

ORIGINAL ARTICLE

전지구 대기질 재분석 자료의 평가와 국지규모 미세먼지 예보모델에 미치는 영향

이강열 · 이순환^{1)*} · 김은지²⁾

부산대학교 대기환경과학과, ¹⁾부산대학교 지구과학교육과, ²⁾부산대학교 지구과학과

Assessment of Global Air Quality Reanalysis and Its Impact as Chemical Boundary Conditions for a Local PM Modeling System

Kangyeol Lee, Soon-Hwan Lee^{1)*}, EunJi Kim²⁾

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

¹⁾*Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

²⁾*Department of Earth Science, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

Abstract

The initial and boundary conditions are important factors in regional chemical transport modeling systems. The method of generating the chemical boundary conditions for regional air quality models tends to be different from the dynamically varying boundary conditions in global chemical transport models. In this study, the impact of real time Copernicus atmosphere monitoring service (CAMS) re-analysis data from the modeling atmospheric composition and climate project interim implementation (MACC) on the regional air quality in the Korean Peninsula was carried out using the community multi-scale air quality modeling system (CMAQ). A comparison between conventional global data and CAMS for numerical assessments was also conducted.

Although the horizontal resolution of the CAMS re-analysis data is not higher than the conventionally provided data, the simulated particulate matter (PM) concentrations with boundary conditions for CAMS re-analysis is more reasonable than any other data, and the estimation accuracy over the entire Korean peninsula, including the Seoul and Daegu metropolitan areas, was improved. Although an inland area such as the Daegu metropolitan area often has large uncertainty in PM prediction, the level of improvement in the prediction for the Daegu metropolitan area is higher than in the coastal area of the western part of the Korean peninsula.

Key words : MACC, CAMS, PM, CMAQ, Aerosol, Air quality modeling

1. 서론

미세먼지(PM₁₀)는 지름 10 μm 이하의 입자를 의미하며, 이 중 주로 인위적인 활동으로 배출되는 지름 2.5 μm

이하의 입자를 초미세먼지(PM_{2.5})라고 한다. 초미세먼지는 폐에서 걸러지지 않고 호흡기 내부로 유입되어 인체에 심각한 악영향을 미치기도 한다(US EPA, 1996).

이러한 미세먼지 및 초미세먼지의 대기 중 농도는 해

Received 21 June, 2016; Revised 1 July, 2016;

Accepted 4 July, 2016

*Corresponding author : Soon-Hwan Lee, Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea
Phone: +82-51-510-2706
E-mail : withshlee@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.

마다 증가하고 있는데, 이것은 중국의 경제발전과 밀접한 관련이 있다. 이는 한반도가 지리적 및 기상학적 측면에서 중국의 풍 하측 지역에 있기 때문이다(Yamaji et al., 2012). 최근, 중국의 급속한 경제발전은 석유 및 석탄을 포함하는 화석연료의 사용량을 심하게 증가시켰으며, 이에 따라 미세먼지 배출량도 증가하여 한반도의 미세먼지 고농도 사례가 증가하고 있다(Kim, 2013).

이에 환경부는 초미세먼지에 의한 대국민 피해를 줄이기 위한 노력으로 2013년 8월부터 수도권 지역을 대상으로 PM₁₀ 시범예보 시행 후 11월부터 전국을 대상으로 시범예보를 실시하였고 2014년 2월에는 전국을 대상으로 정식예보를 실시하였으나, 시범예보를 시행한 2013년 8월부터 2014년 2월 21일까지의 전체 예보 정확도는 71.8%로 분석되었다. 그러나 실제 미세먼지 농도가 높았던 날만 따지면 예보 정확도는 33.3%에 불과하였다. 특히, 영남과 강원지역에서의 정확도가 다른 지역에 비해 매우 낮아 예보 정확도 취약 지역의 오보 원인에 대한 집중적인 분석이 필요하다(Koo et al., 2015).

대기질 모델링 시스템의 오차 원인은 대부분 입력자료의 불확실성에서 기인하며, 주로 배출량, 기상, 초기 및 경계 농도자료의 불확실성이 크다(Hanna et al., 1998). 이 중 초기 및 경계 농도자료는 대기질 모델이 수행되지 않는 초기 농도와 도메인 바깥에서 안으로 유입될 수 있는 도메인 경계면의 농도를 의미한다. 이 자료들은 관측값을 사용하는 것이 가장 타당하겠으나 시간-비용적인 측면에서 많은 제약이 따른다.

Berge et al.(2000)은 대기화학모델의 초기 농도자료의 불확실성을 상쇄하기 위해 적당한 시간을 모델링 한 후의 모의결과를 사용하는 것을 제안하였다. 그러나 대기질 확산 모델이 화학 물질의 수송 농도를 예측할 때, 심각한 오류를 유발하는 것은 초기조건이 아니라 경계조건이다(Seinfeld and Pandis, 1997). 최근의 연구에서는 대기 중에 체류 기간이 상대적으로 긴 물질의 대륙 간 장거리수송 모델링에서 경계조건의 정확성이 예측 성능에 결정적인 기여를 하는 것으로 밝혀졌다(Lin et al., 2008).

초기 및 경계자료를 생산하기 위해 과거에는 전 지구 평균값인 고정된 농도를 기후자료에서 추출하여 초기 및 경계농도 자료로 사용하였으나 현재에 들어 기후변화가 심해지고, 인위적인 배출원이 늘어남에 따라 고정된 농

도값을 이용한 경계농도 자료의 불확실성이 크게 증가하였다.

현재, 가장 일반적으로 사용되는 초기 및 경계농도 계산 방법은 기상모델과 같이 대기질 모델의 도메인을 등지 격자구조로 설정하여 상위 도메인에서 하위 도메인으로 경계값을 계산하는 것이다(Byun et al., 2006; Umeda and Martien, 2002). 이 방법은 동아시아 지역 같은 지역규모의 모델링 도메인에서 한반도나 시도를 중심으로 한 국지규모 도메인의 초기 및 경계 농도자료를 추출하는 것으로 지역규모 모델링 도메인은 전 지구 평균값을 사용한다. 이 또한 최초 도메인의 외부에 주요 오염원이 있거나 대기 중에서 체류 기간(lifetime)이 긴 오염물이 배출될 경우 불확실성이 높아지는 단점이 있다.

이러한 도메인의 공간적 제약을 완화 위해 GEOS-Chem (global air chemistry model of Goddard earth observation system)이나 MOZART (model for ozone and related chemical tracers)같은 전구 대기질 수송 모델의 수치모의 결과를 지역규모 모델의 초기 및 경계자료로 활용하기도 하였다(Francis and Sokhi, 2013). 이 중 유럽 기상청의 GMES (global monitoring for environment and security) 그룹에서 관리하는 MACC 전지구 대기질 재분석 자료는 다양한 배출원을 모두 고려하고 매일 수행되므로 지역규모 대기질 수송 모델이 가지는 사-공간적 제약이 없고 대기 중에 오래 체류하는 물질까지 추적할 수 있는 장점이 있어 이를 이용하여 지역규모 모델의 초기 및 경계자료를 계산하여 사용하기도 하였다(Giordano et al., 2015). 전지구 대기질 재분석 자료는 다양한 관측자료를 이용한 4차원 자료동화를 수행하여 배출량을 비롯한 대기질 모델의 불확실성이 다소 완화되었다는 장점도 가지고 있다(Francis and Sokhi, 2013).

환경부에서 운영하는 미세먼지 모델링 시스템의 도메인 구조는 등지격자형이며, 동아시아 영역, 한반도 영역, 각 지역별 세부 권역으로 구성되어 있다(Koo et al., 2015). 동아시아 영역, 한반도 영역의 도메인에서 예측된 미세먼지 농도는 각각 한반도 영역과 세부 권역의 초기 및 경계 농도자료 계산을 위해 사용된다. 그러나 중국에서 고농도 미세먼지가 한반도로 수송되는 날에는 모델링 시스템의 예측 오류가 증가하며 이것은 중국에서 한반도로 유입되는 경계농도의 불확실성이 커짐을 의미

한다.

따라서 본 연구에서는 초기 및 경계 농도자료의 신뢰성을 높이기 위해 유럽에서 생산·관리하는 대기질 재분석자료를 이용하여 초기 및 경계 농도자료로 사용하여 그 영향을 분석하였다. 우선, 한반도의 미세먼지 관측 농도와 비교하여 정확성을 검증하였다. 그리고 중국에서 고농도 미세먼지가 수송되어 한반도에서 고농도 사례가 나타났던 2월 24일과 2월 25일을 중심으로 미세먼지 모델링 시스템을 구축하고, 대기질 재분석 자료를 초기 및 경계자료로 이용하여 미세먼지 농도를 예측해 보았다. 또한, 기존의 지역규모 도메인에서 계산된 초기 및 경계 자료를 이용한 모델링 예측 결과와 비교하여 서로 다른 경계 농도자료가 미세먼지 농도 예측에 미치는 영향을 정량적으로 분석해 보았다.

2. 자료 및 방법

전지구 대기질 재분석 자료를 직접 국지규모 미세먼지 예보 모델에 적용하기 위하여, 재분석 자료를 대기질 모델의 초기 및 경계자료로 이용하여 수치모의 하였다. 이미, 지역규모 모델링에 적용하여 긍정적인 평가를 받은 선행 연구사례가 있고(Giordano et al., 2015), 대기질 재분석 자료는 자료동화를 통하여 수평 격자 0.125°

× 0.125° 까지 상세화되어 있으므로 본 연구에서는 국지 규모 대기질 모델 시스템에 초기 및 경계 자료로 적용하여 그 영향을 평가하였다. 이후, 일반적으로 이루어지는 동지격자형 모델링 시스템을 이용한 수치모의와 비교하여 개선효과를 검증하였다.

2.1. CAMS 재분석 자료

CAMS는 2003년부터 2012년까지 진행된 유럽 기상센터의 MACC-II의 후속 프로그램으로 MACC 사업을 통해 구축된 전 지구 대기질 모델링 시스템에 지상 및 연직 대기질 관측, 항공기 관측, 위성 관측 등의 자료를 수집하고, 4차원 자료동화 기법을 통해 대기질 모델링 시스템의 불확실성을 줄이고자 시작된 사업이다.

MACC 사업은 전지구 대기질 모델링 시스템을 구축 개선하고, 이를 통해 예측된 대기질 자료를 축적함으로써 대기질 서비스, 대기조성 및 기후연구, UV 복사 및 태양광 연구에 필요한 자료를 축적하는 데 목적이 있다. MACC 사업에 이용된 기상자료는 유럽 기상센터에서 제공하고 있는 ECMWF (the European centre for medium-range weather forecast) Interim 재분석자료를 이용하고 있으며, 대기질 모델은 NCEP (national centers for environmental prediction)에서 개발한 MOZART를 적용하였다(Inness et al., 2012), IFS-MOZART (integrated

Table 1. Main features of the MACC modeling system

| MACC | Details |
|-------------------------|---|
| Meteorology | ECMWF Interim |
| Horizontal resolution | T255(85 km) |
| Vertical resolution | Hybrid sigma-pressure coordinate, 60 levels |
| Gas phase chemistry | MOZART-3 chemistry(Kinnison et al., 2007) Isoprene chemistry as in Pfister et al.(2008) |
| Heterogeneous chemistry | on stratospheric clouds(Kinnison et al., 2007) SO _x /NH ₃ /NH ₄ /DMS chemistry from MOZART-4(Emmons et al., 2010) |
| Dry deposition | Resistance approach(Wesely, 1989) |
| Wet deposition | Rainout and washout(Horowitz et al., 2003) |
| Anthropogenic emissions | MACCItty(Granier et al., 2011) |
| Biogenic emissions | MEGAN-v2(Guenther et al., 2006) |
| Fire emissions | GFAS v1.0(Kaiser et al., 2012) |
| Lightning emissions | Cloud top height parameterization(Price and Rind, 1992; Price et al., 1997) |

forecast system-MOZART) 모델에 대한 세부사항은 Table 1과 같다.

배출량은 전지구 배출량으로 개발된 여러 가지 배출량을 수집·개선하여 자체적으로 업그레이드 하고 있는 MACCity (MACC/cityzen EU project) 배출량을 사용하며, 배출량의 수평 해상도는 1° × 1°로 구성되어 있다 (Granier et al., 2011). 식생 배출량은 MEGAN (model of emissions of gases and aerosols from nature) 모델을 사용하며, 산불 등에 의한 배출량과 번개 발생에 의한 배출량도 산정하여 관리하고 있다.

CAMS 재분석 자료는 연직구조가 60개의 sigma 좌표로 구성된 자료와 이를 이용하여 25개 등압면으로 재구성된 자료, 그리고 지상 자료로 구성되어 있으며 O₃, SO_x, NO_x, HCHO(포름알데히드), 에어로졸 등의 농도 자료와 각 오염물의 AOD (aerosol optical depth) 자료를 포함하고 있다. 에어로졸은 해양입자, 먼지, 2차 생성물 등을 직경별로 나누어 농도를 저장해 놓았다. 그리고 자료동화를 실시한 재분석 자료의 경우, 매일 6시간마다 저장되어 있고 자료동화를 실시한 매일 0000UTC를 기준으로 120시간(5일)을 예측하는 예보장은 3시간 간격으로 저장되어 있다.

2.2. 미세먼지 예보 시스템

본 연구에서 이용한 미세먼지 예보 시스템은 환경부에서 운영하는 예보 시스템과 유사한 구조로 설계하였으며,

기상모델은 WRF (weather research and forecasting), 대기질 모델은 CMAQ을 각각 사용하였다.

기상모델인 WRF 수치모델의 모의 영역은 Fig. 1과 같다. 한반도를 중심으로 최종 도메인 2는 3 km의 수평 해상도를 가지며, 연직 층은 총 33개 층으로 구성된다. 연구에 적용된 물리 옵션은 Table 2에 제시하였다. 기상 모델의 초기자료 및 경계자료는 공간 해상도 1°×1°, 6시간의 시간 해상도를 가진 FNL (final) 재분석자료를 사용하였으며, 경계조건에서 발생하는 오차를 줄이기 위해 2개의 도메인을 설정하여 동지 격자 구조를 설정하였다.

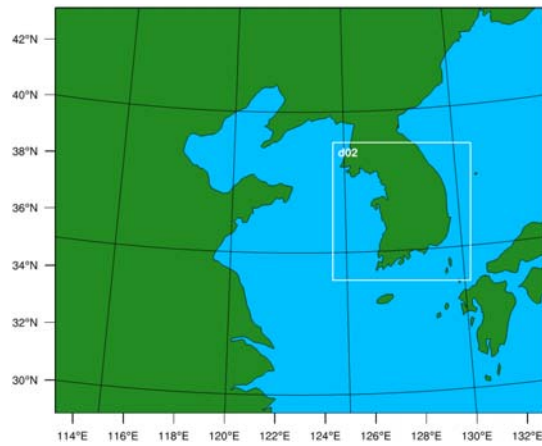


Fig. 1. Model domains for WRF simulations in this study.

Table 2. Configuration of WRF simulation

| | D1 | D2 |
|------------------|---|---------|
| Horizontal grid | 211x175 | 178x178 |
| Resolution | 9 km | 3 km |
| Vertical layers | 33 Layers | |
| | WRF Single-Moment3-class scheme | |
| | RRTM scheme | |
| Physical process | Dudhia scheme | |
| | Noah Land Surface Model | |
| | Mellor-Yamada-Janjic scheme | |
| Initial data | NCEP FNL Operational Global Analysis data | |
| Time period | 2014.01.12. 0000UTC ~ 2014.01.19. 0000UTC | |

Table 3. Configuration of CMAQ model for PM concentration assessment

| | C1 | C2 |
|--------------------|---|---------|
| Horizontal grid | 201x165 | 168x168 |
| Resolution | 9 km | 3 km |
| Vertical layers | 33 Layers | |
| Chemical mechanism | SAPRC99, Aero5 | |
| Chemical solver | ROS3 | |
| Emission data | INTEX-B | CAPSS |
| Met. Input | D01 | D02 |
| Time period | 2014.01.12. 0000UTC ~ 2014.01.09. 0000UTC | |

더욱 정밀한 수치모의 결과를 얻기 위하여 지형자료는 고해상도 지형인 shuttle radar topography mission (SRTM) 3초 자료와 환경부에서 제공하는 중분류 토지 피복도 3초 자료를 사용하였으며, 초기장 자료동화 (analysis nudging) 방법을 통해 기상장 수치모의 결과의 정확도를 높여 오염물질의 이류 및 화학반응에 있어 기상장에서 생기는 오차를 줄이고자 하였다.

3차원 오일리리안 광화학 모델 CMAQ(Byun et al., 2006) 역시 Fig. 1과 같이 동지격자 구조로 모델링 수행하였다. 기상 입력자료는 도메인 경계지역의 불확실성을

제거하기 위하여 WRF 도메인에서 동서남북 방향으로 마지막 5개의 격자를 제외하고 사용하였으며, WRF와 마찬가지로 동아시아 영역에서 한반도 영역까지 동지 격자 구조로 설정하였다. 초기농도자료의 불확실성을 충분히 상쇄하기 위하여 WRF와 CMAQ 모델링 사례일의 3일 전부터 수치모의를 수행하였다(Umeda and Mariten, 2002). 화학메커니즘은 SAPRC99(state-wide air pollution research center version 1999, Carter, 2000)를, 에어로졸 반응 메커니즘은 Aero4(aerosol reaction module of CMAQ version 4)를 각각 사용하였다. 수평과 연직 격

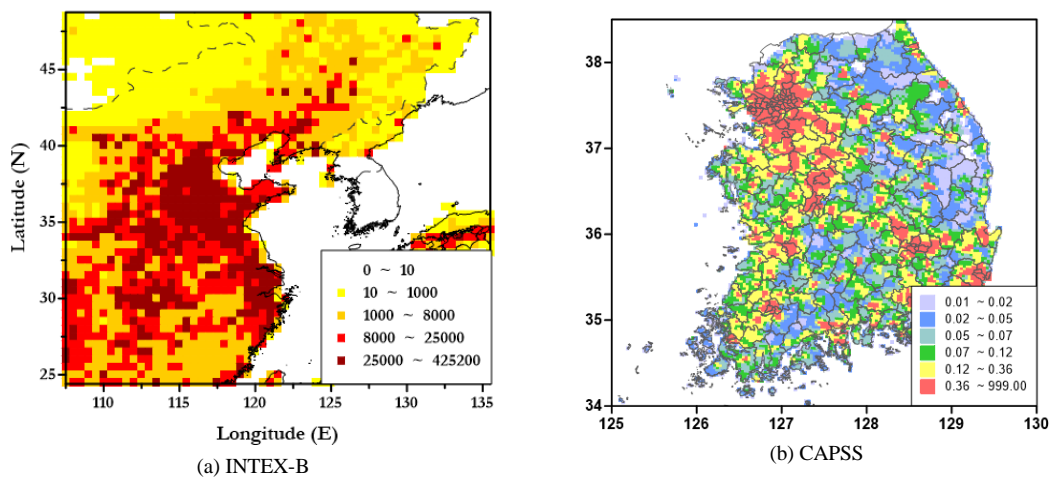


Fig. 2. Distribution of emission inventories at a) East Asian (INTEX-B, kg/year) and b) Korea (CAPSS 2010, g/s) emissions.

Table 4. Experiment design for different initial and boundary conditions

| | BASE | CAMS |
|--------------------------------|---|----------------------------|
| Initial and boundary condition | from D02 Domain | from CAMS Re-analysis Data |
| Met. Input | D02 | D02 |
| Time period | 2014.02.20. 0000UTC ~ 2014.02.27. 0000UTC | |

자구조 및 CMAQ 수치모의의 제반 사항은 Table 2에 제시하였다.

CMAQ에 사용될 배출량은 배출량 산정 모델인 SMOKE (sparse matrix operator kernel emissions) 모델을 통해 산출하였으며, 중국 및 북한지역은 2006년을 기준으로 산정된 INTEX-B (intercontinental chemical transport experiment - phase b) 배출량(Zhang et al., 2009)을 사용하였다. 남한지역 배출 통계 자료는 국립환경과학원에서 관리하고 2010년을 기준으로 산정된 CAPSS (clean air policy support system) 배출량을 기본 자료로 이용하여 산출하였다(Fig. 2).

2.3. 수치실험 설계

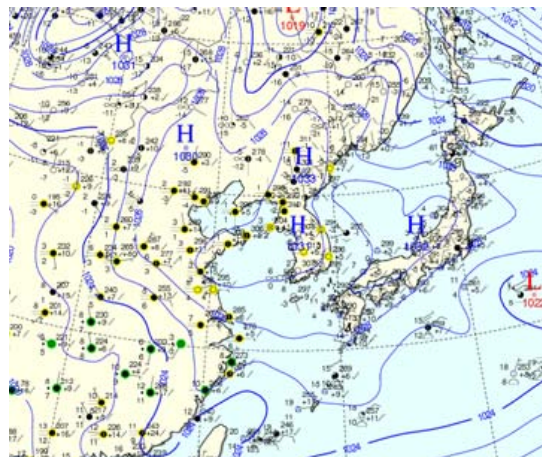
우선, 미세먼지 예보 시스템을 이용하여 미세먼지 농도를 수치모의 하였다. 동지 격자 구조로서 상위 도메인의 경계자료는 전지구 평균 프로파일을 사용하였다. 수치모의 사례는 하위 도메인에서 사용한 초기 및 경계자

료의 종류로 분류할 수 있다. BASE case에서는 상위 도메인에서 계산된 농도값을 그대로 사용하였으며 CAMS case는 CAMS 전지구 대기질 재분석 자료를 사용하였다.

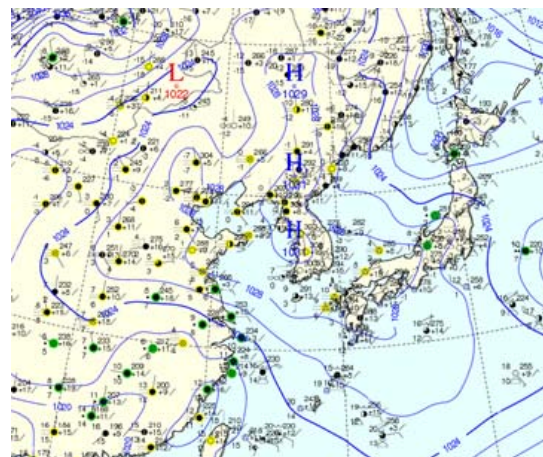
전구 자료를 지역규모 모델링 도메인을 거치지 않고 바로 국지 규모의 경계 자료로 사용한 것은 서풍이 지배적이었던 사례일의 환경에서 중국에서 수송되는 미세먼지의 오염원이 한반도에서 비교적 멀리 떨어져 있어 크게 확산될 것으로 추정되기 때문이다. 또한, 미세먼지 예측 시스템에서 사용한 중국 배출량과 CAMS 재분석 자료 생산을 위해 사용된 중국지역 배출량의 수평 해상도가 모두 1°이므로 비슷한 해상도를 가지고 있을 것으로 판단하였다.

2.4. 연구 사례일

수치모의는 2014년 2월 20일에서 2월 27일까지 수행하였으며, 이 중 가장 미세먼지 농도가 높았던 2014년



(a) 0000UTC on 24 February 2014



(b) 0000UTC on 25 February 2014

Fig. 3. Surface weather map at 0000UTC on a) 24 and b) 25 February 2014.

This charts are provided by KMA (korea meteorological administrator).

2월 25일은 몇몇 곳에서 미세먼지의 농도가 한 시간 평균 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 가깝거나 초과하였던 날로 2014년 한 해 동안 가장 높은 미세먼지 농도가 나타난 날이었다. 한반도에는 정체성 고기압이 자리 잡고 있는 상황이며, 주변의 중관강제력의 영향력이 약화되는 사례로 판단된다. 이러한 고기압의 영향으로 인해 전체적으로 날씨가 맑고 바람이 약해, 중관강제력이 강했던 날 한반도로 수송된 미세먼지가 오랫동안 한반도에 영향을 미치게 되었다 (Fig. 3).

3. 결과 및 고찰

3.1. CAMS 재분석 자료 평가

우선 CMAS 재분석 자료를 평가하기 위해, 재분석 자료에서 서울지역의 미세먼지 농도값을 추출하여 서울지역 6개소 대기질 자동 측정망에서 관측된 미세먼지 농도와 직접 비교해 보았다.

Fig. 5에는 Fig. 4에 제시된 서울시내 6개 측정망에서 관측된 PM_{10} 농도와 CAMS 재분석 자료에서 추출한 서울 지역 PM_{10} 농도를 함께 나타낸 것이다. 비교에 사용된 서울시내 6개 관측소는 각각 중구 서소문동(111121), 은평구 불광동(111181), 동작구 사당동(111241), 강남구 대치동(111261), 강동구 천호동(111274), 양천구 신정동(111301)이다. 21일부터 26일까지 매일 서울시 모든 지역의 미세먼지 1시간 평균 농도가 기준치를 초과하는

극심한 고농도 사례가 나타나고 있으며, 비교적 서울 남쪽에 위치한 사당동과 천호동에서 더 높은 농도가 나타나고 있다. 재분석 자료의 미세먼지 농도는 3시간 간격으로 나타내었으며 재분석 자료 사이에 예보장을 섞어서 나타내었다.

21일 0000LST 주변, 23일 0000LST 주변에 재분석 자료가 미세먼지 농도를 크게 과대평가하고 있으며 대체적으로 주로 야간에 과대평가하고 있다. 그러나 대체적으로 관측값과 잘 일치하고 있으며 농도의 경향도 관측값에 잘 따르고 있었다.

농도의 변화(기울기)는 오히려 관측값보다 더 가파른 경향을 띠고 있고 전체적으로 농도를 과대평가하고 있는 것은 중국에서 고농도 미세먼지가 이루어지고 있기 때문에 판단되며 좀 더 자세하고 장기적인 분석이 필요할 것으로 사료된다.

3.2. 기상 모델링 결과 검증

대기질 모델의 입력 자료로 사용될 WRF 모델을 통한 기상 수치모델의 결과를 통계적인 기법으로 평가해 보았다. 평가 지점은 중국에서의 수송되는 고농도 미세먼지의 영향을 직접적으로 받는 서울지역과 북서풍이 주를 이루고 있을 때, 국내에서 배출된 미세먼지 농도의 영향이 비교적 더 많이 미치는 대구지역을 선정하여 비교해 보았다. Table 5에는 관측값과 모델값을 비교하여 산출한 통계지수를, Fig. 6에는 통계지수 산출에 사용된 자료를 시계열로 나타내었다.

서울지역에서는 해안에서 불어 들어가는 바람과 육지에서 해안으로 부는 바람 두 방향이 지배적인 가운데 전체적으로 북풍계열이 우세하다. 이러한 단순한 바람 패턴으로 서울지역 풍속의 통계지수는 MB (mean bias)가 -0.12 m/s , RMSE (root mean square error)가 0.93 m/s , IOA (index of agreement)가 0.8 로 매우 잘 일치하고 있다.

대구지역에서도 풍향, 풍속에 비교적 단순하여 잘 일치하고 있지만, 풍속의 경우 26일에 크게 과대모의하여 예측 지수가 크게 떨어진 것으로 사료된다. 그러나 23일에서 25일에는 매우 잘 일치하고 있다.

기온의 경우에는 일변화 패턴과 최대/최소 기온이 나타나는 시간이 매우 잘 일치하고 있으나 대구의 경우 서울보다 최대 기온을 과소평가하고 최소 기온을 과대평가

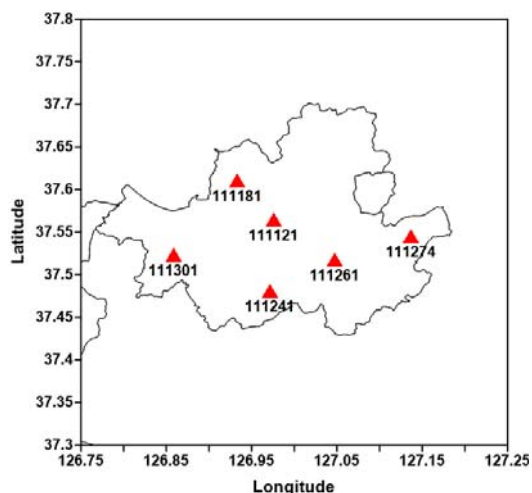


Fig. 4. Distribution of PM observation station.

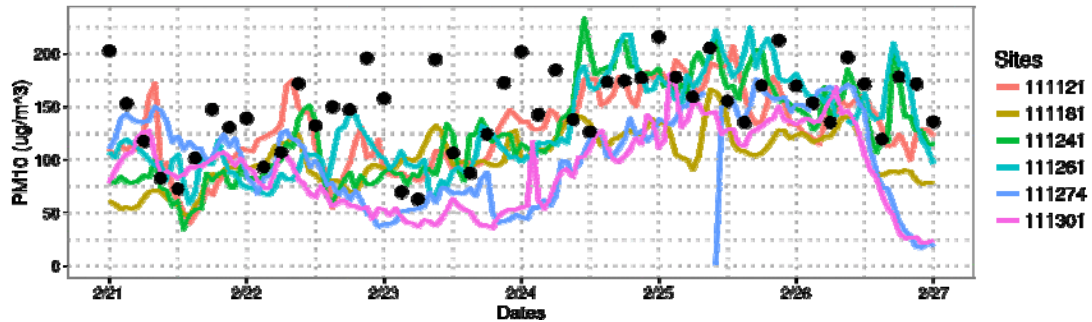


Fig. 5. Diurnal variation of PM concentration of CAMS reanalysis data(black dotted) and air quality observation stations (Fig. 4).

Table 5. Statistics of estimated surface temperature, wind speeds, for episode period

| | Seoul | | | Daegu | | |
|------------------|-------|------|------|-------|------|------|
| | MB | RMSE | IOA | MB | RMSE | IOA |
| Temperature (°C) | 0.42 | 2.13 | 0.82 | 0.31 | 3.39 | 0.77 |
| Wind speed (m/s) | -0.12 | 0.93 | 0.80 | -1.56 | 2.19 | 0.50 |

하는 결과를 나타냈다. 그러나 전체적인 통계지수는 IOA가 서울은 0.82, 대구는 0.77을 나타내어 전체적으로 신뢰성 높은 결과가 나타났다.

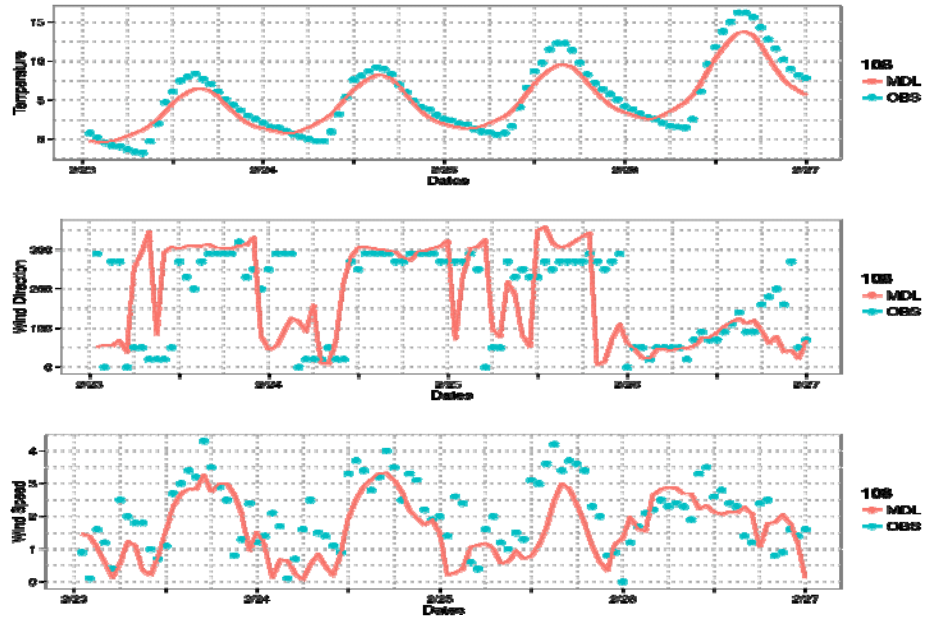
3.3. 재분석 자료와 동아시아 영역의 미세먼지 농도 예측

Fig. 7에는 한반도를 중심으로 한 세부 도메인의 초기 및 경계 자료로 활용될 CAMS 재분석 자료(왼쪽)와 동아시아 영역(d02, 오른쪽)의 모델링 예측 결과를 비교하여 나타내었다. 모델링 결과와 비교하면 재분석 자료에서 한반도에 이루어 하는 미세먼지가 매우 많은 것으로 나타났다. 전체적으로는 서해에 고기압 중심이 위치해 그 영향으로 중국에서부터 시계방향으로 미세먼지가 이루어 오고 있는 모습이 비슷하게 묘사되었다.

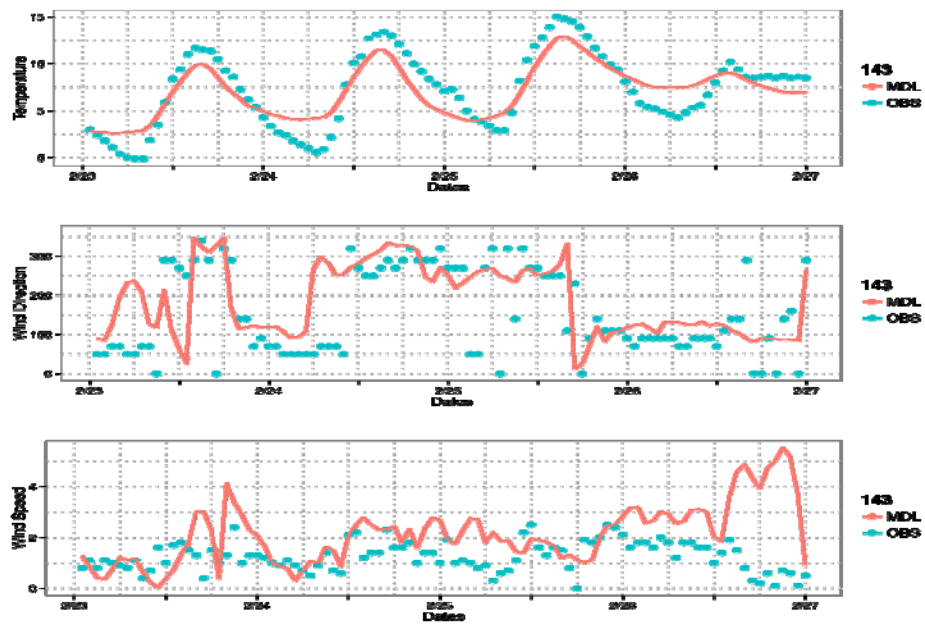
두 도메인의 농도분포가 크게 차이가 나는 것은 여러 가지 원인으로 해석할 수 있는데 CAMS 재분석 자료의 경우에는 모델링과 비교하여 도메인 밖에서 배출되는 배출원의 영향을 고려해 줄 수 있고, 이를 전부터 수치모의를 수행한 모델링 사례와 달리 그 전에 배출되어 축적된 농도까지 고려해 줄 수 있기 때문인 것으로 사료된다. 이것은 동해안 지역에 모델링에는 없는 높은 등농도 곡선

이 재분석 자료에 나타나게 된 주요 원인으로 사료된다. 또한, 재분석 자료에서는 모델링 시스템이 표현할 수 없는 황사나 부유분진을 고려할 수 있고 산불까지 현실화되어 있어 보다 많은 배출량이 산정되어 있는 것도 원인으로 들 수 있다. 마지막으로 고정 관측소가 없는 곳까지 위성 자료동화를 통하여 농도를 보정하였던 결과로 판단된다.

이러한 동아시아 영역의 농도 패턴을 경계 자료로 하여 BASE case와 CAMS case를 각각 수행하였을 때, 경계 자료의 영향으로 많은 농도 차이가 나타났다(Fig. 8). 그러나 동아시아 영역에 비해서 큰 농도 차이가 나타나지 않는데 이것은 대기질 모델링이 상위 도메인에서 경계 농도값을 받아 올 때, 수평 해상도의 차이에 의해서 강제적으로 농도가 확산되는 경향이 있기 때문이다. 그리고 상위 도메인과 하위 도메인의 바람장에 차이가 있어 경계 농도값으로 설정한 농도가 하위 도메인 내부로 유입되지 않을 경우도 있기 때문이다. 그럼에도 불구하고 등농도 곡선의 차이가 크며 CAMS case에서 BASE case에 비해 동해안이나 영남 지역에 까지 고농도 미세먼지가 이루어진 것으로 나타났다.



(a) Seoul



(b) Daegu

Fig. 6. Diurnal variation of observed and simulated temperatures, wind directions, and wind speeds at Seoul and Daegu.

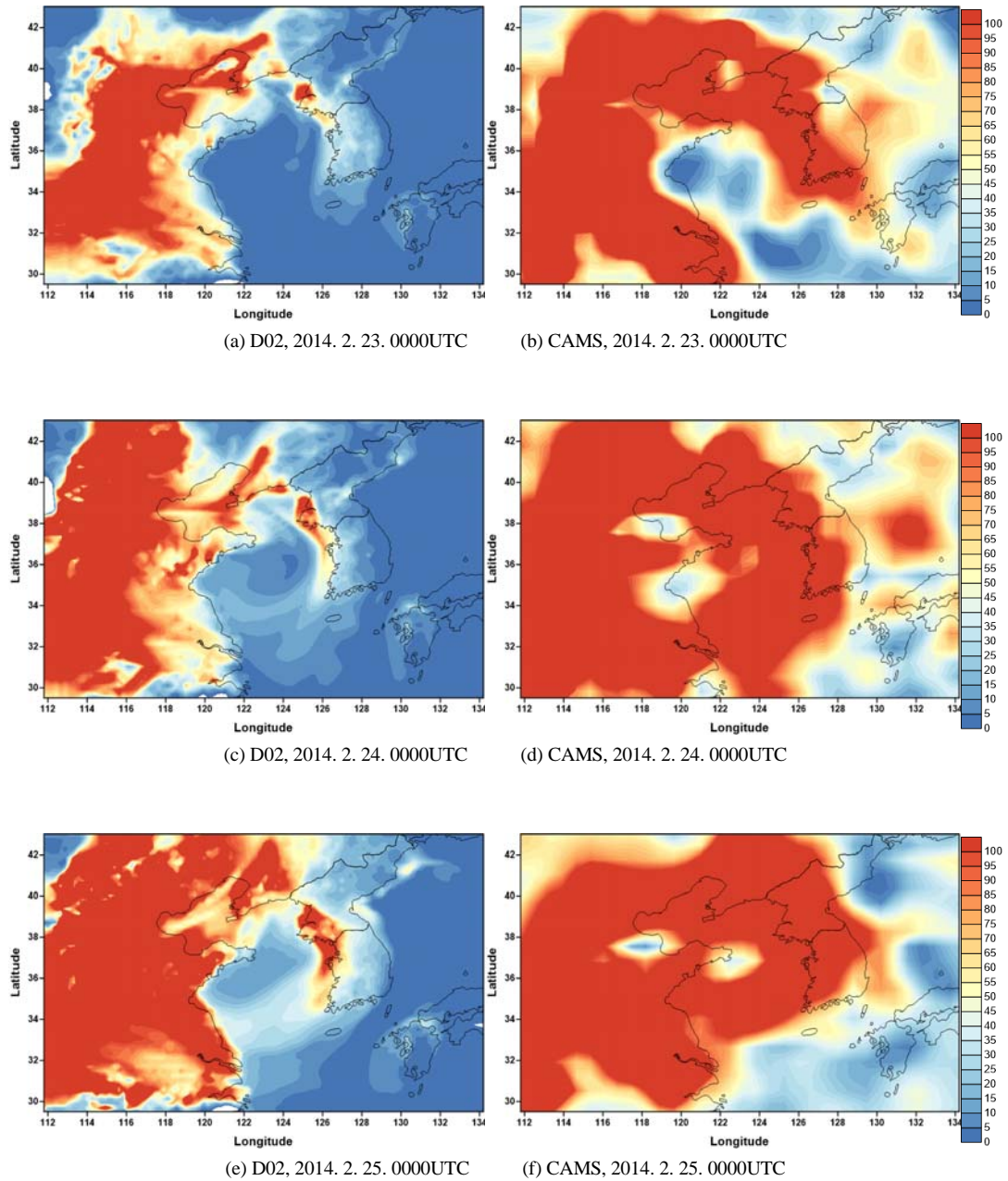


Fig. 7. Simulated surface PM concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) at 2104. 2. 23. 0000UTC a) d02 b) CAMS, 2014. 2. 24. 0000UTC c) d02 d) CAMS and 2014. 2. 25. 0000UTC e) d02 f) CAMS.

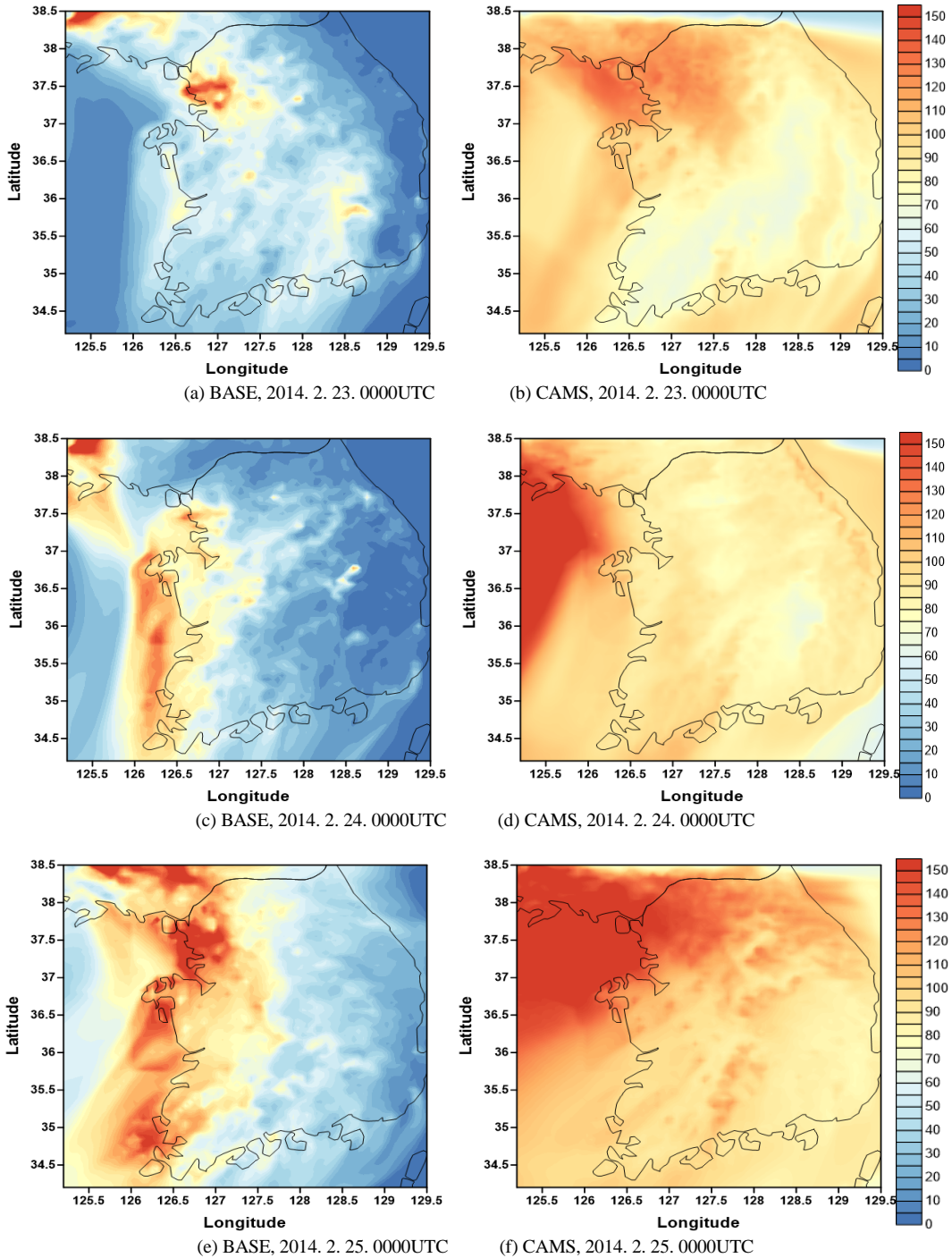


Fig. 8. Simulated surface PM concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) at 2104. 2. 23. 0000UTC a) BASE b) CAMS, 2014. 2. 24. 0000UTC c) BASE d) CAMS and 2014. 2. 25. 0000UTC e) BASE f) CAMS.

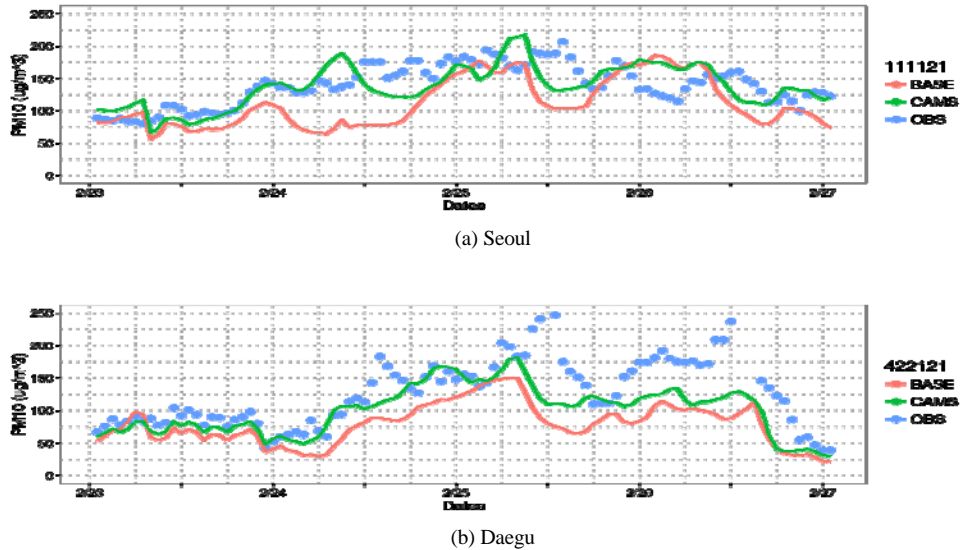


Fig. 9. Diurnal variation of observed and simulated PM₁₀ concentration, at Seoul and Daegu.

Table 6. Statistics of estimated surface PM₁₀ concentrations for episode period

| | Seoul | | | Daegu | | |
|------|--------|-------|------|--------|-------|------|
| | MB | RMSE | IOA | MB | RMSE | IOA |
| BASE | -18.22 | 36.35 | 0.51 | -42.76 | 58.05 | 0.53 |
| CAMS | 4.16 | 21.19 | 0.63 | -18.26 | 24.81 | 0.64 |

이런 경향은 서울지역과 대구지역의 미세먼지 시계열에서 잘 나타났다(Fig. 9). 서울보다 대구에서 좀 더 많은 미세먼지 농도 개선 효과가 있는 것을 확인할 수 있다. 모델값과 관측값에 의한 통계지수를 살펴보면(Fig. 10), 서울의 경우에는 MB 값이 $-18.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $4.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 크게 상승하였으며, RMSE도 $36.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $21.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 개선이 이루어졌다. IOA는 0.51에서 0.63으로 역시 크게 상승되었다. 대구 지역의 농도 개선은 더 크게 이루어져 MB와 RMSE가 동시에 대략 24% 정도의 오차가 감소하였고, IOA도 상승하여 0.64를 기록하였다.

본 연구에서는 국지규모의 대기질 모델링 시스템에 CAMS 재분석 자료를 경계자료로 이용하여 대기질 예측 성능을 개선시킬 수 있었다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 지역규모 및 국지규모 대기질 모델이 가지는 공간

적, 시간적 한계를 가지지 않는 자료를 사용하였기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결론

MACC-II 사업에서 구축된 IFS-MOZART 전구 대기질 모형은 미세먼지 뿐 아니라 오존, 이황산가스, 탄소, 포름알데히드, 질산화합물 등 주요 대기질 이슈가 되는 물질과 기후변화를 추적할 수 있고 태양 복사에 영향을 주는 여러 가지 물질들을 모의하여 자료동화를 통한 재분석 자료로 제공하고 있다. 이 모델은 산불과 번개 같은 다양한 배출량을 포함하고 있고 도메인 경계가 무한하며 매일 계속해서 수행되므로, 지역 및 국지규모 모델에 비해 시-공간적 제약이 없다는 장점이 있다.

서울지역의 6개소의 대기질 자동 측정망에서 관측된

미세먼지 농도와 CAMS 재분석 자료에서 추출한 미세먼지 농도는 다소 차이가 있고 재분석 자료가 서울의 미세먼지 농도를 과대평가 하고 있었으나 비교적 잘 일치하고 있었고 관측값과 유사한 패턴을 가지고 있어 신뢰할 수 있는 수준의 자료로 평가되었다.

CAMS 재분석 자료를 이용하여 계산된 초기 및 경계 자료를 한반도 미세먼지 모델링에 적용할 경우, 서울의 경우에는 MB 값이 $-18.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $4.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 크게 상승하였으며 RMSE도 $36.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $21.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 개선되는 것을 확인하였다. 따라서 이 자료를 지역규모 및 국지구모 대기질 모델의 초기 및 경계자료로 이용한다면 모델링의 예측 성능을 비교적 용이하게 개선시킬 수 있을 것이라 기대한다.

향후, 대기질 모델의 초기 및 경계자료로서, 그리고 동아시아 영역의 대기질 분석자료로서 CAMS 재분석 자료를 활용하고 신뢰성과 불확실성을 면밀하게 검토하기 위해서는 장기적으로 축적된 재분석 자료와 모델링 자료의 비교가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 “화학 사고 대응 환경기술개발 사업”의 지원으로 이루어졌습니다(No. 2015001950002).

REFERENCES

- Berge, E., Ho-Chun, H., Julius, C., Tsun-Hsien, L., 2000, A study of the importance of initial conditions for photochemical oxidant modelling, *J. Geophys. Res.*, 106(D1), 1347-1364.
- Byun, D. W., Schere, K. L., 2006, Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models 3 community multiscale air quality (CMAQ) modeling system, *Appl. Mech. Rev.*, 59(2), 51-77.
- Carter, W. P. L., 2000, Documentation of the SAPRC 99 chemical mechanism for VOC reactivity assessment, Final Report to the California Air Resources Board, Contracts No. 92 329 and No. 95 308.
- Emmons, L. K., Walters, S., Hess, P. G., Lamarque, J.-F., Pfister, G. G., Fillmore, D., Granier, C., Guenther, A., Kinnison, D., Laepple, T., Orlando, J., Tie, X., Tyndall, G., Wiedinmyer, C., Baughcum, S. L., Kloster, S., 2010, Description and evaluation of the model for ozone and related chemical tracers, version 4 (MOZART-4), *Geosci. Model Dev.*, 3, 43-67.
- Granier, C., Bessagnet, B., Bond, T., D'Angiola, A., Denier van der Gon, H., Frost, G. J., Heil, A., Kaiser, J. W., Kinne, S., Klimont, Z., Kloster, S., Lamarque, J.-F., Liousse, C., Masui, T., Meleux, F., Mieville, A., Ohara, R., Raut, J.-C., Riahi, K., Schultz, M. G., Smith, S. G., Thompson, A., van Aardenne, J., van der Werf, G. R., van Vuuren, D. P., 2011, Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980 - 2010 period, *Clim. Change*, 109, 163-190.
- 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), *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3181-3210.
- Hanna, S. R., Lu, Z., Frey, H. C., Wheeler, N., Vukovich, J., Arunachalam, S., Fernau, M., Hansen, D. A., 2001, Uncertainties in predicted ozone concentrations due to input uncertainties for the UAM-V photochemical grid model applied to the July 1995 OTAG domain, *Atmos. Environ.*, 35, 891-903.
- Horowitz, L. W., Walters, S., Mauzerall, D. L., Emmons, L. K., Rasch, P. J., Granier, C., Tie, X., Lamarque, J.-F., Schultz, M. G., Tyndall, G. S., Orlando, J. J., Brasseur, G. P., 2003, A global simulation of tropospheric ozone and related tracers: Description and evaluation of MOZART, version 2, *J. Geophys. Res.*, 108(D24), 4784.
- Kaiser, J. W., Heil, A., Andreae, M. O., Benedetti, A., Chubarova, N., Jones, L., Morcrette, J.-J., Razinger, M., Schultz, M. G., Suttie, M., van der Werf, G. R., 2012, Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power, *Biogeosciences*, 9, 527-554.
- Kim, D. Y., 2013, Causes and measures of fine dust that threaten the health, *Gyeonggi Research Institute Issue & Anal.*, 121.
- Kim, J. S., Jung, D. I., Hong, J. H., Kim, J. Y., Ban, S. J., Park, S. N., Lee, Y. M., Choi, E. G., 2006, Development of modeling input system for air quality assessment in Seoul metropolitan areas, National

- Institute of Environ. Res.
- Kinnison, D. E., Brasseur, G. P., Walters, S., Garcia, R. R., Marsh, D. R., Sassi, F., Harvey, V. L., Randall, C. E., Emmons, L., Lamarque, J. F., Hess, P., Orlando, J. J., Tie, X. X., Randel, W., Pan, L. L., Gettelman, A., Granier, C., Diehl, T., Niemeier, U., Simmons, A. J., 2007, Sensitivity of chemical tracers to meteorological parameters in the MOZART-3 Chemical Transport Model, *J. Geophys. Res.*, 112, D03303.
- Lin, J. T., Wuebbles, D. J., Liang, X. Z., 2008, Effects of interconti-nental transport on surface ozone over the United States: Present and future assessment with a global model, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L02805.
- Martien, P. T., Harley, R. A., Gauci, D. G., 2006, Adjoint sensitivity analysis for a three-dimensional photochemical model: Implementation and method comparison, *Environ. Sci. & Tech.*, 40(8), 2663-2670.
- Napelenok, S. L., Cohan, D. S., Hu, Y., Russell, A. G., 2006, Decoupled direct 3D sensitivity analysis for particulate matter (DDM-3D/PM), *Atmos. Environ.*, 40, 6112-6121.
- Pfister, G., Emmons, L. K., Hess, P. G., Lamarque, J. F., Walters, S., Guenther, A., Palmer, P. I., Lawrence, P., 2008, Contribution of isoprene to chemical budgets: A model tracer study with the NCAR CTM MOZART-4, *J. Geophys. Res.*, 113, D05308.
- Price, C., Rind, D., 1992, What determines the cloud-to-ground fraction of lightning in thunderstorms, *Geophys. Res. Lett.*, 20, 463-466.
- Price, C., Penner, J., Prather, M., 1997, NO_x from lightning 1. global distribution based on lightning physics, *J. Geophys. Res.*, 102, 5929-5941.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 1997, *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*, Wiley-Interscience, New York, 1203-1239.
- Umeda, T., Martien, P. T., 2002, Evaluation of a data assimilation technique for a mesoscale meteorological model used for air quality modeling, *J. Appl. Meteor.*, 41, 12-29.
- Yamaji, K., Uno, I., Irie, H., 2012, Investigating the response of East Asian ozone to Chinese emission changes using a linear approach, *Atmos. Environ.*, 55, 475-482.
- Wesely, M. L., 1989, Parameterization of surface resistance to gaseous dry deposition in regional numerical models, *Atmos. Environ.*, 16, 1293-1304.
- Zhang, Q., Streets, D. G., Carmichael, G. R., He, K. B., Huo, H., Kannari, A., Klimont, Z., Park, I. S., Reddy, S., Fu, J. S., Chen, D., Duan, L., Lei, Y., Wang, L. T., Yao, Z. L., 2009, Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmos. Chem. and Phys.*, 9, 5131-5153.