

# 항공초분광 영상 기반 한국 연안 갯녹음의 장기 변화 분석(2014-2023)\*

— 항공초분광 영상 기반 우리나라 갯녹음 분석 —

방건준<sup>1</sup>·최임호<sup>2</sup>·김준호<sup>2</sup>·오지철<sup>2</sup>·강진우<sup>2</sup>·김채송<sup>2</sup>·김익재<sup>3\*\*</sup>

## Long-term Analysis of Marine Bed Whitening in Korea Based on Airborne Hyperspectral Imagery (2014-2023)\*

— Analysis of Marine Bed Whitening in South Korea  
Using Airborne Hyperspectral Imaging —

Kon Joon Bhang<sup>1</sup>·Im Ho Choi<sup>2</sup>·Jun Ho Kim<sup>2</sup>·Ji Chul Oh<sup>2</sup>·  
Jin Woo Kang<sup>2</sup>·Chae Song Kim<sup>2</sup>·Ik Jae Kim<sup>3\*\*</sup>

### 요 약

본 연구는 항공초분광영상 분석 기술을 활용하여 2014년부터 2023년까지 한국 연안(동해, 서해, 남해, 제주도)에 대해 수집된 초분광영상을 바탕으로 각 지역별 갯녹음의 진행 양상과 변화를 조사하였다. 초분광영상은 갯녹음 면적을 산출에 직접 적용할 수 있어, 기존 통계적 방법론보다 더 높은 정확도와 신뢰도를 갖춘 데이터베이스를 구축하는데 활용되었다. 분석 결과, 한국 연안의 갯녹음은 전체적으로 감소하거나 안정화되는 경향을 보였으나, 일부 지역에서는 갯녹음이 여전히 심각하게 진행되고 있는 양상을 확인할 수 있었다. 동해안의 경우, 울릉권, 강릉, 양양과 같은 지역에서 갯녹음의 정상 상태 면적 비율이 증가하였으며 해양 생태계 복원 경향이 뚜렷하게 나타났다. 서해안에서는 대다수의 지역이 안정적인 상태를 유지하고 있었으나, 자월도와 덕적도1과 같은 일부 지역에서는 여전히 갯녹음이 진행 중인 심각한 상태로 나타나 국지적 갯녹음 악화가 진행되고 있음을 확인하였다. 남해안의 경우, 여수, 순천, 고흥 등은 안정적인 생태계를 유지하고 있었으나,

2024년 11월 13일 접수 Received on November 13, 2024 / 2024년 12월 13일 수정 Revised on December 13, 2024 / 2024년 12월 13일 심사완료 Accepted on December 13, 2024

\* 본 연구는 한국수산자원공단의 전국 연안 갯녹음 실태조사 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

<sup>1</sup> 금오공과대학교 토목공학과 교수/ Kumoh National Institute of Technology, Department of Civil Engineering

<sup>2</sup> 한국수산자원공단, 연구원/ Korea Fisheries Resources Agency

<sup>3</sup> ㈜지오랩스, 기술이사 / Geolabs Inc.

\*\* Corresponding Author E-mail : kiz@geolabs.co.kr

울산과 부산 지역에서는 여전히 갯녹음이 진행 중으로, 지역별 특성에 따른 관리가 필요한 상황이었다. 제주도는 서부에 비해 동부 지역에서 갯녹음이 더 심화된 양상을 보였으며, 특히 조천읍과 구좌읍에서는 심각한 상태로 갯녹음 비율이 높았다. 이 연구를 통해 항공초분광영상이 해양 환경에서 적용되기 어려운 점에도 불구하고, 연안 생태계의 갯녹음을 효과적으로 모니터링할 수 있는 실용적 기술임을 확인하였다. 이는 향후 해양 생태계 보호 및 관리에 유용한 정보를 제공할 뿐 아니라, 앞으로 갯녹음 발생 원인과 해양 환경 요소 간의 연관성을 심층적으로 분석하여 보다 효율적이고 지속 가능한 해양 생태계 복원 방안을 마련하게 될 것으로 기대한다.

주요어 : 갯녹음, 해양 백화현상, 항공초분광, 영상분석, 연안 모니터링, 현황

## ABSTRACT

This study investigates the progression and changes in marine bed whitening across different coastal regions of Korea (the East Sea, West Sea, South Sea, and Jeju Island) from 2014 to 2023, using airborne hyperspectral imagery analysis. Hyperspectral imagery enables the direct estimation of the whitening area, facilitating the creation of a highly accurate and reliable database compared to traditional statistical methods. The analysis results indicate that, overall, whitening in Korea's coastal areas has either decreased or stabilized, although some regions continue to experience severe whitening. In the East Sea, areas such as Ulleung, Gangneung, and Yangyang show an increase in the proportion of stable marine bed area, signaling a clear trend of ecosystem recovery. Along the West Sea, most areas remained stable; however, local sites like Jawoldo and Deokjeokdo 1 exhibited ongoing, serious whitening, indicating localized degradation. In the South Sea, locations such as Yeosu, Suncheon, and Goheung maintained a stable ecosystem, whereas Ulsan and Busan continued to experience whitening, highlighting the need for region-specific management strategies. In Jeju Island, whitening was more severe in the eastern region compared to the west, with especially high levels noted in Jocheon-eup and Gujwa-eup. This study demonstrates that, despite challenges in applying airborne hyperspectral imagery to marine environments, the technology is a practical tool for monitoring coastal ecosystem whitening effectively. The results not only provide valuable information for the protection and management of marine ecosystems but also pave the way for future in-depth analyses of the causes of whitening and their correlations with marine environmental factors, ultimately supporting the development of more efficient and sustainable marine ecosystem restoration strategies.

*KEYWORDS : Marine Whitening, Airborne Hyperspectral, Image Analysis, Coastal Monitoring, Current Status*

## 서론

갯녹음이란 해양 생태계에서 수온 상승 및

오염 물질의 유입으로 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>) 성분의 무절석회조류가 증가하면서 암반이 하얗게 변하고, 해양 식물과 생물이 서식지를 잃어가는 현상을 말한다(Lee et al., 2005). 이 용어는

백화현상(Algae Whitening)(Jung et al., 2000)이라는 용어로 사용되기도 하였는데, 우리나라에서는 1970년대 발견되어 '갯녹음'(Kim and Kim, 1998)으로 표현하여 해양 생태계 붕괴를 설명하는데 사용되고 있다. 학계에서는 여러 가지 형태의 용어들이 유사한 현상을 설명하기 위해 사용되는데, 성계와 같은 초식 생물의 과도한 해조류 섭취와 해양 환경 변화로 인해 해조류가 감소하고 생물 다양성이 저하되는 현상을 설명하는 '해조류 숲 감소(Kelp Forest Decline)'나 '성계 불모지(Urchin Barrens)', 그리고 해수 온도 상승 및 해양 산성화로 인해 산호의 생존력이 저하되어 산호초에 달라붙은 조류가 감소되면서 산호초가 하얗게 변하는 현상인 '산호 백화현상(Coral Bleaching)'(Jung et al., 1998) 등이 모두 해양 생태계 파괴와 관련된 문제들로 갯녹음과 같은 맥락으로 사용된다. 이 현상들은 갯녹음과 마찬가지로 해양 생태계의 구조와 기능에 심각한 영향을 미치며, 해양 자원의 고갈을 가속화하는 요인으로 작용한다.

갯녹음은 여러 가지 복합적인 원인으로 발생하는 것으로 알려져 있다. 해조류 숲 감소(Steneck et al., 2002), 지구온난화로 인한 해수 온도의 상승(Hoegh-Guldberg et al., 2017), 무절석회조류의 번식과 성장(Hwang et al., 2017), 대기 중 이산화탄소 흡수에 따른 해양 산성화(Gao et al., 2019), 해안 도시 개발로 인한 오염원의 유입(Jung et al., 1998), 석회조류의 암반 착생(Park and Lee, 2023), 그리고 육상에서 유입된 화학 비료로 인한 해양의 화학적 환경 변화(Kessouri et al., 2021) 등이 주요 요인으로 꼽힌다. 또한, 산소 농도가 감소하여 발생하는 저산소현상(Hypoxia)(Diaz, 2001)이나, 해수 중 탄산칼슘의 농도 증가로 인한 해양설(Marine Snow)(Alldredge and Silver, 1998) 현상 역시 해양 생물의 서식지를 교란하며 갯녹음의 확산을 가속화하는 요소들이다.

이러한 갯녹음 현상은 생물 다양성 손실 및 해양 자원의 고갈을 나타내는 중요한 지표로,

해양 생태계 보호와 복원에 대해 중요한 의미를 갖는다. 갯녹음은 해조류 감소뿐만 아니라 생물 다양성을 심각하게 저해하며, 결과적으로 해양 생태계를 파괴하는 문제를 야기하므로(Paulus, 2021; Ward et al., 2022; Kay et al., 2023) 이를 모니터링하여 대책을 강구할 수 있다, 또 대기 중 이산화탄소 농도의 증가와 밀접한 연관이 있어(Andres et al., 2012; Gao et al., 2019), 기후 변화가 해양 생태계에 미치는 영향을 구체적으로 파악할 수 있고, 해양 탄소 저장 기능을 유지하기 위한 전략 수립에도 중요한 단서를 제공한다. 또 건강한 해양 생태계는 어업, 관광, 생물자원 등 다양한 산업의 기반이 된다. 갯녹음이 진행됨에 따라 이러한 산업에 심각한 경제적 위협이 발생할 수 있으므로, 이를 방지하기 위한 연구는 경제적 손실을 최소화하는데 중요한 역할을 한다(Satpati et al., 2022). 더불어, 갯녹음 방지와 같은 해양환경보존은 해양 생물 및 관련 자원의 광범위한 다양성과 풍부함에 영향을 미쳐, 사회의 건강, 문화 체계 및 경제를 지탱할 수 있게 한다(Barbier, 2017). 이러한 연구는 정책 입안자들에게 해양 관리 및 보호 전략을 수립하는 데 필요한 데이터를 제공하며(Evans et al., 2024), 해양 생태계의 복잡한 상호작용에 대한 이해를 심화시키는 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다(Velázquez et al., 2020; Van de Putte et al., 2021).

이처럼 갯녹음은 해양 생태계에 막대한 영향을 미치는 중요한 문제로, 해조류의 대규모 감소와 이에 따른 해양 생물 다양성의 심각한 손실을 초래한다. 이러한 변화는 해양 환경의 균형을 무너뜨리고 어류 서식지와 해양 자원에 부정적인 영향을 미치기 때문에, 갯녹음 현상의 정확한 조사와 모니터링은 필수적이다.

우리나라 갯녹음 조사는 2013년까지 과학잠수조사(Jung et al., 1994)를 바탕으로 수행되었다. 이 방법은 현장 자료 수집하여 통계적인 방법으로 우리나라 연안의 갯녹음 상태를 추정하는 방식인데, 넓은 해역에 걸친 갯녹음의 분포와 진행 양상을 종합적이며 정밀하게 파악하

기에는 물리적 접근의 난점으로 인해 한계가 있었다. 이에 원격탐사기술이 대안으로 떠오르며 위성기반 다중분광 기술이 사용되었다(Deysher, 1993). 그러나 해수 내의 염도 및 부유 물질로 인해 빛의 투과성이 낮아 얕은 연안에만 적용이 가능하다는 제약이 있었다. 해외에서는 원격탐사영상 분석 기법으로 다양한 연구를 진행하며, 갯녹음과 유사한 산호백화현상(Kalyan De et al., 2021)나 해조류 탐지(Volent et al., 2007; Bennion et al., 2018)에서 많은 결과를 도출하였으며, 수열 보정(Zoffoli et al., 2014; Minghelli-Roman and Dupouy, 2014)과 같은 해양 탐사시 발생하는 문제점을 해결할 수 있는 기술도 개발하였다.

우리나라도 본 연구를 통해 2014년부터 최초로 항공초분광영상 원격탐사 기술을 도입하였는데, 항공초분광영상 기술은 넓은 해역을 고 해상도로 관측할 수 있고, 기존 잠수 방식의 한계를 극복할 수 있을 뿐 아니라, 위성에서 볼 수 없는 자세한 광학적 특성을 추출할 수 있어 연안의 수심, 해저 지형, 해양 조건을 반영한 정밀한 데이터를 제공할 수 있다. 또 해양에서의 광학기술의 발달로 다양한 영상 보정을 통해 시간과 자원을 절약하면서도 대규모 해역의 변화 양상을 체계적으로 파악할 수 있게 되었다.

본 연구의 목적은 2014년부터 2023년까지 10년간 축적된 항공초분광영상을 활용하여 동해, 서해, 남해, 제주 연안의 갯녹음을 모니터링하고, 이를 통해 연안의 장기적인 갯녹음 변화 상태와 그 추이를 파악하는 것이다. 본 연구의 차별성은 기존의 조사 방법과 달리, 국내에서는 처음으로 항공초분광영상 기술을 갯녹음 모니터링에 적용하여 공간정보 기반의 장기 연속 데이터를 구축했다는 점에 있다. 이를 통해 각 연안 지역의 갯녹음 상태를 구체적으로 파악할 수 있었고, 지역별·시기별 변화 양상을 종합적으로 분석할 수 있었다. 또한, 본 연구는 향후 갯녹음 모니터링을 위한 체계적이고 포괄적인 모니터링 시스템 구축의 기초 자료를 제공하고, 지역별 맞춤형 대응 방안을 마련할 수 있는 근

거 자료를 제시하였다. 더불어, 항공초분광영상 기술이 해양 생태계 모니터링에 과학적으로 유용한 도구임을 실증함으로써, 향후 해양 생태계 관리 및 보호를 위한 효과적인 기술적 기반을 마련하였다.

## 연구지역 및 시기

전국 연안의 갯녹음 실태 및 현황을 파악하기 위해, 2014년부터 2023년까지 동해안, 서해안, 남해안, 그리고 제주도 연안을 대상으로 현장 및 항공초분광 영상기반의 조사가 이루어졌다. 지역별 조사는 재원의 한정으로 동일 시기에 모든 지역을 촬영할 수 없었고, 재원 유효 기간, 기상 조건 등을 고려하여 표 1과 같이 해당 기간 중에 촬영되었다.

각 지역의 환경적 특징은 동해안의 경우, 깊은 수심과 계절적 수온 변화가 큰 특징을 지니며, 북서 계절풍의 영향을 받아 겨울철 수온이 현저히 낮아진다. 이로 인해 주로 갈조류와 같은 한류성 해조류가 우세하게 분포한다(Gang, 1985; Hong, 2019). 남해안은 복잡한 해안선과 다수의 섬으로 인해 다양한 해양 생물 군집을 형성하고 있는 것이 특징이다. 상대적으로 따뜻한 수온과 얕은 수심 덕분에 갈조류, 녹조류, 홍조류가 혼재된 바다숲이 발달해 있다(An and Lee, 2021). 서해안은 동해안과 남해안에 비해 상대적으로 수심이 얕고 조석의 차이가 크며, 조류가 활발한 것이 특징이다. 서해안의 해양 환경은 황해난류와 조석의 영향을 많이 받아 탁도가 높은 편이며, 저층에서는 진흙 퇴적물이 분포한다. 이러한 환경적 조건으로 인해 서해안 연안에는 염생식물과 함께 갈조류와 녹조류가 혼합된 해양 식생이 형성되어 있다(Kim et al., 2018; NORI, 2022). 제주연안은 독특한 화산섬 지형과 따뜻한 해양 환경을 배경으로 다양한 해양 생물 군락이 형성된 지역이다. 제주해역의 바다숲은 얕은 수심에서 넓게 분포하고 있으며, 갈조류가 주된 구성 성분을 이룬다(Kwon, 2015; Choi, 2022).

TABLE 1. Study areas and survey periods

	Area	Survey Period									
		2014. 08~12	2015. 08~12	2016. 06~12	2017. 05~11	2018. 05~12	2019. 03~11	2020. 06~11	2021. 06~11	2022. 05~11	2023. 06~11
East Sea	ULL, GOS	○			○		○				
	SOK, YNG, GAN, DON, SAM, YEO, ULJ, POH, GYE, ULS	○			○		○			○	
West Sea	JAW, DEO, TAE, GAE, BAE, SUN, SAP, HOD, ECH, OYE, NOK, GWA, BYE, WID, MYE, ANM, SON, SEO, BIG, DOC, SAN, HAJ, HEU, HON, GAG							○			○
	ULS		○			○					
South Sea	BUS		○		○	○				○	
	YEO, SUN, BOS, GOH, JAN, GAN, WAN, HAE, CHA, GEO, TONG, SAC, GWA, GOS, NAM, HAD		○			○	○			○	
	JEJ		○	○		○	○		○		○
Jeju	SEO			○			○		○		○
	HAN, HAL, AEW, JOC, GUJ, SES, PYO, NAM, AND, DAE			○					○		○

Abbreviation codes for locations							
Code	Location	Code	Location	Code	Location	Code	Location
ULL	Ulleungdo	GOS	Goseong County	SOK	Sokcho City	YNG	Yeongyang County
GAN	Gangneung City	DON	Donghae City	SAM	Samcheok City	YEO	Yeongdeok County
ULJ	Uljin County	POH	Pohang City	GYE	Gyeongju City	ULS	Ulsan City
JAW	Jawoldo	DEO	Deokjeokdo	TAE	Taeon	GAE	Gaeuido
BAE	Baekado	SUN	Seonyudo	SAP	Sapsido	HOD	Hodo
ECH	Eocheongdo	OYE	Oeyeondo	NOK	Nokdo	GWA	Gwanrido
BYE	Byeonsan Peninsula	WID	Wido	MYE	Myeongdo	ANM	Anmado
SON	Songido	SEO	Seogeocho	BIG	Bigeumdo	DOC	Dochodo
SAN	Sangjodo	HAI	Hajodo	HEU	Heuksando	HON	Hongdo
GAG	Gageodo	BUS	Busan City	YEO	Yeosu City	SUN	Suncheon City
BOS	Boseong County	GOH	Goheung County	JAN	Jangheung County	GAN	Gangjin County
WAN	Wando County	HAE	Haenam County	CHA	Changwon City	GEO	Geoje City
TON	Tongyeong City	SAC	Sacheon City	GWA	Gwangyang City	NAM	Namhae County
HAD	Hadong County	JEJ	Jeju City	SEO	Seogwipo	HAN	Hangyeong-myeon
HAL	Hallim-eup	AEW	Aewol-eup	JOC	Jocheon-eup	GUJ	Gujwa-eup
SES	Seongsan-eup	PYO	Pyoseon-myeon	NAM	Namwon-eup	AND	Andeok-myeon
DAE	Daejeong-eup						

## 조사방법

### 1. 장비

초분광 영상은 미국 Cessna사에서 제작한 T206H Stationair 모델 항공기에 장착하여 영

상을 촬영하였다. 초분광 영상 데이터는 연간 동해는 20m 수심까지 150 스트립, 남해는 수심 10m까지 485 스트립, 제주는 수심 20m까지 70 스트립의 영상을 2개의 초분광센서(표 1)를 사용하여 GPS/INS와 함께 취득되었다.

TABLE 2. Specifications and features of hyperspectral sensors

항목	CASI-1500(ITRES,2019)	AisaFENIX1K(SPECIM,2022)
제조사	ITRES	SPECIM
사용기간	2014년 ~ 2021년	2022년 ~ 2023년
분광 범위	380nm ~ 1,050nm	380nm ~ 2,500nm
분광 채널 수	최대288개(ITRES,2019)	VNIR: 174개 SWIR:247개(SPECIM,2022)
분광 해상도	2.4nm ~ 9.6nm	VNIR: 4.5nm SWIR: 14nm
공간 해상도	1,500 픽셀	1,024 픽셀
시야각(FOV)	40도	40도
동적 범위	14-bit(ITRES,2019)	VNIR: 12-bit SWIR: 16-bit
특징	고성능 광학 시스템 높은 신호 대 잡음비(SNR) SASI-600과 결합하여 VNIR-SWIR 연속 커버리지 제공	단일 광학계로 VNIR 및 SWIR 데이터 동시 취득 높은 기하학적 정확도 다양한 GNSS/IMU 시스템과의 인터페이스 지원

TABLE 3. Specifications of GPS/INS system for geometric correction

항목	OxfordTechnicalSolutions의 Survey+시스템 (OXTS,2022)	Applanix사의 POSAV(Applanix,2022)
지원 위성 시스템	GPS, GLONASS, GALILEO	GPS, GLONASS, GALILEO
위치 정확도 (DGPS 기준)	±0.4m(OXTS,2022)	±0.4m(Applanix,2022)

2. 데이터 처리

항공초분광센서에서 취득된 영상은 방사/기하/대기/수면반사/수열 보정과 같은 영상 전처리 과정을 거쳐 암반 및 갯녹음 분류 작업(그림 1)을 통해 최종적인 갯녹음 맵이 벡터형식으로 도출되었다.

1) 방사/기하 보정

초분광 센서로 취득한 원시 영상 데이터는 센

서의 특성과 촬영 환경으로 인해 방사 및 기하적으로 왜곡된 정보를 포함하고 있다. 먼저 대기 중 에어로졸 및 수증기량에 의해 왜곡된 신호를 제거하고, 센서 특성에 따른 신호 왜곡을 보정하며, 태양 각도에 따른 신호 변화를 추가로 보정하였다. 이 중 일부는 센서 자체 내 보정 기능을 통해 수행되었다.

방사보정을 통해 센서별로 14비트, 12비트, 16비트 영상의 픽셀 수치(DN, Digital

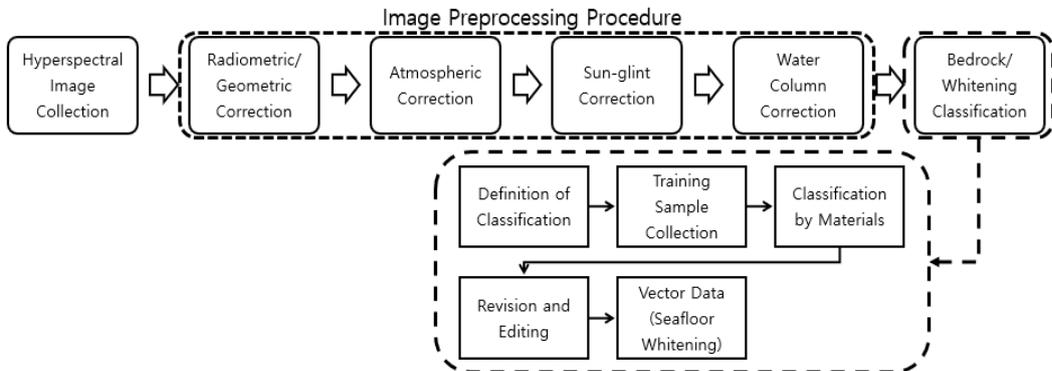


FIGURE 1. Image processing procedure

Number)를 복사조도(Irradiance) 값으로 변환하였다. 기하보정은 GPS/INS를 사용해 항공기의 위치와 자세, 카메라 매개변수, 시야각, 지상기준점, DEM 등의 정보를 이용하여 Boresight Calibration을 통해 항공 촬영 시 센서와 GPS/INS 장치 간의 미세한 이격과 항공기 자세 변화로 인해 발생하는 회전량 차이를 보정하여 영상의 기하학적 왜곡을 최소화하였다. 이를 위해 익산산업단지를 대상으로 각 코스에서 10~11개의 Tie Point를 설정하여 정확한 보정량을 계산하였다.

## 2) 대기 보정

대기 보정은 센서로부터 측정된 화소별 조도(복사조도)값을 대기 중 입자나 가스에 의한 흡수 및 산란 등의 영향을 제거하고, 이를 순수한 표면 반사율로 변환하는 과정으로 본 연구에서는 MODTRAN-5 복사전달모델 기반의 ATCOR-4 프로그램을 사용하여 대기 보정을 수행하였다. 대기 보정을 위해 초분광 센서의 촬영 당시 세부 정보(센서의 기하학적 구성, 촬영 당시의 위치, 화각(FOV), 비행고도, 촬영 각도, 시간, 센서의 분광 특성 등), 디지털 고도 모델(DEM), 태양과의 기하 정보, 지형 보정 자료, 양방향 반사도 분포 함수(BRDF, Bidirectional Reflectance Distribution Function)를 입력자료로 활용하였다.

## 3) 수면반사 보정(Sun Glint Correction)

수면반사는 물체 표면에서 태양광이 직접 반사되어 발생하며, 수체의 순수한 반사 특성을 왜곡한다. 수면반사 보정은 이를 제거하는 중요한 전처리 과정으로 본 연구에서는 Hedley et al. (2005)가 제안한 방법(Simple and robust removal)이 사용되었는데, 이 방법은 근적외선(NIR) 대역과 가시광선 대역 간의 선형 관계를 활용하여 수면에서 발생하는 태양광 반사(sun glint)를 보정하는 방식이다. NIR 대역은 물에 대한 흡수율이 높아 수면 반사가 거의 나타나지 않기 때문에, NIR

대역의 밝기와 가시광선 대역의 반사도 간의 선형 회귀 분석을 통해 sun glint가 포함된 가시광선 픽셀의 값을 보정하는 방식이다.

본 연구에서는 수면반사 보정을 위해 근적외선 대역에서 754.5nm에 해당하는 밴드를 사용하였다. 이 밴드는 알고리즘이 제안한 원리에 따라 수체의 최소 반사율을 나타내는 대역(700~1,000nm)으로, 이 대역을 통해 수면에서 발생하는 반사 효과를 가장 효과적으로 제거할 수 있었다. 따라서, 해당 밴드를 선택한 후, 이를 바탕으로 수면반사율을 계산하고, 영상의 각 화소에서 이를 제거하여 순수한 수체의 반사율을 복원하고, 수면반사를 제거하여 영상 데이터를 보정하였다.

## 4) 수열 보정(Water Column Correction)

수열 보정은 저서면 분석을 위해 필수적인 과정으로, 물의 깊이에 따라 빛이 감쇠하는 현상을 보정하는 작업을 의미한다. 수면에 도달한 빛이 다시 반사되어 센서에 도달하는 과정에서, 물기둥(Water column)은 빛을 흡수하고 산란시키며, 이는 수중의 정확한 반사율 측정을 방해한다. 이를 보정하기 위해서는 먼저 수표면에서 측정된 원격탐사 반사도( $R_{rs}$ )를 수표면 아래에서의 반사도( $r_{rs}$ )로 변환한 후, 이를 저서면 반사도로 변환하는 과정을 거쳐야 한다. 본 연구에서는 저서면의 반사도를 얻기 위해 SAMBUCA(Semi-Analytical Model for Bathymetry, Un-mixing, and Concentration Assessment)(Brando et al., 2009)기법을 활용한 수열 보정을 수행하였다. 이 방법은 수심(H), 엽록소 농도(Cchl), 유색용존 유기물 농도(CDOM), 총 부유 물질 농도(TSM) 등 수질과 관련된 여러 변수를 고려하여 수중에서 빛의 전파를 최적화하는 방식으로 필요한 변수는 모두 현장 조사 시 각 지역에 대해 3곳의 시료 채취를 통해 이루어졌으며, 이러한 검출된 변수를 기반으로 저서 피복의 반사도를 계산하였다.

## 5) 암반 및 갯녹음 분류

암반 분류를 위해서는 초분광 영상에서 각 화소의 재질을 분류하는데 사용할 레퍼런스분광 특성 라이브러리(훈련 샘플) 구축이 필수적이다. 해역별로 해저면의 반사 특성이 상이하게 나타나는 점을 고려하여, 지역별로 서로 다른 샘플(암반, 모래, 갯녹음 등)을 채취하고 변이를 고려하여 동일한 재질을 가진 30개 화소의 분광 반사율을 측정하고 평균하여 샘플로 정의하였다.

암반 분류를 위해서 세 가지 기준 분광 특성 라이브러리와 분광각 매퍼(SAM: Spectral Angle Mapper) 알고리즘(Kruse et al., 1993)을 사용하여, 영상에 대한 암반 및 갯녹음 분류를 수행하였다. SAM 알고리즘은 각 화소의 분광 특성과 레퍼런스 분광 특성 간의 각도를 계산하여, 각도가 가장 작은 기준에 따라 화소를 분류하는 방식이다. 초기 분류 결과에는 영상 잡음 및 환경적 변이로 인해 오분류된 화소가 다수 포함되었으나, 이를 보완하기 위해 주변 화소의 분류 결과를 고려한 다수결 필터링(Majority filtering)(Kim, 1996)을 적용하여 분류 결과의 일관성을 극대화하였다. 분류된 암반 결과는 격자(raster) 형식으로 벡터 데이터로 변환하여 데이터 용량을 줄이고, 다른 자료와의 중첩을 용이하게 하였다.

자동 분류된 암반 결과는 정확성을 높이기 위해 다양한 현장 조사 자료를 활용하여 수동으로 편집되었다. 수심 측량 자료는 선박을 이용한 싱글빔 또는 멀티빔 측정 자료를 사용하였는데, 암반 지역은 주변보다 수심이 얕고 불규칙한 형태를 띠기 때문에, 모래나 펄과 명확한 경계를 형성한다. 따라서 벡터화된 암반 분류 결과와 수심 자료를 중첩하여 암반 및 갯녹음 경계와 오분류를 수정하였다. 또 갯녹음 분류를 위해 2차 통계 값 기반 측정법 중 하나인 MF(Matched Filter) 기법을 이용하여 분광 반사 곡선의 패턴과 특성

간의 관계를 분석하여 갯녹음을 분류하였다.

#### 6) 갯녹음 판정 기준

본 연구에서 수행된 항공초분광영상을 활용한 갯녹음 실태는 한국수자원공단(FIRA)의 기준(표 4)에 따라 영상에서 구분 가능한 유·무절 석회조류의 피도만으로 갯녹음 상태를 판정하였다. 이 기준은 유·무절 석회조류의 피도가 40% 미만이면 갯녹음 정상지역, 40~80%의 범위를 갯녹음 진행지역, 80% 이상인 해역을 심각지역으로 각각 구분하고 있으며, 현재 한국수자원공단의 바다숲 조성사업의 기본자료로 활용되고 있다.

## 결 과

### 1. 동해안 갯녹음 변화 분석: 2014-2022년 조사 결과(그림 4, 표 3-6)

2014년에는 총 조사 면적 15,903.1 ha 중 정상 상태 면적 비율이 33.9%, 진행 상태 27.9%, 심각 상태 38.2%로 절반 이상이 진행 또는 심각한 갯녹음이 관찰되었다. 이후 2017년에는 조사 면적이 12,372.1 ha로 감소하였지만, 정상 상태 비율이 48.8%로 증가하고 심각 상태가 25.1%로 감소하는 양상을 보였다. 2019년에는 총 조사 면적이 13,425.1 ha로 소폭 증가하면서 정상 상태가 51.7%로 유지되고, 진행 상태 26.1%, 심각 상태는 21.0%로 소폭 감소하여 갯녹음이 다소 회복되는 모습을 보였다. 2022년까지 조사 결과에서 정상 상태 면적이 전체의 49.4%를 차지하였고, 심각 상태 비율은 18.6%로 낮아지며 다소 개선되는 추세를 유지하였다.

지역별 갯녹음 현황과 변화는 울릉권의 경우,

TABLE 4. Criteria for determining coralline algae bleaching using hyperspectral aerial imagery (Korea Fisheries Resources Agency, 2016)

정상	진행	심각
유·무절 석회조류 40% 미만	유·무절 석회조류 피도 40~80%	유·무절 석회조류 80% 이상

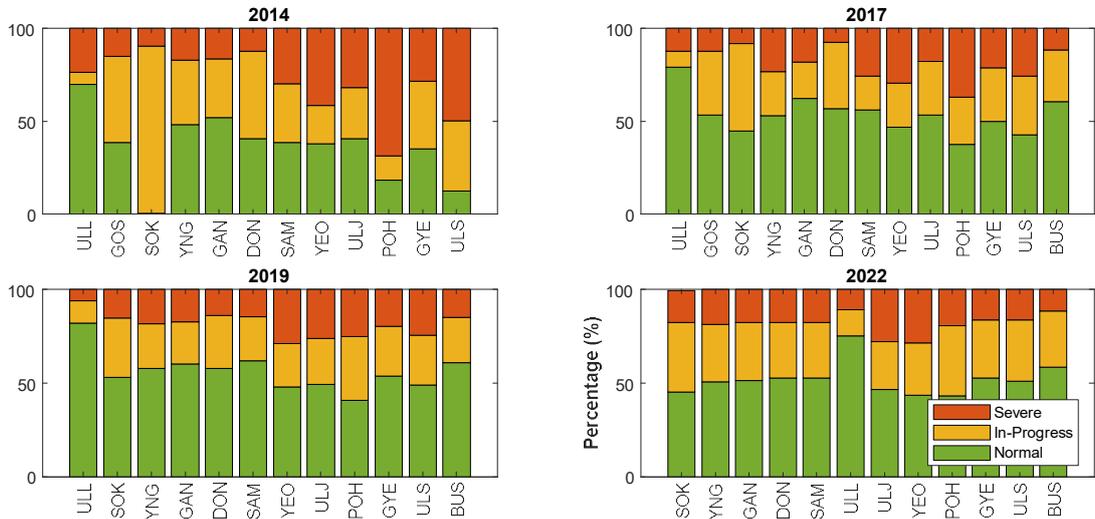


FIGURE 2. Whitening status of the East Coast

2014년부터 2022년까지 정상 상태 비율이 꾸준히 69.9% 이상을 기록하며 동해안에서 가장 안정적인 상태를 유지했다. 이는 다른 지역에 비해 울릉도 지역의 해양 환경의 영향이 적었을 가능성이 있다. 속초시는 2014년 조사에서 진행 상태 비율이 89.9%로 다른 지역에 비해 갯녹음이 활발하게 진행된 것으로 나타났으나, 이후 점차 안정화되면서 2022년에는 정상 상태

면적 비율이 크게 증가하여, 복원 프로그램의 효과나 자연적 복원 과정의 영향을 받은 결과로 해석될 수 있다. 양양군 및 강릉시의 경우 정상 상태 비율이 매년 점진적으로 증가하며 2019년과 2022년 조사에서 50% 이상을 기록하였는데, 이는 갯녹음에 대한 관리가 효과적으로 작용했을 가능성을 보여준다. 포항시와 울산시는 갯녹음이 심각하게 진행된 지역으로, 2014년

TABLE 5. Results of the whitening status of the East Coast (2014)

	AREA(ha)			PERCENTAGE(%)			
	Bedrock	Normal	In-Progress	Severe	Normal	In-Progress	Severe
ULL	885.2	618.6	57.0	209.7	69.9	6.4	23.7
GOS	1,414.6	546.2	655.0	213.4	38.6	46.3	15.1
SOK	295.1	1.4	265.4	28.4	0.5	89.9	9.6
YNG	1,184.3	572.5	407.3	204.6	48.3	34.4	17.3
GAN	1,180.6	613.5	373.8	193.4	52.0	31.6	16.4
DON	306.5	124.8	143.6	38.1	40.7	46.9	12.4
SAM	943.3	362.2	298.0	283.1	38.4	31.6	30.0
YEO	1,344.1	508.3	278.9	556.9	37.8	20.8	41.4
ULJ	1,296.2	525.3	357.0	413.9	40.5	27.6	31.9
POH	4,203.0	764.4	549.7	2,888.9	18.2	13.1	68.7
GYE	1,734.2	608.0	632.8	493.4	35.1	36.5	28.4
ULS	1,115.8	139.8	420.0	556.0	12.5	37.6	49.9
Total	15,903.1	5,385.0	4,438.4	6,079.7	33.9	27.9	38.2

포항시의 심각 상태 비율은 68.7%, 울산시는 49.8%에 달했다. 그러나 2022년에는 포항시의 심각 상태 비율이 19.4%, 울산시는 16.2%로 크게 감소하여 갯녹음 관리 및 복원 프로그램이 어느 정도 성과를 보여주고 있음을 알 수 있다.

전반적으로 동해안 지역의 정상 상태 면적이 매년 증가하는 경향을 보이며, 이는 해양 생태계의 복원이 긍정적인 방향으로 진행 중임을 나

타낸다고 할 수 있다. 따라서, 동해안 갯녹음은 2014년 이후 점차 개선되고 있으며, 특히 울릉권과 강릉시 등 몇몇 지역에서는 해양 환경이 안정적으로 유지되고 있다고 할 수 있다. 더구나 포항시와 울산시처럼 갯녹음이 컸던 지역에서 관리 프로그램의 긍정적인 효과가 나타남으로 인해 이 지역에 대한 향후 지속적인 모니터링과 관리가 필요하다.

TABLE 6. Results of the whitening status of the East Coast (2017)

	AREA(ha)				PERCENTAGE(%)		
	Bedrock	Normal	In-Progress	Severe	Normal	In-Progress	Severe
ULL	802.5	634.4	68.2	99.9	79.1	8.5	12.4
GOS	848.6	452.5	291.5	104.6	53.3	34.4	12.3
SOK	314.8	140.8	147.6	26.4	44.7	46.9	8.4
YNG	425.9	225.0	102.3	98.6	52.8	24.0	23.2
GAN	669.9	416.0	131.3	122.6	62.1	19.6	18.3
DON	207.3	117.8	74.2	15.3	56.8	35.8	7.4
SAM	580.1	325.5	105.9	148.7	56.1	18.3	25.6
YEO	700.5	326.7	168.2	205.6	46.6	24.0	29.4
ULJ	827.0	441.4	238.3	147.3	53.4	28.8	17.8
POH	4,086.3	1,532.6	1,033.4	1,520.3	37.5	25.3	37.2
GYE	768.6	384.2	219.8	164.6	50.0	28.6	21.4
ULS	1,456.5	622.3	460.6	373.6	42.7	31.6	25.7
BUS	684.1	414.0	189.2	80.9	60.5	27.7	11.8
Total	12,372.1	6,033.2	3,230.5	3,108.4	48.8	26.1	25.1

TABLE 7. Results of the whitening status of the East Coast (2019)

	AREA(ha)				PERCENTAGE(%)		
	Bedrock	Normal	In-Progress	Severe	Normal	In-Progress	Severe
ULL	794.7	650.6	94.6	49.5	81.9	11.9	6.2
SOK	358.1	190.4	112.3	55.4	53.2	31.4	15.4
YNG	468.2	270.1	112.0	86.1	57.7	23.9	18.4
GAN	853.0	514.2	190.2	148.6	60.3	22.3	17.4
DON	638.4	369.8	180.1	88.5	57.9	28.2	13.9
SAM	652.2	404.2	153.3	94.7	62.0	23.5	14.5
YEO	789.3	378.4	182.9	228.0	47.9	23.2	28.9
ULJ	1,004.2	494.9	248.5	260.8	49.3	24.7	26.0
POH	4,263.1	1,734.0	1,457.0	1,072.1	40.7	34.2	25.1
GYE	773.2	414.6	207.2	151.4	53.6	26.8	19.6
ULS	1,686.7	825.9	446.0	414.8	49.0	26.4	24.6
BUS	1,144.0	695.2	279.3	169.5	60.8	24.4	14.8
Total	13,425.1	6,942.3	3,663.4	2,819.4	51.7	27.3	21.0

TABLE 8. Results of the whitening status of the East Coast (2022)

	AREA(ha)				PERCENTAGE(%)		
	Bedrock	Normal	In-Progress	Severe	Normal	In-Progress	Severe
ULL	800.8	602.7	112.7	85.4	75.2	14.1	10.7
SOK	405.5	183.2	152.7	69.6	45.2	37.1	17.2
YNG	440.3	223.0	134.7	82.6	50.6	30.6	18.8
GAN	1,042.7	533.9	325.4	183.4	51.2	31.2	17.6
DON	721.1	380.4	214.3	126.4	52.8	29.7	17.5
SAM	721.1	380.4	214.3	126.4	52.8	29.7	17.5
ULJ	1,055.9	493.3	269.3	293.3	46.7	25.5	27.8
YEO	767.5	333.2	215.6	218.7	43.4	28.1	28.5
POH	4,556.3	1,968.6	1,705.1	882.6	43.2	37.4	19.4
GYE	839.1	442.9	259.5	136.7	52.8	30.9	16.3
ULS	2,086.1	1,061.9	685.6	338.6	50.9	32.9	16.2
BUS	1,602.6	938.7	478.6	185.3	58.6	29.9	11.5
Total	15,522.5	7,665.4	4,974.8	2,882.3	49.4	32.0	18.6

## 2. 서해안 갯녹음 변화 분석: 2020~2023년 조사 결과(그림 3, 표 9)

서해안은 다른 해안과 비교하면, 비교적 갯녹음의 영향이 적은 것으로 판단된다. 하지만 여전히 진행중이거나 심각 단계의 영역이 존재하여 지속적인 조사가 필수적이다. 2020년과 2023년 서해안의 갯녹음 조사 결과를 비교해

보면, 2023년에 비해 2020년은 정상 상태의 면적이 더 많았던 것으로 확인된다. 서해안 내 갯녹음 진행 단계별로 조사된 면적 비율을 보면, 대부분의 지역에서 '정상' 상태의 면적이 가장 큰 비율을 차지했으나, '진행' 과 '심각' 단계의 비율이 소폭 증가한 양상을 보였다. 특히, 자월도와 덕적도1의 경우 진행과 심

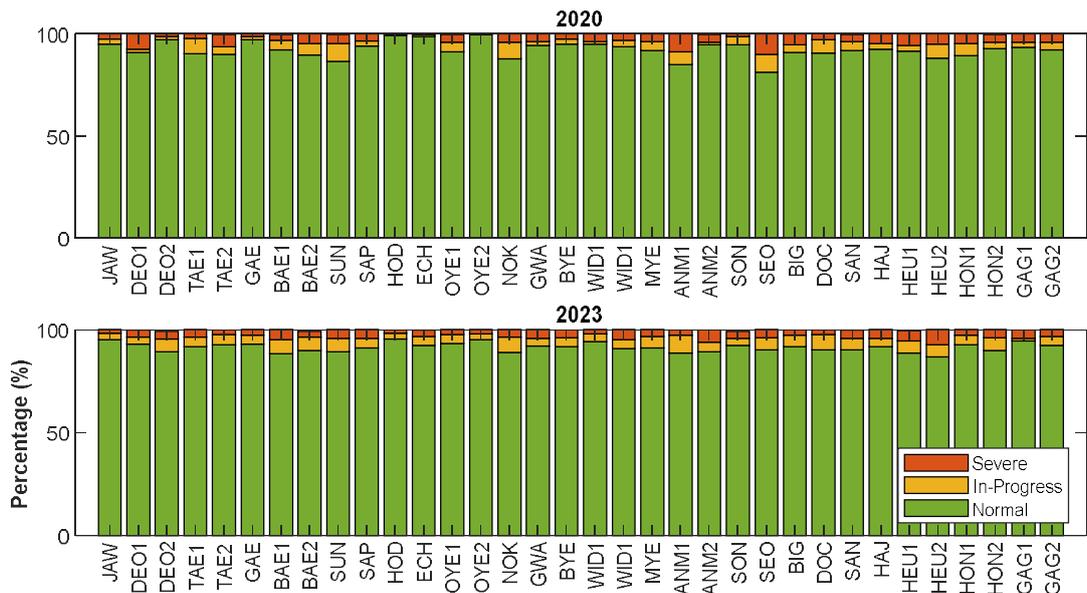


FIGURE 3. Whitening status of the West Coast

TABLE 9. Results of the whitening status of the West Coast (A=2020 and B=2022)

	AREA(ha)								PERCENTAGE(%)					
	Bedrock		Normal		In-Progress		Severe		Normal		In-Progress		Severe	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
JAW	2.2	0.2	2.1	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	95.0	95.3	2.5	3.0	2.5	1.7
DEO1	31.3	0.4	28.4	0.4	0.5	0.0	2.4	0.0	90.9	93.1	1.5	3.4	7.6	3.4
DEO2	3.7	0.1	3.5	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	97.2	89.2	1.5	6.3	1.3	3.6
TAE1	32.3	0.5	29.2	0.5	2.4	0.0	0.7	0.0	90.5	91.7	7.3	4.6	2.2	3.7
TAE2	37.4	0.4	33.7	0.3	1.3	0.0	2.3	0.0	90.2	92.8	3.5	4.8	6.2	2.7
GAE	36.1	0.4	35.2	0.3	0.5	0.0	0.4	0.0	97.4	93.0	1.5	4.5	1.1	2.5
BAE1	11.0	0.1	10.1	0.1	0.5	0.0	0.3	0.0	92.3	88.3	4.7	6.8	2.9	4.9
BAE2	11.2	0.1	10.1	0.1	0.7	0.0	0.5	0.0	89.6	89.8	5.8	6.5	4.6	2.8
SUN	14.3	0.1	12.4	0.1	1.3	0.0	0.7	0.0	86.6	89.2	8.8	6.5	4.5	4.3
SAP	25.6	0.4	24.1	0.4	0.6	0.0	0.9	0.0	94.1	91.1	2.5	4.7	3.4	4.2
HOD	12.8	0.3	12.7	0.3	0.0	0.0	0.1	0.0	99.3	95.5	0.2	2.7	0.5	1.9
ECH	9.5	0.5	9.4	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	98.9	92.5	0.7	4.2	0.4	3.1
OYE1	13.3	0.2	12.1	0.2	0.6	0.0	0.5	0.0	91.2	93.3	4.8	4.5	3.9	2.2
OYE2	14.5	0.1	14.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	99.6	95.1	0.1	2.8	0.3	2.1
NOK	5.4	0.1	4.7	0.1	0.4	0.0	0.2	0.0	88.0	89.1	8.0	7.3	4.0	3.6
GWA	6.4	0.1	6.0	0.1	0.1	0.0	0.2	0.0	94.3	92.1	2.0	3.6	3.7	4.3
BYE	15.6	0.5	14.9	0.4	0.4	0.0	0.4	0.0	95.2	91.7	2.3	4.3	2.5	4.1
WID1	17.6	0.2	16.7	0.2	0.3	0.0	0.7	0.0	94.9	94.3	1.4	3.8	3.7	1.9
WID2	11.3	0.3	10.5	0.2	0.4	0.0	0.3	0.0	93.7	90.8	3.3	4.4	3.1	4.8
MYE	12.4	0.3	11.4	0.2	0.5	0.0	0.5	0.0	92.0	91.2	4.3	5.5	3.7	3.3
ANM1	11.3	0.1	9.6	0.1	0.7	0.0	1.0	0.0	85.0	88.6	6.2	8.6	8.8	3.8
ANM2	19.5	0.2	18.5	0.2	0.3	0.0	0.7	0.0	94.6	89.3	1.5	4.7	3.8	6.5
SON	9.2	0.1	8.8	0.1	0.4	0.0	0.1	0.0	94.8	92.5	3.9	3.4	1.3	3.4
SEO	5.6	0.1	4.6	0.1	0.5	0.0	0.6	0.0	81.3	90.2	8.6	5.9	10.1	3.9
BIG	12.2	0.1	11.2	0.1	0.4	0.0	0.7	0.0	91.1	91.9	3.6	5.4	5.3	4.1
DOC	9.3	0.1	8.5	0.1	0.6	0.0	0.2	0.0	90.7	90.2	6.7	7.6	2.7	3.3
SAN	8.7	0.1	8.0	0.1	0.4	0.0	0.3	0.0	91.8	90.1	4.5	5.6	3.6	4.2
HAI	7.3	0.1	6.7	0.1	0.2	0.0	0.3	0.0	92.5	91.8	3.0	4.1	4.5	4.1
HEU1	11.4	0.2	10.4	0.2	0.3	0.0	0.6	0.0	91.7	88.8	2.8	5.6	5.5	5.2
HEU2	9.6	0.2	8.5	0.2	0.7	0.0	0.5	0.0	88.2	86.8	6.8	5.9	5.0	7.3
HON1	8.6	0.3	7.7	0.3	0.5	0.0	0.4	0.0	89.3	92.6	6.2	4.7	4.5	2.7
HON2	12.7	0.3	11.8	0.2	0.4	0.0	0.5	0.0	93.0	89.8	3.1	6.4	3.8	3.8
GAG1	15.4	0.2	14.4	0.2	0.4	0.0	0.6	0.0	93.6	94.6	2.4	1.2	4.0	4.8
GAG2	5.7	0.1	5.2	0.1	0.2	0.0	0.2	0.0	92.2	92.3	3.8	4.4	4.0	3.3
Total	470.1	7.6	435.4	6.9	16.7	0.4	18.0	0.3	92.6	91.7	3.6	4.7	3.8	3.6

각 단계의 비율이 각각 2.5%, 7.6%로 상대적으로 높게 나타났으며, 이는 갯녹음이 심화되고 있는 일부 지역이 존재함을 나타낸다.

각 지역별 조사 결과를 비교해 보면, 덕적도2,

가의도, 외연도 등은 정상 상태의 비율이 90% 이상을 유지하여 갯녹음 영향을 덜 받은 것으로 보인다. 반면, 서거차도, 흑산도1, 흑산도2 등에서는 ‘진행’ 과 ‘심각’ 단계 비율이 10% 이

상으로 높아져 갯녹음 악화가 뚜렷하게 드러났다. 또 안마도와 송이도에서 ‘진행’ 상태 비율이 6%대를 넘기며 동일해안 다른 지역에 비해 갯녹음의 진행이 눈에 띄게 두드러졌다.

전체 조사 결과에서는 정상 상태가 90% 이상을 차지하여 해양 생태계가 상대적으로 건강한 상태를 유지하고 있는 것으로 보이지만, 일부 특정 지역에서는 갯녹음 현상이 빠르게 진행 중이며, 이러한 지역들에 대한 지속적 모니터링이 필요할 것으로 보인다. 그러나, 서해는 다른 지역과 달리 암반과 갯녹음의 면적에 있어 큰 차이가 있어, 진행, 심각 단계를 판정하는데 좀 더 개선된 기준 마련이 필요한 것으로 판단된다.

3. 남해안 갯녹음 변화 분석: 2015-2022년 조사 결과(그림 4, 표 8-11)

남해안의 갯녹음은 2015년부터 2022년까지 연도별 조사 데이터를 기반으로 갯녹음 상태 변화를 평가하였다. 갯녹음의 정상 상태는 2015년과 2022년 약 86%로 비슷한 수준을 보였으나, 중간 조사 기간(2018~2019년)에는 66~65%로 감소했다가 다시 회복세를 보이는 양상을 나타냈다.

지역별로 보면, 여수시에서는 조사 면적이 증가하면서 정상 상태 비율이 회복세를 보였고, 순천시에서는 정상 상태 비율이 조사 기간 내내 100%를 유지하였다. 고흥군과 장흥군 역시 정상 상태 비율이 90% 이상으로, 남해안 내에서 안정적인 생태계를 보유한 지역으로 나타났다. 완도군은 조사 면적이 크게 증가했음에도 불구하고 높은 정상 상태 비율을 유지하며, 안정적 환경을 가진 것으로 평가된다. 부산시와 창원시에서는 갯녹음이 진행된 면적이 10% 이상으로 나타나 추가적인 관리가 요구된다.

특이사항으로 울산과 거제시에서는 갯녹음이 심각한 상태에 이른 면적 비율이 20% 이상으로 남해의 다른 지역에 비해 심각한 상태를 보였다. 보성군과 광양시는 조사 기간 동안 갯녹음 발생이 거의 없는 안정된 상태를 유지하고 있었다.

남해안 갯녹음 현상은 일부 지역에서 여전히 진행 중이지만, 복원과 관리가 활발히 이루어진 지역에서는 정상 상태 면적 비율이 증가하는 긍정적인 변화가 확인되었다. 그러나 울산, 거제시, 제주도와 같이 갯녹음 비율이 높은 지역에서는 지속적인 모니터링과 적극적인 관리가 필요하다.

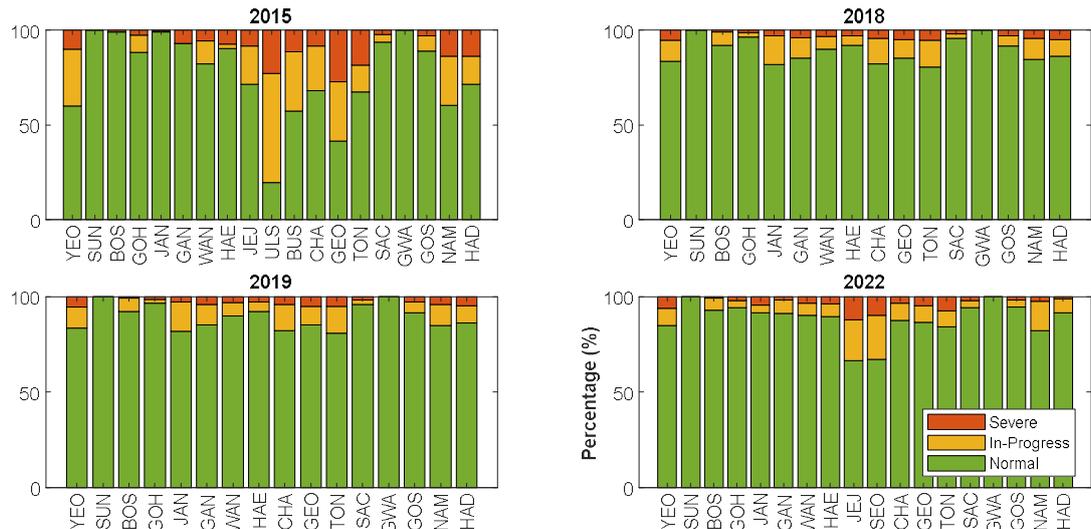


FIGURE 4. Whitening status of the South Coast

TABLE 10. Results of the whitening status of the South Coast (2015)

	AREA(ha)				PERCENTAGE(%)		
	Bedrock	Normal	In-Progress	Severe	Normal	In-Progress	Severe
YEO	1,449.1	870.0	435.5	143.5	60.0	30.1	9.9
SUN	0.7	0.7	-	-	100.0	0.0	0.0
BOS	24.2	24.0	-	0.2	99.2	0.0	0.8
GOH	630.8	558.3	56.1	16.5	88.5	8.9	2.6
JAN	33.2	32.9	-	0.2	99.1	0.3	0.6
GAN	7.2	6.7	-	0.5	93.1	0.0	6.9
WAN	1,515.7	1,245.7	185.9	84.1	82.2	12.3	5.5
HAE	207.3	187.2	5.1	15.0	90.3	2.5	7.2
JEJ	247.5	176.6	50.2	20.7	71.4	20.2	8.4
ULS	291.8	57.3	167.9	66.6	19.6	57.6	22.8
BUS	1,012.1	582.1	314.7	115.2	57.5	31.1	11.4
CHA	108.8	74.2	25.5	9.1	68.2	23.4	8.4
GEO	726.6	301.1	227.5	198.0	41.4	31.3	27.3
TON	1,176.8	793.5	167.4	216.0	67.4	14.2	18.4
SAC	143.2	134.4	5.6	3.2	93.9	3.9	2.2
GWA	0.5	0.5	-	-	100.0	0.0	0.0
GOS	159.6	142.2	12.9	4.5	89.1	8.1	2.8
NAM	433.7	262.5	111.2	60.0	60.5	25.7	13.8
HAD	65.2	46.6	9.7	8.9	71.5	14.8	13.7
Total	8,234.0	5,496.5	1,775.2	962.2	66.8	21.5	11.7

TABLE 11. Results of the whitening status of the South Coast (2018)

	AREA(ha)				PERCENTAGE(%)		
	Bedrock	Normal	In-Progress	Severe	Normal	In-Progress	Severe
YEO	1,563.8	1,306.8	173.2	83.9	83.6	11.0	5.4
SUN	2.9	2.9	-	-	100.0	0.0	0.0
BOS	26.6	24.5	1.8	0.3	92.2	6.9	0.9
GOH	885.1	853.2	20.5	11.4	96.4	2.3	1.3
JAN	31.5	25.8	4.8	0.9	82.0	15.2	2.8
GAN	8.3	7.1	0.9	0.3	85.3	10.7	4.0
WAN	1,516.5	1,363.7	105.4	47.4	89.9	6.9	3.2
HAE	169.0	155.7	8.6	4.8	92.1	5.1	2.8
CHA	89.3	73.4	12.3	3.7	82.2	13.7	4.1
GEO	663.2	564.8	65.1	33.3	85.2	9.8	5.0
TON	1,071.0	864.3	152.6	54.2	80.7	14.2	5.1
SAC	150.5	144.2	3.4	2.9	95.8	2.3	1.9
GWA	0.1	0.1	-	-	100.0	0.0	0.0
GOS	141.4	129.6	7.8	4.0	91.6	5.6	2.8
NAM	479.4	405.6	53.4	20.4	84.7	11.1	4.2
HAD	43.8	37.8	3.9	2.1	86.3	8.9	4.8
Total	7,170.9	6,209.8	666.6	294.4	86.6	9.3	4.1

TABLE 12. Results of the whitening status of the South Coast (2019)

	AREA(ha)				PERCENTAGE(%)		
	Bedrock	Normal	In-Progress	Severe	Normal	In-Progress	Severe
YEO	1,948.3	1,654.90	173.3	120.1	84.9	8.9	6.2
SUN	1.2	1.2	–	–	100.0	0.0	0.0
BOS	31.8	29.5	2.1	0.2	92.8	6.6	0.6
GOH	915.6	861	36.1	18.5	94.1	3.9	2.0
JAN	44.6	40.9	1.7	2.0	91.7	3.8	4.5
GAN	11.4	10.4	0.8	0.2	91.2	7.0	1.8
WAN	2,290.1	2,066.4	141.6	82.1	90.2	6.2	3.6
HAE	179.9	161.4	11.6	6.9	89.7	6.5	3.8
JEJ	8,433.0	5,600.1	1,816.8	1,016.1	66.4	21.5	12.1
SEO	6,890.8	4,620.80	1,597.20	672.8	67.1	23.2	9.7
CHA	122.0	106.7	10.9	4.4	87.5	8.9	3.6
GEO	726.6	628.3	63.7	34.6	86.5	8.7	4.8
TON	1,203.4	1,012.9	101.9	88.6	84.1	8.5	7.4
SAC	165.3	155.8	6.0	3.5	94.3	3.6	2.1
GWA	0.5	0.5	–	–	100.0	0.0	0.0
GOS	166.4	157.6	5.7	3.1	94.7	3.4	1.9
NAM	558.0	458.9	85.0	14.1	82.2	15.3	2.5
HAD	47.3	43.3	3.5	0.5	91.5	7.4	1.1
Total	38,305.3	25,248.1	8,000.6	5,056.6	65.9	20.9	13.2

TABLE 13. Results of the whitening status of the South Coast (2022)

	AREA(ha)				PERCENTAGE(%)		
	Bedrock	Normal	In-Progress	Severe	Normal	In-Progress	Severe
BUS	443.6	346.1	67.0	30.5	78.0	15.1	6.9
CHA	127.6	107.6	14.6	5.4	84.4	11.4	4.2
GEO	745.9	610.9	92.7	42.3	81.9	12.4	5.7
TON	1,282.8	1,089.5	125.6	67.7	84.9	9.8	5.3
SAC	169.2	160.7	5.3	3.2	95.0	3.1	1.9
GWA	0.1	0.1	–	–	100.0	0.0	0.0
GOS	252.2	234.7	12.6	4.9	93.1	5.0	1.9
NAM	563.2	453.9	98.6	10.7	80.6	17.5	1.9
HAD	46.3	42.8	3.3	0.2	92.4	7.2	0.4
YEO	2,054.5	1,716.2	222.6	115.7	83.5	10.8	5.7
SUN	1.1	1.1	–	–	100.0	0.0	0.0
BOS	35.0	33.0	1.8	0.2	94.3	5.1	0.6
GOH	1,024.0	943.7	63.7	16.6	92.2	6.2	1.6
JAN	41.3	38.1	2.1	1.1	92.3	5.1	2.6
GAN	11.1	10.2	0.7	0.2	91.9	6.3	1.8
WAN	2,355.5	2,111.1	168.9	75.5	89.6	7.2	3.2
HAE	187.7	166.4	15.6	5.7	88.7	8.3	3.0
Total	9,341.1	8,066.1	895.1	379.9	86.4	9.6	4.0

4. 제주도 갯녹음 변화 분석: 2016~2023년 조사 결과(그림 5, 표 12~14)

2016, 2021, 2023년도 조사에서 전체적으로 정상 상태는 평균 60~65% 수준을 유지했다. 정상 상태 비율이 2016년 64.7%, 2021년 60.5%, 2023년 61%로 2016년 대비 다소 감소하는 경향을 보이고 있으나, 오차 범위를 5~10%로 설정한다면, 유의미한 수치는 아닌 것으로 판단된다. 진행 상태는 2016년 19.3%에서 2023년 21.6%로 증가했고, 심각 상태도 같은 기간 동안 16.0%에서 17.5%로 증가하여 갯녹음의 확산이 점차 심화되고 있음을 시사한다.

지역별 분석에 따르면, 환경면, 한림읍, 애월읍 등 제주 서부 지역에서 정상 상태 비율이 높았으나, 제주시는 심각 상태 비율이 2016년 39.9%에서 2023년 21.7%로 일부 감소했음에도 여전히 높은 수치를 기록했다. 특히 조천읍,

구좌읍, 성산읍 등 동부 지역은 2023년 기준 진행 및 심각 상태가 40%에 근접하여 서부 지역에 비해 갯녹음의 피해가 더 심각한 것으로 평가되었다. 남원읍과 서귀포 지역에서도 심각 상태 비율이 20% 이상을 기록하며 추가적인 관리가 필요로 하고 있다.

특이사항으로는, 연도별 조사를 통해 일부 지역에서는 갯녹음이 완화되는 경향이 나타나기도 했다. 예를 들어, 추자면의 경우 2023년 조사에서 정상 상태가 70%로 타 지역에 비해 높았고, 심각 상태는 8.3%에 불과하여 상대적으로 안정적인 상태를 유지했다. 하지만 한림읍과 애월읍의 경우에는 2023년 진행 및 심각 상태가 30% 이상을 차지하여 개선의 여지가 많음을 확인할 수 있다. 제주도 갯녹음 현상은 연도별 및 지역별로 진행과 심각 상태 비율이 증가하는 경향을 보이며, 특히 동부 지역에서 갯녹음이 두드러진다.

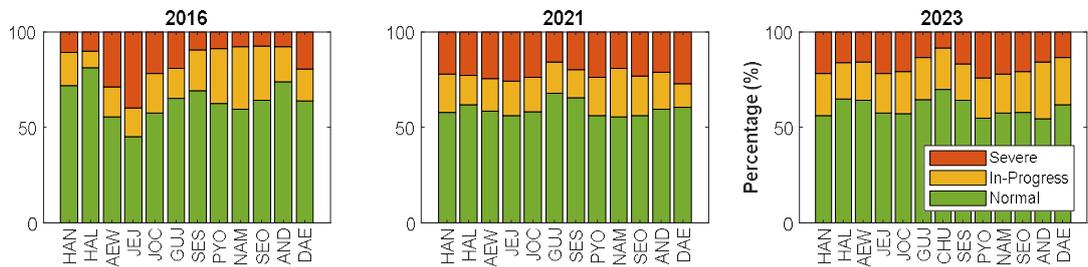


FIGURE 5. Whitening status of Jejudot

TABLE 14. Results of the whitening status of Jejudot (2016)

	AREA(ha)				PERCENTAGE(%)		
	Bedrock	Normal	In-Progress	Severe	Normal	In-Progress	Severe
HAN	995.3	713.1	175.7	106.4	71.7	17.6	10.7
HAL	1,689.4	1,371.9	148.9	168.6	81.2	8.8	10.0
AEW	862.7	477.8	135.9	249.0	55.4	15.7	28.9
JEJ	1,226.1	551.8	185.3	489.0	45.0	15.1	39.9
JOC	833.0	479.3	170.9	182.7	57.5	20.6	21.9
GUJ	2,788.1	1,818.9	440.4	528.8	65.2	15.8	19.0
SES	1,442.0	998.5	309.6	133.8	69.2	21.5	9.3
PYO	735.9	460.7	210.3	64.9	62.6	28.6	8.8
NAM	1,298.0	770.8	424.5	102.6	59.4	32.7	7.9
SEO	1,551.8	992.7	442.3	116.9	64.0	28.5	7.5
AND	639.1	472.4	117.2	49.6	73.9	18.3	7.8
DAE	1,518.7	968.6	253.8	296.3	63.8	16.7	19.5
Total	15,580.0	10,076.6	3,014.7	2,488.7	64.7	19.3	16.0

TABLE 15. Results of the whitening status of Jejudot (2021)

	AREA(ha)				PERCENTAGE(%)		
	Bedrock	Normal	In-Progress	Severe	Normal	In-Progress	Severe
HAN	1,054.8	609.8	211.1	233.9	57.8	20.0	22.2
HAL	1,478.2	912.8	229.8	335.6	61.8	15.5	22.7
AEW	881.7	514.6	151.8	215.3	58.4	17.2	24.4
JEJ	1,738.8	974.7	317.3	446.8	56.1	18.2	25.7
JOC	848.4	494.4	152.0	202.0	58.3	17.9	23.8
GUJ	2,927.4	1,981.4	484.7	461.3	67.7	16.5	15.8
SES	1,622.9	1,063.3	237.3	322.3	65.5	14.6	19.9
PYO	734.8	413.2	146.2	175.4	56.2	19.9	23.9
NAM	1,407.4	782.7	353.6	271.1	55.6	25.1	19.3
SEO	1,597.9	899.7	325.7	372.5	56.3	20.4	23.3
AND	567.3	337.5	110.5	119.3	59.5	19.5	21.0
HAE	1,542.8	934.2	188.8	419.8	60.6	12.2	27.2
Total	16,402.4	9,918.3	2,908.8	3,575.3	60.5	17.7	21.8

TABLE 16. Results of the whitening status of Jejudot (2023)

	AREA(ha)				PERCENTAGE(%)		
	Bedrock	Normal	In-Progress	Severe	Normal	In-Progress	Severe
HAN	10.5	5.9	2.3	2.3	56.2	21.9	21.9
HAL	14.8	9.6	2.8	2.4	64.9	18.9	16.2
AEW	8.9	5.7	1.8	1.4	64.0	20.3	15.7
JEJ	12.0	6.9	2.5	2.6	57.5	20.8	21.7
JOC	8.6	4.9	1.9	1.8	57.0	22.1	20.9
GUJ	29.0	18.7	6.4	3.9	64.5	22.1	13.4
CHU	6.0	4.2	1.3	0.5	70.0	21.7	8.3
SES	16.2	10.4	3.1	2.7	64.2	19.1	16.7
PYO	7.5	4.1	1.6	1.8	54.7	21.3	24.0
NAM	14.1	8.1	2.9	3.1	57.4	20.6	22.0
SEO	15.9	9.2	3.4	3.3	57.9	21.3	20.8
AND	5.7	3.1	1.7	0.9	54.4	29.8	15.8
DAE	15.5	9.6	3.8	2.1	61.9	24.6	13.5
Total	164.7	100.4	35.5	28.8	61.0	21.6	17.5

## 토 의

### 1. 동해안 갯녹음 변화 및 개선 요인

초분광영상을 이용한 조사 초기인 2014년에 비해 정상 상태 면적이 증가하고 심각 상태 비율은 감소한 것은 해양 생태계 복원 노력이 성과로 풀이된다. 특히 울릉도의 해양 환경은 다른 지역에 비해 안정적이며, 이는 울릉도의 자연적 특성이 덜 영향을 받았기 때문일 가능성이 있다. 또한 속초, 양양, 강릉 등에서는 갯녹음이

개선되고 있으며, 이는 갯녹음에 대한 지역적 관리 프로그램의 효과와 자연적인 복원 과정의 영향을 모두 고려할 수 있다. 반면, 포항시와 울산시처럼 과거 갯녹음이 심각하게 진행되었던 지역에서 2022년 조사에서 눈에 띄게 갯녹음이 감소한 것은 관리 및 복원 프로그램의 영향에 기인하는 것으로 판단할 수 있다.

### 2. 서해안 갯녹음 진행의 불균형적 양상

서해안의 조사 결과에 따르면, 대부분의 지역

에서 건강한 상태를 유지하고 있으나, 일부 지역에서는 갯녹음이 빠르게 진행되며 심각 상태의 비율이 증가하고 있는 것으로 확인되었다. 자월도와 덕적도1에서는 진행 및 심각 상태가 다른 지역에 비해 높은 비율로 나타났으며, 이는 서해안에서도 국지적으로 갯녹음이 빠르게 진행되고 있는 해역이 존재함을 나타낸다. 서해안은 수심이 얕고 조차가 커서 바닥이 주로 모래와 펄로 이루어져 있어 바다숲의 형성에 불리한 환경을 갖고 있으며, 이로 인해 기반암의 노출 면적이 적어 해조류가 자라기 어려운 특성이 있다.

또한, 서해의 갯녹음 불균형 양상을 분석한 결과, 태안반도와 장산곶은 황해 저층냉수의 영향을 받는 해역으로, 연중 수온이 낮게 유지된다. 여름철에도 해조류의 생육 조건이 비교적 안정적으로 유지되며, 갯녹음의 진행 속도가 느리게 나타날 수 있다. 반면, 자월도와 덕적도는 황해 저층냉수의 영향권에서 벗어난 해역으로, 하절기에는 표층 수온이 상승하여 상대적으로 높은 수온에 도달할 수 있다(Lim et al., 2008). 이로 인해, 해조류는 고온 스트레스를 받아 생리적 기능이 저하되고 피도가 감소하게 되며, 감소한 피도의 공간을 무절석회조류가 차지하여 우점화될 가능성이 높다. 이러한 피도의 감소와 무절석회조류의 공간 점유 증가는 서해안 자월도와 덕적도 지역의 갯녹음을 가속화하는 요인으로 작용할 수 있다.

따라서, 자월도와 덕적도와 같은 특정 해역에서는 정기적인 수온 관측과 표층 수온에 따른 갯녹음 진행 경향의 모니터링이 필요하며, 이 지역에 맞춘 맞춤형 관리 프로그램이 요구된다.

### 3. 남해안에서의 복원 및 안정화 양상

남해안의 갯녹음 조사 결과에 따르면, 연도별로 일부 변동이 있었으나 대부분의 지역이 상대적으로 안정적인 상태를 유지하고 있다. 여수, 순천, 고흥, 장흥 등 해역에서는 정상 상태 비율이 높은 수준을 유지하고 있으며, 이는 한국수산자원공단(FIRA)에서 추진한 바다숲 조성사업

의 긍정적 효과가 일부 지역에서 관찰된 결과일 가능성이 크다. 실제로, 여수와 고흥 해역에서는 바다숲 조성사업을 통해 해조류 피도가 회복되고 생물 다양성이 증가한 사례가 보고된 바 있다(한국수산자원공단, 2022).

한편, 울산 및 부산 지역에서 갯녹음이 여전히 지속되고 있는 원인은 동한 난류의 연중 지속적인 유입이 해당 지역의 해수 온도를 일정하게 유지시키며, 이로 인해 무절 석회조류의 생장이 촉진되는 것으로 해석된다(Kim et al., 2020; Lee et al., 2022). Lee et al. (2022)의 연구에서는 동한 난류가 부산-울산 연안에 지속적으로 유입됨으로써 계절과 관계없이 일정한 온난수 공급을 유지시킨다고 보고하였다. 이러한 환경적 특성은 서해안과는 뚜렷하게 차별화된 요인이며, 이로 인해 부산-울산 지역에서는 서해안과 달리 갯녹음의 지속 현상이 뚜렷하게 나타나는 것으로 보인다. 따라서, 부산-울산 지역에 대한 맞춤형 관리 전략이 필요하며, 이러한 해양 환경의 특이성을 반영한 지역별 관리 방안이 요구된다 할 수 있다.

### 4. 제주도에서의 악화 경향과 동부 지역의 취약성

제주도는 전체적으로 큰 변동은 없었으나, 진행 및 심각 상태의 비율이 연도별로 점진적으로 증가하는 경향이 확인되었다. 특히, 제주도 동부 지역(조천읍, 구좌읍, 성산읍)에서는 갯녹음이 상대적으로 심각하게 나타나 동부 지역의 해양 환경이 다른 지역에 비해 더 큰 영향을 받고 있음을 암시한다. 제주도 서부 지역에 비해 동부 지역의 갯녹음 상태가 더 심각한 것은 해류의 흐름 차이, 동부 지역의 얕은 수심, 해양 환경의 이질성에 기인할 가능성이 있다. 특히, 구좌읍과 성산읍의 경우, 동해안 난류의 일부 영향을 받을 수 있어 여름철 표층 수온이 높게 유지되면서 해조류의 고온 스트레스가 증가할 가능성이 제기된다.

추자면과 같은 일부 지역에서는 갯녹음이 완화된 긍정적인 경향도 관찰되었다. 이러한 경

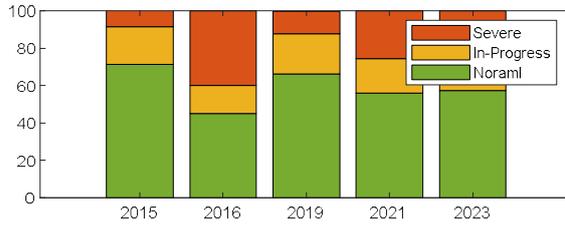


FIGURE 6. Whitening status of the coast of Jeju City

향은 황해 저층냉수의 유입, 바다숲 조성사업의 효과, 해류의 특성 변화와 같은 요인이 복합적으로 작용했을 가능성이 있다. 제주도 해역의 2015년, 2019년, 2021년, 2022년 조사 결과를 비교한 결과, 그림 6에서와 같이 진행 및 심각 상태의 비율이 점진적으로 증가하고 있음을 확인할 수 있었다. 제주도 지역에 대한 지속적인 관리와 복원이 필요한 것으로 판단된다.

5. 데이터의 시간적 불일치와 변동 가능성

본 연구에서는 2014년부터 2023년까지의 장기 관찰 자료를 사용하여 갯녹음의 연도별 변동 경향을 분석하였다. 이 과정에서 2019년의 조사가 3월-4월에 수행되었고, 다른 연도의 조사 시기(6월-8월)와의 시간적 불일치가 존재한다.

3월-4월의 해조류 피도는 6월-8월에 비해 상대적으로 더 높게 나타날 가능성이 있으며, 이러한 시간차로 인해 2019년 데이터의 피도 값이 다른 연도에 비해 상대적으로 높게 관찰될 가능성이 존재한다. 그러나, 본 연구의 목표는 장기적인 변동 경향을 파악하는 것이며, 2~3개월의 시간차가 10년간의 전체적인 장기 변화 패턴에 미치는 영향은 매우 제한적일 것으로 판단된다. 이에 따라, 2019년 데이터를 다른 연도의 데이터와 동일한 기준으로 사용하였다.

6. 항공초분광 기술의 유용성

우리는 갯녹음 조사를 위해 이용한 항공초분광 기술이 기존의 미흡했던 과학잠수조사의 많은 부분을 채워줄 수 있음을 확인하였다. 과학

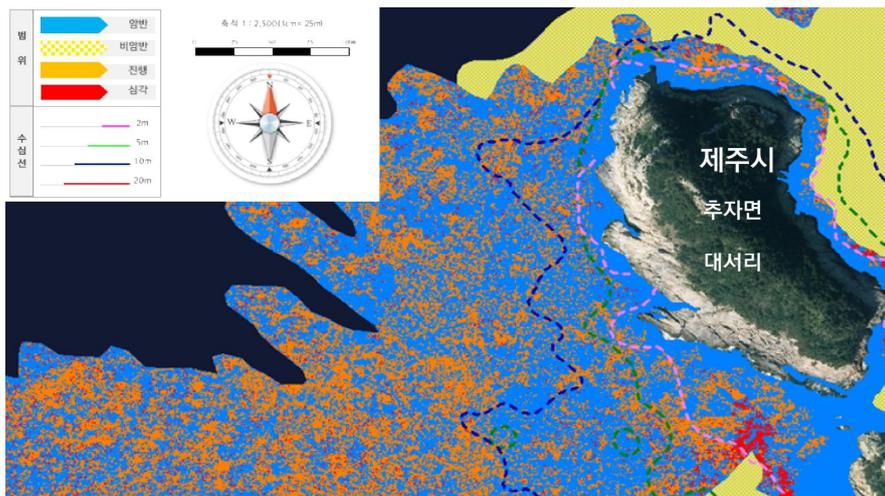


FIGURE 7. Case study on mapping the status of coralline algae bleaching in certain areas of Jeju Island after processing hyperspectral imagery (within 20m Depth)

잠수조사가 광대한 지역에서 선택된 몇 개의 지역에 대한 조사만을 바탕으로 전체를 추측하는 것과는 달리 항공초분광 기술은 해양 환경의 '시간과 공간의 스냅샷'을 포착하여 영역 전체에 대한 해양 생태계의 변화를 시각적으로 '지도화' (그림 7)할 수 있어, 갯녹음이 확산되는 속도나 패턴을 추적할 수 있게 해준다. 물론 과학잠수조사는 여전히 필요하며, 항공초분광 기술의 분류 및 정확도 향상을 위한 기초적인 방법으로 반드시 필요하다. 하지만, 한번 구축된 잠수조사 자료는 라이브러리로 구축되어 재사용이 가능하기 때문에 항공초분광 기술은 갯녹음 조사에 큰 장점을 갖는다 할 수 있다. 앞으로 이를 더 발전시켜 공간정보 기반의 분석 기술, 예를 들면, 갯녹음이 해양 서식지의 생태적 다양성에 미치는 변화를 경고하고, 특정 종이 갯녹음으로 인해 사라질 위기에 처해 있는지 파악하며, 다양한 해양의 오염 물질이 우리나라 연안에 전달되는 과정 및 변화 추이를 시각화하여 맞춤형 보존 전략을 개발할 수 있을 것으로 기대한다.

## 결 론

본 연구에서는 2014년부터 2023년까지의 한국 연안(동해, 서해, 남해, 제주도)의 갯녹음 상태를 항공초분광영상 분석기술을 통해 추출하여, 각 지역의 갯녹음 진행 양상과 변화를 분석하였다. 분석된 갯녹음 영역 자료는 벡터화되어 면적 산출에 직접 활용되어 기존의 통계 방식보다 더 개선된 정확한 결과 자료를 구축할 수 있었다.

갯녹음은 많은 지역에서 감소하거나 안정화되는 경향을 보였으나, 일부 지역에서는 갯녹음이 여전히 심각하게 진행 중임을 확인할 수 있었는데, 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다. 첫째, 동해안에서는 울릉권, 강릉, 양양과 같은 지역에서 정상 상태의 면적 비율이 높아지는 등 복원 경향이 뚜렷하게 나타났다. 이는 해당 지역에서의 관리 프로그램이 효과적으로 작용했을 가능성을 시사하며, 해양 생태계 복원과 관리가 지속적으로 이루어질 경우 갯녹음의 개

선이 가능함을 보여준다. 둘째, 서해안의 경우 대다수 지역에서 정상 상태를 유지하고 있었으나, 자월도와 덕적도1과 같은 일부 지역에서는 진행 및 심각 상태 비율이 증가하여 국지적인 갯녹음 악화가 관찰되었다. 따라서 서해안의 특정 지역에 대한 정밀한 모니터링과 복원 대책이 필요하다. 셋째, 남해안에서는 여수, 순천, 고흥 등의 지역이 안정적인 생태계를 유지하고 있는 반면, 울산, 부산과 같은 지역에서는 갯녹음이 여전히 진행되고 있는 것으로 나타났다. 이는 지역 특성에 따른 해양 환경의 차이와 연관이 있을 수 있으므로, 지역별 특성에 맞춘 맞춤형 관리 방안을 마련할 필요가 있다. 넷째, 제주도는 서부 지역에 비해 동부 지역에서 갯녹음 진행이 심화된 경향이 나타났으며, 특히 조천읍과 구좌읍에서는 심각한 상태 비율이 높게 나타났다. 이는 지역적 특성에 따른 해양 환경의 차이로 인한 것으로 추정되며, 제주도 동부 지역의 경우 추가적인 생태 복원과 환경 보호 대책이 필요하다.

전반적으로 2014년 이후 동해안과 남해안 지역에서는 갯녹음이 감소하는 경향을 보였고, 서해안과 제주도에서도 건강한 생태계를 유지하는 지역이 많다. 이는 각 지역에서 시행된 관리 프로그램의 효과를 일부 확인할 수 있는 결과라 할 수 있다. 그러나 특정 지역, 특히 대도시 주변의 연안에서는 여전히 갯녹음이 심각하게 진행되고 있는 사례들이 존재하며, 이러한 지역을 대상으로 갯녹음 발생의 근본 원인을 찾아 대책 마련이 시급하며, 이와 함께 맞춤형 관리와 복원이 필요하다. 특히 제주도 동부 및 서해안 일부 지역처럼 빠르게 갯녹음이 진행 중인 지역에 대한 정밀 모니터링과 생태 환경 변화에 대한 체계적 연구가 요구된다. 이러한 연구는 지역별로 갯녹음에 대한 다양한 요인(예: 해양 온도, 오염, 자연적 복원력 등)을 반영한 종합적 접근이 향후 연구를 통해 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 한국 연안 갯녹음의 진행 양상을 항공초분광영상 분석기술을 통해 체계적으로 파악함으로써, 지역별 특성에 맞춘 갯녹음 관리 및 복원 전략 수립이 필요함을 언급하였다. 또,

초분광영상 기술이 갯녹음 파악 및 추후 다양한 관련 연구를 가능케하여 이를 통한 보다 정밀한 자료 생성을 위한 기술의 실용성을 입증하였다. 향후 연구에서는 갯녹음 발생 원인과 해양 환경 요소 간의 연관성을 더욱 심층적으로 조사하여, 보다 효율적이고 지속 가능한 해양 생태계 복원 방안이 제시될 수 있기를 바란다. 

## REFERENCES

- Allredge, A.L. and M.W. Silver. 1988. Characteristics, dynamics and significance of marine snow. *Progress in Oceanography* 20(1):41–82.
- An, J.G. and Y.S. Lee. 2021. Marine algal communities of Geumo Island, Dadohaehaesang National Park in the central southern coast of Korea. *Journal of National Park Research* 12(2): 97–102 (인중관, 이용수. 2021. 남해안 중부 다도해해상국립공원 금오도 해조군집. *국립공원연구지* 12(2): 97–102).
- Andres, R.J., T.A. Boden, F.M. Bréon, P. Ciais, S. Davis, D. Erickson, J.S. Gregg, A. Jacobson, G. Marland, J. Miller, T. Oda, J.G.J. Olivier, M.R. Raupach, P. Rayner and K. Treanton. 2012. A synthesis of carbon dioxide emissions from fossil–fuel combustion. *Biogeosciences* 9(5):1845–1871. doi: 10.5194/bg–9–1845–2012.
- Barbier, E.B. 2017. Marine ecosystem services. *Cell Press* 27(11):R507–R510.
- Bennion, M., J. Fisher, C. Yesson and J. Brodie. 2018. Remote Sensing of Kelp (Laminariales, Ochrophyta): Monitoring Tools and Implications for Wild Harvesting. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture* 27:127–141. <https://doi.org/10.1080/23308249.2018.1509056>.
- Brando, V.E., J.M. Anstee, W. Magnus, P.J. Dekker, A. Torras and R. Palma. 2015. Global coastal, estuarine, and inland water quality monitoring. *Environmental Science and Technology* 48(3):1242–1250.
- Choi, S.K. 2022. Ecological evaluation of marine algal distribution characteristics in the coastal waters of Jeju Island. Korea Institute of Ocean Science and Technology Research Report (최선경. 2022. 제주도 연안의 해조류 분포 특성을 이용한 생태학적 평가. 한국해양과학기술원 연구보고서).
- De, K., M. Nanajkar, M. Arora, M. Nithyananda, S. Mote and B. Ingole. 2021. Application of remotely sensed sea surface temperature for assessment of recurrent coral bleaching (2014–2019) impact on a marginal coral ecosystem. *Geocarto International* 37:4483–4508. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1886345>.
- Deysher, L. 1993. Evaluation of remote sensing techniques for monitoring giant kelp populations. *Hydrobiologia* 260–261:307–312. <https://doi.org/10.1007/BF00049033>.
- Diaz, R.J. 2001. Overview of hypoxia around the world. *Journal of Environmental Quality* 30(2):275–281.
- Evans, K., J.O. Schmidt, K.A. Addo, M.J. Bebianno, D. Campbell, J. Fan, R. Gonzalez–Quiros, E.Y. Mohammed, M.G. Shojaei, V. Smolyanitsky and C.–I. Zhang. 2024. Delivering scientific evidence for global policy and management to ensure ocean sustainability. *Sustainability Science*

- 10:1-15. doi: 10.1007/s11625-024-01579-2.
- Fujita, D. 2002. Current status of 'Isoyake' in the world. *Journal of Fisheries Engineering* 39(1):41-46.
- Gang, Y.G. 1985. Annual variations of sea temperature, air temperature, and sea surface temperature differences in the East Sea. *Journal of the Korean Society of Oceanography* 18(3): 151-160 (강용균. 1985. 동해의 수온, 기온 및 해면 온도차의 연 변화. *한국해양학회지* 18(3): 151-160).
- Gao, K., J. Beardall, D.P. Häder, J.M. Hall-Spencer, G. Gao and D.A. Hutchins. 2019. Effects of ocean acidification on marine photosynthetic organisms under the concurrent influences of warming, UV radiation, and deoxygenation. *Frontiers in Marine Science* 6(322):1-15. doi: 10.3389/fmars.2019.003221.
- Hedley, J.D., A.R. Harborne and P.J. Mumby. 2005. Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing* 26(10): 2107-2112.
- Hoegh-Guldberg, O., E.S. Poloczanska, W. Skirving and S. Dove. 2017. Coral reef ecosystems under climate change and ocean acidification. *Frontiers in Marine Science* 4(158):1-21. doi: 10.3389/fmars.2017.00158.
- Hong, C.H. 2019. Effects of sea temperature on air temperature at the east and west coastal areas of Korea during winter. *Journal of Korean Society for Marine Environment and Energy* 22(4): 259-271 (홍철훈. 2019. 동계 한반도 동·서 연안역 기온에 미치는 수온의 영향. *한국해양환경에너지학회지* 22(4): 259-271).
- Hwang, S.I., D.K. Kim, B.J. Seong, S.K. Jeon, J.I. Bae and B.H. Jeon. 2017. Influence of climate change on the spread of whitening in Jeju coastal waters. *Korean Journal of Environment and Ecology* 31(6):529-536 (황성일, 김대권, 성봉준, 전수경, 배종일, 전병현. "제주 연안에서 기후변화가 갯녹음 확산에 미치는 영향." *Korean J. Environ. Ecol* 31(6): 529-536).
- Jung, H.S. 1994. Methodological Studies on the Investigation of Nearshore Environment Using Scientific SCUBA Diving. Korea Institute of Ocean Science and Technology Report (정형석. 1994. 과학적 SCUBA 다이빙을 활용한 연안 환경 조사 방법론 연구. *한국해양연구원 보고서*).
- Jung, H.S., G.W. Cho, K.H. Jung, J.H. Kim, S.H. Shin, Y.W. Seo, J.S. Kang and I.K. Lee. 1998. Ecological characteristics of whitening phenomenon in the coastal area of Seogwipo, Jeju Island. *Algae* 13(3):361-374 (정호성, 조기웅, 정경호, 김지희, 신종현, 서영환, 강재신, 이인규. 제주도 서귀포 연안의 백화현상에 대한 생태학적 특성. *Algae* 13(3):361-374).
- Kay, S., A. Avillanosa, V.V. Cheung, H.N. Dao, B.J. Gonzales, H.P. Palla, R.A. Praptiwi, A.M. Queiros, S.F. Sailley, J.C.C. Sumeldan, W.M. Syazwan, A.Y.-H. Then and H.B. Wee. 2023. Projected effects of climate change on marine ecosystems in Southeast Asia. *Global Change and the Future Ocean* 10.
- Kessouri, F., J.C. McWilliams, D. Bianchi and S.B. Weisberg. 2021. Coastal eutrophication drives acidification, oxygen loss, and ecosystem change in a major

- oceanic upwelling system. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118(21):1–10. doi: 10.1073/pnas.2018856118.
- Kim, C.M., J.W. Lee and T.H. Kwon. 1995. Terrain analysis of Odaesan national park using digital elevation model. *Korean Journal of Environment and Ecology* 9(1):70–76 (김철민, 이준우, 권태호. 1995. 수치고도모형을 이용한 오대산 국립공원지역의 지형분석. *응용생태연구* 9(1):70–76).
- Kim, J.H., H.S. Yoo, K.S. Kim and S.C. Kim. 2018. Characteristics of tidal currents in the central western coastal waters of Korea by season. *Journal of the Korean Navigation and Port Research* 42(3): 301–314 (김중훈, 유하상, 김경수, 김석천. 2018. 서해중부 연안의 계절별 조류 특성. *한국항해항만학회* 42(3): 301–314).
- Kim, M.K. and K.T. Kim. 2000. Research on seaweeds of Ulleungdo and Dokdo: I. Decline of species composition and changes in seaweed. *Algae* 15(2): 199–124 (김미경, 김기태. “울릉도, 독도의 해조류 연구: I. 해조류의 종조성 감소와 해조상의 변화.” *Algae* 15(2):199–124).
- Korea Fisheries Resources Agency (FIRA). 2016. Identification and countermeasures for green tide (Bak-Hwa) phenomenon: enhanced restoration of Bak-Hwa by region. Korea Fisheries Resources Agency. <https://fira.or.kr> (Accessed May 5, 2023) (한국수산자원관리공단. 2016. 백화현상 식별 및 대응방안: 지역별 백화 복원 강화. 한국수산자원관리공단).
- Korea Fisheries Resources Agency (KFRA). 2022. Final Report on the Sea Forest Creation Project. Korea Fisheries Resources Agency (한국수산자원공단. 2022. 바다숲 조성사업 최종보고서. 한국수산자원관리공단).
- Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST). 2018. Study on the Behavior of the Cold Bottom Water Mass in the Yellow Sea and Its Impact on the Ecosystem. KIOST Research Report (한국해양과학기술원. 2018. 황해 저층냉수괴의 거동과 생태계에 미치는 영향 연구: 2단계 최종보고서. 한국해양과학기술원 연구보고서).
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA). 2022. Characteristics of Sea Surface Temperature and Changes in the Marine Ecosystem of the West Sea. KHOA Research Report (한국해양조사원. 2022. 서해 해역의 수온 특성과 해양 생태계 변화. 한국해양조사원 연구보고서).
- Kwon, C.J. 2015. Brown algae that form an underwater forest. *ScubaNet* 5(1): 23–29 (권천중. 2015. 바다 속 숲을 이루는 갈조류. *스쿠버넷* 5(1): 23–29).
- Lee, B.G., Y.H. Ahn and Y.C. Choi. 2005. Calculation of whitening area using satellite imagery. *Journal of Marine and Environmental Research, Jeju University* 29(2):97–101 (이병걸, 안영화, 최영찬. “위성영상을 이용한 갯녹음 면적 산출에 관한 연구.” *제주대 해양과환경연구논문집* 29(2):97–101).
- Lim, D., M. Kang, P. Jang, S. Kim, H. Jung, Y. Kang and Y. Kang. (2008). Water Quality Characteristics Along Mid-western Coastal Area of Korea. *Ocean and Polar Research*, 30, 379–399. <https://doi.org/10.4217/OPR.2008.30.4.379>.
- Minghelli-Roman, A. and C. Dupouy. 2014. Correction of the Water Column Attenuation:

- Application to the Seabed Mapping of the Lagoon of New Caledonia Using MERIS Images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 7:2619–2629. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2307956>.
- National Institute of Marine Investigation (NIMDI). 2020. Analysis of Changes in the Marine Environment of the East Sea and the Impact of the East Korean Warm Current. National Institute of Marine Investigation Report, Busan, Korea (국립해양조사원. 2020. 동해의 해양 환경 변화와 동한난류의 영향 분석. 국립해양조사원 보고서, 부산).
- National Oceanographic Research Institute (NORI). 2022. Study on the characteristics of tidal currents in the West Sea. Ministry of Oceans and Fisheries Report (국립해양조사원. 2022. 서해안 조류 특성 연구. 해양수산부 보고서).
- Park, S.W. and J.A. Lee. 2023. Current status of management and ecological and policy suggestions for whitening in Korea. *Ocean and Polar Research* 45(3):173–183 (박성욱, 이주아. “우리나라 갯녹음 관리 현황과 생태적·정책적 제언.” *Ocean and Polar Research* 45(3):173–183).
- Paulus, E. 2021. Shedding light on deep-sea biodiversity—A highly vulnerable habitat in the face of anthropogenic change. *Frontiers in Marine Science* 8.
- Satpati, G.G., S. Sengupta and R. Pal. 2022. Seaweeds: The ecological roles, the economic benefits and the threats for changing the carbon cycle. In *Sustainable Global Resources of Seaweeds Volume 1*, A. Ranga Rao and G.A. Ravishankar, Eds. Cham: Springer, pp. 1–45. doi: 10.1007/978-3-030-91955-9\_16.
- Steneck, R.S., M.H. Graham, B.J. Bourque, D. Corbett, J.M. Erlandson, J.A. Estes and M.J. Tegner. 2002. Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future. *Environmental Conservation* 29(4):436–459. doi: 10.1017/S03768929020003221.
- Van de Putte, A.P., H.J. Griffiths, C. Brooks, P. Bricher, M. Sweetlove, S. Halfter and B. Raymond. 2021. From data to marine ecosystem assessments of the Southern Ocean: Achievements, challenges, and lessons for the future. *Frontiers in Marine Science* 8:637063.
- Velásquez, V.M., R.L.G. Raimundo, R.S. Rosa and A.F. Navia. 2020. The use of ecological networks as tools for understanding and conserving marine biodiversity. In *Marine Coastal Ecosystems Modelling and Conservation*, Cham: Springer, pp. 179–202. doi: 10.1007/978-3-030-58211-1\_9.
- Volent, Z., G. Johnsen and F. Sigernes. 2007. Kelp forest mapping by use of airborne hyperspectral imager. *Journal of Applied Remote Sensing* 1. <https://doi.org/10.1117/1.2822611>.
- Ward, D., J. Melbourne-Thomas, G.G. Pecl, K. Evans, M. Green, P.C. McCormack, C. Novaglio, R. Trebilco, N. Bax, M.J. Brasier, E.L. Cavan, G. Edgar, H.L. Hunt, J. Jansen, R. Jones, M. Lea, R. Makomere, C. Mull, J.M. Semmens, J. Shaw, D. Tinch, T.J. van Steveninck and C. Layton. 2022. Safeguarding marine

life: conservation of biodiversity and ecosystems. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 31:65–100.

Zoffoli, M., R. Frouin and M. Kampel. 2014. Water Column Correction for Coral Reef Studies by Remote Sensing. *Sensors (Basel, Switzerland)* 14:16881–16931. <https://doi.org/10.3390/s140916881>.

**KAGIS**