환경영향평가 Vol. 29, No. 4(2020), pp.272~285 J. Environ. Impact Assess. 29(4): 272~285(2020) ISSN 1225-7184
https://doi.org/10.14249/eia.2020.29.4.272

Research Paper

지역규모 대기질 모델 결과 평가를 위한 통계 검증지표 활용

– 미세먼지 모델링을 중심으로 –

김철희* · 이상현 · 장 민*** · 천성남**** · 강수지**** · 고광근***** · 이종재****** · 이효정***

부산대학교 대기환경과학과*, 공주대학교 대기과학과**,
한국외국어대학교 대기환경연구센터***, 한국전력공사 전력연구원****,
연세대학교 동서문제연구원*****, 울산과학기술원 도시환경공학부******

A Study on Statistical Parameters for the Evaluation of Regional Air Quality Modeling Results

– Focused on Fine Dust Modeling –

Cheol-Hee Kim* · Sang-Hyun Lee · Min Jang*** · Sungnam Chun**** · Suji Kang**** · Kwang-Kun Ko***** · Jong-Jae Lee****** · Hyo-Jung Lee***

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University*
Department of Atmospheric Science, Kongju National University**
Research Center for Atmospheric Environment, Hankuk University of Foreign Studies***
Korea Electric Power Corporation Research Institute, Korea Electric Power Corporation****
Institution of East and West Studies, Yonsei University*****
School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science & Technology (UNIST)******

요약: 본 연구에서는 3차원 기상 및 대기질 모델의 입출력 자료를 평가하는 데 필요한 통계 검증지표를 선별하고, 선정된 검증지표의 기준치를 조사하여 그 결과를 요약하였다. 여러 국내외 문헌과 최근 논문 검토를 통해 최종 선정된 통계 검증지표는 MB (Mean Bias), ME (Mean Error), MNB (Mean Normalized Bias Error), MNE (Mean Absolute Gross Error), RMSE (Root Mean Square Error), IOA (Index of Agreement), R (Correlation Coefficient), FE (Fractional Error), FB (Fractional Bias)로 총 9가지이며, 국내외 문헌을 통해 그 기준치를 확인하였다. 그 결과, 기상모델의 경우 대부분 MB와 ME가 주요 지표로 사용되어 왔고, 대기질 모델 결과는 NMB와 NME 지표가 주로 사용되었으며, 그 기준치의 차이를 분석하였다. 아울러 이들 통계 검증지표값을 이용하여 모델 예측 결과를 효과적으로 비교하기 위한 표출 도식으로 축구 도식, 테일러 도식, Q-Q (Quantile-Quantile) 도식의 장단점을 분석하였다. 나아가 본 연구

First&CorrespondingAuthor:Cheol-HeeKim,Tel:+82-51-510-3687,E-mail:chkim2@pusan.ac.kr,ORCID:0000-0002-2967-4987
Co-Authors: Sang-Hyun Lee, Tel: +82-41-850-8526, E-mail: sanghyun@kongju.ac.kr, ORCID: 0000-0002-7998-9194
Min Jang, Tel: +82-31-8020-5589, E-mail: mjang@hufs.ac.kr, ORCID: 0000-0002-0263-4686
Sungnam Chun, Tel: +82-42-865-5461, E-mail: sungnam.chun@kepco.co.kr ORCID: 0000-0001-8767-3950
Suji Kang, Tel: +82-42-865-5665, E-mail: suji_kang@kepco.co.kr, ORCID: 0000-0003-0087-4763
Kwang-Kun Ko, Tel: +82-2-2123-8490, E-mail: busi3k@yonsei.ac.kr, ORCID: 0000-0002-3548-918X
Jong-Jae Lee, Tel: +82-52-217-2851, E-mail: jongjaelee@unist.ac.kr, ORCID: 0000-0003-0664-4846
Hyo-Jung Lee, Tel: +82-51-512-1720, E-mail: hyojung@pusan.ac.kr, ORCID:0000-0003-3943-2671

Received: 24 April, 2020. Revised: 22 July, 2020. Accepted: 24 July, 2020.

결과를 기반으로 우리나라의 산악지역의 특수성 등이 잘 고려된 통계 검증지표의 기준치 설정 등의 추가 연구가 효과적으로 진행될 수 있기를 기대한다.

주요어 : 통계 검증지표, 모델 결과 검증, 지역 대기질 모델, 미세먼지 모델링

Abstract : We investigated statistical evaluation parameters for 3D meteorological and air quality models and selected several quantitative indicator references, and summarized the reference values of the statistical parameters for domestic air quality modeling researcher. The finally selected 9 statistical parameters are MB (Mean Bias), ME (Mean Error), MNB (Mean Normalized Bias Error), MNE (Mean Absolute Gross Error), RMSE (Root Mean Square Error), IOA (Index of Agreement), R (Correlation Coefficient), FE (Fractional Error), FB (Fractional Bias), and the associated reference values are summarized. The results showed that MB and ME have been widely used in evaluating the meteorological model output, and NMB and NME are most frequently used for air quality model results. In addition, discussed are the presentation diagrams such as Soccer Plot, Taylor diagram, and Q-Q (Quantile-Quantile) diagram. The current results from our study is expected to be effectively used as the statistical evaluation parameters suitable for situation in Korea considering various characteristics such as including the mountainous surface areas.

Keywords : Statistical evaluation parameters, Model evaluation, Regional air quality model, $PM_{2.5}$ modeling

I. 서론

3차원 대기질 모델은 미세먼지 예보뿐만 아니라 건설 분야의 환경영향평가 등 매우 다양하게 사용된다. 특히, 측정 자료만으로는 주변 배출원으로부터의 정량적 영향 해석이 불가능하므로, 필히 3차원 지역규모 대기질 모델을 활용하여야 한다. 환경영향평가 등 어떤 특정한 사안에 대하여 대기질 모델을 수행하여 그 결과를 이용하고자 할 때, 모델 수행 시 그 입력자료의 양질성과 객관성이 충분히 확보되어야 하며, 모델링 출력 결과 또한 충분히 그 신뢰도를 검증하여야 비로소 활용 가능한 결과로 인정받게 된다. 따라서 모델링 전 과정이 얼마나 과학적이고 객관성 있게 이루어졌는가에 대한 평가 및 검증을 수행하는 과정은 매우 중요하며, 특히 모델링 입력 및 출력 자료를 인정받기 위한 공정하고 상세한 평가 방법과 일관성 있는 기준이 필요하다.

최근에 와서 모델링 입력자료의 품질 평가 및 검증을 위한 객관적 통계 검증지표 도입의 필요성이 많이 대두되고 있으며, 대기질 모델 결과의 활용도와 자료 요구가 늘어나면서 예전의 자료 항목보다 더 많은 대기오염 변수를 사용해야 하는 경우가 자주 발생되므로 이에 상응하는 추가 항목에 대한 검증방법과 기준 제시가 필요해지고 있다. 미세먼지 모델링을 예를 들면 과거 대부분 모델링 출력 결과인 질량 농도에 대한 것만을 검증하는 경우가 대부분이었으나, 환경부 미세먼지 상세 측정소 자료 혹은 한·미 대기질 (Korea-US Air Quality; KORUS-AQ) 캠페인 등에서 측정되어 연구되고 있는 미세먼지의 화학성분별 농도 자료의 검증, 예를 들어 황산염(sulfate), 질산염(nitrate component), 유기염(organic component) 등도 검증이 요구되고 있어서 그 해당 지표의 기준치 또한 중요해 지고 있다.

모델의 입출력자료를 정량적이고 객관적으로 평가하기 위해서는 모델에 의해 도출된 결과의 오차가 검증 지표 오차 기준 이내에 해당되는 지를 확인하는 방식이 제일 효과적이고 기본적인 방법이다. 그러기 위해서는 모델의 입출력자료를 정량적으로 평가하는데 사용되는 통계 검증지표의 오차 기준값 (reference value)에 근거하여야 한다. 그러나 국내

외 연구를 살펴보면 이러한 과정이 중요시되지 않는 경우가 있으며, 각 모델별로 서로 다른 평가 검증 변수를 사용하는 경우가 많아서 모델 결과 평가에 대한 결론을 내리기 모호할 때가 많다.

본 연구에서는 모델의 산출 자료인 기상 자료와 대기질 자료를 분리하여 그 결과를 검증하는 통계 검증 지표를 소개하고 최근 많이 연구되고 있는 미세먼지 모델링 연구 결과를 평가하는 지표의 기준치를 조사하고자 하며, 이를 적용한 국내외 사례들 또한 정리하고자 한다. 특히 국내 미세먼지와 연관되는 항목들을 검증하고 평가하는 기준치에 대한 논의는 국내에서도 상대적으로 많이 다루어지지 않기 때문에 이들의 사용 기준치의 연구는 반드시 수행되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 또한 우리나라 각 시군구 등 행정구역을 기준으로 하는 대기환경영향평가 연구가 절대 다수를 차지하므로 우리나라 공간규모에 해당하는 중규모 기상모델과 지역규모 대기질 모델에 국한하여 조사하였다. 즉, 기후모델과 같은 전지구규모 모델이나 빌딩 규모의 미규모 모델의 예측 검증 지표 해석은 본 연구의 대상에서 제외하였다.

아울러, 모델 출력자료 검증 연구는 이들 통계 검증지표들의 기준치와 그 기준치 만족 유무 정도를 논하기 위하여 대부분의 연구에서는 간단한 도표로 제시하는 것이 일반적이다. 따라서 모델링 수행자가 필요로 하는 결과를 보다 효과적인 도식으로 그 지표값을 효과적으로 표시하는 표출 도구 혹은 다이어그램들, 예를 들어 축구 도식(Soccer plot), 테일러 도식(Taylor diagram), Q-Q 도식(Quantile-Quantile diagram) 등을 본 논문에서 함께 논의하였다.

II. 기상 및 대기질 모델 통계 검증지표

1. 통계 검증지표 선정

3차원 대기질 모델의 모의 기상장과 대기질 검증을 위해 필요한 측정자료를 활용하기 위해 먼저 우리나라에 위치한 측정소 및 측정 자료의 가용성을 평가하는 것은 중요하다. 기상장 변수와 오존(O_3) 농도, 미세먼지(PM_{10} 혹은 $PM_{2.5}$) 질량 농도와 구성 성분 및 그 전구물질 (예, NOx, SO_2)의 지상 측정 자료의 가용성은 연도와 영역에 따라 상당히 다르다. 2016년 기준으로 국내에 사용 가능한 자료로 환경부에서 운영하는 260여 개소 AQMS (Air Quality Monitoring Station) 네트워크 자료와 6개 대기오염 집중측정지점(백령도, 서울, 대전, 광주, 울산, 제주) 측정자료가 존재한다. 이들 집중 측정소 자료는 미세먼지 모델링 결과를 성분별로 상세하게 검증할 수 있어 유용하다.

검증 변수 선정을 위하여 본 연구에서는 국외의 경우 NRC (National Research Council)의 보고서(2007), Emery et al.(2017), Hurley et al.(1999), Borge et al.(2008), Kryza et al.(2012) 등 연구 문헌과 국외 저널에 출판된 논문들을 참조하였고, 국내의 경우 국립환경과학원(National Institute of Environmental Research: NIER)에서 출판된 대기질모델링 가이드라인 연구 관련 보고서(NIER 2010; 2013; 2016; 2017) 및 국내 관련 학술지에 출판된 다수의 논문(예, Ju et al. 2017; Choi et al. 2016; Kim et al. 2017)을 참조하였다. 조사 결과, 모델 정확도를 검증하기 위해 국내외적으로 공통적으로 사용되는 통계 검증지표를 선정하였으며, 선정된 지표는 MB (Mean Bias), ME (Mean Error), MNB (Mean Normalized Bias Error), MNE (Mean Absolute Gross Error), RMSE (Root Mean Square Error), IOA (Index of Agreement), R (Correlation Coefficient)로 나타났으며, 일부 연구에서 FE (Fractional Error) 혹은 FB (Fractional Bias)가 사용되고 있는 바 본 연구에서 포함시켰다(Table 1). 이들은 기상 변수와 대기질 변수의 구분 없이 모든 지역규모 기상 및 대기질 모델의 출력자료들에 동일하게 적용한다는 목표로 이들을 선정되었다(Table 1). 그 외 기준치를 찾기 힘든 변수이거나, 국외에서는 사용하고 있으나 국내에서 사용되지 않은 통계 검증지표들은 제외하였다.

선정된 통계 검증지표들의 수학적 정의는 특정 시간 t와 공간 x에서의 오염물질의 관측된 농도와 모델 결과를 각각 $O(x,t)$, $S(x,t)$로 각각 표시하고, 그 평균값을 각각 $\overline{O}$, $\overline{S}$라 정의하여 그 통계적 정의를 수식으로 Table 1에 수록하였다. Table 1의 총 9개의 통계 검증지표 중에서 상위 5개 지표는 학계 및 국내외

Table 1. Statistical parameters for the evaluation of air quality modeling results

Statistics	Full Name	Formula
MB	Mean Bias	$\frac{1}{N}\sum(S-O)$
ME	Mean (Absolute Gross) Error	$\frac{1}{N}\sum\lvert S-O\rvert$
RMSE	Root Mean Square Error	$\sqrt{\frac{1}{N}(S-O)^2}$
NMB	Normalized Mean Bias Error (%)	$\frac{1}{N}\sum(\frac{S-O}{O})\times 100\,(\%)$
NME	Normalized Mean Error (%)	$\frac{1}{N}\sum(\frac{\lvert S-O\rvert}{O})\times 100\,(\%)$
FB	Fractionalized Bias (%)	$\frac{2}{N}\sum(\frac{S-O}{S+O})\times 100\,(\%)$
FE	Fractionalized Error (%)	$\frac{2}{N}\sum\lvert\frac{S-O}{S+O}\rvert\times 100\,(\%)$
IOA	Index of agreement	$1-\frac{\sum((S-\bar{S})-(O-\bar{O}))^2}{\sum(\lvert S-\bar{S}\rvert+\lvert O-\bar{O}\rvert)^2}$
R	Correlation Coefficient	$\frac{\sum(O-\bar{O})(S-\bar{S})}{\sum((O-\bar{O})^2)^{1/2}\sum((S-\bar{S})^2)^{1/2}}$

다수 연구자들에 의해 모델 결과를 평가하는 경우에 빈번히 통용되어 왔음을 확인할 수 있었다(Fox 1981; Hogrefe et al. 2008; 2011; U.S. EPA 2004; 2005; 2006; 2007; NIER 2010; 2013; 2016; 2017).

2. 중규모 기상모델과 결과 검증 지표 기준

지역규모 대기질 모델의 입력자료로 사용되는 대부분의 기상 자료 생산은 전지구 기상모델보다는 중규모 기상모델이 국내 연구에서는 주로 사용되고 있다. 중규모 기상모델에는 대표적으로 WRF (Weather Research and Forecasting; Skamarock et al. 2008), MM5(Mesoscale Meteorological Model Version 5, Grell et al. 2000) 등이 있으며, 국내의 미세먼지 예보 모델의 경우 기상청 UM(Unified Model)이 사용되고 있다. 특히 WRF 모델은 지역규모 대기질 모델인 CAMx (Comprehensive Air quality Model with extensions), CMAQ (The Community Multiscale Air Quality Modeling System) 수행에 필요한 기상 입력자료를 생산하는 기상모델로 국내에서는 광범위하게 사용되며, WRF-Chem (WRF-Chemistry) 모델처럼 대기질 모델과 직접 연동되어 대기질 모델링의 기상변수 생산을 위한 중규모 기상모델로서 국내외적으로 폭넓게 사용되고 있다. 따라서 WRF 기상모델은 대기질 모델의 입력자료로 직접 사용되므로 대기질 모델의 모사 정확도에도 직접적으로 관련되어 있다고 볼 수 있다.

WRF 모델을 구동하기 위해서는 초기 기상장과 경계조건이 필요하며, 국내의 연구자들은 국내 기상청에서 현업으로 운용하는 UM (Unified Model) 예측 자료, 혹은 미국 NCEP (National Center for Environmental Prediction)에서 제공하는 FNL 재분석 자료(6시간 간격의 1.0°×1.0° 격자 해상도)나 GFS (Global Forecasting System) 예측 자료가 널리 이용된다(Chen et al. 2017). 그 외 ECMWF ERA-Interim(격자 해상도: 약 75 km) 재분석 자료도 많이 활용된다. 중규모 기상모델의 출력 자료 검증을 위해 사용될 수 있는 국내 지상 관측자료는 현재 기상청에서 운영하고 있는 70여개의 정규 기상관측소와 AWS (Automatic Weather Station)에서 정기적으로 측정하고 있는 기상자료가 대표적이다. 이를 통합

하여 기상 자료를 생산하는 모델의 적합성을 검증할 수 있다. 이를 위해 중규모 기상모델의 출력 기상 자료가 얼마나 한국의 관측 자료를 재현하였는가를 신중히 검증하여야 하며, 필요에 따라 각 통계 검증지표별로 지정되어 사용되고 있는 각 통계 검증지표의 기준치(reference value)를 검증 대상 변수에 따라 확대하거나 적절히 우리나라 현실에 맞게 수정하여야 할 것으로 판단된다.

3. 지역규모 대기질 모델

지역규모 대기질 모델은 CAMx (Environ 2014), CMAQ (Byun et al. 2007), WRF-Chem (Grell et al. 2005)이 전 세계적으로 많이 사용되고 있으며, 현재 국내에서 가장 많이 사용되는 대표적인 지역규모 대기질 모델은 CMAQ으로 확인된다. CMAQ 모델은 미국 환경보호청(US EPA)에서 개발하여 황산화물, 질소산화물 등 무기 및 유기 오염물질을 전반적으로 모두 고려할 수 있도록 설계되었고 전 세계적으로도 많은 사용자를 보유하고 있다. CAMx 모델은 미국 Environ사에서 1997년도부터 개발하기 시작하여 현재까지도 지속적으로 개발되고 있으며 특히 미세먼지 배출원별 기여도 분석을 위한 방법으로서 PSAT (Particulate Source Apportionment Technology, Yarwood et al. 2004) 기법을 포함하고 있어서 배출지역별 해당 지역의 미세먼지 기여도인 배출원-수용지 관계(Source-Receptor relationship)를 분석하는 경우 유용하다. 따라서 CMAQ 모델 혹은 기타 대기질 모델을 이용하여 각 배출 및 수용지를 나누고 지역별 배출량을 할당하여 순차적으로 모델링을 수행하여야 하는 BFM (Brute-Forec Method; ENVIRON, 2014)에 비해 빠른 결과를 도출할 수 있는 장점이 있다. 그러나 어떠한 대기질 모델을 선정하더라도 모델 결과의 정합도를 분석하는 단계를 거쳐야 하므로, 모델링 수행 시 구체적이고 다양한 정확도 평가가 선행되어야 한다.

대기질 모델링 출력 자료를 통계적으로 검증하기 위해서는 모델의 입력자료 검증방안과 동일한 지표를 사용하는 것이 효과적일 것이다. 또한 평가하려는 대기오염물질은 관련 변수를 되도록 많이 포함하여야 합리적이다. 예를 들어 미세먼지 농도를 평가할 경우 미세먼지의 질량 농도 및 화학성분별 농도뿐만 아니라, 2차 미세먼지의 전구 물질인 기체상 오염물질, 예를 들어 NOx, SO_2, NH_3 등 되도록 많은 오염물질을 동시에 평가하여야 그 평가 결과의 신뢰도가 높을 것이다. 그럼에도 불구하고 대상 지역 측정 자료의 시공간적 부재와 배출량 불확실성을 정량 평가하지 못하는 점 등의 한계로 국내에서는 그 정량 평가가 쉽게 이루어지지 않고 있는 실정이다. 이러한 환경에서 본 연구에서는 미세먼지의 질량 농도와 함께 미세먼지의 화학성분물질인 NO_3^-, SO_4^{2-}, NH_4^+, OC, EC를 모두 포함하여 통계적 평가지표(statistical parameter)를 정리하였으며, 국내 문헌자료 분석을 통해 현재 널리 사용되고 있는 평가지표의 기준치(reference value)를 확인하였다. 나아가 모델의 성능(performance)이 해상도, 공간규모 등과 연관되는 바, 이와 연관되는 지역규모 대기질 모델 통계 검증지표 활용방법을 논의하였다.

III. 결과

1. 기상모델링 자료 적용

기상모델의 출력 변수는 풍속, 기온, 습도 등 다양하다. 국외에서는 통계 검증지표(Table 1)를 이용하여 모델 출력자료의 오차 정도를 판별하는 평가 기준치를 모델 대상 영역의 국지적 특성(산악 지역 포함 유무)에 따라 각각 다르게 적용하였다(Emery et al. 2001; McNally 2009; Environ and Alpine 2012). 그 결과는 Table 2에 정리하였고, 기상모델의 경우 대부분 ME와 MB가 주요 지표로 사용되어 왔음을 알 수 있고 대기질 모델에서 주로 사용되는 NME, NMB는 기상모델의 검증에는 거의 사용되지 않았음을 알 수 있었다. Table 2에서 빗금 친 부분(▨)은 문헌상에 나타나지 않은 영역이다. 예를 들어 습도의 통계 검정 지표의 기준치 등은 여러 국내외 문헌에도 기록되지 않아 필요에 따라 실제 국내에 적합한 기준치 설정 연구가 필요한 영역임을 암시한다고 볼 수 있다.

Table 2의 결과, 대부분의 기상 변수에서 ME의 기

Table 2. Reference values of several statistical parameters for meteorological variables

	Wind speed (m/s)		Wind direction (deg)		Temperature (K)		Humidity (g/kg)	
	FLT*	MTN**	FLT	MTN	FLT	MTN	FLT	MTN
MB[1)]	±0.5	±1.5	±10	±10	±0.5	±2.0	±0.8	±1.0
ME[1)]	±2.0	±2.5	±30	±50	±2.0	±2.5	±2.0	±2.0
RMSE[2)-4)]	2.0[2)]		50 ~ 110		2.5 ~ 3.5		10.0	
NMB (%)	N/A***		N/A		N/A		N/A	
NME (%)	N/A		N/A		N/A		N/A	
IOA[2)-4)]	0.6 ~ 0.7 0.6[1)]		0.7 ~ 0.8		0.8		0.9	
R^2 [2)-4)]	0.5		0.6 ~ 0.7		0.8 ~ 0.9		N/A	

FLT* : flat areas with no mountainous areas
MTN** : mountaneous area
N/A*** : not available
▨: Not found in previous studies.
1) Emery et al. (2001)
2) Borge et al. (2008)
3) Miglietta et al. (2012)
4) Kryza et al. (2012)

준값은 MB에 비해 약 1.5 – 5배 완화된 기준치를 적용한 것으로 확인되며, 산악지역의 포함 유무에 따라 다르게 적용되었지만, IOA의 경우 대부분의 기상 변수에 대하여 0.7 이상, 상관계수(R)는 풍속 0.5, 그 외 0.6 이상을 요구하였다. ME와 MB 모두 풍속과 기온의 차이를 특히 구분하여 제시된 것으로 확인되었다. 그러나 우리나라처럼 산악지역이 많은 경우의 기상 변수에 대하여 평탄한 경우의 기준치를 적용하게 되면 바람장 등 여러 기상변수에 대하여 모델링 정합도가 높지 않은 것으로 판정되는 사례도 가능하게 된다. 대상 영역이 평탄한 경우와 복잡한 지형이 존재하는 경우의 모든 기상 변수별 오차 판정 기준을 살펴보면 Table 2에 제시되어 있는 바와 같이 지형이 복잡한 영역에서는 기상모델의 오차의 범위를 상대적으로 더 확대하여 적용함으로써 평탄한 지역보다 지형이 복잡한 경우의 기상모델의 정확도가 낮음을 감안하는 등 기상모델의 평가를 유연하게 적용하였음을 알 수 있다(McNally 2009; Environ and Alpine 2012). 이런 맥락에서 기상 현상 또한 일변화, 혹은 시간 변화가 심한 경우가 많아서 통계 검증지표의 기준치를 그대로 사용하기보다는 자료의 특성(시간평균, 일평균, 계절평균인지의 구분) 및 대상영역 특성(얼마나 산악지형이 포함된 영역인가의 구분)에 따라 그 기준치를 달리하여 국내에 맞게 개발되어야 할 것으로 판단된다.

2. 대기질 모델링 자료 적용

지역규모 대기질 모델인 CMAQ 혹은 CAMx 등의 모사성능을 검증하기 위한 기준치는 국내외 모두 Emery et al.(2017)의 논문에 대부분 평가 기준치가 가장 자세히 요약되어 있다. 특히 Emery et al.(2017)에서는 기준치를 '목표(goals)'와 '기준(criteria)'으로 구분하여 제시하였다. 여기서 '목표(goals)' 기준치는 과거 수행된 많은 모델 결과를 통계적으로 나열하여 상위 1/3의 모델이 달성한 평균치이며, '기준(criteria)'은 상위 약 2/3의 모델이 달성한 평균치를 이용하였다. 제시된 4가지 통계 검증지표 즉 NMB, NME, FB, FE에 대하여 두 가지 경우로 구분한 기준치와 그 외 국내외에서 주로 사용하는 나머지 통계 검증지표들의 기준치를 Table 3에 제시하였다.

Emery et al.(2017)의 연구사례 즉, 목표치와 기준치를 이용하여 모델 결과를 각 통계 검증지표별 '우수 모델'과 '다수 모델'로 구분하는 경우처럼 국내 연구에서도 상황에 맞는 적절한 판단 기준 연구가 필요할 것으로 판단된다. Emery et al.(2017)에서는 '우수 등급' 모델 결과는 많은 모델링 결과 중에서 '목표

Table 3. Reference values for several air quality variables

	NMB[1] (%)	NME[1] (%)	FB[2] (%)	FE[2] (%)	MB[2]	ME[2]	RMSE[3]	IOA[3),4]	R[3)–5]
$PM_{2.5}$ (goal)	±10	±35	±30	±50	5.5	6.5	20	0.5	0.70
$PM_{2.5}$ (criteria)	±30	±50	±60	±75					0.40
1-hr O_3 (goal)	±15	±35							0.75
1-hr O_3 (criteria)	±15	±35							0.50
8-hr O_3 (goal)	±5	±15	±30	±50					0.75
8-hr O_3 (criteria)	±15	±25	±60	±75					0.50
SO_4^{-2} (goal)	±10	±35	±30	±50			5 ~ 15	0.7	0.70
SO_4^{-2} (criteria)	±30	±50	±60	±75					0.40
NH_4^+ (goal)	±10	±35	±30	±50			3.3 ~ 4.0	0.7	0.70
NH_4^+ (criteria)	±30	±50	±60	±75					0.40
NO_3^{-2} (goal)	±15	±65	±30	±50			5 ~ 15	0.7	
NO_3^{-2} (criteria)	±65	±155	±60	±75					
OC (goal)	±15	±45	±30	±50					
OC (criteria)	±50	±65	±60	±75					
EC (goal)	±20	±50	±30	±50					
EC (criteria)	±40	±75	±60	±75					

[1)] Emery et al. (2017)
[2)] Boylan and Russell (2006)
[3)–5)] NIER (2010), NIER(2013), and NIER(2016)
G*(Goals") indicate statistical values that about a third of top performing past applications have met, and should be viewed as the best a model can be expected to achieve.
C**(Criteria) indicate statistical values that about two thirds of past applications have met, and should be viewed as what a majority of models have achieved. The outlying one-third of past applications that exceed the criteria are considered poor performers for the particular metric and chemical species. See the text for additional information on the metrics and benchmarks.
▨ indicates the statistical reference values are not proposed in previous studies, and
▩ denotes no applicable reference values are generated.

(goals)' 기준치를 달성한 최상의 모델 결과를 의미하므로, 해당 검증지표 또한 상위 1/3의 모델그룹의 정합도 평균과 오차를 나타나며, '다수 모델' 등급의 경우 상위 2/3의 모델그룹의 평균치와 오차로 명시하였다. 따라서 'goals' 등급은 목표치를 우수하게 달성한 "우수" 등급으로, 그리고 'criteria' 등급은 "양호" 수준으로 평가할 만하다. 역으로 'criteria' 기준치를 만족하지 못하는 모델의 경우 하위 1/3의 평가 결과를 도출한 결과가 되므로 해당 모델 결과를 '부적합'으로 판정을 내릴 수 있는 근거가 될 수 있다.

Table 3에 의하면 기상모델과 달리 MB와 ME는 대기질 모델에서는 잘 사용되지 않았고, 대신 MB와 ME의 정규화된 지표인 NMB, NME를 대부분 사용한 것으로 나타났다. 이는 대기오염도의 지역적 특성이 강하여 농도 그 자체의 절대적 차이에 근거하여 모델의 정합도를 판정하기 어려운 것에 기인하며, 따라서 오차를 정규화한 값으로 표출하는 NMB 혹은 NME로 그 기준치를 작성한 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 IOA는 기상모델에서 요구하는 0.7을 동일하게 요구하였고, 상관 계수(R)의 경우 풍속 0.5 이상, 그 외 0.6 이상을 요구하였으나, 일부 미세먼지 화학성분 항목에서는 0.4를 요구하는 성분도 포함되어 있음을 알 수 있다. Table 3의 빗금 친 부분(▨)은 국내외 문헌 어디에도 사용되지 않아서 필요에 따라 실제 국내에 적합한 기준치 설정 연구가 필요한 영역을 표시한 것이다. 또한 최근 미세먼지의 화학성분 측정이 자주 이루어지면서 그 필요성 측면에서 필요하다고 판단되어 ▩영역으로 도시하였다. 아울러 사용 빈도가 적은 지표의 경우라도 활용도가 큰 평가 지수 또한 있을 수 있으므로 계속적인 관련 통계지수 발

굴 연구가 필요하며, 나아가 국가적으로 수집되는 많은 상세측정망 자료가 활용 가능해지면 2차 미세먼지의 전구물질의 정확도까지 평가하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

3. 모델의 검증 지표 평가 도식

모델 검증 지표는 대부분 통계 검증지표별 결과를 도표로 만들어 설명하는 것이 일반적인데, 이럴경우 각 지표간 차이 혹은 특성이 확연하게 드러나지 않을 수 있다. 결국 모델 결과의 검증은 모델이 어느 정도 모사되었는지를 제시하는 기준값, 즉 수치로 귀결되기는 하나, 이 수치의 의미가 알기 쉽게 도식화하여 통용되어야 한다는 점에서 이들 통계 검증지표 값을 효과적으로 표시하는 평가 도구가 개발되어야 한다. 대기질 모델링의 정확도 평가에 사용되는 통계치들과 별도로 다른 분석 도구, 예를 들어 시계열 분석, 산포도(Scatter Diagram) 등은 한눈에 모델의 결과를 정성적으로 파악할 수 있어서 많이 이용된다. 모델의 검증 결과 또한 하나의 가시적인 도식에 넣어 보다 간결하고 효율적인 평가를 수행할 수 있도록 개발되어야 할 것으로 판단된다.

모델 결과의 검증 지표를 도식화한 예는 많이 있으나, 기상모델 결과는 "축구 도식(Soccer plot)"을, 그리고 대기질 모델 평가 결과는 테일러 도식 (Taylor diagram)을 많이 사용하였다(Figure 1 참고). 축구 도식의 경우 Figure 1에 제시되어 있듯이 x축을 MB, 그리고 y축을 ME로 설정하고 기준치를 사각형 도형 위에 도시하고 해당 모델링 결과를 점으로 표시하는 간단한 형식이다. 도시된 점이 오차 범위 사각형 내에 위치할 경우 모델 정합도가 '적합'함을 확연히 가시적으로 확인할 수 있다. 역으로 사각형 오차 범위를 벗어나게 되면 모델 정합도에 '부적합' 판정을 부여할 수 있다. "축구 도식"은 Emery et al. (2001)이 제안한 방법으로서, 일반적으로 기상 변수 검증에 많이 사용되었던 MB, ME 등을 통합하여 그림으로 도식적으로 평가하도록 하되, 평가 표준을 "benchmark"로 표시하는 방법으로, 미국 동부와 텍사스 지역의 오존 대기질 모델링을 위한 입력 기상자료의 평가에 활용된 바 있다(McNally 2009; Environ and Alpine 2012).

반면 테일러 도식은 모델의 통계 검증치들을 두 개 이상 모아 사용한 것으로, 몇 가지 방사 축은 측정치 표준편차에 대비한 모델의 '표준편차'와 모델치와 측정치간의 상관계수를 사용하고, 이러한 방사형 평면에서 표준편차와 상관계수를 두 좌표로 하여 나타내는 점으로부터 측정참조점(observational reference point)까지의 거리를 표시한다(NIER 2010). 이 거리는 모델표준편차 대비 측정치 표준편차의 제곱근(root-mean squared standard deviation)을 나타낸다. 실제 테일러 도식을 적용하게 되면, Figure 1의 예처럼 일정 모델링 기간을 몇개의 구간으로 나

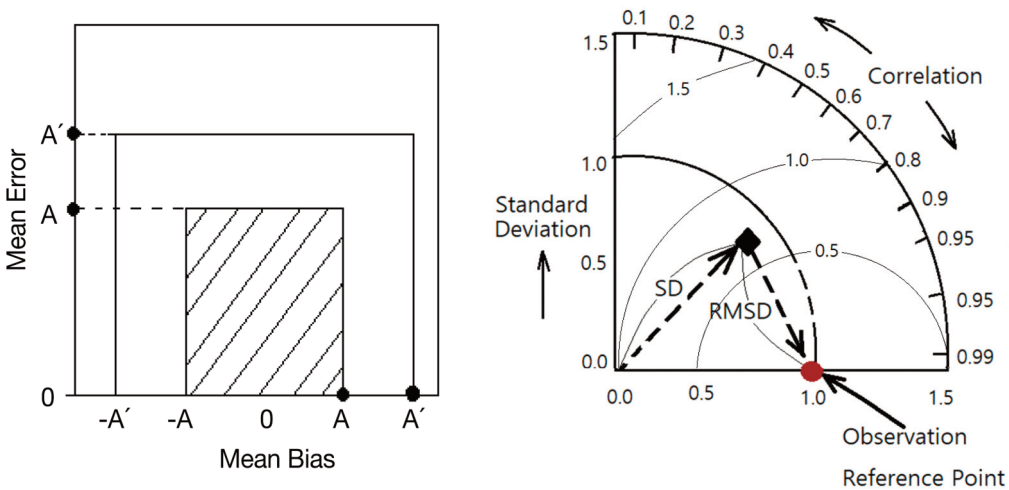


Figure 1. Schematic diagrams of two plots: (left) Soccer plot and (right) Tayler diagram.

누었을 때 구간별로 전반적인 모델의 정확도 변화 여부를 모델링 지역과 함께 추적할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 통계 검증지표의 기준치를 명확히 확인하기 힘들고, 테일러 도식만으로는 우수 혹은 양호 등급으로 명확히 구분하지는 않아서 Table 1에 제시한 검증 변수들의 기준치를 최종적으로 다시 확인해야 한다. 그러나 모델간의 상호 비교나 모델 결과를 종합적으로 분석하기에는 매우 유용한 평가 도식으로 기대된다.

Figure 2는 WRF 중규모 기상모델 결과를 축구 도식으로 표현한 한 예이다(Korea Electric Power Corporation 2020). 동북아시아를 12km 해상도로, 그리고 한반도를 4km 해상도로 WRF 모델을 구성하여 2016년에 대하여 기상모델을 수행한 후 겨울철(1월)과 여름철(6월) 월 평균을 축구 도식을 통해 검증한 결과이다. 여러 검증변수에 대한 민감도 평가를 4 km 도메인 내의 기상모니터링 사이트(DS3505)에서의 풍속, 풍향, 기온, 습도 등에 대하여 축구도식을 이용하여 수행하였다. 그 결과 모든 평가 항목이 신뢰도 판정 기준의 범위 안에 위치하는 것을 알 수 있다. 특히 풍속은 겨울에 상대적으로 우수 등급을 보이는 반면, 분석 지역이 평탄할 경우 여름에는 기준치를 벗어났다. 반면, 산악 지형의 기준치를 적용한 경우 모두 양호한 결과를 도출한 것으로 평가할 만하였다. 풍향의 경우 다소 판정 기준에 근접되어 있음을 알 수 있으며, 기온은 여름철에, 그리고 습도는

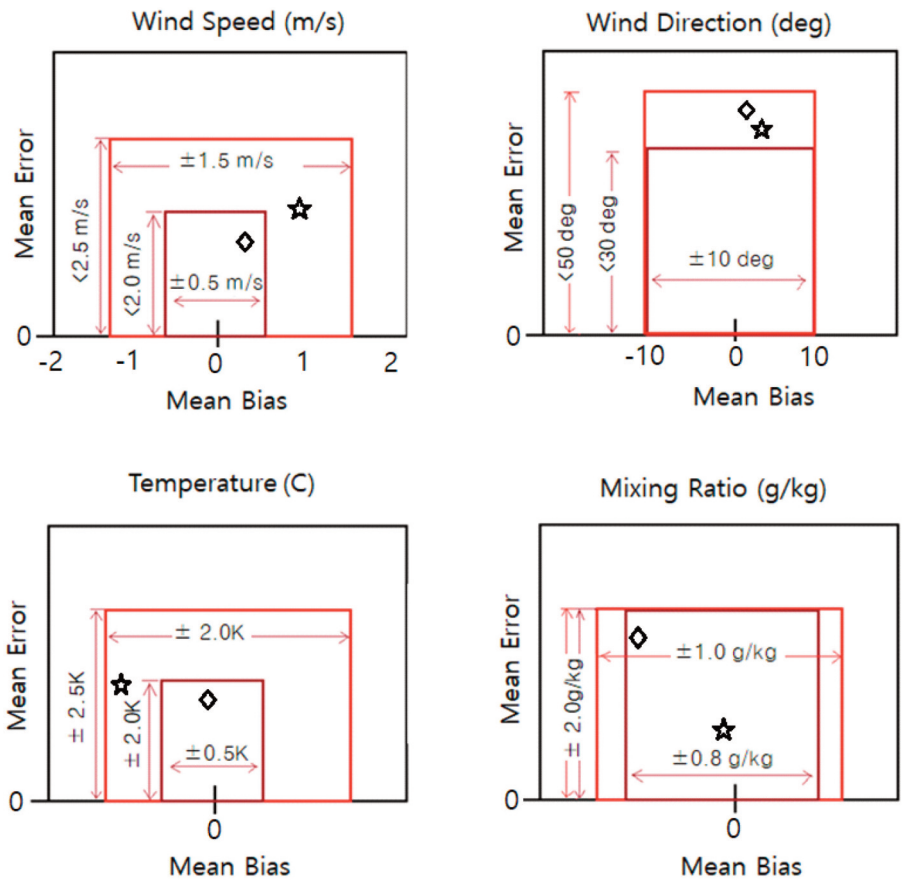


Figure 2. Examples of soccer plots for WRF-4km resolution statistics from monthly wind speed (top, left), wind direction (top, right), temperature (bottom, left), and mixing ratio (bottom, right) for January (☆) and July (◇) in 2016, over Korean Peninsula domain (Korea Electric Power Corporation Research Institute, 2020). Inner red box areas represent reference values for mountainous areas, and magenta box areas denote for flat areas, respectively.

겨울철에 보다 나은 결과를 보였음을 한눈에 알 수 있다. 이상과 같이 월 평균의 경우 잘 모사되는 것으로 나타났으나, 일평균으로 평가할 경우 365일 자료 중에서 약 50% 이상 기준치를 넘지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 자료의 시간규모를 잘 파악하여 이에 맞는 기준치를 다르게 적용해야 함을 잘 암시해 준다.

Figure 3은 앞서 제시한 두 도식의 몇 가지 단점을 보완한 그림이다. 보완된 축구 도식에서는 오차를 기준점에서의 거리로 정의하므로, 기준치로부터의 거리(오차)를 사각형에서 원형으로 교정하였으며, 테일러 도식의 경우 Table 1에 제시된 일반적인 검증 변수인 NMB, NME를 x와 y축의 변수로 사용하도록 조정하였다. 이에 따라 기존의 테일러 도식에서는 측정 참조점의 해석이 모호하거나 RMSE의 해석이 불확실했던 단점을 보완할 수 있으며, 통계 검증지표를 다시 확인해야 하는 기존의 번거로움을 줄일 수 있다. 그러나 검증 변수의 기준치는 사용하는 모델의 수평 및 연직 해상도가 다르거나, 자료의 시간 평균 규모가 다를 경우, 매우 다른 양상으로 전개되므로 시간 평균 규모에 따라 그 기준값을 다르게 사용할 필요가 있다고 판단되므로, 보다 정확하고 신뢰성 있는 평가를 위해서는 국내 모델링 연구자들이 도출한 다수의 결과로부터 시간 규모별(예를 들어 시간평균, 일평균 월평균) 기준치를 추산하여 개발할 필요가 있으며, 이에 따른 도식 또한 개발된 기준치에 맞게 동시에 수정 및 보완하여야 할 것으로 판단된다.

또 하나 도식으로 편리하게 사용할 수 있는 것은 정규분포 분위수 대조도(Quantile-Quantile; Q-Q) 도식이다. Q-Q 도식은 측정자료와 모델링 결과가 얼마나 같은 분포를 지니고 있는가를 파악할 수 있는 도식이다. 이 Q-Q 도식은 전혀 사전 지식이 없어서 자료의 초기 특성 파악이 필요할 때 측정-모델링 두 자료의 전반적인 분포 형태를 진단하는 도식이다. 그 예로, 2016년 5월부터 측정이 시작된 KORUS-AQ 한·미 연합 대기질 측정 캠페인에서 측정된 다양한 미세먼지 화학 성분 자료는 10초 단위의 정밀 대기질 측정 자료인데, 그 특성을 파악하고자 하는 경우 초기 진단용 도구로서 Q-Q 도식이 효과적이다.

Figure 4는 2016년 5월 21일 KORUS-AQ 항공 캠페인 당시 측정했던 항공 경로와 미세먼지 화학성분 자료를 CAMx와 비교한 Q-Q 도식의 한 예이다. 그림에서 알 수 있듯이 항공기의 경로를 따라서 x축의 항공기 측정 자료와 y 축의 CAMx 모델링 자료를 도식으로 표현해 본 결과, 질산염(nitrate)과 암모늄염(ammonium)은 항공기 측정치에 비해 CAMx 모델이 소폭 과대모사를, 그리고 황산염과 포름알데히드는 과소모사되는 경향을 보였음을 한눈에 알 수 있고, 과소모사 경향은 농도가 클수록 그 경향은 증가함을 알 수 있다. 2016년 KORUS-AQ 한미 대기질 캠페인에서는 항공기 관측을 통해 미세먼지 질량 농도뿐만 아니라, 화학성분별 농도까지 상세히 측정되었으며, 당시 국내 상공의 측정치가 전무한 상황에서,

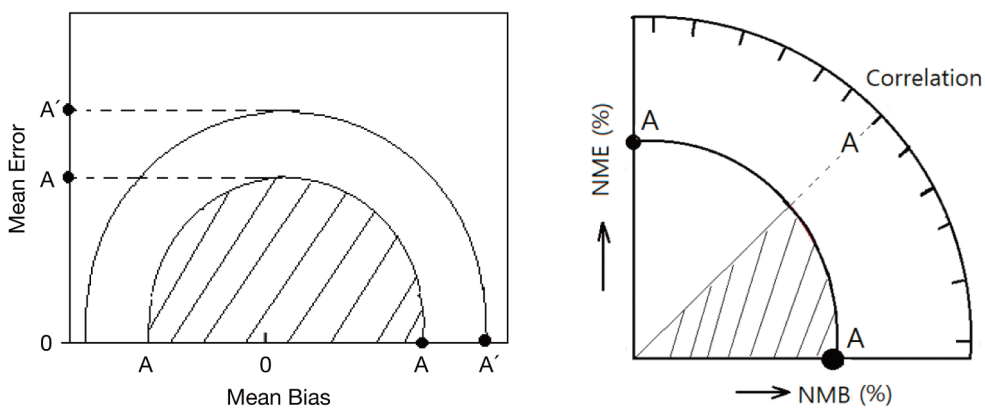


Figure 3. Modified soccer plots and Tayer diagram. Here value A and A' denote the reference values for flat areas and mountainous areas, respectively.

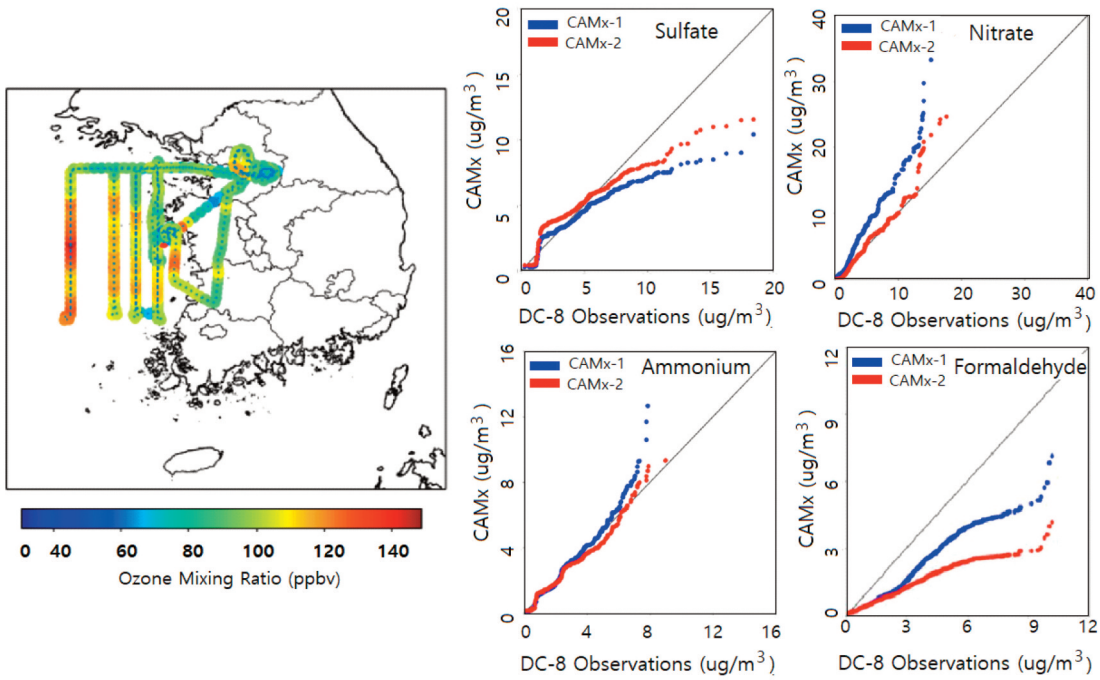


Figure 4. (Left) Map of observed ozone (ppb) from KORUS-AQ DC-8 flight for May 21, 2016, and (right) examples of Quantile-Quantile plots for two different runs of CAMx with different initial conditions (Korea Electric Power Corporation Research Institute, 2020).

Q-Q도식은 측정자료 구조를 파악하는 데 중요한 연구 도구로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결론

모델 결과의 검증을 위해 필연적으로 요구되는 통계 오차 유의성 문제를 해결하기 위하여 대기질 모델링의 정확도 평가에 사용해 오던 통계 검증지표들을 정리하고 그 기준치를 요약하였다. 본 연구에서는 대기질 모델의 입력자료인 기상 자료 또한 중규모 기상모델의 출력자료이므로 이를 통합적으로 모두 적용할 수 있도록 통계 검증지표들을 도입하였다.

최종 선별한 검증 변수로서 국내외적으로 주로 많이 사용되는 통계 검증지표는 MB, ME, MNB, MNE, RMSE, IOA, R, FE, FB로 총 9가지 지표를 선정하였고, 그 기준값을 국내외 문헌을 통해 조사하였다. 아울러 이들 통계 검증지표들의 기준치에 대한 논의뿐만 아니라 이들 통계 검증지표값을 효과적으로 표시하는 표출 도구 혹은 다이어그램들로 축구 도식, 테일러 도식, Q-Q 도식을 함께 논의하였다.

연구 결과 기상모델의 경우 MB와 ME가 주요 지표로 대부분 사용되어 왔고, IOA는 대부분 0.7 이상을 요구하였으며, 상관계수(R)는 풍속 0.5, 그 외 기상변수에 대해서는 0.6 이상을 요구하였다. 대기질 모델 결과 검증을 위해서는 NMB와 NME 지표가 주로 사용되었고, 기상모델과 달리 MB와 ME는 잘 사용되지 않았으며, IOA, R 등의 기준값은 기상모델 결과보다는 대기질 모델에서 유의 수준을 다소 완화하여 사용되고 있었다. 그러나 기상모델의 경우 우리나라의 산악 지역에 맞도록 재조정할 필요가 있을 것으로 판단하였고, 기상 및 대기질 모델의 결과 산출물은 시간규모(시간평균, 일평균, 계절평균)로 구분하여 기준치를 도출할 필요가 있다고 판단하였다.

모델 출력자료 검증 수행시, 격자 평균값인 모델값과 지점 값인 관측 값과의 비교는 어떠한 통계 검증지표값을 사용하더라도 모델 자체의 불확실성이 분명 내재되어 있으며, 특히 단기간의 자료일 경우 더 유의하여야 한다. 특히 대기오염물질 모델링 결과는 모

델의 목적(예를 들어 한시간 농도, 일평균 농도, 일중 최대 농도 등)에 따라, 통계지표의 선정 기준을 다르게 도출할 필요가 있으므로 국내 모델링 결과모델 통계 지표의 활용 사례 등을 모델의 시간규모에 맞게 구분하여 설명하고 정리할 필요가 있다. 따라서 다수의 모델링 결과를 바탕으로 구분된 시간규모에 따라 다양하게 통계 검증지표를 적용하도록 구축하고 이들을 개선하여 향후 더 신뢰성 있는 검증 결과를 도출 할 수 있을 것을 기대해 본다.

향후 상세한 모델 적용 상황에 따른 통계 검증지표의 기준 설정연구를 통해 그 기준치를 합리적으로 수정하고 추가 개발하여야 할 것으로 판단되며, 통계적으로 적합도 유무만을 판정하는 것이 아닌, 모델 결과가 실제 대기의 내부 경향을 잘 모사하는 지에 대한 통계 검증지표의 개발 또한 추가적으로 필요하다고 판단된다. 마지막으로 특히 모델링 연구진으로부터 도출된 다수의 모델링 결과와 다양한 시간 평균 자료로 분류하여 그 기준치를 개발하고 정립하는 것이 필요하며, 이와 병행하여 여러 가지 통계적 도구를 구축하여 미세먼지 등의 대기오염물질에 대한 모델링 특성 연구로 인해 본 연구 결과의 활용도가 높아질 것으로 기대한다.

사사

본 연구는 한국전력공사의 지원(CX72180045)을 받아 연구되었으며, 2020년도 기초연구지원사업(No. 2020R1A6A1A03044834)의 일부 지원에도 감사드립니다.

References

Borge R, Alexandrov J, Lumbreras J, Rodriguez E. 2008. A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula. Atmospheric Environment. 42: 8560-8574.

Boylan JW, Russell AG. 2006. PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three dimensional air quality models. Atmospheric Environment. 40: 4946-4959.

Byun DW, Kim ST, Kim SB. 2007. Evaluation of air quality models for the simulation of a high ozone episode in the Houston metropolitan area. Atmospheric Environment. 41: 837-853.

Chen D, Xie X, Zhou Y, Lang J, Xu T, Tang N, Zhao Y, Liu X. 2017. Performance Evaluation of the WRF-Chem Model with Different Physical Parameterization Schemes during an Extremely High $PM_{2.5}$ Pollution Episode in Beijing. Aerosol and Air Quality Research. 17: 262-277.

Choi DR, Koo YS, Jo JS, Jang YK, Lee JB, Park HJ. 2016. The effect of dust emissions on PM_{10} concentration in East Asia, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. 32(1): 32-45. [Korean Literature]

Emery C, Tai E, Yarwood G. 2001. Enhanced Meteorological Modeling and Performance Evaluation for Two Texas Ozone Episodes, Prepared for the Texas Natural Resource Conservation Commission. ENVIRON International Corporation. Novato, CA.

Emery C, Liu Z, Russell AG, Odman MT, Yarwood G, Kumar N. 2017. Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance. Journal of the Air & Waste Management Association 67(5): 582-598.

Environ. 2014. User's Guide: Comprehensive Air Quality Model with Extensions Version 6.1, http://www.camx.com.

Environ and Alpine. 2012. Western Regional Air Partnership (WRAP) West-wide Jump-start Air Quality Modeling Study (WestJump

AQMS) – WRF Application/Evaluation. ENVIRON International Corporation, Novato, California. Alpine Geophysics, LLC. University of North Carolina. February 29.

Fox DG. 1981. Judging air quality modeled performance. Bulletin of American Meteorological Society 62: 599-609.

Grell GA, Emeis S, Stockwell WR, Schoenemeyer T, Forkel R, Michalakes J, Knoche R, Seidl W. 2000. Application of a multiscale, coupled MM5/chemistry model to the complex terrain of the VOTALP valley campaign. Atmospheric Environment. 34: 1435-1453.

Grell GA, Peckham SE, Schmitz R, McKeen SA, Frost G, Skamarock WC, Eder B. 2005. Fully coupled "online" chemistry within the WRF model. Atmospheric Environment. 39: 6957-6975.

Hogrefe C, Civerolo KL, Hao W, Ku JY, Zalewsky EE, Sistla G. 2008. Rethinking the assessment of photochemical modeling systems in air quality planning applications. J. Air Waste Management Association. 58: 1086-1099.

Hogrefe C, Hao W, Zalewsky EE, Ku JY, Lynn B, Rosenzweig V, Schultz MG, Rast S, Newchurch MJ, Wang L, Kinney PL, Sistla G. 2011. An analysis of long-term regional-scale ozone simulations over the northeastern United States: Variability and trends. Atmospheric Chemistry and Physics 11: 567-582.

Hurley PJ. 1999. The Air Pollution Model (TAPM) Version 1: Technical Description and Examples. CSIRO: Clayton, Australia. 11: 567-582.

Ju H, Bae C, Kim BU, Kim H, Yoo C, Kim S. 2017. $PM_{2.5}$ Source Apportionment Analysis to Investigate Contributions of the Major Source Areas in the Southeastern Region of South Korea. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. 34(4): 517-533. [Korean Literature]

Korea Electric Power Corporation Research Institute. 2020. Study of $PM_{2.5}$ in Korea (SPIKE). Contributions from different sources and regions:3002017909.

Kim S, Kim O, Kim BU, Kim HC. 2017. Impact of Emissions from Major Point Sources in Chungcheongnam-do on Surface Fine Particulate Matter Concentration in the Surrounding Area. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. 33(2): 159-173. [Korean Literature]

Kryza M, Werner M, Dore AJ, Vieno M, Blas M, Drzeniecka OA, Netzel P. 2012. Modelling meteorological conditions for the episode (December 2009) of measured high PM_{10} air concentrations in SW Poland – application of the WRF model, International Journal of Environment and Pollution. 50: 41-52.

McNally DE. 2009. 12km MM5 Performance Goals. Presentation to the Ad-Hoc Meteorology Group. 25-June.

Miglietta MM, Thunix P, Georgieva E, Pederzoli A, Bessagnet B, Terrenoire E, Colette A. 2012. Evaluation of WRF model performance in different European regions with the DELTA-FAIRMODE evaluation tool. International Journal of Environment and Pollution. 50: 83-97.

National Institute of Environmental Research (NIER). 2010. A study of data accuracy improvement for national air quality forecasting(III). [Korean Literature]

National Institute of Environmental Research (NIER). 2013. Studies on the optimization

method for improving the accuracy of air quality modeling. [Korean Literature]

National Institute of Environmental Research (NIER). 2016. A study of accuracy improvement of numerical air quality forecasting model(III). [Korean Literature]

National Institute of Environmental Research (NIER). 2017. A study of accuracy improvement of numerical air quality forecasting model(III). [Korean Literature]

National Research Council (NRC). 2007. Models in Environmental Regulatory Decision Making. Washington, DC: National Research Council of the National Academies. doi:10.17226/11972.

Scire JS, Robe FR, Fernau ME, Yamartino RJ. 2000. A User's Guide for the CALMET Meteorological Model(Version 5). Earth Tech, Inc.

Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Duda MG, Huang X, Wang W, Powers JG. 2008. A description of the advanced research WRF version 3 (Note NCAR/TN-475+STR). National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Micro-scale Meteorology Division.

U.S. EPA (Environmental Protection Agency). 2004. The Ozone Report: Measuring Progress Through 2003. EPA 454/k-04-001. http://www.epa.gov/air/airtrends/aqtrnd04/ozone.html.

U.S. EPA (Environmental Protection Agency). 2005. Technical Support Document for the Final Clean Air Interstate Rule-Air Quality Modeling. March 2005. Docket number OAR-2003-0053-0162. http://www.epa.gov/CAIR/pdfs/finaltech02.pdf.

U.S. EPA (Environmental Protection Agency). 2006. Office of Air Quality Planning and Standards, Technical Support Document for the Proposed PM NAAQS Rule Response Surface Modeling. Research Triangle Park. NC 27711, February 2006.

U.S. EPA (Environmental Protection Agency). 2007. Guidance on the use of models and other analyses for demonstrating attainment of air quality goals for ozone, $PM_{2.5}$, and regional haze. Tech Rep. EPA-454/B-07-002. Research Triangle Park. NC.

Yarwood G, Morris RE, Wilson GM. 2007. Particulate matter source apportionment technology (PSAT) in the CAMx photochemical grid model. Air Pollution Modeling and its Application XVII. 478-492.