



논문

태풍 최대풍속반경과 지표 거칠기길이에 따른 태풍사전방재모델의 적합성 평가

Assessment of the Suitability of the Typhoon Disaster Prevention Model according to the Typhoon Maximum Wind Speed Radius and Surface Roughness Length

나하나, 정우식*

인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터

Hana Na, Woo-Sik Jung*

Department of Atmospheric Environment Information Engineering/
Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University

접수일 2019년 2월 13일

수정일 2019년 2월 26일

채택일 2019년 2월 28일

Received 13 February 2019

Revised 26 February 2019

Accepted 28 February 2019

*Corresponding author

Tel : +82-(0)55-320-3932

E-mail : wsjung1@inje.ac.kr

Abstract In this study, the validity of the typhoon disaster prevention model was verified by comparing the results calculated from the model with the measured values of the gust wind speed. Analysis was conducted by selecting the typhoons that affected the Korean Peninsula from 2002 to 2015. Moreover, to assess the usability of the typhoon disaster prevention model throughout the Korean Peninsula, the wind speed comparison at a 10 m ASL was performed by selecting Typhoon Bolaven that caused severe damages to the entire Korean Peninsula including the Seoul metropolitan area among the typhoons that affected the Korean Peninsula. Consequently, it was found that the 3-second gust values and 10 m ASL wind speed values of the typhoon disaster prevention model well simulated the measured values. Moreover, the values estimated from the model were slightly higher than the measured values. This appears to be highly useful results from the disaster prevention perspective, which is the purpose of the model. Through comparison and analysis, it was found that the model showed better results in the inside of the maximum wind speed radius than in the outside during the typhoon impact period. In addition, the model showed results that are more similar to the measured values on the coast than in the inland with complex terrains, and it indicated better results in the islands than on the coast. If the typhoon disaster prevention model is utilized using these data, it will more effectively contribute to prior disaster prevention activities for preventing the damage caused by typhoons in advance.

Key words: WRF, 3-second gust, GUST wind speed, RMW

1. 서 론

최근 기후변화에 따른 지구온난화로 인해 해수의 온도가 증가하고, 태풍, 허리케인의 강도가 강해지고 있다. 이러한 영향으로 한반도에 영향을 미치는 태풍이 발생하는 북서태평양 해역의 온도 또한 상승하면서 이 지역 태풍의 세기도 강해지며, 태풍에 의해 발생하는 인적·물적 피해도 증가하고 있는 추세(IPCC,

2015)이다. 실제 한반도에서 발생하는 태풍에 의한 피해를 살펴보면, 최근 10년(2008~2017년) 자연재해에 의해 나타난 피해 중에서 태풍은, 발생 빈도는 다른 자연재해에 비해 적지만, 피해액은 전체 자연재해에 의한 피해의 약 48%로써 절반가량을 차지하고 있다. 이에 여러 선행연구들에서는 태풍의 영향이 시작되는 시점부터 기상현상을 예측하고, 태풍에 의해 발생하는 피해예측과 관련된 연구가 수행되어 왔다. 국외

의 경우, 허리케인이 내습한 기간 동안 발생할 수 있는 피해 지역과 규모를 예측하는 Florida Public Hurricane Loss Model 개발(FDFS, 2005)되었으며, Sheets (1990)은 지구온난화로 인해 허리케인의 강도가 증가하는 것에 대비하여, 취약성 모델을 제시하고, 주택 구조물에 대한 경제적인 피해를 추정하는 연구를 수행하였다. Klawar and Ulbrich (2003)은 과거 영향을 미쳤던 허리케인의 기록과 바람장 모델(deterministic wind field model)을 이용하여 허리케인 영향 시기, 바람에 의해 나타난 피해를 추정하였다. 국외에서는 이러한 기초연구를 바탕으로 허리케인 영향 시기 발생하는 강풍에 의한 피해를 미리 예측하여, 재난 관리 체계에 따른 사전방재 활동에 관련된 정보를 제공하고, 재해 보험에 적용하고 있다. 반면, 국내의 경우에는, 태풍에 의해 나타나는 피해를 예측하기 위해 지상에서 발생하는 최대풍을 예측하는 방법을 제안한 연구(Park *et al.*, 2008)가 수행된 바 있으며, Jung *et al.* (2010)은 한반도에서 가장 강한 최대풍속을 기록한 태풍 매미를 대상으로 최대풍을 추정하고 이러한 강풍으로 인해 발생 가능한 최대의 피해액을 추정함으로써 현장에서의 태풍에 대한 사전 방재활동에 활용 가능한 성과를 도출한 바 있다. Kim (2013)은 태풍의 영향 시기 발생할 수 있는 최대풍인 3-second gust를 계산하고, 이로 인해 발생할 수 있는 피해액을 산정하는 과정을 한반도의 지리적, 지형적 특성을 고려하여 기존의 최대풍 예측방법을 개선한 태풍사전방재 모델을 개발하였다. 또한 이를 이용한 공공·산업시설을 대상으로 3-second gust를 계산하여 태풍에 의해 발생하는 피해를 저감시키기 위한 연구(Jung, 2015)도 수행된 바 있다. 최근 Na *et al.* (2018)의 연구에서는 Kim (2013)에 의해 개발된 태풍사전방재모델이 가지는 시, 공간적 저해상도의 한계를 개선한 고해상도의 태풍사전방재모델을 개발하였으며, 이를 이용하여 연도별, 엘니뇨·라니냐 발생 유무별, 태풍의 진행 경로 유형별 3-second gust의 특징에 대한 다각적 분석이 이루어졌다. 하지만, 여전히 국내에서는 태풍 내습시 발생하는 최대풍속에 관련된 기초적 이론 연구

(Moon and Choi, 2011; Lee *et al.*, 1992) 및 태풍사전방재모델 개발에 대한 연구(Na *et al.*, 2018; Jung, 2015; Jung *et al.*, 2010; Park *et al.*, 2008)는 일부 수행된 바 있으나, 태풍 내습시기에 방재관련 민관 기관에서 직접적으로 활용가능한 현장적용형 모델형태로 개선하고, 태풍사전방재모델의 검증 및 실제 3-second gust를 활용하는 연구는 매우 부족한 실정이다. 또한, 태풍에 의한 피해는 지속적인 평균풍 형태의 강한 바람에 의해 일어나기보다는 순간적으로 발생하는 돌풍 개념의 최대풍인 3-second gust에 의해서 대부분 나타나기 때문에, 방재적인 측면에서 매우 중요한 의미를 가지고 있는 3-second gust의 예측을 통해 효율적으로 태풍 피해를 저감할 수 있는 태풍사전방재에 유용하게 적용될 수 있다. 그 중에서도 태풍이 내습하였을 때 실제 최대풍속이 나타나고, 피해가 발생하는 최대풍속반경과 바람에 큰 영향을 미치는 인자인 지표 거칠기길이는 3-second gust와 관련된 정보가 더욱더 유용하게 적용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 최근 한반도에 영향을 미친 태풍을 대상으로 태풍사전방재모델에 의해 산정되는 최대풍인 3-second gust와 10 m 고도 풍속결과를 대상으로 태풍사전방재모델의 활용가능성을 살펴보고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2. 1 연구 대상

National Typhoon Center (2018)에 따르면 우리나라에서 기상 관측이 시작된 1904년부터 2018년까지 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 WRF (Weather Research and Forecasting) 수치모의의 입력 자료로 사용된 기상청 RDAPS (Regional Data Assimilation Prediction System) 수치 예보 자료의 생산이 2002년부터 이루어지고 있으므로, 본 연구에서는 2002년부터 2015년까

Table 1. List of typhoons affecting the Korean Peninsula (2002~2015).

Year	Name of typhoon	Number
2002	RAMMASUN (2005), NAKRI (0208), FENGSHEN (0209), RUSA (0215)	4
2003	LINFA (0304), SOUDELOR (0306), ETAU (0310), MAEMI (0314)	4
2004	MINDULLE (0407), NAMTHEUN (0410), MEGI (0415), CHABA (0416), SONGDA (0418)	5
2005	NABI (0514)	1
2006	EWINIAR (0603), WUKUONG (0610), SHANSHAN (0613)	3
2007	MAN-YI (0704), USAGI (0705), NARI (0711)	3
2008	KALMAGI (0807)	1
2009	-	-
2010	DIANMU (1004), KOMPASU (1007), MALOU (1009)	3
2011	MEARI (1105), MUIFA (1109), TALAS (1112)	3
2012	KHANUN (1207), DAMREY (1210), TEMBIN (1214), BOLAVEN (1215), SANBA (1216)	5
2013	LEEPI (1304), KONG-REY (1315), DANAS (1324)	3
2014	NEOGURI (1408), HALONG (1411), NAKRI (1412), VONGFONG (1419)	4
2015	CAHN-HOM (1509), NANGKA (1511), HALOLA (1512), GONI (1515)	4
Total		43

지의 기간에 대해 한반도에 영향을 미친 태풍을 연구 대상으로 선정하여 분석을 수행하였다.

한반도에 영향을 미친 태풍을 분류하기 위해 본 연구에서는 Park *et al.* (2006)의 연구에서 제시한 방법을 사용하였다. 즉, 북태평양의 서쪽에서 발생하여 위도 25°N, 경도 110~140°E 사이를 지나는 태풍들 중에서 한반도에 직접 상륙하는 경우, 또한 태풍의 경로가 중국과 일본을 통과하면서 태풍의 중심이 경도 120~135°E 사이에 위치하는 경우를 ‘한반도에 영향을 미친 태풍’으로 정의하였고, 태풍의 경로가 중국과 일본을 통과하면서 한반도에 영향을 미치는지에 대한 판단이 확실하지 않은 경우에는 태풍시기의 한반도 강수 자료를 분석하여, 태풍의 경로와 근접한 지역의 평균 누적 강수량이 100 mm를 기록되거나, 특정 지역에서의 최고 누적 강수량이 250 mm 이상의 강수가 기록된 경우를 한반도에 영향을 미친 태풍으로 정의하였다. 이러한 방법으로 연구 대상 기간인 2002년부터 2015년 까지 한반도에 여향을 미친 태풍을 분류한 결과, 표 1에 제시한 바와 같이 총 43개의 태풍이 선정되었다.

2. 2 연구 자료

2. 2. 1 최대풍속 자료

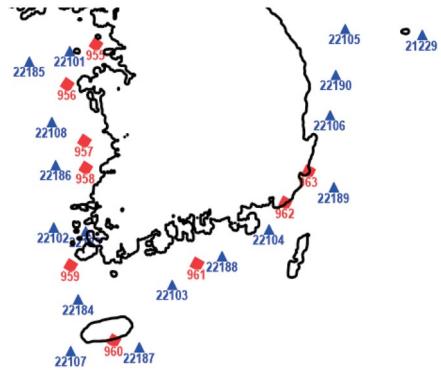
본 연구에서는 Na *et al.* (2018)에 의해 개선된 고해상도의 태풍사전방재모델을 이용하여 계산한, 발생

가능한 최대풍속인, 3-second gust 결과를 검증하기 위해, 기상청에서 최대풍속의 개념으로 관측되고 있는 해양부이의 ‘GUST풍속’과 등표지점에서 관측되는 ‘최대순간풍속’을 분석에 사용하였다. 즉, 해양부이와 등표지점에서 관측된 ‘최대순간풍속’은 표면(수표면)에서의 마찰이 거의 없는 해상에서 측정된 것이므로, ‘실제로 발생 가능한 최대의 풍속값’이라 할 수 있고 태풍사전방재모델에서 제공되는 발생 가능한 최대풍 속인 3-second gust값과 비교하는 데 사용한 것이다.

기상자료개방포털의 각 자료에 대한 카탈로그를 살펴보면, 해양부이는 신속한 기상실황 파악 및 기상 예보 생산·지원에 기여하기 위하여, 대기와 해양 경계에서 발생하는 해양기상현상을 각종 장비로 관측하는 장비이다. 관측 요소로는 풍속, 풍향, 기압, 기온, 습도, 파고 등이 있다. 본 연구에서는 해양부이의 매 0.25초 간격으로 3초 동안 샘플링 된 12개의 자료를 평균하고, 1초 간격으로 이동 평균하여 순간풍속을 산출한 최대풍속 개념의 GUST풍속을 이용하였다. 등표지점은 등표나 관측탑 등의 해양 구조물에 기상 관측장비를 설치하고 관측하는 기상관측 지점이며, 관측 요소로는 풍속, 풍향, 기온, 파고, 수온 등이 있다. 본 연구에서는 풍속을 매 1초 간격으로 3초 동안 샘플링 된 3개의 자료를 평균하고, 1초 간격으로 이동 평균하여 순간풍속을 산출한 최대순간풍속을 이용하

Table 2. Location of marine buoy and beacon observation station.

Buoy (▲)	Beacon (■)	Point distribution
Deokjeokdo (22101)		
Chilbaldo (22102)		
Geomundo (22103)		
Geojedo (22104)		
East Sea (22105)	Seosudo (955)	
Pohang (22106)	Gadaeam (956)	
Marado (22107)	Sib-idongpa (957)	
Oeyeondo (22108)	Galmaeyeo (958)	
Ulleungdo (21229)	Haesuseo (959)	
Sin-an (22183)	Jigwido (960)	
Chujado (22184)	Gan-yeoam (961)	
Incheon (22185)	Gwangan (962)	
Buan (22186)	Ideogseo (963)	
Seogwipo (22187)		
Tongyeong (22188)		
Ulsan (22189)		
Ujin (22190)		



였다. 앞서 언급한 바와 같이, 태풍이 영향을 미치는 시기에 바람에 의해 발생하는 피해는 주로 GUST에 의해 나타나므로, 해양부이와 등표지점에서 제공되는 GUST 풍속과 최대순간풍속은 매우 중요한 관측 요소이다. 이를 자료는 1시간 간격으로 제공되고 있다. 본 연구에서 사용한 해양부이와 등표지점 분포는 다음(표 2)과 같다.

2.2.2 10m 고도 풍속 자료

기상청에서 최대풍속의 개념으로 관측되는 GUST 풍속, 최대순간풍속 관측은 해양부이와 등표지점에서 수행되고 있다. 즉, 바다 위나 섬에서 관측되고 있으며, 연안지역을 포함한 육지내륙에서는 이를 풍속 자료가 관측되고 있지 못하다. 앞서 설명한 바와 같이, 태풍에 동반된 강풍으로 인해 발생하는 피해는 순간최대풍속 개념인 GUST나 최대순간풍에 의해 주로 나타나게 되지만, 이러한 바람의 관측정보는 기상청 관측소가 대부분 위치한 내륙에서는 제공되고 있지 않다. 따라서 태풍시기에 태풍사전방재모델에서 계산된 내륙지역의 각 격자별 순간최대풍속인 3-second gust를 직접적으로 비교, 검증할 수가 없다. 따라서, 본 연구에서는 태풍사전방재모델에서 계산되는 3-second gust가 도출되는 직전의 계산값인 10m 고도

풍속값을 내륙의 관측소에서 관측된 10m 고도 풍속 관측값과 비교하여 태풍사전방재모델의 타당성을 검토하고자 하였다. 참고로, 태풍사전방재모델에서 계산되는 순간최대풍속인 3-second gust는 각 지점별로 발생 가능한 10m 고도에서의 풍속에 돌풍계수(Gust factor)를 적용하여 도출된다. 이러한 과정의 상세한 설명은 Kim (2013)의 연구에 상세히 설명되어 있다.

본 연구에서는 내륙지역에서 관측된 10m 고도 풍속과 태풍사전방재모델에서 계산된 10m 고도 풍속을 비교하기 위해, 크게 3개 권역으로 구분하여 분석을 수행하였다. 태풍사전방재모델에서는 지면의 상태를 고려하는 요소는 ‘지표면거칠기’이다. 따라서 지면의 상태가 넓은 지역에 걸쳐 균일한 ‘바다’, 지면의 경사가 평坦하고 완만한 ‘연안’, 그리고 ‘내륙’으로 구분하여 분석을 수행하였다. ‘바다’에 해당하는 지점은 해양부이이며, ‘연안’에 해당하는 지점은 해안으로부터 10km 이내에 위치한 기상관측소를 대상으로 하였다. 또한 ‘내륙’은 그 외 모든 내륙에 위치한 기상관측소가 해당된다. 또한, Ministry of Construction&Transportation (2006)에서 제시한 한반도의 기본풍속도를 나타내는 데 있어서도 ‘섬’, ‘연안’, ‘내륙’ 이렇게 3가지로 구분하고 있다. 즉, 바람은 지형적 장애에 가장 큰 영향을 받기 때문에 이러한 지형적 장애에 의한 영향의

Table 3. Location of automatic weather station.

Area	Station	Point distribution
Island (■)	Baengnyeongdo (102) Ulleungdo (115) Heuksando (169) Seongsan (266)	
Coastal (●)	Gangneung (105) Busan (159) Mokpo (165) Incheon (112)	
Inland (▲)	Seoul (108) Daejeon (133) Gwangju (156) Daegu (176)	

강약을 구분하는 데 있어 기본적으로 이와 같은 구분을 선행연구에서도 적용하고 있다.

따라서 본 연구에서도 이러한 구분에 따라 섬, 해안, 내륙 각각 4개의 지점을 선정하여 해당 지점에서 관측된 10 m 고도 풍속값과 본 연구에서 사용한 태풍 사전방재모델에서 계산된 10 m 고도 풍속값을 비교하였다. 이에 해당하는 각각의 지점은 표 3에 나타내었다.

2.3 연구 방법

태풍사전방재모델에서 산정되는 3-second gust와 10 m 고도 풍속의 타당성을 평가하기 위해 시계열 분석, RMSE (Root Mean Square Error), IOA (Index of Agreement), MAE (Mean Absolute Error), BIAS 분석을 수행하였다.

2.3.1 태풍사전방재모델

본 연구에서 활용한 고해상도 태풍사전방재모델(그림 1)은 태풍 정보(태풍 중심 위·경도, 중심 기압)와 고층바람 정보(700 hPa 풍속), 토지이용도(Landuse) 등의 자료를 입력자료로 사용하여 최종적으로 3-second gust를 산정하는 모형이다. 태풍사전방재모델에서 제공되는 3-second gust는 ‘발생 가능한 최대 풍속값’의 의미를 가지고 있다. 즉, 해당시점에서의 태풍정보를 바탕으로 이로 인해 발생할 수 있는 이론적 최대풍속값을 제공함으로써, 이 최대풍속값을 임

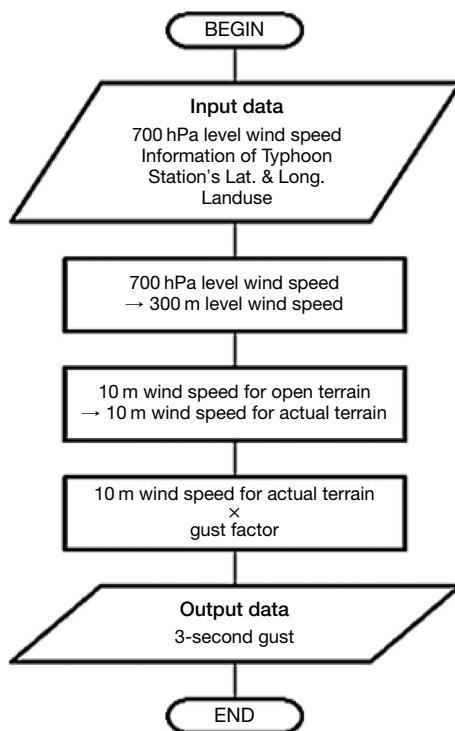


Fig. 1. Flow diagram of the typhoon disaster prevention model (Na et al., 2018).

계점, 또는 기준점으로 방재활동 및 대책을 마련할 수 있도록 하는 데 그 의미가 있다.

기존의 선행연구에서는 수평해상도 12 km, 시간간격 6시간의 시공간 해상도를 가지는 기상청 RDAPS

수치예보 자료의 700 hPa 풍속을 태풍사전방재모델의 입력자료로 사용하였지만, 본 연구에서는 WRF 기상장 수치모델링을 수행하여 수평해상도 3 km, 시간 간격 1시간의 시·공간적 고해상도의 700 hPa 풍속을 사용하였다.

2.3.2 WRF 수치모델

태풍사전방재모델의 입력자료로 이용되는 700 hPa 풍속을 산정하기 위해, 본 연구에서는 국내·외에서 협업, 연구용으로 많이 활용되고 있는 WRF 수치모델을 이용하였다. WRF Version 3.5.1을 사용하였으며, 도메인 구성은 Two-way nesting 기법을 이용하여 총 3개의 도메인으로 다음(그림 2)과 같이 구성하였

고, 물리옵션 및 초기 입력자료에 대한 정보는 표 4와 같다.

2.3.3 최대풍속반경(RMW, Radius of Maximum Wind speed)

태풍 내습시 상대적으로 더욱 강한 풍속이 발생하는 영역을 의미하는 RMW는 RSMC (Regional Specialized Meteorological Center)와 JTWC (Joint Typhoon Warning Center)에서 1~6시간 간격으로 제공하고 있다. 그러나 본 연구에서는 태풍 내습시 정확한 RMW를 적용하기 위해 선행 연구(Powell *et al.*, 1996, 1990)에서 제시한 중위도 지역에 가장 적합한 식(1)을 이용하여 태풍의 RMW를 직접 계산하여 도출하였다.

$$\ln R_{\max} = 2.556 - 0.000050255 \Delta p^2 + 0.42243022 \Psi \quad (1)$$

R_{\max} : 최대풍속반경

Δp (hPa) : 중심기압의 깊이(태풍 중심 기압과 주변 기압의 차이)

$\Psi(^{\circ})$: 태풍 중심의 위도

RMW는 상대적으로 더욱 강한 풍속이 나타나는 태풍 중심으로부터의 영역을 나타낸다. 따라서, 태풍에 의한 피해 저감이라는 방재적 측면에서 본다면 매우 중요하고 유용한 정보라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 더욱 강한 바람이 나타나는 RMW 안쪽 영역과 바깥쪽 영역으로 구분하여, 태풍사전방재모델에서 계

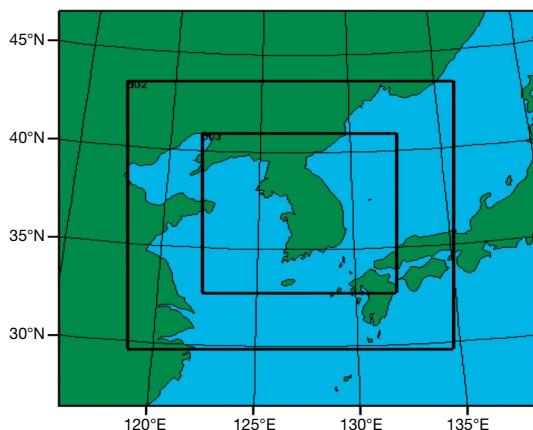


Fig. 2. Domain configurations.

Table 4. The configuration of WRF modeling.

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Horizontal grid	85 × 85	172 × 172	304 × 304
Horizontal resolution	27 km	9 km	3 km
Vertical layers		27	
Physical options	mp_physics bl_pbl_physics sf_surface_physics sf_sfclay_physics ra_lw ra_sw cu_physics	WSM6 scheme YSU scheme Noah LSM Monin-Obukhov scheme RRTM Longwave Dudhia Shortwave Kain-Fritsch scheme	No CPs
Initial data		RDAPS data	

산된 3-second gust값의 정확도를 살펴보자 하였다.

연구 대상으로 선정된 총 43개 태풍이 한반도에 영향을 미쳤던 모든 기간 동안, 해양부이와 등표지점이 최대풍속반경 안쪽과 바깥쪽에 위치했던 시간 개수를 분석한 결과, RMW의 안쪽에 위치한 시간 개수는 40개, RMW의 바깥쪽에 위치한 시간 개수는 234개로 나타났다. 여기서 시간 개수는 각 태풍이 내습한 전체 기간 동안 최대풍속반경이 계산되는 시점에서 최대풍속반경의 안쪽 혹은 바깥쪽에 위치한 해양부이, 등표관측 지점의 수를 의미한다.

3. 결 과

3.1 3-second gust 분석

태풍사전방재모델에서 산정되는 3-second gust값

과 해양부이의 GUST풍속값, 등표지점의 최대순간풍속값의 시계열 분석을 수행하였다.

그림 3(a)는 RMW의 바깥에 위치한 관측지점(해양부이, 등표지점)에서 관측된 각각의 시간별 풍속을 나타낸 것이며, 그림 3(b)는 RMW의 안쪽에 위치한 관측지점에서 관측된 각각의 시간별 풍속을 나타낸 것이다. 그림을 보면, RMW의 바깥 지점(그림 3a)과 RMW의 안쪽 지점(그림 3b) 모두 태풍사전방재모델에서 산정되는 3-second gust값과 관측값이 상당히 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

특히, 태풍사전방재모델에서 계산된 3-second gust값이 거의 모든 지점에서 관측값보다 조금 더 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 매우 중요한 의미를 가지는데, 본 연구에서 사용한 태풍사전방재모델은 태풍이 한반도에 영향을 미칠 것으로 예상되는 경우에, 강풍에 의해 발생할 수 있는 피해를 미리

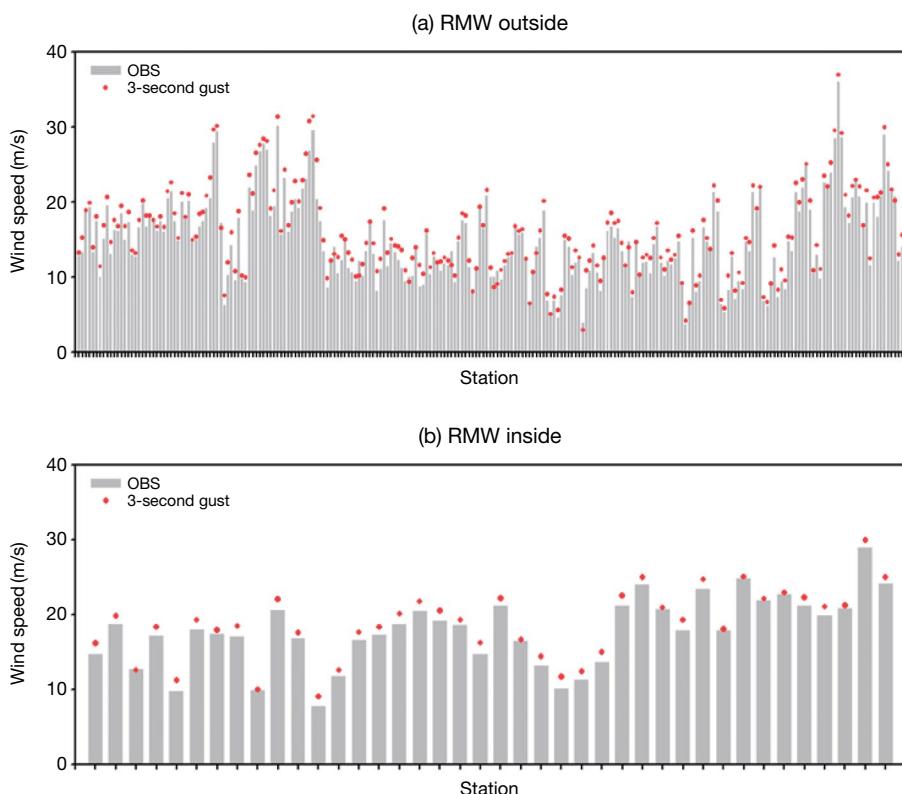


Fig. 3. Comparison of calculated 3-second gust and observations.

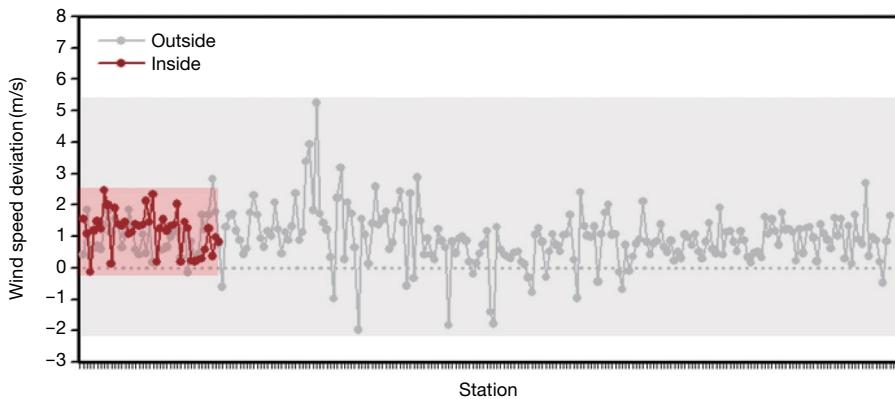


Fig. 4. Deviation of calculated 3-second gust and observations at inside/outside of RMW.

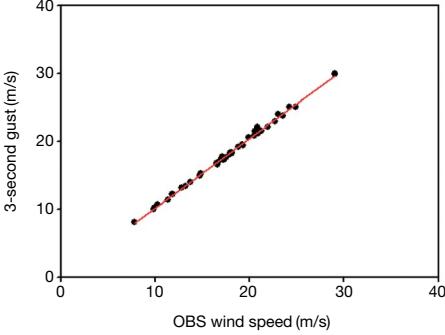
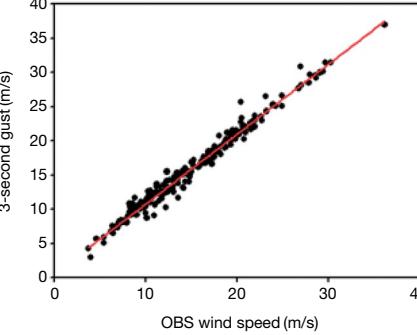
신속히 예측 및 진단하여 중앙 및 지자체의 사전방재 행정에 판단자료로 활용하는 것을 목적으로 하고 있다. 따라서 강풍피해에 대한 방재적 측면에서 볼 때, 강풍정보는 피해발생 및 대책의 임계값 개념으로 적절히 제공되어야만 한다. 즉, 실제 나타날 수 있는 가장 강한 바람을 임계값으로 설정해, 이 풍속에 대비한 방재를 하는 것이 실효성 있는 방재활동이 될 수 있는 것이지, 실제 발생할 수 있는 풍속보다 낮은 풍 속정보는 방재적 측면에서 전혀 실효성이 없는 재난 대응이 될 수 있는 것이다. 따라서 방재적인 측면에 서는 임계값보다 약간 높은 바람정보가 실효적 측면에서 매우 중요하며, 이러한 관점에서 볼 때, 본 연구에서 도출된 태풍사전방재모델에서의 3-second gust 값이 실제로 나타날 수 있는 가장 강한 바람인 해양 부이나 등표지점에서의 관측값보다 약간 높게 나타나고 있는 것은 매우 실효성이 있으며 타당한 결과를 나타낸 것이라 할 수 있다.

태풍의 최대풍속반경, RMW는 태풍의 구조에서 상대적으로 더욱 강한 바람이 나타나는 영역의 경계의 의미를 가지고 있다. 즉, 태풍에서 가장 강한 바람이 나타나는 태풍의 눈으로부터 RMW까지의 동심원 영역이 다른 영역에 비해 상대적으로 더욱 강한 바람이 나타나는 것이다. 따라서, 실제 태풍에 동반된 강 풍에 의한 피해 또한 이 영역, 즉, RMW 안쪽의 영역이 그 이외의 영역인, RMW 바깥쪽 영역보다 더 크게

나타날 가능성이 크다. 따라서, 태풍사전방재모델로부터 도출되는 3-second gust 정보가 태풍의 전체 영역에서 정확하게 제공되는 것도 중요하지만, 실제 강 풍에 의한 피해 가능성의 높은 RMW 안쪽 영역에 서의 3-second gust 정보의 정확도가 더 중요하다 할 수 있다.

그림 4와 표 5는 연구 대상 기간 동안 한반도에 영향을 미친 43개 각각의 전체 태풍기간 동안, 해양부이 와 등표지점에서 측정된 RMW 안쪽 영역의 관측값 40개와 RMW 바깥쪽 영역에서의 관측값 234개 각각을 태풍사전방재모델에서 계산된 3-second gust와 비교하여 영역별로 나타낸 것이다. 그림 4에서 보는 바와 같이, 태풍의 전체 영역에서 상대적으로 더욱 강한 바람이 나타나는 RMW 안쪽(빨간색)에서의 풍속차이(계산값-관측값)가 $-0.14 \sim 3.46 \text{ m/s}$ 이고 RMW 바깥 영역에서는 $-1.99 \sim 5.24 \text{ m/s}$ 로 나타나서 RMW 안쪽에서 차이가 더 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히, 풍속차이값이 음(-)으로 나타나는 것은, 관측된 풍속에 비해 계산된 풍속이 작게 나타난 것을 의미하고, 이것은 앞서 언급한 바와 같이, 실제 나타날 수 있는 최대의 풍속보다 태풍사전방재모델에서 더 약하게 예측한 것이며 강풍에 대한 사전방재적 측면에서는 유용하지 않은 정보를 제공하게 되는 것이므로 그 의미가 크다. 이러한 관점에서 RMW 안쪽과 바깥영 역 전체를 보더라도, 음의 값이 나타난 시간개수가 전

Table 5. Statistic results for 3-second gust and observations.

	Inside	Outside
Scatter plot		
BIAS	0.981	0.978
RMSE	1.061	1.259
IOA	0.999	0.988
MAE	1.005	1.040

체 274개 중에서 20개로 7.3%밖에 되지 않아 전반적으로 좋은 결과를 나타내고 있지만, RMW 안쪽과 바깥쪽을 나누어 구체적으로 살펴보면, RMW 바깥쪽에서는 계산값이 관측값보다 작은 음의 값을 나타내는 시간개수가 전체 234개 중에서 19개(8.1%)이고 음의 최대 풍속편차도 1.99 m/s로 나타난 반면, 우리가 관심을 가지고 있고 방재적 측면에서 더욱 중요한 의미를 가지는 RMW 안쪽에서는 계산값이 관측값보다 작은 음의 값을 나타내는 시간개수가 전체 40개 중에서 1개(2.5%)밖에 되지 않으며 음의 최대 풍속편차도 상대적으로 작은 0.14 m/s로 나타나고 있어 RMW 안쪽 영역에서 더욱 효용성이 높은 3-second gust 계산값을 제공하는 것을 알 수 있다. 즉, 본 연구에서 사용한 태풍사전방재모델이 태풍이 영향을 미칠 때 상대적으로 더 강한 풍속이 나타나는 최대풍속반경 안쪽의 영역에서 정확도가 더욱 높으며, 방재에 활용 가능한 효용성 측면에서도 더욱 신뢰성 있는 정보를 제공할 수 있다는 것을 나타낸 것이라 할 수 있다. 표 5에 나타낸 통계분석결과를 보더라도 위에서 설명한 바와 같이, RMW 안쪽과 바깥쪽 모두에서 좋은 결과를 나타내고 있음을 알 수 있으며, RMW 안쪽에서의 계산값이

바깥쪽에서의 계산값에 비해 더욱 좋은 결과를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

3.2 10 m 고도 풍속 분석

앞에서, 본 연구에서 활용한 태풍사전방재모델의 타당성 평가를 위한 비교, 분석이 수행되었고, 모델의 정확도와 효용성에 있어 타당한 결과가 도출되었지만 우리나라의 경우, 태풍 내습시 한반도의 내륙을 통과하거나 내륙이 태풍의 영향권에 포함되는 경우가 거의 대부분이므로, 한반도 내륙을 포함한 전역을 대상으로 태풍사전방재모델의 타당성을 평가하는 과정도 수행할 필요가 있다. 그러나 기상청에서 제공하는 ‘순간최대풍속’의 관측값은 해양부이와 등표지점이 위치한 해상에서만 측정이 이루어지고 있고, 내륙 전역에 위치한 기상관측 지점에서는 ‘순간최대풍속’의 정보가 제공되고 있지 않다. 따라서, 앞서 ‘2.2.2 10 m 고도 풍속 자료’에서 설명한 바와 같이, 내륙 지점들을 대상으로도 타당성 분석을 위해 10 m/s 고도 풍속 비교를 수행하였다. 이를 위해 섬, 연안, 내륙에 위치한 각각의 4지점들을 대상으로 분석을 수행하였다. 분석을 위한 태풍 사례로는, 본 연구의 대상 태풍 43

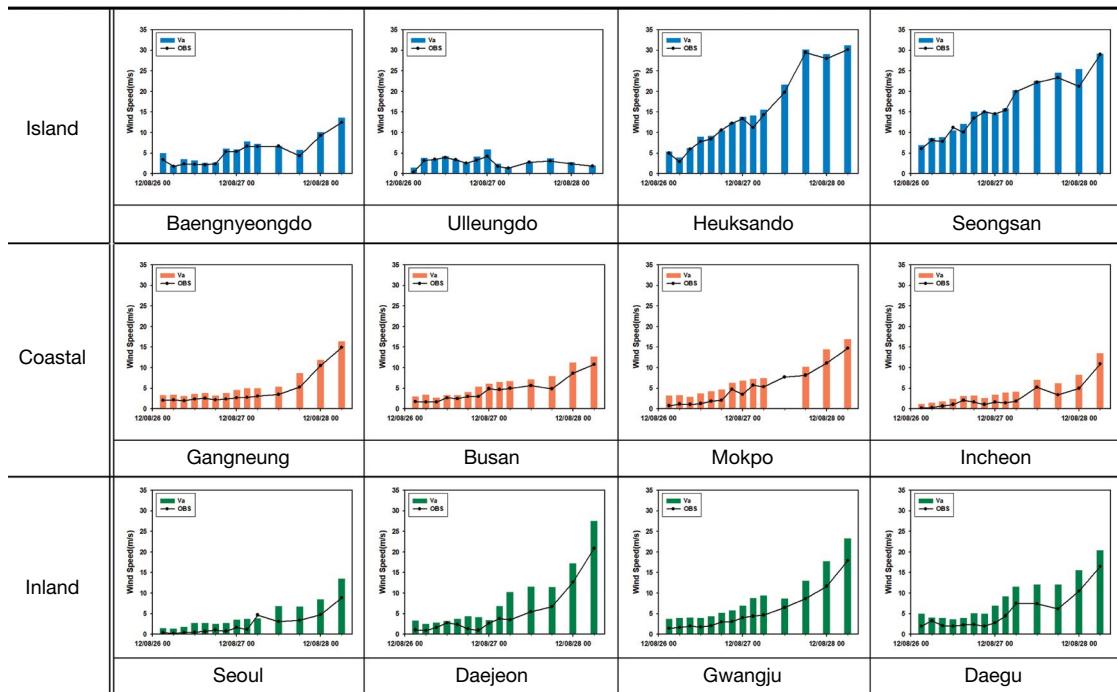


Fig. 5. Comparisons of calculated 10 m wind speed and observations.

개 중에서 한반도의 서해안을 따라 북상하며, 수도권을 포함한 한반도 전체에 큰 피해를 입힌 태풍 볼라벤을 대상으로 분석하였다.

그림 5는 태풍사전방재모델에서 산정된 10 m 고도 풍속값과 섬, 연안, 그리고 내륙지역에 위치한 각각의 4개 기상관측소에서의 10 m 고도 풍속의 관측값을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 막대는 계산값을 나타낸 것이고 실선은 관측값이다. 그림에 나타난 바와 같이, 섬, 해안, 내륙 각각의 4개 지역 모두에서 10 m 고도 풍속 계산값과 관측값이 각 시간대별로 유사하게 나타나는 것을 알 수 있고, 앞서, 사전방재적 측면에서 중요한 의미인 계산값이 관측값보다 더 높게 나타나는 결과가 거의 모든 지역과 시간대에서 나타나고 있음을 볼 수 있다.

이와 더불어, 각 영역별로 구분한 섬, 연안, 내륙에서의 결과를 자세히 살펴보면, 전반적으로, 모든 영역의 지점들에서 좋은 결과를 나타내었지만, 섬 지점들이 나머지 연안과 내륙의 지점들에 비해 계산값과 관

측값의 차이가 크게 나타난 것을 알 수 있고, 나머지 두 지역인 연안과 내륙의 지점들 비교에서도, 연안의 4개 지점에서의 풍속 차이값이 내륙 지점들에 비해서 크게 나타나고 있다. 즉, 계산된 풍속과 관측된 풍속의 차이가 섬에서 가장 크게 나타나고, 그 다음으로 연안에서 크게 나타나며, 내륙에서는 조금 더 큰 차 이를 볼 수 있다. 이러한 각 지역별 차이에 대한 정량적 평가는 그림 6과 표 6의 결과를 보면 자세히 알 수 있다.

이러한 결과가 나타난 것은, 본 연구에서 사용한 태풍사전방재모델에서 도출되는 10 m/s 풍속이나 3-second gust는 해당 시점의 각 지역에서 발생 가능한 최대 풍속의 개념을 가지고 있고 여기에 고려되는 요소는 지면거칠기이다. 따라서 바다위에 있는 섬에서 계산되는 풍속은 표면(수표면)의 마찰이 거의 없어서 태풍에 의해 나타날 수 있는 최대의 풍속을 비교적 정확하게 계산할 수 있다. 이에 비해 연안과 내륙지역은 지면거칠기 외에도 실질적으로 풍속에 영향을 크게

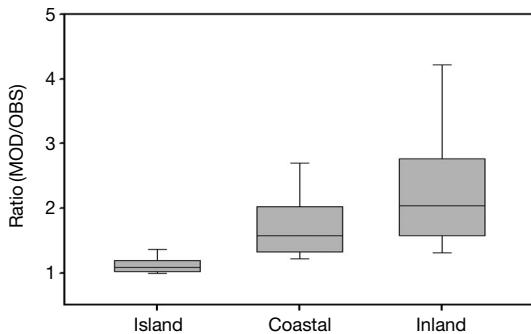


Fig. 6. Box plot of island, coastal, inland.

Table 6. Statistic results for 10 m wind speed and observations.

	Island	Coastal	Inland
BIAS	0.777	1.983	2.819
RMSE	1.170	2.263	3.294
MAE	0.827	1.964	2.803
IOA	0.985	0.854	0.773

주는 지형의 굴곡이나 경사, 다양한 인공구조물 등이 섬에 비해 분명하게 존재하지만, 현재의 태풍사전방재모델에서는 이러한 지형의 형태 및 인공구조물의 영향은 고려되지 않아 모델에서 계산된 값과 관측값의 차이가 섬에 비해 조금 더 크게 나타난 것으로 분석된다.

이상의 과정을 통해, 그림과 표에 나타낸 바와 같이 태풍 내습시 강풍에 대한 사전방재적 측면에서 태풍사전방재모델에서 도출되는 풍속이 전반적으로 타당한 수준의 결과를 제공하고 있음을 알 수 있다. 하지만, 우리나라의 내륙이 복잡 다양한 굴곡의 지형으로 이루어져 있다는 점을 고려해 볼 때, 내륙에서 현재보다 좀 더 향상된 결과를 제공할 수 있도록 태풍사전방재모델의 개선과정에 대한 연구는 지속적으로 진행이 되어야 할 것으로도 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 최근으로 올수록 태풍에 의한 피해

가 증가함에 따라 태풍 내습시 사전방재 측면에서 활용 가능한 태풍사전방재모델의 타당성을 평가해 보고자 하였다. 이를 위해 태풍 내습시 강풍피해에 직접적으로 연관되는 순간최대풍속인 3-second gust 모델 계산값과 기상청에서 관측하고 있는 순간최대풍속인 해양부이의 GUST 풍속과 등표지점의 최대순간풍속을 비교, 분석하였다. 또한, 이들 순간최대풍속 관측값이 제공되지 못하는 내륙에서의 태풍사전방재모델의 활용 가능성을 평가하기 위하여, 10 m 고도풍속 계산값과 관측값 비교를 수행하였다.

연구를 수행한 결과, 태풍 내습시 태풍사전방재모델에서의 계산값과 관측값들이 상당히 잘 일치하였으며, 특히, 태풍사전방재모델의 활용성 측면에서 매우 중요한, 관측값에 비해 조금 더 강한 풍속 계산값이 도출되는 것을 알 수 있었다. 이와 더불어, 태풍영역에서 상대적으로 더 강한 바람이 존재하는 최대풍속반경 (RMW) 안쪽영역과 상대적으로 약한 바깥영역을 구분하여 모델 계산값과 관측값을 비교한 결과, 피해의 정도가 더 크게 나타날 수 있어 방재적 측면에서의 정확한 예측이 더욱 중요한 최대풍속반경 안쪽영역에서의 계산결과가 더욱 좋은 결과를 나타내어 태풍 내습시 사전방재활동을 위한 현장에서의 활용 가능성이 높음을 알 수 있었다.

이와 더불어, 섬, 연안, 내륙지역을 대상으로 모델 계산값과 관측값 비교를 수행한 결과, 지면의 장애가 가장 적은 섬에서 가장 좋은 일치도를 보였으며, 다음으로 연안, 내륙지역 순으로 좋은 일치도를 나타내었다. 다만, 복잡한 지형의 굴곡과 경사, 그리고 인공구조물이 다양한 형태로 존재하는 내륙에서의 정확도를 지금보다 더욱 향상시킬 수 있도록, 향후 지속적인 연구의 필요성도 확인할 수 있었다.

그럼에도 불구하고, 우리나라에 매년 큰 피해를 일으키고, 향후 더욱 강력한 태풍의 발생가능성이 높은 현 시점에서, 태풍 내습시 강풍에 의해 발생 가능한 피해를 최소화하는 데 있어 실질적으로 활용 가능한, 본 연구에서 제시한, 태풍사전방재모델의 타당성과 효용성은 비교적 우수하게 나타났으며, 향후 이 모델

을 이용한다면 태풍에 의한 피해를 저감하는 데 유용하게 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No.2017R1D1A3B03036152).

References

- Florida Department of Financial Services (FDFS) (2005) Florida Public Hurricane Loss Projection Model, Engineering Team Final Report Volume I-III, pp. 48.
- Forrest, J. (2004) Measurement, Modeling and Simulation of Ground-Level Tropical Cyclone Winds, Master's thesis, Florida University, pp. 203.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2015) Climate Change 2015: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jung, W.S. (2015) An estimation of extreme wind speed of typhoon affecting the damage of public and industrial facilities, Journal of the Environmental Sciences, 24(9), 1199-1210. (in Korean with English abstract), DOI: 10.5322/JES.2015.24.9.1199.
- Jung, W.S., Park, J.K., Choi, H.J. (2010) An estimation of amount of damage using the 3-second gust when the typhoon attack, Journal of the Environmental Sciences, 19(3), 353-363. (in Korean with English abstract), DOI: 10.5322/JES.2010.19.3.353.
- Kim, J.S. (2013) On the characteristics of damage scale and risk management system by strong wind speed of Typhoon, Master's thesis, Inje University, pp. 109.
- Klawa, M., Ulbrich, U. (2003) A model for the estimation of storm losses and the identification of severe winter storms in Germany, Natural Hazards Earth System Sciences, 3, 725-732, DOI: 10.5194/nhess-3-725-2003.
- Lee, D.K., Jang, D.A., Wee, T.K. (1992) Typhoons approaching Korea, 1960-1989 Part II: Prediction experiments on a mesoscale numerical model, Asia-Pacific Journal of Atmospheric, 28, 133-147. (in Korean with English abstract)
- Ministry of Construction&Transportation (2006) A Basic Study on the Extraction of Climate Influencing Factors for the Establishment of Durability Design Technique in Buildings, Korea Institute of Construction and Transportation Technology Evaluation, Ministry of Construction and Transportation, pp. 378.
- Moon, I.J., Choi, E.S. (2011) A definition and criterion on typhoons approaching to the Korean Peninsula for the objective statistical analysis, Atmosphere, Journal of Korean Meteorological Society, 21(1), 45-55. (in Korean with English abstract)
- Na, H.N., Park, J.K., Jung, W.S. (2018) Building baseline data for a typhoon protection system via calculation of the extreme wind speed during a typhoon, Journal of Environmental Sciences, 27(3), 203-217. (in Korean with English abstract), DOI: 10.5322/JESI.2018.27.3.203.
- National Typhoon Center (2018) <http://typ.kma.go.kr/TYPHOON/index.jsp>.
- Park, J.K., Jung, W.S., Choi, H.J. (2008) The study on the strong wind damage prediction for estimation surface wind speed of typhoon season (I), Journal of Environmental Science, 17(2), 195-201. (in Korean with English abstract). DOI: 10.1155/2019/8063169.
- Park, J.K., Kim, B.S., Jung, W.S., Kim, E.B., Lee, D.G. (2006) Changes in characteristics of typhoon affecting the Korean Peninsula, Atmosphere, Journal of Korean Meteorological Society, 16(1), 1-17. (in Korean with English abstract)
- Powell, M.D., Black, P.G. (1990) The relationship of hurricane reconnaissance flight-level wind measurements to winds measured by NOAA's oceanic platforms, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 36, 381-392, DOI: 10.1175/1520-0434(1991)006.
- Powell, M.D., Houston, S.H., Reinhold, T.A. (1996) Hurricane Andrew's landfall in South Florida, Part I: standardizing measurements for documentation of surface wind fields, American Meteorological Society, Weather and Forecasting, 11, 304-328, DOI: 10.1175/1520-0434(1996)011.
- Sheets, R.C. (1990) The National Hurricane Center - Past, Present, and Future, American Meteorological Society, Weather and Forecasting, 5, 185-232.

Authors Information

나하나(인제대학교 대기환경정보공학과 박사과정)
정우식(인제대학교 대기환경정보공학과 교수)