creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

석사학위논문

한국 기상청과 미해군 해양순환예측시스템의 수온 분석장 정확도 비교

제주대학교 대학원

해양기상학 협동과정

고 은 별

2018년 8월

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

한국 기상청과 미해군 해양순환예측시스템의 수온 분석장 정확도 비교

지도교수 문 일 주

고 은 별

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2018年 6月

고은별의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 _____
위　　원 _____
위　　원 _____

제주대학교 대학원

2018年　6月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

A Comparison of Accuracy of the Analyzed Ocean Temperature Data of the KMA and the US Navy Ocean Circulation Prediction System

Eunbyeol Ko
(Supervised by professor Il-Ju Moon)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of science.

2018 . 08.

This thesis has been examined and approved.

Interdisciplinary Postgraduate Program
in Marine Meteorology

GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

목 차

List of Figures ····· ii
List of Tables ····· iv
Abstract ····· v

Ⅰ. 서론 ····· 1
Ⅱ. 자료 및 방법 ····· 4
2.1 모델 구성 및 차이 ····· 4
2.2 관측자료 및 분석방법 ····· 8
Ⅲ. 수온모의에 대한 모델 정확도 ····· 12
3.1 열대 태평양 ····· 12
3.2 북서태평양 ····· 21
3.3 한반도 근해 ····· 32
Ⅳ. 토의 ····· 38
Ⅴ. 요약 및 결론 ····· 40

참고문헌 ····· 43

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

List of Figures

Fig. 1. Locations of (a) TAO buoy, (b) JMA vessel observation line and (c) KMA ocean buoy. ····· 8

Fig. 2. Comparisons between the KMA NEMO and the US Navy HYCOM for mean (a) Bias, (b) RMSE and (c) R at each TA.....

O buoy. The black and gray lines represent NEMO and HYCOM, respectively. ····· 13

Fig. 3. Time series for daily mean SST of the KMA NEMO and the US Navy HYCOM, and buoy at the two TAO buoys, (a, c) 23 and (b, d) 10, from March 2015 to February 2016 and the differences (c, d) between model and buoy. ····· 15

Fig. 4. Monthly variation of mean Bias (dashed line) and RMSE (bold line) estimated using the total 24 TAO buoy data. The black and gray lines represent NEMO and HYCOM, respectively. ····· 16

Fig. 5. Comparisons between the KMA NEMO (black) and US Navy HYCOM (gray) for mean Bias (dashed line) and RMSE (bold line) at each TAO buoy, which are estimated according to depth using vertical temperature profile. ····· 18

Fig. 6. Comparisons between monthly mean SST estimated using eight TAO buoys located at Nino 3.4 region and model-simulated mean SST at the same locations from March 2015 to February 2016. The black and gray lines represent NEMO and HYCOM, respectively. The open circles present the TAO buoy. ····· 20

Fig. 7. Same as in Fig. 5, but at the six JMA vessel observation lines. ···· 23

Fig. 8. Distributions of (a) vertical water temperatures along the JMA vessel observation line A from April 18 to 23 2015, and their differences with (b)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

KMA NEMO and (c) US Navy HYCOM. ····· 26
Fig. 9. Same as in Fig. 8, but at the JMA vessel observation line B from May 14 to 22 2015. ····· 27
Fig. 10. Same as in Fig. 8, but at the JMA vessel observation line C from June 20 to July 13 2015. ····· 28
Fig. 11. Same as in Fig. 8, but at the JMA vessel observation line D from June July 23 to August 13 2015. ····· 29
Fig. 12. Same as in Fig. 8, but at the JMA vessel observation line E from February 25 to 4 March 2016. ····· 30
Fig. 13. Same as in Fig. 8, but at the JMA vessel observation line F from February 6 to 11 2016. ····· 31
Fig. 14. Time series for daily mean SST of the KMA NEMO and the US Navy HYCOM, and buoy at the two KMA ocean buoys, (a, c) Ulleungdo and (b, d) Pohang buoy, from March 2015 to February 2016, and the differences (c, d) between model and buoy. ····· 33
Fig. 15. Same as in Fig. 4, but using the eight KMA ocean buoys. ····· 34
Fig. 16. Same as in Fig. 9, but at the two KMA ocean buoys, (a) Deokjeokdo and (b) Geomundo buoy, during the winter season (December 2015 to February 2016). ····· 35
Fig. 17. Spatial distributions of SST from (a) KMA NEMO, (b) US Navy HYCOM and (c) FNMOC satellite on 20 January 2016. The red X and O symbols represent the location of Deokjeokdo and Geomundo buoy. The contour interval is 2.0°C. ····· 37

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

List of Tables

Table 1. Comparison between the KMA NEMO and the US Navy HYCOM for grid system and resolution, data assimilation method, atmospheric forcing, vertical coordinate and mixing schemes and air-sea flux exchange parameterization method. ····· 6

Table 2. Types and sources of data assimilated in the KMA NEMO and the US Navy HYCOM. ····· 7

Table 3. Locations and observation periods for the six JMA vessel observation lines. ····· 10

Table 4. Comparisons between the KMA NEMO and the US Navy HYCOM for the mean RMSE, Maximum RMSE, and depths with the maximum RMSE estimated using the TAO buoy data. ····· 19

Table 5. Comparisons between the KMA NEMO and the US Navy HYCOM for the mean RMSE, Maximum RMSE, and depths and bias when RMSE is the maximum, which are estimated using the JMA vessel observation data from surface to 1000m. ····· 22

Table 6. Comparisons between the KMA NEMO and the US Navy HYCOM for mean Bias, RMSE, and correlation coefficient (R) estimated using the KMA ocean buoy data. ····· 32

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Abstract

In this study, the accuracy of the two ocean analysis data, which are produced from the Korea Meteorological Administration (KMA) Nucleus for European Modelling of the Ocean/Variational Data Assimilation (NEMO/NEMOVAR, hereafter KMA NEMO) system and the United States (US) HYbrid Coordinate Ocean Model/Navy Coupled Ocean Data Assimilation (HYCOM/NCODA, hereafter US Navy HYCOM) system, was evaluated using various oceanic observation data from March 2015 to February 2016. The evaluation was made for the water temperature in the tropical Pacific, the western North Pacific, and the Korean peninsula. Overall results reveal that the KMA NEMO generally outperformed the US Navy HYCOM in the three regions. Particularly, for the Tropical Atmosphere Ocean project (TAO) buoys, the accuracy of the KMA NEMO for both the sea surface temperature and vertical water temperature profile was about two times higher than that of the US Navy HYCOM. For the Japan Meteorological Administration (JMA) vessel observation data in the western North Pacific, which were not used for data assimilation, the RMSE (Root Mean Square Error) of the KMA NEMO profiles up to 1000m (0.49°C) was much lower than that of the US Navy HYCOM (0.73°C). For the KMA Ocean buoys around the Korean peninsula, the errors of the two models were large in the winter and small in the summer, but their differences in RMSE were small (NEMO, 0.61°C; HYCOM, 0.72°C). The differences in the accuracy between the KMA NEMO and the US Navy HYCOM for the water temperature may be attributed to horizontal and vertical resolutions of the models, vertical coordinate and mixing scheme, data quality control system, data used for data assimilation, and atmosphere forcing. These findings can be used as basic information before the KMA NEMO becomes the operational model of the KMA, which

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

provides real-time ocean analysis and prediction data for regional ocean modeling and typhoon-ocean coupled predictions.

Key words: NEMO, HYCOM, ocean analysis data, accuracy, water temperature

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅰ. 서론

해양은 뛰어난 열 저장 능력 때문에 태양복사에너지의 일부를 흡수 및 축적하고, 잠열의 형태로 대기에 열을 이동 시키게 된다. 해양은 대기와 열 교환뿐만 아니라 운동량, 물, 이산화탄소 등의 다양한 물리량과 물질을 교환하면서 전지구적인 날씨, 생태, 및 기후에 영향을 미친다. 바람을 통해 대기에서 해양으로의 수송된 운동량은 해표면에 풍파와 해류를 발생 시키고 이로 인해 해양의 온도 분포가 변화한다. 이러한 해양의 온도변화는 대기에 다시 영향을 미쳐 바람과 날씨를 변화시키게 된다. 이처럼 해양과 대기는 일방적으로 영향을 미치는 관계로 맺어져 있지 않고 상호작용 관계에 있다. 특히, 해양은 대기에 비해 온도의 보존성과 지속성이 크기 때문에 장기간에 걸쳐 대기에 영향을 줄 수 있어 기상의 장기변화나 기후변동에 큰 영향을 미친다(Kim et al., 2013). 이러한 해양의 영향력으로 인하여 해양 상태를 정확하게 모의하는 해양자료의 중요성이 증대되고 있다.

최근 인공위성과 ARGO (Array for Real-time Geostrophic Oceanography)를 이용한 해양관측 기술발달의 영향으로 해양관측자료가 획기적으로 증가하게 되었고, 해양자료동화 및 해양예측 수치모델링 기술의 발달로 해양의 모의와 예측은 빠른 속도로 발전하고 있다. 기상 및 기후에 미치는 해양의 영향력 때문에 세계 각국에서는 해양을 더 잘 이해하고 해양 모의 및 예측 기술을 높이기 위하여 다양한 연구를 진행하고 있다(Kim et al., 2005). 영국 기상청(Met Office)은 유럽연합에서 개발한 Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO) 해양모델 기반으로 해양자료동화 예측시스템을 구축하여 전지구적인 해양예측뿐 아니라 지중해 및 유럽 연안을 대상으로 지역 해양예측을 현업에 활용하고 있다. 호주는 연방과학원, 호주기상청, 그리고 해군이 공동으로 Modular Ocean Model (MOM) 기반의 전지구 해양예측모델과 자료동화체계를 구축하여 다양한 해양정보를 해양생태계, 선박운항 및 해군 작전 등 다양한

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

분야에 활용하고 있다. 미국은 대학과 연구소에서 독자적으로 여러 해양모델들을 개발하여 사용 중에 있으며, 특히 그 중에서 군용 목적으로 필요한 해양정보를 생산하기 위해 미해군 연구소에서 전지구 자료동화시스템(HYbrid Coordinate Ocean Model/Navy Coupled Ocean Data Assimilation, HYCOM/NCODA, 이후 HYCOM)을 개발하여 운용 중이다. 미해군에서 실시간으로 생산하고 있는 HYCOM의 전지구 해양 분석장 및 예측장은 전 세계적으로 단기 지역해양예측모델, 태풍-해양 접합모델, 그리고 장기 기후예측모델의 초기·경계장으로 가장 널리 사용되고 있다(Kim et al., 2013).

우리나라는 기상청, 국립수산과학원, 국립해양조사원, 한국해양과학기술원에서 해양예측모델 및 자료동화에 관한 다양한 기술을 개발하고 있다. 특히, 기상청 산하 국립기상과학원에서는 영국 기상청과 함께 NEMO 기반의 자료동화체계(Variational Data Assimilation, NEMOVAR)인 전지구 해양순환예측시스템(NEMO/NEMOVAR, 이후 NEMO)을 개발하여 기상청 계절예측시스템(Global Seasonal Forecast System 5, GloSea5)의 해양초기장으로 활용하고 있다.

본 연구에서는 한국 기상청의 전지구 해양순환예측시스템에서 생산된 해양분석장의 정확도를 다양한 관측자료를 이용하여 검증하고, 전 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 미해군 전지구 자료동화시스템의 해양분석장과 그 정확도를 비교하였다. 이 연구는 향후 기상청 전지구 해양순환예측시스템에서 생산한 해양 분석장 및 예측장을 현업에서 제공하기 전에 사용자에게 자료의 정확도를 알리고자 하는 목적도 있다. 최근, Jeong et al. (2016b)은 기상청의 해양-대기 접합모델인 GloSea5와 해양 단독모델인 NEMO의 예측결과를 이용하여 대기-해양 접합 효과가 해양예측에 미치는 영향과 열대해양과 한반도 근해에서 전지구 해양순환예측시스템의 7일 해양예측 성능을 조사하였다. 그러나 이 연구는 모델의 성능 평가가 2월과 5월에 국한되어 이루어졌을 뿐만 아니라 자료동화에 사용되지 않은 독립적인 자료를 사용하여 모델의 성능을 평가하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 총 1년간의 자료를 사용하여 계절별 모델의 정확도 변화를 조사하고 자료동화에 사용되지 않은 선박 관측자료를 이용하여 추가적으로 모델 자체의 성능을 평가하였다. 특히, 이번 평가는 기후 및 날씨에 직접적인 영향을 미치는 해수온도에 대해서만 초점을 맞추어 수행하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제 2장에서는 본 연구에 사용된 해양모델, 관측자료, 그리고 분석방법에 대해 설명하였다. 제 3장에서는 열대태평양, 북서태평양, 한반도 근해에 대해 기상청 NEMO와 미해군 HYCOM의 정확도를 평가하였다. 제 4장에서는 연구결과를 바탕으로 두 모델의 모의성능이 차이나는 원인에 대한 토의와 제 5장에서 결론 그리고 향후 연구에 대하여 기술하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅱ. 자료 및 방법

2.1 모델 구성 및 차이

한국 기상청의 해양모델 NEMO는 ORCA025L75 기반으로 수평으로 0.25°×0.25° 그리고 수직으로 75층의 해상도로 구성되어 있다(Table 1). 자료동화시스템은 3차원 변분기법(3DVAR) 기반의 NEMOVAR를 사용한다(Weaver et al., 2005). 입력자료로 사용되는 관측자료들은 NEMOQC를 이용하여 품질관리가 이루어졌다. 기상청 NEMO 모델의 외력은 기상청 전지구 예측모델(GDAPS)로부터 생산된 3시간 간격의 자료를 사용한다. 모델의 연직좌표계는 DRAKKAR (Bernie et al., 2005) 기반의 z-level 체계를 사용하며 수직혼합은 Turbulent Kinetic Energy (TKE) scheme을 사용한다(Gaspar et al., 1990).

미해군 해양모델 HYCOM은 수평으로 1/12°×1/12° 그리고 수직으로 40개층으로 이루어져 있다(Table 1). 연직좌표계는 Hybrid 체계로 이루어져 있으며(Bleck et al., 2002), 수직혼합은 K-Profile Parameterization (KPP, Large et al., 1994) 방법을 사용한다. 모델의 대기외력은 1시간 간격의 NAVGEM (Navy Global Environmental Model) 자료를 사용한다. 미해군 HYCOM의 자료동화 및 품질관리 시스템은 3차원 변분기법 기반의 NCODA를 사용한다(Cummings and Smedstad, 2013).

두 모델의 시스템에 있어서 차이는 해상도에 있으며, 수평으로는 미해군 HYCOM이, 수직으로 기상청 NEMO가 고해상도이다. 연직좌표계는 기상청 NEMO의 경우 지오포텐셜 고도를 사용하며, 미해군 HYCOM은 수심을 현실에 가깝게 재현하기 위하여 수심에 따라 다르게 적용하는 세가지 혼합 연직좌표계를 사용하는데 있어 차이가 있다(Halliwell, 2004). TKE 모수화 기법은 난류 점성과 확산을 추정하여 성층이 난류 혼합에 미치는 정도를 계산하며, KPP 모수화 기법은 표면 경계층과 해양 내부의 수직 혼합을 각각 계산하는 방식으로

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

수직혼합 모수화 기법에서도 차이를 보인다(Kwak et al., 2013).

자료동화 방법은 두 모델이 공통적으로 3DVAR를 사용하고 있으나 사용된 관측자료들(위성고도계, 해빙농도, 수온프로파일 등을 포함한 위성 및 현장관측 자료)이 차이가 있다(Table 2). 특히 위성 해수면온도 (Sea Surface Temperature, SST)와 해빙농도에서 미해군 HYCOM이 기상청 NEMO에 비해 4배 이상의 자료를 자료동화에 사용하고 있다. 조석은 두 모델 모두 직접 고려하지는 않고 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 1. Comparison between the KMA NEMO and the US Navy HYCOM for grid system and resolution, data assimilation method, atmospheric forcing, vertical coordinate and mixing schemes and air-sea flux exchange parameterization method.

Ocean Model	KMA NEMO	US Navy HYCOM
Grid system & Resolution	ORCA 0.25° L75 (Madec, 2008)	Uniform 0.08° L40 (Bleck et al., 2002)
Assimilation scheme	3DVAR (NEMOVAR, Mogensen et al., 2009)	3DVAR (NCODA, Chassignet et al., 2007)
Atmospheric forcing	KMA-NWP N512 3hourly	NAVGEM v1.3 T425L50 1hourly
Vertical coordinate	Geopotential levels using the DRAKKAR 75 level set (Bernie et al., 2005)	Hybrid (Halliwell, 2004)
Vertical mixing scheme	Turbulen kinetic energy (TKE) scheme (Gaspar et al., 1990)	The K-Profile Parameterization (KPP, Large et al., 1994; 1997)
Flux exchange	Bulk formula	Bulk formula

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 2. Types and sources of data assimilated in the KMA NEMO and the US Navy HYCOM.

Type	Source	
	KMA NEMO	US Navy HYCOM
Satellite SST	NOAA-18, MetOp-B	NOAA-18, NOAA-19, MetOp-A, MetOp-B, GOES-13, GOES-15, MeteoSat-9, Suomi-NPP VIIRS, COMS-1
In situ SST	Ships, Drifting buoy, Fixed buoy	Ships, Drifting buoy, Fixed buoy
Satellite altimeter	Jason-2, Cryosat-2	Jason-2, Cryosat-2, SARAL
Sea ice concentration	OSI-SAF	DMSP-F13, DMSP-F14, DMSP-F15, DMSP-F16, DMSP-F17, DMSP-F18
Profiles	Fixed buoy, Argo, XBT, TESAC (CTD)	Fixed buoy, Argo, XBT, TESAC (CTD), Drifting buoy

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.2 관측자료 및 분석방법

본 연구에서는 2015년 3월부터 2016년 2월까지 총 1년간 산출된 NEMO와 HYCOM의 일분석장을 관측자료와 비교하였다. 모델 검증에 사용된 관측자료는 열대 태평양의 TAO (Tropical Atmosphere Ocean project) 계류부이자료, 일본기상청 (Japan Meteorological Agency, JMA) 선박관측선의 북서태평양 수온프로파일 자료, 한반도 근해 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA) 해양기상부이(KMA 해양부이) 자료이다. 모델 검증은 수온에 대해서만 실시하였다.

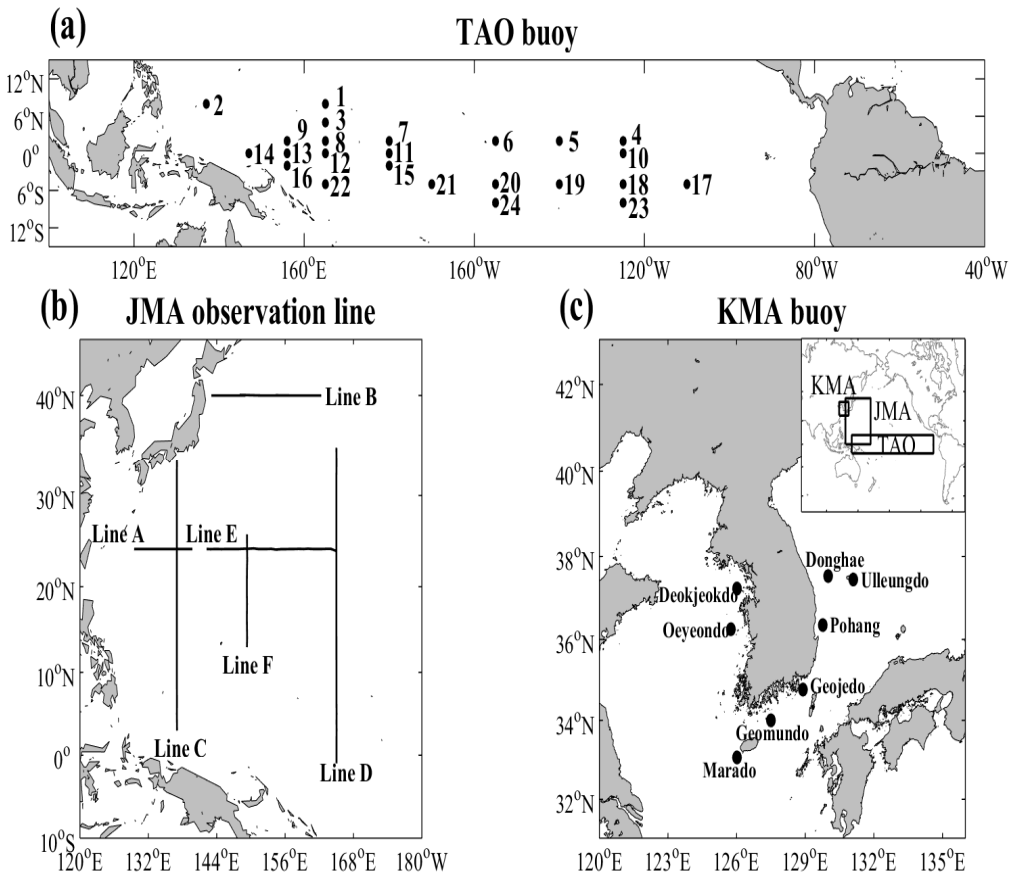

Fig. 1. Locations of (a) TAO buoy, (b) JMA vessel observation line and (c) KMA ocean buoy.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

TAO 계류부이는 열대 태평양해역(8°S-9°N, 130°E-95°W)에서 주로 ENSO (El Niño/Southern Oscillation)와 같이 열대해역에서의 기후변화를 감시하고 예측하기 위해 설치된 부이이다(Ji and Leetmaa, 1997; McPhaden et al., 2010; Chiodi and Harrison, 2017). TAO 계류부이는 약 70여개 지점에서 일평균자료를 제공하며, 그 중 본 연구에서는 수온의 계절변동성을 조사하기 위해서 해수면온도와 수온프로파일의 관측자료 개수가 360일 이상 존재하는 24개의 TAO 계류부이에 대해서만 분석을 실시하였다(Fig. 1a). TAO 계류부이 자료는 26개의 수심에서 관측된 수온을 제공하기 때문에 이 자료를 모델과 비교하기 위해서 모델의 수심을 TAO 계류부이의 관측수심에 맞게 내삽하여 사용하였다.

JMA 선박관측자료는 일본 기상청이 총 4개의 선박을 이용하여 2015년 4월부터 2016년 2월까지 북서태평양해역(125-170°E, 1°S-40°N)에서 CTD (Conductivity Temperature Depth)를 이용하여 1m 간격으로 2000m 내외까지 6개의 관측라인에서 수온프로파일을 관측한 자료이다(Table 3, Fig. 1b). 이 자료는 3-4개월 정도의 품질처리 과정을 거친 후 제공되기 때문에 실시간으로 모델 자료동화의 입력 자료로 사용할 수 없어 자료동화의 영향을 받지 않는 독립적인 모델의 검증에 사용 될 수 있다. JMA 선박관측자료도 관측수심이 모델과 다르기 때문에 모델 결과는 관측자료에 맞게 내삽하여 사용하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 3. Locations and observation periods for the six JMA vessel observation lines.

Cruise Line	Location		Observation Period	
	Latitude	Longitude	Start [YYYY/MM/DD]	End [YYYY/MM/DD]
Line A	24.0°N	129.5-142.4°E	2015/04/18	2015/04/23
Line B	40.0°N	143.0-162.3°E	2015/05/14	2015/05/22
Line C	3.0-33.6°N	137.0°E	2015/06/21	2015/07/13
Line D	1°S-35.0°N	165.0°E	2015/07/23	2015/08/16
Line E	24.0°N	140.2-165.0°E	2016/02/25	2016/03/04
Line F	13.0-25.8°N	149.0°E	2016/02/06	2016/02/11

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

기상청 해양기상부이 자료는 총 8개 지점(울릉도, 덕적도, 거문도, 거제도, 동해, 포항, 마라도, 외연도)에서 1시간 간격으로 관측된 해수면온도를 일평균한 자료이다(Fig. 1c). 이 자료는 두 모델이 한반도 연안에서 얼마나 관측과 유사하게 모의하는지를 평가하기 위해 사용되었다.

본 연구에서는 모델과 관측자료의 오차 분석과 공간적인 해수면온도 분포 양상을 파악하기 위해 추가적으로 10km의 공간 해상도로 6시간 간격으로 제공하는 FNMOC (Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center) 위성 SST 자료를 사용하였다. 참고로 FNMOC 자료는 한반도 주변의 해상부이 자료와 비교에서 다양한 위성 합성자료와 모델 재분석장들 중에 해수면온도 오차가 가장 낮은(RMSE, 0.94℃) 것으로 알려져 있다(Beak, 2016). 또한 JMA 관측선과 동일하게 FNMOC 위성자료는 자료동화에 쓰이지 않는 독립적인 자료이다.

모델의 검증은 편차(Bias), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE), 그리고 상관계수(Correlation coefficient, R)를 이용하였다.

여기서 N은 관측자료의 개수, M은 모델값, 그리고 O는 관측값을 의미한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅲ. 수온모의에 대한 모델 정확도

3.1 열대 태평양

태평양 열대해역 24개 TAO 계류부이에서 관측한 해수면온도와 연직 수온프로파일 자료를 이용하여 기상청 NEMO와 미해군 HYCOM의 정확도를 비교하였다. 먼저 1년간 두 모델의 해수면온도 시계열을 분석한 결과, 두 모델 모두 대부분의 부이에서 양의 편차(즉, 과대모의 경향)를 보이며, 그 크기는 HYCOM(0.05℃)이 NEMO(0.03℃)보다 컸다(Fig. 2a). 기상청 NEMO는 평균적으로 편차가 작을 뿐 아니라 거의 모든 지점이 양의 편차를 가지는 일관성을 보였다. 반면, 미해군 HYCOM은 평균적으로 편차의 크기가 클 뿐만 아니라 부이별로 양과 음의 편차를 가지는 경향이 혼재된 결과를 보였다. 오차도 NEMO(0.15℃)가 HYCOM(0.29℃)에 비해 상대적으로 작고(Fig. 2b), 상관계수에서도 NEMO(R=0.95)가 HYCOM(R=0.83)에 비해 높은 결과를 보여(Fig. 2c), 전체적으로 기상청 NEMO가 미해군 HYCOM보다 열대해역의 해수면온도를 더 정확하게 모의하고 있음을 알 수 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

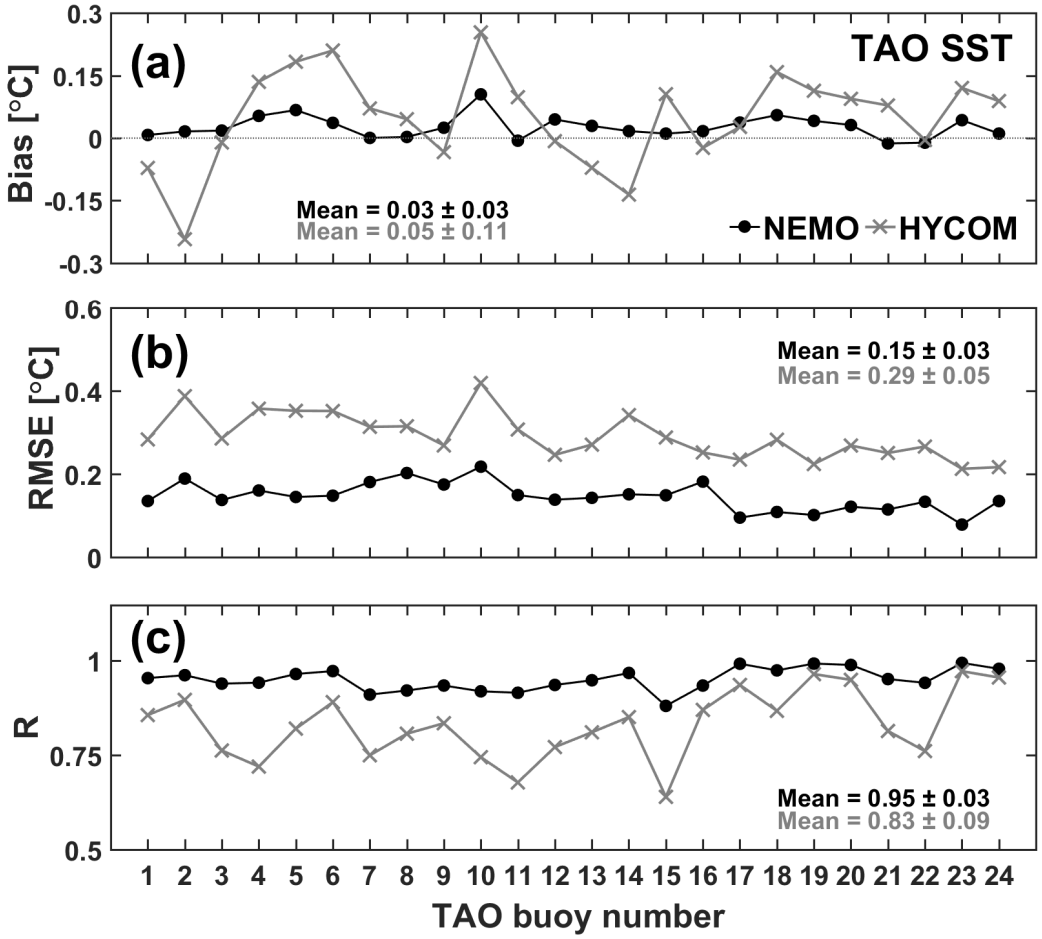

Fig. 2. Comparisons between the KMA NEMO and the US Navy HYCOM for mean (a) Bias, (b) RMSE and (c) R at each TAO buoy. The black and gray lines represent NEMO and HYCOM, respectively.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

두 모델에서 오차가 가장 큰 10번 부이와 가장 작은 23번 부이의 시계열을 분석한 결과(Fig. 3), 모델의 오차 크기는 부이별 시계열의 단기 변동성의 크기에 의존하는 것으로 나타났다. 즉 오차가 작았던 23번 부이에서는 단기변동의 진동폭이 작았지만(Fig. 3c), 1~2주 사이에 온도가 1℃이상 크게 변화하는 큰 진동폭을 보인 10번 부이에서는 오차가 크게 나타났다(Fig. 3d). 특히, 미해군 HYCOM은 이러한 변동의 시점을 잘 맞추지 못할 뿐 아니라 변동을 과대모의하는 경향을 보여 기상청 NEMO보다 더 큰 오차를 유발한 것으로 사료된다. 10번 부이에서는 흥미롭게도 연평균 해수면온도에 비해 2℃이상 낮은 26℃이하의 찬 해수가 나타나 3월 초에 급격하게 상승하는 현상이 관측되었다(Fig. 3b). 이러한 급격한 수온 상승은 2015년 봄부터 강화되기 시작한 엘니뇨의 영향 또는 북적도 해류의 남북방향 이동과 관련된 것으로 생각된다. 이 시기에 두 모델은 이러한 급격한 수온변동을 매우 정확하게 모의하였다. 모든 부이의 오차를 월별로 평균하여 계절별 오차특성 변화를 비교한 결과(Fig. 4), 두 모델의 오차는 9월에 가장 낮았고 1월에 가장 큰 값을 보였다. 그러나 두 모델의 오차와 편차에서 뚜렷한 계절적인 변화 특성은 보이지 않았다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

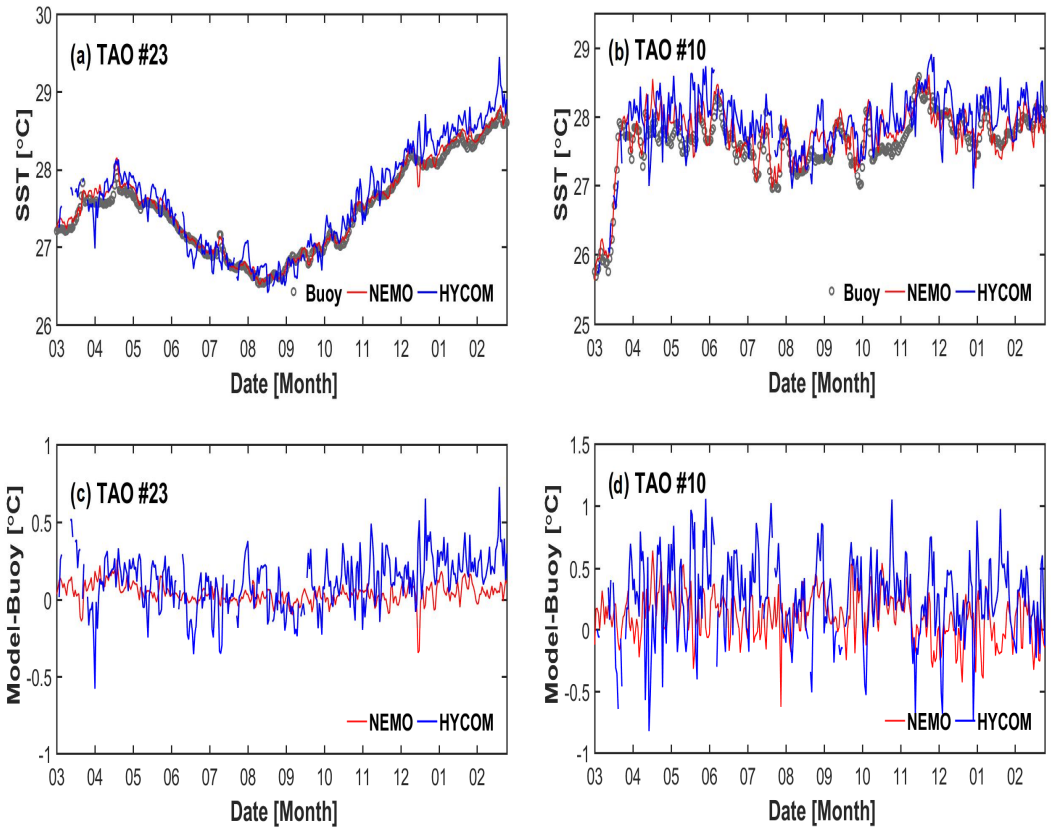

Fig. 3. Time series for daily mean SST of the KMA NEMO and the US Navy HYCOM, and buoy at the two T

AO buoys, (a, c) 23 and (b, d) 10, from March 2015 to February 2016 and the differences (c, d) between model and buoy.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

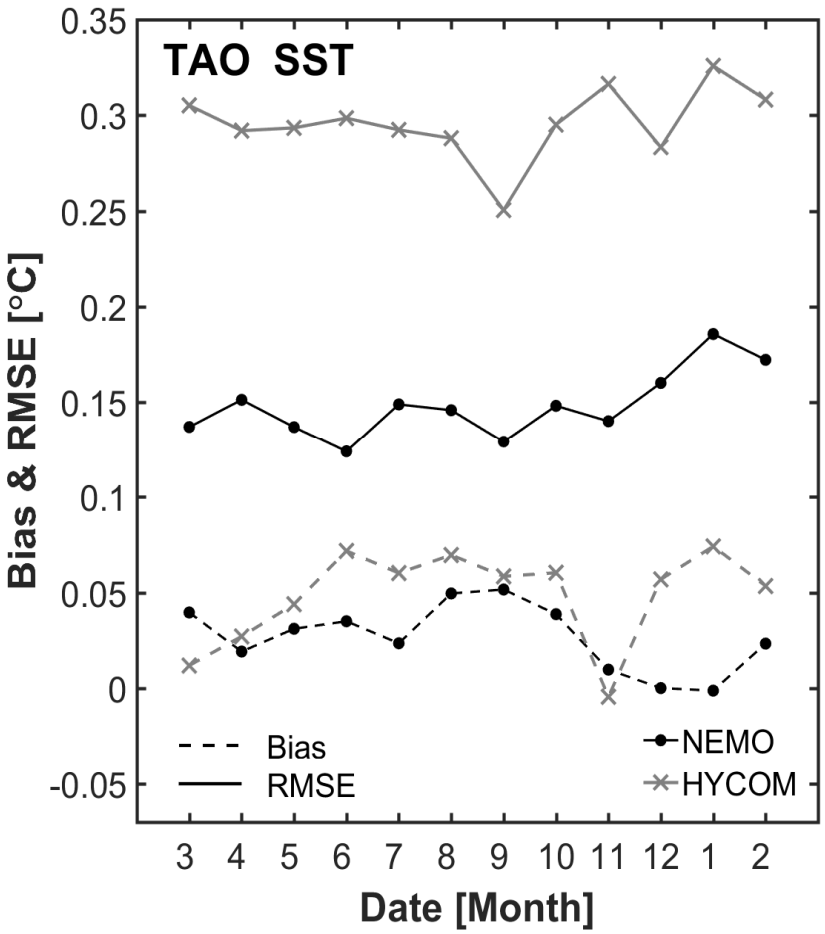

Fig. 4. Monthly variation of mean Bias (dashed line) and RMSE (bold line) estimated using the total 24 TAO buoy data. The black and gray lines represent NEMO and HYCOM, respectively.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

TAO 계류부이에서는 해수면온도뿐만 아니라 연직 수온프로파일을 제공하고 있어 수심별로 두 모델의 수온프로파일 오차를 조사하였다(Fig. 5, Table 4). 모든 부이에서 최대 오차는 온도변화가 급격히 발생하는 수온약층 깊이(100~200m)에서 나타났다. 부이별로 500m 수심까지 1년간 평균한 오차를 보면, 미해군 HYCOM(0.71℃)이 기상청 NEMO(0.36℃)보다 평균적으로 두 배 가량 크게 나타났다. 앞서 SST에서 가장 큰 오차를 보였던 10번 부이는 수직프로파일 오차에서도 가장 큰 오차(HYCOM=1.01℃, NEMO=0.54℃)를 보였다. 수온약층에서 가장 큰 오차가 발생한 부이는 기상청 NEMO 경우 2번(1.18℃) 그리고 미해군 HYCOM의 경우 5번(2.60℃)으로 나타났다. 수심별 수온분석에서도 계절에 따른 평균오차 변화는 두 모델 모두 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

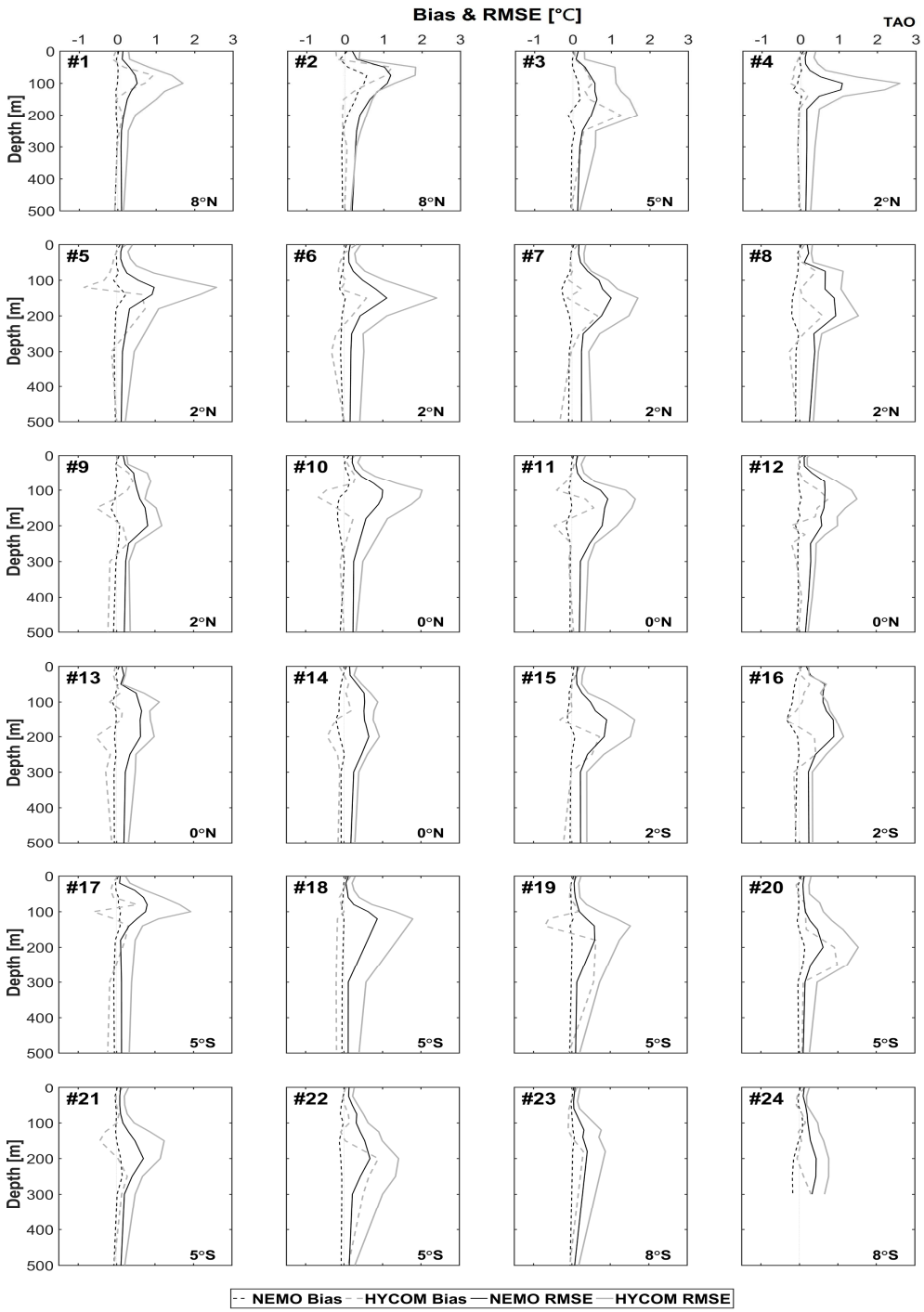

Fig. 5. Comparisons between the KMA NEMO (black) and US Navy HYCOM (gray) for mean Bias (dashed line) and RMSE (bold line) at each TAO buoy, which are estimated according to depth using vertical temperature profile.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 4. Comparisons between the KMA NEMO and the US Navy HYCOM for the mean RMSE, Maximum RMSE, and depths with the maximum RMSE estimated using the TAO buoy data.

Buoy Number	Mean RMSE [°C]		Max. RMSE [°C]		Depth with Max. RMSE [m]	
	NEMO	HYCOM	NEMO	HYCOM	NEMO	HYCOM
1	0.23	0.72	0.51	1.30	100	100
2	0.55	0.73	1.18	1.83	75	50
3	0.33	0.86	0.72	1.67	150	200
4	0.39	0.94	1.09	2.58	100	100
5	0.35	0.98	0.98	2.60	120	120
6	0.36	0.84	1.11	2.40	150	150
7	0.46	0.77	1.02	1.71	150	150
8	0.48	0.74	0.94	1.53	200	200
9	0.41	0.61	0.81	1.18	200	200
10	0.54	1.01	1.01	2.03	100	100
11	0.45	0.79	0.94	1.65	125	125
12	0.36	0.63	0.67	1.50	100	125
13	0.36	0.55	0.65	1.11	125	100
14	0.37	0.54	0.65	0.92	200	200
15	0.40	0.75	0.91	1.63	150	150
16	0.49	0.58	0.90	1.15	200	200
17	0.38	0.83	0.80	1.93	80	100
18	0.26	0.66	0.87	1.79	120	120
19	0.22	0.62	0.60	1.52	180	140
20	0.23	0.68	0.62	1.53	200	200
21	0.25	0.55	0.70	1.24	200	150
22	0.32	0.72	0.68	1.42	200	200
23	0.18	0.44	0.40	0.87	180	180
24	0.26	0.48	0.44	0.76	200	200

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

엘니뇨 감시구역인 Nino 3.4 지역(5°S-5°N,170-120°W)은 활발한 대기-해양 상호작용으로 상층해양과 SST 변동성이 크기 때문에 해양모델의 성능을 조사하는 데 널리 사용된다(An and Choi, 2012; Park et al., 2015; Jeong et al., 2016a). 본 연구에서는 Nino 3.4 지역에 위치한 TAO 부이(4, 5, 6, 10, 19, 20, 21, 22번)의 해수면온도 평균값을 이용하여 두 모델의 열대해역 모의 성능을 조사하였다. 분석결과, 두 모델 모두 Nino 3.4 지역에서 SST의 계절변동을 관측값과 유사하게 잘 모의하고 있었지만 기상청 NEMO가 미해군 HYCOM에 비해 좀 더 오차가 작았다(Fig. 6).

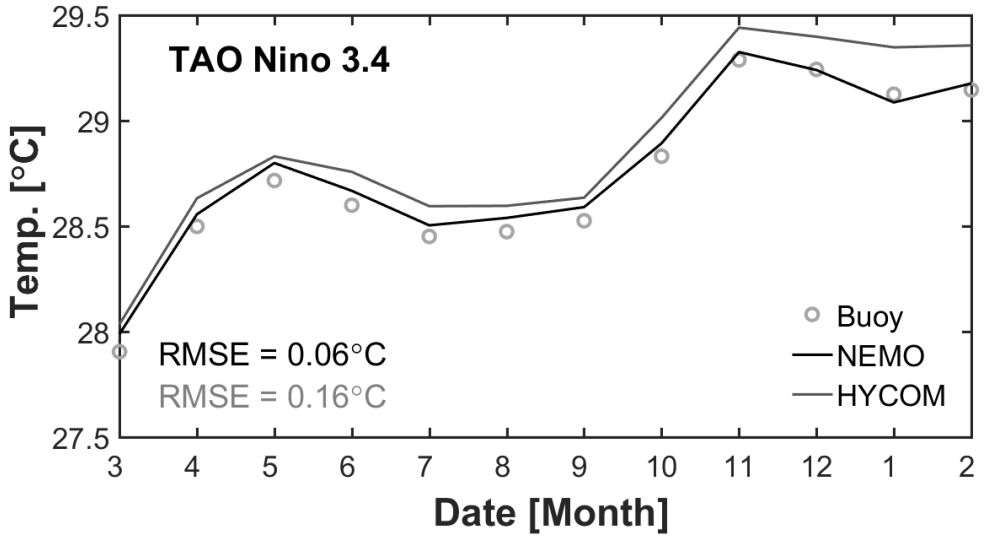

Fig. 6. Comparisons between monthly mean SST estimated using eight TAO buoys located at Nino 3.4 region and model-simulated mean SST at the same locations from March 2015 to February 2016. The black and gray lines represent NEMO and HYCOM, respectively. The open circles present the TAO buoy.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.2 북서 태평양

자료동화에 사용되지 않은 북서태평양 JMA 선박관측 자료를 이용하여 두 모델의 연직 수온프로파일 정확도를 조사하였다. 이 자료는 3.1장에서 분석한 TAO 부이 자료보다 더 깊은 수심(약 2000m)까지 관측된 자료이기 때문에 모델의 심층수온 정확도를 조사하는 데에도 유용하게 사용될 수 있다. 본 연구에서는 압력의 효과를 제거한 온위(potential temperature)를 이용하여 수온의 변화와 차이가 큰 수심 1000m까지의 수온 프로파일에 대해서 정확도를 조사하였다. JMA 선박관측자료와 기상청 NEMO는 온위 자료가 제공되나 미해군 HYCOM은 현장온도 자료만 제공되어, 본 연구에서는 현장온도를 온위로 변환한 후 사용하였다. Fig. 7은 6개의 관측라인에 대하여 수심별로 구한 편차와 오차를 나타낸다. 6개 라인에 대해 모두 평균한 오차는 기상청 NEMO(0.49℃)가 미해군 HYCOM(0.73℃)보다 약 50% 작았으며, B와 C 라인에서 가장 큰 오차를 보였다(Table 5).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 5. Comparisons between the KMA NEMO and the US Navy HYCOM for the mean RMSE, Maximum RMSE, and depths and bias when RMSE is the maximum, which are estimated using the JMA vessel observation data from surface to 1000m.

Cruise Line	Mean RMSE [℃]		Max. RMSE [℃]		Bias with Max. RMSE [℃]		Depth with Max. RMSE [m]	
	NEMO	HYCOM	NEMO	HYCOM	NEMO	HYCOM	NEMO	HYCOM
Line A	0.34	0.65	0.73	1.57	-0.30	-0.61	78	62
Line B	0.73	0.86	3.19	2.86	-0.21	-0.61	51	63
Line C	0.79	1.27	1.35	2.04	-0.02	-0.40	227	383
Line D	0.52	0.59	1.93	1.60	0.07	-0.20	163	181
Line E	0.28	0.57	1.02	1.66	-0.15	-0.56	103	104
Line F	0.28	0.44	0.73	1.28	-0.15	-0.49	112	113
Average	0.49	0.73	1.49	1.84	-0.13	-0.48	122.3	151

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

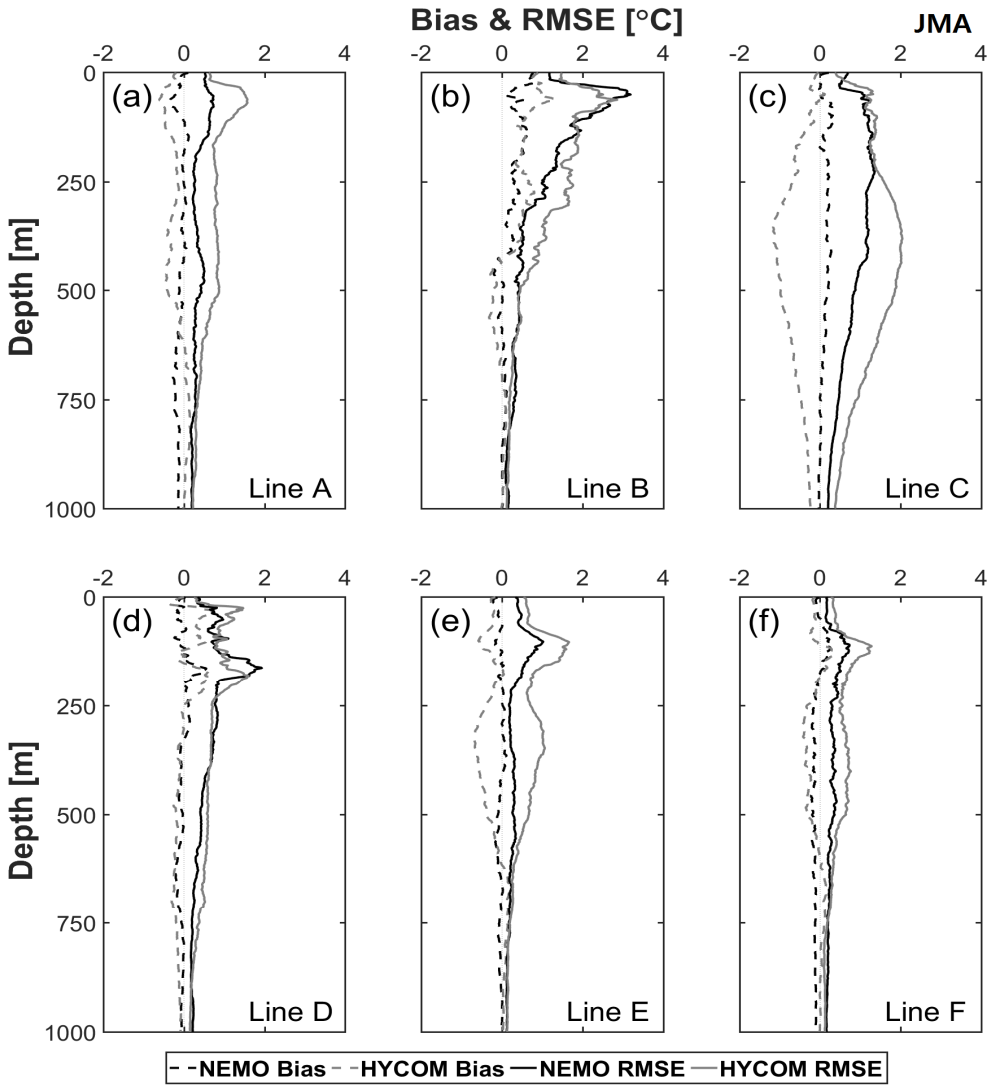

Fig. 7. Same as in Fig. 5, but at the six JMA vessel observation lines.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

JMA 선박관측자료를 이용하여 두 모델의 수온모의 성능을 조사하고자 관측라인별로 관측수온의 연직단면을 모델결과와 비교하였다(Fig. 8-13). A 라인은 두 모델이 과소·과대 모의하는 경향이 혼재되어있으며, 약 100m 이내에서 관측과의 차이가 크게 나타났다(Fig. 8). 특히 기상청 NEMO에 비해 미해군 HYCOM의 과소모의 경향이 더 컸다. B 라인은 쿠로시오 해류와 오야시오 해류가 만나 수온의 변동성이 큰 지역이다. 이곳에서 두 모델은 모두 수심 200m 이내에서 관측과 2°C 이상의 차이를 보였다(Fig. 9). 특히, 기상청 NEMO는 145°E 부근에서, 미해군 HYCOM은 160°E 부근에서 과대모의 경향이 크게 나타났다. C 라인에는 북태평양 중층수(North Pacific Intermediate Water, NPIW)가 위치한다. NPIW는 중층(수심 200m에서 1200m 사이) 염분 최소층으로 특징지어지는 북태평양의 대표적 수괴로서, 북태평양의 아한대역에서 대기와의 열·담수교환에 의해 해수특성이 결정된 이후 중층 수심으로 가라앉아 북태평양 아열대순환계를 따라 순환하는 수괴이다(Shuto, 1996; Yasuda, 1997; Min and Yim, 2015). NPIW는 또한 대기 이산화탄소를 해양에 흡수•저장하며 대기의 기후변동을 해양에서 기억·보존한다. 따라서 NPIW 지역의 모의 결과는 기후 및 해양순환 모델의 성능 평가에 널리 사용된다. 특히, 수온은 NPIW의 용존산소량과 생물생산력에 영향을 미칠 뿐 아니라 북서태평양에서 기후변화를 추적하는 유용한 지표로 사용되기 때문에(Kouketsu et al., 2007) NPIW 지역에서 수온에 대한 모델의 성능평가 결과는 그 중요성과 활용성이 크다. 기상청 NEMO는 33°N 근처에서 표층부터 심층까지 수온을 과대 모의하는 반면, 미해군 HYCOM은 30-33°N 해역에서 과소 모의가 뚜렷이 나타났다. 특히, 미해군 HYCOM은 250-400m 수심에서 과소 모의 경향이 매우 컸을 뿐 아니라(Fig. 10c) 평균오차도 기상청 NEMO 비해 상대적으로 크게 나타나(Table 5), NPIW 지역에서 열적 환경의 모의 성능이 기상청 NEMO에 비해 낮은 것으로 평가된다. 165°E 라인을 관측하는 D 라인에서는 두 모델의 평균오차 차이(0.07°C)가 크지 않았다. 다만 온도가 급격하게 변화하는 34°N 근처에 지역에서 두 모델이 관측보다 크게 모의하였다. 최대오차는 기상청 NEMO가 미해군 HYCOM에 비해 약간 크게 나타났으나, 평균오차로 비교했을 때는 기상청 NEMO가 미해군 HYCOM에 비해 오차가 작았다. E 라인은 A 라인과

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

동일한 위도(24°N)에서 관측하지만 경도가 다르다. 모델과 관측 수온과의 차이를 비교해 보면(Fig. 12), 미해군 HYCOM의 오차가 기상청 NEMO보다 약간 더 크게 나타났으며, 특히 153-161°E 해역에서 JMA 선박자료보다 과소 모의하는 경향이 뚜렷이 나타났다. F 라인에서는 기상청 NEMO가 표층부근을 잘 모의하였지만 미해군 HYCOM은 상대적으로, 특히 수심 100m 부근에서, 관측과 큰 차이가 나타났다(Fig. 13). 이상의 결과를 종합하면, JMA 선박관측자료에 대해서는 수직적으로 해상도가 높은 기상청 NEMO가 미해군 HYCOM에 비해 수온 모의 정확도가 높은 것으로 평가된다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

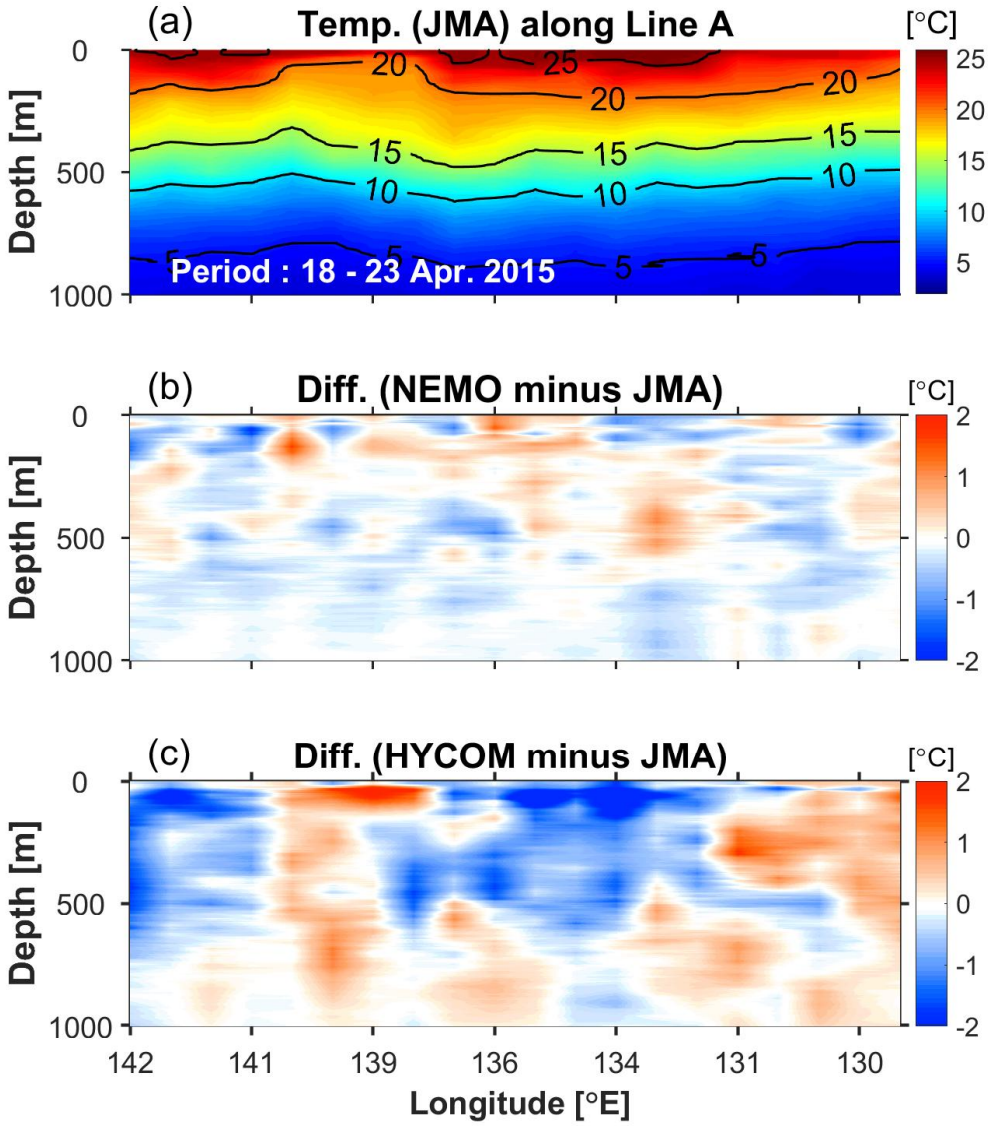

Fig. 8. Distributions of (a) vertical water temperatures along the JMA vessel observation line A from April 18 to 23 2015, and their differences with (b) KMA NEMO and (c) US Navy HYCOM.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

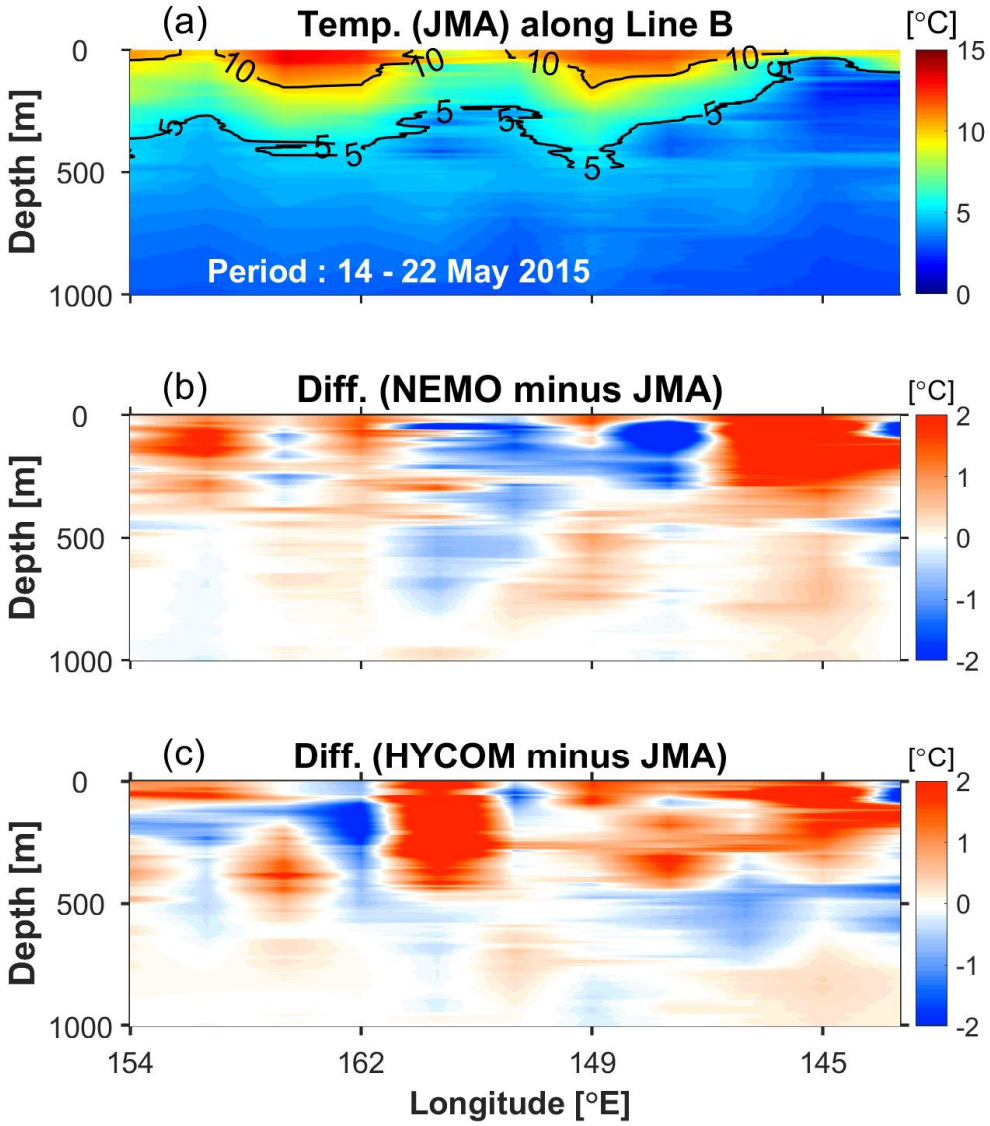

Fig. 9. Same as in Fig. 8, but at the JMA vessel observation line B from May 14 to 22 2015.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

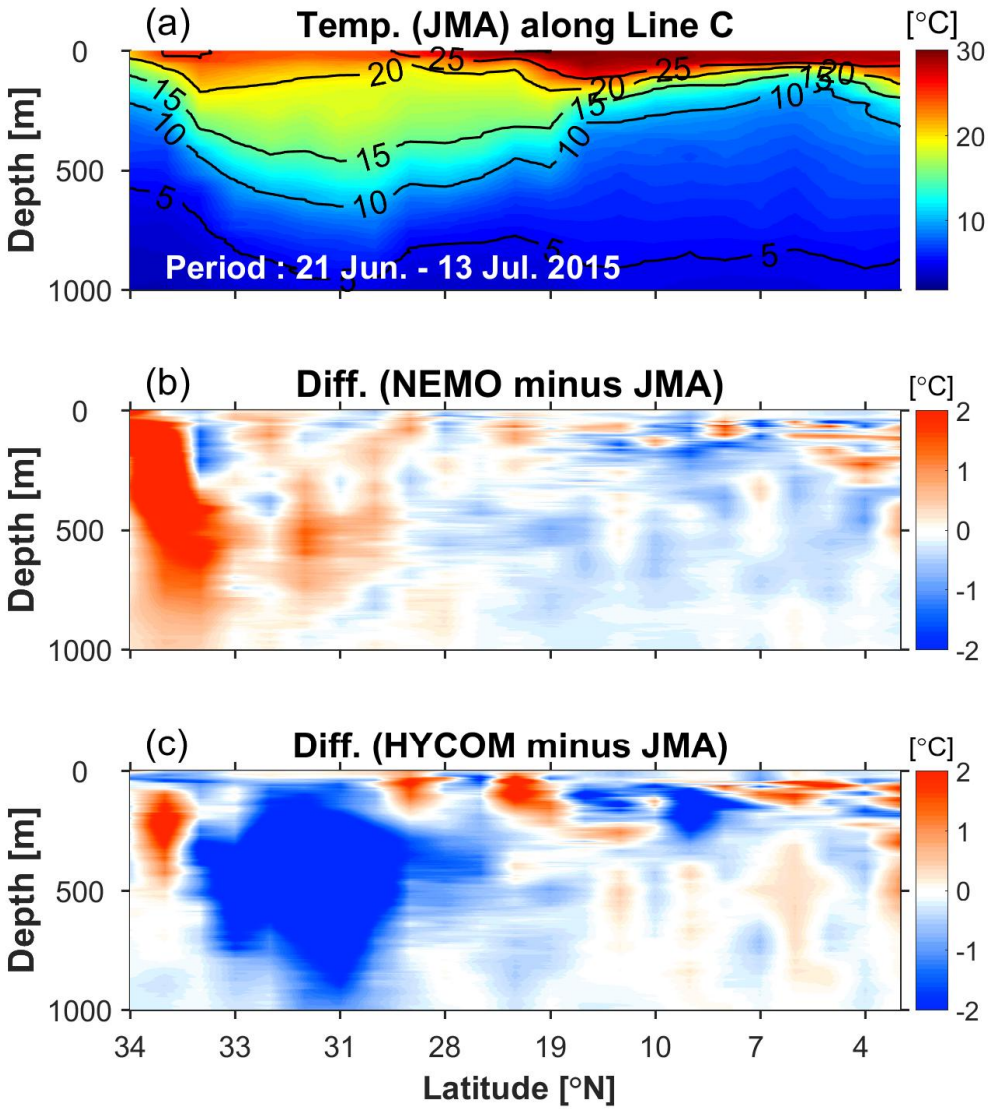

Fig. 10. Same as in Fig. 8, but at the JMA vessel observation line C from June 20 to July 13 2015.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

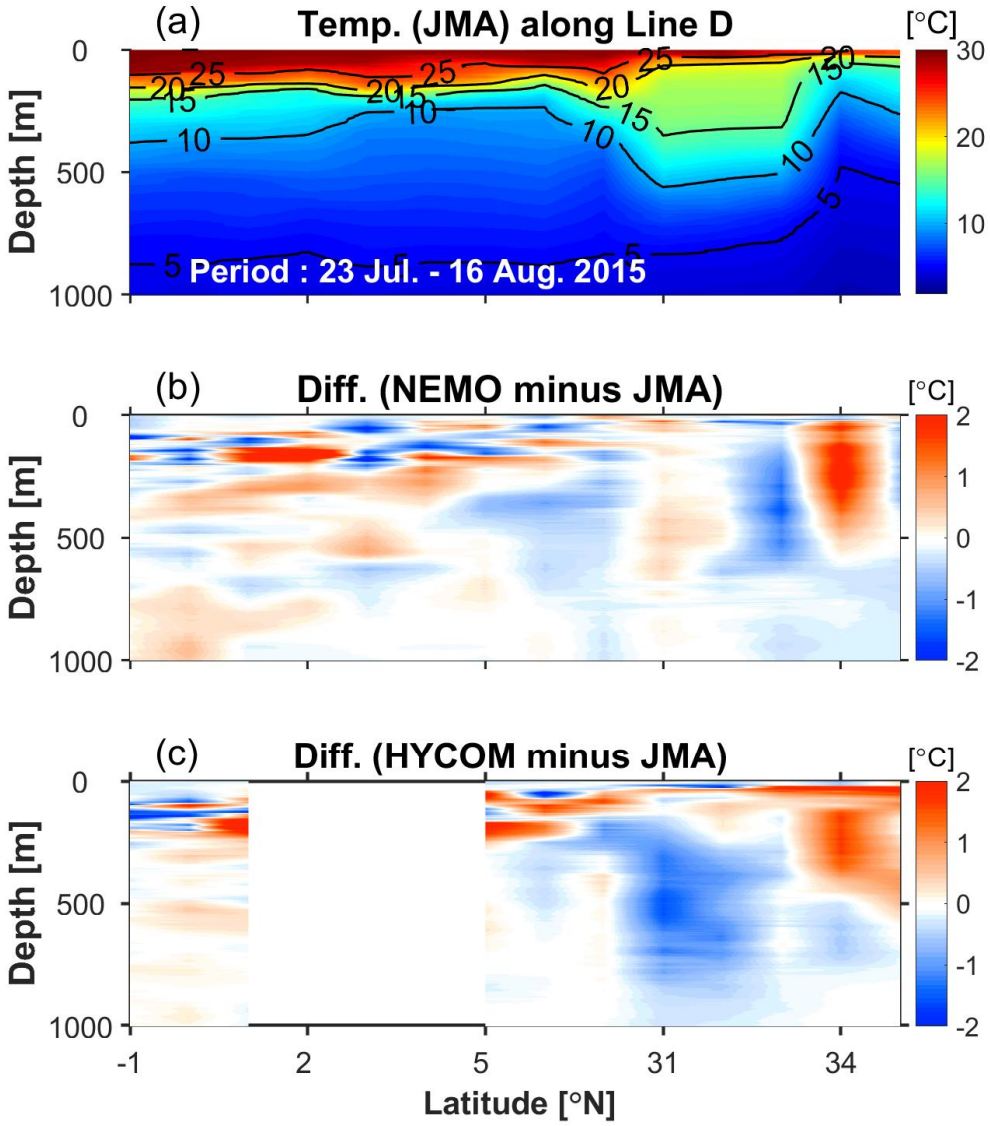

Fig. 11. Same as in Fig. 8, but at the JMA vessel observation line D from June July 23 to August 13 2015.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

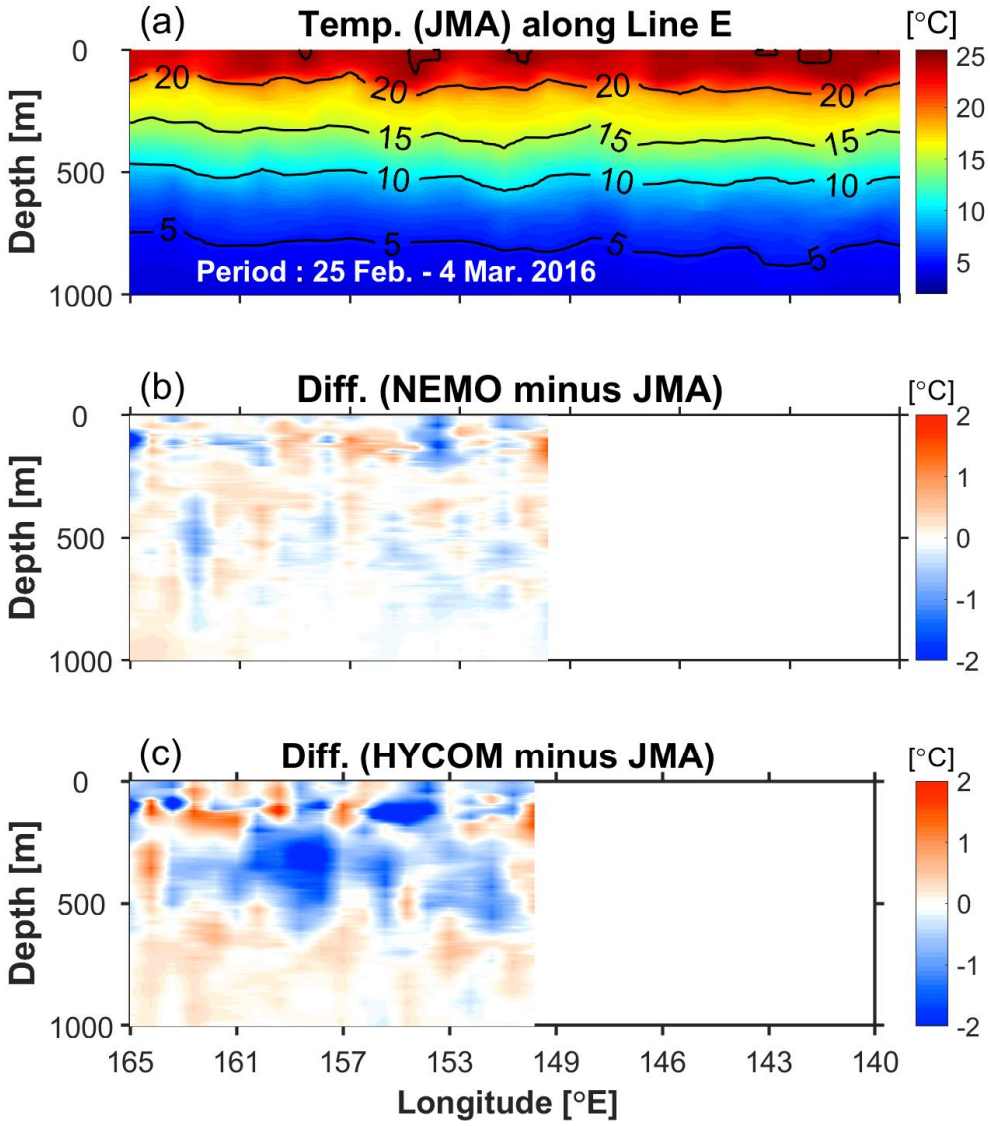

Fig. 12. Same as in Fig. 8, but at the JMA vessel observation line E from February 25 to 4 March 2016.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

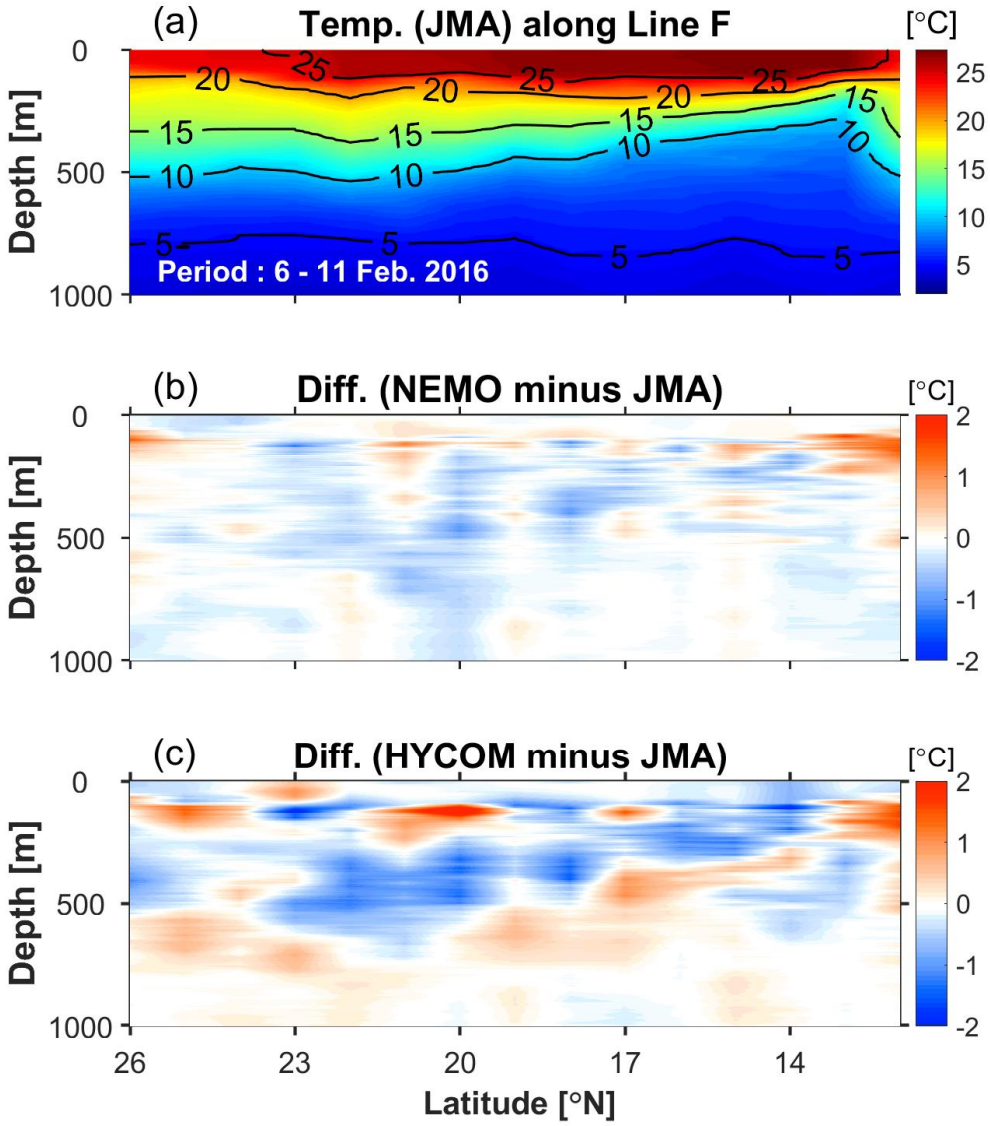

Fig. 13. Same as in Fig. 8, but at the JMA vessel observation line F from February 6 to 11 2016.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.3 한반도 근해

8개의 KMA 해양부이의 일평균 해수면온도 자료를 이용하여 기상청 NEMO와 미해군 HYCOM의 한반도 근해 해수면온도 모의 정확도를 평가하였다(Table 6). 분석결과, 두 모델의 1년간 전체 평균오차는 각각 0.61℃와 0.72℃로 큰 차이를 보이지 않았으나, 편차에서는 전반적으로 미해군 HYCOM(-0.19℃)이 기상청 NEMO(0.03℃)보다 해수면온도를 과소 모의하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 평균적으로 보았을 때, 한반도 근해에서 모델의 오차는 열대 태평양에서 보다 전반적으로 크게 나타난다. 이것은 대양에 위치한 TAO 계류부이에 비해 연안에 위치한 KMA 해양부이에서 수온의 시공간적인 변화가 크기 때문으로 사료된다.

Table 6. Comparisons between the KMA NEMO and the US Navy HYCOM for mean Bias, RMSE, and correlation coefficient (R) estimated using the KMA ocean buoy data.

Buoy	Bias [℃]		RMSE [℃]		R	
	NEMO	HYCOM	NEMO	HYCOM	NEMO	HYCOM
Ulleungdo	-0.06	-0.08	0.29	0.51	0.99	0.99
Deokjeokdo	-0.19	-0.14	0.64	0.61	0.99	0.99
Geomundo	-0.13	-0.08	0.85	0.72	0.98	0.98
Geojedo	0.41	-0.56	0.76	0.86	0.98	0.98
Donghae	-0.17	-0.16	0.60	0.87	0.99	0.98
Pohang	-0.13	-0.04	0.60	0.96	0.99	0.97
Marado	0.38	-0.22	0.82	0.71	0.98	0.98
Oeyeondo	0.09	-0.23	0.33	0.55	0.99	0.99
Average	0.03	-0.19	0.61	0.72	0.99	0.98

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

부이별로 오차를 비교해보면, 덕적도, 거문도, 마라도 부이에서는 미해군 HYCOM이 그리고 나머지 부이들에서는 기상청 NEMO의 오차가 작게 나타났다. 8개의 부이 중에 오차가 가장 작은 울릉도 부이와 가장 크게 나타난 포항 부이(특히 미해군 HYCOM)의 해수면온도 시계열과 모델과 관측의 차이를 확인한 결과(Fig. 14), 두 모델 모두 이 지역에서 10-28°C까지 변화하는 수온의 계절변동을 전반적으로 잘 모의하고 있으나, 미해군 HYCOM의 오차가 기상청 NEMO보다 크게 나타났다. 특히, 포항에서는 8, 12, 1월에 미해군 HYCOM의 오차가 2°C를 초과하는 경우가 몇 차례 발생하였다(Fig. 14d). 이는 동해안에서 용승으로 인해 발생한 급격한 해수면온도 변화를 모델이 모의하지 못하여 발 발생한 것으로 보인다.

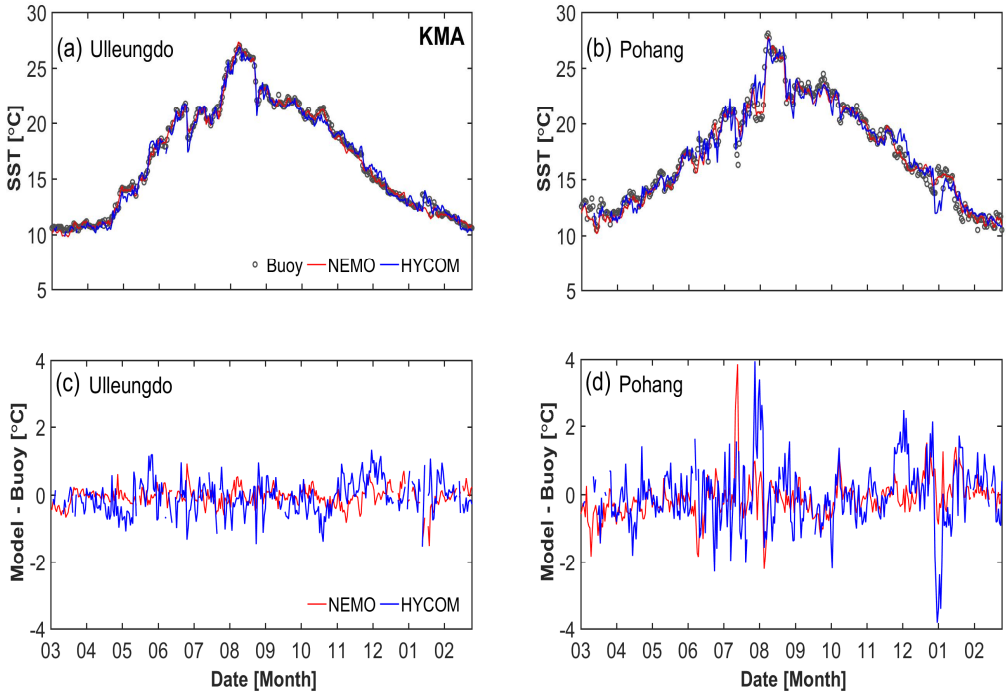

Fig. 14. Time series for daily mean SST of the KMA NEMO and the US Navy HYCOM, and buoy at the two KMA ocean buoys, (a, c) Ulleungdo and (b, d) Pohang buoy, from March 2015 to February 2016, and the differences (c, d) between model and buoy.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

월별로 모델의 편차 변동을 분석한 결과에서(Fig. 15), 기상청 NEMO는 가을철(11월)까지 양의 편차를 보이다가 겨울철에 급격하게 음의 편차로 바뀌는 계절적인 변화의 특성을 잘 나타내고 있다. 특히, 음의 편차가 가장 큰 12월과 1월에는 기상청 NEMO의 오차도 가장 큰 값을 보였다. 미해군 HYCOM 경우 모든 계절에서 과소 모의 경향이 나타났으며(특히 9월에 가장 음의 편차가 크게 나타남), 기상청 NEMO와 달리 여름철(7-8)월에 오차가 가장 크게 나타났다.

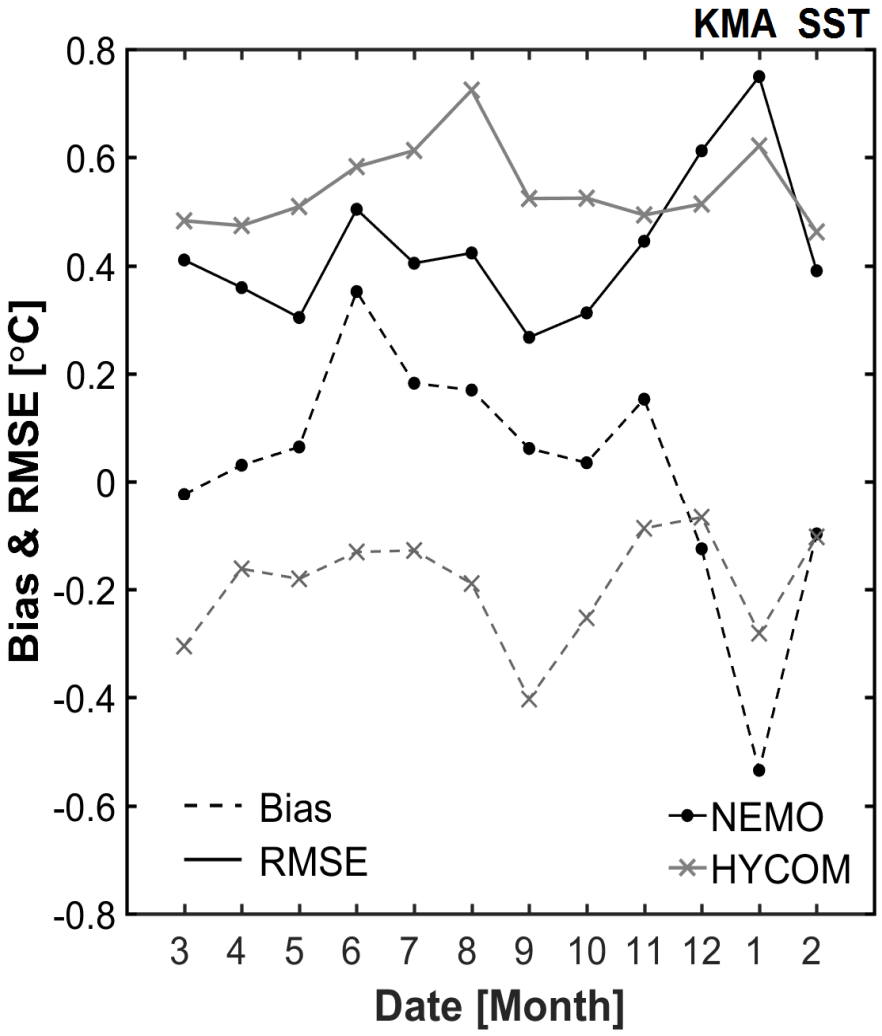

Fig. 15. Same as in Fig. 4, but using the eight KMA ocean buoys.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

기상청 NEMO의 경우 1월에 덕적도와 거문도 부이에서 오차와 과소 모의가 가장 크게 나타났다. 이 두 지점에서 겨울철(12, 1, 2월) 모델의 해수면온도를 관측값과 비교한 결과(Fig. 16), 기상청 NEMO가 전반적으로 겨울철에 해수면온도를 과소 모의하는 것이 뚜렷하게 나타난다. 이 결과는 앞서 대부분의 부이 분석결과에서 기상청 NEMO가 미해군 HYCOM에 비해 낮은 오차와 편차를 보인 것과 대조적이다. 보다 자세한 분석을 위하여 기상청 NEMO의 오차가 가장 컸던 2016년 1월 20일에 대하여 위성 FNMOC 해수면온도 자료를 이용하여 공간분포를 비교하였다(Fig. 17). 오차가 컸던 덕적도와 거문도 부근에서 기상청 NEMO가 위성자료보다 해수면온도를 과소 모의 하는 경향이 뚜렷이 보인다.

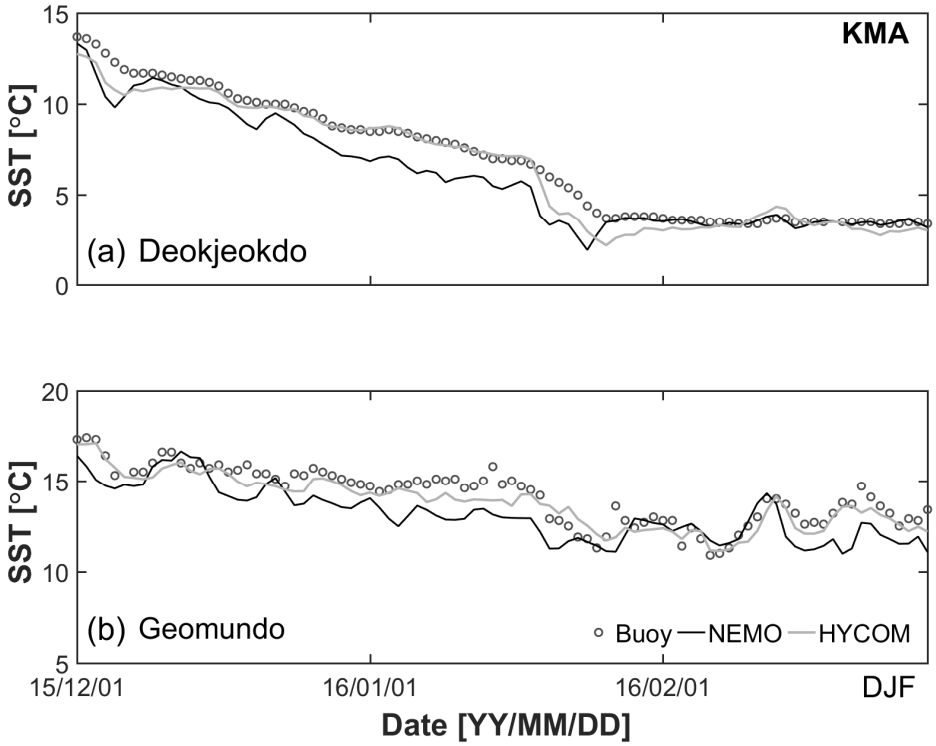

Fig. 16. Same as in Fig. 9, but at the two KMA ocean buoys, (a) Deokjeokdo and (b) Geomundo buoy, during the winter season (December 2015 to February 2016).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

덕적도 부이가 위치한 경기만 태안반도 주변 해역은 강한 조류로 인한 조석혼합으로 조석전선(Tidal front)이 발생하는 것으로 알려져 있다(Cho and Seung, 1989). 거문도 부이는 제주도 해협에 존재하는 열염 전선으로 인하여 표층 수온·염분 변화가 크게 나타나는 지역이다(Han et al., 2013). Hickox et al. (2000)은 위성 해수면온도자료를 이용하여 두 지역에서 겨울철에 뚜렷이 나타나는 전선의 존재를 보고한 바 있다. 이렇게 전선이 발생하는 지역은 공간적인 수온의 변화가 크기 때문에 수평해상도가 낮은 기상청 NEMO 모델에서는 지역 및 시기에 따라 큰 오차가 발생할 가능성 있음을 확인하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

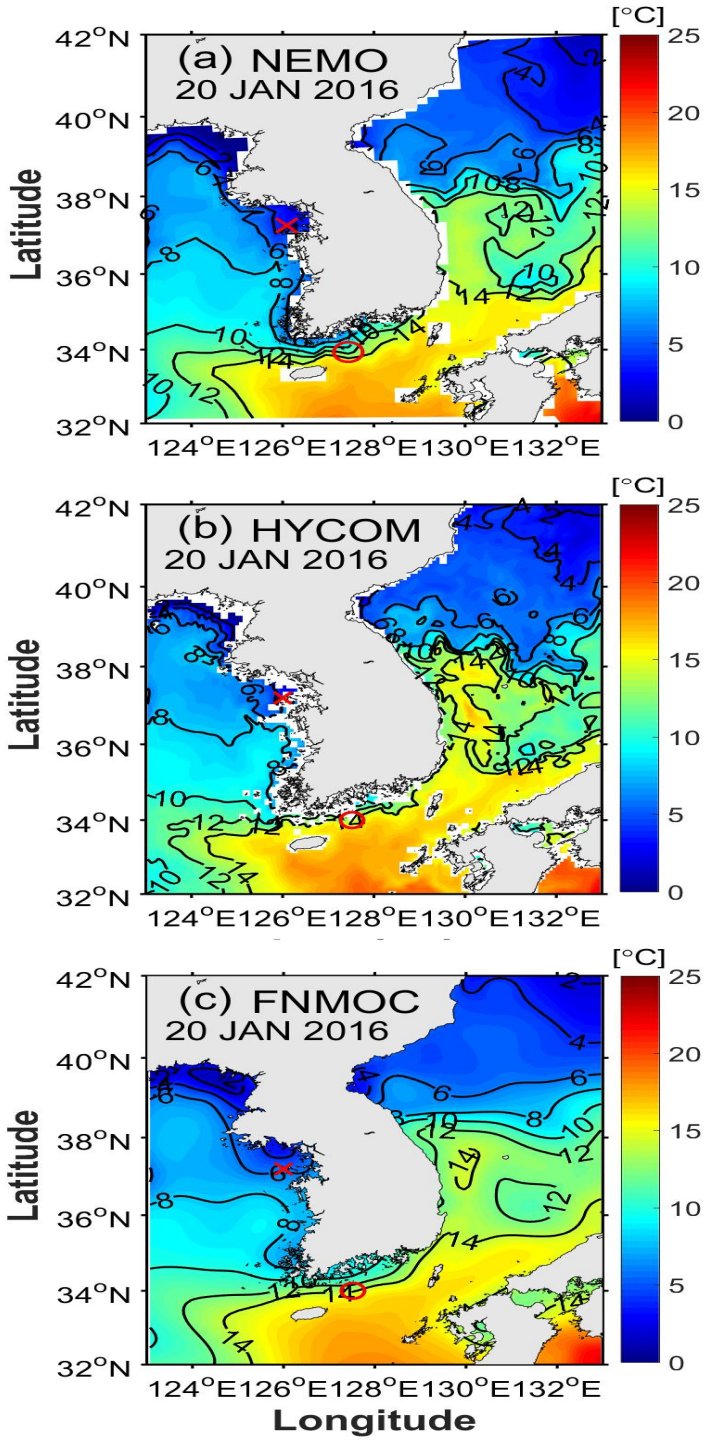

Fig. 17. Spatial distributions of SST from (a) KMA NEMO, (b) US Navy HYCOM and (c) FNMOC satellite on 20 January 2016. The red X and O symbols represent the location of Deokjeokdo and Geomundo buoy. The contour interval is 2.0°C.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅳ. 토의

열대해양, 북서태평양, 그리고 한반도 근해에서 기상청 NEMO와 미해군 HYCOM의 수온모의 정확도 차이를 유발한 원인은 본 연구에서 정확히 규명하기는 힘들다. 그러나 본 장에서는 두 모델의 차이를 비교함으로써 그 원인에 대해 논해 보고자 한다. 앞서 언급한 바와 같이 두 모델은 수평 및 수직해상도, 수직격자체계(z-level과 Hybrid), 수직혼합 모수화기법 (TKE와 KPP), 자료동화 시스템, 품질처리 시스템 및 자료동화에 쓰이는 입력자료, 그리고 대기외력에 있어 차이가 있다.

모델의 수평해상도에서는 미해군 HYCOM이 기상청 NEMO에 비해 약 3배 정도 높은 반면, 수직해상도에서는 기상청 NEMO(75층)가 미해군 HYCOM(40층) 보다 약 두 배 정도 높다. 이러한 해상도의 차이는 두 모델의 지역별 및 수심별 성능차이를 유발한 주요한 원인으로 사료된다. 특히, JMA 선박관측 수직단면 자료와의 비교에서 평균적으로 기상청 NEMO가 미해군 HYCOM보다 수직적으로 수온모의 정확도가 높았다. 이는 NEMO모델의 수직해상도가 더 높은 것과 관련이 있어 보인다. 또한 한반도 근해에서 전선의 영향으로 공간적인 수온변화가 큰 지역에 있어서는 수평해상도가 높은 미해군 HYCOM의 모의성능이 높게 나타났다. 즉, 다른 요인들이 같다면 앞서 언급한 바와 같이 공간적인 변화가 심한 전선이 존재하는 지역에서는 미해군 HYCOM이 그리고 수직적으로 고해상도가 필요한 북태평양 중층수 지역에서는 기상청 NEMO가 수온모의에 있어 더 유리하게 작용한 것으로 사료된다.

자료동화 방법에 있어서 두 모델은 동일한 3DVAR 방법을 사용하고 있으나 품질처리과정을 포함한 자료동화 시스템 자체가 다를 뿐 아니라(기상청 NEMO는 NEMOVAR, 미해군 HYCOM은 NCODA), 자료동화에 사용된 입력자료의 개수와 종류가 다른 점이 두 모델의 성능 차이를 유발할 수 있다에 영향을 미친 것으로 사료된다. 특히, 두 모델의 자료동화에 사용된 위성 해수면온도 자료를 비교하면, 미해군 HYCOM이 훨씬 다양하고 많은 자료를 사용하고 있음에도 불구하고 기상청 NEMO에 비해 오차가 크게 나타난 것은

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

매우 흥미롭다. Cummings and Smedstad (2014)는 HYCOM의 자료동화에 사용된 입력자료를 분석한 결과에서 정지궤도 위성인 GOES-13(Geostationary Operational Environmental Satellite-13)의 Full-disk 영역 가장자리에서 오차가 증가하는 경향을 확인하였고, 이것이 자료동화 시에 오차를 증가시킬 수 있음을 보고한 바 있다. 이것은 자료동화에 있어 다양한 자료를 많이 사용하는 것만큼 양질의 자료를 사용하는 것도 중요함을 시사한다. 특히, 두 모델의 차이가 자료동화에 사용되지 않은 자료를 이용한 비교한 결과에서도 크게 나타난 것은 두 모델의 정확도 차이가 자료동화 방법 및 사용된 자료 외에도 앞서 언급한 모델 자체의 다양한 차이에서 발생한 것임을 나타낸다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅴ. 요약 및 결론

본 연구에서는 기상청 전지구 해양순환예측시스템(NEMO/NEMOVAR)의 정확도를 평가하기 위하여 열대 태평양 TAO 계류부이, 북서태평양 해역의 JMA 선박관측자료, 그리고 한반도 근해의 KMA 해양부이 자료를 이용하여 1년간 (2015년 3월 ~ 2016년 2월) 모델 분석장의 편차, RMSE, 상관도를 조사하였다. 또한 최근 전 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 미해군의 해양자료동화시스템(HYCOM/NCODA)의 분석장 정확도를 같이 평가하여 상대적 모델 성능을 분석하였다.

열대 태평양에서는 기상청 NEMO가 미해군 HYCOM에 비해 수온 모의성능이 높았다. 해수면온도 모의 정확도 결과는 평균적으로 기상청 NEMO가 미해군 HYCOM에 비해 약 2배 높았다. 이러한 차이는 미해군 HYCOM이 해수면온도의 단기변화 시점을 잘 맞추지 못할 뿐 아니라 변동을 과대 모의하여 나타난 결과로 나타났다. 연직 수온프로파일의 분석에서는 두 모델 모두 온도변화가 급격히 발생하는 수온약층 깊이(100~200m)에서 최대 오차가 나타났고, 1년간 수심 평균한 오차 비교에서 미해군 HYCOM(0.71℃)이 기상청 NEMO(0.36℃)보다 평균적으로 약 두 배 크게 나타났다. 대기-해양 상호작용으로 인해 수온 변동성이 큰 Niño 3.4 지역에서는 두 모델 모두 해수면온도의 계절변동을 관측값과 유사하게 잘 모의하고 있었으며, 기상청 NEMO가 미해군 HYCOM에 비해 좀 더 모의성능이 높았다. 모든 TAO부이에서 오차의 계절적인 변화는 해수면온도와 수온프로파일에서 두 모델 모두 뚜렷하지 않았다.

JMA 선박관측자료는 자료동화에 사용되지 않은 독립적인 자료이며, TAO 부이보다 더 깊은 약 2000m 수심까지 관측되어 모델의 중층과 심층 수온 정확도 분석에 유용하다. 북서태평양의 총 6개 관측라인에 대해 모두 1000m까지 수심 평균한 오차는 미해군 HYCOM(0.73℃)이 기상청 NEMO(0.49℃)보다 약 50% 컸다. 쿠로시오 해류가 지나는 C 라인과 쿠로시오와 오야시오 해류가 만나는 B 라인에서는 두 모델 모두 오차가 가장 크게 나타났다. 특히, 북태평양 중층수의

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

분포를 볼 수 있는 C 라인의 수온연직단면의 공간적인 분포 분석에서 기상청 NEMO가 미해군 HYCOM보다 북태평양 중층수 수온 분포를 더 잘 모의하는 것으로 나타났다. 전반적으로 수직해상도가 높은 기상청 NEMO가 미해군 HYCOM에 비해 북서태평양의 수온 모의 성능이 좋았다.

KMA 해양부이를 이용한 한반도 근해의 해수면온도 모의 정확도 평가에서는 두 모델의 1년간 전체 평균 오차는 큰 차이를 보이지 않았으나(NEMO, 0.61℃; HYCOM,0.72℃),편차에서는 전반적으로 미해군 HYCOM(-0.19℃)이 기상청 NEMO(0.03℃)보다 모든 해양부이에서 과소 모의하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 기상청 NEMO의 경우 가을철(11월)까지 양의 편차를 보이다가 겨울철에 급격하게 음의 편차로 바뀌는 계절적인 변화특성이 나타났고, 특히 음의 편차가 가장 큰 12월과 1월에는 가장 큰 오차를 보였다. 미해군 HYCOM 경우 모든 계절에서 과소 모의 경향이 나타났고, 기상청 NEMO와 달리 여름철(7-8)월에 오차가 가장 크게 나타났다. 기상청 NEMO의 경우 1월에 덕적도와 거문도 부이에서 큰 오차와 과소 모의 경향이 가장 크게 나타났다. 이것은 이 지역에서 빈번이 나타나는 조석전선과 열염전선의 영향으로 수평해상도가 낮은 기상청 NEMO 모델에서 공간적인 수온의 변화가 큰 전선을 모의하는 데에는 한계가 있음을 시사한다.

본 연구에서는 다양한 관측자료를 이용하여, 한정된 기간(1년간), 지역(태평양 열대해역, 북태평양지역, 한반도 근해), 그리고 요소(열적환경)에 대해서만 기상청 NEMO와 미해군 HYCOM의 정확도를 평가하였다. 따라서 본 연구의 결과가 다른 연도와 해역(대서양, 인도양 등)에서도 같이 적용되는지는 알 수 없으며, 특히 수온 이외에 염분이나 해류 등에 대해서도 평가가 이루어지지 않아 두 모델의 성능 평가에 대한 전체적인 결론을 내리기 위해서는 좀 더 장기간 여러 지역의 다양한 요소에 대한 평가가 필요하다. 비록 한정된 평가이지만 본 연구결과는 크게 두 가지의 의미를 가질 수 있다. 첫째, 본 연구결과는 기상청 전지구 해양예측시스템이 향후 현업화되어 해양 분석장 및 예측장이 실시간으로 제공될 때에 그 정확도가 어느 정도인지를 판단할 수 있는 기초자료가 될 수 있다. 둘째, 본 연구에서 기상청 전지구 해양예측시스템의 결과를 현재 우리나라에서 가장 널리 사용되고 있는 미해군 HYCOM 자료와 제한적이지만

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

정량적으로 비교하여 그 우수성이 증명되었다는 점이다. 따라서 본 연구는 향후 기상청 NEMO가 지역해양모델링, 태풍예측, 그리고 장기예측 등의 다양한 분야에서 미해군 HYCOM을 대체하여 활용될 때에 중요한 기초자료로 사용 될 수 있을 것이다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

참고문헌

An, S. I., and J., Choi, 2012: On the development of 2012 El Niño. *Atmosphere*, **22**, 465 - 472.

Beak, Y.-H., 2016: A study on an accuracy of satellite-observed and numerical model-calculated SST around the Korean peninsula. Master thesis, Jeju National University, p70.

Bernie, D. J., S. J. Woolnough, J. M. Slingo, E. Guilyardi, 2005: Modeling diurnal and intraseasonal variability of the ocean mixed layer. *J. Climate*, **18**, 1190 - 1202.

Bleck, R., Jr., G. R. Halliwell, A. J. Wallcraft, S. Carroll, K. Kelly, K. Rushing, 2002: Hybrid coordinate ocean model (HYCOM) user's manual: details of the numerical code. *HYCOM*, **2**, p177.

Chassignet, E. P., H. E. Hurlburt, O. M. Smedstad, G. R. Halliwell, P. J. Hogan, A. J. Wallcraft, R. Baraille, and R. Bleck, 2007: The HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system. *J. Mar. Syst.*, **65**, 60 - 83.

Chiodi, A. M., and D. E. Harrison, 2017: Simulating ENSO SSTAs from TAO/TRITON Winds: The impacts of 20 years of buoy observations in the waveguide and comparison with reanalysis products. *J. Climate*, **30**, 1041 - 1059.

Cho, C. H., and Y. H. Seung, 1989: An oceanographic survey of tidal front around Kyunggi Bay. *Yellow Sea Res.*, **2**, 51 - 61.

Cummings, J. A., and O. M. Smedstad, 2013: Variational data assimilation for the global ocean. *In Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and*

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Hydrologic Applications, **2**, 303 – 343.

_____ and _____, 2014: Ocean data impacts in global HYCOM. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **31**, 1771 – 1791.

Gaspar, P., Y. Grégoris, and J. Lefevre, 1990: A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic vertical mixing: Tests at station Papa and long-term upper ocean study site. *J. Geophys. Res.*, **95**, 16179-16193.

Halliwell, G., 2004. Evaluation of vertical coordinate and vertical mixing algorithms in the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM). *Ocean Modelling*, **7**, 285 – 322.

Han, I.-S., Y.-S. Suh, and K.-T. Seong, 2013: Wind-induced spatial and temporal variations in the thermohaline front in the Jeju Strait, Korea. *Fish. Aquat. Sci.*, **16**, 117 – 124.

Hickox, R., I. Belkin, P. Cornillon, and Z. Shan, 2000: Climatology and seasonal variability of ocean fronts in the East China, Yellow and Bohai Seas from satellite SST data. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2945 – 2948.

Ji, M., and A. Leetmaa, 1997: Impact of data assimilation on ocean initialization and El Nino prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 742 – 753.

Jeong, J.-H., T.-W. Park, J.-H. Choi, S.-W. Son, K. H. Song, J.-S. Kug, B.-M. Kim, H. K. Kim, and S.-Y. Yim, 2016a: Assessment of climate variability over East Asia-Korea for 2015/16 winter. *Atmosphere*, **26**, 337 – 345.

Jeong, Y. Y., I.-J. Moon, and P.-H. Chang, 2016b: Accuracy of short-term ocean prediction and the effect of atmosphere-ocean coupling on KMA global seasonal forecast system (GloSea5) during the development of

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

ocean stratification. *Atmosphere*, **26**, 599 - 615.

Kim, D.-H., N. Nakashiki, Y. Yoshida, K. Maruyama, and F. O. Bryan, 2005: Regional cooling in the South Pacific sector of the Southern Ocean due to global warming. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L19607, doi:10.1029/2005GL023708.

Kim, Y. H., B.-J. Choi, J.-S. Lee, D.-S. Byun, K. R. Kang, Y.-G. Kim, and Y.-K. Cho, 2013: Korean ocean forecasting system: present and future. *The Sea*, **18**, 89 - 103.

Kouketsu, S., I. Kaneko, T. Kawano, H. Uchida, T. Doi, and M. Fukasawa, 2007: Changes of North Pacific intermediate water properties in the subtropical gyre. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L02605, doi:10.1029/2006GL028499.

Kwak M.-T., G.-H. Seo, B.-J. Choi, C.-S. Kim, and Y.-K. Cho, 2013: Sensitivity of simulated water temperature to vertical mixing scheme and water turbidity in the Yellow sea. *The Sea*, **18**, 111-121.

Large, W. G., J. C. McWilliams, and S. C. Doney, 1994: Oceanic vertical mixing: A review and a model with a non-local boundary layer parameterization. *Rev. Geophys.*, **32**, 363 - 403.

_____, G. Danabasoglu, S. C. Doney, and J. C. McWilliams, 1997: Sensitivity to surface forcing and boundary layer mixing in a global ocean model: Annual-mean climatology. *J. Phys. Oceanogr.*, **27**, 2418 - 2447.

Madec, G., 2008: NEMO ocean engine. *Note du Pôle de modélisation,* Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, No **27**, ISSN No 1288-1619.

McPhaden, M. J., K. Ando, B. Bourlès, H. P. Freitag, R. Lumpkin, Y. Masumoto, V. S. N. Murty, P. Nobre, M. Ravichandran, J. Vialard, D.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Vousde, and W. Yu, 2010: The global tropical moored buoy array. *Proceedings of Ocean Obs.*, **9**, 668 - 682.

Min, H. S. and B. Y., Yim, 2015: Evaluation of North Pacific intermediate water simulated by HadGEM2-AO. *Ocean and Polar Res.*, **37**, 265 - 278.

Mogensen K., M. A. Balmaseda, A. T. Weaver, M. Martin, and A. Vidard, 2009: NEMOVAR: A variational data assimilation system for the NEMO model. *ECMWF Newslett.*, **120**, 17 - 22.

Park, T., C. J. Jang, M.-H. Kwon, H. Na, and K.-Y. Kim, 2015: An effect of ENSO on summer surface salinity in the Yellow and East China Seas. *J. Mar. Sys.*, **141**, 122 - 127.

Shuto, K., 1996: Interannual variations of water temperature and salinity along the 137° E meridian. *J. Oceanogr.,* **52**, 575-595.

Weaver, A. T., C. Deltel, É. Machu, S. Ricci, and N. Daget, 2005: A multivariate balance operator for variational ocean data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.,* **131**, 3605 - 3625.

Yasuda, I, 1997: The origin of the North Pacific intermediate water. *J. Geophys. Res.*, **102**, 893 - 909.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY