

Research Paper

기상-대기질 모델을 활용한 2010~2014년 우리나라 PM₁₀ 변동 특성 분석: 기상 요인을 중심으로

남기표* · 이대균* · 박지훈**

국립환경과학원 기후대기연구부 대기질통합예보센터*, 국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과**

Analysis on the Characteristics of PM₁₀ Variation over South Korea from 2010 to 2014 using WRF-CMAQ: Focusing on the Analysis of Meteorological Factors

Ki-Pyo Nam* · Dae-Gyun Lee* · Ji-Hoon Park**

Air Quality Forecasting Center, Climate and Air Quality Research Department, NIER*
Air Quality Research Division, Climate and Air Quality Research Department, NIER**

요약: 본 연구에서는 기상조건 변화에 따른 우리나라 PM₁₀ 농도변화 범위를 정량적으로 산정하기 위하여, 2010년에서 2014년까지(5년간) 모델의 입력자료인 국내의 배출량을 동일하게 가정하였을 때 기상 조건에 따른 우리나라 PM₁₀ 농도변화 범위를 분석하였다. 본 분석에 사용된 모델은 WRF(ver.3.8.1)과 CMAQ(ver.5.0.2)이며, 기상 입력자료는 NCEP FNL 1°×1° 자료, 국외 배출량 목록은 MIX 2010, 국내 배출량 목록은 CAPSS 2010을 이용하였다. 모델 모사결과는 2010년의 전국 일평균 PM₁₀ 농도에 대해 측정값과 0.82의 R값을 보이며 실제 PM₁₀ 농도의 증감경향을 잘 나타냈지만, 모델은 실제 PM₁₀ 농도와 비교하여 과소모의 하는 것으로 나타났다. 기상 및 대기질 모델을 통해 모사된 우리나라 연평균 PM₁₀ 농도는 기상조건의 변화로 인해 2010년 대비 평균적으로 약 2.6 μg/m³의 농도변화를 나타내었으며, 계절별로는 봄, 여름, 가을, 겨울에 대해 각각 4.8 μg/m³, 1.7 μg/m³, 1.7 μg/m³, 4.2 μg/m³의 표준편차를 나타내며 봄철과 겨울철에 상대적으로 큰 PM₁₀ 농도 차이를 나타냈다. 전국 18개 권역을 대상으로한 지역별 분석 결과에서는 기상조건의 변화로 인해 모든 지역에서 연평균 PM₁₀ 농도가 1.0 μg/m³ 이상의 표준편차를 나타냈으며, 특히 서울과 경기북부, 경기남부, 강원영서, 충북 지역의 경우 2.0 μg/m³ 이상으로 타 지역에 비해 상대적으로 높은 차이를 나타냈다.

주요어: 미세먼지, 변동성 분석, 기상조건, WRF, CMAQ

First Author: Ki-Pyo Nam, Air Quality Forecasting Center, Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, Hwangyong-ro 42, Seogu, Incheon, Korea, Tel: +82-32-560-7722, E-mail: kipyonam@korea.kr

Corresponding Author: Dae-Gyun Lee, Air Quality Forecasting Center, Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, Hwangyong-ro 42, Seogu, Incheon, Korea, Tel: +82-32-560-7721, E-mail: hileedg@korea.kr

Co-Author: Ji-Hoon Park, Air Quality Research Division, Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, Hwangyong-ro 42, Seogu, Incheon, Korea, E-mail: pjhd080@korea.kr

Received: 11 September, 2018. Revised: 6 October, 2018. Accepted: 8 October, 2018.

Abstract: The impact of meteorological condition on surface PM₁₀ concentrations in South Korea was quantitatively simulated from 2010 to 2014 using WRF (ver.3.8.1) and CMAQ (5.0.2) model. The result showed that seasonal standard deviations of PM₁₀ induced by change of weather conditions were 4.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 4.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for spring, summer, autumn and winter compared to 2010, respectively, with the annual mean standard deviation of about 2.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The results of 18 regions in South Korea showed standard deviation of more than 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in all regions and more than 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Seoul, Northern Gyeonggi, Southern Southern Gyeonggi, Western Gangwon and Northern Chungcheong in South Korea.

Keywords: PM₁₀, Variability analysis, Weather condition, WRF, CMAQ

I. 서론

PM₁₀은 대기중에 부유하고 있는 직경 10 μm 이하 크기의 입자로, 황산암모늄($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), 질산암모늄(NH_4NO_3)을 비롯하여 토양성분(crustal mass)과 타타늄, 철, 아연, 납을 비롯한 미량 유해중금속(trace metal), 유기물질(organic matter), 해염입자 등 다양한 성분으로 구성되어 있다(Chan et al. 1997). 이러한 입자들은 매우 작은 크기로 인하여 호흡을 통해 인체 내로 쉽게 유입되어 기도 및 호흡기질환(Dockery & Pope 1994; Zoran et al. 2011)과 폐질환(Zelikoff et al. 2003), 심혈관계 질환을 발생시킴과 동시에 조기사망률에도 영향을 주는 것으로 보고되고 있다(Dockery et al. 1993; Katsouyanni et al. 1997; WHO 2013; Nishiwaki et al. 2013).

인체 유해성에 대한 국민들의 인식과 우려가 증가함에 따라 우리나라에서는 2013년 8월부터 대기질 예보를 통해 고농도 미세먼지 현상에 대한 사전 대비를 할 수 있도록 관련 정보를 제공하고 있다. 대기질 예보는 단기적으로 인체에 유해한 위험으로부터 사전에 회피할 수 있는 기회를 제공하는 기능이 있지만, 장기적인 안목으로 국민들의 건강을 지키기 위해 미세먼지를 저감시킬 수 있는 대책 마련이 필요하다. 하지만 미세먼지는 배출원에서 직접적으로 배출되는 1차 대기오염 물질의 특성과 대기 중에서 화학 반응을 통해 생성 및 소멸되는 2차 대기오염 물질의 특성을 함께 지니며 동시에(Choi et al. 2013; Kim et al. 2016), 우리나라의 경우 지리적인 특성으로 인하여 중국, 북한 등으로부터 장거리 수송된 미

세먼지 및 그 전구물질의 영향을 받아(Han et al. 2006; Jung et al. 2010; Kim 2016) 미세먼지 현상의 원인 분석 및 대책 마련이 복잡할 실정이다.

미세먼지 농도는 크게 기상조건과 배출량에 의해 크게 영향을 받으므로(Seigneur et al. 2000), 효과적인 미세먼지 저감 대책 마련을 위해서는 기상과 배출량의 변동에 의한 미세먼지 농도변화 특성 및 변동 범위에 대한 이해가 필요하다. 이와 관련한 선행 연구로 Kim et al.(2017)은 BFM(Brute Force Method) 기법을 적용한 기상 및 대기질 모델링 수행 결과, 기상 및 배출량의 영향으로 수도권 미세먼지 농도에 영향을 미치는 국내외 기여도는 차이를 보임을 나타냈으며, 모의된 지상 미세먼지 농도는 기상조건에 의해 큰 차이가 나타남을 밝혔다. 그리고 Shin et al. (2007)은 풍향, 풍속, 상대습도, 일기 유형, 해륙풍 유무 등의 기상인자가 인천지역 PM₁₀ 농도에 미치는 영향을 분석하였으며, Lee et al.(2018)은 여름철의 기온 변화가 PM₁₀과 PM_{2.5}의 감소폭 차이를 발생시킴을 보이며 기상이 미세먼지 농도에 뚜렷한 영향을 미칠 수 있음을 나타냈다.

대기질 모사를 위한 배출량 목록(inventory)의 경우 국내 배출량은 매년 국가에서 공식적으로 산정하는 CAPSS(Clean Air Policy Support System) 자료를 사용할 수 있는 반면, 중국을 비롯한 우리나라 주변국의 배출량 목록은 습득이 제한적임에 따라 국내 대기질 모사시 주변국으로부터 장거리 수송되는 대기오염물질 및 그 전구물질의 영향에 대해 상당한 불확실성을 내포하고 있다. 또한, 기상인자와 PM₁₀

농도의 관계는 대상 시기 및 지역에 따라 그 특성은 상이할 수 있으므로 기온, 강수, 풍향, 풍속, 종관 기상 패턴 등을 종합적으로 반영한 분석이 수행되어야 한다. 하지만 기존에 수행된 선행 연구들은 관측 자료를 활용한 기상 인자와 대기오염물질과의 직접적인 비교를 수행하거나 비교적 짧은 기간 또는 우리나라 일부지역에 대한 분석이 주로 수행되었다. 이에 본 연구에서는 기상-대기질 모델링을 활용하여 2010년에서 2014년까지의 장기 분석을 통해 고정된 배출량 조건에서 기상조건의 변화로 인한 우리나라 PM₁₀ 농도의 변화범위를 정량적으로 분석하고자 한다. 본 연구 결과는 PM₁₀ 농도변화의 원인을 밝히는데 기초 자료로 활용됨과 동시에 향후 미세먼지 대책 마련시 근거 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 연구방법 및 검증

1. 분석 대상기간 및 PM₁₀ 관측자료

본 연구의 분석 대상기간은 2010년에서 2014년으로 지상에서 측정된 우리나라 PM₁₀ 농도는 2010년

51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2012년 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 지속적으로 감소한 뒤 2013년과 2014년에 49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 증가하여 PM₁₀ 농도의 증감 경향이 동시에 나타남과 동시에(NIER 2014), 선행 대기질 모델링 연구에서 많이 사용되고 있는 동아시아 배출량인 MIX 배출목록(Li et al, 2015)은 2010년을 기준연도로 개발되어 본 연구의 분석 대상기간에 대한 국외 배출량의 불확실성을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 기상 변화로 인한 우리나라 PM₁₀의 농도변화 특성을 분석하기 위하여 국립환경과학원 NAMIS(National Ambient air quality Monitoring Information System)를 통해 수집된 도시대기측정망의 지상 PM₁₀ 측정자료를 이용하였으며, 일 자료가 75% 이상 수집되었을 경우에만 유의한 자료로 처리하였다. 그리고 2010년에서 2014년 사이 신규 등록되거나 폐쇄된 측정망 지점은 분석대상에서 제외하여, 지속적으로 운영되었던 220개 지점의 자료를 이용하여 통계 검증 및 분석을 수행하였다. 그리고 분석 대상기간 동안 인위적 활동에 의한 PM₁₀ 농도변화를 분석하기 위해 전국 6대 권역(수도권, 강원권, 충청권, 호남권, 영남권, 제주권)을 기준으로 서울, 춘천, 대전, 광주, 부산, 제주 지점의

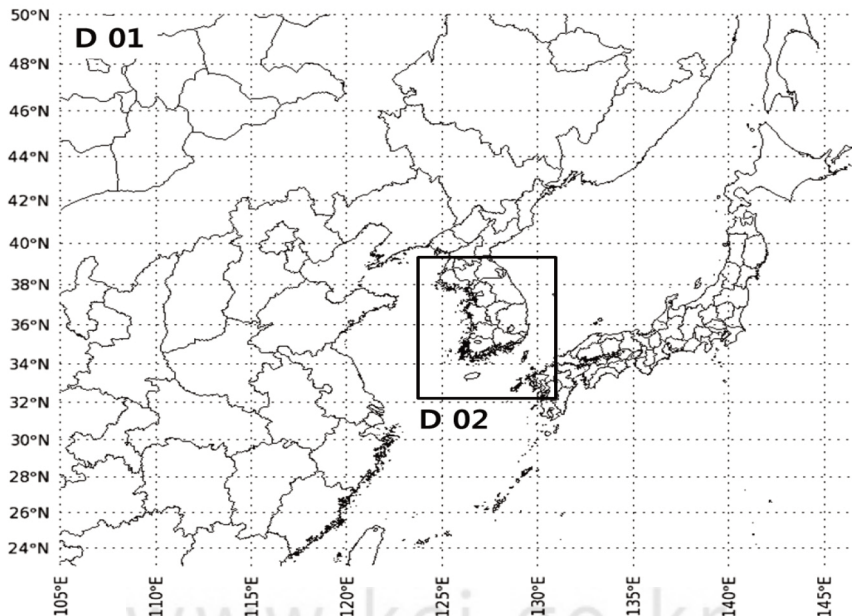


Figure 1. Spatial coverage of the domains of East-Asia (D01) and the Korean Peninsula (D02) used for CMAQ.

기상청 정규기상관측소 중 1개 권역 이상 황사가 발생한 날짜를 분석 대상기간에서 제외하였으며, 연구 대상기간인 2010년에서 2014년까지 연간 황사 발생일은 각각 22일, 14일, 4일, 6일, 14일로 총 60일에 해당한다.

2. 기상 및 대기질 모델

고정된 국내외 배출량 조건에서 기상조건의 변화로 인한 PM₁₀ 농도 변동범위를 평가하기 위해 WRF (Weather Research and Forecast; Skamarock et al., 2008)와 CMAQ(Community Multiscale Air Quality; Byun & Ching 1999)을 활용하여 모델링을 수행하였다. 본 연구 수행을 위해 사용된 기상 모델은 WRF(ver.3.8.1)이며, 대기질 모델은 CMAQ(ver.5.0.2)를 사용하였다. 모델 모사 영역은 38.0°N, 126.0°E를 중심으로 한 동지격자 체계로 크게 동북아 영역(D01)과 우리나라 영역(D02)으로 구성된다(Figure 1). 이 중 동북아 영역은 27km의 수평 분해능을 가지며 동서 방향으로 174개 남북 방향으로 128개의 격자로 구성되었으며, 우리나라 영역은 9km의 수평 분해능을 가지며 동서방향으로 67개, 남북방향으로 82개의 격자로 구성되었다. 기상-대기질 모델 수행에서 사용된 주요 물리-화학과정으로 미세물리 과정은 WRF Single-Moment 3-class scheme

Table 1. WRF (ver.3.8.1) and CMAQ (ver.5.0.2) configurations used in this study

(a) WRF (ver.3.8.1)	
Micro physics	WSM3 (Hong et al. 2004)
Long wave radiation	RRTM (Mlawer et al. 1997)
Short wave radiation	Goddard (Tao et al. 1989)
Land-Surface Model	Noah LSM (Chen & Dudhia 2001)
PBL scheme	YSU (Hong et al. 2006)
(b) CMAQ v5.0.2 (ver.5.0.2)	
Chemical mechanism	SAPRC99 (Carter 1999)
Chemical solver	EBI
Aerosol module	AERO5 (fifth generation CMAQ aerosol module)
Advection scheme	YAMO
Horizontal diffusion	Multiscale
Vertical diffusion	ACM2

(Hong et al., 2004), PBL(Planetary Boundary Layer)은 YSU scheme(Hong et al., 2006)을 활용하였으며, 에어로졸 화학반응은 AERO5, 그리고 광화학반응은 SAPRC99(Statewide Air Pollution Research Center Version 99; Carter 1999)를 적용하였다. 기상-대기질 모델에 사용된 자세한 설정은 Table 1에 정리하였다.

모델링에 사용된 기상 입력자료는 미국 NCEP(The National Center for Environmental Prediction)에서 제공하고 있는 FNL(Final Operational Global Analysis data, NCEP 2000) 1° x 1° 자료를 이용하였으며, 인위적 배출목록의 경우, 국외는 MIX 2010, 국내는 CAPSS(Clean Air Policy Support System) 2010년 자료를 이용하였다. 인위적 배출량은 SMOKE(Sparse Matrix Operator Kernel Emissions; Benjay et al., 2001)을 이용하여 대기질 모델의 전처리 과정을 수행하였으며, 자연적 배출량은 MEGAN 2(Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2; Guenther et al., 2006) 모델을 이용하였다.

3. 모사결과 통계 검증 방법

기상 및 대기질 모델에서 산출된 PM₁₀ 모사결과와 정확도를 평가하기 위해 많은 선행연구에서 사용된 R(Pearson's Correlation Coefficient), RMSE(Root Mean Square Error), MB(Mean Bias), NMB(Normalized Mean Bias)를 이용하여 통계 검증을 수행하였다(Willmott 1981; U.S. EPA 2007). 아래 (1)~(4) 수식에서 N은 관측 지점 수, M_i는 관측 지점에 대한 모사값, O_i는 관측 지점에서의 측정값을 나타내며, \bar{M} , \bar{O} 는 각각 모사값과 측정값의 평균을 나타낸다. 검증에 사용된 통계식 중 R은 측정값과 모사값의 경향성의 유사도를 확인할 수 있으며 1에 가까울수록 높은 유사도를, 0에 가까울수록 낮은 유사도를 나타낸다. RMSE는 모델의 평균적인 오차 크기를 나타내며 MB, NMB는 관측값 대비 모사값의 과대 또는 과소 모사 경향을 나타낸다.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M}) \times (O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2 \times \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i) \quad (3)$$

$$NMB = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N (O_i)} \quad (4)$$

4. 모델 검증 결과

본 연구에서 사용된 대기질 모델의 모사능력을 평가하기 위해 국내외 배출량 인벤토리가 작성된 2010년을 대상으로 국립환경과학원 도시대기측정망에서 수집된 측정자료를 이용하여 통계검증을 수행하였다. Figure 2는 2010년 중 국내 황사 관측일을 제외한 기간을 대상으로 대기질 모델로부터 산출된 전국 일평균 PM₁₀ 모사값과 측정값을 나타낸 산포도 자료이며, Table 2에 우리나라 18개 시도에 대

한 모사값과 측정값의 통계 검증결과를 나타내었다. 모델 모사결과는 2010년의 전국 일평균 PM₁₀ 농도 값에 대해 측정값과 0.82의 R값을 나타내며 실제 PM₁₀ 현상에 대한 계절 및 월별 증감경향을 잘 모사했지만, MB값은 -25.9로 나타나 모델은 실제 농도와 비교하여 상당히 과소모의 (underestimation) 하는 것으로 나타났다. 이러한 과소모의 경향은 모델링 수행시 사용된 배출량 목록에서 도로 및 나대지에서의 비산먼지, 노천소각 등에 대한 미세먼지 배출량의 불확도 영향과 더불어(Kim 2008) 중국, 북한 등 주

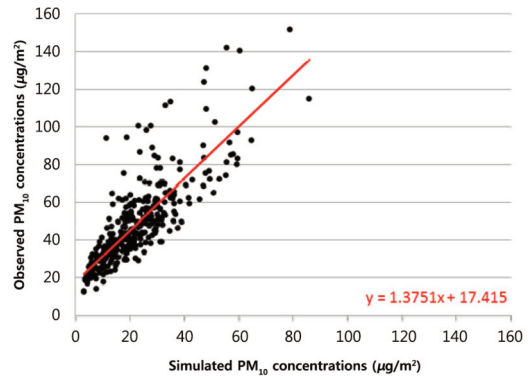


Figure 2. Scatter plots showing observed and simulated daily mean PM₁₀ concentrations in 2010.

Table 2. Discrete statistics for daily mean PM₁₀ for selected regions and cities in 2010

Region	SE	IC	NG	WG	WG	EG
R	0.75	0.72	0.76	0.76	0.75	0.64
RMSE	25.8	29.6	37.9	33.0	36.3	31.7
MB	-18.8	-22.9	-32.8	-26.9	-30.6	-27.2
NMB	-40.6%	-43.5%	-57.6%	-49.1%	-57.4%	-67.6%
Region	DJ	NC	SC	GJ	JN	JS
R	0.76	0.78	0.73	0.74	0.74	0.77
RMSE	24.7	40.0	26.0	29.4	35.1	24.1
MB	-19.5	-34.7	-20.1	-23.7	-30.3	-20.8
NMB	-48.4%	-60.4%	-46.5%	-57.6%	-60.1%	-54.7%
Region	BS	DG	US	NGS	SGS	JJ
R	0.77	0.80	0.69	0.79	0.80	0.73
RMSE	32.5	31.6	30.6	28.1	28.2	35.6
MB	-30.0	-28.0	-26.6	-25.1	-25.6	-30.5
NMB	-65.2%	-61.2%	-59.2%	-58.0%	-60.3%	-71.2%

SE: Seoul, IC: Incheon, NG: Northern Gyeonggi, SG: Southern Gyeonggi, WG: Western Gangwon, EG: Eastern Gagnwon, DJ: Daejeon, NC: Northern Chungcheong, SC: Southern Chungcheong, GJ: Gwangju, JN: Northern Jeolla, JS: Southern Jeolla, BS: Busan, DG: Daegu, US: Ulsan, NGS: Northern Gyeongsang, SGS: Southern Gyeongsang, JJ: Jeju

변 국의 배출량의 불확실성, 황사와 같은 자연 배출량의 미반영 등에 의해 발생한 것으로 보여진다. 계절별 MB의 경우 봄, 여름, 가을, 겨울에 대해 각각 $-31.2\mu\text{g}/\text{m}^3$, $-23.2\mu\text{g}/\text{m}^3$, $-22.5\mu\text{g}/\text{m}^3$, $-27.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나, 미세먼지 농도가 가장 높은 것으로 알려진 겨울보다 봄철에 모델과 측정값의 차이가 큰 것으로 나타났다. 이는, 2010년의 경우 황사가 22일에 걸쳐 발생하여 대기질 모델이 봄철 황사유입시기 전후의 자연 배출량에 의한 조대입자의 영향을 충분히 반영하지 못하는 것에 기인한 것으로 판단된다. 대기질 모사결과를 지역별로 통계 검증하였을 때, 강원 영동을 제외한 대부분 지역에서 PM_{10} 측정값과 모사값의 R 값이 약 0.7 이상으로 유의한 관계를 나타내었으며 모든 지역에서 전국 일평균 PM_{10} 결과에서와 동일하게 모사값이 실제 측정값보다 과소 모사하는 것으로 나타났다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 기상조건 변화에 따른 연평균 PM_{10} 변동 특성 분석

Table 3은 지상 측정소에서 관측된 황사 발생일을 제외한 연평균 PM_{10} 농도 및 모델을 통해 모사된 고정된 배출량 조건에서 기상조건 변화에 따른 연평균 PM_{10} 농도와 2010년 대비 PM_{10} 농도 차이를 나타낸 것이다. 지상에서 측정된 우리나라 연평균 PM_{10} 농도는 2010년부터 2012년까지 지속적으로 감소한 뒤, 2013년에 $3.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가, 2014년에 $1.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소한 것으로 나타났으며, 기상조건 변화에 따른 2010년 대비 PM_{10} 연평균 농도변화는 평균적으로 약 $1.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다.

대기질 모델의 모사결과는 2011년 이후의 PM_{10} 농도의 증감경향을 잘 나타냈지만, 2010년 대비 2011

년 PM_{10} 의 농도변화 경향을 잘 모사하지 못하였으며, 2014년의 경우 전년 대비 PM_{10} 농도의 감소 경향성을 나타내었지만 실제 감소폭과는 상이한 차이를 나타냈다. 이는 2.1절에서 나타낸 것과 같이 황사발생 횟수가 높았던 2010년, 2011년, 2014년에 대해 황사 발생 주변일에 대해 자연 배출원으로부터 발생하는 조대입자의 영향을 모델이 잘 모사하지 못한 것으로 판단된다. 모델 모사결과는 2010년부터 2014년까지 우리나라 연 PM_{10} 농도변화를 실제 측정값과 유사한 수준인 약 $2.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 표준편차를 나타내며 기상조건이 연평균 PM_{10} 농도변화에 크게 기여함을 나타내었다. 하지만 이러한 기상요인의 영향과 동시에 배출량은 고농도 PM_{10} 의 발생빈도 및 강도, 지속시간에 영향을 미칠 것으로 판단되며, 추후 본 연구 결과와 더불어 배출량 변화를 반영한 분석을 통해 기상 및 배출량이 미세먼지 농도에 미치는 종합적인 요인 분석이 가능할 것으로 기대된다.

2. 기상조건 변화에 따른 계절별 PM_{10} 농도 변동 특성 분석

기상조건 변화에 따른 계절별 PM_{10} 농도의 변동특성을 분석하기 위하여 모델을 통해 모사된 2010년부터 2014년까지 우리나라 전국 계절 평균 PM_{10} 농도를 Figure 3에, 2010년 대비 계절별 PM_{10} 농도차이를 Table 4에 나타내었다. 모사된 PM_{10} 농도는 상대적으로 겨울철에 가장 높은 수준을 나타냈으며, 분석대상기간동안 기상조건 변화로 인해 봄철의 PM_{10} 농도가 지속적으로 증가하는 경향성을 보이는 특징이 나타났다. 기상청의 전국 95개 종관기상관측장비(Automated Synoptic Observing System)에서 수집된 평균기온, 강수량, 평균풍속을 분석한 결과 2011년부터 2014년까지의 평균기온은 2010년 대비

Table 3. Measured and simulated annual mean PM_{10} concentrations and differences compared to 2010 (unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Year	2010	2011	2012	2013	2014
Measured PM_{10}	48.3	46.9	44.5	48.4	47.1
Difference	-	-1.4	-3.8	+0.1	-1.2
Simulated PM_{10}	22.5	24.2	21.8	25.5	25.3
Difference	-	+1.7	-0.7	+3.0	+2.8

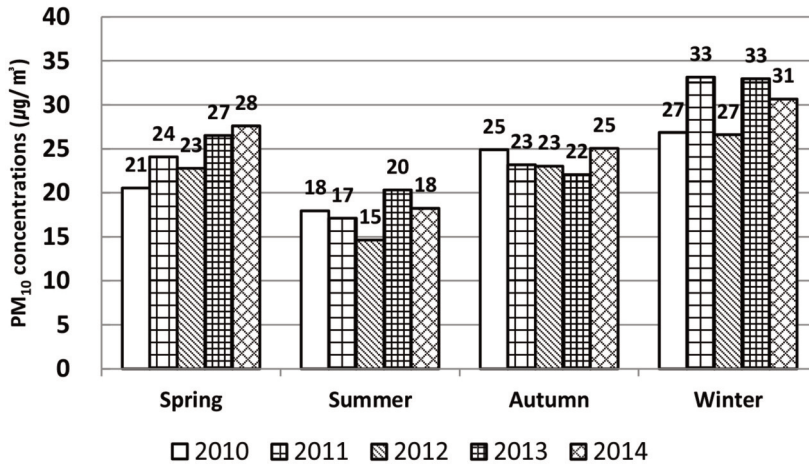


Figure 3. Changes in simulated PM₁₀ concentration from 2010 to 2014 in South Korea.

Table 4. Seasonal PM₁₀ differences from 2011 to 2014 compared to 2010 in South Korea (unit : µg/m³)

Season	2011	2012	2013	2014
Spring	3.6	2.3	6.0	7.1
Summer	-0.9	-3.4	2.3	0.2
Autumn	-1.7	-1.9	-2.8	0.2
Winter	6.3	-0.2	6.2	3.9

각각 0.3 °C, 1.4 °C, 0.8 °C, 2.3 °C 증가, 평균풍속은 각각 0 m/s, -0.1 m/s, -0.1 m/s, -0.3 m/s로 뚜렷한 차이를 나타내지 않았지만, 2011년부터 2014년까지의 계절 평균 강수량은 2010년 대비 각각 59mm, 49mm, 51mm, 87mm 감소하여 봄철의 PM₁₀ 농도변화와 유사한 경향성을 나타내었다. 하지만 우리나라의 PM₁₀ 농도는 국내 자체의 영향과 더불어 중국, 북한 등 국외로부터 장거리 수송되어 국내로 유입되는 PM₁₀과 그 전구물질의 영향을 동시에 받으므로, 추후 이동성 고기압 및 저기압 등의 중관 기상 패턴의 변화가 국내 미세먼지 농도에 미치는 영향 분석이 수행되어야 할 것으로 판단된다. 대기질 모델 모사결과에 따른 계절별 PM₁₀ 농도의 표준편차는 2010년 대비 봄, 여름, 가을, 겨울에 대해 각각 4.8 µg/m³, 1.7 µg/m³, 1.7 µg/m³, 4.2 µg/m³로 나타나 PM₁₀ 농도는 상대적으로 봄철과 겨울철에 기상에 의한 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

3. 기상조건 변화에 따른 PM₁₀ 공간 분포 특성 분석

기상조건 변화에 따른 우리나라 내 지역별 PM₁₀ 농도의 변동범위 특성을 분석하기 위해 Figure 4에 고정된 배출량 조건에서 WRF-CMAQ 모델을 통해 모사된 2010년에서 2014년까지의 평균 PM₁₀ 농도와 표준편차에 대한 공간분포를 나타내었다. 모델에서 모사된 우리나라 PM₁₀ 농도는 수도권과 서부지역을 중심으로 높은 수준을 나타내었으며, 그 외에 화력발전소가 위치한 강릉, 당진 등과 대규모 산업단지가 위치한 구미, 울산, 포항, 창원 등의 지역에서 상대적으로 높은 PM₁₀ 수준을 나타내었는데 이는 수도권, 화력발전소, 산업단지 등 인위적 배출량이 많은 지역에서 자체적으로 생성된 PM₁₀ 양이 많았던 것에 기인한 것으로 판단된다. 그리고 PM₁₀의 공간분포는 우리나라 서해상에서 중국방향으로 PM₁₀ 농도가 점진적으로 증가하는 경향을 나타내었으며 상대적으로 우리나라 서부지역에서 동부지역 대비 높은 PM₁₀ 농도를 나타내는 경향성을 보였는데, 이는 중국을 비롯

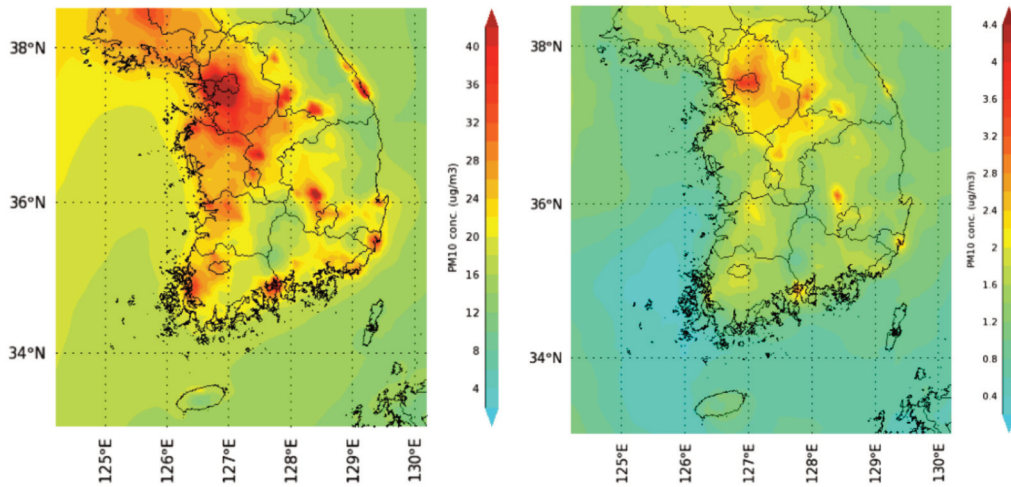


Figure 4. Spatial distribution of averaged PM₁₀ concentrations(left) and standard deviations(right) from 2010 to 2014.

한 국외로부터 장거리 수송된 PM₁₀ 또는 그 전구물질의 영향을 암시하는 것으로 판단된다.

2010년부터 2014년 사이의 연평균 PM₁₀ 표준편차를 살펴본 결과, 전체적으로 PM₁₀ 농도의 공간분포와 유사한 경향을 나타내었지만, 국외의 영향보다는 주로 국내 주요 배출원이 위치한 곳에서 연평균 PM₁₀ 농도변화가 큰 것으로 나타났으며 특히 국내 고배출 지역에서 상대적으로 기상조건 변화의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

4. 기상조건 변화에 따른 지역별 연평균 PM₁₀ 농도 변동 특성 분석

본 절에서는 기상조건 변화에 따른 PM₁₀ 농도변화의 지역적 차이를 정량적으로 분석하기위해 국내 대기질 예보대상 권역을 기준으로 PM₁₀ 변동범위 분석을 수행하였다. 분석 대상 지역은 서울, 인천, 경기북부, 경기남부, 강원영서, 강원영동, 대전, 충북, 충남, 광주, 전북, 전남, 부산, 울산, 경상북도, 경상남도, 제주로 총 18개 권역이며, 세종시의 경우 본 연구의 분석 대상기간에 대한 PM₁₀ 농도가 측정되지 않아 분석 대상지역에서 제외하였다.

Figure 5에 모델을 통해 산출된 2010년에서 2014년 사이 지역별 연평균 PM₁₀ 변동범위와 2010년 대비 PM₁₀ 농도 변동율을 상자그림(box plot) 형태로 나타내었다. 지역별 PM₁₀ 농도는 Figure 4의 공간분포에

서 나타난 것과 같이 수도권 지역과 강원영서, 충청권 지역을 중심으로 높은 수준을 나타냈으며 강원영동, 제주 등의 지역에서는 상대적으로 낮은 수준의 PM₁₀ 농도를 나타내었다. 그리고 기상조건 변화에 따른 PM₁₀ 농도의 변동 폭은 지역별로 상이한 차이를 나타내었으며, 상대적으로 고농도 지역에서 주로 PM₁₀ 농도 변동 폭이 큰 것으로 나타났다. 그리고 2010년 대비 연평균 PM₁₀ 농도변화율은 18개 지역에서 평균적으로 약 9.3%의 변화율을 나타내었으며, 기상조건 변화에 따른 PM₁₀ 농도는 지역 및 시기에 따라 2010년 대비 약 -5%에서 20% 수준의 변화율을 나타냈다.

Table 5에 2010년에서 2014년 사이의 18개 권역별 연평균 및 연구 대상기간 평균 PM₁₀ 농도, 표준편차를 나타내었다. 2010년부터 2014년 사이 기상조건 변화로 인해 발생한 연평균 PM₁₀ 농도의 표준편차는 모든 지역에서 1.0 µg/m³ 이상의 농도 차이를 나타냈으며, 특히 서울과 경기북부, 경기남부, 강원영서, 충북 지역에서 2.0 µg/m³ 이상의 차이를 나타내며 타 지역에 비해 상대적으로 기상조건 변화에 민감한 영향을 받은 것으로 나타났다. 이는 배출량이 변하지 않는 조건하에서 기상만으로도 연 평균 PM₁₀ 농도는 지역별로 상당한 수준의 변동을 보일 수 있음을 나타내며, 지역 배출량의 차이에 따라 기상조건 변화에 따른 PM₁₀ 농도의 변동특성 또한 상이할 수 있음을 나타낸다.

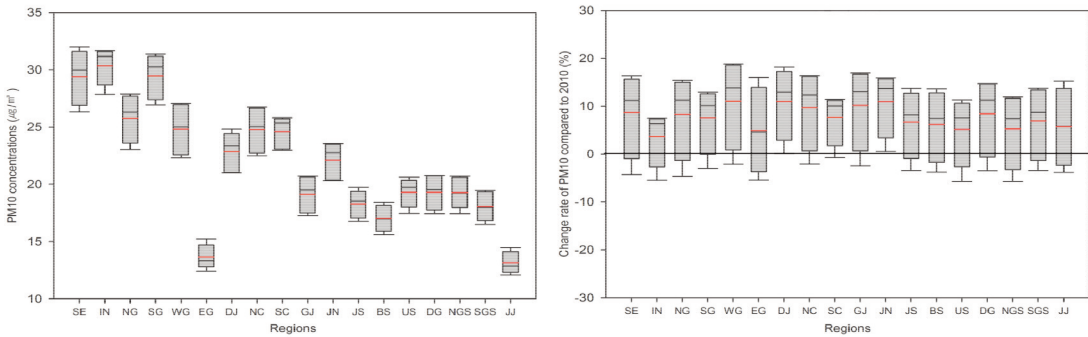


Figure 5. Box-plot of PM₁₀ concentration (above) and change rate of PM₁₀ compared to 2010 (below) for 18 regions in South Korea from 2010 to 2014 (SE: Seoul, IC: Incheon, NG: Northern Gyeonggi, SG: Southern Gyeonggi, WG: Western Gangwon, EG: Eastern Gagnwon, DJ: Daejeon, NC: Northern Chungcheong, SC: Southern Chungcheong, GJ: Gwangju, JN: Northern Jeolla, JS: Southern Jeolla, BS: Busan, US: Ulsan, DG: Daegu, NGS: Northern Gyeongsang, SGS: Southern Gyeongsang, JJ: Jeju).

Table 5. Annual mean PM₁₀ concentrations and standard deviation for 18 regions from 2010 to 2014

Year	Regions									
	SE	IC	NG	SG	WG	EG	DJ	NC	SC	
2010	27.5	29.5	24.2	27.8	22.8	13.1	21.0	23.0	23.2	
2011	30.0	31.7	26.3	30.2	25.0	13.3	23.3	25.0	25.3	
2012	26.3	27.9	23.0	26.9	22.3	12.4	21.0	22.5	23.0	
2013	32.0	31.5	27.9	31.4	26.9	14.2	24.8	26.6	25.7	
2014	31.2	31.2	27.5	31.0	27.1	15.2	24.1	26.7	25.8	
Average	29.4	30.4	25.8	29.5	24.8	13.6	22.8	24.8	24.6	
STDEV	2.4	1.6	2.1	2.0	2.2	1.1	1.8	2.0	1.4	
	GJ	JN	JS	BS	DG	US	NGS	SGS	JJ	
2010	17.7	20.3	17.3	16.2	18.1	18.5	18.5	17.1	12.6	
2011	19.5	22.8	18.5	17.0	19.5	19.7	19.2	18.0	12.8	
2012	17.3	20.4	16.7	15.6	17.4	17.5	17.4	16.5	12.1	
2013	20.6	23.5	19.0	17.9	20.7	20.1	20.5	19.2	13.7	
2014	20.7	23.4	19.7	18.4	20.7	20.6	20.7	19.5	14.5	
AVE	19.2	22.1	18.2	17.0	19.3	19.3	19.3	18.1	13.1	
STDEV	1.6	1.6	1.2	1.2	1.5	1.3	1.4	1.3	1.0	

IV. 결론

본 연구에서는 기상조건 변화가 우리나라의 PM₁₀ 농도에 미치는 영향을 평가하기 위해, 기상 및 대기질 모델을 활용하여 고정된 배출량 조건에서 기상조건 변화에 따른 2010년에서 2014년 사이 우리나라의 PM₁₀ 농도 변동범위를 정량적으로 분석하였다. 모델을 통해 산정된 PM₁₀ 농도의 변화경향은 실제 측정 자료의 변화 경향을 전체적으로 잘 나타내었으며, 모

사된 연 평균 PM₁₀ 농도변화는 실제 측정값과 유사한 수준을 나타내어 기상조건 변화가 연평균 PM₁₀ 농도변화에 크게 기여함을 나타내었다.

기상조건 변화에 따른 계절별 PM₁₀ 변동특성을 분석하기 위하여 모델에서 산정된 전국 계절 평균 PM₁₀ 농도를 분석한 결과, 기상조건 변화로 인해 2010년에서 2014년 사이 봄철의 PM₁₀ 농도가 지속적으로 증가하는 경향성을 보이는 특징을 나타냈으며, 계절별 PM₁₀ 농도는 2010년 대비 봄, 여름, 가을, 겨울에

대해 각각 $4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $4.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 표준편차를 보이며 상대적으로 봄철과 겨울철에 기상조건의 변동에 따른 PM_{10} 농도 차이가 크게 나타났다. 모델을 통해 국내 지역별 PM_{10} 농도를 모사한 결과, PM_{10} 농도는 수도권을 비롯하여 인위적 배출량이 많은 산업단지, 발전소 등이 위치한 지역에서 상대적으로 높은 수준을 보였다. 그리고 기상조건 변화에 따른 지역별 PM_{10} 농도의 변동범위 특성을 분석한 결과, PM_{10} 농도의 표준편차는 모든 지역에서 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 농도 차이를 나타냈으며, 특히 서울과 경기북부, 경기남부, 강원영서, 충북 지역에서 $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 차이를 나타내 상대적으로 타 지역에 비해 기상조건 변화에 민감한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 기상-대기질 모델을 통해 고정된 배출량 조건에서 기상조건의 변화로 인한 우리나라 PM_{10} 농도의 변동범위를 정량적으로 파악하고자 하였다. 하지만, PM_{10} 의 경우 인위적 배출량뿐만 아니라 자연적인 배출원에서 발생하는 조대 입자의 영향이 공존하고 있어 향후 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단되며, 기상-대기질 모델의 경우 다양한 물리적·화학적 가정들을 내포하고 있어 이에 대한 지속적인 보완 및 개선의 노력이 필요할 것으로 판단된다.

References

- Benjey W, Houyoux M, Susick J. 2001. Implementation of the SMOKE emissions data processor and SMOKE tool input data processor in Models-3. U.S. EPA.
- Byun DW, Ching S. 1999. Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multi-scale Air Quality(CMAQ) Modeling System. EPA Report. EPA/600/R-99/030, NERL, Research Triangle Park, NC.
- Carter W. 1999. Documentation of the SAPRC-99 Chemical Mechanism for VOC Reactivity Assessment. Report to California Air Resources Board.
- Chan YC, Simpson RW, McTainsh GH, Vowles, Cohen DD, Bailey GM. 1997. Characterisation of chemical species in $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} aerosols in Brisbane, Australia. *Atmospheric Environment*. 31(22): 3773-3785.
- Chen F, Dudhia. 2001. Coupling an advanced land surface hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Mon. Wea. Rev.*. 129: 569-585.
- Choi JK, Heo JB, Ban SJ, Yi SM, Zoh KD. 2013. Source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ at the coastal area in Korea. *Science of the Total Environment*. 447: 370-380.
- Dockery DW, Pope CA. 1994. Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annual review of public health*. 15(1): 107-132.
- Dockery DW, Pope CA, Xu X, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, Ferris BG, Speizer FE. 1993. An association between air pollution and mortality in six US cities. *New England journal of medicine*. 329(24): 1753-1759.
- Guenther A, Hewitt CN, Erickson D, Fall R, Geron C, Graedel T, Harley P, Klinger L, Lerdau M, McKay WA, Pierce T, Scholes B, Steinbrecher R, Tallamraju R, Taylor J, Zimmerman P. 1995. A global model of natural volatile organic compound emissions. *J. Geophys. Res.*. 100: 8873-8892.
- Han JS, Kim YM, Ahn JY, Kong BJ, Choi JS, Lee SU, Lee SJ. 2006. Spatial distribution and variation of long-range transboundary air pollutants flux during 1997~2004. *Atmosphere*. 22(1): 99-106.
- Hong SY, Dudhia J, Chen SH. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds

- and precipitation. *Monthly Weather Review*. 132(1): 103-120.
- Hong SY, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with and explicit treatment of entrainment processes. *Monthly weather review*. 134(9): 2318-2341.
- Jung J, Kim YJ, Lee KY, Cayetano MG, Batmunkh T, Koo JH, Kim J. 2010. Spectral optical properties of long-range transport Asian dust and pollution aerosols over Northeast Asia in 2007 and 2008. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(12): 5391-5408.
- Katsouyanni K, Touloumi G, Spix C, Schwartz J, Balducci F, Medina S, Rossi G, Wojtyniak B, Sunyer J, Bacharova L, Schouten JP, Ponka A. 1997. Short term effects of ambient sulphur dioxide and particulate matter on mortality in 12 European cities: results from time series data from the APHEA project. *Bmj*. 314(7095): 1658
- Kim BU, Kim OG, Kim HC, Kim ST. 2016. Influence of fossil-fuel power plant emissions on the surface fine particulate matter in the Seoul Capital Area, South Korea. *Journal of the Air and Waste Management Association*. 66(9): 863-873.
- Kim DY. 2008. PM Analysis Using CMAQ in Seoul Metropolitan Area. Policy Research Gyeonggi Research Institute. 6. [Korean Literature]
- Kim HC, Kim EH, Bae CH, Cho JH, Kim BU, Kim ST. 2017. Regional Contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, South Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory. *Atmos. Chem. Phys.*, 17(17): 10315-10332.
- Lee G, Oh HR, Ho CH, Park R. DS, Kim JW, Chang LS, Lee JB, Choi JS, Sung MY. 2018. Slow decreasing tendency of fine particles compared to coarse particles associated with recent hot summers in Seoul, Korea. *Aerosol and Air Quality Research*. 18(9): 2185-2194.
- Li M, Zhang Q, Kurokawa J, Woo JH, He KB, Lu Z, Ohara T, Song Y, Streets DG, Carmichael GR, Cheng YF, Hong CP, Huo H, Jiang XJ, Kang SC, Liu F, Su H, Zheng B. 2015. MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory for the MICS-Asia and the HTAP projects. *Atmos. Chem. Phys. Discuss*. 15(23): 34-813.
- Mlawer EJ, Taubman SJ, Brown PD, Iacono MJ, Clough SA. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 102(D14): 16663-16682.
- NIER. 2014. Annual Report of Air Quality In Korea 2014. NIER-GP2015-087. p. 17-18. [Korean Literature]
- NCEP. 2000. NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analysis, continuing from July, 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research. Computational and Information System Laboratory, <https://doi.org/10.5065/D6M043C6> (accessed on Jan. 03, 2018)
- Nishiwaki Y, Michikawa T, Takebayashi T, Nitta H, Iso H, Inoue M, Tsugane S. 2013. Long-term exposure to particulate matter in relation to mortality and incidence of cardiovascular disease: the JPHC Study. *Journal of atherosclerosis and thrombosis*. 30(3): 296-309.
- Seigneur C, Pun B, Pai P, Louis JF, Solomon P, Emery C, Morris R, Zahniser M, Worsnop

- D, Koutrakis P, White W, Tombach I. 2000. Guidance for the Performance Evaluation of Three-Dimensional Air Quality Modeling Systems for Particulate Matter and Visibility. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 50(4): 588-599.
- Shin MK, Lee CD, Ha HS, Choe CS, Kim YH. 2007. The influence of meteorological factors on PM₁₀ concentration in Incheon. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*. 23(3): 322-331.
- 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. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR. National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 125.
- Tao WK, Simpson J, McCumber M. 1989. An ice-water saturation adjustment, *Monthly Weather Review*. 117(1): 231-235.
- U. S. EPA, 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. EPA-454/B-07-002, Research Triangle Park.
- WHO. 2013. Health Effects of Particulate Matter- Policy implications for countries in eastern Europe. Caucasus and central Asia. p. 6-7.
- Willmott CJ. 1981. On the validation of models. *Physical geography*. 2(2): 184-194.
- Zelikoff JT, Chen LC, Cohen MD, Fang K, Gordon T, Li Y, Nadziejko C, Schlesinger RB. 2003. Effects of inhaled ambient particulate matter on pulmonary antimicrobial immune defense. *Inhalation Toxicology*. 15(2): 131-150
- Zoran DR, Miljevic B, Surawski NC, Morawska L, Gong KM, Goh F, Yang IA. 2012. Respiratory health effects of diesel particulate matter. *Respirology*. 17(2): 201-212.