

ORIGINAL ARTICLE

## 태풍 내습 시 발생 가능한 최대 풍속 산정을 통한 태풍의 사전 방재 시스템 기초 자료 구축

나하나 · 박종길<sup>1)</sup> · 정우식\*

인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터, <sup>1)</sup>인제대학교 환경공학과/대기환경정보연구센터,

### Building Baseline Data for a Typhoon Protection System via Calculation of the Extreme Wind Speed During a Typhoon

Hana Na, Jong-Kil Park<sup>1)</sup>, Woo-Sik Jung\*

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

<sup>1)</sup>*Department of Environmental Engineering/Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 50834, Korea*

#### Abstract

For this study, WRF numerical modeling was performed, using RDAPS information for input data on typhoons affecting the Korean peninsula to produce wind data of 700hPa. RAM numerical modeling was also used to calculate 3-second gusts at the extreme wind speed. After comparing wind speeds at an altitude of 10 m to evaluate the feasibility of WRF numerical modeling, modeled values were found to be similar with measured ones, reflecting change tendencies well. Therefore, the WRF numerical modeling results were verified. As a result of comparing and analyzing these wind speeds, as calculated through RAM numerical modeling, to evaluate applicability for disaster preparedness, change tendencies were observed to be similar between modeled and measured values. In particular, modeled values were slightly higher than measured ones, indicating applicability for the prevention of possible damage due to gales. Our analysis of 3-second gusts during the study period showed a high distribution of 3-second gusts in the southeast region of the Korean peninsula from 2002-2006. The frequency of 3-second gusts increased in the central north region of Korea as time progressed. Our analysis on the characteristics of 3-second gusts during years characterized by El Niño or La Nina showed greater strength during hurricanes that affected the Korean peninsula in El Niño years.

**Key words** : 3-second gust, WRF, RAM, El Niño, La Nina

#### 1. 서론

최근 전 세계는 지구온난화에 따른 기후변화로 인

해 폭염, 집중호우, 태풍과 같은 극한 기상의 발생 빈도가 증가하고 피해 규모가 대형화되어 실제 피해가 수 조원에 달하고 있는 실정이다. 특히, 한반도에 영향을

Received 17 January, 2018; Revised 5 March, 2018;

Accepted 6 March, 2018

\*Corresponding author: Woo-Sik Jung, Department of Atmospheric Environment Information Engineering/Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 50834, Korea  
Phone : +82-55-320-3932  
E-mail : wsjung1@inje.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

미치는 여러 자연 재해 중에서 태풍은 영향 빈도는 낮지만, 전반적 피해의 범위는 광범위한 경향을 보인다(Yoo et al., 2011; Ho, 2012).

최근 약 100년간 한반도에서 발생한 태풍 피해는 사망 또는 실종을 포함하는 인명피해가 약 6천여명, 재산피해액이 약 15조원으로 나타났으며 그 중에서 20% 정도인, 약 3조원 정도가 2000년 이후에 발생하였다. 또한 우리나라에서 기상관측이 시작된 1904년부터 2016년까지 약 110년 간 한반도에 영향을 미친 각각의 태풍에 의해 발생한 순간 최대풍속과 재산피해액 기록을 살펴보면, 상위 5위 내에 해당하는 태풍이 모두 2000년 이후에 발생한 태풍으로 나타났는데, 이것은 과거에 비해 최근으로 올수록 태풍의 강도가 강해지고, 그에 따른 피해가 증가하는 경향이 있는 것으로 볼 수 있다.

IPCC 보고서(2015)에 따르면 지구온난화에 의해 열대 해수의 온도가 상승하고, 열용량이 증가하게 되면서 태풍의 강도가 증가할 것으로 예측되는데, 실제 한반도에 영향을 미치는 태풍이 발생하는 서태평양과 한반도 주변의 해수 온도가 전 세계 평균 해수온도 증가율보다 빠른 속도로 증가하면서 한반도에 영향을 주는 태풍의 강도가 증가할 것으로 전망된다. 태풍의 강도가 증가함에 따라 강한 바람을 동반한 태풍에 의해 발생하는 피해 규모 또한 증가할 것으로 전망된다. 또한 해수 온도의 급격한 변화를 주는 엘니뇨·라니냐의 발생과 이들의 강도 변화도 한반도에 영향을 주는 태풍의 발생과 강도에 큰 영향을 미칠 수 있다.

태풍에 의한 피해는 크게 호우에 의해 나타나는 피해, 강풍에 의해 나타나는 피해로 구분할 수 있다. 태풍 내습 시 호우와 호우에 의한 피해에 관련된 연구는 많이 수행되었으나(Oh et al., 2011; Ju et al., 2017), 태풍 내습 시 발생하는 강풍과 강풍에 의한 피해와 관련된 연구는 부족한 실정이다. 태풍 내습과 관련된 국내의 선행연구(Lee, 2002; Oh et al., 2011)를 살펴보면 태풍에 의한 산사태 피해, 태풍의 지속시간, 태풍에 의한 홍수 피해와 같은 태풍이 한반도에 영향을 미친 기간의 피해 현상에 대해 중점적으로 살펴본 반면, 실제 피해 저감을 위한 사전 방재 측면의 연구와 분석은 거의 이루어지지 않고 있다. 태풍 내습 시 발생하는 강풍의 사전 방재에 관련된 선행연구로는 태풍에 의해

발생하는 피해를 예측하기 위한 지상풍을 정확히 예측하는 방법을 제안한 연구(Park et al., 2008)가 있으며, Jung et al.(2010)은 한반도에서 역대 최대 풍속을 기록한 태풍 매미에 대하여 지상풍, 발생 가능한 최대 풍속과 그에 따른 피해액을 추정함으로써 태풍의 사전 방재 활동을 위한 기초 연구를 수행한 바 있다. Kim(2013)은 태풍 내습 시 발생 가능한 순간 최대풍속인 3-second gust 계산식과 피해액 계산 과정의 개선을 통해 예측 정확도를 향상 시키고자 하였으며, 3-second gust와 피해액을 산정한 뒤 태풍의 위기관리 시스템 구축을 제안하였다. 또한 공공·산업시설에 대하여 태풍 내습 시 3-second gust를 계산하여 태풍에 의한 피해를 저감시키기 위한 연구(Jung, 2015)도 수행된 바 있다. 이처럼 태풍 사전 방재 시스템의 구축 및 개발을 위한 연구가 많이 선행되었으나 태풍에 대한 사전 방재 측면에서는 실질적인 활용이 어려운 실정이므로 본 연구에서는 태풍사전 방재 시스템의 기초 자료 생산을 통해 DB를 구축하여, 사전 방재 시스템의 활용성을 높여 태풍에 의한 피해를 최소화하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 최근에 한반도에 영향을 준 태풍을 대상으로, 태풍 내습 시 발생 가능한 순간 최대풍속 및 피해액을 추정할 수 있는, 사전 방재 진단 및 예측 모델인 RAM (Risk Assessment prediction Model)을 활용하여 태풍 내습 시 실제 피해에 직접적인 영향을 미치는 순간 최대풍속인 3-second gust를 산정하여 태풍 내습 시 발생 가능한 최대풍, 즉 극한 개념의 최대풍속을 산출하여 관계 기관 및 대국민 정보 제공과 관련된 사전 방재 측면에서 활용 가능한 분석을 수행하고자 하였다.

## 2. 자료 및 연구방법

### 2.1. 연구 대상 기간

최근 약 110년(1904~2016) 간 한반도에 영향을 준 태풍 시기의 기록을 보면, 순간 최대풍속과 재산 피해액 기록의 상위 1위에서 5위까지는 모두, 2000년 이후에 발생한 태풍에 의해 나타났고, WRF (Weather Research and Forecasting)수치모의 입력 자료로 사용되는 RDAPS (Regional Data Assimilation Prediction

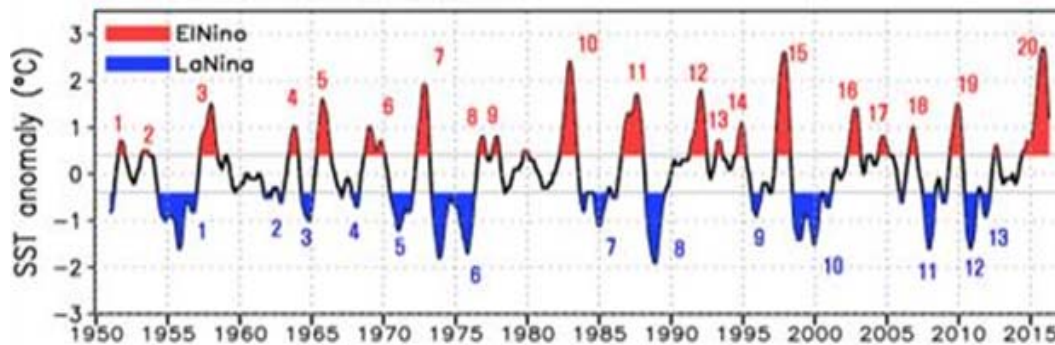


Fig. 1. Occurring El Niño, La Niña. in Korea(기상청 기후정보포털, 2015).

Table 1. Classification occurring El Niño, La Niña year

|                 | El Niño                            | La Niña                      |
|-----------------|------------------------------------|------------------------------|
| Occurrence year | 2002, 2004, 2005, 2006, 2014, 2015 | 2007, 2008, 2010, 2011, 2012 |

System) 자료의 생산이 2002년부터 시작되었다는 점을 고려하여, 본 연구에서는 2002년부터 2015년까지를 연구 대상 기간으로 선정하였다.

#### 2.1.1. 엘니뇨, 라니냐 발생 연도

최근 지구온난화로 인해 이상 해수온 현상이 빈번히 나타나고 있다. 그 중에서도 전 지구적으로 큰 영향을 주는 엘니뇨·라니냐 현상은 높은 강도로 자주 발생하고 있다. 엘니뇨는 주로 적도 부근에서 발생하는 현상으로, 서태평양의 해수온이 평년보다 높아지게 되는 현상이며, 반대로 해수온이 평년보다 낮아지는 현상을 라니냐라고 한다. 본 연구에서는 한반도에 영향을 미치는 태풍이 서태평양 부근의 해수온이 달라지게 되는 엘니뇨, 라니냐 현상과 어떠한 영향이 있는지 살펴보기 위하여 2002년부터 2015년까지 엘니뇨·라니냐가 발생한 연도를 대상으로 태풍 내습시 발생한 3-second gust를 분석해 보았다(Table 1). 연구 대상 기간 중 2003, 2013년은 엘니뇨 및 라니냐 현상이 발생하지 않은 연도이고, 2009년은 한반도에 영향을 미친 태풍이 없었으므로 이들 3개 연도는 분석대상에서 제외하였다(Table 1).

#### 2.1.2. 한반도 영향 태풍 선정

한반도에 영향을 미친 태풍을 분류하는 방법으로 는 여러 연구들에서 제시한 방법이 있다. 기상청 국가

태풍센터(태풍백서,2011)에서는 태풍의 중심이 32-40°N, 128-138°E 사이에 위치하며, 한반도에 영향을 주는 경우를 한반도 영향 태풍으로 정의하고 있다. 그러나 한반도에 영향을 주는 경우라는 기준은 매우 주관적일 수 있는데, 같은 태풍이라도 분류하는 기준에 따라 달라질 수 있다. Lee et al.(1992)은 7,8,9월 중에 25°N을 지나고 110-140°E를 통과한 태풍 중 한반도에 상륙하거나, 동해, 서해, 남해를 통과한 태풍을 한반도 영향 태풍으로 정의하였고, Park et al.(2006)은 한반도 영향 태풍을 북태평양 서부해상에서 발생하여 25°N을 지나면서 110-140°E를 통과하는 태풍 중 한반도에 상륙하거나 태풍 경로가 중국, 일본을 통과하는 경우, 그리고 태풍 중심이 120-135°E 사이에 있는 경우를 한반도에 영향을 미친 태풍으로 간주하고, 태풍 경로가 중국과 일본을 통과하면서 한반도에 영향을 주는지에 대한 판단이 어려운 경우에는 태풍 시기의 한반도 강수 자료를 분석하여 태풍의 진로와 근접한 지역에서의 평균 강수량이 100 mm 이거나 특정 지역에서의 최고 강수량이 250 mm 이상의 강수가 나타난 경우에 한반도에 영향을 미친 태풍으로 정의하였다. 본 연구에서는 Park et al.(2006)의 태풍 분류 방법을 적용한 결과 총 43개의 태풍이 선정되었다(Table 2).

**Table 2.** List of typhoons affecting the Korean Peninsula (2002-2015)

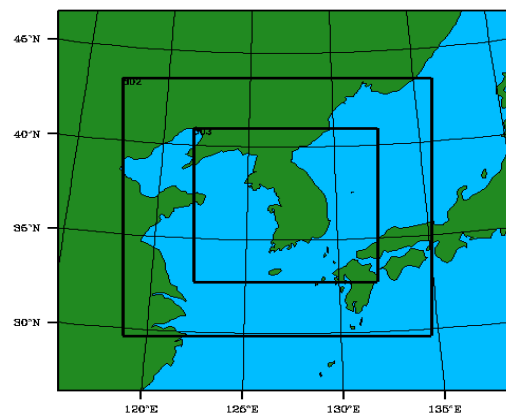
| Typhoon number | Typhoon name | Typhoon number | Typhoon name |
|----------------|--------------|----------------|--------------|
| 0205           | RAMMASUN     | 1004           | DIANMU       |
| 0208           | NAKRI        | 1007           | KOMPASU      |
| 0209           | FENGSHEN     | 1009           | MALOU        |
| 0215           | RUSA         | 1105           | MEARI        |
| 0304           | LINFA        | 1109           | MUIFA        |
| 0306           | SOUDELOR     | 1112           | TALAS        |
| 0310           | ETAU         | 1207           | KHANUN       |
| 0314           | MAEMI        | 1210           | DAMREY       |
| 0407           | MINDULLE     | 1214           | TEMBIN       |
| 0410           | NAMTHEUN     | 1215           | BOLAVEN      |
| 0415           | MEGI         | 1216           | SANBA        |
| 0416           | CHABA        | 1304           | LEEPI        |
| 0418           | SONGDA       | 1315           | KONG-REY     |
| 0514           | NABI         | 1324           | DANAS        |
| 0603           | EWINIAR      | 1408           | NEOGURI      |
| 0610           | WUKONG       | 1411           | HALONG       |
| 0613           | SHANSHAN     | 1412           | NAKRI        |
| 0704           | MAN-YI       | 1419           | VONGFONG     |
| 0705           | USAGI        | 1509           | CHAN-HOM     |
| 0711           | NARI         | 1511           | NANGKA       |
| 0807           | KALMAEGI     | 1512           | HALOLA       |
|                |              | 1515           | GONI         |

## 2.2. WRF 수치모델

한반도의 육상과 해상을 포함한 전 영역에 걸쳐, 태풍 내습 시 발생 가능한 3-second gust를 고해상도로 도출하기 위해 RAM 모형을 이용한다. RAM (Risk Assessment Model) 수치모의를 수행하여 결과를 도출하기 위해서는 700 hPa 고도에서의 풍속자료가 필요한데, 본 연구에서는 WRF3.5.1을 사용하여 연구를 수행하였다. WRF수치모형은 연구목적으로도 광범위하게 활용되고 있을 뿐만 아니라 미국 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 산하 기관인 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) 등의 현업에서의 활용되고 있는 기상 수치예보 모형이다.

본 연구에서는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 한반도 지역을 대상으로 two-way nesting을 통해 총 3개의 영

역으로 구성하였으며, 각 영역별 수평해상도를 비롯한 물리 옵션 등의 모델 구성은 Table 3에 나타내었다.



**Fig. 2.** Nested model domains used in this study.

**Table 3.** 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         | 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          | RDAPS data         |                      |          |

### 2.3. RAM

본 연구에서는 태풍 내습 기간 동안 태풍 영향반경 내의 지상(고도 10 m)에서 발생 가능한 최대풍속과 태풍 내습에 따른 피해에 직접적인 영향을 미치는 순간 최대풍속인 3-second gust를 산정하기 위하여 RAM(Park et al., 2008; Jung et al., 2010; Kim, 2013)을 이용하였다. RAM은 태풍이 한반도에 영향을 미치는 경우, 태풍 내습에 따른 발생 가능한 최대풍속 정보와 피해액을 진단하고 예측할 수 있으며, 이를 통해 최종적으로 태풍 내습에 따른 피해를 미리 예방할 수 있도록 상세한 사전 방재정보를 제공하기 위해 개발된 모형이다. RAM 수치모의에 요구되는 초기 입력 자료는 700 hPa 풍속 자료와 거칠기 길이, 그리고, 해당 태풍의 최대풍속반경(RMW, Radius of Maximum Wind Speed)이 필요하다(Fig. 3).

RAM은 미국 연방재난관리청(FEMA)에서 개발된 Florida Public Hurricane Loss Model (FPHLM)을 근간으로 하여 한국형으로 개선한 것으로, 기존의 FPHLM에 비해 여러 측면에서 개선되었다. 개선된 여러 사항들 중에서 특히 중요한 2가지는 다음과 같다. 첫 번째는, 기존의 FPHLM에서는 드롭존데(drop sonde)를 이용하여 태풍에서 관측된 700 hPa 고도의 풍속이 사용되었다. 그러나, 개선된 RAM에서는 시, 공간적으로 규격화된 NCEP FNL 등의 자료를 이용하여 과거 사례에 대한 진단이나 분석을 수행할 수 있고, 특히, 한국 기상청에서 제공하는 RDAPS 자료와 같은

규격화된 예보자료를 이용하면 태풍 내습에 동반되는 강풍 관련 정보를 예측하고 그에 따르는 피해액을 예측할 수 있도록 개선되었다. 두 번째로는, 기존의 FPHLM에서는 태풍 내습 시 발생 가능한 최대풍속을 계산할 때, 태풍의 최대풍속반경(RMW)과 연관된 조정함수(Adjustment function)를 이용하여 각각의 공간 지점별로 조정계수를 계산하지 않고, 넓은 범위(~30 km)에 걸쳐 2개의 구간으로 구분하여 각각의 구간에 1개의 대표 조정계수 값을 사용할 수 밖에 없었다. 이러한 경우, 태풍 내습 시 강도변화가 매우 급박한 최대풍속반경 주변(~약 30 km)에서 변화가 크게 나타나게 되는 조정계수 값이 실제와 다르게 획일적으로 적용되어 각각의 공간지점에서 나타나는 최대풍속에 중대한 오류가 나타나게 된다. 그러나 개선된 RAM에서는, 이와 달리, 태풍의 최대풍속반경과 연관된 여러 조정함수들 중에서 북반구 중위도에 위치한 한반도에 가장 최적의 조정함수를 선택하고, 기존의 FPHLM에서 최대풍속반경 주변(~약 30 km)지역을 2개의 대표 조정계수로 설정하였던 것과는 달리, 매 순간별 어느 지점에서든지 고해상도로 조정계수를 직접 계산하도록 개선하였다. 더욱이, 본 연구에서는, 이러한 RAM 모형을 더욱 개선하여 최대풍속 정보를 도출하기 위해, 기상청 RDAPS(수평해상도 12 km)자료의 700 hPa 풍속을 사용한 선행연구(Kim, 2013)와 달리, WRF 수치모의를 직접 수행하여 매 시간간격마다 고해상도(수평해상도 3 km)의 700 hPa 풍속을 산정

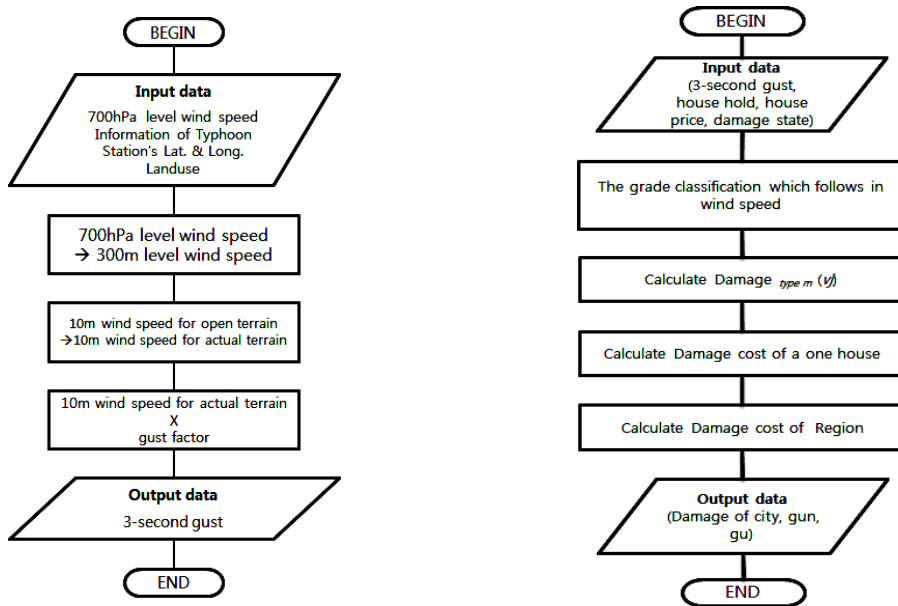


Fig. 3. Flow chart of Risk Assessment prediction Model(RAM).

하였다. 이러한 과정으로 연구를 수행한 주된 목적은 태풍이 한반도로 진행하여 강풍에 의한 피해가 예상되는 경우 한반도가 태풍의 영향권에 들어가는 시점부터, 태풍에 동반된 강풍에 의해 발생 가능한 최대의 피해를 미리 예측하여 사전방재활동에 실질적으로 활용될 수 있는 사전 예측정보를 제공하기 위해서이다. 즉, 사전 방재를 위한 예보 정보로서 700 hPa의 풍속 정보가 제공되어야 하고, 이를 위해 연구에서는 기상청 RDPAS 예측정보를 이용하여 직접 WRF 모델링을 수행하고 이를 통해 예측정보로서의 고해상도 700 hPa 풍속을 도출하였다.

RAM 수치모델에 필요한 태풍의 최대풍속반경(RMW) 자료는 RSMC (Regional Specialized Meteorological Center) Tokyo Typhoon Center의 Best Track자료를 활용하였다.

### 3. 결과

#### 3.1. WRF 및 RAM 수치모델의 검증

##### 3.1.1. WRF수치모델의 검증

3-second gust를 산정하기 위해서는 RAM의 입력

자료로 사용하는 700 hPa의 풍속이 중요하므로, WRF 수치모델에서 계산된 풍속값이 타당한지에 대한 검토가 필요하다. 따라서 연구 대상 기간 한반도에 영향을 준 태풍들 중 가장 높은 순간 최대 풍속을 기록한 태풍 매미를 대상으로 WRF수치모델에 대한 타당성을 평가하기 위하여 시계열 분석과 통계 분석을 수행하였다.

##### 3.1.1.1. 시계열 분석

WRF수치모델의 결과의 타당성을 평가하기 위하여 WRF수치모델을 통해 도출된 10 m 고도의 풍속과 서울(108), 부산(159), 제주(184)의 기상대에서 관측된 10 m 고도의 풍속, 그리고 2 m고도의 기온과 각각의 기상대에서 관측된 2 m 고도에서의 기온을 비교하였다(Fig. 4). 분석 결과, 기온의 경우, 전반적으로 수치모델의 결과값이 관측값과 유사한 수준의 기온을 나타내고 있을 뿐만 아니라 일별, 시간별 변화 경향 또한 특징적인 현상을 잘 나타내고 있었다. 이와 더불어 풍속과 풍향을 비교하여 살펴본 결과, 기온과 마찬가지로 풍속과, 풍향에서 나타나는 특정 시간대의 변화경향 및 강도 등에 있어서도 관측과 유사한 특징을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 특히, 풍속의 경우, 다른

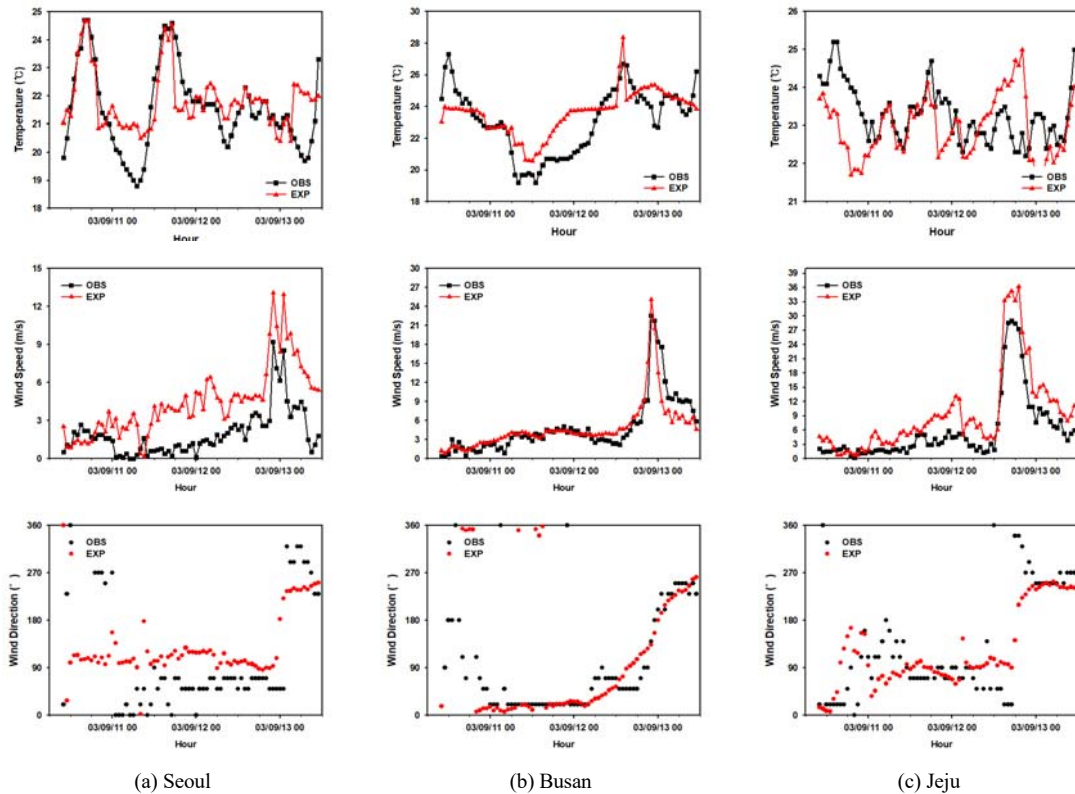


Fig. 4. Time series of observed(black) and simulated(gray) air temperature, wind speed, and wind direction at Seoul, Busan, and Jeju, respectively.

기상요소에 비해 주변 일대의 지형, 지물에 큰 영향을 받는다는 점을 고려해 본다면, 본 연구에서 수행한 WRF 수치모의 결과가 전반적으로 타당한 결과를 나타내고 있다고 판단된다.

#### 3.1.1.2. 통계 분석

수치모의 결과를 통계적으로 검증하기 위하여 수치모델 결과에서의 기온과 풍속을 관측 자료와 비교하여 RMSE (Root Mean Square Error), MB (Mean Bias)를 이용하여 분석을 수행하였다(Table 4). 특히, 기온의 경우, RMSE 값이 대부분 1.5 이하의 값을 나타내서, 수치모의에서 나타난 기온값의 수준 대비, 비교적 우수한 결과를 나타내고 있음을 잘 알 수 있으며, MB 값 또한 0에 가까운 값을 나타내는 있어, 이들 분석을 통해서 볼 때, 본 연구에서 수행한 WRF 수치모의가 비교적 타당한 수준의 결과를 제시하고 있다고

판단된다.

#### 3.1.2. RAM 검증

태풍 내습시 발생 가능한 최대의 풍속을 진단하고 예측하기 위해 본 연구에서는 강풍에 의한 피해를 예측하는 모델인 RAM을 이용하였다. RAM 모형을 통해 이러한 개념의 최대풍속을 도출하기 위해서는, WRF 수치모의 결과에서 도출되는 700 hPa 고도에서의 풍속 자료가 입력 자료로 사용된다. 이 자료를 바탕으로 300 m 고도에서의 풍속을 구하고, 이후 평탄지형에서의 10 m 고도 풍속을 산정한 후, 관심지역이나 특정지역, 또는 지점에서의 지표 특성이 고려된 실제 지형의 10 m 고도에서 발생 가능한 최대풍속을 도출하게 된다. 본 연구에서는 이러한 과정을 통해 도출된 10 m 고도에서 발생 가능한 최대풍속의 타당성을 검증하기 위해 과거 한반도에 영향을 미쳤던 태풍 중

Table 4. RMSE, MB at AWS station

| Station | Element     | RMSE  | MB     |
|---------|-------------|-------|--------|
| Seoul   | temperature | 1.044 | 0.299  |
|         | wind speed  | 3.082 | -1.658 |
| Busan   | temperature | 1.478 | 0.5102 |
|         | wind speed  | 1.187 | -0.602 |
| Jeju    | temperature | 1.056 | -0.349 |
|         | wind speed  | 2.655 | 1.814  |

가장 강한 순간 최대풍속을 기록한 태풍 매미를 대상으로 서울(108), 인천(112), 울산(152), 광주(156), 부산(159), 제주(184) 기상대에서의 관측값과 비교, 분석해 보았다.

#### 3.1.2.1. 시계열 분석

Fig. 5는 각 지점별 수치모의된 최대풍속과 관측값을 비교하여 나타낸 것이다. 그림을 보면, 전반적으로 각 지점별로에서 모델 결과값이 시간대별로 관측값과 유사한 풍속값을 보일 뿐만 아니라 변화 경향에 있어 매우 유사한 형태를 보이고 있다. 더욱이, 인천과 제주 지점의 한두 시간을 제외하고 각 지점의 모든 시간대에서 모델 결과값이 관측값보다 높은 풍속을 나타내고 있는데, 이것은 사전방재의 활용적 측면에서 매우 중요하고 타당한 의미를 가지고 있다. 즉, 사전 방재에서는 위험성에 대비하는 극한적 측면의 정보제공이 필수적이므로 강풍 피해에 대한 방재를 위해서는 건물을 비롯한 구조물에 작용하는 최대 풍압(wind pressure)에 대한 정보가 요구된다. 다시 말해, 이론적 측면에서 본다면, 주어진 조건에서 ‘발생 가능한 최대 풍속’의 의미는 주어진 시점과 공간에서 나타날 수 있는 최대풍속이 되고, 이 풍속에 동반되는 풍압을 기준으로 여러 사전방재 활동이 설정되면 최적의 효율적 정보제공이 될 수 있다는 것이다. 따라서, 이러한 개념의 최대풍속 정보 없이 일정수준의 풍속에 대한 방재 작업이 진행되었을 경우, 해당 풍속보다 강한 바람이 불어오게 되면, 방재에 투입된 비용, 시간이 무의미해질 뿐 아니라, 더욱 중요한 점인, 인적, 물질적 피해에 있어 방재를 하지 않은 것과 같은 결과가 초래될 가능성이 있게 된다. 하지만, 이러한 최대풍속을 설정하는데 있어서도 시, 공간적으로 과도하게 높게 또는 일률

적으로 설정한다면 방재에 동반되는 비용과 시간에 있어 적절성이나 효율성에 많은 문제가 나타날 수 있다. 따라서 결론적으로, 발생 가능한 최대풍속에 대한 가장 효율적인 정보는 지역 맞춤형으로, 시간대별 발생 가능한 최대풍속을 일정 정도 초과하는 풍속값을 신속히 제공하는데 있다.

이러한 관점에서 본다면, Fig. 5에 제시된 바와 같이, RAM 모델에서 수치모의된 각 지점별 시간에 따른 발생 가능한 최대풍속 결과값이 관측값에 비해 대부분의 지점에서, 대부분의 시간대에서 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는, 기본적으로, 본 연구에서 도출된 이러한 최대풍속 정보가 사전 방재적 측면에서 활용 가능한 개념적 수준의 객관적 정보일 뿐만 아니라 지역별로도 맞춤형 방재활동에 대한 효율적 정보로 활용 가능한 수준으로 제공할 수 있다는 것이다. 물론, 현재의 결과에 있어 개선이 필요한 점도 있다. 즉, 그림에서 보는 바와 같이, 전반적으로는 RAM 수치모의의 결과가 거의 모든 지점과 시간대에서 관측값에 비해 높은 풍속을 나타내고 있고 풍속의 변화경향도 대체적으로 잘 따라가고 있지만, 관측값을 일정부분 초과하는 풍속값의 폭(관측값과 모델값의 차이)이 지점별로, 시간대별로 일률적이지 않다. 이와 관련해서는 현재의 연구에 이어 추가적으로 분석되고 수정하는 연구가 수행되고 있으므로 차후 개선된 결과가 도출될 수 있을 것이다. 하지만, 현 상태에서의 연구결과가 이러한 개선점이 있지만, 태풍에 의한 강풍피해를 예방하고 대비하는 사전방재의 측면에서 현장 적용적으로 활용 가능한 개념적 정보제공에 관한 유의미한 학술적 가치를 가지고 있다고 판단된다.



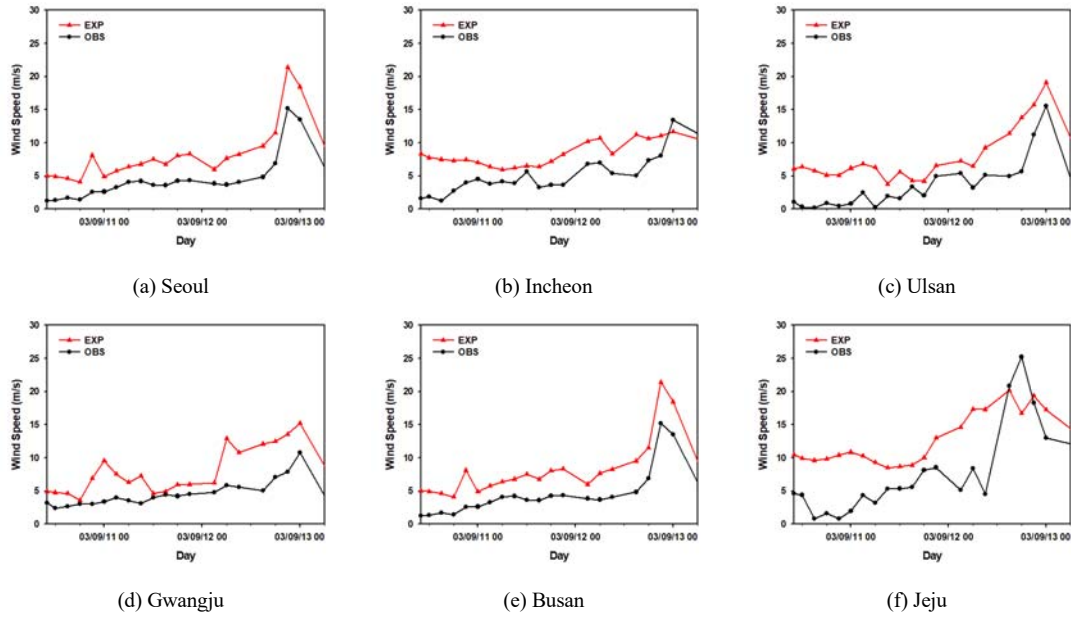


Fig. 5. Time series of observed(black) and simulated(gray) wind speed at Seoul, Incheon, Ulsan, Gwangju, Busan and Jeju.

### 3.2. 연도 별 3-second gust 분석

태풍 내습시 강풍에 의해 발생하는 피해는 앞서 분석한 평균개념의 최대풍속에 의해서 발생하기도 하지만, 대부분의 경우에 있어서는 순간적으로 발생하는 돌풍개념의 최대풍속에 더욱 크게 영향을 받는다. 따라서 태풍에 동반된 최대풍속에 의한 피해를 평가하고 예측하기 위해서는 이러한 개념의 순간 최대풍속 정보를 도출하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는, 앞서 상세한 분석과 타당성을 검증한 10 m 고도에서의 최대풍속에 순간 최대풍속 정보 도출에 적용되는 돌풍계수인 Gust factor를 고려하여, 3-second gust를 산정해 보았다.

Fig. 6은 연구 대상 기간 동안 각 연도 별 한반도에 영향을 미친 태풍의 3-second gust와 분포를 나타낸 것이다. 2009년은 한반도에 영향을 미친 태풍이 없어 분석에서 제외하였다. 그림은 우리나라 기상청에서 분류하고 있는 태풍의 단계별 분류기준을 참고하여 나타내었다. 우리나라 기상청에서는 태풍의 중심부근 최대풍속을 기준으로 4단계로 구분하고 있다. 즉, 중심 부근 최대풍속이 17~25 m/s 이면 ‘약’, 25~33 m/s

이면 ‘중’, 그리고 33~44 m/s 이면 ‘강’, 그리고 44 m/s 이상이면 ‘매우 강’으로 구분하고 있다. 본 연구에서는 이러한 우리나라 기상청의 태풍 분류 기준을 참고하여 풍속대별 그림으로 표출하였다.

Fig. 6에 나타낸 그림은 해당 연도별로 그 해 발생한 모든 태풍에 의해 발생한 3-second gust를 모두 나타내어 풍속대 별로 분포를 나타낸 것이다. Fig. 6a는 한반도에 역사상가장 큰 피해를 주었던 태풍 ‘루사’를 포함해서 4개의 태풍이 한반도에 영향을 미친 2002년의 결과이다. 그림을 보면, 전라남도 지역 일부를 제외한 한반도의 대부분 지역에서 33~44 m/s의 ‘강’에 해당하는 3-second gust가 나타나며, 전라북도 지역과 동해 일부에서는 44 m/s 이상의 ‘매우 강’에 해당하는 3-second gust가 나타났다. Fig. 6b는 기상 관측이 시작된 이래 기록된 순간 최대풍속에서 가장 높은 값을 기록한 태풍 ‘매미’가 발생한 2003년의 결과로, 경상남도, 경상북도 그리고 강원도를 포함한 동해 일부지역에 33~44 m/s에 해당하는 강한 강도의 3-second gust가 나타났다. 2004년의 3-second gust를 살펴보면 (Fig. 6c) 경상남북도와 전라남도 지역의 육상과 해상

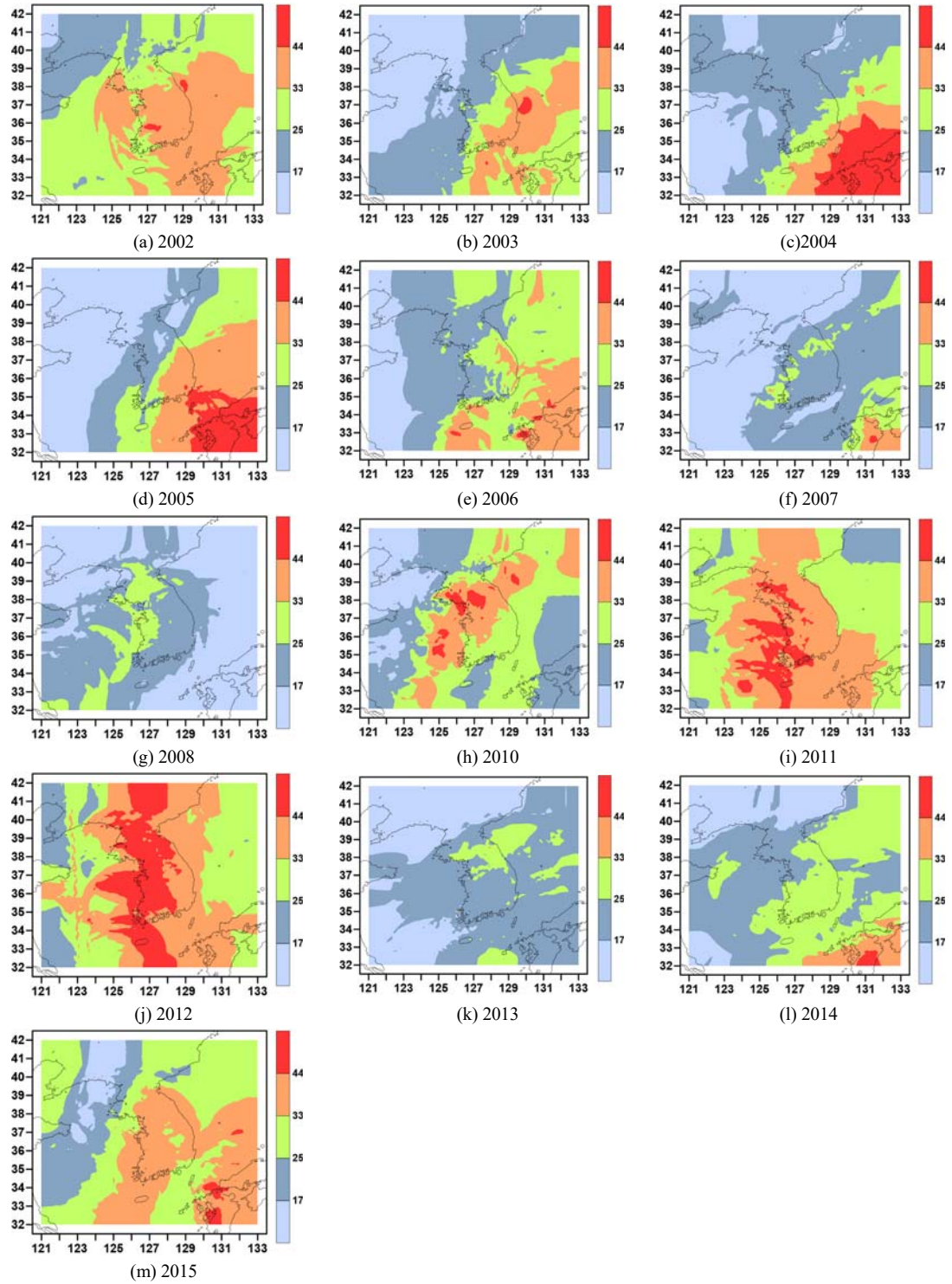


Fig. 6. Annual distribution of 3-second gust (2002-2015).

**Table 5.** Probability distribution of 3-second gust (2002-2015)

| Year | 3-second gust(m/s) |       |       |       |          |  |
|------|--------------------|-------|-------|-------|----------|--|
|      | ~ 17 m/s           | 17~25 | 25~33 | 33~44 | 44 m/s ~ |  |
| 2002 | 0.1                | 13.0  | 40.7  | 45.5  | 0.7      |  |
| 2003 | 23.2               | 35.5  | 20.8  | 19.7  | 0.8      |  |
| 2004 | 16.2               | 48.7  | 14.2  | 9.1   | 11.8     |  |
| 2005 | 34.8               | 19.6  | 15.6  | 21.7  | 8.3      |  |
| 2006 | 11.2               | 40.6  | 31.5  | 15.9  | 0.8      |  |
| 2007 | 41.6               | 48.0  | 8.6   | 1.6   | 0.2      |  |
| 2008 | 41.6               | 44.9  | 13.4  | 0.1   | -        |  |
| 2010 | 10.2               | 28.4  | 37.6  | 20.5  | 3.3      |  |
| 2011 | -                  | 2.6   | 34.4  | 51.3  | 11.7     |  |
| 2012 | -                  | 5.6   | 28.5  | 43.9  | 22.0     |  |
| 2013 | 25.3               | 63.8  | 10.9  | -     | -        |  |
| 2014 | 8.5                | 43.7  | 44.1  | 3.2   | 0.5      |  |
| 2015 | 5.8                | 17.5  | 36.7  | 38.4  | 1.6      |  |
|      | 19.9               | 31.7  | 25.9  | 22.6  | 5.6      |  |

에서 걸쳐 25~33 m/s의 3-second gust가 넓게 분포하고 있는 것을 알 수 있는데, 특히, 부산, 울산, 포항을 포함한 경상도 일부 지역에서 33~44 m/s의 강한 3-second gust가 나타났다. 2005년의 경우(Fig. 6d)에는 경기도와 충청권을 제외한 우리나라 거의 대부분 지역에 25~33 m/s의 3-second gust가 나타났고, 경상도와 강원도 지역에 걸쳐 33~44 m/s의 강한 3-second gust가 넓게 나타났다. 2006년(Fig. 6e)은 강원도 일부 지역과 경상도 일부 지역, 제주도 지역에서 강한 3-second gust가 나타났다. 2007년(Fig. 6f)은 연구 대상기간 중 3-second gust 값이 가장 낮게 나타난 해로 한반도 전역에 걸쳐 17~25 m/s의 3-second gust가 나타났고, 강원지역과 전라북도, 서해안 일부 지역에서 국지적으로 25~33 m/s의 3-second gust가 나타났다. 2008년(Fig. 6g)은 한반도에 1개의 태풍이 영향을 준 해로써, 태풍이 중국에 상륙하여 서해로 북상하는 경로를 가진 태풍의 영향에 의해 서해안을 포함한 전라북도와 충청도 일부 지역에 25~33 m/s의 3-second gust가 나타났다. 2010년(Fig. 6h)에는 서해안으로 북상하여 수도권과 강원도 지역을 통과하는 경로의 태풍으로 인해 서해와 수도권, 강원도 지역에서 33~44 m/s의 강한 3-second gust가 나타났으며, 특히, 서울

지역과 인천연안지역에서 매우 강한 순간 최대풍속이 나타났다. 2011년(Fig. 6i)에는 한반도에 영향을 미친 태풍2개 모두 서해로 북상하다 한반도에 상륙하지 못하고 소멸하는 경로를 가졌다. 이로 인해, 동해를 제외한 한반도 전체에서 33 m/s 이상의 강한 3-second gust가 나타났으며, 진행경로 근처에 위치한 서해와 전라남도 일부 지역에는 44 m/s 이상의 매우 강한 3-second gust가 나타났다. 2012년(Fig. 6j)은 짧은 기간에도 불구하고 매우 큰 피해를 준 태풍인 ‘볼라벤’이 발생한 연도로, 한반도의 육상과 해상 전역에서 33 m/s 이상의 강한 3-second gust가 나타났으며, 서해를 포함한 제주, 전라도, 충청도 지역에는 44 m/s 이상의 매우 강한 3-second gust가 나타났다. 2013년(Fig. 6k)에는 한반도에 영향을 미친 태풍 모두 한반도 근처에서 열대저기압으로 소멸되어, 전반적으로 한반도에 비교적 약한 3-second gust가 나타났다. 2014년(Fig. 6l)의 3-second gust는 서해 일부, 남해, 동해안을 포함한 한반도에 25~33 m/s의 3-second gust가 나타났으며, 2015년(Fig. 6m)에는 경상남도 일부지역과 경상북도, 경기도 일부 지역을 제외하고 한반도 전체에서 33~44 m/s의 3-second gust가 나타났다. 이상에서 살펴본 각 연도별 3-second gust의 분포를 보면, 태풍의

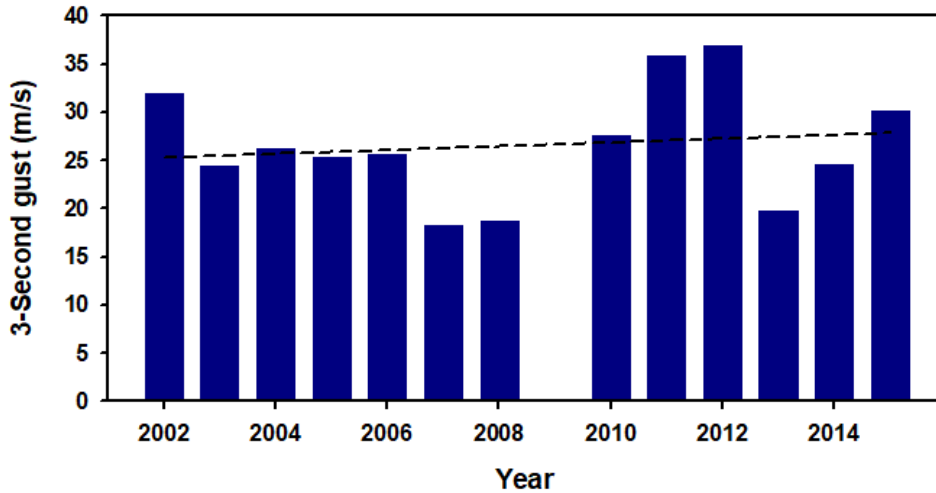


Fig. 7. Annual average of 3-second gust (2002-2015).

경로에 따라 한반도의 육상과 해상을 포함한 각 지역 별로 순간 최대풍속의 발생이 상당히 다른 경향을 보이는 것을 잘 알 수 있다. 즉, 전체 연구 대상 기간 동안 각 연도별 3-second gust 분포를 보면, 2002-2006년까지 한반도의 남동해안을 포함한 경상도 일부 지역에 높은 3-second gust가 나타나는 경향을 보이며, 최근으로 올수록 3-second gust의 강풍 영역이 넓어지고, 서해안, 수도권 지역을 중심으로 한반도 전역에 걸쳐 3-second gust가 강해지는 특징을 보였다.

Table 5는 연구 대상 기간 동안 우리나라의 기상청 태풍 분류기준에 해당하는 각 풍속대별 3-second gust의 발생 비율을 나타낸 것이다. 표에 나타난 바와 같이, 연구 대상 기간 동안 우리나라 기상청의 태풍 강도 분류 중에서 ‘중’에 해당하는 17~25 m/s에 해당하는 3-second gust가 31.7%로 가장 많이 발생하였으며, 그 다음으로 태풍 강도 분류 중에서 ‘강’에 해당하는 25~33 m/s의 순간 최대풍속이 25.9%의 비율로 발생하였다. 그리고 태풍의 강도 분류 기준에서 가장 강한 풍속대에 해당하는 ‘매우 강’에 해당하는 44 m/s 이상의 순간 최대풍속도 5.6%의 비율로 나타났다.

Fig. 7은 각 연도별로 한반도에 태풍이 영향을 미친 기간 동안 3-second gust의 평균을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 2012년에 36.9 m/s로 가장 강한 순간 최대풍속이 나타난 것을 알 수 있고, 2007

년에 비교적 가장 약한 순간 최대풍속이 발생한 것을 볼 수 있다. 또한, 각 연도별 3-second gust가 전반적으로 조금씩 강해지는 경향을 보이고는 있지만, 이것에 관해서는 좀 더 신중하고 추가적인 분석이 추가되어야 할 것으로 사료된다.

### 3.3. 엘니뇨·라니냐에 따른 3-second gust 분석

여러 선행 연구(Cha et al., 1999; Seol et al., 2001)를 보면, 엘리뇨 발생 연도에는 평년이나 라니냐 발생 연도에 비해 태풍의 운동에너지가 더 강하게 나타난다는 것을 제시하고 있다. 즉, 엘리뇨 발생 연도에는 태풍에서 나타나는 최대풍속이나 순간 최대풍속이 평년이나 라니냐 발생 연도에 비해 더 강하게 나타날 수 있다는 것을 의미한다. 이에 본 연구에서는 연구 대상 기간 동안 엘리뇨 발생연도와 라니냐 발생연도의 3-second gust의 발생특성을 분석해 보았다. 연구 대상 기간 중에서 2003년과 2013년은 엘리뇨, 라니냐가 발생하지 않았고, 2009년에는 한반도에 영향을 미친 태풍이 존재하지 않았기 때문에 이 3개 연도는 분석에서 제외하였다.

Table 6은 연구 대상 기간 동안 엘니뇨·라니냐 발생 연도한반도에 영향을 미친 태풍의 횟수와 그에 해당하는 태풍들에서 발생한 평균 3-second gust 값을 나타낸 것이다. 연구 대상 기간 동안 엘니뇨가 발생한

**Table 6.** Typhoon frequency, Average of 3-second gust in El Niño, La Niña

|                               | El Niño year                       | La Niña year                 |
|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Occurrence year               | 2002, 2004, 2005, 2006, 2014, 2015 | 2007, 2008, 2010, 2011, 2012 |
| Frequency of typhoon occurred | 21                                 | 14                           |
| Average 3-second gust (m/s)   | 26.2                               | 24.6                         |

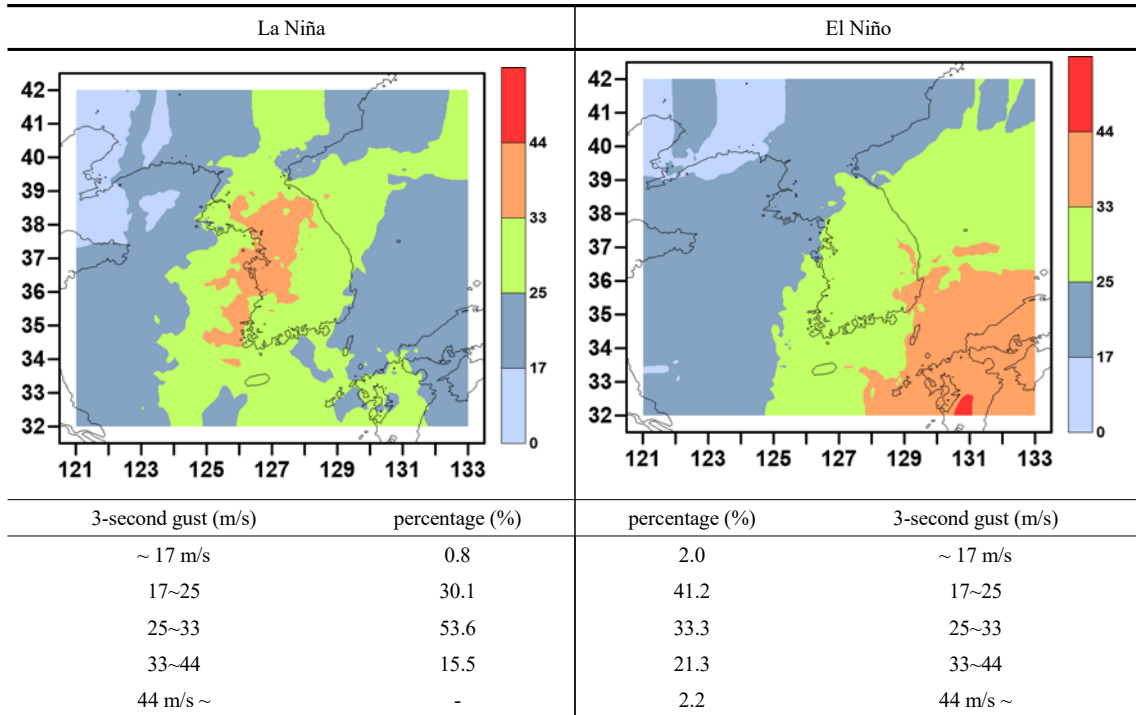
연도는 6년이었으며 라니냐가 발생한 연도는 5년으로 나타났고, 이들 각각의 엘니뇨와 라니냐 발생 해에 한반도에 영향을 미친 태풍은 각각 21회, 14회로 나타났다. 표에서 보는 바와 같이, 엘니뇨가 발생한 연도에 해당하는 태풍에서 나타난 평균 3-second gust는 26.2 m/s 였으며, 라니냐가 발생한 연도는 해당하는 태풍에서는 평균 3-second gust는 24.6 m/s로 나타나서, 엘니뇨가 발생한 연도에 한반도에 영향을 미치는 태풍에서 나타나는 3-second gust가 라니냐가 발생한 연도에 발생한 태풍에서보다 더 강하다는 것을 알 수 있다.

Table 7은 엘니뇨, 라니냐 발생 연도에 한반도에 영향을 미친 태풍 21개와 14개에서 발생한 3-second

gust의 분포를 나타낸 것이다. 33~44 m/s의 분포를 살펴보면 엘니뇨 해는 남동해안을 걸쳐 나타났으며, 라니냐 해의 경우 서해안과 강원도 일부 지역에서 나타났다. 강한 풍속에 해당하는 구간에서의 발생비율이 엘니뇨 발생 해에서 더 높게 나타나고 있으며, 특히, 44 m/s 이상의 매우 강한 풍속의 발생비율은 엘니뇨 해에서는 나타났지만, 라니냐 해에서는 나타나지 않았다.

따라서, 이들 분석에서 살펴본 바와 같이, 엘니뇨가 발생한 연도에 한반도에 영향을 미친 태풍에서 더 강한 풍속의 3-second gust가 나타났다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 태풍의 운동에너지가 엘니뇨

**Table 7.** Probability distribution of 3-second gust in El Niño, La Niña



발생 연도가 더 높게 나타났다는 여러 선행 연구의 결과와 상당히 밀접한 연관이 있는 것으로, 엘니노가 발생함에 따라 서태평양 해수온이 평년이나 라니냐 발생 연도보다 높아지게 되고, 이로 인해, 이 지역에서 발생한 더욱 강력한 태풍이 진행되는 경로에 위치한 한반도에도 더욱 강력한 3-second gust가 발생하게 된 것으로 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 한반도에 영향을 미친 태풍을 대상으로 발생 가능한 순간 최대풍속인 3-second gust를 산정하여, 풍속대 별 분포 특징을 살펴보고, 고해상도의 각 격자 별 3-second gust DB를 만들어 태풍에 대한 사전 방재 시스템의 기초 자료를 구축하고자 하였다. 이를 위해 연구 대상 기간인 2002년부터 2015년까지 한반도에 영향을 미친 태풍을 대상으로 태풍 내습 시 3-second gust를 각 연도 별로 살펴보았다. 분석을 수행한 결과, 전반적으로 2002년부터 2006년까지는 한반도의 남동해안을 포함한 경상도 지역에서 높은 3-second gust가 나타나는 경향을 보였으며, 이후, 최근으로 올수록 3-second gust의 강풍 영역이 넓어지고, 수도권 지역에서 3-second gust가 높게 나타나는 경향이 나타났다. 연도 별로 평균 3-second gust를 보면, 2012년 가장 높은 3-second gust가 나타났으며, 2007년에 가장 낮은 순간 최대풍속을 보였다.

이와 더불어 엘니노와 라니냐가 발생한 해에 한반도에 영향을 미친 태풍을 대상으로 3-second gust의 특성을 살펴본 결과, 엘니노 발생 연도에는 3-second gust가 26.2 m/s로 나타났으나 라니냐 발생 연도에는 24.6 m/s로 나타나며, 엘니노 발생 연도에 한반도에 영향을 미친 태풍에서 더욱 강한 순간 최대풍속이 나타난 것을 알 수 있었다.

본 연구의 연구 결과를 통해 태풍 내습 시 발생 가능한 최대 풍속, 3-second gust의 연도 별, 엘니노·라니냐 발생 연도에 따른 특징과 DB화 된 자료를 통해 사전 방재 시스템의 기초 자료로 사용할 수 있을 것으로 판단되며, 추후에 연구 기간을 연장하여 자세히 분석해 볼 필요가 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 기상청 기상산업지원 및 활용기술 개발 사업(KMIPA 2015-8070)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

- Cha, E. J., Jhun, J. G., Chung, H. S., 1999, A Study on characteristics of climate in South Korea for El Nino/La Nina years, *Journal of Atmospheric Sciences*, 35(1), 98-117.
- Ham, H. J., Lee, S. S., Yoon, W. S., 2013, Evaluation of Typhoon Risk on Sandwich Panel Building Systems, *Korea Society of Civil Engineers*, 17(1), 1-7.
- Ho, C. H., 2012, Future Climate Change and the Associated Changes in Tropical Cyclone. *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, 16(3), 57-61.
- 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.
- Ju, Y. H., Kim, Y., Park, J. H., 2017, An Analysis of Major Issues in the Inventory System for Counting Damage on Buildings and Facilities due to Heavy Rains and Typhoons and a Proposal for its Improvement, *Journal of Korea Planning Association*, 52(3), 237-261.
- 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.
- 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.
- 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, Kimhae, Korea, 109.
- Lee, D. K., Jang, D. Y., W, T. K., 1992, Typhoons Approaching Korea, 1960-1989 Part I : Statistics and Synoptic Overview, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 28, 133-147.
- Lee, S. G., 2002, Damage State and Countermeasures by Typhoon Rusa (Landslide), *Journal of the Korea*

- Society of Civil Engineers, 50(10), 40-49.
- Oh, J. H., Seo, K. D., Kim, Y. O., 2011, An Analysis of the Strength and Duration of Typhoons Affecting the Korean Peninsula over the past 60 Years, *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, 31(2), 121-128.
- Park, J. K., Jang, E. S., Choi, H. J., 2005, An Analysis of Meteorological Disasters Occurred in the Korean Peninsula, *Journal of the Environmental Sciences*, 14(6), 613-619(Korean).
- Park, J. K., Jung, W. S., Choi, H. J., 2007, Pilot Study on the Typhoon for the Meteorological Information Application and Disaster Prevention, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 7(1), 21-28.
- Park, J. K., Kim, B. S., Jung, W. S., Kim, E. B., Lee, D. G., 2006, Changes in Statistical Characteristics of Typhoons Affecting Korean Peninsula, *Atmosphere*, 16(1), 1-17.
- 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 the Environmental Sciences*, 17(2), 195-201.
- Seol, D. I., Kim, K. M., Lee, K. J., Lee, D. J., 2001, Relationship between El Nino and La Nina phenomena and the Number of Typhoons Which have Affected on Korea, 7(1), 1-6.
- Yoo, Y. M., Yoon, C. R., Lee, H. N., Lee, J. W., 2011, A Study on Natural Disaster Damage and Response in Vulnerable Country, *Journal of Applied Geography*, (29), 77-93.
- KMA, 2011, Typhoon White Book. National Typhoon Center/KMA. 345pp.