

논문

# 2019년 수도권 연무사례시 기상모델의 분석 넛징 자료동화가 PM<sub>2.5</sub> 농도 모의에 미치는 효과

## Effect of Analysis Nudging Data Assimilation on the PM<sub>2.5</sub> Concentration Simulation during a Haze Event in the Seoul Metropolitan Area in 2019

조성빈, 송상근<sup>1)\*</sup>, 문수환

제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공, <sup>1)</sup>제주대학교 지구해양과학과

Seong-Bin Cho, Sang-Keun Song<sup>1)\*</sup>, Soo-Hwan Moon

Faculty of Earth and Marine Convergence/Earth and Marine Science Major,  
Jeju National University, Republic of Korea

<sup>1)</sup>Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Republic of Korea

접수일 2021년 1월 20일  
수정일 2021년 3월 16일  
채택일 2021년 3월 23일

Received 20 January 2021  
Revised 16 March 2021  
Accepted 23 March 2021

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)64-754-3431  
E-mail : songsk@jejunu.ac.kr

**Abstract** In this study, we investigated the effect of assimilated meteorological fields on the numerical simulation of PM<sub>2.5</sub> concentrations during the severe haze event observed over the Seoul metropolitan area (SMA) from February 27 to March 6, 2019. The analysis was performed by two sets of simulation experiments: (1) CMAQ simulation with base WRF run (Base) and (2) CMAQ simulation with grid-nudged WRF run (Nudging) that includes four dimensional data assimilation (FDDA) analysis nudging technique. Overall, the meteorological variables (air temperature, wind speed, and relative humidity) of Nudging case showed a higher improvement than those of Base case, especially wind speed. In addition, the PM<sub>2.5</sub> concentrations in the Base case were mostly underestimated in the study area compared to the Nudging case. The meteorological improvements contributed greatly to the increase in PM<sub>2.5</sub> concentrations in the Nudging case, and thus, showed good agreement with its observed concentrations, especially to the nighttime PM<sub>2.5</sub> increase due to the enhancement of atmospheric stability by reduced wind speed. In terms of spatial distributions, high PM<sub>2.5</sub> concentrations in the Nudging case (especially March 3~4) were mostly simulated in the western coastal area, northwestern or southwestern areas of the SMA. Significant differences ( $\geq 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in the mean PM<sub>2.5</sub> concentrations between the Nudging and Base cases were found mainly in the northwestern and east-southeast areas of the SMA. The enhanced PM<sub>2.5</sub> concentrations might be primarily due to the meteorological conditions (e.g., reduced wind speed or wind convergence) and/or the pollutant transport from strong emission sources (e.g., Chinese or local emissions) along northerly/northwesterly winds caused by analysis nudging effect.

**Key words:** Analysis nudging, Wind speed, PM<sub>2.5</sub>, Haze event, WRF-CMAQ

### 1. 서 론

연무는 주로 상대습도 75% 미만의 조건에서 대기 중에 연기, 먼지 등의 미세한 고체 입자가 수증기와 함께 응집되면서 시정을 1~10 km 정도로 크게 감소시키고, 대기가 우윳빛으로 흐려 보이는 현상을 말한

다(KMA, 2016). 우리나라에서 연무는 자체 배출원의 인위적 오염물질과 중국으로부터의 장거리 수송 등의 영향으로 주로 발생하며, 이는 지역 대기질을 악화시켜 광범위의 악시정을 유발하고 인체 호흡기에 해로운 영향을 미친다(Zhang *et al.*, 2012; Pope and Dockery, 2006). 이러한 연무현상의 환경적 원인 및 영향을

분석하기 위해 국내외적으로 기상-대기질 모델링을 활용한 많은 연구가 수행되어왔다 (Yu *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2012; Koo *et al.*, 2008). 과거 10년간(2001~2010년) 중국 허베이 남부의 연무 현상(시정 10 km 이하와 안개, 박무 등 제외)을 대상으로 인근 지역(베이징, 톈진, 산둥성 등)의 배출량 조절의 민감도 실험을 수행한 결과, 이 지역은 자체 배출에 의한 기여보다 다른 지역에서의 오염물질 수송 영향이 더 크게 기여한 것으로 나타났다(Wang *et al.*, 2012). 또한 2013년 1월 중국에서 발생한 극심한 연무 사례의 수치모델링 연구에서 에어로졸의 피드백(feedback) 효과에 의한 기상변화가 고농도 PM<sub>2.5</sub>(입자크기 2.5 μm 미만의 먼지)를 유발시켰음을 보였다(Wang *et al.*, 2014). 여기서 에어로졸의 효과는 지표로 유입되는 태양복사를 감소시켜 지표기온을 감소시키고, 대기경계층의 상부에서는 다량의 흡습성 에어로졸(예, 수용성 에어로졸)이 상부의 온도를 높게 되어 결국 대기경계층 내 기온 역전과 안정층을 강화시켰다. 보다 안정해진 대기경계층은 오염물질의 수직 혼합 및 확산을 억제시켜 고농도의 PM<sub>2.5</sub>를 유발하게 된다. 국내의 경우, Yu *et al.* (2019)은 2014년 2월 우리나라 광주에서 관측된 연무사례시 PM<sub>2.5</sub> 성분농도의 관측자료와 모델링을 통해, 이 지역의 겨울철 연무(고농도 PM<sub>2.5</sub>와 함께)는 중국 북동쪽으로부터의 장거리 수송과 국지적 대기 정체에 의한 2차 생성이 주요 원인을 밝힌 바 있다. 이외에도, 연무의 물리적/화학적 특성과 고농도 PM<sub>2.5</sub> 원인 규명에 관한 많은 연구가 수행되어 왔다(Amil *et al.*, 2016; Niu *et al.*, 2016; Koo *et al.*, 2008; Sun *et al.*, 2006).

일반적으로, 기상-대기질 모델링을 통해 연무현상의 원인과 영향을 정확하게 분석하는 것은 배출량 및 기상장 모의의 불확실성, 다양한 관측망의 부족, 화학적 상호작용, 수치모델 자체의 예측 한계 등 여러 가지 오차를 포함하고 있어 매우 복잡하고 어렵다(Pun *et al.*, 2006). 이러한 문제 중 기상장은 대기질 모의에서 오염물질의 수송, 침적, 광화학 반응에 큰 영향을 미치므로 실제 대기와 가깝게 현실적인 기상장을 생

성하는 것은 매우 중요하다(Jeong *et al.*, 2016; Jeon *et al.*, 2011). 이에 많은 연구자들은 실제 대기와 유사한 기상장을 모의하기 위해 다양한 연구들을 수행하여 왔다(Mun *et al.*, 2020; Jo *et al.*, 2017). Mun *et al.* (2020)은 KORUS-AQ (The Korea-United States Air Quality Study) 기간 동안 기상모델의 초기 및 경계 조건으로 고해상도(수평공간해상도 0.25°×0.25°) NCEP (National Centers for Environmental Prediction) GDAS/FNL (Global Data Assimilation System/Final analyses)과 ECMWF ERA5 (European Center for Medium-range Weather Forecasts Reanalysis 5) 재분석 자료를 이용한 수치모의 결과, 기온 및 혼합비는 ERA5 자료를 이용했을 때, 풍속은 FNL 자료를 이용했을 때 정확도가 향상된 것을 확인하였다. Jo *et al.* (2017)은 FNL 재분석 자료와 GFS (Global Forecast System) 예보자료를 이용하여 수치모의 실험을 비교한 결과, 기온은 두 초기 기상장에 따른 모의 결과가 크지 않았으나 풍속은 GFS를 이용했을 때 서해안과 수도권 지역을 중심으로 과대 모의되었음을 밝혔다.

과거 오랫동안 대기질 모의 정확도 향상을 위해 기상모델의 초기 및 경계조건을 개선시키는 방법 중 자료동화기법을 활용한 많은 연구들이 수행되어 왔다(Kim *et al.*, 2016a; Jeon *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2009; Otte, 2008). Otte (2008)은 기상모델의 분석 넷징(analysis nudging)을 적용한 수치모의 결과가 분석 넷징을 적용하지 않은 결과에 비해 기상요소(기온, 풍속 등)는 물론 시간별 및 일 최고 오존농도의 모의 정확도가 향상되었음을 보였다. Lee *et al.* (2009)은 기상 관측 및 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 위성자료를 이용한 분석 넷징과 관측 넷징(observation nudging)을 적용하여 기상장을 개선하였고, 이를 통해 오존농도 모의가 향상되었음을 밝혔다. Kim *et al.* (2016a)의 연구에 따르면, 2012년 봄철(4~5월) 오존 수치모의에 있어 넷징의 종류(관측 및 분석 넷징)와 등지격자 영역(domain)에 따른 자료동화 효과를 분석한 결과, 관측 넷징에 비해 모든 영역

에 대하여 분석 넛징을 적용하였을 때 가장 향상된 결과를 보였다. 이외에도, 기상모델의 분석 넛징 자료동화를 적용한 기상장 개선(변화)은 PM<sub>2.5</sub> 수치모의에 있어 관측 농도와 가깝게 향상된 모의결과를 가져왔다(Jeon *et al.*, 2015).

앞서 언급하였듯이, 기상모델의 개선 및 자료동화 효과에 관한 다양한 연구들이 수행되어 왔지만, 고농도 오염 사례시 고해상도 기상 자료동화를 적용한 미세먼지 수치모의 연구는 여전히 부족한 실정이다. 또한 우리나라는 지정학적으로 중국의 풍하층에 위치하고 있어 중국의 거대 오염원으로부터의 장거리 수송 영향을 많이 받고 있으므로(중국발 스모그 등), 향후 지속적으로 미세먼지 예측 향상에 관한 많은 연구들이 필요하다. 본 연구는 고농도 미세먼지 사례연구로서, 최근 수도권에 나타난 극심한 연무사례일(2019년 2월 27일~3월 6일)을 대상으로 기상모델에 분석 넛징 자료동화를 적용하여 주변지역의 기상 변화를 분석하였으며, 이를 자료동화를 적용하지 않은 모의결과와 비교하였다. 또한 기상 자료동화(분석 넛징)를 적용한 국지기상 변화가 PM<sub>2.5</sub> 수치모의에 미치는 영향 및 개선 효과를 분석하였다.

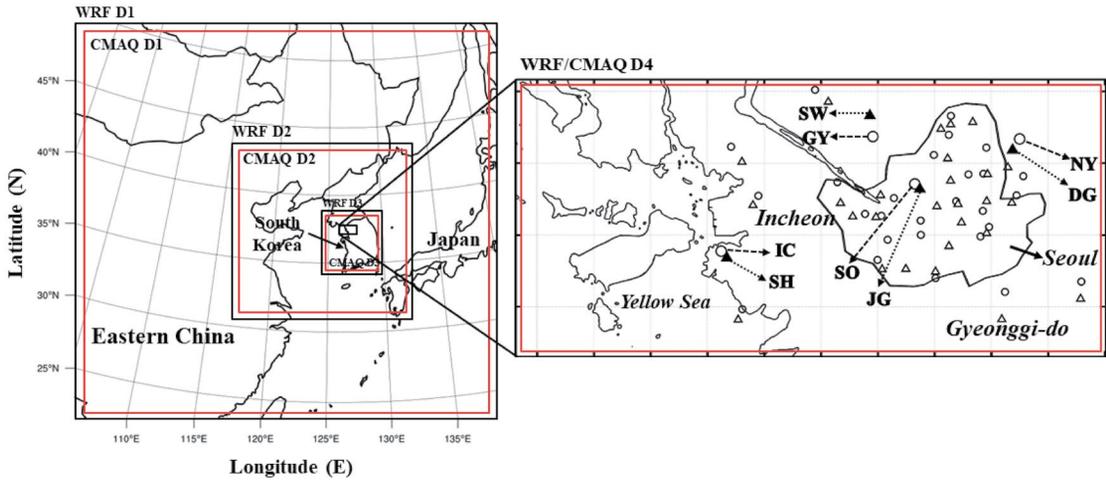
## 2. 재료 및 방법

### 2.1 대상지역, 자료 및 방법

본 연구에서는 수도권 지역의 연무사례일(2019년 2월 27일~3월 6일)을 대상으로 기상 자료동화에 따른 PM<sub>2.5</sub> 모의 개선효과를 상세하게 분석하기 위해, 수도권 내 4개의 대기질 관측지점과 4개의 기상 관측지점을 선정하였다(그림 1). 각 관측지점의 일반적인 특성은 다음과 같다. 먼저 대기질 관측지점은 서울 중구(JG, 37.56°N, 126.97°E), 인천 신흥동(SH, 37.47°N, 126.63°E), 고양 신원동(SW, 37.67°N, 126.89°E), 구리 동구동(DG, 37.62°N, 127.13°E)에 위치한다. JG 지점은 서울 도심지로서 고층 빌딩과 교통량이 많은 지역이며, SH 지점은 도로변 가까이 위치하여 주로 교통량

이 많고 상업지역에 포함된다. SW 지점은 주거 밀집 지역에 속하고, DG 지점은 주변에 산이 위치한 교외 지역이다. 본 연구의 목적을 위해 4개 지점 모두 환경부 도시대기측정망에서 수집된 시간별 PM<sub>2.5</sub> 질량농도를 이용하였다. 또한 기상 관측지점은 서울과 인천에 각각 1개, 경기도에 2개 지점을 포함하여, 각각 대기질 관측지점과 가깝고(3km 이내) 지형의 영향을 적게 받는 곳으로 선정하였다. 서울(SO, 37.57°N, 126.96°E, 해발 86 m)과 인천 지점(IC, 37.48°N, 126.62°E, 해발 69 m)의 시간별 기상요소(기온, 풍속, 상대습도)는 기상청 종관기상관측시스템 ASOS (Automated Synoptic Observing System)으로부터 수집되었으며, 고양(GY, 37.63°N, 126.89°E, 해발 44.7 m)과 남양주 지점(NY, 37.63°N, 127.15°E, 해발 26 m)의 기상요소는 방재기상관측소 AWS (Automatic Weather System)으로부터 수집되었다. 전체 사례 기간 중 PM<sub>2.5</sub> 관측 농도는 인천 SH 및 고양 SW 지점에만 각각 약 1% 결측, 기상관측에서는 고양(GY) 지점에만 기온, 풍속, 상대습도 자료의 약 3% 이내 결측으로 미미하였다.

수치모의를 위한 연구사례일은 2019년 수도권에 나타난 극심한 연무일(2월 27일~3월 6일)로서, 이는 최근의 연무사례 중 약 7일간 지속된 장기사례이며 대상 지역 내 일평균 PM<sub>2.5</sub> 농도가 최저 약 39 µg/m<sup>3</sup>에서 최고 122 µg/m<sup>3</sup>까지 관측되었다. 본 연구에서 연무일을 선정하기 위해 기상청에서 제시하고 있는 연무의 정의 및 기준과 환경부 도시대기측정망의 PM<sub>2.5</sub> 농도 자료를 이용하였다. 즉, 기상청 ASOS 일기현상의 “40”에 해당하고(상대습도 75% 미만과 시정 1~10 km, KMA, 2016), 대기환경기준치(일평균 PM<sub>2.5</sub> 농도: 35 µg/m<sup>3</sup>)를 초과하는 날을 연무일로 선정하였으며, 아울러 대상지역의 시정에 영향을 미칠 수 있는 일기현상(예, 강수, 황사, 안개, 박무 등)은 제외하였다. 본 연구에서는 선정된 연무사례일에 대해 기상모델의 자료동화를 적용하여 이로 인한 기상 변화가 PM<sub>2.5</sub> 농도 모의에 미치는 영향을 분석하였다. 즉, 기상 자료동화를 적용한 실험(Nudging)과 적용하지 않은 실험(Base)의 PM<sub>2.5</sub> 농도 차이를 비교함으로써 기상 자료동화가 주



**Fig. 1.** The nested model domains for WRF and CMAQ simulations and the geographical locations of 31 air quality (triangles) and 31 meteorological monitoring sites (circles). "JG", "SH", "SW", and "DG" in the figure represent four air quality monitoring sites, Jung-gu in Seoul, Sinheung-dong in Incheon, Sinwon-dong in Gyeonggi-do, and Donggu-dong in Gyeonggi-do. "SO", "IC", "GY", and "NY" in the figure represent four meteorological monitoring sites, Seoul (ASOS), Incheon (ASOS), Goyang (AWS), Namyangju (AWS) and these sites are located less than 3 km away from the air quality monitoring sites.

변 대기질에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구에 이용된 기상 및 대기질 모델에 대한 자세한 구성은 2.2 절에 제시하였다. 이외에도, 기상 및 대기질 모델의 모의결과 검증을 위해, 연구 기간 동안 대상지역(수도권) 내 4개의 대기질 관측지점(JG, SH, SW, DG)을 포함한 총 31개 지점의  $PM_{2.5}$  농도와 그리고 4개의 기상 관측지점(SO, IC, GY, NY)을 포함한 총 31개 지점의 기상요소(기온, 바람 등)에 대해 통계적 분석을 수행하였다(그림 1의 관측지점). 기상요소 및  $PM_{2.5}$  농도의 각 관측값과 모델값에 대해 IOA (index of agreement), RMSE (root mean square error), MBE (mean bias error)를 분석하였다. 0과 1 사이의 값을 가지는 IOA는 1에 가까울수록 모델값과 관측값 사이에 일치도가 높음을 의미하며, RMSE와 MBE는 0에 가까울수록 오차가 작아 서로 유사함을 의미한다. 또한 양(+)의 MBE는 과대모의를, 음(-)의 MBE는 과소모의를 나타낸다.

## 2.2 모델 구성 및 입력 자료

본 연구의 연무사례시 기상 및 미세먼지( $PM_{2.5}$ ) 수

치모의를 위해 이용한 기상과 대기질 모델은 각각 WRF (Weather Research and Forecasting, version 3.6)와 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality, version 5.0.2) 모델이다. WRF 모델은 미국 NCAR (National Center of Atmospheric Research)와 NCEP에서 공동 개발한 완전 압축성 비정수계 (fully compressible non-hydrostatic) 방정식을 이용한다(<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>). 이 모델은 수평격자로 Arakawa-C 격자체계를 사용하고 연직격자로 Eulerian 질량 좌표계를 사용한다(Skamarock and Klemp, 2008). CMAQ 모델은 미국 EPA (Environmental Protection Agency)에서 개발된 종합적인 Eulerian 광화학 모델이며(<https://www.cmascenter.org/cmaq/>), 대기오염물질의 수송, 침적 등 여러 물리적 과정과 대기 중 광화학을 포함한 상세 화학반응 모듈을 통해 3차원 공간에서 시간별 대기오염물질의 농도를 산정한다(Byun and Ching, 1999). WRF 모델을 이용해 생산된 기상장은 MCIP (Meteorological Chemistry Interface Processor, version 4.2)을 통해 CMAQ 모델의 입력 자료로 전환된다. 본 연구에서 CMAQ 모델링을 위해 이용한 화학

메커니즘은 SAPRC99 (Statewide Air Pollution Research Center version 99, Carter, 2003)이며, 에어로졸 산정 모듈로 AERO6를 이용하였다.

WRF 모델의 수치모의 영역은 그림 1과 같이 총 4개의 영역 즉, 동아시아 영역(D1, 수평해상도 27 km), 한반도 영역(D2, 9 km), 남한 영역(D3, 3 km), 수도권 영역(D4, 1 km)으로 분류하였다. 여기서 모델의 외부 및 내부 영역 사이를 feedback 해주는 양방향 상호 동적 격자계(two-way interacting nested grid system)를 적용하여 구성하였다. 모델의 초기 및 경계조건은 6시간 간격의 NCEP GDAS/FNL 0.25° 재분석 자료를 사용하였으며, 본 연구에 이용된 격자의 크기, 연직 층수, 물리적 옵션들은 표 1에 제시하였다. 즉, 연직 층은 총 30개 층으로 설정하였으며 물리옵션 중 미세물리 과정은 D1에 WRF Single-Moment 3-class scheme (Hong *et al.*, 2004), 나머지 D2~D4에 WRF Double-Moment 6-class scheme (Lim and Hong, 2010)을 사용하였다. 단파와 장파 복사에 대해 각각 Dudhia scheme (Dudhia, 1989)과 RRTM scheme (Mlawer *et al.*, 1997)을 이용하였고, 행성경계층 YSU PBL scheme (Hong *et al.*, 2006)과 지표 모수화 5-layer thermal diffusion scheme (Dudhia, 1996)을 이용하였다. 이외에도, WRF 모의는 USGS (US Geological Survey)에서 제공하는 24개 유형의 land-use 자료(30초)와 지형자료(30초)를 이용하여 수행되었다(USGS, 2008). 또한 이러한 자료를 적용한 기상모의 결과를 MODIS\_IGBP

(International Geosphere-Biosphere Programme)의 21개 유형 land-use (30초) 자료 (Friedl *et al.*, 2010)를 적용한 결과와 비교하였다. 모델링 기간은 본 연구의 연무사례일을 포함하고 7일간의 초기적응시간(spin-up time)을 고려하여 2019년 2월 19일 00 UTC부터 3월 9일 00 UTC로 정하였다.

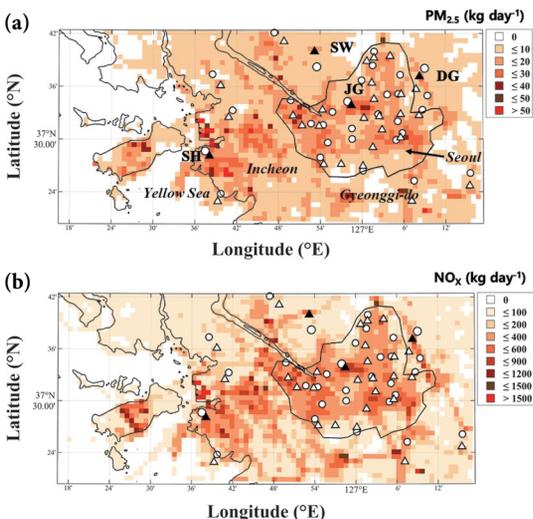
기상 및 대기질 수치모의의 정확도 향상을 위해서 우선 기상모델의 초기 조건과 경계 조건의 정확도 향상이 필요하며 (Desroziers and Ivanov, 2001), 이를 위한 자료동화 방법은 대기의 흐름을 실제와 가깝게 얻기 위해 이용 가능한 모든 정보를 활용한다 (Talagrand, 1997). 자료동화 기법 중 4차원 자료동화(FDDA: four dimensional data assimilation)는 오차를 줄이는 데 효율적인 방법으로서, 관측치를 직접 내삽하는 관측 넷징과 종관장을 따르는 관측치를 이용해 경계 조건을 변화시키고 격자 형태로 내삽하는 분석 넷징이 있다 (Shafran *et al.*, 2000). 본 연구에서는 모델링 기간 동안 재분석장(NCEP GDAS/FNL)을 이용하여 6시간 간격으로 분석 넷징 자료동화 기법을 적용하였다(Kim *et al.*, 2018; Yoo *et al.*, 2017). 이는 기존 배경장의 격자점과 관측 사이의 차이를 구하여 새로운 초기장의 격자점으로 내삽하면서 서로 간의 오차를 줄이는 방법이다 (Jeon *et al.*, 2015; Bowden *et al.*, 2012; Otte, 2008; Shafran *et al.*, 2000). 본 연구의 도메인은 4개의 영역이지만 동아시아 영역인 D1에만 분석 넷징을 적용하였고, D2~D4에는 외부와 내부 영역간의 피드백

**Table 1.** Details of the grids and physical options used in the WRF model.

	D1	D2	D3	D4
Horizontal grid	126 × 118	148 × 160	151 × 166	91 × 43
Horizontal resolution (km)	27	9	3	1
Vertical layers	30	30	30	30
Microphysics	WSM3 (Hong <i>et al.</i> , 2004)		WDM6 for D2-D4 (Lim and Hong, 2010)	
Short wave radiation	Dudhia (Dudhia, 1989)			
Long wave radiation	Rapid radiative transfer model (RRTM) (Mlawer <i>et al.</i> , 1997)			
Planetary boundary layer	YSU (Hong <i>et al.</i> , 2006)			
Land surface	5-layer thermal diffusion (Dudhia, 1996)			
Surface layer	Monin-Obukhov (Monin and Obukhov, 1954)			
Cumulus	Kain-Fritsch scheme for D1 and D2 (Kain, 2004)			

(feedback) 영향이 미치도록(양방향 동지화 기법) 모델을 수행하였다(Park, 2020). 모델링 기간 동안 행정 경계층 내에서 바람( $u, v$ ), 기온( $t$ ), 수증기 혼합비( $q$ ) 성분을 낮추었으며, 각 성분의 낮추는 계수는 여러 선행연구에서 제시한 바와 같이 기상장을 가장 효과적으로 개선하는 계수( $0.0003 \text{ s}^{-1}$ )를 설정하여 6시간 간격으로 수행하였다(Yoo *et al.*, 2017; Jeon *et al.*, 2015).

CMAQ 모델링을 위한 배출량 자료는 동아시아 영역의 경우  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  수평해상도를 가진 MICS-Asia (Model Inter-Comparison Study for Asia) 2010년 인위적 배출량 자료를 이용하였고(Carmichael *et al.*, 2002), 남한 영역의 경우 환경부 국가미세먼지정보센터에서 제공하는 CAPSS (Clean Air Policy Supporting System) 2015년 배출량 자료를 이용하였다(<http://www.air.go.kr>). 전체 연구 영역에 대한 자연적 배출량은 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) version 2.04 모델을 통해 산정된 결과를 이용하였다(Guenther *et al.*, 2006). 각 오염물질별 배출량은 계산 프로그램(MATLAB 등)을 이용하여 인위적 배출량과 자연적 배출량의 합으로 처리하였으며, 각각의 연구 영역(domain)에 맞게 재격자화하여 최종적으로



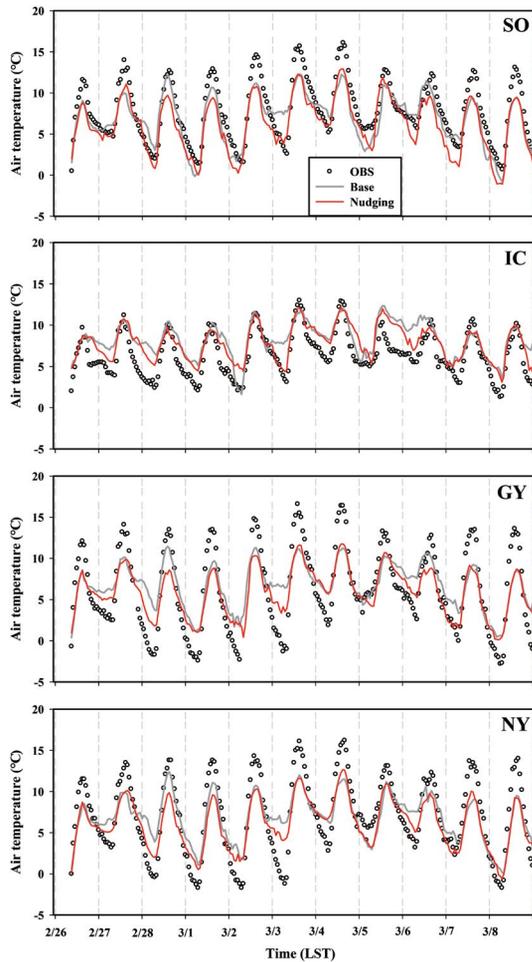
**Fig. 2.** The spatial distributions of the emissions ( $\text{kg day}^{-1}$ ) of (a)  $\text{PM}_{2.5}$  and (b)  $\text{NO}_x$  in the 1 km model domain (D4).

CMAQ 모델에 입력가능한 형태로 변환하였다. 이외에도, 본 연구대상지역(수도권)에서 미세먼지와 관련된 오염물질의 배출량 특성을 파악하기 위해, 입력 자료 중  $\text{PM}_{2.5}$ 와  $\text{NO}_x$ 의 배출량 공간분포를 살펴보았다(그림 2). 전반적으로, 두 물질의 배출량 공간분포는 주로 연안 주변지역(예, SH)과 도시의 중심지(예, JG) 및 이동오염원(도로, 선박, 항공 등)에 많이 집중되어 나타났다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 자료동화 효과에 따른 기상 변화 분석

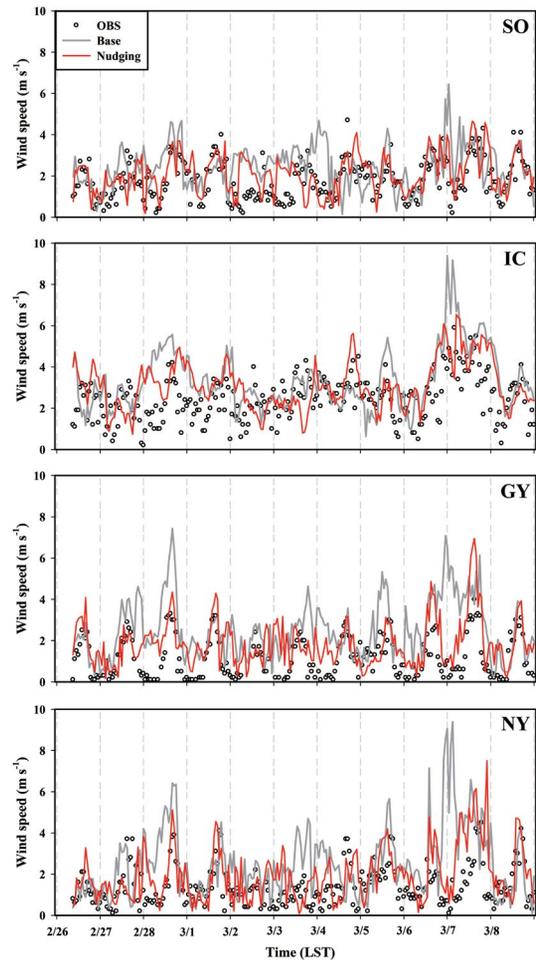
그림 3~5는 연무사례일(2019년 2월 27일~3월 6일)을 포함한 수치모의 기간 동안 4개의 기상 관측지점(SO, IC, GY, NY)에서 자료동화를 적용하지 않은 실험(Base)과 적용한 실험(Nudging) 결과와 관측요소(기온, 풍속, 상대습도)와의 비교를 나타낸다. 2.1절에서 언급하였듯이, 기상 관측지점은 각 대기질 관측지점(JG, SH, SW, DG)과 가깝고(3 km 이내) 지형에 의한 방해가 없는 지점으로 선정하였다(그림 1). 전반적으로, 관측지점에 따라 약간의 차이는 있지만 모든 기상요소에서 Nudging 실험이 Base보다 대체로 향상된 결과를 보였다. 한편, 본 연구에서 이용한 USGS land-use 자료는 대상지역(수도권)의 지표 특성이 일부 제대로 반영되어 있지 않아 Base 실험의 오차는 다소 클 수 있으며, Nudging 효과가 이러한 오차를 보정하여 더욱 향상된 결과를 보인 것으로 사료된다. 보다 자세히 살펴보기 위해, MODIS land-use 자료를 이용하여 Base 및 Nudging 실험을 수행하고 이를 USGS land-use 자료를 이용한 결과와 비교하였다(그림 제외). 전반적으로 기온과 풍속은 대부분 관측지점에서 USGS land-use를 이용한 두 실험(Base와 Nudging)의 차이가 더 크게 나타났으며, 이는 모의 검증에 위한 통계분석에서도 뚜렷한 차이가 확인되었다. 예를 들어, 4 지점 모두 USGS land-use를 이용한 Base와 Nudging 사이의 IOA 차이가 기온과 풍속에 대해 각각  $0.01 \sim$



**Fig. 3.** Time series plot of the observed and simulated air temperature at four meteorological monitoring sites (SO, IC, GY, and NY) ( $\leq 3$  km away from the air quality monitoring sites) for Base and Nudging cases during the entire simulation period (February 26~March 8, 2019).

0.08과 0.01~0.21로 나타났으며, MODIS land-use를 적용했을 때 각각 0.001~0.03과 0.01~0.05로 나타나 USGS land-use를 적용한 경우가 더 크게 향상되었다. 한편 상대습도는 2가지 land-use를 이용한 Base 및 Nudging 사이의 차이가 서로 비슷하게 나타났다(IOA 차이: 각각 0.04~0.08과 0.06~0.08).

기온에 대해 자세히 살펴보면(그림 3), 두 실험 모두 서울(SO)과 인천(IC) 지점에서 경기도 지점(GY와



**Fig. 4.** Same as Fig. 3 except for wind speed.

NY)에 비해 최저 및 최고 기온을 더 잘 모의한 것으로 나타났다. 또한 전반적으로 Nudging 실험결과가 Base 실험보다 관측값에 더 가깝게 모의되었으나, Base 실험이 더 가깝게 모의된 시간대도 일부 나타났다. 예를 들어, 수치모의 기간의 야간과 오전시간대에 자료동화를 적용한 Nudging 실험결과가 Base 실험에 비해 대체로 뚜렷한 개선효과를 보였으나(특히, 3월 3~4일, 일부 낮 시간대(정오 전후)에는 자료동화를 적용하지 않은 Base 실험에서 좀 더 향상된 모의결과도 나타났다. 풍속의 경우, 기온과는 다소 다르게 4지점 모두 Nudging 실험결과가 Base 결과보다 뚜렷하게 향상

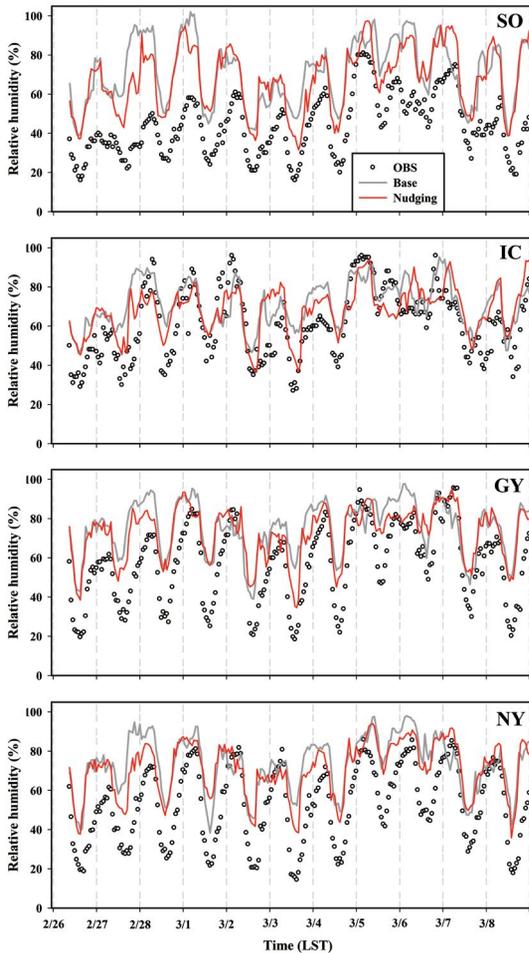


Fig. 5. Same as Fig. 3 except for relative humidity.

된 것을 볼 수 있었다(그림 4). 또한 풍속 관측값에 대해서 Base 실험은 대체로 과대모의하는 경향을 보였지만, Nudging 실험에서는 이러한 부분이 개선되어 관측값과 더 가깝게 모의되었다. 예를 들어, 대부분 지점에서 하루 중 정오 및 자정 전후의 시간대에서 과대 모의된 Base 실험에 비해 Nudging 실험에 의한 개선 효과가 대체로 뚜렷하게 나타났다. 특히, 3월 6일 늦은 밤~7일 새벽 사이에 Base 실험에서는 4지점 모두 강한 바람(약 6~9 m/s)이 모의되었으나, Nudging 실험에서는 약 5 m/s 이하로 감소되어 관측값과 매우 유사한 특징을 보였다. 상대습도의 시계열 특성을 보면(그

림 5), 연구 기간 동안 관측값의 다소 건조한 대기상태를 일부 모의하지 못한 것으로 나타났으나(특히, SO), 대체로 Base 실험결과에 비해 Nudging 실험의 상대습도 모의가 보다 향상된 것을 확인할 수 있었다. 대상 지역의 대부분 지점에서 특히 2월 27~28일과 3월 3~6일에 Base 실험에 비해 Nudging 실험의 향상된 결과를 보였다. 반면, SO와 NY 지점에서는 일부(예, 3월 1일 오후) Nudging 실험에 비해 오히려 Base 실험결과가 관측값과 좀 더 가깝게 모의되었다.

본 연구에서는 기상 자료동화(분석 네팅) 모의결과에 대한 정량적 검증을 위하여 모델값과 관측값 사이의 통계적(IOA, RMSE, MBE) 분석을 수행하였다(표 2). 전반적으로, 수도권 4지점(SO, IC, GY, NY)과 31개 지점(All) 모두 Nudging 실험결과가 Base 실험에 비해 관측값과 더 가깝게 모의되어 향상되었다. 기온의 경우, Nudging 실험에 의한 IOA가 Base 실험과 비교하여 최소 0.78~최대 0.90에서 0.85~0.91로 향상되었고(All: 0.86 → 0.88), RMSE가 최소 2.10°C~최대 3.16°C에서 1.87°C~2.70°C로 낮아져 오차가 감소하였다(All: 2.42°C → 2.39°C). 풍속과 상대습도 역시 Nudging 실험이 Base 실험에 비해 관측값과 더 가깝게 향상된 모의를 보였다. 예를 들어, 풍속의 IOA는 최소 0.42~최대 0.57에서 0.58~0.69로 향상되었고(All: 0.42 → 0.52), RMSE는 최소 1.43 m/s~최대 2.13 m/s에서 1.01 m/s~1.47 m/s로 감소하였다(All: 1.88 m/s → 1.47 m/s). 한편, IC 지점의 풍속은 Base 실험에 비해 Nudging 실험의 모의결과가 크게 개선되지 않았는데(IOA는 0.01 증가, RMSE는 0.2 m/s 감소), 이것은 실제 IC 지점이 해안에 인접하고 많은 도서지역으로 둘러싸인 복잡한 지역에 위치하는 반면, 모델에서는 영역 내 큰 격자 공간으로 처리되어 약간의 오차가 발생하였기 때문으로 추정된다. 또한 상대습도의 IOA는 최소 0.53~최대 0.72에서 0.60~0.76으로 개선되었으며(All: 0.59 → 0.66), RMSE는 최소 16.3%~최대 30.1%에서 14.8%~26.3%로 오차가 감소(All: 27.5% → 24.1%)한 것으로 추정되었다. 이외에도, 기상요소의 관측값에 대해 Nudging 및 Base 실험의 기온은 대

**Table 2.** Statistical evaluation of the meteorological variables and PM<sub>2.5</sub> concentrations between the observed and simulated values for Base and Nudging cases: results compared at several monitoring sites ("All", 31 sites each for meteorological variables and PM<sub>2.5</sub>, including SO, IC, GY, and NY (for meteorological variables) and JG, SH, SW, and DG (for PM<sub>2.5</sub>), during the entire simulation period (February 26~March 8, 2019).

Site	Variable	Base case			Nudging case		
		IOA <sup>a</sup>	RMSE <sup>b</sup>	MBE <sup>c</sup>	IOA <sup>a</sup>	RMSE <sup>b</sup>	MBE <sup>c</sup>
SO (ASOS)	TEMP	0.90	2.10	-0.92	0.91	2.05	-1.61
	WS	0.48	1.43	0.64	0.69	1.01	0.31
	RH	0.53	30.1	27.2	0.60	26.3	24.1
IC (ASOS)	TEMP	0.78	2.39	1.82	0.85	1.87	1.44
	WS	0.57	1.67	0.89	0.58	1.47	0.65
	RH	0.72	16.3	10.3	0.76	14.8	7.28
GY (AWS)	TEMP	0.83	3.16	0.47	0.88	2.70	-0.26
	WS	0.53	1.95	1.44	0.69	1.26	0.79
	RH	0.67	22.7	18.8	0.74	19.2	15.7
NY (AWS)	TEMP	0.85	2.74	-0.17	0.89	2.45	-0.82
	WS	0.42	2.13	1.14	0.61	1.36	0.56
	RH	0.64	24.9	21.0	0.70	21.8	18.4
All	TEMP	0.86	2.42	-0.61	0.88	2.39	-1.32
	WS	0.42	1.88	1.13	0.52	1.47	0.74
	RH	0.59	27.5	23.3	0.66	24.1	20.4
JG		0.71	41.0	-23.7	0.86	25.6	-13.9
SH		0.64	54.9	-40.1	0.69	46.1	-34.5
SW	PM <sub>2.5</sub>	0.64	51.7	-39.9	0.79	36.3	-26.9
DG		0.70	39.7	-29.7	0.87	25.6	-15.1
All		0.67	47.2	-32.3	0.82	32.7	-20.1

<sup>a</sup>IOA: index of agreement, <sup>b</sup>RMSE: root mean square error, <sup>c</sup>MBE: mean bias error  
TEMP: air temperature, WS: wind speed, RH: relative humidity

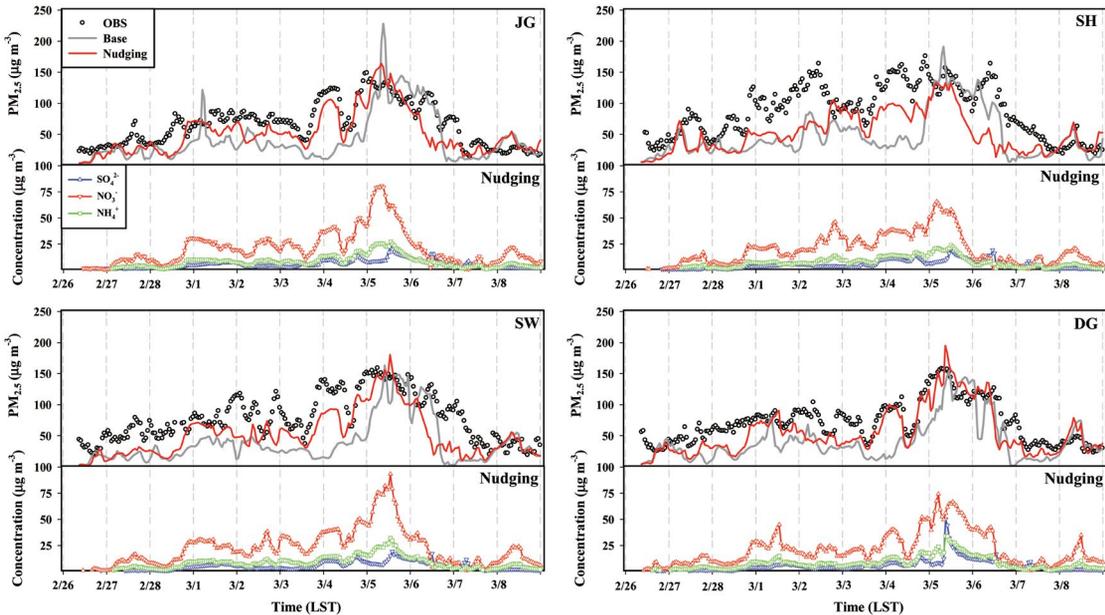
부분 지점에서 과소모의, 풍속과 상대습도는 4지점 모두 과대모의 하는 경향이 나타났다. 따라서 모델결과의 검증에 종합해보면, 기상 자료동화를 적용한 Nudging 실험의 향상된 결과가 대상지역의 PM<sub>2.5</sub> 농도 분포에 영향을 주어 보다 향상된 모의를 예상할 수 있다.

### 3.2 PM<sub>2.5</sub> 농도 예측에 미치는 기상 자료동화의 영향

#### 3.2.1 PM<sub>2.5</sub> 시계열 분석

그림 6은 연구 기간 동안 수도권 내 4개의 대기질 관측지점 (JG, SH, SW, DG)을 대상으로 Nudging 및 Base 실험의 PM<sub>2.5</sub> 농도와 관측 농도와의 비교를 나타낸다. 또한 Nudging 실험의 PM<sub>2.5</sub> 2차 무기 이온성분

즉 황산염(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 질산염(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), 암모늄(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)의 농도 시계열도 같이 분석하였다. 전반적으로, 대상지역에서(4지점 모두) 기상 자료동화를 적용한 Nudging 실험결과가 Base 실험에 비해 관측값과 더 유사하게 향상된 결과를 나타냈다. 지점별로 자세히 살펴보면, 먼저 서울 JG 지점의 Base 실험결과는 대부분 PM<sub>2.5</sub> 관측 농도의 패턴을 따라가지 못하고 있는 반면, Nudging 결과는 대체로 관측값과 유사한 경향을 보였다(그림 6). 예를 들어, 이 지점의 3월 1일과 5일의 이른 아침에 Base 실험은 관측값과 달리 PM<sub>2.5</sub> 농도의 정점(각각 약 122 µg/m<sup>3</sup>, 228 µg/m<sup>3</sup>)이 나타났으나, Nudging 결과는 상대적으로 관측값과 매우 유사하게 모의하여(약 71 µg/m<sup>3</sup>, 158 µg/m<sup>3</sup>) 크게 개선된 것을 확인하였다. 특히 3월 3일 야간~4일 아침까지 Base



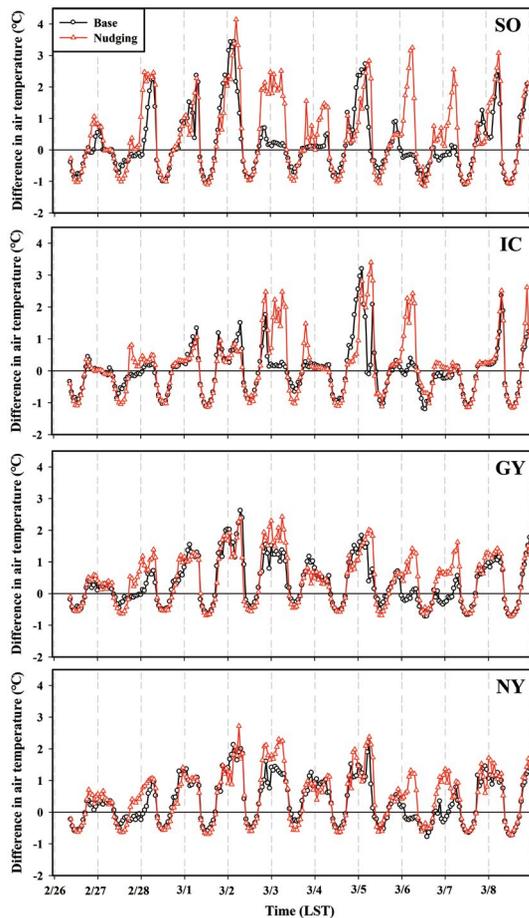
**Fig. 6.** Time series plot of the concentrations of observed and simulated  $PM_{2.5}$ , including  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ , and  $NH_4^+$  in  $PM_{2.5}$  (Nudging case only) at four air quality monitoring sites (JG, SH, SW, and DG) for Base and Nudging cases during the entire simulation period (February 26~March 8, 2019).

실험의 심각한 과소모의 경향을 Nudging 실험에서는 매우 크게 향상된 모습이 나타났다. 이것은 JG 인근의 관측값(SO 지점의 기상관측)과 비교해 볼 때 Nudging을 통한 기상요소(특히, 풍속)의 향상된 수치모의가 기여한 것으로 추정된다. 즉, 동일 시간대(3월 3일 야간~4일 아침)에 Base 실험의 풍속 과대모의는  $PM_{2.5}$  농도를 매우 낮게 모의하여 관측값과 다른 결과를 초래한 반면, Nudging 실험에서는 야간의 풍속 감소와 지표냉각으로 인해(그림 3과 4) 대기안정도가 강화되면서(Base에 비해 강한 기온역전, 그림 7)  $PM_{2.5}$ 의 농도 증가에 영향을 준 것으로 사료된다(Jo and Kim, 2010; Lim *et al.*, 2005).

JG 지점과 마찬가지로, 나머지 3지점(SH, SW, DG)에서도 Base에 비해 Nudging 실험에 의한  $PM_{2.5}$  농도가 대부분 관측값과 더 가깝게 모의된 것을 알 수 있었다. 즉, 3지점에서 Base 실험의 과소모의 경향이 자료동화를 적용한 Nudging 실험을 통해 크게 향상된 모습이 확인되었다(특히, 3월 3~4일). 이것은 JG 지

점과 유사하게 Nudging 실험에서의 보다 향상된 기상 수치모의(각각 IC, GY, NY 지점)가 주요 원인인 것으로 사료된다. 이외에 SH 지점을 보면, 3월 5일에 Base 실험에서 나타났던  $PM_{2.5}$  정점이 Nudging 실험에서는 크게 개선되어 관측값과 유사하게 모의되었다. 그러나 이 지점의 고농도 미세먼지 기간 중 일부(3월 1~2일) 기간에 대해서는 두 실험(Base 및 Nudging) 모두 다른 지점에 비해 제대로 모의하지 못하였다. 이것은 이 지점 인근(IC 지점)에서 두 실험의 풍속 과대모의가  $PM_{2.5}$ 의 농도감소에 일부 영향을 준 것으로 사료된다(그림 4). 한편, 대부분 지점에서 3월 6일 늦은 밤~7일 새벽에 Base 실험에서 매우 낮은  $PM_{2.5}$  농도가 나타났는데, 이것은 같은 시간대 Base 실험에서 기온과 상대습도는 관측값과 어느 정도 비슷하게 모의되었지만(그림 3과 5), 풍속의 과대모의가 너무 크고 대기안정도가 상대적으로 매우 약했기 때문으로 사료된다(그림 4와 7).

본 연구의 사례 기간 동안  $PM_{2.5}$  농도에 대해 전체 2



**Fig. 7.** The differences in air temperatures between the first model layer (about 30 m) and surface level (2 m) simulated by the WRF model at four meteorological monitoring sites (SO, IC, GY, and NY) for Base and Nudging cases during the entire simulation period.

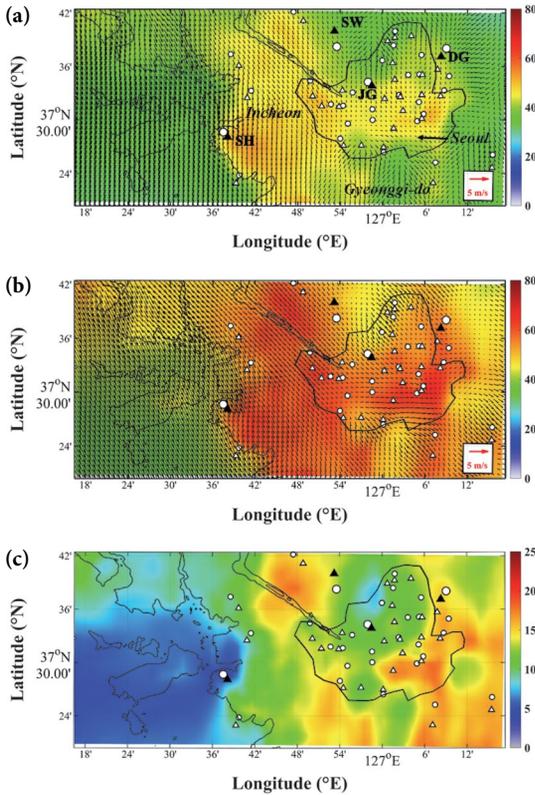
차 무기 이온성분( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ )이 차지하는 비율은 4지점(JG, SH, SW, DG)에서 각각 약 61%, 56%, 65%, 60%였다(그림 6). 특징적으로, 4지점 모두 2차 무기 이온성분 중에서  $\text{NO}_3^-$  농도가 PM<sub>2.5</sub> 농도의 패턴 및 크기에 가장 크게 기여(JG: 평균 37%, SH: 33%, SW: 40%, DG: 36% 차지)한 것으로 나타났다. 이것은 대상지역에서의  $\text{NO}_3^-$  전구물질인  $\text{NO}_x$ 의 많은 배출량(그림 2)과 함께 기상장 개선(자료동화 효과) 등의 복합적 영향으로 사료된다. 반면,  $\text{SO}_4^{2-}$ 와  $\text{NH}_4^+$ 는 상

대적으로 작게 기여( $\text{SO}_4^{2-}$ : 4지점 모두 약 10%,  $\text{NH}_4^+$ : 약 12~15% 차지)한 것으로 나타났으며, 그 경향도 PM<sub>2.5</sub> 농도 패턴과 일부 다른 양상을 보였다. 특히, 하루 중 야간~새벽시간대에 나타난 고농도  $\text{NO}_3^-$ 는 PM<sub>2.5</sub> 이온성분 농도의 관측 부재로 정확한 원인은 알 수 없지만 야간에  $\text{NO}_3^-$  관련 이질적 반응(heterogeneous reaction)이 일부 영향을 준 것으로 추정된다. 예를 들어, Pathak *et al.* (2011)은 야간에 높은 상대습도 조건하에서  $\text{N}_2\text{O}_5$ 의 이질적 가수분해(heterogeneous hydrolysis,  $\text{N}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O}(\text{aq}) \rightarrow 2\text{HNO}_3$ )가  $\text{NO}_3^-$  에어로졸의 농도증가에 기여하였음을 밝힌 바 있다.

PM<sub>2.5</sub> 수치모의 검증 결과(표 2), 전반적으로 4지점을 포함한 31개 지점(All)에서 Nudging 실험의 IOA, RMSE, MBE가 Base 실험에 비하여 다소 향상되었음을 알 수 있었다(All: IOA 0.67 → 0.82, RMSE 47.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  → 32.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). 지점별로 상세히 보면, JG와 DG 지점은 IOA가 각각 0.71, 0.70에서 0.86, 0.87로 크게 향상, RMSE가 각각 41.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 39.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 25.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 25.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 오차가 크게 감소, 그리고 두 지점에서의 MBE도 각각 -23.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , -29.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 -13.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , -15.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 과소모의 경향이 감소하였다. SW 지점은 IOA가 0.64에서 0.79로 향상, RMSE가 51.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 36.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 크게 감소, MBE가 -39.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 -26.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소하였다. 마지막으로 SH 지점은 자료동화에 의한 개선효과가 가장 작게 나타났다(두 실험 간 IOA와 RMSE의 차이가 상대적으로 작음). 이것은 SH 인근의 IC 기상 관측지점에서 풍속과 상대습도에 대한 자료동화의 개선효과가 다른 지점에 비해 상대적으로 작았기 때문에 이로 인한 PM<sub>2.5</sub> 모의 개선 수준이 낮게 나타난 것으로 볼 수 있다(표 2). 결과적으로, 기상 및 PM<sub>2.5</sub> 수치모의 분석과 통계적 검증으로부터 기상모델의 자료동화로 인한 개선효과가 대기질 모델(CMAQ)을 통한 PM<sub>2.5</sub> 농도 예측 향상에 크게 영향을 준 것으로 사료된다.

### 3.2.2 PM<sub>2.5</sub> 공간분포 분석

본 연구에서는 연무발생시 기상 자료동화가 미세먼

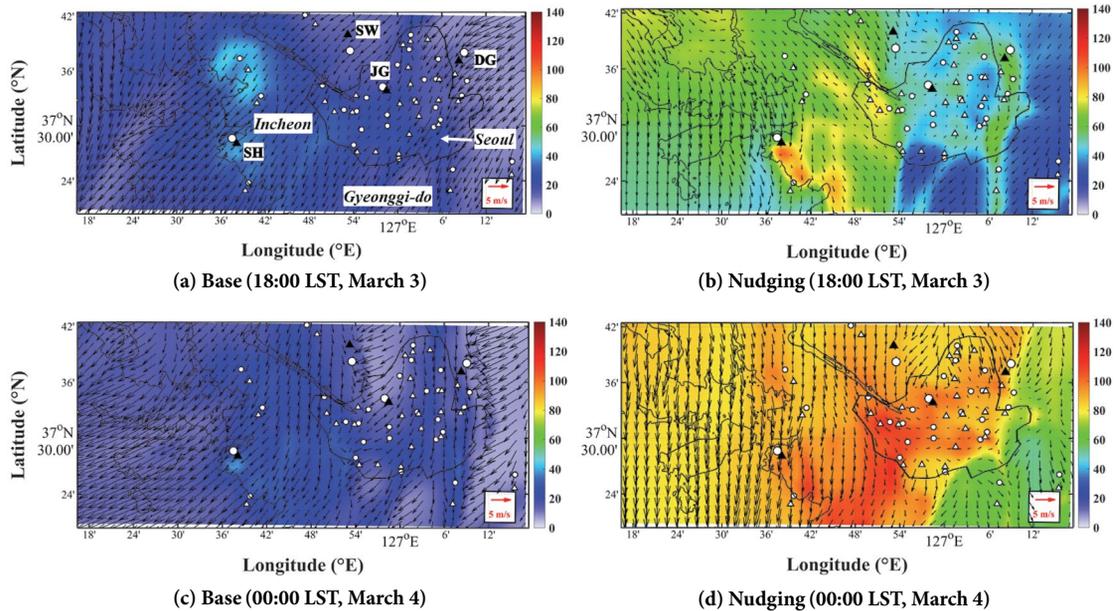


**Fig. 8.** Spatial distributions of the simulated  $PM_{2.5}$  concentrations averaged from all grids in the 1 km model domain (D4). (a) Base, (b) Nudging, and (c) the difference in  $PM_{2.5}$  concentrations between Base and Nudging cases.

지 수치모의에 미치는 영향을 공간적으로 파악하기 위해, 모델 영역(D4)의 격자 평균한  $PM_{2.5}$  분포(그림 8)와 3월 3~4일의 오후 및 새벽시간대(자료동화 효과가 가장 큼)의  $PM_{2.5}$  분포(그림 9)를 각각 분석하였다. 먼저 그림 8을 보면, 전반적으로, Base 실험의  $PM_{2.5}$  분포는 모델 영역 내 전체 격자에서 대략  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이하로 모의되었으며, 공간적 차이가 뚜렷하지 않았다. 반면, Nudging 실험에서는 공간분포의 차이가 어느 정도 나타났으며, 주로 서해 해안가 주변, 수도권의 서/북서쪽 방향 및 일부 동쪽 방향에서 상대적으로 높은 농도가 모의되었다. 따라서 Nudging과 Base 실험의  $PM_{2.5}$  농도 차이는 기상 자료동화의 효과로 인해 모델 영역 내 전체 격자에서 증가하였으며, 지점별로

서로 다른 양상을 보였다. 특히, 수도권의 북서쪽과 동/남동쪽 방향에서 가장 큰 차이가 나타났고(약  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이상), 다음으로 서해 해안가 주변 및 서울 중심 지역에서 약  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  정도의 차이를 보였다. 한편, 모델 영역 중 주변에 지형에 의한 장애물이 거의 없고 오염물질 배출량이 제한적인 해양에서의 자료동화(Nudging) 효과는 상대적으로 작게 나타났다. 전체 연구영역에서의 이러한 농도 차이는 Nudging 실험에서의 기상장 개선효과(예, 바람 성분)와 함께 많은 오염물질 배출원으로부터의 장거리 수송(외부 유입, 그림 제외) 및 자체 배출량에 의한 영향(그림 2와 8) 등 복합적인 효과가 주요 원인인 것으로 사료된다.

자료동화 효과를 보다 상세하게 살펴보기 위해, 연구 기간 중에서 Nudging 효과가 가장 크게 나타난 3월 3일의 18시와 3월 4일의 자정에 대해  $PM_{2.5}$  농도의 공간분포를 분석하였다(그림 9). 참고로 그림 9의 (a)와 (c)는 Base 실험의 모의결과이고 (b)와 (d)는 Nudging 실험의 모의결과이다. 전반적으로, Base 실험은 그림 8의 평균 농도 분포와 유사하게 공간적 차이가 뚜렷하지 않은 반면, Nudging 실험에서는 상대적으로 공간적 변화 특성이 뚜렷하게 모의되었다. 또한 전체 영역에서 3월 3일 오후(18시)보다는 4일 새벽(00시)에 더 높은 농도가 넓게 분포한 것을 알 수 있었다. 먼저 3월 3일 18시의  $PM_{2.5}$  분포는 Base와 달리 Nudging 실험에서는 서해 해안가 주변(예, SH)에서 약  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  정도의 고농도  $PM_{2.5}$ 가 모의되었고, 수도권의 서쪽지역에서 약  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  정도의 농도가 분포하였다. 이러한 분포는 다량의 오염물질 배출량(그림 2)과 기상조건 등의 복합적 영향이 원인인 것으로 사료된다. Base 실험에서는 전반적으로 강한 북동풍 바람이 탁월한 반면(그림 9(a)), Nudging 실험에서는 고농도 지역 주변으로 풍속 감소(야간 대기안정도 강화 유발, 그림 7) 또는 북/북서풍과 동풍 바람의 수렴 등 대기정체가 나타나면서 농도 증가(축적)를 일으킨 것으로 사료된다(그림 9(b)). 대상지역 4지점에서 야간 풍속이 감소하면서(대기정체 유발 가능)  $PM_{2.5}$  농도가 증가한 빈도를 살펴보니 약 65% (서울 SO)~72% (고양



**Fig. 9.** Spatial distributions of PM<sub>2.5</sub> concentrations simulated at 18:00 LST on March 3, 2019 and 00:00 LST on March 4, 2019 for Base and Nudging cases.

GY) 정도였다(그림 제외). 결론적으로, 기상모델의 자료동화 적용으로 인해 기상장이 개선(특히, 바람 성분) 되었으며, 결국 이러한 개선효과로 인해 PM<sub>2.5</sub> 농도(2차 무기 이온성분이 약 56~65% 기여) 모의의 정확도가 향상된 것으로 볼 수 있다.

3월 4일 00시를 보면, 전날 18시의 PM<sub>2.5</sub> 공간분포와 유사하게 Base 실험에서는 모델 영역 내 전체 격자에서 뚜렷한 공간적 차이를 볼 수 없었다(그림 9(c)). 그러나 Nudging 실험에서는 3월 3일(18시)과 4일(00시)의 공간분포가 다소 차이가 나타났다(그림 8(d)). 즉, 3월 4일 새벽에는 전반적으로 3일보다 고농도 PM<sub>2.5</sub>가 넓게 분포하였으며, 서해 해안가 주변뿐만 아니라 수도권의 서쪽 및 남서쪽 방향에서 매우 높은 농도가 모의되었다(약 120 µg/m<sup>3</sup>). 또한 서울의 중심지역(예, JG), 수도권 북/북서쪽 방향, 그리고 해양 영역에서도 상당한 농도가 넓게 분포하였다. 이처럼 수도권 북/북서쪽과 해양 영역에는 배출량이 매우 제한적인 지역임에도 불구하고(그림 2) 고농도 PM<sub>2.5</sub>(약 80~90 µg/m<sup>3</sup>)가 나타난 것은 수도권 북서쪽 지역으

로부터(예, 중국 오염원) 다량의 오염물질의 수송(바람 전환: 북동풍(Base) → 북/북서풍(Nudging))이 일부 영향을 준 것으로 추정된다(그림 제외). 여러 선행 연구에서도 이와 유사하게 고농도 미세먼지 사례시(예, 연무) 중국의 거대한 오염원으로부터 장거리 수송의 영향으로 인해 PM<sub>2.5</sub> 농도가 증가하였음을 밝힌 바 있다(Kim *et al.*, 2016b; Oh *et al.*, 2015; Oh *et al.*, 2010; Koo *et al.*, 2008). 그러나 대부분의 미세먼지 수치모의 연구에서 해양기원의 에어로졸(황화디메틸(DMS) 관련 에어로졸 등) 배출량을 고려한 연구는 거의 수행된 바가 없는데, 향후 이러한 부분을 추가하여 해양/연안 지역에서의 보다 정확한 미세먼지 영향 평가 연구가 필요하다고 본다. 한편 그림 6과 9에서 알 수 있듯이, 3월 4일 00시는 새벽시간대임에도 불구하고 고농도 PM<sub>2.5</sub>가 나타난(관측값과 Nudging 결과 모두) 것은 3.2.1절에서 설명한 바와 같이 Base에 비해 향상된 기상장 수치모의와 2차 무기 이온성분인 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 관련하여 야간 이질적 반응 등이 복합적으로 작용한 것이라 추정된다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 우리나라 수도권 연무사례시(2019년 2월 27일~3월 6일)  $PM_{2.5}$  농도 예측에 미치는 기상모델의 분석 넷징 자료동화 효과를 분석하였다. 전반적으로, 기상모델의 분석 넷징을 적용한 Nudging 실험이 Base 실험에 비해 뚜렷한 기상장 개선효과가 나타났다(특히, 풍속). 또한 자료동화의 개선효과는 통계적 정량분석에서도 확인할 수 있었는데, Nudging 실험에서 기온, 풍속, 상대습도의 IOA는 각각 0.85~0.91, 0.58~0.69, 0.60~0.76으로 Base 실험보다 다소 향상된 모의를 보였으며, RMSE 역시 각각 1.87~2.70°C, 1.01~1.47 m/s, 14.8~26.3%로 오차가 감소하였다. 이러한 기상 자료동화의 개선효과는 전반적으로 대상지역의 연무사례일에 대해  $PM_{2.5}$  농도 모의의 정확도를 향상시키는 데 크게 기여하였다(IOA 증가(0.67 → 0.82), RMSE 감소(47.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  → 32.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )). 연무사례일 중에서 3월 3일 야간~4일 아침에 Base 실험의  $PM_{2.5}$  농도 과소모의 경향이 Nudging 실험에서는 크게 개선된 것을 확인하였다. 즉, Base 실험의 풍속 과대모의는  $PM_{2.5}$ 의 농도감소를 초래하여 관측값과 상이한 반면, Nudging 실험에서는 풍속 감소로 인한 대기안정도 강화가  $PM_{2.5}$  농도(2차 무기 이온성분, 특히  $\text{NO}_3^-$ ) 모의 개선에 크게 기여한 것으로 사료된다.

$PM_{2.5}$  농도의 공간분포를 보면, 전반적으로 과소모의하고 있는 Base 실험과는 달리 Nudging 실험에서는 주로 서해 해안가 주변, 수도권의 서/북서쪽 및 동쪽 방향에서 고농도  $PM_{2.5}$ 가 모의되었다. Base 실험과의 차이를 보면, 수도권의 북서쪽 및 동/남동쪽 방향에서 가장 큰 차이를 보였다(약 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상). 또한 연무사례일 중 3월 3일의 오후에 서해 해안가 주변과 수도권의 서쪽지역에서 모의된 고농도  $PM_{2.5}$ 는 다량의 오염물질 배출량(국내외 배출원)과 기상조건(Nudging 실험에서의 저풍속 또는 바람 수렴)의 복합적 효과가 원인인 것으로 사료된다. 한편, 3월 4일의 새벽에는 서해 해안가 주변, 수도권 서/남서쪽과 해양 영역을 포

함하여 광범위하게 고농도  $PM_{2.5}$ 가 모의되었다. 특히, 해양은 배출량이 제한적인 지역임에도 불구하고 상당한 농도가 나타났는데, 이것은 여러 선행연구에서도 밝혀졌듯이 중국의 거대 오염원으로부터의 외부 수송(Nudging 실험에서의 북/북서풍을 따라)이 일부 영향을 준 것으로 추정된다.

본 연구에서는 기상 자료동화의 효과에 따른  $PM_{2.5}$  농도 모의가 개선되었음을 확인하였으나,  $PM_{2.5}$  화학성분별 관측 농도 및 자료 수집의 제한, 그리고 배출량 입력 자료(해양기원 에어로졸 등)의 한계 등으로 인해 대상지역(연안 주변)에서 기상 자료동화의 효과를 정확히 해석하고 미세먼지 농도에 미치는 영향인자를 평가하는 데 다소 어려움이 있었다. 향후 이러한 한계점을 보완하고 다양한 대기오염 사례에 대해 자료동화 효과를 분석한다면, 기상장 개선에 따른 대기질 수치모의의 정확도 향상에 크게 기여할 것이고 또한 대기오염물질 원인규명을 이해하는 데 보다 신뢰성 있는 정보를 제공할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2020R1A2C2011081). 그리고 본 연구의 미세먼지( $PM_{2.5}$ ) 모델링 수행을 위해 남한 영역의 대기오염물질 배출량 자료를 제공해 준 환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀에 감사드립니다.

#### References

- Amil, N., Latif, M.T., Khan, M.F., Mohamad, M. (2016) Seasonal Variability of  $PM_{2.5}$  Composition and Sources in the Klang Valley Urban-industrial Environment, Atmospheric Chemistry and Physics, 16, 5357-5381. <https://doi.org/10.5194/acp-16-5357-2016>
- Bowden, J.H., Otte, T.L., Nolte, C.G., Otte, M.J. (2012) Examining Interior Grid Nudging Techniques Using Two-way

- Nesting in the WRF Model for Regional Climate Modeling, *Journal of Climate*, 25(8), 2805-2823. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00167.1>
- Byun, D.W., Ching, J.K.S. (1999) Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, U.S. Environmental Protection Agency (US EPA), EPA/600/R-99, 30.
- Carmichael, G.R., Calori, G., Hayami, H., Uno, I., Cho, S.-Y., Engardt, M., Kim, S.-B., Ichikawa, Y., Ikeda, Y., Woo, J.-H., Ueda, H., Amann, M. (2002) The MICS-Asia Study: Model Intercomparison of Long-range Transport and Sulfur Deposition in East Asia, *Atmospheric Environment*, 36(2), 175-199. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00448-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00448-4)
- Carter, W.P.L. (2003) The SAPRC-99 Chemical Mechanism and Updated VOC Reactivity Scales, California Air Resources Board.
- Desrozier, G., Ivanov, S. (2001) Diagnosis and Adaptive Tuning of Observation-error Parameters in A Variational Assimilation, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 127(574), 1433-1452. <https://doi.org/10.1002/qj.49712757417>
- Dudhia, J. (1989) Numerical Study of Convection Observed during Winter Monsoon Experiment using a Mesoscale Two-dimensional Model, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46(20), 3077-3107. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2)
- Dudhia, J. (1996) A Multi-layer Soil Temperature Model for MM5, The Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users Workshop, 22-24, Boulder, Colorado.
- Friedl, M.A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., Huang, X. (2010) MODIS Collection 5 Global Land Cover: Algorithm Refinements and Characterization of New Datasets, *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 168-182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>
- Guenther, A., Karl, T., Harley, P., Wiedinmyer, C., Palmer, P.I., Geron, C. (2006) Estimates of Global Terrestrial Isoprene Emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), *Atmosphere Chemistry Physics*, 6(11), 3181-3210. <https://doi.org/10.5194/acp-6-3181-2006>
- Hong, S.-Y., Dudhia, J., Chen, S.H. (2004) A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for The Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation, *Monthly Weather Review*, 132(1), 103-120. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2)
- Hong, S.-Y., Noh, Y., Dudhia, J. (2006) A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes, *American Meteorological Society, Monthly Weather Review*, 134(9), 2318-2341. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- 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, *Atmospheric Environment*, 122, 763-774. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.050>
- 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, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(1), 30-40, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.1.030>
- Jeong, J.-H., Oh, I.-B., Kang, Y.-H., Bang, J.-H., An, H.-Y., Seok, H.-B., Kim, Y.-K., Hong, J.-H., Kim, J.-Y. (2016) WRF Modeling Approach for Improvement of Air Quality Modeling in the Seoul Metropolitan Region: Seasonal Sensitivity Analysis of the WRF Physics Options, *Journal of Environmental Science International*, 25(1), 67-83, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2016.25.1.67>
- Jo, H.-Y., Kim, C.-H. (2010) Characteristics of East Asia Synoptic Meteorological Conditions in Association with Haze Phenomena, *Atmosphere*, 20(2), 161-172, (in Korean with English abstract).
- Jo, Y.-J., Lee, H.-J., Chang, L.-S., Kim, C.-H. (2017) Sensitivity Study of the Initial Meteorological Fields on the PM<sub>10</sub> Concentration Predictions Using CMAQ Modeling, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(6), 554-569, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.6.554>
- Kain, J.S. (2004) The Kain-Fritsch Convective Parameterization : An Update, *Journal of Applied Meteorology*, 43(1), 170-181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2)
- Kim, A.-H., Yum, S.S., Chang, D.Y. (2018) Sensitivity Test of the Parameterization Methods of Cloud Droplet Activation Process in Model Simulation of Cloud Formation, *Atmosphere*, 28(2), 211-222, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2018.28.2.211>
- Kim, H.-C., Kim, S., Son, S.-W., Lee, P., Jin, C.-S., Kim, E., Kim, B.-U., Ngan, F., Bae, C., Song, C.-K., Stein, A. (2016b) Synoptic Perspectives on Pollutant Transport Patterns Observed by Satellites over East Asia: Case Studies with a Conceptual Model, *Atmospheric Chemistry and Phy-*

- sics Discussions, 1-30. <https://doi.org/10.5194/acp-2016-673>
- Kim, T.-H., Kim, Y.-K., Shon, Z.-H., Jeong, J.-H. (2016a) Sensitivity Analysis of Ozone Simulation according to the Impact of Meteorological Nudging, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(4), 372-383, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2016.32.4.372>
- Koo, Y.-S., Kim, S.-T., Yun, H.-Y., Han, J.-S., Lee, J.-Y., Kim, K.-H., Jeon, E.-C. (2008) The Simulation of Aerosol Transport over East Asia Region, *Atmospheric Research*, 90, 264-271. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.03.014>
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2016) Guidelines for Ground Weather Observation. KMA, South Korea, p. 282.
- Lee, C.-B., Kim, J.-C., Cheon, T.-H. (2009) Effects Study on the Accuracy of Photochemical Modeling to MM5 Four Dimensional Data Assimilation Using Satellite Data, *Journal of Environmental Science International*, 25(4), 264-274, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2009.25.4.264>
- Lim, K.S.S., Hong, S.-Y. (2010) Development of an Effective Double-Moment Cloud Microphysics Scheme with Prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for Weather and Climate Models, *American Meteorological Society. Monthly Weather Review*, 138(5), 1587-1612. <https://doi.org/10.1175/2009MWR2968.1>
- Lim, Y.-K., Kim, Y.-K., Oh, I.-B., Song, S.-K. (2005) Nocturnal Inversion Layer observed by Tethersonde and AWS System and its Relation to Air Pollution at Ulsan, *Journal of the Environmental Sciences*, 14(6), 555-563, (in Korean with English abstract).
- 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, *Journal of Geophysical Research*, 102(D14), 16,663-16,682. <https://doi.org/10.1029/97JD00237>
- Monin, A.S., Obukhov, A.M. (1954) Basic Laws of Turbulent Mixing in the Surface Layer of the Atmosphere, *Contributions of the Geophysical Institute of the Academy of Sciences of USSR*, 24(151), 163-187.
- Mun, J.-H., Jeon, W.-B., Lee, H.-W. (2020) Impact of Different Meteorological Initializations on WRF Simulation During the KORUS-AQ Campaign, *Journal of Environmental Science International*, 29(1), 33-44, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2020.29.1.33>
- Niu, H., Hu, W., Zhang, D., Wu, Z., Guo, S., Pian, W., Cheng, W., Hu, M. (2016) Variations of Fine Particle Physicochemical Properties during a Heavy Haze Episode in the Winter of Beijing, *Science of the Total Environment*, 571, 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.147>
- Oh, H.-R., Ho, C.-H., Kim, J., Chen, D., Lee, S., Choi, Y.-S., Chang, L.S., Song, C.-K. (2015) Long-range Transport of Air Pollutants Originating in China: A Possible Major Cause of Multi-day High-PM<sub>10</sub> Episodes during Cold Season in Seoul, Korea, *Atmospheric Environment*, 109, 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.03.005>
- Oh, I.-B., Kim, Y.-K., Hwang, M.-K., Kim, C.-H., Kim, S., Song, S.-K. (2010) Elevated Ozone Layers over the Seoul Metropolitan Region in Korea: Evidence for Long-range Ozone Transport from Eastern China and its Contribution to Surface Concentration, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, 203-220. <https://doi.org/10.1175/2009jamc2213.1>
- Otte, T.L (2008) The Impact of Nudging in the Meteorological Model for Retrospective Air Quality Simulations, Part I: Evaluation against National Observation Networks, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(7), 1853-1867. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1790.1>
- Park, H.-S. (2020) Effects of Data Assimilation by 3DVAR with Analysis Nudging for fog Prediction in the West Coast of the Korean peninsula, MSc Dissertation, Jeju National University, Jeju, South Korea, (in Korean with English abstract).
- Pathak, R.K., Wang, T., Wu, W.S. (2011) Nighttime Enhancement of PM<sub>2.5</sub> Nitrate in Ammonia-poor Atmospheric Conditions in Beijing and Shanghai: Plausible Contributions of Heterogeneous Hydrolysis of N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and HNO<sub>3</sub> Partitioning, *Atmospheric Environment*, 45, 1183-1191. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.003>
- Pope, C.A., Dockery, D.W. (2006) Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Pun, B.K., Seigneur, C., Vijayaraghavan, K., Wu, S.Y., Chen, S.Y., Knipping, E.M., Kumar, N. (2006) Modeling Regional Haze in the BRAVO study using CMAQ-MADRID: 1. Model evaluation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D6). <https://doi.org/10.1029/2004JD005608>
- Shafan, P.C., Seaman, N.L., Gayno, G.A. (2000) Evaluation of Numerical Predictions of Boundary Layer Structure during the Lake Michigan Ozone Study, *Journal of Applied Meteorology*, 39(3), 412-426. <https://doi.org/>

- 10.1175/1520-0450(2000)039<0412:EONPOB>2.0.CO;2
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B. (2008) A Time-split Nonhydrostatic Atmospheric Model for Weather Research and Forecasting Applications, *Journal of Computational Physics*, 227(7), 3465-3485. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037>
- Sun, Y., Zhuang, G., Tang, A., Wang, Y., An, Z. (2006) Chemical Characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Haze-fog Episodes in Beijing, *Environmental Science & Technology*, 40, 3148-3155. <https://doi.org/10.1021/es051533g>
- Talagrand, O. (1997) Assimilation of observations, an introduction (gtspecial Issue\data Assimilation in Meteorology and oceanography: Theory and Practice), *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 75(1B), 191-209. [https://doi.org/10.2151/jmsj1965.75.1B\\_191](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.75.1B_191)
- United States Geological Survey (USGS) (2008) Global land cover characteristics data base version 2.0 user guide, US Geological Survey. [http://edc2.usgs.gov/glcc/globdoc2\\_0.php](http://edc2.usgs.gov/glcc/globdoc2_0.php)
- Wang, J., Wang, S., Jiang, J., Ding, A., Zheng, M., Zhao, B., Wong, D.C., Zhou, W., Zheng, G., Wang, L., Pleim, J.E., Hao, J. (2014) Impact of Aerosol-Meteorology Interactions on Fine Particle Pollution during China's Severe Haze Episode in January 2013, *Environmental Research Letters*, 9(9), 094002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/9/094002>
- Wang, L., Xu, J., Yang, J., Zhao, X., Wei, W., Cheng, D., Pan, X., Su, J. (2012) Understanding haze pollution over the southern Hebei area of China using the CMAQ Model, *Atmospheric Environment*, 56, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.04.013>
- Yoo, J.-W., Park, S.-Y., Jeon, W.-B., Kim, D.-H., Lee, H.W., Lee, S.-H., Kim, H.-G. (2017) Effect of Aerosol Feedback on Solar Radiation in the Korean Peninsula Using WRF-CMAQ Two-way Coupled Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(5), 435-444, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.5.435>
- Yu, G.-H., Lee, B.-J., Park, S.-S., Jung, S.-A., Jo, M.-R., Lim, Y.-J., Kim, S.-T. (2019) A Case Study of Severe PM<sub>2.5</sub> Event in the Gwangju Urban Area during February 2014, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 195-213, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.195>
- Zhang, X.Y., Wang, Y.Q., Niu, T., Zhang, X.C., Gong, S.L., Zhang, Y.M., Sun, J.Y. (2012) Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols, *Atmospheric Chemistry & Physics*, 12(2), 779-799. <https://doi.org/10.5194/acp-12-779-2012>

## Authors Information

조성빈 (제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공 석박사통합과정)

송상근 (제주대학교 지구해양과학과 교수)

문수환 (제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공 석사과정)