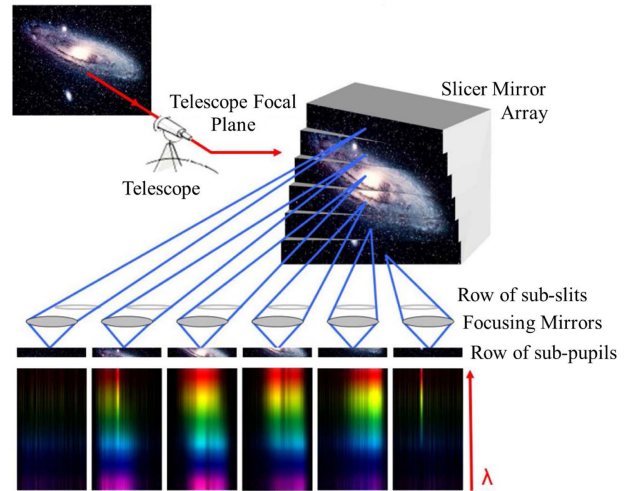


Fig. 8 Image slicer concept. The field of view is divided into N strips on a slicer mirror (here N = 6). Each of N slices reimages the telescope pupil, so there are N images in the pupil plane. Because of a tilt adapted to each individual slice, the N images are arranged by the Focusing Mirrors along a line and form a long pseudo-slit [58] (Adapted from Ref. 58 with permission)

스펙트럼 정보를 공간 및 스펙트럼 주사 없이 초분광 큐브를 획득하는 방식으로, 기존 초분광 이미징 측정 방식의 한계를 극복하기 위해 연구되었다. 초기 스냅샷 방식의 초분광 이미징 시스템은 Fig. 8과 같이 시편의 정보를 가진 광이 이미지 슬라이서(Image Slicer)를 만나 여러 개의 띠 형태로 쪼개어진 후 각 초점 거울에 이미징되어 슬릿에 나열된다. 이후, 분산 프리즘을 통과해 검출기로 이미징되어 초분광 큐브를 획득하는 방식이다. 주사 없이 초분광 큐브를 획득하기 때문에 빠른 측정속도와 기하학적 왜곡이 발생하지 않고, 움직이는 부품의 부재로 인해 향상된 견고성 및 소형화의 장점을 가지며, 비교적 높은 광 수집 효율을 가진다. 하지만 슬라이서의 패시(Facet) 크기와 기하학적 정렬은 측정 데이터의 공간 분해능을 제한하고, 이와 더불어 물리적으로 공간 분해능과 스펙트럼 분해능이 상충 관계(Trade-off)이기 때문에 공간 분해능을 높게 설계하면 스펙트럼 분해능이 저하된다[56-58].

5.2 Computed Tomography Imaging Spectrometry (CTIS)

2차원 회절 격자와 초점 평면 배열로 광을 회절시키고, 공간 및 스펙트럼 정보를 분리하여 다양한 위치에 다르게 나타남

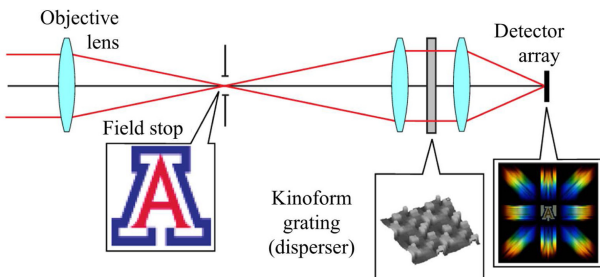


Fig. 9 The system layout for a computed tomography imaging spectrometer (CTIS) [59]

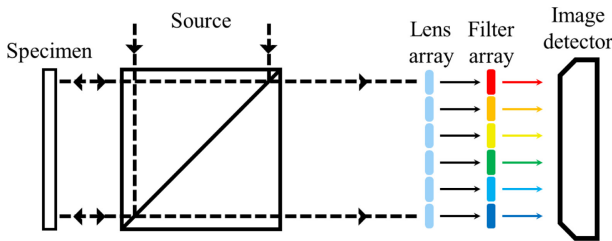


Fig. 10 The system layout for the MAFC

회절된 이미지를 재구성하는 방식의 CTIS는 Fig. 9와 같이 나타난다[59]. 이 시스템은 시편으로부터 반사 및 투과된 광을 대물렌즈로 수집하여 조리개에 들어간 후, Kinoform 회절 격자를 이용해 광을 분산시키고 릴레이 렌즈와 검출기를 이용해 초분광 큐브를 획득하는 방식이다. 이러한 CTIS는 입사하는 광의 대부분을 활용하기 때문에, 광 손실을 최소화하여 높은 신호 대 잡음비를 제공한다[60]. 이를 통해, 망막의 동맥과 정맥에서 산소 포화도 차이를 정량적으로 측정하여 의료 분야에 적용한 결과를 보고하였으며, 450-700 nm의 대역에서 50개의 채널과 4 nm의 스펙트럼 분해능으로 크기가 75 μm 이하인 작은 혈관을 명확하게 시각화한 것을 검증하였다[61]. 그러나 CTIS는 정밀한 2차원 회절 격자를 필요로 하기 때문에 제작에 오랜 시간이 소요되고 높은 비용을 요구한다. 뿐만 아니라 사용되는 시스템은 가시광 대역에 한정되어 있고, 회절 격자의 분산 효율이 비선형적이기 때문에 특정 파장 대역에서 신호 왜곡이 발생하는 한계가 있다.

5.3 Multi-aperture Filtered Camera (MAFC)

렌즈 배열과 필터 배열을 이용해 초분광 큐브를 획득하는 MAFC의 기본적인 광학 구성도는 Fig. 10과 같이 나타난다. 이 시스템은 시편에 반사된 광이 렌즈 배열을 통과하게 되면 다수의 동일한 이미지로 나누어지게 된다. 이후, 각각의 필터를 통과한 광이 검출되어 초분광 큐브를 획득할 수 있다. 렌즈의 작은 구경과 메타표면(Meta-surface) 기반 필터를 활용하면 소형화와 경량화에 최적화된 스냅샷 방식의 초분광 시스템이 가능해지고, 이러한 MAFC는 필터의 설계와 배치를 조정하여 원하는 파장 대역에 맞게 시스템을 유연하게 조정할 수 있는 장점을 가진다[62]. 연구 결과에 따르면, MAFC는 795-980 nm의 파장 대역에서 20개의 채널과 7 nm의 스펙트럼 분해능으로 높은 성능을 보였으나, 필터와

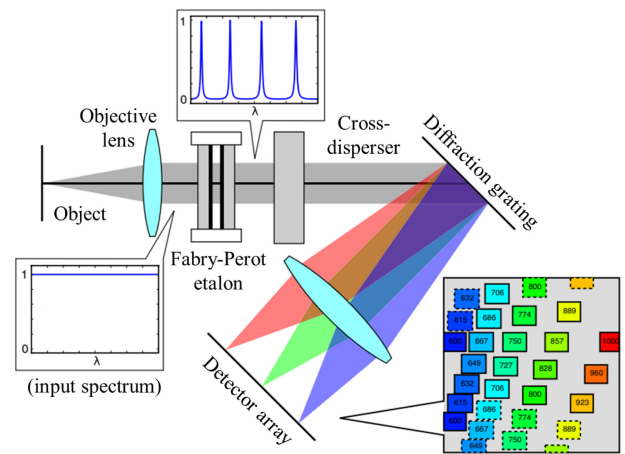


Fig. 11 The system layout for the tunable echelle imager (TEI). The box numbers in the raw data simulation shown here indicate wavelengths of subimages in nm; the dashed boxes indicate a replicate order of the Fabry-Pérot etalon [59] (Adapted from Ref. 59 on the basis of OA)

렌즈의 제작 과정에서 나노 단위의 정밀도가 요구되며, 메타표면 필터의 물리적인 불균일성으로 인해 측정 스펙트럼에 오차가 발생하는 한계가 있었다[63]. 또한, 작은 렌즈 구경으로 인해 광효율의 한계가 발생하여 신호 대 잡음비가 저하되고, 다수의 렌즈와 필터가 이미지의 픽셀이 결정되어 공간 분해능에 한계가 발생하였다.

5.4 Tunable Echelle Imager (TEI)

스냅샷 방식의 초분광 이미징 기술을 위한 또 다른 방법으로는 Fig. 11과 같이 패브리-페로 간섭계(Fabry-Pérot Interferometer)를 이용하여 특정한 파장을 방출하는 필터로 사용하고[59], 일반적인 회절 격자보다 높은 스펙트럼 분해능을 갖는 Echelle 회절 격자(Echelle Diffraction Grating)를 이용하여 이미지를 공간적으로 분리하는 TEI가 연구되었다[64]. 이때, 패브리-페로 간섭계의 두 거울 사이의 간격을 조정함으로써, 사용하는 광원의 대역폭에 따라 시스템의 파장 대역을 유연하게 변화시킬 수 있다. 600-1000 nm 사이 파장 대역에서 107개의 채널 수로 Fabry-Pérot 간격 설정에 따라 12-900 μm 으로 스펙트럼 분해능이 결정되고, 9-48 arcsec의 공간 분해능을 가짐을 확인하였다[65]. 하지만, 패브리-페로 간섭계의 빛의 반사에 의한 광 손실로 인해 전체 광효율이 감소하고, 넓은 파장 대역을 측정하기 위해서는 패브리-페로 간섭계의 공간 주사가 필요한 한계가 있다.

5.5 Image Mapping Spectrometry (IMS)

최근, 이미지 슬라이서를 이용한 초기 스냅샷 방식의 초분광 이미징 시스템 성능 개선을 위해, Fig. 12와 같이 패킷의 기술기가 주기적으로 반복되는 구조를 이용하여 이미지를 획득하는 IMS 연구가 진행되었다[59,66]. IMS에서는 특정 영역에 해당하는 공간 이미지만 획득할 수 있고, 이후 검출된 이미지들을 프리즘 및 회절 격자를 통해 분산시키고 재구성하는 과정을 거쳐 초분광 큐브를

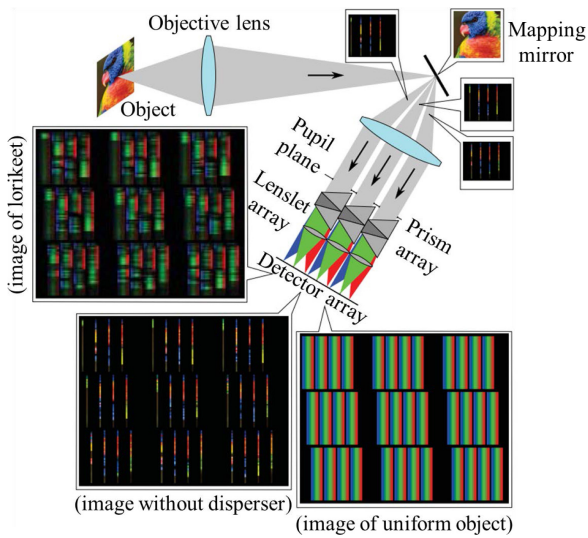


Fig. 12 The IMS system layout [59] (Adapted from Ref. 59 on the basis of OA)

획득한다. 이러한 IMS는 입사하는 광량의 대부분을 사용할 수 있기 때문에 광 손실을 최소화하여 높은 신호 대 잡음비를 제공한다. 그 결과 470-670 nm 사이 파장 대역에서 41개의 채널 수로 약 6-16 nm 사이의 스펙트럼 분해능, 0.78 μm의 공간 분해능의 성능을 보고하였다[67]. 하지만 사용한 광학 소자가 가시광 대역에 최적화되어 있어 가용 파장 대역을 넓히기 위해서는 소자 설계에서 추가적인 기술 개발이 필요하다. 또한 광학 소자의 파장 대비 분광 효율이 비선형적인 특성을 가져 모든 파장에서 균일한 해상도를 제공하기 어려운 한계가 있다.

5.6 Multispectral Sagnac Interferometer (MSI)

스냅샷 방식의 초분광 이미징 기술은 간섭계를 통해서도 구현할 수 있으며, 삭나 간섭계(Sagnac Interferometer)[68]에 블레이즈 회절 격자(Blazed Diffraction Grating)[69]가 추가된 구조의 MSI에 대한 연구가 진행되었다[70]. 입사하는 광은 블레이즈 회절 격자를 통과해 분산되어, 서로 다른 파장 대역의 광이 서로 다른 공간 주파수에 나타나고, 이러한 주파수 정보를 푸리에 변환을 통해 초분광 큐브를 획득한다. MSI는 간섭 패턴을 기반으로 모든 스펙트럼 정보를 동일한 좌표계에서 처리하므로 공간 및 스펙트럼 간의 왜곡이 적다. 또한, 가시광 대역을 모두 포함하는 넓은 파장 대역에서 측정할 수 있기 때문에, 다양한 분야에 적용이 가능하다는 장점을 가진다. 그 결과 400-750 nm 사이 파장 대역에서 총 4개의 채널 수로 약 70 nm의 스펙트럼 분해능을 가지고 있으며, 다중 채널 구현으로 인해 공간 분해능의 저하가 있음을 확인하였다[70]. 추가적으로 스펙트럼 채널 간 주파수 간격이 공간 주파수 영역을 차지하므로 스펙트럼 채널이 증가할수록 공간 분해능이 감소할 수 있다.

5.7 스냅샷 초분광 기술들의 성능 비교

Table 1은 앞서 소개한 스냅샷 방식의 초분광 이미징 기술들의

Table 1 Comparison of measured roughness data

	Spatial resolution	Spectral resolution	Optical efficiency
CTIS	Moderate-high	High	High
MAFC	Low	High	Low
TEI	Moderate	Low	Low
IMS	High	High	High
MSI	Moderate	Moderate	Moderate

성능을 비교한 결과를 나타낸다. CTIS는 검출기의 성능과 회절 격자 분산에 따라 공간 분해능과 스펙트럼 분해능이 정해지며, MAFC는 메타 표면과 렌즈 개구의 설계에 따라 공간 분해능이 정해지고 필터의 대역폭에 따라 스펙트럼 분해능이 정해진다. 그러나 메타표면의 설계가 채널 간 간섭을 줄 수 있어 광효율이 감소한다. 한편, TEI는 회절 격자와 광학 시스템에 의해 공간 분해능이 결정되고, 페브리-페로 간섭계 및 Echelle 회절 격자 사용으로 높은 스펙트럼 분해능을 가지지만 페브리-페로 간섭계로 인한 낮은 광효율을 보인다. IMS는 높은 공간 및 스펙트럼 분해능을 보이며, 대부분의 광을 사용할 수 있는 시스템이기 때문에 높은 광 효율을 보인다. 마지막으로, MSI는 넓은 파장대역에서 사용 가능하지만 공간 분해능과 스펙트럼 분해능 간의 상충 관계를 갖는다. Table 1에서 나타난 스냅샷 방식의 초분광 이미징 기술들의 성능 비교는 일반적인 상황에서의 성능 비교를 나타낸 것으로, 이는 실제 응용 및 시스템 구성에 따라 다소 달라질 수 있다.

6. 논의 및 결론

본 논문에서는 초분광 이미징 기술의 초분광 큐브 획득 방식에 따라 기존 기술의 한계를 분석하고 이를 극복하기 위한 다양한 연구 결과들을 제시하였다. 다양한 측정 방식에 따른 각각의 연구 결과에서는 기술적 개선 및 초분광 이미징 기술의 효율성과 정확성을 향상시켜 실질적인 응용 가능성을 보여주었다. 점 주사 방식의 초분광 이미징 기술에서는 긴 주사 시간과 짧은 획득 시간의 제약을 해결하기 위해 디지털 마이크로미터 장치와 파장 분산 장치를 결합한 효율적인 압축 센싱 기술을 개발하였고, 조명 변화를 보정하는 저차원 행렬 방법으로 측정 정확도를 향상시켰다. 선 주사 방식의 초분광 이미징 기술에서는 다중 센서를 활용해 넓은 관측 영역을 확보하였으며, 스마일 왜곡과 키스톤 왜곡을 보정하고, 저비용 접근성을 강화하여 실제적인 응용 가능성을 높였다. 스펙트럼 주사 방식의 초분광 이미징 기술에서는 다양한 파장 가변 시스템을 이용하여 일반적인 RGB 카메라보다 높은 스펙트럼 분해능 성능을 기록하고, 새로운 매질인 수은 할라이드 기반 음향 광학 가변 필터로 초분광 이미징 시스템을 구성하여 기존 스펙트럼 주사 방식보다 높은 스펙트럼 분해능과

높은 회절 효율을 기록하였다. 한편, 스냅샷 방식의 초분광 이미징 기술에서는 기존의 단일 센서 기반 시스템의 제한을 극복하고, 2차원 회절 격자와 메타표면 기반 필터를 통해 소형화와 경량화를 달성하였으며, 신호 대 잡음비와 스펙트럼 분해능을 향상시키는 새로운 설계 방법이 제안되었다.

최근 초분광 이미징 기술의 주요 이슈로는 소형화 및 저비용, 1,000채널 이상의 극초분광 이미징 기술 개발, 그리고 딥러닝을 포함한 머신러닝 기반의 실시간 데이터 분석 기술 개발이 주목 받고 있다. 이러한 기술적 요구는 초분광 이미징 시스템의 응용 범위를 환경 모니터링, 의료 진단, 스마트 팩토리 머신비전 등 다양한 산업 분야로 확장하고 있다. 딥러닝 기반 초분광 큐브의 실시간 분석 기술을 개발 중이며, 이를 기반으로 한 초분광 진단 시스템 및 제조용 머신비전 기술로의 활용 가능성을 전망하고 있다. 초분광 이미징 기술의 발전에도 불구하고 다음과 같은 한계점들이 여전히 존재하며, 이를 해결하기 위한 추가 연구가 필요하다. 첫 번째로, 압축 센싱을 통해 데이터를 축약하면 복원 과정이 복잡하며, 복원이 완벽하지 않을 경우 일부 데이터 손실이 발생할 수 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 복원 알고리즘의 최적화와 고급 보정 기술 개발이 필요하다. 두 번째로, 가시광 대역에 최적화된 기존 광학 소자는 넓은 파장 대역 확장을 위한 기술적 한계를 가지며, 파장 대비 비선형적인 분광 효율로 인해 균일한 해상도를 제공하기 어렵다는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 비선형 보정 알고리즘과 새로운 광학 소자 개발이 필요하다. 세 번째로, 시스템 내의 센서 정렬의 불완전성으로 인해 이미지 왜곡이 발생하며, 센서의 동기화 및 데이터 정렬 기술이 더욱 정밀하게 발전해야 한다. 마지막으로, 초분광 큐브는 대규모의 고차원 데이터로, 실시간 처리 및 분석이 어려운 한계가 있다. 딥러닝 및 머신러닝 기반의 효율적인 데이터 처리 알고리즘이 필요하며, 하드웨어 가속화 기술을 통한 분석 시간 단축이 요구된다.

현재, 초분광 이미징 기술은 환경 모니터링, 지형 분석, 위성 및 항공 탐사, 식품 품질 관리, 바이오 및 의료 진단 등 다양한 응용 분야에서 중요한 도구로 자리 잡고 있다. 다양한 방법의 초분광 이미징 기술 연구가 진행되고 있으나 여전히 해결해야 할 과제들이 남아 있으며, 이를 통해 초분광 이미징 기술의 범용성과 활용도를 더욱 확대할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구는 복잡한 복원 과정의 최적화, 넓은 파장 대역 확장을 위한 새로운 광학 소자 개발, 고속 실시간 데이터 분석 기술의 도입 등을 중심으로 진행될 것이다. 이러한 노력이 지속된다면 초분광 이미징 기술은 다양한 산업 및 과학적 응용에서 더욱 중요한 역할을 하게 될 것이다.

REFERENCES

1. Ojaghi, A., Fay, M. E., Lam, W. A., Robles, F. E., (2018), Ultraviolet hyperspectral interferometric microscopy, *Scientific Reports*, 8(1), 9913.

2. Wang, Q., He, H., Li, B., Lin, H., Zhang, Y., Zhang, J., Wang, Z., (2017), UV-Vis and ATR-FTIR spectroscopic investigations of postmortem interval based on the changes in rabbit plasma, *PLoS One*, 12(7), e0182161.

3. Fuchs, S., Rödel, C., Blinne, A., Zastrau, U., Wünsche, M., Hilbert, V., Glaser, L., Viehhaus, J., Frumker, E., Corkum, P., (2016), Nanometer resolution optical coherence tomography using broad bandwidth xuv and soft x-ray radiation, *Scientific Reports*, 6(1), 20658.

4. Shen, Z., D'Agui, H., Walden, L., Zhang, M., Yiu, T. M., Dixon, K., Nevill, P., Cross, A., Matangulu, M., Hu, Y., (2022), Miniaturised visible and near-infrared spectrometers for assessing soil health indicators in mine site rehabilitation, *Soil*, 8(2), 467-486.

5. Lu, G., Fei, B., (2014), Medical hyperspectral imaging: a review, *Journal of Biomedical Optics*, 19(1), 010901.

6. Bonanno, A. S., Griffiths, P. R., (1993), Short-wave near infrared spectra of organic liquids, *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 1(1), 13-23.

7. Siedliska, A., Baranowski, P., Zubik, M., Mazurek, W., Sosnowska, B., (2018), Detection of fungal infections in strawberry fruit by VNIR/SWIR hyperspectral imaging, *Postharvest Biology and Technology*, 139, 115-126.

8. Okada, K., Segawa, K., Hayashi, I., (1993), Removal of the vegetation effect from LANDSAT TM and GER imaging spectroradiometer data, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 48(6), 16-27.

9. Rogalski, A., Chrzanowski, K., (2014), Infrared devices and techniques (revision), *Metrology and Measurement Systems*, 21(4), 565-618.

10. Deutsch, E. R., Kotidis, P., Zhu, N., Goyal, A. K., Ye, J., Mazurenko, A., Norman, M., Zafiriou, K., Baier, M., Connors, R., (2014), Active and passive infrared spectroscopy for the detection of environmental threats, *Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies XI*, 20-29.

11. Felton, M., Gurton, K. P., Pezzaniti, J. L., Chenault, D. B., Roth, L. E., (2010), Measured comparison of the crossover periods for mid-and long-wave IR (MWIR and LWIR) polarimetric and conventional thermal imagery, *Optics express*, 18(15), 15704-15713.

12. Sun, X., Shu, P., (2011), An airborne thematic thermal infrared and electro-optical imaging system, *Proceedings of the International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011: Advances in Infrared Imaging and Applications*, 1281-1287.

13. Tseng, Y.-P., Bouzy, P., Stone, N., Pedersen, C., Tidemand-Lichtenberg, P., (2018), Long wavelength identification of microcalcifications in breast cancer tissue using a quantum cascade laser and upconversion detection, *Biomedical Vibrational Spectroscopy 2018: Advances in Research and Industry*, 29-35.

14. Bacon, C. M., (2006), Development of long wave infrared detectors for space astronomy, University of Rochester.

15. Lee, M., Kim, K., Min, G., Son, D., Kim, J., Kim, S., (2019), Recent trends of hyperspectral imaging technology, *Electronics and*

- Telecommunications Trends, 34(1), 86-97.
16. Krauz, L., (2023), Hyperspectral imaging in VIS-IR, Doctoral Thesis, Czech Technical University.
 17. Kalina Capdevila, A., (2019), Study of a preliminary value-cost model of earth observation (EO) satellites operating in very and low earth orbit (VLEO/LEO) for the detection of methane emission, Bachelor's Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
 18. Yokoya, N., Miyamura, N., and Iwasaki, A., (2010), Preprocessing of hyperspectral imagery with consideration of smile and keystone properties, In *Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Remote Sensing Technology, Techniques, and Applications III*, 73-81.
 19. Bakker, W., van der Werff, H., and van der Meer, F., (2019), Determining smile and keystone of lab hyperspectral line cameras, *Proceedings of the 10th Workshop on Hyperspectral Imaging and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing*, 1-5.
 20. Gao, L., Smith, R. T., (2015), Optical hyperspectral imaging in microscopy and spectroscopy-a review of data acquisition, *Journal of Biophotonics*, 8(6), 441-456.
 21. Uto, K., Seki, H., Saito, G., Kosugi, Y., Komatsu, T., (2016), Development of a low-cost hyperspectral whiskbroom imager using an optical fiber bundle, a swing mirror, and compact spectrometers, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(9), 3909-3925.
 22. Fowler, J. E., (2014), Compressive pushbroom and whiskbroom sensing for hyperspectral remote-sensing imaging, *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*, 684-688.
 23. Wendel, A., and Underwood, J., (2017), Illumination compensation in ground based hyperspectral imaging., *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 129, 162-178.
 24. Funatomi, T., Ogawa, T., Tanaka, K., Kubo, H., Caron, G., Mouaddib, E. M., Matsushita, Y., Mukaigawa, Y., (2022), Eliminating temporal illumination variations in whisk-broom hyperspectral imaging, *International Journal of Computer Vision*, 130(5), 1310-1324.
 25. Mlnhe, J. I., Jensen, J. R., (2000), Continuous piecewise geometric rectification for airborne multispectral scanner imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(2), 163-171.
 26. Breuer, M., and Albertz, J., (2000), Geometric correction of airborne whiskbroom scanner imagery using hybrid auxiliary data, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33, 93-100.
 27. Pope, P., Scarpace, F. L., (2000), Initial testing of a method to geographically register airborne scanner imagery through parametric modeling with image-to-image matching, *International Archives of Photogrammetry And Remote Sensing*, 33, 732-739.
 28. Breuer, M., Albertz, J., (1996), Geometric correction of airborne line-scanner imagery, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31, 19-23.
 29. Lee, C., Bethel, J., (2001), Georegistration of airborne hyperspectral image data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(7), 1347-1351.
 30. Li, J., Ma, L., Fan, Y., Wang, N., Duan, K., Han, Q., Zhang, X., Su, G., Li, C., Tang, L., (2021), An image stitching method for airborne wide-swath hyperspectral imaging system equipped with multiple imagers, *Remote Sensing*, 13(5), 1001.
 31. Al-Hourani, A., Balendhran, S., Walia, S., Hourani, T., (2023), Line scan hyperspectral imaging framework for open source low-cost platforms, *Remote Sensing*, 15(11), 2787.
 32. Qin, J., Kim, M. S., Chao, K., Chan, D. E., Delwiche, S. R., Cho, B. K., (2017), Line-scan hyperspectral imaging techniques for food safety and quality applications, *Applied Sciences*, 7(2), 125.
 33. Kim, M. S., Chen, Y. R., Cho, B. K., Chao, K., Yang, C. C., Lefcourt, A. M., Chan, D., (2007), Hyperspectral reflectance and fluorescence line-scan imaging for online defect and fecal contamination inspection of apples, *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 1, 151-159.
 34. Hsu, Y. J., Chen, C. C., Huang, C. H., Yeh, C. H., Liu, L. Y., Chen, S. Y., (2017), Line-scanning hyperspectral imaging based on structured illumination optical sectioning, *Biomedical Optics Express*, 8(6), 3005-3016.
 35. Miljković, V., Gajski, D., (2016), Adaptation of industrial hyperspectral line scanner for archaeological applications, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 343-345.
 36. Lee, H., Kim, M. S., Chao, K., Kang, S., Cho, B. K., (2017), Raman hyperspectral imaging for detection of watermelon seeds infected with *Acidovorax Citrulli*, *Sensors*, 17(10), 2188.
 37. Vasefi, F., MacKinnon, N., Farkas, D. L., (2016), Hyperspectral and multispectral imaging in dermatology, In: *Imaging in Dermatology*, Elsevier, 187-201.
 38. Manolakis, D., Rossacci, M., O'Donnell, E., D'Amico, F. M., (2006), Signal processing algorithms for staring single pixel hyperspectral sensors, *Imaging Spectrometry XI*, 266-277.
 39. Favreau, P. F., Hernandez, C., Heaster, T., Alvarez, D. F., Rich, T. C., Prabhat, P., Leavesley, S. J., (2014), Excitation-scanning hyperspectral imaging microscope, *Journal of Biomedical Optics*, 19(4), 046010-046010.
 40. Gat, N., (2000), Imaging spectroscopy using tunable filters: a review, *Wavelet Applications VII*, 4056, 50-64.
 41. Ravikanth, L., Jayas, D. S., White, N. D., Fields, P. G., Sun, D. W., (2017), Extraction of spectral information from hyperspectral data and application of hyperspectral imaging for food and agricultural products, *Food and Bioprocess Technology*, 10, 1-33.
 42. Zhang, C., Rosenberger, M., Breitbarth, A., Notni, G. (2016), A novel 3D multispectral vision system based on filter wheel cameras, *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques*, 267-272.

43. Brauers, J., Schulte, N., Aach, T., (2008), Multispectral filter-wheel cameras: geometric distortion model and compensation algorithms, *IEEE Transactions on Image Processing*, 17(12), 2368-2380.
44. Gunn, M., Langstaff, D. P., Barnes, D., (2011), Developments towards a filter wheel hyperspectral camera for planetary exploration, *EPSC-DPS Joint Meeting*, 397.
45. Yu, J., Zhao, J., Zhu, J., Cui, G., (2022), High spectral resolution imaging based on dual-camera system with filter wheel, *IEEE Access*, 10, 40119-40129.
46. Öhman, Y., (1938), A new monochromator, *Nature*, 141(3563), 291.
47. Leroy, J. L., (1980), Solc elements in Lyot-Öhman filters, *Journal of Optics*, 11(5), 293.
48. Stevenson, B. P., Kendall, W. B., Stellman, C. M., Olchowski, F. M., (2003), Phirst light: A liquid crystal tunable filter hyperspectral sensor, *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery IX*, 104-113.
49. Hegyi, A., Martini, J., (2015), Hyperspectral imaging with a liquid crystal polarization interferometer, *Optics Express*, 23(22), 28742-28754.
50. Wang, X., Zhang, Y., Ma, X., Xu, T., Arce, G. R., (2018), Compressive spectral imaging system based on liquid crystal tunable filter, *Optics express*, 26(19), 25226-25243.
51. Chang, I., (1976), Tunable acousto-optic filters: An overview, *Acousto-Optics: Device Development/Instrumentation/Applications*, 90, 12-22.
52. Voloshinov, V. B., (1992), Close to collinear acousto-optical interaction in teo2 single crystal, *Acousto-optics and Applications*, 162-176.
53. Sharma, B. D., (1996), Mercurous halides, *Struct Chem*, 7, 167-169.
54. Krauz, L., Páta, P., Bednář, J., Klíma, M., (2021), Quasi-collinear IR AOTF based on mercurous halide single crystals for spatio-spectral hyperspectral imaging, *Optics Express*, 29(9), 12813-12832.
55. Krauz, L., Páta, P., Bednář, J., Klíma, M., Janout, P., (2022), Broadband Wollaston prism with a large output beam separation based on mercurous halides, *Optics Express*, 30(26), 47388-47403.
56. Bowen, I. S., (1938), The image-slicer a device for reducing loss of light at slit of stellar spectrograph, *Astrophysical Journal*, 88, 113.
57. Weitzel, L., Krabbe, A., Kroker, H., Thatte, N., Tacconi-Garman, L. E., Cameron, M., Genzel, R., (1996), 3D: the next generation near-infrared imaging spectrometer, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 119(3), 531-546.
58. Vives, S., Prieto, E., Salaun, Y., Godefroy, P., (2008), New technological developments in integral field spectroscopy, *Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation*, 959-968.
59. Hagen, N., Kudenov, M. W., (2013), Review of snapshot spectral imaging technologies, *Optical Engineering*, 52(9), 090901.
60. Okamoto, T., Yamaguchi, I., (1991), Simultaneous acquisition of spectral image information, *Optics Letters*, 16(16), 1277-1279.
61. Johnson, W. R., Wilson, D. W., Fink, W., Humayun, M., Bearman, G., (2007), Snapshot hyperspectral imaging in ophthalmology, *Journal of Biomedical Optics*, 12(1), 014036.
62. Shogenji, R., Kitamura, Y., Yamada, K., Miyatake, S., Tanida, J., (2004), Multispectral imaging using compact compound optics, *Optics Express*, 12(8), 1643-1655.
63. McClung, A., Samudrala, S., Torfeh, M., Mansouree, M., Arbabi, A., (2020), Snapshot spectral imaging with parallel metasystems, *Science Advances*, 6(38), eabc7646.
64. Barnard, T. W., Crockett, M. I., Ivaldi, J. C., Lundberg, P. L., (1993), Design and evaluation of an echelle grating optical system for ICP-OES, *Analytical Chemistry*, 65(9), 1225-1230.
65. Baldry, I. K., Bland-Hawthorn, J., (2000), A tunable echelle imager, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 112(774), 1112.
66. Gao, L., Kester, R. T., Tkaczyk, T. S., (2009), Compact image slicing spectrometer (ISS) for hyperspectral fluorescence microscopy, *Optics Express*, 17(15), 12293-12308.
67. Bedard, N., Hagen, N., Gao, L., Tkaczyk, T. S., (2012), Image mapping spectrometry: calibration and characterization, *Optical Engineering*, 51(11), 111711.
68. Culshaw, B., (2005), The optical fibre Sagnac interferometer: an overview of its principles and applications, *Measurement Science and Technology*, 17(1), R1-R16.
69. Palmer, C., Loewen, E. G., (2005), *Diffraction grating handbook*, Newport Corporation.
70. Kudenov, M. W., Jungwirth, M. E., Dereniak, E. L., Gerhart, G. R., (2010), White-light Sagnac interferometer for snapshot multispectral imaging, *Applied Optics*, 49(21), 4067-4076.

**Seon Il Seo**

M. S. student in the 3D optical metrology laboratory of the Department of Photonic Engineering at Chosun University. His research areas are optical dimensional metrology, interferometry and ellipsometry. His current research focuses on the development of a Mueller matrix spectroscopic ellipsometer system for critical dimension measurements.
E-mail: ouj7379@naver.com

**Seongwook Jang**

M. S. student in the 3D optical metrology laboratory of the Department of Photonic Engineering at Chosun University. His research areas are optical dimensional metrology, interferometry and microscopy. His current research is lateral shearing interferometry for measuring surface figures of large optics.
E-mail: 991125tjd@naver.com

**Jisoo Oh**

M. S. student in the 3D optical metrology laboratory of the Department of Photonic Engineering at Chosun University. Her research areas are optical dimensional metrology, interferometry and chromatic confocal microscopy. Her current research focuses on the development of a point-based chromatic confocal system that enhances the difference between the focal lengths for each wavelength.
E-mail: ojs5364@naver.com

**Ki-Nam Joo**

Professor at Chosun University and his research areas are optical dimensional metrology, interferometry, microscopy and femtosecond pulse applications. He achieved Ph.D. at KAIST with the absolute distance measurement by using a femtosecond pulse laser and experienced industrial applications of optical dimensional metrology from TUDelft and Mitutoyo RCE.
E-mail: knjoo@chosun.ac.kr