

기상청 계절예측시스템(GloSea5)의 해양성층 강화시기 단기 해양예측 정확도 및 대기-해양 접합효과

정영윤¹⁾ · 문일주^{1)*} · 장필훈²⁾

¹⁾제주대학교 해양기상학협동과정/태풍연구센터, ²⁾국립기상과학원

(접수일: 2016년 7월 20일, 수정일: 2016년 10월 6일, 게재확정일: 2016년 11월 3일)

Accuracy of Short-Term Ocean Prediction and the Effect of Atmosphere-Ocean Coupling on KMA Global Seasonal Forecast System (GloSea5) During the Development of Ocean Stratification

Yeong Yun Jeong¹⁾, Il-Ju Moon^{1)*}, and Pil-Hun Chang²⁾

¹⁾*Typhoon Research Center/Graduate School of Interdisciplinary Program in Marine Meteorology, Jeju National University, Jeju, Korea*

²⁾*National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea*

(Manuscript received 20 July 2016; revised 6 October 2016; accepted 3 November 2016)

Abstract This study investigates the accuracy of short-term ocean predictions during the development of ocean stratification for the Korea Meteorological Administration (KMA) Global Seasonal Forecast System version 5 (GloSea5) as well as the effect of atmosphere-ocean coupling on the predictions through a series of sensitive numerical experiments. Model performance is evaluated using the marine meteorological buoys at seas around the Korean peninsular (KP), Tropical Atmosphere Ocean project (TAO) buoys over the tropical Pacific ocean, and ARGO floats data over the western North Pacific for boreal winter (February) and spring (May). Sensitive experiments are conducted using an ocean-atmosphere coupled model (i.e., GloSea5) and an uncoupled ocean model (Nucleus for European Modelling of the Ocean, NEMO) and their results are compared. The verification results revealed an overall good performance for the SST predictions over the tropical Pacific ocean and near the Korean marginal seas, in which the Root Mean Square Errors (RMSE) were 0.31~0.45°C and 0.74~1.11°C respectively, except oceanic front regions with large spatial and temporal SST variations (the maximum error reached up to 3°C). The sensitive numerical experiments showed that GloSea5 outperformed NEMO over the tropical Pacific in terms of bias and RMSE analysis, while NEMO outperformed GloSea5 near the KP regions. These results suggest that the atmosphere-ocean coupling substantially influences the short-term ocean forecast over the tropical Pacific, while other factors such as atmospheric forcing and the accuracy of simulated local current are more important than the coupling effect for the KP regions being far from tropics during the development of ocean stratification.

Key words: GloSea5, NEMO, sea temperature, short-term ocean prediction

*Corresponding Author: Il-Ju Moon, Typhoon Research Center/
Graduate School of Interdisciplinary Program in Marine Meteorology,
Jeju National University, 102 Jejudaeak-ro, Jeju 63243, Korea.
Phone: +82-64-754-3412, Fax: +82-64-756-3483
E-mail: ijmoon@jejunu.ac.kr

1. 서 론

최근 기상이변 현상이 빈번하게 지역적으로 발생하고 기후환경이 급속하게 변화함에 따라 이에 대한 적응과 대비의 필요성이 강조되고 있다. 장기 계절예측 정보는 기후환경 변화에 대응하고 국민활동의 질적향상 및 산업활동 등에 필요한 기초 기상정보로 사용되기 때문에 그 정확성에 대한 요구가 점점 더 커지고 있다. 이러한 요구를 반영하여 기상청은 영국 기상청과 함께 ‘한영 공동계절예측시스템(the KMA-Met Office Joint Seasonal Forecasting System; Kang et al., 2011)’을 운영하고 있으며, 이를 통해 계절예측시스템의 양상불 뎀버를 기관 간에 공유하여 한정된 계산 자원 내에서 계절예측의 불확실성을 줄이고자 하였다. 기상청은 2009년부터 영국 기상청의 GloSea4 (Global Seasonal Forecast System version 4; Arribas et al., 2011)에 기반한 계절예측시스템 개발을 시작하였고, 이후 2014년 하반기부터는 GloSea4의 모델 물리과정과 수평분해능을 개선한 고해상도 기후모델인 GloSea5를 현업에 도입하여 활용하고 있다.

GloSea5가 현업에 활용되어 많은 예측자료가 축적됨에 따라 이를 이용하여 최근 국내에서 많은 연구가 진행되고 있다. Jung et al. (2015)은 GloSea5의 6개월 과거 기후 모의자료를 이용해 1996~2009년 기간동안 계절예측시스템의 6개월 기후예측 능력을 평가하였다. 이 연구에서는 지표기온의 예측성과 동아시아 기후에 직·간접적으로 영향을 미치는 El Niño-Southern Oscillation (ENSO), Indian Ocean Dipole (IOD), 그리고 다양한 몬순지수들의 예측성을 평가하였다. 그 결과, NINO 3.4 지수는 최소 6개월 전부터 그리고 IOD는 늦여름과 가을철에 한하여 5~6개월 전부터 예측이 가능한 것으로 나타났다. 또한 여름과 겨울 아시아 몬순지수들은 전체적으로 예측성능이 낮았지만 북서태평양 몬순지수는 4~6개월 전에 예측이 가능한 것으로 나타났다. Lee and Kwon (2015)은 1996년부터 2009년까지 GloSea5의 6개월 적분된 모의(hindcast)자료를 사용하여 역학-통계 모형을 구성하고 동아시아 여름철 강수편차를 예측하였다. 그 결과, 동아시아 지역 강수에 대한 공간 패턴의 예측성능이 대부분의 영역에서 향상된 것으로 나타났다. 특히, 모델로부터 예측된 동아시아 지역(115°~150°E, 30°~50°N)의 강수지수는 전구 강수재분석자료인 CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation)과 높은 상관($r=0.81$)이 있음을 보고하였다.

국외에서는 GloSea를 이용한 연구가 오래전부터 수행되어왔다. Graham et al. (2005)은 UK GloSea의 대기-해양 접합모델(Coupled General Circulation Model, CGCM)과 해양모델이 접합되지 않은 전지구기후모델

(Atmosphere General Circulation Model, AGCM)을 이용하여 계절예측에 있어 대기-해양 상호작용의 중요성을 조사하였다. 이 연구에서 해양-대기 접합 효과는 열대 동태평양에서 ENSO를 동반한 해수면온도(Sea surface temperature, SST) 변동성 예측을 크게 향상시킨 것으로 나타났다. 또한 열대지역의 ENSO 예측능력의 향상은 원격상관반응을 통하여 북태평양과 북아메리카 지역의 계절예측 성능을 향상시킨 것으로 보고되었다. 최근 Camp et al. (2015)는 1996년부터 2009년까지 GloSea4, GloSea5, 그리고 ERA-Interim 재분석 결과를 사용하여 열대폭풍(Tropical Storm, TS) 활동의 변동에 대해 조사하였다. 이 연구에서 GloSea5는 TS 빈도와 ACE (Accumulated Cyclone Energy) 지수를 전 해역에서 통계적으로 유의하게 예측하였고, 특히 북대서양과 호주지역에서는 GloSea4보다 더 향상된 예측기술을 보였다.

지금까지 GloSea를 이용한 국내·외 연구들은 다양한 기후인자들에 대한 예측성능 평가와 강수 및 기온 등의 대기적 요소에 대한 평가에 초점이 맞추어져 있었다. 또한 GloSea를 이용하여 대기-해양의 접합효과를 조사한 연구에서도 접합효과가 대기 및 기후에 미치는 영향만을 관심에 두고 있었다. 그러나 대기와 해양모델이 접합된 GloSea5의 예측성능은 대기모델 뿐만 아니라 해양모델의 정확도에 크게 의존한다. 실제로 해양-대기의 접합효과는 대기와 기후 예측뿐 아니라 해양예측에도 크게 영향을 미칠 수 있다. 따라서 GloSea5의 구성요소인 해양모델의 예측성능을 평가하고 대기-해양 접합효과가 해양예측에 미치는 영향을 조사하는 것은 GloSea5의 계절예측 성능을 높이기 위해 반드시 필요하다.

본 연구에서는 북반구에서 해양성층이 강화되는 시기(겨울과 봄철)에 대해 GloSea5의 해양모델인 NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean)에서 산출되는 단기 해양예측 결과의 정확도를 다양한 관측자료를 이용하여 평가하고자 한다. 또한 이 시기에 대기-해양 접합모델(GloSea5)의 해양예측결과와 해양 단독모델 NEMO의 결과를 비교함으로써 대기-해양 접합효과가 해양의 단기예측에 미치는 영향을 조사하고자 한다. 제 2장에서는 본 연구에 사용된 수치모델과 관측자료 그리고 분석방법에 대해 서술하였다. 제 3장에서는 GloSea5의 대기-해양 접합효과와 해양예측 정확도 평가결과를 제시하였다. 제 4장에서는 연구내용을 요약하고 향후 연구에 대해 논하였다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 계절예측시스템(GloSea5)의 구성 및 특징

계절예측시스템 GloSea5는 네 개의 모델(대기, 해

Table 1. Descriptions for two experiments (GloSea5 vs. NEMO).

	Used Model	Ocean model resolution	Initial condition field		Atmos. & ocean flux exchange	Forecast time
			Atmos.	Ocean		
Exp. 1	GloSea5 (UM + NEMO + CICE + JULES)	ORCA025, 75 layers	N216	NEMOVAR	Two-tier (3-hour intervals)	60-day
Exp. 2	NEMO (NEMO + CICE)		KMA-NWP N512		Bulk formula	7-day

양, 해빙, 지표면)이 결합된 시스템이다. 대기모델은 중단기 기상예보에 사용되고 있는 통합모델(Unified Model, UM), 해양모델은 프랑스 라플라스 연구소를 중심으로 개발되어 전지구 및 지역 해양순환모의에 활용되는 NEMO, 해빙모델은 미국 Los Alamos National Laboratory에서 개발된 CICE (community Ice CodE), 그리고 지표면모델은 영국 기상청의 JULES (Joint UK Land Environment Simulator)를 기반으로 한다. 대기모델의 해상도는 수평적으로 N216 ($0.83^\circ \times 0.56^\circ$), 연직으로 85층이다. 해양모델의 수평 및 수직 해상도는 각각 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 와 75층이다. NEMO 모델에 대한 자세한 설명은 Madec et al. (2008)에서 확인할 수 있다.

GloSea5는 적분을 수행하면서 대기-해양 플럭스를 3시간 간격으로 OASIS coupler에 의하여 교환한다. 또한 GloSea5는 60일 적분을 수행한 후 예보 불확실성을 낮추기 위하여 앙상블 예측을 수행한다. 본 연구에서는 무작위로 생성된 물리모수화 파라미터를 (MacLachlan et al., 2014) 이용하여 수행된 두 개의 앙상블 멤버(010와 011)의 평균값을 사용하였다. GloSea5의 지표면과 대기 모델의 초기장은 기상청에서 운영중인 수치분석장(KMA-NWP)에서 생산된 자료를 사용한다. 해양과 해빙 초기장은 영국기상청, CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique), ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), INRIA/LJK (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique/Laboratoire Jean Kuntzmann)이 공동으로 개발한 NEMOVAR 자료동화 시스템에서 생산된 자료를 사용한다(Martin et al., 2007; Donlon et al., 2012).

2.2 자료 및 분석방법

본 연구에서는 GloSea5의 대기-해양 접합효과를 조사하기 위하여 접합모델에서 예측된 결과(Exp. 1, 이후 GloSea5로 표시)와 해양모델 단독으로 예측된 결과(Exp. 2, 이후 NEMO로 표시)를 비교하였다(Table 1). Exp. 1과 Exp. 2는 사용된 해양모델(NEMO), 해양 초기장, 자료동화시스템은 같지만 대기장을 생성한 모

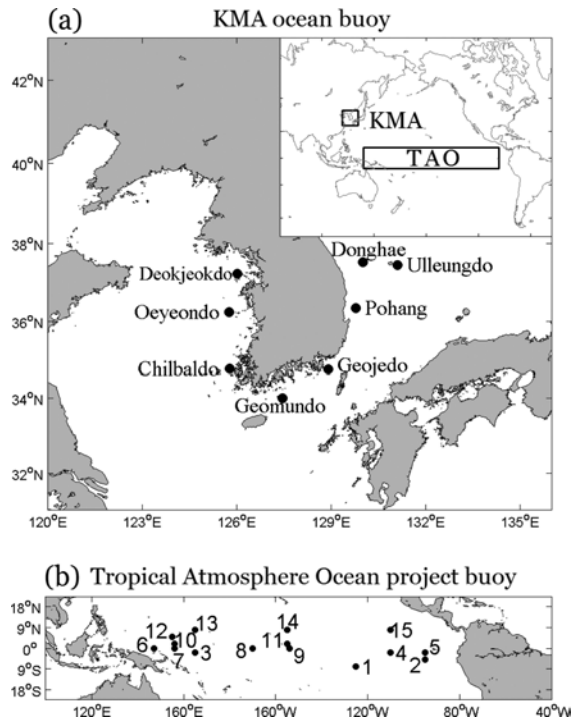


Fig. 1. Locations of (a) KMA and (b) TAO buoys.

델의 해상도와 대기-해양의 플럭스 교환방식의 차이가 있다. 즉, Exp. 1의 대기모델 해상도는 N216 ($0.83^\circ \times 0.56^\circ$)이지만 Exp. 2에서는 N512 ($0.35^\circ \times 0.23^\circ$)이다. 또한, Exp. 1에서는 coupler에 의해 3시간 간격으로 접합모델에서 계산된 대기-해양 플럭스가 교환되지만 Exp. 2에서는 KMA 수치분석장에서 나온 3시간 간격의 표층 플럭스(바람응력, 단파 등)가 해양모델에 입력된다.

해양모델의 단기 해양예측 정확도와 대기-해양 접합효과는 북반구 겨울(2월)과 봄(5월)에 대해서 이루어졌다. 여기서 2월과 5월을 선택한 이유는, 2월은 북반구에서 상층수직혼합이 강한(혼합층이 깊은) 시기이고 5월은 성층이 강화되는 시기이므로, 두 시기의 해양 혼합층과 수온약층(성층) 구조가 뚜렷이 차이를

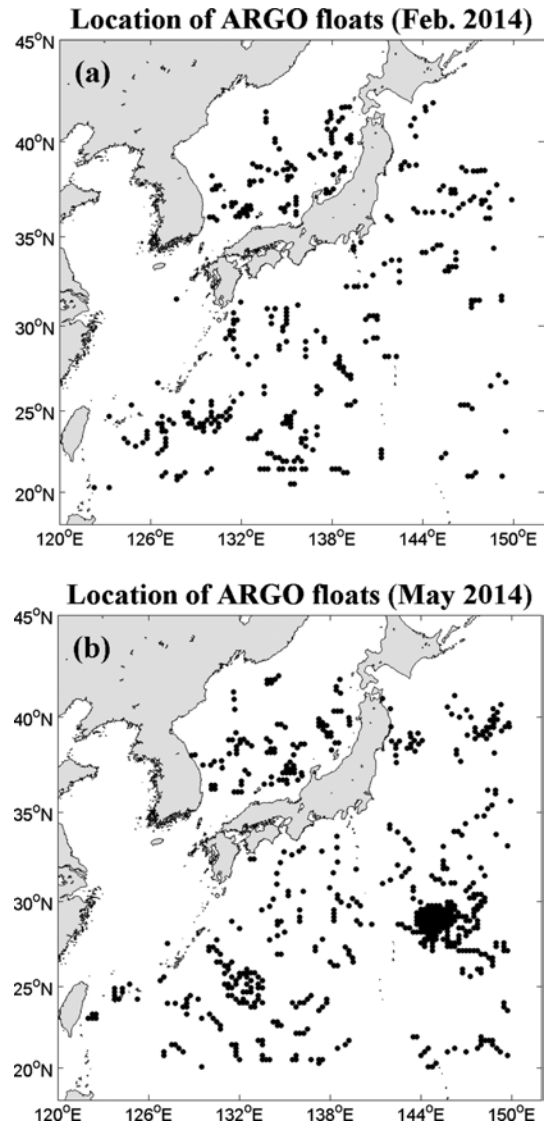
Table 2. Location and mooring depth for the KMA buoys.

Buoy	Location		Mooring depth
Deokjeokdo	37°14'N	126°01'E	30 m
Oeyeondo	36°15'N	125°45'E	45 m
Chilbaldo	34°47'N	125°46'E	33 m
Geomundo	34°00'N	127°27'E	80 m
Geojedo	34°46'N	128°54'E	84 m
Pohang	36°21'N	129°47'E	310 m
Donghae	37°32'N	130°00'E	1,518 m
Ullengdo	37°27'N	131°06'E	2,220 m

Table 3. Location, type, and month used in verifications for TAO buoys.

Buoy number	Locations		Mooring type	Month used in verifications
1	8°S	125°W	ATLAS	Feb. & May
2	5°S	95°W	ATLAS	May
3	2°S	165°E	ATLAS	Feb. & May
4	2°S	110°W	TRION	May
5	2°S	95°W	ATLAS	Feb.
6	0°N	147°E	TRION	Feb. & May
7	0°N	156°E	TRION	Feb. & May
8	0°N	170°W	ATLAS	Feb. & May
9	0°N	154°W	TRION	Feb.
10	2°N	156°E	TRION	Feb. & May
11	2°N	155°W	ATLAS	May
12	5°N	155°E	TRION	Feb. & May
13	8°N	165°E	ATLAS	Feb. & May
14	8°N	155°W	ATLAS	Feb. & May
15	8°N	110°W	TRION	Feb.

보일 뿐 아니라 겨울에서 봄으로 넘어가면서 해양성층이 급속하게 강화될 때 모델이 이러한 해양의 변동을 얼마나 잘 모의하는 가를 조사할 수 있기 때문이다. 모델 평가에 사용된 관측자료는 기상청에서 운영하는 한반도 근해의 해양기상부이, NOAA에서 제공하는 열대해역의 TAO (Tropical Atmosphere Ocean project) 부이, 그리고 북서태평양의 ARGO float 자료이다. 기상청 해양기상 부이 자료는 덕적도, 외연도, 칠발도, 거문도, 거제도, 포항, 동해, 울릉도에서 1시간 간격으로 관측된 SST 자료를 일평균하여 사용되었다(Fig. 1a와 Table 2). TAO 부이 자료는 태평양 열대해역(8°S~9°N, 130°E~95°W)에 설치된 고정 계류부이에서 관측된 일평균 SST 자료가 사용되었다(Fig. 1b와 Table 3). TAO 부이는 연직 수온 관측자료도 제공되지만 같은 초기장을 사용하는 단기(7일 미만) 해양예측 실험에서는 두 모델의 연직수온구조 차이는 크지 않아 본 연구에서는 모델 간의 차이가 가장 뚜렷이 나타나는 표층자료에 대해서만 분석을 실시하였다.

**Fig. 2.** Locations of Argo profiles used for model performance evaluation in (a) February and (b) May 2014.

ARGO 자료는 북서태평양 영역(110~150°E, 20~42°N)에서 2014년 2월과 5월에 각각 관측된 426개와 1051개의 ARGO 연직 수온 프로파일 자료가 사용되었다(Fig. 2). 모델과 ARGO 프로파일 자료는 수직해상도가 서로 다르기 때문에 두 자료는 오차 계산 전에 모두 1m 간격(수심 1m에서 100m까지)으로 내삽한 후 사용되었다.

본 연구에서는 모델의 오차원인 분석을 위하여 부이 및 ARGO와 같은 지점(point) 자료 외에 OSTIA (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice

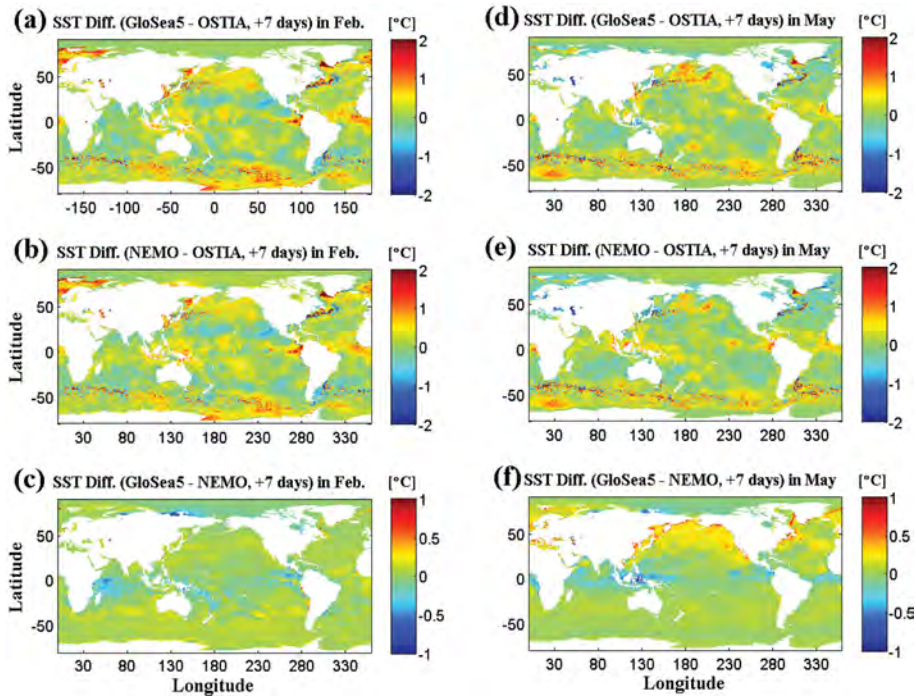


Fig. 3. Mean sea surface temperature (SST) differences between (a, d) GloSea5 and OSTIA, (b, e) NEMO and OSTIA, (c, f) GloSea5 and NEMO at 7-day forecast lead time for February (left panel) and May (right panel) 2014.

Analysis)와 FNMOC (Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center)에서 제공하는 위성 해수면 온도 자료(각각 5-km와 10-km 공간해상도) 그리고 국립해양조사원에서 제공하는 동해의 해류장을 사용하여 공간적인 특성을 조사하였다. 동해 해류장은 0.25° 공간해상도의 인공위성 고도계 자료를 기반으로 일평균된 표층해류 자료로 현재 국립해양조사원(<http://www.khoa.go.kr/>)에서 매일 준실시간으로 생산하여 제공된다.

해양모델의 예측 정확도는 관측자료와 예측된 SST의 일평균값을 이용하여 편차(Bias), 평균절대오차 (Mean Absolute Error, MAE), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)에 대해 평가되었다.

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i) \tag{1}$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|F_i - O_i|) \tag{2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \tag{3}$$

여기서, N 은 검증자료의 개수이며 F 는 모델값, O 는 관측값을 나타낸다. 단기 해양예측 정확도를 분석하

기 위하여 사용한 Exp. 1의 모델값은 60일 예측결과를 최초 적분일로부터 7일까지 예측결과를 사용하였고, Exp. 2에서는 7일 예측결과를 사용하였다.

3. 모델 정확도 비교 및 대기-해양 접합효과 조사

먼저 두 모델이 모의한 해수면온도에 대해 예측정확도를 공간적으로 파악하기 위해 매일 예측된 7일 후의 자료를 OSTIA 위성 해수면온도 자료와 비교하였다. Figures 3a, 3b, 3d, 3e는 2월과 5월에 한 달 동안 두 모델과 OSTIA 차이를 평균한 것이다. 그림에서 모델과 관측자료의 편차가 큰 지역은 크게 쿠로시오와 멕시코 만류가 사행하는 지역, 남극순환류 지역, 그린란드 주변 해역으로 나타났다. 대기-해양 접합효과에 대한 조사는 Exp. 1 (GloSea5)과 Exp. 2 (NEMO)에서 예측된 해수면온도 차이(Exp. 1~Exp. 2)를 이용하여 조사하였다. Figures 3c와 3f는 2월과 5월에 대해 두 모델의 7일 후 해수면온도 예측장 차이를 월별로 평균한 것이다. 지역적인 차이를 자세히 살펴보면, 2월에는 GloSea5가 NEMO보다 적도 태평양 및 인도양 해역, 시베리아 인근 북극해에서 낮게 모의하고, 북서태평양과 남반구 중위도 해역에서 다소 높게 모

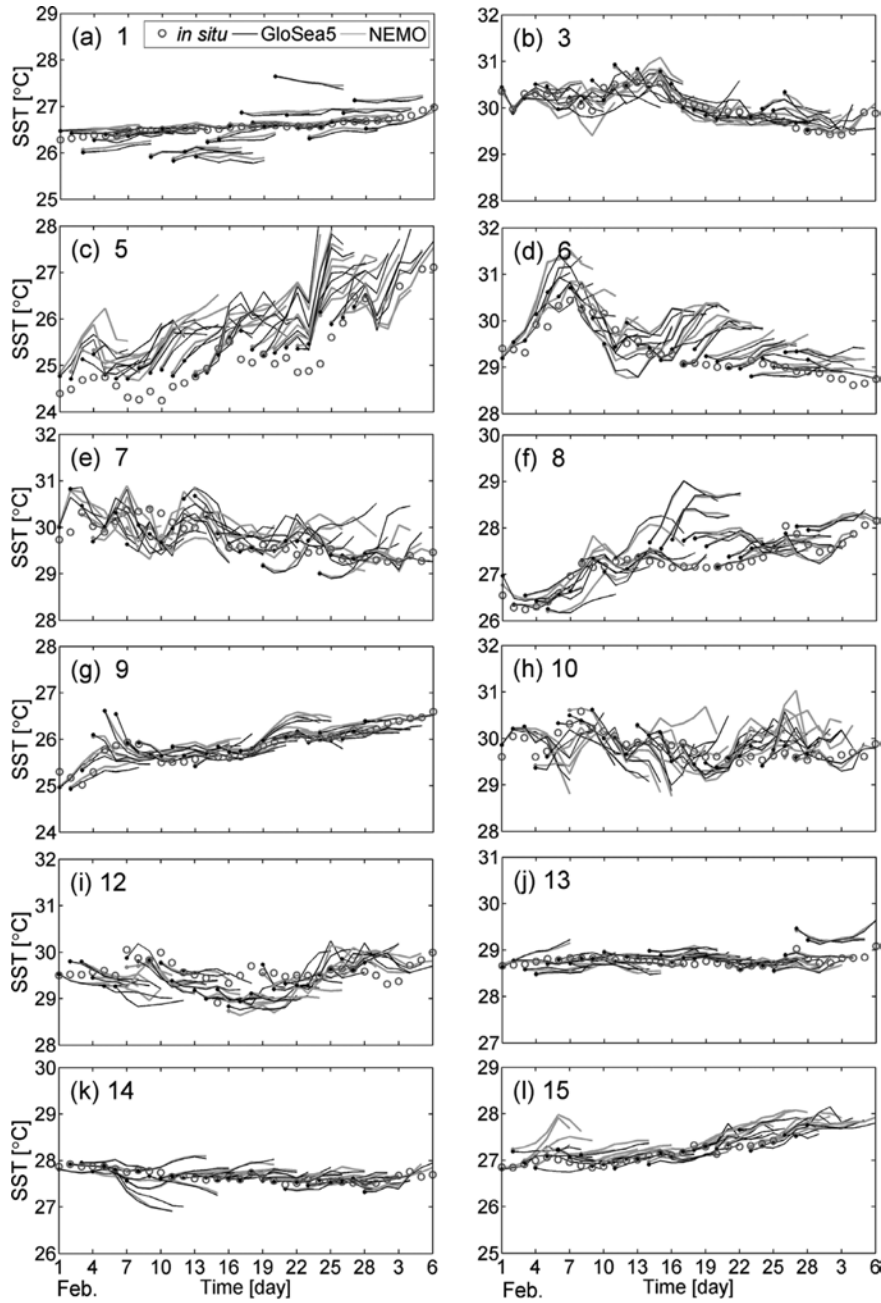


Fig. 4. Comparisons of daily 7-day SST predictions at TAO buoys for February 2014. The black and grey lines represent the prediction results from GloSea5 (Exp. 1) and NEMO (Exp. 2) respectively. The grey open circles use the TAO buoys data. The black dot represents the initial time of forecast.

의하는 경향이 나타났다. 5월은 2월과 비슷하게 대부분의 적도해역에서 GloSea5가 NEMO보다 해수면온도를 낮게 모의하고 있다(단, 필리핀해역 및 남아메리카 동쪽 해역은 2월보다 좀 더 낮게 모의함). 그러나

북반구의 대부분의 해역(특히, 태평양과 대서양 연안을 따라)에서는 GloSea5가 NEMO보다 해수면온도를 높게 모의하는 경향이 뚜렷이 나타난다. 앞서 설명한 바와 같이 Exp. 1과 2는 동일한 초기장 및 해양모델

Table 4. Comparisons of correlation coefficient, bias, and RMSE (averaged from 1 to 7-day forecast lead time) for predicted SST between Exp. 1 and Exp. 2 at TAO buoys in February 2014.

Buoy number	Correlation (R)		Bias (°C)		RMSE (°C)	
	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
1	0.500	0.510	-0.048	0.013	0.312	0.298
3	0.754	0.755	0.031	0.043	0.233	0.250
5	0.781	0.726	0.844	0.869	0.973	1.013
6	0.714	0.728	0.318	0.407	0.537	0.613
7	0.433	0.548	0.085	0.089	0.425	0.385
8	0.490	0.493	0.221	0.278	0.577	0.588
9	0.797	0.794	0.018	0.077	0.195	0.212
10	0.133	-0.001	-0.011	0.049	0.401	0.487
12	-0.047	0.110	-0.180	-0.166	0.454	0.419
13	0.135	0.135	0.048	0.051	0.194	0.203
14	0.090	0.165	0.000	0.027	0.223	0.202
15	0.688	0.544	0.072	0.242	0.188	0.329

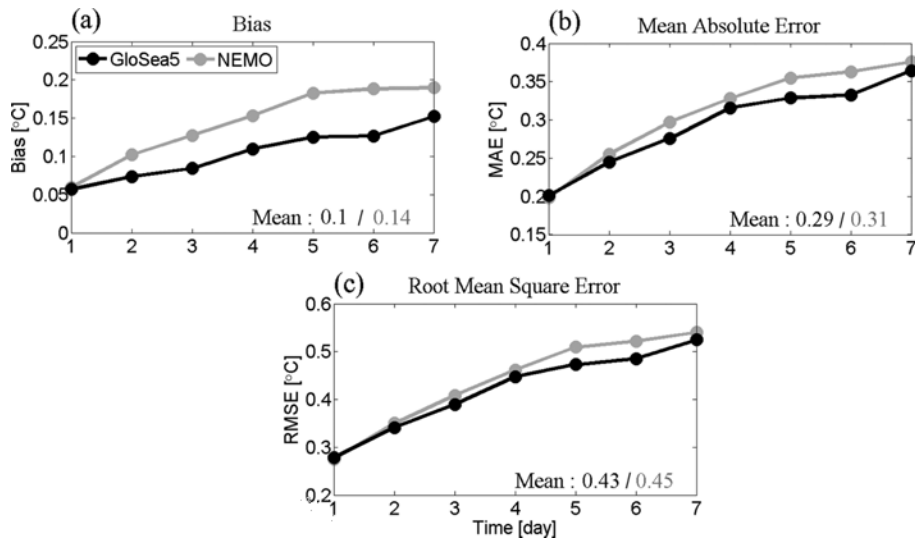


Fig. 5. Comparison of (a) Bias, (b) MAE and (c) RMSE for simulated SST between GloSea5 (Exp. 1) and NEMO (Exp. 2) at forecast lead times from 1 to 7 day (1-day interval) at TAO buoys over tropical Pacific in February 2014.

을 사용하지만 GloSea5는 접합된 대기모델로부터 계산된 대기입력장을 그리고 NEMO는 따로 계산된 대기모델의 결과를 사용하여 표면경계의 플럭스를 고려한다. 따라서 두 실험결과의 차이는 엄밀히 말하면 해양모델에 사용된 대기입력장의 차이에서 기인하였다고 할 수 있다. 그렇지만 넓은 의미에서 보면 이러한 대기입력장의 차이는 결국 대기-해양 접합이 고려된 모델과 그렇지 않은 모델의 차이이므로 본 연구에서는 두 실험의 차이를 광역의 의미에서 대기-해양의 접합효과로 정의하였다. 본 장에서는 두 모델의 차이가 가장 뚜렷이 나타나는 태평양 열대해역, 북서태평양,

한반도 근해에 대해 관측자료를 이용하여 두 모델의 해양예측 정확도 비교 및 대기-해양의 접합효과를 살펴보고자 한다.

3.1 태평양 열대해역

태평양 열대해역의 TAO 부이에서 관측된 해수면온도 자료를 이용하여 두 모델의 해양예측 성능을 평가하고 이를 바탕으로 대기-해양 접합효과를 조사하였다. Figure 4와 Table 4는 겨울철(2월) 12개의 TAO 부이에서 관측된 해수면온도와 두 모델의 시계열 그리고 이를 이용한 통계분석 결과(상관도, 편차, RMSE)

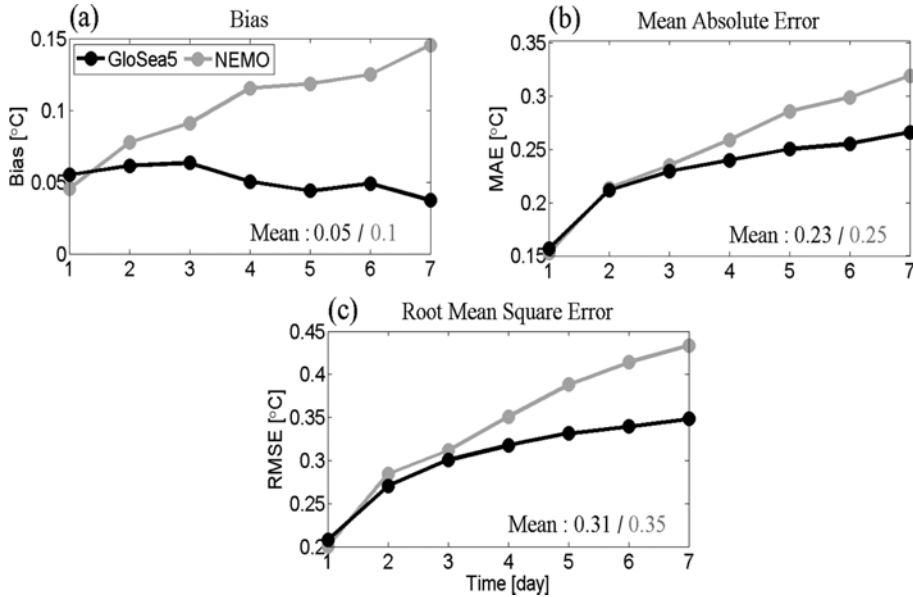


Fig. 6. Same as in Fig. 5, but for May 2014 (TAO buoys).

를 각각 나타낸다. 여기서 모델 결과는 1일 간격으로 7일까지 예측된 자료이다. 상관도 분석은 해수면온도의 변화 경향을 얼마나 모델이 잘 모의하고 있는지를 나타낸다.

2월은 두 실험의 상관도 차이가 거의 나타나지 않았고, 두 모델 모두 대부분의 부이에서(10, 12, 13, 14번 부이 제외) 95% 신뢰수준의 높은 상관도를 보였다. 흥미로운 것은 상관도가 매우 높게 나온 5번과 6번 부이는 편차와 RMSE 분석에서는 12개 부이 중에 가장 큰 값을 보인 반면 상관도가 매우 낮았던 10, 12, 13, 14번 부이는 오차가 비교적 낮았다(Table 4). 이것은 Fig. 4의 해수면온도 시계열에서 알 수 있듯이 5, 6번 부이에서 2월 한 달간 수온변동이 2~3°C로 12개 부이 중에 가장 컸고, 반면 10, 12, 13, 14번 부이에서 수온변동이 1°C 이하로 매우 낮았기 때문에 사료된다. 즉, 태평양 적도해역 중앙에 위치하여 수온변동이 작은 지역(13, 14번 부이)은 모델이 변동경향을 잘 모의하지 못하더라도 오차는 작을 수 있고, 반면 태평양 서쪽과 동쪽 연안에 위치하여 연중 수온변동이 큰 지역(5, 6번 부이)에서는 변동경향을 잘 모의하더라도 오차는 커질 수 있다. 예측시간(lead time, 하루 간격)별로 두 모델의 차이를 좀 더 자세히 비교해 보면(Fig. 5), 거의 모든 시간에서 GloSea5가 NEMO보다 낮은 편차와 오차를 보였다. 특히, 예측시간이 길어질수록 그 차이는 더 크게 나타났다. 이러한 결과는 열대해역에서 대기-해양 접합효과가 해양예측의 정확도를 향상 시키는 방향으로 작용함

을 의미한다.

5월의 결과도 전반적으로 2월과 유사하게 거의 모든 시간에서 GloSea5가 NEMO보다 낮은 편차와 오차를 보였다(Fig. 6). 한 가지 다른 점은 두 모델의 차이가 더욱 뚜렷해 졌다는 것이다. 즉, 5월에는 GloSea5의 7일 후 편차, MAE, RMSE가 NEMO보다 각각 약 0.1°C, 0.05°C, 0.08°C 더 낮아졌다(이 차이는 2월에 비해 약 2~3배 커진 값임). 5월이 2월보다 GloSea5와 NEMO의 오차 차이가 더욱 커졌다는 것은 대기-해양의 접합효과가 5월에 더 중요하게 작용하였다고 해석할 수 있다. 실제로 5월은 북반구에서 성층이 강화되는 시기이므로 대기-해양의 플럭스 교환이 매우 중요하게 작용한다. 따라서 이 결과는 접합모델을 통해 현실적으로 해양-대기 플럭스를 교환하는 방법(GloSea5 경우)이 대기-해양 상호작용을 고려하지 않고 대기모델에서 계산한 플럭스를 일방적으로 해양모델에 전달하는 방법(NEMO 경우)보다 열대해역의 해양예측 성능을 더 높일 수 있음을 시사한다.

3.2 북서태평양

북서태평양 영역(110~150°E, 20~42°N)에서 2월과 5월에 관측된 ARGO float 자료(Fig. 2)와 두 실험의 연직 수온프로파일을 비교하였다(Fig. 7). 2월의 분석결과를 보면, 두 모델이 표층에서는 편차가 크지 않지만 수심이 깊어질수록 과대 모의하는 경향이 나타났다(100 m 수심에서 약 0.4°C). RMSE는 두 모델에서

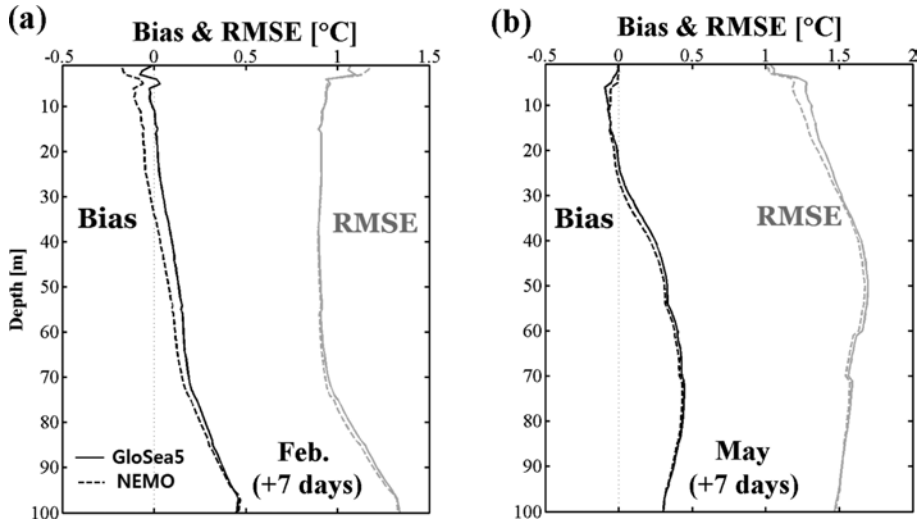


Fig. 7. Comparison of bias and MAE for simulated temperature profiles between GloSea5 (Exp. 1) and NEMO (Exp. 2) at 7-day forecast lead time at TAO buoys for (a) February and (b) May 2014.

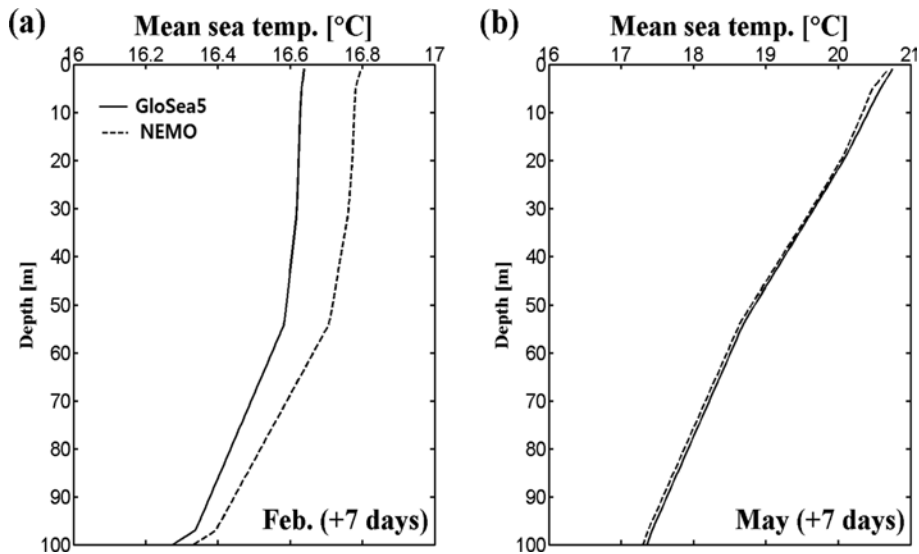


Fig. 8. Mean sea temperature vertical profiles from the GloSea5 (solid black) and the NEMO (dashed black) at 7-day forecast lead time for (a) February and (b) May 2014.

70 m까지 거의 일정하고 수심 100 m에서 최대값을 보인다. 2월에 북서태평양의 평균적인 연직수온분포를 보면(Fig. 8a), 이러한 수직적인 오차의 분포는 수심 75.5 m (GloSea5는 71 m, NEMO는 80 m)까지 수직적으로 혼합층이 발달하고 있는 것과 관련이 깊다. 5월에는 성층이 발달하여 2월과는 달리 상층에서 수심에 따른 오차의 분포가 일정하게 나타나지 않는다(Fig. 8b). 대체로 수심 30 m 이상에서 양의 편차가 뚜렷이

나타난다. 두 모델에서 최대 오차를 보이는 수심은 약 50 m에서(GloSea5는 1.70°C, NEMO는 1.67°C) 확인되었고, 두 모델의 차이는 수심 6 m에서 가장 큰 차이(0.09°C)를 보인다.

2월과 5월은 공통적으로 상층해양에서 GloSea5와 NEMO의 수온 연직분포의 차이가 크게 나타나지 않는다. 이것은 같은 초기장을 사용한 두 모델이 7일간의 적분만으로는 대기-해양 결합효과에 의해 수심 100

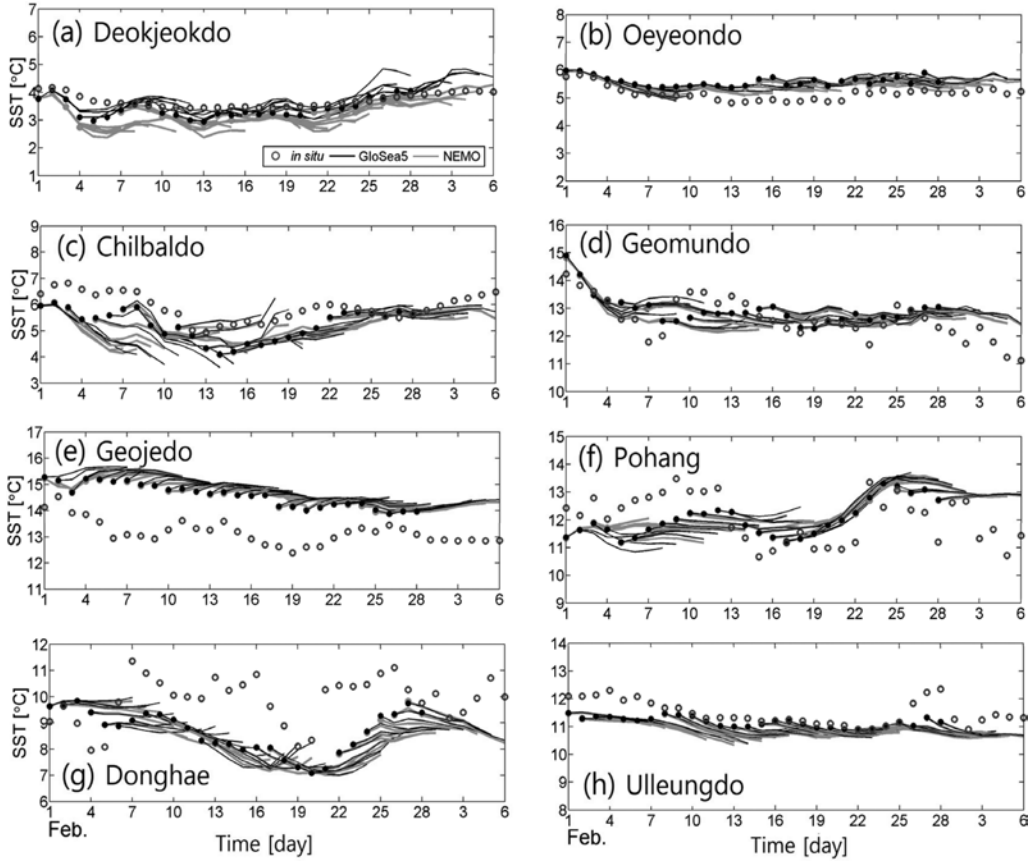


Fig. 9. Same as in Fig. 4, but for KMA buoys (February 2014).

Table 5. Same as Table 4, but for KMA buoy data.

Buoy	Correlation		Bias (°C)		RMSE (°C)	
	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
Deokjeokdo	0.773	0.735	0.027	-0.478	0.323	0.577
Oeyeondo	0.491	0.518	0.387	0.326	0.433	0.372
Chilbaldo	-0.259	-0.175	0.388	0.282	0.700	0.609
Geomundo	0.083	0.094	0.171	0.108	0.658	0.635
Geojedo	0.292	0.263	1.680	1.572	1.759	1.653
Pohang	0.029	0.105	0.153	0.245	1.156	1.081
Donghae	0.023	0.027	-1.568	-1.633	1.955	2.018
Ulleungdo	0.564	0.560	-1.006	-1.012	1.096	1.099

m 이내의 상층해양까지 수온의 차이를 발생시키기 어렵다는 것을 의미한다.

3.3 한반도 근해

한반도 근해에서 GloSea5와 NEMO의 단기 해양예측 정확도를 평가·비교하기 위하여 우리나라 연안의 8개 기상청 계류부이에서 관측된 해수면온도 자료와

두 모델의 2월과 5월 단기 예측결과를 비교하였다. 먼저 2월의 시계열 및 통계분석 자료를 살펴보면(Fig. 9와 Table 5), 덕적도와 외연도에서는 모델의 예측값이 관측값의 변화경향을 잘 따라가고 있음을 알 수 있다. 실제로 이 두 지점은 상관도와 RMSE 분석에서 8개 부이 중에 가장 좋은 예측성능을 보였다. 그러나 이 두 부이를 제외한 나머지 부이들의 상관도는

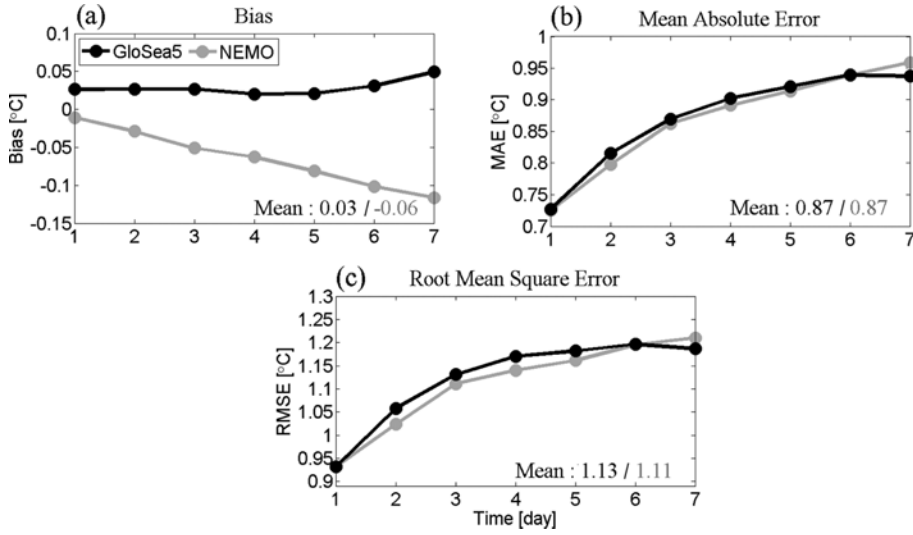


Fig. 10. Same as in Fig. 5, but for KMA buoys (February 2014).

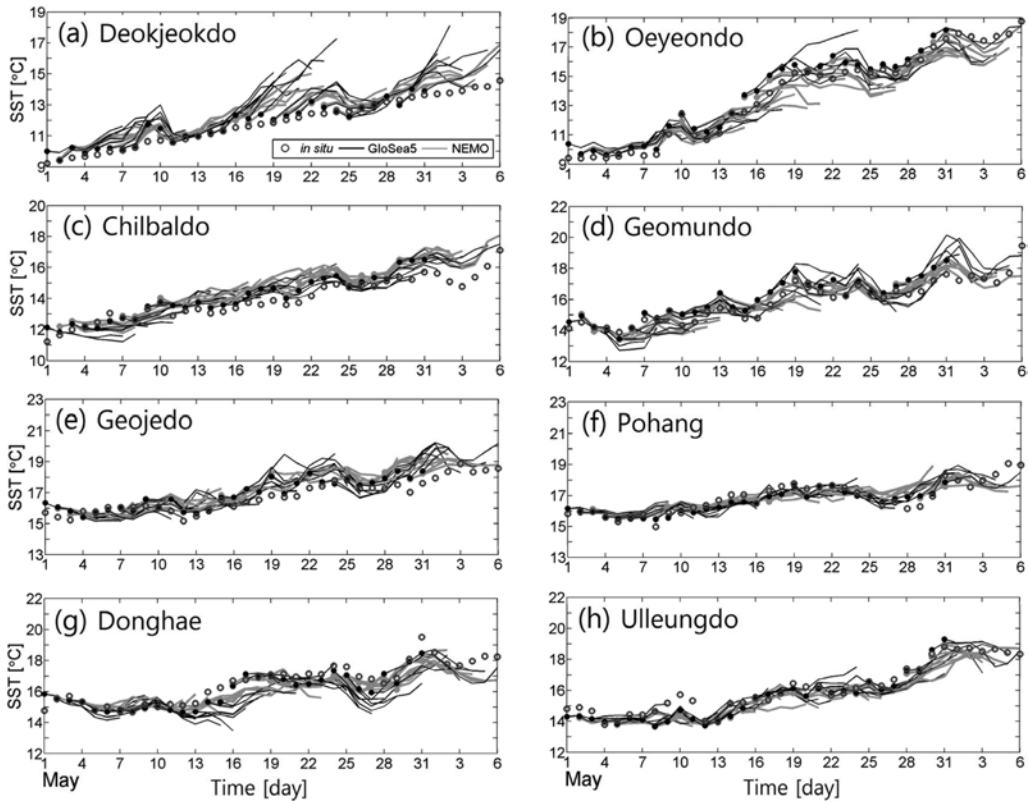


Fig. 11. Same as in Fig. 9, but for May 2014 (KMA buoys).

상대적으로 낮았고 RMSE도 높았다. 특히, 동해와 남해에 위치한 부이들(포항, 동해, 울릉도, 거제도 부이)

은 1°C 이상의 큰 오차를 보였다(Table 5). 부이별로 편차를 비교해 보면, 동해와 울릉도 부이에서 두 모

Table 6. Same as Table 5, but in May 2014.

Buoy	Correlation		Bias (°C)		RMSE (°C)	
	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
Deokjeokdo	0.836	0.931	1.108	0.840	1.473	1.001
Oeyeondo	0.952	0.962	0.033	-0.386	0.827	0.867
Chilbaldo	0.875	0.911	-0.265	0.102	1.077	0.768
Geomundo	0.892	0.891	0.140	0.004	0.808	0.595
Geojedo	0.842	0.876	0.479	0.560	0.913	0.818
Pohang	0.784	0.661	0.023	0.067	0.561	0.673
Donghae	0.800	0.870	-0.754	-0.487	1.068	0.784
Ulleungdo	0.924	0.938	-0.139	-0.354	0.593	0.618

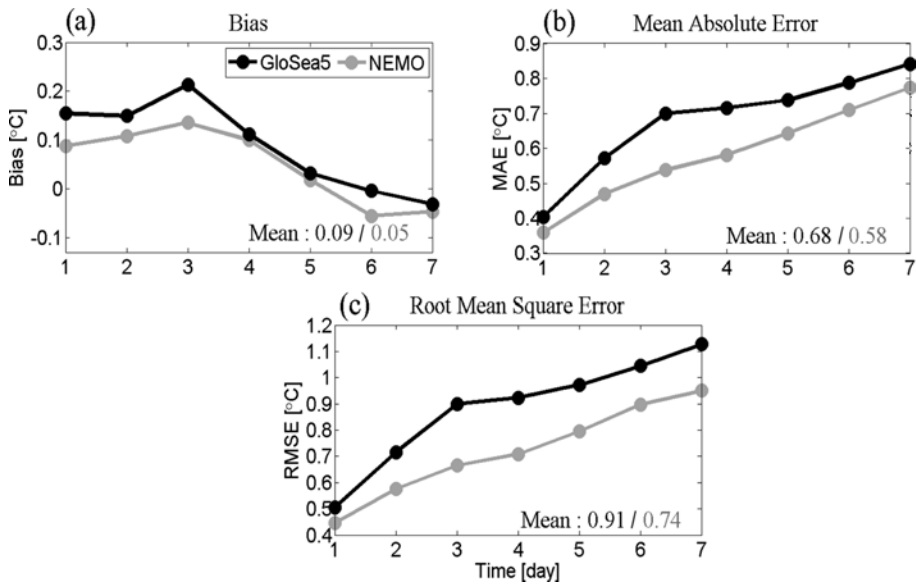


Fig. 12. Same as in Fig. 10, but for May 2014 (KMA buoys).

델이 관측값에 비해 해수면온도를 과소 모의하는 경향이 강했고 나머지 부이들에서는 과대모의 경향이 뚜렷하게 나타났다(특히, 거제도에서 과대모의 경향 가장 큼). 2월 동안 대부분의 부이들은 GloSea5와 NEMO의 통계분석 결과에서 큰 차이가 보이지 않았다. 다만 덕적도 부이에서 두 모델의 편차 부호가 달랐으며 RMSE도 가장 큰 차이를 보였다. 예측시간별 통계분석 결과(Fig. 10), 두 모델의 편차는 대부분의 예측시간에서 서로 다른 부호를 가졌다(즉, GloSea5는 과대모의, NEMO는 과소모의). 편차의 크기는 전반적으로 NEMO가 크게 나타났고 예측시간이 길어질수록 음의 편차가 증가하는 경향을 보였다. MAE와 RMSE에서 두 모델 간의 차이는, 비록 크지는 않지만, 대부분의 예측에서 NEMO가 적은 오차를 보였다(4일 후 예측에서 최대 0.03°C, 평균적으로 0.02°C RMSE

가 적음).

5월은 전반적으로 2월보다 두 모델의 예측성능이 향상되었다(Fig. 11과 Table 6). 특히, 상관도 분석에서 5월은 2월과는 달리 대부분의 부이에서 0.8 이상의 높은 값을 보였다. RMSE는 5월이 2월보다 평균적으로 낮아졌지만 지역적으로는 황해에 위치한 부이들(덕적도, 외연도, 칠발도)에서 2월보다 오차가 증가하였고, 동해 및 남해에 위치한 부이들(포항, 동해, 울릉도, 거제도)에서 오차가 감소하였다(Table 6). GloSea5와 NEMO의 성능차이는 예측시간별로 편차와 오차를 비교한 Fig. 12에서 뚜렷이 보인다. 전 시간대에서 NEMO의 편차, MAE, RMSE는 GloSea5보다 각각 0.04°C, 0.02°C, 0.17°C 낮아졌다. 이러한 두 모델의 5월 RMSE 차이는 2월에 비해 약 8배 큰 값이다.

한반도 근해에서 NEMO의 해수면온도 예측성능이

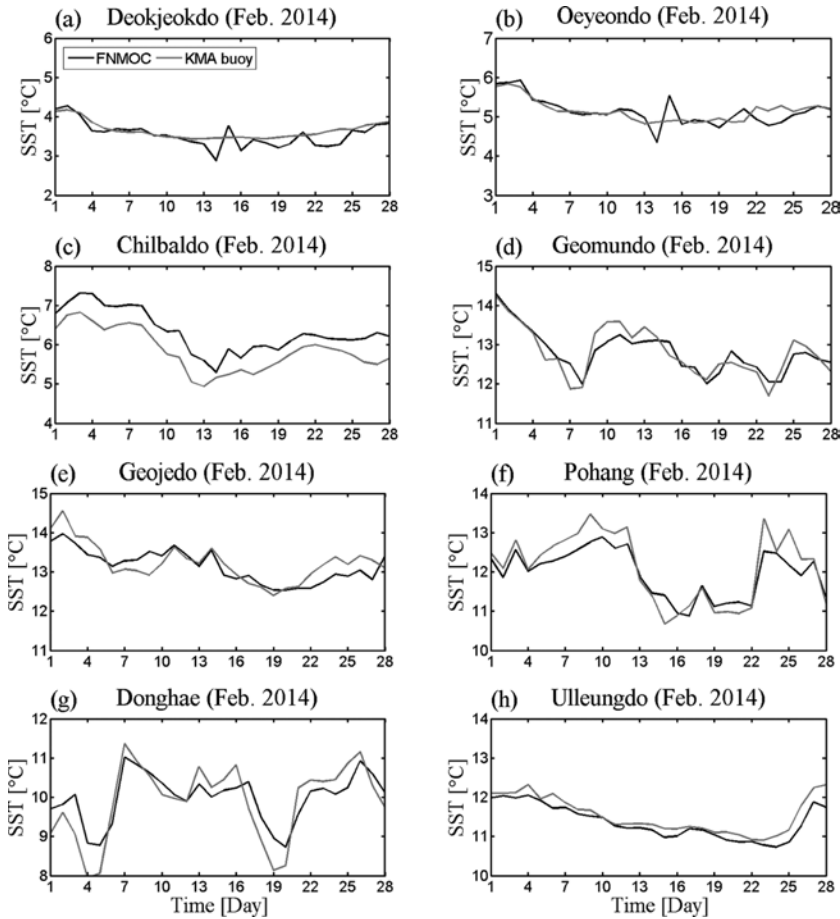


Fig. 13. Comparisons of SST between FNMOC satellite and KMA buoy data at (a) Deokjeokdo, (b) Oeyeondo, (c) Chilbaldo, (d) Geomundo, (e) Geojedo, (f) Pohang, (g) Donghae, and (h) Ulleungdo in February 2014. The Black and grey lines represent FNMOC satellite and KMA buoys data, respectively.

GloSea5보다 좋았다는 것은(특히, 5월에) 두 가지 의 미로 생각해 볼 수 있다. 첫째, 열대해역에서는 대기-해양의 접합효과가 매우 중요하게 작용하지만 열대해역에서 멀리 떨어진 한반도 근해에서는 대기-해양의 접합효과 보다 다른 국지적인 요인들에 의해 영향을 받는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 추론은 GloSea5의 대기-해양의 접합효과가 열대해역의 해수면온도 예측결과를 개선하는 긍정적인 방향으로 작용하였지만(앞서 열대해역 결과 참고), 한반도 근해에서는 반대의 결과가 나타난 것으로 알 수 있다. 둘째, NEMO 모델의 입력자료로 사용된 KMA 수치분석장 기반의 표층 플릭스 자료가 한반도 근해에서는 접합모델보다 더 현실적인 값을 제공했을 수 있다. 일반적으로 한반도 근해의 KMA 수치분석장은 우리나라 및 주변국에서 관측된 더 많은 자료가 추가적으로 자료동화에

사용되어 외국기관이나 접합모델의 결과보다 더 정확도가 높을 수 있기 때문이다. 또한 NEMO 분석장 생성을 위해 사용된 대기모델의 해상도(N516)가 GloSea5 대기모델 해상도(N216)보다 더 높았던 것도 한반도 근해에서 해수면온도 예측성능을 높이는데 기여한 것으로 사료된다. 왜냐하면 한반도 근해는 열대해역보다 상대적으로 시공간적인 변동성의 크기가 클 뿐 아니라 변동성의 공간규모도 작기 때문에 고해상도 대기입력장을 사용한 NEMO 모델이 한반도 근해에서는 더 유리할 수 있기 때문이다.

4. 토 의

본 장에서는 모델예측의 불확실성과 오차에 대한 원인을 파악하기 위하여 분석기간 중 TAO와 기상청

부이를 통틀어 가장 큰 오차를 보인 2월 22일 동해부이(Fig. 9g)에 대한 분석을 실시하였다. 2월 동해부이에서 GloSea5와 NEMO 모델은 모두 큰 오차가 발생하였지만 두 모델 간의 성능차이는 거의 없었다. 따라서 본 분석에서는 GloSea5의 결과만을 사용하여 다양한 관측자료와 비교하였다. 또한 한 지점의 부이자료를 사용하여 모델과 관측값의 차이가 발생하는 원인을 밝히는 것은 매우 힘들기 때문에 본 연구에서는 공간적인 분포를 알 수 있는 위성기반 FNMOC 해수면온도와 국립해양조사원 해류도 자료를 사용하였다.

위성 해수면온도 자료를 분석에 사용하기 위해서는 위성자료의 정확도를 먼저 평가할 필요가 있다. Figure 13은 2014년 2월 한 달 동안 한반도 근해의 8개 기상청 부이와 위성 자료의 해수면온도 시계열을 비교하고 있다. 오차분석 결과, 2월 동안 8개 부이의 평균 RMSE는 약 0.35°C 로 매우 낮았다. 분석에 사용된 동해부이에서 두 자료의 상관지수는 0.89, 편차는 0.09°C , 그리고 RMSE는 0.50°C 로 나타났다. 위성자료는 10 km 격자에 대한 평균값이고 부이자료는 한 지점의 자료임을 고려하면, 이러한 차이는 주로 공간해상도의 차이로 발생하였을 가능성이 높다. 따라서 위성 해수면온도 자료를 본 분석에 사용하는 데에는 큰 문제가 없는 것으로 사료된다. 동해 해류자료의 정확도는 기존 연구에서 동해 남서부 해역에서 선박장착 초음파 해류계(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)를 이용하여 이미 검증되었기 때문에(Lee et al., 2009), 본 연구에서는 따로 분석을 실시하지는 않았다.

동해는 태평양의 북서쪽에 위치한 반쯤 닫혀진 바다에 위치하고 있다. 동해의 수온은 동해 주변의 바람장 변화, 동아시아 몬순, 그리고 해양-대기 상호작용 등에 의해 영향을 받아 연변화 및 경년변동을 포함한 다양한 주기의 변동성을 보이는 것으로 선행연구들에서 보고되고 있다(Minobe et al., 2004; Kim et al., 2011). 특히, 한반도 동쪽 연안 가까이에 위치한 동해부이에서는 그 변동성이 매우 컸다. 실제로 2014년 2월 한 달간 동해부이와 위성자료에서 관측된 표층수온 변동을 살펴보면(Fig. 13g), 1.5°C 이상의 수온 하강과 상승이 여러 차례 나타났다.

부이와 모델 사이에 가장 큰 오차가 발생한 2014년 2월 22일의 해수면온도 공간분포를 비교해보면, 모델에서 한류가 한반도 연안을 따라 혀(tongue) 모양으로 동해부이까지 남하하고 있고 이로 인해 그 지역에 동서방향으로 급격한 수온경사가 나타난다(Fig. 14a). 반면 위성자료에서는 한반도 연안을 따라 동해까지 남하하는 한류 뿐 아니라 동서방향으로 급격한 수온경사가 나타나지 않았다(Fig. 14b). 모델과 위성자료의 공간적인 차이를 보면(Fig. 14c), 모델은 동해부이 근처에서 연안을 따라 해수면온도를 매우 낮게 모의하

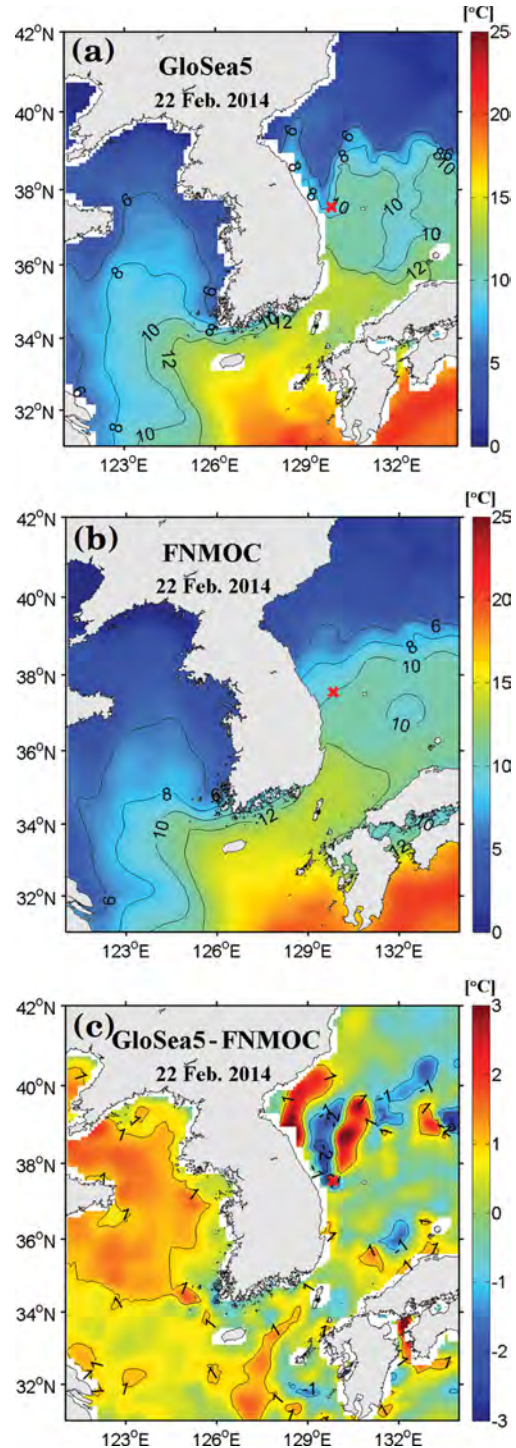


Fig. 14. Spatial distributions of SST from (a) GloSea5 simulation (Exp. 1) and (b) FNMOC satellite on 22 February 2014 and (c) their differences (GloSea5 minus FNMOC). The X symbol represents the location of Donghae buoy.

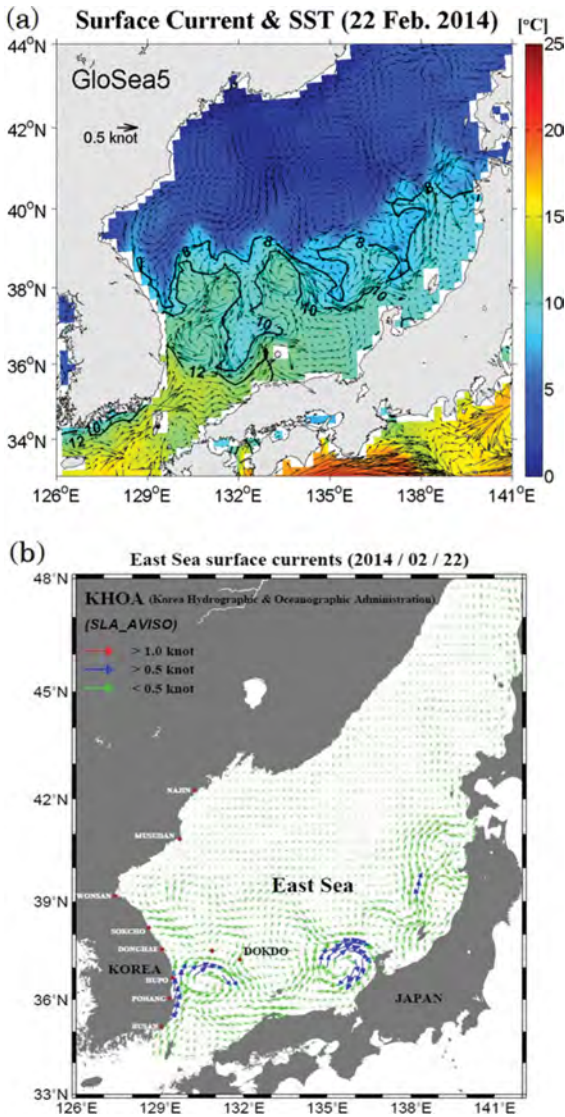


Fig. 15. Spatial distributions of (a) GloSea5-simulated surface currents (vectors) and SST (shade) and (b) satellite-based geostrophic currents (vectors) produced by the KHOA on 22 February 2014.

고 있고, 북한 연안과 울릉도 근처에서 높게 모의하고 있음이 뚜렷이 나타난다.

Choi et al. (2012)에 따르면, 동해의 극전선(Polar Front)은 남쪽에 유입되는 따뜻한 동한난류와 북쪽에서 남하하는 차가운 북한한류가 만나는 경계로서 약 37~40°N에 동서 방향으로 형성된다고 보고하였다. 극전선은 주로 바람이 강하고 태양복사량이 적은 겨울에 가장 잘 관측되고 그 위치도 남쪽으로 가장 많이 이동한다. 극전선의 위치는 계절에 따라 그리고 해마다

남북방향으로 크게 변화하여 그 위치를 정확히 예측하기는 어렵다(Kim et al., 2002; Choi et al., 2012). 특히, 극전선의 위치를 결정하는 동한난류는 동해안을 따라 북상하면서 큰 시공간적인 변동성을 가지며 위도 37~39°N 부근에서 해안을 떠나 울릉도 북쪽 해역을 지나 쓰가루해협 쪽으로 이동하기 때문에 그 변동을 예측하기는 매우 어렵다(Cho and Kim, 1996).

모델에서 모의한 2월 22일 표층해류 분포를 보면 (Fig. 15a), 북한한류는 동해안을 따라 위도 37°N까지 남하하고 있고, 동한난류는 36.5°N 근처에서 이안하여 10°C 등온선을 따라 울릉도 북쪽 해역까지 넓게 확장하고 있음을 알 수 있다. 그러나 같은 날 국립해양조사원의 일평균 표층해류 분포에서(Fig. 15b) 북한한류는 38°N 부근에서 동쪽으로 이안하여 울릉도 북서쪽을 통과하고 있고, 동한난류는 주축(0.5 knot 이상 해류)이 37°N까지 북상하여 울릉도 이남을 통과하고 있다. 따라서 동해부이에서 나타난 모델의 과소모의 결과는 모델이 북한한류를 관측보다 남쪽에 위치하는 것으로 모의하고, 동시에 동한난류를 연안을 따라서 관측보다 남쪽으로 그리고 외해에서 관측보다 북쪽까지 확장한 것으로 모의한 결과로 발생한 것으로 해석된다.

5. 결론 및 요약

본 연구에서는 북반구에서 해양성층이 강화되는 시기에 대해 기상청에서 운용 중인 전지구 계절예측시스템(GloSea5)의 단기 해양예측 결과를 한반도 근해의 해양기상부이, 열대해역의 TAO (Tropical Atmosphere Ocean project) 부이, 그리고 북서태평양의 ARGO float 자료를 이용하여 그 정확도를 평가하였다. 또한 이 시기에 해양-대기 접합모델인 GloSea5에서 계산된 해양예측결과와 GloSea5의 해양모델인 NEMO를 단독으로 수행한 결과를 비교하여 대기-해양 접합효과가 해양의 단기예측에 미치는 영향을 조사하였다.

분석결과, 대부분의 열대해역에서는 GloSea5가 NEMO보다 해수면온도를 낮게 모의하고 있고, 반면 북반구의 나머지 해역(특히 5월에 북극 지역을 제외한 태평양과 대서양 연안을 따라)에서는 GloSea5가 NEMO보다 해수면온도를 높게 모의하는 경향이 나타났다. 태평양 열대해역의 TAO 부이 자료를 이용하여 두 모델의 해양예측 성능을 비교하면, 상대적으로 해수면온도를 낮게 모의하고 있는 GloSea5의 편차와 오차가 NEMO보다 낮게 나타났다(특히 성층이 강화된 5월에 차이가 뚜렷함). 이러한 결과는 열대해역에서 대기-해양 접합효과가 단기 해양예측에 긍정적으로 작용하였음을 시사한다. 한편, 열대해역에서 멀리 떨어진 한반도 근해에서는 GloSea5보다 상대적으로 해수

면온도를 높게 모의하고 있는 NEMO가 평균적으로 오차가 더 낮았다. 이것은 이 지역의 단기 해양예측 정확도가 대기-해양의 접합효과 보다는 다른 요인들(국지적인 해류 및 해상풍 재현 능력 등)에 의해 더 큰 영향을 받았음을 시사한다. 특히, NEMO 모델의 입력자료로 사용된 KMA 수치분석장이 우리나라 근해에서는 더 많은 관측자료가 자료동화에 사용되어 접합모델보다 더 현실적인 값을 제공한 것으로 사료된다. 한편, 북서태평양 영역(110~150°E, 20~42°N)에서 관측된 ARGO float 자료와 두 실험의 연직 수온 프로파일을 비교한 결과에서는 대부분의 수심에서 모델에 따라 큰 차이가 나타나지 않았다. 이 결과는 7 일간의 적분만으로는 대기-해양 결합효과가 표층 아래의 상층해양까지 영향을 주지 못하였음을 의미한다.

분석기간 중 TAO와 기상청 부이를 통틀어 가장 큰 오차를 보인 동해부이 지점에 대해 모델예측의 불확실성과 오차에 대한 원인을 조사하였다. 분석결과, 동해부이는 북한한류와 동한난류가 만나는 전선해역에 위치하여 수온 변동성이 매우 클 뿐 아니라 수시로 이동하는 전선의 위치에 따라 모델과 관측값의 차이가 매우 크게 나타났다. 특히, 2014년 2월 22일에 동해부이와 모델 사이의 큰 해수면온도 차이는 모델이 북한한류를 관측보다 남쪽에 위치하는 것으로 모의하였고, 이와 동시에 동한난류를 연안에서는 관측보다 남쪽에 그리고 외해에서는 관측보다 북쪽까지 확장한 것으로 모의하였기 때문에 발생한 것으로 분석된다.

본 연구에서는 GloSea5의 단기 해양예측 정확도를 평가하고 대기-해양 접합효과가 해역별로 차이가 있음을 제시하였다. 이 결과는 단기 해양예측에 초점을 맞추어져 있어 모델과 관측값의 오차 또는 모델간의 차이가 기상청의 장기 계절예측시스템에 어떠한 영향을 미칠 것인가에 대한 대답은 주지 못한다. 그러나 단기 예측결과에서도 이미 나타난 바와 같이 적분시간이 길어질수록 오차의 크기는 커지는 경향이 있어 해양예측의 정확도가 장기 계절예측의 성능에도 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 향후에 보다 장기적으로 GloSea5의 해양예측 정확도를 평가하고, 이를 기반으로 해양모델을 개선하는 연구를 수행하고자 한다. 이와 더불어 북반구에서 성층이 강화되는 겨울(2월)과 봄(5월) 시기뿐 아니라 여름에서 가을로 성층이 약화되는 시기에 대해서도 향후 추가분석을 실시하여 모델 정확도의 계절적인 변화 특징을 조사하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국립기상과학원 “기상업무지원기술개발 연구(NIMS-2016-3100)”의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Arribas, A., and Coauthors, 2011: The GloSea4 Ensemble Prediction system for seasonal forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 1891-1910.
- Camp, J., M. Roberts, C. MacLachlan, E. Wallace, L. Hermanson, A. Brookshaw, A. Arribas, and A. A. Scaife, 2015: Seasonal forecasting of tropical storms using the Met Office GloSea5 seasonal forecast system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 2206-2219.
- Cho, Y. K., and K. Kim, 1996: Seasonal variation of the East Korea Warm Current and its relation with the cold water. *La Mer*, **34**, 172-182.
- Choi, B. J., D. S. Byun, and K. H. Lee, 2012: Satellite-altimeter-derived East Sea surface currents: Estimation, description and variability pattern. *The Sea*, **17**, 225-242 (in Korean with English abstract).
- Donlon, C. J., M. Martin, J. Stark, J. Roberts-Jones, E. Fiedler, and W. Wimmer, 2012: The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system. *Remote Sens. Environ.*, **116**, 140-158.
- Graham, R. J., M. Gordon, P. J. McLean, S. Ineson, M. R. Huddleston, M. K. Davey, A. Brookshaw, and R. T. H. Barnes, 2005: A performance comparison of coupled and uncoupled versions of the Met Office seasonal prediction general circulation model. *Tellus*, **57A**, 320-339.
- Jung, M.-I., S.-W. Son, J. Choi, and H.-S. Kang, 2015: Assessment of 6-Month Lead Prediction Skill of the GloSea5 Hindcast Experiment. *Atmosphere*, **25**, 323-337 (in Korean with English abstract).
- Kang, H.-S., K.-O. Boo, and C. Cho, 2011: Introduction to the KMA-Met Office joint seasonal forecasting system and evaluation of its hindcast ensemble simulations. In *36th NOAA Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop*, 3-6.
- Kim, K., Y.-K. Cho, B.-J. Choi, Y.-G. Kim, and R. C. Beardsley, 2002: Sea level variability at Ulleung Island in the East (Japan) Sea. *J. Geophys. Res.*, **107**, 3015.
- Kim, S.-J., S.-H. Woo, B.-M. Kim, and S.-D. Hur, 2011: Trends in sea surface temperature (SST) change near the Korean peninsula for the past 130 years. *Ocean Polar Res.*, **33**, 281-290.
- Lee, K.-J., and M. H. Kwon, 2015: A prediction of North-east Asian summer precipitation using Teleconnection. *Atmosphere*, **25**, 179-183 (in Korean with English abstract).
- Lee, S. H., D. S. Byun, B. J. Choi, and E. Lee, 2009: Estimation of the surface currents using mean dynamic

- topography and satellite altimeter data in the East Sea. *The Sea*, **14**, 195-204 (in Korean with English abstract).
- MacLachlan, C., and Coauthors, 2014: Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5): A high resolution seasonal forecast system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 1072-1084.
- Madec, G., and the NEMO team, 2008: NEMO ocean engine. Note du Pôle de modélisation de l'Institut-Pierre-Simon Laplace, **27**, 401 pp.
- Martin, M. J., A. Hines, and M. J. Bell, 2007: Data assimilation in the FOAM operational short-range ocean forecasting system: A description of the scheme and its impact. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **133**, 981-995.
- Minobe, S., A. Sako, and M. Nakamura, 2004: Interannual to interdecadal variability in the Japan Sea based on a new gridded upper water temperature dataset. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 2382-2397.