

연구논문

수도권 지역별 목표대기질 달성을 위한 오염배출 삭감율 산정 연구

김정수 · 김지영 · 홍지형 · 정동일 · 반수진 · 박상남

국립환경과학원 환경총량관리연구부 대기총량과
(2006년 7월 21일 접수, 2006년 12월 18일 승인)

An Estimation of Emission Reduction Rates to Achieve the Target Air Quality in Seoul Metropolitan Area

Jeongsoo Kim · Jiyoung Kim · Jihyung Hong · Dongil Jung · Soojin Ban · Sangnam Park

Air Pollution Cap System Division, National Institute of Environmental Research

(Manuscript received 21 July 2006; accepted 18 December 2006)

Abstract

This study was carried out to estimate the emission reduction rates for the regional allowable emissions by special measures to achieve the target air quality in Seoul Metropolitan Area (SMA).

A modeling system was designed to validate the details in enforcement regulations set up by local governments based on the current status and plans for air quality improvement.

Modeling system was composed of meteorological model (MM5), emission model (SMOKE), and air quality model (CMAQ). Predicted results by this system show quiet well not only daily air pollutants concentration but also the tendencies of wind direction, wind speed and temperature.

To achieve the target air quality in Seoul Metropolitan Area (SMA), emission allowances are estimated by seasons and regions. Referring to the base year 2002, it was estimated that emission reduction rates to achieve the intermediate goal in 2007 were 14.2% and 16.6% for NO_x and PM₁₀, respectively. It was also estimated that 52% of NO_x and 48% of PM₁₀ reductions from the base year 2002 would be required to accomplish the air quality improvement goal of 22 ppb for NO₂, and 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM₁₀ in year 2014.

To improve NO₂ and PM₁₀ concentration through emissions reduction policies, it was found that emissions reduction for the on-road mobile sources would be the most effective in SMA.

Key words : Seoul Metropolitan Area(SMA), modeling system, emission allowances, NO_x, PM₁₀

I. 서론

한반도의 중부권에 위치하고 있는 서울시, 인천시, 경기도의 수도권 지역은 전 국토 면적의 12%에 해당하는 좁은 면적에 우리나라 총 인구의 48%가 집중되어 있으며 전국 사업장의 46%, 전체 자동차 등록대수의 47%(2003년, 통계청 자료 참고) 등 오염원이 집중되어 있어 이 지역의 대기오염물질 배출량은 자연적으로 정화가 가능한 수준인 환경용량을 이미 넘어서고 있는 실정이다. 이에 환경부와 서울시 등 수도권 3개 시도에서는 수도권 지역의 대기환경개선을 위한 대책들을 추진하고 있다.

이러한 대기환경개선 대책의 일환으로 2003년 12월 대기오염이 심각한 수도권 지역의 대기환경을 개선하기 위하여 종합적인 시책을 추진하고 대기오염원을 체계적으로 관리하여 지역주민의 건강을 보호하고 쾌적한 생활환경을 조성함을 목적으로 한 「수도권 대기환경개선에 관한 특별법」을 제정하고 2004년 12월 하위법령을 제정하여 2005년 11월에 수도권대기환경관리에 대한 기본계획을 고시하였다.

이에 따라 각 지자체는 특별대책 추진에 필요한 시행계획서를 2006년 11월까지 작성하여 환경부에 제출하여야 하며 국립환경과학원의 수도권 대기환경연구지원단에서는 지자체별 대기환경개선에 대한 세부시행계획의 적정성 여부를 정밀 검토하여야 하므로 시행계획의 검토를 위한 평가시스템 구축이 요구된다.

본 연구에서는 우선 정밀하고 체계적인 대기질 평가가 가능할 수 있도록 미국에서 개발한 CMAQ 대기질 모델을 기반으로 한 대기오염 예측·평가시스템을 구축하였으며, 이를 활용하여 수도권대기환경관리 기본계획의 목표대기질 달성을 위한 미래연도에 대한 오염물질 배출감축을 새로이 산정해 보고, 오염물질 저감정책에 대한 유연성을 판단해 보고자 하였다. 본 연구를 통하여 구축된 대기질 예측·평가시스템은 향후 지자체에서 마련될 시행계획을 보다 세밀하고 정교하게 평가할 수 있는 수단으로 활용가능 할 것으로 여겨지며, 지자체의 대기저감정책이 과학적이고 합리적으로 수립될 수 있도록 지원할 것으로 여겨진다.

II. 연구내용 및 방법

1. 대기오염 예측·평가시스템의 구축

일정지역에서의 대기질 관리를 위한 정책개발과 평가를 위해서는 대기질 모형이 필수적이다. 대기질 모형은 오염물질의 배출, 이류 및 확산, 반응, 침적 등 일련의 과정들을 수식으로 표현하여 프로그램화한 것으로 대기오염의 배출원과 수용체 사이의 인과관계를 이해하기 위한 핵심적인 도구이다. 따라서 수도권 지역에서의 대기질을 평가할 수 있는 시스템을 그림 1과 같이 구축하였다.

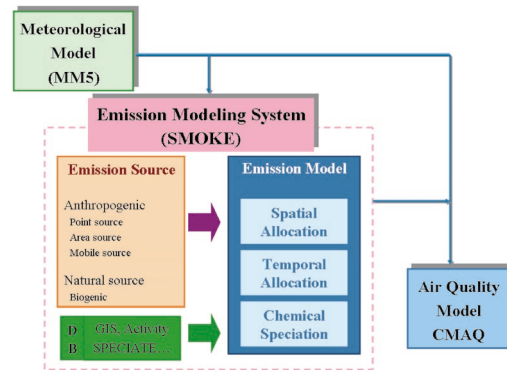


Figure 1. Air quality modeling system.

1) 기상모델

본 연구에서는 미국을 포함한 세계 각국에서 기상예보를 위해 사용하고 있는 MM5 모델을 사용하였다. MM5는 지금까지 사용되고 있는 기상모델 가운데 가장 발달된 것 중의 하나로 1970년 초에 펜실베니아 주립대학의 Anthes에 의해 개발된 중규모 모델로서 이후 지속적인 개선을 통해 연구 목적으로서 뿐만 아니라 기상 예보를 위한 현업에서도 광범위하게 사용되고 있다.

2) 배출모델

배출모델은 배출목록을 기본으로 대기질 모델에 알맞은 배출량 입력 자료를 생성하기 위한 도구로서 대기질 모델을 운영하기 위해서 반드시 필요하다. 대표적인 배출모델에는 미국 EPA의 EPS (Emissions Preprocessor System)와 SMOKE (Sparse

Matrix Operator Kernel Emissions)가 있으며, 이중 SMOKE는 대기 화학 모델에서 중요한 입력 변수인 배출량 자료를 처리하는 모델로써 토지 피복 자료, 기상자료, 배출목록 자료를 입력 자료로 사용하여 점, 면, 이동, 자연 배출원 등 각 배출원별로 배출량을 산출할 수 있도록 구성되어 있다.

3) 대기질 모델

EPA에서는 기존의 대기오염 모델의 단점을 보완하여 3세대 모델이라고 할 수 있는 Model-3/CMAQ을 1998년 6월에 1차 공식 버전으로 발표하였으며 현재도 활발하게 개선하고 있다. 이 모델은 주모델을 실행하기 위한 전처리 모델과 주모델인 화학수송모델(CCTM, CMAQ Chemical Transport Model)로 구성되어 있다.

가스상 물질의 상호반응은 화학 메커니즘을 통해 표현되는데 CMAQ에서는 이를 위해 CB-IV(Gery *et al.* 1989), RADM(Stockwell *et al.*, 199), SAPRC-97(Carter, 1997)을 제공하고 있다.

화학반응을 나타내는 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dC_i}{dt} = P_i - L_i C_i$$

$$P_i = \sum_{l=1}^{m_i} v_{il} r_l, L_i C_i = \sum_{l=1}^{n_i} r_l$$

여기서, C_i 는 화학종 i 의 농도, v_{il} 은 반응 l 에서 화학종 i 의 화학양론계수, 그리고 r_l 은 반응 l 의 반응률을 나타낸다.

가스상 물질과는 달리 에어로졸 처리에 있어서는 입자 크기가 중요한 요소이기 때문에 대기질 모델에 에어로졸 입자를 포함시키는 것은 입자의 총 수, 총 질량 및 입자크기 분포를 어떻게 결정할지를 선택하는 것을 의미한다. 일단 이것이 결정되고 나면, 입자를 포함하는 중요 물리·화학적 과정들이 표현된다. CMAQ에서 에어로졸 처리를 위해서 다음과 같은 가정들이 적용된다. 입자를 표현하는 식들은 관측된 입자들과 일치해야 하며 표현식들은 컴퓨터 계산시간을 최소화하기 위해 수학적으로, 수치적으로 효율적이어야 한다. 그리고 표현식들은 지역규모에서 도시규모 모의에 다 사용할 수 있어야 한다. CMAQ에

서는 이러한 가정들을 만족하는 Whitby(1978)가 제안한 모드(mode)라 불리는 로그노말 분포의 중첩으로 입자를 수치모의한다.

입자의 로그노말 분포는 다음과 같이 정의된다.

$$n(\ln D) = \frac{N}{2\pi \ln \sigma_g} \exp \left[-0.5 \left(\frac{\ln \frac{D}{D_g}}{\ln \sigma_g} \right)^2 \right]$$

여기서 N 은 입자 수농도, D 는 입자직경, D_g 와 σ_g 는 각각 분포상의 기하평균직경과 표준편차를 나타낸다.

2. 목표대기질 달성을 위한 배출삭감량 산정

수도권지역의 목표대기질 달성에 필요한 배출삭감량을 산정하기 위하여 국립환경연구원(2001)에서 사용했던 접근방법을 이용하였다. 다만 보다 구체적인 배출원 부문별 삭감율을 고려하는 것은 서울시 등 지자체의 특성을 반영해야 하므로 본 연구에서는 수도권특별법 기본계획과 동일한 방법으로 구하였다.

1) 배출허용총량 산정방법

대기환경용량(atmospheric environmental critical loads, 이하 CL)이란 어떤 지역의 대기환경 상태에 일정 수준 이상의 피해를 주지 않고 수용할 수 있는 정도의 배출량을 뜻하며, 기상요인을 고려하지 않더라도 대기오염물질의 독성, 지점별 완충능력, 배출원의 밀집도 등 다양한 요인에 의해 달라질 수 있다.

이와 같은 환경용량을 파악하는 것은 현재의 환경질의 수준을 가늠하고 개선해야 할 양 및 위치 등에 대한 구체적인 정보를 제공하게 되는 체계적인 방법이라 할 수 있다.

대기환경용량을 산정하기 위해서는 오염물질마다 기여율이 다르므로 우선 조사하고자 하는 대상물질을 선정하여야 한다. 다음은 CL의 정의에서 언급하였듯이 "... 일정 수준이상의 피해를 주지 않고..."에 해당하는 기준을 선정하여야 한다. 그 기준은 대상지역의 용도, 보존가치 등에 따라 크게 달라질 수 있으나 일반적으로는 도시지역을 대상으로 적용할

경우 대기환경기준 등을 판단기준으로 삼을 수 있다. 대기환경기준은 정부 등 행정기관이 달성하고자 하는 정책목표의 개념이 강한 경우에 적절하고 보다 개선할 필요가 있는 경우에는 대기환경기준의 80%, 또는 1/2, 1/3 수준 따위의 그 지역에 적합한 새로운 기준을 정할 수 있다. 이를 정리하면, 전체 대기환경에서의 총 대기환경용량(CLtotal)은 각 오염물질의 환경용량(CLp)의 합으로 나타낼 수 있을 것이다.

$$CL_{total} = \sum(CL_p)$$

이를 보다 구체적으로 표현하면, 대상지역과 오염물질간의 관계에 따라 미치는 영향 정도가 다를 수 있다. 예컨대 황사와 같은 알칼리계 토양의 먼지는 우수나 생태계의 산성화를 악화시키는 역할을 하는 것을 들 수 있다. 그러나 위 식의 표현대로 모든 오염물질의 CL을 구할 필요는 없다. 왜냐하면 현재 시행중인 대기환경기준은 오염물질별로 그 기준치가 정해져 있지만 다른 오염물질이 공존하는 상태도 감안한 것이기 때문이다.

여기서 중요한 사실은 대기중 농도만으로는 환경기준 초과여부만을 알 수 있을 뿐 CL을 알 수 없다는 점이다. 즉, 그 지역의 CL 기준치를 만족할 수 있는 배출량을 구하여야 한다. 이는 대기질 개선을 위한 관리대상은 농도가 아닌 배출량이어야 하기 때문이다.

어떤 물질의 CL의 초과분은 감축해야할 부분이 된다. 즉, 어떤 물질의 농도가 기준치를 초과하고 있다면,

$$\text{Exceedance}(C) = \text{Situation}(C) - \text{CL}(C)$$

이며, 이를 배출량의 형태로 변형하면 다음 식과 같다.

$$\text{Exceedance}(E) = \text{Situation}(E) - \text{CL}(E)$$

여기에서 CL(E)는 배출후 CL(C)가 되는 최대 배출량을 의미하며 배출후 확산·이동 및 화학과정을 거치기 때문에 서로 비선형 관계이므로 수치 모델 등을 이용한 접근이 필요하다.

또한 대기오염물질은 다양한 배출원에서 방출되므로 각각의 배출원 파악이 필요하다. 총배출량

(E(total))은 자체 배출량과 외부 배출량의 합과 같으며, 또한 이는 인위적 배출량과 자연배출량의 합으로 표현할 수 있다. 이는 다시 구체적으로 연료연소, 산업공정, 자연배출, 2차반응에 의한 자체 배출량과 인위적 배출과 자연 배출에 의한 외부유입량과 2차 반응등을 포함한 unknown 배출량으로 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} E(\text{total}) &= E(\text{local}) + E(\text{transp.}) = E(\text{anthr.}) + E(\text{natural}) \\ &= E[\text{fuel comb.} + \text{Indust. process} + \text{natural} + \\ &\quad \text{second. reaction}]_{\text{local}} + E(\text{anthropogenic} + \\ &\quad \text{natural})_{\text{transport}} + \text{Unknown} \end{aligned}$$

위 식의 각 항에 대한 기여율을 파악함으로써 개선대상과 방법이 결정되게 된다. 외부 유입분 보다는 자체배출원의 관리가 우선 이루어져야하고, 자연배출원보다 인위적인 활동에 의한 배출량을 감축하는 것이 효과적이다. 인위적인 배출원 중에서는 가정난방과 같이 불특정 다수인 소형 배출원 보다는 배출특성이 명확하고 개선대책의 적용이 용이한 대형 배출시설을 주요대상으로 하고, 대형시설 중에서도 업종별로 배출 저감시 충격도 및 경제성, 기술적 난이도 등을 검토하여 유리한 분야부터 검토하는 것이 바람직하다. 이와 같이 대기환경용량을 산정하기 위해서는 여러 가지 요인들을 고려한 시나리오 적용이 필요하나, 본 연구에서는 배출허용총량을 산정하기 위해 평균적인 삭감량을 검토하기 위하여 배출원 특성은 고려하지 않고 모든 물질 및 모든부분에 대해서 50%를 저감하는 동일한 저감 시나리오를 적용하였다. 향후 지자체 시행계획 수립이 완료되면 앞서 언급한 요인들을 고려한 배출허용총량 산정에 관한 구체적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

2) 목표대기질 설정

표 1은 2003년의 지역별·계절별 NO₂ 농도를 나타낸 것으로 지역별 농도는 서울시 38 ppb, 인천시 30 ppb, 경기도 32 ppb로 서울시가 가장 높은 농도를 보였으며 계절별 농도는 봄 37 ppb, 여름 27 ppb, 가을 32 ppb, 겨울 37 ppb로 봄에 가장 농도가 높았고, 여름에 가장 낮은 농도를 보였다. 수도권 전체 지역의 NO₂의 연평균 농도는 34 ppb로 나타났다.

Table 1. NO₂ concentration for seasons and regions(2003)
(unit : ppb)

Region \ Season	Spring	Summer	Fall	Winter	Annual
Seoul	43	32	36	42	38
Incheon	34	25	29	31	30
Gyeonggi	35	25	32	38	32
Average	37	27	32	37	34

Table 2. PM₁₀ concentration for seasons and regions(2003)
(unit : μg/m³)

Region \ Season	Spring	Summer	Fall	Winter	Annual
Seoul	82.0	60.7	55.7	80.7	69.8
Incheon	72.7	58.7	50.0	62.3	60.9
Gyeonggi	78.4	59.7	56.5	76.3	67.7
Average	77.7	59.7	54.1	73.1	66.1

표 2는 2003년의 지역별 · 계절별 PM₁₀ 농도를 나타낸 것이다. 지역별 농도는 서울시 69.8 μg/m³, 인천시 60.9 μg/m³, 경기도 67.7 μg/m³로 서울시가 가장 높은 농도를 보였다. 계절별 농도는 봄 77.7 μg/m³, 여름 59.7 μg/m³, 가을 54.1 μg/m³, 겨울 73.1 μg/m³로 봄에 가장 농도가 높았고, 여름에 가장 낮은 농도를 보였다. 수도권 전체의 PM₁₀의 연평균 농도는 66.1 μg/m³로 나타났다.

수도권 대기환경관리 기본계획에 따른 목표 대기질 달성을 위한 지역별 · 계절별 오염물질 배출허용총량 및 배출삭감율을 산정에 있어 각 지자체별 목표 대기질 농도는 수도권 대기환경 특별법에 따른 목표 대기질 농도로 하였으며 목표는 서울, 인천, 경기도의 관리권역 중 가장 높은 오염도를 개선하는 것으로 수립되었으므로 3개 시도중 서울의 오염도를 단계별로 개선하는 내용으로 추진하게 되어있다. 아울러 서울의 대기질에 많은 영향을 주는 인천과 경기도의 대기질도 현수준보다 개선해 나아가야 목표달성이 가능할 것으로, 이 지역에 대해서도 단계적인 개선목표를 설정하였다. 이렇게 산정한 시도별 NO₂의 2007년 중간목표농도는 서울시 35 ppb, 인천시 27 ppb, 경기도 29 ppb이며, PM₁₀의 중간목표농도는 서울시 60 μg/m³, 인천시 53 μg/m³, 경

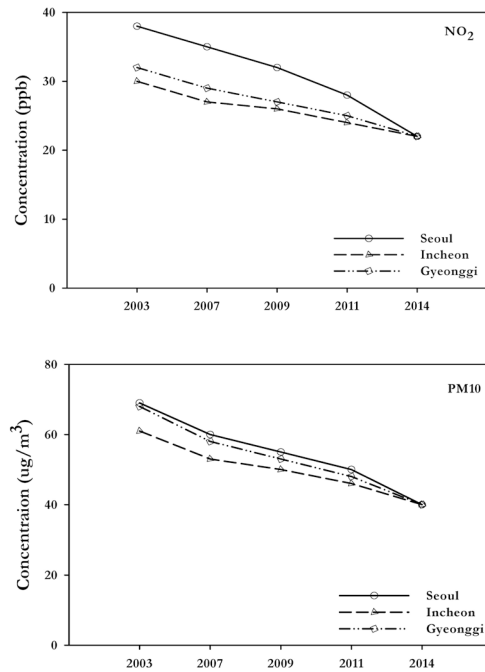


Figure 2. Goal of stages for air quality improvement (NO₂, PM₁₀)

기도 58 μg/m³로 나타났다.

3. 배출원별 삭감유연성 평가

그동안의 수도권지역 대기환경개선 정책에서 NO_x 저감대책의 대부분은 이동 오염원에 관한 것이었으며, 수도권대기환경특별법의 대기환경개선목표 농도 또한 NO₂와 PM₁₀에 대한 것으로 이 두 물질에 대한 주 배출원을 조사하여 삭감 유연성을 평가해보았다.

그림 3은 국립환경과학원에서 운영중인 대기정책지원시스템(CAPSS)의 NO_x와 PM₁₀ 배출량에 대한 2001년과 2003년의 부문별 기여율을 나타낸 것이다(국립환경연구원, 2004a). 두 물질의 최근 3년간 배출량 부문별 추이를 살펴보면 부문별 기여율에 뚜렷한 변화는 없었으며 두 물질 모두 이동 오염원, 특히 도로이동 오염원에 의한 기여율이 가장 큰 것을 알 수 있었다. 따라서 이러한 기여율을 참고하여 본 연구에서는 주요오염원에 의한 삭감유연성 평가를 위해 수도권지역 대기질에 대한 기여율이 가장

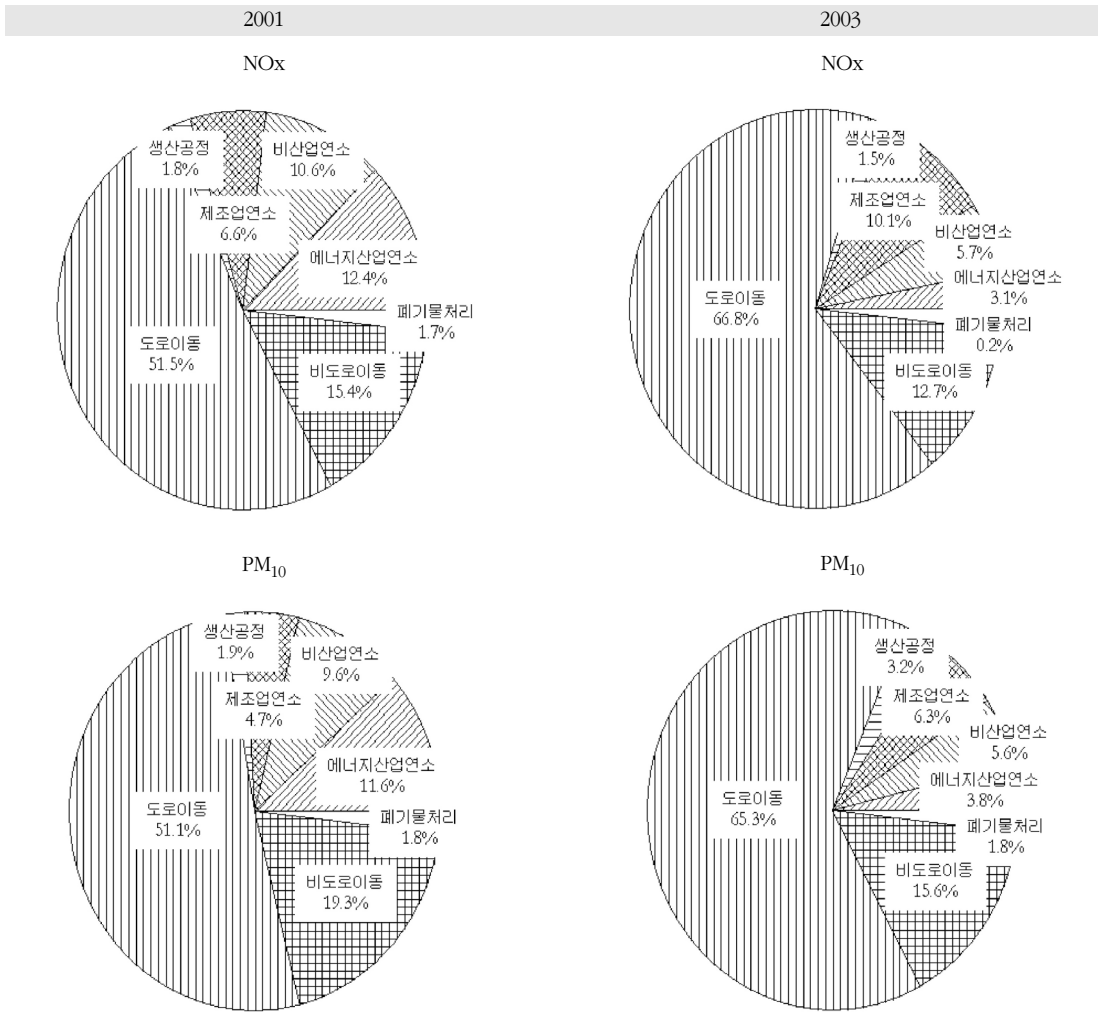


Figure 3. Emission contribution by sources for year 2001 and 2003 in SMA

큰 이동오염원의 배출량을 변화시키는 것을 중심으로 NO₂와 PM₁₀ 오염기여도 변화를 평가하였다. 다만 PM₁₀의 경우는 도로재비산, 사업장 비산먼지, 농어촌 폐기물 및 불법소각 등에 의한 배출량도 많은 것으로 알려져 있으나 아직은 정확한 실태파악이 안되어 배출량 추정이 곤란한 실정이다. 따라서 이들에 의한 배출량을 제외하면 모델링 결과가 매우 왜곡되기 때문에 그림 3에는 제시하지 않았으나 도로재비산먼지 배출량은 현재 CAPSS에서 시범적으로 산정한 격자별 자료를 모델링에 적용하였다.

시나리오의 사례는 무한히 많을 수 있으나 본 연

구에서는 현재 배출량에 의한 모델링으로 배출량과 기상조건에 의한 예측치와 실측치의 관계를 파악하였으며 사례 분석을 위해 다음의 세가지 시나리오에 대해서만 모델링을 실시하여 분석하였다. 여기서 도로재비산먼지에 대해서도 삭감시나리오가 적용되는 것으로 간주하여 그림 3의 업종별 배출기여도를 감안하여 삭감되는 것으로 하였다.

- EXP 1: 도로 이동 오염원 50% 저감
- EXP 2: 도로 이동 및 비도로 이동 오염원 50% 저감
- EXP 3: 전체 오염원 50%를 저감

4. 모델링을 위한 정합도 분석

CMAQ을 기반으로 구축한 모델링시스템의 정합도 분석을 위하여 배출량변화에 따른 대기질을 예측해보았다. 모델링은 연간계절별 특성을 대표할 수 있는 사례일을 선정하여 수행하였으며, 각 계절별 사례일은 기상청의 서울 기상대 관측자료와 환경부의 대기오염도 측정망 자료를 이용하여 각 계절별로 강수가 없는 날과 NO₂와 PM₁₀의 농도가 평균농도를 나타내고 있는 날을 선정하였다(표 3). 선정된 각 계절별 사례일에 대해 기상청에서 제공하는 RDAPS (Regional Data Assimilation Prediction System) 자료를 초기 및 경계 기상자료로 사용하여 MM5 모델로 상세 기상자료를 생산하였다.

본 연구에서는 Lambert-conformal 격자 투영법을 사용하여 그림 4와 같이 모델의 수평격자를 구성하였으며, 연직격자는 지형을 따르는 33개의 σ층으로 구성하였다. 모델링의 해상도는 동북아시아 지

역 27km로부터 한반도 지역 9km, 수도권 지역 3km의 3단계 등격자형으로 설정하였으며, 모델영역의 중심지점(Map center)은 동경 126도 북위 38도로 설정하였다.

배출량 입력자료는 동아시아와 북태평양 지역을 대상으로 수행된 ACE-Asia Project에서 얻어진 자료와 CAPSS에서 전국을 1km×1km 격자별로 산출한 2002년의 CO, SO_x, NO_x, TSP, PM₁₀, VOC, NH₃의 배출량 자료를 이용하였다. 현재 CAPSS에서는 비산먼지 배출량을 산정하고 있으나 국내에서 입수 가능한 기초자료가 미흡하여 공식 자료로 활용하고 있지는 않고 있다. 다만 본 연구에서는 그림 3과 같이 총계에서는 제시하지 않았으나 인위적인 먼지 배출량만으로는 예측에 한계가 있으므로 도로재비산먼지 등 CAPSS 비산먼지도 포함하여 모델링을 수행하였다. CMAQ에 입력되는 배출량 형태로 변환하기 위해 SMOKE 모델을 통해 모델링 영역에 맞는 격자별/시간별/종별로 가공하여 9km 해상도와 3km 해상도 영역의 입력자료로 사용하였다. 이 때 자연배출량은 NCAR (National Center of Atmospheric Research)에서 자연배출량 산정을 위해 개발된 GloBEIS (Global Biosphere Emission and Interaction System)라는 window 기반 Access 프로그램을 사용하였다. 국내의 배출량 자료를 SMOKE에서 사용하기 위해 CAPSS의 SCC 코드와 미국 EPA SCC 코드를 일치시키는 작업을 선행하였으며 입력된 배출량 자료는 SMOKE 내에서 중분류 factor와 시간분류 factor를 사용하여 중분류, 시간분배가 이루어지게 된다. 시간분배 방법을 간략히 소개하면 다음과 같다

$$E = E_{annual} * WF_{month} * WF_{week} * WF_{hour}$$

여기서, E_{annual} 은 업종별 연간배출량(ton/yr)이며, WF_{month} , WF_{week} , WF_{hour} 는 각각 월별, 주간별, 일별 배출비율을 나타낸다.

본 연구에서는 CMAQ version 4.4를 사용하였으며 화학중분류를 위해서 CB-IV 메카니즘을 사용하였다(표 4).

2003년 기상사례일과 배출량 기간의 불일치는 배

Table 3. Modeling period for each season

	Period
Winter	2003. 02. 01. 12UTC ~ 2003. 02. 06. 12UTC
Spring	2003. 04. 01. 12UTC ~ 2003. 04. 06. 12UTC
Summer	2003. 06. 01. 12UTC ~ 2003. 06. 06. 12UTC
Fall	2003. 10. 05. 12UTC ~ 2003. 10. 10. 12UTC

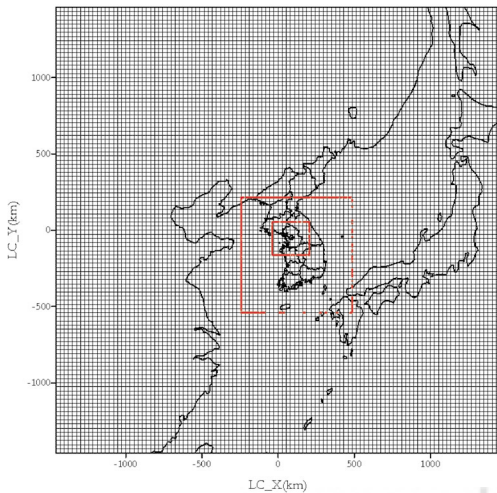


Figure 4. Map of modeling domain by Lambert-Conformal Projection

Table 4. VOC and PM2.5 species using CB-IV-aero mechanism

Pollutant	Species	Description
VOC	ALD2	Acetaldehyde and higher aldehydes
	ETH	Ethene(CH ₂ =CH ₂)
	FORM	Formaldehyde(CH ₂ =O)
	ISOP	Isoprene(C ₅ H ₈)
	OLE	Olefinic carbon bond(C=C)
	PAR	Paraffin carbon bond(C-C)
	TOL	Toluene(C ₆ H ₄ -CH ₃)
	XYL	Xylene(C ₆ H ₅ -(CH ₃) ₂)
NR	Non reaction	
PM2.5	PMFINE	PM 2.5
	PEC	Elemental Carbon
	POA	Organic Carbon
	PNO ₃	Nitrate
	PSO ₄	Sulfate

출량 자료의 입수가 가능한 시점에서의 최근자료가 2002년 자료였으며 배출량의 양적인 차이가 있을 수 있으나 업종별 배출기여도와 시·공간 패턴은 크게 변하지 않을 것으로 판단(오염물질 별로 0~5% 범위)되어 2002년 배출량 자료를 사용하였다.

1) 기상모델의 평가

가을 사례일에 대한 MM5 모델링 결과와 관측값을 비교 검증한 결과(그림 5), 기온의 경우 주간에는 높게 야간에는 낮게 나타나는 기온의 일변화 경향과

기온을 아주 잘 모사하고 있는 것을 볼 수 있으며 풍향은 전반적으로 북풍과 북동 계열의 바람을 잘 모사하였으며, 풍속의 경우는 모델링 결과가 다소 강하게 나타났으나 풍속의 강약 경향은 측정결과와 비교적 잘 일치 하였다.

2) 대기질모델의 평가

그림 6은 가을 사례일에 대한 수도권 주요지점에서 NO₂의 관측값(점)과 모델값(실선)의 시계열을 나타낸 것이다. 절대농도에서는 약간의 차이가 나지만 일변화 경향은 유사하게 모델값이 예측하고 있음을 볼 수 있다. 권역별로 살펴보았을 때 모델값이 서울 지역 0.03 ppb, 인천지역 0.61 ppb, 경기지역 5.22 ppb 낮게 예측하였으며, 대기오염측정망이 있는 위치의 수도권 전체 지역의 값을 살펴보았을 때에는 모델은 44.93 ppb, 관측은 46.89 ppb로 관측값이 모델값보다 1.96 ppb 높게 나타났다. 절대값에서는 약간의 차이를 보이지만 오전과 오후의 peak 경향을 대체로 잘 모사하는 것을 알 수 있었다.

그림 7은 수도권 주요 지점에서의 PM₁₀의 관측값과 모델값을 시계열로 나타낸 것이다. PM₁₀의 경우 앞의 NO₂보다 다소 많은 차이가 나는 것을 알 수

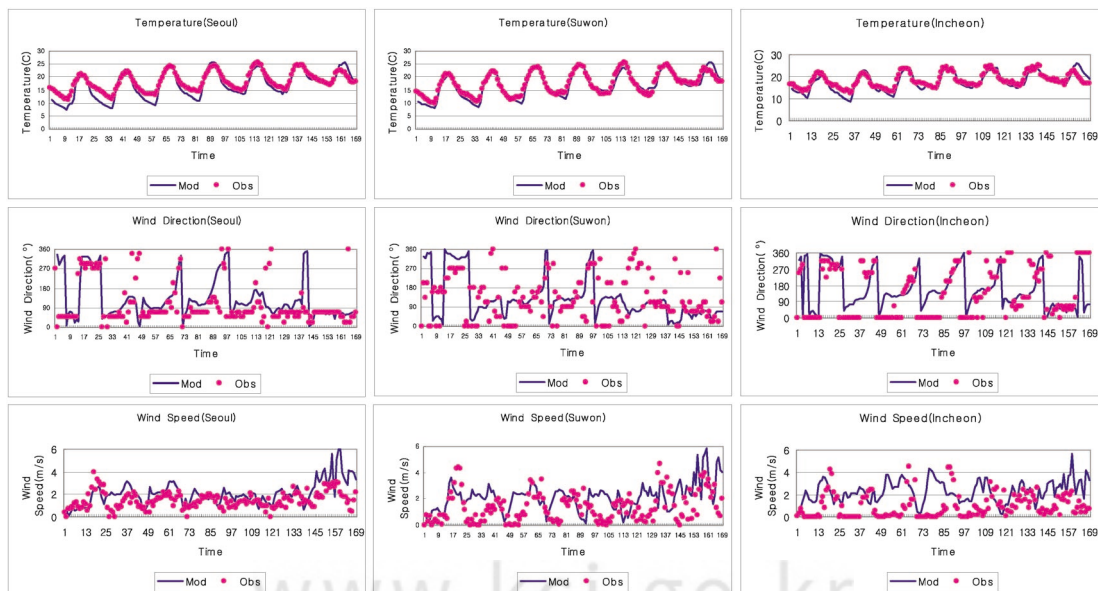


Figure 5. Comparison with simulated data and observation for fall case

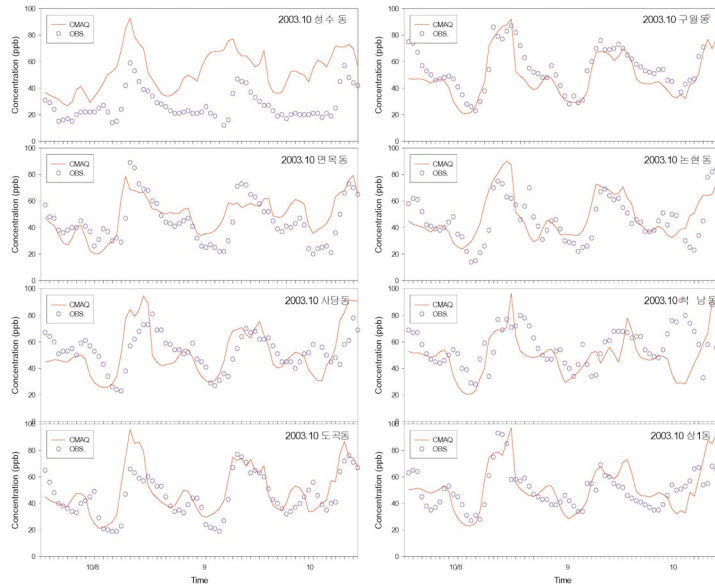


Figure 6. Time variation of observed and calculated NO₂ concentrations at monitoring sites in SMA

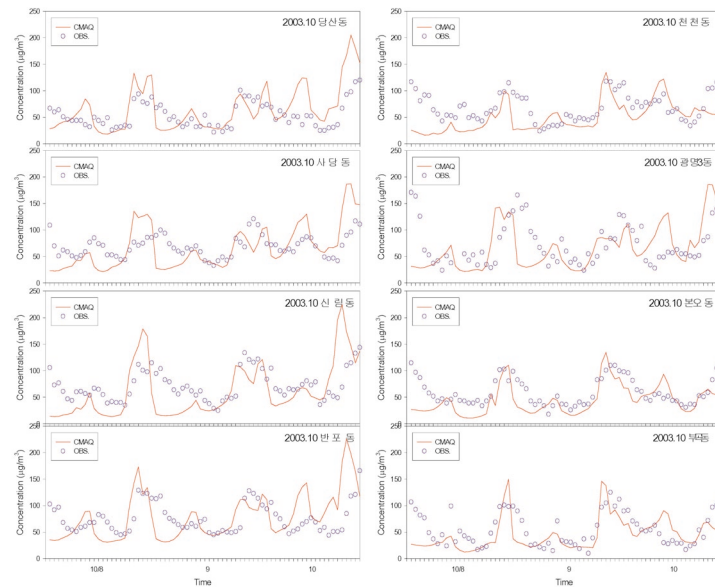


Figure 7. Time variation of observed and calculated PM₁₀ concentrations at monitoring sites in SMA

있다. 수도권 내의 오염물질 측정소가 있는 지점에서의 모델에 의한 값은 서울의 경우 실측이 17.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인천은 모델이 14.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 경기는 실측이 25.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높게 나타났다. 수도권 전체 평균농도

는 모델이 73.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 실측이 65.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 모델이 8.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높은 값을 나타내었다. 그러나 전반적인 일변화 경향은 모델값이 실측값과 유사하게 예측하고 있음을 볼 수 있었다.

III. 연구결과

1. 목표대기질 달성을 위한 배출허용총량 산정 결과

기본 배출량의 50%를 줄였을 때 NO₂의 연평균 농도감소율은 지역별로 연평균 서울시 33%, 인천시 30%, 경기도 32%로 나타났으며 수도권 평균은 31%의 농도 감소가 나타나 같은 양만큼의 배출량을 감소시켰을 때 서울시에서 가장 큰 농도감소가 있는 것으로 나타났다. 또한 계절별 농도감소율은 봄 31%, 여름 32%, 가을 31%, 겨울 25%로 겨울철이 가장 낮게 나타났다.

PM₁₀의 기본 배출량의 50%를 줄였을 때 서울시 40%, 인천시 52%, 경기도 46%로 농도 감소가 나타났으며 수도권 평균은 46%의 농도감소가 나타나 같은 양만큼의 배출량을 감소시켰을 때 인천시에서 가장 큰 감소가 있는 것으로 나타났다. 또한 계절별 농도감소율은 봄 50%, 여름 38%, 가을 41%, 겨울 33%로 봄철이 가장 높게 나타났다.

2. 목표대기질 달성을 위한 배출삭감량 산정결과

저감 시나리오의 모델 결과를 바탕으로 선형롤백 방법을 통해 산정한 각 지자체별 2014년 목표대기질 달성을 위한 NO₂, PM₁₀(비산먼지 제외)의 지역별 계절별 배출삭감율과 배출삭감량을 산정하였다. 최선의 배출량 삭감방법은 고농도 지역을 중심으로 삭감유연성이 높은 배출원을 우선 관리하는 것이겠

으나 본 연구에서 이러한 조건을 모델링을 통해 평가하기에는 너무 시간적 제약이 크다. 따라서 현재의 배출량 분포에서 일률적으로 삭감하는 것을 가정하여 선형롤백 방법에 의한 삭감량을 도출하였으며 그 결과, NO₂의 지역별 개선목표농도를 달성하기 위한 배출삭감율은 NO₂의 경우 서울시 65.2%, 인천시 42.7%, 경기도 48.5%로 나타나 수도권 평균은 52%의 배출삭감율을 나타내었다. 또한, PM₁₀의 배출삭감율은 서울시 52.7%, 인천시 42.6%, 경기도 51.1%로 나타나 수도권 평균은 49%의 배출삭감율을 나타내었다(그림 9).

또한 계절별 삭감율을 살펴보면 겨울철에 가장 많은 배출량 삭감이 이루어져야 하는 것을 알 수 있으며 NO₂의 경우 여름철, PM₁₀은 가을철이 다른 계절에 비해 배출량을 덜 삭감해도 되는 것을 알 수 있었다(그림 10).

최종 목표농도 달성을 위해서 삭감해야하는 배출량은 NO₂의 경우 2002년 대비 서울시 69,817 ton/yr, 인천시 26,508 ton/yr, 경기도 90,242 ton/yr로 나타나 수도권 전체에서 삭감해야 하는 배출량은 총 186,567 ton/yr로 나타났으며, PM₁₀의 경우 2002년 대비 서울시 2,490 ton/yr, 인천시 1,174 ton/yr, 경기도 4,852 ton/yr로 나타나 수도권 전체에서 삭감해야 하는 배출량은 총 8,516 ton/yr로 나타났다.

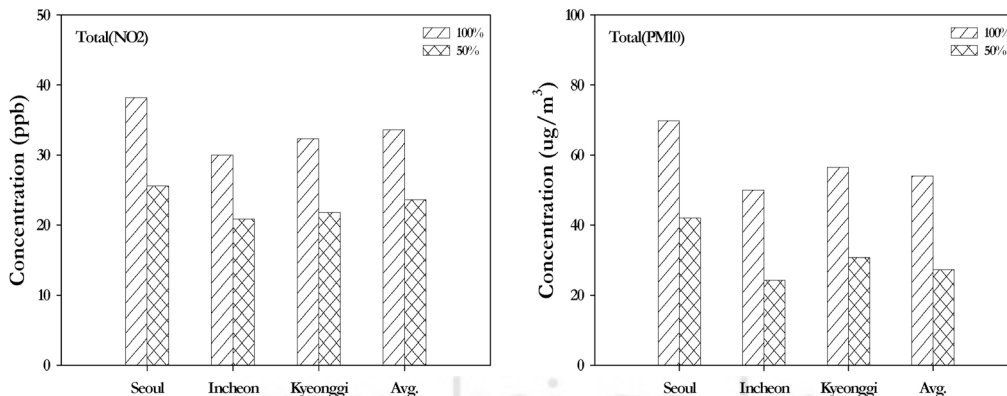


Figure 8. Concentration of NO₂ and PM₁₀ with control and reduction emission

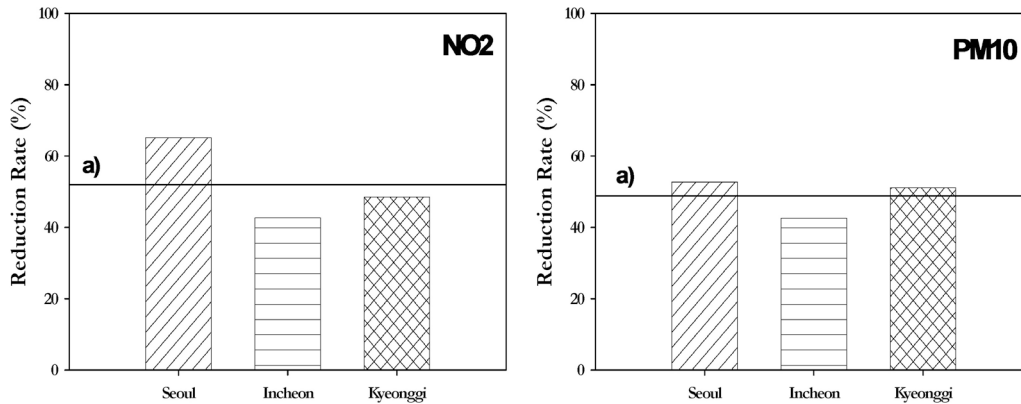


Figure 9. NO₂ and PM₁₀ emission reduction rate by region to achieve goals in 2014

Line a), denotes the averaged reduction rate for target concentration

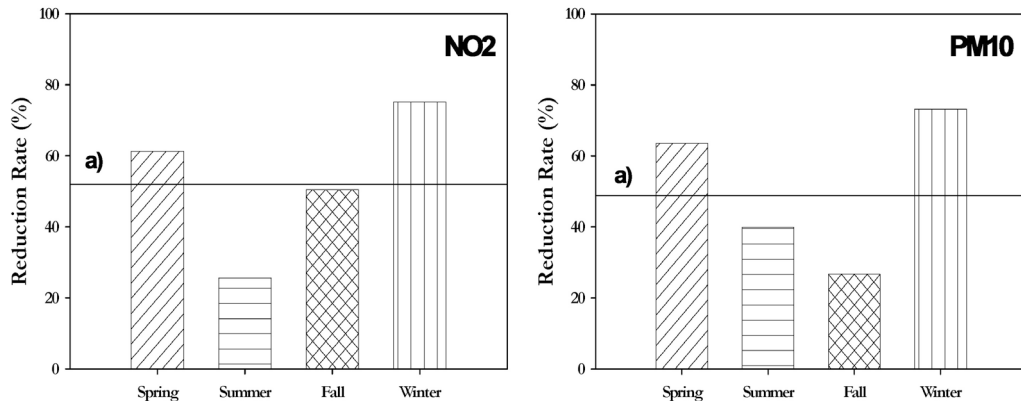


Figure 10. NO₂ and PM₁₀ emission reduction rate by season to achieve goals in 2014

3. 배출원별 삭감유연성 평가 결과

표 5는 NO₂ 및 PM₁₀에 대한 시나리오별 배출량 변화를 나타낸 것이며, 표 6은 시나리오별 결과 농도 및 농도기여율을 나타낸 것이다. 배출량의 저감 없이 기본 배출량으로 모델링을 했을 경우 NO₂의 평균농도는 41.9 ppb였으며 도로이동 오염원을 50% 저감했을 경우는 기본농도의 76.8%, 도로 이

동 및 비도로 이동오염원을 50%를 저감했을 경우는 기본농도의 70.9%로 나타나 비도로 이동에 의한 농도 기여율은 5.9%로 나타났다. 전체 오염원의 50%를 저감한 경우는 기본농도의 62.3%의 농도가 나타나 배출 기여율이 큰 이동오염원에 의한 농도 저감 효과가 아주 큰 것을 알 수 있었다.

PM₁₀의 경우, NO₂와 마찬가지로 배출 기여율이 큰 이동오염원에 의한 농도 저감 효과가 큰 것으로 나타났다.

Table 5. NO₂ & PM₁₀ Emissions for scenarios

	Base Year (2002)	EXP1	EXP2	EXP3
NO ₂ (ton/year)	355,278	262,686	228,770	177,639
PM ₁₀ (ton/year)	120,321	62,935	61,602	60,161

Table 6. NO₂ & PM₁₀ concentration and contribution for scenarios

	EXP1	EXP2	EXP3	Concentration
NO ₂	76.8%	70.9%	62.3%	41.9 (ppb)
PM ₁₀	65.3%	64.2%	53.8%	53.6 (μg/m ³)

이러한 삭감유연성 평가결과로 볼 때 이동오염원이 수도권 오염도에 미치는 영향이 크며, 따라서 수도권 오염저감을 위해서는 이동오염원의 배출 저감이 가장 효과적인 방법으로 볼 수 있다.

IV. 결론

본 연구는 수도권 특별법의 대기환경관리 기본계획에 따라 수립될 지자체의 대기환경개선 세부시행계획에 대한 평가를 정교하고 세부적으로 검토하기 위하여 대기모델링을 기반으로 한 평가시스템을 구축하고, 평가시스템을 토대로 목표대기질 달성을 위한 배출허용초량을 산정해 보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

2007년 각 지자체별 중간목표농도를 달성하기 위해서는 수도권 평균적으로는 2002년 CAPSS 배출량 대비 NO₂의 경우 14.2%의 배출량 삭감이, PM₁₀의 경우 16.6%의 배출량 삭감이 이루어져야 하며 2014년 수도권 대기질 개선의 최종목표인 NO₂ 22ppb, PM₁₀ 40 µg/m³을 달성하기 위해서는 NO₂의 경우 52%, PM₁₀의 경우 49%의 배출량 삭감이 이루어져야 함을 알 수 있었으며 계절별로는 겨울철에 다소 많은 배출량 삭감이 필요하며 여름철에는 상대적으로 적은 배출량 삭감이 필요하다는 결과를 얻었다. 지역별로는 배출량 부하가 큰 서울, 경기 지역이 인천보다는 다소 많은 배출량 삭감이 필요한 것으로 판단되었다. 이러한 배출량 삭감을 통한 NO₂ 및 PM₁₀의 대기질 농도를 낮추기 위해서는 이들 물질에 대한 배출 기여율이 큰 도로 이동오염원에 대한 배출량 삭감이 가장 효율적인 것으로 나타났다. 이는 배출 기여율만을 고려한 삭감유연성 평가결과로, 비용편익적인면을 고려할 때 지자체별 특성을 고려한 다양한 시나리오 적용이 필요할 것이며 지자체별 시행계획 수립이 완료되면 구체적인 사례연구가 가능할 것으로 판단된다.

향후 지자체별 배출원 특성이 보다 명확하게 파악이 되고 TMS 설치와 같이 사업장의 배출량 모니터링이 투명하고 정확하게 이루어진다면 현재의 일

괄적인 배출량 삭감정책보다 기여도가 높고 배출삭감유연성이 높은 배출원이나 지역에 대해 탄력적으로 삭감을 적용할 수 있는 보다 개선된 정책적용이 가능할 것으로 판단된다. 아울러 배출저감정책 시행과정에서는 지자체별 특성을 최대한 고려하여 추진할 수 있는 재량을 부여함으로써 수도권 대기환경개선 목표달성이라는 최종목표를 성공적으로 달성할 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

- 서울시정개발연구원, 2000, 서울시 대기환경개선 실천계획.
- 경기도, 1999, 21C 경기 대기보전 실천계획.
- 인천시, 2000, 21C 인천시 대기보전실천계획.
- 국립환경연구원, 2001, 도시지역 대기질 관리를 위한 대기환경용량 산정 연구.
- 국립환경연구원, 2004, 수도권지역에서 주요 지역간 대기오염물질 배출원 · 피해지 연구.
- 한국대기환경학회, 2005, 21세기 대기환경정책 대토론회집.
- 국립환경연구원, 2004a, 대기정책지원시스템 (CAPSS: Clean Air Policy Support System).
- Carter, W. P. L., Luo D. and Malkina I. L., 1997, Environmental chamber studies for development fo an updated photochemical mechanism for reactivity assessment. Final report for California Air Resources Borad Contract No. 92-345, Coordinating Research Council, Inc., Project M-9 and National Renewable Energy Laboratory, Contract ZF-2-12252-07.
- Gery M. W., Whitten G. Z., Killus J. P., and Dodge M. C., 1989, A photochemical kinetics mechanism for urban and regional scale computer modeling. J.

- geophys. Res. 94, 12, 925-12, 956.
- Stockwell W. R., Middleton P., and Chang J. S., 1990, The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. J. geophys. Res. 95(d10), 16, 343-16, 347.
- U. S. EPA, 1998, EPA third-generation air quality modeling system, Models-3, Volume 9B: user manual. Report prepared by the National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, EPA-600/R-98/069(a).
- Whitby, K. T., 1978, The physical characteristics of sulfur aerosols, Atmos. Environ., 12, 135-159.

최종원고채택 06. 12. 29