Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 34, No. 3, June 2018, pp. 469-485
https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.3.469
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

미세먼지 농도 개선을 위한 배출량 저감대책 효과 분석

Evaluation of the Effectiveness of Emission Control Measures to Improve $PM_{2.5}$ Concentration in South Korea

김은혜 · 배창한 · 유 철[1] · 김병욱[2] · 김현철[3,4] · 김순태*
아주대학교 환경안전공학과, [1]국립환경과학원 대기환경연구과, [2]미국조지아주환경청,
[3]미국국립해양대기청, [4]메릴랜드대학 기후 · 위성 연구소

(2018년 1월 23일 접수, 2018년 3월 6일 수정, 2018년 6월 18일 채택)

Eunhye Kim, Changhan Bae, Chul Yoo[1], Byeong-Uk Kim[2], Hyun Cheol Kim[3,4] and Soontae Kim*
Department of Environmental & Safety Engineering, Ajou University
[1]National Institute of Environmental Research
[2]Georgia Environmental Protection Division
[3]Air Resources Laboratory, National Oceanic & Atmospheric Administration
[4]Cooperative Institute for Climate and Satellites, University of Maryland

(Received 23 January 2018, revised 6 March 2018, accepted 18 June 2018)

Abstract

On September 26, 2017, South Korean government has established the Particulate Matter Comprehensive Plan to improve Korean air quality by 2022, which aims to reduce annual mean surface $PM_{2.5}$ concentration to 18 μg/m^3. This study demonstrates quantitative assessment of predicted $PM_{2.5}$ concentrations over 17 South Korean regions with the enforcement of the comprehensive plan. We utilize the Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) modeling system with CAPSS 2013 and CREATE 2015 emissions inventories. Simulations are conducted for 2015 with the base emissions and the planned emissions, and impacts from model biases are minimized using the RRF (Relative Response Factor). With effective emission reduction scenario suggested by the comprehensive plan, the model demonstrates that the surface $PM_{2.5}$ concentration may decrease by 6 μg/m^3 (23 μg/m^3 → 17 μg/m^3) and 7 μg/m^3 (25 μg/m^3 → 18 μg/m^3) for Seoul and South Korea, respectively. The number of high $PM_{2.5}$ days (daily mean > 25 μg/m^3) also decreases from 21 days to 4 days.

Key words : $PM_{2.5}$, Comprehensive plan, Exceedance, CMAQ

1. 서 론

국내 미세먼지(PM_{10}) 농도는 2012년까지 감소한 후, 다소 증가하는 추세이며(Kim *et al.*, 2017a), 2015년 전국 연평균 $PM_{2.5}$ 농도는 26 μg/m^{3}로(AirKorea; http://www.airkorea.or.kr), WHO (World Health Organization) 권고치인 10 μg/m^{3}을 크게 웃돌았다(WHO, 2006). 2015년 정부에서는 '2차 수도권 대기환경관리

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)31-219-2511, E-mail : soontaekim@ajou.ac.kr

기본계획'을 마련하고 2024년까지 서울 기준 연평균 $PM_{2.5}$ 농도를 20 μg/m^3 수준으로 개선하고자 목표하였다. 그러나 수립된 대책이 차량 운행제한 등 NO_x 배출량 삭감에 초점이 맞추어져 있고 대상지역도 대부분 수도권으로 한정되어, 보다 실효성 있는 정책 마련이 필요해짐에 따라 2016년 6월 3일 '수도권 미세먼지 특별대책'을 수립하여, 대상지역을 일부 확대하고 목표연도를 3년 앞당겼다. 새 정부 출범 이후 2017년 9월 26일에는 고농도 미세먼지 발생 빈도 증가에 대한 국민의 대기질 개선 요구를 수용하여 '미세먼지 관리 종합대책'(이하 '종합대책')을 발표하였으며, 국무조정실, 기재부, 산업부, 환경부, 국토부 등 12개 관계부처가 합동하여 2022년까지 수도권을 포함한 국내 전역에 걸쳐 발전, 산업, 교통, 생활 부문에 대한 1차 및 2차 $PM_{2.5}$ 배출량을 2014년 대비 30% 가량 감축함으로써 서울을 중심으로 연평균 $PM_{2.5}$ 농도를 18 μg/m^3 수준으로 개선하고, 전국에 대한 나쁨($PM_{2.5}$ > 50 μg/m^3) 이상의 발생일수를 연간 78일까지 줄이고자 목표하였다(MOE, 2017a). 그러나 이러한 배출량 삭감 정책 적용에 따른 지역별 $PM_{2.5}$ 목표농도 달성 정도는 아직까지 예측된 바 없다.

배출량 삭감대책 마련 및 시행에 따른 전망농도의 예측에 있어 정확성을 도모하기 위해 미국 환경청의 경우 관측치와의 비교를 통한 수행평가 등 다양한 방법을 통해 검토하며, 반복적인 모사 수행을 통해 최적의 모사 플랫폼(platform)을 마련한다. 또한, 오차를 최소화하기 위해 장래 대기질 목표수준 달성도 평가 시 측정소 부근에서 모사된 기준연도 농도 대비 미래연도 농도의 비율인 RRF(Relative Response Factor)를 활용하여 농도를 예측하도록 권고하고 있다(U.S. EPA, 2007). 국내의 경우에도 Bae *et al.*(2017a)이 관측농도에 대한 모사농도 비율인 CCF(Concentration Correction Factor)를 적용하여 기여도를 검토한 바 있다.

본 연구에서는 2017년 9월에 발표된 종합대책에 준하는 배출량 저감 대책 시행에 따른 $PM_{2.5}$ 농도 변화 범위를 추정하기 위해 대기질 모사를 수행하고, RRF를 적용하여 2022년 국내 지역별 $PM_{2.5}$ 농도를 정량적으로 예측하였다. 또한, 배출량 감소에 따른 연평균 농도 기준 초과일수를 추정함으로써 정책의 실효성을 검토하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 배출량 시나리오

2022년까지 2014년에 대한 국내 배출량 30% 삭감을 목표로 관계부처에서는 발전, 산업, 수송, 생활을 4대 핵심 배출원으로 규정하고 정량화가 가능한 33개 배출원 관리수단을 도출하였다. 이때 기본적으로 이용된 배출량 목록은 2014년 CAPSS(Clean Air Policy Support System) 자료로, 계획이 발표된 2017년 당시 이용 가능한 최신의 자료였기 때문으로 판단된다. 본 연구에서는 미래연도에 대한 배출량 산정을 위해 종합계획에서 가정한 배출량 삭감 방법, 수도권 지자체 시행계획 및 이행실적 평가 방법 등을 바탕으로 부문별 삭감량을 구체적으로 추정하였다. 예를 들어, 발전부문과 산업부문 삭감량은 총량관리 할당 계획과 배출허용기준 강화 계획을 반영하였으며, 수송부문은 차종별, 연료별 배출허용기준 강화 계획, 친환경차 보급 계획, 노후 경유차 조기폐차 계획을 고려하였다. 또한, 생활부문은 도로청소차량 보급, 도료 VOC 함량 제한, 저NO_x버너 보급 사업의 물량과 기준을 적용하여 삭감량을 산정하였다(MOE, 2017a). 한편, '2차 수도권 대기환경관리 기본계획 변경계획'(이하 '수도권 변경계획') 수립을 위한 연구 및 '종합대책'의 경우 국내 $PM_{2.5}$ 농도에 주요하게 기여하는 것으로 보고되는 암모니아 배출량에 대하여(Watts *et al.*, 2017), 고효율 SCR(Selective Catalytic Reduction) 이용에 따른 수송부문 및 산업부문의 암모니아 누출 감소 등을 바탕으로 국내 전역에 대해 15% 삭감을 적용하고 있다.

앞서 언급한 국내 미세먼지 대책에 가정된 배출량 저감 시나리오를 바탕으로, 본 연구에 이용된 부문별 배출물질에 대한 삭감량을 표 1에 제시하였다. Primary $PM_{2.5}$의 경우 발전부문에서 877 ton/year, 산업부문에서 4,330 ton/year, 수송부문에서 7,739 ton/year, 생활부문에서 4,750 ton/year 감축을 가정하였으며, 목표농도 달성을 위하여 국내 배출량 삭감 이외에 중국의 배출량 변화가 함께 고려되었다. Wang *et al.*(2014) 연구로부터 중국의 부문별 배출량이 2024년까지 30% 가량 감소할 것으로 예측되었으며, 국내 미세먼지 농도 달성 목표연도인 2022년에 대하여 '수도권 변경계획' 및 '종합대책'에서 설정한 바와 같이 정부의 미세먼지 배출저감 노력, 농도변화 추세 등을 고려하여 중국의 배

출량이 2015년 대비 35% 가량 감소할 것으로 가정하였다(MOE, 2017b).

2.2 대기질 모사

본 연구에서는 국내 미세먼지 관리를 위한 배출량 저감대책 시행에 따른 목표연도의 미세먼지 농도를 예측하기 위하여 대기질 모사를 수행하였다. '2차 수도권 변경계획'의 대상연도이자 측정자료가 공개된 2015년을 기준연도로 하였으며, 목표연도는 2022년으로 설정하였다. 모사영역은 중국, 일본 등 동북아시아를 포함하는 27-km 수평해상도 영역으로부터 둥지격자(nesting-down) 기법을 적용하여 한반도 중심의 9-km 영역을 대상으로 설정하였다. 그림 1은 본 연구에 이용된 모사영역으로, 모사평가를 위한 대기질 측정소(Air Monitoring Station, AMS)를 함께 나타내었다.

기상모사를 위해 NCEP(National Center for Environmental Prediction)의 FNL(Final aNaLysis)을 초기자료로 WRF(Weather Research and Forecast; Skamarock and Klemp, 2008) version 3.5.1을 수행하였으며, 세부 옵션은 표 2와 같다. 기준연도에 대한 배출량은 자연 배출량 및 인위적 배출량을 병합하여 생성하였다. 자연 배출량의 경우 MEGAN(Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature; Guenther *et al*., 2006) version 2.04를 이용해 산정하였다. 인위적 배출량의 경우 국외지역에 대하여는 CREATE(Comprehensive Regional Emissions inventory for Atmospheric Transport Experiment; http://aisl.konkuk.ac.kr/ais/emission/create.do) 2015, 국내지역에 대하여는 CAPSS 2013을 바탕으로 2015년에 대한 추계(projected) 배출량 목록을 마련하였으며, SMOKE(Sparse Matrix Operator Kernel Emission; Benjey *et al*., 2001) version

Table 1. Emissions reduction scenario.

Emission sector	Emissions reductions (ton/year)			
	Primary $PM_{2.5}$	SO_2	NO_X	VOC
Power plant	877	21,403	53,475	1,054
Industrial	4,330	106,610	146,963	–
Transportation	7,739	4,017	201,669	22,240
Residential	4,750	1,235	4,984	43,061
Total	17,696	133,265	407,091	66,355

Table 2. WRF configurations.

Physical options	Scheme
Boundary layer	YSU (Hong *et al*., 2006)
Cumulus	Kain-fritsch (Kain, 2004)
Land-surface	NOAH (Chen and Dudhia, 2001)
Long-wave radiation	RRTM (Mlawer *et al*., 1997)
Short-wave radiation	Goddard (Chou and Suarez, 1994)
Microphysics	WSM3 (Hong *et al*., 2004)

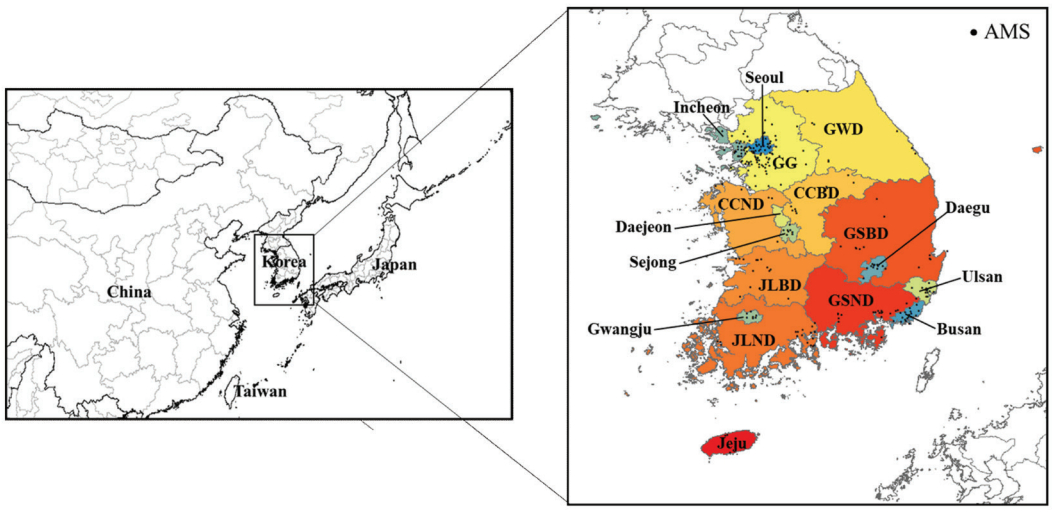

Fig. 1. Modeling domain at a horizontal resolution of 27-km (left) and 9-kim (right) used in this study. The black circle in right panel shows AMS monitors. AMS: air quality monitoring stations.

Table 3. CMAQ configurations.

Module	Option
Horizontal Advection	Yamo (Yamartino, 1993)
Vertical Advection	Yamo (Yamartino, 1993)
Horizontal Diffusion	Multiscale (Louis, 1979)
Vertical Diffusion	Eddy (Louis, 1979)
Aerosol	AERO5 (Binkowski and Roselle, 2003)
Chemical mechanism	SAPRC99 (Carter, 1999)

3.1을 이용한 시 · 공간 할당 및 화학종 분류를 수행하였다. 목표연도에 대한 배출량은 앞서 가정한 배출량 저감 시나리오를 적용하여 마련하였다. 저감대책 별 삭감 배출량 할당 과정은 부록 1을 참조할 수 있다. 대기질 모사는 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality; Byun and Schere, 2006) version 4.7.1을 이용하였으며, 세부 옵션은 표 3과 같다.

3. 결과 분석

3.1 2022년 전망 배출량

그림 2의 2022년 전망배출량은 앞서 설명한 바와 같이 2015년 기본배출량에 본 연구에서 '종합대책'을 바탕으로 가정한 배출량 저감 시나리오를 적용하여 계산하였으며(부록 2 참조), 기본 배출량의 배출원별 공간분포를 적용하여 서울(Seoul), 인천(Incheon), 경기도(Gyeonggi-do; GG), 강원도(Gangwon-do; GWD), 충청북도(Chungcheongbuk-do; CCBD), 충청남도(Chungcheongnam-do; CCND), 대전(Daejeon), 세종(Sejong), 경상북도(Gyeongsangbuk-do; GSBD), 경상남도(Gyeongsangnam-do; GSND), 대구(Daegu), 울산(Ulsan), 부산(Busan), 전라북도(Jeollabuk-do; JLBD), 전라남도(Jeollanam-do; JLND), 광주(Gwangju), 제주도(Jeju)로 세분화 하였다. 전체 권역에 대하여 평균적으로 NO_x 37%, SO_2 26%, NH_3 15%, $PM_{2.5}$ 21%, VOC 6% 가량 삭감되었으며, 가장 많은 배출량 감소율을 보인 지역은 NO_x의 경우 충청남도(46%), SO_2의 경우 경상남도(45%), $PM_{2.5}$의 경우 인천(38%), VOC의 경우 세종(9%)으로 나타났다. 그림 3과 4에 NO_x 및 SO_2 배출량에 대하여 지역별로 주요 삭감이 이뤄지는 배출부문과 전체 삭감량 중 해당 배출부문이 차지하는 비율을 CAPSS 배출량 목록의 12개 SCC 대분류(에너지산업연소, 비산업연소, 제조업연소, 생산공정, 에너지수송 및 저장, 유기용제 사용, 도로이동오염원, 비도로이동오염원, 폐기물처리, 농업, 기타 면오염원, 비산먼지, 생물성연소)로 구분하여 제시하였다. 인천, 충청남도, 경상남도, 울산지역의 경우 에너지산업연소 부문의 삭감 비율이 NO_x 및 SO_2에 대해 공통적으로 높게 나타났으며, 이는 발전부문 배출량 저감 정책이 반영된 결과로 분석된다. 강원도, 충청북도, 경상북도 지역의 경우 제조업연소에 대한 배출량 삭감이 크게 나타났으며, 울산 및 전라남도에서는 생산공정에 대한 배출량 삭감이 주요한 것으로 분석되었다. 한편, NO_x의 경우 대부분의 지역에서 도로이동오염원, 비도로이동오염원 등 이동오염원의 배출량 삭감이 두드러진다.

3.2 기본모사 평가

3.2.1 기상모사 평가

대기화학 모델에 입력자료로 이용되는 기상모사에 대한 정합도는 기상청 관측자료를 이용해 평가하였다. 그림 5에 2-m 온도 및 10-m 풍속에 대한 일평균 시계열 및 산포도를 보였으며, 표 4에 통계적 분석 결과를 제시하였다. 온도의 경우 편차(Bias) −0.77°C, 상관계수(R) 0.99로 관측치와의 신뢰도가 높게 모사되었으며, 풍속의 경우 편차 1.34 m/s, 상관계수 0.86으로 다소 과대 모사하는 경향을 보였다. Kim *et al*. (2017a)에 따르면, 풍속이 10% 감소될 때 PM_{10} 농도가 20% 가량 증가할 수 있다. 이에 본 연구에서는 기상에 대한 불확실성을 배제하기 위하여 기준연도 및 미래연도에 대하여 동일한 기상을 적용함으로써 배출량 변화에 따른 상대적 농도변화를 살펴보았으며, RRF를 적용하여 미래연도 농도 예측 시 정확도를 확보하고자 하였다. 추후 기상모사 개선을 위해 서해안 지역의 복잡한 해안선 등이 고려된 기상입력자료 확보 및 관련 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

3.2.2 대기질 모사 평가

2022년에 대한 $PM_{2.5}$ 농도 예측에 앞서 기준연도에 대한 농도모사 평가를 수행하였다. 그림 6은 각 권역에 대한 $PM_{2.5}$ 관측농도 및 모사농도를 시계열로 나타낸 것으로, 일평균 $PM_{2.5}$ 농도 기준인 50 $\mu g/m^3$에 대하여 겨울철 및 봄철에 높아지며 여름철에 낮아지는 계절 변동성이 관측치와 유사하게 나타났다. 특히, 여름철의

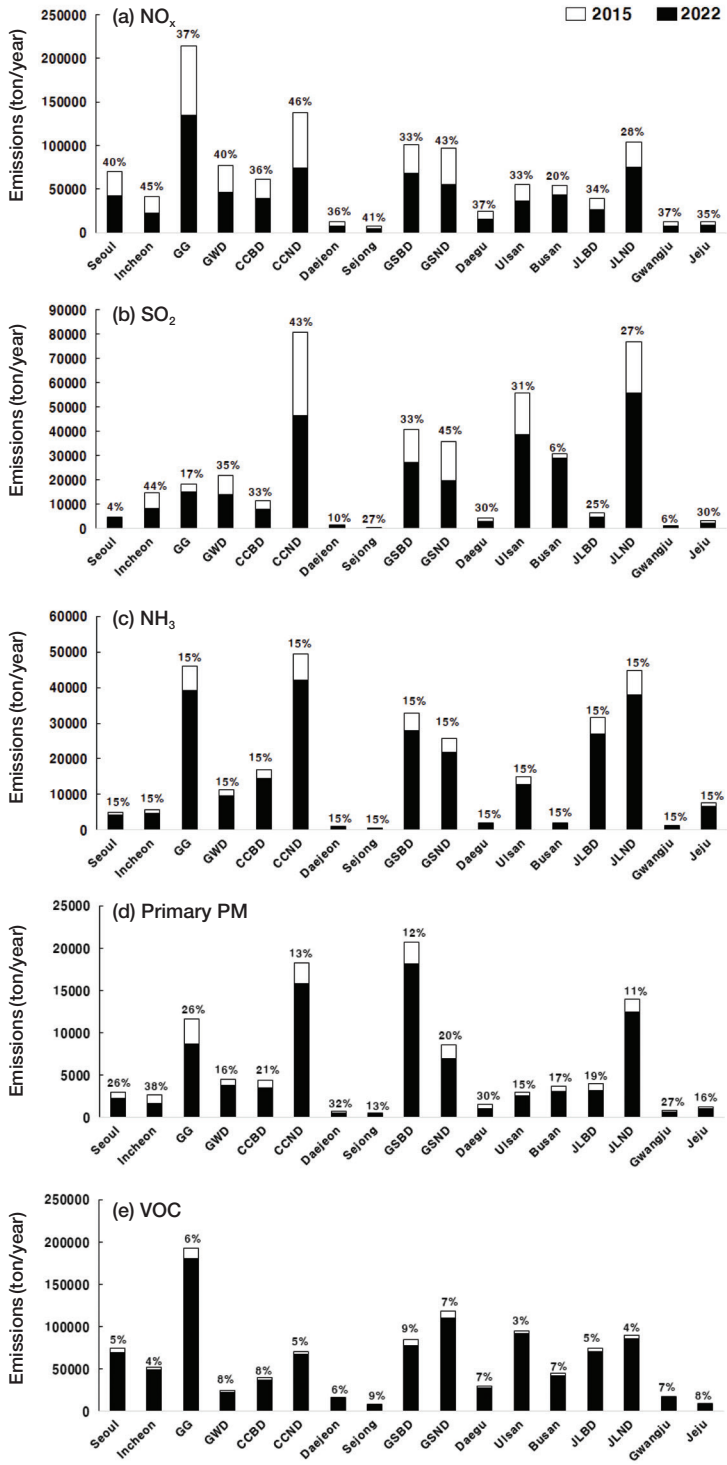

Fig. 2. Emissions changes in 2022 compared to 2015; (a) NO_x, (b) SO_2, (c) NH_3, (d), $PM_{2.5}$, (e) VOC. Percent represents emissions reduced between 2015 and 2022.

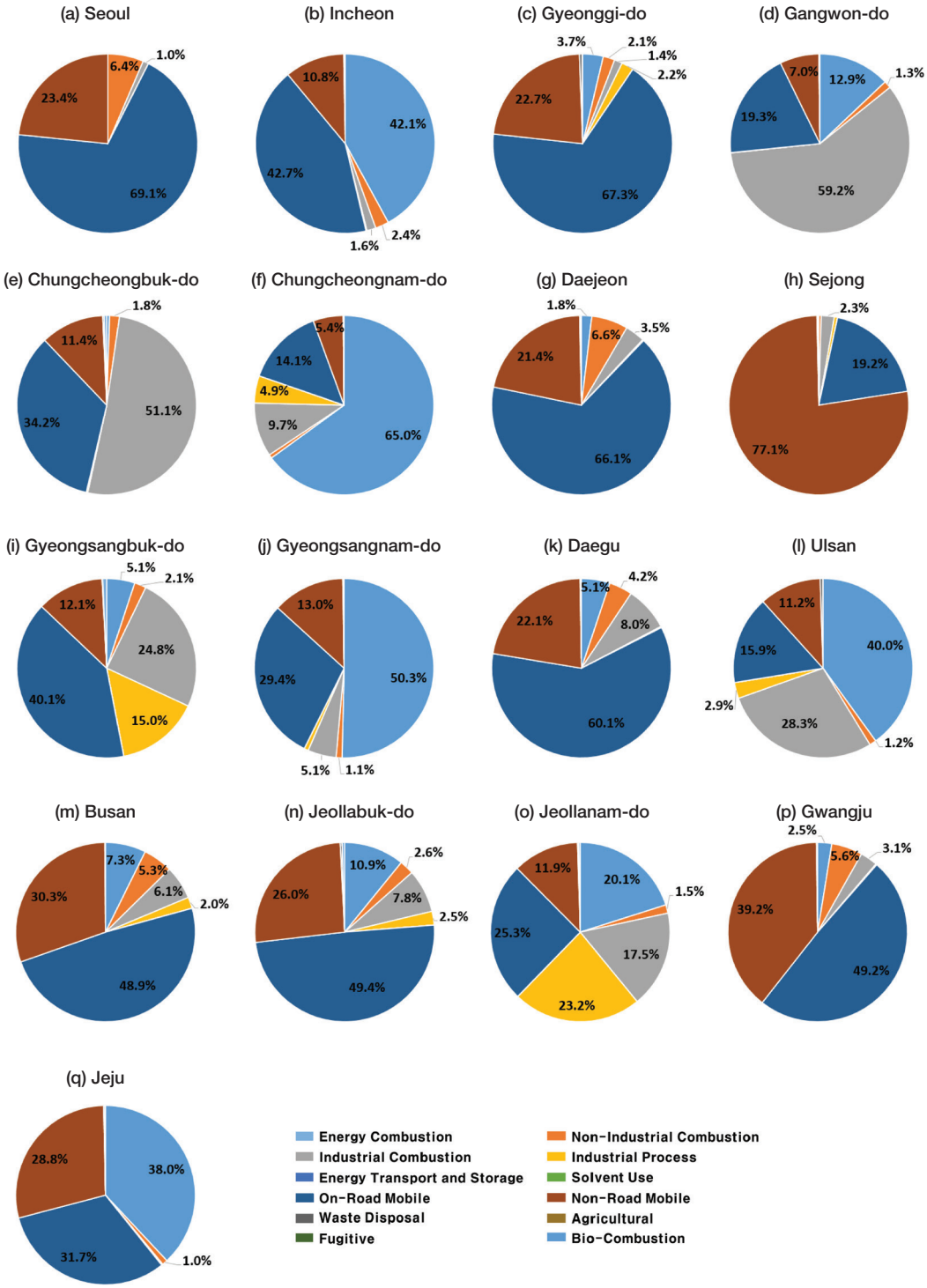

Fig. 3. Percentage of NO_x emission reduction from the major source categories in 17 regions.

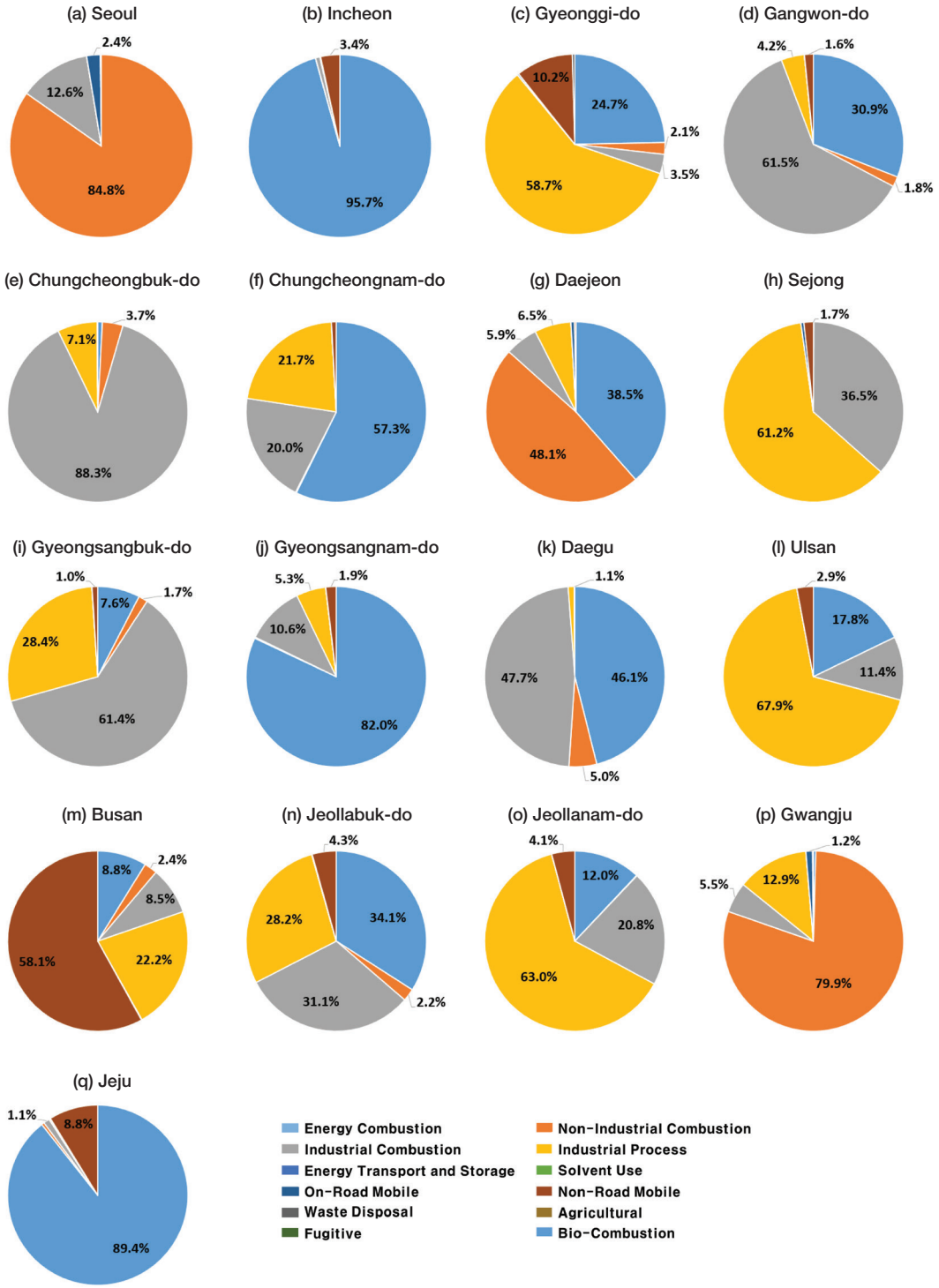

Fig. 4. Percentage of SO_2 emission reduction from the major source categories in 17 regions.

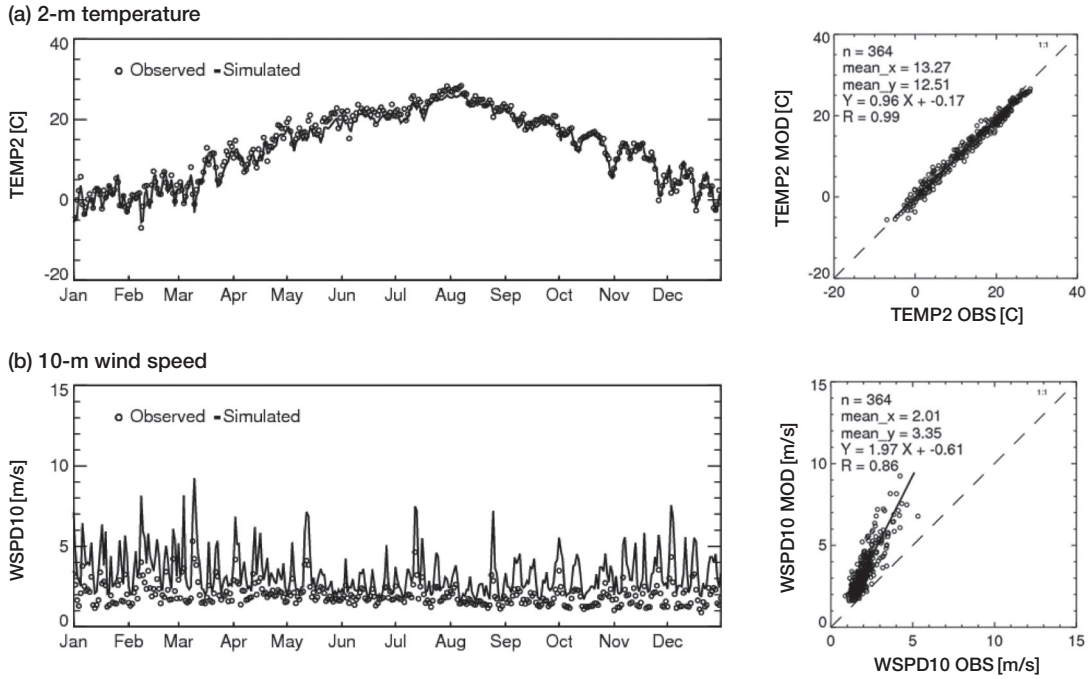

Fig. 5. Meteorological model performance evaluation over South Korea in 2015.

Table 4. Statistical model performance evaluation of meteorological model.

	2-m temperature (°C)	10-m wind speed (m/s)
Mean (observed)	13.27	2.01
Mean (simulated)	12.51	3.35
Bias	−0.77	1.34
R	0.99	0.86
MB (Mean Bias)	−0.77	0.74
MGE (Mean Gross Error)	1.19	1.34
NMB (Normalized Mean Bias) (%)	−5.78	1.34
NME (Normalized Mean Error) (%)	8.97	66.80
FB (Fractional Bias) (%)	−4.81	47.81
FE (Fractional Error) (%)	9.58	47.81

경우에는 대부분의 지역에서 과소 모사되는 경향을 보였다. 이러한 변동성은 풍향, 강수, 혼합고 등 기상 변화 및 배출량의 월별 시간할당 차이에 의해 나타나는 것으로 판단된다(Bae *et al*., 2017b). 지역별로는 서울, 경기도, 경상북도에서는 과대모사 경향이 주요하게 나타났으며, 강원, 세종, 제주에서는 다소 과소 모사되었다. 표 5의 통계적 분석결과에서는 대부분의 지역에서 Emery *et al*. (2017)이 제안한 Mean Normalized Bias (NMB), Normalized Mean Error (NME), R 및 Boylan and Russell (2006)이 제안한 Fractional Bias (FB), Fractional Error (FE)를 충족시켜 농도모사 결과가 신뢰할 만 한 것으로 평가되었다. 단, 충청남도, 세종, 제주도의 경우 결측치가 많으므로 해석 시 주의가 필요하다.

3.3 미래연도 농도 예측

3.3.1 중국 배출량 변화 고려 시 $PM_{2.5}$ 농도

앞서 가정한 국내외 저감 시나리오를 바탕으로 마련된 배출량을 이용하여 2022년에 대한 대기질 모사를 수행하였으며, 2015년의 농도 모사결과와 비교하였다. 그림 7은 배출량 삭감 전후에 대한 연평균 $PM_{2.5}$ 농도 변화를 공간분포로 보인 것으로, (c) 농도 차이로부터 배출량 삭감 후 수도권을 포함한 국내 전 지역에 대해 $PM_{2.5}$ 농도가 4~8 μg/m^3 가량 저감되는 것으로 나타났다. 그림 8은 남한 전체에 대한 일평균 농도를 비교한 것으로, 일 변화 패턴은 2015년과 2022년이 유사하였

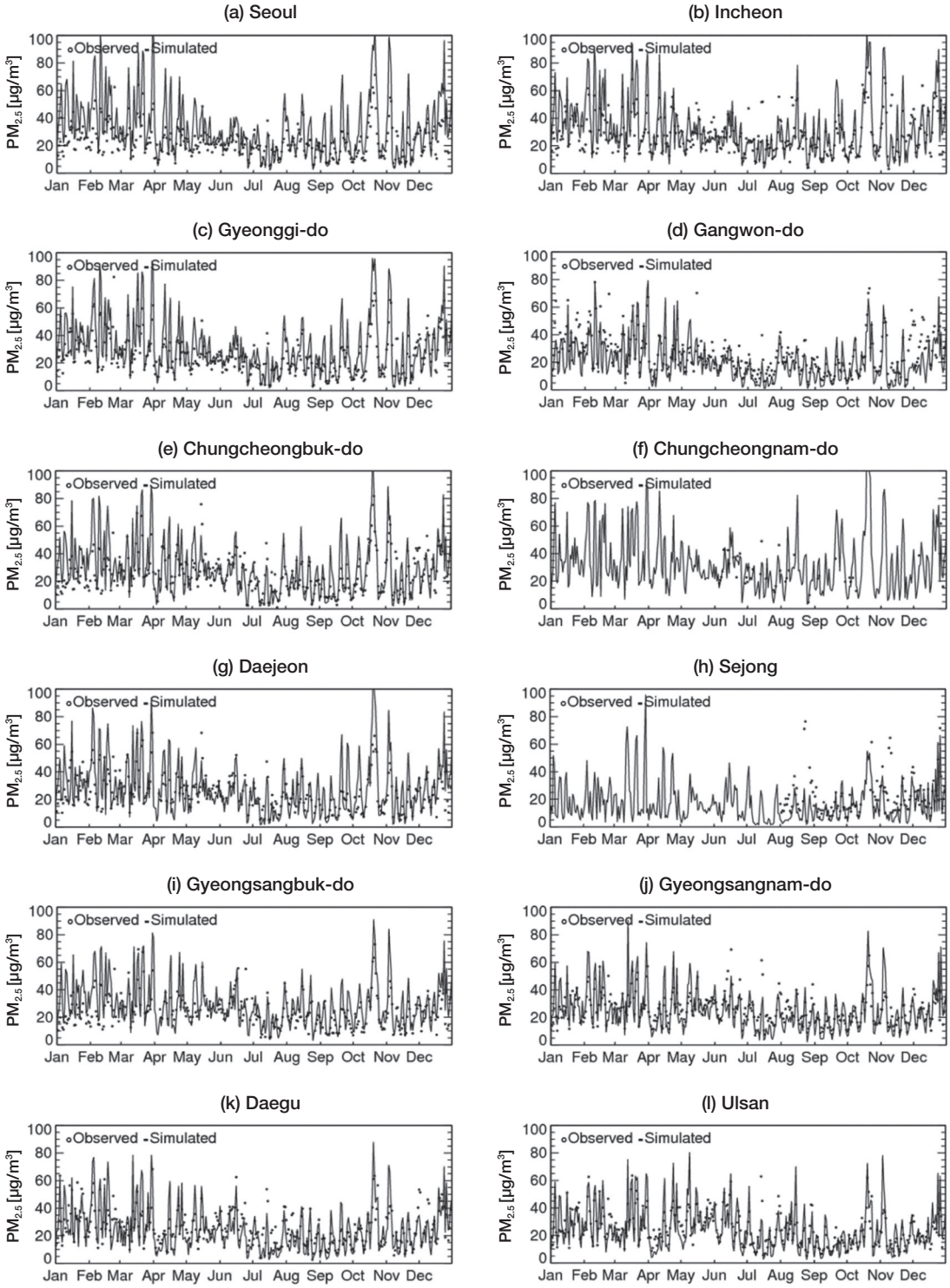

Fig. 6. CMAQ model performance evaluation over South Korea in 2015.

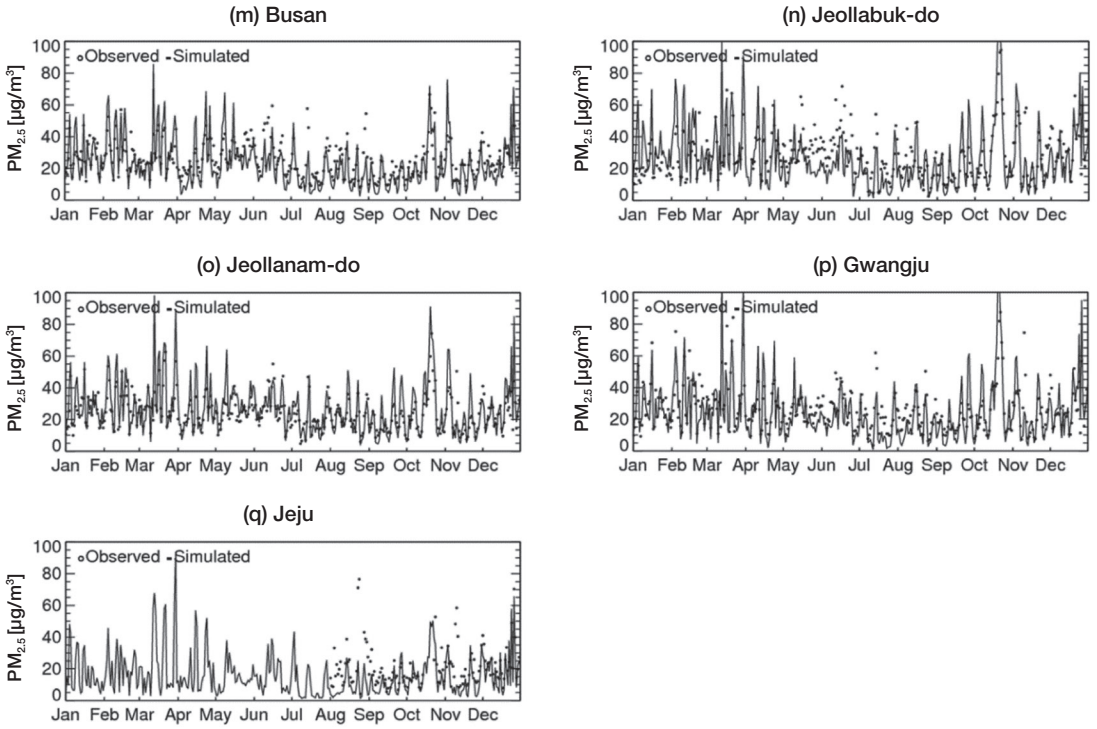

Fig. 6. Continued.

으나 저감 시나리오를 바탕으로 모사된 2022년의 $PM_{2.5}$ 농도가 5~10 μg/m^3 가량 더 낮게 모사되었다. 이러한 농도 저감 효과는 고농도 시에 더 두드러지게 나타났으며, 계절별로는 봄 및 겨울철에 큰 것으로 확인되었다.

지역별 농도 예측을 위해서 기준연도 모사에서 나타나는 불확도를 감안하여 RRF를 적용하였다. RRF는 기준연도의 측정농도와 측정소 근처에서 모사된 농도의 비율로, SIP를 위한 미래연도의 농도 추정 시 주로 활용된다(U.S. EPA, 2007). $PM_{2.5}$의 경우 Sulfate, Nitrate, Ammonium, EC, OC 등 8개 개별 성분농도에 대하여 RRF를 산정하도록 권장되나(U.S. EPA, 2007), 이용 가능한 관측자료의 한계로 본 연구에서는 식(1)과 같이 2015년의 지역별 $PM_{2.5}$ 관측자료를 이용하여 모사농도를 추정하였다.

$$M^{2022}_{mm,dd,RRF} = M^{2022}_{mm,dd} \times \frac{O^{2015}_{mm}}{M^{2015}_{mm}} \quad (1)$$

$M^{2022}_{mm,dd,RRF}$은 2022년 mm월 dd일에 대한 월별 보정계수 적용 후 모사농도를 나타낸 것으로, $M^{2022}_{mm,dd}$은 2022년 mm월 dd일에 대한 일평균 모사농도, O^{2015}_{mm}은 2015년 mm월에 대한 월평균 관측농도, M^{2015}_{mm}은 월평균 모사농도를 의미한다. 단, 관측자료가 적은 충남, 세종, 제주 지역에 대하여는 O^{2015}_{mm}을 M^{2015}_{mm}과 같은 값으로 가정하여 RRF를 1로 적용하였다.

RRF를 바탕으로 농도를 보정하여, 배출량 저감 시나리오 적용 후 변화된 권역별 $PM_{2.5}$ 농도를 보였다(그림 9). 권역 평균 $PM_{2.5}$의 연평균 농도는 2015년 25 μg/m^{3}에서 2022년 18 μg/m^{3}로 7 μg/m^3 가량 감소되어 목표농도를 충족하는 것으로 확인되었으며, 전라북도가 8 μg/m^{3}로 가장 많이 감소되었다. 한편, $PM_{2.5}$ 농도 감소율은 24~30% 수준으로 권역별로 유사하게 나타났다. 그림 10은 연간 $PM_{2.5}$ 농도기준 초과일수에 대한 변화를 보인 것으로, (a) 일평균 '나쁨' ($PM_{2.5}$ > 50 μg/m^3) 이상을 보이는 날은 권역 평균 2015년 21일에서 2022년 4일로 17일 감소되었으며, 전체 권역에 대한 초과일은 총 66일로 나타났다. (b) 연평균 대기환경기준 ($PM_{2.5}$ > 25 μg/m^3) 적용 시, 초과일수는 권역 평균

Table 5. Statistical model performance evaluation of CMAQ over South Korea in 2015.

	Number of data	Mean (observed)	Mean (simulated)	R	MB	NMB	NME	FB	FE
Seoul	364	22.96	32.58	0.84	9.62	41.92	50.30	24.15	37.53
Incheon	361	28.59	32.49	0.79	3.90	13.65	32.67	7.04	29.75
Gyeonggi-do	365	25.50	30.79	0.84	5.29	20.74	34.33	12.35	30.47
Gangwon-do	362	25.79	20.63	0.77	−5.16	−20.01	32.26	−32.56	43.58
Chungcheongbuk-do	351	25.26	28.70	0.76	3.44	13.63	63.07	4.50	35.15
Chungcheongnam-do	43	27.21	26.99	0.76	−0.22	−0.81	24.33	−2.15	25.99
Daejeon	317	25.35	29.15	0.76	3.80	15.01	37.86	3.45	37.65
Sejong	138	21.57	14.25	0.60	−7.32	−33.95	41.93	−48.06	54.72
Gyeongsangbuk-do	314	24.52	29.85	0.73	5.32	21.70	36.39	16.67	32.94
Gyeongsangnam-do	365	25.67	25.13	0.79	−0.55	−2.14	27.26	−11.61	29.87
Daegu	364	25.22	24.59	0.77	−0.63	−2.51	29.98	−11.13	32.51
Ulsan	362	24.39	24.29	0.80	−0.10	−0.41	27.61	−9.02	30.30
Busan	365	25.52	22.71	0.79	−2.81	−11.01	27.88	−22.01	33.13
Jeollabuk-do	345	28.26	26.50	0.71	−1.76	−6.23	35.43	−15.63	39.29
Jeollanam-do	363	24.30	26.91	0.82	2.61	10.73	26.98	3.34	25.28
Gwangju	361	26.33	24.55	0.77	−1.78	−6.78	31.83	−18.98	37.65
Jeju	139	20.89	13.09	0.58	−7.81	−37.37	44.47	−55.13	60.73

Unit: mean ($\mu g/m^3$), NMB (%), NME (%), FB (%), FE (%).
Emery *et al.* (2017) goals for 24-hr total and speciated $PM_{2.5}$: NMB < ± 10%, NME < 35%, r > 0.70.
Emery *et al.* (2017) criteria for 24-hr total and speciated $PM_{2.5}$: NMB < ± 30%, NME < 50%, r > 0.40.
Boylan and Russell (2006) goals for 24-hr total and speciated PM: FB < ± 30%, FE < 50%.
Boylan and Russell (2006) criteria for 24-hr total and speciated PM: FB < ± 60%, FE < 75%.

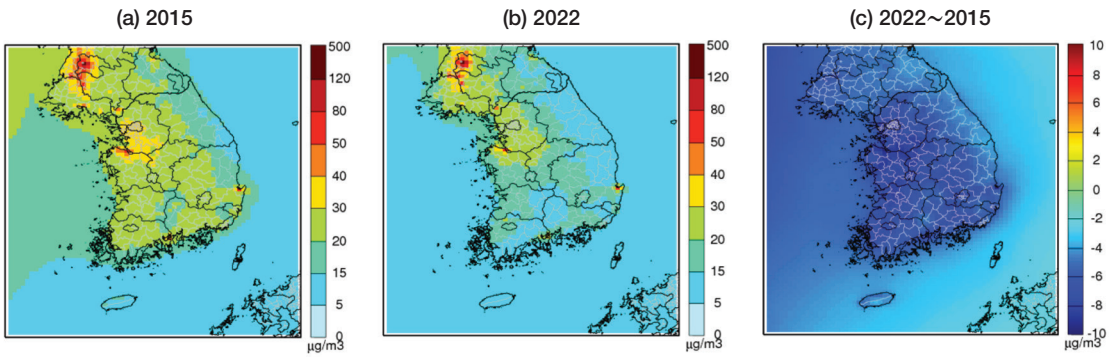

Fig. 7. Spatial distributions of $PM_{2.5}$ concentrations in (a) 2015, (b) 2022, and the difference (c) 2022 ~ 2015.

2015년 150일에서 2022년 73일로 77일 감소되었다.

3.3.2 중국 배출량 변화 미 반영 시 $PM_{2.5}$ 전망농도

앞 절에서는 '수도권 변경계획', '종합대책'으로부터 2022년까지 중국의 배출량이 기준연도 대비 35% 가량 감축될 것으로 가정하였다. 본 절에서는 국내에 대한 영향만을 추가적으로 살펴보고자, 중국 배출량에 대한 변화가 없는 것으로 가정하고 동일한 방법으로 분석을 수행하였다. 2022년 국내 $PM_{2.5}$ 전망농도는 권역평균 22 $\mu g/m^3$로, 그림 9의 기준연도 농도에 비해 3 $\mu g/m^3$ 가량 낮아지는 것으로 확인되었다(그림 11). 다만, 중국의 배출량 변화가 고려되었을 경우에 비해 전체 권역에서 4~5 $\mu g/m^3$ 가량 농도가 높게 나타나, 국내 배출량 감소 영향에 비해 중국 배출량 감소 영향이 큰 것으로 분석되었다. 이는 본 논문에서 가정한 중국 배출량 삭감이 국내 배출 삭감에 비해 5% 가량 높은 수치이며, Kim *et al.* (2017b) 연구로부터 중국 기여도가 상대

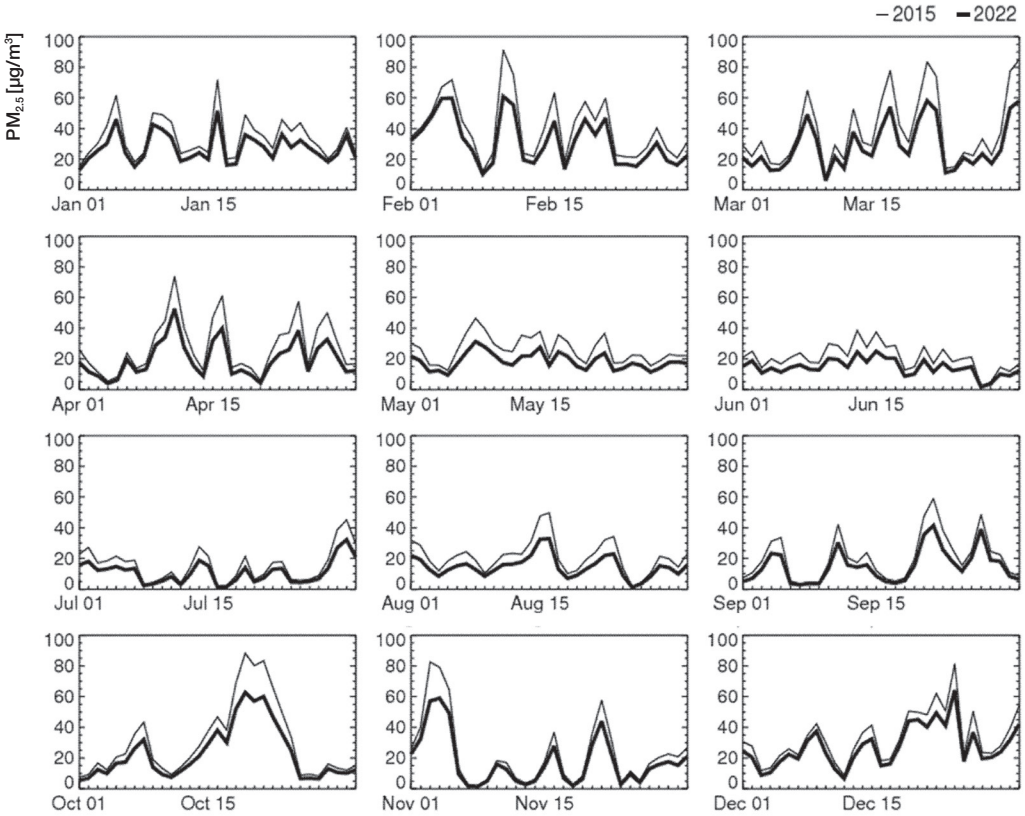

Fig. 8. Time series of daily $PM_{2.5}$ concentrations over South Korea.

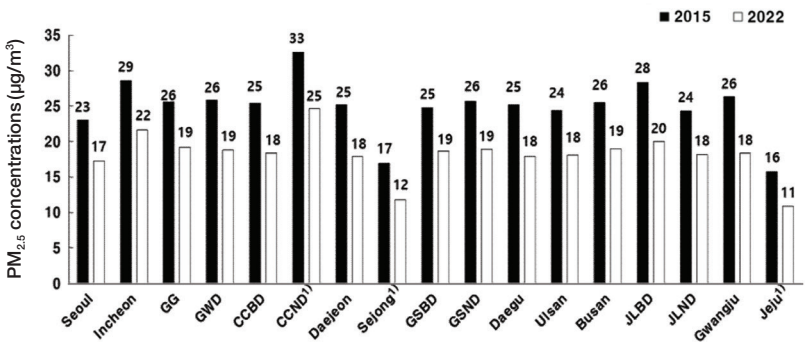

Fig. 9. Annual averaged $PM_{2.5}$ concentrations changes for each region. [1)]Note that the number of $PM_{2.5}$ observations during the simulation period are not enough to calculate RRF for CCND, Sejong, and Jeju as shown in Table 1. It is assumed that the RRF for those regions should be 1.

적으로 높게 모의되는 배출량 목록이 이용되었기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 그림 8에서 고농도 시 $PM_{2.5}$ 농도 변화 폭이 크게 나타나는 이유는, 중국 배출량에 대한 기여도가 크게 나타나면서 미래연도에 대한 중국

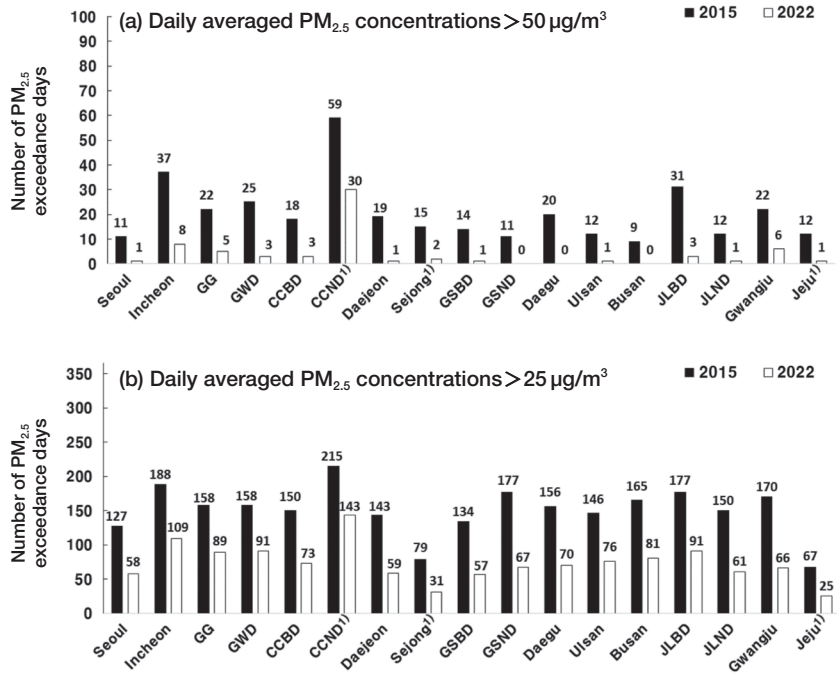

Fig. 10. Number of days above $PM_{2.5}$ regulatory standard (a) daily average, (b) annual average. [1)]Note that the number of $PM_{2.5}$ observations during the simulation period are not enough to calculate RRF for CCND, Sejong and Jeju as shown in Table 1. It is assumed that the RRF for those region is 1.

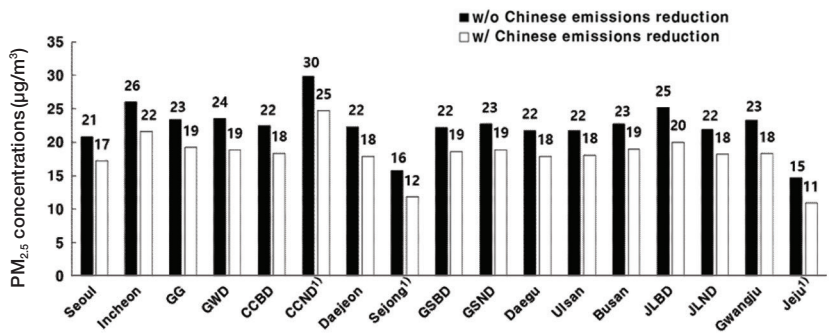

Fig. 11. Annual averaged $PM_{2.5}$ concentrations changes for each region according to Chinese emissions reduction in 2022. [1)]Note that the number of $PM_{2.5}$ observations during the simulation period are not enough to calculate RRF for CCND, Sejong, and Jeju as shown in Table 1. It is assumed that the RRF for those regions should be 1.

배출량 감소 영향 또한 크게 반영되었기 때문으로 판단된다. 이와 같이 중국 배출량 변화에 따라 국내 $PM_{2.5}$ 목표농도 달성 여부가 달라질 수 있기 때문에, 후속 연구에서는 중국 배출량 변화에 따른 국내 $PM_{2.5}$ 농도 변화에 대한 민감도 분석 결과를 제시하고자 한다.

4. 결 론

'종합대책'에서는 7.2조원을 투입하여 2022년까지 국내 $PM_{2.5}$ 농도를 연평균 18 μg/m^3 수준으로 개선하고자 목표하고 있다(MOE, 2017a). 본 연구에서는 '종합

대책'과 유사한 배출량 저감 시나리오를 마련하여 배출량 저감대책에 따른 $PM_{2.5}$ 농도 저감 효과를 검토하였다. 배출량 저감 시나리오로부터 연간 삭감 배출량은 Primary $PM_{2.5}$ 17,696 ton, SO_2 133,265 ton, NO_x 407,091 ton, VOC 66,355 ton으로 산정되었다. 서울 및 경기를 포함하는 대부분의 지역에서 차량 등 수송부문 배출량 저감대책에 의한 NO_x 저감이 크게 나타났으며, 화력발전이 위치하는 인천, 충청남도, 경상남도, 울산 지역의 경우 발전부문 배출량 저감대책에 의한 저감이 주요한 것으로 분석되었다. 배출량 저감 시나리오가 적용된 2022년의 연평균 $PM_{2.5}$ 농도는 권역 평균 18 $\mu g/m^3$로 2015년 대비 7 $\mu g/m^3$(27%)가량 감소되었으며, 서울에 대하여는 6 $\mu g/m^3$(25%)가량 감소되었다. 또한, 전국에 대한 '나쁨'($PM_{2.5} > 50\ \mu g/m^3$) 이상의 미세먼지 발생일수는 66일로 2015년 대비 283일 감소되어 목표농도(18 $\mu g/m^3$) 및 기준농도 초과일수(78일)를 충족할 것으로 예측되었다. 중국의 배출량 변화를 반영하지 않고 국내 배출량 저감노력만 고려하였을 때 연평균 국내 $PM_{2.5}$ 농도는 3 $\mu g/m^3$ 가량 개선될 것으로 분석되었으며, 이는 1 $\mu g/m^3$ 감축을 위해 2조 4천억원 이상의 예산이 소요됨을 의미한다. 앞서 논의된 국내 배출량 저감대책은 2022년 18 $\mu g/m^3$의 목표 달성을 위한 기본적인 대책 및 삭감량을 제시하는 것으로 평가되나, 이를 실제로 적용하기 위해서는 $PM_{2.5}$ 구성성분에 대한 이해를 바탕으로 시도별, 배출 부문별 배출량 할당 등 구체적인 저감 계획이 마련되어야 한다. 또한, 2018년 3월 26일 개정된 대기환경기준(15 $\mu g/m^3$) 달성을 위해 보다 엄격한 배출량 삭감 대책이 강구되어야 할 것으로 사료된다. 본 연구에서 추정한 $PM_{2.5}$ 전망농도는 중국의 배출량 감소를 가정하고 있기 때문에 중국의 배출량 변화를 주목하여 변동에 따른 지속적인 영향 분석이 요구되며, 추후 장기간에 대한 모사를 통해 기상장의 변화 등이 고려된 결과를 제시함으로써 모사결과의 신뢰도를 제고할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 미래창조과학부/한국연구재단 지원 초미세먼지 피해저감 사업단(2017M3D8A1092020)의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

Bae, C., You, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2017a) $PM_{2.5}$ simulations for the Seoul Metropolitan Area: (III) application of the modeled and observed $PM_{2.5}$ ratio on the contribution estimation, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33(5), 445-457. (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. (2017b) Impact of Emission Inventory Choices on PM_{10} 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)

Benjey, W., Houyoux, M., Susick, J. (2001) Implementation of the SMOKE emission data processor and SMOKE tool input data processor in Models-3, US EPA.

Binkowski, F.S., Roselle, S.J. (2003) Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model aerosol component 1. Model description, Journal of Geophysical Research, 108(D6).

Boylan, J.W., Russell, A.G. (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., 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.

Carter, W.P.L. (1999) Documentation of the SAPRC-99 Chemical Mechanism for VOC Reactivity Assessment, Report to California Air Resources Board, Contracts 92-329 and 95-308.

Chen, F., Dudhia, J. (2001) Coupling an Advanced Land Surface-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity, Monthly Weather Review, 129(4), 569-585.

Chou, M.D., Suarez, M.J. (1994) An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models, National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, 85pp.

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

Guenther, C.C. (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.

Hong, S.Y., Dudhia, J., Chen, S.H. (2004) A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation, Monthly Weather Review, 132 (1), 103-120.

Hong, S.Y., Noh, Y., Dudhia, J. (2006) A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes, Monthly Weather Review, 134(9), 2318-2341.

Kain, J.S. (2004) The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update, Journal of Applied Meteorology, 43(1), 170-181.

Kim, H.C., Kim, S., Kim, B.-U., Jin, C.-S., Hong, S., Park, R., Son, S.-W., Bae, C., Bae, M., Song, C.-K., Stein, A. (2017a) Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea. Scientific Reports, 7.

Kim, H.C., Kim, E., Bae, C., Cho, J.H., Kim, B.-U., Kim, S. (2017b) Regional Contributions to Particulate Matter Concentration in the Seoul Metropolitan Area, Korea: Seasonal Variation and Sensitivity to Meteorology and Emissions Inventory, Atmospheric Chemistry and Physics, 17(17), 10315-10332.

Louis, J.-F. (1979) A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, Boundary-Layer Meteorology, 17(2), 187-202.

Mlawer, E.J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J., Clough, S.A. (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 102(D14), 16663-16682.

Ministry of Environment (MOE) (2017a) Comprehensive Plan Report, http://www.me.go.kr/home/file/readDownloadFile.do?fileId=152146&fileSeq=1 (accessed on Dec 22, 2017).

Ministry of Environment (MOE) (2017b) 2nd stage of air quality management plan revision over the Seoul Metropolitan Area, https://www.nkis.re.kr:4445/subject_view1.do?otpId=NRCS00051764&otpSeq=0&popup=P#none (accessed on Mar 30, 2018).

Skamarock, W.C., Klemp, J.B. (2008) A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, Journal of Computational Physics, 227, 3465-3485.

U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2007) Guidance on the Use of Models and Other Analyses for Demonstrating Attainment of Air Quality Goals for Ozone, PM_{25}, and Regional Haze, https://www.epa.gov/scram001/guidance/guide/final-03-pm-rh-guidance.pdf (accessed on Dec 22, 2017).

Wang, S.X., Zhao, B., Cai, S.Y., Klimont, Z., Nielsen, C.P., Morikawa, T., Woo, J.H., Kim, Y., Fu, X., Xu, J.Y., Hao, J.M., He, K.B. (2014) Emission trends and mitigation options for air pollutants in East Asia, Atmospheric Chemistry and Physics, 14(13), 6571-6603.

Watts, N., Amann, M., Ayeb-Karlsson, S., Belesova, K., Bouley, T., Boykoff, M., Byass, P., Cai, W., Campbell-Lendrum, D., Chambers, J., Cox, P.M., Daly, M., Dasandi, N., Davies, M., Depledge, M., Depoux, A., Dominguez-Salas, P., Drummond, P., Ekins, P., Flahault, A., Frumkin, H., Georgeson, L., Ghanei, M., Grace, D., Graham, H., Grojsman, R., Haines, A., Hamilton, I., Hartinger, S., Johnson, A., Kelman, I., Kiesewetter, G., Kniveton, D., Liang, L., Lott, M., Lowe, R., Mace, G., Odhiambo Sewe, M., Maslin, M., Mikhaylov, S., Milner, J., Latifi, A.M., Moradi-Lakeh, M., Morrissey, K., Murray, K., Neville, T., Nilsson, M., Oreszczyn, T., Owfi, F., Pencheon, D., Pye, S., Rabbaniha, M., Robinson, E., Rocklöv, J., Schütte, S., Shumake-Guillemot, J., Steinbach, R., Tabatabaei, M., Wheeler, N., Wilkinson, P., Gong, P., Montgomery, H., Costello, A. (2017) The Lancet Countdown on health and climate change: from 25 years of inaction to a global transformation for public health, The Lancet, 391 (10120), 581-630.

World Health Organization (WHO) (2006) Air Quality Guidelines, Global Update 2005: Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulphur Dioxide.

Yamartino, R.J. (1993) Nonnegative, Conserved Scalar Transport Using Grid-Cell-centered, Spectrally Constrained Blackman Cubics for Applications on a Variable-Thickness Mesh, Monthly Weather Review, 121(3), 753-763.

Appendices 1 and 2 tabulate emission control measures and corresponding emission reductions. We prepared tabulated data in Korean instead of English for clarity.

부록 1과 부록 2는 본 연구에서 고려된 배출량 저감 대책과 배출량 삭감 정보를 담고 있으며, 명확한 의미 전달을 위해 국문으로 작성되었습니다.

Appendix 1. Classification of emission control measures and source categories applied to estimate air quality improvement in the study.

부문	대책	CAPSS 분류	
	전체	대분류	중분류
발전	노후 석탄화력발전소 봄철 가동중단 및 조기폐쇄	에너지산업연소	공공발전
	공정률 10%미만 석탄화력발전소 원점 재검토		
	운영 중인 석탄발전소 관리강화(기준강화, 성능개선)		공공발전
	2030년까지 신재생에너지 발전비중 20%		공공발전, 민간발전, 석유정제, 지역난방
	충청권 자발적 협약		공공발전
산업	수도권 외 총량관리 대상 확대	제조업연소	공정로, 기타, 연소시설
	먼지총량제 도입	에너지산업연소	공정로, 기타, 연소시설
	공장시설 배출관리 강화(배출허용기준 강화)	제조업연소	공정로, 기타, 연소시설
	질소산화물 배출부과금 신설	에너지산업연소	공정로, 기타, 연소시설
	수도권 총량관리 강화	제조업연소	공정로, 기타, 연소시설
수송	노후경유차 조기폐차 확대 및 저공해 조치(도로)	도로이동	화물차, 버스
	노후경유차 운행제한 확대(도로)	도로이동	화물차, 버스
	친환경차 보급 확대(도로)	도로이동	승용차, RV
	친환경차 협력금 제도 시행(도로)		
	공공기관 친환경차 의무구매 비율 상향(도로)	도로이동	승용차, RV
	대도시 노선버스를 CNG 버스로 전면 교체(도로)	도로이동	버스
	이륜차 관리 강화 및 전기이륜차 보급 확대(도로)	도로이동	이륜차
	LPG 차량 규제 완화(도로)	도로이동	RV, 버스, 승용차, 승합차, 이륜차, 택시, 특수차, 화물차
	에너지 상대가격 합리적 조정방안 검토(도로)	도로이동	승용차, RV
	건설장비 배출저감(비도로)	비도로이동	건설기계
	선박, 항만 미세먼지 저감(비도로)	비도로이동	선박
	경유철도차량의 전기철도차량으로 교체 추진(비도로)	비도로이동	철도
	수도권 광역급행철도 조기 확충(비도로)	도로이동	승용차, RV
	제작차 기준 강화(도로)	도로이동	버스, 화물차, RV
	건설기계 제작차 기준 강화(비도로)	비도로이동	건설기계
생활	도로청소차량 보급 확대	비산먼지	도로재비산
	도로설계기준 마련	비산먼지	도로재비산
	건설현장 비산먼지 자발적 협약	비산먼지	건설공사
	불법소각 지도단속	생물성연소	농업잔재물 소각, 노천소각
	고기구이 음식점 방지시설 설치 등	생물성연소	농업잔재물 소각, 노천소각
	저NO_X버너 설치지원 사업 추진	비산업연소	주거용시설, 농업, 축산, 수산업시설
	도료 VOC 함량 제한 및 수성도료 사용 확대	유기용제	상업 및 공공기관시설, 주거용시설
	농업잔재물 불법소각 관리	생물성연소	농업잔재물, 노천소각
	주유소 유증기 관리	에너지수송 및 저장	주유소

Appendix 2. List of emission control measures and corresponding expected reductions of air pollutant emissions.

부문	대책	삭감량(톤/년)			
		$PM_{2.5}$	SO_2	NO_X	VOC
	전체	17,696	113,265	407,091	66,355
	발전부문 전체	877	21,403	53,475	1,054
발전	노후 석탄화력발전소 봄철 가동중단 및 조기폐쇄	257	9,962	21,481	328
	공정률 10%미만 석탄화력발전소 원점 재검토				
	운영 중인 석탄발전소 관리강화	90	1,886	4,129	
	2030년까지 신재생에너지 발전비중 20%	237	5,513	9,558	411
	충청권 자발적 협약	293	4,043	18,307	315
	산업부문 전체	4,330	106,610	146,963	–
산업	수도권 외 총량관리 대상 확대		93,409	84,762	
	먼지총량제 도입	3,663			
	공장시설 배출관리 강화	262	8,350	22,898	–
	질소산화물 배출부과금 신설			31,218	
	수도권 총량관리 강화	405	4,852	8,085	–
	수송부문 전체	7,739	4,017	201,669	22,240
수송	노후경유차 조기폐차 확대 및 저공해 조치(도로)	2,160	12	40,486	3,073
	노후경유차 운행제한 확대(도로)				
	친환경차 보급 확대(도로)	355	10	12,573	3,329
	친환경차 협력금 제도 시행(도로)				
	공공기관 친환경차 의무구매 비율 상향(도로)	0	0	74	47
	대도시 노선버스를 CNG 버스로 전면 교체(도로)	156	3	10,243	
	이륜차 관리 강화 및 전기이륜차 보급 확대(도로)			68	100
	LPG 차량 규제 완화(도로)	409		10,697	40
	에너지 상대가격 합리적 조정방안 검토(도로)	786	5	26,230	
	건설장비 배출저감(비도로)	504	–	9,133	77
	선박, 항만 미세먼지 저감(비도로)	498	3,975	1,754	61
	경유철도차량의 전기철도차량으로 교체 추진(비도로)	23	10	389	64
	수도권 광역급행철도 조기 확충(비도로)	189	2	7,137	202
	제작차 기준 강화(도로)	2,658		31,870	9,637
	건설기계 제작차 기준 강화(비도로)			51,013	5,612
	생활부문 전체	4,750	1,235	4,984	43,061
생활	도로청소차량 보급 확대	1,512			
	도로설계기준 마련	343			
	건설현장 비산먼지 자발적 협약	1,371			
	불법소각 지도단속	155			
	고기구이 음식점 방지시설 설치 등	182	1	3	48
	저NO_X버너 설치지원 사업 추진	52	1,234	4,168	
	도료 VOC 함량 제한 및 수성도료 사용 확대				29,034
	농업잔재물 불법소각 관리	1,135		814	9,173
	주유소 유증기 관리				4,805