

Article

## 한반도 연안 위성합성 및 수치모델 재분석 해수면온도 자료의 정확도

백유현<sup>1,2</sup> · 문일주<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>제주대학교 태풍연구센터

<sup>2</sup>제주대학교 해양기상학협동과정

(63243) 제주특별자치도 제주시 제주대학교 102

## The Accuracy of Satellite-composite GHRSST and Model-reanalysis Sea Surface Temperature Data at the Seas Adjacent to the Korean Peninsula

You-Hyun Baek<sup>1,2</sup> and Il-Ju Moon<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Typhoon Research Center, Jeju National University

<sup>2</sup>Graduate School of Interdisciplinary Program in Marine Meteorology, Jeju National University  
Jeju 63243, Korea

**Abstract :** This study evaluates the accuracy of four satellite-composite (OSTIA, AVHRR, G1SST, FNMONC-S) and three model-reanalysis (HYCOM, JCOPE2, FNMOC-M) daily sea surface temperature (SST) data around the Korean Peninsula (KP) using ocean buoy data from 2011–2016. The results reveal that OSTIA has the lowest root mean square error (RMSE; 0.68°C) and FNMOC-S/M has the highest correction coefficients ( $r = 0.993$ ) compared with observations, while G1SST, JCOPE2, and AVHRR have relatively larger RMSEs and smaller correlations. The large RMSEs were found in the western coastal regions of the KP where water depth is shallow and tides are strong, such as Chilbaldo and Deokjeokdo, while low RMSEs were found in the East Sea and open oceans where water depth is relatively deep such as Donghae, Ulleungdo, and Marado. We found that the main sources of the large RMSEs, sometimes reaching up to 5°C, in SST data around the KP, can be attributed to rapid SST changes during events of strong tidal mixing, upwelling, and typhoon-induced mixing. The errors in the background SST fields which are used in data assimilations and satellite composites and the missing in-situ observations are also potential sources of large SST errors. These results suggest that both satellite and reanalysis SST data, which are believed to be true observation-based data, sometimes, can have significant inherent errors in specific regions around the KP and thus the use of such SST products should proceed with caution particularly when the aforementioned events occur.

**Key words :** sea surface temperature, satellite composite, accuracy, model reanalysis, typhoon, upwelling, tide, Korean peninsula

### 1. 서 론

해수면온도(sea surface temperature, SST)는 대기와 해양의 경계면에서 열속(heat flux)을 결정하는 중요한 변수

로서 기후 모델링, 지구의 열균형, 대기와 해양의 대순환, 엘니뇨 등의 다양한 연구 분야에서 기초자료로 활용된다 (Reynolds et al. 2002; Park et al. 2008; Kim 2017). 해수면온도는 또한 국지적인 규모에서 소용돌이, 열전선, 용승, 일차 생산성, 태풍강도 등의 연구에 중요한 기초자료가 될 뿐 아니라 전 지구 및 지역규모의 기상, 기후 및 해

\*Corresponding author. E-mail : ijmoon@jejunu.ac.kr

양 순환모델링과 다양한 수치예보모델의 기본 입력자료로 널리 사용된다(Jeong et al. 2013; Ko et al. 2018).

해수면온도 자료는 부이나 선박 등을 이용한 직접 관측과 인공위성을 통한 원격관측을 통해 수집된 자료를 수치모델 자료동화 또는 자료합성(composite) 방법을 통해 시·공간적으로 공백이 없고 실시간 이용이 가능한 형태로 생성된다(Martin et al. 2012). 현재 여러 기관에서 제공하는 격자(gridded)화된 일간격의 해수면온도 자료는 크게 모델분석장과 위성합성장으로 분류할 수 있다. 모델분석장은 사용 가능한 모든 해수면온도 관측자료를 입력자료로 사용하여 수치모델의 자료동화 과정을 통해 생산되며, 위성합성장은 다양한 위성 및 현장 관측자료의 합성과 관측자료가 채워지지 않은 부분에 대한 내·외삽과 기후장을 이용한 대체 등을 통해 생성된다.

이렇게 생성된 해수면온도 자료는 사용된 위성 및 현장 관측자료의 종류, 자료의 품질 보정(quality control) 과정, 시·공간해상도, 내·외삽방법, 합성방법, 사용된 수치모델과 자료동화 방법 등의 차이로 인해 정확도의 차이가 발생한다(Donlon et al. 2002; Gentemann et al. 2004; Reynolds et al. 2005). 따라서 현재 사용하고 있는 해수면온도 자료에 대해 정확도와 오차 특성을 파악하는 것은 가장 기초적이며 필수적이다.

많은 선행 연구에서 다양한 해수면온도 자료에 대해 관측자료와의 비교를 통해 정확도를 평가하였다. Chassignet et al. (2007)은 HYCOM (Global Hybrid Coordinate Ocean Model) 해수면온도 재분석자료와 북아메리카 연안의 멕시코 만류를 따라 2003년 6월 1일부터 2005년 4월 13일까지 관측된 자료를 비교하여 멕시코만과 대서양 플로리다 동부해안에서 각각  $0.7^{\circ}\text{C}$ 와  $0.86^{\circ}\text{C}$ 의 평균제곱오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 보고하였다. Stark et al. (2007)와 Reynolds et al. (2007)은 각각 FNMOC (The Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center) 수치모델 재분석 해수면온도 자료와 OISST.v2.AVHRR (The Optimal Interpolation Sea Surface Temperature version 2, only Advanced Very High Resolution Radiometer) 위성합성 해수면온도 자료를 2006년 11월 1일부터 2007년 3월 31일까지와 2003년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지 현장관측 자료와 비교하여 낮 시간 동안 해수면온도가 태양복사에 의해 과대추정되는 주간 효과(Diurnal warm effect)를 밝혔다. Martin et al. (2012)은 위성합성 고해상도 해수면온도 자료인 GHRSST-L4 (Group for High Resolution Sea Surface Temperature Level 4) 자료들을 양상블(A GHRSST Multi-Product Ensemble, GMPE)하여 정확도 높은 해수면온도 자료를 생산하였다. 이렇게 생산된 양상블 평균 해수면온도 자료는 현장관측 자료인 Argo 자료와 2010년 1년 동안 비교하였을 때  $0.40^{\circ}\text{C}$ 의 RMSE와

$0.03^{\circ}\text{C}$ 의 편차(이하 Bias)를 나타내었다.

한반도 근해에서도 다양한 해수면온도 자료에 대한 정확도 평가가 이루어졌다. Miyazawa and Yamagata (2003)은 수치모델 재분석 해수면온도 자료인 JCOPE2 (Japan Coastal Ocean Predictability Experiment 2)를 현장관측 자료와 2002년 9월 6일부터 2003년 2월 26일까지 비교하여 일본 연안에 약  $1^{\circ}\text{C}$ 의 RMSE가 있음을 보고하였다. Xie et al. (2008)은 2005년 10월 1일부터 2006년 9월 31일까지 동중국해 및 황해 연안의 현장관측 자료를 GHRSST-L4 자료와 비교한 결과, 수심이 얕아짐에 따라 GHRSST-L4 자료들의 RMSE가 증가되는 것을 발견하였다. 이 연구에서는 OSTIA (Operational SST and Sea Ice Analysis) 자료가  $-0.04^{\circ}\text{C}$ 의 Bias와  $0.31^{\circ}\text{C}$ 의 RMSE를 보여 다른 GHRSST-L4 자료와 비교하였을 때 가장 정확도가 높음을 보고하였다. Park et al. (2008)은 북동아시아 해역에서 1994년부터 2003년 까지 10년간 845개의 현장 관측자료와 위성으로부터 관측된 해수면온도 자료를 비교하여  $0.89^{\circ}\text{C}$ 의 RMSE와  $0.18^{\circ}\text{C}$ 의 Bias 그리고, 겨울철의 과대모의와 여름철의 과소모의 경향을 보고하였다. Kim (2017)은 2012년 7월부터 2016년 8월까지 약 4년 동안 한반도 주변해역에서 AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer-2) 기반의 해수면온도 자료를 162,264개의 현장관측자료와 비교하여 일치점자료로부터  $0.63^{\circ}\text{C}$ 의 RMSE와  $0.05^{\circ}\text{C}$ 의 Bias가 있음을 보였다. 또한, 이 연구에서는 이러한 차이가 발생한 원인을 약한 바람에 의한 해수면온도의 과도한 가열, 연안으로부터의 거리, 그리고 열전선 등에 의한 것임을 밝혔다.

외해에 비해 연안의 해수면온도 자료는 육지에 의한 오염과 육지와 해양의 경계 값 오류 등으로 인해 해수면온도의 이상 또는 결측 값이 산출되는 경우가 많다 (Ricciardulli and Wentz 2004; Kim 2017). 연안에서 이러한 오류는 광범위하게 이루어지고 있는 연안 수산업 및 양식업, 레저활동, 적조와 같은 연안환경 모니터링, 그리고 기상현상(안개, 집중호우, 폭설) 예측 등에 영향을 미칠 수 있다(Jeong et al. 2013). 그러나 지금까지 대부분 해수면온도 자료의 정확도 평가에 관한 연구들은 연안보다는 외해에 대한 평가가 주로 이루어졌다. 또한 연안에서 오차의 계절적인 변화 특성 조사가 가능하도록 같은 지점에서 1년 이상 장기 자료를 이용하여 오차 특성을 분석한 사례도 거의 없고, 모델 재분석 자료와 위성 해수면온도 자료를 동시에 평가한 결과도 많지 않다. 특히, 한반도 연안은 해안선이 복잡하고, 조차가 크며, 난류와 한류가 만나는 지역이기 때문에 자료별, 계절별, 그리고 지역별로 해수면온도 자료의 정확도와 오차특성이 다를 수 있으며, 이에 대해 시공간적으로 상세하게 해수면온도 자료의 정확도를 평가한 연구는 거의 없었다.

본 연구에서는 2011년부터 2016년까지 6년간 위성합성 및 모델분석 해수면온도 자료의 정확도를 한반도 연안(해안선으로부터 영해의 외측한계까지)에 위치하고 있는 10개의 기상부이 자료를 이용하여 평가하고 그 오차 특성을 조사하였다. 특히, 본 연구에서는 한반도 연안에서 해수면온도 자료가 부이자료와 큰 차이가 나타나는 경우에 대해 사례분석을 통해 그 원인을 분석하였다. 2장에서는 이 연구에 사용한 해수면온도 자료와 분석방법을 설명하고, 3장에서는 각 자료간의 상호비교 및 자료의 정확도 분석 결과를 제시한다. 4장에서는 차이의 원인에 대한 다양한 분석 결과를, 그리고 5장에서는 이를 종합하여 결론과 토의를 제시한다.

## 2. 자료 및 분석 방법

### 위성합성 해수면온도 자료

다양한 위성으로부터 관측된 해수면온도 자료를 이용하여 합성된 해수면온도 자료들은 GHRSSST에서 통합 관리된다. 본 연구에서는 GHRSSST의 위성합성 해수면온도 자료 중 4개의 자료를 정확도 검증에 사용하였다. 본 연구에서 사용된 위성 해수면온도 자료의 시공간 해상도, 제공기관, 이용 가능 기간, 그리고 자료동화 방법 및 사용된 입력자료 등을 Table 1에 요약하였다.

AVHRR 해수면온도 자료는 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 여러 위성 (NOAA-N, MetOp 등)에 탑재된 적외센서인 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)에서 측정된 해수면온도 자료와 현장관측 자료를 최적보간법(optimal

interpolation, OI)을 이용하여 1981년 9월부터 전구 영역에 대해 일일 합성한 해수면온도 자료이다. AVHRR 해수면온도 자료는 위성합성으로 산출된 해수면온도 자료 중 가장 오래된 자료이다. 초기 개발된 AVHRR 해수면온도 자료는 시·공간 해상도가 낮았고( $7\text{일}, 1^\circ$ ), 이후 Richard W. Reynolds에 의해  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 의 공간해상도와 하루(Daily)의 시간해상도를 가진 “Reynolds SST 또는 OISST.v2 AVHRR”가 개발되었다. AVHRR 해수면온도 자료는 지난 30년간(1982–2011년) 기후 평균자료와 편차를 계산해 기준을 초과하는 값을 제거하는 후처리과정을 실시하고 있다. 또한, AVHRR 자료는 구름을 투과할 수 있는 마이크로웨이브 센서인 AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth observing system)를 이용하여 AVHRR + AMSR-E 해수면온도 자료를 2002년 6월부터 2011년 9월까지 제공하였다. 그러나 AMSR-E가 2011년 10월 원인불명으로 고장나면서 AVHRR + AMSR-E 해수면온도 자료는 그 이후 제공되지 않는다.

FNMOC-S (FNMOC High Resolution SST/Sea Ice Analysis for GHRSSST) 자료는 NOAA-N과 MetOp 위성들의 AVHRR 적외센서와 정지궤도 위성인 GOES-R의 적외센서에서 측정된 해수면온도 자료를 입력자료로 사용하여 2005년 6월부터 제공된다. FNMOC-S는 마이크로웨이브 센서로 측정된 해수면온도 자료는 사용하지 않지만 DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) 위성 시리즈에 탑재된 마이크로웨이브 센서인 SSM/I (Special Sensor Microwave Imager Sounder)로 측정된 해빙농도 자료를 이용하여 해빙 가장자리의 해수면온도를 보다 정확하게 계산한다.

Table 1. Detailed specification of sea surface temperature (SST) products used in this study

Name of product	Spatial resolution	Temporal resolution	Input data	Assimilation system	Institute, county	Available period of data
HYCOM	$0.08^\circ / 0.03^\circ$	daily	AVHRR/NOAA, GOES, altimeter SSH, Argo, CTD, XBT, SSM/I/DMSP, In situ	NCODA-3D MVOI	U.S Naval Research Laboratory, USA	January 2003–Present
JCOPE2	$0.1^\circ$	daily	AVHRR/NOAA, JASON-1, Geosat, Argo FRDATA (Fisheries Research Institution DATA)	NCODA-3D MVOI	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	January 1993–Present
FNMOC-M	$1/6^\circ / 1/8^\circ$	daily	FNMOC-S, Argo, CTD, XBT, altimeter SSH, In situ, MODAS synthetic	NCODA-3D MVOI	Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center, USA	June 2005–Present
OSTIA	$0.05^\circ$	daily	AATSR/Envisat, AVHRR/NOAA, AVHRR/MetOp, AMSR-E/Aqua, TMI/TRMM, SEVIRI/MSG, OSI-SAF, In situ	OI	UK Met office, UK	April 2006–Present
G1SST	$0.01^\circ$	daily	AATSR/Envisat, AVHRR/NOAA, AVHRR/MetOp, AMSR-E/Aqua, MODIS/Aqua, Terra, TMI/TRMM, SEVIRI/MSG, GOES, MTSAT-2, In situ	2D VAR	NASA Jet Propulsion Laboratory, USA	June 2010–Present
AVHRR	$0.25^\circ$	daily	AVHRR/NOAA, AVHRR/MetOp, In situ	OI	NOAA National Climatic Data Center, USA	September 1981–Present
FNMOC-S	$0.1^\circ$	6 h	AVHRR/NOAA, AVHRR/MetOp, GOES-R, SSM/I/DMSP, In situ	NCODA-2D MVOI	Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center, USA	June 2005–Present

G1SST (Global 1-km SST)는 NASA 제트추진연구소(NASA Jet Propulsion Laboratory)에서 생산한 1 km의 공간 해상도를 가지는 고해상도 자료이다. 이 자료는 극궤도 위성에서 산출된 해수면온도 자료뿐 만 아니라 정지궤도 위성에서 측정된 해수면온도 자료(SEVIRI/MSG GOES, MTSAT)를 사용하여 합성된다. 타 위성합성 해수면온도 자료에 비해 많은 입력 자료를 사용하여 공간해상도를 향상시켰고 보간 되는 격자를 줄였다. 합성 방법은 2DVAR(Two-Dimensional Variation)을 사용한다.

OSTIA (Operational SST and Sea Ice Analysis)는 영국 기상청(UK Met office)과 노르웨이 및 덴마크 기상 연구소에서 공동으로 생산하는 EUMETSAT OSI-SAF (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility) 해빙자료를 포함한 해수면온도 자료이다. OSTIA는 입력되는 자료의 품질보정 과정에서 낮 시간에 풍속이 6 m/s 이하인 경우 해당 자료를 사용하지 않음으로써 주간 효과에 의한 오차를 줄인다. 또한 총 오차 확률(Probability of Gross Error, PGE)을 추정하여 그 값이 0.5 보다 큰 경우 제거한다. 이러한 해수면온도 입력 자료들의 전 처리 과정에서 약 0.5%의 자료가 제거되고  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  격자 크기로 보간된다. 이러한 과정에서 여전히 채워지지 않는 격자는 이전 분석장과 기후장으로 이용하여 채워지고, 지역적인 특징이 강한 곳은 현장관측 자료를 이용하여 보정된다.

### 수치모델 재분석 해수면온도 자료

본 연구에서 사용된 수치모델 재분석자료는 US GODAE (US Global Ocean Data Assimilation Experiment)에서 제공하는 미 해군 수치기상 및 해양 센터의 고해상도 해양재분석 자료(이하 FNMOC-M), 미 해군연구소(U.S Naval Research Laboratory)에서 제공하는 전 지구 해양순환모델 HYCOM (HYbid Coordinate Ocean Model) 재분석 자료, 그리고 쿠로시오 해류의 정확한 추적 및 관측을 위해 일본 해양과학기술센터(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, JAMSTEC)에서 생산한 해양모델 JCOPE2의 재분석자료이다(상세 정보는 Table 1 참고).

FNMOC-M은 FNMOC-S 위성 해수면온도 자료, Argo의 수온·염분 프로파일, 현장관측 CTD (Conductivity, Temperature, Depth) 및 XBT (Expendable Bathymeterograph) 자료, 위성 해수면고도 편차자료, 그리고 MODAS synthetic profile 등을 3차원 MVOI (Three-dimensional multivariate optimum interpolation) 기법으로 자료동화하여 제공한다. FNMOC-M은 24시간 주기로 생산되며, 자료동화 시점부터 9시간 이내에 자료만을 사용

한다. FNMOC-M은 주간 효과를 보정하기 위하여 풍속이 6 m/s 미만이고 일사량이  $100 \text{ W/m}^2$ 를 초과하면 해당 위성자료는 사용하지 않는다. 또한, FNMOC-S 자료에 비해 더 많은 해양 관측자료가 사용되므로 해양의 특성이 잘 반영된다.

HYCOM 자료는 Mercator-curve linear의 수평 격자와 33개의 z-levels를 가진 NCODA-3DVAR (Navy Coupled Ocean Data Assimilation - Three Dimension Multi-variate Optimum Interpolation) 해양예측 시스템에서 생산되며, 5일 간격의 과거 재분석자료와 예보자료를 제공한다. NCODA-3DVAR는 5가지의 해양변수(수온, 염분, 역학고도, U/V 속도 성분)를 동화한다. HYCOM 해수면온도 자료는 Reynolds and Smith 기후자료(즉, AVHRR 기후 자료)와 비교하여 월별 차이, 연평균 차이, RMSE, 상관도, 그리고 Skill Score를 산출하여 재분석장을 보정한다(Cummings 2011).

일본 해양과학기술센터에서 제공하는 JCOPE2는  $1/12^\circ$  공간 해상도를 가지며 1993년 1월부터 제공되고 있다. 모델의 입력자료는 JASON-1과 GEOSAT 위성에서 측정된 SSHA, NAVOCEANO MCSST의 해수면온도, 그리고 Argo와 Ship에서 관측된 온도·염분 프로파일을 사용한다. 2008년부터는 FRDATA (Fisheries Research Institution in situ DATA)를 입력자료에 추가하여 정확성을 향상시켰다. 실제로 일본 주변에서의 FRDATA 자료가 동화된 재분석장은 Kuroshio frontal waves, Oyashio intrusion, 그리고 Mesoscale eddies를 매우 효과적으로 포착할 수 있으며 그 오차는 쿠로시오 해역에 대해 해수면온도는 약  $1^\circ\text{C}$ , 염분은 약 0.2 psu로 알려져 있다(Miyazawa and Yamagata 2003).

### 검증 및 분석에 사용된 자료

해수면온도 자료의 비교 검증과 오차 특성을 조사하기 위해 사용된 현장관측 자료는 일 평균된 9개 지점의 기상청 해양기상부이 자료, 그리고 흑산도 조위관측소 자료이다(Table 2, Fig. 1). 흑산도 조위관측소에서는 해수면온도의 오차 분석을 위해 조위 관측자료가 사용되었다. 기상청 해양기상부이는 해수면에서 관측된 해양기상요소(풍향, 풍속, 기압, 기온, 습도, 파고, 파주기, 파향, 수온)를 1시간 간격으로 제공한다(Korea Meteorological Administration 2013). 해양기상부이의 해수면온도 자료는 수심 15–20 cm에서 측정되며,  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  이내의 높은 정확도를 가지는 것으로 알려져 있다(Korea Meteorological Administration 2013).

본 연구에서는 해양기상부이 자료 이외에 위성합성 및 수치모델 재분석 해수면온도 자료의 오차 발생 원인을 분석하기 위해 TRMM Microwave Imager 해수면온도 자료

Table 2. Specification of observational data used in this study

Observational data	Name of station	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (m)	Available period of data
Moored buoy, KMA	Deckjeokdo (DJ)	37.2361	126.0188	30	1996.07.01.–Present
	Oeyeondo (OY)	36.2500	125.7500	51	2009.10.21.–Present
	Chilbaldo (CB)	34.7933	125.7769	33	1996.07.01.–Present
	Donghae (DH)	37.5442	130.0000	1518	2001.04.01.–Present
	Ulleungdo (UL)	37.4554	131.1144	2169	2011.12.28.–Present
	Pohang (PH1)	36.3500	129.7833	320	2008.11.15.–Present
	Geojeodo (GJ)	34.7667	128.9000	84	1998.05.01.–Present
	Geomundo (GM)	34.0014	127.5014	80	1997.05.01.–Present
Tidal station, KHOA	Marado (MR)	33.0833	126.0333	110	2008.11.15.–Present
	Heuksando (HS)	34.6842	125.4356		1965.08.01.–Present
Coastal station, NIFS	Pohang (PH2)	36.0472	129.4361		1947.04.01.–Present
	Homigot (HM)	36.0764	129.5750		1934.02.01.–Present
	Gampo (GP)	35.8056	129.5111		1967.05.01.–Present
Serial Oceanographic Observation Data, NIFS	-	31.5000–39.7383	122.2167–135.1917		1961.01.29.–Present

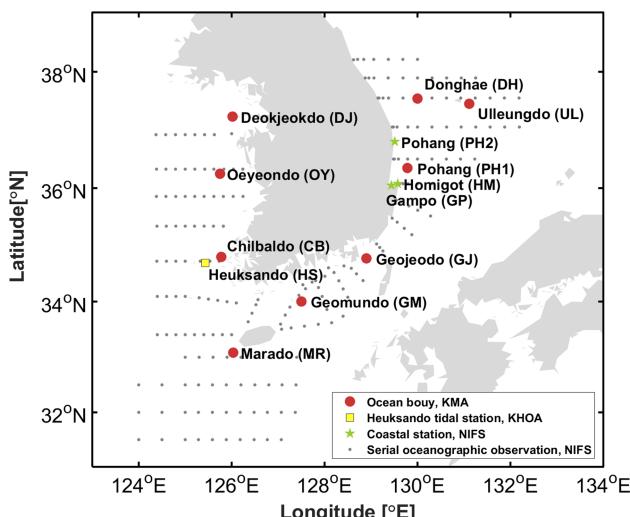


Fig. 1. Locations of observational points around the Korean peninsula (KP) used in this study. Red circles represent the ocean buoy of the Korea Meteorological Administration (KMA). A yellow square represents Heuksando tidal station of the Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA). Green stars and gray dots represent coastal stations and serial oceanographic observation points of the National Institute of Fisheries Science (NIFS), respectively.

(Stammer et al. 2003), 국립해양조사원의 국가 해양 관측 정보(<http://www.khoa.go.kr/koofs>), 그리고 국립 수산

과학원의 정선 해양관측 자료(Kim et al. 2015)를 추가적으로 사용하였다.

### 분석 방법

위성합성장, 수치모델 재분석장, 부이자료는 해수면온도의 측정 수심이 다르다. 예를 들면, 수치모델 재분석 해수면온도 자료는 수치모델 최상층의 평균된 온도이며, 위성합성 해수면온도 자료는 표층온도(skin temperature, 수  $\mu\text{m}$  이내)이고, 현장관측 자료는 20 cm 이내에서 관측된 수온(bulk Temperature)이다. 그러나 이들 자료들은 전통적인 해수면온도 개념인 Bulk temperature에 맞도록 산출계수를 사용하여 조정되어 제공되기 때문에 자료를 직접 비교하는 데에는 큰 문제점이 없는 것으로 알려져 있다. 현장관측 자료의 해수면온도는 지점(Point) 자료이며, 위성합성 및 수치모델 재분석 해수면온도 자료는 격자(grid) 자료이다. 두 자료의 비교는 현장관측지점에서 가까운 격자점을 이용하여 이중선형보간(Bilinear Interpolation)법을 사용하여 내삽한 후 이루어졌다. 이중선형보간법은 2차원 보간법의 한 종류로 먼저 수평 방향으로 보간한 후에 수직으로 보간하여 원하는 위치의 값을 얻는 방법이다. 위성합성 및 수치모델 재분석 해수면온도 자료의 정확도 평가는 월별, 지점별, 시간별로 RMSE, Bias, 상관도(Correlation, R)를 이용하였다(아래 식 참고).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SST_i - insitu_i)^2}{n}} \quad (1)$$

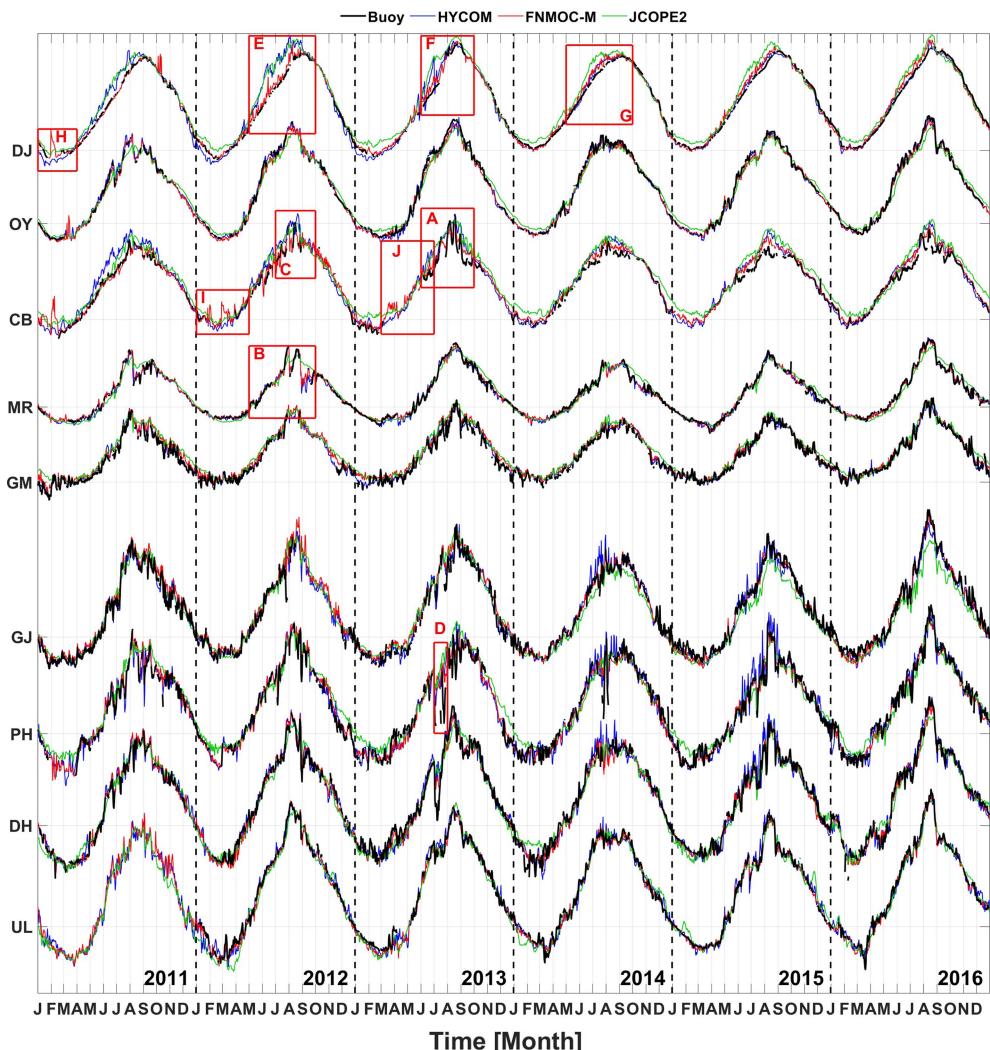
$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (SST_i - insitu_i)}{n} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (SST_i - \overline{SST})(insitu_i - \overline{insitu})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (SST_i - \overline{SST})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (insitu_i - \overline{insitu})^2}} \quad (3)$$

여기서,  $n$ 은 해수면온도 자료와 현장관측 자료가 일치되는 자료의 개수,  $SST_i$ 는 위성합성 또는 수치모델 재분석 해수면온도 자료,  $insitu_i$ 는 현장관측 자료이다.  $\bar{\cdot}$ 는 평균을 나타낸다. 상관도 간에 유의한 차이가 있는 지는 Fisher transformation을 통한 Z 검정 방법을 이용하였다.

### 3. 자료의 정확도 평가

해수면온도 자료들의 전체적인 변화 경향을 조사하기 위해서 먼저 10개의 관측지점에서 6년간 위성합성 및 수치모델 재분석 자료의 시계열을 현장관측 자료와 비교하였다(Fig. 2, Fig. 3). 그림에서 각각의 해수면온도 자료들은 현장관측 자료와 대부분 유사한 패턴을 보이지만, 일부 관측지점에서 관측자료와 큰 차이가 나타나는 시기가 발견되었다. 이러한 차이가 발생하는 원인에 대해서는 4절에서 상술하기로 하고, 여기서는 각각의 해수면온도 자료들에 대한 정확도 평가 결과를 비교한다(Fig. 4, Table 3). 참고로 Fig. 4의 통계 분석에는 15,036개의 많은 자료가 사용되어 상관도 차이가 0.001인 경우에도 95% 유의수준



**Fig. 2. Comparison of SST time series between model-reanalysis products and buoy at Deokjeokdo (DJ), Oeyeondo (OY), Chilbaldo (CB), Marado (MR), Geomundo (GM), Geojeodo (GJ), Pohang (PH), Donghae (DH), and Ulleungdo (UL) during 2011–2016 years. The red boxes (A to J) indicate periods of time that have large errors and require further investigations for their causes (see Figs. 6, 9, 12, 16, and 18)**

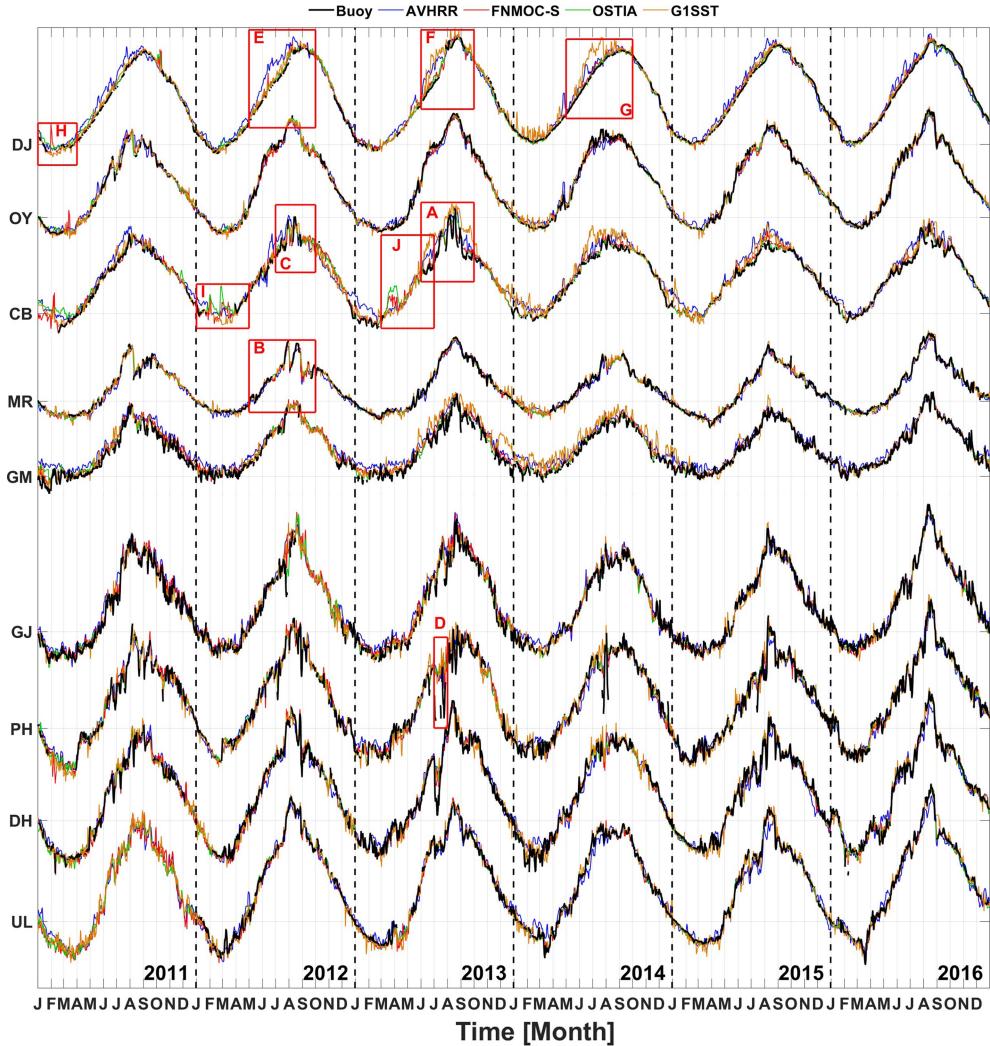
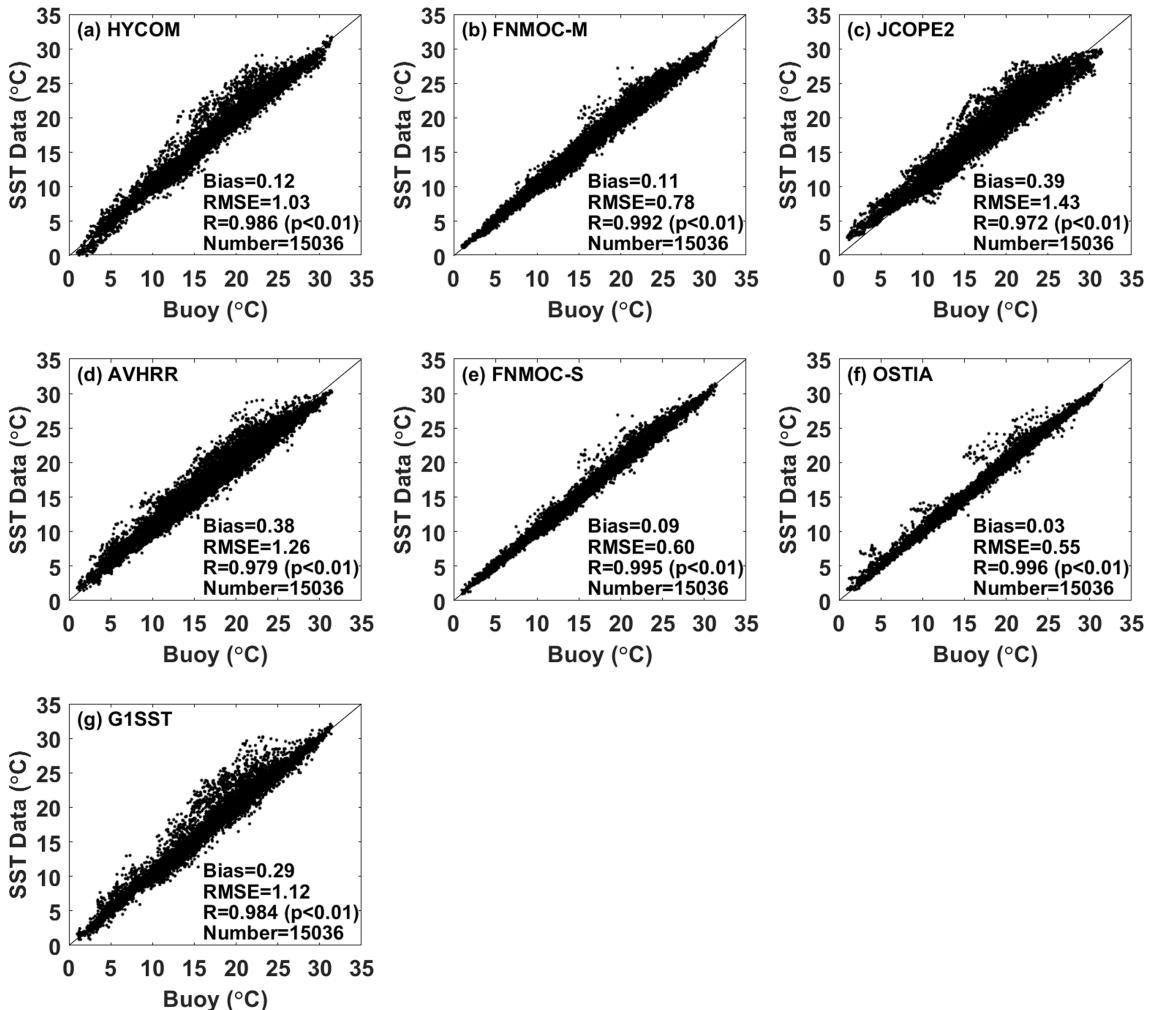


Fig. 3. Same as in Fig. 2, but for the satellite-composite SST products

에서 모두 유의한 차이를 나타내었다.

통계분석결과, 수치모델 재분석 해수면온도 자료 중에서는 FNMOC-M가 가장 낮은 Bias(0.11)와 RMSE(0.78) 그리고 가장 높은 상관도( $R = 0.992$ )를 보였다(Fig. 4b). HYCOM은 FNMOC-M와 유사한 Bias(0.12)를 보였지만 RMSE(1.03)는 더 높았다(Fig. 4a). JCOPE2는 세 모델 중에 Bias(0.39), RMSE(1.43), 그리고 상관도(0.972) 평가에서 모두 정확도가 가장 낮았다(Fig. 4c). 위성합성 해수면온도 자료 중에서는 OSTIA가 Bias(0.03)와 RMSE(0.55)에서, Xie et al. (2008)의 결과와 유사하게, 가장 낮은 Bias와 RMSE를 보였다(Fig. 4f). FNMOC-S는 OSTIA 다음으로 낮은 Bias(0.09)와 RMSE(0.60)를 보였다. 흥미롭게도 FNMOC-S는, 큰 차이는 아니지만, 같은 기관에서 산출된 모델재분석 자료인 FNMOC-M보다는 높은 정확도를 보였다. G1SST는 1 km의 가장 높은 공간해상도를

가지며, 가장 많은 입력자료를 사용하였지만 Bias(0.29), RMSE(1.12), 그리고 상관도(0.984) 평가에서 모두 OSTIA 와 FNMOC-S보다 정확도가 낮았다(Fig. 4g). AVHRR는 Bias(0.38), RMSE(1.26), 그리고 상관도(0.979)에서 위성 합성 해수면온도 자료 중에서 가장 정확도가 낮았다(Fig. 4d). 이것은 대부분의 위성합성 해수면온도 자료들이 구름을 투과하는 마이크로웨이브 센서자료를 입력자료로 사용하는 것과는 달리 AVHRR는 오직 적외센서로부터 산출된 해수면온도 자료만 사용하기 때문인 것으로 사료된다. 실제로 마이크로웨이브 센서자료를 사용하지 않는 경우, 자료 결측이 없는 지역은 정확도가 높지만, 구름에 가려진 많은 지역들에서 기후장 및 현장 관측자료를 이용하여 빈 공간을 메우는 과정에서 큰 차이가 발생할 수 있다. 모든 모델재분석 자료에서 공통적으로 양의 Bias를 보이는 것은 위성합성 자료에서 과대모의 경향이 모델 재분석장에



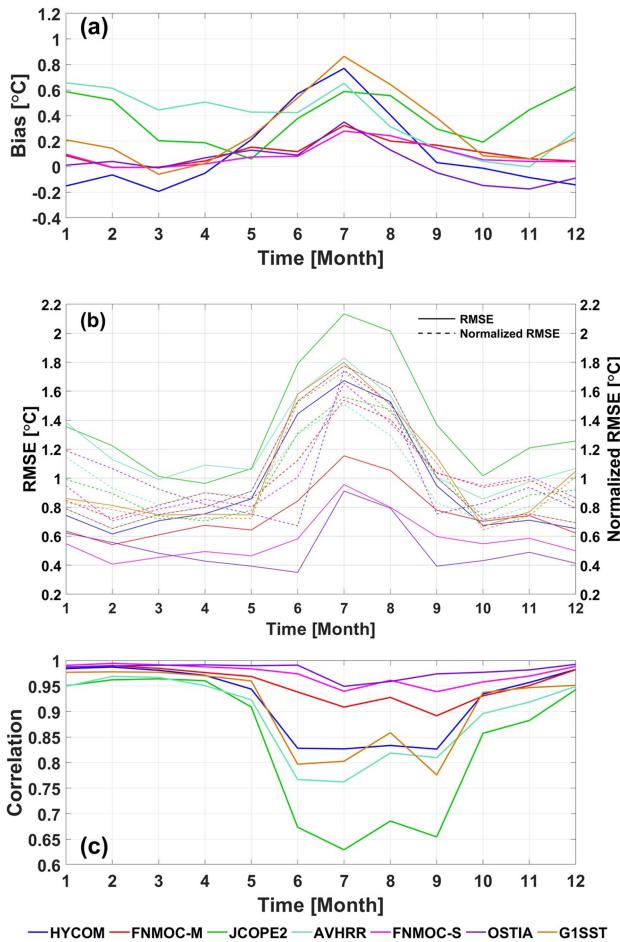
**Fig. 4.** Scatter plots of model-reanalysis and satellite-composite SST against buoy SST (a, FNMOC-M; b, HYCOM; c, JCOPE2; d, FNMOC-S; e, AVHRR; f, OSTIA; g, G1SST). Bias, RMSE, and correlation coefficients (R), are shown in the right-bottom corner. Statistical analysis has been done using 9 KMA-buoy data around the KP for 2011–2016

도 영향을 미친 것으로 사료된다.

해수면온도 자료의 계절별 정확도 변화경향을 조사하기 위하여 2011년부터 2016년까지 모든 해수면온도 자료들의 월 평균 Bias, RMSE, 상관도를 구하였다(Fig. 5). 계절별로 보면, 봄에서 여름까지, 즉 5월에서 9월까지 모든 해수면온도 자료에서 Bias와 RMSE 값이 증가하고 상관도는 낮아졌다. 특히, 오차의 증가 경향은 7월에 가장 뚜렷이 나타났다. 이렇게 평균적으로 여름철에 Bias와 RMSE 가 증가하는 이유는 해수면온도의 절대값이 커진 것, 여름 철 강한 성층화로 인한 수온의 수직 변동성 증가, 연안에서 조석혼합으로 인한 공간적인 변동성 증가, 그리고 위성 관측 자료의 정확성에 영향을 주는 구름과 비의 증가 등이다. RMSE 값을 해수면온도의 월 평균값으로 나눈 Normalized RMSE를 추가적으로 분석결과, 여름에 정확

도가 낮아지는 계절별 차이가 여전히 나타났다(Fig. 5b). 이 결과는 해수면온도의 절대값이 커진 것보다는 앞서 언급한 물리적인 환경요인 변화가 여름철 해수면온도의 정확도를 떨어뜨린 더 큰 원인이었음을 나타낸다.

자료들 간의 특성을 자세히 비교해 보면, FNMOC-M, FNMOC-S, OSTIA는 다른 자료와 비교해서 특히 여름철에 낮은 Bias와 RMSE를 보였다. 그러나 이 자료들도 겨울철에는 다른 자료들과 큰 차이가 없었다. 따라서 이 자료들은 다른 자료들에 비해 계절별 변화가 크지 않았다. HYCOM은 여름철에 오차가 크게 증가하지만 겨울철에는 낮은 오차를 보였다. AVHRR과 JCOPE2는 전 계절에서 모든 자료들 중에 RMSE와 상관도 평가에서 가장 정확도가 낮았다. HYCOM이 여름철에 오차가 증가하는 이유는 한반도 연안에서 여름철에 정확도가 낮은 AVHRR 위성



**Fig. 5. Monthly variations of (a) bias, (b) RMSE, and (c) correlation coefficient for all SST products. Statistical analysis has been done using 9 KMA-buoy data around the KP for 2011–2016**

해수면온도 자료를 동화에 사용하기 때문에 분석된다. 지점별로 보면, 칠발도(CB)와 덕적도(DJ)에서 평균적으로 가장 큰 Bias와 RMSE를 보였다(Table 3). 이 두 지역에서 오차가 크게 나타난 이유는, 4절에서 상세히 다루겠지만, 이 지역에 존재하는 강한 조석 때문으로 사료된다. 한편, 포항(PH), 마라도(MR), 동해(DH), 울릉도(UL)는 상대적으로 오차가 낮은 지역으로 분류된다. 이 지역들은 수심이 비교적 깊고 조차가 크지 않은 동해 및 제주부근에 위치하고 있다.

#### 4. 오차원인에 대한 상세 분석

앞선 분석에서 지점별로 해수면온도 자료와 현장관측 자료의 차이가 증가하는 시기가 발견되었다. 본 절에서는 해수면온도 자료의 오차가 커지는 원인에 대해 다섯 가지(조석, 태풍, 용승, 배경장 오류, 관측자료 결측 등의 영향)

로 분류하여 상세 분석을 실시하였다.

#### 조석 영향

우리나라 연안에서 해수면온도의 오차를 유발하는 가장 큰 요인은 조석에 의한 수직혼합 및 이류에 의한 시공간적인 수온변동성의 증가이다. 특히, 황해는 삼면이 육지로 둘러싸여 있는 만의 형태로 조석에너지가 집중되며 지역의 고유진동주기와 조석주기가 비슷하여 조석현상이 다른 해역보다 증폭되어 나타난다(Moon et al. 2003). 특히, 수심이 낮고 조류가 강한 지역에서 여름철 성층이 강하게 발달된 시기에 강한 조석에 의한 수직혼합으로 해수가 전층에서 혼합되어 조석전선이 형성되면서 해수면온도의 시공간적인 변동성이 매우 커진다. 앞서 칠발도와 덕적도에서는 평균적으로 RMSE와 Bias가 높게 나타난 것은(Table 3) 이 지역의 조류가 강한 것과 관련이 깊다.

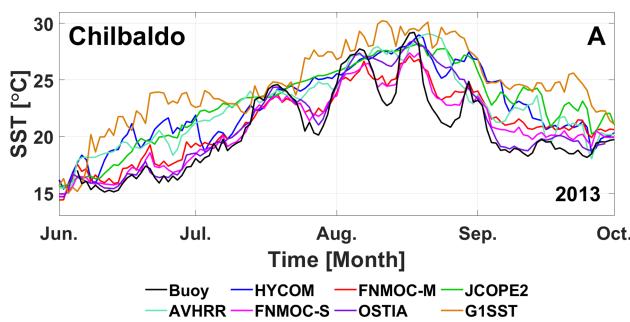
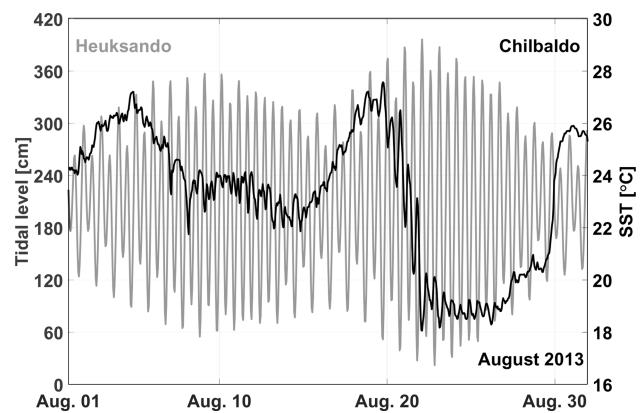
조석이 해수면온도의 오차를 유발하는 과정을 상세히 살펴보기 위해 칠발도에서 2013년 6월부터 9월까지 현장관측자료와 위성합성 및 수치모델 재분석 해수면온도의 시계열 자료를 비교하였다. Fig. 6은 Fig. 2와 Fig. 3의 Box A를 확대하여 나타낸 시계열로, 조석으로 인한 15일 주기의 변동이 7월 중순부터 8월 말까지 뚜렷이 관찰된다. 조석과 해수면온도의 관련성은 칠발도와 가까운 위치에 있는 흑산도 조위관측소 자료와 해수면온도의 시계열에서 더 명확히 확인할 수 있다(Fig. 7). 그림에서 보면, 대조(사리) 시기인 8월 10일과 23일 전후로 해수면온도가 급격히 낮아졌으며, 특히 연중 가장 대조가 강한 백중사리 시기(8월 23일)에 해수면온도는 28°C에 18°C까지 무려 10°C가 낮아졌다. 낮아진 수온은 소조기(조금)인 8월 15일과 30일로 가면서 각각 다시 회복하여 약 15일 주기로 수온은 상승과 하강을 반복한다.

이러한 조석혼합에 의한 해수면온도의 급격한 하강은 대부분의 위성합성 및 수치모델 재분석 자료들에서 잘 모의되지 못하였다(Fig. 6). 특히, JCOPE2, AVHRR, G1SST, OSTIA 그리고 HYCOM은 이러한 조석에 의한 주기적인 급격한 해수면온도의 하강을 거의 모의하지 못하였다. G1SST는 대조 시기에 수온이 오히려 상승하면서 최대 10°C 이상의 차이를 보였다. FNMOC-S와 FNMOC-M는 조석에 의한 변동을 비교적 잘 모의하였다. 그러나 수온의 변동폭을 과소모의(즉, 최대값은 과소모의 최소값은 과대모의)하는 경향을 보였다.

자료 간의 차이를 더 자세히 분석하기 위해, 조석혼합에 의한 해수면온도 하강이 커던 2013년 8월 23일 백중사리 시기에 대해 모든 자료의 공간분포를 비교하였다(Fig. 8). 현장관측 자료와의 비교를 위해 2013년 8월에 국립수산과학원의 정선관측 자료를 합성한 자료를 추가적으로 비교하였다(Fig. 8i). 정선관측 자료는 8월의 자료이지만

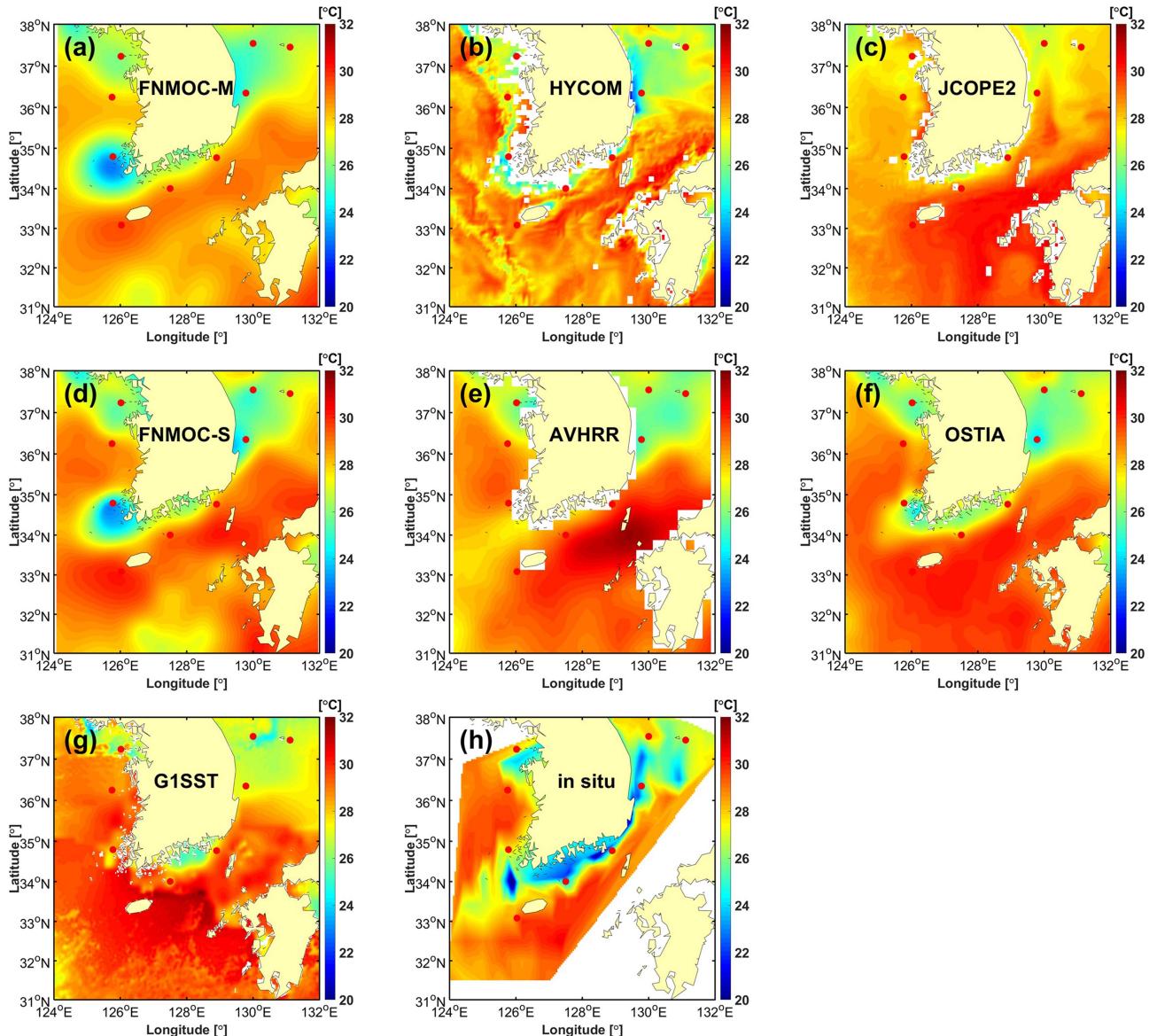
**Table 3. Comparison of SST accuracy (RMSE, Bias, R) at 9 buoys**

	<b>HYCOM</b>	<b>FNMOC-M</b>	<b>JCOPE2</b>	<b>AVHRR</b>	<b>FNMOC-S</b>	<b>OSTIA</b>	<b>G1SST</b>
CB	Corr.	0.977	0.990	0.974	0.969	0.995	0.993
	Bias	1.117	0.573	1.824	1.330	0.353	0.255
	RMSE	1.907	1.038	2.325	2.021	0.700	0.747
DJ	Corr.	0.983	0.995	0.979	0.982	0.998	0.998
	Bias	0.311	0.246	1.309	0.777	0.181	0.063
	RMSE	1.498	0.757	2.018	1.584	0.476	0.480
DH	Corr.	0.985	0.991	0.978	0.983	0.995	0.994
	Bias	-0.021	-0.156	-0.103	-0.023	-0.114	-0.044
	RMSE	0.897	0.701	1.057	0.938	0.529	0.546
GM	Corr.	0.987	0.988	0.973	0.971	0.990	0.991
	Bias	0.180	0.698	0.955	1.305	0.550	0.277
	RMSE	0.782	1.009	1.450	1.728	0.868	0.701
GJ	Corr.	0.985	0.987	0.968	0.979	0.991	0.989
	Bias	-0.085	0.175	-0.371	0.415	0.177	-0.034
	RMSE	0.787	0.769	1.199	1.016	0.655	0.439
UL	Corr.	0.993	0.996	0.988	0.989	0.998	0.998
	Bias	-0.031	-0.184	-0.233	-0.086	-0.117	-0.074
	RMSE	0.625	0.478	0.857	0.810	0.336	0.310
PH	Corr.	0.976	0.981	0.958	0.975	0.988	0.986
	Bias	0.053	-0.013	0.449	0.065	0.058	0.027
	RMSE	1.046	0.907	1.423	1.040	0.745	0.788
MR	Corr.	0.994	0.995	0.978	0.989	0.997	0.997
	Bias	-0.145	-0.009	-0.012	-0.261	-0.027	-0.063
	RMSE	0.521	0.465	0.994	0.743	0.365	0.361
OY	Corr.	0.997	0.997	0.992	0.994	0.999	0.999
	Bias	-0.113	-0.283	-0.029	0.000	-0.223	-0.070
	RMSE	0.573	0.671	1.143	0.925	0.492	0.343

**Fig. 6. Comparison of SST products with buoy data during the events of significant SST changes due to strong tidal mixing at Chilbaldo in 2013****Fig. 7. Comparison of time series between SST (black line) at Chilbaldo buoy and tidal level (gray line) at Heuksando tidal station in August 2013**

실제로 7월부터 9월 사이에 정점별로 관측 날짜가 다른 자료를 합성한 자료이므로 대조기간에 관측될 확률이 크지 않음에도 불구하고 칠발도와 덕적도 근처에서 냉수대가 잘 나타난다. 실제로 이 지역은 여름철에 조석전선이

잘 형성되는 것으로 알려져 있다(Seung et al. 1990). 앞서 시계열 자료에서 조석에 의한 수온변동을 비교적 잘 모의



**Fig. 8. Comparisons of spatial SST distributions among (a) FNMOC-M, (b) HYCOM, (c) JCOPE2, (d) FNMOC-S, (e) AVHRR, (f) OSTIA, (g) G1SST, and (h) in-situ data (NIFS serial oceanographic observation data blended from July to September 2013). SST products (a-g) are obtained on August 23, 2013, when the effects of tidal mixing were strong**

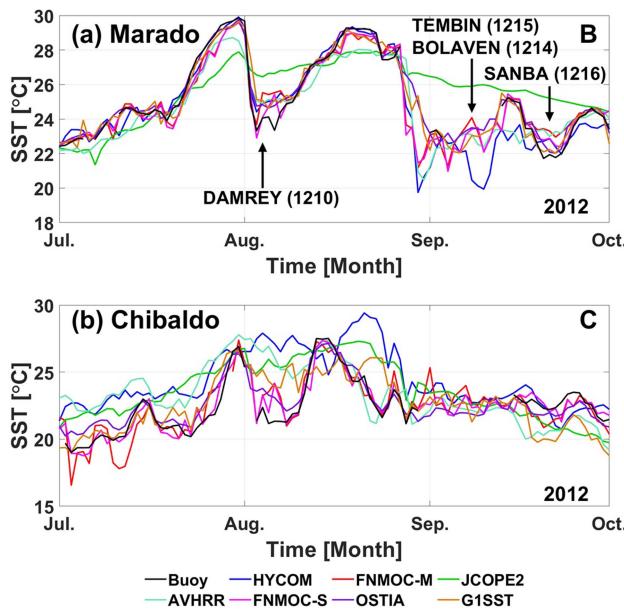
한 FNMOC-M와 FNMOC-S 자료는 이 부근에 냉수대를 잘 모의하고 있다. 반면, HYCOM, JCOPE2, AVHRR, 그리고 G1SST는 조석혼합에 의한 냉수대를 전체적으로 과소모의 하거나, 아예 모의하지 못하였다. OSTIA는 덕적도와 칠발도 부근의 냉수대를 어느 정도 모의하고 있지만 그 강도를 매우 과소모의하고 있다.

이렇게 대부분의 자료에서 조석에 의한 냉수대의 출현을 모의하지 못하는 이유는 구름 또는 연안역의 오염으로 인해 이 지역의 자료가 결측되었거나 위성 해수면온도 산출 알고리즘에서 조석혼합에 의한 급격한 수온 하강을, 기

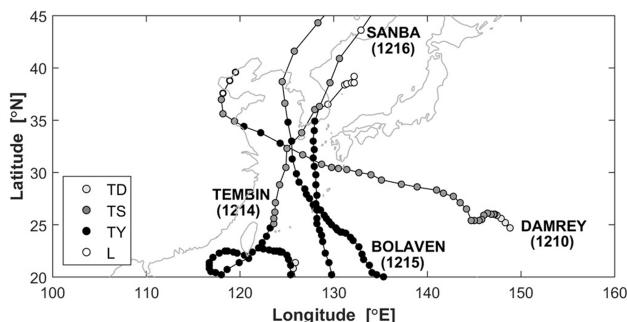
후 값과 비교하여 너무 큰 차이가 나기 때문에, 자료의 오류로 판단하여 제거된 결과로 사료된다. 이렇게 결측 또는 제거된 자료는 기후장을 이용하여 보간되는 과정에서 오차가 발생하게 된다.

#### 태풍 영향

태풍에 동반된 강한 바람은 상층 해양을 혼합시키고 용승을 일으켜 해수면온도를 하강시킨다(Moon and Kwon 2012; Jeong et al. 2013). 태풍 시기에 발생한 이러한 해수면 냉각현상은 태풍이 통과한 후에도 해양의 관성운동



**Fig. 9. Comparison of SST products with buoy data during the passage of typhoon at (a) Marado and (b) Chibaldo in 2012**



**Fig. 10. Tracks of Typhoons, DAMREY, TEMBIN, BOLAVEN, and SANBA that caused significant SST changes around the KP in 2012**

에 의해 수 일간 지속된다(Shay et al. 1992; Lin et al. 2003; Shang et al. 2008). Fig. 9a는 Fig. 2와 Fig. 3의 Box B를 확대하여 나타낸 시계열로, 태풍에 의한 해수면 온도의 하강이 뚜렷이 나타난 사례이다. 이 시기(2012년 8월부터 9월까지)에는 마라도 인근 해역을 네 개의 태풍, DAMREY(1210), TEMBIN(1214), BOLAVEN(1215), SANBA(1216)가 순차적으로 통과하면서(Fig. 10) 강한 해수면 냉각을 발생시켰다.

첫 번째 DAMREY 시기에는 마라도 부이에서 30°C에서 23°C로 약 7°C의 해수면 냉각이 발생하였고, 이것은 그 후 20일이 지나서야 완전히 복원되었다(Fig. 9a). 이러한 현상은 칠발도 부이에서도 나타났고 27°C에서 22°C

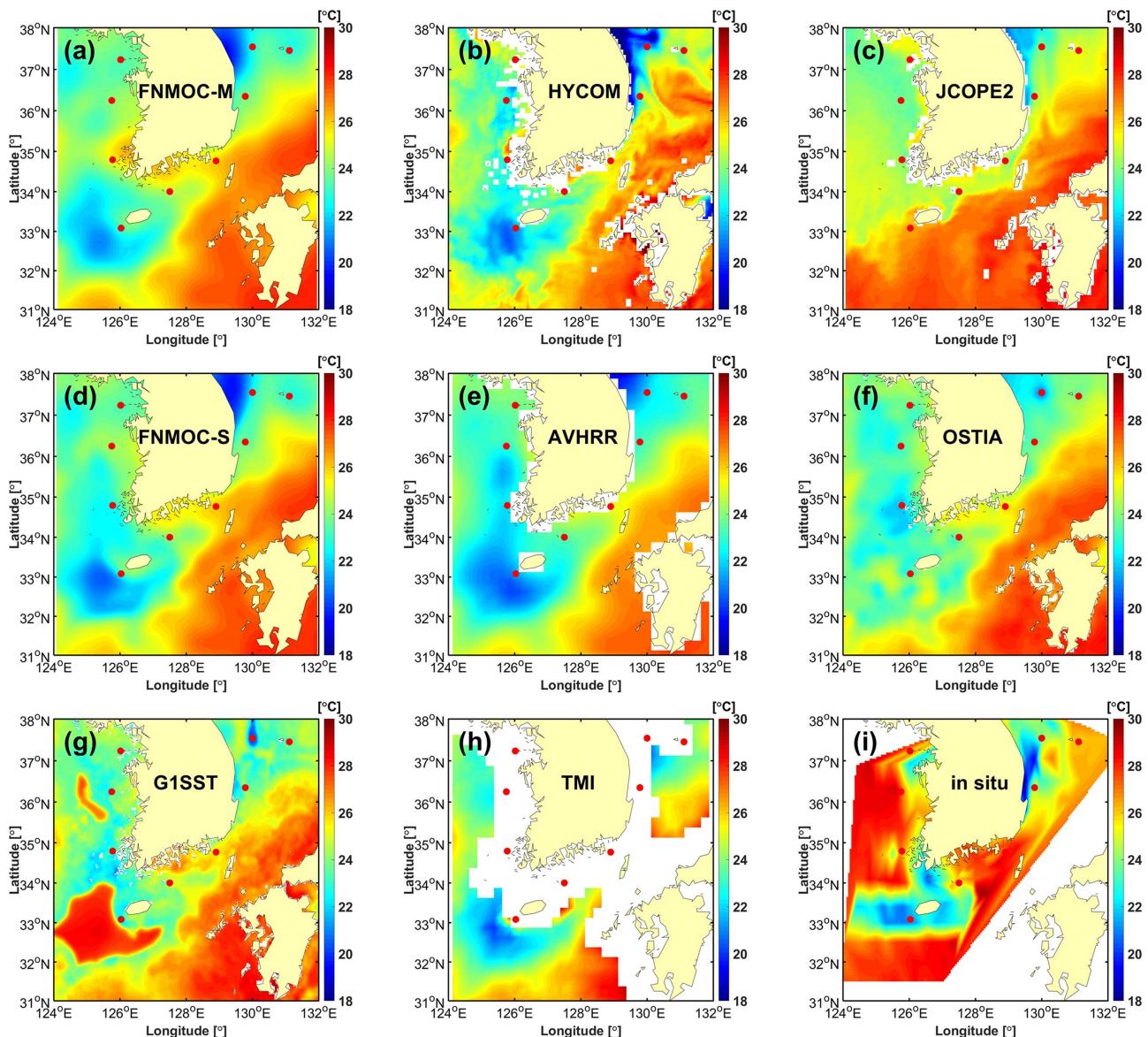
로 약 5°C의 해수면 냉각이 일어났다(Fig. 9b). 이 시기의 해수면 온도의 변화는 JCOPE2와 G1SST를 제외한 대부분의 자료에서 잘 재현되었다. 두 번째 해수면 냉각은 TEMBIN과 BOLAVEN 시기에 발생하였다. 8월 말에 연속적으로 이 두 태풍이 통과하면서 HYCOM의 해수면 온도 자료에서는 마라도에서 29°C에서 20°C로 약 9°C의 해수면 냉각이 발생하였고 다른 자료에서도 6~9°C의 해수면 온도 하강이 나타났다. 세 번째 해수면 냉각은 SANBA 시기로 TEMBIN과 BOLAVEN 때에 발생한 해수면 온도 하강이 완전히 회복되기 전에 다시 추가적으로 해수면 온도 하강이 발생하였다. 이 시기에 모든 해수면 온도 자료는 부이 자료와 잘 일치하였다.

이러한 결과들은 2012년 9월 1일의 각각의 해수면 온도 자료들의 공간 분포에서도 잘 나타난다(Fig. 11). 참고로 이 시기에는 TRMM-TMI (Tropical Rainfall Measuring Mission-TRMM Microwave Imager)으로 추정한 해수면 온도 자료(Fig. 11h)와 2012년 8월(7~9월 관측) 국립수산과학원 정선관측자료를 합성한 공간분포 자료(Fig. 11i)를 추가로 비교하였다. TRMM-TMI 자료의 경우, 구름을 투과할 수 있는 마이크로웨이브 센서자료이므로 태풍 시기의 해수면 냉각을 보다 잘 관측할 수 있지만 육지 근처에서 자료의 결측이 많은 단점이 있다. 실제로 이 자료에서 태풍 BOLAVEN의 통과 시기에 마라도 서남해역에서 강한 해수면 냉각이 잘 관측되었지만 육지 근처에서는 자료를 얻을 수 없었다(Fig. 11h).

마라도 근처에서 나타된 해수면 온도 하강 지역은 FNMOC-M, HYCOM, FNMOC-S, 그리고 AVHRR에서 TRMM-TMI와 비슷하게 관측되었다. 국립수산과학원 8월(7~9월 관측) 정선관측자료에서도 마라도 부근의 낮은 수온이 관측되었다(Fig. 11i). OSTIA는 제주도 부근과 황해 연안에서 전반적으로 낮은 수온을 나타내었지만 마라도 해역에서 강한 해수면 온도 하강은 뚜렷이 나타나지 않았다. JCOPE2와 G1SST는 마라도 해역에서 발생한 태풍에 의한 해수면 냉각을 전혀 모의하지 못하였다. 특히, G1SST는 이러한 급격한 해수면 온도 하강을 자료의 오류로 여겨 기후값으로 대체하면서 비현실적인 해수면 온도 분포를 나타내었다(Fig. 11g). 이것은 G1SST가 타 해수면 온도 자료에 비해 고해상도이며, 다양한 위성에서 측정된 해수면 온도 자료를 사용하기 때문에 엄격한 품질 보정이 사용되어 나타난 결과로 사료된다.

### 용승 영향

한반도의 동해안은 여름철에 남풍이 지속적으로 강하게 불면 애크만 수송 효과로 하층의 차가운 해수가 상층으로 올라와 해수면 온도가 지속적으로 하강한다. 2013년 7월 포항 부이에서 이러한 용승현상으로 해수면 온도가 약 8°C

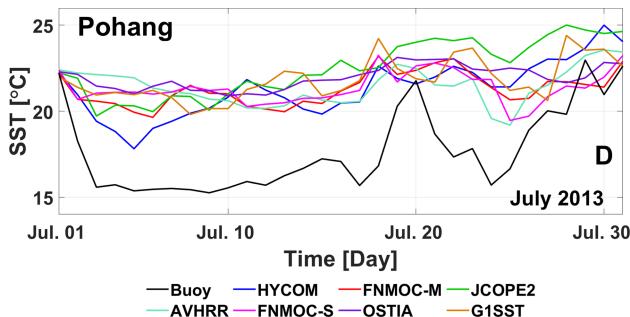


**Fig. 11. Comparisons of spatial SST distributions among (a) FNMOC-M, (b) HYCOM, (c) JCOPE2, (d) FNMOC-S, (e) AVHRR, (f) OSTIA, (g) G1SST, (h) TMI (TRMM Microwave Imager), and (i) in-situ data (NIFS serial oceanographic observation data blended from July to September 2012). SST products (a-h) are obtained on September 1, 2012, when the effects of SST cooling due to Typhoon BOLAVEN were strong**

하강하였고, 이것은 중간에 상승과 하강을 반복하면서 거의 한 달간 지속되었다(Fig. 2와 Fig. 3D, Fig. 12). 이 시기에 모든 위성합성 및 수치모델 재분석 해수면온도 자료들은 이러한 급격한 해수면온도의 변화 경향과 폭을 모의하지 못하였다. 모든 자료 중에 HYCOM 자료는 7월 초에 급격한 해수면온도 하강을 제일 관측과 가깝게 모의하였다(비록 그 크기는 과소평가 되었고, 그 이후에는 다른 결과와 유사하게 관측값과 차이가 커지긴 하였지만).

용승과 관련된 해수면온도 하강은 포항 부이 주변에 위

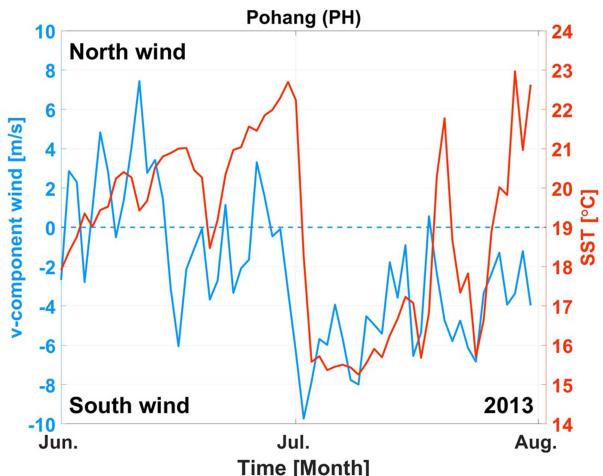
치하고 있는 포항, 감포, 호미곶의 연안관측소에서도 관측되었다(Fig. 13). 세 연안관측소에서는 모두 10°C 이상의 해수면 온도 하강이 동시에 관측되었고, 이것은 7월 16일 까지 지속된 후 점진적으로 회복되었다. 실제로 이 시기애 국립수산과학원에서 이러한 용승현상으로 인한 냉수대 경보가 발령되었다(National Institute of Fisheries Science 2013). 이러한 급격한 해수면온도의 하강이 남풍에 의한 용승현상이 그 원인이었음을 증명하기 위해 2013년 6월부터 7월까지 포항에서 관측된 바람자료를 분석하였다.



**Fig. 12. Comparison of SST products with buoy data during the events of significant SST changes due to upwelling at Pohang in July 2013**

그 결과, 남풍계열의 강한 바람이 6월 말부터 강하게 불기 시작하여 7월 중순까지 지속되었고, 이 때 해수면온도 하강이 동시에 발생한 것을 알 수 있다(Fig. 14).

용승으로 인한 해수면온도의 하강을 자세히 살펴보기 위해 용승이 지속적으로 발생한 2013년 7월 15일에 해수면온도 자료들의 공간분포를 비교하였다(Fig. 15). 그림에서 보면, 앞서 시계열 분석 결과와는 달리 동해안에서 용승에 의한 해수면 하강이 FNMOC-M, HYCOM, JCOPE, FNMOC-S, 그리고 G1SST에서 잘 나타난다. 그러나 부이와 연안관측소 자료에서 관측된 10°C 이상의 강한 냉수대는 모의하지 못하였다. 전반적으로 보면, 모델 재분석장이 위성자료에 비해 용승 현상을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 이것은 연안 가까이 위치하고 수온의 변동 폭이 커서

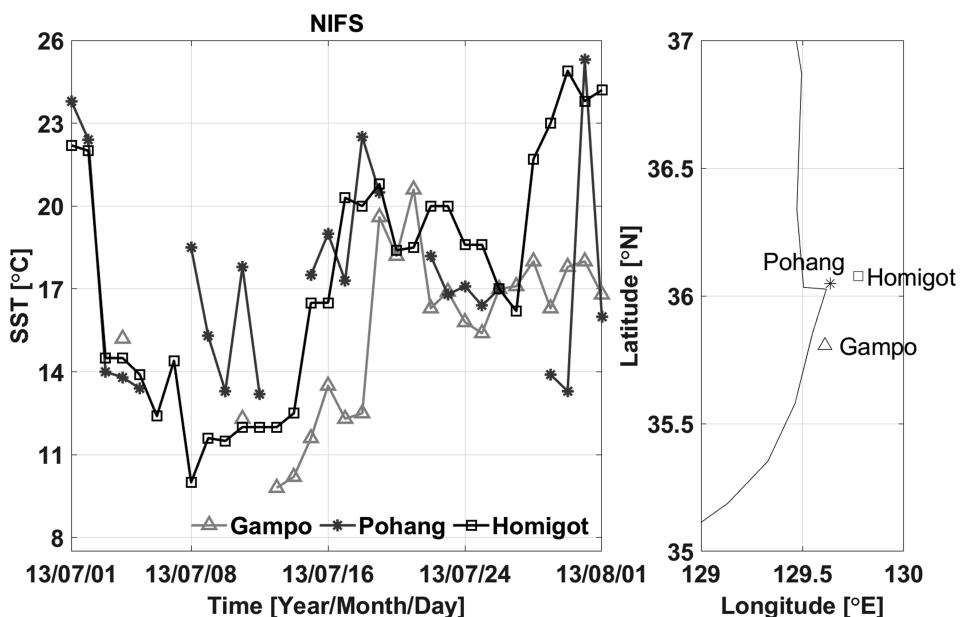


**Fig. 14. Comparison of time series between SST (red line) and v-component of surface wind (blue line) at Pohang buoy from June to July, 2013**

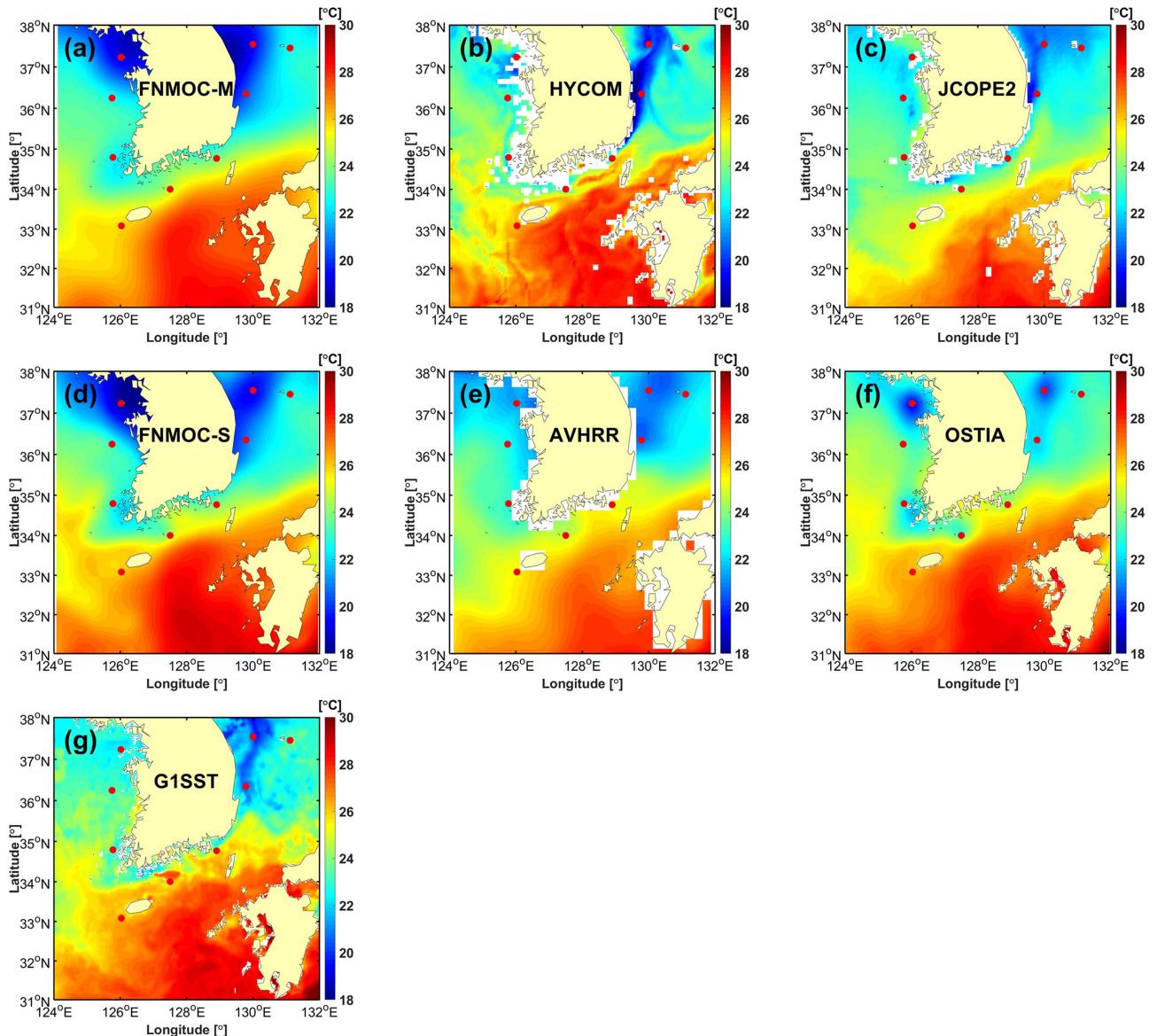
위성에서 잘 탐지하지 못하는 용승 지역을 수치모델에서는 역학적으로 어느 정도 재현될 수 있기 때문이다.

#### 배경장 오류의 영향

덕적도와 칠발도 부이에서는 5월에서 9월까지 약 4개월 간 일부 자료에서 관측값과 5°C 이상의 차이가 연속적으로 나타난다(Fig. 2, Fig. 3E–G, Fig. 16). 특히, HYCOM, JCOPE2 그리고 AVHRR에서 이러한 경향이 뚜렷이 보인다. G1SST는 2012년(Fig. 16a)에 비교적 관측값과 유사하



**Fig. 13. Time series of SST at three NIFS coastal stations, Gampo, Pohang, and Homigot, in July 2013, when a sudden SST drop was observed due to coastal upwelling**



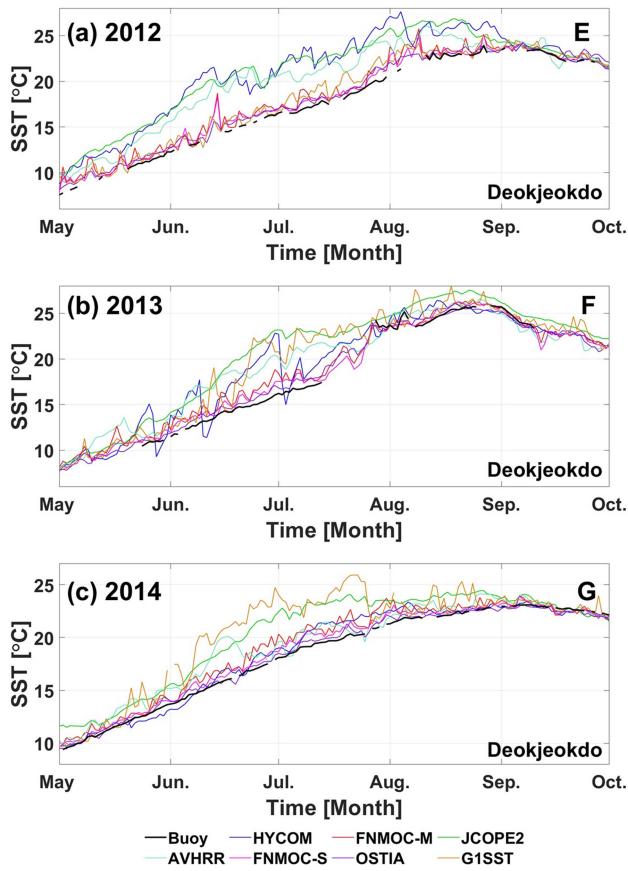
**Fig. 15. Comparisons of spatial SST distributions among (a) FNMOC-M, (b) HYCOM, (c) JCOPE2, (d) FNMOC-S, (e) AVHRR, (f) OSTIA, and (g) G1SST on July 15, 2013, when a significant SST drop was observed due to coastal upwelling**

게 모의하였지만 2013년(Fig. 16b), 2014년(Fig. 16c)에는 큰 오차를 보여, 일관성 없는 결과를 보였다.

이렇게 장기간에 걸쳐 해수면온도의 오차가 지속적으로 크게 발생하는 것은 자료동화나 위성자료 합성 시에 사용되는 배경장의 오류와 관련이 있다. 일반적으로 자료동화 및 합성장에 사용되는 해수면온도 자료의 배경장은 전 날의 결과를 바탕으로 이루어진다(Martin et al. 2012). 따라서 잘못 추정된 해수면온도 자료는 다음 날의 배경장을 오염시키고, 이것은 그 다음 날의 배경장을 다시 오염시켜 그 지역에서 연속적으로 오차를 유발하는 것으로 사료된다.

앞서 덕적도와 칠발도 부이 지역은 조석혼합에 의한 냉수대가 여름철에 나타나지만 일부 모델에서 이를 잘 재현하지 못함을 보였다. 성충이 발달하는 5월부터 조석혼합을 고려하지 못한(주로 과대추정됨) 이러한 자료들은 그 다음 날의 배경장으로 사용되어 위성에서 관측된 정상적인 자료들(즉 냉수대)을 오차로 여겨 제거한다. 이러한 과정은 성충이 깨지는 9월까지 지속되는 것으로 여겨진다.

FNMOC-S, FNMOC-M, 그리고 OSTIA 자료는 이러한 배경장의 오류로 인한 오차는 상대적으로 낮았다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 이 자료들이 조석혼합의 효과를



**Fig. 16. Comparison of SST products with buoy data from spring to summer (May to September) at (a) Deokjeokdo in 2012, (b) Deokjeokdo in 2013, and (c) Deokjeokdo in 2014. These long-lasting errors are related to those of the background fields used in data assimilation**

어느 정도 고려할 수 있어 배경장으로 사용된 해수면자료의 정확도가 높았기 때문으로 사료된다. 실제로 조석혼합이 강하게 나타났던 2012년 7월 1일의 해수면온도 자료의 공간분포를 보면(Fig. 17), 이 자료들은 조석혼합으로 발생한 냉수대를 현실적으로 재현하고 있지만 나머지 자료들은 냉수대를 거의 재현하지 못하였다.

#### 관측자료 결측의 영향

FNMOC-S, FNMOC-M, 그리고 OSTIA 자료가 덕적도와 칠발도에서 다른 자료에 비해 상대적으로 조석혼합 및 배경장 오류에 의한 오차가 적은 것은 해수면온도의 합성 및 자료동화 시에 부이 자료를 포함한 현장관측(*in situ*) 자료를 이용하여 보정하기 때문이다(Martin et al. 2012). 특히, FNMOC-S 자료는 현장관측 자료를 이용한 보정을 가장 강하게 하고, OSTIA도 FNMOC-S보다 약하지만 현장관측 자료를 이용한 보정이 이루어지는 것으로 알려져

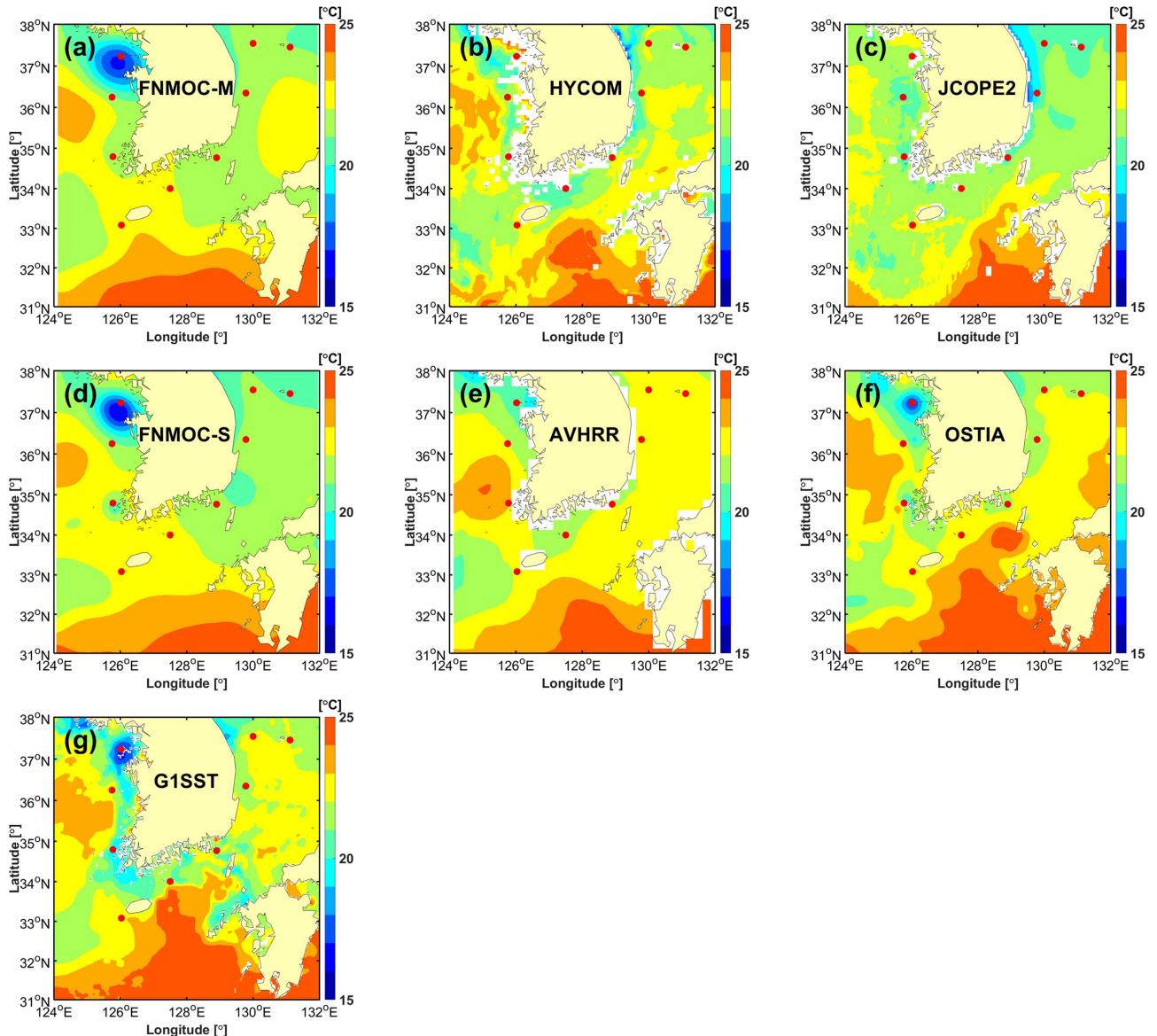
있다(Reynolds and Chelton 2010). 이렇게 현장관측이 비교적 풍부한 연안에서 현장관측 자료를 잘 활용할 경우, 연안에서 시공간적으로 특이하게 변화하는 현상을 잘 재현할 수 있는 장점이 있다. 그러나 FNMOC-S와 같이 현장관측 자료에 크게 의존할 경우, 현장관측 자료의 결측 시에 심각한 오차가 발생할 수 있다.

Fig. 18은 현장관측 자료가 존재하지 않았을 때 FNMOC-S와 FNMOC-M에서 갑자기 5°C 이상 해수면온도가 증가한 예를 보여준다. 먼저, 덕적도 사례를 보면 (Fig. 18a), 2011년 1월 말부터 2월 말까지 현장관측 자료가 존재하지 않았고, 이 기간에 FNMOC-S와 FNMOC-M 자료에서 갑자기 해수면온도가 1.2°C에서 7.2°C로 약 6°C 증가하였다. 다른 자료들에서는 이러한 현상이 나타나지 않았고, 이 시기에 다른 특별한 기상현상이 관측되지 않았음을 고려하면, 이러한 갑작스런 수온의 증가는 FNMOC-S의 위성자료 합성 시에 현장관측 자료를 이용하여 보정하는 과정에서 오류가 발생한 것으로 사료된다. FNMOC-M은 FNMOC-S를 자료동화에 사용하기 때문에 같은 문제가 발생한 것으로 사료된다. 이렇게 겨울철과 봄철에 걸쳐 현장관측 자료의 결측 시에 오류 값이 나타나는 현상은 외연도와 칠발도 부이에서도 나타난다(Fig. 18b-c). 칠발도 부이의 경우는 현장관측 자료의 결측이 두 달 이상 지속되는 동안 FNMOC-S와 FNMOC-M 이외에도 OSTIA 자료가 3월 중순부터 4월 중순까지 비슷하게 갑자기 온도가 증가하는 현상이 나타났다. 이러한 결과는 위성자료의 합성 시에 현장관측 자료를 이용한 보정을 강하게 할 경우, 변동성이 강한 연안에서 해수면온도의 정확도를 높이는 데 도움이 되지만, 현장관측 자료가 존재하지 않는 경우에는 치명적인 오류를 산출할 수 있어 이를 보완할 수 있는 알고리즘개발이 필요함을 시사한다.

#### 5. 결론 및 토의

본 연구는 한반도 주변 해역에서 2011년에서 2016년까지 널리 사용되는 위성합성 및 수치모델 재분석 해수면온도 자료를 현장관측 부이자료를 이용하여 그 정확도를 조사하였다. 분석결과, 위성합성 해수면온도 자료 중에서는 OSTIA가 가장 낮은 Bias와 RMSE를 보였고, 그 다음으로 FNMOC-S가 좋은 정확도를 보였다. G1SST와 AVHRR은 상대적으로 다른 자료들에 비해 큰 오차를 보였다. 모델재분석 자료 중에서는 FNMOC-M이 가장 낮은 오차를 보였고, 그 다음으로 HYCOM, JCOPE2 순서로 오차가 낮았다.

계절별로 보면, 오차는 봄에서 여름으로 가면서 증가하여 7월에 최대값을 가지고 가을에 다시 감소하는 뚜렷한 계절변동을 보였다. 이렇게 평균적으로 여름철에 오차가

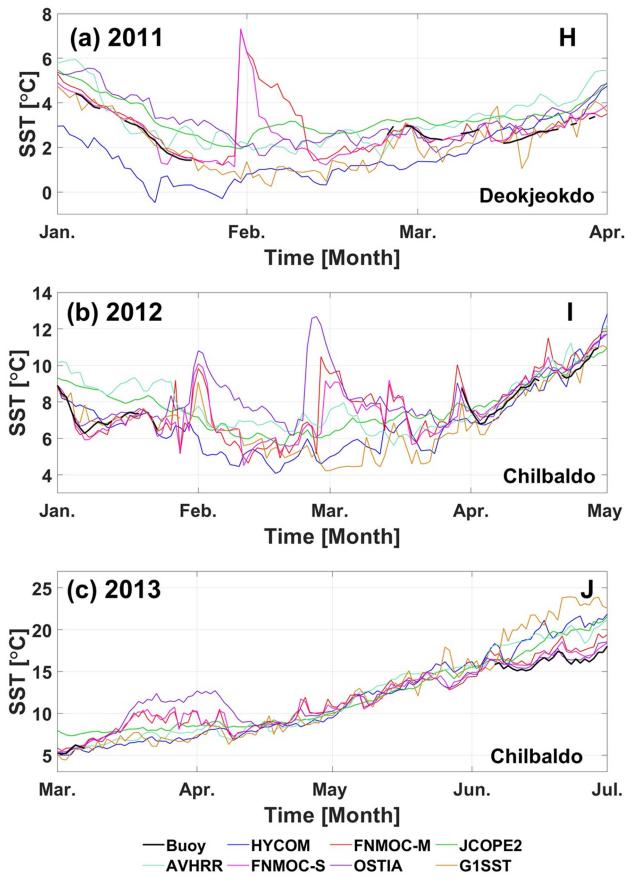


**Fig. 17. Comparisons of spatial SST distributions among (a) FNMOC-M, (b) HYCOM, (c) JCOPE2, (d) FNMOC-S, (e) AVHRR, (f) OSTIA, and (g) G1SST on July 1, 2012, when a large error related to the background fields was found**

증가하는 이유는 해수면온도의 절대값 증가, 성층화로 인한 수온의 수직 변동성 증가, 연안에서 조석혼합으로 인한 공간적인 변동성 증가, 그리고 위성관측 자료의 결측에 영향을 주는 구름과 비의 증가 등으로 사료된다. 지점별로 보면, 수심이 낮고 조석이 강한 칠발도와 덕적도에서 오차가 가장 컼고, 수심이 비교적 깊고 조차가 크지 않은 동해 및 제주부근에 위치한 포항, 마라도, 동해, 울릉도에서 상대적으로 오차가 낮았다.

한반도 연안에서 해수면온도 자료의 정확도를 결정하는 요인은 크게 두 가지로 요약된다. 첫째, 어떠한 입력자료

가 합성 및 자료동화에 사용되는 것이다. 예를 들면, AVHRR가 위성합성 해수면온도 자료 중에서 RMSE와 상관도 평가에서 가장 낮은 정확도를 보인 것은 AVHRR가 마이크로웨이브 센서자료를 사용하지 않고, 적외센서로부터 산출된 해수면온도 자료만 사용했기 때문으로 분석된다. 실제로 한반도 연안에서는 구름이 낀 날의 수가 많아 적외센서 자료만 사용할 경우 자료의 결측이 더 많이 발생하고, 이를 메워서 격자화하는 과정에서 오차가 더 커지게 된다. FNMOC-M의 경우는 정확도 높은 FNMOC-S 자료가 동화에 사용되어 FNMOC-S와 유사한 높은 정확



**Fig. 18. Comparison of SST products with buoy data at (a) Deokjeokdo in 2011 winter, (b) Chilbaldo in 2012 winter, and (c) Chilbaldo in 2013 spring. These events (particularly, for FNMOC-M, FNMOC-S, and OSTIA) are related to missing buoy data used in assimilation**

도를 가진 것으로 사료된다. 둘째, 알고리즘의 품질보정 방법의 차이이다. 다시 말하면, 어느 지역에서 기후값의 범위를 크게 초과하는 자연적인 수온변동이 생겼을 때 알고리즘이 이를 정상적인 자료로 받아들이는가 아니면 오류로 여겨 제거하는 가의 차이이다. 실제로 많은 알고리즘에는 다양한 원인으로 발생된 오염 자료를 제거하기 위하여 기후값에 비해 어느 이상(예를 들면,  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  이상) 수온 차이가 발생할 경우 이를 오류로 분류하여 제거한다. 예를 들면, G1SST의 경우, 1 km의 가장 높은 공간해상도를 가질 뿐 아니라 가장 많은 입력자료를 사용하지만 이 때문에 더 엄격한 품질 보정방법이 사용되어 한반도 근해에서 더 많은 자료를 오류로 분류하는 것으로 나타났다. 반면, FNMOC-S/M와 OSTIA는 현장에서 관측된 부이자료들을 품질보정에 이용하여 정상 자료의 오류 분류를 최소화할 뿐 아니라 이를 동화하여 보다 현실적인 해수면온도 자료를 생성하는 것으로 나타났다.

한반도 연안에서 해수면온도의 오차가 커지는 원인은 크게 조석, 용승, 태풍, 배경장 오류, 관측자료 결측 등의 영향으로 분류할 수 있다. 조석은 성층이 강한 봄과 여름철에 수심이 얕고 조류가 강한 지역에서 해수를 수직 혼합시켜 해수면온도를 급격하게 하강시키는 역할을 한다. 특히, 조석이 강한 칠발도 부이에서 대조(만조) 시기에 큰 폭으로 하강하는 해수면온도를 대부분의 자료에서 재현하지 못하였다. 조석에 의한 해수면온도의 하강을 상대적으로 가장 잘 재현한 자료는 FNMOC-S/M로 나타났다.

태풍은 강한 바람으로 상층 해양을 혼합시켜 해수면온도를 급격히 하강시킨다. 특히, 태풍이 자주 통과하는 제주도와 남해안 지역에서 태풍 시기에 이러한 해수면온도의 하강이 잘 관측되었다. 태풍에 의한 해수면온도의 하강은 JCOPE2와 G1SST를 제외한 대부분의 자료들에서 잘 재현되었다. G1SST의 경우에는 2012년 태풍 Bolaven의 통과 시기에 마라도 근처에서 발생한 급격한 해수면온도의 하강 현상을 모두 오류로 인식하여 주변 보다 더 높은 기후값으로 대체하여 비현실적인 분포를 나타내었다.

해수면온도 자료의 배경장은 자료동화 및 합성장에 생성에 사용되는 기초자료로 주로 전 날의 결과를 이용한다. 따라서 잘못 추정된 해수면온도 자료는 다음 날의 배경장을 오염시키고, 이것은 또 다시 그 다음 날의 배경장을 다시 오염시키는 악순환이 발생한다. 이러한 연속적인 배경장 오류는 덕적도와 칠발도 부이에서 5월부터 9월 사이에 HYCOM, JCOPE2, AVHRR, G1SST 자료에서 뚜렷이 나타났다. FNMOC-S, FNMOC-M, OSTIA 자료들의 이러한 배경장의 오류로 인한 오차는 상대적으로 낮았다. 그러나 이 세 자료들(특히, FNMOC-S, FNMOC-M)은 부이자료가 결측 되었을 때, 특히 겨울과 봄에 외연도와 칠발도 부이에서, 갑자기 비현실적으로 높은 수온을 발생시켰다. 그 이유는 이 자료들이 위성자료의 합성 시에 현장관측 자료를 이용한 보정을 강하게 하기 때문으로 사료된다. 향후 현장관측 자료의 결측 시에 발생하는 이러한 알고리즘의 문제는 보완이 필요해 보인다.

이상의 결과를 종합하면, 널리 사용되는 위성합성 및 모델재분석 해수면온도 자료 중에는 때에 따라 그 오차가  $5^{\circ}\text{C}$  이상이 나타나는 경우도 있으며, 특히 여름철에 조석과 용승이 강하게 발생하는 지역에서 오차가 커짐을 확인하였다. 또한 자료에 따라 오차가 봄부터 여름까지 장기간 지속되는 양상도 관측되었다. 따라서 연구자는 해수면온도 자료를 사용할 때에 각각의 자료에 대한 오차 특성을 먼저 파악한 후에 그 목적에 맞게 사용하여야 한다. 예를 들면, 위성합성 해수면온도 자료를 태풍 시기의 해양 수치모델의 결과와 비교하거나 조류가 강한 지역에서 수치모델 결과와 비교할 때에는 특히 주의를 요한다. 본 연구 결과는 향후 위성합성장 및 모델재분석장 해수면온도의

생성 및 개선 시에 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 사 사

이 논문은 2018학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었습니다.

## 참고문헌

- Chassignet EP, Hurlburt HE, Smedstad OM, Halliwell GR, Hogan PJ, Wallcraft AJ, Baraille R, Bleck R (2007) The HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system. *J Mar Syst* **65**:60–83
- Cummings JA (2011) Ocean data quality control. In: Schiller A, Brassington GB (eds) Operational oceanography in the 21st century. Springer, Dordrecht, pp 91–121
- Donlon CJ, Minnett PJ, Gentemann C, Nightingale TJ, Barton IJ, Ward B, Murray MJ (2002) Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research. *J Climate* **15**:353–369
- Gentemann CL, Wentz FJ, Mears CA, Smith DK (2004) In situ validation of tropical rainfall measuring mission microwave sea surface temperatures. *J Geophys Res* **109**(C4):C04021. doi:10.1029/2003JC002092
- Jeong Y-Y, Moon I-J, Kim S-H (2013) A study on upper ocean response to typhoon Ewiniar (0603) and its impact. *Atmosphere* **23**:205–220
- Kim S-D, Choi S-H, Park J-Y, Park S-Y (2015) Data standardization for research ocean-data management and standard proposal of physical oceanographic data. *Ocean Polar Res* **37**(4):249–263
- Kim H-Y (2017) Characteristics of sea surface temperature errors in the seas around Korea using GCOM-W1/AMSR2. M.S. Thesis, Seoul National University, 41 p
- Ko E-B, Moon I-J, Jeong Y-Y, Chang P-H (2018) A comparison of accuracy of the ocean thermal environments using the daily analysis data of the KMA NEMO/NEMOVAR and the US Navy HYCOM/NCODA. *Atmosphere* **28**:1–14
- Korea Meteorological Administration (2013) Guidelines for marine meteorological observations. Korea Meteorological Administration, Seoul, 100 p
- Lin I, Liu WT, Wu CC, Wong GT, Hu C, Chen Z, Liu KK (2003) New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone. *Geophys Res Lett* **30**(51):1–4
- Martin M, Dash P, Alexander I, Banzon V, Beggs H, Brasnett B, Cayula J-F, Cummings J, Donlon C, Gentemann C, Grumbine R, Ishizaki S, Maturi E, Reynolds RW, Roberts-Jones J (2012) Group for high resolution SST (GHRSST) analysis fields inter-comparisons Part 1. A GHRSST multi-product ensemble (GMPE). *Deep-Sea Res Part II* **77**:21–30
- Miyazawa Y, Yamagata T (2003) The JCOPE ocean forecast system. In: First ARGO Science Workshop, Tokyo, 12–14 Nov 2003
- Moon I-J, Oh IS, Murty T, Yoon YH (2003) A study on the cause of the unusual coastal flooding generated by typhoon Winnie along the western coast of Korea. *Nat Hazards* **29**(3):485–500
- Moon I-J, Kwon SJ (2012) Impact of upper-ocean thermal structure on the intensity of Korean peninsular landfall typhoons. *Prog Oceanogr* **105**:61–66
- National Institute of Fisheries Science (2013) News flash for abnormal sea conditions: Alert on abnormal cold water near Homigot. [https://www.nifs.go.kr/bbs?id=seastate&flag=pre&boardIdx=342&view\\_gubn=cms&viewChk=1](https://www.nifs.go.kr/bbs?id=seastate&flag=pre&boardIdx=342&view_gubn=cms&viewChk=1) Accessed 13 Mar 2019
- Park K-A, Sakaida F, Kawamura H (2008) Oceanic skin-bulk temperature difference through the comparison of satellite-observed sea surface temperature and in-situ measurements. *J Kor Remote sensing* **24**(4):273–287
- Reynolds RW, Rayner NA, Smith TM, Stokes DC, Wang W (2002) An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J Climate* **15**(13):1609–1625
- Reynolds RW, Zhang HM, Smith TM, Gentemann CL, Wentz F (2005) Impacts of in situ and additional satellite data on the accuracy of a sea surface temperature analysis for climate. *Int J Climatol* **25**:857–864
- Reynolds RW, Smith TM, Liu C, Chelton DB, Casey KS, Schlax MG (2007) Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *J Climate* **20**:5473–5496
- Reynolds RW, Chelton DB (2010) Comparisons of daily sea surface temperature analyses for 2007–08. *J Climate* **23**(13):3545–3562
- Ricciardulli L, Wentz FJ (2004) Uncertainties in sea surface temperature retrievals from space: Comparison of microwave and infrared observations from TRMM. *J Geophys Res* **109**(C12):C12013. doi:10.1029/2003JC002247
- Seung YH, Chung JH, Park YC (1990) Oceanographic studies related to the tidal front in the mid-Yellow Sea off Korea: physical aspects. *J Korean Soc Oceanogr* **25**(2):84–95
- Shang S, Li L, Sun F, Wu J, Hu C, Chen D, Shang S (2008) Changes of temperature and bio-optical properties in the South China Sea in response to Typhoon Lingling. 2001. *Geophys Res Lett* **35**(10):L10602. doi:10.1029/2008GL033502

- Shay LK, Black PG, Mariano AJ, Hawkins JD, Elsberry RL (1992) Upper ocean response to Hurricane Gilbert. *J Geophys Res* **97**:227–247
- Stammer D, Wentz F, Gentemann C (2003) Validation of microwave sea surface temperature measurements for climate purposes. *J Climate* **16**(1):73–87
- Stark JD, Donlon CJ, Martin MJ, McCulloch ME (2007) OSTIA: An operational, high resolution, real time, global sea surface temperature analysis system. In: *Oceans 2007 - Europe*, Aberdeen, 18–21 Jun 2007
- Xie J, Zhu J, Li Y (2008) Assessment and inter-comparison of five high-resolution sea surface temperature products in the shelf and coastal seas around China. *Cont Shelf Res* **28**:1286–1293

Res **28**:1286–1293

#### **Author's Information**

##### **You-Hyun Baek**

Ph.D. Candidate, Jeju National University

##### **Ii-Ju Moon**

Professor, Jeju National University

---

*Received Jun. 17, 2019*

*Revised Nov. 14, 2019*

*Accepted Nov. 18, 2019*