



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

모의 태풍 합성 재분석 바람장을
이용한 북서태평양 극치풍속 추정

제주대학교 대학원

해양기상학 협동과정

김 혜 인

2021 년 2 월

모의 태풍 합성 재분석 바람장을 이용한 북서태평양 극치풍속 추정




지도교수 문 일 주

김 혜 인

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2020년 12월

김혜인의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장	김 광 일	
위 원	최 광 응	
위 원	문 일 주	

제주대학교 대학원

2020년 12월

Estimation of Extreme Wind Speeds in the
Western North Pacific
Using Reanalysis Data Synthesized with
Empirical Typhoon Vortex Model

Hye-In Kim
(Supervised by professor Il-Ju Moon)

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

2020 . 12.

This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis director, Kwang-Il Kim, Prof. of Marine Industry and Maritime Police

.....
Gwang-Yong Choi, Prof. of Geography Education

.....
Il-Ju Moon, Prof. of Marine Industry and Maritime Police

Date 2020. 12.

Interdisciplinary Postgraduate Program in Marine Meteorology
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Figures	ii
List of Tables	iv
Abstract	v
I. 서론	1
II. 자료 및 방법	4
2.1 재분석 자료	4
2.2 경험적 모의 태풍 바람장 모델	6
2.3 관측자료 및 분석 방법	9
2.4 극치분석 방법	14
III. 바람장 모의 성능 평가	20
3.1 북서태평양	20
3.2 한반도 근해	25
IV. 합성 바람장을 이용한 극치분석	28
4.1 재분석 자료와 모의 태풍 바람장 합성	28
4.2 북서태평양 극치풍속 추정	36
VI. 요약 및 결론	38
참고문헌	40

List of Figures

- Fig. 1.** Example of radial wind speed profile used in empirical typhoon vortex model. Rmax means radius of maximum wind speed. 7
- Fig. 2.** Wind field of empirical typhoon vortex model in the Western North Pacific during passage of Typhoon BOLAVEN (27 August 2012). 8
- Fig. 3.** Locations of KMA buoys. 12
- Fig. 4.** Difference between extreme wind speeds using GEV and GPD. 16
- Fig. 5.** Extreme wind speed for various return periods. 17
- Fig. 6.** Mean residual life (MRL) plot with the 95% confidence intervals. · 18
- Fig. 7.** Mean absolute difference of typhoon position in the Western North Pacific between JTWC best track data and reanalysis data from 2010 to 2018. The error bar represents the standard deviation. 21
- Fig. 8.** Comparison of typhoon track between JTWC best track data and 5 reanalysis data sets for typhoons (a) KOMPASU, (b) BOLAVEN, (c) CHABA. The gray and black lines represent JTWC best tack and reanalysis data, respectively. 22
- Fig. 9.** Comparison of maximum wind speed (MWS) estimated from 5 reanalysis data sets with JTWC best track during the passage of typhoon in the Western North Pacific from 2010 to 2018. 24
- Fig. 10.** Comparison of wind fields among ERA5 reanalysis (a,d), empirical (EMP) typhoon vortex model (b,e), synthesized (SYN) wind (c,f) in the Western North Pacific during passage of Typhoon CHABA (3 October 2016). d-f are enlarged views of the box in a-c. The white line represents the track of Typhoon CHABA. A-B dashed line represents the cross-section position for Fig. 11. 29
- Fig. 11.** Cross-sections of ERA5 reanalysis wind (black line), empirical

	(EMP) typhoon vortex wind (red line) and synthesized (SYN) wind (blue dot) at the center of the Typhoon CHABA (see A-B dashed line in Fig. 10) on 3 October 2016.	30
Fig. 12.	Best tracks of three typhoons in JTWC used for verification of empirical typhoon vortex wind and synthesized wind.	32
Fig. 13.	Comparison of wind speed (6-h intervals) among KMA buoy, empirical typhoon vortex model (EMP), and synthesized wind data (SYN) during the passage of Typhoon KOMPASU at (a) Deokjeokdo, (b) Chilbaldo, (c) Geomundo, (d) Geojedo, (e) Pohang, (f) Marado buoy. The black, red, blue lines represent KMA buoy, empirical wind and synthesized wind, respectively.	33
Fig. 14.	Comparison of wind speed (6-h intervals) among KMA buoy, empirical typhoon vortex model (EMP), and synthesized wind data (SYN) during the passage of Typhoon BOLAVEN at (a) Deokjeokdo, (b) Chilbaldo, (c) Geomundo, (d) Geojedo, (e) Donghae, (f) Pohang, (g) Marado, (h) Oeyeondo buoy. The black, red, blue lines represent KMA buoy, empirical wind and synthesized wind, respectively.	34
Fig. 15.	Comparison of wind speed (6-h intervals) among KMA buoy, empirical typhoon vortex model (EMP), and synthesized wind data (SYN) during the passage of Typhoon CHABA at (a) Deokjeokdo, (b) Chilbaldo, (c) Geomundo, (d) Geojedo, (e) Donghae, (f) Pohang, (g) Marado, (h) Oeyeondo buoy. The black, red, blue lines represent KMA buoy, empirical wind and synthesized wind, respectively.	35
Fig. 16.	Spatial distribution of maximum wind speed at each grid calculated using synthesized wind data (1980-2018) around (a) the Korean Peninsula, (c) Japan, and (e) Philippines, and their extreme wind speeds for various return periods at marked (+) points (b, d, f). Black line represents estimates using ERA5 wind field and red line represents estimates using synthetic wind field.	37

List of Tables

Table 1. Summary of the analysis and reanalysis wind datasets used in this study.	5
Table 2. Specifications of KMA buoy data used in this study.	11
Table 3. Comparison of wind speed uncertainty (RMSE) of reanalysis data indicated by comparison with KMA buoy data during the passage days of typhoons from 2010 to 2018.	26
Table 4. Comparison of wind speed accuracy (RMSE, R) among reanalysis data indicated by comparison with KMA buoy data during all periods from 2010 to 2018.	27

Abstract

In this study, extreme wind speeds in the western North Pacific (WNP) were estimated using reanalysis wind fields synthesized with empirical typhoon vortex model. First, to select reanalysis wind field suitable for the extreme value analysis in the WNP, the accuracy of various reanalysis wind fields as evaluated using the Korea Meteorological Administration (KMA) buoy data and the Joint Typhoon Warning Center (JTWC) best track data from 2010 to 2018. The suitability was determined based on the maximum wind speed and the center position of the typhoon period, the simulated performance of offshore winds nearshore the Korean Peninsula, and the period of available data. The results showed that the Fifth-generation European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) reanalysis (ERA5) data was the most suitable data for the extreme value analysis in this study. The empirical typhoon vortex model was synthesized with the ERA5 wind fields to improve the tendency to underestimate the maximum wind speed during the typhoon period in the selected ERA5 data. The empirical typhoon vortex model used has the advantage of being able to realistically reproduce the asymmetric winds of typhoon using the gale/storm-forced wind radii information in the 4 quadrants of typhoon. Using a total of 39 years of the synthesized reanalysis wind fields from 1980 to 2018 in the WNP, extreme value analysis is performed using the General Pareto Distribution (GPD) model based on the Peak-Over-Threshold (POT) method, which can be used effectively in case of insufficient data. The results showed that the extreme analysis using the synthesized wind data significantly improved the problem to underestimate the extreme wind speeds compared to using only reanalysis wind data. Considering the difficulty of obtaining long-term observational

wind data over ocean, the results of extreme value analysis based on the synthesized wind fields developed in this study can be used as basic data for the design of offshore structures.

Key words: Extreme Wind Speed, Reanalysis Data, Empirical Typhoon Vortex Model, Peak-Over-Threshold, General Pareto Distribution, Western North Pacific

I. 서론

풍속 극치 값은 설계, 건설, 공학적인 측면에서 기본 자료로 사용된다. 극치 값을 이용하여 정확한 설계풍속을 산정하는 것은 해상 구조물의 안전성을 확보할 뿐만 아니라 설계풍속에 따라 단면 강성이 달라지는데, 이는 공사비용과 직결되므로 경제성까지 좌우한다(Kwon and Lee, 2009). 극치풍속의 추정은 해상 구조물의 과대 설계에 따른 막대한 비용 및 과소 설계에 따른 강풍으로 인한 피해를 예방할 수 있기 때문에 정확하게 극치풍속을 추정하는 것이 필요하다.

극치풍속을 추정하기 위하여 다양한 방법의 연구들이 수행되어 왔다. Lee et al. (2011)은 수치바람자료를 이용하여 제주도 지역의 극한풍속지도를 구축하였고, Lee et al. (2012)은 같은 자료를 이용하여 국내 15개의 주요 풍력발전단지의 극치풍속을 추정하였다. Kwon and Lee (2009)과 Lee and Kim (2013)은 측정-상관-예측(Measure-Correlate-Predict; MCP) 방법을 적용하여, 각 장대교량 현장의 단기 풍 관측 탐 자료를 장기간 풍속 자료로 변환한 뒤 극치풍속을 추정하였다. MCP 방법은 단기간 풍속 자료와 인근 육상의 장기간 풍속 자료의 상관성을 이용하여 장기 풍속을 추정하는 기법으로, 두 관측 지점 사이의 거리가 멀거나 태풍으로 인한 육상 자료의 결측 시 태풍 특성을 반영하기 어렵다(Ko et al., 2014). 또한 이러한 연구들은 대부분 5년 이하의 단기 관측자료를 사용하였다는 한계가 있다. 극치풍속을 추정하기 위한 가장 좋은 방법은 장기간의 자료를 사용하는 것이지만, 해상에서 신뢰도 높고 연속적인 장기 관측자료를 확보하기 어렵고 특히, 해양 기상 부이와 같은 관측자료는 태풍이 근접했을 때 결측이 많아 정확한 극치 값을 추정하기 어렵다.

이러한 관측자료의 한계성을 극복하기 위하여 최근에 태풍 시뮬레이션 기법을 이용하여 장기 풍속 자료를 산출하여 극치풍속을 추정하는 연구가 진행되었다. Ott (2006)은 Holland 모델(Holland, 1980)을 사용하여 북서태평양의 극치풍속을 산정하였고, Ko et al. (2014)도 같은 모델을 사용하여 한반도 서해안 지역의 극치풍속을 예측하였다. 한편, Kwon and Lee (2008)과 Lee and Kim (2016)은 서

남해안의 극치풍속과 해안가 지역의 극치풍속을 추정하기 위하여, 각각 개선된 태풍 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 제시하였다. 그러나 이러한 연구들 또한 태풍 시기만을 고려하여 극치분석을 수행하였다는 한계가 있다.

극치풍속을 발생시키는 강풍은 주로 태풍에 의해 가장 많이 발생하지만, 태풍 이외에도 최근 온대저기압에 의한 강풍과 같이 국지적 및 계절적으로 발생하고 있다(함 등, 2017). 따라서 비 태풍 시기의 바람도 극치분석에 영향을 미칠 수 있다.

극치풍속을 추정하기 위한 방법으로는 일반적으로 연 최대치 계열(Annual Maximum Series, AMS) 방법과 POT (Peak-Over-Threshold) 방법이 사용된다(An and Pandey, 2005). 이 두 가지 방법은 극치 자료에 대한 접근 방식과 자료들의 적합에 사용되는 분포 모형에 있어 차이가 있다. AMS 방법은 정해진 시간 간격(주로 1년 단위)에서 측정된 값 중 최대 관측값만을 사용하며, 이를 주로 일반화 극단 분포(Generalized Extreme Value Distribution, GEVD)에 적용한다(Katz et al., 2002; Hawkes et al., 2008). 반면, POT 방법은 시간 간격에 상관없이 특정 임계값 이상의 독립된 자료들을 선택하여 사용하며, 이를 주로 일반화 파레토 분포(Generalized Pareto Distribution, GPD)에 적용한다(Lang et al., 1999; Silva et al., 2014; Katz et al., 2002; Hawkes et al., 2008). POT 방법에서는 적절한 임계값을 결정하는 것이 중요하다(Li et al., 2012). 기존 자료의 많은 부분이 사용되지 않고 최대값만 사용하는 AMS 방법과 달리, POT 방법은 특정 임계값 이상의 자료를 모두 빈도해석에 사용함으로써 극치 분포의 우측 꼬리에 추가적인 정보를 제공한다(Kim et al., 2019). 따라서 POT 방법을 기반으로 하는 GPD 모형이 AMS 방법을 기반으로 하는 GEVD 모형보다 더 많은 자료를 사용하기 때문에 더 정확한 통계적 추론이 가능하다(류와 박, 2012).

본 연구는 북서태평양에서 태풍 시기뿐 아니라 비 태풍 시기의 강한 바람도 현실적으로 모의할 수 있는 장기간(30년 이상)의 해상풍 자료를 생산하고, 이를 이용하여 재현기간(어떤 크기의 풍속이 발생하는 데 걸리는 시간)별 극치풍속을 추정하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 다양한 재분석 자료의 바람 모의 성능을 평가하였고, 활용 가능한 자료의 기간을 고려하여 극치분석에 적합한 자료를 선별하였다. 또한 태풍 시기의 강풍을 현실적으로 고려하기 위하여 경험적 모

의 태풍 바람장 모델을 선별한 재분석 바람장에 합성하였다. 사용된 모의 태풍 바람장 모델은 태풍의 이동 속도를 고려하는 것 외에는 태풍의 비대칭적 특성을 고려할 수 없는 일반적인 경험적 모의 태풍 바람장 모델과 달리, 태풍 최적경로에서 제공하는 사분면 방향의 강풍 반경 정보를 이용하여 비대칭적 태풍 바람 특성을 고려할 수 있을 뿐 아니라 육지의 마찰 효과에 의한 풍속 감소까지도 고려하도록 구성하였다. 극치분석은 보다 정확한 통계적 추론이 가능하도록 POT 방법을 기반으로 하는 GPD 모델을 사용하였다.

이를 위해 제 2장에서는 본 연구에 사용된 재분석 바람장, 경험적 모의 태풍 바람장 모델, 관측자료 및 분석 방법, 그리고 극치분석 방법에 대해 설명하였다. 제 3장에서는 한반도 근해와 북서태평양에 대해 재분석 바람장의 모의 성능 평가 결과를 제시하였고, 제 4장에서는 합성 바람장에 대한 설명과 이를 이용하여 북서태평양의 극치풍속을 추정한 결과를 제시하였다. 제 5장에서는 주요 연구 결과를 요약하고 결론을 기술하였다.

II. 자료 및 방법

2.1. 재분석 바람장

본 연구에서 사용된 바람장 자료는 미국의 국립환경예측센터(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)에서 제공하는 GFS (Global Forecast System) 분석 바람장, NASA (National Aeronautics and Space Administration)에서 제공하는 MERRA-2 (Modern Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2, Gelaro et al., 2017) 재분석장, 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)에서 제공하는 ERA-Interim(Dee et al., 2011)과 ERA5 (5세대 ECMWF, Hersbach et al., 2019) 재분석장, 그리고 일본 기상청(Japan Meteorological Agency, JMA)에서 제공하는 55년 재분석장 JRA-55(Kobayashi et al., 2015)이다(Table 1).

GFS는 대기-해양-지표-해빙이 결합된 분석 자료로 공간 해상도는 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 이다. 자료동화 시스템은 3차원 변분기법(3 Dimensional Variational, 3DVAR) GSI (Gridpoint Statistical Interpolation)를 사용하고, TC (Tropical Cyclone) 초기화 방법으로 볼텍스 재배치(Vortex relocation) 방식을 사용한다. 볼텍스 재배치는 모델에서 예측된 볼텍스를 관측된 태풍 최적경로 위치로 재배치하거나, 지정된 공간 해상도에 초기 볼텍스가 누락되었거나 너무 약한 경우 인위의 볼텍스를 삽입하는 방법이다(Liu et al., 2000; Schenkel and Hart, 2012). MERRA-2도 TC 초기화 방법으로 볼텍스 재배치를 사용한다. MERRA-2의 공간 해상도는 $0.625^\circ \times 0.5^\circ$ 이고, 3차원 변분기법 GSI와 IAU (Incremental Analysis Update)가 결합된 자료동화 시스템을 사용한다(Gelaro et al., 2017). ERA-Interim과 ERA5의 공간 해상도는 각각 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 와 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 이고 자료동화 시스템은 4차원 변분기법(4DVAR)을 사용한다. 4DVAR은 관측치의 영향을 모델 역학에 의해 보다 강하게 컨트롤할 수 있게 한다(Thépaut et al. 1996). ERA-Interim은

4DVAR을 통해 구름과 강수의 영향을 받는 복사를 직간접적으로 동화시킨다 (Schenkel and Hart 2012). ERA-Interim 자료는 2019년 8월까지 생산되었고 그 후 후속 버전인 ERA5로 대체되었다. ERA5는 ERA-Interim에 비해 모델 물리학 및 중심 역학이 개선되었고, 자료동화 시스템에 훨씬 더 많은 수의 재가공 된 위성 자료와 새로운 관측자료가 포함되어 있으며, 더 높은 시간 및 공간 해상도를 제공한다. JRA-55는 4차원 변분기법 자료동화 시스템을 사용하고, TC 초기화 방법으로 TC wind profile retrieval을 사용한다. TC wind profile retrieval은 TC 중심 및 주변 풍속 프로파일(wind profile)을 과거 자료에서 검색하고, 근사치의 합성 dropwindsonde를 동화하는 방법이다(Hatsushika et al., 2006; Onogi et al., 2007; Kobayashi et al., 2015). 자료 기간은 5개의 자료 중 가장 장기간 자료로, 1958년부터 제공되고, 자료 기간이 가장 짧은 자료는 GFS로 2007년부터 제공된다. 공간 해상도는 JRA-55가 $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ 로 5개의 자료 중 가장 낮고, ERA5가 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 로 가장 높은 해상도를 제공한다.

Table 1. Summary of the analysis and reanalysis wind datasets used in this study.

Product	Spatial resolution	Assimilation	TC initialization	Data period
GFS	$0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$	3DVAR GSI	Vortex relocation	2007.1-Present
MERRA-2	$0.625^{\circ} \times 0.5^{\circ}$	3DVAR GSI+IAU	Vortex relocation	1980.1-Present
ERA-Interim	$0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$	4DVAR	None	1979.1-2019.8
ERA5	$0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$	4DVAR	None	1979.1-Present
JRA-55	$1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$	4DVAR	TC wind profile retrieval	1958.1-Present

2.2. 경험적 모의 태풍 바람장 모델

본 연구에서는 태풍의 현실적인 바람장을 고려하기 위하여, 경험적 모의 태풍 바람장 모델을 사용하였다. 일반적으로 모의 태풍 바람장 모델로는 Holland 모델, Original Rankin vortex(Schloemer, 1954) 모델을 사용한다. 이러한 모델들은 태풍의 이동속도를 고려한 것 외에는 태풍 구조를 단순한 대칭의 동심원으로 가정하기 때문에 실제 태풍의 비대칭적인 특성을 고려할 수 없다. 또한, 태풍이 육지에 영향을 미치는 경우에 육지의 마찰 효과에 의한 풍속 감소를 고려하지 못한다. 이러한 한계를 개선하기 위하여, 본 연구에서는 태풍 최적경로자료에서 제공하는 사분면에 대한 강풍 정보를 사용하고, 지형 정보(고도 자료)를 적용하는 바람장 모델을 사용하였다(Moon et al., 2003).

태풍 정보는 미군합동경보센터(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)에서 제공하는 6시간 간격의 태풍 최적경로자료를 사용하였다. JTWC 태풍 최적경로 자료의 태풍의 중심위치(위경도), 최대풍속, 중심기압, 주변기압. 그리고 사분면 방향의 18 ms^{-1} 와 26 ms^{-1} 풍속반경, 최대풍속반경을 모델의 입력 자료로 사용하였고, 이를 30분 간격으로 내삽한 후, Moon et al. (2003)에 따라 아래의 식을 이용하여 네 방향(북동, 남동, 북서, 남서)에 대한 Radial wind profile을 산출하였다.

$$V(r) = V_{\max} \exp \left\{ \frac{R_{\max} - r}{\left[\frac{R_{\max} - (R_{18} + R_{26})/2}{\log(22/V_{\max})} \right]} \right\}, \quad r \geq R_{\max}$$

$$= \frac{r V_{\max}}{R_{\max}}, \quad r < R_{\max}$$

여기서, V_{\max} 는 태풍의 최대풍속이며, R_{\max} 는 최대풍속반경, R_{18} 과 R_{26} 은 사분면 방향의 18 ms^{-1} 와 26 ms^{-1} 풍속반경, 그리고 r 은 반경이다. 이 식에 따르면, r 이 R_{\max} 보다 작을 때는 최대풍속반경과 최대풍속의 비에 비례하여 풍속이 선형적으로 증가하고, r 이 R_{\max} 보다 클 때는 R_{18} 과 R_{26} 의 평균값에 비례하여 지수 함

수적으로 감소한다(Fig. 1).

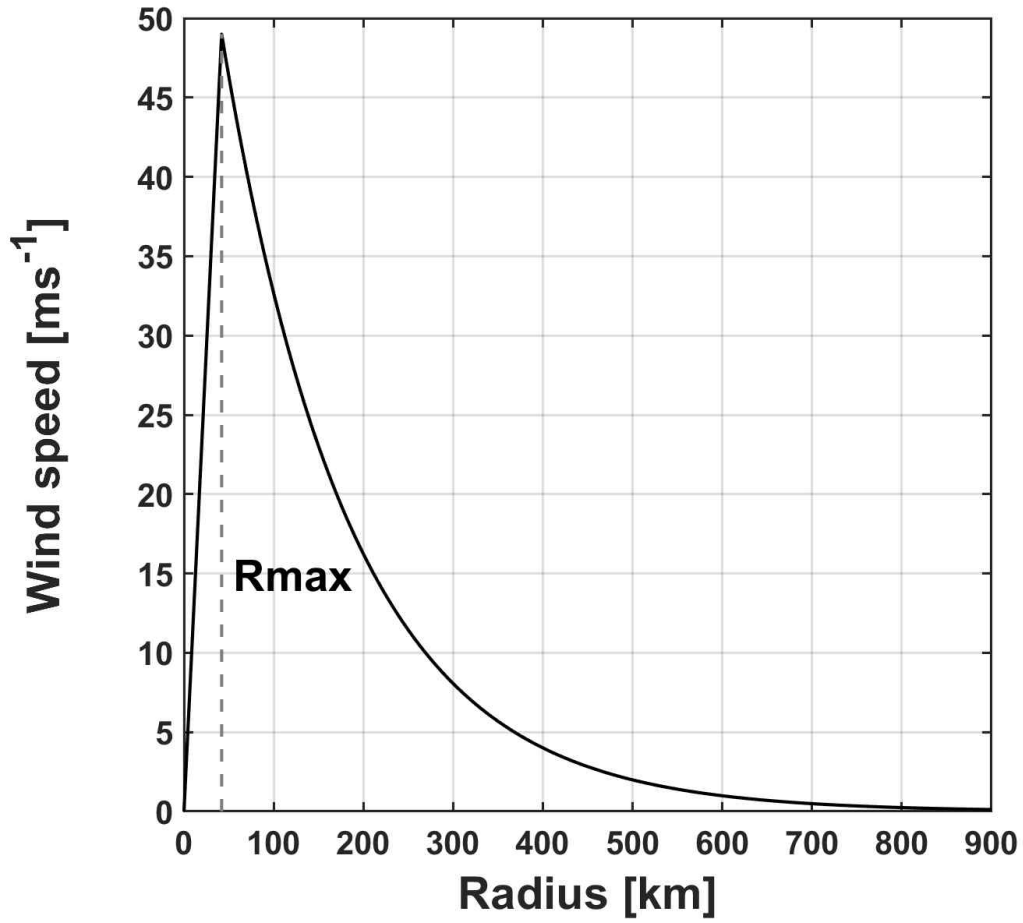


Fig. 1. Example of radial wind speed profile used in empirical typhoon vortex model. Rmax means radius of maximum wind speed.

본 연구에서 사용한 경험적 모의 태풍 바람장 모델은 사분면에 대한 강풍 정보를 사용하였기 때문에 일반적인 태풍 바람장 모델과 달리 태풍의 비대칭적인 특성을 잘 반영할 수 있다. 또한 지형 정보를 이용하여 육지와 해상의 바람을 구분함으로써 육지의 마찰 효과를 고려할 수 있도록 구성하여 보다 현실적인 태풍 바람장이 생성될 수 있다(Fig. 2).

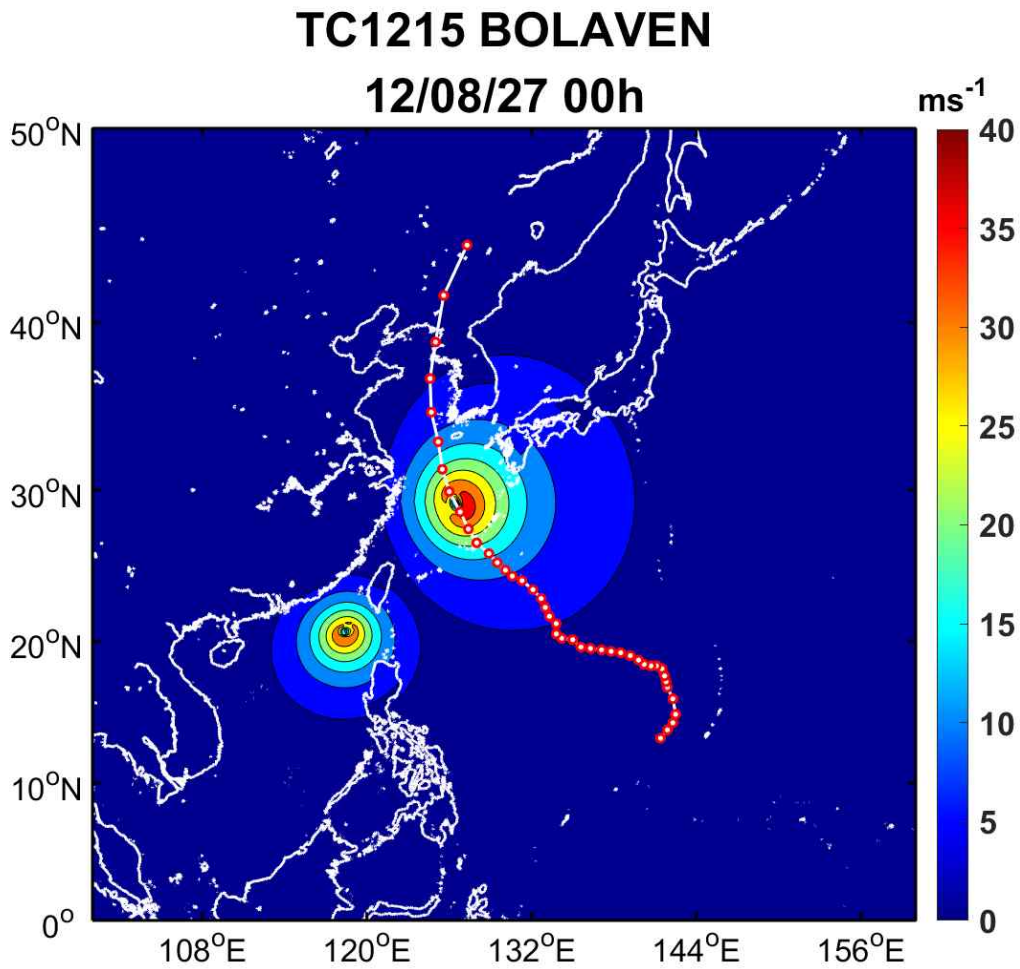


Fig. 2. Wind field of empirical typhoon vortex model in the Western North Pacific during passage of Typhoon BOLAVEN (27 August 2012).

2.3. 관측자료 및 분석 방법

재분석 자료의 바람 정확도 평가 및 경험적 모의 태풍 모델 바람장 검증을 위해 사용된 관측자료는 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA) 해양 기상부이와 JTWC 태풍 최적경로자료이다.

본 연구에서는 2010년부터 2018년까지의 자료를 제공하는 총 8개 지점(덕적도, 칠발도, 거문도, 거제도, 동해, 포항, 마라도, 외연도) KMA 해양부이의 1시간 간격의 풍속자료를 사용하였다(Table 2, Fig. 3). 이 관측자료를 사용하여 한반도 근해에서의 각 재분석 자료의 풍속이 태풍 시기 및 전 기간 동안 얼마나 관측과 유사하게 모의하는지를 평가하였고, 산출된 모의 태풍 바람장의 검증을 위해 사용되었다.

KMA 해양부이의 풍속계 높이가 3.6 m 또는 3.9 m로 각각 다르기 때문에, 재분석 자료 및 모의 태풍 바람장과 비교하기 위해 아래의 식을 사용하여 부이의 풍속 자료를 10 m 높이의 해상풍으로 변환하였다(De Rooy et al., 2004; Oh and Ha, 2005; Jeong et al., 2008).

$$U_{10} = U_H \frac{\ln(10/Z_0)}{H/Z_0}$$

여기서 U_{10} 은 10 m 고도에서의 풍속이며, U_H 는 관측 고도 H에서의 풍속, H는 관측 지점에서 해상풍을 관측한 높이, Z_0 은 거칠기 길이이다. Z_0 은 KMA 해양부이가 대부분 연안에 근접해 있는 것을 고려하여, 연안의 거칠기 길이 값으로 사용되는 10^{-3} m를 적용하였다(Stull, 1988).

KMA 해양부이 자료는 지점 자료이고 재분석 자료 및 모의 태풍 바람장은 격자 자료이므로 아래의 식과 같은 역거리 가중법(Inverse Distance Weighting, IDW; Shepard, 1968)을 사용하여 각 격자에 해당하는 부이의 풍속값을 추출한 후 비교 및 검증을 수행하였다. 역거리 가중법은 공간 보간법 중 하나로, 주변의 가까운 점의 값에 거리에 따라 반비례하게 가중치를 두어 원하는 지점의 값을

계산하는 방법이다.

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad W_i = \frac{1}{d_i^2}$$

여기서 Z_p 는 부이 지점의 보간값이며, Z_i 는 격자 (x_i, y_i) 의 풍속값, W_i 는 역거리 가중치, d_i 는 부이 지점부터 격자 (x_i, y_i) 까지의 거리이다. 부이 지점으로부터 가까운 격자의 값일수록 더 많은 가중치가 적용된다.

Table 2. Specifications of KMA buoy data used in this study.

Name of station	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Height of Anemometer (m)	Data period
Deokjeokdo	126.0188	37.2361	3.6	1996.07.01- Present
Chilbaldo	125.7769	34.7933	3.6	1996.07.01- Present
Geomundo	127.5014	34.0014	3.6	1997.05.01- Present
Geojeodo	128.9000	34.7667	3.6	1998.05.01- Present
Donghae	130.0000	37.5442	3.9	2001.04.01- Present
Pohang	129.7833	36.3500	3.9	2008.11.15- Present
Marado	126.0333	33.0833	3.9	2008.11.15- Present
Oeyeondo	125.7500	36.2500	3.6	2009.10.21- Present

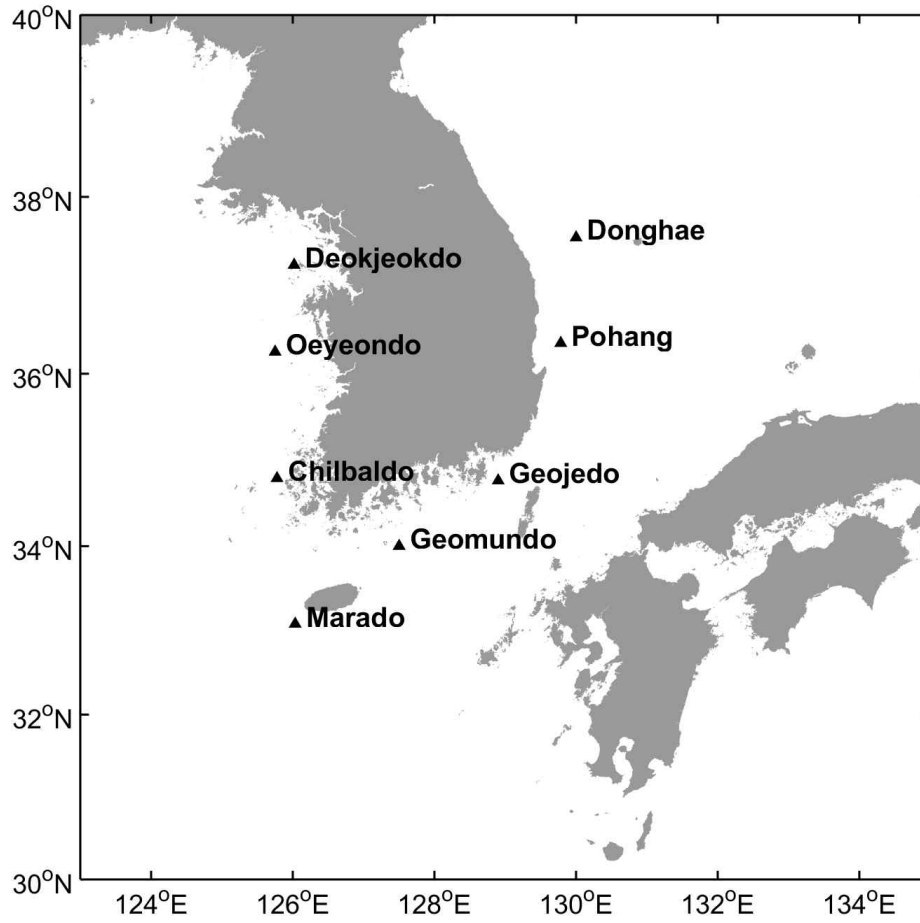


Fig. 3. Locations of KMA buoys.

JTWC 자료는 북서태평양에서의 재분석 자료의 태풍 위치 및 강도 모의 성능을 평가하기 위해 사용되었다. 태풍의 등급은 세계기상기구 기준으로 강도에 따라 열대 저압부(Tropical Depression, TD), 열대 폭풍(Tropical Storm, TS), 강한 열대 폭풍(Severe Tropical Storm, STS), 태풍(Typhoon, TY)으로 구분된다. 한국 기상청은 강도가 17 ms^{-1} 이상인 TS부터 태풍이라고 정의하기 때문에, 본 연구에서는 북서태평양에서 발생한 열대저기압 중 TS 이상인 경우에 대해서만 분석을 수행하였다.

재분석 자료의 태풍 위치 모의 성능 평가는 JTWC 자료의 태풍 위치를 중심으로 $5^\circ \times 5^\circ$ 내의 평균해면기압(Mean Sea Level Pressure, MSLP) 최소값 및 925hPa 상대와도(Relative Vorticity) 최대값을 사용하여 태풍 위치를 추적한 후 (Manning and Hart, 2007), JTWC 태풍 위치와 비교하는 방법을 사용하였다. 재분석 자료의 태풍 강도 모의 성능 평가는 JTWC 태풍 위치로부터 200km 반경 내의 최대풍속을 산출한 후, JTWC 최대풍속과 비교하는 방법을 사용하였다.

재분석 자료의 바람 모의 성능 평가 및 모의 태풍 바람장 검증은 평균제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE), 그리고 상관계수(Correlation, R)를 이용하였다.

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

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (W_i - \bar{W})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (W_i - \bar{W})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$$

여기서, N은 관측자료의 개수, W은 재분석 자료 및 모의 태풍 모델의 값, 그리고 O는 관측값이다.

2.4. 극치분석 방법

극치분석은 POT 접근 방식을 기반으로 하는 GPD 모형을 사용하였다. GPD의 누가확률분포함수 $F(x)$ 는 아래의 식과 같이 정의된다(Hosking and Wallice 1987).

$$F(x) = 1 - 1 \left(k \frac{x - x_o}{\alpha} \right)^{1/k}$$

여기서, x 는 확률변수, x_o 는 임계값(Threshold), σ 는 규모 매개변수(scale parameter), k 는 형상 매개변수(shape parameter)이며, GPD의 매개변수는 최대우도추정법(Maximum Likelihood Estimation, MLE)을 적용하여 추정하였다. $k < 0$ 일 때, x 의 범위는 $x_o < x < \infty$ 이다. 임계값은 사전에 결정되어야 한다. 임계값을 작게 설정하면 임계값을 초과하는 관측자료가 이론적으로 GPD를 따르지 않을 것이고, 너무 크게 설정하면 사용하는 관측자료의 수가 매우 적어져 분석의 정확도가 떨어진다고(류와 박, 2012). 따라서 임계값을 적절하게 설정하는 것이 중요하다. 임계값을 설정하는 방법은 가장 많이 이용되는 방법 중 하나인 평균 초과함수(Mean Residual Life, MRL) plot 방법을 이용하였다(Coles, 2001). MRL plot은 임계값을 변화시켜 가면서 2차원 좌표 $\{x_o, e(x_o)\}$ 를 선으로 연결하여 그린 것이다. 평균 초과함수의 식은 아래의 식과 같다.

$$e(x_o) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_o)}{n}$$

여기서, n 은 임계값을 초과하는 관측치의 수이고, x_i 는 임계값을 초과하는 관측값들이다. 이 방법의 장점은 임계값을 정할 때 계산이 간단하고 시간이 적게 걸린다는 것이다. 그러나 사용자가 직접 눈으로 확인하여 결정해야 하기 때문에 임계값이 주관적인 판단 하에 결정되고 자동화를 할 수 없다는 단점이 있다(류와

박, 2012).

본 연구에서는 보다 객관적인 판단을 위해 Jung et al. (2018) 방법에 따라, 연 최대 극치풍속 자료를 GEV 모델에 적용하여 도출한 재현기간별 극치풍속 값들과 가장 유사하게 재현되는 값을 임계값으로 설정하였다. 즉, AMS 방식을 기반으로 하는 GEV 모델 결과와 POT 방식을 기반으로 하는 GPD 모델 결과 사이의 차이를 계산한 뒤, 두 모델 사이의 차이가 가장 작게 나타나는 값을 임계값으로 설정하였다. 두 모델 사이의 차이 *Diff*는 아래의 식으로 계산되었다.

$$Diff = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_i \left(1 - \frac{x_{T_i}^{GPD}}{x_{T_i}^{GEV}} \right)^2}$$

여기서, $x_{T_i}^{GPD}$ 는 GPD 모델을 적용하여 추정된 재현기간 T_i -year 극치풍속이며, $x_{T_i}^{GEV}$ 는 GEV 모델을 적용하여 추정된 재현기간 T_i -year 극치풍속이다(Jung et al., 2018). 재현기간 T_i 는 10년부터 100년까지 10년 단위의 재현기간이 적용되었다.

예시로, 산출된 차이 *Diff*는 Fig. 4와 같이 도시할 수 있다. x 축은 POT 시계열을 추출하기 위해 적용된 임계값을 의미하고, y 축은 GEV 모델과 임계값을 적용하여 산출한 GPD 모델 사이의 차이를 의미한다. 여기서는 임계값 $x_0 = 11.72 \text{ ms}^{-1}$ 를 적용하였을 경우에 두 모델 사이의 차이가 가장 작은 것을 알 수 있다. GEV 모델을 이용하여 추정된 재현기간별 극치풍속과 $x_0 = 11.72 \text{ ms}^{-1}$ 를 적용하여 GPD 모델을 이용하여 추정된 재현기간별 극치풍속은 Fig. 5와 같이 나타나며, 두 모델 결과 사이의 차이가 작은 것을 확인할 수 있다. 설정된 임계값 x_0 은 Fig. 6과 같이 MRL plot을 이용하여 타당성을 판단하였다. MRL plot은 일반적으로 작은 임계값에서는 비선형적인 곡선이 나타나고, 임계값이 증가하면서 대략적인 직선 구간이 나타나는데, 이 직선 구간에 있는 임계값을 설정하는 것이 추

천된다(Jung et al.,, 2018). 여기서는 대략 $11.5\text{--}13\text{ ms}^{-1}$ 의 직선 구간이 나타나는데, 11.72 ms^{-1} 로 설정된 임계값이 MRL plot의 직선 구간에 해당되는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 6).

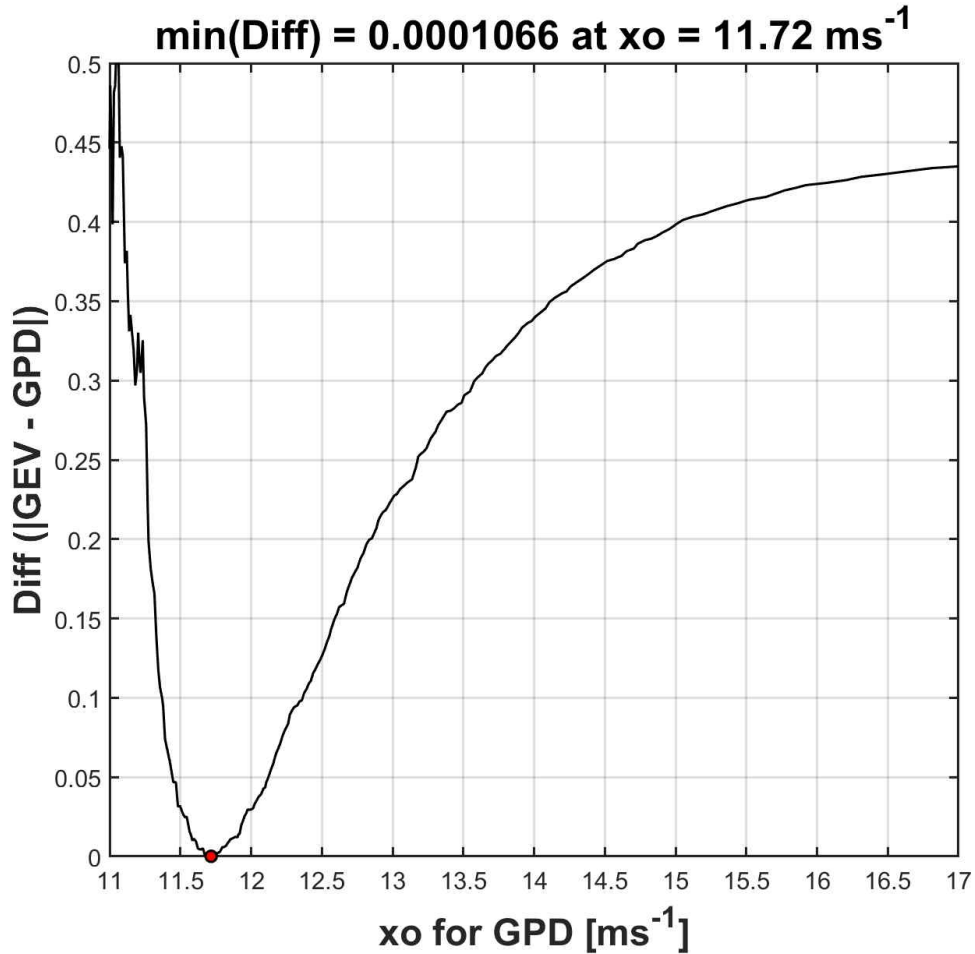


Fig. 4. Difference between extreme wind speeds using GEV and GPD.

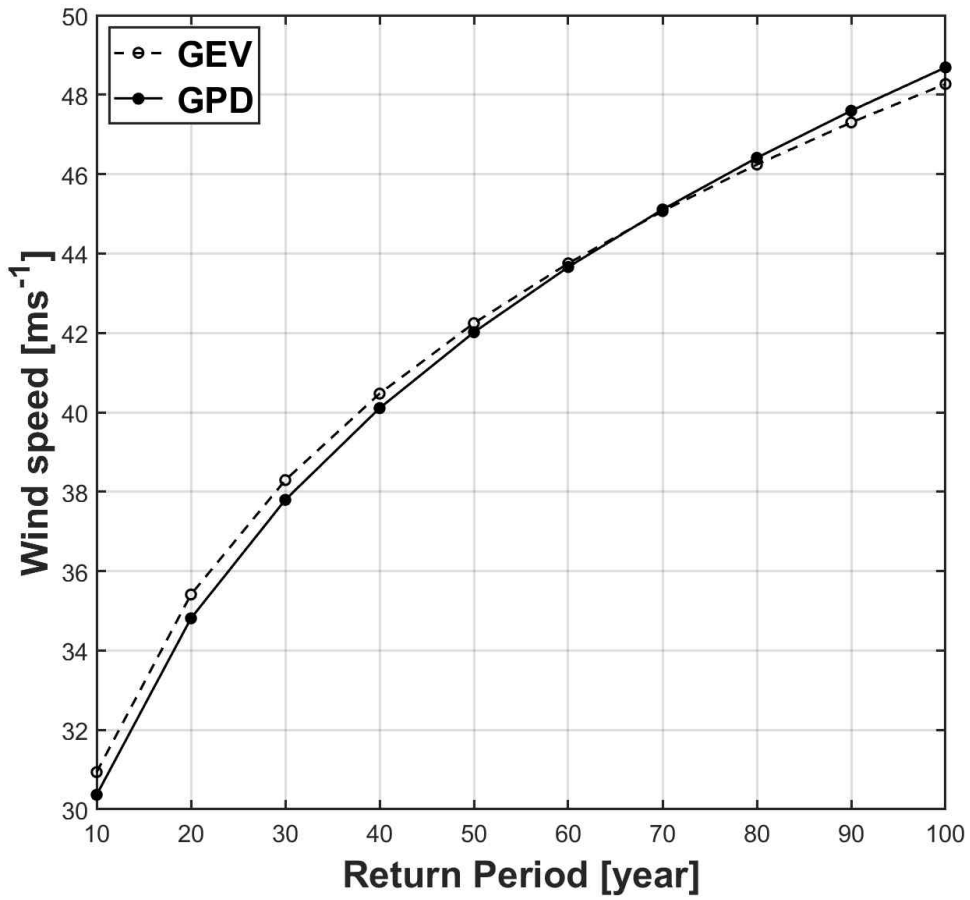


Fig. 5. Extreme wind speed for various return periods.

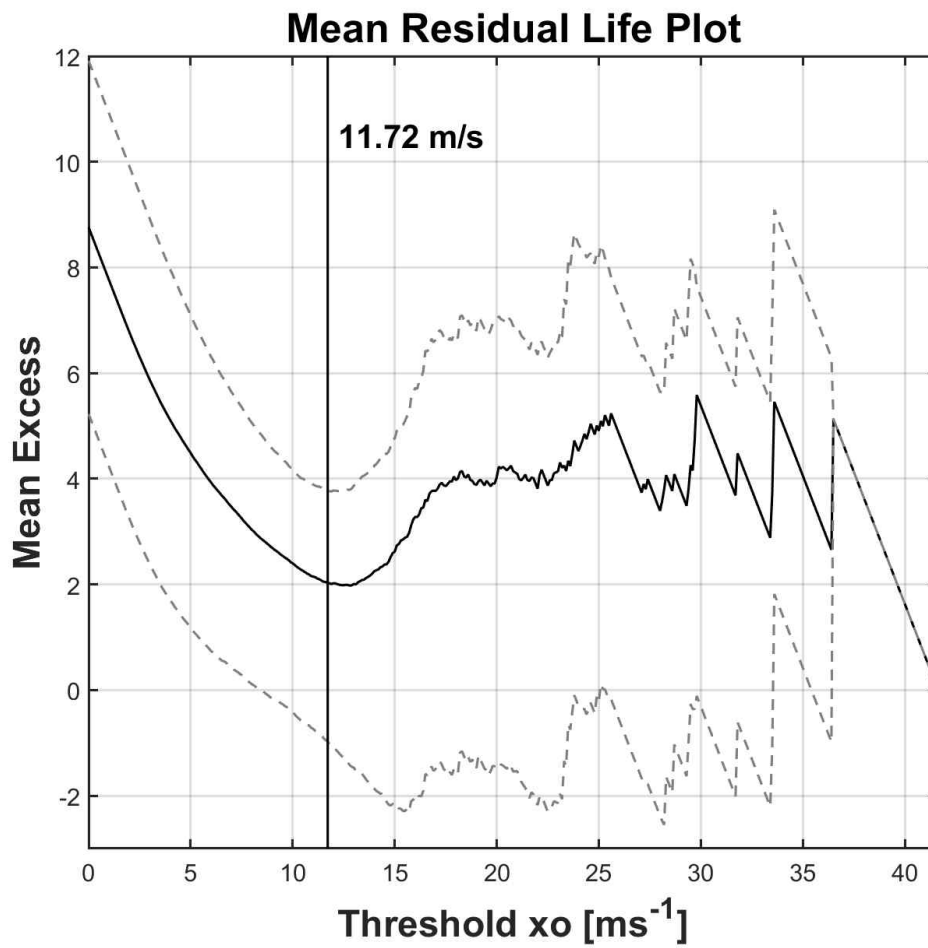


Fig. 6. Mean residual life (MRL) plot with the 95% confidence intervals.

극치분석에 사용되는 자료들의 독립성을 보장하기 위해서는 x_o 를 산출한 후, x_o 를 초과하는 값들이 연속적으로 선택되지 않도록 설정하여야 한다. 본 연구에서는 시간 풍속자료로부터 일 최대풍속자료 y 를 구성한 뒤, $y > x_o$ 인 값들 중에서 $y_{t-1} < y_t$ 및 $y_t > y_{t+1}$ 인 값만 선택하여 시계열 x 를 구성함으로써 독립성을 확보하였다(Jung et al., 2018).

최종적으로 극치풍속은 누가확률분포함수 $F(x)$ 의 역함수를 구한 뒤, 연간 발생률 λ 을 적용하여 아래의 식과 같이 추정될 수 있다.

$$x_T = x_o + \frac{\sigma}{k} (1 - (\lambda T)^{-k})$$

여기서, x_T 는 재현기간 T -year에 대응하는 극치풍속이며, λ 는 연도별 임계값을 초과하는 풍속의 기대값이다. 본 연구에서는 재현기간 T -year을 10년부터 100년 까지로 설정하였다.

Ⅲ. 바람장 모의 성능 평가

3.1. 북서태평양

극치분석에 적합한 재분석 자료를 선별하기 위하여 5개의 재분석 바람장의 정확도를 평가하였다. 먼저 재분석 바람장이 북서태평양에서 2010년부터 2018년까지 발생한 태풍을 얼마나 잘 모의하고 있는지를 평가하기 위하여, JTWC 태풍 최적경로자료에서 제공되는 태풍의 중심위치 및 최대풍속 값과 비교하였다. 먼저 재분석 자료의 태풍 위치를 JTWC 자료의 태풍 위치와 비교한 결과, GFS가 다른 재분석 자료에 비해 가장 작은 44.3 km의 위치 오차를 나타냈다(Fig. 7). ERA5는 GFS 다음으로 작은 오차(68.1 km)를 나타냈다. 이는 TC 초기화 방법으로 볼텍스 재배치 방법이 적용된 MERRA-2와 TC wind profile retrieval 방법이 적용된 JRA-55보다 더 작은 위치 오차를 보여준다. 반면, ERA-Interim은 가장 큰 위치 차이를 보였다(101.6 km). 예시로, Fig. 8은 각각 2010년, 2012년, 2016년에 한반도에 영향을 미친 태풍 KOMPASU, BOLAVEN, CHABA의 JTWC 자료의 태풍 최적경로와 각 재분석 자료에서 산출된 태풍의 위치를 보여준다. GFS와 ERA5의 태풍 위치가 JTWC 태풍 경로와 비슷한 반면, ERA-Interim의 태풍 위치는 JTWC 태풍 경로와 크게 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

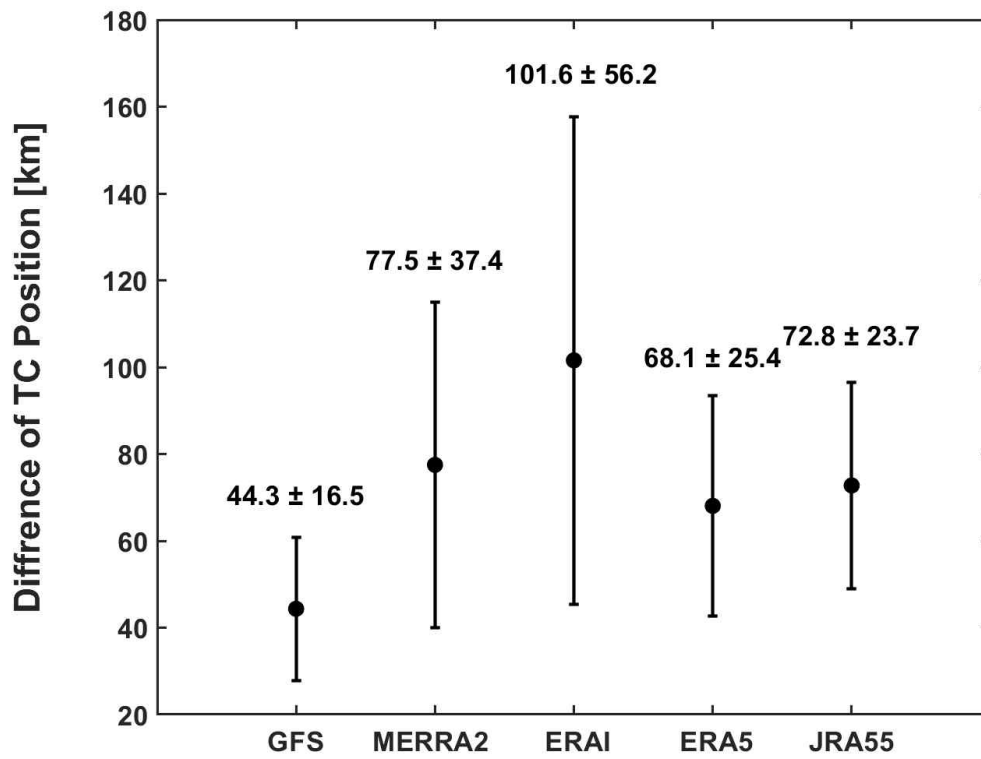


Fig. 7. Mean absolute difference of typhoon position in the Western North Pacific between JTWC best track data and reanalysis data from 2010 to 2018. The error bar represents the standard deviation.

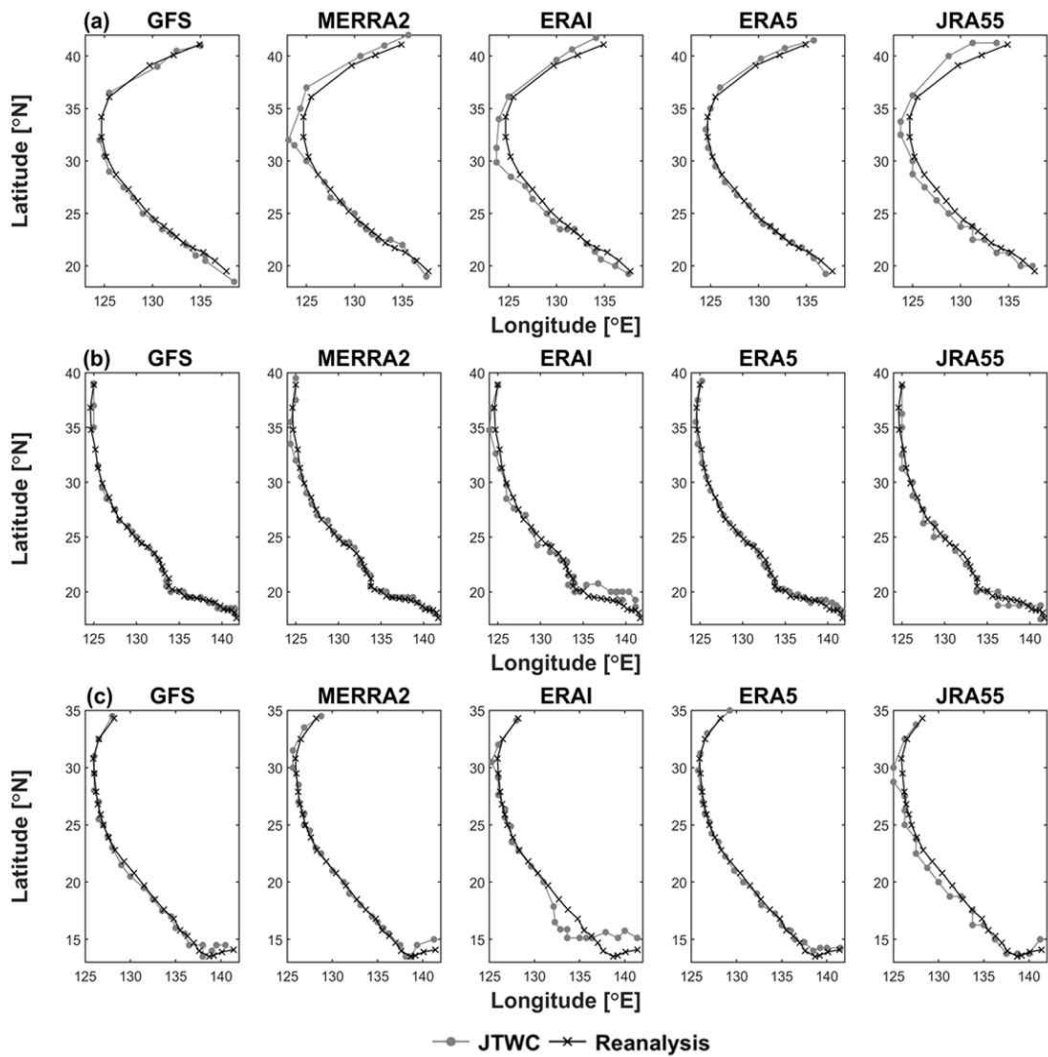


Fig. 8. Comparison of typhoon track between JTWC best track data and 5 reanalysis data sets for typhoons (a) KOMPASU, (b) BOLAVEN, (c) CHABA. The gray and black lines represent JTWC best tack and reanalysis data, respectively.

재분석 자료의 태풍 강도 모의 성능을 비교한 결과, GFS를 제외한 대부분의 재분석 자료가 태풍의 최대풍속을 크게 과소 모의하는 것으로 나타났고, 특히 약 40 ms^{-1} 이상의 강한 풍속일 때 큰 차이가 나타났다(Fig. 9). 5개의 자료 중 GFS가 JTWC 자료와의 가장 높은 상관도($r=0.87$)를 보였고, 그다음으로 ERA5가 0.68의 상관도를 보였다. 반면, ERA-Interim은 가장 낮은 상관도($r=0.34$)를 보였다. ERA5가 같은 기관에서 산출된 ERA-Interim보다 태풍의 위치 및 강도 표현이 개선된 것은 더 높아진 시공간 해상도 때문이다(Dullaart et al., 2020). 더 높은 시공간 해상도는 태풍을 특징짓는 큰 압력 구배 및 강풍을 잘 포착한다. 개선된 또 다른 이유는 ERA-Interim과 달리 ERA5의 자료동화 체계가 ASCAT 풍속 자료를 포함하기 때문으로 알려져 있다(Dullaart et al., 2020). GFS가 북서 태평양에서의 태풍 위치 및 강도 모의 성능이 가장 좋았지만, 자료의 기간이 총 12년으로 짧기 때문에, 본 연구에서는 GFS 다음으로 태풍 위치 모의 성능이 좋고 자료 기간(39년)이 길며, 한반도 근해에서 부이와의 오차가 가장 작고, 가장 높은 공간 해상도를 가진 ERA5를 극치분석을 위한 자료로 선별하였다.

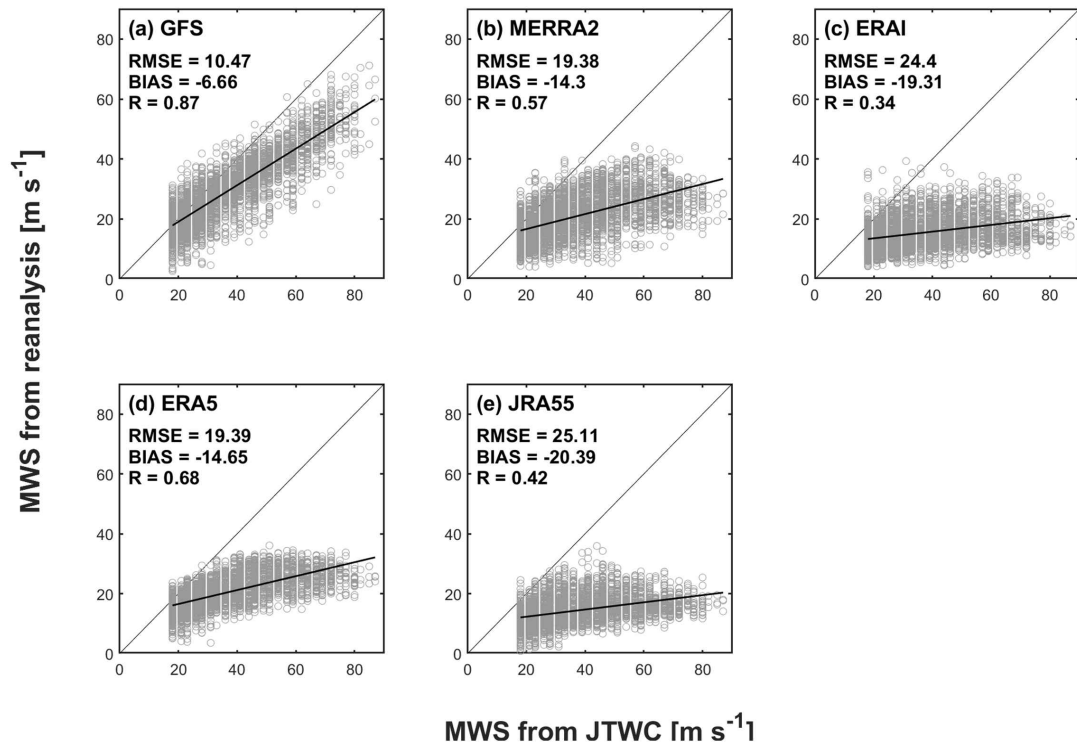


Fig. 9. Comparison of maximum wind speed (MWS) estimated from 5 reanalysis data sets with JTWC best track during the passage of typhoon in the Western North Pacific from 2010 to 2018.

3.2. 한반도 근해

한반도 근해에서의 재분석 자료의 바람 모의 성능을 평가하기 위하여 2010년부터 2018년까지의 태풍 시기 및 전 기간 동안의 재분석 자료의 풍속을 8개의 KMA 해양부이 관측자료와 비교하였다(Table 3, Table 4).

태풍 시기에 대한 분석은 기상청에서 정의한 한반도 영향 태풍 시기로 한정하였으며(기상청, 2011), 태풍이 한반도 근해의 부이들을 지나갈 때, 각 부이가 최대풍속을 기록한 시점을 기준으로 전후 1일 기간에 대하여 풍속을 비교하는 방법을 사용하였다. 비교 결과, 33개의 한반도 영향 태풍 시기 동안 ERA5가 평균적으로 가장 낮은 RMSE(1.63 ms^{-1})를 보였다. MERRA-2는 ERA5 다음으로 낮은 RMSE(1.97 ms^{-1})를 보였다. 반면, JRA-55는 가장 높은 RMSE(2.69 ms^{-1})를 보였다.

전 기간에 대한 비교 결과에서도, ERA5는 사용된 자료 중 평균적으로 가장 낮은 RMSE(1.45 ms^{-1}) 및 부이 관측값과 가장 높은 상관도($r=0.91$)를 보였다. 반면, JRA-55는 가장 높은 RMSE(2.26 ms^{-1}), 그리고 ERA-Interim은 가장 낮은 상관도($r=0.82$)를 보였다. 참고로 연구에 사용된 자료 중 ERA5의 공간 해상도($0.25^\circ \times 0.25^\circ$)가 가장 높았고 JRA-55의 공간 해상도($1.25^\circ \times 1.25^\circ$)가 가장 낮았다. ERA5가 다른 자료에 비해 고해상도이기 때문에 지점 자료인 KMA 해양부이 관측자료와 비교할 때, 이러한 해상도 차이가 우리나라 연안과 같이 복잡한 지형을 가진 곳에서는 오차를 줄이는데 기여했을 것으로 사료된다.

Table 3. Comparison of wind speed uncertainty (RMSE) of reanalysis data indicated by comparison with KMA buoy data during the passage days of typhoons from 2010 to 2018.

Name of station	Reanalysis				
	GFS	MERRA-2	ERA-Interim	ERA5	JRA-55
Deokjeokdo	1.75	1.49	1.91	1.13	2.97
Chilbaldo	2.29	1.81	2.51	2.18	1.90
Geomundo	2.10	1.98	2.64	1.60	2.14
Geojeodo	2.40	2.54	2.85	1.85	4.31
Donghae	1.79	1.64	1.83	1.29	1.86
Pohang	2.64	2.42	2.97	1.86	3.38
Marado	2.36	2.23	2.63	1.88	2.40
Oeyeondo	1.63	1.63	1.94	1.25	2.60
Total	2.12	1.97	2.41	1.63	2.69

Table 4. Comparison of wind speed accuracy (RMSE, R) among reanalysis data indicated by comparison with KMA buoy data during all periods from 2010 to 2018.

Name of station	GFS		MERRA-2		ERA-I		ERA5		JRA-55	
	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R
Deokjeokdo	1.52	0.86	1.30	0.90	1.73	0.83	1.27	0.91	2.31	0.86
Chilbaldo	1.74	0.85	1.50	0.88	1.81	0.84	1.58	0.89	1.76	0.87
Geomundo	1.70	0.89	1.69	0.90	1.97	0.85	1.37	0.93	1.89	0.87
Geojeodo	2.11	0.83	2.25	0.81	2.19	0.77	1.59	0.88	3.26	0.80
Donghae	1.76	0.84	1.75	0.84	2.12	0.76	1.25	0.91	1.99	0.80
Pohang	2.05	0.84	2.09	0.85	2.67	0.77	1.60	0.91	2.84	0.79
Marado	1.91	0.87	2.04	0.89	1.99	0.86	1.78	0.92	1.96	0.89
Oeyeondo	1.43	0.89	1.31	0.92	1.65	0.86	1.13	0.93	2.06	0.90
Total	1.78	0.86	1.74	0.87	2.02	0.82	1.45	0.91	2.26	0.85

IV. 합성 바람장을 이용한 극치분석

4.1. 재분석 자료와 모의 태풍 바람장 합성

재분석 자료가 태풍의 최대풍속을 과소 모의하는 문제점과 모의 태풍 바람장이 태풍 외곽바람을 현실적으로 모의하지 못하는 문제점을 해결하기 위하여, 본 연구에서는 경험적 모의 태풍 바람장 모델과 재분석 바람장을 합성하여 극치분석에 사용하였다. 바람장 합성은 ERA5 바람장의 풍속과 모의 태풍 바람장의 풍속을 각 격자마다 비교한 뒤, 값이 더 큰 자료의 격자 값을 선택하는 방법으로 이루어졌다. 예시로, Fig. 10은 2016년에 발생한 태풍 CHABA의 10월 3일 18시 시점의 ERA5 바람장, 모의 태풍 바람장, 그리고 합성 바람장을 도시한 것이다. Fig. 10a, d에서 ERA5 바람장이 태풍 중심의 최대풍속을 과소 모의하는 문제점과 Fig. 10b, e에서 모의 태풍 바람장이 태풍 주변의 바람을 추정하지 못하는 문제점이 나타난다. 태풍 바람장의 단면을 도시한 Fig. 11에서도 이러한 문제점을 확인할 수 있다. 반면, 두 자료를 합성한 바람장은 재분석 바람장과 모의 태풍 바람장의 문제점이 보완된 것을 확인할 수 있다(Fig. 10c, f 및 Fig. 11).

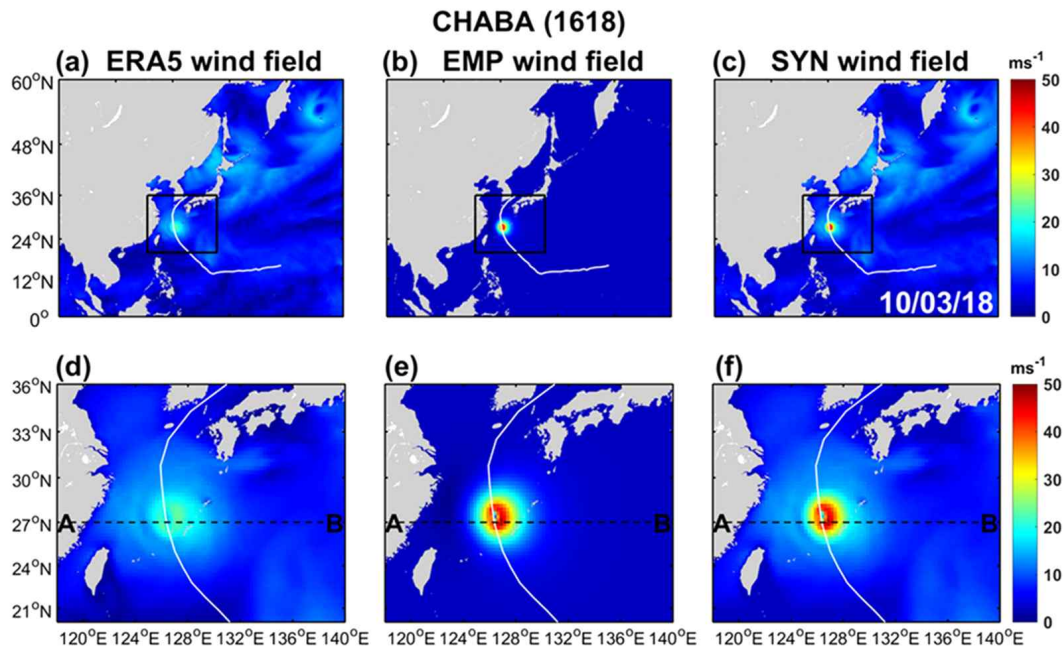


Fig. 10. Comparison of wind fields among ERA5 reanalysis (a,d), empirical (EMP) typhoon vortex model (b,e), synthesized (SYN) wind (c,f) in the Western North Pacific during passage of Typhoon CHABA (3 October 2016). d-f are enlarged views of the box in a-c. The white line represents the track of Typhoon CHABA. A-B dashed line represents the cross-section position for Fig. 11.

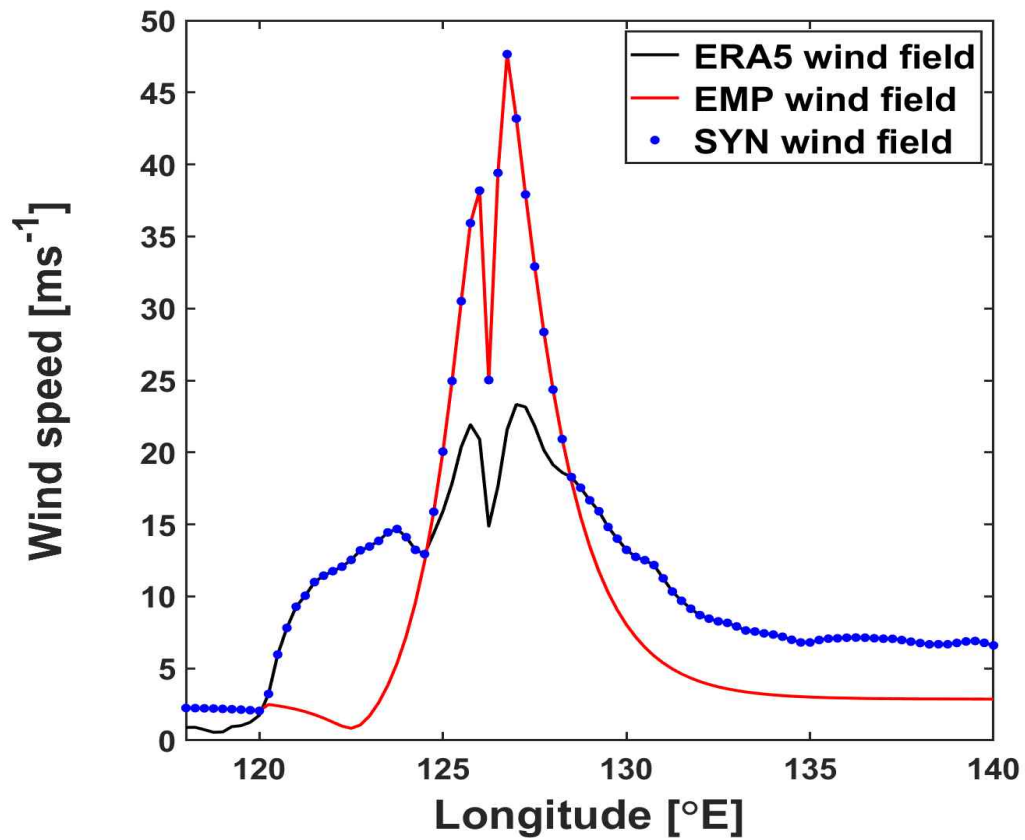


Fig. 11. Cross-sections of ERA5 reanalysis wind (black line), empirical (EMP) typhoon vortex wind (red line) and synthesized (SYN) wind (blue dot) at the center of the Typhoon CHABA (see A-B dashed line in Fig. 10) on 3 October 2016.

모의 태풍 바람장 및 합성 바람장을 검증하기 위해 각각 2010년, 2012년, 2016년에 발생한 한반도 영향 태풍 KOMPASU BOLAVEN, CHABA를 대상으로 KMA 해양부이와 비교하였다(Fig. 12). 태풍의 중심위치가 부이와 가장 가까운 시점을 기준으로 전후 1일 기간에 대하여 비교한 결과, 모의 태풍 바람장의 값은 태풍 중심이 부이를 지나갈 때 관측값과 매우 비슷하게 나타났다(Figs. 13-15). 그러나 Fig. 13f, Fig. 14a, h, Fig. 15c, d, g와 같이 태풍 중심이 부이를 지나가기 전후나 Fig. 13c, d, Fig. 14e, f, Fig. 15a, e, h와 같이 태풍이 부이로부터 멀리 떨어져 이동하는 경우, 모의 태풍 바람장의 값이 관측값과 큰 오차를 보였다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이, 경험적 모의 태풍 바람장 모델이 태풍 정보만을 사용하기 때문에 태풍 바람만 산출하고 태풍 주변의 바람장은 산출하지 못하기 때문이다. 반면, 본 연구에서 생성한 합성 바람장은 태풍 중심이 통과할 때 강한 바람뿐 아니라 태풍 중심이 부이를 지나가기 전후 및 태풍 경로로부터 멀리 떨어진 부이에서도 관측값과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 1980년부터 2018년까지 총 39년의 ERA5 재분석 자료와 동기간 북서태평양에서 발생한 태풍에 대해 산출한 모의 태풍 바람장을 합성하여 북서태평양 도메인(90° - 180° E, 0° - 60° N)에 대해 태풍 중심 및 태풍 주변 바람. 그리고 비 태풍 시기까지 고려할 수 있는 바람장을 생성하였고, 이를 극치분석에 이용하였다.

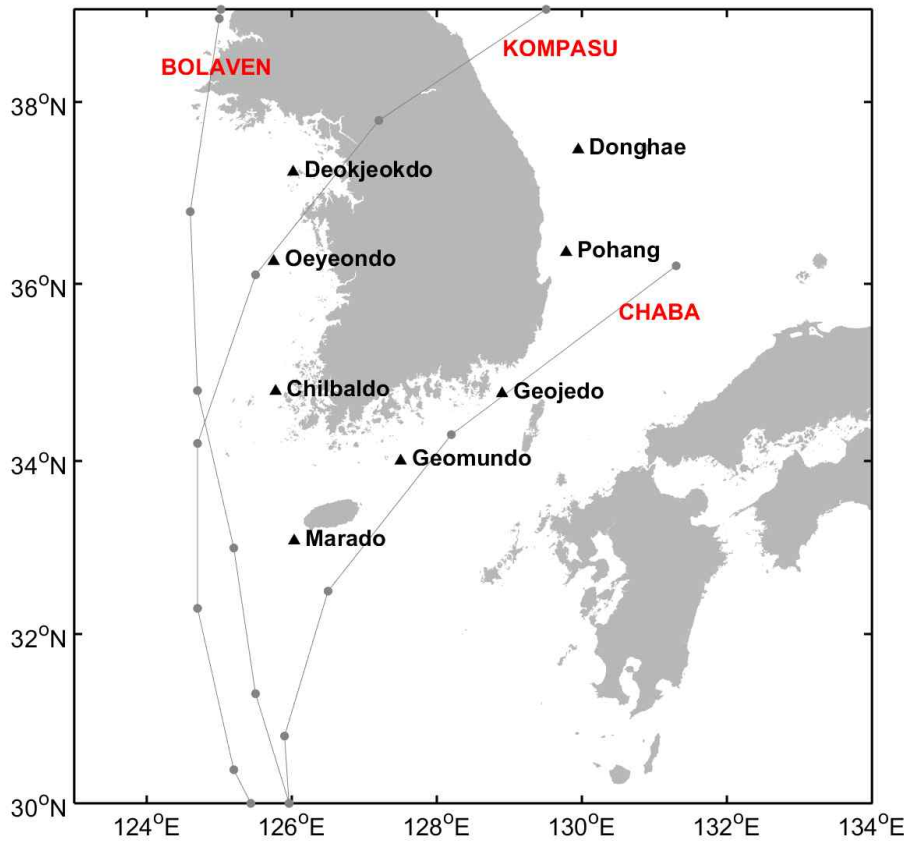


Fig. 12. Best tracks of three typhoons in JTWC used for verification of empirical typhoon vortex wind and synthesized wind.

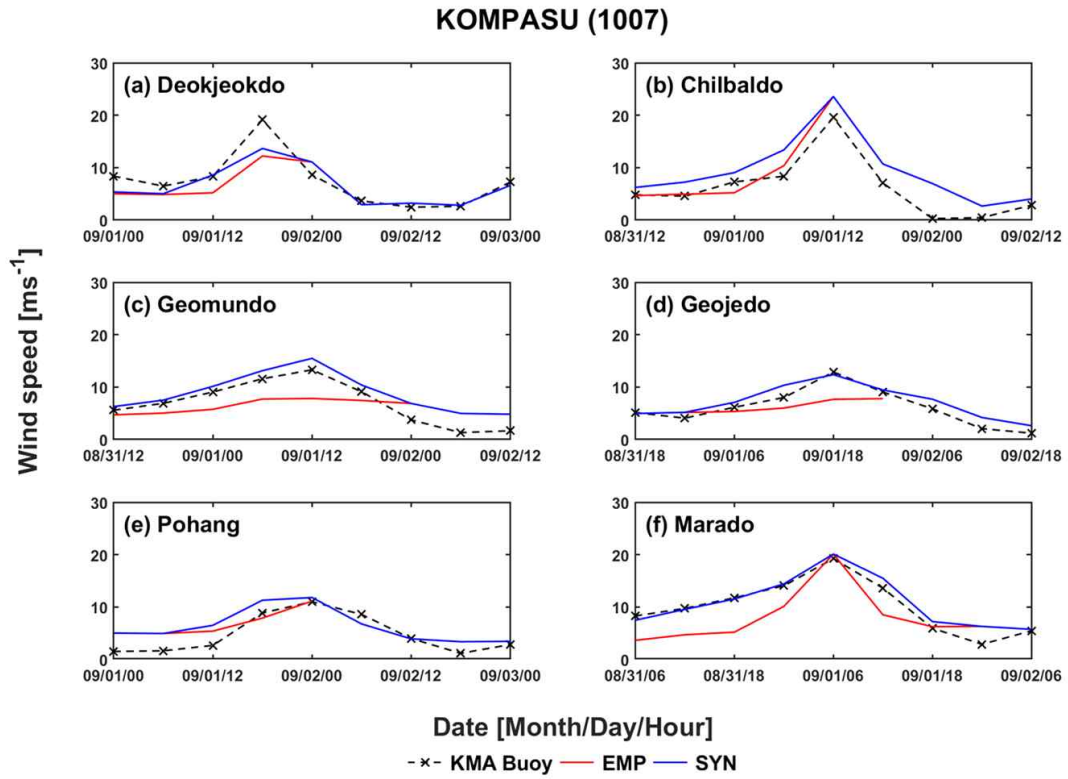


Fig. 13. Comparison of wind speed (6-h intervals) among KMA buoy, empirical typhoon vortex model (EMP), and synthesized wind data (SYN) during the passage of Typhoon KOMPASU at (a) Deokjeokdo, (b) Chilbaldo, (c) Geomundo, (d) Geojedo, (e) Pohang, (f) Marado buoy. The black, red, blue lines represent KMA buoy, empirical wind and synthesized wind, respectively.

BOLAVEN (1215)

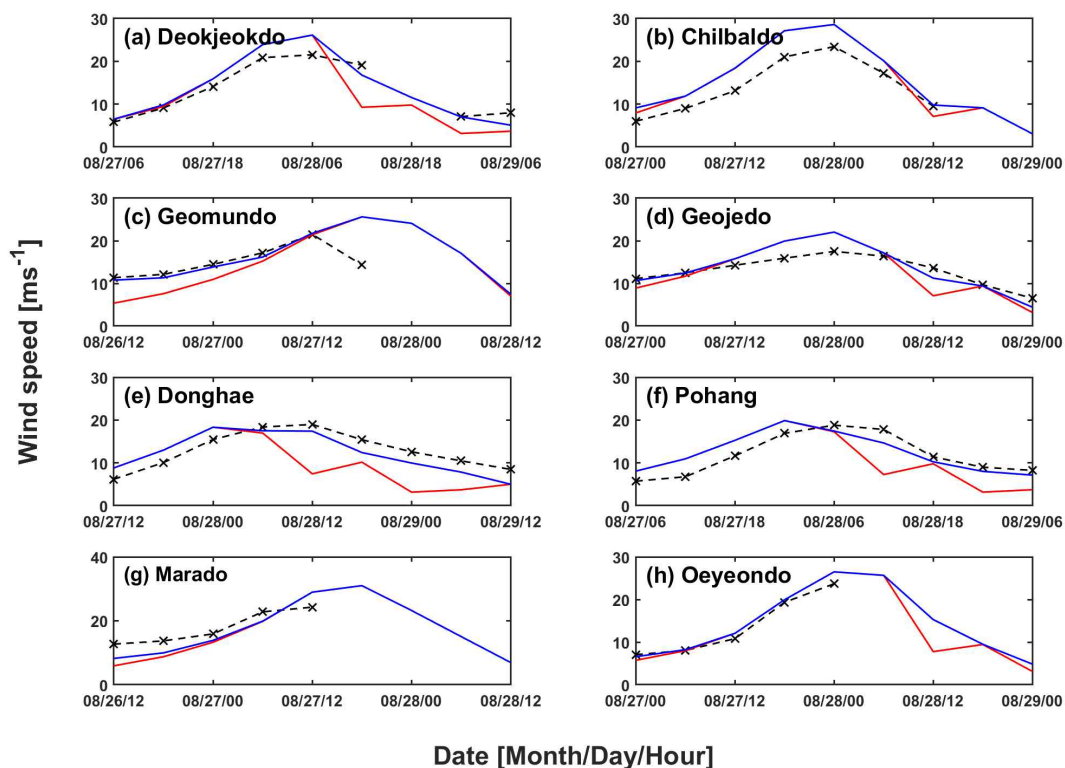


Fig. 14. Comparison of wind speed (6-h intervals) among KMA buoy, empirical typhoon vortex model (EMP), and synthesized wind data (SYN) during the passage of Typhoon BOLAVEN at (a) Deokjeokdo, (b) Chilbaldo, (c) Geomundo, (d) Geojedo, (e) Donghae, (f) Pohang, (g) Marado, (h) Oeyeondo buoy. The black, red, blue lines represent KMA buoy, empirical wind and synthesized wind, respectively.

CHABA (1618)

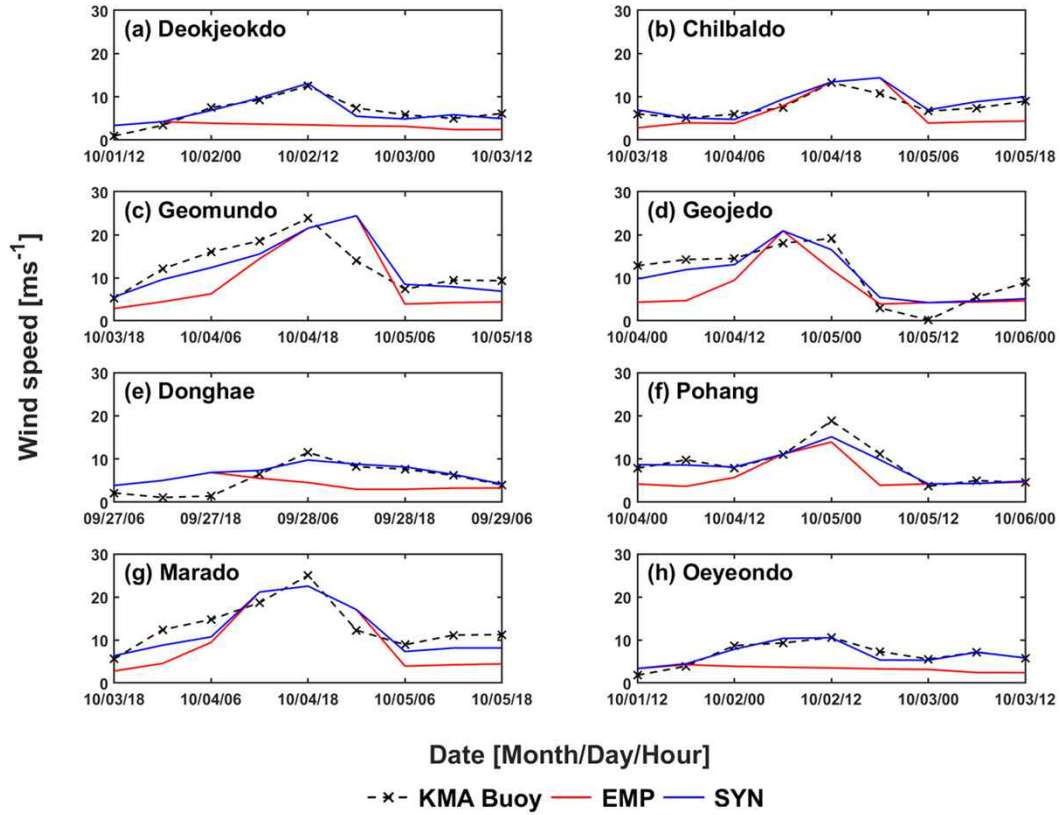


Fig. 15. Comparison of wind speed (6-h intervals) among KMA buoy, empirical typhoon vortex model (EMP), and synthesized wind data (SYN) during the passage of Typhoon CHABA at (a) Deokjeokdo, (b) Chilbaldo, (c) Geomundo, (d) Geojeodo, (e) Donghae, (f) Pohang, (g) Marado, (h) Oeyeondo buoy. The black, red, blue lines represent KMA buoy, empirical wind and synthesized wind, respectively.

4.2. 북서태평양의 극치풍속 추정

앞서 기술한 자료와 방법을 이용하여 극치분석을 수행하였고, 북서태평양의 재현기간별 풍속을 추정하였다. Fig. 16은 한반도와 일본, 그리고 필리핀 근해의 1980년부터 2018년 기간 동안 각 격자점에서의 최대풍속의 공간 분포와 각 근해에서 특정 지점(한반도 근해 126.5°E, 32.75°N; 일본 근해 133.25°E, 31.75°N; 필리핀 근해 123.75°E, 17.5°N)을 선택하여, 재분석 자료만을 이용하여 추정한 재현기간별 풍속과 합성 바람장을 이용하여 추정한 재현기간별 풍속을 나타낸 것이다. 전반적으로 재분석 자료만을 이용하여 극치분석을 수행하였을 때 재현기간별 풍속이 낮게 추정되어, 10년부터 100년까지의 재현기간별 풍속의 변화가 작게 나타났다. 한반도 근해 지점의 경우 재분석 자료만을 이용하여 산출한 39년 빈도의 풍속은 29.5 ms^{-1} 로 39년간 최대풍속인 34.2 ms^{-1} 보다 낮게 예측되었고, 반면 합성 바람장을 이용하여 산출한 39년 빈도의 풍속은 35.9 ms^{-1} 로 39년간 최대풍속과 비슷하게 나타났다(Fig. 16b). 일본 근해와 필리핀 근해 지점 또한 39년간 최대풍속이 각각 41.6 ms^{-1} , 63.9 ms^{-1} 였지만 재분석 자료만을 이용하여 산출한 39년 빈도의 풍속은 각각 25.5 ms^{-1} , 32.6 ms^{-1} 로 매우 낮게 예측되었고, 합성 바람장을 이용하여 산출한 39년 빈도의 풍속은 각각 39.9 ms^{-1} , 66 ms^{-1} 로 39년간 최대풍속과 비슷하게 나타났다(Fig. 16d, f). 또한 재분석 자료만을 이용하여 극치분석을 수행한 결과, 10년부터 100년까지의 재현기간 동안 추정된 풍속의 변화가 10 ms^{-1} 미만으로 매우 작게 나타난 반면, 합성 바람장을 이용하여 극치분석을 수행한 결과, 이러한 부분이 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 구조물 설계를 위해 100년 빈도의 풍속이 사용된다. 그러나 재분석 자료를 이용하여 산출한 북서태평양 각 지점의 100년 빈도의 풍속이 39년간 최대풍속보다 낮게 나타났다. 합성 바람장을 이용하여 산출한 100년 빈도의 풍속은 이러한 문제점을 개선함으로써 구조물 설계를 위한 보다 정확도 높은 기초 자료를 제공할 수 있다.

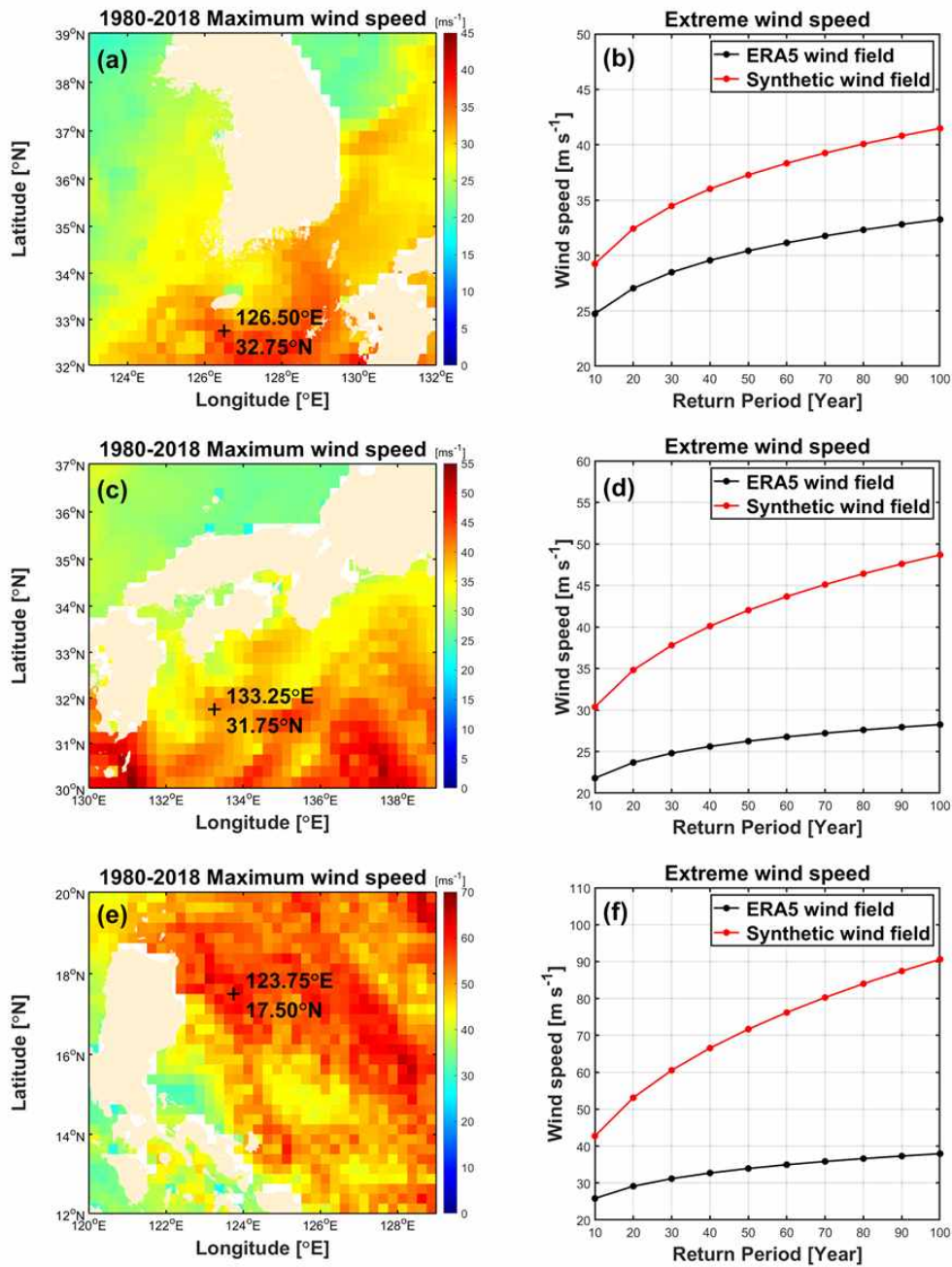


Fig. 16. Spatial distribution of maximum wind speed at each grid calculated using synthesized wind data (1980–2018) around (a) the Korean Peninsula, (c) Japan, and (e) Philippines, and their extreme wind speeds for various return periods at marked (+) points (b, d, f). Black line represents estimates using ERA5 wind field and red line represents estimates using synthetic wind field.

VI. 요약 및 결론

본 연구에서는 재분석 자료와 모의 태풍을 합성한 바람장을 이용하여 북서태평양에서 재현기간별 극치풍속을 추정하였다. 먼저, 극치분석에 적합한 재분석 자료를 선별하기 위해 KMA 해양부이 자료와 JTWC 태풍 최적경로자료를 이용하여 2010년부터 2018년까지의 다양한 재분석 바람장의 모의 성능을 평가하였다. 한반도 근해에서 KMA 해양부이와 비교한 결과, ERA5가 태풍 시기 동안 관측값과의 평균 RMSE가 가장 작았고, 전 기간에 대해서도 관측값과의 평균 RMSE는 가장 작고 상관도는 가장 높게 나타났다. 북서태평양에서 발생한 태풍에 대한 재분석 바람장의 평가에서는 GFS가 JTWC 자료의 태풍 중심위치와의 평균 거리 차이가 44.3 km로 가장 작게 나타났고 그 다음으로 ERA5가 68.1 km로 비교적 작게 나타났다. 태풍의 강도는 GFS 자료를 제외한 대부분의 재분석 자료들이 태풍의 최대풍속을 과소 모의 하였고 특히, 약 40 ms^{-1} 이상의 강풍일 때 큰 차이가 나타났다. JTWC 최대풍속과의 상관도는 GFS가 0.87로 가장 높게 나타났고, 그 다음으로 ERA5가 0.68의 높은 상관도를 보였다. GFS가 북서태평양에서의 태풍 위치 및 강도 모의 성능이 가장 좋았지만, GFS 자료는 자료 기간이 짧아 극치분석 자료에 적합하지 않기 때문에, 본 연구에서는 GFS 다음으로 태풍 위치 모의 성능이 뛰어나고 자료 기간이 길며, 가장 높은 공간 해상도를 가진 ERA5를 극치분석 자료로 선별하였다.

ERA5 재분석 자료가 태풍의 최대풍속을 과소 모의하는 문제점을 보완하기 위하여 경험적 모의 태풍 바람장 모델을 재분석 바람장과 합성하였다. 본 연구에서 사용된 모의 태풍 바람장 모델은 태풍 최적경로자료에서 제공하는 사분면 방향의 강풍 반경 정보를 이용하여 비대칭적인 태풍 바람 특성을 고려할 수 있을 뿐 아니라 육지의 마찰 효과에 의한 풍속 감소까지 고려되어 보다 현실적인 바람장이 생성할 수 있다. 이렇게 구성된 합성 바람장을 KMA 해양부이와 비교한 결과, 태풍 중심이 부이를 통과할 때의 강풍뿐 아니라 부이를 지나가기 전후 또는 태풍 경로와 멀리 떨어져 있는 부이 지점에서도 관측값과 잘 일치하는 것을

확인할 수 있었다.

본 연구에서는 1980년부터 2018년까지 총 39년 기간의 ERA5 자료와 동기간 북서태평양에서 발생한 태풍에 대하여 산출한 모의 태풍 바람장을 합성한 바람장을 이용하여 북서태평양에서 극치분석을 수행하였다. 극치분석은 POT 방법을 사용하여 합성 바람장의 특정 임계값 이상의 풍속 자료를 추출하여 수행되었다. 매개변수 추정법으로는 최대우도추정법을 사용하였으며, 극치 모델은 GPD를 사용하였다. 한반도, 일본 그리고 필리핀의 특정 지점에 대하여 극치분석을 수행한 결과, 재분석 자료만을 이용하였을 때 각 지점의 39년 빈도 극치풍속은 한반도 지점 29.5 ms^{-1} , 일본 지점 25.5 ms^{-1} , 필리핀 지점 32.6 ms^{-1} 로 추정되었지만, 이는 각 지점의 39년간 연 최대풍속 34.2 ms^{-1} , 41.6 ms^{-1} , 63.9 ms^{-1} 보다 낮았다. 반면, 합성 바람장을 이용하였을 때 각 지점의 39년 빈도 극치풍속은 한반도 지점 35.9 ms^{-1} , 일본 지점 39.9 ms^{-1} , 필리핀 지점 66 ms^{-1} 로 추정되어 그 지점의 39년간 최대풍속과 유사한 값을 보였다. 이러한 결과는 합성 바람장을 이용하였을 때 극치분석의 오차가 크게 개선되었음을 간접적으로 나타낸다. 또한 재분석 자료를 이용하여 산출한 북서태평양 각 지점의 100년 빈도의 풍속이 39년간 최대풍속보다 낮게 나타나는 문제점이 합성 바람장을 이용하였을 때 개선된 것을 확인할 수 있었다. 이는 합성 바람장을 이용함으로써 구조물 설계에 일반적으로 사용되는 100년 빈도 풍속의 보다 정확도 높은 자료를 제공할 수 있음을 나타낸다.

그동안 해상에서 장기간 해상풍 관측자료를 확보하기 어려워 관측자료 대신 단기 관측자료나 모의 태풍 바람장을 이용해 왔다. 그러나 단기 관측자료는 기간이 짧고, 장기간의 재분석 자료는 태풍의 최대풍속을 과소 모의 하는 경향이 있고, 모의 태풍 바람장은 태풍 바람만을 추정하기 때문에 극치풍속을 정확하게 추정하는 데에는 한계가 있었다. 본 연구에서는 재분석 자료와 모의 태풍 바람장을 합성하여 정확도 높은 장기간의 해상풍 자료를 생산하였다. 이 자료는 향후 파랑 및 해일 등의 극치 값 추정 및 북서태평양에서의 해상 구조물의 안정적이고 경제적인 설계를 위한 기초자료로 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 기상청, 2011: 태풍백서, p. 262.
- 류상범, 박정수, 2012: 기상통계론, pp. 305-307.
- 함재희, 정하윤, 광경환, 2017: 중관기상관측자료를 이용한 한반도 강풍 분포 특성 분석. 한국기상학회 학술대회 논문집, pp. 589-590.
- An Y. and Pandey M.D., 2005: A comparison of methods of extreme wind speed estimation. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **93**, 535-545.
- Coles S., 2001: An introduction to statistical modeling of extreme values. London: Springer Series in Statistics.
- Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C. M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., HÓlm E. V., Isaksen L., Kállberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge Sanz B. M., Morcrette J. J., Park B. K., Peubey C., deRosnay P., Tavolato C., Thépaut J. N., Vitart F., 2011: The ERA Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 553-597.
- De Rooy W. and Kok K., 2004: A combined physical statistical approach for the downscaling of model wind speed. *Weather Forecast*, **19**(3), 485-495.
- Dullaart J. C. M., Muis S., Bloemendaal N., Aerts J. C. J. H., 2020: Advancing global storm surge modelling using the new ERA5 climate reanalysis. *Clim. Dyn.*, **54**, 1007-1021.
- Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C. A., Darmenov A., Bosilovich M. G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da

- Silva A. M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J. E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S. D., Sienkiewicz M., Zhao B., 2017: The Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2). *J. Clim.*, **30**(14), 5419–5454.
- Hatsushika H., Tsutsui J., Fiorino M., Onogi K., 2006: Impact of wind profile retrievals on the analysis of tropical cyclones in the JRA-25 reanalysis. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **84**(5), 891–905.
- Hawkes P. J., Gonzalez-Marco D., Sánchez-Arcilla A., Prinos P., 2008: Best practice for the estimation of extremes: A review. *J. Hydraul. Res.*, **46**, 324–332.
- Hersbach H., Bell W., Berrisford P., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., 2019: Global reanalysis: Goodbye ERA Interim, hello ERA5. *ECMWF Newsl.*, **159**, 17–24.
- Holland G. J., 1980: An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon. Weather Rev.*, **108**(8), 1212–1218.
- Hosking J. and Wallis J., 1987: Parameter and quantile estimation for the generalized Pareto distribution. *Technometrics*, **29**(3), 339–349.
- Jeong, J.-Y., Shim J.-S., Lee D.-K., Min I.-K., Kwon J.-I., 2008: Validation of QuikSCAT Wind with Resolution of 12.5 km in the Vicinity of Korean Peninsula. *Ocean Polar Res.*, **30**(1), 47–58.
- Jung B. S., Lee O. J., Kim K. M., Kim S. D., 2018: Non-stationary Frequency Analysis of Extreme Sea Level Using POT Approach. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **18**(7), 631–638.
- Katz R. W., Parlange M. B., Naveau P., 2002: Statistics of extremes in hydrology. *Adv Water Resour*, **25**, 1287–1304.
- Kim K. M., Kwon H. H., Kwon S. D., 2019: A Nonstationary Frequency Analysis of Extreme Wind Speed in Jeju using Bayesian Approach. *J.*

- Korean Soc. Civ. Eng.*, **39**(6), 667–673.
- Ko D. H., Jeong S. T., Cho H. Y., Kang K. S., 2014: Extreme Offshore Wind Estimation using Typhoon Simulation. *J. Korean Soc. Coast Ocean Eng.*, **26**(1), 16–24.
- Kobayashi S., Ota Y., Harada Y., Ebita A., Moriya M., Onoda H., Onogi K., Kamahori H., Kobayashi C., Endo H., Miyaoka K., Takahashi K., 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **93**, 5–48.
- Kwon S.-D. and Lee J.-H., 2008: Estimation of extreme wind speeds in southern and western coasts by typhoon simulation. *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, **28**(4A), 431–438.
- Kwon S.-D. and Lee S. L., 2009: Estimation of design wind velocity based on short term measurements. *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, **29**(3A), 209–216.
- Lang M., Ouarda T., Bobée B., 1999: Towards operational guidelines for over-threshold modeling. *J. Hydrol.*, **225**(3), 103–117.
- Lee B. H., Kim H. G., Ha Y. C., 2011: An Estimation of Wind Speeds for Return Period in Jeju Island for Investigating Wind Scale of Wind Turbines. *J. Wind Eng. Inst. Korea*, **15**(2), 37–44.
- Lee B.-H., Ahn D.-J., Kim H.-G., Ha Y.-C., 2012: An estimation of the extreme wind speed using the Korea wind map. *Renew. Energ.*, **42**, 4–10.
- Lee S.-L. and Kim S.-W., 2013: Estimation of Basic Wind Speed at Bridge Construction Site Based on Short-term Measurements. *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, **33**(4), 1271–1279.
- Lee S. S. and Kim G. Y., 2016: Estimation of Extreme Wind Speeds in Korean Peninsula using Typhoon Monte Carlo Simulation. *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, **29**(2), 141–148.
- Li F., Bicknell C., Lowry R., Li Y., 2012: A comparison of extreme wave analysis methods with 1994–2010 offshore Perth dataset. *Coast. Eng.*, **69**,

1-11.

- Liu Q., Marchok T., Pan H.-L., Bender M., Lord S., 2000: Improvements in hurricane initialization and forecasting at NCEP with global and regional (GFDL) models. NOAA Tech. Proc. Bull., 472, 7 p.
- Manning D. M. and Hart R. E., 2007: Evolution of North Atlantic ERA40 tropical cyclone representation. *Geophys. Res. Lett.*, **34**(5), L05705.
- Moon I.-J., Ginis I., Hara T., Tolman H. L., Wright C. W., Walsh E. J., 2003: Numerical Simulation of Sea Surface Directional Wave Spectra under Hurricane Wind Forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, **33**(8), 1680-1706.
- Oh H.-M. and Ha K.-J., 2005: Analysis of Marine Meteorological Characteristics at Jeodo Ocean Research Station from 2003 to 2004. *Atmosphere*, **41**(5), 671-680.
- Onogi K., Tsutsui J., Koide H., Sakamoto M., Kobayashi S., Hatsushika H., Matsumoto T., Yamazaki N., Kamahori H., Takahashi K., Kadokura S., Wada K., Kato K., Oyama R., Ose T., Mannoji N., Taira R., 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **85**(3), 369-432.
- Ott S., 2006: Extreme Winds in the Western North Pacific. Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- Schenkel B. A. and Hart R. E., 2012: An examination of tropical cyclone position, intensity, and intensity life cycle within atmospheric reanalysis datasets. *J. Clim.*, **25**(10), 3453-3475.
- Schloemer R. W., 1954: Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okeechobee, Florida. Hydromet Rep 31.
- Shepard D., 1968: A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data. paper presented at 23rd National Conference, Assoc for Comput Mach, New York.
- Silva A. T., Portela M. M., Naghettini M., 2014: On peaks-over-threshold modeling of floods with zero-inflated poisson arrivals under stationarity and nonstationarity. *Stoch Environ Res Risk Assess*, **28**(6), 1587-1599.

Stull R. B., 1988: An introduction to boundary layer meteorology. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic.

Thépaut J., Courtier P., Belaud G., Lemaître G., 1996: Dynamical structure functions in a four-dimensional variational assimilation: A case study. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **122**, 535 - 561.