

## 2014년 계절예측시스템과 중기예측모델의 예측성능 비교 및 검증

이상민\* · 강현석 · 김연희 · 변영화 · 조천호

기상청 국립기상과학원

(접수일: 2015년 12월 3일, 수정일: 2016년 2월 1일, 게재확정일: 2016년 2월 1일)

### Verification and Comparison of Forecast Skill between Global Seasonal Forecasting System Version 5 and Unified Model during 2014

Sang-Min Lee\*, Hyun-Suk Kang, Yeon-Hee Kim, Young-Hwa Byun, and ChunHo Cho

National Institute of Meteorological Sciences, Korea Meteorological Administration, Jeju, Korea

(Manuscript received 3 December 2015; revised 1 February 2016; accepted 1 February 2016)

**Abstract** The comparison of prediction errors in geopotential height, temperature, and precipitation forecasts is made quantitatively to evaluate medium-range forecast skills between Global Seasonal Forecasting System version 5 (GloSea5) and Unified Model (UM) in operation by Korea Meteorological Administration during 2014. In addition, the performances in prediction of sea surface temperature anomaly in NINO3.4 region, Madden and Julian Oscillation (MJO) index, and tropical storms in western north Pacific are evaluated. The result of evaluations appears that the forecast skill of UM with lower values of root-mean square error is generally superior to GloSea5 during forecast periods (0 to 12 days). The forecast error tends to increase rapidly in GloSea5 during the first half of the forecast period, and then it shows down so that the skill difference between UM and GloSea5 becomes negligible as the forecast time increases. Precipitation forecast of GloSea5 is not as bad as expected and the skill is comparable to that of UM during 10-day forecasts. Especially, in predictions of sea surface temperature in NINO3.4 region, MJO index, and tropical storms in western Pacific, GloSea5 shows similar or better performance than UM. Throughout comparison of forecast skills for main meteorological elements and weather extremes during medium-range, the effects of initial and model errors in atmosphere-ocean coupled model are verified and it is suggested that GloSea5 is useful system for not only seasonal forecasts but also short- and medium-range forecasts.

**Key words:** Global seasonal forecasting system version 5, unified model, medium-range forecast skill

### 1. 서 론

기상현상은 일반적으로 2주 이상 예측이 불가능하다. 이는 대기가 혼돈 상태여서 초기 상태의 작은 오차일지라도 며칠 안에 크게 성장하기 때문이다(Lorenz,

1963). 그러나 대기는 기후로 연장되어 변화를 이끄는 예측 가능하고 느리게 변하는 인자들에 의해 영향을 받는다. 예를 들어 열대 태평양 지역 El-Nino and Southern Oscillation (ENSO) 기간 동안 매년 해수면 온도의 변동은 많은 지역에서 계절적 온도 분포와 강수량에 영향을 미친다(e.g., Trenberth and Caron, 2000; Alexander et al., 2002; Smith et al., 2012). 이러한 시간규모의 기상현상은 해수면 온도뿐만 아니라 Madden and Julian Oscillation (MJO), 몬순 시스템, 중위도 블로킹, 적도 파 등이 해당하며, 대규모 몬순 시스템과

\*Corresponding Author: Sang-Min Lee, Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Korea Meteorological Administration, Jeju-do 63568, Korea.  
Phone: +82-64-780-6670, Fax: +82-64-738-9072  
E-mail: lsmin9@gmail.com

열대지역 변동은 지역의 일기 시스템에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Xavier et al., 2014).

최근 들어 2주에서 2개월 규모의 예측성 향상이 이슈가 되고 있다. 이는 2주 이상의 시간규모를 가진 기상현상이 인간의 삶과 지역사회에 미치는 영향이 크지만 수치 기상예측 모델로 2주 이상을 예측하기는 힘들고, 기후예측 모델로 계절규모 이하를 예측하기 어렵기 때문이다. 이렇듯 단기예측과 계절예측 사이 예측 공백기간의 이음새 없는 예측에 대한 관심이 높아지면서 국제기상기구는 2주에서 2개월 간 예측성 향상을 위해 Subseasonal to Seasonal (S2S)라는 슬로건을 내걸고 2014년부터 10년 간 프로젝트를 추진 중에 있다(WMO, 2013).

한편, 영국 기상청은 2009년 9월부터 Hadley Centre Global Environmental Model Version 3 (HadGEM3) 기반의 전지구 결합모델인 계절예측시스템 Global Seasonal Forecasting System version 4 (GloSea4)을 운영하고 있으며(Arribas et al., 2011) 2013년 7월에는 공간해상도 등을 업그레이드 한 5번째 버전인 Global Seasonal Forecasting System version 5 (GloSea5)를 운용 중에 있다. GloSea5는 영국기상청 Unified Model (UM) 대기모델, Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO) 해양모델, Los Alamos Sea-ice Model (CICE) 해빙모델, Met Office Surface Exchange Scheme (MOSES-II) 지면모델로 구성되며, 앙상블 예측시스템으로 HadGEM3 전 지구 기후모델의 고해상도 버전이다(MacLachlan et al., 2015). 한국 기상청과 국립기상과학원도 영국 기상청과 계절규모의 한영 공동 기후예측시스템을 정착하고, 2010년부터 GloSea4를 도입하고, 2014년부터는 안정화된 GloSea5를 현업으로 활용 중에 있다.

GloSea5를 이용한 계절규모의 예측성능을 검증한 대표적인 연구로 고해상도 GloSea5를 이용하여 대기의 주요 경년 변동모드(ENSO, 북 아틀란트 진동과 북극 진동)의 성능을 검증하고, 북서태평양 아열대 고기압을 이용한 동아시아 여름강수 예측성을 검증한 연구(MacLachlan et al., 2015)와 남동아시아 극한 강수 현상에 MJO의 영향에 대한 예측성을 검증한 연구(Xavier et al., 2014), 열대성 저기압의 계절예측 성능을 검증한 연구(Camp et al., 2015) 등이 있다. 이러한 연구들은 고해상도로 업그레이드된 GloSea5가 계절규모에서 예측성능이 다른 모델에 비해 우수하다는 것을 검증하였다. 그러나 아직까지 단중기 기간 동안 대기 기본 변수들과 강수 예측성능 등 GloSea5의 초기 관측 오차와 대기, 해양 자료동화, 모델 균형상태를 위한 스핀 업 기간 등 모델 오차의 예측성능에 대해 검증을 수행한 연구는 찾아보기 어렵다.

비록 GloSea5는 HadGEM3 기반의 전 지구 기후 예

측모델이지만 대기 모델로 UM을 사용하기 때문에 초기치의 정확도가 뛰어나고, 해양과 해빙 자료동화가 수행되기 때문에 해양의 영향을 많이 받는 지역 기상현상이나 대기-해양 상호작용으로 발생하는 기상현상 예측에 있어 우수한 성능을 보일 것으로 예상되지만, 기존의 중기예측모델과 예측성능이 정량적으로 얼마나 차이를 보이는지 비교하고 검증해 볼 필요가 있다. 실제적으로 GloSea4의 경우 서태평양에서 ENSO 강수 아노말리의 과대모의가 나타난다(MacLachlan et al., 2015). 이것은 대부분의 계절예측시스템과 결합기후 모델에서 나타나는 일반적인 모델오차이다(Luo et al., 2005; Guilyardi et al., 2009).

따라서 본 연구는 한국 기상청 계절예측시스템인 GloSea5의 단중기 예측성능을 검증하기 위해 대기의 기본 변수들과 일 강수량, 열대 해수면 온도 아노말리, MJO, 열대성 저기압 등 기상변수 및 기상현상들에 대해 중기예측모델인 UM 전구 모델과의 전반적인 예측성능을 정량적으로 비교하고 검증하였다. 이를 통해 대기와 해양 결합모델이 단중기 기간 동안 가지는 해양과 해빙자료의 동화 효과를 검증하고 스핀 업 기간 동안 GloSea5가 가지는 모델 오차 등을 분석하였다.

## 2. 사용된 모델과 검증 방법

### 2.1 Global Seasonal Forecast System Version 5 (GloSea5) and Unified Model (UM)

GloSea5 예측장은 대기-해양이 결합된 General Circulation Model (GCM)을 이용한 예측장으로부터 산출된다. 이것은 HadGEM3 기후모델 버전으로 UM 대기, NEMO 해양과 MOSES 지표면을 사용한다. GloSea5는 대기는 N216(위도 0.8도, 경도 0.5도, 중위도에서 수평적으로 약 50 km 해상도), 해양은 ORCA0.25 (0.25도)를 사용한다. 연직 해상도는 GloSea4와 유사하게 대기 85층, 해양 75층이다. 기후 강제력(에어로졸, 메탄, 이산화탄소 농도 등)은 과거모의기후 기간 동안 관측 값이며 A1B 시나리오를 따른다. 오존은 관측된 기후 값이며, 계절 사이클을 포함한다(Mogensen et al., 2009).

UM은 단일 대기모델로 4-dimensional variational data assimilation (4D-Var)로 자료동화하며, 수평 해상도에 따라 Global Data Assimilation and Prediction System (GDAPS, 25 km), Regional Data Assimilation and Prediction System (RDAPS, 12 km), Local Data Assimilation and Prediction System (LDAPS, 1.5 km)로 전구, 지역, 국지 모델로 나누어 운용된다. 한국 기상청은 단중기 기상을 예측하기 위해 UM을 2010년 5월 이후 현재까지 현업모델로 이용하고 있으며, 전

**Table 1.** Simple description of GloSea5 and UM.

	GloSea5	UM
Resolution	Atmosphere (UM): 60 km (N216L85) Ocean (NEMO): 25 km (ORCA 0.25 L75)	25 km (N512L70)
Grid	432 X 325	1024 X 768
Layers	Atmosphere: 85 levels Ocean: 75 levels	70 vertical levels
Coupler	OASIS	-
Data Assimilation	Ocean: 3D-VAR	4D-VAR
Land Surface Scheme	MOSES (Met Office Surface Exchange Scheme)	JULES

**Table 2.** Used atmospheric variables, phenomenon and verification area and index.

Variables	Analysis Data	Verification Area	Verification Index
Z500, T850 and U200	Z500, T850 and U200 of ECMWF analysis data (global)	Global	Root-mean Square Error
1-day Precipitation	Global Telecommunication System and Global Precipitation Measurement	East Asia	Success Ratio Probability of Detection BIAS Critical Success Index
SST & SSTA (ENSO)	Skin temperature of ECMWF analysis data (global) (Mean data: NCEP/NCAR reanalysis data)	NINO3.4 region	Anomaly Correlation
MJO (RMM)	OLR, U850 and U200 of ECMWF analysis data (global) (Mean data: NCEP/NCAR reanalysis data)	Tropical region	Correlation Skill RMSE
Tropical Storms	Best track of RSMC Tokyo	Western North Pacific	Detection rate Direct Position Error Maximum central wind speed Minimum central pressure

구 모델은 240시간 예측장이 생산된다. 두 예측시스템의 간략한 설명은 Table 1과 같다.

**2.2 검증 변수 및 영역과 사용된 분석 자료**

본 연구에서 예측성능을 비교하기 위해 사용된 대기 변수와 현상은 Table 2와 같다. 대기 기본변수(지위고도, 온도, U 성분 바람) 에 대한 모델 예측장의 오차 분석에는 the European Center for Medium range Weather Forecasting (ECMWF) 전구 분석장이 사용되었으며, 일강수량 검증에는 동아시아 영역 Global Teleconnection System (GTS)관측망에서 수집된 강수 자료와 Global Precipitation Measurement (GPM) 고해상도 위성자료가 이용되었다. 해수면 온도 검증은 NINO3.4 지역 해수면 온도 아노말리를 검증하여 ENSO 예측성능을 분석하였고, 대기와 해양 상호작용인 MJO의 실시간 위치와 강도에 대한 검증도 이루어졌다. 마

지막으로 북서태평양 지역 열대성 저기압의 위치와 강도에 대한 검증도 수행하였다.

**2.3 검증방법**

**2.3.1. Root-Mean Square Error (RMSE)**

예측성능 평가를 위해 기본적으로 예측장과 관측장의 차이는 Root-Mean Square Error (RMSE)가 사용되었다(Eq. 1). RMSE는 실제 관측된 값과 모델에 의해 예측된 값 사이 차이를 측정하는데 주로 사용된다.

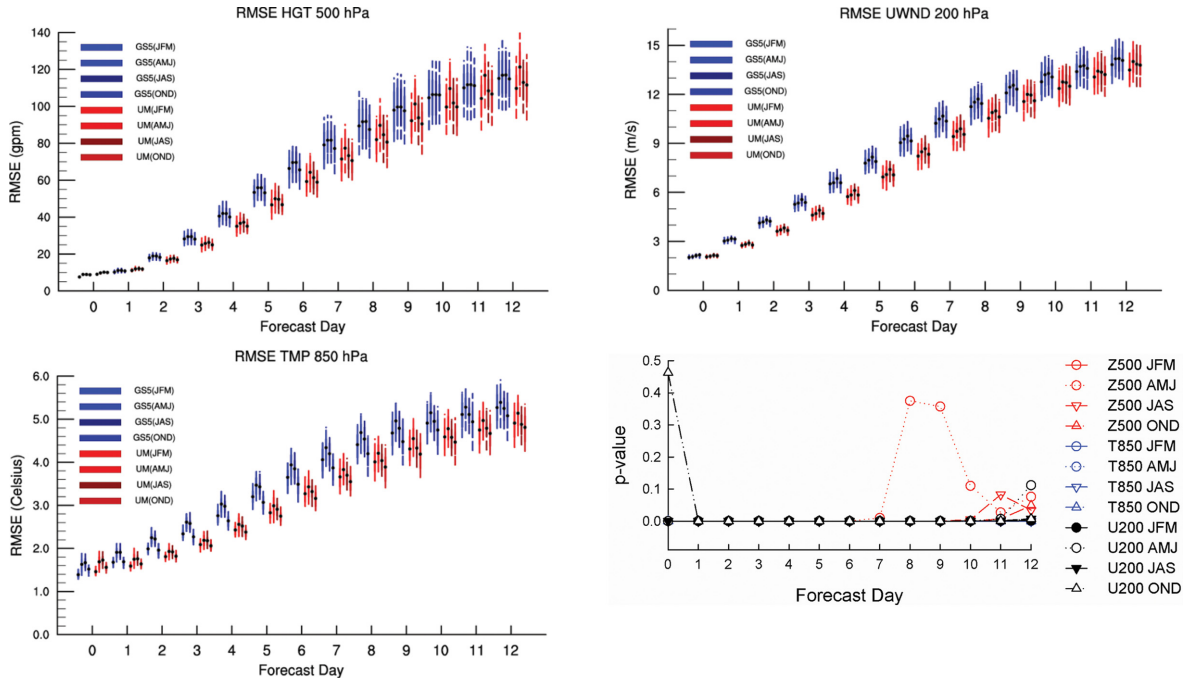
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N (y_m - o_m)^2} \tag{1}$$

**2.3.2 Performance Diagram**

1일 누적 강수 예측성능을 검증하기 위해 Performance Diagram을 이용하였다. 접근 방법은 개념적으로 Taylor

**Table 3.** Contingency table.

		FORECAST		
		YES	NO	
OBSERVATION	YES	Hits	Misses	H+M
	NO	False alarm	Correct Rejections	F+R
		H+F	M+R	



**Fig. 1.** Time-averaged RMSE distribution between forecast of GloSea5 (blue lines), UM (red lines) and analysis of ECMWF during 365 days in 2014. Lines are expressed seasonally using boxplots. Four lines indicate the period of January to March, April to June, July to September, and October to December, respectively. Bottom figure appears p-value distribution at significance level of 0.05.

(2001) 도표와 유사하며 양분된 예측성능의 4가지 측정 사이 기하학적 관계를 활용하는 것이 가능하다. 4가지 검증 지수는 probability of detection (POD), false alarm ratio (FAR), the success ratio (SR), critical success index (CSI)이다. 각각의 지수는 분할표(Table 3)를 이용하여 다음과 같이 산출된다.

$$\text{Success Ratio (SR)} = \frac{H}{H + F} \tag{2}$$

$$\text{Probability of Detection (POD)} = \frac{H}{H + M} \tag{3}$$

$$\text{BIAS} = \frac{H}{H + M + F} \tag{4}$$

$$\text{Critical Success Index (CSI)} = \frac{H}{H + F} \tag{5}$$

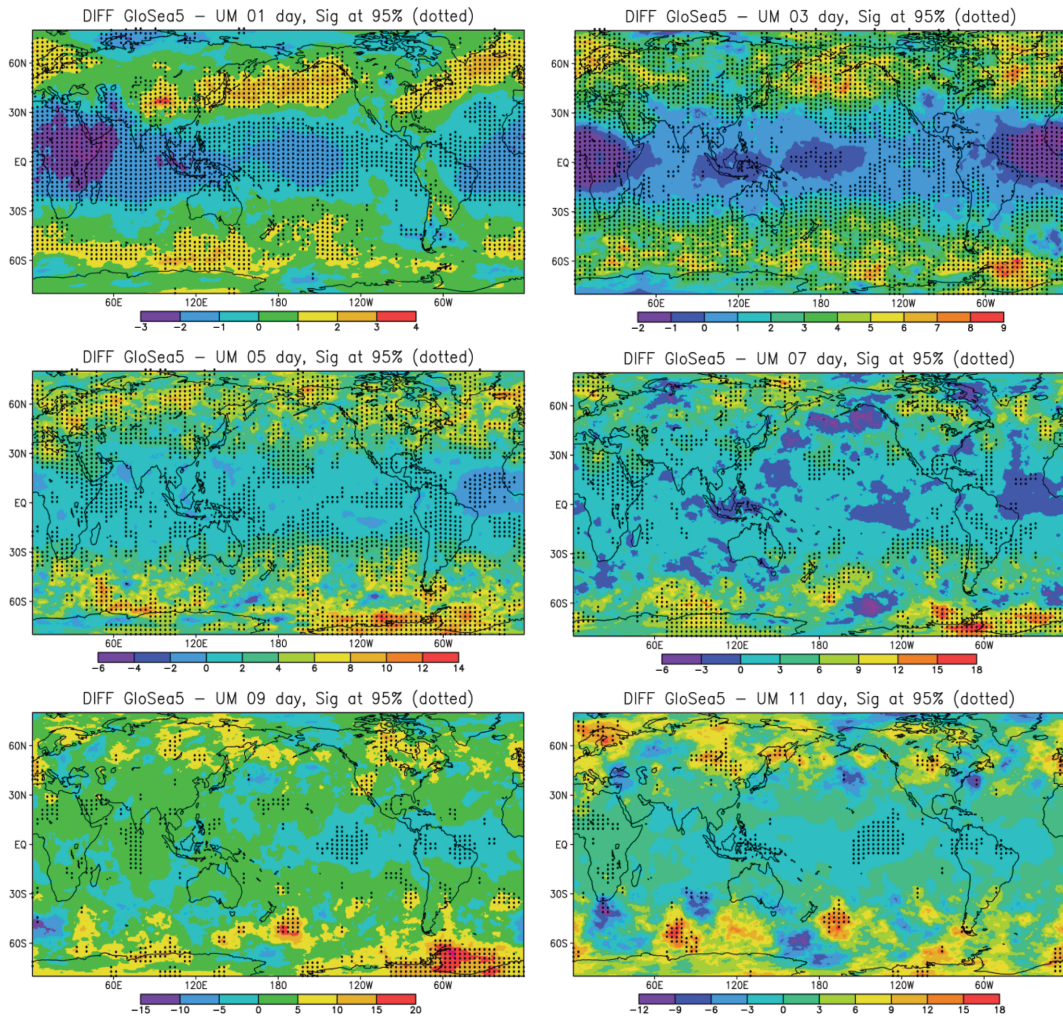
**2.3.3 Anomaly Correlation (AC)**

Anomaly Correlation (AC)은 NINO3.4 지역 해수면 온도 아노말리의 예측성능을 평가하기 위해 사용되었다(Eq. 6).

$$AC = \frac{\sum_{m=1}^M (y'_m - \bar{y}') (o'_m - \bar{o}')} {[\sum_{m=1}^M (y'_m - \bar{y}')^2 \sum_{m=1}^M (o'_m - \bar{o}')^2]}^{1/2} \tag{6}$$

여기서,  $y'$ 와  $o'$ 은 각각 기후적 평균에서 예측과 관측 해수면온도 아노말리,  $\bar{y}'$ 과  $\bar{o}'$ 은 주어진 M 격자 지





**Fig. 2.** Spatial distribution of RMSE Difference of geopotential height at 500 hPa between GloSea5 and UM system during 12-day forecast time in 2014. The dotted areas represent significance level of 0.05 or better according to a Student's t test.

점에서 평균된 아노말리를 나타낸다. AC는 기후적인 평균장으로부터 시작되는 패턴의 유사성을 탐지하도록 고안되었으며(Wilks, 2006), 관측된 값과 모의된 변동성 사이 완벽한 상관은 1.0이다. 본 연구에서는 특정 격자 지점에서 시간 변동성의 유사성을 평가하는데 사용되었다.

### 3. 500 hPa 지위고도, 850 hPa 온도, 200 hPa U 바람 예측성능

#### 3.1 시간 평균된 RMSE 분포

대기 주요 기상변수인 500 hPa 고도(Z500), 850 hPa 온도(T850), 200 hPa U 성분 바람장(U200)에 대해

ECMWF 전구 분석장을 이용하여 GloSea5와 UM 초기장부터 12일 예측장까지 일별 RMSE를 산출하였다(Fig. 1). 3개월씩으로 구분하여 일별 RMSE를 boxplot으로 나타내었다. 그 결과 3개 변수에 대한 GloSea5와 UM의 RMSE 패턴은 모두 유사한 분포를 보였다. Z500에 대한 RMSE 분포의 경우, 예측기간이 길어질수록 RMSE는 증가하는 일반적인 패턴과 초기 관측의 불확실성과 모델의 불확실성이 나타난다. GloSea5는 초단기 예측기간 동안 UM에 비해 RMSE의 증가율이 크게 나타나 두 시스템의 RMSE 차이가 증가하는 패턴을 보이다가, 예측기간이 길어질수록 RMSE 차이는 감소하는 패턴을 보인다. 3개월씩 구분한 RMSE의 계절 분포의 경우 UM 4~6월은 다른 계절에 비해

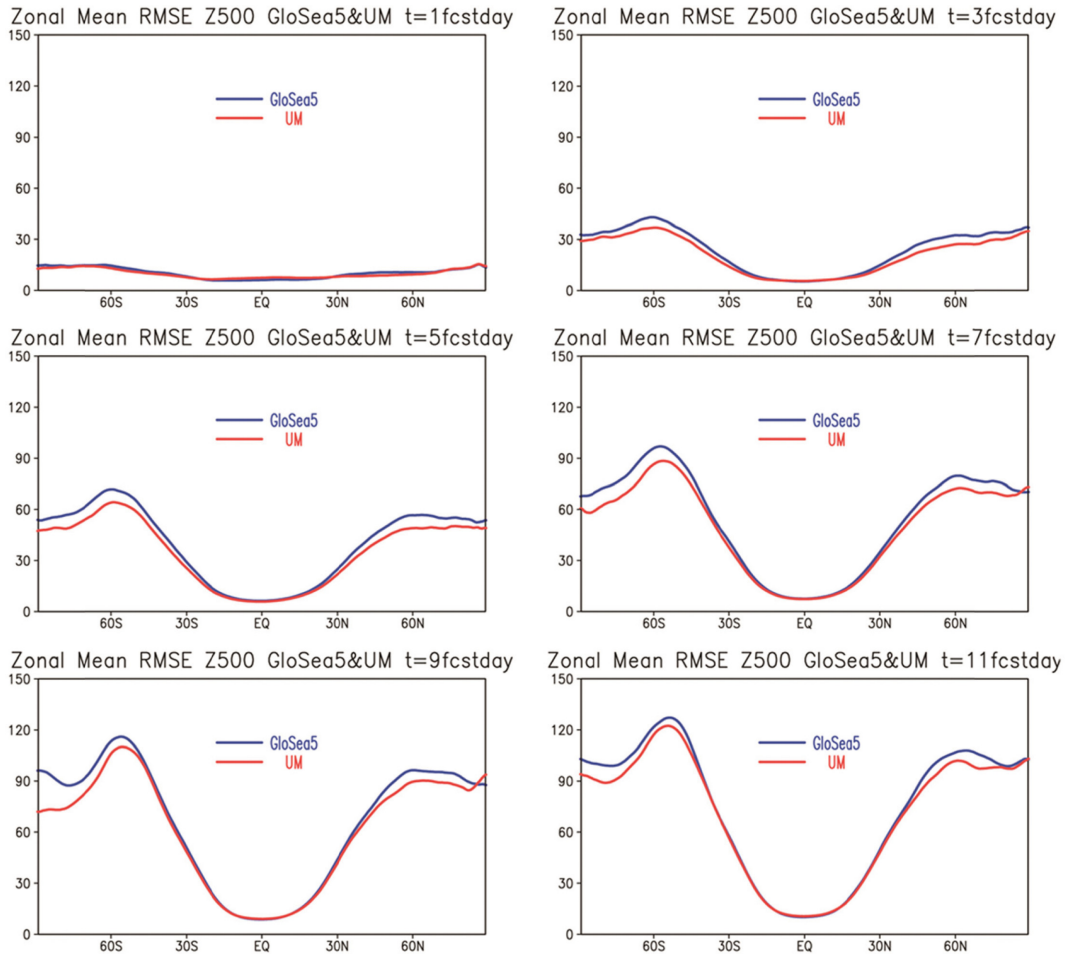


Fig. 3. Meridional Distribution of zonal mean RMSE of GloSea5 and UM system during 12-day forecast time in 2014.

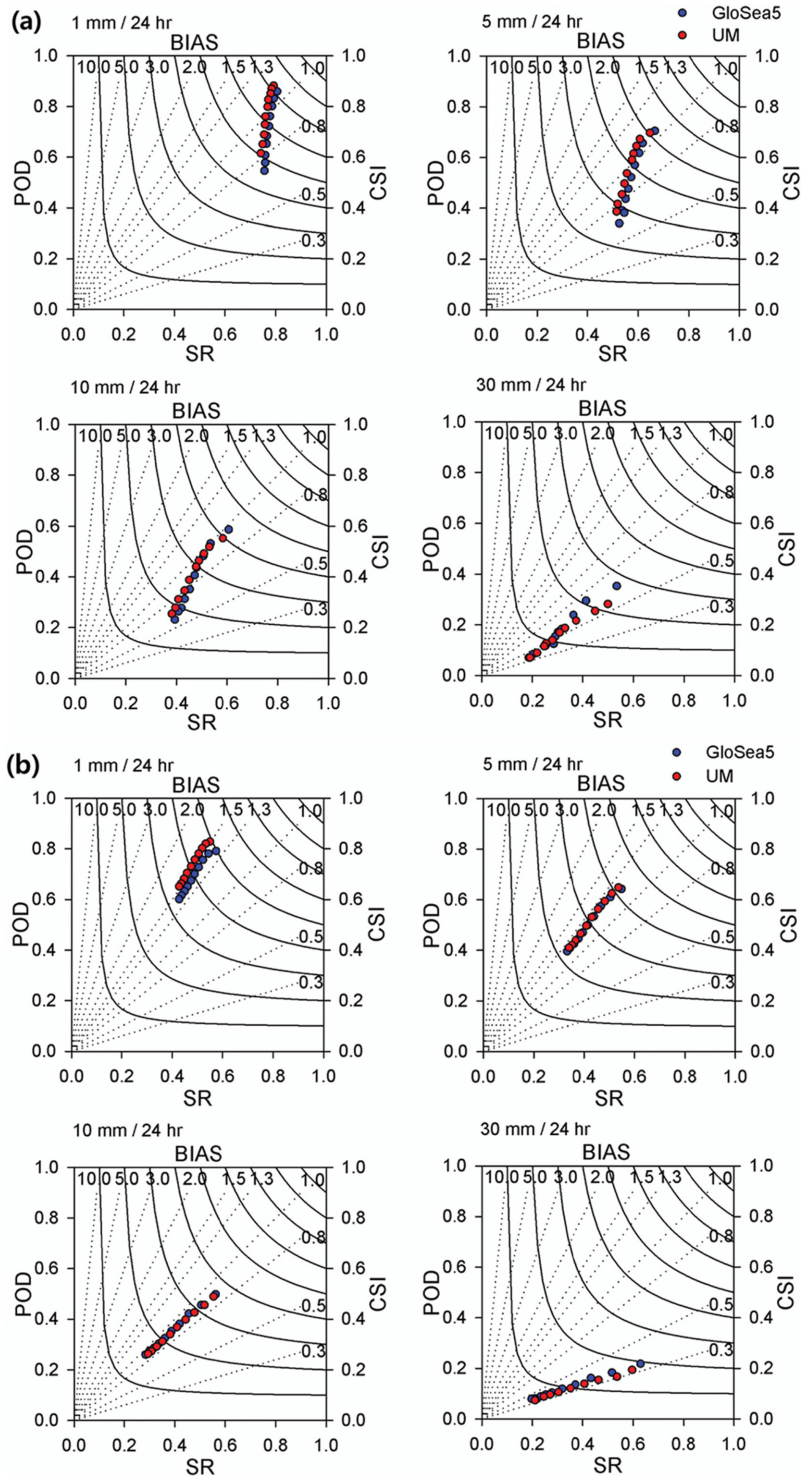
더 큰 RMSE 값을 가진다. 이로 인해 9일 이후 예측 기간 동안 UM은 GloSea5보다 더 큰 RMSE 값을 가져 예측성능이 더 낮은 것으로 분석된다. 그러나 이러한 특징은 Z500에서만 한정되어 나타난다. 다른 두 변수(T850, U200)에 대한 RMSE 패턴은 고도 RMSE 분포와 유사한 패턴을 가진다. 각 변수 별 RMSE 차이에 대한 유의성을 검증한 결과에서도 두 시스템의 RMSE 차이는 초단기 기간 동안 대부분 유의수준 5%에서 통계적으로 유의한 분포를 보이나 중기 이후 예측기간이 길어질수록 몇몇 변수와 기간에서 유의하지 않은 기간이 나타났다(Z500 4~6월, 10~12월 등). 또한 전반적으로 두 시스템은 모두 12일 예측기간 동안 RMSE가 일정하게 유지되는 패턴은 나타나지 않아 불확실성은 예측기간이 길어질수록 지속적으로 증가하는 패턴을 보인다.

초단기 예측기간 동안 GloSea5의 RMSE가 UM에

비해 ECMWF 분석장과 더 큰 차이를 보이는 원인은 추가적인 연구가 필요하겠지만 GloSea5는 대기-해양-해빙 결합 모델로 같은 기간 동안 스핀 업 기간 등 모델안정화에 시간이 소요되기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.2 평균 예측기간 별 RMSE의 공간분포

Figure 2와 Fig. 3은 Z500에 대한 예측기간 동안 일별 평균 RMSE의 공간분포를 나타낸다. ECMWF 전구 분석장과 비교하여 GloSea5와 UM의 RMSE 차이(GloSea5 - UM, Fig. 2)와 동서평균된 RMSE의 남북 분포(Fig. 3)를 분석하였다. 공간 분포의 경우 두 시스템의 차이에 대해 95% 신뢰구간에서 유의성을 검증하였다. RMSE의 차이가 유의한 영역은 점으로 표시하였다. 앞 절에서 검증된 RMSE 결과와 유사하게 초단기 예측기간 동안 GloSea5의 RMSE 증가율이 두드러지며 이후 UM의 RMSE 증가율이 상승하여 예측기



**Fig. 4.** Performance diagram of showing verification statistics for GloSea5 and UM system in using (a) GTS and (b) GPM data in 2014. This diagram simultaneously shows POD, 1-FAR, CSI, and Frequency Bias values for 1~10-day forecast times and precipitation thresholds. The best scores are in the upper right corner; bias values close to one are typically considered optimal.

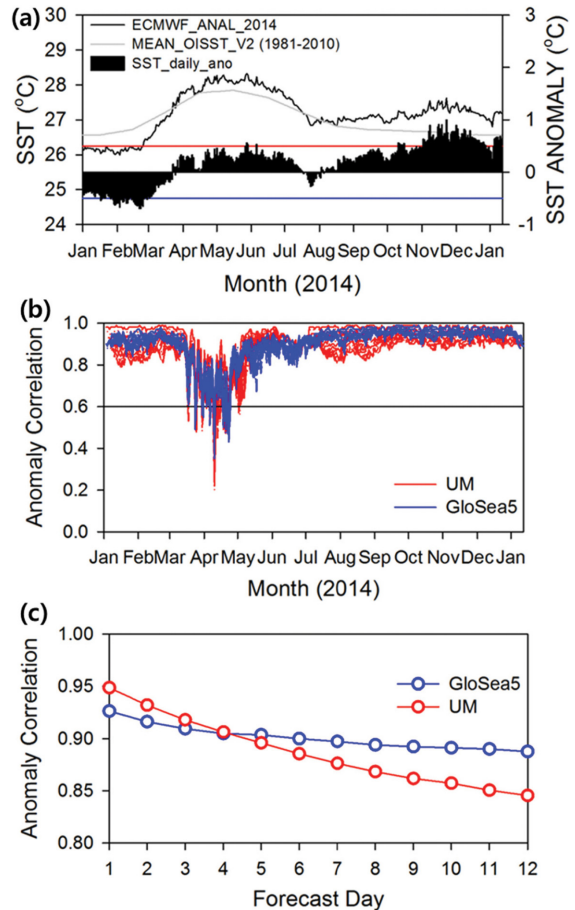


간이 길어질수록 두 시스템 간 RMSE 차이는 줄어드는 패턴을 보인다. 유의성 검증에서도 예측기간이 길어질수록 유의한 영역이 줄어드는 패턴을 보여, RMSE 차이는 감소하는 분포를 보인다. 특히, RMSE는 중위도 지역을 중심으로 급격히 상승하고, 두 시스템의 RMSE 차이도 중위도 지역에서 더 큰 값을 가진다. 또한, 예측기간이 길어질수록 열대 해양과 중위도 지역에서 지역적으로 GloSea5의 RMSE가 UM보다 적은 값을 가진다. 따라서 GloSea5의 Z500 예측성능이 UM에 비해 우수한 지역이 존재함을 확인하였다. 이러한 결과에서 단일 대기 모델에 비해 해양과 해빙의 자료동화 효과가 중기 이후 기상 예측성능을 향상시킬 수 있으며 특히, 대기와 해양 상호작용에 의해 발생하는 기상현상에 대한 예측성능의 경우 단기 예측기간 동안에도 UM보다 GloSea5가 더 우수한 예측성능을 가질 가능성을 시사한다.

#### 4. 동아시아 지역 1일 강수의 예측성능

1일 누적 강수에 대한 예측성능 검증을 위해 동아시아 영역을 대상으로 GTS 강수자료(01.01.~12.31.)와 GPM 고해상도 강수자료(04.01.~10.31.)를 관측 값으로 이용하여 performance diagram을 통해 검증하였다(Fig. 4). 강수 검증에 앞서, GloSea5와 UM의 모델 해상도 차이를 동일하게 조절하기 위해 해상도가 큰 UM의 강수 예측장을 GloSea5에 맞게 내삽하여 해상도를 동일하게 수정하였다. GTS 강수관측 값은 동아시아 지역에 약 1,440개 지점이 존재하며, 강수관측 값은 결측 값이 많이 존재하여 일 평균 200개 정도의 관측 값이 존재한다. GTS는 모델 격자와 가장 가까운 지점 값을 이용하였고, GPM은 GloSea5 격자로 역시 내삽한 후 비교하였다. 일 강수 임계치는 1.0, 5.0, 10.0, 30.0 mm d<sup>-1</sup>로 총 4개의 임계치에 대해 검증을 수행하였다. 검증은 1~10일 예측기간까지 총 1일 간격 10일에 대해 수행하였으며 검증기간 동안 각 예측기간별 평균 값을 산출하였다.

그 결과 GTS와 GPM 모두 GloSea5와 UM의 예측기간별 강수 예측성능은 유사한 분포를 보였다. 평균적으로 강수 임계치가 작을수록, 예측기간이 짧을수록 SR, POD, BIAS, CSI는 1에 가까운 값을 가져 우수한 성능을 보였다. 특히 예측기간이 증가함에 따라 모든 지수의 값이 비례적으로 낮아져 낮은 예측성을 보였으며 GTS 자료를 이용할 때 보다 GPM 자료를 이용하였을 때, 예측기간에 따른 POD의 변화가 더 크고, 작은 값을 가지는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 앞 절에서도 언급하였듯이 GTS 자료의 결측 값이 많이 존재하여 자료의 해상도가 낮기 때문이다. 또한 일 강수 임계치가 낮을수록 SR의 변화보다는 POD

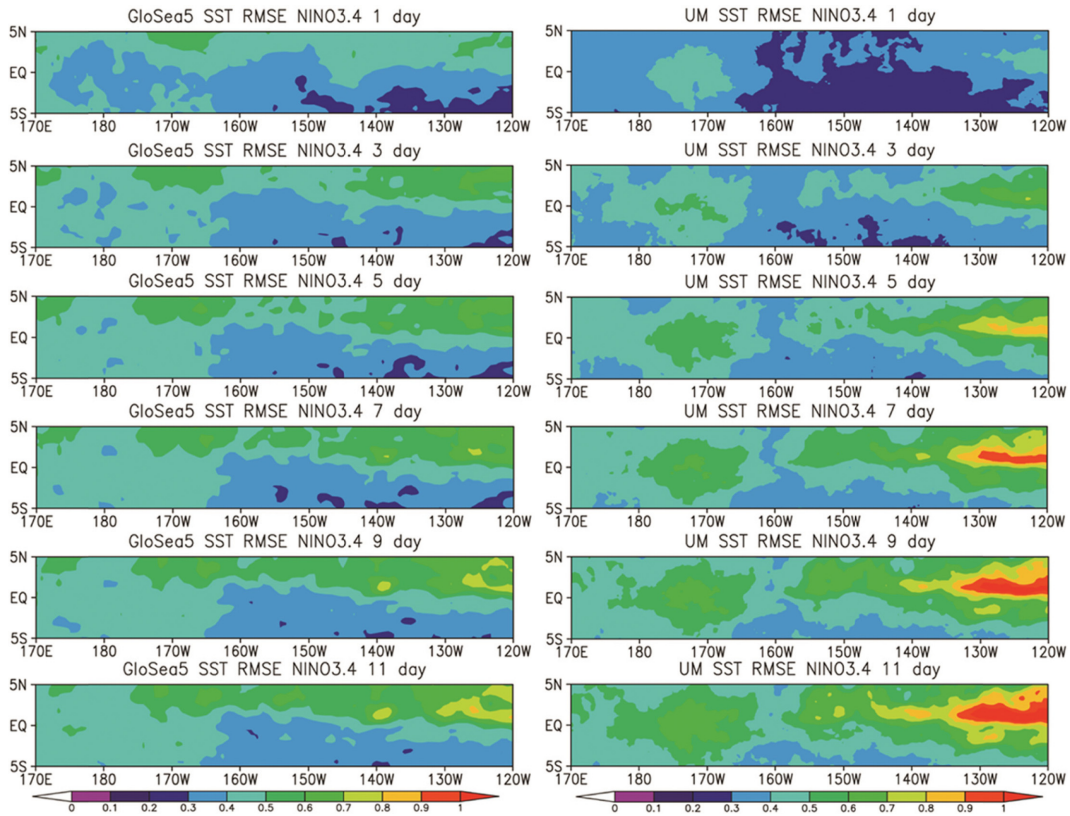


**Fig. 5.** (a) Distribution of Sea surface temperature and its anomaly in 2014 and climatological value in NINO3.4 region, (b) 5-day running means and (c) time averaged values of anomaly correlation in GloSea5 and UM during 1 to 12-day forecast time in 2014.

의 변화가 더 큰 폭으로 낮아지는 특징을 보였다. 결과적으로 앞 절에서 분석된 대기-해양 결합 모델의 초기 모델오차에도 불구하고 GloSea5는 동아시아 영역에서 단중기 기간 동안 UM과 유사한 강수예측 성능을 보이는 것으로 확인되었다.

#### 5. NINO3.4 지역 해수면온도 아노말리의 예측성능

열대 태평양지역 해수면온도 아노말리 분포로 ENSO 예측 성능을 검증하기 위해 NINO3.4 지역(5°S-5°N, 170°W-120°W) 해수면온도 아노말리의 예측성능을 Anomaly Correlation (AC)를 이용하여 분석하였다. NINO3.4 지역은 적도 cold tongue 지역으로 적도대류



**Fig. 6.** Spatial distribution of time-averaged RMSE of Sea surface temperature anomaly in NINO3.4 region at GloSea5 and UM system during 1 to 12-day forecast time in 2014.

와 대기순환 패턴 변화를 보여주는 해수면온도와 해수면온도의 기울기 변화를 측정하는 중요한 지역에 해당하기 때문에 모델의 성능을 검증하는데 주로 사용되는 영역 중 하나이다.

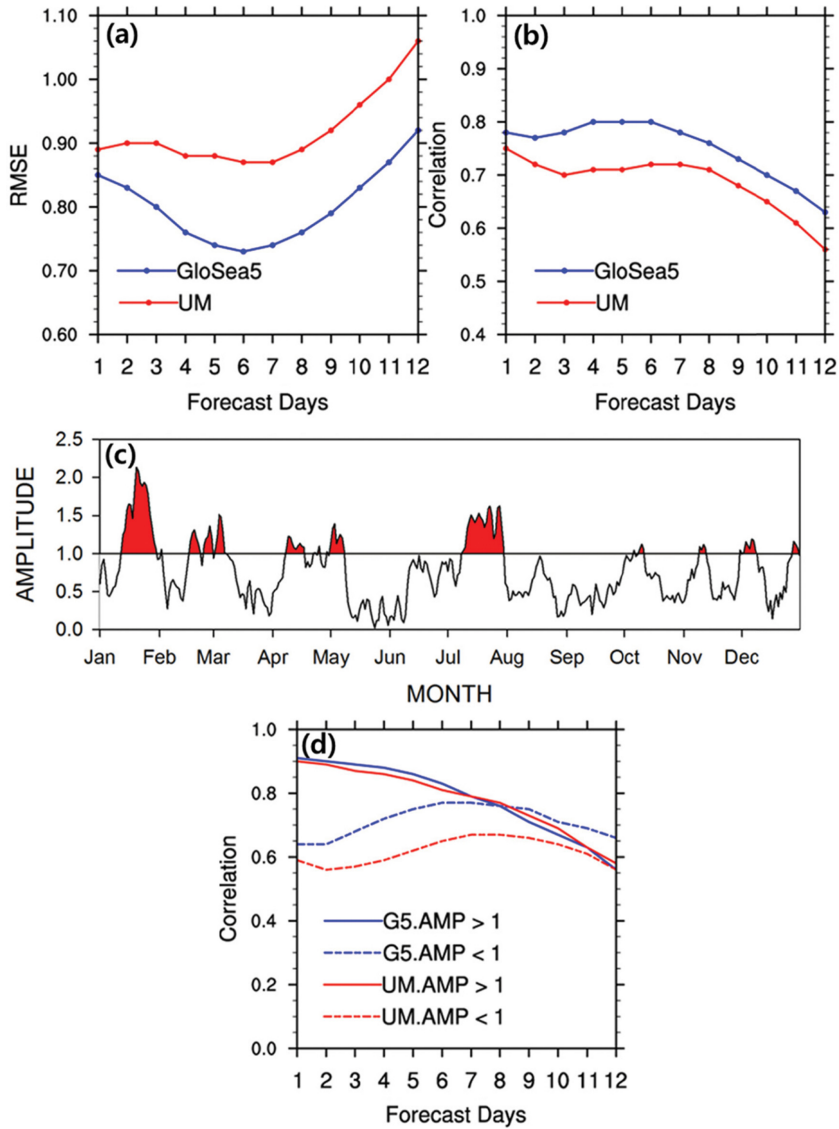
먼저 AC 산출을 위해 평년에 대한 2014년 일별 평균 해수면온도 아노말리를 계산하고 GloSea5와 UM 예측 값과 평균 해수면온도를 이용하여 1~12일 예측장에 대한 아노말리를 산출하였다. 30년 평균 자료는 NCEP/NCAR 재분석 자료를 이용하였으며, 2014년 일별 분석장은 ECMWF 표면 온도를 이용하였다. 2014년 일별 해수면온도 아노말리의 분포를 보면, 3월 말 음에서 양의 아노말리로, 7월 말 단기간 음의 아노말리 분포를 보이고 있으며, ENSO 관정 기준치와 비교해 볼 때 2014년의 경우 엘니뇨 또는 라니냐 현상은 발생하지 않았다(Fig. 5a).

NINO3.4 지역 해수면온도 아노말리에 대한 365일 동안의 AC를 산출한 결과는 Fig. 5b와 같다. 먼저 연변동 분포의 경우, 3~4월 GloSea5와 UM은 모두 AC의 낮은 값이 산출되었으며, 이는 해수면온도 아노말리 값이 같은 기간 음에서 양으로 아노말리의 위상 변화 영

향뿐만 아니라 해수면 온도 예측에 있어 나타나는 봄철 예측 장벽과 관련된 것으로 판단된다. 5일 이동평균된 GloSea5와 UM의 예측기간 별 변동 분포를 보면, GloSea5가 UM에 비해 작은 변동 폭을 가진다. 여기서 비록 UM의 해수면온도는 초기 입력장으로서 이용되고 이후 예측장에서는 변화가 없지만 초기장부터 3일 예측기간까지는 GloSea5에 비해 관측 값과 더 유사한 값을 가진다. 그러나 4일 예측기간 이후부터는 GloSea5의 NINO3.4 지역 해수면온도 아노말리 예측성능이 우수한 분포를 가지는 것이 확인되었다(Fig. 5c).

NINO3.4 지역 GloSea5, UM 해수면온도 예측장과 ECMWF 분석장 차이의 예측 시간별로 평균된 RMSE 공간분포를 검증한 결과, 단기 예측기간 동안은 UM의 예측장이 분석장과 유사하지만, 예측기간이 길어질수록 GloSea5의 예측성능이 더 우수한 분포가 AC 분포와 유사하게 나타난다(Fig. 6). UM 시스템은 예측기간이 길어질수록 NINO3.4 지역 동쪽해역에서 분석장과 차이가 크게 나타나기 시작하여 RMSE가 증가하는 분포를 보였다.

이번 연구결과에서 제시는 하지 않았지만, 한반도



**Fig. 7.** (a) Correlation skill and (b) RMSE for the bivariate MJO index during 1~12-day forecast time in 2014. Blue and red line indicates GloSea5 and UM, respectively. (c) Time-series of MJO strength in 2014. Red area shows period of strong MJO events. (d) Correlation skill for MJO strength. Solid (dashed) curves indicate correlation skill for strong (weak) MJO events.

근해 GloSea5의 persistence 예측 결과에서도 UM persistence 예측보다 BIAS와 RMSE의 성장률이 낮은 분포를 보여 더 우수한 해수면 온도 예측성능을 보이는 것을 확인하였다.

### 6. Madden and Julian Oscillation 지수 예측성능

해양과 대기의 상호작용으로 나타나는 기상현상 중

하나인 MJO는 계절안 진동인 30~60일 주기를 가진 열대대기의 대기순환과 열대 대류현상 사이 대규모 결합 현상이다. MJO 현상에 대한 실시간 예측성능을 분석하기 위해 Wheeler and Hendon (2004) 방법인 Real-time Multivariate MJO (RMM) 지수를 산출하여 GloSea5와 UM의 RMM 예측기술을 검증하였다. RMM 지수는 MJO의 위치와 강도를 실시간으로 탐지하는 지수로 RMM1, RMM2로 이루어지며, 이를 이용하여 대류강도, 상하층 바람의 위치와 강도를 측정하는 방

**Table 4.** List of Typhoons over western North Pacific in 2014.

TY_number	TY Name	Period (day)	TY_number	TY Name	Period (day)
1408	NEOGURI	4	1415	KALMAEGI	3
1409	RAMASON	4	1418	PHANFONE	5
1410	MATMO	2	1419	VONGFONG	6
1411	HALONG	9	1420	NURI	4
1413	GENEVIEVE	3	1422	HAGUPIT	5

법이다.

RMM 지수의 산출은 먼저, 15°N-15°S 평균된 OLR, 850과 200 hPa 동서 바람의 일자료를 이용하여 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function, EOF) 분석을 수행하였다. EOF 분석 이전에 각 일자료들의 기후평균, 계절주기, ENSO 변동성 등을 제거하기 위하여 최근 120일의 시간 평균을 제거한 편차장을 사용하였다. 이렇게 산출된 eigenvectors (EOF1 and EOF2) 와 현재 일자료를 비교하여 MJO의 실시간 위치와 강도를 분석하였다.

**6.1 MJO 지수 예측성능**

검증기간 동안 두 시스템의 1~12일 예측장을 이용하여 ECMWF의 분석장으로 산출된 RMM 지수와 비교하여 RMSE와 Correlation Skill 값을 산출하였다 (Fig. 7a, b). 그 결과 검증기간 시간 평균된 1~12일 예측기간 동안 GloSea5는 UM보다 낮은 RMSE 분포를, 높은 Correlation Skill 값을 가져 2014년 동안 MJO의 위치와 강도 예측성능이 더 우수한 것으로 분석되었다. 두 시스템은 단기 예측기간 동안 유사한 예측성능을 보이다가 중기(1주) 이후부터 급격히 예측성능은 떨어지는 분포를 보였다. 그러나, GloSea5 RMSE의 경우 단기 예측기간(1주) 동안은 반대로 예측성능이 향상되는 분포를 보였다. 이러한 패턴은 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각되나 검증기간이 다소 짧고(365일), 2014년 동안 MJO가 다른 기간에 비해 상대적으로 강하지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

**6.2 MJO 강도 예측성능**

검증기간 동안 MJO 강도에 따른 예측성능을 분석하였다. MJO 강도는 Eq. (7)과 같이 정의된다.

$$AMP = \sqrt{RMM1^2 + RMM2^2} \tag{7}$$

2014년의 MJO를 강도 별로 분석한 결과 강한 MJO는 101일, 약한 MJO는 264일로 구분되었다(Fig. 7c). 구분 기준은 MJO 강도가 1보다 클(작을) 경우 강한(약한) MJO로 정의하였다.

MJO 강도에 따른 GloSea5와 UM의 12일 예측성능을 검증한 결과(Fig. 7d), 강한 MJO 발생에 따른

Correlation Skill은 두 시스템 모두 유사한 값을 가지고, 예측기간이 길어질수록 예측성능은 떨어지는 일반적인 분포를 보였다. 그러나 약한 MJO 발생에 따른 예측성능의 경우 GloSea5의 예측성능이 UM에 비해 우수한 분포를 보였다. 또한 단기 예측기간(1주)까지 예측성능이 다소 향상되는 결과는 앞에서 언급한 것과 같이 검증기간이 짧은 것이 그 원인으로 판단된다. GloSea5의 경우 단기(1주) 이후 예측기간 동안은 MJO가 약할 때 예측성능이 더 우수한 분포를 보였다. 또한 검증기간 동안 두 시스템은 모두 0.5 이상의 Correlation Skill을 가지는 것으로 나타났다.

**7. 북서태평양 지역 열대성 저기압 예측성능**

2014년 북서태평양에서 발생한 Tropical Storm (TS) 들 중에서 중심최대풍속이 64 knots 이상인 Typhoon (TY) 급으로 발달한 TS를 대상으로 GloSea5와 UM의 예측장을 이용하여 태풍의 중심을 탐지하고 탐지된 태풍의 위치와 강도 및 이동경로 오차를 산출하여 검증하였다. 2014년 동안 TY 급으로 발달한 TS는 지역 특별기상센터(Regional Specialized Meteorological Centre, RSMC) 도쿄 베스트 트랙을 이용하여 Table 4와 같이 총 10개 태풍이다. 각각 태풍으로 지속된 기간은 표와 같이 다르게 나타난다. 검증 간격은 24시간이다.

**7.1 TS 중심 탐지**

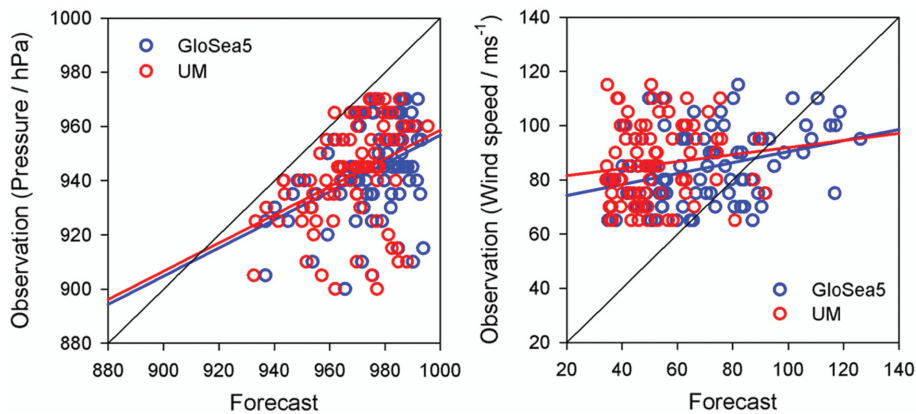
태풍의 중심을 탐지하기 위해서 다음과 같은 기준을 설정하였다. 1) 북서태평양 지역(100°E~180°E, 적도~40°N) 최저 해면기압 지점, 2) 최저 해면기압 지점 1도 이내 지역에서 850 hPa 최대풍속 17 m s<sup>-1</sup> 이상, 3) 1)과 2)의 조건을 만족하고 850 hPa 상대와도가 0.0003/s 이상, 4) 이전 관측된 TY 중심으로부터 예측된 TY 중심까지 거리 차가 10도 이내. 이러한 중심탐지 방법은 다른 연구들에서 제안된 조건을 반영하여 산출하였다(Bengtsson et al., 1995; Murakami and Wang, 2010; Suzuki-Parker, 2012).

RSMC 도쿄 베스트 트랙과 GloSea5, UM의 예측장을 이용하여 10개 TY에 대해 예측한 결과, 전반적으



**Table 5.** Mean error statics of typhoon forecasts between GloSea5 and UM in 2014.

Verification Index	T+00		T+24		T+48		T+72	
	GloSea5	UM	GloSea5	UM	GloSea5	UM	GloSea5	UM
Possibly verified	45		35		25		15	
Detection rate (%)	42/45 (93.3%)	40/45 (88.9%)	25/35 (71.4%)	28/35 (80.0%)	14/25 (56.0%)	16/25 (64.0%)	4/15 (26.7%)	3/15 (20.0%)
DPE (km)	41.3	50.7	112.5	112.5	212.4	213.1	203.9	149.6

**Fig. 8.** Scatter plot for central minimum pressure (left panel) and maximum wind speed (right panel) between GloSea5 & UM and observation of 10 typhoons over western North Pacific in 2014.

로 TY의 지속기간보다 더 짧게 예측하는 경향이 나타났으며, 13호 태풍 GENEVIEVE는 11호 태풍 HALONG 발생기간에 동시에 발생하여 중심이 탐지되지 않았다.

## 7.2 TS 중심 탐지와 예측 결과

TS 중심 탐지와 중심 최대기압 및 풍속에 대한 GloSea5와 UM의 예측성능을 검증하였다. TY 중심 탐지는 GloSea5와 UM의 초기 값부터 72시간 예측장까지 검증하였으며, 탐지율과 Direct Position Error (DPE)를 산출하였다(Table 5). T+00부터 T+72까지 best track 기준 각각 45, 35, 25, 15개의 중심이 탐지되었으며, 예측시간 별 탐지율은 예측기간이 길어질수록 낮은 탐지율을 보이나, 두 시스템 모두 유사한 탐지율을 보였다. 또한 DPE는 예측기간이 길어질수록 증가하는 일반적인 분포를 보였으며 두 시스템 모두 DPE 또한 유사한 결과를 보였다. 단, T+72시간의 경우 사례가 작은 UM의 DPE가 다소 작은 값을 보였다. 또한 두 시스템에서 T+48, T+72시간에도 DPE가 작은 이유는 실제 48, 72시간까지 관측된 태풍의 수가 작기 때문이다.

TY 강도 검증에서는 최저 중심기압 분포의 경우 두 시스템 모두 관측보다 높은 기압분포를 보여 태풍을 더 약하게 모의하였으며, 특히 GloSea5가 UM보다 태풍을 더 약하게 모의하는 경향을 보였다(Fig. 8). 최대 중심풍속 분포는 UM의 경우 관측보다 약한 풍속을 모의하지만, GloSea5는 관측치에 비해 더 강한 풍속을 모의하는 경우가 존재하는 것으로 분석되었다. 일반적으로 해상도가 낮은 모델일수록 풍속을 더 약하게 모의하지만 본 연구에서는 2014년 동안 태풍 급으로 발생한 10개의 열대성 저기압 분포에서는 GloSea5의 예측된 중심풍속이 UM보다 더 강하게 모의되었다.

## 8. 요약 및 결론

2014년 1년 동안 기상청 현업 계절예측시스템인 GloSea5와 중기예측모델인 UM의 단중기 예측성능을 비교하고 검증하였다. 그 결과, 대기 기본 변수들(Z500, T850, U200)의 12일 예측 평균 RMSE 분포의 경우, GloSea5는 단기(초기~3일) RMSE의 증가율이 크게 나타나지만, 예측기간이 길어질수록 UM RMSE와의 차이는 감소하였다. 동아시아 영역 1일 누적강수에 대



해 GTS 강수량자료와 GPM 고해상도 강수량자료를 이용하여 1~10일 예측기간의 강수 예측성능을 검증한 결과, GloSea5는 모든 임계치(1.0, 5.0, 10.0, 30.0 mm d<sup>-1</sup>)에서 전반적으로 UM과 유사한 강수 예측성능을 보이는 것으로 평가되었다. 또한 NINO3.4 지역 해수면 온도와 아노말리 예측 성능을 검증한 결과, UM은 해수면온도가 초기장외로만 제공됨에도 불구하고, 4일 전 예측기간까지 RMSE가 낮은 값을 가지나, 4일 이후부터 예측기간이 길어질수록 GloSea5의 예측성능이 우수한 분포가 평균 AC 분포로 검증되었다. MJO RMM 지수에 대한 예측성능 검증 결과에서는, 강한 MJO의 경우 유사한 예측성능을 보이나 약한 MJO의 경우는 GloSea5의 예측성능이 더 우수하였다. 열대성 저기압 중 TY급으로 발달한 TS에 대한 예측성능 검증 결과에서는 탐지율과 중심위치의 경우 유사한 성능을 보였으며, 태풍 발달 정도의 경우 최대 중심기압은 두 시스템 모두 약하게 태풍을 모의하였고, 최대 중심풍속은 GloSea5가 과대 모의하는 경향이 나타났다.

이러한 결과를 토대로 계절예측시스템인 GloSea5는 중기예측모델인 UM과 비교할 때 전반적으로 단중기 기간 동안 유사한 예측성능을 보이는 것으로 평가된다. 특히 해수면온도와 대기-해양 상호작용에 의해 발생하는 대기 현상인 MJO와 태풍 예측성능에서 UM과 유사하거나 우수한 성능을 보였다. 초단기 기간 동안 스핀 업 기간 등 모델이 안정화 되기까지 예측오차의 성장률은 높으나 중기 이후로 갈수록 예측오차는 줄어드는 패턴을 확인하였다. 이를 통해 GloSea5는 초기 모델오차가 크지 않아 S2S 시간 규모의 계절예측뿐만 아니라 단중기 기간 기상현상, 특히 해양과 대기 상호작용에 의해 발생하는 태풍과 MJO 현상, 그리고 현재 UM에서 수행되지 않는 해수면온도의 예측 등에 활용 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국립기상과학원 주요사업 ‘기상업무지원 기술개발연구(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, doi:http://dx.doi.org/10.1175/2010MWR3615.1.
- Alexander, M. A., I. Bladé, M. Newman, J. R. Lanzante, N. Lau, and J. D. Scott, 2002: The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. *J. Climate*, **15**, 2205-2231.
- Bengtsson, L., M. Botzest, and M. Esch, 1995: Hurricane-type vortices in a general circulation model. *Tellus*, **47A**, 175-196.
- 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. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **141**, 2206-2219, doi:10.1002/qj.2516.
- Guilyardi, E., A. Wittenberg, A. Fedorov, M. Collins, C. Wang, A. Capotondi, G. J. van Oldenborgh, and T. Stockdale, 2009: Understanding El Niño in ocean atmosphere general circulation models: Progress and challenges. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **90**, 325-340, doi:10.1175/2008BAMS2387.1.
- Luo, J. J., S. Masson, E. Roeckner, G. Madec, and T. Yamagata, 2005: Reducing climatology bias in an ocean-atmosphere CGCM with improved coupling. *Phys. J. Climate*, **18**, 2344-2360, doi:10.1175/JCLI3404.1.
- MacLachlan, C., and Coauthors, 2015: Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5): a high-resolution seasonal forecast system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **141**, 1072-1084, doi:10.1002/qj.2396.
- Mogensen, K. S., M. A. Balmaseda, A. Weaver, M. J. Martin, and A. Vidard, 2009: NEMOVAR: A variational data assimilation system for the NEMO ocean model. ECMWF newsletter 120, summer 2009.
- Murakami, H., and B. Wang, 2010: Future change of North Atlantic tropical cyclone tracks: Projection by a 20-km-mesh global atmospheric model. *J. Climate*, **23**, 1699-2721.
- Smith, D. M., A. A. Scaife, and B. Kirtman, 2012: What is the current state of scientific knowledge with regard to seasonal and decadal forecasting? *Environ. Res. Lett.*, **7**, 015602, doi:10.1088/1748-9326/7/1/015602.
- Suzuki-Parker, A., 2012: *An assessment of uncertainties and limitations in simulating tropical cyclones*. Springer Thesis. XIII, 78 pp.
- Taylor, K. E., 2001: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, **106**, 7183-7192.
- Trenberth, K. E., and J. M. Caron, 2000: The southern oscillation revisited: Sea level pressures, surface temperatures and precipitation. *J. Climate*, **13**, 4358-4365.
- Wilks, D. S., 2006: *Statistical methods in the atmospheric*

- sciences*. 2nd ed. Elsevier Inc., 627 pp.
- WMO, 2013: Sub-seasonal to seasonal prediction research implementation plan. [Available online at [https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/S2S\\_Implem\\_plan\\_en.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/S2S_Implem_plan_en.pdf)].
- Xavier, P., R. Rahmat, W. K. Cheong, and E. Wallace, 2014: Influence of madden-julian oscillation on southeast Asia rainfall extremes: Observations and predictability. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 4406-4412, doi:10.1002/2014GL060241.