

## 북서태평양 태풍 강도 가이드선스 모델 성능평가

오유정<sup>1)</sup> · 문일주<sup>1)\*</sup> · 김성훈<sup>1)</sup> · 이우정<sup>2)</sup> · 강기룡<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>제주대학교 태풍연구센터/해양기상학협동과정, <sup>2)</sup>기상청 국가태풍센터

(접수일: 2015년 8월 3일, 수정일: 2016년 1월 9일, 게재확정일: 2016년 1월 25일)

## Validations of Typhoon Intensity Guidance Models in the Western North Pacific

You-Jung Oh<sup>1)</sup>, Il-Ju Moon<sup>1)\*</sup>, Sung-Hun Kim<sup>1)</sup>, Woojeong Lee<sup>2)</sup>, and KiRyong Kang<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup>*National Typhoon Center, Korea Meteorological Administration, Jeju, Korea*

(Manuscript received 3 August 2015; revised 9 January 2016; accepted 25 January 2016)

**Abstract** Eleven Tropical Cyclone (TC) intensity guidance models in the western North Pacific have been validated over 2008~2014 based on various analysis methods according to the lead time of forecast, year, month, intensity, rapid intensity change, track, and geographical area with an additional focus on TCs that influenced the Korean peninsula. From the evaluation using mean absolute error and correlation coefficients for maximum wind speed forecasts up to 72 h, we found that the Hurricane Weather Research and Forecasting model (HWRF) outperforms all others overall although the Global Forecast System (GFS), the Typhoon Ensemble Prediction System of Japan Meteorological Agency (TEPS), and the Korean version of Weather and Weather Research and Forecasting model (KWRF) also shows a good performance in some lead times of forecast. In particular, HWRF shows the highest performance in predicting the intensity of strong TCs above Category 3, which may be attributed to its highest spatial resolution (~3 km). The Navy Operational Global Prediction Model (NOGAPS) and GFS were the most improved model during 2008~2014. For initial intensity error, two Japanese models, Japan Meteorological Agency Global Spectral Model (JGSM) and TEPS, had the smallest error. In track forecast, the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and recent GFS model outperformed others. The present results has significant implications for providing basic information for operational forecasters as well as developing ensemble or consensus prediction systems.

**Key words:** Tropical cyclone, intensity prediction, validation, guidance models

### 1. 서 론

태풍은 강풍, 집중호우, 해일 등을 동반하여 많은 인명 및 재산 피해를 주는 자연재해 중 하나이다. 우리

나라는 자연재해로 발생한 피해들 중에 50% 이상이 태풍의 직·간접적 영향으로 발생한다(NEMA, 2011). 최근 기후변화와 더불어 한반도에 상륙하는 태풍의 강도는 지난 55년간 꾸준히 증가하였고, 특히 2000년에 들어 그 증가 경향이 더욱 뚜렷해졌다(Choi and Moon, 2008). 태풍에 의한 피해를 저감하기 위해서는 무엇보다 정확한 태풍의 진로 및 강도 예측이 필수적이다. 그 동안 관측 및 수치모델링 기술의 발달로 태풍진로 예측 기술은 크게 발전하였지만 상대적으로

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

태풍강도 예측기술은 크게 향상되지 못하였다. 그 이유는 정확한 태풍 강도 예측을 위해서는 다양한 환경 조건, 해양-대기 상호작용, 그리고 태풍내부 역과정의 이해와 더불어 정확한 진로예측이 이루어져야 가능하기 때문이다(Rogers et al., 2006; DeMaria et al., 2007; Elsberry, 2014).

태풍예보의 오차를 줄이기 위하여 태풍예보 기관들은 다양한 국내·외 수치모델들의 결과들을 가이드نس(Guidance)로 활용하고 있다. 이러한 가이드نس 모델들의 정보를 현업예측에서 사용하기 위해서는 각 모델들의 성능을 평가할 필요가 있다. 합동태풍경보센터(Joint Typhoon Warning Center - Honolulu, JTWC)와 동경지역특별기상센터(Regional Specialized Meteorological Centers - Tokyo, RSMC-Tokyo)에서는 각 기관에서 사용하는 가이드نس 모델에 대한 성능 평가를 매년 실시하고 있으며, 많은 선행연구들에서도 여러 가이드نس 모델들의 정확도를 평가하고 있다.

Elsberry et al. (2007)는 대서양과 북서태평양에서 2003년부터 2004년까지 국가허리케인센터(National Hurricane Center, NHC)에서 열대저기압(Tropical Cyclone, TC) 강도 가이드نس로 사용하고 있는 5개의 통계 및 역학 모델들에 대하여 TC 강도 구간을 3단계로 나누어 정확도를 평가하였다. 이 연구를 통해 TC가 형성되는 초기단계와 강도가 급격하게 강화되는 시기에 오차가 커지는 것을 확인하였다. 또한 TC 강도가 감소하는 단계에서 모든 모델들이 실제 강도보다 약하게 모의하는 경향이 있음을 보고하였다. DeMaria et al. (2007)는 지난 20년간 대서양과 북태평양에서 발생한 TC에 대해 NHC와 JTWC의 강도예측 결과를 분석하였다. 이 연구에서 대서양의 24시간과 48시간 예보와 북태평양의 72시간 예보에 대해 평균절대오차(Mean Absolute Errors, MAE)가 20년간 큰 변화가 없었음을 보였다. Aberson (2008)은 NHC의 현업 TC 강도예측 결과와 3개의 강도 예측모델들에 성능을 Skill Score와 오차확률을 이용하여 평가한 결과, 전체적으로 강도예측 기술은 크게 향상되지 않았지만 30 knot 이상의 큰 오차를 보이는 확률은 감소함을 보고하였다.

Chen et al. (2012)은 Aberson (2008)이 제안한 Skill Score를 이용하여 2008년과 2009년에 동중국지역기상센터(East China Regional Meteorological Center, ECRMC)에서 가이드نس 모델로 사용된 8개의 강도 예측모델의 정확도를 평가하였다. 그 결과, 2008년에는 모델들이 태풍강도를 평균적으로 약하게 예측하고, 2009년에는 과대하게 예측하는 경향을 발견하였다. 또한, 대부분의 모델들이 예보시간이 길어짐에 따라 예보오차가 커짐을 보고하였다. Li et al. (2012)는 Chen et al. (2012)이 사용한 가이드نس 모델결과를 강화와 소멸 단계로 나누어 평가하였다. 이 연구에서 대부분

의 모델들이 12시간 동안에 발생하는  $\pm 5 \text{ m s}^{-1}$  이하의 작은 강도 변화는 예측 정확도가 높았지만 그 이상으로 급격하게 강화되거나 약화되는 경우는 오차가 커지는 것으로 나타났다.

최근 태풍 역학모델은 해상도 및 물리과정 개선 등을 통해 그 성능이 해마다 바뀌고 있으며 사용 가능한 가이드نس 모델의 수도 점점 많아지고 있다. 따라서 매년 가이드نس 모델들의 성능을 평가하고 그 경향성을 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 2008년부터 2014년 까지 최근 7년간 국가태풍센터에서 사용하고 있는 11개의 태풍 가이드نس 모델들(Table 1)에 대한 예측성능을 평가하여 향후 태풍예측을 위한 객관적인 자료로 활용하는데 그 목적이 있다. 태풍강도 예측성능 평가는 기본적인 통계 오차분석 외에도 태풍 강도별, 급격한 강도 변화 시, 한반도 영향 태풍의 경우, 이동경로별, 해역별 오차분포 등과 같은 기존 연구에 다루지 않은 다양한 방법으로 분석을 실시하고자 한다. 또한 현업 이용 시에 참고할 수 있도록 분석 항목마다 모델의 성능을 순위로 나타내었고, 모델 정확도에 따라 상위, 평균, 하위 그룹으로 나누어 분석하였다. 모델의 해상도에서 큰 차이를 보이는 전구모델(global model, G)과 지역모델(region model, R)은 구분하여 평가하였다.

2장에서는 국가태풍센터에서 태풍강도예측 가이드نس로 사용되고 있는 모델들과 예측결과의 성능평가 방법에 대해서 상술했다. 3장에서는 각 모델들의 예측성능 평가결과를 나타내었다. 4장에서는 본 연구의 전체 결과를 요약하고 결론을 제시하였다.

## 2. 자료 및 분석방법

### 2.1 태풍 가이드نس 모델들의 특징

본 연구에서는 국가태풍센터에서 북서태평양 태풍 강도 예측 가이드نس 모델로 사용하고 있는 11개 모델들에 대한 예측성능을 평가하였다. 사용된 가이드نس 모델들은 7개의 전구모델, 4개의 지역모델로 구성되어 있다. 각 모델의 설명, 자료기간, 공간해상도, 자료생산 간격 및 주기 등은 Table 1에 기술되어 있다.

11개 모델 중에 우리나라에서 운용 중인 모델은 UM, UM\_R, TWRF, KWRF, KEPS이다. UM은 영국 기상청의 통합수치모델(Unified Model, UM)을 도입하여 개발한 기상청의 전지구 자료동화예측시스템(Global Data Assimilation and Prediction System, GDAPS)으로 2010년부터 기상청의 현업예측모델로 사용되고 있다(Lee et al., 2011). UM은 전구모델과 지역모델로 구성되어 있다. UM 전구모델은 4차원 변분법을 사용하며 25 km의 공간해상도와 70개의 연직 층을 가지며, 하루 4번 예측정보를 생산한다. 자료기간은 2010년부

**Table 1.** Descriptions and information on guidance models used for present study (x, longitude; y, latitude; w, maximum wind speed; p, minimum central pressure; G, global model; R, regional model).

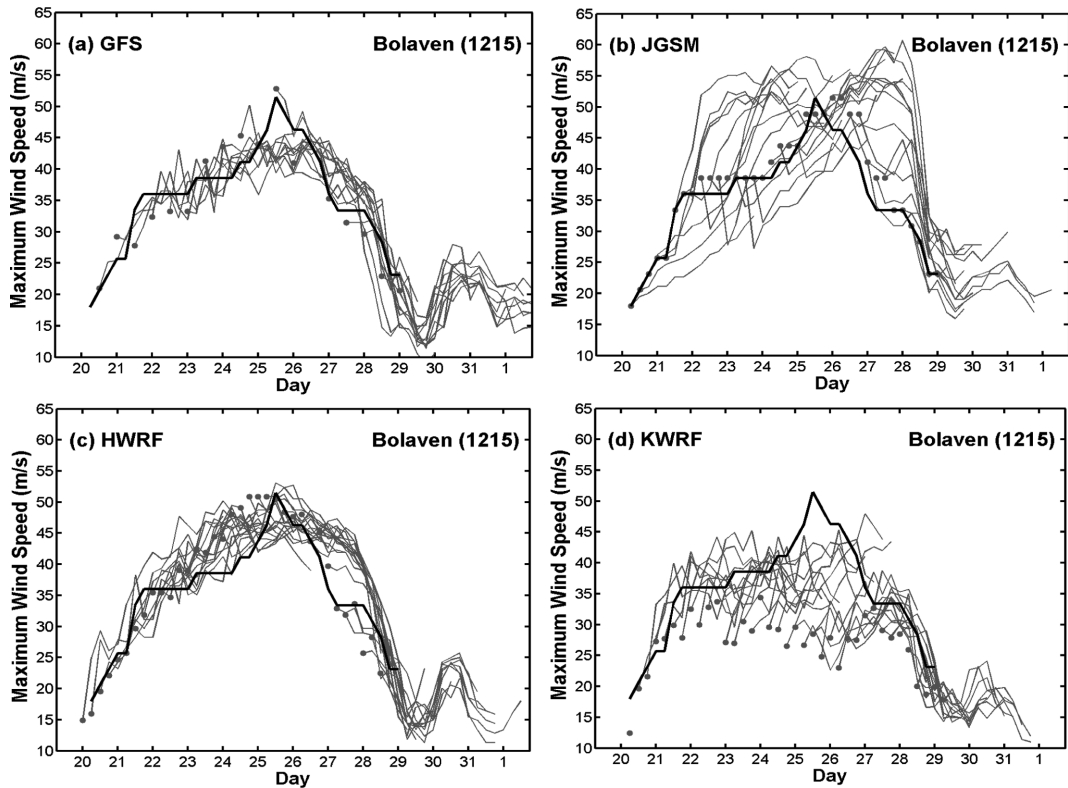
Model name	Description	Data period	Spatial resolution	Forecast interval	Forecast number per day	Products	
UM	KMA Operational Global Model (Unified Model)	2010~2014	25 km	6 h	4	x, y, w, p	
JGSM	JMA Operational Global Spectral Model	2008~2014	20 km	6 h	4	x, y, w, p	
TEPS	JMA Operational Typhoon Ensemble Prediction System	2009~2014	60 km	6 h	2	x, y, w, p	
G	NOGAPS	Navy Operational Global Prediction System	2008~2014	55 km	6 h	2	x, y, w, p
	GFS	NCEP Global Forecast System	2008~2014	1°	6 h	2	x, y, w, p
	ECMWF	European Center for Medium-range Weather Forecasting	2008~2014	0.5°	24 h	2	x, y, w, p
	KEPS	KMA Ensemble Prediction System (24 members)	2012~2014	40 km	6 h	2	x, y, w, p
R	UM_R	KMA Operational Regional Model (Unified Model)	2011~2014	12 km	3 h	4	x, y, w, p
	TWRF	WRF-based Typhoon Model (Typhoon WRF)	2010~2014	15 km	6h	2	x, y, w, p
	KWRF	WRF-based KMA Operational Regional Model (Korea WRF)	2011~2014	10 km	6 h	4	x, y, w, p
	HWRF	NCEP EMC WRF-based Regional Model (Hurricane WRF)	2012~2014	27/9/3 km	6 h	4	x, y, w, p

터 2014년까지이다. 지역모델인 UM\_R(UM Regional, UM\_R)은 12 km의 공간해상도와 70개 연직 층을 가지는 기상청의지역예보시스템(Regional Data Assimilation and Prediction System, RDAPS)으로 하루 4번의 예측 자료를 생산한다. 자료기간은 총 4년(2011~2014년)이다. KWRF는 WRF (Weather Research and Forecasting) 모델을 기반으로 한 기상청의 지역예보시스템 중의 하나이다. KWRF는 10 km의 고해상도 격자와 고급역학을 적용한 고정밀 모델로, 특히 초기 분석장 품질 향상을 위해 3차원 변분법을 이용한 자체분석을 수행할 뿐 아니라 태풍 초기장 개선을 위한 보거싱(Bogusing) 기법을 개발하여 적용하고 있다(Park et al., 2008). 하루 4번 예측자료를 생산하며, 자료기간은 총 4년(2011~2014년)이다. TWRF는 WRF를 기반으로 한 태풍전용 예측모델이다. 15 km의 공간해상도를 가지며 하루 2번 예측을 수행한다. 2010년부터 2014년까지 5년간의 자료가 존재하지만 최대풍속(Maximum Wind Speed, MWS) 자료는 2013년부터 포함되었다. KEPS (Korea Ensemble Prediction System)는 2011년부터 기

상청에서 운영해 오고 있는 앙상블 모델로 4차원 변분법을 사용하여 전구모델로부터 초기장을 생성한다. 40 km의 공간해상도와 70개의 연직 층을 갖는다. 초기 섭동은 Ensemble Transform Kalman Filter (ETKF)를 사용하여 생산되고 총 24개의 앙상블 멤버로 구성되어 있다. 하루 2번 예측정보를 생산한다.

GFS는 미국 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 산하 EMC (Environmental Modeling Center)에서 개발되어 NWS (National Weather Service)에서 운영하고 있는 전지구 예측시스템(Global Forecast System)이다(NCEP, 2003). 수평해상도는 35 km이며, SAS (Simplified Arakawa-Schubert) 구름 모수화, 3차원 변분 GSI (Gridpoint Statistical Interpolation) 자료동화, 그리고 Vortex Relocation 방식 초기화 방법을 사용한다. 하루 2회 예측자료를 생산하며, 자료기간은 2008년부터 2014년까지 7년이다.

HWRF (Hurricane WRF)는 미국 NCEP에서 운용 중인 WRF 기반의 지역 허리케인 예측모델이다. GFS 전지구 예측장을 초기 및 경계 값으로 사용하며, 향



**Fig. 1.** Comparisons of TC intensity (MWS) between model predictions and RSMC-Tokto best track for Typhoon Bolaven (1215) using (a) GFS, (b) JGSM, (c) HWRF, and (d) KWRF. The bold black line indicates the RSMC-Tokyo best track. Thin lines indicate the model predictions. Filled circles represent the issue time of the prediction.

상된 보거싱 방법과 물리과정 모수화 방법을 사용한다. 태풍 중심을 따라 이동하는 등지 격자 시스템을 사용하여 태풍 중심 부근에서 3 km까지 고해상도로 예측이 가능하다(Vijay et al., 2014). NOGAPS (Navy Operational Global Atmospheric Prediction System)는 미 해군에서 개발·운영 중인 55 km 수평해상도와 30개의 연직 층으로 구성된 전지구 모델이다. 3차원 자료동화 방법을 사용하며, 자료기간은 2008년부터 2014년까지이다.

ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast)는 유럽 28개국을 회원국으로 구성되어 있는 독립적인 정부간(intergovernmental) 조직에서 운용 중인 전지구 예측모델이다. ECMWF는 최신의 역학코어(Dynamical core), 자료동화(4차원 변분), 물리과정 모수화를 사용하며, 가장 진로예측 성능이 우수한 전지구 모델 중의 하나로 알려져 있다. 25 km 수평격자와 91개의 연직 층을 가지며 하루 2번 예측정보를 생산한다. 자료기간은 2008년부터 2014년까지이다.

JGSM (Japan Global Spectral Model)은 일본 기상

청의 전지구 예측모델로 하루 4번 예측정보를 생산한다. 수평해상도는 18 km이며, 4차원 변분 자료동화 방법을 사용한다(Nakagawa, 2009). TEPS (Typhoon Ensemble Prediction System)는 일본 기상청의 전지구 앙상블 모델로 수평해상도는 56 km이며, 11개의 앙상블 멤버로 구성되어 있다(Yamaguchi and Komori, 2009).

## 2.2 자료 및 분석방법

11개의 태풍 가이드선스 모델들의 예측결과는 열대폭풍(Tropical Storm, TS)급 이상의 태풍에 대해 RSMC-Tokyo에서 제공하는 6시간 간격의 최대풍속, 중심기압, 그리고 태풍중심 위치자료와 비교하였다. Figure 1은 2012년 15호 태풍 블라벤에 대해 모델예측 결과와 RSMC-Tokyo의 최대풍속을 비교한 예시이다.

최대풍속의 정의에 있어 RSMC-Tokyo에서는 세계 기상기구(World Meteorological Organization, WMO) 권고 기준인 10분 평균 최대풍속을 사용하지만 JTWC는 1분 평균풍속을 사용한다. Simiu and Scanlan (1978)에 따르면 10분 평균풍속은 1분 평균풍속의 약 88%

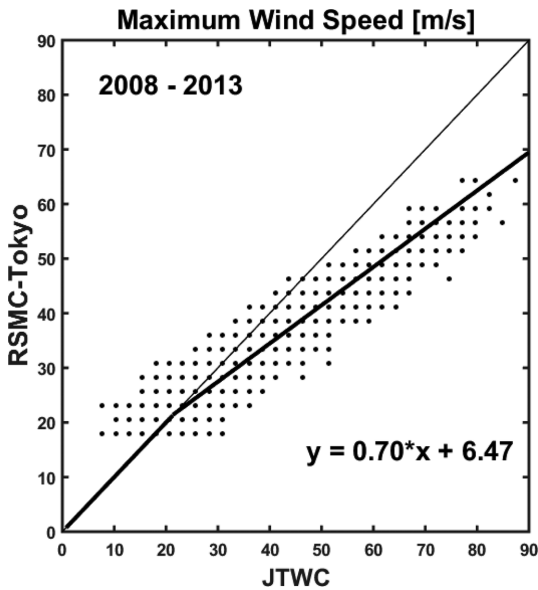


Fig. 2. A scatter plot of MWS between RSMC-Tokyo (10-min average) and JTWC (1-min average) best track data during 2008~2013. A thick line represents the linear regression between two data sets.

에 해당되며 풍속이 증가할수록 그 차이는 더 커지는 것으로 보고하고 있다. 따라서 1분 평균풍속을 사용하여 초기장을 생성하고 편차조정을 하는 모델들(GFS, HWRP 등)을 10분 평균풍속 기반의 RSMC-Tokyo 자료를 사용하여 성능평가를 할 경우 상대적으로 태풍 강도를 과대 모의하는 경향이 커진다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 1분 평균풍속 기반의 모델들에 대해서는 RSMC-Tokyo와 JTWC의 관계식을 이용하여 최대풍속을 보정하여 성능을 평가하였다. Figure 2는 2008년부터 2013년까지 JTWC와 RSMC-Tokyo 자료의 최대풍속 산포도를 나타내며, 식 (1)은 이 자료를 바탕으로 구한 두 기관의 최대풍속 선형 회귀식을 나타낸다.

$$MWS_{RSMC} = 0.70 \times MWS_{JTWC} + 6.47 \quad (MWS_{JTWC} > 21.65 \text{ m s}^{-1}) \quad (1)$$

여기서 최대풍속이  $21.65 \text{ m s}^{-1}$  이상인 경우에만 회귀식을 적용한 이유는 구해진 회귀식이 RSMC의 최대풍속이  $21.65 \text{ m s}^{-1}$  이상일 때부터 JTWC가 더 큰 값을 가지기 때문이다.

대부분의 가이던스 모델들은 일 2회 예측자료를 생산하지만, 일부 모델들의 경우는 일 4회 자료를 생성한다. 본 연구에서는 동일한 조건으로 통계분석을 하기 위하여 일 2회(0000 UTC와 1200 UTC) 예측 결과만을 이용하였다. 분석은 2008년부터 2014년까지 기

간에 대해 실시되었지만 모든 모델의 자료가 존재하는 2013년부터 2014년에 대해 대부분의 상세 통계분석이 이루어졌고 나머지 시기에는 연도별 오차변화 경향만이 조사되었다.

본 연구에서 태풍강도 가이던스 모델들의 예측정확도 분석은 주로 최대풍속( $\text{m s}^{-1}$ ) 자료를 이용하여 이루어졌다. 태풍 진로예측결과와 태풍 강도의 또 다른 지표인 태풍의 최저중심기압(hPa)은 최대풍속 자료와의 비교·분석을 위해서만 제한적으로 사용되었다. 통계분석은 모델과 최적경로자료 사이의 평균절대오차(MAE), 편차(Bias), 그리고 상관계수(Correlation Coefficient, R)를 이용하여 수행되었다(식 (2)와 (3) 참고).

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

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - O_i) \quad (3)$$

여기서  $F_i$ 와  $O_i$ 는 각각 모델값과 관측값(최적경로 자료)을 각각 의미하며,  $n$ 는 자료의 총 개수를 의미한다.

본 연구에서는 먼저 최근 2년간(2013~2014년) 상기 통계분석 항목을 예보시간별, 월별, 태풍 강도별, 급격한 강도 변화 시, 한반도 영향 태풍의 경우, 태풍 강도변화( $\Delta MWS$ ) 기준, 이동경로별, 그리고 해역별로 나누어 평가하였다. 예보시간별 평가는 모든 모델들이 공통적으로 자료가 존재하는 72 시간까지만 이루어졌다. 사용된 11개 수치모델들은 전구모델(UM, JGSM, TEPS, NOGAPS, GFS, ECMWF, KEPS)과 해상도가 상대적으로 높은 지역모델(UM\_R, TWRF, KWRP, HWRP)로 구분하여 분석하였다. 또한 현업 이용 시에 참고할 수 있도록 분석 항목마다 모델의 성능을 순위로 나타내었고, 모델 정확도에 따라 예측성능이 상대적으로 우수한 상위그룹(평균값보다 0.5 표준편차 이상), 평균보다 예측성능이 낮은 하위그룹(평균값보다 0.5 표준편차 이하), 그리고 이 두 중간에 해당에 해당되는 평균그룹으로 분류하였다. 모델 성능의 연변화 경향은 모델별로 2008년부터 2014년까지 자료가 존재하는 기간에 대해 48h 예측 값을 이용하여 실시하였다. 이 분석에서는 강도뿐만 아니라 진로에 대한 성능 평가를 함께 실시하였다. 태풍 강도 등급별 평가는 국가태풍센터에서 사용하고 있는 태풍 강도 기준에 따라 약( $17 \text{ m s}^{-1} = MWS < 25 \text{ m s}^{-1}$ , weak), 중( $25 \text{ m s}^{-1} = MWS < 33 \text{ m s}^{-1}$ , medium), 강( $33 \text{ m s}^{-1} = MWS < 44 \text{ m s}^{-1}$ , strong), 매우 강( $44 \text{ m s}^{-1} = MWS$ , very strong)으로 나누어 분석하였다.

Elsberry et al. (2014)는 “태풍의 급격한 강도변화”를 24시간 동안 최대풍속이 30 knot 변화하였을 때로 정의하여 사용하였다. 그러나 이 정의는 JTWC를 기

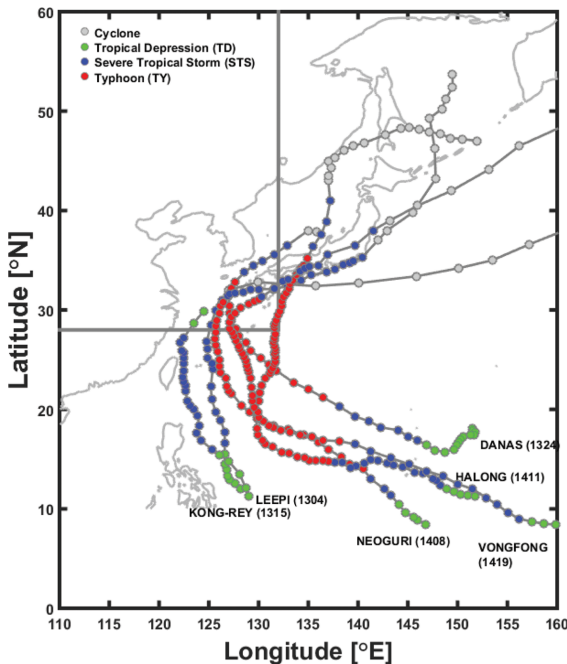


Fig. 3. Track for typhoons that influenced the Korean peninsula during 2013~2014. Gray box represents a typhoon-emergency region defined by KMA.

준으로 한 1분 평균풍속을 사용한다. 그러므로 급격한 강도변화 크기에 따른 분석에서는 앞서 정의한 RSMC-Tokyo와 JTWC 최대풍속 관계식(식 (1))을 적용하여 24시간 동안 강도의 증가 또는 약화가 약  $12.81 \text{ m s}^{-1}$  이상인 경우를 급격한 강화(Rapid Intensification, RI)와 급격한 약화(Rapid Weakening, RW)로 정의하여 사용하였다.

한반도 영향태풍에 대한 분석은 국가태풍센터에서 발간한 2013년과 2014년 태풍분석보고서에 분류된 한반도 영향 태풍 6개, 리피(1304), 콩레이(1315), 다나스(1324), 너구리(1408), 할롱(1411), 봉풍(1419)에 대해 실시하였다. 이 태풍들은 모두 태풍백서에서 정의하는 비상구역( $28^{\circ}\text{N}$  북쪽,  $132^{\circ}\text{E}$  서쪽)에 진입하여 한반도에 영향을 주었다(Fig. 3). 태풍 리피(1304)는 2013년 6월 18일에 0000 UTC에 발생하여 6월 21일 0000 UTC에 온대저기압으로 변질되었으며, 6월 20일 0000 UTC부터 비상구역에 진입하며 한반도에 영향을 주었다. 태풍 콩레이(1315)는 같은 해 8월 26일 0600 UTC에 발생하여 8월 30일 0600 UTC에 소멸하였고, 8월 30일 0300 UTC부터는 비상구역에 진입하였다. 태풍 다나스(1324)의 경우 10월 4일 0600 UTC에 발생하여 10월 9일 0000 UTC에 온대저기압으로 변질되었으며 10월 8일 0300 UTC부터 비상구역에 진입하며 한반도

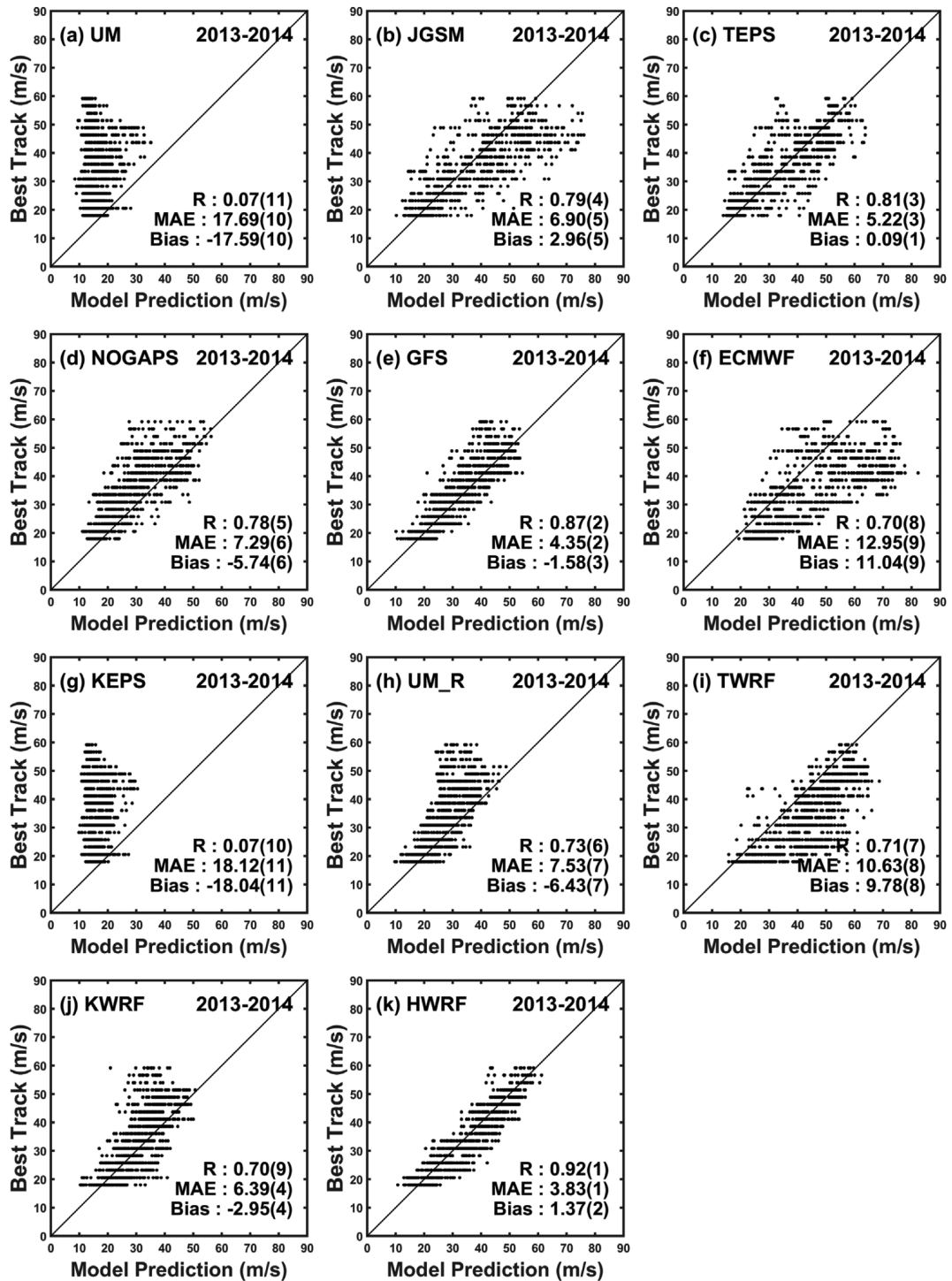
에 영향을 주었다. 2014년에 발생한 8호 태풍 너구리의 경우 2014년 7월 3일 0000 UTC에 발생하여 7월 11일 0000 UTC에 소멸하였으며 7월 8일 1800 UTC부터 비상구역에 진입하였다. 태풍 할롱(1411)은 7월 29일 0000 UTC에 발생하여 8월 8일 0600 UTC에 비상구역에 진입하였으며 8월 11일 0000 UTC에 온대저기압으로 변질 되었다. 마지막 태풍 봉풍(1419)는 10월 3일 0000 UTC에 발생하여 10월 14일 0000 UTC에 온대저기압으로 변질되었으며, 10월 12일 0000 UTC 이후부터 비상구역에 진입하며 한반도에 영향을 주었다. 2014년 12호 태풍 나크리는 한반도 영향 태풍으로 분류되었지만 수명이 너무 짧아 본 연구에서는 분석에서 제외하였다.

태풍 진로별 모델의 성능평가는 Kim et al. (2011)에서 사용된 Fuzzy c-Means Clustering Method (FCM)을 이용하여 태풍진로를 6개의 군집으로 분류한 후 수행하였다. 군집분류에 사용된 자료는 1982년부터 2014년까지 북서태평양에서 발생한 모든 태풍을 6시간마다 최대 5일(120 h) 간격으로 만든 총 15377개의 태풍진로이다. 5일 간격으로 태풍 진로를 구성한 것은 태풍의 진로가 긴 경우에 이동하는 중간에 환경이 달라져 모델의 예측성능에 차이가 발생하는 것을 구별하여 평가할 수 있게 하기 위함이다.

### 3. 연구결과

최근 2년간(2013~2014년) 예측자료가 존재하는 11개 가이드스 모델의 태풍 강도 예측성능을 평가하기 위하여 먼저 모델별로 0~72 h까지 모든 예측자료(12시간 간격)를 누적한 산포도, 상관계수(R), MAE, Bias를 구하였다(Fig. 4). 그림에서 괄호 안의 값은 각각의 평가요소에 대한 순위를 나타낸다. (a)-(g)는 전구모델 그리고 (h)-(k)는 지역모델의 결과이다.

모델들의 상관계수 평가에서는 HWRF, GFS, TEPS, JGSM, NOGAPS가 모두 0.78 이상의 상관도를 보여 상위그룹으로 분류되었다. 특히, HWRF ( $R=0.92$ )와 GFS ( $R=0.87$ )는 전 예보시간에서 평균적으로 태풍 강도의 변화경향을 가장 예측하는 모델로 평가된다. 절대오차 평가에서는 HWRF, GFS, TEPS, KWRF가  $3.8\text{--}6.4 \text{ m s}^{-1}$ 의 낮은 오차를 가지며 상위그룹의 예측성능을 보였다. 반면 UM과 KEPS는 상관도(0.07)가 매우 낮을 뿐 아니라 MAE( $17 \text{ m s}^{-1}$  이상)도 높아 두 평가에서 모두 평균보다 낮은 예측성능을 보인 모델(하위그룹)로 분류되었다. Bias는 JGSM, TEPS, ECMWF, TWRF, HWRF를 제외 한 대부분의 모델들이 최대풍속을 과소 모의 하였다. 특히, UM과 KEPS 모델은 과소 모의 경향이 가장 컸고 최대풍속  $30 \text{ m s}^{-1}$  이상의 강한 태풍들을 전혀 모의하지 못하는 것으



**Fig. 4.** Scatter plots of MWS between model predictions and RSMC-Tokyo best track for all lead times up to 72 h (12-h interval) during 2013-2014: (a) UM, (b) JGSM, (c) TEPS, (d) NOGAPS, (e) GFS, (f) ECMWF, (g) KEPS, (h) UM\_R, (i) TWRP, (j) KWRF, and (k) HWRF. The correlation coefficients (R), MAE, and bias are denoted with the rank (number in bracket) based on the model performance in terms of R, MAE, and bias, respectively.

**Table 2.** Mean absolute errors (MAE) for maximum wind speed (MWS) and minimum central pressure (MCP) forecasts at lead times of 0 to 72 h (24-h interval) during 2013~2014. The numbers in bracket represent the rank based on the model performance in terms of MAE. Bold numbers represent the group of low-performance models. Bold numbers with asterisk represent the group of high-performance models. G and R indicate global models and regional models, respectively.

Model	Lead time	MWS [ $m s^{-1}$ ]				MCP [hPa]			
		0 h	24 h	48 h	72 h	0 h	24 h	48 h	72 h
G	UM	<b>16.5</b> (10)	<b>18.0</b> (10)	<b>18.6</b> (11)	<b>17.5</b> (9)	15.1 (7)	<b>18.0</b> (7)	<b>18.1</b> (8)	13.5 (6)
	JGSM	<b>0.9*</b> (1)	<b>6.4*</b> (4)	10.8 (8)	12.3 (8)	<b>1.5*</b> (1)	<b>12.7*</b> (4)	<b>20.7</b> (10)	<b>23.9</b> (11)
	TEPS	<b>0.9*</b> (1)	<b>5.0*</b> (3)	7.4 (6)	9.3 (7)	<b>1.5*</b> (1)	<b>10.2*</b> (1)	14.0 (5)	<b>18.5</b> (10)
	NOGAPS	8.8 (7)	7.5 (6)	<b>6.2*</b> (4)	<b>4.9*</b> (4)	<b>26.7</b> (11)	<b>25.1</b> (11)	<b>20.9</b> (11)	14.9 (8)
	GFS	<b>3.9*</b> (4)	<b>4.5*</b> (2)	<b>4.5*</b> (2)	<b>4.9*</b> (2)	<b>20.4</b> (10)	<b>18.2</b> (8)	15.6 (6)	<b>10.8*</b> (4)
	ECMWF	<b>9.9</b> (8)	<b>12.7</b> (9)	<b>15.4</b> (9)	<b>17.8</b> (11)	13.3 (5)	<b>13.2*</b> (6)	<b>11.4*</b> (3)	<b>8.7*</b> (3)
	KEPS	-	<b>18.4</b> (11)	<b>18.6</b> (10)	<b>17.6</b> (10)	14.9 (6)	<b>20.1</b> (10)	<b>20.1</b> (9)	15.4 (9)
	G-mean	6.8	10.4	11.6	12.0	13.3	16.8	17.3	15.1
R	UM_R	7.7 (5)	8.2 (7)	<b>7.0*</b> (5)	<b>5.3*</b> (5)	12.6 (4)	<b>13.1*</b> (5)	<b>10.8*</b> (2)	<b>7.4*</b> (1)
	TWRF	<b>11.6</b> (9)	<b>12.0</b> (8)	8.4 (7)	7.2 (6)	<b>20.4</b> (9)	<b>18.8</b> (9)	16.8 (7)	14.1 (7)
	KWRF	8.5 (6)	<b>7.0*</b> (5)	<b>5.1*</b> (3)	<b>4.9*</b> (3)	16.9 (8)	<b>12.3*</b> (3)	<b>10.2*</b> (1)	<b>8.6*</b> (2)
	HWRf	<b>2.7*</b> (3)	<b>4.1*</b> (1)	<b>4.3*</b> (1)	<b>4.8*</b> (1)	<b>5.5*</b> (3)	<b>10.3*</b> (2)	<b>12.0*</b> (4)	12.0 (5)
	R-mean	7.6	7.8	6.2	5.6	13.9	13.6	12.5	10.5
All-mean	7.1	9.4	9.7	9.7	13.5	15.6	15.5	13.4	

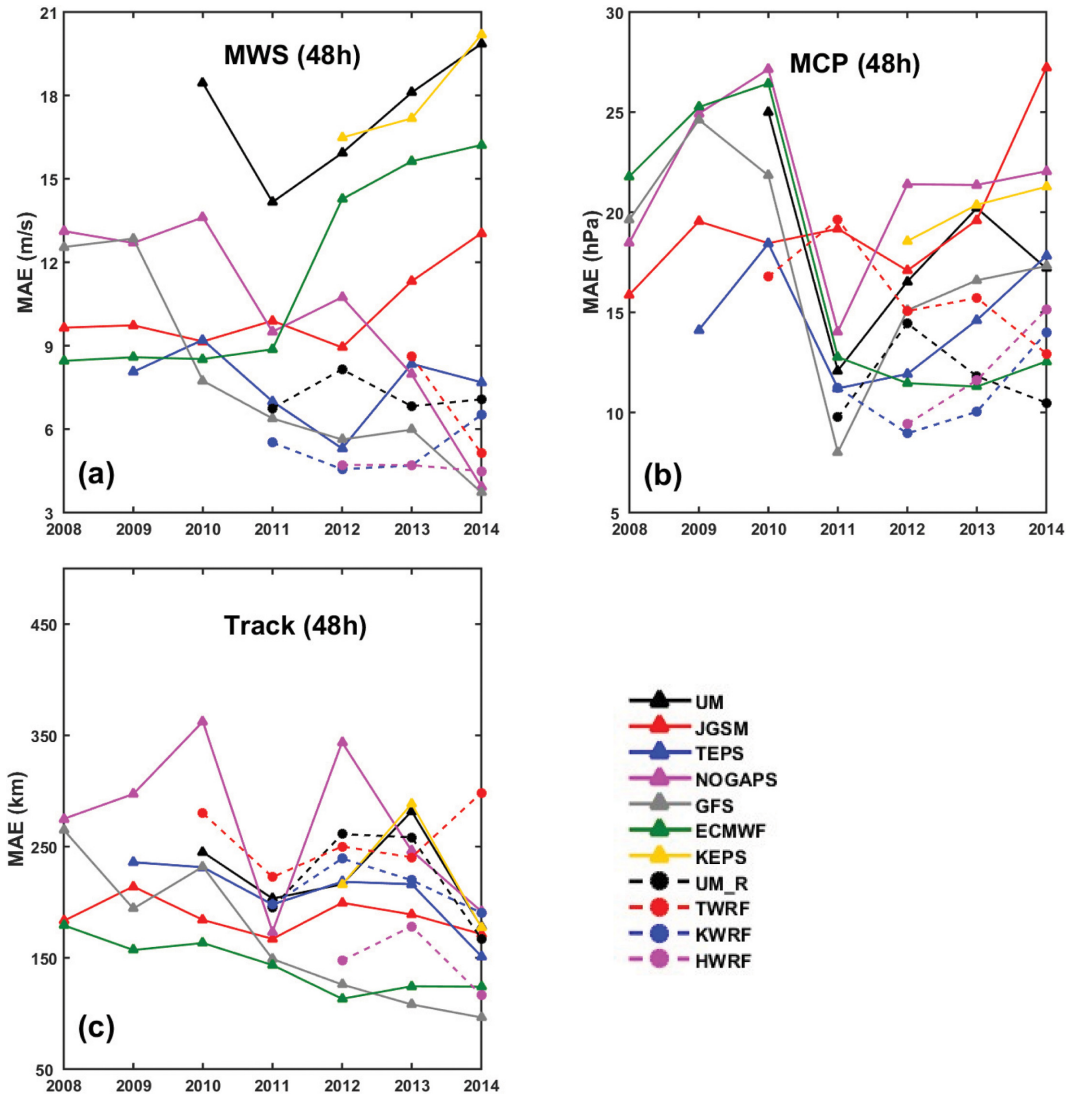
로 나타났다. 전구모델인 TEPS와 GFS는 공간해상도가 각각 60 km와 1°로 다른 모델들에 비해 상대적으로 해상도가 낮지만 상관도, MAE, Bias 평가에서 모두 상위그룹의 성능을 보였다. 전구모델에 비해 공간 해상도가 높은 지역모델들은 대부분의 평가항목에서 모두 평균 또는 그 이상의 성능을 보였다(KWRF와 HWRf는 상위그룹, UM\_R과 TWRF는 평균그룹에 속함).

예보시간별로 보면, NOGAPS를 제외한 대부분의 전구모델들은 예보시간이 길어질수록 최대풍속의 오차가 증가하는 반면, 대부분의 지역모델들은 반대의 경향을 보였다(Table 2). 예를 들면, 일본 현업 전구모델인 JGSM과 TEPS는 초기시간에 최대풍속의 절대 오차가  $0.9 m s^{-1}$ 로 모든 모델 중에 가장 낮았으나 예보시간이 길어질수록 오차가 크게 증가하여 72시간

후에는  $12.3 m s^{-1}$ 와  $9.3 m s^{-1}$ 까지 도달되었다(하위그룹의 성능). 반면, 지역모델인 TWRF와 KWRF는 초기시간의 오차가 각각  $11.6 m s^{-1}$ 와  $8.5 m s^{-1}$ 로 평균보다 큰 오차를 보였지만 72시간 후에는  $7.2 m s^{-1}$ 와  $4.9 m s^{-1}$ 로 낮아져 평균 또는 그 이상의 성능을 보였다. HWRf와 GFS는 절대오차평가에서 모든 예측시간에, NOGAPS, UM\_R, KWRF는 48시간 이후에, 그리고 TEPS와 JGSM은 24시간까지 상위그룹의 좋은 성능을 보였다.

태풍의 중심기압 예측성능에 대한 평가는 최대풍속의 결과와 대부분 유사하게 나타났지만 일부 모델들은 다르게 나타났다. 예를 들면, NOGAPS와 GFS는 최대풍속에 비해 최소중심기압의 예측정확도는 상대적으로 매우 낮았고, 반면 ECMWF는 최대풍속 평가





**Fig. 5.** Comparisons of the changing model performance in terms of the MAE for (a) maximum wind speed, (b) minimum central pressure, and (c) track forecasts at the lead time of 48 h during 2008-2014. Solid lines with triangle represent global models. Dashed lines with circle represent regional models.

에서 전 예보시간에서 하위그룹에 속했지만 중심기압 평가에서 초기시간(0h)을 제외한 모든 예보시간에서 상위그룹에 속하였다. UM\_R와 KWRF는 초기시간을 제외하고 평균적으로 태풍중심기압 예측성능이 가장 우수한 모델로 평가된다.

각 모델들의 예측성능은 연도, 월, 강도, 이동경로, 해역별로 나누어 아래에서 상세히 설명한다. 또한 초기 값으로부터 태풍의 강도(최대풍속)변화 예측성능 그리고 태풍의 강도가 급격하게 변화하는 경우와 한반도 영향 태풍에 대해서는 추가적으로 예측성능을

따로 평가하였다.

### 3.1 연도 및 계절 별 예측성능

연도별로 가이던스 모델의 성능변화는 2008년부터 2014년까지 48시간 예측된 최대풍속(MWS), 중심기압(MCP), 태풍중심위치(Track)의 MAE를 이용하여 조사하였다(Fig. 5). 그림에서 세모(△)-실선 그래프는 전구모델의 성능변화를 나타내고 동그라미(○)-점선 그래프는 지역모델을 나타낸다. 최대풍속 평가에서 최근 가장 큰 향상을 보인 모델은 NOGAPS(2008년 13.1

**Table 3.** Same as in Table 2, but MAEs for all lead times up to 72 h (12-h interval) categorized by the specified months.

Model	Month	MWS [ $\text{m s}^{-1}$ ]			
		April-July	August	September	October-November
G	UM	<b>16.2</b> (10)	<b>15.8</b> (10)	<b>12.8</b> (10)	<b>22.9</b> (10)
	JGSM	6.9 (7)	<b>4.3*</b> (4)	7.1 (5)	<b>7.0*</b> (4)
	TEPS	<b>5.7*</b> (4)	<b>3.7*</b> (3)	<b>4.7*</b> (2)	<b>6.0*</b> (3)
	NOGAPS	6.7 (6)	6.3 (7)	8.2 (7)	7.6 (6)
	GFS	<b>3.0*</b> (1)	<b>2.9*</b> (1)	<b>4.9*</b> (3)	<b>5.5*</b> (2)
	ECMWF	<b>12.6</b> (9)	<b>12.4</b> (8)	9.7 (8)	<b>16.4</b> (9)
	KEPS	<b>16.8</b> (11)	<b>16.0</b> (11)	<b>13.2</b> (11)	<b>23.3</b> (11)
	G-mean	9.7	8.8	8.7	12.7
R	UM_R	6.2 (5)	<b>5.1*</b> (6)	7.2 (6)	9.9 (8)
	TWRF	<b>11.6</b> (8)	<b>13.5</b> (9)	<b>12.5</b> (9)	<b>7.2*</b> (5)
	KWRF	<b>4.4*</b> (3)	<b>4.5*</b> (5)	<b>6.2*</b> (4)	8.6 (7)
	HWRf	<b>3.3*</b> (2)	<b>3.6*</b> (2)	<b>4.2*</b> (1)	<b>3.9*</b> (1)
	R-mean	6.4	6.7	7.5	7.4
All-mean	8.5	8.0	8.2	10.8	

$\text{m s}^{-1}$ 에서 2014년  $3.9 \text{ m s}^{-1}$ 로)와 GFS (2008년  $12.6 \text{ m s}^{-1}$ 에서 2014년  $3.7 \text{ m s}^{-1}$ 로)로 나타났다(Fig. 5a). 최근 들어 정확도가 도리어 낮아진 모델도 있었다. ECMWF는 2008년에 오차가  $8.5 \text{ m s}^{-1}$ 이었으나 해마다 계속 오차가 증가하여 2014년에는  $16.2 \text{ m s}^{-1}$ 까지 높아졌다. JGSM, UM, KEPS도 최근 들어 성능이 저하된 모델로 분류된다. 전반적으로 지역모델의 성능은 전구모델보다 평균적으로 높았고 시간이 지남에 따라 성능이 좋아지는 경향도 더 뚜렷이 나타났다.

태풍 중심기압의 예측성능 변화경향은 최대풍속의 결과와 대체로 유사하게 나타났다(Fig. 5b). 그러나 한 가지 특징적인 것은 최근 최대풍속 예측성능이 낮아지고 있는 ECMWF가 중심기압 예측성능은 반대로 향상되고 있다는 사실이다. 실제로 ECMWF는 2008년에 모든 모델 중에 가장 큰 오차( $21.8 \text{ hPa}$ )를 보였지만 2014년에는 세 번째로 작은 오차( $12.6 \text{ hPa}$ )를 보

였다. 이것은 일반적으로 알려진 태풍의 최대풍속과 중심기압의 선형적인 관계식이 적용되지 않는 결과로 추후 이 원인에 대한 추가적인 분석이 요구된다.

연도별로 가이드스 모델의 예측진로를 평가한 결과에서는 TWRF를 제외한 대부분의 모델들이 성능이 향상되거나 유지한 것으로 나타났다(Fig. 5c). 진로오차가 가장 많이 개선된 모델은 GFS로 나타났다. GFS는 2008년에 48시간 진로오차가 약  $265 \text{ km}$ 에 달하였으나 해마다 정확도가 향상되어 2014년에는 오차가  $96 \text{ km}$ 까지 낮아져 11개 모델 중에 가장 좋은 성능을 보였다. 최근(2012~2014년) 들어 진로오차가 평균적으로 가장 적은 모델은 ECMWF, GFS, HWRf으로 나타났다. ECMWF는 진로오차가 가장 낮은 모델로 알려져 있지만 2014년에는 GFS, HWRf 다음으로 좋은 성능을 보였다. 전구모델과 지역모델을 구분하여 비교하면, 태풍 진로는 강도예측 결과와는 달리 전구모

**Table 4.** Same as in Table 3, but MAEs for all lead times up to 72 h (12-h interval) categorized by TC intensity.

Model	Category	MWS [ $m\ s^{-1}$ ]			
		Weak	Medium	Strong	Very strong
G	UM	3.8 (6)	<b>10.0</b> (9)	<b>13.3</b> (10)	<b>25.1</b> (10)
	JGSM	<b>2.2*</b> (2)	<b>3.5*</b> (4)	<b>5.9*</b> (6)	9.4 (7)
	TEPS	<b>1.6*</b> (1)	<b>3.5*</b> (2)	<b>5.4*</b> (4)	<b>6.6*</b> (3)
	NOGAPS	3.5 (5)	6.4 (7)	7.2 (7)	8.6 (6)
	GFS	<b>2.7*</b> (3)	<b>3.1*</b> (1)	<b>4.4*</b> (2)	<b>5.1*</b> (2)
	ECMWF	<b>10.9</b> (10)	7.2 (8)	<b>10.9</b> (8)	<b>15.7</b> (9)
	KEPS	4.0 (8)	<b>10.3</b> (10)	<b>13.6</b> (11)	<b>25.4</b> (11)
	G-mean	4.1	6.3	8.7	13.7
R	UM_R	3.3 (4)	4.8 (6)	<b>5.5*</b> (5)	10.1 (8)
	TWRF	<b>13.8</b> (11)	<b>15.3</b> (11)	<b>11.8</b> (9)	8.0 (5)
	KWRF	5.5 (9)	<b>3.8*</b> (5)	<b>4.7*</b> (3)	<b>7.9*</b> (4)
	HWRF	3.9 (7)	<b>3.5*</b> (3)	<b>4.2*</b> (1)	<b>3.8*</b> (1)
	R-mean	6.6	6.9	6.6	7.5
	All-mean	5.0	6.5	7.9	11.4

텔이 평균적으로 지역모델보다 예측 정확도가 높고 성능개선도 더 크게 이루어진 것으로 나타났다.

가이던스 모델의 계절별 예측성능은 표본수의 분포에 따라 총 4개의 기간으로 나누어 분석하였다(Table 3). 즉, 상대적으로 표본수가 적은 4~7월(봄~초여름)은 묶고, 표본수가 많은 여름철 8월과 9월은 따로 나누고, 10~11월(가을철)은 묶어 성능평가를 실시하였다. 계절별로 평균오차를 비교하면, 10~11월에 예측오차가 가장 크게 나타나는 것이 특징이다. 이것은 10~11월에 북서태평양에서 강한 태풍이 가장 많이 발생하는 것과 관련이 깊다. 실제로 계절별로 발생한 태풍의 최대풍속 평균값을 비교하면 10~11월이  $47.4\ m\ s^{-1}$ 로 4개의 기간 중 가장 큰 값을 보였다. 따라서 강한 태풍에 대해 최대풍속을 크게 과소모의 하였던 전구 모델들(UM과 KEPS 등)에 의해 이 시기의 예측오차가 더욱 커진 것으로 사료된다. 전구모델 중에서는

TEPS와 GFS 그리고 지역모델 중에서는 KWRF와 HWRF가 모든 계절에서 좋은 예측성능을 보였다. 반면 전구모델 중에 ECMWF, KEPS, UM 그리고 지역모델 중에서 TWRF는 대부분의 시기에서 하위그룹에 속하였다. 특정 계절에만 좋은 성능을 보이는 모델도 있었다. JGSM은 8월과 10~11월에, UM\_R은 8월에, 그리고 TWRF는 10~11월에만 상위그룹의 예측성능을 보였다.

### 3.2 태풍 강도별 예측성능

강도별 가이던스 모델들의 예측성능은 모든 예측시간(0~72시간)의 절대오차 평균값을 이용하여 비교하였다(Table 4). 태풍강도의 구분은 국가태풍센터에서 발행한 태풍백서에 표시된 분류방법을 따랐다. 분석 결과, 전반적으로 태풍의 강도가 약할수록 가이던스 모델들의 오차가 작게 나타났으며 강도가 강해질수록

**Table 5.** Same as in Table 3, but MAEs for all lead times up to 72 h (12-h interval) categorized by types of rapid intensity change (RW, rapid weakening; RI, rapid intensification).

Model	Type	MWS [ $m s^{-1}$ ]	
		RW	RI
G	UM	<b>14.5</b> (11)	<b>20.7</b> (10)
	JGSM	7.6 (5)	8.3 (5)
	TEPS	7.8 (7)	9.0 (6)
	NOGAPS	6.9 (4)	11.3 (8)
	GFS	<b>4.1*</b> (2)	<b>5.2*</b> (3)
	ECMWF	<b>12.3</b> (9)	<b>5.3*</b> (4)
	KEPS	<b>13.1</b> (10)	<b>23.1</b> (11)
	G-mean	9.5	11.8
R	UM_R	<b>5.6*</b> (3)	11.2 (7)
	TWRF	7.6 (6)	<b>15.1</b> (9)
	KWRF	8.0 (8)	<b>3.5*</b> (2)
	HWRf	<b>3.7*</b> (1)	<b>3.4*</b> (1)
	R-mean	6.2	8.3
All-mean	8.3	10.6	

오차가 커지는 경향을 보였다. 이러한 현상은 가이드스 모델들에서, 특히 전구모델에서, 전반적으로 나타나는 과소모의 경향 때문에 나타난 것으로 분석된다. TWRF는 예외적으로 태풍 강도가 강해질수록 오차가 감소하는 경향을 보였다.

지역모델 중에 KWRF와 HWRf는 약한(weak 급) 태풍을 제외한 모든 강도의 태풍에서 예측성능이 우수하였다. 특히, 가장 높은 공간해상도(3 km)를 가진 HWRf는 매우 강한(very strong) 태풍에 대한 강도 예측성능이 탁월하였다(평균오차  $3.8 m s^{-1}$ ). 두 번째로 공간해상도가 높은 KWRF(10 km)의 경우에도 강한 태풍에 대한 예측성능이 우수하였다. 전구모델 중에는 TEPS와 GFS가 모든 강도 군에서  $6.6 m s^{-1}$  이하의 오차를 보이며 상위그룹에 속하였다. 이 두 모델

은 공간해상도가 각각 60 km와 약  $1^\circ$ 로 지역모델에 비해 해상도는 낮았음에도 강한 태풍을 잘 모의하여 그 의미가 더욱 크다. 한편, UM과 KEPS는 매우 강한 태풍에 대한 오차가 가장 큰 모델(모두  $25 m s^{-1}$  이상)로 나타났다.

### 3.3 급격한 강도 변화 시 예측성능

태풍의 강도가 급격하게 변하는 경우에 대한 예측 능력은 전체적인 수치모델의 성능을 평가하는 중요한 기준으로 사용될 수 있다(Knaff et al., 2005). Table 5는 급격한 강도 변화 예측성능에 대한 평가결과를 나타낸다. 전구모델 중에는 GFS 그리고 지역모델 중에는 HWRf가 급격한 강도의 강화와 약화를 모두 잘 예측하였다. 반면, UM\_R는 RW 경우 그리고 ECMWF와 KWRF는 RI의 경우에 상위그룹의 좋은 성능을 보였다. RI와 RW의 오차를 비교하면, 대부분의 가이드스 모델들(ECMWF, KWRF, HWRf 제외)이 RI의 경우에 오차가 더 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 앞서 기술한 바와 같이 많은 수치모델들이 태풍강도를 과소 모의하는 경향이 크기 때문에 나타난 결과로 사료된다.

### 3.4 한반도 영향 태풍의 예측성능

우리나라는 평균적으로 매년 3-4개의 태풍이 직·간접적으로 영향을 미친다(Lee et al., 1992). 본 연구에서는 2013년과 2014년에 우리나라에 영향을 주었던 6개의 태풍에 대해 72시간까지 모든 예측결과를 종합하여 모델별 성능분석을 실시하였다(Table 6). 6개의 태풍은 1304와 1315를 제외하면 모두 매우 강하게(very strong 급) 발달한 태풍이었다.

6개의 모든 태풍에 대한 평균적인 예측성능은 JGSM, TEPS, NOGAPS, GFS, HWRf가 상위그룹에 속하였다. 이 중 GFS와 HWRf는 모든 개별 태풍예측에서 상위그룹에 속하는 성능을 보여주었고, KWRF 또한 태풍 봉풍(1419) 사례를 제외 한 모든 태풍에서 상위그룹에 속하였다. 반면 UM, ECMWF, KEPS의 경우 평균적인 예측성능이 하위그룹에 속할 뿐 아니라 대부분의 개별 분석에서도 하위그룹이었다. 일본 현업 모델인 JGSM과 TEPS의 경우 태풍 강도가 약했던 태풍(1304, 1315) 경우 더 우수한 예측성능을 보였다.

### 3.5 태풍 강도변화 예측성능

대부분의 가이드스 모델들은 초기시간부터 큰 오차를 보인다. 그러나 현업예보의 측면에서 보면 초기값은 이미 알고 있기 때문에 초기값의 성능평가는 의미가 없고 그보다 초기시간 이후의 강도변화를 잘 예측하는 것이 더 중요하다. Table 7은 초기값으로부터 태풍의 최대풍속변화( $\Delta MWS$ ) 예측성능을 72시간까지

**Table 6.** Same as in Table 3, but MAEs for all lead times up to 72 h (12-h interval) for typhoons that influenced the Korean peninsula.

Model	TC number	MWS [ $m s^{-1}$ ]						All-mean	
		1304	1315	1324	1408	1411	1419		
G	UM	4.6 (7)	<b>10.2</b> <b>(10)</b>	<b>19.3</b> <b>(10)</b>	<b>18.1</b> <b>(9)</b>	<b>23.5</b> <b>(10)</b>	<b>30.0</b> <b>(10)</b>	<b>20.9</b> <b>(10)</b>	
	JGSM	<b>1.4*</b> <b>(2)</b>	<b>2.6*</b> <b>(3)</b>	<b>6.5*</b> <b>(4)</b>	9.1 (8)	<b>5.1*</b> <b>(7)</b>	9.0 (5)	<b>6.7*</b> <b>(5)</b>	
	TEPS	<b>1.0*</b> <b>(1)</b>	<b>2.1*</b> <b>(2)</b>	7.3 (5)	7.7 (7)	<b>4.1*</b> <b>(3)</b>	9.4 (6)	<b>6.3*</b> <b>(4)</b>	
	NOGAPS	3.1 (6)	6.0 (7)	10.1 (9)	<b>5.1*</b> <b>(5)</b>	<b>5.0*</b> <b>(5)</b>	<b>5.1*</b> <b>(3)</b>	<b>5.7*</b> <b>(3)</b>	
	GFS	<b>2.1*</b> <b>(3)</b>	<b>1.8*</b> <b>(1)</b>	<b>4.8*</b> <b>(2)</b>	<b>2.7*</b> <b>(2)</b>	<b>2.1*</b> <b>(1)</b>	<b>8.0*</b> <b>(4)</b>	<b>4.0*</b> <b>(2)</b>	
	ECMWF	<b>8.9</b> <b>(10)</b>	6.5 (8)	8.5 (7)	<b>18.8</b> <b>(10)</b>	<b>24.8</b> <b>(11)</b>	15.1 (8)	<b>16.6</b> <b>(9)</b>	
	KEPS	5.0 (8)	<b>9.0</b> <b>(9)</b>	<b>19.8</b> <b>(11)</b>	<b>20.6</b> <b>(11)</b>	<b>23.2</b> <b>(9)</b>	<b>30.2</b> <b>(11)</b>	<b>21.8</b> <b>(11)</b>	
	G-mean	3.7	5.5	10.9	11.7	12.5	15.3	11.7	
	R	UM_R	<b>2.9*</b> <b>(5)</b>	4.0 (6)	9.7 (8)	<b>4.0*</b> <b>(4)</b>	<b>4.2*</b> <b>(4)</b>	16.1 (9)	7.6 (7)
		TWRF	<b>14.6</b> <b>(11)</b>	<b>15.1</b> <b>(11)</b>	8.2 (6)	6.2 (6)	10.6 (8)	<b>4.3*</b> <b>(1)</b>	8.3 (8)
KWRF		<b>7.2</b> <b>(9)</b>	<b>3.3*</b> <b>(5)</b>	<b>6.2*</b> <b>(3)</b>	<b>3.6*</b> <b>(3)</b>	<b>5.1*</b> <b>(6)</b>	14.3 (7)	7.0 (6)	
HWRF		<b>2.4*</b> <b>(4)</b>	<b>3.2*</b> <b>(4)</b>	<b>3.3*</b> <b>(1)</b>	<b>2.3*</b> <b>(1)</b>	<b>3.5*</b> <b>(2)</b>	<b>5.0*</b> <b>(2)</b>	<b>3.4*</b> <b>(1)</b>	
R-mean		6.8	6.4	6.9	4.0	5.9	9.9	6.6	
All-mean	4.8	5.8	9.4	8.9	10.1	13.3	9.8		

모든 예측결과를 종합하여 평가한 결과를 나타낸다.

분석결과, 강도변화 예측에 대한 상관도와 절대오차 분석에서 모두 상위그룹의 좋은 성능을 보인 모델은 GFS, TEPS, HWRF로 나타났다. HWRF는 강도 절대값 뿐 아니라 변화값 평가에서도 가장 좋은 예측성능을 보였다. 반면, 절대값의 상관도 분석에서 0.07의 낮은 값으로 하위그룹에 속했던 UM과 KEPS는 변화값의 평가에서도 0.1 이하의 낮은 상관도를 보여 최하위 성능을 보였다. ECMWF와 KWRF도 변화값에 대한 오차 평가에서는 가장 낮은 성능을 보였다. 한편, JGSM의 경우 초기값 예측 정확도가 높아 절대값 예측에서는 0.79의 상관도를 보이며 상위권 성능을 보였지만(Fig. 4 참고) 강도 변화값에 대한 평가에서는 상관도가 0.4로 낮아져 하위그룹에 속하였다. 편차 분석에서는 대부분의 모델들이 양의 값을 보여 강도변

화를 실제보다 더 과대 모의하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 절대값 평가에서 많은 모델들이 과소 모의하는 경향과 상반된 것으로 대부분의 모델들이 과소 모의된 초기값을 보충하기 위해 강도변화를 과대하게 예측하는 경향이 있는 것으로 해석할 수 있다.

### 3.6 이동경로 및 해역 별 예측성능

현재 기상청에서는 동적 데이터베이스를 기반으로 하는 태풍진로 예측시스템인 DYTRAP (Dynamic database Typhoon Track Prediction)을 사용하고 있다(Lee et al., 2011). 이 방법은 예측하고자 하는 태풍의 이동경로와 가장 유사한 과거 태풍을 선택하고 이 태풍들에 대해 과거 수치모델의 예측성능 결과를 바탕으로 앙상블 평균을 구하는 방식을 사용한다(Jun et al., 2015). 이렇게 유사경로 태풍에 대해 모델 예측성능을

**Table 7.** Correlation coefficient (R), MAE and Bias for the predicted changes ( $\Delta$ MWS) from initial MWS for all lead times up to 72 h (12-h interval) during 2013~2014. The numbers in bracket represent the rank based on the model performance in terms of R, MAE, and Bias. Bold numbers represent the group of low-performance models. Bold numbers with asterisk represent the group of high-performance models. G and R indicate global models and regional models, respectively.

Model	$\Delta$ MWS [ $m s^{-1}$ ]		
	R	MAE	Bias
UM	<b>0.1</b> (10)	<b>7.7</b> (8)	2.3 (6)
JGSM	<b>0.4</b> (9)	<b>7.7</b> (9)	3.4 (8)
TEPS	<b>0.6*</b> (4)	<b>5.7*</b> (3)	<b>0.1*</b> (1)
NOGAPS	0.5 (7)	<b>7.4</b> (7)	<b>4.6</b> (9)
GFS	<b>0.7*</b> (3)	<b>5.1*</b> (2)	<b>0.3*</b> (2)
ECMWF	0.5 (8)	<b>8.9</b> (11)	<b>5.8</b> (10)
KEPS	<b>0.0</b> (11)	6.5 (5)	2.2 (4)
G-mean	0.4	7.0	2.7
UM_R	0.5 (6)	6.4 (4)	2.3 (5)
TWRF	<b>0.8*</b> (2)	6.6 (6)	-2.2 (3)
KWRF	<b>0.6*</b> (5)	<b>8.1</b> (10)	<b>6.5</b> (11)
HWRF	<b>0.8*</b> (1)	<b>4.6*</b> (1)	2.8 (7)
R-mean	0.7	6.4	2.4
All-mean	0.5	6.8	2.6

평가하여 예측에 활용하는 이유는 태풍의 강도가 이동경로 상의 해양 및 대기의 환경에 의해 결정되고 모델별로 이러한 환경을 고려하는 성능에 차이가 나기 때문이다. 본 연구에서는 태풍의 이동경로별로 가이드선스 모델의 예측성능을 평가하기 위하여 1982년부터 2014년까지 최적경로 자료를 이용하여 태풍의 이동경로를 6개의 군집으로 분류한 뒤 군집별로 오차분석을 실시하였다(Fig. 6).

분류된 군집별 태풍의 이동경로 특성을 요약하면

**Table 8.** Same as in Table 3, but MAEs for all lead times up to 72 h (12-h interval) categorized by clusters according to typhoon's track.

Model	Cluster	MWS [ $m s^{-1}$ ]			
		C1	C2	C3	C4
UM		<b>11.0</b> (9)	<b>18.9</b> (11)	<b>25.9</b> (11)	<b>16.7</b> (10)
JGSM		6.7 (7)	<b>6.7*</b> (5)	10.3 (7)	6.1 (6)
TEPS		<b>5.8*</b> (5)	<b>5.3*</b> (3)	<b>6.2*</b> (3)	<b>4.7*</b> (3)
NOGAPS	G	8.1 (8)	7.8 (6)	<b>8.2*</b> (4)	6.3 (7)
GFS		<b>4.4*</b> (2)	<b>4.6*</b> (2)	<b>6.1*</b> (2)	<b>3.4*</b> (2)
ECMWF		<b>5.6*</b> (4)	12.1 (8)	<b>16.0</b> (9)	<b>16.7</b> (9)
KEPS		<b>11.5</b> (10)	<b>18.9</b> (10)	<b>25.7</b> (10)	<b>17.2</b> (11)
G-mean		7.6	10.6	14.1	10.2
UM_R		6.1 (6)	8.6 (7)	10.8 (8)	<b>5.8*</b> (4)
TWRF		<b>11.8</b> (11)	<b>12.9</b> (9)	8.4 (5)	7.8 (8)
KWRF	R	<b>4.5*</b> (3)	<b>6.7*</b> (4)	8.9 (6)	6.0 (5)
HWRF		<b>4.2*</b> (1)	<b>4.4*</b> (1)	<b>3.7*</b> (1)	<b>3.2*</b> (1)
R-mean		6.7	8.2	8.0	5.7
All-mean		7.2	9.7	11.8	8.5

다음과 같다. Cluster1(이하, C1)은 평균진로가 남중국해를 지나 서진하여 중국 내륙에 상륙하는 저위도 태풍의 이동경로를 나타낸다. C2는 대만을 지나 동아시아에 상륙하는 태풍의 경로를 나타낸다. C3은 주로 일본 동쪽 해안을 따라 태평양을 향해 북동진하는 진로를 나타낸다. C4는 C3과 비슷한 경향을 보이지만 좀 더 북서쪽으로 치우쳐 일본 내륙을 직접적으로 관통하는 진로를 나타낸다. C5는 140°E 이동에서 발생하여 일본 동쪽의 먼 해양을 통과하여 북동쪽으로 이동하는 경로를 나타낸다. C6는 열대해역 동쪽에서 발생하여 북서진하는 저위도 이동경로를 나타낸다. 본 연구에서는 연구기간 동안에 자료가 적었던 군집 C5와 C6를 제외한 4개의 군집에 대해서 강도 예측성능을 평가하였다.

분석결과, 전구모델 중에는 TEPS와 GFS 그리고 지

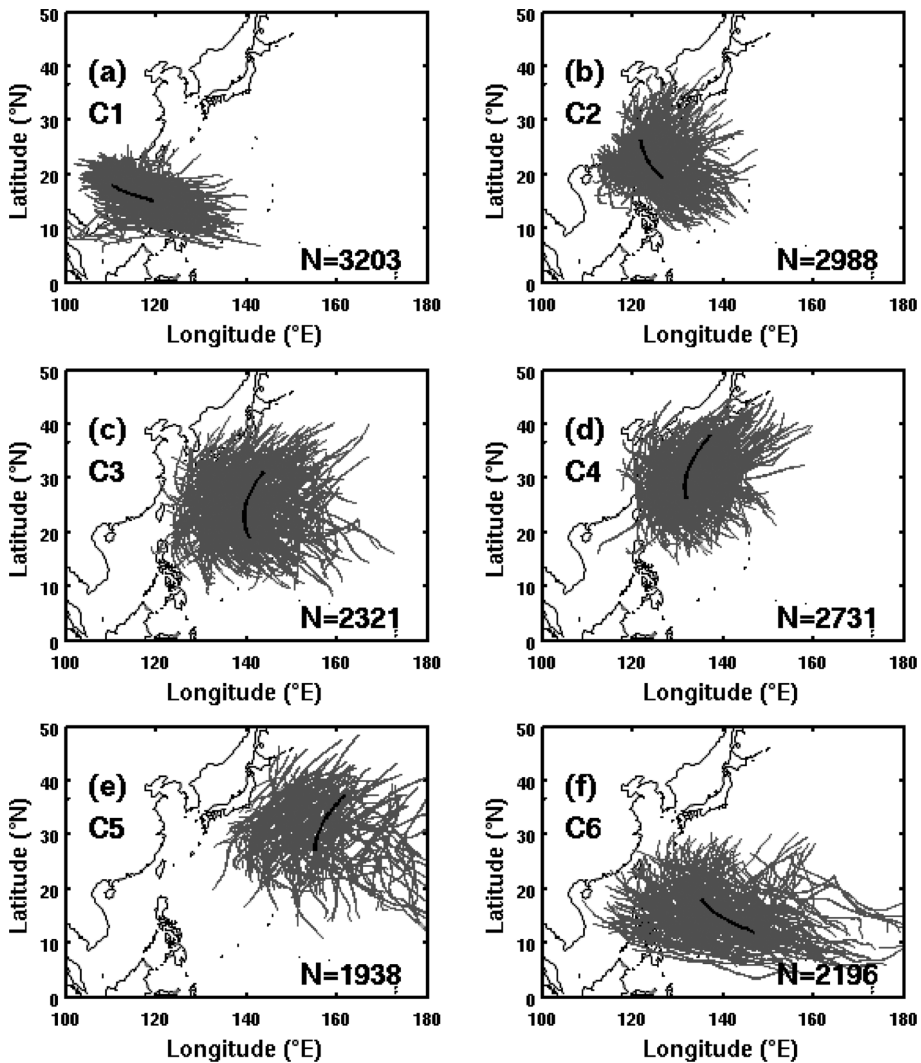


Fig. 6. Six track patterns over the western North Pacific during the TC season for the period of 1982~2014 based on the Fuzzy *c*-mean clustering method. The thick lines represent the mean tracks of each cluster. Numbers represent the sampling number of each cluster.

역모델 중에는 HWRF가 모든 군집에서 상위그룹에 속하는 예측성능을 보여주었다. UM과 KEPS는 모든 군집에서 하위그룹의 성능을 보였다. 특정 경로의 군집에서만 좋은 성능을 보이는 모델도 있었다. JGSM은 C2, NOGAPS는 C3, 그리고 UM\_R은 C4에서 상위그룹의 좋은 성능을 보였다. 평균적으로 가장 오차가 큰 진로군집은 C3이었고 가장 오차가 작은 진로 형태는 C1이었다.

수치모델들의 해역별 예측성능을 비교하기 위해 48 h 최대풍속의 절대오차를 경위도 10° 간격으로 구간을 나누어 분석하였다(Fig. 7). 분석결과, 대부분의 모델

들은 태풍이 가장 많이 발생하고 발달하는 지역(10~20°N, 130~140°E)에서 오차가 가장 컸다. 또한 대부분 저위도 지역에서 모델의 오차가 크고 위도가 높아질수록 오차가 작아지는 경향이 보인다. 이것은 고위도 해역에서 대부분의 태풍은 약화되는 경향이 있어 강도예측이 상대적으로 쉽고 저위도에서는 일반적으로 태풍이 강하게 발달하기 때문에 강도에 비례하여 오차도 커지기 때문에 발생하는 현상으로 사료된다. 해역별로 성능 차이가 많이 나는 모델은 UM, ECMWF, KEPS 등이며, 반대로 해역별 차이가 적은 모델은 NOGAPS, TWRF, HWRF 등으로 나타났다.

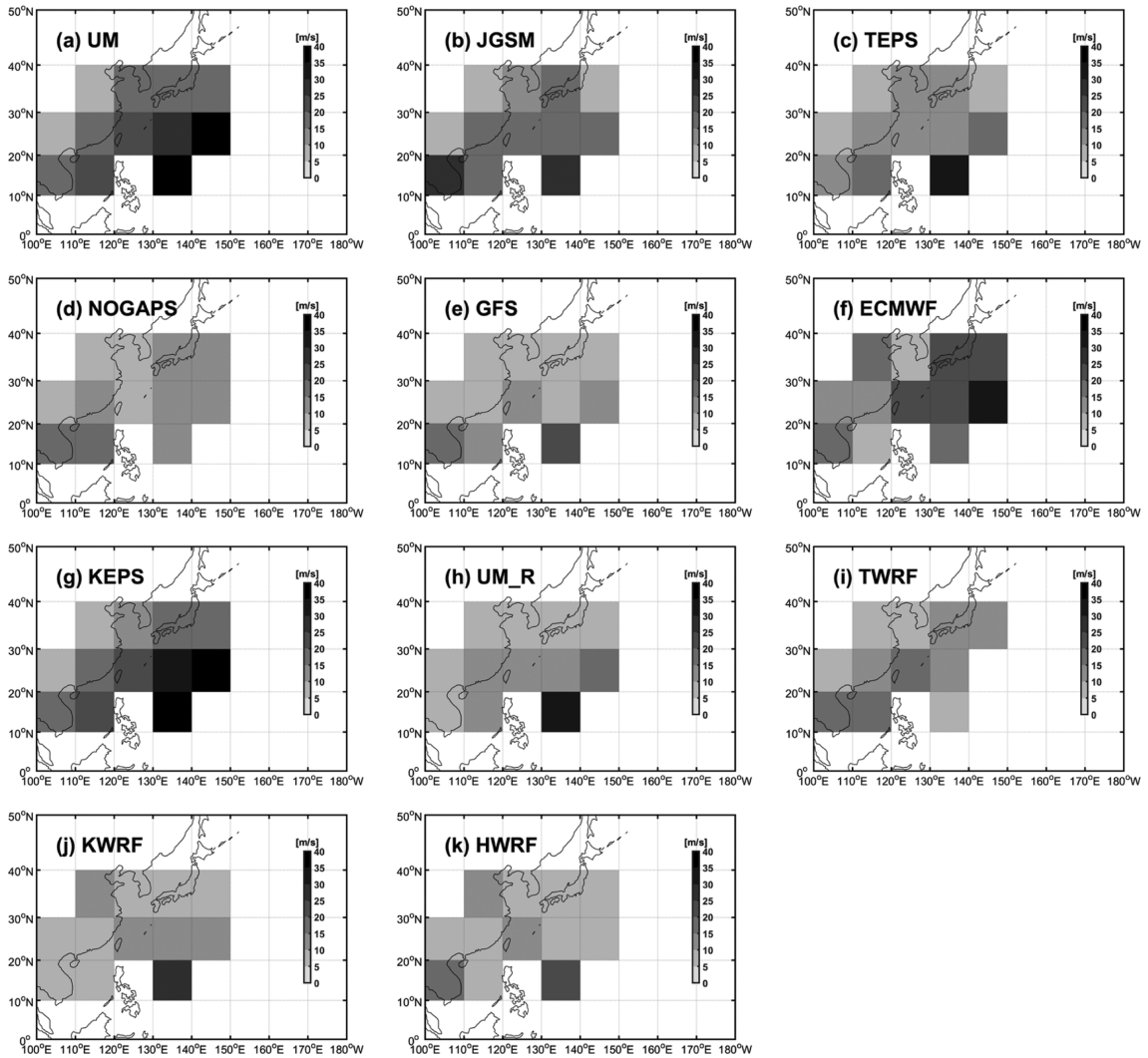


Fig. 7. Spatial distributions of MAE averaged over  $10^{\circ} \times 10^{\circ}$  grid for MWS predicted from 11 guidance models at the lead time of 48 h during 2008~2014.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2008년부터 2014년까지(집중분석은 2013~2014년 기간 동안) 북서태평양에서 발생한 태풍에 대해 국가태풍센터에서 가이드스 모델로 사용하고 있는 11개 태풍 수치모델들의 강도 예측성능을 예보 시간, 강도, 급격한 강도변화, 월, 년, 해역, 이동경로, 그리고 한반도 영향태풍의 경우로 나누어 평가하였다. 또한 현업 이용 시에 참고할 수 있도록 분석 항목마다 모델의 성능을 순위로 나타내었고, 모델 정확도에 따라 상위, 평균, 하위 그룹으로 나누어 분석하였다.

72시간까지 모든 예보시간에 대한 최대풍속의 절대

오차 평가에서는 HWRF, GFS, TEPS가 상위그룹의 성능을 보였다. HWRF는 태풍전용지역모델, GFS는 전구모델, 그리고 TEPS는 앙상블모델인 점을 고려하면, 이 결과는 최근 태풍강도 예측기술이 다양한 형태로 발달하고 있음을 시사한다. HWRF는 최근 고해상도, 물리과정 모수화 개선, 자료동화 향상 등으로 모델의 자체 성능이 개선되었을 뿐 아니라 HWRF 모델에 초기 및 경계 값을 제공하는 GFS 모델의 성능이 개선되어 그 정확도가 더욱 향상된 것으로 사료된다. 실제로 GFS는 11개의 가이드스 모델 중에 최근 들어 가장 크게 성능이 개선된 모델 중에 하나로 평가되었다. 한편, 태풍경로의 예측성능이 뛰어난 것으로 알려진



ECMWF는 강도오차 평가에서는 11개의 가이던스 모델 중에 하위그룹의 성능을 보였다. 우리나라 기상청 모델인 UM과 KEPS도 하위그룹에 속하였다.

예보시간별로 성능을 자세히 비교해 보면 초기시간에서는 일본의 두 모델인 JGSM과 TEPS가 다른 모델과 큰 차이로 최대풍속과 중심기압 모두 가장 좋은 예측성능을 보였다. 이것은 도쿄지역 특별기상센터의 자료를 생산하는 일본에서 이 자료를 초기장의 자료동화에 사용한 결과로 사료된다. 그러나 이 두 모델은 예보시간이 길어질수록 오차가 크게 증가하는 경향을 보였다. TWRP와 KWRP는 초기시간의 오차는 컸지만 예보시간이 길어질수록 성능이 좋아진 모델로 분류된다. 이러한 모델들은 향후 자료동화를 이용한 초기값 개선이 이루어지면 전체적인 예측성능이 향상될 것으로 사료된다.

태풍의 중심기압 예측성능에 대한 평가는 최대풍속의 결과와 대부분 유사하게 나타났지만 일부 모델들은 다르게 나타났다. NOGAPS와 GFS는 최대풍속에 비해 중심기압의 예측정확도는 상대적으로 매우 낮았고, 반면 ECMWF는 최대풍속 평가에서 전 예보시간에서 하위그룹에 속했지만 중심기압 평가에서는 초기시간(0 h)을 제외 한 모든 예보시간에서 상위그룹에 속하였다. UM\_R과 KWRP도 최대풍속에 비해 중심기압 예측성능이 우수한 모델로 평가된다. 이러한 결과는 모델별로 태풍의 강도예측 성능이 우수한 항목을 선택한 후에 이것을 중심기압과 최대풍속 관계식을 사용하여 변환하여 태풍 강도를 예측하는 것이 더 좋은 결과를 얻을 수 있음을 시사한다.

연도별로 가이던스 모델들의 48 h 최대풍속 예측성능 변화를 살펴보면, NOGAPS와 GFS는 지속적인 성능 개선이 이루어지고 있는 반면 JGSM, ECMWF, UM, KEPS는 성능 향상이 거의 없거나 오히려 더 나빠지는 경향을 보인다. 이 결과는 향후 앙상블 또는 컨센서스 기법 연구에서 장기자료를 사용하는 것보다 최근 자료만을 사용하는 것이 그리고 성능개선이 큰 모델들을 더 비중 있게 고려하는 것이 예측성능을 높일 수 있음을 의미한다.

태풍 강도별 평가에서는 약한 태풍(weak 급)의 경우 TEPS, JGSM, GFS와 같은 전구모델의 성능이 태풍전용모델이나 지역모델에 비해 우세하였지만, 강한 태풍의 경우(strong 또는 very strong 급) 태풍전용모델인 HWRF와 고해상도 지역모델인 KWRP가 특히 좋은 성능을 보였다. 이것은 강한 태풍의 경우 공간해상도와 태풍전용 물리과정 및 역학과정 도입 등이 강도예측 성능을 결정하는 주요 요인으로 작용함을 나타낸다.

태풍이 급격히 강화 또는 약화되는 경우에 대한 평가에서는 대부분 급격하게 강화되는 경우보다 약화되는 경우에 오차가 더 낮았다. 이것은 대부분의 모델

들이 태풍 강도를 과소모의하고 있는 것과 관련이 깊다. 전구모델 중에는 GFS 그리고 지역모델 중에는 HWRF가 급격한 강도의 강화와 약화를 모두 잘 예측하는 모델로 평가되었다. UM\_R는 급격한 약화의 경우 그리고 ECMWF와 KWRP는 급격한 강화의 경우에만 상위그룹의 좋은 성능을 보였다.

태풍의 강도 변화값 예측결과에 대한 평가에서는 강도의 절대값(즉 최대풍속)을 예측한 결과와 대부분 유사하게 나타났다. 그러나 JGSM의 경우 최대풍속 절대값 예측에서는 좋은 성능을 보였지만, 변화값에 대한 평가에서는 성능이 좋지 않았다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 JGSM 모델의 경우 초기값의 정확도는 높았지만 태풍 강도변화를 예측하는 능력은 떨어져 나타난 결과로 사료된다. 이 결과는 컨센서스 예측에서 모델별로 다양한 특성을 살린 기술개발이 필요함을 시사한다.

한반도에 영향을 미친 태풍에 대한 성능평가는 전체 태풍에 대한 결과와 유사하게 나타났다. 즉, 전체 태풍에 대한 평가에서 상위 그룹에 속한 HWRF와 GFS는 한반도 영향 태풍들도 가장 잘 예측하였고 전체 평가에서 성능이 좋지 않았던 UM, ECMWF, KEPS는 여기에서도 하위그룹에 속했다. 태풍 이동경로에 따라 6개 군집으로 나누어 성능을 평가한 결과에서도 HWRF와 GFS가 거의 모든 군집에서 상위그룹에 속하였다. 이것은 성능이 우수한 모델의 경우 진로에 따라 성능 차이가 크지 않음을 나타낸다. 월별 평가 결과에서도 전체 예측성능이 우수한 HWRF, GFS, TEPS는 계절에 관계없이 좋은 성능을 보였다. 이러한 결과는 DYTRAP과 같이 태풍의 이동경로별로 우수한 모델을 선택하여 앙상블계산에 이용하는 방법이 실제적으로 크게 효과가 없음을 시사한다.

해역별 모델오차 분석에서는 대부분의 모델들이 태풍이 많이 발생하는 저위도 열대해역에서 오차가 크고 위도가 높아질수록 오차가 작아지는 경향을 보였다. 이것은 위도별 평균 태풍강도 차이와 고위도에서 일관성 있게 나타나는 태풍약화 경향 때문에 발생한 것으로 사료된다.

본 연구에서는 다양한 평가지표와 분류방법을 이용하여 태풍 가이던스 모델의 예측성능을 비교·평가하였다. 본 분석결과는 현업 태풍예측에서 가이던스 모델의 예측결과를 사용할 때 중요한 기초자료로 활용될 수 있다. 또한 이러한 성능평가 결과는 향후 앙상블 및 컨센서스 기법 연구 있어서도 모델 개발과 검증에 필수적인 자료로 사용될 수 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2015학년도 제주대학교 학술진흥연구비

지원사업에 의하여 연구되었습니다.

## REFERENCES

- Choi, E. S., and I. J. Moon, 2008: The variation of extreme values in the precipitation and wind speed during 56 years in Korea. *Atmosphere*, **18**, 397-416.
- DeMaria, M., M. Mainelli, L. K. Shay, J. A. Knaff, and J. Kaplan, 2005: Further improvements to the statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS). *Wea. Forecasting*, **20**, 531-543.
- Elsberry, R. L., 2014: Advances in research and forecasting of tropical cyclones from 1963~2013. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 3-16.
- Kim, H. S., J. H. Kim, C. H. Ho, and P. S. Chu, 2011: Pattern classification of typhoon tracks using the fuzzy c-means clustering method. *J. Climate*, **24**, 488-508.
- Knaff, J., C. R. Sampson, and M. DeMaria, 2005: An operational statistical typhoon intensity prediction scheme for the western north Pacific. *Wea. Forecasting*, **20**, 688-699.
- Lee, D. K., D. E. Jang, and T. K. Wee, 1992: Typhoons approaching Korea, 1960~1989. Part I: Statistics and synoptic overview. *Atmosphere*, **28**, 133-147.
- Lee, J. W., S. W. Lee, S. O. Han, S. J. Lee, and D. E. Jang, 2011: The impact of satellite observations on the UM-4DVar analysis and prediction system at KMA. *Atmosphere*, **21**, 85-93.
- Lee, Y. J., H. J. Kwon, and D. C. Joo, 2011: Dynamic database typhoon track prediction (DYTRAP). *Atmosphere*, **21**, 209-220.
- Nakagawa, M., 2009: Outline of the high resolution global model at the Japan Meteorological Agency. *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Rev.*, **11**, 1-13.
- National Centers for Environmental Prediction (NCEP), 2003: The GFS atmospheric model. NCEP Office Note 442, NCEP Modeling Center, 14 pp.
- National Emergency Management Agency (NEMA), 2011: Annual Disaster Report, NEMA, 986 pp.
- National Typhoon Center-Korea Meteorological Administration (NTC-KMA), 2011: Typhoon white book. NTC-KMA, 342 pp.
- \_\_\_\_\_, 2013: Analysis report for the affecting typhoons to Korea peninsula (2013). NTC-KMA, 120 pp.
- \_\_\_\_\_, 2014: Analysis report for the affecting typhoons to Korea peninsula (2014). NTC-KMA, 83 pp.
- Park, S. Y., S.-W. Joo, H. C. Shin, and J. Y. Cho, 2008: Coupling of typhoon bogus for KMA WRF. *Proc. Spring Meeting of KMS*, **2008**, 260-261.
- Rogers, R., and Coauthors, 2006: The intensity forecasting experiment: A NOAA multiyear field program for improving tropical cyclone intensity forecasts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **87**, 1523-1537.
- Simiu, E., and R. H. Scanlan, 1978: *Wind effects on structures: an introduction to wind engineering*. Wiley-Interscience, 458 pp.
- Vijay, T., and HWRF Team, 2014: Overview of the NCEP Operational HWRF modeling system. Joint EMC/DTC HWRF Tutorial, 47 pp.
- Yamaguchi, M., and T. Komori, 2009: Outline of the typhoon ensemble prediction system at the Japan Meteorological Agency. *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Rev.*, **11**, 14-24.
- \_\_\_\_\_, T. Nakazawa, and K. Aonashi, 2012: Tropical cyclone track forecasts using JMA model with ECMWF and JMA initial conditions. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, doi:10.1029/2012GL051473.