

PM_{2.5} 예보를 위한 모델 성능평가와 편차보정 효과 분석

Model Performance Evaluation and Bias Correction Effect Analysis for Forecasting PM_{2.5} Concentrations

김영성* · 최용주 · 김순태¹⁾ · 배창한¹⁾ · 박진수²⁾ · 신혜정²⁾

한국의국어대학교 환경학과, ¹⁾아주대학교 환경안전공학과,

²⁾국립환경과학원 대기환경연구과

(2016년 11월 26일 접수, 2016년 12월 27일 수정, 2017년 1월 2일 채택)

Young Sung Ghim*, Yongjoo Choi, Soontae Kim¹⁾, Chang Han Bae¹⁾,
Jinsoo Park²⁾ and Hye Jung Shin²⁾

Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies

¹⁾*Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University*

²⁾*Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research*

(Received 26 November 2016, revised 27 December 2016, accepted 2 January 2017)

Abstract

The performance of a modeling system consisting of WRF model v3.3 and CMAQ model v4.7.1 for forecasting PM_{2.5} concentrations were evaluated during the period May 2012 through December 2014. Twenty-four hour averages of PM_{2.5} and its major components obtained through filter sampling at the Bulgwang intensive measurement station were used for comparison. The mean predicted PM_{2.5} concentration over the entire period was 68% of the mean measured value. Predicted concentrations for major components were underestimated except for NO₃⁻. The model performance for PM_{2.5} generally tended to degrade with increasing the concentration level. However, the mean fractional bias (MFB) for high concentration above the 80th percentile fell within the criteria, the level of accuracy acceptable for standard model applications. Among three bias correction methods, the ratio adjustment was generally most effective in improving the performance. Albeit for limited test conditions, this analysis demonstrated that the effects of bias correction were larger when using the data with a larger bias of predicted values from measurement values.

Key words : CMAQ/WRF, Major components, Mean fractional bias, Ratio adjustment

1. 서 론

2013년 8월 수도권을 대상으로 미세먼지(PM₁₀) 예보

를 시험 실시한 이후 2014년 2월부터 전국을 대상으로 미세먼지 예보를 실시 중이다. 2015년 1월과 4월에는 각각 초미세먼지(PM_{2.5})와 오존으로 대상을 확장하였다. 2014년 11월에는, (1) 오전 11시와 오후 5시 2차례 예보를, 오전 5시, 11시와 오후 5시, 11시 4차례로 늘렸

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-330-4993, E-mail : ysgnim@hufs.ac.kr

고, (2) 수도권, 강원권, 충청권, 영남권, 호남권, 제주권 등 6개 권역을, 수도권을 서울, 인천, 경기남부, 경기북부 등 4개 권역으로, 강원권을 영동, 영서 등 2개 권역으로 나누어 총 10개 권역으로 구분하였으며, (3) 좋음, 보통, 약간 나쁨, 나쁨, 매우 나쁨의 5등급을, 좋음, 보통, 나쁨, 매우 나쁨의 4등급으로 조정하였다(ME and NIER, 2014).

우리나라에서는 미세먼지 예보에 3차원 수치(numerical) 대기질 모델을 이용하고 있다. 대기질 모델은 배출과 기상 자료를 바탕으로 초기와 경계 조건을 지정하여 대기 중 농도를 계산한다. 대기과정에 대한 물리, 화학적 지식을 토대로 하기 때문에 과거 자료 중심의 통계모델보다 이론적으로 우수하다. 하지만 역사가 오래되었고 자료 이용체계가 잘 갖추어진 기상 자료를 별개로 하더라도, 이용 가능한 모든 자료를 이용하여 최선의 초기장을 구성하고, 영역을 충분히 넓혀 경계 조건의 불확실성을 최소화하여도, 배출까지 정확하게 재현하지 못하는 한 배출의 차이만큼 예보는 부정확하다. 높이 수십 m, 가로, 세로 수 km 크기의 격자 내 평균을 계산하는 예측값을, 국민건강 보호를 위하여 환경기준초과를 점검하고자 주로 인구밀집 지역의 지표 부근에 설치한 측정망 측정값과 비교하여 정확도를 판단하는 것도, 모델이나 입력자료와 무관하게 예보를 어렵게 하는 또 다른 요인이다.

예보의 정확도는, 예보일의 농도를 측정값과 비교하여 적중률(percent correct)이나 감지 확률(probability of detection) 등을 계산하여 조사할 수 있다(NIER, 2014; USEPA, 2003). 이번 연구에서는 예보 정확도 조사의 전 단계로, 현재 수준의 모델과 입력자료를 이용하였을 때 모델의 성능을 점검하고자 첫 번째로, 2012년 5월부터 2014년 12월까지 약 3년간 예보에 사용되는 모델의 PM_{2.5} 계산결과를 측정값과 비교하였다. 측정값으로는 서울 불광동 집중측정소에서 필터로 측정된 질량농도와 성분 자료를 이용하였다. 두 번째로, 측정값과의 편차를 보정하였을 때 보정 방법에 따른 성능의 변화를 살펴보았는데 모델과 입력자료가 완전하더라도 예측값과 측정값의 근본적인 특성 때문에 두 값이 차이를 보일 수 있는 만큼 두 값을 근접시킬 수 있는 수단이 필요하다고 생각하였기 때문이다.

2. 방 법

2.1 모델링

WRF (Weather Research and Forecast) v3.3 (Skamarock and Klemp, 2008), SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emissions Processor) v2.1 (<http://www.smoke-model.org>), 그리고 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality) 모델링 시스템 v4.7.1 (Byun and Schere, 2006)을 이용하여 2012년 5월부터 2014년 12월까지 약 3년간 PM_{2.5} 농도를 예측하였다. WRF의 초기값으로 GFS (Global Forecasting System) 자료를 이용하였다. WRF 모델 결과로부터 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor)을 이용하여 배출자료 처리와 대기질 모델링에 필요한 자료를 준비하였다.

표 1은 CMAQ 이용 조건이다. 인위적 배출자료로, 동북아시아에 대해서는 2006년 INTEX-B (Intercontinental Chemical Transport Experiment-Phase B) 자료를 (Zhang *et al.*, 2009), 우리나라에 대해서는 2007년 CAPSS (Clean Air Policy Support System) 자료를 (<http://airemiss.nier.go.kr>) 이용하였으며, SMOKE를 이용하여 격자별 시간자료를 얻었다. 생물학적 배출자료로는 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) v2.04 (Guenther *et al.*, 2006)을 이용하였다. 그림 1은 CMAQ의 격자 모습으로, 수평방향 격자 크기는 각각 27, 9, 3 km였다. 연직방향으로는 시그마 좌표를 이용하였고, 50 kPa까지 15층이었으며 가장 아래층의 높이는 약 32 m였다. 모델링 시스템의 예보 기능을 점검하고자 하였기 때문에 CMAQ에서도 측정값을 이용한 자료 동화는 시도하지 않았다.

Table 1. CMAQ modeling system configurations.^a

Chemical mechanism	SAPRC99
Chemical solver	EBI
Aerosol module	AERO5
Boundary condition	Default profile for the 27-km domain
Advection scheme	YAMO
Horizontal diffusion	Multiscale
Vertical diffusion	Eddy
Cloud scheme	RADM

^aSAPRC, Statewide Air Pollution Research Center; EBI, Euler backward iterative; AERO5, the fifth-generation modal CMAQ aerosol model; YAMO, Yamartino advection; RADM, Regional Acid Deposition Model.

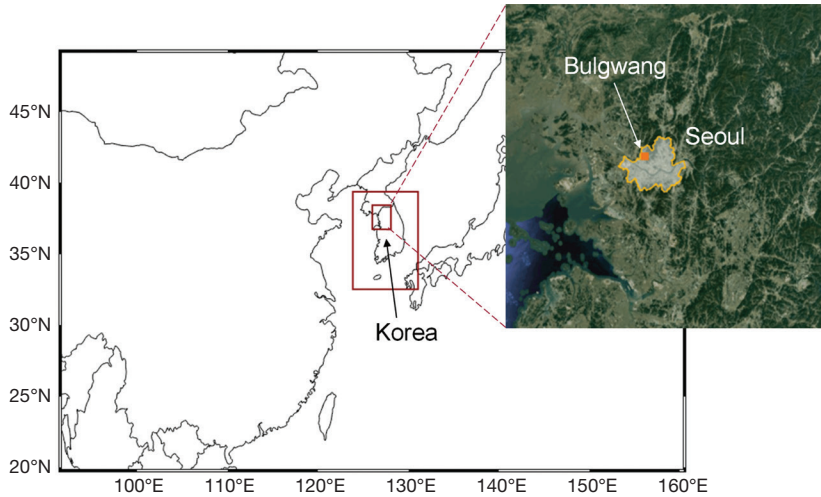


Fig. 1. Modeling domain consisting of three grids with horizontal resolutions of 27, 9, and 3 km. Location of the Bulgwang intensive measurement station is shown on the finest grid.

2.2 농도 측정

서울 불광동 집중측정소(126.93°E, 37.61°N, 해발 67 m; 그림 1)에서 WINS (well impactor ninety-six) 임팩터와 연속채취기(PMS-103, APM)를 이용하여 24시간 동안 유속 16.7 L/min로 PM_{2.5} 시료를 채취하였다. 질량농도 측정과 무기이온 분석을 위한 시료는 20°C 항온과 35% 항습 조건에서 24시간 항량시킨 테플론 필터(Zefluor, Pall)를, 탄소성분 분석을 위한 시료는 850°C에서 4시간 이상 가열하여 전처리한 석영 필터(Tissuquartz 2500QAT-UP, Pall)를 이용하였다.

시료채취 전후의 필터 무게는 필터무게 자동 계량 시스템(MTL)에서 전자저울(UMX2, Mettler Toledo)을 이용하여 측량하였다. 무기이온은 이온크로마토그래피(ICS 2000, Dionex)로 분석하였으며, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ 등 음이온 분석에는 AG15와 AS15 컬럼을, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ 등 양이온 분석에는 CG12와 CS12 컬럼을 이용하였다. 탄소성분은 Sunset의 OCEC 분석기를 이용하여 TOT(thermal optical transmittance) 방법으로 분석하였다. 시료 채취와 측량, 농도 분석에 관한 상세한 내용은 Jeon *et al.* (2015)를 참조할 수 있다. 대상기간 질량농도와 무기이온, 탄소성분 농도를 모두 측정할 일수는 전체 974일 중 47%인 460일로, 2012년 146일, 2013년 138일, 2014년 176일이었다.

2.3 모델 성능평가

모델 성능은 MFB (mean fractional bias), 상관계수(R), 그리고, 예측값과 측정값의 최적합치선의 기울기와 절편을 이용하여 평가하였다. MFB는 식(1)과 같이 표시되는데(Boylan and Russell, 2006),

$$MFB = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \frac{p_i - m_i}{p_i + m_i} \tag{1}$$

여기서 p_i 와 m_i 는 각각 예측값과 측정값, N 은 자료수이다. 편차나 오차를 측정하는 많은 지표 가운데 MFB를 이용한 이유는, (1) 측정값과 예측값 평균에 대한 상대 오차를 계산하기 때문에 과대평가와 과소평가 때 편차의 크기가 동일하며, (2) 농도에 따라 변하는(최선의 모델이 달성할 수 있는) 성능 목표(goals)와 (보편적 모델이라면 달성하여야 할) 성능 기준(criteria)이 주어지고, (3) 절대값을 계산하는 오차에 비하여 +, -로부터 과대, 과소를 판단할 수 있기 때문이었다. 성능 목표와 기준은(Boylan and Russell, 2006),

$$\begin{aligned} |MFB(\text{goals})| &\leq 1.7e^{-2\bar{C}} + 0.3 \\ |MFB(\text{criteria})| &\leq 1.4e^{-2\bar{C}} + 0.6 \end{aligned} \tag{2}$$

로 주어지는데, \bar{C} 는 $(\bar{p} + \bar{m})/2$ 로 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, \bar{p} 와 \bar{m} 는 각각 예측값과 측정값 평균이다.

상관계수 R과 최적합치선의 기울기와 절편은 예측

값과 측정값의 상관관계에 대한 전반적 정보를 얻기 위하여 선택하였다. 절편은, 세로 축의 예측값 평균으로 나는 상대값을 이용하였는데, 절대값은 세로 축의 범위에 따라 값의 크기가 변하기 때문이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 성능평가

표 2(a)는 24시간 PM_{2.5}에 대한 모델 성능평가 결과이다. 전체 평균 예측값은 측정값의 68%이며, MFB는 목표선 밖이지만 차이가 크지 않다(그림 2(a)). 상관계수는 0.68로 보통 수준이고 최적합치선의 기울기는 0.56으로 1보다 충분히 작으며 상대절편도 작지 않다. 국내에서 모델 예측값은 측정값보다 작은 것이 보통인데(NIER, 2014; ME, 2013; Koo *et al.*, 2012), 그림 2(a)를 보면 농도가 높을수록 편차가 커져서 성능이 저하되는 모습이다(Ghim *et al.*, 2016). 표 2(a)에서도 농도가 ≤20백분위수로 가장 낮을 때 기울기가 60~80백분위수에 이어 2번째로 1에 가깝고 상대절편이 가장 작으며, 농도가 >80백분위수로 가장 높을 때 기울기가 가장 작아지는 등 다른 지표에서도 유사한 경향을 관찰할 수 있다. 하지만 상관계수는 모든 자료를 이용

하였을 때보다 농도 범위를 구분하였을 때 값이 작고, 농도가 낮은 편인 20~40백분위수 때 상관계수가 가장 작은데, 농도를 범위별로 구분함에 따라 농도 변화의 영향이 제한되면서 나타난 현상으로 생각된다.

표 2(b)는 PM_{2.5} 주요 성분에 대한 성능평가 결과이다. 무기이온은 8개 이온을 분석하였지만 CMAQ이 K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ 등 3개 이온 농도를 계산하지 않아 5개 이온에 대해서만 성능을 조사하였다. NO₃⁻의 편차가 양일 뿐 다른 성분은 모두 음이며, 그림 2(b)의 MFB를 보면 OC가 크게 과소평가되며 기준선 밖인데 비하여, Na⁺, Cl⁻, NH₄⁺ 등이 목표선 안이다. 미국에서는 기타(other) 성분의 과대평가가 PM_{2.5} 성능평가를 결정하는 주요한 요인이나(Zhang *et al.*, 2014; Appel *et al.*, 2008), 그림 2(b)에서는 과소평가되었을 뿐 아니라 목표선에 근접하여 평가결과가 다르다. 목표선과 기준선이 농도에 따라 변하는 그림 2(b)와 달리 표 2(b)에서는 농도가 높은 2차 이온이 다른 성분에 비하여 상관계수가 크고 기울기도 1에 가깝게 나타나는 등 성능 지표가 보편적으로 좋다.

3.2 편차보정

모델성능을 개선하기 위한 방안으로는 (1) 모델 개선, (2) 배출량 등 입력자료 개선, (3) 모델 결과 보정 등이

Table 2. Model performance for PM_{2.5}.

	Measured (µg/m ³) ^a	Predicted (µg/m ³) ^a	MFB	R	Slope	Relative intercept
Overall	27.3	18.5	-0.42	0.69	0.56	0.17
(a) By concentration range (percentile)						
≤20 th	9.9	8.2	-0.32	0.30	0.74	0.11
20 th ~40 ^{th,b}	16.3	11.9	-0.40	0.18	0.65	0.11
40 th ~60 th	23.0	16.8	-0.39	0.37	1.44	-0.97
60 th ~80 th	32.1	21.6	-0.48	0.32	0.99	-0.48
>80 th	55.2	34.1	-0.51	0.37	0.44	0.29
(b) By chemical components						
NO ₃ ⁻	4.45	5.31	0.43	0.65	0.65	0.45
SO ₄ ²⁻	6.45	3.60	-0.56	0.61	0.40	0.28
NH ₄ ⁺	3.36	2.96	-0.12	0.66	0.62	0.30
Na ⁺	0.15	0.02	-1.48	0.36	0.13	0.17
Cl ⁻	0.19	0.18	-0.22	0.15	0.16	0.83
OC	4.89	2.11	-0.79	0.56	0.28	0.35
EC	1.77	0.74	-0.77	0.46	0.18	0.56
Other ^c	6.04	3.61	-0.34	0.35	0.19	0.69

^a Mean concentration.

^b The lower limit is exclusive while the upper limit is inclusive.

^c The remainder of PM_{2.5} excluding the components listed above.

가능하다. (1)은 가장 근본적 해결방안이지만 많은 시간과 노력이 필요하다. 모델에 큰 결함이 없다면 (2)를 시도할 수 있다. 하지만 입력자료가 아무리 완전하여도 과거에 기초한 정보를 이용하는 까닭에 미래를 예측하

는 데는 한도가 있을 수 밖에 없으며, 성격이 다른 측정값과 비교하여 정확도를 평가하기 때문에 더욱 그러하다. 따라서 예측값을 측정값에 근접시킬 수 있는 수단이 필요하다고 생각하여, (3)의 일환으로 표 3과 같이 편차차감(mean subtraction), 비율보정(ratio adjustment), 최적합치선 맞춤(best-fit line fitting) 등 편차보정 방법에 따른 성능의 변화를 조사하였다(Zhang *et al.*, 2012; McKeen *et al.*, 2005).

편차보정 방법과 무관하게 예측값 평균은 모두 측정값 평균과 동일한데, 예측값과 측정값의 평균을 이용하여 편차를 보정하였기 때문이다. 또한 모든 자료로부터 동일한 값을 빼거나(편차차감), 동일한 비율을 곱하거나(비율보정), 동일한 절편을 뺀 후 기울기로 나누었기 때문에(최적합치선 맞춤) 상관계수는 변함이 없다. 편차차감에서는, MFB는 크게 개선되었으나 기울기가 동일하고 상대절편은 오히려 커졌다. 최적합치선 맞춤에서는, 기울기와 상대절편이 완전하여졌으나 MFB 개선이 작다. 비율보정에서는, MFB가 크게 개선되었고 상대절편이 그대로인 상태에서 기울기가 커지는 등 전체적으로 효과가 좋다. 그림 3(a), (b)는 비율보정을 하였을 때 각각 PM_{2.5}와 주요 성분의 MFB이다. 그림 2(a)에서는 ≤20백분위수 때 목표선에 근접하였을 뿐 모두 목표선 밖이었으나 비율보정한 그림 3(a)에서는 농도가 >80백분위수 때에도 목표선 안이다. 성분별로도 기준선 밖의 OC가 기준선 안으로 들어오고, 각각 그림 2(b)(혹은 표 2(b))와 그림 3(b)로부터 계산한 모든 성분의 MFB 평균이 -0.48에서 -0.19로 감소하는 등 전체적으로 편차가 줄었지만, NO₃⁻는 MFB가 0.43에서 0.70으로 증가하여 기준선 밖이 되었다.

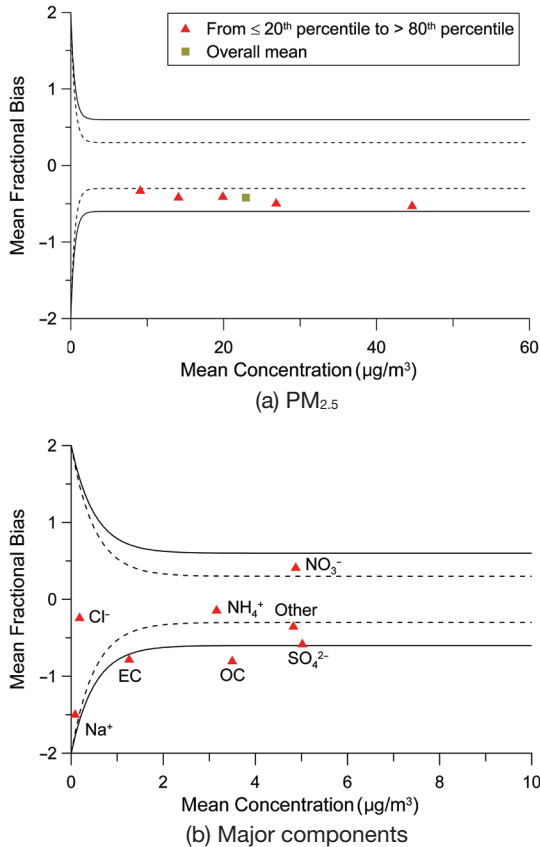


Fig. 2. Mean fractional biases (MFBs) for PM_{2.5} and major components. Solid lines denote upper and lower limits of the performance criteria, and dotted lines denote those of the performance goals. In (a), MFBs are shown by concentration ranges, ≤20th percentile, 20th~40th percentile, and so on, from the left along with overall mean.

3.3 다른 해 측정값을 이용한 편차보정

지금 논문은 과거를 대상으로 하였기 때문에 앞 절에서는 같은 시기 측정값을 이용하여 편차보정을 시험할 수 있었다. 그러나 미래를 대상으로 하는 예보에서

Table 3. Effects of the bias correction on the model performance for PM_{2.5}.

Method	Measured (µg/m ³)	Predicted (µg/m ³)	MFB	R	Slope	Relative intercept
None	27.3	18.5	-0.42	0.68	0.56	0.18
Mean subtraction	27.3	27.3	0.08	0.68	0.56	0.44
Ratio adjustment	27.3	27.3	-0.06	0.68	0.82	0.18
Best-fit line fitting	27.3	27.3	-0.24	0.68	1.00	0.00

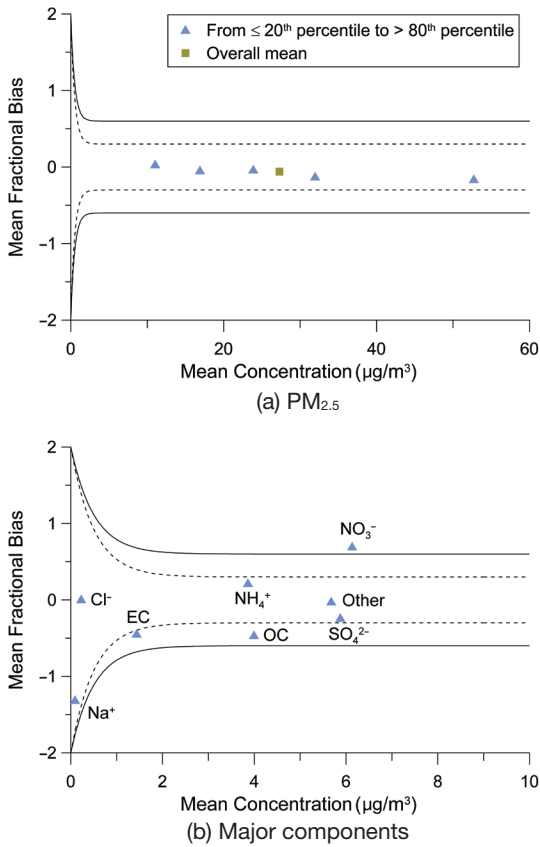


Fig. 3. Mean fractional biases (MFBs) for PM_{2.5} and major components with ratio-adjusted bias corrections. Symbols and lines used are the same as in Fig. 2.

는 과거 측정값만을 이용할 수 있다. 따라서 표 4에서는 2012년 5월부터 2014년 12월까지 대상기간을 연도 별로 나누어 같은 해와 다른 해 측정값을 이용하였을 때 편차보정 효과를 조사하였다. 이용할 수 있는 다양한 과거 측정값을 다른 해 측정값으로 가정하여, 나머지 두 해 각각의 측정값과 두 해를 합하여 2년의 측정값을 이용하였을 때 결과를 비교하였다. 편차보정 중에서는 비율보정의 효과가 가장 나았기 때문에 비율보정만을 시험하였다.

2012년의 경우, 2012년의 예측값을 2012년 같은 해 측정값으로 보정하였을 때 MFB와 기울기가 많이 개선되었으나 2013년의 측정값을 이용하였을 때 MFB가 더욱 줄고 기울기도 커져 효과가 더 낫다. 2014년 측정값의 보정효과는 각각 2012, 13년 측정값을 이용하였을 때보다 못하다. 2013, 14년 2년의 측정값을 이용하였을 때도 보정효과가 떨어지는 2014년 측정값이 더해진 까닭에, 2013년 측정값만을 이용하였을 때보다 못하다. 2013년은 같은 해 측정값을 이용하였을 때 보정효과가 가장 큰 반면, 2014년은 같은 해 측정값을 이용하였을 때 기울기는 1에 가깝지만 MFB의 보정효과는 다른 해 측정값을 이용하였을 때보다 못하여 지표에 따라 다르다. 보정하지 않은 당초 예측값과 측정값의 편차는 2013년이 가장 크고 2014년이 가장 작다. 편차가 큰 자료의 보정 효과가 더 큰 이유에 대해서는 좀더 다양한 경우를 대상으로 조사가 필요하다.

Table 4. Effects of the bias correction by ratio adjustment on the model performance for PM_{2.5}.

Year	Measured (µg/m ³)	Data used	Predicted (µg/m ³)	MFB	R	Slope	Relative intercept
2012	23.3	None	15.2	-0.43	0.55	0.40	0.39
	23.3	Same year	23.3	-0.03	0.55	0.61	0.39
	23.3	2013	24.3	0.01	0.55	0.64	0.39
	23.3	2014	20.4	-0.15	0.55	0.54	0.39
	23.3	2013, 2014	22.0	-0.08	0.55	0.58	0.39
2013	29.6	None	18.5	-0.46	0.62	0.37	0.40
	29.6	Same year	29.6	-0.01	0.62	0.60	0.40
	29.6	2012	28.4	-0.06	0.62	0.57	0.40
	29.6	2014	24.9	-0.18	0.62	0.50	0.40
	29.6	2012, 2014	26.2	-0.13	0.62	0.53	0.40
2014	28.8	None	21.4	-0.39	0.78	0.78	-0.05
	28.8	Same year	28.8	-0.11	0.78	1.05	-0.05
	28.8	2012	32.8	0.01	0.78	1.19	-0.05
	28.8	2013	34.3	0.05	0.78	1.24	-0.05
	28.8	2012, 2013	33.6	0.04	0.78	1.22	-0.05

4. 요약 및 결론

2012년 5월부터 2014년 12월까지 WRF v3.3와 CMAQ v4.7.1을 이용하여 PM_{2.5}와 주요 성분의 농도를 예측하고, 불광동 집중측정소에서 필터를 이용하여 측정된 24시간 평균값과 비교함으로써, 예보 모델의 성능을 평가하고 측정값을 이용한 편차보정의 효과를 조사하였다.

전체 기간 PM_{2.5} 예측값 평균은 측정값의 68%였다. 농도가 높아질수록 편차가 커져서 성능이 저하되었으나 농도가 >80백분위수 때도 MFB는 기준선 안이었다. 주요 성분별 MFB는, OC가 크게 과소평가되어 기준선 밖인데 비하여 NH₄⁺는 목표선 안이었고, 미국에서 과대평가가 문제가 되는 기타 성분은 과소평가되었을 뿐 아니라 목표선에 근접하여 성능이 양호하였다.

편차보정 방법 중에서는 비율보정의 효과가 대체로 가장 우수하였다. 당초 ≤20백분위수 때만 기준선 안이었던 PM_{2.5} MFB는 비율보정 결과 >80백분위수 때도 목표선 안이 되었다. 주요 성분별 MFB는, 기준선 밖의 OC가 기준선 안으로 들어오는 등 전체적으로 편차가 줄었으나 당초 과대평가되었지만 기준선 안이었던 NH₄⁺는 편차가 더욱 커져 기준선 밖이 되었다.

예보에서는 미래의 측정값을 이용할 수 없으므로 다른 해 측정값을 이용할 때 보정 효과를 조사하여 같은 해 측정값을 이용하였을 때와 비교하였다. 같은 해 자료를 이용하였을 때보다 예측값과 편차가 큰 측정값을 이용하였을 때 보정효과가 커지는 모습이었는데, 이유를 확인하기 위하여서는 좀더 다양한 경우를 대상으로 조사가 필요하였다.

감사의 글

이 연구는 미래창조과학부/한국연구재단 지원 초미세먼지 피해저감 사업단(NRF-2014M3C8A5030623)과 한국외국어대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

Appel, K.W., P.V. Bhawe, A.B. Gilliland, G. Sarwar, and S.J.

- Roselle (2008) Evaluation of the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model version 4.5: Sensitivities impacting model performance; Part II-particulate matter, *Atmospheric Environment*, 42, 6057-6066.
- Boylan, J.W. and A.G. Russell (2006) PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models, *Atmospheric Environment*, 40, 4946-4959.
- Byun, D.W. and K.L. Schere (2006) Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system, *Applied Mechanics Reviews*, 59, 51-77.
- Ghim, Y.S., Y. Choi, S. Kim, C.H. Bae, J. Park, and H.J. Shin (2016) Evaluation of model performance for forecasting fine particle concentrations in Korea using measurement data at the surface (in revision).
- Guenther, A., T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P.I. Palmer, and C. Geron (2006) Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 3181-3210.
- Jeon, H., J. Park, H. Kim, M. Sung, J. Choi, Y. Hong, and J. Hong (2015) The Characteristics of PM_{2.5} concentration and chemical composition of Seoul metropolitan and inflow background area in Korea Peninsula, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 15, 261-271. (in Korean with English abstract)
- 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, *Atmospheric Environment*, 58, 56-69.
- McKeen, S., J. Wilczak, G. Grell, I. Djalalova, S. Peckham, E.-Y. Hsie, W. Gong, V. Bouchet, R. Moffet, J. McHenry, J. McQueen, Y. Tang, G.R. Carmichael, M. Pagowski, A. Chan, T. Dye, G. Frost, P. Lee, and R. Mathur (2005) Assessment of an ensemble of seven real-time ozone forecasts over eastern North America during the summer of 2004, *Journal of Geophysical Research*, 110, D21307, doi:10.1029/2005JD005858.
- ME (Ministry of Environment) (2013) Improvement of Urban-scale Forecasting System for Particulate Matter (IV), Prepared by Ajou University. (in Korean)
- ME and NIER (National Institute of Environmental Research) (2014) Press release, Division of Climate and Air

- Quality Policy of ME, and Korean Integrated Air Quality Forecast Center and Department of Air Quality Research of NIER, October 27. (in Korean)
- NIER (2014) Study on Optimization of the Forecasting Model for Particulate Matter, Prepared by Inha University, Enitech, and Yeungnam University. (in Korean)
- Skamarock, W.C. and J.B. Klemp (2008) A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, *Journal of Computational Physics*, 227, 3465-3485.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency) (2003) Guidelines for Developing an Air Quality (Ozone and PM_{2.5}) Forecasting Program, Research Triangle Park, NC.
- Zhang, H., G. Chen, J. Hu, S.H. Chen, C. Wiedinmyer, M. Kleeman, and Q. Ying (2014) Evaluation of a seven-year air quality simulation using the Weather Research and Forecasting (WRF)/Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) models in the eastern United States, *Science of the Total Environment*, 473, 275-285.
- Zhang, Q., D.G. Streets, G.R. Carmichael, K.B. He, H. Huo, A. Kannari, Z. Klimont, I.S. Park, S. Reddy, J.S. Fu, D. Chen, L. Duan, Y. Lei, L.T. Wang, and Z.L. Yao (2009) Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 5131-5153.
- Zhang, Y., M. Bocquet, V. Mallet, C. Seigneur, and A. Baklanov (2012) Real-time air quality forecasting, Part II: State of the science, current research needs, and future prospects, *Atmospheric Environment*, 60, 656-676.