

ORIGINAL ARTICLE

## 초기 입력 자료에 따른 WRF 기상장 모의 결과 차이 - ERA-Interim과 FNL자료의 비교

문정혁 · 이화운<sup>1)\*</sup> · 전원배<sup>2)</sup> · 이순환<sup>3)</sup>

부산대학교 지구환경시스템학부, <sup>1)</sup>부산대학교 대기환경과학과, <sup>2)</sup>부산대학교 환경연구원,

<sup>3)</sup>부산대학교 지구과학교육과

## Impact of Meteorological Initial Input Data on WRF Simulation - Comparison of ERA-Interim and FNL Data

Jeonghyeok Mun, Hwa Woon Lee<sup>1)\*</sup>, Wonbae Jeon<sup>2)</sup>, Soon-Hwan Lee<sup>3)</sup>

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

<sup>1)</sup>*Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

<sup>2)</sup>*Institute of Environment Studies, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

<sup>3)</sup>*Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

### Abstract

In this study, we investigated the impact of different initial data on atmospheric modeling results using the Weather Research and Forecast (WRF) model. Four WRF simulations were conducted with different initialization in March 2015, which showed the highest monthly mean PM<sub>10</sub> concentration in the recent ten years (2006-2015). The results of WRF simulations using NCEP-FNL and ERA-Interim were compared with observed surface temperature and wind speed data, and the difference of grid nudging effect on WRF simulation between the two data were also analyzed. The FNL simulation showed better accuracy in the simulated temperature and wind speed than the Interim simulation, and the difference was clear in the coastal area. The grid nudging effect on the Interim simulation was larger than that of the FNL simulation. Despite of the higher spatial resolution of ERA-Interim data compared to NCEP-FNL data, the Interim simulation showed slightly worse accuracy than those of the FNL simulation. It was due to uncertainties associated with the Sea Surface Temperature (SST) field in the ERA-Interim data. The results from the Interim simulation with different SST data showed significantly improved accuracy than the standard Interim simulation. It means that the SST field in the ERA-Interim data need to be optimized for the better WRF simulation. In conclusion, although the WRF simulation with ERA-Interim data does not show reasonable accuracy compared to those with NCEP-FNL data, it would be able to be Improved by optimizing the SST variable.

**Key words** : ERA-Interim, NCEP-FNL, Grid nudging, Air quality modeling, WRF

Received 5 September 2017; Revised 1 November, 2017;

Accepted 10 November, 2017

\*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.

## 1. 서론

미세먼지(Particulate Matter, PM)는 화석연료의 연소 또는 공장과 자동차 등에서 배출되는 여러 입자상 오염물질의 혼합물로, 대기오염, 시정감소 등을 포함한 여러 환경문제와 인간의 건강에 영향을 미친다(Jeon et al., 2015). 이에 세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 2013년에 미세먼지를 1급 발암물질로 지정하였고(WHO, 2013), 이 후 미세먼지와 인체의 건강에 대한 연구가 이루어짐에 따라, 고농도 미세먼지에 노출될수록 호흡기 질환과 심혈관계 관련질환의 발생위험이 높아지는 것으로 알려졌다(Bae, 2014; Jo et al., 2017).

대기질에 대한 관심이 높아짐에 따라, 수치모델을 이용한 대기질 연구들이 진행되고 있다. 대기질 모델링의 경우 대기오염물질의 수송, 침적, 화학반응에 관계하는 기상 인자들의 영향을 받게 되고, 정확한 기상 입력 자료를 사용할수록 신뢰성이 높아지기 때문에 대기질 모의에 있어 기상 모델링이 중요하다(Jeon et al., 2011; Jeong et al., 2016). 이에 복잡한 연안 지역에서의 지표면 자료 상세화(Lee et al., 2008), 상세 해수면 온도자료 적용(Jeon et al., 2009, 2014), 상세 토지피복도 적용(Jeong and Kim, 2009), 계절별 물리옵션 민감도 연구(Jeong et al., 2016) 등 다양한 기상장 최적화 방안들이 제시되었다. 최근에는 자료동화적용에 따른 기상장 모의 정확도 향상에 관한 다양한 연구 결과들이 보고되고 있다(Choi et al., 2009; Choi and Lee, 2015; Jeon et al., 2015; Kim et al., 2016).

초기 입력 자료는 기상 모델의 수치모의 결과에 매우 큰 영향을 미친다. 초기 입력 자료는 일반적으로 GCM (Global Circulation Model)을 통해 모의된 모델 자료와 다양한 관측 자료가 결합하여 생산된다. 수치 연구에 주로 사용되는 초기 입력 자료로는 NCEP (National Centres for Environmental Prediction)의 NCEP-CFSR (Climate Forecast System Reanalysis), ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts)의 ERA-40, ERA-Interim, 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. 수치모의 관련 국내의 선행 연구를 살펴보면 상당수가 FNL자료를 기상 입력 자료로 사용하고 있고, 정확도 높은 기상장 모의 결과를 보여주고 있다(Choi et al., 2015; Jeon et al., 2016; Jeong et al., 2016; Kim et al., 2016). 반면, 국외의 관련 연구결과들을 살펴보면 4DVAR (Four-dimensional variational data assimilation)를 사용하여 산출한 고해상도 재분석 자료인 ERA-Interim의 정확도가 높다고 보고되었고(Mooney et al., 2011; Zhu et al., 2014; Dong et al., 2017), 각 초기 입력 자료를 이용한 기상 모의 결과를 비교한 연구에서도 ERA-Interim 재분석 자료를 이용한 수치모의 실험에서 가장 정확도 높은 모의 결과를 보였다(Srivastava et al., 2013; Carvalho et al., 2014; Heo et al., 2017). 그럼에도, 한반도지역에 대한 기상장 수치모의 시 ERA-Interim 자료를 초기 입력자료로 이용한 연구는 많지 않으며, 초기 입력 자료별 모델링 결과 및 특성을 상세히 비교하여 제시한 연구는 드문 실정이다. 그러므로 선행 연구에서 정확도가 가장 높게 평가된 ERA-Interim 자료와 국내의 모델링 연구에 가장 많이 사용되고 있는 FNL 자료의 특성 비교 및 정확도 검증에 관한 연구는 정확도 높은 수치 연구를 위해 반드시 필요하다.

따라서 본 연구에서는 고농도 미세먼지 사례를 선정하여, FNL 분석자료와 ERA-Interim 재분석 자료의 원시 자료의 특징 및 정확도를 비교한 후 각 자료를 초기 입력 자료로 사용했을 때의 중규모 기상 모델 WRF (Weather Research and Forecasting)의 모의 결과를 비교 분석하고, 자료 동화 적용에 따른 각 자료별 모의 정확도 향상 결과를 정량적으로 비교하여 고농도 미세먼지 사례기간에 대한 기상장 모의 정확도를 평가하고자 한다. 궁극적으로는 초기 입력 자료별 모의 정확도 평가 및 비교를 통해 미세먼지 수치모의에 필요한 정확도 높은 기상 입력장 생성에 관한 유용한 결과를 제시하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 사례일 선정

본 연구는 대기질 모델의 기상 입력 자료로 사용되는

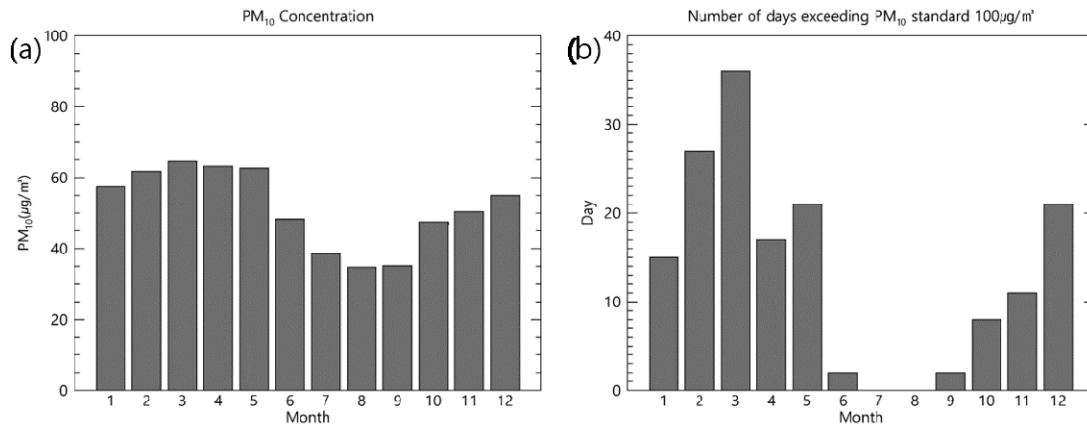


Fig. 1. Annual variation of mean PM<sub>10</sub> concentration for ten years(2006-2015) (a), and number of days exceeding the monthly PM<sub>10</sub> standard level ( $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (b).

기상 모델의 설정 및 초기 입력 자료에 따른 분석을 위해 최근 10년간 월평균 미세먼지 농도가 높았던 달을 수치모의 사례기간으로 선정하였다. Fig. 1은 각각 2006년부터 2015년까지 대기질자동측정망(Air Quality Monitoring Stations, AQMS)의 PM<sub>10</sub> 농도를 10년 평균하여 월별로 나타낸 그래프 Fig. 1(a)와 PM<sub>10</sub>의 일 평균 농도가 대기환경기준치인  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과한 일 수를 월별로 나타낸 그래프 Fig. 1(b)이다. 미세먼지 10년 평균 농도는 3월에  $64.620\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았고, 10년간 미세먼지 기준치 초과 일 수도 3월에 36일로 가장 빈번했다. 따라서 본 연구에서는 미세먼지의 영향이 가장 큰 달인 3월 중 가장 최근인 2015년 3월을 사례일로 선정하였다.

## 2.2. 실험 설계 및 모델 설정

본 연구에서는 대기질 모델의 기상 입력 자료를 생성하기 위하여 WRF 3.8.1 버전을 사용하였다. Table. 1은 본 연구에서 사용된 WRF 모델 설정에 대한 개요를 나타낸 것이다. 도메인은 동아시아 영역(D01), 한반도 영역(D02), 남한 영역(D03)으로 총 3개로 설정하였다(Fig. 2). 수평해상도는 각각 27 km, 9 km, 3 km이고, 물리옵션은 구름미세물리 모수화 과정으로 WSM (WRF Single Momentum) 3-class simple ice scheme을 적용하였고, 복사과정에서 장파복사기법과 단파복사기법은 각각 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model)과 Dudhia scheme을 사용하였다. 지

표면 모델은 Unified Noah LSM (Land Surface Model), 행성경계층과정은 YSU PBL (YonSei University Planetary Boundary Layer) scheme을 사용하였으며, 적운 모수화과정은 Kain-Fritsch scheme을 동아시아 영역(D01)과 한반도 영역(D02)에만 적용하였다.

초기 입력 자료는 NCEP에서 제공하는 FNL자료와 ECMWF에서 제공하는 ERA-Interim자료를 각각 사용하였다. NCEP-FNL자료는 6시간의 시간해상도와  $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 의 수평공간해상도를 가진 전지구 분석 자료로, GDAS (Global Data Assimilation System)의 3DVAR (Three-D VAR)를 사용하고 GFS에 관측자료를 추가하여 생산되었다. 한편, ERA-Interim자료는 시간해상도는 FNL과 동일한 6시간이며, 전지구 규모 모델인 IFS (Integrated Forecast System)에서 4DVAR를 사용하여 생산되었으며, 여러 수평공간해상도 자료를 가지고 있다. 그 중 본 연구에서는 가장 해상도가 높은  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 의 지표면 자료(Surface)와 연직 층을 38개로 나눈 연직 자료(Pressure levels)를 이용하였다.

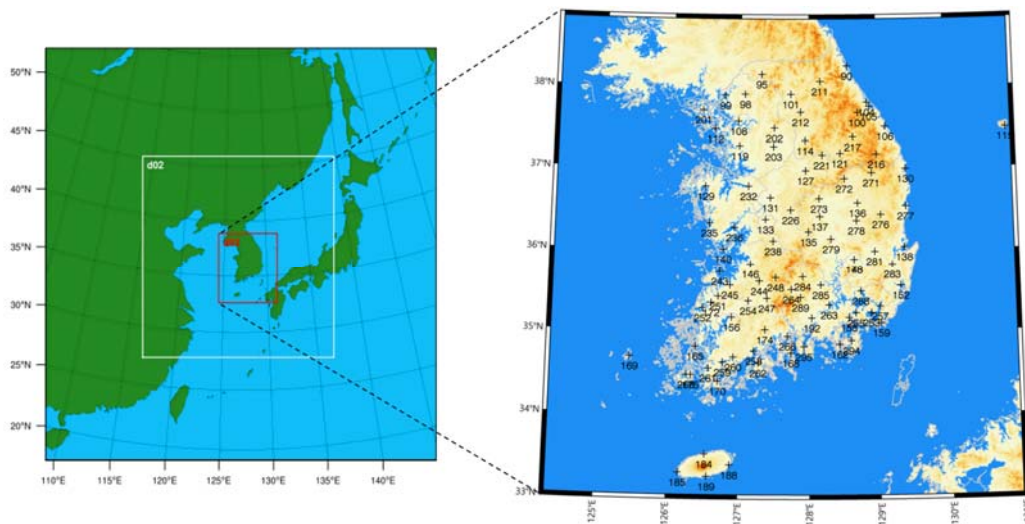
본 연구에서는 위의 2가지 초기 입력 자료를 이용하여 수치모의를 실시하였다. 또한, 초기 입력장을 이용하여 수치 모의 결과를 개선하는 자료동화 방법인 그리드 너징(Grid nudging)을 사용하여, 너징을 적용하지 않은 경우와의 비교분석을 통해 각 기상자료별

**Table 1.** Detailed options for WRF simulation(WRF ver3.8.1)

| Domain                        | D01                           | D02  | D03                         |
|-------------------------------|-------------------------------|--|-----------------------------|
| Number of grids               | 150 × 150                     | 220 × 220                                  | 202 × 209                   |
| Horizontal Resolution         | 27 km                         | 9 km                                       | 3 km                        |
| Vertical layers               |                               | 30 Layers                                  |                             |
| Time step                     | 135 sec                       | 45 sec                                     | 15 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 |  | No cumulus parameterization |
| Initial data                  |                               | NCEP FNL/ERA-Interim (Pressure levels)     |                             |
| Nudging coefficient (u,v,t,q) |                               | 0.003 sec <sup>-1</sup>                    |                             |
| Time period                   |                               | 2015.03.01.00LST - 2015.03.31.23LST        |                             |

자료동화 적용 민감도를 살펴보고자 하였다. 이 때, 너징에 관한 세부 설정값은 Jeon et al.(2015)에서 제시된 값들과 동일하게 적용하였다. 총 수치 모의 기간은 초기 스핀 업 기간을 고려하여 2015년 2월 20일 09LST부터 2015년 4월 1일 09LST까지이고, 그 중 3월의 모의 결과를 비교하였다.

기상 모델의 수치 모의 성능을 정량적으로 평가하기 위해 통계지표인 RMSE (Root Mean Square Error), IOA (Index Of Agreement), MBE (Mean Bias Error)를 사용하였고, 각 지표는 다음과 같이 정의된다(식 1-3). 이 때 N은 관측지점 개수,  $M_i$ 은 모델값,  $O_i$ 는 관측값,  $\bar{O}$ 는 관측값의 평균을 의미한다.

**Fig. 2.** The nested model domains (left) and the location of the Automatic Synoptic Observing System (ASOS) operating by Korea Meteorology Administration (KMA) in the finest domain (right).

**Table 2.** Experimental design for four different WRF simulations

| Nudging | Initial data | NCEP-FNL | ERA-Interim |
|---------|--------------|----------|-------------|
|         | off          | FNL      | Interim     |
|         | on           | FNL_Nud  | Interim_Nud |

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

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

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

관측 자료는 전국의 93개 종관기상관측지점(ASOS)의 기온 및 풍속 자료를 이용하였고, 모델 자료는 관측지점과 가장 가까운 격자의 지상으로부터 2 m 높이의 기온 및 10 m 높이의 풍속 자료를 이용하였다.

초기 입력 자료 및 자료동화 적용 효과에 따른 수치 모의 결과를 비교하기 위하여 4가지 실험을 설계하였고, 모의 결과의 순수한 비교 및 분석을 위해 상세 토지 피복도, 해수면 온도 자료, 지표면 자료 상세화 등의 알려진 최적화 방안은 적용하지 않았다. 4가지 실험에 대한 설명은 다음과 같다(Table. 2). 먼저, 초기 입력 자료에 대한 모의 결과를 비교하기 위해 FNL자료를 사용한 실험(FNL)과 ERA-Interim자료를 사용한 실험(Interim)을 설계하였다. 이 후 자료별 자료동화 적용 민감도를 살펴보기 위해, FNL자료를 사용하고 그리드 너징을 적용한 실험(FNL\_Nud)과 ERA-Interim자료를 사용하고 그리드 너징을 적용한 실험(Interim\_Nud)을 추가 구성하였다.

### 3. 결과 및 고찰

초기 입력 자료에 따른 기상장 수치모의 결과를 검증 및 비교하기 위해 93개 ASOS 지점의 기온 및 풍속 자료와 각 실험의 모델값을 이용하였다. 우선 원시 자

료의 기온 및 풍속 자료를 바탕으로 원시 자료가 가지고 있는 특징과 정확도를 비교하였다. 다음으로 초기 입력 자료별 기본 모의 결과를 비교 분석하기 위해 FNL과 Interim 결과를 관측값을 이용하여 각각 검증하고, 상호비교를 통해 자료별 기상장 모의 특성을 분석하였다. 아울러 각 자료별 자료동화 적용 효과를 살펴보기 위해 FNL\_Nud와 Interim\_Nud의 결과를 추가하여 분석하였다.

각 자료의 평균적인 모의 정확도를 살펴보기 위해 ASOS 93개 지점에 대한 각 실험의 통계분석결과를 비교하였다(Table. 3, Table. 4). 통계지표로는 앞서 언급된 RMSE, MBE, IOA가 사용되었으며, RMSE와 MBE는 0에, IOA는 1에 근접할수록 모의정확도가 높음을 의미하고, 비교 실험 중 모의 정확도가 우수한 통계값을 진하게 표시하였다. 또한, 각 실험의 시간에 따른 모의 정확도를 비교하기 위해 사례 기간 동안의 전 지점에 대한 평균적인 시계열 분포를 나타내었고(Fig. 3, Fig. 5), 지역별 상세 분석을 위해 지점별로 통계값을 구하여 비교 실험에 대한 통계값의 편차를 구하였다. 이 때, IOA편차를 제외한 RMSE와 MBE의 편차가 정량적인 의미를 가지는데, MBE는 방향성을 가지기 때문에 제외하였다. 따라서 각 실험에 대한 RMSE 편차를 지점별로 나타내었고, RMSE 편차가 2 [°C 또는 ms<sup>-1</sup>] 이상인 지점에는 별표로 표시하였다(Fig. 4, Fig. 6, Fig. 7).

#### 3.1. 원시 자료의 기온 및 풍속 비교

초기 입력 자료별 WRF모의 결과를 비교하기 위해 앞서 원시 자료의 특성 및 정확도를 비교하고자 한다. NCEP-FNL과 ERA-Interim은 각각 3DVAR, 4DVAR 자료동화 기법을 이용하여 생성되었다. 각 자료동화 기법을 살펴보면, 3DVAR는 관측지점의 공간적 분포를 이용하여 자료동화를 실시하는 반면, 4DVAR는 3DVAR에 시간을 고려하여 자료의 질을 향상시킨다고

**Table 3.** Statistics of temperature and wind speed for the raw initial data in March 2015. The values are averaged for 93 ASOS stations

| Variables        |             | Temperature  |              |               | Wind speed   |              |              |
|------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| Statistics       |             | RMSE         | IOA          | MBE           | RMSE         | IOA          | MBE          |
| Raw initial data | NCEP-FNL    | 4.127        | 0.891        | -0.319        | 3.337        | <b>0.706</b> | 1.855        |
|                  | ERA-Interim | <b>2.305</b> | <b>0.968</b> | <b>-0.205</b> | <b>3.312</b> | 0.650        | <b>1.746</b> |

보고된 바 있다(Hodges et al., 2011). 이에 4DVAR를 이용하여 생성된 ERA-Interim 재분석 자료가 기상 요소의 시간 변동성을 잘 모의할 것으로 사료되며, 그 결과는 기존의 몇몇 국외 연구에서 이미 보고된 바 있다(Carvalho et al., 2014; Hodges et al., 2011).

Table. 3은 두 원시 자료를 93개 ASOS 관측 지점 자료와 직접 비교하여 산출한 통계 분석 결과이다. 이때, 원시 자료는 격자간격이 크기 때문에 거리에 대한 가중평균을 이용하여 각 관측지점별 격자값을 산출하였고, 구체적인 산출 방법은 Mooney et al.(2011)에서 제시한 Co-location techniques method 2를 사용하였다. Table. 3에 나타난 바와 같이 기온 및 풍속 모의에 있어 원시 자료간 비교에서 전체적으로 4DVAR를 이용한 ERA-Interim이 NCEP-FNL에 비해 더 높은 정확도를 보였다.

### 3.2. 초기 입력 자료별 기본 모의 결과 비교

#### 3.2.1. 기온 모의 결과 비교

초기 입력 자료별 기본 모의 결과를 비교하기 위해

FNL과 Interim에 대한 모의 정확도를 비교분석 하였다. 우선 Table. 4에 나타난 평균적 통계분석결과를 살펴보면, FNL과 Interim이 전반적으로 관측값에 비해 기온을 낮게 모의하였다. 또한, 두 실험간 비교에서는 FNL이 Interim보다 평균적으로 정확도 높은 모의 결과를 보였다.

다음으로 시간에 따른 모의 정확도를 비교하기 위해 Fig. 3(a)에 나타난 FNL과 Interim의 기온 시계열 그래프를 살펴보았다. 두 실험 모두 기온의 일변화 경향은 관측과 유사하게 모의하고 있으나, 전반적으로 낮은 기온경향을 보였다. 또한, FNL이 Interim에 비해 비교적 관측값을 정확히 모의하고 있으며, 특히 16일의 경우 Interim이 일 변동성을 정확히 모의하지 못하여 FNL과의 차이가 크게 나타났다. 하지만, Fig. 3은 전 지점 평균에 대한 시계열 그래프이기 때문에 상세한 분석에는 어려움이 있다.

따라서, Fig. 4에서는 지역별 상세 분석을 위해 지점별 RMSE편차를 이용하였고, FNL의 RMSE가 더 작을수록 붉은 색으로, Interim의 RMSE가 더 작을수록

**Table 4.** Statistics of temperature and wind speed for each case at 93 ASOS stations. The values are averaged for the whole time period of simulation (March 2015)

| Variables             |  | Temperature  |              |               | Wind speed   |              |              |
|-----------------------|--|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| Statistics            |  | RMSE         | IOA          | MBE           | RMSE         | IOA          | MBE          |
| FNL                   |  | <b>4.047</b> | <b>0.887</b> | <b>-2.533</b> | <b>3.400</b> | <b>0.625</b> | <b>2.177</b> |
| Interim               |  | 4.275        | 0.883        | -2.721        | 3.696        | 0.600        | 2.456        |
| FNL - Interim         |  | -0.228       | 0.004        | 0.188         | -0.296       | 0.025        | -0.279       |
| FNL_Nud               |  | <b>2.741</b> | <b>0.946</b> | <b>-1.109</b> | 2.645        | 0.718        | <b>1.612</b> |
| Interim_Nud           |  | 2.817        | 0.945        | -1.290        | <b>2.606</b> | <b>0.721</b> | 1.663        |
| FNL_Nud - Interim_Nud |  | -0.076       | 0.001        | 0.181         | 0.039        | -0.003       | -0.051       |



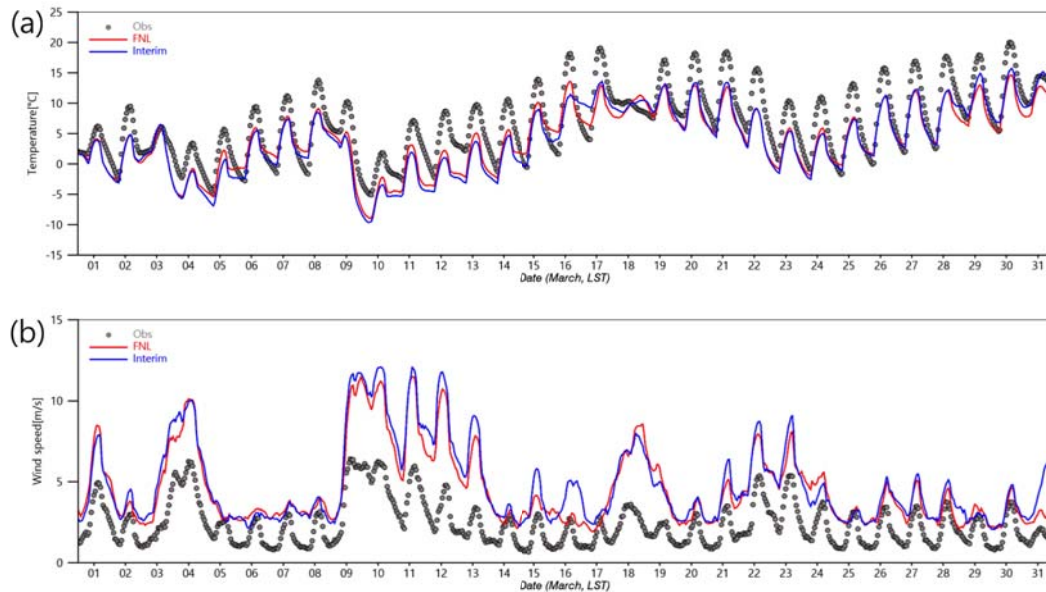


Fig. 3. Time series of the observed (Obs: grey dots) and simulated (FNL: red line; Interim: blue line) temperature (a) and wind speed (b) in March 2015. The values are averaged values for 93 ASOS stations.

파란 색으로 표시해 보았다. Fig. 4(a)는 FNL과 Interim의 지점별 기온 RMSE편차를 나타낸 것으로, 앞선 결과와 마찬가지로 대부분의 지점에서 FNL의 모의 정확도가 높았다. 지역별로는 남서해안 지역에서 두 실험 간의 모의 정확도 차이가 크게 나타났다. 또한, 경기도의 대다수 지점과 일부 동해 연안 지점에서는 Interim의 모의 정확도가 높게 나타났다.

### 3.2.2. 풍속 모의 결과 비교

풍속 모의의 평균적 통계분석결과에서 두 실험 모두 풍속을 관측값보다 높게 모의 하였으며, FNL이 Interim 보다 정확도 높은 모의 결과를 보였다(Table. 4). Fig. 3(b)에 나타난 시계열 분석에서도 기상 모델이 전체적으로 풍속을 높게 모의하는 경향을 보였고, FNL이 Interim보다 관측값을 잘 모의하였다. 또한, 시간에 따라 두 실험의 모의 정확도가 다르게 나타나는 데, 31일에 Interim은 관측값에 비해 최대  $4 \text{ ms}^{-1}$  높게 모의 하였지만, FNL은 관측값과의 오차가  $2 \text{ ms}^{-1}$  미만으로 비교적 정확하게 모의하였다. Fig. 4(b)의 지점별 RMSE편차에 대한 분석에서는 남해안 일부 지점을 제외한 대부분 지점에서 FNL이 정확도 높은 모의

성능을 보였다. 따라서, 기온과 풍속 모두 FNL의 모의 정확도가 Interim에 비해 높게 나타났으며, 이에 대한 자세한 분석은 3.4절에 나타내었다.

### 3.3. 초기 입력 자료별 자료동화 적용효과 비교

3.3.1. 자료동화 적용에 따른 기온 모의 결과 변화  
자료동화 적용 효과를 분석하기 위해 FNL과 FNL\_Nud, Interim과 Interim\_Nud를 각각 비교하였다. 또한 FNL\_Nud와 Interim\_Nud를 비교하여 자료동화 적용 시 두 실험의 결과의 차이를 살펴보았다. 먼저 Table. 4의 각 실험별 기온 통계 분석 결과를 살펴보면, FNL과 Interim 모두 자료동화 적용 시 모의 정확도가 개선됨을 확인할 수 있다. 특히 Interim에서 각 통계값의 증감폭이 크게 나타났고, 이는 Interim의 자료동화 적용에 따른 기온 모의 결과 개선 정도가 FNL보다 큼을 보여준다.

시간에 따른 자료동화 적용 효과를 비교하기 위해 시계열 그래프를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)에서 자료동화 적용 시 기온을 과소 모의하던 경향이 개선됨을 확인할 수 있다. 또한 일별로는 두 실험 모두 13일 오후에 모의 정확도가 가장 크게 개선되었고, 두

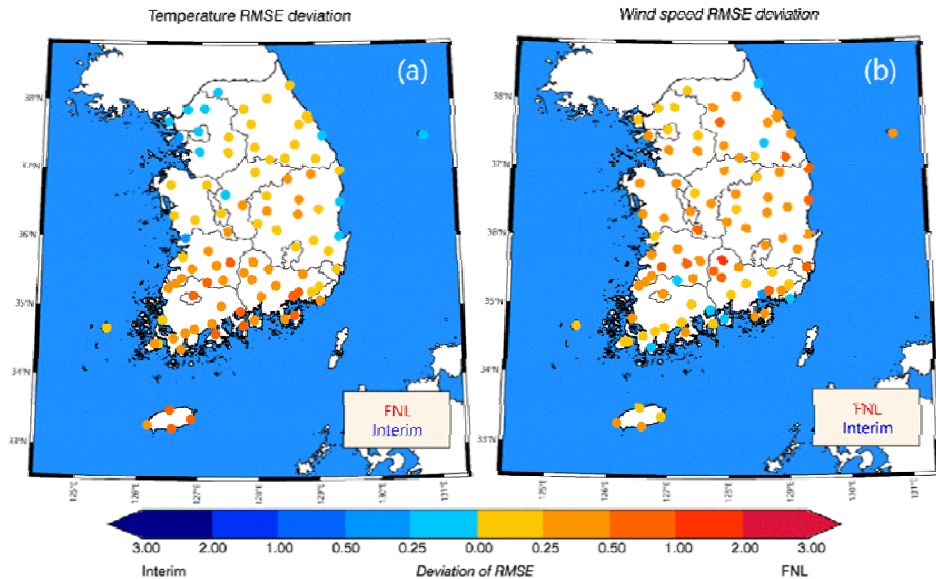


Fig. 4. Comparison of RMSE deviation of temperature (a) and wind speed (b) for the FNL and Interim simulations.

실험간 모의 정확도의 차이가 가장 크게 나타났던 16일에 Interim\_Nud가 일변화 경향을 비교적 정확하게 모의하여 두 실험간 모의 정확도 차이가 줄어들었다. FNL에 비해 모의 정확도가 떨어졌던 Interim에서 자료동화 적용 효과가 크게 나타나, 자료동화를 적용한 두 실험(FNL\_Nud, Interim\_Nud)에서는 모의 정확도 차이가 크게 나타나지 않고 거의 유사한 일변화 경향을 보였다.

지역별 자료동화 적용 효과를 상세하게 분석하기 위해, 지점마다 각 실험별 RMSE 편차를 구하여 Fig. 6에 나타내었다. 앞선 결과와 마찬가지로 자료동화 적용 시 Interim에서 모의 정확도가 크게 개선되는 지점들이 많이 나타났다. FNL\_Nud와 Interim\_Nud에서 RMSE가 2 °C 이상 크게 개선된 지역을 살펴보면, 강원도 및 경기도 산악지역에서 자료동화 적용 효과가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 추가적으로 Fig. 6(c)에 나타난 자료동화를 적용한 두 실험간 비교에서는 연안 지역에서 Interim\_Nud의 모의 정확도가 FNL\_Nud보다 높게 나타났다. 이는 그리드 너징에 사용된 연안 지역에 대한 ERA-Interim 원시 자료의 정확도가 NCEP-FNL 자료에 비해 높았기 때문인 것으로 판단된다. 특히, 연안 지역의 국지 순환계에 큰 영

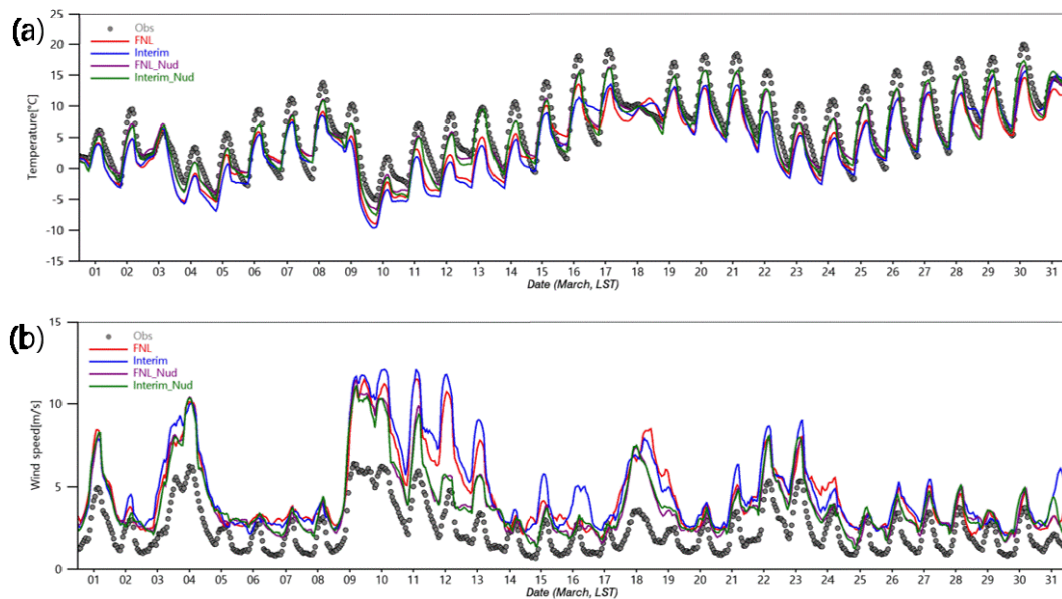
향을 미치는 변수들의 모의 정확도가 크게 개선되어 연안 지역을 중심으로 Interim\_Nud의 모의 정확도가 FNL\_Nud보다 높게 나타난 것으로 사료된다.

### 3.3.2. 자료동화 적용에 따른 풍속 모의 결과 변화

풍속의 자료동화 적용 효과를 분석하기 위해 FNL과 Interim 두 실험에 대해 각각 자료동화를 적용한 실험과 비교하였다. 먼저 Table. 4에서 두 실험 모두 자료동화 적용 시 모의 정확도가 개선됨을 확인할 수 있다. 또한, 자료동화를 적용한 실험을 비교하면 Interim\_Nud가 FNL\_Nud보다 정확도 높은 풍속 모의 결과를 보여주고 있다. 앞서 3.2.2절의 결과에서는 FNL이 Interim보다 풍속 모의 정확도가 높았으나, Interim\_Nud의 모의 정확도가 FNL\_Nud보다 높기 때문에 풍속의 자료동화 적용 효과는 Interim이 FNL보다 크다고 할 수 있다.

Fig. 5(b)에 나타난 시계열 분석 결과 풍속을 과대 모의하는 경향은 자료동화 적용 후 감소했음을 확인할 수 있다. 일별로는 자료동화 적용 시 모두 12일에 모의 정확도가 가장 크게 증가하였지만, 4, 9, 10, 18 일에서는 여전히 약  $4 \text{ ms}^{-1}$  이상의 높은 오차를 보였다. 이는 기상 모델이 높은 풍속을 모의하는데 있어 지나치게 과대모의하는 경향이 있기 때문인 것으로





**Fig. 5.** Time series of temperature (a) and wind speed (b) for the observed (Obs: grey dots) and simulated (FNL: red line; Interim: blue line; FNL\_Nud: purple line; Interim\_Nud: green line) in March 2015. The values are averaged values for 93 ASOS stations.

생각된다. 한편, FNL과 Interim의 모의 정확도의 차이가 가장 컸던 31일에 Interim\_Nud의 모의 정확도가 개선되면서 두 실험간 차이가 줄어들었다.

지역별로는 두 실험 모두 산악지역보다 연안 지역에서 자료동화 적용 효과가 크게 나타났고, 특히 동해안을 중심으로 모의 정확도가 크게 개선되었다. 또한, Fig. 6(f)에 나타난 FNL\_Nud와 Interim\_Nud간 비교에서 Interim\_Nud는 남해 연안 지역에서, FNL\_Nud는 서해 연안 지역에서 각각 모의 정확도가 높게 나타났다.

자료동화 적용에 따른 기온 및 풍속의 모의 결과를 종합해 보면 기본 모의 결과에 비해 Interim\_Nud의 정확도 개선 효과가 FNL\_Nud에 비해 높게 나타났다. 이는 ERA-Interim 원시 자료의 정확도가 NCEP-FNL에 비해 높기 때문에 (Table 3) 원시 자료가 자료동화에 활용되는 그리드 너지의 적용 효과 또한 Interim\_Nud에서 높게 나타난 것으로 분석된다.

### 3.4. 해수면 온도 자료 추가 실험 결과

초기 입력 자료별 기본 WRF 모의 결과를 종합해보면, 기온과 풍속 모의에 있어 평균적으로 FNL의 모의

정확도가 높았다. 이는 3.1절의 원시 자료간 비교 결과에서 ERA-Interim 자료의 정확도가 높았던 것과 상반되며, 서론에 언급된 선행연구들의 결과와도 다소 차이가 있었다. 특히, 연안 지역을 중심으로 FNL과 Interim의 모의 정확도 차이가 크게 나타났는데 이는 각 자료별 해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST)로 사용되는 변수의 차이 때문인 것으로 판단된다.

이에 대한 추가적인 분석을 위해 NCEP-FNL과 ERA-Interim 원시 자료의 SST 변수를 자세히 살펴보았다. 우선 NCEP-FNL의 경우 원시 자료 내에 SST 변수가 직접 포함되지 않아 ‘SKIN\_TEMP’ 변수를 이용하여 격자별 SST 분포를 나타낸 반면, ERA-Interim의 경우 원시 자료 내에 포함된 ‘SST’ 변수를 직접 사용하여 격자별 SST 분포를 나타내었다. ERA-Interim 원시 자료에 포함된 자료는 영국 Met office에서 개발된 OSTIA(Operational sea surface temperature and sea-ice analysis) SST 자료로써(Dee et al., 2011), 한반도 인근의 해수면 관측 자료와 매우 유사한 시공간 분포를 보인다고 알려져 있다(Xie et al., 2008; Lee et al., 2010).

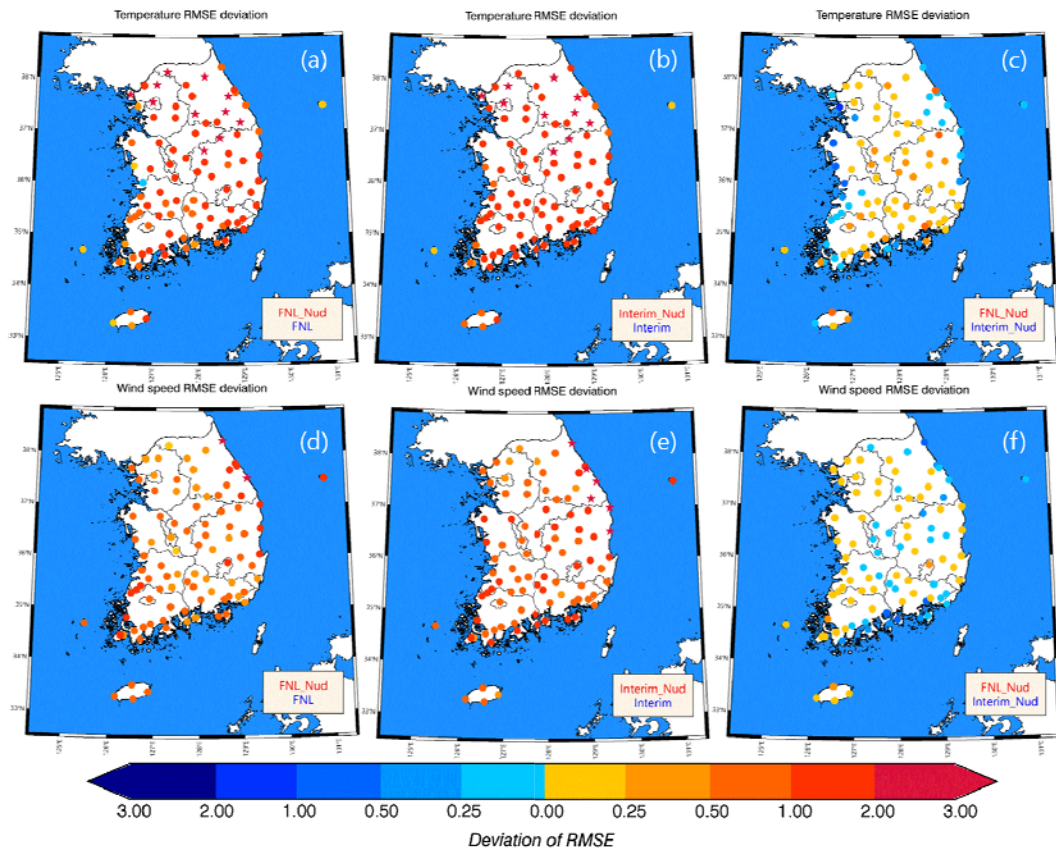


Fig. 6. Comparison of RMSE deviation of temperature (top) and wind speed (bottom) for FNL and FNL\_Nud (a,d), Interim and Interim\_Nud (b,e), Interim\_Nud and FNL\_Nud (c,f).

여기서 주목해야 할 점은 ERA-Interim 자료를 이용한 WRF 기본 모의 시 (Interim) SST 분포가 정확하게 표현되지 못했다는 점이다. 결과적으로 기온 및 풍속과 같은 관련 변수들의 모의 정확도가 FNL에 비해 상대적으로 낮게 나타났다. 이에 ERA-Interim 자료를 이용한 WRF 수치모의 시 SST 변수로 인해 발생하는 오차를 정량적으로 추정해 보기 위해 추가적인 민감도 실험을 실시하였다. FNL과 Interim 수치 모의 시 동일한 SST 자료를 사용한 실험을 추가적으로 실시하여 ERA-Interim에 포함된 SST 변수가 처리될 때 발생하는 오차를 간접적으로 추정해보고자 하였다. 추가 민감도 실험에 사용된 SST 자료는 미국의 NCEP에서 제공하는  $0.083^\circ \times 0.083^\circ$  해상도의 실시간 전지구 해수면온도 (Real Time Global Sea Surface

Temperature, RTG SST) 자료이다.

RTG\_SST를 이용한 기온 수치 모의 결과, FNL의 경우(FNL\_RTG) 기본 모의 결과(FNL)에 비해 동해 연안 및 내륙 지점들을 중심으로 다소 개선된 결과를 보여주었으나 남해 및 서해안지역의 경우 오히려 기본 모의에 비해 더 좋지 않은 결과가 나타났다 Fig. 7(a). 선행연구에 따르면 우리나라 남해안은 쓰시마 난류가 통과하고 서해안의 경우 수심이 매우 얇아 SST의 변동성이 매우 크기 때문에 정확한 SST 모의가 쉽지 않다(Choi et al., 2012; Lee et al., 2011). Fig. 7(a)에서 남해 및 서해안을 중심으로 FNL\_RTG의 모의 정확도가 FNL보다 오히려 낮게 나타났던 이유는 RTG\_SST가 남서해안의 복잡한 SST 분포를 제대로 표현하지 못했음을 의미한다. 그 결과 남서해안 주변의

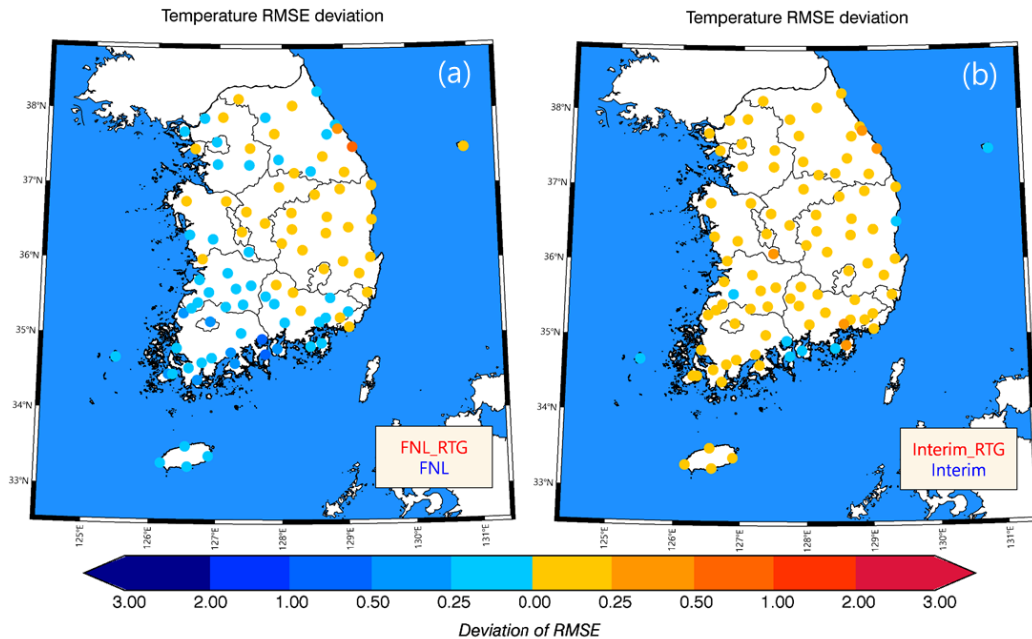


Fig. 7. Comparison of RMSE deviation of temperature for FNL and FNL\_RTG (a), Interim and Interim\_RTG (b).

지점들에서 SKIN\_TEMP 변수를 이용하여 SST 변수를 생성하는 FNL의 모의 정확도가 오히려 RTG\_SST보다 높았다. 동해안의 경우 수심이 깊고 수온의 변동성이 크지 않으므로 RTG\_SST를 적용하였을 때 모의 결과가 뚜렷하게 개선되었다.

반면, Interim의 경우(Interim\_RTG) 거의 모든 지점에서 RTG 자료를 추가한 실험이 기본 모의(Interim)에 비해 높은 기온 모의 정확도를 나타내었다. Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 Interim\_RTG의 모의 정확도는 거의 모든 지점에서 Interim보다 높게 나타났는데 이는 RTG\_SST가 적용되었을 때의 효과가 FNL에 비해 Interim이 훨씬 더 컸음을 의미한다. FNL의 경우 원시 자료 내의 SKIN\_TEMP 변수를 이용하여 비교적 정확하게 SST가 표현되었지만, Interim에서는 SST 분포가 정확하게 표현되지 않아 RTG\_SST를 적용했을 때의 효과가 FNL에 비해 상대적으로 더 크게 나타났다. Interim에서 SST가 정확히 표현되지 못한 이유는 WRF 3.8.1 버전에서 제공되고 있는 'Vtable'이 ERA-Interim 원시 자료의 SST 관련 변수를 완벽히 활용하지 못했을 가능성을 추정해 볼 수 있

으나 ERA-Interim 원시 자료에 포함된 OSTIA SST 자료가 가지는 불확실성에 대한 검증이 이루어지지 않았기 때문에 정확한 판단은 쉽지 않다.

이상의 민감도 실험 결과를 종합해 볼 때, ERA-Interim 원시 자료의 높은 정확도에도 불구하고 WRF를 이용한 기본 모의(Interim) 정확도가 낮게 나타난 이유는 부정확한 SST 모의 결과에 의한 것임을 확인 할 수 있다. 따라서 ERA-Interim 자료를 이용한 정확한 WRF 수치모의를 위해서는 ERA-Interim 원시 자료에 포함된 OSTIA SST 자료의 정확도 검증, WRF 3.8.1 버전의 'Vtable'이 가지고 있는 문제점에 대한 추가적인 분석이 반드시 필요하다고 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구는 미세먼지 수치모의에 필요한 정확도 높은 기상 입력장 생성에 관한 유용한 결과를 제시하기 위해 기상 수치 모의의 초기 입력 자료 및 자료동화의 유무에 대한 기상장 모의 성능을 비교하였다.

먼저, 기본 실험(FNL, Interim)을 비교한 결과, 원

시 자료간 비교에서 정확도가 높았던 ERA-Interim이 WRF 기본 모의 시 모의 정확도가 FNL에 비해 떨어졌고, 연안 지역에서 차이가 크게 나타났다. 이를 해석하고자 RTG\_SST 자료를 추가한 실험(FNL\_RTG, Interim\_RTG)을 실시하였고, 결과적으로 FNL은 RTG\_SST 자료를 추가한 실험(FNL\_RTG)과 기본 실험(FNL)에 있어 지역별 차이를 보였으나, Interim의 경우 RTG\_SST 자료를 추가한 실험(Interim\_RTG)에서 대부분 지점의 모의 정확도가 향상되었다. 따라서, 기본 모의 결과 비교에 있어 연안 지역의 모의 정확도가 높게 나타난 것은 Interim의 SST가 정확히 표현되지 못했기 때문인 것으로 사료된다. 이는 ERA-Interim에 대한 WRF 3.8.1 버전의 'Vtable'이 최적화 문제로 추정할 수 있으나, ERA-Interim 원시 자료에 포함된 OSTIA SST 자료에 대한 검증이 이루어지지 않았기 때문에 이에 대한 후속 연구가 필요하다고 생각된다. 따라서 ERA-Interim의 OSTIA SST 자료의 정확도 검증 및 WRF 3.8.1 버전의 'Vtable'에 대한 추가 분석을 통해 ERA-Interim 자료를 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

추가적으로, 자료동화를 적용한 FNL\_Nud와 Interim\_Nud 실험을 통해 각 실험의 자료동화 적용효과를 비교한 결과 Interim의 자료동화 적용효과가 크게 나타났다. 이는 ERA-Interim이 NCEP-FNL보다 높은 정확도를 보이고, 그리드 너징은 초기 입력 자료를 활용하는 자료동화 기법이기 때문에 Interim의 개선효과가 더 크게 나타난 것으로 사료된다. 또한, 연안 지역에서 Interim\_Nud의 기온 모의 정확도가 FNL\_Nud에 비해 높게 나타난 것은 자료동화 적용 시 Interim\_Nud에서 국지 순환계에 영향을 미치는 변수들의 모의 정확도가 개선되기 때문인 것으로 생각되며, 연안 지역의 기온 수치 모의 시 ERA-Interim을 초기 입력 자료로 하고 자료동화를 적용한 Interim\_Nud이 유용한 결과를 제시할 것으로 사료된다.

본 연구는 한 달의 사례일에 대한 모의 결과를 비교하였고, 지표면의 기온과 풍속만 비교하였기 때문에 장기간의 모의 성능 비교 및 연직 프로파일 분석 등 초기 입력 자료에 대한 자세한 후속 연구가 진행될 필요가 있다.

## 감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

## REFERENCES

- Bae, H. J., 2014, Effects of short-term exposure to PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> on mortality in Seoul, J. Environ. Health Sci., 40, 346-354.
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M., Silva Santos, C., 2014, WRF wind simulation and wind energy production estimates forced by different reanalyses: comparison with observed data for Portugal, Appl. Energy, 117, 116-126.
- Choi, H. J., Lee, H. W., Sung, K., Kim, M. J., 2009, The effect of atmospheric flow field according to the radius influence and nudging coefficient of the objective analysis on complex area, J. Environ. Sci., 18(3), 271-281.
- Choi, H. J., Lee, H. W., Jeon, W. B., Lee, S. H., 2012, The numerical modeling the sensitivity of coastal wind and ozone concentration to different SST forcing, Atmos. Environ., 46, 554-567.
- 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.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J. J., Park, B. K., Peubey, C., de Rosnay, C., Tavolato, C., Thépaut, J. N., Vitart, F., 2011, The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quart. J. R. Meteorol. Soc., 137, 553-597.
- Dong, Y., Li, G., Yuan, M., Xie, X., 2017, Evaluation of five grid datasets against radiosonde data over the eastern and downstream regions of the Tibetan plateau in summer, Atmosphere, 8(3), 56.
- Heo, K. Y., Ha, T., Choi, J. Y., Park, K. S., Kwon, J. I., Jun,

- K., 2017, Evaluation of wind and wave simulations using different global reanalyses, *J. Coast. Res.*, 79(sp1), 99-103.
- Hodges, K. I., Lee, R. W., Bengtsson, L., 2011, A Comparison of extratropical cyclones in recent reanalyses ERA-Interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25, *J. Climate*, 24(18), 4888-4906.
- Jeon, W. B., Choi, Y. S., Lee, H. W., Lee, S. H., Yoo, J. W., Park, J. H., Lee, H. J., 2015, A Quantitative analysis of grid nudging effect on each process of PM<sub>2.5</sub> production in the Korean Peninsula, *Atmos. Environ.*, 122, 763-774.
- Jeon, W. B., Choi, Y., Percell, P., Sour, A. H., Song, C. K., Kim, S. T., Kim, J., 2016, Computationally efficient air quality forecasting tool: implementation of STOPS v1.5 model into CMAQ v5.0.2 for a prediction of Asian dust, *Geosci. Model Dev.*, 9, 3671-3684.
- Jeon, W. B., Lee, H. W., Lee, S. H., Choi, H., Leem, H. H., 2009, Numerical study on the impact of SST spacial distribution on regional circulation, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25(4), 304-315.
- 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.
- Jeon, W. B., Lee, S. H., Lee, H., Park, C., Kim, D. H., Park, S. Y., 2014, A Study on high ozone formation mechanism associated with change of NOx/VOCs ratio at a rural area in the Korean Peninsula, *Atmos. Environ.*, 89, 10-21.
- 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.
- 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, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25(5), 432-449.
- Jo, E. J., Lee, W. S., Jo, H. Y., Kim, C. H., Eom, J. S., Mok, J. H., Kim, M. H., Lee, K., Kim, K. U., Lee, M. K., Park, H. K., 2017, Effects of particulate matter on respiratory disease and the impact of meteorological factors in Busan, Korea, *Resp. Med.*, 124, 79-87.
- 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, S. H., Lee, H. W., Kim, Y. K., Jeon, W. B., Choi, H. J., Kim, D. H., 2011, Impact of continuously varied SST on land-sea breezes and ozone concentration over south-western coast of Korea, *Atmos. Environ.*, 45, 6439-6450.
- Lee, H. M., Lee, H. W., Lee, S. H., 2010, Numerical simulation and comparison of particle dispersion and air quality with domain setting of Gwangyang bay area, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26(6), 591-605.
- Lee, H. W., Jeon, W., Lee, S. H., Choi, H., 2008, Analysis of numerical meteorological fields due to the detailed surface data in complex coastal area, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 24(6), 649-661.
- Lee, H. W., Cha, Y. M., Lee, S. H., Kim, D. H., 2010, Impact of high-resolution sea surface temperatures on the simulated wind resources in the southeastern coast of the Korean Peninsula, *J. Environ. Sci. Int.*, 19, 171-184.
- 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.
- Srivastava, P. K., Han, D., Rico Ramirez, M. A., Islam, T., 2013, Comparative assessment of evapotranspiration derived from NCEP and ECMWF global datasets through weather research and forecasting model, *Atmos. Sci. Lett.*, 14(2), 118-125.
- WHO Regional Office for Europe, 2013, Review of evidence on health aspects of air pollution - REVIHAAP project: final technical report.
- Xie, J., Zhu, J., Li, Y., 2008, Assessment and inter-comparison of five high-resolution sea surface temperature products in the shelf and coastal seas around China, *Cont. Shelf Res.*, 28, 1286-1293.
- Zhu, J. H., Ma, S. P., Zou, H., Zhou, L. B., Li, P., 2014, Evaluation of reanalysis products with in situ GPS sounding observations in the eastern Himalayas, *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 7(1), 17-22.