

종관 환경 변화에 따른 아격자 산악모수화와 고해상도 지면 자료가 WRF 모델의 바람장 모의에 미치는 영향

이현지¹⁾ · 김기병¹⁾ · 이준홍²⁾ · 신혜음³⁾ · 장은철⁴⁾ · 임종명⁵⁾ · 임교선^{1)*}

¹⁾경북대학교 대기과학과, ²⁾막스플랑크 기상연구소, ³⁾미국국립대기연구센터,
⁴⁾공주대학교 대기과학과, ⁵⁾한국원자력연구원 원자력환경실

(접수일: 2022년 2월 23일, 수정일: 2022년 3월 21일, 게재확정일: 2022년 3월 24일)

Effects of the Subgrid-Scale Orography Parameterization and High-Resolution Surface Data on the Simulated Wind Fields in the WRF Model under the Different Synoptic-Scale Environment

Hyeon-Ji Lee¹⁾, Ki-Byung Kim¹⁾, Junhong Lee²⁾, Hyeyum Hailey Shin³⁾,
Eun-Chul Chang⁴⁾, Jong-Myoung Lim⁵⁾, and Kyo-Sun Sunny Lim^{1)*}

¹⁾Department of Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu, Korea

²⁾Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany

³⁾National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA

⁴⁾Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Korea

⁵⁾Environmental Radioactivity Assessment Team, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea

(Manuscript received 23 February 2022; revised 21 March 2022; accepted 24 March 2022)

Abstract This study evaluates the simulated meteorological fields with a particular focus on the low-level wind, which plays an important role in air pollutants dispersion, under the varying synoptic environment. Additionally, the effects of subgrid-scale orography parameterization and improved topography/land-use data on the simulated low-level wind is investigated. The WRF model version 4.1.3 is utilized to simulate two cases that were affected by different synoptic environments. One case from 2 to 6 April 2012 presents the substantial low-level wind speed over the Korean peninsula where the synoptic environment is characterized by the baroclinic instability. The other case from 14 to 18 April 2012 presents the relatively weak low-level wind speed and distinct diurnal cycle of low-level meteorological fields. The control simulations of both cases represent the systematic overestimation of the low-level wind speed. The positive bias for the case under the baroclinic instability is considerably alleviated by applying the sub-grid-scale orography parameterization. However, the improvement of wind speed for the other case showing relatively weak low-level wind speed is not significant. Applying the high-resolution topography and land-use data also improves the simulated wind speed by reducing the positive bias. Our analysis shows that the increased roughness length in the high-resolution topography and land-use data is the key contributor that reduces the simulated wind speed. The simulated wind direction is also improved with the high-resolution data for both cases. Overall,

*Corresponding Author: Kyo-Sun Sunny Lim, Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, School of Earth System Sciences, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea.
Phone: +82-53-950-7135, Fax: +82-53-950-6359
E-mail: kyosunlim@knu.ac.kr

our study indicates that wind forecasts can be improved through the application of the subgrid-scale orography parameterization and high-resolution topography/land-use data.

Keywords: Wind fields, WRF model, Synoptic environment, High-resolution surface data, Subgrid-scale orography parameterization

1. 서 론

Weather Research and Forecasting (WRF) 중규모 기상 모델(Skamarock et al., 2019)은 미국 국립 대기 연구 센터(National Center for Atmospheric Research, NCAR)에서 개발한 커뮤니티 모델로써, 기상 현상 예측과 중규모 현상 연구(Lee and Hong, 2006; Hong and Lee, 2009; Byun et al., 2011; Park et al., 2019) 뿐만 아니라, 여러 응용 기상 연구에 널리 사용되고 있다(Byun et al., 2010; An et al., 2015; Choi et al., 2018; Lim et al., 2021). 이러한 연구들 중, 최근에는 대기오염 연구와 더불어 가상의 원전사고 시 방사성 물질 확산에 의한 피해가 클 것으로 예상되는 발전용 및 연구용 원전 주위 지역에 대한 국지 바람 및 방사성 물질의 대기 확산 특성을 연구하기 위해 WRF 모델을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다(An et al., 2015; Choi et al., 2018; Lim et al., 2021).

바람에 의해 대기 오염 물질이 이류 또는 분산되기 때문에 특정 지역 및 시점의 정확한 오염물질의 농도 예측을 위해서는 기상 모델을 통해 예측된 바람장의 신뢰성이 담보되어야 한다. 예를 들어, Chang et al. (2003)은 대기 수송 및 확산 모델링의 가장 큰 오차는 모의된 풍향에서 기인함을 보였으며, 바람에 의해 대기 오염 물질이 이류 또는 분산되기 때문에 특정 지역 및 시점의 정확한 오염물질의 농도 예측을 위해서는 기상 모델을 통해 예측된 바람장의 신뢰성이 담보 되어야함을 제시하였다. Yang et al. (2013)의 연구에서는 환경으로 배출된 오염 물질이 주변 바람장 변화에 따라 주변 지역의 오염 농도에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 두가지 분석 모형을 제시하고, 주변 대기환경에 따른 확산을 통해 특정 지역의 오염 집중도를 파악하는 것이 중요하다고 언급하였다. 그리고 Lee and Yun (2011)은 화산 분출 시 바람장이 분출물의 확산 예측에 매우 중요한 요소임을 제시하며 다양한 시간 규모로 평균화 된 바람장을 적용하여, 백두산 화산 분출물의 확산 예측 수치 실험을 수행하였다. 이처럼 오염물질의 확산과 농도의 시공간적 변화는 바람장에 따라 민감하게 반응하기 때문에 바람장은 확산 예측에 매우 중요한 예측 인자로 사용되고 있다.

WRF 모델은 선행 연구를 통해 하층 풍속 예측에

있어 상당한 양의 편차를 보인다고 알려져 있다(Chang et al., 2003; Mass and Owens 2010, 2011). Shimada et al. (2011)은 WRF 모델에 의해 모의된 연간 평균 풍속이 행성 경계층(Planetary Boundary Layer, PBL)의 하부에서 양의 편차를 보임을 제시하였다. Ngan et al. (2013)은 WRF-ARW 모델에서 YSU PBL 방안을 적용하였을 때, 야간에 풍속의 양의 편차가 존재함을 확인하였다. Banks et al. (2016)은 중관 흐름에 따라 실험 사례 유형을 분류한 후, WRF 모델을 이용하여 10 m 풍속 모의에 대한 PBL 모수화 방안의 민감도 실험을 수행하였다. PBL 모수화와 중관 유형에 따라 모의된 바람장이 상이함을 보였으며, 이는 PBL 모수화 방안뿐만 아니라 중관적 환경 요인이 바람장 모의에 있어서 중요한 역할을 한다는 점을 시사한다.

선행 연구를 통해 알려진 WRF 모델의 하층 풍속의 양의 편차를 완화하기 위해 Lee et al. (2020)은 WRF 모델의 거칠기 아층(roughness sublayer)에서의 추가적인 혼합을 고려할 수 있도록 Harman and Finnigan (2007, 2008)이 고안한 거칠기 아층 모수화를 WRF 모델에 적용하였다. 그 결과 거칠기 아층 모수화를 적용하지 않은 WRF 모델의 결과보다 더 큰 지표면 거칠기를 모의하여 10 m 풍속의 양의 편차를 완화하였다. 바람장 개선을 위해 아격자 지형 효과를 고려하고자 운동량방정식에서 지형에 따른 지표 항력의 강도를 바람과 층후로 조절하는 아격자 산악모수화 방안(Jiménez and Dudhia, 2012, 이하 JD12)이 개발되었다. Kim et al. (2015)은 JD12를 WRF 모델에 적용하여 사례 모델 적분을 수행하고 관측된 한반도 전 지역의 하층 풍속과 비교한 결과, 풍속 세기의 편차와 제곱근오차가 향상됨을 밝힌 바 있다. 또한, Lim et al. (2019)은 JD12를 WRF 모델에 적용함으로써 한국 원자력 연구원 주변의 바람장 모의가 향상됨을 보였다.

기상 모델의 직접적인 개선 외에 모델 결과의 후처리 방법 또는 고해상도 토지피복정보 사용을 통한 바람장의 개선 연구 또한 진행되고 있다. Lee et al. (2008)은 고해상도 지형 및 토지 자료 적용을 통해 복잡한 연안지역에서 실제와 가까운 해안선의 형태가 표현 가능함을 보였다. 뿐만 아니라 Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) 모델에서 과대 예측된 풍속이 감소하여 향상된 결과를 보여주었다. 또한 Seo

et al. (2010)은 WRF 모델을 이용하여 지면 경계 조건의 개선에 대한 실험을 수행하였다. 기존의 WRF 모델에서 사용되는 지형 및 지표 이용도 자료를 고해상도의 자료로 개선 후, 풍속의 편차와 계급근오차의 값이 개선 전에 비해 모든 시간에서 낮아지는 결과를 확인하였다. Kim and Han (2012)은 WRF를 통해 예측된 풍속의 통계적 보정 알고리즘을 개발하고, 한반도의 지표 특성을 최대한 반영하여 바람 정보가 갖는 예측 오차를 최소화하고자 위성 원격 탐사자료로부터 생산된 고해상도의 토지피복정보를 활용하여 모델링에 활용하였다.

본 연구에서는 방사성 물질의 확산이 일어날 수 있다는 가정하에 대전 한국 원자력 연구원 주변에서의 WRF 모델을 활용한 바람장 모의 성능을 평가하고 예측 성능을 향상시키고자 한다. 또한 WRF 중규모 모델의 하층 바람장 모의 성능을 종관 저기압의 영향을 받는 사례와 그렇지 않은 사례로 구분하여 검증하고자 한다. 하층 바람장 예측 성능 향상을 위해

JD12 및 고해상도 지면 자료를 모델에 적용하여 바람 모의 개선 효과를 평가할 것이다. 선행 연구를 통해 JD12 및 고해상도 지형 자료가 바람장 개선에 미치는 영향에 대해 연구된 바 있으나, 바람장 세기에 따라 어느정도 개선을 미치는지에 대한 평가는 이루어진 바 없다. 본 연구에서는 바람장 세기, 즉 종관 시스템의 영향 여부에 따른 JD12 및 고해상도의 지면 자료의 효과를 통합적으로 평가하고자 한다. 2장에서는 사례 설명과 실험 설계를 포함하는 연구방법을 기술하였으며, 3장에서는 실험결과를 제시하였다. 마지막 4장에서는 요약 및 결론을 기술하였다.

2. 연구방법

2.1 사례 설명

2001년부터 2020년까지 20년에 대해 월평균 풍속의 평년 값을 계산해 가장 풍속이 강했던 월을 찾고, 해당 월의 평균 풍속의 연변화를 분석해 풍속이 가장

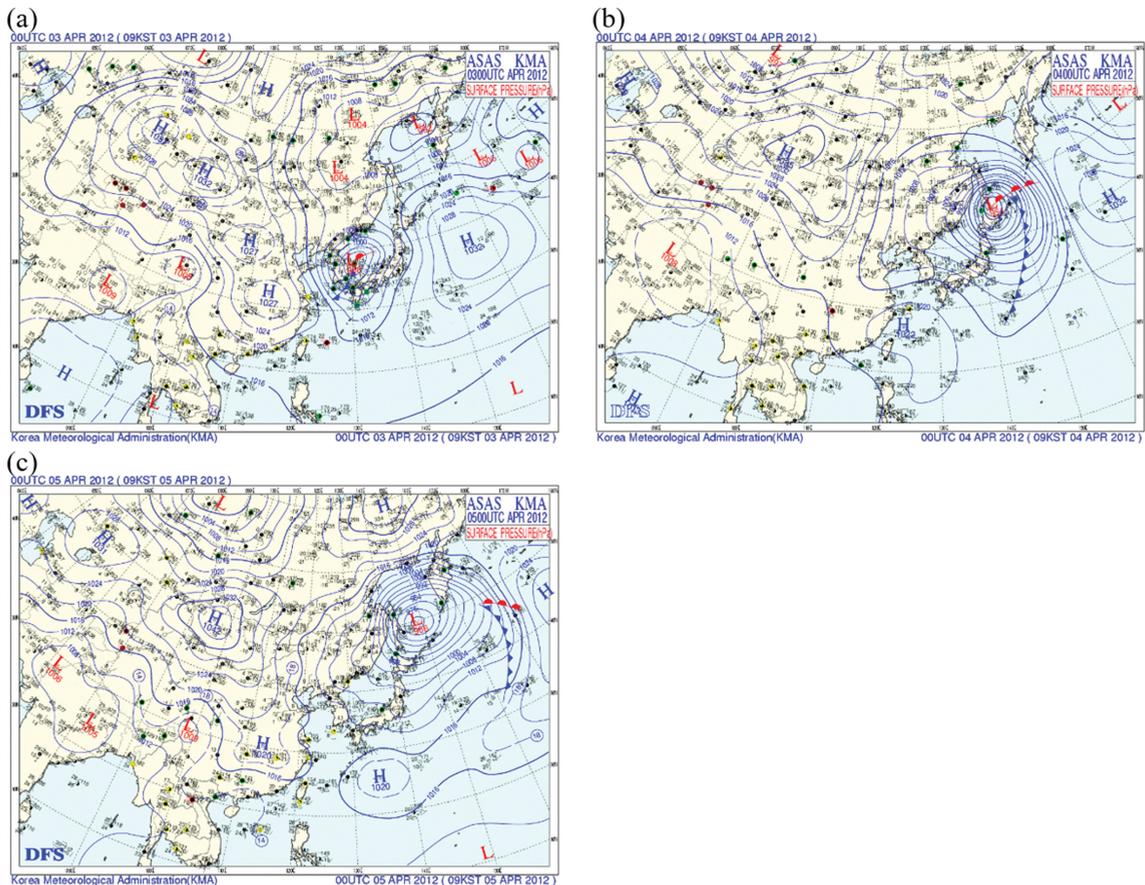


Fig. 1. Surface weather charts at (a) 0900 KST 03, (b) 0900 KST 04, and (c) 0900 KST 05 April 2012.

강했던 2012년 4월을 선정하였다. 기상청 방재기상정보시스템(<https://afso.kma.go.kr/>)에서 제공하는 일기도 및 the fifth generation European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ReAnalysis (ERA5) (Hersbach et al., 2020)의 지위 고도장, 그리고 대전 기상청에서 관측된 ASOS 자료를 사례 분석에 활용하였다. 중관 저기압의 영향을 받는 경우와 그렇지 않은 경우의 사례를 분석한 결과, 강한 경압불안정이 존재하며 최대 풍속이 약 14 m s^{-1} 로 나타났던 2012년 4월 2일 0900 KST부터 6일 1500 KST까지 총 102시간을 중관 저기압의 영향을 받는 사례 기간으로 선택하였고, 다른 날에 비하여 최대 풍속이 약 7 m s^{-1} 로 약하게 나타나며, 하층 기상장의 일 변화가 뚜렷한 2012년 4월 14일 0900 KST부터 18일 1500 KST까지 총 102 시간을 중관 저기압의 영향을 받지 않는 사례 기간으로 선택하였다.

중관 저기압의 영향을 받는 사례(Case1)의 주요 시간대별 지상 일기도를 Fig. 1에 제시하였다. 4월 3일

0900 KST에 한반도 서쪽에서 접근해온 두 개의 중관 규모 저기압이 하나로 합쳐져 동해안 지역에 중심을 두고 온난 전선과 한랭 전선을 동반하며 강하게 발달하였다(Fig. 1a). 이후 저기압은 중심 기압 경도가 강화되며 오호츠크해 방향으로 북동진하는데 일본 동쪽으로 발달하는 한랭 전선 방향과 저기압 진행 후면인 한반도 방향으로 기압골이 확장하는 형태를 보인다(Figs. 1b, c). 4월 5일까지 저기압 후면인 한반도 지역으로 확장한 기압골이 유지되면서 강풍 환경에 해당하는 높은 기압 경도가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 4월 3일 0900 KST의 상층 기압 구조는 850 hPa에서 300 hPa까지 전반적으로 오호츠크해 상에 중심을 둔 기압골이 한반도 지역으로 확장하는 형태를 보인다. 850 hPa에서는 한반도 지역에 중심을 두며 절리된 형태의 저기압이 명확히 나타나며, 남중국해 및 동중국해 지역의 수분이 저기압 남쪽의 남풍 계열의 흐름에 의하여 한반도 지역으로 유입되는 것을 볼 수 있다(Fig. 2a). 500 hPa 등압면에서는

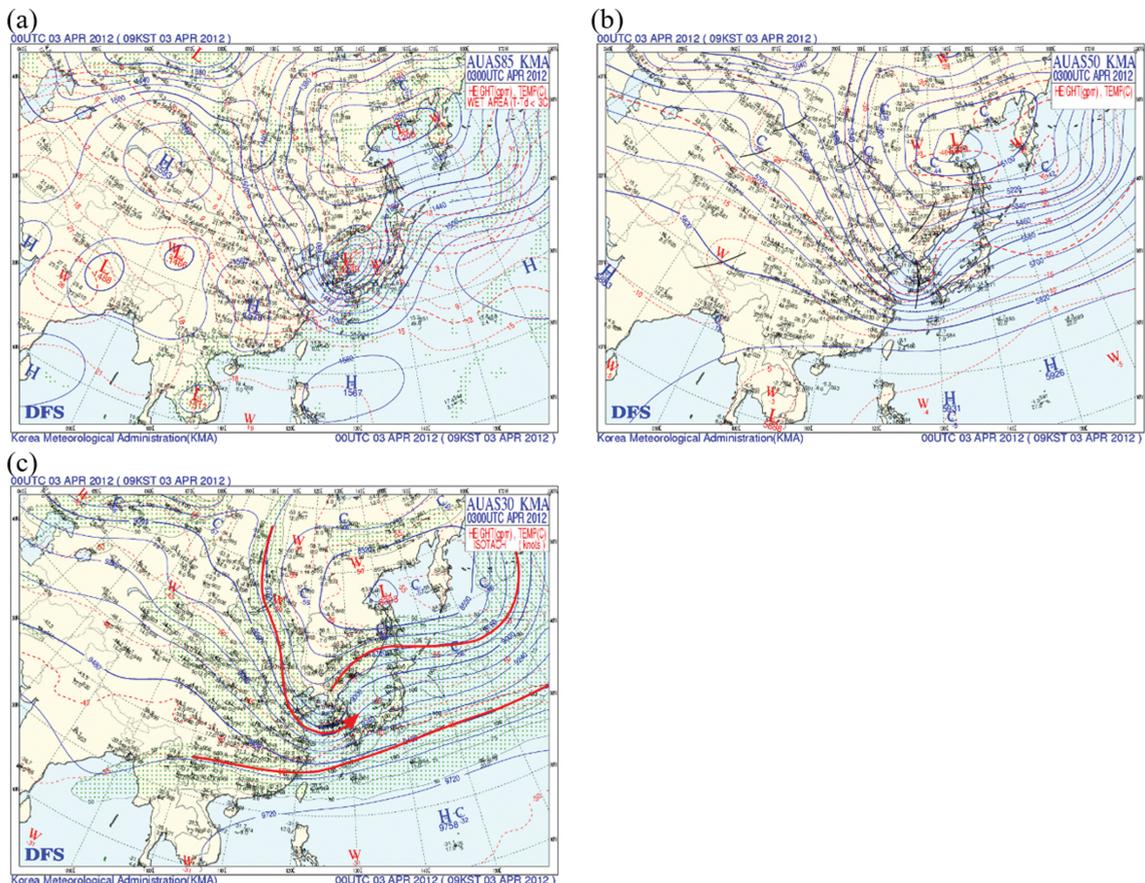


Fig. 2. Weather charts at (a) 850 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 300 hPa at 0900 KST 03 April 2012.

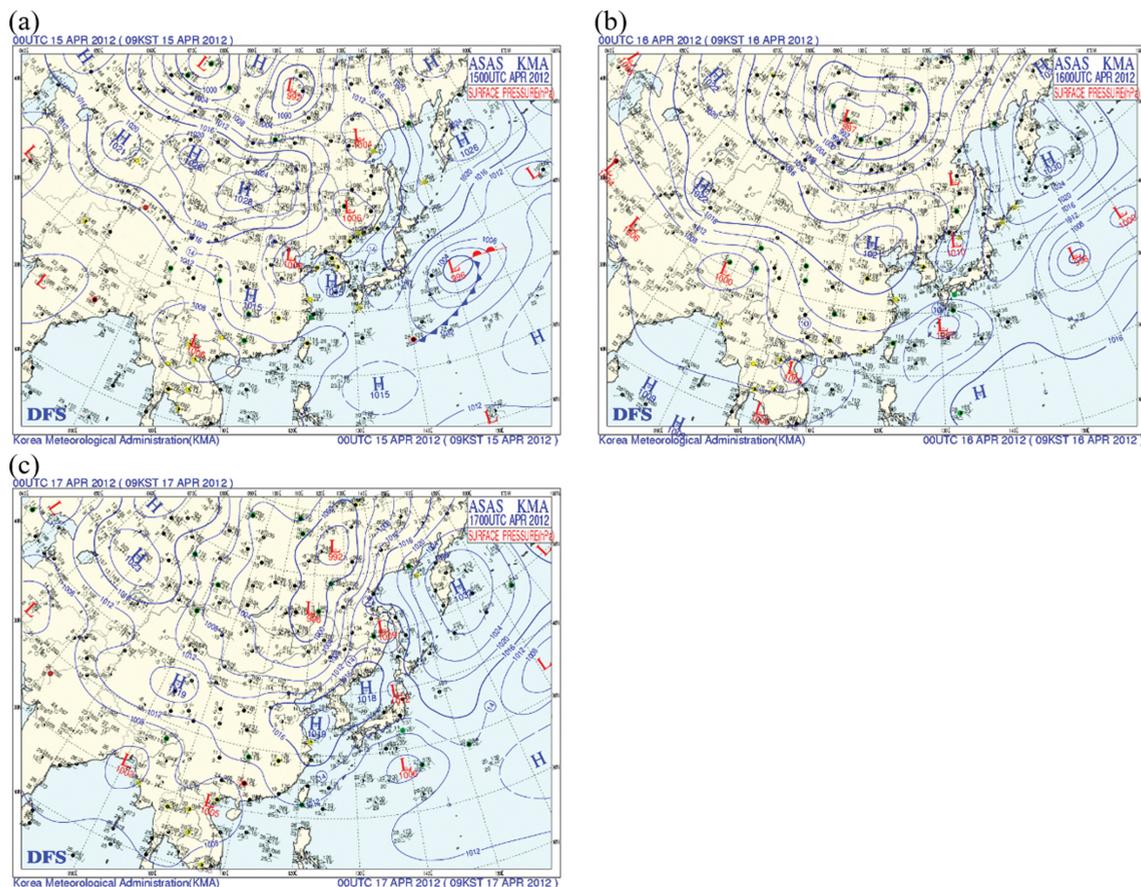


Fig. 3. Surface weather charts at (a) 0900 KST 15, (b) 0900 KST 16, and (c) 0900 KST 17 April 2012.

한반도 서해안 지역에 기압골 축이 위치하여(Fig. 2b) 하층 저기압의 진행방향 후면에 위치함으로써 경압 불안정이 지상 및 상층 기압골을 강화시키는 구조가 형성된 것을 알 수 있다. 300 hPa 고도의 일기도를 살펴보면(Fig. 2c), 풍속이 75 knots 이상 되는 상층 제트(초록색 구역)가 한반도를 중심으로 사행 하면서 제트의 출구 좌측 지역이 하층 저기압의 중심과 일치하면서 상승 구조가 하층에서 대류권 상부까지 연결될 수 있음을 볼 수 있다.

Figure 3은 중관 저기압의 영향을 받지 않는 사례(Case2)의 주요 시간대별 지상 일기도이다. 제시된 4월 15일에서 17일 사이의 기간 동안 5 m s^{-1} 이하의 약한 바람이 한반도 상에서 관측되었는데 15일은 중규모의 이동성 고기압이, 16일부터 17일은 중국 지역에서 접근하는 중관 규모의 고기압의 영향을 받아 한반도는 Case1에 비해 상대적으로 작은 기압 경도가 분석됨을 확인할 수 있다. 또한 상층 일기도를 분석하였을 때, 명확한 경압불안정이 나타나지 않았다.

Figure 4는 각 사례별 주요 시간대인 Case1 기간 중 3일 0900 KST (Fig. 4a)와 4일 0900 KST (Fig. 4b), Case2 기간 중 15일 0900 KST (Fig. 4c)와 16일 0900 KST (Fig. 4d)의 850 hPa 지위고도장을 분석한 것으로 한반도 상의 기압 경도가 Case1에서만 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

2.2 실험 설계

본 연구에서는 WRF 모델 버전 4.1.3을 사용하였으며 사용한 물리 과정은 다음과 같다. 구름미세물리 방안은 WRF Double-Moment 6-class (WDM6) (Lim and Hong, 2010), 지면 모델은 Unified Noah (Chen and Dudhia, 2001), 복사 물리 방안은 Rapid Radiative Transfer Model for General Circulation Models (RRTMG) (Iacono et al., 2008; Morcrette et al., 2008), 행성 경계층 방안은 Yonsei University (YSU) (Hong et al., 2006; Hong, 2010), 그리고 적운 모수화 방안은 Kain-Fritsch (Kain and Fritsch, 1990; Kain, 2004)를 적용하

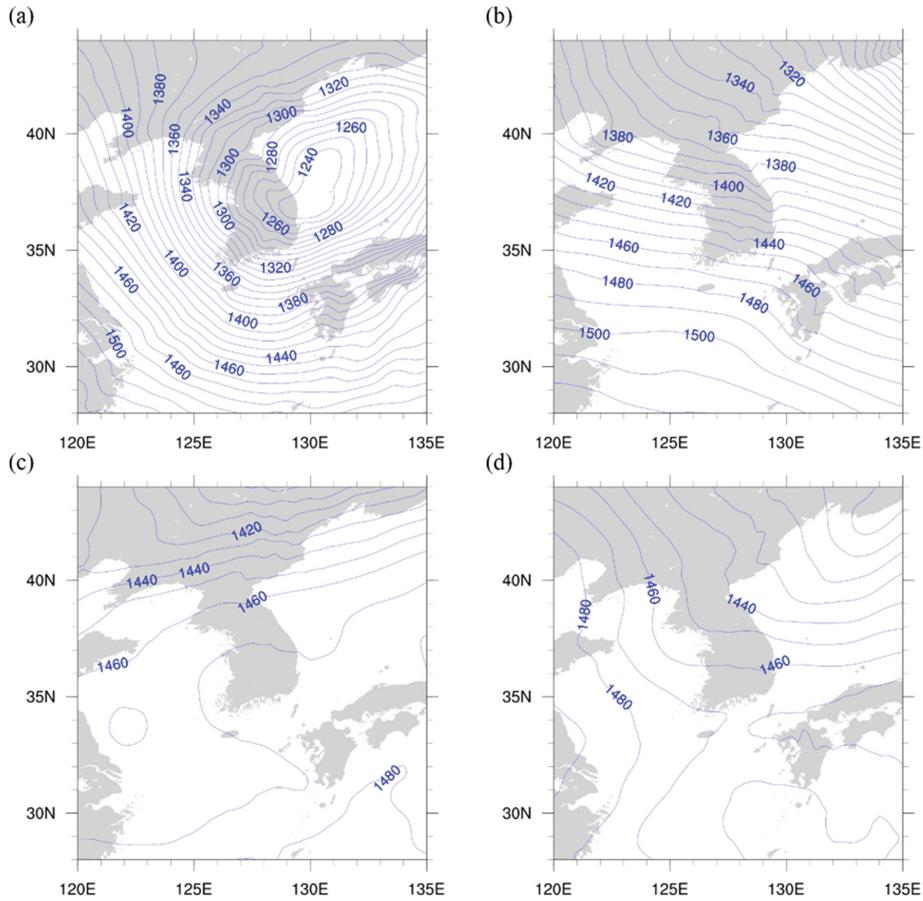


Fig. 4. 850 hPa geopotential heights (m) at (a) 0900 KST 03, (b) 0900 KST 04, (c) 0900 KST 15, and (d) 0900 KST 16 April 2012. (a), (b) are for the Case1 and (c), (d) are for Case2.

Table 1. Summary of the WRF model configurations.

	WRF V4.1.3		References
	Domain 1	Domain 2	
Number of grid (x × y × z)	160 × 180 × 65	160 × 180 × 65	
Cumulus	Kain-Fritsch	No Cumulus	Kain and Fritsch (1990); Khain (2004)
PBL	Yonsei University Scheme		Hong et al. (2006)
Surface layer	Revised MM5 Monin-Obukhov scheme		Jiménez and Dudhia (2012)
Land surface	Unified Noah Land Surface Model		Chen and Dudhia (2001)
Long/short wave radiation	Rapid Radiative Transfer Model for General Circulation Models		Iacono et al. (2008); Morcrette et al. (2008)
Initial/boundary conditions	ERA5 0.25 Degree		Hersbach et al. (2020)

였다(Table 1). 1 km 도메인은 구름 및 강수 과정이 격자 규모에서 분해될 수 있다고 가정하여 적운 모수

화 방안을 적용하지 않았다. Figure 5와 같이 바깥의 도메인(Domain1)의 수평 해상도는 10 km, 안쪽의 도

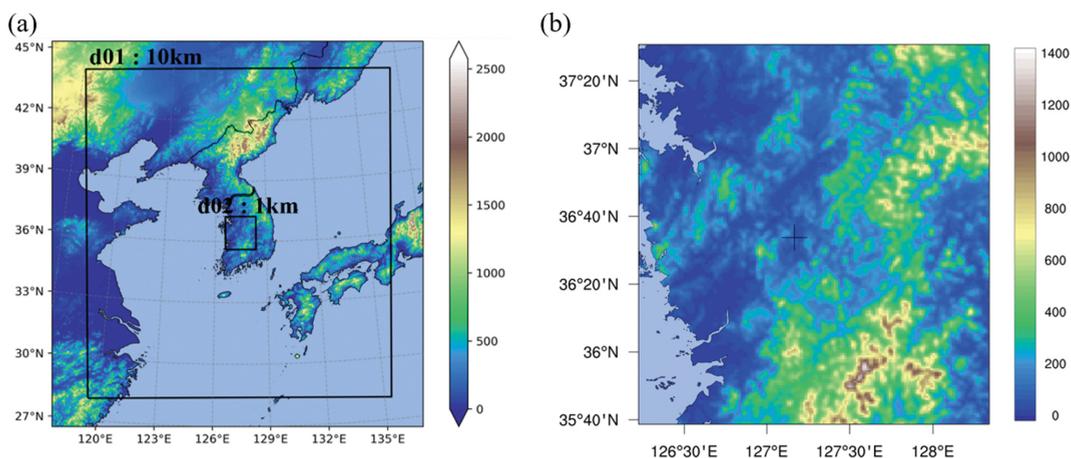


Fig. 5. (a) Model domain with terrain height (m) for (a) the entire domain and for (b) the inner domain (Domain2). Two nested domains have 10 km and 1 km resolution centered on the Korea Atomic Energy Research Institute (noted as a black cross mark in b).

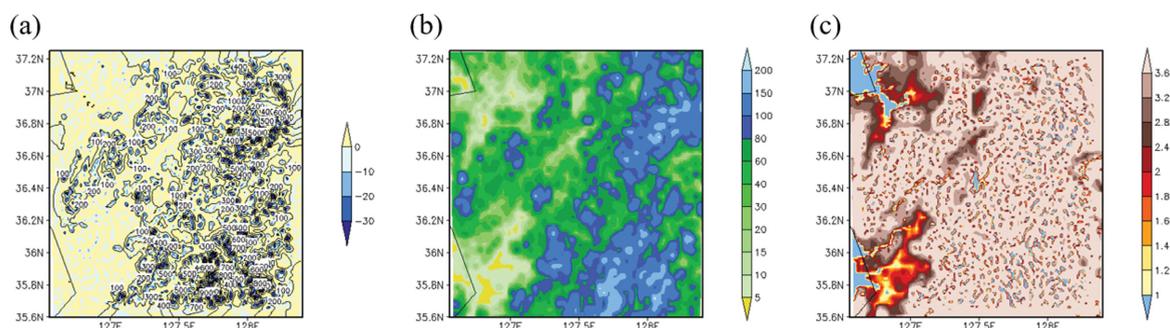


Fig. 6. (a) Nondimensional Laplacian of the topography (m, shade) with the terrain height (m, black contour), (b) standard deviation of subgrid-scale terrain height (m), and (c) factor (c_t) that controls the sink term in the momentum equation in the study of Jiménez and Dudhia (2012).

메인(Domain2)은 1 km로 설정하고, 각 도메인은 단방향의 등지 격자 체계로 구성하였다. 각 도메인은 대전의 한국원자력연구원 지점을 중심으로 하여 설정해주었다. 모델의 상층 경계면은 50 hPa로 설정하였으며, 연직 층은 38개의 층으로 구성하였다. 모델의 초기 및 경계 자료로 ERA5 재분석 자료를 사용하였다. 지면 경계조건으로는 United States Geological Survey (USGS) 30초 자료, 즉, 수평 해상도가 900 m인 지형 자료와 토지이용도 자료를 사용하였다.

아격자 산악모수화란 아격자 규모의 산과 같은 지형에 의한 바람의 끌림 효과를 격자 규모에서 모수화한 것으로 JD12는 WRF 모델의 해상도에서 분해되지 않은 지형을 고려하기 위하여 지표면 운동량을 감소시키는 소멸항 c_t 를 포함하는 다음의 식을 도입하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \dots - c_t \frac{u_*^2 u}{\Delta z V} \quad (1)$$

식(1)에서 u 는 첫번째 모델 층에서 동서 바람 성분을 나타내고, V 는 첫번째 모델 층에서 풍속이며, u_* 는 마찰 속도, 그리고 Δz 는 첫번째 모델 층의 두께이다. JD12에서는 지형을 구분하기 위해 무차원 라플라시안 연산자를 아래 식(2)와 같이 도입하였다.

$$\Delta^2 h_{i,j} = 0.25(h_{i+1,j} + h_{i,j+1} + h_{i-1,j} + h_{i,j-1} - 4h_{i,j}) \quad (2)$$

WRF에서 계산된 지형의 무차원 라플라시안은 Fig. 6a와 같다. 계수 c_t 는 식(3)과 같이 계산되며 지형의 특징을 나타내는 $\Delta^2 h$ 및 아격자 규모 지형 높이의 표준편차(σ_{SSO})의 함수이다. 여기서, $\alpha = (\Delta^2 h + 20)/10$ 이고, e 는 자연로그 밑(2.718)이다. Figures 6b, c는 각각 σ_{SSO}

Table 2. Summary of experiments conducted in this study.

Expt	Description
NOJD	Experiment without the subgrid-scale orography parameterization
JD	Experiment with the subgrid-scale orography parameterization
JD_HIGH	Experiment applying the high-resolution topography and land-use data in JD

와 c_t 의 수평 분포를 보여준다.

$$\left\{ \begin{array}{ll} c_t = 1 & \text{if } \Delta^2 h > -20 \text{ and } \sigma_{sso} \\ \ln \sigma_{sso} & \text{if } \Delta^2 h > -10 \text{ and } \sigma_{sso} \\ \alpha \ln \sigma_{sso} + (1 - \alpha) & \text{if } -10 > \Delta^2 h > -20 \text{ and } \sigma_{sso} \\ \frac{\Delta^2 h + 30}{10} & \text{if } -20 > \Delta^2 h > -30 \\ 0 & \text{if } -30 > \Delta^2 h \end{array} \right. \quad (3)$$

본 연구에서는 아격자 산악모수화의 영향을 살펴보고자 JD12를 포함한 JD 실험과 그렇지 않은 NOJD 실험, 그리고 고해상도 지면 자료가 하층 바람장 모의에 미치는 영향을 파악하기 위해 JD 실험에 지형 자료를 National Aeronautics Space Administration (NASA)와 National Geospatial-Intelligence Agency (NGA)의 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)에 의해 제작된 Digital Elevation Models (DEM) 형식의 고해상도 3초(90 m) 자료로, 피복 자료를 환경부에서 작성한 3초 토지이용도(중분류 토지 피복도) 자료로 변경한 JD_HIGH 실험을 수행하였다. Table 2에 수행한 실험들을 정리하여 기술하였다. 모델 결과의 검증에 위해 대전 지점(36.37°N, 127.37°E)의 Automated Surface Observing System (ASOS)의 2 m 온도와 상대습도, 그리고 10 m 바람 자료를 사용하였다.

3. 결 과

3.1 아격자 산악모수화의 효과

Case1에 대하여 모델 적분 시간인 총 102시간 동안 관측 및 모델이 예측한 2 m 온도와 상대습도, 그리고 10 m 풍속(Figs. 7a-c)과 관측과의 편차(Figs. 7d-f)를 살펴보았다. 관측에서 각 기상 변수에 대한 일변화가 두드러짐을 알 수 있다. 관측 온도는 오후 3시경에 최대 값, 새벽 6시경에 최소값을 보이는 반면, 상대습도는 온도가 가장 낮은 새벽 6시경에 최대값, 온도가 가장 높은 오후 3시경에 최소값을 보인다. 바람은 오후 3시경에 최대값이 관측되었으며, 새벽 6시경에 최소값이 관측되었다. 두 실험은 관측에서 나타난 온도, 상대습도, 그리고 풍속의 일변화를 대체적으로 잘 모의하였다(Figs. 7a-c). 4월 3일 2100 KST 이후에 NOJD

와 JD 모두 관측보다 낮은 온도와 높은 상대습도를 모의하였다(Figs. 7a, b). 야간에는 JD에 비해 NOJD가 관측 값과 더 유사한 온도와 상대습도를 모의하고 있으나, 두 실험 간의 차이는 크지 않다. 전체 기간에 대해 평균한 온도 편차는 NOJD와 JD가 각각 -0.71 , -0.93°C 이며, 상대습도 편차는 7.77, 8.91%이다. NOJD와 JD 모두 온도의 음의 편차와 그에 따른 상대습도의 양의 편차가 나타나며, 편차가 주간보다는 야간에 증가하는 것을 확인할 수 있다(Figs. 7d, e). Hu et al. (2013)에 따르면 WRF 모델 3.4.1 이상 버전에 적용된 YSU 행성 경계층 방안은 야간 안정 경계층에서의 기상장 혼합을 약하게 모의함으로써 기존 모델에서 나타난 야간의 하층 바람 과대 모의 문제를 해소하였다. 이에 따라 모의된 하층 기온이 감소함이 보고되었으며, NOJD와 JD 역시 이러한 YSU 행성 경계층 방안의 보고된 온도 모의 특징을 보이고 있다.

모델이 모의한 바람장을 살펴보면(Fig. 7c), 풍속이 강해지는 주간에는 관측 대비 풍속을 강하게 모의한다. 관측에서 나타난 풍속의 최대값은 약 7 m s^{-1} 이고 모델에서 나타난 풍속의 최대값은 약 14 m s^{-1} 로 관측에 비해 대체적으로 풍속을 과대모의하고 있음을 확인할 수 있다. NOJD와 JD가 모의한 바람의 편차를 살펴보면(Fig. 7f), 풍속이 상대적으로 강한 주간에 관측에 비해 큰 바람 속도를 모의하고 있음을 뚜렷하게 알 수 있다. 한편 JD는 NOJD에 비해 양의 바람 속도 편차가 현저히 감소하였는데 전체 기간에 대해 평균한 풍속 편차가 NOJD는 3.59 m s^{-1} , JD는 2.35 m s^{-1} 로 JD에서 1.15 m s^{-1} 감소하였으며, 특히 종관 저기압의 영향을 직접적으로 받았던 4월 2일 2100 KST에서 4월 3일 0900 KST까지 풍속의 과대 모의가 뚜렷하게 개선된 것으로 보인다. 두 실험의 풍속 차이가 0.1 m s^{-1} 이상 나는 시간대를 분석해보면, 4월 2일 2000 KST에서 3일 0900 KST, 3일 2000 KST에서 4일 1100 KST, 4일 1800 KST에서 5일 1000 KST, 그리고 4월 5일 2000 KST에서 6일 0900 KST임을 알 수 있다. 즉, 대부분 늦은 저녁시간부터 다음날 아침까지 야간에 대기가 안정된 상태를 가지는 시간대에 두 실험 간의 풍속 차이가 큰 것을 알 수 있다. 그러나 이의 불안정한 대기 상태인 시간대의 경우 관측 값과 NOJD와 JD를 비교해보았을 때 풍속의 과대 모의는 거의 개선되지 않았다. 이는 Lorente-Plazas et al.

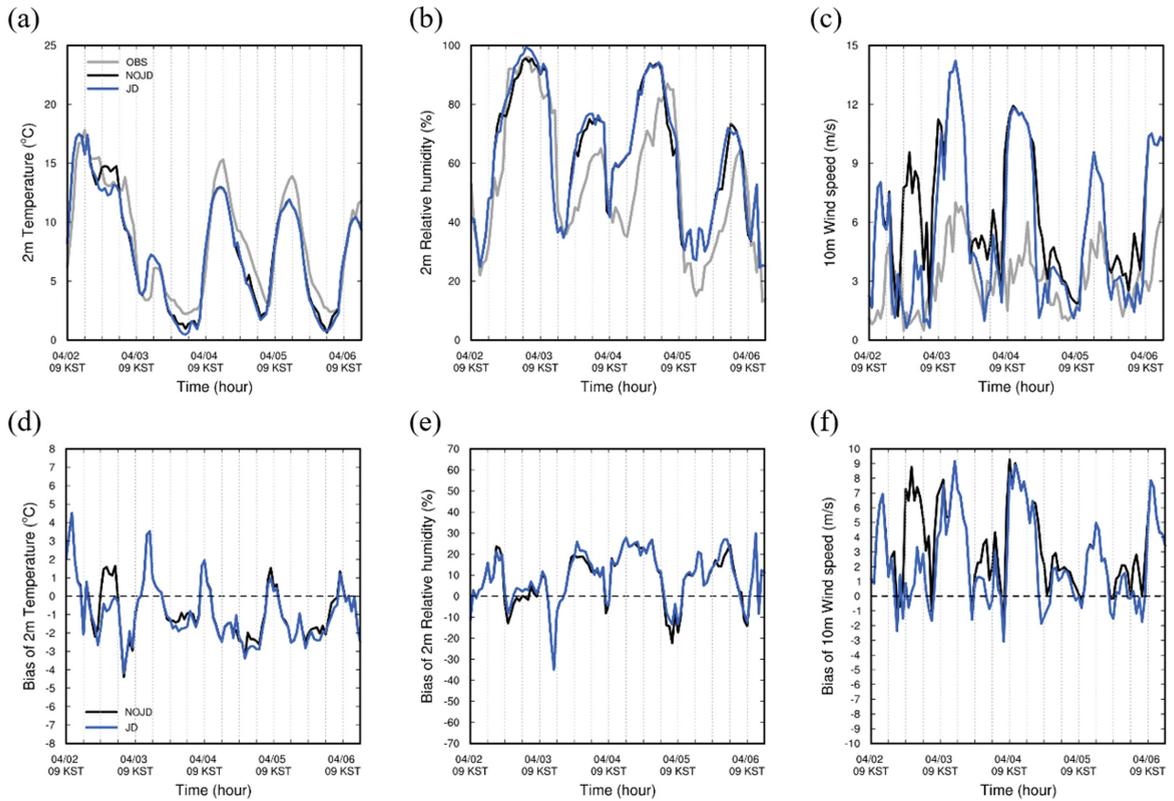


Fig. 7. (a-c) Time series and (d-f) ones of bias for the temperature (a, d), relative humidity (b, e), and wind speed (c, f) at Daejeon station for Case1. Gray, blue, and black lines indicate the observation, NOJD, and JD, respectively.

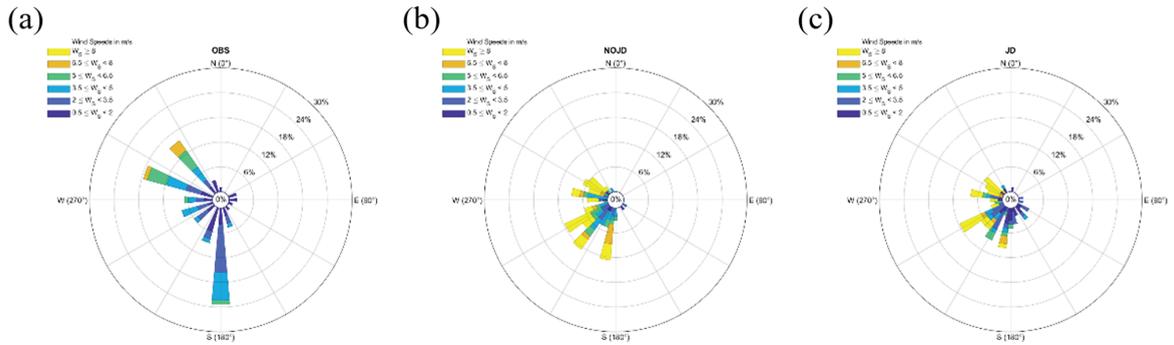


Fig. 8. Wind rose of (a) observation, (b) NOJD, and (c) JD at the Daejeon station for Case1.

(2016)에서 JD12를 적용하였을 때, 대기가 안정한 야간에 관측과 더 유사한 결과를 보인 것과 일치한다.

JD12 모수화의 적용이 풍향에 미치는 효과를 알아보기 위해 NOJD와 JD, 그리고 대전 지점의 ASOS 자료를 활용하여 산출한 바람 장미를 비교하였다(Fig. 8a). 관측에서 나타난 주풍은 남풍으로 분석되며, 북서풍과 서북서풍도 상당수 관측된 것을 알 수 있다.

주풍인 남풍의 최대 속도는 6.5 m s^{-1} 를 초과하지 않는 것으로 분석되며, 북서풍 계열의 바람 또한 그 최대값이 8 m s^{-1} 이내이다. NOJD와 JD에서 나타난 주풍은 모두 남서풍 계열로 모델이 관측된 바람을 정확하게 모의하지 못하는 것으로 나타났으며, 두 실험 모두 8 m s^{-1} 이상의 풍속을 보이며 풍속을 과대모의하고 있다(Figs. 8b, c). 그렇지만 JD는 NOJD에 비해

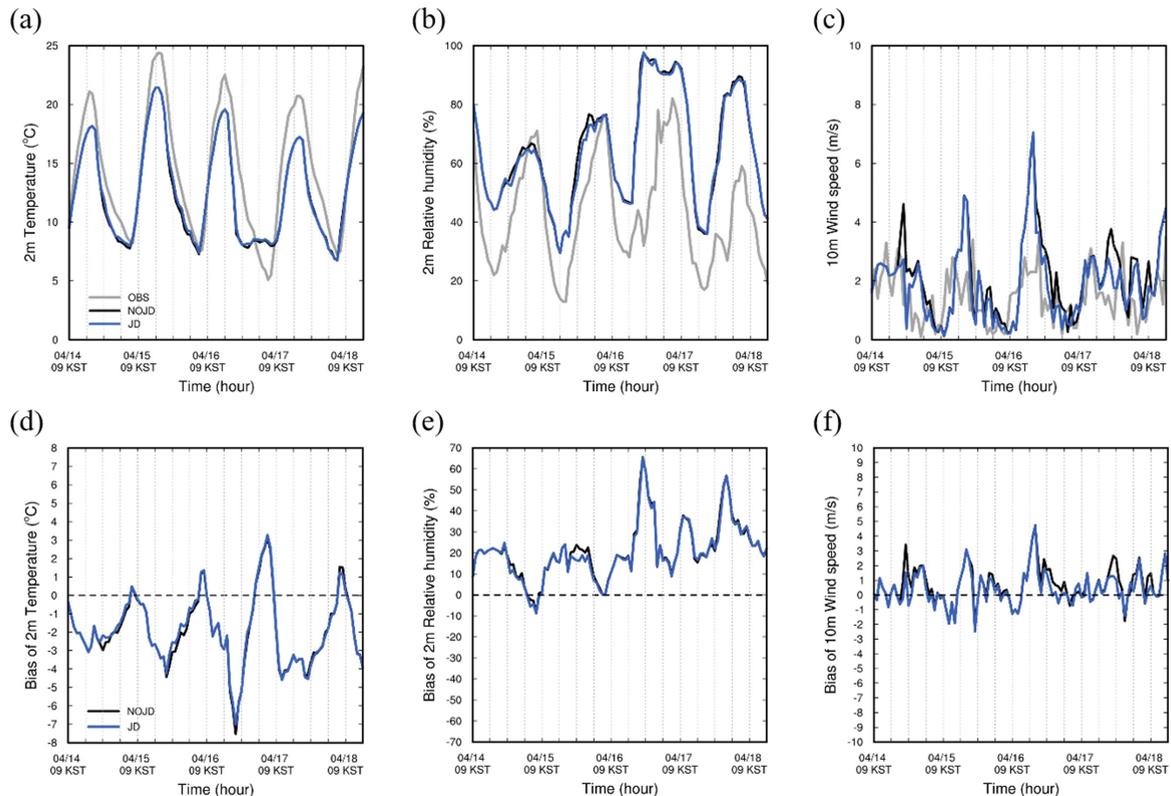


Fig. 9. Same as Fig. 8 but representing Case2.

남풍 계열의 풍속이 현저히 감소하면서 관측된 풍속과 좀 더 유사함을 알 수 있다(Fig. 8c).

Figure 9는 Case2에 대한 온도, 상대습도, 그리고 풍속(Figs. 9a-c)과 관측과의 편차(Figs. 9d-f)를 나타낸 것이다. 중관 저기압의 영향이 없었던 Case2의 경우 Case1보다 하층 기상 변수의 일변화가 더 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 4월 17일 0300 KST부터 0900 KST를 제외하고는 Case1과 마찬가지로 모델은 관측보다 낮은 온도 및 높은 상대습도를 예측하고 있다(Figs. 9a, b). 반면, Case1의 모델 결과와 비교하여 야간의 온도 예측 성능이 개선되었음을 확인할 수 있다. 두 실험 모두 관측된 풍속의 일변화 주기를 잘 모의하고 있지만 관측과 비교하여 풍속의 과대 모의의 경향을 나타낸다. Case2에서 나타난 전체 기간에 대해 평균한 온도 편차는 NOJD와 JD가 각각 -1.96 , -1.89°C 이며, 상대습도의 편차는 21.32, 20.67%이다. Case2의 경우 Case1에 비해 주간 온도를 크게 과소 모의하고 있으며, 이에 따라 Case1에 비해 온도 음의 편차가 더 크게 나타난다. 야간 온도 모의의 음의 편차와 풍속의 과대 모의는 Case1에서와 마찬가지로 야간 대기 하층의 혼합을 약하게 모의하는 YSU 행성 경계층 모

수화 방안의 특징에 영향을 받는 것으로 보인다. 관측에서 나타난 풍속의 최대값은 약 3.5 m s^{-1} 이고 모델에서 나타난 풍속의 최대값은 약 7 m s^{-1} 이다. 풍속의 과대 모의의 정도는 Case1에서 보다는 적지만 여전히 전체적으로 양의 편차가 나타나고 있다(Fig. 9f). 풍속의 과대 모의가 가장 심한 시간은 4월 16일 1700 KST(+56시)이다. 하지만 이 시간에서 JD12의 효과는 나타나지 않는다. 두 실험의 풍속 차이가 0.1 m s^{-1} 이상 나는 시간대는, 4월 14일 1900 KST에서 15일 0600 KST, 15일 1900 KST에서 16일 0700 KST, 16일 1800 KST에서 17일 0300 KST, 그리고 4월 17일 1700 KST에서 18일 1300 KST이다. Case2의 전체 기간에 대해 평균한 풍속 편차는 NOJD가 0.69 m s^{-1} , JD가 0.43 m s^{-1} 로 나타났다. JD에서 편차가 0.26 m s^{-1} 감소하면서 풍속 모의가 개선되었다. Case1과 마찬가지로 야간에 풍속이 줄어든 것을 볼 수 있으며, 나머지 시간에서의 개선은 거의 없다.

Figure 10은 Case2에 대해 관측, NOJD, 그리고 JD에서 나타난 바람장이다. 관측의 주풍은 북서풍과 북북서풍이고, NOJD와 JD 모두 주풍은 북서풍으로 관측에서 나타난 주풍의 방향을 잘 모의하였다. 하지

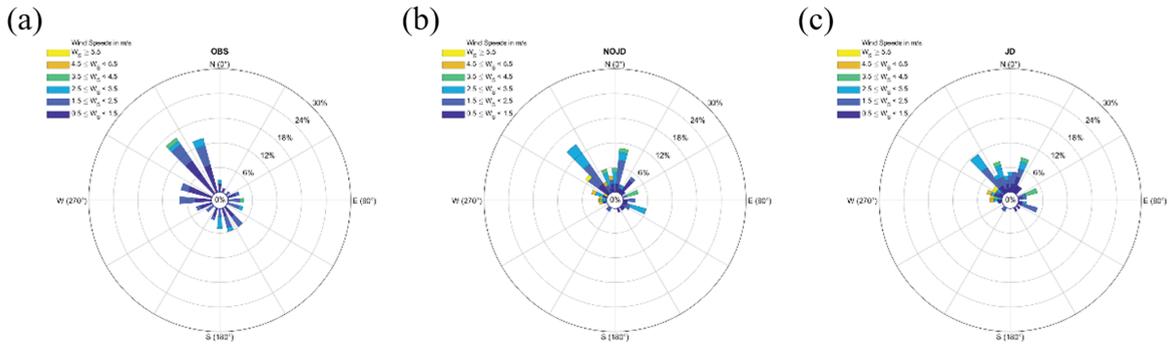


Fig. 10. Same as Fig. 7 but representing Case2.

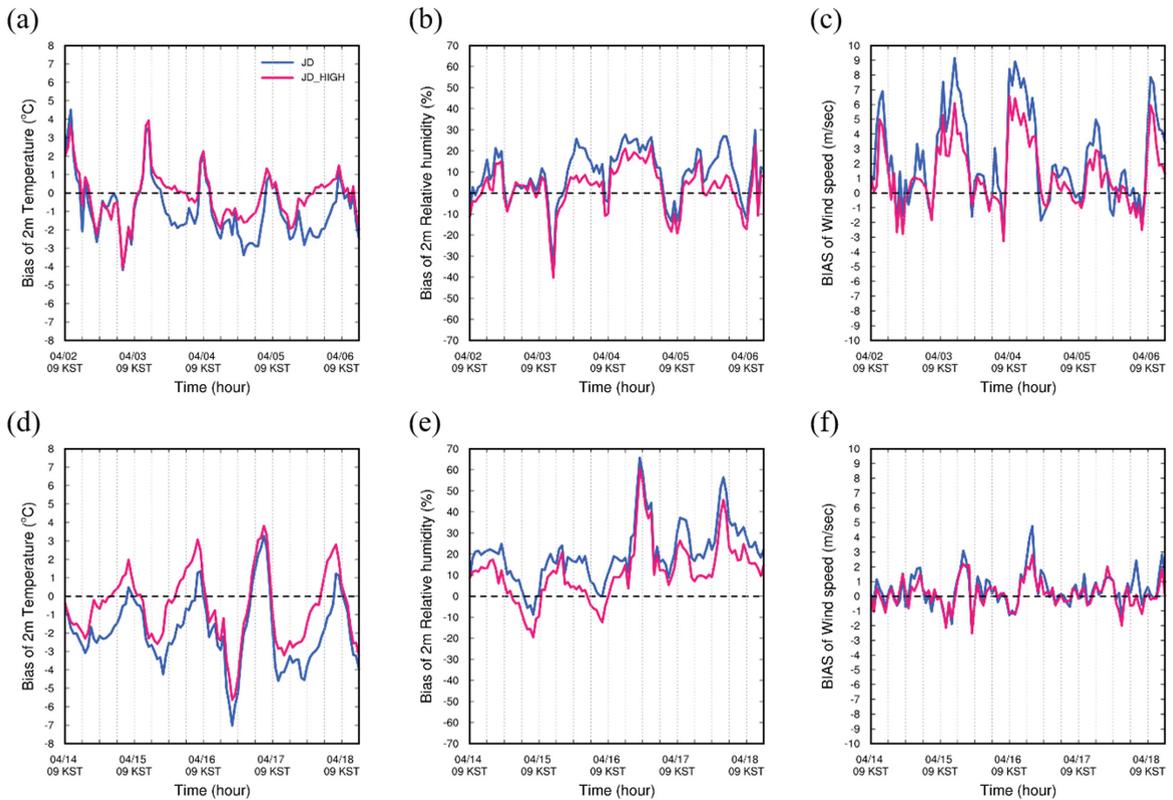


Fig. 11. The times series of bias for the temperature (a, c), relative humidity (b, e), and wind speed (c, f) at Daejeon station for (a-c) Case1, (d-f) Case2. Blue, pink lines indicate the JD and JD_HIGH, respectively.

만 관측에서는 거의 나타나지 않은 북동풍 계열의 바람을 많이 모의하고 있는데 JD는 NOJD와 비교했을 때 북북서풍의 바람을 더 많이 모의함에 따라 예측 성능이 개선됨을 알 수 있다. 관측의 주풍인 북서풍의 최대값은 4.5 m s^{-1} 를 초과하지 않는 것으로 분석되고 북북서풍의 풍속의 최대값은 3.5 m s^{-1} 이내이다. 하지만 NOJD와 JD 모두 5.5 m s^{-1} 이상의 풍속을 모

의하고 있다. JD는 NOJD에 비해 풍속이 다소 감소하지만 관측에 비해 여전히 강하게 모의하고 있다. 앞서 비교한 기상 변수의 편차에서도 확인할 수 있듯이, Case2에 대해서는 온도와 상대습도뿐만 아니라, 풍속의 개선에 있어 JD12의 효과는 미비한 것으로 판단된다(Figs. 9d-f). 즉, JD12가 바람장의 속도를 개선하지만, 개선 효과는 종관 저기압의 영향을 받았던 Case1

에서 뚜렷한 것으로 평가된다.

3.2 고해상도 지면 자료의 효과

Figure 11은 JD와 JD에 고해상도 지면 자료를 적용한 JD_HIGH의 온도, 상대습도, 그리고 풍속의 편차를 Case1 (Figs. 11a-c)과 Case2 (Figs. 11d-f)에 대해 비교한 그림이다. Case1의 온도 편차의 평균은 JD와

JD_HIGH가 각각 -0.93 , -0.16°C 이며, 상대습도 편차의 평균은 각각 8.91 , 2.57% 로 JD_HIGH가 관측과 유사한 온도와 상대습도를 모의한 것으로 분석되었다 (Figs. 11a, b). 풍속 편차의 평균은 JD가 2.35 m s^{-1} , JD_HIGH가 1.29 m s^{-1} 로 나타났으며, 역시 JD_HIGH에서 분석기간 전반에 걸쳐 개선된 것을 알 수 있다. 특히 풍속이 전반적으로 강한 주간에 크게 개선되었

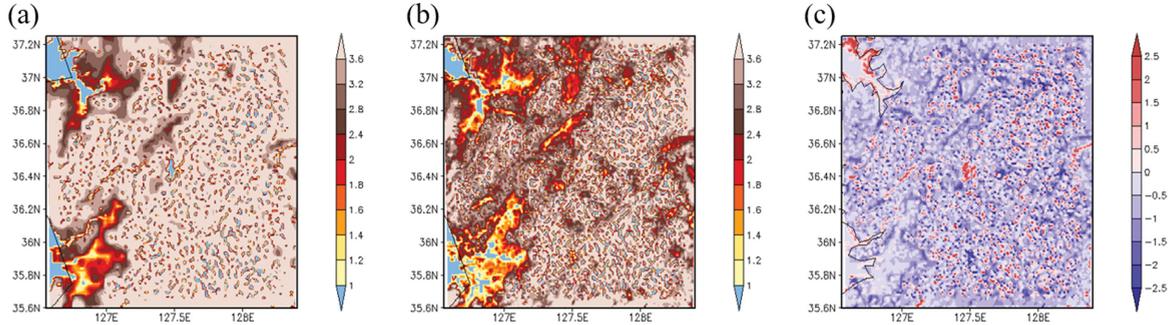


Fig. 12. (a) Factor (c_i) that controls the sink term in the momentum equation in JD12, (b) c_i in JD_HIGH, and (c) differences between JD_HIGH and JD (JD_HIGH minus JD).

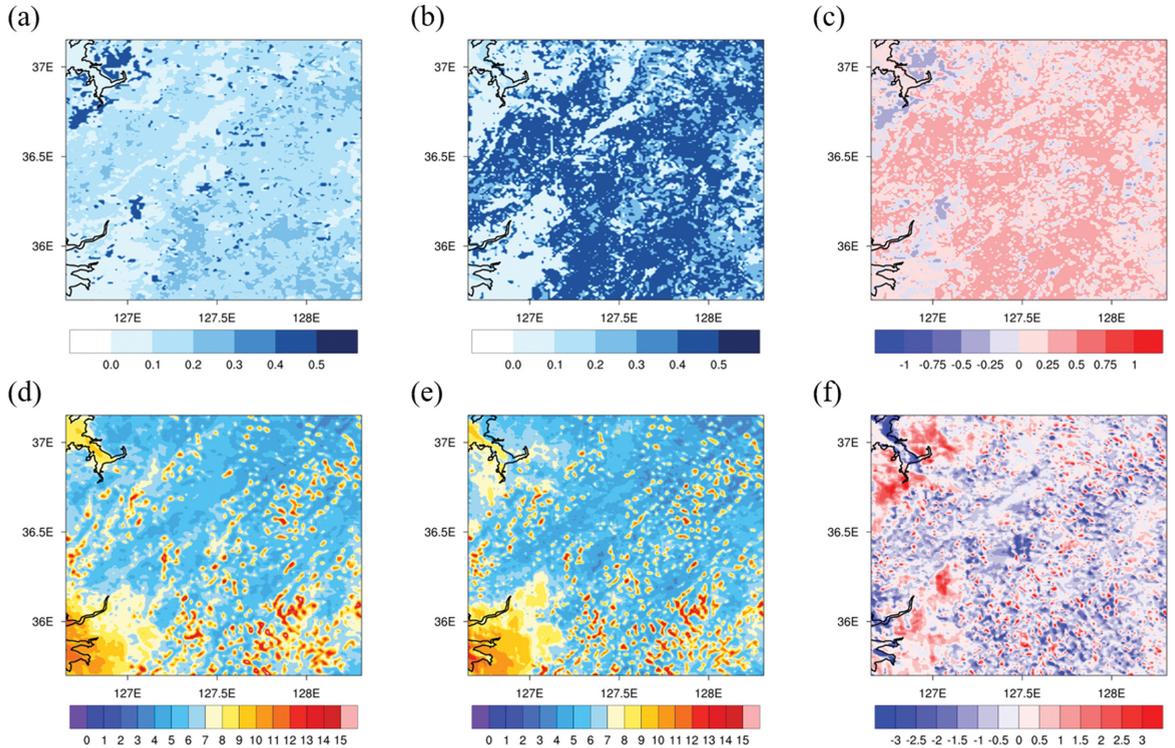


Fig. 13. Spatial distribution of (a-c) roughness length (m) and (d-f) wind speed (m s^{-1}) for (a), (d) JD, (b), (e) JD_HIGH, and (c), (f) differences between JD_HIGH and JD (JD_HIGH minus JD) during 1500 KST 02 to 1500 KST 03 April 2012. The results represent for Case1.

다(Fig. 11c). Case2의 경우 온도 편차의 평균은 JD가 -1.89°C , JD_HIGH가 -0.59°C 로 나타났으며, 상대습도 편차의 평균은 각각 20.67, 11.49%로 분석되었다. 풍속 편차는 각각 0.43, 0.17 m s^{-1} 로 Case1과 마찬가지로 JD_HIGH에서 예측 성능이 개선된 것을 알 수 있다(Fig. 11d-f). Figure 12는 JD와 JD_HIGH에서 사용된 JD12 모수화의 c_i 값과 두 실험 간의 c_i 값 차이를 나타낸다. 대부분의 분석 영역에서 c_i 값이 JD_HIGH에서 감소한 반면, 지표면 거칠기는 JD_HIGH에서 증가하였다(Figs. 12c, 13c). JD와 JD_HIGH의 4월 2일 1500 KST에서 3일 1500 KST까지 총 25시간 평균 풍속의 차이를 살펴보면(Fig. 13f), 지표면 거칠기가 증가한 지역과 풍속이 감소한 지역이 일치하는 것을 알 수 있다(Figs. 13c, f). 즉, 고해상도의 지형 자료를 모델에 처방하였을 때, JD12에 의해서는 감소된 c_i 가 처방되어 풍속이 증가할 수 있으나, 지표면 거칠기의 증가에 의한 효과가 우세하여 풍속이 감소하는 것으로 분석된다.

Figure 14는 Case1과 Case2에 대한 JD_HIGH의 바람 장미를 나타낸 그림이다. Case1에서 JD_HIGH는 주풍이 남남서풍의 계열인 바람을 모의함에 따라 주풍이 남풍인 관측의 풍향과 유사하게 모의하고 있으며 풍속은 줄어든 경향을 볼 수 있다(Figs. 8a, 14a). 마찬가지로 Case2에서의 JD_HIGH가 모의한 바람을 분석해보면 JD와 주풍은 같으나 북서풍과 북동풍 계열의 바람을 주로 모의한 JD와는 달리 관측과 유사하게 풍속이 센 바람들이 주로 북서풍 계열에서 나타난다(Figs. 10c, 14b). 즉, Case2 또한 JD_HIGH의 풍향이 관측과 더 비슷한 경향을 볼 수 있다(Fig. 10a). 고해상도의 지면 자료 적용을 통해 풍향 예측성이 높아진 것을 확인할 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 아격자 산악모수화 및 고해상도 지면 자료를 적용하여 대기 하층 바람장 예측 성능을 향상시키고자 하였다. 종관 저기압의 영향을 받는 사례와 받지 않는 사례를 비교함으로써 종관장에 따른 바람장을 포함한 기상장의 예측 성능에 대해 평가하였다. 연구를 위해 미국대기연구센터에서 개발된 WRF 중규모 모델을 사용하였으며, 수평 해상도 10 km-1 km를 갖는 두 개의 도메인을 구축하여 각 도메인은 단방향의 등지 격자 체계로 구성하였다. 모델의 초기 및 경계 자료로는 ERA5 재분석 자료를 활용하였다. 최근 20년 중 풍속이 가장 강했던 2012년 4월 한달 종관 저기압의 영향을 받는 2012년 4월 2일부터 6일까지를 Case1, 종관 저기압의 영향을 받지 않는 4월 14일부터 18일까지는 Case2로 선정하여 실험을 수행하였다.

종관 저기압의 영향을 받는 사례와 받지 않는 사례 모두 관측과 비교하여 온도와 상대습도를 비교적 잘 모의하였으나, 풍속을 강하게 모의하는 것으로 분석되었다. 두 사례 모두 모델은 관측보다 다소 낮은 온도 및 높은 상대습도를 모의하였으며, 아격자 산악모수화의 적용은 온도 및 상대습도 모의에 큰 영향을 미치지 않았다. 그러나 아격자 산악모수화를 적용한 모델은 모의된 풍속을 현저히 줄이면서 관측과의 편차를 감소시켜 예측 성능을 향상시켰다. 모의된 바람의 시계열 분석을 통해 주간보다 야간의 풍속이 현저히 개선되는 것을 알 수 있었다. 풍속의 예측성 향상은 풍속이 강했던 종관 저기압의 영향을 받는 사례에서 두드러졌다. 반면, 풍속이 약했던 종관 저기압의 영향을 받지 않는 사례에서는 아격자 산악모수화 적

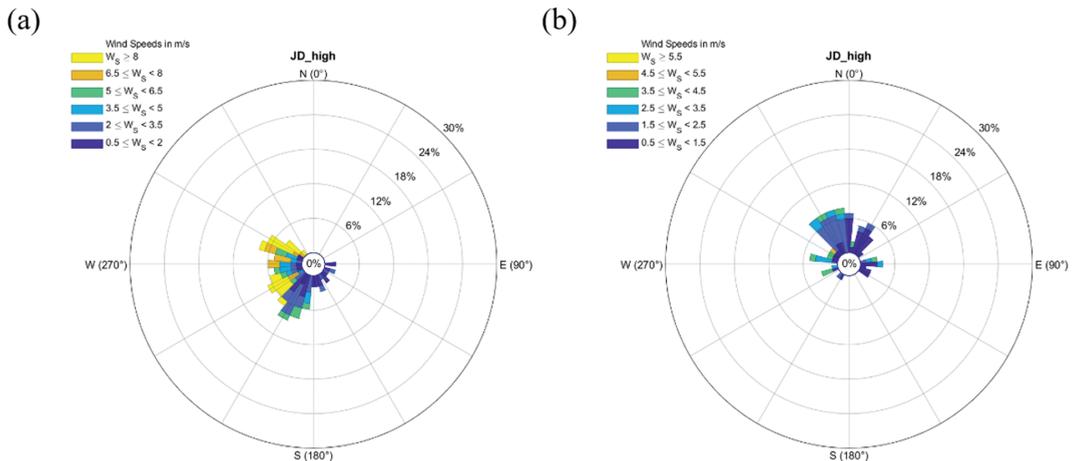


Fig. 14. Wind rose of JD_HIGH at the Daejeon station for (a) Case1 and (b) Case2.

용에 의한 바람장의 개선 효과가 크지 않았다. 추가적으로 수행한 고해상도 지면 자료의 적용은 모델의 온도와 상대습도뿐만 아니라 바람장의 예측 성능을 크게 향상시켰다. 고해상도 피복 자료를 사용하였을 때 지면 거칠기 길이가 증가하여 풍속을 감소시킨 것으로 분석되었다. 고해상도의 지형 및 피복 자료의 적용에 따른 풍속 감소 효과는 중관 저기압의 영향을 받는 사례에서 크게 나타났다.

본 연구를 통해 기존 WRF 모델이 보이는 양의 풍속 편차가 아격자 산악모수화와 고해상도 지면 자료를 사용함으로써 개선되었다. 따라서 정확한 바람장을 모의하기 위해서는 아격자 산악모수화의 적용과 함께 고해상도의 지면 자료의 적용이 필요하다. 그러나 모델 모수화의 고도화 및 고해상도 지면 자료의 적용에도 불구하고 여전히 모델은 관측보다 강한 크기의 바람장을 모의하고 있다. 본문에서 언급하였듯이 모델의 행성 경계층 모수화 방안에서 계산하는 대기 난류에 의한 하층 대기 혼합 역시 하층 바람장과 온도장 모의에 큰 영향을 미칠 수 있다. 차후 하층 난류의 대기 혼합 과정을 직접적으로 분해할 수 있는 고해상도 WRF-Large Eddy Simulation (LES) 모델을 이용하여 풍속의 예측 정확성을 향상시킬 수 있는 추가적인 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국원자력연구원 주요사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: 1711139310).

REFERENCES

- An, H. Y., Y.-H. Kang, S.-K. Song, J.-H. Bang, and Y.-K. Kim, 2015: Atmospheric dispersion of radioactive material according to the local wind patterns around the Kori Nuclear Power Plant using WRF/HYSPLIT model. *J. Environ. Sci. Int.*, **24**, 81-96, doi:10.5322/JESI.2015.24.1.81 (in Korean with English abstract).
- Banks, R. F., J. Tiana-Alsina, J. M. Baldasano, F. Rocadenbosch, A. Papayannis, S. Solomos, and C. G. Tzani, 2016: Sensitivity of boundary-layer variables to PBL schemes in the WRF model based on surface meteorological observations, lidar, and radiosondes during the HygrA-CD campaign. *Atmos. Res.*, **176**, 185-201, doi:10.1016/j.atmosres.2016.02.024.
- Byun, J.-Y., Y.-J. Choi, and B.-K. Seo, 2010: Characteristics of a wind map over the Korean Peninsula based on mesoscale model WRF. *Atmosphere*, **20**, 195-210 (in Korean with English abstract).
- Byun, U.-Y., S.-Y., Hong, H. Shin, J.-W. Lee, J.-I. Song, S.-J. Hahm, J.-K. Kim, H.-W. Kim, and J.-S. Kim, 2011: WRF-based short-range forecast system of the Korea Air Force: Verification of prediction skill in 2009 summer. *Atmosphere*, **21**, 197-208, doi:10.14191/Atmos.2011.21.2.197 (in Korean with English abstract).
- Chang, J. C., P. Franzese, K. Chayantrakom, and S. R. Hanna, 2003: Evaluations of CALPUFF, HPAC, and VLSTRACK with two mesoscale field datasets. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **42**, 453-466.
- Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 569-585.
- Choi, G.-S., J.-M. Lim, K.-S. S. Lim, K.-H. Kim, and J.-H. Lee, 2018: Characteristics of regional scale atmospheric dispersion around Ki-Jang research reactor using the Lagrangian Gaussian puff dispersion model. *Nucl. Eng. Technol.*, **50**, 68-79, doi:10.1016/j.net.2017.10.002.
- Harman, I. N., and J. J. Finnigan, 2007: A simple unified theory for flow in the canopy and roughness sublayer. *Bound.-Lay. Meteorol.*, **123**, 339-363.
- _____, and _____, 2008: Scalar concentration profiles in the canopy and roughness sublayer. *Bound.-Lay. Meteorol.*, **129**, 323-351.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **146**, 1999-2049, doi:10.1002/qj.3803.
- Hong, S.-Y., 2010: A new stable boundary-layer mixing scheme and its impact on the simulated East Asian summer monsoon. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **136**, 1481-1496, doi:10.1002/qj.665.
- _____, and J.-W. Lee, 2009: Assessment of the WRF model in reproducing a flash-flood heavy rainfall event over Korea. *Atmos. Res.*, **93**, 818-831.
- _____, Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.
- Hu, X.-M., P. M. Klein, and M. Xue, 2013: Evaluation of the updated YSU planetary boundary layer scheme within WRF for wind resource and air quality assessments. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 10490-10505, doi:10.1002/jgrd.50823.
- Iacono, M. J., J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shephard, S. A. Clough, and W. D. Collins, 2008: Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **113**, D13103, doi:10.1029/

- 2008JD009944.
- Jiménez, P. A., and J. Dudhia, 2012: Improving the representation of resolved and unresolved topographic effects on surface wind in the WRF model. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**, 300-316, doi:10.1175/JAMC-D-11-084.1.
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 170-181.
- _____, and J. M. Fritsch, 1990: A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2784-2802.
- Kim, D. Y., and K. S. Han, 2012: Temporal and spatial wind information production and correction algorithm development by land cover type over the Republic of Korea. *Kor. Soc. Geospatial Inf. Sci.*, **20**, 19-27, doi:10.7319/kogsis.2012.20.3.019 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-Y., D.-Y. Kim, J.-H. Oh, S. H. Kim, H.-G. Kim, Y.-H. Kang, J.-J. Kim, and C.-H. Cho, 2015: Sensitivity evaluation of surface wind simulations by surface drag parameterization and spatial resolution using WRF model. *J. Wind Engin. Ins. Korea*, **19**, 77-83 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-W., and S.-Y. Hong, 2006: A numerical simulation study of orographic effects for a heavy rainfall event over Korea using the WRF model. *Atmosphere*, **16**, 319-332 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.-W., W.-B. Jeon, S.-H. Lee, and H.-J. Choi, 2008: Analysis of numerical meteorological fields due to the detailed surface data in complex coastal area. *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, **24**, 649-661 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.-H., and S.-H. Yun, 2011: Impact of meteorological wind fields average on predicting volcanic tephra dispersion of Mt. Baekdu. *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, **32**, 360-372, doi:10.5467/JKESS.2011.32.4.360 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., J. Hong, Y. Noh, and P. A. Jiménez, 2020: Implementation of a roughness sublayer parameterization in the Weather Research and Forecasting model (WRF version 3.7. 1) and its evaluation for regional climate simulations. *Geosci. Model Dev.*, **13**, 521-536, doi:10.5194/gmd-13-521-2020.
- Lim, K.-S. S., and S.-Y. Hong, 2010: Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1587-1612, doi:10.1175/2009MWR2968.1.
- _____, J.-M. Lim, H. H. Shin, J. Hong, Y.-Y. Ji, and W. Lee, 2019: Impacts of subgrid-scale orography parameterization on simulated atmospheric fields over Korea using a high-resolution atmospheric forecast model. *Meteor. Atmos. Phys.*, **131**, 975-985, doi:10.1007/s00703-018-0615-4.
- _____, J. M. Lim, J. Lee, and H. H. Shin, 2021: Impact of boundary layer simulation on predicting radioactive pollutant dispersion: A case study for HANARO research reactor using the WRF-MMIF-CALPUFF modeling system. *Nucl. Eng. Technol.*, **53**, 244-252, doi:10.1016/j.net.2020.06.011.
- Lorente-Plazas, R., P. A. Jiménez, J. Dudhia, and J. P. Montávez, 2016: Evaluating and improving the impact of the atmospheric stability and orography on surface winds in the WRF model. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 2685-2693.
- Mass, C., and D. Ovens, 2010: WRF model physics: problems, solutions, and a new paradigm for progress. *Preprints, 2010 WRF Users' Workshop*, NCAR, 49 pp. [Available online at https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2010/presentations/session%204/4-1_WRFworkshop2010Final.pdf].
- _____, and _____, 2011: Fixing WRF's high speed wind bias: a new subgrid scale drag parameterization and the role of detailed verification. *Preprints, 24th Conference on Weather and Forecasting/20th Conference on Numerical Weather Prediction*, Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc., 9B.6. [Available online at <https://ams.confex.com/ams/91Annual/webprogram/Paper180011.html>].
- Morcrette, J.-J., H. W. Barker, J. N. S. Cole, M. J. Iacono, and R. Pincus, 2008: Impact of a new radiation package, McRad, in the ECMWF Integrated Forecasting System. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 4773-4798.
- Ngan, F., H. Kim, P. Lee, K. Al-Wali, and B. Dornblaser, 2013: A study of nocturnal surface wind speed over-prediction by the WRF-ARW model in southeastern Texas. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **52**, 2638-2653, doi:10.1175/JAMC-D-13-060.1.
- Park, H.-H., J. Lee, E.-C. Chang, and M. Joh, 2019: High-resolution simulation of snowfall over the Korean eastern coastal region using WRF model: Sensitivity to domain nesting-down strategy. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **55**, 493-506, doi:10.1007/s13143-019-00108-x.
- Seo, B.-K., J.-Y. Byon, and Y.-J. Choi, 2010: Sensitivity evaluation of wind fields in surface layer by WRF-PBL and LSM parameterizations. *Atmosphere*, **20**, 319-332 (in Korean with English abstract).

Shimada, S., T. Ohsawa, S. Chikaoka, and K. Kozai, 2011: Accuracy of the wind speed profile in the lower PBL as simulated by the WRF model. *SOLA*, **7**, 109-112, doi:10.2151/sola.2011-028.

Skamarock, W. C., and Coauthors, 2019: A description of the advanced research WRF model version 4.1. Tech.

Rep. NCAR/TN-556+STR, 145 pp.

Yang, C.-H., Y. S. Koo, I. S. Kim, and J.-G. Sung, 2013: Studies on the methodology of a hybrid model for emission dispersion analysis. *J. Kor. Soc. Transport.*, **31**, 69-79, doi:10.7470/jkst.2013.31.2.069 (in Korean with English abstract).