

K-14-SG-23-02R-1-C

위성 빅데이터 기반 적조 탐지 및 발생경향 분석연구

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

2014. 11. 20.

한 국 해 양 과 학 기 술 원

제 출 문

위성 빅데이터 기반 적조 탐지 및 발생경향 분석연구

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

한국과학기술정보연구원장 귀하

이 보고서를 “위성 빅데이터 기반 적조 탐지 및 발생경향 분석연구” 과제의 보고서로 제출합니다.

2014. 11. 20.

위탁연구기관명 : 한국해양과학기술원 (인)

위탁연구책임자 : 유 신 재 (인)

연 구 원 : 손 영 백 (한국해양과학기술원)
김 수 인 (한국해양과학기술원)
이 순 미 (한국해양과학기술원)
김 예 슬 (한국해양과학기술원)

한 국 해 양 과 학 기 술 원

보고서 요약서

요약문

보고서 번호	K-14-SG-23-02R-1-C		연구기간	2014.02.01-2014.11.30	
본과제명	과학기술 빅데이터 공유·융합체제 구축				
연구과제명	위성 빅데이터 기반 적조 탐지 및 발생경향 분석연구 (A Study on the detection and likelihood assessment of HAB outbreaks using big satellite databases)				
연구책임자	유 신 재	참여 연구원수	총 : 5명 내부 : 1명 외부 : 4명	연구비	정부: 290,000 천원 기업: 천원 계: 290,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원		참여기관명		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	xvii, 123
<p><input type="checkbox"/> 연구의 목표</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 적조 현장 자료 및 다중 위성 적조 빅데이터 구축 ○ 적조 탐지 알고리즘 비교 및 평가 ○ 적조 빅데이터 분석 플랫폼 구축 <p><input type="checkbox"/> 연구 내용 및 결과</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 적조 발생 현장 자료 수집 및 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 과거 적조 발생 상황 문헌 수집, digitizing 및 적조 시공간 변화 파악 ○ 적조 발생 해역에서 현장관측 수행을 통한 해양, 기상, 환경 자료 수집 <ul style="list-style-type: none"> - <i>C. polykrikoides</i> 적조종 광특성 및 적조 발생 해역 해양 환경 특성 파악 - 와편모조류 적조종 배양 및 흡광 특성 분석 ○ 적조 관련 다중위성 자료 및 해황 자료 수집 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 적조 탐지 알고리즘 평가를 위한 해석 위성 자료 및 적조 발생 경향 분석을 위한 다중 위성 자료 수집 및 분석 ○ 기존 적조 탐지 알고리즘 비교 및 평가 <ul style="list-style-type: none"> - 해석위성 자료 이용 기존 적조 탐지 알고리즘 분석 및 정확도 평가 - 현장관측 및 모델 분석 자료 기반 <i>C. polykrikoides</i> 적조종 광학적 특성 파악 ○ 적조 빅데이터 자료 수집 및 분석용 플랫폼 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 적조 빅데이터의 효율적 처리를 위한 다차원 배열 DBMS 분석 플랫폼 구축 및 운영을 위한 융합 연구 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	유해성 적조, 빅데이터 분석, 원격탐사, 적조 탐지, 다차원 배열 DBMS			
	영 어	Harmful Algal Bloom (HAB), Big Data Analysis, Remote Sensing, Red-tide Detection, Multi-array DBMS			

I. 제목

“위성 빅데이터 기반 적조 탐지 및 발생경향 분석연구”

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 요구된다. 또한 지역적으로 국한된 조사만으로는 시·공간적 증대된 유해성 적조의 탐지 및 모니터링에 한계가 있다. 최근 원격탐사를 활용한 적조 탐지는 다양한 환경에서 존재하는 적조를 탐지 및 모니터링 하기에 유용하다. 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 위한 중요한 잠재력을 제공하고 적조 발생 시 민감 지역에서 효율적이고 신속하게 적조 방제를 위한 과학적 자료 제공을 할 수 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 적조관련 빅데이터 수집 및 분석
- 기존 적조 탐지 알고리즘 비교 및 평가
- 적조 빅데이터 분석 플랫폼 구축

IV. 연구개발결과

- 2002년 ~ 2013년 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
- 현장관측, 위성, 해양자료 기반 적조 발생 해역 해양환경 특성 파악
 - 적조 발생 해역 해양, 기상, 해양 자료 수집, 분석 및 DB 구축
 - *C. polykrikoides* 적조종 광특성 분석
- 해석 위성 영상 기반 적조 탐지 알고리즘 비교 및 평가
 - 기존 적조 탐지 알고리즘 분석 및 정확도 평가
- 적조 빅데이터 분석용 플랫폼 구축

V. 연구개발결과의 활용계획

- 적조 자료와 지리정보시스템 기반 새로운 탐지 기술 제공하여 방제 체계 구축에 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

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

Red tide events within enclosed and semi-enclosed bays of the south coast of Korea have occurred frequently since early 1990s. Since 1995, red tides have been dominated by *Cochlokinium polykrikoides* blooms. The duration and areal extent of red tide have been increasing in both inshore and offshore areas of Korean waters, particularly in the south sea of Korea and on the east and west coasts of Korea. *C. polykrikoides* red tide events have caused enormous economical loss and negative impacts to ecosystems. Most red tide detection activity have carried out *in-situ* monitoring. It is difficult to detect and monitor the red tides in complicated oceanic environments. Satellite remote sensing has been successfully employed to monitor the increasing spatial and temporal scales of red tide under various sea conditions, as part of monitoring and detecting harmful algal blooms. Especially, the combined study of remote sensing and large data processing can develop new techniques of detection and likelihood assessment of red tides and provide useful scientific data set to systematically detect and monitor the red tides.

III. Content and scope of the study

- Collection and analysis of red tide big data base
- Comparison and accuracy assessment of proposed red tide detection algorithms
- Establishment of big-data platform for red tide analysis

IV. Result of research

- Spatial and temporal variations of red tide events based on red tide occurrence from 2002 to 2013
 - Red tide occurrence data collection and database generation
 - Spatial and temporal variation of red tide occurrence - transport - spreading - disappearance
- Environmental characteristics in red tide areas based on *in-situ* measurement, satellite data, hydrographic data
 - Collection and analysis of ocean, atmosphere, and hydrography data and database generation in red tide occurrence areas
 - *C. polykrikoides* red-tide species optical characteristics
- Comparison of accuracy of red tide detection algorithms based on satellite data
 - Analysis and accuracy assessment of proposed red tide detection algorithms
- Establishment of big-data platform for red tide analysis

V. Application schemes

- New technology and control system development based on red tide and GIS systems
- Application to disaster studies using big data analysis system
- Application of coastal environment monitoring study for high resolution analysis of spatial and temporal variation

Contents

Chapter 1. Introduction	1
Part 1. Background of the study and necessity	1
Part 2. The purpose of study and contents	5
Chapter 2. Red tide Big data	9
Part 1. Historical red tide occurrence data analysis	10
Part 2. <i>In-situ</i> measurements in red-tide occurrence areas	25
Part 3. Red-tide species culture experiments	65
Part 4. Red-tide satellite big data	68
Part 5. Construction of hydrography data in red-tide occurrence area	71
Chapter 3. Comparison and accuracy assessment of red tide detection algorithms	83
Part 1. Study of red tide detection	83
Part 2. Assessment of red tide detection	86
Part 3. Red tide detection algorithm development	106
Chapter 4. Red tide big data analysis platform	109
Part 1. Red tide big data construction and DB	109
Part 2. Summarized red tide analysis platform	111
Chapter 5. Conclusion	112
References	115
Supplement	120

<List of Tables>

<Table 2-1> Structure of red tide big data	9
<Table 2-1-1> Yearly red tide occurrence and trend	14
<Table 2-2-1> Summary of observations	27
<Table 2-2-2> Observation items	28
<Table 2-4-1> Ocean color satellites and collected data	68
<Table 2-5-1> Name and duration of occurred typhoons	78
<Table 3-2-1> Summary of red tide detection methods	86
<Table 3-2-2> Accuracy assessments of satellite against reference data	88
<Table 4-1-1> Red tide big data structures and development status	109
<Table 4-2-1> Specification of the nodes in the cluster system	111

<List of Figures>

<Figure 1-2-1> Implementation system	7
<Figure 1-2-2> Division of the study scope	8
<Figure 2-1-1> Harmful algal blooms in Korean coastal waters	11
<Figure 2-1-2> Digitizing process	11
<Figure 2-1-3> A digitized map	11
<Figure 2-1-4> States of red-tide occurrence during 2002 ~ 2013 in the Korean coastal waters	12
<Figure 2-1-5> Historical red-tide occurrence	15
<Figure 2-1-6> The spatial and temporal variations of red-tide occurrence	19
<Figure 2-1-7> Duration of red-tide and the damage	22
<Figure 2-1-8> The frequency of red-tide occurrence from July to September during 2002 ~ 2013	23
<Figure 2-1-9> The frequency of red-tide occurrence in even, odd and all years during 2002 ~ 2013	24
<Figure 2-2-1> (a) Sampling stations in May, 2014, (b) sampling stations in August, 2014 (R1~5: the stations of red-tide detection)	26
<Figure 2-2-2> UV VIS Spectrophotometer for measuring optical density	30
<Figure 2-2-3> Spatial distribution of (a) temperature ($^{\circ}\text{C}$), (b) salinity (psu), (c) density (σ_t , kgm^{-3}), (d) dissolved oxygen (ml l^{-1}) at surface and bottom in May, 2013	36
<Figure 2-2-4> Spatial distribution of (a) temperature ($^{\circ}\text{C}$), (b) salinity (psu), (c) density (σ_t , kgm^{-3}), (d) dissolved oxygen (ml l^{-1}) at surface and bottom in May, 2014	37
<Figure 2-2-5> Spatial distribution of (a) total chlorophyll <i>a</i> concentration (mgm^{-3}), (b) 5 μm chlorophyll <i>a</i> concentration (mgm^{-3}), (c) the ratio of 5 μm to total chlorophyll <i>a</i> concentration at surface and bottom in May, 2014	38
<Figure 2-2-6> P-I curve in May, 2014	39
<Figure 2-2-7> Spatial distribution of TSS (mg l^{-1}) at surface and bottom in	

May, 2014	39	sampling depth in August, 2014	58
<Figure 2-2-8> Absorption coefficient of phytoplankton (a_{ph}) at each sampling depth in May, 2014	40	<Figure 2-2-21> Absorption coefficient of CDOM (a_{cdom}) at each sampling depth in August, 2014	60
<Figure 2-2-9> Specific absorption coefficient of phytoplankton (a^*_{ph})	42	<Figure 2-2-22> Spatial distribution of (a) nitrate (NO_3), (b) ammonium (NH_4), (c) phosphate (PO_4), (d) silicate (SiO_2) at surface and bottom in August, 2014	64
<Figure 2-2-10> Absorption coefficient of CDOM (a_{cdom}) at each sampling depth in May, 2014	43	<Figure 2-3-1> Cultured <i>C. polykrikoides</i> in laboratory	65
<Figure 2-2-11> Spatial distribution of (a) nitrate (NO_3), (b) ammonium (NH_4), (c) phosphate (PO_4), (d) silicate (SiO_2) at surface and bottom in May, 2014	47	<Figure 2-3-2> Phytoplankton absorption coefficients (a_{ph}) of cultured (a) <i>C. polykrikoides</i> , (b) <i>Alexandrium tamarense</i> , (c) <i>Scrippsiella trochoidea</i> , (d) <i>Akashiwo sanguinea</i>	67
<Figure 2-2-12> Spatial distribution of (a) temperature ($^{\circ}C$), (b) salinity (psu), (c) density (σ_t , kgm^{-3}), (d) dissolved oxygen ($ml\ l^{-1}$) at surface and bottom in August, 2013	50	<Figure 2-4-1> Study area in the south coast of Korea	70
<Figure 2-2-13> Spatial distribution of (a) temperature ($^{\circ}C$), (b) salinity (psu), (c) density (σ_t , kgm^{-3}), (d) dissolved oxygen ($ml\ l^{-1}$) at surface and bottom in August, 2014	51	<Figure 2-5-1> Sampling stations of KODC (black circles: stations used for long-term observation data in this study)	72
<Figure 2-2-14> Spatial distribution of (a) total chlorophyll <i>a</i> concentration (mgm^{-3}), (b) 5 μm chlorophyll <i>a</i> concentration (mgm^{-3}), (c) the ratio of 5 μm to total chlorophyll <i>a</i> concentration at surface and bottom in August, 2014	52	<Figure 2-5-2> Time-series of (a) surface temperature ($^{\circ}C$) and (b) salinity (psu) at coastal stations (black circles: the mean of 205-01, 206-01, 400-16) and offshore stations (white circles: the mean of 205-03, 206-03, 400-14) for the period 2000~2013 (grey circles: value for each station)	73
<Figure 2-2-15> (a) Total chlorophyll <i>a</i> concentration (mgm^{-3}), (b) 5 μm chlorophyll <i>a</i> concentration (mgm^{-3}) at surface in August, 2014 including the stations of red-tide occurrence	53	<Figure 2-5-3> Time-series of (a) stratification indices (kgm^{-4}) and (b) difference in two stratification indices (kgm^{-4}) at coastal stations (black circles: the mean of 205-01, 206-01, 400-16) and offshore stations (white circles: the mean of 205-03, 206-03, 400-14) for the period 2000~2013 (grey circles: value for each station)	73
<Figure 2-2-16> P-I curve in August, 2014	54	<Figure 2-5-4> Time-series of (a) surface irradiance (SIR, Wm^{-2}) at Busan (grey circles), Tongyeong (black circles), Yeosu (white circles) and Wando (red circles), (b) all region anomaly (Wm^{-2}) for the period 2000~2013	74
<Figure 2-2-17> Spatial distribution of TSS ($mg\ l^{-1}$) at surface and bottom in August, 2014	55	<Figure 2-5-5> (a) Monthly precipitation (mm) at Tongyeong (black circles) and Yeosu (white circles), (b) rainy season (d) in the south coast, (c) precipitation (mm) of before the rainy season - rainy season after the rainy season at Tongyeong (black bars), Yeosu (white bars)	76
<Figure 2-2-18> TSS ($mg\ l^{-1}$) at surface in August, 2014 including the stations of red-tide occurrence	55	<Figure 2-5-6> Monthly tidal range (m) at Gadeokdo (grey circles), Tongyeong	
<Figure 2-2-19> Absorption coefficient of phytoplankton (a_{ph}) at each sampling depth in August, 2014	56		
<Figure 2-2-20> Specific absorption coefficient of phytoplankton (a^*_{ph}) at each			

(black circles), Yeosu (white circles) and Wando (red circles)	77	proposed algorithms, and (j) accuracy assessment for August 21, 2007	99
<Figure 2-5-7> Path of typhoons affecting the entire Korean Peninsula for the period 2000~2014 (red numbers in the upper left corner of each figure indicate the number of cases, red cross marks indicate the dissipation location.)	80	<Figure 3-2-7> Maps of (a) RGB image, (b) red-tide areas, (c) chlorophyll <i>a</i> concentration, (d) sea surface temperature, (e-i) estimate of red-tide area using proposed algorithms, and (j) accuracy assessment for October 15, 2012	101
<Figure 2-5-8> Time-series of surface (a) nitrate (μM), (b) phosphate (μM) and (c) silicate (μM) at coastal stations (black circles: the mean of 205-01, 206-01, 400-16) and offshore stations (white circles: the mean of 205-03, 206-03, 400-14) for the period 2000~2013 (grey circles: value for each station)	81	<Figure 3-2-8> Maps of (a) RGB image, (b) red-tide areas, (c) chlorophyll <i>a</i> concentration, (d) sea surface temperature, (e-i) estimate of red-tide area using proposed algorithms, and (j) accuracy assessment for August 6, 2013	103
<Figure 2-5-9> Time-series of surface dissolved oxygen ($mg l^{-1}$) at coastal stations (black circles: the mean of 205-01, 206-01, 400-16) and offshore stations (white circles: the mean of 205-03, 206-03, 400-14) for the period 2000~2013 (grey circles: value for each station)	82	<Figure 3-2-9> Maps of (a) RGB image, (b) red-tide areas, (c) chlorophyll <i>a</i> concentration, (d) sea surface temperature, (e-i) estimate of red-tide area using proposed algorithms, and (j) accuracy assessment for August 14, 2013	105
<Figure 3-2-1> Maps of (a) RGB image, (b) red-tide areas, (c) chlorophyll <i>a</i> concentration, (d) sea surface temperature, (e-i) estimate of red-tide area using proposed algorithms, and (j) accuracy assessment for August 19, 2002	89	<Figure 3-3-1> Remote sensing reflectance spectral characteristics in (a) non-red-tide case and (b) red-tide case collected from hydrography cruise during August 2013	108
<Figure 3-2-2> Maps of (a) RGB image, (b) red-tide areas, (c) chlorophyll <i>a</i> concentration, (d) sea surface temperature, (e-i) estimate of red-tide area using proposed algorithms, and (j) accuracy assessment for August 22, 2003	91	<Figure 3-3-2> Remote sensing reflectance (a) using IOCCG simulation data and (b) cultured <i>C. polykrikoides</i> phytoplankton absorption coefficient	108
<Figure 3-2-3> Maps of (a) RGB image, (b) red-tide areas, (c) chlorophyll <i>a</i> concentration, (d) sea surface temperature, (e-i) estimate of red-tide area using proposed algorithms, and (j) accuracy assessment for October 2, 2003	93	<Figure 4-2-1> Multi-array process and DAS system	111
<Figure 3-2-4> Maps of (a) RGB image, (b) red-tide areas, (c) chlorophyll <i>a</i> concentration, (d) sea surface temperature, (e-i) estimate of red-tide area using proposed algorithms, and (j) accuracy assessment for August 6, 2004	95		
<Figure 3-2-5> Maps of (a) RGB image, (b) red-tide areas, (c) chlorophyll <i>a</i> concentration, (d) sea surface temperature, (e-i) estimate of red-tide area using proposed algorithms, and (j) accuracy assessment for August 15, 2007	97		
<Figure 3-2-6> Maps of (a) RGB image, (b) red-tide areas, (c) chlorophyll <i>a</i> concentration, (d) sea surface temperature, (e-i) estimate of red-tide area using			

목 차

제1장 서론	1
제1절 연구개발의 배경 및 필요성	1
제2절 연구개발의 목표 및 내용	5
제2장 적조 빅데이터	9
제1절 과거 적조발생 현장자료	10
제2절 적조발생 해역 현장관측	25
제3절 적조종 배양	65
제4절 적조 위성 빅데이터	68
제5절 적조 발생해역 해황자료	71
제3장 적조 탐지 알고리즘 비교 및 평가	83
제1절 적조 탐지 연구	83
제2절 적조 탐지 알고리즘 평가	86
제3절 적조 탐지 알고리즘 개발	106
제4장 적조 빅데이터 분석 플랫폼	109
제1절 적조관련 빅데이터 구성 및 DB	109
제2절 적조분석 플랫폼 구성현황	111
제5장 결론	112
참고문헌	115
부록	120

<표 차례>

<표 2-1> 적조 빅데이터 구성	9
<표 2-1-1> 연도별 적조 상황 및 자료 변화 상황	14
<표 2-2-1> 조사 관측 정보	27
<표 2-2-2> 조사 관측 항목	28
<표 2-4-1> 해색위성 종류 및 수집된 자료	68
<표 2-5-1> 발생된 태풍의 이름과 기간	78
<표 3-2-1> 기존의 적조 탐지 방법	86
<표 3-2-2> 위성자료와 현장 적조 발생 자료를 이용한 적조 탐지 방법 정확도 평가	88
<표 4-1-1> 적조 빅데이터 구성 및 구축 현황	109
<표 4-2-1> 분산병렬처리 서버 노드별 사양	111

<그림 차례>

<그림 1-2-1> 연구 추진 체계	7
<그림 1-2-2> 연구 분담 내역	8
<그림 2-1-1> 국립수산과학원 “한국연안의 적조발생 상황” 적조속보	11
<그림 2-1-2> Digitizing 과정	11
<그림 2-1-3> Digitizing 결과	11
<그림 2-1-4> 2002 ~ 2013 한반도 주변 해역 적조 발생 상황	12
<그림 2-1-5> 과거 적조발생상황	15
<그림 2-1-6> 적조 발생의 시·공간적 변화	19
<그림 2-1-7> 적조 발생 시기 및 피해액	22
<그림 2-1-8> 2002 ~ 2013년 7 ~ 9월 적조 발생 빈도수	23
<그림 2-1-9> 2002 ~ 2013년 짝수년, 홀수년, 전체 연도 적조 발생 빈도수	24
<그림 2-2-1> (a) 2014년 5월 조사정점, (b) 2014년 8월 조사정점(R1~5: 적조발생 정점)	26
<그림 2-2-2> Optical density (<i>O.D</i>) 측정을 위한 UV VIS Spectrophotometer	30
<그림 2-2-3> 2013년 5월 표층과 저층의 (a) 수온(°C), (b) 염분(psu), (c) 밀도(σ_t , kgm^{-3}), (d) 용존산소($ml l^{-1}$)의 공간적 분포	36
<그림 2-2-4> 2014년 5월 표층과 저층의 (a) 수온(°C), (b) 염분(psu), (c) 밀도(σ_t , kgm^{-3}), (d) 용존산소($ml l^{-1}$)의 공간적 분포	37
<그림 2-2-5> 2014년 5월 표층과 저층의 (a) 전체 엽록소 <i>a</i> 농도(mgm^{-3}), (b) 5 μm 엽록소 <i>a</i> 농도(mgm^{-3}), (c) 전체 엽록소 <i>a</i> 농도에 대한 5 μm 엽록소 <i>a</i> 농도 비율의 공간적 분포	38
<그림 2-2-6> 2014년 5월 P-I curve	39
<그림 2-2-7> 2014년 5월 표층과 저층의 총 부유물질량($mg l^{-1}$)의 분포	39
<그림 2-2-8> 2014년 5월 각 샘플층의 식물플랑크톤 흡광계수(a_{ph})	40
<그림 2-2-9> 2014년 5월 각 샘플층의 식물플랑크톤 비 흡광계수(a^*_{ph})	42
<그림 2-2-10> 2014년 5월 각 샘플층의 용존 유기물 흡광계수(a_{dom})	43
<그림 2-2-11> 2014년 5월 표층 저층의 영양염 농도(μM), (a) 질산염(NO_3), (b)	

암모늄(NH_4), (c) 인산염(PO_4), (d) 규산염(SiO_2)의 공간적 분포	47
<그림 2-2-12> 2013년 8월 표층과 저층의 (a) 수온(°C), (b) 염분(psu), (c) 밀도(σ_t , kgm^{-3}), (d) 용존산소량($ml l^{-1}$)의 공간적 분포	50
<그림 2-2-13> 2014년 8월 표층과 저층의 (a) 수온(°C), (b) 염분(psu), (c) 밀도(σ_t , kgm^{-3}), (d) 용존산소량($ml l^{-1}$)의 공간적 분포	51
<그림 2-2-14> 2014년 8월 표층과 저층의 (a) 전체 엽록소 <i>a</i> 농도(mgm^{-3}), 5 μm 엽록소 <i>a</i> 농도(mgm^{-3}) (b), 전체 엽록소 <i>a</i> 농도에 대한 5 μm 엽록소 <i>a</i> 농도 비율 (c)의 공간적 분포	52
<그림 2-2-15> 적조발생정점을 포함한 2014년 8월 표층의 (a) 전체 엽록소 <i>a</i> 농도(mgm^{-3}), (b) 5 μm 엽록소 <i>a</i> 농도(mgm^{-3})	53
<그림 2-2-16> 2014년 8월 P-I curve	54
<그림 2-2-17> 2014년 8월 표층과 저층의 총 부유물질량($mg l^{-1}$)의 공간적 분포	55
<그림 2-2-18> 적조발생정점을 포함한 2014년 8월 표층의 총 부유물질량($mg l^{-1}$)	55
<그림 2-2-19> 2014년 8월 각 샘플층의 식물플랑크톤 흡광계수(a_{ph})	56
<그림 2-2-20> 2014년 8월 각 샘플층의 식물플랑크톤 비 흡광계수(a^*_{ph})	58
<그림 2-2-21> 2014년 8월 각 샘플층의 용존 유기물 흡광계수(a_{dom})	60
<그림 2-2-22> 2014년 8월 표층, 저층의 영양염 농도(μM), (a) 질산염(NO_3), (b) 암모늄(NH_4), (c) 인산염(PO_4), (d) 규산염(SiO_2)의 공간적 분포	64
<그림 2-3-1> 실험실에서 배양하고 있는 <i>C. polykrikoides</i>	65
<그림 2-3-2> 배양된 (a) <i>C. polykrikoides</i> , (b) <i>Alexandrium tamarense</i> , (c) <i>Scrippsiella trochoidea</i> , (d) <i>Akashiwo sanguinea</i> 식물플랑크톤 흡광계수(a_{ph})	67
<그림 2-4-1> 대한민국 남해안 연구해역	70
<그림 2-5-1> 한국해양자료센터의 조사 관측정점 (검은 원: 이번 연구에서 장기 관측 자료를 위해 사용된 정점)	72
<그림 2-5-2> 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(°C)과 (b) 염분(psu) time-series (회색 원: 각 정점들의 값)	73
<그림 2-5-3> 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 (a) stratification index(kgm^{-4} , 회색 원: 각 정점들의 값)와 (b) 연안과 외해의 stratification index 차(kgm^{-4}) time-series 73

<그림 2-5-4> 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 74

<그림 2-5-5> (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) 76

<그림 2-5-6> 2000~2013년 기간 동안의 가덕도(회색 원), 통영(검은 원), 여수(흰 원) 그리고 완도(빨간 원)에서의 월별 조차(m) 77

<그림 2-5-7> 2000~2014년 기간 동안 한반도 전역에 영향을 미친 태풍의 진로(왼쪽 위의 빨간 숫자는 발생건수, 빨간 십자마크는 소멸위치를 나타냄) 80

<그림 2-5-8> 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(NO_3), (b) 인산염(PO_4), 그리고 (c) 규산염(SiO_2) time-series (회색 원: 각 정점들의 값) 81

<그림 2-5-9> 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(ml^{-1}) time-series (회색 원: 각 정점들의 값) 82

<그림 3-2-1> 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 89

<그림 3-2-2> 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 91

<그림 3-2-3> 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 93

<그림 3-2-4> 2004년 8월 6일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소 a 농

도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과 95

<그림 3-2-5> 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 97

<그림 3-2-6> 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 99

<그림 3-2-7> 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 101

<그림 3-2-8> 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 103

<그림 3-2-9> 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 105

<그림 3-3-1> 2013년 8월 현장관측 얻어진 (a) 적조가 없는 경우의 반사도 스펙트럼 특성과 (b) 적조가 있는 경우의 반사도 스펙트럼 특성 108

<그림 3-3-2> (a) IOCCG 시뮬레이션 자료의 반사도 스펙트럼 특성과 (b) 배양된 *C. polykrikoides* 흡광자료를 이용하여 계산된 반사도 스펙트럼 특성 108

<그림 4-2-1> 분산병렬처리 서버 및 DAS 111

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 배경 및 필요성

1. 연구배경

과거에 출현한 적조는 시·공간적 변동이 특정 기간과 해역에 국한되어 나타났다. 그러나, 오늘날의 적조 발생 현황은 극단적으로 한반도 연안 어디서나, 어떤 시기에든 발생하는 경향을 띠고 있다. 특히 최근 *Cochlodinium ploykrikoides* 적조종에 의해 발생되어지는 적조는 지역적으로 국한되지 않고 남해 전역뿐만 아니라 동해 및 서해 연안 해역까지 확산되면서 어류의 집단폐사 등과 같은 경제적 손실과 생태계에 막대한 악영향을 야기해왔다. 적조 발생에 따른 피해액이 1995년에는 746억, 2003년에는 215억, 2007년에는 115억, 2012년 44억, 2013년에는 247억이 발생했다. 특히 2013년의 경우 방제방지에 74억, 연 인원 32,515명, 황토살포 56,812톤, 장비 동원 1,875대, 복구비용 206억, 보험금 지급 75억으로 적조 대응과 피해 대책 비용으로 600억 이상이 소요되었다.

적조 발생에 따른 피해를 최소화하기 위해 적조 탐지 및 모니터링 활동들이 있었다. 그러나 기존의 적조탐지는 직접 현장조사를 통해 이루어지기 때문에 많은 비용과 시간이 요구되고 적조 예보 또한 성공적으로 이루어지지 못했다. 그리고 지역적으로 국한된 조사만으로는 유해성 적조의 조기 탐지 및 모니터링에 한계가 있다. 특히 유해성 적조는 광역적으로 저밀도를 유지하다가 증식·이동-밀집에 의해 유발하기 때문에 광역적·국지적 탐사와 접근이 필요하다. 또한 양식장 주변에 발생한 적조는 짧은 시간에 빠르게 진행되어 현재의 예찰 방법으로는 적조 피해 예방을 위한 시간이 부족하다. 결과적으로 단기적 적조 방제나 발생률 저감은 힘들기 때문에 발생 초기 예보·이동·확산 경로에 대한 예측이 필요한 실정이다.

최근 현장조사와 연계하여 위성을 활용한 적조탐지 연구가 제안되었다. 원격탐사는 상대적으로 적은 비용과 적은 시·공간적 제약으로 다양한 환경에 적용할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 자연적 변화인 기후변화와 인간 활동에 의한 인위적 변화에 빠르게 변화하는 해양환경을 효율적으로 감시하는데 유용하다. 특히 원격탐사 기술과 신속한 자료 분석 기술을 융합한 적조탐지 및 발생 경향 분석 기술 개발은 적조 피해 저감을 위한 체계적 적조 감시 체계 구축을 위한 중요한 잠재력을 제공하고, 적조 발생 시 민감지역에서 효율적이고 신속하게 적조 방제를 위한 과학적 자료 제공을 할 수 있다.

당해 수행된 공동연구는 적조탐지 연구와 빅데이터 분석 기술을 융합하여 대한민국

연안에 발생하는 적조를 신속하고 효율적으로 탐지하고 발생 가능 예측 연구를 수행하는 것이다. 1차년도 연구는 공동 연구 성과로 도출되는 적조 빅데이터 분석 기술을 적용하기 위해 장기 20년 이상의 적조관련 해황 자료(위성, 현장자료, 문헌 등)의 수집 및 DB 구축, 기존 적조탐지 방법 검증 및 적조탐지 방법 개선을 위한 연구를 수행했다. 그리고 적조 빅데이터 기반 장기 모니터링 연구와 구축된 적조 분석 플랫폼 상에서 통계 모델을 연동하여 적조 발생 확률론적 특성을 파악하여 적조 발생 경향 분석 연구를 위한 자료 수집 및 DB 구축 연구를 수행하였다.

가. 국·내외 연구 동향

일본은 1970년대부터 정부차원의 집중적인 투자로 활발한 기초 적조연구를 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 적조연구 예산 투입으로 적조생물의 발생기작, 생리생태 특성, 적조방제 연구에 집중했으며, 최근에는 적조발생 메카니즘 규명과 제어기술 개발 연구가 활발히 이루어지고 있다(김, 2005). 미국은 1990년대 초부터 적조연구를 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 적조발생기작, 탐지기술, 독성, 생리, 적조구제 및 천적 연구를 진행하고 있다(김, 2005).

국내의 적조연구는 1967년부터 학문적 접근을 시작하여, 1980년대까지 적조생물의 분류와 생태학적 기초연구를 수행하였다. 1990년 이후에는 적조생물의 환경생리, 이동확산, 적조방제 기술개발, 적조예보와 제어기술개발을 위한 연구가 진행되었고, 적조발생기작, 생물 상호관계, 휴면포자연구, 적조발생모델 등으로 다양화되었으나 상호연계성이 적고, 산발적으로 적조 관련 연구들이 진행되었다(김, 2005). 최근 원격탐사를 활용한 적조탐지 및 모니터링 연구가 수행되었지만 단편적 접근에 그치고 장기적인 자료를 이용한 적조 연구는 수행되지 않았다.

최근 정부는 관계부처 합동으로 2013년 "적조 대응 중장기 종합대책"을 수립하고 3가지 목표와 5개 항의 추진전략을 설정하고 많은 예산을 투입했고, 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 연구소, 대학, 및 기업에서 수행되었다. 그 중에서 황토살포 분야는 전해

수 황토살포기를 개발해 방제에 적용중이나 실질적인 효과는 미미한 수준으로서 생태계에 부정적 효과를 나타내는 등 의도하지 않은 부정적 효과가 발생했고, 살조제제의 개발도 실험실 수준에서는 적용가능하나 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 융합연구 기반인 원격탐사와 빅데이터 분석 기술을 연계하여 해양환경 변화를 감시하고 모니터링 할 수 있는 기초분야가 망라한 다학제적 연구가 필요한 실정이다. 한국과학기술정보연구원의 역할 중에는 선진 정보 분석 기법과 방법론의 개발 및 연구와 국·내외 핵심기술정보의 개발, 수집, 관리 등으로 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. 본 연구를 통해서 방대한 해양 자료를 효율적으로 분석하는 과학기술정보 분석 기술 연계를 통하여 자연적 변화인 기후변화와 인간 활동에 의한 인위적 변화에 의해서 빠르게 변화하는 해양환경을 신속하고 정확하게 탐지하고 모니터링 하는 유용한 정보를 제공 할 수 있는 시너지 효과의 도출이 필요하다.

나. 연구개발의 기술수준

위성을 활용한 적조 탐지 연구는 위성 산출물(엽록소 a , 부유물질, 형광과장 등)의 값을 이용한 탐지 기술과 파장별 값을 이용한 탐지 기술이 개발되어 기존의 해상위성인 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. 기본적인 방법은 위성에서 추정된 고농도의 엽록소 해역을 파악하고 RGB 합성 영상을 이용하여 적조 의심 해역을 분석한다. 또는 적조 발생 주변 해역에서 설치된 해상 부위를 이용하여 수온, 염분 및 광학 센서를 이용하여 실시간 적조 탐지 방법도 개발되었다. 적조가 발생한 해역

의 현장조사 시 적조생물의 이미지와 밀도 자료를 측정하는 장비를 탑재하여 연속적인 모니터링 방법도 운영 중이다.

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. 적조 빅데이터 기반 다차원 배열 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 극복 할 수 있을 것이다.

제 2 절 연구개발의 목표 및 내용

1. 연구 목표

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 평가 및 개선
 - 적조 발생 해역 해양, 기상, 해양 자료 수집 및 DB 구축
 - 적조종의 광학적 특성 자료에 기반을 둔 적조 탐지 알고리즘 비교 및 평가
- 적조 빅데이터 분석 플랫폼 구축

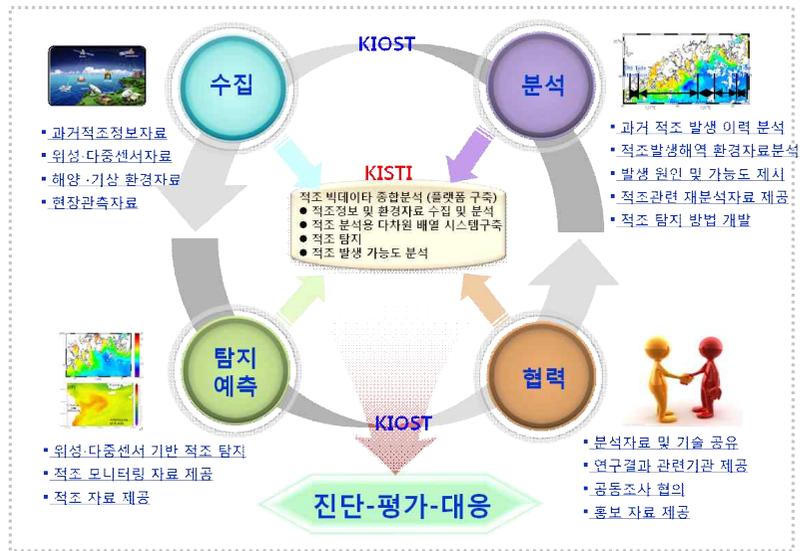
2. 연구 주요 내용

- 적조 발생 현장 자료 수집 및 분석
 - 과거 적조 발생 상황 문헌 수집, digitizing 및 적조 시공간 변화 파악
- 적조 발생 해역에서 현장관측 수행을 통한 해양, 기상, 환경 자료 수집
 - *C. polykrioides* 적조종 광특성 및 적조 발생 해역 해양 환경 특성 파악
 - 외편모조류 적조종 배양 및 흡광 특성 분석
- 적조 관련 다중위성 자료 및 해양 자료 수집 분석
 - 적조 탐지 알고리즘 평가를 위한 해석 위성 자료 및 적조 발생 경향 분석을 위한 다중 위성 자료 수집 및 분석
- 기존 적조 탐지 알고리즘 비교 및 평가
 - 해석위성 자료 이용 기존 적조 탐지 알고리즘 분석 및 정확도 평가
 - 현장관측 및 모델 분석 자료 기반 *C. polykrioides* 적조종 광학적 특성 파악
- 적조 빅데이터 자료 수집 및 분석용 플랫폼 구축
 - 적조 빅데이터의 효율적 처리를 위한 다차원 배열 DBMS 분석 플랫폼 구축 및 운영을 위한 융합 연구

3. 추진체계

가. 연구사업 추진전략 및 방법

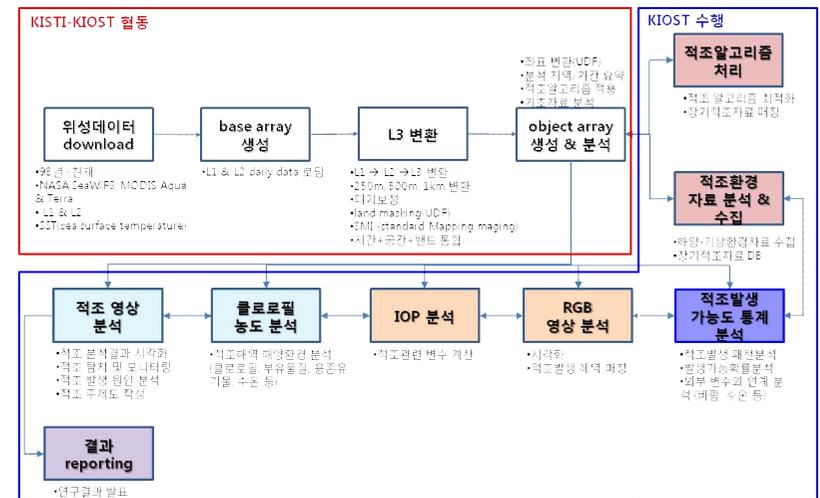
- 대외 연구기관, 연구소 및 학교와 협력을 하여 관측 자료 및 적조 관련 문헌 수집
 - 적조 관련 해양, 기상, 환경 자료 수집
 - 기존 적조 관련 문헌 조사 및 DB 구축
 - 적조 발생 해역 조사 시 공동 참여하여 자료 수집 및 교환
 - 현장 관측 자료, 위성 자료 및 실험실 배양 자료 기반 적조 탐지 방법 검증
- 국·내외 연구기관과 긴밀한 협조 하에 적조관련 빅데이터 분석 기술 개발과 활용 기술 연구 수행
 - 위성 및 다중센서 자료 DB 구축 및 분석 시스템 안정화
 - 적조 탐지 연구와 분석 시스템간의 융합 시스템 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 처리 시스템 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

- 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 제공함
- 한국과학기술정보연구원은 15년 이상의 위성 자료를 신속하고 효율적으로 처리하고 관리할 수 있는 분석 시스템 개발과 통계학적 분석 구축 업무를 담당함
- 두 기관은 서로 다른 영역의 자료와 기술들이 융합될 수 있도록 상호 점검을 실시하고, 최적화된 분석 시스템과 분석 결과가 도출 될 수 있도록 협조함



<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 방제 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 기초 자료 활용

제 2 장 적조 빅데이터

적조 탐지 및 발생 경향 분석을 위해 아래와 같은 항목에(<표 2-1>) 대해서 적조 관련 자료를 수집하였고, 적조 위성 빅데이터 분석을 위한 대용량 서버를 구축하였다.

<표 2-1> 적조 빅데이터 구성

자료 유형	자료 종류	산출물
과거 적조 발생 현장 자료	- 문헌 정보(2002 ~ 2013) - 수산과학원 적조속보(2014, http://portal.nfrdi.re.kr/redtideInfo)	- 적조 발생 자료 digitizing - 시/공간 정보 자료 추출 - 적조발생 지도 제작
적조 발생해역 현장관측 자료	- 해수분석: 엽록소 <i>a</i> , 부유물질, 영양염, 일차생산, 흡광 - 센서관측: 수온, 염분, 해수반사도, IOP, FRRF, PAR, ASD 기타: 투명도	- 적조 발생 전/후 환경 자료 - 적조 발생 해역 광특성 - 일반중, 적조중 흡광 - 적조 발생 해역 플랑크톤 특성 파악
적조중 배양	- 일반중 및 적조중 실험실 배양	- 농도별 흡광 자료 산출 - 현장자료 비교 및 모델 입력 자료 사용
해색위성	- SeaWiFS Level 1(1998 ~ 2007) - MODIS Aqua, Terra Level 1a ~ Level 2(2000 ~ 2013)	- 파장별 해수 반사도 - 엽록소 <i>a</i> , 수온, PAR
해황 자료	- 적조 발생 주변 해역 해양/기상 자료 - 기상청, 부이, 기타 위성 자료	- 수온, 기온, 바람, 강수량, 염분 등

제 1 절 과거 적조발생 현장자료

1. 적조 속보 digitizing

가. 적조 속보 digitizing

(1) 적조 속보

국립수산과학원에서는 적조현상이 발생하여 그 세력이 크거나 유해성 종이 출현하여 어업피해 발생위험이 있을 때 적조예보를 발령한다. 항공기 예찰이나 선박 관측을 통한 적조예보에는 적조주의보, 적조경보, 적조해제가 있으며 적조주의보나 경보 발령 중 적조의 진행과 변화정보(유독 종의 출현, 이동 확산) 및 어업피해방지에 관한 조치가 필요할 때 적조 속보가 내려진다.

적조주의보는 반경 2 ~ 5 km (12~79 km²) 수역에 걸쳐 발생하고 어업피해가 발생할 위험이 있을 때, 적조 경보는 반경 5 km (79 km²) 이상 수역에 걸쳐 발생 위험이 크거나 상당한 어업피해가 발생했을 때, 적조해제는 적조가 소멸되어 어업피해 위험이 없고 수질이 정상상태로 회복했을 때 발령된다. 이러한 기준은 세부적으로 적조생물밀도 (*cell ml⁻¹*)에 의해 결정된다. 예를 들어 *Cochlodinium polykrikoides* 농도가 300 *cell ml⁻¹* 이상이면 적조주의보가 발령되며, 1,000 *cell ml⁻¹* 이상일 경우 적조 경보가 발령된다 (http://portal.nfrdi.re.kr/redtide/webpage/operation/operation_04.jsp).

(2) 자료 수집 방법

우리나라 적조발생 현황 파악은 농림수산식품부 훈령 제123호 '적조예찰·예보 및 피해방지에 관한 요령'에 의거 전국연안 130정점에 54명의 지자체 담당 공무원이 수행하고 있으며, 적조발생 시 적조발생해역, 원인 적조 생물, 밀도 및 수온 등을 국립수산과학원의 적조정보시스템을 통하여 정보를 입력하고 국립수산과학원은 이를 확인하여 홈페이지(<http://portal.nfrdi.re.kr/redtideInfo>)와 국립수산과학원에서 발간하는 "한국연안의 적조발생 상황" 정보지(<그림 2-1-1>)로 제공한다(국립수산과학원, 2013). 정보지는 유해성 *C. polykrikoides* 적조 발생 전·후의 해양환경 조사결과와 유해성 적조의 발생 특징인 조기발생, 장기지속, 재 발생 등의 해양환경 변화를 설명하고 있고 유해성 적조 발생 시 일간 작성된 적조속보와 발생 해역 정보가 기재된다.

국립수산과학원 Tel : 051720-2260 Fax : 051720-2266	적 조 속 보	제 12 호 2008. 8. 10
1. 조사일시 : 2008. 8. 10		
2. 적조생물 : <i>Cochodinium polykrikoides</i>		
3. 적조발생현황 (발생 해역도 참조)		
해역	밀도(cells/mL)	수온(°C)
전남 여수시 가막만~황포수도~금호도 동쪽	50~360	26.3~29.0
전남 장흥군 관산읍(고마~우산), 회진면(노덕도)	200~500	27.5~29.4
전남 고흥군 득량면(안산 동부~도양 득량도)	100~350	24.9~27.0
경남 통영시 만지도~우도	400~600	25.0
경남 남해도 남면 유구~홍원	20~60	25.3~26.9

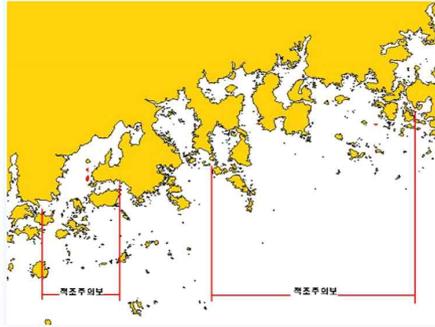
4. 전염상황
 ○ 전남 여수시 가막만 동산을 근해~외포도 내수역까지 적조도 출현하고 있음
 ○ 장흥군 관산읍 고마지산에서 우산지선까지 산발적으로 적조도로 분포하고 있으며 회진면 노덕도 지산에 미 출현
 ○ 득량면 소록도 서해면의 동부면 일대에서 적조의 분포
 ○ 통영시 만지도의 우도사이 적조가 형성되어 조류에 따라 이동하고 있음
 ○ 남해도 남면 유구에서 홍원해역에 전염보다 감소하여 저밀도의 적조생물 출현

5. 특보사항
 ○ 적조 위험도 판정배치
 - 전남 관동도 약산면 득암리 종단 ~ 전남 고흥군 관산면 거금도 동쪽 종단
 - 전남 여수시 화정면 거도 서쪽 종단 ~ 경남 통영시 용초도 동쪽 종단
 ○ 적조 위험도 판정배치
 - 전남 관동도 남달면 남달도 동쪽 종단 ~ 전남 고흥군 관산면 거금도 동쪽 종단

6. 감시관망
 ○ 현재 기온 및 동해남부해역에 발생한 냉수대가 약화되고, 소조기에 염이들어 적조 밀도 증가 및 범위의 확대가 우려됨.
 ○ 향후 기상청의 저수층 증가와 수온상승 등으로 적조생물의 밀도 증가 및 발생해역 확대가 예상된다

7. 기타
 ○ 적조 위험 기상 예측과 피해 경감을 위해 태백 지도반 편성 운영
 - 적조 자동출발전화(AIRS) : 051-720-2100
 - 인터넷 홈페이지 : <http://www.nsis.go.kr>
 ○ 적조상황은 수산사무소, 해양생태연구소, 수산연구소의 선박 및 육상출발 견뢰함

8. 당부사항
 ○ 여수시 가막만 하단 및 금호도 동남, 고흥군 득량면, 장흥군 관산읍 주변, 남해도 남면 및 통영시 만지도와 우도사이의 기온과 염도와 적조발생해역의 어업인들께서는 황포수도 및 산소공급 등 양식장관리에 철저를 기하여 주시기 바랍니다.



<그림 2-1-1> 국립수산과학원 “한국연안의 적조발생 상황” 적조속보

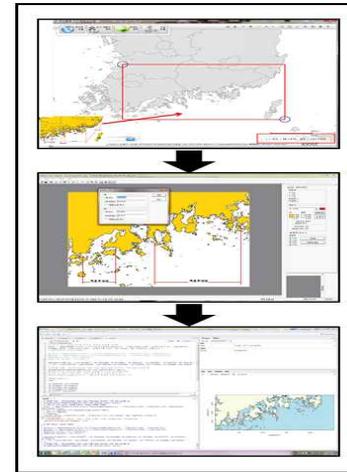
(3) Digitizing 방법

적조의 시공간적 분포를 분석하기 위해 일별 단위로 작성된 적조 속보 정보를 기초로 적조 생물의 공간분포를 digitizing하여 공간정보 데이터를 구축하였다.

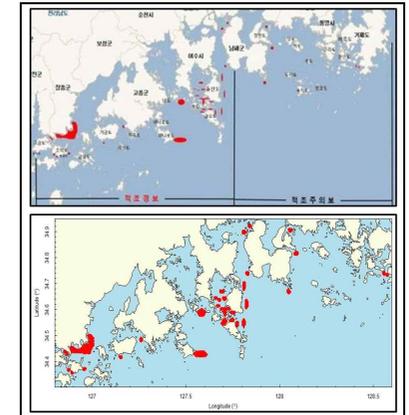
본 방법은 digitizing software인 GetData Graph Digitizer를 이용하여 제작되었다. <그림 2-1-1>에서 수집한 적조 속보 자료 중 *C. polykrikoides* 적조발생 해역도를 스캔한 뒤 적조가 일어난 부분을 재편집하여 새로운 지도 자료를 생성하였다. 이렇게 생성한 지도의 각 X, Y축 최소점과 최대점을 위경도로 환산하여 값을 추출하였다. 이 지도와 위경도 값을 가지고 GetData software로 이동하여 다음 작업을 시작하였다(<그림 2-1-2>).

GetData로 가져온 지도에 각 X, Y축의 최소점과 최대점 위경도 값을 입력하고 지도에 나타난 적조 지점에 dot 형태의 정점을 표시하였다. 이 점들은 각각의 위경도 값으로 변환 하여 excel data로 출력하였다.

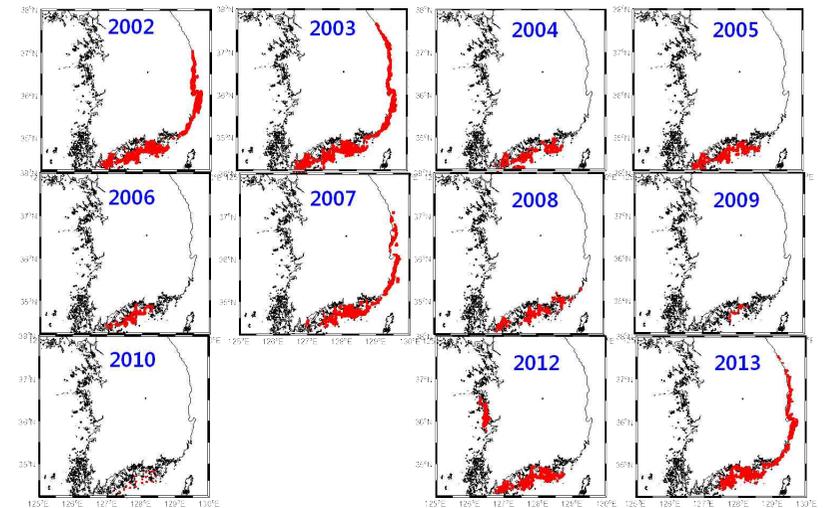
GetData에서 출력된 excel datas는 R software를 이용하여 Graphic으로 변환하고(<그림 2-1-3>), 전체 자료를 이용하여 연도별 발생 해역 지도를 제작하였다(<그림 2-1-4>).



<그림 2-1-2> Digitizing 과정



<그림 2-1-3> Digitizing 결과



<그림 2-1-4> 2002-2013 한반도 주변 해역 적조 발생 상황

(3) Digitizing 결과

국립수산과학원의 적조정보시스템에서는 일별 적조 정보를 취합하여 수일 내에 홈페이지를 통해 적조발생자료를 배포한다. 이를 연 별로 정리하여 매년 “한국연안의 적조발생 상황” 정보지를 발간한다.

본 사업에서는 적조 지도를 디지털화하기 위한 자료 수집으로 적조정보시스템과 정보지 두 개의 매체를 이용하였기 때문에 적조속보발령과 digitizing 결과의 총 개수가 상이하다. 또한, 적조정보시스템에서 발령한 적조정보와 정보지의 적조정보가 일치하지 않는 경우도 있으며 정보지의 적조정보의 모든 발령에 지도를 포함하고 있지 않는 경우도 있다(<표 2-1-1>).

1999년은 54일간 적조가 지속되었고 적조속보는 56호가 발령되었으며 digitizing 결과는 54개가 있다. 2000년은 29일간 적조가 지속되었고 적조속보는 31호가 발령되었으며 digitizing 결과는 22개가 있다. 2001년은 42일간 적조가 지속되었고 적조속보는 43호가 발령되었으며 digitizing 결과는 36개가 있다. 2002년은 57일간 적조가 지속되었고 적조속보는 57호가 발령되었으며 digitizing 결과는 40개가 있다. 2003년은 62일간 적조가 지속되었고 적조속보는 62호가 발령되었으며 digitizing 결과는 56개가 있다. 2004년은 30일간 적조가 지속되었고 적조속보는 35호가 발령되었으며 digitizing 결과는 30개가 있다. 2005년은 58일간 적조가 지속되었고 적조속보는 60호가 발령되었으며 digitizing 결과는 55개가 있다. 2006년은 23일간 적조가 지속되었고 적조속보는 36호가 발령되었으며 digitizing 결과는 32개가 있다. 2007년은 48일간 적조가 지속되었고 적조속보는 48호가 발령되었으며 digitizing 결과는 50개가 있다. 2007년은 48일간 적조가 지속되었고 적조속보는 48호가 발령되었으며 digitizing 결과는 50개가 있다. 2008년은 62일간 적조가 지속되었고 적조속보는 61호가 발령되었으며 digitizing 결과는 58개가 있다. 2009년은 17일간 적조가 지속되었고 적조속보는 6호가 발령되었으며 digitizing 결과는 6개가 있다. 2010년은 3일간 적조가 지속되었고 적조속보는 3호가 발령되었으며, digitizing 결과는 13개가 있다. 2012년은 75일간 적조가 지속되었고 적조속보는 75호가 발령되었으며 digitizing 결과는 62개가 있다. 2013년은 93일간 적조가 지속되었고 적조속보는 60호가 발령되었으며 digitizing 결과는 51개가 있다.

<표 2-1-1> 연도별 적조 발생 및 자료 변환 상황

연도	지속기간	적조속보발령	Digitizing 결과
1999	54	56	54
2000	29	31	22
2001	42	43	36
2002	57	57	40
2003	62	62	56
2004	30	35	30
2005	58	60	55
2006	23	36	32
2007	48	48	50
2008	62	61	58
2009	17	-	6
2010	3	3	13
2011	-	-	-
2012	75	75	62
2013	93	60	51

진도연안까지 적조가 발생하였으며, 대마난류의 강세와 8월 동해남부해역 냉수대의 발달로 강원도 강릉까지 적조가 확산되었다. 또한 2003년의 경우 1995년 이래 최고 밀도의 적조가 발생하였다. 2001년 *ml* 당 최대 31,000 *cells*을 보인 것보다 훨씬 증가된 *ml* 당 최대 48,000 *cells*이 남해도 동부해역에서 발생하였다. 지난해와 마찬가지로 적조 지속일이 62일을 기록하는 장기화 패턴을 보였고, 이는 한반도를 통과하는 태풍이 없어 연안 해양환경이 매우 안정화되었기 때문으로 보고했다. 이에 따라 9월 초까지 고밀도의 적조가 지속되었고, 9월 중순 태풍 메미의 통과 후 일시적 소강상태에 접었지만, 9월 말까지 고수온이 유지됨에 따라 적조의 장기화가 지속화 된 것으로 보고했다(국립수산과학원, 2004).

국립수산과학원(2005)의 결과에 따르면, 2004년은 적조 발생 초기에 외양수가 연안으로 강하게 접근하지 못하면서 유해성 적조생물 *C. polykrioides* 역시 연안으로 다량 이동, 집적 되지 못한 것으로 보고되었다(<그림 2-1-4, 2-1-5, 2-1-6>). 그러나 장기간의 가뭄과 고온 현상, 잦은 태풍과 같은 기상변화에 따른 해양환경 변화와 연안의 고염분 환경 등이 고니아올락스 같은 연안성종이 번성할 수 있는 환경이 조성된 것으로 판단되고, 상대적으로 외해역에서 세력을 유지하던 *C. polykrioides*가 더 이상 연안역으로 세력을 확장하지 못하고 소멸된 것으로 추정했다. 또한 일반적으로 외나로도에서 시작되는 패턴과 다르게 경남 거제 연안 및 전남 여수시 외해역에서 동시에 *C. polykrioides*가 발생한 것도 특징적 현상으로 보고했다(국립수산과학원, 2005).

국립수산과학원(2006)의 결과에 따르면, 2005년은 수온 전선대의 형성 없이 *C. polykrioides* 적조가 발생한 것이 특징적 현상으로 보고했다. 강한 수온 성층을 유지하고 있는 가운데 강우를 동반한 태풍이나 게릴라성 집중 호우가 없어 성층의 파괴나 영양염 공급이 없었던 것으로 분석되어졌다(<그림 2-1-4, 2-1-5, 2-1-6>, 국립수산과학원, 2006).

국립수산과학원(2007)의 결과에 따르면, 2006년은 수온약층의 지속과 쿠로시오 해류의 외해 측 분포 및 강한 냉수대 형성으로 *C. polykrioides*의 강한 번성이 없었던 것으로 분석했다(<그림 2-1-4, 2-1-5, 2-1-6>, 국립수산과학원, 2007).

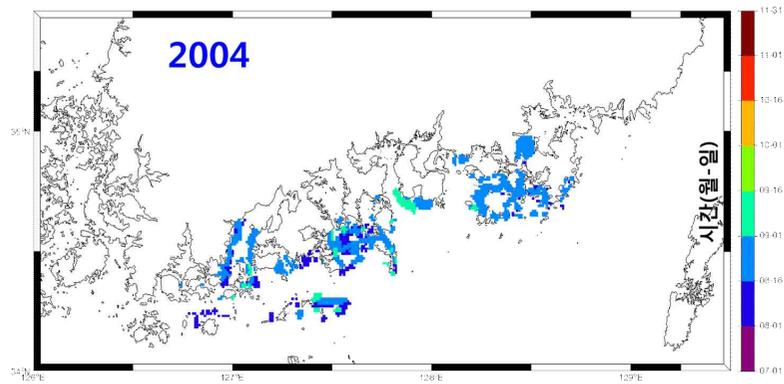
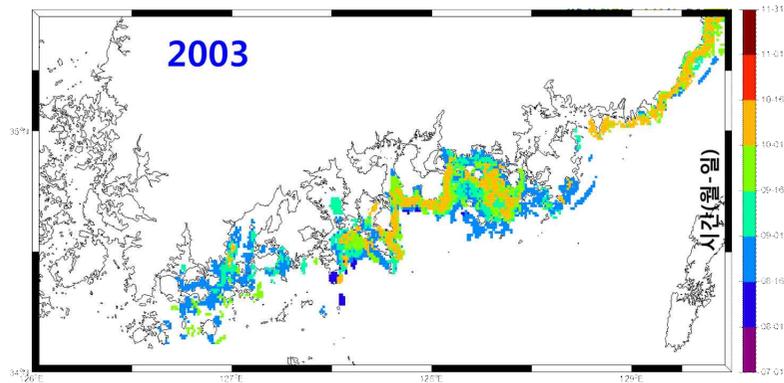
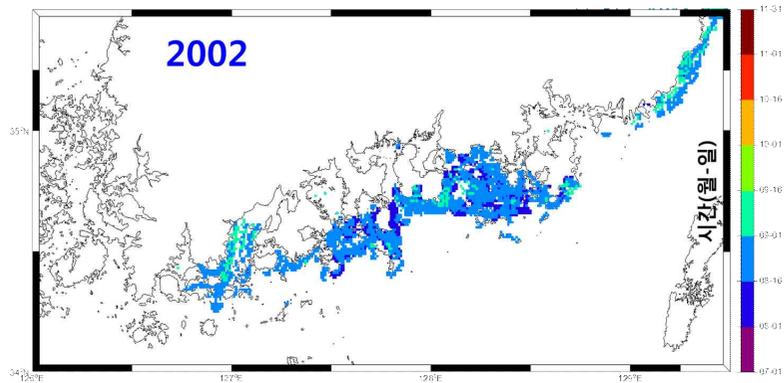
국립수산과학원(2008)의 결과에 따르면, 2007년은 적조생물 밀도의 변동 폭이 매우 크고 남해안에서 고밀도 적조가 지속된 것으로 보고했다. 8월 냉수대의 조기 소멸 및 해류의 영향으로 적조가 동해안으로 신속하게 이동·확산되었고, 태풍의 직·간접적 영향과 지속적 강우로 인한 식물플랑크톤 종 천이로 인해 적조의 소멸이 이루어진 것으로 추정했다(<그림 2-1-4, 2-1-5, 2-1-6>, 국립수산과학원, 2008).

국립수산과학원(2009)의 결과에 따르면, 2008년 7월말 가막만 하단에서 발생되기 시작한 *C. polykrioides* 적조는 발생초기부터 강한 냉수대 발달 및 낮은 강수량으로 인한 영양염 공급 부족으로 급속한 성장을 이루지 못한 것으로 추정했다. 적조의 확산 또한 냉수

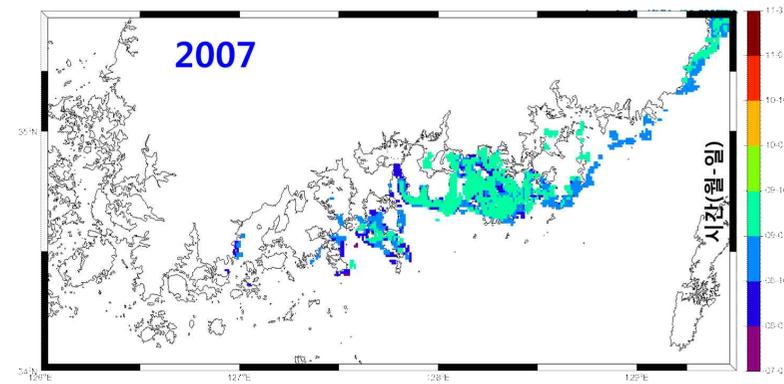
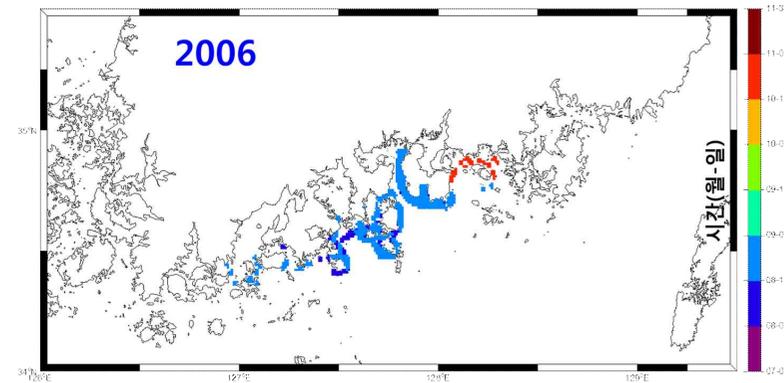
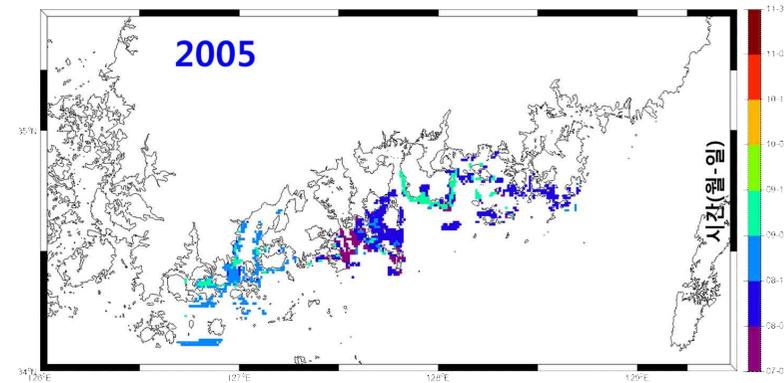
대로 발달로 인하여 지연되었으며 강수량 부족 및 강한 수온성층의 영향으로 영양염 공급이 억제되어 고밀도 적조로 성장하지 못한 것으로 판단했다. 이에 따라 일부 해역에서는 소강상태를 보이기도 하였다. 9월 초 대마난류가 지속적으로 강하게 연안까지 유입되었고 빈영양염의 상태가 지속되었으며 식물플랑크톤 여과섭식자이며 섭이률이 매우 높은 바다술통류가 이상 다량으로 출현하여 환경 변동에 크게 영향을 미친 것으로 판단했다. 9월 중순 수온성층의 재생성 및 늦더위로 인한 일사량 증가로 적조 재발생이 보고되었고, 연안역에 규조류 번식과 식물플랑크톤 종간경쟁 및 수온 하강으로 적조는 소멸된 것으로 판단했다(<그림 2-1-4, 2-1-5, 2-1-6>, 국립수산과학원, 2009).

국립수산과학원(2013)의 결과에 따르면, 2009 ~ 2011년까지는 두드러지는 적조 생물의 번성이 발생하지 않았다. 2010년은 1995년 이후 최단기간인 3일간 *C. polykrioides*가 지속하다 소멸하였고, 2011년 역시 1995년 이후 발생하던 *C. polykrioides*의 발생이 없었다(<그림 2-1-4, 2-1-5, 2-1-6>, 국립수산과학원, 2013). 2012년 유해성 *C. polykrioides* 적조 발생의 특성은 장기화, 광역화, 고밀도화이다. 2012년 *C. polykrioides*는 7월 27일부터 10월 24일 간인 총 75일간 지속되었고 남해와 서해에 걸친 광역화된 범위를 보였으며 *ml* 당 최대 23,000 *cells*을 보이는 고밀도화가 보였다(<그림 2-1-4, 2-1-5, 2-1-6>). 남해를 시작으로 태풍 블라벤과 텐빈이 지난 후 *C. polykrioides*는 서해로 옮겨 열흘간 지속되었다(국립수산과학원, 2013). 또 다른 태풍 산바와 서해의 강한 조류로 인해 서해 적조는 사그라졌으나 고흥 - 통영 간 적조는 가을적조로 불리며 23일간 지속되었다고 보고했다(<그림 2-1-4, 2-1-5, 2-1-6>, 국립수산과학원, 2013).

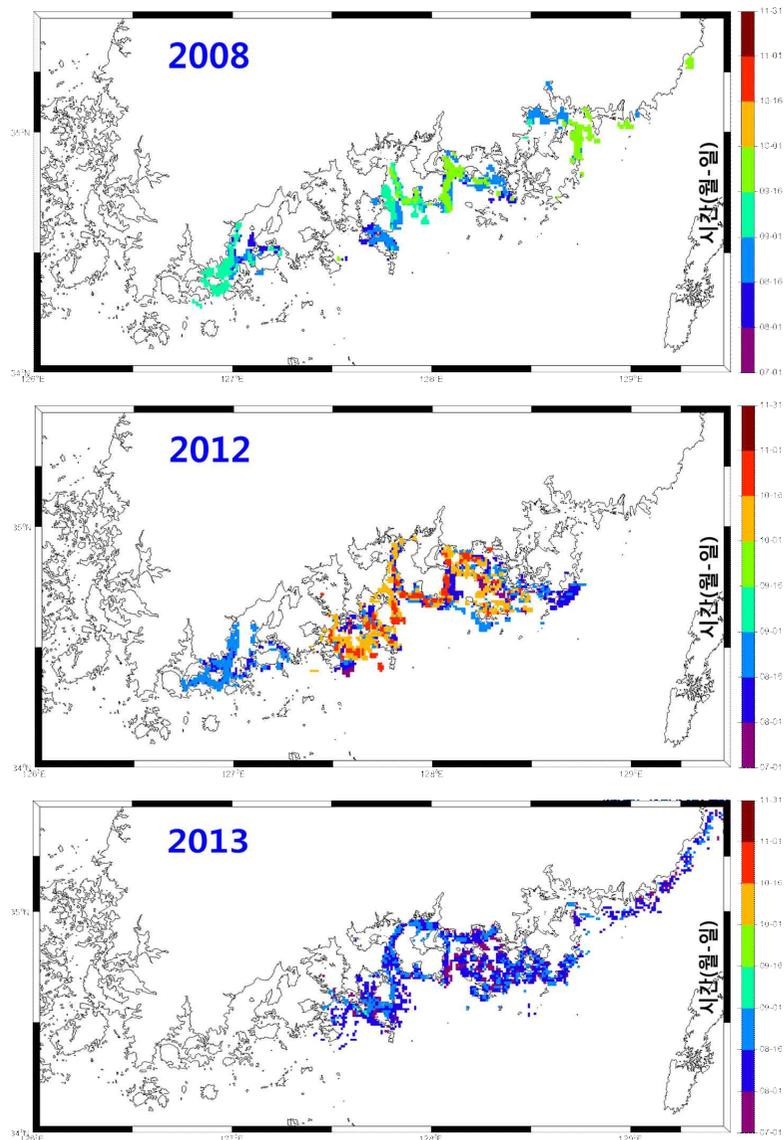
국립수산과학원(2014)의 결과에 따르면, 2013년은 역대 가장 빠른 적조가 발생하였다. 7월 남해안은 강한 일사량과 낮은 강수량으로 인한 폭염이 지속되었고, 대마난류의 강세로 예년보다 고수온을 나타내고, 강한 남풍계열 바람이 지속되어 외측수역 적조생물의 연안 집적 가속화를 불러일으킨 것으로 판단했다. 또한 연안해역의 낮은 규조류 등 식물플랑크톤 생체량으로 인해 종간경쟁 없이 종 천이가 이루어져 고온, 고염, 고조도에서 잘 자라는 *C. polykrioides*의 성장이 호적 환경 아래 조기 조성된 것으로 추정했다. 전남도에서부터 강원도까지 걸쳐 광역적으로 대규모로 발생한 *C. polykrioides*는 *ml* 당 최대 34,800 *cells*을 보이는 고밀도를 보였다(<그림 2-1-4, 2-1-5, 2-1-6>, 국립수산과학원, 2014).



<그림 2-1-6> 적조 발생의 시·공간적 변화



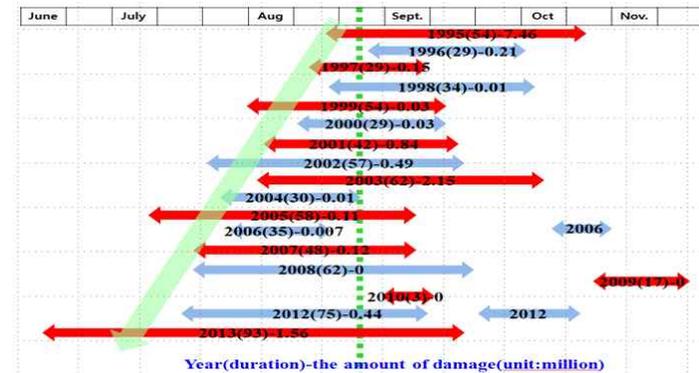
<그림 2-1-6> Continued



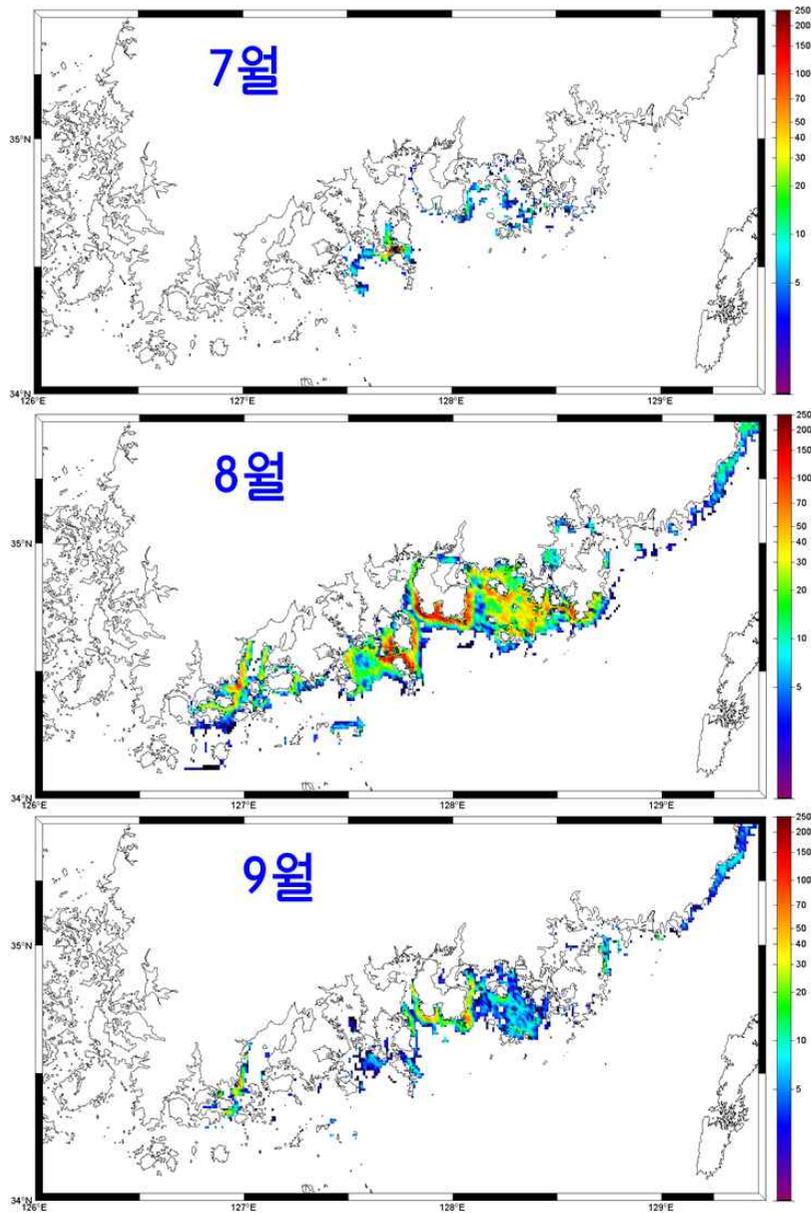
<그림 2-1-6> Continued

<그림 2-1-5, 2-1-7>에서 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.

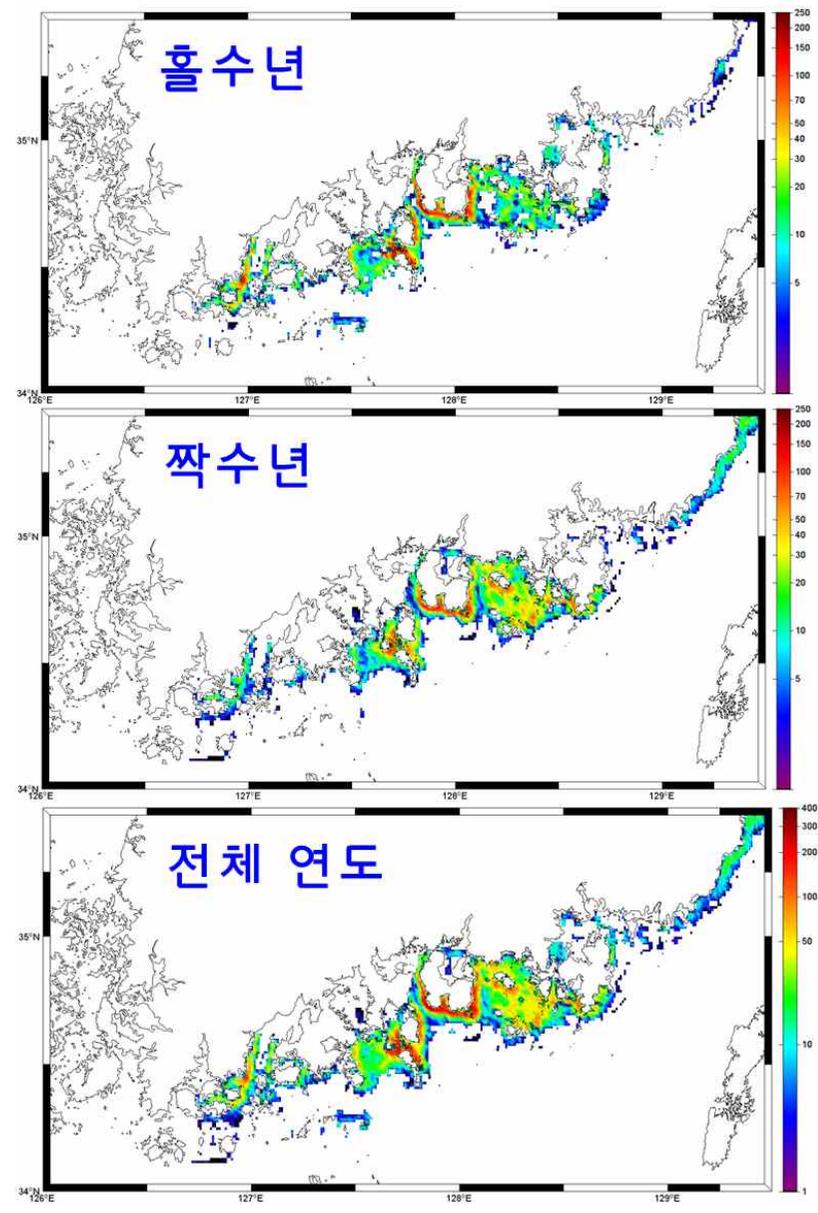
2002년부터 2013년까지 계절별 누적 적조 발생 빈도수를 살펴보면, 7월은 나로도, 여수 및 남해도 부근 해역에서 적조가 발생하고, 8월은 남해안 전 해역에서 발생되어지며, 9월에는 남해도와 거제 사이의 해역과 부산 부근 해역에서 발견되었다(<그림 2-1-8>). 짝수년도에 적조 발생 빈도수가 높은 해역은 고흥과 여수와 남해도 사이 해역으로 나타나고, 홀수년도에는 여수, 남해도 및 남해도와 거제 사이 해역에 높고 나타난다(<그림 2-1-9>). 2002년부터 2013년까지 전체 누적 적조 발생 빈도수를 보면 연구해역 남서쪽 해역에서는 완도와 고흥 사이 해역에서 높고 나타나고, 연구해역 중간 부근 해역에서는 여수, 남해도 거제 서쪽에서 자주 발생하는 것으로 나타났다(<그림 2-1-9>).



<그림 2-1-7> 적조 발생 시기 및 피해액



<그림 2-1-8> 2002 ~ 2013년 7 ~ 9월 남해안 적조 발생 빈도수



<그림 2-1-9> 2002 ~ 2013년 작수년, 홀수년, 전체연도 적조 발생 빈도수

제 2 절 적조 발생해역 현장관측

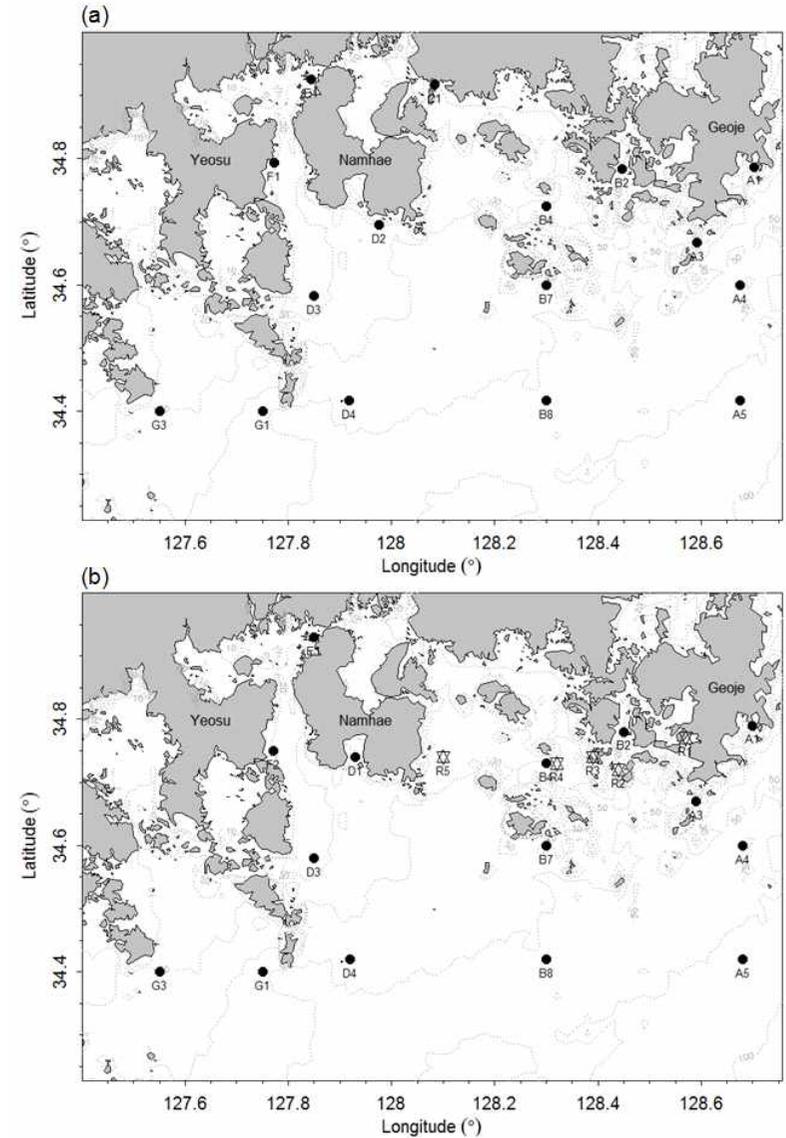
1. 현장 관측 자료 개요

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.

따라서 이번 연구에서는 남해 조사해역의 적조 탐지 및 발생 경향 분석을 위하여 2014년 봄, 여름 총 2회에 걸쳐 약 일주일 동안 현장조사를 실시하였으며(<표2-2-1>) 조사항목은 <표2-2-2>에 제시하였다. 현장조사가 이루어진 정점은 해황 및 적조종 시료 채취 등으로 인하여 다소 차이를 보인다(<그림2-2-1>).



<그림 2-2-1> (a) 2014년 5월 조사정점, (b) 2014년 8월 조사정점(R1~5: 적조발생정점)

<표 2-2-1> 조사 관측 정보

(a) 2014년 5월 관측 정보

Station	Longitude (°)	Latitude (°)	Observation time (yyyy-mm-dd hh:mm)	Depth (m)	Sample (m)
D3	127.85	34.58	2014-05-19 11:30	21	5, 10, 15
D4	127.92	34.42	2014-05-19 12:53	45	5, 20, 40
G1	127.75	34.40	2014-05-19 14:35	46	5, 15, 40
G3	127.55	34.40	2014-05-19 16:40	18	5, 13
B7	128.30	34.60	2014-05-20 8:50	45	5, 15, 40
B8	128.30	34.42	2014-05-20 10:58	59	5, 15, 30, 55
A5	128.68	34.42	2014-05-20 14:05	86	5, 20, 30, 50, 81
A4	128.68	34.60	2014-05-20 16:30	67	5, 15, 30, 60
A1	128.70	34.79	2014-05-21 8:40	19	5, 15
A3	128.59	34.67	2014-05-22 14:43	72	5, 20, 41, 70
B2	128.45	34.78	2014-05-22 16:15	15	2, 5, 10
B4	128.30	34.73	2014-05-23 10:50	30	5, 14, 25
C1	128.08	34.92	2014-05-23 14:55	18	5, 13
D2	127.98	34.70	2014-05-24 12:18	25	2, 6, 20
F1	127.77	34.79	2014-05-24 15:00	13	5, 10
E1	127.85	34.93	2014-05-25 8:50	14	5, 10

(b) 2014년 8월 관측 정보

Station	Longitude (°)	Latitude (°)	Observation time (yyyy-mm-dd hh:mm)	Depth (m)	Sample (m)
F2	127.77	34.75	2014-08-25 10:20	15	2, 12
D3	127.85	34.58	2014-08-25 12:55	20	2, 17
G3	127.55	34.40	2014-08-26 7:40	20	2, 17
G1	127.75	34.40	2014-08-26 9:42	45	2, 20, 42
D4	127.92	34.42	2014-08-26 11:25	46	2, 20, 40
B8	128.30	34.42	2014-08-26 14:18	57	2, 20, 40
B7	128.30	34.60	2014-08-26 16:50	45	2, 20, 35
R1	128.57	34.77	2014-08-27 11:50	41	0
B2	128.45	34.78	2014-08-27 13:55	14	2, 10
A3	128.59	34.67	2014-08-27 16:50	75	2, 20, 40
A1	128.70	34.79	2012-08-28 7:00	19	2, 14
R2	128.44	34.72	2012-08-28 11:00	36	2, 10, 20, 30
R3	128.39	34.74	2012-08-28 13:40	56	0
B4	128.30	34.73	2012-08-28 15:40	29	2, 10, 20
R4	128.32	34.73	2012-08-28 17:00	29	-
A5	128.68	34.42	2012-08-28 21:50	78	2, 25, 35, 55
A4	128.68	34.60	2014-08-29 23:40	70	2, 25, 50
R5	128.10	34.74	2014-08-30 13:00	24	0, 2, 5, 10, 15
D1	127.93	34.74	2014-08-30 16:20	16	2, 13
E1	127.85	34.93	2014-08-30 19:10	14	2, 10

<표 2-2-2> 조사 관측 항목

세부분야	세부조사내용
부유환경	수온, 염분, 밀도, 광합성유효광(PAR), 영양염, 용존 산소, 부유물질, 용존 유기물 흡광, 입자상 물질 흡광
식물플랑크톤	엽록소 <i>a</i> size fraction, 일차생산(광합성-광도 매개변수), 식물플랑크톤 흡광, <i>C. polykrikoides</i> 흡광

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 흔들어서 섞은 후 여과압력 30 ~ 40 *kPa* 상태에서 Whatman 47 mm GF/F 여과지와 5 μ 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 액화질소에 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 *a*를 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 *a*값을 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 계산하였다.

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

여기서 E는 광합성유효광($\mu mol m^{-2} s^{-1}$)이며 σ'^{PSII} 는 주변광 이하에서 측정된 기능적 흡광단면적($10^{-20} m^2 photon^{-1}$)이다. q_p 는 광화학적 소멸계수이며 ϕ_e 는 광계II에서 1 mol 전자가 생성하는 산소 분자를 나타내는 전자전달 양자수율($mol O_2 (mole electrons)^{-1}$)로 0.2를 적용하였다. n_{PSII} 는 광합성 단위크기($mol RCII (mol Chla)^{-1}$)이며 이 연구에서는 0.002로 설정하였다(Falkowski and Kolber 1995). f 는 암적응 상태에서의 광계II 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($P_m^B, mgCmgChla^{-1}h^{-1}$)과 포화광 이하에서 광합성-광도 모델의 초기 기울기($\alpha, mgCmgChla^{-1}h^{-1} [\mu mol m^{-2} s^{-1}]^{-1}$)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 냉동보관 하였다.

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 흡광(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 2-2-2>), 안정도를 테스트하기 위해 air-air baseline을 측정하고 Noise가 ± 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 2-2-2> 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(λ)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; $S cm^2$)으로 나누어준 값이다. 상수 "2"는 β -effect(Kiefer and SooHo, 1982; optical pathlength 증폭현상)로서, 흡광계수를 측정할 때 부유 입자 상태에서 측정된 값과 여과지를 통해서 측정된 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, $a^*_p (m^2 mg^{-1})$ 는 단위 엽록소 a 농도($chl mg m^{-3}$)당 식물플랑크톤의 흡광계수($a_{ph}(\lambda) m^{-1}$)이며 다음과 같은 식에 의해서 파장에 따른 식물플랑크톤의 비 흡광계수를 계산하였다.

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

(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 담은 125 ml 갈색병

(*Qorpak™*)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 달아 어두운 곳에 보관하였다.

0.2 μm pore size 47 mm polycarbonate membrane(염색되지 않은 것)을 plastic petri-dish에 넣고 적어도 15분 정도 10% HCl에 담가 둔 후 증류수로 여과지를 행귀주었다. 해수를 여과시켜 병 안을 한 번 행구고, 나머지 해수는 여과하여 병에 받았다. 시료는 100 ml 정도의 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(SiO₂), 암모니아성 질소(NH₄-N), 아질산성 질소(NO₂-N)와 질산성 질소(NO₃-N), 인산염(PO₄-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~10분 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 μs 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 염록소 *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.

3. 현장 관측 자료 분석결과

가. 2014년 봄 관측

이번 2014년도 5월 관측은 2014년 5월 19일부터 5월 25일까지 국립공원 연구1호 조사선에서 이루어졌다. 총 조사 정점은 16개이며 각 수층별로 이루어졌다. 2014년 5월 관측 자료와 비교를 위해 2013년 4월 29일부터 5월 9일까지의 총 28정점에서 시행된 CTD 관측 자료를 여수 국립공원 관리공단으로부터 제공받았다.

(1) CTD 관측 자료의 공간적 분포

연구해역에서 2013년과 2014년 5월에 관측된 수온, 염분, 밀도, 용존산소량의 공간적 분포 특성은 <그림 2-2-3>과 <그림 2-2-4>와 같다.

2013년도 5월의 표층수온은 12.84 ~ 16.29°C (평균 14.52±0.96°C), 저층수온은 12.35 ~ 15.74°C (평균 13.52±0.87°C) 범위로 나타났다. 표층수의 경우 섬진강 영향 주변 해역을 제외하면 대체적으로 뚜렷한 공간변화는 보이지 않았으며 저층 또한 표층수와 유사하게 섬진강과 남강 영향 주변 해역 그리고 34.4°C 부근 해역을 제외하면 균질한 값을 보였다. 2014년도 5월의 표층수온은 15.18 ~ 19.12°C (평균 17.03±1.06°C), 저층수온은 13.90 ~ 18.50°C (평균 15.55±1.43°C) 범위로 나타났다. 2014년의 수온은 표층과 저층 모두 2013년도 5월보다 높게 나타났으며 저층의 경우 수심이 깊은 외해로 갈수록 수온이 내려가는 수온경사를 보였다.

2013년도 5월의 표층염분은 32.35 ~ 34.11psu (평균 33.58±0.46psu), 저층염분은 32.72 ~ 34.20psu (평균 33.67±0.39psu) 범위를 나타냈다. 표층염분과 저층염분 모두 섬진강 영향 주변 해역을 제외하면 대체적으로 균질한 값을 보였다. 2014년도 5월의 표층염분은 33.03 ~ 34.20psu (평균 33.91±0.35psu), 저층염분은 33.15 ~ 34.30psu (평균 34.03±0.34psu) 범위로 나타났다. 2014년도 5월 염분은 2013년도 5월의 염분과 마찬가지로 섬진강 영향 주변 해역을 제외하면 대체적으로 균질한 값을 보였다.

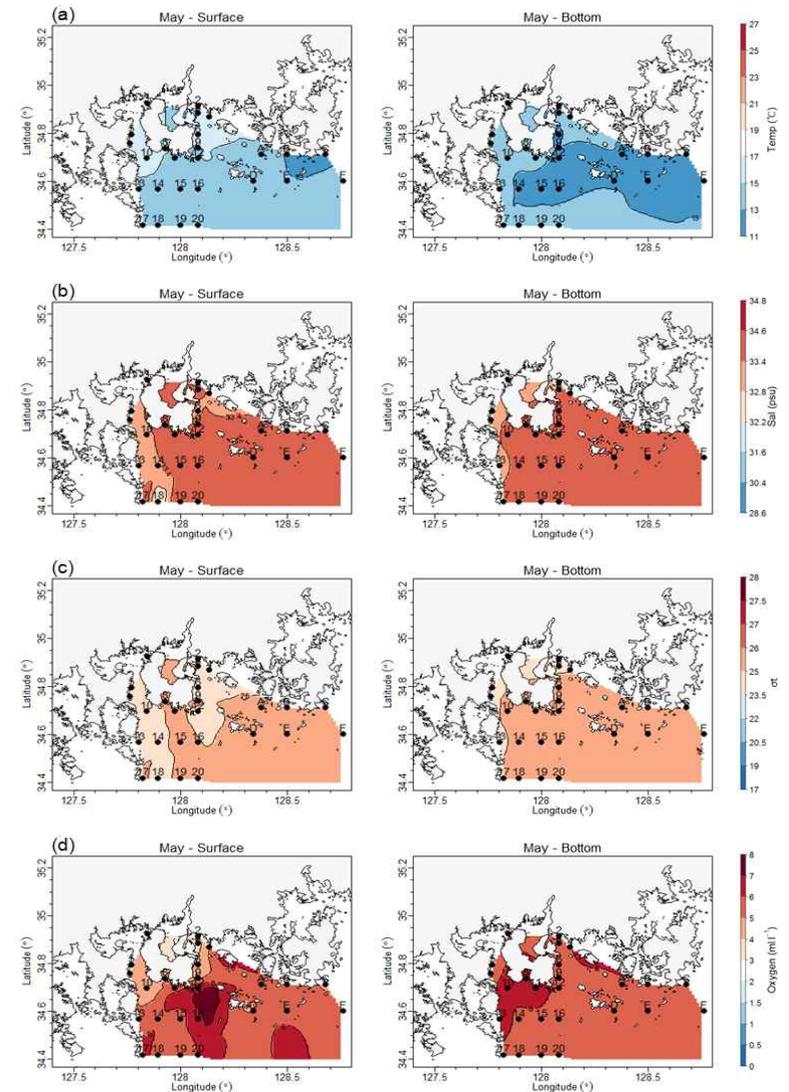
밀도의 범위는 2013년도 5월 표층에서 24.11 ~ 25.68 $kg m^{-3}$ (평균 24.99±0.49 $kg m^{-3}$), 저층에서 24.32 ~ 26.00 $kg m^{-3}$ (평균 25.40±0.49 $kg m^{-3}$)로 나타났으며 2014년 5월 표층에서 23.51 ~ 25.31 $kg m^{-3}$ (평균 24.69±0.50 $kg m^{-3}$), 저층에서 23.78 ~ 25.96

kgm^{-3} (평균 $25.24 \pm 0.65 kgm^{-3}$)로 나타났다. 염분 분포범위와 같이 밀도 또한 섬진강 영향 주변 해역에서 낮게 나타났으며 2014년도 5월의 경우 그 범위가 훨씬 크게 나타났다.

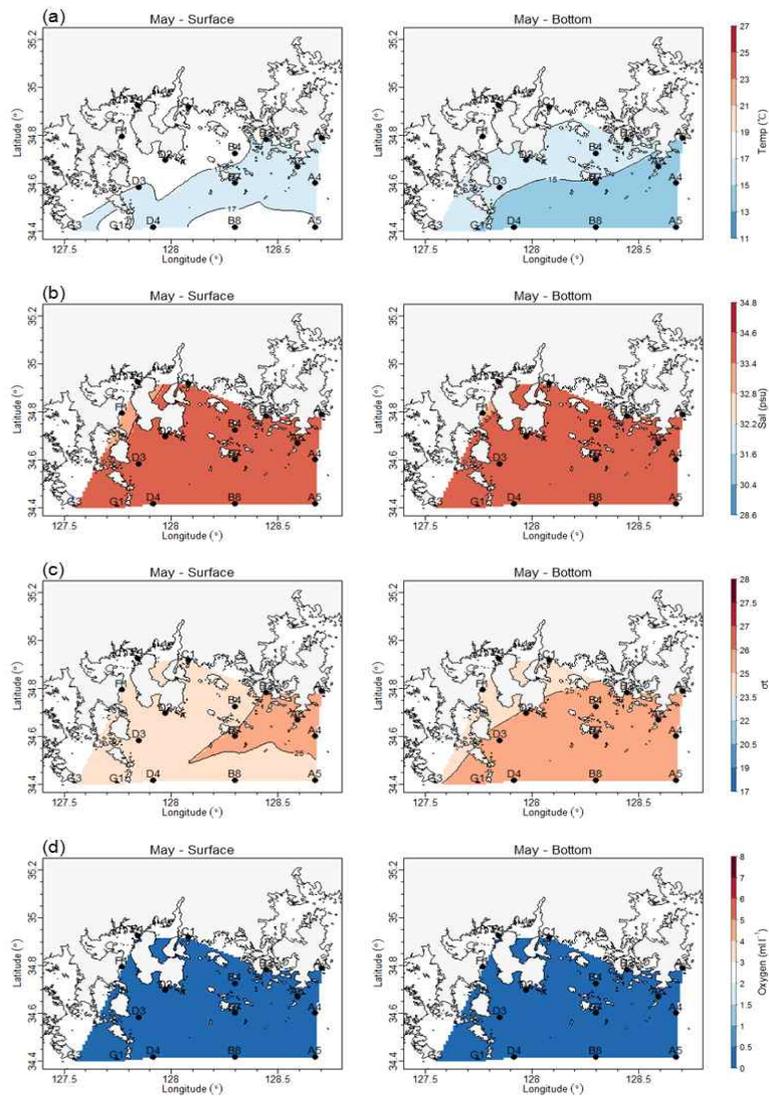
용존산소량은 2013년 5월과 2014년 5월이 두드러지게 다른 분포범위를 보였고 2014년 5월의 범위가 현저히 낮게 나타났다. 2013년도 5월의 용존산소량은 표층에서 $3.63 \sim 6.82 ml^{-1}$ (평균 $5.21 \pm 0.82 ml^{-1}$), 저층에서 $5.12 \sim 6.75 ml^{-1}$ (평균 $5.80 \pm 0.36 ml^{-1}$)로 나타났고 2014년도 5월의 용존산소량은 표층에서 $0.04 \sim 0.42 ml^{-1}$ (평균 $0.09 \pm 0.09 ml^{-1}$), 저층에서 $0.05 \sim 0.12 ml^{-1}$ (평균 $0.08 \pm 0.03 ml^{-1}$)로 나타났다.

(2) 엽록소 a 농도의 공간적 분포

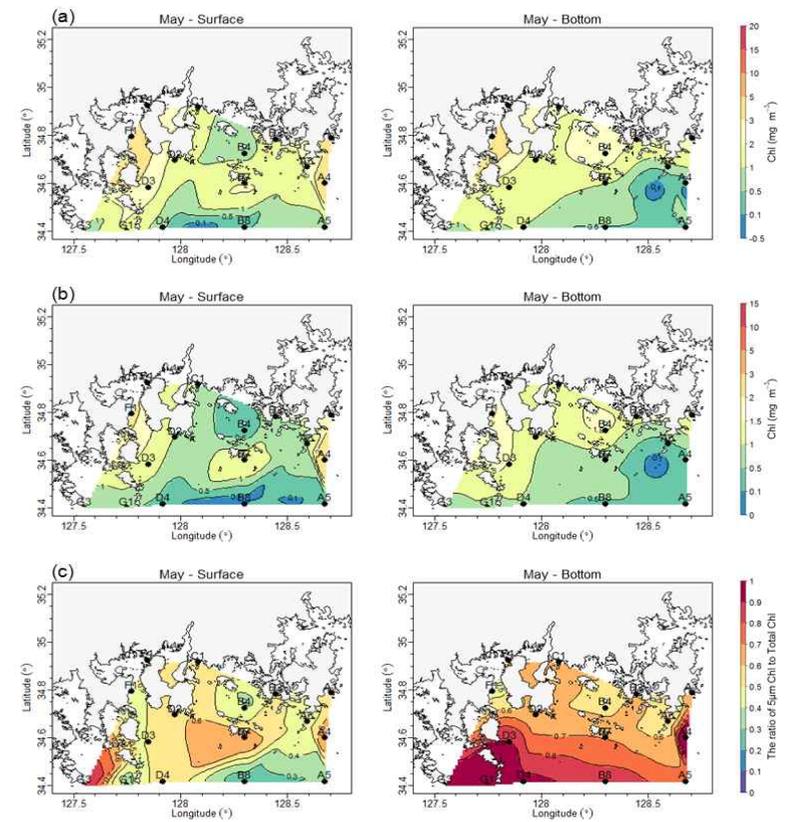
조사정점 해역에서의 엽록소 a 농도는 조사시기와 관측위치에 따라 다양하게 나타난다. 일반적으로 온대해역 외해에서 봄철과 가을철에 식물플랑크톤 대번성이 일어나는 것으로 알려져 있으나 현장관측에서는 연안의 부영화로 대번성 시기가 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다. <그림 2-2-5>와 같이 공간적으로 5월에 육지의 영향이 큰 연안해역에서 높게 나타났고 대마난류의 영향을 받는 외해역에서 낮게 나타났다. 전체 엽록소 a 농도는 2014년 5월 표층에서 $0.43 \sim 4.63 mgm^{-3}$ (평균 $2.04 \pm 1.28 mgm^{-3}$), 저층에서 $0.25 \sim 4.28 mgm^{-3}$ (평균 $1.58 \pm 1.10 mgm^{-3}$)로 나타났다. $5 \mu m$ 엽록소 a 농도는 표층에서 $0.12 \sim 2.95 mgm^{-3}$ (평균 $1.09 \pm 0.76 mgm^{-3}$)로 전체 엽록소 a 농도의 약 51%를 차지하는 것으로 나타났다. 저층에서의 $5 \mu m$ 엽록소 a 농도는 $0.22 \sim 2.03 mgm^{-3}$ (평균 $1.04 \pm 0.55 mgm^{-3}$)로 나타났으며 전체 엽록소 a 농도의 약 74%를 차지하는 것으로 나타났다. 특히 저층의 경우 연안해역에서 외해역으로 갈수록 $5 \mu m$ 엽록소 a 농도 비율이 점점 크게 나타났다.



<그림 2-2-3> 2013년 5월 표층과 저층의 (a) 수온($^{\circ}C$), (b) 염분(psu), (c) 밀도(σ_t , kgm^{-3}), (d) 용존산소($ml l^{-1}$)의 공간적 분포



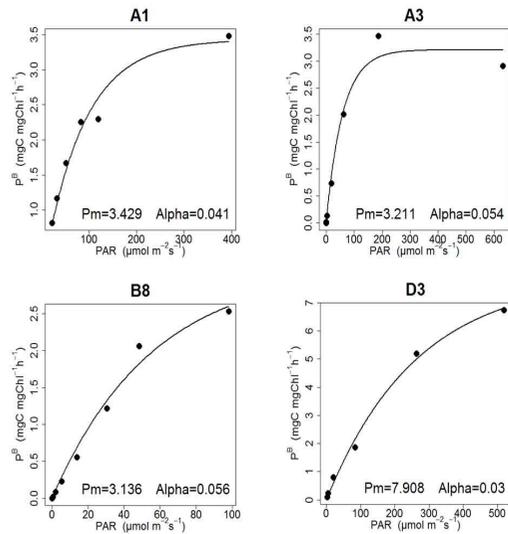
<그림 2-2-4> 2014년 5월 표층과 저층의 (a) 수온($^{\circ}\text{C}$), (b) 염분(psu), (c) 밀도(σ_t , kgm^{-3}), (d) 용존산소(ml l^{-1})의 공간적 분포



<그림 2-2-5> 2014년 5월 표층과 저층의 (a) 전체 엽록소 a 농도(mgm^{-3}), (b) $5\mu\text{m}$ 엽록소 a 농도(mgm^{-3}), (c) 전체 엽록소 a 농도에 대한 $5\mu\text{m}$ 엽록소 a 농도 비율의 공간적 분포

(3) 광합성-광도 매개변수 산출

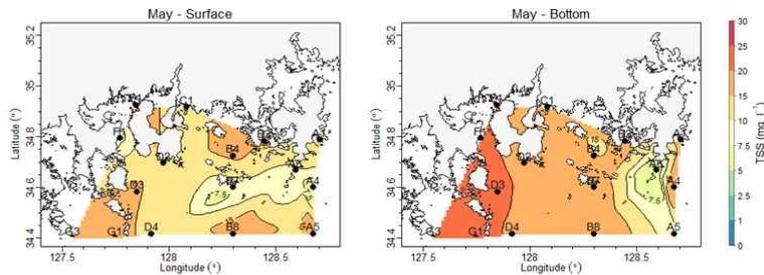
2014년 5월 P-I curve에서 산출된 α 값과 P_m^B 값은 관측정점 중 일부정점(A1 정점, A3 정점, B8 정점, D3 정점)에서 산출하였다. 이 정점들에서의 α 값은 $0.030 \sim 0.056 \text{ mgCmgChla}^{-1}\text{h}^{-1}(\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1})^{-1}$, P_m^B 값은 $3.136 \sim 7.908 \text{ mgCmgChla}^{-1}\text{h}^{-1}$ 범위로 해역마다 다르게 나타났다(<그림 2-2-6>).



<그림 2-2-6> 2014년 5월 P-I curve

(4) 총 부유물질량(TSS)의 공간적 분포

2014년 5월 관측된 총 부유물질량은 표층에서 $6.20 \sim 20.00 \text{ mg l}^{-1}$ (평균 $13.72 \pm 3.96 \text{ mg l}^{-1}$), 저층에서 $6.60 \sim 23.60 \text{ mg l}^{-1}$ (평균 $17.50 \pm 4.48 \text{ mg l}^{-1}$) 범위로 해역마다 조금씩 다르게 나타났으며 저층에서 보다 높게 나타났다(<그림 2-2-7>). 저층의 경우 섬진강과 같은 강물 유입이 되는 서쪽의 연안 해역에서 높게 나타났다.

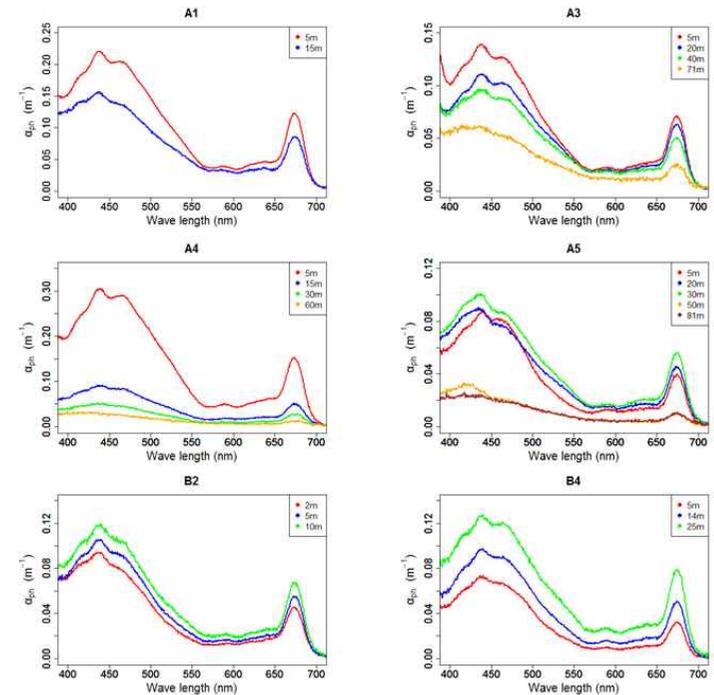


<그림 2-2-7> 2014년 5월 표층과 저층의 총 부유물질량(mg l^{-1})의 분포

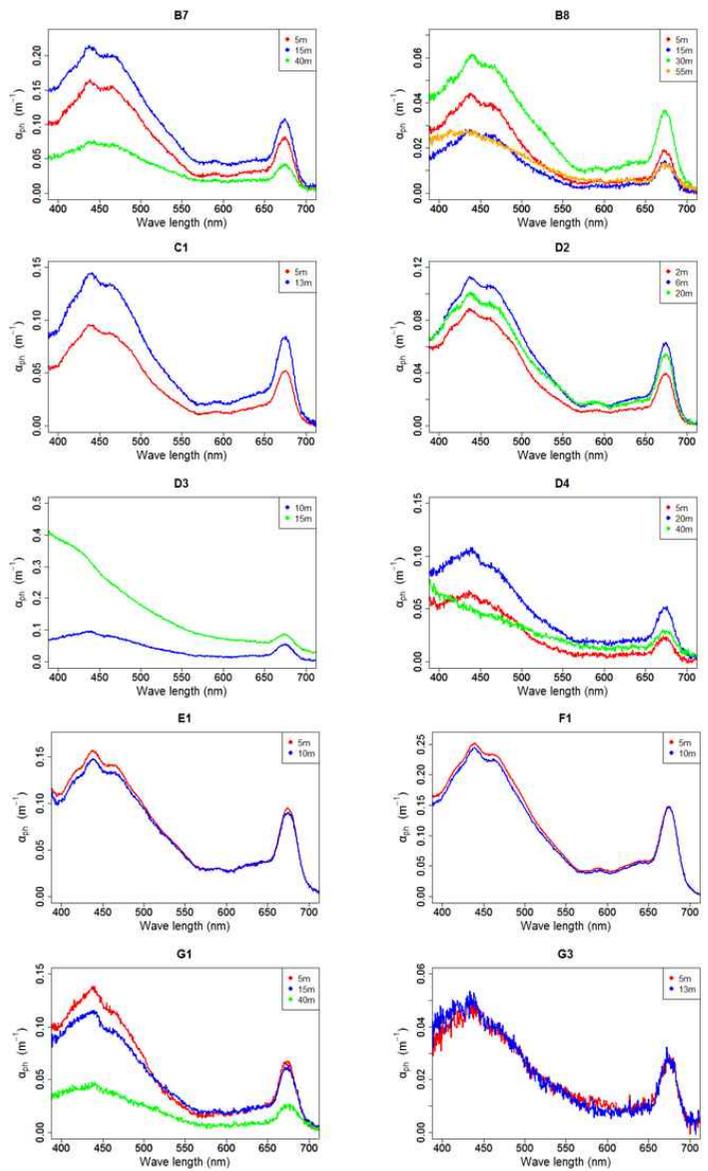
(5) 입자상 물질의 흡광(AP)

<그림 2-2-8>과 <그림 2-2-9>는 각각 2014년 5월 현장관측을 통해 얻은 파장 $400 \sim 700 \text{ nm}$ 영역에서 식물성 플랑크톤의 광 흡수 계수(a_{ph})와 비 흡광계수(a^*_{ph}) 스펙트럼을 나타낸 그림이다.

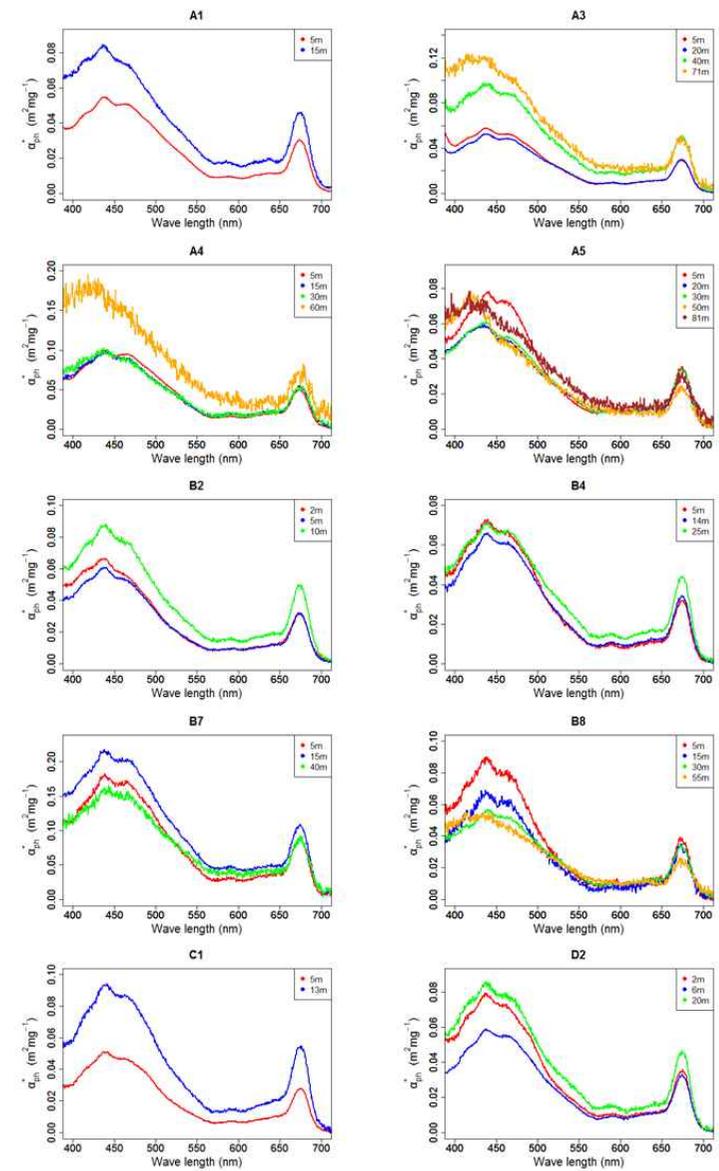
파장 440 nm 부근에서 엽록소 흡광 peak와 파장 670 nm 부근에서 엽록소 형광 peak가 잘 나타나는 스펙트럼의 형태를 보여주고 있다. 엽록소 흡광영역의 중심 파장대인 440 nm 부근에서의 a_{ph} 값의 분포 범위는 $0.024 \sim 0.328 \text{ m}^{-1}$ 이고 a^*_{ph} 값은 $0.047 \sim 0.435 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1}$ 의 분포범위를 나타냈고, 엽록소 흡광영역의 중심 파장대인 670 nm 부근에서의 a_{ph} 값의 분포 범위는 $0.011 \sim 0.153 \text{ m}^{-1}$ 이고 a^*_{ph} 값은 $0.025 \sim 0.156 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1}$ 의 분포범위가 나타났다.



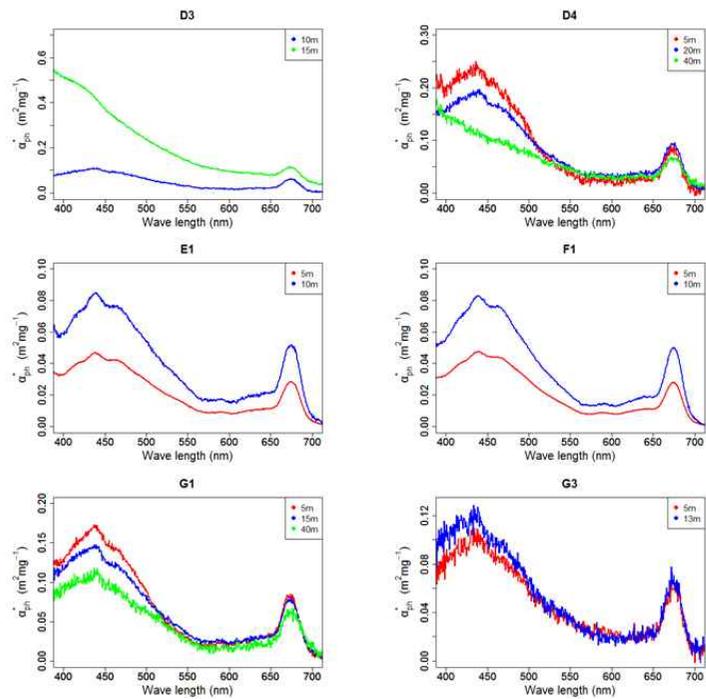
<그림 2-2-8> 2014년 5월 각 샘플층의 식물플랑크톤 흡광계수(a_{ph})



<그림 2-2-8> Continued



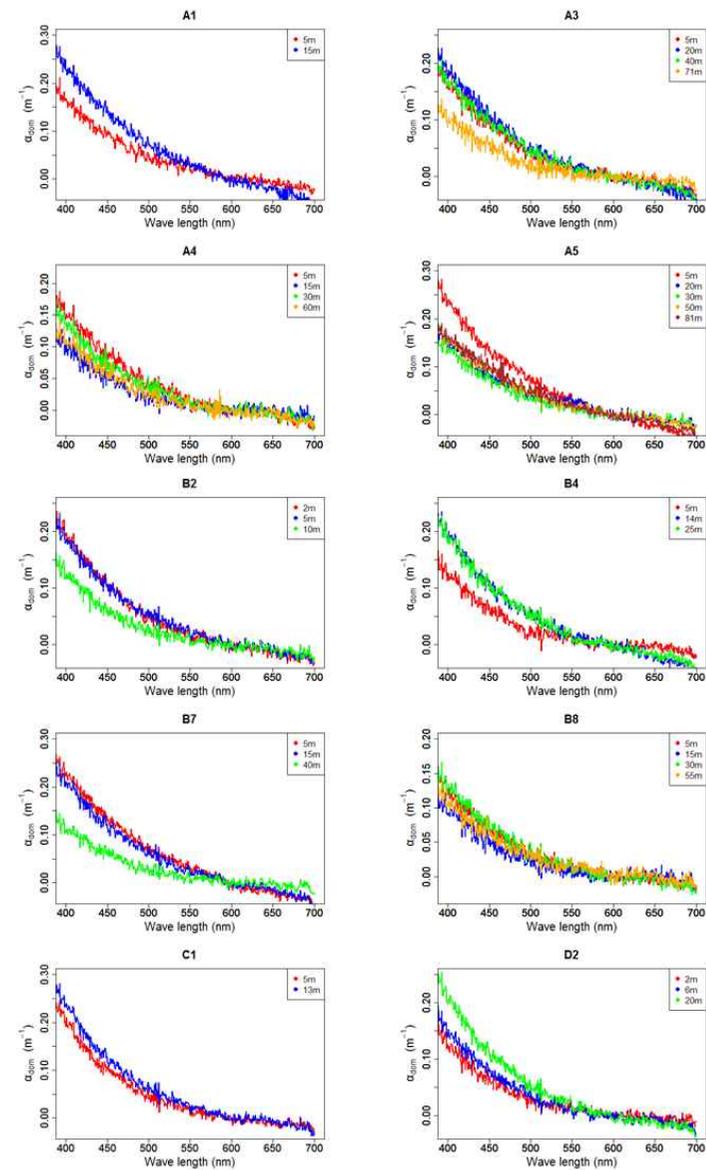
<그림 2-2-9> 2014년 5월 각 샘플층의 식물플랑크톤 비 흡광계수(a^*_{sp})



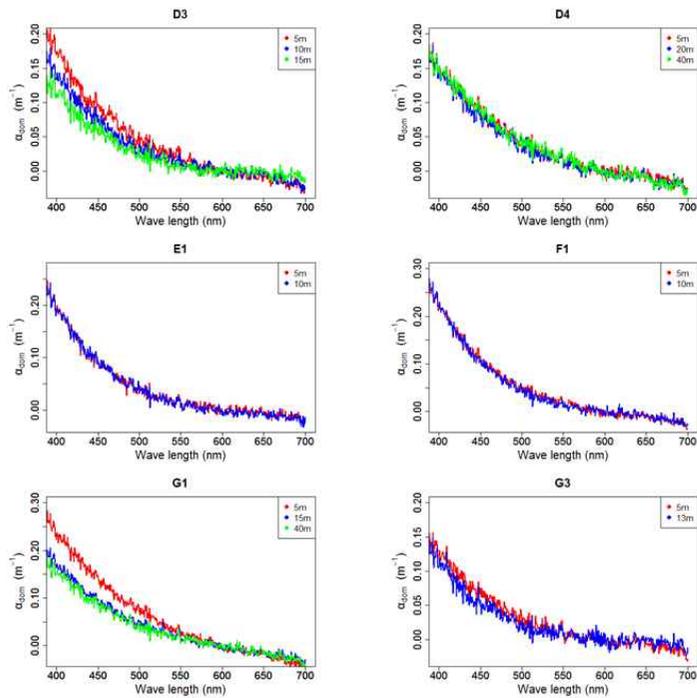
<그림 2-2-9> Continued

(6) 용존 유기물(CDOM)의 흡광

<그림 2-2-1>은 2014년 5월 현장관측을 통해 얻은 400 ~ 700 nm 영역에서 용존 유기물의 흡광계수(a_{cdom}) 스펙트럼을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 400 nm 으로 갈수록 용존 유기물의 흡광계수가 커짐을 알 수 있다.



<그림 2-2-10> 2014년 5월 각 샘플층의 용존 유기물 흡광계수(a_{cdom})



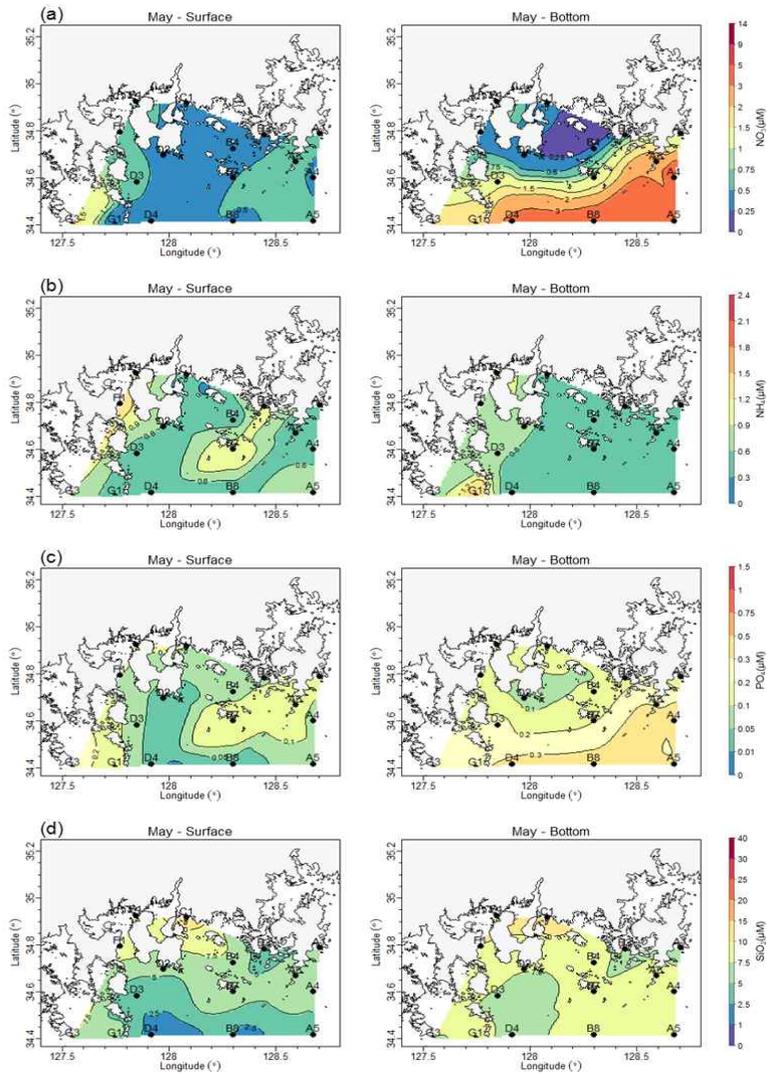
<그림 2-2-10> Continued

(7) 영양염의 공간적 분포

연구해역에서 2014년 5월에 적조 탐지 정점을 포함하여 관측된 질산염(NO_3), 암모늄(NH_4), 인산염(PO_4) 그리고 규산염(SiO_2)의 공간적 분포 특성은 <그림 2-2-11>과 같다.

2014년도 8월의 표층에서의 질산염 농도는 $0.30 \sim 1.58 \mu M$ (평균 $0.57 \pm 0.31 \mu M$), 저층에서 $0.28 \sim 4.14 \mu M$ (평균 $1.72 \pm 1.39 \mu M$) 범위로 나타났다. 표층의 경우 섬진강 영향 주변 해역에서 높은 농도를 보이지만 섬진강 영향 주변 해역을 제외하면 대체적으로 뚜렷한 공간변화는 보이지 않았다. 저층의 경우 표층과 달리 연안해역에서 외해역으로 갈수록 증가되는 양상을 보였다. 표층과 비교하여 저층의 농도가 비교적 높고, 이는 저층 냉수괴의 형성·유입으로 인해 동쪽해역에서 상대적으로 높게 나타나는 것으로 해석된다.

암모늄 농도는 표층에서 $0.42 \sim 1.39 \mu M$ (평균 $0.68 \pm 0.30 \mu M$), 저층에서 $0.38 \sim 1.35 \mu M$ (평균 $0.63 \pm 0.28 \mu M$) 범위로 나타났다. 표층의 경우 섬진강 영향 주변 해역에서 높은 농도를 보였고 육지도 주변 해역에서도 높은 농도를 보였다. 저층의 경우 섬진강 영향 주변 해역을 포함한 서쪽 해역을 제외하면 대체적으로 뚜렷한 공간변화는 보이지 않았다. 표층과 비교하여 저층의 농도는 그리 큰 차이를 보이지 않았다. 인산염 농도는 표층에서 $0.03 \sim 0.25 \mu M$ (평균 $0.10 \pm 0.06 \mu M$), 저층에서 $0.09 \sim 0.39 \mu M$ (평균 $0.23 \pm 0.10 \mu M$) 범위로 나타났다. 표층의 경우 섬진강 영향 주변 해역을 포함한 서쪽해역과 육지도 부근 해역에서 높은 농도를 보였다. 저층의 경우 표층과 달리 연안해역에서 외해역으로 갈수록 높은 농도를 보이는 것으로 나타났다. 표층과 비교하여 저층의 농도가 비교적 높으며 이는 질산염과 유사한 패턴을 보인다. 규산염 농도는 표층에서 $1.65 \sim 11.12 \mu M$ (평균 $5.81 \pm 2.47 \mu M$), 저층에서 $6.25 \sim 11.46 \mu M$ (평균 $8.30 \pm 1.49 \mu M$) 범위로 나타났다. 표층의 경우 연안해역에서 외해역으로 갈수록 낮은 농도를 보였다. 저층의 경우 표층과 달리 섬진강과 남강 영향 주변 해역을 제외하고는 비교적 균질한 농도를 보였다. 표층과 비교하여 저층의 농도는 비교적 높게 나타났다.



<그림 2-2-11> 2014년 5월 표층 저층의 영양염 농도(μM), (a) 질산염(NO_3), (b) 암모늄(NH_4), (c) 인산염(PO_4), (d) 규산염(SiO_2)의 공간적 분포

나. 2014년 여름 관측

이번 2014년도 8월 관측은 2014년 8월 25일부터 8월 30일까지 국립공원 연구1호 조사선에서 이루어졌다. 총 조사 정점은 적조발생 정점 5개를 포함하여 총 20개이며 각 수층별로 이루어졌다. 2014년 8월 관측 자료와 비교를 위해 2013년 8월 5일부터 8월 14일까지의 총 28정점에서 시행된 CTD 관측 자료를 여수 국립공원 관리공단으로부터 제공받았다.

(1) CTD 관측 자료의 공간적 분포

연구해역에서 2013년과 2014년 8월에 관측된 수온, 염분, 밀도, 용존산소량의 공간적 분포 특성은 <그림 2-2-12>, <그림 2-2-13>과 같다.

2013년도 8월의 표층수온은 17.80 ~ 26.19°C (평균 23.03±1.98°C), 저층수온은 14.43 ~ 22.07°C (평균 16.77±2.37°C) 범위로 나타났다. 표층수의 경우 봄철 5월과 달리 연안 해역에서 외해역으로 갈수록 높은 값을 보였으며 저층에서는 이와 반대로 연안 해역에서 높은 값을 보였다. 그 결과 연안해역보다 외해역에서 보다 강한 성층 구조를 나타냈다. 2014년도 5월의 표층수온은 22.16 ~ 24.71°C (평균 23.68±0.84°C), 저층수온은 14.41 ~ 23.41°C (평균 18.96±3.45°C) 범위로 나타났다. 2014년의 수온은 표층에서 비교적 균질한 값을 나타냈으나 저층에서 연안 해역에서 외해역으로 갈수록 점점 낮아지는 수온경사를 보였다. 결국 외해역의 저층수 수온은 표층수와 다르게 봄철의 저층수온을 그대로 유지하는 것으로 판단된다. 연안해역의 낮은 수심과 강한 조석작용에 의해 혼합층이 발달하지만 외해역의 경우 상대적으로 깊은 수심으로 인하여 표층만 수온이 증가하거나 저층수의 영향으로 강한 성층이 형성되는 것으로 보인다. 따라서 여름철 경우 연안해역과 외해역 사이에 강한 수온전선이 발달하는 것으로 해석된다.

2013년도 8월의 표층염분은 31.95 ~ 33.77psu (평균 32.69±0.46psu), 저층염분은 32.02 ~ 34.40psu (평균 33.53±0.66psu) 범위를 나타냈다. 2013년 8월의 표층염분은 육지로부터의 담수 유입으로 연안 해역에서 낮은 농도를 보이지만 저층의 경우 섬진강 영향 주변 해역을 제외하고 비교적 균질한 값을 나타내었다. 2014년도 8월의 표층염분은 28.92 ~ 32.52psu (평균 31.20±1.24psu), 저층염분은 29.52 ~ 34.16psu (평균 32.87±1.22psu) 범위로 나타났다. 2014년도 8월 염분은 2013년도 8월의 염분과 달리 더 낮은 염분을 나타내었으며 육지와 가까운 연안 해역에서 외해역으로 갈수록 대체적으로 증가하는 염분경사를 보였다.

밀도의 범위는 2013년도 8월 표층에서 20.88 ~ 24.37 kgm^{-3} (평균 22.17±0.79

kgm^{-3}), 저층에서 22.14 ~ 25.78 kgm^{-3} (평균 24.57±1.13 kgm^{-3})로 나타났으며 2014년 8월 표층에서 19.18 ~ 22.12 kgm^{-3} (평균 20.87±0.99 kgm^{-3}), 저층에서 19.71 ~ 25.64 kgm^{-3} (평균 23.48±1.79 kgm^{-3})로 나타났다. 수온과 염분 분포범위에 따라 밀도 또한 심진강 영향 주변 해역에서 낮게 나타났으며 2014년도 8월의 저층의 경우 훨씬 강한 밀도 경사를 보였다.

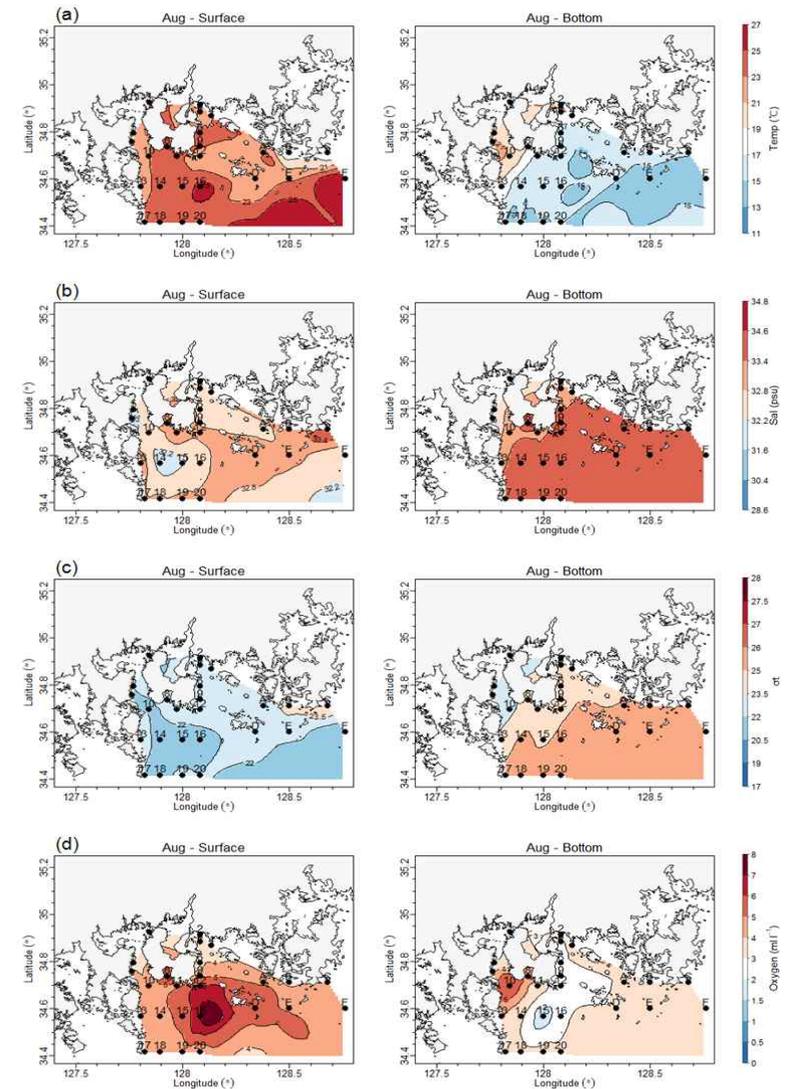
용존산소량은 2013년 8월과 2014년 8월이 두드러지게 다른 분포범위를 보였고 2014년 8월의 범위가 현저히 낮게 나타났다. 2013년도 8월의 용존산소량은 표층에서 3.25 ~ 7.02 ml^{-1} (평균 4.50±0.90 ml^{-1}), 저층에서 1.69 ~ 5.74 ml^{-1} (평균 3.32±0.73 ml^{-1})로 나타났고 2014년도 8월의 용존산소량은 표층에서 0.64 ~ 1.54 ml^{-1} (평균 0.89±0.24 ml^{-1}), 저층에서 0.43 ~ 1.46 ml^{-1} (평균 0.77±0.25 ml^{-1})로 나타났다. 2013년도에는 8월이 5월보다 낮은 값을 나타내었으나 2014년도 8월의 경우 5월보다 높은 값을 나타내었다.

(2) 엽록소 a 농도의 공간적 분포

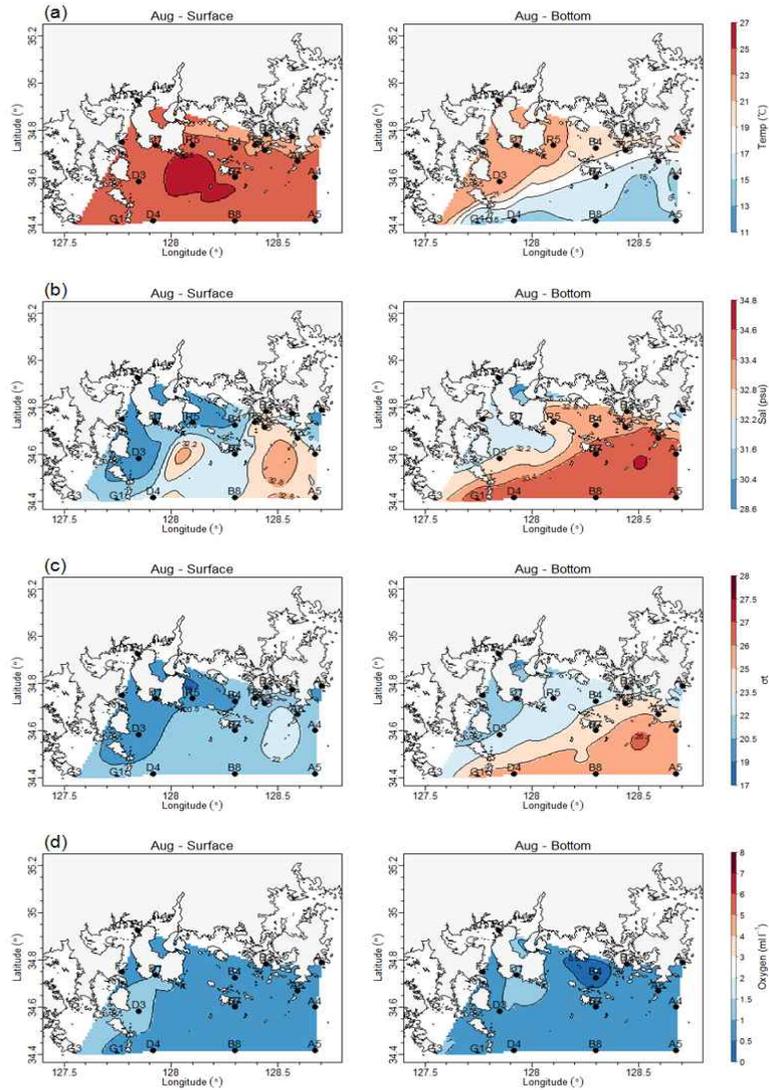
2014년 8월의 엽록소 a 농도는 5월의 엽록소 a 농도에 비해 관측위치에 따라 더욱 다양하게 나타났다. <그림 2-2-14>에서 나타나듯이 적조발생 정점들(R 정점)을 제외하고 볼 때 공간적으로 육지의 영향이 큰 연안해역에서 높게 나타났고 대마난류의 영향을 받는 외해역에서 낮게 나타났는데 특히 적조발생 정점들을 제외한 나머지 정점 중 D3 정점이 다른 정점들에 비해 매우 높게 나타났다. 적조발생 정점을 제외한 나머지 정점에서의 범위를 살펴보면 전체 엽록소 a 농도는 2014년 8월 표층에서 0.24 ~ 18.92 mgm^{-3} (평균 3.46±4.80 mgm^{-3}), 저층에서 0.10 ~ 3.20 mgm^{-3} (평균 1.10±1.02 mgm^{-3})로 나타났다. 5 μm 엽록소 a 농도는 표층에서 0.03 ~ 11.55 mgm^{-3} (평균 2.42±3.22 mgm^{-3})로 전체 엽록소 a 농도의 약 70%를 차지하는 것으로 나타났다. 저층에서의 5 μm 엽록소 a 농도는 0.04 ~ 2.12 mgm^{-3} (평균 0.84±0.80 mgm^{-3})로 나타났으며 전체 엽록소 a 농도의 약 76%를 차지하는 것으로 나타났다. 특히 표층의 경우 5월보다 두드러지게 8월의 경우 대체적으로 연안해역에서 외해역으로 갈수록 5 μm 엽록소 a 농도 비율이 점점 작아지는 것으로 나타났다.

<그림 2-2-15>를 보면 표층에서 적조발생정점인 R 정점의 전체 엽록소 a 농도와 5 μm 엽록소 a 농도는 나머지 정점에 비해 매우 높게 나타났으며 R5 정점에서 각각 최대 293.27 mgm^{-3} , 51.29 mgm^{-3} 로 나타났다. R2 정점을 제외하고 모든 R 정점에서의 적조종은 1 ml 당 매우 높은 개체수를 나타내었는데 R2 정점의 경우 적조종이 해류를 타

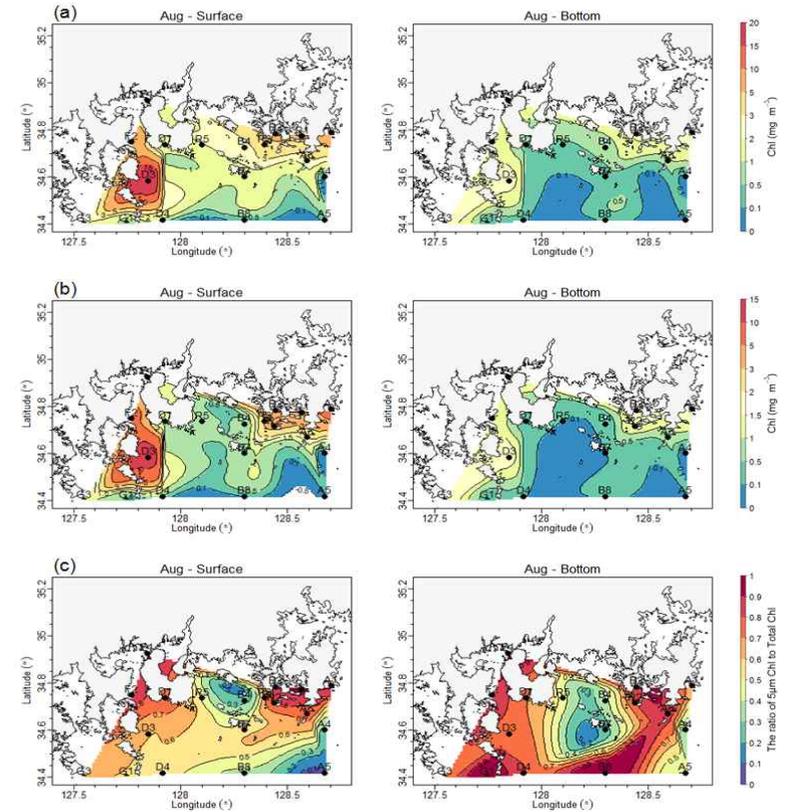
고 빠르게 이동하여 관측 시 탐지시기를 놓쳤기 때문에 낮게 나타난 것으로 보인다.



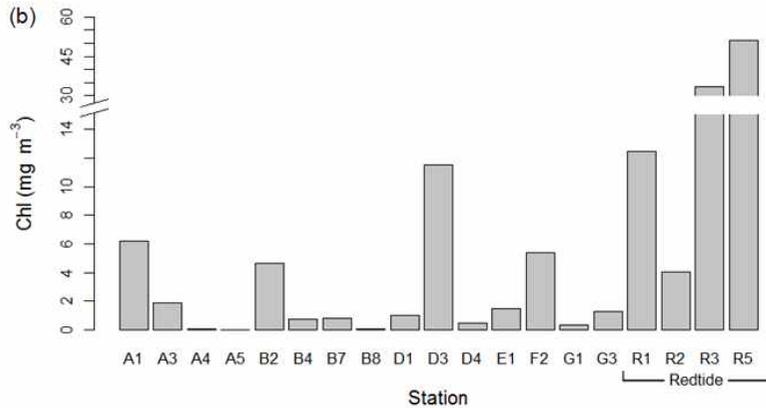
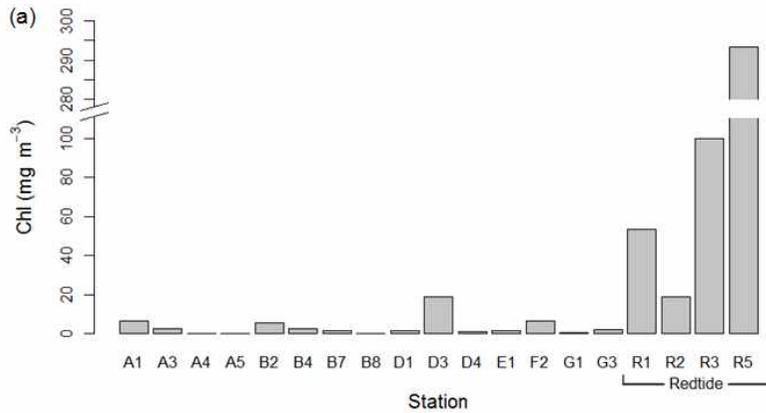
<그림 2-2-12> 2013년 8월 표층과 저층의 (a) 수온(°C), (b) 염분(psu), (c) 밀도(σ_t , kgm^{-3}), (d) 용존산소량($ml l^{-1}$)의 공간적 분포



<그림 2-2-13> 2014년 8월 표층과 저층의 (a) 수온($^{\circ}\text{C}$), (b) 염분(psu), (c) 밀도(σ_t , kgm^{-3}), (d) 용존산소량(ml l^{-1})의 공간적 분포



<그림 2-2-14> 2014년 8월 표층과 저층의 (a) 전체 엽록소 a 농도(mgm^{-3}), $5 \mu\text{m}$ 엽록소 a 농도(mgm^{-3}) (b), 전체 엽록소 a 농도에 대한 $5 \mu\text{m}$ 엽록소 a 농도 비율 (c)의 공간적 분포

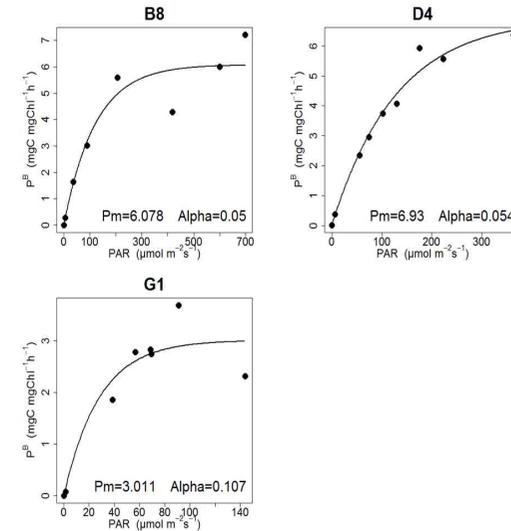


<그림 2-2-15> 적조발생정점을 포함한 2014년 8월 표층의 (a) 전체 엽록소 *a* 농도(mgm^{-3}), (b) $5\ \mu m$ 엽록소 *a* 농도(mgm^{-3})

(3) 광합성-광도 매개변수 산출

2014년 8월 P-I curve에서 산출된 α 값과 P_m^B 값은 관측정점 중 일부정점(B8 정점, D4 정점, G1 정점)에서 산출하였다. 이 정점들에서의 α 값의 범위는 $0.050 \sim 0.107\ mgCmgChla^{-1}h^{-1}(\mu molm^{-2}s^{-1})^{-1}$, P_m^B 값은 $3.011 \sim 6.930\ mgCmgChla^{-1}h^{-1}$ 로 해역마다 다르게 나타났다(<그림 2-2-16>). Eppley(1972)는 다양한 해양환경에서 측정하

P_m^B 값은 $0.4 \sim 10.0\ mgCmgChla^{-1}h^{-1}$ 의 범위를 갖는다고 발표하였으며 이번 관측에 의해 산출된 P_m^B 값은 모두 이 범위에 속하고 있다. B8 정점의 경우 2014년 5월과 8월 동일한 관측정점임에도 불구하고 P_m^B 값이 상대적으로 큰 차이를 보이는데 8월의 P_m^B 값이 5월의 P_m^B 값의 약 2배로 나타났다. 이는 이 지역에 서식하고 있는 식물플랑크톤의 생리적인 상태를 결정할 수 있는 영양염 등의 다른 요인이 작은 규모 내에서도 복잡한 양상을 띠고 있음을 시사한다. 또한, 5월과 8월 각각의 α 값과 P_m^B 값의 관계를 살펴보면 전반적으로 α 값이 크면 P_m^B 값이 작게 나타나는 반비례 관계를 보였는데 이에 대해서는 좀 더 분석이 필요하다.



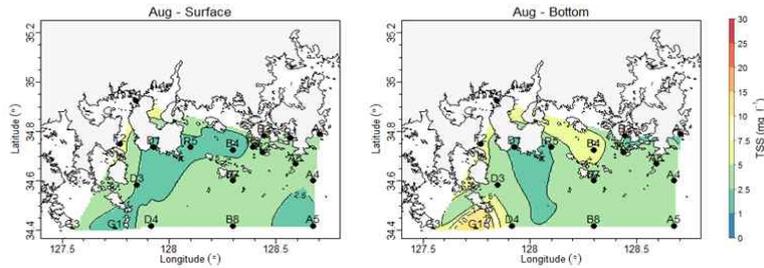
<그림 2-2-16> 2014년 8월 P-I curve

(4) 총 부유물질량(TSS)의 공간적 분포

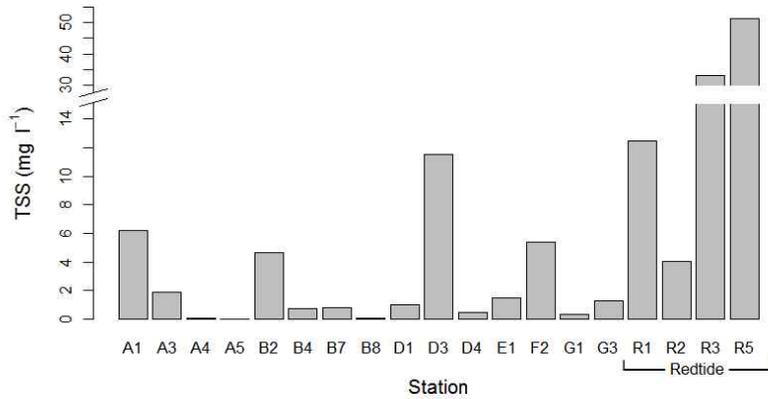
2014년 8월에 측정된 총 부유물질량은 적조발생 정점을 제외하고 볼 때 표층에서 $1.20 \sim 6.40\ mgL^{-1}$ (평균 $3.16 \pm 1.40\ mgL^{-1}$), 저층에서 $1.80 \sim 14.33\ mgL^{-1}$ (평균 $4.97 \pm 3.07\ mgL^{-1}$) 범위로 대체적으로 균질하게 나타났으며 저층에서 보다 높게 나타났다(<그림 2-2-17>). 저층의 경우 5월 봄철과 마찬가지로 섬진강과 같은 강물 유입이 되는 서쪽의

연안해역에서 높게 나타났다. 다만, 5월 봄철과 8월 여름철을 비교하면 봄철이 상대적으로 크게 나타나는데 이 원인에 측정 여과지의 차이가 포함된 것으로 판단된다.

<그림 2-2-18>을 보면 표층에서 적조발생 정점인 R 정점 중 R3 정점과 R5 정점에서 총 부유물질량은 나머지 정점에 비해 매우 높게 나타났으며 R5 정점에서 최대 36.00 mg l^{-1} 로 나타났다. R2 정점의 경우 적조종이 해류를 타고 빠르게 이동하여 관측 시 탐지시기를 놓쳤기 때문에 낮게 나타난 것으로 보인다.



<그림 2-2-17> 2014년 8월 표층과 저층의 총 부유물질량(mg l^{-1})의 공간적 분포

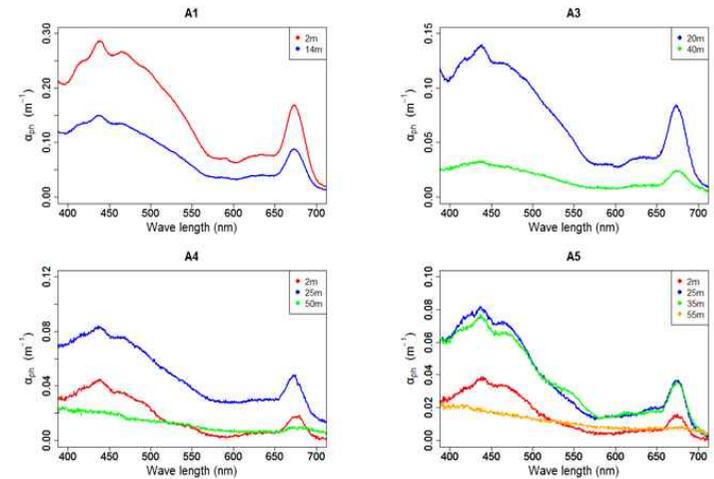


<그림 2-2-18> 적조발생정점을 포함한 2014년 8월 표층의 총 부유물질량(mg l^{-1})

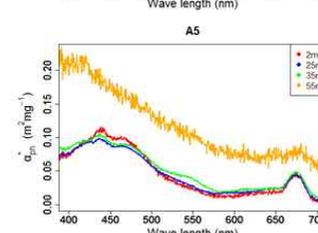
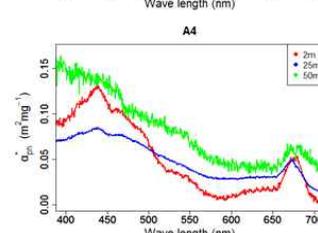
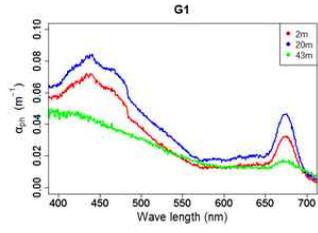
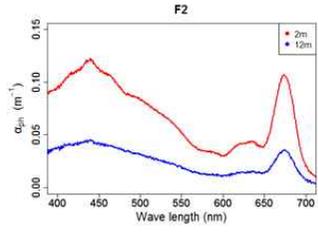
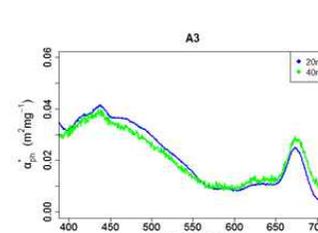
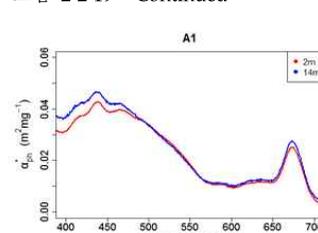
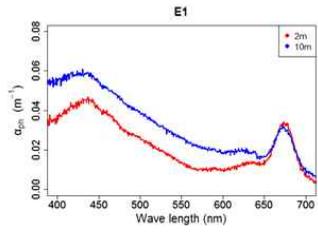
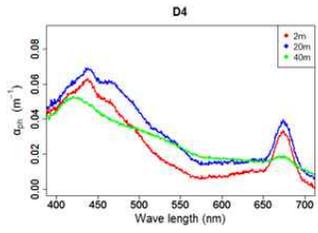
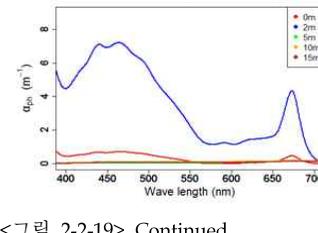
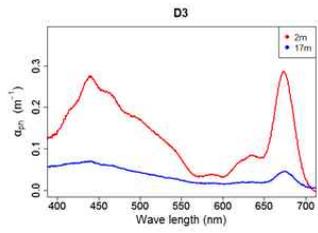
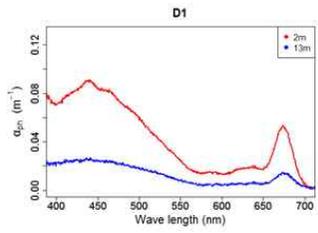
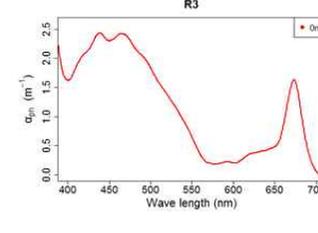
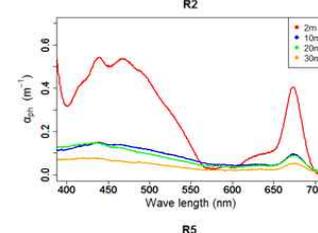
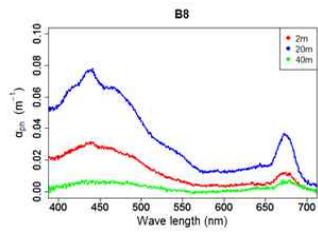
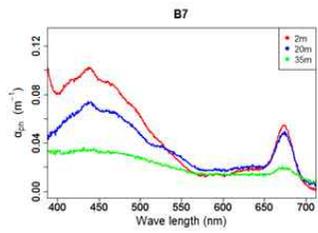
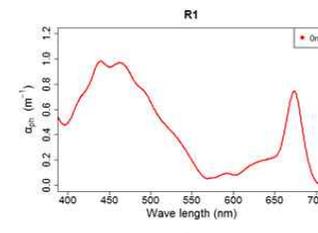
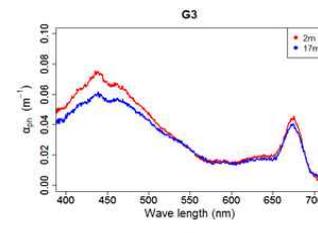
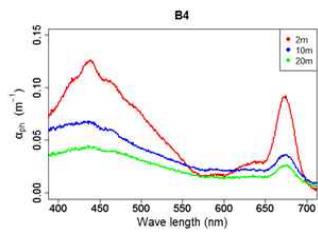
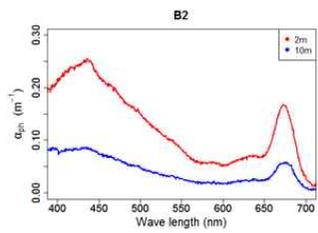
(5) 입자상 물질의 흡광(AP)

<그림 2-2-19>와 <그림 2-2-20>은 각각 2014년 8월 현장관측을 통해 얻은 파장 400 ~ 700 nm 영역에서 식물성 플랑크톤의 광 흡수 계수(a_{ph})와 비 흡광계수(a^*_{ph}) 스펙트럼을 나타낸 그림이다.

파장 440 nm 부근에서 엽록소 흡광 peak와 파장 670 nm 부근에서 엽록소 형광 peak가 잘 나타나는 스펙트럼의 형태를 보여주고 있다. 엽록소 흡광영역의 중심 파장대인 440 nm 부근에서의 a_{ph} 값의 분포 범위는 $0.007 \sim 0.287 \text{ m}^{-1}$ 이고 a^*_{ph} 값은 $0.015 \sim 0.213 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1}$ 의 분포범위를 나타냈고, 엽록소 흡광영역의 중심 파장대인 670 nm 부근에서의 a_{ph} 값의 분포 범위는 $0.007 \sim 0.288 \text{ m}^{-1}$ 이고 a^*_{ph} 값은 $0.012 \sim 0.087 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1}$ 의 분포범위가 나타났다. <그림 2-2-19>의 R1, R2, R3, R5 정점은 적조가 발생했던 해역으로 440 nm 부근에서의 a_{ph} 값 $0.040 \sim 7.127 \text{ m}^{-1}$, 670 nm 부근에서의 a_{ph} 값이 $0.052 \sim 4.336 \text{ m}^{-1}$ 로 엽록소의 농도가 매우 컸기 때문에 큰 분포범위를 나타낸다.



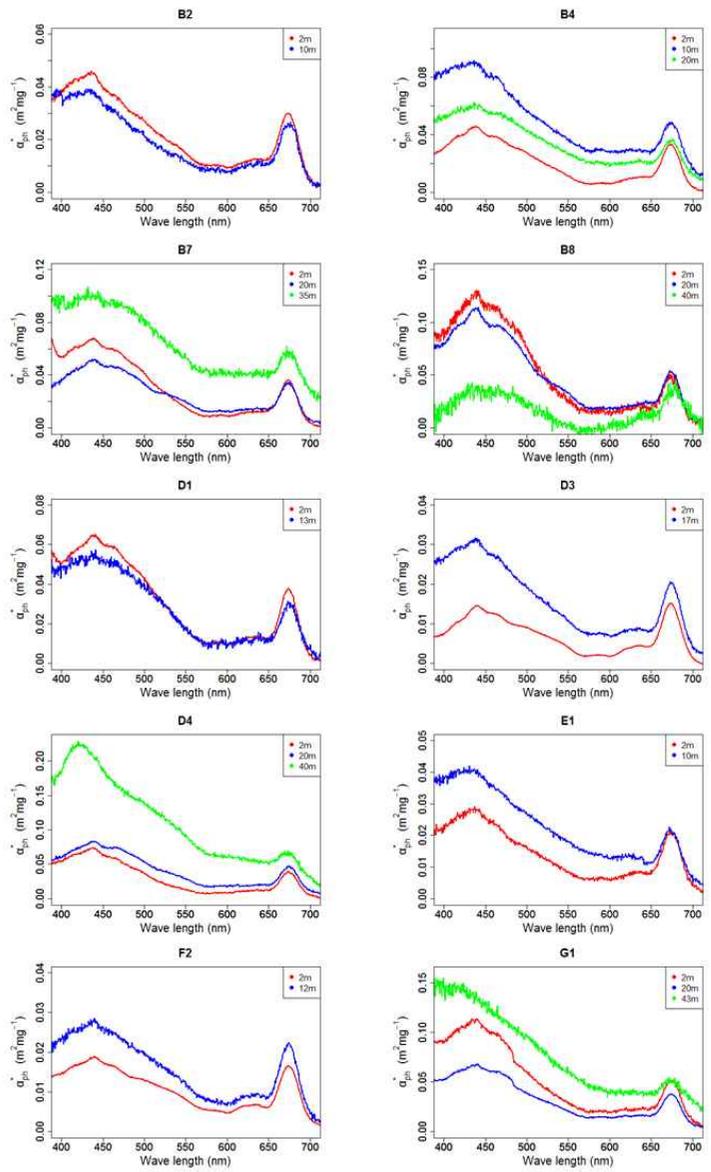
<그림 2-2-19> 2014년 5월 각 샘플층의 식물플랑크톤 흡광계수(a_{ph})



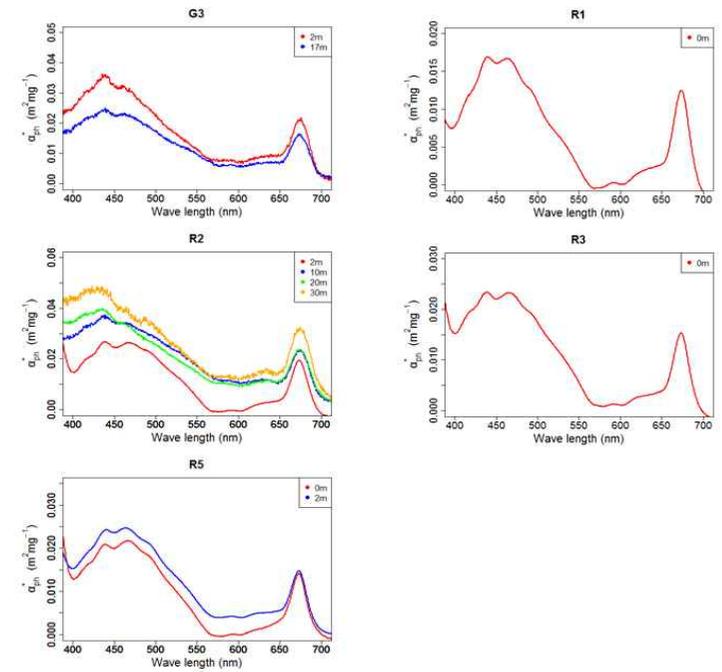
<그림 2-2-19> Continued

<그림 2-2-19> Continued

<그림 2-2-20> 2014년 8월 각 샘플층의 식물플랑크톤 비 흡광계수(a_{ph}^*)



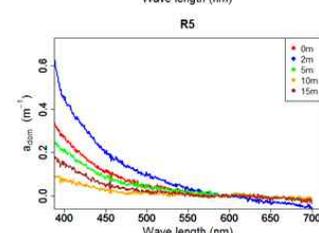
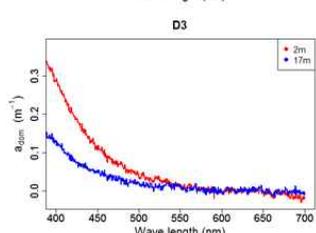
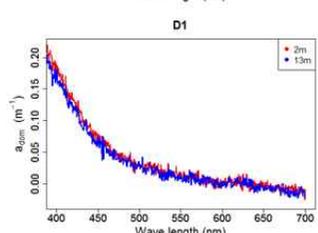
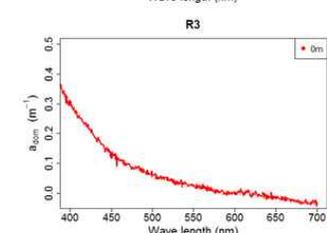
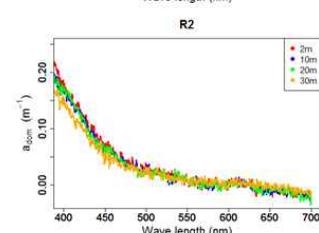
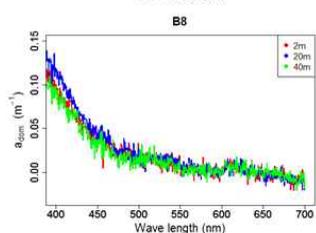
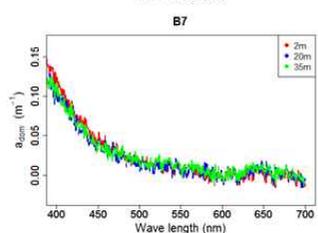
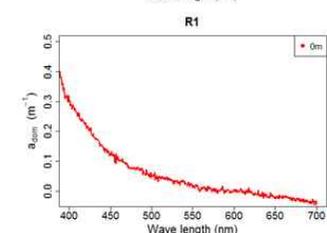
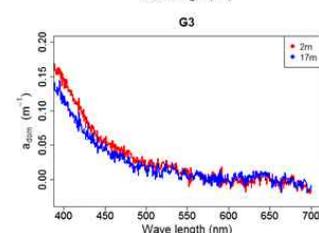
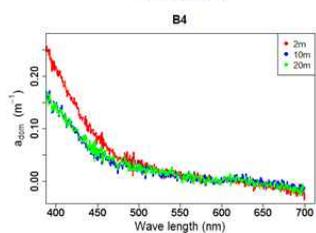
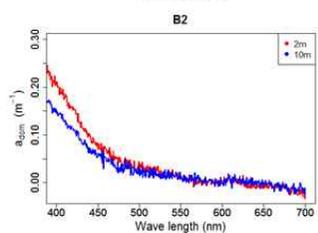
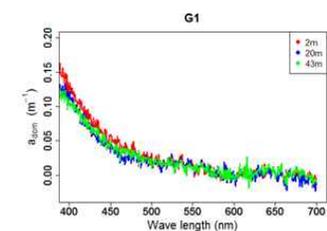
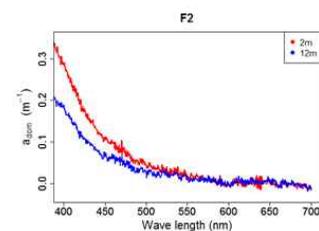
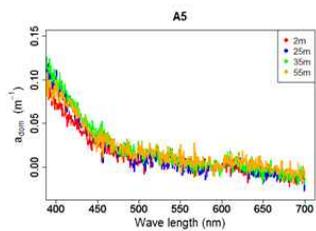
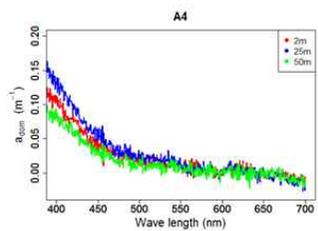
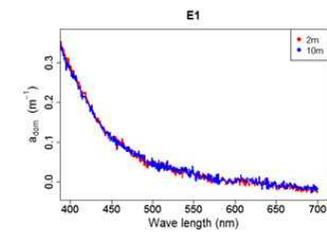
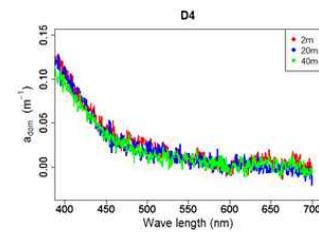
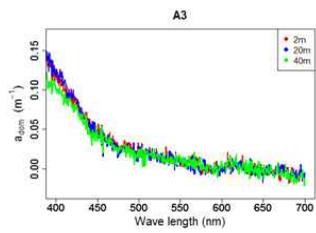
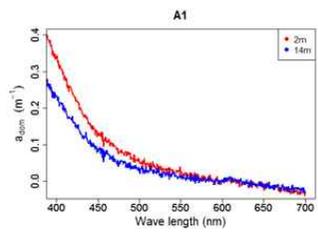
<그림 2-2-20> Continued



<그림 2-2-20> Continued

(6) 용존 유기물(CDOM)의 흡광

<그림 2-2-21>은 2014년 8월 현장관측을 통해 얻은 400 ~ 700 nm 영역에서 용존 유기물의 흡광계수(a_{cdom}) 스펙트럼을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 400 nm 으로 갈수록 용존 유기물의 흡광계수가 커짐을 알 수 있다. R1, R2, R3, R5 정점은 적조가 발생했던 해역으로 대체적으로 a_{cdom} 값이 적조가 발생하지 않은 해역보다 큰 값을 보였다.



<그림 2-2-21> 2014년 5월 각 샘플층의 용존 유기물 흡광계수(a_{dom})

<그림 2-2-21> Continued

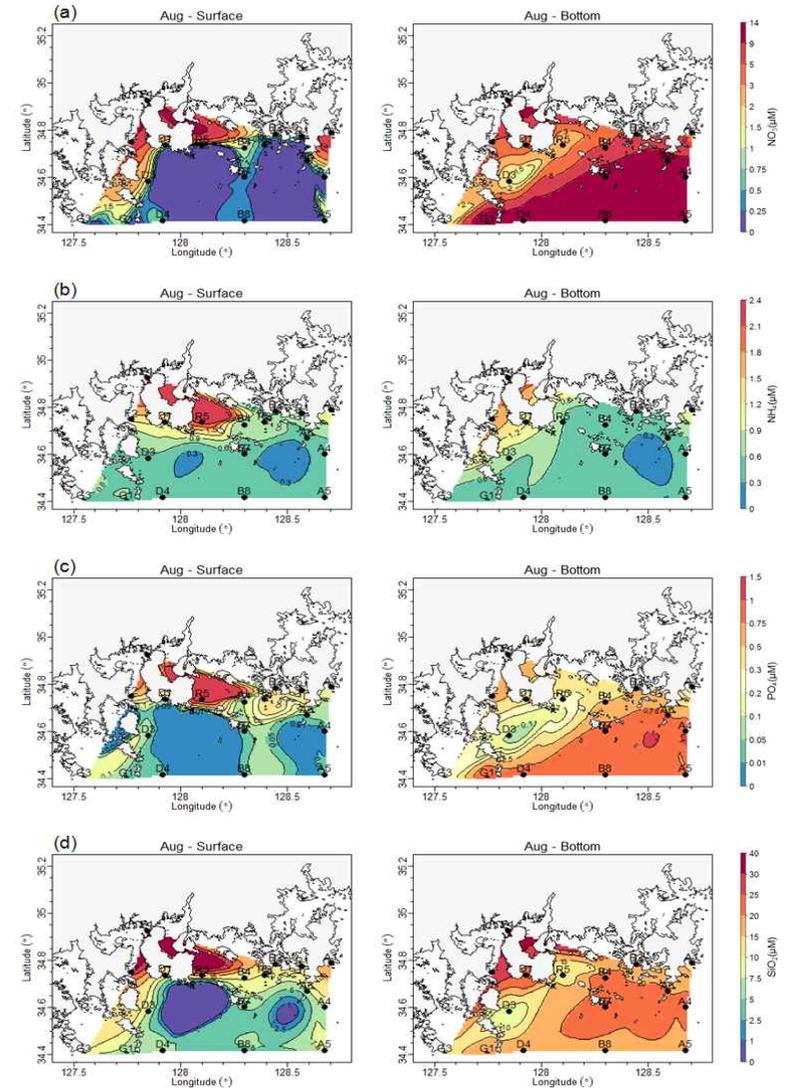
(7) 영양염

연구해역에서 2014년 8월에 관측된 질산염(NO_3), 암모늄(NH_4), 인산염(PO_4) 그리고 규산염(SiO_2)의 공간적 분포 특성은 <그림 2-2-22>와 같다.

2014년도 8월의 표층에서의 질산염 농도는 $0.03 \sim 11.21 \mu M$ (평균 $2.34 \pm 3.67 \mu M$), 저층에서 $1.54 \sim 13.87 \mu M$ (평균 $8.22 \pm 4.56 \mu M$) 범위로 나타났다. 표층의 경우 섬진강 영향 주변 해역을 포함한 서쪽 해역에서 높은 농도를 보였고 외해역과 비교하여 큰 차이를 나타냈다. 저층의 경우 표층과 달리 서쪽 연안해역에서 외해역으로 갈수록 높은 농도를 보이는 것으로 나타났다. 표층과 비교하여 저층의 농도가 매우 높게 나타났다.

암모늄 농도는 표층에서 $0.39 \sim 2.39 \mu M$ (평균 $0.76 \pm 0.55 \mu M$), 저층에서 $0.36 \sim 2.16 \mu M$ (평균 $0.75 \pm 0.55 \mu M$) 범위로 나타났다. 표층의 경우 섬진강과 남강 영향 주변 해역에서 매우 높은 농도를 보였고 저층의 경우 또한 섬진강 영향 주변 해역을 포함한 서쪽 해역에서 높게 나타났다. 이들 해역을 제외하면 대체적으로 뚜렷한 공간변화는 보이지 않았다. 인산염 농도는 표층에서 $0.02 \sim 1.26 \mu M$ (평균 $0.14 \pm 0.19 \mu M$), 저층에서 $0.09 \sim 0.96 \mu M$ (평균 $0.61 \pm 0.30 \mu M$) 범위로 나타났다. 표층의 경우 연안해역에서 높은 농도를 보였으며 적조 탐지 정점들 또한 높은 농도를 보였다. 저층의 경우 표층과 달리 서쪽 연안해역에서 외해역으로 갈수록 높은 농도를 나타냈다. 표층과 비교하여 저층의 농도가 비교적 높으며 이는 질산염과 유사한 패턴을 보였다. 규산염 농도는 표층에서 $4.62 \sim 36.41 \mu M$ (평균 $11.88 \pm 9.34 \mu M$), 저층에서 $8.48 \sim 36.48 \mu M$ (평균 $20.18 \pm 6.45 \mu M$) 범위로 나타났다. 표층이 저층 모두 연안해역에서 외해역으로 갈수록 낮은 농도를 보였으며 저층이 표층보다 높은 것으로 나타났다. 적조 탐지 정점에서도 외해보다는 높은 농도를 나타냈는데 적조종 번성이 이와 관련하여 어떠한 영향을 받는지 좀 더 살펴볼 필요가 있다.

일반적으로 저층에서 암모늄을 제외하고 질산염, 인산염, 규산염은 봄철 농도에 비해 매우 높게 나타났다. 이를 통하여 이 해역에서의 영양염 순환을 살펴볼 수 있는데 여름철에 담수로부터 유입된 많은 양의 영양염과 저층수의 높은 영양염이 모두 소비되지 못하고 저층에 계속 축적된 결과로 판단된다.



<그림 2-2-22> 2014년 8월 표층, 저층의 영양염 농도(μM), (a) 질산염(NO_3), (b) 암모늄(NH_4), (c) 인산염(PO_4), (d) 규산염(SiO_2)의 공간적 분포

제 3 절 적조종 배양

1. 적조종 특성

해양에서 적조현상을 일으키는 해양생물은 동·식물성 플랑크톤, 원생동물, 세균 등이 있으나 식물성 플랑크톤이 주류를 이루고 있다. 이 연구에서 다루고 있는 적조종은 *C. polykrikoides*로 편모를 가지고 있어 유영능력을 가진 와편모조류이다. 이 종은 우리나라 해역에서 적조를 발생시키는 주요 종으로서 보통 6월에서 9월까지 나타난다. 광 조건이 좋고, 영양염류가 풍부할 때 대 증식하기 때문에 주로 8월과 9월 경 고밀도로 나타나며, 유해독성물질을 가지고 있어 연안에서 어류 피해를 일으킨다. *C. polykrikoides*는 길이 30 ~ 40 μm , 폭 20 ~ 30 μm , 형태는 타원형이고 보통 8개 이하의 균체를 형성한다.

2. 배양 방법

실험에 사용한 *C. polykrikoides*(<그림 2-3-1>)는 한국 남해안에서 채집된 종으로 한국해양과학기술원 남해연구소 해양시료도서관에서 2014년 7월 분양받았다. 이 종은 60 ml Culture Flask에 배양하였고, 배지는 Sigma사에서 시판하는 Guillard's(F/2) Marine Water Enrichment Solution(without silicate)과 autoclave로 멸균한 여과해수를 혼합하여 사용하였다. *C. polykrikoides*가 성장함에 따라 개체수가 늘어가는 주기에 맞추어 약 2 ~ 4주 간격으로 계대배양을 하였다. 배양 조건은 온도 20°C, 광주기 14L:10D, 광도 약 110 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 설정하였다.



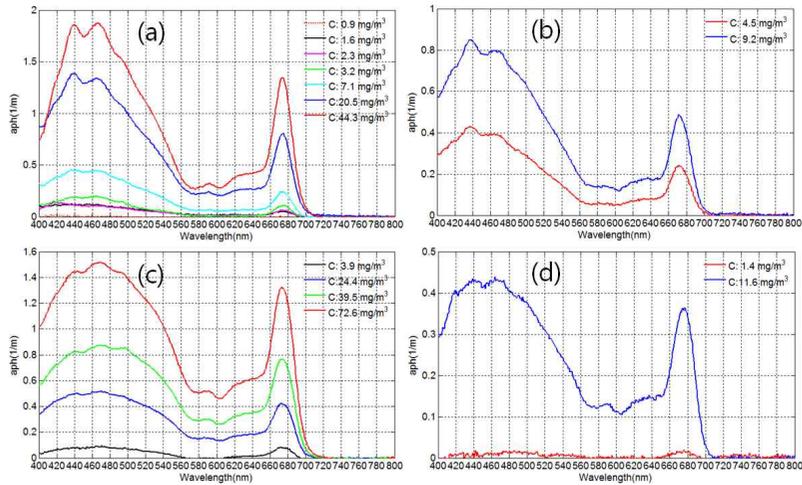
<그림 2-3-1> 실험실에서 배양하고 있는 *C. polykrikoides*

3. *C. polykrikoides*의 흡광도 분석

단일배양을 실시한 *C. polykrikoides* 흡광 분석은 앞에서 설명하였던 입자상 물질의 흡광 분석 방법과 동일한 방법으로 실시하였다. 배지를 만드는데 사용한 여과해수로 reference sample을 만들었으며, 측정할 *C. polykrikoides* 샘플은 다양한 비율로 희석하거나 농축하여 각각 다른 엽록소 *a* 농도로 여과할 샘플을 만들었으며, 엽록소 *a*는 Aquafuor handheld fluorometer로 측정하였다. 각각 측정된 엽록소 *a* 농도를 기록해두고 다양한 비율의 sample을 100 ml 씩 Whatman 25 mm GF/F에 여과시켰다. 여과가 끝난 여과지는 라벨링을 한 35 mm petri-dish에 넣고 호일로 빛을 차단시켰다. *C. polykrikoides* 흡광 측정은 여과 직 후 바로 실시하였고, 앞서 제시하였던 입자상 물질의 optical density를 측정할 때와 동일한 방법으로 총 입자상 물질의 흡광도(OD_{total}) 측정을 실시한 후 입자상 부유물질의 흡광도(OD_{ss}) 측정을 수행하였다. 이와 같은 방법으로 얻어진 데이터는 앞서 제시한 계산법과 동일한 방법으로 $a_{ph}(m^{-1})$, $a_{ph}^*(m^2/mg)$ 값을 산출하였다.

4. 결과

<그림 2-3-2>은 실험실 배양된 *C. polykrikoides* 적조종 흡광뿐만 아니라 서로 다른 세 개의 종에 대해서 식물플랑크톤 흡광을 측정하였다(*Alexandrium tamarense*, *Scrippsiella trochoidea*, *Akashiwo sanguinea*). 실험실에서 배양된 대부분의 종들은 440 nm와 680 nm 부근에서 공통적으로 주 흡광대를 나타냈으며, 580 nm 부근에서 최저값을 보였다. 그리고 종들과 농도에 따라 차이를 보이지만 460 nm와 590 nm 부근에서 보조 흡광대를 나타냈다. 안 등(2009) 연구에서는 530 nm 부근도 보조 흡광대가 나타나는 것으로 보고 되었지만, 본 연구에서는 두 개의 보조 흡광대를 제외하고는 나타나지 않았다. 그리고 두 개의 보조 흡광대는 식물플랑크톤 농도가 증가 할수록 뚜렷한 피크를 나타내고 있다. 안 등(2009)은 대한민국 여름철 적조를 발생 시키는 와편모조류의 경우 비흡광 및 비역산란 값이 다른 분류군 보다 낮게 나타나지만, 녹조류의 경우 높은 흡광계수와 폭이 좁은 형태의 흡광스펙트럼을 나타내고, 규조류는 낮은 비흡광계수 나타낸다고 보고했다. 이런 결과들은 위성을 활용한 적조 탐지에 유용한 입력 변수로 활용될 수 있다.



<그림 2-3-2> 배양된 (a) *C. polykrikoides*, (b) *Alexandrium tamarense*, (c) *Scrippsiella trochoidea*, (d) *Akashiwo sanguinea* 식물플랑크톤 흡광계수(a_{ph})

제 4 절 적조 위성 빅데이터

1. 해색위성

적조 탐지 및 기존 알고리즘 평가 및 개발을 위해 수집된 해색 위성자료는 SeaWiFS , MODIS Aqua와 Terra이다(<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). SeaWiFS 해색위성 자료는 2002년부터 2004년까지 적조가 발생한 기간 전후를 포함한 일일 자료를 수집했고, MODIS 해색위성 자료는 2002년부터 2013년까지 적조 발생 기간 전후를 포함한 일일 자료를 수집했다. SeaWiFS 해색위성 자료는 Level 1을 수집했고, MODIS 해색위성 자료는 Level 1a를 수집하여 단계별 처리과정을 통하여 산출물을 계산했다.

<표 2-4-1> 해색위성 종류 및 수집된 자료

Satellite	Level	Period(daily)	count
SeaWiFS	Level 1	2002.8.1. ~ 9.30.	102
		2003.8.1. ~ 11.26.	168
		2004.8.1. ~ 9.30.	83
MODIS Aqua	Level 1a	2002.8.1. ~ 9.30.	84
		2003.8.1. ~ 11.26.	188
		2004.8.1. ~ 9.30.	125
		2005.7.1 ~ 9.30.	187
		2006.8.1. ~ 10.31.	127
		2007.7.1. ~ 9.30.	196
		2008.7.1. ~ 9.30.	190
MODIS Terra	Level 1a	2009.7.1. ~ 11.30.	309
		2010.7.1. ~ 9.30.	192
		2011.7.1. ~ 9.30.	192
		2012.7.1. ~ 10.30.	257
		2013.6.1. ~ 9.30.	261
		2008.7.1. ~ 9.30.	90
		2009.7.1. ~ 11.30.	190
		2010.7.1. ~ 9.30.	124
Total	Total	2011.7.1. ~ 9.30.	189
		2012.7.1. ~ 10.30.	129
		2013.6.1. ~ 9.30.	187
			194
			311
			188
			191
	254		
	251		
Total			4,959

2. 위성자료 처리 방법

NASA에서 제공하는 해색위성 자료는 해색위성 자료 처리용 전용 프로그램인 SeaDAS를 이용하여 단계별로 처리했다(McClain et al., 2004). SeaWiFS 해색위성은 SeaDAS 프로그램을 이용하여 Level 1 자료에서 Level 2 산출물로 전환되었고, MODIS 해색위성 자료는 Level 1a를 이용하여 Level 1b 그리고 Level 2 자료로 계산되었다. 해색위성 자료는 SeaDAS 프로그램을 이용하여 기하, 복사, 대기보정 과정을 거쳐서 사용자 요구에 맞는 자료로 계산했다. SeaWiFS 자료는 공간해상도 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 가지는 파장별 반사도와 엽록소 a 자료를 계산했고, MODIS 자료는 공간해상도 $250\text{ m} \times 250\text{ m}$ 와 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 가지는 파장별 반사도, 엽록소 a 와 표층수온 자료를 가공하여 적조 연구에 사용했다. SeaWiFS는 6개 가시광선 파장과 2개 적외선 파장을 계산했고(412, 443, 490, 510, 555, 670, 765, 865 nm), MODIS는 10개 가시광선 파장과 2개 적외선 파장을 계산했다(412, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 645, 667, 678, 748, 869 nm).

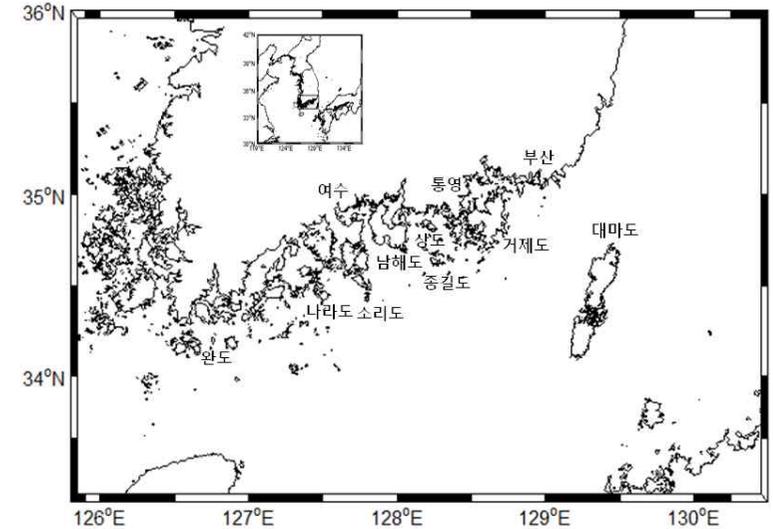
적조 발생 해역의 특성을 파악하기 위해 RGB 영상 제작했고, SeaWiFS는 Level 1 자료에서 그리고 MODIS는 Level 1b 자료를 이용하여 세 개의 파장을 합성하여 만들어졌다(Franz 2006). SeaWiFS는 최대 1 km 해상도를 가지는 RGB 영상으로 제작되었고, MODIS는 최대 250 m 해상도를 가지는 영상으로 제작되었다. SeaDAS를 이용하여 제작된 RGB 영상은 Rayleigh 신호를 제거하여 제작되었고, 세 개의 파장을 이용하기 생성되었기 때문에 상세한 공간적인 정보를 포함한다(Hu et al., 2005).

3. 테스트 데이터 산출

기존의 적조 탐지 알고리즘 비교 및 평가를 위한 테스트 데이터 산출은

- 2002년부터 2013년까지 적조 발생 현장 자료에서 적조가 발생한 기간 중에서 적조 발생한 해역을 포함하는 위성자료가 있을 경우 테스트 데이터로 선정하고,
- 선정된 해색위성 자료는 연구해역(<그림 2-4-1>, $125.8^{\circ}\text{E} \sim 130.5^{\circ}\text{E}$, $33.3^{\circ}\text{N} \sim 36.0^{\circ}\text{N}$)을 포함하는 1 km 와 250 m 해상도를 가지는 SMI(Standard Mapped Image) 제작되고,
- SMI로 제작된 해색위성 자료에서 좌표를 가지는 파장별 반사도, 엽록소 a , 표층수온 자료를 추출하고,
- 3장 2절에 제시된 기존의 적조 탐지 방법을 적용하여 적조 발생 해역을 추정하였고,
- 추정된 해역과 적조 발생 현장 자료와 매칭을 통하여 기존의 적조 탐지 방법들에 대한 정확도 분석하였고,

- 또한, 선정된 날짜의 해색위성자료에서 RGB 영상을 이용하여 적조 발생 현장 자료와 시각적으로 분석을 실시하였고,
- 해색위성 자료에서 적조가 있는 경우와 없는 해역을 선정하여 반사도 자료를 추출하고 스펙트럼 특성을 분석하였다.



<그림 2-4-1> 대한민국 남해안 연구해역

제 5 절 적조 발생해역 해황자료 구축

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(σ_t)를 구하였다(Fofonoff and Millard, 1983).

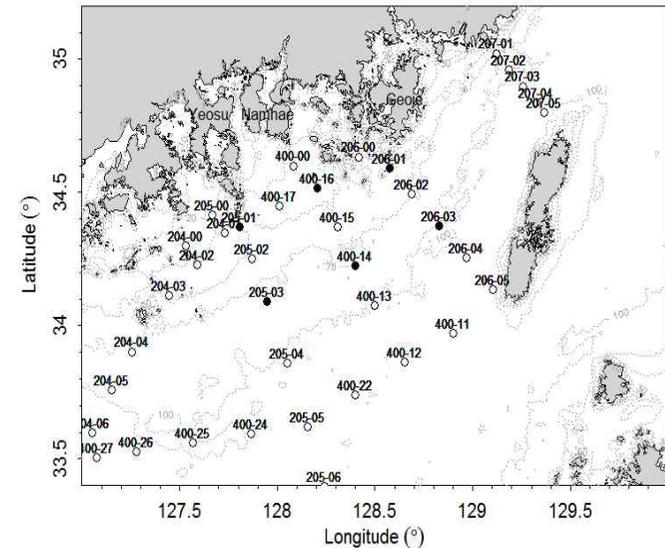
연안해역과 외해역의 표층 수온의 차는 그리 크지 않으나 전반적으로 외해역의 표층 수온이 대마난류의 영향으로 조금 더 높게 나타났다(<그림 2-5-2>). 표층 염분의 경우 여름철에는 외해역이 대체적으로 낮고 그 이외의 계절에는 높게 나타났다. 여름철 외해역의 염분이 낮은 이유는 여름철의 중국 양자강 유역에서 발생하는 저염분수가 대마난류를 따라 외해역으로 유입되기 때문이라 여겨진다. 특히 2001년, 2006년, 2010년 그리고 2013년의 여름에 외해역의 염분이 현저히 낮게 나타났으며 이와 반대로 2007년과 2011년의 여름에 연안해역의 염분이 더 낮게 나타났다.

연안해역과 외해역에서의 성층화 현상이 어느 정도인지 살펴보기 위하여 stratification index(SI)를 아래의 공식에 의거하여 구하였다.

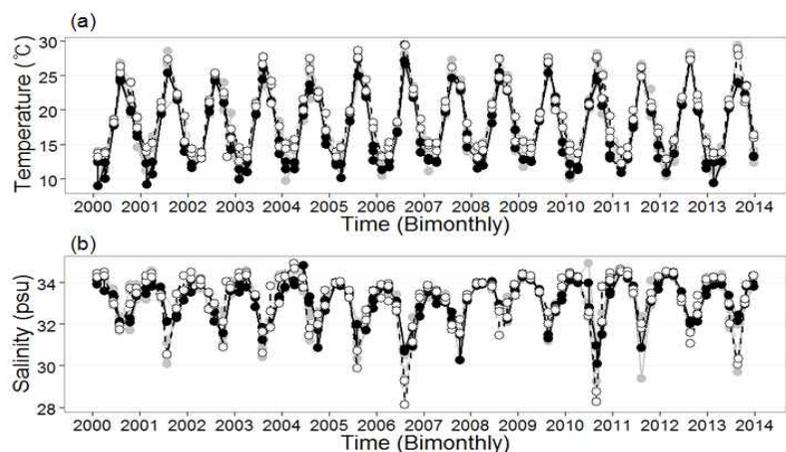
$$SI = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{z_2 - z_1}$$

σ_1 과 σ_2 는 표층과 저층에서의 밀도를 나타내며 z_1 과 z_2 는 표층과 저층에서의 수심을 나타낸다.

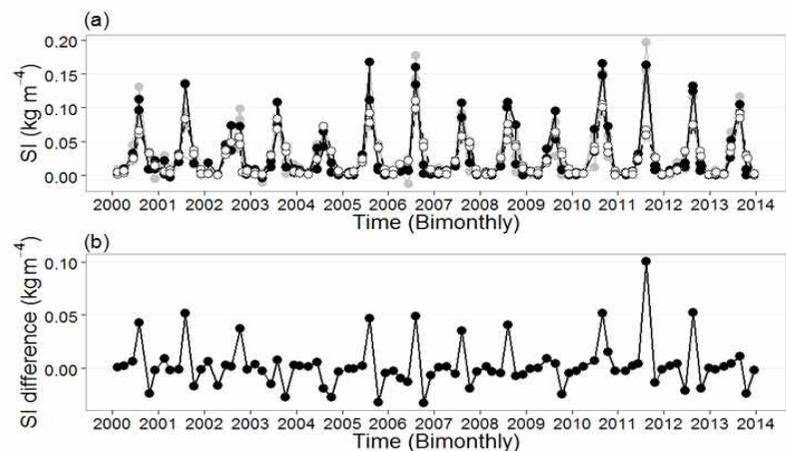
연안해역의 경우 각각의 표층과 저층의 수심은 0 m와 30 m이며 외해역에서의 표층과 저층의 수심은 0 m와 75 m로 선정하였다. <그림 2-5-3>과 같이 외해역보다는 연안해역의 성층화 현상이 더 강하게 나타났으며 그 차는 여름철에 두드러졌다. 여름이 끝난 직후 가을철에는 이와 반대로 외해역의 성층화 현상이 강하게 나타나는데 이로 보아 연안해역의 수괴의 변화정도가 외해역보다 더 심한 것으로 보인다. 특히 2011년 여름철 연안해역과 외해역의 성층화 정도가 현저히 차이 나는데 이 원인에 대해서는 앞으로 좀 더 살펴보아야 할 것으로 판단된다. 다만, 현장관측 자료와 달리 연안해역과 외해역의 성층 발달이 상반된 결과를 보여주어 연안해역으로 선정된 정점보다 더 연안과 가까운 정점들을 조사해 볼 필요가 있다.



<그림 2-5-1> 한국해양자료센터의 조사 관측정점 (검은 원: 이번 연구에서 장기 관측 자료를 위해 사용된 정점)



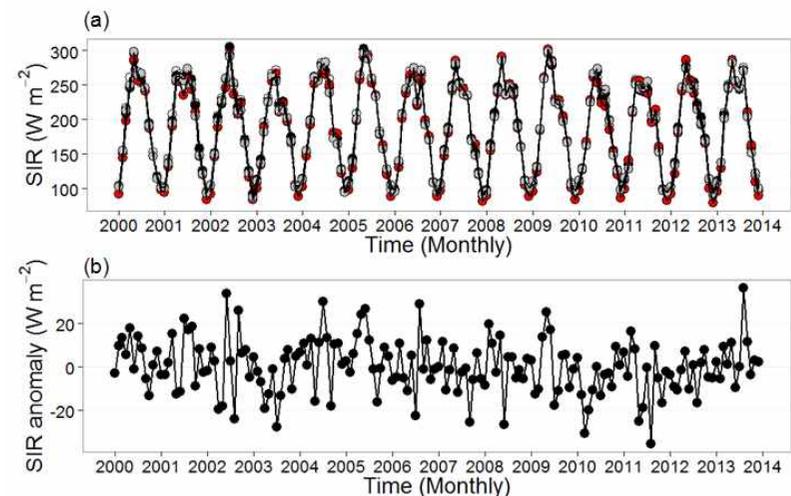
<그림 2-5-2> 2000~2013년 기간 동안의 연안정점(검은 원: 205-01, 206-01, 400-16의 평균값)과 외해정점(흰 원: 205-03, 206-03, 400-14의 평균값)의 표층에서의 (a) 수온(°C)과 (b) 염분(psu) time-series (회색 원: 각 정점들의 값)



<그림 2-5-3> 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($kg\ m^{-4}$, 회색 원: 각 정점들의 값)와 (b) 연안과 외해의 stratification index 차($kg\ m^{-4}$) 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($129.03^{\circ}\ E$, $35.10^{\circ}\ N$), 통영($128.43^{\circ}\ E$, $34.85^{\circ}\ N$), 여수($127.74^{\circ}\ E$, $34.74^{\circ}\ N$) 그리고 완도($126.70^{\circ}\ E$, $34.40^{\circ}\ N$)에서의 표층 일사량은 <그림 2-5-4>와 같았다.



<그림 2-5-4> 2000~2013년 기간 동안의 (a) 부산(회색 원), 통영(검은 원), 여수(흰 원) 그리고 완도(빨간 원)에서의 표층 일사량(SIR: surface irradiance, $W\ m^{-2}$)과 (b) 지역 평균의 표층 일사량 anomaly($W\ m^{-2}$) 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. polykrikoides*의 번성기작을 이해하는데 매우 중요한 것으로 판단되므로 앞으로 적조종의 번성과 관련하여 더욱 자세히 들여다 볼 예정이다.

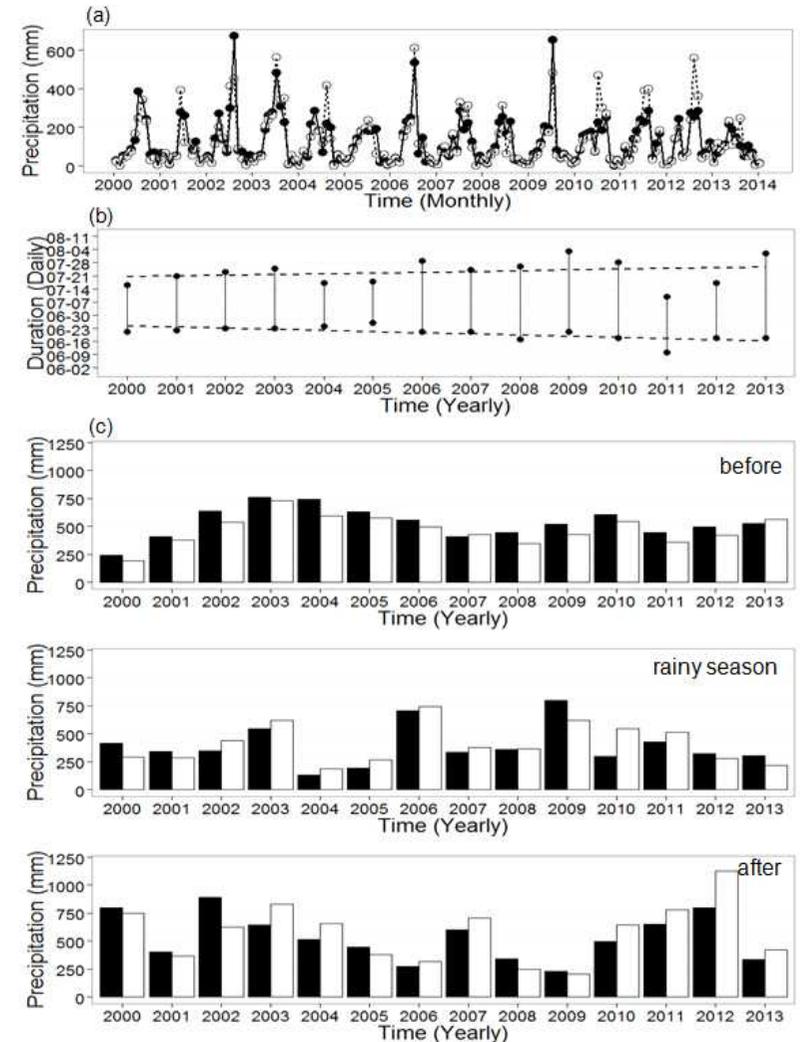
다. 강수량

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=SF C&MNU=MNU>) 통영(128.43° E, 34.85° N)과 여수(127.73° E, 34.73° N)에서의 관측 값은 <그림 2-5-5>와 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 2-5-5 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.

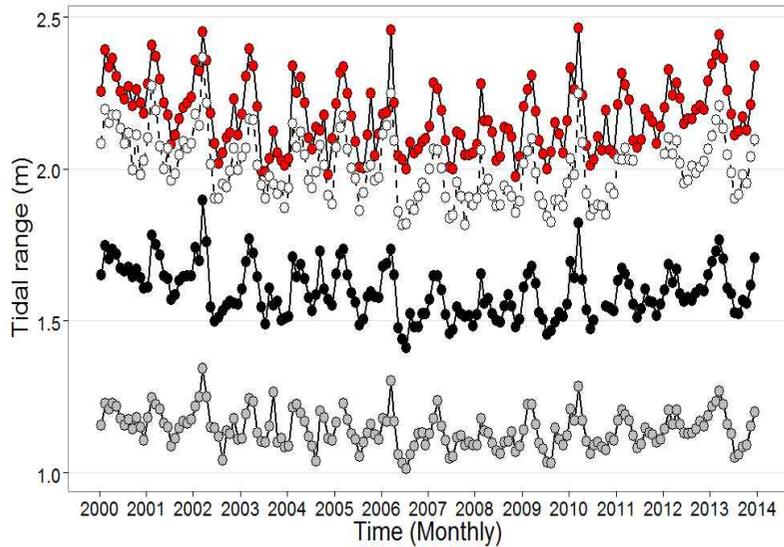
장마의 시기와 장마기간은 연 강수량 변동과 매우 밀접한 관련을 가지며 이는 육지의 강으로부터 유입되는 영양염 농도나 수피의 성층구조 발달에 매우 큰 영향을 미치므로 앞으로 장마의 시기 및 기간의 변화와 적조중 번성과 어떠한 관계가 있는지 살펴볼 필요가 있다.



<그림 2-5-5> (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) 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 보이는 데 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 2-5-6>과 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 2-5-6> 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). 위도 30°에서 50°, 경도 120°에서 135°구역을 경계구역으로 하여 이 지역에 영향을 주는 태풍만을 선별하였고(<그림 2-5-7>) 발생에서 소멸기간은 아래의 <표 2-5-1>과 같다.

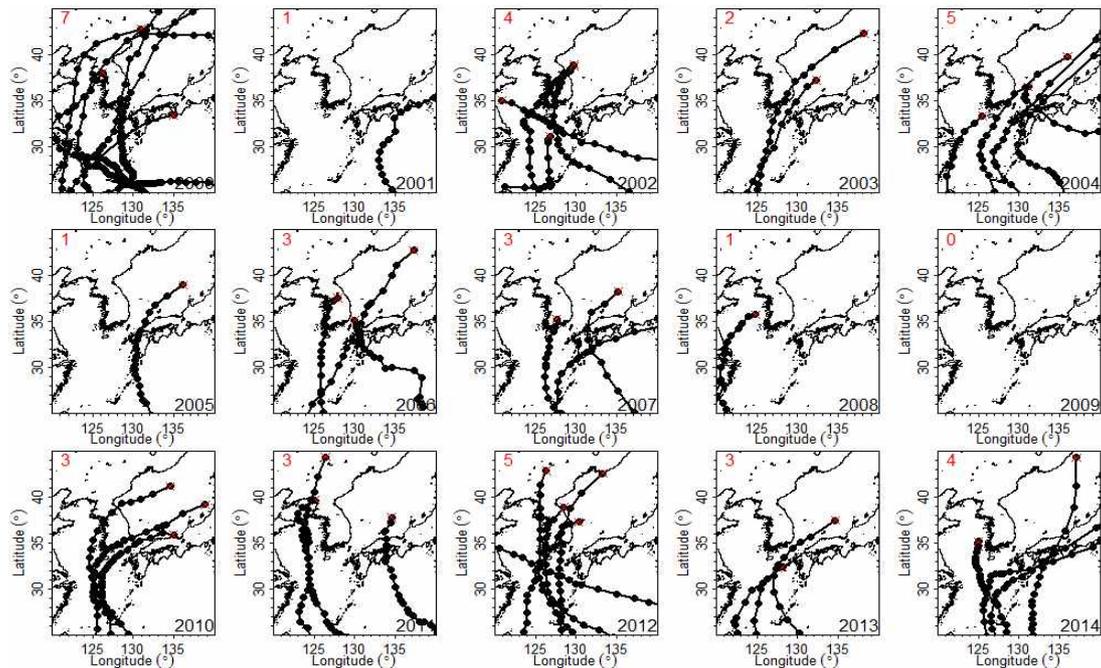
한국 근해에서 태풍이 가장 많이 발생한 해는 2000년도이며 7월 초부터 11월 초까지 발생건수는 무려 7번이나 되었다. 가장 적게 발생한 해는 2009년도이며 이 해에는 어떠한 태풍도 한국 근해에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 한국의 남해에서 태풍의 영향을 가장 많이 받은 해는 2012년으로 이 해에는 블라벤과 덴빈이 연이어 발생하였고 산바도 이에 못지않은 영향을 준 것으로 나타났다. 태풍은 적조의 소멸원인이 되기도 하므로 앞으로 태풍과 적조가 어떠한 관계가 있는지 알아보는 것은 매우 중요하다.

<표 2-5-1> 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.

- 79 -

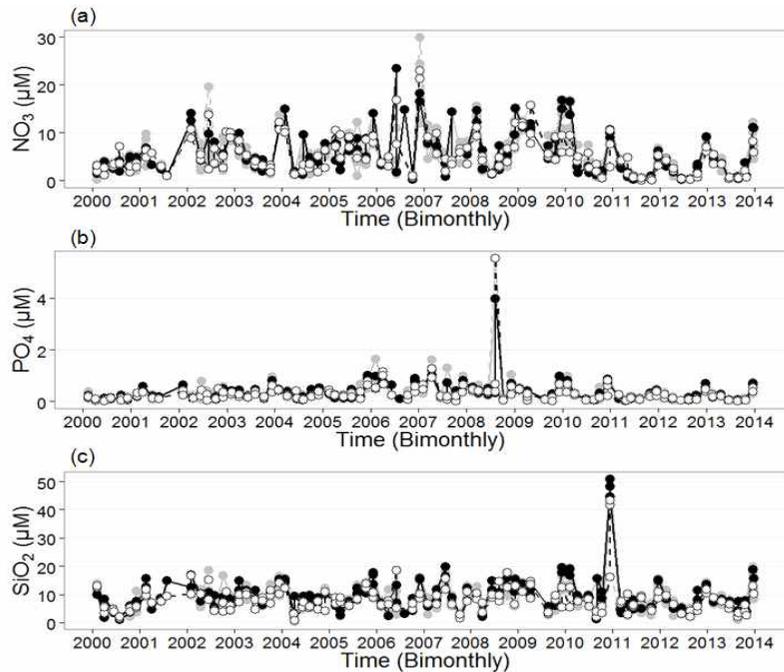


<그림 2-5-7> 2000~2014년 기간 동안 한반도 전역에 영향을 미친 태풍의 진로(왼쪽 위의 빨간 숫자는 발생건수, 빨간 십자마크는 소멸위치를 나타냄)

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

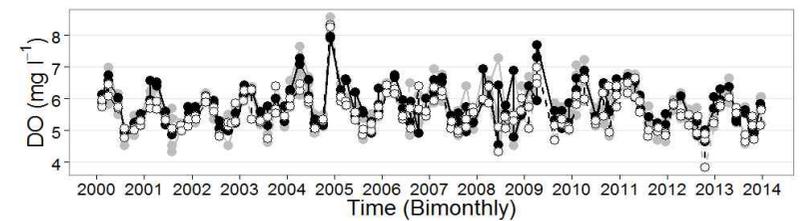


<그림 2-5-8> 2000~2013년 기간 동안 연안정점(검은 원: 205-01, 206-01, 400-16의 평균 값)과 외해정점(흰 원: 205-03, 206-03, 400-14의 평균값) 표층에서의 (a) 질산염(NO_3), (b) 인산염(PO_4), 그리고 (c) 규산염(SiO_2) time-series (회색 원: 각 정점들의 값)

<그림 2-5-8>과 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 2-5-9>와 같이 연안해역이 외해역보다 크게 나뉘었으며 연안해역과 외해역의 차는 가을철을 제외한 나머지 계절에서 약 0.25 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 2-5-9> 2000~2013년 기간 동안 연안정점(검은 원: 205-01, 206-01, 400-16의 평균 값)과 외해정점(흰 원: 205-03, 206-03, 400-14의 평균값) 표층에서의 용존산소 (mg l^{-1}) time-series (회색 원: 각 정점들의 값)

제 3 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 a 의 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 연안

에서의 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 a 와 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 와편모조류에 속하는 *Cochlostinium polykrioides* 종으로 Puerto Rico 연안에서 처음 발견(Margalef 1961) 되었고, 이후 북미 대서양 연안의 뉴저지주 Barnegat만과 미국 캘리포니아 연안에서 적조를 일으킨 *C. keratolactatum*(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. polykrioides*에 의해서 발생되었다(Kang et al., 2002; Lee et al., 2002; Suh et al., 2004; Lee 2006). *C. polykrioides* 적조는 맑은 해역인 나로도도 남해도 사이에서 발생하여 남해안 전역으로 확대되고, 연도별 차이를 보이지만 서해안 및 동해 지역에서 발생된 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 지

역적으로 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 해색위성 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 국립수산물품질관리원 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 해색 위성 자료를 이용하였다.

기존의 적조 탐지 방법 중에서 bbp-Morel과 SS 방법은 미국 걸프만에서 *K. brevis* 적조 탐지를 위해 개발되었고, TSF, FRITD, SC 방법은 대한민국 남해안에서 발생하는 *C. polykrikoides* 적조를 탐지하기 위해 개발되었다(<표 3-2-1>). 기존의 적조 탐지 방법의 정확도 평가는 적조가 발생한 날짜의 위성자료와 현장관측 자료의 매칭을 통하여 <표 3-2-2>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 3-2-1>).

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

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

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

<표 3-2-1> 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)	$SS(490) = nLw(488) - nLw(443) - (nLw(531) - nLw(443)) \times (488 - 443) / (531 - 443)$

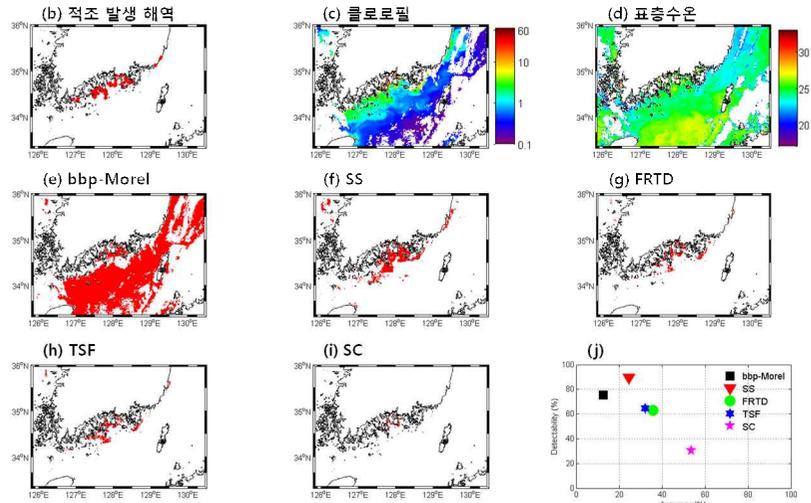
(Wynne et al., 2008; Tomlinson et al., 2009)	A negative SS(490) was indicative of a <i>K. brevis</i> bloom. (Original wavebands for SeaWiFS (443, 490, 510 nm) are modified by MODIS wavelengths (443, 488, 531 nm)).
Two-stage filtering (TSF) (Kim et al., 2009)	Step. 1: MODIS sea surface temperature ranged from 22.0-26.0 °C is used for potential red-tide area and remove other pixels. Step. 2: $MRI = (nLw(555) - nLw(488)) / (nLw(555) + nLw(488))$. Positive MRI is potential red-tide pixel and negative MRI is clear and/or turbidity water pixel (remove negative MRI pixel). Step. 3: Remove turbidity water using the threshold of above 1.5 of nLw(667). Step. 4: Determine the <i>C. polykrikoides</i> bloom area using local Moran's I spatial statistical method.
Feasibility of red-tide detection (FRTD) (Suh et al., 2004)	Suspended solid considering particles of red-tide bloom = $-11.51 \times \ln((nLw(488)/nLw(555)) + 14.38$ (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.)
Spectral Classification (SC) (Son et al., 2011; 손 등 2012)	Step 1: If the highest value of the radiance data is Rrs(555) with a fluorescence peak at 678 nm ($Rrs(678) > Rrs(667)$) 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) 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 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

<표 3-2-2> 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)

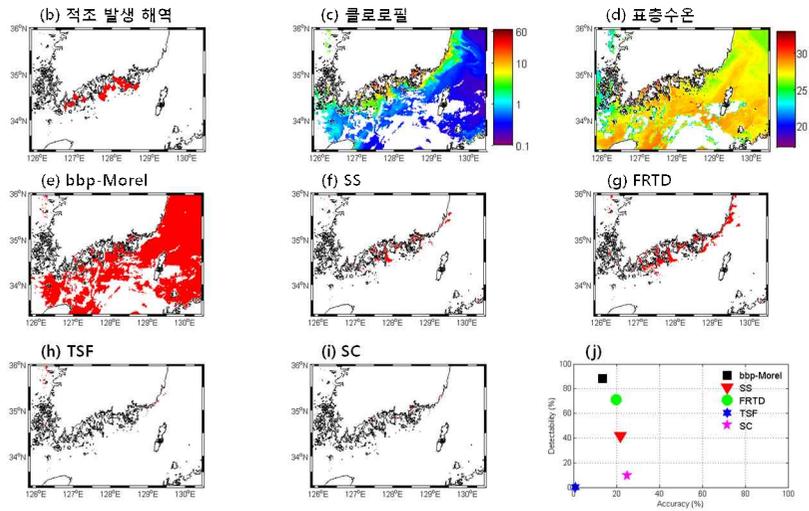
2. 결과

국립수산과학원의 유해성 적조 주의보(red-tide attention) 및 경보(red-tide alert) 발령은 *C. polykrikoides*의 밀도가 300 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(<그림 2-1-5, 2-1-6, 2-1-7>). 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 3-2-1>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°C 이상의 높은 수온을 나타내고, 현장관측 자료에서도 $23\sim 26^\circ\text{C}$ 로 관측 되었다(국립수산과학원, 2004). 적조 발생 자료와 MODIS 해상위성 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 3-2-1>.



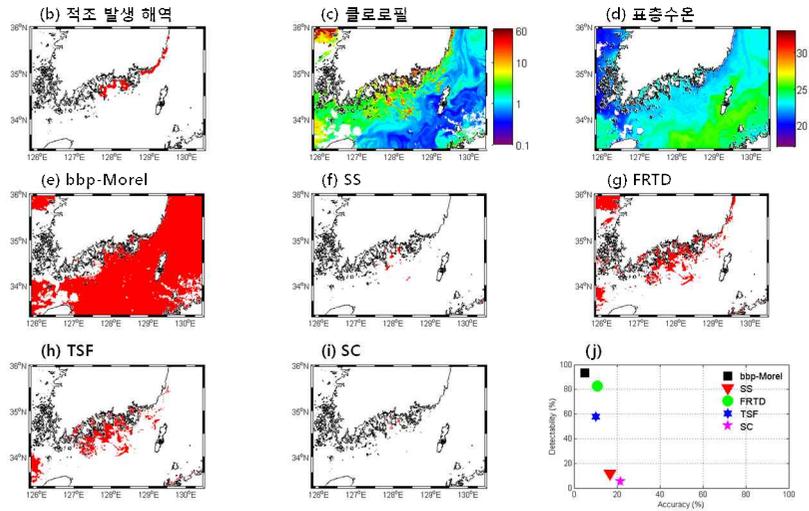
<그림 3-2-1> 2002년 8월 19일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소 a 농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과

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(<그림 2-1-5, 2-1-6, 2-1-7>). 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 3-2-2>의 RGB 영상에서 적조 발생 해역은 주위보다 진한 색깔을 나타내고, 엽록소 a 농도도 증가되어 나타난다. 적조 발생 주변 해역은 27°C 이상의 높은 수온을 나타내고, 현장관측 자료에서도 25°C 이상 관측이 되었다(국립수산과학원, 2004). 적조 발생 자료와 MODIS 해색위성 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 3-2-2>).



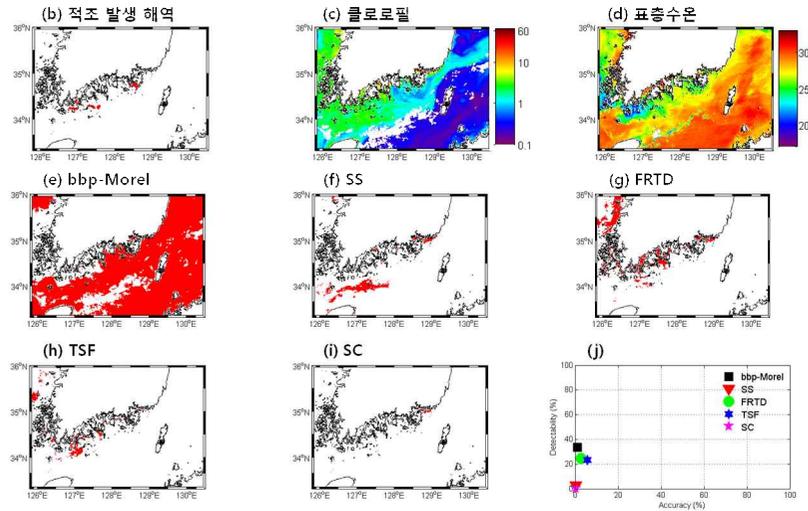
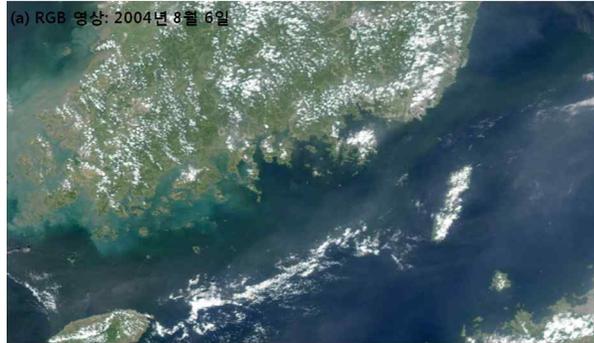
<그림 3-2-2> 2003년 8월 22일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소 a 농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과

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 3-2-3>의 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 해상위성 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 3-2-3>).



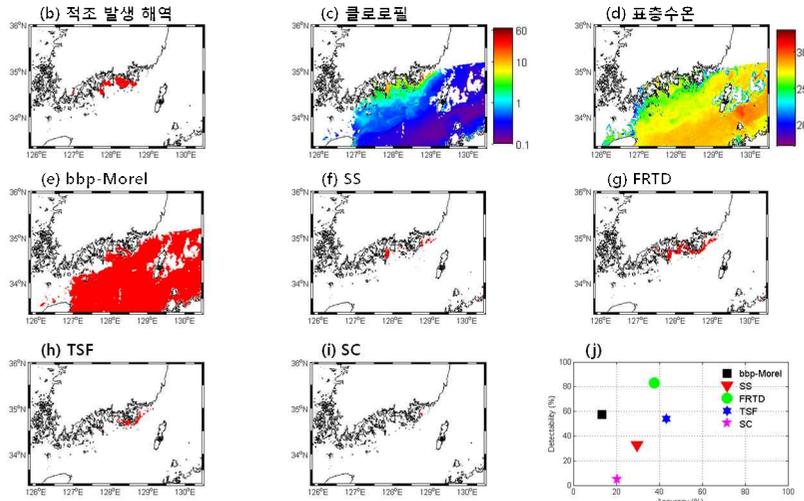
<그림 3-2-3> 2003년 10월 2일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소 *a* 농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과

2004년 유해성 적조는 8월 5일 외나로도에서 발견되어 9월 4일 소멸되기까지 30일 동안 완도 부근 해역에서 거제 해역까지 발달되면서 총 1.2억의 피해를 발생시켰다(<그림 2-1-5, 2-1-6, 2-1-7>). 2004년 8월 6일 적조 발생 상황은 고흥과 거제 부근 해역에서 발생했고, 거제 서측은 적조 주의보로 거제 동측은 적조 경보가 발령되었다. *C. polykrioides* 셀 농도는 상대적으로 낮은 $20 \sim 3,100 \text{ cell ml}^{-1}$ 을 나타냈다(국립수산과학원, 2005). <그림 3-2-4>에서 적조 발생은 지역적으로 협소하여 RGB 영상에서 뚜렷하게 보이지 않을 뿐만 아니라, 엽록소 *a* 농도 또한 뚜렷하게 증가된 해역을 나타내지 않는다. 표층수온은 외해에서 27°C 이상의 높은 수온을 나타내지만, 연안역은 외해보다 상대적으로 낮은 26°C 이하를 나타내고, 현장관측 자료에서도 $21 \sim 26^\circ\text{C}$ 로 낮은 수온이 관측되었다(국립수산과학원, 2005). 적조 발생 자료와 MODIS 해석위성 자료를 이용하여 기존의 적조 알고리즘을 적용한 결과, bbp-Morel 방법은 대부분 해역을 적조 발생으로 추정했고, FRTD와 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 3-2-4>).



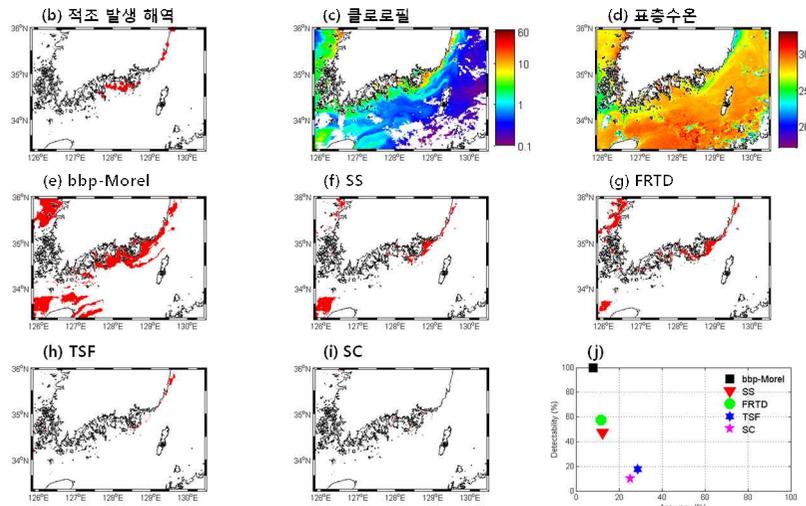
<그림 3-2-4> 2004년 8월 6일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소 *a* 농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과

2007년 유해성 적조는 7월 31일 외나로도에서 발견되어 9월 16일 소멸되기까지 48일 동안 완도부근 해역에서 기장 해역까지 발달되면서 상대적으로 높은 피해를 발생시켰다 (총 115억, <그림 2-1-5, 2-1-6, 2-1-7>). 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 ~ 15,000 $cell\ ml^{-1}$ 을 나타냈다(국립수산과학원, 2008). <그림 3-2-5>의 RGB 영상에서 적조 발생 해역은 진한 녹색 또는 검은색을 띠고 있으며, 엽록소 *a* 농도도 외해에 비해 상대적으로 높은 $> 5\ mg\ m^{-3}$ 을 나타냈다. 수온은 연안역이 외해에 비해서 상대적으로 낮지만 적조가 발생한 해역은 상대적으로 높은 23 ~ 27°C로 관측되었다(국립수산과학원, 2008). 적조 발생 자료와 MODIS 해색위성 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 3-2-5>).



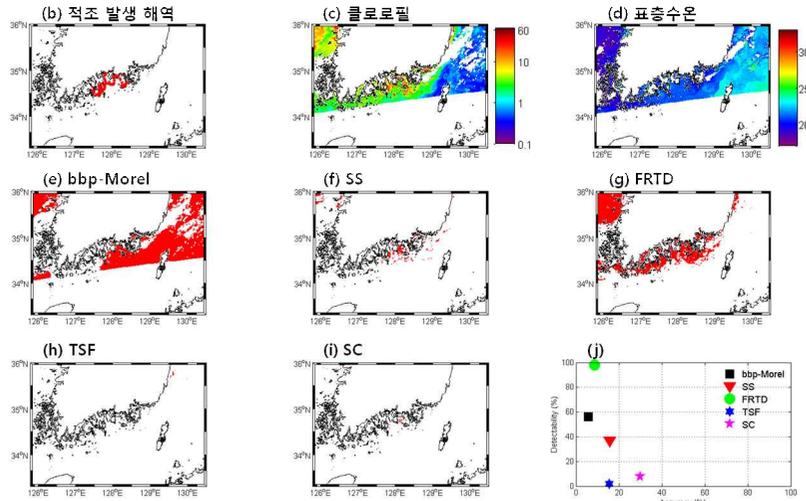
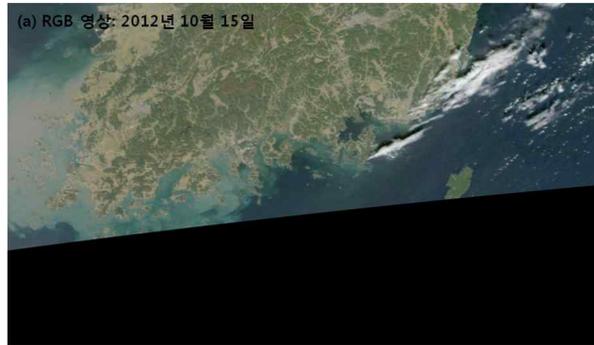
<그림 3-2-5> 2007년 8월 15일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소 *a* 농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과

2007년 8월 21일 적조 발생 상황은 완도-소리도 부근 해역은 적조 주의보, 소리도-거제 동측 부근 해역은 적조 경보가 발령되었고, *C. polykrioides* 셀 농도는 상대적으로 높은 $10\sim 12,500\text{ cell ml}^{-1}$ 을 나타냈다(국립수산과학원, 2008). <그림 3-2-6>의 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°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 3-2-6>).



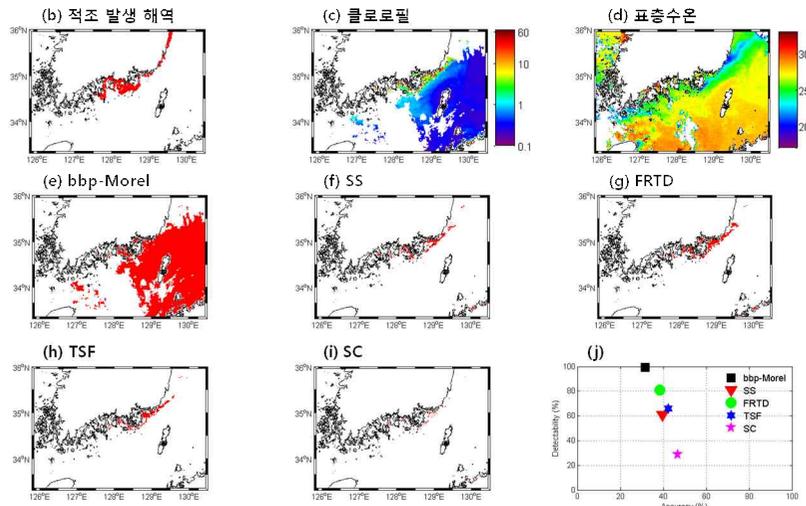
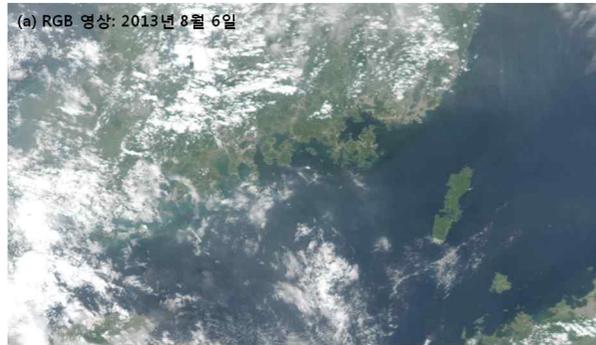
<그림 3-2-6> 2007년 8월 21일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소 a 농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과

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(<그림 2-1-5, 2-1-6, 2-1-7>). 2012년 10월 15일 적조 발생 상황은 나라도-거제도 부근 해역은 적조 주의보가 발령되었고, *C. polykrikoides* 셀 농도는 $60 \sim 9,600 \text{ cell ml}^{-1}$ 을 나타냈다(국립수산과학원, 2013). <그림 3-2-7>의 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°C 내외의 수온을 나타내고, 현장 관측 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 accuracy를 보이고, 나머지 방법들과 이와 유사하게 낮은 accuracy를 나타냈다(<그림 3-2-7>).



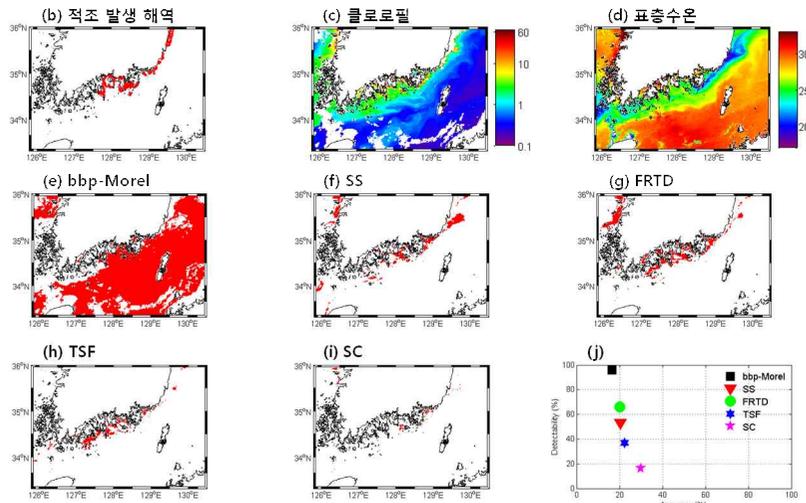
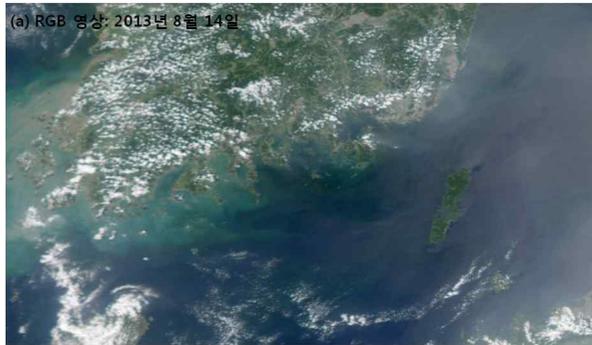
<그림 3-2-7> 2012년 10월 15일 (a) RGB 영상, (b) 적조 발생 해역, (c) 엽록소 a 농도, (d) 표층수온, (e-i) 기존 적조 알고리즘 적용 결과와 (j) 적조 알고리즘 정확도 결과

2013년 유해성 *C. polykrikoides* 적조는 6월 26일 외나로도에서 발견되어 9월 26일 소멸되기까지 93일 동안 대한민국 남해안뿐만 아니라 동해까지 발생하면서 총 156억 피해를 발생시켰다(<그림 2-1-5, 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⁻¹을 나타냈다(<http://www.nfrdi.re.kr/redtideInfo>). <그림 3-2-8>의 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 3-2-8>).



<그림 3-2-8> 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 3-2-9>의 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°C 내외), 현장관측 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 3-2-9>).



<그림 3-2-9> 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 3 절 적조 탐지 알고리즘 개발

3장 2절에서 기존 적조 탐지 알고리즘 비교 결과 대부분의 적조 탐지 알고리즘은 최대 60% 정확도를 가질 경우도 있지만, 대부분의 경우 40% 미만의 정확도로 <그림 3-2-1 ~ 3-2-9> 기존의 알고리즘을 적용하여 위성을 이용한 적조 탐지에는 한계가 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서는 대한민국 남해안에 유해성 적조를 발생시키는 *C. polykrioides* 적조종에 대해서 최적화된 탐지 방법을 제안하기 위해서 적조종의 광학적 특성을 파악했다.

1. *C. polykrioides* 적조종 스펙트럼 특성

<그림 3-3-1>은 2013년 8월 적조 발생 해역 현장관측에서 얻어진 파장별 반사도 스펙트럼 특성을 나타내고 있다. 전체 조사 정점 중에서 총 5개 정점에서 적조를 탐지하였고, 나머지 정점에서는 나타나지 않았다. 적조 발생 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 상대적으로 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(Son et al., 2011; 손 등 2012) 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 등근 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.

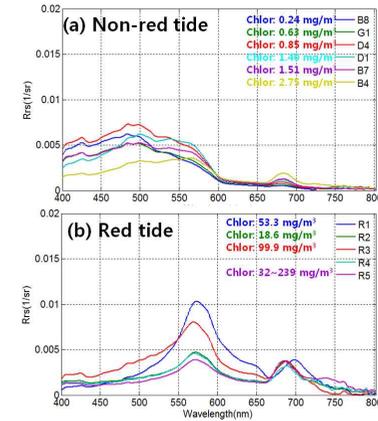
2. *C. polykrikoides* 적조종 흡광 특성

실제 해수 중에서는 *C. polykrikoides* 적조종에 의한 영향뿐만 아니라 다른 종에 의한 영향으로 반사도 및 스펙트럼 특성에 영향을 줄 수 있기 때문에, 실험실에서 배양된 *C. polykrikoides* 적조종을 이용하여 반사도 모델에 적용하여 적조종 고유의 스펙트럼 특성을 파악했다. 적조종 배양 및 흡광 분석 방법은 제 2장 제 3절에서 자세하게 언급하였다.

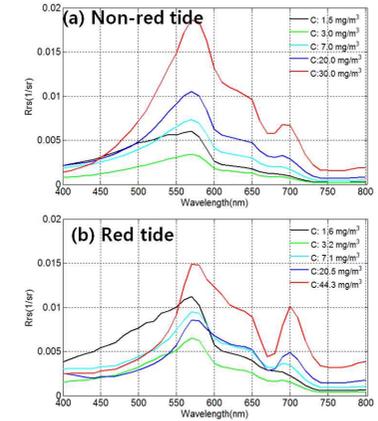
<그림 2-3-2>는 실험실에서 배양한 *C. polykrikoides* 적조종의 파장별 흡광값과 적조발생 해역에서 얻어진 파장별 흡광특성을 보여준다. 두 자료 모두에서 농도에 따라 절대값의 차이는 있지만, 440과 680 nm 부근에서 피크를 나타내고 있다. 그러나 적조가 없는 해역의 자료와 비교해 볼 때 특이하게 *C. polykrikoides* 적조종은 470과 590 nm 부근에서 보조 흡광대를 나타냈다(<그림 2-3-2>). 이것은 *C. polykrikoides* 적조종을 연구한 다른 연구에서도 이와 유사한 피크가 관측되었다. 또한 대한민국 남해안에 적조를 발생 시키는 와편모조류에서 동일하게 발견되었다(<그림 2-3-2>). 식물성 플랑크톤이 가지는 주 흡광대와 더불어 보조 흡광대 파장을 이용하면 앞으로 적조 탐지 연구에 유용하게 활용 될 것으로 판단된다.

C. polykrikoides 적조종의 반사도 스펙트럼 특성을 파악하기 위해서 배양된 *C. polykrikoides* 적조종의 흡광자료를 반사도 모델에 적용하여 계산을 실시하였다. <그림 3-3-2>는 IOCCG에서 제공하는 시뮬레이션 자료(적조가 없는 경우, <http://www.ioccg.org/>)와 시뮬레이션 자료에 배양된 *C. polykrikoides* 적조종의 흡광자료를 적용하여 반사도 스펙트럼 특성을 보여준다. 농도에 따라 절대값은 다르지만 적조가 아닌 경우 녹색 파장에서 피크를 가지지만, 적색 파장(670 ~ 680 nm, fluorescence peak)에서는 상대적 낮은 값을 나타낸다. 적조종을 가지고 반사도 모델에 적용한 경우에도 이와 유사하게 녹색 파장 피크를 보이지만, 적색 파장(670 ~ 680 nm, fluorescence peak)에서는 상대적 높은 값을 나타낸다. 두 반사도 스펙트럼은 유사하게 보이지만, 적조가 없는 경우는 청색파장의 값이 낮지만 청색에서 녹색파장까지 완만한 경사를 보이는 반면, 배양된 적조종을 이용한 반사도는 청색파장 부근에서는 완만한 경사를 가지지만 녹색 파장 부근에서는 급격한 경사를 가지는 특성을 보이고 이것은 현장관측 얻어진 반사도 스펙트럼과 유사한 특성을 가지고 있다.

결론적으로 배양된 적조종을 이용한 반사도 모델 결과를 통해서 현장에서 얻어진 반사도 스펙트럼은 *C. polykrikoides* 적조종에 의해 나타나는 것으로 확인되었다.



<그림 3-3-1> 2013년 8월 현장관측 얻어진 (a) 적조가 없는 경우의 반사도 스펙트럼 특성과 (b) 적조가 있는 경우의 반사도 스펙트럼 특성



<그림 3-3-2> (a) IOCCG 시뮬레이션 자료의 반사도 스펙트럼 특성과 (b) 배양된 *C. polykrikoides* 흡광자료를 이용하여 계산된 반사도 스펙트럼 특성

제 4 장 적조분석 플랫폼 구축현황

제 1 절 적조관련 빅데이터 구성 및 DB

적조 관련 빅데이터 구성은 크게 세 개의 자료로 분류된다. 첫째, 적조 현상과 관련된 현장관측 자료, 둘째, 다중 위성 관측 자료, 셋째, 적조 현상과 관련된 환경 자료로 구성 되어 있다. 구축된 자료들은 적조 탐지 및 발생 경향 분석에 사용 될 것이다.

<표 4-1-1> 적조 빅데이터 구성 및 구축 현황

자료 구성	자료 종류	자료 형식	현황
현장 관측	적조발생현장자료 (수산과학원 적조속보 digitizing)	ascii (시간, 위도, 경도)	2000 ~ 2013 (98 ~ 99 자료 수집예정)
	적조발생해역 현장관측 자료 (수온, 염분, 엽록소 a, 영양염, 일차생산, IOP, AOP 등)	ascii (시간, 위도, 경도, 수심, 값)	2014년 5월과 8월 자료 수집 완료
	적조종 흡광자료	ascii (파장별 흡광값)	실험실 적조종 배양
다중 위성	해색위성 (SeaWiFS, MODIS 파장별 반사도, 엽록소 a, PAR, 표층수온 등)	HDF, ascii (시간, 위도, 경도, 산출물 값)	1998 ~ 2004 SeaWiFS 2002 ~ 2013 MODIS
	표층수온 (NOAA AVHRR)	HDF, ascii (시간, 위도, 경도, 표층수온)	1985 ~ 2009
	표층바람 (QuicksScat, Ascet)	netcdf, ascii (시간, 위도, 경도, 표층수온)	2000 ~ 2013
	강우량 (SSMI)	ascii (시간, 위도, 경도, 강우량)	1991 ~ 2013
환경 자료	일사량, 강수량, 태풍 (기상청)	ascii (시간, 위도, 경도, 값)	2000 ~ 2013
	수온, 염분, DO, 영양염 (국립수산과학원)	ascii (시간, 위도, 경도, 값)	2000 ~ 2013
	조석 (국립해양조사원)	ascii (시간, 위도, 경도, 값)	2000 ~ 2013

1. 현장관측 자료

적조 발생 현장 자료는 국립수산과학원에서 제공된 문헌 자료와 홈페이지를 통해서 얻어진 자료이다. 이 자료는 적조 발생의 시·공간적 정보, 적조종 정보, 셀 농도, 주변 해양환경 정보 등을 포함하고 있다. 본 연구에서는 먼저 적조 발생지에 대한 이미지 자료를 digitizing을 통하여 공간적 정보를 추출하여 DB를 구축했다. 구축된 자료는 기존의 적조 탐지 방법 비교와 평가를 위해 구축되었고, 적조 탐지 방법 개발뿐만 아니라 적조 발생 경향 분석에 유용한 자료로 사용되었다.

2013년 적조발생 해역 현장관측은 적조 발생 전인 5월과 적조가 발생한 시기인 8월에 두 번 수행되었다. 현장관측의 주목적은 적조종이 가지는 광학적 특성을 파악하여 이를 이용하여 위성에서 적조 탐지를 위한 알고리즘 개발에 이용하는 것이다. 두 번째로 적조가 발생하는 해역의 해양환경을 이해하기 위해서 적조가 발생 전의 환경을 관측하고, 발생 시 환경을 이해하므로 적조 발생-이동-확산-소멸 되는 원인을 규명하는데 이용된다.

또한 실험실에서는 적조종을 배양하여 다양한 종들이 가지는 광학적 특성을 파악하고 특히 적조종이 가지는 고유한 특징을 분석하고 이 자료를 이용하여 반사도 모델에 적용하여 적조종의 반사도 값 추정을 했다.

2. 다중 위성 자료

해색위성 자료는 기본적으로 적조 탐지 및 기존 적조 알고리즘 비교/평가에 사용된다. 본 연구에서는 해색위성의 파장별 반사도 스펙트럼을 이용하여 기존에 개발된 알고리즘에 적용하여 정확도 평가를 했고, 추후 적조 분석 플랫폼을 이용하여 개발된 알고리즘을 적용하여 과거 위성자료를 재분석을 하여 장기 적조 발생 경향 분석에 이용할 뿐만 아니라 적조발생 현장자료와 비교하여 광역의 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 관측에 제공하는 자료로써 적조 탐지 결과와 더불어 장기 자료 분석을 통한 적조 발생 경향 분석을 위해 사용된다.

제 2 절 적조 분석 플랫폼 구성 현황

1. 분산·병렬 처리 시스템

한국과학기술정보연구원에서 개발 중인 맞춤형 위성 빅데이터 고속변화효율 처리 시스템 구동을 위해 서버 5대를 클러스터링하여 고성능 분산처리가 가능한 시스템과 데이터 백업용 DAS를 구축하였다<그림 4-2-1>. 기존에 있는 3대의 서버는 Web 서버용, SciDB master 노드용 및 MySQL 서버로 사용될 예정이다. <표 4-2-1>은 분산병렬처리를 위한 서버의 성능을 보여주고 있다. 또한 위에서 언급한 SGE 기반의 분산·병렬 처리 소프트웨어를 각 서버에 설치하고 클러스터를 구성함으로써 인공위성원격탐사 자료의 효율적인 처리가 가능하도록 하였다.



<그림 4-2-1> 분산병렬처리 서버 및 DAS

<표 4-2-1> 분산병렬처리 서버 노드별 사양

CPU	Memory	HDD	Storage (Link)	OS
Intel Xeon E3-1230V3, 3.3GHz, L2 8MB	32GB	12TB	48TB	CenterOS

제5장 결론

한국해양과학기술원은 한국과학기술정보연구원과 “위성 빅데이터 기반 적조 탐지 및 발생 경향 분석 연구” 주제로 공동 연구를 실시하였다. 총 3년간 공동 연구 수행을 목표로 2014년에는 적조 탐지 알고리즘 비교 및 평가에 대한 연구를 수행했고, 2015년에 적조 빅데이터 처리 기술 활용 및 위성자료 재처리 연구 및 2016년에는 적조 발생 경향 및 발생 가능도(likelihood) 분석 연구를 통하여 최종적으로 위성 빅데이터 기반 다차원 배열 DBMS 처리 기술 연계를 통한 적조 종합적 분석 체계 구축과 다차원 배열 DBMS 기술과 생태학적 가설을 연계한 적조 탐지, 발생 경향 분석 및 적조 모니터링 기술 개발에 그 목표가 있다.

세부연구목표 및 연구 개발 내용	2014	2015	2016
적조탐지 알고리즘 비교 및 평가 - 위성자료 기반 매칭데이터 생성 - 적조 탐지 알고리즘 최적화	1차년		
적조빅데이터 처리기술 활용 및 위성자료 재처리 - 적조 빅데이터 처리 기술 검증 - 다차원 DBMS 플랫폼 활용 위성자료 분석		2차년	
적조 발생 경향 및 가능도(likelihood) 분석 - 적조 빅데이터 수립 및 분석 - 적조 발생 경향 분석			3차년

최종 목표를 달성하기 위해서 2014년에 수행된 연구는 첫째, 적조 관련 빅데이터 수집 및 분석을 실시하였다. 최근 15년 이상의 적조 발생에 대한 정보를 수집하기 위해서 적조 관련 현업 기관인 한국수산과학원에 제공하는 적조 속보 자료를 1999년부터 2013년까지 문헌 및 홈페이지를 통해서 수집하였다. 2014년 자료는 홈페이지를 통해서 수집하였지만, 지도 제작은 현재 수행 중이다. 적조 발생 시 제공하는 적조 속보에 포함되어 있는 적조 발생 지도를 digitizing을 통하여 시간과 공간적 정보를 가지는 자료로 전환하였다. Digitizing된 자료와 문헌 정보 분석을 통해서 *C. polykrikoides* 유해성 적조는 2011년 제외하고 1995년부터 2014년까지 남해안에 매년 발생을 했으며 서해 연안에 3회 발생을 했고, 동해 연안에 총 9회 발생한 것으로 보고되었다. 적조 발생 시기도 1990년대 중/후반에는 늦어짐에 발생했지만 최근 들어 초여름에 발생되어졌고, 지속 기간도 길어지고 피해 규모도 증가된 것으로 조사되었다. 2002년부터 2013년까지 발생한 적조 빈도수를 누적하여 분석해 본 결과, 적조가 빈번하게 발생하는 지역으로 여수, 남해도,

거제 및 통영 부근 해역으로 나타났다.

적조 관련 빅데이터 수집과 관련하여 2014년 봄과 여름에 걸쳐 두 차례 적조 발생 해역에서 현장관측을 실시하였다. 적조 발생 전과 적조가 발생 시기에 조사를 통하여 적조 발생 해역의 해양환경을 분석했고, 해수 샘플 및 광학 측정을 통하여 *C. polykrikodes* 유해성 적조종의 광특성을 파악했다. 그리고 실험실에서 적조종 배양을 시작하여 흡광 특성 또한 동시에 분석하였다.

둘째, 기존 적조 탐지 알고리즘 비교 및 평가를 위해서 해상위성 자료를 수집하고 연구해역에 맞도록 반사도, 엽록소 *a* 및 표층수온 자료를 추출하였다(2002년~2013년). 현재까지 개발된 총 5개의 적조 탐지 방법을 위성영상 자료에 적용하여 특성을 파악하였고, digitizing 자료와 매칭을 통하여 정확도 분석을 실시하였다. 영상 기반 적조 탐지 알고리즘 비교 결과 대부분의 적조 탐지 알고리즘은 최대 60% 정확도를 가지는 경우는 있었지만, 대부분 40% 미만의 낮은 정확도를 보였고, *C. polykrikodes* 유해성 적조종에 적합한 새로운 탐지 방법이 요구되었다. 새로운 적조 탐지 방법을 제안하기 위해서 *C. polykrikodes* 유해성 적조종이 가지는 광학적 특성을 파악하기 위해, 현장관측 자료와 배양된 흡광 자료를 분석하였다. *C. polykrikodes* 유해성 적조종이 가지는 반사도 특징은 청색 파장에서 상대적으로 낮은 값을 가지고 녹색 파장과 적색 파장에 상대적으로 높은 값을 나타냈다. 그리고 400-500 nm 부근 파장에서는 완만한 경사를 나타냈지만, 500-550 nm 파장에서는 급격한 경사를 나타냈다. 이런 반사도 스펙트럼 특성은 현장관측 및 반사도 모델을 이용하여 시뮬레이션 결과에서 유사하게 나타났고, 적조가 아닌 경우와 비교하여 뚜렷한 대비를 보였다. 또한 *C. polykrikodes* 유해성 적조종의 흡광자료에서 460과 590 nm 부근에서 보조 흡광대를 가지고 있으며, 이런 특징을 종합하면 *C. polykrikodes* 유해성 적조종에 최적화된 탐지 방법 개발이 가능할 것으로 판단된다.

셋째, 최종 목표는 적조 발생 가능성도 분석을 위해서, 적조 속도 자료, 다중 위성자료, 기타 적조 발생 주변 해역의 해양 자료들을 수집하였다(적조 정보, 수온, 염분, 기온, 바람, 강우량, 일사량, 조석, PAR 등). 다양한 적조 관련 자료들은 적조 탐지 연구에 이용될 뿐만 아니라, 적조 발생원인 규명 및 장기 모니터링 자료 기반 적조 발생 원인을 이해하는데 중요한 자료이다.

넷째, 적조관련 위성 빅데이터 분석을 위해서 플랫폼을 구축하였다. 현재 한국과학기술정보연구원에서 개발 중인 위성 빅데이터 고속변화고효율 처리 시스템 구동을 위해 한국해양과학기술원 전산실에 클러스터와 시스템 백업용 DAS 시스템을 구축을 완료하였다. 처리 시스템 구동 전에 offline 상태에서 MODIS 해상위성 테스트 자료를 이용하여 탐지 알고리즘 적용하여 연산되는 것을 확인하고 검증하였다.

결론적으로 본 연구를 통해서 한국해양과학기술원은 기존 적조 탐지 알고리즘에 대

한 비교 및 평가를 실시하고, 위성을 통한 적조 탐지 비교 및 평가의 가능성을 구현했다. 그리고 적조 탐지 및 발생 가능성도 분석을 위한 보조 자료 수집 및 분석을 실시하였다. 한국과학기술정보연구원은 위성 빅데이터 고속변화고효율 처리 시스템 구축을 위한 공동 연구를 실시하였다. 즉, 빅데이터 처리 기술을 개발하여 위성 빅데이터를 이용한 적조 탐지 방법을 적용해 보았으며, 장기간의 시계열 자료를 분석할 수 있는 기반을 조성하였다. 이를 통하여 장기간 자료에 대한 연속적인 탐지 자료 제처리가 가능해지고, 탐지 및 발생 경향 분석의 정확도가 향상될 것이다.

참 고 문 헌

- 국립수산과학원, 2002. 2000.2001년도 한국연안의 적조발생 상황
- 국립수산과학원, 2004. 2002.2003년도 한국연안의 적조발생 상황
- 국립수산과학원, 2005. 2004년도 한국연안의 적조발생 상황
- 국립수산과학원, 2006. 2005년도 한국연안의 적조발생 상황
- 국립수산과학원, 2007. 2006년도 한국연안의 적조발생 상황
- 국립수산과학원, 2008. 2007년도 한국연안의 적조발생 상황
- 국립수산과학원, 2009. 2008년도 한국연안의 적조발생 상황
- 국립수산과학원, 2013. 2010.2011.2012년도 한국연안의 적조발생 상황
- 국립수산과학원, 2014. 2013년도 한국연안의 적조발생 상황
- 김학균, 최우정, 정영균, 정창수, 박종수, 안경호, 백철인, 1999. 나로도 인근해역에서 *Cochlodinium polykrioides* 적조의 최초발생과 환경특성. 수지연구보고, 57:119-129.
- 김학균, 2005. 해양적조. 다솜출판사, p 467.
- 손영백, 강윤향, 유주형, 2012. 천리안 해상위성 GOCI를 이용한 대한민국 남해안 적조 모니터링. 한국원격탐사학회지, 28(5):531-548.
- 안유환, 문정언, 서원찬, 윤홍주, 2009. 해상원격탐사 활용을 위한 적조생물종 고유 광특성 연구. 한국해양환경공학회지, 12(1):47-54.
- 임월애, 2004. 한국 남해안의 적조발생과정에 대한 연구. 부산대학교 대학원, 박사학위 논문, 99.
- Ahn, Y.H., 1990. Optical properties of biogeneous and mineral particles present in the ocean. Application: Inversion of reflectance. Ph.D thesis, Paris-VI University, France.
- 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.
- Aiken, J. et al. 2000. The atlantic meridional transect: overview and synthesis of data. Progressive in Oceanography, 45:257-312.
- Babin, M., Morelm A., and Gentili, B., 1996. Remote sensing of sea surface sun-induced chlorophyll-a fluorescence: Consequences of natural variation in the optical characteristics of phytoplankton and the quantum yield of chlorophyll a fluorescence. International Journal of Remote Sensing, 17:2417-2448.
- Cannizzaro, J.P., Carder, K.L., Chen, F.R., Heil, C.A., and 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.
- Carder, K.L., and Steward, R.G., 1985. A remote-sensing reflectance model of a red-tide dinoflagellate off west Florida. Limnology and Oceanography, 30:286-298.
- Dierssen, H.M., Kudela, R.M., Ryan, J.P., and Zimmerman, R.C., 2006. Red and black tides: Quantitative analysis of water-leaving radiance and perceived color for phytoplankton, colored dissolved organic matter, and suspended sediments. Limnology and Oceanography, 51(6):2646-2659.
- Eppley, R.W., 1972. Temperature and phytoplankton growth in the sea. Fishery bulletin, 70:1063-1085
- Falkowski, P.G., and Kolber, Z., 1995. Variation in chlorophyll fluorescence yields in phytoplankton in the world oceans. Australian Journal of Plant Physiology, 22:341-355.
- Fofonoff, N.P., and Millard, R.C., 1983. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. Unesco technical papers in marine science, 44.
- Franz, B.A., 2006. Extension of MODIS Ocean Processing Capabilities to Include the 250 & 500-meter Land/Cloud Bands, NASA Ocean Biology Processing Group, Ocean Color Web, URL http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/DOCS/modis_hires/.
- Hu, C., Muller-Karger, F.E., Biggs, D.C., Carder, K.L., Nababan, B., Dadeau,

- D., and Vanderbloemen, J., 2003. Comparison of ship and satellite bio-optical measurements on the continental margin of the NE Gulf of Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 24(13):2597-2612.
- 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 detection and tracing using MODIS fluorescence data: A regional example in SW Florida coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 97:311-321.
- Ishizaka, J., Kitaura, Y., Touke, Y., Sasaki, H., Tanaka, A., Murakami, H., Suzuki, T., Matsuoka, K., and Nakata, H., 2006. Satellite detection of red-tide in Ariake Sound, 1998-2001. *Journal of Oceanography*, 62:37-45.
- Kang, Y.S., Kim, H.G., Lim, W.E., and Lee, C.K., 2002. An unusual coastal environment and *Cochlodinium polykrioides* blooms in 1995 in the South Sea of Korea. *Journal of Korean Society Oceanography*, 37(4):1-12.
- Kiefer, D.A., and SooHo, J.B., 1982. Spectral absorption by marine particles of coastal waters of Baja California. *Limnology and Oceanography*, 27(3):492-499.
- Kim H.G., Choi, W.J., Jung, Y.G., Park, P.S., An, K.H., and Baek, C.I., 1999. Initiation of *Cochlodinium polykrioides* blooms and its environmental characteristics around the Narodo Island in the western part of South Sea of Korea. *Bulletin National Fishery and Research Development Institute, Korea* 57:119-129.
- Kim, Y., Byun, Y., Kim, Y., and Eo, Y., 2009. Detection of *Cochlodinium polykrioides* red-tide based on two-stage filtering using MODIS data. *Desalination*, 249:1171-1179.
- Kolber, Z. and Falkowski, P.G., 1993. Use of active fluorescence to estimate phytoplankton photosynthesis *in situ*. *Limnology and Oceanography*, 38:1646-1665.
- Laws, E.A., 1991. Photosynthetic quotients, new production and net community production in the open ocean. *Deep Sea Res*, 38:143-167.
- Lee, D.K., 2008. *Cochlodinium polykrioides* blooms and eco-physical conditions in the South Sea of Korea. *Harmful Algae*, 7:318-323.
- Lee, S.G., Kim, H.G., Bae, H.M., Kang, Y.S., Jeong, C.S., Lee, C.K., Kim, S.Y., Kim, C.S., Lim, W.A., and Cho, U.S., 2002. Handbook of harmful marine algal blooms in Korean waters. National Fisheries Research and Development Institute, Republic of Korea, p 172.
- Lee, Y.S., 2006. Factors affecting outbreaks of high-density *Cochlodinium polykrioides* red-ides in the coastal seawaters around Yeosu and Tongyeong, Korea. *Marine Pollution and Bulletin*. 52:1249-1259.
- Margalef, R., 1961. Hidrografía y fitoplancton de una área marina de la costa meridional de Puerto Rico. *Inv. Pesq.*, 18: 76-78, Fig. 27m.
- McClain, C.R., Feldman, G.C., and Hooker, S.B., 2004. An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series. *Deep Sea Research II*, 51:5-42.
- O'Reilly, J.E., et al., 2000. Ocean Color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2 and OC4: Version4 .in SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analysis, Part3, SeaWiFS Postlaunch Tech. Rep. Ser., vol.11, NASA/TM-2000-206892, edited by S.B. Hooker and E.R. Firestone, NASA, Greenbelt, MD, pp 9-27.
- Parsons T.R., Y Maita, and CM Lalli., 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, New York. 173.
- Rosati, A., and Miyakoda, K., 1988. A general circulation model for upper ocean simulation. *Journal of Physical Oceanography*, 18:1601 - 1626.

2. 리더스 경제에 실린 “빅 데이터 효율적 활용 - 인류에게 유익한 정보제공 공”

(<http://www.leaders.kr/news/articleView.html?idxno=9284>)

리더스경제신문

2014F/W DOWN로드 구매서
발행권리크리프트권증정

뉴스 | 금융 | 증권 | 기업 | 부동산 | 채용수상 | 교육 | 문화/예체 | 기획/연재

문화일반 | 전사공연 | 영화 | BOOK | 취미 | 맛집 | 우리동네문화공간 | 용이문 | 리드스GoF | 인격의 불려리온

홈 > 기획/연재 > 사담을 만나다

‘빅 데이터’ 효율적 활용... 인류에게 유익한 정보제공 공
[사담, 사담을 만나다] - (25) 한국해양과학기술원 손영백 박사

발간리드스경제신문 | webmaster@leaders.kr

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 관련한 세계적인 논의가 한창 진행되고 있는 시점에 위성 원격탐사 분야, 특히 바다를 연구하는 몇몇 되지 않는 과학자를 만났다. 손영백 연구원은 미국에서 학위

손영백 박사가 남해에서 적조 관측용 포츠를 하고 있다.

를 마치고 미 해양대기국(NOAA)과 일본의 나가사키 그리고 나고야 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 기술을 다양한 분야에 걸쳐서 존재하는 방대한 질적 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 생활할 집이나 보안 측면에서 문제점 또한 제기되고 있습니다. 빅 데이터 시대에 살고 있는 저희들로서는 이것을 효율적으로 분석 및 활용 할 수 있는 자세가 필요합니다. 그러기 위해서는, 구급의 수석경제분석가가 언급한 것처럼 빅 데이터 시대에 우리는 데이터를 올바르게 이해하고, 처리하고, 가치를 뽑아내고, 시각화하고, 적절할 수 있는 논리를 귀요도록 해야 할 것입니다.

3. 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 in Science & Industry

뉴스 | 오디언 | 라이프 | 커뮤니티 | 포토뉴스

기초보스 | 인문 | 건강 | 기술 | 저술 | 기업탐방 | 행사연재 | 북스타트

Home > 기사내용

한달 걸렸던 일 '하루에 해결'...과학자들 협업 '화제'

KIST-KOIST 과학자들 슈퍼컴 통한 협업 연구-패킷 빅데이터 분석기술 개발
"속수무속 적조 현상 3일만에 비보가능해 될것"

2014.11.15
kddp@hellodd.com



#물레도 어뢰없이 풀어냈다. 지난 7월 24일 경상남도 지역해 발생한 적조는 88일간 지속되어 분석 어류 477만3000마리가 폐사하고 63만2300만원의 피해를 냈다. 올해 적조기원은 그동안 가장 긴 기록이었던 2003년의 82일보다 24일이 더 많은 역대 최장기록이었다.

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

데이터 개발 기술이 없다고 할 정도로 과학기술이 발달하며 정보가 쏟아지고 있다. 하지만 정보는 적재적소, 적시에 활용될 때 시너지 효과도 큰 법.

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



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^a, Byoung-Ju Choi^b, Yong Hoon Kim^c, Young-Gyu Park^{d,*}

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

^b Department of Oceanography, Korean National University, Guseong 573-701, Republic of Korea

^c Applied Science Associate Inc. (APS ASA), South Kingstown, RI, USA

^d 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
ICAG
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 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 MEARI, 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 green 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, Keessing, 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 socio-economically 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 (Y.-G. Park).