

# 위성 빅데이터 기반 적조 탐지 및 발생경향 분석 연구

A study on the detection and likelihood  
assessment of HAB outbreaks using  
big satellite databases

2018. 02. 28.



한국해양과학기술원



# 제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “위성 빅데이터 기반 적조 탐지 및 발생 경향 분석연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2018. 02. 28.

총괄연구책임자 : 유신재

참 여 연 구 원 : 김나연 김미나 김수인

김수진 김예슬 김은영

김현아 공은진 권혁재

박광섭 박정욱 배광한

손영백 안소연 안소정

양혜림 이보람 이순미

이태희 Bui Xuan Thai





# 보고서 요약서

보고서 번호	BSPE99503-11542-1		연구기간	2015.01.01 - 2017.12.31	
본과제명	과학기술 빅데이터 공유·융합체계 구축				
연구과제명	위성 빅데이터 기반 적조 탐지 및 발생 경향 분석연구 (A Study on the detection and likelihood assessment of HAB outbreaks using big satellite databases)				
연구책임자	유 신 재	참여 연구원수	총 : 21명 내부 : 2명 외부 : 19명	연구비	정부: 394,000 천원 기업:            천원 계: 394,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원		참여기관명		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	xv, 201
<p><input type="checkbox"/> 연구의 목표</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 빅데이터 처리 기술 활용 적조 탐지 위성자료 재처리 및 적조 발생 환경 분석</li> <li>○ 정확도가 높은 적조 탐지 알고리즘 개발</li> <li>○ 적조 발생 경향 및 가능성도(likelihood) 분석 체계 구축</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> 연구 내용 및 결과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 적조종의 광특성 기반 적조 탐지 알고리즘 개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 주요 적조종 광학 모델 개발</li> <li>- 적조 탐지 정확도 검증</li> <li>- 정확도 높은 인공신경망 알고리즘 개발</li> </ul> </li> <li>○ 적조 빅데이터 분석 플랫폼 운영 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 위성 빅데이터 처리시스템에서 적조 관련 해석 위성자료 처리(TuPiX OC)</li> </ul> </li> <li>○ 적조 발생관련 환경자료의 DB 구축 및 적조 발생 환경 분석 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 위성 빅데이터 처리시스템에 과거 적조 관련 환경자료 DB 구축(해양, 기상, 해황자료)</li> <li>- 적조 빅데이터 처리 및 분석 방법 개발 및 종합적 평가 체계 마련</li> </ul> </li> </ul>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	유해성 적조, 빅데이터 분석, 원격탐사, 적조 탐지, 인공신경망			
	영 어	Harmful Algal Bloom (HAB), Big Data Analysis, Remote Sensing, Red tide Detection, Neural network algorithms			

# 요 약 문

## I. 제목

“위성 빅데이터 기반 적조 탐지 및 발생 경향 분석 연구”

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

1990년대 초반까지는 대한민국 남해안 해역의 적조는 내만 같이 지역적으로 국한되어 발생했다. 그러나 최근 유해성 적조는 *Cochlokinium polykrikoides* 적조종에 의해 발생되면서 발생 시기도 길어지고 지역적으로 국한되지 않고 남해 전역 및 동해 및 서해 연안 해역까지 확산되면서 어류의 집단폐사 등과 같은 경제적 손실과 생태계에 막대한 영향을 야기해 왔다. 기존의 적조 탐지는 직접 현장조사를 통해 이루어지기 때문에 많은 비용과 시간이 요구되며 지역적으로 국한된 조사가 대부분이어서 시·공간적으로 증대된 유해성 적조의 탐지 및 모니터링에 한계가 있다. 최근 원격탐사를 활용한 적조 탐지는 다양한 환경에서 존재하는 적조를 탐지 및 모니터링하기에 큰 잠재력을 가지고 있으나 충분하게 활용되지 못하고 있어 활용기술의 개발이 시급하다. 특히 원격탐사 기술과 체계적 자료 분석 기술을 융합한 적조 탐지 및 발생 경향 분석 기술 개발은 적조 피해 저감을 위한 체계적 적조 감시 체계 구축을 위해 중요하고 적조 발생 시 민감 지역에서 효율적이고 신속하게 적조 방제를 위한 과학적 자료 제공을 할 수 있다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 적조 광특성 기반 적조 탐지 알고리즘 개발
- 적조 빅데이터 분석 플랫폼 운영
- 적조 발생관련 환경자료를 적조 빅데이터 분석 플랫폼에 DB 구축 및 적조 발생 환경 분석

#### IV. 연구개발결과

- 적조종의 광특성 기반 적조 탐지 알고리즘 개발
  - *C. polykrikoides* 및 주요 적조종 반사도 모델 개발
  - 적조 탐지 정확도 검증 및 개선
  - 정확도 85% 이상의 수중 및 위성활용 인공지능망 알고리즘 개발
- 1998년 ~ 2016년 적조 발생 자료 기반 적조 시·공간 변화 파악
  - 적조 발생 상황 수집 분석 및 DB 구축
  - 시·공간 적조 발생-이동-확산-소멸 변화 분석
- 적조 발생관련 환경자료를 적조 빅데이터 분석 플랫폼에 DB 구축 및 적조 발생 환경 분석
  - 위성 빅데이터 처리시스템에 과거 적조 관련 환경자료 DB 구축(해양, 기상, 해황 자료)
  - 적조 빅데이터 처리 및 분석 방법 개발 및 종합적 평가 체계 구축
- 적조 빅데이터 분석용 플랫폼 구축
  - 위성 빅데이터 처리시스템에서 적조 관련 해색 위성자료 처리(TuPiX OC)

#### V. 연구개발결과의 활용계획

- 당 연구 결과의 활용성을 극대화할 수 있는 국가 R&D 사업의 개발
  - 적조 조기 탐지를 위한 무인 광학 계측 시스템 개발
  - 고해상도 위성을 이용한 적조예찰 및 확산 감시 시스템 개발
  - 위성 예찰과 해류순환모델을 결합한 적조 발생-이동-확산 경로 예보시스템 구축

# Summary

## I. Title

“A study on the detection and likelihood assessment of HAB outbreaks using big satellite databases”

## II. Objective of the study and its importance

Until early 1990s, HAB (harmful Algal Blooms) in the southern coast of Korea were limited within enclosed and semi-enclosed bays. Since 1995, HAB have been dominated by *Cochlokinium polykrioides* blooms. The duration and areal extent of HAB have been increasing in both inshore and offshore areas of Korean waters, particularly in the southern coastal waters of Korea and expanding to the eastern and western coastal waters. *C. polykrioides* blooms have caused enormous economical loss and negative impacts to ecosystems. Most HAB detection activities have been based on *in-situ* monitoring and consequently limited temporally and spatially. Satellite remote sensing, despite its potential, has not been fully utilized in detecting and monitoring HAB. Developing the essential techniques for satellite monitoring of HAB is the purpose of this study. Especially, the combined study of remote sensing and big data processing can develop new techniques for detection and likelihood assessment of HAB and provide useful scientific data set to systematically detect and monitor HAB.

## III. Content and scope of the study

- Development of HAB detection algorithm based on bio-optics
- Establishment and use of HAB analysis platforms.
- Satellited data re-analysis and environmental monitoring using big data analysis methods

#### IV. Result of research

- Development of red tide detection algorithm based on optical properties of HAB species
  - Development of reflectance model of *C. polykrikoides* and other major HAB species
  - Validation and improvement of HAB detection accuracy
  - Development of neural network algorithms with accuracies higher than 85% for in-water and Satellite applications
- Understanding of the spatial and temporal variations of HAB from 1998 to 2016
  - HAB occurrence data collection and database generation
  - Spatial and temporal variation of HAB occurrence-transport-spreading-disappearance
- Making of big data platform and analyzing HAB and environmental characteristics
  - Long-term HAB environmental data analysis using satellite big data system (ocean, atmosphere, and hydrography environmental data)
  - Development of HAB environmental data collection and analysis system
- Establishment of big-data platform for HAB analysis
  - Analysis of HAB database using satellite big data platform (TuPiX OC)

#### V. Application schemes

- Development of national R&D project to maximize the utility of the results of this study
  - Development of automatic optical detection systems for early detection of HAB
  - Development of high-resolution Satellite sensors for early detection

and monitoring of HAB

- Development of HAB forecasting systems for early detection-dispersion-expansion of HAB

# 목 차

<b>제 1 장 서론</b>	<b>1</b>
제 1 절 연구개발의 배경 및 필요성	1
제 2 절 연구개발의 목표 및 내용	5
<b>제 2 장 적조 과거 발생자료 분석</b>	<b>9</b>
제 1 절 적조속보 자료 추출	9
제 2 절 적조발생 상황 분석	12
<b>제 3 장 적조 현장 관측</b>	<b>23</b>
제 1 절 현장조사 개요	23
제 2 절 2015년 적조발생 해역 현장관측	30
제 3 절 2016년 적조발생 해역 현장관측	54
제 4 절 2017년 적조발생 해역 현장관측	68
<b>제 4 장 적조 탐지 알고리즘 비교 및 평가</b>	<b>76</b>
제 1 절 적조 탐지 연구	76
제 2 절 적조 탐지 알고리즘 평가	79
<b>제 5 장 적조종 광학적 특성 분석</b>	<b>99</b>
제 1 절 적조종 배양	99
제 2 절 적조종 흡광자료 분석	101
<b>제 6 장 적조 탐지 알고리즘 개발</b>	<b>106</b>
제 1 절 적조 탐지 알고리즘 개발의 필요성	106
제 2 절 <i>C. polykrikoides</i> 적조 탐지 반사도 모델 개발	111
<b>제 7 장 <i>C. polykrikoides</i> 적조 탐지 인공지능망 알고리즘 개발과 적용</b>	<b>128</b>
제 1 절 배 경	128
제 2 절 인공지능망의 종류와 특성	128
제 3 절 자료 및 방법	130
제 4 절 결과	132

제 5 절	인공신경망 알고리즘 성능의 평가 .....	136
제 6 절	적조 인공신경망 알고리즘에 의한 위성자료 분석 .....	139
<b>제 8 장</b>	<b>적조 빅데이터 분석 플랫폼 구축</b> .....	<b>145</b>
제 1 절	적조관련 빅데이터 구성 및 DB .....	145
제 2 절	적조분석 플랫폼 구성현황 .....	148
제 3 절	TuPiX Ocean Color .....	149
<b>제 9 장</b>	<b>적조 발생 환경 빅데이터 분석</b> .....	<b>150</b>
제 1 절	적조 발생해역 해황자료 .....	150
제 2 절	적조 발생 및 발생 환경 분석 .....	162
<b>제 10 장</b>	<b>결론</b> .....	<b>187</b>
	<b>참고문헌</b> .....	<b>189</b>
	<b>부 록</b> .....	<b>193</b>



# 표 차례

표 2-1-1. 적조예보 발령기준 .....	9
표 2-2-1. 1998 ~ 2016년 적조 발생 상황 .....	17
표 3-2-1. 2015년 현장조사 관측정보 .....	31
표 3-2-2. 2015년 현장조사 관측항목 .....	32
표 3-2-3. 2014년과 2015년 R정점 표층에서의 수온(℃)과 염분( <i>psu</i> )의 범위 .....	40
표 3-2-4. 2014년과 2015년 R정점 표층에서의 영양염 농도( $\mu M$ )의 범위 .....	50
표 3-2-5. R1 ~ R5정점 표층에서의 우점종 .....	52
표 3-2-6. B1, C1, D1, Z2, Z3정점 표층에서의 우점종 .....	52
표 3-3-1. 2016년 현장조사 관측정보 .....	56
표 3-3-2. 2016년 6월 조사 관측항목 .....	57
표 3-3-3. 2014년, 2015년의 적조 발생 해역(R정점)과 2016년 현장 조사 해역 표층 수온(℃)과 표층염분( <i>psu</i> )의 범위 비교 .....	67
표 3-4-1. 2017년 8월 관측정보. ....	69
표 3-4-2. 2017년 8월 관측항목 .....	70
표 4-2-1. 기존의 적조 탐지 방법 .....	79
표 4-2-2. 위성자료와 현장 적조 발생 자료를 이용한 적조 탐지 방법 정확도 평가	81
표 6-2-1. 반사도 시뮬레이션 입력 자료 .....	113
표 6-2-2. 반사도 시뮬레이션 입력 자료와 현장자료의 범위 비교 .....	113
표 7-3-1. MODIS-적조속보 Match-up 자료 .....	131
표 7-3-2. 신경망 훈련에 사용된 다중 영상 .....	131
표 7-4-1. 엽록소 농도에 따른 확률적 인공신경망 알고리즘의 예측 정확도 .....	132
표 7-4-2. 독립적 자료에 의한 In-water 인공신경망 알고리즘의 예측 성공률. ..	134
표 7-5-3. MODIS 다중 영상에 (비선별 자료) 대한 인공신경망 알고리즘의 예측 성공률 ·	135
표 7-4-4. MODIS 다중 영상에 (선별 자료) 대한 인공신경망 알고리즘의 예측 성공률 .....	135
표 7-5-1. MODIS 다중 영상에 (비선별 자료) 대한 PNN 인공신경망 알고리즘의 예측 성공률의 예 .....	138
표 8-1-1. 적조 빅데이터 구성 및 구축 현황 .....	145
표 8-2-1. 분산병렬처리 서버 노드별 사양 .....	148
표 9-1-1. 발생된 태풍의 이름과 기간 .....	157
표 9-2-1. 적조 발생 규모의 정의 .....	162
표 9-2-2. 적조 발생 지역구분 .....	163

# 그림 차례

그림 1-2-1. 연구 추진 체계 .....	7
그림 1-2-2. 연구 분담 내역 .....	8
그림 2-1-1. 국립수산과학원 “한국연안의 적조 발생 상황” 적조속보 예시 .....	10
그림 2-1-2. Digitizing한 적조속보의 (a) 원 자료와 (b) 균일한 격자로 재생성된 자료 .....	10
그림 2-1-3. 1998 ~ 2015년 한반도 전 해역의 적조 발생 공간적 분포. ....	11
그림 2-2-1. 적조 발생의 시·공간적 변화 .....	18
그림 2-2-2. 적조 발생 시기 및 피해액 .....	21
그림 2-2-3. 2002 ~ 2013년 7 ~ 9월 남해안 적조 발생 빈도수 .....	22
그림 3-1-1. Optical density ( <i>O.D</i> ) 측정을 위한 UV VIS Spectrophotometer ..	26
그림 3-2-1. (a) 2015년 5월 조사정점, (b) 2015년 8월 조사정점(별표: R1 ~ R5 적조 발생 정점) .....	30
그림 3-2-2. 2015년 5월 표층과 저층에서의 (a) 수온( $^{\circ}\text{C}$ ), (b) 염분( <i>psu</i> ), (c) 밀도( $\sigma_t$ , $\text{kgm}^{-3}$ ), (d) 용존산소( $\text{mll}^{-1}$ )의 공간적 분포 .....	34
그림 3-2-3. 2015년 5월 표층과 저층에서의 전체 엽록소 <i>a</i> 농도( $\text{mgm}^{-3}$ )의 공간적 분포 ..	35
그림 3-2-4. 2015년 5월 표층과 저층에서의 (a) 질산염( $\text{NO}_3$ ), (b) 암모늄( $\text{NH}_4$ ), (c) 인산염( $\text{PO}_4$ ), (d) 규산염( $\text{SiO}_2$ ) 농도( $\mu\text{M}$ )의 공간적 분포 .....	36
그림 3-2-5. 2015년 8월 수온( $^{\circ}\text{C}$ ), 염분( <i>psu</i> ), 밀도( $\sigma_t$ , $\text{kgm}^{-3}$ )의 수직 분포 .....	38
그림 3-2-6. 2015년 8월 표층과 저층에서의 (a) 수온( $^{\circ}\text{C}$ ), (b) 염분( <i>psu</i> ), (c) 밀도( $\sigma_t$ , $\text{kgm}^{-3}$ ), (d) 용존산소량( $\text{mll}^{-1}$ )의 공간적 분포 .....	39
그림 3-2-7. 2014년과 2015년 R정점에서의 (a) 수온( $^{\circ}\text{C}$ )과 (b) 염분( <i>psu</i> )의 수직 분포 .....	40
그림 3-2-8. 2015년 8월 10-AU로 연속 측정된 엽록소 <i>a</i> 농도( $\text{mgm}^{-3}$ ) .....	41
그림 3-2-9. 2015년 8월 표층과 저층에서의 (a) 전체 엽록소 <i>a</i> 농도( $\text{mgm}^{-3}$ ), (b) 5 $\mu\text{m}$ 이하 엽록소 <i>a</i> 농도( $\text{mgm}^{-3}$ ), (c) 전체 엽록소 <i>a</i> 농도에 대한 5 $\mu\text{m}$ 이하 엽록소 <i>a</i> 농도 비율의 공간적 분포 .....	42
그림 3-2-11. 2015년 8월 표층과 저층에서의 총 부유물질량( $\text{mg}l^{-1}$ )의 공간적 분포 43	
그림 3-2-12. 2014년과 2015년 8월 (a) 적조가 발생한 R정점과 (b) 적조가 발생하지 않은 일부 정점에서의 총 부유물질량( $\text{mg}l^{-1}$ ) 비교 .....	43
그림 3-2-13. 2014년 8월 (a) 적조가 발생한 R정점 표층에서의 식물플랑크톤 흡광계수( $a_{ph}$ , $\text{m}^{-1}$ ) (b) 적조가 발생하지 않은 정점 표층에서의 식물플랑크톤 흡광계수( $a_{ph}$ , $\text{m}^{-1}$ ), 2015년 8월 (c) 적조가 발생한 R정점 표층에서의 식물플랑크톤 흡광계수( $a_{ph}$ , $\text{m}^{-1}$ ), (d) 적조가	

발생하지 않은 정점 표층에서의 식물플랑크톤 흡광계수( $a_{ph}, m^{-1}$ )	45
그림 3-2-14. 2015년 8월 (a) 적조가 발생한 R4정점 저층에서의 식물플랑크톤 흡광계수( $a_{ph}, m^{-1}$ ) 와 (b) 적조가 발생하지 않은 정점 저층에서의 식물플랑크톤 흡광계수( $a_{ph}, m^{-1}$ )	46
그림 3-2-15. 엽록소 $a$ 농도 ( $\mu g l^{-1}$ )에 따른 440 nm 비흡광 계수 분포. 데이터는 2014년과 2015년 8월 남해안 현장관측에서 얻어짐	46
그림 3-2-16. 2014년 8월 (a) 적조가 발생한 R정점 표층에서의 용존 유기물의 흡광계수 ( $a_g, m^{-1}$ ), (b) 적조가 발생하지 않은 정점 표층에서의 용존 유기물의 흡광계수( $a_g, m^{-1}$ ), 2015년 8월 (c) 적조가 발생한 R정점 표층에서의 용존 유기물의 흡광계수( $a_g, m^{-1}$ ), (d) 적조가 발생하지 않은 정점 표층에서의 용존 유기물의 흡광계수( $a_g, m^{-1}$ )	47
그림 3-2-17. 2015년 8월 표층, 저층에서의 (a) 질산염( $NO_3$ ), (b) 암모늄( $NH_4$ ), (c) 인산염( $PO_4$ ) 그리고 (d) 규산염( $SiO_2$ ) 농도( $\mu M$ )의 공간적 분포	49
그림 3-2-18. 2015년 8월 (a) N:P 비(점선: Redfield ratio 16:1, 실선: 현장 관측 비 10:1)와 (b) Si:P 비(점선: Redfield ratio 16:1, 실선: 현장 관측 비 36:1)	50
그림 3-2-19. 2015년 8월 적조가 발생한 R정점과 적조가 발생하지 않은 일부 정점 표층에서의 (a) 질산염( $NO_3$ ), (b) 암모늄( $NH_4$ ), (c) 인산염( $PO_4$ ), (d) 규산염( $SiO_2$ ) 농도( $\mu M$ ) 비교	50
그림 3-2-20. 2015년 8월 적조가 발생한 R정점과 적조가 발생하지 않은 일부 정점 표층에서의 식물플랑크톤 군집 조성	51
그림 3-2-21. FlowCam에서 포착된 R1 ~ R5정점과 B1, C1, D1, Z2, Z3정점 표층에서의 우점종. (a) <i>Cochlodinium polykrikoides</i> , (b) <i>Asterionella glacialis</i> , (c) <i>Pseudo-nitzschia turgidula</i> , (d) <i>Chaetoceros difficilis</i> , (e) <i>Bacteriatrum comosum</i>	53
그림 3-2-22. 현미경에서 포착된 R1 ~ R5정점과 B1, C1, D1, Z2, Z3정점 표층에서의 우점종. (a) <i>Bacteriatrum delicatulum</i> , (b) <i>Chaetoceros affinis</i> , (c) <i>Chaetoceros atlanticus</i> , (d) <i>Chaetoceros tortissimus</i> , (e) <i>Chaetoceros decipiens</i> , (f) <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> , (g) <i>Leptocylindrus minimus</i> , (h) <i>Chaetoceros compressa</i> , (i) <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	53
그림 3-3-1. (a) 2016년 6월 조사정점, (b) 2016년 8월 조사정점	55
그림 3-3-2. 2016년 6월 표층과 저층에서의 (a) 수온( $^{\circ}C$ ), (b) 염분( $psu$ ), (c) 밀도( $\sigma_t, kg m^{-3}$ ), (d) 용존산소( $ml l^{-1}$ )의 공간적 분포	59
그림 3-3-3. 2016년 6월 수온( $^{\circ}C$ ), 염분( $psu$ ), 밀도( $\sigma_t, kg m^{-3}$ )의 수직 분포	60
그림 3-3-4. 2016년 6월 표층과 저층에서의 전체 엽록소 $a$ 농도( $mg m^{-3}$ )의 공간적 분포	61
그림 3-3-5. 2016년 6월 표층과 저층에서의 (a) 질산염( $NO_3$ ), (b) 암모늄( $NH_4$ ), (c) 인산염( $PO_4$ ), (d) 규산염( $SiO_2$ ) 농도( $\mu M$ )의 공간적 분포	62

그림 3-3-6. 2016년 6월 표층과 저층에서의 총 부유물질량( $mg\ l^{-1}$ )의 공간적 분포	63
그림 3-3-7. 2016년 8월 표층과 저층에서의 (a) 수온( $^{\circ}C$ ), (b) 염분( $psu$ ), (c) 밀도( $\sigma_t$ , $kg\ m^{-3}$ ), (d) 용존산소( $ml\ l^{-1}$ )의 공간적 분포	65
그림 3-3-8. 2016년 8월 수온( $^{\circ}C$ ), 염분( $psu$ ), 밀도( $\sigma_t$ , $kg\ m^{-3}$ )의 수직 분포	66
그림 3-4-1. 2017년 8월 조사정점	69
그림 3-4-2. 2017년 8월 표층과 저층에서의 수온( $^{\circ}C$ ), 염분( $psu$ ), 엽록소 $a$ 농도 ( $mg\ m^{-3}$ ), 및 입자성유기탄소( $mg\ m^{-3}$ )의 공간적 분포	72
그림 3-4-3. 2017년 6월 수온( $^{\circ}C$ ), 염분( $psu$ ), 밀도( $\sigma_t$ , $kg\ m^{-3}$ )의 수직 분포	73
그림 3-4-4. 2017년 8월 관측된 반사도 스펙트럼.	75
그림 4-2-1. 2002년 8월 19일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소 $a$ 농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과	82
그림 4-2-2. 2003년 8월 22일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소 $a$ 농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과	84
그림 4-2-3. 2003년 10월 2일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소 $a$ 농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과	86
그림 4-2-4. 2004년 8월 6일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소 $a$ 농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과	88
그림 4-2-5. 2007년 8월 15일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소 $a$ 농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과	90
그림 4-2-6. 2007년 8월 21일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소 $a$ 농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과	92
그림 4-2-7. 2012년 10월 15일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소 $a$ 농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과	94
그림 4-2-8. 2013년 8월 6일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소 $a$ 농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과	96
그림 4-2-9. 2013년 8월 14일 R(a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소 $a$ 농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과	98
그림 5-1-1. 한국 연안에서 적조를 일으키는 4가지 종들. (a) <i>Cochlodinium polykrikoides</i> , (b) <i>Akashiwo sanguinea</i> , (c) <i>Alexandrium tamarense</i> , (d) <i>Scrippsiella trochoidea</i> .	100
그림 5-2-1. 440 $nm$ 에서의 흡광 계수와 엽록소 $a$ 농도( $\mu g\ l^{-1}$ )와의 관계	101
그림 5-2-2. (a) <i>Cochlodinium polykrikoides</i> , (b) <i>Akashiwo sanguinea</i> , (c) <i>Alexandrium tamarense</i> , (d) <i>Scrippsiella trochoidea</i> 의 비흡광 계수( $m^2\ mg^{-1}$ ) 스펙트럼	102
그림 5-2-3. 550 파장에서 규격화된 적조 4종의 비흡광 계수 스펙트럼	103

그림 5-2-4. (a) 배양된 <i>C. polykrikoides</i> 의 흡광 스펙트럼과 적조가 발생한 R정점에서의 흡광 스펙트럼 비교, (b) 배양된 <i>C. polykrikoides</i> 의 흡광 스펙트럼과 적조가 발생하지 않은 정점에서의 흡광 스펙트럼 비교 .....	104
그림 5-2-5. 배양실험 데이터를 이용한 반사도 시뮬레이션 결과 .....	105
그림 6-1-1. (a) 국립수산과학원 “한국연안의 적조 발생 상황”의 2007년 8월 17일자 적조 속보, (b) 같은 날의 MODIS Chl 자료(Kim et al., 2016), (c) MODIS true color image .....	107
그림 6-1-2. (a) 적조 배양종의 흡광스펙트럼 분포 (b) 일반적인 자연 해수 속 식물플랑크톤의 흡광스펙트럼 분포(IOCCG, 2006) .....	110
그림 6-2-1. 해수 구성요소의 농도에 따른 영향을 받는 반사도 .....	111
그림 6-2-2. 2014년과 2015년 8월 적조 발생 해역과 발생하지 않은 해역에서의 흡광 및 반사도 특성. (a) 식물플랑크톤 흡광계수, (b) 쇄설성 물질 흡광계수, (c) 용존유기물 흡광계수, (d) 반사도(Rrs) .....	115
그림 6-2-3. (a)와 (b) 정성·정량 분석 결과에서 <i>C. polykrikoides</i> 가 우점 정점에서 관측된 반사도 스펙트럼과, (c) 정성·정량 분석 결과에서 규조류 우점 정점에서 관측된 반사도 스펙트럼 특징 .....	116
그림 6-2-4. (a) Hydrolight simulation에서 계산된 <i>C. polykrikoides</i> 반사도 스펙트럼과 2014년과 2015년 적조 발생해역에서 관측된 스펙트럼 비교. (b) 모델 및 현장 적조 반사도를 547 파장으로 normalize한 스펙트럼. ....	117
그림 6-2-5. 2007년 8월 14일 적조 발생에서 관측된 (a) MODIS Aqua RGB 영상, (b) 엽록소 a 농도, (c) 적조 추정되는 위성 반사도와 현장관측 반사도, (d) 위성 반사도와 모델 반사도, (e) 위성-현장-모델 반사도를 547 로 normalize한 스펙트럼 ..	118
그림 6-2-6. 2007년 8월 17일 적조 발생에서 관측된 (a) MODIS Aqua RGB 영상, (b) 엽록소 a 농도, (c) 적조 추정되는 위성 반사도와 현장관측 반사도, (d) 위성 반사도와 모델 반사도, (e) 위성-현장-모델 반사도를 547 로 normalize한 스펙트럼. .	119
그림 6-2-7. 2013년 8월 13일 적조 발생에서 관측된 (a) MODIS Aqua RGB 영상, (b) 엽록소 a 농도, (c) 적조 추정되는 위성 반사도와 현장관측 반사도, (d) 위성 반사도와 모델 반사도, (e) 위성-현장-모델 반사도를 547 로 normalize한 스펙트럼. .	120
그림 6-2-8. 2015년 9월 8일 적조 발생에서 관측된 (a) MODIS Aqua RGB 영상, (b) 엽록소 a 농도, (c) 적조 추정되는 위성 반사도와 현장관측 반사도, (d) 위성 반사도와 모델 반사도, (e) 위성-현장-모델 반사도를 547 nm로 normalize한 스펙트럼 .....	121
그림 6-2-9. 엽록소 농도 30 에서의 와편모조류 적조종의 반사도 스펙트럼 .....	122
그림 6-2-10. 엽록소 농도 변화에 따른 <i>C. polykrikoides</i> 적조인 경우와 아닌 경우의 반사도 스펙트럼(빨간 선: <i>C. polykrikoides</i> 적조, 초록 선: 적조가 아닌 경우) .....	123

그림 6-2-11. (a) 엽록소 농도에 따른 반사도 스펙트럼의 유사도, (b) 특정 밴드에서의 443, 488, 531, 555 에서의 반사도 유사성 .....	124
그림 6-2-12. 엽록소 농도가 증가(5, 10, 15, 20, 30 )함에 따른 반사도 밴드 비 분포 변화 (빨간 원: 적조인 경우(C. polykrikoides 80% 우점), 초록 세모: 적조가 아닌 경우) .....	125
그림 6-2-13. 엽록소 농도가 일정할 때, 용존유기물질 농도에 따른 반사도 밴드 비 분포 .....	126
그림 6-2-14. C. polykrikoides 적조인 경우(빨간 원)와 아닌 경우(초록 세모)의 반사도 모델자료 및 현장자료(검정 세모, 검정 원)의 밴드 비 .....	127
그림 7-2-1. 확률적 신경망의 구조(Cheung and Cannons, 2012). .....	129
그림 7-4-2. 엽록소 농도와 확률신경망 알고리즘의 예측도의 관계 .....	133
그림 7-4-3. 역방전파신경망의 최종 구조 .....	134
그림 7-5-1. 확률적 신경망 알고리즘(PNN)과 기타 경험적 알고리즘의 예측도 비교 .....	136
그림 7-6-1. 2002년 9월 8일의 Cocchlo dinium 적조 분포. (a) 국립수산과학원 적조 속보. (b) MODIS 영상에서 인공신경망 알고리즘으로 계산한 적조분포. ....	139
그림 7-6-2. 2002년 9월 11일의 Cocchlo dinium 적조 분포. (a) 국립수산과학원 적조 속보. (b) MODIS 영상에서 인공신경망 알고리즘으로 계산한 적조분포 .....	140
그림 7-6-3. 2003년 8월 22일의 Cocchlo dinium 적조 분포. (a) 국립수산과학원 적조 속보. (b) MODIS 영상에서 인공신경망 알고리즘으로 계산한 적조분포 .....	141
그림 7-6-4. 2003년 9월 30일의 Cocchlo dinium 적조 분포. (a) 국립수산과학원 적조 속보. (b) MODIS 영상에서 인공신경망 알고리즘으로 계산한 적조분포 .....	141
그림 7-6-5. 2007년 8월 17일의 Cocchlo dinium 적조 분포. (a) 국립수산과학원 적조 속보. (b) MODIS 영상에서 인공신경망 알고리즘으로 계산한 적조분포 .....	142
그림 7-6-6. 2013년 8월 14일의 Cocchlo dinium 적조 분포. (a) 국립수산과학원 적조 속보. (b) MODIS 영상에서 인공신경망 알고리즘으로 계산한 적조분포 .....	142
그림 7-6-7. 2014년 8월 22일의 Cocchlo dinium 적조 분포. (a) 국립수산과학원 적조 속보. (b) MODIS 영상에서 인공신경망 알고리즘으로 계산한 적조분포 .....	142
그림 7-6-8. 2015년 9월 4일의 Cocchlo dinium 적조 분포. (a) 국립수산과학원 적조 속보. (b) MODIS 영상에서 인공신경망 알고리즘으로 계산한 적조분포 .....	144
그림 8-2-1. 적조 빅데이터 분석 체계 .....	148
그림 8-3-1. TuPiX OC를 이용한 위성 데이터 가시화 예 .....	149
그림 9-1-1. 한국해양자료센터의 조사 관측정점 (검은 원: 이번 연구에서 장기 관측 자료를 위해 사용된 정점) .....	151
그림 9-1-2. 2000~2013년 기간 동안의 연안정점(검은 원: 205-01, 206-01, 400-16	

의 평균값)과 외해정점(흰 원: 205-03, 206-03, 400-14의 평균값)의 표층에서의 (a) 수온( $^{\circ}\text{C}$ )과 (b) 염분(psu) time-series (회색 원: 각 정점들의 값) .....	152
그림 9-1-3. 2000~2013년 기간 동안의 연안정점(검은 원: 205-01, 206-01, 400-16의 평균값)과 외해정점(흰 원: 205-03, 206-03, 400-14의 평균값)의 (a) stratification index(회색 원: 각 정점들의 값)와 (b) 연안과 외해의 stratification index 차() time-series .....	152
그림 9-1-4. 2000~2013년 기간 동안의 (a) 부산(회색 원), 통영(검은 원), 여수(흰 원) .....	153
그림 9-1-5. (a) 통영(검은 원)과 여수(흰 원)에서의 월별 강수량(mm), (b) 남해안의 장마 기간(mm), (c) 장마 전, 장마 기간, 장마 후의 통영 (검은 막대)과 여수(흰 막대)에서의 강수량(mm) .....	155
그림 9-1-6. 2000~2013년 기간 동안의 가덕도(회색 원), 통영(검은 원), 여수(흰 원) 그리고 완도(빨간 원)에서의 월별 조차(m) .....	156
그림 9-1-7. 2000~2014년 기간 동안 한반도 전역에 영향을 미친 태풍의 진로(왼쪽 위의 빨간 숫자는 발생건수, 빨간 십자마크는 소멸위치를 나타냄) .....	159
그림 9-1-8. 2000~2013년 기간 동안 연안정점(검은 원: 205-01, 206-01, 400-16의 평균값)과 외해정점(흰 원: 205-03, 206-03, 400-14의 평균값) 표층에서의 (a) 질산염(), (b) 인산염(), 그리고 (c) 규산염() time-series (회색 원: 각 정점들의 값) .....	160
그림 9-1-9. 2000~2013년 기간 동안 연안정점(검은 원: 205-01, 206-01, 400-16의 평균값)과 외해정점(흰 원: 205-03, 206-03, 400-14의 평균값) 표층에서의 용존산소() time-series (회색 원: 각 정점들의 값) .....	161
그림 9-2-1. 적조 발생 지역구분(음영 영역: 적조 발생 해역, 노란색: 서해안, 빨간색: 남해안, 녹색: 동해안) .....	163
그림 9-2-2. 1998 ~ 2015년 (a) 적조 발생 해역(원그래프: 해역별 적조 발생 빈도수), (b) 적조 최대밀도() 계절 사이클, (c) 공간적 적조 발생 빈도수, (d) 월별 적조 발생 빈도수 .....	164
그림 9-2-3. 1998 ~ 2015년 7월, 8월, 9월 그리고 10월의 공간적 적조 발생 빈도수 .....	165
그림 9-2-4. 1998 ~ 2015년 각 지역별 적조 발생 빈도수 .....	166
그림 9-2-5. 1998 ~ 2015년 연별 (a) 적조 발생 빈도수, (b) 적조 지역적 범위( $^{\circ} \times ^{\circ}$ ), (c) 적조 최대밀도( $cell\text{m}l^{-1}$ ), (d) 적조 발생 규모 .....	167
그림 9-2-6. (a) 적조 발생 빈도수와 적조 최대밀도( $cell\text{m}l^{-1}$ )와의 관계, (b) 적조 지역적 범위( $^{\circ} \times ^{\circ}$ )와 적조 최대밀도( $cell\text{m}l^{-1}$ )와의 관계 .....	167
그림 9-2-7. 1998 ~ 2015년 남해안, 동해안 그리고 서해안에서의 일일 적조 최대밀도( $cell\text{m}l^{-1}$ ) time-series .....	169
그림 9-2-8. 1998 ~ 2015년 일일 적조 지역적 범위( $^{\circ} \times ^{\circ}$ ) time-series .....	169
그림 9-2-9. 1998 ~ 2015년 연간 적조 발생 시·공간적 변화 .....	170

그림 9-2-10. 1998 ~ 2015년 (a) 적조 시작 시기, (b) 적조 peak 시기(원의 크기는 최대밀도의 상대적 크기), (c) 적조 종료 시기의 공간적 분포 .....	171
그림 9-2-11. 1998 ~ 2015년 적조 발생 시기(파란 원: 시작 시기, 검은 원: peak 시기, 빨간 원: 종료 시기) .....	172
그림 9-2-12. 남해안 6지역에서의 적조 발생 시작 시기(회색 원)와 종료 시기(검정 원) ..	172
그림 9-2-13. 물리적 환경요인과 <i>C. polykrikoides</i> 적조 발생(초기-변성-소멸)간의 관계(Lee, 2008) .....	174
그림 9-2-14. 2013년 여름 동해안의 적조 발생에 관한 네 가지 메커니즘. (1) Lagrangian flow에 의한 동해로의 적조 유입; (2) 연안 용승으로 인한 영양염 공급; (3) 높은 일사량; (4) 25의 적조종 성장에 적절한 수온분포(Kim et al., 2016) .....	175
그림 9-2-15. 태풍의 단계별 풍속과 적조 지속-감소-소멸간의 관계(Lim et al., 2015) ..	175
그림 9-2-16. 한반도 해역의 연평균 표층수온 anomaly time-series .....	177
그림 9-2-17. 1998 ~ 2014년 적조 발생과 관련된 물리적 인자의 연평균 anomaly time-series .....	179
그림 9-2-18. 1993 ~ 2013년 지역별 적조 최초발생 빈도수(이 외, 2015) .....	180
그림 9-2-19. 고밀도 적조와 일평균 강수량(영양염 proxy)의 상관관계. (a) Lee (2006)의 분석결과, (b) Lee (2006)의 자료에 2004 ~ 2014년 자료를 추가한 분석결과 .....	181
그림 9-2-20. 2000 ~ 2014년 남해안 해역의 일일 바람방향 분포도 .....	182
그림 9-2-21. 2000 ~ 2014년 수직 수온 분포(x축: KODC 정선 관측정점 204-01부터 204-06까지의 거리(km)) .....	183
그림 9-2-22. 고흥 나로도 주변해역의 적조 발생 기작 (Lee, 2008) .....	184
그림 9-2-23. 2000 ~ 2014년 실제 적조 발생에 대한 적조 발생 예측결과 검증	185
그림 9-2-24. 물리적 환경인자와 적조 최초 발생 시작일과의 관계 (1998 ~ 2014년 climatological mean) .....	186
그림 9-2-25. 물리적 환경인자(광합성 유효광, 표층수온, 바람응력)와 연간 적조 최초 발생 시작일과의 관계 (1998 ~ 2014) .....	186





# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구개발의 배경 및 필요성

### 1. 연구배경

적조는 전 세계 연안 지역(한반도 주변 해역을 포함)에서 집단 폐사, 물리적 손상과 막대한 생태계에 영향을 야기해왔고, 최근 표층수온 상승과 같은 기후변화에 의한 영향으로 증가되고 있다.

1990년대 초반까지는 대한민국 남해안 해역의 적조는 내만 같이 지역적으로 국한되어 발생했다. 그러나 1995년 이후 유해성 적조는 dinoflagellate인 *Cochlodinium polykrikoides* 적조종에 의해 발생되면서 발생 시기도 길어지고 지역적으로 국한되지 않고 남해 전역 및 동해 및 서해 연안 해역까지 확산되면서 어류의 집단폐사 등과 같은 경제적 손실과 생태계에 막대한 영향을 야기해 왔다. *C. polykrikoides* 적조는 맑은 해역인 나로도와 남해도 사이에서 발생하여 남해안 전역으로 확대되고, 연도별 차이를 보이지만 서해안 및 동해 지역에서도 발생 된 것으로 보고되었다. 남해안 유해성 적조의 발생 원인은 연안의 해수와 외해의 해수가 만나는 지역에서 frontal mixing에 의해서 맑은 해역인 나로도 또는 남해도 부근해상에서 발생하여 강한 남서풍에 의해서 적조가 확산 되는 것으로 보고되었다. 그리고 남해안 유해성 적조의 중요한 특성 중에 하나는 지역적으로 국한되지 않고 남해 전역 및 동해 및 서해 연안 해역까지 확산되면서 많은 피해를 주는 것이다.

기존의 적조 탐지는 직접 현장조사를 통해 이루어지기 때문에 많은 비용과 시간이 요구되며 지역적으로 국한된 조사가 대부분이어서 시·공간적 증대된 유해성 적조의 탐지 및 모니터링에 한계가 있다. 특히, 현재까지 적조관련 연구를 통해서 방대한 적조 관련 자료 및 문헌이 존재하지만, 대부분의 연구가 이벤트성 현상을 다루고 있고 체계적 그리고 장기 경향 분석 연구가 결여되어 있으며, 과거 장기 적조 자료에 대한 DB 구축이 미미했다. 또한 특정 시기 및 제한된 해역에서만 적조 탐지 연구가 진행 진행되면서 적조 빅데이터 분석 기반 장기 모니터링 연구가 없었다.

본 연구에서는 원격탐사 기술과 체계적 자료 분석 기술을 융합한 적조 탐지 및 발생 경향 분석 기술 개발을 통하여 적조 피해 저감을 위한 체계적 적조 감시 체계 구축으로 적조 발생 시 민감 지역에서 효율적이고 신속하게 적조 방제를 위한 과학적 자료 제공하고자 한다. 첫째, 공동연구 기관인 한국과학기술정보연구원 맞춤형 위성 빅데이터 처

리시스템을 활용하여 적조 탐지 자료와 적조 발생 환경 자료 DB를 구축하고 다양한 자료를 재처리 및 재분석하여 장·단기 적조 발생 경향과 환경요인의 관계에 대한 가설을 제시할 것이다. 둘째, 적조 발생 해역의 현장관측을 통하여 자료 수집 및 발생 환경을 분석하고, 현장자료와 배양자료를 이용하여 적조종의 광학적 특성을 계측하여 원격탐사 기반 적조 탐지 알고리즘 개발 및 개선 연구를 수행할 것이다.

본 연구를 통해서 개발된 연구 결과는 적조 자료와 지리정보시스템을 연계하여 새로운 적조 탐지 기술을 제공하여 적조 방제 체계 구축에 활용 될 수 있으며, 기초 및 재해관련 연구에 빅데이터 분석 방법 및 시스템이 활용 될 수 있을 것이다.

#### 가. 국·내외 연구 동향

일본은 1970년대부터 정부차원의 집중적인 투자로 활발한 기초 적조 연구를 수행하였으며, 1980년대에는 적조생물의 발생기작, 생리, 생태특성, 유해성 연구에 집중했고, 1980년대 중반에는 적조생물과 패류치사기작에 대한 연구에 투자하였다. 1980년대 후반에는 휴면포자 분석 연구와 유해생물종의 독성 분석 연구를 수행했다(김, 2005). 중국은 1990년대 후반부터 정부차원의 적조 연구 예산 투입으로 적조생물의 발생기작, 생리생태 특성, 적조방제 연구에 집중했으며, 최근에는 적조 발생 메커니즘 규명과 제어기술 개발 연구가 활발히 이루어지고 있다(김, 2005). 미국은 1990년대 초부터 적조 연구를 시작하여 1997년부터 “ECO HAB (Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms) Research Project”를 통하여 적조의 기초과학 연구 진행, 정부기관(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration) 및 대학 등에서 적조 발생기작, 탐지기술, 독성, 생리, 적조구제 및 천적 연구를 진행하고 있다(김, 2005).

국내의 적조 연구는 1967년부터 학문적 접근을 시작하여, 1980년대까지 적조생물의 분류와 생태학적 기초연구를 수행하였다. 1990년 이후에는 적조생물의 환경생리, 이동확산, 적조방제 기술개발, 적조예보와 제어기술개발을 위한 연구가 진행되었고, 적조 발생기작, 생물 상호관계, 휴면포자연구, 적조 발생모델 등으로 다양화되었으나 상호 연계성이 적었고, 대체적으로 적조와 관련된 연구들이 산발적으로 진행되었다(김, 2005). 최근 원격탐사를 활용한 적조 탐지 및 모니터링 연구가 수행되었지만 단편적 접근에 그치고 장기적인 자료를 이용한 적조 연구는 수행되지 않았다. 한국해양과학기술원은 수중음향 기술을 이용한 적조 생물 실시간 탐지를 위해 “유비쿼터스 해양 유용/유해생물 관리기술 개발” 연구를 수행하여 적조 생물에 대한 음향특성을 파악하고 이에 적합한 탐지시스템을 개발하였다. 그리고 안정적인 육상 수조식 양식장의 활용을 통한 적조 재해 대응 양성기술 개발을 위해 해양수산부 용역과제로 “적조대응 육상양식기반 기술개발을 위한 연구(2014 ~ 2015년)” 를 수행하고 있다.

최근 정부는 관계부처 합동으로 2013년 “적조 대응 중장기 종합대책”을 수립하고 3가지 목표와 5개 항에 대한 추진전략의 시행을 위해 많은 예산을 투입했다. 해수부와 미래부는 적조대응 기초 원천기술 개발에 최근 13년(2000 ~ 2012년) 동안 88개 과제에 약 225억 원을 지원했다. 주요 연구 사업으로 모니터링, 예보, 황토살포에 의한 방제 및 살조제제의 개발 분야 등이 있으며 이러한 연구는 연구소, 대학, 및 기업에서 수행되었다. 그 중에서 황토살포 분야는 전해수 황토살포기를 개발해 방제에 적용중이나 실질적인 효과는 미미한 수준으로서 생태계에 부정적 효과를 나타내는 등 의도하지 않은 부정적 효과가 발생했고, 살조제제의 개발도 실험실 수준에서는 적용 가능하나 해양 현장에 적용은 실험단계에 머물고 있어 적조 발생과 피해 예방에 좋은 해결 방안과 기술들이 도출되지 못하고 있다.

## 2. 연구의 필요성

### 가. 공동연구의 중요성

신속하고 효율적인 적조 탐지 및 예측이 되기 위해서 융합 연구 기반인 원격탐사와 빅데이터 분석 기술을 연계하여 해양환경 변화를 감시하고 모니터링 할 수 있는 기초분야가 망라한 다학제적 연구가 필요한 실정이다. 한국과학기술정보연구원은 선진 정보 분석 기법과 방법론의 개발 및 연구와 국·내외 핵심기술정보의 개발, 수집, 관리 등의 차세대 과학기술 및 정보 분석 분야의 핵심기술과 인력을 보유하고 있다. 그리고 한국해양과학기술원은 해양과학 기술의 연구개발을 통한 관할 해양의 관리기반 구축, 해양환경 보전과 해양안전 확보 능력 축적 및 그 성과 보급으로 해양의 효율적 관리를 위한 과학적 근거자료 제공, 장단기 모니터링 시스템 구축을 통하여 해양환경 보전과 해양안전 확보 기능 고도화에 기여 할 수 있는 인력과 기술을 보유하고 있다. 이러한 방대한 해양 자료를 효율적으로 분석하는 과학기술정보 분석 기술의 연계를 통하여 기후변화와 인위적 변화에 의해 빠르게 변화하는 해양환경을 신속·정확하게 탐지하고 모니터링 할 수 있는 유용한 정보를 제공함으로써 시너지 효과를 도출할 수 있다.

### 나. 연구개발의 기술수준

위성을 활용한 적조 탐지 연구는 위성 산출물(엽록소 a 농도, 부유물질, 형광과장 등)의 값을 이용한 탐지 기술과 과장별 값을 이용한 탐지 기술이 개발되어 기존의 해상 위성인 SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-View Sensor), MODIS (MODerate resolution

Imaging Spectroradiometer), MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer), GOCI (Geostationary Ocean Color Imager) 등에서 사용하고 있다. 현재 기본적으로 위성에서 추정된 고농도의 엽록소 a 농도 해역을 파악하고 RGB 합성 영상을 이용하여 적조 의심 해역을 분석하거나 적조 발생 주변 해역에서 설치된 해상 부위의 수온, 염분 및 광학 센서 자료를 이용하여 실시간으로 적조를 탐지하는 방법이 개발되고 있다. 뿐만 아니라, 적조가 발생한 해역의 현장조사 시 적조생물의 이미지와 밀도 자료를 측정하는 장비를 탑재하여 연속적으로 모니터링할 수 있는 방법도 운영 중에 있다.

적조 발생은 부영양화뿐만 아니라 기후변화에 의해 증가할 수 있고 단기적으로 적조 발생률을 낮추는 것은 불가능하며 발생 초기에 조기 예보와 이동·확산 경로를 예측하는 것이 적조 피해를 최소화하는 방법일 것이다. 또한 유해성 적조는 상당한 기간 중 광역적으로 낮은 밀도를 유지하다가 증식-이동-밀집에 의해 피해를 유발하기 때문에 광역적-국지적 규모 연계된 탐지 및 예보 활동이 필요하다. 개선된 적조 발생 예보시스템 구축을 위해서는 장기적 종합적 자료 분석을 토대로 한 통계 모델을 개발하고 이를 순환-생태 모델과 연계하여 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 기존 연구들은 이벤트성 현상을 다루고 있고 체계적, 장기적 경향 분석의 연구가 결여되어 있어 방대한 장기 적조 관련 자료에 대한 접근이 이루어지지 않고 있다. 그리고 정량적인 예보 모델의 부재로 적조 발생-이동-확산에 대해 파악하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 적조 빅데이터 기반 다차원 배열 Database Management System (DBMS) 처리 기술을 연계해 적조를 종합적으로 분석할 수 있는 체계를 구축하여 적조 발생의 확률론적 특성을 파악하고자 하며, 적조 발생, 이동, 확산에 대한 장기적이고 종합적인 자료를 축적하기 위해 통계적 모델을 활용하고 발생 후 확산, 이동을 예측하기 위해 동적 모델을 활용하여 기존 연구의 한계를 극복하고자 한다.

## 제 2 절 연구개발의 목표 및 내용

### 1. 연구목표

본 연구의 최종 목표는

- 위성 빅데이터 기반 다차원 배열 DBMS 처리 기술 연계를 통한 적조 종합적 분석 체계 구축
- 다차원 배열 DBMS 기술과 생태학적 가설을 연계한 적조 탐지, 발생 경향 분석 및 적조 모니터링 기술 개발

당해 연도 연구 목표는

- 적조 탐지 알고리즘 개발
- 적조 빅데이터 분석 플랫폼 운영
- 적조 발생 관련 환경자료를 적조 빅데이터 분석 플랫폼에 DB 구축 및 적조 발생 환경 분석

### 2. 연구 주요내용

- 적조종의 광특성 기반 적조 탐지 알고리즘 개발
  - 주요 적조종 특화 탐지 알고리즘 개발
  - 적조 탐지 정확도 검증 및 개선
- 적조 빅데이터 분석 플랫폼 운영
  - 위성 빅데이터 처리시스템에서 적조 관련 해색 위성자료 처리(TuPiX OC)
- 적조 발생관련 환경자료를 적조 빅데이터 분석 플랫폼에 DB 구축 및 적조 발생 환경 분석
  - 위성 빅데이터 처리시스템에 과거 적조 관련 환경자료 DB 구축(해양, 기상, 해황자료)
  - 적조 빅데이터 처리 및 분석 방법 개발 및 종합적 평가 체계 마련

### 3. 추진체계

#### 가. 연구사업 추진전략 및 방법(그림 1-2-1)

- 대외 연구기관, 연구소 및 학교와 협력을 하여 관측 자료 및 적조 관련 문헌 수집
  - 적조 관련 해양, 기상, 환경 자료 수집
  - 기존 적조 관련 문헌 조사 및 DB 구축
  - 적조 발생 해역 조사 시 공동 참여하여 자료 수집 및 교환
  - 현장 관측 자료, 위성 자료 및 실험실 배양 자료 기반 적조 탐지 방법 검증
  
- 국·내외 연구기관과 긴밀한 협조 하에 적조관련 빅데이터 분석 기술 개발과 활용 기술 연구 수행
  - 위성 및 다중센서 자료 DB 구축 및 분석 시스템 안정화
  - 적조 탐지 연구와 분석 시스템간의 융합 시스템 구축
  - 적조관련 빅데이터 분석 자료를 이용한 적조 탐지 및 모니터링 활용 연구 지원
  
- 적조 탐지 방법 개발 및 적조 경향 분석(KIOST)
  - 기존의 적조 탐지 방법에 대한 검증
  - 연구해역에 맞는 적조 탐지 방법 개발 및 검증
  - 과거 적조 자료 분석을 통한 경향 분석 및 원인 규명
  
- 위성 및 다중센서 빅데이터 처리시스템 개발(KISTI)
  - 위성 및 다중센서 수집
  - Base array와 object array 생성 및 분석 시스템 개발

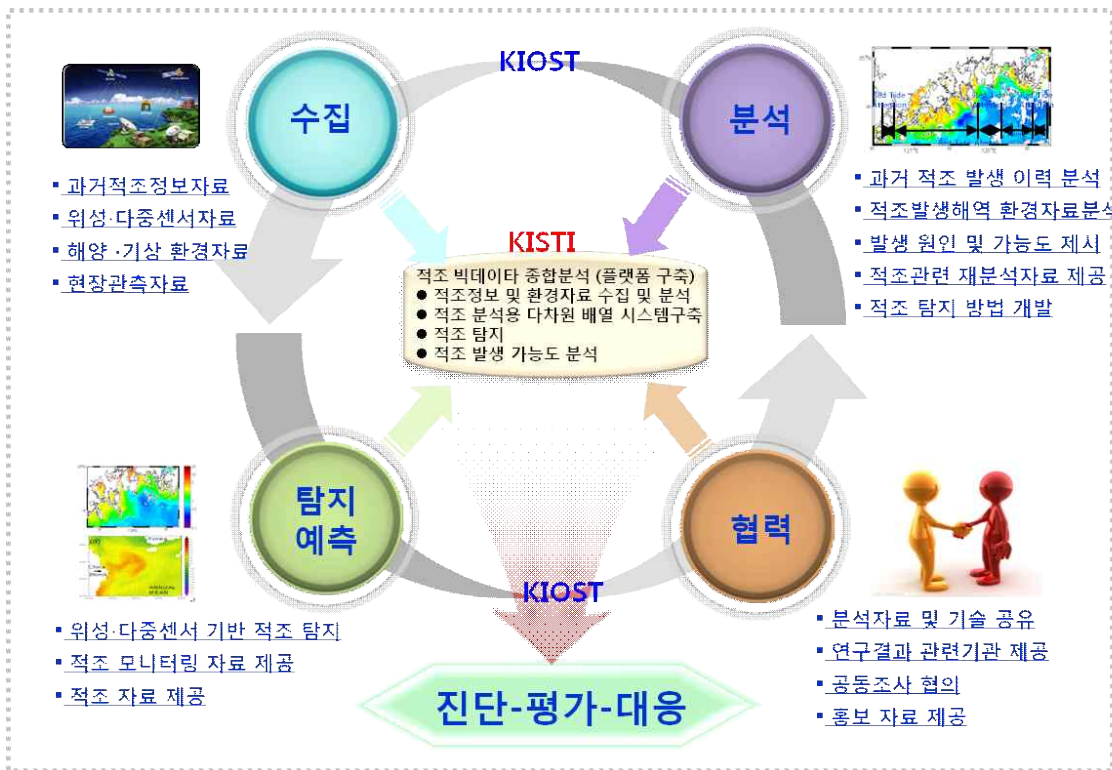


그림 1-2-1. 연구 추진 체계.

나. 역할 분담 내역(그림 1-2-2)

- 한국해양과학기술원은 위성 및 다중센서 활용 적조자료 분석 업무를 담당하고, 국·내 기관 및 연구소로부터 적조 연구에 필요한 위성·다중센서·재분석 자료에 대한 업무협조를 통하여 자료를 제공 받고 필요시 분석된 자료를 제공한다.
- 한국과학기술정보연구원은 15년 이상의 위성 자료를 신속하고 효율적으로 처리하고 관리할 수 있는 분석 시스템 개발과 통계학적 분석 구축 업무를 담당한다.
- 두 기관은 서로 다른 영역의 자료와 기술들이 융합될 수 있도록 상호 점검을 실시하고, 최적화된 분석 시스템과 분석 결과가 도출 될 수 있도록 협조한다.



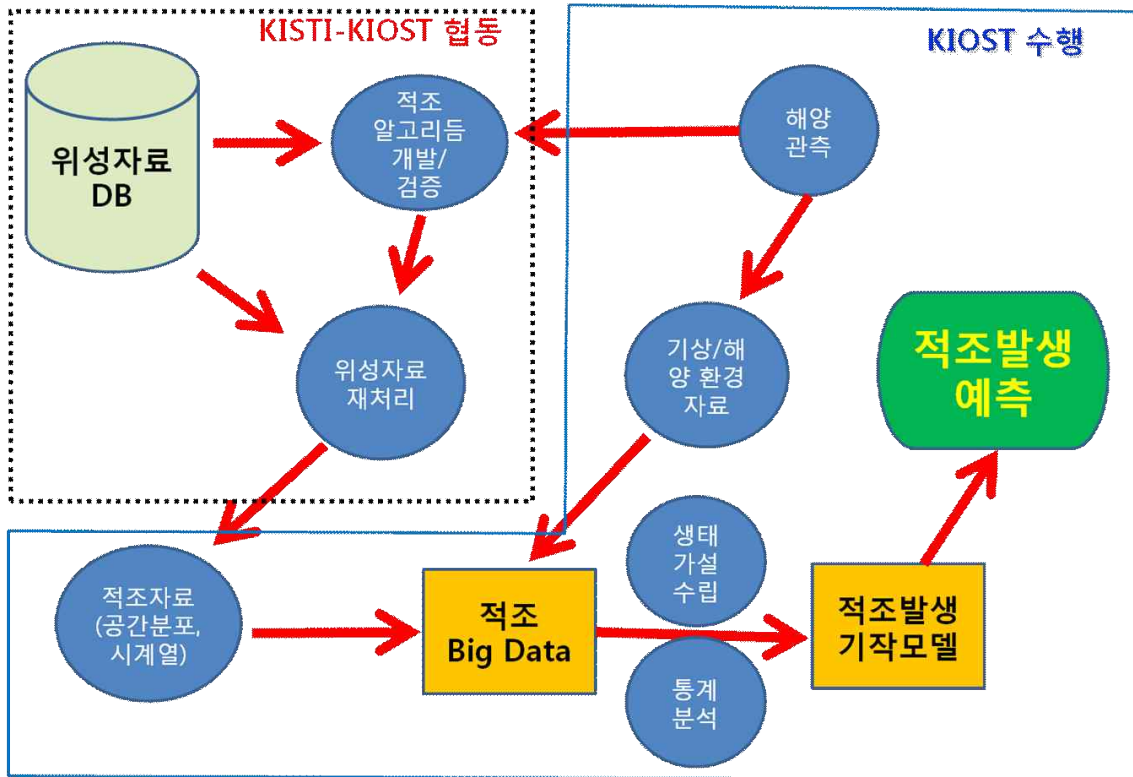


그림 1-2-2. 연구 분담 내역.

#### 4. 기대성과 및 활용 방안

- 대용량 적조관련 빅데이터 고속 분산/병렬 처리 기술 확보 및 다양한 유형의 자료에 대한 효율적 관리 및 공유 가능
- 국가 적조 대응 체계 구축을 통해 효율적 적조대응 및 피해 감소
  - 적조 조기 경보에 의한 적조 피해 저감에 기여
  - 국가 적조 대응 체계 구축의 활용을 통해 효율적 적조 대응 전략 수립에 기여
- 적조 자료와 지리정보시스템 연계 새로운 기술 창조 및 방재 체계 구축 기초자료 활용
- 기초 및 재해관련 연구에 빅데이터 분석 방법 및 시스템 활용
- 시간해상도 및 공간해상도가 높은 정밀 분석이 필요한 연안 환경 모니터링 연구 활용 연구 유도
- 접근이 어려운 지역 및 해역 자료 제공으로 영토 관리 및 국가 간 분쟁 시 기초자료 활용

## 제 2 장 적조 과거 발생자료 분석

### 제 1 절 적조속보 자료 추출

#### 1. 적조 속보 digitizing

##### 가. 적조 속보

국립수산과학원 수산해양종합정보과에서는 적조 발생 상황과 적조의 시·공간적인 변화 등을 효율적으로 파악하고 적조로 인한 수산피해를 최소화하고자 적조상황실을 운영하고 있다. 이들은 적조 유해종의 출현 및 세력규모에 따라 표 3-1-1과 같은 적조예보를 발령하여([http://www.nifs.go.kr/redtide/webpage/operation/operation\\_04.jsp](http://www.nifs.go.kr/redtide/webpage/operation/operation_04.jsp)) 유관기관, 언론 그리고 어업인 등에게 통보하고 있다. 아울러 이들은 적조 발생해역, 원인 적조생물, 밀도 및 수온 등을 국립수산과학원 적조정보시스템에 입력하여 적조속보 자료를 제공하고 있으며(그림 6-1-1, <http://www.nifs.go.kr/portal/redtideInfo>) 매해마다 “한국연안의 적조 발생 상황” 보고서를 발간하고 있다.

표 2-1-1. 적조예보 발령기준

종류	규모	적조생물 밀도	비고
적조생물 출현주의보	적조생물의 출현밀도가 증가하여, 적조 발생 가능성이 예상될 때	<i>C. polykrikoides</i> 10 $cells\ ml^{-1}$ 이상	○ 수산과학원장은 적조생물 특성,해황에 따라 피해가 우려될 경우 적조 규모 및 밀도에 관계없이 적조 예보를 발령할 수 있음
적조 주의보	반경 2 ~ 5 $km$ (12 ~ 79 $km^2$ ) 수역에 걸쳐 발생하고 어업피해가 우려될 때	<i>C. polykrikoides</i> 100 $cells\ ml^{-1}$ 이상	○ 적조규모와 밀도는 현지상황과 적조생물에 따라 변할 수 있음
적조 경보	반경 5 $km$ (79 $km^2$ ) 이상 수역에 걸쳐 발생하여 상당한 어업피해가 예상될 때	<i>C. polykrikoides</i> 1,000 $cells\ ml^{-1}$ 이상	○ 수산과학원장은 적조의 진행과 변화정보의 전파 및 어업피해 방지에 관한 조치가 필요할 때 적조속보를 발령할 수 있음
적조 해제	적조가 소멸되어 어업피해 위험이 없고 수질이 정상상태로 회복되었을 때		

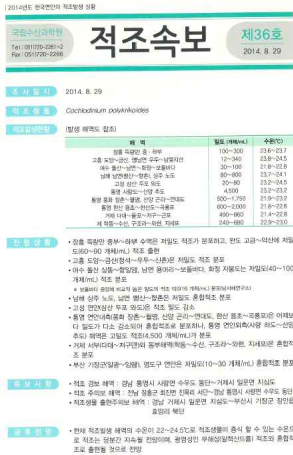


그림 2-1-1. 국립수산과학원 “한국연안의 적조 발생 상황” 적조속보 예시.

## 나. Digitizing 방법

적조 탐지를 위한 위성 알고리즘 추정값을 검증하고 적조의 장기 발생 경향 및 시공간적 분포를 분석하기 위해 1998년부터 2015년까지 일일 단위로 작성된 적조속보 정보를 기초로 적조종 *C. polykrikoides*의 공간적 분포를 digitizing하였다. Digitizing software의 GetData Graph Digitizer를 이용하여 일일 단위로 표시된 정점들의 좌표 값을 위경도 값으로 변환한 뒤 이 데이터를 다시  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  균일격자로 재생성하였다(그림 2-1-2). 일일 단위로 생성된 데이터는 연도별 자료로 병합되어 최종적으로 적조 발생 공간적 분포도를 작성하는데 이용되었다(그림 2-1-3).

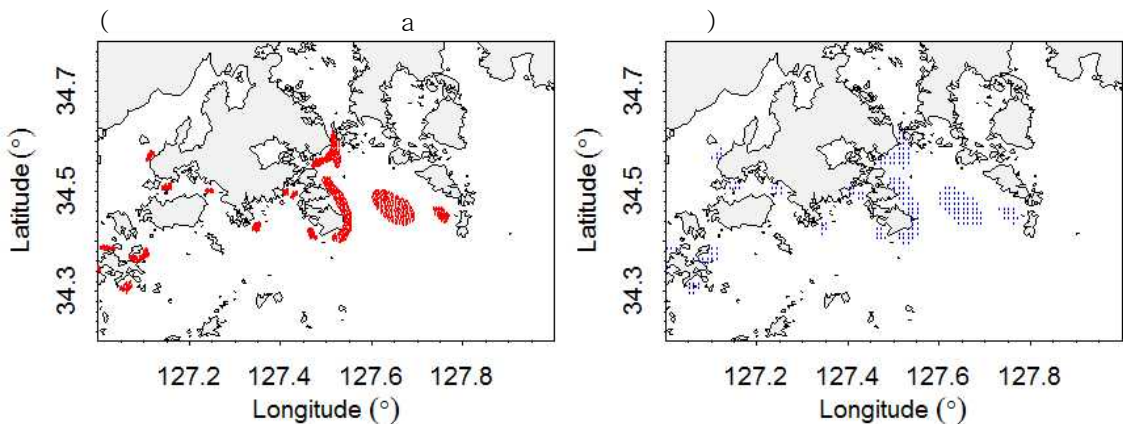


그림 2-1-2. Digitizing한 적조속보의 (a) 원 자료와 (b) 균일한 격자로 재생성된 자료.

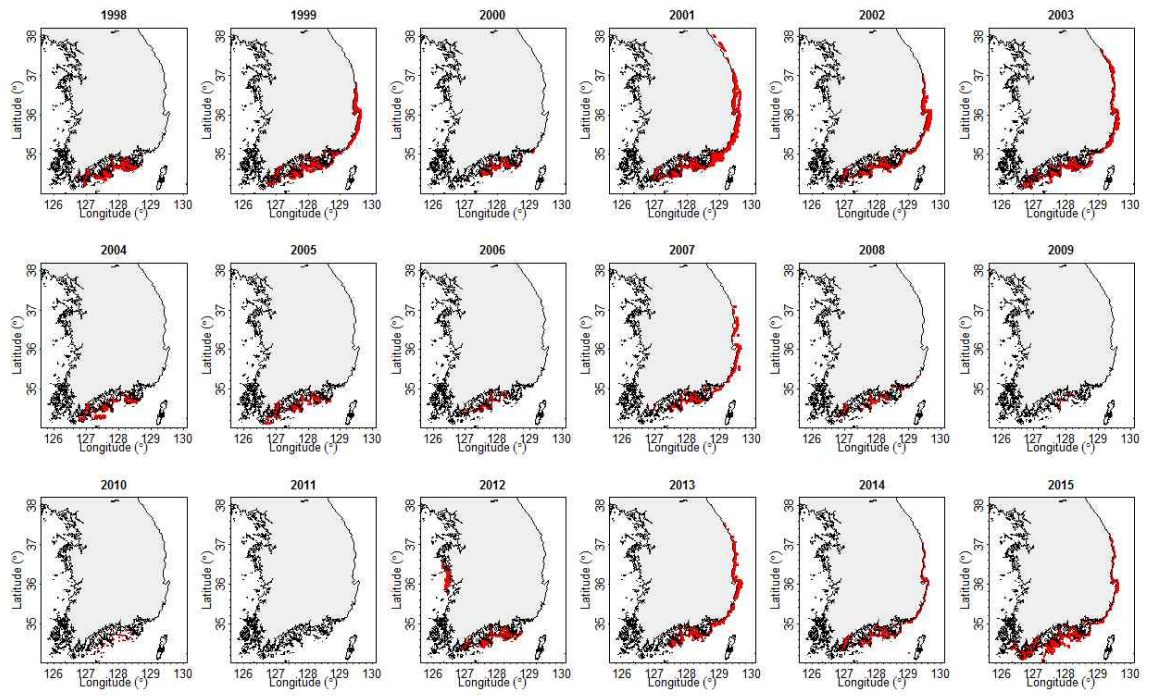


그림 2-1-3. 1998 ~ 2015년 한반도 전 해역의 적조 발생 공간적 분포.

## 제 2 절 적조발생 상황 분석

1998년부터 2016년까지의 국립수산과학원에서 제공하는 “한국 연안의 적조 발생 상황” 과 적조속보를 바탕으로 연간 적조 발생 현황과 피해액을 표 2-2-1에 나타냈다.

1998년은 8월 30일부터 10월 2일까지 34일간, 고흥 나로도 인근에서 시작하여 완도 ~ 거제에 이르는 해역에서 발생하였다. 9월 15일 고흥 연안에서 최대밀도가 25,000  $cells\ ml^{-1}$ 이었으며 이 해에는 서천 ~ 군산 해역에서도 적조종이 발생되었다. 적조의 소멸은 태풍 예니의 발생과 수온 하강에 의한 것으로 분석되었다(국립수산과학원, 2008).

1999년은 1998년보다 약 3주 빠른 8월 11일부터 10월 3일까지 54일간, 고흥 나로도 인근에서 시작하여 완도 ~ 울진, 서천 ~ 군산에 이르는 광대 해역에서 발생하였다(그림 6-1-3). 국립수산과학원은 여름철 태풍의 영향에 의한 연안 수온약층의 조기 소멸로 인하여 적조가 이른 시기에 발생하였으며 고수온 지속과 일사량의 증가에 의해 적조 발생 기간이 장기화되었다고 분석하였다(국립수산과학원, 2000). 남해안에서의 최대밀도는 9월 6일 고흥 연안에서 35,000  $cells\ ml^{-1}$ 이었으며, 동해안에서의 최대밀도는 영덕 ~ 울진 연안에서 43,000  $cells\ ml^{-1}$ 로 남해안보다 높은 값을 보였다. 적조의 소멸은 태풍 바트의 발생과 수온 하강에 의한 것으로 보고되었다(국립수산과학원, 2008).

2000년 적조는 8월 22일 여수 나로도 인근과 남해 남면 연안에서 최초로 발생하여 9월 20일까지 고흥 ~ 기장에 걸쳐 29일간 짧게 지속되었다. 9월 4일 통영 연안에서 최대 밀도 15,000  $cells\ ml^{-1}$ 을 보였으나 전년도 대비 다소 낮은 밀도이며 다른 적조생물과 혼합하여 발생한 것으로 보고되었다(국립수산과학원, 2002). 적조의 소멸은 태풍 사오마이의 발생과 수온 하강에 의한 것으로 분석되었다(국립수산과학원, 2008).

2001년은 8월 14일부터 9월 24일까지 42일간, 여수 나로도 와 돌산도 인근에서 시작되어 완도 ~ 삼척에 이르는 광대 해역에서 발생하였다(그림 2-2-1). 태풍의 영향 없는 전반적으로 안정된 수층, 평년 대비 1 ~ 3°C 높은 고수온 현상 등 전반적으로 적조종의 발생과 증식에 적합한 환경이 조성되어 비교적 단기간에 동해 연안까지 대규모로 확산되었다(국립수산과학원, 2002). 남해안에서의 최대밀도는 9월 1일 거제 연안에서 32,000  $cells\ ml^{-1}$ 이었으며, 동해안에서의 최대밀도는 울진 연안에서 30,000  $cells\ ml^{-1}$ 이었다. 이 해의 적조의 소멸은 수온 하강에 의한 것으로 분석되었다(국립수산과학원, 2008).

2002년은 8월 2일부터 9월 27일까지 55일간, 여수 북돌바다 인근 해역에서 시작되어 장기 지속되었으며 2001년과 마찬가지로 완도 ~ 울진에 이르는 광대 해역에서 발생하였다(그림 2-2-1). 국립수산과학원은 8월 초순에 내린 집중호우로 인해 내만 수역에는 무해성 규조적조가, 외측 수역에는 유해성 적조가 발생하는 혼합적조가 나타났으며 일

사량의 증가와 급격한 수온의 상승으로 인해 빠른 속도로 적조가 증식하였다고 보고하였다(국립수산과학원, 2004). 남해안에서의 최대밀도는 8월 20일 여수 연안에서 25,000  $cells\ ml^{-1}$ 이었으며, 동해안에서의 최대밀도는 8월 29일 부산 ~ 울산 연안에서 30,000  $cells\ ml^{-1}$ 으로 전년도와 비슷한 규모를 보였다. 적조의 소멸은 수온 하강에 의한 것으로 분석되었다(국립수산과학원, 2008).

2003년 적조 또한 2001년, 2002년과 마찬가지로 진도 ~ 강릉에 이르는 광대 해역에서 발생하였다(그림 2-2-1). 8월 13일부터 10월 13일까지 62일 간, 여수 북돌바다 인근 해역과 남해 미조면 동측 해역에서 시작되어 장기 지속되었으며 태풍 매미 등의 이상 기상으로 인하여 적조 밀도의 변동폭은 매우 컸다(국립수산과학원, 2004). 남해안 서부해역에서 발생한 적조는 일사량의 증가와 호적의 수온 유지로 장기간 지속되었으며 대마난류의 강세로 신속하게 동해안으로 확산된 것으로 보고되었다. 완도, 통영 등의 조류의 소통이 원활하지 않은 미약한 내만성 해역에서는 고밀도 적조가 보고되었다. 남해안에서의 최대밀도는 9월 2일 남해 연안에서 48,000  $cells\ ml^{-1}$ 으로 1998년부터 2015년까지 가장 높은 밀도를 보였으며, 동해안에서의 최대밀도는 9월 17일 울주 ~ 포항 연안에서 32,000  $cells\ ml^{-1}$ 으로 높은 밀도 보였다. 적조의 소멸은 수온 하강에 의한 것으로 분석되었다(국립수산과학원, 2008).

2004년은 8월 5일부터 9월 4일까지 다른 년도와 다른 해역인 거제 인근 해역에서 최초로 발생하여 완도 ~ 거제에 걸쳐 30일간 짧게 지속되었다(그림 2-2-1). 8월 25일 여수 연안에서 최대밀도 5,800  $cells\ ml^{-1}$ 로 다른 년도에 비해 매우 낮은 밀도를 보였으며 이는 무해성 고니아울락스(*Gonyaulax*) 적조의 번성으로 인해 *C. polykrikoides*의 세력이 약화되었기 때문인 것으로 분석되었다(국립수산과학원, 2005).

2005년은 2004년보다 약 2주 빠른 7월 19일부터 9월 16일까지 고흥 나로도 인근 해역에서 최초로 발생하여 완도 ~ 거제에 걸쳐 58일간 장기 지속되었다(그림 2-2-1). 8월 2일 여수 연안에서 최대밀도 25,000  $cells\ ml^{-1}$ 을 나타내었다. 2005년도는 특이하게 8월 중순 규조류의 천이로 소멸되었다가 다시 재발생되었고 차토넬라(*Chattonella antiqua*) 적조종이 고흥 ~ 완도 해역에서 처음 출현하여 9월 초 태풍 나비에 의해 소멸된 것으로 보고되었다(국립수산과학원, 2006). 이 해의 적조는 쿠로시오의 약세로 인하여 호적환경에 조성되지 않아 연안성 규조류의 우점으로 소멸된 것으로 분석되었다(국립수산과학원, 2008).

2006년은 8월 6일부터 8월 29일까지 24일간, 여수 가막만 인근에서 시작하여 완도 ~ 남해에 이르는 해역에서 발생하였다가 약 한달 반 후인 10월 18일부터 10월 30일까지 남해안 동부의 남해 ~ 통영 해역에서 13일간 저밀도로 재발생하는 특이한 현상을 보였

다. 8월 16일 남해 연안에서 최대밀도가  $22,500 \text{ cells ml}^{-1}$ 이었으며 적조의 소멸은 강한 수온약층의 지속, 쿠로시오 해류의 외해측 분포 그리고 수온 하강에 의한 것으로 분석되었다(국립수산과학원, 2007).

2007년은 적조생물 밀도의 변동 폭이 매우 크고 남해안에서 고밀도 적조가 지속된 것으로 보고되었다(국립수산과학원, 2008). 7월 31일부터 9월 16일까지 50일간, 고흥 나로도 인근에서 시작하여 완도 ~ 울진에 이르는 광대 해역에서 발생하였다(그림 2-2-1). 국립수산과학원은 7월 하순 ~ 8월 초순에 대마난류 세력이 한반도 및 일본 연안에 약세를 보이던 8월 중순 이후 강세로 전환됨과 더불어 거제도 주변 해역에 발달했던 강한 냉수대의 소멸로 수온이 상승됨에 따라 남해안의 적조가 해류를 따라 동해안으로 빠르게 이동·확산되었다고 분석하였다(국립수산과학원, 2000). 남해안에서 최대밀도는 9월 4일 남해 연안에서  $32,500 \text{ cells ml}^{-1}$ 였으며, 동해안에서의 최대밀도는 8월 25일 부산 ~ 포항 연안에서  $15,000 \text{ cells ml}^{-1}$ 였다. 적조의 소멸은 태풍의 직·간접적 영향과 지속적 강우로 인한 식물플랑크톤 중 천이와 수온 하강에 의한 것으로 추정되었다(국립수산과학원, 2008).

2008년은 7월 30일부터 9월 29일까지 62일간, 여수 가막만 인근에서 시작하여 완도 ~ 울산에 이르는 해역에서 발생하였다(그림 2-2-1). 최대밀도는 9월 22일 거제 연안에서  $7,300 \text{ cells ml}^{-1}$ 로 저밀도 분포를 보였으며, 9월 19일 부산 연안에서의 최대밀도 또한  $2,000 \text{ cells ml}^{-1}$ 로 매우 낮은 밀도를 보였다. 이 해에는 발생초기 냉수대의 발달 및 낮은 강수량으로 인한 영양염 공급 부족으로 인하여 급속한 성장을 이루지 못한 것으로 추정되며 이에 따라 일부 해역에서는 소강상태를 보이다가 연안역의 규조류 번식과 식물플랑크톤 종간경쟁 및 수온 하강으로 적조가 소멸된 것으로 추정되었다(국립수산과학원, 2009).

2007년 이후 적조 발생 규모는 점점 작아져 2011년에는 적조가 발생하지 않는 현상이 나타났다. 특히 2009년과 2010년은 적조 최대밀도가  $2000 \text{ cells ml}^{-1}$  이하로 그 규모가 매우 작았으며 지속일 또한 매우 짧았다. 2009년은 늦가을 경 10월 28일부터 11월 15일까지 20일간, 여수 돌산 백포 인근에서 시작하여 여수 ~ 통영에 이르는 소규모 해역에서 발생하였다(그림 2-2-1). 최대밀도는 11월 9일 남해 연안에서  $1,660 \text{ cells ml}^{-1}$ 이었다. 2010년은 1995년 이후 최단 기간인 3일간 동안 통영 풍화에서 발생되었으며 최대 밀도는  $1,300 \text{ cells ml}^{-1}$ 로 1998년부터 2015년까지의 적조 발생 기간 중 가장 낮은 밀도를 보였다. 2011년에는 적조가 발생하지 않은 것으로 보고되었다(국립수산과학원, 2013).

2012년은 남해안에서 7월 27일부터 9월 6일까지 고흥 북돌바다 북부해역 인근에서 시작하여 완도 ~ 거제에서 42일간, 태풍 블라벤과 덴빈 이후 서해안 태안 주변 해역으

로 옮겨가 9월 10일부터 19일까지 10일간, 총 52일 동안 발생하였다. 2012년은 과거의 가을 적조가 발생한 2006년, 2009년과 마찬가지로 적조 소멸 약 한달 후인 10월 2일부터 10월 24일까지 23일간 남해 남면 유구 인근 해역에서 다시 시작하여 고흥 ~ 통영에 이르는 해역까지 확장되는 특이한 현상을 보였다. 다만 2006년과 다른 점은 7월 말부터 발생한 적조는 9월 초까지  $10,000 \text{ cells ml}^{-1}$  이하의 낮은 밀도를 보이다가 재발생된 이후 10월 6일 남해 연안에서  $23,000 \text{ cells ml}^{-1}$ 로 최대밀도를 보였다는 점이다. 적조의 소멸은 서해안의 경우 태풍 산바와 강한 조류, 남해안의 경우 계절변화에 따른 수온 감소와 일사량의 감소에 의한 것으로 추정되었다(국립수산과학원, 2013).

2013년은 1998년부터 2015년 기간 동안 가장 이른 발생을 보여 7월 17일부터 9월 26일까지 51일간, 여수 붓돌바다 인근해역과 통영 육지도 인근에서 시작하여 고흥 ~ 양양에 이르는 광범위한 해역에서 발생하였다(그림 2-2-1). 남해안에서의 최대밀도는 8월 6일 통영 연안에서  $35,000 \text{ cells ml}^{-1}$ 였으며, 동해안에서의 최대밀도는 8월 12일 포항 연안에서  $20,000 \text{ cells ml}^{-1}$ 로 매우 높은 밀도를 보였다. 국립수산과학원은 7월 남해안의 강한 일사량, 지속되는 폭염, 대마난류의 강세로 인한 고수온, 강한 남풍계열 바람의 지속으로 인하여 외측수역의 적조생물이 연안으로 빠르게 집적되고 낮은 규조류 농도로 인한 중간경쟁의 약화로 *C. polykrikoides*의 성장이 매우 빠르게 증가하였을 것이라 추정했다(국립수산과학원, 2014).

2014년은 7월 31일부터 10월 17일까지 79일간, 고성 두포 인근해역에서 시작하여 완도 ~ 삼척에 이르는 광범위한 해역에서 역대 최장 기간 동안 발생하였다. 남해안에서의 최대밀도는 9월 13일 거제 연안에서  $18,300 \text{ cells ml}^{-1}$ 이었으며, 동해안에서의 최대밀도는 포항 ~ 울진 연안에서  $20,000 \text{ cells ml}^{-1}$ 로 다소 높은 밀도를 보였다. 국립수산과학원은 9월 초부터 진행된 적조의 빠른 확산과 고밀도 적조의 지속 이유를 9월 초 급격한 일사량의 증가와 8월 대비  $0.6^\circ\text{C}$  수온 상승, 내만역의 염분 상승( $30\text{psu} \rightarrow 32\text{psu}$ )으로 추정하였으며 특히 경남 해역에서  $10,000 \text{ cells ml}^{-1}$ 이상의 고밀도 적조가 9월 내내 장기 지속되었다고 보고하였다(국립수산과학원, 2015).

2015년은 8월 2일부터 9월 26일까지 56일간, 통영 연안에서 시작하여 진도 ~ 울진에 이르는 광범위한 해역에서 발생하였다. 남해안에서의 최대밀도는 8월 20일 거제 연안에서  $17,920 \text{ cells ml}^{-1}$ 였으며, 동해안에서의 최대밀도는 부산 연안에서  $32,000 \text{ cells ml}^{-1}$ 로 남해보다 높은 밀도를 보였다. 국립수산과학원은 7월 평년대비  $1^\circ\text{C}$  낮은 저수온의 영향으로 최근 3년 평균보다 1주일가량 늦게 발생되었다고 추정하였으며 2003년 이후 처음으로 근해역인 거문도와 남해안 최서단 진도까지 적조가 확산되었다고 보고하였다(국립수산과학원, 2015). 특히 남해안의 경우 8월은 동고서저, 9월은 서고동저형



의 모습을 보였는데 이와 관련하여 국립수산과학원은 경남에서는 8월에 고밀도 적조가 지속되다 태풍의 간접영향과 집중강우로 인하여 적조가 약화되고, 진도 주변 해역에서는 8월 중순 이후 진도의 냉수대 약화로 인하여 9월 초부터 적조가 급격히 확산되어 월별 다른 동서 패턴이 나타난 것이라고 분석하였다(국립수산과학원, 2015).

2016년은 8월 16일부터 8월 29일까지 14일간, 전남 여수에서 시작하여 고흥 ~ 여수까지 좁은 해역에서 발생하였다. 그리고 *C. polykrikoides* 적조뿐만 아니라 *Karenia mikimotoi* 및 다른 적조 생물들에 의한 적조가 동시에 발생했으나, *C. polykrikoides*의 적조가 우점하고 확장되지 못했다. 남해안에서의 최대밀도는 8월 22일  $15,400 \text{ cells ml}^{-1}$ 이었으며 양식장이 없는 외해역에서 발생하여 피해는 보고되지 않았다. 금년도 적조는 서동해안으로는 확산되지 않았으며, 적조생물 출현주의보 2회, 적조 주의보 2회 발령으로 이전년도 보다 비교적 소규모 적조로 짧은 기간 동안 발생한 것으로 보고되었다(<http://www.nifs.go.kr/redtide/mapattr/outiddrtf001.jsp?srcode=2016082901>).

표 2-2-1. 1998 ~ 2016년 적조 발생 상황

연도	최초 발생일	소멸일	최초 발생 지역	발생범위	지속일 (일)	최대밀도 ( $cells\ ml^{-1}$ )	동해 발생 여부	서해 발생 여부	피해액 (억원)
1998	8월 30일	10월 2일	고흥	완도 ~ 거제	34	25,000		발생	1.6
1999	8월 11일	10월 3일	고흥	완도 ~ 울진	54	43,740	발생	발생	3.2
2000	8월 22일	9월 20일	여수	고흥 ~ 기장	29	15,000			2.6
2001	8월 14일	9월 24일	여수	완도 ~ 삼척	42	32,280	발생		84.0
2002	8월 2일	9월 27일	여수	완도 ~ 울진	55	30,000	발생		49.0
2003	8월 13일	10월 13일	여수, 남해	진도 ~ 강릉	62	48,000	발생		215.0
2004	8월 5일	9월 4일	거제	완도 ~ 거제	30	5,800			1.2
2005	7월 19일	9월 16일	고흥	완도 ~ 거제	58	25,000			10.6
2006	8월 6일	8월 29일	여수	완도 ~ 남해	37	22,500			0.7
	10월 18일	10월 30일	남해	남해 ~ 통영					
2007	7월 31일	9월 16일	고흥	완도 ~ 울진	50	32,500	발생		115.0
2008	7월 30일	9월 29일	여수	완도 ~ 울산	62	7,300	발생		-
2009	10월 28일	11월 15일	여수	여수 ~ 통영	20	1,660			-
2010	9월 17일	9월 19일	통영	통영	3	1,300			-
2011	-	-	-	-	-	-			-
2012	7월 27일	9월 19일	고흥	완도 ~ 거제, 태안	75	23,000		발생	44.0
	10월 2일	10월 22일	남해	고흥 ~ 통영					
2013	7월 17일	9월 26일	여수, 통영	고흥 ~ 양양	51	35,000	발생		247.0
2014	7월 31일	10월 17일	고성	완도 ~ 삼척	79	20,000	발생		74.0
2015	8월 2일	9월 26일	통영	진도 ~ 울진	56	32,000	발생		151.0
2016	8월 16일	8월 29일	여수	고흥 ~ 여수	14	15,400			-

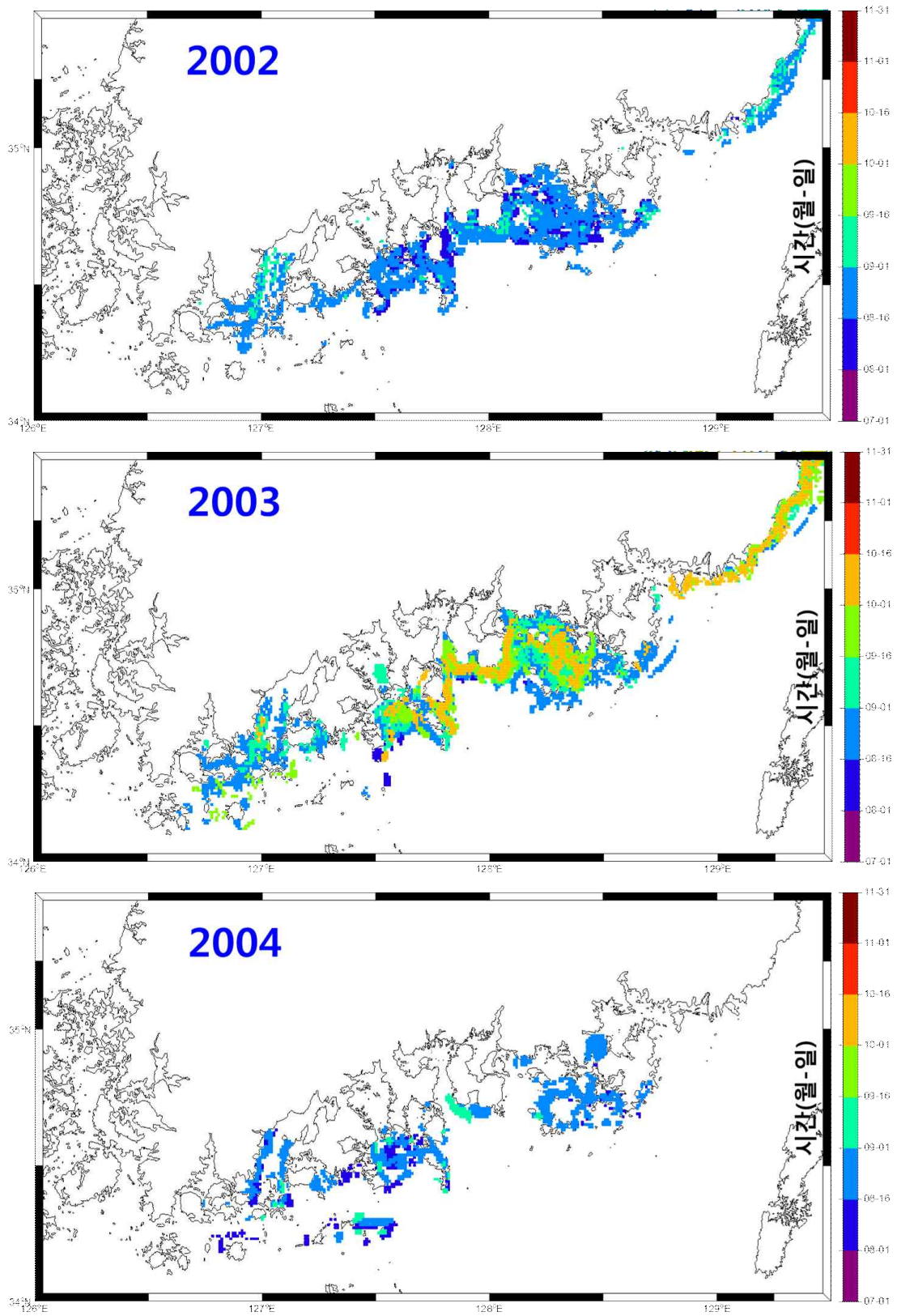


그림 2-2-1. 적조 발생의 시·공간적 변화

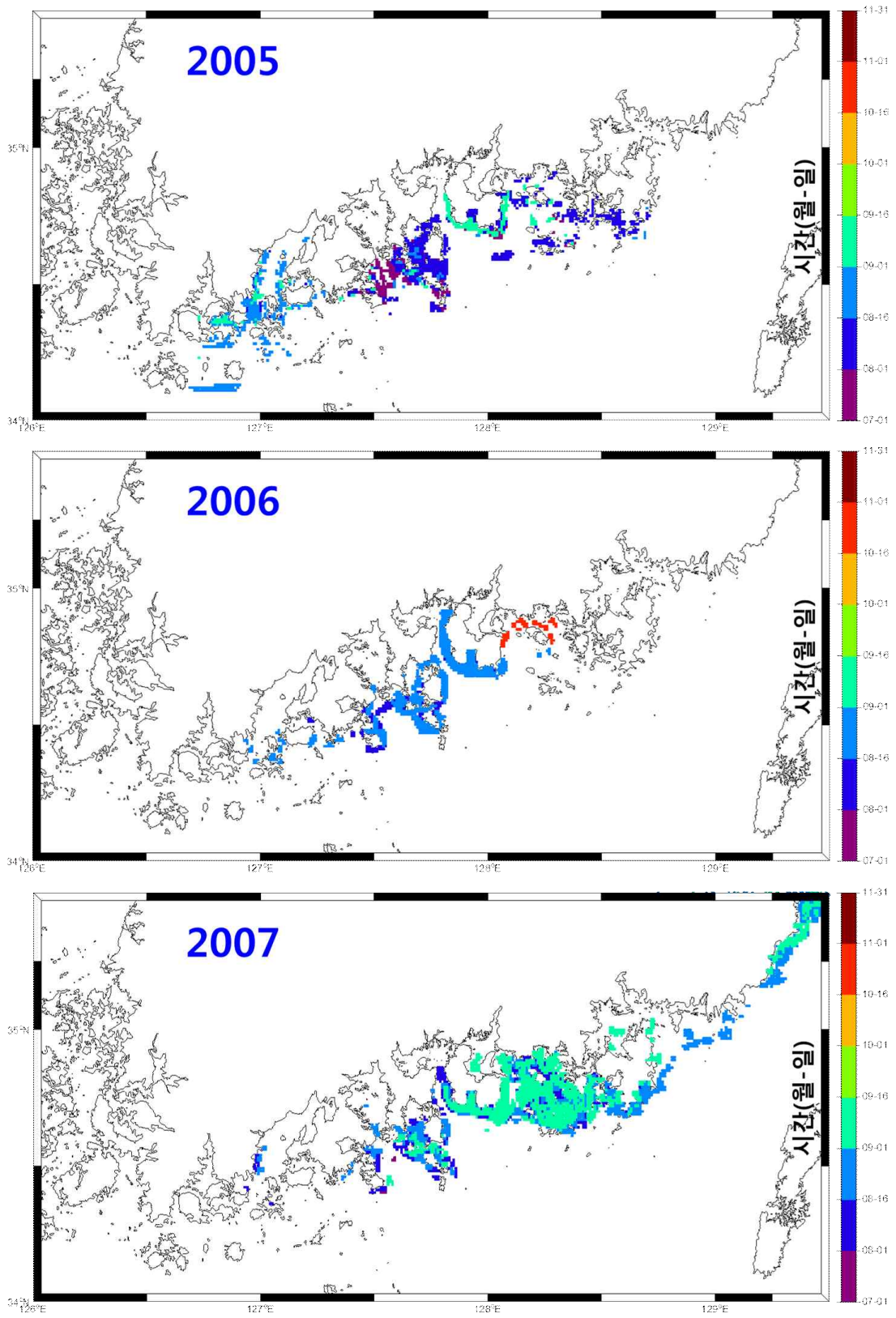


그림 2-2-1. Continued

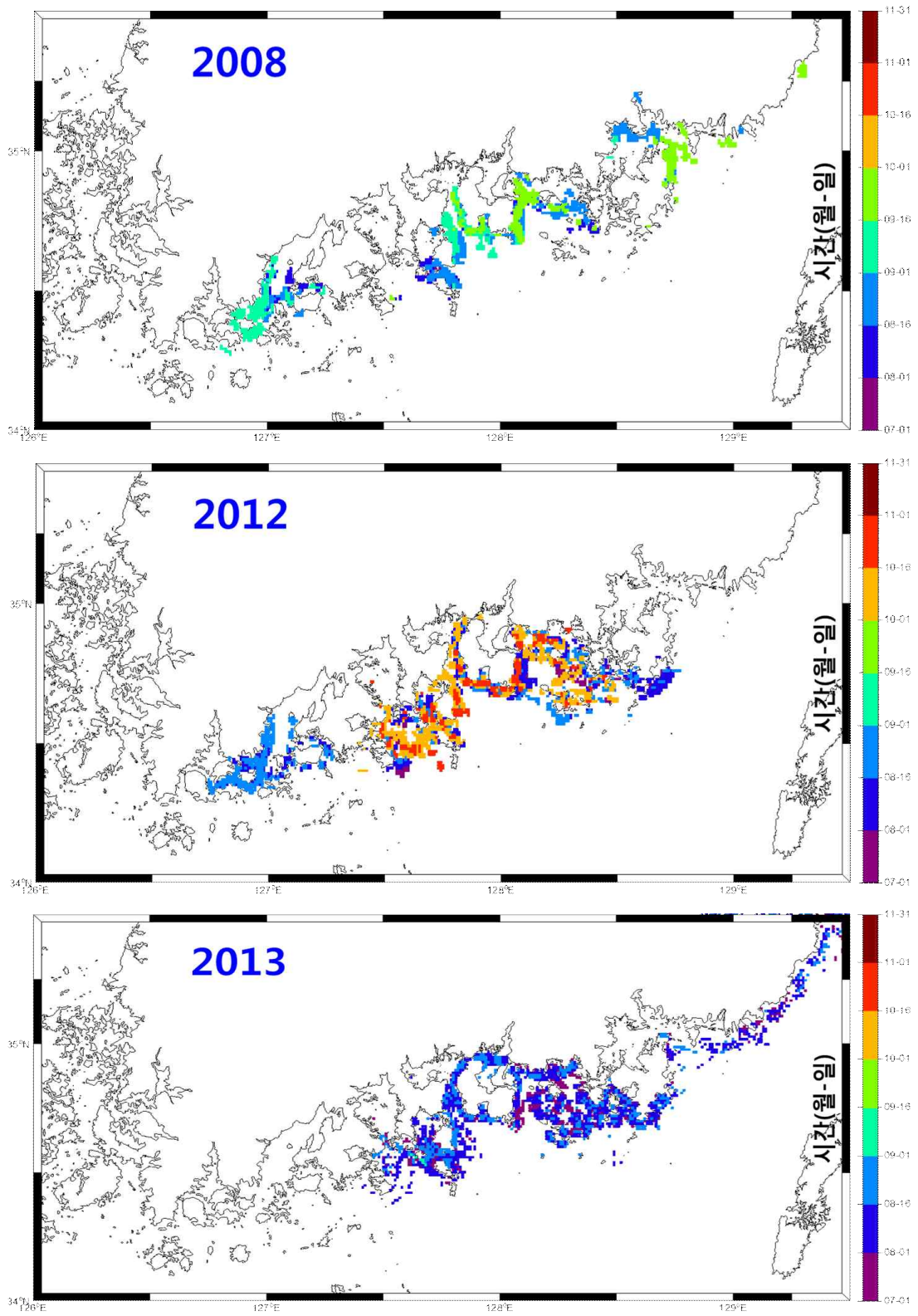


그림 2-2-1. Continued



그림 2-2-2에서 과거 1990년대 중반 및 후반에 적조 발생은 늦여름에 시작해서 가을에 소멸되었지만, 최근 적조 발생은 초여름에 발생하여 가을까지 지속되는 것으로 파악되었다. 이런 원인으로서는 연안역의 부영양화뿐만 아니라 기후변화에 의한 영향으로 고려되어 진다. 그리고 1995년부터 2013년까지 홀수년도의 적조 피해액은 1,344.9억이고, 짝수년도는 119.8억으로 짝수년도 보다 홀수년도에 적조 발생에 따른 경제적 피해가 크게 발생했다. 홀수년도는 10억 이상 피해가 발생한 빈도수가 7회에 달하고, 짝수년도 3회로 홀수년도에 피해가 크게 발생하는 것으로 나타났다.

2002년부터 2013년까지 계절별 누적 적조 발생 빈도수를 살펴보면, 7월은 나로도, 여수 및 남해도 부근 해역에서 적조가 발생하고, 8월은 남해안 전 해역에서 발생되어 지며, 9월에는 남해도와 거제 사이의 해역과 부산 부근 해역에서 발견되었다(그림 2-2-3). 짝수년도에 적조 발생 빈도수가 높은 해역은 고흥과 여수와 남해도 사이 해역으로 나타나고, 홀수년도에는 여수, 남해도 및 남해도와 거제 사이 해역에 높고 나타난다. 2002년부터 2013년까지 전체 누적 적조 발생 빈도수를 보면 연구해역 남서쪽 해역에서는 완도와 고흥 사이 해역에서 높고 나타나고, 연구해역 중간 부근 해역에서는 여수, 남해도 거제 서쪽에서 자주 발생하는 것으로 나타났다(그림 2-2-3).

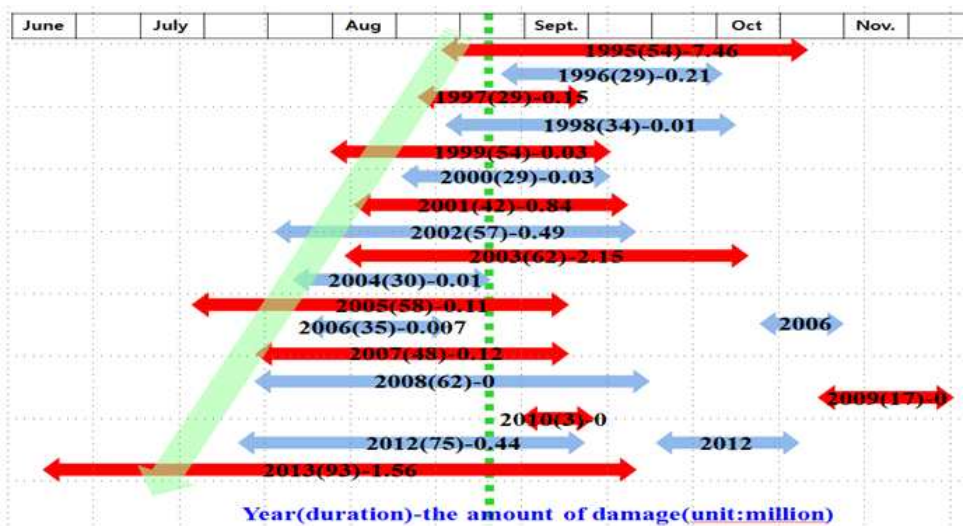


그림 2-2-2. 적조 발생 시기 및 피해액

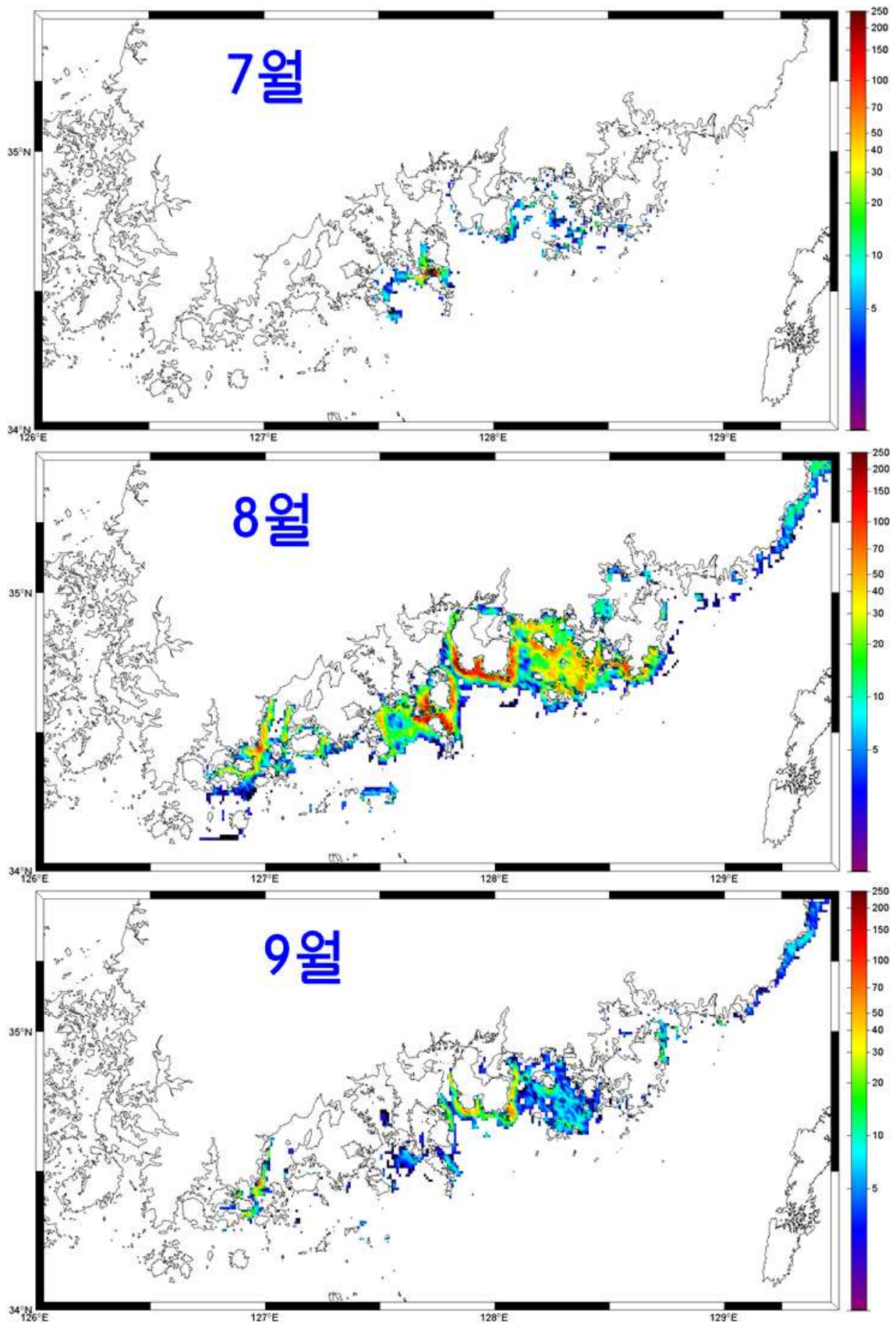


그림 2-2-3. 2002 ~ 2013년 7 ~ 9월 남해안 적조 발생 빈도수

## 제 3 장 적조 현장 관측

### 제 1 절 현장조사 개요

#### 1. 조사 해역

남해동부 조사해역(127° 4 'E ~ 128° 4'E)은 전라남도 여수시에서 거제시의 연안에 이르는 해역으로 해안선에서 외해 방향으로 갈수록 수심이 점점 깊어져 최대 약 80m에 이른다. 이 해역은 섬진강, 남강 등의 큰 규모의 하천과 한려해상 해역으로 이루어져 있으며 대한해협(Korea Strait)을 통하여 동해와 연결되어 있다. 조사해역은 전형적인 리아스식 해안으로 외해역에는 많은 섬들이 산재하고 있고 육지방향으로는 길게 만입한 광양만, 진주만, 고성-자라만 등의 크고 작은 여러 만(bay)들과 함께 갯벌(tidal flat)들이 발달해 있다.

한국 남해 연안해역은 고온고염의 특성을 가지는 대마난류수의 영향이 지배적이며 이는 이 해역의 생태계에 큰 영향을 미친다. 대마난류수는 열과 염분을 공급하는 주요한 수괴로서, 이로 인하여 해안선과 평행한 전선이 발달되는 것으로 보고되고 있다. 연안수와 외해수 사이에 형성되는 이 전선의 발달은 1차 생산자인 식물플랑크톤의 생산력에 큰 영향을 미치며 특히 적조의 발생 원인으로 제시되고 있다(임, 2004). 또한 이 해역은 섬진강과 남강 등을 비롯한 크고 작은 여러 강과 하천들이 위치하고 있어 많은 양의 담수가 연안해역으로 유입된다. 섬진강은 남해 연안해역으로 공급되는 주요 담수와 퇴적물 공급원으로써 여수해협을 거쳐 외해 쪽으로 이동하여 여수해협의 외해 쪽에 거대한 섬진강 삼각주를 형성한다.

이와 같이 남해안은 다양한 수괴에 의해 복잡한 해양환경을 이루고 있으며 이러한 수괴들의 시공간적 변동에 따라 해양 부유 생물 뿐만 아니라 어장 형성과 해조류 양식이 큰 영향을 받는다. 또한, 최근 연안 개발, 수산·양식 활동 증가 등 인위적이고 지역적인 환경요인에 의해 남해 연안해역은 그 변동 폭이 다른 해역에 비해 매우 높게 관측되고 있으며 적조에 의한 피해도 나날이 커지고 있는 실정이다.



## 2. 현장 관측 자료 분석방법

### 가. 현장시료

#### (1) 물리자료

CTD(Conductivity-Temperature-Depth)를 이용한 현장관측은 수중 광학관측을 통해 얻어진 자료와 동일 정점에서 해양 물리적 환경요인을 비교하여 관측함으로써, 수심 방향에 의한 수층(water column)의 구조 특성을 파악했다. 형광관측 sensor는 식물플랑크톤의 광합성에 의한 엽록소 a 농도의 수직 분포를 분석하는데 이용했고, CTD에 부착된 PAR sensor로부터 수심에 따른 광량의 소광계수를 산출했다. 이번 현장관측에서 사용된 장비는 SBE 9 plus CTD, SBE 37 CTD이며 수온, 염분, 밀도, 엽록소 형광, 광투과도, 용존 산소의 수직 프로파일을 얻었다.

#### (2) 엽록소 a 농도

춘계 (5월)와 하계 (8월)에 실시한 남해안 적조 발생 해역의 현장조사에서의 엽록소 a 측정은 다음과 같이 이루어졌다. CTD에 부착된 Niskin bottle을 이용하여 각각 표층, SCM(Subsurface Chlorophyll Maximum)층, 저층의 해수를 빛에 노출되지 않도록 암병에 담아 채수하였다. 채수된 해수를 고르게 잘 흔들어 섞은 후 여과압력 30 ~ 40 *kPa* 상태에서 Whatman 47 mm GF/F 여과지와 5  $\mu$ m pore size 47 mm polycarbonate membrane 여과지를 이용하여 여과했다. 관측정점 해역에서는 평균 500 ml을 여과하였다. 여과가 끝난 여과지는 2 ml cryogenic vial에 라벨을 한 후 즉시 액체질소에 보관하여 pigment degradation에 대해 최소화하였고 액체질소에 보관한 시료를 가능한 빨리 분석을 하였다. 색소를 추출하기 위해서 액체질소에서 여과지를 꺼내 20 ml vial에 넣고 90% 아세톤 10 ml를 첨가해 4° C에서 24시간 냉암 상태에서 엽록소 a를 추출한다. 추출한 시료는 직경 Whatman 25 mm의 GF/F 여과지를 이용하여 부유입자를 제거하였다. 측정은 표준 엽록소 a(Sigma Co.)로 보정한 형광광도계(TD-700, Turner Design)를 이용하여 형광측정법(Parsons et al., 1984)으로 정량적인 엽록소 a값을 구하였다.

#### (3) 광합성-광도 매개변수의 산출

FRRF에서 얻은 형광 생리변수를 아래의 식을 이용하여(Kolber and Falkowski, 1993; Suggett et al., 2001) 단위 엽록소 당 광합성량( $P_{FRRF}^B$ ,  $mgCmgChla^{-1}h^{-1}$ )을 계산

하였다.

$$P_{FRRF}^B = E \times \sigma'^{PSII} \times q_p \times \phi_e \times n_{PSII} \times f \times S \text{ [mgCmgChla}^{-1}\text{h}^{-1}\text{]}$$

여기서 E는 광합성유효광( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )이며  $\sigma'^{PSII}$ 는 주변광 이하에서 측정된 기능적 흡광단면적( $10^{-20} \text{ m}^2 \text{ photon}^{-1}$ )이다.  $q_p$ 는 광화학적 소멸계수이며  $\phi_e$ 는 광계 II에서 1 mol 전자가 생성하는 산소 분자를 나타내는 전자전달 양자수율( $\text{mol O}_2 (\text{mole electrons})^{-1}$ )로 0.2를 적용하였다.  $n_{PSII}$ 는 광합성 단위크기( $\text{mol RCII} (\text{mol Chla})^{-1}$ )이며 이 연구에서는 0.002로 설정하였다(Falkowski and Kolber 1995).  $f$ 는 암적응 상태에서의 광계 II 반응중심 비율이며  $S$ 는 단위 환산인자이다.

계산된  $P_{FRRF}^B$ 는 다시 광합성-광도모델(P-I curve)에 적합화하여 매개변수 단위 엽록소 당 최대 광합성량( $P_m^B$ ,  $\text{mgCmgChla}^{-1}\text{h}^{-1}$ )과 포화광 이하에서 광합성-광도 모델의 초기기울기( $\alpha$ ,  $\text{mgCmgChla}^{-1}\text{h}^{-1} [\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}]^{-1}$ )를 구하였다.

#### (4) 총 부유물질량(TSS, Total suspended solids)

GF/F 여과지의 경우 증류수를 1/3기압 하에서 걸러 furnace에 450° C로 4시간 회화한 후 수분을 완전히 제거하기 위하여 데시케이터에 24시간 넣어 두었다. Polycarbonate membrane 여과지의 경우 50° C 오븐에 6시간 건조시킨 후, 24시간 동안 데시케이터 안에 보관한 후 무게를 측정하였다. 각 관측정점에서 평균 500 ml의 해수를 준비하여 30 ~ 40 kPa 압력 하에서 무게를 잰 여과지에 걸렸다. 여과 후 염분을 제거하기 위해 증류수 100 ml을 흘려주어 염분이 제거되도록 하였고, 분석 전까지 냉동보관하였다.

실험실에서 여과지들을 50° C 오븐에 넣고 6시간 건조시킨 후, 다시 데시케이터에 24시간 보관한 다음 무게를 측정하였다. 여과 전의 여과지 무게와 비교하여 그 변화량을 계산해 총 부유물질량을 계산했다.

#### (5) 입자상 물질의 흡광도(AP, particulate absorption) 측정

입자상 물질의 흡광도(AP)를 측정하기 위해 여과지 Whatman 25 mm GF/F를 사용했고, 채수 및 여과 방법은 엽록소 a 여과 방법과 동일하였다. 여과지는 여과해수에 15 ~ 20분간 담가두었다가 사용하였다. 여과해수 25 ~ 50 ml을 걸러 2개의 blank sample을

만들었고, 해당 수심에서 채수한 해수는 300 ~ 500 ml 정도를 여과하여 샘플을 채취하고, 분석 전까지 액체질소에 보관하였다.

흡광계수 스펙트럼을 측정하기 위해 UV VIS Spectrophotometer를 사용했으며(그림 3-1-1.), 안정도를 테스트하기 위해 air-air baseline을 측정하고 Noise가  $\pm 0.005$  미만이 되도록 했다. 시료를 측정하기에 앞서 reference 여과지 2개를 이용하여 파장 350 ~ 900 nm 영역에서 baseline correction을 실행하였다. 측정할 시료는 항상 수분에 적셔진 상태로 유지하였고 측정하는 도중에 여과지가 빛에 노출되지 않도록 주의를 기울였다. 측정이 끝난 시료는 다시 tissue capsule에 담아 냉동 보관 하였다.



그림 3-1-1. Optical density ( $O.D$ ) 측정을 위한 UV VIS Spectrophotometer

총 입자상 물질의 흡광도( $O.D_{total}$ , optical density of total particulate absorption) 측정이 끝난 여과지(blank sample 포함)는 부유물질에 대한 흡광도( $O.D_{ss}$ , optical density of TSS)를 측정하기 위해 Tissue capsule의 여과지를 35 mm petri-dish에 옮겨 담고 100% 메탄올 4 ml에 약 2 ~ 4시간 담가두었다. 메탄올에 담가둔 여과지와 용액을 이용하여 다시 여과를 실시하였고 마지막으로 60 ml의 여과해수로 헹굼 여과를 실시하였다. 여과가 끝나면  $O.D_{total}$  측정법과 동일한 방법으로  $O.D_{ss}$ 를 측정하였다.

Spectrometer에서 측정된 파장( $\lambda$ )에 따른 식물성플랑크톤의 흡광도( $O.D_{ph}$ , optical density of phytoplankton)는 파장에 따른  $O.D_{total}$ 에서  $O.D_{ss}$ 값을 빼주면 구할 수 있다.

$O.D_{ph}$ 와  $O.D_{ss}$  값은 상대적인 값이므로, 식물플랑크톤의 흡광계수(absorption coefficient) 값인  $a_{ph}$  (absorption coefficient of phytoplankton)로 변환하였고 식은 다음과 같다.

$$a_{ph}(\lambda) = \frac{O.D_{ph}(\lambda) \times 2.303}{\left(\frac{V}{S}\right) \times 2} \times 100 [m^{-1}]$$

여기서 상수 “2.303” 은 상용대수 함수인 O.D를 자연대수 함수인 흡광계수( $a$ )로 변환해 주기 위한 상수이고 “ $\frac{V}{S}(cm)$ ” 는 여과한 해수의 양( $V, ml$ )을 필터의 착색된 여과면적(입자에 의하여 착색된 면적;  $S \text{ cm}^2$ )으로 나누어준 값이다. 상수 “2” 는  $\beta$ -effect(Kiefer and SooHo, 1982; optical pathlength 증폭현상)로서, 흡광계수를 측정할 때 부유 입자 상태에서 측정한 값과 여과지를 통해서 측정한 값의 비이고(Ahn, 1990), 상수 “100” 은 흡광계수 단위를  $cm^{-1}$ 에서  $m^{-1}$ 로 환산하기 위한 상수이다. 비 흡광계수(specific absorption coefficient,  $a^*_p$ )는 단위 농도 당 입자의 흡광계수로서,  $a^*_{ph}$  ( $m^2 mg^{-1}$ )는 단위 엽록소 a 농도( $chl \text{ mg } m^{-3}$ )당 식물플랑크톤의 흡광계수( $a_{ph}(\lambda) \text{ } m^{-1}$ )이며 다음과 같은 식에 의해서 파장에 따른 식물플랑크톤의 비 흡광계수를 계산하였다.

$$a^*_{ph}(\lambda) = \frac{a_{ph}(\lambda)}{chl} [m^2 mg^{-1}]$$

#### (6) 용존 유기물(coloured dissolved organic matter, CDOM)의 흡광

용존 유기물 측정은 분광광도계(Spectrophotometer)를 이용하여 용존 유기물의 흡광도( $O.D_{cdom}$ )를 측정하여 흡광계수를 산출했다. 실험 방법은 시료를 담을 125 ml 갈색 병(Qorpak<sup>TM</sup>)과 뚜껑을 2차 증류수에 헹군 후, 10% HCl에 24시간 이상 담가두었고, 2차 증류수에 세척, 행굼을 반복하여 유기 오염물질을 완벽하게 제거하였다. 뚜껑은 60° C 오븐에 4 ~ 6시간 건조시키고 병은 알루미늄 호일로 감싼 후 450° C furnace에 6시간 회화하였다. 회화가 끝난 갈색병과 건조를 한 뚜껑을 증류수로 헹군 후 증류수를 가득 담아서 뚜껑을 닫아 어두운 곳에 보관하였다.

0.2  $\mu m$  pore size 47 mm polycarbonate membrane(염색되지 않은 것)을 plastic petri-dish에 넣고 적어도 15분 정도 10% HCl에 담가 둔 후 증류수로 여과지를 헹궈주었다. 해수를 여과시켜 병 안을 한 번 헹구고, 나머지 해수는 여과하여 병에 받았다. 시료는 100 ml정도의 채취하고 어두운 상태에서 4° C에서 냉장보관을 하였다.

측정 전 냉장에 보관되었던 시료는 상온에 두어 주변온도와 비슷해지도록 하였고, 측정은 UV VIS Spectrophotometer을 사용했다. 측정에 사용할 10 cm quartz cuvette는 10% HCl로 두세 번, 에탄올로 두세 번 충분히 세척하였다. 측정 장비의 안정도를 테스트하기 위해 air-air, cuvette air-air 그리고 cuvette 증류수-air baseline을 측정하였다. 이때 noise는 ±0.0005 미만이 되도록 하였다. 본격적인 측정을 위해 0.2 μm pore size 47 mm polycarbonate membrane 여과지로 여과한 증류수 샘플을 두 개의 cuvette에 기포가 생기지 않도록 꼭 채웠다. optical windows에 두 개의 cuvette를 spectro-photometer에 넣어 baseline을 측정하였다. Baseline이 안정적으로 나오면 reference cuvette를 제외한 다른 한 쪽의 cuvette에 들어 있는 증류수를 버리고 다음 측정할 샘플 5-10 ml로 cuvette에 샘플을 꼭 채운 후 측정을 했다. 측정된  $O.D_{cdom}$ 을 CDOM의 흡광계수(absorption coefficient of CDOM,  $a_{cdom}(\lambda)$ ) 값으로 환산하였고 이 때 사용된 식은 다음과 같다.

$$a_{cdom}(\lambda) = \frac{2.303 \times O.D_{cdom}(\lambda)}{0.1} [m^{-1}]$$

여기서 상수 “0.1” 은 cuvette의 길이(10 cm)를 나타낸다.

## (7) 영양염

Whatman 47 mm GF/F 여과지를 통과한 여과해수는 15 ml conical tube에 넣어 냉동 보관하여 영양염 분석용으로 사용하였다. 영양염 시료는 분석 전 해동하여 규산염(SiO<sub>2</sub>), 암모니아성 질소(NH<sub>4</sub>-N), 아질산성 질소(NO<sub>2</sub>-N)와 질산성 질소(NO<sub>3</sub>-N), 인산염(PO<sub>4</sub>-P)을 Parsons et al.(1984)의 분석법에 따라서 auto analyzer(QuAatro, Seal Analytical Inc.)로 분석하였다.

### 나. 광학장비

수중광학 관측은 조사선에 의해 현장에서 관측 장비를 해수 중으로 내려 관측하는 방법과 부이 시스템에 부착된 수중광학장비에 의해 관측하는 방법이 있다. 이번 연구에서는 모두 조사선, 국립공원 연구 1호에 의해 현장 관측 되었으며 수중광학 관측 장비의 특성은 각 장비별로 아래에 설명하였다.

조사선에서 광학장비를 이용하여 수중광학 측정을 할 경우 조사선박의 그림자에 의한 영향을 받을 수 있으므로 이를 피할 수 있는 위치에서 작업을 진행하였다. 또한 표층에서 관측에 의한 오차를 최소화하기 위하여 기기의 작동 시간을 포함한 약 5분~10

분 동안 일정 수심에서 자료를 획득하다가 일정한 속도로 천천히 케이블을 내려 광학 자료를 얻을 수 있도록 하였다.

(1) AC-9 plus(Absorption and attenuation meter)

AC-9 plus(WET Labs, Inc.)는 기존의 AC-9 이중경로 흡수, 감쇄측정기에 WetLab사의 ECO-VSF 센서 또는 CTD System등과 자료통합이 가능하도록 기능이 추가된 장비로써 현재 연구실에는 SBE37 CTD가 장착되어 있다. AC-9 plus에 의해 측정된 전도도, 수온, 수심 및 광 산란량 등의 자료는 RS-232통신을 통하여 전송되며 실시간 표출 소프트웨어인 WETView Software에 연결되어 저장과 함께 실시간으로 표출된다. 따라서 수온, 염분에 의한 해수에서의 광 특성을 설명하기에 필요한 자료들을 동시에 측정했다.

(2) FRRF(Fast repetition rate fluorometry)

FRRF(Chelsea Instruments Ltd.)는 150 ~ 400  $\mu s$  동안 20,000  $\mu mol m^{-2} s^{-1}$  이상의 강한 빛을 반복적으로 주사하여 형광을 측정한다. FRRF는 dark chamber와 light chamber로 구성되어 있으며 광 sensor가 장착되어 있다. FRRF의 가장 큰 장점은 엽록소 a 농도가 낮아도 측정이 가능하여 빈영양 및 외해에서 사용할 수 있다는 것이다 (Falkowski and Kolber, 1995; Aiken et al., 2000). 이번 연구에서는 FRRF를 이용하여 전자전달율을 계산함으로써 식물플랑크톤의 생리변수를 추정하였다.

## 제 2 절 2015년 적조발생 해역 현장관측

### 1. 현장 관측자료 개요

2015년에는 봄, 여름 총 2회에 걸쳐 약 일주일동안 현장 조사를 실시하였으며 조사정점(그림 3-2-1, 표 3-2-1)과 조사항목은 표 3-2-1에 제시하였다. 참고적으로 2015년 8월의 현장조사는 8월 26일 태풍 ‘고니’가 소멸한 뒤에 현장 조사를 진행하였다.

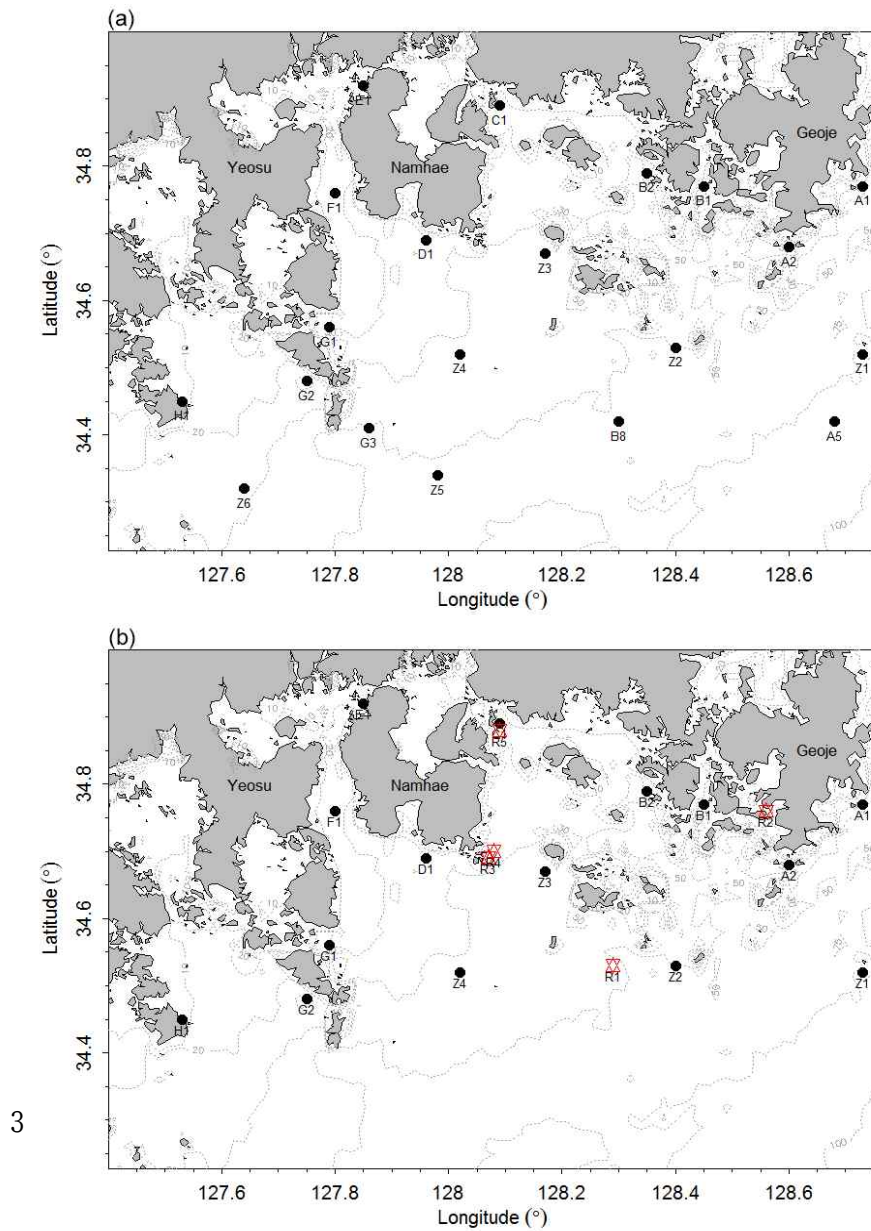


그림 3-2-1. (a) 2015년 5월 조사정점, (b) 2015년 8월 조사정점(별표: R1 ~ R5 적조 발생 정점)

표 3-2-1. 2015년 현장조사 관측정보

(a) 2015년 5월 관측정보

Station	Longitude (°)	Latitude (°)	Observation time (yyyy-mm-dd)	Depth (m)	Sample (m)
A1	128.73	34.77	2015-05-24	43	2, 43
A2	128.60	34.68	2015-05-26	55	2, 55
A5	128.68	34.42	2015-05-24	80	2, 34, 80
B1	128.45	34.77	2015-05-26	13	2, 13
B2	128.35	34.79	2015-05-26	22	2, 22
B8	128.30	34.42	2015-05-22	55	2, 12, 55
C1	128.09	34.89	2015-05-26	11	2, 11
D1	127.96	34.69	2015-05-27	21	2, 21
E1	127.85	34.92	2015-05-27	9	2, 9
F1	127.80	34.76	2015-05-20	10	2, 10
G1	127.79	34.56	2015-05-20	18	2, 18
G2	127.75	34.48	2015-05-21	28	2, 28
G3	127.86	34.41	2015-05-20	45	2, 12, 45
H1	127.53	34.45	2015-05-21	10	2, 10
Z2	128.40	34.53	2015-05-24	45	2, 45
Z3	128.17	34.67	2015-05-27	38	2, 38
Z4	128.02	34.52	2015-05-22	28	2, 8, 28
Z5	127.98	34.34	2015-05-22	40	2, 25, 40
Z6	127.64	34.32	2015-05-21	24	2, 12, 24

(b) 2015년 8월 관측정보

Station	Longitude (°)	Latitude (°)	Observation time (yyyy-mm-dd hh:mm)		Depth (m)	Sample (m)
A1	128.73	34.77	2015-09-02	09:00	47	2, 44
A2	128.60	34.68	2015-09-02	10:57	53	2, 50
B1	128.45	34.77	2015-09-02	14:25	16	2, 13
B2	128.35	34.79	2015-09-02	16:23	25	2, 22
C1	128.09	34.89	2015-09-03	14:21	16	2, 13
D1	127.96	34.69	2015-09-03	10:39	26	2, 23
E1	127.85	34.92	2015-09-05	07:27	12	2, 10
F1	127.80	34.76	2015-08-31	08:34	15	2, 12
G1	127.79	34.56	2015-08-31	11:01	26	2, 23
G2	127.75	34.48	2015-08-31	13:35	32	2, 29
H1	127.53	34.45	2015-08-31	15:55	9	2, 6
R1	128.29	34.53	2015-09-01	14:25	44	0
R2	128.56	34.76	2015-09-02	13:07	48	0
R3	128.07	34.69	2015-09-03	12:17	27	0
R4	128.08	34.70	2015-09-03	12:55	25	2, 10, 20
R5	128.09	34.88	2015-09-04	16:30	15	0
Z1	128.73	34.52	2015-09-01	18:30	79	2, 30, 72
Z2	128.4	34.53	2015-09-01	15:30	47	2, 30, 42
Z3	128.17	34.67	2015-09-03	08:25	41	2, 30, 38
Z4	128.02	34.52	2015-09-01	11:48	33	2, 15, 30



표 3-2-2. 2015년 현장조사 관측항목

세부 분야	세부 조사내용	측정기기
해양환경	수온	SBE 9 plus CTD
	염분	SBE 9 plus CTD
	밀도	SBE 9 plus CTD
	용존산소	SBE 9 plus CTD
	광합성 유효광	SBE 37 CTD
	부유물질	BP221S electronic balance
	pH	EC-pH 601 pH meter
	영양염	QUAATRO Full Automatic Nutrients Analyzer
	광학 (a and c, remote sensing reflectance (Rrs))	AC-9 , Profiler II
	용존유기물 흡광	Cary300 UV-Spectrophotometer
입자성 물질흡광	Cary300 UV-Spectrophotometer	
식물플랑크톤	엽록소 a 농도, 5 $\mu$ m 이하 엽록소 a 농도	10-AU
	식물플랑크톤 종조성	FlowCam-VS, Zeiss-microscope
	식물플랑크톤 흡광	Cary300 UV-Spectrophotometer

## 2. 현장 관측자료 분석 결과

### 가. 2015년 봄 관측

이번 2015년도 5월 관측은 총 조사 정점이 20개였으며, 조사기간은 5월 20일부터 5월 27일까지로 여수 국립공원 관리공단 연구원에 의해 시행되었다.

#### (1) 물리적 자료의 공간적 분포

연구 해역에서 2015년 5월에 관측된 수온, 염분, 밀도, 용존산소량의 공간적 분포 특성은 그림 3-2-2와 같았다. 표층수온은 15.15 ~ 21.18°C (평균  $17.13 \pm 1.51$ °C), 저층수온은 13.91 ~ 16.76°C (평균  $14.91 \pm 0.66$ °C) 범위로 나타났다. 표층의 경우 남해 주변 해역이 다른 해역보다 높은 값을 보였으며 저층은 섬진강과 남강의 영향을 받는 주변 해역을 제외하면 균질한 값을 보였다. 표층염분은 31.59 ~ 34.21psu (평균  $33.31 \pm 0.65$ psu), 저층염분은 32.38 ~ 34.38psu (평균  $33.58 \pm 0.54$ psu) 범위로 나타났다. 표층과 저층의 염분 모두 섬진강의 영향을 받는 주변 해역에서 낮은 값을 보였다. 밀도의 범위는 표층에서 21.85 ~ 25.14  $kgm^{-3}$  (평균  $24.18 \pm 0.74$   $kgm^{-3}$ ), 저층에서 23.56 ~ 25.51  $kgm^{-3}$  (평균  $24.89 \pm 0.53$   $kgm^{-3}$ )로 나타났다. 염분 분포 범위와 같이 밀도 또한 섬진강의 영향을 받는 주변 해역에서 낮게 나타났으며 그 외의 해역에서는 대체적으로 균질한 분포를 보였다. 용존산소량은 표층에서 6.53 ~ 8.99  $mlt^{-1}$  (평균  $7.77 \pm 0.73$   $mlt^{-1}$ ), 저층에서 6.07 ~ 7.99  $mlt^{-1}$  (평균  $6.91 \pm 0.59$   $mlt^{-1}$ )로 나타났다. 특히, 연도 부근 G3정점 표층에서 8.95  $mlt^{-1}$ 로 매우 높은 값을 보였다.

#### (2) 엽록소 a 농도의 공간적 분포

조사정점 해역에서의 엽록소 a 농도는 조사시기와 관측위치에 따라 다양하게 나타났다. 그림 3-2-3과 같이 공간적으로 5월에 육지의 영향이 큰 연안해역에서 높게 나타났고 대마난류의 영향을 받는 외해역에서 낮게 나타났다. 전체 엽록소 a 농도는 2015년 5월 표층에서 0.57 ~ 4.32  $mgm^{-3}$  (평균  $2.41 \pm 1.33$   $mgm^{-3}$ ), 저층에서 0.28 ~ 3.30  $mgm^{-3}$  (평균  $1.18 \pm 0.87$   $mgm^{-3}$ )로 나타났다.

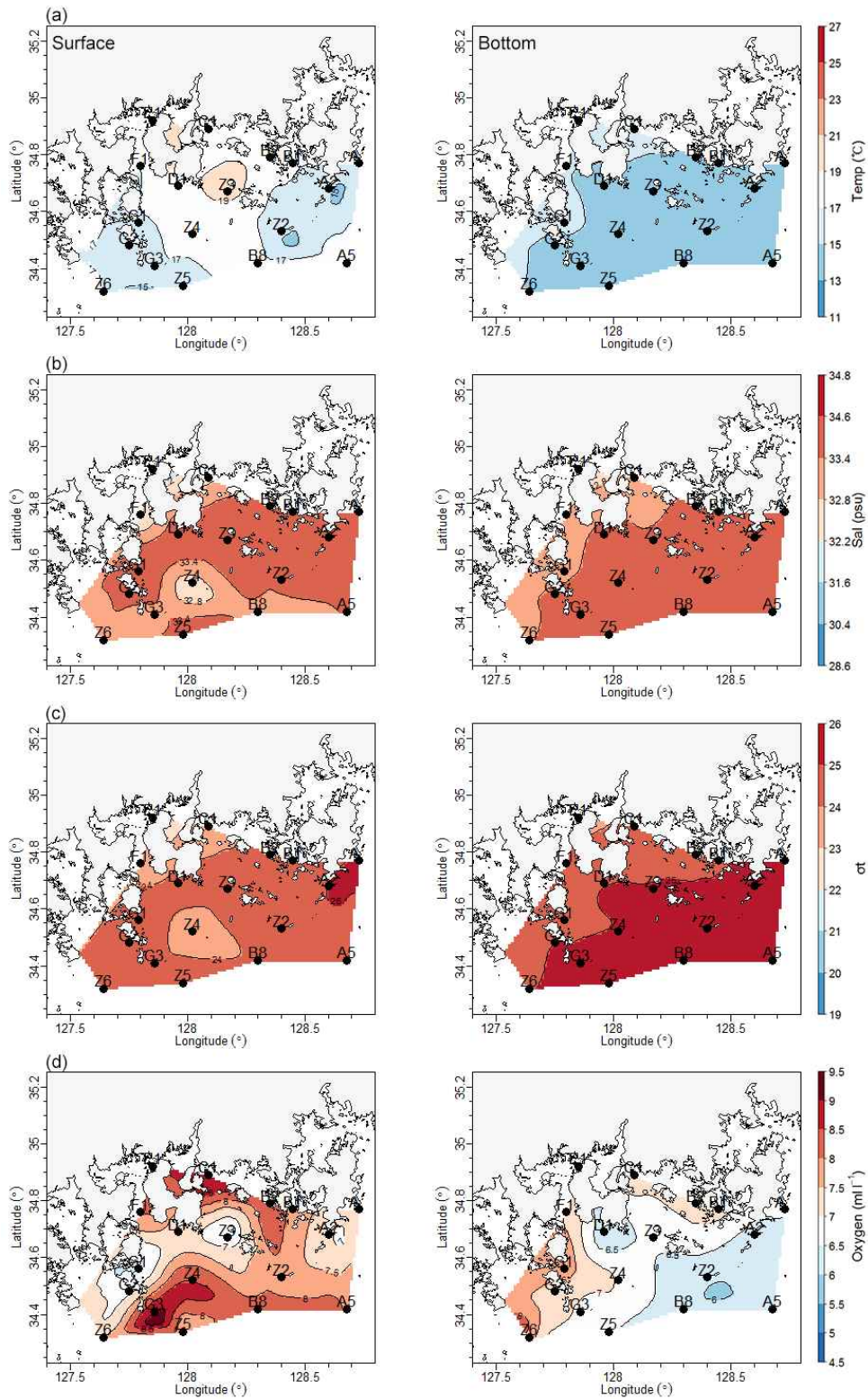


그림 3-2-2. 2015년 5월 표층과 저층에서의 (a) 수온( $^{\circ}\text{C}$ ), (b) 염분( $\text{psu}$ ), (c) 밀도 ( $\sigma_t, \text{kgm}^{-3}$ ), (d) 용존산소( $\text{ml l}^{-1}$ )의 공간적 분포

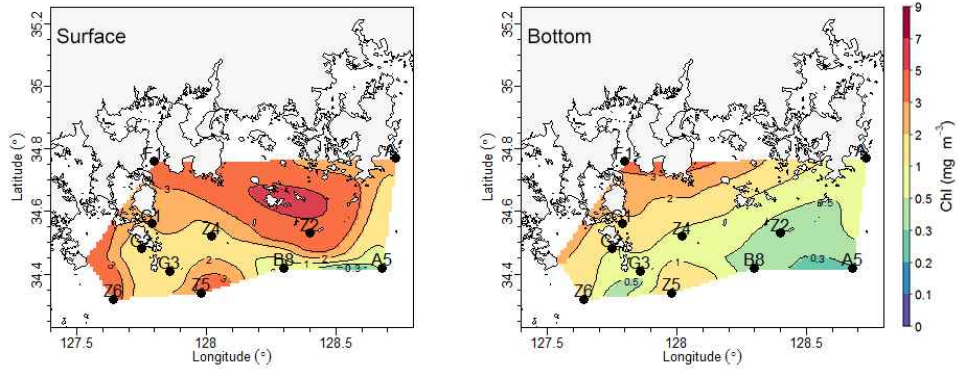


그림 3-2-3. 2015년 5월 표층과 저층에서의 전체 엽록소  $a$  농도( $mgm^{-3}$ )의 공간적 분포

### (3) 영양염의 공간적 분포

연구해역에서 2015년 5월에 관측된 질산염( $NO_3$ ), 암모늄( $NH_4$ ), 인산염( $PO_4$ ) 그리고 규산염( $SiO_2$ )의 공간적 분포 특성은 그림 3-2-4와 같았다. 2015년도 5월의 표층에서의 질산염 농도는  $0.96 \sim 10.31 \mu M$  (평균  $4.90 \pm 2.96 \mu M$ ), 저층에서  $4.45 \sim 21.14 \mu M$  (평균  $11.64 \pm 4.49 \mu M$ ) 범위로 나타났다. 표층의 경우 섬진강의 영향으로 주변 해역에서 높은 농도를 보였으며 특히 매물도 남단 A5정점에서 매우 높은 농도( $10.31 \mu M$ )를 보였다. 저층의 경우 표층과 달리 섬진강 영향을 받는 주변 해역에서 낮은 값을 보였으나 특이하게 G3정점에서 매우 높은 값( $21.14 \mu M$ )을 보였다. 저층의 경우 연안에서 외해로 갈수록 증가되는 양상을 보였다. 표층과 비교하여 저층의 농도가 비교적 높고, 이는 저층 냉수괴의 형성과 유입으로 인해 동쪽해역에서 상대적으로 높게 나타나는 것으로 해석된다. 암모늄 농도는 표층에서  $0.62 \sim 2.49 \mu M$  (평균  $1.19 \pm 0.54 \mu M$ ), 저층에서  $0.47 \sim 2.86 \mu M$  (평균  $1.34 \pm 0.72 \mu M$ ) 범위로 나타났다. 표층과 저층 모두 섬진강 영향을 받는 주변 해역에서 높은 농도를 보였으며 외해로 갈수록 감소되는 양상을 보였으며 표층과 비교하여 저층의 농도는 그리 큰 차이를 보이지 않았다. 인산염 농도는 표층에서  $0.03 \sim 0.50 \mu M$  (평균  $0.20 \pm 0.16 \mu M$ ), 저층에서  $0.22 \sim 1.27 \mu M$  (평균  $0.78 \pm 0.30 \mu M$ ) 범위로 나타났다. 표층의 경우 섬진강 영향을 받는 주변 해역을 포함한 서쪽 해역과 매물도 부근 해역에서 높은 농도를 보였다. 저층의 경우 표층과 달리 연안에서 외해로 갈수록 높은 농도를 보였다. 표층과 비교하여 저층의 농도가 비교적 높게 나타났으며 이는 질산염과 유사한 패턴이었다. 규산염 농도는 표층에서  $2.42 \sim 16.72 \mu M$  (평균  $8.85 \pm 4.69 \mu M$ ), 저층에서  $9.97 \sim 32.04 \mu M$  (평균  $19.69 \pm 6.41 \mu M$ ) 범위로 나타났다. 규산염의 농도 또한 질산염, 인산염과 비슷한 패턴을 보였는데 표층의 경우 섬진강의 영향으로 주

변 해역에서 높은 농도를 보였으며 연안에서 외해로 갈수록 낮은 농도를 보였다. 저층의 경우 심진강 영향을 받는 주변 해역에서 낮은 값을 보였으나 G3정점에서는 매우 높은 값( $32.04 \mu M$ )을 보였다. 저층의 경우 연안에서 외해로 갈수록 증가되는 양상을 보였으며 표층과 비교하여 높은 값을 나타내었다.

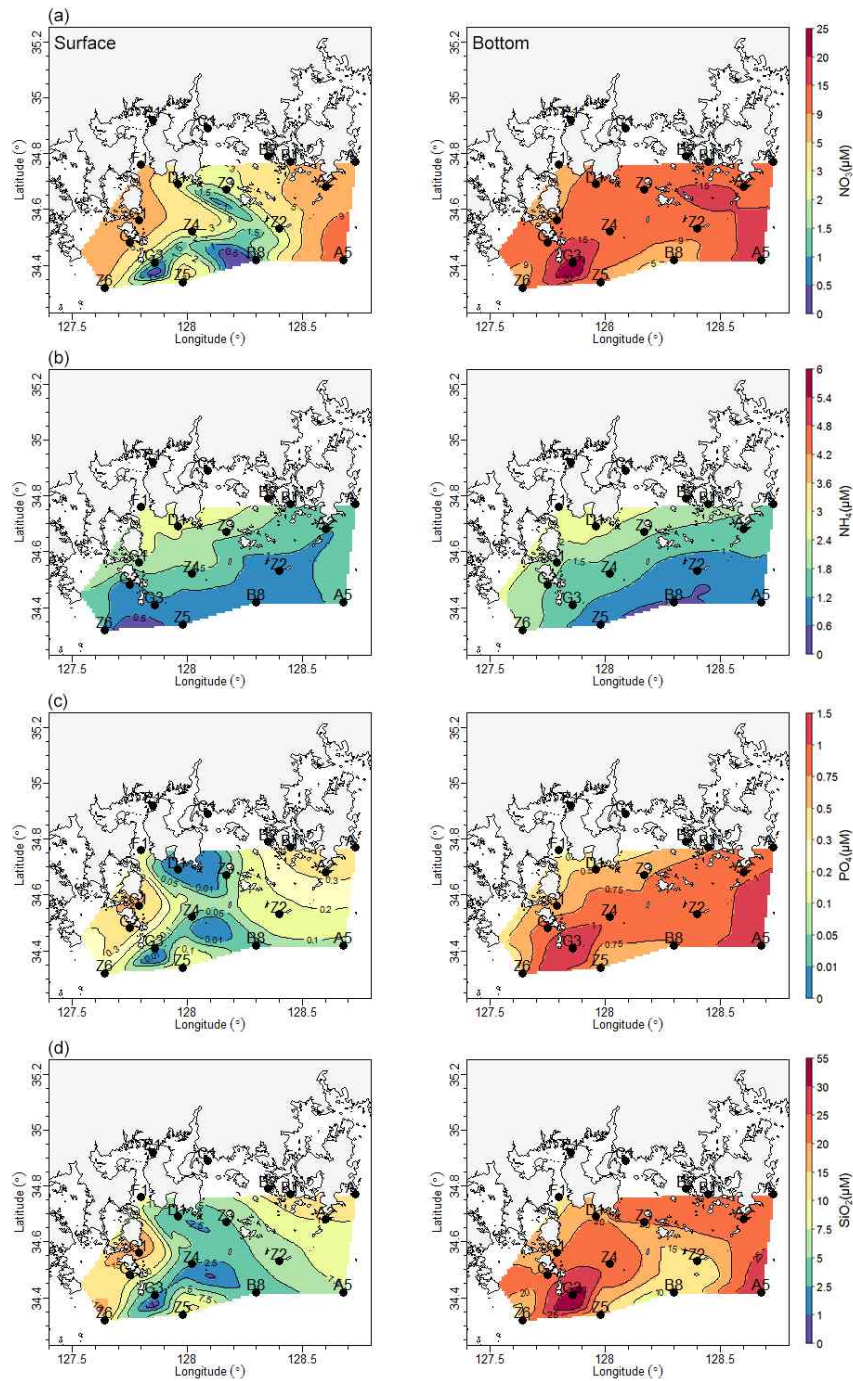


그림 3-2-4. 2015년 5월 표층과 저층에서의 (a) 질산염( $NO_3$ ), (b) 암모늄( $NH_4$ ), (c) 인산염( $PO_4$ ), (d) 규산염( $SiO_2$ ) 농도( $\mu M$ )의 공간적 분포



## 나. 2015년 여름 관측

2015년도 8월 관측은 8월 31일부터 9월 5일까지 시행되었으며, 총 조사정점은 적조 발생 정점 5개를 포함하여 총 20개였다. 관측은 국립공원 연구1호 조사선을 이용하여 각 수층별로 이루어졌다.

### (1) 물리적 관측자료

연구해역에서 2015년 8월에 관측된 물리적 관측자료의 수직적 분포와 공간적 분포의 특성은 그림 3-2-5와 그림 3-2-6과 같았다.

수온, 염분 그리고 밀도의 수직적 분포는 각 정점마다 상이한 결과를 보였다. 수심이 깊은 외해역인 A1, A2, Z1, Z2, Z4정점은 약 20 ~ 30 m 부근에서 수온약층이 형성되었으며 거제에서 고흥 쪽으로 육지와 가까워지면 가까워질수록 약한 수온약층이 형성되었다. 이번에 적조가 발견된 R1정점은 가장 가까운 외해역의 Z2정점과 비슷한 분포를 보여 적조가 발생한 정점과 발생하지 않은 정점 간 수괴의 차이점을 발견할 수 없었다.

표층수온은 22.87 ~ 25.17°C (평균 24.42±0.72°C), 저층수온은 15.06 ~ 25.14°C (평균 21.59±3.26°C) 범위로 나타났다. 표층의 경우 일부 해역을 제외하면 균질한 값을 보였으나 저층의 경우 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 수온이 점점 낮아지는 수온경사가 나타났다. 이는 연안의 경우 낮은 수심과 강한 조석작용에 의해 혼합층이 발달하는 반면, 외해에서는 상대적으로 깊은 수심에 의한 저층의 냉수대 유지와 고온고염의 대마난류수의 유입으로 인하여 강한 성층이 형성되기 때문으로 해석된다. 따라서 이러한 수괴의 차이로 인하여 연안과 외해 사이에 강한 수온 전선이 발달하는 것으로 보인다.

표층염분은 31.05 ~ 32.63psu (평균 32.52±0.36psu), 저층염분은 31.21 ~ 34.29psu (평균 32.52±0.87psu) 범위를 나타냈다. 염분 역시 표층 수온과 비슷한 분포를 보였으며 저층의 경우 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 높은 값을 나타내는 염분경사가 나타났다. 밀도의 범위는 표층에서 20.31 ~ 22.17 kgm<sup>-3</sup> (평균 21.16±0.45 kgm<sup>-3</sup>), 저층에서 20.44 ~ 25.41 kgm<sup>-3</sup> (평균 22.41±1.51 kgm<sup>-3</sup>)로 나타났다. 수온과 염분 분포범위와 같이 밀도 또한 저층에서 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 높은 값을 보이는 밀도경사를 보였다. 용존산소량은 표층에서 4.98 ~ 8.56 ml<sup>-1</sup> (평균 6.70±0.88 ml<sup>-1</sup>), 저층에서 4.75 ~ 7.00 ml<sup>-1</sup> (평균 5.62±0.65 ml<sup>-1</sup>)로 나타났으며 특히, 금오도 부근 G1정점 표층에서 8.56 ml<sup>-1</sup>로 매우 높은 값을 보였다.

적조가 발생한 R정점들에서의 수괴의 특징을 조사하기 위하여 2014년과 2015년 관측된 R정점들 수괴의 수직구조를 살펴보았다(그림 3-2-7). 그러나 적조가 발생한 R정점

들의 수직구조는 모두 상이하어 특정한 패턴을 찾을 수 없었으며 그 범위는 표 3-2-3과 같았다. 일반적으로 적조종이 잘 자랄 수 있는 최적의 범위는 수온의 경우 21 ~ 26°C, 염분의 경우 30 ~ 36psu로 알려져 있는데(Kim et al., 2004) 이번 조사기간 동안의 수온과 염분 분포 모두 이 범위 안에 포함되는 것으로 나타났다. 앞으로 적조종의 발생과 물리적 환경 간의 관계를 살펴보기 위해서는 단순히 발생과 발생하지 않은 해역의 비교로 국한하지 않고 관측 수온에 따라 지역적 범위와 개체밀도가 어떻게 달라지는지 살펴볼 필요가 있다.

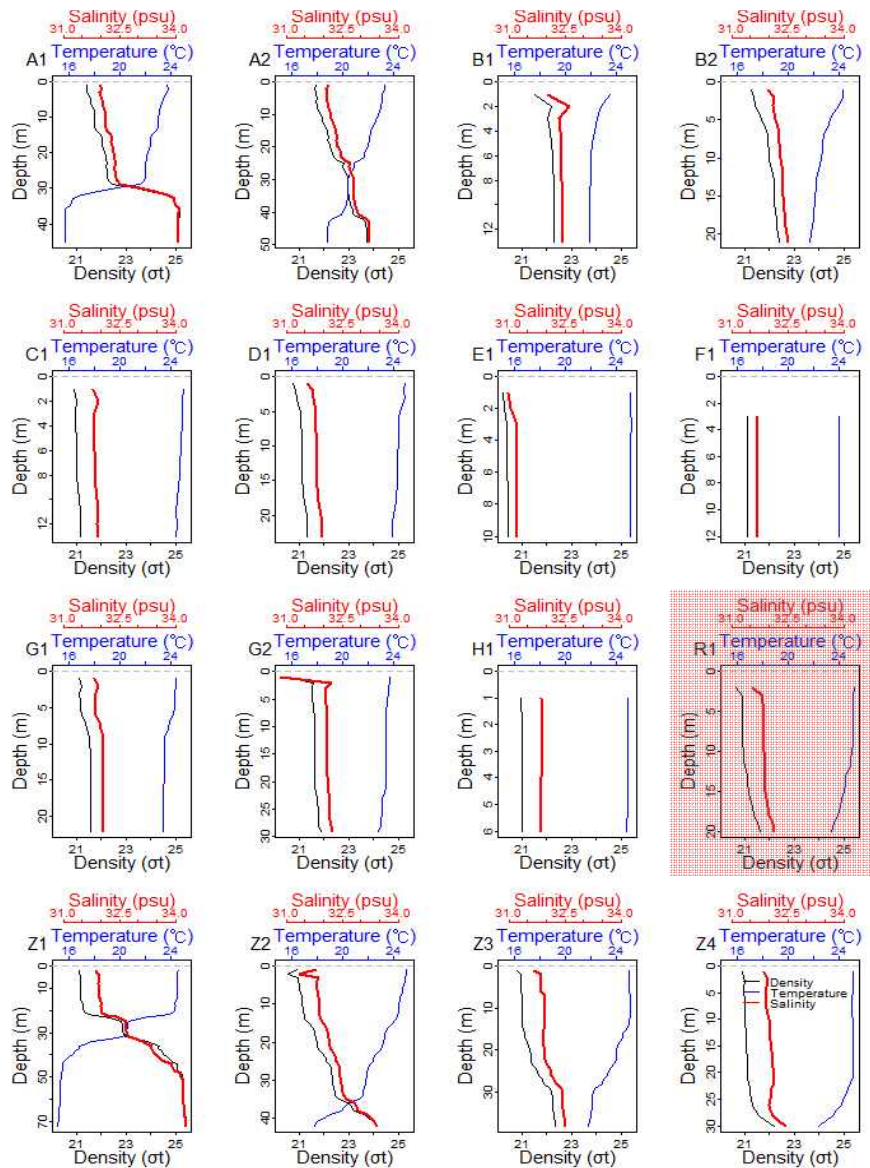


그림 3-2-5. 2015년 8월 수온(°C), 염분(psu), 밀도( $\sigma_t$ ,  $kg\ m^{-3}$ )의 수직 분포

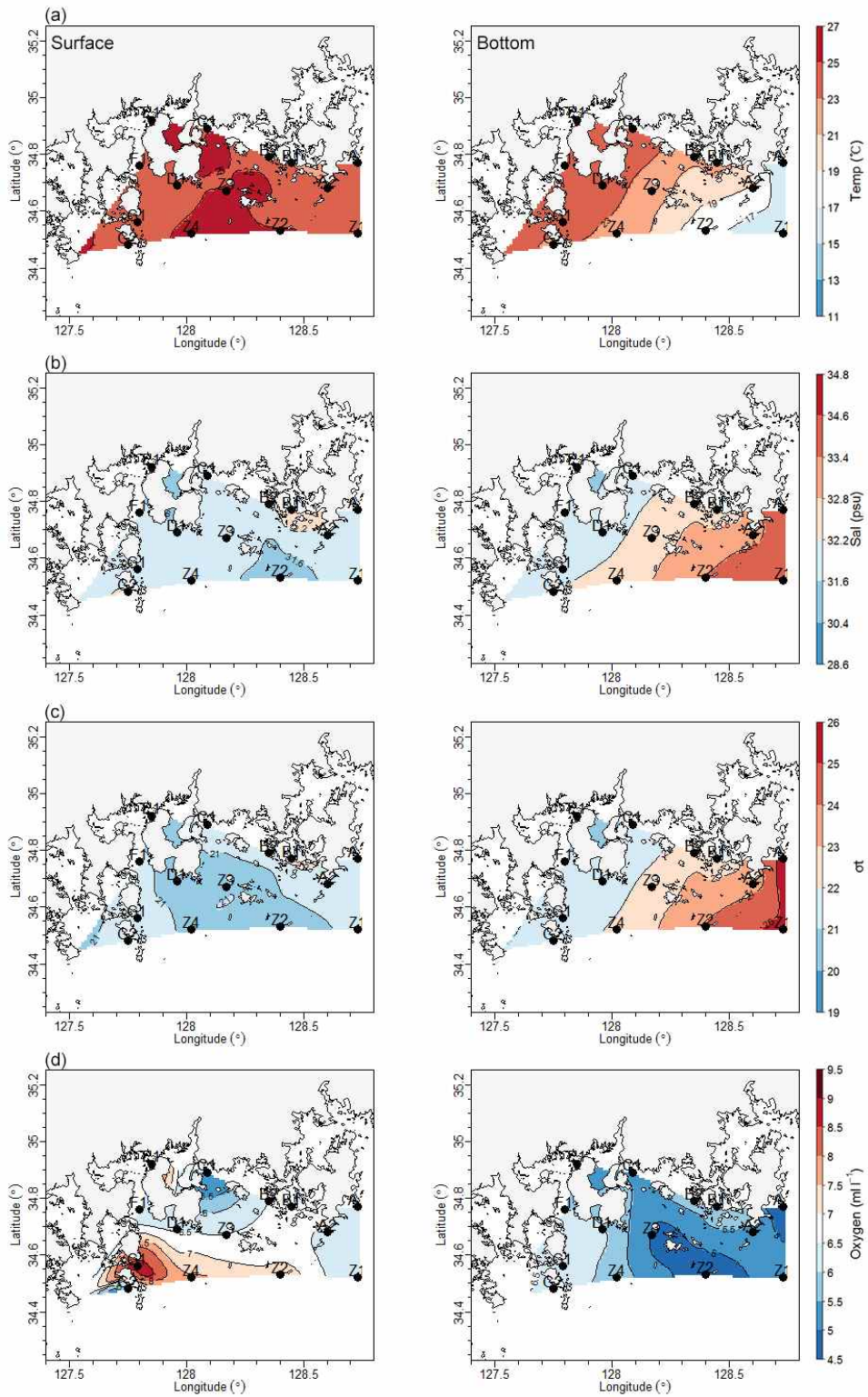


그림 3-2-6. 2015년 8월 표층과 저층에서의 (a) 수온(°C), (b) 염분(psu), (c) 밀도 ( $\sigma_t$ ,  $kgm^{-3}$ ), (d) 용존산소량( $ml l^{-1}$ )의 공간적 분포



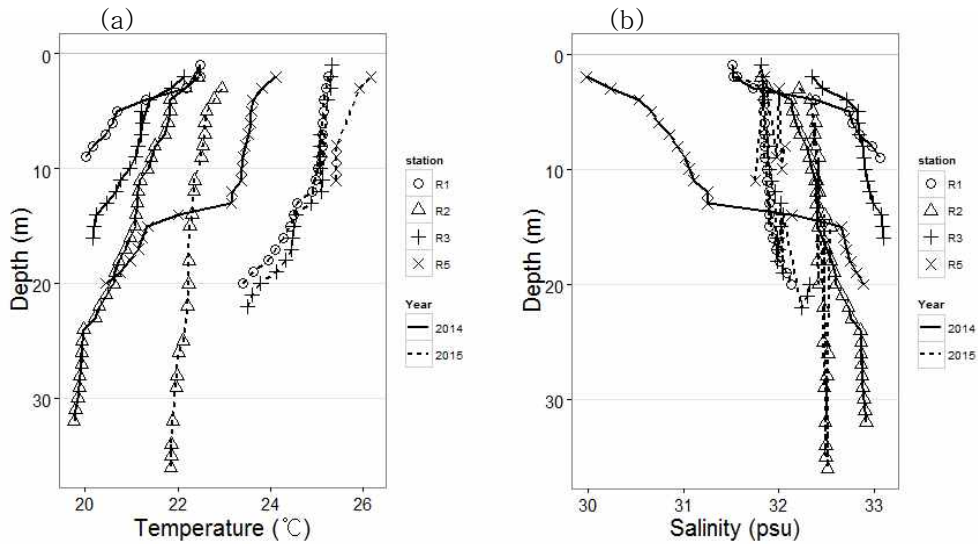


그림 3-2-7. 2014년과 2015년 R정점에서의 (a) 수온(°C)과 (b) 염분(psu)의 수직 분포

표 3-2-3. 2014년과 2015년 R정점 표층에서의 수온(°C)과 염분(psu)의 범위

물리적 인자	Optimal growth (Kim et al., 2004)	2014 ~ 2015년		
		2014	2015	2015년
수온(°C)	21.0~26.0	22.4~24.1	22.9~26.2	22.4~26.2
염분(psu)	30.0~36.0	30.0~32.3	31.6~32.2	30.0~32.3

## (2) 엽록소 a 농도

2015년 8월의 엽록소 a 농도는 5월의 엽록소 a 농도에 비해 관측위치에 따라 더욱 다양하게 나타났다. 이번 현장 관측에서는 좀 더 정확한 적조 탐지를 위해 10-AU 연속 측정과 FlowCam을 이용하여 적조 패치의 유무를 판별하여 탐지 정확도를 높였다. 엽록소 a 농도의 연속 측정값은 경우 현장에서 10-AU를 이용하여 형광값을 연속 측정 한 뒤 실험실에서 측정한 엽록소 a 농도와 비교하여 형광값을 엽록소 a 농도로 변환하였다 (그림 3-2-8). 2015년 8월에 관측된 엽록소 a 농도의 공간적 분포 특성은 그림 3-2-9와 같았다. 전체 엽록소 a 농도는 표층에서  $0.32 \sim 8.00 \text{ mgm}^{-3}$  (평균  $3.10 \pm 2.46 \text{ mgm}^{-3}$ ), 저층에서  $0.14 \sim 6.15 \text{ mgm}^{-3}$  (평균  $1.58 \pm 1.80 \text{ mgm}^{-3}$ )로 나타났다.  $5 \mu\text{m}$  이하의 엽록소 a 농도는 표층에서  $0.00 \sim 2.20 \text{ mgm}^{-3}$  (평균  $0.61 \pm 0.67 \text{ mgm}^{-3}$ )로 전체 엽록소 a 농도의 약 19%를 차지하였다. 저층에서의  $5 \mu\text{m}$  이하의 엽록소 a 농도는  $0.00 \sim 0.57 \text{ mgm}^{-3}$  (평균  $0.16 \pm 0.22 \text{ mgm}^{-3}$ )로 나타났으며 전체 엽록소 a 농도의 약 10%를 차지하는 것으로 나타났다. 이 비율은 약 73%를 차지하는 것으로 나타났던 2014년 8월의 관

측에 비해 매우 낮은 수치였다. 전체 엽록소 a 농도와 5  $\mu m$  이하의 엽록소 a 농도는 여수와 통영 부근 해역의 표층과 저층에서 모두 높게 측정되었다. 특히, R2정점을 제외한 나머지 R정점들의 표층 엽록소 a 농도는 이 정점들과 가장 가까운 위치에서 측정된 적조가 발생하지 않은 정점들의 표층 엽록소 a 농도와 비교하여 볼 때, 10.80 ~ 27.33  $mgm^{-3}$  (평균  $16.84 \pm 7.61 mgm^{-3}$ )로 매우 높게 나타나 적조종이 매우 높은 밀도로 패치를 형성하고 있음을 알 수 있었다(그림 3-2-10). 이러한 적조종의 높은 밀도는 2014년 8월 적조가 발생한 R정점들과 같은 현상이었다. 그러나 2014년과 비교해 볼 때 2015년 8월에 관측된 적조종 *C. polykrikoides*의 밀도는 상대적으로 낮게 관측되었는데 이는 2015년 8월 말 발생한 태풍 ‘고니’의 영향으로 적조 패치가 크게 형성되지 못한 상태에서 적조 조사관측이 시행되었기 때문이라 여겨진다.

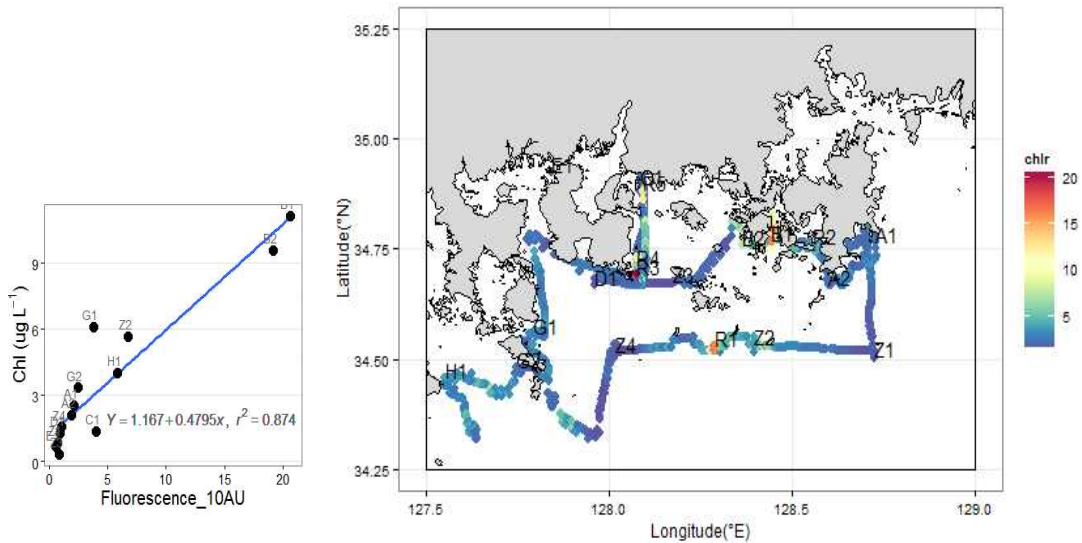


그림 3-2-8. 2015년 8월 10-AU로 연속 측정된 엽록소 a 농도( $mgm^{-3}$ )

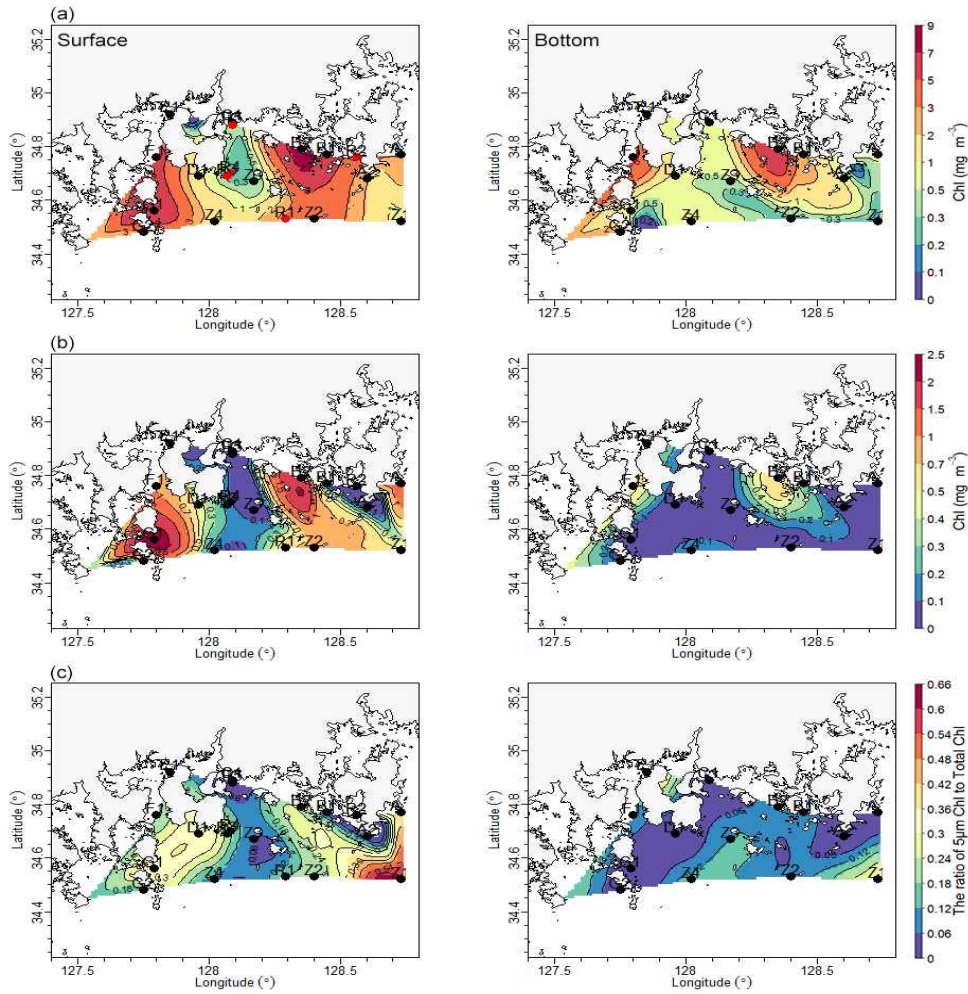


그림 3-2-9. 2015년 8월 표층과 저층에서의 (a) 전체 엽록소 *a* 농도( $mgm^{-3}$ ), (b) 5  $\mu m$  이하 엽록소 *a* 농도( $mgm^{-3}$ ), (c) 전체 엽록소 *a* 농도에 대한 5  $\mu m$  이하 엽록소 *a* 농도 비율의 공간적 분포

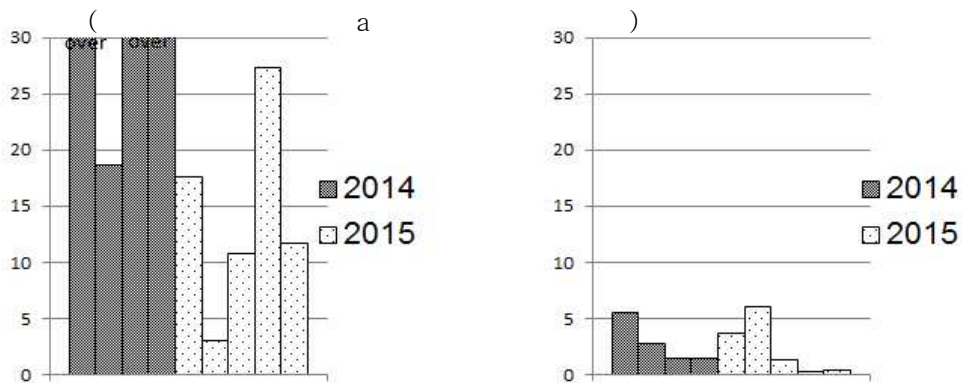


그림 3-2-10. 2014년과 2015년 8월 (a) 적조가 발생한 R정점과 (b) 적조가 발생하지 않은 일부 정점에서의 전체 엽록소 *a* 농도( $mgm^{-3}$ ) 비교

(3) 총 부유물질량(Total suspended solids, TSS)

2015년 8월에 관측된 총 부유물질량의 공간적 분포 특성은 그림 3-2-11과 같았다. 표층에서의 총 부유물질량은  $0.6 \sim 18.8 \text{ mg l}^{-1}$  (평균  $5.57 \pm 5.18 \text{ mg l}^{-1}$ ), 저층에서  $0.7 \sim 17.6 \text{ mg l}^{-1}$  (평균  $8.41 \pm 5.71 \text{ mg l}^{-1}$ ) 범위로 나타났다. 표층과 저층 모두 해안선을 따라 높은 값을 나타내었으며 특히 섬진강 영향을 받는 주변해역이 매우 높게 관측되었다.

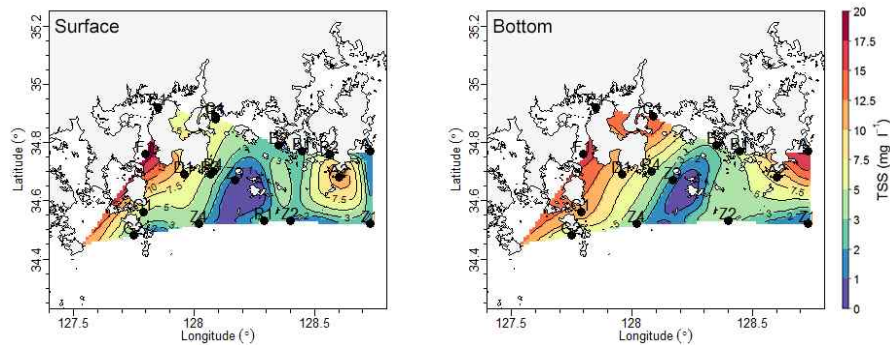


그림 3-2-11. 2015년 8월 표층과 저층에서의 총 부유물질량( $\text{mg l}^{-1}$ )의 공간적 분포

R정점들에서 관측된 총 부유물질량은 적조가 발생하지 않은 정점들과 비교하였을 때 다소 적조가 발생한 정점들의 부유물질량보다 많아 보이거나 그리 큰 차이를 보이지는 않았다(그림 3-2-12). 다만, 2014년 적조가 발생한 R정점들의 총 부유물질량과 2015년 적조가 발생한 R정점들의 총 부유물질량을 모두 고려하여 살펴보면 이 정점들과 가장 가까운 위치에서 측정된 적조가 발생하지 않은 정점들의 총 부유물질량에 비해 높게 측정된 것으로 나타났다. 적조의 지역적 범위가 부유물질과 관련성이 있는지는 앞으로 좀 더 살펴볼 필요가 있다.



그림 3-2-12. 2014년과 2015년 8월 (a) 적조가 발생한 R정점과 (b) 적조가 발생하지 않은 일부 정점에서의 총 부유물질량( $\text{mg l}^{-1}$ ) 비교

#### (4) 입자상 물질의 흡광(Particulate Absorption, AP)

2015년 8월 남해안 현장 관측을 통해 가시광역 파장대 400 ~ 700 nm 영역에서 식물플랑크톤의 흡광 스펙트럼 모양과 흡광 계수는 다음과 같았다. 그림 3-2-13은 적조가 발생한 R정점과 적조가 발생하지 않은 정점에서의 표층 흡광 스펙트럼 패턴을 보여준다. 모든 정점에서 공통적으로 엽록소 a 색소에 의한 영향으로 블루, 레드 계열의 파장대(440 nm 부근, 670 nm 부근)에서 큰 흡광 값을 보였으며, 적조가 발생한 R정점의 흡광 스펙트럼은 우점하는 적조종의 광 특성에 의해 모두 비슷하게 나타났으나 적조가 발생하지 않은 정점에서의 흡광 스펙트럼은 각기 다른 특성을 보였다. 또한 적조가 발생한 R정점과 적조가 발생하지 않은 정점의 표층 흡광 계수는 다음과 같은 큰 차이를 보였다. 적조가 발생한 R정점에서의 엽록소 a 농도는 최대  $27.33 \mu g l^{-1}$ 까지 관찰되었으며 고밀도로 존재하였던 *C. polykrikoides*에 의해 440 nm 부근의 흡광 계수가 최대  $0.65 m^{-1}$ 로 높게 나타났다. 이처럼 적조가 발생한 R정점의 해수 속에 다량으로 존재했던 *C. polykrikoides*에 의해 가시광역 파장대에서의 흡광 계수가 증가한 것으로 보인다. 반면, 적조가 발생하지 않은 정점의 흡광 계수는 가시광역 파장대에서 낮은 흡광 계수를 보였고 440 nm 부근에서 최대  $0.23 m^{-1}$ 로 적조가 발생한 R정점과 비교하였을 때 매우 낮은 값을 보였다. 이와 같이 적조가 발생한 R정점과 적조가 발생하지 않은 정점의 흡광 스펙트럼의 차이는 2014년 8월 현장조사 결과와도 일치하였다(그림 3-2-13). 2014년의 적조 발생은 *C. polykrikoides*에 의한 적조였으며 2015년보다 더 고밀도로 발생되었는데 이는 흡광 스펙트럼 및 흡광 계수 실험 결과에서도 뚜렷하게 나타났다. 2014년의 440 nm 부근의 흡광 계수는 최대 약  $7 m^{-1}$ 로 2015년 440 nm 부근의 흡광 계수와(최대  $0.65 m^{-1}$ )와 큰 차이를 보였다.

2015년 8월 적조가 발생한 R정점과 적조가 발생하지 않은 정점 저층에서의 흡광 스펙트럼은 표층과 다른 패턴을 보였다(그림 3-2-14). 적조가 발생한 정점 저층에서의 흡광 스펙트럼은 R4정점에서만 측정되었으며 표층과 비교하였을 때 식물플랑크톤에 의한 영향이 적은 것으로 나타났다. 적조가 발생하지 않은 정점의 저층에서도 식물플랑크톤 흡광에 의한 영향이 매우 작게 나타났으며 부유물질에 의한 흡광 특성이 크게 나타났다.

2014년과 2015년 8월의 현장 조사로 얻어진 흡광 측정 결과를 이용하여 엽록소 a 농도에 따른 440 nm의 비흡광 계수( $a^*_{ph}$ ) 분포를 조사하였다(그림 3-2-15). 그래프에 표시된 실선은 Bricaul et al. (1995)과 Fischer and Fell (1999)에서 제시된 엽록소 a 농도에 따른 Global sea water 흡광 계수의 분포를 나타낸 피팅 선이다. 일반적으로 단위 엽록



소 a 농도 당 흡광 계수, 즉 비흡광 계수는 엽록소 a 농도가 증가함에 따라 감소한다. 2014년과 2015년의 현장 조사에서 얻어진 흡광 측정 결과도 마찬가지로 엽록소 a 농도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 생물량이 많아질수록 package effect의 영향이 커져  $a^*_{ph}$ 가 감소하기 때문인데 반대로 엽록소 a 농도가 낮을 경우  $a^*_{ph}$ 가 커지는 것은 낮은 엽록소 a 농도일 때 부유물질 흡광의 영향이 커져 이의 영향이 완전히 제거되지 않았기 때문이다.

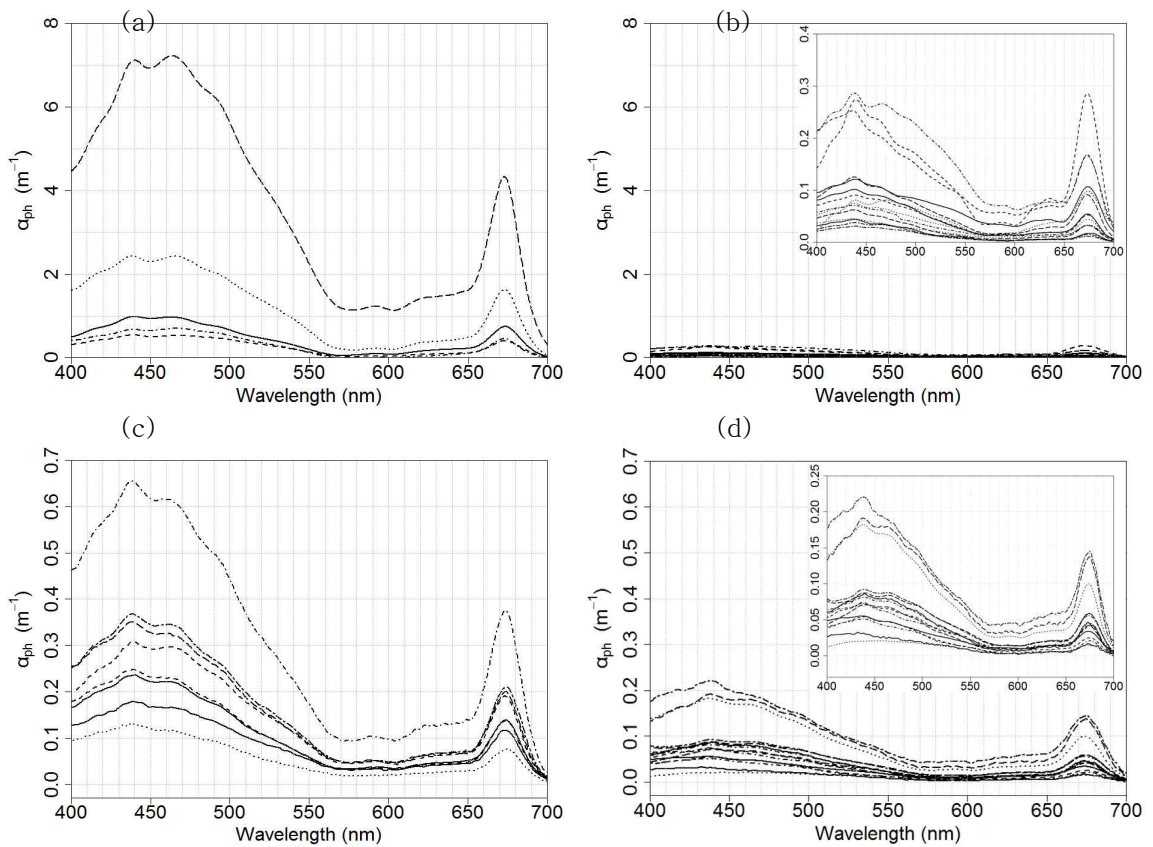


그림 3-2-13. 2014년 8월 (a) 적조가 발생한 R정점 표층에서의 식물플랑크톤 흡광계수( $a_{ph}, m^{-1}$ ) (b) 적조가 발생하지 않은 정점 표층에서의 식물플랑크톤 흡광계수( $a_{ph}, m^{-1}$ ), 2015년 8월 (c) 적조가 발생한 R정점 표층에서의 식물플랑크톤 흡광계수( $a_{ph}, m^{-1}$ ), (d) 적조가 발생하지 않은 정점 표층에서의 식물플랑크톤 흡광계수( $a_{ph}, m^{-1}$ )

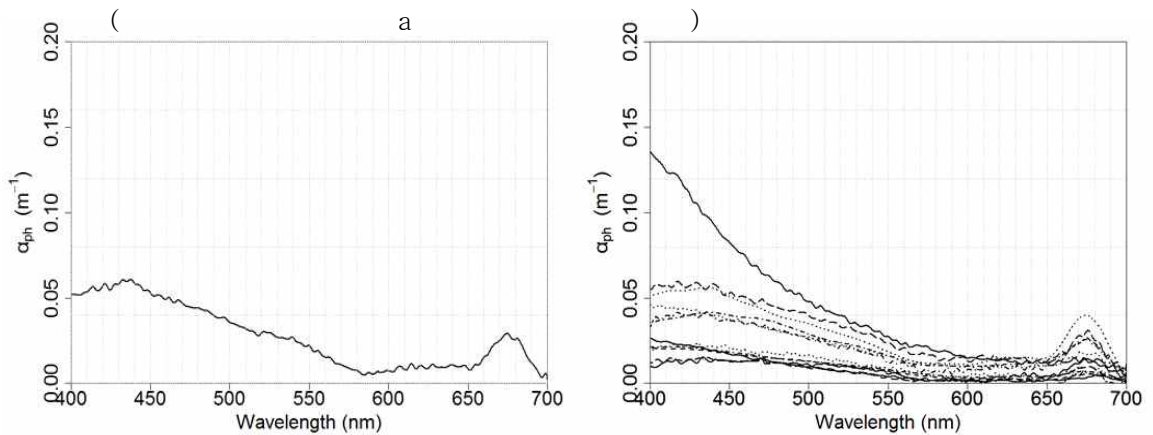


그림 3-2-14. 2015년 8월 (a) 적조가 발생한 R4정점 저층에서의 식물플랑크톤 흡광계수( $a_{ph}$ ,  $m^{-1}$ ) 와 (b) 적조가 발생하지 않은 정점 저층에서의 식물플랑크톤 흡광계수( $a_{ph}$ ,  $m^{-1}$ )

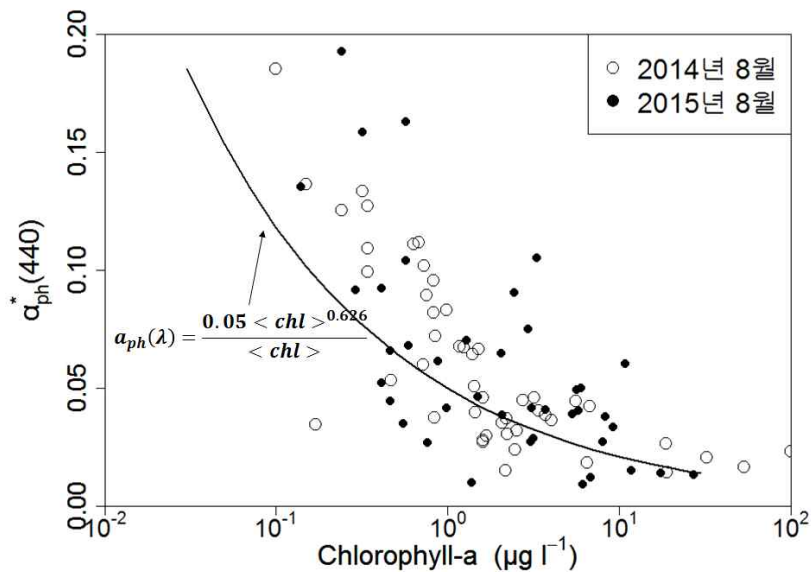


그림 3-2-15. 엽록소  $a$  농도 ( $\mu g l^{-1}$ )에 따른  $440\text{ nm}$  비흡광 계수 분포. 데이터는 2014년과 2015년 8월 남해안 현장관측에서 얻어짐

### (5) 용존 유기물(Colored Dissolved Organic Matter, CDOM)의 흡광

2015년 8월 가시광역 파장대  $400 \sim 700\text{ nm}$  영역에서의 용존 유기물에 의한 흡광 스펙트럼 모양과 흡광 계수는 2014년 8월 현장 관측 자료와 비교하여 그림 3-2-16에 나타내었다. 2014년과 2015년 모두 용존 유기물에 의한 흡광 스펙트럼 모양과 흡광 계수는 적조가 발생한 R정점과 적조가 발생하지 않은 정점에서 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 2015년의 적조가 발생한 R정점의  $400\text{ nm}$ 에서의 용존 유기물 흡광 계수는  $0.09 \sim 0.22\text{ m}^{-1}$  범위에 분포하였고 이와 비교하여 2014년 적조가 발생한 R정점은  $400\text{ nm}$ 에서

의 용존 유기물 흡광 계수는  $0.18 \sim 0.45 \text{ m}^{-1}$ 로 약 2배 정도의 높은 흡광 값을 보였다. 가장 고밀도 적조가 발생했던 2014년 R5-2정점의 용존 유기물 흡광 계수가 가장 큰 값을 나타내었다. 현장관측에서 연안에 가까웠던 정점들의 표층 용존 유기물 흡광 계수는 외해역 부근의 정점들에 비해 상대적으로 높은 값을 보였다(data not shown).

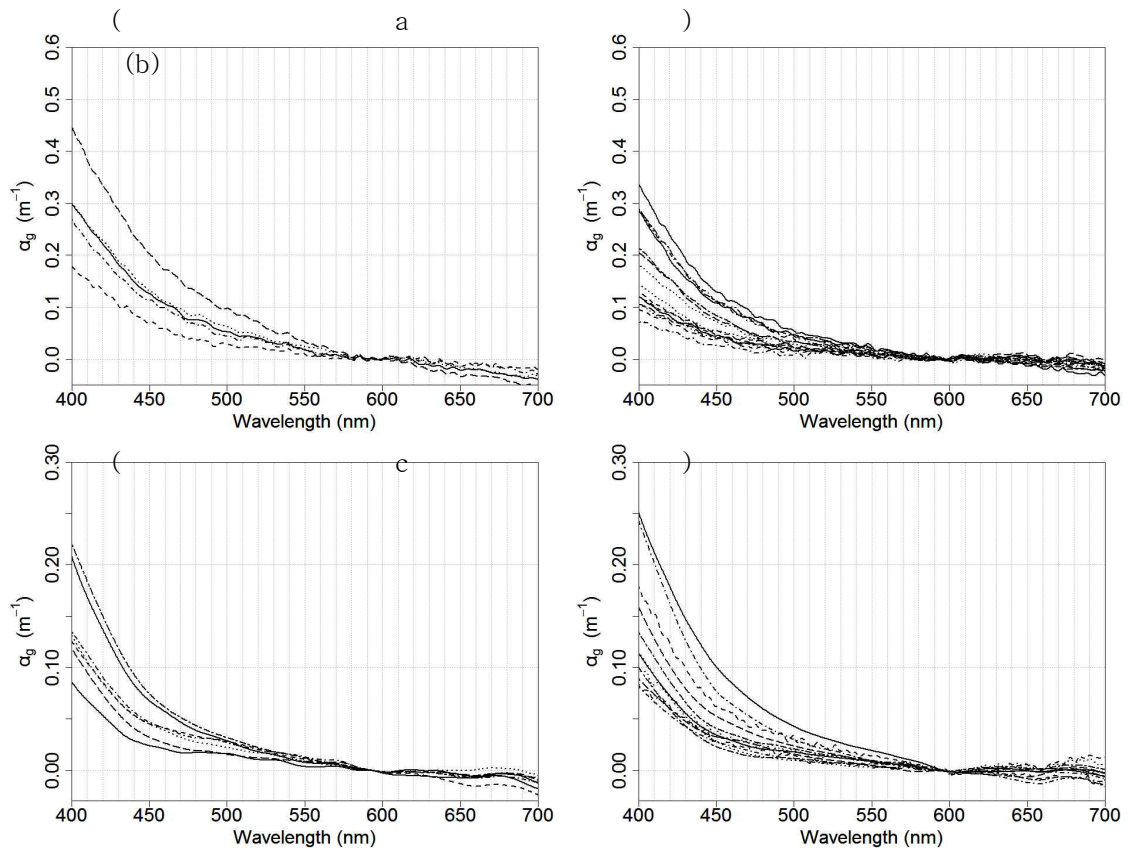


그림 3-2-16. 2014년 8월 (a) 적조가 발생한 R정점 표층에서의 용존 유기물의 흡광계수( $a_g$ ,  $\text{m}^{-1}$ ), (b) 적조가 발생하지 않은 정점 표층에서의 용존 유기물의 흡광계수( $a_g$ ,  $\text{m}^{-1}$ ), 2015년 8월 (c) 적조가 발생한 R정점 표층에서의 용존 유기물의 흡광계수( $a_g$ ,  $\text{m}^{-1}$ ), (d) 적조가 발생하지 않은 정점 표층에서의 용존 유기물의 흡광계수( $a_g$ ,  $\text{m}^{-1}$ )

## (6) 영양염

2015년 8월에 연구해역에서 관측된 질산염( $\text{NO}_3$ ), 암모늄( $\text{NH}_4$ ), 인산염( $\text{PO}_4$ ) 그리고 규산염( $\text{SiO}_2$ )의 공간적 분포 특성은 그림 3-2-17과 같았다.

질산염의 표층 농도는  $0.12 \sim 13.38 \mu\text{M}$  (평균  $3.21 \pm 3.29 \mu\text{M}$ ), 저층의 농도는  $0.96 \sim 21.78 \mu\text{M}$  (평균  $6.21 \pm 6.21 \mu\text{M}$ ) 범위로 나타났다. 표층의 경우 남해와 통영 연안해역에서 다소 높은 값을 보였고 저층의 경우 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 점점 높아지는 분



포를 보였다. 암모늄의 표층 농도는 0.52 ~ 5.75  $\mu M$  (평균  $1.59 \pm 1.67 \mu M$ ), 저층의 농도는 0.46 ~ 5.00  $\mu M$  (평균  $1.54 \pm 1.31 \mu M$ ) 범위를 나타냈다. 암모늄 농도의 경우 표층과 저층 모두 남해 연안해역 에서 가장 높은 값을 보였다. 인산염 농도는 표층에서 0.027 ~ 1.312  $\mu M$  (평균  $0.373 \pm 0.388 \mu M$ ), 저층에서 0.280 ~ 1.778  $\mu M$  (평균  $0.776 \pm 0.437 \mu M$ )로 나타났다. 표층에서 인산염의 농도는 암모늄 농도와 마찬가지로 남해의 연안해역 에서 높은 값을 보였으며 저층에서 표층보다 높은 값을 대체적으로 나타내었다. 규산염의 농도는 표층에서 3.83 ~ 40.26  $\mu M$  (평균  $17.87 \pm 10.65 \mu M$ ), 저층에서 16.22 ~ 52.06  $\mu M$  (평균  $27.94 \pm 10.25 \mu M$ )로 나타났다. 조사 해역에서 규산염 농도의 공간적 분포는 인산염 농도의 공간적 분포와 매우 유사하게 나타났으며 다른 영양염 농도에 비해 매우 높게 측정되었다. 저층에서 암모늄을 제외하고 질산염, 인산염, 규산염은 봄철 농도에 비해 매우 높게 나타났는데 이는 여름철에 담수로부터 유입된 많은 양의 영양염과 저층수의 높은 영양염이 모두 소비되지 못하고 저층에 계속 축적된 결과로 판단된다.

이번 관측해역에서의 표층과 저층에서의 N:Si:P 영양염비의 평균은 각각 12.84:47.88:1과 11.06:40.47:1로 비슷한 영양염비를 보였으며 기울기를 통한 N:Si:P의 비율은 10:36:1로 N:P비는 일반적으로 알려진 Redfield ratio, 16:1보다 낮게 측정된 10:1인 반면, Si 농도는 N 농도의 약 3.6배로 매우 높게 측정되었다(그림 3-2-18). 2015년 8월 남해안의 이러한 높은 Si 농도를 통해 2015년의 적은 *C. polykrikoides*의 번성은 성장에 규산염을 필요로 하는 규조류와의 경쟁에서 밀린 결과가 아닌지 유추해 볼 수 있다.

마지막으로 R정점들에서 관측된 영양염 농도는 적조가 발생하지 않은 정점들과 비교하였을 때 눈에 띄는 차이를 보이지 않아 적조의 발생이 영양염 농도와 어떠한 관련이 있는지 이번 관측 데이터만으로는 알 수가 없었다(그림 3-2-19). 2014년과 2015년 8월 관측 결과, 질산염의 경우 0.360 ~ 7.644  $\mu M$ 로 약 21배, 암모늄의 경우 0.604 ~ 5.057  $\mu M$ 로 약 8배, 인산염의 경우 0.032 ~ 1.694  $\mu M$ 로 약 57배, 규산염의 경우 6.081 ~ 52.122  $\mu M$ 로 약 9배로, 적계는 8배 많게는 57배 차이가 나는 것으로 나타났다. 이러한 관측 결과는 이번 관측에서 뿐만 아니라 기존의 적조 발생 해역에서도 관측되어 영양염 농도와 적조 발생 간에 어떠한 관계가 있는지 이를 분명하게 하기 위해서는 추가적인 생리실험이 필요할 것으로 판단된다(표 3-2-4).

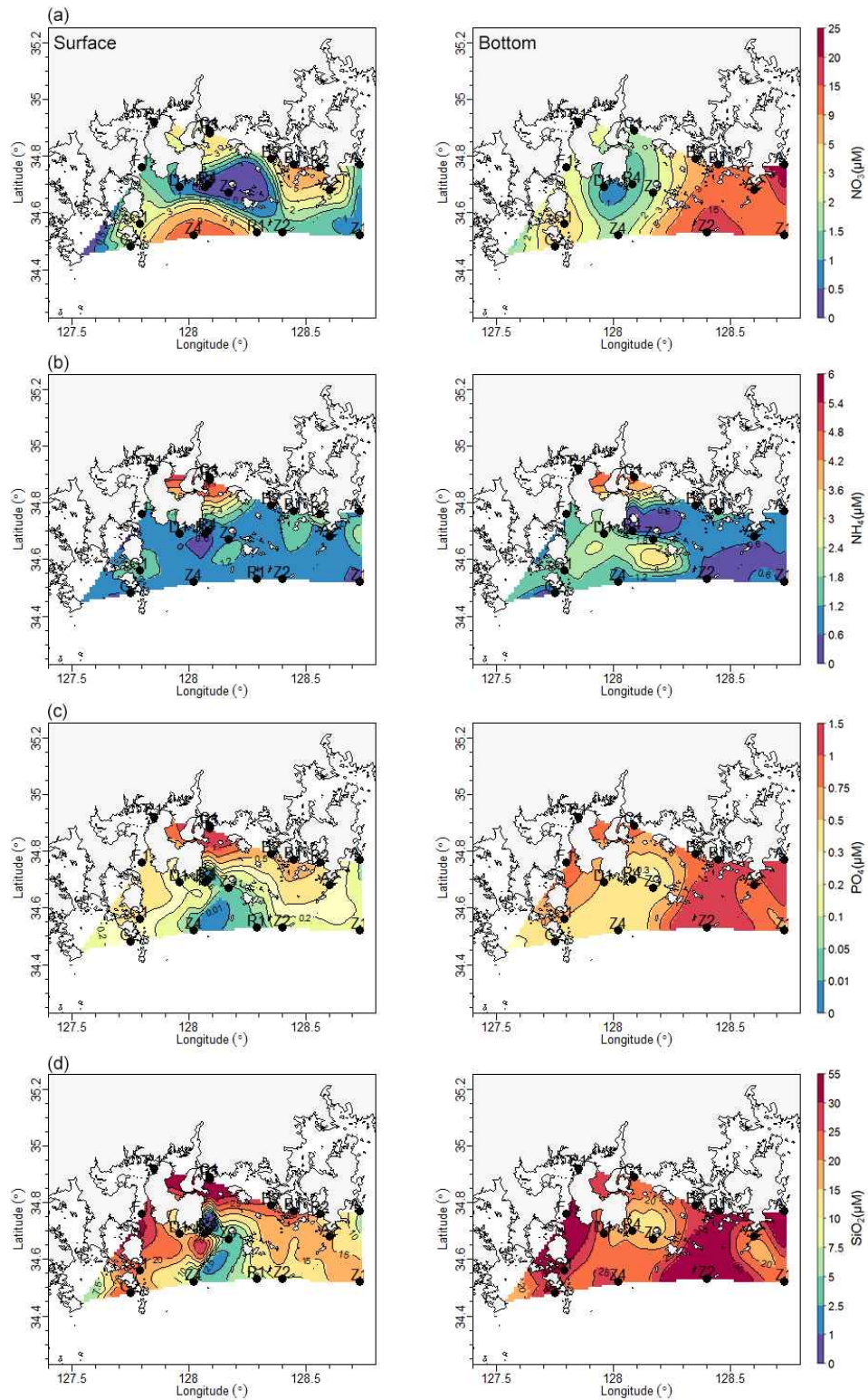


그림 3-2-17. 2015년 8월 표층, 저층에서의 (a) 질산염( $NO_3$ ), (b) 암모늄( $NH_4$ ), (c) 인산염( $PO_4$ ) 그리고 (d) 규산염( $SiO_2$ ) 농도( $\mu M$ )의 공간적 분포

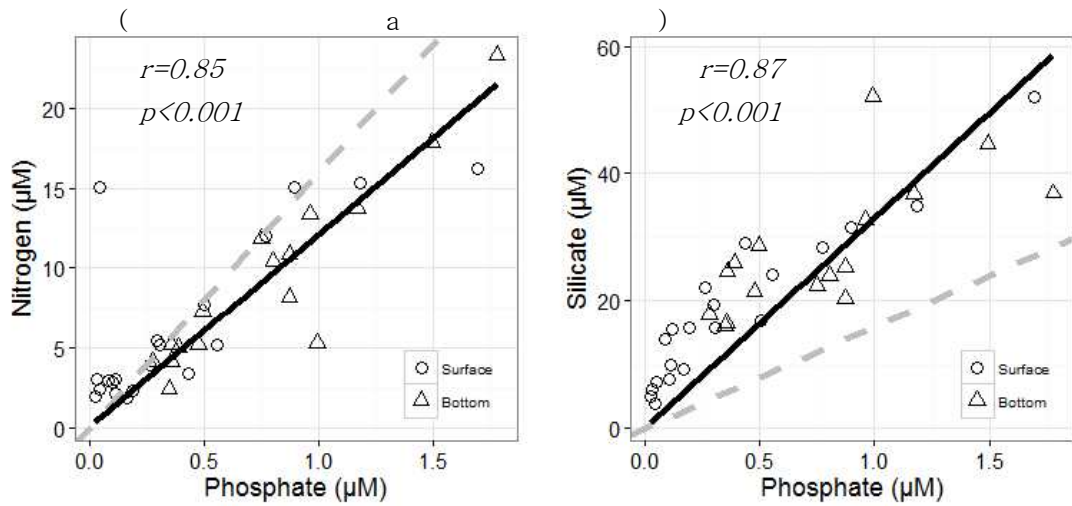


그림 3-2-18. 2015년 8월 (a) N:P 비(점선: Redfield ratio 16:1, 실선: 현장 관측 비 10:1)와 (b) Si:P 비(점선: Redfield ratio 16:1, 실선: 현장 관측 비 36:1)

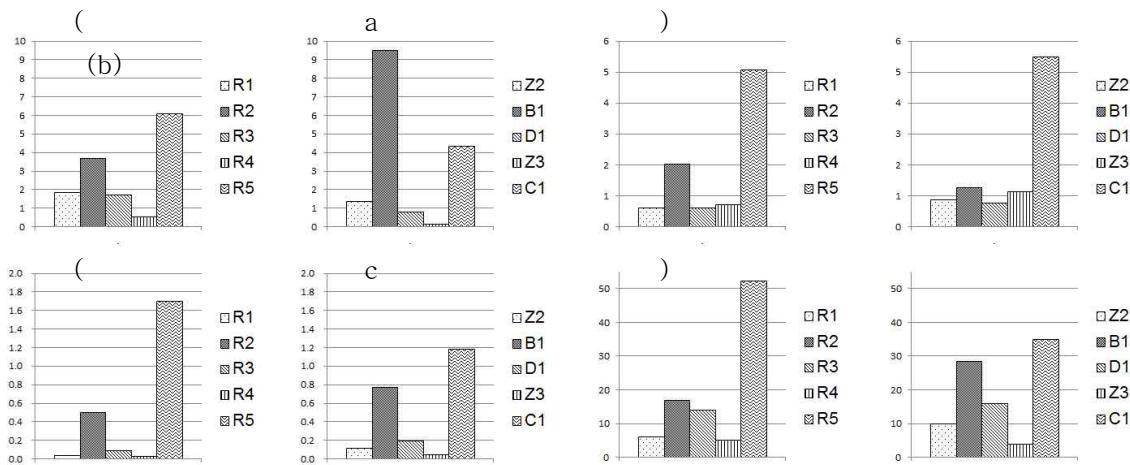


그림 3-2-19. 2015년 8월 적조가 발생한 R정점과 적조가 발생하지 않은 일부 정점 표층에서의 (a) 질산염( $NO_3$ ), (b) 암모늄( $NH_4$ ), (c) 인산염( $PO_4$ ), (d) 규산염( $SiO_2$ ) 농도( $\mu M$ ) 비교

표 3-2-4. 2014년과 2015년 R정점 표층에서의 영양염 농도( $\mu M$ )의 범위

영양염	1981~2009년 적조			2014 ~ 2015년 R정점
	발생해역 (Park <i>et al.</i> , 2013)	2014년 R정점	2015년 R정점	
질산염( $\mu M$ )	0.4~53.7	0.360~1.433	1.778~7.644	0.360~7.644
암모늄( $\mu M$ )	0.2~53.5	0.627~2.192	0.604~5.057	0.604~5.057
인산염( $\mu M$ )	0.1~2.2	0.244~1.264	0.032~1.694	0.032~1.694
규산염( $\mu M$ )	0.0~43.9	9.893~15.843	6.081~52.122	6.081~52.122

(7) 군집 조성

2015년 8월 연구해역에서 관측된 적조가 발생한 R정점들과 이 정점들과 가장 가까운 위치에서 관측된 적조가 발생하지 않은 정점들의 표층에서 출현한 식물플랑크톤의 군집 조성은 그림 3-2-20과 같았다. 각 정점 표층에서의 우점종 순위는 표 3-2-5, 표 3-2-6에 제시하였으며 FlowCam과 현미경으로 찍은 각 정점 표층에서의 우점종 사진을 그림 3-2-21과 그림 3-2-22에 나타내었다.

적조가 발생한 R1 ~ R5정점에서의 *C. polykrikoides*의 우점율은 66 ~ 89%이었으며 외편모류는 *C. polykrikoides*의 높은 우점율로 인해 최소 68%에서 최대 91%까지 우점율을 차지하였다. 그러나 *C. polykrikoides*를 제외하면 기타 외편모류의 비율은 1 ~ 19%로 총 외편모류 점유율의 매우 적은 부분을 차지하는 것으로 나타났다. 특히, R3정점과 R4정점을 제외한 다른 R정점에서 기타 외편모류의 우점율은 5%를 넘기지 못하였다. R3정점과 R4정점에서 외편모류 *C. polykrikoides* 다음으로 *Alexandrium fraterculus*가 10% 이상의 우점율을 보였다(표 6-2-5). 규조류는 *C. polykrikoides*를 포함한 총 외편모류 다음으로 점유율이 높았으며 약 9 ~ 32%를 차지하는 것으로 조사되었다.

적조가 발생하지 않은 B1, C1, D1, Z2 그리고 Z3 모든 정점에서 규조류는 53 ~ 96%로 높은 우점율을 보였다. 우점종으로 비교하였을 때, 적조가 발생하지 않은 5정점들 모두 우점종 1위의 비율은 40% 이하로 나타났으며 B1, D1, Z3정점에서의 1위 우점종은 모두 규조류, C1정점과 Z2정점에서의 1위 우점종은 외편모류인 *C. polykrikoides*로 조사되었다(표 3-2-6). B1정점을 제외한 나머지 4정점에서 2위 우점종들의 우점율은 10% 이상 차지하는 것으로 나타났다. R5정점을 제외한 9개 정점 모두 규조류 *Chaetoceros*속의 생물 1종 이상이 우점종으로 출현하였다.

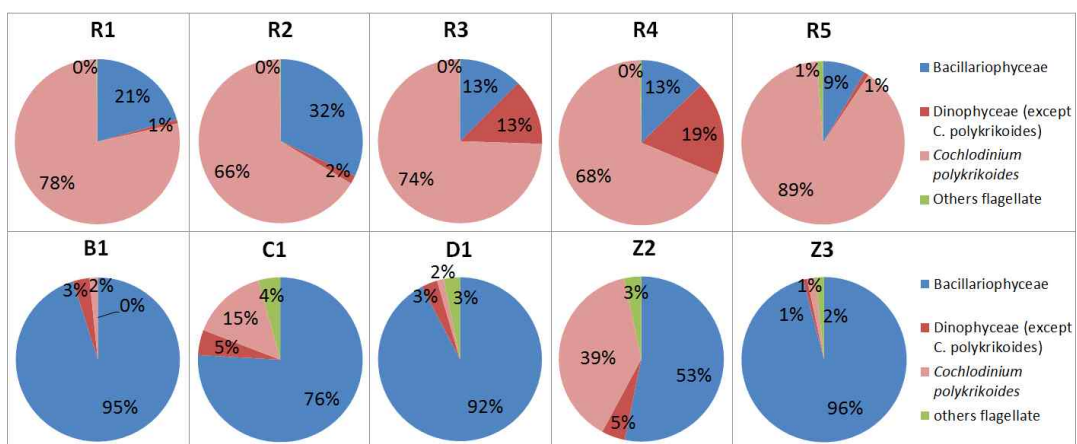


그림 3-2-20. 2015년 8월 적조가 발생한 R정점과 적조가 발생하지 않은 일부 정점 표층에서의 식물플랑크톤 군집 조성

표 3-2-5. R1 ~ R5정점 표층에서의 우점종

우점 순위	R1	R2	R3	R4	R5
1	<i>Cochlodinium polykrikoides</i> 78.3%	<i>Cochlodinium polykrikoides</i> 66.2%	<i>Cochlodinium polykrikoides</i> 74.3%	<i>Cochlodinium polykrikoides</i> 68.3%	<i>Cochlodinium polykrikoides</i> 89.4%
2	<i>Chaetoceros compressa</i> 8.2%	<i>Chaetoceros costatus</i> 9.3%	<i>Alexandrium fraterculus</i> 11.4%	<i>Alexandrium fraterculus</i> 12.4%	<i>Pseudo-nitzschia turgidula</i> 2.9%
3	<i>Bacteriatrum comosum</i> 6.2%	<i>Chaetoceros debilis</i> 4.6%	<i>Bacteriatrum comosum</i> 5.2%	<i>Chaetoceros costatus</i> 3.8%	<i>Leptocylin drus minimus</i> 1.3%
4	<i>Chaetoceros brevis</i> 1.9%	<i>Chaetoceros decipiens</i> 4.6%	<i>Chaetoceros decipiens</i> 4.5%	<i>Chaetoceros atlanticus</i> 3.2%	<i>Chrysochromulina parva</i> 0.9%

표 3-2-6. B1, C1, D1, Z2, Z3정점 표층에서의 우점종

우점 순위	B1	C1	D1	Z2	Z3
1	<i>Asterionellopsis glacialis</i> 31.1%	<i>Cochlodinium polykrikoides</i> 14.8%	<i>Chaetoceros compressa</i> 10.9%	<i>Cochlodinium polykrikoides</i> 39.1%	<i>Chaetoceros tortissimus</i> 18.0%
2	<i>Pseudo-nitzschia turgidula</i> 8.2%	<i>Chaetoceros pseudocrinitus</i> 11.7%	<i>Chaetoceros difficilis</i> 10.0%	<i>Bacteriatrum delicatulum</i> 10.2%	<i>Chaetoceros pelagicus</i> 16.4%
3	<i>Pseudo-nitzschia subcurvata</i> 7.4%	<i>Chaetoceros didymus</i> ver. protuberans 9.3%	<i>Chaetoceros lorenzianus</i> 10.0%	<i>Chaetoceros tortissimus</i> 5.9%	<i>Bacteriatrum comosum</i> 9.8%
4	<i>Chaetoceros atlanticus</i> 6.6%	<i>Cylinrotheca closterium</i> 6.2%	<i>Cheatoce ros tortissimus</i> 8.2%	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i> 3.4%	<i>Chaetoceros affinis</i> 9.0%



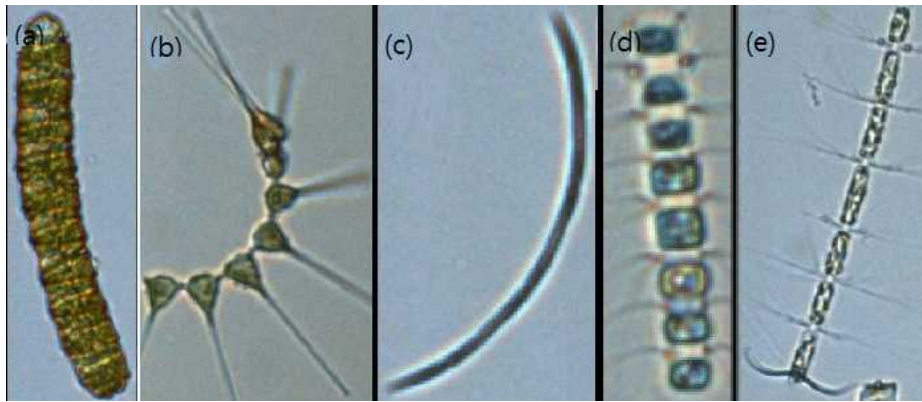


그림 3-2-21. FlowCam에서 포착된 R1 ~ R5정점과 B1, C1, D1, Z2, Z3정점 표층에서의 우점종. (a) *Cochlodinium polykrikoides*, (b) *Asterionella glacialis*, (c) *Pseudo-nitzschia turgidula*, (d) *Chaetoceros difficilis*, (e) *Bacteriatrum comosum*



그림 3-2-22. 현미경에서 포착된 R1 ~ R5정점과 B1, C1, D1, Z2, Z3정점 표층에서의 우점종. (a) *Bacteriatrum delicatulum*, (b) *Chaetoceros affinis*, (c) *Chaetoceros atlanticus*, (d) *Chaetoceros tortissimus*, (e) *Chaetoceros decipiens*, (f) *Pseudo-nitzschia pungens*, (g) *Leptocylindrus minimus*, (h) *Chaetoceros compressa*, (i) *Chaetoceros lorenzianus*.

## 제 3 절 2016년 적조발생 해역 현장관측

### 1. 현장 관측자료 개요

남해안 동부 조사해역(127.4 ~ 128.4° E)은 전라남도 여수시에서 거제시의 연안에 이르는 해역으로 해안선에서 외해로 갈수록 수심이 점점 깊어져 최대 약 80m에 이른다. 이 해역은 섬진강, 남강 등의 큰 규모의 하천과 한려해상 해역으로 이루어져 있으며 대한해협(Korea Strait)을 통하여 동해와 연결되어 있다. 조사해역은 전형적인 리아스식 해안으로 외해역에는 많은 섬들이 산재하고 있고 육지방향으로는 길게 만입한 광양만, 진주만, 고성-자라만 등의 크고 작은 여러 만들과 함께 갯벌들이 발달해 있다.

한국 남해안은 고온고염의 특성을 가지는 대마난류수의 영향이 지배적이며 이러한 수괴에 의해 해양생태계가 큰 영향을 받고 있다. 대마난류수는 열과 염분을 공급하는 주요한 수괴로서, 이로 인하여 해안선과 평행한 전선이 발달되는 것으로 보고되고 있다. 연안수와 외해수 사이에 형성되는 이 전선의 발달은 일차생산자인 식물플랑크톤의 생산력에 큰 영향을 미치며 특히 적조의 발생 원인이 되는 것으로 알려져 있다(임, 2004). 또한 이 해역은 섬진강과 남강 등을 비롯한 크고 작은 여러 강과 하천들이 위치하고 있어 많은 양의 담수가 연안해역으로 유입된다. 섬진강은 남해 연안해역으로 공급되는 주요 담수와 퇴적물 공급원으로써 여수 해협의 외해 쪽에 거대한 섬진강 삼각주를 형성한다. 아울러 동중국해의 장강 희석수는 여름철에 대마난류수와 함께 제주를 거쳐 남해안의 해양생태계에 지대한 영향을 주고 있는 것으로 보고되고 있다. 이와 같이 남해안은 다양한 수괴에 의해 복잡한 해양환경을 이루고 있으며 이러한 수괴들의 시·공간적 변동은 해양 부유 생물 뿐만 아니라 어장 형성과 해조류 양식에 큰 영향을 미치고 있다.

최근 연안 개발, 수산·양식 활동의 증가 등 인위적인 환경요인에 의해 남해의 연안해역은 그 변동폭이 다른 해역에 비해 매우 높게 관측되고 있으며 적조에 의한 피해도 지속되고 있다. 이번 연구에서는 남해안 조사해역의 적조 탐지 및 발생 경향 분석을 위하여 2016년 6월 현장관측을 실시하였고 8월 현장관측 물리 자료는 국립공원 관리공단에서 제공받아 분석하였다(그림 3-3-1, 표 3-3-1). 적조 발생 전 수행한 6월 현장관측은 약 일주일동안 실시하였으며 조사항목은 표 3-2-2에 제시하였다.

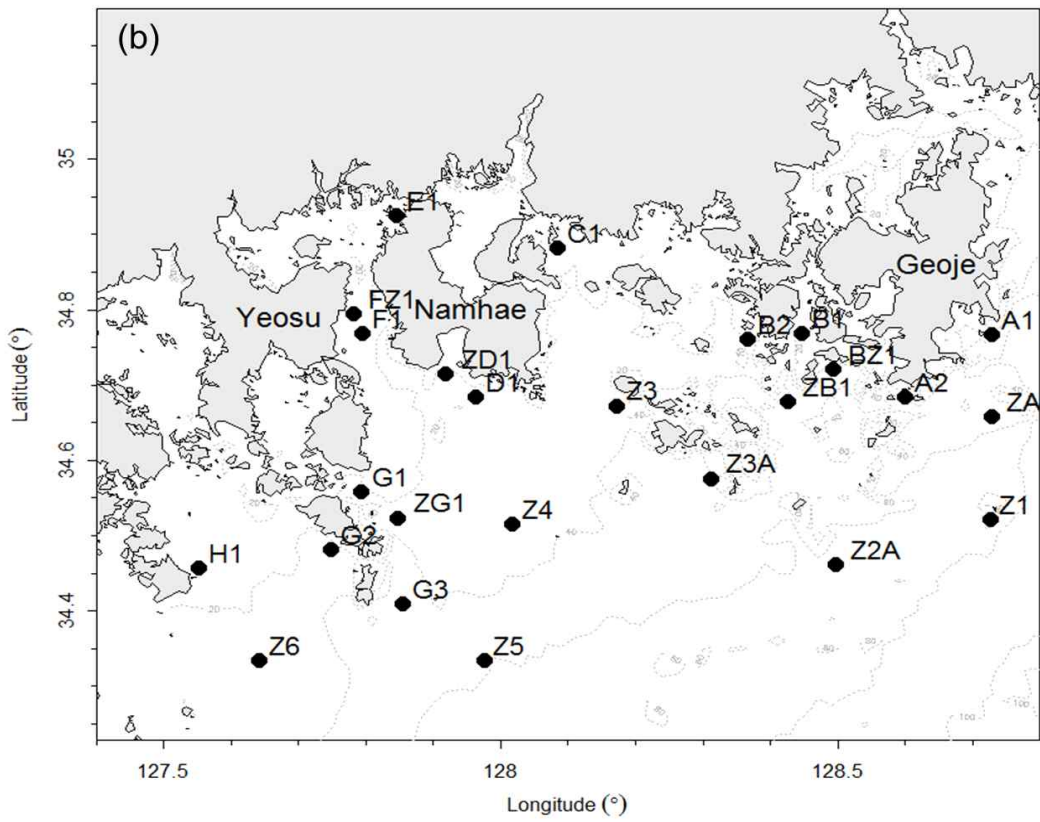
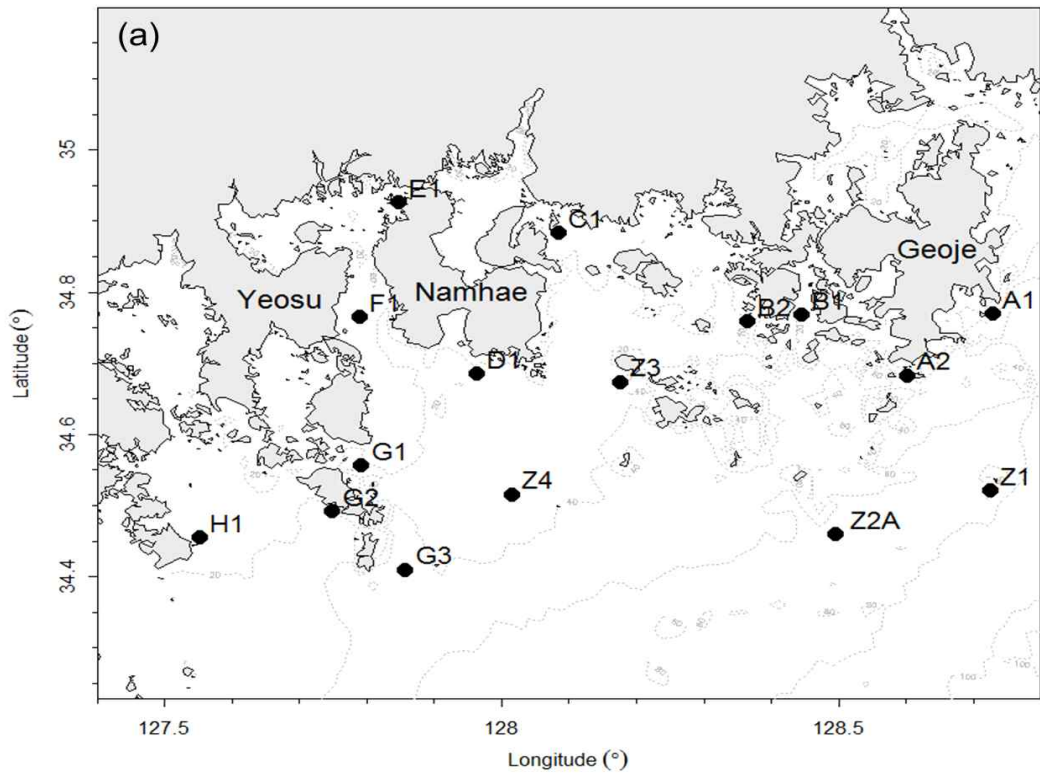


그림 3-3-1. (a) 2016년 6월 조사정점, (b) 2016년 8월 조사정점



표 3-3-1. 2016년 현장조사 관측정보

(a) 2016년 6월 관측정보

Station	Longitude (°)	Latitude (°)	Observation time (yyyy-mm-dd)	Depth (m)	Sample (m)
A1	129.73	34.77	2016-06-04	44	0, 15, 41
A2	128.60	34.68	2016-06-04	48	0, 45
B1	128.44	34.77	2016-06-05	18	0, 15
B2	128.36	34.76	2016-06-05	27	0, 24
C1	128.08	34.88	2016-06-05	14	0, 12
D1	127.96	34.68	2016-06-07	24	0, 15, 22
E1	127.85	34.93	2016-06-07	16	0, 14
F1	127.79	34.77	2016-06-01	13	0, 11
G1	127.79	34.56	2016-06-01	32	0, 29
G2	127.75	34.49	2016-06-02	28	0, 26
G3	127.86	34.41	2016-06-02	53	0, 30, 50
H1	127.55	34.46	2016-06-02	11	0, 9
Z1	128.73	36.52	2016-06-03	78	0, 40, 75
Z2A	128.50	34.46	2016-06-03	67	0, 30, 64
Z3	128.18	34.67	2016-06-05	43	0, 22, 40
Z4	128.02	34.52	2016-06-03	33	0, 10, 30

(b) 2016년 8월 관측정보

Station	Longitude (°)	Latitude (°)	Observation time (yyyy-mm-dd)	Depth (m)
A1	128.73	34.77	2016-08-14	44
A2	128.60	34.68	2016-08-15	48
B1	128.45	34.77	2016-08-15	16
B2	128.37	34.76	2016-08-15	26
BZ1	128.49	34.72	2016-08-15	30
C1	128.08	34.88	2016-08-15	15
D1	127.96	34.68	2016-08-16	26
E1	127.85	34.92	2016-08-16	13
F1	127.79	34.77	2016-08-12	12
FZ1	127.78	34.79	2016-08-12	12
G1	127.79	34.56	2016-08-12	22
G2	127.75	34.48	2016-08-12	32
G3	127.85	34.41	2016-08-13	52
H1	127.55	34.46	2016-08-12	11
Z1	128.73	34.52	2016-08-14	79
Z2A	128.50	34.46	2016-08-14	68
Z3	128.17	34.67	2016-08-13	41
Z3A	128.31	34.58	2016-08-14	46
Z4	128.02	34.52	2016-08-13	32
Z5	127.98	34.33	2016-08-13	57
Z6	127.64	34.33	2016-08-12	27
ZA1	128.73	34.66	2016-08-14	60
ZB1	128.43	34.68	2016-08-15	49
ZD1	127.92	34.71	2016-08-16	20
ZG1	127.85	34.52	2016-08-12	24

표 3-3-2. 2016년 6월 조사 관측항목

세부 분야	세부 조사내용	측정기기
해양환경	수온	SBE 25 plus CTD
	염분	SBE 25 plus CTD
	밀도	SBE 25 plus CTD
	용존산소	SBE 43
	광합성 유효광	Biospherical PAR sensor
	부유물질	BP221S electronic balance
	pH	EC-pH 601 pH meter
	영양염	QUAATRO Full Automatic Nutrients Analyzer
	광학 (a and c, remote sensing reflectance (Rrs))	AC-9 , Profiler II
	용존유기물 흡광	Cary300 UV-Spectrophotometer
	입자성 물질흡광	Cary300 UV-Spectrophotometer
식물플랑크톤	엽록소 a 농도, 5 $\mu$ m 이하 엽록소 a 농도	10-AU
	식물플랑크톤 종조성	FlowCam-VS, Zeiss-microscope
	식물플랑크톤 흡광	Cary300 UV-Spectrophotometer

## 2. 현장 관측자료 분석 결과

### 가. 2016년 봄 관측

이번 2016년도 6월 관측은 총 조사 정점이 16개였으며, 조사기간은 6월 1일부터 6월 8일까지로 여수 국립공원 관리공단 연구원에 의해 시행되었다.

#### (1) 물리적 관측자료

연구 해역에서 2016년 6월에 관측된 수온, 염분, 밀도, 용존산소량의 공간적 분포 특성은 그림 3-3-2와 같았다. 표층수온은 16.37 ~ 20.37 $^{\circ}$ C (평균 18.71 $\pm$ 1.26 $^{\circ}$ C), 저층수온은 15.32 ~ 20.24 $^{\circ}$ C (평균 17.12 $\pm$ 1.46 $^{\circ}$ C) 범위로 나타났다. 표층의 경우 여수 ~ 남해 주변 해역이 거제 주변 해역보다 높은 값을 보였으며 저층은 섬진강과 남강의 영향을 받는 주변 해역이 높은 값을 보였으며 외해로 갈수록 이보다 낮은 값으로 균질한 수온 분포를 보였다. 표층염분은 32.24 ~ 33.90psu (평균 33.30 $\pm$ 0.50psu), 저층염분은 32.50 ~

34.41psu (평균  $33.58 \pm 0.52 \text{psu}$ ) 범위로 나타났다. 표층과 저층의 염분 모두 섬진강의 영향을 받는 주변 해역에서 낮은 값을 보였다. 밀도의 범위는 표층에서  $22.74 \sim 24.82 \text{kgm}^{-3}$  (평균  $23.79 \pm 0.63 \text{kgm}^{-3}$ ), 저층에서  $22.79 \sim 25.42 \text{kgm}^{-3}$  (평균  $24.39 \pm 0.74 \text{kgm}^{-3}$ )로 나타났다. 염분 분포 범위와 같이 밀도 또한 섬진강의 영향을 받는 주변 해역에서 낮게 나타났으며 이와 달리 거제 해역에서는 상대적으로 높은 값을 보였으며 그 외의 해역에서는 대체적으로 균질한 분포를 보였다. 용존산소량은 표층에서  $4.24 \sim 6.08 \text{ml}^{-1}$  (평균  $5.44 \pm 0.48 \text{ml}^{-1}$ ), 저층에서  $4.32 \sim 5.55 \text{ml}^{-1}$  (평균  $4.90 \pm 0.38 \text{ml}^{-1}$ )로 나타났다.

수온, 염분 그리고 밀도의 수직적 분포 그림 3-3-3과 같이 각 정점마다 상이한 결과를 보였다. 조사시기가 늦봄 ~ 초여름에 해당하는 시기였기 때문에 수심이 깊은 외해역인 G3, Z1, Z2A 정점은 약 20 ~ 30 m 부근에서 수온약층이 형성되었으며 이외에 수심이 얇은 연안 해역의 경우 표층과 저층의 수온, 염분의 고른 분포를 보이며 혼합층을 형성하였다.

## (2) 엽록소 a 농도의 공간적 분포

조사정점 해역에서의 엽록소 a 농도는 조사시기와 관측위치에 따라 다양하게 나타났다. 그림 3-3-4과 같이 공간적으로 육지의 영향이 큰 연안 해역에서 표층과 저층 모두 엽록소 a 농도가 높게 나타났고 대마난류의 영향을 받는 외해역에서 낮게 나타났다. 전체 엽록소 a 농도는 2016년 6월 표층에서  $0.13 \sim 3.50 \text{mgm}^{-3}$  (평균  $1.73 \pm 1.08 \text{mgm}^{-3}$ ), 저층에서  $0.20 \sim 3.25 \text{mgm}^{-3}$  (평균  $1.34 \pm 0.86 \text{mgm}^{-3}$ )로 나타났다.

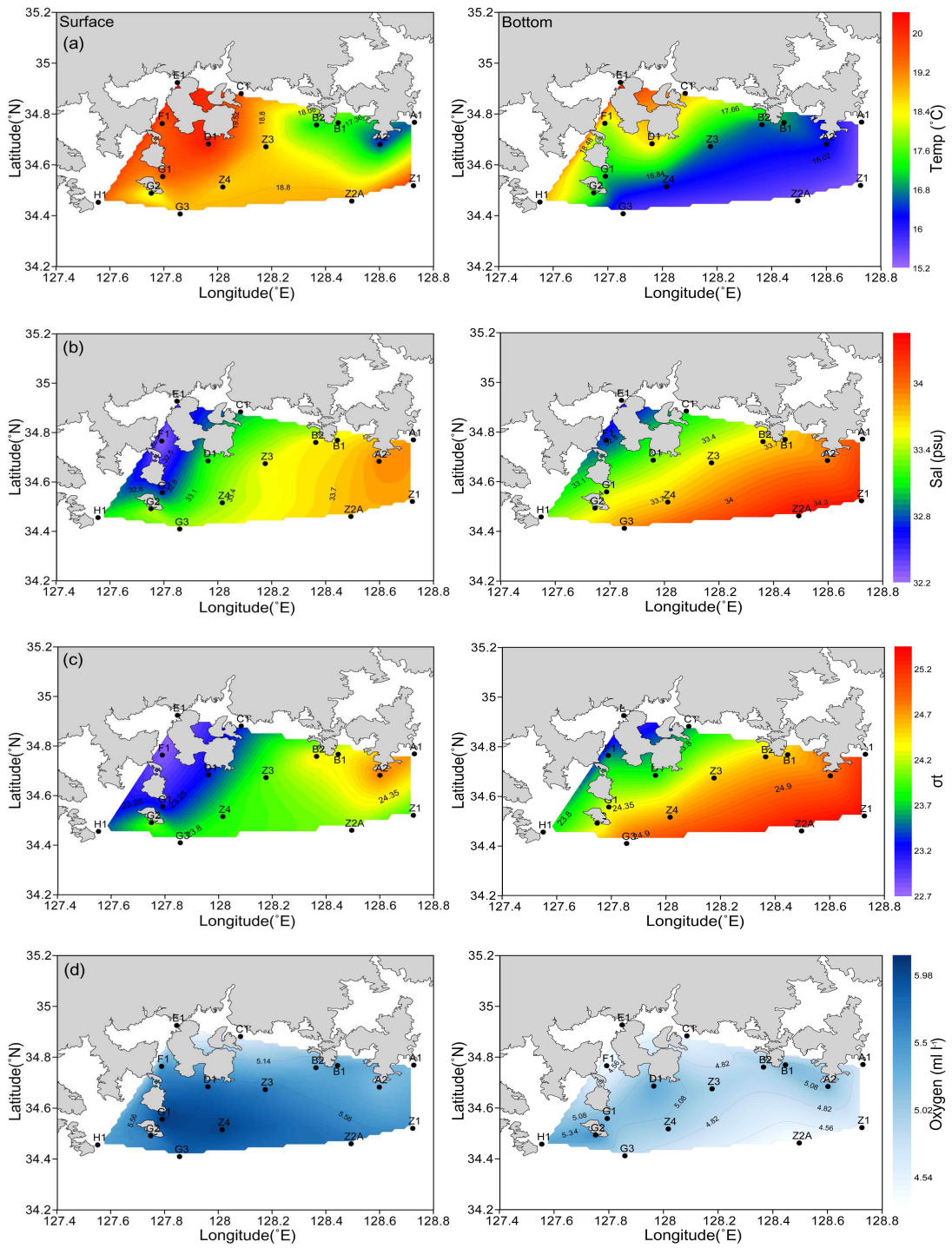


그림 3-3-2. 2016년 6월 표층과 저층에서의 (a) 수온(°C), (b) 염분(psu), (c) 밀도( $\sigma_t$ ,  $kg m^{-3}$ ), (d) 용존산소( $ml l^{-1}$ )의 공간적 분포

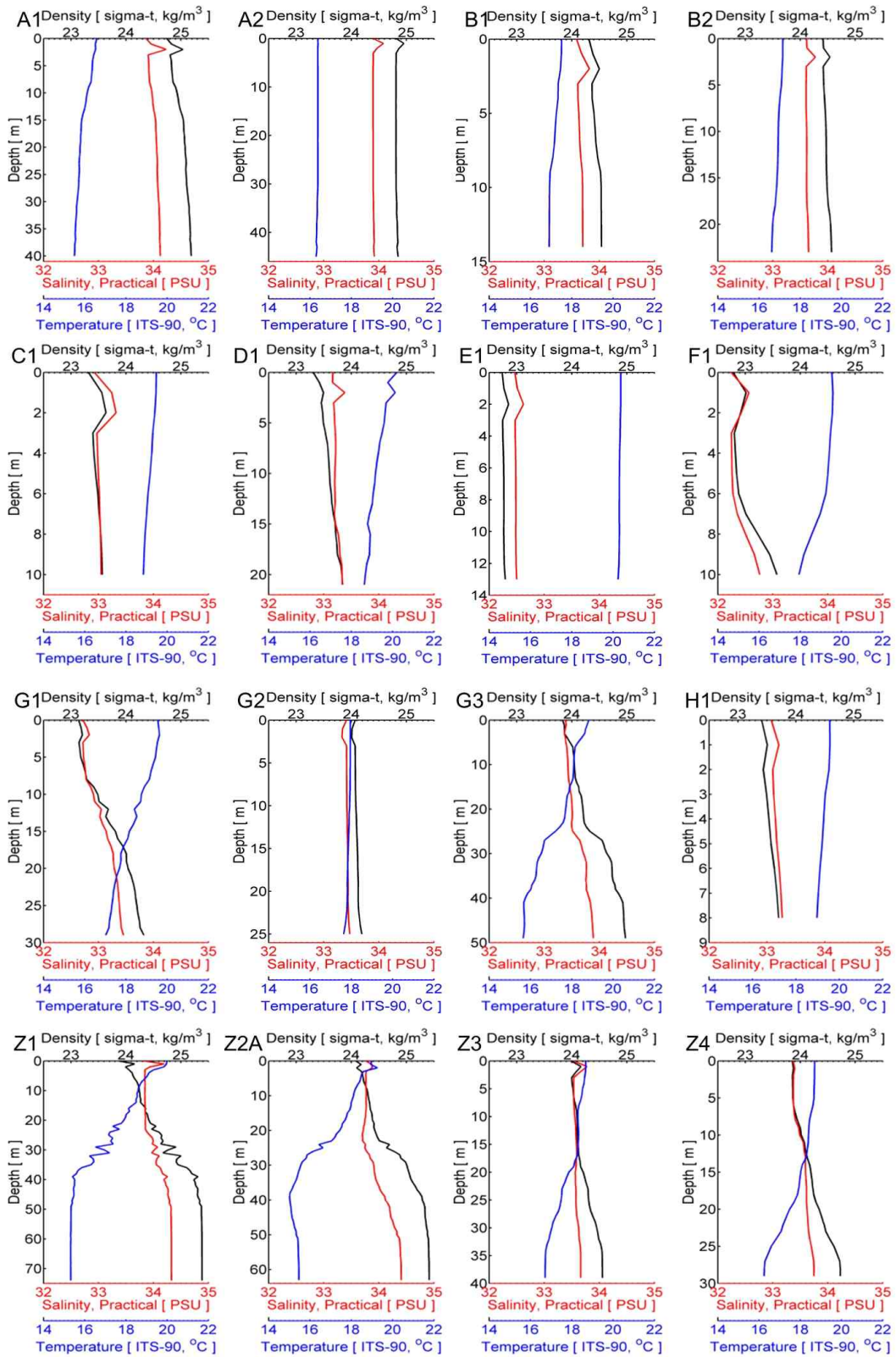


그림 3-3-3. 2016년 6월 수온( $^{\circ}\text{C}$ ), 염분( $\text{psu}$ ), 밀도( $\sigma_t$ ,  $\text{kg m}^{-3}$ )의 수직 분포

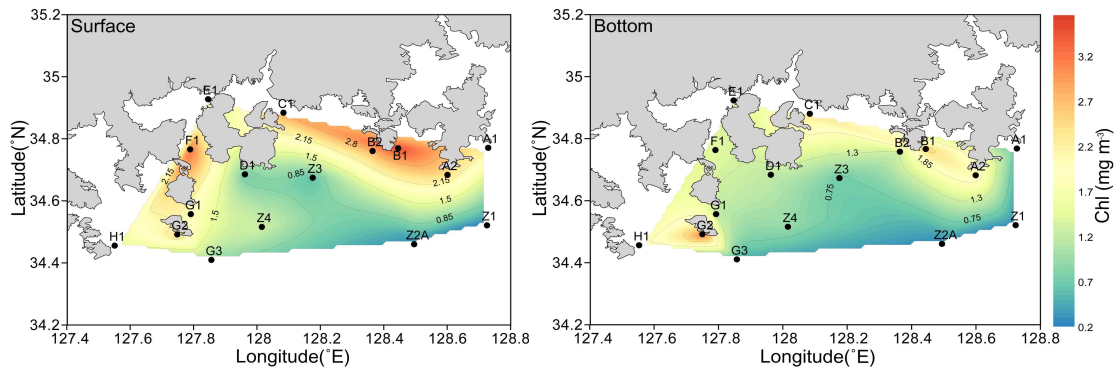


그림 3-3-4. 2016년 6월 표층과 저층에서의 전체 엽록소 *a* 농도( $mg\ m^{-3}$ )의 공간적 분포

### (3) 영양염의 공간적 분포

연구해역에서 2016년 6월에 관측된 질산염( $NO_3$ ), 암모늄( $NH_4$ ), 인산염( $PO_4$ ) 그리고 규산염( $SiO_2$ )의 공간적 분포 특성은 그림 3-3-5와 같았다. 2016년도 6월의 표층에서의 질산염 농도는  $0.11 \sim 3.00 \mu M$  (평균  $0.94 \pm 1.04 \mu M$ ), 저층에서  $0.19 \sim 7.57 \mu M$  (평균  $2.33 \pm 2.30 \mu M$ ) 범위로 나타났다. 표층의 경우 섬진강 주변 해역과 매물도 ~ 해금강 남단 A1 ~ A2정점에서 외해역보다 약간 높은 농도를 보였다. 저층의 경우 표층과 달리 섬진강 영향을 받는 주변 해역에서 낮은 값을 보였고 특이하게 Z2A정점에서 매우 높은 값( $7.57 \mu M$ )을 보였다. 저층의 경우 연안에서 외해로 갈수록 증가되는 양상을 보였다. 표층과 비교하여 저층의 농도가 비교적 높고, 이는 저층 냉수괴의 형성과 유입으로 인해 동쪽해역에서 상대적으로 높게 나타나는 것으로 해석된다. 암모늄 농도는 표층에서  $0.37 \sim 5.92 \mu M$  (평균  $1.40 \pm 1.47 \mu M$ ), 저층에서  $0.35 \sim 7.69 \mu M$  (평균  $1.55 \pm 2.05 \mu M$ ) 범위로 나타났다. 표층과 저층 모두 섬진강 영향을 받는 주변 해역에서 대체로 높은 농도를 보였고 저층의 경우 한산도 근해 역에서 특히 높은 농도를 보였다. 암모늄 농도는 외해로 갈수록 감소되는 양상을 보였으며 표층과 비교하여 저층의 농도는 그리 큰 차이를 보이지 않았다. 인산염 농도는 표층에서  $0.04 \sim 0.56 \mu M$  (평균  $0.17 \pm 0.15 \mu M$ ), 저층에서  $0.11 \sim 0.62 \mu M$  (평균  $0.35 \pm 0.18 \mu M$ ) 범위로 나타났다. 표층의 경우 섬진강 영향을 받는 주변 해역을 포함한 연안 해역에서 높은 농도를 보였다. 저층의 경우 표층과 달리 연안에서 외해로 갈수록 높은 농도를 보였고 서쪽 해역보다 동쪽 해역이 높은 농도를 보였다. 표층과 비교하여 저층의 농도가 비교적 높게 나타났으며 이는 질산염과 유사한 패턴이었다. 규산염 농도는 표층에서  $3.82 \sim 20.96 \mu M$  (평균  $7.89 \pm 5.01 \mu M$ ), 저층에서  $3.83 \sim 19.71 \mu M$  (평균  $10.78 \pm 4.40 \mu M$ ) 범위로 나타났다. 규산염의 농도 또한 표층과 저층의 경우 섬진강 주변 해역에서 높은 농도를 보였고 표층의 경우 연안에서 외해로 갈수록 낮은 농도를 나타냈다. 저층의 경우에는 부분적으로 서쪽 해역 금오도



부근과 동쪽 해역 한산도 근해 역에서 낮은 농도를 보였고 전체적으로 표층과 비교하여 높은 농도를 보였다.

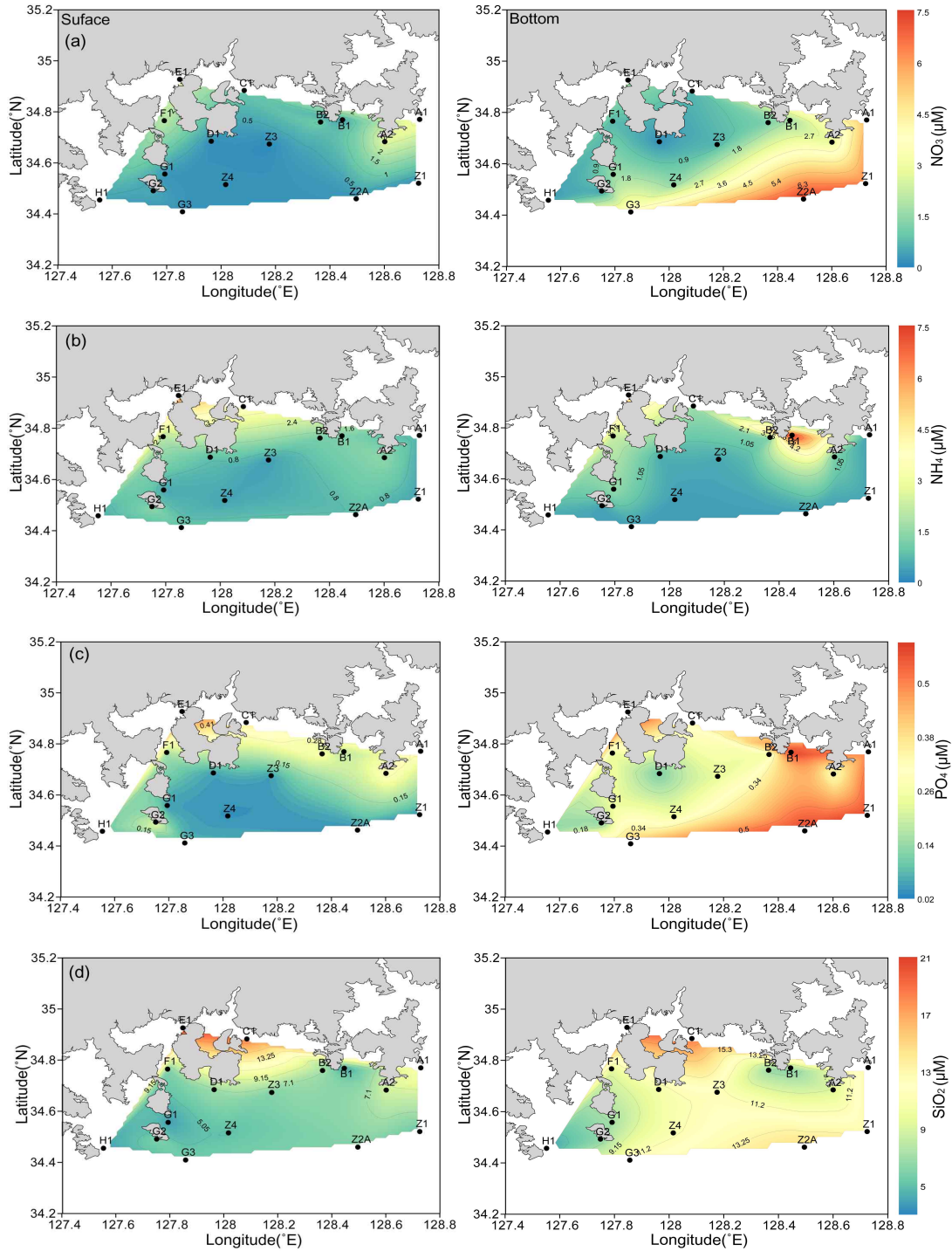


그림 3-3-5. 2016년 6월 표층과 저층에서의 (a) 질산염( $NO_3$ ), (b) 암모늄( $NH_4$ ), (c) 인산염( $PO_4$ ), (d) 규산염( $SiO_2$ ) 농도( $\mu M$ )의 공간적 분포

#### (4) 총 부유물질 량(Total suspended solids, TSS)

2016년 6월에 관측된 총 부유물질량의 공간적 분포 특성은 그림 3-3-6과 같았다. 표층에서의 총 부유물질량은  $0.4 \sim 12.4 \text{ mg l}^{-1}$  (평균  $4.08 \pm 3.59 \text{ mg l}^{-1}$ ), 저층에서  $3.20 \sim 10.80 \text{ mg l}^{-1}$  (평균  $5.7 \pm 2.6 \text{ mg l}^{-1}$ ) 범위로 나타났다. 표층과 저층 모두 해안선을 따라 높은 값을 나타내었으며 표층의 경우 섬진강 영향을 받는 주변해역과 동쪽 해역의 매물도 연안역이 매우 높은 농도가, 외해역은 낮은 농도가 관측되었다. 저층의 경우 표층보다 전체적으로 낮은 농도를 보였지만 외해의 G2, Z2A 정점에서 표층보다 높은 값을 나타냈다.

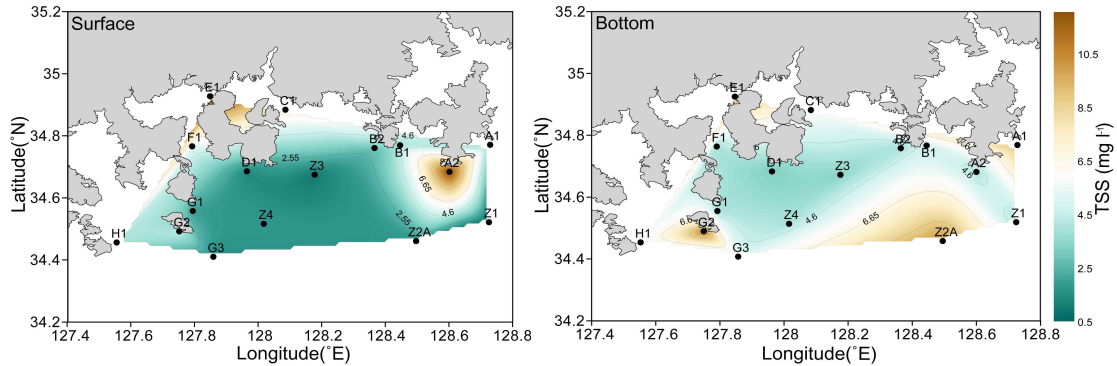


그림 3-3-6. 2016년 6월 표층과 저층에서의 총 부유물질량( $\text{mg l}^{-1}$ )의 공간적 분포

#### 나. 2016년 여름 관측

2016년도 8월 관측은 8월 12일부터 8월 16일까지 시행되었으며, 총 조사정점은 적조 총 25개였다. 조사가 이루어지던 시기는 적조가 발생하기 시작한 시기로 관측은 국립공원 연구1호 조사선에서 이루어졌다. 2016년 여름의 물리적 관측자료는 국립공원 관리공단으로부터 제공 받아 분석하였다.

##### (1) 물리적 관측자료

연구해역에서 2016년 8월에 관측된 물리적 관측자료의 수직적 분포와 공간적 분포의 특성은 그림 3-3-7와 그림 3-3-8과 같았다. 먼저 수온, 염분, 밀도 및 용존산소의 공간적 분포를 살펴보았다. 표층수온은  $26.00 \sim 29.70^\circ\text{C}$  (평균  $28.00 \pm 1.07^\circ\text{C}$ ), 저층수온은  $14.38 \sim 26.33^\circ\text{C}$  (평균  $18.50 \pm 3.58^\circ\text{C}$ ) 범위로 나타났다. 표층의 경우 일부 해역을 제외하면 균질한 값을 보였으나 저층의 경우에는 특히나 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 수온이 점



점 낮아지는 수온경사가 나타났다. 이는 연안의 경우 낮은 수심과 강한 조석작용에 의해 혼합층이 발달하는 반면, 외해에서는 상대적으로 깊은 수심에 의한 저층의 냉수대 유지와 고온고염의 대마난류수의 유입으로 인하여 강한 성층이 형성되기 때문으로 해석된다. 따라서 이러한 수괴의 차이로 인하여 연안과 외해 사이에 강한 수온 전선이 발달하는 것으로 보인다.

표층염분은  $29.48 \sim 32.48\text{psu}$  (평균  $31.40 \pm 0.89\text{psu}$ ), 저층염분은  $32.28 \sim 34.31\text{psu}$  (평균  $33.53 \pm 0.66\text{psu}$ ) 범위를 나타냈다. 염분은 표층의 경우 연안에서 외해로 갈수록 낮아지는 특이 경향을 보였다. 저층의 경우 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 높은 값을 나타내는 염분경사가 나타났다. 밀도의 범위는 표층에서  $17.70 \sim 21.02 \text{ kgm}^{-3}$  (평균  $19.69 \pm 0.95 \text{ kgm}^{-3}$ ), 저층에서  $21.03 \sim 25.57 \text{ kgm}^{-3}$  (평균  $23.97 \pm 1.40 \text{ kgm}^{-3}$ )로 나타났다. 수온과 염분 분포범위와 같이 밀도 또한 저층에서 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 높은 값을 보이는 밀도경사를 보였다. 용존산소량은 표층에서  $3.31 \sim 7.02 \text{ ml}^{-1}$  (평균  $5.18 \pm 0.64 \text{ ml}^{-1}$ ), 저층에서  $3.34 \sim 3.46 \text{ ml}^{-1}$  (평균  $3.40 \pm 0.06 \text{ ml}^{-1}$ )로 나타났으며 표층과 저층 모두 연안역이 외해역보다 상대적으로 높은 값을 보였다. 특히, 저층의 경우 섬진강의 영향이 큰 서쪽 해역이 높은 농도를 나타냈다.

그림 3-3-8은 수온, 염분 그리고 밀도의 수직적 분포를 보여주며 세 가지 물리적 요소들은 정점마다 상이한 결과를 보였지만 높은 표층수온 때문에 대부분의 정점에서 강한 수온약층이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 수심이 깊은 외해역인 Z1, ZA1, Z2A, Z5정점은 약  $10 \sim 30 \text{ m}$  부근까지 수온약층이 형성되었으며 수심이 낮은 고힌 ~ 여수 근해의 정점들은 표층에서 저층까지 일정한 온도를 보이며 혼합층을 형성한 것을 확인할 수 있었다.

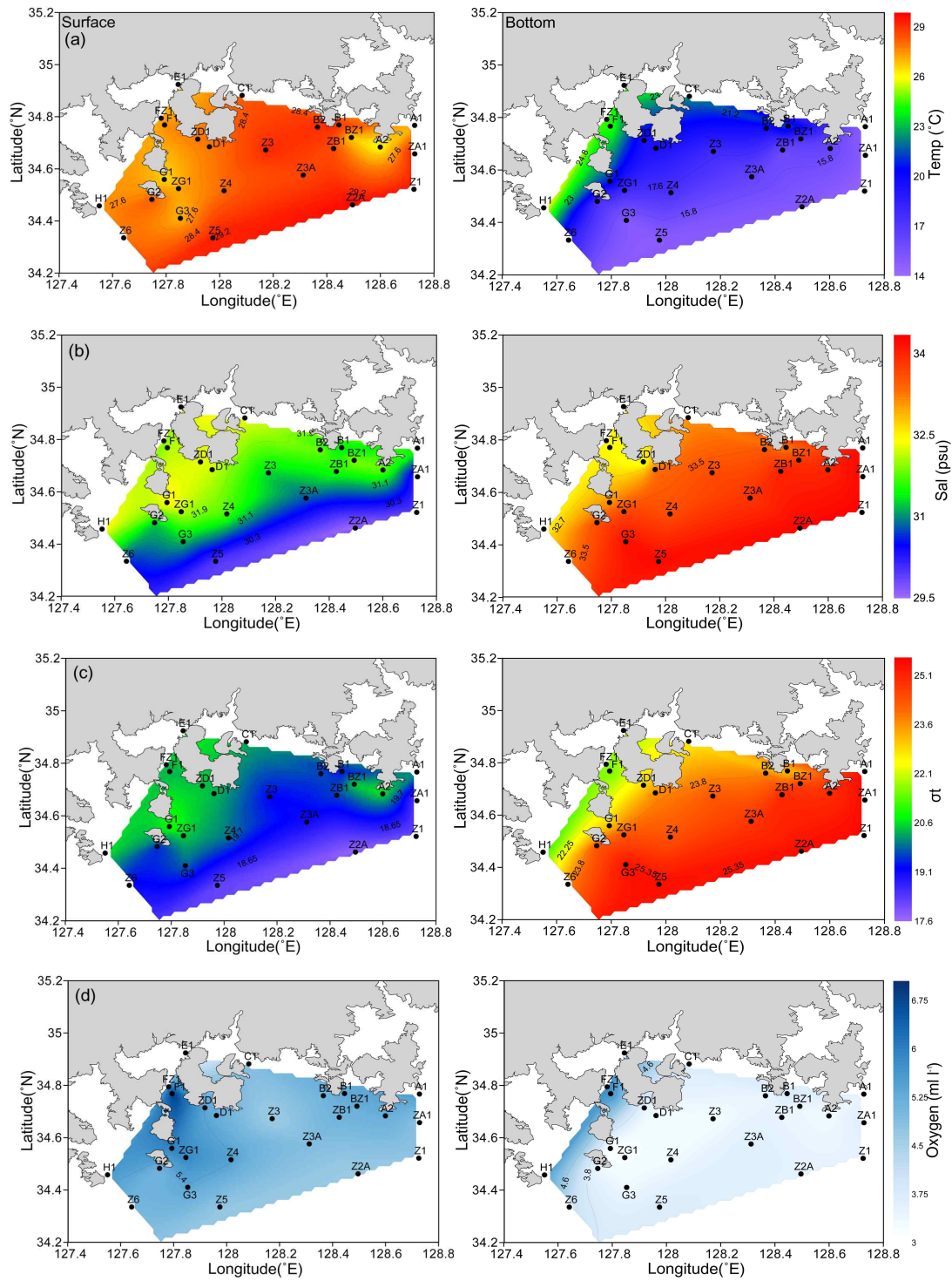


그림 2-2-7. 2016년 8월 표층과 저층에서의 (a) 수온( $^{\circ}\text{C}$ ), (b) 염분( $\text{psu}$ ), (c) 밀도( $\sigma_t$ ,  $\text{kgm}^{-3}$ ), (d) 용존산소( $\text{ml l}^{-1}$ )의 공간적 분포.

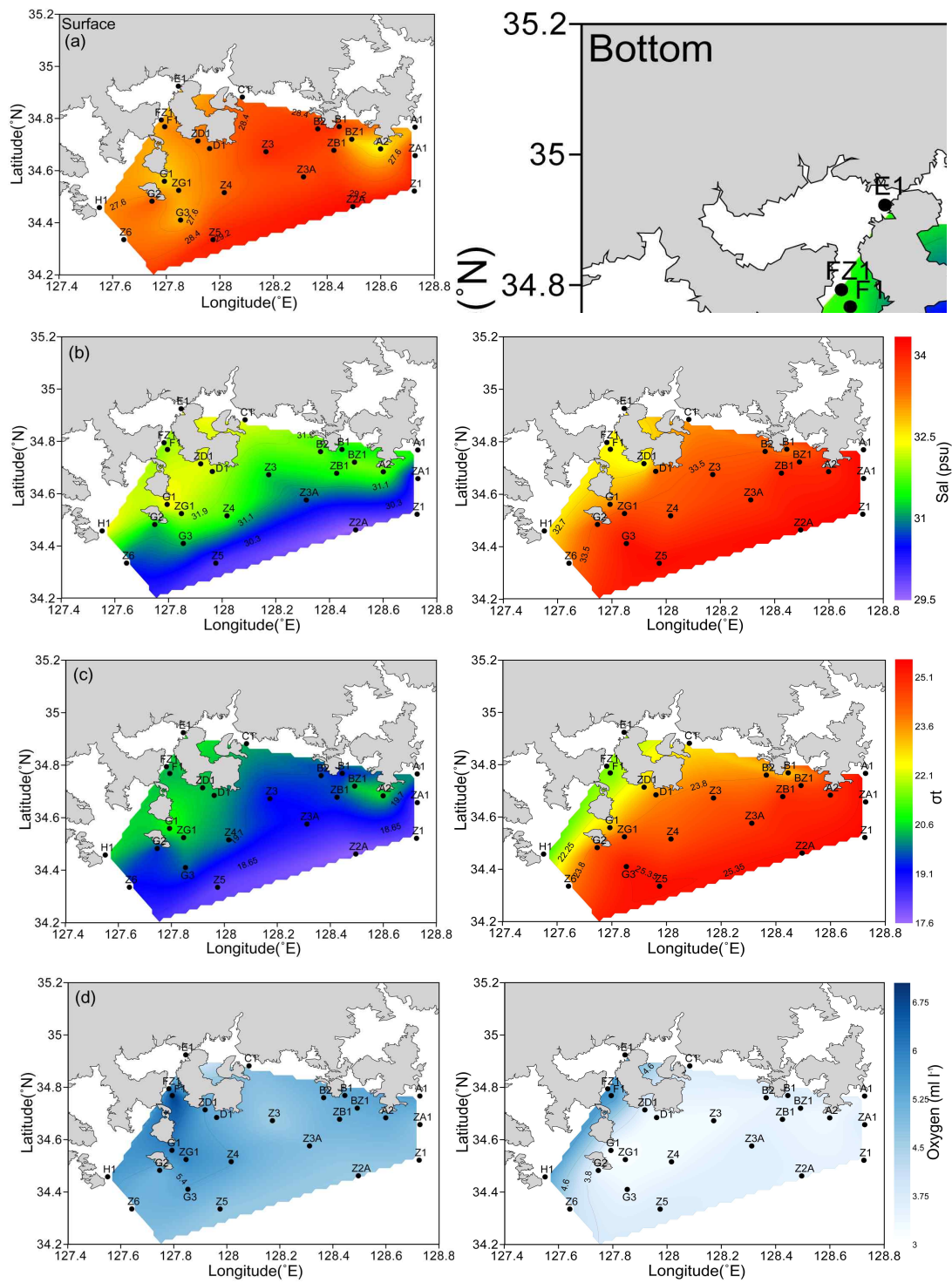


그림 3-3-8. 2016년 8월 표층과 저층에서의 (a) 수온( $^{\circ}\text{C}$ ), (b) 염분( $\text{psu}$ ), (c) 밀도( $\sigma_t$ ,  $\text{kgm}^{-3}$ ), (d) 용존산소( $\text{ml l}^{-1}$ )의 공간적 분포

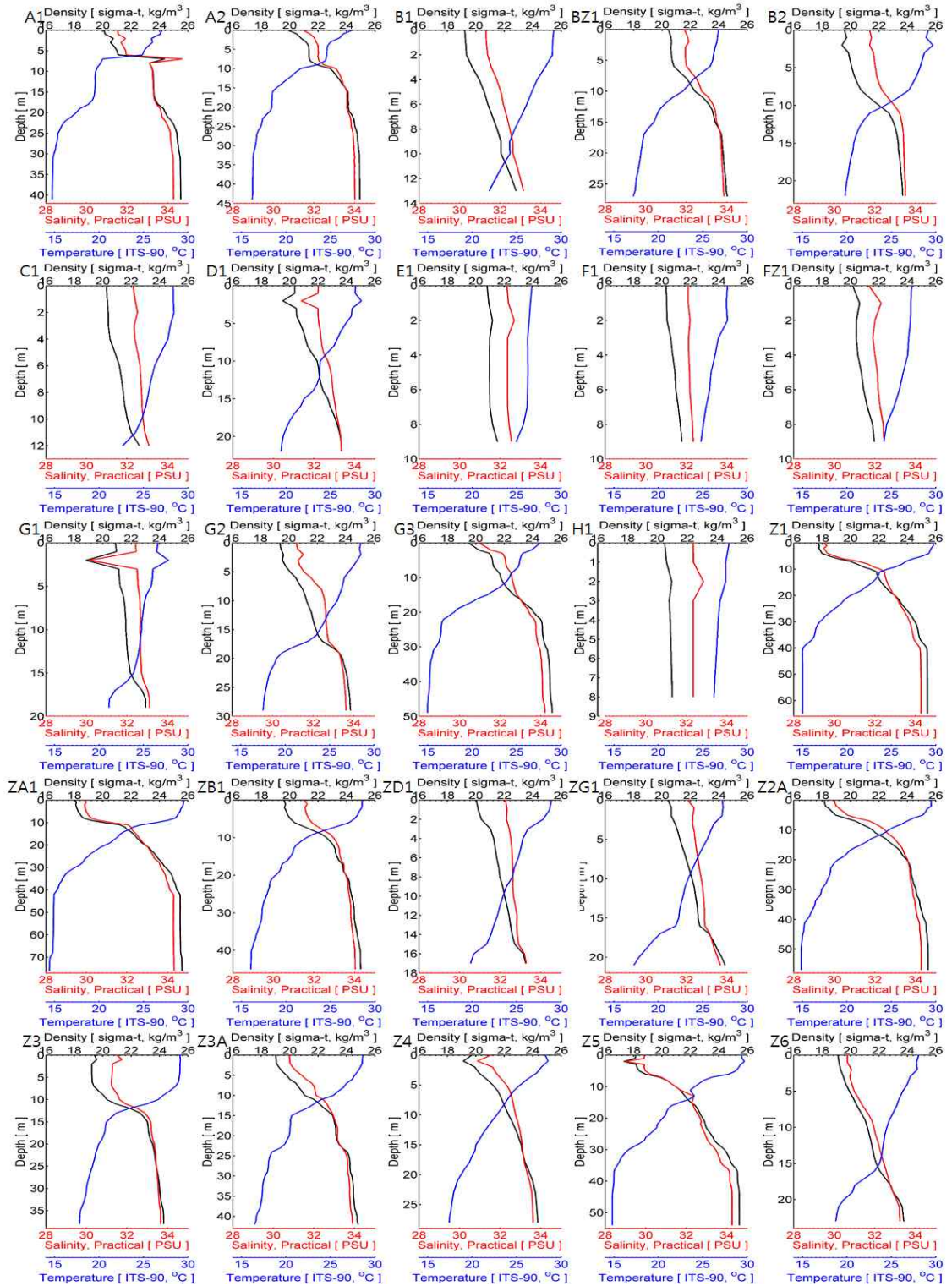


그림 3-3-9. 2016년 8월 수온(°C), 염분(psu), 밀도( $\sigma_t$ ,  $kgm^{-3}$ )의 수직 분포

금년도의 경우 적조 발생 시기에 강하게 발달한 북태평양고기압의 영향으로 가열된 공기와 강한 일사로 폭염이 지속되어 해수면 온도도 2014년, 2015년과 비교하여 조사한

전체 해역에서 높은 값을 나타냈다. 일반적으로 *C. polykrikoides* 적조종이 잘 자랄 수 있는 최적의 범위는 수온의 경우 21 ~ 26℃, 염분의 경우 30 ~ 36psu로 알려져 있는데 (Kim et al., 2004) 특히 이번년도의 적조 발생 시기 동안의 수온은 *C. polykrikoides*의 성장 최적조건을 초과한 매우 높은 온도 범위를 보였고 염분의 경우는 29.5psu의 낮은 값을 보이기도 했다(표 3-2-3). 2016년 적조는 2014년, 2015년과 비교하여 규모와 세력이 매우 약했으며 발생 지속기간 또한 짧았다. 이는 고수온에 현상에 의해 *C. polykrikoides*가 출현하여 번성하기 위해서 적합한 환경이 아니었다는 것으로 판단된다.

표 3-3-3. 2014년, 2015년의 적조 발생 해역(R정점)과 2016년 현장 조사 해역 표층수온(℃)과 표층염분(psu)의 범위 비교

물리적 인자	Optimal growth			
	(Kim <i>et al.</i> , 2004)	2014	2015	2016
수온(℃)	21.0~26.0	22.4~24.1	22.9~26.2	<b>26.0~29.7</b>
염분(psu)	30.0~36.0	30.0~32.3	31.6~32.2	<b>29.5~32.5</b>



## 제 4 절 2017년 적조발생 해역 현장관측

### 1. 현장 관측자료 개요

남해안 동부 조사해역(127.4 ~ 128.4° E)은 전라남도 여수시에서 거제시의 연안에 이르는 해역으로 해안선에서 외해로 갈수록 수심이 점점 깊어져 최대 약 80m에 이른다. 이 해역은 섬진강, 남강 등의 큰 규모의 하천과 한려해상 해역으로 이루어져 있으며 대한해협(Korea Strait)을 통하여 동해와 연결되어 있다. 조사해역은 전형적인 리아스식 해안으로 외해역에는 많은 섬들이 산재하고 있고 육지방향으로는 길게 만입한 광양만, 진주만, 고성-자라만 등의 크고 작은 여러 만들과 함께 갯벌들이 발달해 있다.

한국 남해안은 고온고염의 특성을 가지는 대마난류수의 영향이 지배적이며 이러한 수괴에 의해 해양생태계가 큰 영향을 받고 있다. 대마난류수는 열과 염분을 공급하는 주요한 수괴로서, 이로 인하여 해안선과 평행한 전선이 발달되는 것으로 보고되고 있다. 연안수와 외해수 사이에 형성되는 이 전선의 발달은 일차생산자인 식물플랑크톤의 생산력에 큰 영향을 미치며 특히 적조의 발생 원인이 되는 것으로 알려져 있다(임, 2004). 또한 이 해역은 섬진강과 남강 등을 비롯한 크고 작은 여러 강과 하천들이 위치하고 있어 많은 양의 담수가 연안해역으로 유입된다. 섬진강은 남해 연안해역으로 공급되는 주요 담수와 퇴적물 공급원으로써 여수 해협의 외해 쪽에 거대한 섬진강 삼각주를 형성한다. 아울러 동중국해의 장강 희석수는 여름철에 대마난류수와 함께 제주를 거쳐 남해안의 해양생태계에 지대한 영향을 주고 있는 것으로 보고되고 있다. 이와 같이 남해안은 다양한 수괴에 의해 복잡한 해양환경을 이루고 있으며 이러한 수괴들의 시·공간적 변동은 해양 부유 생물 뿐만 아니라 어장 형성과 해조류 양식에 큰 영향을 미치고 있다.

최근 연안 개발, 수산·양식 활동의 증가 등 인위적인 환경요인에 의해 남해의 연안해역은 그 변동폭이 다른 해역에 비해 매우 높게 관측되고 있으며 적조에 의한 피해도 지속되고 있다. 이번 연구에서는 남해안 조사해역의 적조 탐지 및 발생 경향 분석을 위하여 2017년 8월 현장관측을 실시하였다(그림 3-4-1, 표 2-2-1, 2-2-2).

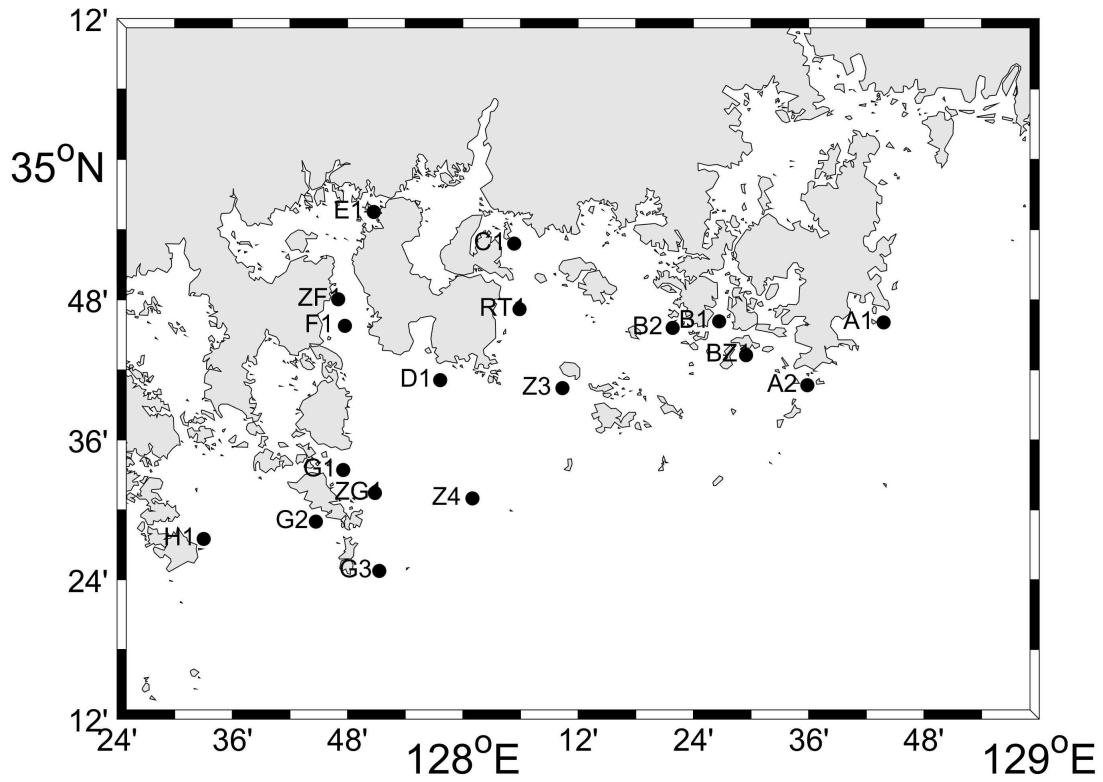


그림 3-4-1. 2017년 8월 조사정점.

표 3-4-1. 2017년 8월 관측정보.

정점	경도 [° E]	위도[° N]	시간 [yyyy-mm-dd]	수심 [m]
A1	128.73007	34.76782	2017-08-26	49
A2	128.59770	34.67817	2017-08-26	45
B1	128.44470	34.76930	2017-08-26	16
BZ1	128.49135	34.72111	2017-08-26	29
B2	128.36404	34.75999	2017-08-26	28
C1	128.08907	34.88015	2017-08-25	14
D1	127.96066	34.68544	2017-08-25	25
F1	127.79536	34.76291	2017-08-24	14
ZF1	127.78370	34.80079	2017-08-27	27
G1	127.79237	34.55702	2017-08-24	32
ZG1	127.84740	34.52420	2017-08-24	15
G2	127.74500	34.48319	2017-08-24	31
G3	127.85500	34.41260	2017-08-24	50
H1	127.55035	34.45840	2017-08-24	5
Z3	128.17278	34.67403	2017-08-25	42

Z4	128.01665	34.51640	2017-08-25	32
RT1	128.09830	34.78670	2017-08-25	20
E1	126.7928	34.92516	2017-08-27	13

표 3-4-2. 2017년 8월 관측항목.

세부 분야	세부 조사내용	측정기기
해양환경	수온	SBE 25 plus CTD
	염분	SBE 25 plus CTD
	밀도	SBE 25 plus CTD
	용존산소	SBE 43
	광합성 유효광	Biospherical PAR sensor
	부유물질	BP221S electronic balance
	pH	EC-pH 601 pH meter
	입자성유기탄소	CHN
식물플랑크톤	엽록소 <i>a</i> 농도	10-AU

## 2. 현장 관측자료 분석 결과

### 가. 2017년 여름 관측

2017년도 8월 관측은 8월 24일부터 8월 28일까지 시행되었으며, 조사정점은 총 18개였다. 조사가 이루어지던 시기에는 적조가 발생하기 않았고 관측은 국립공원 연구1호 조사선에서 이루어졌다.

#### (1) 물리적 관측자료

연구해역에서 2017년 8월에 관측된 물리적 관측자료의 수직적 분포와 공간적 분포의 특성은 그림 3-4-2와 그림 3-4-3과 같았다. 먼저 수온과 염분의 공간적 분포를 살펴 보았다. 표층수온은 21.00 ~ 29.00℃, 저층수온은 15.00 ~ 27.00℃ 범위로 나타났다. 표층의 경우 거제도 부근 해역을 제외하면 균질한 값을 보였으나 저층의 경우에는 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 수온이 점점 낮아지는 수온경사가 나타났다. 그리고, 금오도 부근 해역에서는 특이하게 고온 저염의 패치가 관측되었다. 연안의 경우 낮은 수심과 강한 조석 작용에 의해 혼합층이 발달하는 반면, 외해에서는 상대적으로 깊은 수심에 의한 저층의



냉수대 유지와 고온고염의 대마난류수의 유입으로 인하여 강한 성층이 형성되기 때문으로 해석된다. 따라서 이러한 수괴의 차이로 인하여 연안과 외해 사이에 강한 수온 전선이 발달하는 것으로 보인다.

표층염분은 30.00 ~ 33.50psu, 저층염분은 31.5 ~ 34.00psu 범위를 나타냈다. 염분은 표층의 경우 서쪽에서 동쪽해역(거제도) 갈수록 증가하는 경향을 보였다. 저층의 경우도 표층과 유사하게 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 높은 값을 나타내는 염분경사가 나타났다. 그림 3-4-3은 수온, 염분 그리고 밀도의 수직적 분포를 보여주며 세 가지 물리적 요소들은 정점마다 상이한 결과를 보였지만 높은 표층수온 때문에 대부분의 정점에서 강한 수온약층이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 수심이 외해역에서는 약 10 ~ 20 m 부근까지 수온약층이 형성되었으며 수심이 낮은 고히 ~ 여수 근해의 정점들은 표층에서 저층까지 일정한 온도를 보이며 혼합층을 형성한 것을 확인할 수 있었다.

## (2) 엽록소 a 농도의 공간적 분포

조사정점 해역에서의 표층 엽록소 a 농도는 조사시기와 관측위치에 따라 다양하게 나타났다. 그림 3-4-2과 같이 공간적으로 육지의 영향이 큰 연안 해역에서 높게 나타났고 대마난류의 영향을 받는 외해역에서 낮게 나타났다. 전체 엽록소 a 농도는 2017년 8월 표층에서 0.19 ~ 9.28  $mgm^{-3}$  로 나타났다.

## (3) 입자성유기탄소(POC) 공간적 분포

조사정점 해역에서의 표층 입자성유기탄소 농도는 조사시기와 관측위치에 따라 다양하게 나타났다. 그림 3-4-2과 같이 공간적으로 육지의 영향이 큰 연안 해역에서 높게 나타났고 대마난류의 영향을 받는 외해역에서 낮게 나타났다. 특히 적조로 의심되는 해역과 남해도 부근 해역에서 상대적으로 높게 나타났다. 표층 입자성유기탄소 농도는 2017년 8월 표층에서 200 ~ 1,300  $mgm^{-3}$  로 나타났다.

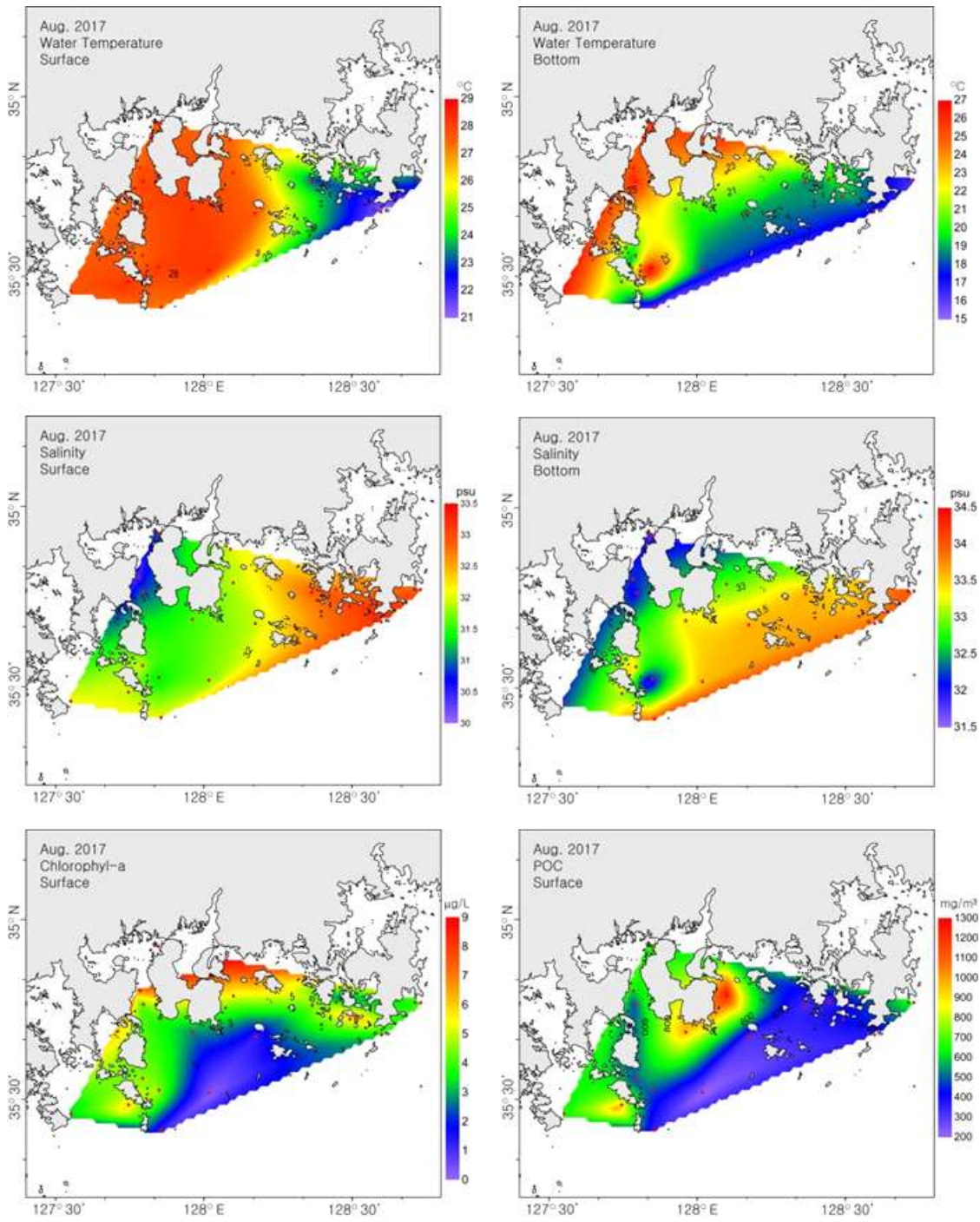


그림 3-4-2. 2017년 8월 표층과 저층에서의 수온(°C), 염분(psu), 엽록소 a 농도(mgm<sup>-3</sup>), 및 입자성유기탄소(mgm<sup>-3</sup>)의 공간적 분포.

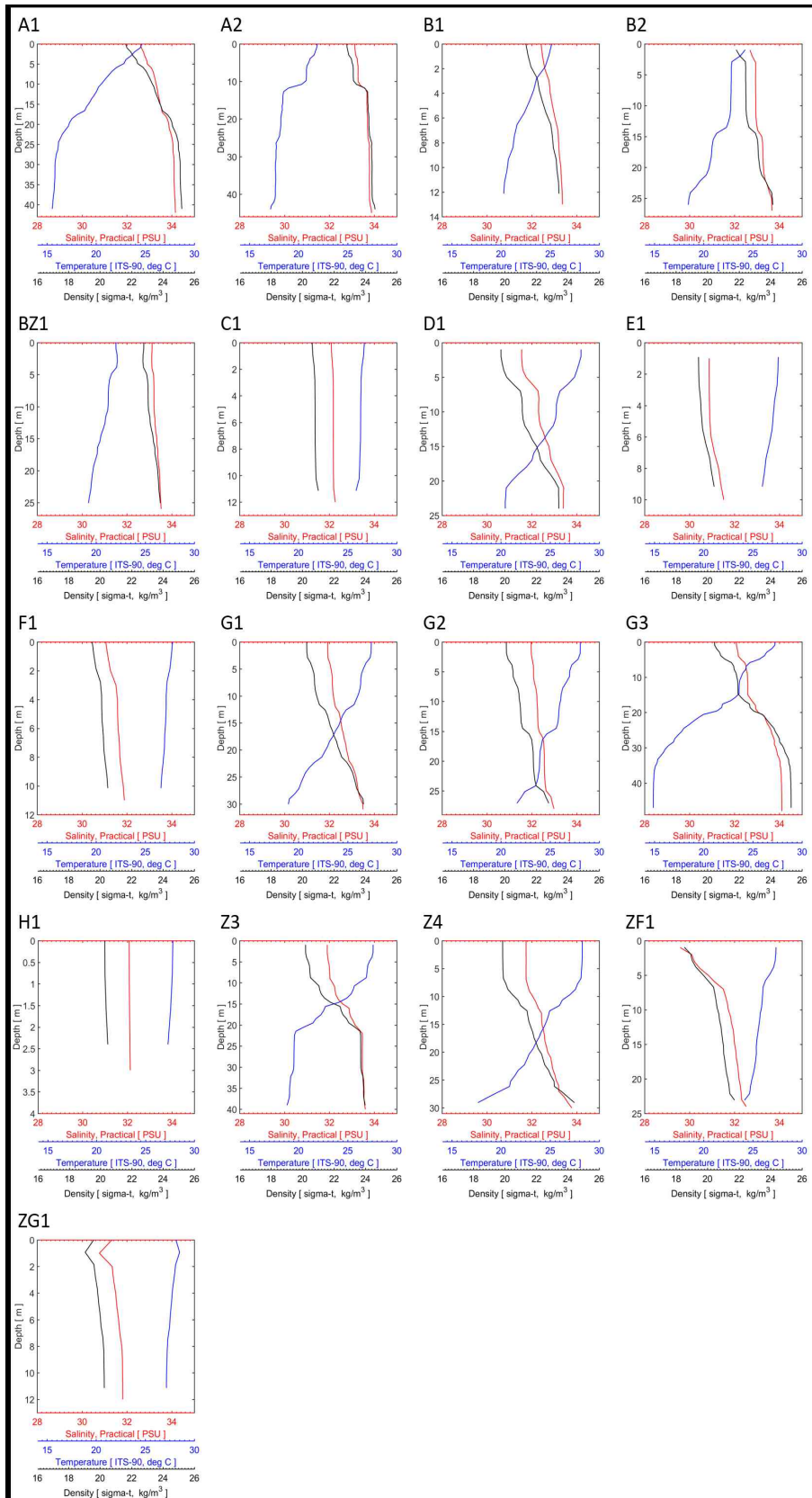


그림 3-4-3. 2017년 6월 수온( $^{\circ}\text{C}$ ), 염분( $\text{psu}$ ), 밀도( $\sigma_t$ ,  $\text{kgm}^{-3}$ )의 수직 분포

#### (4) 반사도 특성 분석

그림 3-4-4는 2017년 8월 현장관측에서 얻어진 파장별 반사도 스펙트럼 특성을 나타내고 있다. 전체 조사 정점 중에서 1개 정점에서 클로로필-a 농도가  $9 \text{ mgm}^{-3}$  이상으로 높은 해역으로 적조로 의심되었고, 나머지 정점에서는 나타나지 않았다. 적조로 의심되는 해역의 스펙트럼 특성은 청색 파장(400 ~ 450 nm) 영역에서 상대적으로 낮은 값을 나타내지만 녹색파장(550 ~ 600 nm)에서 뚜렷한 피크를 보이고 적색 파장(670 ~ 680 nm, fluorescence peak)에서는 상대적 높은 값을 나타낸다. 적조가 발생 하지 않은 해역의 스펙트럼은 청색 파장(400~450 nm)에서 상대적으로 높은 절대값을 보이지만, 적색 파장(670 ~ 680 nm, fluorescence peak)에서는 상대적으로 낮은 값을 나타낸다. 적조가 발생하지 않은 해역의 엽록소 a 농도가 적조 발생 해역과 비교하여 상대적으로 낮아 뚜렷한 스펙트럼 특성이 나타나지 않을 수 있다. 그러나 기존의 연구 결과에서 유사한 엽록소 a 농도를 가지는 적조인 경우와 적조가 아닌 경우의 스펙트럼 특성 분석결과, 두 해역 모두 녹색파장과 적색파장에서 피크를 보이지만, 위의 결과와 유사하게 적조가 아닌 경우의 스펙트럼은 청색 파장(400 ~ 450 nm)에서 상대적으로 높은 절대값을 나타내고 전체적인 스펙트럼 특성이 둥근 형태를 보인다. 반면 적조로 추정되는 스펙트럼 특성은 짧은 파장(400 ~ 450 nm)에서 상대적으로 낮은 값을 보이면서 전체적인 스펙트럼 특성이 녹색파장 부근에서 역삼각형 형태를 나타낸다. 이런 스펙트럼 특성은 일반적으로 해수 중에 입자가 증가하게 되면 녹색파장 부근에서 피크가 발생하게 되지만 적조를 포함한 해역은 용존 유기물 및 자체 흡광이 증가하면서 청색 파장에서 반사도가 감소하게 되면서 적조가 아닌 해역의 스펙트럼과 차이를 나타내는 것으로 파악된다.

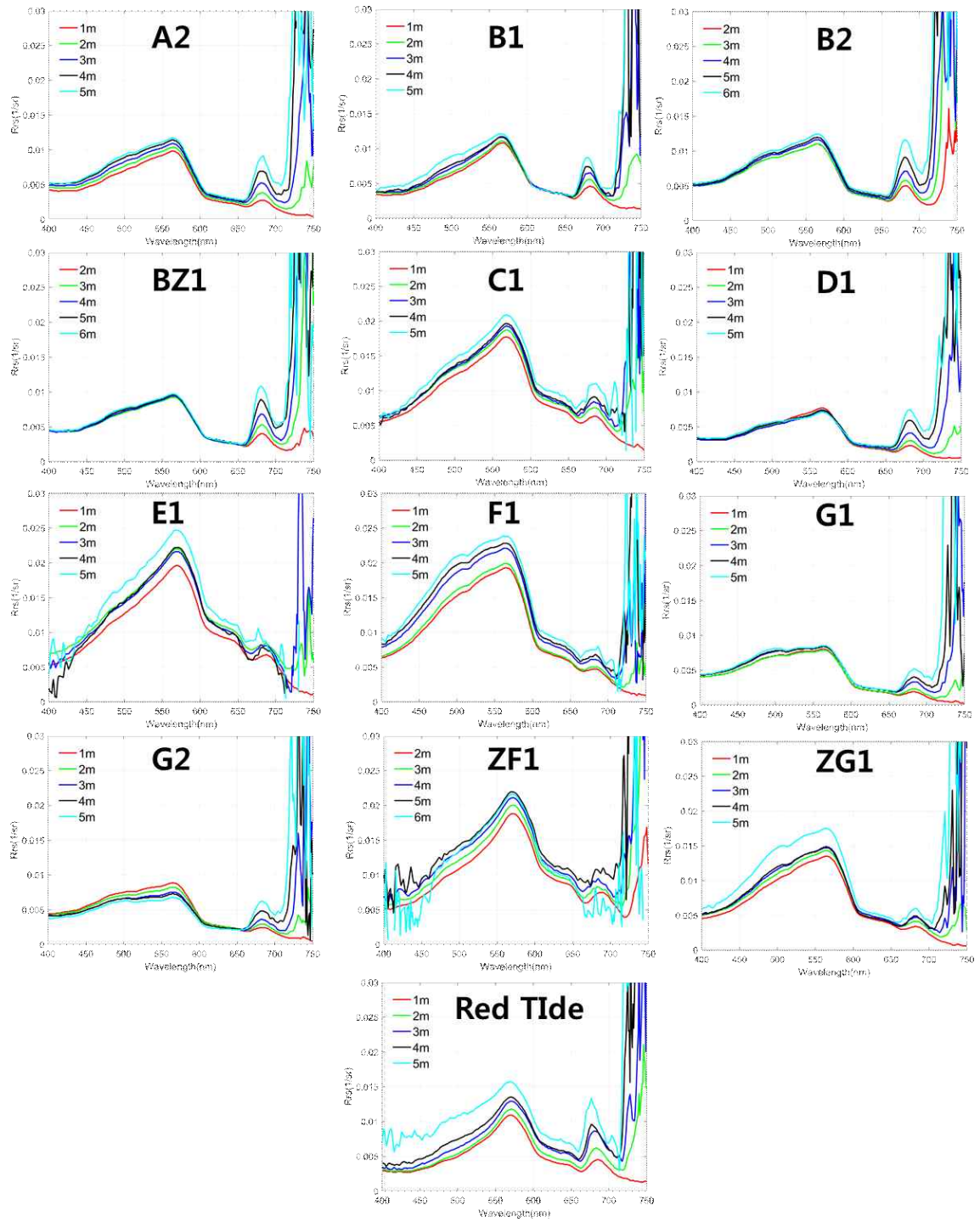


그림 3-4-4. 2017년 8월 관측된 반사도 스펙트럼.

## 제 4 장 적조 탐지 알고리즘 비교 및 평가

### 제 1 절 적조 탐지 연구

적조 발생은 다양한 적조 생물의 환경/생리적 특성이 원인이 되고, 지난 수십 년 전부터 전 세계 연안 지역(한반도 주변 해역을 포함)에서 집단 폐사, 물리적 손상과 막대한 생태적 영향을 야기해왔다.

막대한 피해를 유발시키는 적조를 탐지하고 모니터링 하는 분야 중에서 원격탐사를 활용한 연구가 활발하게 진행 중이다. 위성을 이용한 적조 탐지는 1985년 Carder and Steward에 의해서 처음 시도되었다. 그 이후 여러 방법들이 제안되었고, 기본적인 방법으로 해색위성에서 추정된 엽록소 a 농도나 엽록소 a 이상을 이용하여 적조가 발생한 해역을 추정하는 방법이 이용되었다(Stumpf et al., 2003; Hu et al., 2004, 2005; Suh et al., 2004; Tomlinson et al., 2004; Ahn and Shanmugam 2006; Ahn et al., 2006; Ishizaka et al., 2006). Stumpf et al. (2003)과 Tomlinson et al. (2004) 연구는 위성에서 추정된 엽록소 a의 두 달 평균값에서 엽록소 a 이상을 계산하여 적조 발생 지역과 아닌 지역을 구분하였고, 현재 NOAA에서는 적조 탐지를 위한 공식적인 방법으로 사용되고 있다. 그러나 다른 비적조종은 종종 적조와 유사한 엽록소 a 농도를 보이거나 또는 광합성이 덜한 적조종은 위성에서 분석할 수 없을 정도의 약한 엽록소 a 특성을 보이므로 항상 적조지역에서 엽록소 a 농도가 높게 나타나는 것은 아니다. 또한 해수 중에는 부유물질, 용존 유기물 그리고 박테리아와 같은 종속영양체 등 해색에 영향을 주는 여러 성분들이 포함되어 있어 적조가 아닌 해역의 적조와 같이 보이는 경우가 있어 엽록소 a 농도만으로는 순수한 적조를 구별하기에는 어려움이 있다. 현재 대부분의 해색위성에서 추정된 엽록소 a 알고리즘은 맑은 해역에 중점을 두고 개발되어(O'Reilly et al., 2000) 용존 유기물/부유퇴적물 등과 같이 연안역의 복잡한 주의 환경의 영향에 의해 생광학적 알고리즘과 대기보정 방법의 문제점 및 공간/시간 해상도로 인하여 탐지가 어렵다(Hu et al., 2003; Ahn and Shanmugam, 2006; Son et al., 2011).

연안에 발생한 적조는 용존 유기물 및 부유물질의 영향으로 인하여 청색 파장(412 또는 443 nm)에서 흡광이(absorption) 증가하면서 위성에서 추정된 엽록소 a 농도는 과대 추정하게 된다(Son et al., 2011). 이런 문제점을 극복하기 위해서 Hu et al. (2005)는 MODIS 해색위성의 FLH(fluorescence line height) 측정에 기초한 방법을 이용하여 개선된 엽록소 a 농도를 계산하고, 미국 걸프만의 *Karenia brevis* 적조를 탐지하는 연구를 수행했다. 이 방법은 용존 유기물에 의한 영향이 적은 형광 파장을 사용하기 때문에 연



안에서의 적조 감지의 정밀도를 향상시켰으며, 에어로졸과 대기 특성을 모델화하는 복잡한 대기보정 방법보다 간단한 대기보정을 요구한다. 그러나 이들 방법은 영양염의 유용성, 빛의 강도, 기온과 식물플랑크톤의 물리적 관점에 의존하는 엽록소 a 형광의 효율성 및 다양성으로 인하여 문제를 야기한다. 그리고 이 방법은 부유퇴적물이 많은 탁한 해역에서는 엽록소 a와 부유퇴적물 사이의 상호작용 때문에 적조 탐지에 어려움이 있다 (Babin et al., 1996; Ahn and Shanmugam, 2006).

적조 탐지를 위한 최근 연구는 기존의 엽록소 a 농도의 한계를 극복하기 위해서 해수의 광학적 특성을 파악하여 적조 구분을 시도해왔다(Dierssen et al., 2006; Cannizzaro et al., 2008; Sasaki et al., 2008). Dierssen et al. (2006)과 Sasaki et al. (2008)은 적조 발생 시 가시광선의 흡광도나 반사도가 긴 파장대로(570 ~ 590 nm) 이동되어 나타남을 발견했다. 그리고 Cannizzaro et al. (2008)은 *K. brevis* 적조종은 적조가 발생했을 때 높은 엽록소 a 농도를 보이지만 낮은 역산란값을 나타낸다고 보고했다. 이와 같은 방법은 특별한 식물플랑크톤 종에 대해서는 위험조류의 독특한 광특성에 기초한 안정적 기술이 요구되고 현장조사에 기초한 알고리즘은 비적조종으로부터 적조종이 차별화되어야 하고, 상대적으로 용존유기물이나 부유퇴적물이 적은 해수환경에서 탐지가 용이하다(Ahn et al., 2006).

대한민국 남해안에 유해성 적조를 일으키는 종은 외편모조류에 속하는 *Cochlodinium polykrikoies* 종으로 Puerto Rico 연안에서 처음 발견(Margalef 1961) 되었고, 이후 북미 대서양 연안의 뉴저지주 Barnegat만과 미국 캘리포니아 연안에서 적조를 일으킨 *C. keratolobatum*(Silva 1967)과 같은 종으로 간주되어 왔다. 이 종은 일본을 비롯하여 중남미의 Guatemala의 태평양 연안, 프랑스 Reunion Island, 호주의 퀸스랜드주의 Brisbane 동측에 있는 Moreton Bay에서도 적조를 일으켰다는 보고가 되었다. 이 종은 한국에서는 1982년 낙동강하구에서 최초로 적조를 일으킨 이래 현재까지 남해연안 뿐만 아니라 서해와 동해연안에서 대규모 적조를 일으켜왔다(김 등, 1999). 1990년 초 남해안 지역에서는 주로 diatom에 의한 적조 발생이 빈번했지만, 1995년 이후 적조는 dinoflagellate인 *C. polykrikoides*에 의해서 발생되었다(Kang et al., 2002; Lee et al., 2002; Suh et al., 2004; Lee 2006). *C. polykrikoides* 적조는 맑은 해역인 나로도와 남해도 사이에서 발생하여 남해안 전역으로 확대되고, 연도별 차이를 보이지만 서해안 및 동해 지역에서도 발생 된 것으로 보고되었다(Lee et al., 2002; Suh et al., 2004; Son et al., 2011; <http://www.nfrdi.re.kr/redtideInfo>). 남해안 유해성 적조의 발생 기작은 연안의 해수와 외해의 해수가 만나는 지역에서 frontal mixing에 의해서 맑은 해역인 나로도 또는 남해도 부근해상에서 발생하여 강한 남서풍에 의해서 적조가 확산되는 것으로 보고되었다(Kim et al., 1999; Lee 2008). 그러나 남해안 유해성 적조의 중요한 특성 중에 하나는

지역적으로 국한되지 않고 남해 전역 및 동해 및 서해 연안 해역까지 확산되면서 많은 피해를 주는 것이다. 그래서 지역적으로 국한된 조사만으로는 유해성 적조의 조기 탐지 및 모니터링에 한계가 있기 때문에 위성을 활용한 자료 제공이 필수적이다. 원격탐사 기술은 적조의 다양한 상황에 대한 정보를 제공하는 중요한 요소로 여겨져 왔으며 영향을 최소화하기 위한 중요한 잠재력을 제공하고, 적조 발생 시 민감 지역에서 적합한 적조 방제를 위하여 도움을 준다.

연안 역에서 발생하는 적조는 외해에서 발생하는 적조와는 달리 해수 중에 용존 유기물/부유물질 등과 같은 복잡한 해수 신호를 가지고 있어서 적조 신호와 구분이 힘들다. 이런 남해 연안에 발생한 *C. polykrikoides* 적조를 탐지하기 위해서, Suh et al. (2004)는 적조 발생에 따른 부유물질의 증가를 위성으로 탐지하는 방법을 제안하였다. Ahn et al. (2006)은 연안에서 용존유기물/부유물질에 의한 영향을 개선시킨 대기 보정 방법을 적용하여 Red-tide index Chlorophyll Algorithm (RCA) 방법을 개발하였다. Kim et al. (2009)는 해수면 표층수온과 부유물질의 영향을 고려한 two-stage filtering 방법으로 남해안 적조를 탐지하였다. Son et al. (2011)과 손 등 (2012)는 유해성 적조인 *C. polykrikoides*을 탐지하기 위해서 MODIS와 GOCI 해상위성 자료를 이용하여 spectral classification 방법으로 적조 발생지역을 체계적으로 분리했다. 그리고 위와 같은 적조 탐지 알고리즘의 검증을 위하여 기존의 여러 방법들과 비교 분석하여 지역에 특화된 알고리즘을 개발하였다. Spectral classification 방법은 엽록소 a 농도의 절대값을 사용하지 않고 적조종이 가지는 스펙트럼의 특성을 구분하는 방법으로 대기 효과 및 주위 해수 신호에 민감하지 않아서 연안 역에 발달한 적조를 탐지하는데 용이하다.



## 제 2 절 적조 탐지 알고리즘 평가

### 1. 재료 및 방법

본 연구에서 남해안 유해성 적조의 시·공간적 정보는 국립수산과학원 적조 속보 자료를 이용하였다(<http://www.nfrdi.re.kr/redtideInfo>). 2002년 ~ 2013년 적조 발생 현장자료는 2장 1절에서 생산된 자료를 이용하였다. 해색위성 자료는 2장 4절에서 처리된 해색위성 자료를 이용하였다.

기존의 적조 탐지 방법 중에서 bbp-Morel과 SS 방법은 미국 걸프만에서 *K. brevis* 적조 탐지를 위해 개발되었고, TSF, FRTD, SC 방법은 대한민국 남해안에서 발생하는 *C. polykrikoides* 적조를 탐지하기 위해 개발되었다(표 4-2-1). 기존의 적조 탐지 방법의 정확도 평가는 적조가 발생한 날짜의 위성자료와 현장관측 자료의 매칭을 통하여 표 4-2-2.에서 나타난 방법으로 계산하였다. Kim et al. (2009), Son et al. (2011), 손 등 (2012)의 연구에서는 여러 가지 항목에 대해서 정확도 평가를 하였지만, 본 연구에서는 아래의 accuracy와 detectability항목에 대해서 계산을 했다(표 4-2-1).

$$Accuracy (\%) = [TP / (TP + FP)] \times 100$$

$$Detectability (\%) = [TP / (TP + FN)] \times 100$$

기존 알고리즘 평가에 사용된 자료는 해색위성자료와 적조 현장관측 자료를 이용하여 2002년부터 2013년까지 기존 알고리즘 비교 및 평가를 실시하였고, 대표적인 결과를 도식화했다.

표 4-2-1. 기존의 적조 탐지 방법

Method	Description
bbp-morel (Morel 1988; Carder et al., 1999; Canizzaro et al., 2008; Tomlinson et al., 2009)	$bbp(555) = -0.00182 + 2.058 \times Rrs(555)$ $bbp(555)_{Morel} = 0.3 \times (chl)0.62 \times \{0.002 + 0.02 \times [0.5 - 0.25 \times \log_{10}(chl)]\}$ bbp(555)/bbp(555)_Morel is used to indicate <i>K. brevis</i> bloom, when the value is 2 or less. (where chl is MODIS standard chlorophyll in this study).
Spectral Shape at 490 nm (SS) (Wynne et al., 2008;	$SS(490) = nLw(488) - nLw(443) - (nLw(531) - nLw(443)) \times (488 - 443) / (531 - 443)$ A negative SS(490) was indicative of a <i>K. brevis</i> bloom. (Original wavebands for SeaWiFS (443, 490, 510 nm) are modified

Tomlinson et al., 2009)	by MODIS wavelengths (443, 488, 531 nm)).
Two-stage filtering (TSF) (Kim et al., 2009)	<p>Step. 1: MODIS sea surface temperature ranged from 22.0-26.0 ° C is used for potential red-tide area and remove other pixels.</p> <p>Step. 2: <math>MRI = (nLw(555) - nLw(488)) / (nLw(555) + nLw(488))</math>. Positive MRI is potential red-tide pixel and negative MRI is clear and/or turbidity water pixel (remove negative MRI pixel).</p> <p>Step. 3: Remove turbidity water using the threshold of above 1.5 of nLw(667).</p> <p>Step. 4: Determine the <i>C. polykrikoides</i> bloom area using local Moran's I spatial statistical method.</p>
Feasibility of red-tide detection (FRTD) (Suh et al., 2004)	<p>Suspended solid considering particles of red-tide bloom = <math>-11.51 \times \ln(nLw(488)/nLw(555)) + 14.38</math></p> <p>(In this study, original wavebands for SeaWiFS (490 nm) are modified by MODIS wavelengths (488 nm). The threshold used above 15 as <i>C. polykrikoides</i> bloom.)</p>
Spectral Classification (SC) (Son et al., 2011; 손 등 2012)	<p>Step 1: If the highest value of the radiance data is Rrs(555) with a fluorescence peak at 678 nm (Rrs(678) . Rrs(667))</p> <p>Step 2: If the ratio of Rrs(412) to Rrs(555) is greater than that of (Rrs(555)-Rrs(488)) to Rrs(555), then the area has a low contribution of detritus/CDOM to chlorophyll (continue to step 3); otherwise, the area has a high contribution of detritus/CDOM to chlorophyll (continue to step 4)</p> <p>Step 3: If the ratio of Rrs(443) to Rrs(531) is greater than that of Rrs(488) to Rrs(555), then the area is a red-tide; otherwise, the area consists of non-red-tide water</p> <p>Step 4: If the ratio of Rrs(531) to (Rrs(488) + Rrs(443)) is greater than that of Rrs(488) to (Rrs(555)-Rrs(488)), then the area is a red-tide; otherwise, the area consists of non-red-tide water</p>

표 4-2-2. 위성자료와 현장 적조 발생 자료를 이용한 적조 탐지 방법 정확도 평가

		Satellite data	
		Detection <i>C. polykrikoides</i> pixels	Detection non-red-tide pixels
Reference data	<i>in-situ C. polykrikoides</i> pixels	True Positive (TP)	False Negative (FN)
	<i>in-situ</i> non-red-tide pixels	False Positive (FP)	True Negative (TN)

## 2. 결과

국립수산과학원의 유해성 적조 주의보(red-tide attention) 및 경보(red-tide alert) 발령은 *C. polykrikoides*의 밀도가  $300 \text{ cell ml}^{-1}$  이상 이거나  $1,000 \text{ cell ml}^{-1}$  이상 일 때 지정된다. 2002년 남해안에 처음 유해성 적조 주의보는 8월 2일 옹포, 남해도 향촌 해역에서 발령되어 9월 27일까지 57일 동안 유지되었다. 적조 발생 해역은 완도 해역에서 강원도 울진 연안까지 고밀도의 적조 발생되어 총 49억의 피해를 발생시켰다. 2002년 8월 19일 적조 발생 상황은 소리도 ~ 거제도 부근 해역은 적조 경보 해역으로, 완도 ~ 소리도와 거제도 동측~부산 부근 해역은 적조 주의보 해역으로 발령되었으며, *C. polykrikoides* 셀 농도는  $10 \sim 15,000 \text{ cell ml}^{-1}$ 이다(국립수산과학원, 2004). Lee (2006) 연구에서 연구해역인 남해안은 증가된 강우로 인하여 육상으로부터 많은 양의 영양염 공급으로 적조가 증대되었다고 보고했다. 그림 4-2-1.의 RGB 영상에서 적조가 발생한 해역은 진한 황색을 보여주고, 엽록소 a 농도도  $.2 \text{ mg m}^{-3}$ 을 나타낸다. 적조 발생 주변 해역은 수온  $24^{\circ} \text{C}$  이상의 높은 수온을 나타내고, 현장관측 자료에서도  $23\sim 26^{\circ} \text{C}$ 로 관측 되었다(국립수산과학원, 2004). 적조 발생 자료와 MODIS 해색위성 자료를 이용하여 기존의 적조 알고리즘을 적용하여 지도에서 적색으로 표시된 부분은 적조로 추정되는 해역이다. bbp-Morel 방법은 대부분 해역을 적조 발생으로 추정했고, SS 방법은 남해안에서 엽록소 a 농도가 상대적으로 높은 해역을 적조 발생해역으로 추정했으며, FRTD와 TSF 방법은 나로도 ~ 부산 해역으로 적조 발생으로 추정했고, SC 방법은 여수~통영 해역을 적조 발생해역으로 추정했다. bbp-Morel와 SS 방법을 제외하고 나머지 적조 탐지 방법은 완도-여수-거제도-부산 해역을 적조 발생으로 추정했다. 그러나 bbp-Morel와 SS 방법은 높은 detectability를 보여주지만 30% 이하의 accuracy를 나타내고, SC 방법은 높은 accuracy를 보여주지만, 낮은 detectability를 나타냈다(그림 4-2-1).

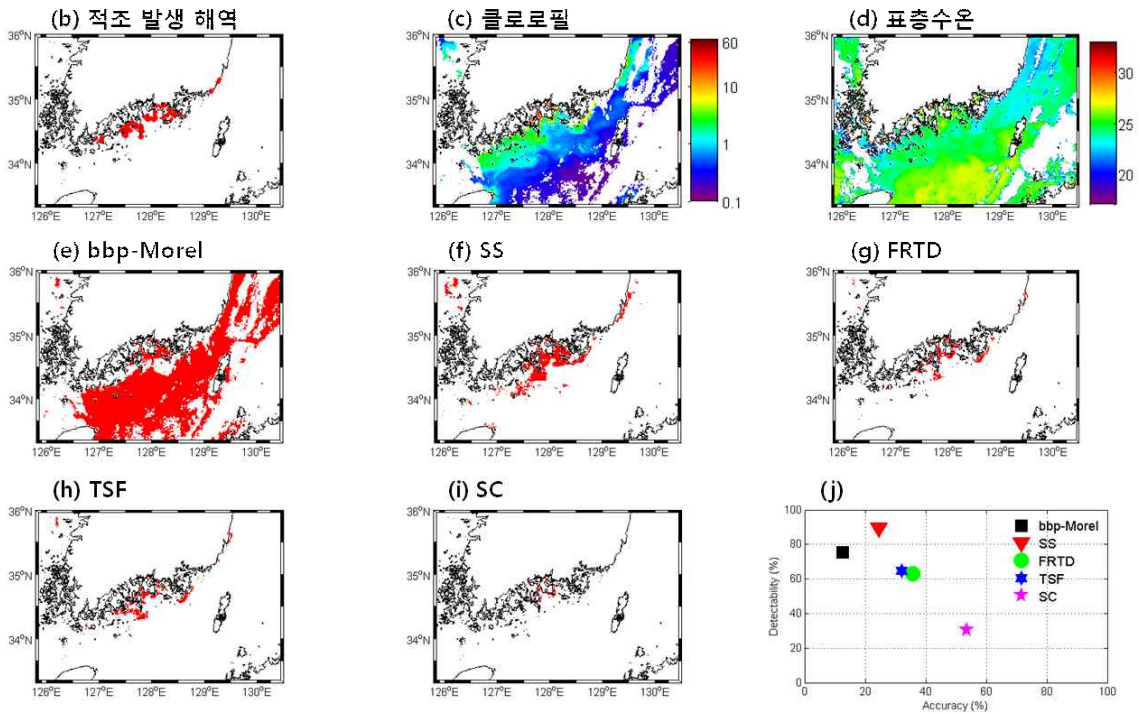


그림 4-2-1. 2002년 8월 19일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소  $a$  농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과

2003년 유해성 적조는 8월 13일 최초로 옹포 및 남해도 해역에서 발견되어 10월 13일 소멸하기까지 총 62일 동안 존재했다. 적조 발생 해역은 진도에서 강릉연안까지 고밀도로 발달되어지면서 총 215억의 피해를 발생시켰다. 2003년 8월 22일 적조 발생 상황은 완도-거문도와 소리도-거제도 해역은 적조 경보, 거문도-소리도는 적조 주의보 해역이고, *C. polykrikoides* 셀 농도는  $25 \sim 8,200 \text{ cell ml}^{-1}$ 이다(국립수산과학원, 2004). 그림 4-2-2의 RGB 영상에서 적조 발생 해역은 주위보다 진한 색깔을 나타내고, 엽록소 a 농도도 증가되어 나타난다. 적조 발생 주변 해역은  $27^{\circ} \text{C}$  이상의 높은 수온을 나타내고, 현장관측 자료에서도  $25^{\circ} \text{C}$  이상 관측이 되었다(국립수산과학원, 2004). 적조 발생 자료와 MODIS 해상위성 자료를 이용하여 기존의 적조 알고리즘을 적용한 결과, bbp-Morel 방법은 대부분 해역을 적조 발생으로 추정했고, SS와 FRTD 방법은 완도에서 부산까지 엽록소 a 농도가 상대적으로 높은 해역을 적조 발생해역으로 추정했으며, TSF 방법은 부산 부근 해역을 적조 발생으로 추정했고, SC 방법은 나로도-통영-부산 해역을 적조 발생해역으로 추정했다. TSF 방법은 적조를 효과적으로 탐지하고 못했으면, 나머지 방법들도 30% 이하의 accuracy를 나타냈다(그림 4-2-2).

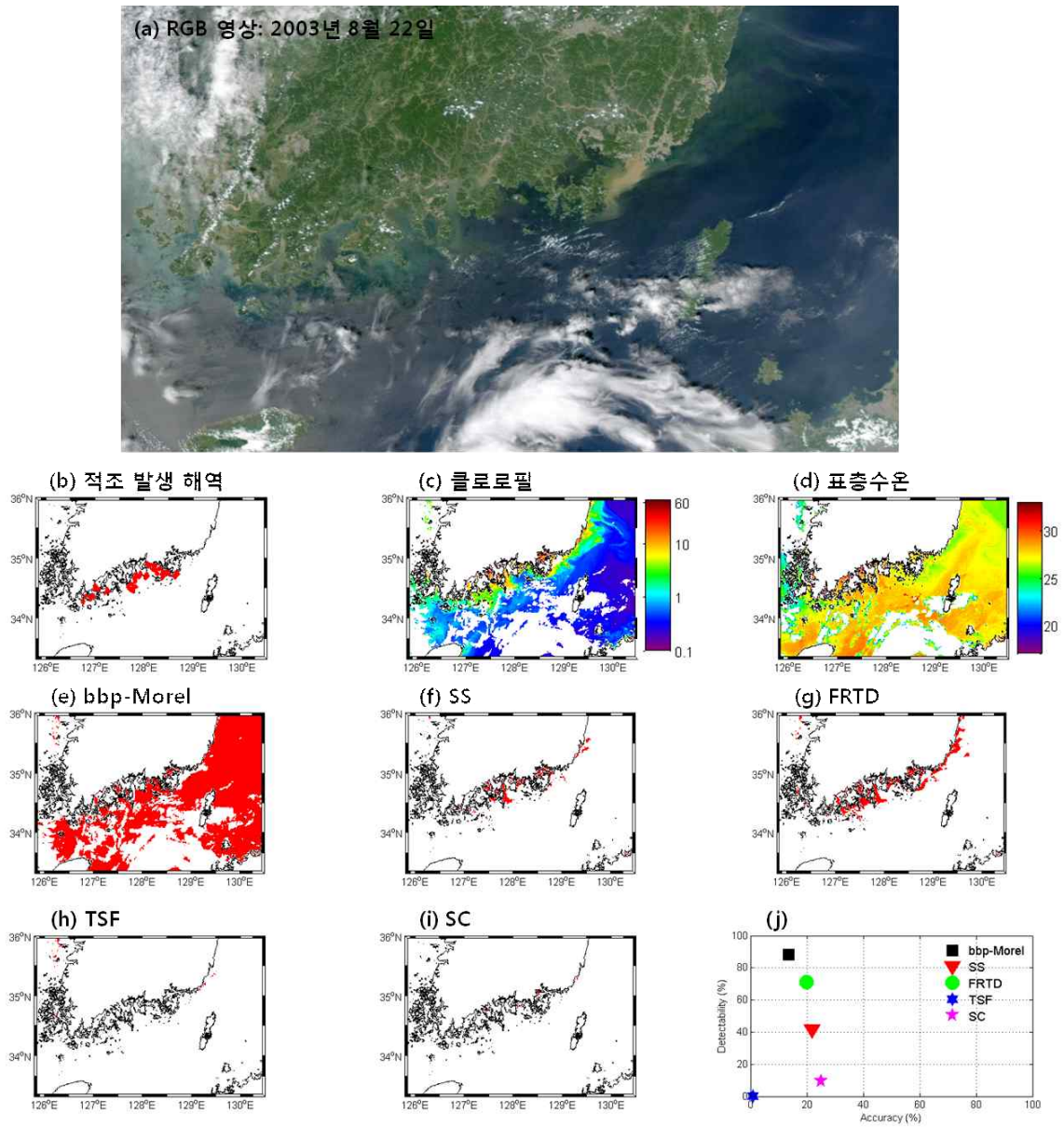


그림 4-2-2. 2003년 8월 22일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소  $a$  농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과

2003년 10월 2일 적조 발생 상황은 진도-완도, 고흥, 거제 동측-기장 해역은 적조 주의보, 완도-고흥, 소리도-거제동측은 적조 경보 해역으로 발령되었고, *C. polykrikoides* 셀 농도는 상대적으로 낮은  $10 \sim 7,000 \text{ cell ml}^{-1}$ 을 나타냈다(국립수산과학원, 2004). 그림 4-2-3의 RGB 영상에서 적조 발생 해역은 진한 녹색 또는 검은색을 띠고 있으며, 소리도 외해에 거대한 적조 패치가 발견되었다. 적조 발생의 엽록소 a 농도도 상대적으로 높은  $.5 \text{ mg m}^{-3}$ 을 나타내고 있지만, 수온은 상대적으로 낮고( $< 23^\circ \text{ C}$ ), 현장관측 자료에서도  $21 \sim 23^\circ \text{ C}$ 로 낮은 수온이 관측되었다(국립수산과학원, 2004). 적조 발생 자료와 MODIS 해색위성 자료를 이용하여 기존의 적조 알고리즘을 적용한 결과, bbp-Morel 방법은 대부분 해역을 적조 발생으로 추정했고, FRTD과 TSF 방법은 연구해역 서쪽부터 부산까지 엽록소 a 농도가 상대적으로 높은 해역을 적조 발생해역으로 추정했으며, SS 방법은 나로도-부산 부근 해역을 적조 발생으로 추정했고, SC 방법은 소리도-거제 부근 해역을 적조 발생해역으로 추정했다. bbp-Morel, FRTD, TSF 방법은 상대적으로 높은 detectability를 보여주고, SS와 SC 방법은 낮은 detectability를 나타내지만, 모든 적조 탐지 방법들은 20% 이하의 accuracy를 나타냈다(그림 4-2-3).



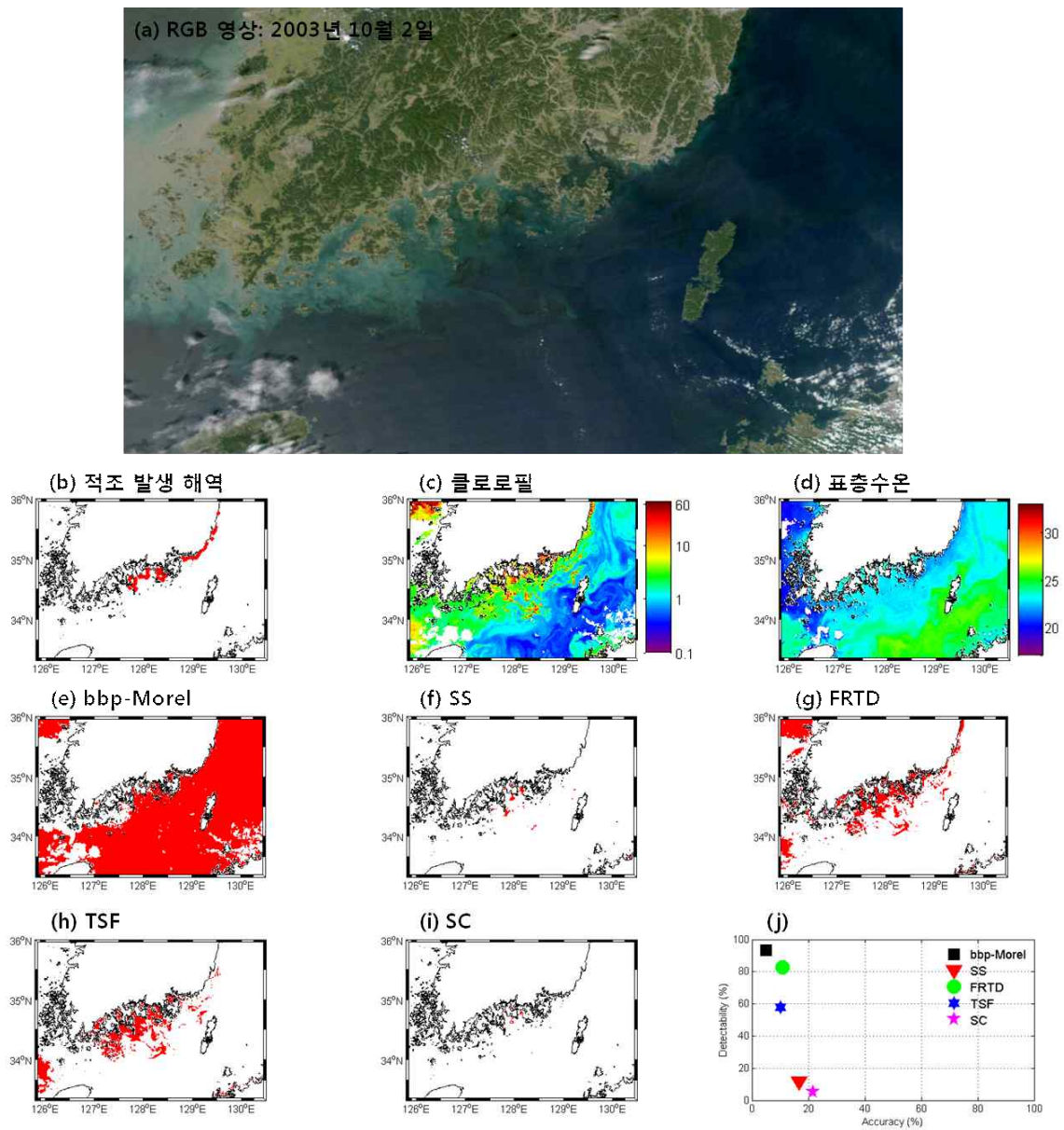


그림 4-2-3. 2003년 10월 2일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소  $a$  농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과



2004년 유해성 적조는 8월 5일 외나로도에서 발견되어 9월 4일 소멸되기까지 30일 동안 완도 부근 해역에서 거제 해역까지 발달되면서 총 1.2억의 피해를 발생시켰다. 2004년 8월 6일 적조 발생 상황은 고흥과 거제 부근 해역에서 발생했고, 거제 서측은 적조 주의보로 거제 동측은 적조 경보가 발령되었다. *C. polykrikoides* 셀 농도는 상대적으로 낮은  $20 \sim 3,100 \text{ cell ml}^{-1}$ 을 나타냈다(국립수산과학원, 2005). 그림 4-2-4.에서 적조 발생은 지역적으로 협소하여 RGB 영상에서 뚜렷하게 보이지 않을 뿐만 아니라, 엽록소 a 농도 또한 뚜렷하게 증가된 해역을 나타내지 않는다. 표층수온은 외해에서  $27^{\circ}\text{C}$  이상의 높은 수온을 나타내지만, 연안역은 외해보다 상대적으로 낮은  $26^{\circ}\text{C}$  이하를 나타내고, 현장관측 자료에서도  $21 \sim 26^{\circ}\text{C}$ 로 낮은 수온이 관측되었다(국립수산과학원, 2005). 적조 발생 자료와 MODIS 해상위성 자료를 이용하여 기존의 적조 알고리즘을 적용한 결과, bbp-Morel 방법은 대부분 해역을 적조 발생으로 추정했고, FRTD과 TSF 방법은 연구해역 서쪽해역을 적조 발생해역으로 추정했으며, SS와 SC 방법은 부산 부근 해역을 적조 발생으로 추정했다. 모든 적조 탐지 방법들은 0% 이하의 accuracy와 40% 이하의 detectability를 나타냈다(그림 4-2-4).

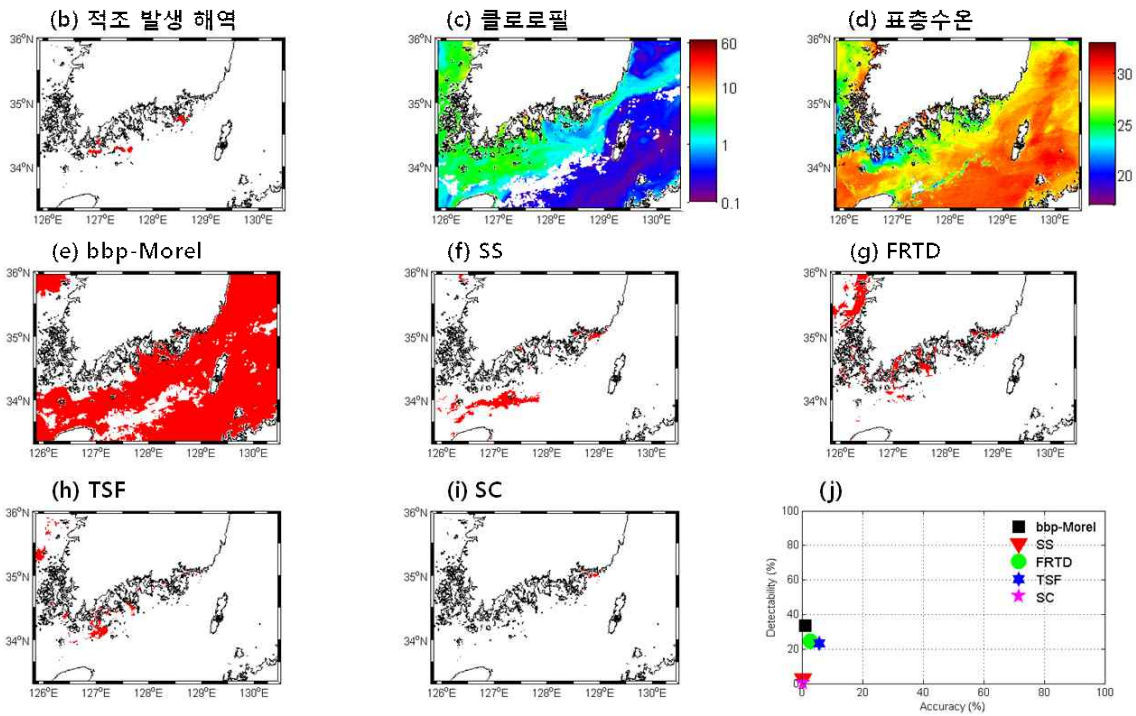
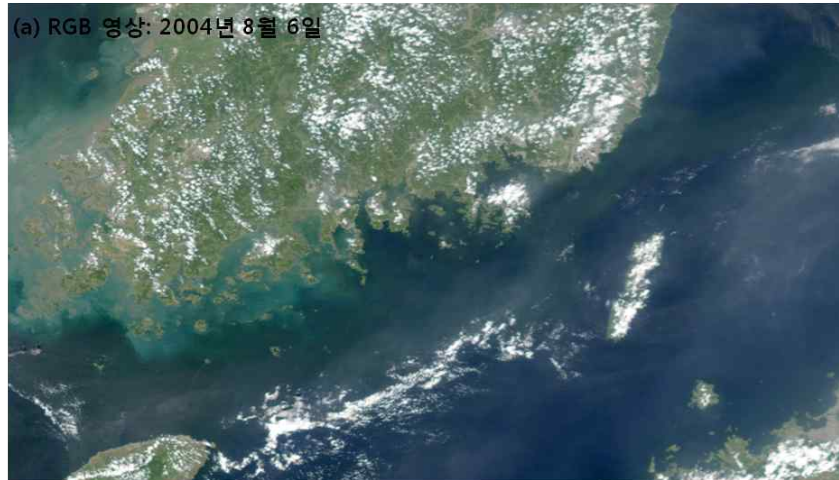


그림 4-2-4. 2004년 8월 6일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소  $a$  농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과

2007년 유해성 적조는 7월 31일 외나로도에서 발견되어 9월 16일 소멸되기까지 48일 동안 완도부근 해역에서 기장 해역까지 발달되면서 상대적으로 높은 피해를 발생시켰다(총 115억). 2007년 8월 15일 적조 발생 상황은 완도-소리도 및 거제 동측 부근 해역은 적조 주의보, 소리도-거제도 부근 해역은 적조 경보가 발령되어졌고, *C. polykrikoides* 셀 농도는 상대적으로 높은  $20 \sim 15,000 \text{ cell ml}^{-1}$ 을 나타냈다(국립수산과학원, 2008). 그림 4-2-5의 RGB 영상에서 적조 발생 해역은 진한 녹색 또는 검은색을 띠고 있으며, 엽록소 a 농도도 외해에 비해 상대적으로 높은  $.5 \text{ mg m}^{-3}$ 을 나타냈다. 수온은 연안역이 외해에 비해서 상대적으로 낮지만 적조가 발생한 해역은 상대적으로 높은  $23 \sim 27^\circ \text{C}$ 로 관측되었다(국립수산과학원, 2008). 적조 발생 자료와 MODIS 해색 위성 자료를 이용하여 기존의 적조 알고리즘을 적용한 결과, bbp-Morel 방법은 대부분 외해 해역을 적조 발생으로 추정했고, 나머지 다른 방법들은 여수에서 거제 부근 해역을 적조 발생 해역으로 추정했다. FRTD과 TSF 방법은 상대적으로 높은 accuracy와 detectability를 보였고, SC 방법은 상대적으로 낮은 정확도를 나타냈다(그림 4-2-5).

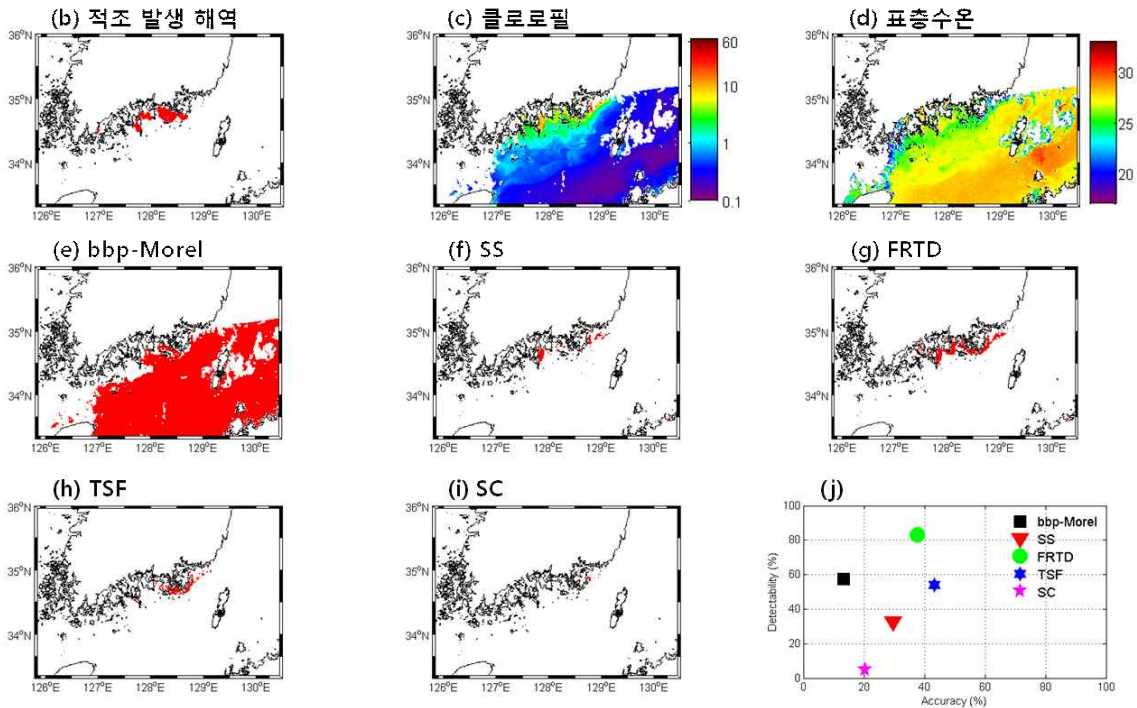
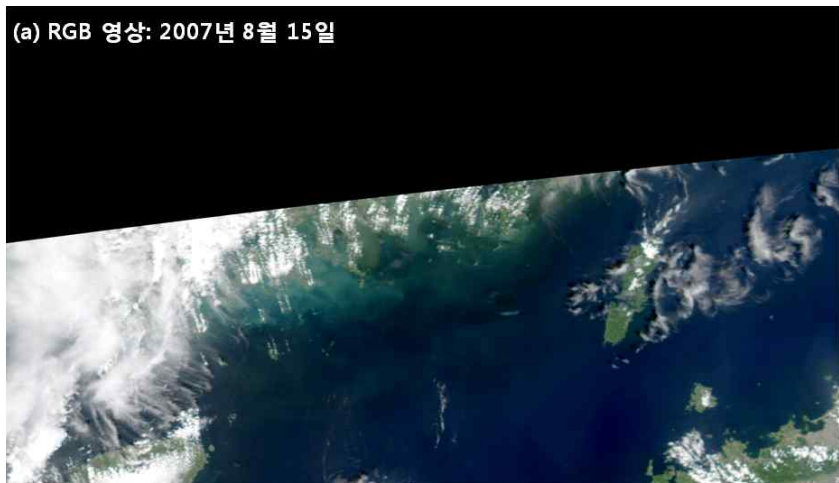


그림 4-2-5. 2007년 8월 15일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소  $a$  농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과

2007년 8월 21일 적조 발생 상황은 완도-소리도 부근 해역은 적조 주의보, 소리도-거제 동측 부근 해역은 적조 경보가 발령되었고, *C. polykrikoides* 셀 농도는 상대적으로 높은  $10\sim 12,500\text{ cell ml}^{-1}$ 을 나타냈다(국립수산과학원, 2008). 그림 4-2-6의 RGB 영상에서 적조 발생 해역은 진한 녹색 또는 검은색을 띠고 있으며, 엽록소 a 농도는 적조 발생은 상대적 낮고 상대적으로 거제 동측 해역이 상대적으로 높은  $.5\text{ mg m}^{-3}$ 을 나타냈다. 수온은 상대적으로 높은  $25^{\circ}\text{C}$  이상을 나타내고, 현장관측 자료에서 이와 유사하게  $25\sim 29^{\circ}\text{C}$ 가 관측되었다(국립수산과학원, 2008). 다양한 적조 탐지 방법 적용 결과, bbp-Morel 방법은 상대적으로 엽록소 a 농도가 높은 해역을 적조 발생으로 추정했고, SS와 FRTD 방법은 완도-부산 연안 해역을 적조로 추정했으며, TSF와 SC 방법은 여수-부산 부근 해역을 추정했다. bbp-Morel 방법은 높은 detectability를 나타내지만, 낮은 10%보다 낮은 accuracy를 보이고, 나머지 방법들도 40% 보다 낮은 accuracy를 나타냈다(그림 4-2-6).

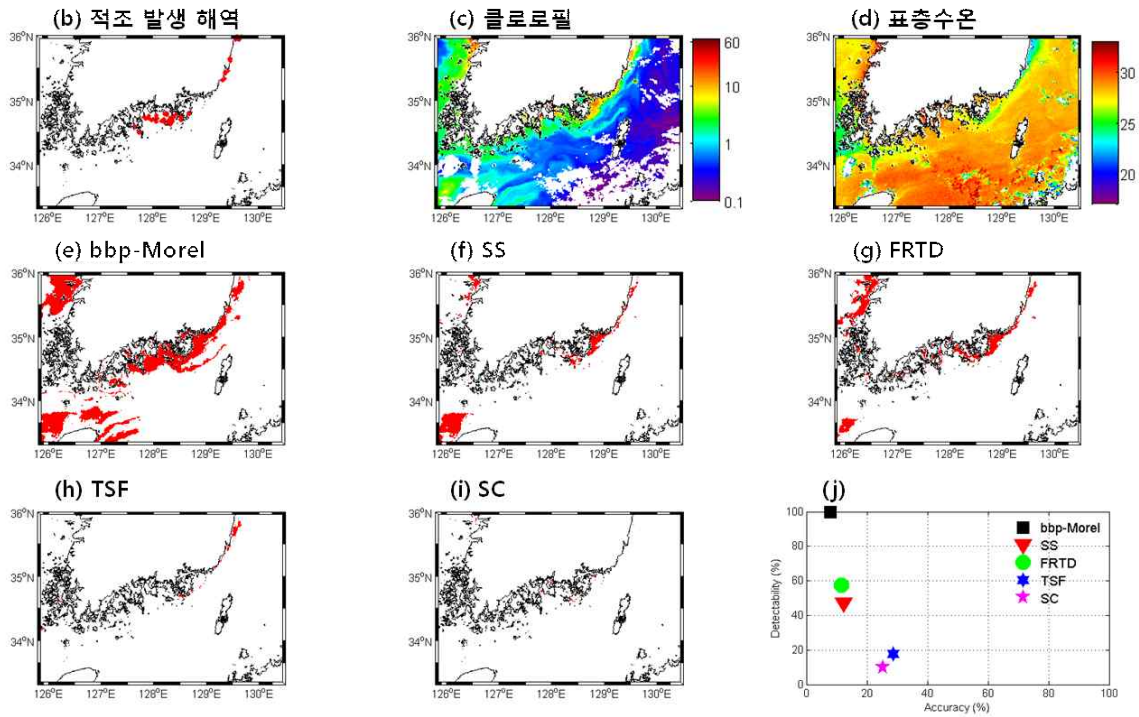


그림 4-2-6. 2007년 8월 21일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소  $a$  농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과

2012년 유해성 *C. polykrikoides* 적조는 7월 27일 외나로도에서 발견되어 9월 19일 소멸되었다가 10월 2일 다시 재 발생하여 10월 22일 소멸되기까지 75일 동안 대한민국 남해안뿐만 아니라 서해까지 발생하면서 총 44억 피해를 발생시켰다. 2012년 10월 15일 적조 발생 상황은 나로도-거제도 부근 해역은 적조 주의보가 발령되었고, *C. polykrikoides* 셀 농도는  $60 \sim 9,600 \text{ cell ml}^{-1}$ 을 나타냈다(국립수산과학원, 2013). 그림 4-2-7의 RGB 영상에서 적조 발생 해역은 진한 녹색 또는 검은색을 띠고 있으며, 엽록소 a 농도는 여수-거제도 부근 해역이 상대적으로 높은 농도를 나타냈다. 수온은 연안역이 외해에 비해서 상대적으로 낮아서  $20^{\circ} \text{C}$  내외의 수온을 나타내고, 현장관측 자료에서도 이와 유사하게 관측되었다( $20 \sim 21^{\circ} \text{C}$ ). 적조 탐지 알고리즘 비교에서, bbp-Morel 방법은 대부분 해역을 적조 발생으로 추정했고, FRTD 방법은 엽록소 a 농도가 상대적으로 높은 연안을 적조 발생 해역으로 추정했고, TSF 방법은 대부분 해역에서 적조가 없는 것으로 추정했으며, SS와 SC 방법은 여수-부산 부근 해역을 적조 발생 해역으로 추정했다. bbp-Morel과 FRTD는 높은 detectability를 나타내지만, 10% 미만의 accuracy을 보이고, 나머지 방법들과 이와 유사하게 낮은 accuracy를 나타냈다(그림 4-2-7).



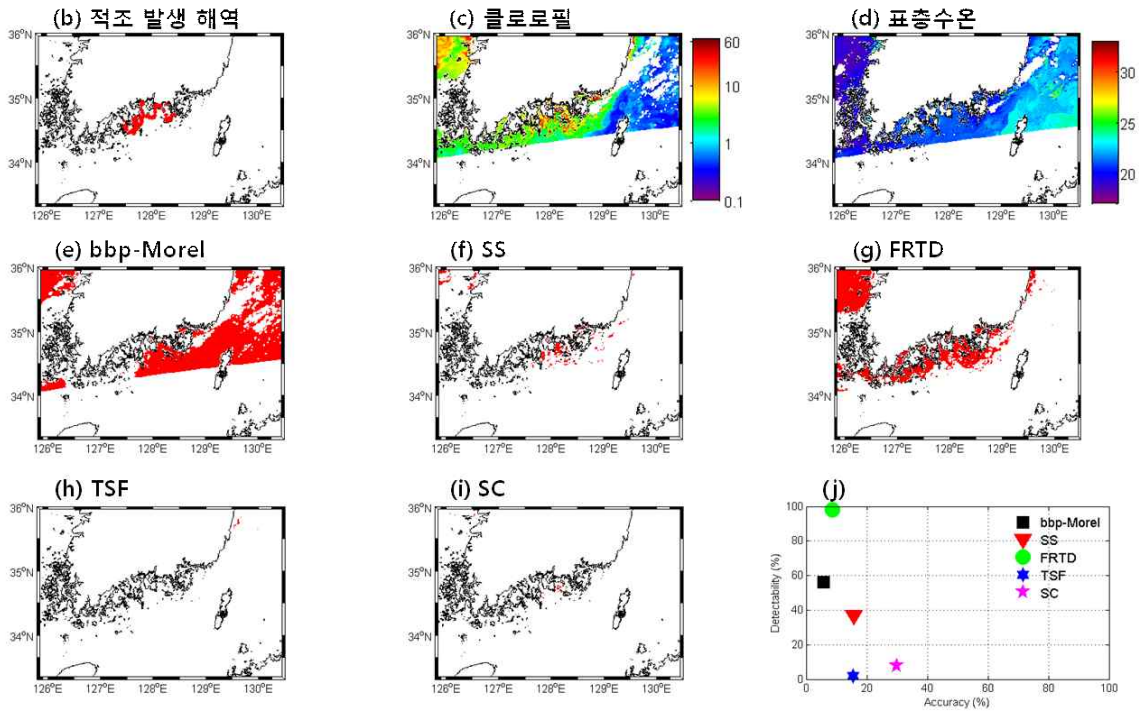


그림 4-2-7. 2012년 10월 15일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소  $a$  농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과



2013년 유해성 *C. polykrikoides* 적조는 6월 26일 외나로도에서 발견되어 9월 26일 소멸되기까지 93일 동안 대한민국 남해안뿐만 아니라 동해까지 발생하면서 총 156억 피해를 발생시켰다(그림 6-1-5, 2-1-6, 2-1-7). 2013년 8월 6일 적조 발생 상황은 나로도-거제, 기장-포항 부근 해역은 적조 경보, 거제-기장 및 영덕 부근 해역은 적조 주의보가 발령되었고, *C. polykrikoides* 셀 농도는 4 ~ 35,000  $cell\ ml^{-1}$ 을 나타냈다(<http://www.nfrdi.re.kr/redtideInfo>). 그림 4-2-8의 RGB 영상에서 적조 발생 해역은 진한 녹색 또는 검은색을 띠고 있으며, 엽록소 a 농도는 여수-부산 부근 해역이 상대적으로 높은 농도를 나타냈다. 수온은 연안역이 외해에 비해서 상대적으로 낮았고, 부산 부근 해역은 냉수대 발달로 20° C 내외의 낮은 수온을 나타내고, 현장관측 자료는 해역에 따라 많은 차이를 나타냈다(17 ~ 28° C). 적조 탐지 알고리즘 비교에서, bbp-Morel 방법은 대부분 해역을 적조 발생으로 추정했고, 나머지 방법은 여수-부산 부근 해역을 적조 발생 해역으로 추정했다. 고농도 및 광역의 적조가 발생되어 있어서 대부분의 적조 탐지 방법에서 40% 내외의 accuracy를 나타냈지만, SC 방법은 30% 미만의 detectability를 나타냈다(그림 4-2-8).

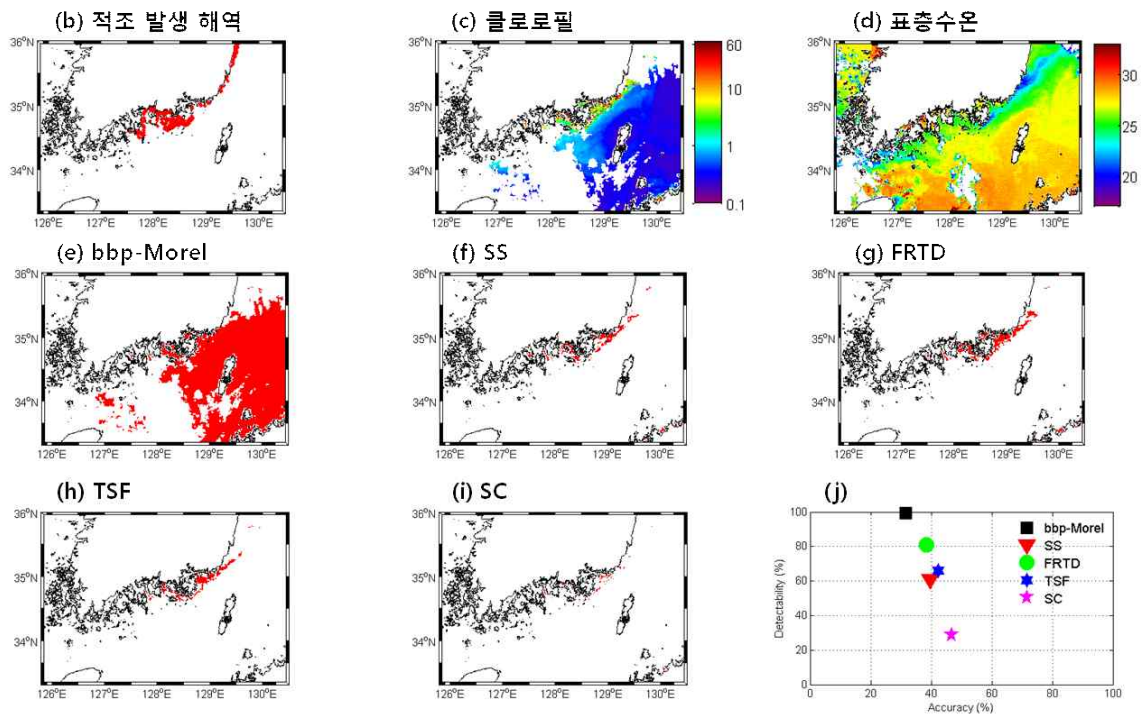
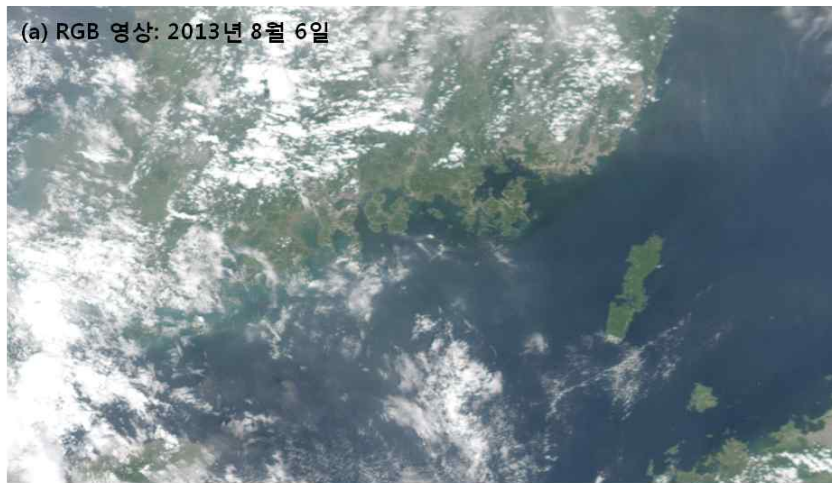


그림 4-2-8. 2013년 8월 6일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소  $a$  농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과

8월 14일 적조 발생 상황은 나로도-거제, 기장-울진 부근 해역은 적조 경보, 거제-기장 및 울진 북쪽 부근 해역은 적조 주의보가 발령되었고, *C. polykrikoides* 셀 농도는  $150 \sim 17,000 \text{ cell ml}^{-1}$ 을 나타냈다(<http://www.nfrdi.re.kr/redtideInfo>). 그림 4-2-9의 RGB 영상에서 적조 발생 해역은 진한 녹색 또는 검은색을 띠고 있으며, 엽록소 a 농도는 여수 부근과 냉수대 발달 해역에서 상대적으로 높게 나타났다. 수온은 연안역과 외해 뚜렷이 구분되고 특히 거제 및 부산 부근에서 냉수대가 발달해 있으며( $20^{\circ} \text{C}$  내외), 현장 관측 자료에서는  $17 \sim 28^{\circ} \text{C}$ 의 다양한 범위를 나타냈다. 적조 탐지 알고리즘 비교에서, bbp-Morel 방법은 대부분 해역을 적조 발생으로 추정했고, SS, FRTD와 TSF 방법은 남해안 전역에 걸쳐 적조 발생 해역으로 추정했고, SC 방법은 여수 및 부산 부근 해역을 적조 발생 해역으로 추정했다. 고농도 및 광역의 적조가 발생되지만 대부분의 적조 탐지 방법에서 30% 미만의 accuracy를 나타냈다(그림 4-2-9).

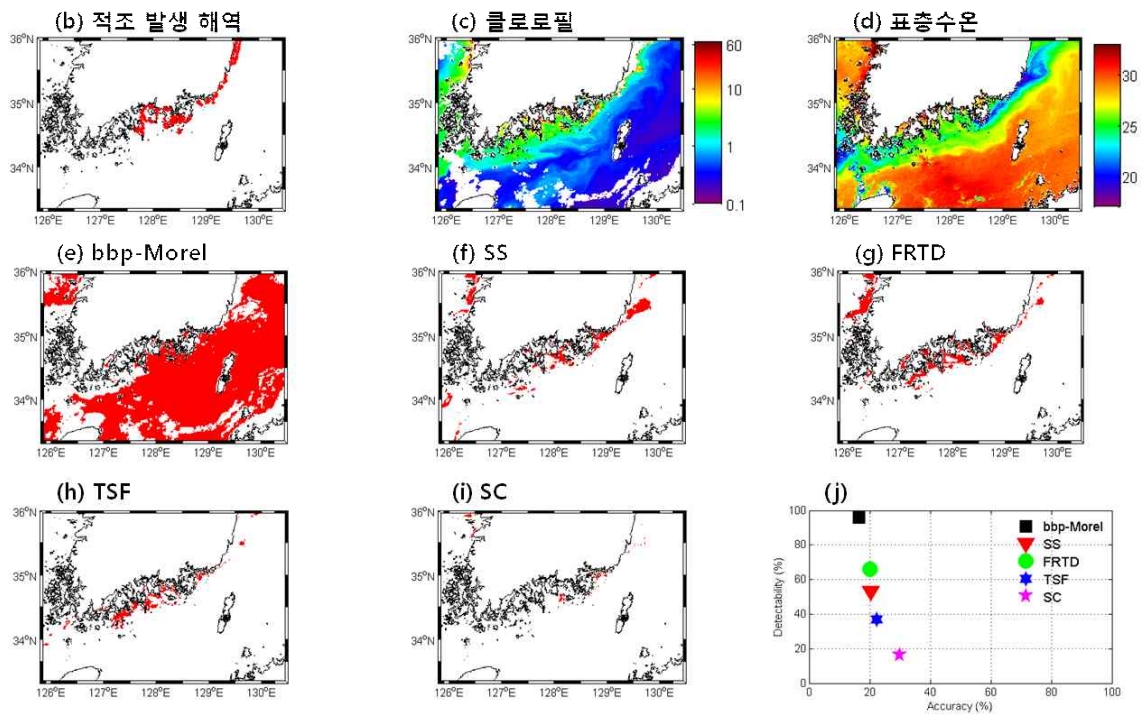
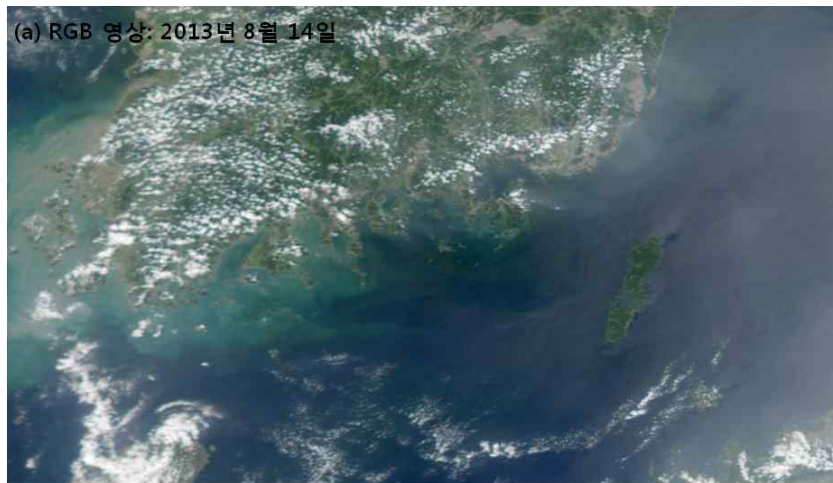


그림 4-2-9. 2013년 8월 14일 R(a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소  $a$  농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과

## 제 5 장 적조종 광학적 특성 분석

### 제 1 절 적조종 배양

#### 1. *C. polykrikoides*의 흡광도 분석

한국해양과학기술원 남해연구소 시료도서관에서 2014년 7월 분양 받은 *C. polykrikoides*, *Alexandrium tamarense*, *Scrippsiella trochoidea*와 2014년 8월 남해안 현장 조사에서 채수한 해수로부터 분리한 *Akashiwo sanguinea*을 실험실의 다단실 배양기에서 단일 배양하였다(온도: 18 ~ 22°C; 광량: 250 ~ 260  $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ; 명암주기: 12L:12D). 남해안에서 유해 적조를 일으키는 것으로 알려진 이 와편모조류 네 종(그림 5-1-1)들의 고유 흡광 특성을 비교·분석하기 위하여 앞서 설명하였던 입자상 물질의 흡광 분석과 동일한 방법인 wet filter technique 방법(Trüper and Yentsch, 1967)으로 흡광도를 측정하였다. 배지를 만드는데 사용한 여과해수로 reference sample을 만들었으며, 배양된 네 종의 샘플은 다양한 비율로 희석하거나 농축하여 각각 다른 엽록소 a 농도로 여과할 샘플을 만들었다. 다양한 비율의 적조종 샘플을 Whatman 25 mm GF/F에 여과시켜 흡착시킨 후 dual beam spectrophotometer(Cary 300)를 이용하여 optical density( $O.D_{total}$ )를 측정하였다. 여과지에 여과된 입자상 물질 흡광을 측정한 뒤 methanol을 이용하여 여과지에 흡착된 적조종의 색소를 추출해 내었고 methanol로 다시 여과하여 입자상 부유물질의 optical density( $O.D_{ss}$ )를 측정하였다. 단위 엽록소 a 농도 당 흡광 계수를 구하기 위해 각 샘플의 엽록소 a 농도를 측정하였는데, 흡광도 측정 샘플과 동일한 샘플로 동일한 종류의 여과지에 흡착시켜 90% acetone에 24시간 동안 냉암 보관하여 엽록소 a 색소를 추출한 뒤 10-AU(Tuner Design)를 이용하여 엽록소 a 농도를 측정하였다. 이와 같은 방법으로 얻어진 optical density와 엽록소 a 농도를 이용하여 식물플랑크톤의 고유 광 특성을 나타내는  $a_{ph}(m^{-1})$ ,  $a^*_{ph}(m^2 mg^{-1})$  값을 산출하였다.

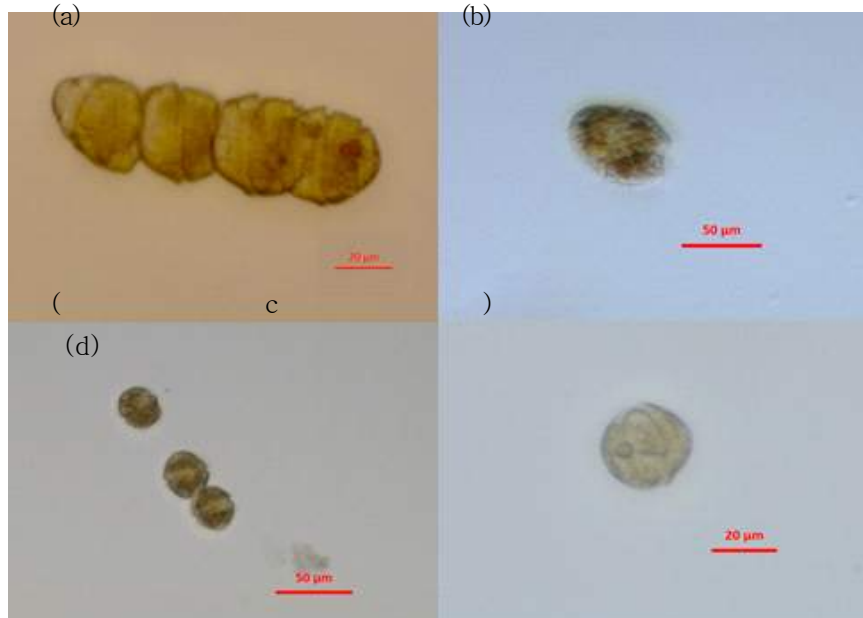


그림 5-1-1. 한국 연안에서 적조를 일으키는 4가지 종들. (a) *Cochlodinium polykrikoides*, (b) *Akashiwo sanguinea*, (c) *Alexandrium tamarense*, (d) *Scrippsiella trochoidea*.

## 제 2 절 적조종 흡광자료 분석

### 1. 적조종 광 특성 파악 및 분석

식물플랑크톤의 흡광 특성은 각 종들이 고유하게 지니고 있는 색소의 구성에 따라 다르게 나타난다. 즉, 식물플랑크톤 분류군에 따라 파장 특성의 식별이 가능하다. 남해안에서 유해 적조를 일으키는 네 가지 적조종의 고유 흡광 특성을 살펴보기 위하여 다양한 엽록소 a 농도로 배양된 적조종 샘플을 이용하여 각 종의 흡광 특성을 파악하였다. 그 결과, 가시광역 파장대(400 ~ 700 nm)에서의 흡광 계수는 엽록소 a 농도와 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다(그림 5-2-1). 즉, 엽록소 a 농도가 증가함에 따라 적조종의 흡광 계수도 증가하는 것으로 나타났다. 단위 엽록소 a 농도 당 흡광계수 스펙트럼, 즉 비흡광 계수 스펙트럼은 다음과 같았다(그림 5-2-2).

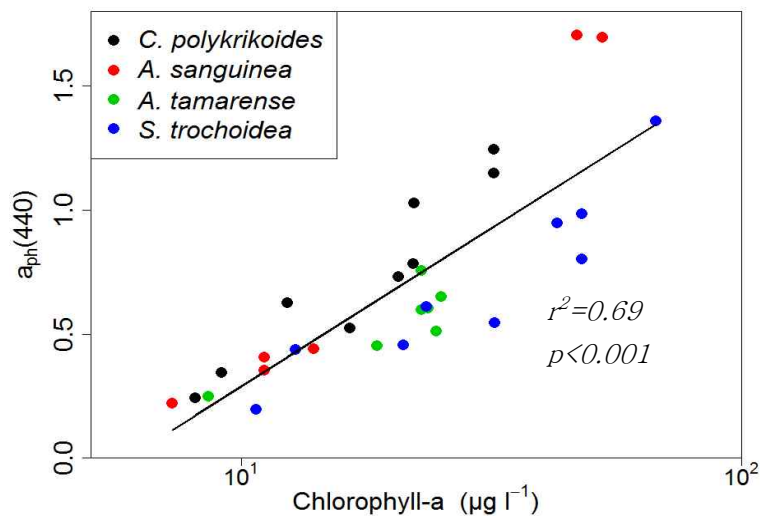


그림 5-2-1. 440 nm에서의 흡광 계수와 엽록소 a 농도( $\mu\text{g l}^{-1}$ )와의 관계



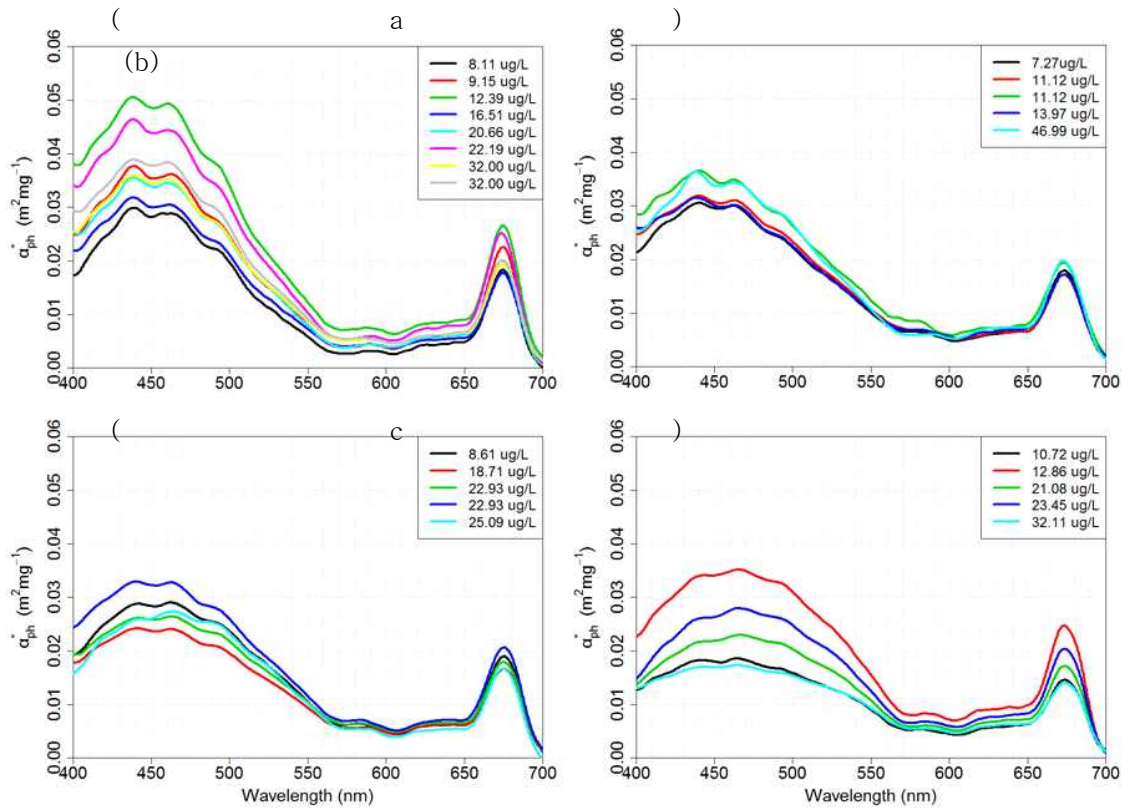


그림 5-2-2. (a) *Cochlodinium polykrikoides*, (b) *Akashiwo sanguinea*, (c) *Alexandrium tamarense*, (d) *Scrippsiella trochoidea*의 비흡광 계수( $m^2 mg^{-1}$ ) 스펙트럼

네 가지 적조종의 흡광 스펙트럼은 공통적으로 400 ~ 500 nm와 650 ~ 700 nm에서 주요 흡광대를 보이는데 이는 식물플랑크톤이 공통적으로 가지는 엽록소 a 색소에 의한 특징이며 네 종 모두 600 nm 부근에서 최소 흡광을 보이고 있다. 주요 흡광대 구간 중 440, 465, 495 nm와 675 nm 파장에서 흡광 피크를 보이는데 440 nm와 675 nm는 주 흡광대, 465 nm와 495 nm는 보조 흡광대로서, 이 흡광 파장들 중에서 최대 흡광 피크를 보이는 파장이 종 별로 차이를 보이고 있다. *C. polykrikoides*와 *A. sanguinea*의 흡광 스펙트럼 모양은 유사한 패턴을 보였는데 *C. polykrikoides*와 *A. sanguinea*는 440 nm에서, *A. tamarense*와 *S. trochoidea*는 465 nm에서 최대 흡광 피크를 보였다. 또한, 블루 계열의 400 ~ 440 nm와 그린 계열의 520 ~ 550 nm와 같은 특정 파장대에서 종 별로 기울기의 차이를 보였는데 이는 흡광이 급격하게 증가하거나 감소함에 따라 나타나는 차이이다. 네 가지 적조종 중에 *C. polykrikoides*의 흡광 값이 가장 급격하게 증가하거나 감소하여 급격한 기울기를 가지는 스펙트럼 모양을 나타내었다. 이와 대조적으로 *S. trochoidea*는 전체적으로 완만한 증감을 보여 흡광 값의 기울기가 완만한 형태를 보였다. 이 결과, 주요 흡광이 나타났던 400 ~ 500 nm와 650 ~ 700 nm파장대의 흡광 값의 차는 *C. polykrikoides*가 가장 큰 반면에 *S. trochoidea*의 두 파장대의 흡광 값의 차

는 가장 작게 나타났다(그림 5-2-3).

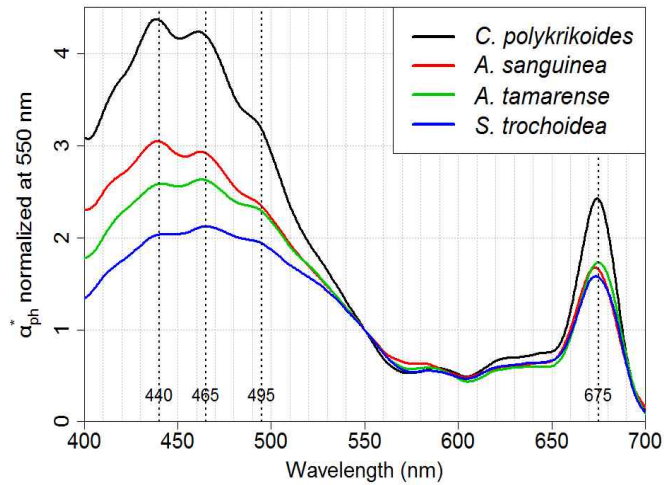


그림 5-2-3. 550 nm 파장에서 규격화된 적조 4종의 비흡광 계수 스펙트럼

배양된 적조종으로 부터 얻은 흡광 스펙트럼과 2015년 8월 남해안 현장조사에서 수집된 R정점의 흡광스펙트럼은 그림 5-2-4와 같았다. 검정색 선으로 나타낸 R정점의 흡광 스펙트럼과 빨간색 실선으로 나타낸 배양된 *C. polykrikoides*의 흡광 스펙트럼은 상당히 유사한 패턴을 보였다. 이와 달리 적조가 발생하지 않은 정점들의 흡광 스펙트럼에서는 적조종에서 나타났던 고유한 흡광 피크가 보이지 않았으며, 특정 파장대에서의 흡광 스펙트럼의 기울기도 적조종과 상당한 차이를 보였다. 실제로 엽록소 a 농도가 최대  $27.33 \mu\text{g l}^{-1}$ 로 나타났던 R정점에서 적조종 *C. polykrikoides*는 최대 90% 우점하는 것으로 나타났다. 따라서 적조가 발생한 R정점에서의 흡광 스펙트럼은 적조종 *C. polykrikoides*의 고유 광 특성을 나타낸다고 할 수 있다.

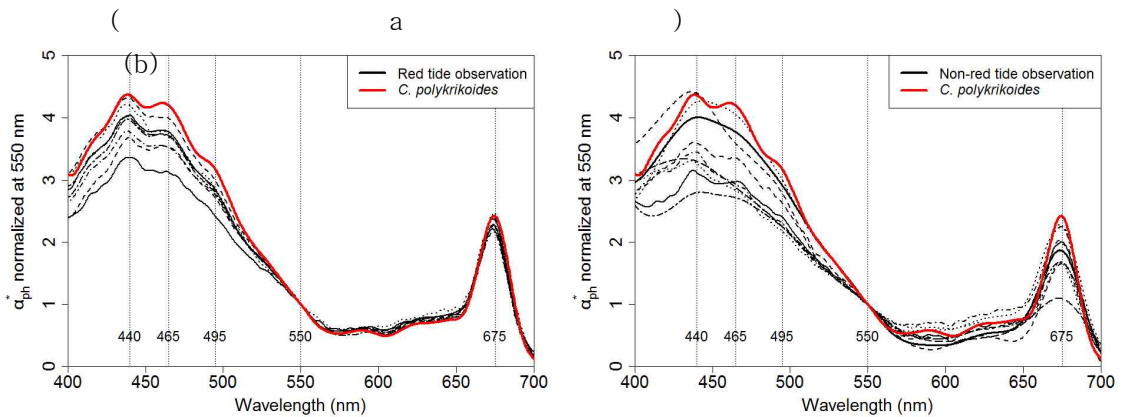


그림 5-2-4. (a) 배양된 *C. polykrikoides*의 흡광 스펙트럼과 적조가 발생한 R정점에서의 흡광 스펙트럼 비교, (b) 배양된 *C. polykrikoides*의 흡광 스펙트럼과 적조가 발생하지 않은 정점에서의 흡광 스펙트럼 비교.

마지막으로, 적조 탐지 알고리즘 개선 연구에는 적조종 각각의 비역산란 계수 ( $bb^*_{ph}$ )도 필요하다. 비역산란 계수는 비흡광 계수와 마찬가지로 식물플랑크톤 분류군에 따라 달라진다. 또한, 외편모류 적조종의 역산란 계수는 규조류의 역산란 계수보다 크며 적조가 발생되어 엽록소 a의 농도가 높은 해역이 일반적인 해역보다 낮은 역산란 계수를 가지는 것으로 알려져 있다(Hui et al., 2011). 그러나 배양 적조종을 이용하여 정확한 비역산란 계수( $bb^*_{ph}$ )를 측정하는 것은 거의 불가능한 일이기 때문에 차후 비역산란 계수에 대한 민감도 분석을 실시할 필요가 있다.

본 연구에서는 남해안에서 주로 적조를 발생시키는 종들의 고유 광 특성(Inherent Optical Properties, IOPs) 중 하나인 흡광 계수를 파악하여 적조 탐지 알고리즘 개선 연구에 활용하고자 하였다. 이번 흡광 실험과 현장 관측을 통해 배양된 적조종의 흡광 스펙트럼과 적조가 발생한 해역에서의 흡광 스펙트럼이 상당한 유사성을 보이는 것을 확인하였으며 앞으로 배양에 의해 발견한 적조종의 고유 흡광 특성을 이용하여 적조 탐지 알고리즘 개선 연구에 활용할 계획이다.

## 2. 배양된 적조종의 광 특성을 활용한 반사도 시뮬레이션 모델자료 비교 분석

배양된 적조종의 흡광 스펙트럼 자료를 이용하여 반사도 시뮬레이션을 실시한 결과, 각 종의 고유 흡광 특성이 반사도 시뮬레이션 결과에 적용되어 나타났다(그림 5-2-5). *C. polykrikoides*의 흡광 스펙트럼은 400 ~ 500 nm에서 가장 급격하게 흡광 값이 증감 패턴을 보였으며, 570 nm에서 배양된 네 종 가운데 가장 큰 흡광 값을 나타냈다.

반사도는 흡광이 증가할수록 감소하는 경향을 보이므로 *C. polykrikoides*의 반사도는 다른 종들에 비해 400 ~ 500 nm에서 가장 낮은 반사도를 나타냈고 400 ~ 570 nm에서 급격한 반사도의 증가를 보였다. 네 종 가운데 *C. polykrikoides*의 570 nm의 반사도가 가장 크게 나타나는 이유는 570 nm 부근의 흡광 계수가 다른 종과 비교하였을 때 가장 작게 나타났기 때문이다.

이처럼 적조생물 종이 갖고 있는 고유한 흡광 특성을 이용한 반사도 시뮬레이션을 통하여 실제로 현장에서 관측되는 적조종의 반사도 특성을 이용하여 보다 정확한 적조 탐지 및 모니터링이 이루어 질 수 있다.

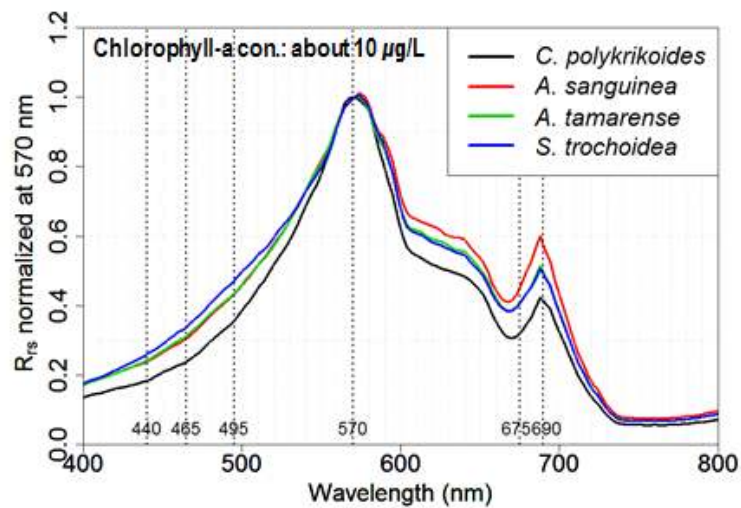


그림 5-2-5. 배양실험 데이터를 이용한 반사도 시뮬레이션 결과

## 제 6 장 적조 탐지 알고리즘 개발

### 제 1 절 적조 탐지 알고리즘 개발의 필요성

#### 1. 기존 적조 탐지 방법의 문제점

본 연구에서는 기존 적조 탐지 방법에 대한 서술과 함께 평가 연구를 수행하였다. 총 6개의 기존의 적조 탐지 방법 중에서 bbp-Morel(Morel 1988; Carder et al., 1999; Canizzaro et al., 2008; Tomlinson et al., 2009)과 SS(Wynne et al., 2008; Tomlinson et al., 2009) 방법은 미국 걸프만에서 *K. brevis* 적조 탐지를 위해 개발되었고, TSF(Kim et al., 2009), FRTD (Suh et al., 2004), SC(Son et al., 2011; 손 외 2012) 방법들은 대한민국 남해안에서 발생하는 *C. polykrikoides* 적조를 탐지하기 위해 개발되었다. 기존의 적조 탐지 방법의 정확도 평가는 적조가 발생한 날짜의 위성자료와 현장관측 자료의 매칭을 통하여 계산하였다. 대부분의 탐지 알고리즘들은 ~30% 미만의 정확도를 나타냈다.

이런 문제를 유발할 수 있는 여러 요인을 살펴보면, 첫째, 국립수산과학원에서 제공하고 있는 적조 속보 적조 현장자료의 불확실성이 있을 수 있다. 적조는 광역의 해역에서 발생했지만, 일부 해역의 자료에 대해서만 보고되었기 때문에 실제 위성에서 관측되어도 현장자료와 매칭이 되지 않기 때문에 적조가 없는 것으로 추정될 가능성이 매우 크다. 그림 6-1-1과 같이 국립수산과학원 적조정보시스템은 양식장 주변 해역을 중심으로 적조에 대한 모니터링을 실시하고 있기 때문에 적조 속보에 보고되지 않은 적조가 외해에 광범위하게 퍼져 있는 것을 파악할 수 없었지만 동일한 날의 인공위성 자료를 통해서 이를 확인 할 수 있었다.

또한 현재 적조 관측 해역 보고 시 육안 관측에 의존하기 때문에 정확한 위치 및 공간 규모에 대해서 부정확성이 존재한다. 둘째, 현장에서 관측이 되었지만 위성관측 시 적조 발생 해역이 이동하였거나 소멸되었을 경우 시·공간적인 매칭이 이루어지지 않을 수 있다. 현재 국립수산과학원에서 제공하고 있는 자료에는 시간에 대한 정보는 포함되어 있지 않다. 셋째, 기존의 적조 탐지 방법들은 *C. polykrikoides* 적조종 광학적 특성을 분석하여 개발된 것이 아니다. 기존의 방법들은 부유물질, 수온 등 환경요인 변화를 탐지 하거나 또는 위성기반 스펙트럼 분석을 통하여 개발된 것들이다(Morel 1988; Carder et al., 1999; Suh et al., 2004; Canizzaro et al., 2008; Wynne et al., 2008; Kim et al., 2009; Tomlinson et al., 2009; Son et al., 2011; 손 외 2012). *C. polykrikoides* 적조종의 광학적 특성에 대한 이해가 없기 때문에 적조 탐지에 대한 정량적이고 객관적인 자료를

제시하기에 힘든 실정이었다. 또한 *C. polykrikoides* 적조종 이외의 적조가 혼합되어 발생하였을 경우 정확한 구분이나 특성을 파악하는데 한계가 있었다.

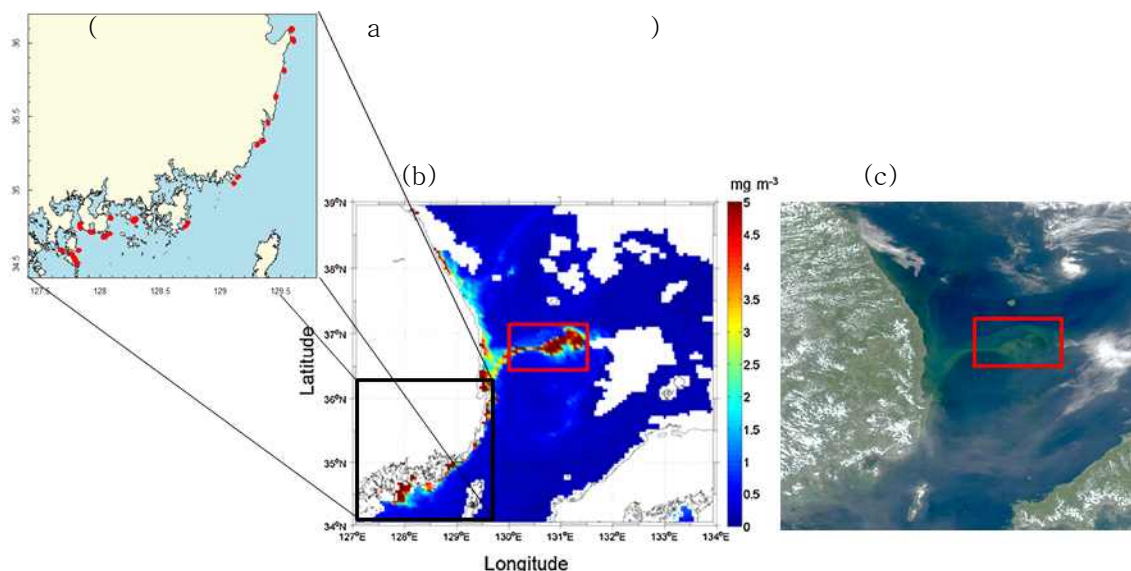


그림 6-1-1. (a) 국립수산과학원 “한국연안의 적조 발생 상황” 의 2007년 8월 17일자 적조 속보, (b) 같은 날의 MODIS Chl 자료(Kim *et al.*, 2016), (c) MODIS true color image

## 2. 적조 탐지 방법 개선 연구

본 연구에서는 기존의 적조 연구에서 제시되었던 문제점에 대해서 정량적이고 객관적인 *C. polykrikoides* 적조 탐지 및 발생 경향 분석 자료를 생산하기 위해 개선된 연구를 수행하였다. 신뢰할 수 있는 자료 생산을 통하여 적조종의 개체군 동적 특성 파악이 가능하게 되며, 환경요인과의 상응성 파악 및 과거 적조 자료 재처리를 통하여 적조 발생 경향 분석이 가능하게 된다. 그리고 발생가능도 분석을 통하여 적조 발생 예상 시기에 대한 자료를 제공하게 되어 효율적인 적조 예측이 가능하게 된다.

- 육안으로 적조 발생 해역 관측 : 적조 발생 해역을 정확히 관측하기 위해서 10-AU 연속관측을 실시했으며 이를 통해 실시간 엽록소 a 농도 이상 해역을 발견하였다. 아울러 그 해역에서 현장관측과 광학측정을 동시 수행하였다.

- *C. polykrikoides* 적조 해역인지 다른 혼합 적조 해역인지 구분 : 1차 년도인 경우 적조 발생해역에서 채집된 다양한 샘플들을 실험실에 가져와 분석을 시행했으나, 그 해역에서 어떤 종들이 존재했는지에 대한 정보가 없었다. 2차 년도에 FlowCam을 이용하여 현장에서 채집된 샘플의 정보를 실시간으로 분석했고 현미경으로 정밀분석을 실시하

여 현장에서 *C. polykrikoides* 적조유무를 파악했다. 또한 채집된 샘플들은 실험실에서 정량·정성 분석을 실시하여 구성종들에 대한 정밀분석을 실시했다.

- 적조 발생 해역과 적조 발생하지 않은 해역의 반사도 구분 : 10-AU 연속관측을 통한 엽록소  $a$  농도 이상 해역에서의 반사도 측정 결과와 정량·정성 분석에 의한 적조종 또는 아닌 종들에 대한 정보를 종합 분석한 뒤, 적조 발생 해역과 발생하지 않은 해역에 대한 신뢰할 수 있는 반사도 차이를 자료로 제시하였다.

- 적조종 흡광 특성 : *C. polykrikoides* 적조종 이외에 여름철 적조를 발생시키는 다양한 종들을 실험실에서 배양하여 농도별 흡광 자료를 측정하였다. 적조종 흡광 분석으로 적조종 간의 유사성 및 차이점을 분석하고, 반사도 모델 개발에 입력 자료로 사용하였다.

- 적조종 광 특성 기반 모델 개발 : 적조종 반사도 모델 개발은 *C. polykrikoides* 적조종 흡광자료와 적조 발생 해역과 유사한 흡광 및 반사 특성을 입력 자료로 사용하여 Hydrolight 시뮬레이션을 이용하여 계산하였다. 계산된 결과와 현장 및 위성자료를 이용하여 비교 분석을 하였다.

이로써 1·2차년도 연구에서는 기존 적조 탐지 방법에 대한 서술과 함께 평가 연구를 수행하였고, 기존의 적조 탐지 연구에서 제시 되었던 문제점을 개선하고 신뢰할 수 있는 자료 생산을 위한 연구를 수행하였다. 3차년도 연구에서는 기존의 인공위성을 활용한 적조 탐지 방법이 안고 있는 문제점을 해결하여 좀 더 정확한 탐지 기술을 개발하기 위하여 적조종 광학적 특성을 면밀히 분석하였다. 그리고 광학적 특성을 기반으로 적조 해역과 적조가 아닌 해역을 구분할 수 있는 간단한 알고리즘을 제시하고자 하였다. 이처럼 적조종의 광학적 특성에 대한 이해를 바탕으로 한 알고리즘을 활용하면 적조 탐지에 대한 정량적이고 객관적인 자료를 제시할 수 있으며 적조종과 비 적조종이 혼합되어 발생한 적조의 경우에도 정확한 구분이나 특성을 파악하는데 도움이 될 수 있다.

### 3. 적조종 광특성 기반 적조 탐지 알고리즘

기존의 인공위성을 활용한 적조 탐지 관련 연구들은 주로 엽록소 농도 이상치를 활용하여 적조를 추정하는 방법을 제시해왔지만 이 같은 방법은 부유물질 농도가 높은 해역에서 한계를 드러낸다. 인공위성으로 연안의 적조를 탐지하면 실제 적조 발생 해역이 아님에도 고농도의 적조처럼 보이는 경우가 흔하게 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 엽록소 추정치를 통한 적조 탐지 방법의 한계를 인지하고, 기존의 적조 연구에서 제시된 문제점을 해결할 수 있으며, 적조를 발생시키는 특정 종을 탐지 할 수 있는 적조



탐지 알고리즘을 개발하기 위한 연구를 진행하였다.

적조종 광특성을 기반으로 개발된 적조 탐지 알고리즘은 신뢰할 수 있는 자료 생산을 통하여 적조종의 개체군 동적 특성 파악이 가능하게 되며, 환경요인과의 상관성 파악 및 과거 적조 자료 재처리를 통하여 적조 발생 경향 분석이 가능하게 된다. 그리고 발생가능도 분석을 통하여 적조 발생 예상 시기에 대한 자료를 제공하게 되어 효율적인 적조 예찰이 가능하게 된다. 본 연구에서는 적조 광특성 자료와 Hydrolight 모델을 활용하여 적조 해역과 적조가 아닌 해역의 반사도를 실제 자연 환경에서의 반사도와 유사하게 모사하였으며 서로 다른 두 해역의 반사도의 차이를 이용하여 적조 탐지를 위한 알고리즘을 개발을 수행하였다. 이처럼 적조를 효율적이고 정확하게 탐지하기 위해 적조종이 갖는 고유한 생물 광학적 특성을 이용하는 방법으로 접근한 연구들을 다수 찾아볼 수 있다(Cannizzaro et al., 2008, Lubac et al., 2008).

Lubac et al (2008) 연구에서는 *Phaeocystis globosa*의 광특성을 이용하여 diatom으로부터 구별하는 방법을 제시하였다. *P. globosa*이 diatom 종들과 흡광 스펙트럼에서 derivative analysis를 실시해 차이를 보이는 파장 찾아냈고 이 특성을 이용하여 두 종을 구별할 수 있는 방법을 제시하였다. 기존의 연구처럼 구별하고자 하는 대상 종들의 흡광 스펙트럼을 활용하기 위해 분석을 실시했다. 그림 6-1-2에서는 적조인 경우와 적조가 아닌 경우의 흡광스펙트럼의 형태를 비교할 수 있다. 그림 6-1-2(a)는 우리나라에서 유해 적조를 일으키는 네 가지 적조종의 흡광스펙트럼을 나타내며 *C. polykrikoides*와 다른 외편모 적조종들간의 광학적 유사성 및 차이점에 대해 살펴보았다. 그림에 제시된 네 가지 적조 종들은 여름철 한국 연안에서 유해 적조를 일으키는 것으로 알려진 외편모조류의 적조종으로 공통적으로 440, 465, 495와 675 nm 부근의 파장대에서 주 흡광 피크를 보였다. 440과 675 nm의 흡광 피크는 식물플랑크톤이 공통적으로 가지는 엽록소 농도에 의한 흡광 신호로 이는 그림 6-1-2(b)의 흡광스펙트럼에서도 동일하게 나타났다. 식물플랑크톤의 흡광특성은 종들이 고유하게 가지는 광합성 색소의 구성에 따라 달라지는데 적조 배양종과 일반적인 해수 속에 존재하는 식물플랑크톤 군집의 흡광스펙트럼 간에는 뚜렷한 차이를 보였다. 그림 6-1-2(a)와 (b)의 두 종류의 스펙트럼의 차이는 보조 색소에 의한 피크의 유무에 의해 나타났다. 적조종들이 가지는 465와 495 nm 보조 흡광 피크는 외편모조류의 광합성 색소인 엽록소 c2와 카로티노이드 색소에 의한 것이며, 이러한 색소 구성 차이로 인해 적조가 아닌 해역의 식물플랑크톤 흡광스펙트럼과 뚜렷한 차이를 나타냈다.

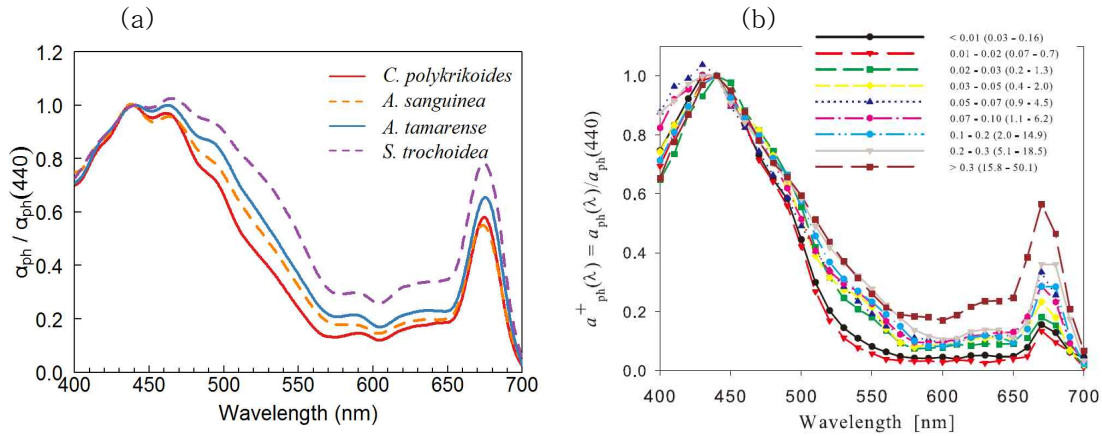


그림 6-1-2. (a) 적조 배양종의 흡광스펙트럼 분포 (b) 일반적인 자연 해수 속 식물플랑크톤의 흡광스펙트럼 분포(IOCCG, 2006)

적조종 광특성을 활용한 적조종 구별 연구에서 식물플랑크톤 흡광특성뿐만 아니라 역산란 특성을 활용한 사례도 있다. Cannizzaro et al (2008)은 유해 적조 종인 *Karenia brevis*에 의한 적조를 분류하기 위하여 엽록소 농도에 대한 역산란계수의 비를 활용하였고 *K. brevis*는 특징적으로 작은 값을 보이는 특성을 가지고 있다. 이런 특성을 이용해 높은 역산란계수를 가지는 diatom 종으로부터 구별해 내는 기술을 제안했다. 역산란계수는 흡광계수와 더불어 식물플랑크톤의 형태나 크기 등에 따라서 달라질 수 있는 고유한 광특성이기 때문에 종마다 측정을 통해 정확한 역산란계수를 알아내는 것이 중요하지만 흡광계수처럼 적조 배양종을 이용하여 역산란계수를 측정하는 것은 매우 어렵다.

## 제 2 절 *C. polykrikoides* 적조 탐지 반사도 모델 개발

### 1. Hydrolight Simulation (반사도 시뮬레이션)

본 연구에서는 *C. polykrikoides*에 특화된 적조 탐지 알고리즘을 개발하기 위하여 적조종의 광특성을 활용하였다. 적조종마다 광합성에 활용하는 색소 구성이 달라 이로 인해 흡광특성이 달라지는 것을 적조 배양 중 흡광분석을 통해 확인하였다. 이처럼 적조종이 보이는 고유 광특성의 차이로 인해 적조종이 대 번성하여 존재하는 해역의 반사도가 달라지는 데 이 차이로 적조가 아닌 해역으로부터 적조인 해역을 광학적으로 구별할 수 있는 방법을 제시하기 위해 연구를 수행하였다. 적조 탐지에 이용되는 해상 원격 반사도(Ocean remote sensing reflectance,  $R_{rs}$ ;  $sr^{-1}$ )는 해수에 입사되는 광에너지(Downwelling irradiance,  $E_d$ ;  $Wm^{-2}$ )에 대한 물 밖으로 벗어나는 수출 광량(Water-leaving radiance,  $L_w$ ;  $Wm^{-2}sr^{-1}$ )의 비로 정의되며 자연 해수에 존재하는 구성요소들의 고유 광특성(IOPs)에 의해 결정된다. 다시 말해 자연해수의 반사도를 정확히 알기 위해서는 해수 구성요소의 흡광계수 및 역산란계수( $a$  와  $b_b$ )의 광특성을 파악해야 한다(그림 6-2-1).

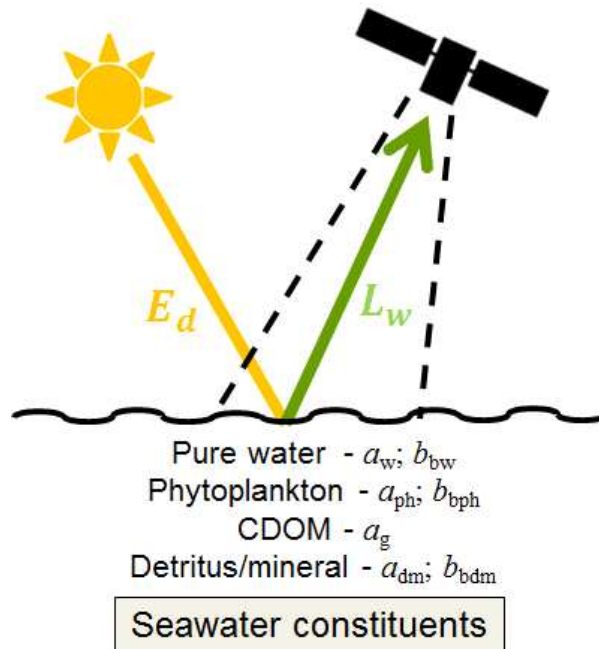


그림 6-2-1. 해수 구성요소의 농도에 따른 영향을 받는 반사도

우리나라 주변해역과 같이 다양한 환경요인의 영향을 받아 광학적으로 복잡한 환경에서도 활용가능한 반사도 알고리즘을 개발하기 위해서는 다양한 광학적 해수 환경에서의 반사도 자료가 필요하다. 광학적으로 복잡한 해수 환경이라 함은 식물플랑크톤(*ph*), 용존유기물(*g*), 부유물질(*dm*) 등의 해수 구성요소들이 각각 다양한 농도로 존재하여 해수 반사도에 영향을 주는 Case 2 water를 말한다. 맑은 해역에서 적조가 대발생한 경우에는 적조종의 식물플랑크톤의 광특성이 이외의 해수 구성요소의 광특성보다 반사도에 절대적인 영향을 주게 되어 쉽게 구별해 낼 수 있다. 그렇지만 적조 발생초기 또는 소멸기에 적조종의 광특성의 영향이 상대적으로 감소하거나, 강 하구와 같이 부유물질의 농도가 높아 탁도가 심한 해역에서 적조가 발생했을 경우, 이외의 다양한 연안의 적조의 반사도 특성을 고려하기 위하여 해수 구성요소의 농도를 조절하여 반사도 시뮬레이션을 실시하였다. 반사도 계산식은 아래와 같다.

$$R_{rs} = \frac{L_w}{E_d} = G \frac{b_b}{a+b_b} [sr^{-1}]$$

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_g(\lambda) + a_{dm}(\lambda) [m^{-1}]$$

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bph}(\lambda) + b_{bdm}(\lambda) [m^{-1}]$$

반사도 시뮬레이션을 위해 Radiative Transfer Equation(RTE)을 바탕으로 하는 HydroLight software version 5.1(Mobley and Sundman, 2012)를 활용하였다. 이 모델은 광해양학과 해색원격탐사에서 개선되어야 하는 사항들을 해결하기 위해 설계되었으며 특정한 환경 조건에서의 spectral radiance distribution을 예측하는데 활용될 수 있다. 본 연구에서는 입력 자료들이 Case 2 water 조건 하에서 가상으로 반사도를 모사하기 위해 설정되었으며, 입력 자료의 정보는 표 6-2-1와 같다.

자연 해수의 반사도를 시뮬레이션하기 위해서는 입력 자료로 적조종의 식물플랑크톤 흡광계수, 역산란계수 뿐만 아니라 부유물질 및 용존유기물의 흡광계수와 역산란계수가 입력 자료로 필요하다. 부유물질 및 용존유기물, 그리고 적조가 아닌 해역의 식물플랑크톤 흡광계수와 역산란계수는 International Ocean-Color Coordinating Group(IOCCG)에서 제공하는 IOPs 자료를 사용하였다. 참고적으로 시뮬레이션에 입력되는 자료의 범위는 현장자료에서 얻은 자료의 범위를 포함하도록 설정하였고 그 범위는 표 6-2-2와 같았다. IOCCG의 IOPs 자료는 알고리즘 테스트 및 비교 분석을 위해 다수의 현장자료를 바탕으로 모델로 생성되었다(IOCCG, 2006). 따라서 이 자료에서 제공되는 식물플랑크톤 흡광계수는 적조 해역 반사도 특성과 비교할 적조가 아닌 해역의 자료로 사용되었다. 적조 해역의 식물플랑크톤 흡광계수는 배양종 흡광 분석을 통해 다양한 염소 농도에서의 측정된 자료를 이용하였다. *C. polykrikoides* 적조종 이외에 여름철 우리

나라 연안에서 유해 적조를 발생시키는 종으로 알려진 Akashiwo sanguinea, Alexandrium tamarense, Scrippsiella trochoidea 종들을 실험실에서 배양하여 다양한 농도에서 흡광 자료를 측정하였다. 적조종 흡광 분석을 통해 적조종간의 유사성 및 차이점을 분석하고 흡광 자료를 반사도 모델 개발에 입력 자료로 사용하였으며 *C. polykrikoides* 특화 적조 탐지 알고리즘 개발 가능성에 대하여 살펴보았다.

표 6-2-1. 반사도 시뮬레이션 입력 자료

Parameters	정 의	입력 값
$a_w$	Absorption coefficient of pure sea water	Pope and Fry (1997)
$a_{ph}$	Absorption coefficient of phytoplankton	$a_{ph}$ based on the measurement IOCCG database
$a_{dm}, a_g$	Absorption coefficient of detritus/mineral and CDOM	IOCCG database $a_{dm}$ (443): $0.003-0.378 m^{-1}$ (n=7) $a_g$ (443): $0.015-1.453 m^{-1}$ (n=13)
$b_{bw}$	Backscattering coefficients of pure sea water	Smith and Baker (1981) Rayleigh-like phase function
$b_{bph}$	Backscattering coefficients of phytoplankton	IOCCG database Fournier-Forand function
$b_{bdm}$	Backscattering coefficients of detritus/mineral	IOCCG database Fournier-Forand function
Chl <i>a</i>	Proxy for phytoplankton biomass	5, 10, 15, 20, 30 $mgm^{-3}$

표 6-2-2. 반사도 시뮬레이션 입력 자료와 현장자료의 범위 비교

Parameters	모델 입력 자료	현장자료	
	IOCCG synthetic data	비 적조 해역	<i>C. polykrikoides</i> 적조 해역
Chl <i>a</i>	5 ~ 30 $mgm^{-3}$	0.459 ~ 11 $mgm^{-3}$	18 ~ 53 $mgm^{-3}$
$a_g$ (443)	0.015 ~ 1.453 $m^{-1}$	0.027 ~ 0.148 $m^{-1}$	0.027 ~ 0.228 $m^{-1}$
$a_{dm}$ (443)	0.003 ~ 0.378 $m^{-1}$	0.003 ~ 0.261 $m^{-1}$	0.035 ~ 0.171 $m^{-1}$

광학적으로 다양한 해수 환경에서의 반사도를 시뮬레이션하기 위해 적조 생물의 농도와 용존유기물질, 부유물질에 변화를 주어 총 2,275개의 반사도 스펙트럼을 생성하였다. 네 가지 적조종에 의해 발생한 적조 반사도와 적조가 아닌 경우의 반사도를 생성하기 위해 다섯 종류의 식물플랑크톤 흡광스펙트럼이 사용되었고 적조종의 농도는 5, 10, 15, 20, 30  $mgm^{-3}$ 으로 다섯 가지 농도로 조절하였다. 적조종이 극우점한 적조 해역이더라도 일반적으로 다양한 종들과 함께 존재하고 있다. 따라서 적조 해역을 자연 상태의 조건과 좀 더 유사하게 모사하기 위해 적조종의 흡광스펙트럼에 적조가 아닌 경우의 흡광스펙트럼을 혼합하여 사용하였다(적조종 흡광스펙트럼 80% + 비 적조 흡광스펙트럼 20%). 용존유기물질과 부유물질의 흡광스펙트럼은 각각 13 가지와 7 가지로 농도를 다양하게 설정하여 사용하였다( $5 a_{ph}(\lambda) \times 5 \text{ Chl } a \times 13 a_g(433) \times 7 a_{dm}(443)$ ). 반사도는 스펙트럼 분석을 위해 400 ~ 800 nm 파장에서 3 nm 간격으로 고해상도의 스펙트럼을 시뮬레이션 하였다.

## 2. 적조 발생 해역 광 특성

적조종의 Hydrolight simulation을 위해서는 입력 자료로 흡광계수와 역산란계수를 사용한다. 적조종의 식물플랑크톤 흡광계수는 배양된 종의 흡광 측정으로 그 범위를 알수 있지만, 그 이외의 쇄설성 물질 및 용존유기물의 흡광계수는 범위를 설정하여 계산을 수행해야 한다. 그림 6-2-2은 2014년과 2015년 8월 적조 발생 해역인 남해안 연안에서 수집된 흡광자료이다. 그림 6-2-2(b)는 쇄설성 물질의 흡광계수이고, 그림 6-2-2(c)는 용존유기물 흡광계수이다. 두 흡광계수는 적조 발생 해역 또는 발생하지 않은 해역 모두에서 유사한 범위를 가지고 있었다. 반면 적조를 포함한 식물플랑크톤 흡광계수는 포함하지 않는 경우와 큰 차이를 보였다(그림 6-2-2 (a)). 결국 반사도 차이를 나타내게 하는 것은 식물플랑크톤이 가지는 흡광 특성이며 반사도는 적조 발생 해역과 발생하지 않은 해역에서 그림 6-2-2 (d)와 같이 나타났다.

적조 발생 해역의 반사도는 청색파장(400 ~ 450 nm) 영역에서 높은 흡광의 영향으로 적조가 발생하지 않은 해역보다 상대적으로 매우 낮은 값을 나타내었다. 녹색파장 파장(550 ~ 600 nm) 영역에서는 상대적으로 높은 흡광을 보이지만 해수 중 입자의 증가에 의해 역산란도 함께 증가되어 적조가 발생하지 않은 해역과 비교해볼 때 그리 높은 값을 보이지는 않았지만 뚜렷한 피크를 보였다. 적조 발생 해역은 엽록소 a 농도 증가로 인하여 적색파장(670 ~ 680 nm, fluorescence peak)에서 적조가 발생하지 않은 해역보다 상대적으로 높은 피크를 보였다.

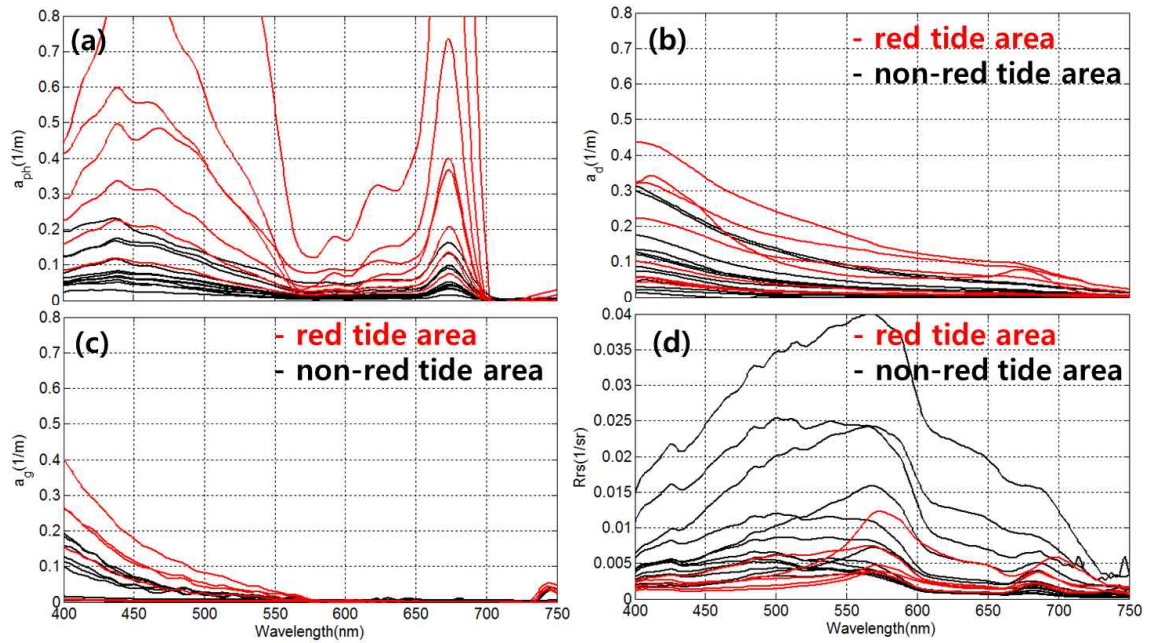


그림 6-2-2. 2014년과 2015년 8월 적조 발생 해역과 발생하지 않은 해역에서의 흡광 및 반사도 특성. (a) 식물플랑크톤 흡광계수, (b) 쇄설성 물질 흡광계수, (c) 용존유기물 흡광계수, (d) 반사도 (Rrs)

2015년 하계 현장관측에서는 *C. polykrikoides* 적조와 규조류 적조 해역이 조사되었다 (그림 6-2-3). 세 개의 정점은 비슷한 엽록소 a 농도를 나타내었지만, *C. polykrikoides* 적조종이 89%와 78%인 정점에서의 반사도는 비슷한 스펙트럼을 보인 반면, 규조류가 우점한 정점에서의 반사도는 절대값과 스펙트럼에서 차이를 보였다. 이것은 식물플랑크톤 흡광이 *C. polykrikoides* 적조종에서 상대적으로 높게 나타나기 때문이다.



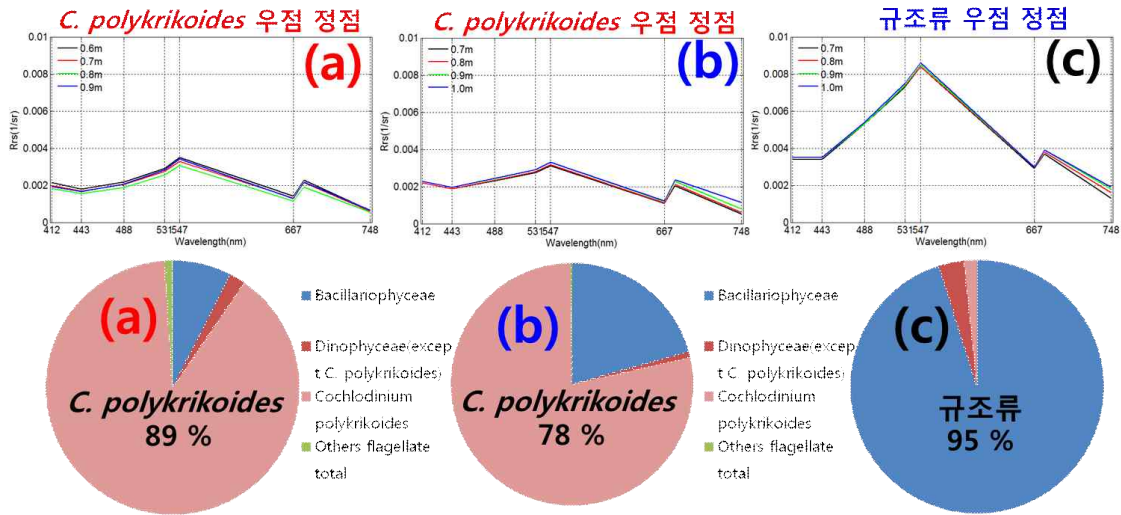


그림 6-2-3. (a)와 (b) 정성·정량 분석 결과에서 *C. polykrikoides*가 우점 정점에서 관측된 반사도 스펙트럼과, (c) 정성·정량 분석 결과에서 규조류 우점 정점에서 관측된 반사도 스펙트럼 특징

### 3. *C. polykrikoides* 반사도 모델

그림 6-2-4은 실험실에 배양된 *C. polykrikoides* 적조종의 다양한 농도에서의 흡광자료와 적조 발생해역의 쇄설성 물질 및 용존유기물의 흡광계수를 가지고 계산된 *C. polykrikoides* 반사도 스펙트럼과 2014년과 2015년 8월 적조 발생해역에서 관측된 반사도 스펙트럼을 비교한 것이다.

일반적으로 적조라고 할 수 있는 것은 식물성 플랑크톤이 일정 농도이상( $>10\text{mgm}^{-3}$ ) 증식이 일어나야 하기 때문에 앞에서 언급한 것처럼 식물플랑크톤에 의한 흡광 효과가 가장 크며, 그 다음으로 쇄설성 물질에 의한 흡광 효과 그리고 용존 유기물에 의한 효과 순으로 나타난다(그림 6-2-2). 반사도 모델에서 계산된 *C. polykrikoides* 적조종의 반사도 스펙트럼 특징을 살펴보면,

1. 반사도는 모든 파장에서 증가된 흡광의 영향으로 상대적으로 매우 낮은 값을 나타내고, 청색파장과 녹색파장 사이의 반사도 차로 인하여 급격한 경사를 나타낸다. 또한 적조종의 흡광이 증가할수록 반사도의 파장과 파장 사이의 뚜렷한 경사가 나타난다.

2. 청색파장에서는 412 nm가 443 nm보다 증가된 스펙트럼을 특징을 나타낸다. 이것은 용존유기물이 상대적으로 식물플랑크톤 흡광이나 쇄설성 물질의 영향보다 적을 경우 나타난다. 만약 용존유기물의 영향이 상대적으로 증가 되어질 경우, 412 nm가 443 nm보다 낮아지며 모든 청색파장이 ~0에 가까운 값으로 수렴하게 되고 녹색파장의 피크와 차이도 커진다.

3. 청색파장(547 nm)과 적색파장(667 nm) 사이의 기울기 및 높이의 차는 쇄설성 물질의 농도에 영향을 받는다. 쇄설성 물질의 농도가 증가할수록 적색파장의 값이 증가하면서 녹색파장과 유사한 값을 가지게 되고 두 파장 사이는 경사가 완만한 스펙트럼을 형태를 가진다.

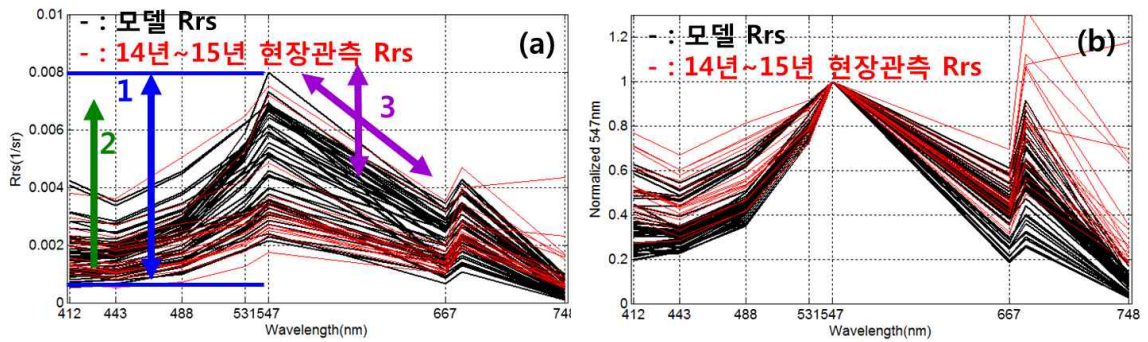


그림 6-2-4. (a) Hydrolight simulation에서 계산된 *C. polykrikoides* 반사도 스펙트럼과 2014년과 2015년 적조 발생해역에서 관측된 스펙트럼 비교. (b) 모델 및 현장 적조 반사도를 547 nm 파장으로 normalize한 스펙트럼.

그림 6-2-3 (b)에서 보이듯 청색파장에서 녹색파장까지 현장관측 및 모델 반사도는 유사한 스펙트럼 특징을 나타내고 있다. 다만 적색파장의 fluorescence 피크는 현장에서 관측된 반사도의 경우 녹색파장과 유사한 값을 가지는 반면 모델에서 모사된 반사도의 경우 상대적으로 녹색파장보다 낮은 값을 나타내었다. 이러한 결과는 모델자료보다 상대적으로 부족한 현장관측 반사도 자료에 의한 것이며 다양한 범위의 자료를 가질 경우 이와 유사한 경향을 보일 것이다.

#### 4. 현장-모델-위성 *C. polykrikoides* 반사도 비교

그림 6-2-5는 2007년 8월 14일 국립수산과학원의 적조 발생 보고를 근거로 하여 MODIS Aqua 위성에서 관측된 *C. polykrikoides* 적조종 반사도 스펙트럼을 2014년과 2015년 현장관측에서 관측된 반사도 및 모델 반사도와 비교한 것이다. 국립수산과학원의 적조속보는 여수 돌산도, 남해도, 사랑도 및 거제남부 해역에 대해서 적조 발생을 보고했다. 위성 RGB 영상과 엽록소 a 농도는 적조 발생 해역에서 discolored된 구조와 엽록소 a 농도 이상을 나타냈다. *C. polykrikoides* 적조로 추정되는 위성 반사도는 모든 파장에서 낮은 값을 보이고, 녹색파장과 적색파장에서 피크를 나타냈다. 청색파장에서 녹색파장까지의 반사도 스펙트럼 특징은 위성, 현장 및 모델에서 유사하게 나타났지만, 청색파장에서 적색파장 사이의 경사는 차이를 보였다. 위성에서 계산된 반사도가 적색파장에

서 마이너스를 나타내었는데 이것은 대기보정의 문제로 인하여 나타나는 현상이다. 그러나 이 부분을 제외한 *C. polykrikoides* 적조종의 위성 반사도 스펙트럼은 반사도 모델에 의해 재현된 스펙트럼 및 현장값의 스펙트럼 특징들과 일치했다.

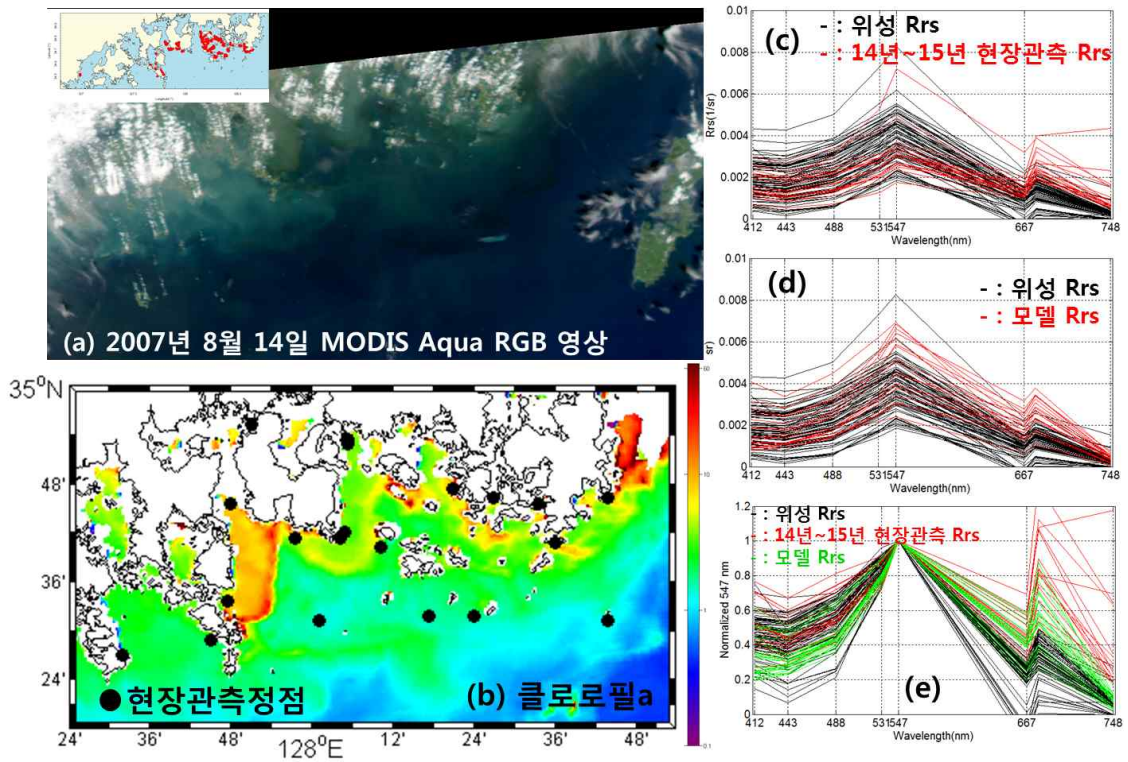


그림 6-2-5. 2007년 8월 14일 적조 발생에서 관측된 (a) MODIS Aqua RGB 영상, (b) 엽록소 a 농도, (c) 적조 추정되는 위성 반사도와 현장관측 반사도, (d) 위성 반사도와 모델 반사도, (e) 위성-현장-모델 반사도를 547 nm로 normalize한 스펙트럼

그림 6-2-6는 2007년 8월 17일 동해안 외해에서 적조로 추정되는 MODIS Aqua 위성 영상과 관측된 *C. polykrikoides* 적조종 반사도 스펙트럼, 2014년과 2015년 현장관측에서 관측된 반사도 및 모델 반사도를 비교한 것이다. 국립수산과학원의 적조속보는 남해안 및 동해 연안의 적조 발생을 보고 하였지만, 울릉도 남부까지 확장된 적조에 대한 보고는 없었다. 엽록소 a 농도는 위성 RGB 영상에서 녹색으로 보이는 해역보다 discolored된 구조에서 증가된 엽록소 a 농도를 나타냈다. *C. polykrikoides* 적조로 추정되는 위성 반사도는 모든 파장에서 낮은 값을 보였고, 녹색파장과 적색파장에서 피크를 가졌다. 엽록소 a 농도가 증가할수록 모든 파장에서 반사도는 감소하는 특징을 나타내었다. 청색파장에서 녹색파장까지의 반사도 스펙트럼 특징은 위성, 현장 및 모델에서 유사하게 나타났다. 그리고 위성 적조 반사도 스펙트럼은 그림 6-2-5에서 보였던 마이너스 값은 없었고, *C. polykrikoides* 적조종의 반사도 모델에서 계산된 반사도 스펙트럼은 현장 및 위성



값 반사도를 잘 재현하여 모델의 반사도 스펙트럼 특징들이 위성 및 현장값과 잘 일치하였다.

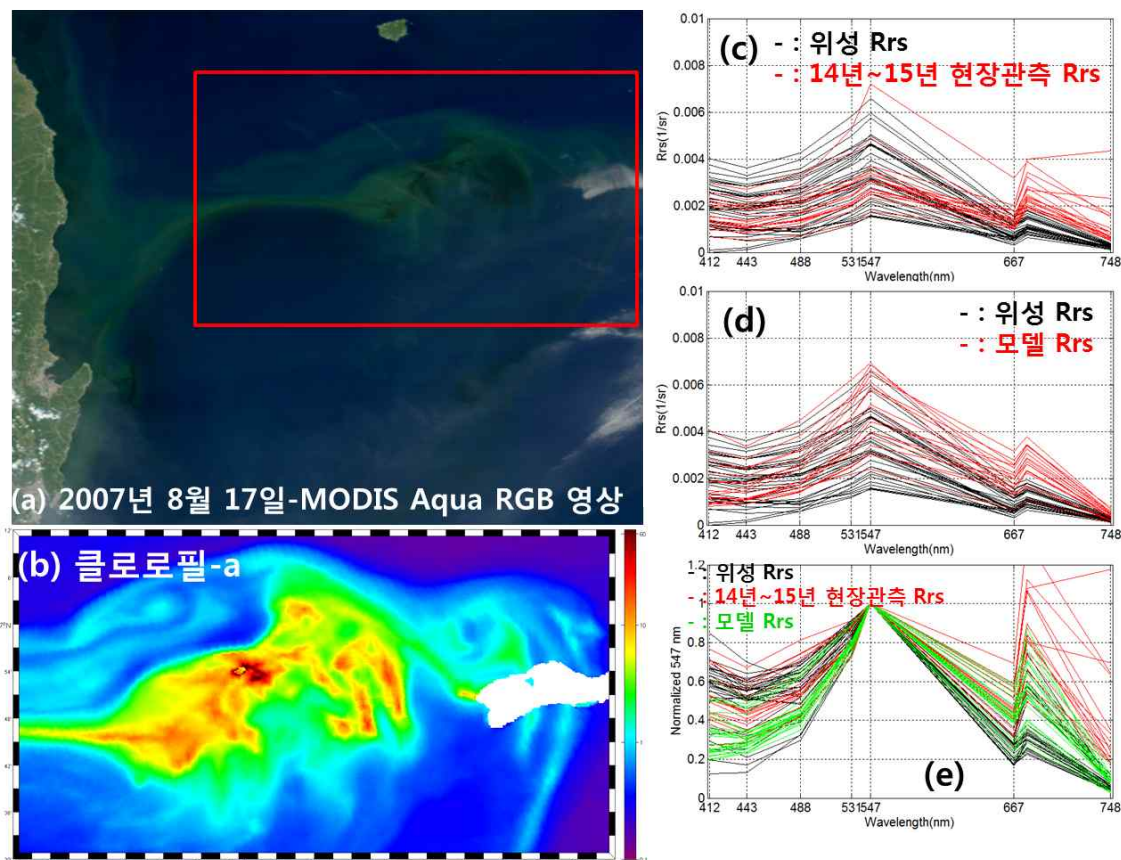


그림 6-2-6. 2007년 8월 17일 적조 발생에서 관측된 (a) MODIS Aqua RGB 영상, (b) 엽록소 *a* 농도, (c) 적조 추정되는 위성 반사도와 현장관측 반사도, (d) 위성 반사도와 모델 반사도, (e) 위성-현장-모델 반사도를 547 nm로 normalize한 스펙트럼.

그림 6-2-7은 2013년 8월 13일 국립수산과학원의 적조 발생 보고를 근거로 하여 MODIS Aqua 위성에서 관측된 *C. polykrikoides* 적조종 반사도 스펙트럼을 2014년과 2015년 현장관측에서 관측된 반사도 및 모델 반사도와 비교한 것이다. 국립수산과학원의 적조속보는 남해안 및 포항 부근 해역에서 적조 발생을 보고했다. 동해안에서 발견된 적조 구조와는 달리 남해안 적조 구조는 복잡한 구조를 보였고 위성 RGB 영상과 엽록소 *a* 농도 영상에서 잘 나타나고 있었다. 증가된 엽록소 *a* 농도 해역은 위성 RGB 영상에서 진한 녹색이나 갈색을 띄고 있었다. *C. polykrikoides* 적조로 추정되는 위성 반사도는 모든 파장에서 낮은 값을 보이지만 상대적으로 청색과 녹색파장에서 증가된 스펙트럼 형태를 가지고 있었다. 이는 높은 농도부터 낮은 농도의 적조를 포함하고 있는 엽록소 *a* 농도에서 계산된다. 청색파장에서 녹색파장까지의 반사도 스펙트럼 특징은 위성, 현장

및 모델에서 유사하게 나타났다. 위성 적조 반사도 스펙트럼의 청색과 적색 파장은 그림 6-2-5에서 보였던 마이너스를 나타내었지만, *C. polykrikoides* 적조종의 반사도 모델에서 계산된 반사도 스펙트럼은 현장 및 위성값 반사도를 잘 재현하였고 스펙트럼 특징들이 위성 및 현장값과 잘 일치하였다.

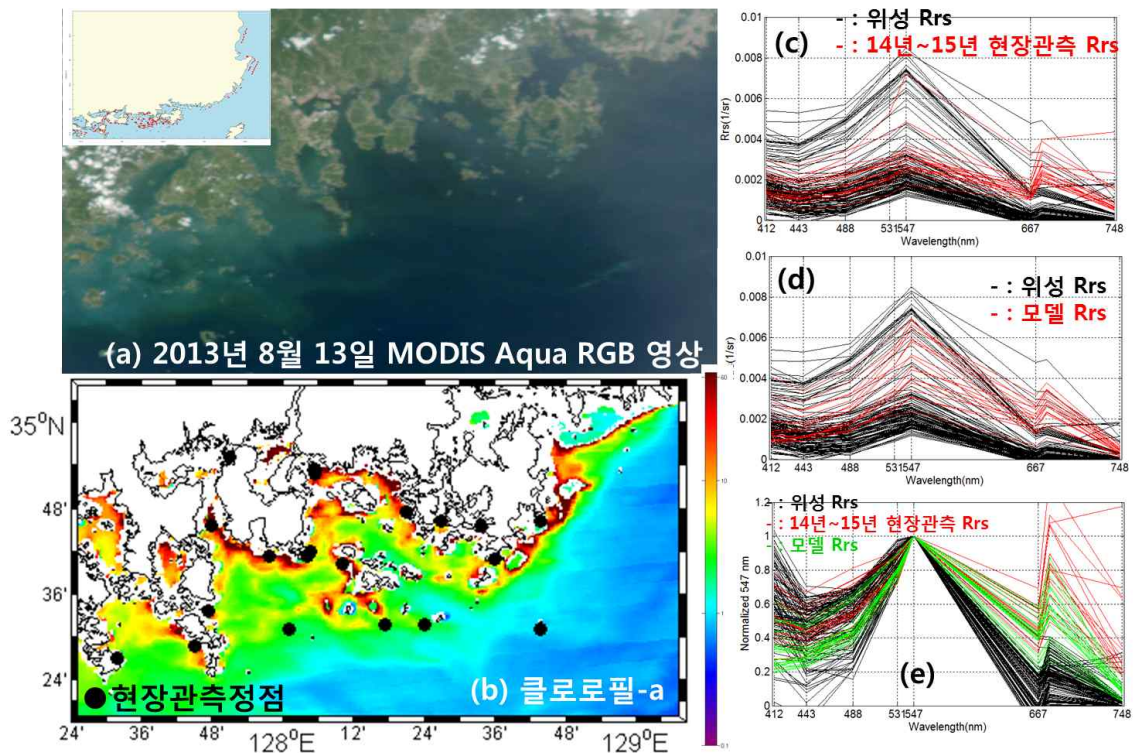


그림 6-2-7. 2013년 8월 13일 적조 발생에서 관측된 (a) MODIS Aqua RGB 영상, (b) 엽록소 *a* 농도, (c) 적조 추정되는 위성 반사도와 현장관측 반사도, (d) 위성 반사도와 모델 반사도, (e) 위성-현장-모델 반사도를 547 *nm*로 normalize한 스펙트럼.

그림 6-2-8은 2015년 9월 8일 국립수산과학원의 적조 발생 보고를 근거로 하여 MODIS Aqua 위성에서 관측된 *C. polykrikoides* 적조종 반사도 스펙트럼, 2014년과 2015년 현장관측에서 관측된 반사도 및 모델 반사도를 비교한 것이다. 국립수산과학원의 적조속보는 탁도 높은 해역인 완도 부근 해역에서 적조 발생을 보고했다. 주위의 탁도 때문에 위성 RGB 영상과 엽록소 *a* 농도 영상에서 뚜렷한 적조 구조가 발견되었다. 증가된 엽록소 *a* 농도 구조가 패치를 이루고 발달되어 있는 것을 볼 수 있으며, 증가된 엽록소 *a* 농도 해역은 위성 RGB 영상에서 진한 녹색이나 갈색을 띄고 있었다. *C. polykrikoides* 적조로 추정되는 위성 반사도는 모든 파장에서 낮은 값을 보였고 특히, 위성 적조 반사도 스펙트럼의 청색에서 급격한 감소를 보이면서 마이너스 값을 나타내었다. 443 *nm*에서의 급격한 감소 경향으로 인하여 위성 반사도 특성은 기존의 현장관측 반사도 및 모



델 반사도에서 보였던 특징과는 일치하지 않았다. 이것은 흡광의 증가로 인하여 대기보정 과정에서 오류가 발생하면서 청색부근의 파장에서 문제를 일으켰기 때문으로 보인다. 이 문제에 대한 개선 방안이 앞으로 필요하다.

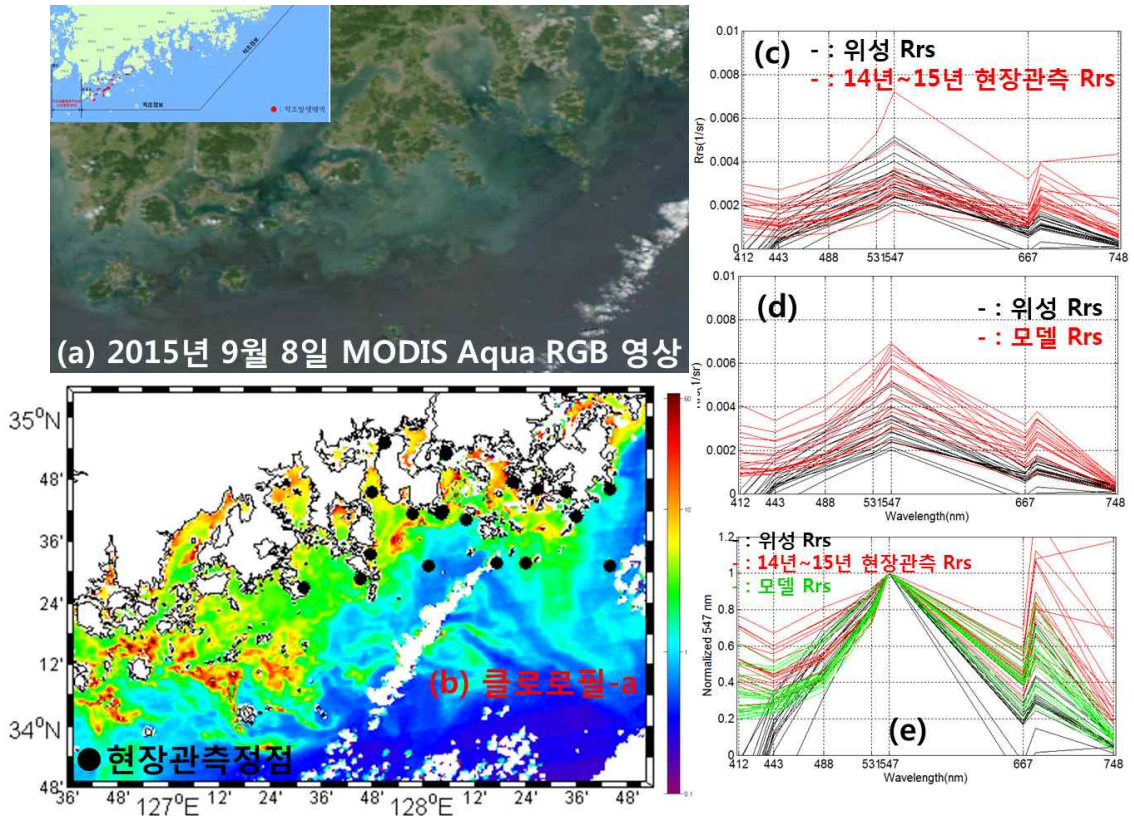


그림 6-2-8. 2015년 9월 8일 적조 발생에서 관측된 (a) MODIS Aqua RGB 영상, (b) 엽록소 a 농도, (c) 적조 추정되는 위성 반사도와 현장관측 반사도, (d) 위성 반사도와 모델 반사도, (e) 위성-현장-모델 반사도를 547 nm로 normalize한 스펙트럼

## 5. *C. polykrikoides* 반사도 밴드 비 모델

*C. polykrikoides*를 포함하는 네 가지 적조종에 의해 적조가 발생했을 경우와 적조가 아닌 경우의 반사도는 자연 환경에서의 반사도와 유사하도록 시뮬레이션 되었으며 다양한 광 조건을 조합하여 반사도 빅데이터를 생성하였다(n=2,275). 그림 6-2-9은 엽록소 농도  $30 \text{ mgm}^{-3}$ 으로 일정할 때 다양한 농도의 용존유기물질, 부유물질의 흡광 및 역산란 계수를 조합하여 계산된 네 가지 적조종 반사도 스펙트럼을 평균하여 나타낸 그림이다. 일반적으로 고농도의 적조가 발생하면 붉은 색으로 변한 해수의 색을 육안으로도 확인할 수 있는데 이는 그 해역의 반사도에 적조종이 갖는 광특성이 강하게 영향을 미치고

있기 때문이다. 하지만 그림 6-2-9처럼 적조종들이 고농도( $30 \text{ mgm}^{-3}$ )로 번성했을 때의 반사도 스펙트럼임에도 불구하고  $400 \sim 700 \text{ nm}$  파장대에서 큰 차이를 보이지 않았다. 와편모조류에 속하는 네 가지 적조종은 유사한 색소 구성으로 인해 흡광 스펙트럼도 상당히 유사한 형태를 보였다(그림 6-1-2(a)). 네 종의 반사도 모두 청색-녹색 파장대에서 함몰된 형태 때문에 매우 낮은 반사도를 나타내며 편평한 스펙트럼 기울기를 보였다. 이와 같은 적조종들이 혼합된 적조가 발생하게 되면 광학적으로 매우 유사한 특성을 보이기 때문에 원인 종을 정확하게 탐지해내기에는 어려움이 있을 것으로 예상된다.

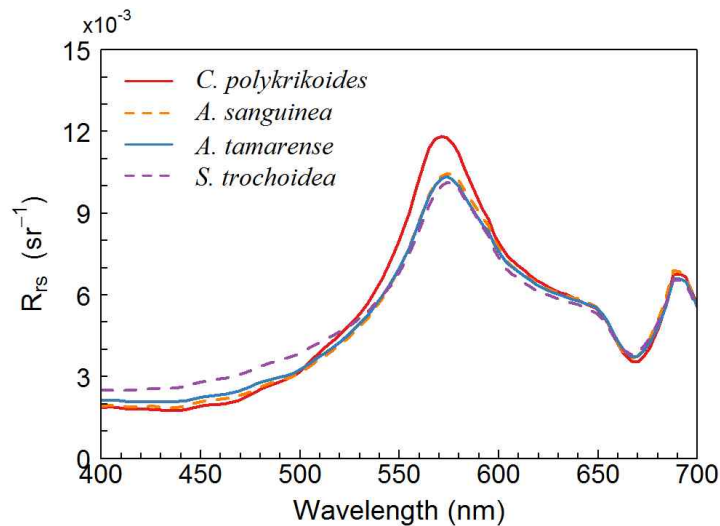


그림 6-2-9. 엽록소 농도  $30 \text{ mgm}^{-3}$ 에서의 와편모조류 적조 종의 반사도 스펙트럼

반면에, *C. polykrikoides* 적조와 적조가 아닌 일반적인 해수의 반사도 스펙트럼은 엽록소 농도가  $30 \text{ mgm}^{-3}$  일 때, 청색-녹색 파장대에서 큰 차이를 보였다. 이 차이는 그림 6-2-10에서 확인할 수 있다. 엽록소 농도가 5, 15,  $30 \text{ mgm}^{-3}$  순서로 증가함에 따라 적조인 경우와 아닌 경우의 반사도 스펙트럼의 변화를 나타냈다. 적조가 아닌 경우의 스펙트럼은  $5 \text{ mgm}^{-3}$ 에서  $30 \text{ mgm}^{-3}$ 으로 증가하더라도 청색-녹색 파장대에서 아주 미세한 감소를 보였지만 적조인 경우에서 엽록소 농도가  $5 \text{ mgm}^{-3}$ 일 때와  $30 \text{ mgm}^{-3}$ 일 때 비교를 해보면 급격하게 스펙트럼이 함몰된 형태를 보이면서 두 경우에 같은 엽록소 농도라고 가정한다면 반사도 광특성을 이용해 구별이 가능할 것으로 판단된다.



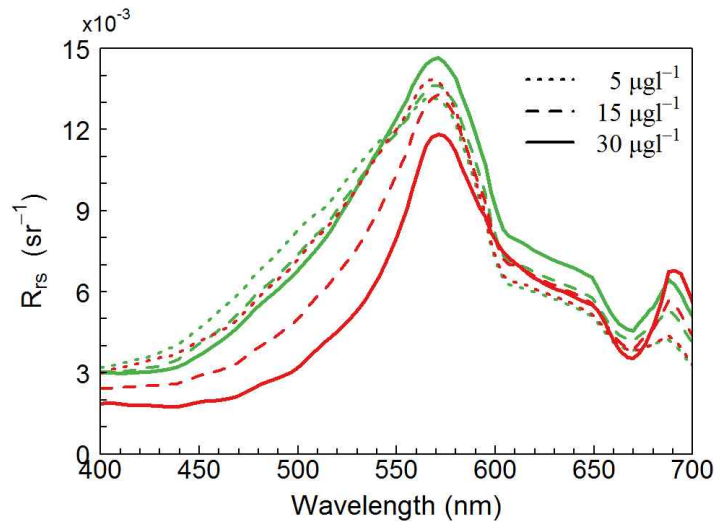


그림 6-2-10. 엽록소 농도 변화에 따른 *C. polykrikoides* 적조 인 경우와 아닌 경우의 반사도 스펙트럼(빨간 선: *C. polykrikoides* 적조, 초록 선: 적조가 아닌 경우)

*C. polykrikoides*의 반사도 스펙트럼의 특성을 좀 더 면밀히 분석하기 위해 세 가지 적조종과 적조가 아닌 경우의 반사도 스펙트럼과 *C. polykrikoides* 인 경우의 반사도 스펙트럼의 유사도(Similarity index) 분석을 실시하였다. 유사도가 1에 가까울수록 비교하는 두 스펙트럼이 거의 일치하는 것을 의미한다. 그림 6-2-11(a)은 반사도 스펙트럼들의 유사도를 나타낸 그래프이다. 엽록소 농도가 증가함에 따라서 *C. polykrikoides*와 적조가 아닌 경우의 스펙트럼 유사도는 급격하게 감소하지만 적조종 사이의 반사도 유사도는 여전히 높은 값을 나타냈다. 한편모조 적조종간에는 유사한 반사도 특성이 보이기 때문에 구분하기 어렵지만, *C. polykrikoides* 적조 반사도와 적조가 아닌 경우의 반사도는 작은 유사성을 보이면서 뚜렷한 차이를 나타냈다. 적조가 아닌 경우 반사도 스펙트럼의 400 ~ 700 nm의 파장에서 가장 차이를 보이는 파장을 선택하여 적조 탐지 알고리즘에 적용하기 위해 특정 파장 밴드에서의 반사도 유사성을 비교하였다. 추후 이 알고리즘을 위성자료 분석에 적용할 것을 고려해 밴드는 MODIS 밴드(443, 488, 531, 555 nm)를 기준으로 선택하였다(그림 6-2-11(b)). 그 결과 30  $mgm^{-3}$ 에서 선택된 밴드 별 반사도 유사도는 앞선 결과와 같이 적조가 아닌 경우와의 유사도가 모든 밴드에서 작은 값을 나타냈고 그 중에서 488 nm 밴드에서 0.65인 최소값을 보였다.

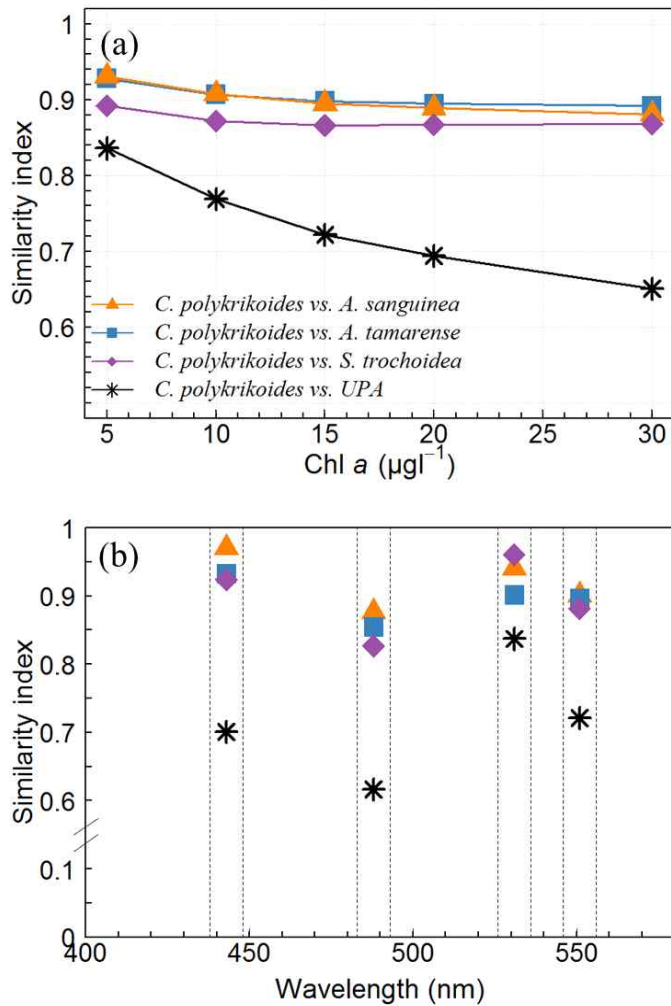


그림 6-2-11. (a) 엽록소 농도에 따른 반사도 스펙트럼의 유사도, (b) 특정 밴드에서의 443, 488, 531, 555 nm에서의 반사도 유사성

이처럼 위성 밴드를 기반으로 적조가 아닌 해역으로부터 적조 해역을 광학적으로 구별할 수 있는 간단한 밴드 비 알고리즘을 개발하였다. 시뮬레이션 된 반사도 스펙트럼 빅데이터에서 R1:  $R_{rs}(488)/R_{rs}(443)$ 과 R2:  $R_{rs}(555)/R_{rs}(531)$ 의 두 가지 밴드 비를 계산하였으며 엽록소 농도에 따른 R1과 R2의 분포 변화를 살펴보았다. 그림 6-2-12은 다양한 엽록소 농도, 용존유기물질 및 부유물질의 농도에서 시뮬레이션 된 적조인 경우와 아닌 경우의 반사도 밴드 비 분포를 보여준다. 동일한 엽록소 농도 일 때 반사도 시뮬레이션에 입력된 다른 해수 구성요소 농도 조건은 동일하기 때문에 밴드 비의 분포는 식물플랑크톤 종에 의해서만 영향을 받는다. 반사도 밴드 비의 분포는 공통적으로 엽록소 농도가 증가함에 따라서 두 가지 경우 모두 R1이 증가하는 패턴을 보이고 있으며 점

들의 분포가 점점 밀집되는 형태를 보였다. *C. polykrikoides* 적조 반사도 밴드 비는 적조가 아닌 경우보다 항상 큰 R1 값을 보이며 엽록소 농도가 증가함에 따라 적조인 경우의 R1은 급격한 증가를 보이면서 적조가 아닌 경우의 반사도로부터 분리되는 것을 확인할 수 있었다.

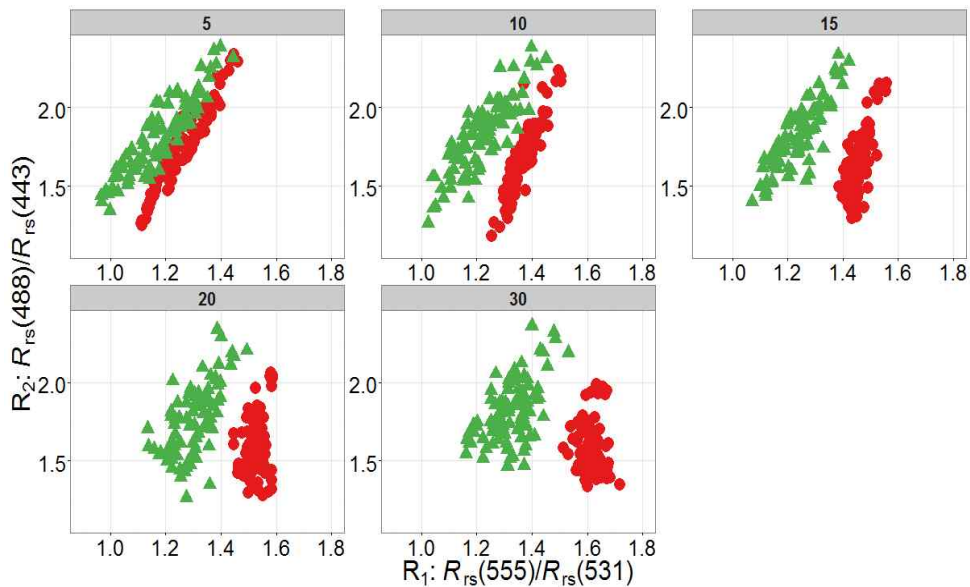


그림 6-2-12. 엽록소 농도가 증가(5, 10, 15, 20, 30  $mgm^{-3}$ )함에 따른 반사도 밴드 비 분포 변화(빨간 원: 적조인 경우(*C. polykrikoides* 80% 우점), 초록 세모: 적조가 아닌 경우)

엽록소 농도가 5 ~ 30  $mgm^{-3}$ 로 증가함에 R1은 적조인 경우 약 0.4, 적조가 아닌 경우는 약 0.2 정도의 증가를 보였다. 증가한 정도가 차이 나는 것에 의해 적조와 적조가 아닌 경우가 분리 간극을 보였다.

동일한 엽록소 농도의 반사도 밴드 비의 분포는 R2의 값의 범위가 매우 넓은 것을 알 수 있다(그림 6-2-12). 엽록소 농도가 증가함에 따라 R2의 범위는 줄어드는 듯하지만 30  $mgm^{-3}$ 에서도 여전히 넓은 값의 범위를 보이고 있다. R2분포에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위해 시뮬레이션의 또 다른 입력 자료인 용존유기물의 농도에 따른 R2 값의 변화를 살펴보았다. 그림 6-2-13은 엽록소 농도 15  $mgm^{-3}$ 에서의 용존유기물질 농도에 따른 반사도 밴드 비 분포를 보여주는 그림이다. 일반적으로 용존유기물질 농도가 증가함에 따라  $a_y(443)$  값도 증가하게 되는데 동일한 엽록소 농도에서  $a_y(443)$ 이 증가함에 따라 R2가 증가하는 패턴을 보여주고 있다. 결론적으로 용존유기물의 농도가 낮은 해역의 반사도는 주로 작은 R2 값을 가지게 된다.

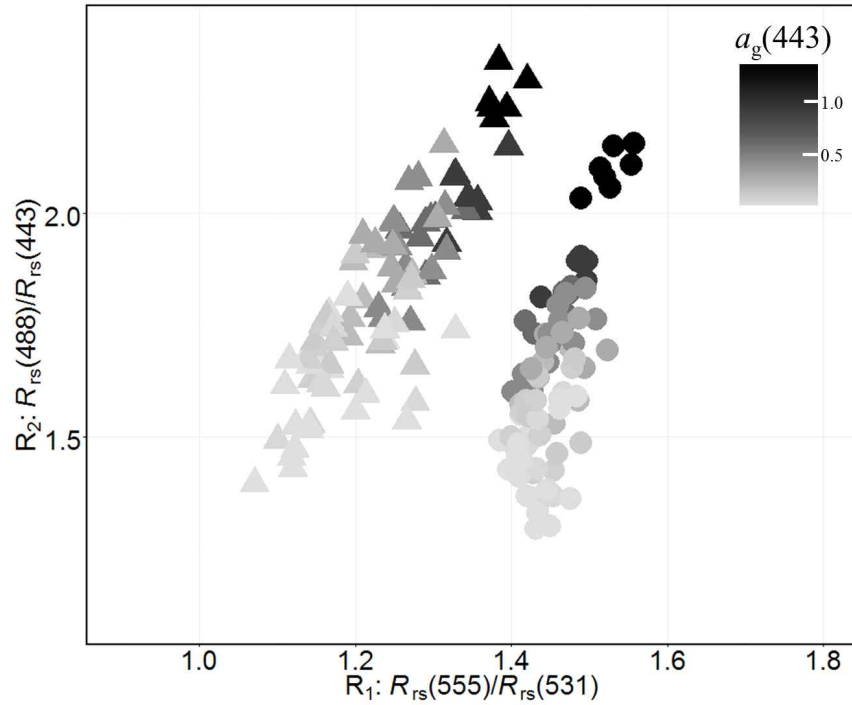


그림 6-2-13. 엽록소 농도가 일정할 때, 용존유기물질 농도에 따른 반사도 밴드 비 분포

## 6. 모델-현장 *C. polykrikoides* 반사도 밴드 비 비교

남해안에서 적조를 일으키는 주요 종인 *C. polykrikoides*의 광특성을 활용하여 적조 해역을 적조가 아닌 해역으로부터 광학적으로 구별할 수 있는 방법을 간단한 반사도 밴드 비를 사용하여 제시하였다. 이 반사도 밴드 비는 광학 모델을 이용하여 다양한 광조건에서 시뮬레이션 된 반사도 스펙트럼을 바탕으로 제안된 것으로 실제 적조 해역에서도 적용 가능한지에 대한 검증이 필요하다. 2014년과 2015년 8월 남해안 적조 해역 현장조사에서 획득한 반사도 스펙트럼에서 반사도 밴드 비를 계산하여 비교 분석하였고 모델자료와 현장자료를 함께 나열한 그림은 그림 6-2-14과 같았다. 엽록소 농도 5, 10, 15, 20, 30  $mgm^{-3}$ 일 때의 시뮬레이션 반사도 밴드 비는 엽록소 농도가 증가함에 따라 분리 간극이 벌어지는 것을 보여주고 있으며, 이에 현장자료를 적용한 결과 *C. polykrikoides* 적조 해역과 비 적조 해역의 반사도 밴드 비가 잘 분리되는 것을 확인할 수 있었다. 우리의 시뮬레이션 빅데이터 자료는 현장조사 시 얻은 해수 구성물질의 광조건을 포함하는 광범위한 input자료를 바탕으로 생성되었기 때문에 다음의 반사도 밴드 비는 다양한 해역에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

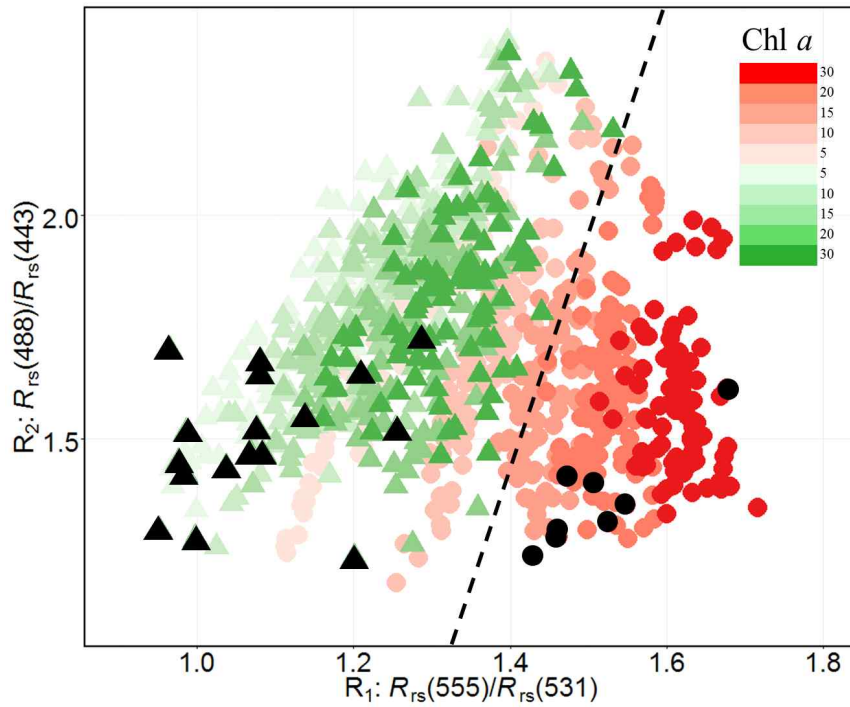


그림 6-2-14. *C. polykrikoides* 적조인 경우(빨간 원)와 아닌 경우(초록 세모)의 반사도 모델자료 및 현장자료(검정 세모, 검정 원)의 밴드 비

지금까지 적조종 흡광자료, IOCCG IOPs 모델자료 등을 활용하여 시뮬레이션 된 반사도로 적조와 적조가 아닌 경우를 광학적으로 구별하는 방법을 간단한 밴드 비를 사용하여 설명하였다. 이는 적조종이 가지는 고유한 광특성에 기반한 구별 방법으로 광범위한 광조건에서도 적용 가능할 것으로 사료된다. 본 연구는 인공위성을 통한 적조 모니터링과 조기 탐지를 위한 기초연구로서의 역할을 하며 효과적이고 정확한 적조 탐지 방법 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 제 7 장 C. polykrikoides 적조 탐지 인공신경망 알고리즘 개발과 적용

### 제 1 절 배 경

제 6장에서 수행한 연구에서 C. polykrikoides와 비와편모 조류가 우점 한 수괴의 위성 반사도의 모양이 달라지며 따라서 밴드 비에 있어 두 경우가 분명히 구별됨을 보여주었다. 이론적으로 반사도 밴드 비에 의해 C. polykrikoides 적조와 비와편모 조류의 구별이 가능할 것으로 사료된다. 그러나 엽록소 농도에 따라 밴드 비가 달라지며, 엽록소 농도가 커짐에 따라 두 경우의 위치가 달라지므로 두 경우를 구별하는 기준선은 엽록소 농도에 따라 달라진다. 현장의 엽록소 농도는 연속적인 분포를 가지므로 엽록소의 모든 농도에 대해 기준선의 위치가 연속적으로 변하고 특히 적조생물과 비 적조 생물의 엽록소 농도의 가능한 조합이 무한할 때 단순한 기준선을 설정하는 것은 불가능하다. 즉, 판별분석, 집괴분석 등 단순한 통계적 판별식을 적용하기는 어렵다는 말이다. 이렇게 하나의 변수가 달라짐에 따라 분류기준이 연속적으로 달라지는 복잡한 상황에서는 좀 더 효과적인 방법이 필요하다. 본 연구에서는 인공신경망을 적용하여 반사도에서 적조를 판별할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

### 제 2 절 인공신경망의 종류와 특성

인공신경망 알고리즘은 여러 종류가 있으며 이 연구에서 사용한 Back propagation 모델 이외에도 확률론적 신경망 (Probabilistic Neural Network: PNN), 일반화된 회귀 신경망 (Generalized Regression Neural Network: GRNN), 순환 신경망 (Recurrent Neural Network) 등이 있다. 각기 다른 종류의 신경망은 훈련의 용이도, 수렴 가능성, 훈련 시간, 신경망 적용시 계산시간 등에 있어 차이가 나므로 적조 탐지에 있어 복수의 알고리즘의 효율성에 대한 비교를 하여 선택하는 것이 바람직하다. 문제에 따라 신경망 모델이 수렴하지 않는 경우도 있고 적조를 실시간으로 예측하기 위해서는 계산시간이 적절히 빨라야 하므로 특히 이 두 가지 요인을 평가할 필요가 있다. 따라서 이 연구에서는 Resilient Back-propagation, 확률론적 신경망 (PNN), 두 가지 알고리즘의 성능을 교차하여 비교하였다.

가장 오래되고 널리 쓰이는 것은 역방전과 (backpropagation) 법으로 hidden layer의

수와 노들의 수를 사용자가 정하고 학습 자료와 특정 매개변수에 대응한 모델 값을 비교하여 반복적인(iterative) 매개변수의 조정을 통하여 매개변수의 값을 적합화 하는 것이다. 역방전과는 층 구조나 노들의 수가 불확실하고 때에 따라 해답의 수렴이 어려울 수 있다. 반면에 분류를 목적으로 할 경우 확률적 신경망이 더 효율적인 것으로 알려져 있다(Specht, 1990).

확률적 신경망은 학습과정이 빠르고 국지적 최소값(local minima)의 문제가 없어 항상 해답을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 확률적 신경망은 4개의 층(Input layer, Pattern layer, Summation layer, Output layer)으로 이루어져 있다(그림 7-2-1). 패턴 층에서는 각 표본에서 확률분포함수를 추정한 후 전체 모집단의 확률분포함수를 추정하여 학습을 한다. 한 표본 k의 확률분포함수는 다음 식에서 구한다.

$$\frac{1}{\sigma} W\left(\frac{x-x_k}{\sigma}\right)$$

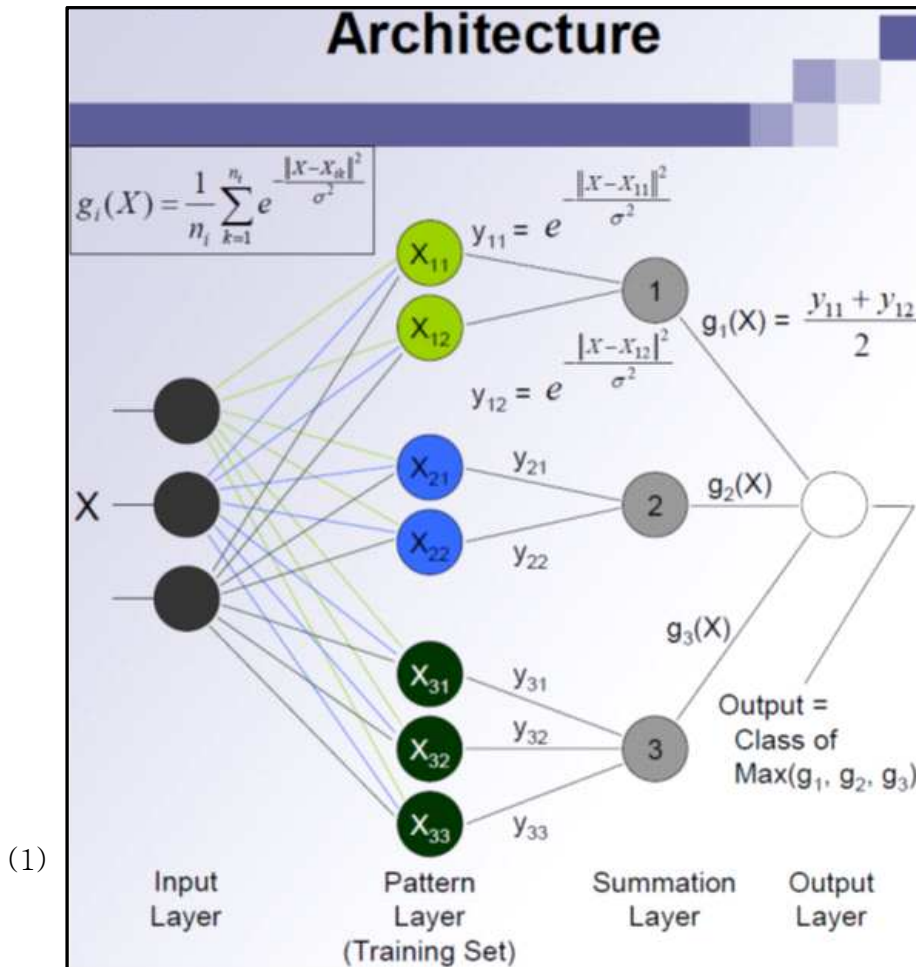


그림 7-2-1. 확률적 신경망의 구조(Cheung and Cannons, 2012).



모집단의 확률분포함수는 확률분포함수를 합한 것이다.

$$\frac{1}{n\sigma} \sum_{k=1}^n W\left(\frac{x-x_k}{\sigma}\right)$$

모집단의 확률분포함수가 구해지면 Bayes 최적 결정법에 따라 주어진 표본이 어느 범주에 속하는지 결정하게 된다.

$$h_i c_i f_i(X) > h_j c_j f_j(X)$$

### 제 3 절 자료 및 방법

#### 1. 수중 알고리즘 (in-water algorithm)

입력층(input layer)로는 Chl a,  $R_{rs}(443)$ ,  $R_{rs}(488)$ ,  $R_{rs}(531)$ ,  $R_{rs}(555)$  등 5개의 변수를 선택하였다. 이 중 4개 밴드의 반사도( $R_{rs}$ )는 제 2절의 연구결과에서 보여 준대로 적조생물의 밀도 증가에 대해 가장 민감하게 반응하는 밴드이다. 제 6장 2절에서 수행한 모의실험에서 만들어진 2,275여개의 반사도는 적조가 일어난 수괴의 식물플랑크톤 군집은 *C. polykrikoides* 80%, 적조가 아닌 경우 20%로 구성되었다는 가정 하에 만들어진 것이다. 비 적조 해역은 적조가 아닌 경우 100%로 구성되었다고 가정하였다. 한국 연안의 복잡한 광학 조건을 포괄하는 광범위 환경 조건을 포함하고 현장 자료에 검증된 자료로 광범위의 환경조건에 적용이 가능하다. 이들은 각각 엽록소가 5, 10, 15, 20, 30 mg m<sup>-3</sup>, CDOM의 ag(443)이 0.015-1.453 m<sup>-1</sup>, 부유입자 adm(443)이 0.003-0.378 m<sup>-1</sup> 범위의 조합을 대상으로 만들어졌다. 이 반사도 중 980개의 반사도를 선정하여 약 1/2을 학습에 사용하였고 나머지 1/2을 가지고 학습된 알고리즘의 정확도를 검증하였다. 확률적 인공신경망의 계산에는 R 언어를 사용하였고 pnn package(Chasset, 2016)와 neuralnet package를 사용하였다.

#### 2. 다중영상을 이용한 인공신경망 훈련

2002 - 2015년 까지 국립수산과학원에서 발간한 적조속보에 나온 적조의 일일 분포도를 디지털화하여 기초자료를 만들었다. GetData Graph Digitizer를 이용하여 일일 단위로 표시된 정점들의 좌표 값을 위경도 값으로 변환한 뒤 이 데이터를 다시 0.01° ×

0.01° 균일격자로 재생성하였다. MODIS영상 중 일부라도 적조 분포를 포함하는 영상을 골라 총 143개의 match-up 자료를 만들었다 (표 7-3-1)

표 7-3-1. MODIS-적조속보 Match-up 자료

Year	Scene
2002	10
2003	18
2004	11
2005	11
2006	9
2007	14
2008	13
2012	22
2013	10
2014	14
2015	11
합계	143

이중에서 매해 충분한 면적과 지역별 분포를 잘 보여주는 영상을 매해 하나 씩 골라 훈련자료를 만들었으며 모두 112,275 개의 화소에 해당하였다 (표 7-3-2). 112,275 개의 화소는 적조 대 비적조 화소가 약 1:3의 비율로 구성이 되어 정확도 평가 시에 비적조-비적조 매치부분이 정확도를 왜곡하는 것을 피하고자 하였다.

표 7-3-2. 신경망 훈련에 사용된 다중 영상

Year	Month	Day	Pixels	Year	Month	Day	Pixels
2002	Aug.	17	5,660	2007	Aug.	18	6,430
2003	Sep.	30	42,554	2012	Aug.	1	12,587
2004	Aug.	13	6,434	2013	Aug.	6	18,985
2005	Aug.	4	8,335	2014	Sep.	11	6,572
2006	Aug.	16	6,434	2015	Sep.	6	5,660

112,275 개의 화소는 적조 대 비적조 화소가 약 1:3의 비율로 구성이 되어 정확도 평가 시에 비적조-비적조 매치부분이 정확도를 왜곡하는 것을 피하고자 하였다.

## 제 4 절 결과

### 1. 확률론적 신경망

PNN은 분류에 특히 강한 알고리즘으로 전진 복층 (feedforward multilayered) 구조를 가지며 입력층 (input layer), 패턴층 (pattern layer), 종합층 (summation layer), 출력층 (output layer)의 4층 구조를 가진다 (그림 7-4-1).

반사도 모의실험 자료는 5개의 엽록소 농도 조건, 즉 엽록소 농도가 각각 5, 10, 15, 20, 30  $mgm^{-3}$  일 때를 가정하여 만들어진 것이다. 학습을 거쳐 매개변수를 정하고 학습에 사용되지 않은 자료에 적용했을 때의 정확도는 다음과 같다. 우선 엽록소 농도가 5  $mgm^{-3}$  일 때의 예측 정확도는 71.6%로 나타났고 엽록소 농도가 10  $mgm^{-3}$ 일 때의 예측 정확도는 82.0%로 5  $mgm^{-3}$ 일 때에 비해 향상되었다. 엽록소 15  $mgm^{-3}$ 로 증가하면 예측 정확도는 85.7%로 5  $mgm^{-3}$ 일 때에 비해 더 향상되었다(표 7-4-1).

표 7-4-1. 엽록소 농도에 따른 확률적 인공신경망 알고리즘의 예측 정확도

Chl <i>a</i> ( $mgm^{-3}$ )	Observed	Predicted	Case	Success rate (%)
5	Non HAB	Non HAB	105	71.6
	Non HAB	HAB	39	
	HAB	Non HAB	54	
	HAB	HAB	129	
10	Non HAB	Non HAB	90	82.0
	Non HAB	HAB	11	
	HAB	Non HAB	36	
	HAB	HAB	125	
15	Non HAB	Non HAB	61	85.7
	Non HAB	HAB	11	
	HAB	Non HAB	10	
	HAB	HAB	65	
20	Non HAB	Non HAB	37	83.7
	Non HAB	HAB	5	
	HAB	Non HAB	11	
	HAB	HAB	45	
30	Non HAB	Non HAB	23	89.8
	Non HAB	HAB	0	
	HAB	Non HAB	5	
	HAB	HAB	21	

그러나 엽록소 농도가 20  $mgm^{-3}$ 로 증가하면 예측 정확도는 83.7%로 15  $mgm^{-3}$

일 때에 비해 오히려 감소되었다(표 7-4-1). 이는 학습 자료에서  $20 \text{ mgm}^{-3}$  부분이 상대적으로 적어 학습이 잘 되지 않은 결과로 생각된다.

엽록소 농도가  $30 \text{ mgm}^{-3}$  로 증가하면 예측 정확도는 89.8%로 가장 큰 값을 보였다(표 7-4-1). 이들 결과를 종합하면 엽록소 농도가  $20 \text{ mgm}^{-3}$  일 때를 제외하면 엽록소 농도가 증가하면 확률적 신경망 알고리즘에 의한 예측 정확도는 증가를 보였다(그림 7-4-1). 이는 제 6장 2절에서 본 것처럼 엽록소 반사도의 밴드 비 공간에서 엽록소 농도가 증가할수록 분리 간극이 증가하는 것과 일치한다. 즉, 엽록소 농도가 증가하면 반사도의 청록대 부분이 함몰되는 정도가 심해지고 이는 반사도 밴드 비에서 더 거리가 멀어지는 것으로 나타난다. 따라서 밴드비의 값이 차이가 많이 날수록 확률 신경망 알고리즘의 예측도가 향상되는 것은 당연한 것이라 할 수 있다.

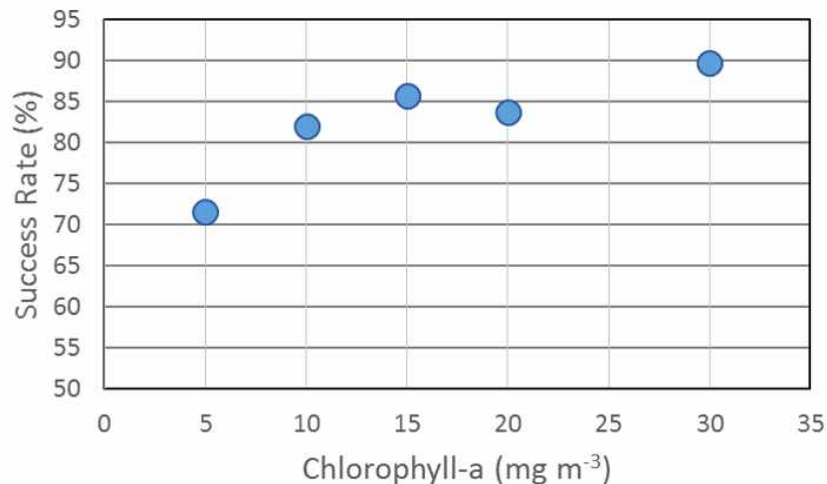


그림 7-4-2. 엽록소 농도와 확률신경망 알고리즘의 예측도의 관계

## 2. 역방전파 인공신경망

Resilient Backpropagation 신경망 적용을 위해 R 언어를 사용하였고 R package 'neuralnet'을 활용하였다. Error function은 SSE (sum of square error), 알고리즘은 rprop+을 사용하였다. 최적의 인공신경망 구조를 결정하기 위해 다양한 구조가 시도되었고 시행착오를 거쳐 최종 구조를 결정하였다(그림 7-4-2). 최적 구조는 3-2의 hidden layer와 chl, 442, 487, 532, 558 nm 등 5개의 input layer를 가지고 있다. 412, 550, 667, 679 nm의 추가는 적합도를 유의하게 향상 시키지 못하였다. 인공신경망 훈련에는 980개의 씨플레이션 자료 중 1/2인 490 개를 무작위적으로 골라 사용하였고 나머지 490개를

정확도 검증에 사용하였음. 예측 성공률은 95%였다 (표 7-4-2).

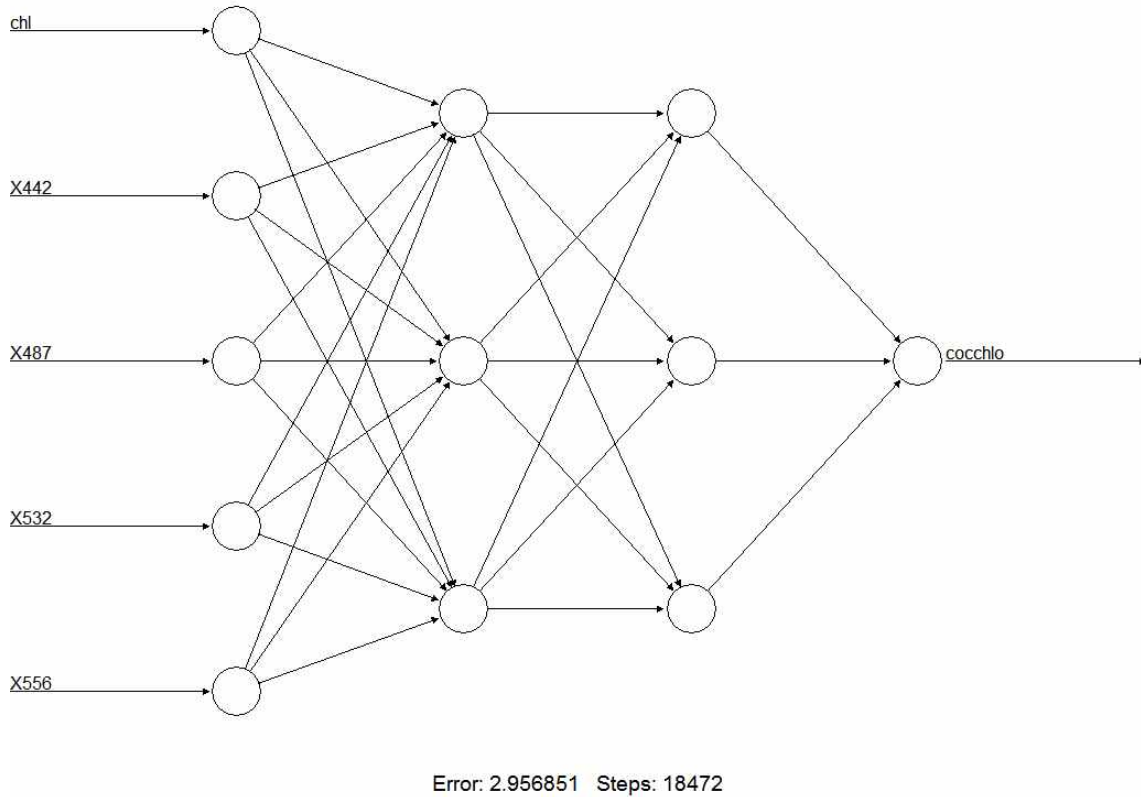


그림 7-4-3. 역방전파신경망의 최종 구조

표 7-4-2. 독립적 자료에 의한 In-water 인공신경망 알고리즘의 예측 성공률.

		Observed	
		Non-HAB	HAB
Predicted	Non-HAB	227	15
	HAB	9	239

### 3. MODIS 인공신경망 알고리즘

같은 구조의 인공신경망을 MODIS 다중 영상에 적용한 결과, 412, 678 nm 두 개의 밴드를 추가 할 때 예측도가 향상하였고 최적 구조는 그림 7-4-2와 동일하다. MODIS 다

중 영상을 훈련할 때 훈련 자료의 적절성이 문제가 될 수 있으며 실제로 아무런 선별 작업이 없이 훈련하면 정확도가 72%로 낮아지며 특히 적조가 있을 때 탐지를 못할 확률이 커지게 됨 (표 7-4-3).

표 7-5-3. MODIS 다중 영상에 (비선별 자료) 대한 인공지능망 알고리즘의 예측 성공률.

n.hab = 4000	Test on All	
HAB pix range	0.0	1.0
nonHAB pix range	0.0	1.0
	Observed	
Predicted	0	1
0	61457	23368
1	2184	4452
Succes rate	0.72	

자료 선별의 근거는 2016년에 시행한 시뮬레이션 및 현장관측 자료에서 나타난 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 반사도 특징이다. 즉, *Cochlodinium polykrikoides* 고유의 색소 특성에 의해 430-500 nm대의 반사도가 급격히 감소하는 패턴이 나타난다 (Kim et al., 2016). 현재의 훈련에 의한 인공지능망을 훈련에 사용하지 않은 다중 영상 화소 37,400개에 대해 검증한 결과 88-90%의 예측 성공률을 확보하였다 (표 7-4-4).

표 7-4-4. MODIS 다중 영상에 (선별 자료) 대한 인공지능망 알고리즘의 예측 성공률.

n.hab = 4000	Test on screened	
HAB pix range	0.0	0.6
nonHAB pix range	0.4	1.0
HAB ratio=1:1 (both)	Observed	
Predicted	0	1
0	18087	3472
1	613	15228
Succes rate	0.89	
run	2/50	fit
		fit180105H.data

## 제 5 절 인공신경망 알고리즘 성능의 평가

인공신경망 모델은 여러 종류의 모델을 시험한 결과 수렴의 용이성, 계산 시간 등을 고려하여 Resilient Backpropagation 모델을 최종적으로 선정하였다. 인공신경망 훈련은 위성영상을 적용하기 전에 일차적으로 광학적 시뮬레이션 모델의 결과를 이용하여 이루어 졌으며 이 목적은 이론적인 근거로 훈련하여 1) 최적의 인공신경망 구조를 확립하고 2) 수중 광학부이 등 현장 관측자료에서 실시간으로 적조를 탐지할 수 있는 알고리즘을 개발하는 것임. 여기서 개발된 확률 신경망 알고리즘은 수중(in-water) 알고리즘이다. 학습에 사용된 시뮬레이션 자료가 반해석적(semi-analytic) 알고리즘에 의해서 만들어졌기 때문에 확률 신경망 알고리즘의 예측도는 경험적인 방법에 의한 기존의 적조탐지 알고리즘 보다 더 높을 것으로 기대된다. 기존의 경험적 알고리즘을 동일한 자료에 적용했을 경우와 비교하면 확률적 신경망 알고리즘은 실제로 다른 경험적 알고리즘에 비해 훨씬 높은 정확도를 보인다(그림 7-5-1). 또 다른 특징은 엽록소 농도가 증가함에 따라 경험적 알고리즘들은 정확도의 변화가 없거나 오히려 감소하는 것을 보여주나 확률 신경망 알고리즘의 정확도는 더욱 향상되어 90%에 접근한다. 또한 사용된 매개변수의 범위가 한국 연안 환경보다 훨씬 더 넓다는 것을 고려할 때 경험적 알고리즘과 달리 한국 연안 뿐 아니라 광범위한 해양 환경에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

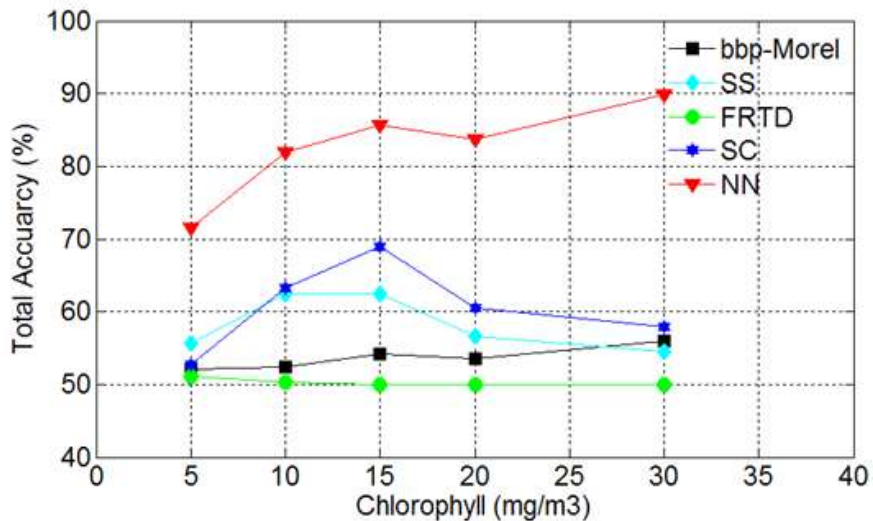


그림 7-5-1. 확률적 신경망 알고리즘(PNN)과 기타 경험적 알고리즘의 예측도 비교

수중광학 시뮬레이션 자료에 PNN을 훈련하여 테스트한 결과 엽록소 농도에 따라 정



확도가 71.6% (Chl-a > 5 mg m<sup>-3</sup>) to 89.8% (Chl-a > 30 mg m<sup>-3</sup>)로 증가하였다 (그림 7-5-1). 한편 Resilient Back-propagation method는 95%의 정확도를 보였고 (표 7-4-2) 엽록소 농도에 독립적이었다.

위의 신경망 알고리즘은 수중(in-water) 알고리즘이므로 인공위성 원격탐사에 이용하기 위해서는 추가적 연구가 필요하다. 무엇보다도 인공위성에서 관측된 신호는 해양 신호 뿐 아니라 전체 신호의 80 ~ 90%에 달하는 대기 잡음을 포함하고 있어 해양신호를 제대로 추출하기 위해서는 대기 잡음을 효과적으로 제거하여야 한다. 이러한 과정을 대기보정(atmospheric correction)이라고 한다. 현재 해상원격탐사에서 충분히 해결하지 못한 문제 중에 하나가 대기보정이라 할 수 있다(Mouw et al., 2015). 대기보정은 특히 적조가 빈발하는 연안역에서 심각한 문제이다. 하나의 원격탐사 자료를 이용하여 확률적 신경망 알고리즘을 학습시켰을 때 정확도는 72.3%에 달하였다. 그러나 연안역의 원격탐사자료는 여전히 상당한 부분의 대기잡음을 포함할 수 있으며 대기 상태나, 연안의 광학적 특성에 따라 오차의 정도가 달라질 것으로 예상된다. 따라서 다양한 위성영상에 적용할 수 있는 신경망 알고리즘을 개발하기 위해서는 여러 날이나 계절의 다중 영상을 이용하여 학습하였다.

MODIS 다중 영상 비선별 자료에 PNN을 훈련하여 30회 테스트한 결과 70.4-71.8%의 정확도를 보여 Resilient Back-propagation method와 비슷한 정확도를 보였다. 그러나 내용에 있어 Resilient Back-propagation method는 현장에 적조가 있을 때 탐지 못하는 비율이 비대칭적으로 높은 반면 PNN은 고른 오차 패턴을 보였다 (표 7-5-1). PNN과 Resilient Back-propagation method를 비교할 때 PNN은 항상 1번의 훈련에 해답에 수렴하였으나 Resilient Back-propagation은 경우에 따라 500번 이상 수행해야 해에 수렴하거나 구조가 부적합할 경우 아예 수렴하지 않아 훈련이 용이하지 않았다. 반면에, PNN은 확률 계산에 있어 시간이 많이 소요되어 한 영상 처리에 십수 시간 이상 걸리는 반면 Resilient Back-propagation은 vector 계산이 가능하여 수초 이내에 계산이 가능하였다. 따라서 빠른 계산시간이 요구되는 적조 탐지에 있어 Resilient Back-propagation method 이 더 유용하다고 판단된다. 그러나 Resilient Back-propagation은 적정의 신경망 구조를 찾는 것이 용이하지 않으며 추후 MODIS가 아닌 다른 위성을 활용하기 위한 알고리즘을 훈련할 때 이 연구에서 습득한 구조 탐색 기술을 활용할 필요가 있다.

표 7-5-1. MODIS 다중 영상에 (비선별 자료) 대한 PNN 인공신경망 알고리즘의 예측 성공률의 예.

		Observed	
		Non-HAB	HAB
Predicted	Non-HAB	3,546	1,845
	HAB	1,014	3,595

## 제 6 절 적조 인공지능망 알고리즘에 의한 위성자료 분석

개발한 Resilient Back-propagation 인공지능망을 이용하여 2002-2015년 간 구름이 가리지 않은 MODIS 영상에서 적조 분포를 계산하였다. 아래에서 몇 개의 대표적 영상을 골라 적조속보와 비교하였다.

그림 7-6-1은 2002년 9월 8일의 *Cocchloclodium* 적조 분포로 위성자료에서 추출한 적조분포는 육안으로 보고된 적조속보와 비교할 때 적조 패치의 위치와 규모에 있어 차이가 있다. 구룡반도 부근의 적조는 연안에서 떨어져 있고 여러 개의 패치로 나누어져 있다. 사량도 부근의 적조도 위치가 조금 다르고 규모도 훨씬 작다. 이러한 차이는 적조속보 정보의 부정확함과 위성영상과의 관측 시간 차이로 설명이 되며 적조속보가 주로 어선에서 육안으로 목도한 정성적인 정보임을 고려할 때 위치나 규모는 위성영상이 보다 정확할 것으로 판단된다.

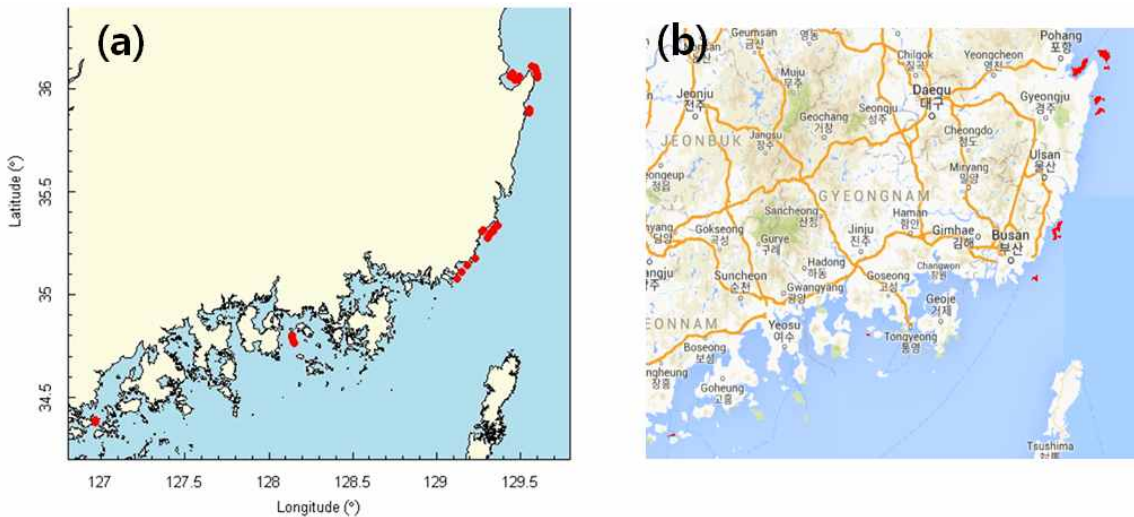


그림 7-6-1. 2002년 9월 8일의 *Cocchloclodium* 적조 분포. (a) 국립수산과학원 적조속보. (b) MODIS 영상에서 인공지능망 알고리즘으로 계산한 적조분포.

그림 7-6-2은 2002년 9월 11일의 *Cocchloclodium* 적조 분포로 위성자료에서 추출한 적조분포는 9월 8일자와 비교할때 (그림 7-6-1) 남해에서는 확산되지 않았으나 동해 연안을 따라 확산된 것을 볼수 있다. 또한 적조속보와 달리 구룡반도 남쪽 연안은 적조패치가 불연속적으로 흩어져 있고 포항 북쪽 연안은 확산 규모가 큰 분포를 잘 보여준다.

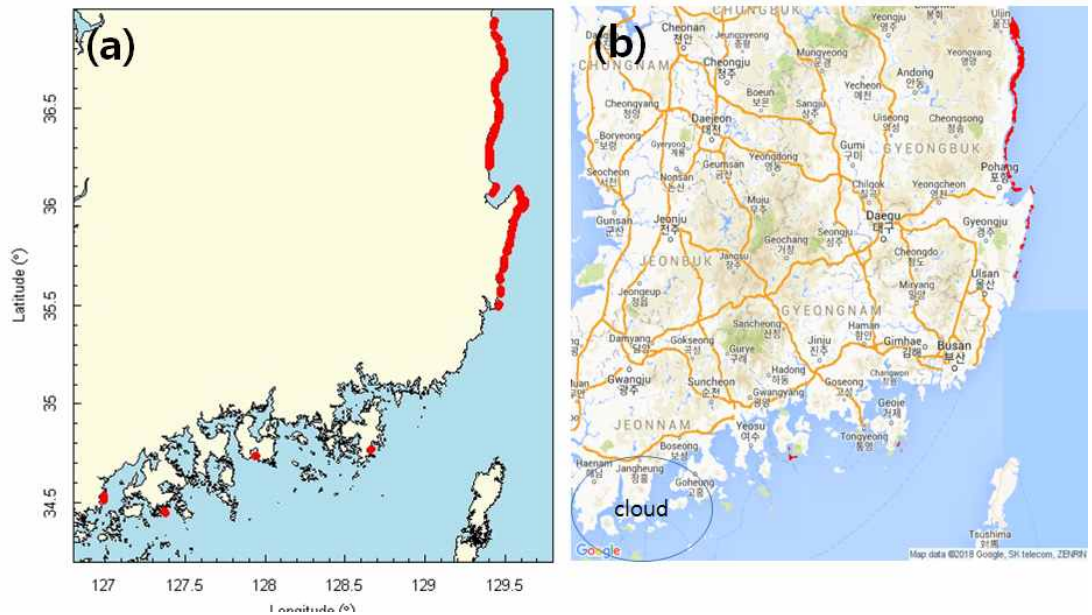


그림 7-6-2. 2002년 9월 11일의 *Cocchloclodinium* 적조 분포. (a) 국립수산과학원 적조속보. (b) MODIS 영상에서 인공신경망 알고리즘으로 계산한 적조분포.

2003년 8월 22일의 *Cocchloclodinium* 적조 분포를 보면 위성자료에서 추출한 적조분포는 적조속보에서 보고된 위치와 크게 볼 때 일치하며 적조속보에서 볼수 없는 적조의 광역적 분포 특성을 보여 준다 (그림 7-6-3). 즉 득량만, 진주만, 자란만 등 만 내해에서는 큰 규모의 적조 패치가 발달되어 있으나 외해 쪽에는 적조패치가 불연속적으로 흩어져 분포하는 특성을 보여 준다. 이러한 광역 분포 특성은 처음 밝혀진 것으로 적조의 확산 형태 연구에 새로운 정보를 제공할 수 있음을 보여준다.

2003년 9월 30일에는 8월에 비해 *Cocchloclodinium* 적조 분포가 축소된 반면 동해안을 따라 북상한 것을 보여준다 (그림 7-6-4). 적조속보에서는 지역적 강도의 차이와 정확한 위치를 알 수 없어 위성자료가 더 많은 정보를 주는 것을 알수 있다.

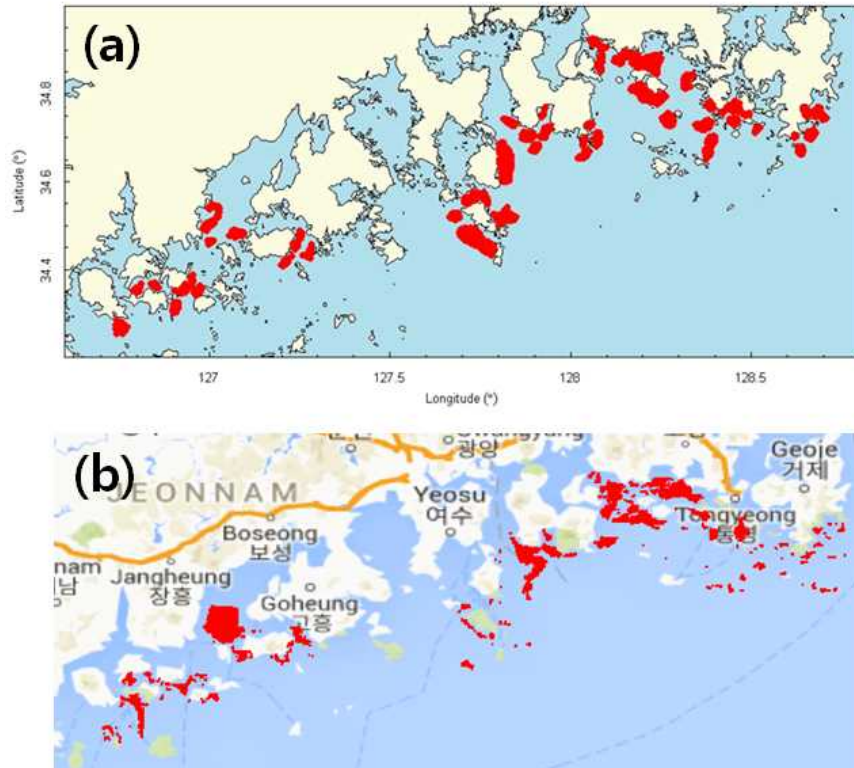


그림 7-6-3. 2003년 8월 22일의 *Cocchlostinum* 적조 분포. (a) 국립수산과학원 적조속보. (b) MODIS 영상에서 인공신경망 알고리즘으로 계산한 적조분포.

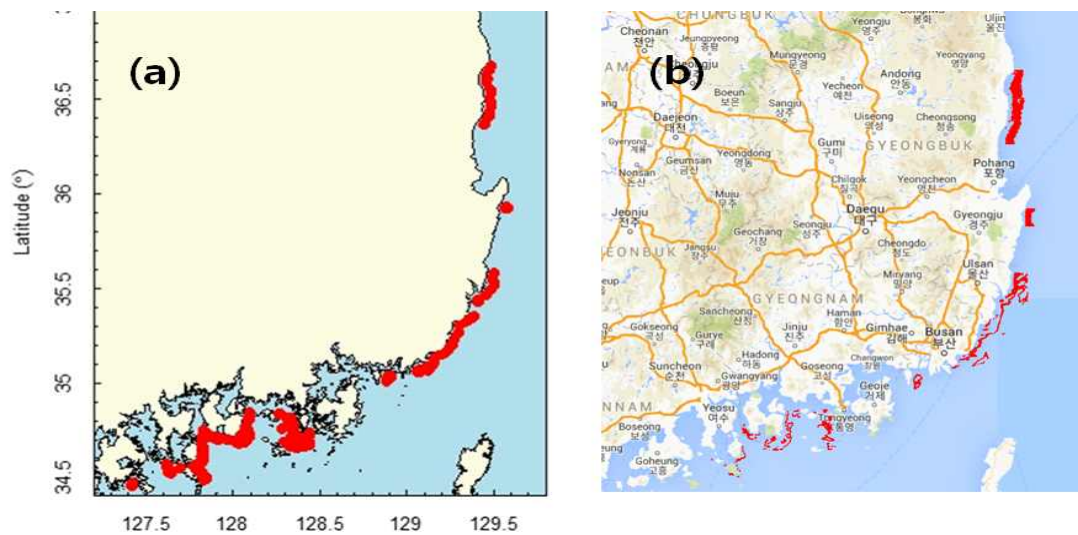


그림 7-6-4. 2003년 9월 30일의 *Cocchlostinum* 적조 분포. (a) 국립수산과학원 적조속보. (b) MODIS 영상에서 인공신경망 알고리즘으로 계산한 적조분포.



위성자료에서 추출한 2007년 8월 17일의 *Cocchlostinium* 적조 분포는 적조속보에서 보고하지 않은 적조 분포를 보여준다 (그림 7-6-5). 즉 금오열도, 남해도 부근, 동해안 (울산-포항)에 큰 규모의 적조 패치가 발달되어 있으나 적조속보에는 보고되지 않았다.

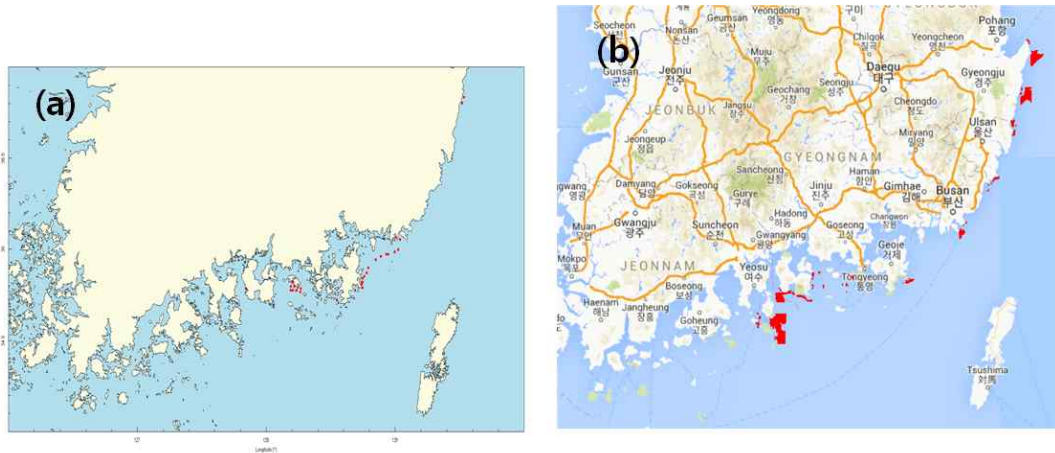


그림 7-6-5. 2007년 8월 17일의 *Cocchlostinium* 적조 분포. (a) 국립수산물과학원 적조속보. (b) MODIS 영상에서 인공신경망 알고리즘으로 계산한 적조분포.

그림 7-6-6은 2013년 8월 14일의 *Cocchlostinium* 적조 분포로 위성자료에서 추출한 분포도는 적조속보에서 보고하지 않은 적조 분포를 보여준다. 즉 남해도 남쪽, 육지도 남쪽, 기장군 외해, 울산 외해 등의 큰 규모의 적조 패치가 발달되어 있으나 적조속보에는 보고되지 않았다.

그림 7-6-7은 2014년 8월 22일의 *Cocchlostinium* 적조 분포로 위성자료에서 추출한 분포도는 적조속보에서 보고하지 않은 적조 분포를 보여준다. 직경 1km 미만의 수십개의 작은 패치부터 10km에 이르는 큰 패치까지 보여 주며 실제 현장의 적조 분포 특성과 유사하다. 이러한 분포 특성은 산발적인 목격 기록에 의존해서 작성된 적조속보에서는 찾아낼수 없는 특성이다.

-2015년 9월 4일의 위성자료에서 추출한 *Cocchlostinium* 적조 분포도는 득량만과 같은 탁도가 높은 해역에서 구룡반도 외측과 같이 비교적 맑은 해역에 이르기 까지 적조를 효율적으로 잘 탐지하고 있다 (그림 7-6-8). 거문도 부근, 남해도, 사랑도 부근 적조속보에서 보고하지 않은 적조 분포를 보여줌. 직경 1km 미만의 수십개의 작은 패치부터 10km에 이르는 큰 패치까지 보여 주며 이러한 분포 특성은 산발적인 목격 기록에 의존해서 작성된 적조속보에서는 찾아낼수 없는 특성이다.

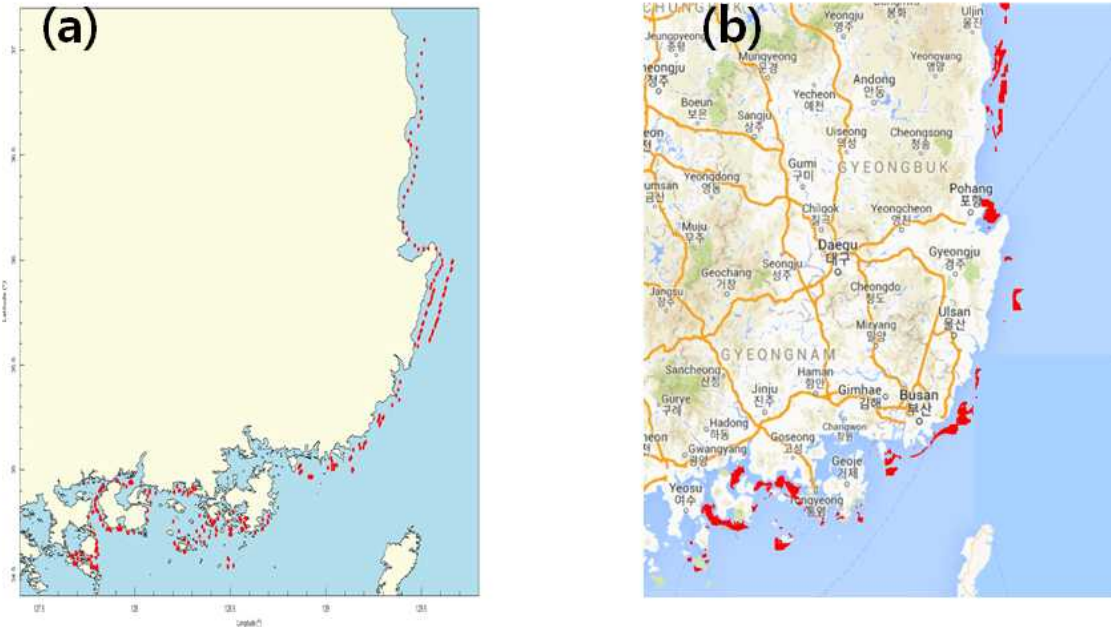


그림 7-6-6. 2013년 8월 14일의 *Cocchlo dinium* 적조 분포. (a) 국립수산과학원 적조속보. (b) MODIS 영상에서 인공신경망 알고리즘으로 계산한 적조분포.

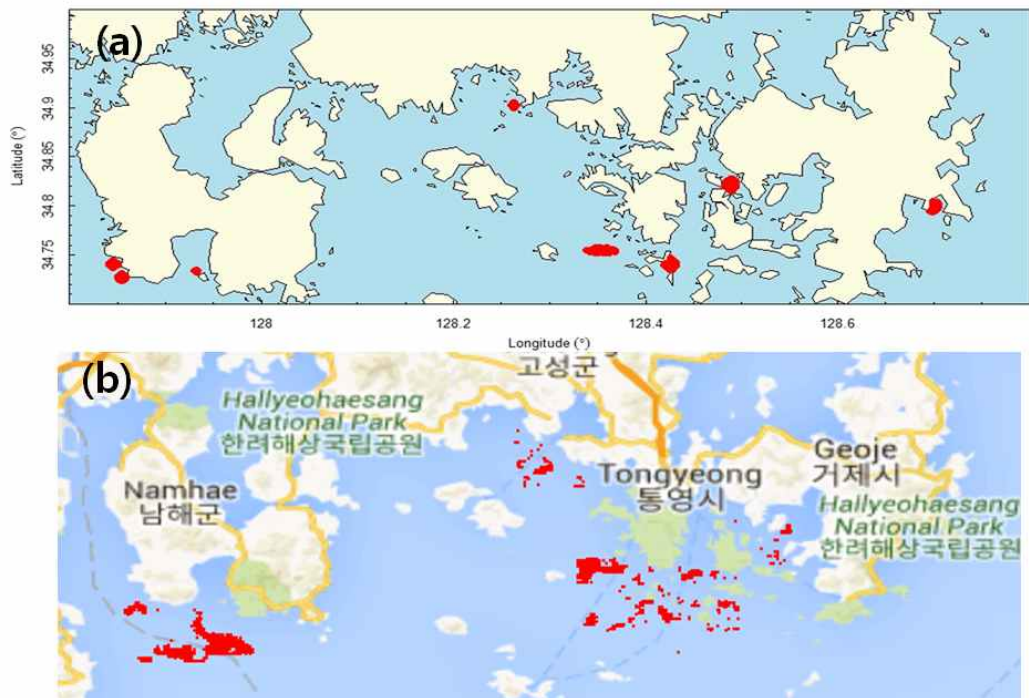


그림 7-6-7. 2014년 8월 22일의 *Cocchlo dinium* 적조 분포. (a) 국립수산과학원 적조속보. (b) MODIS 영상에서 인공신경망 알고리즘으로 계산한 적조분포.





그림 7-6-8. 2015년 9월 4일의 *Cocchlostinium* 적조 분포. (a) 국립수산과학원 적조속보. (b) MODIS 영상에서 인공신경망 알고리즘으로 계산한 적조분포.

## 제 8 장 적조 빅데이터 분석 플랫폼 구축

### 제 1 절 적조관련 빅데이터 구성 및 DB

적조 관련 빅데이터는 2014년과 2016년에 걸쳐 수집을 하였고, 구성은 크게 세 개의 자료로 분류된다(표 8-1-1). 첫째, 적조 현상과 관련된 현장관측 자료, 둘째, 다중 위성 관측 자료, 셋째, 적조 현상과 관련된 환경 자료로 구성되어 있다. 구축된 자료들은 daily, 8-day, monthly 자료로 구성되며, 적조 탐지 및 발생 경향 분석에 사용 될 것이다.

표 8-1-1. 적조 빅데이터 구성 및 구축 현황

자료 구성	자료 종류	자료 형식	현황
현장 관측	적조 발생현장자료 (수산과학원 적조속보 digitizing)	ascii (시간, 위도, 경도)	1998 ~ 2016
	적조 발생해역 현장관측 자료 (수온, 염분, 엽록소 <i>a</i> 농도, 영양염, 일차생산, IOP, AOP 등)	ascii (시간, 위도, 경도, 수심, 값)	2014년 5월과 8월 2015년 5월과 8월 2016년 5월
	적조종 흡광자료	ascii (파장별 흡광값)	실험실 적조종 배양
다중 위성	해색위성 (SeaWiFS, MODIS 파장별 반사도, 엽록소 <i>a</i> 농도, 광합성 유효광, 표층수온 등)	HDF, ascii (시간, 위도, 경도, 산출물 값)	1998 ~ 2007 SeaWiFS 2003 ~ 2016 MODIS
	표층수온 (NOAA AVHRR)	HDF, ascii (시간, 위도, 경도, 표층수온)	1985 ~ 2012
	표층바람 (QuicksScat, Ascet)	netcdf, ascii (시간, 위도, 경도, 표층수온)	2000 ~ 2016
	강우량 (SSM/I)	ascii (시간, 위도, 경도, 강우량)	1991 ~ 2016
	해수면 (AVISO)	netcdf, ascii (시간, 위도, 경도, sea level anomaly)	1998 ~ 2016
환경 자료	일사량, 강수량, 태풍 (기상청)	ascii (시간, 위도, 경도, 값)	1998 ~ 2016
	수온, 염분, 용존산소, 영양염 (국립수산과학원)	ascii (시간, 위도, 경도, 값)	1998 ~ 2016
	조석 (국립해양조사원)	ascii (시간, 위도, 경도, 값)	2000 ~ 2016
	기후인덱스 (NASA CPC)	ascii (시간, 값)	1950 ~ 2016

## 1. 현장 관측자료

적조 발생 현장 자료는 국립수산과학원에서 제공된 문헌 자료와 홈페이지를 통해서 얻어진 자료이다. 1차년도인 2014년에는 2002년부터 2013년 자료에 대한 수집 및 분석을 완료하였고, 2015년에는 1998년 ~ 2001년과 2014년 ~ 2015년 자료에 대해서 적조 발생의 시·공간적 정보, 적조종 정보, 셀 농도, 주변 해양환경 정보 등을 수집하였으며, 2016년 도 적조 발생에 대한 정보를 구축하였다. 1998년 ~ 2016년 적조 발생지에 대한 이미지 자료는 digitizing을 통하여 시·공간적인 정보를 구축했다. 구축된 자료는 기존의 적조 탐지 방법 비교와 평가를 위해 사용하였고, 적조 탐지 방법 개발뿐만 아니라 적조 발생 경향 분석에 유용한 자료로 사용될 것이다.

2014년과 2015년 적조 발생 해역 현장관측은 적조 발생 전인 5월과 적조가 발생한 시기인 8월에 두 번 수행되었으며, 2016년 적조 발생 해역 현장관측은 적조 발생 전인 5월에 실시하여 적조 발생 전의 해양 환경 분석을 수행하였다. 2016년 8월의 현장관측은 실시하지 않았으며 국립공원 관리공단으로부터 물리적 관측자료를 제공받아 분석하였다. 현장관측의 주목적은 적조종이 가지는 광학적 특성을 파악하여 위성에서 적조 탐지를 위한 알고리즘 개발에 이용하는 것이다. 두 번째로 적조가 발생하는 해역의 해양 환경을 이해하기 위해 적조 발생 전과 후의 환경을 관측하고 분석하여 적조 발생-이동-확산-소멸이 되는 원인을 이해하는 것이다.

실험실에서는 남해안 적조 발생 시 큰 피해를 주는 *C. polykrikoides* 적조종과 적조종 이외에 적조를 발생시키는 다른 종들도 함께 배양하여 종들이 가지는 광학적 특성을 파악하고 그들의 고유한 흡광특성을 분석하였다. 이렇게 분석된 자료를 반사도 모델에 적용시켜 적조종의 반사도 값을 계산하였고 현장 값과 위성에서 추정된 값들과 비교 분석을 실시하였다. 금년도 연구에서는 실험실에서 배양된 *C. polykrikoides* 적조종 흡광자료를 이용한 Hydrolight 반사도 모델을 가지고 다양한 환경에 대한 반사도 특성을 계산하여 이를 기반으로 적조 탐지 알고리즘을 개발을 실시하였다.

## 2. 다중위성 자료

적조 탐지, 기존 적조 알고리즘 비교·평가 및 새로운 알고리즘이 개발되면 해색위성 자료를 가지고 과거 적조 발생 지도를 재처리하여 국립수산과학원에서 예보하지 못하는 부분까지 적조를 탐지하여 적조 발생 경향 분석에 이용할 예정이다. 2014년 연구에서는 해색위성의 파장별 반사도 스펙트럼을 가지고 기존에 개발된 알고리즘에 적용하여 정확도 평가를 했다. 추후에는 적조 분석 플랫폼에 의해 개발된 알고리즘을 이용하

여 과거 위성자료를 재분석한 뒤 장기 적조 발생 경향을 분석할 예정이다. 뿐만 아니라 적조 발생 현장자료와 비교하여 광대역의 적조 발생 분석을 실시 할 예정이다.

기타 열적외선 및 마이크로웨이브를 이용하여 관측된 표층수온, 바람, 강우량 자료들은 적조 발생 경향 분석을 위한 해양환경자료로 이용된다.

### 3. 환경자료

환경자료는 적조 발생 주변 해역의 정점 관측 자료, 육상 관측에서 제공하는 장기 자료로서 적조 탐지 결과와 더불어 1, 2차년도에 적조 발생 경향 분석을 위해 사용되었다. 금년도 연구에서 수행한 적조 탐지 알고리즘을 위성자료에 적용해 적조 발생분포 및 규모를 재처리 하여 신뢰할 수 있는 자료를 확보한 뒤 수집한 환경자료와 결합하여 재분석을 실시할 계획이다.

## 제 2 절 적조분석 플랫폼 구성현황

### 1. 적조 빅데이터 플랫폼 구축 및 다차원 배열 스키마 설계

한국과학기술정보연구원에서 개발 중인 맞춤형 위성 빅데이터 고속변화 고효율 처리시스템 구동을 위해 2014년 서버 5대와 2015년에 6대를 추가 구입하여 서버 1대는 마스터로 구축하고 나머지 10대는 클러스터링하여 고성능 분산처리가 가능한 시스템과 데이터 백업용 NAS를 구축하였다(그림 8-2-1). 표 8-2-1은 분산병렬처리를 위한 서버의 성능을 보여주고 있다. 또한 위에서 언급한 SGE 기반의 분산·병렬 처리 소프트웨어를 각 서버에 설치하여 클러스터를 구성함으로써 인공위성 원격탐사 자료의 효율적인 처리가 가능하도록 하였다.

한국과학기술정보연구원과 협조를 통하여 SciDB 교육을 수행하면서, 다양한 테스트 자료를 이용하여 자료 입·출력 테스트를 완료하였고, 시스템 안정화를 위한 여러 가지 테스트를 수행하고 있다. 또한, 적조 빅데이터 분석 플랫폼 상의 다차원 배열 구성과 플랫폼 상에서 자료 처리를 위한 업무 협조를 수행하고 있다.

- 입력자료 : 해색위성, 적조관련 해양환경자료
- 다차원 배열 : 시/공간적 해상도 차이로 인하여 여러 차원의 배열 구조 필요
- 자료분석 : 대용량 자료로 인하여 서버 내부에서 연산이 가능한 분석 방법 개발을 위해서 협무 협조 중(예: EOF 분석, K-mean clustering, 통계 분석 등)

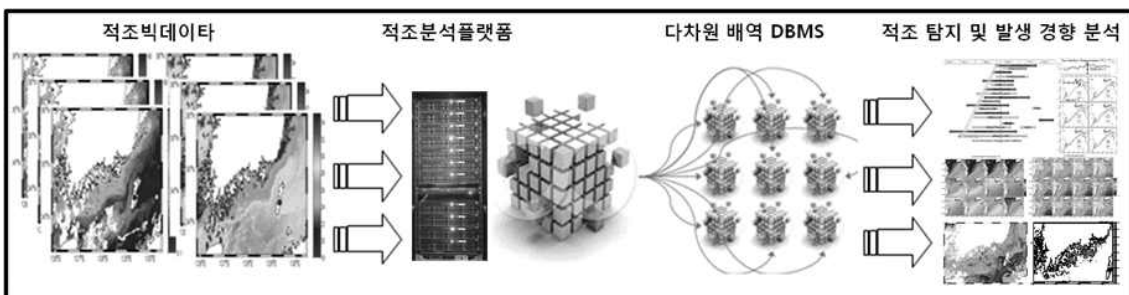


그림 8-2-1. 적조 빅데이터 분석 체계

표 8-2-1. 분산병렬처리 서버 노드별 사양

CPU	Memory	HDD	Storage (Link)	OS
Intel Xeon E3-1230V3, 3.3GHz, L2 8MB	32GB	12 TB	110 TB	CenterOS

### 제 3 절 TuPiX Ocean Color

#### 1. TuPiX OC를 활용한 적조 빅데이터 분석 기술

한국과학기술정보연구원에서 개발한 TuPiX Ocean Color는 위성 원격탐사 데이터를 사용하는 과학자들이 대규모 데이터를 SeaDAS를 이용해 정적으로 관리하며 변환하여 연구를 수행하면서 발생하는 비효율성을 개선하기 위한 시스템이다. 다시 말해 연구자들이 각자의 PC에서 SeaDAS를 구동하여 위성 데이터 변환을 수행하여 얻어진 영상 데이터 또는 직접 개발하고 작성한 위성 영상 분석 알고리즘을 구동하여 분석된 결과를 공유할 수 없고 비효율적인 데이터 가시화 처리 문제를 해결하고자 하는 것이 TuPiX OC 시스템 개발의 목적이다.

이 시스템을 통해 위성 영상 데이터를 분석한다면 SeaDAS 변환 처리를 분산화하여 동시에 여러 머신에서 구동하므로 시스템 자원의 효율적 사용 및 고속 처리 수행이 가능하다. 더불어 변환 대상의 위성 영상들을 통합 관리함으로써 특정 연구자가 변환한 영상을 다른 연구자가 공유하여 사용하는 것이 가능해진다. TuPiX 시스템의 또 다른 장점은 위성 영상 알고리즘 처리 수행 결과를 표출하는 기능을 제공하기 때문에 처리 결과를 쉽게 확인할 수 있도록 가시화 할 수 있다(그림 8-3-1). 또한 이 시스템은 웹 기반 플랫폼이기 때문에 사용자들은 별도 응용 프로그램 설치 없이 이 모든 기능들에 대한 서비스를 사용할 수 있다. 현재 TuPiX 시스템 상에서는 MODIS 해색위성 자료 수집 및 분석이 가능하다.

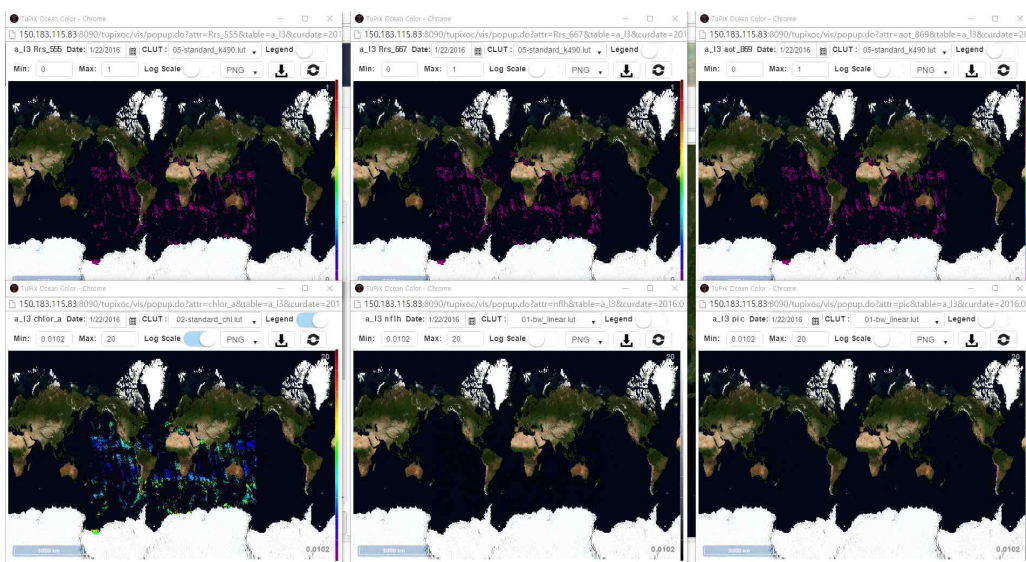


그림 8-3-1. TuPiX OC를 이용한 위성 데이터 가시화 예.

## 제 9 장 적조 발생 환경 빅데이터 분석

### 제 1 절 적조 발생해역 현황자료

#### 1. 기존문헌 연구자료

적조 관련 문헌자료는 총 51편의 자료를 수집하여 각각 적조 모니터링에 관한 자료, 동향 분석, 적조종의 생물학적 특징, 적조 탐지 방법, 적조 피해상황, 대응체계 구축 등으로 분류하여 정리하였고 현장 관측 해역인 남해안의 해양환경을 살펴보기 위해 그 동안의 문헌 자료를 토대로 데이터화 하였다.

#### 2. 물리 관측 자료

##### 가. 수온 및 염분

적조발생과 남해안의 해양환경을 살펴보는데 가장 기초가 되는 수온과 염분의 장기변화를 살펴보기 위하여 한국해양자료센터(Korea ocean data center, KODC)에서 제공하는 정선 해양 관측 자료를 이용하였다. 연안해역과 외해역의 변화를 각각 살펴보기 위해 <그림2-5-1.와 같이 정점을 구분하였는데 연안해역의 정점으로는 205-01(127.81° E, 34.37° N), 206-01(128.58° E, 34.59° N) 그리고 400-16(128.20° E, 34.52° N)을, 외해역의 정점으로는 205-03(127.95° E, 34.09° N), 206-03(128.83° E, 34.37° N) 그리고 400-14(128.40° E, 34.23° N)를 선택하였다. 2000년부터 2013년까지 수심 0 m의 수온과 염분의 격월 장기 자료를 가지고 표층수온과 표층염분을 추출하였고 전 수층에서의 수온과 염분을 이용하여 밀도( $\sigma_t$ )를 구하였다(Fofonoff and Millard, 1983).

연안해역과 외해역의 표층 수온의 차는 그리 크지 않으나 전반적으로 외해역의 표층수온이 대마난류의 영향으로 조금 더 높게 나타났다(그림 9-1-2.). 표층 염분의 경우 여름철에는 외해역이 대체적으로 낮고 그 이외의 계절에는 높게 나타났다. 여름철 외해역의 염분이 낮은 이유는 여름철의 중국 양자강 유역에서 발생하는 저염분수가 대마난류를 따라 외해역으로 유입되기 때문이라 여겨진다. 특히 2001년, 2006년, 2010년 그리고 2013년의 여름에 외해역의 염분이 현저히 낮게 나타났으며 이와 반대로 2007년과 2011년의 여름에 연안해역의 염분이 더 낮게 나타났다.

연안해역과 외해역에서의 성층화 현상이 어느 정도인지 살펴보기 위하여



stratification index(SI)를 아래의 공식에 의거하여 구하였다.

$$SI = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{z_2 - z_1}$$

$\sigma_1$ 과  $\sigma_2$ 는 표층과 저층에서의 밀도를 나타내며  $z_1$ 과  $z_2$ 는 표층과 저층에서의 수심을 나타낸다.

연안해역의 경우 각각의 표층과 저층의 수심은 0 m와 30 m이며 외해역에서의 표층과 저층의 수심은 0 m와 75 m로 선정하였다. 그림 9-1-3.과 같이 외해역보다는 연안해역의 성층화 현상이 더 강하게 나타났으며 그 차는 여름철에 두드러졌다. 여름이 끝난 직후 가을철에는 이와 반대로 외해역의 성층화 현상이 강하게 나타나는데 이로 보아 연안해역의 수괴의 변화정도가 외해역보다 더 심한 것으로 보인다. 특히 2011년 여름철 연안해역과 외해역의 성층화 정도가 현저히 차이 나는데 이 원인에 대해서는 앞으로 좀 더 살펴보아야 할 것으로 판단된다. 다만, 현장관측 자료와 달리 연안해역과 외해역의 성층 발달이 상반된 결과를 보여주어 연안해역으로 선정된 정점보다 더 연안과 가까운 정점들을 조사해 볼 필요가 있다.

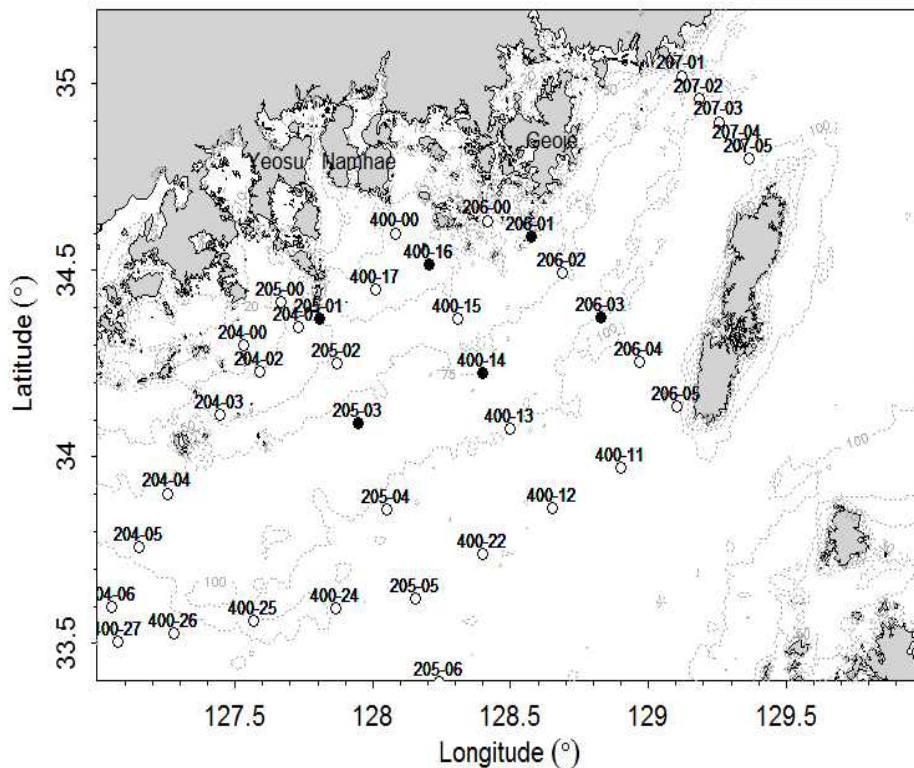


그림 9-1-1. 한국해양자료센터의 조사 관측정점 (검은 원: 이번 연구에서 장기 관측 자료를 위해 사용된 정점)

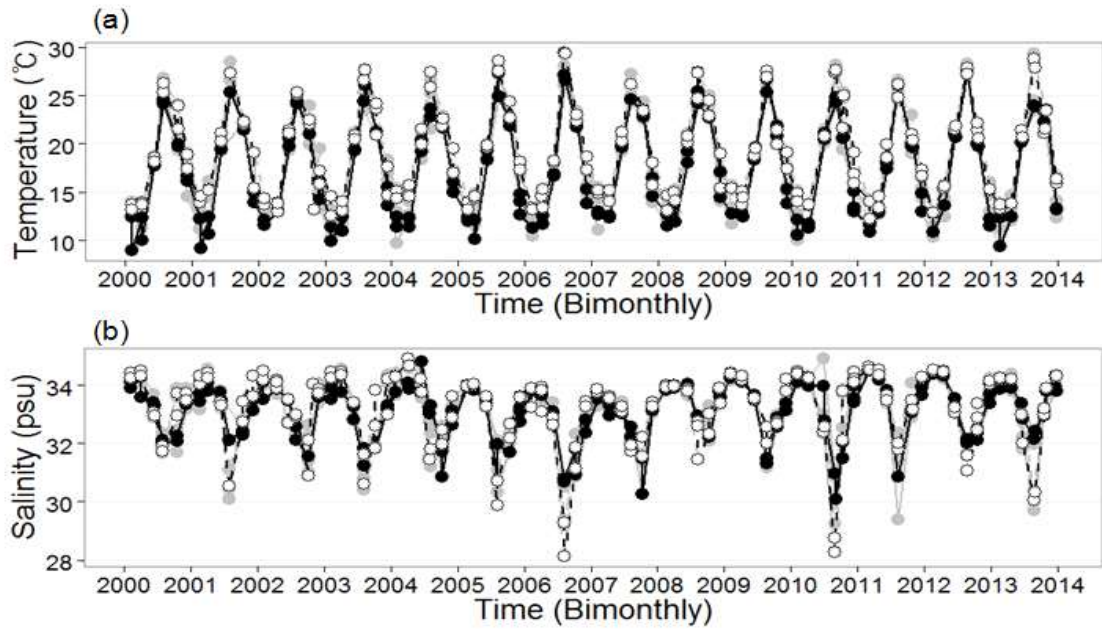


그림 9-1-2. 2000~2013년 기간 동안의 연안정점(검은 원: 205-01, 206-01, 400-16의 평균값)과 외해정점(흰 원: 205-03, 206-03, 400-14의 평균값)의 표층에서의 (a) 수온( $^{\circ}\text{C}$ )과 (b) 염분(psu) time-series (회색 원: 각 정점들의 값)

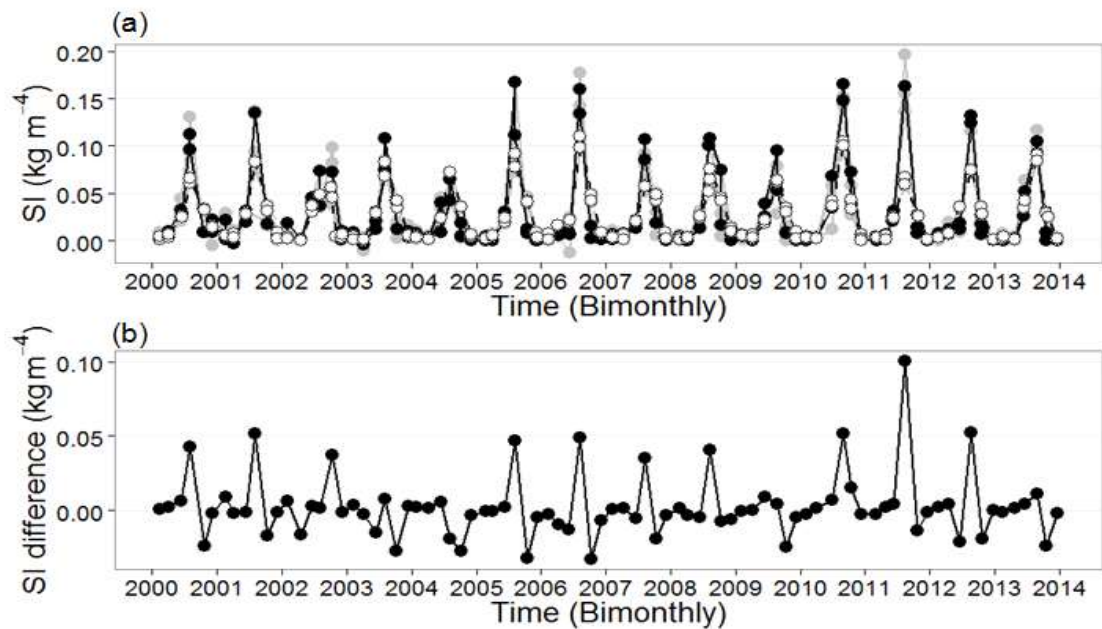


그림 9-1-3. 2000~2013년 기간 동안의 연안정점(검은 원: 205-01, 206-01, 400-16의 평균값)과 외해정점(흰 원: 205-03, 206-03, 400-14의 평균값)의 (a) stratification index( $\text{kg m}^{-4}$ , 회색 원: 각 정점들의 값)와 (b) 연안과 외해의 stratification index 차( $\text{kg m}^{-4}$ ) time-series

나. 일사량

표층 일사량(SIR, surface irradiance)은 위도, 경도, 시간, 운량 그리고 알베도를 고려한 천문공식을 이용하여(Rosati and Miyakoda, 1988) 기상청의 국가기후자료에서 제공하는 운량 자료를 가지고 계산하였다. 부산(129.03° E, 35.10° N), 통영(128.43° E, 34.85° N), 여수(127.74° E, 34.74° N) 그리고 완도(126.70° E, 34.40° N)에서의 표층 일사량은 그림 9-1-4와 같았다.

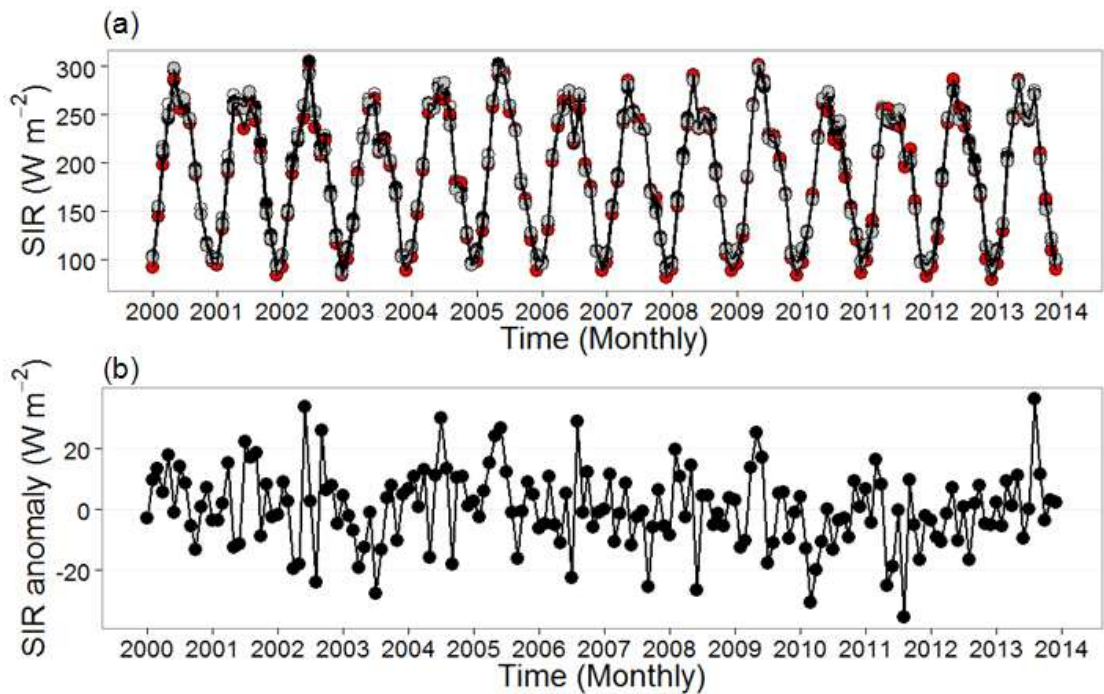


그림 9-1-4. 2000~2013년 기간 동안의 (a) 부산(회색 원), 통영(검은 원), 여수(흰 원)

그리고 완도(빨간 원)에서의 표층 일사량(SIR: surface irradiance,  $Wm^{-2}$ )과 (b) 지역 평균의 표층 일사량 anomaly( $Wm^{-2}$ ) time-series

네 정점에서의 표층일사량은 비슷하게 나타났으며 시기적으로 2009년 5월에 가장 높은 값을 보였고 2007년 12월에 가장 낮은 값을 보였다. 표층 일사량의 anomaly를 살펴보면 2011년 여름철에 가장 낮은 값을 보였고 2013년 여름철에 가장 높은 값을 보였다. 일반적으로 외편모조류는 높은 일사량에서 크게 번성을 하는 것으로 알려져 있어 표층 일사량에 대한 분석은 적조종 C. polykrikoides의 번성기작을 이해하는데 매우 중요할 것으로 판단되므로 앞으로 적조종의 번성과 관련하여 더욱 자세히 들여다 볼 예정이다.

#### 다. 강수량

기상청의 국가기후자료에서 제공하는 관측분야별 통계의 일별 강수량과 요소별 분석의 지역별 장마기간에서 2000년부터 2013년도까지의 자료를 수집하였으며(<http://sts.kma.go.kr/jsp/home/contents/statistics/newStatisticsSearch.do?menu=SFC&MNU=MNU>) 통영(128.43° E, 34.85° N)과 여수(127.73° E, 34.73° N)에서의 관측값은 그림 9-1-5와 같다.

두 지역 모두 여름철 가장 높은 강수량을 보였는데 통영에서는 2002년 8월에 672.7 mm, 여수에서는 2006년 7월에 610.8 mm로 가장 큰 값을 보였다. 두 지역 모두 7, 8월의 강수량이 연 강수량의 약 36 ~ 41%정도 차지하는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 월별 강수량을 고려할 때 담수의 영향은 여름철에 가장 클 것으로 예상되며 이는 염분 자료에 의해 잘 반영되어 나타나고 있다. 두 지역 모두 2002년, 2006년 그리고 2009년 여름철에 큰 강수량을 나타냈으며 2005년과 2013년 여름철에 낮은 강수량을 나타냈다.

장마기간은 그림 9-1-5 b.에서 나타나듯이 시작시점이 점점 빨라지고 있고 그 기간 또한 조금씩 증가하는 것으로 나타났다. 시기적으로 살펴보면 2011년도에는 장마가 가장 일찍 시작되었고 2005년도에는 장마가 가장 늦게 시작되었음을 알 수 있다. 장마기간이 가장 짧았던 해는 2005년이며 그 기간은 23일이었다. 2013년도는 예외적으로 연 강수량이 적은 데에 비해 장마기간이 가장 긴 46일을 기록하였다. 장마기간 동안의 강수량은 매해 큰 폭으로 차이를 보였는데 이는 연 강수량과 마찬가지로 2006년과 2009년도에 가장 큰 값을 나타내었다. 장마기간 전과 달리 장마기간 후의 연간 변화 정도는 매우 크게 나타났으며 장마 기간 전후의 강수량 변화가 남해안의 해양환경 변화에 어떠한 영향을 주는지는 앞으로 좀 더 살펴보아야 할 것으로 판단된다.

장마의 시기와 장마기간은 연 강수량 변동과 매우 밀접한 관련을 가지며 이는 육지의 강으로부터 유입되는 영양염 농도나 수괴의 성층구조 발달에 매우 큰 영향을 미치므로 앞으로 장마의 시기 및 기간의 변화와 적조종 번성과 어떠한 관계가 있는지 살펴볼 필요가 있다.

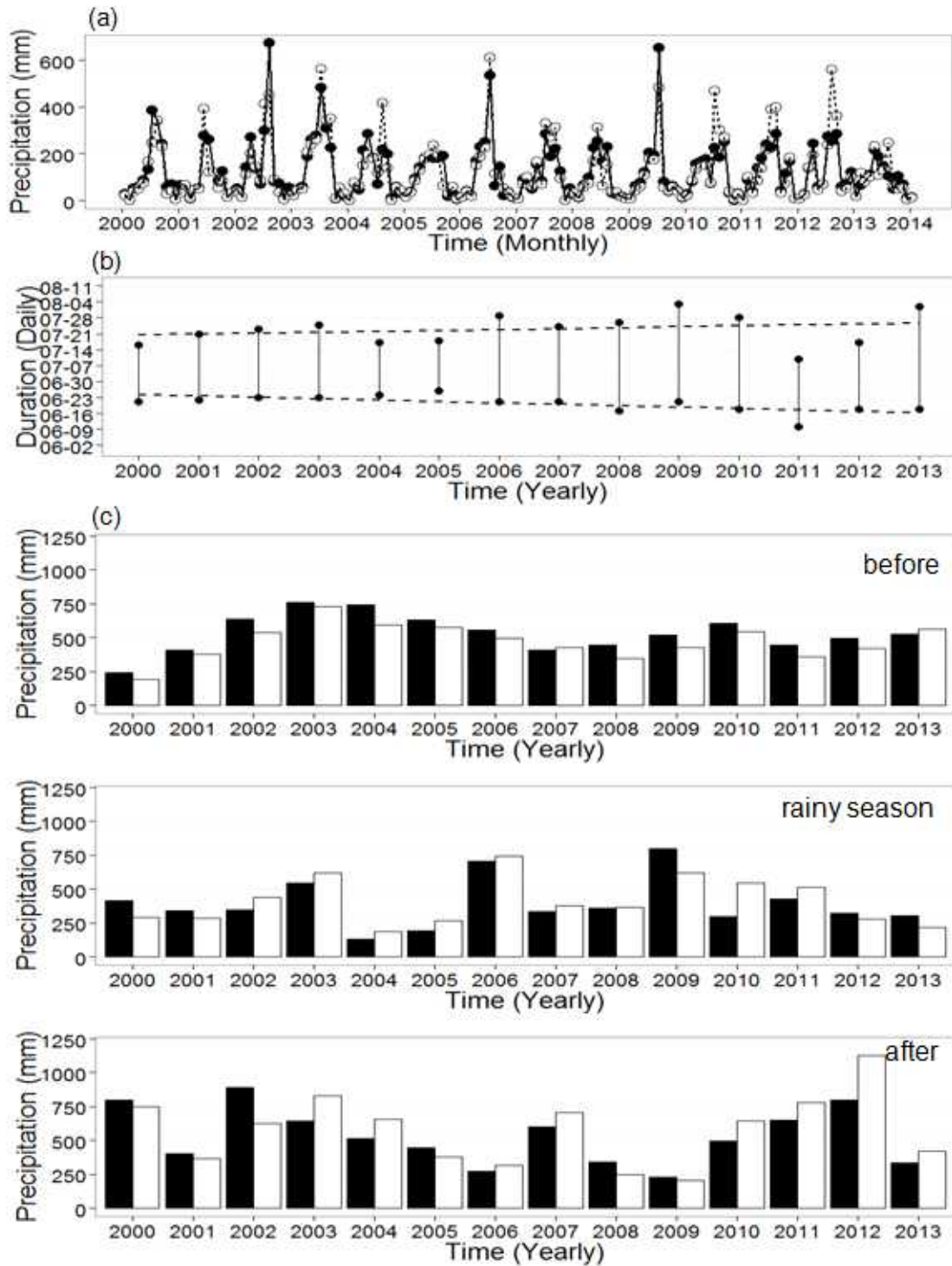


그림 9-1-5. (a) 통영(검은 원)과 여수(흰 원)에서의 월별 강수량(mm), (b) 남해안의 장마 기간 (mm), (c) 장마 전, 장마 기간, 장마 후의 통영 (검은 막대)과 여수(흰 막대)에서의 강수량(mm)



## 라. 조석

국립해양조사원의 조석예보 및 성과에 나와 있는 편차계산표를 이용하여 ([http://sms.khoa.go.kr/koofs/kor/tide/etc\\_main.asp?contents=tideforecast](http://sms.khoa.go.kr/koofs/kor/tide/etc_main.asp?contents=tideforecast)) 통영(128.4° E, 34.8° N), 여수(127.7° E, 34.7° N), 가덕도(128.8° E, 35° N), 완도(126.7° E, 34.3° N)에서의 고조와 저조의 차를 계산하였다. 조차는 계절적으로 여름에 가장 적은 값을 보이는데 여름에 조차가 거의 없게 되면 민물과 바닷물이 잘 섞이지 않아 염분 농도가 높은 바닷물은 아래로 가라앉고 강에서 유입되는 가벼운 물은 상층에 떠 있는 성층화 현상이 발생하게 된다. 우리나라는 여름철 장마로 인해 많은 양의 비가 내려 바다로 유입되므로 이는 약화된 조석현상과 함께 남해의 여름철 성층화 현상을 강화시킨다. 그림 9-1-6과 같이 남해에서의 조차는 동쪽에서 서쪽으로 갈수록 커진다. 이 기간 동안의 평균조차는 가덕도에서 약 1.1 m, 통영에서 약 1.6 m, 여수에서 약 2.0 m, 완도에서 약 2.2 m로 나타났다. 조차는 2000년부터 점점 감소하여 2006년도에 가장 작은 값을 나타내었으며 그 이후 조금씩 상승세를 보이는 것으로 나타났다. 앞으로 적조 발생 현상 경향분석을 위하여 다른 환경적 요인과 함께 조차에 대해 면밀히 살펴볼 필요가 있다.

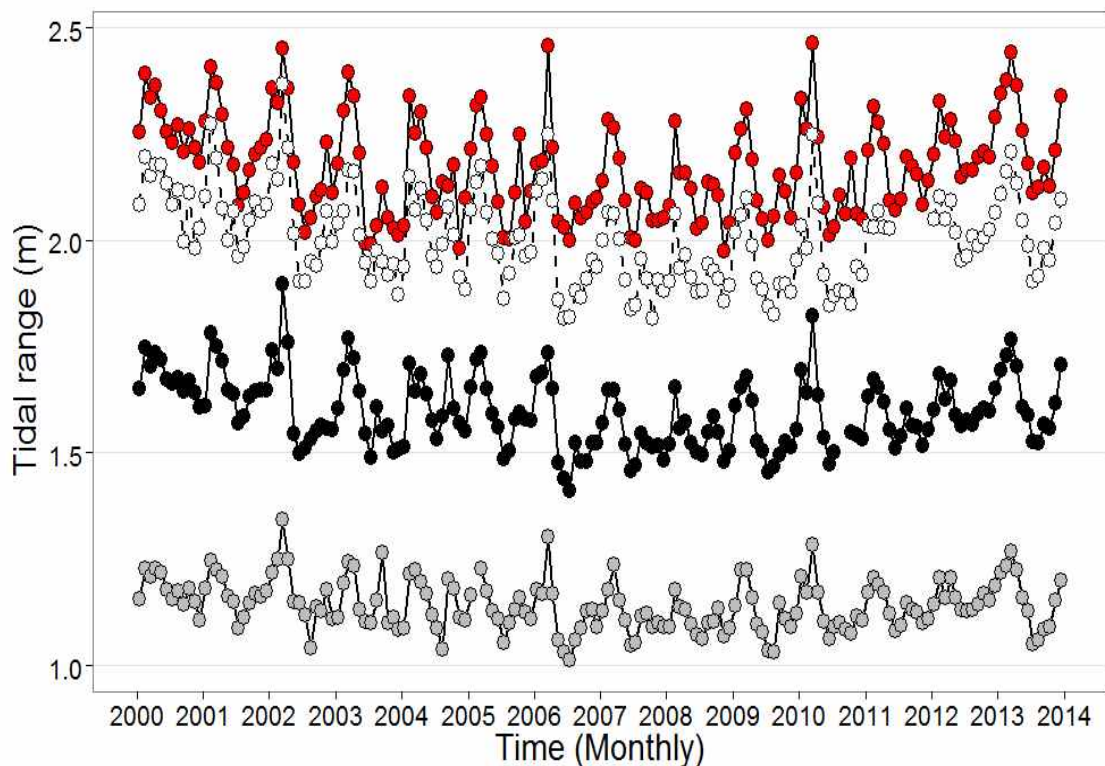


그림 9-1-6. 2000~2013년 기간 동안의 가덕도(회색 원), 통영(검은 원), 여수(흰 원) 그리고 완도(빨간 원)에서의 월별 조차(m)

마. 태풍

태풍의 자료는 기상청의 국가태풍센터에서 제공하는 연별 태풍 진로도에서 수집하였다 ([http://typ.kma.go.kr/TYPHOON/statistics/statistics\\_02\\_4.jsp](http://typ.kma.go.kr/TYPHOON/statistics/statistics_02_4.jsp)). 위도 30° 에서 50° , 경도 120° 에서 135° 구역을 경계구역으로 하여 이 지역에 영향을 주는 태풍만을 선별하였고(그림 9-1-7.) 발생에서 소멸기간은 아래의 표 9-1-1.과 같다.

한국 근해에서 태풍이 가장 많이 발생한 해는 2000년도이며 7월 초부터 11월 초까지 발생건수는 무려 7번이나 되었다. 가장 적게 발생한 해는 2009년도이며 이 해에는 어떠한 태풍도 한국 근해에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 한국의 남해에서 태풍의 영향을 가장 많이 받은 해는 2012년으로 이 해에는 블라벤과 덴빈이 연이어 발생하였고 산바도 이에 못지않은 영향을 준 것으로 나타났다. 태풍은 적조의 소멸원인이 되기도 하므로 앞으로 태풍과 적조가 어떠한 관계가 있는지 알아보는 것은 매우 중요하다.

표 9-1-1. 발생된 태풍의 이름과 기간

태풍번호	태풍명	발생 ~ 소멸(년-월-일 시)
2000-04	KAI-TAK	2000-07-03 12. ~ 2000-07-12 00.
2000-06	BOLAVEN	2000-07-24 00. ~ 2000-08-02 00.
2000-08	JELAWAT	2000-07-31 18. ~ 2000-08-12 12.
2000-10	BILIS	2000-08-18 12. ~ 2000-08-27 06.
2000-12	PRAPIROON	2000-08-24 18. ~ 2000-09-04 06.
2000-14	SAOMAI	2000-08-31 18. ~ 2000-09-19 00.
2000-20	XANGSANE	2000-10-24 18. ~ 2000-11-02 06.
2001-11	PABUK	2001-08-14 21. ~ 2001-08-23 09.
2002-05	RAMMASUN	2002-06-29 15. ~ 2002-07-06 21.
2002-08	NAKRI	2002-07-09 03. ~ 2002-07-13 21.
2002-09	FENGSHEN	2002-07-15 06. ~ 2002-07-27 21.
2002-15	RUSA	2002-08-23 09. ~ 2002-09-01 15.
2003-06	SOUDELOR	2003-06-13 18. ~ 2003-06-20 03.
2003-14	MAEMI	2003-09-06 15. ~ 2003-09-14 06.
2004-07	MINDULLE	2004-06-23 15. ~ 2004-07-04 09.
2004-10	NAMTHEUN	2004-07-25 21. ~ 2004-08-01 21.



2004-15	MEGI	2004-08-16 15. ~ 2004-08-20 18.
2004-16	CHABA	2004-08-19 21. ~ 2004-08-31 21.
2004-18	SONGDA	2004-08-28 09. ~ 2004-09-08 15.
2005-14	NABI	2005-08-29 21. ~ 2005-09-08 15.
2006-03	EWINIAR	2006-07-01 03. ~ 2006-07-10 22.
2006-10	WUKONG	2006-08-13 15. ~ 2006-08-19 16.
2006-13	SHANSHAN	2006-09-10 21. ~ 2006-09-19 15.
2007-04	MAN-YI	2007-07-09 03. ~ 2007-07-17 09.
2007-05	USAGI	2007-07-29 15. ~ 2007-08-04 09.
2007-11	NARI	2007-09-13 15. ~ 2007-09-17 00.
2008-07	KALMAEGI	2008-07-15 15. ~ 2008-07-20 18.
2010-04	DIANMU	2010-08-08 21. ~ 2010-08-12 15.
2010-07	KOMPASU	2010-08-29 21. ~ 2010-09-03 03.
2010-09	MALOU	2010-09-03 15. ~ 2010-09-08 09.
2011-05	MEARI	2011-06-22 15. ~ 2011-06-27 15.
2011-09	MUIFA	2011-07-28 15. ~ 2011-08-09 09.
2011-12	TALAS	2011-08-25 09. ~ 2011-09-05 03.
2012-07	KHANUN	2012-07-16 15. ~ 2012-07-19 12.
2012-10	DAMREY	2012-07-28 21. ~ 2012-08-03 15.
2012-14	TEMBIN	2012-08-19 09. ~ 2012-08-31 00.
2012-15	BOLAVEN	2012-08-20 15. ~ 2012-08-29 06.
2012-16	SANBA	2012-09-11 09. ~ 2012-09-18 09.
2013-04	LEEPI	2013-06-18 09. ~ 2013-06-21 09.
2013-15	KONG-REY	2013-08-26 15. ~ 2013-08-31 03.
2013-24	DANAS	2013-10-04 15. ~ 2013-10-09 09.
2014-19	VONGFONG	2014-10-03 21. ~ 2014-10-14 09.
2014-12	NAKRI	2014-07-30 03. ~ 2014-08-03 15.
2014-11	HALONG	2014-07-29 12. ~ 2014-08-11 09.
2014-08	NEOGURI	2014-07-04 09. ~ 2014-07-11 09.

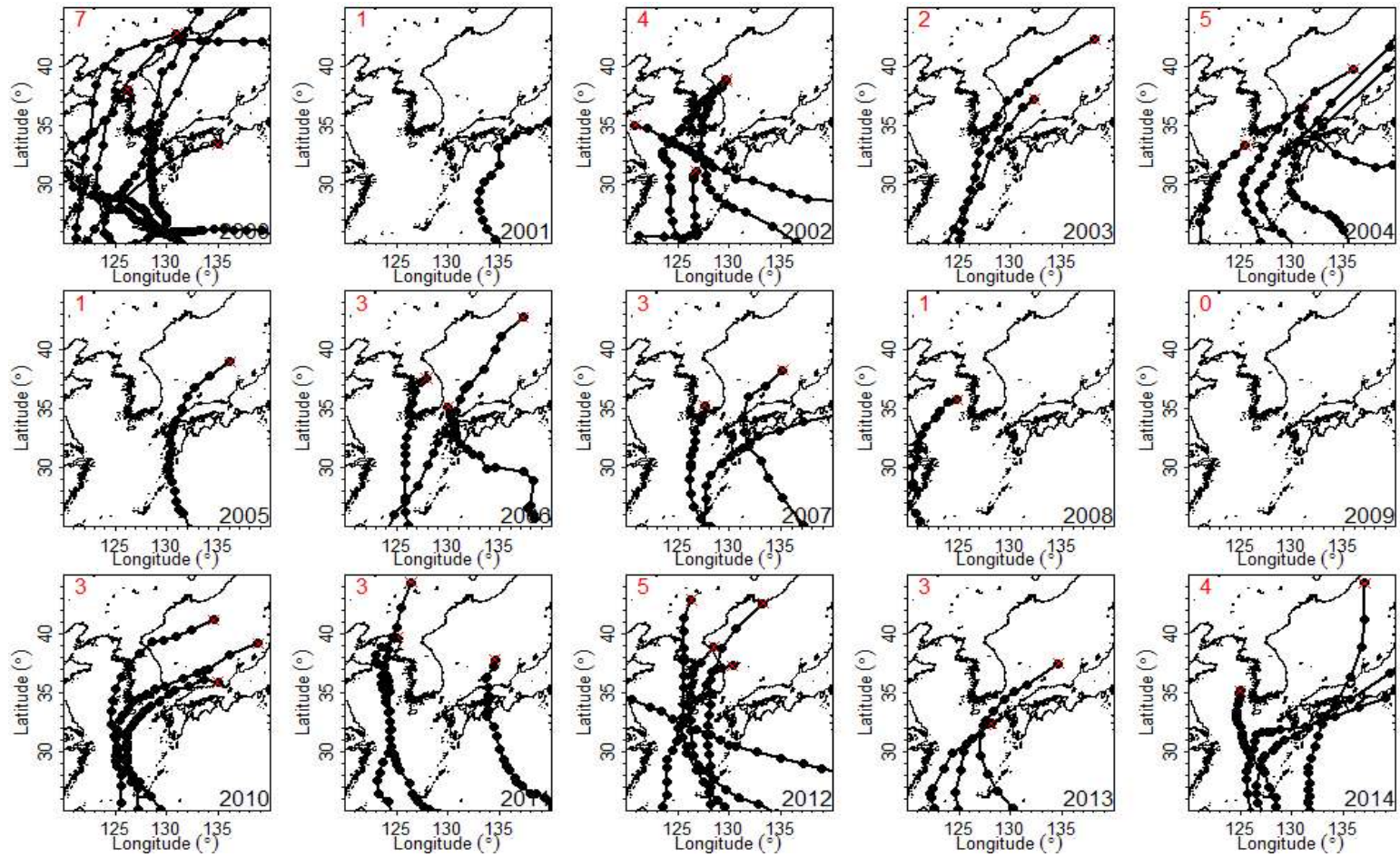


그림 9-1-7. 2000~2014년 기간 동안 한반도 전역에 영향을 미친 태풍의 진로(왼쪽 위의 빨간 숫자는 발생건수, 빨간 십자마크는 소멸위치를 나타냄)

### 3. 화학 관측 자료

최근 남해 동부해역은 남해의 서부해역과 비교하여 부영화가 상당히 진행되고 있고 이와 적조발생이 밀접한 상관관계를 가지고 있으리라 판단된다. 따라서 적조발생과 남해안의 해양환경 변화 간의 관계를 살펴보기 위하여 영양염과 용존산소의 장기자료를 KODC에서 제공받았다. 연안해역과 외해역의 변화를 각각 살펴보기 위해 물리적 자료와 마찬가지로 연안해역의 정점(205-01, 206-01, 400-16)과 외해역의 정점(205-03, 206-03, 400-14)으로 구분하였다. 2000년부터 2013년까지 수심 0 m의 영양염과 용존산소의 time-series는 다음과 같다.

#### 가. 영양염

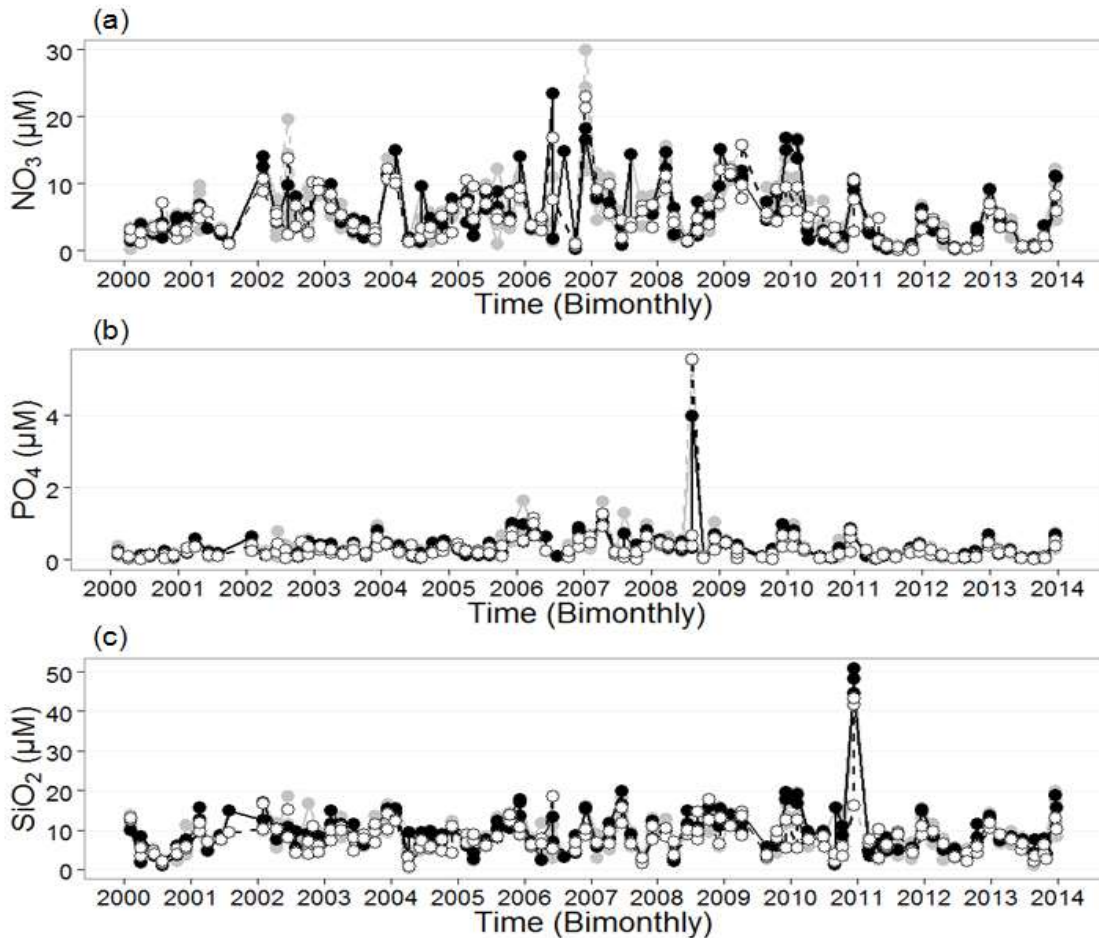


그림 9-1-8. 2000~2013년 기간 동안 연안정점(검은 원: 205-01, 206-01, 400-16의 평균값)과 외해 정점(흰 원: 205-03, 206-03, 400-14의 평균값) 표층에서의 (a) 질산염( $NO_3$ ), (b) 인산염( $PO_4$ ), 그리고 (c) 규산염( $SiO_2$ ) time-series (회색 원: 각 정점들의 값)

그림 9-1-8과 같이 전반적으로 연안해역의 영양염이 외해역의 영양염보다 약간 더 풍부한 것으로 나타났으며 그 차는 겨울철에 더욱 컸다. 질산염의 경우 2000년부터 점점 상승하다가 2006년과 2007년에 상대적으로 높은 농도를 보였고 그 이후 조금씩 하락하는 모습을 보였다. 인산염의 경우 또한 질산염과 마찬가지로 2000년 이후 점점 그 값이 상승하다 2007년 이후 하락하는 모습을 보였다. 다만 질산염과 달리 2008년 여름에 다른 해와 다르게 매우 높은 농도를 보였는데 이에 대해 추가적인 분석이 필요하다. 규산염의 경우에는 두 영양염과 다르게 뚜렷한 경년변동을 보이지 않았고 매해 거의 비슷한 값을 보였다. 다만, 예외적으로 2010년 겨울에 연안해역과 외해역 모두 매우 높은 농도를 보였는데 이로 인해 군집간의 어떠한 변화를 일으켰는지 앞으로 살펴볼 필요가 있다.

#### 나. 용존산소

표층에서의 용존산소량은 그림 9-1-9와 같이 연안해역이 외해역보다 크게 나타났으며 연안해역과 외해역의 차는 가을철을 제외한 나머지 계절에서 약  $0.25 \text{ mg l}^{-1}$  정도로 나타났다. 일반적으로 해양에서 식물플랑크톤 대량번식이 일어날 경우 해수 내의 용존산소량은 증가하게 된다. 따라서 봄철에 용존산소량이 가장 컸으며 여름철에 가장 낮게 나타났다. 시기적으로 연안해역과 외해역 모두 2004년 겨울철에 가장 크게 나타났고 가장 낮은 값은 연안해역에서 2008년 10월에, 외해역에서 2012년 10월에 나타났다. 앞으로 저층에서의 용존산소량과 함께 수온과의 상관관계를 분석하여 적조 발생과 어떠한 관계가 있는지 살펴볼 계획이다.

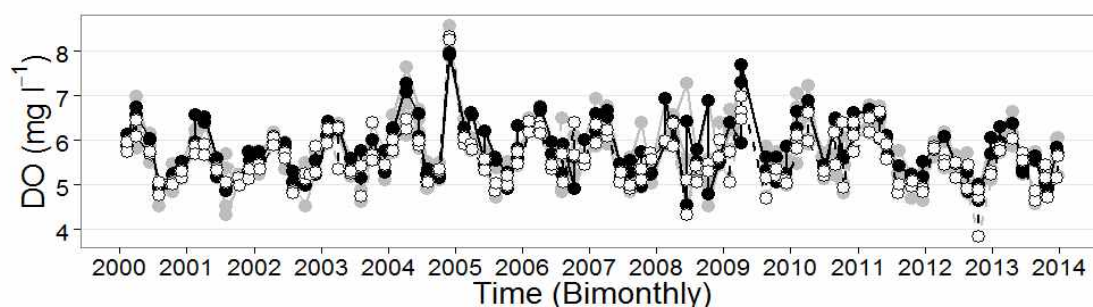


그림 9-1-9. 2000~2013년 기간 동안 연안정점(검은 원: 205-01, 206-01, 400-16의 평균값)과 외해정점(흰 원: 205-03, 206-03, 400-14의 평균값) 표층에서의 용존산소 ( $\text{mg l}^{-1}$ ) time-series (회색 원: 각 정점들의 값)

## 제 2 절 적조 발생 및 발생 환경 분석

### 1. 적조 발생 분석

적조의 장기 발생 경향 및 시·공간적 분포를 분석하기 위해 1998년부터 2015년까지의 국립수산물품질관리원에서 제공하는 적조속보 자료와 digitizing하여 재생성된 적조 발생 공간적 분포 자료 그리고 2014년과 2015년 현장 관측자료를 이용하였다. 우선 적조의 장기 발생 경향을 분석하기 위하여 연간 적조 발생 빈도수, 지역적 범위, 최대밀도, 발생규모 그리고 적조 발생 시기를 조사·분석하였다. 적조 발생 빈도수는 재생성된 적조 발생 공간적 분포 데이터를 이용하여 각 위·경도의 일일 빈도수를 가지고 계산하였다. 적조 지역적 범위는 적조 발생 공간적 분포 데이터의 연도별 영역을 수치화하여 나타내었으며 최대밀도는 적조속보 자료에서 제공하는 연간 적조 발생 최대밀도 값을 이용하였다. 연간 적조 발생 규모는 정과 안(2011)의 정의를 참고하여 발생해역 범위, 최대밀도 그리고 발생기간을 가지고 표 9-2-1과 같이 세 가지의 규모 즉, 소규모, 중규모 그리고 대규모로 나누었다.

표 9-2-1. 적조 발생 규모의 정의

적조 발생	기준항목		
	발생해역	최대밀도	발생기간
소규모	남해안 일부	10,000 <i>cell ml<sup>-1</sup></i> 미만	25일 미만
중규모	남해안의 고흥 ~ 남해 해역 이상	10,000 <i>cell ml<sup>-1</sup></i> 이상	25일 이상
대규모	동해안의 포항 이상	20,000 <i>cell ml<sup>-1</sup></i> 이상	50일 이상

또한, 해역별 시공간적 분포를 살펴보기 위해 적조 발생 해역을 서해안, 남해안 그리고 동해안으로 크게 나눈 뒤, 다시 각 해역을 도시로 세분화하였다(그림 9-2-1, 표 9-2-2). 서해안에서의 적조 발생 해역은 군산에서 태안에 이르는 범위, 남해안에서의 적조 발생 해역은 진도에서 거제에 이르는 범위 그리고 동해안에서의 적조 발생 해역은 부산에서 강릉에 이르는 범위로 정의하였다. 적조 발생은 특정 도시에 국한되어 발생하기보다 여러 도시와 맞물려 발생하기 때문에 하나하나의 도시로 구분하기 보다는 일정 구간 구획으로 나누고 대표되는 도시를 선정하여 적조 발생 영역을 나누는 것이 타당하

다 여겨 표 9-2-2와 같이 각 해역의 대표도시를 선정하고 구획을 정의하였다.

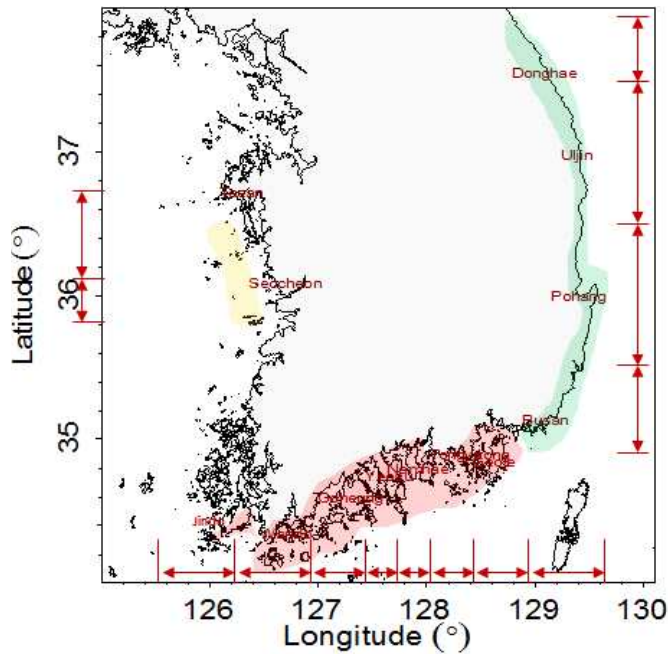


그림 9-2-1. 적조 발생 지역구분(음영 영역: 적조 발생 해역, 노란색: 서해안, 빨간색: 남해안, 녹색: 동해안)

표 9-2-2. 적조 발생 지역구분

해역	지역	영역
서해안	태안	태안 ~ 보령
	서천	서천 ~ 군산
남해안	진도	진도 ~ 해남
	완도	완도 ~ 장흥
	고흥	보성 ~ 고흥
	여수	광양 ~ 여수
	남해	하동 ~ 남해
	통영	사천 ~ 고성 ~ 통영
	거제	거제
동해안	부산	부산 ~ 기장 ~ 울주, 울산
	포항	경주 ~ 포항 ~ 영덕
	울진	울진 ~ 삼척
	동해	동해 ~ 강릉

가. 1998년 ~ 2015년 기간 동안의 적조 발생 분석



1998년부터 2015년까지 18년 기간 동안 적조 발생 시·공간적 분포는 그림 9-2-2와 같았다. 적조가 발생한 해역의 범위는 위도 34.02 ~ 38.00 N, 경도 126.03 ~ 129.72 E 였으며 18년 기간 동안의 적조 발생 빈도수는 남해안에서 75.1%, 동해안에서 23.8% 그리고 서해안에서 1.1%였다. 남해안에서의 적조 발생 빈도수는 동해안에서의 적조 발생 빈도수의 약 3배로 가장 많이 발생한 것으로 나타났다. 18년 기간 동안의 적조는 남해안에서 6월 말에, 그 뒤를 이어 동해안에서 7월 말에, 서해안에서 9월 중순에 시작된 후 동해안에서 10월 초에, 남해안에서 11월 중순에 소멸되었다. 서해안의 경우 관측된 데이터의 누락으로 인하여 소멸시기가 부정확하였다. 적조 일일 최대밀도는 남해안과 동해안 모두 9월 초에 가장 높게 나타났으며 남해안에서  $48,000 \text{ cell ml}^{-1}$ , 동해안에서  $43,740 \text{ cell ml}^{-1}$ 로 남해안에서 가장 높게 나타났다.

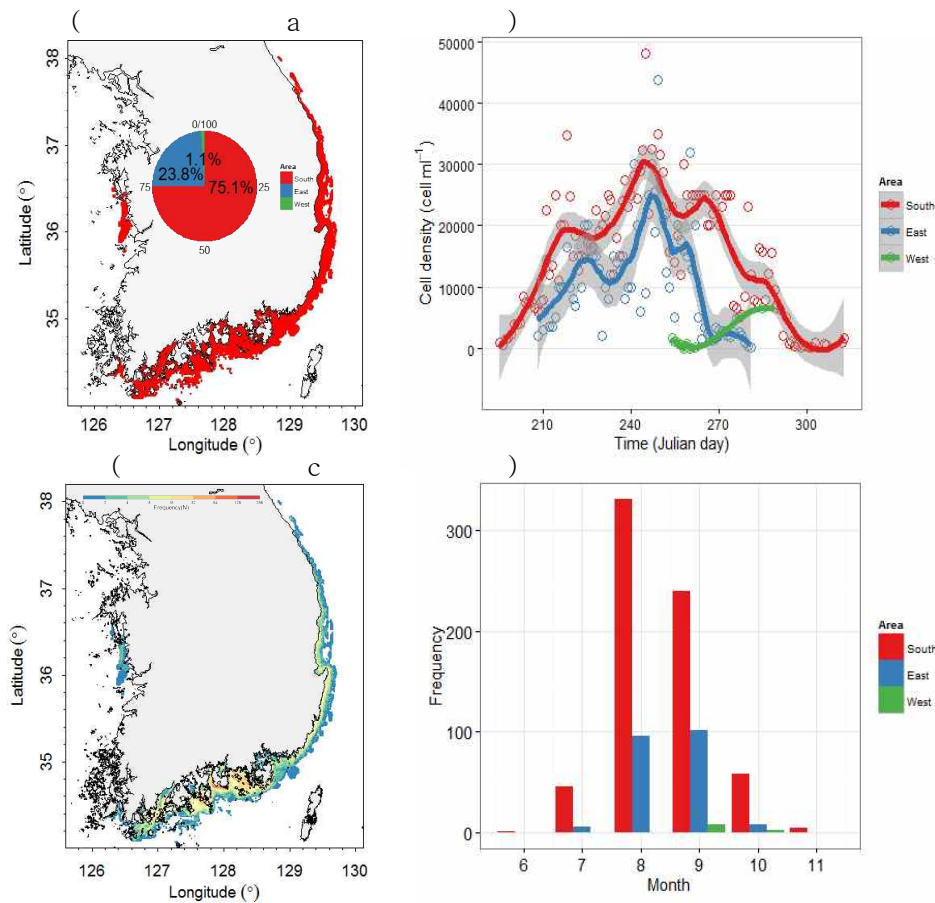


그림 9-2-2. 1998 ~ 2015년 (a) 적조 발생 해역(원그래프: 해역별 적조 발생 빈도수), (b) 적조 최대밀도( $\text{cell ml}^{-1}$ ) 계절 사이클, (c) 공간적 적조 발생 빈도수, (d) 월별 적조 발생 빈도수  
1998년부터 2015년까지 18년 기간 동안의 공간적 발생빈도수 범위는 1 ~ 176건으로



적조 발생 해역에서 평균 약 11건으로 나타났으나, 대부분의 해역은 적조 발생빈도수가 4건인 것으로 조사되었다. 특히, 남해안의 여수, 남해 그리고 통영부근에서 32건 이상으로 매우 높은 빈도수를 보였고 서해안의 태안과 서천에서 4건 이하로 가장 낮은 빈도수를 보였다. 월별로 일일누적 적조 발생빈도수를 살펴보면 남해안의 경우 8월에 337건, 동해안의 경우 9월에 106건으로 가장 무더운 여름에서 늦여름 사이 적조가 많이 발생한 것으로 나타났다. 1998년부터 2015년까지의 월별 누적 적조 발생 빈도수를 공간적으로 살펴보면, 7월은 고흥 나로도에서 거제 인근 해역과 동해안 포항 아래의 일부 해역에서 발생하다가 8월에 남해안 전 해역과 동해안 전 해역의 넓은 해역으로 확장되었고 9월에 서해안의 일부 해역까지 발생하다가 10월에 다시 고흥 나로도에서 부산 인근 해역 그리고 동해안의 해안선 인접 해역으로 축소되는 것으로 나타났다(그림 9-2-3). 월별 누적 적조 발생 빈도수의 범위는 1 ~ 102건, 평균 약 6건이었으며 8월과 9월에 남해안의 완도에서 거제에 이르는 해역에서 매우 빈번히 발생하는 것으로 조사되었다.

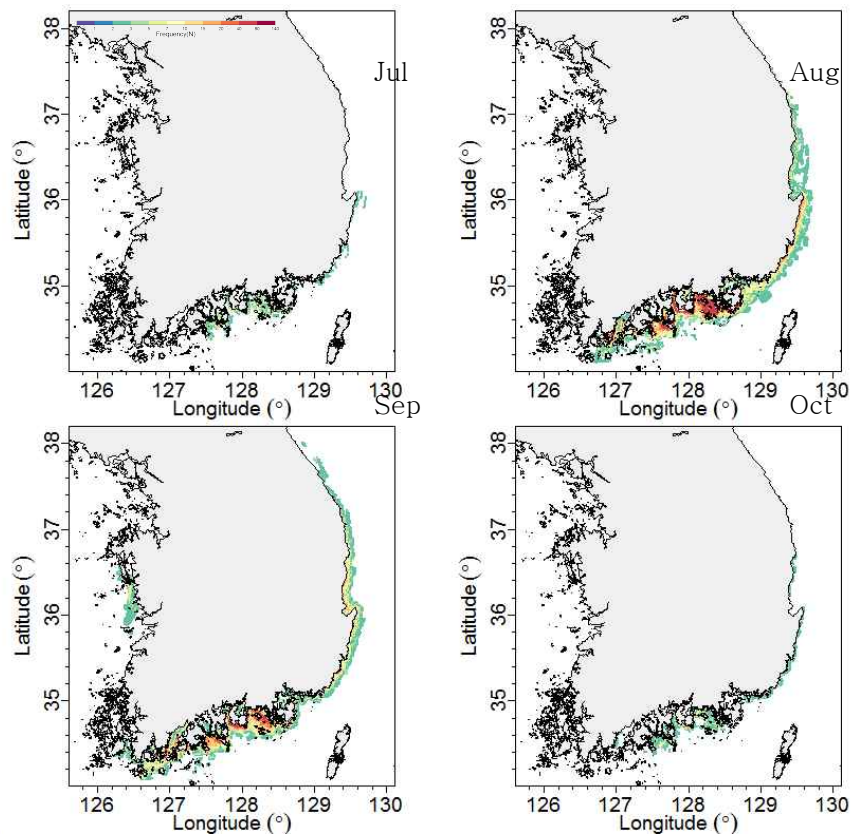


그림 9-2-3. 1998 ~ 2015년 7월, 8월, 9월 그리고 10월의 공간적 적조 발생 빈도수

표 9-2-2에서 구분된 지역으로 1998년 ~ 2015년 기간 동안 연도별 누적 적조 발생

빈도수를 살펴보면 남해안의 통영에서 551건으로 가장 많이 발생하였고 그 다음으로 남해 520건, 여수 503건, 완도 376건, 고흥 371건, 거제 348건 그리고 진도 41건 순이었다 (그림 9-2-4). 동해안의 경우 부산에서 209건으로 가장 많이 발생하였고 포항 193건, 울진 96건 그리고 동해 13건 순이었다. 서해안의 경우 서천에서 7건, 태안에서 8건으로 가장 적은 적조 발생 빈도수를 나타내었다. 완도에서 울진에 이르는 해역은 1990년대 말부터 2010년대 중반까지 꾸준히 발생하였으나 동해 위까지 확장되는 해는 2001년과 2013년에 국한되었다. 적조 발생이 진도 해역까지 발생한 해는 2003년과 2015년이였다.

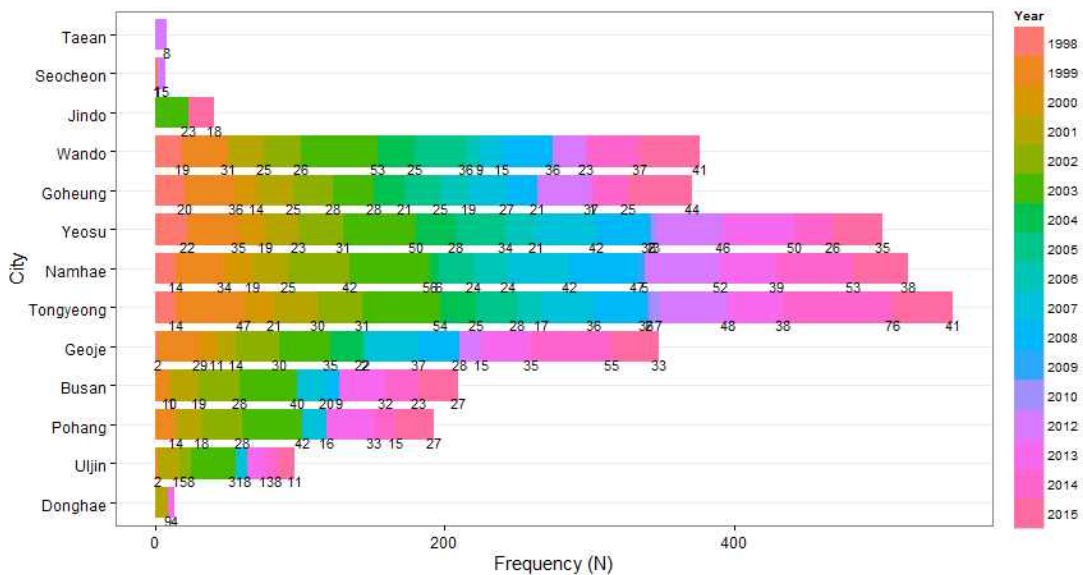


그림 9-2-4. 1998 ~ 2015년 각 지역별 적조 발생 빈도수

전 해역에서의 각 연도별 적조 발생 빈도수, 지역적 범위, 적조 최대밀도 그리고 규모의 크기는 그림 9-2-5와 같았다. 1998년부터 2015년까지 적조 발생 빈도수는 평균 42건으로 2014년 81건, 2011년 0건이었으며, 1998년부터 2008년까지 빈도수가 일정하게 오르고 내리고를 반복하다가 2009년부터 2011까지 적조 발생이 거의 일어나지 않았으며 다시 2012년부터 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 지역적 범위 또한 1998년부터 2015년까지 적조 발생 빈도수와 비슷한 패턴을 보였으며 2001년에 가장 높은 값을 보이다가 그 이후 점점 규모가 작아져 2011년에 적조가 발생하지 않았으며 2012년에 다시 높은 지역적 범위를 보였다. 1998년부터 2015년까지 적조 최대밀도의 평균은 약  $23,500 \text{ cell} \text{ m}^{-1}$ 이었고 2003년에  $48,000 \text{ cell} \text{ m}^{-1}$ 로 가장 높은 값을 보였으며 적조 발생빈도수보다 지역적 범위와 높은 양의 상관관계( $r=0.79$ )를 나타내며 매우 유사한 패턴을 보였다 (그림 9-2-6).

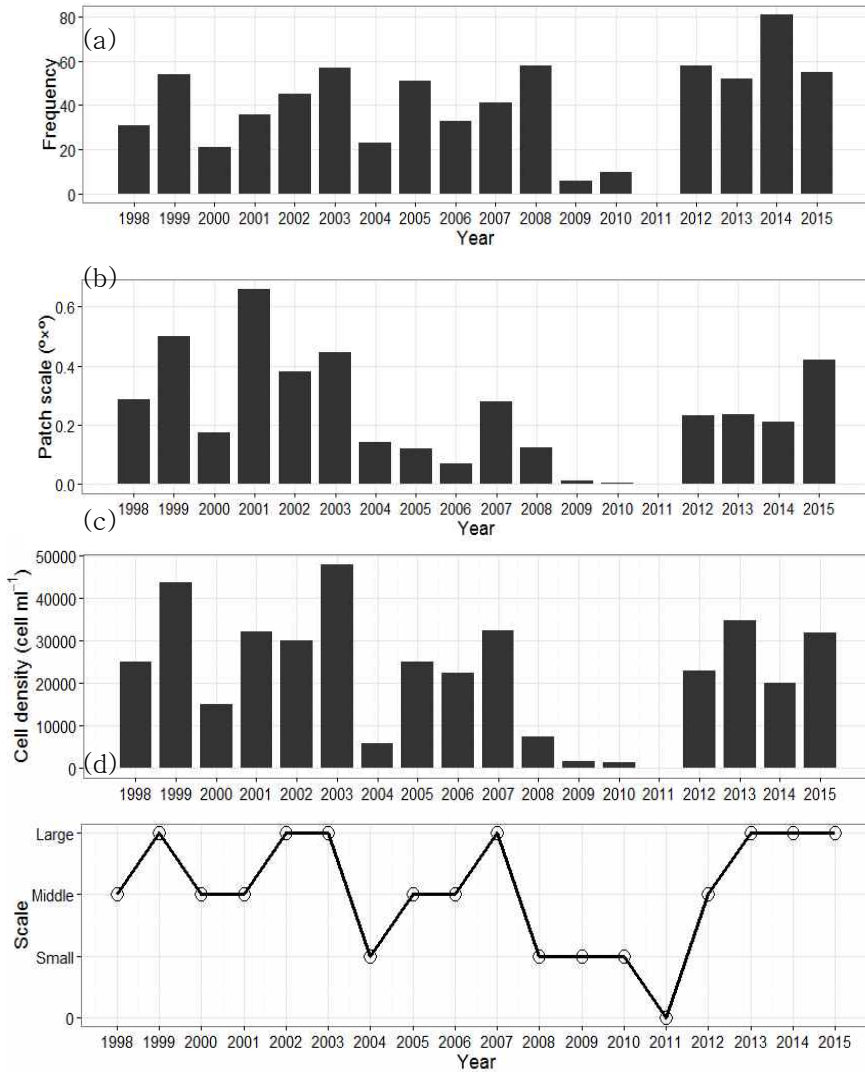


그림 9-2-5. 1998 ~ 2015년 연별 (a) 적조 발생 빈도수, (b) 적조 지역적 범위( $^{\circ} \times ^{\circ}$ ), (c) 적조 최대밀도( $cell\ ml^{-1}$ ), (d) 적조 발생 규모

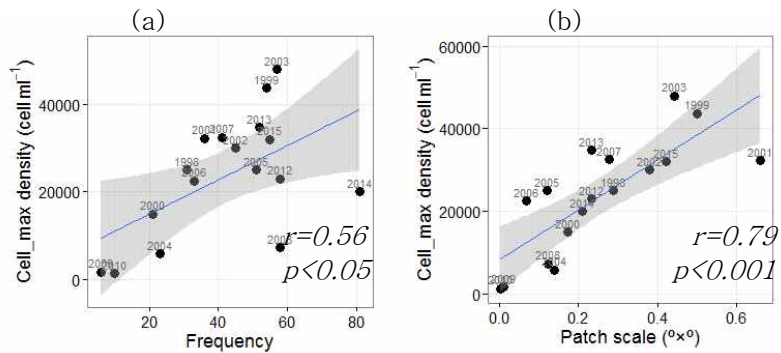


그림 9-2-6. (a) 적조 발생 빈도수와 적조 최대밀도( $cell\ ml^{-1}$ )와의 관계, (b) 적조 지역적 범위( $^{\circ} \times ^{\circ}$ )와 적조 최대밀도( $cell\ ml^{-1}$ )와의 관계

1998년부터 2015년까지 남해안, 동해안 그리고 서해안에 일일 적조 최대밀도와 지역적 범위의 장기 time-series는 그림 9-2-7과 그림 9-2-8과 같았다(단, 일일 최대밀도는 적조속보 정보에서 제공되는 값으로 공간적 분포에 대한 가중치는 고려하지 않음). 일일 적조 최대밀도의 시간적 변화는 대부분 7월에서 시작하여 11월 중순에 종료되는 단봉형 패턴을 보였다(그림 9-2-7). 그러나, 2006년과 2012년은 특이하게 이른 시기에 발생했다가 다시 늦은 시기에 재발생하는 양봉형 패턴을 보였다. 단, 2006년에는 앞부분의 변성에서 일일 적조 최대밀도가 컸으나 2012년에는 이와 정반대로 뒷부분의 변성에서 일일 적조 최대밀도가 더 크게 나타났다. 가장 큰 일일 적조 최대밀도를 보인 연도는 2003년이었으며 이와 함께 1999년, 2001년, 2007년, 2013년과 2015년에  $30,000 \text{ cell ml}^{-1}$ 가 넘는 일일 적조 최대밀도를 보였다. 2004년, 2008 ~ 2011년의 일일 적조 최대밀도는 다른 해와 비교하여 볼 때  $10,000 \text{ cell ml}^{-1}$  이하로 월등히 작은 값을 보였다. 해역으로 살펴보면 1999년과 2002년에서 동해안의 일일 적조 최대밀도는 남해안의 일일 적조 최대밀도보다 더 높은 것으로 나타났다.

일일 적조 지역적 범위의 시간적 변화 또한 일일 최대밀도 시간적 변화와 마찬가지로 대부분 단봉형의 패턴을 보였다(그림 9-2-8). 일일 적조 지역적 범위의 시간적 변화는 2001년에 가장 큰 규모를 보였고 이 연도에 지역적 범위는 동해안 강릉 이상으로 확장된 것으로 나타났다(그림 9-2-9). 특이하게 2006년, 2012년과 2015년의 경우 양봉형 패턴으로 나타났고 규모의 크기는 앞부분과 뒷부분의 변성에서 별 차이를 보이지 않았다. 2015년의 경우, 8월 중순에 지역적 범위가 커진 후 8월 말에 작아지다가 다시 9월 중순에 커지는 패턴을 보였다.

1998년부터 2015년까지의 연간 적조 발생 시·공간적 변화는 그림 9-2-9와 같았다. 대부분 남해안 고흥 나로도 ~ 거제 인근 해역에서 처음 시작되어 다시 이 해역에서 소멸하는 관계로 그림 9-2-9만으로 시·공간적 변화를 확실히 알아내기에는 다소 무리가 따랐다. 따라서 그림 9-2-7과 그림 9-2-8의 일일 시간적 변화와 함께 살펴보았다. 1998 ~ 2015년의 연간 적조 발생 시간적 변화에서 1998 ~ 2002년, 2007년, 2008년, 2014년과 2015년의 시간적 변화는 대체로 비슷하였고 2004 ~ 2006년에는 다른 해보다 좀 더 이른 시기에, 2003년, 2009년과 2012년은 다른 해보다 늦은 시기까지 적조가 발생한 것으로 나타났다. 일일 적조 최대밀도와 지역적 범위의 시간적 변화에서 나타났던 2006년과 2012년의 적조 재발생이 그림 9-2-9에서도 포착되었다. 2015년의 경우 남해안의 동쪽 고흥 나로도 인근 해역에서 시작하여 남해안의 서쪽 완도와 진도 인근 해역에서 늦게까지 발생되는 패턴이 나타났는데 그림 9-2-8의 2015년 일일 지역적 범위의 시간적 변화와 함께 볼 때 8월의 적조 발생은 동고서저형, 9월의 적조 발생은 서고동저형으로 남해안의 동쪽과 서쪽의 시간적 변화가 매우 명확히 구분되는 것을 알 수 있다.

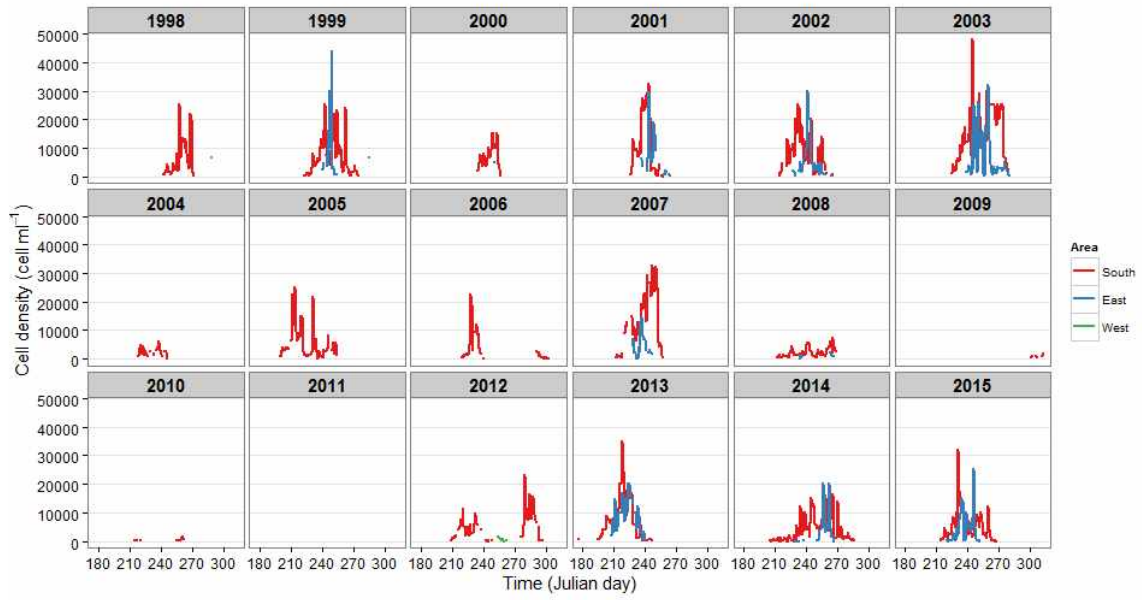


그림 9-2-7. 1998 ~ 2015년 남해안, 동해안 그리고 서해안에서의 일일 적조 최대밀도( $cell\ ml^{-1}$ ) time-series

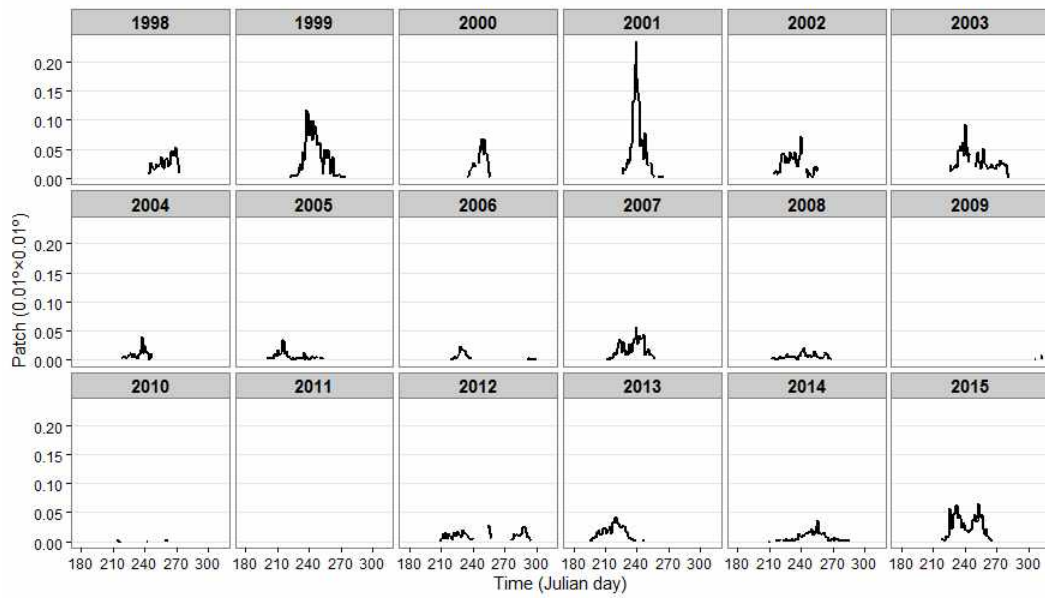


그림 9-2-8. 1998 ~ 2015년 일일 적조 지역적 범위( $^{\circ} \times ^{\circ}$ ) time-series



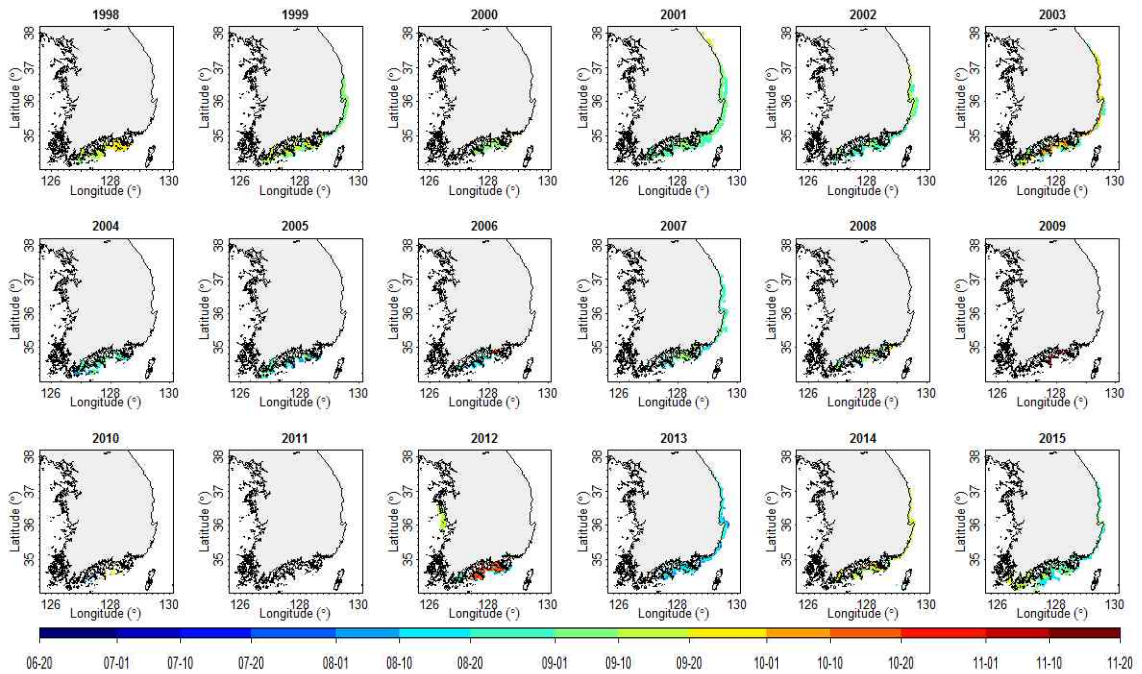


그림 9-2-9. 1998 ~ 2015년 연간 적조 발생 시·공간적 변화

연간 적조 발생의 시작 위치는 표 3-1-2에서 보여주듯이 주로 고흥과 여수 인근 해역과 남해 ~ 거제에 이르는 인근 해역에서 주로 발생하였다(그림 9-2-10). 2004년을 제외하면 1998년부터 2009년까지는 고흥과 여수 인근 해역에서 적조가 주로 시작되었으나 2010년 이후부터는 남해 ~ 거제 인근 해역에서 적조가 시작되는 일이 빈번해졌다. 적조 최대밀도는 1999년, 2002년, 2014년과 2015년을 제외하면 대부분 남해안의 고흥 ~ 거제에 이르는 인근 해역에서 나타났으며 동해안에서 적조 최대밀도가 나타난 해역은 주로 포항 ~ 울진 인근 해역이었다. 적조 발생의 종료 위치는 2001년과 2015년을 제외하면 적조 발생의 시작 위치와 비슷한 범위 내에서 발생하였다. 2001년은 동해안 강릉에서 늦은 시기까지 지속되다가 소멸되었으며(그림 9-2-9) 2015년은 9월 말에 남해안 서쪽 해역인 완도와 진도의 인근 해역에서 소멸되었다.

지금까지 1998부터 2015년까지 18년 기간 동안의 적조 발생 시·공간적 분포를 살펴보았다. 적조는 7월에서 10월 사이에 주로 남해안에서 빈번하게 발생하였으나 적조 발생 빈도수, 지역적 범위, 최대밀도, 시작 시기/피크 시기/종료 시기의 위치 등은 매해마다 다르게 나타났다. 적조 발생의 빈도수, 지역적 범위, 최대밀도, 시기의 위치들 사이에는 밀접한 관계를 보이기도 하였으며 시·공간적으로 뚜렷한 경향을 나타내기도 하였다. 앞으로 연구에서는 1990년대를 거쳐 2010년대로 오면서 적조의 발생이 어떻게 변화되어 왔는지 이러한 변화가 해양환경의 변화와 어떠한 밀접한 관계가 있는지 좀 더 깊이 살펴볼 필요가 있다.

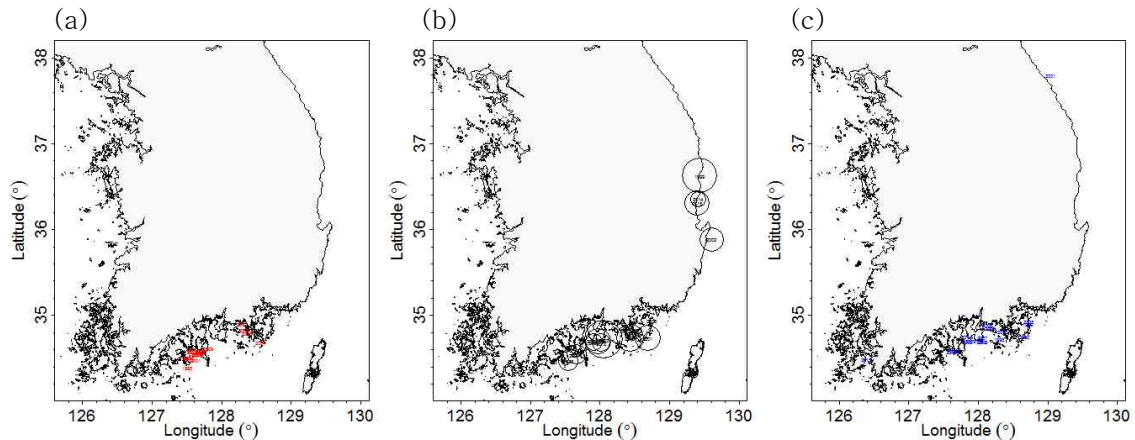


그림 9-2-10. 1998 ~ 2015년 (a) 적조 시작 시기, (b) 적조 peak 시기(원의 크기는 최대밀도의 상대적 크기), (c) 적조 종료 시기의 공간적 분포

#### 나. 적조 발생 시기의 경향

1998년부터 2015년까지 18년 기간 동안의 적조 발생에 있어 시·공간적 경향을 살펴보기 위하여 적조속보 자료와 digitizing하여 재구성된 적조 발생 공간적 분포 자료를 분석한 결과, 적조 발생 시기에서 뚜렷한 경향을 찾을 수 있었다. 그림 9-2-11에서 보여 주듯이, 전 해역의 적조 발생 시기는 2002년, 2012년과 2015년 등 몇 가지 연도를 제외하면 대부분 남해안의 적조 발생 시기와 일치하여 적조 발생의 시작과 종료는 대체적으로 남해안에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 적조 발생 시기에 있어 가장 눈에 띄는 경향은 전 해역에서 적조 발생 시작 시기가 1990년대 후반의 늦여름 8월 말에서 2010년대 중반의 초여름 8월 초로 점점 앞당겨지고 있다는 것이다. 적조 발생 피크 시기 또한 1990년대 후반부터 2000년대 중반까지는 적조 시작 시기와 마찬가지로 점점 앞당겨지다가 2008년 이후부터는 발생 시기가 불규칙하게 나타나는 패턴을 보였다. 적조 발생 종료 시기는 2000년대 중반까지는 앞당겨지는 듯하였으나 2006년과 2012년 10월 말 재발생된 적조의 영향과 최근 2014년과 2015년의 적조의 장기 지속으로 전체적으로 점점 늦춰지는 것처럼 보인다. 그러나 적조 발생 종료 시기는 시작 시기에 비해 변동폭이 너무 커 뚜렷한 패턴을 보인다고 할 수 없다. 전 해역의 적조 발생 시기는 2002년, 2012년과 2015년 등 몇 가지의 연도를 제외하면 대부분 남해안의 적조 발생 시기와 일치하였다. 동해안의 적조 발생 시작 시기는 남해안과 마찬가지로 1990년대 후반 8월 말에서 2010년대 중반 8월 중순으로 점점 앞당겨지고 있었고 그 변동폭은 남해안에 비해 크지는 않았다.



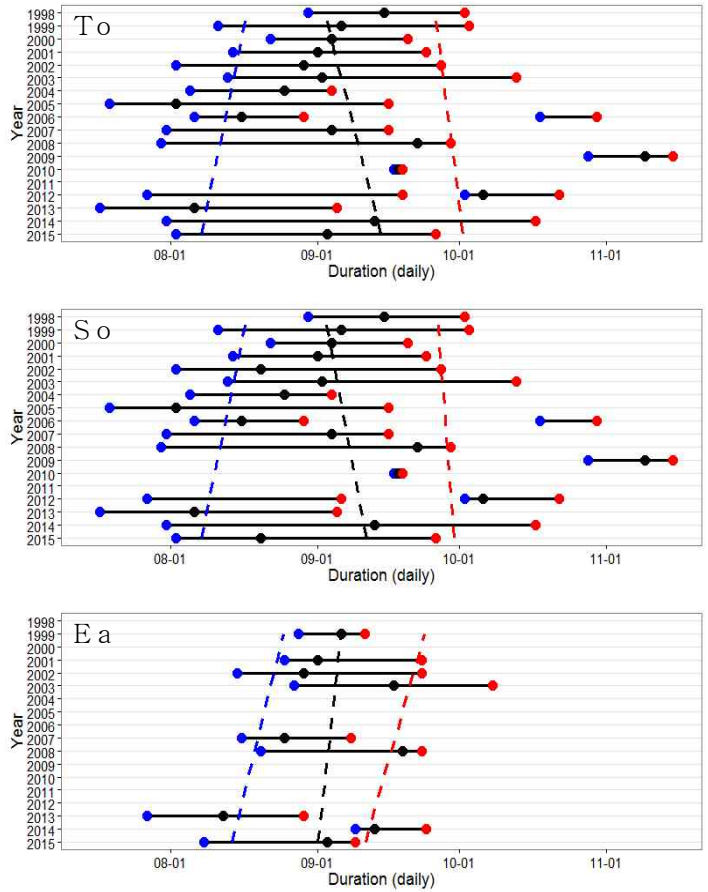


그림 9-2-11. 1998 ~ 2015년 적조 발생 시기(파란 원: 시작 시기, 검은 원: peak 시기, 빨간 원: 종료 시기)

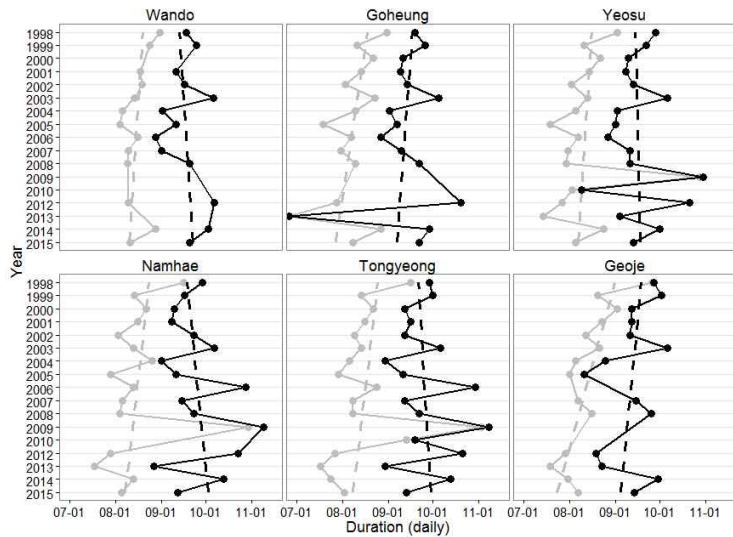


그림 9-2-12. 남해안 6지역에서의 적조 발생 시작 시기(회색 원)와 종료 시기(검정 원)

## 2. 적조 발생 환경 기존 연구

20년 이상 지속된 유해 적조의 발생 환경에 대한 이해와 분석을 통해 원인을 파악하여 해양환경 변화 감시 및 모니터링을 통해 적조를 조기 예측, 방제를 실시해 적조로 인한 막대한 경제적 피해를 막고자 많은 연구들이 진행되었다. 가장 초기 연구들은 주로 적조 발생 해역분포 양상과 수온, 염분의 분포 양상간의 관계를 연구하고자 하였다. 서 등(2000)은 1995년 ~ 1998년 적조 발생 시 초기 수온 값과 등 수온선의 분포양상은 적조의 분포 유지와 소멸 시까지 밀접한 연관성을 지니며 적조분포의 시·공간적인 조정자 역할을 한다고 주장하였으며 하계 연근해역에서 발생하는 20℃ 이하의 냉수대는 적조 확산을 막는 역할을 한다고 보고하였다. 이외에도 초기의 많은 연구들에서 *C. polykrikoides* 적조종은 24 ~ 26℃의 고온 수에서 성장을 활발히 한다고 주장하였다. 적조가 발생하는 해역의 급격한 수온, 염분의 변화는 외해 수의 유입으로 해수 특성이 달라질 때 발생하기 때문에 양 등 (2000)은 적조 발생-소멸과 외해수 유입간의 상관관계를 제시하였다.

윤 등(2003)은 남해 중부해역에서의 적조 발생과 기상 및 해양인자와의 관계에 대해 설명하며 적조 발생 횟수를 증가시키는 메커니즘을 지배하는 가장 중요한 기상인자는 강수량이라 제시하였다. 적조가 발생하기 위해 최소 2 ~ 4일 전 23.4 ~ 54.5 mm 정도의 많은 강수량이 필요한 것으로 당시에 분석되었다. 더불어 이후에 Lee (2006) 연구에서 여수반도를 중심으로 담수 유입이 적조 발생에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 메커니즘을 밝히기 위해 2003년 호우기를 전후로 영양염 농도를 조사하였다. 그는 집중호우 시 섬진강 및 동천으로부터 유입되는 다량의 영양염을 현장관측을 통해 확인하였고 이것이 여수 주변 해역의 적조 발생에 영향을 미치는 것으로 결론지었다. 영양염에 의한 적조 발생 관련한 또 다른 연구로 Lee and Kim (2007)에서는 적조 발생에 영향을 미치는 영양염의 공급원으로서 남해 연안의 지하수가 중요한 역할을 한다고 제시하였다. 실제로 방사성 동위원소를 이용해 지하수 유입량을 계산하였고 이를 통해 지하수를 통해 유입되는 영양염의 농도가 강물을 통한 유입된 것과 비교하여 높다는 것을 확인하였다.

이외에도 적조종의 성장에 필요한 조건 중 광량과 파장에 관한 생리실험을 실시하여 적조종의 성장에 몇 가지 요인들이 미치는 영향에 대해 파악한 연구들도 있었다(Kim et al., 2004). 이러한 연구들은 적조종의 성장-번성에 기여할 수 있는 생리적인 요인들을 바탕으로 한 적조 발생 메커니즘 관련 연구들이었으며 물리적인 요인에 의해 적조 패치의 확산-밀집에 관련된 연구들도 다수 발표되었다.

Lee (2008)은 고흥 주변 해역은 지형적으로 다른 해역과 차이를 보임으로써 생태

물리적인 기작에 의해 적조가 발생할 수 있다는 가설을 제안하였다. 그는 수온과 염분 관측자료, 바람 자료를 이용하여 고흥 나로도 인근 해역에서 발생하는 적조에 관한 생태 물리적 연구를 수행하였다. 이 해역은 주로 적조가 최초로 발생하는 해역으로 알려져 있는데 그 원인을 바람과 해저협곡 지형과 관련지어 적조 초기-번성-소멸의 과정을 설명하였다(그림 9-2-1).

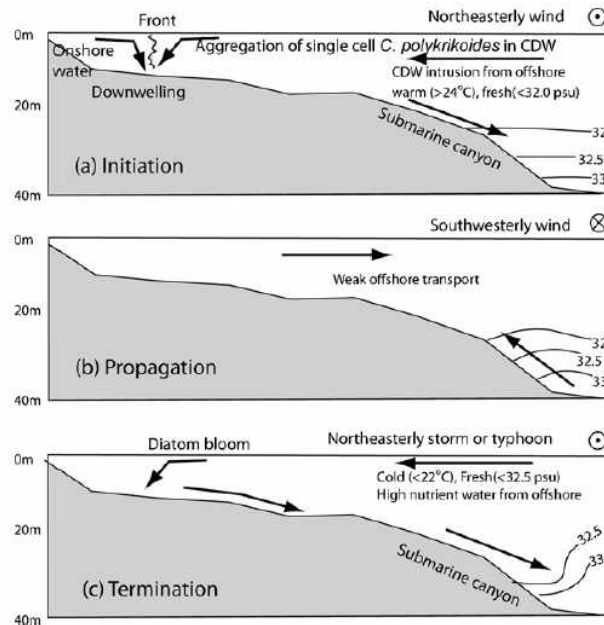


그림 9-2-13. 물리적 환경요인과 *C. polykrikoides* 적조 발생(초기-번성-소멸)간의 관계(Lee, 2008)

남해안의 적조가 동해안으로 확산되어 번성하는 메커니즘에 대하여 Kim et al (2016) 연구에서 해양 물리적인 요인과 관련지어 설명하였다(그림 9-2-14). 2013년 남해에서 동해로 확산된 적조가 번성한 네 가지 주요 메커니즘은 Lagrangian flow를 통한 동해로부터의 적조 생물 유입이 있고 이렇게 유입된 적조는 강한 일사량과 용승으로 공급된 풍부한 영양염, 그리고 성장하기 적합한 수온으로 인해 대규모 적조를 발생시켰다고 결론지었다.

이 밖에도 적조 발생 환경에 관한 초기 연구부터 적조 발생-소멸에 태풍이 미치는 영향에 관한 내용들이 지속적으로 등장했다. 적조 발생 시기와 비슷한 시기에 이벤트 성으로 발생하는 태풍은 적조 발생 초기와 맞물리면 적조 소멸의 효과를 줄 수 있다. Lim et al (2015)연구에서는 2012년 ~ 2014년 사이에 발생한 태풍과 적조와의 상관성에 대해 분석하여 태풍의 풍속 및 강도에 따라 적조 지속, 감소, 소멸의 과정을 설명하였다(그림 9-2-15).

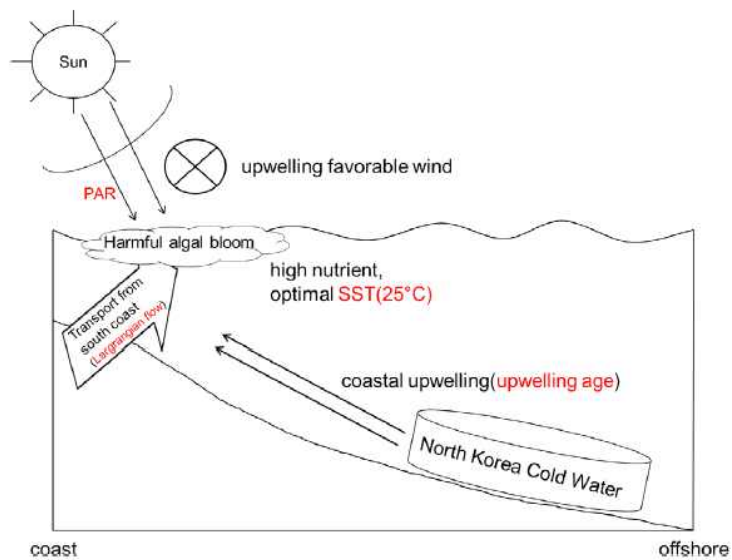


그림 9-2-14. 2013년 여름 동해안의 적조 발생에 관한 네 가지 메커니즘. (1) Lagrangian flow에 의한 동해로의 적조 유입; (2) 연안 용승으로 인한 영양염 공급; (3) 높은 일사량; (4) 25°C의 적조종 성장에 적절한 수온분포(Kim *et al.*, 2016)

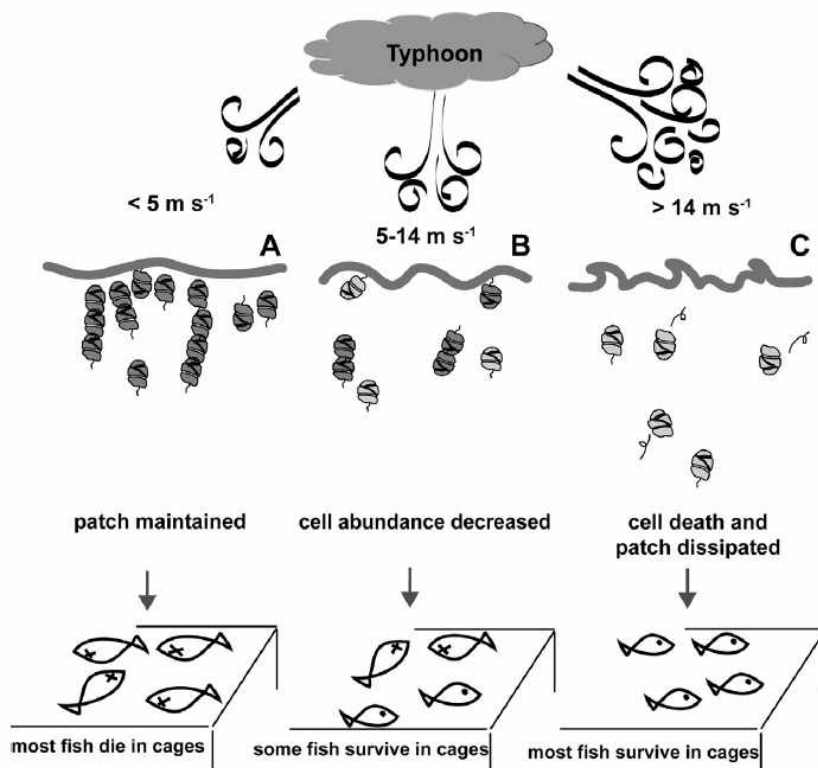


그림 9-2-15. 태풍의 단계별 풍속과 적조 지속-감소-소멸간의 관계(Lim *et al.*, 2015)

하지만 이러한 연구들은 단편적인 연구로서 특정 해에만 해당하는 일회성 과정연구가 주류를 이루었으며 기존에 제시된 발생 환경 연구들에 대한 종합적인 이해를 돕는 연구가 여전히 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 그 동안 제시된 적조 발생 기작에 대한 종합적인 이해를 목표로 하고 있다. 1, 2차년도 연구에서는 적조의 장기 발생 경향 및 시·공간적 분포를 분석하기 위해 국립수산과학원에서 제공하는 1998년부터 2016년까지의 적조속보 자료와 digitizing하여 재생성된 적조 발생 공간적 분포 자료 그리고 2014년과 2015년 적조 현장 관측자료를 이용하였다. 특히 적조 발생 환경 분석에 필요한 적조 공간적 분포 자료는 국립수산과학원에서 선박, 육상, 항공관측을 기반으로 발행한 적조속보 자료에 절대적으로 의존하였다. 이 자료들을 바탕으로 시·공간적 적조 발생에 대한 분석을 수행했고, 빅데이터로 구축한 적조 발생 환경자료 또한 장기 패턴 분석을 실시하였다.

2016년 연구에서 수행한 적조 탐지 알고리즘 개발 결과, 다중 위성자료를 이용하여 적조 공간적 분포 자료 재처리의 가능성에 한 걸음 더 접근하였다. 따라서 이전 연구에서 구축된 위성 빅데이터 활용하여 적조 공간적 분포 재처리 자료와 국립수산과학원의 속보자료를 비교·분석하여 좀 더 정확한 적조의 분포를 파악해야 할 필요가 있다. 이는 적조 발생 환경 분석을 위해 반드시 필요한 과정으로 판단된다.

본 연구에서는 적조의 장기적 발생 경향에 대한 분석을 위해 적조 발생 빈도수, 지역적 범위, 최대밀도, 발생 규모 그리고 적조 발생 시기를 조사·분석한 바 있다. 지금까지 1998년부터 2016년까지 19년 기간 동안의 적조 발생 자료를 살펴본 결과 남해안을 중심으로 연도별 적조 발생 빈도수가 가장 높았고 그 시·공간적 분포는 남해안을 중심으로 적조 발생 빈도수, 지역적 범위, 최대밀도, 시작시기/피크시기/종료 시기 등은 매해마다 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또 하나의 결과로 연도별 적조 발생 규모에서 국립수산과학원 적조속보 기준으로 적조 미 발생 해로 분류 되는 2009년 ~ 2011년은 적조가 발생했던 해와 어떤 환경이 다른지에 대해 분석하였지만 당시 해양환경의 변화와 어떠한 관계가 있는 지 확인 할 수 없었다. 따라서 원점으로 잠시 돌아가 적조 미 발생으로 구분된 자료의 정확성에 대한 검토가 필요할 것이다.

### 3. 적조 발생 환경 분석

1998년부터 2014년까지 장기적으로 적조의 발생이 어떻게 변화되어 왔는지 이러한 변화가 해양환경의 변화와 어떠한 밀접한 관계가 있는지 분석하기 위하여 표 8-1-1과 같이 빅데이터 플랫폼에 구축된 다양한 환경자료를 이용하였다.

가. 적조 발생 환경 장기변화 분석

1985년부터 2010년까지 표층수온의 장기경향을 살펴보았을 때 한반도 전 해역의 표층수온은 1997년 이후 상대적으로 높은 값을 보여 수온 상승 경향을 나타내었다(그림 9-2-16). 그러나 1998년 이후 점차 표층수온이 감소하여 2003년에 다시 음의 anomaly 값을 보이다가 이후 다시 상승세로 돌아섰다.

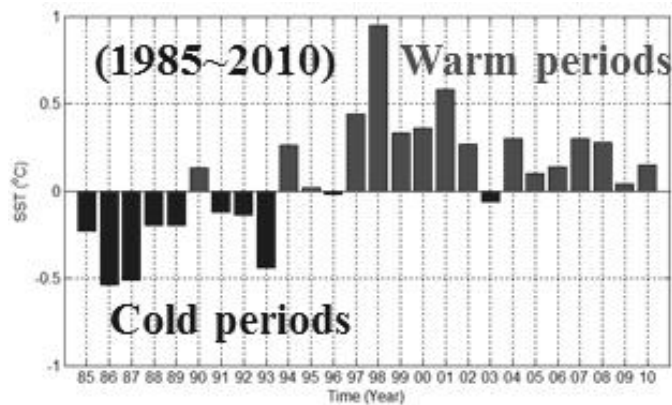


그림 9-2-16. 한반도 해역의 연평균 표층수온 anomaly time-series

적조 발생 해역에서의 환경 장기변화를 살펴보기 위하여 1998년부터 2014년까지 위도 34.0 ~ 38.2 ° N, 경도 125.6 ~ 130.2 ° E 해역의 위성 물리자료와 기상청, 국립해양조사원에서 제공하는 남해안 구간의 물리자료를 살펴보았다. 적조 발생 일일 자료의 불확실성을 개선하기 위하여 연간 자료를 우선적으로 이용하였다. 적조 발생과 관련된 지표로는 시작 시기(*yearday*), 빈도수(*n*), 최대밀도(*cell ml<sup>-1</sup>*) 그리고 지역적 범위(° × °)를 선택하였고 물리적 지표로는 7월에서 10월까지의 여름 평균 표층수온(Sea Surface Temperature, SST, °C), 대마난류(Tshushima Warm Current, TWC) 수송량(*Sv*), 장강 희석수(Changjiang Diluted Water, CDW) 방출량(*m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>*), 바람응력(Wind stress, *Nm<sup>-2</sup>*), 바람속도(Wind speed, *ms<sup>-1</sup>*), 조차(Tidal range, *mm*), 광합성 유효광(Photosynthesis Available Radiation, PAR, *Einsteinm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>*), 순열속(Net Heat Flux, NHF, *Wm<sup>-2</sup>*), 운량(Cloud cover), 강수량(Precipitation, *kgm<sup>-2</sup>*), 해수면 이상(Sea Level Anomaly, SLA, *m*), 해면 기압(Sea Level Pressure, SLP, *hP*), 태평양 십년주기 진동(Pacific Decadal Oscillation, PDO), 남방진동지수(Southern Oscillation Index, SOI), 북극진동지수(Arctic Oscillation Index, AOI) 그리고 동아시아 여름 몬순지수(East Asian Summer Monsoon Index, EASMI)를 이용하였다.

그림 9-2-17은 1998년에서 2014년의 기간 동안의 각 지표들의 anomaly 장기경향을 보여준다. 우선, 최대밀도와 지역적 범위는 1990년대 후반에서 2000년대 중반으로 가면서 감소하다가 이후 다시 증가하는 패턴을 보였다. 적조 발생 빈도수는 2000년대 중반까지 뚜렷한 패턴을 보이지 않다가 2009 ~ 2011년의 적조규모의 급격한 감소로 인해 2000년대 후반부터 급격한 증가를 보였고 적조 발생 시작 시기의 경우는 이와 반대로 점점 빨라지는 패턴을 보였다.

7월 ~ 10월의 여름 평균 SST는 앞서 보여준 한반도 전 해역의 표층수온의 패턴과 일치하는 모습을 보였으며 2000년대 중반까지 감소하다 이후 증가하는 패턴을 보였다. TWC 수송량, CDW 방출량과 조차 또한 표층수온과 마찬가지로 2000년대 후반부터 다시 증가 추세를 보였다. 바람응력, 바람속도 그리고 해면 기압은 2000년대 초반까지는 증가하다가 2000년대 중반부터 다시 감소하는 패턴을 보였다. PAR는 1990년대 후반 이후 감소하는 운량과 강수량의 영향으로 증가할 것이라는 예상과 달리 감소하는 경향을 보였으며 NHF는 2000년대 초반 이후 점점 증가하는 경향을 보였다. SLA는 1990년대 후반에 감소하다 2000년대 중반부터 큰 변동폭을 보이지 않았으며 SLP는 2000년대 초반까지 급격히 증가한 뒤 이후 낮은 수치를 보였다. PDO는 2000년대 초 이후 2000년대 후반까지 감소를 보이다가 다시 급격한 증가를 보였으며 SOI는 이와 반대 패턴을 보였다. AOI는 2010년의 큰 이상값으로 인해 그 경향이 뚜렷이 보이지 않았고 EASMI는 2000년 초 이후 미미한 감소를 보였다.

아직 이러한 물리적 환경 지표와 적조 발생 지표 간 어떠한 상관관계가 있는지는 분석하지 않아 결론을 내릴 수 없으나 2000년대 중반 이후 증가하는 표층수온과 대마난류 수송량과 장강 희석수 방출량 증가 그리고 바람세기의 약화에 따른 성층화 강화, NHF의 증가 현상이 적조 발생 시작 시기, 지역적 범위와 최대밀도 등에 복합적으로 영향을 줄 것이라 유추할 수 있다. 앞으로 기후변화에 따라 적조 발생 규모가 어떻게 변화할지 기후인자를 포함하여 심도있게 연구할 필요가 있다.



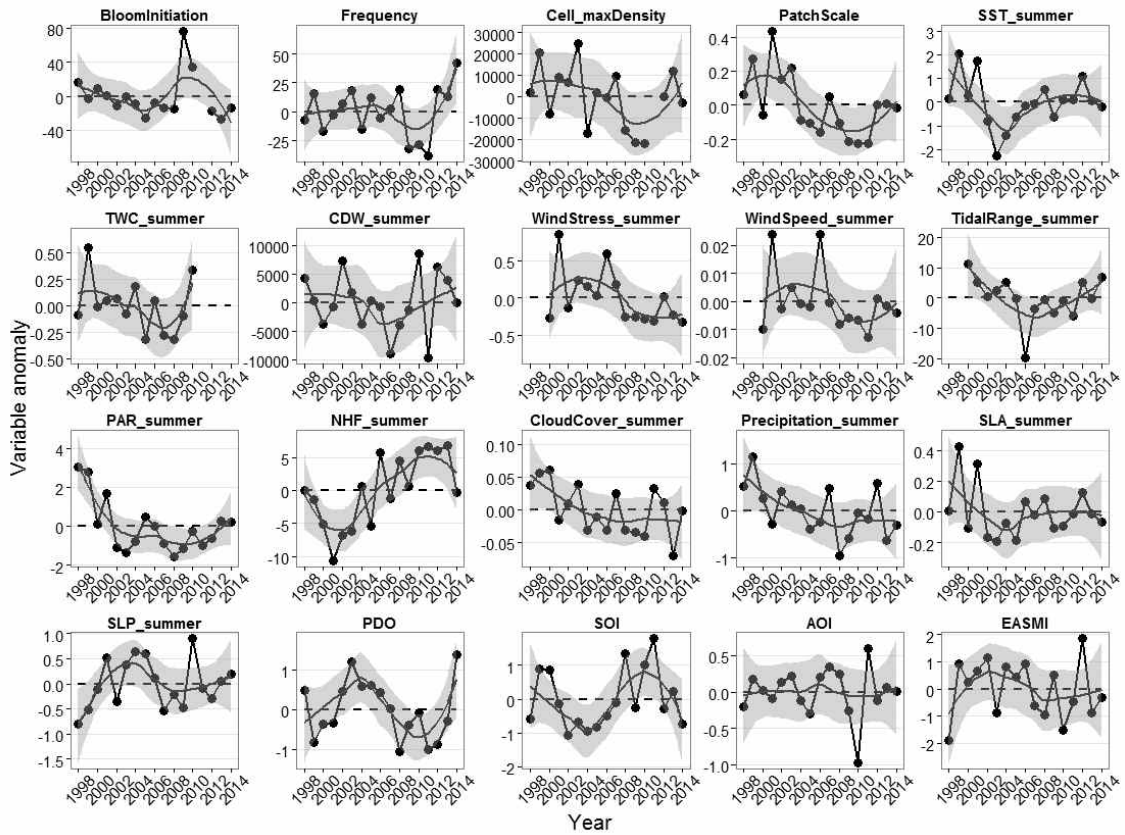


그림 9-2-17. 1998 ~ 2014년 적조 발생과 관련된 물리적 인자의 연평균 anomaly time-series

#### 나. 적조 발생 환경과의 연관성 분석

남해안의 지역별 적조 발생 시작일을 나타낸 그래프를 보면 *C. polykrikoides* 적조의 최초 발생 해역은 모두 남해안에 위치하며 고흥과 여수가 최초 발생의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다(그림 9-2-18). 이 외(2015)에 의하면 실제로 1993년부터 2013년까지의 적조 중 절반 이상이 고흥 나로도 해역과 여수 돌산, 여천 및 가막만 해역에서 가장 먼저 발생한 것으로 나타났다. 이러한 자료를 바탕으로 하여 고흥과 여수의 해역에서 가장 먼저 적조가 발생하는 원인을 지역별 환경인자와 함께 살펴보았다.

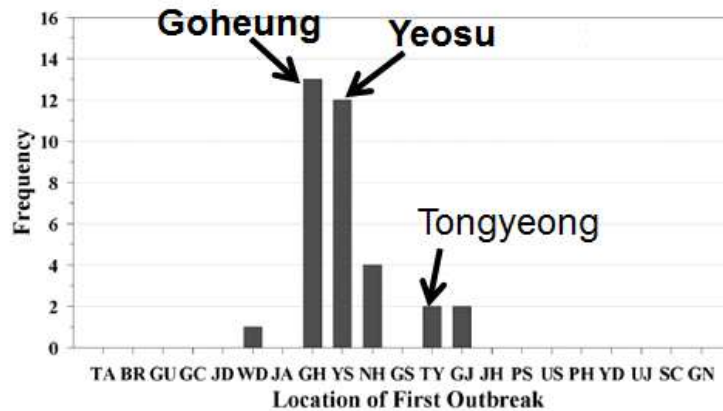


그림 9-2-18. 1993 ~ 2013년 지역별 적조 최초발생 빈도수(이 외, 2015)

첫째, 남해안의 여수는 남해안으로 유입되는 섬진강 하구에 위치한 지역으로 강으로 유입되는 영양염의 공급으로 인해 적조생물이 고밀도로 번성하기에 좋은 환경을 갖추고 있다. Lee (2006)는 여수반도를 중심으로 한 남해안에서 담수 유입이 *C. polykrikoides* 적조의 발생에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 매커니즘을 밝히기 위해 2003년 호우기를 전후로 하여 영양염 농도를 조사하였다. 그는 집중 호우 시 섬진강 및 동천으로부터 유입되는 다량의 영양염을 확인하였고 이것이 적조 발생에 영향을 미치는 것으로 결론지었다.

우리나라는 여름철 많은 강수량에 의해 바다로 유입되는 강물의 양이 증가하게 된다. 바다로 유입되는 강 유입량의 증가로 인해 영양염의 공급도 증가하게 되는데 이 때, 해양에 산발적으로 존재하던 적조생물이 호적환경을 만나게 됨으로써 폭발적인 번성을 하게 된다. 이번 연구에서는 Lee (2006)가 제시한 가설을 바탕으로 하여 섬진강의 영향을 받는 여수 지역뿐만 아니라 남강의 영향을 받는 통영 지역까지 확장하여 2004 ~ 2014년 기간 동안 여름철 강수량과 당해 고밀도 적조와의 상관관계를 살펴보았다. 기상청에서 제공하는 일 평균 강수량을 이용하여 최초 적조 발생 15일 전부터 최고 밀도 적조 발생일 2일 전까지의 강수량의 일 평균 값을 계산하였다. 여수의 경우 여수와 순천의 강수량 자료를 이용하였고, 통영의 경우 진주의 강수량 자료를 이용하였다.

Lee (2006)가 제시한 다량의 담수 유입에 의한 고밀도 적조 발생 기작을 참고하여 강수량(영양염의 proxy)과 적조 발생 간의 관계를 비교 분석한 결과, Lee (2006)가 제시했던 1996년부터 2003년의 강수와 적조생물의 밀도는 뚜렷한 양의 상관성을 보였으나 그 이후 자료인 2004 ~ 2014년을 추가하였을 때는 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다(그림 9-2-19). 2011년은 적조가 발생하지 않았던 해였음에도 불구하고 2011년에 여수와 통영 일 평균 강수량은 상당한 값을 보였고, 이외에도 몇몇의 해에서 일평균 강수량과 고밀

도 적조 발생일수 간 상관성이 없는 것으로 나타났다. 즉, 강수량으로 인한 적조 발생을 설명할 수 없는 해가 네 해 중에 한 해로 나타났다.

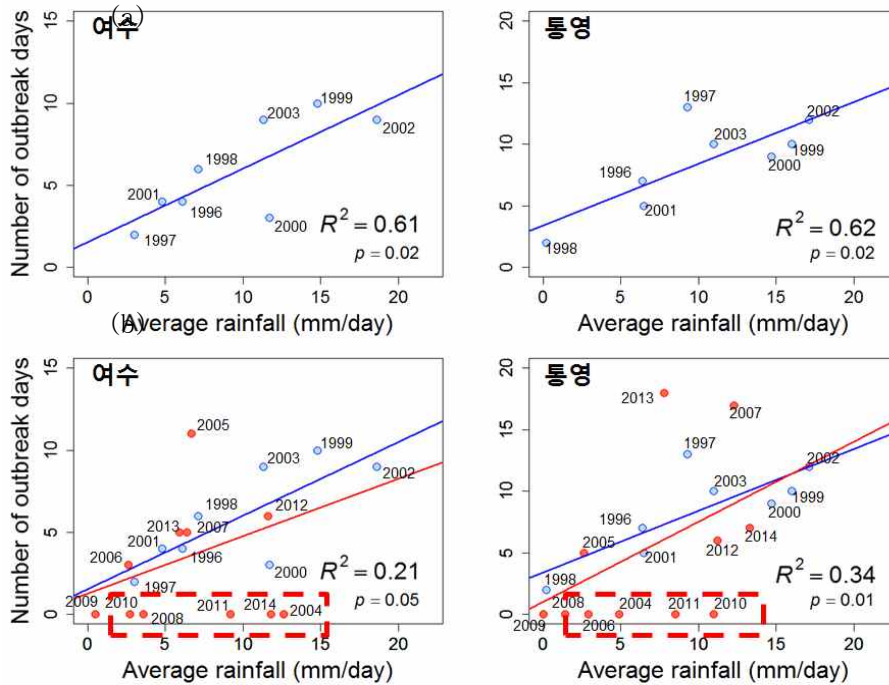


그림 9-2-19. 고밀도 적조와 일평균 강수량(영양염 proxy)의 상관관계. (a) Lee (2006)의 분석결과, (b) Lee (2006)의 자료에 2004 ~ 2014년 자료를 추가한 분석결과

둘째, 여수를 비롯하여 최초 적조 발생 빈도수가 가장 많았던 고흥 해역은 지형적으로 다른 해역과 차이를 보임으로써 생태물리적인 기작에 의해 적조가 발생할 수 있다는 가설이 제안되었다(Lee, 2008). Lee (2008)는 수온과 염분 관측자료, Quick Scatterometer (QuikSCAT) 위성 영상 및 Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) 해상풍 자료를 이용하여 나로도 인근 해역에서 발생하는 *C. polykrikoides* 적조 출현에 관한 생태물리적 연구를 수행하였다. Lee (2008)는 고흥 나로도 해역은 주로 적조가 최초로 발생하는 해역이고 그 원인을 바람과 해저협곡 (submarine canyon) 지형과 관련지어 설명하였다(그림 9-2-22). 적조가 발생하는 시기인 8월 말은 계절풍의 방향이 남서풍에서 북동풍으로 바뀌는 시기로 강한 북동풍이 불기 시작하면 동시에 나로도 인근 해역으로 중국 대륙으로부터 오는 고온 저염의 장강 희석수가 에크만 수층에 의해 성질이 다른 저온 고염 남해안 연안수와 만남으로써 전선이 형성된다고 설명하였다. 그 결과, 장강 희석수가 유입되어 형성된 전선을 따라 장강 희석수에 존재하던 *C. polykrikoides* 세포가 집적됨으로써 적조가 발생한다는 것이다. 세포가 밀집되는 이 전선에서 침강류가 형성

되는데 유영능력을 가진 *C. polykrikoides*는 이 환경에서 적응하고 성장하여 적조를 발생시킬 수 있다는 것이다. 따라서 두 번째로 Lee (2008)가 제시한 물리적인 기작에 의해 고흥 해역에서 적조가 최초로 출현할 수 있는지 장기 데이터를 이용하여 살펴보았다. 고흥 해역에서의 최초 적조 출현 기작을 테스트하기 위해 다음의 두 가지 조건을 이용하여 2000 ~ 2014년까지 매해 고흥에서의 적조 발생과 시기적으로 일치하는지 살펴보았다. 우선, 적조가 발생했을 당시 조건 ①: 북동풍이 5일 이상 지속되었는지 QuikSCAT daily (0.25 degree) 바람 자료를 이용하여 살펴보았고(그림 9-2-20) 한국해양자료센터(Korea Ocean Data Center, KODC)의 수온과 염분의 수심별 자료를 활용하여 조건 ②: 남해안 연안수와 장강 희석수의 전선이 형성되었는지 확인하였다(그림 9-2-21). 마지막으로, 고흥 나로도에서의 실제 적조 최초 발생과 조건①과 ②가 작용한 예측된 적조 발생이 일치했는지 확인하였다. 2000 ~ 2014년까지 분석결과는 그림 9-2-23과 같았다.

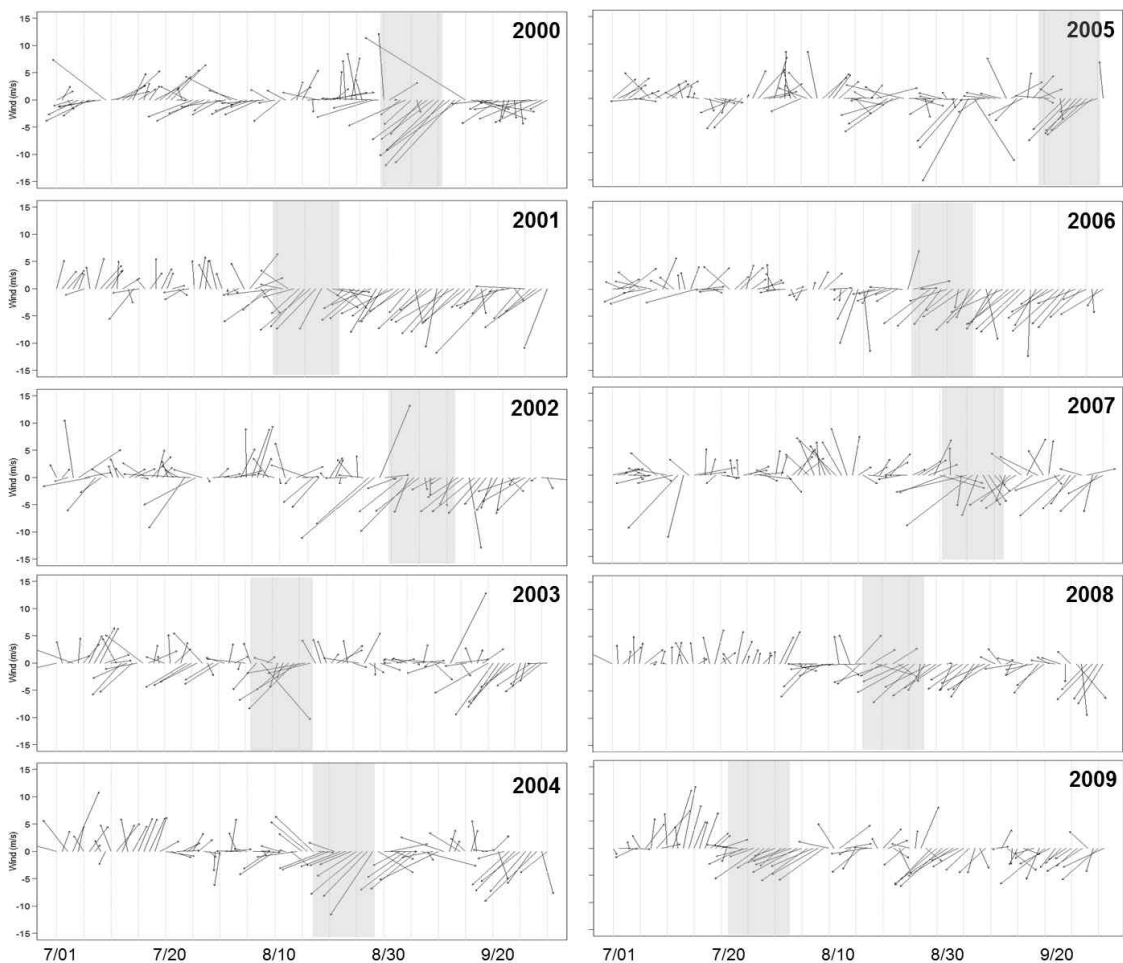


그림 9-2-20. 2000 ~ 2014년 남해안 해역의 일일 바람방향 분포도

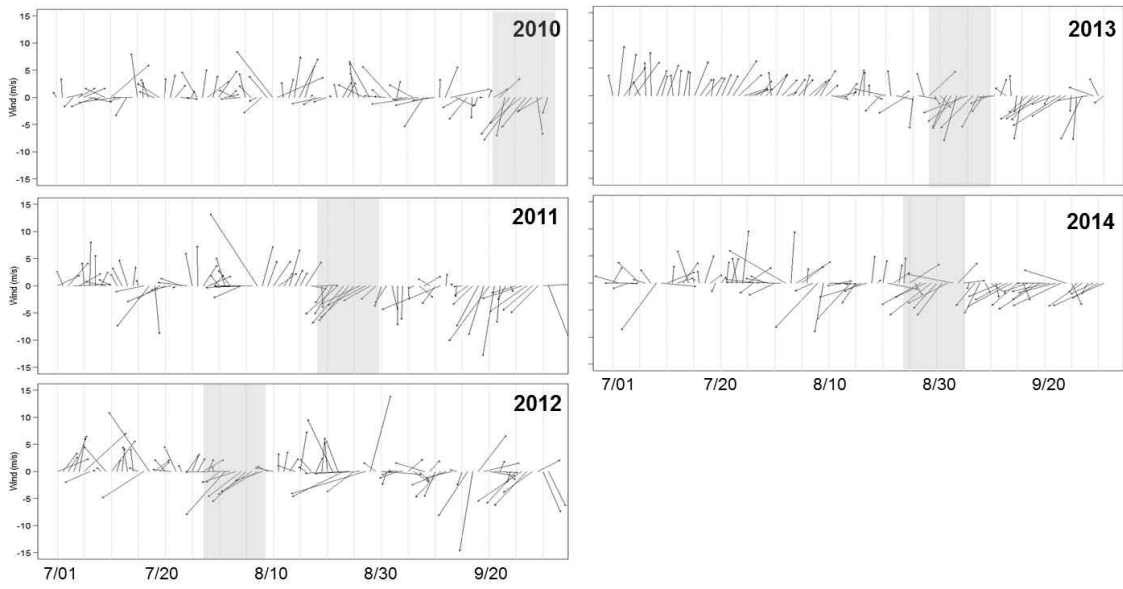


그림 9-2-20. Continued

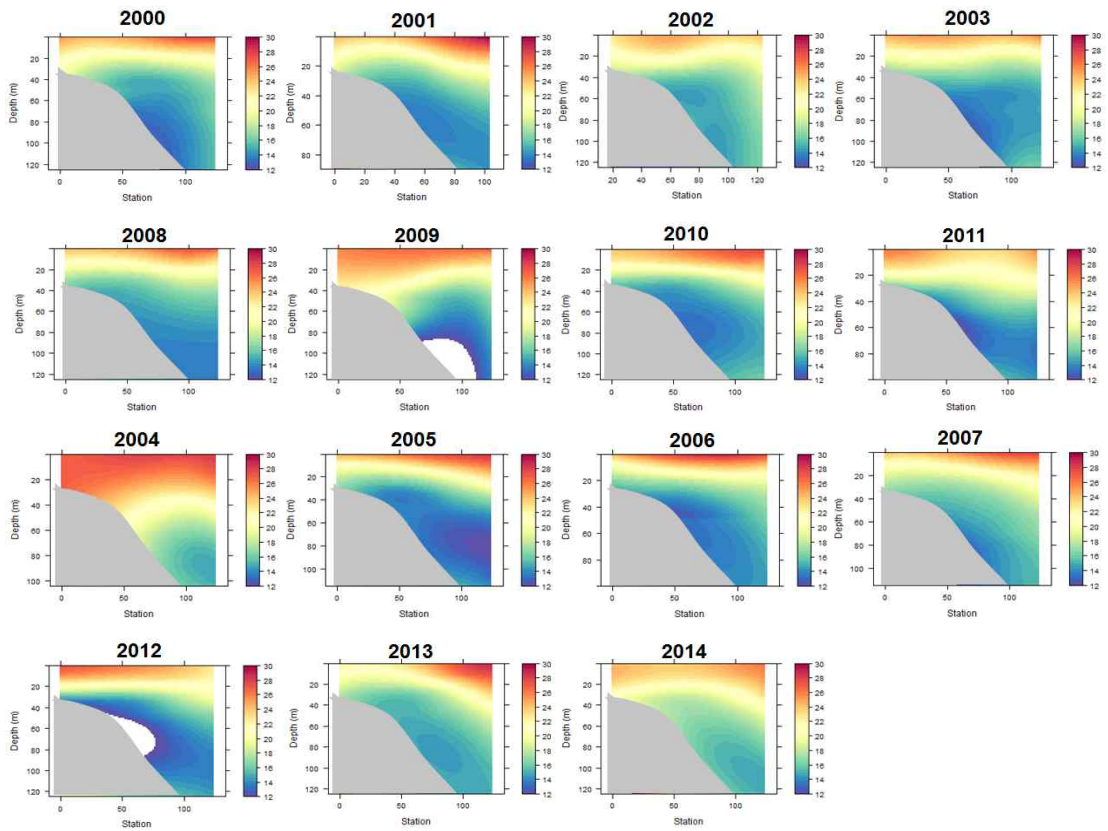


그림 9-2-21. 2000 ~ 2014년 수직 수온 분포(x축: KODC 정선 관측정점 204-01부터 204-06까지의 거리(km))

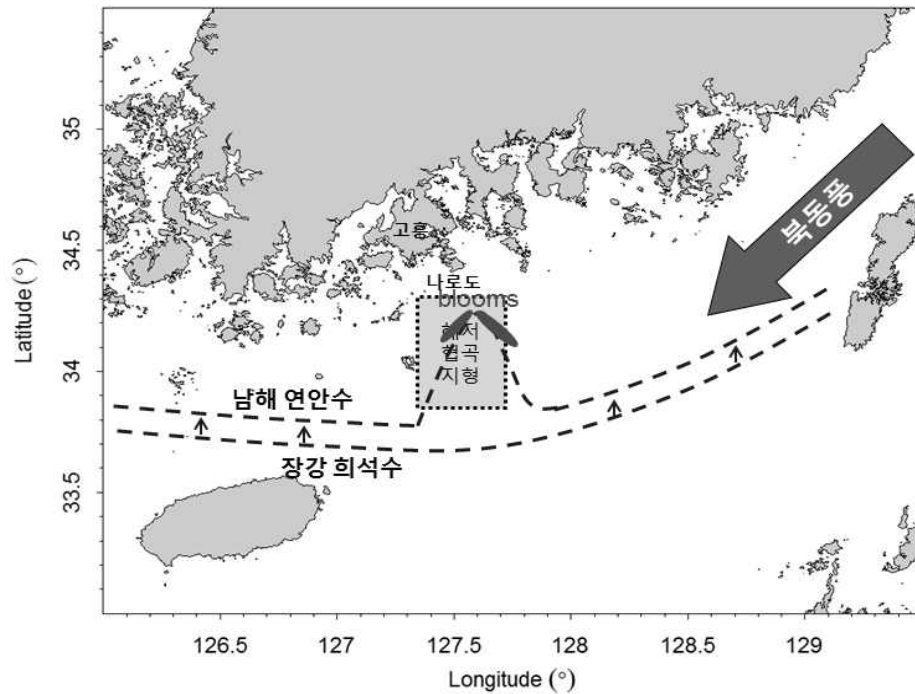


그림 9-2-22. 고흥 나로도 주변해역의 적조 발생 기작 (Lee, 2008).

북동풍 5일 이상 지속 여부는 2000 ~ 2014년까지 모든 해에서 조건을 만족하였다. 그러나 전선 형성은 해마다 차이를 보였다. 조건 ①과 ②를 만족시킨 2000, 2001년과 2006년은 적조 발생 예상 연도로 고흥 나로도의 실제 적조 최초 발생과 일치함을 보여 조건 ①과 ②의 물리적 기작에 의해 고흥의 적조 최초 발생이 설명되는 것처럼 보였다. 그러나 2005년과 2007년의 경우 조건 ①과 ②를 만족했음에도 불구하고 실제로 적조 최초 발생이 일어나지 않았다. Lee (2008)가 제안한 물리적 가설에 의해 예측된 적조 발생과 실제 적조 발생은 단 1/3의 일치만을 보임으로써 그가 제시한 적조 발생 물리적 기작만으로 고흥에서의 적조 최초 발생 이유를 설명하기에는 불충분하였다.

본 연구에서는 고흥과 여수에서 최초 적조 발생 빈도수가 가장 높게 나타난 이유를 이전 연구들이 제시한 물리적 환경 변수들과 관련된 가설을 이용하여 설명하고자 하였다. 결과적으로, Lee(2006)와 Lee(2008)가 제시한 두 가지 기작 모두 고흥과 여수 지역의 적조 최초 발생 원인을 설명하지 못하는 것으로 나타났다.

연도	①	②	적조 예측	나로도 실제 적조	검증 (시기 일치 여부)
	북동풍	전선 형성			
2000	+	+	+	+	+
2001	+	+	+	+	+
2002	+	-	-	+	-
2003	+	-	-	+	-
2004	+	-	-	-	-
2005	+	+	+	+	-
2006	+	+	+	+	+
2007	+	+	+	+	-
2008	+	+	+	-	-
2009	+	-	-	-	-
2010	+	+	+	-	-
2011	+	+	+	-	-
2012	+	-	-	+	-
2013	+	+	+	-	-
2014	+	-	-	+	-

그림 9-2-23. 2000 ~ 2014년 실제 적조 발생에 대한 적조 발생 예측결과 검증

마지막으로 1998년부터 2014년까지 남해안의 적조 발생 해역의 일일 최대밀도를 이용하여 장기 time-series 자료 분석하였다. 17년간의 climatological mean을 살펴보면 적조의 최초 발생 시작일은 표층수온의 증가율이 크게 상승하고 장마가 끝난 직후 표층 광합성 유효광이 다시 회복세로 돌아서는 시점 그리고 여름철 조차와 바람의 규모가 크게 감소하다 다시 증가하는 시기에서 나타났다(그림 9-2-24). 그러나 이를 다시 연별로 분석해보면 이러한 물리적 인자들과 적조 최초 발생 시작일과는 관련성이 50% 이상 넘기 힘들다는 것을 알 수 있다(그림 9-2-25). 앞으로 연구에서는 좀 더 확률론적 특성을 파악하여 장기 발생 경향에 대한 생태학적 가설을 수립할 필요가 있다.



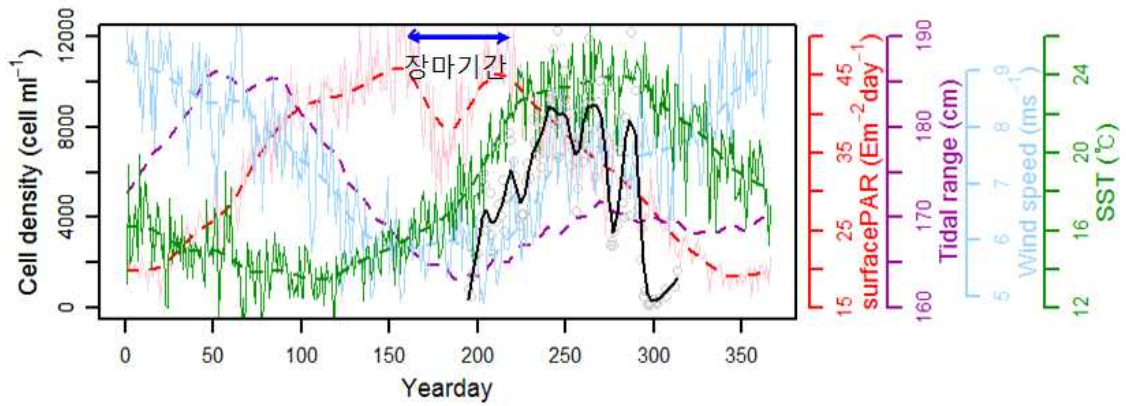


그림 9-2-24. 물리적 환경인자와 적조 최초 발생 시작일과의 관계 (1998 ~ 2014년 climatological mean)

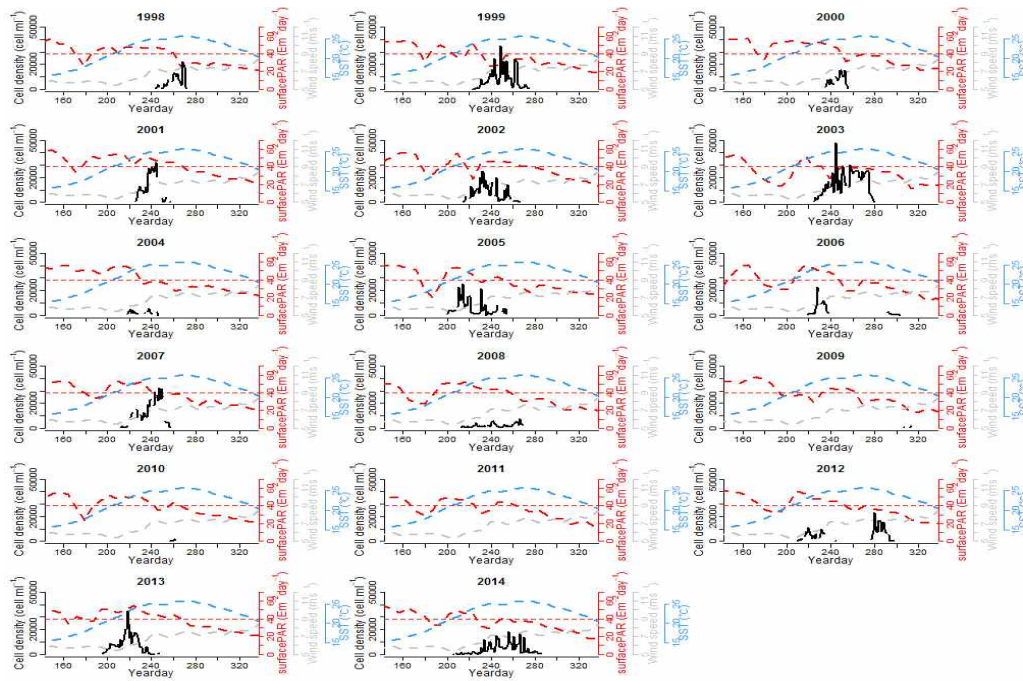


그림 9-2-25. 물리적 환경인자(광합성 유효광, 표층수온, 바람응력)와 연간 적조 최초 발생 시작일과의 관계 (1998 ~ 2014)

## 제 10 장 결론

1980년대 이래로 남해안 해역에서 적조가 빈발하여 큰 피해를 입히고 있고 이를 해결하기 위해 수많은 연구가 이루어졌으나 아직도 적조에 실제로 대처하여 피해를 경감할 수 있는 뚜렷한 연구결과는 별로 없는 실정이다. 초기의 적조는 남해안에 국한되어 발생되었지만, 1990년대 이래 유해성 적조는 지역적으로 국한되지 않고 남해 전역 및 동해 및 서해 연안 해역까지 확산되면서 어류의 집단폐사 등과 같은 경제적 손실과 생태계에 막대한 영향을 야기해왔다. 기존의 적조 탐지는 직접 현장 조사를 통해 이루어지기 때문에 많은 비용과 시간이 요구되고, 또한 지역적으로 국한된 조사만으로는 유해성 적조의 조기 탐지 및 모니터링에 한계가 있기 때문에 위성 등 다양한 플랫폼을 활용한 탐지기술의 개발이 필요하다. 원격탐사는 상대적으로 적은 비용이 들고 시·공간적 제약이 없기 때문에 다양한 환경에 적용할 수 있는 장점을 가지고 있음에도 활용되지 못하고 있다. 이 연구사업에서는 특히 원격탐사 기술과 체계적 자료 분석 기술을 융합하여 적조를 조기에 탐지하고 적조 발생 경향을 분석할 수 있는 기술을 개발하고자 하였다.

새로운 적조 탐지 알고리즘 개발을 하기 위하여 특히 적조종의 광학적 특성을 분석하고 광학모델을 이용하여 새로운 알고리즘을 개발하였다. 이를 위해 적조 발생해역에서 현장관측을 수행하였고 적조 종을 배양하고 흡광도를 측정하여 적조 반사도 모델에 적용하여 다양한 환경 조건 하의 반사도 변화를 시뮬레이션하여 데이터 베이스를 만들고 적조 탐지 알고리즘 개발의 이론적 근거를 확보하였다. 이 데이터 베이스를 토대로 적조 탐지 알고리즘의 정확도와 효율을 높일 수 있도록 역방전과 인공신경망, 확률론적 인공신경망, 2 종류의 인공신경망 모델을 적용하여 교차 검증하였다. 이들 알고리즘의 정확도는 수중 알고리즘의 경우 95% 이상, 위성 알고리즘의 경우 88-90%에 달하여 현장에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 개발된 위성 알고리즘을 2002-2015년 기간의 MODIS 영상에 적용하여 국립수산과학원에서 발간한 목측 적조자료와 비교하여 현장 목측 자료와 유사하지만 훨씬 더 자세한 위치 정보를 보여 주는 결과를 얻어 위성에 의한 적조 탐지 기술의 효용성을 입증하였다. 이와 함께 빅데이터를 구축하고 이를 이용하여 적조 발생 가설들을 검증하였다.

이 연구사업의 결과를 활용하여 적조 관리와 관련하여 유용성을 극대화 할 수 있게 다음과 같은 분야에서 국가 R&D 사업의 개발이 필요하다.

### 1) 적조 조기 탐지를 위한 무인 광학 계측 시스템 개발

이 연구에서 개발한 수중 적조 알고리즘은 4개 파장대의 반사도와 형광을 측정하면 90% 이상의 정확도로 적조 탐지가 가능하므로 단순한 광학센서를 이용할 수 있는 플랫폼에 인공 신경망 알고리즘을 펌웨어로 탑재하여 적조 빈발 해역에 설치하면 조기 탐지가 가능할 것이다. 광학부이, 부유 부이, 무인 타워, 선박장착의 플랫폼 등을 이용할 수 있다. 이미 상용화된 소형 광학부이를 이용하거나 새로 개발하고 여기에 이 연구에서 개발된 알고리즘을 S/W화 하여 탑재 운용한다. 광학 부이 시스템을 적조 빈발 해역에 설치하고 텔레메트리를 이용하여 자동 경보 시스템으로 활용할 수 있다.

### 2) 고해상도 위성을 이용한 적조 예찰 및 확산 감시 시스템 개발

유럽의 Sentinel 3 (2017), 일본의 SGLI (2017), 한국의 GOCI-II (2019)와 같은 고해상도 위성은 해상도가 250-300m로 연안 환경문제, 특히 적조 탐지에 활용도가 높다. 그러나 이 연구사업에서 개발한 위성 알고리즘은 MODIS 위성자료로 학습한 것으로 다른 위성들은 밴드 파장대, 대기 보정 등이 MODIS와 달라 새로운 학습이 필요하다. 이 연구에서 습득한 인공신경망 개발 기술을 활용하고 MODIS 적조 영상을 이용하여 교차 학습을 시행하면 새로운 위성에 맞는 알고리즘을 개발하는 것이 용이할 것으로 예상된다. 추후에도 여러나라에서 지속적으로 고해상도 위성을 발사할 것이며 여러 종류의 위성자료를 동시에 사용하면 좀 더 많은 영상 확보가 가능하여 실제 활용이 가능한 실시간 혹은 준-실시간 예보 시스템 구축이 가능할 것이다.

### 3) 위성 예찰과 해류 순환 모델을 결합한 적조 발생 이동-확산 경로 예보시스템 구축

적조를 저밀도의 초기 단계에서 탐지하면 해양 순환 모델과 연결하여 적조의 확장 가능성, 이동 및 확산 경로를 단기적으로 예측하여 가두리의 이동이나 기폭기 등 저감 장치를 효율적으로 이용할 수 있도록 하여 적조 피해를 최소화할 수 있다.

## 참고문헌

- 국립수산과학원, 2000. 1999년도 한국연안의 적조 발생 상황
- 국립수산과학원, 2002. 2000.2001년도 한국연안의 적조 발생 상황
- 국립수산과학원, 2004. 2002.2003년도 한국연안의 적조 발생 상황
- 국립수산과학원, 2005. 2004년도 한국연안의 적조 발생 상황
- 국립수산과학원, 2006. 2005년도 한국연안의 적조 발생 상황
- 국립수산과학원, 2007. 2006년도 한국연안의 적조 발생 상황
- 국립수산과학원, 2008. 2007년도 한국연안의 적조 발생 상황
- 국립수산과학원, 2009. 2008년도 한국연안의 적조 발생 상황
- 국립수산과학원, 2013. 2010.2011.2012년도 한국연안의 적조 발생 상황
- 국립수산과학원, 2014. 2013년도 한국연안의 적조 발생 상황
- 국립수산과학원, 2015. 2014년도 한국연안의 적조 발생 상황
- 국립수산과학원, 2015. 2015년도 한국연안의 적조 발생 상황
- 김학균, 2005. 해양적조. 다솜출판사, 467.
- 서영상, 김정희, 김학균, 2000. NOAA 위성자료에 의한 해수표면 수온분포와 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생의 상관성. 한국환경과학회지. 9(3), 215-221.
- 양재삼, 최현용, 정해진, 정주영, 박종규, 2000. 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생연구: 1. 물리·화학적인 특성. 한국해양학회지. 5(1), 16-26.
- 오승열, 김대현, 윤홍주, 2016. 연근해 양식장 주변 적조 모니터링을 위한 무인 항공영상 적용 연구. 대한원격탐사학회지. 32(2), 87-96.
- 윤홍주, 김승철, 박일흠, 2003. 한국 남해중부해역의 적조발생에 관한 기상 및 해양환경 특성. 한국해양정보통신학회지. 7(4), 845-852.
- 임월애, 2004. 한국 남해안의 적조 발생과정에 대한 연구. 부산대학교 대학원, 박사학위 논문. 99.
- Ahn, Y.H. and Shanmugam, P. 2006. Detecting the red tide algal bloom from satellite ocean color observations in optically complex Northeast Asia Coastal waters. Remote Sensing of Environment, 103, 419-437.

- Ahn, Y.H., Shanmugam, P., Ryu, J.H., and Jeong, J.C., 2006. Satellite detection of harmful algal bloom occurrences in Korean waters. *Harmful Algae*, 5, 213-231.
- Cannizzaro, J.P., Carder, K.L., Chen, F.R., Heil, C.A., Vargo, G.A., 2008. A novel technique for detection of the toxic dinoflagellate, *K. brevis*, in the Gulf of Mexico from remotely sensed ocean color data. *Continental Shelf Research*. 28, 137-158.
- Chasset, Pierre-Olivier, 2016. Package ‘pnn’ . CRAN.
- Cheung, V., Cannons, K., 2002. An Introduction to Probabilistic Neural Networks. A presentation.  
([http://www.wi.hs-wismar.de/~cleve/vorl/projects/dm/ss13/PNN/Quellen/CheungCannons\\_AnIntroductiontoPNNs.pdf](http://www.wi.hs-wismar.de/~cleve/vorl/projects/dm/ss13/PNN/Quellen/CheungCannons_AnIntroductiontoPNNs.pdf))
- Hu, C., Muller Karger F.E., Vargo, G.A., Neely, M.B., and Johns, E., 2004. Linkages between coastal runoff and the Florida keys ecosystem: A study of a dark plume event. *Geophysical Research letter*, 31, doi: 10.1029/2004GL020382.
- Hu, C., Muller Karger, F.E., Taylor, C., Carder, K.L., Kelble, C. Johns, E., and Heil, C.A., 2005. Red tide detecting and tracing using MODIS fluorescence data: A regional example in SW Florida coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 97, 311-321.
- IOCCG, 2006. Remote sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications. No. 5, IOCCG Dartmouth, NS.
- Kim, D., Matsuyama, Y., Nagasoe, S., Yamaguchi, M., Yoon, Y., Oshima, Y., Imada, N. and Honjo, T., 2004. Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the harmful red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* Margalef (Dinophyceae). *Journal of Plankton Research*. 26, 61-66.
- Kim, D.H, Jo, Y.H, Choi, J.K., Choi, J.K., Bi, H., 2016. Physical processes leading to the development of an anomalously large *Cochlodinium polykrikoides* bloom in the East sea/Japan sea. *Harmful Algae*, 55,

250-258.

- Lee, Y., 2006. Factors affecting outbreaks of high-density *Cochlodinium polykrikoides* red tides in the coastal seawaters around Yeosu and Tongyeong, Korea. *Marine Pollution Bulletin*. 52, 1249-1259.
- Lee, Y.W. and Kim G., 2007. Linking groundwater-borne nutrients and dinoflagellate red-tide outbreaks in the southern sea of Korea using a Ra tracer. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 71, 309-317.
- Lee, D., 2008. *Cochlodinium polykrikoides* blooms and eco-physical conditions in the South Sea of Korea. *Harmful Algae*. 7, 318-323.
- Lim, A.S., Jeong, H.J., Jang, T.Y., Kang, N.S., and Jang, S.H., 2015. Differential effects of typhoons on ichthyotoxic *Cochlodinium polykrikoides* red tides in the South Sea of Korea during 2012-2014. *Harmful Algae*, 45, 26-32.
- Lubac, B., Loisel, H., Guiselin, N., Astoreca, R., Felipe Artigas, L.F., and Mériaux, X., 2008. Hyperspectral and multispectral ocean color inversions to detect *Phaeocystis globosa* blooms in coastal waters. *Journal of Geophysical Research*, 113(C6), C06026.
- Mobley, C.D., Sundman, L.K., 2012. HydroLight 5.1 EcoLight 5.1 Users' Guide. Sequoia Scientific, Inc.
- Mouw, C. B., Greb, S., Aurin, D., DiGiacomo, P.M., Lee, Z.P., Twardowski, M., Binding, C., Hu, C., Ma, R., and Moore, T., 2015. Aquatic color radiometry remote sensing of coastal and inland waters: Challenges and recommendations for future satellite missions. *Remote Sensing of Environment*. 160, 15-30.
- Pope, R. and Fry, E., 1997. Absorption spectrum (380 ~ 700 nm) of pure waters: II. Integrating cavity measurement. *Applied Optics*. 36, 8710-8723.
- Smith, R. and Baker, K., 1981. Optical properties of the clearest natural waters (200 ~ 800 nm). *Applied Optics*. 20(2), 177-184.

- Specht D.F., 1990. Probabilistic neural networks. *Neural networks*, 3(1):109-118.
- Stumpf, R.P., Culver, M.E., Tester, P.A., Tomlinson M., Kirkpatrick G.J., Pederson, B.A., Truby, E., Ransibrahmanakul, V., and Soracco, M., 2003. Monitoring *Karenia brevis* blooms in the Gulf of Mexico using satellite ocean color imagery and other data. *Harmful Algae*, 2, 147-160.
- Suh, Y.S., Jang, L.H., Lee, N.K., and Ishizaka, J., 2004. Feasibility of red tide detection around Korea waters using satellite remote sensing. *Journal of Fisher Science Technology*, 7(3), 148-162.
- Tomlinson, M.C., Stumpf, R.P., Ransibrahmanakul, V., Turby, E.W., Kirkpatrick, G.J., Pederson, B.A., Gabriel, A.V., and Heil, C.A., 2004. Evaluation of the use of SeaWiFS imagery for detecting *Karenia brevia* harmful algal blooms in the eastern Gulf of Mexico, *Remote Sensing of Environment*, 91, 293-303.



# 부 록

## 1. 홍보 자료

가. 한국경제에 실린 “위성 영상 빅데이터 분석해 적조 예방”

(<http://www.hankyung.com/news/app/newsview.php?aid=2014070643671&intype=1>)

### 위성 영상 빅데이터 분석해 적조 예방

입력 2014-07-08 20:33:42 · 수정 2014-07-07 09:18:29 · 지면등록 2014-07-07 A19면

#### KISTI·KIOST 공동개발



지난해 여름 경남 통영시 신암읍 차돌리리 적조 방제작업 모습. KOBQ 제공

위성 영상 빅데이터 분석을 통해 매년 여름 반복되는 적조 피해를 예방할 수 있게 됐다.

한국과학기술정보연구원(KISTI)과 한국해양과학기술원(KIOST)은 최근 위성 영상의 빅데이터 분석 기법을 활용해 한반도 연안 적조를 찾아내는 시스템을 개발했다.

적조현상 탐지를 위해서는 위성에서 측정한 다양한 파장대의 빛 신호와 에너지를 측정, 오차를 보정하고 여러 가지 영상을 결합하는 복잡한 처리 과정을 거쳐야 한다.

KISTI가 1년에 걸쳐 위성영상 빅데이터를 처리할 수 있는 플랫폼을 개발함에 따라 적조 현상을 체계적이고 입체적으로 모니터링할 수 있게 됐다. 대용량 위성 영상으로부터 빠르고 정확성을 갖춘 다양한 데이터를 추출함에 따라 적조 현상 탐지 외에도 다양한 분야에서 연구와 응용이 가능해졌다.

적조 현상 모니터링은 그동안 여객선을 타고 바다에 나가 관측하거나 어선 신고에 의존하는 방식으로 대응할 수밖에 없었다. 지난해 한반도 연안에서 51일간 적조가 동시다발적으로 발생해 낚치와 참돔 등 양식어류 2800만마리가 폐사, 247억원의 피해가 발생했다. 수온 상승, 강우량 증가 등으로 유해성 적조 발생 건수는 매년 늘고 있다.

KISTI와 공동연구 작업을 벌이고 있는 KIOST는 2002년부터 축적해 온 해양환경 자료와 적조 현상 실측 데이터를 위성영상 빅데이터에 접목해 적조 탐지 속도와 정확성을 높이고 예보까지 가능한 솔루션을 내놓을 계획이다. 이상찬 KISTI 과학기술빅데이터 연구실장은 “빅데이터 분석 플랫폼을 통해 적조로 인한 어민들의 손실을 줄일 수 있게 됐다”고 말했다.

최규술 기자 kyusul@hankyung.com

#### 신차정보



프로상업차 투  
하이브 닥터스톤 스포츠



Phantom  
Drochread Coupe

SKYEDU

SKY데라 유희 국/영/수 1등급 프로젝트

2015  
윈터스쿨

The beginning of your dream!  
심석현상을 위한 최고의 기회!

남양주스카이에듀 작명기술학원  
12/28(일) 개강

나. 리더스 경제에 실린 “빅 데이터 효율적 활용 - 인류에게 유익한 정보제공”  
 (http://www.leaders.kr/news/articleView.html?idxno=9284)



# 리더스경제신문

일간

뉴스
금융
증권
기업
부동산
해양수산
교육
문화/레저
기획/연재

문화일반 | 전시/공연 | 영화 | BOOK | 리뷰 | 맛집 | 우리동네문화공간 | 물이탄 | 리더스OFF | 전격의 콜라보

홈 > 기획/연재 > 사담을 만나다

## ‘빅 데이터’ 효율적 활용-- 인류에게 유익한 정보제공

[사람, 사람을 만나다] - (25) 한국해양과학기술원 손영백 박사

일간리더스경제신문 | webmaster@leaders.kr

+ -



방문 20141021 13:10:31

지금 부산에서는 ‘ICT 올림픽’으로 불리는 국제전기통신연합(ITU)전권회의가 열리고 있다. 이 회의를 통하여 170여개국 3,000여명의 정부대표단이 참석하여 글로벌 ICT 현안을 논의하고 정책 방향을 결정한다. 정보통신기술에 관한 세계적인 논의가 한창 진행되고 있는 시점에 위성 원격탐사 분야, 특히 바다를 연구하는 몇몇되지 않는 과학자를 만났다. 손영백 연구원은 미국에서 학위를 마치고 미 해양대기국(NOAA)과 일본의 나가사키 그리고 니고야 대학을 거쳐 현재의 한국 해양 연구의 선두 연구 기관인 한국해양과학기술원에 근무를 하고 있다. 그는 우리나라 위성인 천리안 위성뿐만 아니라 외국의 다양한 위성을 이용하여 기후변화뿐만 아니라 재난/재해 현상을 이해하고 그 해법을 찾고 있다. 위성 연구를 통한 국경 없는 바다로부터 수많은 정보를 수집하고 우리에게 유용한 정보를 제공하고 있는 그를 만나 많은 이야기를 들었다.

**- “빅 데이터 (Big Data)”란 무엇입니까?**

빅 데이터라는 것은 보는 시각에 따라 해석이 조금씩 다를 수는 있습니다. 그러나 일반적으로 정치, 경제, 사회, 문화, 과학 기술 등 다양한 분야에 걸쳐서 존재하는 방대한 정형 및 비정형화된 자료들로부터 우리가 살고 있는 사회에 유용한 정보를 추출하여 제공하는 기술이라고 할 수 있습니다. 현재 전 세계적으로 빅 데이터가 화두가 되고 있습니다. 정보를 수집하는 과정에서 개인의 사생활 침해나 보안 측면에서 문제점 또한 제기되고 있습니다. 빅 데이터 시대에 살고 있는 저희들로서는 이것을 효율적으로 분석 및 활용 할 수 있는 자세가 필요합니다. 그러기 위해서는, 구글의 수석경제분석가가 언급한 것처럼 빅 데이터 시대에 우리는 데이터를 올바르게 이해하고, 처리하고, 가치를 뽑아내고, 시각화하고 전달할 수 있는 능력을 키우도록 해야 할 것입니다.



손영백 박사가 남해에서 격조 관측용 포즈를 취하고 있다.

다. 대덕넷에 실린 “한달 걸렸던 일 ‘하루에 해결’ 과학자들 협업 ‘화제’”  
<http://www.hellodd.com/news/article.html?no=50840>

투자유치를 희망하는 역량있는  
개인 및 법인사업자 공개 모집

HelloDD.com  
Korea's No. 1 Media on Science & Industry

뉴스    오피니언    라이프    커뮤니티    포토뉴스

과학 뉴스 | 인물 | 중대 | 기술 | 제품 | 기업탐방 | 행사정보 | 보도자료

HOME > 기사내용

한달 걸렸던 일 '하루에 해결'...과학자들 협업 '화제'

KISTI-KOIST 과학자들 슈퍼컴 통한 협업 연구...핵심 빅데이터 분석기술 개발  
"속수무속" 격조 현상 3일만에 비보기능해 골감"

\* 게재일: 2014.11.13  
 ksdaps@hellodd.com



#올해도 어렵음이 잦아왔다. 지난 7월 24일 경상남도 지역에 발생한 격조는 86일간 지속되며 양식 어류 477만3000마리가 폐사하고 63억2300만원의 피해를 냈다. 올해 격조기라는 그동안 가장 긴 기록이었던 2003년의 62일보다 24일이 더 많은 역대 최장기록이었다.

3개월간 지속된 적조현상으로 어민들의 가슴은 붉은 피멍이 들었다. 어민들 못지 않게 이런 상황을 속수무속으로 지켜보며 가슴 아파한 이들이 있다. 관련 과학자들이다.

더이상 개발할 기술이 없다고 할 정도로 과학기술이 발달하며 정보가 쏟아지고 있다. 하지만 정보는 적재적소, 적시에 활용할 때 시너지 효과도 큰 법.

그동안 지형정보, 광학자료 등 대용량 위성자료를 사용할 경우 분석하기까지 시간이 많이 소요돼 예보가 제대로 이뤄지지 못했다. 인공지능을 통해 받는 사진이나 영상 등 정보의 규모가 너무 커 빅데이터를 수집하고 처리하는데 어려움이 있었기 때문이다.



다. 과학동아 2016년 7월 호 “ ‘빅데이터 재료’ 다듬어 일류 연구 이끈다.”  
 (http://dl.dongascience.com/magazine/view/S201607N064)

**Career**  
 KISTI 연구실탐방

공정기획 **KISTI** 한국과학기술정보연구원

## ‘빅데이터 재료’ 다듬어 일류 연구 이끈다

과학자들의 연구를 '요리'에 비유한다면, 과학기술 빅데이터는 '재료'라고 할 수 있다.  
 일부 과학 분야는 엄청난 양의 재료를 손질해야 한다. 재료를 씻고 다듬고 정리하는데 시간이 워낙 많이 걸려  
 정작 요리를 할 시간이 부족할 정도다. 나중에 요리를 할 때 필요한 재료를 골라서 빨리 가져오려면  
 차곡차곡 정리도 해주어야 한다. 이런 번거로운 일을 확 줄여주는 요리사가 있으면 어떨까.  
 글번진 기자

“유럽입자물리연구소(CERN)가 힉스 입자를 발견할 수 있었던 이유 중 하나는 과학기술 빅데이터를 효율적으로 처리하고 분석하는 기술이 있었기 때문입니다.”

이상환 한국과학기술정보연구원(KISTI) 과학데이터연구센터장은 우리나라의 과학기술 발전을 위해선 날로 용량이 커지는 과학기술 빅데이터를 빠르게 처리하고 분석하는 기술이 필요하다고 말했다. 이 센터장은 “과학자들에게 물어보니 전체

연구시간의 80%를 데이터 전처리(데이터를 다듬고 추리는 과정)하는 데 보낸다고 했다”면서 “단순반복노동에 가까운 이런 시간을 줄이고, 데이터를 분석하는데 더 많은 시간과 에너지를 투입할 수 있다면 연구의 효율성도 높아질 것”이라고 말했다.

KISTI 과학데이터연구센터는 과학기술 빅데이터를 처리하고 분석하는 기술을 개발하는 곳이다. 예를 들어 대용량 데이터를 여러 컴퓨터에서 처리해 속도를 높이거나, 원본 데이터에 직접

158

접근해 바로 분석할 수 있는 '인 시츄(in-situ)' 분석 엔진을 개발하는 식이다. 이상환 센터장은 "우리 센터의 목표는 과학자들이 대용량의 데이터를 처리하는 데 들이는 시간을 전체 연구시간의 20%로 줄이는 것"이라고 했다.

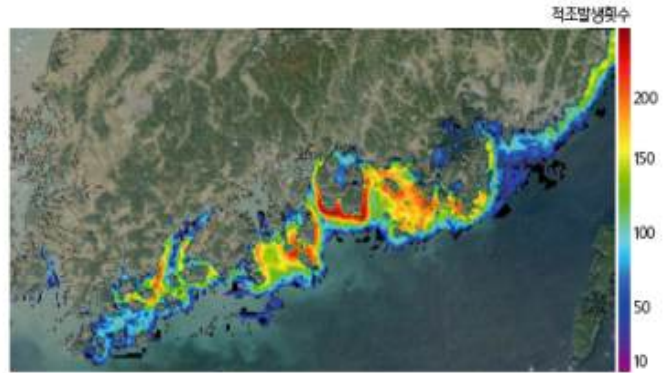
#### 빅데이터 기술이 연구주제도 바꾼다

실제 연구현장에 과학기술 빅데이터 처리 및 분석 기술이 적용된 사례를 보면 이해하기 쉽다. KISTI는 3년 전부터 한국해양과학기술원(KIOST), 극지연구소(KOPRI)와 함께 미국항공우주국(NASA)의 해색(海色) 위성 센서(MODIS)와 우리나라 천리안 위성의 정지궤도해색센서(GOCI), 다중위성을 통해

얻은 정보를 빠르게 처리하고 분석하기 위한 기술을 개발해 현재 마무리 단계에 있다. 해색센서와 다중위성은 한반도 인근 바다색을 가시광선과 근적외선으로 관측해 식물성플랑크톤 변화를 관측하고, 수온, 바람, 해류, 파랑 등의 정보를 얻는다.

GOCI같은 해색센서로 촬영한 영상은 용량이 엄청나게 크다. 사진 한 장이 IGB(기가바이트)에 이른다. 한 달 동안 얻은 자료를 합치면 용량이 ITB(테라바이트)에 이른다. 그런데 만약 적조 현상만 관찰한다면 모든 과정의 정보를 볼 필요가 없다. 적조를 일으키는 미생물의 업록소가 흡수하는 극히 일부분의 파장만 보면 된다. 이처럼 전체에서 필요한 정보를 압축하고 추려내는 과정이 전처리인데, 원본 데이터의 양이 워낙 크다보니 전처리에 도 시간이 꽤 많이 걸린다.

손영백 KIOST 제주국제해양과학기술연구지원센터 선임연구원은 "KISTI와 함께 과학기술 빅데이터 처리 및 분석 소프트웨어를 만들고 나서 단순반복 업무인 전처리 과정에 소모되는 시간이 획기적으로 줄었다"며 "이제 거의 실시간으로 정보를 처리할 수 있게 됐다"고 말했다. 실제 KISTI가 GOCI와 유사한 해색 위성센서인 AQUA 위성의 MODIS 센서로 얻은 비가공 정보를 해양연구자들이 사용할 수 있는 정보로 변환하는 효율을 측정할 결과, 전처리 기술 적용 전·후로 시간당 변환량이 무려 35.7배나 많아졌다.



1998~2015년 남해안 적조발생횟수

KIOST가 KISTI와 함께 개발한 데이터 처리 및 분석 기술을 이용해 1998년부터 2015년까지 남해안 적조와 관련된 빅데이터를 분석했다.

효율 증가는 연구주제에도 영향을 미친다. 손 선임연구원은 "예전에는 데이터를 다루는 데 시간이 많이 걸려 논문 한 편에 2~3년치 적조 데이터를 비교하는 수준이었는데, 전처리 기술이 갖춰지고 나서 훨씬 장기간의 데이터를 비교할 수 있게 됐다"고 말했다. 현재 손 선임연구원은 1998년도부터 2015년까지 남해안에서 발생했던 적조현상을 분석한 논문을 준비 중이다. 대용량 데이터를 자유롭게 사용할 수 있게 되면 연구주제도 확장될 수 있다. 손 선임연구원은 "앞으로는 기온, 수온, 강수량, 강물의 유입량, 구름의 양, 해류변화 등 여러 변수와 적조현상과의 상관관계를 비교해볼 수 있을 것"이라고 말했다.

#### 과학기술 빅데이터는 계속 늘어난다

각 연구기관마다 사용하는 데이터의 종류가 다르기 때문에 필요한 데이터 처리와 분석 기술도 각기 다를 수밖에 없다. 이상환 센터장은 "연구기관에 필요한 기술을 개발하려면 해당 기관의 연구분야에 대한 이해가 필요하다"며 "새로운 연구기관을 맡게 되면, 그 기관이 무엇을 연구하는지부터 열심히 공부해야 한다"고 말했다. 그동안 한국해양과학기술원과 극지연구소에 필요한 데이터 처리 및 분석 기술을 개발했고, 현재 국가핵융합연구소에서도 플라즈마 데이터를 처리하고 분석하기 위한 기술을 개발하고 있다. ■



## 2. 논문 실적

Remote Sensing of Environment 156 (2015) 21–33



Contents lists available at ScienceDirect

Remote Sensing of Environment

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/rse](http://www.elsevier.com/locate/rse)



### Tracing floating green algae blooms in the Yellow Sea and the East China Sea using GOCI satellite data and Lagrangian transport simulations



Young Baek Son<sup>a</sup>, Byoung-Ju Choi<sup>b</sup>, Yong Hoon Kim<sup>c</sup>, Young-Gyu Park<sup>d,\*</sup>

<sup>a</sup> Marine Ecosystem Research Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), Ansan, P.O. Box 29, Seoul 425-600, Republic of Korea

<sup>b</sup> Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Republic of Korea

<sup>c</sup> Applied Science Associates Inc. (RPS ASA), South Kingstown, RI, USA

<sup>d</sup> Ocean Circulation and Climate Research Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), Ansan, P.O. Box 29, Seoul 425-600, Republic of Korea

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 1 July 2013

Received in revised form 22 August 2014

Accepted 19 September 2014

Available online xxx

##### Keywords:

GOCI

IGAG

Floating green algae

Lagrangian particle trajectory

*Ulva prolifera*

Yellow Sea

East China Sea

#### ABSTRACT

In an image from the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) taken on 13 June 2011, a recurrent floating green algae bloom was detected around Qingdao. To detect the bloom an index based on multi-spectral band ratios using three wavelengths (555, 660, 745 nm) was utilized. One month later, the GOCI images detected widespread floating green algae patches (east-west elongated) across the Yellow Sea and East China Sea (YS, ECS). The presence of the patches was confirmed from various oceanic observation cruises. Lagrangian particle tracking experiments were conducted to understand the pathway of the floating green algae patches and interpret the physical forcing factors that affect the distribution and advection of the floating green algae. The numerical simulation results indicated that dominant southerly winds during June and July 2011 were related to offshore movement of the floating green algae, especially their eastward extension in the YS/ECS. An infrequent and unusual event occurred in June 2011: a typhoon MAON, caused the green algae to detach from the coast and initiated movement to the east. After the typhoon event, sea surface temperature recovered rapidly enough to grow the floating green algae, and wind and local current controlled the movement of the massive floating algae patches (coastal accumulation or offshore advection in the YS/ECS). Analysis of the floating green algae pixels' movement during passage of Typhoon MAON in July 2011 revealed that the floating green algae patches were significantly controlled by both ocean currents and enhanced winds. These findings suggest that the floating green algae bloom off Qingdao and in the middle of the YS and ECS in the summer of 2011 occurred due to the combined effects of recent rapid expansion of seaweed aquaculture, strong winds, and the wind patterns in blooming regions. Our combined approach, using satellite data and numerical simulations, provides a robust estimate for tracing and monitoring changes in green algae blooms on a regional scale.

© 2014 Elsevier Inc. All rights reserved.

#### 1. Introduction

The green macroalga *Ulva prolifera* (previously known as *Enteromorpha prolifera*) is generally constrained to coastal areas (Hayden et al., 2003). Every year between April and July from 2000 to 2009 the green algae were found in coastal and offshore waters of the Yellow Sea (YS) and the East China Sea (ECS) (Hu et al., 2010). The green algae blooms themselves are not harmful but their excessive growth deteriorates marine tourism, marine-culture, transportation and marine ecosystem health. Massive algae blooms can cause negative impacts and raise great concerns because of their high productivity, elevated organic matter concentrations, and resulting anoxic conditions in the euphotic zone (Liu, Keesing, Xing, & Shi, 2009; Sun et al., 2008). Considering the negative impacts of green algal blooms on tourism and the quality of wild and cultured marine products such as fish and

shellfish, detecting these blooms and predicting their fates to provide early warning to stakeholders is not only scientifically but also socioeconomically important.

The world's first Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) provides up to eight images of waters around Korea including the YS and the ECS every day, and could be a useful tool for detecting such blooms (Ryu & Ishizaka, 2012; Son, Kang, & Ryu, 2012; Son, Min, & Ryu, 2012). The GOCI images showed that during the summer of 2011, massive floating green algae blooms occurred in the YS and the ECS (Son, Min, & Ryu, 2012). Floating green algae blooms have recurred not only in coastal areas but also in offshore areas, a unique phenomenon that has not been reported previously. During *in-situ* hydrographic cruises between July and August 2011, patches of floating green algae were also observed around Jeju Island and on the west coast of Korea (Fig. 1b, Son, Min, & Ryu, 2012).

To trace the pathway of the floating green algae and to understand how the control processes are determined by physical forcing factors, Lagrangian particle-tracking experiments have been used (e.g., Lee,

\* Corresponding author. Tel.: +82 31 400 6131; fax: +82 31 08 5829.  
E-mail address: [ypark@kiost.ac](mailto:ypark@kiost.ac) (Y.-G. Park).

## Optical discrimination of harmful *Cochlodinium polykrikoides* blooms in Korean coastal waters

YESEUL KIM,<sup>1,2</sup> SINJAE YOO,<sup>1,2,\*</sup> AND YOUNG BAEK SON<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jeju International Marine Science Center for Research and Education, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Jeju 63349, South Korea

<sup>2</sup>Ocean Science and Technology School, Korea Maritime and Ocean University/Korea Institute of Ocean Science and Technology Joint Program, Busan 49112, South Korea  
\*syoo@kiost.ac.kr

**Abstract:** We investigated the possibility of optically discriminating harmful algal blooms (HABs), focusing on *Cochlodinium polykrikoides*, the major HAB causative dinoflagellate species in Korean waters. We produced a large data set of simulated remote sensing reflectance ( $R_{rs}$ ) spectra in a wide range of bio-optical conditions using Hydrolight software and bio-optical data provided by the International Ocean-Color Coordinating Group. The two  $R_{rs}$  band ratios ( $R_{rs}(555)/R_{rs}(531)$  and  $R_{rs}(488)/R_{rs}(443)$ ) were determined to be effective in discriminating high-density *C. polykrikoides* blooms. The results were consistent with *in situ* observations and seem applicable to diverse coastal environments. Our findings provide theoretical and quantitative criteria upon which in-water HAB detecting algorithms can be developed.

© 2016 Optical Society of America

**OCIS codes:** (010.4450) Oceanic optics; (010.1030) Absorption; (010.0280) Remote sensing and sensors.

### References and links

1. C. J. Gobler, A. Burson, F. Koch, Y. Tang, and M. R. Mulholland, "The role of nitrogenous nutrients in the occurrence of harmful algal blooms caused by *Cochlodinium polykrikoides* in New York estuaries (USA)," *Harmful Algae* **17**, 64–74 (2012).
2. Y. B. Son, J. Ishizaka, J. C. Jeong, H. C. Kim, and T. Lee, "Cochlodinium polykrikoides red tide detection in the South Sea of Korea using spectral classification of MODIS data," *Ocean Sci. J.* **46**(4), 259–263 (2011).
3. Y. H. Ahn and P. Shummingam, "Detecting the red tide algal blooms from satellite ocean color observations in optically complex Northeast-Asia Coastal waters," *Remote Sens. Environ.* **103**(4), 419–437 (2006).
4. D. L. Roelke, C. D. Kennedy, and A. D. Weidemann, "Use of discriminant and fourth-derivative analyses with high-resolution absorption spectra for phytoplankton research: Limitations at varied signal-to-noise ratio and spectral resolution," *Gulf Mex. Sci.* **17**(2), 75–86 (1999).
5. G. J. Kirkpatrick, D. F. Millie, M. A. Moline, and O. Schofield, "Optical discrimination of a phytoplankton species in natural mixed populations," *Limnol. Oceanogr.* **45**(2), 467–471 (2000).
6. S. Shang, J. Wu, B. Huang, G. Lin, Z. P. Lee, J. Liu, and S. Shang, "A new approach to discriminate dinoflagellate from diatom blooms from space in the East China Sea," *J. Geophys. Res.* **119**(7), 4653–4668 (2014).
7. S. E. Craig, S. E. Lorentz, Z. Lee, K. L. Mahoney, G. J. Kirkpatrick, O. M. Schofield, and R. G. Steward, "Use of hyperspectral remote sensing reflectance for detection and assessment of the harmful alga, *Karenia brevis*," *Appl. Opt.* **45**(21), 3414–3425 (2006).
8. J. K. Choi, J. E. Min, J. H. Noh, T. H. Han, S. Yoon, Y. J. Park, J. E. Moon, J. H. Ahn, S. M. Ahn, and J. H. Park, "Harmful algal bloom (HAB) in the East Sea identified by the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)," *Harmful Algae* **39**, 295–302 (2014).
9. J. P. Camizero, K. L. Carder, F. R. Chen, C. A. Heil, and G. A. Vargo, "A novel technique for detection of the toxic dinoflagellate, *Karenia brevis*, in the Gulf of Mexico from remotely sensed ocean color data," *Cont. Shelf Res.* **28**(1), 137–158 (2008).
10. A. A. Kirekin, P. I. Miller, and H. J. Van der Woerd, "Satellite discrimination of *Karenia mikimotoi* and *Phaeocystis* harmful algal blooms in European coastal waters: Merged classification of ocean colour data," *Harmful Algae* **31**, 163–176 (2014).
11. S. Akai, C. Moulin, Y. Dandonneau, and H. Loisel, "Seasonal distribution and succession of dominant phytoplankton groups in the global ocean: A satellite view," *Global Biogeochem. Cy.* **22**(3) (2008).

#272639

<http://dx.doi.org/10.1364/OE.24.0A1471>

Journal © 2016

Received 1 Aug 2016; revised 29 Sep 2016; accepted 16 Oct 2016; published 27 Oct 2016



## Lagrangian Coherent Structures and the Dispersion of Green Algal Bloom in the Yellow and East China Sea

Young Baek Son<sup>1</sup>, Yong Heon Kim<sup>2</sup>, Byoung-Ju Choi<sup>3\*</sup>, and Young-Gyu Park<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Jeju International Marine Science Center for Research & Education  
Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), Korea

<sup>5</sup>EPS ASA (Applied Science Associate Inc.)  
South Kingstown, RI, USA

<sup>2</sup>College of Ocean Science and Technology  
Korean National University, Korea

<sup>3</sup>Ocean Circulation and Climate Research Center  
Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), Korea



www.cerf-jcr.org



www.JCRonline.org

### ABSTRACT

Son, Y.B.; Kim, Y.H.; Choi, B.-J., and Park, Y.-G., 2016. Lagrangian Coherent Structures and the dispersion of green algal bloom in the Yellow and East China Sea. In: Vih-Cancejo, A.; Bruce, E.; Kennedy, D.M., and McCarroll, R.J. (eds.), *Proceedings of the 14th International Coastal Symposium* (Sydney, Australia). *Journal of Coastal Research*, Special Issue, No. 75, pp. 1237 - 1241. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

During the summer 2011, the Geostationary Ocean Colour Imager (GOCI) detected patches of the recurrent massive floating green algae in the central part of the Yellow Sea (YS) and East China Sea (ECS). This study utilizes the Lagrangian Coherent Structures (LCSs) analysis to demonstrate the horizontal dispersion pattern of algal bloom patches. This approach is based on the assumption that unstable manifolds such as ridges in the finite-time Lyapunov exponent (FTLE) fields coincide with material transport barriers. To calculate the FTLE fields, flow fields derived from the Regional Ocean Modeling System (ROMS) and wind fields were utilized. The combined effects of winds and currents in material transport in coastal and ocean environments were investigated. Comparison of LCSs derived by current only and current-wind combined flow showed that the results of current-wind combined flow cases match better the observation results from GOCI than those of current only cases. This implies that the distribution pattern of green algae patches would be controlled by the combined effect of the surface current and wind that was included LCS in terms of leeway effect.

**ADDITIONAL INDEX WORDS:** *Lagrangian particle tracking, Floating green algae detection, GOCI Leeway effect.*

### INTRODUCTION

Green algae blooms due to *Ulva prolifera* (previously known as *Sargassum prolifera*; Hayden *et al.*, 2003) are commonly observed in Chinese coastal waters (Hu *et al.*, 2010). During summer 2011, the image analysis of the world's first Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) and various field observations showed the recurrent massive floating green algae bloomed in the Yellow Sea (YS) and East China Sea (ECS) (Son *et al.*, 2012b, 2015, Figure 1). One of massive green algae blooms was detected at offshore area near Qingdao, China on 13 June 2011. After one month, they were suddenly appeared in the central part of the YS/ECS and even near the west coast of Korea. During *in situ* hydrographic cruises conducted in the early July 2011 in the YS and on the west coast of Korea, the presence of patches of the floating green algae was confirmed (Son *et al.*, 2015).

This expansion of the floating green algae bloom to the west coast of Korea is a rather unusual event. To elucidate the pathway of the floating green algae patches and the governing

factors, Son *et al.* (2015) conducted Lagrangian particle tracking modeling experiments. They demonstrated that in addition to the ocean current dominant southerly winds during June and July 2011 caused the green algae to detach from the coast and move to the east toward the west coast of Korea. The previous study was more about the overall movement of the patches over longer time scale (*i.e.*, months). However, the structure of the dispersion pattern of bloom patches in shorter term (*i.e.*, hours to days), the main theme of this study, was not investigated.

In this study we utilized the Lagrangian Coherent Structures (LCSs) analysis to unravel the effects of winds and currents on the dispersion of macroalgae bloom patches (or floated materials) in marine environments. Analysing LCSs such as stable and unstable manifolds is one emerging technologies for characterizing Lagrangian pathways and trajectories in aquatic environments (Beron-Vera *et al.*, 2013; Griffa *et al.*, 2013; Olascoaga and Haller, 2012; Peacock and Haller, 2013). LCS approach assumes that unstable manifolds such as ridges (*i.e.*, high values) in the finite-time Lyapunov exponent (FTLE) fields coincide with material transport barriers.

By far, most of LCS studies have applied either surface flow fields or wind fields in geophysical applications. None of

DOI 10.2112/SI75-2481 received 15 October 2015 accepted in revision 15 January 2016

\*Corresponding author: ypark@kiost.ac.kr

<sup>4</sup>Coastal Education and Research Foundation, Inc. 2016



## Interannual variability of the phytoplankton community by the changes in vertical mixing and atmospheric deposition in the Ulleung Basin, East Sea: A modelling study



Soonmi Lee<sup>a,b</sup>, Sinjae Yoo<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup> Jeju International Marine Science Center for Research and Education, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Cuiwa Ijuidongro 2670, Jeju, South Korea

<sup>b</sup> Ocean Science and Technology School, Korea Maritime and Ocean University/Korea Institute of Ocean Science & Technology Joint Program, Busan 606-791, South Korea

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 2 July 2015

Received in revised form

21 November 2015

Accepted 25 November 2015

#### Keywords:

Phytoplankton functional types

ERSEM

Winter vertical mixing

Atmospheric deposition

East Sea

### ABSTRACT

The East Sea (Japan Sea) ecosystem has experienced a significant warming and ever-increasing anthropogenic atmospheric deposition of nitrogen during recent decades. To understand the impacts of such environmental changes on the planktonic community, we set up a zero-dimensional European Regional Seas Ecosystem Model (ERSEM) in the Ulleung Basin, East Sea for the years 2001–2012. The model results show that as the winter maximum mixed layer depth (MMLD) changes, the growth and grazing loss of phytoplankton functional types (PFTs) are affected differently, resulting in differential success of PFTs in the upper mixed layer. Diatoms pre-empted the early spring growth by better utilization of light and nitrate. Diatoms' advantages lessened as the MMLD decreased. Flagellates and picophytoplankton showed mixed responses to decreased MMLD. Their net primary productivity (NPP) and peak biomass decreased but their annual biomass increased due to decreased grazing. Dinoflagellates always did better when MMLD decreased. The model results also indicate that with an increase in atmospheric deposition, the picophytoplankton and the flagellates increased in summer, whereas the dinoflagellates and the diatoms decreased. For the study period, the atmospheric deposition in the Ulleung Basin increased the annual net primary production by 4.58% (mean; range 3.77–10.58%). Biological variables showed the largest responses in summer with high year-to-year variability. Picophytoplankton increased the most (summer increase mean: 23.23%; summer increase range: 9.12–42.6%) while dinoflagellates decreased the most (summer decrease mean: –2.33%; summer decrease range: –9.09 to 10.13%). The changes in flagellates and diatoms were much less. Taking the results together, it is likely that as the warming and atmospheric deposition continue to intensify into the future, the phytoplankton community in the region will shift to smaller phytoplankton with consequent changes of food web structure to follow.

© 2015 Elsevier B.V. All rights reserved.

### 1. Introduction

The composition of the phytoplankton community plays an important role in controlling marine biogeochemical cycling and primary production (Doney et al., 2002; Pallrowski et al., 2003). The phytoplankton groups have different nutrient requirements and utilization methods (Pallrowski et al., 2004; Litchman et al., 2007; Jennings et al., 2008; Finlay et al., 2009) and are grazed by

different zooplankton groups (Sterner and Elser, 2002). For example, diatoms transport carbon to the deep ocean through rapid sinking and have a great effect on carbon export production. Their frustules are an important determinant of the silicon cycle (Smetacek, 1999). Diatoms are also an important food web element supporting large fish populations. Therefore, it is important to predict present and future changes in phytoplankton community composition to understand how the marine ecosystem is influenced by environmental changes such as warming and anthropogenic forcing.

In recent decades, climate warming and the increase in anthropogenic nutrient inputs to surface waters have been major issues in the oceans. Recent models have begun to include many different phytoplankton functional types (PFTs) and zooplankton

\* Corresponding author at: Jeju International Marine Science Center for Research and Education, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Cuiwa Ijuidongro 2670, Jeju, South Korea. Tel.: +82 64798 6070; fax: +82 64798 6085.  
E-mail address: [syoo@kioos.tac.kr](mailto:syoo@kioos.tac.kr) (S. Yoo).