수도권 지역의 대기환경관리 시행계획 추진결과 평가를 위한 대기질 모델링 적용 방법

유 철 · 이대균 · 이용미* · 이미향 · 홍지형 · 이석조

국립환경과학원 기후대기연구부 대기공학연구과
(2011년 10월 27일 접수; 2011년 12월 19일 수정; 2011년 12월 25일 채택)

Methodology of Application to Air Quality Model to Evaluate the Results of the Enforcement Plan in Seoul Metropolitan Area

Chul Yoo, Dae-gyun Lee, Yong-mi Lee*, Mi-Hyang Lee, Ji-hyung Hong, Seok-jo Lee

*Air Pollution Control Research Division, Climate and Air Quality Research Department,
National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea*

(Manuscript received 27 October, 2011; revised 19 December, 2011; accepted 25 December, 2011)

Abstract

The Government had devised legislation of Special Act and drew up guidelines for improving air quality in Seoul Metropolitan area. In 2007 local government of Seoul, Incheon and Gyeonggi conducted the results of application policy by reduced air pollutants emission for the first time. Although there was reduction of air pollutant emission in each local government, it was ineffective as expected using air pollution monitoring database. Therefore we worked out a way to prepare modeling input data using the results of enforcement plan. And we simulated surface NO₂ and PM₁₀ before and after decrease in air pollutants emission and examine reduction effects of air pollution according to enforcement regulation except other influence, by using MM5-SMOKE-CMAQ system.

Each local government calculated the amount of emission reduction under application policy, and we developed to prepare input data so as to apply to SMOKE system using emission reduction of enforcement plan. Distribution factor of emission reduction were classified into detailed source and fuel codes using code mapping method in order to allocate the decreased emission. The code mapping method also included a way to allocate spatial distribution by CAPSS distribution. According to predicted result using the reduction of NO_x emission, NO₂ concentration was decreased from 19.1 ppb to 18.0 ppb in Seoul. In Gyeonggi and Incheon NO₂ concentrations were down to 0.65 ppb and 0.68 ppb after application of enforcement plan. PM₁₀ concentration was reduced from 18.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 17.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Seoul. In Gyeonggi PM₁₀ concentration was down to 0.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and in Incheon PM₁₀ concentration was decreased about 0.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ which was the lower concentration than any other cities.

Key Words : Enforcement plan, Allocation, Emission, Reduction, Air quality model

*Corresponding author : Yong-mi Lee, Climate and Air Quality Research Division, Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea
Phone: +82-32-560-7333
E-mail: s7424yoo@korea.kr

1. 서론

지금까지 이산화황, 일산화탄소, 납 등의 1차 대기 오염물질 배출량 감축을 위한 다양한 정책이 시행됨에 따라 1차 오염물질의 대기오염도는 선진국 수준으로 개선되는 성과를 거두었다. 그러나 2차 대기오염물

질의 관리는 상대적으로 미흡하여 미세먼지, 이산화질소, 오존 등의 대기오염도는 선진국의 주요 도시에 비해 심각한 상태이다. 또한 수도권지역은 총인구의 46%가 거주하고 있으며, 1980년에서 2000년 사이 자동차 증가율이 20배 정도로 높아짐에 따라 질소산화물의 환경부하가 전국평균의 5배로 높은 실정이다. 그러나 현재 대기환경관리는 대기환경보전법을 중심으로 한 농도 규제에 의존하는 사후관리에 그치고 있으며, 대기오염물질의 농도 규제는 자치단체별로 분산 관리됨에 따라 대기오염문제 해결에 한계를 드러내고 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하고 수도권지역의 대기환경을 개선하기 위하여 종합적인 시책을 추진하고, 대기오염원을 체계적으로 관리함으로써 지역주민의 건강을 보호하고 쾌적한 생활환경을 조성하기 위하여 환경부에서는 2003년 12월 수도권대기환경개선에 관한 특별법(이하 ‘특별법’)을 제정하여 시행하고 있다(환경부, 2010). 이를 위하여 환경부에서는 10년 마다 수도권대기환경관리 기본계획을 수립하고, 지자체에서는 이를 시행하기 위한 세부시행계획을 수립하여 매년 시행계획 추진 실적을 보고하고 있다. 그러나 이러한 시행 계획 추진실적에 따라 수도권 대기오염물질 배출량이 삭감된 것으로 분석되나 대기오염 자동측정망 자료를 이용한 분석 결과 이러한 배출량 저감 효과가 잘 나타나지 않는 것으로 분석되었다.

따라서 본 연구에서는 기존의 대기정책지원시스템의 배출량 자료를 사용자 마다 각각 다른 방법론으로 배출량 모델에 입력하던 것을 일관성 및 신뢰성 향상

및 시행계획 추진실적 보고서의 대기오염물질 배출 삭감량이 대기오염도 저감에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 삭감 실적을 대기질 예측 모델링에 적용할 수 있는 방법(Code mapping method)을 고안하고자 한 것이다. 또한 이러한 방법론을 통하여 2007년에 시행된 지자체 추진 실적을 적용함으로써 대기개선 정책의 평가 방법론의 실효성을 파악하였으며 그에 따른 영향을 파악해 보고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 2007년 지자체별 시행계획 추진실적

수도권대기환경개선을 위해서 정부에서는 2014년 기준 미세먼지 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, NO_2 22 ppb를 목표로 배출 삭감량은 미세먼지 9,533톤, NO_x 171천톤을 달성하기 위하여 여러 가지 정책을 시행중에 있다.

2007년도 서울, 인천, 경기의 지자체별 시행계획 추진 실적 중 NO_x 및 PM_{10} 의 저감량은 Fig. 1과 같다. 우선, 수도권 지역의 PM_{10} 의 삭감계획은 4,569톤이었으나 실제 저감량은 4,050톤으로 계획대비 89%의 달성 비율을 나타냈다. 또한 NO_x 의 저감량은 계획 대비 50% 미만으로 PM_{10} 에 비해 저조한 실적을 나타냈다. PM_{10} , NO_x , 등은 대부분 도로이동오염원 분야에서 저감되었다. 수도권 지역의 도로이동오염원의 저감 실적은 비교적 높게 나타났으나, 비도로이동오염원, 사업장 및 면오염원 대책 등은 대기오염물질 저감 실적이 저조한 것으로 분석되었다(수도권대기환경청, 2008).

Fig. 1. Emission reduction plans and accomplishments.

본 연구에서는 이러한 지자체별 시행계획을 통한 저감 실적이 대기오염에 미치는 영향을 살펴보기 위해 각 세부 대책별 저감 실적을 CAPSS 인벤토리 자료의 분류체계에 따라 배분되는 방법론을 고안해 보 고자하였다. 대기질 개선 대책은 수도권대기환경개 선 기본계획의 저감 대책에 따른 것으로서 2007년 시 행계획 추진 실적이 존재하는 세부 추진 대책의 예는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2. Emission reduction for NOx and PM10 by enforcement plan.

2.2. 모델링 수행 조건

본 연구의 모델링 기간은 2006년의 계절별 대표 사 레일로 1월, 4월, 8월, 10월로 설정하였다. 대상 기간의

선정은 기상자료의 월평균 온도 및 풍속, 주풍향 등을 고려하여, 각 계절을 대표할 수 있도록 선정하였다. 본 연구의 모델링 계산 영역은 Lambert Conformal(LC) 격자 투영법을 이용하였으며 모델영역을 수평적으로 세 개의 도메인을 통해 중첩화(nesting)하여 동북아시아에서 수도권 영역까지를 계산하였고 경계의 feed-back을 허용하는 two-way interacting nested grid system을 적용하였다(Fig. 3). 연직으로는 지형을 따르는 33개의 시그마 층으로 기상모델을 구성하였으며, SMOKE 및 대기질 모델은 이 중 21개로 구성하였다.

기상 모델 수행시 사용된 물리 과정을 살펴보면, 적운 모수화 과정은 Grell cumulus scheme(Grell 등, 1995)을 사용하였고, 복사과정은 Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) Longwave Scheme을 사용하여 수증기, 이산화탄소, 오존에 의한 상세한 흡수 스펙트럼 효과를 고려하였다. 대기 경계층에 대한 물리 과정은 Eta PBL Scheme을 사용하였고 지표면 물리 과정은 Five-Layer soil scheme을 선택하였다(Dudhia, 1996). 기상 수치모의에 사용된 중규모 모델의 초기 및 경계입력 자료는 6시간 단위 Climatol Data Assimilation System (CDAS)를 사용하였다.

배출모델의 입력자료 중 인벤토리 자료는 National Aeronautics and Space Administration (NASA)의 INTEX-B Project(2006)에서 도출된 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 의 격

Fig. 3. Example of countermeasures classification by enforcement plan.

자 단위의 자료와 1 km×1 km 간격의 2006년 CAPSS 배출량 자료를 사용하였다. 자연배출량의 경우는 Global Biosphere Emission and Interaction System (GloBEIS3)의 Biogenic Emission Inventory System ver.2 (BEIS2)를 이용하여 산정한 결과를 이용하였다. 본 연구에서 SMOKE 내의 프로파일 및 레퍼런스(reference profile) 등의 기존 연구를 기반으로 수행하였다(김 등, 2006; 김 등, 2008).

대기질 모델에서의 화학처리 과정을 살펴보면, 오존을 포함한 대기오염물질의 계산에는 미국 EPA의 Models-3/Community Multiscale Air Quality (CMAQ)를 활용하였다(Byun 등, 1999). 수평과 수직적 이류 계산에는 Yamartino scheme을 활용하였다(Odman, 1998). 수평 확산 모듈로는 지역적 바람을 변형하는 분산 계수를 활용하였고, 수직 확산 모듈로는 ACM2 (Asymmetric Convective Model version 2)를 활용하였다. 또한 광해리를 산정과정은 clear-sky 모듈과 운량 보정을 통해 광해리율을 내삽하여 산정하였다. 또한 가스상 화학 반응 모듈로는 33여개의 화학종과 81개의 화학반응으로 이루어진 Carbon-Bond Chemical Mechanism

Version IV (CB4)를 사용하였다. 입자상 산정 모듈로는 Aero3 (3rd generation CMAQ aerosol module) 모듈을 이용하였다.

2.3. 모델링 정합도 분석

수도권 지역의 대기질 예측결과와 신뢰성 분석을 위하여 대기오염자동측정망의 90여개의 자료를 이용하여 비교 분석을 실시하였고, 그 중 서울 지역 4개, 인천 2개 및 경기도 6개의 대표 측정소를 선정하여 보다 상세한 통계 분석을 실시하였다. 본 연구에서는 관측값과 각 시나리오에 따른 모델링 결과의 차이를 정량적으로 판단하기 위하여 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error : RMSE), 상관계수(R), 일치도 지수(index of agreement : IOA) 등의 몇 가지 통계적 방법을 사용하였다(김 등, 2003; Hurley 등, 2001; Pielke, 1984). Mean Normalized Bias(MNB)로 대표되는 표준편차 변수는 모델이 관측된 공간적, 시간적 패턴을 재현할 수 능력을 평가하는 지표로서 정확도의 근거가 된다(Liang 등, 2004). Mean Fractional Bias는 각 예측값과 관측값간의 편차와 오차를 표준화하는 지표

* Dotted line in third domain was the domain for SMOKE and CMAQ

Fig. 4. The coarse and nested grid domains for MM5-SMOKE-CMAQ system.

로써 PM의 MFE의 적합한 범위는 75%이하이며, 50%이하의 값은 이상적인 값으로 규정하고 있다 (James 등, 2006).

MM5V3을 이용한 기상 모델링의 결과를 살펴보기 위하여 온도, 풍향, 풍속 등의 항목에 대하여 서울, 인천, 수원 등 기상대의 관측 자료와 그 위치에서 예측된 결과를 비교·분석하였다. 온도장은 전반적인 일변화 경향을 잘 나타내고 있으며, 지형 및 토지 이용도에 따른 온도구배를 잘 표현하고 있었다. 서울 및 인천 등의

도심 지역에서 반사도, 수분함량 등의 물리적 특성에 의해 고온역이 형성 되었으며, 해안선을 따라 기온 경도가 크게 나타났다. 위의 몇 가지 통계적 분석 방법으로 살펴본 결과로는 봄, 여름, 가을철 온도의 오차범위 (RMSE)가 3.0 내외로 일변화를 잘 모사하고 있으나, 겨울철의 경우 RMSE와 BAIS가 다른 계절에 비해 높게 분석되었다. 그러나 R은 0.76이상으로 나타났으며, 세 지역 모두 관측값과의 일치도 지수(IOA)도 0.8이상으로 높은 상관성을 나타냈다(Table 1, 2).

Table 1. Model performance statistics calculated for temperature and wind in Apr. and Aug.

Month	meteorology	region	R	RMSE	IOA	Bias
April	Temperature	Seoul	0.81	2.94	0.86	-1.74
		Incheon	0.76	2.53	0.83	-1.37
		Suwon	0.83	2.60	0.89	-1.29
	Wind speed	Seoul	0.17	2.45	0.40	1.72
		Incheon	0.53	1.85	0.68	0.79
		Suwon	0.53	2.68	0.39	1.98
	Wind direction	Seoul	-	-	-	96.13
		Incheon	-	-	-	88.52
		Suwon	-	-	-	72.73
August	Temperature	Seoul	0.78	2.47	0.86	0.25
		Incheon	0.79	1.65	0.89	0.27
		Suwon	0.83	2.00	0.90	-0.40
	Wind speed	Seoul	0.22	1.20	0.66	0.01
		Incheon	0.14	1.56	0.58	0.84
		Suwon	0.26	1.36	0.59	-0.06
	Wind direction	Seoul	-	-	-	81.82
		Incheon	-	-	-	88.61
		Suwon	-	-	-	77.84

Table 2. Model performance statistics calculated for temperature and wind in Oct. and Jan.

Month	meteorology	region	R	RMSE	IOA	Bias
October	Temperature	Seoul	0.88	2.71	0.89	-1.83
		Incheon	0.88	1.95	0.90	-0.97
		Suwon	0.91	2.17	0.93	-1.16
	Wind speed	Seoul	0.20	1.22	0.65	0.16
		Incheon	0.00	2.24	0.34	1.51
		Suwon	0.24	1.53	0.54	-0.02
	Wind direction	Seoul	-	-	-	84.33
		Incheon	-	-	-	92.61
		Suwon	-	-	-	87.36
January	Temperature	Seoul	0.91	4.67	0.78	-4.26
		Incheon	0.90	3.18	0.84	-2.73
		Suwon	0.92	3.94	0.83	-3.51
	Wind speed	Seoul	0.39	1.99	0.62	-0.27
		Incheon	0.49	2.37	0.56	1.65
		Suwon	0.50	1.15	0.79	0.55
	Wind direction	Seoul	-	-	-	84.31
		Incheon	-	-	-	119.10
		Suwon	-	-	-	85.75

서울, 인천, 경기의 대표 측정지점에서의 대기질 분석 결과는 표 3과 같다. 본 연구에서는 총 90여개의 지점 결과를 이용하여 정합도 분석을 실시하였으며, 이 중 각 지역별 대표 지점의 상세한 통계적 분석을 실시하였다. 우선, 세 지역의 NO₂의 예측 농도는 지역별로 관측값에 비해 저평가 되는 것으로 분석되었다. 서울의 예측 농도는 약 20 ppb이며, 경기도의 평균 예측 농도는 15.4 ppb였다. 서울과 경기도의 대표 지점별 분석결과, 마포 및 도곡 등의 일치도지수가 0.5이상으로 높은 상관성을 나타냈으며, 수원과 김포 지역의 일치도 지수 역시 0.6 내외로 분석되었다. 인천의 경우 평균 예측 농도가 14.8 ppb로 저평가 되어 관측값과의 상관성이 다른 지역에 비해 낮았으나 비교적 유의한 수준으로 나타났다(Table 3).

수도권 PM10 예측결과를 살펴보면, 지역별의 평균 예측 농도는 19.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (서울), 16.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (경기), 14.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (인천)로 관측값(서울:51.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 경기:65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 인천:55.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 크게 저평가되었다. 지점별 분석결과로는 서울과 경기의 일치도 지수가 0.45이상으로 비교적 유의한 상관성을 나타내고 있었으나 MFE가 100% 내외로 비교적 높은 오차를 갖고 있었다. James 등(2006)에서는 PM10의 유의한 오차정도를 60%이하로 밝힌 바 있으나 본 연구에서는 비교적 큰 오차를 갖는 것으로 분석되었다. 또한 인천의 연희동의 경우 일치도 지수가 0.42로 다른 지역에 비해 낮

은 상관성을 나타냈다(Table 3). 이렇게 전반적인 PM10의 예측 신뢰성이 낮은 것은 우리나라 PM10 배출량의 불확실성에 의한 것으로서, 장영기 등(2009)의 연구에서는 PM10의 배출량 비중이 큰 건설, 농업 등의 비산먼지와 고기구이, 노천 소각 등의 생물성 연소 배출량이 현 대기오염물질 배출량 산정시 제외되었음을 언급한 바 있다. PM10의 예측능력을 높이기 위해 배출량의 신뢰성에 관한 기반 연구가 필요할 것으로 사료된다.

마지막으로 오존 예측 결과를 살펴보면, 서울지역의 평균 예측값은 27.2 ppb로 관측값(15.8 ppb)에 비해 높게 모사되었다. 마포와 도곡 지점의 분석결과, 두 지점 모두 일치도지수가 0.6이상으로 유의한 상관성을 나타냈으나, RMSE는 18 ppb이상으로 비교적 높게 분석되었고 MNB는 200%이상으로 EPA의 권고수치에 비해 높게 분석되었다. 경기도와 인천시의 예측값은 관측값(경기도 : 17.8 ppb, 인천시 : 20.6 ppb)에 비해 과대평가 되는 것으로 분석되어 경기도는 30.9 ppb, 인천시는 31.6 ppb로 예측되었다. 그러나 수원과 김포 등의 경기 지역의 일치도 지수는 0.6이상으로 높은 상관성을 나타냈으며, 인천의 연희 지점 역시 0.63으로 높은 상관성을 나타냈다(Table 3). 오존의 경우, 인천의 오차의 범위 및 편차가 가장 낮은 것으로 분석되었다.

Table 3. Model performance statistics calculated for air pollutant concentration

Region		Predicted mean	Monitored mean	R	IOA	RMSE	MNB (%)
NO ₂ (ppb)	Mapo	20.6	41.6	0.33	0.53	28.8	-44.4
	Dogok	22.2	40.1	0.46	0.58	26.1	-26.2
	Suwon	16.8	28.5	0.45	0.61	18.3	-38.7
	Gimpo	14.1	31.1	0.38	0.57	24.4	-48.1
	Yeunhui	13.6	24.5	0.26	0.53	20.4	-30.3
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mapo	18.4	45.6	0.26	0.49	39.46	88.0
	Dogok	20.6	52.9	0.34	0.50	42.74	92.0
	Suwon	18.0	55.9	0.31	0.49	52.93	100.4
	Gimpo	16.6	80.3	0.29	0.45	74.22	131.8
	Yeunhui	14.9	51.7	0.01	0.42	51.07	109.8
O ₃ (ppb)	Mapo	26.8	17.9	0.42	0.64	18.9	238.0
	Dogok	25.8	14.3	0.51	0.66	19.7	478.1
	Suwon	30.0	19.8	0.40	0.62	20.6	184.6
	Gimpo	31.4	16.4	0.46	0.60	21.1	444.8
	Yeunhui	32.0	22.1	0.44	0.63	18.9	169.4

수도권 지역의 대표 측정망에서 NO_2 및 PM_{10} 의 시계열 분포의 예는 아래 그림 4 및 5와 같다. 세 지역 모두 NO_2 의 일변화 경향을 잘 모사하고 있었으나, 전반적으로 NO_2 의 예측 농도가 크게 저평가 되는 것으로 분석되었다. PM_{10} 의 경우 세 지역 모두 관측값에 비해 예측농도가 크게 저평가 된 것으로 분석되었다. 특히, 여름을 제외한 모든 계절에서 PM_{10} 예측값이

관측값에 비해 전반적으로 낮게 모사되었다. 이것은 국내 PM_{10} 배출량의 저평가에 의한 영향과 함께 PM_{10} 배출량의 장거리 이송에 의한 영향으로 사료된다(이 등, 2005). 그림 6은 오존의 대표 지점별 시계열 분포의 예를 나타낸 것이다. 세 지역 모두 오존의 일변화 경향을 잘 모사하고 있었으나, 서울시와 경기도의 경우 전반적으로 오존 농도를 과대평가하는 것으로

Fig. 5. Time series of NO_2 between observed and predicted value at some of AQMS.

Fig. 6. Time series of PM_{10} between observed and predicted value at some of AQMS.

Fig. 7. Time series of O₃ between observed and predicted value at some of AQMS.

분석되었으며, 국내 실정을 반영한 VOCs speciation 자료의 부제와 CMAQ의 고농도 오존 모사능의 특성으로 다소 MNB가 다른 물질에 비하여 높게 예측되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 시행계획 추진실적을 이용한 모델링 입력자료 작성

본 연구는 2006년도 CAPSS의 격자별 배출량을 기반으로 각 지자체에서 산정한 시행계획 추진 실적을 적용 전·후의 결과를 이용하여 모델링 입력자료 산출하였다. 이때, 시행계획 추진 실적에 따른 삭감량은 오염원(SCC) 및 연료코드(Fuel code)별 배출량으로 구분하여 기존의 배출량과 삭감량과의 비를 이용하여 삭감비를 계산하였다. 이렇게 산출된 삭감비는 2006년 격자별 배출량에 적용하였으며, 동일한 오염원 및 연료 분류에는 같은 비율 적용하였다.

$$\begin{aligned} & \text{'07년 시행계획적용배출량} = \\ & \text{'06년 CAPSS격자별배출량} \times (1 - \text{삭감량비율}) \end{aligned}$$

본 연구의 기본 배출량은 현재 산정된 가장 최신 연도의 신뢰성 있는 국가 대기오염물질 배출량으로, 일

괄적인 대기 개선 정책의 적용을 위해 2007년도의 대기개선 정책이 배제된 2006년 배출량을 기본 배출량 자료로 활용하였다. 이때, 일부 저감 정책에 따른 배출 삭감량이 기본 배출량 보다 큰 경우 2006년 CAPSS 기본배출량에 저감량을 가산하여 수정된 배출량을 본 연구의 기본 배출량으로 사용하였다. 수정된 기본배출량 부문으로는 수도권 지역의 이동오염원의 연료품 질강화(황함량) 및 인천, 경기 지역의 기타대책 중 화물차 부문 등이었다.

각 대책별 삭감비율을 산정하기 위해서는 지자체별 저감 대책을 CAPSS 인벤토리 자료에 맞추어 코드를 분배해주는 과정이 필요하다. 이러한 할당 방법은 code mapping method로서 각 대책별로 Source classification code와 fuel code를 할당해준 방법이다. 지자체별 대기개선 대책은 『수도권 지역 배출총량관리제 추진방안』(한국환경정책·평가연구원, 2004)의 지역배출총량관리를 위한 각 분야별 대책에 따른다.

각 분야별 code mapping method를 살펴보면, 이동오염원 부문은 대기질 개선 대책에 따라 각 차종별 및 연료별로 코드를 할당하는 것을 기본으로 하였다 (Table 4). 도로이동오염원의 경우 대기개선정책 적용에 따른 삭감만을 포함하기 위하여 엔진 가열 및 미가열 부문만을 고려하여 삭감비율을 산정하였다. 각 대

Table 4. Code mapping method for mobile source by SCC and fuel code

countermeasure	specific countermeasure	code mapping method
Supply of mobile with low emission	electric vehicle (two-wheeled vehicle)	- match up gasoline vehicle - add codes for two-wheeled vehicle by vehicle type
	Hybrid	- suppose to reduce the emission with diesel by supply of mobile with low emission
	Diesel/Gasoline	- allocate fuel code to each vehicle
	Gas/CNG or LPG	
Attach device for low emission	DPF	- classify the countermeasures as diesel vehicle
	pDPF	- add fuel codes by SCC according to existing vehicle type
	DOC	
Remodel to LPG cars		- suppose to change fuel from diesel to LPG
		- map the code by existing vehicle model and adding fuel code
Early scrape car		- mapping the code by existing vehicle type
		- adding the fuel code for each vehicle type
Tighter acceptable standard of emission for manufacturing vehicle		- map the code by existing vehicle and fuel type.
Improvement of fuel quality	change sulfur contents for gasoline, diesel, LPG	- add SCC for each vehicle model by fuel type
	two-wheeled vehicle	- map the code two-wheeled vehicle to gasoline - add SCC by vehicle model
Other measures		- add SCC by vehicle and fuel type
Emission reduction by non-road source	regulation for vessel fuel by sulfur content	- allocate codes to vessel sector

책별 코드 mapping시 중분류 이상의 차종 및 연료별 할당이 어려운 경우에는 하위의 세부 오염원 및 연료 코드를 추가하였다. 이때, 추가된 배출원에 대한 삭감 비율은 2006년 CAPSS 배출비율을 적용하였다. 사업장 부문 삭감 대책의 경우 해당 오염원분류에 따라 코드를 일치시켰으며, 이 중 연소에 관련된 삭감 대책은 제조업 연소 부문의 연료별 코드를 할당하였다(Table

5). 면오염원의 경우 한국환경정책·평가연구원(2004)의 지역총량관리를 위한 대책에 따라 오염원 및 연료 코드를 할당하였다(Table 5). 또한 친환경에너지 및 도시관리 정책 대책에서는 에너지 부문의 경우 주거 및 공공발전으로 할당하였으며, 그 외의 대책은 해당 오염원의 점 및 면오염원 모두에 삭감량을 배분하였다(Table 6).

Table 5. Code mapping method for point and area sources by SCC and fuel code

Counter-measure	Specific countermeasure	Code mapping method
Point source	Expanding use of low-sulfur oil	- add codes in manufacturing combustion/combustion facilities
	Close down small incinerator	- map on waste disposal/waste incineration/industrial waste/small incinerator - allocate emission reduction to mid-sized incinerator instead of small incinerator
	Expansion of low-NOx burner in industries	- add codes in manufacturing combustion/combustion facilities
	relocation plants	- add codes in manufacturing combustion/combustion facilities
Area source	Expanding use of low-sulfur oil	- map on non-manufacturing combustion/commerce and public facilities, residence facilities or agriculture, stockbreeding, fisheries facilities
	Obligation of Stage II	- map on energy transportation and storage/gas supply/gas station
	Tighter acceptable standards of emission(VOCs)	- add code on use organic solvent/painting and cleaning facilities by SCC
	Limit the use of cutback asphalt	- map on use of organic solvent/use of other organic solvent/pave road with asphalt

Table 6. Code mapping method for green energy and urban control by SCC and fuel code

Counter-measure	Specific countermeasure	Code mapping method
Green energy and urban control	Supply of solar energy	- map on non-manufacturing combustion/residence facilities - allocate codes to both of point and area sources
	Construct green building	- map on non-manufacturing combustion/commerce and public facilities, residence facilities - allocate codes to both of point and area sources
	Optimal indoor temperature	- map on non-manufacturing combustion/commerce and public facilities, residence facilities - allocate codes to both of point and area sources
	District heating	- map on energy combustion/district heating facilities and non-manufacturing combustion/residence facilities - add codes on non-manufacturing combustion/residence facilities as small facilities
	Geothermal energy	- map on energy combustion/public power plant facilities and district heating
	Urban control (Green space)	- on-manufacturing combustion/commerce and residence facilities - allocate codes to both of point and area sources
	Incineration heat (waste combustion)	- energy industry combustion/public power plant facilities and district heating

지금까지 할당된 오염원 코드에 따라 삭감량을 할당하여 기본 배출량과의 비를 이용하여 삭감비율을 산정하였으며, 삭감비율에 따라 하위 및 동일한 오염원에 삭감량을 배분하였다. 삭감량 산정의 일련의 과정은 Microsoft office access 2007을 이용하였다. 이러한 일련의 과정을 순서도로 나타낸 것은 Fig. 7과 같다.

이러한 시행계획 적용 실적을 CAPSS 인벤토리 자료에 맞춰 나타낸 배출량의 격자별 자료는 Fig. 8 및 9와 같다. Fig. 8(a)와 8(c)는 NOx 배출량의 저감 실적 적용 전의 면 및 이동오염원의 배출량 분포로 Fig. 8(b)와 8(c)에 비해 전반적으로 높은 분포를 보이며 최고 배출량 역시 약간 높은 것으로 분석되었다. Fig. 9 역시 PM10의 배출량 저감 실적 적용 전·후의 배출

Fig. 8. Flow chart of preparation process of modeling input data using propulsive results.

* (a) before and (b) after NOx reduction from mobile, (c) before and (d) after NOx reduction from area

Fig. 9. Spatial distribution before and after reducing NOx emission from Area and Mobile source.

* (a) before and (b) after PM10 reduction from mobile, (c) before and (d) after PM10 reduction from area

Fig. 10. Spatial distribution before and after reducing PM10 emission from Area and Mobile source.

량 분포를 나타낸 것이다. Fig. 9(a)와 9(b)는 배출량 저감 전의 먼오염원과 이동오염원의 배출량 분포로서 Fig. 9(b)와 9(c)에 비해 고배출 영역이 비교적 많은 것으로 나타났으며, 이동오염원의 경우 최고 배출량의 차이를 확인 할 수 있었다.

3.2. 시행계획 추진에 따른 대기오염도 개선효과 분석

2007년도 지자체별 시행계획 저감 실적을 적용한 대기오염도의 예측 결과는 Table 9 및 10과 같다. 각 시도별 NO₂ 시행계획 실적을 적용한 결과, 서울시의 연평균 예측농도가 19.1 ppb에서 18.0 ppb로 1.1 ppb 정도 저감된 것으로 분석되었다(Table 9). 경기도의 연평균 NO₂ 농도는 저감 대책 적용 전에 14.9ppb에서 적용 후 14.3 ppb로 0.65 ppb 정도 저감된 것으로 예측되었다. 인천시의 경우 연간 평균 NO₂ 농도가 0.68 ppb 저감될 것으로 예측되어 서울시 가장 높은 대기 오염도 저감 효과를 나타내고 있었다.

시도별 및 계절별 저감 농도 분포를 살펴보면, 서울의 최저 저감 농도는 0.60 ppb로 여름철에 나타났으며, 최고 저감 농도는 가을에(0.56 ppb) 나타났다. 경기도와 인천의 경우 최저 농도는 모두 여름철로서 0.1 ppb이하의 농도로 나타났다. 가장 높은 저감 농도를

나타낸 계절은 경기도는 가을철(1.45 ppb), 인천은 겨울철(1.33 ppb)로 분석되었다. 전반적으로 서울의 지역별 편차는 낮은 것으로 분석되었고, 특히, 인천과 경기의 모든 계절에서 최저 농도차가 0.2 ppb 이하로 낮은 값을 나타냈다.

Table 10을 통해 각 시도별 PM10 농도 저감 결과를 살펴보면, 서울시는 18.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 17.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 약 0.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도가 감소된 것으로 분석되었다. 경기도의 저감 대책 적용시 0.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도가 감소될 것으로 예측되었고 인천시는 수도권 지역 중 가장 낮은 0.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 만이 저감되는 것으로 분석되었다.

시도 및 계절별 편차를 살펴보면, 서울시에서 가장 높은 저감효과를 보인 계절은 겨울(1.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이며, 최저 저감 농도는 봄철(0.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 나타났다. 경기도의 경우, 최고 및 최저 저감 농도는 모두 겨울철에 나타났으며, 최고 저감 농도는 1.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최저 저감 농도는 0.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 인천의 경우 최고 저감 농도는 겨울철(1.11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 나타났으며, 최저 저감 농도는 0.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 봄철에 나타났다. PM10의 결과 역시 NO₂와 유사하게 서울의 지역별 편차는 낮은 것으로 분석되었고, 경기도의 경우 지역별 편차가 가장 큰 것으로 분석되었다.

Table 7. NO₂ concentration predicted by local enforcement plan(unit : ppb)

Region	Period	Before application	After application	Difference	Max. difference	Min. difference
Seoul	Annual	18.0	19.1	1.11	1.56	0.60
	spring	15.1	16.2	1.07	1.31	0.69
	summer	13.3	14.2	0.93	1.24	0.60
	fall	22.7	24.0	1.28	1.56	0.97
	winter	20.8	22.0	1.15	1.47	0.68
Gyeong-gi	Annual	14.3	14.9	0.65	1.45	0.09
	spring	10.8	11.4	0.56	1.18	0.10
	summer	10.8	11.3	0.52	1.14	0.09
	fall	17.3	18.0	0.74	1.45	0.15
	winter	18.2	19.0	0.75	1.38	0.11
Incheon	Annual	13.3	14.0	0.68	1.33	0.07
	spring	11.1	11.8	0.67	1.15	0.10
	summer	10.4	11.0	0.60	0.98	0.07
	fall	15.9	16.6	0.75	1.23	0.17
	winter	15.7	16.4	0.69	1.33	0.15

Table 8. PM10 concentration predicted by local enforcement plan(unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Region	Period	Before application	After application	Difference	Max. difference	Min. difference
Seoul	Annual	17.5	18.2	0.71	1.28	0.33
	spring	12.7	13.2	0.54	0.69	0.40
	summer	13.9	14.4	0.49	0.68	0.33
	fall	25.0	25.9	0.90	1.16	0.61
	winter	18.5	19.4	0.90	1.28	0.49
Gyeong-gi	Annual	15.7	16.2	0.51	1.26	0.07
	spring	10.6	11.0	0.36	0.64	0.08
	summer	13.1	13.5	0.38	0.72	0.08
	fall	22.2	22.8	0.62	1.15	0.09
	winter	16.8	17.5	0.67	1.26	0.07
Incheon	Annual	13.9	14.4	0.47	1.11	0.05
	spring	9.6	9.9	0.33	0.59	0.05
	summer	12.1	12.5	0.36	0.62	0.06
	fall	20.2	20.7	0.57	0.88	0.12
	winter	15.0	15.6	0.61	1.11	0.10

지금까지의 시행계획 적용 전·후에 따른 예측 농도의 차이를 살펴본 결과, 지역별로 약간의 차이가 있으나 NO₂와 PM10의 최고 농도차가 각각 2 ppb와 1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 낮은 수준이었다. 따라서, 저감 실적 적용 전·후에 따른 농도차의 유의성을 검증하기 위하여 통계적인 방법을 이용하여 분석을 실시하였다(Table 11). 우선, NO₂의 분석결과, 서울(1.11 ppb), 경기(0.65 ppb), 인천(0.68 ppb) 지역의 농도차는 p-value 0.05이하로 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석됨에 따라 서울의 정책 저감 효과가 가장 높은 것으로 분석 되었다. 계절에 따라서 NO₂의 농도는 여름

철이 0.66 ppb로 가장 낮고 가을철이 0.91 ppb로 가장 높았으며, 이것은 통계적으로 유의한 차이를 나타내는 것으로 분석되었다(p<0.05). PM10의 경우 지역별로 측정된 결과가 역시 통계적으로 유의한 차이를 나타내는 것으로 나타나 역시 서울지역의 정책 반영에 따른 대기오염 저감 효과가 가장 뚜렷한 것으로 나타났다. 계절에 따른 분석결과, 봄과 여름의 저감 농도가 0.41 ppb로 가장 낮았으며, 겨울이 0.73 ppb로 가장 높은 저감 농도를 보였다. 이는 p-value가 0.05이하로 통계적으로 유의한 차를 갖는 것으로 분석되었다.

Table 9. Statistic performances of predicted NO₂ and PM10 concentration using ANOVA test according to application of enforcement plan

	NO ₂			p-value	PM10			p-value
	N	before and after application of enforcement plan			N	before and after application of enforcement plan		
Seoul	108	1.11±0.20		0.000	108	0.71±0.23		0.000
Gyeonggi	208	0.65±0.30			208	0.51±0.27		
Incheon	38	0.68±0.30			38	0.47±0.25		
Total	354	0.79±0.35			354	0.56±0.27		
Spring	90	0.73±0.32		0.000	90	0.41±0.15		0.000
Summer	87	0.66±0.29			87	0.41±0.15		
Fall	87	0.91±0.37			87	0.70±0.27		
Winter	90	0.87±0.35			90	0.73±0.29		
Total	354	0.79±0.35			354	0.56±0.27		

4. 결 론

지금까지 결과를 통해 2007년 한 해 동안의 수도권의 지자체별 대기개선 정책에 따른 대기오염물질 배출량 저감량이 대기오염도에 미치는 영향을 살펴보았다. 본 연구를 통해 한 해 동안의 시행계획 저감실적을 이용한 정책 적용에 따른 대기질을 예측하기 위한 방법론을 고안하고자 하였다. 이러한 방법론은 기본적으로 시행계획 추진 실적에 따른 삭감량을 오염원(SCC) 및 연료코드(Fuel code)별로 할당하여 기존의 배출량과 삭감량과의 삭감비를 산출하였다. 각 대책별 삭감비율을 산정하기 위해서는 지자체별 저감 대책을 CAPSS 인벤토리 자료에 맞추어 코드를 분배해주는 과정이 필요하다. 이러한 할당 방법은 code mapping method로서 각 대책별로 Source classification code와 fuel code를 할당해준 방법이다. 지자체별 대기개선 대책은 『수도권 지역 배출총량관리제 추진방안』(한국환경정책·평가연구원, 2004)의 지역배출총량관리를 위한 각 분야별 대책을 활용하였다. 이러한 방법을 통해 2007년 시행계획 저감 실적을 적용한 결과 NO_2 및 PM_{10} 의 대기오염도 저감효과는 비교적 낮은 수준으로 NO_2 의 경우, 서울시 0.6 ppb~1.56 ppb, 경기도 0.09 ppb~1.45 ppb, 인천시 0.07 ppb ~1.33 ppb 정도 개선된 것으로 예측되었다. 또한 PM_{10} 은 서울시 $0.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ~1.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 경기도 $0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ~1.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 인천시 $0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ~1.11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 개선된 것으로 예측되었다. 또한 이러한 대기오염도 개선 효과는 통계적으로 유의한 차를 갖는 것으로 나타났으며, 특히 이러한 결과는 지역별 및 계절별로 차이를 나타내는 것으로 분석되었다. 그러나 2007년 한 해 동안의 배출량 저감 결과를 통해 대기오염도 개선 효과를 평가하기에는 어려운 점이 있었으나 다년간의 대기오염물질 배출량 삭감에 따른 개선효과를 분석시 유용하게 활용 될 것으로 기대된다. 또한 지자체 시행계획 이행실적 평가 보고서의 삭감실적은 수도권 시·도 단위의 공간구분 자료만 존재하여 삭감비율에 대한 공간분포는 2006년 CAPSS의 배출량 공간분포를 적용하여 연구를 수행함에 따라 신뢰성 높은 개선효과 분석을 위해서는 공간적 분포 고려 및 세부분야별 배출량 삭감량을 산출하는 것이 필요할 것이다. 아울러, 미

세면지의 예측성능을 높이기 위해서는 미반영된 배출원에 대한 배출량 산정이 시급하며, 오존 예측을 위해서는 미국 VOCs speciation 자료를 대체할 수 있는 국내 실정을 반영한 speciation 연구가 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- 김정수, 정동일, 홍지형, 김대곤, 김지영, 반수진, 박상남, 이용미, 최은경, 2006, 수도권 대기질 예측평가에 필요한 모델 입력시스템 개발, 국립환경과학원.
- 김지영, 김정수, 홍지형, 정동일, 반수진, 이용미, 2008, SMOKE 모델의 입력 모듈 변경에 따른 영향 분석, 한국대기환경학회지, 24(3), 284-299.
- 김철희, 나진균, 박철진, 박진호, 임차순, 윤이, 김민섭, 박춘화, 김용준, 2003, 유해화학물질 대기확산 예측을 위한 RAMS 기상모델의 적용 및 평가 - CARIS의 바람장 모델 검증, 한국대기환경학회지, 19(5), 595-610.
- 이학성, 강충민, 강병욱, 이상권, 2005, 수용모델을 이용한 서울지역 미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)에 영향을 미치는 배출원 특성에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 21(3), 329-341.
- 장영기, 김 정, 김필수, 신용일, 이호진, 최민애, 2009, 비산면지와 생물성 연고사 보완된 PM_{10} 의 지역별 배출량 비교, 춘계학술대회 논문집, 한국대기환경학회, 169-170.
- 수도권대기환경청, 2008, 2007년도 수도권 대기환경개선 시행계획 추진실적 평가보고서.
- 한국환경정책·평가연구원, 2004, 수도권 지역 배출총량관리제 추진방안.
- 환경부, 2010, 수도권 대기환경개선에 관한 특별법.
- Byun, D. W., Ching, J. K. S., 1999, Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality(CMAQ) Modeling System, EPA-600/R-99/030, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Dudhia, J., 1996, A multi-layer soil temperature model for MM5, The Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop, Boulder, Colorado, 49-50.
- Grell, G. A., Dudhia, J., Stauffer, D. R., 1995, A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR/TN-398+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 107.

- Hurley, P. J., Blockley, A., Rayner, K., 2001, Verification of a prognostic meteorological and air pollution model for year-long predictions in the Kwinana industrial region of Western Australia, *Atmospheric Environment*, 35, 1871-1880.
- James, W., B., Armistead, G. R., 2006, PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models, *Atmospheric Environment*, 40, 4946-4959.
- Liang, J., Martien, P. T. S., Soong, -T., Tanrikulu, S., 2004, A photochemical model comparison study: CAMx and CMAQ performance in central California, 13th Conference on the Applications of Air Pollution Meteorolgy with the Air and Waste Management Assoc.
- Odman, M. T., 1998, Research on Numerical Transport Algorithms for Air Quality Simulation Models, Environmental Protection Agency.
- Pielke, R. A., 1998, Mesoscale Meteorological modeling, Academic Press Inc., 612.