

2013년 태풍에 대한 수치모델들의 강도 예측성 평가

김지선^{1)*} · 이우정¹⁾ · 강기룡¹⁾ · 변건영¹⁾ · 김지영²⁾ · 윤원태¹⁾

¹⁾기상청 국가태풍센터, ²⁾기상청 레이더분석과

(접수일: 2014년 4월 29일, 게재확정일: 2014년 8월 22일)

Evaluation of the Intensity Predictability of the Numerical Models for Typhoons in 2013

Ji-Seon Kim^{1)*}, Woojeong Lee¹⁾, KiRyong Kang¹⁾, Kun-Young Byun¹⁾,
Jiyoung Kim²⁾, and Won-Tae Yun¹⁾

¹⁾National Typhoon Center/Korea Meteorological Administration, Jeju, Korea

²⁾Weather Radar Center/Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

(Manuscript received 29 April 2014; accepted 22 August 2014)

Abstract An assessment of typhoon intensity predictability of numerical models was conducted to develop the typhoon intensity forecast guidance comparing with the RSMC-Tokyo best track data. Root mean square error, box plot analysis and time series of wind speed comparison were performed to evaluate the each model error level. One of noticeable fact is that all models have a trend of error increase as typhoon becomes stronger and the Global Forecast System showed the best performance among the models. In the detailed analysis in two typhoon cases [Danas (1324) and Haiyan (1330)], GFS showed good performance in maximum wind speed and intensity trend in the best track, however it could not simulate well the rapid intensity increasing period. On the other hand, ECMWF and Hurricane-WRF overestimated the typhoon intensity but simulated track trend well.

Key words: Typhoon intensity, forecast guidance, numerical model, Danas (1324), Haiyan (1330)

1. 서 론

태풍은 단 한 번의 영향으로도 큰 피해를 줄 수 있으나 철저한 사전 대비가 수행된다면 그 피해저감은 가능하다. 이를 위해서는 우선 정확한 태풍 예보와 함께 꾸준한 예측기술 개발이 이루어져야 한다. 특히 태풍 예보에 있어 강도는 태풍 피해 정도를 예측하는데 핵심요소이기 때문에 진로만큼이나 매우 중요하다. 이에 국외 주요 기관들에서는 태풍 예보에 사용되고 있는 모델의 예측성을 매년 평가하고 있으며, 연간보

고서를 통해 그 결과를 발표하고 있다. 미국의 국립 허리케인 센터(National Hurricane Center, NHC)에서는 매년 예보 검증 보고서를 발표하고 있으며(Cangialosi, 2013), 여기에는 평가지표를 비롯한 예측 성능의 평가 방법 및 현재 활용 중인 예보 모델이 기술되어 있다. 또한 대서양 및 북동태평양에서 발생한 허리케인의 진로 및 강도 예보에 대한 정확도를 평가하고 있을 뿐만 아니라, 현업에 활용 중인 역학모델, 통계 모델, 컨센서스 모델 등의 예측 성능을 평가하고 있다. 이 평가 결과가 컨센서스 모델 결정을 위한 지표로 사용된다.

미국합동태풍경보센터(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)에서는 수치예보가이드의 중요성을 강조하고 모델의 성능 동향을 제공하기 위하여 월간 모델 요약 보고서를 발표하고 있다(Strahl, 2012). 이 보고서에서는 당월 태풍 예보의 진로 및 강도오차, 그리고 미국

*Corresponding Author: Ji-Seon Kim, National Typhoon Center/
Korea Meteorological Administration, 2 Seoseongro 810-gil,
Namwon-eup, Seogwipo-si, Jeju 699-942, Korea.
Phone : +82-70-7850-6371, Fax : +82-64-805-0368
E-mail : jisun89@korea.kr

합동태풍경보센터 컨센서스(CONW)에 사용되고 있는 6개의 역학 모델[NOGAPS, AVN (Lord (1993)), UKMET [Cullen (1993), Heming *et al.* (1995)], ECMWF, JGSM, GFDN [Bender *et al.* (2007)]과 3개의 중규모 열대저기압 모델[Hurricane WRF (HWRF), 대만 중앙 기상청의 TWRF, 미 해군의 COAMPS-TC (COTC)]의 진로 및 강도 예측 성능을 평가하고 있다.

도쿄지역특별기상센터(Regional Specialized Meteorological Center Tokyo, RSMC Tokyo)에서는 매년 연간 보고서를 통해 북서태평양에서 발생한 태풍의 진로 및 강도 예보에 대한 정확도를 평가하고 있다(JMA, 2012). 또한 일본기상청(Japan Meteorological Agency, JMA)의 현업 전 지구 모델인 JGSM과 앙상블 모델인TEPS (Yamaguchi *et al.*, 2009)에 대한 진로 및 강도 예측 성능을 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE) 및 Bias를 통해 평가하고 있다(TEPS의 경우 진로오차만 평가함).

이 외에도 Yu *et al.* (2013)은 2010~2011년에 북서태평양의 열대저기압 예보에 운영 중인 6개 모델 [전구 모델 3개; CMA-GSM (Guan *et al.*, 2008), ECMWF-GSM, JMA-GSM, 지역 모델 3개; GFDN (Bender *et al.*, 2007), GRAPES_TCM (Huang *et al.*, 2007), GRAPES_TM (Yuan *et al.*, 2011)]의 강도 예측성능을 최대풍속(V_{max})과 최저해면기압(P_{min})에 대해서 상대오차, 스킬(Skill), 등급 지수(Category score) 등의 방법을 이용하여 평가하였다. 그 결과 GFDN과 ECMWF-GSM의 성능이 우수함을 밝혔다.

Sampson *et al.* (2008)은 현재 사용되고 있는 열대저기압 예측 가이드선의 강도 예측 성능을 평가하였다. 그 결과 대서양과 북동태평양에서는 GFDI (Kurihara *et al.*, 1993, 1995, 1998), DSHP (DeMaria *et al.*, 2005), GFNI (Bender *et al.*, 2007)가 다른 모델에 비하여 우수한 성능을 보였고, 북서태평양에서는 STID (Knaff *et al.*, 2005)와 GFNI의 성능이 다른 모델에 비하여 우수함을 밝혔다. 이처럼 국외 기관 및 많은 연구에서는 열대저기압 예보에 사용되고 있는 모델의 성능 평가 결과 및 다양한 컨센서스 기법들을 개발하고 있으며, 이를 통해 열대저기압 예보 시 수많은 모델 자료를 손쉽게 참고할 수 있도록 하고 있다.

현재 기상청에서는 진로 예보와 강도 예보에 대한 검증은 수행하고 있으나 수치예측모델들의 태풍 예측성 검증은 진로에 대해서만 중점적으로 이루어지고 있다. 태풍 예보에 사용되고 있는 수치모델에 대한 강도 예측성 검증이 상세히 이루어진다면 태풍의 강도 예보 시 유용하게 활용할 수 있는 근거가 될 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 태풍 예보 시 활용될 수 있는 강도 예측 가이드선 개발을 위한 기초 연구로써 현재 태풍예보에서 사용되고 있는 다양한 수치모델들의 강도예측성능을 평가하고, 2013년에 발생했던 강한 두 태풍 사례에 대해서 모델들의 예측 경향을 분석하고자 한다. 본 연구에서 사용된 자료와 분석방법은 2장에서 소개하였고, 3장에서는 강도예측오차 경향을 분석하였으며, 마지막으로 4장에서는 주요 내용을 요약하였다.

Table 1. Specification of numerical models used for typhoon forecast.

	Title	Provider	Finest model resolution	Bogusing	Daily forecast time	Forecast interval	Predicted variables
Global NWP model	GDAPS	KMA	~25 km	O	4	6	x, y, w, p
	JGSM	JMA	20 km	O	4	6	x, y, w, p
	NAVGEN	US Navy	1°	O	2	6	x, y, w, p
	GFS	NCEP	1°	X	2	6	x, y, w, p
	ECMWF	ECMWF	0.5°	X	2	24	x, y, w, p
Regional NWP model	TWRF	NTC/KMA	15 km	O	2	6	x, y, w, p
	HWRF	NCEP/EMC	3 km	O	4	6	x, y, w, p

GDAPS: Global Data Assimilation and Prediction System

JGSM: JMA-Global Spectral Model

NAVGEN: Navy Global Environmental Model

GFS: Global Forecast System

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

TWRF: Typhoon Weather Research and Forecasting

HWRF: Hurricane Weather Research and Forecasting

KMA: Korea Meteorological Administration

JMA: Japan Meteorological Agency

NCEP: National Centers for Environmental Prediction

NTC: National Typhoon Center

ECM: Environmental Modeling Center

2. 자료 및 분석방법

2.1 자료

본 연구에서는 2013년 태풍예보에 사용된 20개의 모델 중 태풍의 최대풍속 예측이 포함된 국외 주요 수치 모델과 기상청에서 운용중인 수치 모델에 대한 강도 예측성을 평가하였다. Table 1은 본 연구에서 평가한 모델로써, 총 5개의 전 지구 모델과 2개의 지역 모델을 나타내었다. 모델들의 예보자료는 보통 1일 4회 또는 2회에 걸쳐 생산되며, 이 때 생산된 자료에는 분석자료(0시)와 6시간 또는 24시간 간격의 예보자료가 포함된다. ECMWF의 경우 24시간 간격의 예보자료가 생산되고, 이외 모델들은 6시간 간격의 예보자료가 생산되고 있다. 수평해상도가 가장 큰 모델은 GFS와 NAVGEM이며, 가장 작은 모델은 HWRP이다. 또한 ECMWF와 GFS의 경우 모조 태풍을 삽입하는 보거싱 과정을 거치지 않고 있다. 이 모델들은 태풍 중심의 위·경도, 최대풍속, 최저해면기압 자료를 제공하며, 본 연구에서는 최대풍속 자료를 사용하였다. 그리고 모델의 예측 정확도를 평가하기 위한 비교 자료로 RSMC Tokyo의 베스트트랙 자료를 사용하였다. 이때 열대저압부(Tropical Depression, TD)를 제외하고 열대폭풍(Tropical Storm, TS)-태풍(Typhoon, TY)

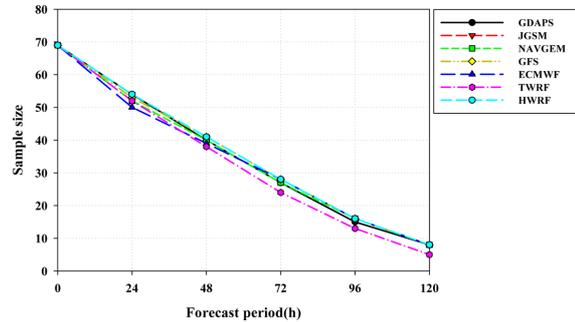


Fig. 1. Sample size of model.

등급에 해당하는 자료만을 사용하였다. 또한 각 모델들의 객관적인 강도예측성능 평가를 위해서 7개의 모델 자료 및 베스트트랙 자료가 모두 동일하게 존재하는 시간의 예보자료만을 샘플링하여 사용하였다. 그 결과 각 모델의 예보시간별 샘플 개수는 Fig. 1과 같았으며, 총 23개의 태풍이 선정되었다(Table 2).

2.2 연구 방법

2013년 수치예측모델의 성능을 평가하기 위한 방법으로 베스트트랙 및 각 모델이 예보한 최대풍속 간의

Table 2. List of typhoon cases selected for this study.

Typhoon Name	Typhoon period (TS~TY) (YYYYMMDDHH-YYYYMMDDHH)	Maximum Intensity (Maximum sustained wind, m s ⁻¹)
YAGI(1303)	2013060812-2013061200	22
RUMBIA(1306)	2013062812-2013070206	25
SOULIK(1307)	2013070800-2013071318	50
CIMARON(1308)	2013071700-2013071812	20
JEBI(1309)	2013073100-2013080306	25
UTOR(1311)	2013080918-2013081506	52
TRAMI(1312)	2013080612-2013080718	20
KONG-REY(1315)	2013082606-2013082918	27
TORAJI(1317)	2013090118-2013090321	25
MAN-YI(1318)	2013091300-2013091609	32
USAGI(1319)	2013091618-201309230	55
PABUK(1320)	2013092106-2013092618	30
WUTIP(1321)	2013092706-2013093018	32
SEPAT(1322)	2013093000-2013100212	20
FITOW(1323)	2013093018-2013100700	37
DANAS(1324)	2013100406-2013100821	45
NARI(1325)	2013100912-2013101512	37
WIPHA(1326)	2013101012-2013101603	45
FRANCISCO(1327)	2013101606-2013102603	52
LEKIMA(1328)	2013102018-2013102606	57
KROSA(1329)	2013102918-2013110400	37
HAIYAN(1330)	2013110400-2013111100	62
PODUL(1331)	2013111412-2013111418	17

예측시간별(0, 24, 48, 72, 96, 120시간) 평균제곱근오차와 상자그림(box plot)을 살펴보았다. 평균제곱근오차는 관측값과 예측값의 일치 정도를 평가하기 위해 널리 쓰이는 통계적 지표로써, 아래 식으로 정의될 수 있다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}, \quad (1)$$

여기서 N 은 샘플의 개수이며, P_i 는 예측값으로 모델에 의해 예측된 최대풍속, O_i 는 관측값으로 베스트트랙 자료이다. 평균제곱근오차는 0에서 무한대까지의 값을 가질 수 있으며, 비교하고자 하는 두 값이 완전히 일치하는 경우에는 0의 값을 가져 표본의 평균적인 오차를 알 수 있으나, 편차에 대한 방향성은 나타내지 못한다. 반면에 상자그림은 자료의 범위가 어떻게 분포되어있는 쉽게 알아볼 수 있어, 자료에 대한 편차의 방향성 평가가 가능하다. 따라서 상자그림을 이용하여 예측시간별 각 모델과 베스트트랙 간의 예보오차에 대한 분산과 방향성도 함께 살펴보았다. 이때 모델들의 강도 오차는 베스트트랙 최대풍속과 모델이 예측한 최대풍속의 차로 정의된다. 또한 태풍의 강도를 풍속 구간별로 나누어 각 모델의 강도예측성을 평가하였다. 태풍의 강도별 분류는 세계 기상 기구(World Meteorological Organization, WMO)의 기준에 따라 열대 폭풍(Tropical Storm, TS: $17 \text{ m s}^{-1} \sim 25 \text{ m s}^{-1}$), 강한 열대 폭풍(Severe Tropical Storm, STS: $25 \text{ m s}^{-1} \sim 33 \text{ m s}^{-1}$), 태풍(Typhoon, TY: 33 m s^{-1} 이상)으로 나누었으며(WMO, 2012), 각 예보시간의 강도 등급은 베스트트랙 자료를 기준으로 분류하였다. 또한 2013년 북서태평양 발생 태풍 중 가장 강했던 태풍 하이옌(HAIYAN, 1330)과 우리나라에 영향을 미쳤던 태풍 중 가장 강도가 강했던 태풍 다나스(DANAS, 1324)에 대해 시계열 분석을 수행하여 각 모델의 강도예측 경향성을 분석하였다.

3. 결 과

3.1 예측오차 수준

2013년의 전반적인 모델 강도 예측 오차를 살펴보기 위해서 각 모델들의 예측시간별 강도 오차 상자그림 및 평균제곱근오차를 살펴보았다. Figure 2는 모델의 오차를 상자그림으로 나타낸 것이며, Table 3은 각 모델에 대한 오차의 최대값, 최소값, 중앙값, 25분위수, 75분위수를 나타낸 것이다.

GDAPS의 오차 중앙값은 0~120시간까지 각각 -10.7 , -14.8 , -15.0 , -15.0 , -20.1 , -15.2 m s^{-1} 였으며, NAVGEM의 오차 중앙값은 0~120시간까지 각각 -7.4 , -9.6 , -6.7 , -4.5 , -2.5 , -5.5 m s^{-1} 로 나타났다. 또한 75분위수 역시 대부분 음수로 나타나 두 모델이 2013년 태

풍에 대해서 베스트트랙보다 과소 모의하였다는 것을 알 수 있다. GFS는 75분위수가 모두 양수였지만, 각 예보시간에 대한 오차의 중앙값이 0.1, -2.1 , -0.7 , -2.2 , 0.5, -1.1 m s^{-1} 로 대부분 음수였고, 25분위수에 가까운 오차들의 비율이 높아 GDAPS와 NAVGEM과 마찬가지로 과소 모의하는 경향이 더 강한 것으로 나타났다. JGSM의 0~72시간까지 오차의 중앙값은 각각 1.1, 1.3, 4.2, 10.0 m s^{-1} 로 나타나 대체로 과대 모의하는 경향을 보였고, 분석시간(0시)은 오차들이 거의 0 m s^{-1} 에 가까웠으나 48시간까지 오차 분산이 점차 커지는 것으로 나타났다. ECMWF의 0~120시간까지 오차 중앙값은 6.3, 4.7, 7.1, 13.5, 20.0, 25.7 m s^{-1} 로 점차 증가하였고, 25분위수 역시 24시간을 제외하고 모두 양수로 나타나 대체로 과대 모의한 것으로 나타났다. 또한 그 오차 분포 역시 큰 것으로 나타났다. TWRP의 0~120시간까지 오차 중앙값은 12.4, 14.7, 10.0, 4.2, 2.0, -4.5 m s^{-1} 로 점차 감소하였고, 48시간까지 25분위수가 양수, 72, 96시간에는 25분위수가 음수였지만 오차값이 대체로 75분위수에 가까워 과대 모의하는 경향을 보였다. 반면에 120시간 예보는 과소 모의한 것으로 나타났다. HWRP의 0~120시간까지 오차 중앙값은 3.4, 8.3, 7.8, 10.9, 10.1, 4.8 m s^{-1} 로 모두 양의 값을 가졌으며, 25분위수 역시 48시간을 제외하고는 모두 양의 값으로 나타나 HWRP를 통해 예측된 풍속이 베스트트랙에 비하여 과대 모의하는 것으로 나타났다.

다음으로 예보시간별(0, 24, 48, 72, 96, 120시간) 베스트트랙 최대풍속과 모델 예측 최대풍속 간의 평균제곱근오차를 살펴보았다(Fig. 3, Table 4). GFS의 경우 시간에 따른 평균제곱근오차의 변화는 뚜렷하지 않았으며, 24~120시간까지 평균제곱근오차가 7.3, 7.2, 7.9, 6.2, 6.4 m s^{-1} 로 가장 작았다. JGSM의 경우 분석시간(0시간)의 평균제곱근오차가 2.2 m s^{-1} 로 가장 작았지만 시간이 지날수록 9.6, 14.3, 14.9 m s^{-1} 로 증가해 예보시간 후반으로 갈수록 예측 성능이 초반에 비해 떨어지는 것으로 보인다. NAVGEM은 48~120시간까지의 평균제곱근오차가 10.6, 8.4, 7.6, 7.7 m s^{-1} 로 다른 모델에 비하여 낮은 것으로 나타났다. ECMWF는 모든 시간에 대해서 다른 모델들의 평균제곱근오차가 10.7, 14.7, 15.9, 17.9, 21.7, 24.3 m s^{-1} 로 시간이 지날수록 증가하였고, 다른 모델들에 비하여 큰 값을 보였다. 특히 96, 120시간에 대한 평균제곱근오차가 21.7, 24.3 m s^{-1} 로 가장 컸다. TWRP는 24~120시간까지 평균제곱근오차가 17.4, 14.4, 9.7, 7.3, 7.2 m s^{-1} 로 감소하였고, 96, 120시간에는 GFS 다음으로 작았다. HWRP의 평균제곱근오차는 7.9, 12.3, 11.4, 11.1, 12.0, 7.5 m s^{-1} 로 시간에 따른 증감의 경향성이 나타나지 않았고, 모든 시간대에 3, 4번째로 작았다. 마지막으로

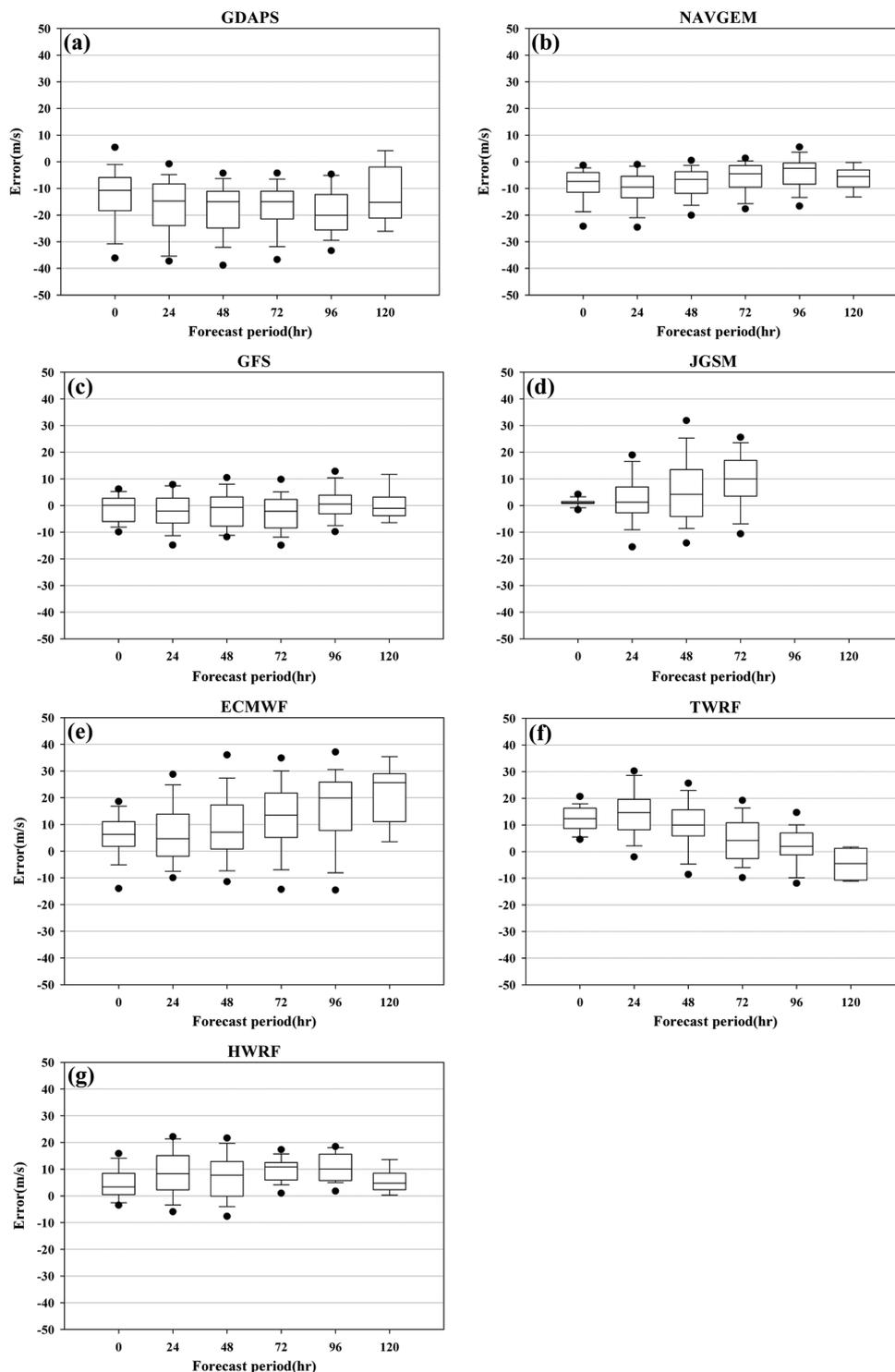


Fig. 2. Error distribution of maximum sustained wind speed. The dots at the top (bottom) signal the 95th (5th) percentile of relative error. The upper (lower) bounds of the quadrate boxes signal the 75th (25th) percentile of relative errors. The middle line inside the boxes are the median.

Table 3. Maximum, minimum, median, 25th percentile, and 75th percentile value of each numerical model error.

Model	Forecast time	Max	Min	Median	25th percentile	75th percentile
GDAPS	0	8.3	-42.0	-10.7	-18.9	-5.9
	24	5.5	-42.5	-14.8	-24.2	-8.2
	48	-3.2	-40.7	-15.0	-25.6	-11.1
	72	-2.8	-40.3	-15.0	-21.7	-10.7
	96	-4.5	-34.7	-20.1	-26.4	-11.8
	120	4.6	-28.1	-15.2	-21.3	0.6
JGSM	0	9.2	-3.6	1.1	0.8	1.5
	24	22.2	-22.2	1.3	-2.8	7.3
	48	33.2	-27.6	4.2	-4.8	13.7
	72	32.4	-19.0	10.0	3.3	17.5
NAVGEM	0	1.3	-27.3	-7.4	-11.5	-4.0
	24	0.1	-26.0	-9.6	-13.5	-5.2
	48	2.9	-31.3	-6.7	-11.9	-3.7
	72	5.0	-22.1	-4.5	-9.7	-1.1
	96	6.2	-18.0	-2.5	-8.5	-0.4
	120	0.9	-14.5	-5.5	-9.9	-3.0
GFS	0	9.2	-20.3	0.1	-6.0	2.8
	24	12.2	-20.6	-2.1	-6.6	2.8
	48	11.2	-14.7	-0.7	-8.0	3.3
	72	13.6	-18.9	-2.2	-9.0	2.7
	96	13.7	-10.7	0.5	-3.3	4.5
	120	14.3	-7.3	-1.1	-4.1	4.5
ECMWF	0	28.0	-19.0	6.3	1.8	11.1
	24	42.3	-28.8	4.7	-2.0	14.1
	48	39.2	-16.2	7.1	0.6	18.2
	72	36.6	-17.0	13.5	4.7	21.9
	96	39.9	-16.9	20.0	5.4	26.6
	120	37.2	3.2	25.7	7.7	30.2
TWRP	0	21.6	0.7	12.4	8.7	16.3
	24	36.3	-5.3	14.7	8.2	19.9
	48	34.0	-14.4	10.0	5.9	16.5
	72	23.0	-15.6	4.2	-3.1	11.3
	96	15.7	-12.4	2.0	-1.8	7.2
	120	1.7	-11.1	-4.5	-10.9	1.4
HWRF	0	22.8	-4.5	3.4	0.5	8.6
	24	24.7	-12.9	8.3	2.2	15.1
	48	26.5	-9.4	7.8	-0.2	13.0
	72	19.2	-6.3	10.9	5.8	12.5
	96	18.6	0.4	10.1	5.7	15.9
	120	15.7	0.0	4.8	1.7	8.7

Unit : m s^{-1}

로 GDAPS의 경우 평균제곱근오차가 대체로 약 20 m s^{-1} 정도로 72시간까지 다른 모델들에 비하여 가장 컸다.

다음으로 태풍의 강도 등급별로 각 모델의 평균제곱근오차를 살펴보았다. 먼저 태풍 등급이 TS일 때를

살펴보면(Fig. 4) 예측시간 48시간까지 ECMWF와 TWRP의 평균제곱근오차가 가장 컸고, 이외 다른 모델들의 평균제곱근오차는 대체로 비슷하였다. 그러나 JGSM의 경우 72시간부터 급격하게 증가하였고, 예측 시간별로(0, 24, 48, 72, 96, 120시간) 평균제곱근오차

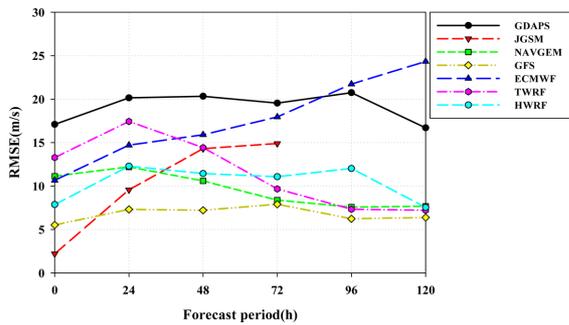


Fig. 3. RMSE of maximum sustained wind speed by intensity guidance models for 2013.

가 가장 작았던 모델은 각각 JGSM (1.2 m s^{-1}), NAVGEM (1.9 m s^{-1}), HWRF (2.5 m s^{-1}), NAVGEM (3.2 m s^{-1}), TWRP (4.5 m s^{-1}), GFS (1.3 m s^{-1})였다. 다음으로 등급이 STS일 때를 살펴보면 72시간까지 TWRP의 평균제곱근오차가 가장 컸고, 96, 120시간에는 ECMWF의 평균제곱근오차가 가장 컸다(Fig. 5). 예측시간별로 평균제곱근오차가 가장 작았던 모델은 각각 JGSM (2.3 m s^{-1}), GFS (5.0 m s^{-1}), GFS (6.3 m s^{-1}), GFS (6.9 m s^{-1}), NAVGEM (6.2 m s^{-1}), NAVGEM (4.2 m s^{-1})으로 대체로 0시를 제외하고는 NAVGEM과 GFS의 평균제곱근오차가 작은 것으로 나타났다. 태풍 등급이 TY일 때는 96시간까지 GDAPS의 평균제곱근오차가 가장 컸고, ECMWF 역시 평균제곱근오차가 큰 것으로 나타났다(Fig. 6). 예측 시간별로 평균제곱근오차가 가장 작았던 모델은 각각 JGSM (2.9 m s^{-1}), GFS (9.4 m s^{-1}), GFS (8.3 m s^{-1}), TWRP (7.8 m s^{-1}), GFS (5.3 m s^{-1}), GFS (4.6 m s^{-1})로 다른 강도 등급과 마찬가지로 GFS의 평균제곱근오차가 가장 작았다.

GDAPS의 경우 TS일 때보다 TY일 때의 평균제곱근오차가 모든 시간에 대해서 증가하였으며, 그에 따라 평균제곱근오차가 작은 순서대로 순위를 부여했을 때 그 순위 역시 하위권으로 밀려나는 경향을 보였다.

JGSM은 태풍 강도에 상관없이 예측시간 초반에는 상위권이었던가 예측 시간이 지날수록 평균제곱근오차가 급격히 증가하며, 순위 역시 하위권으로 밀려났다. NAVGEM은 TS와 STS일 때는 주로 중, 상위권의 평균제곱근오차를 가지나 태풍 강도가 TY로 강해짐에 따라서 중, 하위권의 평균제곱근오차를 가졌다. GFS의 경우 강도가 TS 일 때는 중위권, STS일 때는 중, 상위권, TY일 때는 상위권으로 대체로 다른 모델에 비하여 평균제곱근오차가 작지만 특히 강도가 강할 때 다른 모델에 비하여 작다는 것을 알 수 있다. ECMWF의 경우 평균제곱근오차의 순위가 TS, STS, TY일 때 모두 하위권이었고, TWRP의 경우 TS, STS일 때는 주로 중, 하위권이었으나 TY일 때는 상위권으로 강도가 약할 때보다는 평균제곱근오차가 증가하였지만 다른 모델들에 비해서 작은 평균제곱근오차를 보였다. 마지막으로 HWRF의 경우 TS일 때는 시간에 따라 다양한 순위로 나타났고, STS, TY일 때는 대체로 3, 4번째로 평균제곱근오차가 작아 중위권을 유지한 것으로 나타났다.

이처럼 수치모델들의 성능이 각 강도 등급에 따라 다르게 나타나는 이유는 Davis *et al.* (2008)과 Cha and Wang (2013)의 연구를 통해 각 역학 모델의 태풍 강도 예측 성능에 영향을 주는 것으로 밝혀진 특성들(모델의 해상도, 태풍 물리과정 모수화, 태풍 초기화 조건)이 각 모델마다 다르기 때문이다.

3.2 사례분석: 태풍 다나스(1324)와 하이옌(1330)

앞 절에서는 2013년 모델들의 평균적인 강도예측오차를 예측시간 및 강도별로 분석하여 전반적인 예측 성능을 살펴보았다. 이를 통해서 태풍의 강도가 강해질수록 예측 결과의 오차가 큰 모델(GDAPS), 반대로 강도가 강할수록 예측 오차가 작았던 모델(TWRP), 초기 예측 오차는 작았으나 예측시간 후반으로 갈수록 오차가 커지는 모델(JGSM) 등 모델의 강도 모의 오차 특성이 각 모델마다 다름을 알 수 있었다. 따라서 이번 절에서는 2013년 북서태평양 발생 태풍 중 최성기의 강도가 ‘매우 강’(기상청 태풍 강도 분류기

Table 4. RMSE of maximum sustained wind speed and sample size by intensity guidance models for 2013.

	GDAPS		JGSM		NAVGEM		GFS		ECMWF		TWRP		HWRF	
000 h	17.1	(69)	2.2	(69)	11.1	(69)	5.5	(69)	10.7	(69)	13.3	(69)	7.9	(69)
024 h	20.1	(54)	9.6	(54)	12.2	(52)	7.3	(53)	14.7	(50)	17.4	(52)	12.3	(54)
048 h	20.3	(40)	14.3	(41)	10.6	(40)	7.2	(41)	15.9	(39)	14.4	(38)	11.4	(41)
072 h	19.5	(27)	14.9	(28)	8.4	(27)	7.9	(28)	17.9	(28)	9.7	(24)	11.1	(28)
096 h	20.7	(15)	-	-	7.6	(16)	6.2	(16)	21.7	(16)	7.3	(13)	12.0	(16)
120 h	16.7	(8)	-	-	7.7	(8)	6.4	(8)	24.3	(8)	7.2	(5)	7.5	(8)

*Most smallest RMSE

Unit : m s^{-1} , (): sample number

Tropical Storm

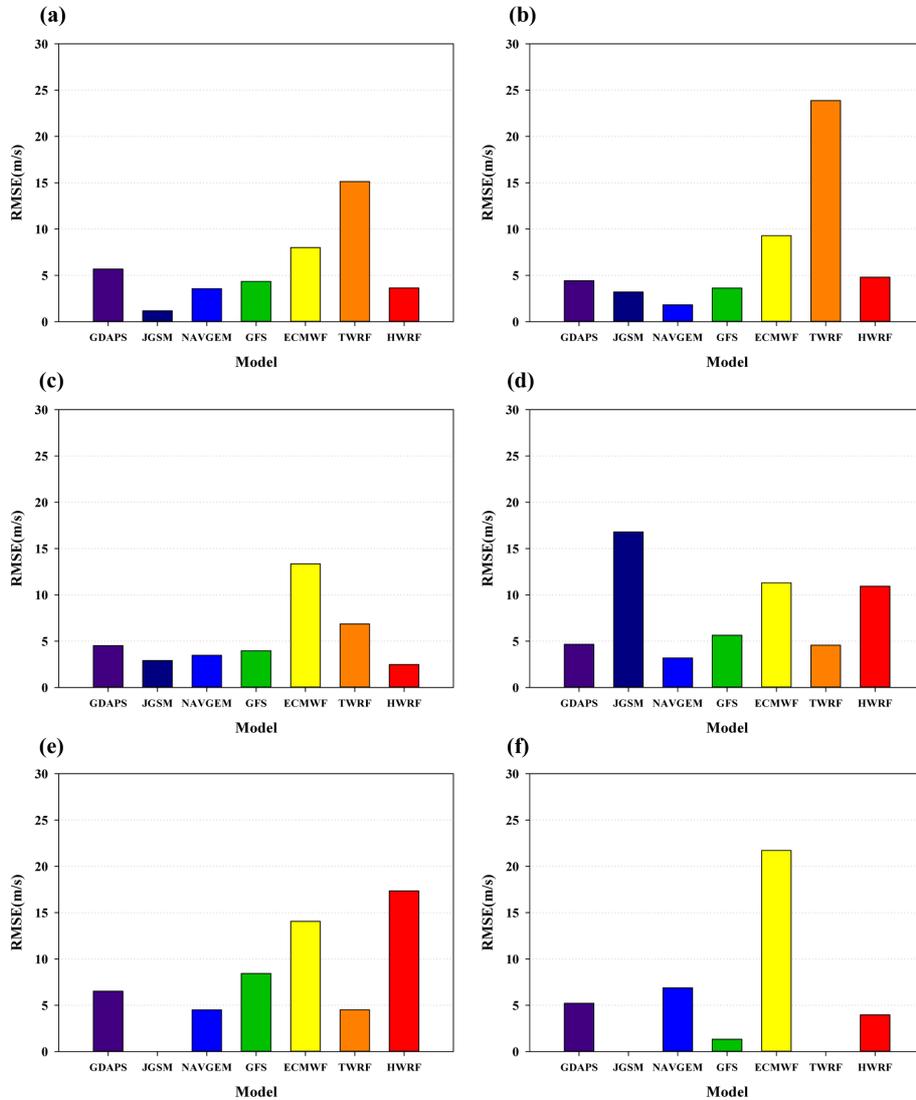


Fig. 4. RMSE of the best track and numerical models for the tropical storm cases. (a) 0 h, (b) 24 hr, (c) 48 hr, (d) 72 hr, (e) 96 hr, (f) 120 hr.

준을 따름) 이었던 태풍 다나스(1324)와 하이옌(1330)을 사례로 하여, 베스트트랙의 최대풍속과 모델이 예측한 최대풍속의 시계열을 통해 각 모델의 예측 경향성을 살펴보았다.

태풍 다나스(1324)는 최성기일 때 크기 중형의 매우 강한 태풍으로 최대풍속이 48 m s^{-1} 까지 나타난 태풍이었다. 이후 한반도에 접근하며 서귀포 남쪽 약 400 km 해상에서 최대풍속 45 m s^{-1} 의 매우 강한 세력을 유지하였다(National Typhoon Center-Korea Meteorological Administration, 2013). 태풍 다나스(1324) 시기에 모델

들의 예측 경향성을 살펴보면(Fig. 7), 먼저 ECMWF의 경우 최대풍속이 증가하는 부분은 베스트트랙의 경향성을 대체로 잘 따라갔지만, 이후 약화되는 부분은 다소 과대 모의하였다. GDAPS는 베스트트랙의 경향성도 잘 모의하지 못했을 뿐만 아니라 최대풍속을 최대 25 m s^{-1} 이하로 과소 모의하였다. GFS는 35 m s^{-1} 이하의 풍속이 나타나는 구간에 대해서는 경향성 및 그 값을 잘 모의하였지만 그 이상의 풍속은 잘 모의하지 못하고 과소 모의한 것으로 나타나, 급격한 강도 경향에 다소 취약한 것으로 생각된다. 하지만 10

Severe Tropical Storm

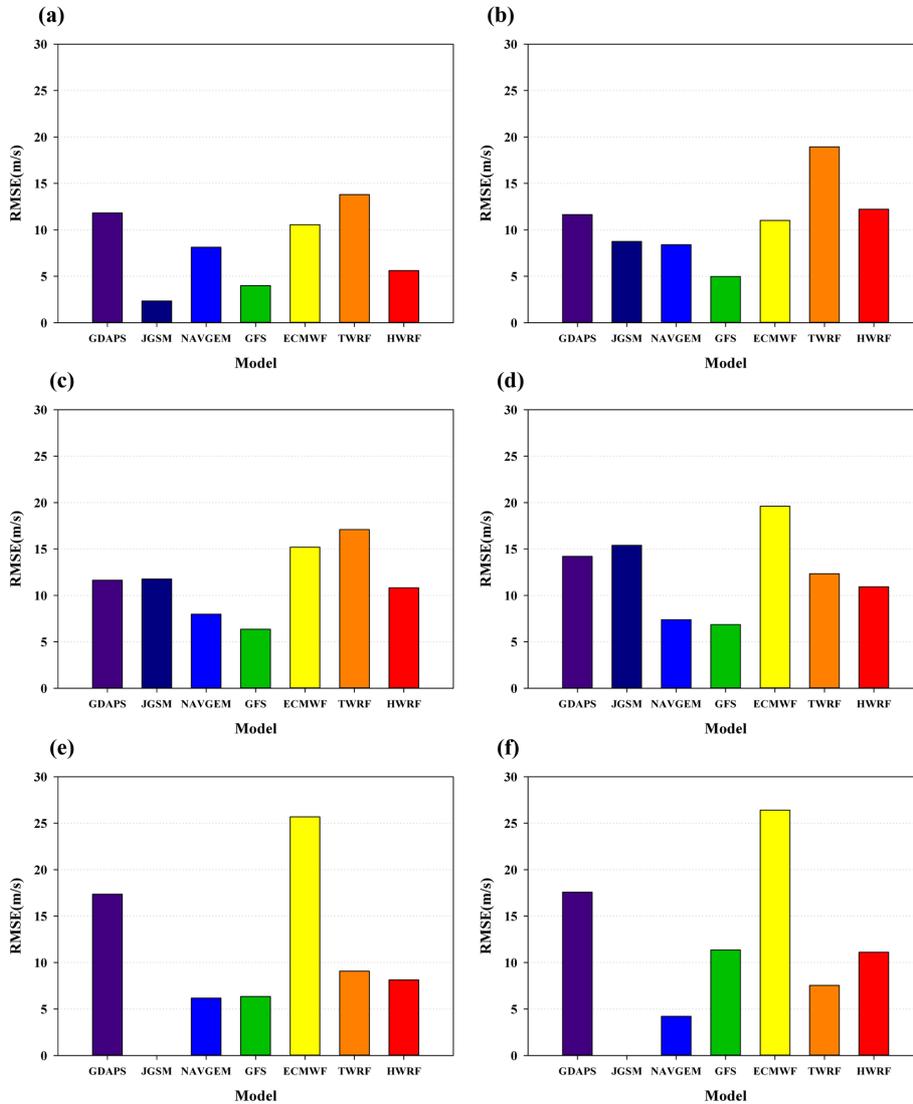


Fig. 5. RMSE of the best track and numerical models for the sever tropical storm cases. (a) 0 h, (b) 24 hr, (c) 48 hr, (d) 72 hr, (e) 96 hr, (f) 120 hr.

월 8일 0000 UTC 이후에는 베스트트랙의 경향을 잘 따랐다.

HWRP를 통해 예측된 최대 풍속은 베스트트랙의 최대 풍속에 비하여 그 값이 컸지만 풍속의 증감 등 그 경향성은 잘 모의하였다. 이 때 각 예측 자료에 대한 분석 자료(0시 자료)의 값이 매우 크게 나타나는 데 이는 HWRP의 초기 입력자료인 JTWC의 분석 자료가 1분 평균 풍속을 사용하기 때문으로 사료된다. 다음으로 JGSM의 경우 예측 자료들의 분석 자료(0시)

는 오차가 작았지만, 이후 예측 값은 그 경향성을 잘 따르지 못하였다. NAVGEM의 경향성은 GFS와 비슷하지만 그 예보 값들은 더 작은 것으로 나타나 GFS에 비하여 더 과소 모의된 것을 알 수 있다. TWRP는 초기에 생산된 예측 자료들인 10월 4일 1200 UTC, 5일 0000 UTC, 1200 UTC, 6일 1200 UTC(검은 실선, 빨간 점선, 초록 점선, 노란 점선) 자료가 풍속이 증가하는 시기에 베스트트랙의 최대 풍속 값보다 훨씬 크게 모의하여 강도 증가를 잘 모의하지 못하였다. 그

Typhoon

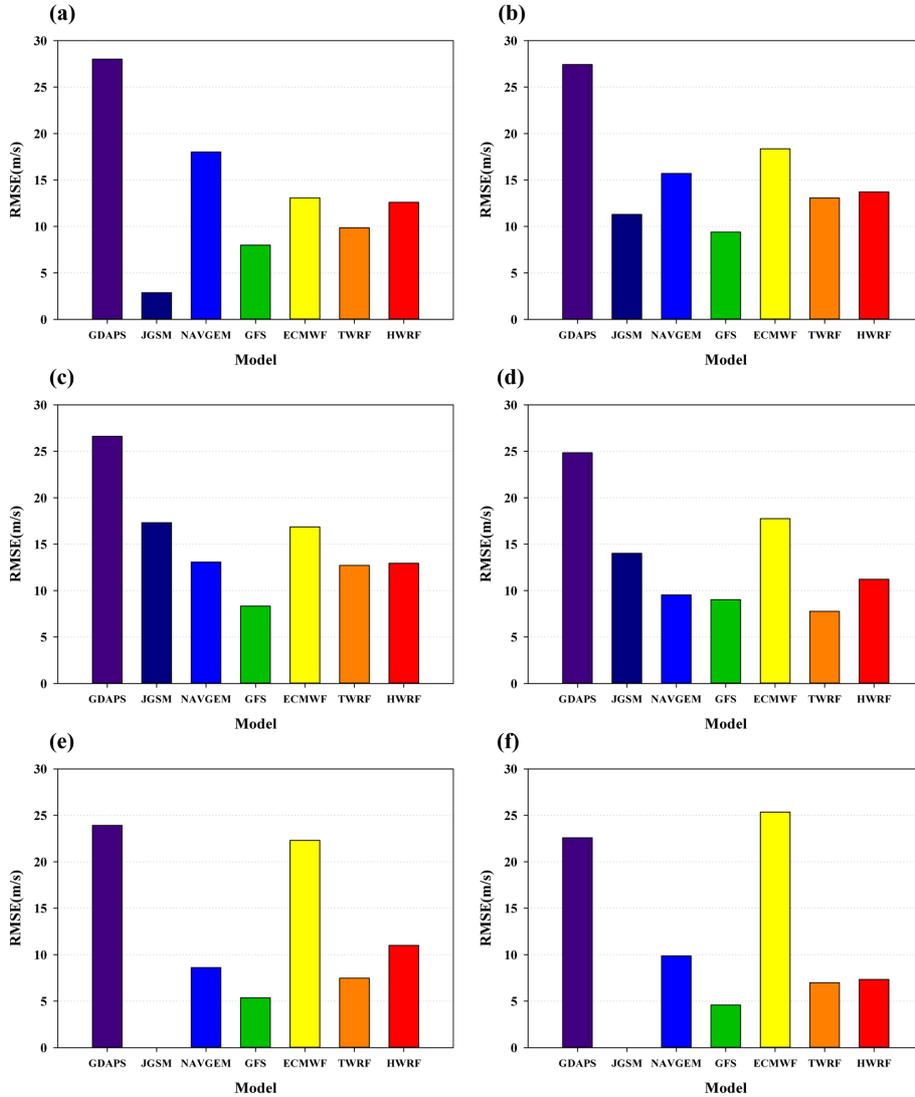


Fig. 6. RMSE of the best track and numerical models for the typhoon cases. (a) 0 h, (b) 24 hr, (c) 48 hr, (d) 72 hr, (e) 96 hr, (f) 120 hr.

러나 감소하는 시기에는 그 값이 베스트트랙보다 크지만 경향성은 대체로 잘 모의한 것으로 보인다.

태풍 하이엔(1330)은 크기 중형의 매우 강한 태풍으로 필리핀에 상륙하여 강풍과 폭우로 수많은 사상자 및 피해를 발생시켰다. 하이엔(1330)이 TS~TY의 등급으로 복서진 하는 기간 동안 베스트트랙의 최대 풍속 변화경향을 살펴보면(Fig. 8), 2013년 11월 4일 1200 UTC부터 풍속이 급격히 상승하여 11월 7일 1200~1800 UTC 기간 중 가장 강하게 나타났다. 이후 필리핀을 지나면서 서서히 감소하였지만 풍속이 증가

할 때보다는 비교적 천천히 감소하였다. ECMWF가 태풍 기간 동안 모의한 모델 예측 최대풍속을 보면 검은색 실선으로 표시된 2013년 11월 4일 0000 UTC 예측 자료를 제외하고 5일 0000 UTC 예측 자료부터 태풍의 풍속이 증가하는 경향을 잘 모의하는 것으로 보인다. 그러나 다나스(1324)의 경우와 마찬가지로 강도가 감소하는 부분에 대해서는 과대 모의하는 경향이 있었다. GDAPS의 경우 베스트트랙의 경향성을 전혀 따라가지 못하고 실제 최대 풍속보다 훨씬 약한 30 m s^{-1} 미만의 최대풍속이 나타나는 것으로 모의하

Typhoon DANAS (1324)

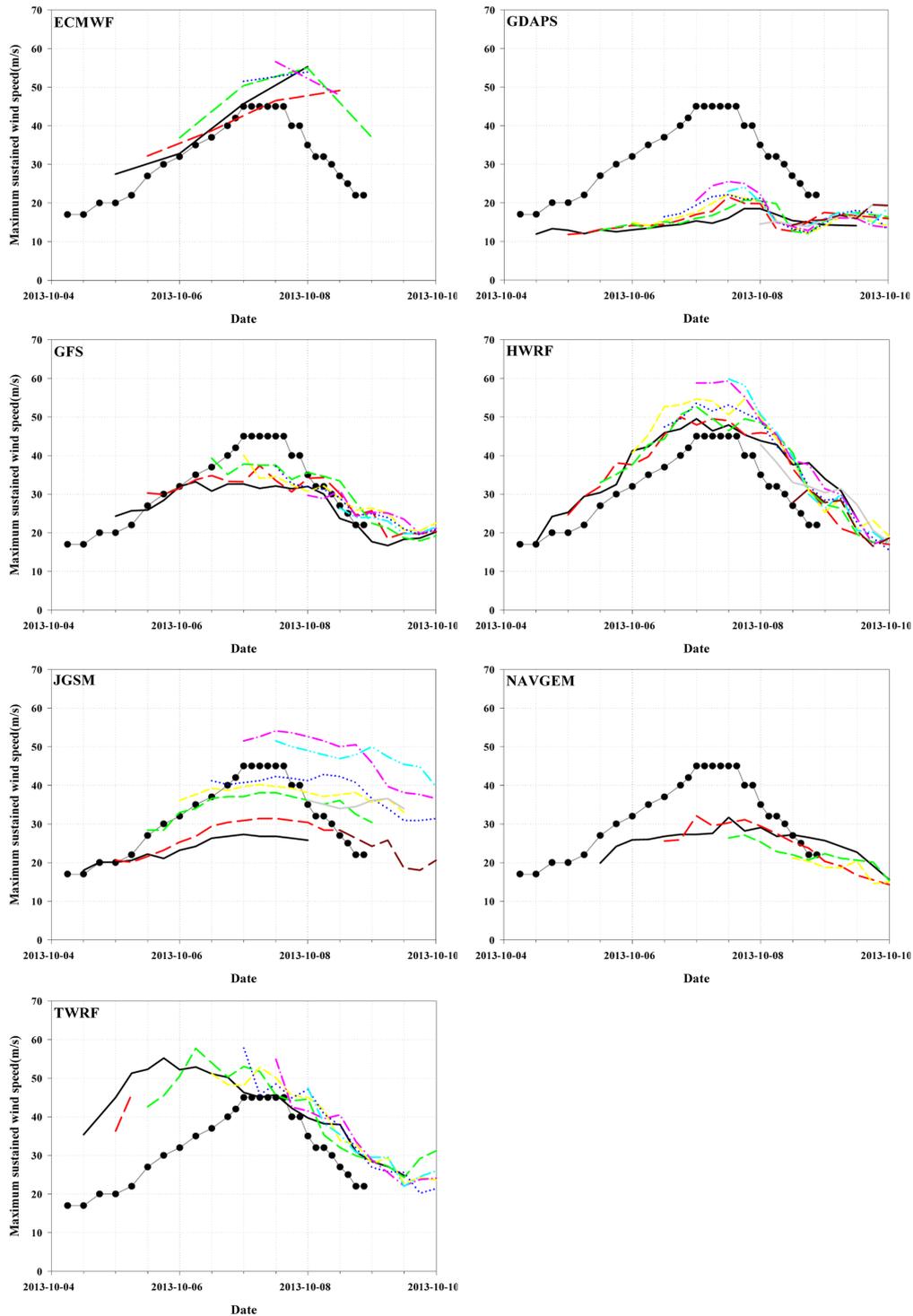


Fig. 7. Typhoon Danas (1324)'s best track maximum sustained wind speeds and maximum sustained wind speed time series simulated by numerical models (The detail information of colored lines was explained in the text).

Typhoon HAIYAN (1330)

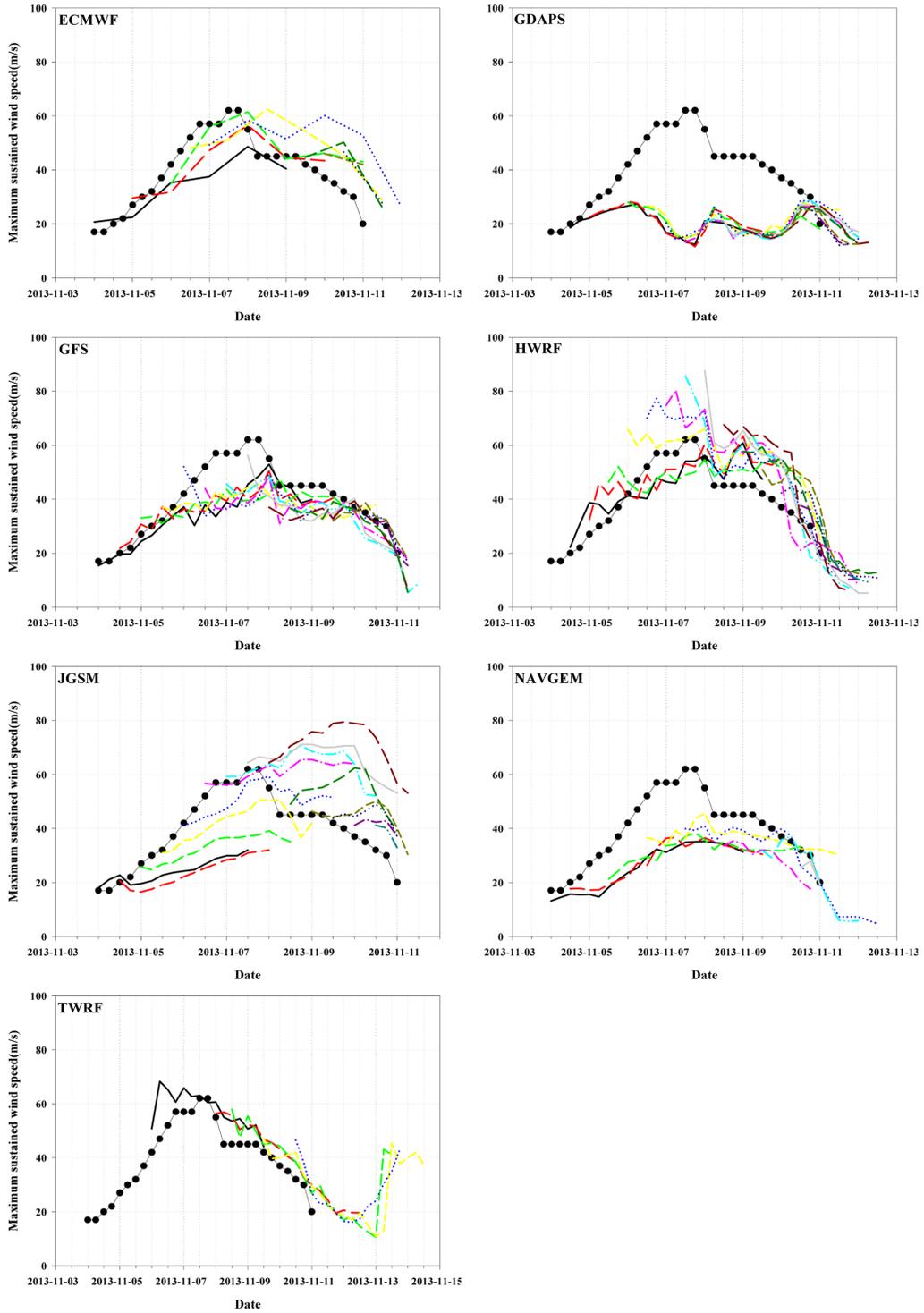


Fig. 8. Typhoon Haiyan (1330)'s best track maximum sustained wind speeds and maximum sustained wind speed time series simulated by numerical models (The detail information of colored lines was explained in the text).

었다. GFS는 거의 모든 예측 자료가 태풍이 처음 발생하고 난 이후로 11월 6일 0000 UTC까지 베스트트랙을 잘 모의하였다. 또한 11월 8일 0000 UTC부터 모든 시간의 모델자료들이 천천히 감소하는 풍속의 경향성을 매우 잘 모의하였다. 그러나 베스트트랙의 최대 풍속이 급격히 증가하는 시기의 모델 예측 값은 서서히 증가하는 경향을 보여 다나스(1324) 때와 마찬가지로 급격한 강도변화 모의에는 취약한 것으로 보인다.

HWRF는 거의 모든 시간대의 모델 결과들이 그 경향성을 잘 모의하는 것으로 보이지만, 초기 예측 자료인 11월 4일 1200 UTC, 5일 0000 UTC, 1200 UTC (검은 실선, 빨간 점선, 초록 점선)에는 다른 모델들과 마찬가지로 급격한 강도 변화 시기에 과소 모의하였다. 반면에 각 예측 자료들의 분석값(0시 자료)은 베스트트랙보다 훨씬 크게 모의되는 경향을 보였는데, 이는 다나스(1324)의 경우와 마찬가지로 0시의 자료를 생산할 때 JTWC의 분석 자료를 사용하기 때문으로 생각된다. 따라서 각 예측 자료들의 0시간 이후의 예측값들이 베스트트랙에 비하여 대체로 과대 모의되는 경향을 볼 수 있다. JGSM은 모든 예측자료들의 분석값이 베스트트랙에 가깝지만 예측 시간 후반으로 갈수록 차이가 커졌고, 풍속의 증감 경향도 잘 모의하지 못하였다. NAVGEM의 예측 경향은 GFS와 거의 비슷하게 나타났으나, 다나스(1324)의 경우와 마찬가지로 더 과소 모의하였다. TWRF는 11월 6일 0000 UTC부터 예보자료가 생산되어 강도가 증가하는 부분에 대한 예측자료가 없었지만 태풍이 약화되는 부분에 대한 예측 경향은 대체로 잘 따랐다. 그러나 7일 0600~1800 UTC에 급격히 약화되는 경향은 잘 따르지 못하였다. 또한 태풍이 TD로 약화된 이후에 급격한 강도 상승을 모의하여 베스트트랙과 다른 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 태풍 예보에 활용하고 있는 수치 모델 7개를 대상으로 하여 각 모델의 태풍 강도예측 성능을 평가하였다. 강도에 관련된 요소는 최대풍속과 최저기압이 있지만 그 중에서도 태풍으로 인한 자연 재해에 직접적으로 영향을 미치는 최대풍속에 대하여 상자그림, 평균제곱근오차, 시계열 분석을 수행하였다.

먼저 2013년 발생태풍에 대한 모델 예측시간별(0, 24, 48, 72, 96, 120시간) 상자그림을 살펴본 결과, GDAPS, NAVGEM, GFS는 베스트트랙에 비하여 과소 모의하였고, JGSM, ECMWF, TWRF, HWRF는 과대 모의하는 경향이 큰 것으로 나타났다. GFS의 경우 오차 분포가 다른 모델들에 비하여 0에 가까웠다. 또한 예측시간별 평균제곱근오차를 살펴본 결과

ECMWF와 JGSM은 예측시간 후반으로 갈수록 증가하였으며, TWRF는 감소하였다. 이외에 GDAPS, NAVGEM, GFS, HWRF는 예측 시간이 평균제곱근오차의 증감과 관련이 없는 것으로 나타났다. 모델들 중 평균제곱근오차가 가장 작았던 모델은 GFS로 24~120 시간까지의 평균제곱근오차가 가장 작았다. 또한 본 연구에서는 강도 등급에 따른 모델의 강도 예측 모의 성능을 살펴보았다. 그 결과 TWRF를 제외한 대부분의 모델이 강도가 강해질수록 평균제곱근오차가 증가하였으며, 특히 GDAPS와 NAVGEM의 경우 그러한 경향성이 강하게 나타났다. 평균제곱근오차가 작은 순서대로 순위를 본다면 GFS가 강도가 강할수록 높은 순위를 유지하여 강도가 강할 때 역시 다른 모델들에 비하여 성능이 좋은 것으로 나타났다. 이처럼 수치모델의 성능이 다른 것은 태풍 강도 예측에 영향을 주는 요소(모델 해상도, 초기화, 물리과정 모수화 등)가 모델마다 다르게 적용되었기 때문이다.

2013년 강한 태풍으로 기록되었던 두 태풍 사례, 다나스(1324)와 하이옌(1330)의 모델 예측 경향을 살펴본 결과 모델들은 각각 다른 특징의 최대 풍속 모의 경향을 나타내었다. GDAPS의 경우 경향성 모의는 물론 그 값도 매우 과소 모의하였으며, 태풍으로 발생하고 난 직후와 열대저압부로 약화되기 직전의 풍속 값이 베스트트랙의 최대풍속 값과 거의 비슷한 결과를 보였다. 이 때문에 앞서 살펴본 강도별 예측성능 평가에서 TS급의 강도 일 때 평균제곱근오차가 비교적 작게 나타난 것으로 생각된다. JGSM은 경향성 분석뿐만 아니라 상자그림과 평균제곱근오차 분석에서도 초기 분석값에 대한 모의 능력이 뛰어났다. 그러나 예측 시간 후반에는 경향성을 잘 모의하지 못하였다. 반면에 GFS는 급격한 최대풍속 증가를 잘 모의하지 못하였으나 그 외 시기에 최대 풍속 경향과 값은 잘 모의한 것으로 보인다. ECMWF와 HWRF는 다른 모델들에 비하여 오차가 작은 것은 아니었으나, 베스트트랙의 경향성은 매우 잘 모의하였다. 따라서 베스트트랙과의 오차가 가장 작은 모델은 GFS, 경향성을 잘 모의한 모델은 ECMWF와 HWRF로 나타나 이제 모델의 성능이 다른 모델에 비하여 우수한 것으로 사료된다. 비록 ECMWF와 HWRF의 경우 예측값이 과대 모의되는 경향이 강하였지만, 추후 추가적인 연구를 통해 더 많은 태풍을 사례로 하여 경향성 모의 능력을 보다 정량적으로 평가하고 그 값을 보정하는 기법을 연구한다면, 좋은 모델 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 또한 본 연구 결과를 토대로 강도 예측을 위한 여러 가지 컨센서스 기법을 개발하고 그 유용성을 평가하여 태풍 강도예측에 활용한다면, 여러 수치모델의 결과를 보다 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의글

본 연구는 기상청 “국가태풍센터 운영” 사업 및 국립기상연구소의 “예보기술 지원 및 활용 연구”의 일환으로 수행되었습니다. 아울러 유익한 지적과 많은 조언을 해주신 익명의 심사위원님들께 심심한 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Ashley, D. E., and J. F. Robert, 2012: *Annual Tropical Cyclone Report*. JTWC, 117 pp.
- Bender, M. A., I. Ginis, R. Tuleya, B. Thomas, and T. Marchok, 2007: The operational GFDL coupled hurricane-ocean prediction system and a summary of its performance. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3965-3989.
- Cangialosi, J. P., and J. L. Franklin, 2013: *2012 National Hurricane Center Forecast Verification Report*. NHC, 79 pp.
- Cha, D. H., and Y. Wang, 2013: A dynamical initialization scheme for real-time forecasts of tropical cyclone using the WRF model. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 964-986.
- Cullen, M. J. P., 1993: The Unified Forecast/Climate Model. *Meteor. Mag.*, **122**, 81-122.
- Davis, C., and Coauthors, 2008: Prediction of landfalling hurricanes with the advanced hurricane WRF model. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 1990-2005.
- DeMaria, M., M. Mainelli, L. K. Shay, J. A. Knaff, and J. Kaplan, 2005: Further improvement to the Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS). *Wea. Forecasting*, **20**, 531-543.
- Guan, C., Q. Chen, H. Tong, and H. Wang, 2008: Experiments and evaluations of global medium range forecast system of T639L60 (in Chinese). *Meteor. Mon.*, **34**, 11-16.
- Heming, J. T., J. C. L. Chan, and A. M. Radford, 1995: A new scheme for the initialization of tropical cyclones in the UK Meteorological Office Global Model. *Meteor. Appl.*, **2**, 171-184.
- Huang, W., Y. Duan, J. Xue, and D. Chen, 2007: Operational experiments and its performance analysis of the tropical cyclone numerical model (GRAPES-TCM) (in Chinese). *Acta Meteorol. Sin.*, **65**, 578587.
- Japan Meteorological Agency (JMA), 2012: *Annual Report on the Activities of the RSMC Tokyo - Typhoon Center 2011*. JMA, 21 pp.
- Knaff, J., and M. DeMaria, 2005: An operational statistical typhoon intensity prediction scheme for the western North Pacific. *Wea. Forecasting*, **20**, 688-699.
- Kurihara, Y., M. A. Bender, R. J. Ross, 1993: An initialization scheme of hurricane models by vortex specification. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2030-2045.
- _____, R. E. Tuleya, and M. A. Bender, 1998: The GFDL hurricane prediction system and its performance in the 1995 hurricane season. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1306-1322.
- _____, _____, R. E. Tuleya, and R. J. Ross, 1995: Improvements in the GFDL hurricane prediction system. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2791-2801.
- Lord, S. J., 1993: Recent developments in tropical cyclone track forecasting with the NMC global analysis and forecast system. *20th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 290-291.
- National Hurricane Center (NHC), 2009: *Technical Summary of the National Hurricane Center Track and Intensity Models*. NHC, 18 pp.
- National Typhoon Center-Korea Meteorological Administration, 2011: *Typhoon white book*. National Typhoon Center-Korea Meteorological Administration, 345 pp.
- _____, 2013: *Analysis Report for the Affecting Typhoons to Korea Peninsula (2013)*. National Typhoon Center-Korea Meteorological Administration, 116 pp.
- Park, Y. H., J. H. Son, D. J. Kim, S. W. Park, W. J. Lee, K. R. Kang, and J. S. Park, 2012: *Assessment of Numerical forecast system (2011)*. Korea Meteorological Administration, 151-162.
- Sampson C. R., J. L. Franklin, J. A. Knaff, and M. Dmaria, 2008: Experiments with a Simple Tropical Cyclone Intensity Consensus. *Wea. Forecasting*, **23**, 304-312.
- Strahl Brian, 2012: *JTWC June Model Summary*. JTWC, 23 pp.
- _____, 2012: *JTWC July Model Summary*. JTWC, 15 pp.
- _____, 2012: *JTWC August Model Summary*. JTWC, 49 pp.
- WMO, 2012: *Typhoon Committee Operational Manual*. WMO, 30.
- Yamaguchi, M., R. Sakai, M. Kyoda, T. Komori, and T. Kadowaki, 2009: Typhoon ensemble prediction system developed at the Japan Meteorological Agency. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 2592-2604.
- Yu, H., P. Chen, Q. Li, and B. Tang, 2013: Current capability of operational numerical models in predicting tropical cyclone intensity in the Western North Pacific. *Wea. Forecasting*, **28**, 353-367.
- _____, and Coauthors, 2012: Operational tropical cyclone forecast verification practice in the Western North Pacific region. *Trop. Cyclone Res. Rev.*, **1**, 361-372.
- Yuan, J., L. Song, Y. Huang, Z. Chen, C. Liu, and W. Ding, 2011: A method of initial vortex relocation and numerical simulation experiments on tropical cyclone track. *J. Trop. Meteor.*, **17**, 36-42.