

BSPE99606-11984-1

한반도 해역 고해상도 재분석자료 생산과 활용

2019. 2

연구기관
한국해양과학기술원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “한반도 해역 고해상도 재분석자료 생산과 활용”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2019. 2. 28

연구 책임자 : 김영호

참여 연구원 : 강석구 권민호 김성대 김철호 박영규
백승호 염승식 이 석 임동일 조철호
김원국 박명숙 송규민 박균도 최준명
오경희 김동희 김민우 김연경 김진호
노주철 박은석 박준성 박혁민 서성봉
이강진 이나운 이민지 이선주 진현근
황청희

보고서 초록

과제고유번호	PE99606	해당단계 연구기간	2018. 01. 01 - 2018. 12. 31	단계 구분	기초
연구사업명	중사업명	(미래바다보기)해양연구를 통한 기후변화 예측 및 대응			
	세부사업명	한반도 해역 고해상도 재분석자료 생산과 활용			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	한반도 해역 고해상도 재분석자료 생산과 활용			
연구책임자	김영호	해당단계 참여연구원수	총 : 30 명 내부: 16 명 외부: 14 명	해당단계 연구비	정부: 424,000천원 기업: 천원 계 : 424,000천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 30 명 내부: 16 명 외부: 14 명	총 연구비	정부: 424,000천원 기업: 천원 계 : 424,000천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 해양·순환기후연구센터		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	71면
<p>○ 한반도 해역 고해상도 재분석자료 생산과 검증</p> <ul style="list-style-type: none"> - 해면고도의 차이로부터 가상의 수온과 염분 프로파일을 생성하고 이를 동화함으로 위성해면고도계 자료동화 시스템을 개발하여 전지구 모델에 시범 적용함. - NCEP GODAS, ECMWF ORAS4, KIOST ESM_V1, SODA 3.4.2 등 다양한 해양재분석 자료를 비교 검증함. <p>○ 재분석자료 검증을 위한 제주해협 표층해류 모니터링</p> <ul style="list-style-type: none"> - 이상신호 발생시 신속대응 시스템을 구축함으로, 제주해협 표층해류 모니터링 시스템의 연간 시계열 자료수집율을 91.5%로 유지함. HF Radar 표층해류자료를 실측자료와 비교 검증함. <p>○ 모형의 성능 향상을 위한 아중규모 난류혼합의 모수화</p> <ul style="list-style-type: none"> - CARTHE 부이를 사용하여 제주북부지역에서 4월과 11월에 표층 부이실험을 수행함. 반일주조가 강하게 관찰된 제주해협에서는 수평전단과 아중규모순환이 난류확산을 주도하였으며, 온도전선과 평균장이 강한 대한해협에서는 중간규모이상의 순환이 난류확산을 주도하였음. <p>○ 재분석자료 기반 고수온 저염분 현상의 구조와 영향 평가</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1982년부터 올해 2018년까지 고수온 이벤트의 빈도(Event frequency), 총 발생 일수(duration), 최대 강도(Intensity)의 장기 데이터베이스를 구축함. 한반도 고수온 현상은 북서태평양(필리핀해) 해수면 온도 상승과 대기 고기압이 강화되어 나타나는 폭염과 상관성이 높은 것으로 보임. - 경기만 연안해역에서의 해면염분 추정 알고리즘을 개발하고 GOCI에 적용함. <p>○ 재분석자료 기반 생태계모델 적용과 활용</p> <ul style="list-style-type: none"> - 우리나라에서 발생하는 코클로디니움 적조(HAB)의 장기관측자료 결과에 근거하면, 하계 중국 양쯔강으로부터 유입되는 강우량과 양쯔강 희석수 확장경로 및 범위가 적조발생 및 비발생 지역과 밀접한 관계가 있는 것으로 파악되었음. 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	한반도 해역, 해양재분석 자료, 고주파 레이다, 표층해류, 생태계 변화, 기후변화			
	영 어	Korean marginal seas, ocean reanalysis, high-frequency radar, sea surface current, marine ecosystem change, climate change			

요 약 문

I. 제 목

한반도 해역 고해상도 재분석자료 생산과 활용

II. 연구개발의 목적 및 필요성

□ 필요성

기후변화가 진행됨에 따라 한반도 해역에서도 해양환경의 급격한 변화가 관찰되고 있으며 이를 진단하고 예측하기 위한 고해상도 해양 재분석자료*에 대한 수요가 증가하고 있다.

* 재분석자료란 두 개의 자료를 통계적으로 오차가 가장 작도록 융합하는 기법인 자료동화기법을 적용하여 일정 기간 동안의 관측자료를 수치모델에 동화하여 생산되는 자료를 뜻함. 조밀한 모델격자에서 생산되며 관측자료의 특성이 통계적으로 오차가 작도록 반영된 자료이기 때문에 흔히 관측 자료로 간주되기도 함.

□ 목적

이 과제에서는 기존에 구동되고 있는 북서태평양 고해상도 해양예측 시스템을 활용하여 고해상도 해양재분석 자료를 생산하고 활용하는 연구를 수행하고자 하였다. 이를 위하여 자료동화 모듈을 개선하여 장기간 재분석 자료를 생산하고, 표층해류 실시간 모니터링 시스템 및 해양혼합 모수화기법 개발 등을 통해 해양재분석 자료를 검증하고 개선하고자 하였다. 또한 해양재분석 자료를 활용하여 한반도 해역 고수온/고염분 현상의 진단과 원인 규명, 쿠로시오 및 아열대역에서 에디변동성 진단 등을 수행하고자 하였다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

□ 연구기간

2018. 01. 01 - 2018. 12. 31

□ 연구개발의 내용

1. 한반도 해역 고해상도 재분석자료 생산과 검증

- 해면고도 자료동화 시스템 구축
- 재분석자료와 관측자료의 대한해협과 동중국해 단면 통과 수송량 비교 분석
- 재분석 자료와 대양관측 자료로부터 대만 동남방-아열대역 서부 난수 에디 분포 특성 분석

2. 재분석자료 검증을 위한 제주해협 표층해류 모니터링

- 연간 80%이상 자료획득을 위한 실시간 하드웨어 및 자료 상시모니터링 시스템 구축
- 제주해협에 초음파 해류계 장착 고정점 해양관측부이를 단기간(1개월 이내) 설치, 운영하여 HF 레이더 관측 표층해류 자료의 정확성 검증 및 해류의 연직 구조 파악
- 제주해협에 운용중인 시계열 해류정보를 조사하여 정확성 검증에 기여
- 1m 표류부이 및 난류혼합 모수화를 위한 표층부이간의 동시관측을 통한 표층해류 자료 신뢰도 분석

3. 모형의 성능 향상을 위한 아중규모 난류혼합의 모수화

- 표층부이 실험
- 통계적 기법을 사용한 난류특성 분석
- Random Walk와 비선형 stochastic model에 관한 문헌조사를 수행

4. 재분석자료 기반 고수온 저염분 현상의 구조와 영향 평가

- 위성에 기반한 자료를 이용한 한반도 해역 고수온 현상 특성 분석
- 기존 관측 자료 기반 한반도 해역 고수온 현상 유형 분류
- 현장조사 자료에 기반한 황해지역 해수 CDOM과 염분도 상관관계 분석

5. 재분석자료 기반 생태계모델 적용과 활용

- 우리나라 적조생물(HABs)의 장기변동과 양쯔강 희석수의 관계
- 우리나라 주변해역에서 산호류의 분포 변화특성
- 우리나라 권역별 어류 어획량 변화특성

IV. 연구개발결과

1. 한반도 해역 고해상도 재분석자료 생산과 검증

- 해면고도 자료동화 시스템 구축

- 위성해면고도자료를 이용하여 수온 및 염분의 연직구조를 개선하는 자료동화시스템을 구축하였음.
- 수치실험을 통해 검증한 결과, 해당 기법을 적용하였을 때 열대해역, 북서태평양 및 남극해의 표층염분 bias가 감소하였음.
- 해당기법을 적용한 결과, North Equatorial Undercurrent (NEUC)에 대하여 현실적으로 모의함.
- 재분석자료와 관측자료의 대한해협과 동중국해 단면 통과 수송량 비교 분석
 - 4개 재분석자료에서 산출된 수송량을 관측과 비교하여 평가함.
 - NCEP GODAS는 제주 남방 단면과 대한해협 단면의 수송량이 관측수송량과 일치함으로 가장 높은 신뢰도를 보임.
 - ECMWF ORAS4와 KIOST ESM_v1은 각각 대한해협 단면에서 관측 수송량과 일치하지만 제주 남방 단면의 수송량과는 차이를 나타냄으로 재분석자료에서 유속과 수심의 처리에 주의를 요함.
 - SODA 3.4.2는 대한해협 수송량에서 관측보다 2배 이상 큰 평균값과 변동을 보임으로써 자료의 정확도와 신뢰도에 문제점을 제기함.
- 재분석 자료와 대양관측 자료로부터 대만 동남방-아열대역 서부 난수 에디 분포 특성 분석
 - KIOST ESM_v1과 NCEP GODAS 재분석자료의 표층수온(SST)을 OISST와 HadISST 관측 데이터셋과 비교 분석하였음.
 - KIOST ESM_v1과 NCEP GODAS는 북서태평양 아열대해역의 장기 월평균 표층수온분포에서 OISST 및 HadISST와 거의 일치하는 패턴을 나타냄으로 이 두 재분석자료의 SST 재현 성능이 양호한 것으로 평가됨.
 - 특히, KIOST ESM_v1은 아열대 해역내에서 하계에 형성되는 난수 에디들의 위치와 공간적 범위에서 관측과 매우 유사한 성능을 보임.

2. 재분석자료 검증을 위한 제주해협 표층해류 모니터링

- 고주파레이다를 이용한 제주북부해역 광역표층해류의 연간 시계열 자료수집율은 91.5%로써 계획된 80%이상의 수집율을 상회함.
- 운용되는 고주파레이다 실시간 감시시스템 구축을 통한 이상발생시 신속한 대응 시스템 구축완료
- HFR로 관측된 제주북부 표층해류자료는 RCM 해류계와 상호 비교시 비교적 높은 상관계수($R=0.629\sim 0.831$)를 보임.
- 두가지 형태의 표류 부이 비교실험한 결과, 해류계를 이용한 결과 대비 표류부이와의 관계에서 높은 상관계수($R=0.93$)를 보였으며, 표층부이를 이용하는 것이 수심 1미터 이내의 표층해류를 관측하는데 유용한 것으로

평가함.

3. 모형의 성능 향상을 위한 아중규모 난류혼합의 모수화

- 표층부이 실험
 - CARTHE 부이를 사용하여 제주북부지역에서 4/25~4/31과 11/26~11/27에 실험을 수행함.
 - 4월 실험의 경우 모든 부이가 대마도 북부해역을 통과하였지만 11월 실험에서는 대마도 북쪽과 남쪽 모두를 통과함. 또한 북서풍에 의하여 드로그가 없는 부이들이 남하하여 일본 남부해역으로 진출하였음.
 - 약 35%의 부이가 제주와 일본 해안에 상륙하였고, 이는 바람의 영향에 의한 것으로 추정됨.
- 통계적 기법을 사용한 난류특성 분석
 - 통계적 방법을 이용하여 난류특성을 조사한 결과, 물리적 특성이 다른 제주해협과 대한해협에서 각각 다른 확산통계가 나타남.
 - 반일주조가 강하게 관찰된 제주해협에서는 수평전단과 아중규모순환이 난류확산을 주도하였음
 - 온도전선과 평균장이 강한 대한해협에서는 중간규모이상의 순환이 난류확산을 주도하였음.
- Random Walk와 비선형 stochastic model에 관한 문헌조사를 수행
 - 해양해색위성에서 산출된 속도장의 속도분포가 non-Gaussian을 보임에 따라 Random walk은 사용은 지양되어야 하고 고차원의 비선형 stochastic model의 사용이 권장됨.

4. 재분석자료 기반 고수온 저염분 현상의 구조와 영향 평가

- 위성에 기반한 자료를 이용한 한반도 해역 고수온 현상 특성 분석
 - 지난 30년간 해수면 온도 중 상위 10 퍼센타일의 값을 경계값으로 이용하여, 3일 이상 경계값을 넘을 때를 고수온 이벤트 발생으로 정의함.
 - 우리나라 해역에서의 고수온의 경계값을 각각 남해는 약 27°C, 동해는 약 25°C로 적용하면 고수온 탐지가 가능함.
- 기존 관측 자료 기반 한반도 해역 고수온 현상 유형 분류
 - 우리나라 여름철의 해수온 장기 트렌드에 대하여 분석함. 황해는 감소하는 추세가 나타났으며, 동중국해와 동해, 남해는 상승하는 추세를 보임.
 - 1982년부터 올해 2018년까지 고수온 이벤트의 빈도(Event frequency), 총 발생 일수(Duration), 최대 강도(Intensity)의 장기 데이터베이스를 구축함.

- 고수온의 트렌드가 다소 다르게 나타나는 5개의 해역을 정의하여, 각 해역의 고수온 경년 변동성의 시계열을 분석함.
- 이러한 고수온 현상의 원인을 파악하고자 장기 고수온 일수 변동의 정규직교함수(EOF) 분석을 수행하였음.
- 주성분(PC1)은 북서태평양(필리핀해) 해수면 온도의 warming과 큰 상관관계를 보임.
- PC2와 대기 500 hPa의 Geopotential height와 상관관계를 구했을 때, 동서로 길게 늘어져 동해와 서해에 영향을 주는 고수온의 경우 대기 고기압이 강화되어 폭염과 연관성이 큰 것을 의미함.
- 현장조사 자료에 기반한 황해지역 해수 CDOM과 염분도 상관관계 분석
 - 경기만 연안해역에서의 SSS 추정 알고리즘을 개발하고 GOCI에 적용하였음. 그 결과를 HYCOM 자료와 비교 검증을 수행하였음.

5. 재분석자료 기반 생태계모델 적용과 활용

- 우리나라 적조생물(HABs)의 장기변동과 양쯔강 희석수의 관계
 - 우리나라에서 발생하는 코클로디니움 적조(HAB)의 장기관측자료 결과에 근거하면, 하계 중국 양쯔강으로부터 유입되는 강우량과 양쯔강 희석수 확장경로 및 범위에 따라서 적조발생 및 비발생과 밀접한 관계가 있는 것으로 파악되었음.
 - 특히, 양쯔강 희석수가 동중국해를 걸쳐 제주북단(SSFZ; South Sea Frontal Zone)에 영향을 강하게 미치는 년도에는 적조발생 면적이 현저히 떨어지는 경향을 파악함.
- 우리나라 주변해역에서 산호류의 분포 변화특성
 - 산호류 검붉은수지맨드라미 및 가시수지맨드라미의 생물학적 특성, 분포 범위, 분포지역별 피도를 구체화
- 우리나라 권역별 어류 어획량 변화특성
 - 수온상승으로 1990년 이후 연근해 해역의 어획량은 고등어류, 멸치, 살오징어 등 난류성 어종이 증가하고, 명태, 꽂치, 도루묵 등 한류성 어종의 감소가 두드러지게 나타남.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 해양순환모델 및 오염물질 확산 모델링의 검증 등 수치모델 성능 강화를 위한 자료로 활용함.
- 한반도 남, 서해 해수순환 및 물질 플럭스 연구의 기반 자료로 활용

- 우리나라 주변 해역 고수온 현상을 예측하기 위한 토대를 마련
- 생물기반 한반도 기후변화 취약(빈감) 해역 및 관리해역 검토를 위한 기반 자료
- 우리나라 유해유독생물(HABs; Harmful Algal Bloom species) 대발생에 관한 과거자료 재해석은 미래 발생할 수 있는 적조피해 최소화를 위한 관리방안을 제시할 수 있는 기초자료로 활용
- 한반도주변해역의 미래 해양생물자원 변동 예측 등

S U M M A R Y

I. Title

Production and Application of High-Definition Reanalysis Data in Marginal Seas of Korea

II. Necessities and Objectives of Research and Development

Necessities

As climate change progresses, a sudden change in the marine environment is also observed in the Korean Peninsula, and demand for high-resolution reanalysis data* to diagnose and predict it is increasing.

* Reanalysis data means the data produced by assimilating observations into a numerical model for a given period of time by applying the data assimilation technique, which is a technique that combines the two data with the smallest statistical error. Often considered observational data because it is produced in high-resolution model grids and the characteristics of observational data are statistically small errors.

Objectives

The project was designed to develop a real-time monitoring system for surface ocean currents and a ocean mixing parameterization to improve data assimilation modules, produce reanalysis data for organs, and validate and improve the reanalysis data by utilizing the existing high-resolution marine forecasting system in the northwest Pacific. Further, the Commission intended to use the data produced to diagnose and identify the causes of high temperature/salt phenomenon in the Korean Peninsula, diagnose eddy volatility in the Kuroshio and subtropical regions, and combine it with biochemical models.

III. Contents of Research and Development

Period of research

01 January, 2018 – 31 December, 2018

Contents of research

1. Production and Verification of High-resolution Reanalysis Data in Korean Sea

- Development of the Data Assimilation System using the Satellite Sea Level data
- Comparison of the volume transports in the Korea Strait and the East China Sea from the reanalysis data with the observed transport
- Comparison of the reanalysis data with the observations on the distributions of warm eddies in the western part of the subtropical North Pacific

2. Monitoring of sea surface currents in northern Jeju Strait using HFR for the verification of reanalysis data

- The annual time series data collection rate of the regional surface ocean currents in the northern Jeju Island using HFR is 91.5%
- Establishment of quick response system in case of problems through real-time monitoring system
- The surface current data of the northern of Jeju Island observed with HFR have a relatively high correlation coefficient ($R=0.629\sim 0.831$) when compared with the RCM current meter
- In comparison with the two-type drifts HFR and surface drifts show high correlation coefficient ($R=0.93$).
- In the verification of HFR, it is possible to minimize the error by using the drift buoys within 1-meter of the sea-surface layer.

3. Parameterization of the Submesoscale Turbulent Mixing for Improving Model Performance

- Surface Buoy Experiment
- Analysis of turbulent flow characteristics using statistical models
- Literature survey on the random walk and the non-linear stochastic model

4. Evaluation of structure and effect of high temperature and low salinity phenomena based on the reanalysis data

- Analysis of high temperature phenomena in the Korean Peninsula based on the satellite data
- Classification of high temperature phenomena in the Korean Peninsula based on the observations
- Correlation between salt and sea water CDOM in Yellow Sea region based on the in-situ data

5. Ecological model application and utilization

- Relationship between long-term trends of red tide organism (HABs) and extension of Yangtze diluted water in Korean water
- Distributional characteristics of soft coral in Korean water
- Long-term catch trends of commercial fish

IV. Results

1. Production and Verification of High-resolution Reanalysis Data in Korean Sea

- Development of the Data Assimilation System using the Satellite Sea Level data
 - To increase simulate performance for vertical structures of the temperature and salinity, establishing the advanced Data Assimilation System which is require the Satellite Sea Level data
 - When this method was applied, the lower SSS bias show in tropical ocean, the Northwest Pacific and the Antarctic Ocean than the DA-free results.
 - Realistically simulated North Equatorial Undercurrent (NEUC) similar to the previous results.
- Comparison of the volume transports in the Korea Strait and the East China Sea from the reanalysis data with the observed transport
 - Volume transports estimated from the four reanalysis datasets were evaluated with the comparison of observed transport.
 - NCEP GODAS reveals high credibility, showing coincidence of transports in the Korea Strait and the East China Sea section with the observed by Takikawa and Yoon(2005).

- ECMWF ORAS4 and KIOST ESM_v1 also show the Korea Strait transport corresponding to the observation.
- However, for the calculation of transport, they need more careful treatment in their velocity and depth information, as they show some difference in the transports between the Korea Strait and the East China Sea section. SODA 3.4.2 reveals the lowest credibility by showing the largest difference with the observation.
- Comparison of the reanalysis data with the observations on the distributions of warm eddies in the western part of the subtropical North Pacific
 - Sea surface temperature(SST) in the KIOST ESM_v1 and NCEP GODAS reanalysis data were compared with the observation-based OISST and HadISST datasets in the northwestern Pacific subtropical region.
 - KIOST ESM_v1 and NCEP GODAS show a good performance in their SST product as they represent a very close pattern of monthly mean SST to the OISST and HadISST.
 - Especially KIOST ESM_v1 produced a very exact pattern of warm eddies corresponding to the OISST for their location and seasonal variations.

2. Monitoring of sea surface currents in northern Jeju Strait using HFR for the verification of reanalysis data

- The annual time series data collection rate of the regional surface ocean currents in the northern Jeju Island using HFR is 91.5%
- Establishment of quick response system in case of problems through real-time monitoring system
- The surface current data of the northern of Jeju Island observed with HFR have a relatively high correlation coefficient ($R=0.629\sim 0.831$) when compared with the RCM current meter
- In comparison with the two-type drifts HFR and surface drifts show high correlation coefficient ($R=0.93$).
- In the verification of HFR, it is possible to minimize the error by using the drift buoys within 1-meter of the sea-surface layer.

3. Parameterization of the Submesoscale Turbulent Mixing for Improving Model Performance

- Surface Buoy Experiment
 - The observations had been performed twice in April and November on the Northern Sea of Jeju island
 - In the April experiment, all the buoy passed through the northern sea of Tsushima island, but it passed both north and south of the island in November experiments. And some buoys had been moved south into the southern coast of Japan due to the northwest wind.
 - About 35% of the buoys which is starting from the South Sea, had been landed to Jeju island or coastal region in Japan by the impact of the wind.
- Analysis of turbulent flow characteristics using statistical models
 - Diffusion statistics appear in the Jeju Strait and the Korea Strait, which have different physical characteristics.
 - Horizontal shear stress and sub-mesoscale circulation led the diffusion of turbulence in the Jeju Strait where semidiurnal surface was strongly observed.
 - In the Korea Strait, where the temperature front was strong, mesoscale circulations led the turbulent flow diffusion.
- Literature survey on the random walk and the non-linear stochastic model
 - As the velocity distribution of speed field calculated from the oceanographic satellite shows non-Gaussian, the use of random walk should be stopped and the use of high-dimensional nonlinear static model is recommended.

4. Evaluation of structure and effect of high temperature and low salinity phenomena based on the reanalysis data

- Analysis of high temperature phenomena in the Korean Peninsula based on the satellite data
 - The value of the upper 90 percentile of sea level temperature over the past 30 years is defined as the occurrence of a high temperature event when the boundary value exceeds the boundary value.
 - boundary value of the high water temperature each southern Korea is about 27 degrees Celsius, the East Sea is about 25 °C, which is

applied, by high temperature event can be detected.

- Classification of high temperature phenomena in the Korean Peninsula based on the observations
 - Analyzed the long - term trends of the JJA SST around the Korea Peninsula. The descent trend shows in the Yellow Sea. But increase trends show in the East China Sea, East Sea and South Sea.
 - Builds long-term database of the high-temperature event such as frequency, duration, and Intensity from 1982 to 2018.
 - Analysis on the inter-annual variability of the high temperature in 5 marginal seas with different high temperature trends
 - EOF analysis of the long-term duration variability for high-temperature events was performed to determine the cause of this phenomena.
 - Main components (PC1) are strongly correlated with the warming of sea level temperatures in the northwest Pacific (Philippine Sea).
 - When the correlation between the PC2 and 500hPa Geopotential height is obtained, for high temperature in the east-west pattern, the atmospheric high pressure is strengthened, which means a large connection with the heat wave.
- Correlation between salt and sea water CDOM in Yellow Sea region based on the in-situ data
 - SSS estimation algorithm has been developed and applied to GOCI. And its results have been compared with HYCOM data.

5. Ecological model application and utilization

- Relationship between long-term trends of red tide organism (HABs) and extension of Yangtze diluted water in Korean water
 - We confirmed the non-outbreak mechanism of red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* in Korean water related with extension of Yangtze diluted water by much rainfall of Yangtze River area in early July, which is very important role in controlling the *C. polykrikoides* population densities.
 - In particular, huge red tide event of *C. polykrikoides* in Korean water did not occur when salinity was relatively kept to low (i.e., 28-30 psu) in the southern area (SSFZ: South Sea Frontal Zone)

including the Jeju channel based on the long-term data of red tide.

- Distributional characteristics of soft coral in Korean water
 - We demonstrated the bio-geographical distribution pattern and mean coverage of Coral *Dendronephthya suensoni* and *Dendronephthya spinulosa* in Korean water
- Long-term catch trends of commercial fish
 - Due to temperature increase related global warming, catch of cold water fish such as pollock and pacific saury was decreased, whereas catch of warm water fish (i. e., mackerel, anchovy and squid) was gradually increased since 1990.

V. Application plan of results and products

- To enhance performance of numerical models, including verification of marine circulation model and pollutant diffusion modeling
- Use as a basis data for study on Ocean Circulation and Material Flux on the South Sea and West Sea
- Foundation for Predicting High Temperature Event in the Marginal Seas Surrounding of Korea
- To minimize red tide damage, we prepared the technical development and management tool based our long-term HABs trends and extension of Yangtze diluted water
- It can be utilized as indicator species of climate change and water temperature increase based on the coral migration pattern toward northern area in Korean water
- It can be used to predict the future fishery resource in Korean water based on the past fish catch data related with water temperature distributional pattern

핵심어 : 한반도 해역, 해양재분석 자료, 고주파 레이더, 표층해류, 생태계 변화, 기후변화

KEYWORDS : Korean marginal seas, ocean reanalysis, high-frequency radar, sea surface current, marine ecosystem change, climate change

C O N T E N T S

Chapter 1. Introduction	1
Section 1. Necessities and Objectives of Research and Development	1
Section 2. Goals and Contents of Research and Development	3
Chapter 2. Domestic and International Status of Technology Development	5
Section 1. Status of Domestic Technology Development	5
Section 2. Status of International Technology Development	7
Chapter 3. Contents and results	9
Section 1. Production and Verification of High-resolution Reanalysis Data in Korean Sea	9
Section 2. Monitoring of sea surface currents in northern Jeju Strait using HFR for the verification of reanalysis data	23
Section 3. Parameterization of the Submesoscale Turbulent Mixing for Improving Model Performance	32
Section 4. Evaluation of structure and effect of high temperature and low salinity phenomena based on the reanalysis data	36
Section 5. Ecological model application and utilization	45
Chapter 4. Goal attainment and external contribution of Research and Development	57
Section 1. Appropriateness of research performance in comparison to plan	57
Section 2. Achievement and excellence of Research and Development performance	59
Section 3. Contribution to relevant fields	65

Chapter 5. Application plan of results and products	67
Section 1. The Technological, Economic and Social Effects of Research Results	67
Section 2. Utilization Planning of Research Results	68
Chapter 6. Reference	69

목차

제 1 장 서론	1
제 1 절 연구개발의 필요성	1
제 2 절 연구개발 목표 및 내용	3
제 2 장 국내외 기술개발 현황	5
제 1 절 국내 기술개발 현황	5
제 2 절 국외 기술개발 현황	7
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	9
제 1 절 한반도 해역 고해상도(4km 해상도) 재분석자료 생산과 검증	9
제 2 절 재분석자료 검증을 위한 제주해협 표층해류 모니터링	23
제 3 절 모형의 성능 향상을 위한 아중규모 난류혼합의 모수화	32
제 4 절 위성-재분석자료 기반 고수온 저염분 현상의 구조와 영향 평가	36
제 5 절 재분석자료 기반 생태계모델 적용과 활용	45
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	57
제 1 절 계획대비 연구수행의 적절성	57
제 2 절 연구개발 성과의 달성도 및 우수성	59
제 3 절 관련분야에의 기여도	65
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	67
제 1 절 연구결과의 기술적, 경제적, 사회적 파급 효과	67
제 2 절 연구결과의 활용계획	68
제 6 장 참고문헌	69

그림 목 차

그림 3.1.1. 본 연구에서 적용된 해수면 고도 자료동화 알고리즘(CH96) 개요도 (상) 해수면 고도 과 대모의 사례(위성자료 < 수치모델), (하) 해수면 고도 과소모의 사례 (위성자료 > 수치 모델)	10
그림 3.1.2. 동해 3차원 변분법 시스템에 적용된 해면고도 자료동화 시스템 모식도	11
그림 3.1.3. 본 연구에 적용된 EnOI기법 기반 해면고도 자료동화 시스템 모식도	11
그림 3.1.4. 재분석 자료별 전지구 표층염분 분포 (1993-2002)	13
그림 3.1.5. 대한해협 수송량 산정을 위한 각 재분석자료들의 대한해협 대표 단면들	16
그림 3.1.6. 각 재분석자료의 대표단면별 대한해협 수송량 변동과 관측 수송량 변동 (단위 : Sv) 18	
그림 3.1.7. 재분석 자료 및 위성자료의 SST 분포도 (2001-2010 평균, 좌상-KIOST ESM_v1, 우상 -NCEP GODAS, 좌하-OISST, 우하-HadISST) Comparison of the SST distribution in the reanalysis data and the observed data in the western part of the subtropical North Pacific Ocean(upper left-KIOST ESM_v1, upper right-NCEP GODAS, lower left-OISST, lower right-HadISST, averaged from 2001 to 2010)	20
그림 3.1.8. 동서방향지형류수평분포 (26.8-27.4 사이 평균) (Qiu et al., 2013)	21
그림 3.1.9. 한국해양과학기술원 전지구 재분석 자료에 대한 자료별 & 수심별 (500-900m) U 수평 분포 (2007-2011 평균) (좌)DASK_2015, (중)KIOST_ESM_v1, (우)KIOST_ESM_v2 21	
그림 3.1.10. 동서방향 지형류 연직 분포 (Qiu et al., 2013)	22
그림 3.1.11. 자료별 & 수심별 (500-900m) U 연직 분포 (2007-2011 평균) (좌)DASK_2015, (중)KIOST_ESM_v1, (우)KIOST_ESM_v2	22
그림 3.2.1. 2018년도 제주 고주파레이다 시계열 수집을	24
그림 3.2.2. 2018년도 제주 고주파레이다 공간 수집을	24
그림 3.2.3. 보안모듈이 적용된 상시모니터링	25
그림 3.2.4. 실시간 관측정보제공 화면	25
그림 3.2.5. 고주파레이다 자료 검정을 위한 실험 정점도	26
그림 3.2.6. K1 표류부이(수면 하 1미터관측)와 Carthe 부이(원반형태) 실험장면	26
그림 3.2.7. RCM을 이용한 수면 하 1미터해류관측	27
그림 3.2.8. 고정점 부이 계류도	27
그림 3.2.9. 고정점 부이에 부착된 RCM(청색)과 HFR(적색)자료의 유속 시계열 변화	

(좌측:J08, 우측:J20)	28
그림 3.2.10. HFR와 RCM의 회귀분석 (상 : J08(Stn.2), 하 : J20(Stn.3))	28
그림 3.2.11. 표류부이에서 관측된 위치정보기반 레이더자료의 중첩빈도 (좌측:Carthe, 우측:K1)	29
그림 3.2.12. HFR와 Drifter간의 회귀분석 (좌측:Carthe drifter, 우측: K1 drifter)	30
그림 3.2.13. HFR와 KHOA-25H의 M2조류타원 공간 비교 분석	31
그림 3.2.14. 김녕 Radial 관측현황	31
그림 3.2.15. 고내 Radial 관측현황 (좌측:관측일반상황, 우측:관측최소상황)	31
그림 3.3.1. 4월말(좌)과 11월말(우)에 투입된 CARTHE 표층부이 이동경로	32
그림 3.3.2 초기 2주간의 표층부이 속도자료를 이용한 Rotary spectra. 수직 선분은 1/4일주조 (분홍색), 반일주조(파란색), 일주조(녹색)를 나타냄	33
그림 3.3.3. 초기 2주 동안의 상대분산도 (좌:4월 실험, 우:11월 실험). 오른쪽	34
그림 3.3.4. 표층부이를 이용한 Finite Size Lyapunov Exponent (FSLE)	35
그림 3.3.5. 2차 종방향 성분의 속도구조함수(회색선)와 Helmholtz 분해에 의한 회전(파란선) 성분과 발산(빨간색)성분	35
그림 3.4.1. 본 연구에서 고수온 발생 정의를 위해서 사용된 해수면 온도 경계값. NOAA OI Sea Surface Temperature 일자료를 이용하여 7-9월 해수면 온도의 상위 10퍼센타일 값을 이용함	36
그림 3.4.2. OISST, MGDSST, C-GLORS 해수면 자료로 분석된 1982년부터 2018년까지 7-9월 해수면 온도 평균장의 선형회귀 분석을 통한 해수면온도 트렌드(°C/34년)	37
그림 3.4.3. 1982-2018년 7-9월 고수온 빈도, 총일수, 강도의 선형회귀식을 이용한 장기 트렌드 분 포(Shading). 점으로 표시된 지역은 회귀식의 상승트렌드가 95% 신뢰도로 유의한 지역 을 나타냄	38
그림 3.4.4. 고수온의 시계열 분석을 위해서 정의된 5개의 해역-1:'East Sea',2:'EastSea2',3:'SouthSea', 4:'West/YellowSea',5:'East China Sea'	38
그림 3.4.5. 위 그림에서 정의된 5개의 해역에서의 1982년부터 2018년까지 고수온 총일수의 장기시 계열 결과. *: 트렌드가 95% 신뢰도로 유의함을 나타냄	39
그림 3.4.6. 고수온의 장기변동성의 정규직교함수(EOF)과 관련된 PC(주성분). 두 개의 주된 모드 (PC1, PC2)는 각각 48.9%와 13.4%의 변동성을 설명함	40
그림 3.4.7. PC2 시계열과 대기 500 hPa 지위고도장(GPH500)과의 상관관계 분포	41
그림 3.4.8. 1994년과 2001년 상층기압 아노말리 분포 비교	42
그림 3.4.9. 1994년과 2001년 7-9월 우리나라와 서태평양의 평년대비 해수면온도 Anomaly 분포	42

그림 3.4.10. 경기만 연안 해역의 SSS 추정 알고리즘 및 현장자료	43
그림 3.4.11. 알고리즘을 적용한 경기만의 표층염분도 (좌)2013년 3월 21일, (우)2013년 3월 25일	44
그림 3.4.12. GOCI 기반 자료 및 HYCOM 수치모델의 표층 염분 비교 (좌) 2013년 3월 21일, (우) 2013년 3월 25일	44
그림 3.5.1. 국내 HABs 주제별 연구동향	45
그림 3.5.2. 우리나라 남해안의 염분변화와 적조발생 경향	46
그림 3.5.3. 우리나라 남해안의 년도별 적조발생해역의 면적 및 양쯔강 희석수 확장의 관계	48
그림 3.5.4. 양쯔강 저염수의 확장 및 적조미발생 모식도	49
그림 3.5.5. <i>Dendronephthya suensoni</i> (검붉은수지맨드라미)의 수중생태 모습	50
그림 3.5.6. 검붉은수지맨드라미의 분포범위 및 지역별 평균피도. 1)서귀포 문섬; 2)서귀포 송악산; 3)성산 일출봉; 4)제주 북촌; 5)백도; 6)거제 안경섬; 7)거제 흥도; 8)부산 남형제섬	51
그림 3.5.7. <i>Dendronephthya spinulosa</i> (가시수지맨드라미)의 수중생태 모습	53
그림 3.5.8. 가시수지맨드라미의 분포범위 및 지역별 평균피도. 1)서귀포 문섬; 2)서귀포 송악산; 3)성산 일출봉; 4)제주 북촌; 5)거문도; 6)백도; 7)거제 흥도; 8)부산 남형제섬	53
그림 3.5.9. 수온의 연평균추이 및 주요 어종 어획량	54
그림 3.5.10. 해역권별 주요어종 어획량 변화(통계청: 어업생산동향조사)	55

표 목 차

표 3.1.1. 재분석자료 생성에 사용된 수치모델 입력자료 및 자료동화 입력자료	11
표 3.1.2. 기존의 생성한 전지구 재분석 자료(DASK_2015, KIOST_ESM_v1) 및 해수면 고도자료동화를 적용하여 생성한 전지구 재분석 자료 (KIOST_ESM_v2)	12
표 3.1.3. 분석에 사용된 국내외 재분석자료들	15

Figure List

Figure 3.1.1 Schematic Diagram for the Data Assimilation System using Sea Level Algorithm (CH96) Applied in this Study	10
Figure 3.1.2. Schematic diagram for 3DVar using Sea Level Data over the East Sea	11
Figure 3.1.3. Schematic diagram for the Data Assimilation System based on the EnOI	11
Figure 3.1.4. Global SSS Distribution by Reanalysis Data (1993-2002)	13
Figure 3.1.5. Representative sections adopted for the estimation of volume transport in the Korea Strait in the reanalysis data	16
Figure 3.1.6 Comparison of the volume transport in the reanalysis data and the observation (Takikawa and Yoon, 2005) in the Korea Strait and the East China Sea (unit in Sv)	18
Figure 3.1.7 Comparison of the SST distribution in the reanalysis data and the observation in the western part of the subtropical North Pacific (upper left-KIOST ESM_v1, upper right-NCEP GODAS, lower left-OISST, lower right-HadISST, averaged from 2001 to 2010)	20
Figure 3.1.8 Horizontal Structure for zonal geostrophic current (26.8 - 27.4sigma level mean) (Qiu et al., 2013)	21
Figure 3.1.9. Horizontal distribution of U 500-900m depth from KIOST global reanalysis data (2007-2011 Mean)	21
Figure 3.1.10. Vertical Structure for zonal geostrophic current (Qiu et al., 2013)	22
Figure 3.1.11. Vertical distribution of U from KIOST global reanalysis data (2007-2011 Mean)	22
Figure 3.2.1. HFR time series collection rate operated in Jeju Island in 2018	24
Figure 3.2.2. HFR spatial collection rate operated in Jeju Island in 2018	24
Figure 3.2.3. HFR Monitoring system with security module applied	25
Figure 3.2.4. The screen shot of real-time observation information	25
Figure 3.2.5. Map of study area to the verification of HFR data	26
Figure 3.2.6. The Experimental scene of K1 and Carthe drifters	26
Figure 3.2.7. The current observation below 1 meter of the sea level by RCM	27
Figure 3.2.8. The Schematic mooring Design of the ocean observation buoy	27

Figure 3.2.9. The Time series data of observed velocity in RCM and HFR	28
Figure 3.2.10. The Regression analysis of HFR and RCM	28
Figure 3.2.11. The Number of overlaps between drifters and HFR data	29
Figure 3.2.12. The Regression analysis of HFR and Drifter	30
Figure 3.2.13. M2 tidal ellipses of HFR and KHOA-25H data	31
Figure 3.2.14. The Radial Distribution at the Kimyoung site	31
Figure 3.2.15. The Radial Distribution at the Gonae site	31
Figure 3.3.1. Trajectories of CARTHE drifters in April and November experiments	32
Figure 3.3.2 Rotary power spectra	33
Figure 3.3.3. Relative dispersion	34
Figure 3.3.4. Finite Size Lyapunov Exponent	35
Figure 3.3.5. Second order longitudinal velocity structure function; Rotational and divergent components of structure functions decomposed by Helmholtz decomposition	35
Figure 3.4.1. NOAA OI SST thresholds for definition of marine heat wave in this study. The 90 percentiles of NOAA OI daily SST values in last 30 years used for the thresholds.	36
Figure 3.4.2. Summer mean SST trends ($^{\circ}\text{C}/34$ years) from 1982 to 2018 obtained three different SST data sets (OISST, MGDSST, C-GLORS)	37
Figure 3.4.3. Long-term(1982-2018) trends of JAS marine heat wave event frequency, duration, and intensity. The dotted area indicates the statistically significant region with a 95 % confidence level	38
Figure 3.4.4. Five regions of this study for marine heat wave time series analyses: 1: 'East Sea 1', 2: 'East Sea 2', 3: 'South Sea', 4: 'West/Yellow Sea', 5: 'East China Sea'	38
Figure 3.4.5. Time series of inter-annual variation of marine heat wave duration from 1982 to 2018. * denotes the significant region with a 95 confidence level.	39
Figure 3.4.6. Two primary EOF modes of the inter-annual variatin of marine heat wave duration.	40
Figure 3.4.7. The correlation between PC2 time series and 500 hPa GPH	41
Figure 3.4.8. Upper-tropospheric GPH anomaly distributions for 1994 and 2001	42
Figure 3.4.9 Monthly SST anomaly for 1994 and 2001.	42

Figure 3.4.10. Scatter-plots between GOCI SSS retrieval results and in situ observations in Gyeonggi Bay	43
Figure 3.4.11. The distribution of GOCI SSS (left) 21 March 2013 (right) 25 March 2013	44
Figure 3.4.12. Comparison between GOCI - 및 HYCOM- based SSS (left) 21 March 2013, (right) 25 March 2013	44
Figure 3.5.1. Long -term research trends of red tide species (HABs: Harmful Algal Blooms) in Korean coastal water	45
Figure 3.5.2. Relationship between long-term trend of red tide and salinity condition in the southern area, Korea	46
Figure 3.5.3. Relationship between outbreaking area of red tide and extension of Yangtze diluted water in the southern area, Korea	48
Figure 3.5.4. An illustration for outbreaking mechanism of red tide organism related with extension of Yangtze diluted water	49
Figure 3.5.5. An underwater image of <i>Dendronephthya suenoni</i>	50
Figure 3.5.6. Distribution pattern and mean coverage of <i>D. suenoni</i>	51
Figure 3.5.7. An underwater image of <i>Dendronephthya spinulosa</i>	53
Figure 3.5.8. Distribution pattern and mean coverage of <i>D. spinulosa</i>	53
Figure 3.5.9. Changes in annual average water temperature and catches of major fish	54
Figure 3.5.10. Changes in catch of annual fish in Korean coastal and oceanic water(East Sea, South Sea and Yellow Sea)	55

Table List

Table 3.1.1. Input Data of Numerical Model used to generate Reanalysis data and Data Assimilation System	11
Table 3.1.2. Global reanalysis data (DASK_2015, KIOST_ESM_v1) without satellite data in Data Assimilation Process and global reanalysis data generated by applying sea level elevation in Data Assimilation (KIOST_ESM_v2)	12
Table 3.1.3 Reanalysis data used in the validation	15

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 필요성

1. 기술적 측면

- 최근 지구온난화에 의해 전지구 수온이 상승하고 있으며, 그중에서도 한반도에 영향을 주는 북서태평양 쿠로시오해역에서 수온 상승의 기울기가 가장 가파른 증가하고 있는 추세임.
- 쿠로시오 수송량의 중장기적 변동성의 규명은 한반도 해역의 해양환경에 나타나는 중장기적인 변동을 이해하고 예측하는데 핵심적 주제가 됨.
- 이러한 한반도 해역 해양환경 변화에 대응하기 위해 해양예측 시스템의 개발이 필요함. 또한 해양생지화학 모형의 개발이 필요함.
- 기존 한국해양과학기술원의 해양예측 시스템은 해면고도 자료동화 모듈을 포함하고 있지 않으며, 해류 모의 성능의 개선이 요구됨.
- 대기 폭염 연구와 달리 고수온 연구는 기상학적 원인과 해양 순환의 복합적인 영향으로 나타날 수 있어, 대기-해양 상호작용에 대한 이해가 필요함. 두 분야의 전문가를 인프라로 가지고 있는 우리원에서 선도적으로 원천연구를 수행하는 것이 적당함
- 해양모델링은 널리 사용되고 있지만 아격자규모 이하의 물리현상은 구현할 수 없고 아중(100m-10km) 규모의 난류혼합을 검증할 수 있는 수단은 부족할 실정임. 아중규모의 물리현상의 검증 및 난류혼합의 모수화를 위해서는 이에 상응하는 실제 관측값이 필요함.

2. 경제·산업적 측면

- 우리나라 고수온 현상에 대한 수산 피해가 증가되고 있기 때문에 이에 대한 이해와 예측기술의 개발은 매우 중요함 (2017년 약 68억 수준으로 추정)
- 최근 38년 표층수온이 0.9°C 상승하여 살오징어, 멸치, 고등어, 참다랑어 등의 난류성어종 생산이 증가한 반면, 명태 도루묵 등 냉수어종의 생산성이 급격하게 감소함.

- 기후변화에 따른 해양환경변화는 해양생물상 및 자원변동에 중요한 영향을 미치며, 과거 자료를 바탕으로 생태 모델을 적용하여 미래 예측 가능한 수산생물자원 확보 및 자원 생산에 관한 관리 방안 및 대책 마련이 시급함.
- 또한 고염수 등 자연재해가 급증하는 가운데, 이와 관련된 산업의 부가가치 창출 및 피해 경감에 기여할 수 있음.

3. 사회·문화적 측면

- 정부는 과학기술기본법 제7조(과학기술기본계획)에 따라 매 5년마다 과학기술발전에 관한 중장기 정책목표와 방향을 설정하고 정부의 과학기술 관련 계획과 시책을 종합한 과학기술기본계획을 수립·시행하고 있음.
- 정부 국정과제인 기후변화 대응, 해양환경 보전 등과 연계되며 해양수산 12대 실행전략인 해양과학조사 역량 강화, 해양환경 개선 등과 관련됨.

4. 해양과기원 임무 및 경영목표 등과의 연계성

- 원의 기능인 해양환경에 관한 연구와 관련됨
- 원 경영 목표 중의 하나인 세계적 해양연구기관으로의 위치 매김을 위해서 필요
- 우리의 연구 전략 목표인 “해양의 순환 변동 연구를 통한 기후변화 예측 및 대응”과 관련

제 2 절 연구개발 목표 및 내용

1. 연구개발의 최종목표

- 한반도 해역 고해상도 재분석자료 생산과 활용
 - 한반도 해역 고해상도(4km 해상도) 재분석자료 생산과 검증
 - 재분석자료 검증을 위한 제주해협 표층해류 모니터링
 - 모형의 성능 향상을 위한 아중규모 난류혼합의 모수화
 - 위성-재분석자료 기반 고수온 저염분 현상의 구조와 영향 평가
 - 재분석자료 기반 생태계모델 적용과 활용

2. 연구개발의 목표 및 내용

세부 성과목표	세부 연구개발 내용 및 범위
한반도 해역 고해상도 재분석자료 생산과 검증	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해면고도 자료동화 시스템 구축 ○ 재분석자료와 관측자료의 대한해협과 동중국해 단면 통과 수송량 비교 분석 ○ 재분석 자료와 대양관측 자료로부터 대만 동남방-이열대역 서부 난수 에디 분포 특성 분석
재분석자료 검증을 위한 제주해협 표층해류 모니터링	<ul style="list-style-type: none"> ○ 제주해협 표층 해류 상시모니터링 시스템 구축 ○ 고정점 관측부이를 통한 자료 검증 및 분석 ○ 시,공간 결측자료 원인 분석 및 해결방안 도출 ○ 2타입별 표류 부이 비교실험을 통한 관측자료 상호 검증
모형의 성능 향상을 위한 아중규모 난류혼합의 모수화	<ul style="list-style-type: none"> ○ 남해 아중규모 난류혼합의 모수화를 위한 표층부이 실험 ○ 남해 제주해협의 난류특성 분석 ○ 난류혼합 모수화 모형의 선행연구
재분석자료 기반 고수온 저염분 현상의 구조와 영향 평가	<ul style="list-style-type: none"> ○ 위성에 기반한 자료를 이용한 한반도 해역 고수온 현상 특성 분석 ○ 기존 관측 자료 기반 한반도 해역 고수온 현상 유형 분류 ○ 현장조사 자료에 기반한 황해지역 해수 CDOM과 염분도 상관관계 분석 ○ 홍수/여름철 양자강 저염수 확산 시기 전후의 황해 염분도 변화 관측
재분석자료 기반 생태계모델 적용과 활용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 생지화학모델 수립 ○ 주변해역 산호류 및 해양유해생물 생존 걱정 범위 및 분포도 작성

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술개발 현황

- 한반도 해역 고해상도 해양재분석 시스템 현황
 - 한국해양과학기술원에서는 앙상블 최적내삽기법을 이용한 자료동화시스템을 개발하여 북서태평양 해양예측에 사용하고 있으나 장기가 재분석자료를 생산한 바는 없음.
 - 기후변화와 관련한 극한 기상 현상(폭염, 한파, 태풍 등)의 영향에 대해서는 국내 학계에서 대규모의 연구가 이뤄지고 있음. 또한, 극한 기상 현상의 장기 트렌드 진단, 메커니즘이 규명, 모델링을 통한 미래전망 등 다양한 주제의 연구에서 국내 과학자들이 국제 협력을 주도하고 있음.
 - 국내에서 기후변화와 관련된 해수면 온도는 계절 평균적인 관점에서 많이 연구되었으며, 짧은 기간에 일어나는 극한 해양 현상인 고수온에 대한 국내 연구 수행한 바 없음.
- 동중국해 쿠로시오 수송량과 대마난류 수송량의 상관성 비교를 통한 재분석 자료 검증
 - 한반도 해역에 지대한 영향을 미치는 대마난류와 쿠로시오의 변동과 그 상관성에 관하여는 근래에도 학계에 많은 관심을 불러오고 있으나 현장관측자료의 단속성과 부족으로 인하여 아직까지 그 관계가 분명하게 밝혀지지 못한 상태임.
 - 근래에 10여년 이상 집적된 위성고도계 해수면자료를 활용하여 광역 해양에서 해류와 수송량을 산정하는 연구가 시도됨으로 인해 북태평양 십년 진동과 쿠로시오의 중장기적 변동성 및 지역해 해양변동과의 상관 관계 등이 점차 학계의 주목을 받고 있음.
 - 이에 따라 여러 기후기관들에서 현장관측자료의 부족을 보완하고 광역의 해양 변동을 분석하기에 매우 유용한 고해상도 재분석자료의 생산과 활용에 더욱 관심과 노력을 기울이고 있음.
- 고주파레이다를 활용한 실시간 광역 표층해류장 모니터링 분야
 - 국립해양조사원(KHQA)은 백령도해역, 여수만, 부산신항 인근과 대한해협에서 군산대학교(KNU)는 금강하구역, 서울대학교(SNU)는 동해에서 해양레이더를

설치하여 표층해류 자료를 수집 중이며 2017년 현재 국내에 운용되는 HFR은 총 50기 이상임.

- 한국해양과학기술원에서는 13MHz 고주파레이더를 이용하여 제주북부해역에서 70km이상 광역해역의 실시간 표층해류관측을 진행 중임.

○ 모형의 성능 향상을 위한 아중규모 난류혼합의 모수화

- 해역과 계절에 따라서 난류특성이 다르기 때문에 모델검증을 위한 관측실험은 해역과 계절에 따라 진행되어야 함. 하지만 한반도 주변해역에서 입자추적모델의 아중규모 난류혼합 모수화를 위하여 쓰일 수 있는 관측자료는 제한적이기 때문에 한반도 근처해역에서 유효한 관측자료를 이용한 모수화는 수행되지 못하였음.

제 2 절 국외 기술개발 현황

- 고주파레이다를 활용한 실시간 광역 표층해류장 모니터링 분야
 - 미국, 독일, 일본 등에서 HFR 장비가 개발되어 현재는 프랑스, 노르웨이, 캐나다, 영국, 호주 등 전 세계 해양선진국에서 해류 및 파랑관측에 활용되고 있음.
 - 미국의 경우 NOAA 산하 IOOS(Integrated Ocean Observing System) 조직이 전국 연안 해양레이더망을 구성하여 자료를 통합 분석, 관리하고 최종적으로 NBDC(National Buoy Data Center)에 관측자료를 보관하여 일반에게 제공되고 있음.(IOOS, 2009; Harlan et al. 2010)
- 해양재분석 자료를 이용한 북서태평양 물리현상 연구
 - Gordon 등(2004)과 Andres 등(2009)은 PDO (태평양 십년진동) 지수와 동중국해상의 쿠로시오 수송량이 강한 양의 상관관계를 가지며, 이로써 PDO가 음의 지수일 때 쿠로시오는 약해지고, 동중국해 육붕역을 통해 우리나라 해역으로 유입되는 대마난류 수송량은 증대되며, 동해 해수면은 상대적으로 더 증가할 것임을 시사하였음. Soeyanto 등(2013)은 대만 동부해역부터 동중국해 대륙붕단 중간까지 쿠로시오 수송은 주로 대만 남동방에서 도달하는 중규모에디에 의존하며, 이후부터 토카라해협까지는 오키나와 북동방의 에디들에 의존함을 보였음. 이 연구 결과는 PDO 시그널과 중규모에디와의 상관관계가 쿠로시오의 경년 변동과 더 나아가 쿠로시오에서 분기되는 대마난류의 수송량에도 중요한 요인임을 제시함. 그러나 동중국해 해류 수송량의 변동성을 파악하기에는 아직까지 현장관측자료의 부족으로 인하여 많은 어려움이 있음.
 - 지난 수십 년간 지구온난화에 따른 극한기상/해양 현상의 영향은 전 세계적으로 많이 보고되었음. 특히, 지구 온난화에 따른 폭염, 한파, 폭우, 태풍 등 극한 기상현상의 대한 변화 및 미래 전망은 인류의 주된 관심사로 학계에서 지난 수십 년 동안 광범히 하게 연구되어 왔음.
 - 그러나, 해양의 고온현상인 고수온 현상은 국제적으로도 최근야 본격적으로 연구되기 시작됨.
 - Oliver et al.(2018)이 전구 해역에 고수온 현상의 장기 트렌드를 분석하였다. 이 연구를 제외하고는 선행 연구들은 대부분 특정해의 고수온 현상 사례 연구들이며 호주, 유럽, 동태평양 지역의 사례에 제한됨.

- 최근 Nature Communication에는 각 지역의 장기 트렌드 및 메커니즘 규명 연구, 지구온난화와 관련된 영향력 등에 대한 다양한 연구의 고수온 필요성이 제기됨(Frölicher and Laufkötter, 2018). 특히, 우리나라를 포함한 동아시아 해역 및 서태평양의 고수온 연구는 현재까지 출판된 연구가 거의 없는 것으로 확인됨.

○ 모형의 성능 향상을 위한 아중규모 난류혼합의 모수화

최근 표층부이나 해양위성과 같은 여러 원격탐사 플랫폼을 이용하여 아중간규모 혼합을 관찰하고 있고 이를 모델결과와 비교/분석하여 모델을 검증하는데 사용되고 있음. 통계적 모델을 이용하여 관측자료에서 얻은 난류를 통계적으로 구현하고 이를 모수화에 적용하는 방법으로 입자추적모델의 정확성을 높이고 있음.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 한반도 해역 고해상도(4km 해상도) 재분석자료 생산과 검증

1. 해면고도 자료동화 시스템 구축

○ 해양 자료동화 기법 개선 및 적용

위성관측 해면고도 자료를 동화하는 방안을 개발하였다. 본 연구에서는 해면 고도 위성자료를 표층에 직접적으로 동화하는 것이 아니라 해면 고도 자료와 수치모델의 차이를 통해, 프로파일의 구조를 개선하는 기법을 적용하였다.

이번 연구에 적용된 기법의 이론적 배경은 아래와 같다(Cooper and Haines, 1996). 해수면 고도는 수온·염분의 연직구조를 반영한 결과이다 따라서 해면고도 위성자료와 수치모델의 차이를 알면 수온 염분의 프로파일 구조를 개선할 수 있음을 의미한다.

바닥층의 압력변화(ΔP_s)는 수층 전체의 밀도 변화를 의미하며, 이는 표층의 해수면 고도 변화를 의미한다(수식 1.1, 수식 1.2). 수치모델에서 추출한 프로파일을 수직 방향으로 이동하는 정도(Δh)는 아래와 같은 수식으로 표현이 가능하다(수식 1.3).

$$g \int_0^{-H} \Delta \rho dz = \Delta P_s \quad (\text{수식 1.1})$$

$$\Delta P_s = \rho_0 g \Delta \eta \quad (\text{수식 1.2})$$

$$\Delta h = \frac{\Delta P_s}{g[\rho_0 - \rho(-H)]} \quad (\text{수식 1.3})$$

해당 기법(이하 CH96)은 표층의 해면고도 변화로 인한 해저면 압력 변화는 불변함을 가정으로 한다. 이는 수층의 질량이 변하지 않고, 잠재와도(Potential Vorticity)를 보존하면서 연직 구조를 개선해야 함을

의미한다. 이는 수치모델의 프로파일을 수직 방향으로 이동시킨 후, 표층 또는 바닥층의 물을 채우면 위의 조건을 충족하는 가상의 프로파일을 생성할 수 있다(그림 1.1).

해당 알고리즘(CH96)을 활용하여 동해 해역에 대한 3차원 자료동화 변분법을 적용한 선행 연구 사례가 있다 (Kim et al., 2009). 해당 연구는 수치모델을 통해 SSHA에 대한 3차원 자료동화 변분법을 수행한 후, CH96 알고리즘을 통해, 모든 격자에서 연직 프로파일을 보정하였다(그림 1.2).

본 연구에서는 먼저, CH96 알고리즘을 이용하여 가상의 프로파일을 생성한 뒤, 수온·염분 연직 구조 개선을 위한 자료동화의 기준 자료로 활용된다(그림 1.2). 이를 KIOST 지구시스템 모형에 시범 적용하여 해면고도 자료동화의 효과를 파악한다.

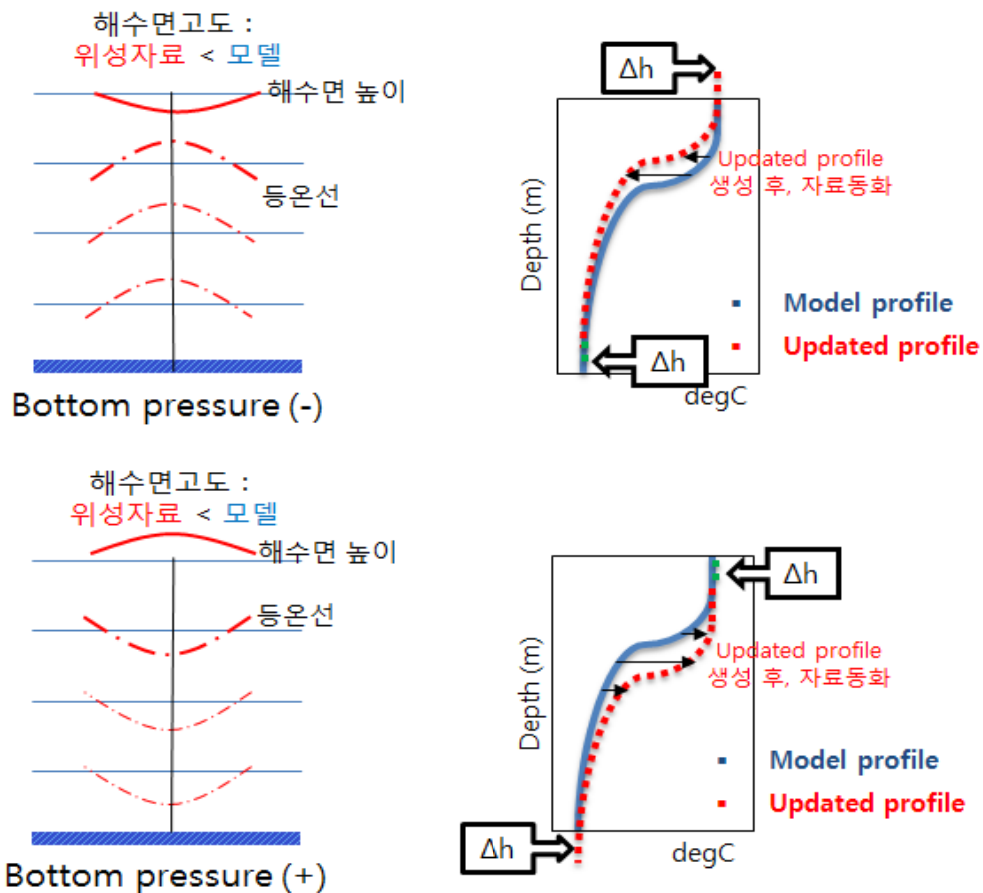


그림 3.1.1 본 연구에서 적용된 해수면 고도 자료동화 알고리즘(CH96) 개요도
 (상) 해수면 고도 과대모의 사례(위성자료 < 수치모델),
 (하) 해수면 고도 과소모의 사례 (위성자료 > 수치모델)

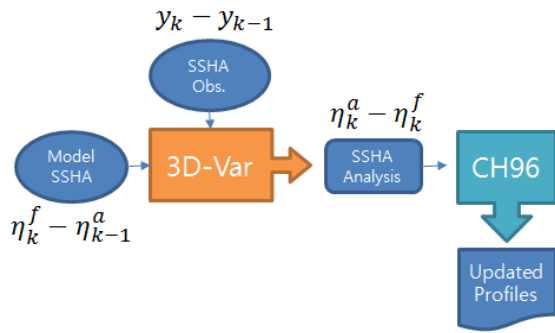


그림 3.1.2. 동해 3차원 변분법 시스템에 적용된 해면고도 자료동화 시스템 모식도

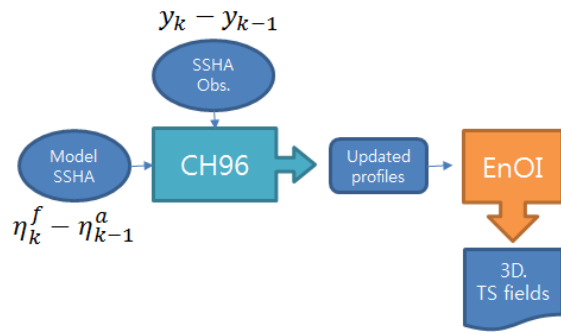


그림 3.1.3. 본 연구에 적용된 EnOI기법 기반 해면고도 자료동화 시스템 모식도

○ 해면고도 자료동화 성능 실험

- 개발된 해면고도 자료동화 시스템의 성능을 파악하기 위해서 KIOST 지구시스템 모형에 시범 적용하였다. 모형의 수평 해상도는 1°*1°임. 해당 모형에 사용된 입력자료는 다음과 같다(표 1.1).

표 3.1.1 재분석자료 생성에 사용된 수치모델 입력자료 및 자료동화 입력자료

	자료 종류	자료명
수치모델 입력자료	해면경계자료	ECMWF ERA interim data
자료동화 입력자료	SST (daily run)	NOAA OISST data
	SLA (weekly run)	AVISO DT data
	TS Profile (weekly run)	ARGO data, KODC data

분석에 사용된 재분석자료는 다음과 같음(표 1.2). DASK_2015는 CM2.1기반 전 지구 해양순환 모델을 활용하여 생성한 재분석 자료다. KIOST_ESM_v1 및 KIOST_ESM_v2는 KIOST 지구시스템 모형을 이용하여 자료동화를 수행하여 얻은 재분석 결과다. KIOST_ESM_v1과 KIOST_ESM_v2의 가장 큰 차이는 바로 해면고도 인공위성 자료에 대한 자료동화 적용 여부다. KIOST_ESM_v1는 T·S profile 및 SST 위성자료만 동화한 반면, KIOST_ESM_v2는 T·S profile, SST 위성자료와 해면고도 자료를 추가적으로 동화하였다(표 1.2).

표 3.1.2. 기존의 생성한 전지구 재분석 자료(DASK_2015, KIOST_ESM_v1) 및 해수면 고도자료동화를 적용하여 생성한 전지구 재분석 자료 (KIOST_ESM_v2)

	기반 모델	해상도	기간	EnOI 기법 적용 대상
DASK_2015	CM2.1	360*200*50	1947-2015	T,S profile, SSHA, SST
KIOST_ESM_v1	CM2.5	360*200*52	1980-2011	T,S profile, SST
KIOST_ESM_v2	CM2.5	360*200*52	1980-2014	T,S profile, SSHA, SST

본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 해면고도 자료를 활용한 자료동화기법을 적용하여 장기적분 재분석 자료를 생성하였다. 자료의 명칭은 KIOST_ESM_v2이며 자료의 기간은 2007년부터 2014년까지다.

생성한 재분석자료에 대하여 관측대비 계절별 표층염분 분포에 대한 분석을 수행하였다. 분석은 MetOffice에서 제공하고 있는 EN4 monthly data를 활용하였다. 이에 대한 재분석자료 및 관측자료의 표층 차이를 살펴보았다.

먼저 DASK_2015의 경우, 북극 및 남극 주변해역에 대하여 강한 양의 bias가 나타났다. 또한 적도 부근 동태평양 및 서태평양 일부해역을 제외하고 전반적으로 음의 bias가 나타났다. 특히 인도네시아 및 대서양에서 강한 음의 bias가 나타났다. KIOST_ESM_v1은 DASK_2015에 비하여 카리브해 등 일부해역을 제외하고 염분의 bias가 전지구 전역에 걸쳐 감소하였다. 특히, 남극해의 양의 bias의 강도가 약해졌다. KIOST_ESM_v2는 KIOST_ESM_v1에 비해 열대 해역 및 북태평양 해역에서의 염분 bias가 개선되었다. 또한 남극해를 따라 강하게 나타나던 양의 bias가 약한 음의 bias로 개선되어 나타났다(그림 1.4).

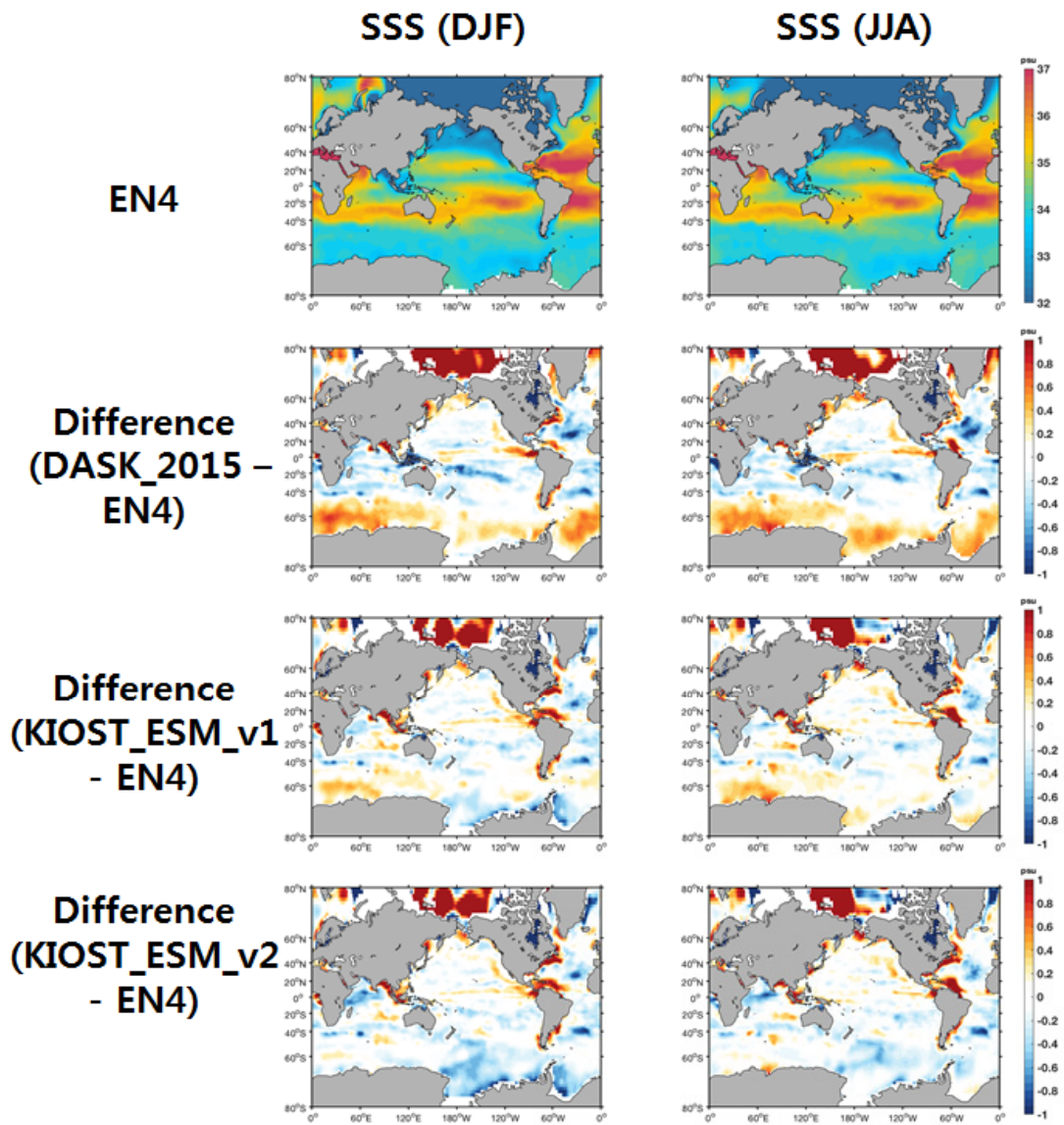


그림 3.1.4. 재분석 자료별 전지구 표층염분 분포 (1993-2002)

2. 재분석자료와 관측자료의 대한해협과 동중국해 단면 통과 수송량 비교 분석

○ 대한해협 수송량 기존 연구

대한해협을 통과하는 대마난류의 해수 수송량에 대하여는 역사적으로 여러 선행 연구가 있어왔다. 초기에는 주로 대한해협 양단의 조석자료를 활용한 순압적 해류의 산정과 그에 기반한 수송량 파악 연구가 이루어졌다(Yi, 1970). 이후 해류계 계류 방식의 정점 해류관측이나 표층 뜰개 관측 등을 통한 직접적 측류 방식의 대마해류 관측이 시도되었다(Isobe, 1994; Teague et al., 2002; Lie and Cho, 2016). 그러나 대한해협을 통과하는 해류 수송량을 파악하는데 있어 가장 충실한 방법으로는 근래에 이루어진 대한해협 횡단 ADCP 연속관측이라 할 수 있다(Takikawa and Yoon, 2005). Takikawa and Yoon(2005)은 부산과 일본 시모노세키를 왕복하는 여객선 선저에 ADCP를 장착하여 십년 이상의 장기 해류관측자료를 획득하였다. 이로부터 산출된 대마난류의 대한해협 통과 수송량은 연평균 2.6 Sv(1 Sv은 해당 단면에 초당 106 m³의 유량이 통과하는 크기) 정도이고 수송량의 최대는 10월(약 3.0 Sv), 최소는 2월(2.1 Sv)에 각각 나타난다. 이 연구에서는 먼저 주요 재분석자료들의 자료현황을 살펴보고 기존 장기 해류관측자료와 비교함으로써 대한해협 수송량에 대한 재분석자료들의 신뢰도를 평가하고자 하였다.

○ 수송량 산정을 통한 재분석자료 평가

표 1.3은 이 연구에서 활용한 국내외의 재분석자료들을 보여준다. ECMWF ORAS4는 위경도 각각 1도 해상도의 전 지구 자료를 1958년부터 2017년까지 제공하며 이는 사용한 재분석자료들 가운데 가장 긴 기간의 재분석자료이다. NCEP GODAS는 경도 1도, 위도 0.5도 간격의 자료를 1981년부터 최근까지 제공한다. SODA 3.4.2는 사용한 재분석자료 가운데 비교적 높은 공간 해상도를 가지며 경도 0.5도, 위도 약 0.5도 간격으로 1980년부터 자료를 제공한다. KIOST_ESM_v1은 한국해양과학기술원의 자료동화시스템에서 생산한 재분석자료로서 경도 1도, 위도 약 1도의 해상도를 가지며 비교적 수직적으로 높은 해상도를 가진다. 이상의 모든 재분석자료들은 월 평균치로 제공받아 사용하였다.

표 3.1.3 분석에 사용된 국내외 재분석자료들

사용 자료명	변수명				자료 해상도	자료 범위	변수 시간 간격	기간
	수온	염분	유속	해수면 변위				
ECMWF ORAS4	thetao	so	uo,vo	zos	360*180*42	전지구	월 평균	1958-2017
NCEP GODAS	pottemp	salt	ucur,vcur	sshg	360*418*40	전지구	월 평균	1981-2017
SODA 3.4.2	temp	salt	u,v	ssh	720*330*50	전지구	월 평균	1980-2015
KIOST_ESM_v1	temp	salt	u,v	ssh	360*200*52	전지구	월 평균	1980-2011

각각의 재분석자료들에서 한반도와 한국과 일본 사이의 대한해협이 지형적으로 어떻게 표현되고 있는지를 파악하기 위하여 각 재분석자료에서 제공하는 대한해협 주위의 육지와 해양 격자를 도면상에 나타냈다(그림 1.5). ECMWF ORAS4와 KIOST ESM_v1은 한반도 남부지역과 일본 큐슈 사이에서 대한해협이 2개 정도의 수심 격자로 구성되어 있다. 이에 비해 NCEP GODAS와 SODA 3.4.2는 그 보다 많은 수의 수심 격자로 표현되고 있는데, SODA의 경우에는 일본측 연안과 대한해협의 지리적 분포가 실제와 상당히 다르게 설정된 문제점을 안고 있다.

수송량 산정을 위하여는 각 단면의 유속과 더불어 해당 단면의 수심 자료를 필요로 한다. 일반적으로 순환모델에서는 평탄하지 않은 해저 지형의 경우 Tracer (수온 또는 염분) 격자의 수심과 인접한 속도 격자의 수심이 다르게 주어진다. 또한 각 자료동화시스템에서 재분석자료를 최종적으로 사용자들에게 제공할 때 해당 자료를 생산한 원래의 해양순환모델들의 격자 체계와는 다른 격자 체계로 변환하여 자료를 제공할 가능성도 있다. 따라서 수송량 계산 시 원래 산출된 유속 격자의 수심을 통한 수송량과 재분석자료에서 제공하는 유속의 수심 정보를 통한 수송량 간에 공간적으로 일관성이 떨어질 수가 있다. 이러한 점을 감안하여 이 연구에서는 각 재분석자료의 유속 정보가 대한해협 관측수송량을 얼마나 적절히 재현하는지 파악하기 위하여 각 재분석자료에서 대한해협 통과수송량을 대표할 수 있는 단면(그림 1.5의 1번 단면과 2번 단면들)을 2개씩 선정하여 고찰하였다.

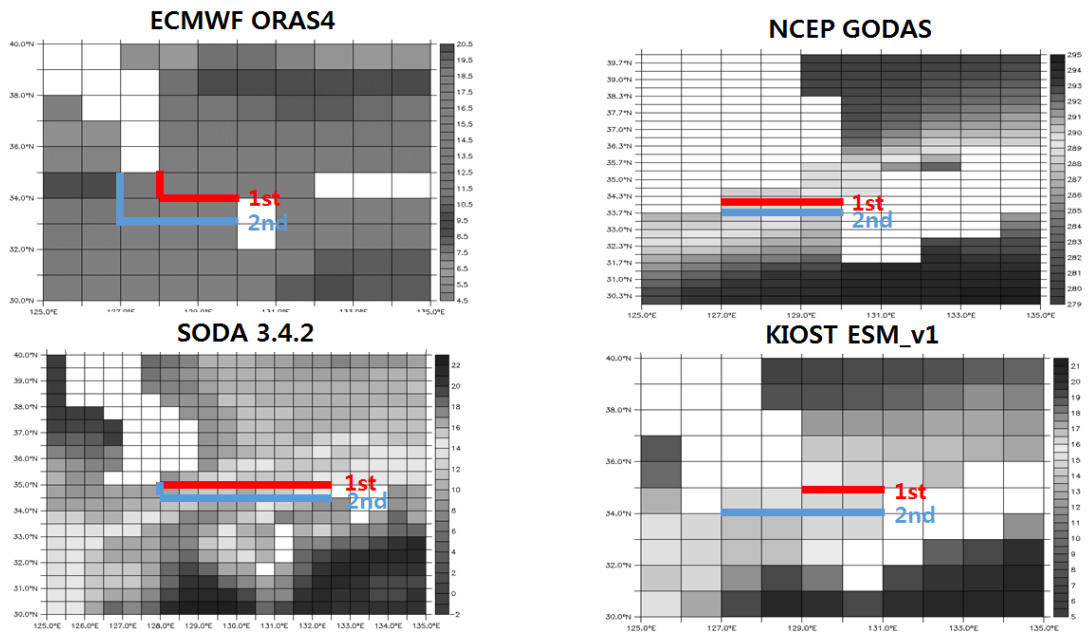


그림 3.1.5. 대한해협 수송량 산정을 위한 각 재분석자료들의 대한해협 대표 단면들

그림 1.6는 위로부터 ECMWF ORAS4, NCEP GODAS, SODA 3.4.2와 KIOST ESM_v1에서 산정된 대한해협 월평균수송량과 관측된 수송량의 변동 형태를 나타낸다. 또한 제주 남방의 33N에 나란한 동중국해 단면에서 통과하는 해수수송량도 함께 나타냈다. 먼저 ECMWF ORAS4의 경우, 1번 단면(짙은 파란색 선)과 2번 단면(파란색 선) 및 3번 단면(엷은 파란색 선; 그림 1.1xx에는 표시하지 않았으나 1번 단면과 2번 단면의 중간에 설정하였음)간에 변동의 형태는 일치하나 1 Sv 이상에 달하는 상당히 큰 수송량 차이가 존재함을 볼 수 있다. 인접한 격자간에 이와 같은 차이가 발생함은 주로 수송량 산정에 주요 인자로 작용하는 수심에 기인한다고 여겨지며, 그 가능성에 대해서는 앞서 언급한 바와 같다. 흥미 있는 점은 1번 단면의 통과 수송량이 제주 남방 단면과 거의 일치함으로 1번 단면이 자료동화시스템에서 산출된 대한해협 통과수송량을 가장 정확히 대표한다고 할 수 있겠으나, 관측된 대한해협 수송량(녹색 선, Takikawa and Yoon, 2005)은 3번 단면의 수송량과 그 크기와 변동에서 가장 잘 일치한다는 점이다.

다음으로 나타낸 NCEP GODAS는 1번 단면(갈색 선)과 제주 남방 단면의 수송량(짙은 갈색 선)이 거의 일치함을 보여주며, 관측과도 비교적 좋은 일치를 보인다. 그에 비해 2번 단면의 수송량은 관측에 비해 0.5~1.0 Sv 정도 더 작은 값의 변동을 나타낸다. SODA 3.4.2는 1번 단면의 수송량

변동이 제주 남방 단면과 비교적 일치하는 모습을 보이지만 관측보다 모두 2 Sv 이상 큰 값을 제시하고 있다. 이것은 자료동화시스템 내에서 해양순환모형의 대한해협 주변의 지형과 일본 연안의 지리적 분포가 부정확하게 설정된데 기인하는 것으로 여겨진다. KIOST_ESM_v1은 1번 단면과 2번 단면의 수송량 값이 서로 일치하는 양호한 결과를 보여주는데, 관측과 비교하여 볼 때 평균적으로 0.3 Sv 정도 작으며 그 진폭도 관측보다 작다.

결과적으로 NCEP GODAS가 제주 남방 단면 수송량과 1번 단면 수송량 및 관측수송량이 거의 일치함으로 가장 신뢰도 높은 재분석자료로 평가된다. 다음으로 ECMWF ORAS4와 KIOST ESM_v1은 각각 3번 단면과 1번(혹은 2번) 단면에서 관측과 일치하는 결과를 보여주지만 제주 남방 단면의 수송량과 차이가 존재함으로 수송량 산정 시 재분석자료의 유속과 수심의 취급에서 면밀한 주의를 요하는 것으로 평가된다. SODA 3.4.2는 대한해협 수송량의 평균과 진폭에서 관측보다 2배 이상 큰 변동을 보임으로써 분석한 4개 재분석자료 가운데 정확도와 신뢰도에서 가장 큰 문제점을 안고 있는 것으로 평가된다.

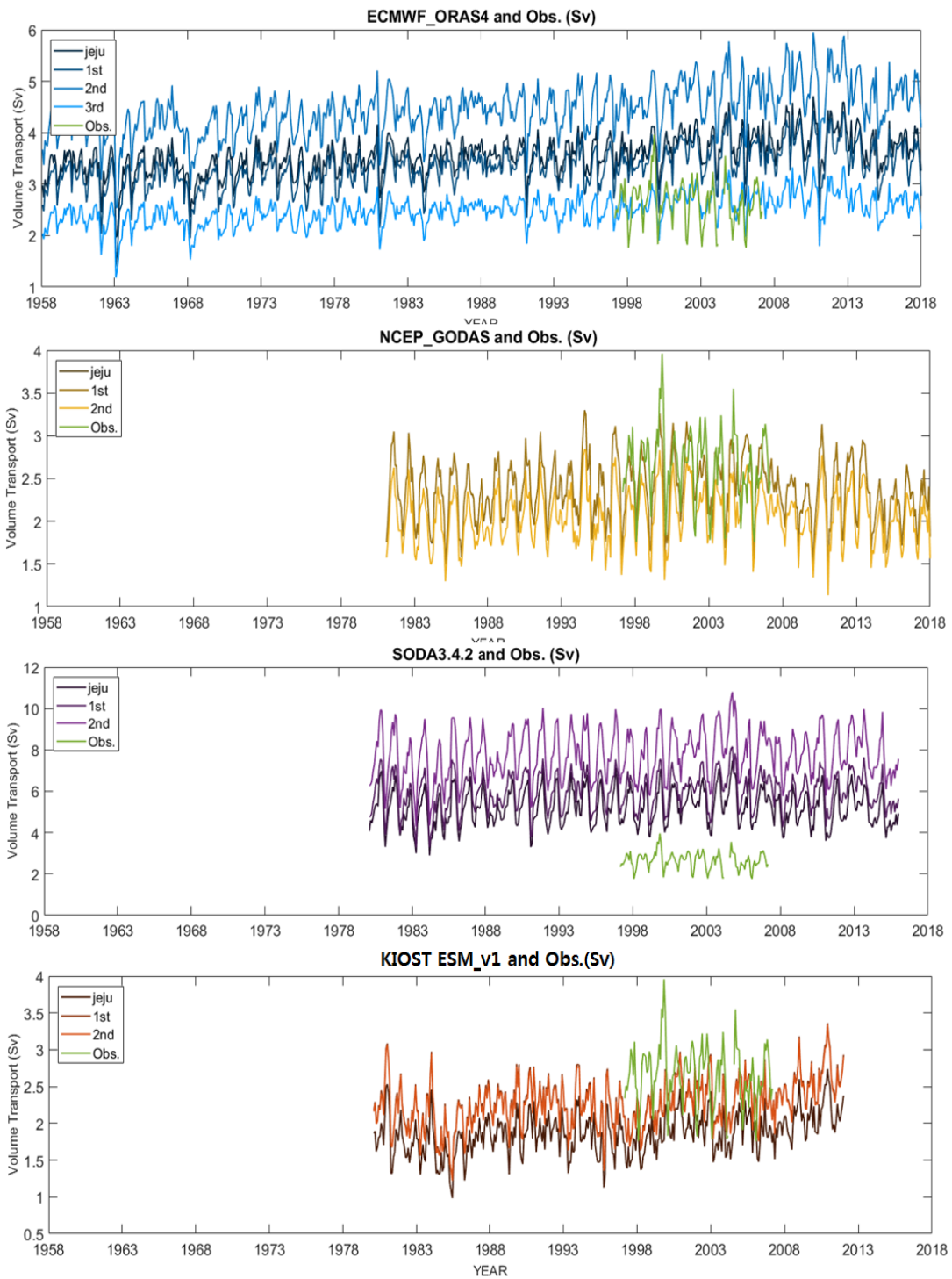


그림 3.1.6 각 재분석자료의 대표단면별 대한해협 수송량 변동과 관측 수송량 변동
(단위 : Sv)

3. 재분석자료와 관측자료의 대만 동남방-아열대해역 서부 난수 에디 분포 비교

○ 재분석자료와 관측자료의 난수역 특성 분포 비교

그림 1.7는 대만과 필리핀 동방, 즉 북서태평양 아열대해역의 서부지역에서 KIOST ESM_v1과 NCEP GODAS 재분석자료와 관측에 기반한 격자자료인 OISST와 HadISST 데이터셋의 표층수온을 함께 비교하여 나타낸 것이다. 각각 2001-2010년 기간의 월평균치로서, KIOST ESM_v1과 NCEP GODAS에서 28°C 이상의 고온의 표층수가 2월에 필리핀 동측 해역에 인접하여 나타나며 이후 하계로 가면서 점차 북상하여 8월에는 일본 남부 해역까지 확장되고 10월과 12월에는 다시 저위도 해역으로 향하여 그 범위가 축소되는 모습을 공통적으로 보여준다. 이러한 아열대역의 온도 분포 패턴은 OISST와 HadISST에서 모두 거의 일치되게 나타남으로 이 두 재분석자료의 SST 재현 성능이 매우 양호한 것을 볼 수 있다. 그런데 두 관측자료 모두에서 30°C 이상 되는 고온의 해수가 6월에는 필리핀 동방에서, 그리고 8월에는 대만 동방-동남방 해역에서 패치 형태로 나타남을 볼 수 있다. 이것은 아열대해역 내에서 하계를 중심으로 형성되는 난수 에디들의 존재를 보여주는 것으로서, 현장 CTD 관측이나 위성 SST 관측 또는 위성 해표면고도 자료를 통해 이와 같은 난수성 에디들의 이동 양상을 관찰할 수 있다. 그러나 1.3.1와 같은 SST 분포도에서는 관측자료의 격자 해상도가 충분히 높지 못하고 또한 장기간 평균되어진 때문에 난수성 에디들이 수평적으로 상당히 평활화된 형태로 표출되고 있다. 이러한 난수 에디가 특히 KIOST ESM_v1에서 그 위치와 공간적 범위에서 관측과 매우 일치되는 형태로 정확하게 재현되고 있다.

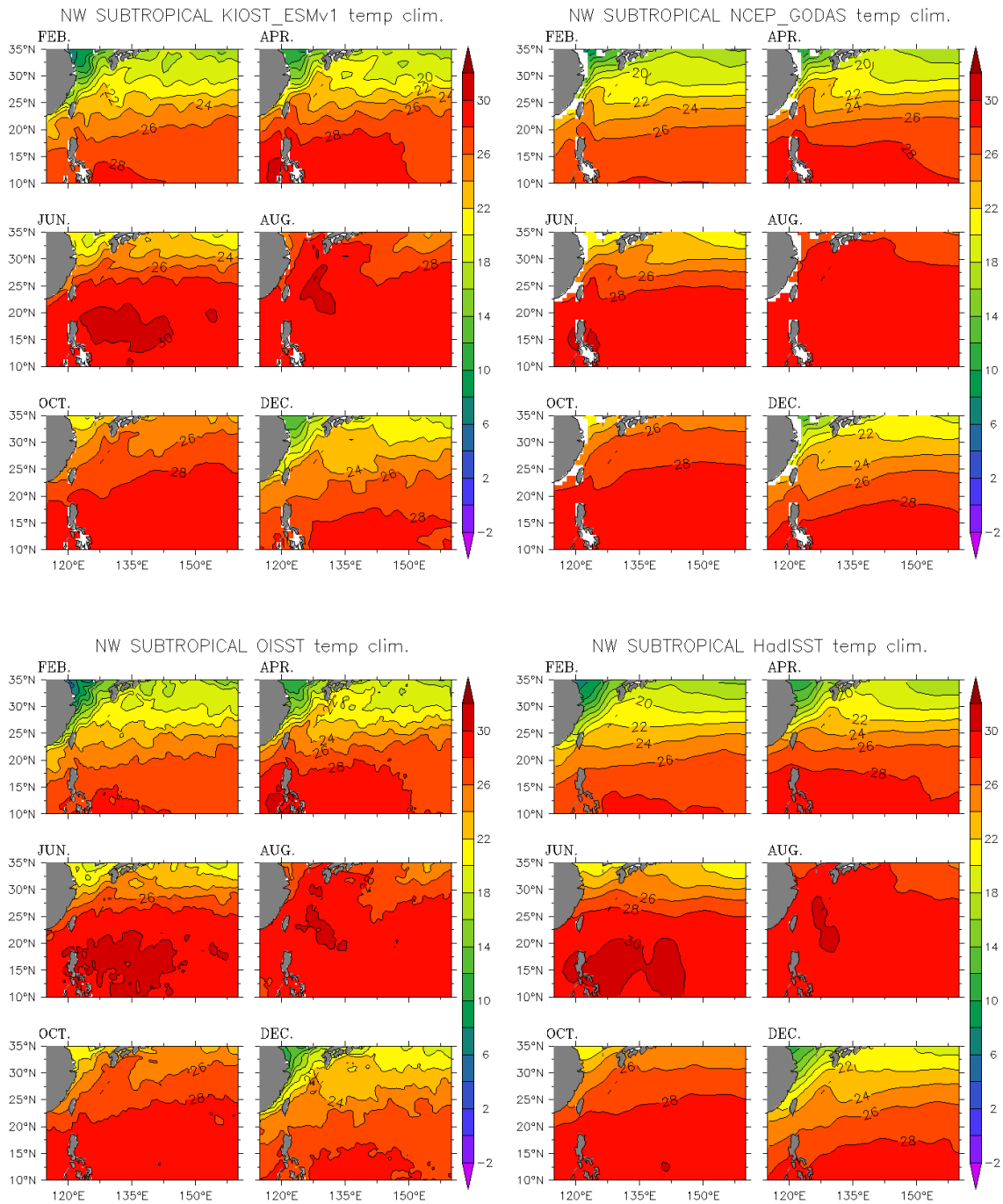


그림 3.1.7 재분석 자료 및 위성자료의 SST 분포도 (2001-2010 평균, 좌상-KIOST ESM_v1, 우상-NCEP GODAS, 좌하-OISST, 우하-HadISST)

Comparison of the SST distribution in the reanalysis data and the observed data in the western part of the subtropical North Pacific Ocean(upper left-KIOST ESM_v1, upper right-NCEP GODAS, lower left-OISST, lower right-HadISST, averaged from 2001 to 2010)

4. 해면고도 자료동화에 따른 아열대역 해류 변동성 모의 성능 평가

○ 아열대 해역 순환류 분석

- 선행연구에 따르면 North Equatorial Undercurrent (NEUC)는 저위도 해역에서 존재하는 subthermocline eastward flows이다(Qiu et al., 2013). 이와 관련하여 관측자료 분석 및 수치모델 기반한 연구가 다수 발표 된 바 있음.
- 먼저 NEUC의 수평 분포에 대한 분석을 수행하였음. 선행연구에 따르면 수치모델을 이용하여 9°N, 13°N, 18°N를 중심축으로 하는 동서 방향 지형류인 NEUC를 모의하였음(그림 1.8, Qiu et al., 2013).
- DASK_2015에서는 5°N- 15°N사이에 1개의 강한 eastward flow가 모의되었음(그림 1.9). 반면에 KIOST_ESM_v1 및 KIOST_ESM_v2에서는 수심 700m-900m에서 3개의 동서방향 지형류가 5°N- 20°N사이에서 잘 모의되고 있음. 또한, KIOST_ESM_v2는 KIOST_ESM_v1에 비해 15°N의 westward flow가 강하게 모의되어 13°N 및 18°N에 위치한 2개의 eastward flow 사이의 경계가 뚜렷함(그림 1.9).

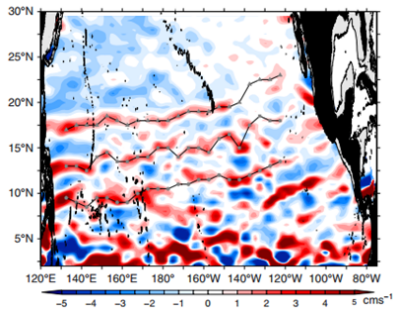


그림 3.1.8. 동서방향지형류수평분포
($26.8\sigma_\theta$ - $27.4\sigma_\theta$ 사이 평균)
(Qiu et al., 2013)

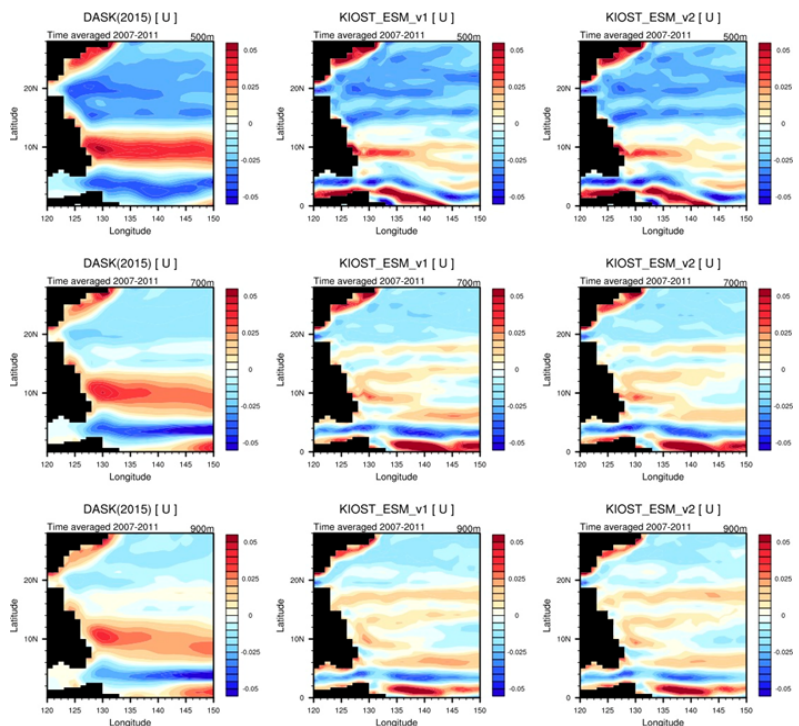


그림 3.1.9. 한국해양과학기술원 전지구 재분석 자료에 대한 자료별 & 수심별 (500-900m) U 수평 분포 (2007-2011 평균)
(좌)DASK_2015, (중)KIOST_ESM_v1,
(우)KIOST_ESM_v2

- 다음은 NEUC의 연직 분포에 대한 분석 결과를 살펴보면 9°N, 13°N, 18°N 부근의 수심 500-1500m 사이에서 eastward flow의 중심축이 나타남 (그림 1.10, Qiu et al., 2013).
- DASK_2015에서는 해당 수심에서 1개의 eastward flow core가 나타나는 반면에 KIOST_ESM_v1 및 KIOST_ESM_v2는 4개의 eastward flow core가 보임. 특히, KIOST_ESM_v2는 KIOST_ESM_v1에 비해 13°N 부근의 eastward flow core가 강하게 모의되었음(그림 1.11).

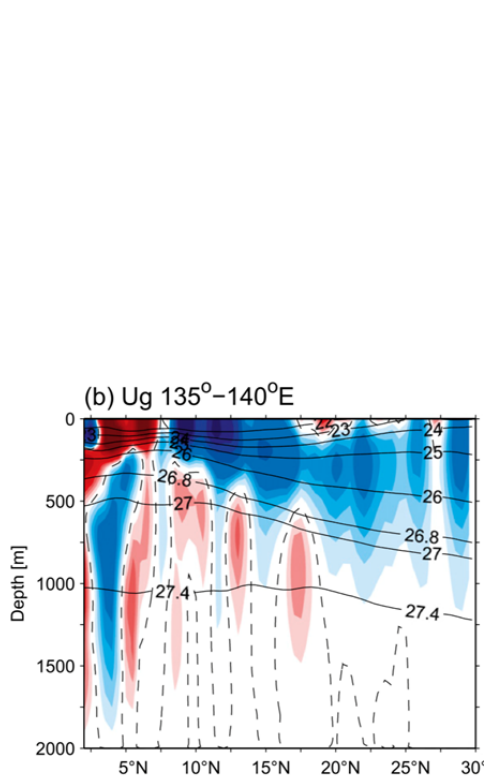


그림 3.1.10. 동서방향 지형류 연직 분포 (Qiu et al., 2013)

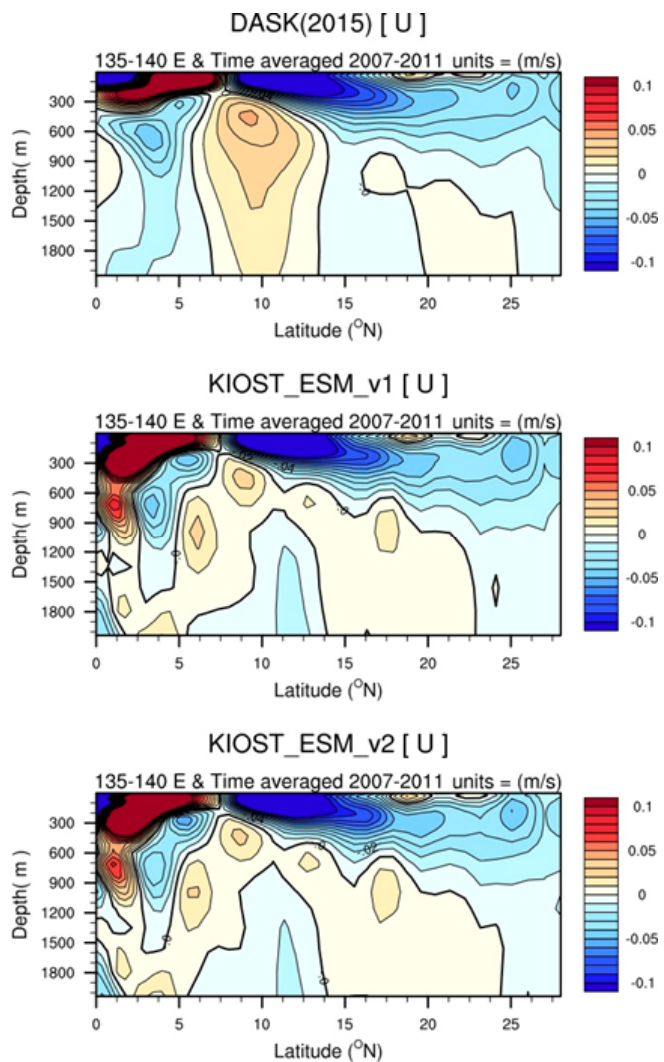


그림 3.1.11. 자료별 & 수심별 (500-900m) U 연직 분포 (2007-2011 평균)
(좌)DASK_2015, (중)KIOST_ESM_v1, (우)KIOST_ESM_v2

제 2 절 재분석자료 검증을 위한 제주해협 표층해류 모니터링

고주파 해수면 관측레이더(High-Frequency Ocean Surface Radar)는 단파(High Frequency)대역을 사용하여 광범위한 해역의 표층 해류를 실시간으로 연속 관측할 수 있으며, 그 정보는 해난구조 및 인명수색과 해양 오염 방제, 군사활동 정보지원 등 다양한 분야에서 활용된다. 특히 21세기 신해양시대를 맞이하여 주요 해양선진국의 해양 영토관리 및 앞으로 발생될 해양환경문제와 해양자원개발에 대비하여 연속적이며 광범위한 해류조사의 새로운 관측기술로 정착되고 있다.

한국해양과학기술원에서는 제주해협 표층해류를 상시연속관측하고 있으며, 본 사업에서는 고주파레이더에서 관측되는 표층해류자료를 이용하여 한반도 해역 재분석자료를 검증하고 활용방안에 대한 체계구축을 계획하고자 한다.

일반적으로 해양에 해류를 관측하기 위해서는 대형부이에 해류계를 설치하여 자료를 획득하는 것이 보편적이다. 이와 같은 방식은 유실 및 파손을 대비하여야 하며 유지보수에 상당한 예산이 요구되어진다. 하지만 해안가에 설치되어 운용되는 고주파레이더는 초기장비 및 설치에 대한 비용이 고가인 반면 유지보수에 대한 예산은 부이운용보다 상대적으로 저렴하며, 기상에 대한 제약도 없으므로 효율적인 운용에 장점을 지닌다.

- * 2018년도 고주파레이더(HFR) 연속관측 운영을 위한 장비 점검 및 유지 보수
 - 2018.02.25.-28 : 김녕사이트 전파반사도 저감을 위한 통신케이블 교체
 - 2018.04.11.-12 : 고내레이더 통신 점검
 - 2018.04.23.-24 : 자료검증을 위한 관측현황 점검
 - 2018.04.26.-28 : 김녕사이트 전력조절과 감시카메라 보완
 - 2018.06.20.-21 : 관측자료 수집 및 자료처리용 컴퓨터 교체
 - 2018.07.04.-06 : 하계 천재지변(태풍, 집중호우 등)대비 시설 점검
 - 2018.08.25.-30 : 태풍(솔릭) 이후 장비 긴급 점검
 - 2018.09.05.-06 : 김녕사이트 부지 및 통신허가 관련 출장
 - 2018.10.11.-16 : 고내사이트 전파환경 측정 및 분석
 - 2018.10.30. : 김녕레이더 UPS 이상발생으로 점검

1. 고주파레이다를 이용한 연간 시,공간 관측자료 수집율

제주해역 표층해류 관측을 위한 13MHz 고주파레이더의 연간 시계열 자료 수집율(그림 3.2.1)과 공간 수집율(그림 3.2.2)을 분석하였다

그림 3.2.1에서 나타나는 바와 같이 김녕은 94%, 고내 97.4%의 연간 시계열 수집율을 보였으며 이는 당초 계획된 80% 이상의 자료획득율을 초과하여 계획 대비 성공적인 관측상황을 보여준다. 또한 최종 표층해류 자료 생산율은 91.5%의 연간 수집율을 보였다.

공간 수집율(그림 3.2.2)의 자료 획득율 90%이상은 제주항 기준으로 정북방향 직선거리 약 42km 이내 영역이며, 60%이상 영역은 동일기준 직선거리 약 65km 이내에서 형성되다. 이는 고주파레이더에서 관측반경이 커질수록 자료 획득율이 떨어지는 결과를 보였다. 또한 공간 변동성은 주야로 달라지는 전파환경 특성과 주변전파환경(건물, 자동차 등 반사체)의 간섭 영향의 영향이 주된 것으로 고려된다.

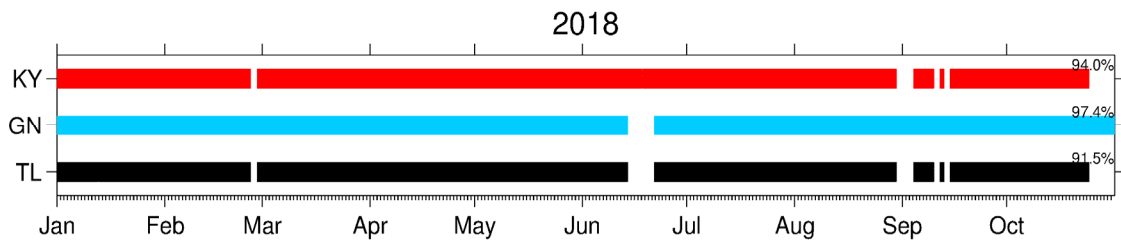


그림 3.2.1. 2018년도 제주 고주파레이더 시계열 수집율

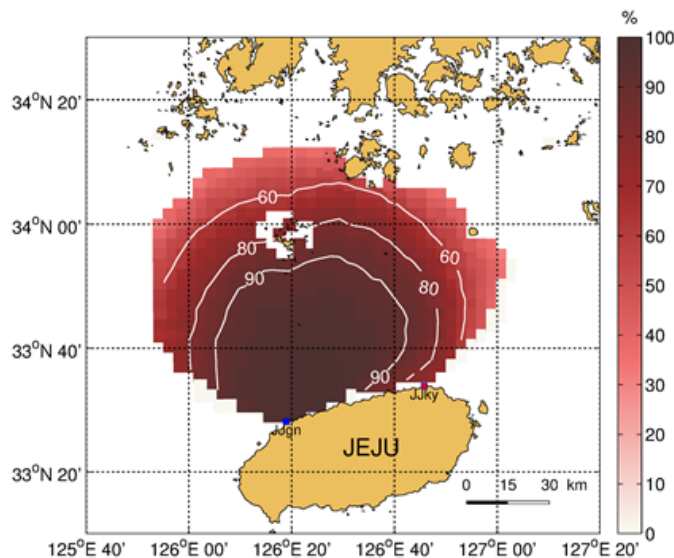


그림 3.2.2. 2018년도 제주 고주파레이더 공간 수집율

2. 제주해협 표층 해류 상시모니터링 시스템 구축

제주북부해역 표층해류를 관측하는 광역 실시간 고주파레이다의 지속적이며, 안정적인 운용 및 장비보호를 위하여 관측정보에 대한 실시간 감시망 구축은 무인으로 운용되는 고주파레이다의 장비에서 필수적인 체계 시스템이다.

이와 같은 시스템은 안정적이고 비용대비 효율적인 감시체계 구축을 위하여 글로벌 클라우드 플랫폼 기반인 아마존 웹서버(AWS)에 구축하였으며, 관측자료 가시화는 실시간 하드웨어 정보 및 관측현장의 전파환경분석 정보가 실시간 반영될 수 있게 구성하였다. 뿐만 아니라 관측기준 한계치를 벗어나는 경우, 화면적색경보 및 관리자에게 문자전송(SMS) 알림을 보내어 신속한 대응이 이루어지도록 구현함으로써 긴급대응에 적합한 시스템을 구축하였다.

웹기반 상시 감시 시스템 구축으로 현장의 신속한 점검 및 대응방안 구축의 현실화 구현하였으며 본 시스템을 통하여 자료 생산율을 90% 이상의 연간 수집율을 올리는데 많은 기여를 하였다(그림 3.2.3.; 그림 3.2.4)

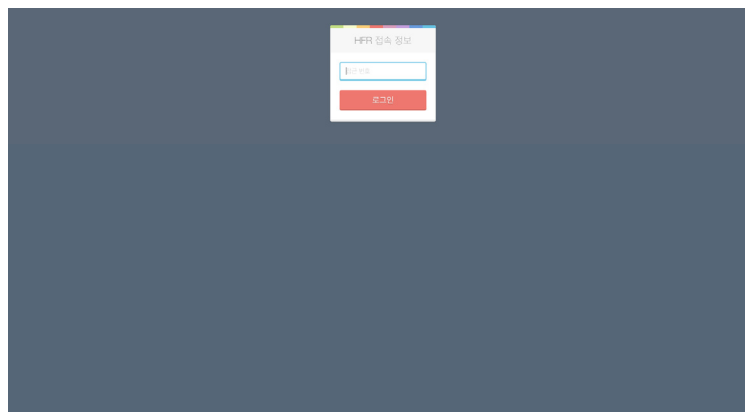


그림 3.2.3. 보안모듈이 적용된 상시모니터링

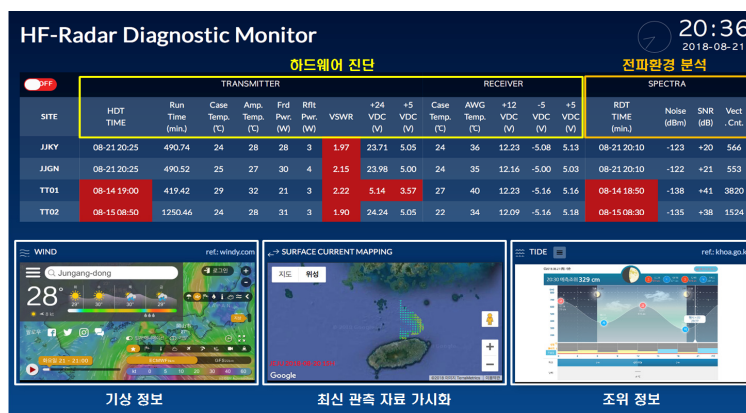


그림 3.2.4. 실시간 관측정보제공 화면

3. 고주파레이다(HFR)로 관측한 유속자료 정확도 분석

고주파레이다로 관측된 제주북부해역 표층해류자료의 정확도 분석을 위하여 2018년도 4월 25일부터 30일(6일간), 제주 북서부해역에서 고정점 부이(2정점) 및 표류부이 (2개 타입)을 활용하여 상호비교 검증 실험을 실시하였다(그림 3.2.5).

관측항목은 RCM을 이용한 2정점에 대한 수면 하 1미터해류관측을 수행하였으며, 30대의 Carthe 부이 및 5대의 KIOST drifters를 이용하여 표면해류유속의 관측을 실시하였다(그림 3.2.6 ; 그림 3.2.7 ; 그림 3.2.8).

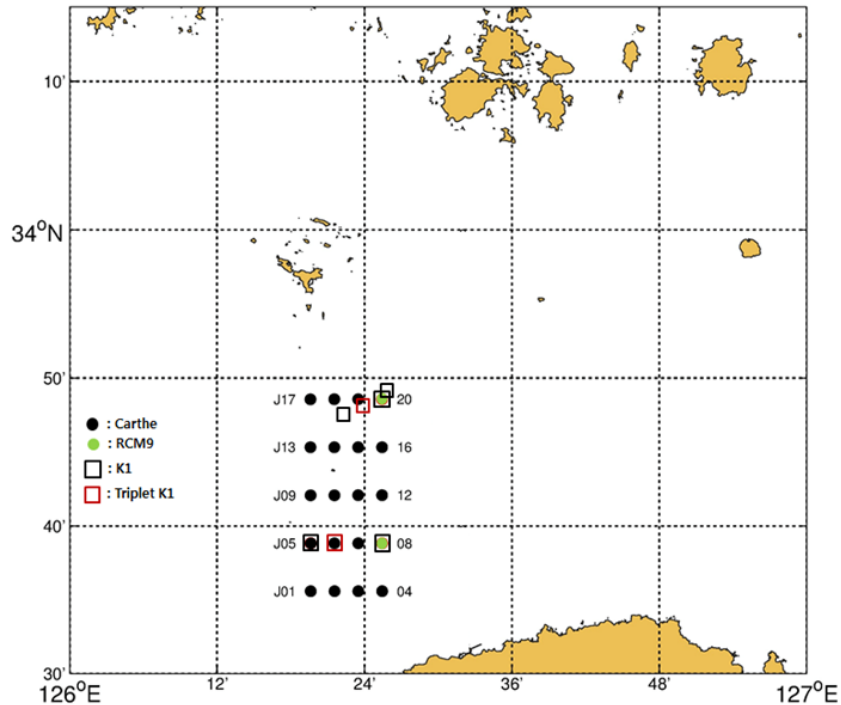


그림 3.2.5. 고주파레이다 자료 검정을 위한 실험 정점도



그림 3.2.6. K1 표류부이(수면 하 1미터관측)와 Carthe 부이(원반형태) 실험장면



그림 3.2.7. RCM을 이용한 수면 하 1미터해류관측

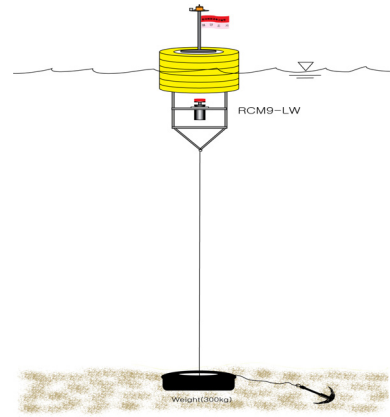


그림 3.2.8. 고정점 부이 계류도

○ 고정점 관측부이를 통한 자료 검증 및 분석

표층해류를 관측하는 고주파해양레이다(HFR)의 특성을 고려하여, 수면 하 약 1미터에 초음파 해류계(RCM)가 장착된 고정점 해양관측부이를 설치하여 HFR 관측 표층해류 자료의 정확도 검증 실험을 실시하였다. 실험기간동안 HFR와 정점별 RCM에 의해 관측된 유동자료의 동-서, 남-북 방향의 유속성분으로 다음과 같은 결과를 나타내었다.

- J08(Stn.2)의 동서방향유속의 상관계수 $R=0.831$, 표준편차 $RMS = 20.852\text{cm/s}$
(그림 2.9 ; 그림 2.10)
- J20(Stn.3)의 동서방향유속의 상관계수 $R=0.629$, 표준편차 $RMS = 28.789\text{cm/s}$
(그림 2.9 ; 그림 2.10)

J08과 J20의 유속비교 결과의 차이에는 radar site로부터 바라본 각과 두 레이더의 radial이 이루는 사이각에 의해 radar 유속오차가 증폭 될 수 있는 효과(GDOP: Geometric Dilution Of Precision)가 포함되어, J08 대비 J20에서 상관계수 및 표준편차가 증가하였음을 알 수 있다. 즉, 레이더와 관측대상영역의 거리가 멀어질수록 오차범위가 증가함을 보였다.

더불어, 직경 1미터 고정부이를 이용하여 수면하 약 1미터의 표층해류를 관측하였으나, 향후 양질의 해류관측을 위하여 부이의 안정적인 자세 유지 및 해류계의 표층수면 관측능력의 검증이 검토되어야 할 것으로 사료되었다.

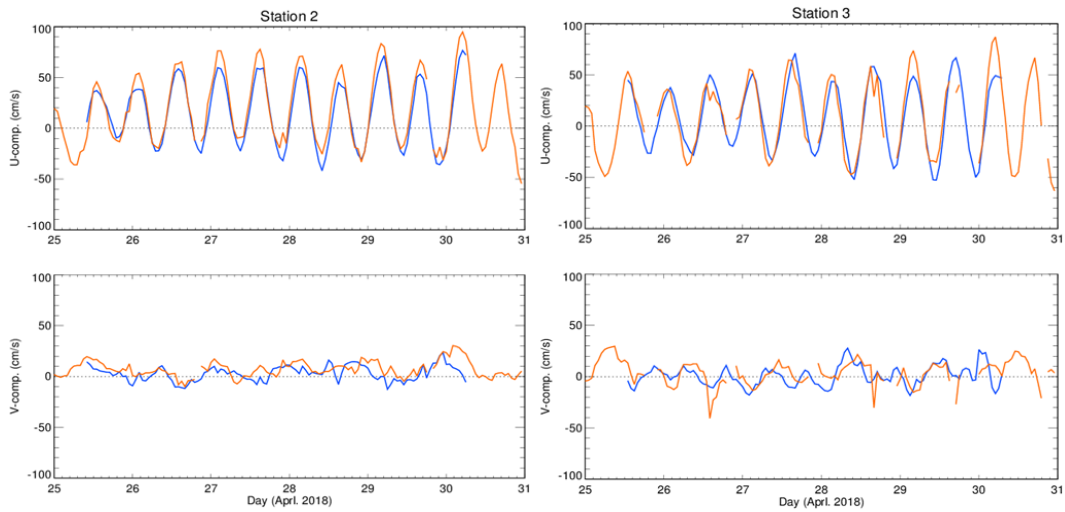


그림 3.2.9. 고정점 부이에 부착된 RCM(청색)과 HFR(적색)자료의 유속 시계열 변화 (좌측:J08, 우측:J20)

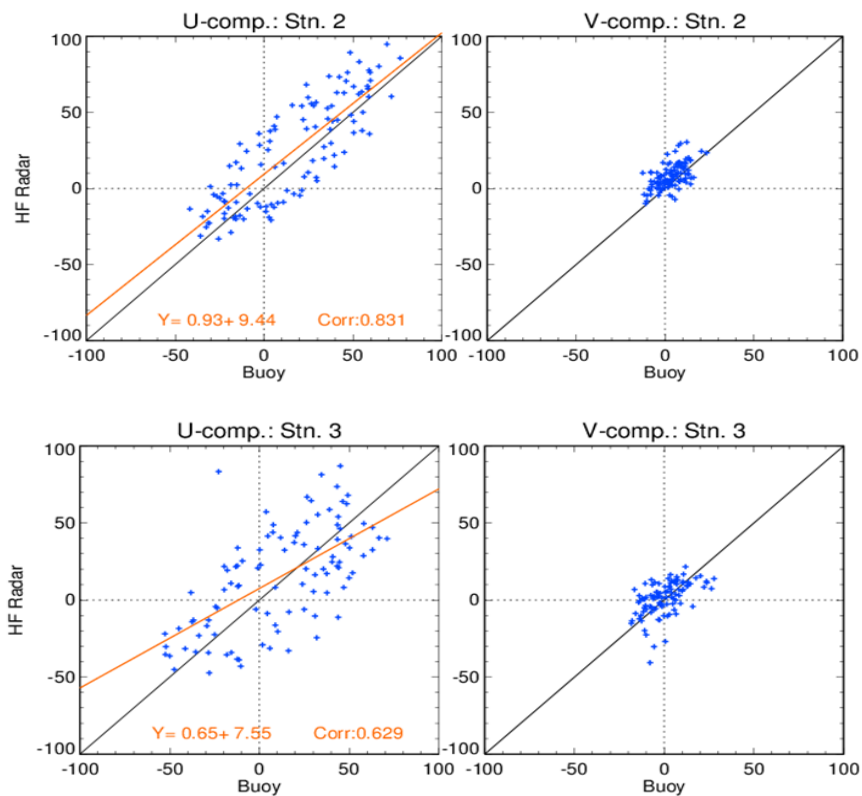


그림 3.2.10. HFR와 RCM의 회귀분석 (상 : J08(Stn.2), 하 : J20(Stn.3))

○ 타입별 표류 부이 비교실험을 통한 관측자료 상호 검증

제주해협에서 운용되는 13MHz HFR자료의 공간 신뢰도를 산정하기 위하여 KIOST에서 개발된 1×1m(drogue 중간수심 0.5m)의 drogue의 형태인

K1 표류부이와 0.38×0.45m (drogue 중간수심 0.4m)의 drogue를 지닌 Pacific Gyre사 Carthe 표류부이를 활용하여 실험을 실시하였다(그림 2.11).

그에 따른 결과로 고주파레이다와 Carter 표류부이의 동서방향유속의 상관계수는 0.934의 결과를 보여주었으며 표준편차는 17.878cm/s로 나타내었다(그림 2.12). 그에 반하여 고주파레이다와 K1 표류부이 동서방향유속의 상관계수와 표준편차는 0.936, 14.379cm/s의 결과를 나타내었다(그림 2.12).

이와 같은 결과는 해류계(RCM)를 이용한 고정점 관측부이 대비 고주파레이다와 표류부이에서 높은 상관관계($R=0.9$)를 나타내었으며, 또한 상대적으로 낮은 RMS 편차를 지님을 알 수 있었다. 이는 고주파레이다 자료검증 시 표층 1미터 이내 표류부이를 활용하는 것이 관측대상오차를 최소화 할 수 있다고 판단된다.

수심에 따른 2-타입별 비교실험결과에서는 상관계수와 표준편차에 대한 약간의 차이는 보이나 본 실험의 결과로 검증에 적합한 수심의 확정과 관측장비를 선택하기에는 향후 여러 위치와 다양한 기상조건에서 많은 실험이 필요하리라 여겨진다. 향후 수치모델에서의 활용 및 자료검증에 대한 신뢰도 산정에 있어 다양한 수심에 따른 부이 비교실험이 요구되는 바이다.

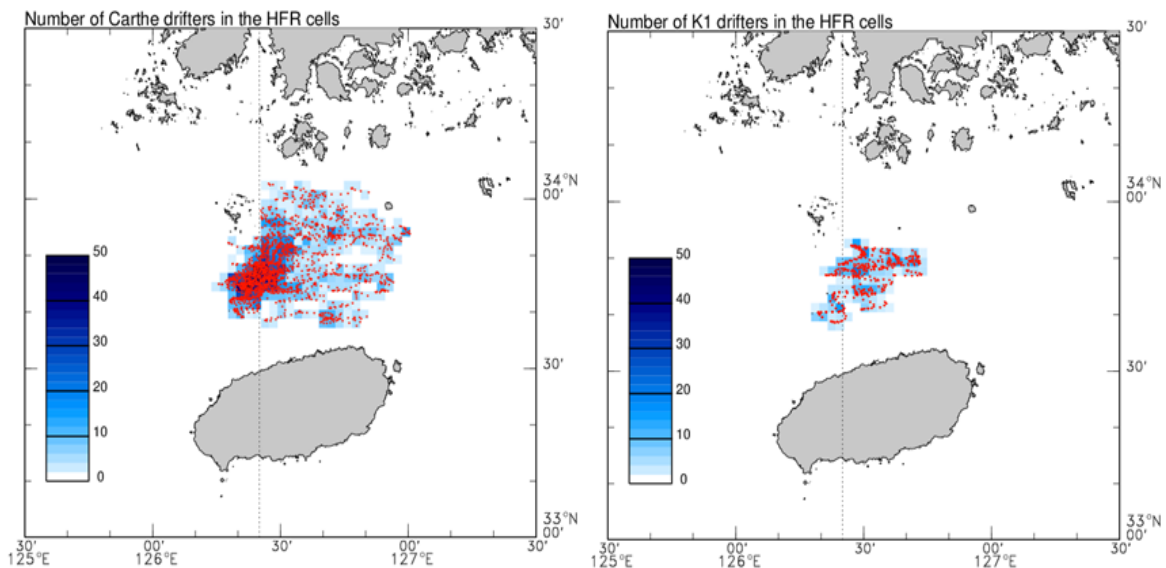


그림 3.2.11. 표류부이에서 관측된 위치정보기반 레이다자료의 중첩빈도 (좌측:Carthe, 우측:K1)

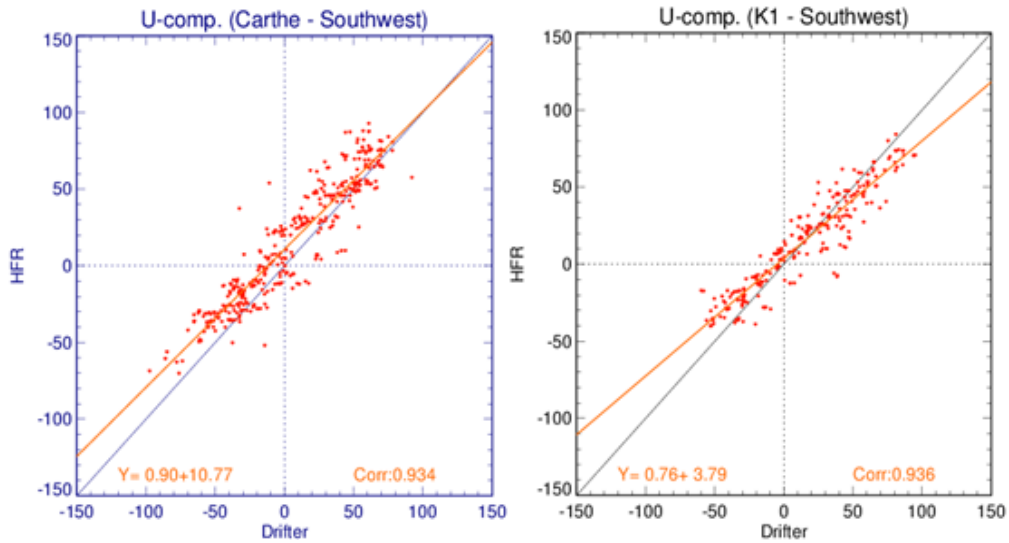


그림 3.2.12. HFR와 Drifter간의 회귀분석 (좌측:Carthe drifter, 우측: K1 drifter)

4. 시, 공간 결측자료 원인 분석 및 해결방안 도출

시, 공간 결측자료의 원인 분석 및 해결방안 도출을 위해서는 공간에 대한 관측자료가 필수적이나 상기 과제에서는 레이다로 관측되는 영역에서 공간자료 관측의 한계가 있으므로 국립해양조사원의 '94, '95, '02년 해류계를 이용한 25시간 고정점 해류관측(M2 조류성분)자료를 활용하였으며, 상기 자료중 제주해협 레이다관측 영역과 부합된 자료를 이용하여 공간 신뢰도 검증을 수행하였다.

그림 2.13에서 반일주조성분인 M2의 조류타원을 비교한 결과, 추자도와 김녕을 이은 선에서 남서쪽은 일치하는 반면 북동쪽 영역은 오차가 있음을 알 수 있었다.

오차의 원인은 고내 Radial site에서 관측되는 방사형 벡터 중, 동쪽영역의 관측 불안정으로 인한 것으로 고려되며(그림 3.2.15), 이는 전파환경의 불안정(특정지역 노이즈 삽입) 또는 지형적인 간섭 등 다양한 현상에 기인할 수 있으리라 예측된다.

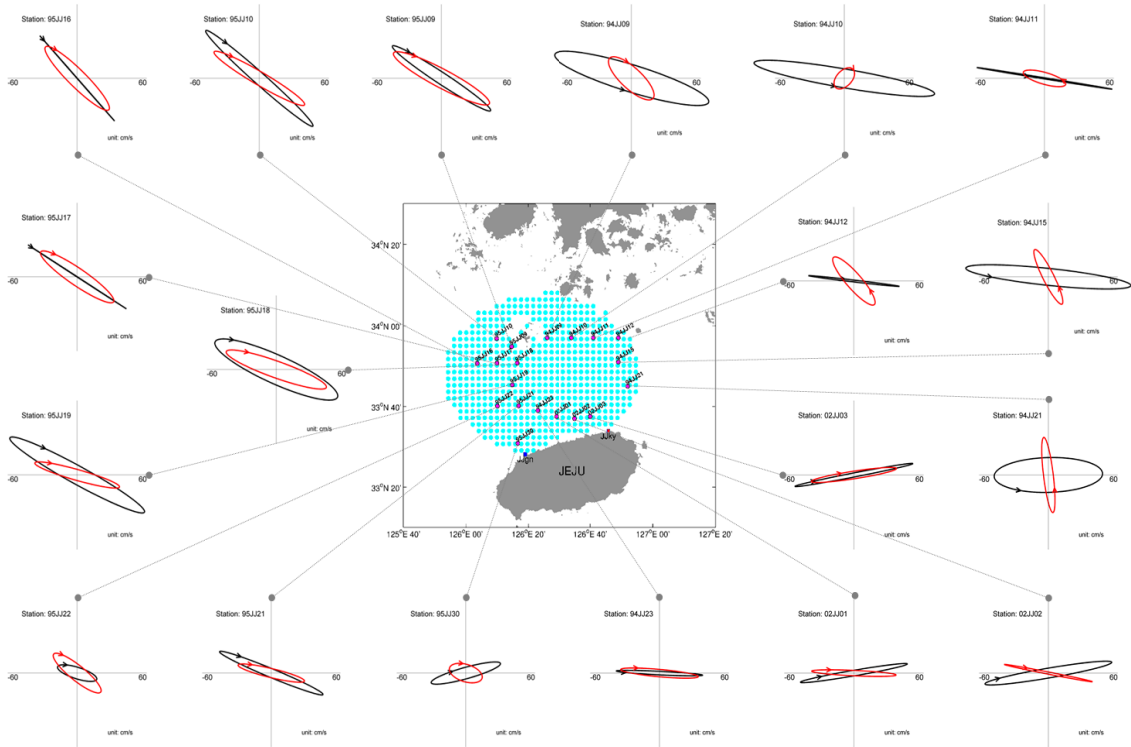


그림 3.2.13. HFR와 KHOA-25H의 M2조류타원 공간 비교 분석

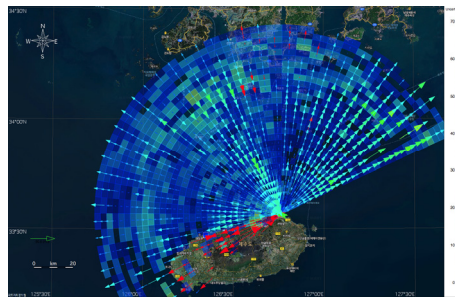


그림 3.2.14. 김녕 Radial 관측현황

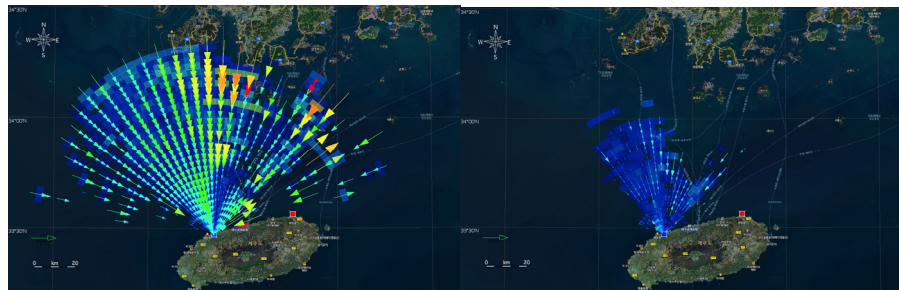


그림 3.2.15. 고내 Radial 관측현황 (좌측:관측일반상황, 우측:관측최소상황)

제 3 절 모형의 성능 향상을 위한 아중규모 난류혼합의 모수화

1. 남해 아중규모 난류혼합의 모수화를 위한 표층부이 실험

○ 표층부이 실험

CARTHE 부이를 사용하여 제주북부지역에서 4/25~4/31과 11/26~11/27에 실험을 수행하였다. CARTHE 표층부이는 가로 40cm 깊이 60cm인 생분해성 플라스틱으로 제작되었고 5분의 시간해상도를 가진다. 4월말 실험에서는 총 35개의 표층부이를 사용하여 전개와 수거를 2회 반복하였고 마지막 전개 후 20개의 표층부이는 장기관찰을 위하여 수거하지 않았다. 대부분의 부이는 드로그가 있는 부이로 2회의 실험을 평균하여 결과를 분석하였다. 11월말 실험에서는 4월 실험과 같은 지점에서 총 29개의 표층부이를 사용하여 1회 투하후 수거하지 않고 장기관찰 하였다. 절반의 부이는 드로그를 탈착하였고 드로그가 있는 부이과 함께 투하하여 비교하였다. 4월 실험의 경우 모든 부이가 대마도 북부해역을 통과하였지만 11월 실험에서는 대마도 북쪽과 남쪽 모두를 통과하였다. 또한 북서풍에 의하여 드로그가 없는 부이들이 남하하여 일본 남부해역으로 진출하였다(그림 3.3.2). 남해에서 약 35%의 부이가 제주와 일본 해안에 상륙하였고, 이는 바람의 영향에 의한 것으로 추정된다.

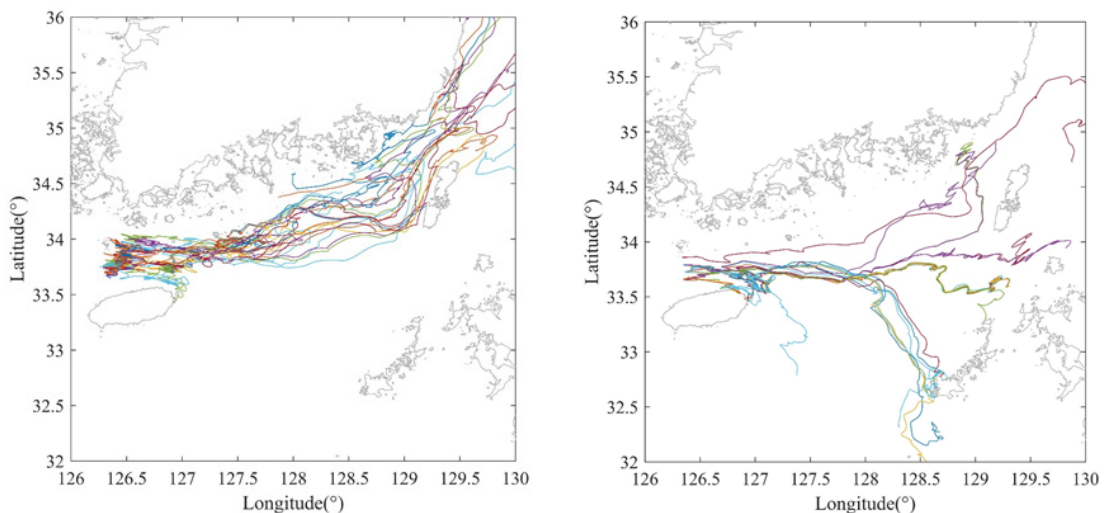


그림 3.3.1. 4월말(좌)과 11월말(우)에 투입된 CARTHE 표층부이 이동경로

2. 남해 난류특성 분석

○ 통계적 기법을 사용한 난류특성 분석

초기 수 시간 동안의 상대분산도는 지수함수에 따라 증가하여(그림 3.3 회색파선) non-local 확산기작이 관찰되었고 전체적으로 Richardson 확산은 나타나지 않았다(그림 3.3). 봄 실험의 경우 기울기는 2에 가깝게 관찰되어 수평전단에 의한 확산으로 판단되지만 가을의 경우 명확한 기울기가 나타나지 않았다. 가을철 실험에서 드로그가 없는 경우(CD-X)의 확산강도는 드로그가 있는 경우(CD)보다 크게 나타났다. 이는 바람에 의하여 형성된 작은 스케일의 난류보다 바람에 의하여 형성된 큰 스케일의 속도장의 변형 및 전단의 의한 것으로 추정된다. 가을철 드로그가 있는 경우 초기 약 일주일동안 지수함수와 같은 확산양상을 보였다(그림 3.3.3 빨간파선). 가을철 평균유동은 봄철보다 빠르지만 초기 약 일주일의 확산강도는 봄철보다 약한 것으로 관찰되었다.

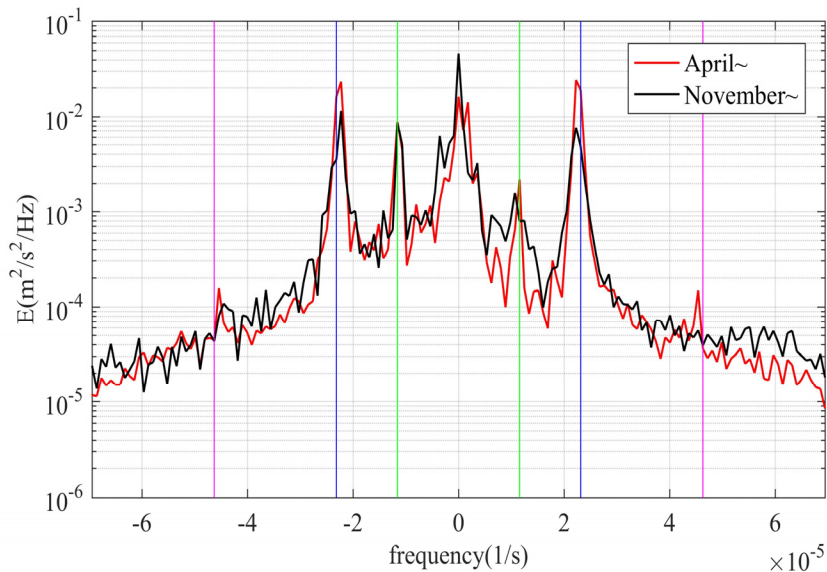


그림 3.3.2 초기 2주간의 표층부이 속도자료를 이용한 Rotary spectra.
수직 선분은 1/4일주조(분홍색), 반일주조(파란색),
일주조(녹색)를 나타냄.

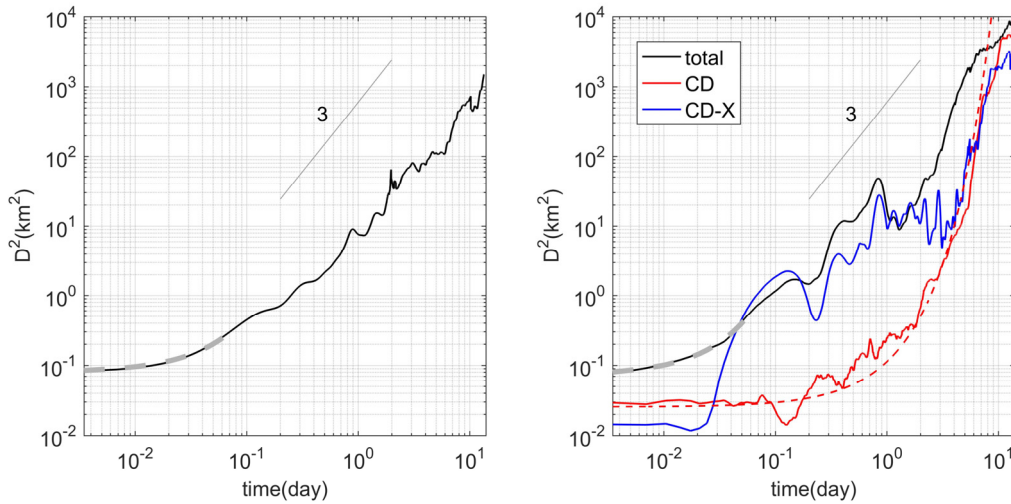


그림 3.3.3. 초기 2주 동안의 상대분산도 (좌:4월 실험, 우:11월 실험). 오른쪽

그림 3.3.4는 두 계절에서 다른 강도와 기울기를 가진 Finite Size Lyapunov Exponent (FSLE)를 보여준다. 4월 실험의 경우 표층부이가 제주해협을 지나기 전까지 약 -0.5의 기울기를 보였고 가을철의 경우 약 -1의 기울기를 보였다. 표층부이가 제주해협을 벗어난 이후에는 동쪽으로 흐르는 강한 해류와 온도전선의 영향으로 부이의 공간분포가 길게 변형되어 FSLE의 기울기가 상수가 됨을 보였다(4월 실험). 11월말 약한 성층과 강한 바람으로 인하여 더 큰 FSLE와 기울기를 보였다.

그림 3.3.5에서는 2차 종방향 속도구조함수와 Helmholtz 분해방법으로 계산된 회전성분과 발산성분을 보여준다. 대체적으로 1km 미만의 규모에서는 발산성분이 강하게 나타났다. 봄철의 경우 약 0.5km~10km의 규모에서는 발산과 회전성분이 대등하였지만 10km 이상에서는 회전성분이 지배하였다. 가을철에는 드로그가 있는 경우에 회전성분이 강한 공간범위가 관찰되었지만 나머지의 경우 발산성분이 주도하였다.

Lagrangian 관측자료는 편향된 정보를 제공할 수 있으므로 보다 일반적인 난류특성을 조사하기 위하여 Eulerian 속도장의 관측 및 분석이 필요하다. 해양해색위성(GOCI) 산출물을 이용하여 광역 Eulerian 속도장과 HF radar로 산출된 국지적 Eulerian 속도장을 이용하여 난류통계를 분석하여 표층부이자료의 결과와 비교할 계획이다.

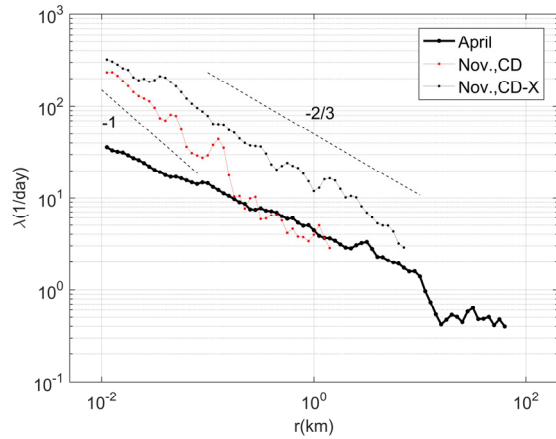


그림 3.3.4. 표층부이를 이용한 Finite Size Lyapunov Exponent (FSLE)

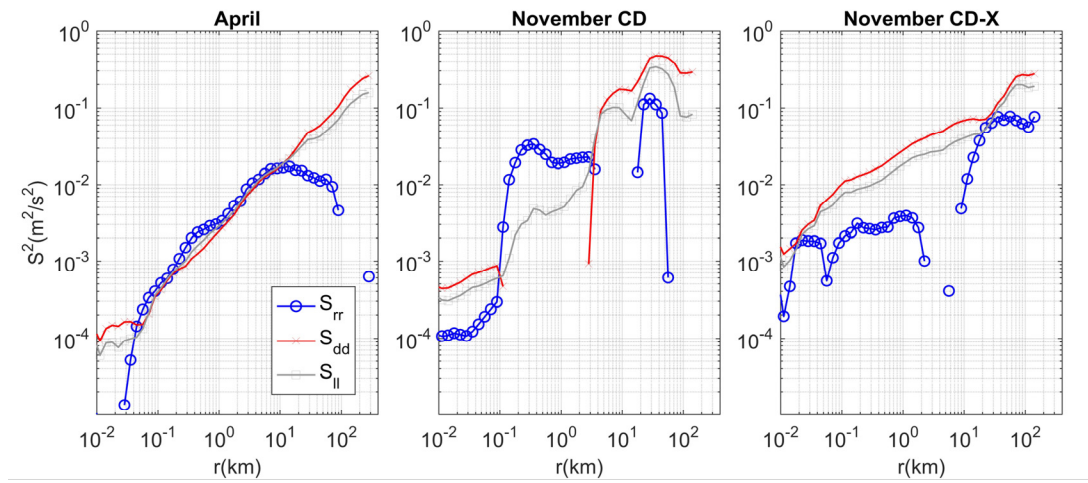


그림 3.3.5. 2차 종방향 성분의 속도구조함수(회색선)와 Helmholtz 분해에 의한 회전(파란선) 성분과 발산(빨간색)성분

3. 입자추적모델 난류모수화의 선행연구

○ 난류모수화 문헌조사

해양해색위성에서 산출된 속도장의 속도분포가 non-Gaussian을 보임에 따라 Random walk와 같은 diffusion의 사용은 지양되어야 하고 고차원의 비선형 stochastic model의 적용이 필요하다. 따라서 Levy Walk (Shlesinger 1987), Uhlenback-Ornstein(Rodean 1996), Matern process(Lilly et al. 2016) 등의 방법을 이용한 모수화 방법을 조사하여 추후 모수화에 이용하고자 하였다.

제 4 절 위성-재분석자료 기반 고수온 저염분 현상의 구조와 영향 평가

1. 위성자료 기반 고수온 탐지 기술 개발

○ NOAA OI SST 위성자료를 이용한 고수온 탐지 기술 개발

최근 국제 학계에서는, 각 해역에서 지난 30년 동안 관측된 모든 해수면 온도 값 중 상위 10% 기준을 넘는 극한 고온의 상태를 고수온 현상으로 정의하도록 합의한 바가 있다. 이는 현재 국립수산과학원에서 현업에 도움을 주기 위해 해역에 상관없이 해수면온도가 28도가 넘을 때 고수온주의보를 발령하는 절대적인 수치와는 다소 차이가 있다.

즉, 본 연구는 고수온의 탐지를 위해서 NOAA OI 해수면 온도 자료에서 각 지역별, 365일 계절별 달라지는 고수온 경계 해수면 온도를 정의하였다. NOAA OI 위성 자료의 공간분해능은 $0.25 \times 0.25^\circ$ 로 일자료로 제공된다. 본 연구에서는 각 지점에서 지난 30년간 해수면 온도 중 상위 10 퍼센타일의 값을 경계값으로 이용하여, 3일 이상 경계값을 넘을 때를 고수온 이벤트 발생으로 정의하였다. 이에 따라, 고수온의 경계값이 우리나라 해역에서 남해의 경우 약 27°C , 동해의 경우 약 25°C 로 결정되었다(Fig 4.1). 동해의 경우 남해와 같은 해수면온도 절대값 27°C 를 적용하면, 동해는 고수온 현상이 거의 존재하지 않는 것으로 나온다. 상대적인 경계값을 이용하면, 해역에 따라 달라지는 해수면 온도 고려하여 고수온 탐지가 가능하다.

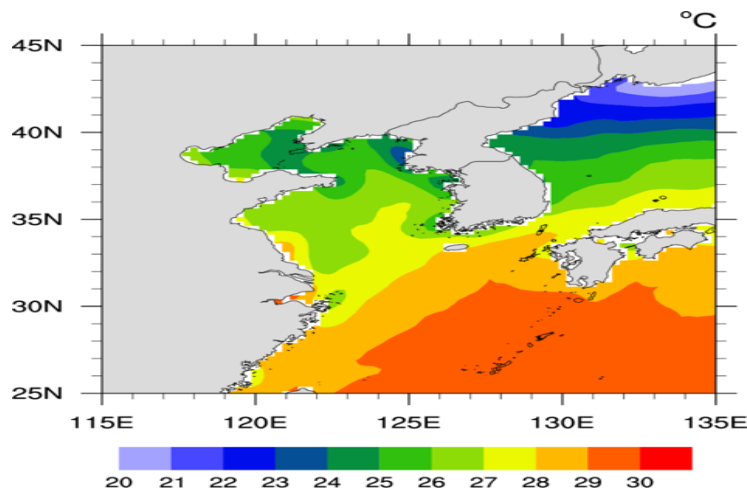


그림 3.4.1. 본 연구에서 고수온 발생 정의를 위해서 사용된 해수면 온도 경계값. NOAA OI Sea Surface Temperature 일자료를 이용하여 7-9월 해수면 온도의 10 퍼센타일 값을 이용함

2. 한반도 해역의 고수온의 장기변동성 데이터 구축 및 트렌드 분석

○ 여름철 평균 해수면온도의 장기변동성 분석

본 연구에서는 우리나라 해역의 해수면온도가 연중 가장 높은 3달(7-9월)을 여름철로 정의하여, 여름철 고수온 현상의 장기변동성을 분석하였다. 분석 기간은 NOAA OI SST 자료가 이용 가능한 1982-2018년까지이다.

고수온 자료 분석에 앞서, NOAA OI SST 자료에 의한 트렌드의 신뢰성을 테스트하기 위해, 여름철 계절 평균을 다른 해수면 온도 자료들과 비교하였다. Fig. 4.2는 NOAA OI 해수면 온도 자료와 우리나라 주변 해역의 여름철 평균온도를 서로 다른 해수면 자료(OI SST, MGDSST, C-GLORS)를 이용하여 비교하였다. 전반적으로 세 데이터베이스에서 지역적인 트렌드변화가 일관된 결과를 보인다. 특히, 동중국해와 북한지역의 동해는 여름철 평균온도가 증가하는 장기트렌드가 유의하게 나타났다. 남해에서는 여름철 평균온도는 증가하는 것으로 나타나나, 증가 추세가 통계적으로 유의하지는 않았다. 황해는 다른 지역들과 다르게, 여름철 평균온도가 감소하는 것으로 나타나나, 통계적으로 유의하지는 않다(Fig 4.2).

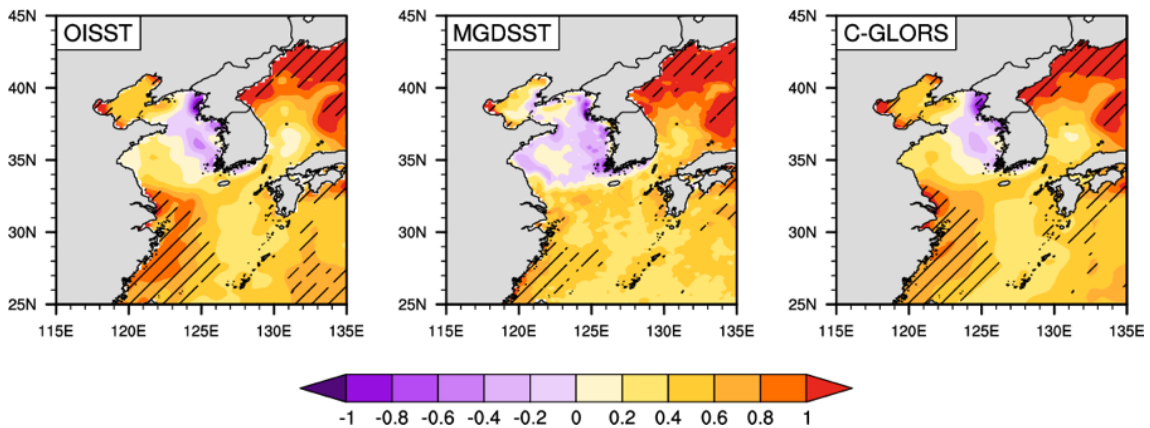


그림 3.4.2. OI SST, MGDSST, C-GLORS 해수면 자료로 분석된 1982년부터 2018년까지 7-9월 해수면 온도 평균장의 선형회귀 분석을 통한 해수면온도 트렌드(°C/34년)

위에서 언급한 고수온의 정의 방법을 이용하여 NOAA OI SST 자료 기반 1982년부터 올해 2018년까지 고수온 이벤트의 빈도(Event frequency), 총 발생 일수(duration), 최고 강도(Intensity)의 장기 데이터베이스를 구축하였다. 고수온의 총일수는 7-9월 3개월 92일 중 고수온 이벤트가 일어났던 일수를 의미한다. Fig. 3.4.3은 장기변동성의 지역분포를 이해하기 위해서 선형회귀

분석의 기울기의 공간 분포를 나타낸 그림이다. 분석 결과, 여름철 평균 온도가 증가 트렌드가 있는 동중국해 해역에서 고수온의 이벤트 일수와 강도 등도 증가하는 것으로 보인다. 우리나라 남해와 제주도 북쪽 해역의 경우, 여름철 평균 온도는 유의하게 증가하지는 않았지만(그림 3.4.2), 이상해항인 고수온 이벤트의 총일수의 증가 추세가 통계적으로 유의하게 나타난 것은 주목할 점이다(그림 3.4.3).

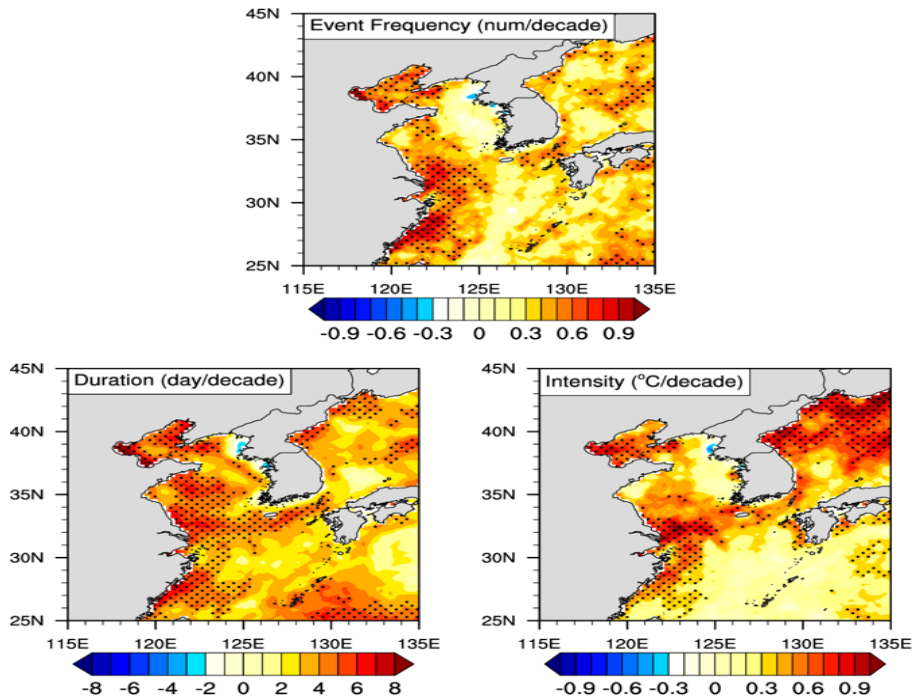


그림 3.4.3. 1982-2018년 7-9월 고수온 빈도, 총일수, 강도의 선형회귀식을 이용한 장기 트렌드 분포(Shading). 점으로 표시된 지역은 회귀식의 상승트렌드가 95% 신뢰도로 유의한 지역을 나타냄

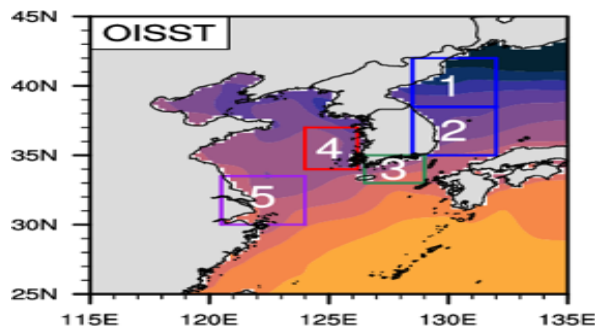


그림 3.4.4. 고수온의 시계열 분석을 위해서 정의된 5개의 해역 - 1 : 'East Sea 1', 2 : 'East Sea 2', 3 : 'South Sea', 4 : 'West/Yellow Sea', 5 : 'East China Sea'

고수온의 트렌드가 다소 다르게 나타나는 5개의 해역을 정의하여(그림 3.4.4), 각 해역의 고수온 경년 변동성의 시계열을 분석하였다. 장기적으로 증가하는 트렌드가 일관적으로 보이나, 경년 변동성이 다소 큰 것으로 나타난다. 그림 3.4.5는 정의된 5개의 해역에서의 1982년부터 2018년까지 고수온 총일수(duration)의 장기시계열을 나타낸다. 그 결과 우리나라 남해는 10년당 고수온 일수가 약 3.5일 증가하는 트렌드가 통계적으로 유의하게 나타났다. 동해와 서해의 경우 고수온 총일수의 증가 트렌드는 나타나나, 경년변동이 커서 통계적으로 유의하지는 않았다.

특히, 고수온의 시계열 결과 한반도 폭염의 해로 유명했던 1994년이 고수온 일수가 많았던 해로 기록되었다. 특이할 점은, 2001년의 경우에 폭염이 두드러진 해는 아니나(Lee and Lee,2016), 동해, 남해, 서해에서 고수온 일수의 피크가 나타나는 해로 기록되었다(그림 3.4.5). 최근, 2018년의 경우, 1994년의 폭염의 기록을 깨는 강한 폭염의 해였으며, 동해와 서해에서 고수온의 피크가 나타났다(그림 3.4.5).

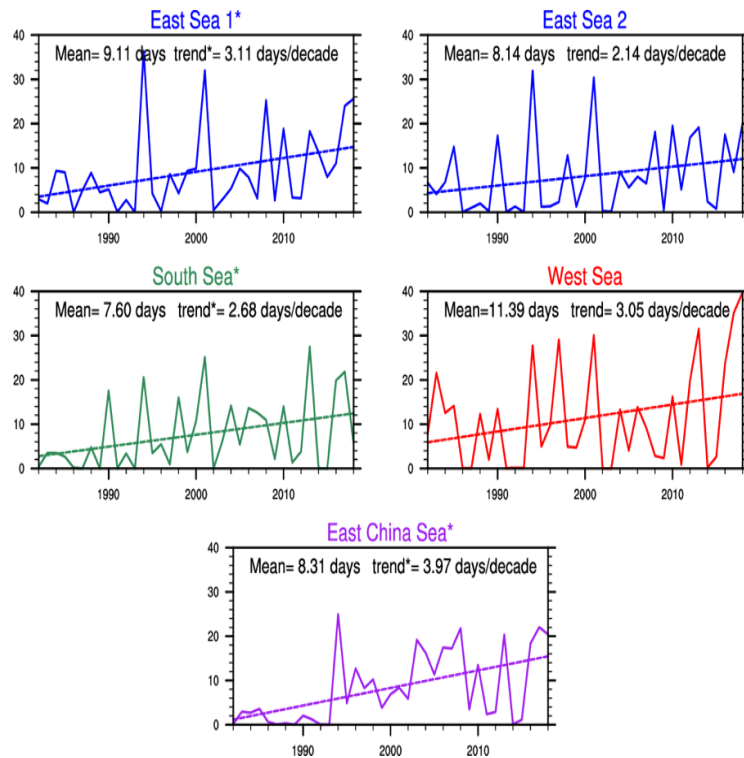


그림 3.4.5. 위 그림에서 정의된 5개의 해역에서의 1982년부터 2018년까지 고수온 총일수의 장기시계열 결과.

*: 트렌드가 95% 신뢰도로 유의함을 나타냄

3. 고수온의 장기변동성의 원인 분석

○ 고수온 경년변동성의 EOF 분석

고수온의 경년변동성을 조절하는 물리적인 메커니즘을 이해하기 위해서, NOAA OI SST 자료를 이용하여 구축된 장기 고수온 일수 변동의 정규직교함수(EOF) 분석을 수행하였다(그림 3.4.6). 분석 결과, 고수온 일수의 경년변동성은 "Mode 1: 서태평양 해수면온도 가열과 관련된 해양모드"와 "Mode 2: 대기 고기압과 관련된 대기모드"로 구분되었다(그림 3.4.6).

첫 번째로, 48.9%의 경년변동성을 설명하는 첫 번째 주성분(PC1)은 북서태평양(필리핀해) 해수면 온도의 warming과 큰 상관관계를 보였다. 즉, 북서태평양이 뜨거워지는 해에 우리나라 해역에서 고수온의 일수가 증가하는 것을 의미한다. 두 번째로, 13.4%의 경년변동성을 설명하는 두 번째 모드는 우리나라 해역과 남쪽 북서태평양에서 쌍극자 분포(Dipole pattern)를 보인다(그림 3.4.6). PC2와 대기 500 hPa의 Geopotential height와 상관관계를 구했을 때, 동서로 길게 늘어서 동해와 서해에 영향을 주는 고수온의 경우 대기 고기압이 강화되어 폭염과 연관성이 큰 것을 의미한다(그림 3.4.7). 각 PC의 시계열의 분석 결과, 1994년 고수온 사례는 Mode 2와 연관된 시계열인 PC2에서 최대치가 나타났으며, 2001년의 경우 Mode 2의 영향이 큰 PC1에서 피크가 나타난다.

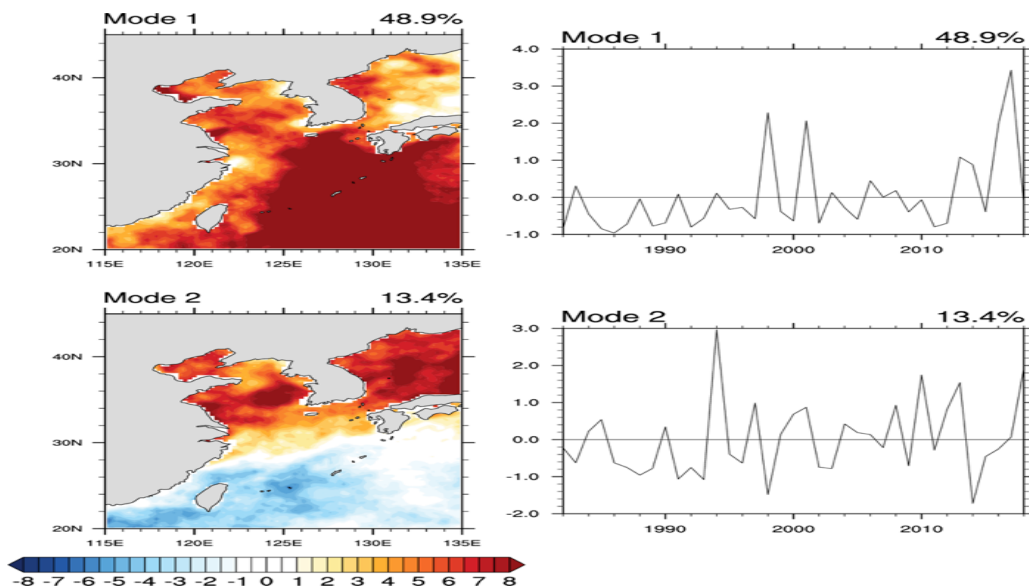


그림 3.4.6. 고수온의 장기변동성의 정규직교함수(EOF)과 관련된 PC(주성분).

두 개의 주된 모드(PC1, PC2)는 각각 48.9%와 13.4%의 변동성을 설명함

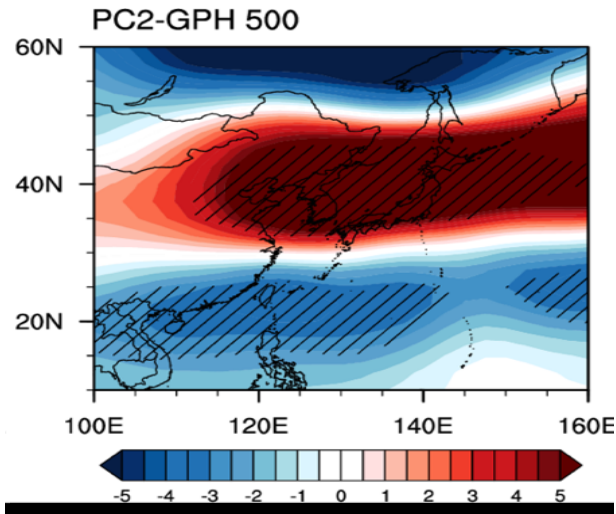


그림 3.4.7. PC2 시계열과 대기 500 hPa 지위고도장(GPH500)과의 상관관계 분포

○ 사례분석을 통한 폭염과 고수온의 연관성 연구

위에서 언급된 1994와 2001년 고수온의 사례에 대해서, 월별 대기장과 해수면의 온도 변화를 분석하였다. 그림 4.8은 평년 대비 1994년과 2001의 7-8월 상층기압 아노말리 분포를 나타낸다. 그림 3.4.9는 평년 대비 우리나라와 서태평양 해역의 해수면 온도 아노말리 분포를 나타낸다.

1994년 폭염이 극심했던 해의 경우 고기압의 강도가 7월에서 8월까지 지속적으로 강했으나 북서태평양의 해수면 온도가 평년보다 낮은 영역이 많아, 해양의 영향이 2001년 보다는 강하지 않았을 것으로 분석되었다. 2001년의 경우에는 8월에 고기압의 강도가 급격하게 약화되었으나, 북서태평양 전역이 상대적으로 따뜻해 우리나라 해역으로 더 따뜻한 해류가 유입되어 고수온 현상이 나타났을 것으로 보인다.

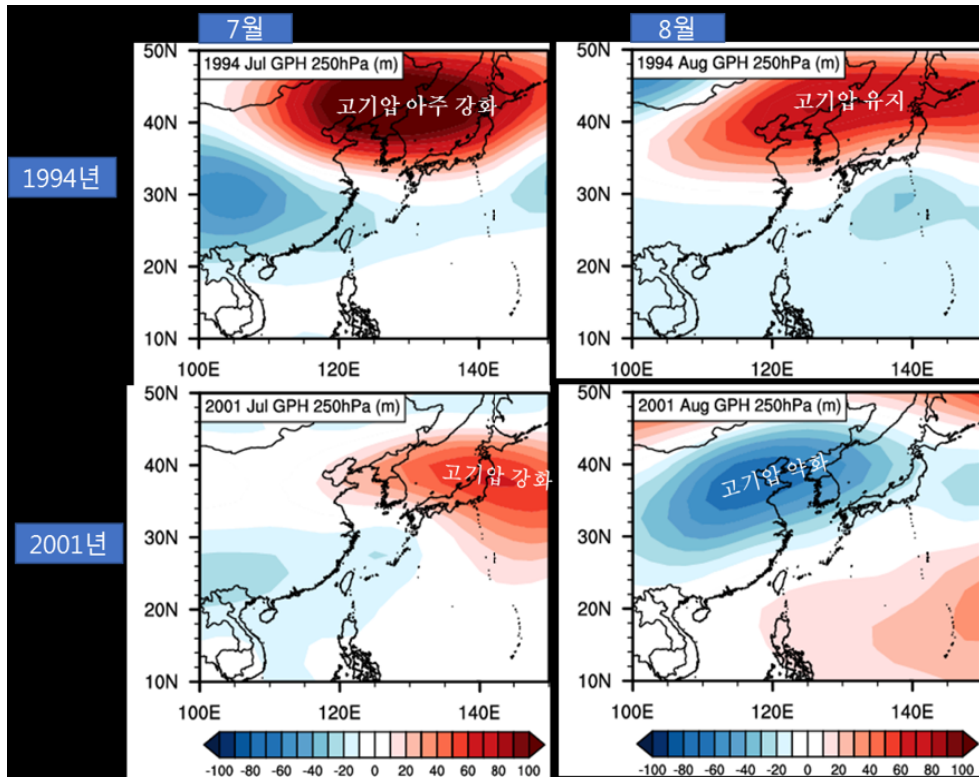


그림 3.4.8. 1994년과 2001년 상층기압 아노말리 분포 비교

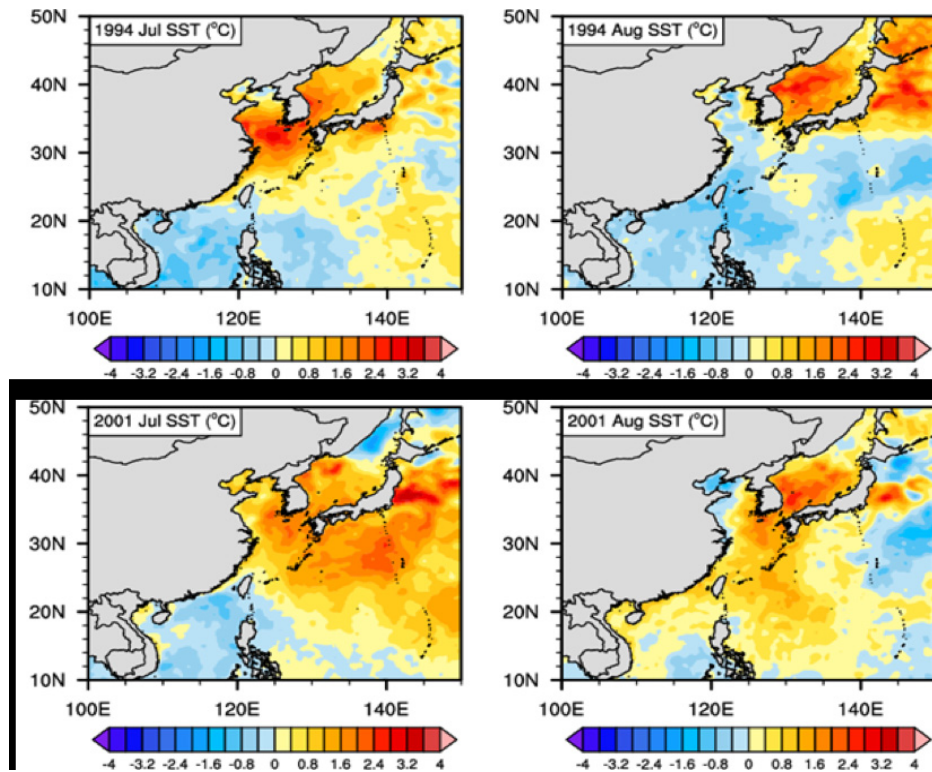


그림 3.4.9 1994년과 2001년 7-9월 우리나라와 서태평양의 평년대비 해수면온도 Anomaly 분포

4. 황해 염분 모니터링 기술 개발

2013년 3월 획득한 35개의 현장자료를 이용하여, Rrs(490), Rrs(555), Rrs(660) 세 개 밴드를 적용한 경기만 연안해역에서의 SSS 추정 알고리즘을 개발하고 GOCI에 적용하였다. 개발된 알고리즘에 현장 Rrs(를 적용하여 계산된 Sea Surface Salinity(SSS)와 측정된 SSS를 비교한 결과, 전체적으로 좋은 상관관계를 보이나, 33psu 이상의 값을 보이는 현장자료에 대해서는 Rrs 기반의 알고리즘이 표현하지 못하였다(그림 3.4.10).

개발된 알고리즘 을 이용하여 2013년 3월 21일과 25일의 경기만 해역 표층염분도 작성하였다(그림 3.4.11). 모든 현장자료는 만 내측(파란색 부분, 32psu 부근)에 집중되어 있어, 이 지역 내 Rrs와 SSS의 상관관계가 경기만 외해 지역까지도 적용 가능한 수준인지 미지수이다.

본 과제에서 개발된 알고리즘의 결과와 HYCOM 모델의 SSS와 비교 분석을 수행하였다(그림 3.4.12). GOCI 기반 자료가 과소모의 경향이 있으며, 많은 자료가 32psu 부근에 집중되어 있음. 이는 HYCOM 모델자료가 만 내측의 자료를 적절히 모의하지 못 한 경우일 수도 있으나, 알고리즘 개선을 위해 경기만 외측의 현장자료 획득 및 분석이 필요한 것으로 판단된다.

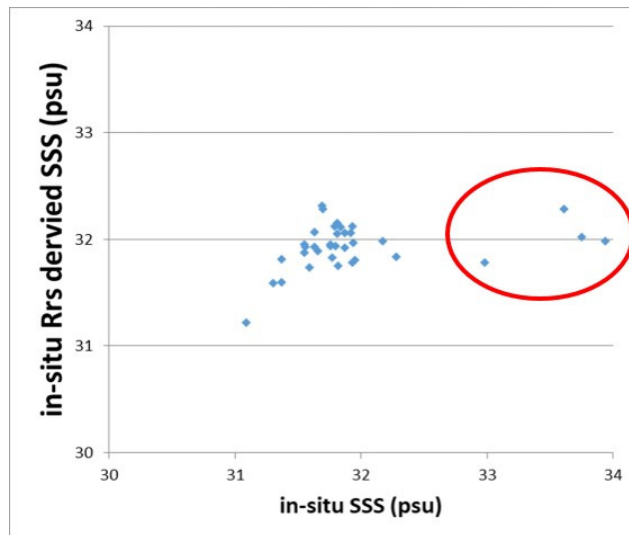


그림 3.4.10. 경기만 연안 해역의 SSS 추정 알고리즘 및 현장자료

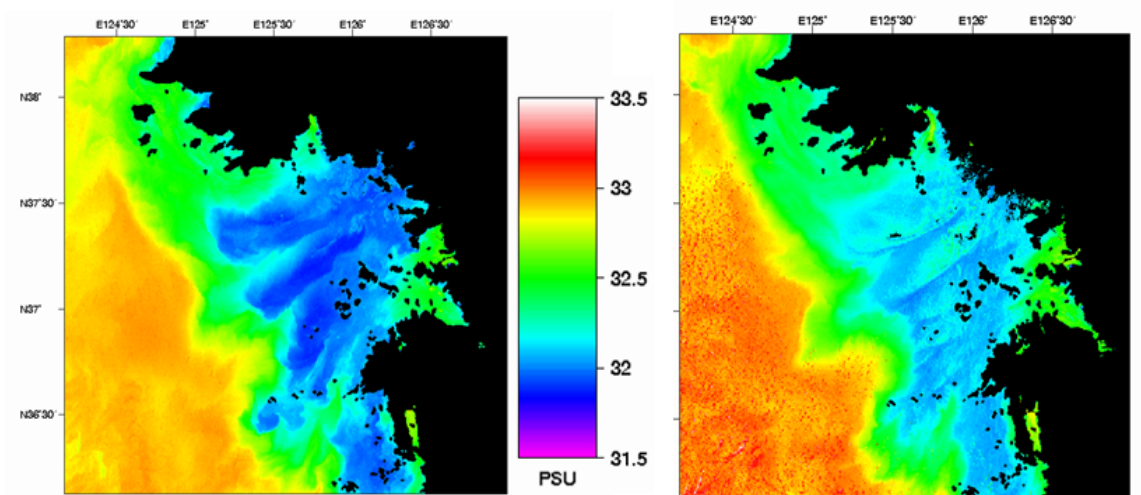


그림 3.4.11. 알고리즘을 적용한 경기만의 표층염분도 (좌) 2013년 3월 21일, (우) 2013년 3월 25일

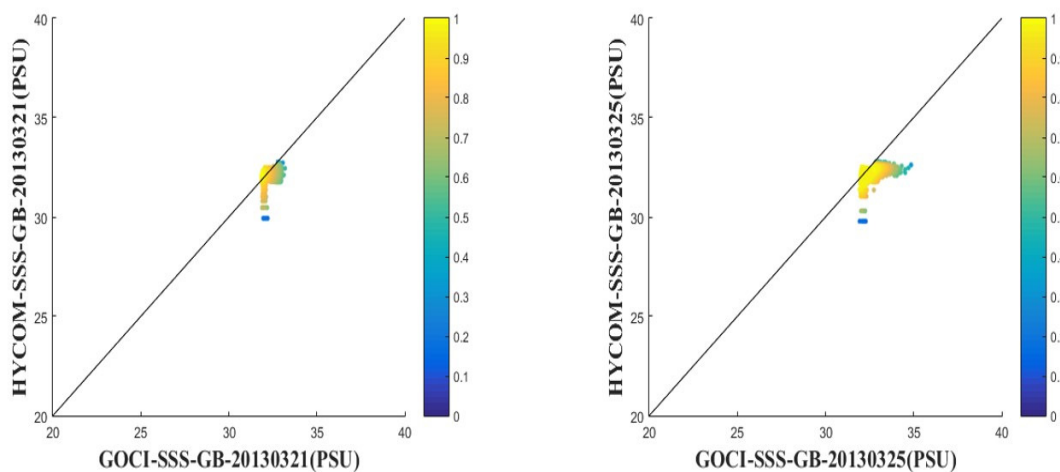


그림 3.4.12. GOCI 기반 자료 및 HYCOM 수치모델의 표층 염분 비교 (좌) 2013년 3월 21일, (우) 2013년 3월 25일

제 5 절 재분석자료 기반 생태계모델 적용과 활용

1. 양쯔강 희석수의 확장과 적조생물(HABs)관계

1986-2015년까지 최근 30년 동안의 유해유독미세조류(Harmful Algae)에 관한 연구논문 동향을 살펴보면, 1997년부터 점차적으로 증가하고 있는 추세이다(그림 3.5.1). 1997년 이전에도 HABs의 연구가 활발히 진행되었으나, 대부분의 연구는 HABs의 키워드가 아닌 “적조:red tide”로 수행되었다. 특히, 1997년 ICHA 국제학회 이후, 독소를 생성하는 미세조류는 낮은 개체수 밀도에도 인간에게 치명적인 소산을 줄 수 있어, “적조”라는 용어가 아닌, “유해미세조류 대발생 Harmful Algal Blooms”로 통합적으로 사용하고 있고, 국제적으로 HABs의 용어로 보편화되고 있다. 우리나라 주변해역은 기후변화의 취약해역으로 구분되고 있고, 해수온상승과 중국의 양쯔강의 강우량에 따라서 우리나라 남해안 HABs의 발생 및 미발생에 일정하게 영향을 미치고 있는 것으로 파악되고 있다. 따라서, 1996년부터 중국 양쯔강 기원 저염분수피가 우리나라 남해안에 미치는 영향을 파악한 결과를 바탕으로 HABs 대발생 및 미발생의 상관성을 구체적으로 조사하였다.

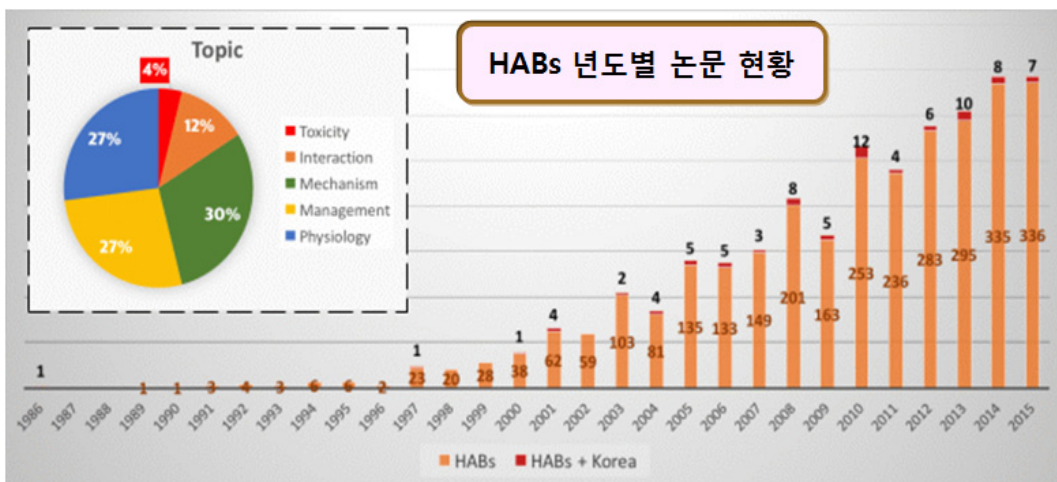


그림 3.5.1. 국내 HABs 주제별 연구동향

하계 남해안에 영향을 지대하게 미치는 양쯔강 희석수는 양쯔강 강우량과 연관성이 강하게 나타났지만, 남해안까지 도달하는 시간이 40일 정도 소요됨으로 해류 및 풍향 풍속이 중요하게 작용하는 것으로 판단된다. 즉, 양쯔강 방류량이 높은 하계에도 불구하고, 남해안에 그다지 영향을 미치지

많은 연도가 있고, 반대로 7월 양쯔강 강우량이 상대적으로 적었음에도 불구하고, 우리나라 남해역 저염분수괴가 전반적으로 관찰된 연도가 있었다. 다시 말하면, 양쯔강 희석수는 양쯔강상류 내륙의 강우와도 연관성이 있지만, 제주도-남해안으로 이어지는 해류와 풍향, 풍속이 중요하게 작용할 수 있다(Lie and Cho, 2016).

특히, 양쯔강 방류 후 우리나라 남해안까지 도달하는 시간이 최소 40-50일정도 소요되는 것으로 보고되고 있고, 이와 같은 양쯔강희석수괴는 제주도 주변해역을 거쳐 남해안 외양으로 유입되면서, 대한해협을 통과하여 동해역으로 흘러가는 경향이 강하다(Lie and Cho, 2016). 일반적으로 하계에는, 양쯔강 희석수의 분류는 조석간만에 따라서 연안으로 확산되는 경향이 일정하게 있지만, 연안내만까지는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 파악된다. 우리나라 남해안 코클로디니움 적조는 7월20일부터 8월15일 사이에 발생하는 경향이 강하다. 따라서 6월중순부터 7월초까지 양쯔강 강우량의 증가는 양쯔강 희석수의 저염분수괴의 확장을 유도할 수 있고, 특히 동중국해역-제주도 북단까지 영향을 크게 미치는 년도에는 상대적으로 코클로디니움 적조의 대발생이 일어나지 않는 경향이 관찰되었다(그림 3.5.2).

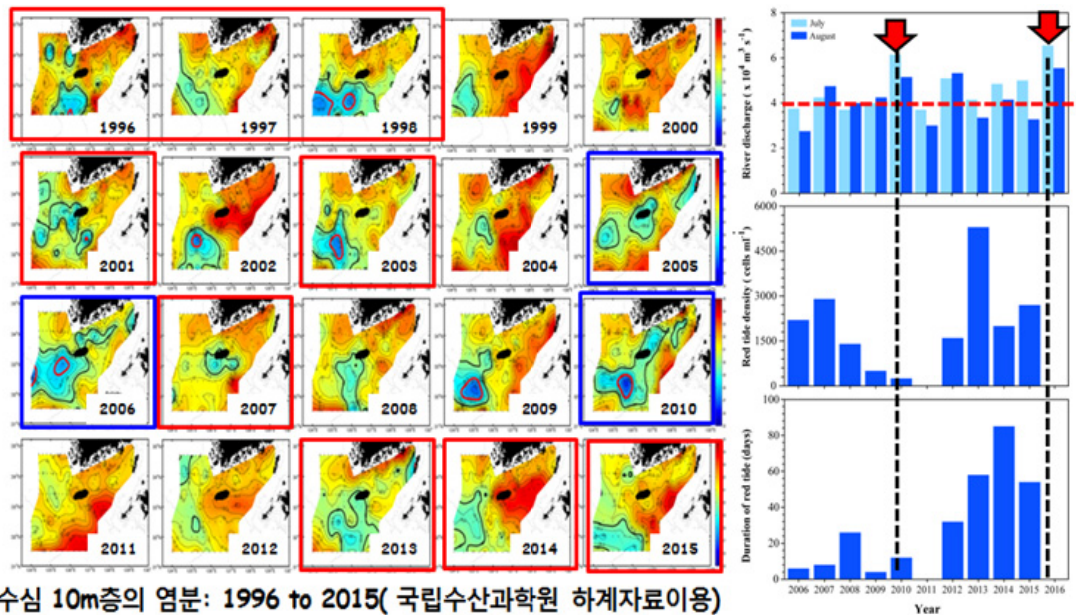


그림 3.5.2. 우리나라 남해안의 염분변화와 적조발생 경향

코클로디니움 적조의 발생은 수온, 염분, 영양염요구량, 규조류와 경쟁, 태풍에 의한 수괴 혼합, 성층형성, 피포식자간의 상관성, 박테리아에 분비되는

비타민합성, 주야연직이동, 등 아주 복잡하게 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 20014; Gobler et al., 2008). 그 중, 양쯔강 강우량의 증가는 동중국해역의 영양염류의 공급원으로 중요하게 작용되고, 이때 공급된 영양염류는 규조류의 대발생을 유도한다(Lim et al., 2014; Baek et al. 2015). 그 후 저염분수괴에 적응능이 강한 와편모조류가 증식하고, 때로는 적조를 형성한다. 하지만, 동중국해역 및 제주도 부근에 양쯔강 희석수의 확산은 광역해역의 염분을 현저하게 떨어뜨려, 고염분 적응에 강한 종의 증식을 억제할 수 있다. 우리나라 해역주변에서 높은 밀도로 출현하는 코클로디니움의 종특이적 생리특성은 고염분의 적응능이 강하고, 수온이 25°C-27°C 전후에서 빠른 증식을 하는 것으로 보고되고 있다(Kim et al., 2004; Gobler et al., 2008). 따라서 동중국해 및 제주도 북단 및 남해안 외해역에 형성되는 광범위한 저염분수괴는 코클로디니움의 증식에 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Kim et al. 2004; Lee et al., 2013). 다음으로 중요한 것은 양쯔강으로 공급된 다량의 영양염류는 양쯔강 하구 및 동중국해역의 규조류 증식을 촉진할 수 있다. 규조류의 높은 밀도로 출현하면, 코클로디니움의 증식 억제하는 역할을 할 뿐만 아니라, 코클로디니움의 유영속도를 현저하게 떨어뜨려, 야간에 저층으로 이동하여 영양염을 흡수할 수 있는 능력을 저하시켜, 결과적으로 코클로디니움의 성장에 부정적인 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Chen et al. 2009;). 그 결과, 양쯔강 강우량 증대와 함께 양쯔강 희석수의 확산은 상대적으로 경쟁에 취약한 코클로디니움의 성장을 둔화시켜, 동중국해-제주북단해역의 개체수 유지에 부정적으로 작용할 가능성이 높을 것으로 사료된다. 아울러, 양쯔강 희석수 확산에 의한 저염분수괴는 코클로디니움의 성장을 둔화시켜 동중국-제주북단-남해안 외측해역의 출현할 수 있는 개체수 밀도를 현저하게 떨어뜨릴 가능성이 높고, 이는 남해안 고흥-나로도해역으로 집적될 수 있는 확률을 현저하게 떨어뜨려, 적조가 발생하지 않을 가능성이 높은 것으로 사료된다(Nagai et al., 2009;Matsuoka et al., 2010; Lee et al., 2013).

2000-2015년 16년 동안 적조발생면적과 양쯔강의 방류량의 상관성을 분석한 결과,2001, 2013과 같이 상대적으로 7-8월 양쯔강 방류량이 낮았던 년도에는 우리나라의 적조발생의 광역화현상을 보였다. 반면, 양쯔강 저염분수가 제주북단SSFZ(South Sea Frontal Zone)에 강하게 영향을 미치게 된 2004, 2006, 2010, 2016년에는 우리나라 남해안에서 적조발생면적이 극히 낮게 관찰되었다(그림 3.5.2).

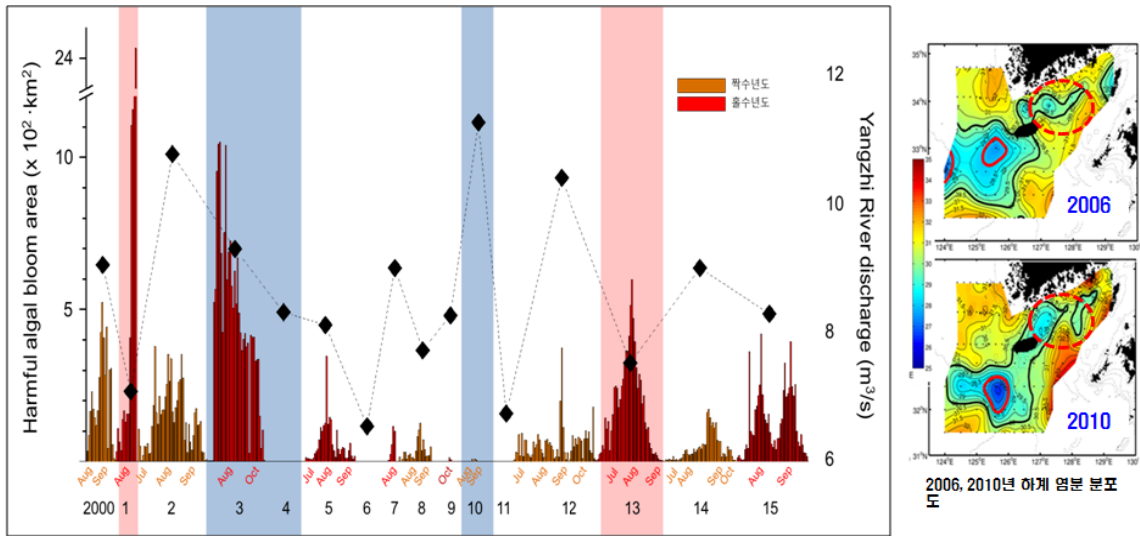


그림 3.5.3. 우리나라 남해안의 년도별 적조발생해역의 면적 및 양쯔강 희석수 확장의 관계

결론적으로 아래의 모식도로 우리나라 남해안에 발생하는 코클로디니움 적조발생의 양상을 설명할 수 있다(그림 3.5.4). 양쯔강 저염수는 Tsushima (TWC) 난류의 북상 강도 및 제주해협으로 선회하는 해류의 강도에 따라서 남해안 SSFZ의 저염분 확장 면적에 차이를 보일 수 있다. 특히, 빈영양수괴인 TWC가 상대적으로 확장하면, 양쯔강 희석수가 우리나라에 영향을 약하게 미칠 가능성이 높다(Lie and Cho 2016). 결과적으로, 양쯔강 희석수의 저염분수괴가 우리나라 SSFZ에 도달하는 시기에 따라서 적조의 대발생 및 미발생 년도를 결정하는 중요한 요인으로 판단된다. 만약, 2016년과 같이 양쯔강 희석수가 7월 20일에서 8월 20일까지 남해안 외양의 광역해역에 영향을 미쳤을 경우, 적조발생시기를 늦추는 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. 매년 코클로디니움의 적조발생시기는 7월 20일에서 8월 20일 전후로 관찰되는 경향이 강하고, 이때 양쯔강기원의 저염분수괴가 동중국해, 제주해협-남해안 SSFZ유역에 확장되면, 적조발생 가능성이 약화될 수 있고, 아울러 동일 해역내 코클로디니움의 개체수의 일정량 사멸은 적조발생시기를 늦추는 역할을 할 것으로 기대되며, 결과적으로 수산피해를 입힐 수 있는 대발생까지 이루어지지 않을 가능성이 높다. 추후 이와 같은 과학적 단서를 제공하기 위해서는 매년, 7월~8월 남해안 전반에 걸쳐 저염분수괴의 형성과 코클로디니움의 개체수 동태에 관한 조사가 필요할 것으로 판단된다.

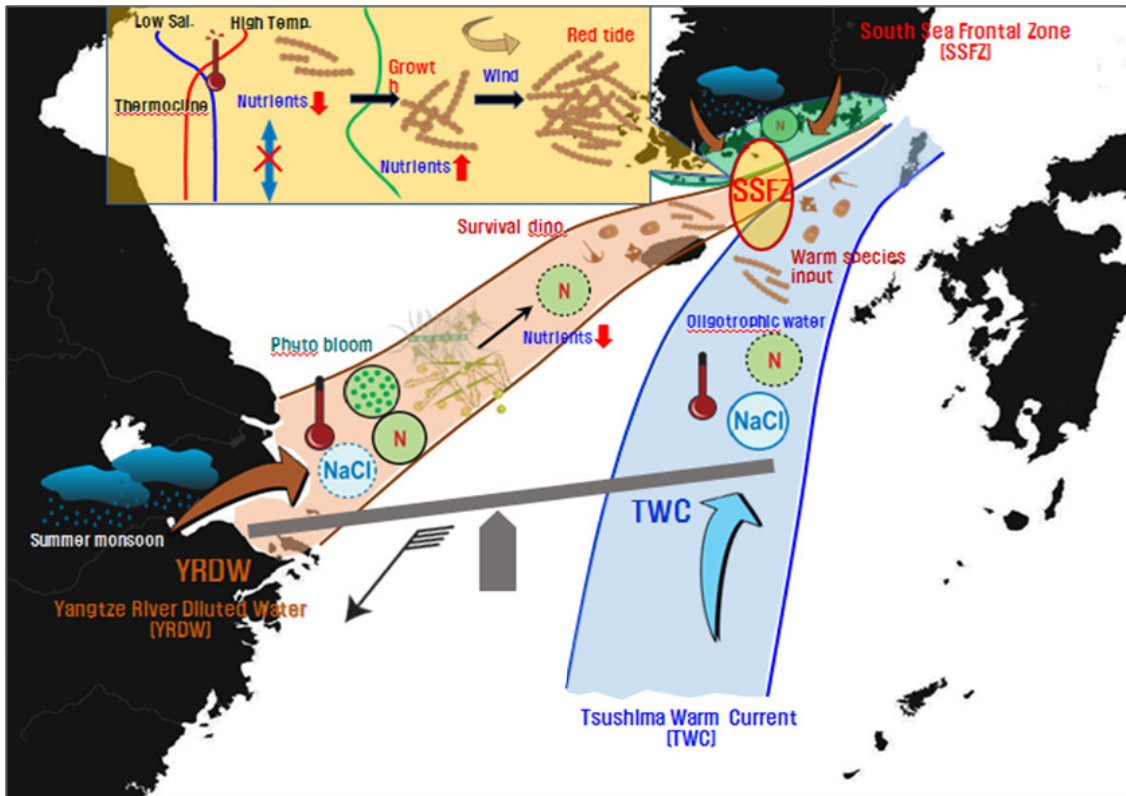


그림 3.5.4. 양쯔강 저염수의 확장 및 적조미발생 모식도

2. 우리나라 산호류의 분포변화 및 특성

본 연구에서는 우리나라에 분포하는 환경변화 예측 지시 산호류를 대상으로 기후변화의 영향을 평가하고자 노력하였다. 본 연구결과에서는 검붉은수지맨드라미/*Dendronephthya suensoni* (Holm, 1894)와 가시수지맨드라미/*Dendronephthya spinulosa* Gray, 1862에 대한 정보를 구체적으로 제공하고자 한다.

○ 검붉은수지맨드라미/ *Dendronephthya suensoni* (Holm, 1894)

- 생태 및 생물 특성: 검붉은수지맨드라미의 서식처는 전형적으로 수심 10-20m 범위의 암반 경사면에서 군락을 이루고 있다. 본 종은 제주남부에서는 군락을 형성하는 보고가 많지 않으나, 제주북부, 백도, 부산 남형제섬 등에서는 군락을 형성하는 것으로 보고되고 있다. 이 종의 대표적인 생리생태특성은 소규모 군락이 급격히 소멸되거나 짧은 시간에 새롭게 생성되는 것이다. 따라서 이종이 가지는 번식특성은 산호군락중 생태학적 지위(Ecological niche)를 가늠할 수 있고, 기후변화 등 다양한 환경변화의 흔적을 예측할 수 있는 좋은 지표종으로 활용할 수 있는 장점이 있다.

특히 무성생식법인 polyp-down현상이 이 종의 군락형성에 많은 영향을 미치는 것으로 판단됨으로 추후 이와 같은 연관성을 종합적으로 고려한 연구가 중요할 것으로 판단된다. 구체적으로 검붉은수지맨드라미의 생식특성을 살펴보면, 암수 군체가 구분되는 자웅이체이며 무성생식과 유성생식을 모두 할 수 있다. 이 종은 같은 속의 다른 종들에 비해 polyp down(폴립 떨어뜨리기)이 매우 활발하게 일어나는데, 군체 주변으로 수많은 폴립을 떨어뜨려 번식하는 특성이 있다. 유성생식은 보통 다른 수지맨드라미 연산호들처럼 조류가 강해지는 사리시기(spring tide) 야간에 spawning(방란&방정)이 일어나는 것으로 알려져 있다(그림 3.5.5).



그림 3.5.5. *Dendronephthya suensoni* (검붉은수지맨드라미)의 수중생태 모습

- 생물지리적 분포특성: 검붉은수지맨드라미의 세계적인 분포범위는 우리나라를 포함하여 일본(사가미만), 수에즈만으로 기록되어 있음. 우리나라에서는 제주도, 백도, 매물도일대, 부산 남형제섬 등에 분포하는 것으로 알려져 있다. 전형적인 서식처는 수심 10-20 m 범위의 암반 경사면으로써 군락을 이루는 것으로 파악되었다. 생물지리적 분포특성은 현재까지일본근해를 제외하고 확실한 분포기록이 나타나지 않았다. 따라서 지금까지의 정보를 바탕으로 이 종은 온대계 난류성 종으로 보는 것이 타당할 것으로 판단된다. 우리나라에서 검붉은수지맨드라미의 분포를 보면 2004년까지 제주남부에 중점적으로 분포하는 것으로 알려져 있었고, 남해안에서는 백도에서만 보고되었다. 최근 10년간의 조사결과를 보면, 제주남부보다 오히려 제주 북부와 제주 동부에서 더 빈번히 발견되고 있으며, 특히 남해안에서는

백도 이외에 홍도(통영), 안경섬(거제), 남형제섬(부산) 등에서도 확인되고 있다. 따라서 정확한 시점을 알 수 없지만 남해 외해도서들에서는 지속적으로 해류의 흐름을 따라 분포범위가 확대되었다는 것을 알 수 있다.

- 분포지역별 피도 비교: 제주 문섬, 제주 북촌, 남해안의 백도, 부산 남형제섬에서 조사된 피도 값을 비교해보면 이 종의 분포변화 경향성을 예측할 수 있다. 지도에 표기된 지역별 피도를 비교해 보면, 제주 문섬이 2.3 %/m², 제주 송악산 3.8 %/m², 성산 일출봉이 5.3 %/m²등으로 2등급 수준의 피도 점유도를 보였다. 반면 제주 북부인 북촌에서는 18.3 %/m²으로 2011년부터 2015년까지 5년간 큰 변동없이 지속적으로 높은 점유도가 유지되고 있다. 남해안의 백도에서는 10.5 %/m²의 피도를 보였으며, 안경섬과 홍도는 각각 6.4 %/m², 1.8 %/m²의 값을 보였다. 부산 남형제섬에서는 정점에 따라 다르지만 최대 점유도를 보이는 곳에서는 12.5 %/m²의 피도를 보였다(그림 3.5.6).

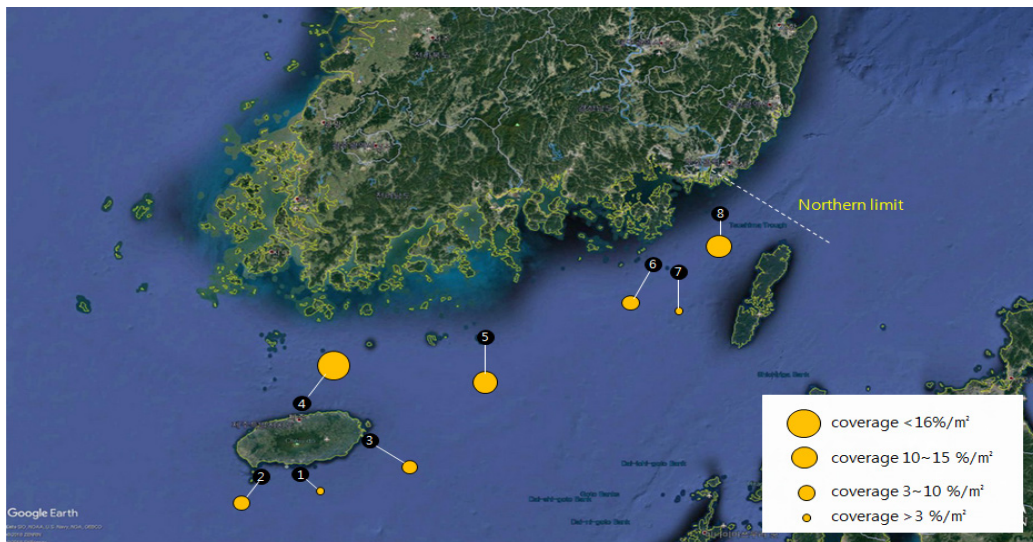


그림 3.5.6. 검붉은수지맨드라미의 분포범위 및 지역별 평균피도.

- 1) 서귀포 문섬; 2) 서귀포 송악산; 3) 성산 일출봉; 4) 제주 북촌; 5) 백도;
- 6) 거제 안경섬; 7) 거제 홍도; 8) 부산 남형제섬

따라서 분포범위와 평균피도를 근거로 보면 전체적으로 제주 남부 보다는 남해 외해도서에서 더 점유도가 높음을 알 수 있다. 한편 이 종은 과거 제주 문섬 일대에서 일정수준의 군락을 이루는 것으로 알려져 있었던 종이었는데, 과거 자료를 보면 평균 약 5.4 %/m² 수준의 피도를 보이는 것으로 나타났다. 반면 최근 3년간의 자료(2015-2017)에서는 2.5%/m²의 값으로 군락은 확인되지 않았고 개체 수준에서 드물게 발견되는 것으로

보고되어있다. 과거 검붉은수지맨드라미의 군락을 이루던 시기의 점유도는 알 수 없지만 제주 남부에서는 서서히 감소하는 추세로 볼 수 있으며, 이 종의 남쪽한계(southern limit)가 서서히 북상하는 것으로 판단된다.

- 보존 및 관리: 이 종은 환경부 멸종위기 야생동식물 II급과 해양수산부 보호대상해양생물로 지정 되어있다. 우리나라에 서식하는 연산호 중에서는 분포범위가 가장 넓은 종이지만 제주 남부에서 감소추세 경향이 나타남으로써 전체적인 분포범위가 좁아질 것으로 예상되는 기후변화 지시종으로 판단됨으로 장기적인 변화 관찰이 중요하다고 생각된다.

○ 가시수지맨드라미/ *Dendronephthya spinulosa* Gray, 1862

- 생태 및 생물 특성: 가시수지맨드라미의 서식처는 전형적으로 수심 25-40m 범위의 암반 경사면이나 평탄암반에서 큰 군락을 형성한다. 일반적으로 제주 문섬에서는 큰 군락을 이루지만 제주북부, 동부, 서부와 남해안의 거문도, 홍도, 부산 남형제섬 등에서도 드물게 발견됨. 생식특성에 대해서는 알려진 바 없으나 기본적으로는 수지맨드라미류의 번식방법과 유사할 것으로 예상된다.
- 분포범위: 가시수지맨드라미의 세계적인 분포는 우리나라를 포함하여 일본, 인도양, 중국해 등에 기록이 있는 종으로써 주로 한국과 일본에 분포하는 것으로 알려져 있다. 일본에서의 분포는 Tanabe Bay로 알려져 있으나, 남부 태평양연안에 걸쳐 분포할 것으로 판단됨. 우리나라에서는 제주도, 거문도, 백도, 매물도일대, 부산 남형제섬 등에 분포하는 것으로 알려져 있음. 특히 이 종은 제주 남부에서 최근 10년 동안 가장 급격히 증가한 종으로 나타나고 있다(그림 3.5.7).
- 생물지리적 분포특성: 일본을 포함하여 인도양(Indian Ocean)과 중국해(China Sea)에 분포하는 것으로 나타나있으나 일본에서도 분포범위가 넓지 않다. 우리나라에서는 제주도 남부 문섬 일대에 가장 큰 군락이 있으며, 최근 크게 군락의 크기가 증가한 것으로 파악된다. 제주해역에서는 문섬 이외에도 주변의 범섬, 숲섬, 지귀도 등에서도 발견되지만 군락을 이루지 않음. 또한 제주 서부, 동부, 북부에서도 개체수준에서 발견되고 있다. 남해안에서는 거문도, 백도, 부산 남형제섬, 홍도(경남) 등에 분포하는 것으로 보고되어 있다. 따라서 제주 남부에서 지속 증가한다는 점과 제주 북부, 동부 남해 외해도서 등에서 드물게 발견되는 양상으로 볼 때 이 종은 아열대성 난류종의 특성을 보이고 있다. 추후 전 세계적인 분포자료를 좀 더 확보할 필요가 있다고 판단된다.

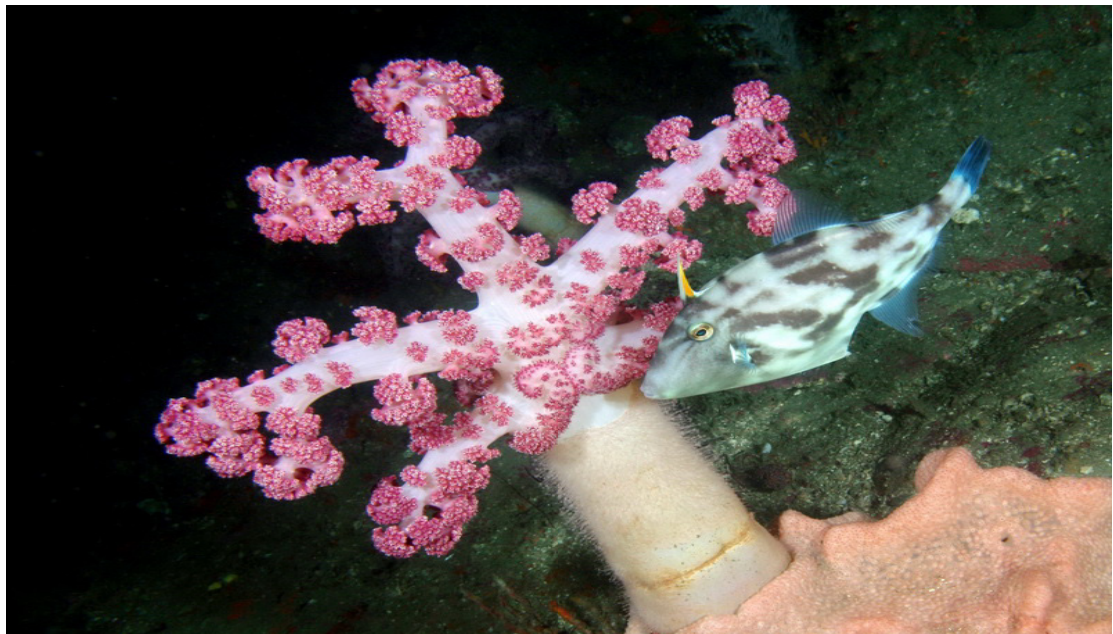


그림 3.5.7. Dendronephthya spinulosa (가시수지맨드라미)의 수중생태 모습

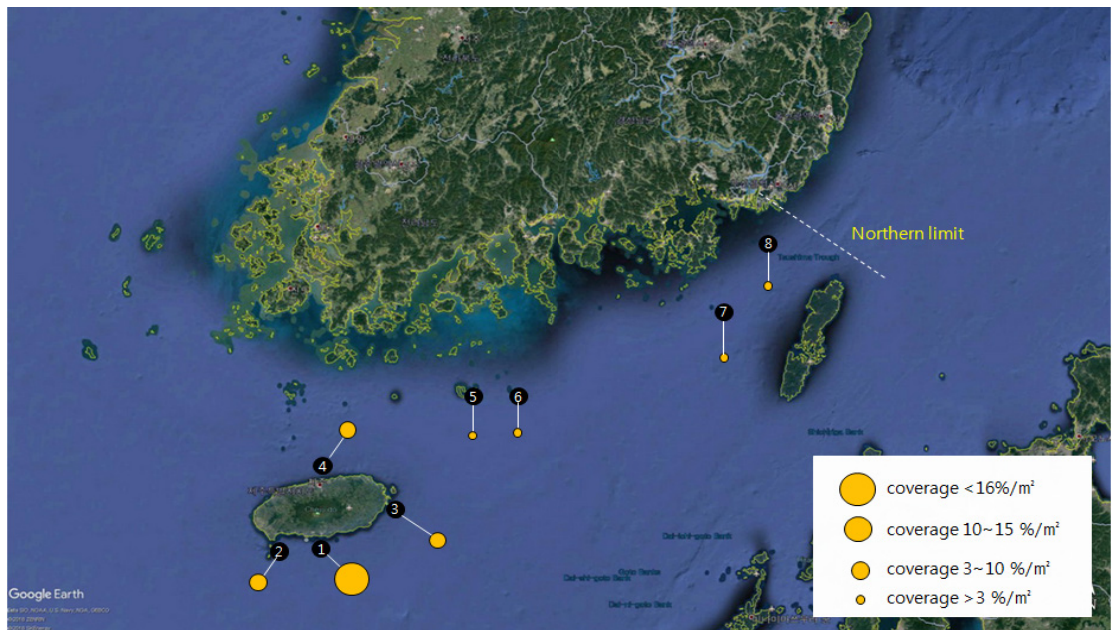


그림 3.5.8. 가시수지맨드라미의 분포범위 및 지역별 평균피도.

- 1) 서귀포 문섬; 2) 서귀포 송악산; 3) 성산 일출봉; 4) 제주 북촌; 5) 거문도;
6) 백도; 7) 거제 흥도; 8) 부산 남형제섬

- 분포지역별 피도 비교: 제주 문섬의 서쪽과 북서쪽 지점에서 2002년부터 2016년까지 평균피도를 파악한 결과 2002년에는 약 $5.3\%/m^2$ 의 평균피도를 보였으나 2009년 $12.2\%/m^2$, 2013년 $22.3\%/m^2$, 2016년 $28.3\%/m^2$ 로

증가한 것으로 나타났으며, 약 5.3배 증가한 것으로 보고되어있음. 제주 문섬을 제외하고는 정량자료가 없지만 사진자료를 분석해보면 제주 남부지역은 평균 약 3-4개체/10m², 제주 북부, 동부 지역은 평균 약 2-3개체/10m², 수준이었으며, 남해안의 거문도는 약 1-2개체/10m², 백도, 홍도, 남형제섬은 약 0.5-1.5개체/10m² 수준이었음. 따라서 제주 문섬과는 큰 차이가 있음을 알 수 있다(그림 3.5.8).

- 보존 및 관리: 이 종은 법정 보호종으로 지정되지 않았으나 해양수산부 보호종 지정 후보종로 추천된 바 있음. 앞서 언급하였듯이 제주 남부에서 급격히 증가하고 있으며 지시종임. 따라서 장기적인 변화 관찰이 필요하다고 판단된다.

3. 우리나라 주변해역의 수산자원변화양상

우리나라의 해역별 표층수온 변화(국립수산과학원, 1968~2017년 자료) 및 주요 어종별 어획량(통계청 어업생산동향조사, 1970~2017년)에 대한 장기 자료를 분석하였다(그림 3.5.9).

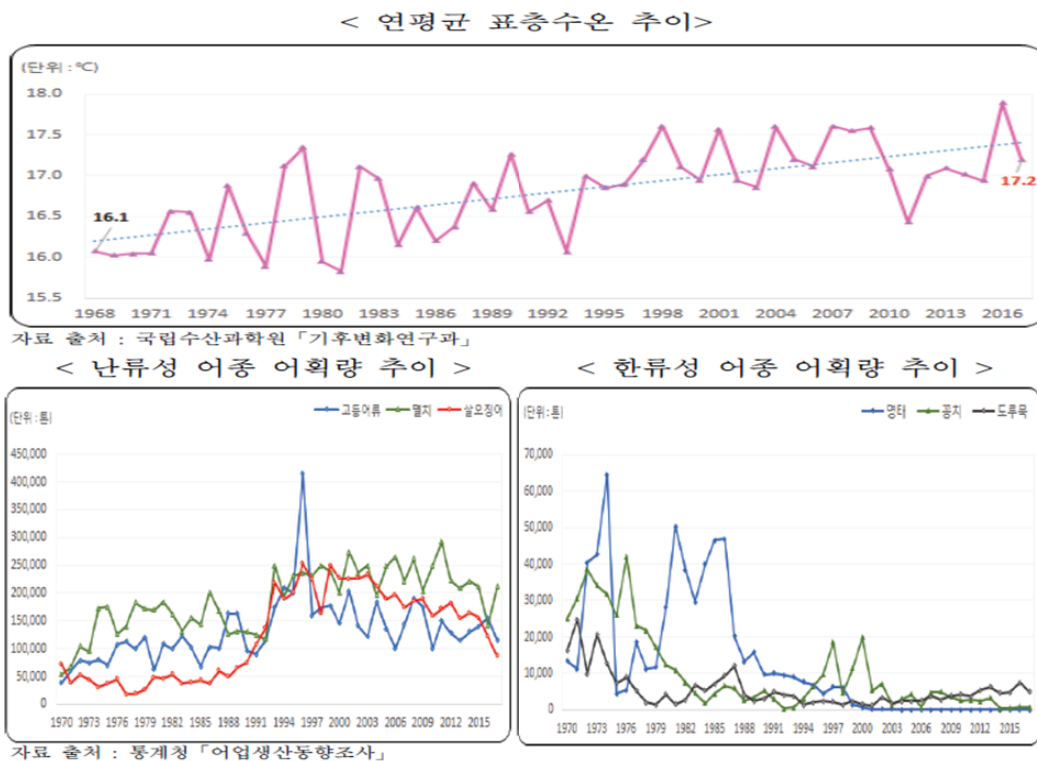


그림 3.5.9. 수온의 연평균추이 및 주요 어종 어획량

- 기온상승: 지구 온난화가 심화된 지난 100년(1918~2017년)동안 전 세계 평균기온은 1.55°C, 표층수온은 0.62°C 상승한 것으로 보고되고 있다. 우리나라 해역의 표층수온은 전세계에 비해 최근 50년(1968~2017년)동안 약 2.2배 높게 상승하였다. 우리나라 해역의 표층수온은 최근 50년 동안 약 1.1°C 상승하고, 동해 1.7°C, 남해 1.4°C, 서해 0.3°C 순으로 높게 상승하였다.
- 주요어종 어획량변화: 수온상승으로 1990년 이후 연근해 해역의 어획량은 고등어류, 멸치, 살오징어 등 난류성 어종이 증가하고, 명태, 꽂치, 도루묵 등 한류성 어종의 감소가 두드러지게 나타났다(그림 3.5.10).

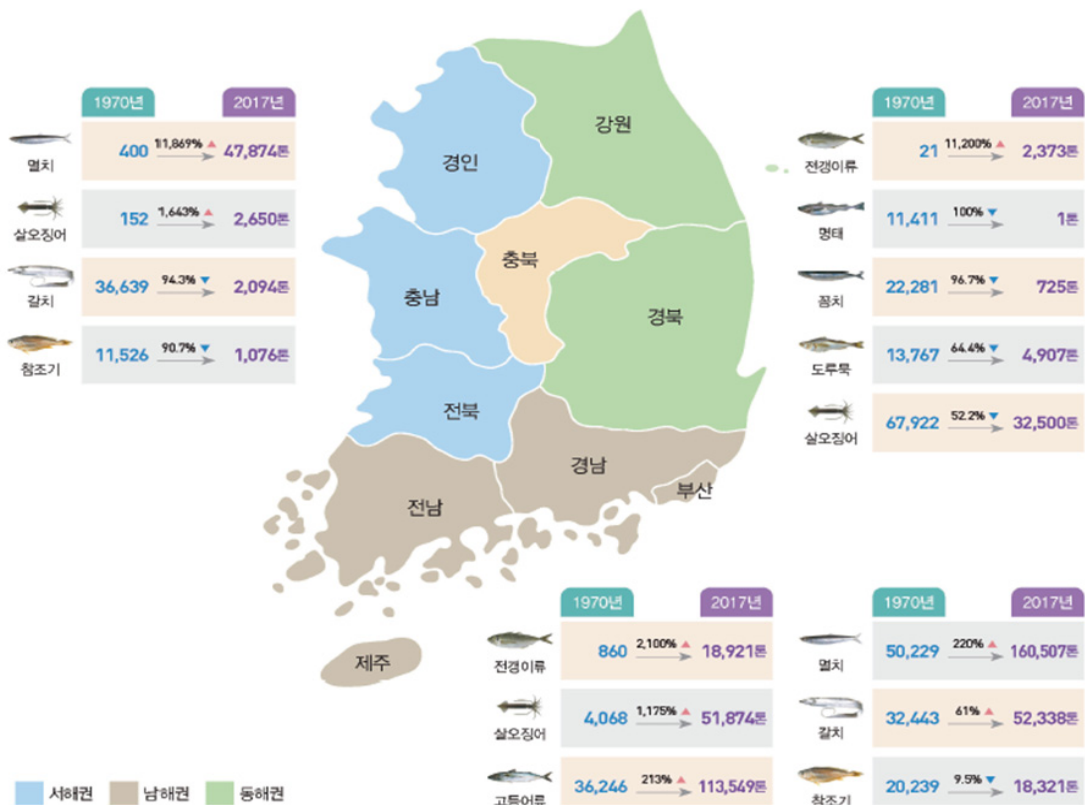


그림 3.5.10. 해역권별 주요어종 어획량 변화(통계청: 어업생산동향조사)

해역권별 주요어종의 어획량의 변화를 살펴보면, 먼저 동해권은 전갱이류 등이 증가한 반면, 명태, 꽂치, 도루묵, 살오징어 등이 감소하는 경향이 관찰되었다. 서해권에서는 멸치, 살오징어 등은 증가한 반면, 갯치, 참조기 등은 감소하는 경향을 보였다. 서해권에서는 살오징어, 고등어류, 멸치, 갯치 등은 증가하였고, 참조기 등은 감소하였다. 결과적으로 연근해 해역의 주요어종의 어획량 변화가 중장기적으로 발생하고 있는 것으로 파악되었다.

이와 같은 어획량의 변화는 기후변화에 따른 수온상승도 있겠지만, 어선 및 어구의 발달, 남획, 중국어선의 불법조업 등 복합적인 요인으로 발생하였을 것으로 사료될 수 있지만, 그중에서도 중장기적으로 난류어종의 증가와 한류어종이 두드러지게 감소한 것은 수온변화의 영향이 크게 작용되었을 것으로 생각된다. 현재 추세로 수온상승이 유지된다면, 우리나라 연근해 해역에서 한류성 어종은 점차적으로 감소하고, 난류성 및 아열대 어종의 비중이 현저하게 높아질 것으로 전망된다. 따라서 기후변화에 대응할 수 있는 매뉴얼을 국가 차원에서 재정립하고, 해양수산부에서는 연근해 해역의 수산자원 회복을 위한 정책시행을 추진하고, 기후변화에 따른 어종변화에 대한 대응방안을 모색할 필요가 있다. 다시 말하면, 수산가치가 높고, 국민이 선호하는 어종에 대한 인공종묘 생산 및 방류사업을 지속적으로 확대 시행하여 수산자원 회복 및 관리를 추진해야 할 것으로 판단된다. 아울러, 변화하는 해양환경에 수산업이 대응할 수 있는 연구역량을 강화하고, 기술개발을 위해서 각고의 노력이 필요할 것으로 사료된다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 계획대비 연구수행의 적절성

1. 추진체계 및 수행방법의 적정 수행 여부

- 해면고도 자료동화기법을 계획대로 개발하였으며 해면고도 자료동화의 성능을 평가하기 위하여 전지구 해양순환모델에 시범 적용하여 해면수온 뿐만 아니라 해면염분 또한 개선되는 것을 확인하였음.
- 입자추적모델에서 난류혼합의 모수화에 필요한 표층부이 관측실험을 추진하였다. 남해에서 4월과 11월에 표층부이를 전개하였으며 계획되었던 난류통계분석 및 모수화를 방안장구를 위한 문헌조사를 실시하였음.
- 재분석장 자료검증을 위한 제주북부해역 실시간 광역표층해류장관측은 연간 91%의 자료획득율의 결과를 얻었으며, 이는 이상발생시 문제점을 즉시 표출할 수 있는 감시체계 구축의 성과임.
- HFR 관측지역 내 2개소 고정점 해양관측부이 운용을 통하여 고정점 자료의 신뢰도를 산출하였으며, 2-타입별 표류부이 비교실험을 통하여 공간자료의 높은 신뢰도를 계산하였음. 기존 제주해협에서 관측된 25시간 해류정보를 활용하여 공간신뢰도를 검증하였으며 이를 통한 시공간 이상 자료 원인 분석 및 해결방안을 도출하였음.
- 최근 국제 학계에서 합의된 고수온의 정의 기준을 따라, 위성 합성 자료 (NOAA OI SST 자료)를 이용하여 고수온의 발생빈도, 지속기간, 강도 등을 탐지하여, 장기 경년변동성을 분석을 수행하였음. 특히, 각 해역 지점에서 지난 30년간 관측된 NOAA OI를 이용하여 그 계절 시기에 관측된 SST 해수면 온도 중 상위 10 퍼센타일 값을 경계값으로 하여, 위성 관측 SST가 지역별, 계절별로 달라지는 경계값을 넘으며 이런 상태가 3일 이상 지속될 때를 고수온으로 탐지하였음.

- 고수온의 경년변동과 관련된 물리적 현상을 조사하기 위해서, 위성 기반으로 탐지된 고수온의 경년변동성의 EOF 분석을 실시하였음. 이에, 변동을 설명하는 주요 대기/해양 모드를 찾아낼 수 있었음. 또한, 이를 구체적으로 검증하기 위해서 강한 고수온인 해인 2001년과 1994년에 대하여 사례분석을 실시하였음.

- GOCI위성 자료에서 염분도를 추정하기 위해서, 현장관측 자료를 이용하였음. 2013년 3월 경기만에서 획득한 총 58개의 현장자료 세트(412nm Rrs, 555nm Rrs, SSS)로부터 경험적 알고리즘을 구하고, 이를 GOCI에 적용하여 경기만 연안해수 표층염분도 추정하였음. 단계적으로는, Rrs412/Rrs555와 acdom의 관계식 유도하여, acdom과 SSS 관계식을 유도하였음.

제 2 절 연구개발 성과의 달성도 및 우수성

1. 연차별 목표 대비 달성도

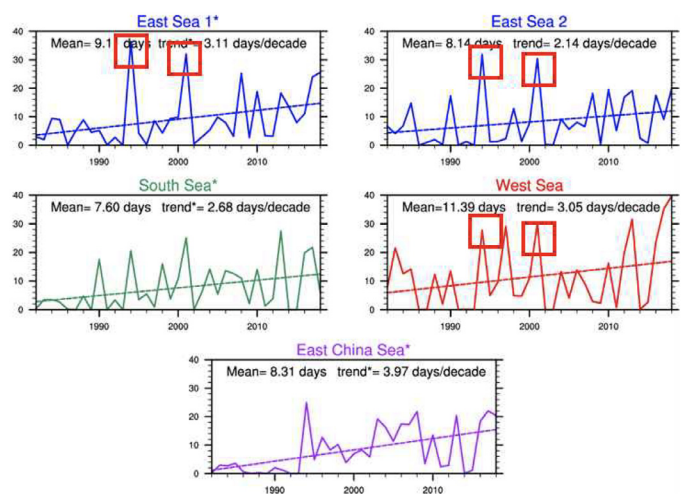
총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내용				연차별 계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	성과목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
1년차	한반도 해역 고해상도 재분석자료 생산과 검증	1-1. 해면고도 자료동화 시스템 구축	0.2	- 해면고도위성자료를 활용한 “해양 자료동화 시스템” 개발	95
		1-2. 재분석자료와 관측자료의 대한해협과 동중국해 단면 통과수송량비교 분석		- 재분석 자료를 활용해 대한해협 수송량 분석	
		1-3. 재분석 자료와 대양관측 자료로부터 대만 동남방 -아열대역 서부 난수 에디 분포 특성 분석		- 재분석 자료를 활용하여 아열대 해역의 난수 에디 분포 검증	
	재분석자료 검증을 위한 제주해협 표층해류 모니터링	2-1. 제주해협 표층 해류 상시모니터링 시스템 구축	0.2	- 웹기반 상시감시 시스템 진단모드 실시간 감시 구축완료	95
		2-2. 고정점 관측부이를 통한 자료 검증 및 분석		- 제주북서부해역 2정점 고정부이계류 및 HFR 자료검증 - 상관도:0.63~0.83	
		2-3. 시, 공간 결측자료 원인 분석 및 해결방안 도출		- 기존 관측정보를 활용한 공간자료 검증 및 오류 관측영역 분석 - 고내 관측영역 전과환경 개선 필요 파악	
		2-4. 타입별 표류 부이 비교실험을 통한 관측자료 상호 검증		- 2타입별 표류부이 실험 결과와 HFR 관측 자료 검증 - 상관도:0.93~0.94	
	모형의 성능 향상을 위한 아중규모 난류혼합의 모수화	3-1. 남해 아중규모 난류혼합의 모수화를 위한 표층부이 실험	0.2	- 4월 표층부이 실험을 수행하였고 11월말 표층부이 실험 준비중	95
		3-2. 남해 제주해협의 난류 특성 분석		- 통계적 방법을 이용하여 난류특성을 분석하였음	
		3-3. 난류혼합 모수화 모형의 선행연구		- Random walk와 고차원의 비선형 stochastic model 에 관한 문헌조사	

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내용				연차별 계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	성과목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
1년차	재분석자료 기반 고수온 저염분 현상의 구조와 영향 평가	4-1. 위성에 기반한 자료를 이용한 한반도 해역 고수온 현상 특성 분석	0.2	- 위성 기반 고수온 탐지 기법 개발하여, 국내에서 최초로 고수온의 장기 변동성데이터베이스를 구축함	100%
		4-2. 기존 관측 자료 기반 한반도 해역 고수온 현상 유형 분류		- 우리나라 주변 해역의 고수온의 원인을 폭염과 관련된 대기 모드와 북서태평양의 해수면 온도와 관련된 해양 모드로 분리하여 원인을 규명함	
		4-3. 현장조사 자료에 기반한 황해지역 해수 CDOM과 염분도 상관관계 분석		- 현장조사 자료를 이용하여 GOCI 기반 황해지역 해수 염분도 알고리즘 개발	
		4-4. 홍수/여름철 양자강 저염수 확산 시기 전후의 황해 염분도 변화 관측		- 개발된 알고리즘을 적용한 사례 분석 수행	
	재분석자료 기반 생태계모델 적용과 활용	5-1. 생지화학모델 수립	0.2	- Offline 탄소순환모델 수행과 해양-대기 이산화탄소 교환량 분석	95%
		5-2. 주변해역 산호류 및 해양유해생물 생존 적정 범위 및 분포도 작성		- 우리나라 적조생물의 장기변동 및 산호류의 분포 변화특성을 제시함	
	계		1.0		96%

2. 연구성과 우수성

가. 정성적 연구성과

우수성과 - 1.	해양자료동화 기법 개선 및 적용
성과 내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 위성 해면고도 자료동화 시스템 개발 및 성능 시험 평가 <ul style="list-style-type: none"> - 해면고도 자료동화 시스템을 개발하였으며 성능을 시험 평가함. - 개발한 해면고도 자료동화 모듈을 KIOST 지구시스템모형에 적용하여 성능을 평가함 (KIOST_ESM_v2). - 해당 자료는 남극해 및 북극해의 표층염분 Bias가 기존의 재분석 자료들에 비해 크게 개선되었음. 또한 관측자료 및 수치모델 실험을 통해 보고된 North Equatorial Undercurrent (NEUC)를 효과적으로 모의하였음.
성과의 우수성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해양자료동화 기법 개선 효과 : 해양 in-situ 자료의 시·공간적 불연속성 및 부재에 대한 대안 <ul style="list-style-type: none"> - 해양 현장관측자료는 관측기간 및 공간분포에 대한 불연속성 및 부재로 인한 한계점이 있음. - 해당 기법은 일정한 간격을 갖는 위성자료를 기반으로 하여, 가상의 프로파일을 생성하면 이러한 한계점을 상당부분 극복할 수 있음. 수온·염분 연직구조 개선을 위한 자료동화를 수행할 수 있음.
	<p>The diagram illustrates the improvement of marine data assimilation. It shows two scenarios: 'Bottom pressure (+)' and 'Bottom pressure (-)'. In both, satellite sea surface height data is compared with model data. The diagram shows depth profiles (Depth in m vs. temperature in degC) where satellite data is used to update the model profile, resulting in a more accurate 'Updated profile' compared to the original 'Model profile'.</p>
증빙자료	<ul style="list-style-type: none"> ○ 소프트웨어 등록 (2018/10/10 “해면고도(Sea Surface Height) 자료동화를 위한 해양순환모델 (GFDL MOM5) 해양 자료동화 모듈”)

우수성과 -2.	우리나라 해역의 고수온의 장기변동성 분석 및 대기/해양 원인 규명
성과 내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 위성자료 기반 고수온 탐지 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 우리나라 해역(동해, 남해, 서해)의 해수면 온도의 지역적 변동성기 큼 - NOAA 합성 해수면 온도 자료를 이용하여 지역적, 계절적으로 달라지는 경계값을 사용한 고수온 이벤트 탐지 ○ 국내에서 최초로 고수온의 장기 경년변동성 데이터베이스 구축 (올해 2018년 고수온 현상 포함) <ul style="list-style-type: none"> - 1982년부터 2018년까지 우리나라에서 전반적으로 고수온 현상이 증가하는 경향성이 나타남 - 남해의 경우, 고수온 일수 증가 경향성이 통계적으로 유의함을 보임 ○ 고수온 현상의 원인 분석 수행 <ul style="list-style-type: none"> - EOF 분석을 통해서 대기/해양의 원인을 구분하여 설명 - 폭염의 경우 대기의 고기압 분포와 상관성이 크나, 고수온의 경우 여름철 고기압 분포 뿐 아니라 북서태평양 온난해역의 발달, 양자강 저염분수, 쿠로시오 난류 등 해양의 상태도 중요함
성과의 우수성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 중장기 기후 변화와 관련된 고수온 연구에 국내에서 선두적인 전문성 확보 <ul style="list-style-type: none"> - 원내 위성, 기상, 해양 분야의 전문가의 협력으로 우리원의 우수성을 확보할 수 있는 새로운 키워드 현상에 대한 본격 연구 시작 - 고수온의 기상(태풍, 안개 등)에 대한 영향 때문에 기상청에서 관심이 큼 - 올해 고수온 현상에 의한 피해가 커지면서 사회적 관심이 증대되어, 본 연구결과가 언론에 홍보됨
	 <p style="text-align: center;">Time Series of MHW duration</p>
증빙자료	<ul style="list-style-type: none"> ○ 논문명 (Journal of Climate, 제출 예정) ○ 학술발표명 (2018/11/6, 제주 ICC, PORSEC) ○ 언론 보도자료

나. 정량적 연구성과

[2018년도 목표 대비 달성도]

구분		가중치*	달성 목표(건)	세부 가중치	달성 (건)	달성도 (%)	
과학적 성과	논문	50%	mrnIF 81점 이상				
			mrnIF 61~80	1	60%	1	100
			mrnIF 41~60	1	40%	1	100
			mrnIF 40점 이하			3	
			국내학술지			1	
			소계	2	100%	6	100
	자료	30%	표층해류자료 연간 80%이상 관측을 획득			1	100
기술적 성과	특허		국제특허 출원				
			국제특허 등록				
			국제특허 추가등록				
			국내특허 출원				
			국내특허 등록				
경제적 성과	기술료		기술이전 성과				
사회적, 인프라	홍보활동	10%	대외홍보	2	70%	3	100%
	대외활동	10%	대외활동	1	30%	1	100
계	-	100%		-		100	

3. 연구결과(실적)

구분	주요 내용
자체 종합 평가의견	<ul style="list-style-type: none"> □ 계획대비 연구를 원활하게 수행하였으며 정성, 정량적 성과가 뛰어남.
1차년 (2018년) 성과 및 의의	<ul style="list-style-type: none"> □ 본 연구를 통해서 개발된 해면고도 자료동화는 해양재분석 시스템 개선에 매우 유용한 기술로 특히 해류 예측 성능을 개선하는 기술로 가치가 큼 □ 제주해협 표층해류의 지속적인 모니터링 체계의 기반을 마련함 □ 아중규모 난류혼합 모수화를 위한 표층부이 현장실험 성공적 수행하였으며, 남해의 난류특성을 정량화는 향후 이 해역의 모델 성능 개선에 기여할 것으로 기대함 □ 기후변화에 따른 남해역 고수온의 장기 변동 특성을 최초로 파악할 수 있었으며 해양의 역할을 규명한 것을 평가할 만함 □ 해양환경 변화에 따른 적조(HAB) 생물 변동과 중국 양쯔강 하계 강우량 관계를 파악한 것을 평가할 만함

제 3 절 관련분야에의 기여도

1. 기술적 측면

- 해면고도 자료동화 기법을 개발함으로 해양재분석 자료뿐만 아니라 해양예측 시스템의 개선에도 활용될 수 있음.
- 해면고도 자료동화 기술은 해양/기후 예측 시스템의 개선에 활용할 예정임.
- 실시간 표층류 모니터링 자료는 해수유동 예측모델의 자료동화 등 입력 및 검증자료로 활용하여 국가해양예보분야의 예측 정확도 향상에 기여함.
- 수집된 아중규모 표층부이 데이터는 KIOST 내의 해양순환 모형뿐만 아니라 한반도 주변 해양을 대상으로 하는 다른 해양모형을 검증할 수 있는 참고자료로 사용 가능함.
- 획득된 표층부이 데이터는 모수화를 통하여 입자추적모델의 현실성을 개선시킬 것으로 예상됨.
- 국내 주변해역 고수온 현상 예측과 관련한 기술적 수준을 제고할 수 있음.
- 동아시아/서태평양 영역의 고수온 변동성은 거의 연구되지 않았다. 본 과제에서는 위성 기반 고수온 탐지 기법 개발하여, 국내에서 최초로 고수온의 장기변동성 데이터베이스를 구축하였다.
- 우리나라 주변 해역의 고수온의 원인을 폭염과 관련된 대기 모드와 북서태평양의 해수면 온도와 관련된 해양 모드로 분리하여 원인을 규명함. 고수온 현상은 대기의 폭염 뿐 아니라 열대 해양의 온도 변화와도 상관성이 큼을 강조함.
- 현장조사 자료를 이용하여 GOCI 기반 황해지역 해수 염분도 알고리즘 개발하였으며, 개발된 알고리즘을 적용한 사례분석을 수행함.
- 기후변화와 관련된 이상기온 및 강수량의 영향으로 적조생물(HABs)의 대발생 및 미발생 특성을 파악할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있음.
- 기후변화 지표생물인 산호류의 한반도내 분포변화 양상을 구체화하는 방법을 확립함으로써, 다양한 해양생물들의 분포변화를 연구할 수 있는 토대를 마련함.
- 기후변화에 따른 수온상승은 난류성 및 아열대성 어종이 점차적으로 북상하여 한반도 주변해역의 수산업의 어획량(난수성어종 증가& 냉수성어종 감소)에도 영향을 미칠 수 있다는 근거자료를 확보함.

2. 경제·산업적 측면

- 물리학 기반의 해양환경 변화 예측과 생물학 기반의 생리/대사 변화 예측 결과의 융합연구로 미래 생물자원 변동 예측 기법 및 관리방안 제시함.
- 국가적 차원의 기후변화 대응 전략방안 마련 및 기후변화 취약해역/민감 해역을 관리할 수 있는 정책 마련을 기반으로 효율적으로 한반도 주변 해역을 감시, 관리체계구축에 기여할 수 있음.
- 표층부이 실험을 통한 모수화 알고리즘의 구현은 오염물질 확산/거동모델링의 정확도 향상에 도움이 되고 이는 오염물질로 인한 관광산업과 어업의 피해를 줄이는데 기여할 수 있음.
- 적조생물(HABs) 대발생에 따른 수산피해 저감을 위한 관리방안을 도출할 수 있는 중요한 단서를 제공하였음.
- 해양생물다양성 보전에 큰 역할을 하고 있는 산호류의 분포변화를 파악하여, 변화되는 해양생물자원의 이용에 적극적으로 대처할 수 있는 기반을 마련함.
- 기후변화에 따른 어종변화에 대한 대응방안을 모색할 수 있는 통계적 근거자료를 제시하였으며, 이는 수산자원 회복 및 관리방안을 도출할 수 있는 기반을 마련하였음.
- 국민의 먹거리인 수산물을 안전하며 지속가능하게 확보할 수 있는 관리방안에 기여함.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구결과의 기술적, 경제적, 사회적 파급 효과

- 해면고도 자료동화 기술을 통해 해양예측 및 기후예측 시스템의 성능 개선에 기여함. 해당 기술을 적용하면 수온, 염분의 연직구조를 개선할 수 있기 때문에 보다 정확한 모의가 가능함. 실제로 아열대 순환기작 및 표층염분에 대한 모의성능이 향상하였음.
- 표층부이 실험이 계절별로 수행되어(4월과 11월) 오염물질의 유동 및 혼합기작의 계절적 변화를 특성화하는데 기여함.
- 고주파레이다로 관측된 실시간 광역 표층해류장은 선박의 안전항해와 효율적인 수색구조를 위한 기반자료로써 효율적인 방재 및 수색기술의 고도화에 활용할 수 있으며, 이는 해양에서 발생하는 현안문제 해결에 파급효과 크게 미치리라 기대함.
- 본 연구결과로 구축된 HFR 실시간모니터링시스템은 국내 연안에 설치, 운용되는 50기 이상의 고주파레이다의 지속적이고, 안정적인 운용을 가능하게 할 수 있으며, 이는 관측 기반기술 성장효과를 유발함.
- 본 과제 수행을 통해서 서태평양 영역에서 최초로 고수온의 장기변화 데이터베이스를 구축하였다. 후속연구로 중장기 기후 변화와 관련된 고수온 연구에 국내/국제적으로 선두적인 기술성을 확보함.
- 과제가 수행되었던 2018년 고수온 현상에 의한 피해가 커지면서 사회적 관심이 증대되어, 본 연구결과가 언론에 홍보되었다. 사회적으로 해양 기후변화에 대한 큰 관심 가져와, 향후 별도의 연구를 통해 기후변화에 따른 수산/양식장 방재 대책 마련에 기여할 수 있을 것으로 기대함.
- 중국 강수량의 영향은 우리나라 남해안 적조생물(HABs)의 대발생 및 미발생을 예측할 수 있는 중요한 축도로 활용함.
- 기후변화에 따른 해양생물 분포변화를 구체화하는 방법론을 구체화함으로써, 미래 해양생물상 변화를 예측할 수 있을 것으로 기대됨.
- 주요 수산생물인 어류의 분포변화를 이해함으로써 기후변화에 따른 어류상 변화를 이해하고, 그에 따른 미래 수산자원 변화를 예측할 수 있는 관리방안 마련의 기초자료로 활용함.

제 2 절 연구결과의 활용계획

- 제주북부지역에서 수행된 아중간규모 표층부이 실험은 북서태평양에서 처음 시도된 실험으로 50개의 표층부이 데이터는 추후 공개되어 남해를 포함하는 모든 해류모델의 아중간규모 및 아격자규모의 물리현상을 검증하는데 활용 가능함.
- 실시간 광역표층해류관측은 기후변화에 따른 시공간 해류변화연구와 함께 선박의 안전항해 및 효율적인 수색구조, 해양환경오염 및 방제활동과 수치모델의 고도화 등에 활용될 수 있음.
- 한반도주변해역의 미래 수산 해양생물자원 변동 예측에 필요한 기초자료로 활용될 수 있음.
- 원내 위성, 기상, 해양 분야의 전문가의 협력으로 KIOST 우수성을 확보할 수 있는 새로운 키워드 현상에 대한 본격 연구 시작할 수 있을 것으로 기대함.

제 6 장 참고문헌

- 통계청 보도자료 2018. 기후(수온)변화에 따른 주요 어종 어획량 변화.
- Ahn, Y.H., Shanmugam, P., Moon, J.E., Ryu, J.H., 2008. Satellite remote sensing of a low-salinity water plume in the East China Sea. *Ann. Geophys.* 26, 2019-2035.
- Baek, S.H., Kim, D.S., Son, M.H., Yun, S.M. & Kim, Y.O. 2015. Seasonal distribution of phytoplankton assemblages and nutrient enriched bioassays as indicators of nutrient limitation of phytoplankton growth in Gwangyang Bay, Korea. *Estuar, Coast. Shelf. Sci.* 163:265-278.
- Bai, Y., Pan, D., Cai, W.J., He, X., Wang, D., Tao, B., Zhu, Q., 2013. Remote sensing of salinity from satellite-derived CDOM in the changjiang river dominated east China sea. *J. Geophys. Res. Oceans* 118 (1), 227-243.
- Chen, Y.L., Chen, H., Jan, S. & Tuo, S. 2009. Phytoplankton productivity enhancement and assemblage change in the upstream Kuroshio after typhoons. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 385: 111-126.
- Cooper and Haines, 1996, Data assimilation with water property conservation, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 101(C1),1059-1078
- Gobler, C.J., Berry, D.L., Anderson, O.R., Burson, A., Koch, F., Rodger, B.S., Moore, L.K., Goleski, J.A., Allam, B., Bowser, P., Tang, Y. & Nuzzi, R. 2008. Characterization, dynamics, and ecological impacts of harmful *Cochlodinium polykrikoides* blooms on eastern Long Island, NY, USA. *Harmful Algae* 7:293-307.
- Frölicher, T.L., and C. Laufkötter, 2018: Emerging risks from marine heat waves, *Nature Communications*, 9, 650.
- Hobday, A. et al. 2016, A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Prog. Oceanogr.* 141, 227-238.
- Isobe, A., 1994, Seasonal variability of the barotropic and baroclinic motion in the Tsushima-Korea Strait. *Journal of Oceanography*. 50, 223-238.
- Kim, Y. H. et al., 2009, Comparison between a reanalyzed product by 3-dimensional variational assimilation technique and observations in the Ulleung Basin of the East/Japan Sea, *Journal of Marine Systems*, 78(2), 249-264
- Kim, Y.H. et al., 2015, An assessment of ocean climate reanalysis by the data assimilation system of KIOST from 1947 to 2012, *Ocean Modeling*, 91, 1-22
- Kim, D.I., Matsuyama, Y., Nagasoe, S., Yamaguchi, M., Yoon, Y.H., Oshima, Y., Imada, N. & Honjo, T. 2004. Effects of temperature, salinity, and irradiance on the growth of the harmful red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* Margalef (Dinophyceae). *J. Plankton Res.* 26: 61-66.

- Lee, C.K., Park, T.G., Park Y.T. & Lim W.A. 2013. Monitoring and trends in harmful algal blooms and red tides in Korean coastal waters, with emphasis on *Cochlodinium polykrikoides*. *Harmful Algae* 30S: S3-S14.
- Lie, H.-J. and C.-H. Cho, 2016, Seasonal circulation patterns of the Yellow and East China Seas derived from satellite-tracked drifter trajectories and hydrographic observations. *Progress in Oceanography*. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2016.06.004>.
- Lee, W.-S., and M.-I. Lee, 2016: Interannual variability of heat waves in South Korea and their connection with large-scale atmospheric circulation patterns. *Int. J. Climatol.*, DOI: 10.1002/joc.4671
- Lie, H.J. & Cho C.H. 2016. Seasonal circulation patterns of the Yellow and East China Seas derived from satellite-tracked drifter trajectories and hydrographic observations. *Progr. Oceanogr.* 146:121-141.
- Lim, A.S., Jeong, H.J., Jang, T.Y., Jang S.H. & Franks, P.J.S. 2014. Inhibition of growth rate and swimming speed of the harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* by diatom: Implications for red tide formation. *Harmful Algae* 37:53-61.
- Lilly, J. M., Sykulski, A. M., Early, J. J., & Olhede, S. C. (2016). Fractional Brownian motion, the Matérn process, and stochastic modeling of turbulent dispersion. arXiv preprint arXiv:1605.01684.
- Liu R. ,J. Zhang, H. Yao, T. Cui, N. Wang, Y. Zhang, L. Wu, J. An, 2017. Hourly changes in sea surface salinity in coastal waters recorded by Geostationary Ocean Color Imager. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 196, 227-236.
- Matsuoka, K., Mizuno, A., Iwataki, M., Takano, Y., Toshifumi, Y., Yoon, Y.H. & Lee, J.B. 2010. Seed population of a harmful unarmored dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* Margalef in the East China Sea. *Harmful Algae* 9: 548-556.
- Nagai, S., Nishitani, G., Sagamoto, S., Sugaya, T., Lee, C.K., Kim, C.H., Itakura, S. & Yamaguchi, M. 2009. Genetic structuring and transfer of marine dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* in Japanese and Korean coastal waters revealed by microsatellites. *Mol. Ecol.*18: 2337-2352.
- Oliver, E. C. et al., 2018, Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nat. Commun.* 9, 1324 (2018).
- Qing S., J. Zhang, T. Cui & Y. Bao, 2013. Retrieval of sea surface salinity with MERIS and MODIS data in the Bohai Sea. *Remote Sensing of Environment*, 136, 117-125.
- Qiu, B. et al, 2013, Generation of the North Equatorial Undercurrent jets by triad baroclinic Rossby wave interactions. *J. Phys. Oceanogr.*, 43, 2682-2698.
- Rodean, H. C. (1996). *Stochastic Lagrangian models of turbulent diffusion* (Vol. 45). Boston: American Meteorological Society.

- Shlesinger, M. F., West, B. J., & Klafter, J. (1987). Lévy dynamics of enhanced diffusion: Application to turbulence. *Physical Review Letters*, 58(11), 1100.
- Takikawa, T. and J.-H. Yoon, 2005, Volume Transport through the Tsushima Straits Estimated from Sea Level Difference. *Journal of Oceanography*, Vol. 61, pp. 699 to 708.
- Teague, W. J., Jacobs, G. A., Perkins, H. T., Book, J. W., Chang, K.-I., and M.-S. Suk, 2002, Low-Frequency Current Observations in the Korea/Tsushima Strait. *Journal of Physical Oceanography*, 32.
- Yi, S.-U., 1970, Variations of oceanic condition and mean sea level in the Korea strait. p. 125-141. In *The Kuroshio (A Symposium on the Japan Current)*, ed. by J. C. Marr, Eastwest Center Press.