

복잡지형에서의 배출량 시나리오에 따른 대기질 수치모의

이 화 운·최 현 정·이 순 환·임 현 호·이 강 열·성 경 희·정 우 식·박 정 임**·문 난 경**
부산대학교 대기과학과, *인제대학교 대기환경정보공학과, **한국환경정책·평가연구원
(2007년 3월 29일 접수; 2007년 8월 6일 채택)

The Air Quality Modeling According to the Emission Scenarios on Complex Area

Hwa Woon Lee, Hyun-Jung Choi, Soon-Hwan Lee, Heon-Ho Lim, Kang-Yoel Lee, Kyoung-Hee Sung, Woo-Sik Jung*, Jeong-Im Park** and Nan-Kyung Moon**

Department of Atmospheric Science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

*Department of Atmospheric Environment Information Engineering, Inje University, Gyeongnam 621-749, Korea

**Korea Environment Institute, Seoul 122-706, Korea

(Manuscript received 29 March, 2007; accepted 6 August, 2007)

The objective of this work is the air quality modeling according to the scenarios of emission on complex terrain. The prognostic meteorological fields and air quality field over complex areas of Seoul, Korea are generated by the PSU/NCAR mesoscale model (MM5) and the Third Generation Community Multi-scale Air Quality Modeling System (Models - 3/CMAQ), respectively. The emission source was driven from the Clean Air Policy Support System of the Korea National Institute of Environmental Research (CAPSS), which is a 1 km x 1 km grid in South Korea during 2003.

In comparison of air quality fields, the simulated averaged PM₁₀, NO₂, and O₃ concentration on complex terrain in control case were decreased as compared with base case. Particularly PM₁₀ revealed most substantial localized differences by (18 ~ 24 µg/m³). The reduction rate of PM₁₀, NO₂, and O₃ is respectively 18.88, 13.34 and 4.17%.

Key Words : Air quality modeling, Emission, Reduction rate, CMAQ

1. 서 론

환경오염에 따른 피해가 다양화, 광역화 현상을 보이면서 이러한 피해를 최소화하고 적절한 수준의 환경상태를 유지하기 위한 정책적 논의가 활발하게 진행되고 있는 가운데, 국내에서도 1970년대 이후 오염물질 발생량 증가로 인한 피해가 크게 확대됨에 따라 각종 지원정책과 규제, 경제적 유인제도 등 다양한 정책 수단의 혼합을 통하여 대응방안을 마련하고 있다. 최근 몇 년간 우리나라 대도시는 물론 중소도시까지 오존주의보 발령 횟수가 계속 증가하고, 대기 중에서 발암성이 함유된 휘발성 유기

화합물질 (VOCs)과 중금속이 국제 기준치 이상으로 검출되는 등 대기질이 전반적으로 악화되고 있는 실정이다³⁾.

본 연구의 대상 지역인 서울과 수도권 지역은 80년대 이후 급속히 발전하면서 꾸준히 도시화가 진행되어 왔다. 이 지역의 토지이용은 농경지와 삼림 등의 면적이 현격히 줄어들었고, 건물과 아스팔트와 같은 대단위 인공건조물들이 들어서 대지와 도로의 점유율이 47%를 차지하는 고밀도형 대도시 형태를 갖고 있다. 그리고 북한산, 인왕산, 도봉산, 우면산, 불암산 등의 크고 작은 26개의 산이 도시외곽을 둘러싸고 있는 전형적인 분지형 도시지역으로서, 대기 오염물질의 확산이 불리하여 대기 오염이 심화되는 지형상의 특성을 내포하고 있다. 이와 같이 서울지역의 경우 지형조건 특성상 대기오염물질의 확산이 용이하지 않아 국지적으로 정체될 뿐만 아니라,

Corresponding Author : Hyun-Jung Choi, Department of Atmospheric Science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-51-515-1689
E-mail: costalian @ yahoo.co. kr

고밀 도시지역에서 배출되는 오염물질 배출량은 적정 환경기준을 훨씬 초과하는 수준을 보이고 있다¹⁾. 또한 산업의 고도화, 도시화, 자동차 보급의 증가로 대기오염의 피해 범위가 전국적으로 가속화되고 오염물질의 양상도 다양화 복잡화되고 있다. 따라서 집중적인 저감 노력이 기울여지지 않는 경우에는 대기질의 악화문제가 심각한 수준에 도달할 것으로 우려된다.

본 연구에서는 이러한 국내 배출특성을 반영하여 장기적인 대기오염 평가 및 예측 모델링에 향상된 결과를 도출하여 대기정책시행에 따른 효과분석 등의 신뢰도를 높이고자 한다. 배출량 시나리오에 따라 대기질 모델에 의해 산출된 대기오염물질의 농도와 분포는 대기오염 물질이 건강에 미치는 영향에 대한 역학연구와 대기질 개선효과 파악에 대한 신뢰있는 입력자료로 구현되어 환경오염 저감정책의 건강편익을 산정하고 경제적인 가치를 예측하는데 중요한 요소로 작용될 것이다.

2. 연구 방법

2.1. 수치 모델

본 연구에 사용된 기상모델은 미국 기상연구소(U.S. National Center for Atmospheric Research)와 펜실베이니아 주립대학(Penn Stat. Univ.)이 공동 개발한 모델인 MM5 (Mesoscale Meteorological Model version 5)이며, 모델은 고분해능을 요구하는 물리과정을 지원하고 있다²⁾.

대기질 수치모의에 사용된 모델로는 US Environmental Agency에서 개발한 Models-3/CMAQ (Third Generation Community Multiscale Air Quality Modeling System⁴⁾)으로 수행하였다. 모델링 영역의 규모가 다양하며, 여러 가지 오염물질이 동시에 고려될 수 있으며, 6개의 전처리 과정과 1개의 화학·수송 모델(CCTM, CMAQ Chemical Transport Model)로 구성되어 있다. 전처리 모델은 기상장 처리 모델인 MCIP (Meteorology- Chemistry Interface Processor), 배출량 처리 모델인 ECIP (Emission- Chemistry Interface Processor), 광해리율 산출 모델인 JPROC (Photolysis Rate Processor), 초기조건을 생성하는 ICON (Initial CONditions processor)과 경계조건을 생성하는 BCON (Boundary CONditions processor)이 있다. 화학처리과정으로는 CB-IV를 사용하였다.

2.2. 입력 자료

2.2.1. 기상장 초기 및 지표 경계자료

본 연구에 사용된 모델의 초기 및 경계 입력자료는 3시간 단위 KMA/RDAPS (Regional Data

Assimilation and Prediction System)를 사용하였다. 기상 모델의 지표경계조건은 실제 대기상태에 가까운 모델 결과를 유도하기 위하여 환경부 지리 정보 시스템(EGIS)의 해상도 90 m (3-seconds)인 지형 고도자료(이하 KDEM)를 모델 내 fine domain에 안정적으로 내삽하였다²⁾. 이러한 상세 지표면 자료는 지형고도자료의 해상도에서 동시에 고해상도화되었을 때 가장 안정적이고 효과적인 수치모의가 될 것이다. 환경부에서는 Landsat TM 위성영상과 SPOT 위성영상을 합성하여 한반도 위성영상지도를 제작하여, 시가화/건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역의 7개 분류항목으로 구성된 지상해상도 30 m급의 대분류 토지피복지도(축척 1:50,000, KLU)를 제작하였으며, 본 연구에서는 안정적으로 모델 내에 이를 적용하여 수치모의 하였다⁷⁾.

2.2.2. 대기질배출량 자료

상세 영역의 배출량 자료는 대기보전 정책수립 지원시스템(CAPSS : Clean Air Policy Support System)에서 산정된 배출량을 사용하였다. CAPSS는 매년 교통량 자료, 기타운송 자료, 업체별 조사 자료, 정유사 관련 자료, 오염도 및 기상관측 자료, 행정구역별 에너지 통계 자료, 일반 통계 자료 등을 배출원 분류코드(SCC Source Classification Codes)를 근거로 정의된다. 사용된 CAPSS 배출량은 전국을 1 km × 1 km 격자 별로 산출한 2003년도 배출량 자료이다. 배출원은 각각 점, 선, 면 오염원과 자연 오염원을 포함하는 10개의 대분류로 이루어져 있으며, 1년 평균 배출량을 ton 단위로 기술하고 있고 월 별, 요일 별, 시간 별 배출계수가 주어진다. 이 배출량은 각각의 배출원을 중심으로 SOx, NOx, VOC 물질에 대해 연간 격자별 총 배출량으로 산출하고 각각의 화학물질을 세분화하였다. CMAQ 내 SMOKE로부터 CB-IV에 의한 VOC종별 배출량을 산출하고 월 별, 요일 별, 시간 별 분배계수를 적용하여 시간 별 배출량 입력 자료를 작성하였다.

2.3. 모델링 영역 및 물리 과정

모델의 등지격자 도메인은 아래와 같으며, 그 중심은 38°N, 126°E 이다 (Fig. 1). 기상장 모델의 연직 간격은 지형을 따르는 33개의 sigma층이며, 분석에 사용된 MM5의 다양한 물리과정 중 구름 모수화 과정 (cloud physics and precipitation processes)과 강수 과정 (precipitation processes)은 각각 상승·하강운동 그리고 보상운동을 고려하는 모수화 방법^{6,9)}을 사용하였다. 그리고 복사과정은 명시적 구름 (explicit cloud)과 장파 및 단파복사의 상호작용을 충분히 고려한 구름-복사 방안 (Cloud-radiation

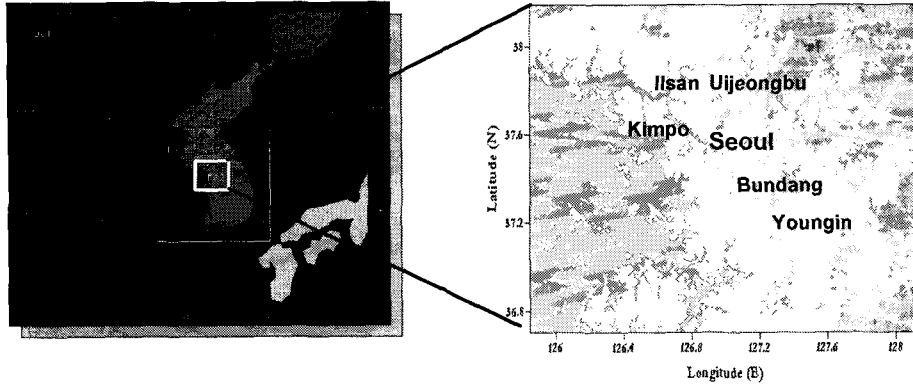


Fig. 1. The coarse and nested grid domains used in this study.

scheme)을 사용하였다. 또한 경계층을 묘사하는 물리식으로 상대적으로 경계층 내에서 강한 혼합을 발생시키는 MRF planetary boundary layer (PBL) parameterization scheme⁷⁾을 사용하고, Explicit Moisture Scheme으로 Reisner Graupel Scheme을 사용하였다. Radiation scheme으로 RRTM long wave scheme¹⁰⁾을, surface scheme으로는 Pleim-Xiu Land-Surface scheme (Pleim-Xiu Land-Surface Model coupled to the Pleim-Xiu PBL and combined land-surface and PBL model)이 선택되어 졌다.

3. 실험설계

본 연구에서는 다양하고 복잡한 도시의 지형과 토지피복이 혼재하고 있는 대표적인 지역인 수도권역을 대상으로, 상세한 지형과 토지피복도, 지형구조물 등을 고려한 3 km 해상도의 1년간 (2005/01/01~12/31)의 현황 기상장을 산출하게 된다. 생산된 현황 기상장은 현황 배출량 (2003년 CAPSS)과 함께 대기질 모델의 입력장으로 사용되어 같은 해상도와 기간의 수도권역을 포함하는 NO₂, PM₁₀, O₃의 격자별 1시간 단위 예측을 수행한다. 예측된 현황 대기질 모델링 결과는 현황 대기질 측정망에 의해 검증되고 보정된다 (Base case). 또한 현황과 비교하여 장래에 예측된 대기질 결과는 2014년을 대상으로 수행하며, 대기질 예측 모델링 결과는 각각 현재의 배출량 증가율을 추정하여 나타난 BAU case와 이동 배출원의 배출량을 중심으로 저감이 이뤄진 배출량을 중심으로 모델링 된 Control case이다. 이는 이동 오염원 중에서 연료를 경유로 사용하는 경우에 대해 2005년의 수도권 대기질 배출 저감정책 (환경부)에 따라 조절된 저감량을 사용한 모델링 결과이다.

CAPSS에 의해 산출된 현황 대기질 (Base case)의 연간 배출량과 2014년의 BAU, Control case에

대한 연간 배출량 차이 분포를 물질별 (NO₂, PM₁₀, VOC)로 나타내었다 (Fig. 2). Fig. 2(a),(b),(c)는 Base case 배출량과 2014년 BAU case 배출량의 차이를 나타내고 있고, Fig. 2(d),(e),(f)는 Base case 배출량과 2014년 Control case 배출량의 차이를 나타낸 분포도이다. Fig. 2(a),(b),(c)에 나타난 현황에 대한 2014년 BAU에서의 배출량 증가정도는 수도권을 중심으로 물질별로 증가가 이뤄지고 있음을 알 수 있으며, Fig. 2(d),(e),(f)에 나타난 2014년 Control case의 저감정도는 수도권을 비롯해 경기 남부지역으로 보다 광역적으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 배출량 증감시나리오에 따라 산출된 현황과 목표연도의 BAU, Control case의 대기질 결과는 대기질 현황에 대한 상세한 정보와 대기질 개선효과 파악에 대한 신뢰 있는 예측을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 모델링 결과

4.1. 현황 대기질(Base case) 보정 결과

수치모델링은 자연현상에 대해 수식화하는 작업으로 모델링결과에 다수의 오차 발생요인을 가질 수 있다. 따라서 실제적인 대기질 현황을 반영하고 안정적인 대기질 결과를 산출하기 위해 대기질 모델링 결과에 대해 신뢰 있는 보정을 실시하는 것은 그에 따른 불확실성을 보완 수 있을 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 오염물질의 계절별 관측값과 대기질 모델링결과에 따라 산출된 회귀식에 의해 보정하기로 한다.

각 오염물질에 대해 대기질 관측지점의 계절별 현황 대기질 관측값은 Fig. 3에 나타난 대기질 측정소 113개 지역의 1년간 (2005/01/01~2005/12/31)의 계절별 관측값이 이용되었고, 같은 기간의 현황 대기질 모델결과 (Base case)를 사용하여 보정하였다. 이때 나타난 계절별 대기질 관측값과 모델 결과값

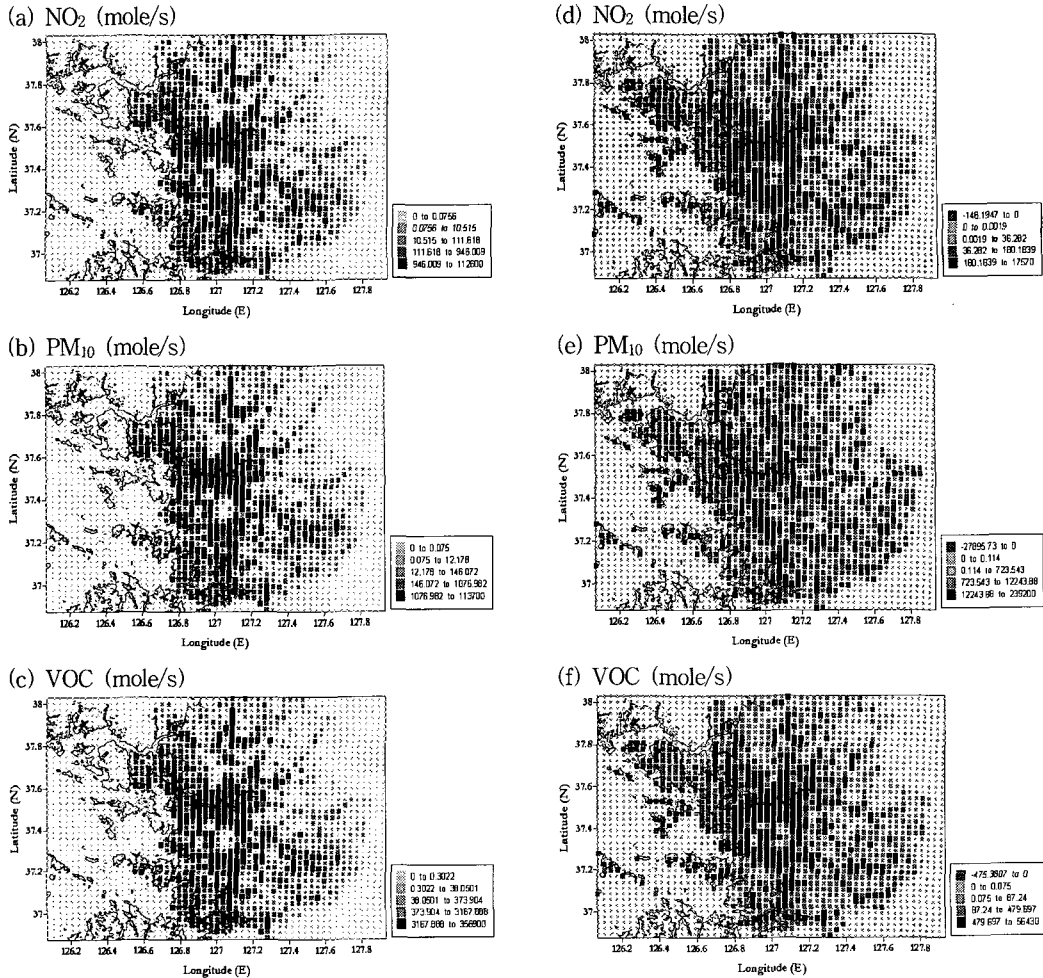


Fig. 2. Horizontal distribution of emission difference (left panel ((a),(b),(c)): ($\Delta_{BAU} - Base$), right panel (d),(e),(f)): ($\Delta_{Base} - Control$).

을 각각의 축으로 하여 $Y = aX + b$ 의 직선 회귀식에서 절편인 b 값을 0으로 산정하며, $Y = aX$ 의 형태로 주어졌을 때의 기울기 a 를 산출하였다. 1년간의 기준연도 대기질 결과 중 계절별로 산출된 a 는 유의확률 (P-value) test를 통해 검증하였으며 (Table 1), 이를 근거로 기준연도 대기질 모델링 결과를 보정하였다. Fig. 4는 보정된 기준연도 계절별 대기질 결과와 관측값과의 상관도이며, Table 2에 나타난 상관 결과는 R^2 값으로 0.65 ~ 0.75의 분포를 나타냈다.

4.2. 배출량 시나리오에 따른 대기질 평균장 분포

Fig. 5는 연평균 NO_2 , PM_{10} , O_3 의 관측값과 대기질 모델링 결과 분포도이다. 이중 현황 대기질 관측값인 Fig. 5(a)와 현황 대기질 모델링 결과인 Fig. 5(b)는 물질별로 유의한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히, 최근 10년간의 기상청 자료에 나타난

서울지역의 풍향 빈도 조사에서 서풍계열이 68.23%로 지배적으로 나타났음을 감안한다면²⁾, 이로 인해 O_3 의 경우 도심의 풍하 측에서 고농도 현상이 빈

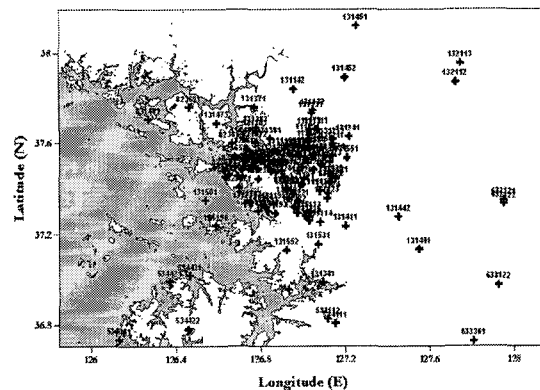


Fig. 3. The distribution of air quality station.

번히 발생한 것을 볼 수 있다. 또한 Fig.5(a)에서 나타나듯 도심의 경우 지속적인 NO_x 배출의 영향으로 오존농도가 상승하지 못하는 반면, 풍하측에서는 상대적으로 적은 NO_x의 직접작용이 나타나며¹¹⁾, 도시 전구물질이 서풍계열의 주풍에 의한 수송과 함께 광화학적 O₃의 축적이 일어났기 때문에 사

료된다.

목표연도의 BAU와 Control case인 Fig. 5(c)와 (d)의 비교에서 NO₂의 경우 수도권을 중심으로 4 ~ 5 ppb의 저감효과가 나타나고 있으며, PM₁₀의 경우 15 ~ 20 µg/m³의 저감 효과가 나타나고 있다. 계

Table 1. Seasonal P value between modeled (Base case) and observed value.

Season	Species		
	NO ₂	PM ₁₀	O ₃
Spring	0.1799	0.1536	0.2359
Summer	0.1593	0.1413	0.2785
Autumn	0.0612	0.0825	0.2110
Winter	0.0517	0.2101	0.1583

Table 2. Seasonal correlation value (R²) between modeled (Base case) and observed value.

Season	Species		
	NO ₂	PM ₁₀	O ₃
Spring	0.6534	0.6926	0.7197
Summer	0.6963	0.6612	0.7191
Autumn	0.6539	0.6862	0.7027
Winter	0.6699	0.6707	0.7455

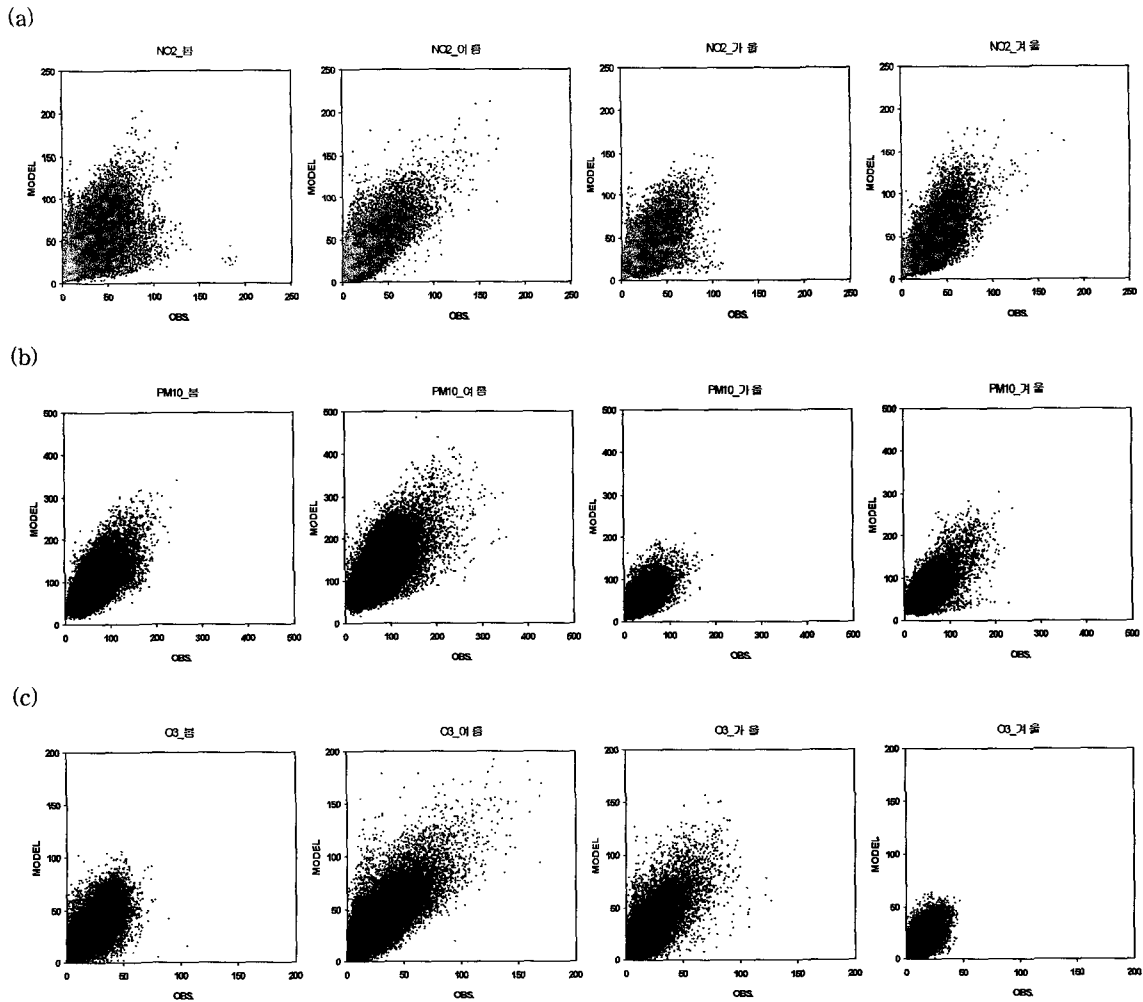


Fig. 4. Seasonal (2005/0101~2005/12/31) correlation of surface concentration between modeled (Base case) and observed value ((a): NO₂, (b): PM₁₀, (c): O₃).

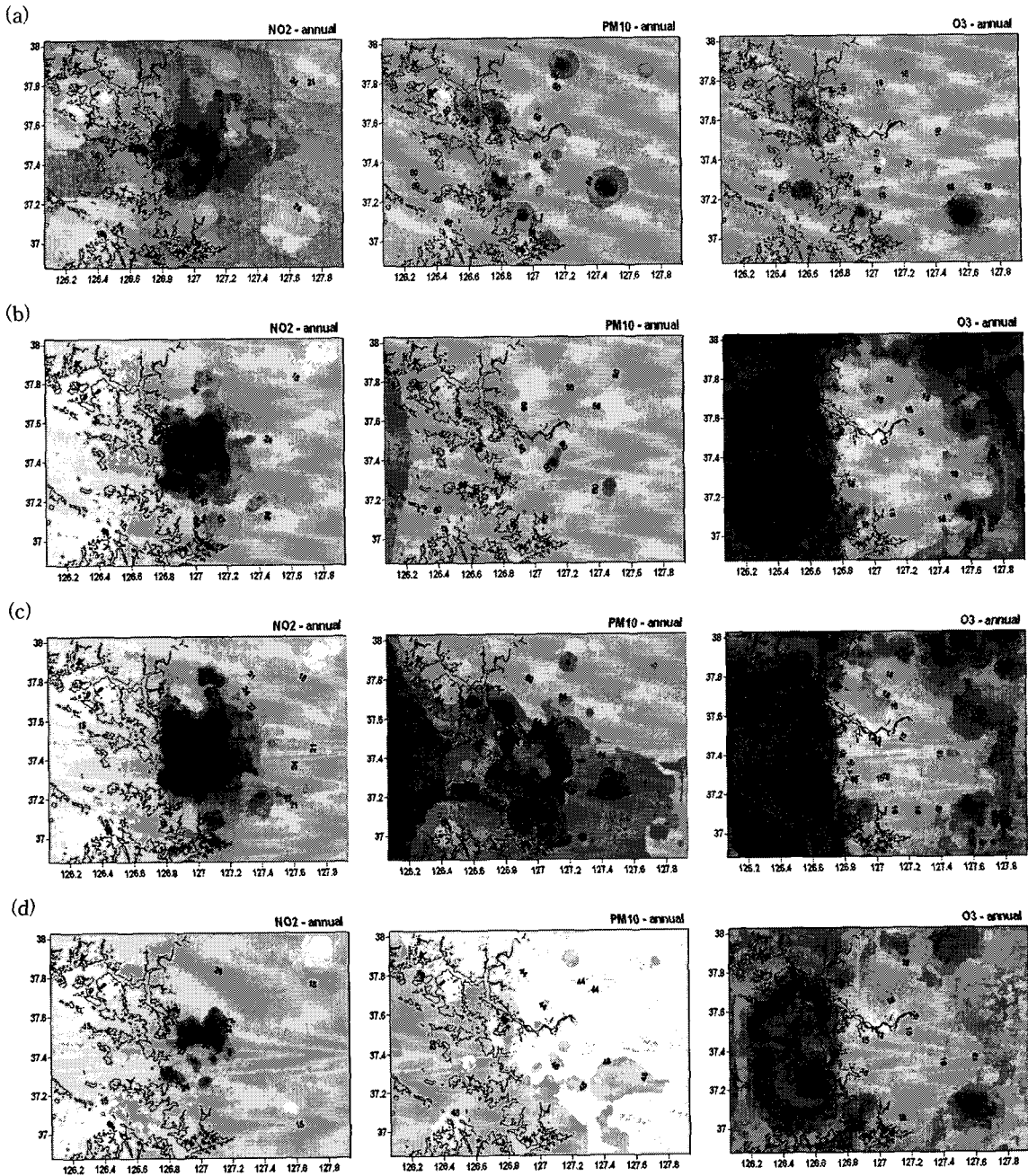


Fig. 5. Yearly averaged distribution of concentration ((a): Observed concentration (b): Base case, (c): BAU case, (d): Control case).

절별로 나타낸 현황 (Base case)과 목표연도 Control case의 대기질 비교 결과 (Fig. 6)에서는 NO₂의 경우 수도권을 중심으로 2 ~ 10 ppb의 저감효과가 나타나고 있으며, PM₁₀의 경우 봄철의 저감효과 (18 ~ 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 특징적으로 크게 나타나고 있다. O₃의 경우 수도권 전역에서 저감 후 지역에 따라 다소

높아진 (1 ~ 4 ppb) 농도패턴도 보이며 다른 물질들에 비해 소폭의 저감 효과를 나타내고 있는 것으로 나타났다.

Table 3은 물질별 관측값과 Base case 그리고 목표연도의 BAU, Control case에 따른 연평균 결과를 나타내었다. Table 3에 제시된 NO₂, PM₁₀, O₃의

복잡지형에서의 배출량 시나리오에 따른 대기질 수치모의

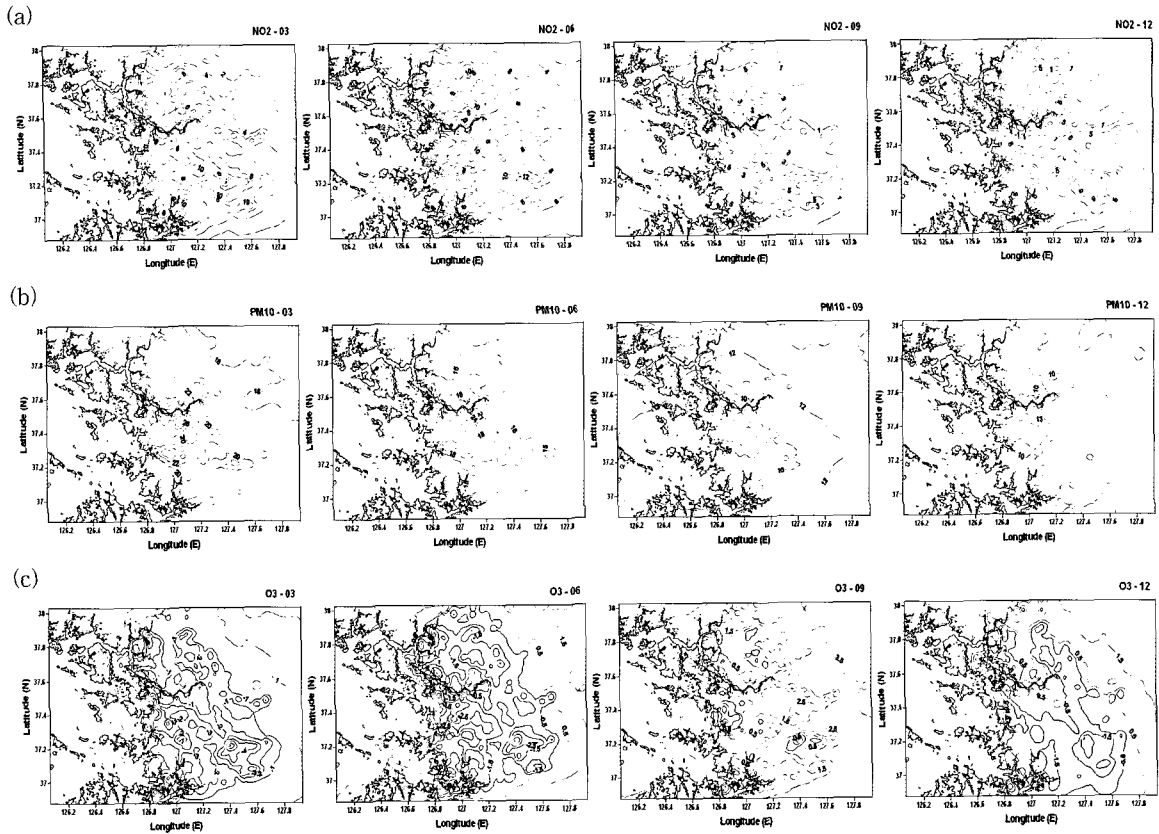


Fig. 6. Monthly averaged difference ($\Delta_{Base\ case - Control\ case}$) between Base and Control case ((a): NO₂, (b): PM₁₀, (c): O₃).

Base case와 비교된 Control case의 저감율(%)은 각각 13.34, 18.88, 4.17로 나타나 PM₁₀의 저감율이 가장 크며, O₃의 저감이 가장 적게 나타남을 알 수 있다. 또한 목표연도의 BAU case와 비교된 Control case의 저감율(%)은 각각 19.02, 27.25, 3.39로 나타나 이 경우에도 PM₁₀의 저감율이 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

Table 3. Comparison analysis of yearly averaged concentrations in each case.

Species	Case			
	Observation	Base	2014년 BAU	2014 Control
NO ₂ (year avg./ppb)	27.05	20.17	21.61	17.50
PM ₁₀ (year avg./ $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	61.03	58.82	65.66	47.77
O ₃ (year avg./ppb)	17.77	19.92	19.78	19.11

5. 결 론

본 연구에서는 다양하고 복잡한 도심의 지형과 토지피복이 혼재하고 있는 대표적인 지역인 수도권역을 대상으로 국지규모의 기상해석에 실제적인 지표면 경계조건을 제공하고, 대기오염 확산의 물리적인 특성을 나타내는 기상인자들을 정밀하게 예측하였다. 이러한 향상된 기상정보와 지역별 대기오염현상의 분석력 향상으로 배출량 시나리오에 따른 대기오염물질의 농도와 분포를 파악하였다.

실제적인 대기질 현황을 반영하고 안정적인 대기질 결과를 반영하기 위해 본 연구에서는 현황 대기질 모델링 결과를 오염물질의 계절별 관측값과 비교하여 산출된 회귀식에 의해 보정하였다.

대기질 모델링 결과 연평균장 분석에서, 현황의 PM₁₀의 경우 서울 남부쪽에 위치하고 있는 대형 점오염원의 영향과 해륙풍에 의해 이루어져 나가는 양상이 잘 나타나 풍하측 지역에서 고농도가 나타날 가능성을 나타내고 있으며, O₃의 경우 도심보다 인근 풍하 측에서 고농도 현상이 빈번히 발생한 것을 볼 수 있었다.

목표연도의 Control case 에서는 Base case 와의 계절별 평균장 분석에서, NO₂의 경우 수도권을 중심으로 2 ~ 10 ppb의 저감효과를 나타내고 있었으며, 특히 PM₁₀의 경우 봄철의 저감효과 (18 ~ 24 µg/m³)가 특징적으로 나타나고 있다. O₃의 경우 수도권 일부 지역에서는 저감 후 다소 높아진 (1 ~ 4 ppb) 농도패턴도 나타났다. 또한 연평균 NO₂, PM₁₀, O₃의 Base case와 비교된 저감율(%)은 각각 13.34, 18.88, 4.17로 나타나 PM₁₀의 저감율이 가장 크며, O₃의 저감이 가장 적게 나타남을 알 수 있다. 또한 목표연도의 BAU case와 비교된 Control case의 저감율(%)은 각각 19.02, 27.25, 3.39로 나타나 PM₁₀의 저감율이 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

본 연구를 통하여 장기간 광화학 모델링의 안정적 실행으로 대기질 개선정책에 따른 개선효과를 파악하여 대기 환경 정보의 구축을 통한 환경오염 저감 정책 수립에 실질적으로 활용되어질 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진개발사업 (CATER2006-2205)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) 서울 시정 개발 연구원, 2000, 서울시 대기오염 특성연구 120pp.
- 2) 이화운, 최현정, 이강열, 2005, 상세한 하부 경계 조건과 관측값 객관분석이복잡지형의 대기흐름장 수치모의에 미치는 효과, 한국기상학회지, 41(1), 73-87.
- 3) 환경부, 2003, 대기오염 배출업소 실태조사표.
- 4) Byun D. W., Ching J. K. S., 1999, Science algorithms of the EPA Models-3Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. EPA Report N. EPA-600/R-99/030, Office of Research and Development.US Envi-

- ronmental Protection Agency, Washington, DC. CARB, 2003.
- 5) Dudhia J., 1993, A nonhydrostatic version of the Penn state-NCAR Mesoscale Model : Validation tests and simulation of an Atlanticcyclone and cold front, Mon. Wea., Rev., 121, 1493-1513.
- 6) 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, CO, 107.
- 7) Hong S. Y. Pan H. L., 1996, Nonlocal boundary layer vertical diffusionin a medium-range forecast model, Monthly Weather Rev. 124, 2322-2339.
- 8) Lee H. W., Choi H. J., Lee K. Y., Lee S. H., Sung K. H., 2006, The Effect of Using Detailed Land-use Conditions for the Photochemical Modeling of Seoul, Korea, JKM, 42(2), 57-73.
- 9) Reisner J., Rassmussen R. J., Bruintjes R. T., 1998, Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model, Q. J. R., Meteorol. Soc. 124B, 1071-1107.
- 10) Mlawer, Taubman E. J., S. J., Brown P. D., Iacono M. J., Clough S. A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. J. Geophys. Res., 102 (D14), 16663-16682.
- 11) Sillman S., 1999, The relation between ozone, NOX and hydrocarbons in urban and polluted rural environment, Atmospheric Environment 33, 1821-1845.