



## 관측자료와 대기질 모사를 이용한 주요 기준성 대기오염물질의 권역별 장기변화 분석

### Long-term Trend Analysis of Key Criteria Air Pollutants over Air Quality Control Regions in South Korea using Observation Data and Air Quality Simulation

주혜지 · 김현철<sup>1,2)</sup> · 김병욱<sup>3)</sup> · 김영성<sup>4)</sup> · 신혜정<sup>5)</sup> · 김순태\*

아주대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>미국국립해양대기청

<sup>2)</sup>메릴랜드대학 기후위성 연구소, <sup>3)</sup>미국조지아주환경청

<sup>4)</sup>한국외국어대학교 환경학과, <sup>5)</sup>국립환경과학원 대기환경연구과

(2017년 12월 26일 접수, 2018년 2월 1일 수정, 2018년 2월 23일 채택)

Hyeji Ju, Hyun Cheol Kim<sup>1,2)</sup>, Byeong-Uk Kim<sup>3)</sup>, Young Sung Ghim<sup>4)</sup>,  
Hye Jung Shin<sup>5)</sup> and Soontae Kim\*

*Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon, South Korea*

<sup>1)</sup>*Air Resources Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration, College Park, MD, USA*

<sup>2)</sup>*Cooperative Institute for Climate and Satellites, University of Maryland, College Park, MD, USA*

<sup>3)</sup>*Georgia Environmental Protection Division, Atlanta, GA, USA*

<sup>4)</sup>*Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, South Korea*

<sup>5)</sup>*Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, South Korea*

(Received 26 December 2017, revised 1 February 2018, accepted 23 February 2018)

### Abstract

In this study, we analyzed long-term measurements and air quality simulation results of four criteria air pollutants (PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub>) for 10 years, from 2006 to 2015, with emphasis on trends of annual variabilities. With the observation data, we conducted spatial interpolation using the Kriging method to estimate spatial distribution of pollutant concentrations. We also performed air quality simulations using the CMAQ model to consider the nonlinearity of the secondary air pollutants such as O<sub>3</sub> and the influence of long-range transport. In addition, these simulations are used to deduce the effect of long-term meteorological variations on trends of air quality changes because we fixed the emissions inventory while changing meteorological inputs. The nation-wide inter-annual variability of modeled PM<sub>10</sub> concentrations was  $-0.11 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{yr}$ , while that of observed concentrations was  $-0.84 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{yr}$ . For the Seoul Metropolitan Area, the inter-annual variability of observed PM<sub>10</sub> concentrations was  $-1.64 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{yr}$  that is two times rapid improvement compared to other regions. On the other hand, the inter-

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-219-2511, E-mail : soontae.kim@ajou.ac.kr

annual variability of observed  $O_3$  concentrations is 0.62 ppb/yr which is larger than the simulated result of 0.13 ppb/yr. Magnitudes of differences between the modeled and observed inter-annual variabilities indicated that decreasing trend of  $PM_{10}$  and increasing trend of  $O_3$  are more influenced by emissions and oxidation states than meteorological conditions. We also found similar patterns in  $NO_2$ . However,  $NO_2$  trends showed greater regional and seasonal differences than other pollutants. The analytic approach used in this study can be applicable to estimate changes in factors determining air quality such as emissions, weather, and surrounding conditions over a long term. Then analysis results can be used as important data for air quality management planning and evaluation of the chronic impact of air quality.

**Key words** : Criteria air pollutants, Long-term trend, Kriging, Modeling, Region

## 1. 서 론

대기질에 대한 장기 추세 분석은 대상지역의 장기간에 걸친 대기질 변화 정도와 그에 대한 배출량, 기상, 주변 여건 등의 변화 요인을 파악하기 위한 기초작업이다(Chambers *et al.*, 2017; Chambers *et al.*, 2016; Williams *et al.*, 2016; Grundstrom, 2015; Li *et al.*, 2014). 또한 장기 추세 분석결과는 인체에 대한 대기질의 만성영향 등을 평가할 때 이용될 수 있다(Yi *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2014; Son *et al.*, 2011). 국내 대기질의 장기분석과 관련한 선행연구 결과를 살펴보면, 수도권(SMA, Seoul Metropolitan Area)을 포함한 국내의 기준성 대기오염물질의 농도는 지속적으로 변화하고 있다(Kim *et al.*, 2016). 한편 장기간 측정결과를 바탕으로 장기 추세 변화의 원인 규명과 관련된 연구도 수행되고 있다. An *et al.*(2015)은 수원을 대상으로 과거 22년간의 관측자료를 통해 오존의 연평균 증가율과  $NO_2/NO_x$  비의 증가 원인을 추정하였다. 또한, 대기 중 초미세먼지의 질량 농도 및 화학성분 변화에 대한 원인을 규명하기 위해 장거리 이동 등이 고려된 관측기반의 대기 오염원 기여도 분석을 중심으로 문헌연구를 수행하고 있다(Han and Kim, 2015). 하지만, 관측자료를 이용한 장기 분석의 경우 특정 지역 및 대상 기간에 대한 분석은 가능하나, 시공간적인 관측자료 부재 시에는 분석 자체가 어렵고, 2차 오염물질의 생성 및 장거리 이동 등 중간과정에 대한 해석이 쉽지 않다. 또한, 장기적인 측면에서 대기오염물질의 농도 변화 요인으로 배출량 또는 기상 변화를 고려해 볼 수 있으나(Kim *et al.*, 2017b), 어떤 요인이 변화를 가져온 주된 요인인지 구별하기 어렵다. 특히 우리나라는 지리적

특성상 계절별로 장거리 이동으로 인한 영향이 강하게 나타난다(Kim *et al.*, 2017d). 최근 많은 관심을 받고 있는 초미세먼지의 상당부분과 오존의 경우 2차 생성되며, 관련 화학반응의 비선형성과 장거리 이동 영향 등을 고려한다면 관측 외에 대기질 모사 등을 활용한 분석이 도움될 수 있다(Bae *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2017c). 이와 관련된 유사 연구로 Kim *et al.*(2017b)은 대기질 모사 시 배출량 입력자료를 고정한 모사를 통해 장기간 기상 변동에 따른 농도 변화 영향을 유추하였다. Colette *et al.*(2011)은 관측값과 배출량을 고정시킨 모사값의 비교를 통해 유럽의 대기질 동향을 검토하였다. 또한, Han *et al.*(2011)은 2005년부터 2009년까지 농촌 지역의  $PM_{2.5}$ 를 채취하였으며, 역귀적 기반 모델을 통해  $PM_{2.5}$  농도에 영향을 주는 주요 원인을 분석하였다.

한편, 대기질 관리의 궁극적인 목적이 일반 국민들의 대기오염에 대한 노출을 최소화하고, 건강 영향을 파악하기 위한 것이라면(Park and Hwang, 2017), 대기질 관리를 위한 기술 분석의 일환으로써 장기간에 걸친 권역별 기준성 대기오염물질의 변화 특성 분석과 이를 통해 각 권역별 거주 인구의 장기 노출 정도와 영향에 대한 평가가 수행되어야 한다. 그러나, 현재 도시 대기 측정망 관측자료만으로는 관측소의 부재 및 자료 누락 등의 이유로 신뢰할 만한 장기 분석이 어려울 수 있다. 특히, 국내 도시대기 측정망은 수도권과 대도시를 중심으로 분포하고 있기 때문에 같은 권역이라 하더라도 대기오염물질 농도의 공간적 편차가 발생할 수 있는 점을 고려하면(Oh *et al.*, 2016), 권역 전반에 대한 농도 분포 및 변화 특성을 검토할 수 있는 방법론이 필요하다.

본 연구에서는 2006년~2015년 사이 10년간의 주요 기준성 대기오염물질의 장기 측정자료와 대기질 모사 결과를 분석하고, 변화 추세를 상호 비교함으로써 장기 농도 변화의 원인을 추정함과 동시에 권역별 농도 수준 및 변화 정도 등을 분석하고자 하였다. 이를 위해 대기질 모사는 배출량을 고정하고 기상만을 변화시켜, 기상변화 및 배출량 변화가 동시에 반영된 측정과의 차별을 두었다. 관측자료의 경우 본 연구에서는 측정소가 위치한 관측지점뿐 아니라 권역에 걸친 전반적인 농도 변화를 검토하기 위하여 Kriging을 이용한 공간 내삽을 적용하였다. 이를 통해, 측정 및 모사결과에서 도출한 변화 추세를 상호 비교할 수 있도록 하였고, 궁극적으로 장기 농도 변화의 원인을 추정함과 동시에 권역별 농도 수준 및 변화 정도 등을 분석하였다. 다만, 본 연구의 경우 대기질 모사가 대상 기간 및 영역, 입력자료 그리고 이용되는 모델 자체의 불확도로 인해 실제 관측값과 차이를 보이는 점을 감안하여 모사값과의 직접적인 비교보다는 관측값과 모사값의 변화율을 선형적으로 도출하고, 그 기울기를 비교하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 자료 및 분석

대기질 모사는 CMAQ (Community Multiscale Air

Quality; Byun *et al.*, 2006) version 4.7.1을 이용하여 남한을 대상으로 9km 수평해상도 격자를 설정하여 수행하였으며, 동북아를 대상으로 27km 격자 설정 및 모사를 통해 경계조건을 마련하였다. 대상 기간은 2006년부터 2015년까지 10년간 모사를 수행하였다. 대상영역은 그림 1과 같이 수도권, 충청권, 강원권, 호남권, 영남권, 제주권으로 나누어서 권역별 대기질을 분석하였다. 표 1에 기상 및 대기질 모델 구성에 관한 상세한 정보를 나타내었다.

대기질 모사를 위한 기상 입력자료는 미국해양대기청 (NOAA)의 재분석 자료인 FNL (Final Operational Global Analysis data; NCEP, 2000)을 기상 초기장으로 하여 WRF (Weather Research and Forecast; Skamarock *et al.*, 2008) version 3.4.1 모델을 이용하여 산정하였다. 배출량 자료는 분석 대상기간의 중간연도에 해당하는 2010년도 자료를 고정하여 사용하였다. 국내의 경우 국립환경과학원에서 제공하는 CAPSS (Clean Air Policy Support System) 2010 배출목록을, 국외의 경우 MICS (Model Inter-Comparison Study for Asia; Li *et al.*, 2017) 2010 배출목록을 이용하였다. 자연배출량은 WRF 결과를 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor)으로 처리한 기상 자료를 이용하여 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature; Guenther *et al.*, 2006)으로 산정하였다.

관측자료의 경우 동일한 기간에 대하여 국립환경과

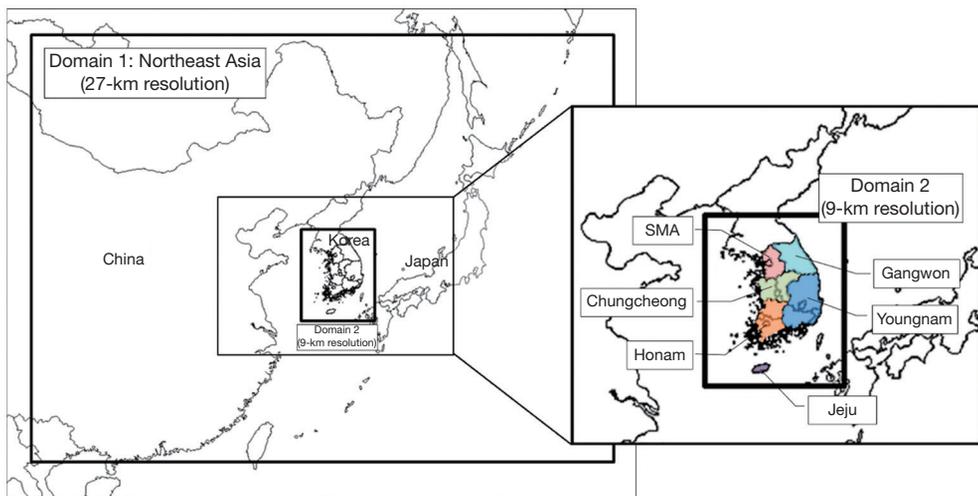


Fig. 1. CMAQ modeling domains at horizontal resolutions of 27 km and 9 km.

Table 1. WRF and CMAQ configuration used in the study.

WRF		CMAQ	
Version	3.4.1	Version	4.7.1
Micro Physics	WSM 6-class	Chemical Mechanism	SAPRC99
Cumulus Scheme	Kain-Fritsch	Aerosol Module	AERO5
Long-Wave Radiation	RRTM	Boundary Condition	Default profile for the 27 km domain
Short-Wave Radiation	Goddard	Advection Scheme	YAMO
PBL Scheme	YSU	Horizontal Diffusion	Multiscale
LSM Scheme	NOAH Land	Vertical Diffusion	Eddy
		Cloud Scheme	RADM

학원에서 제공한 도시대기, 국가배경 및 교외지역 측정망 자료를 Kriging 방법으로 (Valerie *et al.*, 2010; US EPA, 2004), 공간 내삽하여 9 km 대기질 모사격자 체계와 동일한 공간 분포를 매 시간 작성하고 이를 분석에 활용하였다. 공간 내삽자료를 확보하기 위한 기법으로 본 연구에서 적용된 Kriging 방법은 미 EPA 등에서 적용 방법 및 결과 해석에 대한 연구를 수행한 바 있다(US EPA, 2004). 본 연구에서 이용된 관측자료 중 도로변 측정망 자료는 제외되었으며, NO<sub>x</sub> 등 1차 대기 오염물질의 경우 도로변 측정망과 일반대기 측정망에서의 특성이 2차 대기오염물질과는 다를 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 모사 기본수행평가

모사결과에 대한 분석에 앞서, 모사값과 관측값을 비교하여 모사결과에 대한 재현성을 평가하였다. 그림 2는 기상 모사결과에 대한 신뢰성 평가를 위해 월평균 강수, 온도, 풍속을 비교한 것이다. 월평균 강수량은 2011년도부터 점차 감소하여, 2015년도에는 모든 월에 대해 200 mm/month 이하로 가장 적은 강수량을 보였다. 강수 모사는 2007년, 2010년, 2012년 여름철에 각각 약 250 mm/month, 40 mm/month, 100 mm/month 가량 과대 모사하나, 다른 계절에 대해서는 최대 100 mm/month 가량 과소 모사하는 것으로 나타났다. 전반적으로는 R값이 0.89로 관측값과 통계적으로 유의하였다. 남한의 온도에 대한 모사결과는 R값이 1.0으로 모든 월에 대하여 매우 높은 신뢰도를 보였다. 풍속의 경향성은 관측값과 유사하나, 전반적으로 약 2배 과대 모사하는 것으로 나타났다. 이러한 풍속의 과대 모사

는 농도 모사에 영향을 줄 것으로 판단되며, 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 모사값과 관측값의 직접 비교 보다는 변화 추세를 중심으로 분석하였다.

그림 3은 2006년부터 2015년까지 남한의 모든 측정소에 대한 월평균 모사값과 관측값을 물질별로 비교하여 나타낸 것으로, 각 물질의 연도별, 계절별 농도 변화 추세를 볼 수 있다. 미세먼지 관측값의 경우, 점차 감소하다 2012년을 기점으로 다시 증가하는 추세를 보였으며, 이와 관련하여 Kim *et al.*(2017b)은 전반적인 풍속 감소와 상관성을 설명하였다. 모사값의 경우 전체적으로 약 1.5배 과소 모사하나, 관측값과 유사한 월별 변동성을 보인다. 오존은 여름철에 약 70 ppb로 높은 농도를 보이며, 겨울철에는 약 30 ppb로 농도가 감소하는 뚜렷한 경향성을 보인다. 또한, 2011년도까지 농도가 서서히 감소하다가 2012년부터 점차 증가하는 추세를 보였으며, R값은 0.95로 높은 신뢰도를 가지는 것으로 나타났다. NO<sub>2</sub> 농도는 여름철에는 감소하고, 겨울철에는 증가하는 경향을 보였다. 모델에서는 여름철에 과소 모사하고 겨울철에 과대 모사하여, NO<sub>2</sub> 농도의 계절별 경향성을 보기 어려우나, 모사값 수준은 관측값과 유사하게 모사하는 것으로 나타났다. SO<sub>2</sub>의 경우, 겨울철에 높은 농도를 보이며, 여름철에는 농도가 감소하는 경향을 보였다. 2007년 겨울철에 약 10 ppb로 최대 농도를 보였으며, 2015년까지 꾸준히 감소하는 경향을 보였다. 모사값은 연도별 농도 변화가 크지 않았으며, 겨울철에 최대 5 ppb 가량 과소 모사하는 경향을 보였다.

#### 3.2 권역별 물질별 장기모사 및 관측기반 결과의 시계열 분석

앞서 방법론에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는

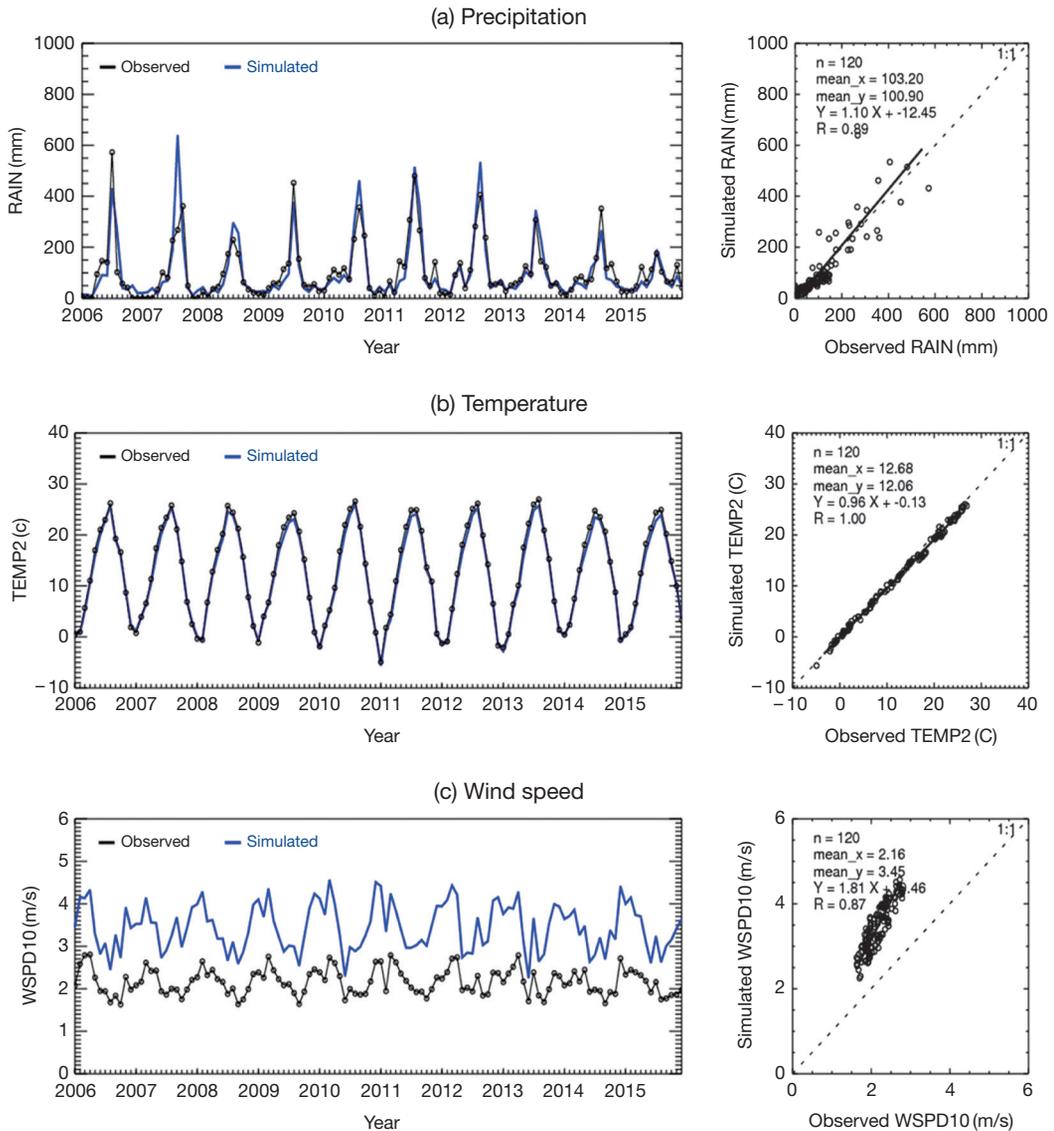


Fig. 2. Monthly variations of (a) precipitation, (b) 2-m temperature, and (c) 10-m wind speeds averaged across 120 meteorological observation sites shown in Fig. 1 during the simulation period of 2006~2015.

장기 농도 변화에 영향을 주는 주요 요인을 분석하기 위하여 배출량은 고정하고 기상변화만을 고려한 모사를 수행하였다. 그림 4~7은 권역별 대기오염물질 농도에 대해 anomaly 분석을 보인 것이다. 여기서 anomaly는 대기오염물질별 권역별 모사기간 평균에 대한 것으로, 연도별로 선형적 변화를 가정하여 변화 추세를 살펴보았다. 이와 같이 anomaly를 분석한 이유는 농도의

절대값이 아닌 연도별 변화 추세를 알아보기가 때문이며, 표 2에는 anomaly 계산의 기준이 되는 모사기간 관측값과 모델값 평균을 비교하였다.

그림 4는 미세먼지의 권역별 연간 농도 변화를 보인 것이다. 미세먼지의 경우 2012년까지 꾸준히 감소하며 2012년 이후 다시 증가하는 경향을 보인다. 모델값의 기울기는  $-0.79\%/yr$  (제주권)~ $-0.13\%/yr$  (수도권)로

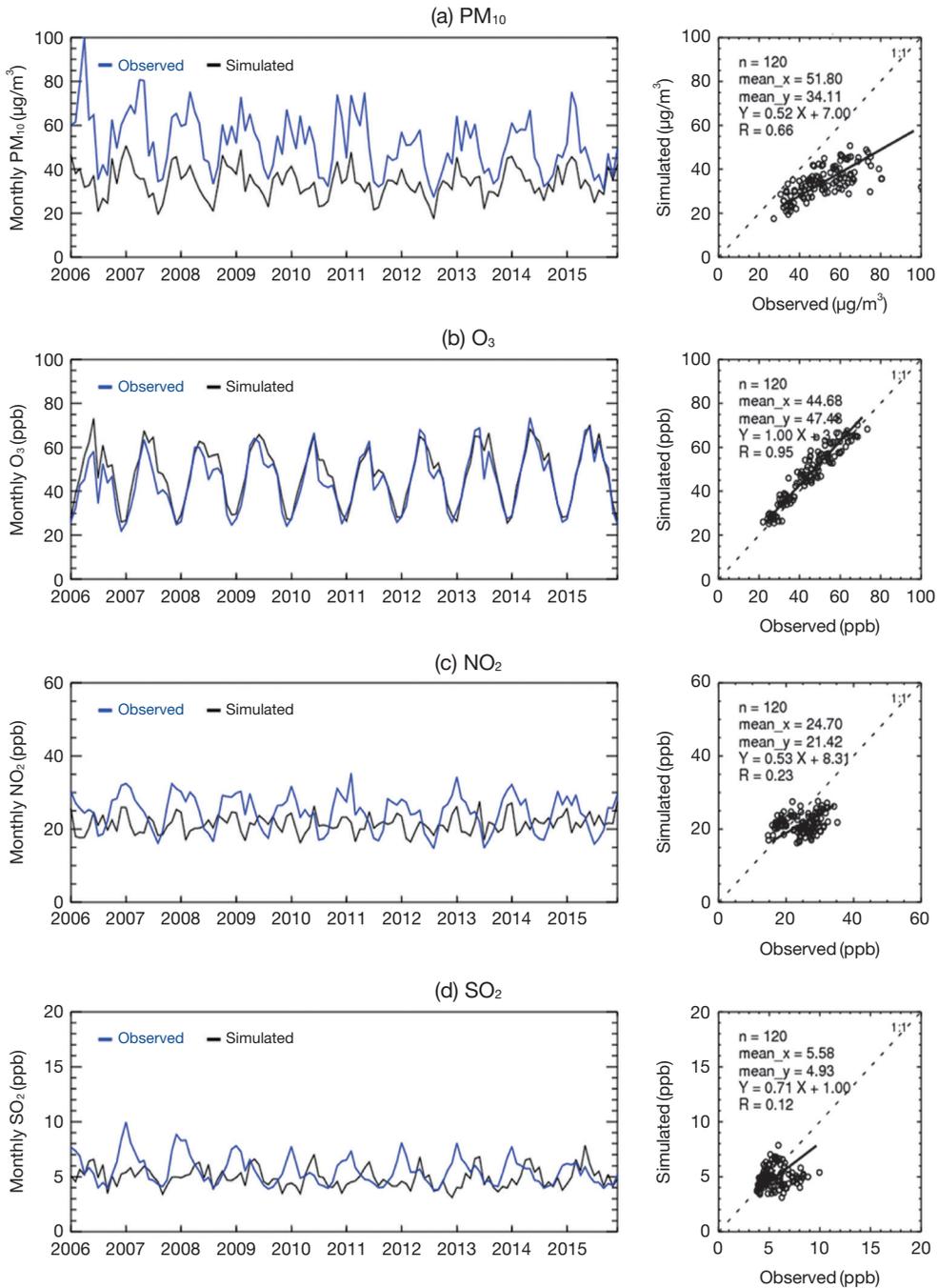


Fig. 3. Monthly variations and scatters for (a) PM<sub>10</sub>, (b) O<sub>3</sub>, (c) NO<sub>2</sub>, and (d) SO<sub>2</sub> averaged across air quality monitoring sites in South Korea during the simulation period.

변화가 크지않은 반면, 관측값의 기울기는  $-3.05\%/yr$  (수도권) $\sim -0.95\%/yr$  (제주권)로 모사값에 비해 뚜렷

한 감소 추세를 보였다. 특히 수도권의 경우 다른 권역에 비해 가장 큰 농도 감소율을 보였는데, 이는 1차 및

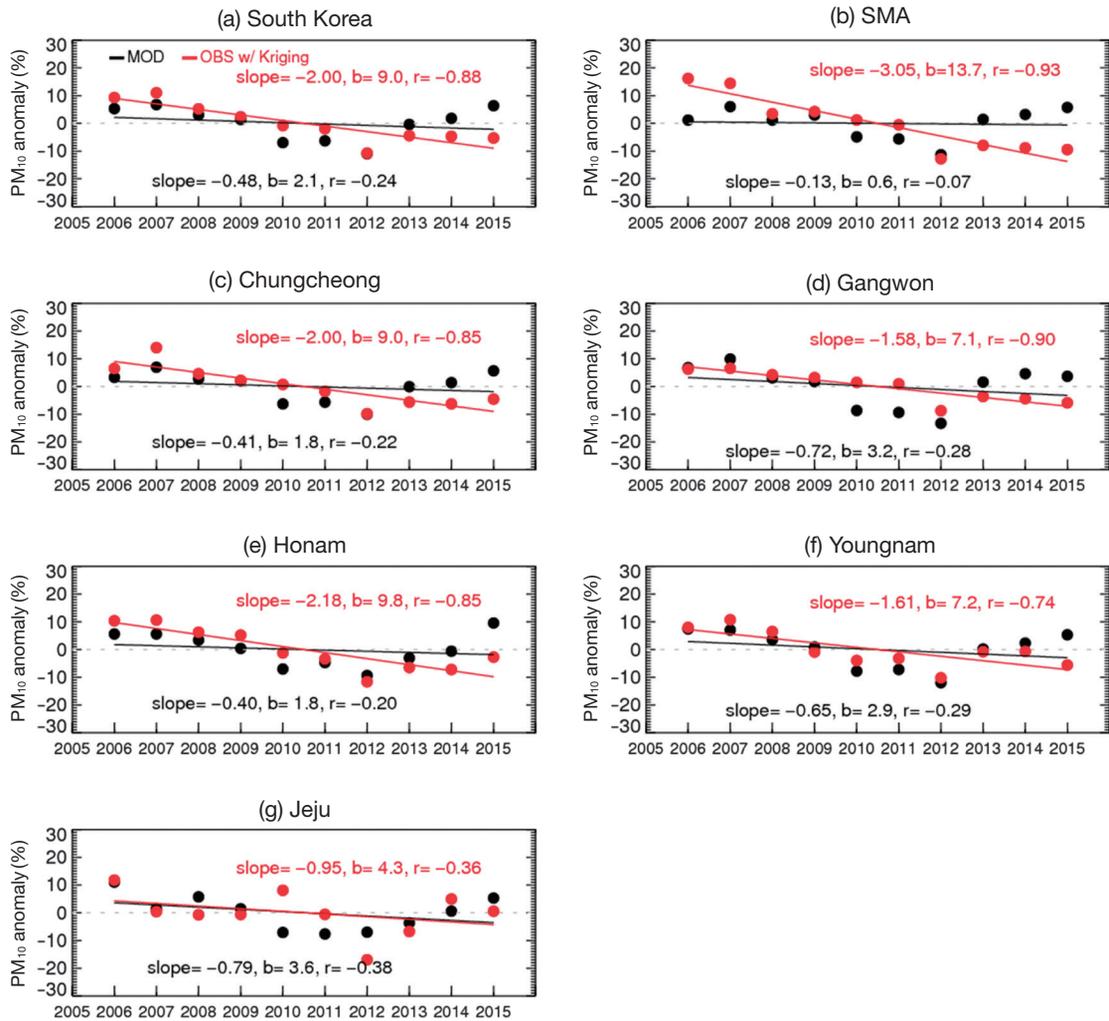


Fig. 4. Normalized anomalies of annual  $PM_{10}$  concentrations in (a) South Korea, (b) SMA, (c) Chungcheong, (d) Gangwon, (e) Honam, (f) Youngnam, and (g) Jeju. Black and red circles represent modeled with fixed emissions and spatially interpolated observed concentrations, respectively.

2차 수도권 대기환경관리 기본계획 수립 등에 의한 배출량 저감에 따른 영향인 것으로 사료된다.

그림 5를 보면 오존의 권역별 연간 농도 변화는 모사값의 경우 추세선의 기울기가 0.25%/yr 가량인 반면, 관측값은 충청권 1.97%/yr, 수도권 1.61%/yr, 영남권 1.47%/yr, 호남권 1.16%/yr 등 증가 추세가 뚜렷이 나타나는데, 이러한 오존의 증가는 배출조건 변화에 의한 것으로 판단된다. 한편, 제주권의 경우 관측값의 기울기가 0.29%/yr 수준으로 다른 권역에 비해 낮았는데, 제주권에서  $NO_2$  농도가 낮고, 농도 변화도 작은 것

을 미루어 볼 때, 오존 농도에 대한 국외 배출량 영향은 국내 배출에 의한 것보다는 상대적으로 작은 것으로 판단된다.

그림 6은  $NO_2$  관측값과 모사값에 대한 anomaly 분석 결과를 보인 것이다. 수도권의 경우, 연간 변화율은 크지않으나 기간 평균 농도가 22.7 ppb로 다른 권역에 비해 높은데, 이는 상대적으로 많은  $NO_x$  배출이 밀집된 결과로 보인다. 한편, 관측에서는 지난 10년 동안 충청권 및 강원권에서 각각 0.95%/yr, 0.80%/yr의 비율로  $NO_2$  농도가 증가하였으며, 호남권과 영남권에서는

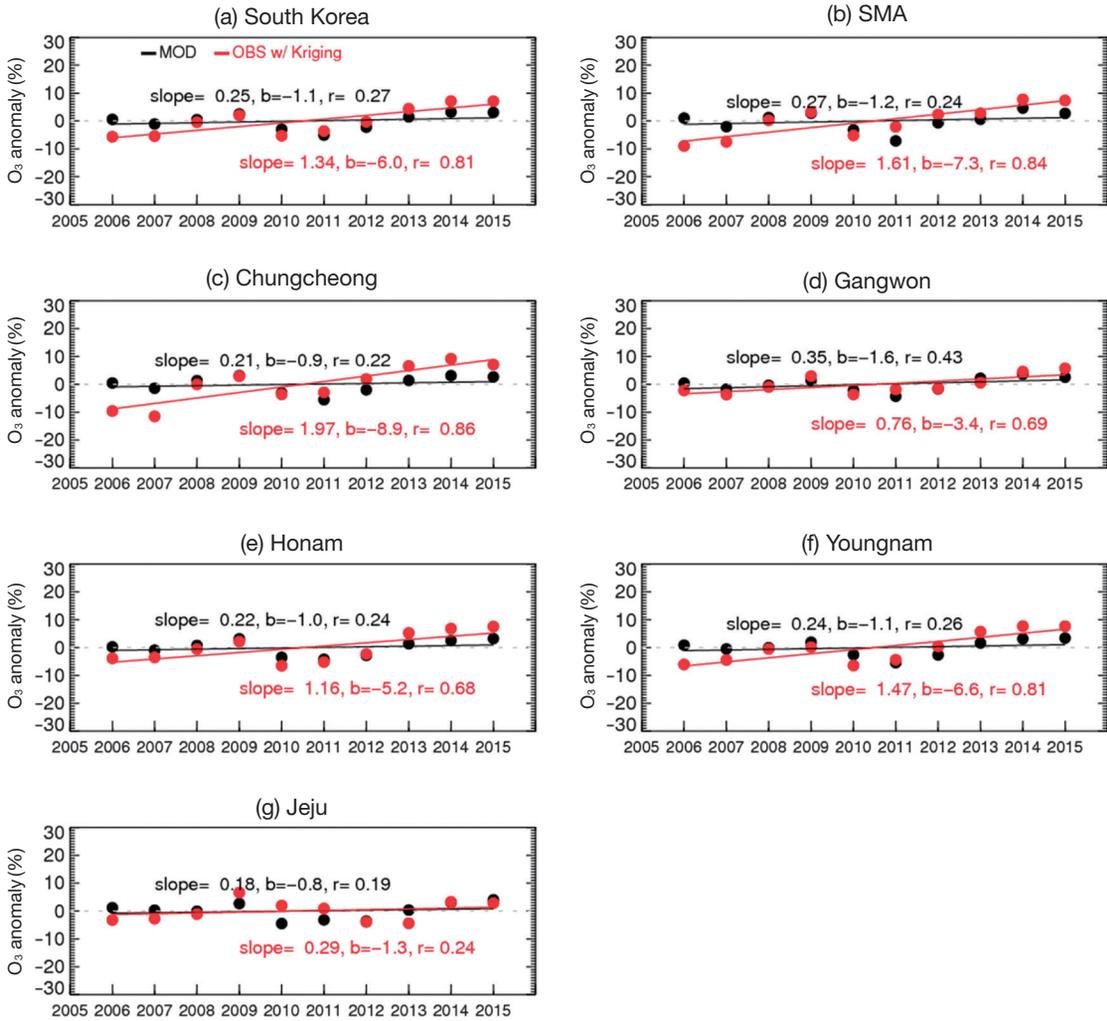


Fig. 5. Normalized anomalies of annual O<sub>3</sub> concentrations in (a) South Korea, (b) SMA, (c) Chungcheong, (d) Gangwon, (e) Honam, (f) Youngnam, and (g) Jeju. Black and red color circles represent modeled with fixed emissions and spatially interpolated observed concentrations, respectively.

각각  $-0.77\%/yr$ ,  $-1.46\%/yr$ 로 감소하는 추세를 보였다. 제주권은  $-0.20\%/yr$ 로 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 따라서, 연평균 NO<sub>2</sub> 농도는 권역별로 차이는 있으나, 다른 대기오염물질에 비해 장기적인 농도 변화 폭은 작은 것으로 분석되었다.

그림 7에서 연평균 SO<sub>2</sub> 농도의 권역별 변화를 보면, 모사에서는  $-1\%/yr$  가량의 농도 변화를 보이나, 관측에서는 충청권  $-3.88\%/yr$ , 호남권  $-3.56\%/yr$  등 제주권을 제외하고 다른 모든 권역에서 SO<sub>2</sub> 농도가 모사에 비해 빠르게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이

들 권역에서 SO<sub>2</sub> 농도 감소는 SO<sub>2</sub> 배출량이 지난 10년간 꾸준히 감소하였기 때문으로 판단된다.

### 3.3 물질별 권역별 대기질 장기모사 및 관측기반 결과의 공간분포 분석

그림 8은 미세먼지, 오존, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>의 2006년~2015년 사이 10년간 관측자료를 공간 내삽한 결과를 측정소별 관측자료와 함께 보인 것이다. 미세먼지 농도는 수도권에서 약  $50\sim60\mu g/m^3$ 으로 가장 높으며, 수도권의 풍하지역에 위치한 충청북도 북부, 강원도 서부가

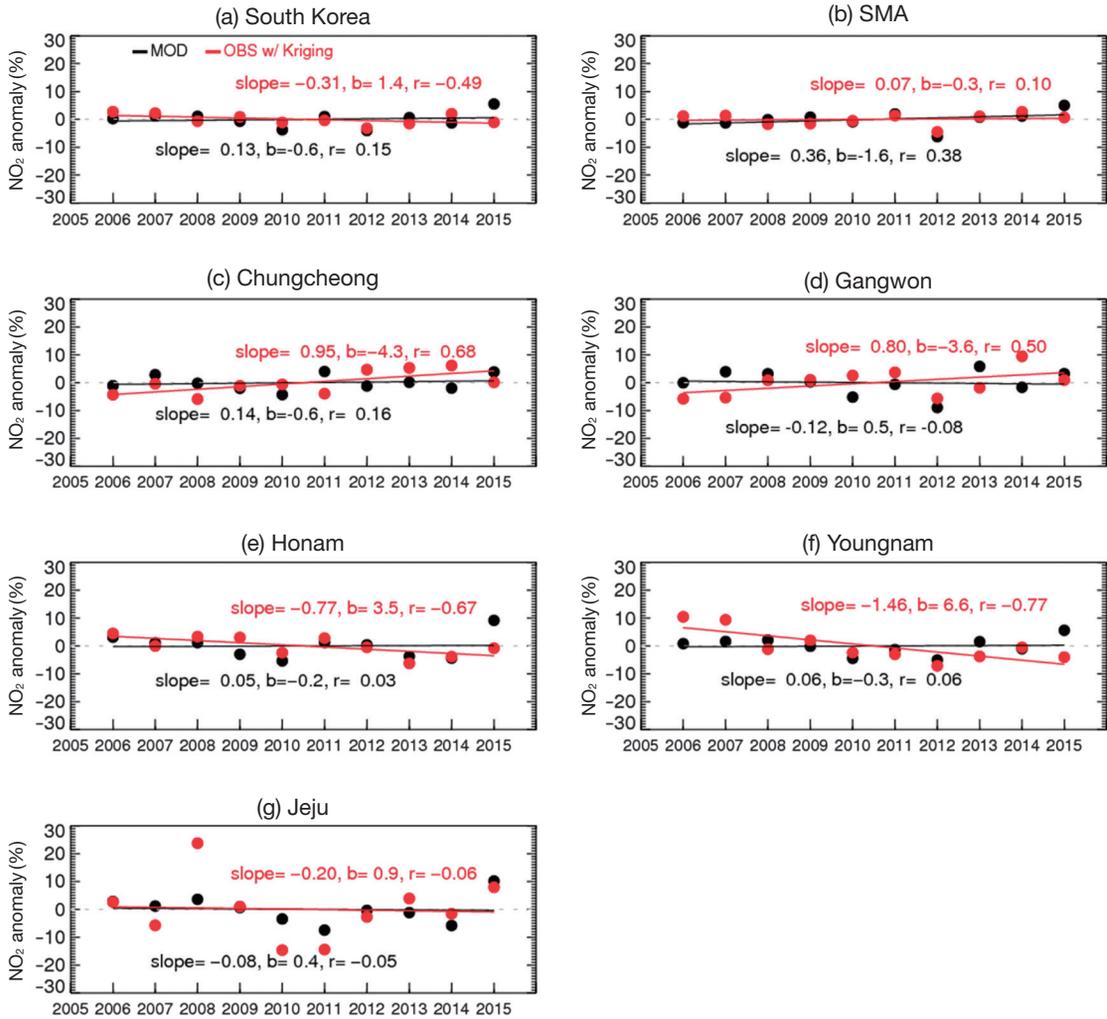


Fig. 6. Normalized anomalies of annual NO<sub>2</sub> concentrations in (a) South Korea, (b) SMA, (c) Chungcheong, (d) Gangwon, (e) Honam, (f) Youngnam, and (g) Jeju. Black and red color circles represent modeled with fixed emissions and spatially interpolated observed concentrations, respectively.

지 50 µg/m<sup>3</sup> 이상으로 나타난다. 또한, 군산, 부산, 울산 등 일부 도시 농도가 약 50 µg/m<sup>3</sup> 가까이 높게 나타나며, 수도권과 주요 도시들을 제외한 대부분 권역의 농도는 약 30~40 µg/m<sup>3</sup>로 산정되었다. 본 연구에서는 오존의 경우 일 최고 1시간 농도를 대상으로 분석하였다. 오존의 평균농도는 전국적으로 약 40~50 ppb 수준을 보였으며, 충남 화력발전소, 경기 일부, 부산, 대구 등이 다른 권역에 비해 상대적으로 높은 관측값을 보였다. 또한 해안가에서 오존 농도가 50~60 ppb로, 내륙에 비해 약 10 ppb 가량 높은 것으로 나타났다. 수도

권 중심의 NO<sub>2</sub> 농도는 약 30~35 ppb로, 다른 권역에 비해서 높은 농도를 보였으며, 풍하지역인 강원도 원주 부근까지 영향을 미치는 것으로 보인다. 영남권 중 부산, 대구의 농도 또한 20 ppb 이상으로, 다른 권역에 비해 높은 농도를 보였다. SO<sub>2</sub>는 주로 영남권의 부산, 울산, 경주와 호남권의 광양만에서 약 6 ppb 이상 높은 농도를 보인다. 또한 충청북도와 강원도 남부에서 6~8 ppb로 높은 농도를 보였는데, 이는 주로 시멘트 킬른 공장 등의 영향인 것으로 사료된다.

그림 9는 대상 물질별로 2006년부터 2010년까지 평

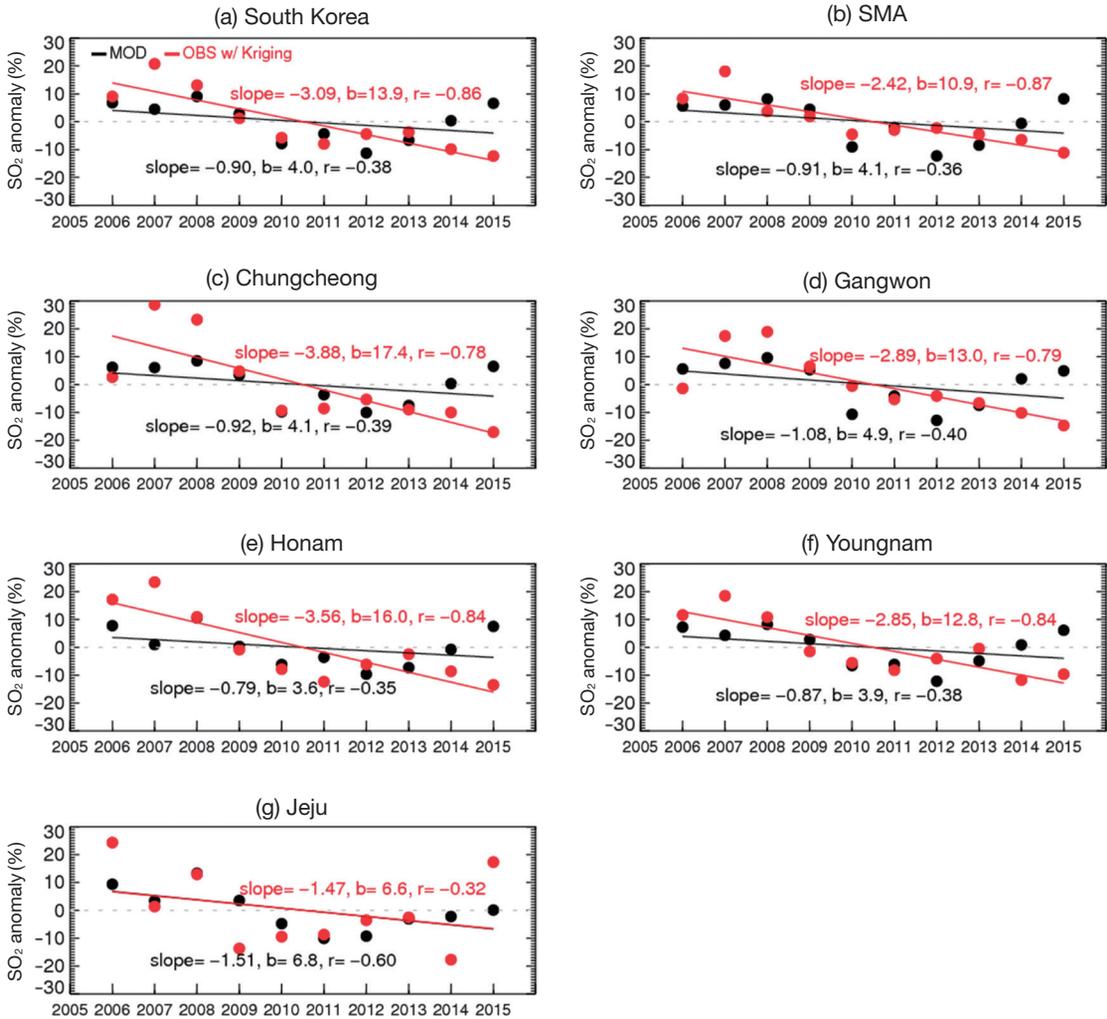


Fig. 7. Normalized anomalies of annual SO<sub>2</sub> concentrations in (a) South Korea, (b) SMA, (c) Chungcheong, (d) Gangwon, (e) Honam, (f) Youngnam, and (g) Jeju. Black and red color circles represent modeled with fixed emissions and spatially interpolated observed concentrations, respectively.

균농도와 2011년부터 2015년까지 평균농도의 차이, 즉, 5년 평균농도의 변화를 공간분포로 나타낸 것이다. 좌측의 그림은 관측값의 평균 변동률이며 우측의 그림은 모사값의 평균 변동률이다. 4가지 물질에 대하여 관측값의 평균 변동률이 모사값의 평균 변동률보다 크게 나타났다. 따라서 대부분의 농도 변화는 기상보다는 배출량 변화에 의한 영향이 지배적임을 알 수 있다. 미세먼지의 경우 모사값은 전국적으로 4% 감소되었고 관측값은 전반적으로 더 큰 폭으로 감소되었는데, 특히 수도권, 충청권, 호남권의 경우 20% 정도 감소하였다.

관측값 중 예외적으로 울산은 20%, 김천은 6% 증가하였다. 오존 농도의 모사값은 전국적으로 5% 미만의 증가율을 보이며 변동률이 작으나 관측값은 전국적으로 12% 증가했으며 특히 서산은 18%, 군산은 20% 이상 증가한 것으로 보인다. NO<sub>2</sub>의 경우 권역별로 농도의 증감차이가 크게 나타났다. 모사값은 수도권, 충청권, 호남권의 농도가 6% 가량 증가하고 강원권과 영남권에서는 6% 정도 감소했으며 인천의 경우 10% 감소하였다. 관측값은 충청남도는 12%, 강원 북부와 충청북도에서는 20% 증가했으며 목포의 경우 30% 이상 증가

**Table 2. Regional mean spatially interpolated observed concentrations and modeled concentration of PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub> between 2006 ~ 2015.**

		PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (ppb)	NO <sub>2</sub> (ppb)	SO <sub>2</sub> (ppb)
South Korea	Observed	41.9	46.3	14.8	4.2
	Modeled	23.3	54.4	6.8	2.2
SMA	Observed	53.7	45.1	22.7	5.1
	Modeled	30.6	51.8	15.0	2.6
Chungcheong	Observed	44.0	44.5	15.8	4.3
	Modeled	26.5	54.7	8.5	2.3
Gangwon	Observed	42.8	45.4	15.3	4.4
	Modeled	20.2	54.2	4.6	1.9
Honam	Observed	34.8	48.0	10.3	3.2
	Modeled	22.3	55.6	4.2	1.8
Youngnam	Observed	43.3	46.2	15.9	4.8
	Modeled	21.8	54.2	6.7	2.5
Jeju	Observed	30.0	51.6	5.6	1.8
	Modeled	17.4	56.6	1.6	0.8

을 보이나, SO<sub>2</sub>의 모사값은 모든 권역에서 10% 감소했으며 관측값 또한 대부분 권역의 농도가 감소했는데, 특히 경기 북부, 충청남도, 경상북도의 서부와 전라남도의 남부에서는 30% 이상 감소하였다. 반면, 경기 남부와 부산, 울산에서는 30% 가량 농도가 증가하였다.

**3.4 물질별 권역별 계절별 장기모사 및 관측기반 결과 분석**

그림 10은 미세먼지 농도의 연평균 변화량을 계절별, 권역별로 구분한 것이다. 실선은 관측값이고, 점선은 모사값을 의미한다. 전반적으로, 관측값이 모사값에 비해 미세먼지 변화량이 크게 나타나며, 수도권과 제주권을 제외한 권역에서 관측값의 변화폭은 유사해 보인다. 관측값을 보면 모든 권역에서 미세먼지 농도가 감소하였으며, 봄철 수도권의 경우 -2.3 µg/m<sup>3</sup>/yr로 가장 큰 폭으로 감소하였다. 여름철 제주권은 연간 -0.03 µg/m<sup>3</sup>로 감소하며 가장 작은 감소폭을 보였다.

권역별로 미세먼지 관측값 변화량을 비교해 보았을 때, 제주권은 모든 계절에서 미세먼지 농도의 변화가 -1 µg/m<sup>3</sup>/yr 보다 적게 나타나는 반면, 수도권은 -1 µg/m<sup>3</sup>/yr 보다 크게 나타나 상반된 결과를 보였다. 수도권은 모든 계절에서 다른 권역보다 큰 감소(최대 -2.3 µg/m<sup>3</sup>/yr에서 최소 -1 µg/m<sup>3</sup>/yr)를 보인다. Kim

et al. (2017b)은 2004년~2016년에 대하여 기상 영향 제거했을 때, 수도권에서의 연평균 미세먼지 변화가 -1.41±0.16 µg/m<sup>3</sup>/yr라고 분석하였으며 남한과 서울보다 큰 값을 제시하였다.

계절별로 미세먼지 관측값의 변화량을 비교해 보았을 때, 영남권을 제외한 권역에서는 봄-가을-겨울-여름 순으로 감소량이 많은 것을 알 수 있다. 수도권은 다른 권역에 비해 계절별 감소폭이 크게 나타났다(최대 1.5 µg/m<sup>3</sup>/yr 최소 0.6 µg/m<sup>3</sup>/yr 차이를 보임). 제주권에서의 여름철과 겨울철 미세먼지 농도 변화는 -0.03 µg/m<sup>3</sup>/yr~-0.1 µg/m<sup>3</sup>/yr 정도의 변화를 보이고, 영남권의 겨울철 미세먼지 농도 변화는 -0.12 µg/m<sup>3</sup>/yr로 변화가 거의 없다.

본 연구에서 모사결과는 배출량은 고정하고 기상자료만 변화를 주어 얻은 것임을 감안하면, 모사값의 변화폭이 미미한 것에 비해 수도권 등지에서 관측값이 상당히 감소한 것은 미세먼지 저감대책을 포함한 배출량 감소가 반영됐기 때문으로 판단된다. 또한 이러한 결과를 통해 국외 영향이 상대적으로 높아지는 겨울철 보다는(Kim et al., 2017a, 2017e) 봄철과 가을철 동안 배출량 저감에 의한 농도 개선효과가 높아짐을 알 수 있다.

오존의 경우 모사에서는 변화가 거의 없는 반면, 관측값에서는 오존이 증가하는 경향을 보인다(그림 11). 오존 모사값 또한 기상 영향만을 고려한 것이기는 하나, 오존의 광화학 특성상 모사값과 관측값의 차이는 대기 중에서 일어나는 화학반응, 배출량 등 다른 요소의 영향으로 사료된다. 관측값은 봄철과 여름철의 변화량이 크며, 겨울철에 가장 변화량이 작다. 특히 충청권의 경우 봄철, 여름철, 가을철에 다른 권역들보다 오존 농도 증가량이 높은 것으로 나타났으며, 특히 여름철에 1.5 ppb/yr로 가장 높은 변화량을 보인다. 이를 감안하면 10년간 약 15 ppb가 상승하는 것으로 추정할 수 있다. 그 다음으로 수도권에서 여름철에 1.3 ppb/yr로 큰 변화량을 보이며, 제주권을 제외한 나머지 권역들의 변화량은 0.5~1.0 ppb/yr로 유사한 것으로 나타났다. 제주권은 0.4 ppb/yr 이내의 변화량을 보였다. 국내에서의 오존 농도의 전반적인 상승은 자체 배출량 또는 중국으로부터의 장거리 이동 영향 증가에 의한 것으로 예상할 수 있다. 하지만 자체 배출량이 높지 않은 제주권에서 오존 농도 증가가 작은 것을 보면 장기

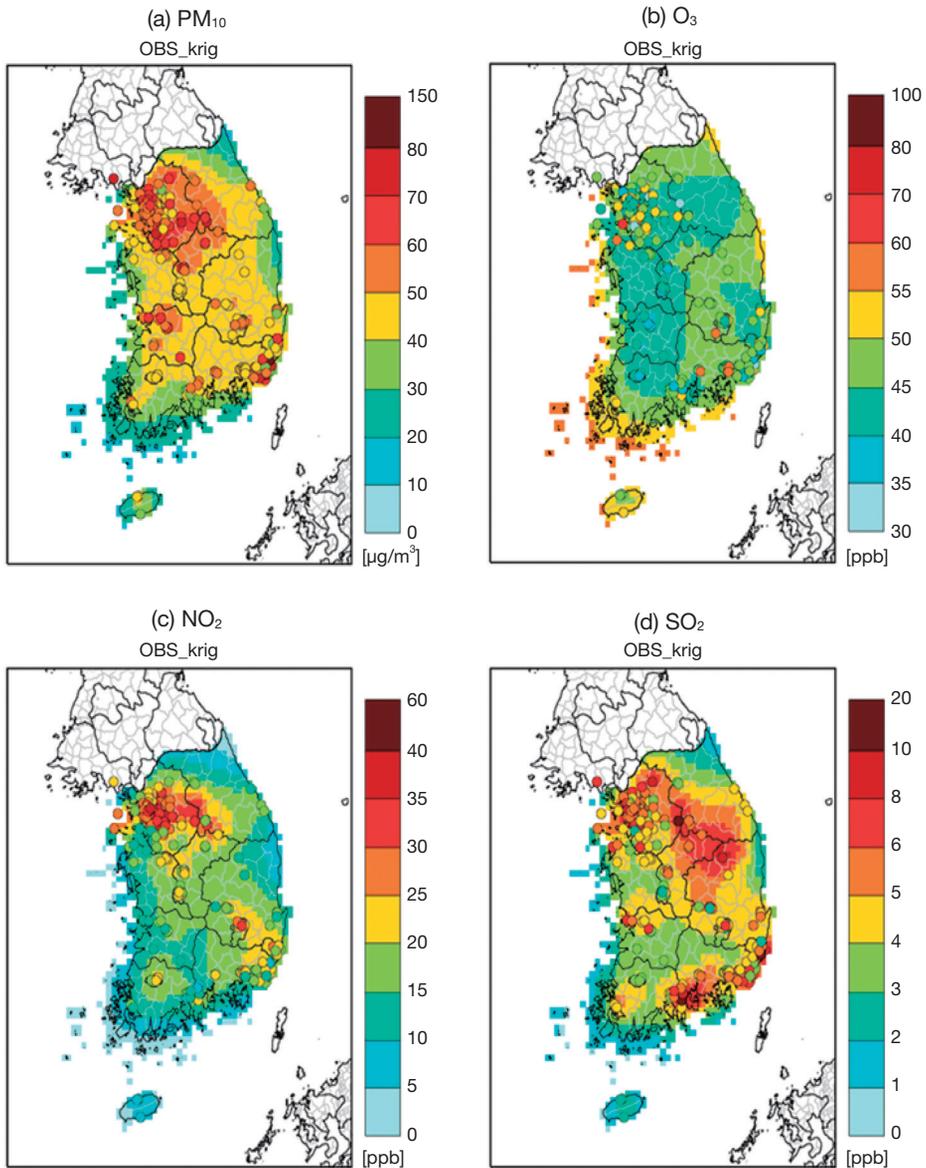


Fig. 8. Period mean concentrations of (a)  $PM_{10}$ , (b)  $O_3$ , (c)  $NO_2$  and (d)  $SO_2$  between 2006 ~ 2015 after spatial interpolation based on the observations.

리 이동은 장기적인 오존 농도 증가 추세에 미치는 영향이 높지 않은 것으로 보인다. 특히, 장거리 이동영향이 상대적으로 낮은 여름철의 오존 농도 상승이 지배적인 점에서 국내 배출량 영향이 증가하는 것으로 추정된다. 또한, 동북아 지역의 전반적인 산화상태 증가로 인한 오존의 지역적 배경농도 증가도 오존 농도 증가 추

세에 상당부분 기여하는 것으로 사료된다(Nagashima *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2009).

그림 12는 권역별 계절별 연간  $NO_2$  농도의 평균 변화량을 도식화한 것이다. 그림 12에서 가장 두드러지게 나타나는 점은 모사값은 권역이나 계절에 관계없이 변화폭이 일정하거나 적은 반면, 관측값은 권역과 계

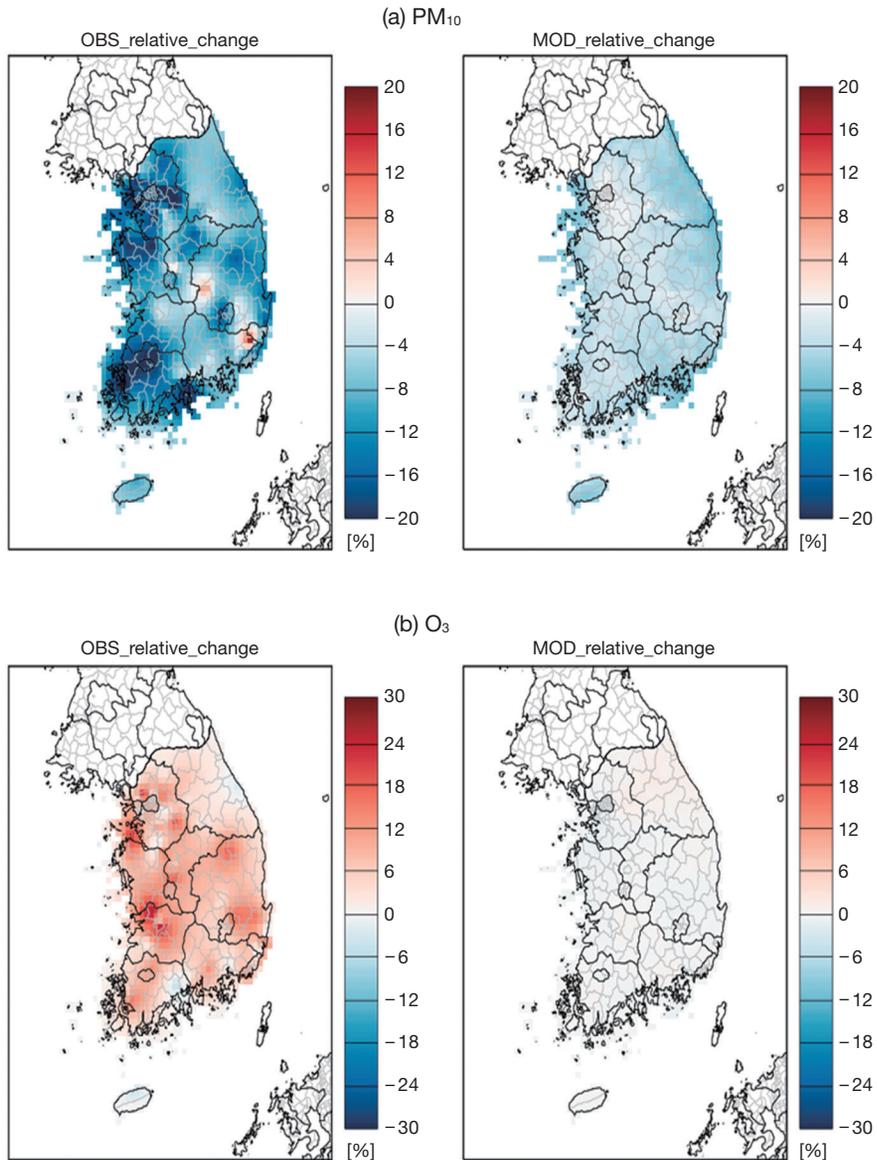


Fig. 9. Decadal changes of spatially-interpolated observations (left) and modeled values (right) for (a)  $PM_{10}$ , (b)  $O_3$ , (c)  $NO_2$ , and (d)  $SO_2$  between 2006~2015. Decadal change was defined as the difference between the second five-year (2011~2015) mean and the first five-year (2006~2010) mean.

절에 따라 변화폭이 크다는 점이다. 남한과 수도권의 경우에는 큰 변화폭 없이 일정한 경향을 보인다. 충청권과 강원권의 경우에 관측값이 봄철과 겨울철에 각각 0.2 ppb/yr, 0.3 ppb/yr로 상승을 주도하는 반면에 호남권과 영남권의 경우에 관측값이 모든 계절에 상관없이

감소를 주도하고 있다. 호남권이 0.05~0.15 ppb/yr 감소를 보이며, 영남권의 경우 0.2~0.25 ppb/yr의 감소를 보인다. 마지막으로 제주권의 경우에는 남한과 비슷하게 계절에 따른 변화폭이 큰 변화없이 일정한 경향을 보인다. 충청권, 강원권, 호남권, 영남권의 변화폭이 큰

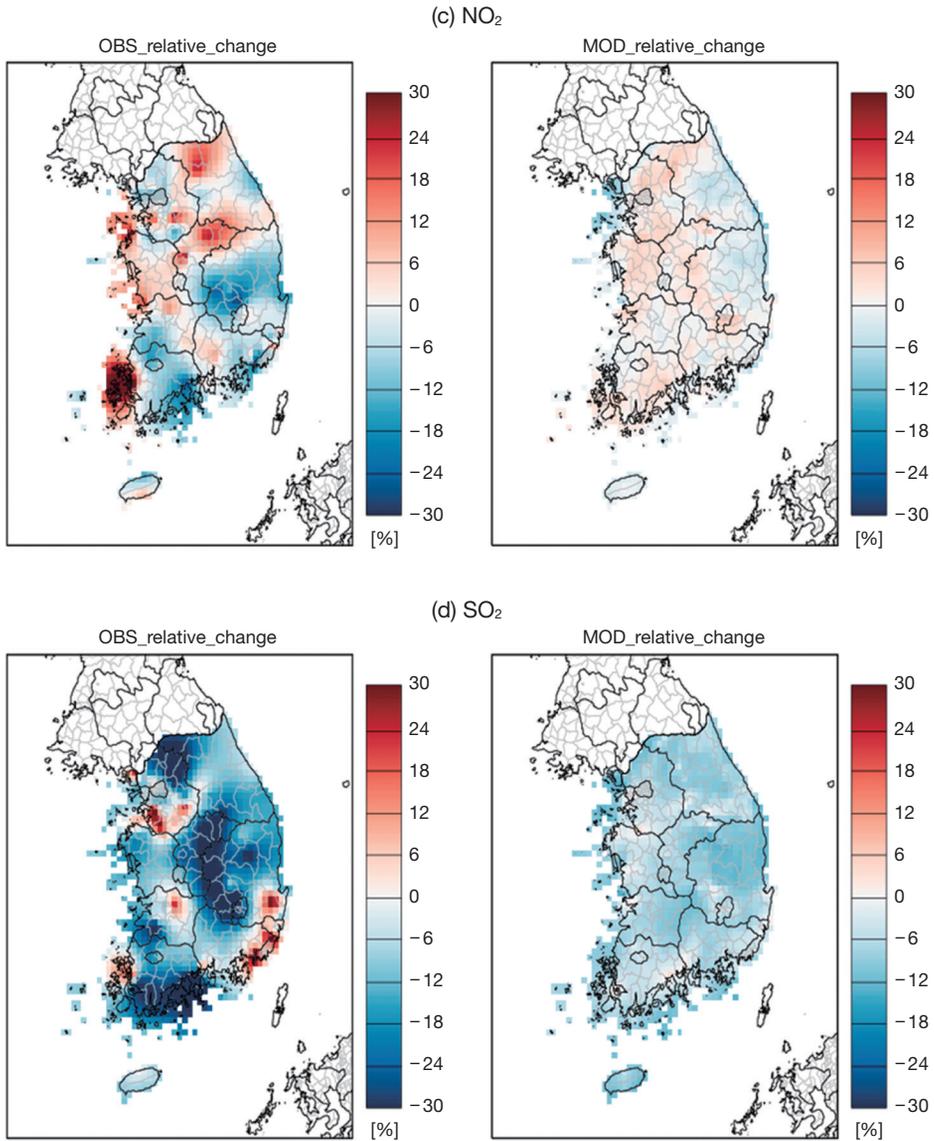


Fig. 9. Continued.

이유로 기상 영향 보다는 권역 자체 배출량 및 풍상으로부터의 이동 영향이 높은 것으로 추정된다.

그림 13은 모사기간 동안 권역별 SO<sub>2</sub> 농도의 계절 평균농도 변화를 보인 것이다. 모사값의 경우, 전체적으로 관측값에 비해 적은 변화량을 보이며, 겨울철에 모사값과 관측값 모두 가장 큰 감소율을 보인다. 관측값은 봄철, 여름철, 가을철 동안 -0.1 ppb/yr에 가까운

감소율을, 겨울철에는 제주권을 제외한 다른 권역들은 약 -0.2~-0.3 ppb/yr의 감소율을 나타낸다.

계절에 따라서 상대적으로 큰 SO<sub>2</sub> 감소율을 보이는 권역은 충청권과 영남권이며, 계절에 따른 감소율 변화가 상대적으로 적은 권역은 호남권과 제주권이다. 관측값의 경우, 충청권에서 겨울철에 0.35 ppb/yr, 영남권에서 0.30 ppb/yr 가까이 감소하였으며, 제주권에서

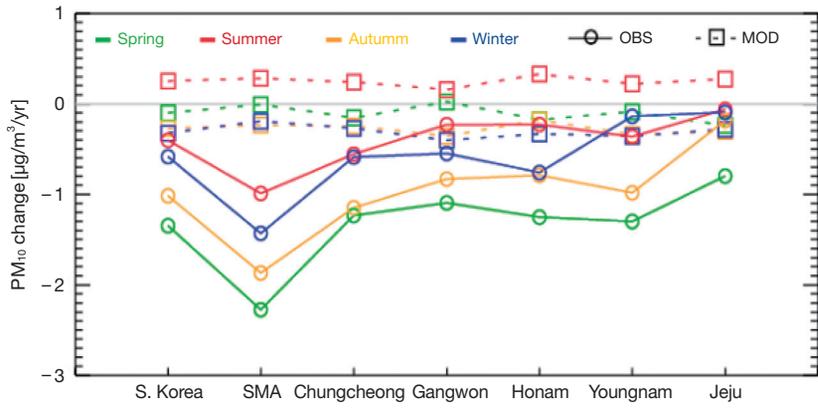


Fig. 10. Annual PM<sub>10</sub> concentration change for each season and region.

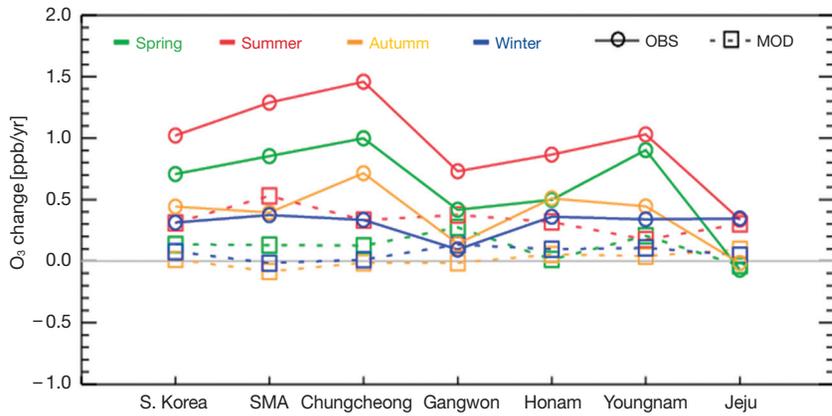


Fig. 11. Annual O<sub>3</sub> concentration change for each season and region.

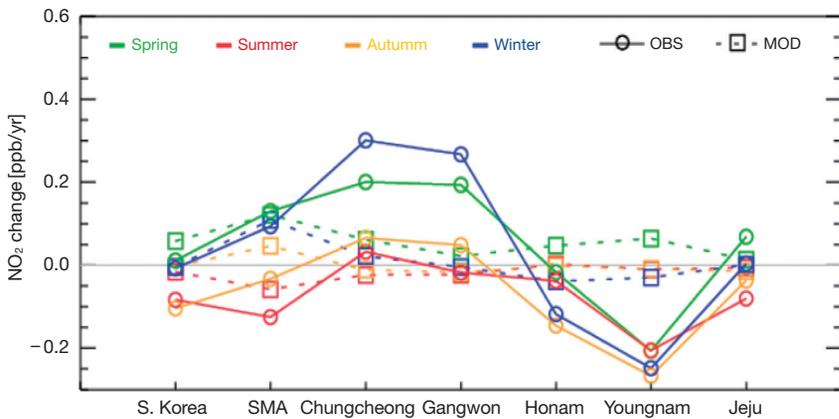


Fig. 12. Annual NO<sub>2</sub> concentration change for each season and region.

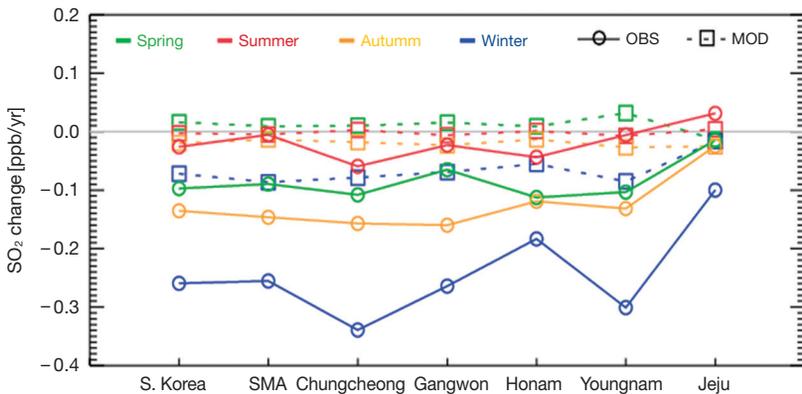


Fig. 13. Annual SO<sub>2</sub> concentration change for each season and region.

는 여름철에 0.03 ppb/yr의 미미한 증가폭을 보였다. 전반적으로 남한의 SO<sub>2</sub> 농도 평균 변화량은 수도권에서의 변화와 유사하였다. 남한의 평균 변화율은 겨울철에 0.27 ppb/yr를 보이는 등 10년간 최대 3 ppb/yr의 변화를 예측할 수 있다. 권역별로 SO<sub>2</sub> 변화량의 차이는 있으나 모든 권역에서 봄철, 가을철, 겨울철 순으로 감소율이 커지며, 겨울철에는 최대 0.3 ppb/yr 이상의 농도 감소를 보이고 있다. 겨울철에 가장 큰 SO<sub>2</sub> 농도 감소를 보이는 이유로는 우리나라 자체의 석탄사용 및 중국으로부터의 영향의 감소가 큰 것으로 추정된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 관측자료와 대기질 모사를 통해 주요 대기오염 물질들의 권역별 장기 변동성을 검토하였다. 미세먼지 농도의 경우 해당 10년간 모사값의 변화율은 -0.11 µg/m<sup>3</sup>/yr로 낮은데 비해, 관측값의 남한 평균은 -0.84 µg/m<sup>3</sup>/yr의 감소율을 보였다. 특히 수도권에서는 미세먼지 농도 감소율이 -1.64 µg/m<sup>3</sup>/yr로 평균적인 남한 감소율에 비해 두 배 가량 높게 나타났으며, 제주권을 제외한 충청권, 강원권, 호남권, 영남권에서의 연평균 미세먼지 농도 감소율은 -0.88~-0.68 µg/m<sup>3</sup>/yr 사이에서 제시되었다. 수도권의 미세먼지 농도 감소율이 상대적으로 높은 이유는 수도권 대기환경관리 기본계획 등 정책효과가 반영된 것으로 보인다. 다만 전반적인 미세먼지 농도 감소는 배출량 감소에 의

한 영향으로 예상되나, 국내의 배출조건 구분은 현재로서는 어려우며, 영남권의 일부 지역에서는 미세먼지 농도 증가도 확인되었다.

이와는 다르게 남한에 대한 오존 농도 연간 증가율은 관측값이 0.62 ppb/yr로 모사값인 0.13 ppb/yr 보다 크게 나타났다. 특히, 충청권에서는 오존의 관측값이 연간 0.88 ppb/yr의 증가를 보여 가장 빠른 증가율을 보인 반면, 제주권에서는 0.4 ppb/yr 이내의 가장 낮은 증가율을 보였다. 본 연구에서 대기질 모사는 배출량을 고정하고 기상만을 변화시킨 결과이기 때문에 이러한 오존 농도 증가는 결국 배출조건 및 산화력의 변화 등에 따른 영향이 반영된 결과로 판단된다. 배출조건 변화는 국내외로 구분될 수 있으나, 제주권을 제외한 모든 권역에서 오존 농도 증가율이 높은 결과를 보면 국외의 배출량 변화보다는 국내 배출량 변화의 효과가 주요한 원인으로 추정된다. 다만 제주권의 경우 관측소의 수가 많지 않고 전반적인 오존 농도 수준이 다른 권역에 비해 높은 점을 고려하면 향후 보다 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 대부분의 권역에서 오존 농도 증가는 여름철 증가에 의한 영향이 가장 높게 제시되었다.

NO<sub>2</sub> 농도의 장기 추세는 권역별 차이를 보이는데, 수도권에서는 거의 변화가 관측되지 않으나, 충청권과 강원권의 봄철과 겨울철에 연간 증가율이 각각 0.2 ppb/yr, 0.3 ppb/yr로 해당 권역 배출량 증가가 그 원인으로 보여진다. 영남권의 경우 연간 -0.23 ppb/yr의 감소율을 보였으며, 호남권 역시 -0.08 ppb/yr의 연간 감

소율이 관측값으로부터 확인되었다. 다만 호남권의 경우 목포 등 일부 지역에서의 NO<sub>2</sub> 농도 증가가 뚜렷이 관찰되어, 권역 내 NO<sub>2</sub> 농도 변화 특성도 세부 지역별로는 차이를 보인다. NO<sub>2</sub>는 1차 대기오염물질이기 때문에 배출에 따른 공간적 농도 구배가 뚜렷이 나타나며, NO<sub>2</sub> 모사값의 경우 변화율이 작은 바, 이러한 NO<sub>2</sub> 농도의 공간적 변화는 지역적인 배출 특성이 반영된 것으로 판단된다.

SO<sub>2</sub> 모사결과에서는 장기 추세 변화가 거의 보이질 않으나, 관측값의 경우 제주권을 제외하고 -2.42%/yr~ -3.88%/yr의 기울기를 보이며, 이는 배출량 감소가 주된 원인으로 판단된다. 다만 계절별로 감소율을 구분하면 겨울철 SO<sub>2</sub> 농도 감소가 다른 계절에 비해 확연히 큰 바, 겨울철 국내 배출감소 또는 중국 등 국외로부터의 유입 감소도 예상될 수 있다.

본 연구를 종합하면 수도권을 비롯한 국내 권역에서 10년간의 관측자료를 이용한 장기 분석 시, 미세먼지 농도 감소 및 오존 농도 증가는 기상 영향 보다는 배출량과 산화변화 등에 의한 영향이 크게 작용함을 알 수 있다. 또한 SO<sub>2</sub> 농도는 장기간에 걸쳐 국내 전 권역에서 감소가 이뤄진 반면, NO<sub>2</sub> 농도의 장기 추세는 권역별 또는 권역 내에서도 공간적 차이를 보였으며, 농도가 기준을 초과하거나 크게 증가하는 지역에 대한 관리가 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 연구는 국립환경과학원(NIER) 연구용역사업(권역별 배출원-기상-지형을 고려한 대기질특성 심층 분석 연구)과 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부) 재원 한국연구재단-미세먼지 국가전략프로젝트 사업(2017M3D8A1092020)의 일환으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

### References

An, H., Han, J., Lee, M., Kang, E. (2015) The Long-term Variations of Ozone and Nitrogen Oxides in Suwon City during 1991~2012, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(4), 378-384. (in

Korean with English abstract)  
 Bae, C., Kim, E., Kim, B.-U., Kim, H.C., Woo, J.H., Moon, K.J., Shin, H.J., Song, I.H., Kim, S. (2017) Impact of Emission Inventory Choices on PM<sub>10</sub> Forecast Accuracy and Contributions in the Seoul Metropolitan Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(5), 497-514. (in Korean with English abstract)  
 Byun, D., 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, *Applied Mechanics Reviews*, 59(2), 51-77.  
 Chambers, S.D., Kang, C.-H., Williams, A.G., Crawford, J., Griffiths, A.D., Kim, K.-H., Kim, W.-H. (2016) Improving the representation of cross-boundary transport of anthropogenic pollution in East Asia using Radon-222, *Aerosol Air Quality Research*, 16, 958-976. <http://dx.doi.org/10.4209/aaqr.2015.08.0522>.  
 Chambers, S.D., Kim, K.H., Kwon, E.E., Brown, R.J.C., Griffiths, A.D., Crawford, J. (2017) Statistical analysis of Seoul air quality to assess the efficacy of emission abatement strategies since 1987, *Science of the Total Environment*, 580, 105-116.  
 Colette, A., Granier, C., Hodnebrog, O., Jakobs, H., Maurizi, A., Nyiri, A., Bessagnet, B., Angiola, A.D., Isidoro, M.D., Gauss, M., Meleux, F., Memmesheimer, M., Mieville, A., Rouil, L., Russo, F., Solberg, S., Stordal, F., Tampieri, F. (2011) Air quality trends in Europe over the past decade: a first multi-model assessment, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(22), 11657-11678, doi:10.5194/acp-11-11657-2011.  
 Grundstrom, M. (2015) The Influence of Atmospheric Circulation and Meteorology on Urban Air Pollution and Pollen Exposure, Faculty of Science, Department of Biological and Environmental Sciences (ISBN 978-91-85529-79-7) <http://hdl.handle.net/2077/38728>.  
 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), *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 6(1), 107-173.  
 Han, Y.J., Kim, S.R., Jung, J.H. (2011) Long-term measurements of atmospheric PM<sub>2.5</sub> and its chemical composition in rural Korea, *Journal of Atmospheric*

- Chemistry, 68(4), 281-298.
- Han, S.H., Kim, Y.P. (2015) Long-term Trends of the Concentrations of Mass and Chemical Composition in PM<sub>2.5</sub> over Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(2), 143-156. (in Korean with English abstract)
- Kim, E., Park, H., Hong, Y.C., Ha, M., Kim, Y., Kim, B.N., Kim, Y., Roh, Y.M., Lee, B.E., Ryu, J.M., Kim, B.M., Ha, E.H. (2014) Prenatal exposure to PM<sub>10</sub> and NO<sub>2</sub> and children's neurodevelopment from birth to 24 months of age: Mothers and Children's Environmental Health (MOCEH) study, *Science of The Total Environment*, 481, 439-445.
- Kim, S., Kim, H.C., Kim, B.-U., Bae C., Kim, E. (2016) CMAQ Simulation Study to Analyze the Long-term Variations of Criteria Air Pollutants in the Seoul Metropolitan Area, South Korea, during 2004~2015, IUAPPA Conference.
- Kim, H.C., Kim, E., Bae, C., Cho, J.H., Kim, B.-U., Kim, S. (2017a) Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, South Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 10315-10332.
- Kim, H.C., Kim, S., Kim, B.-U., Jin, C.S., Hong, S.H., Park, R.J., Son, S.W., Bae, C., Bae, M., Song, C.K., Stein, A. (2017b) Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea, *Scientific reports*, 7, 4710, doi:10.1038/s41598-017-05092-8.
- Kim, S., Bae, C., Kim, E., You, Y.H., Bae, M., Lee, J.B., Seo, I.S., Lim, Y.J., Kim, B.-U., Kim, H.C., Woo, J.H. (2017c) Domestic Ozone Sensitivity to Chinese Emissions Inventories: A Comparison between MICS-Asia 2010 and INTEX-B 2006, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(5), 480-496. (in Korean with English abstract)
- Kim, S., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2017d) PM<sub>2.5</sub> Simulations for the Seoul Metropolitan Area: ( I ) Contributions of Precursor Emissions in the 2013 CAPSS Emissions Inventory, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 139-158. (in Korean with English abstract)
- Kim, B.-U., Bae, C., Kim, H.C., Kim, E., Kim, S. (2017e) Spatially and chemically resolved source apportionment analysis: Case study of high particulate matter event, *Atmospheric Environment*, 162, 55-70.
- Li, L., Qian, J., Ou, C.-Q., Zhou, Y.-X., Guo, C., Guo, Y. (2014) Spatial and temporal analysis of air pollution Index and its timescale-dependent relationship with meteorological factors in Guangzhou, China, 2001-2011, *Environmental Pollution*, 190, 75-81.
- Li, M., Zhang, Q., Kurokawa, J., Woo, J.-H., He, K.B., Lu, Z., Ohara, T., Song, Y., Streets, D.G., Carmichael, G.R., Cheng, Y.F., Hong, C.P., Huo, H., Jiang, X.J., Kang, S.C., Liu, F., Su, H., Zheng, B. (2017) MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory for the MICS-Asia and the HTAP projects, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(2), 935.
- Nagashima, T., Ohara, T., Sudo, K., Akimoto, H. (2010) The relative importance of various source regions on East Asian surface ozone, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(22), 11305-11322, doi:10.5194/acp-10-11305-2010.
- National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (2000) NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, doi:10.5065/D6M043C6.
- Oh, I., Bang, J.H., Kim, S., Kim, E., Hwang, M.K., Kim, Y. (2016) Spatial Distribution of Air Pollution in the Ulsan Metropolitan Region, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(3), 394-407. (in Korean with English abstract)
- Park, J.W., Hwang, B.D. (2017) Analysis of Effects of Regional Air Pollutants (PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, CO) on Respiratory Disease, *Korean Public Health Research*, 43(3), 53-66.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X., Wang, W., Powers, J.G. (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.
- Son, J.Y., Bell, M.L., Lee, J.T. (2011) Survival analysis to estimate the association between long-term exposure to different sizes of airborne particulate matter and risk of infant mortality using a birth cohort in Seoul, Korea, *Environmental Health Effects on Susceptible Populations*, 22(1), 166-167.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2004) Developing Spatially Interpolated Surfaces and Estimating Uncertainty, EPA-454/R-04-004.
- Valerie, C.G., Kristen, M.F., Edith, G., David, M.H., Rao, S.T. (2010) A Comparison of Statistical Techniques for Combining Modeled and Observed Concentrations

- to Create High-Resolution Ozone Air Quality Surfaces, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60(5), 586-595, doi: 10.3155/1047-3289.60.5.586.
- Wang, T., Wei, X.L., Ding, A.J., Poon, C.N., Lam, K.S., Li, S.Y., Chan, L.Y., Anson, M. (2009) Increasing surface ozone concentrations in the background atmosphere of Southern China, 1994-2007, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(16), 6217-6227.
- Williams, A.G., Chambers, S.D., Conen, F., Reimann, S., Hill, M., Griffiths, A.D., Crawford, J. (2016) Radon as a tracer of atmospheric influences on traffic-related air pollution in a small inland city, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 68(1), <https://doi.org/10.3402/tellusb.v68.30967>.
- Yi, S.J., Kim, H., Kim, S.Y. (2016) Exploration and Application of Regulatory PM<sub>10</sub> Measurement Data for Developing Long-term Prediction Models in South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(1), 114-126. (in Korean with English abstract)