

논문

태풍사전방재모델의 예측 정확도 향상을 위한 연구 Part III: 토양자료별 WRF 민감도 분석

A Study on Improving the Prediction Accuracy of a Typhoon Disaster Prevention Model

Part III: Sensitivity of the WRF Model to Soil Data

나하나, 정우식*

인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터

Hana Na, Woo-Sik Jung*

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

접수일 2021년 2월 9일
수정일 2021년 3월 9일
채택일 2021년 3월 26일

Received 9 February 2021
Revised 9 March 2021
Accepted 26 March 2021

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

Abstract Since natural disasters have the risk of destroying almost everything at the moment they exceed the intensity of the threshold, it is important to accurately predict the 3-Second gust and provide reliable information on possible future damage from the perspective of prevention of strong winds accompanying typhoons. To improve the prediction accuracy of the Korean typhoon disaster prevention model, it need to increase reliability of the WRF numerical model that produces the initial wind information input into the model. As a way to improve the accuracy of the WRF model, we perform a sensitivity analysis of the WRF model according to the type of soil data. As a result of comparative analysis of each modeling result by applying the UM model-based GDAPS soil data and NCEP GFS soil data to each WRF model, the accuracy of the WRF modeling results using UM-based GDAPS soil data is better. In addition, the results of the 3-Second gust of the Korean typhoon pre-disaster prevention model, which used WRF modeling results using GDAPS soil data as input, were also found to be more accurate than those of NCEP GFS soil data.

Key words: Soil data, GFS, GDAPS, WRF, Typhoon pre-disaster prevention model

1. 서 론

최근 기후변화에 따른 지구온난화가 지속되면서 전 세계적으로 슈퍼태풍, 폭염, 강풍, 집중호우 등 이상기상현상의 발생이 빈번해지고 있다. 특히, 태풍과 허리케인과 같은 열대성 저기압의 강도가 점차 강력해지면서 이로 인한 막대한 피해 또한 증가하고 있다. 2015년 IPCC의 보고서(IPCC, 2015)에 따르면 북서태평양과 한반도 주변의 해수온이 다른 해역에 비해 빠르게 상승하면서 이로 인한 한반도 영향태풍의 강도 또한 강화될 것으로 전망한 바 있다. 실제 한반도에서

는, 최근으로 올수록, 영향 태풍의 빈도와 강도가 급격히 증가하였으며 그로 인해 막대한 피해가 발생하고 있다(KMA, 2020; Kang *et al.*, 2018). 이와 같은 태풍의 피해증가에 따라 태풍피해를 예측하거나 진단할 수 있는 시스템이 개발되었는데, 그중에서 미국 Florida Department of Financial Services (FDFS)의 Florida Public Hurricane Loss Model (FPHLM)은 Federal Emergency Management Agency (FEMA), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 미국의 Florida 대학을 포함하여 기상학, 풍력 및 구조공학, 기상재해 보험 분야의 전문가로 구성된 팀

(Chen *et al.*, 2009; Pinelli *et al.*, 2009; Vickery and Skerlj, 2005)에서 개발한 허리케인 재난 모델(FDFS, 2005)로서, 허리케인의 내습 시기 발생할 수 있는 최대순간 풍속과 최대피해액을 추정하는 데 유용하고 정확한 정보를 제공하는 데 유용한 도구로 활용되고 있다. 국내에서는 이러한 FPHLM을 기반으로 한반도에 영향을 미치는 태풍에 적용 가능한 한국형 태풍사전방재모델의 개발과 운용에 관한 연구들(Na and Jung, 2020, 2019; Jung, 2015)이 수행된 바 있는데, 이들 연구에서는 태풍 내습에 따른 피해예측 정보를 일선 방재행정현장에서 활용가능한 수준으로 제공하기 위해서는 신속하고 정확한 3-Second gust의 예측이 매우 중요함을 강조하였으며, 태풍사전방재모델과 이 모델의 초기기상입력자료를 생산하는 Weather Research and Forecasting (WRF) 모델의 정확도 향상방안으로 고해상도 해수면온도 자료(Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis, OSTIA)와 기상자료동화(Four Dimension Data Assimilation, FDDA)의 적용, 그리고 Unified Model (UM) 기반의 Global Data Assimilation Prediction System (GDAPS), Regional Data Assimilation Prediction System (RDAPS), 그리고 Global Forecast System (GFS) 자료의 적용에 대한 모델의 수행력에 대한 평가를 한 바 있다.

본 연구에서는, 이러한 측면에서의 추가적 연구로서, 각각 다른 기관에서 제공하고 있는 토양자료를 WRF 모델과 태풍사전방재모델에 적용하여 이들 모델의 민감도 분석과 예측정확도를 평가하였다. 이를 통해, 향후, 태풍으로 인한 피해를 사전에 예측하여 방재행정현장에서 실제로 활용가능한 정보를 생산하는 시스템 개발연구의 중요자료로 활용하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구대상기간

본 연구에서는 토양자료별 적용에 따른 WRF 모델과 태풍사전방재모델의 수행력을 평가하기 위해

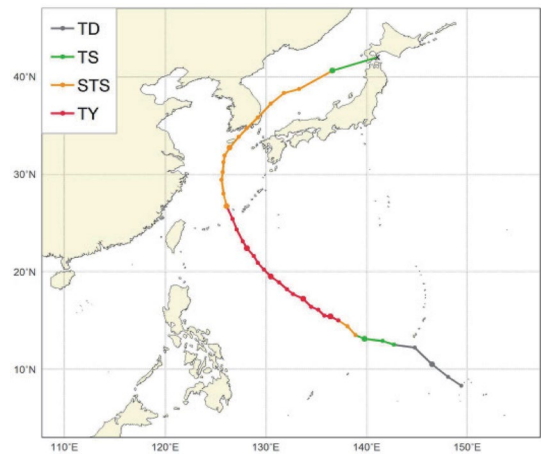


Fig. 1. Track of Typhoon 'KONG-REY (1825)'.

2018년도 한반도 영향태풍인 '콩레이 (1825)'를 분석 대상으로 설정하였다(그림 1). 태풍 콩레이는 한반도에서 근대기상관측이 수행된 이후 한반도에 영향을 미친 전체 태풍 361개 중에서 10월 역대 최다강수량을 갱신하였으며, 울릉도에서 순간최대풍속 36.6 m/s의 풍속이 기록된 태풍으로, 최근 연구의 중요성이 커지고 있는 대표적인 '가을태풍'에 해당한다. 이 태풍은 2018년 한반도 폭염의 여파가 남아있던 10월에 동중국해를 지나며 재발달하여 기상청 태풍 강도 분류 기준으로 '초강력'에 해당하는 매우 강한 태풍이었다. 당시, 강한 풍속과 많은 강수로 인해 재산피해가 약 549억 원 발생하였으며, 사망 2명, 실종 1명으로 인명피해 또한 3명으로 집계되었다. 본 연구에서는 기상청 한반도 영향태풍 보고서(2019)에 기록된 태풍 콩레이의 한반도 영향기간인 2018년 10월 5일 00 UTC~2018년 10월 6일 18 UTC를 대상으로 분석을 수행하였다.

2.2 태풍사전방재모델

본 연구에서 사용한 태풍사전방재모델은 미국 FDFS에서 개발하여 운용 중인 FPHLM을 한반도에 영향을 미치는 태풍에 적용하기 위해 개선 및 보완한 것이다. 태풍 영향시기에 발생 가능한 최대순간풍속인 3-Second gust를 산정할 수 있으며, 또 다른 모듈연

산 과정을 거치면 태풍으로 유발되는 강풍에 의한 재산상 피해액도 산정할 수 있다. 본 연구에서는 3-Second gust 산정에 대한 연구를 진행하였다. 이 모델은 태풍에 의한 피해가 예상되는 가까운 시점에 빠르고 정확한 정보를 제공하기 위해 빠른 계산이 가능하며 사전방재의 관점에서 요구되는 피해관련 단계별 임계값 정보를 산출할 수 있다는 현장적용 측면에서 활용성이 높다. 이러한 태풍사전방재모델에 대한 상세한 설명은 선행연구에 자세히 소개되어 있다(Na and Jung, 2020, 2019). 그림 2는 3-Second gust 산정과정에서 태풍사전방재모델의 개요를 나타낸 것이다.



Fig. 2. Flow chart of Korean typhoon pre-disaster prevention model.

2.3 WRF 모델링

태풍에 동반된 최대순간풍속인 3-Second gust를 계산하기 위해서는 태풍사전방재모델의 초기입력자료로 풍속에 대한 정보가 필요하다. 본 연구에서 사용한 한국형 태풍사전방재모델에는 상세한 시공간정보로서의 고해상도의 풍속이 고려되어야 하는데, 이러한 정보 도출을 위해 기상장수치모델인 WRF를 활용하였다. WRF 모델은 University Corporation for Atmospheric Research/National Centers for Atmospheric Research (UCAR/NCEP)에서 날씨의 연구 및 예측을 위해 개발된 수치모델로서, 본 연구에서는 WRF Version 3.8.1의 연구용 WRF-ARW를 사용하였으며, 본 연구에 적용한 모델의 물리옵션(Dai *et al.*, 2021; Na and Jung, 2020; Tian *et al.*, 2017) 및 도메인 구성은 표 1과 그림 3에 제시되어 있다.

토양자료별 적용에 따른 WRF 모델의 민감도 분석을 수행하기 위해, 본 연구에서는 초기입력자료로, 기상청에서 제공하는 ‘GDAPS 수치모델자료(이하 GDAPS)’와 미국 National Centers for Environmental Prediction(NCEP)에서 권장하고 있는 ‘GFS 수치모델자료(이하 GFS)’를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 GDAPS는 Regional Data Assimilation Data Prediction

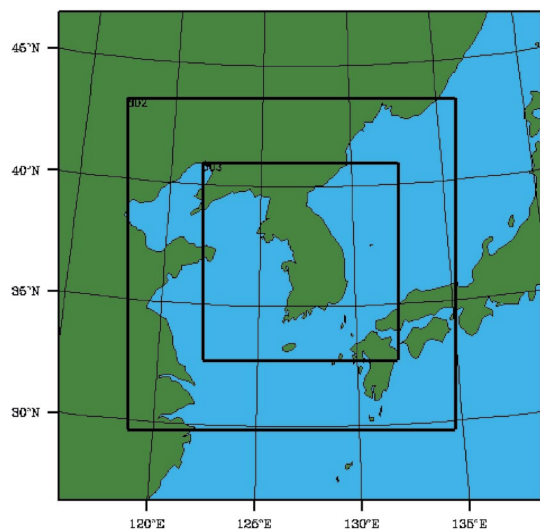


Fig. 3. Nested model domains used in this study.

Table 1. WRF domain and physics option.

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Horizontal grid	124 × 124	223 × 223	334 × 334
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_ws cu_physics	WSM6 scheme YSU scheme Noah LSM Monin-Obukhov scheme RRTM longwave Dudhia shortwave Kain-Fritsch scheme	No CPs
Initial data		GFS, GDAPS	

Table 2. Meteorological input data for WRF modeling.

Input data	Spatial resolution	Temporal resolution	Prediction times
GFS	27.5 km	6 hr	240 hours
GDAPS	10 km	3 hr	288 hours

System (RDAPS)와 함께 우리나라 기상청에서 2010년부터 기상예보업무에 현업 운용 중인 Unified Model (UM)을 기반으로 제공되는 수치모델자료로서, RDAPS는 2018년 4월 생산을 중지하고, 그 이후로는 10 km 해상도의 GDAPS만 생산하고 있다. 이 자료에는 한반도에서의 여러 관측정보(종관기상관측, 존데, 항공기관측자료, 위성자료 등)에 대한 자료동화기법이 반영되어 있다. GFS는 미국 NCEP에서 제공되는 전지구 규모의 수치모델 자료로서 국내외의 여러 WRF 모델링 관련 연구(Haifan and William, 2016; Jee *et al.*, 2016; Oh *et al.*, 2016; Nick, 2014)들에서 보편적으로 많이 사용되고 있는 자료이다. 표 2는 본 연구의 WRF 모델링에 사용된 GDAPS와 GFS 각각에 대한 정보를 나타낸 것이다(표 2에 제시된 GFS 자료 해상도는 2018년 당시의 구성).

2. 4 토양자료

태풍사전방재모델의 예측정확도 향상을 위해서는, 우선적으로, 이 모델의 입력자료로 활용되는 WRF 모

델링 결과의 정확도 향상 및 이를 통한 타당성 확보가 매우 중요하다. 이와 관련된 선행연구를 보면, 고해상도의 해수면온도자료 적용이나 지표 온도 변화에 따른 민감도, 그리고 도시 물리 매개변수에 대한 수행력 등을 평가한 연구들(Ashish *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2016; Carolina *et al.*, 2014; Jeong and Kim, 2009)이 있고 다양한 해수면 온도자료의 적용에 따른 WRF 모델의 수행력을 평가한 연구(Na and Jung, 2020)도 수행된 바 있지만, 상층기상에 큰 영향을 미치는 지표 부근 및 저층대기에서의 기상요소에 직접적으로 큰 영향을 미치는 토양자료별 적용에 따른 WRF 모델의 수행력 평가연구는 매우 부족하다. 앞서 언급한 바와 같이, WRF 모델링을 수행할 때 초기입력자료로 GFS를 일반적으로 많은 연구에서 사용하는 데에는 여러 목적이나 이유가 있지만, 그중에서도, 이 자료는 특별한 재처리 또는 수정과정 없이 WRF 모델링에 바로 사용할 수 있다는 편의적 측면에서의 장점이 큰 이유이기도 하다. 하지만, 표 1에 나타낸 바와 같이, 시공간 측면에서도 고해상도의 구조를 가지며 더 장기간의 예보정보를 제공하는 장점을 가지고 있는 GDAPS를 WRF 모델링에 사용하는 경우에는 GDAPS에 포함된 토양자료의 구조나 배열 등을 재처리하여야 하는 번거로움이나 어려움이 발생한다. 즉, GDAPS에 포함된 기상자료는 특별한 변환과정없이 WRF 모델링에 그대로 사용할 수 있지만, 토양자료부분은 그대로 사용

하지 못한다. 이에 GDAPS 자료를 WRF 모델링 입력 자료로 사용하는 일부 연구(Lee, 2017; Jeong *et al.*, 2011)에서는 기상자료만 GDAPS를 사용하고 토양자료는, 수정이나 변환과정이 필요 없는, GFS를 사용하기도 하였다. 하지만, GDAPS와 GFS를 기상 및 토양자료로 각각 활용하게 되면, 지면-대기 계산과정에서의 자료 간 불합치 및 일관성 결여로 인한 비정상적 상호작용의 결과로 예측 정확도에 있어서의 저하가 나타날 수 있다. Lee *et al.* (2017) 연구를 보면, 기상 및 토양입력자료 모두 GDAPS를 사용한 WRF 모델링 결과와, 기상자료는 GDAPS를 사용하고 토양자료는 GFS를 사용한 WRF 모델링 결과를 비교 분석한 결과, GDAPS만을 사용할 때 GDAPS, GFS를 함께 사용하는 것보다 월등히 좋은 결과를 보일 뿐만 아니라 비정상 범위를 벗어나는 튀는 값을 완화시킨다는 결과를 도출한 바 있다. 다만, 이 연구에서는 토양자료의 비교적 용에 대한 수행력 평가의 관점을 토양관련 요소 중심으로 분석을 수행하여, 토양자료의 차이로 유발되는

Table 3. Input data for each experiment. In both experiments, GDAPS was used as meteorological data, but GFS was used as soil data in EXP1, and GDAPS was used in EXP2.

	Meteorological data	Soil data
EXP1	GDAPS	GFS
EXP2	GDAPS	GDAPS

대기에서의 기상요소와 관련된 변동 특성 등에 대한 분석은 충분하지 못하였던 아쉬움이 있다.

따라서, 본 연구에서는 토양자료별 적용에 따른 WRF 모델링 결과와 태풍사전방재모델링 결과를 살펴보기 위해 기상자료로 기상청에서 제공하는 GDAPS를 사용하고, 토양자료는 GFS를 사용한 ‘EXP1’ 실험과 기상자료와 토양자료 모두 GDAPS를 사용한 ‘EXP2’ 실험을 수행하였다(표 3).

2.5 모델 검증

WRF 모델의 수행력을 평가하기 위해 기상청에서 운용 중인 Automatic Synoptic Observation System (ASOS)에서 관측된 ‘10 m 고도 풍속’ 자료를 분석에 이용하였다. 우리나라에 설치된 ASOS 관측지점은 2018년 기준, 95개 지점이 운용되고 있으나, 태풍 Kong레이의 영향기간 동안 결측이 발생한 2개 지점(철원(95), 광양(266))을 제외한 93개의 지점을 대상으로 비교분석을 수행하였다(그림 4(a)). 이와 더불어, 태풍사전방재모델에서 산정되는 3-Second gust의 예측 정확도 평가에는, 태풍 Kong레이가 한반도에 영향을 미친 시기를 대상으로, 기상청에서 운용하고 있는 ‘해양부이’에서 관측된 ‘GUST’ 자료와, ‘등표’에서 관측된 ‘최대 순간풍속’ 자료를 활용하였다(이후 이들 자료는 ‘3-Second gust’로 통일함). 해양부이는 해수면에서 나타나는 다양한 해양기상현상을 관측하여 기압, 바람,

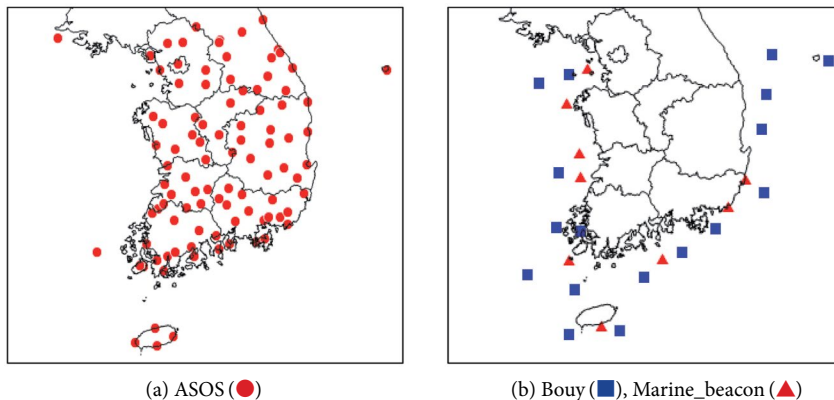


Fig. 4. Distribution of (a) ASOS and (b) Bouy/Marine_beacon sites operating inland and offshore of Korea, as of 2018.

기온, 습도, 파고 등의 다양한 요소를 기록하는 장비로서, 분석대상인 태풍 콩레이가 영향을 미친 2018년 기준으로, 한반도 주변 해역에 총 17개 지점이 운용되고 있다. 등표지점은 등표 또는 관측탑과 같은 해양의 구조물에 기상장비를 설치하여 기상요소를 관측하고, 해상에서도 파고계 등의 여러 해상장비를 통해 해상요소도 관측하고 있으며, 2018년 기준, 9개의 관측지점이 운용되고 있다. 해양부이와 등표관측지점은 그림 4(b)에 나타내었다.

3. 결 과

3.1 토양자료별 비교

토양자료별 WRF 모델의 민감도 및 수행력을 평가하기에 앞서, 두 실험(EXP1, EXP2)에서 적용한 각각의 토양자료(GFS_SOIL, GDAPS_SOIL)가 어느 정도의 차이를 나타내는지 자료에 나타난 토양요소별 비교를 수행하였다. 그림 5는 태풍 콩레이의 영향기간인 2018년 10월 5일 00 UTC 한반도 육상과 해상에서의 지중 5 cm 토양수분량과 토양온도에 대한 두 자료의 차이(GDAPS-GFS)를 나타낸 분포도이다. 토양온도(그림 5(a))를 보면, 충남과 호남전역을 비롯하여 경상 서부지역과 경기 서부지역에서는 GDAPS가 높고, 그 외 육상지역에서는 GFS가 높게 나타나는 경향을 보

이는데 특히, 제주에서는 두 자료간 온도 차이가 3.6°C 정도로 매우 크게 나타났다. 토양수분량(그림 5(b))은 경기서북부 연안지역과 부산 인근을 제외한 한반도 육상 대부분의 지역에서 GDAPS 자료가 GFS에 비해 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있었다.

이와 더불어, 제주와 강릉을 포함하여 7개 대도시, 총 9개 지점을 대상으로 태풍 콩레이 영향기간 동안의 각 자료(GDAPS, GFS)에서 제공하는 5 cm 깊이의 토양온도와 토양수분량을 비교해 보았다(그림 6, 7). 각 자료별로 토양온도는 5 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm 깊이의 토양온도가 제공되는데, 이 중에서 지표에 가장 가까우며 온도변화폭이 큰 5 cm 깊이의 토양온도를 비교하였으며, ASOS 지점에서도 5 cm 깊이의 지중온도 관측값을 제공하므로 함께 비교하였다(대구와 울산지점은 태풍 콩레이 영향기간 동안 결측). 하지만, ASOS 지점에서 토양수분량값은 관측되고 있지 않아 비교하지 못하였다. 그림 6은 9개 지점별 GDAPS 및 GFS의 토양온도값과 관측값을 나타낸 것으로, 대구와 같이 영향기간 동안 두 자료 간 차이가 작은 지점도 있지만, 대부분의 지점에서는 거의 모든 시간대에서 파란색 실선으로 나타낸 EXP2(GDAPS 토양온도)가 붉은색 실선인 EXP1(GFS 토양온도)보다 높은 값을 보이고, 부산과 광주의 일부 시간대에서는 10°C 내외의 온도 차이(GDAPS 토양온도가 높음)가 나타나기도 하였다. 즉, 대부분의 지점과 대부분의 시간대에

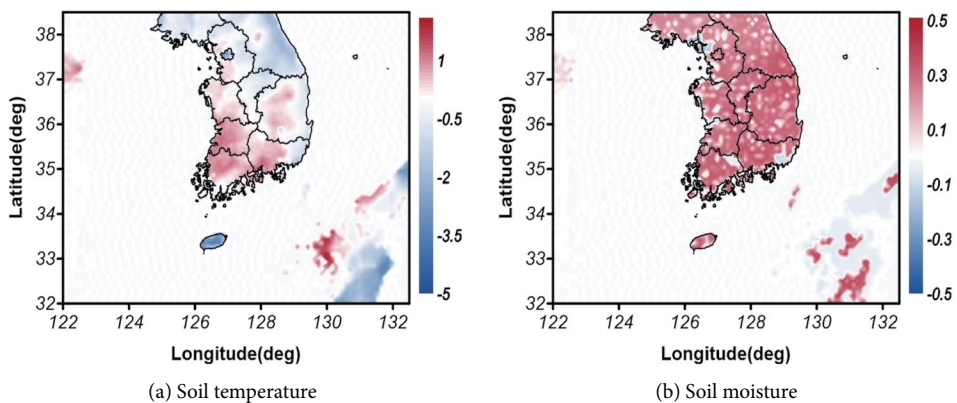


Fig. 5. Horizontal distribution of difference between GDAPS and GFS. (a) and (b) shows a difference in soil temperature, and soil moisture, respectively. The blue color in the figure indicates that GDAPS has a larger value than GFS.

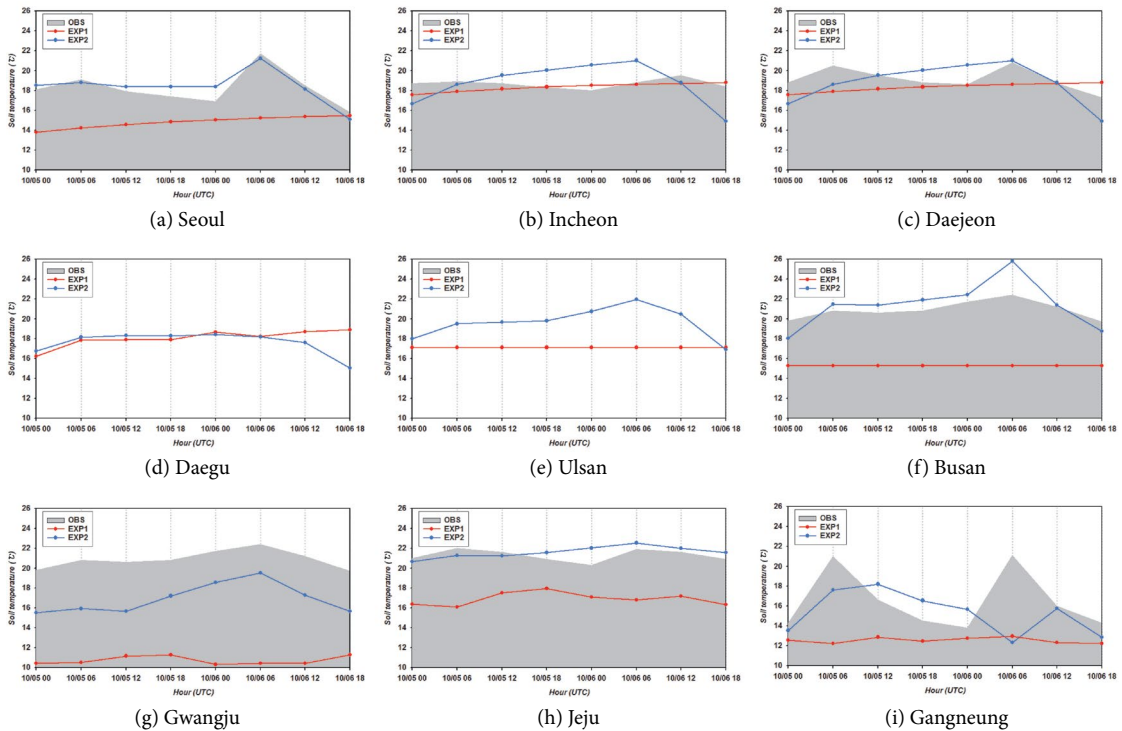


Fig. 6. Comparison of soil temperature at 5 cm depth. The gray area, red line, and blue line shows the observed value and the results of EXP1, EXP2, respectively.

서 두 자료 간 토양온도값 차이를 뚜렷이 보였으며 차이의 정도 또한 최대 10°C 이상으로 나타나서 지면에서의 온도 차이에 따른 열적변동에 큰 영향을 받는 여러 기상요소의 거동에 미치는 영향 또한 나타날 가능성이 있을 것으로 판단된다. 또한, 토양수분량을 비교한 그림 7을 보더라도 부산과 대구를 제외한 나머지 모든 지점들에서 두 자료에 나타난 토양수분값의 차이가 있음을 잘 알 수 있다. 즉, GDAPS와 GFS의 토양자료값 차이가 일정 수준 뚜렷한 범위에서 나타나고 있다는 이러한 결과들이, WRF 모델링 결과에 어느 정도로 영향을 미칠 가능성이 있는지 살펴보아야 할 필요성을 나타내는 것이라 판단된다.

이와 더불어 회색으로 표시된 관측자료와 이 두 자료를 함께 비교해 보면, GDAPS가 시간에 따른 토양온도 변화를 관측값과 더 유사하게 나타내고 있고, 토양온도값 자체를 보더라도 관측값에 더 잘 일치하고 있다. 이에 이러한 시각적 차이가 어느 정도로 나타나

는지 객관적으로 살펴보기 위하여 통계분석을 수행해 보았다. 앞서 설명한 바와 같이, 토양수분량은 관측값이 없어 통계분석은 수행하지 않았다.

그림 8과 표 4는 관측자료가 없는 대구와 울산 지점을 제외한 나머지 7개 ASOS 지점에서 관측된 토양온도와 이 지점에 해당하는 GFS와 GDAPS 토양온도 각각에 대한 통계분석을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 분석에 활용한 통계지표로는 Root Mean Square Error (RMSE), Mean Bias Error (MAE), Index Of Agreement (IOA)이며, 자세한 식은 다음 식 (1), (2), (3)과 같다.

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

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (2)$$

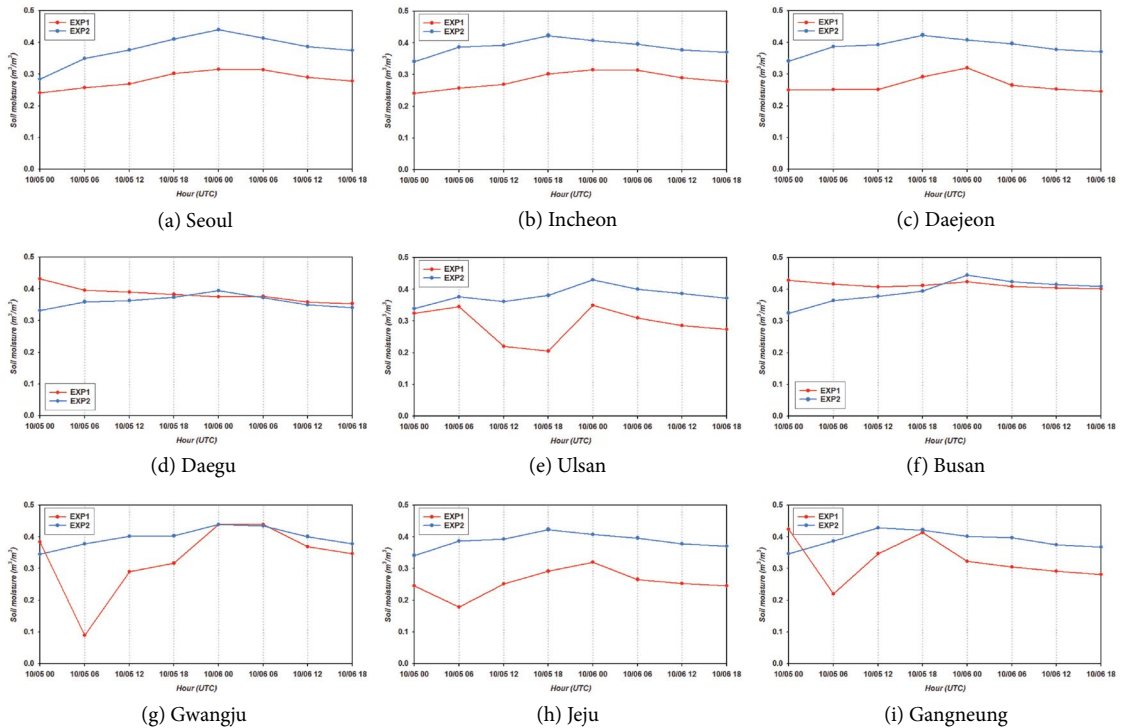


Fig. 7. Same as Fig. 6, except for soil moisture and the gray area.

$$MAE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |M_i - O_i|}{N} \quad (3)$$

7개 지점에서 관측된 토양온도에 대한 평균 RMSE 값은 GFS와 비교한 EXP1에서는 4.649로 나타났고 GDAPS와 비교한 EXP2에서는 2.486로 나타나서 GDAPS가 GFS에 비해 관측값과 조금 더 유사한 수준으로 나타났다. 또한 MAE를 보면, 지점별로 편차가 있으나 모든 지점에서 EXP2의 값이 상대적으로 좋은 것을 알 수 있고, 전 지점 평균값을 보더라도 EXP1에서는 -0.724, EXP2에서는 -0.193으로 나타나서 GFS가 관측값에 비해 더욱 과소평가하는 경향을 보였다. IOA 값은 EXP1과 EXP2가 각각 0.529, 0.892로 나타나서 GDAPS의 일치도가 더 높은 것을 알 수 있다. 이상의 결과들을 보면, GDAPS 토양온도가 GFS 토양온도에 비해 관측값과 더 유사한 온도값과 경향을 보이는 것으로 나타났다.

Table 4. RMSE, MAE, and IOA of the result of EXP1 and EXP2 for soil temperature.

	RMSE		MAE		IOA	
	EXP1	EXP2	EXP1	EXP2	EXP1	EXP2
Seoul	4.748	1.526	2.239	0.184	0.567	0.762
Incheon	5.012	1.914	3.138	-1.110	0.710	0.946
Daejeon	4.019	2.556	-3.353	0.356	0.752	0.959
Busan	3.211	1.520	0.525	0.292	0.308	0.964
Gwangju	7.911	4.017	-6.955	2.275	0.148	0.894
Jeju	3.917	0.808	4.005	0.334	0.571	0.981
Gangneung	3.723	5.058	-4.669	-3.687	0.647	0.741
Average	4.649	2.486	-0.724	-0.193	0.529	0.892

3.2 WRF 모델링 결과

앞서 분석을 통해 살펴본, 각각의 토양자료별 특성에 기반한 WRF 수치모델링 결과를 비교해 보았다. 이를 위해 태풍 콩레이의 영향기간 동안 관측이 수행된 93개 ASOS 지점의 10m 고도 풍속에 대한 관측값과 모델값을 비교하였다. 그림 9는 태풍 콩레이의 한

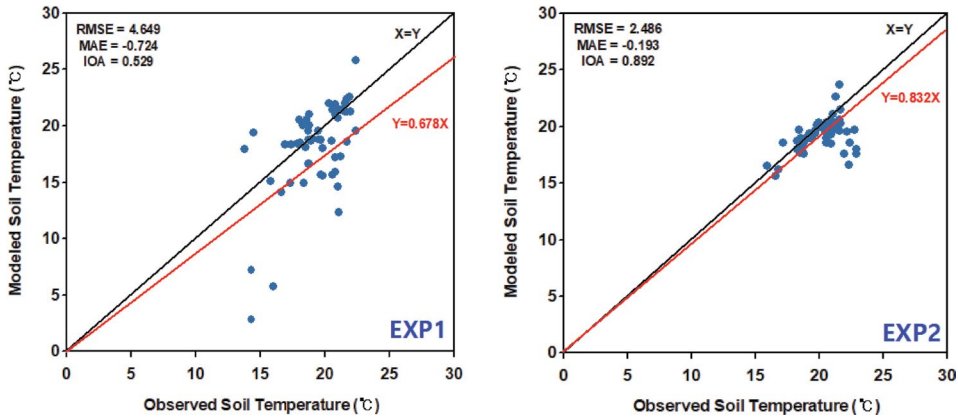


Fig. 8. Scatterplot of the result of EXP1 and EXP2 for soil temperature.

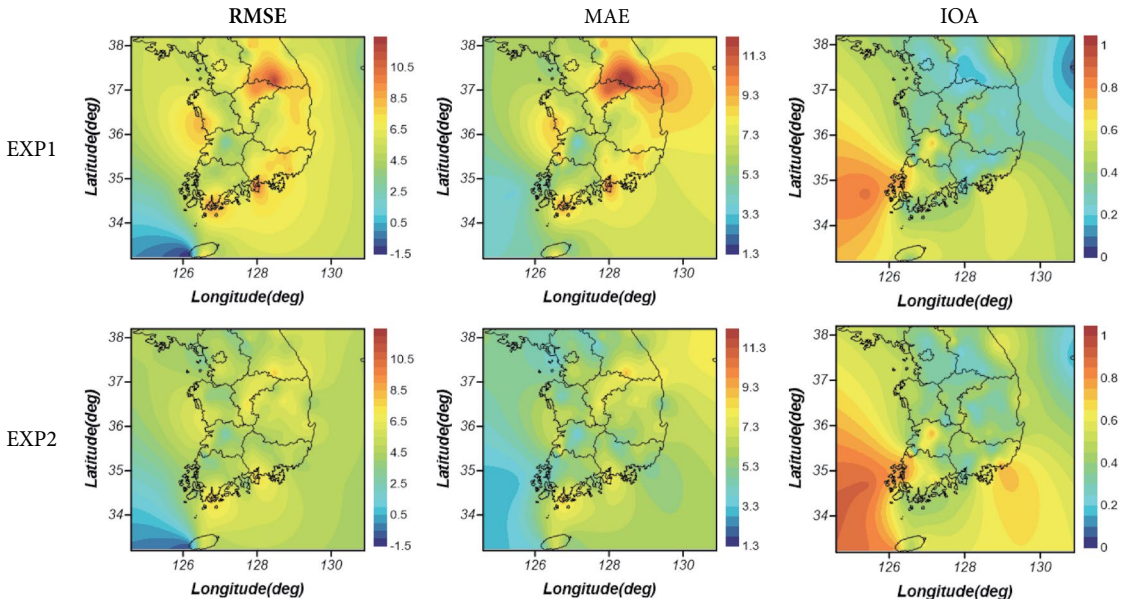


Fig. 9. Distribution of RMSE, MAE, and IOA in wind speed at 10 m AGL.

반도 영향기간 동안 시간별로 모의된 풍속값과 관측 값의 RMSE, MAE 그리고 IOA의 분포도를 나타낸 것이고 표 5는 93개 지점의 평균 RSME, MAE 그리고 IOA를 나타낸 것이다. 전반적으로 RMSE, MAE, 그리고 IOA 분포를 보면, 두 실험 모두, 각 지점별로 다양한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히, EXP1 결과를 보면, 강원 남부내륙과 경상 동부내륙, 그리고

경남 및 전남 서부연안과 충남 서부연안이 다른 지역에 비해 관측값과 비교적 차이가 크게 나타나고 일치도 또한 낮은 것을 알 수 있다. 하지만, EXP2 실험에서는 이들 지역에서의 이러한 차이가 그림으로도 뚜렷이 개선된 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 93개 모든 ASOS 지점의 통계값을 보더라도(표 5) 잘 알 수 있다. 즉, EXP2 모델링 결과에서 나타난 고도 10 m에

서의 풍속이 관측값과 더 유사한 경향을 보이는 결과를 나타내고 있다.

그림 10은 7개 대도시 및 강릉과 제주지점에서의 태풍 영향기간 동안 10 m 고도 풍속의 관측값과 모델값을 나타낸 것이다. 강한 풍속이 발생하는 태풍 사례인 점과 지형지물이 복잡한 대도시에서의 관측값과 비교라는 점을 감안해 볼 때, 두 실험 모두 관측값에 비해 과대평가하는 경향을 볼 수 있지만 풍속의 급격한 증가와 감소의 경향 등을 비교적 유사하게 나타내고 있고 대부분의 지점에서 GDAPS 토양자료를 사용

한 EXP2의 결과가 EXP1에 비해 관측값과 유사한 결과를 보이고 있다. 즉, 각 실험별로 모델값에서 관측값을 뺀 차이값의 시간대별 분포를 보면(그림 11), 각 지점별로 몇몇 시간대를 제외하고는 전반적으로 분석지점의 많은 시간대에서 EXP2의 풍속이 관측값과 차이가 작게 나타났다.

그림 12는 관측된 풍향과 각 실험에서 나타난 풍향을 비교한 것이다. 풍속과 마찬가지로, 태풍 기간이라는 점과 지형, 지물의 효과가 복잡하게 작용하는 도시 지역 풍향 비교라는 점을 고려해 볼 때, 두 실험 모두 관측에 나타난 풍향값과 풍향의 변화 정도를 상당히 잘 나타내고 있는 것으로 판단된다. 즉, 풍속에 비해서는 두 실험 간 차이의 정도가 크지 않게 나타났다. 다만, 태풍의 진행에 따른 풍향의 급변 정도(인천, 울산)는 RDAPS를 사용한 EXP2의 결과에서 일정부분 개선

Table 5. Average RMSE, MAE and IOA for 93 ASOS sites.

	RMSE	MAE	IOA
EXP1	7.499	6.300	0.490
EXP2	6.047	4.993	0.659

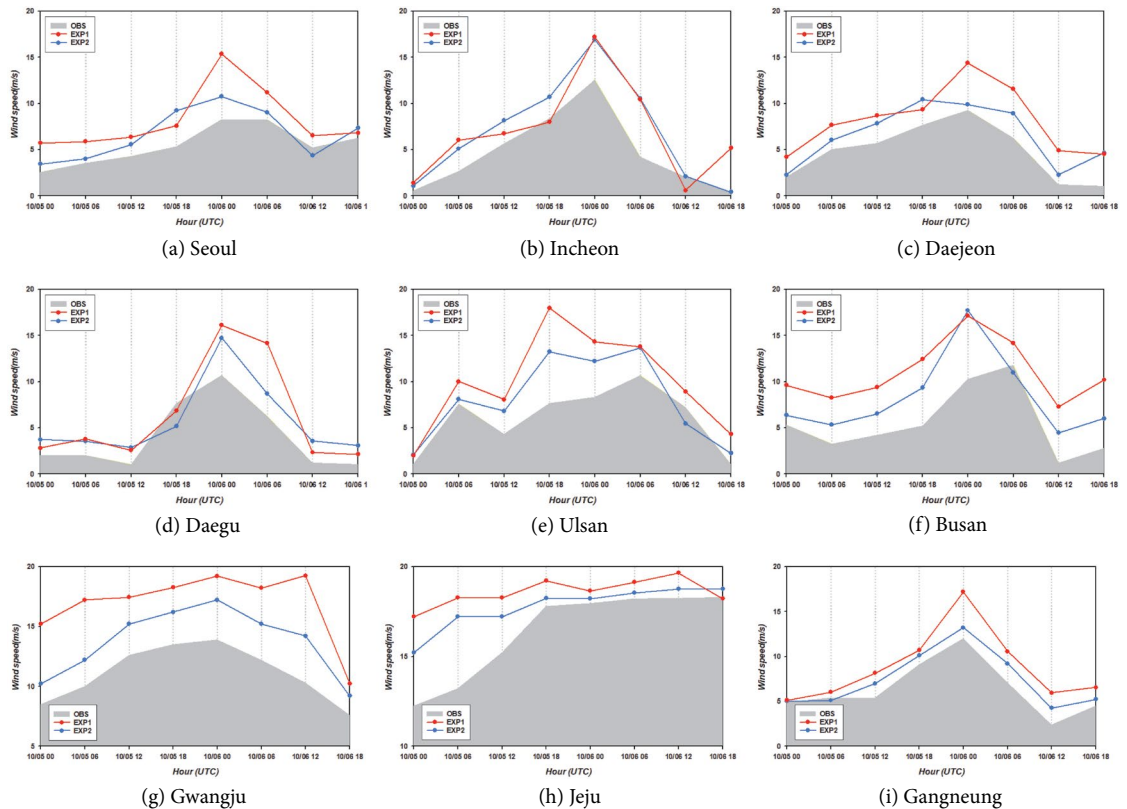


Fig. 10. Same as Fig. 6, except for wind speed.

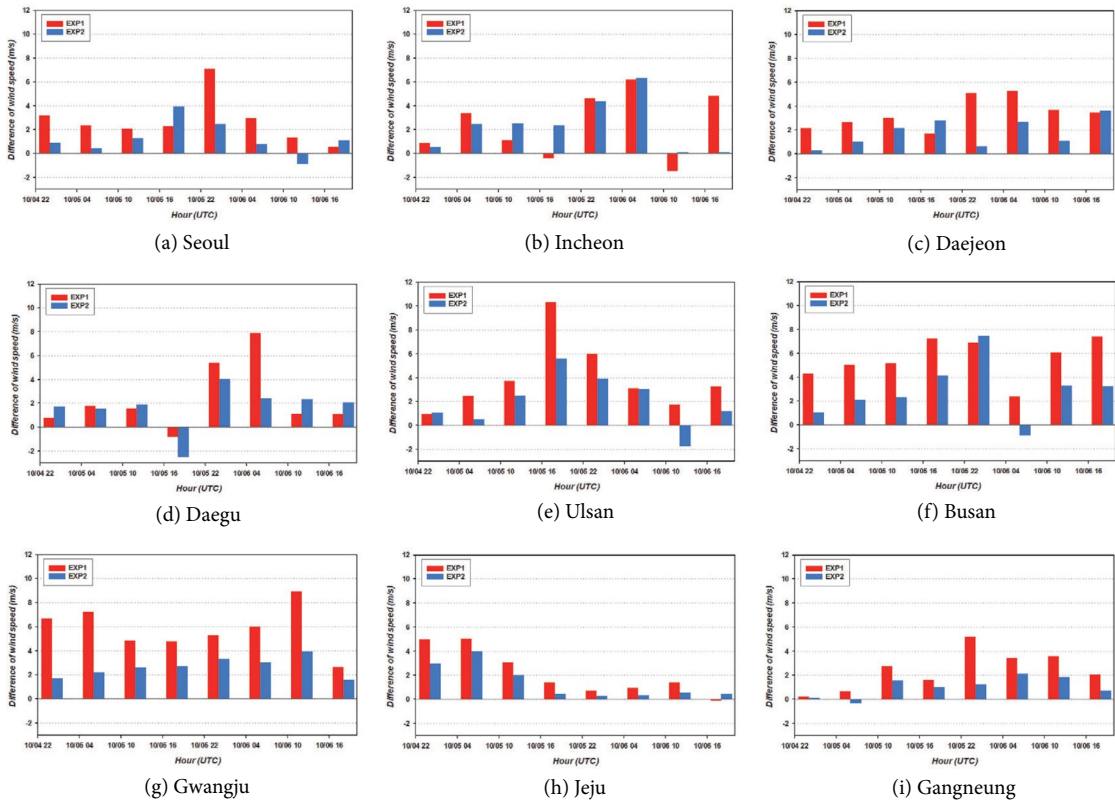


Fig. 11. Deviation of wind speed between observed and simulated values (Red bar: EXP1, Blue bar: EXP2).

이 있으나, 제한적이므로, 추가적 분석이 있어야 할 것으로 보여진다. 이상에서 살펴본 바와 같이, 기상자료는 동일하게 RDAPS를 사용하지만, 토양자료는 각기 달리한 EXP1 실험과 EXP2 실험의 결과를 보면, 관측에 나타난 것처럼 시간에 따른 변화도 상대적으로 뚜렷하고 관측값과도 좀 더 유사한 경향을 보였던 GDAPS를 토양자료로 사용한 WRF 모델링이 더 좋은 결과를 보인 것으로 나타났다.

3.3 태풍사전방재모델링 결과

앞서 토양자료별 적용에 따른 WRF 모델의 평가 결과를 바탕으로, 이들 결과를 입력자료로 활용하여 태풍사전방재모델에서 도출되는 3-Second gust에 대한 평가를 수행해 보았다. 태풍 콩레이 영향기간 동안 3-Second gust 관측값과 EXP1, EXP2 실험값을 비교하기 위

하여, 앞서 설명한 바와 같이, 우리나라 기상청에서 설치한 부이 17개 지점과 등표 9개 지점, 총 26개 지점의 관측값을 분석에 사용하였다. 그림 13은 26개 지점 모두에서 관측된 태풍 콩레이 영향기간 동안의 시간대별 3-Second gust 관측값과 모델값을 나타낸 그림이다. 그림에서 세로축은 3-Second gust이고 가로축은 26개 지점을 나타낸 것이다. 그림을 보면, 태풍사전방재모델을 통해 산정된 3-Second gust 모델값이 대부분의 지점과 시간대에서의 변화 정도나 경향을 상당히 좋은 일치의 정도로 나타내고 있다는 것을 알 수 있는데, 특히, 두 모델의 결과값이 관측값에 비해 일정수준 높게 산정되고 있다. 이는 사전방재의 관점에서 매우 중요한 의미를 가지는데, 태풍에 동반된 강풍으로 발생할 수 있는 최대의 피해를 사전에 방지하기 위해서는 피해유발 풍속에 대한 임계값의 사전정보가 매우 중요하

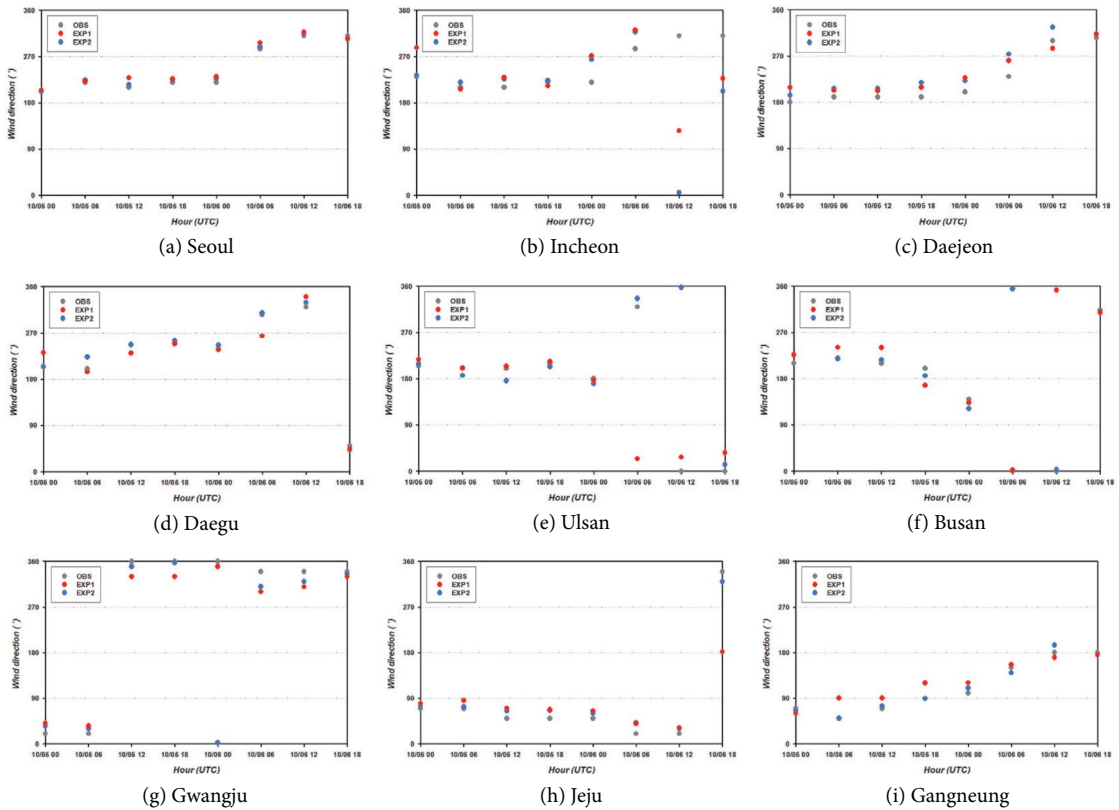


Fig. 12. Same as Fig. 6, except for wind direction.

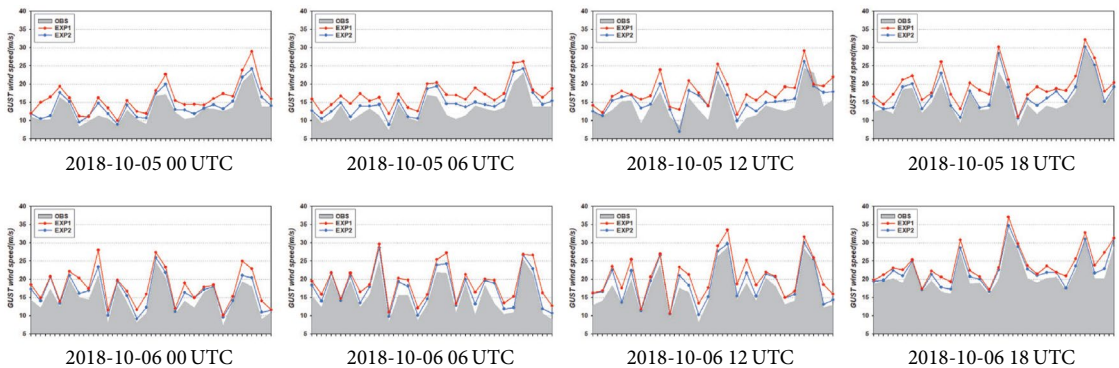


Fig. 13. Same as Fig. 6, except for 3-Second gust.

고, 이것은 실제 풍속보다 조금 높은 수준의 임계값으로 제공되어야 한다. 따라서, 두 실험의 결과가 관측값보다 일정 정도 높은 값을 보이는 것은 방재적인 측면

에서 타당한 결과로 볼 수 있다. 다만, 이러한 임계정보로 활용되는 모델값은 사전방재와 관련된 비용적 측면에서 관측값에 가까울수록 효율적이므로 태풍사전방

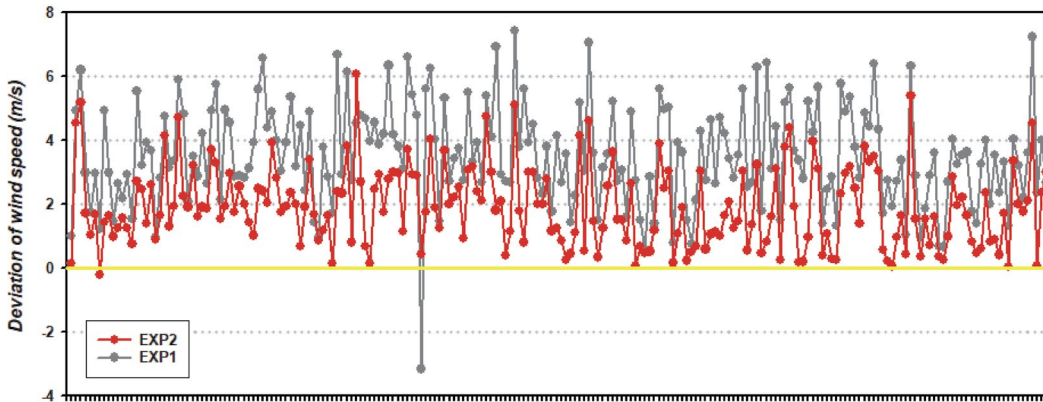


Fig. 14. Deviation of 3-Second gust and observation (Gray line: EXP1, Red line: EXP2, Yellow line = 0), The closer the yellow line, the better the 3-Second gust modeling the observations.

Table 6. RSME, MAE and IOA for 3-Second gust and observation.

	RMSE	MAE	IOA
EXP1	3.550	3.521	0.670
EXP2	1.649	2.557	0.754

재모델에서 도출되는 3-Second gust 값이 관측값에 가까우면서도 크게 제공되어야만 좋은 결과라 할 수 있다. 이와 관련된 결과는 3-Second gust 관측값과 각 실험별 모델값의 차이(모델값-관측값)를 나타낸 그림 14를 보면 잘 알 수 있는데, 두 실험 모두 거의 모든 차이값이 양의 값을 나타내고 있지만, 그 중에서도 GDAPS 토양자료를 사용한 EXP2와의 차이값이 EXP1에 비해 0에 가까운 더욱 좋은 결과를 보이는 것으로 나타났다. 이와 마찬가지로 26개 모든 지점에서의 관측값과 모델값을 비교한 표 6을 보면, EXP2(RMSE 1.649, MAE 2.557, IOA 0.754)가 EXP1(RMSE 3.550, MAE 3.521, IOA 0.670)에 비해 좋은 결과를 나타내고 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 태풍에 동반된 발생 가능한 최대순간풍속인 3-Second gust를 산정하는 태풍사전방재모

델의 정확도 향상을 위해 토양자료(GFS SOIL, GDAPS SOIL)별 민감도 분석을 수행하였다. 먼저, 토양자료를 서로 비교한 결과, GDAPS 자료의 토양온도가 관측에서 나타난 시간에 따른 변화경향과 온도값과 더 좋은 일치도를 보였다. 또한 이들 토양자료별 적용에 따른 WRF 수치모델 결과의 차이를 살펴보기 위해 10m 고도 풍속값을 비교해 본 결과, 기상자료와 토양자료 모두를 GDAPS 자료로 사용한 실험(EXP2)의 결과가 기상자료는 GDAPS 자료를 사용하였지만, 토양자료는 GFS 자료를 사용한 실험(EXP1)에 비해 우수한 경향을 나타내는 것으로 분석되었다. 이를 바탕으로, WRF 모델링 결과로 도출된 바람정보를 입력자료로 활용하는 태풍사전방재모델의 수행력을 분석하기 위해 3-Second gust 관측값과의 비교를 수행한 결과, EXP2 실험에서의 모델값이 관측값보다는 크지만 관측값에 더욱 가까운 좋은 결과를 보여, 사전방재 측면에서 더욱 효율적인 정보를 제공할 수 있는 것으로 나타났다.

하나의 태풍사례를 대상으로 토양자료별 적용에 따른 WRF 모델 및 태풍사전방재모델의 정확도를 살펴본 것으로 토양자료별 최적의 모델링 수행력을 평가한, 일반적 측면에서의 결과라고 하기에는 다소 한계가 있다. 그러나 현재 연구의 목적이 그간 여러 WRF 모델링 연구에서 큰 고민없이 사용한 ‘초기입력자료

로서 기상자료와 토양자료의 이질적 적용'이 WRF 모델링 결과에 있어서의 정확성이나 정보도출에 관한 정량적 평가뿐만 아니라, 이 결과를 사용하는 태풍사전방재 모델링 결과에 미치는 영향도 정량적으로 분석하는 것이 주요 목적이라는 측면에서 볼 때 현재의 연구는 그 자체로 의의가 있다. 다만, 현재 연구에서 나타난 각각의 토양자료 사용에 따른 각 요소별 결과들에 나타난 정량적 차이의 정도는 각 태풍 사례별로 다르게 나타날 수 있으므로, 여러 태풍 사례에 대한 이와 같은 연구방식의 수행이 이루어진다면 초기입력 자료로 토양자료 종류별 적용에 따라 여러 기상요소 값들이 어느 정도 민감하게 반응하는지에 관한 객관화된 근거자료로 제공될 수 있을 것이고, 이를 바탕으로 제공되는 정량적 정보는 사전방재 측면에서의 실제 현장에 적용 가능한 최적의 모델링 수행방안을 수립할 수 있게 될 것이다. 따라서 추후 장기간의 자료를 바탕으로 한반도 영향태풍 전반이 고려된 평가의 수행이 필요하다고 사료된다.

감사의 글

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

References

- Ashish, S., Harindra, J.S.F., Alan, F.H., Jessica, J.H., Michael, B., Fei, C. (2017) Urban meteorological modeling using WRF: a sensitivity study, *International Journal of Climatology*, 37, 1855-1900. <https://doi.org/10.1002/joc.4819>
- Carolina, C., Blanca, M., Jorge, Z.-H. (2014) Sensivity of the surface temperature to changes in total solar irradiance calculated with the WRF model, *Geofisica Internacional*, 53(2), 153-162. [https://doi.org/10.1016/s0016-7169\(14\)71497-7](https://doi.org/10.1016/s0016-7169(14)71497-7)
- Chen, S.C., Chen, M., Zhao, N., Hamid, S., Chatterjee, K., Armella, M. (2009) Florida Public Hurricane Loss Model: Research in Multi-Disciplinary System Integration Assisting Government Policy Making, Special Issue on Building the Next Generation Infrastructure for Digital Government, *Government Information Quarterly*, 26(2), 285-294.
- Dai, D., Chen, L., Ma, Z., Xu, Z. (2021) Evaluation of the WRF physics ensemble using a multivariable integrated evaluation approach over the Haihe river basin in northern China, *Climate Dynamics*, 56(5), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05723-x>
- Florida Department of Financial Services (FDFS) (2005) Florida Public Hurricane Loss Projection Model, Engineering Team Final Report Volume I-III, 48pp.
- Haifan, Y., William, A.G. (2016) An Evaluation of QPF from the WRF, NAM, and GFS Models Using Multiple Verification Methods over a Small Domain, *American Meteorological Society*, 31(4), 1363-1379. <https://doi.org/10.1175/waf-d-16-0020.1>
- 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.
- Jee, J.B., Jang, M., Lee, C.Y., Zo, I.S., Kim, B.Y., Park, M.S., Choi, Y.J. (2016) Sensitivity Analysis of the High-Resolution WISE-WRF Model with the Use of Surface Roughness Length in Seoul Metropolitan Areas, *Atmosphere, Korean Meteorological Society*, 26(1), 111-126. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2016.26.1.111>
- Jeong, J.H., Kim, Y.K. (2009) The Application of High-resolution Land Cover and Its Effects on Near-surface Meteorological Fields in Two Different Coastal Areas, *Journal of Korean Society for Atmospheric*, 25(5), 432-449, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2009.25.5.432>
- Jeong, J.H., Oh, I.B., Ko, D.K., Kim, Y.K. (2011) The Characteristics of Seasonal Wind Fields around the Pohang Using Cluster Analysis and Detailed Meteorological Model, *Journal of the Environmental Sciences*, 20(6), 737-753. <https://doi.org/10.5322/JES.2011.20.6.737>
- 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). <https://doi.org/10.5572/kosae.2009.25.5.432>
- Kang, H.W., Son, C.Y., Park, J.H., Jang, S.H., Kim, J.M. (2018) A Study on the Time-Periodic Characteristics of Changes in Typhoon Activities and Typhoon-Induced Rainfall over the Korean Peninsula, *The Korean Society of*

- Hazard Mitigation, 18(7), 395-402. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.7.395>
- Kim, T.H., Jeong, J.H., Kim, Y.K. (2016) Sensitivity Analysis of the WRF Model according to the Impact of Nudging for Improvement of Ozone Prediction, *Journal of Environmental Science International*, 25(5), 683-694. <https://doi.org/10.5322/jesi.2016.25.5.683>
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2019) Typhoon Analysis Report, 11-1360000-000197-10, Seoul, Korea.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2020) Typhoon Analysis Report, 11-1360000-001533-10, Seoul, Korea.
- Lee, H.K., Jee, J.B., Min, J.S. (2017) A Study on High-resolution Numerical Simulation with Detailed Classification of Landuse and Anthropogenic Heat in Seoul Metropolitan area, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 19(4), 232-245. <https://doi.org/10.5532/KJAFM.2017.19.4.232>
- Lee, S.J., Park, J.H., Shin, H.J., Na, H.N., Song, J.A., Kim, Y.J., Kwon, S.Y., Jung, J.M. (2017) Improvement of NCAM-LAMP, *Journal of the Korean Meteorological Association's Autumn Academic Conference*, 183-186.
- 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>
- Nick, P.B. (2014) An analysis of the operational GFS simplified Arakawa Schubert parameterization within a WRF framework: A Hurricane Sandy (2012) long-term track forecast perspective, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(2), 378-398. <https://doi.org/10.1002/2014jd022211>
- Oh, Y.J., Moon, I.J., Kim, S.H., Lee, W.J., Kang, K.R. (2016) Validations of Typhoon Intensity Guidance Models in the Western North Pacific, *Atmosphere. Korean Meteorological Society*, 26(1), 1-18. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2016.26.1.001>
- Pinelli, J.P., Pita, G., Gurley, K., Torkian, B. (2009) Damage Characterization: Application to Florida Public Hurricane Loss Model, *ASCE Natural Hazard Review*, 12(4), 190-195. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6996\(2009\)0000051](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6996(2009)0000051)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.03.012>
- Vickery, P.J., Skerlj, P.F. (2005) Hurricane Gust Factors Revisited, *Journal of Structural Engineering*, 131(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:5\(825\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:5(825))

Authors Information

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