

Article

모조 태풍 합성 재분석 바람장을 이용한 북서태평양 극치 해상풍 추정

김혜인^{1,2} · 문일주^{1,2*}

¹제주대학교 태풍연구센터
(63243) 제주특별자치도 제주시 제주대학로 102
²제주대학교 해양기상학협동과정
(63243) 제주특별자치도 제주시 제주대학로 102

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

Hye-In Kim^{1,2} and Il-Ju Moon^{1,2*}

¹*Typhoon Research Center, Jeju National University, Jeju 63243, Korea*
²*Graduate School of Interdisciplinary Program in Marine Meteorology, Jeju National University, Jeju 63243, Korea*

Abstract : In this study, extreme wind speeds in the Western North Pacific (WNP) were estimated using reanalysis wind fields synthesized with an empirical typhoon vortex model. Reanalysis wind data used is the Fifth-generation European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) reanalysis (ERA5) data, which was deemed to be the most suitable for extreme value analysis in this study. The empirical typhoon vortex model used has the advantage of being able to realistically reproduce the asymmetric winds of a typhoon by using the gale/storm-forced wind radii information in the 4 quadrants of a typhoon. Using a total of 39 years of the synthesized reanalysis wind fields in the WNP, extreme value analysis is applied to 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 tendency to underestimate the extreme wind speeds compared to using only reanalysis wind data. Considering the difficulty of obtaining long-term observational wind data at sea, the result of the synthesized wind field and extreme value analysis 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

1. 서 론

풍속 극치 값은 설계, 건설, 공학적인 측면에서 기본 자료로 사용된다. 극치 값을 이용하여 정확한 설계풍속을 산정하는 것은 해상 구조물의 안전성 확보 문제뿐 아니라

공사비용과 관련된 경제성에도 영향을 미친다(Kwon and Lee 2009). 즉, 정확한 극치풍속의 추정은 해상 구조물의 과대 설계에 따른 막대한 비용 지출과 과소 설계에 따른 강풍으로 인한 피해를 예방할 수 있다.

극치풍속을 추정하기 위하여 다양한 방법의 연구들이 수행되어 왔다. Lee et al. (2011)과 Lee et al. (2012)은 수치바람지도 자료를 이용하여 풍력발전단지의 극치풍속을

*Corresponding author. E-mail: ijmoon@jejunu.ac.kr

추정하였고, Kwon and Lee (2009)와 Lee and Kim (2013)은 MCP (Measure-Correlate-Predict) 방법을 적용하여 관측탑 자료로부터 극치풍속을 추정하였다. 이러한 연구들은 대부분 5년 이하의 단기 관측자료를 사용하였다. 이 연구들에서 사용된 MCP 방법은 단기 풍속 자료와 인근 육상의 장기 풍속 자료의 관계성을 이용하여 장기 풍속을 추정하는 기법이다. 그러나 이 방법은 두 지점 사이의 거리가 멀거나, 태풍으로 인한 육상 자료의 결측 시 태풍 특성을 반영하기 어렵다(Ko et al. 2014).

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 기법 등의 방법을 이용하여 장기 풍속 자료를 산출하여 극치풍속을 추정하는 연구가 진행되었다. Ott (2006)는 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 서남해안의 극치풍속과 해안가 지역의 극치풍속을 각각 추정하기 위하여, 태풍 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 사용하였다. 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 연최대치 시계열(Annual Maximum Series, AMS) 방법과 POT (Peak-Over-Threshold) 방법이 사용된다(An and Pandey 2005; Kwon and Lee 2009). 이 두 가지 방법은 극치 자료에 대한 접근 방식과 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 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 결정하여 그 임계값 이상의 자료들을 빈도해석에 이용한다(Li et al. 2012). 이러한 방법은 극치분포에서 우측 꼬리 부분에 해당되는

자료를 더 추가시킴으로써 극치분석의 정확도를 높일 수 있다(Kim et al. 2019). 따라서 POT 방법을 기반으로 하는 GPD 모형이 AMS 방법을 기반으로 하는 GEVD 모형보다 더 정확한 통계적 추론이 가능하다(류와 박 2012).

본 연구에서는 북서태평양에서 태풍 시기뿐 아니라 비태풍 시기의 강한 바람도 현실적으로 모의할 수 있는 장기간(30년 이상)의 해상풍 자료를 생산하고, 이를 이용하여 재현빈도별 극치풍속을 추정하는 것을 목표로 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 모조 태풍 바람장 모델을 재분석 바람장에 합성하였다. 사용된 모조 태풍 바람장 모델은, 태풍의 이동 속도를 고려하는 것 외에는 태풍의 비대칭적 특성을 고려할 수 없는 일반적인 경험적 모조 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.

제 2장에서는 본 연구에 사용된 재분석 바람장, 경험적 모조 태풍 바람장 모델, 관측자료 및 오차추정 방법, 그리고 극치분석 방법에 대해 설명한다. 제 3장에서는 한반도 근해와 북서태평양에 대해 재분석 바람장의 정확도 평가 결과를 제시하고, 제 4장에서는 합성 바람장에 대한 설명과 이를 이용하여 북서태평양의 극치풍속을 추정한 결과를 제시한다. 제 5장에서는 요약 및 결론을 기술하였다.

2. 자료 및 방법

재분석 바람장

본 연구에서 사용된 바람장 자료는 미국의 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)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, 유럽의 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)에서 제공하는 ERA-Interim (Dee et al. 2011)과 ERA5 (5세대 ECMWF, Hersbach et al. 2019) 재분석장, 그리고 일본 기상청에서 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. 3차원 변분기법(3 Dimensional Variational, 3DVAR) GSI (Gridpoint Statistical Interpol-

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

ation) 자료동화 시스템을 사용하고, TC (Tropical Cyclone) 초기화 방법으로 볼텍스 재배치(Vortex relocation) 방식을 사용한다. Vortex relocation은 모델에서 예측된 vortex를 관측된 태풍 최적경로 위치로 재배치하거나, 지정된 공간 해상도에 초기 vortex가 누락되었거나 너무 약한 경우 인위의 vortex를 삽입하는 방법이다(Liu et al. 2000; Schenkel and Hart 2012). MERRA-2도 TC 초기화 방법으로 Vortex relocation을 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 3DVAR 보다 계산시간이 더 소요되지만 일반적으로 자료동화 효과가 더 잘 적용되는 것으로 알려져 있다(Thépaut et al. 1996). ERA-Interim의 경우, 특히 구름과 강수에 영향을 미치는 복사자료를 4DVAR을 통해 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 역학, 그리고 TC의 표현이 개선되었고, 자료동화 시스템에 훨씬 더 많은 수의 재가공된 위성 자료와 새로운 관측자료가 포함되어 있으며, 훨씬 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 바람 드롭존데(dropwindsonde)를 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 GFS이다. 공간 해상도는 JRA-55가 $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ 로 5개의 자료 중 가장 낮고, ERA5가 가장 높은 해상도를 제공한다.

경험적 모조 태풍 바람장 모델

본 연구에서는 태풍의 현실적인 바람장을 고려하기 위하여, 경험적 모조 태풍 바람장 모델을 사용하였다. 일반적으로 사용되는 경험적 모조 태풍 바람장 모델은 Holland 모델과 Rankin vortex (Schloemer 1954) 모델 등이 있다. 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). 먼저, 네 방향(북동, 남동, 북서, 남서)에 대한 Radial wind profile은 Moon et al. (2003)이 제시한 아래의 식을 이용하여 산출하였다.

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

$$= \frac{r V_{\max}}{R_{\max}}, \quad r < R_{\max}$$
(1)

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. 태풍 정보는 미군합동경보센터 (Joint Typhoon Warning Center, JTWC)에서 제공하는 6시간 간격의 태풍 최적경로자료를 사용하였고, 이를 30분 간격으로 내삽한 후에, 위 식의 입력 자료로 사용하였다. 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 풍속이 지수 함수적으로 감소한다(Fig. 1).

본 연구에서 사용한 경험적 모조 태풍 바람장 모델은

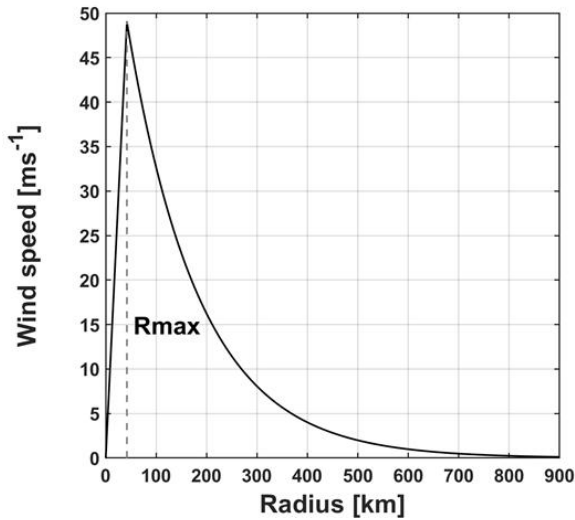


Fig. 1. Example of radial wind speed profile used in empirical typhoon vortex model. Rmax means radius of maximum wind speed

사분면에 대한 강풍 정보를 사용하였기 때문에 기존 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.

관측자료 및 오차추정 방법

재분석 자료의 바람 정확도 평가 및 경험적 모조 태풍 모델 바람장 검증에 위해 사용된 관측자료는 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA) 해양기상부이와 JTWC 태풍 최적경로자료이다.

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

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

$$U_{10} = U_H \frac{\ln(10/Z_0)}{H/Z_0} \quad (2)$$

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

KMA 부이 자료는 지점 자료이고 재분석 자료 및 모조 태풍 바람장은 격자 자료이므로 아래의 식과 같은 역거리가중법(Inverse Distance Weighting, IDW; Shepard 1968)을 사용하여 각 격자에 해당하는 부이의 풍속값을 추출한 후 비교 및 검증을 수행하였다. 역거리가중법은 공간 보간법 중 하나로, 주변의 가까운 점의 거리에 반비례하게 가중치를 두어 원하는 지점의 값을 계산하는 방법이다.

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad W_i = \frac{1}{d_i^2} \quad (3)$$

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

JTWC 자료는 재분석 자료의 태풍 시기 최대풍속 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. KMA는 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 925 hPa 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 200 km 반경 내의 최대풍속을 산출한 후, JTWC 최대풍속과 비교하는 방법을 사용하였다.

재분석 자료의 바람 정확도 평가 및 경험적 모조 태풍 바람장 모델의 검증은 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE), 그리고 상관계수(Correlation, R)를 이용하였다.

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

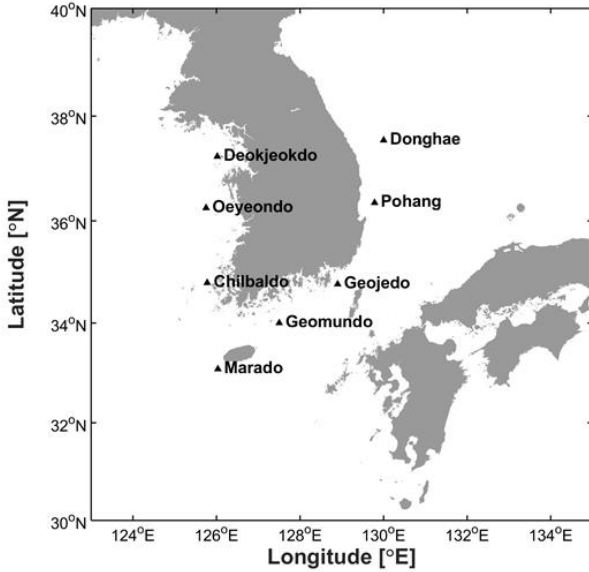


Fig. 2. Locations of KMA buoys

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (W_i - O_i)^2} \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (W_i - \bar{W})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (W_i - \bar{W})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (5)$$

여기서 N 은 관측자료의 개수, W 은 재분석 자료 및 경험적 모조 태풍 바람장 모델의 바람 자료, 그리고 O 는 관측 자료를 의미한다.

극치분석 방법

극치분석은 POT 접근 방식을 기반으로 하는 GPD 모형을 사용하였다. GPD의 누가확률분포함수 $F(x)$ 는 아래의

식과 같이 정의된다(Hosking and Wallis 1987).

$$F(x) = 1 - 1 \left(k \frac{x - x_o}{\sigma} \right)^{1/k} \quad (6)$$

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. 임계값 x_o 를 설정하는 방법은 가장 많이 이용되는 방법 중 하나인 평균 초과함수(Mean Residual Life, MRL) plot 방법을 이용하였다(Coles 2001). 평균 초과함수의 식은 아래의 식과 같다.

$$e(x_o) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_o)}{n} \quad (7)$$

여기서 n 은 임계값을 초과하는 관측치의 수이고, x_i 는 임계값을 초과하는 관측값들이다. MRL plot은 임계값을 변화시켜 가면서 2차원 좌표를 선으로 연결하여 그린 것이다. 이 방법의 장점은 임계값을 정할 때 계산이 간단하고 시간이 적게 걸린다는 것이다. 그러나 사용자가 눈으로 직접 확인하여 결정해야 하기 때문에 임계값을 결정할 때 주관적인 판단을 하게 되고, 자동화를 할 수 없다는 단점이 있다(류와 박 2012).

본 연구에서는 보다 객관적인 판단을 위해 임계값은, Jung et al. (2018) 방법에 따라, 연 최대 극치풍속 자료를 GEV 모델에 적용하여 도출한 재현기간별 극치풍속 값들과 가장 유사하게 재현되는 값으로 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 임계값

으로 설정하였다. 두 모델 사이의 차이 $Diff$ 는 아래의 식으로 계산되었다.

$$Diff = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_i \left(1 - \frac{x \frac{GPD}{T_i}}{x \frac{GEV}{T_i}} \right)^2} \quad (8)$$

여기서 $x \frac{GPD}{T_i}$ 는 GPD 모델을 적용하여 추정된 재현기간 T_i -year 극치풍속이며, $x \frac{GEV}{T_i}$ 는 GEV 모델을 적용하여 추정된 재현기간 T_i -year 극치풍속이다(Jung et al. 2018). 재현기간 T_i 는 10년부터 100년까지의 재현기간이 적용되었다. 설정된 임계값은 앞서 기술한 MRL plot을 이용하여 타당성을 판단하였다.

극치분석에 사용되는 자료들의 독립성을 보장하기 위해서는 임계값 x_o 를 산출한 후, x_o 를 초과하는 값들이 연속적으로 선택되지 않도록 설정하여야 한다. 본 연구에서는 풍속 시계열 자료로부터 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.

$$x_T = x_o + \frac{\sigma}{k} (1 - (\lambda T)^{-k}) \quad (9)$$

여기서 x_T 는 재현기간 T -year에 대응하는 극치풍속이며, λ

는 연도별 임계값을 초과하는 풍속의 기대값이다. 본 연구에서는 재현기간 T -year을 10년부터 100년까지로 설정하였다.

3. 재분석 바람장 정확도 평가

극치분석에 적합한 재분석 자료를 선별하기 위하여 5개의 재분석 바람장의 정확도를 평가하였다. 먼저 한반도 근해에서의 2010년부터 2018년까지의 태풍 시기 및 전 기간 동안의 재분석 자료의 풍속을 8개의 KMA 부이 관측 자료와 비교하였다(Tables 3 and 4).

태풍 시기에 대한 분석은 기상청에서 정의한 한반도 영향 태풍 시기로 한정하였으며(기상청 2011), 태풍이 한반도 근해의 부이들을 지나갈 때, 각 부이가 최대풍속을 기

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	RMSE				
	GFS	MERRA2	ERA1	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		ERA1		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

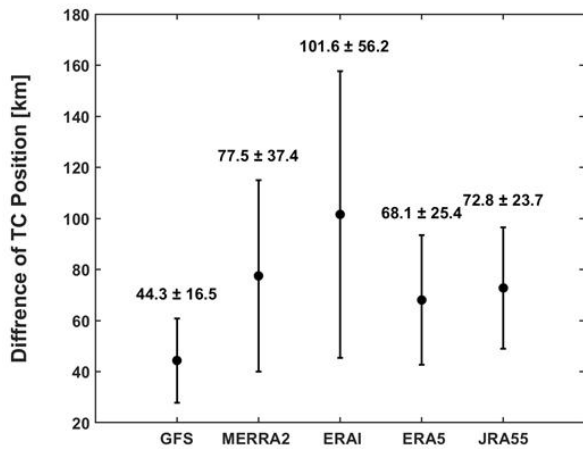


Fig. 3. Mean absolute difference of typhoon position in the western North Pacific between JTWC best track data and reanalysis data from 2010 to 2018. The error bar represents the standard deviation

록한 시점을 기준으로 전후 1일 기간에 대하여 풍속을 비교하는 방법을 사용하였다. 비교 결과, 태풍 시기 동안 전체적으로 ERA5가 가장 낮은 평균 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 가장 낮은 평균 RMSE (1.45 ms^{-1}) 및 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 부이 관측자료와 비교할 때, 이러한 해상도 차이가 우리나라 연안과 같이 복잡한 지형을 가진 곳에서는 오차를 줄이는데

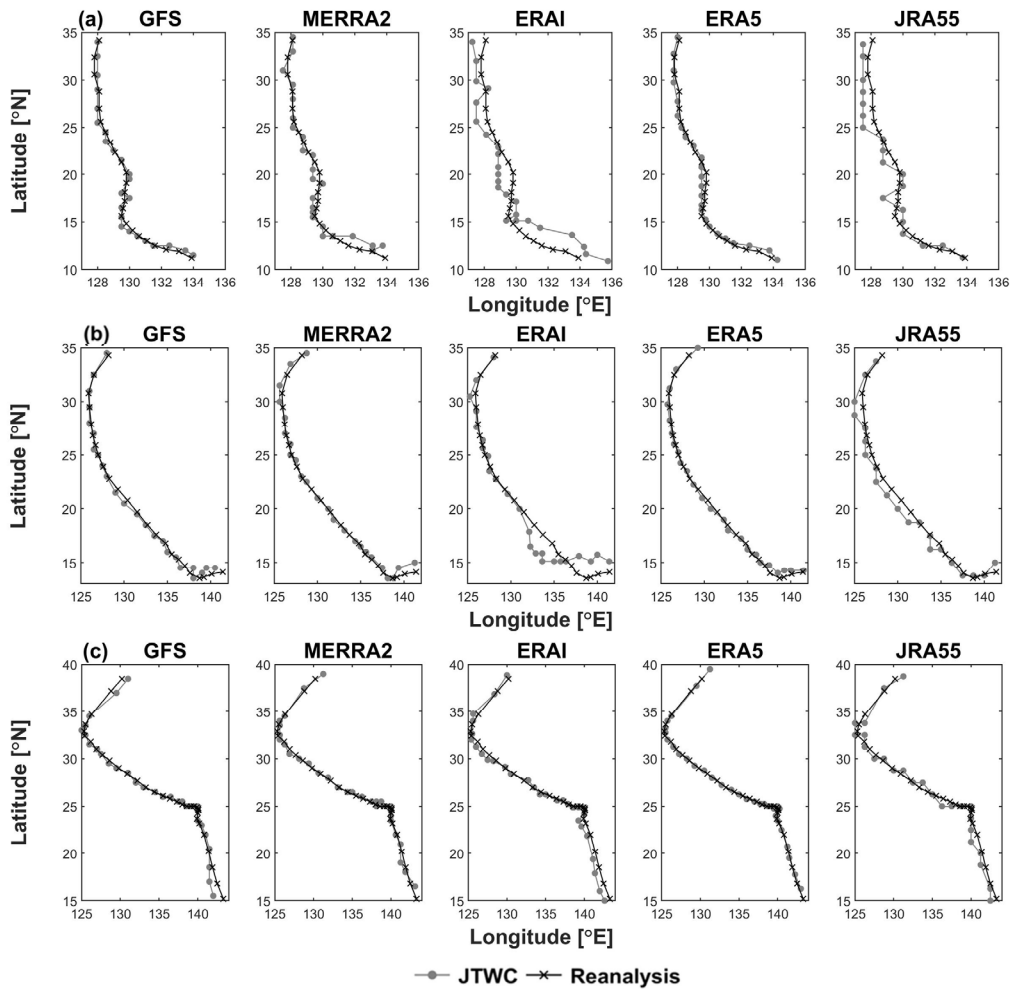


Fig. 4. Comparison of typhoon track between JTWC best track data and 5 reanalysis data sets for typhoons (a) SANBA, (b) CHABA, (c) SOULIK. The gray and black lines represent JTWC best track and reanalysis data, respectively

기여했을 것으로 사료된다.

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. 3). ERA5는 GFS 다음으로 작은 오차를 나타냈는데(68.1 km), 이는 vortex relocation 방법이 적용된 MERRA-2와 TC wind profile retrieval 방법이 적용된 JRA-55보다 더 작은 위치 오차를 보여준다. 반면, ERA-Interim은 가장 큰 위치 오차를 보였다(101.6 km). Fig. 4는 각각 2012년, 2016년, 2018년에 한반도에 영향을 미친 태풍 산바, 차바, 솔릭의 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.

재분석 자료의 태풍 강도 모의 성능을 비교한 결과, GFS를 제외한 대부분의 재분석 자료가 태풍의 최대풍속을 크게 과소 모의하는 것으로 나타났는데, 특히 약 40 m s^{-1} 이상의 강한 풍속일 때 큰 차이가 나타났다(Fig. 5). 5개의 자료 중 GFS가 JTWC 자료와의 가장 높은 상관도(r

= 0.87)를 보였고, ERA5가 0.68, MERRA-2가 0.57의 상관도를 보였다. ERA5가 같은 기관에서 산출된 ERA-Interim보다 태풍의 위치 및 강도 모의 성능이 개선된 것은 더 높아진 시공간 해상도 외에도 ASCAT 풍속 자료가 자료동화에 포함됐기 때문으로 알려져 있다(Dullaart et al. 2020). GFS가 북서태평양에서의 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. 참고로 본 연구에서 태풍 중심 부근의 바람장은 경험적 모조 태풍 바람장 모델 자료로 대체되기 때문에 GFS 자료가 태풍 모의 성능이 ERA5보다 더 우수했지만 그 효과는 합성 후 사라지게 된다.

4. 합성 바람장을 이용한 극치분석

재분석 자료와 모조 태풍 바람장 합성

재분석 자료가 태풍의 최대풍속을 과소 모의하는 문제점과 모조 태풍 바람장이 태풍 외곽바람을 현실적으로 모의하지 못하는 문제점을 해결하기 위하여, 본 연구에서는 경험적 모조 태풍 바람장 모델과 재분석 바람장을 합성하

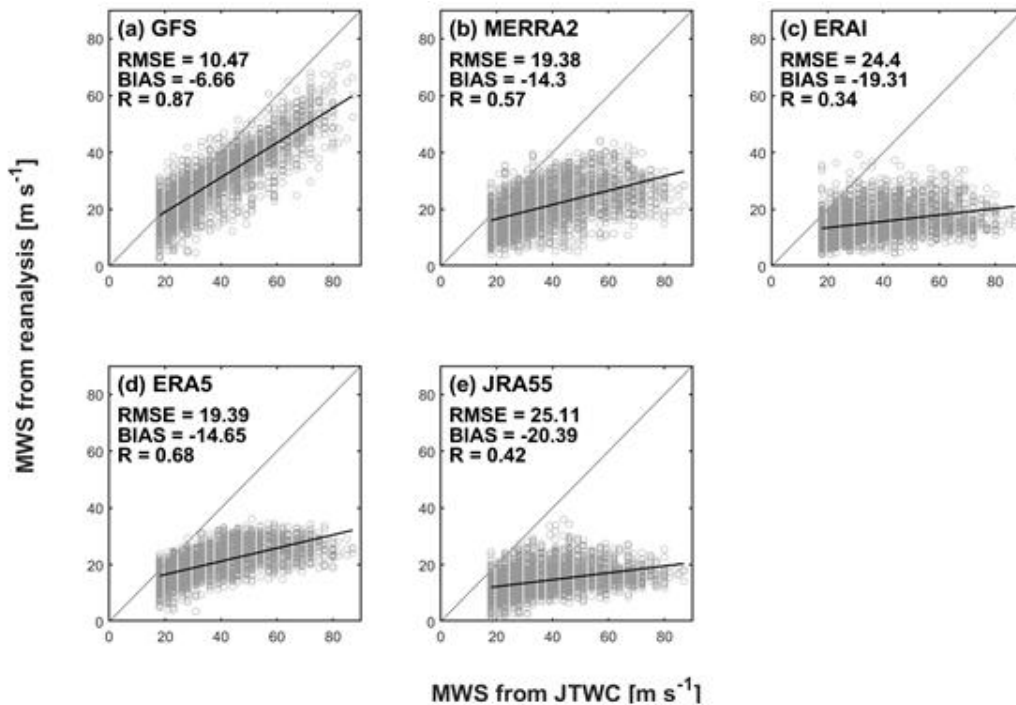


Fig. 5. Comparison of maximum wind speed (MWS) estimated from 5 reanalysis data sets with JTWC best track during the passage of typhoon in the western North Pacific from 2010 to 2018

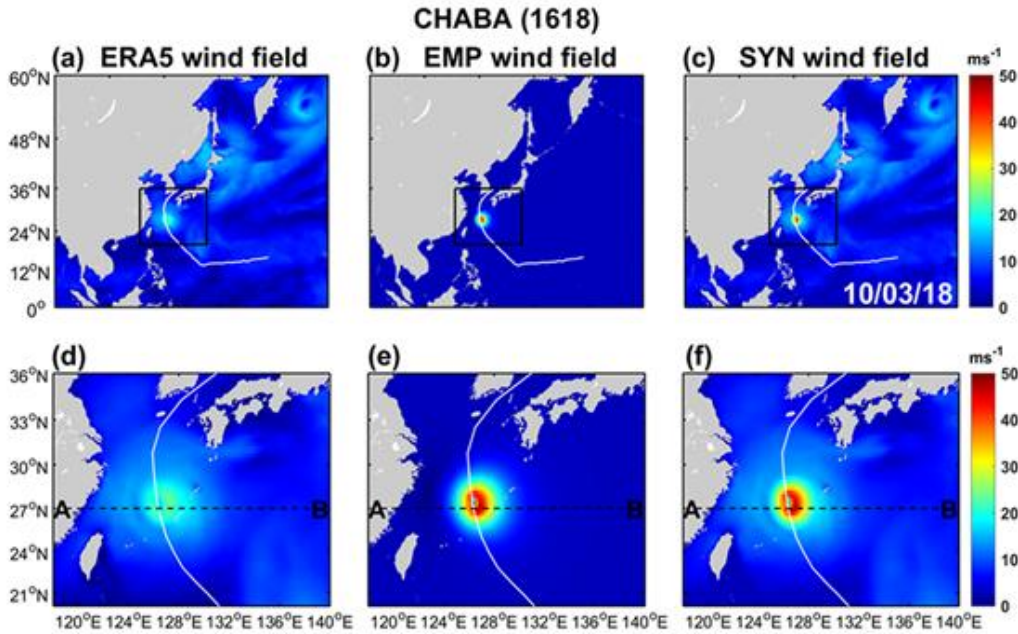


Fig. 6. Comparison of wind fields among ERA5 reanalysis (a), (d), empirical (EMP) typhoon vortex model (b), (e), synthesized (SYN) wind (c), (f) in the Western North Pacific during the passage of Typhoon CHABA (3 October 2016). (d)–(f) are enlarged views of the box in (a)–(c). The white line represents the track of Typhoon CHABA. A–B dashed line represents the cross-section position for Fig. 7

여 극치분석에 사용하였다. 바람장 합성은 ERA5 바람장의 풍속과 모조 태풍 바람장의 풍속을 각 격자마다 비교한 뒤, 값이 더 큰 자료의 격자 값을 선택하는 방법으로 이루어졌다. 예시로, Fig. 6은 2016년에 발생한 태풍 차바의 10월 3일 18시 시점의 ERA5 바람장, 모조 태풍 바람장, 그리고 합성 바람장을 도시한 것이다. Fig. 6a and d에서 ERA5 바람장이 태풍 중심의 최대풍속을 과소 모의하는 문제점과 Fig. 6b and e에서 모조 태풍 바람장이 태풍 주변의 바람을 추정하지 못하는 문제점이 나타난다. 태풍 바람장의 단면을 도시한 Fig. 7에서도 이러한 문제점을 확인할 수 있다. 반면, 두 자료를 합성한 바람장은 각 자료의 문제점들이 보완된 것을 확인할 수 있다(Figs. 6c, f and 7).

태풍 차바 시기에 KMA 부이와 비교한 결과에서도 모조 태풍 바람장이 부이가 최대풍속을 기록하는 시점 즉, 태풍 중심이 부이를 지나갈 때 관측값과 매우 비슷하게 나타났다(Fig. 8). 그러나 Fig. 8c, d, g와 같이 태풍 중심이 부이를 지나가기 전후나 Fig. 8a, e, h와 같이 태풍이 부이로부터 멀리 떨어져 이동하는 경우, 풍속이 관측값과 큰 오차를 보였다. 이것은 경험적 모조 태풍 바람장 모델이 태풍 바람만 산출하고 태풍 주변의 바람장은 산출하지 못하기 때문이다. 반면, 본 연구에서 만든 합성 바람장은 태풍 중심이 통과할 때 강한 바람뿐 아니라 태풍 중심이 부이를 지나가기 전후 또는 태풍 경로로부터 멀리 떨어진

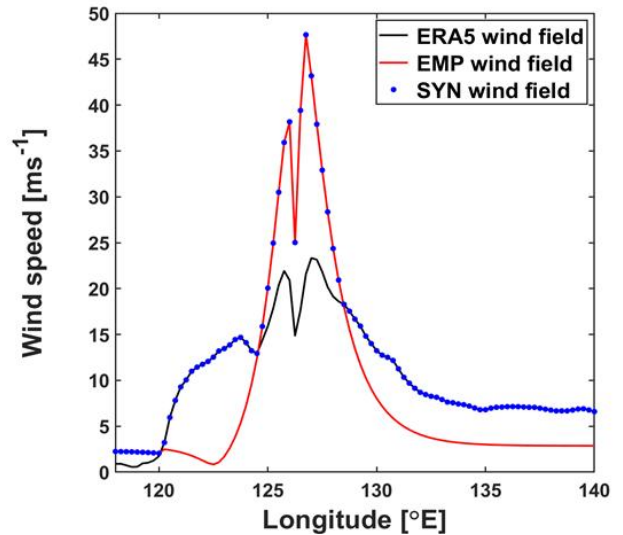


Fig. 7. Cross-sections of ERA5 reanalysis wind (black line), empirical typhoon vortex wind (EMP, red line) and synthesized wind (SYN, blue dot) at the center of the Typhoon CHABA (see A–B dashed line in Fig. 6) on 3 October 2016

부이에서도 관측값과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 1980년부터 2018년까지 총 39년의 ERA5 재분석 자료와 동기간 북서태평양에서 발생한 태풍에 대

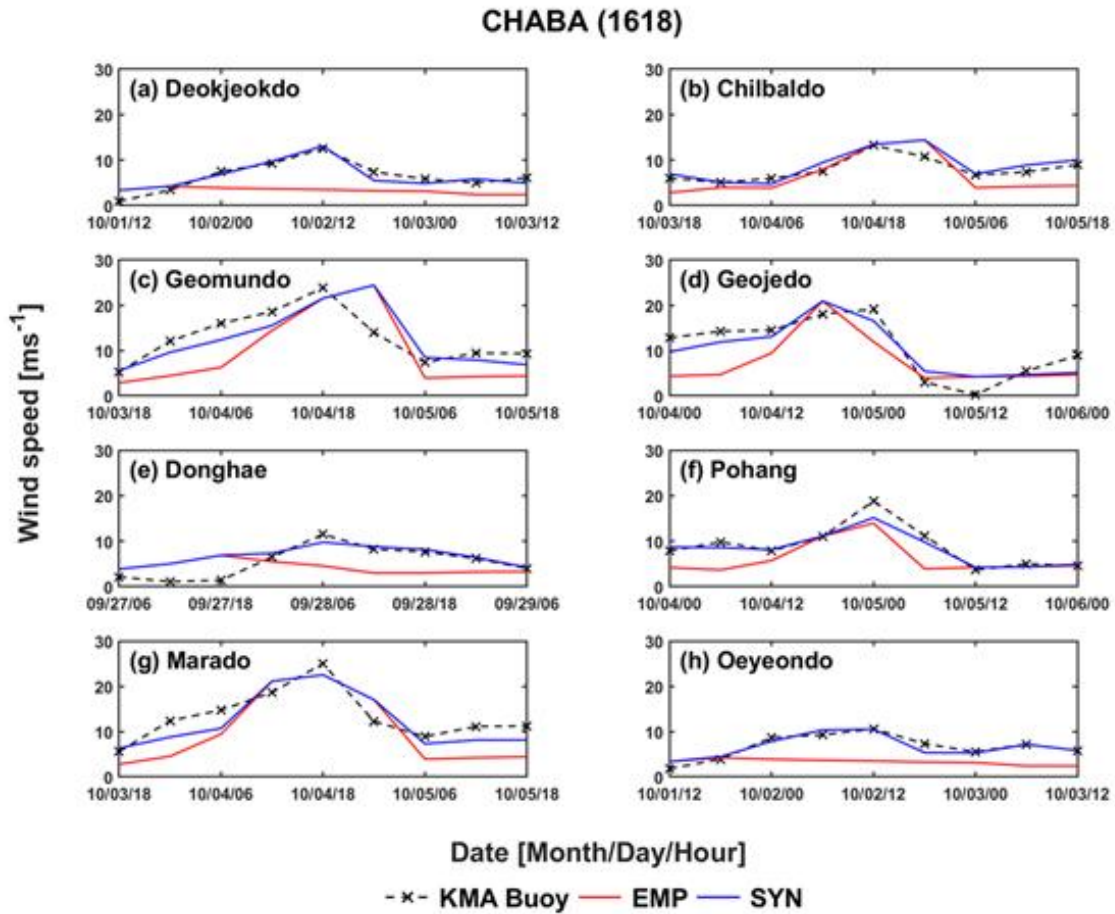


Fig. 8. Comparison of wind speed (6-h intervals) among KMA buoy, empirical typhoon vortex model (EMP), synthesized wind data (SYN) during the passage of Typhoon KOMPASU at (a) Deokjeokdo, (b) Chilbaldo, (c) Geomundo, (d) Geojedo, (e) Pohang, (f) Marado buoy. The black, red, blue lines represent KMA buoy, empirical wind, and synthesized wind, respectively

해 산출한 모조 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.

북서태평양의 극치풍속 추정

앞서 기술한 자료와 방법을 이용하여 북서태평양의 재현기간별 풍속을 추정하였다. Fig. 9는 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 재현기간 풍속과 합성 바람장을 이용하여 추정한 재현기간 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. 9b). 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. 9d and 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. 일

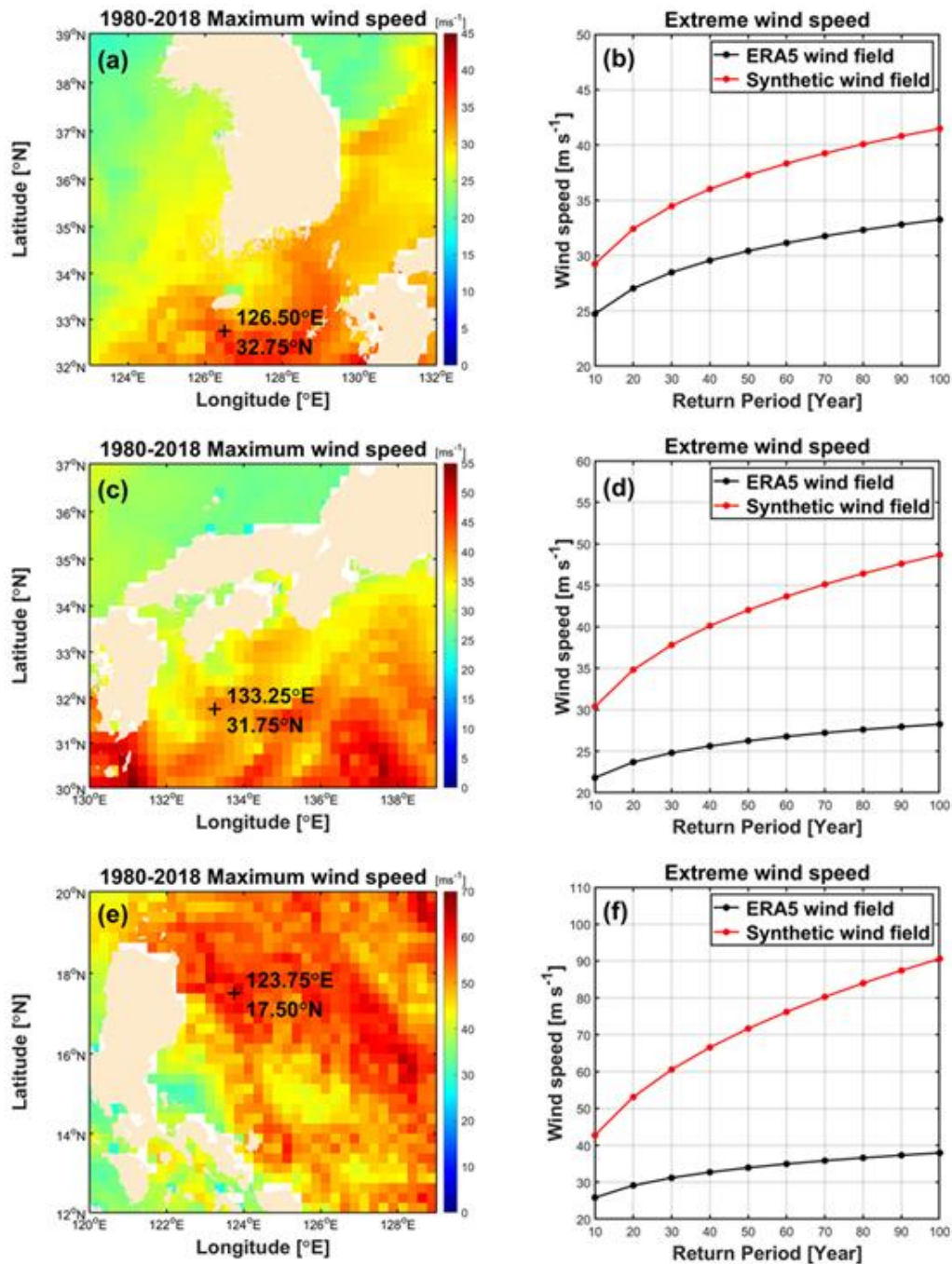


Fig. 9. Spatial distribution of maximum wind speed at each grid calculated using synthesized wind data (1980–2018) around (a) the Korean Peninsula, (c) Japan, and (e) the Philippines, and their extreme wind speeds for various return periods at marked (+) points (b), (d), (f). Black line represents estimates using ERA5 wind field and red line represents estimates using synthetic wind field

반적으로 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 빈도

의 풍속은 이러한 문제점을 개선함으로써 구조물 설계를 위한 보다 정확도 높은 기초 자료를 제공할 수 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 재분석 자료와 모조 태풍을 합성한 바람장을 이용하여 북서태평양에서 재현기간별 극치풍속을 추정하였다. 먼저, 극치분석에 적합한 재분석 자료를 선별하기 위해 KMA 부이 자료와 JTWC 태풍 최적경로자료를 이용하여 다양한 재분석 바람장들의 정확도를 평가하였다. 한반도 근해에서 KMA 부이와 비교한 결과, ERA5가 태풍 시기 동안 관측값과의 RMSE가 가장 작았고, 전 기간에 대해서도 관측값과의 상관도가 가장 높게 나타났다. 북서태평양에서 발생한 태풍에 대한 재분석 바람장의 평가에서는 GFS가 JTWC 자료의 태풍 중심 위치와의 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 과소모의 하는 것으로 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, 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 모조 태풍 바람장 모델을 재분석 바람장과 합성하였다. 본 연구에서 사용된 모조 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 고려되었다. 이렇게 구성된 합성 바람장을 KMA 부이와 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 모조 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 극치분석 결과를 분석한 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 나타낸다. 또한 재분석 자료에서 산출된 북서태평양 각 지점의 100년 빈도의 풍속이 39년간 최대풍속보다 낮게 나타나는 문제점도 합성 바람장을 이용함으로써 개선되었다.

그동안 해상에서 장기간 해상풍 관측자료를 확보하기 어려워 관측자료 대신 재분석 바람장이나 모조 태풍 바람장을 이용해 왔다. 그러나 재분석 자료는 태풍의 최대풍속을 과소 모의 하는 경향이 있고, 모조 태풍 바람장은 태풍 바람만을 추정하기 때문에 극치풍속을 정확하게 추정하는 데에는 한계가 있었다. 본 연구에서는 재분석 자료와 모조 태풍 바람장을 합성하여 정확도 높은 장기간의 해상풍 자료를 생산하였다. 이 자료는 향후 북서태평양에서 해상 구조물 설계, 파랑 및 해일 등의 극치 값 추정을 위한 기초자료로 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(종합해양과학기술 구축 및 활용연구).

참고문헌

- 기상청(2011) 태풍백서. 국가태풍센터, 제주, 262 p
- 류상범, 박정수 (2012) 기상통계론. 전남대학교출판부, 광주, 348 p
- 함재희, 정하윤, 광경환 (2017) 종관기상관측자료를 이용한 한반도 강풍 분포 특성 분석. In: 한국기상학회 가을학술대회 초록집, Bexco, 부산, 2017년 10월 25-27일, pp 589-590
- An Y, Pandey MD (2005) A comparison of methods of extreme wind speed estimation. *J Wind Eng Ind Aerod* **93**(7):535-545
- Coles S (2001) An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer, London, 209 p
- De Rooy W, Kok K (2004) A combined physical statistical approach for the downscaling of model wind speed. *Weather Forecast* **19**(3):485-495
- Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda MA, Balsamo G, Bauer P, Bechtold P, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M,

- Geer AJ, Haimberger L, Healy SB, Hersbach H, Hólm EV, Isaksen L, Kållberg P, Köhler M, Matricardi M, McNally AP, Monge-Sanz BM, 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 Roy Meteor Soc* **137**:553–597
- Dullaart JCM, Muis S, Bloemendaal N, Aerts JCJH (2020) Advancing global storm surge modelling using the new ERA5 climate reanalysis. *Clim Dynam* **54**:1007–1021
- Gelaro R, McCarty W, Suárez MJ, Todling R, Molod A, Takacs L, Randles CA, Darmenov A, Bosilovich MG, Reichle R, Wargan K, Coy L, Cullather R, Draper C, Akella S, Buchard V, Conaty A, da Silva AM, Gu W, Kim G-K, Koster R, Lucchesi R, Merkova D, Nielsen JE, Partyka G, Pawson S, Putman W, Rienecker M, Schubert SD, Sienkiewicz M, Zhao B (2017) The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *J Climate* **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 Jpn* **84**(5):891–905
- Hawkes PJ, 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 GJ (1980) An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon Weather Rev* **108**(8):1212–1218
- Hosking J, 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 BS, Lee OJ, Kim KM, Kim SD (2018) Non-stationary frequency analysis of extreme sea level using POT approach. *J Korean Soc Hazard Mitig* **18**(7):631–638
- Katz RW, Parlange MB, Naveau P (2002) Statistics of extremes in hydrology. *Adv Water Resour* **25**:1287–1304
- Kim KM, Kwon HH, Kwon SD (2019) A Nonstationary frequency analysis of extreme wind speed in Jeju using Bayesian approach. *J Korean Soc Civ Eng* **39**(6):667–673
- Ko DH, Jeong ST, Cho HY, Kang KS (2014) Extreme offshore wind estimation using typhoon simulation. *J Korean Soc Coast Ocean Eng* **26**(1):16–24
- Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, Ebata 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 Jpn* **93**:5–48
- Kwon S-D, 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, Lee SL (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, 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 BH, Kim HG, Ha YC (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 S-L, 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 SS, Kim GY (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 Procedures Bull* 472, 7 p
- Manning DM, Hart RE (2007) Evolution of North Atlantic ERA40 tropical cyclone representation. *Geophys Res Lett* **34**(5):L05705. doi:10.1029/2006GL028266
- Moon I-J, Ginis I, Hara T, Tolman HL, Wright CW, Walsh EJ (2003) Numerical simulation of sea surface directional wave spectra under hurricane wind forcing. *J Phys Oceanogr* **33**(8):1680–1706
- Oh H-M, Ha K-J (2005) Analysis of marine meteorological characteristics at Ieodo ocean research station from 2003 to 2004. *J Atmos Sci* **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 Jpn* **85**(3):369–432
- Ott S (2006) Extreme winds in the Western North Pacific. Riso National Laboratory, Roskilde, 36 p
- Schenkel BA, Hart RE (2012) An examination of tropical cyclone position, intensity, and intensity life cycle within atmospheric reanalysis datasets. *J Climate* **25**(10):3453–3475
- Schloemer RW (1954) Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over lake Okeechobee, Florida. U.S. Department of Commerce, Washington DC, 49 p
- Shepard D (1968) A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: Proceedings of the 1968 ACM National Conference, New York, 27–29 Aug 1968, pp 517–524
- Silva AT, Portela MM, Naghettini M (2014) On peaks-over-threshold modeling of floods with zero-inflated poisson arrivals under stationarity and nonstationarity. *Stoch Env Res Risk A* **28**(6):1587–1599
- Stull RB (1988) An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic, Dordrecht, 670 p
- Thépaut J, Courtier P, Belaud G, Lemaître G (1996) Dynamical structure functions in a four-dimensional variational assimilation: a case study. *Q J Roy Meteor Soc* **122**:535–561

국문 참고자료의 영문표기

English translation / Romanization of references originally written in Korean

- Korea Meteorological Administration (2011) Typhoon white book. National Typhoon Center, jeju, 262 p
- Ryoo SB, Park JS (2012) Meteorological statistics. Chonnam National University Press, Gwangju, 348 p
- Hahm JH, Jeong HY, Kwak KH (2017) Analysis of the characteristics of strong wind distribution on the Korean Peninsula using Automated Synoptic Observing System data. In: Abstracts of the Korean Meteorological Society Fall Meeting, Bexco, Busan, 25–27 Oct 2017, pp 589–590

Author's Information

Hye-In Kim

M.S. Candidate, Jeju National University

I-Ju Moon

Professor, Jeju National University

Received Oct. 16, 2020

Revised Jan. 29, 2021

Accepted Feb. 1, 2021