

초기조건과 배출량이 자료동화를 사용하는 미세먼지 예보에 미치는 영향 분석

An Analysis on Effects of the Initial Condition and Emission on PM₁₀ Forecasting with Data Assimilation

박윤서·장임석¹⁾·조석연*

인하대학교 환경공학과, ¹⁾국립환경과학원 기후대기연구부

(2015년 6월 29일 접수, 2015년 10월 4일 수정, 2015년 10월 5일 채택)

Yun-Seo Park, Im-suk Jang¹⁾ and Seog-yeon Cho*

Department of Environmental Engineering, Inha University

¹⁾*Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research*

(Received 29 June 2015, revised 4 October 2015, accepted 5 October 2015)

Abstract

Numerical air quality forecasting suffers from the large uncertainties of input data including emissions, boundary conditions, earth surface properties. Data assimilation has been widely used in the field of weather forecasting as a way to reduce the forecasting errors stemming from the uncertainties of input data. The present study aims at evaluating the effect of input data on the air quality forecasting results in Korea when data assimilation was invoked to generate the initial concentrations. The forecasting time was set to 36 hour and the emissions and initial conditions were chosen as tested input parameters. The air quality forecast model for Korea consisting of WRF and CMAQ was implemented for the test and the chosen test period ranged from November 2nd to December 1st of 2014. Halving the emission in China reduces the forecasted peak value of PM₁₀ and SO₂ in Seoul as much as 30% and 35% respectively due to the transport from China for the no-data assimilation case. As data assimilation was applied, halving the emissions in China has a negligible effect on air pollutant concentrations including PM₁₀ and SO₂ in Seoul. The emissions in Korea still maintain an effect on the forecasted air pollutant concentrations even after the data assimilation is applied. These emission sensitivity tests along with the initial condition sensitivity tests demonstrated that initial concentrations generated by data assimilation using field observation may minimize propagation of errors due to emission uncertainties in China. And the initial concentrations in China is more important than those in Korea for long-range transported air pollutants such as PM₁₀ and SO₂. And accurate estimation of the emissions in Korea are still necessary for further improvement of air quality forecasting in Korea even after the data assimilation is applied.

Key words : Data assimilation, Initial condition, Emission, Air quality forecasting

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-860-7506, E-mail : sycho@inha.ac.kr

1. 서 론

2000년대에 들어서 대기오염물질이 인체에 미치는 영향에 관심을 가지면서, 비발암성 물질에 대해서는 단기 고농도가 주요 대기오염 관리 대상으로 부상하였다. 그래서 미국에서는 SO_2 , NO_2 , PM_{10} 의 장기 대기환경기준을 폐지하고, 단기 대기환경기준만을 관리지표로 하고 있다(US EPA, 2015).

미국과 유럽 등은 단기 대기환경기준을 달성하지 못하는 경우에 대기오염 민감군에게 필요한 정보를 제공하려는 목적으로 대기질 예보를 하여오고 있다(Monache and Stull, 2003; US EPA, 1999). 우리나라는 1990년대 말부터 일부 지방자치단체에서 오존예보를 실시하였으며, 국가차원에서 미세먼지 예보를 2014년 2월부터 시행하고 있으며 2015년 5월에는 초미세먼지와 오존으로 예보대상물질을 확대하였다.

대기질 예보는 1960년대에 미국에서 시작되었다. 1990년대까지는 통계모형이 주종을 이루었으며, 근래에 들어서는 종합 대기질 모형을 이용한 대기질 예보가 시도되고 있다(Koo *et al.*, 2012; Zhang, 2012; Stajner *et al.*, 2011).

종합 대기질 모형은 대기오염물질의 배출/이동/광화학반응/침착을 모사하는 모형으로써, 대기오염물질의 증장거리 이동, 배출량의 기여도 산정, 증장기 대기질 평가 등에 사용되어 왔다(Kim and Cho, 2003). 최근의 전산기술의 발전은 상세 격자 종합대기질 모형의 실시간 모사를 가능하게 하였다. 종합대기질 모형을 이용한 예보의 정확도는 대기작용 수식화와 수치해석방법의 오차는 물론이고 대기오염물질 배출량과 초기 및 경계조건에 정확도에 영향을 받는다. Kim *et al.* (2014)에 의하면 CMAQ를 포함한 여러 대기질 예보 모형의 예보결과는 기상예보의 정확도뿐만 아니라 배출량의 정확도에도 영향을 받는 것으로 나타났다.

Chen *et al.* (2008)은 전일 예보결과를 사용하여 대기질 예보 모형의 초기조건을 생성하였다. 반면에, Nieradzki and Elbern (2006)은 관측자료를 자료동화하여 삼차원 농도장을 도출하고 이를 초기조건으로 사용하였다. 이와 같이 관측자료를 사용한 초기조건의 생성은 모형의 전파오차를 제거할 뿐만 아니라 풍상방향의 대기오염물질 농도를 관측치로부터 유추함으로써 풍

상방향 배출량의 불확도에 의한 예보오차를 줄일 수 있다는 장점이 있다.

중국의 대기오염배출량이 주목을 받으면서, ACE-Asia, INTEX-B, MICS-Asia 등 국제공동연구에서 중국 배출량을 산정하였다(Carmichael *et al.*, 2012). 이러한 노력에도 불구하고, 중국의 방대한 산업규모와 빠른 경제성장속도로 인하여 중국배출량의 불확도는 적지 않다고 사료된다. 본 논문에서는 우리나라 대기질 예보에서 중국 배출량의 불확도를 극복하는 방안으로 자료동화가 타당한지를 수치실험으로 검토함을 목적으로 한다. 이를 위해서 단기예보에서 초기조건과 배출량의 상대 중요성을 파악함으로써 자료동화에 의해서 생성되는 초기조건의 중요성을 판단하는 기초자료를 도출하였다.

자료동화에 사용되는 대기오염물질 농도의 관측치는 인공위성 관측치와 지면 관측치가 있으며, 사용되는 모형은 지역규모 모형과 전구모형이 있다(Zhang *et al.*, 2012). 지면관측치를 이용하면 측정자료의 불확도는 작지만 측정자료가 도시지역에만 집중되어 있는 문제가 있고, 인공위성 관측치를 이용하면 대상지역에 고르게 측정자료를 얻을 수 있지만 측정자료의 불확도가 높다는 단점이 있다. 본 논문에서는 인공위성 관측자료를 전구모형을 이용하여 자료동화 한 3차원 농도장을 이용하여 우리나라 대기질 예보 모형의 초기조건을 생성하였다.

중국에서는 대기오염에 대한 중국 국민의 높은 관심을 부응하여 대기오염 측정소를 대폭 확충하고 대기오염 측정자료를 실시간으로 공개하고 있다. 따라서, 중국 대기 측정소에 측정소의 대표성, 측정자료의 불확도 등의 세부자료가 확보되면 중국 측정망을 이용한 우리나라 대기질 예보의 초기조건 생성도 가까운 시일에 가능할 것으로 사료된다.

2. 대기질 예보 시스템

대기질 예보 시스템은 기상모형과 이동/화학/광화학반응/침착 모형으로 구성되며, 주요 입력자료는 초기조건, 경계조건, 지면형태, 배출량 등이다. 본 논문에서 기상모형은 WRF 3.6 (Weather Research and Forecasting 3.6)을 사용하고, 대기 이동/확산/광화학반응/침착 모형

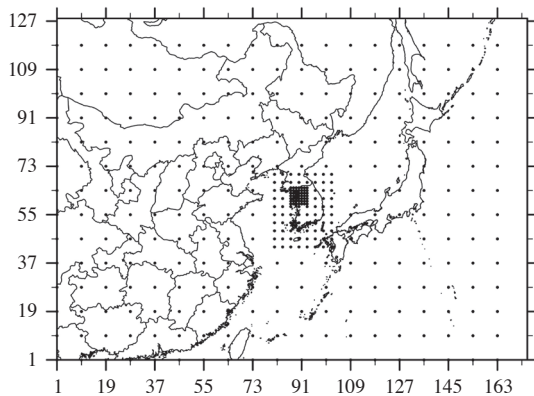


Fig. 1. The nested grid system adopted for the air quality forecast of the present study. The grid numbers in the outer most domain were denoted in the corresponding axis and dots were drawn every nine grid point.

은 CMAQ 5.0.1 (Community Multi-scale Air Quality Model 5.0.1)을 사용하였다. 수평격자체계는 그림 1과 같이 3개의 모사구간으로 구성된 등격자를 사용하여, 중국으로부터 대기오염물질 이동을 반영하는 동시에 수도권에서 상세모사가 가능하도록 하였다. 최외곽 격자의 크기는 27 km이며, 모구간과 자구간의 격자크기 비는 3:1이다. 첫 번째 모사구간인 최외곽 모사구간의 격자수는 174×128이며, 두 번째 모사구간의 격자수는 67×82이고, 그 다음 모사구간의 격자수는 58×61이다. 수직격자는 전 모사구간에서 16개로 동일하였다.

WRF의 초기조건과 경계조건은 미국 환경예측센터 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP)의 예보결과인 GFS (Global Forecast System)를 사용하였으며, WRF의 자료동화 계수(FDDA nudging coefficient)는 OTC (Ozone Transport Commission)의 추천값을 사용하였다(Baker *et al.*, 2009).

CMAQ의 중국과 한국의 배출량은 각각 MICS-ASIA 2010년 배출량과 CAPSS 2012년을 이용하였다. 그리고 화학반응 기작과 에어로졸 모듈은 각각 CBM05TU (carbon bond mechanism version 5, Toluene updated)와 AERO5를 사용하였다. CMAQ의 경계조건은 유럽 중기기상 예보센터 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)에서 개발한 전구 대기질 예보 모형인 MACC-III (Moni-

toring atmospheric composition & climate)의 실시간 예보결과를 사용하였다.

MACC-III는 13개의 인공위성자료를 이용하여 자료동화를 하여 전구 대기질을 예보한다(Wagner *et al.*, 2015). 따라서, MACC-III의 예보결과를 사용하여 초기조건을 생성하면 인공위성자료를 이용한 자료동화 효과를 볼 수 있다. 본 논문에서는 전일 예보 결과를 초기조건으로 사용한 경우를 “비자료동화”라하고 MACC-III 예보결과로부터 초기조건을 생성한 경우를 “자료동화”라고 칭하였다.

3. 배출량 및 초기조건에 대한 대기질 예보결과의 민감도

우리나라 대기질 단기 예보에서 자료동화에 의한 초기조건 생성의 중요성을 파악하기 위해서, 대기오염물질 배출량과 초기조건을 각각 50% 삭감하고 이에 따른 예보결과의 변화를 검토하였다. 민감도 시험 대상 기간은 2015년 11월 2일부터 2015년 12월 1일까지 한 달 동안이었다. 그리고 중국과 한국을 구분하여 배출량과 초기조건을 변화시켰는데, 구체적 내용은 다음과 같다.

3.1 배출량에 대한 대기질 예보결과의 민감도

비자료동화의 경우에 중국의 배출량을 반으로 줄임에 따른 서울에서 주요 대기오염물질 농도 거동을 그림 2와 그림 3에 나타내었다. 그림 2는 수명이 길어서 장거리 이동을 하는 대기오염물질인 PM₁₀과 SO₂의 농도를 보여주는데 중국배출량을 반으로 줄이면 서울에서 농도가 감소하였다. 11월 11일에 발생하였던 PM₁₀과 SO₂ 피크는 중국 배출량을 반으로 줄임에 각각 30%, 35% 감소하여, 고농도 사례시에 중국에서 미치는 영향이 크음을 보여주고 있다. 반면에 광화학반응속도가 빨라서 장거리 이동의 기여도가 낮은 HCHO와 NO₂는 중국 배출량을 반으로 줄여도 그림 3과 같이 서울에서 농도 변화가 미미하였다.

자료동화를 하면 관측치를 반영한 초기조건을 각 예보시마다 생성하므로 기존에 배출된 대기오염물질에 영향을 받지 않게 된다. 그래서 자료동화를 하는 경우에는 그림 4와 같이 중국으로부터 장거리 이동을 하는

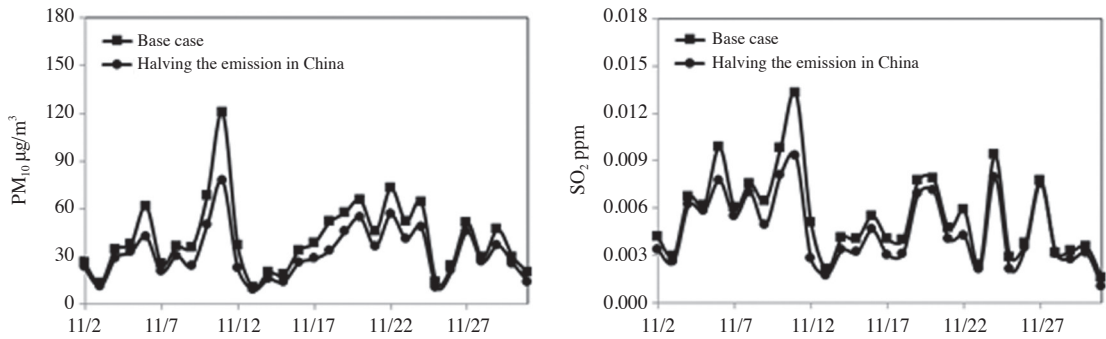


Fig. 2. The effect of halving the emission in China on PM_{10} and SO_2 concentration in Seoul without data assimilation.

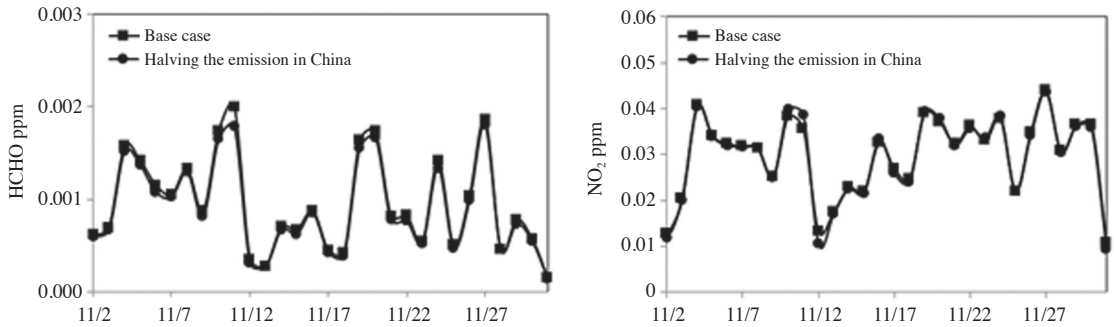


Fig. 3. The effect of halving the emission in China on HCHO and NO_2 concentration in Seoul without data assimilation.

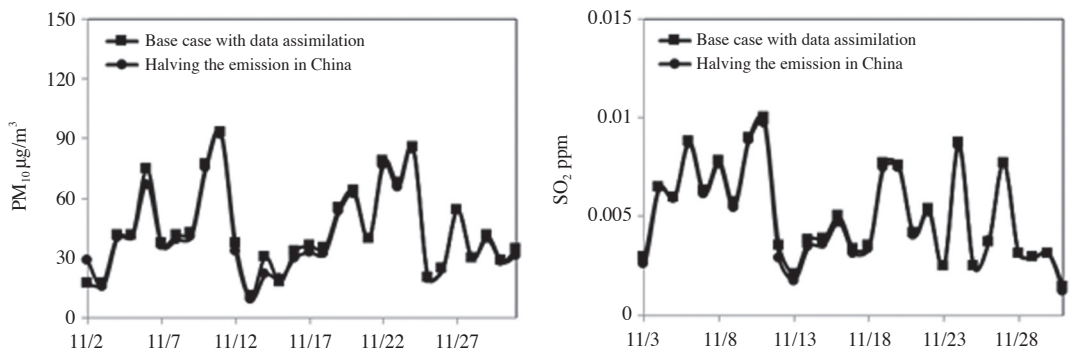


Fig. 4. The effect of halving the emission in China on PM_{10} and SO_2 concentration in Seoul with data assimilation.

PM_{10} 과 SO_2 는 서울에서 농도가 중국 배출량의 감소에 영향을 받지 않는다. 이는 대기질 예보시간인 36시간 동안에는 중국에서 서울로 이동하여 오는 대기오염물질은 새로이 배출된 대기오염물질이 아닌 기존에 배출된 대기오염물질 때문이다. 따라서 중국 배출량의 불

확도가 서울의 PM_{10} 과 SO_2 의 영향은 미미하다고 사료된다.

이와는 달리, 한국에서 배출되는 대기오염물질은 이동하여 오는 시간이 짧으므로 자료동화를 하는 경우에도 그림 5와 같이 서울에서 대기오염물질 농도에 영향

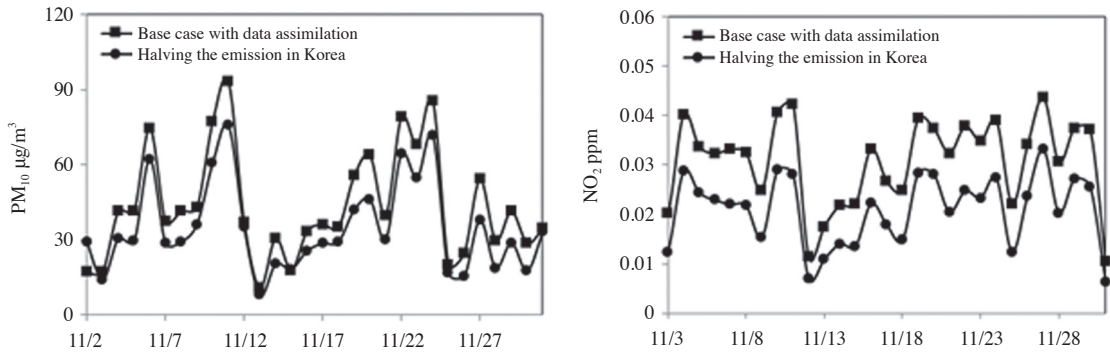


Fig. 5. The effect of halving the emission in Korea on PM_{10} and NO_2 concentration in Seoul with data assimilation.

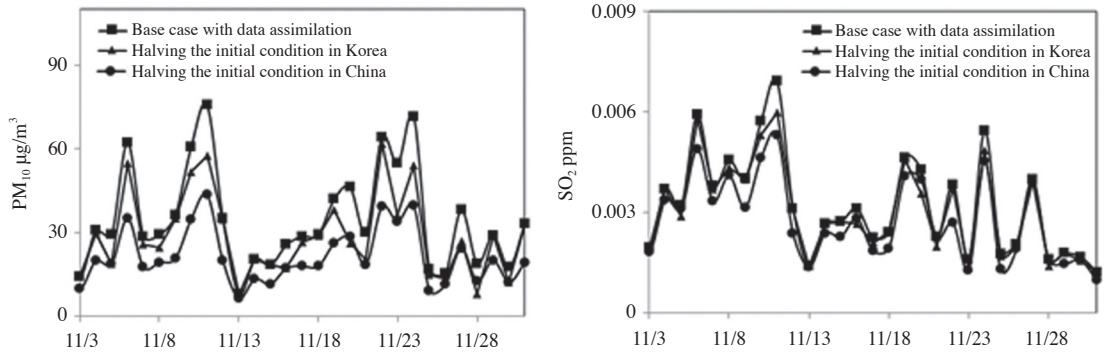


Fig. 6. The effect of halving the initial condition on PM_{10} and SO_2 concentration in Seoul with data assimilation.

을 준다. 대기에서 광화학반응으로 소멸되지 않아서 수명이 긴 PM_{10} 은 물론이고 광화학반응으로 빠르게 소멸되는 NO_2 도 한국 배출량의 영향을 받는다. 따라서 자료동화를 적용할지라도 한국 배출량의 불확도는 한국 대기질 예보의 정확도에 영향을 미친다.

3.2 초기조건에 대한 대기질 예보결과의 민감도

대기질 예보에서 자료동화는 관측치를 반영하여 초기조건을 생성함으로써 대기질 예보의 정확도를 높인다. 그래서 예보결과가 초기조건에 민감할수록 자료동화의 효과가 크다고 할 수 있다. 그림 6은 자료동화로 생성한 중국과 한국의 초기조건을 반으로 줄였을 경우에 서울에서 PM_{10} 과 SO_2 의 농도 변화를 보여준다. 여기서 중국은 그림 1의 동아시아 구간에서 한국구간을 제외한 지역으로 북한과 황해가 대부분 포함된다.

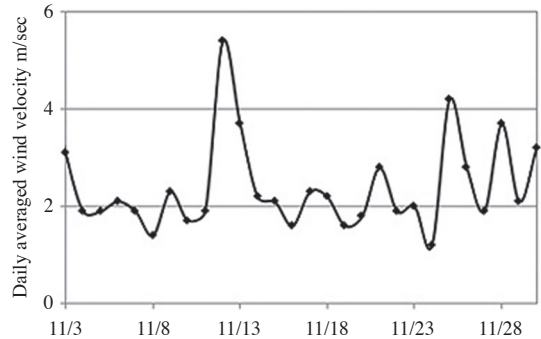


Fig. 7. The daily averaged wind velocity.

PM_{10} 과 SO_2 모두 중국의 초기조건을 줄였을 경우에 서울에서 농도 변화가 크게 나타났다.

한국의 초기조건을 반으로 줄였을 경우에는 11월 5일, 11일, 16일, 20일, 23일, 24일, 27일을 제외하고는

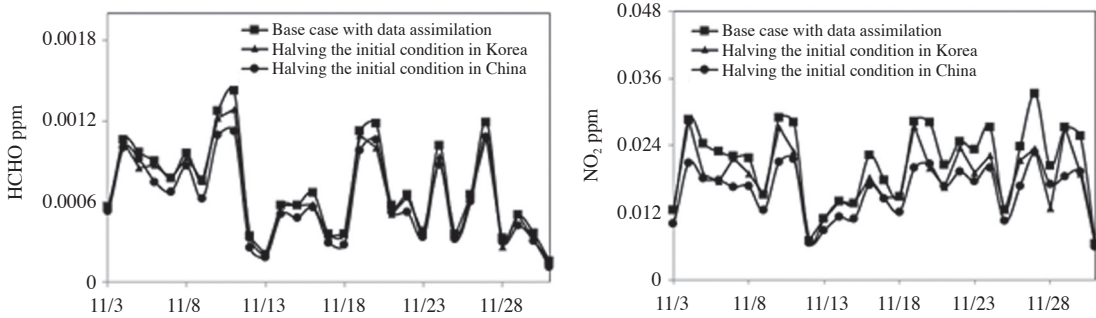


Fig. 8. The effect of halving the initial concentration on HCHO and NO₂ concentration in Seoul with data assimilation.

서울에서 농도 변화가 미미하였다. 이 예외 일자의 경우는 그림 7과 같이 일평균 풍속이 2 m/sec 이하로 느려서 대기가 정체되었기 때문에 대부분의 경우에 피크가 나타났으며 한국의 초기조건의 영향이 오래간 것으로 사료된다.

그림 8과 같이 광화학 반응에 의한 생성과 소멸이 빠른 HCHO는 한국과 중국 초기농도를 반으로 줄여도 일부 피크 농도만 약간 감소하였다. 반면에 NO₂는 중국 초기농도를 반으로 줄인 경우에 서울에서 농도가 20~30% 감소한 경우가 다수 관찰되었다. 이는 중국의 배출량을 반으로 삭감하여도 서울에서 농도가 감소하지 않은 그림 3과는 다른 현상이다. 중국 배출원은 중국 대륙에 국한되어 있는 반면, 여기서 중국 초기농도는 서해에서 농도도 포괄하였기 때문에 중국 배출량과 초기조건에 민감도가 다르게 나타났다고 사료된다. 한국의 NO₂ 초기농도를 반으로 줄인 경우는 중국 초기농도를 반으로 줄인 경우보다 서울에서 NO₂ 농도 감소가 작게 나타났다.

4. 결 론

관측치를 이용해서 모형의 초기조건을 생성하여 예보의 정확도를 높이는 자료동화는 수치기상예보에 널리 사용되는 방법이다. 자료동화가 대기질 예보의 정확도 향상에 기여할 수 있는지는 초기조건 영향의 크기와 초기조건의 불확도 등에 따라서 결정된다. 본 논문에서는 2014년 11월 1개월간의 대기질 예보에 대해서 배출량과 초기조건의 민감도 시험을 하였는데, 중

국의 배출량보다는 초기조건의 정확도가 우리나라 대기질 예보에 더 중요하다는 결과를 얻었다. 물론, 이러한 결과는 36시간 예보에 대한 것이며 예보기간이 증가하면 초기조건의 영향이 감소한다.

관측치에 자료동화를 적용하면 정확한 초기조건을 생성할 수 있다는 점에서 자료동화가 우리나라 대기질 예보의 정확도를 향상시킬 가능성이 높다고 평가된다. 자료동화에 사용되는 관측치는 인공위성 관측치와 지면 관측치가 있다. 본 논문에서는 인공위성 관측치를 이용하여 중국 초기농도를 산출한 MACC-III의 모사 결과를 이용하였다. 본 논문의 민감도 조사는 중국만 아니라 우리나라 초기농도의 정확도가 우리나라 배출량의 정확도와 함께 대기질 예보에 영향을 미침을 보여준다. 따라서 우리나라와 인근지역에 초기농도의 정확도와 우리나라 배출량의 정확도를 높이는 방안의 모색이 바람직하다.

본 논문의 후속연구로 자료동화를 적용시킨 우리나라 대기질 예보를 시도 중에 있다. 자료동화에 따른 대기질 예보의 향상 정도는 원시 및 가공 관측자료의 공간 대표성 및 해상도, 제공 화학종의 개수, 관측자료의 불확도 등에 영향을 받는다. 우리나라는 지면 관측소가 도시지역에 집중되어 있을 뿐만 아니라 인근지역은 대기오염 실시간 측정 자료가 없는 바다와 북한이기 때문에 인공위성 관측자료의 큰 역할이 기대된다.

감사의 글

본 논문은 정부(환경부)의 재원으로 국립환경과학원

의 ‘대기질 예보 개선을 위한 국제협력 체계 구축’사업과 ‘대기질 수치예보 정확도 향상을 위한 모델링 개선 연구(II)’사업을 통해 지원받아 작성되었습니다.

References

- Baker, D., T. Downs, M. Ku, W. Hao, G. Sistla, M. Kiss, M. Johnson, and D. Brown (2009) Sensitivity Testing of WRF Physics Parameterizations for Meteorological Modeling and Protocol in Support of Regional SIP Air Quality Modeling in the OTR, Ozone Transport Commission Modeling Committee.
- Carmichael, G.R., J.H. Woo, T. Ohara, and Q. Zhang (2012) Development of a “Mix for MICS” emission inventory for MICS-Asia phase III, TF HAP meeting.
- Chen, J., J. Vaughan, J. Avise, S. O’Neill, and B. Lamb (2008) Enhancement and evaluation of the AIRPACT ozone and PM_{2.5} forecast system for the Pacific Northwest, *J. Geophys. Res.*, 113, D14305.
- Kim, J.H. and S.Y. Cho (2003) A numerical simulation of present and future acid deposition in North East Asia using a comprehensive acid deposition model, *Atmos. Environ.*, 37, 3375-3383.
- Kim, S.T., F. Ngan, H.C. Kim, and D.G. Lee (2014) Retrospective Air Quality Simulation of The TexAQS-II : Focused on Emissions Uncertainty, *Asian J. Atmos. Environ.*, 8(4), 212-224.
- Koo, Y.S., S.T. Kim, J.S. Cho, and Y.K. Jang (2012) Performance evaluation of the updated air quality forecasting system for Seoul predicting PM₁₀, *Atmos. Environ.*, 58, 56-69.
- Monache, L.D. and R.B. Stull (2003) An ensemble air-quality forecast over western Europe during an ozone episode, *Atmos. Environ.*, 37, 3469-3474.
- Nieradzki, L. and H. Elbern (2006) Variational assimilation of combined satellite retrieved and in situ aerosol data in an advanced chemistry transport model, *Proceedings of the ESA Atmospheric Science Conference, Frascati, ESRI*.
- Stajner, I., P. Davidson, D. Byun, J. McQueen, R. Draxler, G. Manikin, K. Wedmark, K. Carey, and T. McClung (2011) NOAA’s National Air Quality Forecast Guidance Capability: Reaching 50 States, 91st AMS Annual Meeting, 13th Conference on Atmospheric Chemistry, Seattle, Washington.
- US EPA (1999) Guideline for Developing an Ozone Forecasting Program, Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC (United States).
- US EPA (2015) National Ambient Air Quality Standards, <http://www.epa.gov/ttn/naaqs/>.
- Wagner, A., A.-M. Blechschmidt, I. Bouarar, E.-G. Brunke, C. Clerbaux, M. Cupeiro, P. Cristofanelli, H. Eskes, J. Flemming, H. Flentje, M. George, S. Gilge, A. Hilboll, A. Inness, J. Kapsomenakis, A. Richter, L. Ries, W. Spangl, O. Stein, R. Weller, and C. Zerefos (2015) Evaluation of the MACC operational forecast system-potential and challenges of global near-real-time modelling with respect to reactive gases in the troposphere, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 15, 6277-6335.
- Zhang, Y., M. Bocquet, V. Mallet, C. Seigneur, and A. Baklanov (2012) Real-time air quality forecasting, part I: History, techniques, and current status, *Atmos. Environ.*, 60, 632-655.