

논문

한반도 영향 태풍에 적합한 최대풍속반경 Part I: 선행 경험공식 평가 Radius of Maximum Wind Speed Suitable for Typhoons Affecting the Korean Peninsula Part I: Evaluation of Prior Experiences Formula

나하나, 정우식*

인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터

Hana Na, Woo-Sik Jung*

Department of Atmospheric Environment Information Engineering/
Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University,
Gimhae 50834, Republic of Korea

접수일 2022년 1월 5일
수정일 2022년 1월 11일
채택일 2022년 1월 12일

Received 5 January 2022
Revised 11 January 2022
Accepted 12 January 2022

*Corresponding author
Tel : +82-(0)55-320-3932
E-mail : wsjung1@inje.ac.kr

Abstract The damage caused by typhoons mainly occurs within the Radius of Maximum Wind speed (RMW), which is the influence of maximum instantaneous wind speed, rather than the influence of continuous wind speed during the typhoon's impact period. RMW is a stronger windy area and is very important and useful information for preventing typhoons in advance. Therefore, it is imperative to predict reasonable and accurate RMWs. In this study, for typhoons affecting the Korean Peninsula, the strong wind radius data provided by the Korea Meteorological Administration (KMA) and by the foreign institutions, Joint Typhoon Warning Center (JTWC) and Regional Specialized Meteorological Center (RSMC), were compared. The actual strong wind radius data observed in the wind field during typhoons were analyzed. In addition, a study was conducted to compare and analyze the RMW empirical equation developed locally and abroad by applying it to a domestic typhoon. For typhoons affected by the Korean Peninsula, it was confirmed that the empirical equation of Hiroshi was more accurate with the RMW calculation formula, and through the results of this study, it is believed that more accurate and efficient typhoon prevention activities can be carried out.

Key words: Typhoon, Radius of maximum windspeed, Radius of strong wind, Empirical equation

1. 서론

2021년 8월, 기후변화에 관한 정부간 협의체 Inter-governmental Panel on Climate Change (IPCC)는 2013년에 발표된 5차 보고서 이후 8년 만에 기후변화에 대한 포괄적 분석과 인류의 행동 방침을 담은 6차 보고서를 발간하였다(IPCC, 2021). 기존에 발간되었던 1차~5차 보고서와는 달리 “열대 사이클론과 같은 극한 기상현상의 강도 증가에 대하여 신뢰수준은 높다”라는 문구를 기록하였다. 이처럼 최근으로 올수록, 전 세계적으로 열대 사이클론, 즉 태풍과 허리케인과

같은 극한 기상현상의 강도가 강해지면서, 그로 인한 인명 및 재산 피해가 급격히 증가하고 있다. 따라서, 태풍으로 인한 피해를 저감하기 위한 정확하고, 유용한 정보제공이 매우 중요해지고 있다.

태풍의 강도는 태풍으로 인한 피해를 예측하거나, 태풍의 구조를 설명하는 데 있어 매우 중요한 요소이며, 태풍으로 인해 발생하는 기상재해와 직접적인 관련이 있다. 태풍의 강도는 중심기압, 최대풍속, 최대풍속반경(Radius of Maximum Wind speed) 등으로 표현할 수 있으며, 실제 태풍의 예보에서 매우 중요하게 활용된다. RMW는 태풍 구조에 있어, 태풍의 중심으

로부터 최대풍속이 발생하는 지점까지의 방사 거리를 의미하며, 상대적으로 더욱 강한 바람이 나타나는 영역이다. 태풍 영향 시기 강풍이 발생하고, 실제 태풍에 의한 피해는 대부분 RMW 내에서 발생한다. 따라서, 태풍으로 인한 피해 저감이라는 방재적인 측면에서 매우 중요하고 유용한 정보이며, 태풍의 정확한 바람장 모사를 위해 활용되는 요소이기 때문에, 정확하고 합리적인 RMW 정보를 산출하여 활용하는 것은 매우 중요하다. 태풍에 대한 정보들을 제공하고 있는 기관은 대표적으로 한국의 기상청, 일본의 RSMC, 미국의 JTWC가 있다. JTWC에서는 35, 50, 65 kts에 대한 장·단반경 정보를 제공하고 있으며, RSMC에서는 30, 50 kts에 대한 장·단반경 정보를 제공하고 있다. KMA에서는 15 m/s에 해당하는 강풍반경 정보를 제공하였으며, 2020년 5월 이후에는 25 m/s에 해당하는 폭풍반경에 대한 정보를 추가로 제공하고 있다. 국외 대학들과 여러 기관에서는 강풍반경도 활용하지만, 실제 최대풍속이 발생할 수 있는 영역인 RMW를 활용하기 위하여, 경험공식을 산출하기 위한 연구가 다수 수행된 바 있으며(Hiroshi and Wenjie, 2016; Powell *et al.*, 2005; Willoughby and Rahn, 2004; FEMA, 2003; Vickery *et al.*, 2000; Anthes, 1982; Holland, 1980; Graham and Nunn, 1959), 실제 현업에서 활용하고 있다. 반면, 국외와 비교하면 국내에서는 수행된 연구의 수가 매우 적으며, 수행된 연구는 적외영상을 이용한 추정, 중심기압에만 의존된 경험공식 추정 등 부족함이 존재한다(KORDI, 2005; Kang *et al.*, 2002). 이러한 부족함으로 인해, 한반도 영향 태풍에 대한 바람장 모사와 그로 인한 피해를 산출하는 한국형 태풍사전방재 모델에서는 RMW 정보를 국내 경험공식이 아닌, 중위도 지역에 적합하다고 알려진 국외 경험공식인

Vickery *et al.* (2000)을 활용하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 한반도 영향 태풍을 대상으로 기상청에서 제공되고 있는 15 m/s 강풍반경과 국외 기관(JTWC, RSMC)에서 제공되는 35 kts, 30 kts 강풍반경을 비교 분석하고, 국외에서 선행되어 만들어진 RMW 경험공식을 한반도 영향 태풍에 적용하여, 국내 영향 태풍에 적용가능한 RMW 경험공식 산출을 위한 기초연구로서, 선행 경험공식을 한반도 영향 태풍에 적용하여, 평가하고자 하는 연구를 수행하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1 강풍반경과 RMW

2.1.1 강풍반경

강풍반경이란 태풍의 중심으로부터 기준 풍속 이상의 바람이 부는 반경을 의미한다. 서론에서 언급한 바와 같이 각 기관에서는 강풍반경 정보를 제공(표 1)하고 있다. 특히, KMA에서는 태풍 정보 서비스 개선에 따라 2020년 5월 15일 이후부터 강풍반경과 폭풍반경으로 분류하여 제공하고 있다.

모든 기관의 강풍반경 기준은 실제 태풍에 시기 피해가 발생하는 gust 개념의 풍속 기준이 아닌 지속풍속을 기준으로 선정되었다. KMA의 강풍영역 15 m/s 기준을 예시로 살펴보면 그림 1과 같다. 그림 1은 태풍 솔릭(1819)의 한반도 영향 기간 가운데 일부 시간대(2018/08/2300 UTC~08/2400 UTC)의 바람장과 강풍 영역을 나타내었다. 실제 태풍 솔릭의 영향 시기 한반도 내륙과 근해를 포함하여 전체적으로 강풍 영역 기준인 15 m/s 반경에 포함되는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 기상청에서 제공되는 강풍 영역 정보를 실

Table 1. KMA (m/s) and, JTWC, RSMC (kts) strong wind radius standards.

	KMA	RSMC	JTWC
Strong wind radius	15 m/s 25 m/s (2020 ver)	17.5 m/s (30 kts) 25.7 m/s (50 kts)	18 m/s (35 kts) 25.7 m/s (50 kts) 32.9 m/s (65 kts)

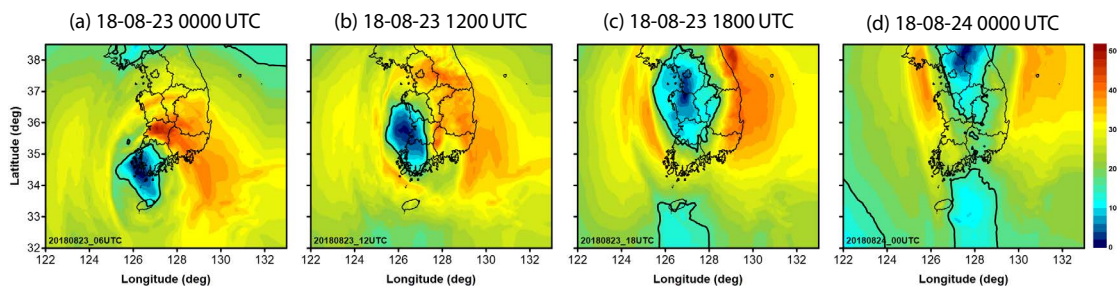


Fig. 1. Wind field and strong wind radius of typhoon soulik (1819) with contours of 0 to 40 m/s wind level, and a strong wind radius standard of 15 m/s expressed as a black bold line.

Table 2. Overseas empirical equation for calculating RMW the variables used and its descriptions.

Overseas empirical equation	
Graham and Nunn (1959)	$R_{\max} = 28.52 \tanh [0.0873(\Phi - 28)] + \frac{12.22}{\exp[(10103.3 - P_c)/33.86]} + 0.2V_f + 37.22$
Anthes (1982)	$R_{\max} = r \left(\frac{V_f}{V_{\max}} \right)^{1/x}$
Holland (1980)	$R_{\max} = A^{\frac{1}{B}}$
Vickery <i>et al.</i> (2000)	$\ln(R_{\max}) = 2.636 - 0.00005086 \Delta p^2 + 0.0394899\psi$
Hiroshi and Wenjie (2016)	$R_{\max} = 0.23R_{15}$

$R_{\max}$: RMW (km), Δp : neutral pressure (1013.1)–central pressure (hPa), P_c : central pressure (hPa)

r : distance from the typhoon center (km), $V_{\max}$: maximum wind speed (m/s)

V_f : wind speed at distance r (m/s), x : index for point (sea 0.5, the other 0.7), Φ : Latitude

V_f : typhoon movement speed $B: 0.886 + 0.0177V_{\max} - 0.0094\Phi$, $A: R_{15}$: 15 m/s wind radius

제 태풍 방재 활동에 활용하기에는 아쉬움이 있을 것으로 사료된다.

2.1.2 RMW

서론에서 언급한 바와 같이, RMW는 태풍의 최대 풍속이 부는 영역을 의미하며, 국외에서는 RMW 산정 경험공식에 연구가 다수 수행되었으나, 국내에서는 매우 부족한 실정이다. 선행된 국외 경험공식 (Hiroshi and Wenjie, 2016; Willoughby and Rahn, 2004; Vickery *et al.*, 2000; Anthes, 1982; Holland, 1980; Graham and Nunn, 1959)에 대하여 살펴보면 표 2와 같다.

본 연구에서는 표 2의 국외 경험공식 5개를 분석에 활용하였다. 태풍의 여러 다양한 요소를 활용하여 구

Table 3. Domestic empirical equation for calculating RMW the variables used and its descriptions.

Domestic empirical equation	
Kang <i>et al.</i> (2002)	$r_0 = 2606.7(1013 - P_c)^{-0.8811}$
KORDI (2005)	$R_{\max} = \frac{\ln(\Delta p) - \ln(\rho(r) - P_c)}{r}$

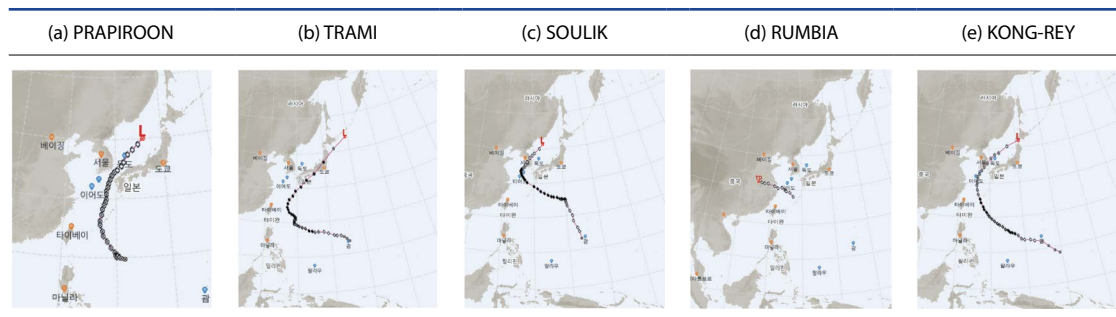
$R_{\max}$: RMW (km), Δp : neutral pressure (1013.1)–central pressure (hPa)

P_c : central pressure (hPa), r : distance from the typhoon center (km)

축되었다. 특히, 열대성 저기압에서 실제 가장 많은 강수와 강한 강풍이 RMW 부근에서 관측된다고 정확도 평가에 관련된 평가까지 수행되었으며, 실제 현업에서도 활용되고 있다. 국내에서 개발된 경험공식 (KORDI, 2005; Kang *et al.*, 2002)은 그 수가 매우 적으며 표 3과 같다. 태풍의 최대풍속과 최소해면기압에

Table 4. Typhoon number, name, and period of 2018 typhoons that affected the Korean peninsula.

Number	Name	Period
1825	KONG-REY	2018-07-03 0000 UTC~2018-07-04 0000 UTC
1824	TRAMI	2018-08-16 0000 UTC~2018-08-16 0000 UTC
1819	SOULIK	2018-08-23 0000 UTC~2018-08-25 0000 UTC
1818	RUMBIA	2018-09-30 0000 UTC~2018-10-01 0000 UTC
1807	PRAPIROON	2018-10-06 0000 UTC~2018-10-07 0000 UTC

Table 5. Track of the 2018 typhoons affecting the Korean peninsula: typhoon kong-rey and soulik both landed on the southern coast of the peninsula; typhoon trami passed through Japan; typhoon rumbia landed in China; and typhoon prapiroon passed through the Korean strait.

대한 상관관계 규명을 위한 개발된 공식으로, 최대풍속반경의 정확한 예측을 위한 공식이 아니므로, ‘기압’에만 의존되어 있다는 아쉬움이 있다.

2.2 연구대상

본 연구에서는 6월부터 10월까지 태풍이 초여름(7월 초)부터 가을(10월 초)까지 꾸준히, 다양한 진로의 태풍이 한반도에 영향을 주었던 2018년을 연구대상 연도로 선정하고, 2018년 한반도에 영향을 미친 태풍 5개(표 4, 5)를 분석하였으며, 기상청에서 공식적으로 발표되는 태풍 영향 기간을 분석 기간으로 선정하여 분석하였다.

2.3 연구자료

Ko *et al.* (2013)에서는 RSMC 자료를 활용하여, 3개의 경험공식(Anthes, 1982; Holland, 1980; Graham and Nunn, 1959)을 태풍 볼라벤(1215), 매미(0314), 곤파스(1007)에 적용하여 비교분석한 결과가 있으며,

Lee *et al.* (2007)의 연구에서는 RSMC와 JTWC 자료를 활용하여 태풍 루사(0215)의 최대풍속과 그 범위를 추정한 연구가 있다. 태풍에 대한 정보를 제공하는 기관은 RSMC, JTWC를 포함하여 KMA가 있다. 본 연구에서는 태풍에 대한 유사한 자료를 제공하고 있지만, 선행연구에서는 활용되지 않았으며, 한반도 영향 태풍의 특성을 잘 반영할 것이라 사료되는 KMA 자료를 활용하고자 한다. KMA에서 제공되는 과거태풍자료(태풍 중심 위치, 중심기압, 최대풍속, 이동속도)를 활용하였다.

본 연구의 분석연도인 2018년에는 폭풍반경이 제공되기 시작한 2020년 이전이기 때문에, 강풍반경 자료만 제공되었다. 태풍 콩레이의 과거태풍자료 가운데 태풍이 경남 고성에 상륙했던 2018년 10월 6일 0900 LST 자료를 보면 강풍반경이 330 km로 기록되어 있다. 한반도 동서길이가 넓은 곳이 약 320 km로, 한국 전체를 포함하는 강풍반경을 제공한 것으로 확인할 수 있다. 이는, 앞서 설명한 바와 같이, 제공되는

자료를 활용하여, 태풍에 대한 정보를 얻는 방재 대응 기관과 국민은 강풍 영역을 직접적인 방재 활동에 활용하기에 강풍반경 자료는 아쉬움이 따를 것으로 사료된다. 따라서, 본 연구에서 산정하여 활용하고자 하는 RMW는 방재적인 측면에서 더욱더 중요하다.

3. 결 과

3.1 강풍반경 비교

태풍에 대한 정보를 제공하는 한국의 KMA, 미국의 JTWC, 일본의 RSMC에서 제공한 2018년 한반도 영향 태풍의 강풍반경 자료를 활용하여 각 기관의 강풍반경 자료를 비교·분석하였다. 2018년 당시 KMA에서 제공된 15 m/s에 대한 강풍반경 자료를 활용하였으며, RSMC와 JTWC의 강풍반경 기준은 단위가 kts로 KMA의 15 m/s에 대한 강풍반경과는 정확히 일치하는 기준과의 비교분석은 불가능하므로, 가장 유사한 값인 JTWC의 35 kts (약 18 m/s)와 RSMC 30 kts (약 15.4 m/s)의 강풍반경을 활용하였다. 2018년 한반도 영향 태풍을 대상으로 분석한 결과는 그림 2와 같다.

2018년 영향 태풍을 대상으로 KMA, JTWC, RSMC의 강풍반경을 분석한 결과(그림 2), RSMC의 결과가 대부분의 시간대에 강풍반경을 비교적 과대분석하는 것으로 나타났다. 표 6을 보면 5개의 태풍의 RSMC 강풍반경 평균이 KMA, JTWC 강풍반경의 약 1.9배에 해당하는 값으로 비교적 넓은 반경을 제공하는 것으

로 나타났다. 특히, 태풍이 강해지며 강풍반경 값이 줄지만, 실제 직접 영향을 받는 시간대에 강풍반경의 증감 변화를 KMA와 JTWC와는 달리, RSMC는 비교적 잘 반영하지 못하는 것으로 나타났다.

3.1.1 강풍반경 평가

KMA, JTWC, RSMC에서 제공된 강풍반경 값이 같은 태풍의 같은 시간에 대한 자료이지만, 그 값의 차이가 발생하여, 제공된 강풍반경을 진단해 보고자 하였다. 실제 관측값을 활용한 바람장 자료를 활용하여, 강풍반경을 산출하고, 그 값을 활용하여 진단하는 것이 가장 바람직하지만, 한반도에 설치된 관측지점의 공간적 해상도가 저해상도로 분포되어 있으며, 해상에서의 바람을 표현하기에는 어려움이 따른다(그림 3). 따라서 본 연구에서는 Weather Research and Forecasting (WRF) 수치모델을 활용하여 바람장을 산정하고, 기준 풍속에 대한 반경을 추정하여 비교에 활용하였다. 그림 3은 태풍 솔릭(1819)의 영향 기간 가운데 2018년 8월 23일 12 UTC의 바람장이며, 그림 3(a)는 기상청에서 제공되고 있는 관측자료를 활용한 바람장이다. 내륙에서는 Automatic Weather System (AWS), Automatic Synoptic Observing System (ASOS) 전 지점 자료를 활용하였으며, 해상에서는 부이와 등표 전 지점의 기상 풍속 값을 활용하였다. 그림 3(b)는 WRF 수치모델을 활용하여 산정한 바람장이다. 본 연구에서는 WRF Version 3.8.1의 연구용 WRF-ARW를 사용하였으며, 본 연구에 적용한 모델의 물리 옵션(Dai *et al.*, 2021; Na and Jung, 2020; Tian *et al.*, 2017) 및 도메

Table 6. Average (minimum to maximum) strong wind radius data of 2018 typhoons affecting the Korean Peninsula from KMA, JTWC, and RSMC.

	KMA	JTWC	RSMC
PRAPIROON	198 (100~270) km	231.5 (111.1~314.8) km	466.7 (444.5~555.6) km
RUMBIA	186 (150~220) km	331.5 (250.0~370.4) km	422.3 (388.9~444.5) km
SOULIK	224.3 (120~340) km	265.9 (222.2~342.6) km	341.3 (277.8~444.5) km
TRAMI	347.5 (300~370) km	421.3 (398.2~453.7) km	648.2 (648.2~648.2) km
KONG-REY	215 (150~330) km	121.4 (67~220) km	500.0 (444.5~555.6) km
Average	234.2 km	274.3 km	475.7 km

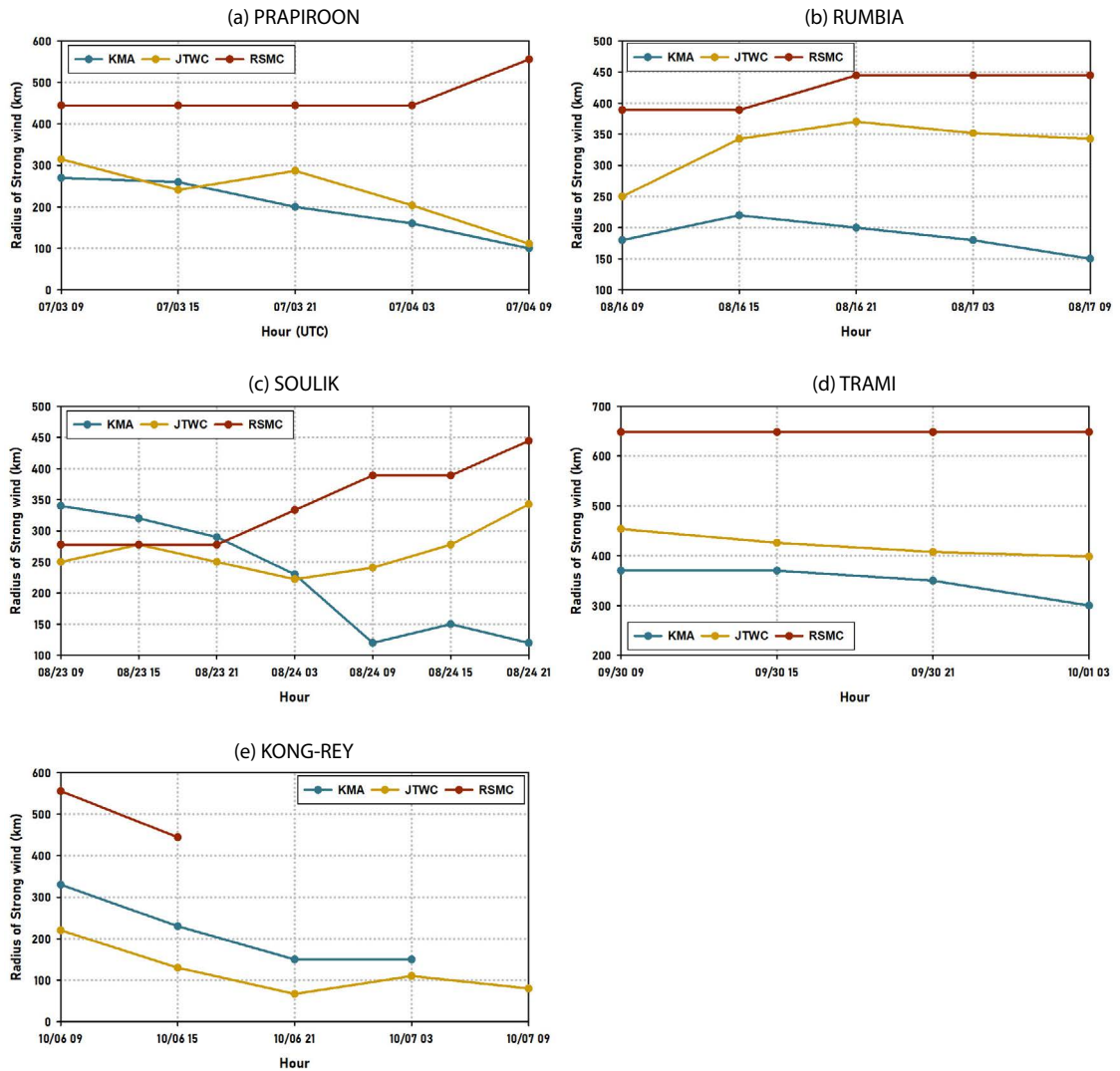


Fig. 2. Comparison of typhoon strong wind radius data of 2018 typhoons affecting the Korean Peninsula from KMA (blue line), JTWC (yellow line), and RSMC (red line).

인 구성은 표 7에 제시되어 있다. WRF 수치모델 결과에서 3km 해상도 모든 격자의 10m 고도 풍속을 추출하여 활용하였다. 해당 WRF 수치모델의 모의 정확도에 대한 평가는 선행연구(Na and Jung, 2021, 2020, 2019)를 참고할 수 있다.

5개 영향태풍(쁘라삐룬, 룸비아, 솔릭, 짜미, 콩레이)와의 비교분석 결과를 보면, 수치모델에서 추정한 강풍반경과 JTWC의 자료가 가장 오차가 적으며, 그

경향 또한 잘 따르는 것으로 판단된다. 태풍 솔릭(1819)을 예시로 보여주면 그림 4와 표 8과 같다. 특히, 23일 1500 LST부터 감소하였다가, 24일 0300 LST부터는 증가하는 경향을 다른 기관들과는 달리 잘 분석하는 것으로 나타난다.

3.2 선행 RMW 경험공식 평가

선행 국내·외 경험공식을 통해 산정된 RMW의 평

가를 위하여, 3.1.1절에서 강풍반경 비교분석을 통해 WRF 바람장에서 추출한 강풍반경과 가장 유사하다고 분석된 JTWC의 자료를 활용하였다. JTWC에서 제공되는 정보들 가운데 ‘RMW’와의 비교분석을 수행하기 때문에, ‘최대풍속’의 의미와 가장 유사하다고 판단되는 기준들 중에 가장 강한 풍속인 65 kts (약

33.4 m/s) 강풍반경과의 비교분석을 수행하였다.

그림 5는 2018년 영향 태풍에 대한 JTWC의 65 kts 강풍반경과 선행 경험공식을 통해 산정된 RMW를 나타낸 그림이다. JTWC의 65 kts 강풍반경을 기준으로 각 경험공식은 RMW를 작게 또는 크게 산정하고 있

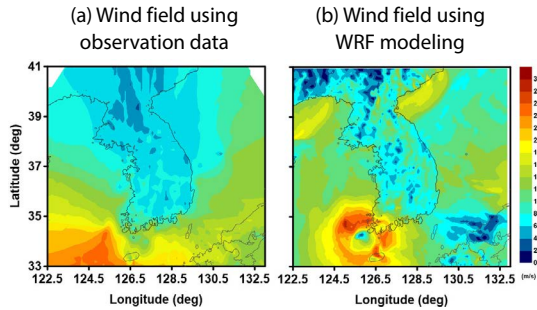


Fig. 3. The 10 m wind (m/s) at 1200 UTC on August 23, 2018, the period influenced by typhoon soulík (1819), using the observed value (a), and calculated using the model result (b).

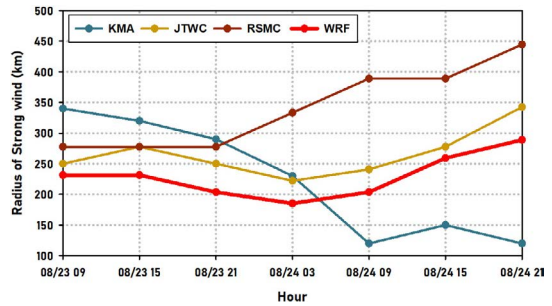


Fig. 4. Comparison of strong wind radius values from KMA, JTWC and RSMC during the period of typhoon soulík (1819). the strong wind radius values were calculated in the WRF numerical model.

Table 7. WRF domain and physics option.

	Domain1	Domain2	Domain3	Domain
Horizontal grid	124 × 124	223 × 223	334 × 334	
Horizontal resolution	27 km	9 km	3 km	
Vertical layers		27		
Physical options	mp_physics	WSM6 scheme		
	bl_pbl_physics	YSU scheme		
	sf_surface_physics	Noah LSM		
	sf_sfclay_physics	Monin-Obukhov scheme		
	ra_lw	RRTM Longwave		
	ra_ws	Dudhia Shortwave		
	cu_physics	Kain-Fritsch scheme	No CPs	
Initial data	GDAPS			

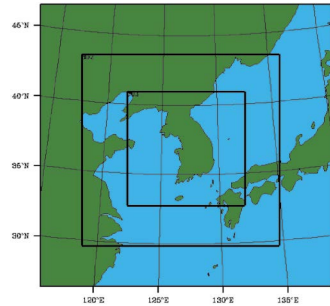


Table 8. Strong wind radius data from KMA, JTWC, and RSMC, and strong wind radius data calculated in the WRF numerical model during the period of typhoon soulík (1819).

	18-08-23 0000 UTC	18-08-23 0600 UTC	18-08-23 1200 UTC	18-08-23 1800 UTC	18-08-24 0000 UTC	18-08-24 0600 UTC	18-08-24 1200 UTC
KMA	340.0	320.0	290.0	230.0	120.0	150.0	120.0
JTWC	250.0	277.8	250.0	222.2	240.7	277.8	342.6
RMSC	277.8	277.8	222.2	222.2	222.2	222.2	222.2
WRF	209.8	188.9	181.8	169.0	198.3	245.7	280.2

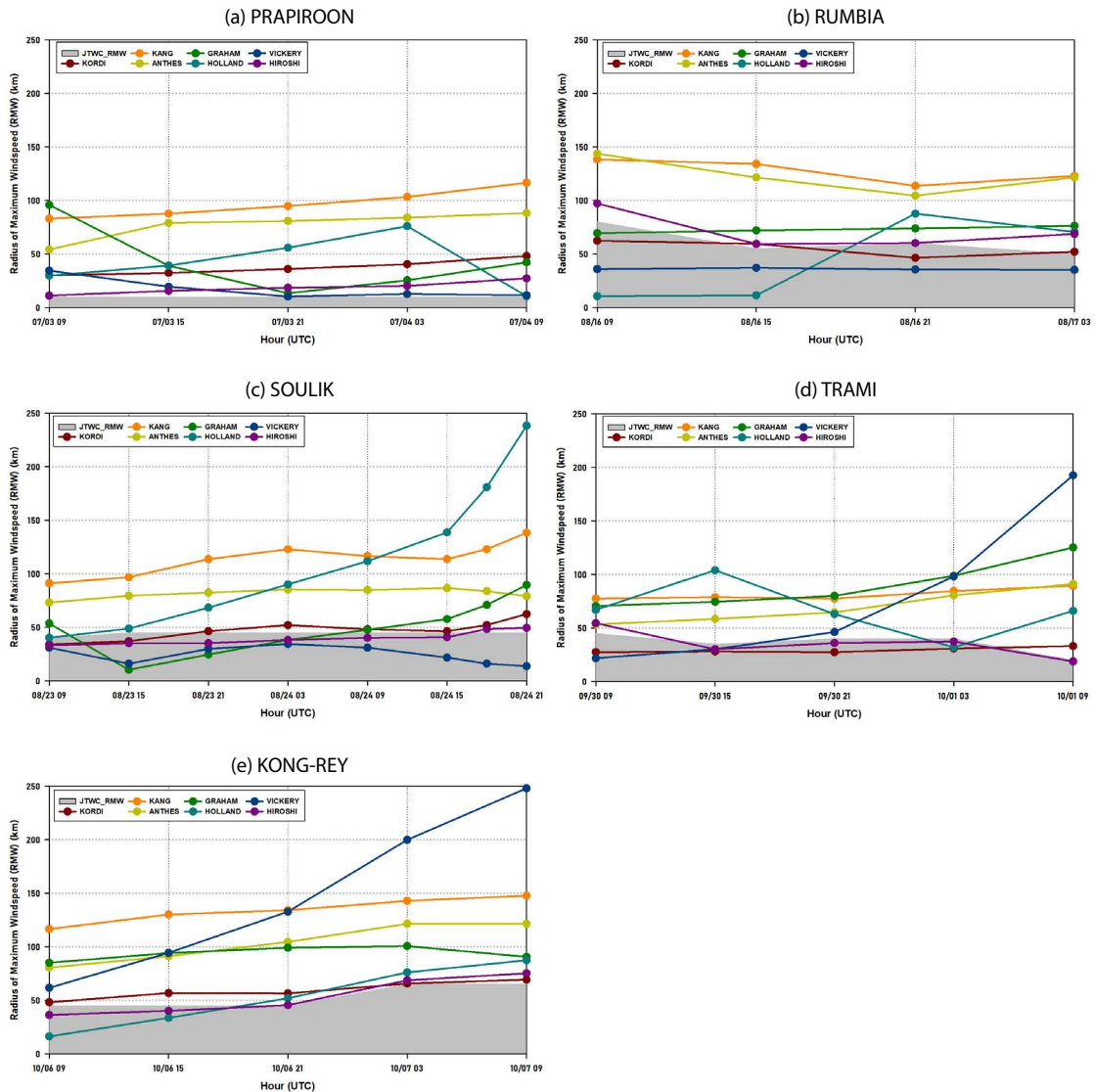


Fig. 5. Comparison of the JTWC 65 kts strong wind radius data (grey area) of 2018 typhoons affecting the Korean peninsula, and RMW calculated through the prior empirical equation (colored line).

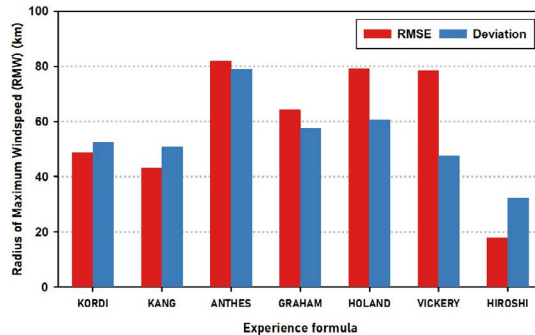
었다. 표 9는 JTWC의 65 kts 강풍반경을 기준으로 각 경험공식과의 상관관계를 살펴본 결과이다. KORDI, Kang, Anthes, Hiroshi의 경험공식이 유의한 상관관계를 보인다고 분석되었으며, Hiroshi의 상관계수가 0.908로 가장 좋은 결과를 나타내었다. 반대로 Holland 경험공식을 활용하여 산정한 RMW는 JTWC의 65 kts 강풍반경과 0.126의 상관계수를 가지며 비교적

일치하지 않는 결과로 나타났다. 그림 6은 JTWC의 65 kts 강풍반경과 경험공식에서 산정된 RMW의 Root Mean Square Error (RMSE) 값과 편차를 나타낸 그림이다. RMSE는 평균 제곱근 오차를 나타내는 값으로, 추정값 또는 모델이 예측한 값과 기준 또는 관측값과의 차이를 다룰 때 흔히 사용하는 척도로 0에 가까울수록 기준과 일치하는 값을 의미한다. RMSE와 편차

Table 9. The correlation coefficients between JTWC 65 kts strong wind radius data and RMW calculated through the prior empirical equation.

	KORDI	Kang	Anthes	Graham	Holland	Vickery	Hiroshi
Pearson correlation	0.624**	0.604**	0.616**	0.282	0.126	0.300	0.908**

**Correlation is significant at level 0.01 (both sides).



	KORDI	Kang	Anthes	Graham	Holland	Vickery	Hiroshi
RMSE	48.8	43.0	81.8	64.2	79.1	78.4	17.8
Deviation	52.5	50.7	78.9	57.4	60.6	47.5	32.3

Fig. 6. RMSE and deviation values calculated through JTWC 65 kts strong wind radius data and prior empirical equation. It was observed that the smaller the deviation value, the smaller the difference between the JTWC 65 kts strong wind radius data and RMW.

모두 Hiroshi 경험공식이 가장 0과 가까운 좋은 결과를 보이며, 다음으로 Kang, KORDI 순으로 나타났다.

3.3 RMW를 활용한 태풍사전방재모델

정확도 평가

태풍의 내습 시기 더욱 강한 바람이 나타나기 때문에, 더욱더 큰 피해가 발생하는 RMW 안쪽 영역과 바깥쪽 영역을 구분하여 태풍의 내습 시기 발생할 수 있는 최대풍속에 대하여 분석하였다. RMW를 중위도 지역에 적합한 Vickery *et al.* (2000)을 사용한 것과는 달리, 3.2절을 통해 한반도 영향 태풍에 가장 적합하다고 판단되는 Hiroshi의 경험공식을 활용하여 RMW를 산정하였으며, 본 3.3절은 RMW의 안쪽과 바깥쪽에 대한 태풍사전방재모델 (Na and Jung, 2021, 2020, 2019)에서 산정된 3초 gust의 예측 정확도를 평가하

기 위한 장으로 분석대상을 여러 태풍을 대상으로 선정하였다.

National Typhoon Center (2020)에 따르면 우리나라에서 기상관측이 시작된 1904년부터 2019년까지 약 110년간, 한반도에 영향을 미친 태풍에 의해 기록된 순간 최대풍속과 재산 피해액을 살펴보면, 상위 5위 안에 2000년 이후의 태풍이 기록되어 있다. 이와 더불어, 본 연구에서 사용한 WRF의 입력자료로 사용한 기상청 수치모델 자료의 생산이 2002년부터 이루어지고 있으므로, 2002년부터 2020년까지의 기간에 대해 한반도에 영향을 미친 태풍, 총 64개를 대상으로 선정하여 RMW에 따른 태풍사전방재모델의 예측 정확도에 대한 분석을 수행하였다.

연구대상 기간 (2002~2020년) 동안 한반도에 영향을 미친 64개 각각의 전체 태풍 기간, 해양부이와 등

표 관측에서 측정된 GUST와 최대순간풍속 값을 활용하였다. 전체 64개 태풍의 RMW 안쪽 영역의 관측값 52개와 RMW 바깥쪽 영역에서의 관측값 256개 각각을 태풍사전방재모델에서 계산된 3초 gust와 비교하여 영역별로 나타낸 것이다. 그림 7에서 보는 바와 같이, 태풍의 전체 영역에서 상대적으로 더욱 강한 바람이 나타나는 RMW 안쪽(붉은색)에서의 풍속 차(모델값-관측값)가 $-0.24 \sim 3.46$ m/s이고, RMW 바깥쪽(푸른색)에서는 $-1.27 \sim 5.24$ m/s로 나타나며, RMW 안쪽에서 차이가 더 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 상대적으로 더욱 강한 바람이 나타나는 RMW 안쪽에서 더욱 정확도가 높은 3초 gust 계산 값을 제공하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 사용한 태풍사전방재모델이 태풍이 영향을 미칠 때 상대적으로 더 강한 풍속이 나타나는 RMW 안쪽의 영역에서 정확도

가 더욱 높으며, 활용 시 더욱 신뢰성 있는 정보를 제공하여, 태풍에 대한 방재 활동이 가능한 값을 보였다. 즉, 본 연구를 통해, 태풍의 RMW에 대한 정확한 정보 산정함으로써, 효율적인 태풍 방재 활동이 가능한 것이라 해석할 수 있다.

그림 8에 나타낸 산점도와 R^2 값을 보더라도 위에서 설명한 바와 같이, RMW 안쪽과 바깥쪽 모두에서 좋은 결과를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있으며, RMW 안쪽에서의 계산 값이 바깥쪽에서의 계산 값과 비교하면 더욱 좋은 결과를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 본 3.3절의 분석을 통해, 보다 정확도 높은 RMW의 산정은 태풍의 방재 활동에 있어 매우 중요하다고 판단할 수 있다.

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 한반도 영향 태풍에 적용 가능한 최대풍속반경 산정식 개발을 위한 기초연구로서 국내외 최대풍속반경 선행 경험공식을 2018년 영향 태풍에 적용하는 연구를 수행하였다. 또한, 태풍에 대한 정보를 제공하는 주요기관인 KMA, JTWC, RSMC에서 제공된 강풍반경 값에 대한 비교분석을 수행하였다. 먼저 각 기관의 강풍반경 자료를 WRF 수치모델에서 산정된 반경 값과 비교한 결과 JTWC의 자료가 비교적

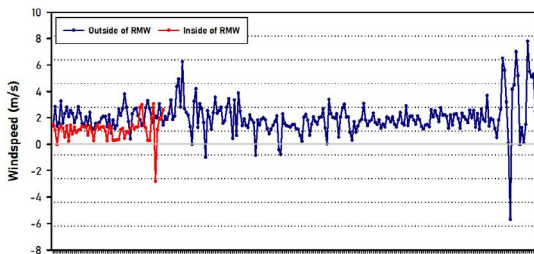


Fig. 7. Deviation of calculated 3-second gust and observations inside/outside of the RMW.

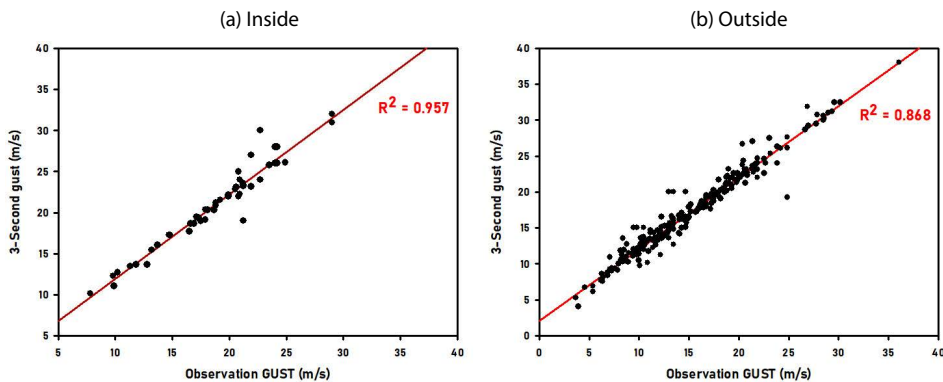


Fig. 8. Statistic results for 3-second gust and observations.

강풍반경 값과 변화를 잘 나타내는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 선행된 국내외 경험공식을 통해 산정된 RMW의 평가에 JTWC에서 제공되는 65 kts 강풍반경과의 비교분석을 수행하였다. RMW와 시계열분석 및 정량적인 분석을 위한 통계분석(RMSE, 편차, 상관계수)을 수행한 결과, Hiroshi의 경험공식이 한반도 영향 태풍에는 가장 적합한 것으로 나타났다. 추가로 Hiroshi의 경험공식을 활용하여 산정한 RMW를 이용하여 태풍사전방재모델의 정확도를 평가한 결과를 통해 RMW의 정확한 산정이 방재 활동에 매우 중요한 점 또한 확인할 수 있었다. 본 연구는 한반도 영향 태풍에 적합한 RMW 산정 공식을 평가한 연구로서, 본 연구의 결과를 통해, 더욱 정확하고 효율적인 태풍사전방재활동을 할 수 있을 것으로 사료된다. 추가적으로, 본 연구는 2018년 영향 태풍을 대상으로 수행한 분석으로, 추후 분석대상을 늘려 분석할 필요가 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1F1A1068738).

References

- Anthes, R.-A. (1982) Tropical Cyclones, Their Evolution, Structure and Effects, American Meteorological Society, Science Press, Ephrata, 208pp. <https://doi.org/10.1007/978-1-935704-28-7>
- Dai, D., Chen, L., Ma, Z., Xu, Z. (2021) Evaluation of the WRF physicsensemble using a multivariable integrated evaluation approach over the Haihe river basin in northern China, *Climate Dynamics*, 57, 557-575. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05723-x>
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2003) <http://www.fema.gov>
- Graham, H.-E., Nunn, D.-E. (1959) Meteorological considerations pertinent to standard project hurricanes, Atlantic and Gulf Coasts of United States, National Hurricane Research Project Report No. 33, U.S., Department of commerce, Weather Bureau, Washington, D.C., 1959.
- Hiroshi, T., Wenjie, W.-U. (2015) Maximum wind speed radius of typhoon passing Japanese southern ocean basin, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 Ocean Engineering*, 71(1), 1-6. <https://doi.org/10.2208/jscejoe.71.1>
- Holland, G. (1980) An Analytic Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes, *Monthly Weather Review*, 108(8), 1212-1218.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021) AR6 climate change 2021: impacts, adaptation and vulnerability. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>
- Kang, S.-W., Jun, K.-C., Bang, G.-H., Park, K.-S. (2002). Empirical relationship between central pressure and maximum sustained wind for tropical cyclones in Northeast Asian Sea, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 38(5), 523-530, (in Korean with English abstract).
- Korea Ocean Research Development Institute (KORDI) (2005) The report of estimation for deep-sea design wave in Korean coastal seas II.
- Lee, Y.-K., Kwon, M. (2015) An Estimation of the of Tropical Cyclone Size Using COMS Infrared Imagery, *Atmosphere*, 25(3), 569-573, (in Korean with English abstract).
- Na, H.-N., Jung, W.-S. (2019) A Study on Improving the Prediction Accuracy of a Typhoon Disaster Prevention Model - Part I: Sensitivity of the WRF Model to High-Resolution SST Data and Meteorological Data Assimilation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(3), 303-317, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.3.303>
- Na, H.-N., Jung, W.-S. (2020) A Study on Improving the Prediction Accuracy of a typhoon Disaster Prevention Model Part II: Sensitivity of the WRF Model to GDAPS, RDAPS GFS Data, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 522-532, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.522>
- Na, H.-N., Jung, W.-S. (2021) A Study on Improving the Prediction Accuracy of a Typhoon Disaster Prevention Model Part III: Sensitivity of the WRF Model to Soil Data, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 248-262, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.2.248>
- Powell, H.-W., Koeppe, M.-J., Symms M.-R., Boulby, P.-A., Salek-H,

- A., Thompson, P.J., Duncan, J.S., Richardson, M.P. (2005) Material-specific lateralization of memory encoding in the medial temporal lobe: blocked versus event-related design, *Neuroimage*, 27(1), 231-239. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.04.033>
- Tian, J., Liu, J., Wang, J., Li, C., Yu, F., Chu, Z. (2017) A spatio-temporal evaluation of the WRF physical parameterisations for numerical rainfall simulation in semi-humid and semi-arid catchments of Northern China, *Atmospheric Research*, 191(15), 141-155, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.03.012>
- Vickery, P.-J., Skerlj, P.-F., Twisdale, L. (2000) Simulation of Hurricane Risk in the U.S. Using Empirical Track Model, *Journal of Structural Engineering*, 126(10), 1222-1237.
- Willoughby, H.-E., Rahn, M.-E. (2004) Parametric Representation of the Primary Hurricane Vortex. Part I: Observations and Evaluation of the Holland (1980) Model, *Monthly Weather Review*, 132(12), 3033-3048.

Authors Information

나하나 (인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터 박사과정) (hana717@nate.com)

정우식 (인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터 교수) (wsjung1@inje.ac.kr)