

ORIGINAL ARTICLE

KORUS-AQ 기간 동안 초기 입력 자료에 따른 WRF 기상장 모의 결과 비교

문정혁 · 전원배¹⁾ · 이화운^{1)*}

부산대학교 지구환경시스템학부, ¹⁾부산대학교 대기환경과학과

Impact of Different Meteorological Initializations on WRF Simulation During the KORUS-AQ Campaign

Jeonghyeok Mun, Wonbae Jeon¹⁾, Hwa Woon Lee^{1)*}

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 46241, Korea

¹⁾*Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

Abstract

Recently, a variety of modeling studies have been conducted to examine the air quality over South Korea during the Korea - United States Air Quality (KORUS-AQ) campaign period (May 1 to June 10, 2016). This study investigates the impact of different meteorological initializations on atmospheric modeling results. We conduct several simulations during the KORUS-AQ period using the Weather Research and Forecasting (WRF) model with two different initial datasets, which is FNL of NCEP and ERA5 of ECMWF. Comparing the raw initial data, ERA5 showed better accuracy in the temperature, wind speed, and mixing ratio fields than those of NCEP-FNL. On the other hand, the results of WRF simulations with ERA5 showed better accuracy in the simulated temperature and mixing ratio than those with FNL, except for wind speed. Comparing the nudging efficiency of temperature and wind speed fields, the grid nudging effect on the FNL simulation was larger than that on the ERA5 simulation, but the results of mixing ratio field was the opposite. Overall, WRF simulation with ERA5 data showed a better performance for temperature and mixing ratio simulations than that with FNL data. For wind speed simulation, however, WRF simulation with FNL data indicated more accurate results compared to that with ERA5 data.

Key words : KORUS-AQ, ERA5, NCEP-FNL, WRF, Grid nudging

1. 서론

최근 미세먼지로 인한 인적, 물적 피해가 증가함에 따라 대기질에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 2016년 5월 1일에서 6월 10일까지 한반도 대기질 문제를 다각도로 분석하고자 국립환경과학원(National Institute of

Environmental Research, NIER)과 미국항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)이 합동하여 한미 대기질 합동 연구(Korea - United States Air Quality, KORUS-AQ) 캠페인을 수행하였다. 캠페인 기간 동안 다양한 관측이 수행되었고, 한반도의 대기질을 정밀하게 진단하기 위한 모델링 연구

Received 21 October, 2019; Revised 19 December, 2019;

Accepted 13 January, 2020

*Corresponding author: Hwa Woon Lee, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea
Phone: +82-51-510-2291
E-mail: hwlee@pusan.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.

또한 활발히 수행되어 왔다(Huang et al., 2018; Lennartson et al., 2018).

수치모델을 이용한 대기질 연구는 일반적으로 기상, 배출량, 화학반응 메커니즘 등에서 여러 오차를 포함하게 된다. 그 중 기상 인자는 대기 오염 물질의 수송, 침적, 광화학 반응에 큰 영향을 미치므로 대기질 수치 모의에 있어 정확도 높은 기상장을 이용하는 것이 중요하다(Jeon et al., 2011; Jeong et al., 2016). 이러한 이유로 기상장 모의 정확도 향상에 관한 다양한 연구들이 지속적으로 수행되어 왔고, 특히 최근에는 자료동화 기법을 활용한 연구 결과가 다수 보고되고 있다(Choi et al., 2013; Jeon et al., 2015; Kim et al., 2016; Mun et al., 2017).

중규모 모델링에 많이 적용되고 있는 자료 동화 기법으로는 FDDA (Four Dimensional Data Assimilation) 과정이 있으며, 이 과정을 통해 향상된 경계 조건을 만들고, 초기 조건에 대한 잡음을 제거함으로써 모델의 초기장을 개선할 수 있다(Ryu and Cho, 2010; Choi and Lee, 2015). 3차원 중규모 모델인 WRF (Weather Research and Forecasting; Skamarock et al., 2008) 모델의 FDDA 과정인 너징(Nudging)은 관측 자료를 이용한 관측 너징(Observational nudging)과 초기 입력 자료를 이용한 분석 너징(Analysis nudging)으로 나뉜다. 관측 너징은 시간 창(time window) 동안 각 격자점을 중심으로 영향 반경(Radius of influence) 내에 있는 관측 지점들과의 차이값을 거리에 따른 가중치로 두고, 설정한 동화 강도에 따라 해당 격자점에 내삽하는 방법으로 관측 자료를 직접 이용한다는 장점이 있으나, 적절한 동화 강도와 영향 반경을 설정하지 않으면 국지 순환의 영향을 손실시킬 수 있는 우려가 있다(Lee et al., 2009). 한편, 분석 너징의 경우 초기 입력 자료의 격자점과 관측 간의 차이를 통해 새로운 초기 입력 자료를 산출하는 방법으로 여러 선행 연구에서 그 효과가 입증된 바 있다(Choi and Lee, 2015; Mun et al., 2017).

초기 입력 자료는 모델의 초기 및 경계 조건을 결정하고, 이는 초기치 문제를 수치적으로 풀어야 하는 모델의 중요한 오차 요소를 결정하기 때문에, 정확한 초기 입력 자료를 이용하는 것은 수치 모의 정확도 향상에 있어 중요하다(NIER, 2013; Jo et al., 2017). 초기 입력 자료는 GCM (Global Circulation Model)의 모의 결과에 관측

자료를 결합하여 생산된다. 수치 모의 연구에 주로 사용되는 초기 입력 자료로는 NCEP (National Centres for Environmental Prediction)의 NCEP-NARR (North American Regional Reanalysis), ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts)의 ERA-Interim, ERA5, NASA (National Aeronautics and Space Administration)의 MERRA (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications) 등의 재분석 자료가 있고, NCEP의 GFS (Global Forecast System)와 FNL (Final analyses)의 분석 자료가 있다. Mun et al.(2017)은 국내 대기질 연구에서 주로 사용 중인 NCEP의 FNL 분석 자료($1^\circ \times 1^\circ$)와 국외 여러 선행 연구에서 정확도 높은 자료로 보고된 ERA-Interim 재분석 자료($0.75^\circ \times 0.75^\circ$)를 이용하여 WRF 수치 모의 비교 실험을 수행하였고, 원시 자료간 비교에서 ERA-Interim 재분석 자료의 정확도가 FNL 분석 자료보다 높았으나 WRF 수치 모의 결과 FNL에 비해 모의 정확도가 떨어졌다고 보고하였다. 한편, 최근 NCEP에서 수평 해상도 0.25° 의 고해상도 FNL 분석 자료가 출시되었고, ECMWF에서도 동일한 수평 해상도의 새로운 ERA5 재분석 자료가 출시되어 고해상도 자료를 초기 입력 자료로 이용한 추가적인 비교 연구가 필요하다.

한편, 기상 요소는 대기 오염 물질의 분포 및 특성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Ha et al., 2017). 예를 들어 기온이 상승하면, 오존 생성을 촉진시키지만(Rasmussen et al., 2011), 대기 경계층 고도를 높여 지상의 미세먼지 농도를 낮추는 효과도 있다(Miao et al., 2017). 또한 풍속이 증가하면, 대기 오염 물질의 이류 및 확산에 큰 영향을 미치는데(Lee et al., 2004), 이로 인해 연직 혼합이 활발하게 이루어져 오염 물질의 농도가 낮아질 수도 있는 반면, 장거리 수송으로 오히려 농도가 증가할 수도 있다. 그리고 상대습도는 2차 에어로졸 생성과정에 밀접한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2007). 이처럼, 대기질 수치 모의에 있어 대상 오염 물질의 종류와 기상 조건에 따라 중요한 기상 요소가 다르게 나타날 수 있기 때문에 연구 사례와 목적에 맞는 기상 요소를 정확히 모의하는 것이 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 KORUS-AQ 캠페인 기간 동안 남한 지역을 대상으로 FNL 분석 자료와 ERA5 재분석 자료의 특징 및 정확도를 비교한 후, 각 자료를 초기

Table 1. Detailed options for WRF simulation

Domain	D01
Number of grids	280 × 260
Horizontal resolution	15 km
Vertical layers	35 Layers
Time step	60 sec
Microphysics option	WSM 3-class simple ice scheme
Radiation option	RRTM scheme(long-wave) Dudhia scheme(short wave)
Surface layer option	Revised MM5 Monin-Obukhov scheme (Jimenez)
Land-surface option	Unified Noah land-surface model
PBL option	YSU scheme
Cumulus option	Kain-Fritsch (new Eta) scheme
Initial data	NCEP FNL / ERA5
Nudging coefficient (u,v,t,q)	0.003 sec ⁻¹
Time period	2016.04.15. 09 LST - 2016.06.18. 09 LST

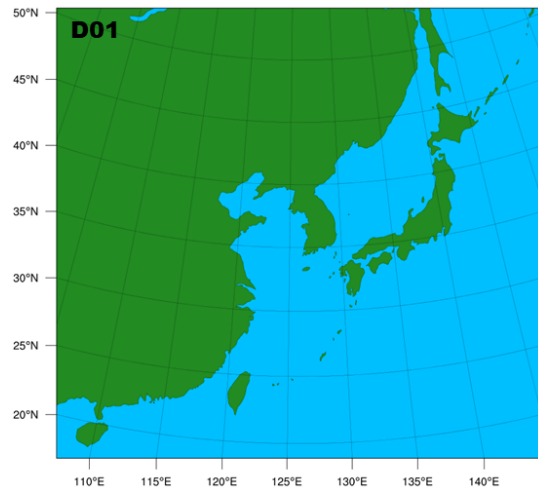
입력 자료로 이용한 WRF 기상 수치 모의 결과를 비교 분석하였다. 또한, 두 초기 입력 자료의 각 기상 요소별 수치 모의 특성을 비교하여, 대기질 모델링 연구의 목적에 맞는 기상장을 제시하고자 하였다. 추가적으로, 자료 동화 효과를 살펴보고자 분석 너징을 추가로 수행하여 자료별 모의 향상 결과를 정량적으로 비교하였다.

2. 연구 방법

2.1. 모델 설정

본 연구는 KORUS-AQ 기간 동안에 대해 대기질 수치 모의를 위한 정확도 높은 기상 입력장을 산출하기 위해 WRF 3.8.1 버전을 이용하였다. Table. 1은 본 연구에서 사용된 WRF 모델 설정에 대한 개요를 나타낸 것이다. 모델링 영역은 동아시아 영역을 포함한 1개의 도메인으로 구성하였고, 격자 수는 280 x 260이고, 수평 해상도는 15 km, 연직 층 수는 35개로 설정하였다(Fig. 1). 모델링 기간은 초기 스핀 업 시간(spin-up time)을 고려하고, KORUS-AQ 캠페인 기간을 포함한 2016년 4월 15일 09 LST부터 2016년 6월 18일 09 LST까지로 설정하였다. 모델의 세부 물리과정으로 장파 복사 방안은 RRTM scheme(Mlawer et al., 1997)을, 단파복사 방안은 Dudhia scheme(Dudhia, 1989)을 이용하였다. 지표면 모델은 Unified Noah LSM (Land Surface Model)

을 적용하였다. 구름미세물리 과정으로는 WSM 3-class simple ice scheme(Hong et al., 2004)을 이용하였고, Cumulus 모수화 방안으로는 Kain-Fritsch scheme(Kain, 2004)을, PBL 모수화 방안은 YSU (YonSei University) PBL scheme(Hong et al., 2006)을 이용하였다.

**Fig. 1.** Model domain.

초기 입력 자료는 FNL 분석 자료, ERA5 재분석 자료를

Table 2. Information on the two datasets

	NCEP-FNL	ERA5
Temporal resolution	6h	1h
Spatial resolution	0.25° × 0.25°	31km (≈0.25°)
Assimilation system	GDAS	IFS Cycle 41r2
Analysis method	3DVAR	10-member ensemble 4DVAR

Table 3. WRF simulations for different initializations

Nudging	Initial data	NCEP-FNL	ERA5
off		FNL_base	ERA5_base
on		FNL_gng	ERA5_gng

각각 이용하여 WRF 수치 모의 비교 실험을 수행하였다. Table. 2는 NCEP-FNL, ERA5 자료의 특징을 비교한 표이다. 먼저, FNL 자료는 6시간 시간 해상도와 0.25° × 0.25°의 수평공간해상도를 가진 전 지구 자료로 관측지점의 공간적 분포를 이용하여 자료동화를 실시하는 3DVAR (Three-dimensional Variational Data Assimilation)를 사용하고, GFS 예보장에 관측 자료를 통합하여 GDAS (Global Data Assimilation System)에서 생산한 분석 자료이다.

한편, ERA5 자료는 1시간 시간 해상도와 0.25° × 0.25°의 수평공간해상도를 가진 전 지구 자료로, ERA-Interim을 대체할 5세대 재분석 자료이다. 기존의 ERA-Interim 재분석 자료와 특징을 비교해보면, 두 자료 모두 IFS (Integrated Forecast System)를 통해 3DVAR에 시간적 변화를 고려한 4DVAR (Four-dimensional Variational Data Assimilation)를 활용하였지만, ERA5는 4DVAR에서 추가적으로 앙상블 기법 (10-member ensemble data assimilation)을 적용하였다. 또한, 기존의 ERA-Interim이 위성 자료를 활용하여 자료 보정을 한 반면, ERA5는 위성 자료뿐만 아니라 오존, 항공, 지상 자료 등 다양한 관측 자료를 통해 보정 작업을 수행하여 보다 정확도 높은 자료를 생산하고자 하였다 (Hersbach and Dee, 2016). ERA5 자료는 지상 자료와 연직 자료로 구분되며, 연직 자료는 pressure levels와 model levels로 나누어진다. 본 연구에서는 ERA5 재분석 자료의 pressure levels 자료를 이용하였고, 초기 입력

자료의 정확도와 각 자료를 사용한 모델 결과를 비교하기 위해 FNL, ERA5 모두 6시간 간격 자료를 이용하였다.

2.2. 실험 설계

본 연구는 KORUS-AQ 기간 동안 초기 입력 자료에 따른 WRF 수치 모델 결과를 비교하고자, FNL 분석 자료와 ERA5 재분석 자료를 이용하여 WRF 수치 모의를 실시하였다. 또한, 각 실험의 자료 동화 적용 효과를 살펴 보기 위해 분석 너징인 그리드 너징을 이용한 추가 실험을 실시하였고, 너징에 대한 세부 설정값은 Jeon et al.(2015)에서 제시된 값들을 이용하였다. Table. 3은 본 연구에서 수행한 실험 설계를 나타낸 표로 너징을 적용하지 않은 실험을 FNL_base, ERA5_base로 표기하고 (base 실험), 너징을 적용한 실험을 FNL_gng, ERA5_gng로 표기하였다(gng 실험).

2.3. 관측 자료 및 통계 지표

본 연구는 서론에서 언급했듯이 대기질 수치 모의에 있어 중요한 기온, 풍속, 혼합비의 지상 및 고층 수치 모의 결과를 비교하고자 하였다. 이에 전국 93개 지점 중관 기상관측소(Automatic Synoptic Observation System; ASOS)의 매시간 기온, 풍속, 혼합비 자료와 전국 9개 지점(백령도, 북강릉, 오산, 포항, 창원, 광주, 흑산도, 고산, 태풍센터) 라디오존데(Radiosonde; SONDE)에서 1일 2회 또는 4회 관측하는 기온, 풍속, 혼합비 프로파일 자료를 이용하였다(Fig. 2).

관측 자료를 바탕으로 모델의 정확도를 정량적으로 평가하기 위해 통계지표인 MBE (Mean Bias Error), RMSE (Root Mean Square Error), IOA (Index Of Agreement), R (Correlation coefficient)를 사용하였다.

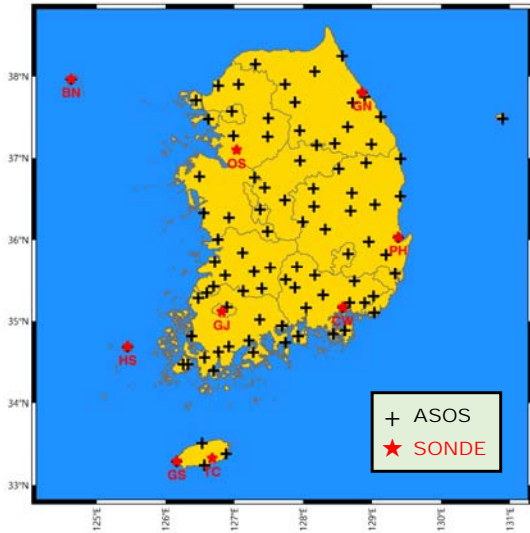


Fig. 2. Observation sites in Korea (ASOS: black cross; SONDE: red star).

3. 결과

3.1. 원시 자료간의 비교

WRF 수치 모의 결과 비교에 앞서, 본 연구에서 사용된 원시 자료의 특징 및 정확도를 비교 분석하고자 하였다. 이 때, 원시 자료의 격자 간격이 약 25 km로 비교적 크기 때문에 거리에 대한 기중 평균을 이용하여 격자 값을 산출하였고, 이를 관측 값과 비교하여 통계 결과를 산

출하였다(Mooney et al., 2011).

3.1.1. 지상 기상 요소 비교

Table. 4는 KORUS-AQ 기간 동안의 FNL, ERA5 원시 자료의 지상 기온, 풍속, 혼합비를 93개 ASOS 관측 지점의 값들과 비교하여 나타낸 통계 결과이다. 기온의 경우 두 자료 모두 MBE 값이 음수로 관측 보다 과소 산정되는 경향이 나타났고, FNL에 비해 ERA5에서 RMSE, MBE 값은 0에 가깝게, IOA, R값은 1에 가깝게 나타났기 때문에 ERA5의 정확도가 비교적 높다고 할 수 있다. 특히, RMSE 차이가 1.217°C로 비교적 큰 차이를 보였다. 풍속의 경우에는 MBE가 0보다 크게 나타나 과대 산정되는 경향이 나타났고, 마찬가지로 ERA5 자료의 정확도가 높게 나타났는데, RMSE 차이가 0.171 m/s로 기온에 비해 큰 차이를 보이지는 않았다. 혼합비의 경우에는 FNL은 과소 산정, ERA5는 과대 산정되는 경향이 나타났고, 평균과 MBE 값을 제외한 나머지 통계 결과에서 ERA5의 정확도가 높게 나타났다.

3.1.2. 고층 기상 요소 비교

Fig. 3은 원시 자료의 고층 기상 정확도를 비교하기 위해 전국 9개 지점의 라디오존데 온도, 풍속, 혼합비 관측 값과 모델 값을 각각 비교하여 전 지점 평균 MBE, RMSE 프로파일을 나타낸 그림이다. 먼저 온도 프로파일의 경우 두 자료 모두 1000 hpa 고도에서 관측보다 낮게 산정되는 경향을 보였고, 전반적으로 ERA5의 RMSE가 FNL에 비해 작게 나타났다. 풍속의 경우에는 1000 hpa 고도에 대해 ERA5는 관측보다 높게 산정된 반면, FNL은 관측보다 낮게 산정되었다. 고도 별 RMSE를 살펴보면, 700 hpa 고도까지는 FNL의 RMSE가 작아 정확도가 높았으나, 상층으로 갈수록 ERA5의 정확도가

Table 4. Statistics of temperature(T2), wind speed(WS10) and mixing ratio(Q2) for the raw initial data during KORUS-AQ. The values are averaged for 93 ASOS stations

Variables	Initial data	OBS	RAW	RMSE	MBE	IOA	R
T2 [°C]	NCEP-FNL	18.967	17.114	3.159	-1.853	0.884	0.848
	ERA5		18.690	1.942	-0.277	0.948	0.912
WS10 [m/s]	NCEP-FNL	2.055	2.920	1.857	0.865	0.778	0.699
	ERA5		2.886	1.686	0.831	0.792	0.703
Q2 [g/kg]	NCEP-FNL	8.780	8.664	1.696	-0.116	0.857	0.769
	ERA5		9.082	1.336	0.302	0.925	0.871

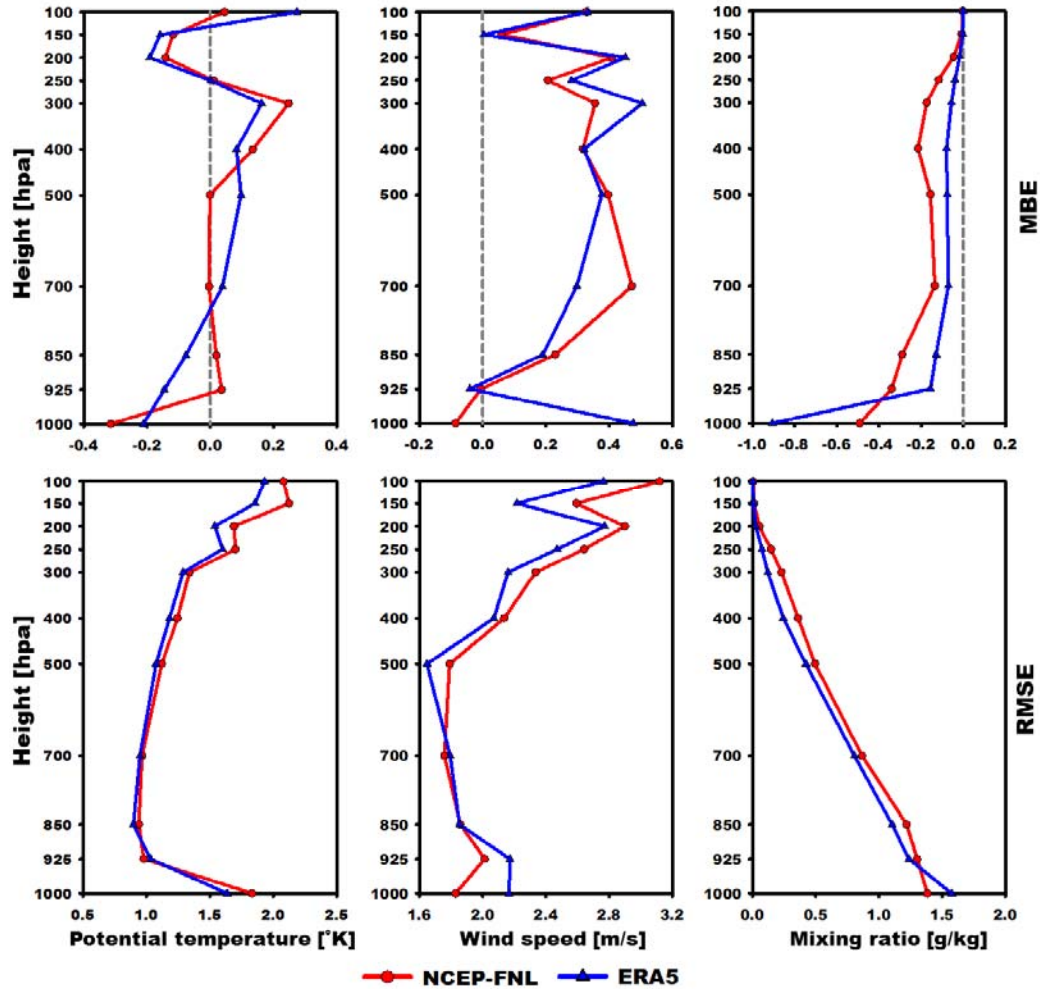


Fig. 3. Vertical profiles of mean difference(MBE, RMSE) between radiosonde(potential temperature, wind speed, mixing ratio) and datasets(NCEP-FNL, ERA5).

높게 나타났다. 마지막으로 혼합비 프로파일을 살펴보면, 두 자료 모두 MBE가 0보다 작아 관측 보다 낮게 산정되는 경향을 보였으며, 1000 hpa 고도를 제외하고는 FNL보다 ERA5의 정확도가 높게 나타났다.

3.2. 초기 입력 자료별 WRF 수치 모의 결과 비교

3.2.1. 지상 기상 모의 결과 비교

초기 입력 자료별 WRF 지상 기상 모의 결과를 비교하기 위해 ASOS 관측 자료와 각 실험별 WRF 수치 모

의 결과의 차이를 바탕으로 통계 결과를 산출하여 Table. 5에 나타내었다. 각 기상 요소의 수치 모의 결과를 살펴보면, 기온의 경우는 모든 실험에서 MBE가 0보다 작아 모델이 관측에 비해 과소 모의하는 경향을 나타냈고, 풍속은 MBE가 0보다 크게 나타나 모델이 과대 모의하는 경향을 보였다. 혼합비의 경우는 FNL_base와 FNL_gng 실험에서는 모델이 과소 모의를 하였고, ERA5_base와 ERA5_gng 실험에서는 모델이 과대 모의하는 경향을 보였다.

Table 5. Statistics of temperature(T2), wind speed(WS10) and mixing ratio(Q2) for WRF simulations during KORUS-AQ. The values are averaged for 93 ASOS stations

Variables	Exp.	OBS	WRF	RMSE	MBE	IOA	R
T2 [°C]	FNL_base	18.893	15.033	4.928	-3.860	0.753	0.780
	ERA5_base		16.184	3.929	-2.709	0.819	0.809
	FNL_gng		16.903	3.170	-1.990	0.889	0.864
	ERA5_gng		17.578	2.589	-1.315	0.921	0.888
WS10 [m/s]	FNL_base	2.073	4.226	3.200	2.153	0.576	0.533
	ERA5_base		4.303	3.211	2.230	0.573	0.532
	FNL_gng		3.125	1.922	1.052	0.755	0.676
	ERA5_gng		3.258	1.990	1.185	0.744	0.675
Q2 [g/kg]	FNL_base	8.742	7.855	2.242	-0.887	0.757	0.640
	ERA5_base		8.891	2.035	0.149	0.816	0.679
	FNL_gng		8.447	1.732	-0.295	0.852	0.765
	ERA5_gng		8.874	1.469	0.132	0.905	0.834

Table 6. Nudging efficiency of the simulations

Nudging efficiency [%]	T2	WS10	Q2
FNL	35.674	39.938	22.748
ERA5	34.105	38.026	27.813

WRF 수치 모의 실험 결과를 비교하기 위해 먼저, 너징을 적용하지 않은 base 실험의 결과를 살펴보면, 기온과 혼합비의 경우는 ERA5_base 실험의 모의 정확도가 FNL_base 실험 보다 높게 나타났고, 풍속의 경우에는 FNL_base 실험의 모의 정확도가 높게 나타났다. 이는 앞서 원시 자료간의 정확도 비교 결과와는 상이한 결과이다. 기온과 혼합비의 경우는 ERA5 원시 자료의 정확도가 FNL 자료 보다 높았고, WRF 수치 모의 결과에서도 동일한 결과가 나타났으나, 풍속의 경우에는 ERA5 자료의 정확도가 높았음에도 불구하고, WRF 수치 모의 결과 FNL_base 실험의 모의 정확도가 ERA5_base 실험 보다 높게 나타났다. 너징을 적용한 gng 실험의 결과에서도 base 실험과 동일하게 기온과 혼합비는 ERA5_gng 실험이, 풍속은 FNL_gng 실험이 보다 정확한 수치 모의 결과를 나타내었다.

또한, 너징 적용 효과를 비교하기 위해 너징을 적용하지 않은 base 실험과 너징을 적용한 gng 실험의 모의 정확도를 비교해보면, FNL 실험(FNL_base, FNL_gng)

과 ERA5 실험(ERA5_base, ERA5_gng) 모두 gng 실험의 모의 정확도가 base 실험보다 높게 나타났다. 정량적으로 너징 적용 효과를 살펴보기 위해, 식 3.1과 같이 너징 효율(E_{nud})을 산출하여 Table. 6에 나타내었다. 그 결과, 기온, 풍속, 혼합비 너징 효율이 FNL 실험에서 각각 35.674 %, 39.938 %, 22.748 %, ERA5 실험에서 각각 34.105 %, 38.026 % 27.813 %로 나타났다. 두 실험 모두 풍속에서 너징 효율이 가장 크게 나타났고, FNL 실험에서 기온과 풍속의 너징 효율이 ERA5 실험 보다 높게 나타났고, ERA5 실험에서는 혼합비의 너징 효율이 FNL 실험 보다 높게 나타났다.

$$E_{nud} = \frac{RMSE_{base} - RMSE_{gng}}{RMSE_{base}} \times 100 (\%) \quad (3.1)$$

3.2.2. 지점별 WRF 수치 모의 결과

지역별 모의 결과 차이를 상세히 분석하기 위해 각 실험별 지상 기온, 풍속, 혼합비 수치 모의 결과의 지점별

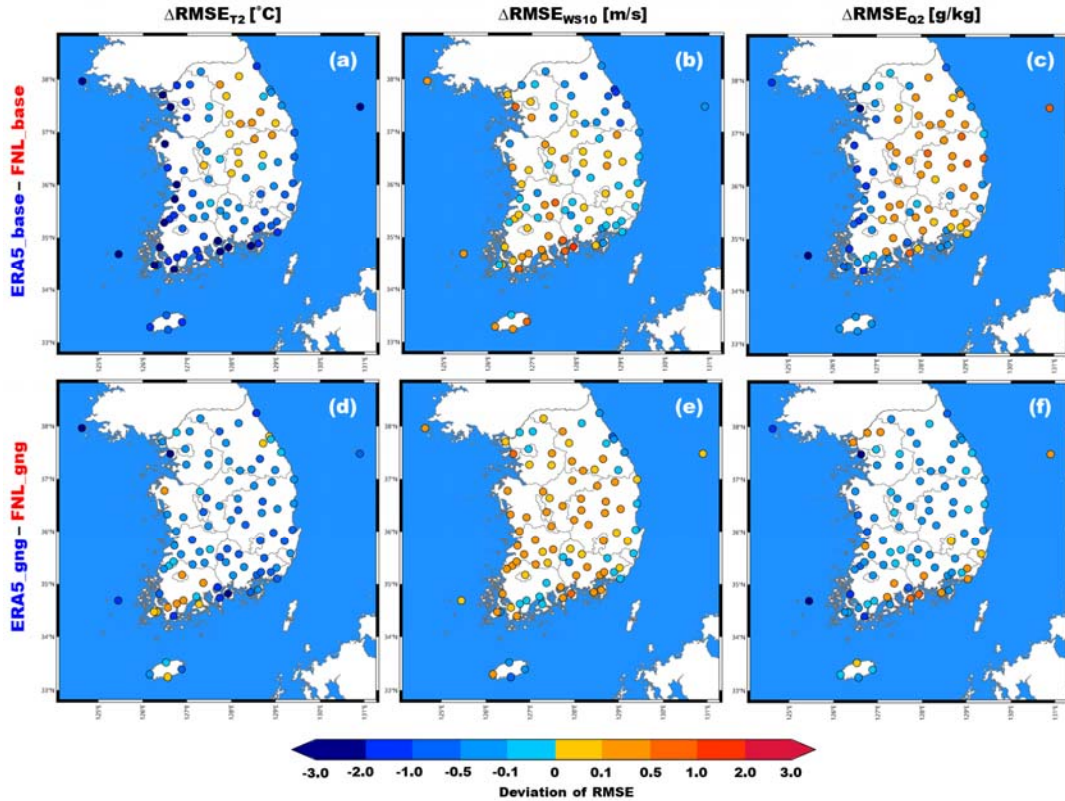


Fig. 4. Comparison of RMSE deviation of temperature(a,d), wind speed(b,e) and mixing ratio(c,f) for the simulations (FNL_base, ERA5_base, FNL_gng, ERA5_gng).

RMSE 차이를 Fig. 4에 나타내었다. 붉은 색에 가까울수록 FNL_base 실험(또는 FNL_gng 실험)의 RMSE 값이 더 작고, 파란 색에 가까울수록 ERA5_base 실험(또는 ERA5_gng 실험)의 RMSE 값이 더 작은 것을 의미한다. 먼저 기온 모의 결과를 살펴보면, base 실험간 비교에서 일부 내륙 지점을 제외하고 대부분의 지점에서 ERA5_base 실험이 FNL_base 실험보다 모의 정확도가 높게 나타났고, 특히 남해 및 서해 연안지역에서 RMSE 차이가 크게 나타났다(Fig. 4a). 너징을 적용한 gng 실험간 비교에서도 여전히 대부분의 지점에서 ERA5_gng 실험의 정확도가 FNL_gng 실험보다 높게 나타났으나, 두 실험간 차이가 base 실험에 비해 비교적 크게 나타나지 않았다(Fig. 4d).

풍속 모의 결과를 살펴보면, base 실험간 비교에서 강원 산간 지역과 일부 지점들을 제외하고 전반적으로

FNL_base 실험의 모의 정확도가 ERA5_base 실험에 비해 높게 나타났다(Fig. 4b). gng 실험간 비교에서도 대부분의 지점에서 FNL_gng 실험의 모의 정확도가 ERA5_gng 실험 보다 높게 나타났는데, 너징 적용 후 두 실험의 정확도 차이가 base 실험간 차이보다 더 크게 나타났다(Fig. 4e).

마지막으로 혼합비 모의 결과를 살펴보면, base 실험간 비교에서는 서해 연안 지역에서는 ERA5_base 실험의 모의 정확도가 FNL_base 실험 보다 높게 나타났고, 그 외 대부분의 내륙 지역에서는 FNL_base 실험의 모의 정확도가 높게 나타났다(Fig. 4c). 한편, gng 실험간 비교에서는 base 실험과 달리 대부분의 지점에서 ERA5_gng 실험의 모의 정확도가 높게 나타났다(Fig. 4f). 종합해보면, 각 기상 요소에 대한 FNL 실험과 ERA5 실험의 너징 효율 차이로 인해, 초기 입력 자료별

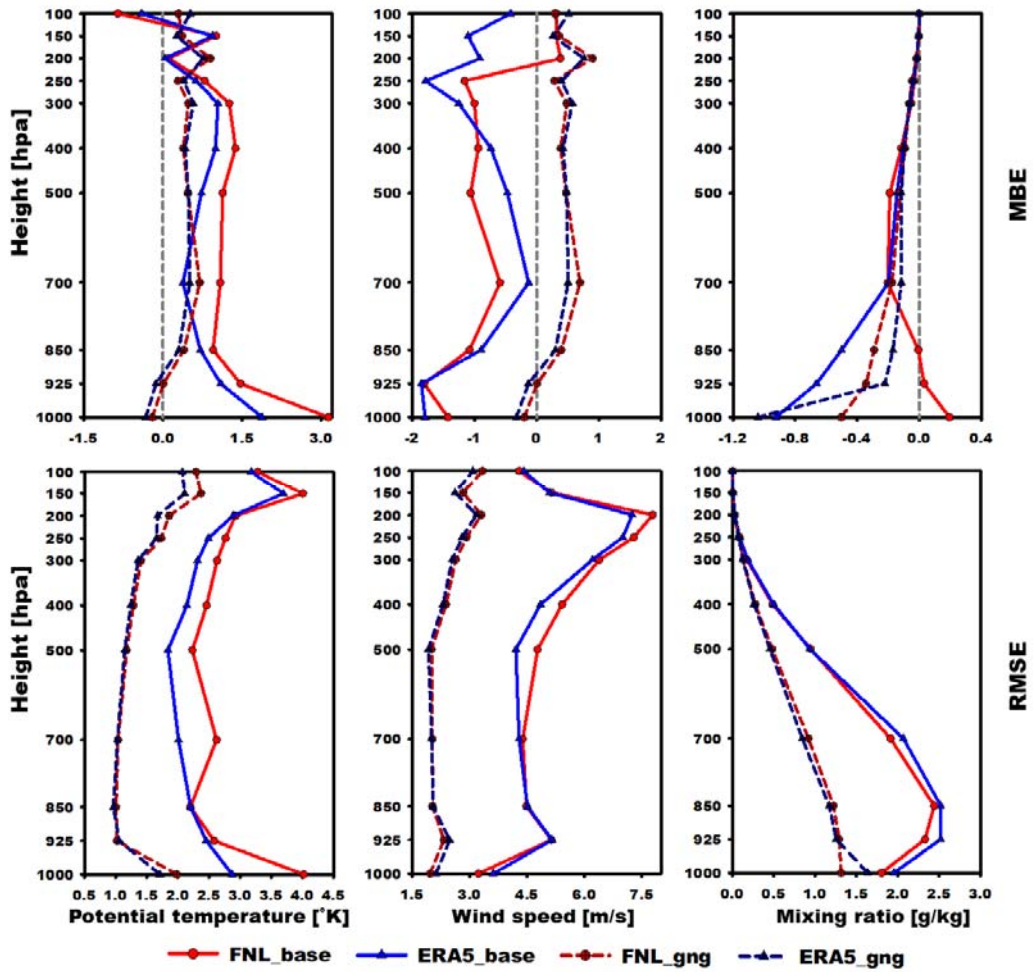


Fig. 5. Vertical profiles of mean difference(MBE, RMSE) between radiosonde(potential temperature, wind speed, mixing ratio) and the simulations(FNL_base, ERA5_base, FNL_gng, ERA5_gng).

너징 적용 효과 차이를 보인 것으로 판단된다.

3.2.3. 고층 기상 모의 결과 비교

각 실험별 고층 기상 모의 정확도를 비교하기 위해 9개 지점의 라디오존데 온위, 풍속, 혼합비 관측 자료와 WRF 수치 모의 값을 각각 비교하여 전 지점 평균 MBE, RMSE의 연직 분포를 Fig. 5에 나타내었다.

먼저 앞서 Fig. 3에 나타낸 원시 자료의 온위, 풍속, 혼합비에 대한 MBE, RMSE의 연직 분포와 Fig. 5를 비교해보면, Fig. 5의 gng 실험과 원시 자료의 MBE, RMSE 연직 분포 경향이 거의 유사하게 나타나는 것을 확인할

수 있다. 이는 원시 자료를 이용하여 자료 동화를 실시하는 그리드 너징의 특징 때문인 것으로 판단된다.

각 실험의 온위, 풍속, 혼합비 RMSE, MBE 연직 분포를 통해 고층 기상 모의 정확도를 비교하고자 하였다. 먼저, 온위의 경우에는 ERA5_base 실험이 전반적으로 FNL_base 실험보다 MBE와 RMSE가 작게 나타났다. 너징 적용 후에는 두 실험 모두 base 실험에 비해 오차가 감소하였으며, 특히 FNL_gng 실험에서 RMSE가 1000 hpa 기준 약 2 °K 정도 크게 감소하여 ERA5_gng 실험과 유사한 모의 정확도를 보였다. 풍속의 경우에는 1000

hpa 고도에서 FNL_base 실험의 모의 정확도가 높았으나, 상층으로 갈수록 ERA5_base 실험의 모의 정확도가 높게 나타났다. 너징 적용 후 두 실험 모두 오차가 감소하였고, 유사한 수준의 모의 정확도를 보였다. 혼합비의 경우에는 FNL_base 실험의 모의 정확도가 ERA5_base 실험 보다 비교적 높게 나타났다. 너징 적용 후에는 1000 hpa 고도에서 FNL_gng 실험의 모의 정확도가 높게 나타났고, 그 외의 고도에서는 ERA5_gng 실험의 모의 정확도가 높게 나타났다.

WRF 모의 결과 차이를 종합해 보면, 지상 기온 및 혼합비의 경우에는 ERA5 실험이 FNL 실험 보다 모의 정확도가 높았고, 지상 풍속의 경우에는 FNL 실험의 모의 정확도가 높게 나타났다. 연직 결과의 경우, 온위 프로파일은 전반적으로 ERA5 실험의 모의 정확도가 더 높았으나, 풍속은 FNL 실험의 모의 정확도가 높게 나타났다. 또한, 혼합비 프로파일의 경우 너징 적용 전에는 FNL 실험의 모의 정확도가 높았으나, 너징 적용 후 ERA5 실험의 모의 정확도가 높게 나타났다. 결과적으로 WRF 수치 모의 시, 기온 및 혼합비 수치 모의가 중요한 사례의 경우는 ERA5 재분석 자료를, 풍속 수치 모의가 중요한 경우는 FNL 분석 자료를 초기 입력 자료로 이용하는 것이 적합하다고 판단된다. 따라서, 연구 사례와 목적에 맞는 초기 입력 자료를 쓰는 것이 WRF 수치 모의에 있어 중요하다고 사료된다.

4. 결론

본 연구는 KORUS-AQ 기간 동안의 대기질 수치 모의를 위한 정확한 기상 입력장을 제시하고자 0.25°의 고해상도 수평 해상도를 가진 FNL 분석 자료와 ERA5 재분석 자료를 초기 입력 자료로 사용한 WRF 수치 모의를 실시하여 두 자료의 특징 및 기상 수치 모의 경향을 비교하였다.

먼저, 원시 자료를 지상 기상 자료와 비교한 결과 ERA5 재분석 자료의 기온, 풍속, 혼합비의 정확도가 FNL 분석 자료보다 높게 나타났다. 라디오존데 관측 자료를 바탕으로 기상 요소의 연직 프로파일을 비교해보니, 온위와 혼합비는 전반적으로 ERA5 재분석 자료의 정확도가 높게 나타났고, 풍속의 경우에는 하층 풍속은 FNL 분석 자료가, 상층 풍속은 ERA5 재분석 자료의 정확도

가 높게 나타났다.

WRF 수치 모의 결과를 살펴보면, 지상 기상 모의에 있어 기온과 혼합비의 경우에는 ERA5 실험의 정확도가 높게 나타난 반면, 풍속은 FNL 실험의 모의 정확도가 높게 나타났다. 또한, 자료 동화 적용 효과를 비교하기 위해 너징을 적용하지 않은 base 실험과 너징을 적용한 gng 실험의 수치 모의 결과를 비교하여 너징 효율을 살펴보니, 기온과 풍속에서 FNL 실험의 너징 효율이 높았게 나타났고, 혼합비의 경우는 ERA5 실험에서 높게 나타났다. 고층 기상의 경우에는 ERA5_base 실험이 FNL_base 실험 보다 온위 연직분포의 모의 정확도가 높게 나타났으나 풍속과 혼합비에 있어서는 FNL_base 실험의 정확도가 높게 나타났다. 한편, 너징을 적용한 gng 실험에서는 원시 자료의 연직분포와 유사한 패턴을 보였는데, 이는 초기 입력 자료를 이용하여 자료 동화를 실시하는 그리드 너징의 특징 때문인 것으로 판단된다.

KORUS-AQ 기간 동안 FNL과 ERA5 자료 사용에 따른 WRF 수치 모의 결과 특징을 종합해 보면, 기온 모의에 있어 MBE가 각각 -1.99°C, -1.32°C, 풍속의 경우 1.05 m/s, 1.19 m/s, 혼합비의 경우 -0.30 g/kg, 0.13 g/kg으로 전반적으로 두 자료 모두 좋은 결과를 보였다. 또한, 수치 모의 결과를 비교해보면, 기온 및 혼합비 모의에 있어서는 ERA5 실험의 모의 정확도가 높았으나, 풍속에 대해서는 FNL 실험의 모의 정확도가 높게 나타났다.

결과적으로 기온이 중요한 오존 모의 사례의 경우 ERA5 자료를, 풍속 수치 모의가 중요한 국지 순환 및 장거리 수송 사례의 경우 FNL 자료를 초기 입력 자료로 사용하는 것이 적합할 것으로 판단된다. 본 연구 결과를 KORUS-AQ 기간의 대기질 수치 모의 연구에 기초 자료로 활용한다면, 각 기상 요소가 대기질에 미치는 영향에 대한 자세한 분석이 이루어질 것이라 생각된다. 한편, 본 연구는 남한 전체에 대한 평균적인 정확도를 비교하였으며, 향후 권역별 비교를 통해 보다 자세한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 과정은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Choi, J. W., Lee, J. G., 2015, A Sensitivity study of WRF model simulations to nudging methods for a Yeongdong heavy snowfall event, *Atmosphere*, 25(1), 99-115.
- Choi, W., Lee, J. G., Kim, Y. J., 2013, The impact of data assimilation on WRF simulation using surface data and radar data: case study, *Atmosphere*, 23(2), 143-160.
- Dudhia, J., 1989, Numerical study of convection observed during winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077-3107.
- Ha, M., Lee, T., Lee, I. H., Jeon, E. C., 2017, Analysis about CO Diffusion Change Caused by Climate Change Using CALPUFF, *J. Climate Change Res.*, 8(2), 81-89.
- Hersbach, H., Dee, D., 2016, ERA5 reanalysis is in production, *ECMWF Newsletter*, 147, 7, available at: <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production>(last access: 14 November 2018).
- Hong, S. Y., Dudhia, J., Chen, S. H., 2004, A Revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation, *Mon. Weather Rev.*, 132, 103-120.
- Hong, S. Y., Noh, Y., Dudhia, J., 2006, A New vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, *Mon. Weather Rev.* 134, 2318-2341.
- Huang, M., Diskin, J. H. G. S., Santanello, J. A., Kumar, S. V., Pusede, S. E., Parrington, M., Charnichael, G. R., 2018, Modeling regional pollution transport events during KORUS-AQ: Progress and challenges in improving representation of land-atmosphere feedbacks, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123, 732-756.
- Jeon, W., Choi, Y., Lee, H. W., Lee, S. H., Yoo, J. W., Park, J., Lee, H. J., 2015, A quantitative analysis of grid nudging effect on each process of PM_{2.5} production in the Korean Peninsula, *Atmos. Environ.*, 122, 763-774.
- Jeon, W. B., Lee, H. W., Lee, S. H., Choi, H. J., Kim, D. H., Park, S. Y., 2011, Numerical study on the impact of meteorological input data on air quality modeling on high ozone episode at coastal region, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 27(1), 30-40.
- Jeong, J. H., Oh, I., Kang, Y. H., Bang, J. H., An, H., Seok, H. B., Kim, Y. K., Hong, J., Kim, J., 2016, WRF modeling approach for improvement of air quality modeling in the Seoul metropolitan region: seasonal sensitivity analysis of the WRF physics options, *J. Environ. Sci.*, 25(1), 67-83.
- Jo, Y. J., Lee, H. J., Chang, L. S., Kim, C. H., 2017, Sensitivity study of the initial meteorological fields on the PM₁₀ concentration predictions using CMAQ modeling, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 33(6), 554-569.
- Kain, J. S., 2004, The Kain-Fritsch convective parameterization: An update, *J. Appl. Meteorol.*, 43, 170-181.
- Kim, J. A., Jin, H. A., Kim, C. H., 2007, Characteristics of time variations of PM₁₀ concentrations in Busan and interpreting its generation mechanism using meteorological variables, *J. Environ. Sci.*, 16(10), 1157-1167.
- Kim, T., Jeong, J. H., Kim, Y. K., 2016, Sensitivity analysis of the WRF model according to the impact of nudging for improvement of ozone prediction, *J. Environ. Sci. Int.*, 25(5), 683-694.
- Lee, H. W., Jung, W. S., Kim, H. G., Lee, S. H., 2004, A Study of atmospheric field around the Pohang for dispersion analysis of air pollutants, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 20(1), 1-15.
- Lee, H. W., Kim, M. J., Kim, D. H., Kim, H. G., Lee, S. H., 2009, Investigation of the Assimilated Surface Wind Characteristics for the Evaluation of Wind Resources, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25(1), 1-14.
- Lennartson, E. M., Wang, J., Gu, J., Castro Garcia, L., Ge, C., Gao, M., Choi, M., Saide, P. E., Carmichael, G. R., Kim, J., Janz, S. J., 2018, Diurnal variation of aerosol optical depth and PM_{2.5} in South Korea: a synthesis from AERONET, satellite (GOCI), KORUS -AQ observation, and the WRF-Chem model, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 15125-15144.
- Miao, Y., Guo, J., Liu, S., Liu, H., Li, Z., Zhang, W., Zhai, P., 2017, Classification of summertime synoptic patterns in Beijing and their associations with boundary layer structure affecting aerosol pollution, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 3097-3110.

- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., Clough, S. A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *JGR*, 102, 16663-16682.
- Mooney, P. A., Mulligan, F. J., Fealy, R., 2011, Comparison of ERA-40, ERA-Interim and NCEP/NCAR reanalysis data with observed surface air temperatures over Ireland, *Int. J. Climatol.*, 31(4), 545-557.
- Mun, J., Lee, H. W., Jeon, W., Lee, S. H., 2017, impact of meteorological initial input data on WRF simulation – comparison of ERA-Interim and FNL data, *J. Environ. Sci.*, 26(12), 1307-1319.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2013, A Study on Improvement and Expansion of Urban Scale PM Forecasting System (IV), 5-13.
- Rasmussen, D. J., Fiore, A. M., Naik, V., Horowitz, L. W., McGinnis, S. J., Schultz, M. G., 2011, Surface ozone-temperature relationships in the eastern US: A monthly climatology for evaluating chemistry-climate models, *Atmos. Environ.*, 47, 142-153.
- Ryu, C. M., Cho, I. H., 2010, Sensitivity analysis of KWRF model using analysis nudging method in relate to forecasting precipitation, *Proceedings of the 2010 Autumn Meeting of Korean Meteorological Society*, 246-247 (in Korean).
- Seibert, P., Beyrich, F., Gryning, S. E., Joffre, S., Rasmussen, A., Tercier, P., 2000, Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. *Atmos. Environ.*, 34, 1001-1027.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X., Wang, W., Powers, J. G., 2008, A Description of the advanced research WRF version 3, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 125.
-
- Doctor's course. Jeong-Hyeok Mun
Devison of Earth Environmental System, Pusan National University
moonworking@pusan.ac.kr
 - Professor. Won-Bae Jeon
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University
wbjeon@pusan.ac.kr
 - Professor. Hwa-Woon Lee
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University
hwlee@pusan.ac.kr