

## 해조류 유래 바이오매스 안전성 확보를 위한 갯녹음 현상 분석 초분광영상 정보 시스템

김용석<sup>1</sup>, 장상목<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>동아대학교 디자인환경대학 조경학과  
49315 부산광역시 사하구 낙동대로 550번길  
<sup>2</sup>동아대학교 공과대학 화학공학과  
49315 부산광역시 사하구 낙동대로 550번길

(2024년 6월 13일 투고; 2024년 7월 2일 수정본 접수; 2024년 7월 2일 채택)

### Hyperspectral Imaging Information System for Analyzing the Urchin Barren Phenomenon to Ensure the Safety of Seaweed-Derived Biomass

Yong-Suk Kim<sup>1</sup> and Sang-Mok Chang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Landscape Architecture, College of Design and Environment, Dong-A University  
550 Nakdong-daero, Saha-gu, Busan 49315, Korea  
<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Dong-A University  
550 Nakdong-daero, Saha-gu, Busan 49315, Korea

(Received for review June 13, 2024; Revision received July 2, 2024; Accepted July 2, 2024)

#### 요 약

전국 연안에 많이 분포된 다양한 해조류에 기반한 바이오매스는 중요한 바다 생물 유기체이다. 해조류는 건강한 바다 생물체를 이루고 있는 요소이지만, 다양한 바다 환경의 변화로 인하여 백화현상(갯녹음)이 발생하고 있으며 그 피해 또한 증가하고 있다. 우리나라 연안 지역의 갯녹음 분포 및 확산에 대한 조사는 꾸준히 진행되고 있으며, 광범위한 지역을 신속하고 정확하게 분석할 수 있는 기술 중 하나가 초분광 영상 정보 시스템에 기반한 탐지 기술이다. 총설에서는 갯녹음에 대한 현황을 조사하는 최신 초분광 영상 기술과 이를 분류하는 기법(원리 및 전처리 기술, 보정 기술 등)에 대한 내용을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 초분광 영상을 제주 해안에 대한 갯녹음 분류기법에 대하여 제시하고, 갯녹음 현황 판정에 대해서 초기, 진행, 심화의 단계로 구분하였다. 그 결과 실험 대상에서 심화 지역이 약 17.5%의 비율이 되는 것으로 나타났으며, 이를 기반으로 다양한 유형별 관리 방안 및 복원 방법을 제시하는 데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

주제어 : 해조류, 바이오매스, 갯녹음, 초분광영상, 제주 해안

**Abstract :** Seaweeds are widely distributed along national coastlines around the world, and the biomass derived from them is an important marine biological organism. Seaweed is a crucial component of a healthy marine ecosystem. However, changes in marine environments have led to the occurrence of urchin barrens, and the damage caused by this phenomenon is steadily increasing. As a result, investigations into the distribution and spread of urchin barrens in the coastal areas of South Korea are being conducted regularly so efficient detection technologies are essential. One of the technologies that can swiftly and accurately analyze extensive areas is detection technology based on hyperspectral image information systems. This study aims to present the latest hyperspectral imaging technology for investigating the current status of urchin barrens and the methods for classifying this technology, including principles, preprocessing techniques, and correction methods. This study also proposes a classification technique for urchin barrens along the coast of Jeju Island that uses hyperspectral images and categorizes the urchin barrens into initial, intermediate, and advanced stages. The results showed that approximately 17.5% of the experimental areas were in the advanced stage. Based on this, various management and restoration methods tailored to different categories of urchin barren can be proposed.

**Keywords :** Seaweed, Biomass, Urchin barren, Hyperspectral imaging, Jeju coast

\*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: smjang@dau.ac.kr, Tel: +82-51-200-7726, Fax: +82-51-200-7728  
<https://doi.org/10.7464/ksct.2024.30.3.175> pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서 론

기후변화의 대표적인 현상인 수온 상승은 해조류의 생장에 영향을 미치며 해조류가 소실되는 갯녹음 현상이 원인으로 주목받고 있다. 갯녹음이란 일반적으로 연안에 서식하는 엽상 바닷말이 소실되고 무절 석회조류(Crustose coralline algae)가 암반 표면을 광범위하게 피복하면서 암반에 서식하던 해양생물의 종 다양성과 생체량이 급격히 감소하여 바다 암반이 황폐해지는 현상이다. 기존 갯녹음 현상 파악은 갯녹음 현상의 유무를 파악하는 조사와 정도를 파악하는 조사, 그리고 원인을 규명하는 조사로 분류하고 있다.

갯녹음 현상의 유무를 파악하는 조사는 조장 형성의 상황을 조사하는 것으로 갯녹음 현상의 유무를 판단하는 고전적인 방법이며, 시간과 정확도가 떨어지는 문제점이 있다. 근래에는 넓은 지역에 분포하고 있는 갯녹음 현상을 파악하기 위하여 위성영상, 항공사진, 음향 측심기 등을 활용한 조사기법들이 사용되고 있다.

본 연구에서 제시하고자 하는 초분광 영상정보는 공간정보에 분광 기술을 겸한 것으로 전자기파의 스펙트럼 밴드에 의한 2차원적인 영상정보를 큐브 분광 형태로 구성하여 대상의 상태나 구성, 특징, 변이 등을 추출할 수 있는 기술을 의미한다. 초분광 영상은 초기 원격탐사가 시작되면서 다중분광 스펙트럼 밴드를 가지고 지상의 물체들을 분류, 분석하는 기법에서 발전하여, 점차 밴드 수가 증가하고 장치 소형화 및 분석 기술의 발전으로 다양한 분야에 걸쳐 활용되고 있다.

초분광 관련 연구로는 연안해역 모니터링을 위한 CASI와 Hymap (Hyperspectral Mapper)과 같은 항공 센서 정보를 적용한 수심 측정과 호주지역의 산호 서식지 분류에 대한 연구가 진행된 바 있다[1]. 국내에서는 연안 및 하천 공간을 대상으로 CASI (Compact Airborne Spectrographic Image) 및 AISA (Airborne Imaging Spectrometer for Application)센서를 항공 초분광 센서에 탑재하여 활용 가능성을 연구하였다[2]. 이러한 연구들은 아직 초기 단계로서 향후 초분광영상의 정확도를 향상하여 보다 쉽게 적용할 수 있는 계기가 마련되고 있다.

최근 발표된 초분광 영상의 세계 시장은 2023년 211억 달러로 추정되고 있으며, 2030년까지 18.5%의 성장으로 약 695억 달러에 달할 것으로 예측된다[3]. 이러한 기술은 국방, 식생, 환경, 건설, 농업, 헬스케어, 자원탐사 및 머신러닝 등 다양한 산업 분야에 활용되고 있다. 특히 국방 및 헬스케어 분야가 전체 약 20%를 차지하고 있으며, 최근 환경탐사 분야에서 성장세가 두드러지게 높아지고 있다[4].

우리나라 갯녹음 현상이 가장 많이 나타나는 제주 연안을 중심으로 현황을 파악하고자 하였으며, 특히 중간대의 경계 지역에서 갯녹음 현상이 두드러지게 나타나는 특징이 있다. 그리고 해조류는 수온 상승의 영향을 크게 받기 때문에, 제주 연안 중간대를 갯녹음으로부터 생태적 연구대상으로 적절하다고 판

단하였다.

본 논문에서는 초분광영상 기술의 분류와 갯녹음 분류기법을 중심으로 논의하고자 하며, 제주 연안지역을 대상으로 갯녹음 분류 결과를 제시하고자 한다.

## 2. 초분광 영상 기술

### 2.1 초분광 영상 원리

초분광영상의 명칭은 영상 분광 측정(Imaging spectrometry)에서 발전되어서 표현되었다. 원격탐사 분야에서는 실험실이나 야외에서 다양한 지표물의 분광 반사 곡선을 측정하기 위하여 분광계를 사용하고 있다. 분광계가 하나의 물체에서 하나의 분광 곡선을 획득하는 데 그치는 반면에 초분광 영상은 영상을 구성하는 하나하나의 화소마다 분광 곡선을 얻을 수 있으며, 이를 이용하여 각 화소에 해당하는 지표물과 관련된 정보를 추출하는 데 사용될 수 있다. 즉, 초분광 센서 시스템은 목표물을 스캔하고 측정하는 전단 광학부와 받아들인 빛을 분광하는 분광부, 그리고 분광된 빛을 스펙트럼으로 바꿔주는 센서(검출)부로 구성되어 있다.

초분광 영상은 좁은 파장 폭을 지닌 수백 개의 밴드가 연속적으로 구성되어 있는 높은 분광해상도의 영상으로 정의되며, Figure 1(a)와 같이 영상의 밴드를 한 축으로 하는 하이퍼 큐브(Hypercube)의 형태로 표현할 수 있다. 또한 Figure 1(b)와 같이 화소별로 파장에 대한 밴드는 x축으로 그리고 각 밴드의 반사율을 y축으로 부여하면 분광반사 곡선을 획득할 수 있다.

초분광 영상은 분광 밴드가 많고(Many), 연속적이고(Continuous), 파장 폭이 좁은(Narrow) 세 가지 특징으로 정의될 수 있다. 초분광영상은 밴드 폭이 넓고 불연속적인 몇 개의 밴드로 구성된 다중분광(Multispectral) 영상에보다 지표에 대한 완전한 분광 반사 곡선을 획득할 수 있다는 장점을 갖고 있다[5].

### 2.2 초분광 영상의 원리

#### 2.2.1 분광센서

분광(分光)이란 빛이 파장의 차이에 따라서 여러 가지 색의

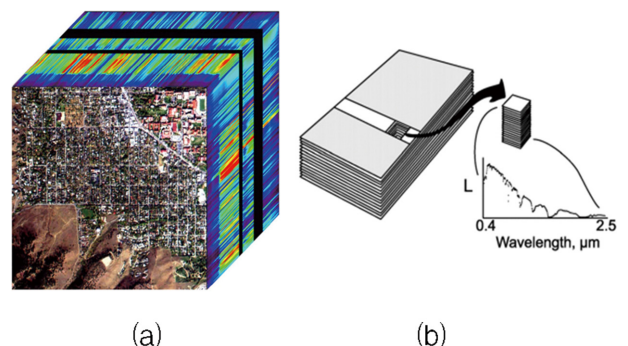
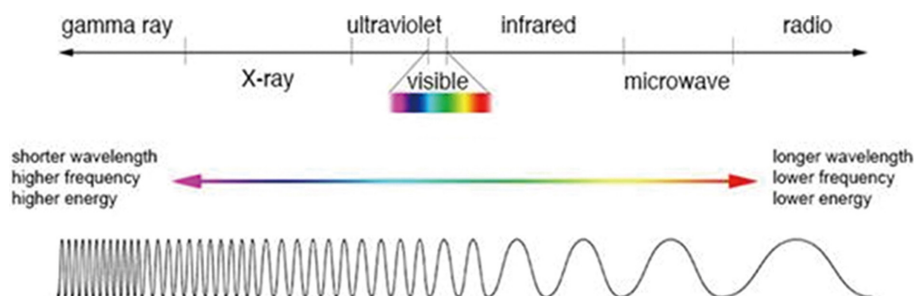


Figure 1. Concept of hyperspectral imaging[6].

**Table 1.** Differences in spectral resolution for each image

	Panchromatic image	Multispectral imaging	Hyperspectral imaging
Number of bands	1	< 10	> 100
Band width	About 600 nm	About 100 ~ 200 nm	About 1 ~ 10 nm
Band continuity	-	Discontinuity	Continuity
Spatial resolution	cm grade	10 ~ 1,000 m grade	1 ~ 100 m grade
Flagship sensor	IKONOS	Landsat ETM+, Worldview-2	AVIRIS, Hyperion



**Figure 2.** Classification of electromagnetic energy according to wavelength[8].

따로 나누어지는 일을 통칭해서 말하며, 광학 분야에서 분광은 파장( $\lambda$ )에 따른 빛과 물질 간의 상호작용을 연구하는 것을 말한다. 지난 100여 년 동안 화학, 생물학, 천문학 등에서 대상 물체의 특성을 구명하기 위한 수단으로 분광계(Spectrometer, Spectro-radiometer)를 사용해 왔으며, 이러한 빛의 반사 특성을 이용하는 연구를 총괄하는 분야를 분광학(Spectroscopy)이라고 한다[7].

광학 영상에 기록되는 전자기 에너지는 에너지원→대기→지표→대기→센서의 이동 경로를 통해 기록되며, 이러한 전자기 복사에너지의 각 경로에 대한 원리, 상호작용 및 왜곡을 이해함으로써, 분광 영상을 이해하고 처리할 수 있다(Table 1).

원격탐사 분야에서 다양한 지표물의 분광 반사 특성을 측정하고 분석하기 위해 분광계를 사용하고 있으며, 영상과의 대응을 통해 다양한 지표물의 특성을 확인할 수 있게 되었다. 그중에서도 초분광 원격탐사(Hyperspectral remote sensing)는 분광계의 특성을 가장 잘 표현한 탐사 분야로 활용도가 매우 높다.

### 2.2.2 파장영역(Wavelength)

분광 영상에 기록되는 광학 에너지는 태양에너지, 지구 복사 에너지, 센서 방사에너지로 구분할 수 있으므로 영상에 기록되는 에너지의 근원을 태양과 지구, 그리고 센서로 구분한다. 일반적으로 파장영역은 맨눈으로 색을 구분할 수 있는 가시광선 영역과 구분이 되지 않는 자외선, 적외선 영역이 있다. 이 중, 광학 영상에서 물질의 구분을 위해 사용되는 영역은 크게 가시광선 영역과 적외선 영역이다. 이를 세분화하면 가시광선 영역은 청색광 영역(400 ~ 500 nm)과 녹색광 영역(500 ~ 600 nm), 적색광 영역(600 ~ 700 nm)으로 나누어지고, 적외선 영역은 근적외선(700 ~ 1,300 nm), 중적외선(1,300 ~ 3,000 nm),

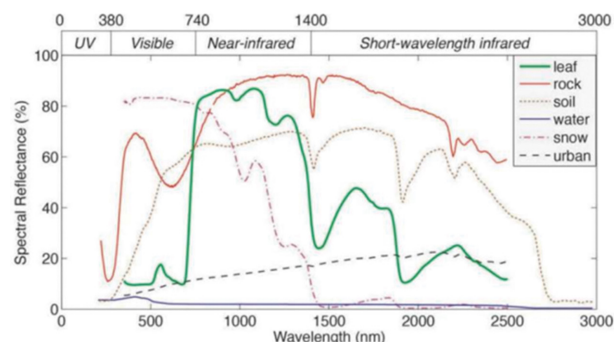
열적외선(3,000 nm ~ 1 mm) 등으로 나누어진다(Figure 2).

### 2.2.3 분광해상도

분광해상도는 영상이 가지고 있는 밴드 수, 밴드폭등을 의미하며, 분광해상도가 높을수록 지표물의 종류, 특성, 상태 등을 파악하는데 훨씬 유용하다. 미세한 분광반사 특성의 차이(분광 반사 곡선)가 유사한 물질을 구별할 수 있는 가능성이 높아진다. 분광해상도에 따라 일반적으로 1개 밴드의 흑백 영상(Panchromatic image), 10개 미만의 밴드를 갖는 다중분광영상(Multi-spectral image), 수십 개 또는 수백 개의 밴드를 포함하는 초분광영상(Hyperspectral image)으로 구분할 수 있다.

### 2.2.4 분광 반사 곡선(Spectral reflectance curve)

태양에너지가 지표면에 반사 또는 복사되어 센서에 도달하여 기록되는 에너지는 지표면을 구성하고 있는 다양한 물체에 따라 다른 특성을 가지며 기록된다. 지표면의 모든 물질은 다



**Figure 3.** Unique spectral reflection curves of various ground objects.

양한 화학적 구성을 하고 있으며, 각각의 화학적 구성요소는 특정 파장에 대한 고유의 흡수, 투과, 반사 특성이 있다. 파장에 따른 물질의 반사 특성을 분광반사율(Spectral reflectance)이라고 하며, 이것은 물질의 구성성분, 구조, 기하학적 위치 등에 의해 다른 특성을 나타낸다.

Figure 3과 같이 수채와 식생, 토양에서 파장영역마다 각기 다른 분광 반사 특성이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 뚜렷하게 구분이 가능하다. 다양한 지표물의 반사 특성을 이해하고 확인할 수 있으면, 분광 라이브러리 구축, 영상처리분석 등 물질에 대한 해석이 가능하다.

### 2.2.5 영상화 기술

화소 당 수백 개의 밴드로 구성된 초분광영상은 불필요한 밴드 정보와 밴드마다 포함된 잡음의 효과로 인해 데이터의 용량이 커지고, 밴드 간의 상관성도 매우 높게 나타난다. 따라서 초분광영상의 영상 처리 및 분석을 위해서는 대용량의 원 영상을 사용하는 것은 적절하지 않으며 잡음의 효과 또한 줄여야만 한다. 초분광영상의 밴드를 줄이는 방법은 일반적으로 압축 기술 또는 차원축소기법이라고 한다.

차원을 축소하여 초분광 자료로부터 적은 용량의 수치적 특징만을 갖는 자료를 표적 탐지나 분류연구에 사용하게 되면 여러 가지 장점이 있게 된다. 먼저, 자료의 용량이 감소함으로써 자료처리에 걸리는 시간과 메모리 용량을 절감할 수 있다. 또한 영상분석에 적합한 자료만을 사용함으로써 분석 정확도를 향상할 수 있게 된다. 이처럼 초분광 자료로부터 분석에 적합한 수치적 특징을 추출하는 과정을 Feature extraction이라고 한다.

대표적으로 사용되는 차원 축소기법으로는 PCA 변환과 MNF 변환기법이 있다. PCA (Principle Component Analysis) 변환기법은 원격탐사 영상처리의 초기부터 널리 사용되어 온 변환기법으로 영상처리를 위해 영상 내 존재하는 정보량을 효과적으로 압축하는 기법이다. 영상의 전체 정보량 중 가장 많은 정보량을 포함하도록 주성분 벡터(Principle component vector-PC vector)를 생성하게 되며 최초의 고유벡터(Eigen vector)가 된다. 최초의 고유벡터는 첫 번째 주성분을 만들고 가장 많은 정보량을 포함하게 되며, 주성분마다 포함하게 되는 정보량을 고윳값(Eigenvalue)이라 한다. 그 이후, 최초의 고유벡터와 직교벡터를 생성하여 2번째 주성분을 생성하게 되며 영상의 밴드 수만큼의 주성분이 생성된다. 일반적으로 고윳값의 합이 전체 고윳값의 90% 이상이 되는 주성분 밴드만을 선정하여 영상처리를 위해 활용한다. 하지만 영상 내 밴드에 필연적으로 포함되는 잡음과 대기흡수 밴드로 인해 생기는 노이즈의 영향이 큰 초분광영상의 압축 방법으로는 적절하지 않다.

### 2.3 초분광영상의 해역 반사신호 구성

초분광영상을 포함한 광학 영상 및 센서는 태양광을 에너지

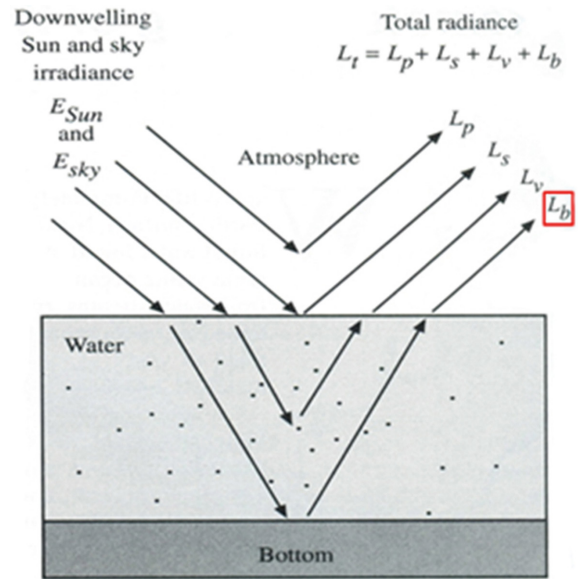


Figure 4. Composition of signals recorded by optical sensors observing the ocean[9].

원으로 이용하며, 입사된 태양에너지가 지구에서 반사되는 에너지를 기록한다. 해양은 육상과 다르게 해저면 위에 물이 존재하는 3차원적인 구조로 되어 있다. 따라서 해양을 관측한 광학센서에 기록되는 반사 에너지(신호)는 Figure 4와 같이 대기에서 산란한 신호, 수면에서 반사된 신호, 수중에서 반사된 신호, 그리고 해저 면에서 반사된 신호로 구성된다. 여기에서 연안해역 재질 분류는 해저 면에서 반사된 신호를 이용한다.

#### 2.3.1 해수의 광학적 흡수 특성

물은 전자기에너지를 흡수하는 물질로, 일반적으로 지구상에서 낮은 반사도를 갖는 물질 중 하나이다. 물에 의한 전자기 에너지의 흡수도는 수층의 두께가 두꺼울수록 기하급수적으로 증가한다. 즉 수심이 얇은 곳에서는 해저 면에 도달하는 태양광량이 높지만, 수심이 깊어질수록 해저 면에 도달하는 태양광량이 기하급수적으로 감소한다. 광학센서의 관점에서 수심이 깊어질수록 해수에서 반사되어 센서에 도달하는 전체 에너지 중 해저 면에서 반사되는 에너지의 비율이 기하급수적으로 감소하는 것이다. 이러한 원리는 Beer의 법칙에 의하여 Equation (1)로 정리할 수 있다.

$$L(z) = L(0) \exp(-Kz) \quad (1)$$

(여기서, K는 흡수계수, z는 수심)

Zoffoli et al.[10]은 매우 맑은 해수(case-1 water)의 수심에 의한 흡수 특성을 파장별로 측정하였고, 다양한 특성(클로로필-a, 탁도)을 갖는 해수를 대상으로 수심에 의한 흡수 특성을 측정하였다. Figure 5는 Zoffoli의 연구에서 측정한 해수의 광학적 흡수 특성을 보여주고 있다. 수심이 깊어질수록 지수의 형태를 보이고 입사광량이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 남태평

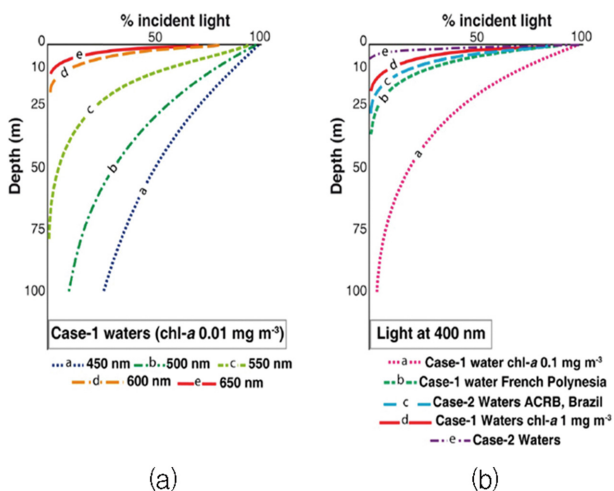


Figure 5. Optical absorption characteristics of seawater[10].

양과 같이 매우 깨끗하고 클로로필-a의 농도가 낮은 해수의 경우 청색광(450 ~ 500 nm)의 경우 100 m 이상의 깊은 수심까지 입사광이 도달하고, 적색광(장파장)으로 갈수록 흡수율이 높아 입사광의 도달 수심이 얕아지는 것을 알 수 있다(Figure 5(a)). 또한 연안과 같이 탁도와 클로로필-a의 농도가 높은 탁한 해수(case-2 water)의 경우 case-1 water에 비해 입사광의 도달 수심이 매우 얇게 나타나 10 ~ 20 m 정도에서 해저 면까지 도달하는 입사광량이 0%로 떨어진다(Figure 5(b)).

2.3.2 해저 반사 신호 분석을 위한 보정 원리

항공 또는 위성 광학센서를 이용하여 해저 면을 관측할 때

센서에 관측되는 신호는 대기에서 산란한 신호, 수면에서 반사된 신호, 그리고 수중에서 반사된 신호, 그리고 수심이 얇은 경우 해저 면에서 반사된 신호로 구성되어 있다[11]. 해저 면에서 반사된 신호를 분석하기 위해서는 대기, 수면, 수중에서 반사된 신호를 제거(보정)하는 과정이 필요하다. 따라서 본 과업에서는 대기보정, 수면 반사 보정, 수심에 의한 반사율 변이를 보정함으로써 수중과 해저 면에서 반사된 신호를 추출하는 보정 과정을 거친다.

3. 초분광영상의 전처리 기술

초분광영상을 취득하기 위한 플랫폼으로는 인공위성이 있으나 위성에 탑재된 초분광 센서의 공간 및 분광해상도에서 제한적이며 기상 상황에 따라 영상 촬영이 주기적으로 이루어지기 어렵고 영상의 활용을 위해서는 보정작업이 필요하기 때문에 이를 대체하기 위해 항공기에 탑재가 가능한 초분광 센서가 개발되어 이를 이용한 연구들이 수행되고 있다. 항공기 기반의 초분광 센서는 높은 공간 및 분광해상도를 가짐에 따라 지표물의 고유 분광스펙트럼을 자세하게 취득할 수 있어 다양한 분야에서 정밀한 표적탐지, 토지피복분류 등의 연구들이 수행되고 있다. 그러나 항공기 기반의 초분광영상을 활용하여 소규모 지역에 대해 주기적인 모니터링에 있어서는 비효율적인 측면과 바람의 세기, 구름, 태양 고도각 등의 환경적 요인과 더불어 대상지에 따라 비행 및 촬영 승인의 행정적인 절차가 필요하여 때로는 항공기를 이용하는 것은 효율적이지 않은 측면이 있다. 이에 따라 최근 드론(Drone) 또는 무인기(Unmanned

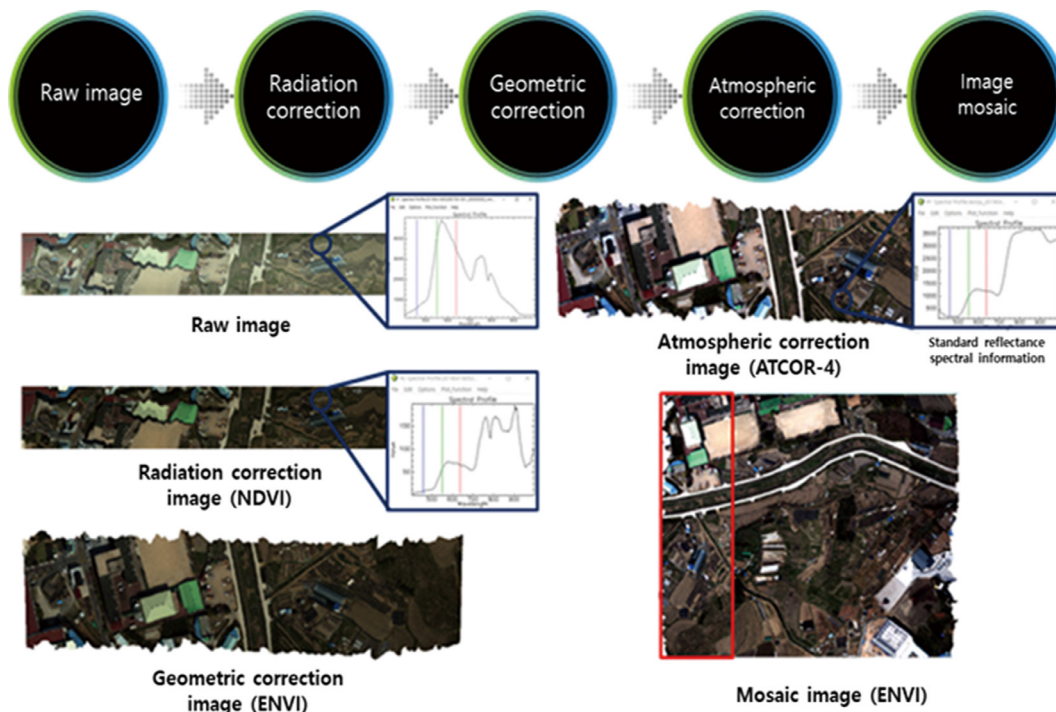


Figure 6. Preprocessing process of hyperspectral imaging.

Aerial Vehicle, UAV) 플랫폼의 도입과 더불어 초소형 초분광 센서가 개발되어 이를 활용한 연구가 이루어지고 있다.

드론 기반의 초분광영상은 대체로 비행고도가 100 ~ 300 m 이하의 저고도에 획득되므로 인공위성과 항공기에서 획득되는 초분광영상에 비해 전처리 과정 중 대기보정의 중요성이 낮아졌으며, 높은 공간해상도의 초분광영상을 적재적소에 획득이 가능하다. 이런 장점에 의해 기존의 인공위성과 항공기로부터 획득된 초분광영상을 활용하여 산호초, 해조류, 모래, 암석 분류 및 산호초와 해조류와 같은 해양 식생의 건강 모니터링 방법을 드론 초분광영상에 적용하기 위한 연구들이 활발하게 수행되고 있다.

### 3.1 전처리 과정

초분광영상의 전처리는 방사 보정, 기하보정, 대기보정, 영상 모자이크 순으로 구성된다(Figure 6). 해수면을 대상으로 한 초분광영상 전처리는 수면의 불규칙한 형태에 의한 수면 반사 보정과 해수면과 해저 면의 반사율을 분리하는 수심 보정이 필요하다.

### 3.2 방사 및 기하보정

방사 보정은 초분광 시스템에 의해 측정된 수치를 방사량과 같은 적절한 물리적 단위로 전환하는 일련의 과정을 말하며, 지표면에서 방사되는 에너지를 지표면과 감지기 간의 기하학적인 관계, 감지기의 반응 특성 등에 의하여 방사치의 왜곡을 보정하는 단계이다. 연구에서는 Corning 사의 Shark 초분광 센서는 초분광영상 획득 시에 방사 보정된 자료 형태의 영상이 획득이 가능한 장점이 있다.

기하보정은 영상의 기하 오차를 보정하는 단계로서 불규칙한 비행체의 위치 및 자세로 인해 영상에 나타나는 위치오차를 소거하여 기하학적 일체성을 갖도록 보정하는 단계이다. 초분광영상은 취득과 동시에 함께 취득된 위치/자세 데이터인 내

비게이션 파일을 이용하여 ENVI 소프트웨어의 Georeference from IGM 도구를 이용하여 지오레퍼런싱을 통한 기하보정 단계를 수행한다(Table 2).

### 3.3 대기보정

초분광 영상의 대기의 흡수 및 산란, 그리고 지형에 의한 감쇠를 보정하기 위한 대기보정 기법은 목적에 따라 절대 복사보정(Absolute radiometric correction)과 상대 복사보정(Relative radiometric correction)으로 나눌 수 있다[12]. 절대 복사보정의 목적은 영상 화소값을 비율 표면 반사도(Scaled surface reflectance)로 변환하는 것이며, 상대 복사보정은 영상 내의 밴드들 또는 특정 표준 영상에 맞춰 정규화하는 것이다. 절대 복사보정 기법에는 기본적인 대기상태의 정보를 알거나 대기흡수 밴드가 영상에 있을 때 사용이 가능한 대기복사 전달에 기초한 대기보정 알고리즘과 현장의 분광반사율 측정값을 이용한 대리 복사보정이 있다. 대표적인 대기복사 보정의 기법인 경험적 선형 보정은 초분광 영상의 화소값과 지상 분광계로 측정된 반사율 사이의 밴드별 선형 관계를 파악하고 이로부터 1차 선형 방정식을 구성하여 전체 영상에 적용하는 기법이다. 초분광영상에 적용이 가능한 대기복사 전달에 기초한 대기보정 알고리즘은 대표적으로 ACORN, QUAC, FLAASH, ATCOR 등이 있으며, 본 연구에서는 초분광 센서의 사양을 별도로 입력하여 사용할 수 있는 Modtran-5 기반의 ATCOR-4 (Atmospheric & Topographic Correction for wide FOV airborne optical scanner data)를 적용하였다. ACTOR-4 처리 과정에서는 초분광 영상으로부터 725 nm, 825 nm 파장에서 수증기와 760 nm 파장에서 O<sub>2</sub>에 의한 태양복사 에너지의 흡수를 직접 측정된 자료와 태양의 천정 각과 방위각, 가시도 등의 기상청의 지상 관측자료, 그리고 영상의 경위도, 취득 시각, 취득 고도 등을 입력하여 반사율 영상을 생성하도록 하였다.

#### 3.3.1 경험적 대기보정


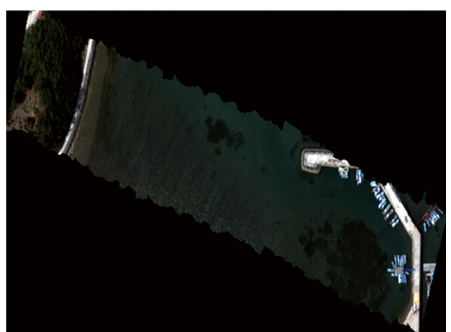
경험적 대기보정을 위한 복사보정에서 화소값과 센서에 도달하는 복사에너지 값의 관계는 Equation (2)와 Figure 7에서와 같이 간단한 1차 선형 방정식으로 표현할 수 있다. Equation (2)에서는 센서 실험을 통해 도출된 C1(gain)과 C2(offset)의 값을 이용하여, 영상의 화소 값과 센서에 기록되는 복사에너지 값의 관계를 추정할 수 있다.

$$L = C1 \times DN \times C2 \tag{2}$$

여기서, L은 센서에 기록되는 복사에너지 값, DN은 영상에 나타는 화소값, C1은 gain 계수, C2는 offset 계수

대기보정은 복사보정과 달리, 센서 측정 당시의 대기 상태에 따라 상이한 보정 값이 요구됨에 따라 정확한 보정이 어려운

**Table 2.** Spectral raw image and geometrically corrected image

Raw image	
Geometrically corrected image	

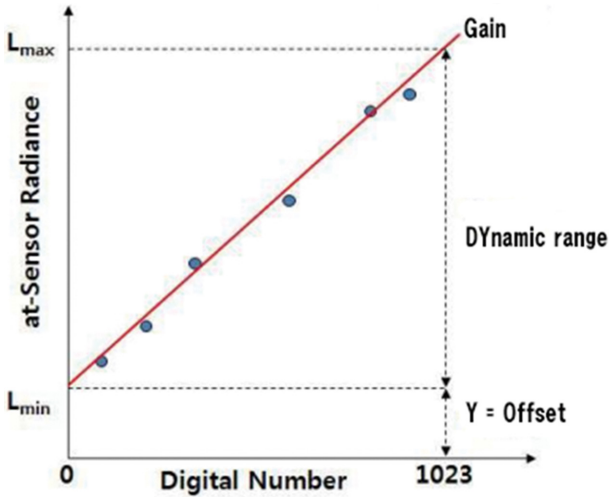


Figure 7. Relationship between pixel value and radiant energy value reaching the sensor.

실정이다. 원격탐사 기법에서 다중 시기 영상을 이용하여 정량적인 분석을 하기 위해 필요한 지표면 반사율 정보는 센서와 대상 사이의 대기에 의한 영향을 크게 받음에 따라 정밀한 오차 제거가 필수적이고 이를 위한 다양한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

연구에서 적용한 대기보정 방법은 대리보정(Vicarious calibration)으로, 센서 측정과 동일한 시각에 지상에서 측정된 분광 값을 이용하여 대상의 물리량을 측정하는 기법이다. 대리보정은 균질한 지표면을 대상으로 영상 촬영 시점의 반사율과 실제 영상에서의 화소값이나 복사량을 비교하여 둘 사이의 관계를 정의하고 이를 이용하여 영상을 보정한다.

3.3.2 ATCOR-4

연구에서 활용하는 대기보정 S/W인 ATCOR-4가 사용하는 복사전달 모델은 MODTRAN 코드 기반으로 좁은 스펙트럼 대역에 대한 대기 복사 전달 코드를 모형화할 수 있다는 장점이 있다. ATCOR-4를 활용한 초분광영상의 대기보정 절차 및 결과 영상은 Figure 8과 9와 같다.

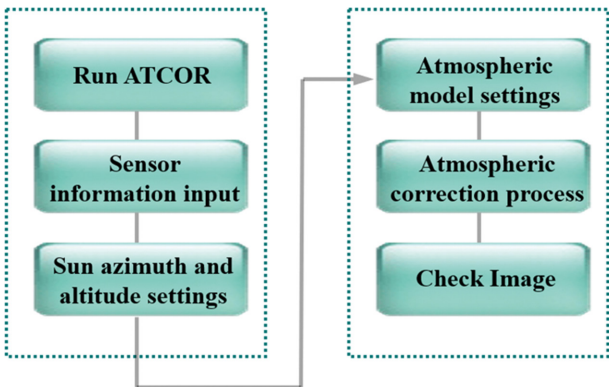


Figure 8. Atmospheric correction procedure for hyperspectral images.

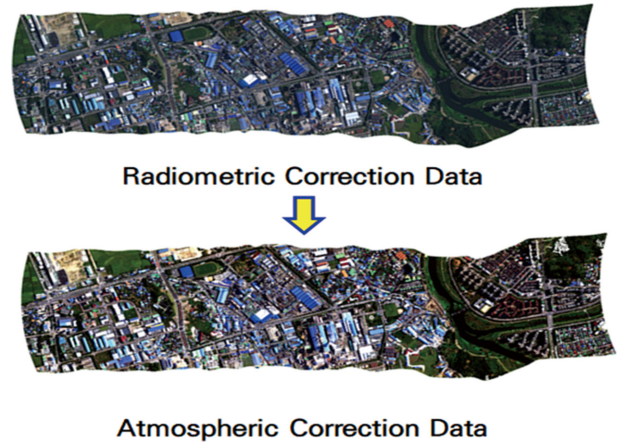


Figure 9. Data processing results.

3.4 수면 반사(sun-glint) 보정

수면 위에서 해양을 관측할 때 태양광이 수면에서 반사되어 반짝이는 거울반사(sun-glint) 현상을 쉽게 볼 수 있다[13]. 이 현상은 수중 또는 해저 면에서 반사된 신호가 아닌 수면에서 반사된 신호로 해양을 분석하는 데 있어 왜곡을 발생시킬 수 있다. 따라서 수면 반사를 보정함으로써 순수한 수출복사량 또는 수채 반사율을 추정할 필요가 있다. Headly et al.[14]는 근적외선 파장에서 수채의 반사율이 0 또는 최솟값이라는 이론적인 가정하에 Equation (3)을 제안하였다. 즉, Figure 10과 같이 순수한 수채의 반사율은 해저의 반사율이 영향을 미치지 않는 매우 깊은 지역에서 나타나는 최소 반사율이고, 그보다 높은 반사율은 수면 반사에 의한 것이라고 할 수 있다. 따라서 각 화소에서 순수한 수채의 반사율과의 차를 수면 반사율로 보고 이를 제거하는 원리이다.

$$R'_i = R_i - b_1(R_{NIR} - Min_{NIR}) \tag{3}$$

3.5 수심 보정

Lyzenga[9]는 Beer의 법칙을 기반으로 수채 기동(수심) 및 해저 면의 반사율과 수채 반사율 간의 관계를 Equation (4)와 같이 정의하였다. 수면에서 관측하는 반사율은 해저 면의 반사도와 순수한 수채 기동의 합으로 수심에 따라 지수 형태로 감소한다.

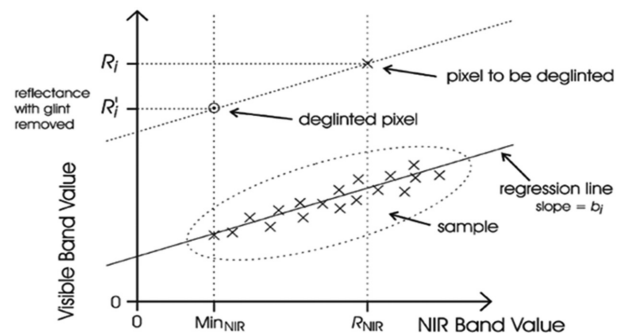


Figure 10. Principle of sun-glint correction[14].

$$R_w = (A_d - R_\infty) \exp(-gz) + R_\infty \quad (4)$$

여기서,  $A_d$ 는 수심 albedo,  $g$ 는 확산 감소계수,  $R_w$ 는 수채반사율,  $R_\infty$ 는 해저 수채 반사율

따라서 수채 기둥의 반사율이 좁은 해역에서 일정하다고 가정할 경우 수심에 의한 반사율의 감소량을 파악하기 위한 실험적 모델을 구축한다. 연구에서는 수면 반사 보정까지 완료된 초분광영상으로부터 수심 1 m 간격의 수채반사율( $R_w$ )을 추출한 뒤 지수(Exponential) 형태의 실험적 모델을 Figure 11과 같이 구축하였다.

그 후, 실험적 모델에서 나타나는 수심에 의한 반사율 감소량에 대한 보정을 실시하면 일정한 수심 또는 수면 바로 아래에서의 해저면 반사율을 추정할 수 있다. Figure 12는 수심에 의한 반사율 변화를 보정하기 위한 모델(수심별 반사율 보정량)을 나타내었다. 좁은 해역에서 수심에 의한 반사율 변화가 일정하다고 가정하고 이 보정 모델을 영상 전체에 적용함으로써 영상 각 화소에 대한 해저면 반사율을 추정하게 된다.

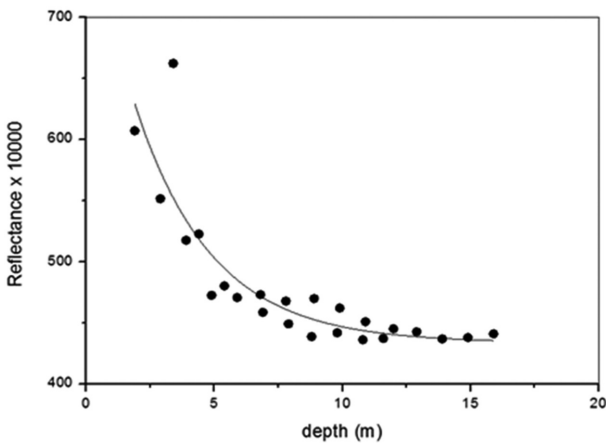


Figure 11. Principle of sleep reflex correction.

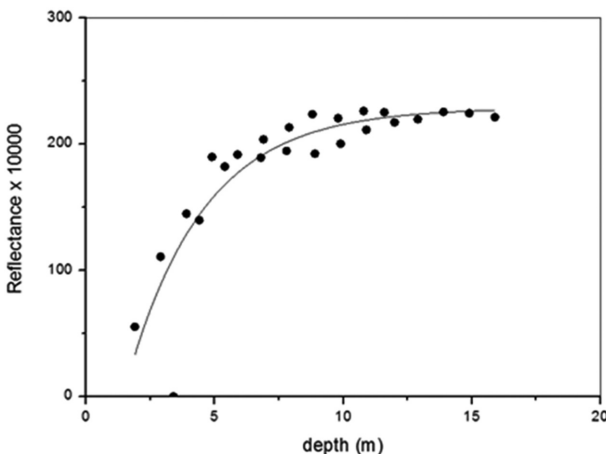


Figure 12. Model for correcting reflectance change due to water depth.

## 4. 초분광영상을 이용한 갯녹음 분류기법

### 4.1 탐지 기술

표적탐지 알고리즘은 분광반사율을 이용하는 알고리즘과 분광반사율과 형태학적 특성을 동시에 이용하는 알고리즘으로 나눌 수 있다. 분광반사율을 이용하는 알고리즘은 다시 분광학적 거리 측정법(Spectral distance measure), 2차 통겅값 기반 측정법(2nd order statistics-based measure or stochastic measure), 분광 특징 정합법(Spectral feature matching)으로 나눌 수 있다. 분광학적 거리 측정법은 가장 기초적인 표적탐지 알고리즘으로, 이미 알려진 기본 분광 반사 곡선(Reference spectrum)과 각 화소의 분광반사율 차를 이용한다. 대표적인 알고리즘으로는 유클리드 거리(Euclidean distance: ED), 분광각 측정법(SAM) 등이 있다[26,27]. 2차 통겅값 기반 측정법은 영상(배경)의 공분산 또는 상관계수 행렬과 기준 분광 반사 곡선, 각 화소의 분광반사율 사이의 관계를 이용한다. 여기에는 마할라노비스 거리(Mahalanobis distance, MD), 정합필터(Matched filter, MF), 우도비(Likelihood ratio, LR) 등이 있다. 분광 특징 정합법은 기준 분광 반사 곡선과 각 화소의 분광 반사 곡선의 분광 특성(패턴)을 비교하며, 이진부호화(Binary encoding, BE), 분광 특징 정합(Spectral feature fitting, SFF) 등이 있다[28]. Table 3은 분광반사율을 기반으로 하는 기존 표적탐지와 분류 알고리즘의 종류를 분석하고, 초분광영상을 이용한 표적탐지 및 분류에 주로 사용되고 있는 대표적인 알고리즘과 그 수식을 제시하였다[29].

분광 거리 측정법은 기준 분광 반사 곡선(Reference spectrum)과 각 화소의 분광반사율의 차 또는 분광 각을 이용하는 기법으로, 수학적으로 간단하고 처리 속도가 빠르다는 장점을 가지고 있다.

Figure 13에서 유클리드 거리(ED)는 각 밴드에서의 화소 값( $t_n$ )과 기준 분광 반사 곡선의 반사율( $r_n$ )의 차의 합계를 거리로 산정한다. Tchebyshev Distance (TD)는 각 밴드의 차 중 최댓값을 거리로 산정하는 가장 기초적인 방법이다. 따라서 영상 또는 분광 반사 자료 획득 당시 광량 또는 기하 조건에 의해 반사율의 절댓값이 변할 경우, 두 알고리즘은 각 밴드에서의 차가 증가하여 표적의 탐지 가능성이 낮아진다[30]. 또한 입력

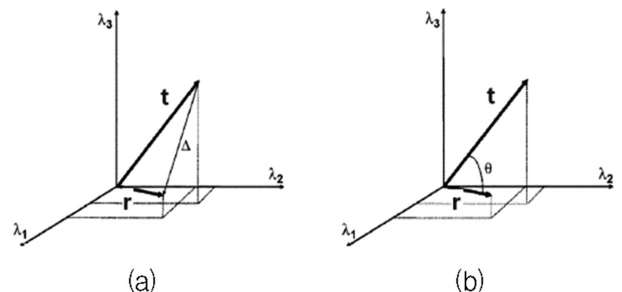


Figure 13. Principles of ED and SAM algorithms[32].



**Table 3.** Summary of target detection and classification algorithms[17-20]

Type	Algorithm	Formula
Spectral distance measure	Euclidean Distance (ED)	$\sum_{n=1}^N  t_n - r_n $ [14]
	Tchebyshev Distance (TD)	$\max_{1 \leq n \leq N} \{ t_n - r_n \}$ [15]
	Spectral Angle Mapper (SAM)	$\cos^{-1} \left( \frac{\sum_{n=1}^N t_n r_n}{\left( \sum_{n=1}^N t_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left( \sum_{n=1}^N r_n^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right)$ [16]
2nd order statistics-based measure (Stochastic measure)	Mahalanobis Distance (MD)	$(t - r)^T \Gamma^{-1} (t - r)$ [17]
	Matched Filter (MF)	$\frac{(t - \mu_b)^T \Gamma (r - \mu_b)}{(r - \mu_b)^T \Gamma (r - \mu_b)}$ [18]
	Adaptive Matched Filter (AMF)	$\frac{t^T \Gamma_t^{-1} r}{r^T \Gamma_t^{-1} r}$ [19]
	Constrained Energy Minimization (CEM)	$\frac{t^T R_t^{-1} r}{r^T R_t^{-1} r}$ [20]
	Likelihood Ratio (LR)	$-\frac{1}{2} \log_e \Gamma - \left[ \frac{1}{2} (t - r)^T \Gamma^{-1} (t - r) \right]$ [21]
	Adaptive Coherence Estimator (ACE)	$\frac{(r^T \Gamma^{-1} t)^2}{(r^T \Gamma^{-1} r)(t^T \Gamma^{-1} t)}$ [22]
Spectral feature matching	Binary Encoding (BE)	① If $t(n) \geq T$ then $h(n) = 1$ else $h(n) = 0$ ② Ratio of matched code $h(n) \geq \text{threshold}$ [23]
	Spectral Feature Fitting (SFF)	① Continuum removal ② Relative absorption band width and depth from continuum ③ Calculation of matching ratio and RMSE by least square fitting for ② [24]

where,  $t_n$  : reflectance of text pixels at band n  
 $r_n$  : reflectance of reference spectrum at band n  
 N : number of bands, t : test pixel spectrum  
 r : reference spectrum  
 $\mu_b$  : mean spectrum of background or image  
 $\Gamma$  : covariance matrix, R : correlation matrix  
 $h(n)$  : spectrum pattern (binary code)

영상과 기준분광 반사 곡선이 달라질 경우, 거리가 정규화된 형태로 나타나지 않아 임계값의 자동화가 어렵다는 단점을 가지고 있다.

분광각 측정법(SAM)은 분광 반사 곡선을 벡터로 가정하고 벡터 사이의 각(내적)을 이용하여 기준 분광 반사 곡선(r)과 화소 분광 반사 곡선(t)의 유사도를 측정하는 방법이다[31]. 따라서 분광각 측정법은 벡터의 길이는 반사율의 절댓값에 영향을 받지 않는다는 장점이 있다. 반면 잡음에 의해 벡터의 방향(각)이 쉽게 변하므로 분광적 변이 또는 잡음에 민감하다는 단점

을 갖고 있다.

2차 통계값 기반 측정법에 속하는 알고리즘들은 공통으로 2차 통계값인 공분산 또는 상관계수 행렬을 사용함으로써, 화소와 기준 분광 반사 곡선의 유사도 뿐만 아니라, 영상의 정보 또한 반영할 방법이다.

이 알고리즘들은 화소 값이 정규분포를 이룬다는 가정하에 수학적 복잡성이 감소하고, 대부분의 경우에 있어 대체로 높은 정확도를 보여주는 것으로 알려져 있다[33]. 그러나 2차 통계값 기반의 알고리즘의 경우 초분광영상의 많은 밴드로부터

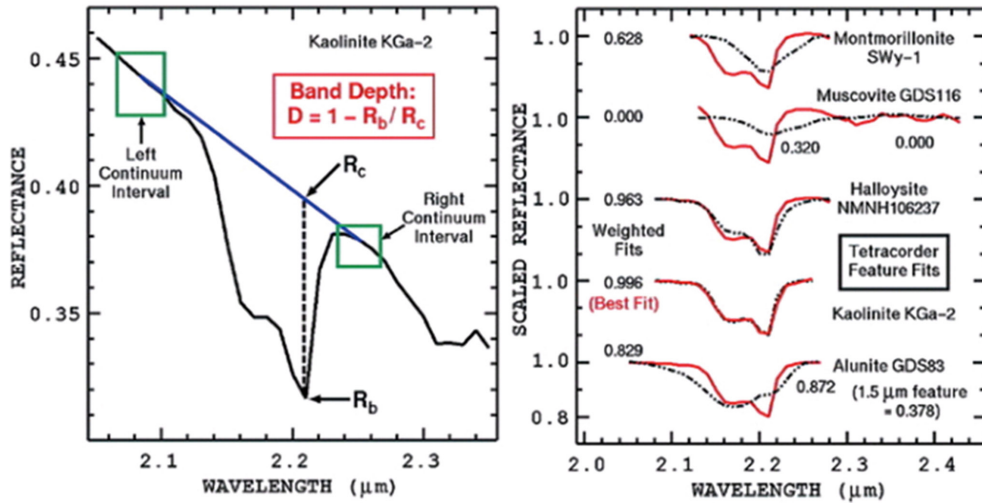


Figure 14. Principles of the SFF algorithm[34].

2차 통갯값을 계산하는 과정에서 오랜 시간이 걸린다는 단점을 갖고 있으며, 실제 화소 값이 정규분포를 이루고 있지 않은 경우도 빈번하다. 또한 대부분의 기존 표적탐지 알고리즘은 공분산 행렬을 사용하고 있는데, 2차 통갯값 중 공분산은 잡음에 민감한 것으로 알려져 있으나, 초분광영상은 좁은 밴드로 인해 다중분광영상에 비해 신호대비 잡음비가 낮다[34].

2차 통갯값 기반 알고리즘의 통갯값 계산을 위해서는 영상의 밴드 수보다 많은 훈련 집단이 필요하다. 그러나 초분광영상의 모든 밴드를 사용할 경우 이러한 조건을 만족시킬 수 없는 경우가 대부분이다[26]. 따라서 영상 전체를 배경으로 가정하여 통갯값을 계산하고 표적이나 배경의 평균을 사용하지 않는 변형된(Adaptive) 알고리즘이 제안되었다[33].

분광 특징 정합법은 분광 반사 곡선 간의 패턴 또는 흡수 특성의 일치 정도를 비교하는 방법으로 수학적 방법보다는 물리 화학적 특성을 이용한 방법에 해당한다. 특히 좁은 파장영역에

서 나타나는 분광 흡수 특성을 이용한 표적탐지가 가능하다는 장점을 가지고 있다[35]. 또한 2차 통갯값 기반의 알고리즘들에 비해 수학적으로 간단하고 처리 속도가 빠르다는 장점이 있다.

분광 특징 정합 알고리즘은 Figure 14와 같이 분광 반사 곡선의 흡수 특성을 연속체 제거(Continuum removal)함으로써 상대적인 깊이와 파장 폭을 나타내고, 최소제곱법에 의해 정합(Fitting)하는 방법이다[32]. SFF의 계산 결과는 0에서 1의 값을 갖는 정합률과 평균제곱근오차(RMSE) 두 가지로 나타나는 데, 일반적으로 정합률을 평균제곱근오차로 나눈 값을 사용함으로써 영상 또는 기준 분광 반사 곡선의 오류로 인한 영향을 최소화한다. 그러나 연속체 제거를 우선 해야 하므로 이에 따른 추가시간이 소요된다. 또한 흡수 특성을 이용하는 데 있어 전체 파장영역보다는 좁은 파장영역을 사용하였을 때 그 성능이 우수하므로, 사용자가 관심 파장영역을 사전에 정의해야 한다는 단점이 있다[35].

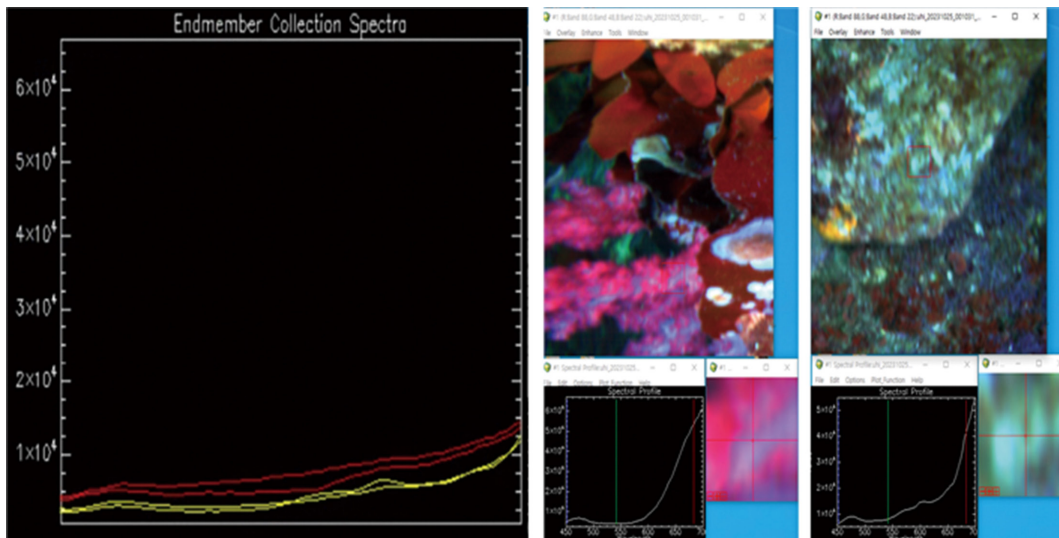


Figure 15. Construction of a spectroscopic library of dog recordings.

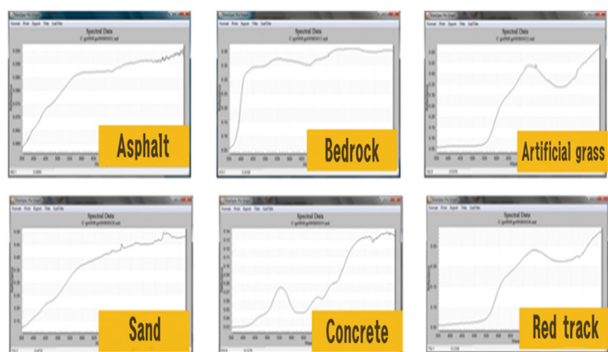


Figure 16. Spectroscopic library.

### 4.2 갯녹음 분류

본 연구에서는 이러한 내용을 바탕으로 제주 연안 지역을 중심으로 갯녹음 정상, 진행, 심화의 분광 라이브러리를 구축하여 갯녹음 지역을 분류하고자 하였다. 먼저, 물체의 반사 특성을 이용하여 현장 조사와 지상 분광계를 통해 확인한 갯녹음과 암반의 분광 라이브러리를 각각 구축한다(Figure 15). 구축된 분광 라이브러리는 영상 내 픽셀의 분광 반사 곡선과 분광 라이브러리의 일치도를 평가하는 표적탐지를 실시하기 위해 사용된다(Figure 16).

초분광영상은 기하보정과 복사보정이 완료된 영상으로 물질의 특성을 나타내기는 하지만 날짜마다 다르게 나타나는 대기 조건과 기상의 영향으로 반사 특성이 오차가 발생할 수 있다. 이러한 영향을 해결하기 위해 대기보정을 먼저 수행해야 하지만, 촬영 당시의 대기조건과 기상 상태를 확실하게 알 수 없어 날짜별로 분광 라이브러리를 구축하여 사용하였다. 암석은 시간이 지나도 그 특성이 변화되지 않기 때문에 각각의 분광 라이브러리와 현장 수중 촬영을 통해 획득한 갯녹음 확인 지역에 대해 영상을 각 날짜 당 갯녹음의 샘플 픽셀(10개)을 선정하여 날짜별로 표적탐지를 위한 분광 라이브러리를 구축하였다.

여기서는 촬영일자별 분석을 통해 분광 반사 곡선의 패턴이나 특성의 관계 탐지를 수행해야 한다. 분광반사율의 차이를 이용하는 SAM이나 ED 기법 대신 영상의 공분산 또는 상관계수 행렬을 이용하여 분광 반사 곡선과 반사 특성의 관계를 활용한 대표적인 2차 통갯값 기반 기법인 MF 기법을 사용하였다(식(5)).

$$\frac{(t - \mu_b)^T \Gamma (r - \mu_b)}{(r - \mu_b)^T \Gamma (r - \mu_b)} \quad (5)$$

여기서,  $t$ 는 샘플 스펙트럼,  $\mu_b$ 는 영상 스펙트럼  $\Gamma$ 는 공분산 행렬  $r$ 는 기준 스펙트럼

갯녹음에 대한 표적탐지를 진행하기 위해 MNF 변환된 초분광영상을 이용하였다. MF 기법 적용을 분광 라이브러리의 갯녹음과 모래의 분광 라이브러리를 이용하여 날짜별로 표적탐지를 실시하였다. MF 기법의 적용 결과는 Figure 17에 나타내



Figure 17. Extraction of urchin barren.

Table 4. Urchin barren area (Jeju Island)

Division		Rock	Normal	Progress	Deepening
Jeju Island	Area (km <sup>2</sup> )	164.7	100.4	35.4	28.9
	Ratio (%)		61.0	21.5	17.5

었다.

갯녹음 분류는 제주도 연안해역에 대해 결과를 제시하였으며, 분류된 갯녹음 지역에 대해 정상, 진행, 심화별로 면적 산출하였다. 면적 산출을 위해 분류된 암반 및 갯녹음 지역에 대해 벡터 자료로 추출하고 이를 이용하여 실제 암반 구성 분포도와 갯녹음 분포도를 구분하여 Table 4와 같이 면적의 비율이 제시되었다.

제주도 암반 추출 면적 약 164.7 km<sup>2</sup> 중 갯녹음 정상 면적은 100.4 km<sup>2</sup>로 61.0%로 나타났고, 진행 면적은 35.4 km<sup>2</sup>로 21.5%, 그리고 심화 면적은 28.9 km<sup>2</sup>로 17.5%를 차지하고 있음을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

2000년대 들어 심각해지고 있는 갯녹음 현상인 국내 연안해역의 갯녹음 현상을 최신 측량기술인 항공 초분광영상을 이용하여 제주 연안해역에 갯녹음에 대해 파악하고, 갯녹음의 분포 비율을 산정하였다.

본 연구를 통하여 초분광영상 기술에 대한 동향과 전처리 기술의 현황을 파악하였으며, MF 기법을 적용하여 갯녹음 현상에 대한 분류 결과를 제시하였다.

그 결과, 제주 연안 지역 암반 면적 약 164.7 km<sup>2</sup> 중 정상 면적은 100.4 km<sup>2</sup>, 진행 면적은 35.4 km<sup>2</sup>, 심화 면적은 28.9 km<sup>2</sup>로 갯녹음이 약 39.0% 분포하는 것을 확인하였다. 기존 잠수조사 방법은 시간과 경비가 많이 소요되며, 넓은 지역을 파악하기에는 한계가 있다. 이에 반해 최신 초분광영상 자료를 적

용하여 갯녹음 현상을 분류한 결과 광역별로 빠르게 조사할 수 있는 이점과 함께 갯녹음 발생에 대한 모니터링 및 관리 방법에 도움이 될 것으로 사료된다.

## 감 사

이 성과는 정부(환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 녹색복원 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

## References

1. Fearn, P. R. C., Klonowski, R. C., Babcock, P., and Phillips, J., "Shallow Water Substrate Mapping using Hyperspectral Remote Sensing," *Continental Shelf Research*, **31**, 1249-1259 (2011).
2. Richter, R. and Schlapfer, D., "Atmospheric/Topographic Correction for Airborne Imagery," ATCOR-4 User Guide (2015).
3. Global Industry Analysts, Inc, "Hyperspectral Imaging Systems," <https://www.giikorea.co.kr/report/go1479329-hyperspectral-imaging-systems.html> (accessed May 2024).
4. Lee, M. S., Kim, K. S., Min, K. H., Son, D. H., Kim, J. E., and Kim, S. C., "Recent Trends of Hyperspectral Imaging Technology," *Elec. Telec. Trends*, **34**(1), 86-97 (2019).
5. Goetz, A. F. H., "Three Decades of Hyperspectral Remote Sensing of the Earth: a Personal View," *Rem. Sens. Environ.*, **113**(1), 5-16 (2009).
6. Goetz, A. F. H., "Imaging Spectrometry for Studying Earth, Air, Fire and Water," *EARSeL Advances in Remote Sensing*, **1**, 3-15 (1991).
7. Gao, B. C., Montes, M. J., Davis, C. O., and Goetz, A. F. H., "Atmospheric Correction Algorithms for Hyperspectral Remote Sensing Data of Land and Ocean," *Rem. Sens. Environ.*, **113**, 17-24 (2009).
8. <https://blog.naver.com/airsens17/222615610489>.
9. Lyzenga, D. R., "Passive Remote Sensing Techniques for Mapping Water Depth and Bottom Features," *Appl. Optics*, **17**(3), 379-383 (1978).
10. Zoffoli, M. L., Frouin, R., and Kampel, M., "Water Column Correction for Coral Reef Studies by Remote Sensing," *Sensors*, **14**(9), 16881-16931 (2014).
11. Stumpf, R. P., Holderied, K., and Sinclair, M., "Determination of Water Depth with High-resolution Satellite Imagery over Variable Bottom Types," *Limnol. Oceanog.*, **48**(1), 547-556 (2003).
12. Kutser, T., Dekker, A. G., and Skirving, W., "Modeling Spectral Discrimination of Great Barrier Reef Benthic Communities by Remote Sensing Instruments," *Limnol. Oceanog.*, **48**, 497-510 (2003).
13. Vahtmae, E. and Kutser, T., "Classifying the Baltic Sea Shallow Water Habitats using Image-based and Spectral Library Methods," *Remote Sensing*, **5**, 2451-2474 (2013).
14. Dokmanic, I., Parhizkar, R., Ranieri, J., and Vetterli, M., "Euclidean Distance Matrices: Essential Theory, Algorithms, and Applications," in *IEEE Sig. Proc. Mag.*, **32**(6), 12-30 (2015).
15. Kløve, T., "Lower Bounds on the Size of Spheres of Permutations under the Chebychev Distance," *Des. Codes Cryptography*, **59**, 183-191 (2011).
16. Zhuang, H., Deng, K., Fan, H., and Yu, M., "Strategies Combining Spectral Angle Mapper and Change Vector Analysis to Unsupervised Change Detection in Multispectral Images," in *IEEE Geosci. Rem. Sens. Lett.*, **13**(5), 681-685 (2016).
17. Fan, Z., Ni, M., Sheng, M., Wu, Z., and Xu, B., "Principal Component Analysis Integrating Mahalanobis Distance for Face Recognition," *2013 Second International Conference on Robot, Vision and Signal Processing, Kitakyushu, Japan*, **27**(1), 89-92 (2013).
18. Akhter, M. A., Heylen, R., and Scheunders, P., "A Geometric Matched Filter for Hyperspectral Target Detection and Partial Unmixing," in *IEEE Geosci. Rem. Sens. Lett.*, **12**(3), 661-665 (2015).
19. Semcheddine, B. A. and Daamouche, A., "Adaptive Matched Filters for VHR Image Classification," *Mediterranean and Middle-East Geoscience and Remote Sensing Symposium (M2GARSS), Istanbul, Turkey*, 50-53 (2022).
20. Zou, Z., Shi, Z., Wu, J., and Wang, H., "Quadratic Constrained Energy Minimization for Hyperspectral Target Detection," *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milan, Italy*, 4979-4982 (2015).
21. Yang, J., Yi, J., Wan, X., Rao, Y., and Leung, H., "An Image-Based Radar Detector Approaching Optimal Likelihood Ratio Detector," *Trans. Aerospace Elect. Sys.*, **58**(3), 2063-2072 (2022).
22. Bai, X., Li, L., Xie, X., Li, W., Wu, Y., and Gao, L., "FPGA Implementation for Hyperspectral Target Detection with Adaptive Coherence Estimator," *International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP), Chongqing, China*, 1-5 (2019).
23. Lin, K. T., "Based on Binary Encoding Methods and Visual Cryptography Schemes to Hide Data," *Eighth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, Piraeus-Athens, Greece*, 59-62 (2012).
24. Hosseini, S. A. and Ghassemian, H., "A Novel Approach to Hyperspectral Data Feature Extraction using Rational Function Curve Fitting," *International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA), Kuala Lumpur, Malaysia*, 494-499 (2015).
25. Headley, J. D., Harborne, A. R., and Mumby, P. J., "Simple and Robust Removal of Sun Glint for Mapping Shallow Water Benthos," *Int. J. Rem. Sens.*, **26**(10), 2107-2112 (2005).
26. Kara, N. Y., Dar, A. R., Alex, A., Held, C., Philip, E., Dennison,

- D., Xiuping, Jia E., and David, B. L., "Mapping Two Eucalyptus Subgenera using Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis and Continuum-removed Imaging Spectrometry Data," *Rem. Sens. Environ.*, **115**(5), 1115-1128 (2011).
27. Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. B., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J., and Goetz, A. F. H., "The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data," *Rem. Sens. Environ.*, **44**, 145-163 (1993).
  28. Chang, C. I., "Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification," *Kluwer Academic/Plenum Publishers*, New York (2003).
  29. Jensen, J. R., "Introductory Digital Image Processing: a Remote Sensing Perspective, 3rd Edition," *Upper Saddle River*, NJ: Pearson Prentice Hall (2005).
  30. Keshava, N., "Distance Metrics and Band Selection in Hyperspectral Processing with Applications to Material Identification and Spectral Libraries," *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, **42**(7), 1552-1565 (2004).
  31. Manolakis, D., Marden, D., and Shaw, G. A., "Hyperspectral Image Processing for Automatic Target Detection Applications," *Lincoln Lab. J.*, **14**(1), 79-116 (2003).
  32. Alam, M. S., Islam, M. N., Bal, A., and Karim, M. A., "Hyperspectral Target Detection using Gaussian Filter and Post-processing," *Optics Laser. Eng.*, **46**(11), 817-822 (2008).
  33. Jia, X. and Richards, J. A., "Binary Coding of Imaging Spectrometer Data for Fast Spectral Matching and Classification," *Rem. Sens. Environ.*, **43**(1), 47-53 (1993).
  34. Clark, R. N., Swayze, G. A., Livo, K. E., Kokaly, R. F., Sutley, S. J., Dalton, J. B., McDougal, R. R., and Gent, C. A., "Imaging Spectroscopy: Earth and Planetary Remote Sensing with the USGS Tetracorder and expert systems," *J. Geophys. Res.*, **108**(5), 5-44 (2003).
  35. Heiden, U., Segl, K., Roessner, S., and Kaufmann, H., "Determination of Robust Spectral Features for Identification of Urban Surface Materials in Hyperspectral Remote Sensing Data," *Rem. Sens. Environ.*, **111**(4), 537-552 (2007).
  36. Liu, J., "Current status and Prospect of Seaweed-based Biofuels as Renewable Energy Resource," *Clean Technol.*, **28**(2), 163-173 (2022).
  37. Ha, J.-M., "Catalytic Hydrodeoxygenation of Biomass-derived Oxygenates: A Review," *Clean Technol.*, **28**(2), 174-181 (2022).