

2022.02.22.

지형류 관측자료를 이용한 자료동화 방법 개발

www.kiost.ac.kr

Development of Geostrophic Currents Observation Data Assimilation Method

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “지형류 관측자료를 이용한 자료동화 방법 개발”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2022. 2. 28.

총괄연구책임자 : 권경만

외부참여연구원 : 명성관

보고서 초록

과제고유 번호	E9996D	해당단계 연구기간	2021.06.14-12.31	단계 구분	1단계
연구사업명	중사업명				
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	지형류 관측자료를 이용한 자료동화 방법 개발			
	세부과제명				
연구책임자	권경만	해당단계 참여연구원수	총 : 2 명 내부: 1 명 외부: 1 명	해당단계 연구비	정부: 119,434 천원 기업: 천원 계 : 119,434 천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 2 명 내부: 1 명 외부: 1 명	총 연구비	정부: 119,434 천원 기업: 천원 계 : 119,434 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 제주특성연구센터		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	28면
<ul style="list-style-type: none"> • 수치모델과 자료동화의 입력자료 <ul style="list-style-type: none"> - 동해영역 수치모델의 초기장, 경계장은 HYCOM daily mean 사용 - 동해영역 수치모델의 기상 외력장은 ECMWF ERA5 3 hourly 사용 - 동해의 표층 수온(OSTIA), 연직 수온·염분(KHOA, NIFS, KOEM, GTSP), 해수면 높이, 지형류 관측자료(CMEMS) 사용 • 지형류 관측자료 자료동화 방법 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 인공위성 지형류와 수치모델과의 시공간적 상관관계를 통해 ±8일 평균장이 최적임을 확인 - 재분석장 및 예측장 ±8일의 평균장을 반영하여 지형류 자료 재생산 방법 개발 • 지형류 자료동화 결과 <ul style="list-style-type: none"> - 2018년 재생산된 지형류 자료를 이용한 자료동화 결과와 NIFS, OSTIA, CMEMS, HYCOM, Mercator와 비교 - 지형류 자료동화 결과와 CTD 관측자료의 연직 수온 분포의 평균 RMSE는 1.79°C - 지형류 자료동화 결과와 OSTIA SST의 표층 수온 분포의 평균 RMSE와 상관계수는 각각 1.31°C, 0.98 - 지형류 자료동화의 해류 결과와 CMEMS 지형류의 평균 RMSE와 상관계수는 0.10 m/s, 0.42 - 지형류를 자료동화 후 기존 수치 모델의 해류보다 33% 향상 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	지형류, 자료동화, 수치모델, 재분석장, 인공위성			
	영 어	geostrophic current, data assimilation, numerical model, reanalysis data, remote sensing			

요 약 문

I. 제 목

지형류 관측자료를 이용한 자료동화 방법 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 국내·외 해양예측시스템의 지형류 자료동화 연구 전무
- 국내 해수유동 관측자료 활용 방안 마련
- 정확한 해양 예측 시스템 정보 수요 증가
- 선진국을 중심으로 지속적으로 해양예측시스템 개발
- 지형류와 수치모델과의 시공간적 상관관계 분석을 통해 지형류 자료를 재생산 방법을 개발하고 자료동화 적용

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 수치모델과 자료동화의 입력자료 수집 및 처리
 - 동해영역 수치모델의 초기장, 경계장, 외력장 수집 및 처리
 - 동해의 표층 수온, 연직 수온·염분, 해수면 높이, 지형류 관측자료 수집 및 처리
- 지형류 관측자료 자료동화 방법 개발
 - 인공위성 지형류와 수치모델과의 시공간적 상관관계 분석
 - 지형류와 수치모델의 시공간적 특성을 반영한 지형류 자료 재생산 방법 개발
- 지형류 자료동화 적용 및 평가

- 재생산된 지형류 자료를 이용하여 자료동화 수행
- 관측자료와 자료동화 전·후 결과의 통계적 비교 분석
- 자료동화 후 개선된 해양 물리적 요소 분석

IV. 연구개발결과

- 수치모델과 자료동화의 입력자료
 - 동해영역 수치모델의 초기장, 경계장은 HYCOM daily mean 사용
 - 동해영역 수치모델의 기상 외력장은 ECMWF ERA5 3 hourly 사용
 - 동해의 표층 수온(OSTIA), 연직 수온·염분(KHOA, NIFS, KOEM, GTSP), 해수면 높이, 지형류 관측자료(CMEMS) 사용
- 지형류 관측자료 자료동화 방법 개발
 - 인공위성 지형류와 수치모델과의 시공간적 상관관계를 통해 ± 8 일 평균장이 최적임을 확인
 - 재분석장 및 예측장 ± 8 일의 평균장을 반영하여 지형류 자료 재생산 방법 개발
- 지형류 자료동화 결과
 - 2018년 재생산된 지형류 자료를 이용한 자료동화 결과와 NIFS, OSTIA, CMEMS, HYCOM, Mercator와 비교
 - 지형류 자료동화 결과와 CTD 관측자료의 연직 수온 분포의 평균 RMSE는 1.79°C
 - 지형류 자료동화 결과와 OSTIA SST의 표층 수온 분포의 평균 RMSE와 상관계수는 각각 1.31°C , 0.98
 - 지형류 자료동화의 해류 결과와 CMEMS 지형류의 평균 RMSE와 상관계수는 0.10 m/s, 0.42
 - 지형류를 자료동화 후 기존 수치 모델의 해류보다 33% 향상

V. 연구개발결과의 활용계획

- 원내 및 타기관 해양 예측시스템에 지형류 자료동화 기술 활용
- 다른 종류 해수 유동 관측 자료동화 활용 기반 마련
- 지역해 수치모델 개방 경계자료 생산

S U M M A R Y

I. Title

Development of Geostrophic Current data assimilation method

II. Necessities and objectives of the study

- No research on geostrophic current data assimilation of domestic and foreign of ocean prediction systems
- Prepare a plan to applicate ocean current ovservation data in domestic
- The demand for information from accurate ocean forecasting systems increases
- Ocean forecasting systems are continuously being developed mainly in developed countries
- Develop a method to reproduce geostrophic current data through spatio-temporal correlation analysis between geostrophic current and numerical model and apply data assimilation

III. Contents and scopes of the study

- Collection and processing of input data of numerical model and data assimilation
 - Collection and processing of initial, boundary and atmospheric forcing data of the numerical model of the East Sea
 - Collection and processing of sea surface temperature, vertical temperature and salinity, sea level and geostrophic current observation data of the East Sea
- Development of geostrophic current data assimilation method
 - Analysis of spatio-temporal correlation between geostrophic current data of satellite and current of numerical model

- Development of a method of reproduction of geostrophic current data by reflecting the spatio-temporal characteristics between geostrophic current and numerical model

- Application and evaluation of geostrophic current data assimilation
 - Data assimilation using the reproduced geostrophic current data
 - Statistical comparative analysis of observation data and before and after data assimilation results
 - Analysis of improved ocean physical factors after data assimilation

IV. Results

- Input data of numerical model and data assimilation
 - HYCOM daily mean was used for the initial and boundary data of the numerical model of the East Sea
 - Atmospheric forcing data uses ECMWF ERA5 3 hourly
 - Use of sea surface temperature (OSTIA), vertical temperature and salinity (KHOA, NIFS, KOEM, GTSPP), sea level, geostrophic current observation data (CMEMS)

- Development of geostrophic current data assimilation method
 - Confirmation that the ± 8 days average field is optimal through the spatio-temporal correlation between the geostrophic current of satellite data and the current of numerical model
 - Development of a method to reproduce geostrophic current data by averaging ± 8 days of reanalysis and forecasting fields

- geostrophic current data assimilation results
 - Comparison of NIFS, OSTIA, CMEMS, HYCOM, and Mercator with data assimilation result using the reproduced topographic data in 2018
 - As a result of comparing the vertical temperature distribution between the geostrophic current data assimilation result and the CTD observation data, the average RMSE was 1.79°C
 - The RMSE and correlation coefficient between the geostrophic current data assimilation result and the OSTIA SST were 1.31°C and 0.98
 - The RMSE and correlation coefficient between the the geostrophic

current data assimilation result and the CMEMS geostrophic current data were 0.10 m/s and 0.42

- After geostrophic current data assimilation, it is improved by 33% compared to that of the numerical model before data assimilation

V. Applications of research findings

- Application of geostrophic current data assimilation method to ocean prediction systems within the KIOST and other institutions

- Prepare a basis for the data assimilation of different types of the current observation data

- Produce open boundary data for regional ocean numerical models

(KEYWORDS : 지형류, 자료동화, 수치모델, 재분석장, 인공위성, geostrophic current, data assimilation, numerical model, reanalysis data, remote sensing)

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction	10
Sec 1. Research purpose	10
Sec 2. Research necessity	10
Chapter 2 Trends of technical development	11
Sec 1. Trends of research in Domestic	11
Sec 2. Trends of research in foreign Countries	13
Chapter 3 Results and methods	15
Sec 1. Numerical model and Observation data	15
Sec 2. Development of geostrophic current data assimilation method	16
Sec 3. Application and analysis of geostrophic current data assimilation	18
Chapter 4 장 Achievements and contributions	24
Sec 1. Achievements information of R&D purpose	24
Chapter 5 Applications of research findings	26
Sec 1. Applications of research results	26
Chapter 6 References	27

목 차

제 1 장 서론	10
제 1 절 연구개발의 목표	10
제 2 절 연구개발의 필요성	10
제 2 장 국내외 기술개발 현황	11
제 1 절 국내 연구현황	11
제 2 절 국외 연구현황	13
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	15
제 1 절 수치모델 및 관측자료	15
제 2 절 지형류 관측 자료 동화 방법 개발	16
제 3 절 지형류 자료동화 적용 및 분석	18
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	24
제 1 절 연구개발목표 달성도 정보	24
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	26
제 1 절 연구개발결과의 활용 가능성 및 파급효과	26
제 6 장 참고문헌	27

본 문

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목표

예측정확도 향상을 위한 인공위성 지형류 자료동화 적용 방법 개발

제 2 절 연구개발의 필요성

국내·외에서 지형류 자료동화 연구가 전무한 선도적인 연구이며 기후변화나 후쿠시마 원전 오염수 배출 경로 등 정확한 해양 예측시스템 정보 수요를 사회적으로 요구하고 있음. 또한 관측장비 및 시스템 기술 개발로 인하여 다양한 관측자료가 제공되고 있으므로 이러한 관측자료를 수치모델에 활용하기 위한 자료동화 기술도 개발되어야함. 특히 국내에는 RCM, ADCP, HF-radar 등 해수유동 관측자료가 생산되고 있지만 자료동화 기술이 확보되지 못하여 활용하지 못하고 있는 실정임. 미국, 유럽, 일본 등 선진국을 축으로 지속적으로 다양한 관측자료를 활용하여 예측 성능을 향상시키는 해양 예측 시스템 개발이 활발하게 진행중이지만 국지적인 특성을 고려하여 개발되는 것으로 그대로 국내 해역에 활용할 수 없음. 따라서 국내 해양 특성에 맞는 기술을 도입하기 위해서는 꾸준한 자료동화 연구 개발이 필요함.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 연구현황

1. 한국해양과학기술원(KIOST)의 운용해양 시스템인 KOOS (Korea Operational Oceanographic System)는 황동중국해 지역에 대해서 MOHID 모델을 이용하여 구축하였고 3일 예측자료를 산출하고 있음(그림1). 또한 1도의 수평해상도를 가지는 전지구 해양순환예측시스템을 구축하여 대규모 해양순환을 예측 및 해양환경 변화 대응에 활용함

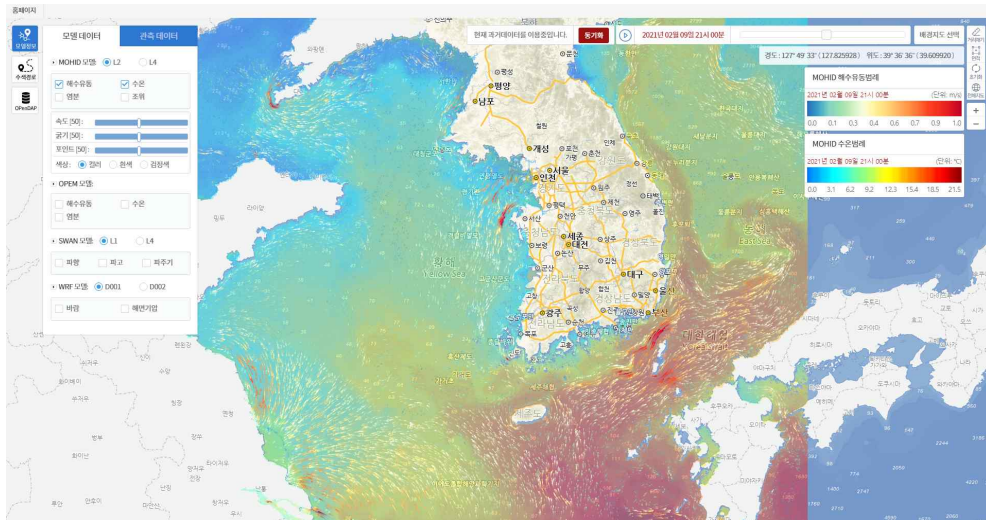


그림 1. KOOS MOHID 해수순환모델 해류, 수온, 염분 예측 시스템

2. 전남대학교는 다년간 우리나라 주변 해역의 예측시스템을 구축하고 개선하는 연구를 진행하였고 현재도 동해 및 황동중국해 영역의 수치예측모델과 자료동화기법을 개선하는 연구를 수행하고 있음(전남대학교, 2013-2020). 표층수온 합성장외에 국립해양조사원, 국립수산물과학원, 한국해양환경관리공단 등에서 관측한 CTD 수온, 염분 자료와 Argo float의 수온, 염분 자료를 동화하고 있으며 NOAA의 위성 해수면 높이 자료를 효율적으로 동화하는 연구를 수행하고 있다. 또한 자체적으로 개발한 자료동화 코드를 이용하여 연구 영역 특성 혹은 관측자료의 특성에 따라 효율적인 자료동화 개선 연구 수행하고 있음
3. 기상청 국립기상과학원에서는 바다예보를 목적으로 북서태평양 해역으로 수평해상도 ~10km, 수직해상도 20개의 s-level로 해양순환모델을 구축하고 실시간으로 운용 중임(그림 2). 자료동화는 3차원 최적내삽법을 이용하여 고해상도 표층 수온 자료인 Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) 자료를 동화하여 3시간 간격으로 3일 예측하고 있다. 예측시스템의 저염분수 분포가 관측자료와 상당한 차이가 있어 저염분수 예측 자료로 활용하지 못하고 있음

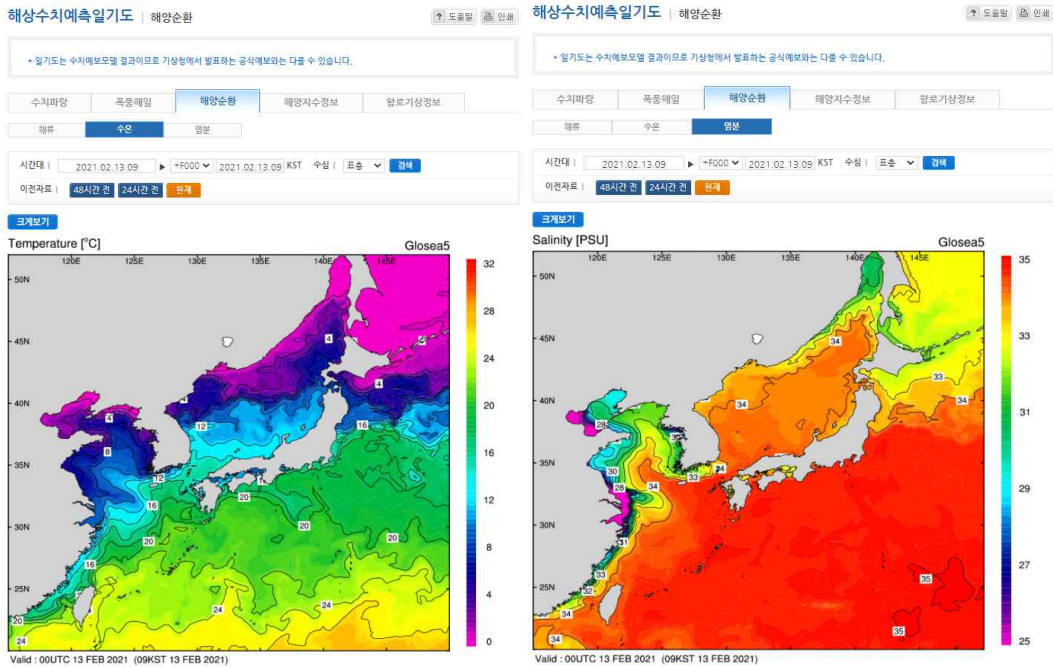


그림 2. 기상청 해양모델예측시스템의 수온, 염분 분포 예측

4. 국립해양조사원에서는 황해-동중국해와 동해 해양순환모델을 각각 구축하여 운용 중에 있으며 앙상블 칼만필터(EnKF)를 사용하여 자료동화시스템 구축하였다. 황해-동중국해 모델과 동해 모델은 수평해상도가 3km정도이며 조석을 포함하여 조석으로 인해 발생하는 연안 주변해역에서의 다양한 현상을 재현할 수 있으며 성능을 높이기 위해 현재 개선해가고 있음. 이러한 황해-동중국해모델과 동해 모델은 지역 해양모델이므로 연안에 구축되어진 정밀 연안모델들의 초기조건 및 개방 경계 자료를 제공하는 데 가장 많이 사용될 것임(그림 3)

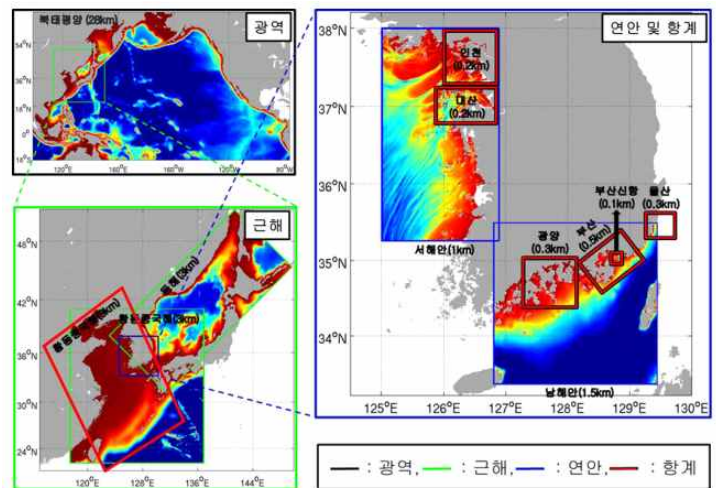


그림 3. 국립해양조사원의 해양예보를 위한 해수순환모델 19종, 기상모델 4종으로 총 23종의 해양예측시스템 운용을 통해 3일 예측자료 생산

5. Kwon et al. (2017)은 황동중국해에서 서로 다른 기관의 위성표층수온 합성장 자료인 OISST, MGDSST, OSTIA, MWIR, GMPE를 각각 앙상블 칼만 필터(EnKF)를 적용하여 자료동화를 수행하여 그 결과를 현장관측자료 표층수온과 비교하여 위성합성장들의 에러 정도와 자료동화 효과정도를 정량적으로 비교하는 연구를 진행하였으며, Lee et al. (2018)은 황해 영역에 4D-Var 자료동화를 적용하여 성능을 평가하고 위성 SST를 동화한 결과가 동화하지 않은 경우보다 현저하게 개선되지만 여름철 성층이 강한 계절에는 개선정도가 떨어지는 계절적 위성합성장 자료동화 연구를 진행하였음
6. OISST, OSTIA, GHRSSST, MGDSST, MWIR, GMPE 등 다양한 종류의 해수면온도 자료가 배포되고 있으며 이중에서 OSTIA와 GHRSSST가 우리나라 주변해역에서 상대적으로 정확도가 높다고 분석되었지만(백유현 2014) 대기의 질이 좋지 않거나 조석전선이 강한 연안에는 큰 오류가 포함되어 있어서 자료동화에 활용하지 않거나 혹은 오류가 큰 영역에 bias correction을 적용시키는 연구 수행하였음(Kwon et al., 2020)

제 2 절 국외 연구현황

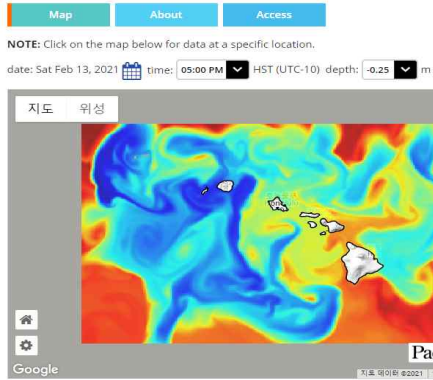
1. 자료동화 해양재분석장은 초기 미국 ECCO(JPL)와 미국 SODA의 ocean/sea ice 재분석 자료를 시작으로 최근에는 보다 고해상도로 정확도가 높은 미국의 HYCOM과 유럽의 Mercator Ocean Model을 지역 해양수치모델에 개방 경계자료로 사용되고 있음(표 1)

표 1. 외국 해양 재분석자료

수치모델	기간	해상도	자료동화기법
HYCOM	2014-present	7km, 40layers	3DVAR, Kalman Filter
Mercator Ocean	1979-present	25km, 50levels	3DVAR
SODA	1890-2010	25km, 40levels	OI
ECCO	1993-2017	100km, 50levels	EnKF, Adjoint

2. 미국 하와이 대학에서 개발한 해양 정보 표출 시스템인 PacIOOS(Pacific Islands Ocean Observing System)은 태평양의 주요 섬들의 해양 및 기상과 파랑 등의 관측 정보와 예측 정보를 제공하고 있으며 해양 순환 모델과 자료동화(4-DVAR)를 통해 고해상도 지역 해양예측 시스템을 구축하였으며 3시간 간격으로 5일까지 예보하는 시스템 개발하였음(그림 4)

Salinity Forecast : Hawai'i



Water Temperature Forecast : Hawai'i

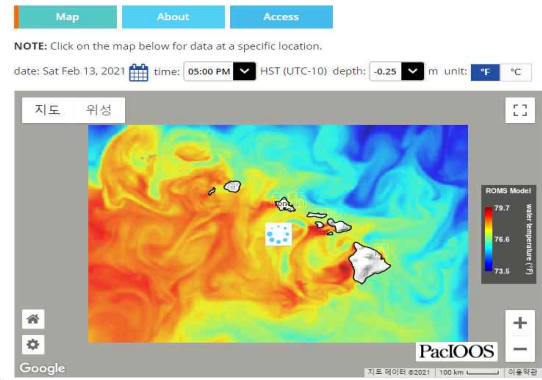


그림 4. PacIOOS 시스템의 해양 정보 표출 시스템의 수온, 염분 예측 분포

- Martin et al. (2019)은 전지구 FOAM 해양 예측 시스템을 이용하여 ESA Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS), NASA Aquarius and Soil Moisture Active Passive (SMAP)의 해표면염분 관측자료를 이용하여 1일 간격으로 3D-Var 자료동화 기법으로 동화하였다. 표층 염분관측자료를 동화함으로써 최대 8% 개선되었으며 SMOS와 SMAP 위성 자료의 동화에 사용되는데 적합함을 자료동화 실험으로 연구 진행하였음

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 수치모델 및 관측자료

1. 수치모델 개요

- 가. 동해 수치모델은 Regional Ocean Modeling System(ROMS)를 사용(그림 5)
- 나. 격자 간격은 수평격자 $1/32^\circ$ 간격으로 322×706 개 격자이며 수직적으로 41개 층으로 구성
- 다. 수심자료는 한국해양과학기술원에서 제공하는 해상도 30초 자료(korbathy 30s)와 National Geophysical Data Center(NGDC)에서 제공하는 Earth TOPOgraphy five minute grid(ETOPO5) 해상도 5분 자료를 사용
- 라. 2018년 초기조건과 개방경계조건은 HYbrid Coordinate Ocean Model(HYCOM) 일평균 자료를 사용
- 마. 기상외력자료는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts(ECMWF)에서 제공하는 ERA5 1시간 간격 자료를 사용
- 바. 조석은 Oregon global tide model version 6(TPX06)의 M2, S2, O1, K1, N2, K2, P1, Q1, Mf, Mm 10개 분조 이용

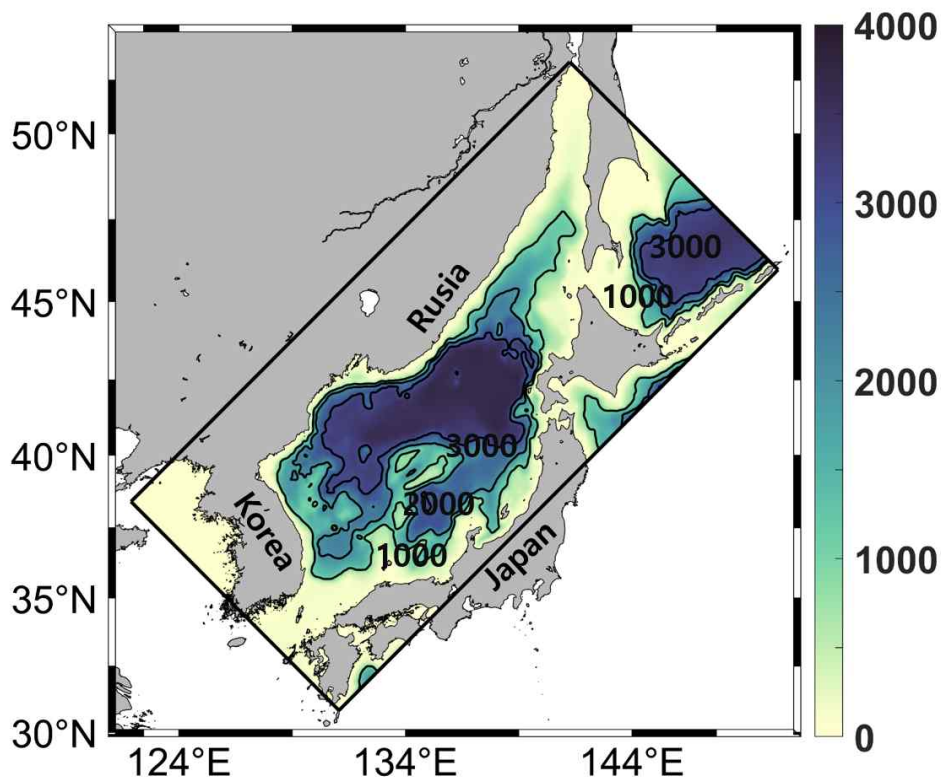


그림 5. 동해 수치모델 영역과 등수심선

2. 관측자료

가. 동해 수치모델 영역에 포함되는 관측자료 수집(그림 6)

- (1) In-situ CTD 수온, 염분 : 국립해양조사원(KHOA), 국립수산과학원(NIFS), 해양환경공단(KOEM)
- (2) Argo float 수온, 염분 : Global Temperature-Salinity Profile Program (GTSP)
- (3) 위성 표층 수온 : The Operational Sea Surface Temperature and Ice Analysis (OSTIA)
- (4) 위성 해수면 높이 : The Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)
- (5) 위성 지형류 : CMEMS

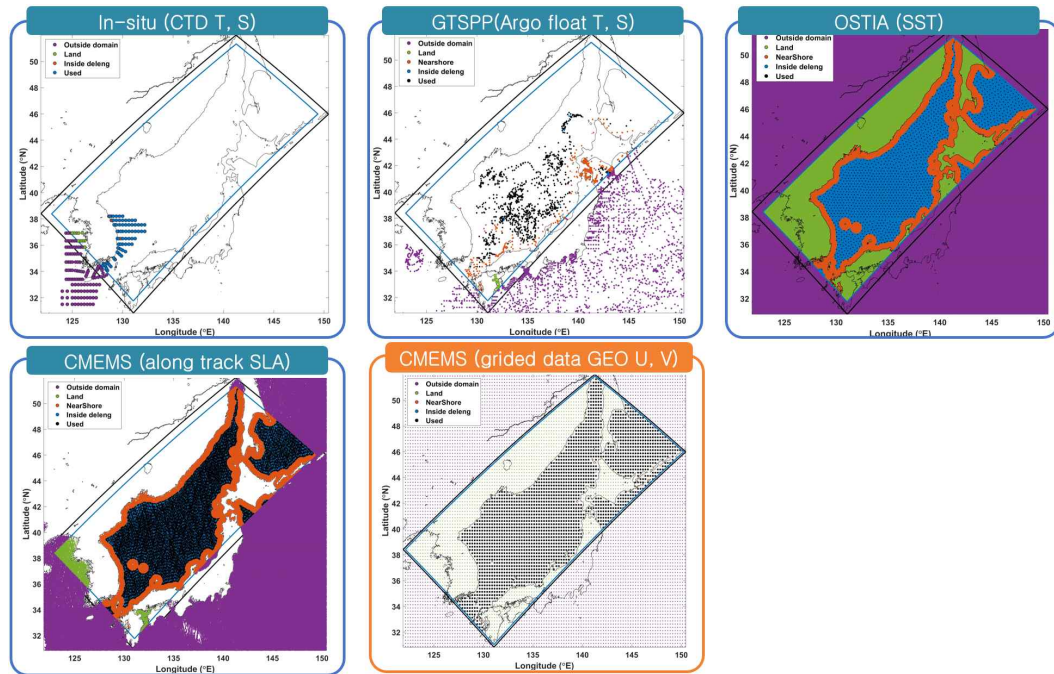


그림 6. 2018년 관측자료의 종류 및 자료동화에 사용된 관측자료 정점

제 2 절 지형류 관측 자료 동화 방법 개발

1. 자료동화

- 가. 동해 수치모델에 앙상블 칼만 필터(EnKF)를 이용하여 자료동화 수행(그림 7)
- 나. 초기에 30개의 앙상블 멤버를 통한 예보장으로 배경오차 공분산을 얻는다. 계산된 배경오차공분산과 관측값으로 앙상블 멤버 30개의 분석장을 얻음
- 라. 30개의 분석장을 다시 초기장으로 이용하여 예보장을 계산하고 다음 자

료동화를 수행

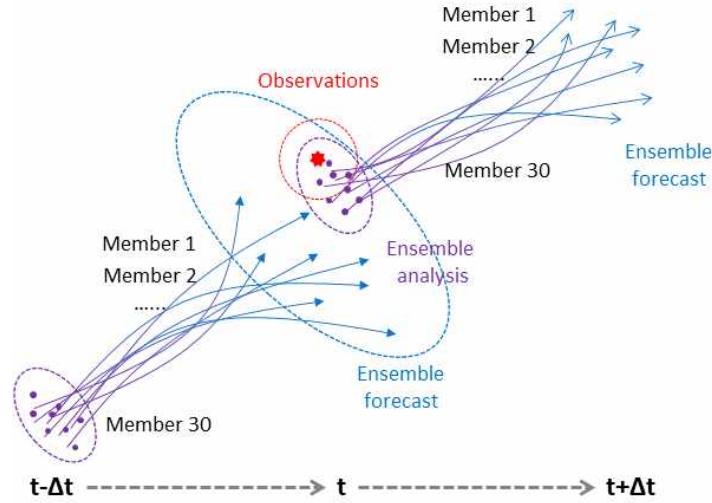


그림 7. 앙상블 칼만 필터 개념도

2. 지형류 관측자료와 수치모델 시공간적 상관관계 분석

가. CMEMS 지형류 자료와 수치모델 시공간적 상관관계수 계산

- CMEMS의 장주기 지형류 자료와 수치모델 해류 자료의 시공간 평균장과의 상관관계수를 통해 수치모델 해류 장기 평균 기간 선정
- 수치모델 자료는 수온, 염분, 해수면 높이 자료만 동화한 결과(ES3K TS)의 해류를 평균하여 인공위성 지형류 자료와 상관관계수를 구했으며 수치모델의 평균 기간은 자료동화 전·후 ±8일을 선정(그림 8)

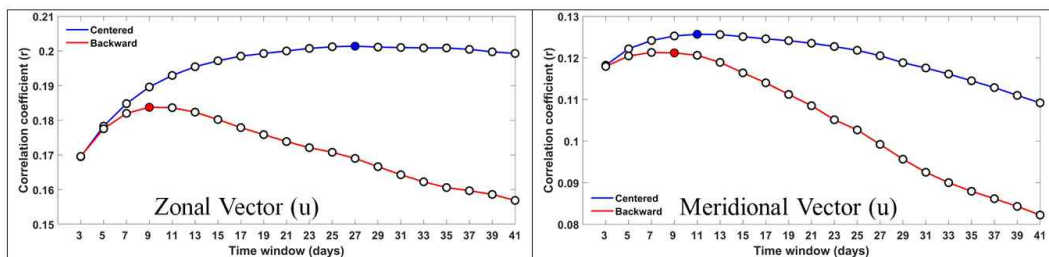


그림 8. 장기 평균된 ES3K TS 유속과 CMEMS 인공위성 지형류와의 공간 상관관계수

3. 지형류 자료 재생산 방법 개발

- 수식 1의 V^o 는 지형류 관측장을 의미하며, \bar{V} 와 V' 은 각각 장기 평균으로 얻어진 장주기 자료와 원자료(V)에서 장주기 자료를 제거한 단주기 자료를 의미
- 수치모델의 해류 17일 평균장(\bar{V}_m)을 통해 단주기 해류(V'_m)를 구하고 인공위성 지형류의 장주기 해류(\bar{V}_o)와 합성하여 자료동화에 적용(V_a) (수식 1)

$$V_m = \bar{V}_m + V'_m$$

$$V_o = \bar{V}_o + V'_m$$

$$V_a = \bar{V}_m + K(\bar{V}_o - H\bar{V}_m) + V'_m$$

수식 1. 지형류 자료동화 개발

제 3 절 지형류 자료동화 적용 및 분석

1. 지형류 자료동화된 수치모델과 인공위성 표층 수온 비교
 - 가. 2월 ES3K UV와 OSTIA 모두 5, 10℃ 등수온선의 위치가 유사하지만 남해 연안과 야마토 분지에서 cold bias가 있으며 약 40°N 이상 한국 동쪽 연안을 따라서 warm bias가 나타나며 동해 전체의 bias와 RMSE는 각각 -0.52, 1.13℃임(그림 9)
 - 나. ES3K UV는 5월 10, 15℃ 등수온선이 OSTIA와 유사하게 재현하고 있으나 약 40°N 이상 한국 동쪽 연안을 따라서 약 1~3℃의 warm bias가 나타나며 동해 전체의 bias와 RMSE는 각각 -0.40, 1.00℃임
 - 다. 8월 20, 25℃ 등수온선의 분포가 유사하며 동해 연안과 동해 북부 위도 약 46°N 이상에서 약 1℃ 이상의 cold bias가 있으며 동해 전체의 bias와 RMSE는 각각 -0.61, 0.98℃임
 - 라. ES3K UV의 11월 결과를 비교하면 10, 15, 20℃ 등수온선의 분포 위치가 유사하게 재현하고 있으며 동해 연안에서 냉수대와 북한 한류의 분포가 OSTIA보다 더 크고 차갑게 재현하고 있으며 동해 전체에 대해 -0.45℃의 bias와 1.02℃의 RMSE가 있음
 - 마. ES3K UV와 OSTIA의 표층 수온 분포 연평균 bias는 -0.46℃로 평균적으로 낮은 수온을 모의하며 RMSE는 1.00℃로 수온, 염분, 해수면 높이, 지형류를 자료동화함으로써 표층 수온 분포를 잘 재현함

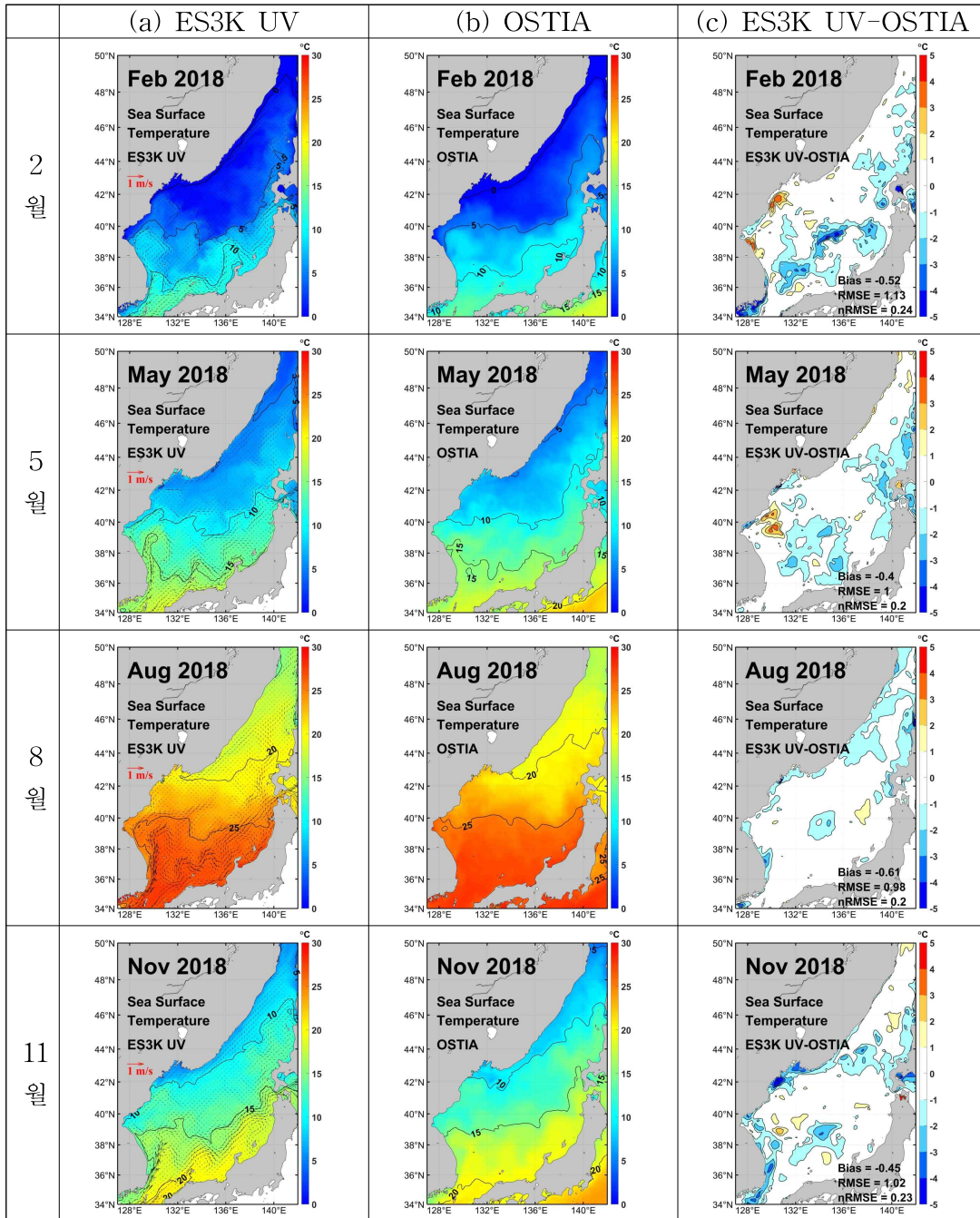


그림 9. 2018년 2월, 5월, 8월, 11월 표층 수온 수평 분포 (a) ES3K UV, (b) OSTIA, (c) ES3K UV와 OSTIA 차이

2. 지형류 자료동화 전·후 비교

가. ES3K UV와 ES3K TS의 수심 10m 수온 수평 분포를 비교한 결과 연평균 bias가 -0.33°C 로 지형류를 자료동화하면 평균적으로 수온을 낮게 만드는데 이는 수치모델의 해류를 변화시킴에 따라서 북한 한류와 동한난류의 세기가 바뀌어 동해 연안의 수온이 변화되는 결과로 판단됨. 또한

야마토 분지에서의 사행하는 해류가 바뀌고 수온전선의 위치가 바뀌면서 수온이 낮아지며 두 모델 간의 수평 분포 연평균 RMSE는 0.76°C 임 (그림 10)

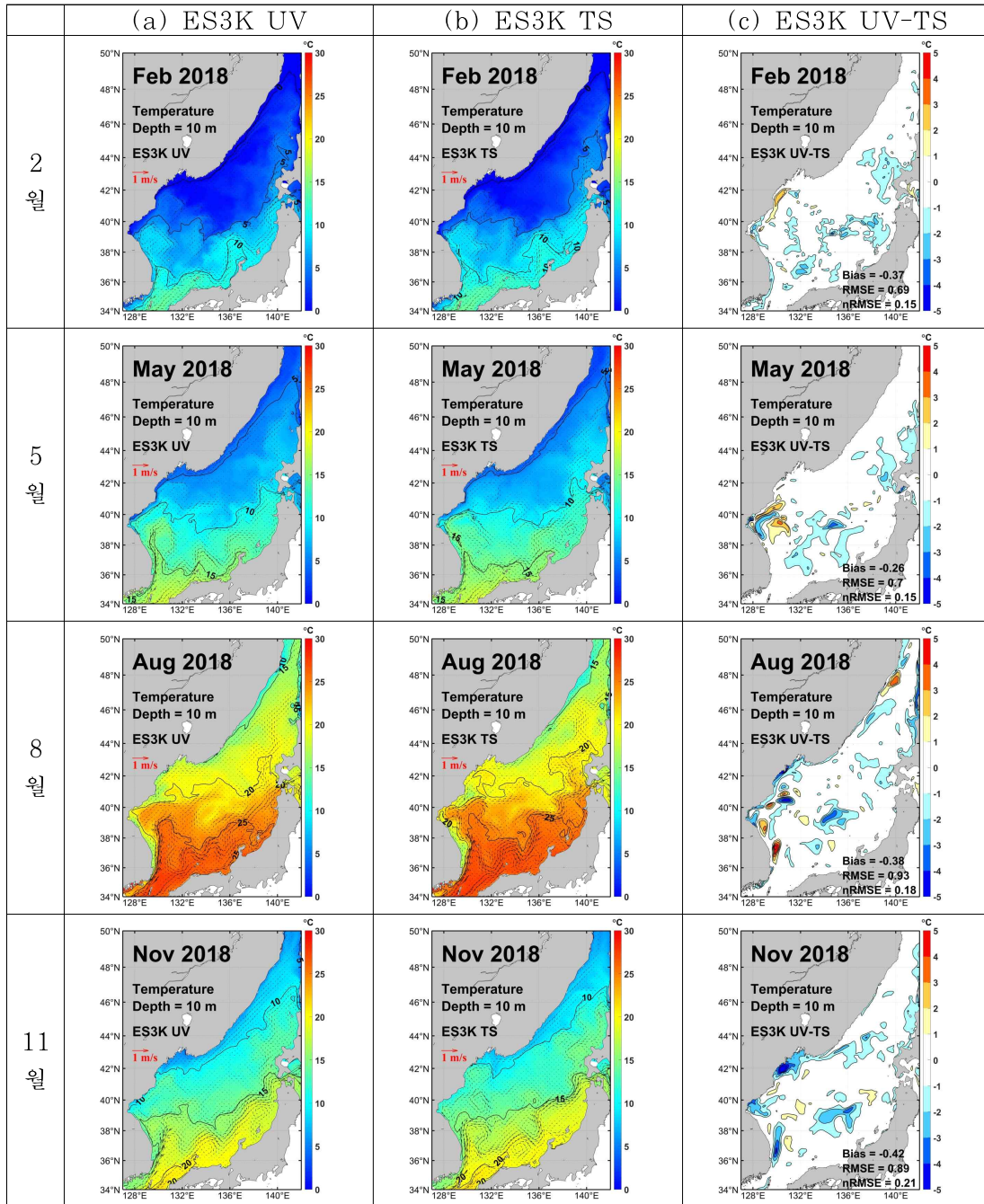


그림 10. 2018년 2월, 5월, 8월, 11월 수심 10m 수온 수평 분포 (a) ES3K UV, (b) ES3K TS, (c) ES3K UV와 ES3K TS 차이

나. ES3K UV와 ES3K TS의 위도 37.5N 수온 수직분포를 살펴본 결과 지형류를 자료동화하면 여름철(7, 8월)은 수온을 높이고 다른 계절에는 수온을 낮추는 역할을 하며 연평균 bias는 -0.25°C 이며 RMSE는 1.26°C 임

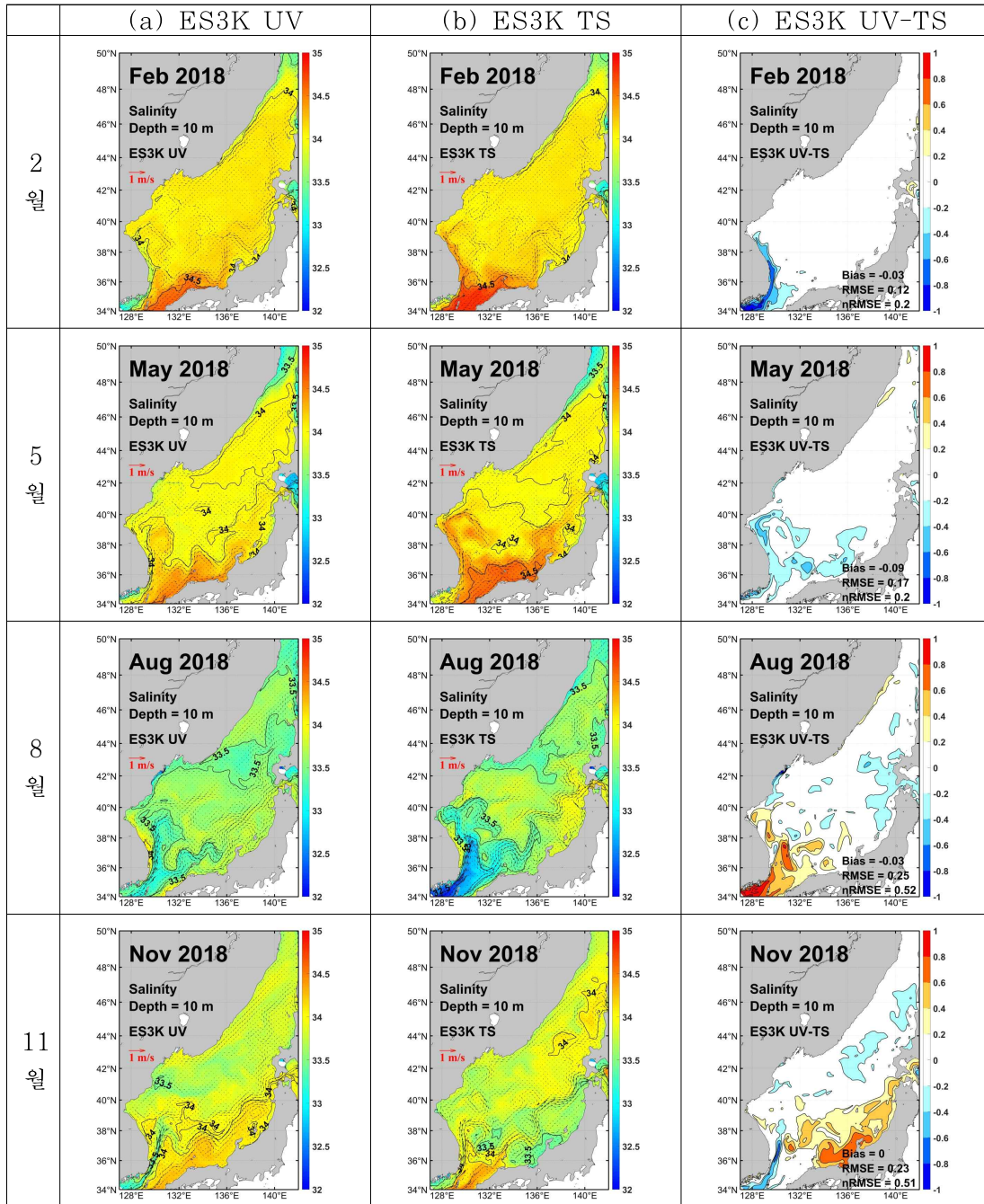


그림 11. 2018년 2월, 5월, 8월, 11월 수심 10m 염분 수평 분포 (a) ES3K UV, (b) ES3K TS, (c) ES3K UV와 ES3K TS 차이

다. ES3K UV와 ES3K TS의 수심 10m 염분 수평 분포를 비교한 결과 연평균 bias가 -0.03으로 지형류를 자료동화하면 평균적으로 염분을 낮게 만드는데 이는 수치모델의 해류를 변화시킴에 따라서 동한난류의 세기 및 방향이 바뀌어 동해의 염분이 변화되는 결과로 판단됨. 2월, 5월, 11월에는 동한난류를 따라 상대적으로 더 낮은 염분수가 한국 동쪽 연안에 가깝게 분포하며 8월에는 상대적으로 더 높은 염분수가 한국 동쪽 연안에 분포함(그림 11)

라. ES3K UV와 ES3K TS의 위도 37.5N 염분 수직분포를 살펴본 결과 지형류를 자료동화하면 8, 9, 10, 11월은 염분을 높이고 다른 시기에는 염분을 낮추는 역할을 하며 연평균 bias는 -0.01이며 RMSE는 0.16임

3. 지형류 자료동화 전·후 시계열 비교

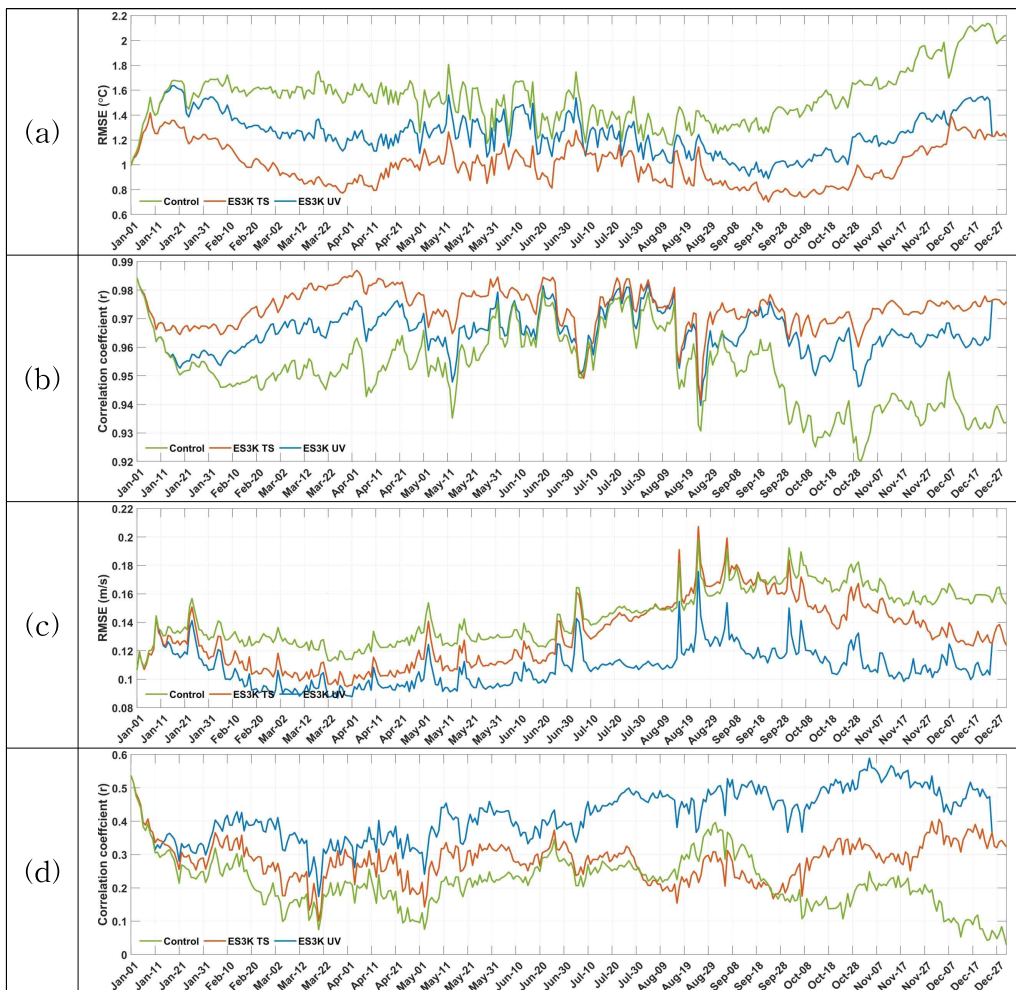


그림 12. Control(녹색선), ES3K TS(적색선), ES3K UV(청색선)과 관측 자료 간의 RMSE, 상관계수 시계열 (a) 수치모델과 OSTIA 표층 수온 RMSE, (b) 수치모델과 OSTIA 표층 수온 상관계수, (c) 수치모델과 CMEMS 지형류 RMSE, (d) 수치모델과 CMEMS 지형류 상관계수

- 가. 자료동화의 수온 개선 효과를 정량적으로 비교하기 위하여 자료동화를 하지 않은 모델(Control), ES3K TS, ES3K UV와 OSTIA의 표층 수온을 시계열 공간 RMSE와 상관계수를 구하여 비교(그림 12a, b)
- 나. 자료동화를 적용함으로써 Control보다 표층 수온이 모두 개선됨. Control, ES3K TS, ES3K UV의 RMSE는 각각 1.55, 1.00, 1.25°C이며 상관계수는 0.95, 0.97, 0.96°C로 ES3K TS가 표층 수온을 가장 잘 재현함
- 다. 자료동화의 해류 개선 효과를 정량적으로 비교하기 위하여 Control, ES3K TS, ES3K UV와 인공위성 지형류를 시계열 공간 RMSE와 상관계수를 구하여 비교(그림 12c, d)
- 라. 자료동화를 적용함으로써 Control보다 해류가 모두 개선됨. Control, ES3K TS, ES3K UV의 RMSE는 각각 0.14, 0.13, 0.11 m/s이며 상관계수는 0.22, 0.28, 0.42 m/s로 ES3K UV가 표층 수온을 가장 잘 재현함

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도 정보

1. 연구개발목표 달성도 상세정보

가. 수치모델 입력장 및 관측자료 수집 및 처리

- HYCOM 수집 및 처리
- ECMWF ERA5 수집 및 처리
- 국립해양조사원(KHOA), 국립수산과학원(NIFS), 해양환경공단(KOEM) CTD 자료 수집 및 처리

- GTSP, OSTIA, CMEMS 관측 자료 수집 및 처리

나. 지형류 관측자료와 수치모델 시공간적 상관관계 분석

- CMEMS 지형류 자료와 수치모델 시공간적 상관관계수 계산

다. 지형류 자료 재생산 방법 개발

- 지형류 관측자료에 수치모델의 단주기 자료합성 방법개발
- 기존 자료동화 시스템에 지형류 자료 재생산 코드 작성

라. 지형류 자료동화 수행 및 결과 비교

- 지형류 자료동화 유·무 수행
- 관측자료와 수치모델 비교 검증 및 개선 평가

2. 연구개발목표 추진계획 및 달성도

구분	세부연구목표	추진 실적 및 계획						
		6	7	8	9	10	11	12
1년차 (2021)	1. 관측자료와 수치모델 입력자료 수집 및 처리	■						
	2. 지형류 자료동화 방법 개발	■	■	■				
	3. 지형류 제외한 자료동화 수행				■	■	■	
	4. 지형류 이용한 자료동화 수행				■	■	■	
	5. 지형류 자료동화 전·후 통계적 비교 분석						■	■
	6. 자료동화 후 개선된 해양 물리적 요소 분석						■	■

※ 파란색 : 계획 / 붉은색 : 실적

3. 연구개발진도 적정 수행여부

가. 관측자료와 수치모델 입력자료 수집 및 처리 수행

- 관측자료 : 국립해양조사원, 국립수산과학원, 해양환경공단 CTD 수온, 염분
 GTSP Argo float 수온, 염분
 OSTIA 인공위성 표층 수온
 CMEMS 인공위성 해수면 높이, 지형류
- 수치모델 입력자료 : HYCOM 수온, 염분, 해류, 해수면 높이
 ECMWF era5 대기압, 상대습도, 일사량, 대기 온도,
 바람, 강수량
- 나. 지형류 자료동화 방법 개발 수행
 - 수치모델 해류와 인공위성 지형류의 시공간적 상관관계 분석을 통해 수치모델의 단주기 해류와 인공위성 지형류 장주기 해류를 합성하여 재생산 방법 개발 후 자료동화 적용
- 다. 지형류 이용한 자료동화 수행
 - 지형류 및 수온, 염분, 해수면 높이 관측자료를 2018년 1월부터 12월까지 1년 수행
- 라. 지형류 제외한 자료동화 수행
 - 수온, 염분, 해수면 높이 관측자료를 2018년 1월부터 12월까지 1년 수행
- 마. 지형류 자료동화 전·후 통계적 비교 분석 수행
 - CTD 수온, 염분 관측자료와 자료동화 결과 RMSE 분석
 - OSTIA 인공위성 표층 수온 관측자료와 자료동화 결과 RMSE와 상관계수 분석
 - CMEMS인공위성 지형류와 자료동화 결과 RMSE와 상관계수 분석
- 바. 자료동화 후 개선된 해양 물리적 요소 분석 수행
 - 수온, 해류 등 관측자료와 수치모델 비교를 통해 개선 정도 파악

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구개발결과의 활용 가능성 및 파급효과

1. 원내 및 타 기관의 해양 예측 시스템의 정확도 향상 제시
2. 다른 해역 수치모델의 활용개방 경계자료 생산
3. 다른 종류 해수 유동 관측(ADCP, HF-radar 등) 자료동화 활용 기반 마련

제 6 장 참고문헌

- 백유현, 문일주, 2014. 한반도 연안의 위성 및 수치모델 해수면온도 자료 검증. 한국 기상학회 학술대회 논문집, 108-109.
- 전남대학교, 2013. 우리나라 주변해역 해류도 개선연구(I), 국립해양조사원
- 전남대학교, 2014. 우리나라 주변해역 해류도 개선연구(II), 국립해양조사원
- 전남대학교, 2015. 우리나라 주변해역 해류도 개선연구(III), 국립해양조사원
- 전남대학교, 2016, 광역·근해 해양 재분석자료 생산기반 연구(I), 국립해양조사원
- 전남대학교, 2017, 광역·근해 해양 재분석자료 생산기반 연구(II), 국립해양조사원
- 전남대학교, 2018, 광역·근해 해양 재분석자료 생산기반 연구(III), 국립해양조사원
- 전남대학교, 2019, 근해 해양 재분석자료 생산 연구(I), 국립해양조사원
- 전남대학교, 2020, 해양수치예측모델 개선 및 재분석장 생산 기반 마련, 국립해양조사원
- Kwon, K., B. J. Choi, S. D. Kim, S. H. Lee and K. A. Park, 2020. Assessment and Improvement of Global Gridded Sea Surface Temperature Datasets in the Yellow Sea Using In Situ Ocean Buoy and Research Vessel Observations. *Remote Sensing*, 12(5). <https://doi.org/ARTN75910.3390/rs12050759>.
- Kwon, K., B. J. Choi, and S. H. Lee, 2018. Assimilation of Different SST Datasets to a Coastal Ocean Modeling System in the Yellow and East China Sea. *Journal of Coastal Research*, 1041-1045. <https://doi.org/10.2112/Si85-209.1>.
- Lee, J. H., T. Kim, I. C. Pang and J. H. Moon, 2018. 4DVAR Data Assimilation with the Regional Ocean Modeling System (ROMS): Impact on the Water Mass Distributions in the Yellow Sea. *Ocean Science Journal*, 53(2), 165-178. <https://doi.org/10.1007/s12601-018-0013-3>.
- Martin, M. J., King, R. R., While, J., & Aguiar, A. B. (2019). Assimilating satellite sea-surface salinity data from SMOS, Aquarius and SMAP into a global ocean forecasting system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(719), 705-726. <https://doi.org/10.1002/qj.3461>

주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.



- 주 의 -

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.