

가시화 기술을 이용한 식물플랑크톤의 탐지에 대한 연구

박치완 · 황재동¹ · 편용범² · 이경훈^{3*}

국립부경대학교 수산물리학과, ¹국립수산과학원 남동해수산연구소, ²한국수산해양공학연구소, ³국립부경대학교 해양생산시스템관리학부

A Research on Phytoplankton Identification Using Visualization Technology

Chiwan Park, Jae Dong Hwang¹, Yongbeam Pyeon² and Kyounghoon Lee^{3*}

Department of Fisheries Physics, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

¹South-East Fisheries Institute, National Institute of Fisheries Science, Tongyeong 53085, Republic of Korea

²Korea Fisheries Maritime Engineering Institute, Busan 48508, Republic of Korea

³Division of Marine Production Management, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

We analyzed the intrinsic wavelengths of two phytoplankton, *Cochlodinium polykrikoides* and *Karenia mikimotoi*, under specific external wavelengths. Spectral analysis showed that *C. polykrikoides* had a maximum radiance of 148, an effective range of 104–183, and an effective width of 69, with a narrow, tall cylindrical spectral shape. *K. mikimotoi* showed a maximum radiance of 147, an effective radiance range of 101–199, and an effective width of 84, with a narrow, steeply sloped conical spectral shape. Although both exhibited similar maximum brightness values, their spectral widths and shapes differed. An image deep learning experiment for red tide identification was conducted. The recognition rate for *C. polykrikoides* ranged from 52% to 93%, with an average of 82% and a standard deviation of 6.58%. For *K. mikimotoi*, the recognition rate ranged from 50% to 91%, with an average of 81% and a standard deviation of 7.23%. Validation experiments using a red tide sensor developed with 520 nm green and 620 nm red wavelengths confirmed its high potential for foreign substance detection at green wavelengths. The red tide detection sensor demonstrated maritime operational stability. Further experiments could enable the development of an artificial intelligence-based classification model to enhance the measurement accuracy.

Keyword: Red tide, Specific external wavelengths, Species identification, Monitoring

서 론

남해안을 중심으로 발생하는 적조는 우리나라 연안 어류 양식 산업에 심각한 피해를 초래하고 있다(Han and Lee, 2022). 실제 적조로 인한 어업 피해액은 1995년 764억원, 2003년 215억원, 2007년 115억원, 2013년 247억원, 2014년 74억원에 해당하며, 특히, 2013년에는 방제 및 피해 복구에만 약 600억원이 투입되는 등 그 경제적 영향은 막대하다(KIOT, 2020). 이와 같은 피해는 단순한 경제적 손실을 넘어서 생태계 및 사회 전반에 걸친 문제로 인식되고 있으며, 이에 따라 전 세계적으로도 적조 발생의 조기 예보 및 방제 기술 개발에 대한 정부와 연구기관의 투자가 증가하고 있다. 우리나라에서도 과거부터 적조 대응을 위한 다양한 과학적 접근이 시도되어 왔으며, 2000

년부터 2012년까지 총 225억원 규모의 기초 원천기술 개발 연구가 수행된 바 있다(KIOT, 2018b). 그러나 현재까지 실질적으로 현장에 적용 가능한 기술은 황토 살포법이 유일하며, 대체 기술의 상용화는 아직 미흡한 상황이다. 이로 인해 효과적인 조기 경보 및 대응 체계의 필요성이 꾸준히 제기되고 있다. 국내 적조는 1961년 진해만 인근에서 처음 관찰된 이후 1995년부터 발생 빈도가 급격히 증가하였으며(Lee et al., 2023), 주요 유해종으로는 *Karenia mikimotoi*, *Cochlodinium polykrikoides*, *Gyrodinium* sp. 등이 보고되고 있다(KMI, 2004). 이 중에서도 *K. mikimotoi*와 *C. polykrikoides*는 점액 물질, 유해산소, 독성 물질을 분비하여 어류를 비롯한 기타 수산유용생물에 광범위한 피해를 주는 대표적 유해종으로서, 동일 해역에서 동시 혹은 시간차를 두고 출현하는 종교대 현상도 관찰되고 있으므로,

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 629. 5889 Fax: +82. 51. 629. 5886

E-mail address: klee71@pknu.ac.kr

 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.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2025.0588>

Korean J Fish Aquat Sci 58(5), 588-596, October 2025

Received 31 May 2025; Revised 24 June 2025; Accepted 16 September 2025

저자 직위: 박치완(대학원생), 황재동(연구관), 편용범(부소장), 이경훈(교수)



Fig. 1. Configuring the spectrum recognition method.

보다 정밀한 생태학적 분석이 필요하다(Kim et al., 2004; Lee et al., 2018, 2021; Li et al., 2019; Sakamoto et al., 2021). 이러한 생물학적인 복잡성과 피해 규모를 고려할 때, 유해조류가 번성하기 전 조기 탐지가 가능한 모니터링 기술이 필요하며, 이를 위한 다양한 탐색 기술이 최근 활발히 연구되고 있다. 특히, 음향 기반 탐지 시스템, 유전자 분석 기법, 고해상도 인공위성 자료 활용, 해양환경자료의 정밀 분석 등 다양한 기술들이 개발되고 있으며(Jang, 2015; KIOST, 2015), 한국해양과학기술원은 위성 해색 자료 기반의 적조 지수(red tide index)를 개발하는 등 실용화 가능성도 확대되고 있다(Shin et al., 2017). 해외에서는 DNA 기반 유전자 탐침 기술이 활발히 개발되고 있으며(KIOST, 2021), 국내에서는 유독성 와편모류의 출현이 보고되고 있으나, 여전히 발생지, 유입경로 등에 대한 정보는 부족하고, 낮은 출현 빈도로 인해 검출 분석에 어려움이 따른다(Jung et al., 2015). 또한, MODIS 해색 위성을 활용한 적조 탐지는 연안에서 탐지 정밀도를 향상시켰으나(Hu et al., 2005), 초기 단계의 탐지나 탁한 해역에서는 오탐지 가능성이 존재한다(Shin et al., 2017). 따라서, 이러한 한계를 극복하기 위해서는 해양물리(marine technology), 생명과학(biotechnology), 정보기술(information technology) 등 융복합 기술을 통한 체계적인 적조 관측 체계가 필요하며, 최근에는 해양생물자료 분석에 이러한 융합 기술을 적용하려는 시도가 활발히 이루어지고 있다(Jung et al., 2015; Kim et al., 2025).

본 연구는 이러한 문제 인식을 바탕으로, 가시화 기반 기술을 활용하여 특정 파장대의 광원에 대한 식물플랑크톤의 반응을 정량적으로 분석하고, 이를 통해 실시간 적조 탐지 및 분류를 위한 기술 개발 가능성을 제시하고자 한다.

재료 및 방법

적조생물 스펙트럼 분석

본 실험은 *C. polykrikoides*와 *K. mikimotoi*, 두 종의 적조생물을 대상으로 일정한 외부 파장에 따른 고유 파장을 분석하였다. 스펙트럼 분석과 디지털 가시화 측정을 위하여 해상도 (1920 × 1080 pixel), 촬영속도(image capture interval, 30 fps), 단일 카메라(GoPro 4; GoPro Inc., San Mateo, CA, USA)를 사용하였다. 영상 전처리를 위해서 측정 소프트웨어는 Thinkers EYES 2D (Tientech, Busan, Korea)를 사용하였다. 광원은 광량 조절이 가능한 Nd: Yag Laser (VA-II-N-532-Green; Viasho, Beijing, China)를 사용하여, 0.5 W, 0.6 W, 0.7 W의 조명 조건에 대해서 실험한 결과를 분석하였으며, Table 1과 같이 적조 예보종류 및 발령기준(NIFS, 2018)에 맞추어 사각형 유리수조

(480 × 250 × 275 mm)에 두 종류의 적조생물에 대한 개체밀도를 달리하여 실험을 수행하였다.

적조 판별 딥러닝(Deep learning) 시스템

적조 판별을 위해서는 탁수와 적조의 판별식이 중요하다. 용존유기물이 다량 발생할 경우에 정확한 판별 알고리즘이 탐지의 신뢰성을 높이는데, 본 연구에서는 deep neural network를 활용하여 인공지능 기반 식물플랑크톤의 스펙트럼 분석에 따른 분류를 수행하였다. 딥러닝 구현을 위하여 기존 플랫폼을 이용하였고, 영상 인식에 뛰어난 성능을 보여주는 convolutional neural networks (CNN)를 적용하였다. 본 연구는 가시화기법을 이용한 대상의 판별 방식으로서, 전체 이미지에서 객체가 관심 영역 대부분을 차지하므로 관심 영역 인식(object detection)을 위한 추가 전처리 과정이 요구되었다. 이를 위하여, 높은 인식 정확도와 실시간 처리가 가능한 you only look once (YOLOv2)를 본 연구에서 사용하였다.

딥러닝 기반 인식 방법은 Fig. 1과 같다. 먼저 데이터를 획득하고 전처리 과정 수행 후 학습을 한 뒤에 테스트 과정을 통해 검증을 확인하였다. YOLO 방법을 활용하여 화면 이미지에서 스펙트럼 인식 범위를 지정, 검출 및 인식을 동시에 수행하였다. 전처리 과정에서는 스펙트럼 분포 학습을 위한 반사 영상 강도 변환 작업을 수행하고 이미지 데이터를 생성하였다.

적조 판별 학습 실험

가시화 기술은 일정한 광원을 이용하여 투영된 영상을 디지털 영상기기로 획득하고, 영상처리기법으로 정량적 수치화를 수행하는 기술이다. 높은 신뢰성을 위하여 학습 과정은 다음과 같이 진행되었다.

먼저, 주요 적조생물 대상으로 600개의 이미지를 스펙트럼 이미지로 변환하였고, 고유 스펙트럼 특징을 학습하고 각 스펙트럼의 분류 기준을 도출하도록 training set와 모델 학습 중 성능 모니터링과 하이퍼파라미터 조정, 최적 조기 중단 시점(early stopping point) 결정을 위한 validation set으로 구성하였다. Training set은 판별 모델의 파라미터 학습에 사용되며, 모델의 패턴을 학습할 충분한 데이터를 제공하여 과소적합을 방지한

Table 1. Red tide organism measurement standard (based on 20 liters)

Red tide organism	Preliminary warning (cell/mL)	Warning (cell/mL)	Alert (cell/mL)
<i>Cochlodinium polykrikoides</i>	10	100	300
<i>Karenia mikimotoi</i>	500	1,000	2,000

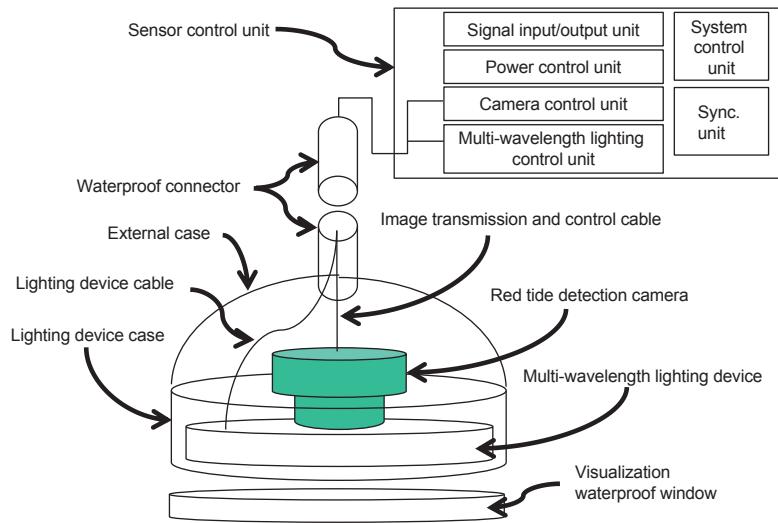


Fig. 2. Conceptual diagram of a red tide detection sensor consisting of a unique wavelength generator and an image storage unit.

다. Validation set은 적절한 구조와 너무 빠른 학습 진행에 따른 예외적인 학습 데이터의 손실을 막을 수 있다. 따라서, 적절하게 평가 신뢰도와 학습 데이터의 부족으로 성능 저하를 방지하기 위하여, 전체 이미지 중 training 이미지는 66.6%, validation 이미지는 33.3%의 비율로 학습시켰고, 각 학습의 적조생물 분포는 출현주의보에 해당하는 *C. polykrikoides*은 10 cell/mL, *K. mikimotoi*는 500 cell/mL을 기준으로 하였다. Training set은 각 적조 종별 광원 532 nm, 0.6 W 이미지 400장을 사용하였고, Validation set은 각 적조 종별 광원 532 nm, 0.5 W 및 0.7 W 이미지 200장을 사용하여 종류별 인식률 테스트를 수행하였다. 이미지 데이터 학습은 총 20,000번의 반복(iteration)을 수행하였고 총 17.2시간이 소요되었다.

적조생물 판별 센서

적조생물의 흡광(absorbance) 및 반사(reflectance) 스펙트럼의 차이를 발생시켜 적조생물을 탐지할 수 있는 녹색파장

(500–550 nm)을 조명 가능한 센서를 Table 2와 같이 제작하였다. 영상촬영장치는 초점이 고정된 렌즈 및 컬러 CCD (charge-coupled device)카메라와 그 부속품으로 구성되며, 조명장치와 연동되어 정지영상 및 연속영상을 촬영할 수 있다(Fig. 2). 외부케이스 및 방수 커넥터는 해수의 부식과 기밀유지를 위해 플라스틱 소재를 사용하고 외부케이스와 조명장치 케이스 연결부위는 고무재질의 패킹을 사용하여 방수 처리하였다. 해상용 방수 케이스는 조명 컨트롤 장치를 연결하는 커넥터와 케이블로 구성하였으며, 센서 제어부는 센서 내부 신호 정보와 외부 명령 등을 전달하는 신호 입출력, 센서에 전원을 공급하는 전원 제어부, 카메라의 셔터스피드, 노출 시간을 조정하는 카메라 제어부, 조명의 노출시간과 동작을 관리하는 조명 제어부, 동기화 신호를 발생하여 카메라와 조명을 제어하는 동기화 장치부 및 내부의 전기전자적 신호를 제어하고 모니터링 하는 시스템 제어부로 구성되고, 적조탐지 센서를 내부 및 외부의 컴퓨터 등에서 제어하도록 구성하였다(Fig. 3).

Table 2. Specifications of detection sensor for red tide

	Specification
Red tide sensor	<ul style="list-style-type: none"> · Size: Length 12.8 cm×Diameter 8.3 cm · Weight: 1.1 kg · Operating power: 24 V (DC) external power supply used · Maximum depth: 300 m · Viewing angle: 150° (underwater) · Communication Interface: ONVIF IP camera video transmission · Signal transmission method: Ethernet
Lighting device	<ul style="list-style-type: none"> · Specifications: Green (174.8 lumens: 520 nm) · Controller: Power supply and operation
Connectors and Cables	<ul style="list-style-type: none"> · Specification: Impulse MCBH male BulkHead connector · Cable length: 20 m

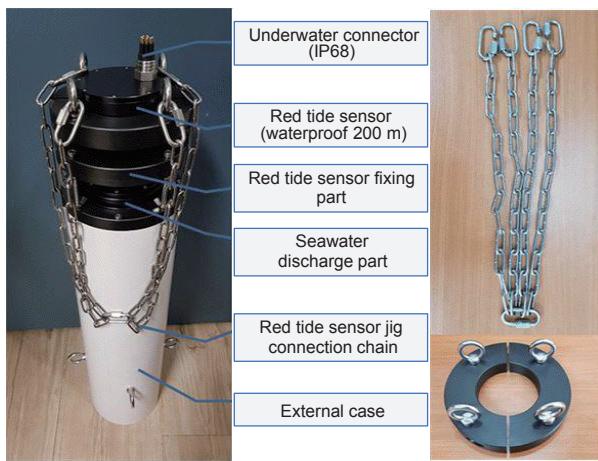


Fig. 3. Appearance of underwater photography device.



Fig. 4. Sea experiment for red tide detection.

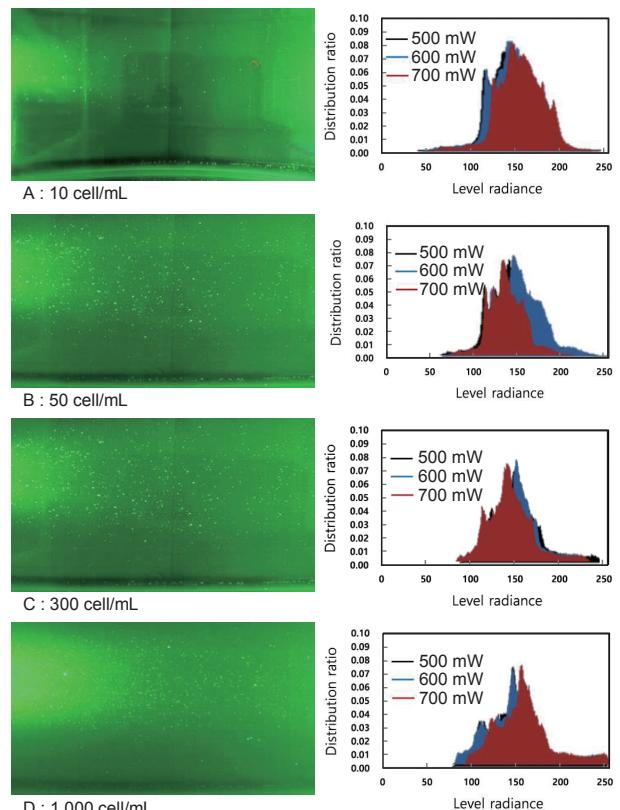
현장 실험 및 검증

적조 탐지 센서를 이용한 해상 실험은 적조 현장조사와 유해성 적조예찰을 목적으로 국립수산과학원 탐구 11호(R/V, 27 G/T)에 승선하여 2018년 8월 28일 9~14시까지 전남 여수에서 출발하여 나로항까지 탐구호의 상시 채수하는 4곳에서 적조탐지 실험을 진행하였다(Fig. 4). 채수정점은 수층별수온염분측정과 적조예측을 위한 채수를 하는 상시 지점으로, 측정시간은 12시 09분, 12시 45분, 13시 03분, 13시 21분으로 20~30분 간격으로 동일하게 진행하였다.

결과

Cochlodinium polykrikoides 스펙트럼 분석

*C. polykrikoides*은 10, 50, 300, 1,000 cell/mL에서 각각 532

Fig. 5. Analysis spectrum of *Cochlodinium polykrikoides* in each distribution, 0.5~0.7 w.

nm (0.5~0.7 W)의 광원을 주사하여 스펙트럼을 분석한 결과는 Fig. 5와 같다. Table 3은 10 cell/mL의 경우, 최대 143~147 radiance, 범위는 107 (최소)~182 (최대) radiance, 유효폭은 71 radiance였다. 50 cell/mL은 최대 139~142 radiance, 범위는 108 (최소)~176 (최대) radiance, 유효폭은 65 radiance였다. 300 cell/mL의 경우 최대 149~150 radiance, 범위는 104 (최소)~182 (최대) radiance, 유효폭은 71 radiance였으며, 1,000 cell/mL의 경우 최대 154~160 radiance, 범위는 104 (최소)~183 (최대) radiance, 유효폭은 69 radiance로 나타났다. 이때 스펙트럼의 모양은 모두 폭이 좁고 높은 원통형을 이루는 유사한 형태를 띠었다.

Table 3. Comparison analysis spectrum details for each volume of *Cochlodinium polykrikoides*

Distribution (cell/mL)	Maximum spectral brightness		Spectral brightness level		Effective spectral level width
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	
10	143	147	107	182	71
50	139	142	108	176	65
300	149	150	104	182	71
1,000	154	160	104	183	69

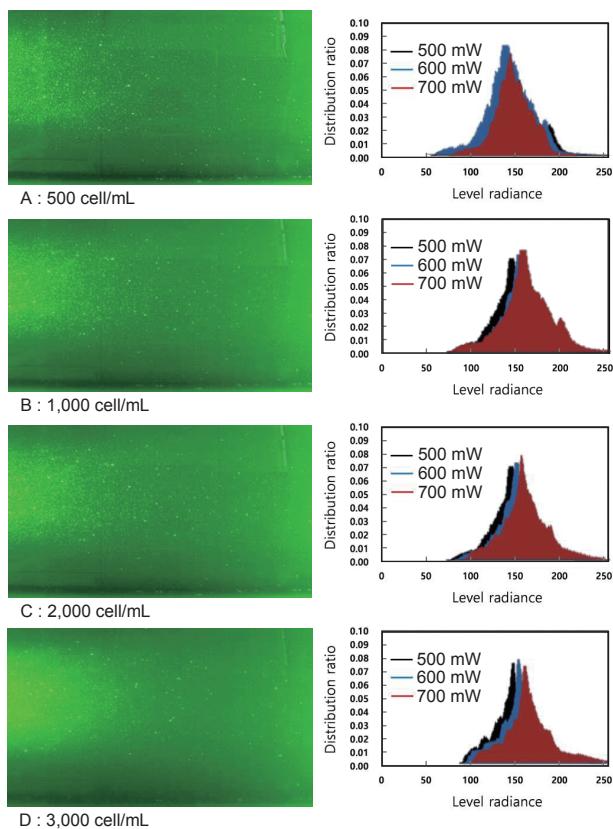


Fig. 6. Analysis spectrum of *Karenia mikimotoi* in each distribution, 0.5–0.7 W.

K. mikimotoi 스펙트럼 분석

*K. mikimotoi*은 500, 1,000, 2,000, 3,000 cell/mL에서 532 nm (0.5–0.7 W)의 광원을 주사하여 스펙트럼을 분석하였고, 그 결과는 다음과 같다(Fig. 6). Table 4는 500 cell/mL에서 최대 140–146 radiance, 범위는 104 (최소)–198 (최대) radiance, 유효 폭은 84 radiance였다. 1,000 cell/mL에서는 최대 141–152 radiance, 범위는 100 (최소)–196 (최대) radiance, 유효 폭은 84 radiance였다. 2,000 cell/mL에서는 최대 145–155 radiance, 범위는 101 (최소)–199 (최대) radiance, 유효 폭은 89 radiance였다. 3,000 cell/mL에서는 최대 144–160 radiance, 범위는 110 (최소)–196 (최대) radiance, 유효 폭은 81 radiance로 나타났다.

Table 4. Comparison analysis spectrum details for each volume of *Karenia mikimotoi*

Distribution (cell/mL)	Maximum spectral brightness		Spectral brightness level		Effective spectral level width
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	
500	140	146	104	198	84
1,000	141	152	100	196	84
2,000	145	155	101	199	89
3,000	144	160	110	196	81

스펙트럼의 모양은 모두 폭이 좁고 경사가 큰 원뿔형을 이루는 유사한 형태로 나타났다.

판별 학습 실험 결과

실험실에서 배양중인 주요 적조생물을 대상으로 고유 스펙트럼 특징을 이용한 적조 판별 학습 실험 결과는 Fig. 7과 같다. 전체 이미지 중 training set 이미지는 66.6%, validation set 이미지는 33.3%로 구성하여 학습을 진행하였다. *C. polykrikoides*의 스펙트럼 이미지는 총 600장을 사용하였고, 딥러닝 인식률은 최소 52%, 최대 93%, 평균 82%, 표준편차 6.58%로 확인되었다. 한편, *K. mikimotoi*의 스펙트럼 이미지는 총 600장을 사용하였고, 딥러닝 인식률은 최소 50%, 최대 91%, 평균 81%와 표준편자는 7.23%가 확인되었다(Fig. 8).

현장 실험

적조 탐지센서가 실제 해상에서는 이물질을 탐지하여 판별계 측이 가능여부를 검증하기 위하여 해상실험을 520 nm의 녹색광원을 사용하여 실시한 실험의 결과는 다음과 같다(Fig. 10). 12시 09분에 촬영한 스펙트럼은 최대 120–130 radiance, 범위는 70 (최소)–140 (최대) radiance였으며, 해수는 아주 맑고 이 물질은 관찰되지 않았다. 12시 45분에 촬영한 스펙트럼은 녹색광원에서 최대 120–130 radiance, 범위는 70 (최소)–140 (최대) radiance였으며, 해수는 아주 맑고 이물질 또한 관찰되지 않았다. 13시 03분에 촬영한 스펙트럼은 녹색광원에서 최대 120–130 radiance, 범위는 75 (최소)–140 (최대) radiance였으며, 해수는 아주 맑았으나 이물질이 일부분 관찰되었다. 13시 21분에 촬영한 스펙트럼은 녹색광원에서 최대 110–125 radiance, 범위는 25 (최소)–130 (최대) radiance였으며, 맑은 해수에 비해 이전보다 많은 양의 이물질이 관찰되었다. 이물질을 포함한 두 종류의 식물플랑크톤 딥러닝으로 분석한 결과, Fig. 9와 같이 *C. polykrikoides*의 결과(83.52%)의 유사성 보였으며, *K. mikimotoi*의 결과(81.00%)의 유사성이 나타나는 것으로 확인되었다. 이는 일반 이물질과 유사 식물성플랑크톤과 판별이 가능한 수준인 것으로 판단된다.

고 칠

우리나라를 비롯한 전 세계적으로 적조의 발생 영역, 기간 및

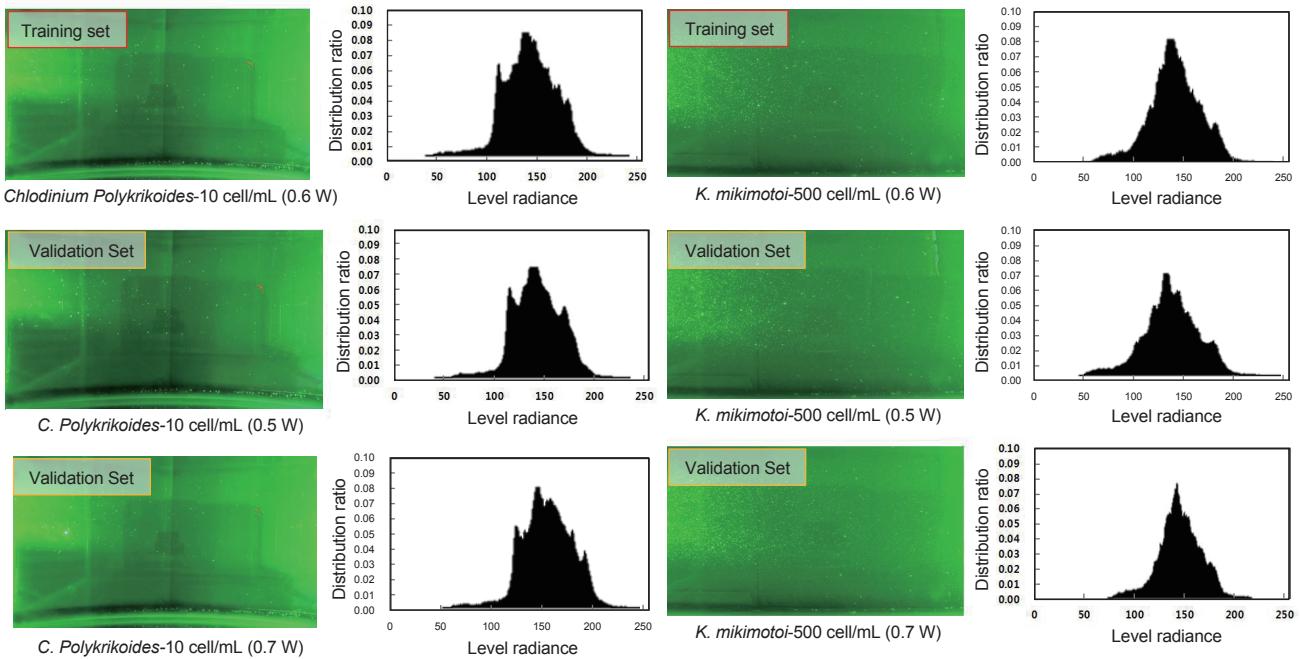


Fig. 7. Example of image use for discriminative learning.

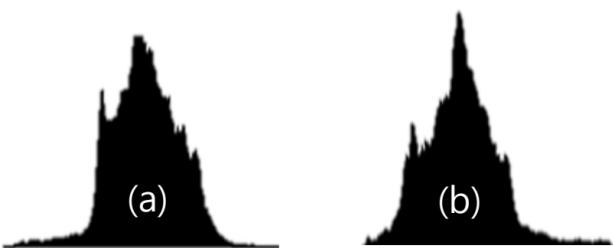
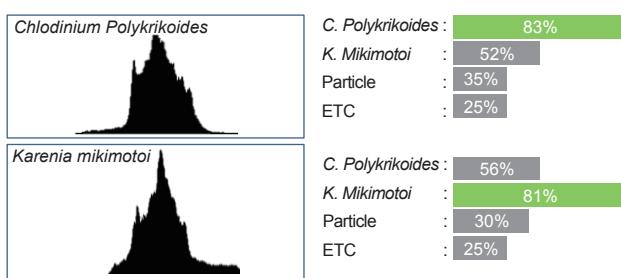
Fig. 8. Result of the synthetic spectrum of red tide organisms *Chodinium polykrikoides* (a), *Karenia mikimotoi* (b).

Fig. 9. Similarity test of red tide organism.

도, 사회적 경제적 손실은 나날이 증가하고 있다. 급속한 산업화와 생활 형태의 변화와 연안의 대규모 개발과 육상기인 오염 물질의 지속적인 증가로 인해 연안 해양환경오염이 급속하게 진행되어 생태계가 위협받고 있다. 우리나라 남해는 평균수심

이 101 m이고, 대륙붕이 발달되어 있을 뿐만 아니라, 섬이 많고 리아스식 해안으로 반 폐쇄형 해역으로서 임해산업단지의 조성, 배후도시발달, 어장밀집 등으로 유해해양생물의 발생 가능성이 높다. 또한, 수온이 계절별로 다른 우리나라 연안에서 발생하는 적조현상은 계절적인 종의 천이현상이 뚜렷하여 적조의 발생을 예측하는 것이 더욱더 어려워지고 있다(Wells et al., 2015; Lee et al., 2021).

따라서, 적조 발생 저감 대책을 수립하고 효율적으로 대처하기 위해서는 대상수역의 가시화기법을 통한 적조발생 탐지를 통한 지속적인 모니터링이 필요하다. 그러나, 위성(MODIS, GOIC)을 이용한 원격탐사는 이전 알고리즘 자료에 비하여 정확도는 높으나 위성간 사용하는 파장대가 다르고, 연안해역의 경우에는 대기보정과정에 의한 적조의 제거현상, 위치 정보로 인한 과대 및 과소평가와 위치오차, 용존유기물과 부유물질 간섭에 의한 과소평가 등에 의하여 초기 탐지가 어려우며(Kim et al., 2007, Son et al., 2011), 음향 기술은 조기탐색은 가능하나, 종식별의 어려움을 가지고 있으므로(Kang et al., 2013), 보다 체계적인 분류방법의 개발과 목표 종에 대한 조기탐지 센서 기술의 확립이 필요하다(Ahn et al., 2012; Son et al., 2012; KIOST, 2018a; Li et al., 2019).

이에 본 연구에서는 식물플랑크톤의 고유 스펙트럼 특성을 활용한 가시광 기반 딥러닝 판별 기법을 도입하였으며, *C. polykrikoides*와 *K. mikimotoi* 두 종류의 적조생물을 대상으로 다양한 농도의 스펙트럼 분포를 정량적으로 분석하였다. Table 5와 같이 *C. polykrikoides*는 좁고 높은 원통형 스펙트럼 형태

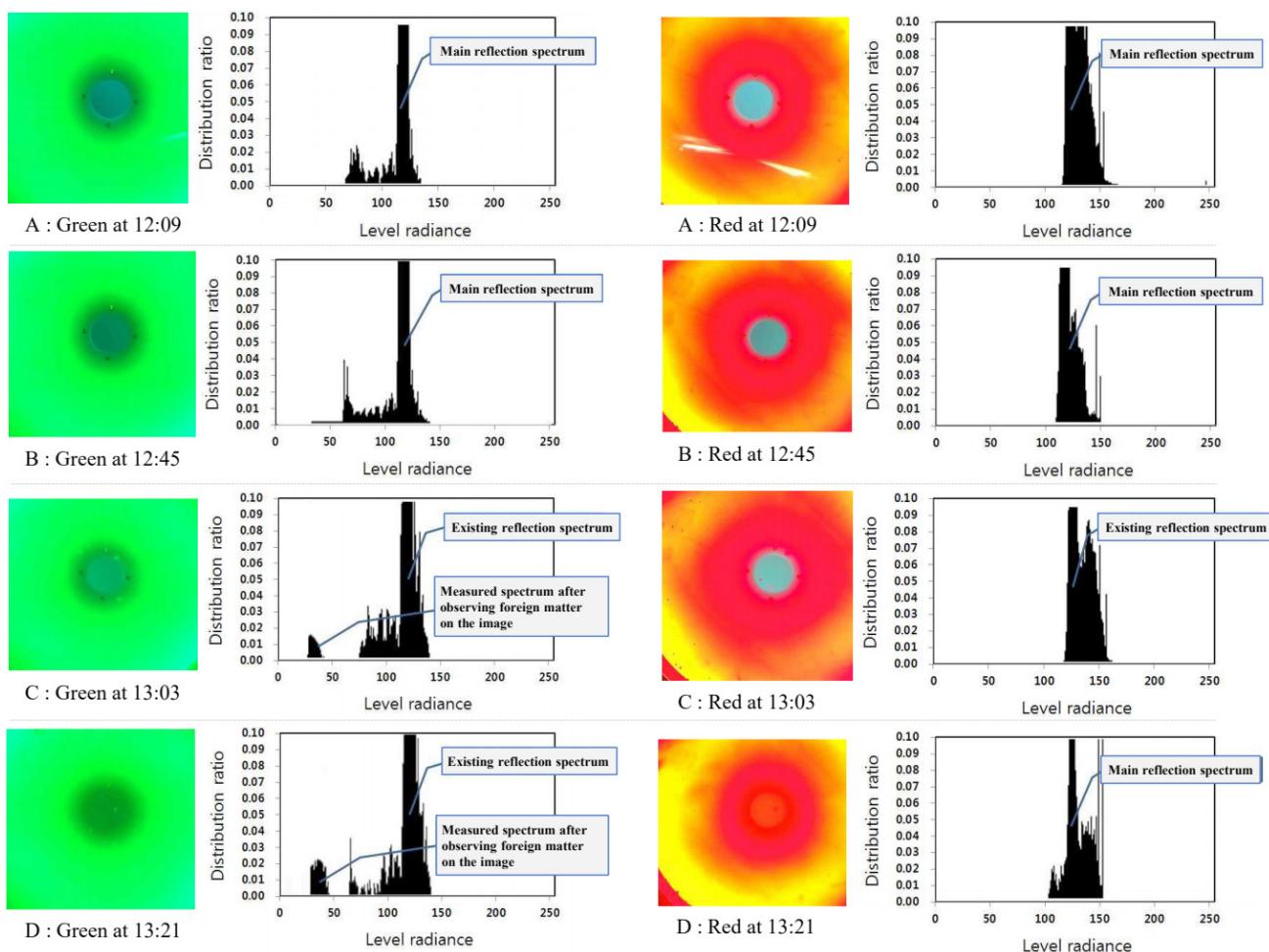


Fig. 10. Results of sea experiments using green lights source and spectrum graphs distribution ratio by level radiance at 12:09, 12:45, 13:03, and 13:21.

를, *K. mikimotoi*는 좁고 경사진 원뿔형 형태를 보였으며, 이러한 특징은 해수 내 개체수 밀도 변화(10–3,000 cell/mL)에 관계 없이 안정적으로 관측되어 종 판별의 핵심 지표로 활용이 가능한 것으로 판단된다(Ahn et al., 2009; Shin et al., 2017).

이러한 형태적 차이를 CNN 기반 딥러닝 모델에 학습시킨 결과, 심층학습 모델 적용 결과, 최대 93% (*C. polykrikoides*)와 91% (*K. mikimotoi*)의 분류 정확도 달성이 가능했으나 표준편차가 각각 6.58%와 7.23%로 나타나 데이터 증강 기법의 도입 필요성이 제기되었다. 특히, 패턴 인식 실패한 사례를 분석한

결과, 해수 내 부유 입자와의 중첩 간섭이 주요 오류 원인으로 파악되어 다중 파장 필터링 알고리즘의 개선이 요구된다(Xu et al., 2022; Liu et al., 2024). 향후, 객체 탐지(object detection) 기법과 분할(segmentation) 네트워크의 결합을 통해 미세 입자 배경을 제거하여 성능을 강화할 필요가 있다고 판단된다.

본 연구에서 개발한 센서는 520 nm 파장을 기반으로 하여 소형화 및 경량화가 가능하며, 향후 휴대용 장비로서의 활용 가능성도 확인되었다. 향후 연구에서는 다중 파장(490 nm, 680 nm) 동시 측정 시스템을 구축하면 클로로필 형광 반응과 세포 내 과

Table 5. Differences in the spectra of *Cochlodinium polykrikoides* and *Karenia mikimotoi*

Red tide organisms	Average maximum spectral brightness	Range	Maximum effective width	Shape
<i>C. polykrikoides</i>	148	104–183	69	Narrow and high cylindrical
<i>K. mikimotoi</i>	147	101–199	84	Cone shape with narrow width and large slope

립 분포를 종합적으로 분석할 수 있을 것으로 전망된다. 특히, LSTM (long short-term memory) 네트워크와의 융합을 통해 시공간적 적조 확산 패턴 예측 모델에 적용하면, 조기 경보 시스템의 정확도를 상당부분 향상시킬 수 있을 것으로 생각한다. 아울러 연안 관측 부표 네트워크에 본 기술을 접목할 경우, 기존 위성 관측의 4시간 주기를 15분 단위 실시간 감시 체계로 전환 가능할 것으로 사료 된다. 그러기 위해서는 실제 적조 해역에서의 추가 데이터를 확보하여 지역 특성과 환경 요인을 반영한 맞춤형 적조 예측 모델을 인공지능 기반으로 구축하는 것이 요구되므로, 본 연구에서 제신된 적조의 조기 탐지와 대응을 위한 실용적 기술 개발의 기초를 제공하였으며, 향후 실 해역 적용과 정량화된 지능형 판별 알고리즘 개발로 이어진다면, 우리나라 연안의 적조 대응 체계에 있어 중요한 전환점을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 국립수산과학원 연구사업인 패류양식 먹이생물 확보 및 생산기술개발(R2025046)에 의해 수행되었으며, 본 연구가 원활하게 수행될 수 있도록 지원해 주신 국립수산과학원 기후환경연구부 기후변화연구과 한인성과장 및 연구원분들께 감사드립니다. 또한, 본 논문을 사려 깊게 검토하여 주신 심사위원님들과 편집위원님께 감사드립니다.

References

- Ahn JH, Park YJ, Ryu JH, Lee B and Oh IS. 2012. Development of atmospheric correction algorithm for Geostationary Ocean Color Imager (GOCI). *Ocean Sci J* 47, 247-259. <https://doi.org/10.1007/s12601-012-0026-2>.
- Ahn YH, Moon JE, Seo WC and Yoon HJ. 2009. Inherent optical properties of red tide algal for ocean color remote sensing application. *J Korean Soc Mar Environ Energy* 12, 47-54.
- Han JD and Lee DC. 2022. A review of the mass-mortalities of sea-cage farm fishes. *J Fish Pathol* 35, 1-25. <https://doi.org/10.7847/jfp.2022.35.1.001>.
- Hu C, Muller-Karger FE, Taylor C, Carder K, Kelble C, Johns E and Heil CA. 2005. Red tide detection and tracing using MODIS fluorescence data: A regional example in SW Florida coastal waters. *Remote Sens Environ* 97, 311-321. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.013>.
- Jang D. 2015. Analysis of the technology development trend for the response of the 'red tide damage': Focused on the patent analysis. *J Marit Bus* 32, 75-102.
- Kang DH, Lim SH, Lee HB, Doh JW, Lee YH and Choi JW. 2013. Development and evaluation of real-time acoustic detection system of harmful red-tide using ultrasonic sound. *Ocean Polar Res* 35, 15-26. <https://doi.org/10.4217/OPR.2013.35.1.015>.
- Kim DI, Yun YH and Honjo T. 2004. Interspecific interactions between harmful dinoflagellates *Cochlodinium polykrikoides* and *Karenia mikimotoi*. In: The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science Conference. Bexco, Busan, Korea, 178-179.
- Kim MJ, Kim HJ, Park JS, Kang D, Cho S, Kim H, Baek SH, Park JJC, Han J, Kim KE and Jung SW. 2025. Quantitative real-time polymerase chain reaction (PCR) assay for rapid monitoring of the harmful algal bloom species *Cochlodinium polykrikoides*. *J Mar Sci Eng* 13, 227. <https://doi.org/10.3390/jmse13020277>.
- Kim YM, Byun YG, Huh Y and Yu KY. 2007. Detection of *Cochlodinium polykrikoides* red tide using MODIS level 2 data in coastal waters. *J Civ Environ Eng Res* 27, 535-540.
- KIOST (Korea Institute of Ocean Science and Technology). 2015. Planning and Research on Establishing an Integrated Red Tide Management System to Minimize Red Tide Damage in Tongyeong Waters. KIOST Report BSPE9931C1085410, KIOST, Busan, Korea.
- KIOST (Korea Institute of Ocean Science and Technology). 2018a. A Study on the Detection and Likelihood Assessment of HAB Outbreaks Using Big Satellite Databases. KIOST Report BSPE99503-1154-21, KIOST, Busan, Korea.
- KIOST (Korea Institute of Ocean Science and Technology). 2018b. Development Plan for an Artificial Intelligence-based Aquaculture Farm Marine Environment Management System. KIOST Report BSPE9944K-1113-04, KIOST, Busan, Korea.
- KIOST (Korea Institute of Ocean Science and Technology). 2020. Report of Red Tide Detection and Prediction System Construction and Verified to Minimize Red Tide Damage. KIMST Report BSPM61410-12308-3, KIOST, Busan, Korea.
- KIOST (Korea Institute of Ocean Science and Technology). 2021. Development of Control Technology for Identifying and Controlling the Mechanism of Marine Harmful Microalgae Bloom/Extinction. NRF Report BSPN68270-12516-3, KIOST, Busan, Korea.
- KMI (Korea Maritime Institute). 2004. Research on Effect Analysis and Improvement Measures of Red Clay Spraying for Red Tide Control. KMI Report 2004-18, KMI, Busan, Korea.
- Lee MO, Kim JK and Kim BK. 2021. Occurrence characteristics of *Cochlodinium polykrikoides* blooms in the Korean costal waters. *Sci Fish Oceanogr* 30, 1-10. <https://doi.org/10.22714/SFO.2021.30.1.1>.
- Lee MO, Kim JK and Kim BK. 2023. Occurrence of algal blooms and current research situations in Jinhae Bay, Korea. In: The Korean Society for marine Environment and Energy. Bexco, Busan, Korea, 116-121.
- Lee SJ, Jo GT, Ok HN, Yang YR and Choi HS. 2018. Risk assessment of three species of harmful red tide organisms, *Cochlodinium polykrikoides*, *Karenia mikimotoi*, and *Alexan-*

- drium affine*, and northern abalone *Haliotis discus hannai*. In: The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science. Gangneung-Wonju National University, Wonju, Korea, 266.
- Li X, Yan T, Yu R and Zhou M. 2019. A review of *Karenia mikimotoi*: Bloom events, physiology, toxicity and toxic mechanism. *Harmful Algae* 90, 101702. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.101702>.
- Liu R, Cui B, Dong W, Fang X, Xiao Y, Zhao X, Cui T, Ma Y and Wang Q. 2024. A refined deep-learning-based algorithm for harmful-algal-bloom remote-sensing recognition using *Noctiluca scintillans* algal bloom as an example. *J Hazard Mater* 467, 133721. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133721>.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2018. The Government Issue a Warning for Red Tide. Retrieved from https://www.nifs.go.kr/portal/pcon0000046/systA/actions-Conts.do?utm_source=chatgpt.com 20 Aug 20, 2018.
- Sakamoto S, Lim WA, Lu D, Dai X, Orlova T and Iwataki M. 2021. Harmful algal blooms and associated fisheries damage in East Asia: Current status and trends in China, Japan, Korea and Russia. *Harmful Algae* 102, 101787. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2020.101787>.
- Shin J, Min JE and Ryu JH. 2017. A study on red tide surveillance system around the Korean coastal waters using GOCI. *Korean J Remote Sens* 33, 213-230. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2017.33.2.9>.
- Son YB, Ishizaka J, Jeong JC, Kim HC and Lee T. 2011. *Cochlodinium polykrikoides* red tide detection in the South Sea of Korea using spectral classification of MODIS data. *Ocean Sci J* 46, 239-263. <https://doi.org/10.1007/s12601-011-0019-6>.
- Son YB, Kang YH and Ryu JH. 2012. Monitoring red tide in South Sea of Korea (SSK) using the geostationary ocean color imager (GOCI). *Korean J Remote Sens* 28, 531-548. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2012.28.5.6>.
- Wells ML, Trainer VL, Smayda TJ, Karlson BS, Trick CG, Kudela RM, Ishikawa A, Bernard S, Wulff A, Anderson DM and Cochlan WP. 2015. Harmful algal blooms and climate change: Learning from the past and present to forecast the future. *Harmful Algae* 49, 68-93. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2015.07.009>.
- Xu L, Xu L, Chen Y, Zhang Y and Yang J. 2022. Accurate classification of algae using deep convolutional neural network with a small database. *ACS EST Water* 2, 1921-1928. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.1c00466>.