



2010

서울시 주요 대기관리정책의 복합영향 분석

Co-effect Analysis of Air Quality Management
Measures in Seoul

최 유 진 · 김 운 수

서울시 주요 대기관리정책의 복합영향 분석

Co-effect Analysis of Air Quality Management Measures in Seoul

2010

■ 연구진 ■

연구책임	최 유 진 • 도시기반연구본부 부연구위원
연구원	김 운 수 • 도시기반연구본부 선임연구위원
	고 경 진 • 도시기반연구본부 연구원

이 보고서의 내용은 연구진의 견해로서
서울특별시의 정책과는 다를 수도 있습니다.

요약 및 정책건의

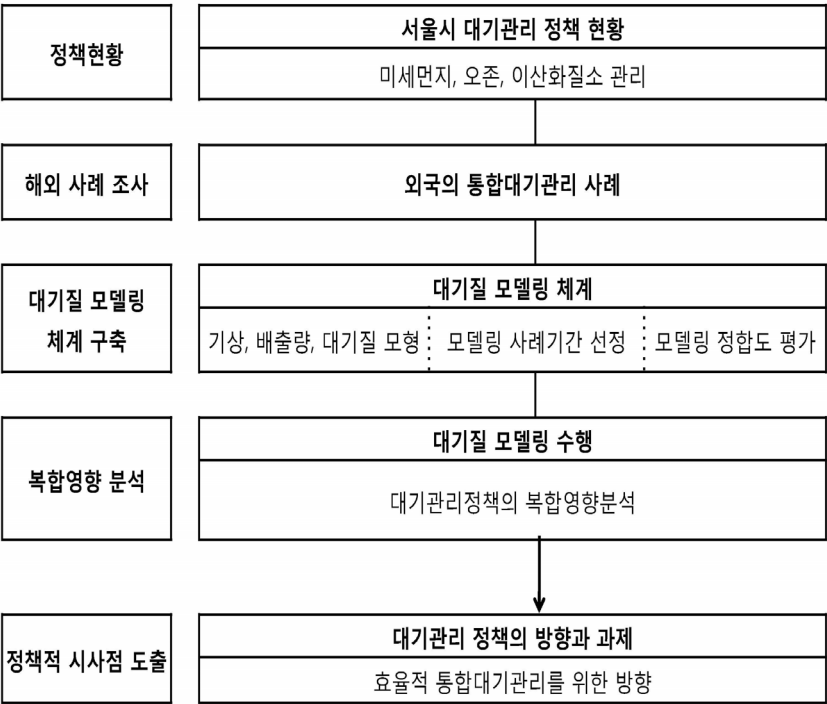
1. 연구의 개요

1) 연구 배경 및 목적

- 연료규제, 배출허용기준 강화, 자동차 저공해사업 추진 등 다양한 대기관리정책 추진으로 일산화탄소(CO), 아황산가스(SO₂) 등 일차형 대기오염물질은 현저한 개선효과를 보이나, 2차형 오염물질인 미세먼지(PM), 오존(O₃), 이산화질소(NO₂)는 단기 환경기준을 초과하는 사례가 꾸준히 발생하고 있음. 특히 오존의 경우 단기기준 초과횟수가 증가하는 경향을 보임.
- 미세먼지, 이산화질소, 오존은 대기 중에서의 생성 및 소멸과정들이 복잡·다양하여 배출원의 배출량 저감이 대기 중의 농도 감소로 나타나는 선형적 특성을 보이지 않음. 또한, 일부 미세먼지 성분, 오존, 이산화질소는 화학적으로 생성·소멸의 과정이 상호 밀접하게 연계되어 있으므로 한 대기오염물질을 타깃으로 하는 대기관리의 정책이 다른 오염물질의 농도변화에 긍정적 혹은 부정적 영향을 미칠 가능성이 있음.
- 따라서 이러한 대기오염물질들 사이의 생성, 반응, 소멸 등 일련의 과정들을 숙지하고 복합적 영향을 분석하는 것이 효과적, 효율적 대기관리 정책의 도출에 중요함. 하지만 지금까지 대부분의 대기관리 정책들은 각각의 대기오염물질을 독립적, 개별적 물질로 보고, 각 대기오염물질의 저감방안이 다른 오염물질의 농도에 미칠 수 있는 영향은 분석되지 않음. 단지, 대기오염물질 저감정책을 통해 한 배출원으로부터 저감 가능한 오염물질들의 배출량 정도만을 산출하는 수준에 머무르고 있음.
- 이 연구는 서울시에서 전개되고 있는 대기관리 정책들이 여러 오염물질의 농도에 미치는 복합영향을 모델링 시스템을 도입하여 분석·평가하고, 개

선방안을 모색하여 효율성을 제고할 수 있는 서울시 대기관리의 방향을 제시하고자 함.

2) 연구의 주요내용 및 체계



〈그림 1〉 연구의 주요내용 및 체계

2. 대기관리정책 현황 분석

- 서울시는 2006년에 수립된 ‘수도권 대기환경개선 기본계획 추진을 위한 서울특별시 시행계획’을 기초로, 2014년까지 미세먼지와 이산화질소의 농도 개선을 목표로 하여 도로이동오염원, 사업장, 에너지 등 광범위한 분야에 걸친 오염물질 배출량 저감정책을 추진하고 있음.

○서울시의 주요한 대기관리 정책들을 부문별로 정리하면 <표 1>과 같음. 유기용제 관리, 주유소 관리, 비산먼지 정책들은 각 정책시행으로 한 종류의 대기오염물질(VOC 또는 PM10) 배출을 감축시키지만, 그 외의 대기정책들(자동차, 에너지 부문 등)은 각 정책의 시행이 두 종류 이상의 오염물질을 동시에 저감함. 서울시에서 가장 중점적으로 추진하고 있는 제작차 및 운행차 관리 정책들은 PM10뿐 아니라 오존과 NO₂를 생성하는 NO_x와

<표 1> 분야별 주요 대기오염물질 저감정책 및 대상 오염물질

분야	주요 저감정책		대기오염물질			
			PM10	NO _x	SO _x	VOC
사업장	총량관리제 및 배출권거래제 시행			√	√	
	총량관리 미대상사업장	산업시설 저NO _x 버너 설치 확대		√		
		사업장 폐쇄유도 및 이전	√	√	√	
면배출원 관리	유기용제관리	친환경 도료 사용 확대 (도료유기용제 함량 제한)				√
		도장 세정시설 비산배출허용기준 설정				√
		소비재유기용제 함량 제한				√
		아스팔트 포장방법 개선				√
	주유소 Stage II 관리					√
	가정용 저NO _x 보일러 보급			√		
	비산먼지관리	도로 비산먼지 관리	√			
		기타 비산먼지 관리	√			
에너지관리	지역 냉난방 공급 확대		√	√	√	√
	신재생에너지 보급 확대		√	√	√	√
제작자동차 관리	제작차 배출허용기준 강화		√	√		√
	저공해차 보급	전기이륜차 보급	√	√	√	√
		하이브리드승용차 보급	√	√		√
		CNG 차량 보급	√	√		
운행자동차 관리	특정경유	DPF 보급	√	√		√
		DOC 보급	√			√
		LPG엔진 개조	√	√		√
		노후차 조기폐차	√	√		√
	자동차 연료품질 개선		√	√	√	√
교통수요 관리	대중교통 확충, 자전거 이용 제고 등		√	√	√	√

VOC(휘발성유기화합물)의 배출에도 영향을 미침.

- 이러한 오염물질들은 개별적으로도 유해성이 있으므로 절대 농도를 줄이는 노력이 필요하나, 더불어 2차 반응을 통한 새로운 유해물질의 생성과 밀접한 연관이 있으므로 효과적 대기질 관리를 위해서는 보다 신중한 접근이 요구됨.
- 따라서, VOC, NO_x, SO_x 등 기체상 물질 배출원 관리와 관련된 정책들에 대해서는 2차 물질(PM₁₀, NO₂, O₃) 생성에 미치는 긍정적 또는 부정적 효과들도 평가하여 정책의 우선순위를 조정하는 과학적 분석과정이 필요함.

3. 외국의 대기질 관리 사례

- 최근 선진국을 중심으로 서서히 논의되고 있는 대기질 관리 분야의 이슈는 Multipollutant air quality management(오염물질 대기질 통합관리)로, 기존의 개별적 대기오염물질 관리의 한계(오존, 미세먼지와 같이 2차 생성대기오염물질의 효과적 관리의 어려움)를 극복하기 위해서는 여러 오염물질을 동시에 고려하는 오염물질 통합관리로 대기관리의 방향을 전환할 필요성을 제기함.
- NARSTO는 최근 대기질 통합관리에 대한 보고서를 통해 궁극적인 대기관리의 방향을 위해성에 기초한 통합관리로 설정하고 대기관리의 단계를 4단계로 구분함.
 - 대부분의 도시나 국가에서의 대기관리 단계는 Level 1 수준에 머무르고 있으며, 일부 선진도시들에서 Level 2, 3의 대기관리를 위한 시범적 시도가 진행 중임.

Level 1 (일반적)	• 목표 : 개별 오염물질의 환경기준 달성 - 기존의 대기질 관리 방향 - 오염물질 사이의 복합영향 미고려
Level 2	• 목표 : 개별 오염물질의 환경기준 달성 - 오염물질 사이의 복합영향 고려한 통합오염물질 저감전략 개발 - 일부 지역에 적용 (미국 캘리포니아 대기질 관리계획)
Level 3	• 목표 : 위해성 최소화 - 오염물질별 위해성 정보를 기초로 함 - 각 오염물질의 위해성을 최소화할 수 있는 오염물질 통합저감전략 개발 - 일부 지역에서 시범적으로 진행 (미국 디트로이트, 노스캐롤라이나/세인트루이스 대기질 관리계획)
Level 4	• 목표 : 위해성 최소화 - 개별 오염물질뿐 아니라 각 오염물질의 복합작용으로 인한 위해성까지 고려 - 오염물질들의 복합적 위해성을 최소화할 수 있는 오염물질 통합저감 전략 개발

자료 : NARSTO, 2010

〈그림 2〉 단계별 대기관리 방향

○ 일부 선진국을 중심으로 시범적으로 시도되고 있는 통합대기관리 사례조사
를 통해 시사점을 도출함.

— 오존, 미세먼지와 같은 2차 오염물질은 ‘개별적 오염물질 관리’의 기존
접근방법으로는 한계가 있으므로 통합적 관점에서 최적의 관리 방법을
찾기 위한 방안이 필요함.

— 대기질 관리의 목표가 환경기준 달성인지 위해성 최소화인지에 따라 대
기질의 효과적 관리 방법이 상이할 수 있으므로 궁극적 대기질 관리의
목표 설정이 필요함.

— 대기오염물질 통합관리를 위해서는 신뢰성 있는 모델링 시스템 도입이
필요하며, 2차 오염물질은 지역적 특성(오염물질 배출특성, 기상학적 특
성 등)에 따라 대기질 관리 방법에 차이가 있으므로 지역적 특성에 대한
세부적인 조사가 필요함.

4. 대기질 모델링 체계의 구축

1) 대기질 모델링 체계

○기상모델링

- 배출량 모델링 및 화학수송모델링의 기상 입력 자료를 산출하기 위한 기상모델로 WRF(Weather Research Forecast) 모델을 도입함.

○배출량 모델링

- 대기질 모델에 알맞은 배출량 입력 자료를 생성하는 도구인 SMOKE 모델을 도입하여, 연간 배출량 자료를 격자별, 시간별, 화학종으로 세분화하여 배출량 자료를 재생성함.

○대기질 모델링

- 화학물질들의 대기 중 이동, 반응, 확산 등의 모사를 위하여 CAMx (Comprehensive Air quality Model with extensions) 모델을 이용함.

○모델링 영역

- 동아시아 지역을 대상으로 27km 해상도, 한반도 지역을 대상으로 9km 해상도, 수도권을 대상으로는 3km 해상도로 설정함.

○모델링 사례기간

- 평균적 변화 및 영향 조사를 위해서는 2009년의 각 계절을 대표할 수 있고 황사 발생일이 없으며 강수량이 비교적 적은 달인 1월, 4월, 8월, 11월을 계절별 대표기간으로 선정함.
- 고농도 상황에서의 영향 조사를 위해 PM₁₀, NO₂, O₃의 고농도 사례일을 조사하여, 세 가지 오염물질이 평균적 경향보다 높았던 사례일을 선정함 (2월 4~8일, 4월 7~12일, 5월 8일, 6월 18일, 7월 30일, 8월 14~15일).

2) 모델링 정합도 분석

○기상 모델링 정합도

- 습도의 일치도지수(IOA)가 0.8, 풍속은 0.7~0.8, 온도는 0.9 이상으로 정합도가 높은 것으로 판단됨.
- 오차범위(RMSE)가 온도는 2℃ 이내, 습도는 20% 이내, 풍속은 1.5m/s 이내로 나타나며 일변화를 잘 모사함.

○대기질 모델링 정합도

- 모델결과와 실측값의 통계분석결과에서는 25개 모든 측정지점에서 모두 일치도지수가 0.6 이상, 상관계수는 0.8 이상을 나타내어 유의한 상관성을 보여줌.
- 25개 측정지점과 비교 결과, PM10은 예측농도가 실측농도보다 낮게 나타났으나, IOA는 0.62 ~ 0.72 범위, 상관계수(R) 값은 모든 지점에서 0.8이상으로 실측값과의 높은 상관성을 보임. 모든 측정지점에 대한 미세먼지의 MFE 통계값이 모두 75% 이하를 나타냈으며, 이는 기존의 미세먼지 모델링 정합도 평가에 적용되는 규정을 만족하는 결과임.
- 이산화질소는 예측농도가 실측농도보다 다소 높게 나타났으나, 모든 지점에서 IOA는 0.7 이상, R값은 0.85 이상으로 실측값과의 높은 상관관계를 보여주며, MNB값은 -4% ~ +68%의 범위로 평균 24.1%로 조사됨.
- 오존의 경우, 예측농도가 실측농도보다 다소 낮게 나타났으며, 모든 지점에서 IOA는 0.7 이상, R 값은 0.8 이상으로 실측값과의 상관관계는 높게 나타나며, MNB는 5% ~ 160%의 범위로 평균 72.5%로 조사되어 NO₂와 PM10보다 높게 나타남.
- 시계열 분석에서는 PM10이 전반적으로 모델농도가 낮게 예측되었고, 오존의 고농도가 저평가되는 경향을 보였으나, 대체적으로 모델이 각 오염물질의 일변화를 잘 모사함.

5. 모델의 적용 및 분석

1) 기존 대기관리 정책의 복합영향 분석

○ 2010년 수도권 대기환경청에서 발표한 ‘기본계획 추진실적 보고서(2007~2009)’의 2009년 사업별 저감실적을 기본으로 하여 미세먼지, 이산화질소, 오존에 대한 사업추진의 복합영향을 모델에 적용하여 분석함.

—서울시 배출량 저감실적의 경우, PM10과 SOx는 계획대비 152%, NOx는 계획대비 89%, VOC는 계획대비 60% 정도의 달성률을 보임. 수도권 전체에 대한 배출량 저감 실적에서도 PM10, NOx, SOx의 경우 대부분이 100%에 가까운 실적을 보였으나 VOC의 경우 달성률이 54%로 배출저감 실적이 저조함.

〈표 2〉 2009년 오염물질별 삭감실적

(단위 : 톤/년)

추진 저감사업		서울				인천				경기			
		PM10	NOx	SOx	VOC	PM10	NOx	SOx	VOC	PM10	NOx	SOx	VOC
수도권 대기환경 관리 시행 계획	도로이동 오염원	2,160	12,186	773	7,156	844	4,339	459	1,820	2,257	13,926	1,738	5,442
	비도로이동 오염원		0,09		0,004		0,06	540	0,003		0,34		0,02
	사업장 관리	96	4,599	2,784	3	933	18,939	9,875	16	1	21,926	17,382	156
	면오염원				18,078				10,799				40,818
추진 실적	친환경 에너지 및 도시관리	153	4,270	238	68	99	538	113	6	263	2,480	98	58
추가	비산먼지 (포장도로 청소)	718				182				890			
합계		3,127	21,055	3,795	25,305	2,058	23,816	10,987	12,641	3,411	38,332	19,218	46,474

○ 2009년 계절별(1, 4, 8, 11월) 복합영향 분석

—오염물질별 저감대책 시행 전·후를 비교한 결과, 저감대책 시행으로 PM10과 NO₂는 개선되는 것으로 나타났으나, O₃은 개선의 경향을 보이

지 않음.

○ 2009년 고농도일의 복합영향 분석

— 계절별 분석결과와 유사하게 나타남.

2) 서울의 대기질 특성 분석

(1) 오존 생성 특성

○ 서울시의 경우 정체성 고기압과 북태평양 고기압의 영향권에 있으면서 온도가 높고 구름이 적은 날에는 고농도의 오존 발생 확률이 높은 것으로 나타남.

○ 오존생성에서는 주요 전구물질인 NO_x와 VOC의 농도뿐 아니라 이들의 적정비율도 중요한 요소임.

— 일반적으로 대상지역이 VOC 농도가 낮고 NO_x 농도가 높은 환경일 경우, VOC가 오존생성의 제한요소로 작용하여 VOC를 감소시키는 것이 오존농도의 감소를 야기함(VOC-limited).

— VOC 농도가 높고 NO_x 농도가 낮은 환경의 지역에서는 NO_x가 오존생성의 제한요소가 되므로 NO_x 배출 감소가 오존농도 감소로 연결될 수 있음(NO_x-limited).

— 따라서 대상 지역에서는 어떠한 조건이 오존생성을 주도하는지 판별하는 것이 대기 중 오존농도를 감소시키기 위한 효율적인 대책 강구에 필수적임.

○ 서울시 대상의 과거 연구자료와 이 연구의 대기질 모델링 분석결과, 수도권 지역의 대기 상태는 VOC가 오존생성의 제한인자로 작용하는 경우와 NO_x가 오존생성인자의 제한인자로 작용하는 경우가 혼재되어 있으나 특히 서울과 같은 도심지역의 경우 VOC를 줄이는 것이 최고 오존농도의 감소에 효과적인 VOC-limited 특성을 보임을 알 수 있음.

- 수도권을 대상으로 주요한 VOC 화학종들에 대한 오존 생성기여도를 분석한 연구에서는 수도권에서 배출량이 많은 톨루엔(Toluene)과 자일렌(Xylene)이 오존 생성에 가장 기여도가 높은 것으로 조사되어 수도권 오존 대책 수립 시 이 두 물질을 저감할 것을 제안함.

(2) 미세먼지 생성 특성

- 서울시와 수도권을 대상으로 측정자료를 이용한 과거 수용모델 연구결과에서는 황산염, 질산염, 암모늄 등 2차 생성에 의한 미세먼지의 기여가 25% ~ 40% 정도인 것으로 추정됨.
 - 이 중 일부는 장거리이동으로 일부는 국지적인 전구물질의 배출원에 의한 2차 생성으로 나타남.
 - 황산염의 경우에는 석탄을 많이 사용하는 중국으로부터의 장거리 이동영향이 국지배출에 의한 영향보다 클 것으로 추정되고 있는 반면, 질산염은 자동차 연소배출 등 국지적 배출의 영향이 보다 큰 것으로 보고 있음.
 - 이 외에도 VOC의 광화학 반응으로 생성되는 2차 생성 유기탄소도 전체 유기탄소의 10% ~ 60% 정도이며, 특히 광화학 반응이 활발한 여름철에 2차 생성 유기탄소가 많이 배출되는 것으로 조사됨.
- 미세먼지 2차 생성 저감을 위해서는 국지배출의 영향이 큰 질산염이나 유기탄소 등의 생성을 억제하는 방향으로 관리가 진행되어야 할 것으로 판단됨. 서울을 대상으로 모델링을 이용하여 수행한 과거연구에서 NOx 저감보다는 VOC 배출 저감이 2차 생성 미세먼지 저감에 더 효과적일 것으로 제시됨.

6. 결론 및 제언

1) 대기질 관리의 방향

- 오염물질 통합관리로 대기질 관리 방향 전환이 필요함.
 - －오존, 미세먼지 등 2차 오염물질은 오염물질 각각의 환경기준 달성에 목표를 둔 ‘오염물질 개별관리’(Level 1 단계의 대기질 관리 방식)로는 효과적, 효율적 관리가 어려움.
 - －관리 대상 오염물질 상호 간의 영향까지도 고려하는 ‘오염물질 통합관리’로의 대기질 관리 접근방법의 전환이 필요함(단계적으로 대기질 관리 Level의 향상 필요).
- ‘미세먼지, NO₂, 오존 통합관리’의 관점에서 현 대기질 관리 정책들을 분석·평가한 결과, 기존의 수도권 대기환경개선을 위한 시행계획의 지속적 추진과 더불어, 특히 VOC 배출과 관련된 배출원에 대한 보다 적극적 관리가 필요할 것으로 판단됨.
 - －PM₁₀, SO_x의 1차 배출원에 대해서는 지속적으로 관리함.
 - －오존, 미세먼지, NO₂ 등 2차 생성을 야기하는 NO_x와 VOC에 대해서는 VOC와 NO_x의 배출을 함께 줄이되 VOC배출 저감을 보다 강화·시행하는 방향으로 추진함.
 - －특히 VOC 배출저감의 경우, toluene과 xylene의 배출이 많은 것으로 보고되고 있는 유기용제와 이동오염원에 중점을 둔 관리가 필요함.
- 중국 등 동아시아지역의 대기환경 변화로 인하여 장거리이동오염물질의 증가도 서울의 대기질에 상당한 영향을 미치는 것으로 조사되고 있으나 일부 고농도 현상의 경우 수도권 지역 내 배출의 영향도 적지 않은 것으로 조사됨.
 - －이는 서울시의 대기질 개선에 있어서 수도권의 공동협력이 반드시 필요함을 시사하므로, 수도권 대기질 개선을 위한 공동연구 및 노력이 지속적으로 진행되어야 할 것으로 판단됨.

2) 연구의 한계 및 향후 과제

○이 연구는 배출량 자료를 바탕으로 하는 모델을 사용하여 분석된 결과이므로 모델과 관련된 불확실성에 따른 결과해석의 한계가 존재함.

—비록 모델 결과의 정합도 분석을 통하여 모델의 신뢰도를 검증하였으나 여전히 개선이 필요한 부분이 존재함(배출량 자료, 기상자료 등 모델입력 자료의 불확실성, 2차 유기물질 생성 등 대기 중 물리·화학반응에 대한 모델의 정확한 구현의 한계 등).

〈표 3〉 대기질 통합관리를 위한 정책 방향

	주요 저감 대책의 지속적 추진	강화대책(VOC 배출관리 강화)
사업장관리	■ 대형사업장 총량관리 ■ 대기오염물질 배출허용기준 강화 ■ 저NOx버너 보급	
면배출원관리	■ 비산먼지 관리 ■ 가정용 저NOx 보일러 보급	■ 유기용제 관리 강화 - 친환경 도료 보급 - 도료 유기용제함량 단계적 강화 - 도장, 세정시설 등 비산 배출 VOC 시설 관리 기준 및 감독 강화 - 소비자 유기용제 함량 제한 강화 ■ 주유소 유증기 회수설비(stage II)설치 의무화
에너지·도시관리	■ 지역 냉난방 보급확대 ■ 신재생에너지 보급 확대 ■ 환경친화적 도시관리	
자동차관리	■ 제작차 배출허용기준 강화 ■ 저공해 자동차 보급 ■ 운행차 저공해화 ■ 노후차 조기폐차 확대 ■ 전기차 보급 확대 및 충전인프라 구축 ■ 유사 석유 사용의 단속 강화, 자동차 연료 품질 개선 ■ 건설기계 등 비도로이동오염원 관리 강화 ■ 대중교통 확충 등 친환경적 교통 수요 관리	

—하지만, 모델의 한계를 정확히 인지하며 모델을 적용하여 도출된 결과를 주의 깊게 해석하고 측정자료 분석 등의 다른 방법을 통한 결과들과 비교하는 방식으로 어느 정도 모델결과의 한계를 극복함.

○이 연구에서는 모델 결과들을 과거의 연구결과들과 비교하여 결론을 도출하여 제시하였으나 연구의 범위를 벗어나 조사되지 못한 중요한 부분에 대해서는 향후 추가적 연구가 필요함.

—VOC 주요 배출원 확인 및 관리방안에 대한 추가 연구가 필요함.

- 배출량 자료는 모델입력자료 중 가장 기초적이고 중요한 자료이며 대기관리 정책 입안의 핵심자료임.
- 이 연구를 통해 통합관리의 관점에서 중요한 관리 대상으로 확인된 VOC 배출의 경우, 배출량 자료의 배출원별 배출기여와 측정자료를 이용하여 분석된 배출원별 기여가 다소 다르다는 조사연구가 보고되고 있고 정품제품에 비해 대기오염물질 배출량이 매우 많은 것으로 알려진 유사 경유·휘발유의 사용이 증가되고 있는바, 보다 효과적인 VOC 배출관리를 위해서는 서울시 주요 VOC 배출원에 대한 정확한 확인이 필요함.

—대기오염으로 인한 건강영향을 대기질 정책 도출에 적용할 수 있는 방안의 도입도 필요함.

- 선진국의 대기질 관리 동향 파악에서 살펴본 바와 같이, 향후 대기질 관리는 위해성에 기초한 통합관리의 방향으로 진행되어야 함.
- 건강영향 모델링 중 많이 사용되고 있는 모델은 미국 EPA에서 개발된 BenMAP(Environmental Benefits Mapping and Analysis Program) 모델로 대기 오염물질의 농도 변화와 관련된 건강영향을 예측하고, 그에 따른 경제적 가치를 추정할 수 있어 대기질 관리 정책별 편익비교 뿐만 아니라 대상지역의 인구집단별·지역단위별 대기오염물질의 노출지도 작성으로 집중 관리대상 및 지역 확인이 가능함.

- 따라서, BenMAP과 같은 건강영향 평가모델 도입에 필요한 국내 대기 오염물질 농도와 질병(사망) 발생률 사이의 상관관계에 대한 지속적인 연구 및 자료의 보완이 필요하며, 이러한 국내 자료들을 적용하여 대기정책의 건강편익을 정량적으로 평가하는 방안 강구가 필요함.

목 차

제1장 서 론	3
제1절 연구배경 및 목적	3
제2절 연구내용 및 방법	10
제2장 대기관리정책 현황 분석	15
제1절 서울시 대기관리 정책의 일반현황	15
제2절 오염물질별 저감정책	17
1. 미세먼지 저감정책	17
2. NO _x 저감정책	21
3. VOC 저감정책	24
4. 황산화물(SO _x) 저감정책	28
5. 오존 저감정책	31
제3절 종합정리	32
제3장 외국의 대기질관리 사례	37
제1절 대기질 관리 방향의 변화	37
제2절 외국의 통합대기관리 사례	39
1. 미국 디트로이트시	39
2. 미국 노스캐롤라이나 & 세인트루이스	42
3. 기타 사례	43
제3절 시사점	46

제4장 대기질 모델링 체계의 구축	49
제1절 대기질 모델링 체계	49
1. 기상 모형	49
2. 배출모형	51
3. 대기질 모형	52
제2절 모델링 영역 및 사례기간	53
1. 모델링 영역	53
2. 모델링 사례기간 선정	54
제3절 모델링 입력자료	73
1. 기상모델링 입력자료 구축	73
2. 배출량 자료	75
제4절 모델링 정합도 평가	78
1. 모델링 결과 정합도 통계분석 방법	78
2. 기상 모델링 결과 정합도 평가	79
3. 대기질 모델링 결과 정합도 평가	84
 제5장 모델의 적용 및 분석	 99
제1절 대기관리정책의 복합영향 분석	99
1. 기존 대기관리정책의 배출량 저감 효과	99
2. 모델결과의 분석	103
제2절 서울시 대기질 특성분석	122
1. 분석방법	122
2. 분석결과	123
3. 서울시 대기질 특성	131

제6장 결론 및 제언	139
제1절 대기질 관리의 방향	139
제2절 연구의 한계 및 향후 과제	142
참고문헌	147
영문요약	153

표 목 차

〈표 1-1〉 연도별 입자상 오염물질 오염도 변화	4
〈표 1-2〉 연도별 가스상 오염물질 변화	5
〈표 1-3〉 오염물질별 대기환경기준 초과횟수	6
〈표 2-1〉 서울시 배출원별 미세먼지 CAPSS 배출량(2000년~2007년)	17
〈표 2-2〉 서울시 미세먼지 배출량(2009년)	18
〈표 2-3〉 미세먼지 저감정책	19
〈표 2-4〉 서울시 CNG차량 보급 실적 및 계획	20
〈표 2-5〉 서울시 운행 경유차 저공해화사업 실적 및 계획	20
〈표 2-6〉 서울시 전기차 도입 실적 및 계획	21
〈표 2-7〉 NOx 저감정책	22
〈표 2-8〉 서울시 배출원별 NOx CAPSS 배출량(2000년~2007년)	22
〈표 2-9〉 서울시 NOx 배출량(2009년)	23
〈표 2-10〉 서울시 연도별 저NOx버너 보급 실적 및 계획	24
〈표 2-11〉 VOC 저감정책	25
〈표 2-12〉 서울시 배출원별 VOC CAPSS 배출량(2000년~2007년)	25
〈표 2-13〉 서울시 VOC 배출량(2009년)	26
〈표 2-14〉 서울시의 도장시설 배출허용기준	28
〈표 2-15〉 SOx 저감정책	28
〈표 2-16〉 연도별 저황유 공급현황	29
〈표 2-17〉 차량용 연료 황함유량 기준 강화	29
〈표 2-18〉 서울시 배출원별 SOx CAPSS 배출량(2000년~2007년)	29
〈표 2-19〉 서울시 SOx 배출량(2009년)	30
〈표 2-20〉 오존 저감대책	32

〈표 2-21〉 분야별 주요 대기오염물질 저감정책	33
〈표 3-1〉 오염물질의 개별관리 전략과 통합관리 전략의 오염물질별 삭감량 비교	41
〈표 3-2〉 오염물질의 개별관리 전략과 통합관리 전략의 효과분석 : PM _{2.5} & O ₃ 농도	41
〈표 3-3〉 노스캐롤라이나 대기오염물질 저감전략 평가를 위한 변수(예시)	43
〈표 4-1〉 서울시 2009년 미세먼지 측정 자료(1월)	55
〈표 4-2〉 서울시 2009년 미세먼지 측정 자료(2월)	56
〈표 4-3〉 서울시 2009년 미세먼지 측정 자료(4월)	56
〈표 4-4〉 서울시 2009년 미세먼지 측정 자료(6월)	57
〈표 4-5〉 서울시 2009년 오존주의보 발령현황(5월)	58
〈표 4-6〉 서울시 2009년 오존주의보 발령현황(6월)	58
〈표 4-7〉 서울시 2009년 오존주의보 발령현황(7월)	59
〈표 4-8〉 서울시 2009년 오존주의보 발령현황(8월)	60
〈표 4-9〉 서울시 2009년 이산화질소 측정 자료(4월)	61
〈표 4-10〉 미세먼지 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(1월)	62
〈표 4-11〉 1월 16~19일의 기상요소 일평균(서울)	63
〈표 4-12〉 미세먼지 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(2월)	63
〈표 4-13〉 2월 4~8일의 기상요소 일평균(서울)	64
〈표 4-14〉 미세먼지와 이산화질소 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(4월)	65
〈표 4-15〉 4월 6~11일의 기상요소 일평균(서울)	65
〈표 4-16〉 오존 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(5월)	66
〈표 4-17〉 5월 7~9일의 기상요소 일평균(서울)	66

〈표 4-18〉 오존 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(6월)	67
〈표 4-19〉 6월 1~3일의 기상요소 일평균(서울)	67
〈표 4-20〉 오존 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(6월)	68
〈표 4-21〉 6월 17~19일의 기상요소 일평균(서울)	68
〈표 4-22〉 오존 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(7월)	69
〈표 4-23〉 7월 15~17일의 기상요소 일평균(서울)	69
〈표 4-24〉 오존 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(7월)	70
〈표 4-25〉 7월 29~31일의 기상요소 일평균(서울)	71
〈표 4-26〉 오존 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(8월)	72
〈표 4-27〉 8월 13~17일의 기상요소 일평균(서울)	72
〈표 4-28〉 2006년 아시아 배출량 자료	76
〈표 4-29〉 2009년 국내 배출량	77
〈표 4-30〉 기상모델링 결과 통계분석(서울 기상대)	80
〈표 4-31〉 기상모델링 결과 통계분석(인천 기상대)	80
〈표 4-32〉 기상모델링 결과 통계분석(수원 기상대)	80
〈표 4-33〉 지점별 PM ₁₀ 통계결과정리	86
〈표 4-34〉 지점별 NO ₂ 통계결과정리	87
〈표 4-35〉 지점별 O ₃ 통계결과정리	88
〈표 5-1〉 2009년 오염물질별 삭감실적	100
〈표 5-2〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 서울시 평균 농도분석	103
〈표 5-3〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 서울시 평균 농도분석 (2월 고농도일)	111
〈표 5-4〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 서울시 평균 농도분석 (4월 고농도일)	113

〈표 5-5〉	오염물질별 저감대책 적용 전·후 서울시 평균 농도분석 (5월 고농도일)	115
〈표 5-6〉	오염물질별 저감대책 적용 전·후 서울시 평균 농도분석 (6월 고농도일)	117
〈표 5-7〉	오염물질별 저감대책 적용 전·후 서울시 평균 농도분석 (7월 고농도일)	119
〈표 5-8〉	오염물질별 저감대책 적용 전·후 서울시 평균 농도분석 (8월 고농도일)	121
〈표 5-9〉	기여도 분석을 위한 지역 구분	124
〈표 5-10〉	기여도 분석을 위한 배출원 그룹별 분류(수원대 추가 배출원 포함)	124
〈표 5-11〉	서울지역 2009년 오존주의보 발령현황	125
〈표 6-1〉	대기질 통합관리를 위한 정책 방향	141

그림 목 차

〈그림 1-1〉	연평균 입자상 오염물질 변화 추이	4
〈그림 1-2〉	연평균 가스상 오염물질 변화 추이	5
〈그림 1-3〉	NO ₂ 의 24시간 평균 대기환경기준 초과횟수	6
〈그림 1-4〉	NO ₂ 의 1시간 평균 대기환경기준 초과횟수	7
〈그림 1-5〉	O ₃ 의 8시간 평균 대기환경기준 초과횟수	7
〈그림 1-6〉	O ₃ 의 1시간 평균 대기환경기준 초과횟수	7
〈그림 1-7〉	미세먼지의 24시간 평균 대기환경기준 초과횟수	8
〈그림 1-8〉	대기오염물질들의 화학적 관계	9
〈그림 1-9〉	연구의 주요내용 및 체계	10
〈그림 2-1〉	서울시 연료별 미세먼지 배출량	19
〈그림 2-2〉	서울시 연료별 NO _x 배출량	23
〈그림 2-3〉	서울시 연료별 VOC 배출량	27
〈그림 2-4〉	서울시 연료별 SO _x 배출량	31
〈그림 3-1〉	단계별 대기관리 방향	38
〈그림 3-2〉	디트로이트 사례 : 통합대기관리를 위한 평가체계	39
〈그림 3-3〉	디트로이트 사례 : 저감전략의 비교를 위한 체계	40
〈그림 3-4〉	오염물질의 개별관리 전략과 통합관리 전략의 효과분석 : 비용편익 ...	42
〈그림 3-5〉	오염물질 삭감에 따른 오존, PM _{2.5} 농도의 변화(7월사례)	44
〈그림 3-6〉	오염물질 삭감에 따른 지역별 인체무해일수의 변화	45
〈그림 4-1〉	WRF 모델의 체계	50
〈그림 4-2〉	SMOKE 구성도	51
〈그림 4-3〉	CAMx 시스템 개요	52
〈그림 4-4〉	모델링 격자 체계도	53

〈그림 4-5〉	2009년 서울시 미세먼지 일별 측정 자료(1월)	55
〈그림 4-6〉	2009년 서울시 미세먼지 일별 측정 자료(2월)	56
〈그림 4-7〉	2009년 서울시 미세먼지 일별 측정 자료(4월)	57
〈그림 4-8〉	2009년 서울시 미세먼지 일별 측정 자료(6월)	57
〈그림 4-9〉	2009년 서울시 평균 오존 농도(5월 8일)	58
〈그림 4-10〉	2009년 서울시 평균 오존 농도(6월 18일)	59
〈그림 4-11〉	2009년 서울시 평균 오존 농도(7월 16일)	59
〈그림 4-12〉	2009년 서울시 평균 오존 농도(7월 30일)	59
〈그림 4-13〉	2009년 서울시 평균 오존 농도(8월 14일)	60
〈그림 4-14〉	2009년 서울시 평균 오존 농도(8월 15일)	60
〈그림 4-15〉	2009년 서울시 이산화질소 일별 측정 자료	61
〈그림 4-16〉	USGS 지형도와 종합시스템 구축 지형도	73
〈그림 4-17〉	USGS 토지이용도와 종합시스템 구축 토지이용도	74
〈그림 4-18〉	2006년 아시아 배출량의 분포도	76
〈그림 4-19〉	2009년 WRF 모델링 결과 시계열 분석(서울 기상대)	81
〈그림 4-20〉	2009년 WRF 모델링 결과 시계열 분석(인천 기상대)	82
〈그림 4-21〉	2009년 WRF 모델링 결과 시계열 분석(수원 기상대)	83
〈그림 4-22〉	2009년 수도권 지역 기상대 측정결과와 WRF 모델링 결과 상관도 ...	84
〈그림 4-23〉	지점별 IOA	89
〈그림 4-24〉	지점별 상관계수(R)	89
〈그림 4-25〉	2009년 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 11월의 모델링 결과와 측정값 비교 시계열 및 상관도	90
〈그림 4-26〉	2009년 고농도 사례일인 5월의 모델링 결과와 측정값 비교 시계열 및 상관도	91

〈그림 4-27〉 2009년 고농도 사례일인 6월의 모델링 결과와 측정값 비교 시계열 및 상관도	92
〈그림 4-28〉 2009년 고농도 사례일인 7월의 모델링 결과와 측정값 비교 시계열 및 상관도	93
〈그림 4-29〉 2009년 고농도 사례일인 8월의 모델링 결과와 측정값 비교 시계열 및 상관도	94
〈그림 5-1〉 서울시 2009년 저감대책별 삭감계획 및 실적(PM10)	101
〈그림 5-2〉 서울시 2009년 저감대책별 삭감계획 및 실적(NOx)	102
〈그림 5-3〉 서울시 2009년 저감대책별 삭감계획 및 실적(SOx)	102
〈그림 5-4〉 서울시 2009년 저감대책별 삭감계획 및 실적(VOC)	102
〈그림 5-5〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 저감차이 분포(1, 4, 8, 11월)	104
〈그림 5-6〉 저감대책 적용 전·후의 미세먼지(PM10) 농도분포	105
〈그림 5-7〉 저감대책 적용 전·후의 이산화질소(NO ₂) 농도분포	107
〈그림 5-8〉 저감대책 적용 전·후의 오존(O ₃) 농도분포	109
〈그림 5-9〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 저감차이 분포 (2월 고농도일)	111
〈그림 5-10〉 저감대책 적용 전·후 오염물질 농도의 시계열 분석 (2월 고농도일)	112
〈그림 5-11〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 저감차이 분포(4월 고농도일)	113
〈그림 5-12〉 저감대책 적용 전·후 오염물질 농도의 시계열 분석 (4월 고농도일)	114
〈그림 5-13〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 저감차이 분포(5월 고농도일)	115
〈그림 5-14〉 저감대책 적용 전·후 오염물질 농도의 시계열 분석 (5월 고농도일)	116

〈그림 5-15〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 저감차이 분포(6월 고농도일)	117
〈그림 5-16〉 저감대책 적용 전·후 오염물질 농도의 시계열 분석 (6월 고농도일)	118
〈그림 5-17〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 저감차이 분포(7월 고농도일)	119
〈그림 5-18〉 저감대책 적용 전·후 오염물질 농도의 시계열 분석 (7월 고농도일)	120
〈그림 5-19〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 저감차이 분포(8월 고농도일)	121
〈그림 5-20〉 저감대책 적용 전·후 오염물질 농도의 시계열 분석 (8월 고농도일)	122
〈그림 5-21〉 오존 고농도 사례일에 대한 역궤적 분석	126
〈그림 5-22〉 서울지역에 대한 지역별 O ₃ 기여도 분석 결과	127
〈그림 5-23〉 서울지역에 대한 배출원별 O ₃ 기여도 분석 결과	128
〈그림 5-24〉 서울지역에 대한 국내 배출원별 O ₃ 기여도 분석 결과	129
〈그림 5-25〉 서울지역에 대한 지역별 O ₃ N, O ₃ V 기여도 분석 결과	130

제1장 서론

제1절 연구배경 및 목적

제2절 연구내용 및 방법

제1장

서론

제1절 연구배경 및 목적

우리나라는 지금까지 연료규제, 배출허용기준 강화 등 다양한 대기관리정책을 추진하여, 일산화탄소(CO), 아황산가스(SO₂) 등 일차형 대기오염물질에 대해서는 현저한 개선효과를 거두었다. 하지만, 소위 선진국형 오염물질인 미세먼지(PM), 오존(O₃), 이산화질소(NO₂)의 경우에는 다양한 대기관리개선을 위한 정책시행에도 불구하고 눈에 띄는 성과가 나타나지 않고 있는 실정이다.

정부는 기존의 대기관리정책에 대한 한계를 인식하고, 2003년 ‘수도권 대기환경 개선 특별대책’과 2005년 ‘수도권 대기환경관리 기본계획’을 수립하였다. 이 계획에서는 2014년까지 수도권의 미세먼지와 이산화질소의 농도를 일본, 파리 등 선진국 대도시의 수준까지 개선하는 것을 목표로 하고 있으며, 이를 위하여 저공해자동차 보급, 운행자동차 배출가스 관리 강화 등에 많은 예산과 노력을 투입하고 있다.

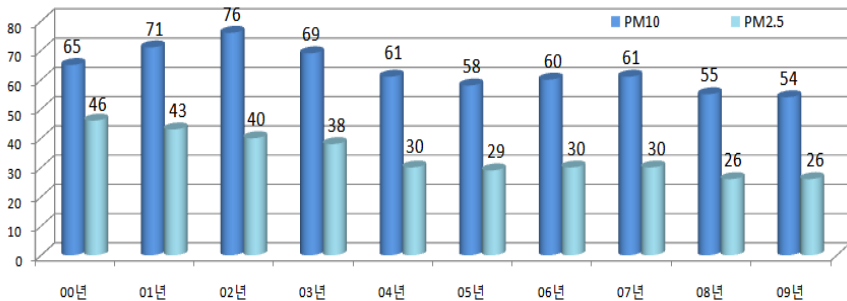
<표 1-1> ~ <표 1-3>과 <그림 1-1> ~ <그림 1-7>는 서울시에서 측정된 각 대기오염물질 연평균농도의 변화 및 단기 환경기준농도의 초과횟수에 대한 연도별 변화경향을 보여준다. <그림 1-1>은 연도별 입자상 오염물질의 변화로 PM10과 PM2.5 농도 추세를 나타내고 있다. <그림 1-2>는 연평균 가스상 오염

물질의 변화를 보여주는 것으로 이산화질소는 연도별 변화가 크게 나타나지 않고 '09년에 다소 감소한 것으로 나타났다. 아황산가스는 대기오염 저감정책의 시행에 따라 환경기준을 만족하는 낮은 농도를 나타내고 있다. 오존의 경우 '06년부터 증가하는 경향을 보이고 있고, 일산화탄소는 연료사용량의 증가에도 불구하고 연소기술의 발전에 의해 환경기준보다 현저히 낮은 농도를 유지하고 있는 것으로 나타났다.

〈표 1-1〉 연도별 입자상 오염물질 오염도 변화

(단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	00년	01년	02년	03년	04년	05년	06년	07년	08년	09년
PM10	65	71	76	69	61	58	60	61	55	54
PM2.5	46	43	40	38	30	29	30	30	26	26



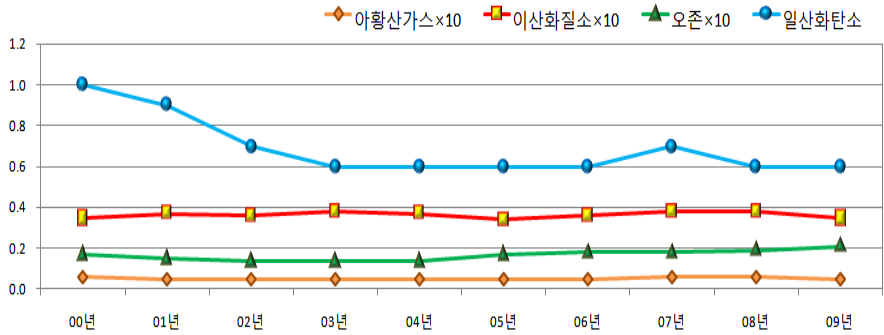
〈그림 1-1〉 연평균 입자상 오염물질 변화 추이

<표 1-3>은 물질별 대기환경기준을 초과한 횟수를 나타낸다. 이산화질소, 오존, 미세먼지는 대기환경기준을 초과하고 있으며, 일산화탄소와 아황산가스는 초과하는 사례가 없는 것으로 나타났다. 미세먼지의 경우 ‘수도권 대기환경관리 기본계획’의 다양한 사업 추진의 결과로 최근 감소하는 추세를 보이고 있으나 황사와 같은 자연적 현상에 의한 경우를 제외하더라도 여전히 환경기준농도를 초과하고 있다. 이산화질소 역시 환경기준을 초과하는 사례가 꾸준히 발생

〈표 1-2〉 연도별 가스상 오염물질 변화

(단위 : ppm)

구 분	아황산가스×10	이산화질소×10	일산화탄소	오존×10
00년	0.06	0.35	1.0	0.17
01년	0.05	0.37	0.9	0.15
02년	0.05	0.36	0.7	0.14
03년	0.05	0.38	0.6	0.14
04년	0.05	0.37	0.6	0.14
05년	0.05	0.34	0.6	0.17
06년	0.05	0.36	0.6	0.18
07년	0.06	0.38	0.7	0.18
08년	0.06	0.38	0.6	0.19
09년	0.05	0.35	0.6	0.21



〈그림 1-2〉 연평균 가스상 오염물질 변화 추이

하고 있으나 초과횟수가 서서히 감소하는 개선의 경향을 보이고 있다. 오존의 경우 단기환경기준(1시간, 8시간)을 초과하는 사례가 광화학 반응이 활발한 여름철에 꾸준히 발생하고 있으며, 미세먼지와 이산화질소와는 달리 단기기준 초과횟수가 증가하는 경향을 나타내고 있다.

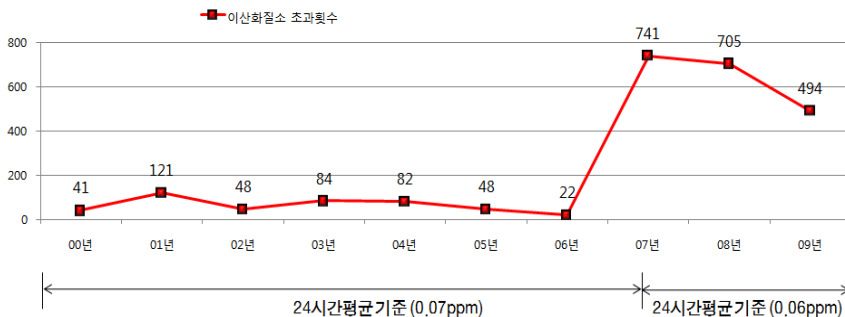
〈표 1-3〉 오염물질별 대기환경기준 초과횟수

구분	00년	01년	02년	03년	04년	05년	06년	07년	08년	09년	10년
NO ₂ 초과횟수 (24시간 평균)	41	121	48	84	82	48	22	741	705	494	326
NO ₂ 초과횟수 (1시간 평균)	35	67	16	48	11	9	6	1,179	1,037	601	202
O ₃ 초과횟수 (8시간 평균)	192	282	192	304	228	539	528	767	656	1,050	1,312
O ₃ 초과횟수 (1시간 평균)	335	128	132	52	122	354	155	558	385	564	565
미세먼지 초과횟수 (24시간 평균)	270	511	367	441	157	148	127	1,185	748	713	377

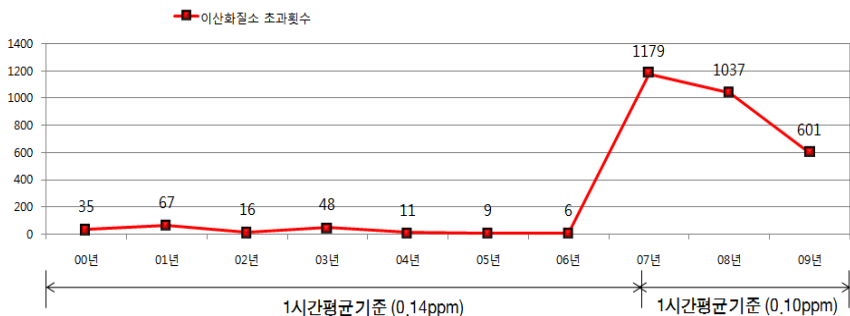
자료 : 대기환경연보(환경부, 00~09년), 2010년 11월까지 초과횟수(서울시보건환경연구원)

주 : 서울시 대기환경기준

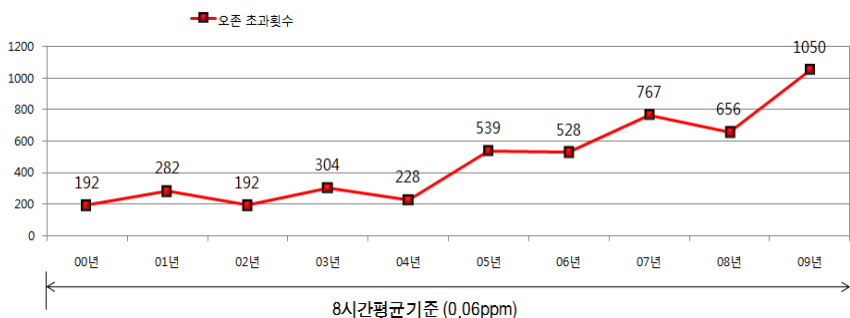
- 1) NO₂는 2000년부터 2006년까지 1시간 평균 0.14ppm, 24시간 평균 0.07ppm, 연평균 0.04ppm이며, 2007년부터 1시간 평균 0.10ppm, 24시간 평균 0.06ppm, 연평균 0.03ppm으로 강화됨.
- 2) O₃는 1시간 평균 0.10ppm, 8시간 평균 0.06ppm임.
- 3) 미세먼지는 2000년부터 2006년까지 24시간 평균 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 연평균 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 2007년부터 24시간 평균 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ppm, 연평균 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 강화됨.



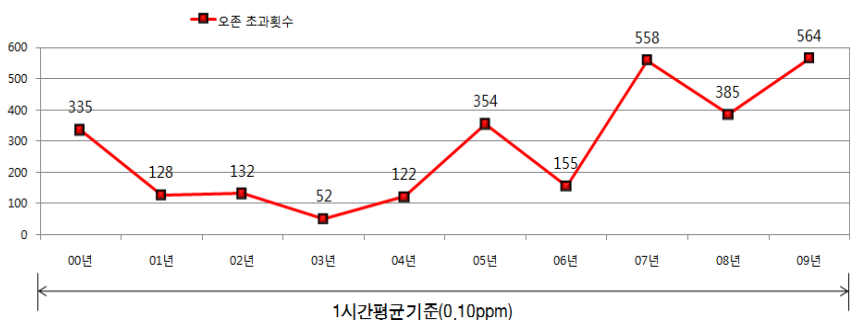
〈그림 1-3〉 NO₂의 24시간 평균 대기환경기준 초과횟수



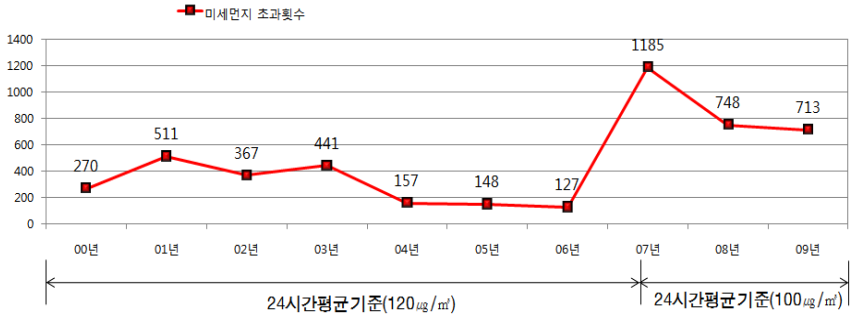
〈그림 1-4〉 NO₂의 1시간 평균 대기환경기준 초과횟수



〈그림 1-5〉 O₃의 8시간 평균 대기환경기준 초과횟수



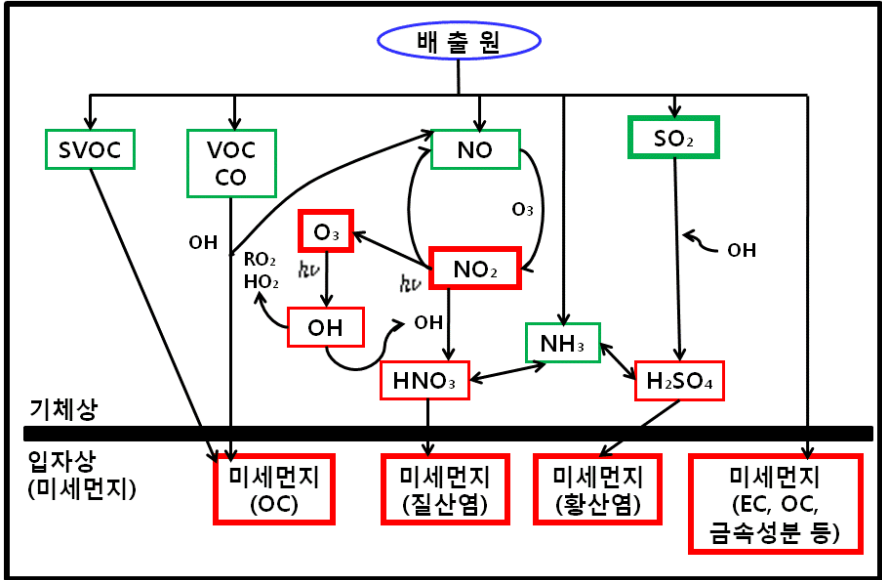
〈그림 1-6〉 O₃의 1시간 평균 대기환경기준 초과횟수



〈그림 1-7〉 미세먼지의 24시간 평균 대기환경기준 초과횟수

미세먼지, 이산화질소, 오존 등 선진국형 대기오염물질의 경우 일차형 대기오염물질과는 다르게 대기 중에서의 생성 및 소멸과정들이 복잡·다양하여 배출원의 배출량 저감이 대기 중의 농도 감소로 나타나는 선형적 특성을 보이지 않는다. 또한, <그림 1-8>에서 볼 수 있듯이 일부 미세먼지 성분, 오존, 이산화질소는 화학적으로 생성·소멸의 과정이 상호 밀접하게 연계되어 있다. 이러한 이유로 한 대기오염물질을 타깃으로 하는 대기관리의 정책이 다른 오염물질의 농도변화에도 긍정적 혹은 부정적 영향을 미칠 가능성이 있음을 짐작할 수 있다.

따라서 이러한 대기오염물질들 사이의 생성, 반응, 소멸 등 일련의 과정들을 숙지하고 복합적 영향을 분석하는 것이 효과적, 효율적 대기관리 정책의 도출에 중요한 단계가 될 수 있다. 하지만 지금까지 대부분의 대기관리 정책들은 각각의 대기오염물질을 독립적, 개별적 물질로 보고, 각 대기오염물질을 저감하는 관리방안들이 다른 오염물질의 농도에 미칠 수 있는 영향은 분석의 대상에서 제외되어 있었다. 단지, 대기오염물질 저감정책을 통해 한 배출원으로부터 저감 가능한 오염물질들의 배출량 정도만을 산출하는 수준에 머무르고 있다. 하지만, 오염물질의 배출량 저감이 대기 중에서 해당 오염물질의 농도 감소와 직접적으로 연관되지 않을 수도 있으므로 배출저감 정도만으로는 다른 오염물질에 미치는 영향을 파악하기에는 무리가 있다.



자료 : 미국 EPA, Multipollutant Report: Technical concepts & Examples, 2008

〈그림 1-8〉 대기오염물질들의 화학적 관계

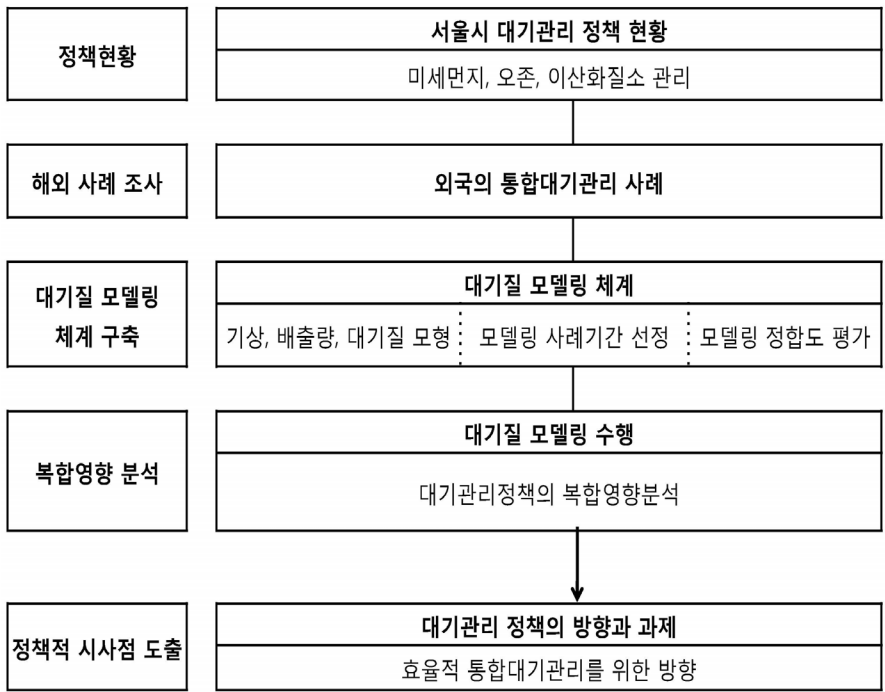
과거에는 대기 중에서 일어나는 복잡한 화학적, 물리적 프로세스를 복합적으로 연구할 수 있는 방법이 전무하였으나, 컴퓨터 하드웨어의 급속한 발전으로 대기 중의 현상을 모사하고 조사하는 것이 현재는 가능하게 되었다. 또한, 지속적인 모델링을 위한 하드웨어의 개선 외에도 연구를 통해 확인되는 물리적, 화학적 이론들이 모델에 적용되면서 모델의 정합도가 상당부분 개선되고 있어, 선진 도시나 국가에서는 대기질 관리를 위하여 모델링 체계를 적극적으로 이용하고 있다.

이러한 배경하에 이 연구는 서울시에서 전개되고 있는 대기관리 정책들이 여러 오염물질의 농도에 미치는 복합영향을 모델링 시스템을 도입하여 분석·평가하고, 개선방안을 모색하고자 한다. 또한 이를 통해 효과를 극대화하고, 효율성을 제고할 수 있는 서울시 대기관리의 방향을 제시하고자 한다.

제2절 연구내용 및 방법

연구의 주요내용은 서울시 대기관리 정책현황 분석으로 문제점을 진단하고, 해외사례 조사를 통한 외국의 통합대기관리의 현황을 파악하며, 대기질 모델링 체계 구축과 이를 활용하여 대기관리 정책의 복합영향을 진단·분석함으로써 향후 서울시의 효과적, 효율적 대기관리 정책방향을 도출하기 위한 5개 부분으로 구성되어 있다. <그림 1-9>는 이 연구의 주요내용 및 체계를 보여준다.

앞서 밝힌 바와 같이, 대기 중의 복잡한 프로세스를 모사하기 위하여 최신의 기상, 배출, 대기질 모형을 도입하였으며, 이들의 프로세스를 위한 입력자료들도 가장 최근에 개선된 자료들을 사용하여 입력자료로 인한 모델링의 오류들을



<그림 1-9> 연구의 주요내용 및 체계

최소화하고자 하였다. 서울시의 대기질은 서울시 내부의 배출원 및 오염물질 만으로는 해석에 한계가 있으므로 공간적 범위를 수도권으로 확대하여 조사하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 따라서 이 연구의 주요한 분야인 모델링의 공간적 범위는 서울을 포함한 수도권으로 한정하되, 결과분석은 서울시를 중심으로 진행하였다.

제2장 대기관리정책 현황 분석

제1절 서울시 대기관리 정책의 일반현황

제2절 오염물질별 저감정책

제3절 종합정리

제2장

대기관리정책 현황 분석

제1절 서울시 대기관리 정책의 일반현황

서울은 동쪽(아차산)과 북쪽(북한산), 남쪽(관악산)이 산으로 둘러싸여 있고, 서쪽은 개방되어 있어 중국 쪽에서의 대기오염물질 유입이 원활한 반면 대기의 확산이 어려운 지형적 구조를 가지고 있다. 또한, 인구의 증가에 따른 에너지의 사용량 증가와 자동차 수요량의 증가가 서울시 대기질을 악화시키는 요소로 작용하고, 중국의 급속한 산업화와 잦은 황사도 서울시의 대기오염을 가중시키는 원인으로 볼 수 있다.

제1장에서 살펴본 바와 같이, 청정연료 사용, 저공해 자동차의 보급, 자동차의 수요관리 등 각종 대기오염 저감정책으로 서울시의 아황산가스와 일산화탄소 농도는 대기환경기준을 만족하는 양호한 상태를 유지하고 있으나 이산화질소, 미세먼지, 오존은 환경기준을 초과하는 사례가 여전히 발생하고 있다.

서울시는 2006년 ‘수도권 대기환경개선기본계획 추진을 위한 서울특별시 시행계획’을 수립하였다. 이 계획에는 2007년부터 2014년까지 도로이동오염원, 사업장, 에너지 등 광범위한 분야에 걸친 오염물질 배출량 저감계획이 포함되어 있으며, 계획의 추진을 통해 미세먼지와 이산화질소의 대기 중 농도를 개선

하고자 노력하고 있다. 제작차 배출허용기준 강화, 자동차 연료품질 기준 강화, 유기용제 함량기준 강화 등 국가차원의 규제를 통한 오염물질 배출저감 계획 외에 서울시가 주체가 되어 다양한 대기오염물질별 1차 배출원에 대한 저감대책들을 계획하고 시행하고 있다. <그림 1-8>에서 살펴본 바와 같이, 오존은 NO_x와 VOC의 반응에 의해서, 일부 미세먼지는 NO_x, VOC, SO_x, NH₃의 반응에 의해서, NO₂는 NO의 반응에 의해서 2차적으로 생성되는 물질이므로 오존, 미세먼지, NO₂의 전구물질이 되는 VOC, SO_x, NO_x의 1차 배출원을 제어하는 것이 필요하다. 즉, 오존 관리는 VOC와 NO_x 저감대책을 통해, 미세먼지는 미세먼지 1차 배출원뿐 아니라 2차적으로 생성되는 전구물질인 VOC, NO_x, SO_x 등의 관리를 통해 이루어진다고 할 수 있다.

비록 오존, 일부 미세먼지 등이 2차적으로 생성되나 지금까지의 대기관리 정책은 2차 생성과정이 오염물질 상호 간에 작용하는 복합적 영향을 고려하지 않고 단순히 1차 배출원의 배출량을 저감하는 정책중심으로 진행되어 왔다. 하지만, 2차적으로 생성되는 오염물질과 전구물질들의 비선형적 관계 때문에, 1차 오염물질 저감이 반드시 2차 생성 오염물질의 감소로 연결되지 않을 수도 있다. 예를 들면, NO_x 배출량 저감이 NO₂는 감소시킬 수 있으나 오존이나 미세먼지의 농도는 오히려 증가시키는 현상이 발생할 수도 있다. 이에 따라, 2차적으로 생성되는 오염물질의 관리에 있어서는 기존처럼 단순히 각종 1차 배출원의 배출량을 저감하는 접근 방법에는 한계가 있으며, 효과적 관리를 위해서는 과학적 분석을 통한 정책별 조정과정이 필요하다.

따라서 이 장에서는 서울시의 대기오염물질 저감정책들이 NO₂, 미세먼지, 오존 등 상호 간에 미치는 복합영향을 분석하기 위하여, 오염물질별 기존의 주요 저감정책을 조사·정리하였다.

제2절 오염물질별 저감정책

1. 미세먼지 저감정책

미세먼지는 대기 중에서 입자의 크기와 구성성분에 따라 발생원이 복합적이고 광범위하여 문제해결의 어려움이 가장 큰 대기오염물질이다. 미세먼지의 발생원은 크게 자연적인 것과 인위적인 것으로 구분할 수 있다. 자연적으로는 토양 및 바위의 침식 등과 같은 생물학적인 오염원이 있고, 인위적으로는 경유 차량·휘발유 차량의 배출, 산업보일러, 석탄연소 발전소, 목재연소, 광산 및 건축 활동 등이 있다.

〈표 2-1〉 서울시 배출원별 미세먼지 CAPSS 배출량(2000년~2007년)

(단위 : 톤/년)

구분	00년	01년	02년	03년	04년	05년	06년	07년
에너지 산업	16 (16)	18 (18)	13 (13)	14 (14)	13	14	7	13
비산업	445 (445)	427 (428)	341 (342)	312 (313)	324	367	363	278
제조업	7 (7)	9 (10)	5 (7)	5 (7)	3	3	4	5
생산공정	-	-	-	-	-	0,013	-	-
도로 이동	2,757 (2,371)	3,509 (3,383)	3,399 (3,485)	3,430 (3,452)	3,508	3,009	2,690	1,911
비도로 이동	521 (521)	566 (566)	875 (875)	916 (916)	570	913	349	1,652
폐기물 처리	3 (3)	3 (3)	4 (4)	5 (5)	5	4	19	22
기타 면오염원	-	-	-	-	-	-	-	38
합계	3,750 (3,364)	4,533 (4,408)	4,637 (4,725)	4,683 (4,708)	4,424	4,311	3,433	3,920

주 : ()는 2003년 기준배출량(산정방법론 변경전 배출량)임.

비산먼지에서 배출되는 배출량은 제외함.

본 연료별 배출량은 연료연소에 의해서만 산정되는 배출량으로 시도별, 오염물질별, 연료별 총배출량과는 차이가 있음.

자료 : 국립환경과학원, 「대기오염물질 배출량 연보(2007)」, 2010.03

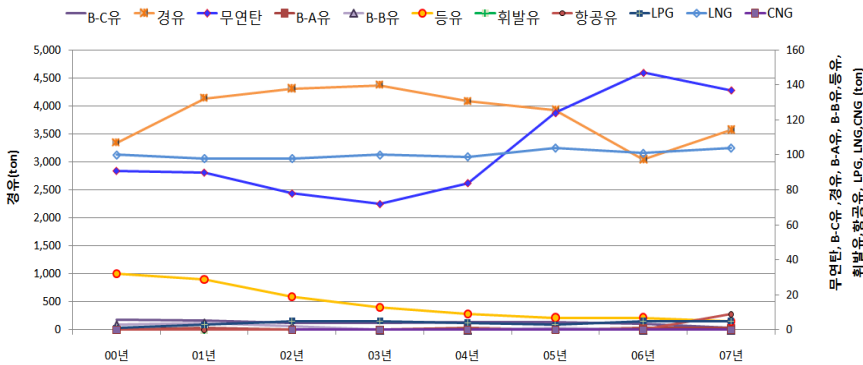
미세먼지는 발생원에서 1차적 생성 이외에 대기 중의 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx), VOC, 암모니아 등의 기체상 물질이 황산, 황산암모늄 및 질산 등으로 전환되는 과정에서 2차적으로도 생성된다. 서울시는 미세먼지 감축을 위해서 1차 배출원의 배출량이 많은 순서로 미세먼지 배출량을 줄여가고 있다. 국가가 추진하는 제작차 배출허용기준 강화 및 자동차연료품질 기준 강화와 서울시

〈표 2-2〉 서울시 미세먼지 배출량(2009년)

구분		서울시 배출원별 배출량(톤/년)	
		PM10	PM2.5
연료연소(CAPSS)	에너지산업 연소	13	11
	비산업 연소	278	250
	제조업 연소	5	5
	생산공정	0	0
	에너지수송 및 저장	0	0
	유기용제 사용	0	0
	도로이동오염원	1,687	1,528
	비도로이동오염원	1,202	1,128
	폐기물처리	22	20
	농업	0	0
	기타 먼오염원	38	34
비산먼지 추가	도로비산(포장)	5,528	793
	도로비산(비포장)	25	3
	건설활동	1,548	155
	건설폐기물 재활용	31	3
	농업활동	8	2
	나대지	1,803	270
	축산활동	0	0
생물성 연소 추가	고기구이	513	460
	노천소각(폐기물)	35	32
	노천소각(곡류)	4	4
	숯가마	109	103
	아궁이	0	0
	화목난로	75	71
총합계		12,924	4,873

자료 : 서울시, 「서울시 대기 중 미세먼지의 상세모니터링을 통한 미세먼지 특성조사 2차 연구」, 2010

가 주체가 되어 추진하는 저공해자동차 보급, 운행경유차의 저공해화, 교통량 감축사업이 중점적으로 진행되고 있다. 또한, 비산먼지의 저감을 위하여 도로 청소, 공사장 점검 등의 관리도 시행되고 있다. 미세먼지 저감대책에 관해 <표 2-3>에 간략하게 요약하였다.



주 : 본 연료별 배출량은 연료연소에 의해서만 산정되는 배출량으로 시도별, 오염물질별, 연료별 총배출량과 차이가 있음.
 자료 : 국립환경과학원, 「대기오염물질 배출량 연보(2007)」, 2010.03

〈그림 2-1〉 서울시 연료별 미세먼지 배출량

〈표 2-3〉 미세먼지 저감정책

구분	내용
자동차	- 제작차배출허용기준 강화 - 자동차 연료품질기준 강화 - 운행경유차 저공해화(배출가스 저감장치 부착, 조기폐차, LPG 개조) - 저공해자동차 보급(CNG 차량, 전기자동차 도입 등) - 대중교통 이용 활성화와 승용차 이용 자제 - 배출가스 단속 및 운행차 배출가스 정밀검사
도로변 먼지	- 노폭 12m 이상 도로인도에 대하여 진공흡입청소차와 물청소차를 이용해 청소 - 토사 유출방지과 먼지 발생이 적은 투수콘크리트 보도블록 교체
공사장 사업장 먼지	- 건물 건설공사장이나 토목공사장 등 대형공사장에 대한 분기 1회 이상 지도 점검 - 각종 공사설계 및 허가 시 공사시방서에 먼지저감을 위한 세부이행사항을 명시하여 시공토록 함
생활주변 먼지	- 공터와 나대지에 꽃이나 나무심기를 추진하여 녹지량 증대 - 매일 하루를 우리 동네 깨끗이 하는 날로 운영하여 건물 옥상의 잔재물과 집앞 공터에 방치된 쓰레기를 제거

CNG차량 보급사업은 2000년, 매연저감장치 부착 등 경유차 저공해화 사업은 2004년에 시작하여 지속적으로 확대 실시되고 있다. 또한, 버스, 승용차, 택시, 이륜차 등에 2014년까지 전기차의 도입을 계획하고 있다.

〈표 2-4〉 서울시 CNG차량 보급 실적 및 계획

구분	연도	CNG 차량 보급대수		
		시내버스	마을버스	청소차
실적	2000년	43	-	-
	2001년	367	-	-
	2002년	929	-	-
	2003년	1,247	-	10
	2004년	1,998	18	20
	2005년	2,384	5	10
	2006년	3,334	71	11
	2007년	4,850	132	81
	2008년	5,414	261	114
	2009년	6,759	214	147
계획	2010년	7,600	80	107
	2011년	-	150	60
	2012년	-	160	52
	2013년	-	-	-
	2014년	-	-	-

자료 : 서울시, 서울시 연차별 대기질 개선사업 추진실적 및 계획

〈표 2-5〉 서울시 운행 경유차 저공해화사업 실적 및 계획

구분	연도	운행 경유차 저공해화 사업			
		LPG 개조	DPF 부착	DOC 부착	조기폐차
실적	2004	585	280	150	-
	2005	2,814	7,789	1,490	37
	2006	8,714	6,854	22,961	609
	2007	14,285	10,626	23,575	5,805
	2008	16,452	6,566	3,230	9,851
	2009	14,027	10,024	1,685	9,130
계획	2010	11,000	9,800	1,000	10,000
	2011	4,650	24,924	-	5,473
	2012	4,747	24,315	-	6,073
	2013	5,001	24,315	-	6,166
	2014	4,347	21,256	-	6,341

자료 : 서울시, 서울시 연차별 대기질 개선사업 추진실적 및 계획

〈표 2-6〉 서울시 전기차 도입 실적 및 계획

구분	연도	전기차 도입			
		버스	승용차	택시	이륜차
실적	2004	-	-	-	-
	2005	-	-	-	139
	2006	-	-	-	39
	2007	-	-	-	3
	2008	-	-	-	50
	2009	-	5	10	7
계획	2010	17	30	10	228
	2011	50	300	50	500
	2012	150	1,500	540	1,000
	2013	300	3,500	2,020	2,000
	2014	400	9,000	3,400	5,005

자료 : 서울시, 서울시 연차별 대기질 개선사업 추진실적 및 계획

2. NOx 저감정책

질소산화물은 NO₂, 오존, 미세먼지 생성의 전구물질로서, 서울시의 경우 도로, 비도로 이동오염원, 비산업연소시설이 NOx의 주요한 배출원으로 작용하고 있다.

국가차원에서 추진하고 있는 제작차 배출허용기준 강화, 서울시에서 추진하는 저공해자동차, 운행경유차 저공해화사업이 주요한 NOx 저감사업이다. 또한, 대형사업장에 대한 배출총량 관리제의 도입과 발전시설 및 대형소각시설의 배출허용기준 강화, 2007년부터 발전시설에 대한 탈질시설 설치·가동 등을 통해 질소산화물의 배출량을 저감하였다.

에너지 관리부분에서 청정연료 사용 의무화, 폐기물, 지열 등 신재생에너지 보급 확대, 지역난방 보급 확대사업을 진행하고 있으며, 공동주택, 중소기업 등에 저NOx버너 설치 지원사업으로 NOx 배출 저감을 꾀하고 있다.

〈표 2-7〉 NOx 저감정책

구분	내용
자동차	- 제작차 배출허용기준 강화 - 자동차 연료품질기준 강화 - 운행경유차 저공해화(배출가스 저감장치 부착, 조기폐차, LPG 개조) - 저공해자동차 보급(CNG 차량, 전기자동차 도입 등) - 대중교통 이용 활성화와 승용차 이용 자제 - 배출가스 단속 및 운행차 배출가스 정밀검사
사업장	- 발전시설 및 대형 소각시설의 배출허용기준 강화 - 발전시설에 탈질시설을 설치·가동 - 대형사업장 총량관리 - 소형소각시설 폐쇄 및 이전
중소기업, 공동주택, 업무상업용 건물	- 저NOx버너 설치 지원(2008년부터)
청정연료사용 확대	- 업무용 시설에 청정연료 사용 의무화 - 일반주택의 도시가스(LNG)보급 확대 - 신재생에너지 사용 확대
지역난방 공급확대	- 지역난방 실시; 열병합발전소(지역난방공사) 등에서 온수를 각 세대로 공급

〈표 2-8〉 서울시 배출원별 NOx CAPSS 배출량(2000년~2007년)

(단위 :톤/년)

구분	00년	01년	02년	03년	04년	05년	06년	07년
에너지 산업	2,276 (946)	2,609 (1,261)	884 (549)	977 (604)	1,012	1,062	399	789
비산업	23,384 (18,571)	21,731 (17,014)	20,638 (16,106)	20,160 (15,544)	20,037	20,744	20,295	19,625
제조업	1,017 (800)	1,451 (1,535)	1,110 (1,492)	1,154 (1,534)	712	1,346	991	1,393
생산공정	-	-	-	-	-	1	-	-
도로 이동	54,315 (49,432)	64,157 (62,618)	64,190 (65,403)	64,372 (65,591)	65,625	59,333	56,040	52,010
비도로 이동	14,907 (14,907)	15,068 (15,068)	22,713 (22,713)	23,875 (23,875)	14,941	23,937	9,161	38,234
폐기물 처리	693 (693)	692 (692)	817 (817)	1,159 (1,159)	1,222	835	1,007	1,014
기타 면오염원	-	-	-	-	-	-	-	22
합계	96,591 (85,348)	105,708 (98,187)	110,354 (107,082)	111,698 (108,307)	103,549	107,257	87,893	113,086

주 : ()는 2003년 기준배출량(산정방법론 변경전 배출량)임.

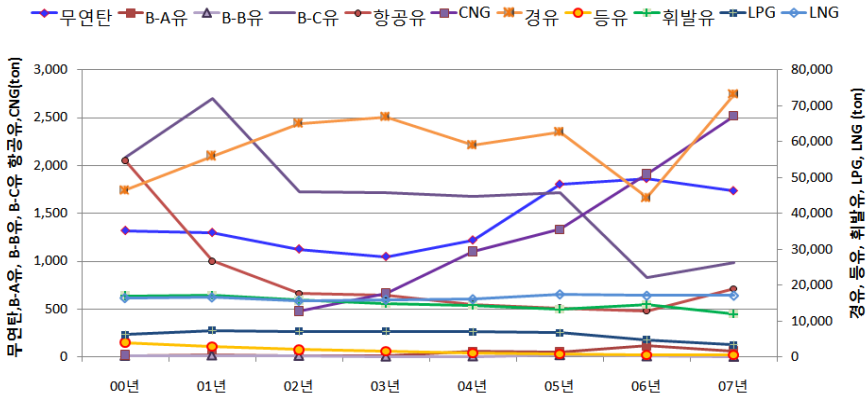
본 연료별 배출량은 연료연소에 의해서만 산정되는 배출량으로 시도별, 오염물질별, 연료별 총배출량과 차이가 있음.

자료 : 국립환경과학원, 「대기오염물질 배출량 연보(2007)」, 2010.03

〈표 2-9〉 서울시 NOx 배출량(2009년)

구분		서울시 배출원별 배출량(톤/년)
		NOx
연료연소(CAPSS)	에너지산업 연소	789
	비산업 연소	25,142
	제조업 연소	1,393
	생산공정	0
	에너지수송 및 저장	0
	유기용제 사용	0
	도로이동오염원	50,748
	비도로이동오염원	30,183
	폐기물처리	1,014
	농업	0
	기타 면오염원	22
생물성 연소 추가	고기구이	0
	노천소각(폐기물)	6
	노천소각(곡류)	2
	숯가마	7
	아궁이	0
	화목난로	10
총합계		109,314

자료 : 서울시, 「서울시 대기 중 미세먼지의 상세모니터링을 통한 미세먼지 특성조사 2차 연구」, 2010



주 : 본 연료별 배출량은 연료연소에 의해서만 산정되는 배출량으로 시도별, 오염물질별, 연료별 총배출량과 차이가 있음.

자료 : 국립환경과학원 「대기오염물질 배출량 연보(2007)」, 2010.03

〈그림 2-2〉 서울시 연료별 NOx 배출량

저NOx버너는 대기오염물질인 질소산화물을 일반버너에 비해 30~50% 저감하고, 연료절감 효과도 3% 정도인 것으로 나타났다. 서울시는 '08년부터 저NOx버너 설치 지원사업을 추진해오고 있다.

〈표 2-10〉 서울시 연도별 저NOx버너 보급 실적 및 계획

구분	실적		계획				
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
대수	210	425	512	400	450	500	550

자료 : 서울특별시, 연차별 대기질개선사업 추진실적 및 계획(2010.7월 기준)

3. VOC 저감정책

휘발성유기화합물인 VOC는 상온, 상압에서 기체상태로 존재하는 모든 유기성물질을 총칭한다. 대기환경보전법에서 “탄화수소류 중 석유화학제품 유기용제 기타물질로 환경부장관이 관계중앙행정기관의 장과 협의하여 고시하는 물질”로 정의하고 있으며, 현재 환경부고시 제2001-36호(2001.3.8)에 따라 휘발유, 벤젠, 부탄 등 37개 물질이 선정 고시되어 있다. 최근 자동차의 급격한 증가와 유기용제의 사용확대로 배출량이 크게 증가하는 추세이고, 대기 중에서 광화학 반응을 통해 오존, 미세먼지를 생성시키는 원인물질이다.

국가차원의 제작차 배출허용기준 강화, 도료의 유기용제 함량 제한 외에 서울시가 주체적으로 추진하고 있는 저감장치 부착사업으로 VOCs 발생을 저감하고 있다. 또한, 서울시는 VOC를 다량 배출하는 사업장인 자동차정비 공장 등 도장시설에 대해 VOC 배출허용기준을 국가보다 9개월 앞당겨 2004년 4월 1일부터 적용하였고, 적정한 VOC 방지시설을 설치하도록 의무화한 서울특별시 대기오염물질배출허용기준 등에 관한 조례를 개정하여 시행 중이다. 또한, 주유소의 휘발유 저장시설(20m³ 이상)에 대해서도 2004년 6월 30일까지 VOC 배출시설 설치를 신고하도록 하고, 2004년 12월 31일까지 VOC 회수시설을 설치하도록 하는 등 관리를 강화하였다. 이 외에도 세정시설, 도장시설 등에 대한 비

산배출관리와 아스팔트 포장방법 개선으로 VOC 배출을 줄이고 있다.

〈표 2-11〉 VOC 저감정책

구분	내용
자동차	- 제작차 배출허용기준 강화 - 자동차 연료품질기준 강화 - 운행경유차 저공해화(배출가스 저감장치 부착, 조기폐차, LPG 개조) - 저공해자동차 보급(전기자동차 도입 등) - 대중교통 이용 활성화와 승용차 이용 자제 - 배출가스 단속 및 운행차 배출가스 정밀검사
도장, 세정 시설 등	- 도장시설의 VOC 배출허용기준 강화 - 세정, 도장시설의 비산배출 관리
주유소	- 휘발유 저장시설(20m 이상)에 대해 VOC 배출시설 설치신고 의무화 - VOC 회수시설을 설치하도록 관리 강화
기타	- 환경친화형 도로 보급(유기용제 함량 기준 강화) - 아스팔트 포장방법 개선

〈표 2-12〉 서울시 배출원별 VOC CAPSS 배출량(2000년~2007년)

(단위 : 톤/년)

구분	00년	01년	02년	03년	04년	05년	06년	07년
에너지 산업	99 (99)	97 (97)	99 (99)	85 (85)	79	87	65	109
비산업	827 (827)	821 (821)	835 (835)	837 (837)	843	874	897	872
제조업	36 (36)	55 (54)	50 (50)	50 (50)	33	65	46	64
생산공정	-	-	-	-	0,04	0,08	-	-
에너지수송 및 저장	3,995 (3,995)	3,671 (3,671)	3,841 (3,841)	3,617 (3,617)	3,344	3,364	3,347	3,829
유기용제 사용	49,311 (47,583)	55,796 (53,835)	55,350 (52,862)	51,648 (49,613)	45,234	45,877	39,261	63,978
도로 이동	28,560 (22,294)	29,098 (27,829)	26,486 (27,694)	25,111 (27,694)	24,226	22,623	22,879	17,548
비도로 이동	1,715 (1,715)	1,774 (1,774)	2,733 (2,733)	2,846 (2,846)	1,769	2,815	1,072	4,751
폐기물 처리	834 (834)	455 (455)	919 (919)	1,949 (1,949)	2,167	266	575	229
기타 면오염원	-	-	-	-	-	-	-	77
합계	85,375 (77,382)	91,768 (88,538)	90,313 (89,034)	86,145 (86,693)	77,695	75,970	68,142	91,459

주 : () 는 2003년 기준배출량(산정방법론 변경전 배출량)임.

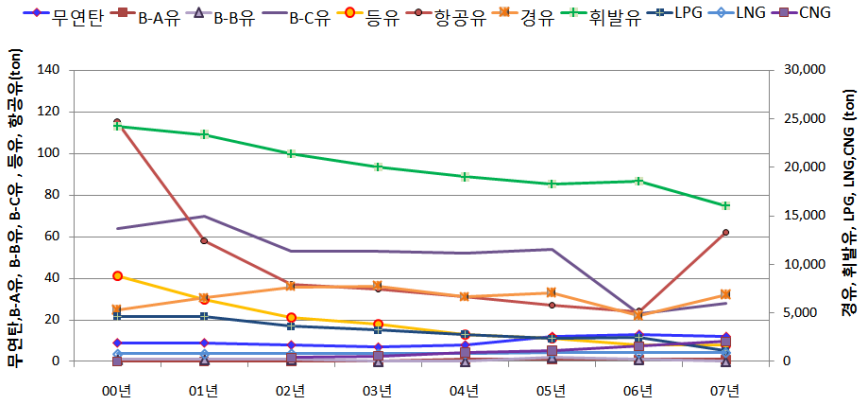
식생에서 배출되는 배출량은 제외함. 본 연료별 배출량은 연료연소에 의해서만 산정되는 배출량으로 시도별, 오염물질별, 연료별 총배출량과 차이가 있음.

자료 : 국립환경과학원, 「대기오염물질 배출량 연보(2007)」, 2010.03

〈표 2-13〉 서울시 VOC 배출량(2009년)

구분		서울시 배출원별 배출량(톤/년)
		VOC
연료연소(CAPSS)	에너지산업 연소	109
	비산업 연소	872
	제조업 연소	64
	생산공정	0
	에너지수송 및 저장	3,829
	유기용제 사용	63,978
	도로이동오염원	20,218
	비도로이동오염원	2,969
	폐기물처리	229
	농업	0
	기타 면오염원	77
비산먼지 추가	도로비산(포장)	0
	도로비산(비포장)	0
	건설활동	0
	건설폐기물 재활용	0
	농업활동	0
	나대지	0
	축산활동	0
생물성 연소 추가	고기구이	48
	노천소각(폐기물)	8
	노천소각(곡류)	3
	숯가마	77
	아궁이	0
	화목난로	151
총합계		92,632

자료 : 서울시, 「서울시 대기 중 미세먼지의 상세모니터링을 통한 미세먼지 특성조사 2차 연구」, 2010



주 : 본 연료별 배출량은 연료연소에 의해서만 산정되는 배출량으로 시도별, 오염물질별, 연료별 총배출량과 차이가 있음.

자료 : 국립환경과학원, 「대기오염물질 배출량 연보(2007)」, 2010.03

〈그림 2-3〉 서울시 연료별 VOC 배출량

수도권 지역에서 사용하는 건축·자동차보수·도료표지용 도료에 대해서 '05년부터 VOC 함유기준을 설정하여 관리하고 있고, VOC 전체 배출량의 약 60%가 도료·유기용제 사용으로부터 배출되고 있다. VOC는 도료 사용 중 바로 대기 중으로 비산 배출되므로 배출허용기준으로 관리하지 않고, 도료 중 VOC 함유기준을 설정하여 관리(수도권지역에만 적용)하고 있다. 또한, 친환경 도료 사용을 위해 2005년 7월부터 VOC가 5~7% 적게 함유된 도료만 공급하였고, 2007년 1월부터는 VOC 함량을 15~17% 저감한 도료를 일반화하였으며, 2010년 1월 1일부터는 VOC 함유기준을 용도별로 약 23%까지 강화하였다. 2010년 이후에는 현행 대비 최고 30% 저감 수준으로 함유기준을 설정하고 하이솔리드계 도료의 사용을 적극 유도할 계획이다.

〈표 2-14〉 서울시의 도장시설 배출허용기준

항목	대상시설	배출시설	국가기준	서울시기준	
				'08.01.01	'09.01.01
탄화수소 (THC)	도장시설	배출가스량 10,000㎥/시간 이상 연속식 도장시설	200	50	-
		배출가스량 10,000㎥/시간 미만 비연속식 도장시설	200	100	-

주 : 연속식이라 함은 1일 8시간 이상 연속하여 가동하는 시설이며, 비연속식이라 함은 연속식 시설이외의 시설
자료 : 서울특별시 맑은환경본부, 맑은 서울 2010특별대책(2008 연동계획)

4. 황산화물(SOx) 저감정책

아황산가스(SO₂)는 그 자체로 유해물질이기도 하지만 암모니아와 반응하여 미세먼지를 생성하기도 한다. 서울시의 주요한 SOx 저감정책을 <표 2-15>에 정리하였다.

〈표 2-15〉 SOx 저감정책

구분	내용
자동차	- 자동차 연료품질기준 강화
사업장	- 대형사업장 총량관리 - 사업장 폐쇄 및 이전
청정연료 사용 확대	- 업무용 시설에 청정연료 사용 의무화 - 일반주택의 도시가스(LNG) 보급 확대 - 신재생에너지 사용 확대 - 지역난방 공급확대

주요한 황산화물(SOx)의 저감대책은 사업장 총량관리와 자동차 연료품질기준 강화이다. 또한, NOx 저감대책 부분에서 언급한 도시가스 등의 청정연료사용 확대도 SOx 배출저감의 역할을 하고 있다.

〈표 2-16〉 연도별 저장유 공급현황

(단위 : 1,000Bbl/day)

유류종류별		02년	03년	04년	05년	06년	07년	08년
총수요	계	698	703	671	654	645	642	552
	B-C	320	305	277	264	255	244	183
	경유	378	398	394	390	390	398	369
저장유	계	550	558	527	507	488	483	435
	B-C	201	188	160	140	124	112	89
	경유	349	370	367	367	364	371	346
공급률(%)	계	79	79	79	78	76	75	79
	B-C	63	62	58	53	49	46	49
	경유	92	93	93	94	93	93	94

주 : 1.0% 이하 중유 공급 · 사용지역 : 0.5% 및 0.3% 이하 중유 공급 · 사용지역을 제외한 전국
자료 : 환경부, 환경통계연감 2009

〈표 2-17〉 차량용 연료 황함유량 기준 강화

연료별	황함유량 기준강화	황 이외의 오염물질 저감효과			
		CO	HC	NOx	PM
휘발유	130 → 50ppm	10%	10%	5%	-
경유	430 → 30ppm	-	15%	5%	- 중소형 자동차 : 7% - 대형 자동차 : 4 %

주 : 자동차의 연료 품질은 2006년부터 대폭 강화, 보급
자료 : 서울특별시, 서울시보 제2749호 2007년 2월 8일

〈표 2-18〉 서울시 배출원별 SOx CAPSS 배출량(2000년~2007년)

(단위 : 톤/년)

구분	00년	01년	02년	03년	04년	05년	06년	07년
에너지 산업	528 (691)	514 (673)	385 (502)	430 (562)	252	265	3	5
비산업	6,210 (7,011)	6,132 (7,134)	5,274 (6,161)	4,720 (5,493)	4,883	6,614	6,629	6,549
제조업	300 (367)	856 (1,124)	117 (147)	165 (209)	90	35	107	170
생산과정	-	-	-	-	-	0.37	-	-
도로 이동	932 (773)	1,083 (1,064)	897 (894)	929 (896)	901	717	213	152
비도로 이동	320 (320)	278 (278)	331 (331)	345 (345)	207	249	137	583

〈표 계속〉 서울시 배출원별 SOx CAPSS 배출량(2000년~2007년)

(단위 : 톤/년)

구분	00년	01년	02년	03년	04년	05년	06년	07년
폐기물 처리	100 (100)	124 (124)	122 (122)	130 (130)	130	169	187	376
합계	8,391 (9,261)	8,989 (10,398)	7,126 (8,156)	6,720 (7,636)	6,462	8,050	7,276	7,835

주 : ()는 2003년 기준배출량(산정방법론 변경전 배출량)임.

본 연료별 배출량은 연료연소에 의해서만 산정되는 배출량으로 시도별, 오염물질별, 연료별 총배출량과 차이가 있음.

자료 : 국립환경과학원, 「대기오염물질 배출량 연보(2007)」, 2010.03

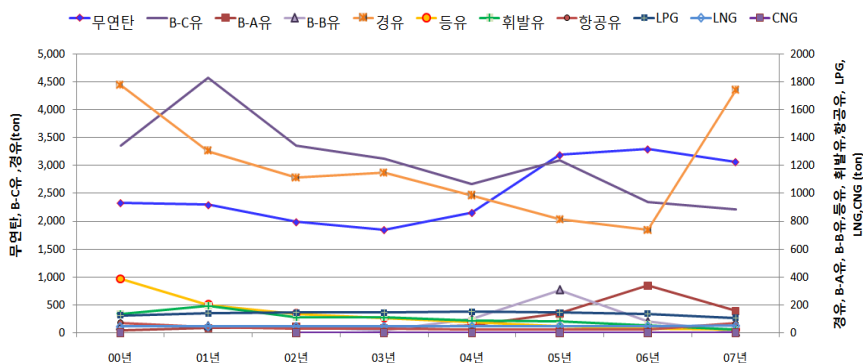
〈표 2-19〉 서울시 SOx 배출량(2009년)

구분		서울시 배출원별 배출량(톤/년)
		SOX
연료연소(CAPSS)	에너지산업 연소	5
	비산업 연소	6,549
	제조업 연소	170
	생산공정	0
	에너지수송 및 저장	0
	유기용제 사용	0
	도로이동오염원	152
	비도로이동오염원	158
	폐기물처리	376
	농업	0
	기타 면오염원	0
비산업면지 추가	도로비산(포장)	0
	도로비산(비포장)	0
	건설활동	0
	건설폐기물 재활용	0
	농업활동	0
	나대지	0
	축산활동	0
생물성 연소 추가	고기구이	0
	노천소각(폐기물)	1
	노천소각(곡류)	0

〈표 계속〉 서울시 SOx 배출량(2009년)

구분	서울시 배출원별 배출량(톤/년)	
	SOX	
생물성 연소 추가	숯가마	
	아궁이	0
	화목난로	74
총합계		7,485

자료 : 서울시, 「서울시 대기 중 미세먼지의 상세모니터링을 통한 미세먼지 특성조사 2차 연구」, 2010



주 : 본 연료별 배출량은 연료연소에 의해서 산정되는 배출량으로 시도별, 오염물질별, 연료별 총배출량과는 차이가 있음.

자료 : 국립환경과학원 「대기오염물질 배출량 연보(2007)」, 2010.03

〈그림 2-4〉 서울시 연료별 SOx 배출량

5. 오존 저감정책

오존은 질소산화물(NOx)과 휘발성유기화합물(VOC)이 대기 중에서 자외선의 영향을 받아 광화학반응으로 생성되는 2차 대기오염물질로, 앞서 언급된 NOx와 VOC의 저감방안들이 오존 관리를 위한 주요한 대책이 되며, 그 외의 관리 대책을 <표 2-20>에 정리하였다.

〈표 2-20〉 오존 저감대책

구분		내용
오존 생성 배출원 관리 강화	자동차 배출가스 무료점검 및 집중단속 실시	- 배출가스 무료점검을 실시하여 자율적인 차량관리 유도(서울시 및 25개 자치구에서 상시 무료점검 실시) 및 오존농도 상승 시 해당지역 배출가스 집중단속 실시
	승용차 운행억제	- 오존경보가 발령되거나 오존중대경보 발령이 예상되는 경우로 교통량 감축이 필요한 때는 자동차 운행을 제한
	하절기 도장·도로포장으로 인한 오존발생 저감방안 추진	- 공공건물인 경우 하절기 이외의 계절에 도장을 실시하고, 대형 사업장도 하절기에는 도장 및 도로포장을 자제하도록 유도 - 자동차 도장작업 등 VOC 배출이 많은 작업은 야간에 실시하도록 유도
	기타시설(세탁시설 등) 오존원인물질 배출억제	- 오염도가 높은 시간대(12:00~15:00)에는 VOC 배출이 많은 드라이크리닝 작업 최소화 협조 요청

주 : NOx, VOC 배출량 저감대책 외의 관리방안
자료 : 서울특별시 맑은환경본부

제3절 종합정리

PM10과 NO₂ 개선을 목적으로 수립된 ‘수도권 대기환경개선기본계획 추진을 위한 서울특별시 시행계획(2006)’에 따라 다양한 오염물질 배출부문에 대한 배출량 저감사업 및 정책들이 계획되었으며, 이를 바탕으로 하여 서울시의 대기관리가 진행되고 있다.

서울시의 주요한 대기관리 정책들을 부문별로 정리하면 <표 2-21>과 같으며, 각 대기정책이 영향을 미칠 수 있는 대기오염물질을 살펴보았다. 유기용제 관리, 주유소 관리, 비산먼지와 같은 정책들은 각 정책시행으로 인하여 한 종류의 대기오염물질(VOC 또는 PM10) 배출을 감축시키지만, 그 외의 대기정책들(자동차, 에너지 부문 등)은 각 정책의 시행으로 인해 두 종류 이상의 오염물질이 저감됨을 볼 수 있다. 서울시에서 가장 중점적으로 추진하고 있는 제작차 및 운행차 관리 정책들의 경우, PM10뿐 아니라 오존과 NO₂를 생성하는 NO_x와

〈표 2-21〉 분야별 주요 대기오염물질 저감정책

분야	주요 저감정책		대기오염물질			
			PM10	NOx	SOx	VOC
사업장	총량관리제 및 배출권거래제 시행			√	√	
	총량 관리	산업시설 저NOx버너 설치 확대		√		
	미대상 사업장	사업장 폐쇄유도 및 이전	√	√	√	
면배출원 관리	유기 용제 관리	친환경 도료 사용 확대(도료유기용제 함량 제한)				√
		도장 세정시설 비산배출허용기준 설정				√
		소비재유기용제 함량 제한				√
		아스팔트 포장방법 개선				√
	주유소 Stage II 관리					√
	가정용 저NOx보일러 보급			√		
	비산먼지 관리	도로비산먼지 관리	√			
		기타 비산먼지 관리	√			
에너지관리	지역 냉난방 공급 확대		√	√	√	√
	신재생에너지 보급 확대		√	√	√	√
제작자동차 관리	제작차 배출허용기준 강화		√	√		√
	저공해차 보급	전기이륜차 보급	√	√	√	√
		하이브리드승용차 보급	√	√		√
		CNG 차량 보급	√	√		
운행자동차 관리	특정경유	DPF 보급	√	√		√
		DOC 보급	√			√
		LPG엔진 개조	√	√		√
		노후차 조기폐차	√	√		√
	자동차 연료품질 개선		√	√	√	√
교통수요 관리	대중교통 확충, 자전거 이용 제고 등		√	√	√	√

VOC의 배출에도 영향을 미침을 알 수 있다. 이러한 오염물질들은 개별적으로도 유해성이 있으므로 절대 농도를 줄이는 노력이 필요하기는 하나, 이와 함께 2차 반응을 통한 새로운 유해물질의 생성과도 밀접한 연관이 있으므로 효과적인 대기질 관리를 위해서는 보다 신중한 접근이 필요할 것으로 보인다. 따라서,

VOC, NO_x, SO_x 등 2차 물질을 생성하는 이러한 기체상 물질 배출원 관리와 관련된 정책들에 대해서는 2차 물질(PM₁₀, NO₂, O₃) 생성에 미치는 긍정적 또는 부정적 효과들도 평가하여 정책의 우선순위를 조정하는 과학적 분석과정이 필요하다.

제3장 외국의 대기질관리 사례

제1절 대기질 관리 방향의 변화

제2절 외국의 통합대기관리 사례

제3절 시사점

제 3 장

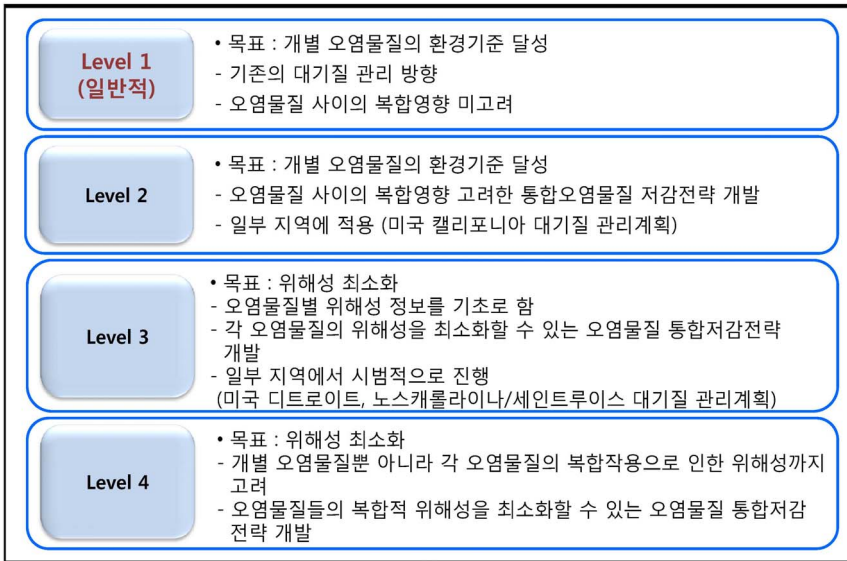
외국의 대기질관리 사례

제1절 대기질 관리 방향의 변화

선진국을 중심으로 서서히 논의되고 있는 대기질 관리 분야의 이슈는 Multipollutant air quality management(오염물질 대기질 통합관리관리)이다. 기존의 대기질 관리는 개별적 오염물질 관리를 기본적 접근 방법으로 하여 진행되어 왔으며, 이러한 대기관리 방법이 CO, Pb, SO₂와 같이 1차 배출로 발생하는 대기 오염물질들의 관리에서는 성공적인 성과를 보여주었다. 하지만, 오존, 미세먼지와 같이 2차 생성을 통해 발생하는 대기오염물질 관리의 경우, 개별적 오염물질 관리를 통한 접근방법으로는 더 이상 기대하는 성과가 나타나지 않을 수 있음이 여러 사례를 통해 확인되었다. 이에 따라, 기존의 오염물질 개별관리에서 여러 오염물질을 동시에 고려하는 오염물질 통합관리로 대기관리의 방향이 전환되어야 한다는 주장이 설득력을 얻게 되었고, 이러한 통합관리를 적용하고자 하는 시도가 일부 지역을 중심으로 시범적으로 진행되고 있다(Chow, 2010).

미국, 캐나다, 멕시코 등 북미국가의 대기질 개선을 위해 1995년에 설립되어 중요한 대기질 관리 문제들에 대한 과학적 평가들을 주도적으로 이끌고 있는 민·관 공동 협력기관인 NARSTO는 최근 대기질 통합관리에 대한 보고서를

내용은 바 있다(NARSTO, 2010). 이 보고서에서는 궁극적인 대기관리의 방향을 위해성에 기초한 통합관리로 설정하여, 대기관리의 단계를 4단계로 구분하여 <그림 3-1>과 같이 제시하였다.



자료 : NARSTO, 2010

<그림 3-1> 단계별 대기관리 방향

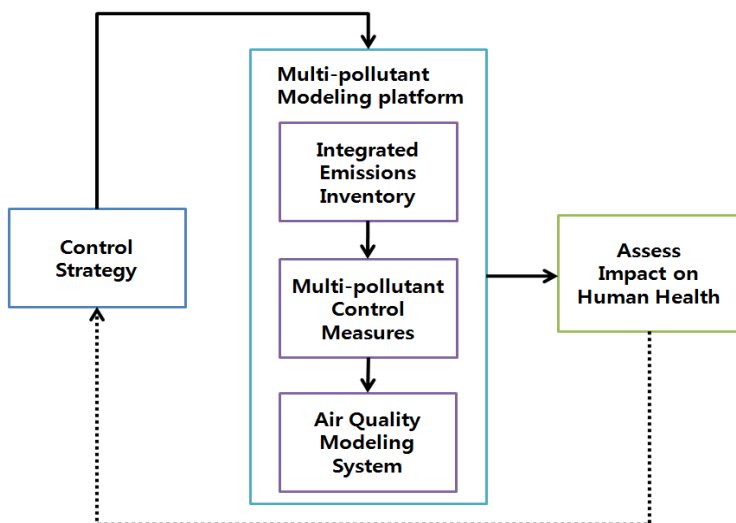
대부분의 도시나 국가에서의 대기관리 단계는 Level 1 수준에 머물고 있으며, 일부 선진도시들은 Level 2, Level 3의 대기관리를 위한 시범적 시도를 하고 있다. Level 3과 4 수준의 대기관리의 경우, 위해성과 관련된 불확실성이 상당히 존재하여 아직까지는 초보적인 수준에 머무르고 있는 상황이다. 이 외에도 단순히 온실가스 배출량과 연계하는 초보적인 대기질-온실가스 통합관리에서 벗어나, 기후변화에 영향을 미칠 수 있는 미세먼지 성분, 오존 등 오염물질들의 광화학적 작용까지 고려하는 통합관리도 향후의 과제로 남겨두고 있다.

제2절에서는 시범적으로 시도되고 있는 통합대기관리의 사례들을 보다 세부적으로 정리하여, 향후 서울시에 적용할 수 있는 시사점을 도출하고자 한다.

제2절 외국의 통합대기관리 사례

1. 미국 디트로이트시

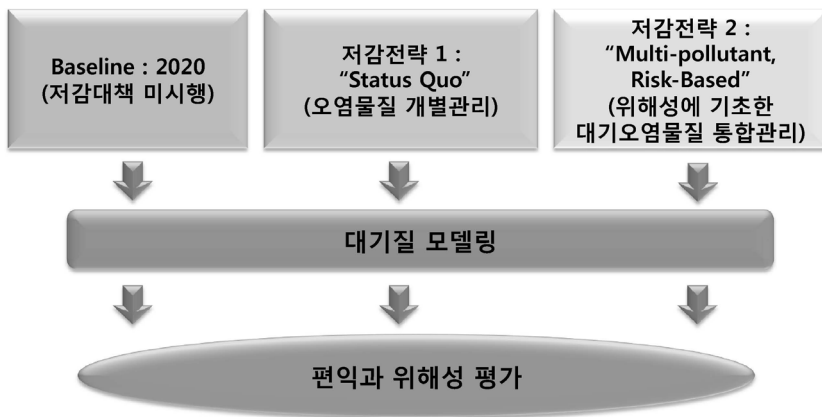
미국 EPA는 향후 대기관리가 개별적 오염물질의 관리에서 통합적 대기질 관리로 전환되어야 함을 인지하면서, 기존의 다양한 정보와 모델링 도구들을 사용한 통합대기관리가 현실적으로 가능성이 있는지를 타진한 바 있다. 이를 위하여 미국 미시간주의 디트로이트를 사례대상지역으로 선정하고, 통합대기관리의 방법을 적용하여 평가하였다. 이 지역에 적용된 대기관리의 단계는 1절에서 소개한 Level 3에 해당하는 수준으로, 이 지역에서 문제되고 있는 PM_{2.5}, 오존, 일부 유해물질(air toxic)을 관리의 대상으로 선정하고, 위해성 관점에서 최적의 저감전략을 개발하고자 하였다. <그림 3-2>는 통합대기관리를 위한 전략개발 평가 체계도로 대기질모델링과 인체유해성 평가방법을 접목하여 최적의 전략을 찾는 과정을 간략화한 것이다.



자료 : Wesson et al., 2010

〈그림 3-2〉 디트로이트 사례 : 통합대기관리를 위한 평가체계

디트로이트 사례에서는 기존의 오염물질 개별관리의 관점에서 오염물질 저감전략과 위해성 최소화에 목적을 둔 대기오염물질 통합관리의 관점에서 저감전략이 비교·분석되었다. 대기오염물질의 통합저감전략은 모니터링지점에서의 PM_{2.5}와 오존의 저감 정도는 오염물질 개별관리와 유사한 수준으로 관리되, 특히 인구밀도가 높은 지역에 대한 PM_{2.5}, 오존, 유해물질의 농도 관리에 초점을 맞추어 위해성을 최소화하는 것을 목적으로 하였다. 오염물질 개별관리 전략의 경우는 PM_{2.5}와 O₃ 환경기준 초과지역에 대한 대기질을 환경기준이내로 유지하는 것을 목적으로 하고 있다.



<그림 3-3> 디트로이트 사례 : 저감전략의 비교를 위한 체계

<표 3-1>은 오염물질 개별관리전략을 통한 오염물질별 삭감량과 오염물질 통합관리전략을 통한 오염물질별 삭감량의 차이를 보여준다. 두 전략 사이의 오염물질별 삭감량의 차이가 크을 알 수 있다. NO_x와 CO의 경우, PM_{2.5}, SO₂, VOC 배출원의 저감방안 추진에 따라 부수적으로 얻어지는 삭감효과이다. 즉, 주요한 PM_{2.5}, SO₂, VOC 배출원의 저감방안 적용이 NO_x와 CO도 함께 저감하는 효과를 발생함을 의미한다.

〈표 3-1〉 오염물질의 개별관리 전략과 통합관리 전략의 오염물질별 삭감량 비교

오염물질	2020년 base case (톤)	저감전략 1(개별관리) case		저감전략 2(통합관리) case		저감량의 차이(2-1) (톤)
		저감량 (톤)	기준변화량 (%)	저감량 (톤)	기준변화량 (%)	
PM2.5	31,485	1,747	6%	3,183	10%	+1,436
SO ₂	187,525	10,297	5%	2,429	1%	-7,868
VOC	104,872	5,814	6%	8,623	8%	+2,808
NO _x	118,432	31	0.03%	2,016	2%	+1,985
CO	424,426	1,546	0.4%	64,187	15%	+62,641
아세트알데하이드		18,35		38,72		+20,38
벤젠		130,25		138,73		+8,84
1,3-뷰타다이엔		41,52		13,19		-28,33
1,4-디클로로벤젠		15,28		15,28		변화없음
포름알데하이드		19,16		44,50		+25,34
염화메칠렌		1,63		0		-1,63
나프탈렌		16,74		4,24		-12,50
망간		0,86		8,50		+7,64
카드뮴		9×10^{-4}		2×10^{-4}		-7×10^{-4}
니켈		0,19		0,05		-0,14
디젤 PM		0		30,70		+30,70

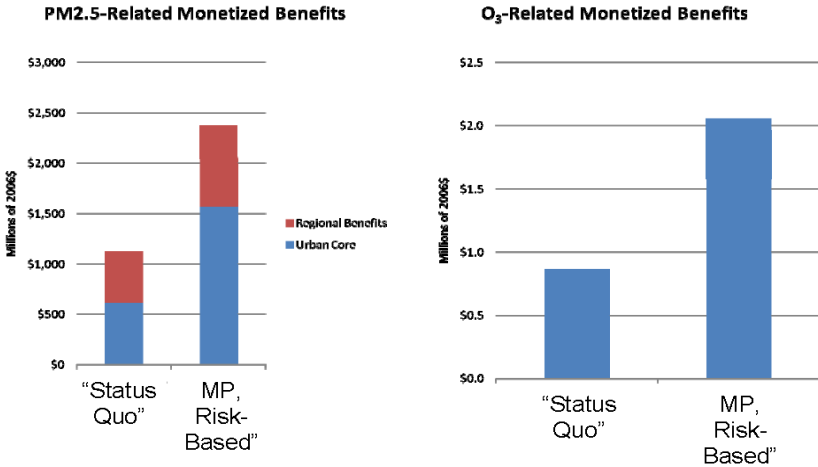
자료 : Wesson et al., 2010

두 전략을 모델링에 적용하여 저감 정도를 비교한 결과, 통합관리가 PM2.5와 오존 농도 저감 정도가 보다 큰 것을 알 수 있으며, 인체유해성과 연관한 편익 분석에서도 통합관리가 인구밀도가 높은 도심지역뿐 아니라 지역전체에 보다 효과적임을 알 수 있다.

〈표 3-2〉 오염물질의 개별관리 전략과 통합관리 전략의 효과분석 : PM2.5 & O₃ 농도

연평균 PM2.5농도	Base case	개별 관리	통합 관리	최대 8시간평균 O ₃ 농도	Base case	개별 관리	통합 관리
Dearborn	18,6	15,6	13,3	Macomb	78,7	78,6	78,4
N,Delray	16,4	13,6	11,8	Washtenaw	73,0	72,9	72,8
Wyandotte	15,4	12,9	12,3	Wayne	71,8	71,7	71,6

자료 : Wesson et al., 2010



주 : "Status Quo" - 저감전략 1(개별관리) "MP, Risk-Based" - 저감전략 2(통합관리)
 자료 : Wesson et al., 2010

〈그림 3-4〉 오염물질의 개별관리 전략과 통합관리 전략의 효과분석 : 비용편익

2. 미국 노스캐롤라이나 & 세인트루이스

미국 EPA는 뉴욕, 노스캐롤라이나, 세인트루이스 지역을 대상으로 대기질관리계획(Air Quality Management Plan)에 통합관리의 개념을 적용하고자 시도하고 있다.

노스캐롤라이나 지역의 경우, 주요한 이슈가 되고 있는 PM2.5, 오존, 유해물질, 온실가스까지를 총괄하는 통합대기오염물질 관리계획 작성을 추진 중이다. 이를 위하여 적합한 모델링 시스템과 다양한 배출량 정보들을 준비하고 있으며, 이 지역의 특성을 반영한 저감대책들을 고려하고, 이들의 효과를 평가하기 위한 방법도 모색하고 있다. 저감전략 개발의 주요 관점은 적절한 비용 내에서 실현가능성을 높이고 편익을 극대화하는 것이다. 이에 따라, 다양한 저감정책의 우선순위를 평가하기 위해 필요한 변수들을 <표 3-3>의 예시처럼 선정하여 분석을 계획하고 있다. <표 3-3>에서 나타나는 것과 같이, 한 가지 저감정책에 대

하여 온실가스, 오존·미세먼지 등과 같은 기준성 대기오염물질, 유해물질, 건강유해성 등 다양한 측면의 통합평가를 계획함을 알 수 있다.

세인트루이스의 경우, 오존, PM2.5와 일부 유해물질을 관리의 대상으로 선정하고, 이들의 통합관리를 위한 최적의 대기관리계획을 준비 중이다. 최적의 통합관리 전략의 기본적인 원칙은 인체유해 최소화에 두고, 최적의 비용으로 관리할 수 있는 방안을 찾고자 하고 있다. 예를 들면, PM2.5와 O₃이 모두 환경기준을 초과하는 상황에서 현 기술과 예산 내에서 최적의 방안을 도출하고자 할 경우, 두 오염물질 중 인체위해측면에서 영향이 큰 오염물질 관리에 우선순위를 두고 대기관리전략을 개발하는 것이다. 이러한 평가를 위하여, 배출량정보, 기상모델, 대기질 모델, 오염물질유해성 평가모델 등 다양한 도구들의 적용을 고려하고 있다(Missouri DNR/Illinois EPA, St. Louis Air Quality Management Plan, 2010).

〈표 3-3〉 노스캐롤라이나 대기오염물질 저감전략 평가를 위한 변수(예시)

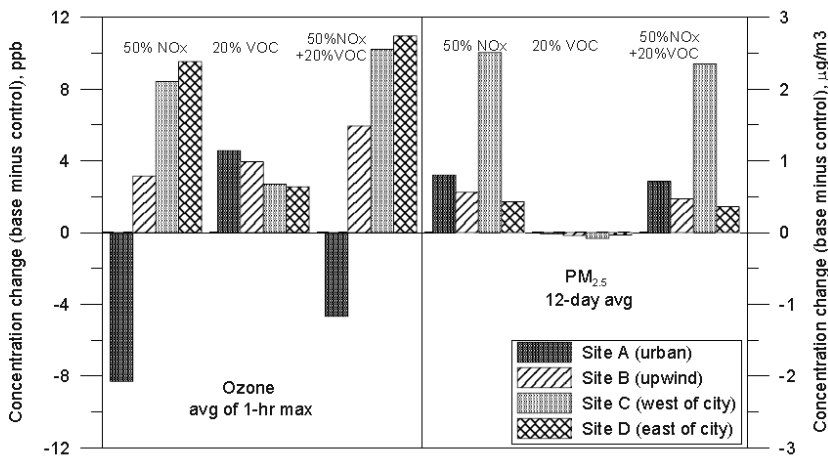
저감전략	오염물질의 종류 (기준성 오염물질, 유해물질)	오염물질별 저감량	온실가스 저감량	대기질에 미치는 영향	기타 환경에 미치는 영향	영향 범위 (공간)
자동차 OBD 프로그램 도입						
제어전략	위해성 평가	이행 가능성	비용 편익	영향을 받는 인구(%)	배출량기여 (%)	규제 VS 시민자발적 참여
자동차 OBD 프로그램 도입						

자료 : North Carolina DENR, North Carolina's Air Quality Multi-Pollutant Process, 2010

3. 기타 사례

Luecken et al.(2008)은 필라델피아 지역에 대하여 저감정책 적용에 따른 PM2.5, 오존, 일부 유해물질 농도 변화의 복합영향을 모델링을 이용하여 분석한 바 있다. VOC와 NOx의 배출량 저감을 위한 세 가지 시나리오(50% NOx

저감, 20% VOC 저감, 50% NO_x + 20% VOC 저감)가 적용되었을 때 도심지와 주변지역에서의 오존과 PM_{2.5}의 변화 정도가 평가되었다. 그 결과가 <그림 3-5>와 같으며, NO_x 배출량만 저감 시, 도심지역에서의 PM_{2.5}는 감소하나 오존은 오히려 증가함을 알 수 있다. 반면, VOC 배출량 저감 시에는 PM_{2.5}는 큰 변화가 없으나 오존은 모든 지역에서 농도가 다소 낮아짐을 알 수 있으며, NO_x와 VOC 배출량을 동시에 저감하는 경우가 NO_x만 저감하는 경우보다 이득이 크며 손해(오존 증가)는 다소 적게 나타남을 알 수 있다.

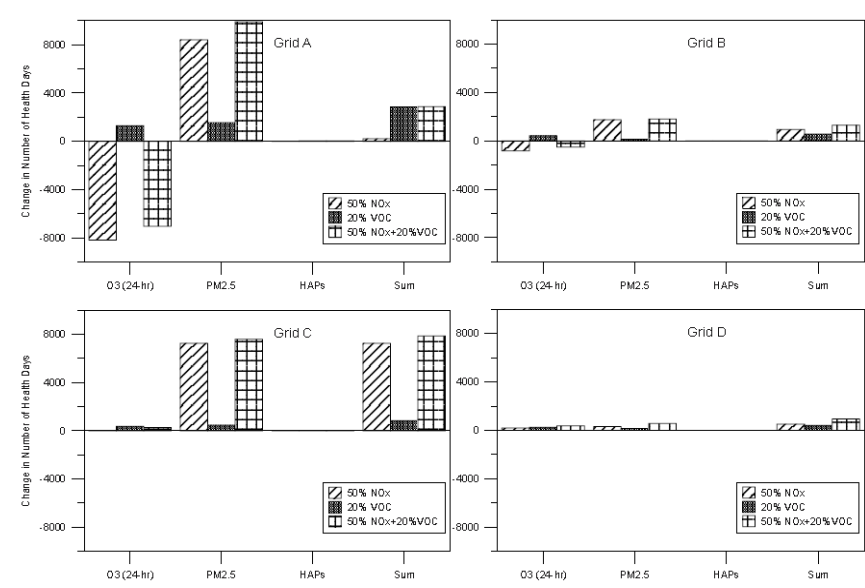


자료 : Lucken et al.,(2008)

<그림 3-5> 오염물질 삭감에 따른 오존, PM_{2.5} 농도의 변화(7월사례)

이와 같이 저감전략이 대기오염물질별로 미치는 영향이 상반되는 경우, 어떤 정책을 추진하는 것이 바람직한가라는 질문을 할 수 있다. 이를 해결하기 위해 각 오염물질의 농도변화를 인체위해효과로 변환하고자 시도하였다. PM_{2.5}, 오존, 유해물질의 농도변화에 따른 인체위해효과를 정량화하여 지역별로 평가한 결과가 <그림 3-6>으로 표현되었다. 즉, 모델링지역의 공간별(예: 격자 A - 도심지역) 배출량 저감시나리오 적용에 따른 PM_{2.5}, 오존, 일부 유해물질의 농도

변화가 종합적으로 인체무해일수(Number of Health days)의 변화정도에 미치는 영향을 평가하여 위해성의 관점에서 최적의 저감전략을 찾고자 시도하고 있다. 모델링 결과는 NOx와 VOC 배출량의 동시 저감전략이 종합적인 건강유해의 측면에서 보다 효과적임을 보여주고 있다.



주 : Grid A, B, C, D 는 Site A, B, C, D를 포함한 모델링 격자(그림 3-4 참조)
 자료 : Lucken et al.,(2008)

〈그림 3-6〉 오염물질 삭감에 따른 지역별 인체무해일수의 변화

이 외에도, Liao et al.(2008)은 아틀란타, 시카고, 휴스턴, LA, 뉴욕을 대상으로 오염물질 배출량 저감에 따른 복합영향을 평가하였다. NOx 배출량을 저감하는 경우, 24시간 평균 PM2.5농도는 모두 감소하나 8시간 평균 오존농도는 지역별로 증가하거나 감소하는 경향이 다르게 나타났으며, 특히 뉴욕과 시카고의 경우, 오존농도가 NOx 배출량 저감에 민감하게 반응한 것으로 조사되었다. Liu et al.(2010)도 중국지역에 대하여 유사한 모델링을 적용하였으며, SOx, NOx,

NH₃ 배출저감이 PM10의 농도를 개선할 수는 있으나, VOC 배출저감은 오히려 PM10농도를 다소 악화시키는 것으로 나타났다. 반면, 주요 대도시 지역에서는 VOC 배출저감으로 오존농도를 개선할 수 있는 것으로 조사되었다. 따라서, 이와 같이 지역별 오염물질 배출 특성 및 기상요소 등에 따라 대기관리 저감전략이 달라질 수 있음을 알 수 있으며, 최적의 저감전략 개발에 있어서 그 지역에 대한 오염물질 특성 이해가 상당히 중요함을 시사하고 있다.

제3절 시사점

이 장에서는 대부분의 국가에서 시행하고 있는 대기질 관리 방법인 개별적 오염물질 관리 방법의 한계와 새로운 대안으로 논의되고 있는 통합 대기오염물질 관리 방법에 대해 살펴보았다. 또한, 일부 선진국을 중심으로 시범적으로 시도되고 있는 통합대기관리 사례들을 보다 자세히 조사하여, 향후 서울시 대기질 관리의 방향 설정에 원용할 수 있는 시사점을 다음과 같이 도출하였다.

- 오존(O₃), 미세먼지(PM)와 같은 2차 오염물질은 ‘개별적 오염물질 관리’의 기존 접근방법으로는 효과적 관리에 한계가 있으므로 통합적 관점에서 최적의 관리 방법을 찾기 위한 방안 필요
- 대기질 관리의 목표가 환경기준 달성인지 위해성 최소화인지에 따라 대기질의 효과적 관리 방법이 상이할 수 있으므로 궁극적 대기질 관리의 목표 설정 필요
- 대기오염물질 통합관리를 위해서는 신뢰성 있는 모델링 시스템의 도입 필요
- 2차 오염물질의 경우, 지역적 특성(오염물질 배출특성, 기상학적 특성 등)에 따라 대기질 관리 방법에 차이가 있으므로 지역적 특성에 대한 세부적인 조사 필요

제4장 대기질 모델링 체계의 구축

제1절 대기질 모델링 체계

제2절 모델링 영역 및 사례기간

제3절 모델링 입력자료

제4절 모델링 정합도 평가

제 4 장

대기질 모델링 체계의 구축

제1절 대기질 모델링 체계

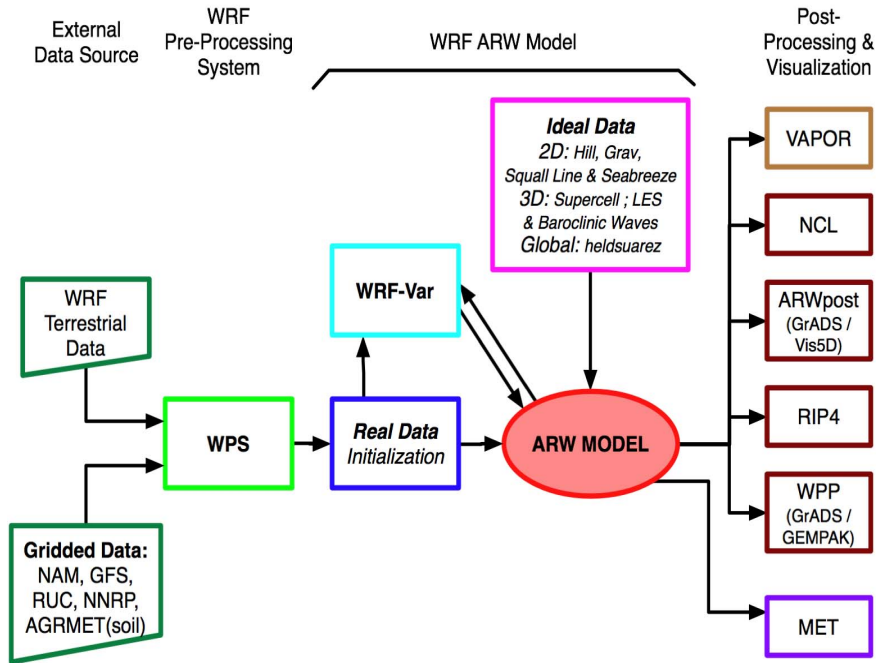
1. 기상 모형

배출량 모델링 및 화학수송모델링의 기상 입력 자료를 산출하기 위한 기상모델로 WRF(Weather Research Forecast) 모델이 도입되었다. WRF는 2005년부터 미국 NOAA 산하 기관인 NCEP의 현업 모델로 사용되고 있으며, FSL의 RUC(Rapid Update Cycle)시스템도 2005년에 WRF로 대체되었다. 이 연구에서 사용된 WRF 모델은 버전 3으로 2008년 4월에 업데이트되었으며, Microphysics, PBL scheme, Polar physics, Radiation, Land-surface physics 등을 비롯한 많은 부분들이 개선·수정되었다.

WRF 모델의 전반적인 체계는 다음과 같다. WRF 모델은 전처리 입력자료로서 가상자료와 실제자료를 모두 이용할 수 있다. <그림 4-1>에서처럼 분홍색 상자의 가상자료, 푸른색 상자의 실제자료를 이용하여 WRF 모델의 입력자료와 경계파일을 생성하게 된다. WRF 모델은 또 다양한 physics에 대한 옵션과 동지화(nesting), 측정값의 자료동화를 지원한다.

WPS(WRF Preprocessing System)는 WRF 모델에 입력자료를 제공하기 위한 전처리자료로서, 격자를 규정하고, 기본 맵을 생성하며, 고도와 지형정보를 제공

하고, 다른 모델의 실측·예보 자료를 취하며, WRF 격자로 자료를 보간(interpolation)하는 기능을 한다. 또, WRF-Var는 모델의 초기조건으로서 측정자료를 동화하기 위한 부분이다.



〈그림 4-1〉 WRF 모델의 체계

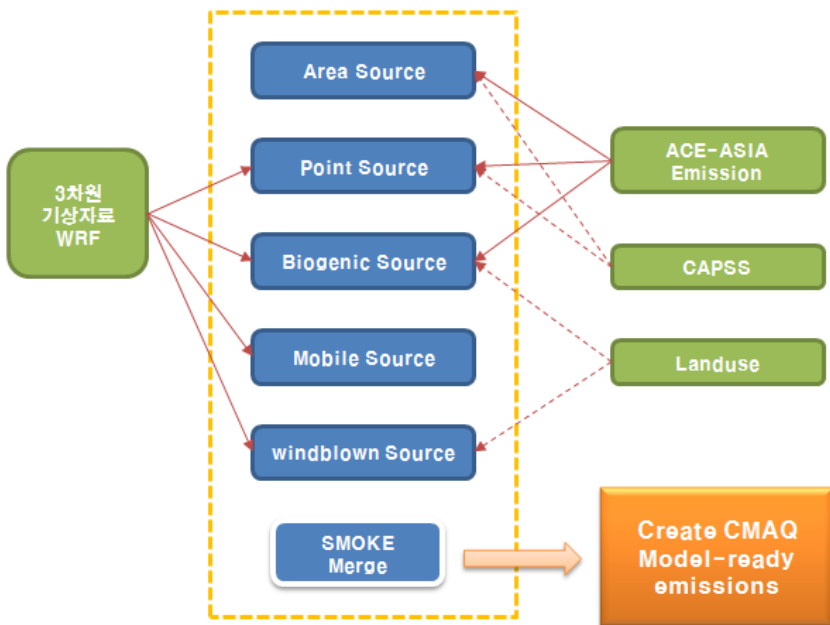
WRF 모델링을 위한 토지이용도 및 고도자료는 환경부에서 제공하는 국내 자료를 재가공하여 사용하였고, 기상모델링을 위한 전구자료는 미국 NCEP에서 제공하는 1도 해상도의 재분석자료를 사용하였다.

또한 기상장의 정확도를 확보하기 위해서 자료동화(FDDA, Four Dimensional Data Assimilation) 기법인 격자 및 측정자료 동화를 적용하였다. 측정자료 동화를 위해서는 국내 고층 및 지표 기상대 관측자료를 사용하였다.

2. 배출모형

배출모형은 대기질 모델에 알맞은 배출량 입력 자료를 생성하는 도구로써, 일반적으로 연간 배출량 자료로 구성된 배출목록을 격자별, 시간별, 화학종으로 세분화된 배출량으로 재생성한다. 이 연구에서는 배출량 자료 계산을 위해서 미국 EPA에서 제공하는 SMOKE(Sparse Matrix Operator Kernel Emissions) 모델을 사용하였다.

<그림 4-2>와 같이, SMOKE 모델은 토지 피복자료, 기상자료, 배출목록 자료를 입력자료로 사용하여 점, 면, 이동, 자연 배출원 등 배출원별로 배출량을 산출할 수 있도록 구성되어 있다(유철 등, 2009)

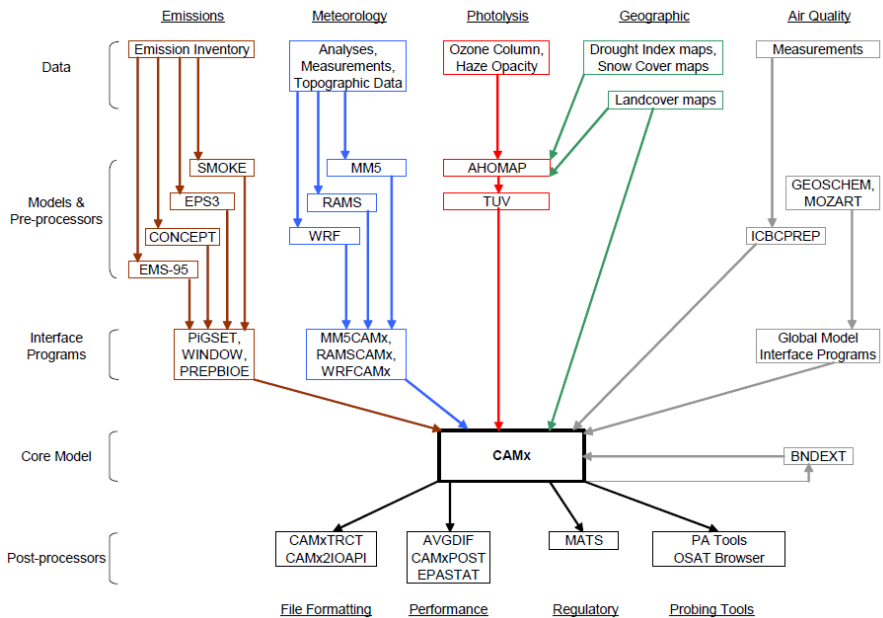


〈그림 4-2〉 SMOKE 구성도

3. 대기질 모형

화학물질들의 대기 중 이동, 반응, 확산 등의 모사를 위하여 CAMx(Comprehensive Air quality Model with extensions) 모델이 이용되었다.

CAMx는 가스상, 입자상 대기오염물질을 통합하여 ‘one-atmosphere’ 평가를 할 수 있는 Eulerian 대기 확산 모델이다. CAMx는 최신의 과학적 성과를 반영한 모형으로 모델링 과정 및 결과를 분석하기 위한 다양한 분석 기능을 제공하고 있는 것이 특징이다. 또한, 여러 개의 동시 격자를 한 번에 모델링 할 수 있는 two-way grid nesting을 지원하여 상위 격자와 하위 격자 간 오염물질의 이동을 보다 정확히 모사할 수 있다.



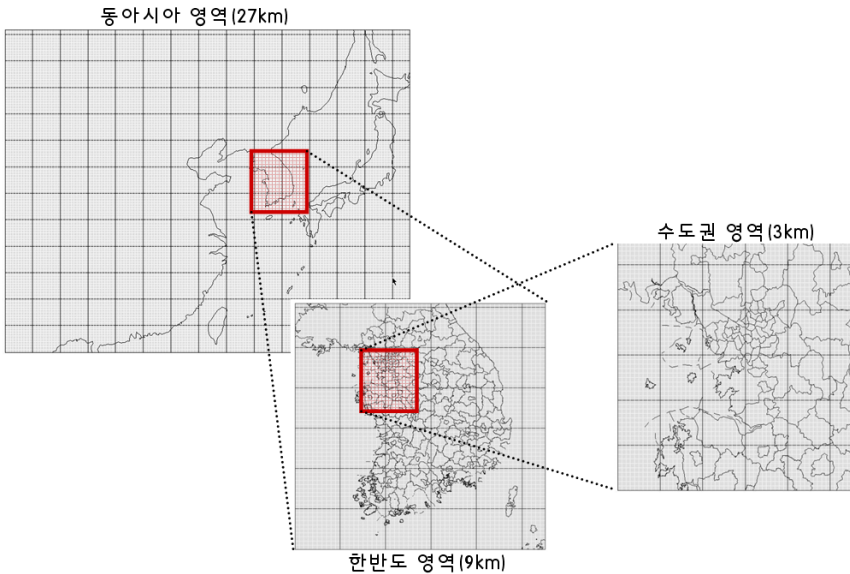
〈그림 4-3〉 CAMx 시스템 개요

제2절 모델링 영역 및 사례기간

1. 모델링 영역

모델 영역은 중국 등 주변국가로부터 장거리 수송의 영향을 포함할 수 있도록 충분히 넓어야 하고, 반면에 도시 내의 국지적인 오염원으로부터의 영향까지 고려할 수 있도록 충분히 작은 격자크기를 가져야 한다. 이를 그대로 반영하게 되면 격자수의 증가로 인해 계산시간이 상당히 길어지게 되므로, 대기질 모델링의 효율성을 높이기 위해 동아시아, 한반도, 수도권 지역을 대상으로 동지화(NESTING) 기법을 사용하였다.

동지화 수평격자체계는 <그림 4-4>와 같이 동아시아 지역을 대상으로 27km 해상도, 한반도 지역을 대상으로 9km 해상도, 수도권을 대상으로 3km 해상도로 설정하였다.



〈그림 4-4〉 모델링 격자 체계도

2. 모델링 사례기간 선정

이 연구에서는 서울시에서 문제가 되고 있는 미세먼지, 오존, 이산화질소를 타깃 오염물질로 하고, 최근 서울시의 미세먼지 상세모니터링 조사연구를 통해 배출량 자료를 포함한 다양한 자료가 구축된 2009년을 기준년도로 선정하였다. 또한, 평균적인 변화와 고농도 발생 시의 변화를 모두 살펴보기 위하여, 두 가지로 사례기간을 나누어 살펴보았다.

1) 계절별 대표기간 선정

평균적 변화 및 영향 조사를 위해 2009년의 각 계절을 대표할 수 있고 황사 발생일이 없으며 강수량이 비교적 적은 달인 1월, 4월, 8월, 11월을 대표기간으로 선정하였다.

2) 고농도 사례기간 선정

고농도 발생사례 중심의 변화정도 조사를 위해 2009년에 각 대기오염물질이 고농도로 발생한 사례일을 조사하여 모델링을 위한 대표 사례일로 선정하고자 하였다. 이를 위하여, 미세먼지와 이산화질소의 경우 24시간 기준을 초과한 사례를 고농도일로 정의하였으며, 오존의 경우 오존주의보·경보가 발생한 사례를 고농도일로 보았다.

(1) 2009년 서울시 고농도 미세먼지 발생일

수도권 대기환경청에 따르면, 서울시에서 2009년 고농도 미세먼지는 황사의 영향을 제외하고 1월, 2월, 4월, 6월, 11월에 발생한 것으로 나타났다. 이중 하루의 단기간 고농도보다는 수일간 고농도가 지속적으로 발생한 달인 1월, 2월, 4월, 6월을 살펴보았다.

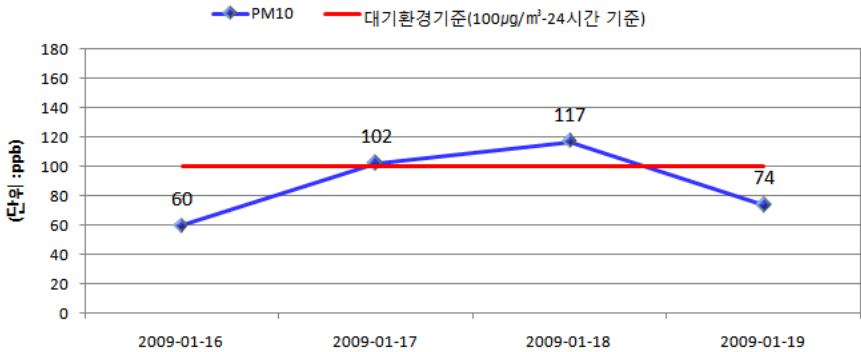
1월의 경우, 17일부터 18일까지 고농도 미세먼지가 발생하였다. 즉, 16일 오

전 9시경부터 서해안에서 미세먼지 농도가 증가하기 시작하여 18일 오후 10시에 최고농도를 보였다가 감소하기 시작하였다. 미세먼지 농도는 수도권(서울, 인천, 경기)부터 급격히 증가하기 시작한 후 중부지방까지 확산되었다.

〈표 4-1〉 서울시 2009년 미세먼지 측정 자료(1월)

구분				
년	월	일	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2.5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
2009	1	16	60	33
2009	1	17	102	57
2009	1	18	117	66
2009	1	19	74	35

자료 : 2009년 서울시 측정 자료



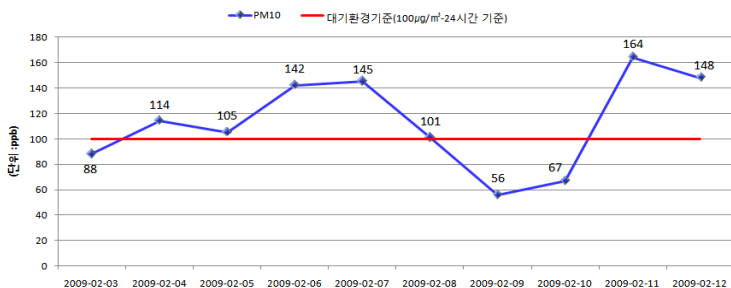
〈그림 4-5〉 2009년 서울시 미세먼지 일별 측정자료(1월)

2월의 경우, 4일부터 12일까지 고농도 미세먼지가 발생하였다. 즉, 2월 3일부터 미세먼지 농도가 서서히 증가하기 시작하였으며, 2월 11일 오전 3시경부터 급격히 증가하여 11일 오후 5시경 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 전·후의 수준을 보였다.

〈표 4-2〉 서울시 2009년 미세먼지 측정 자료(2월)

년	월	구분		
		일	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2.5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
2009	2	3	88	45
2009	2	4	114	62
2009	2	5	105	57
2009	2	6	142	76
2009	2	7	145	76
2009	2	8	101	51
2009	2	9	56	27
2009	2	10	67	35
2009	2	11	164	74
2009	2	12	148	67

자료 : 서울시, 2009년 서울시 측정 자료, 2009



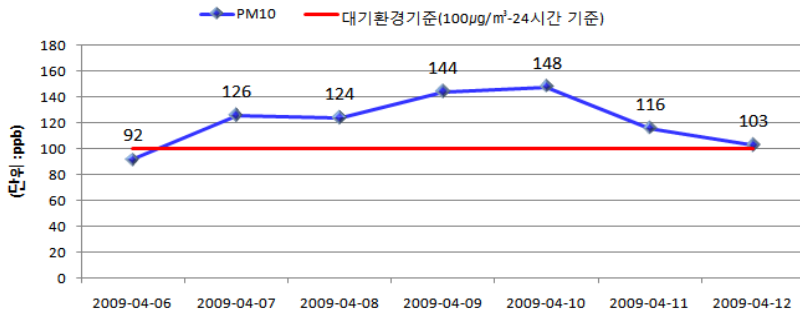
〈그림 4-6〉 2009년 서울시 미세먼지 일별 측정 자료(2월)

4월의 경우, 7일부터 12일까지 증감을 반복하며 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 고농도 미세먼지가 지속적으로 발생한 것으로 나타났다.

〈표 4-3〉 서울시 2009년 미세먼지 측정 자료(4월)

년	월	구분		
		일	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2.5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
2009	4	6	92	49
2009	4	7	126	62
2009	4	8	124	55
2009	4	9	144	71
2009	4	10	148	77
2009	4	11	116	59
2009	4	12	103	56

자료 : 서울시, 2009년 서울시 측정 자료, 2009



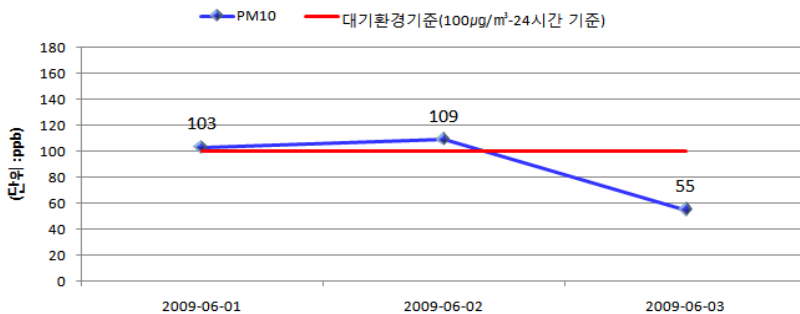
〈그림 4-7〉 2009년 서울시 미세먼지 일별 측정 자료(4월)

6월에는 1일 오후 3시부터 서울시 미세먼지 평균농도가 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 상승하였으며, 2일 오전 2시에 최고농도를 보이다가 감소하였다.

〈표 4-4〉 서울시 2009년 미세먼지 측정 자료(6월)

구분				
년	월	일	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2.5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
2009	6	1	103	51
2009	6	2	109	57
2009	6	3	55	30

자료 : 서울시, 2009년 서울시 측정 자료, 2009



〈그림 4-8〉 2009년 서울시 미세먼지 일별 측정 자료(6월)

(2) 2009년 서울시 고농도 오존 발생일

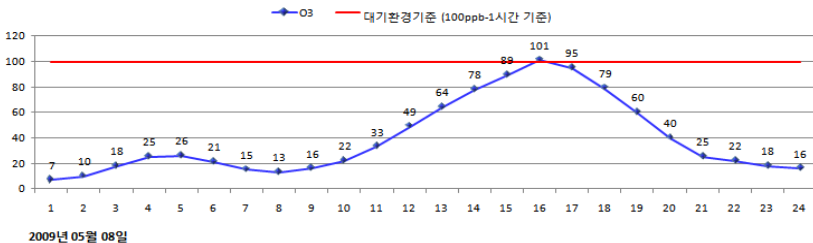
수도권 대기환경청 자료에 따르면, 서울시의 2009년도 고농도 오존주의보·경보는 5월, 6월, 7월, 8월에 발령된 것으로 나타났다.

5월, 6월, 7월, 8월의 서울지역 오존주의보 발령현황은 <표 4-5> ~ <표 4-8>과 같다. 7월, 8월 고농도 오존은 장시간에 걸쳐 지속되었음을 알 수 있다.

<표 4-5> 서울시 2009년 오존주의보 발령현황(5월)

일수	날짜	발령 농도 (ppm)	해제농도 (ppm)	최고 농도 (ppm)	발령 시간 (시)	해제 시간 (시)	경과 시간	발령지역 (측정소 명)
1	05-08	0.120	0.118	0.120	16	17	1	북동지역
	05-08	0.125	0.108	0.108	16	17	1	북서지역

주 : 대기오염 경보는 대기환경기준을 초과해서 주민이 건강·재산이나 동식물의 생육에 심각한 위해를 끼칠 우려가 있는 경우 발령되며, 기상조건 등을 검토하여 대기자동측정소 오존농도가 0.12 ppm 이상일 때 “주의보”, 0.3 ppm 이상일 때 “경보” 및 0.5 ppm 이상일 때 중대경보 발령
자료 : 대기오염실시간공개시스템 홈페이지(<http://www.airkorea.or.kr/>)

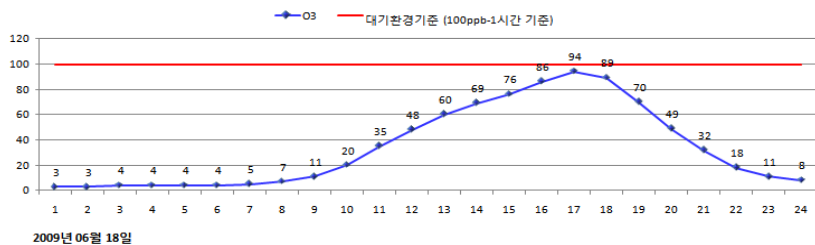


<그림 4-9> 2009년 서울시 평균 오존 농도(5월 8일)

<표 4-6> 서울시 2009년 오존주의보 발령현황(6월)

일수	날짜	발령 농도 (ppm)	해제농도 (ppm)	최고 농도 (ppm)	발령 시간 (시)	해제 시간 (시)	경과 시간	발령지역 (측정소 명)
1	06-18	0.122	0.088	0.122	17	18	1	남서지역 (금천구 시흥동)

자료 : 대기오염실시간공개시스템 홈페이지(<http://www.airkorea.or.kr/>)

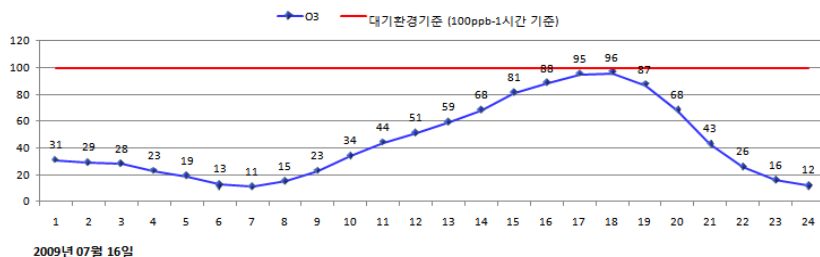


〈그림 4-10〉 2009년 서울시 평균 오존 농도(6월 18일)

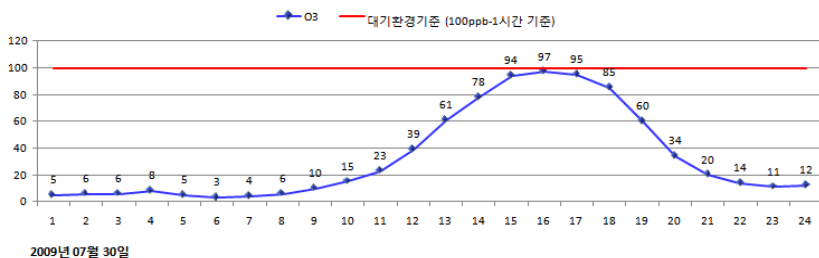
〈표 4-7〉 서울시 2009년 오존주의보 발령현황(7월)

일수	날짜	발령 농도 (ppm)	해제농도 (ppm)	최고 농도 (ppm)	발령 시각 (시)	해제 시각 (시)	경과 시간	발령지역 (측정소 명)
1	07-16	0.127	0.104	0.127	17	19	2	남서지역
2	07-30	0.121	0.103	0.122	15	17	2	남서지역
	07-30	0.127	0.095	0.143	16	20	4	북동지역

자료 : 수도권대기환경청, 수도권대기환경정보 2009년 12월호



〈그림 4-11〉 2009년 서울시 평균 오존 농도(7월 16일)

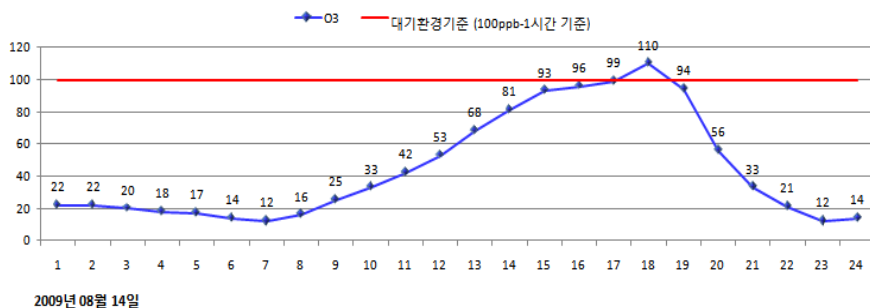


〈그림 4-12〉 2009년 서울시 평균 오존 농도(7월 30일)

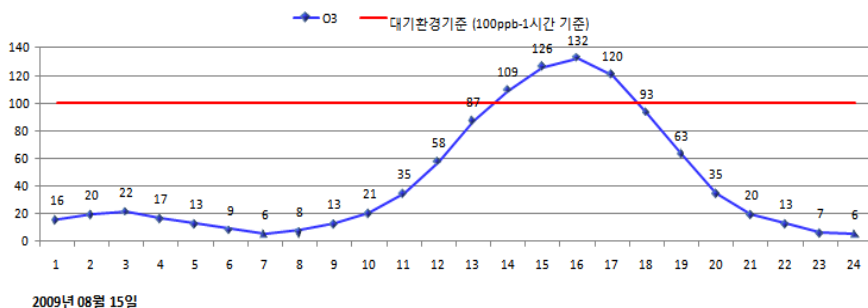
〈표 4-8〉 서울시 2009년 오존주의보 발령현황(8월)

일수	날짜	발령 농도 (ppm)	해제 농도 (ppm)	최고 농도 (ppm)	발령 시간 (시)	해제 시간 (시)	경과 시간	발령지역 (측정소명)
1	08-14	0,137	0,084	0,138	15	20	5	북동지역
	08-14	0,129	0,103	0,129	16	18	2	남동지역
	08-14	0,124	0,098	0,137	16	19	3	남서지역
	08-14	0,127	0,094	0,127	18	19	1	북서지역
2	08-15	0,123	0,093	0,129	14	18	4	북서지역
	08-15	0,137	0,094	0,164	14	19	5	북동지역
	08-15	0,14	0,097	0,153	15	18	3	남서지역
	08-15	0,141	0,117	0,144	15	18	3	남동지역

자료 : 수도권대기환경청, 수도권대기환경정보 2010년 1호



〈그림 4-13〉 2009년 서울시 평균 오존 농도(8월 14일)



〈그림 4-14〉 2009년 서울시 평균 오존 농도(8월 15일)

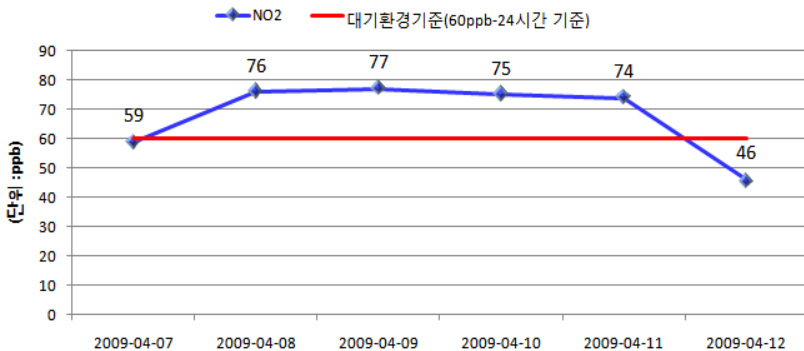
(3) 2009년 서울시 고농도 이산화질소 발생일

2009년 서울시에서 고농도 이산화질소 발생일은 2009년 4월 8일부터 4월 11일까지로 24시간 환경기준을 초과한 것을 볼 수 있으며, 11일 이후로 그 농도가 감소하는 것으로 나타났다.

〈표 4-9〉 서울시 2009년 이산화질소 측정 자료(4월)

발생일	NO ₂ (ppb)
2009-04-07	59
2009-04-08	76
2009-04-09	77
2009-04-10	75
2009-04-11	74
2009-04-12	46

자료 : 서울시, 2009년 서울시 측정 자료, 2009



〈그림 4-15〉 2009년 서울시 이산화질소 일별 측정 자료

(4) 고농도 사례일의 종합분석

2009년 서울시에서 발생한 오염물질별 고농도 사례일을 살펴본 결과, 미세먼지는 봄과 겨울철에, 이산화질소도 미세먼지와 비슷한 시기에, 오존의 경우 늦은 봄과 여름철에 발생하는 것으로 나타났다.

고농도로 하루 이상 지속적으로 발생한 달은 미세먼지가 1월, 2월, 4월, 6월

이며, 이산화질소는 4월, 오존은 5월, 6월, 7월, 8월인 것으로 나타났다. 세 가지 오염물질이 대부분 평균경향보다 높게 나타나는 사례일을 선별하고자, 고농도가 나타난 사례일의 오염물질별 농도 및 기상에 대해서 살펴보았다.

① 1월 사례일

미세먼지가 고농도로 발생한 1월 17일부터 1월 18일까지의 경우, 16일 오전 9시경 서해안에서 농도가 증가하기 시작하여 18일 오후 10시에 최고농도를 보였다가 감소하기 시작하였다. 사례일의 이산화질소는 연평균 및 월평균 농도에 비해 높은 농도를 보였으며, 오존은 월평균이나 연평균농도와 비교 시 비교적 낮은 농도를 보였다(<표 4-10> 참조).

<표 4-10> 미세먼지 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(1월)

발생일	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppm)
2009. 1. 16	60	54	0.003
2009. 1. 17	102	54	0.004
2009. 1. 18	117	53	0.006
2009. 1. 19	74	40	0.012
1월 월평균	57	42	0.011
2009년 연평균	54	35	0.021

자료 : 서울시, 2009년 서울시 측정 자료, 2009

고농도 발생기간의 기상분석 결과, 전체적으로 약한 풍속의 증감과 함께 안정되고 정체된 대기상태에서 미세먼지 농도가 높아지기 쉬운 조건이 형성되었다. 18일 오후부터 북서풍 계열의 강한 바람과 함께 미세먼지 고농도 현상이 나타났고, 19일 오전부터 그 영향이 약해졌다.

〈표 4-11〉 1월 16~19일의 기상요소 일평균(서울)

요소		16일	17일	18일	19일	1월 평균 (합계)
기온(℃)	평균	-2.8	-14.	2.6	0.6	-2.0
	최고	0.4	3.1	6.1	4.7	2.3
	최저	-4.8	-5.9	0.1	-2.7	-5.5
일강수량(mm)		3.3	-	-	-	0.2 (5.7)
풍속(m/s)		2.0	2.3	2.4	2.6	2.5
최대(m/s)	풍향	NE	NE	W	w	W
	풍속	3.2	3.5	6.1	6.1	8.1
습도(%)	평균	80.8	76.8	71.8	48.0	50.0
	최소	48	58	59	20	30.6
일조합(hr)		1.8	7.5	0.3	7.8	6.8 (210.6)
일조율(%)		18.2	75.8	3.0	78.0	68.6
일사합(MJ/m ²)		4.16	9.10	3.34	9.85	8.49 (263.32)
증발량(mm)		1.7	1.0	0.4	1.8	1.4 (44.2)
전운량(10)		6.0	0.9	7.8	2.3	2.5
현지기압(hPa)		1017.6	1015.7	1006.5	1012.3	1017.0
지면온도(℃)		-3.1	-3.3	0.3	-0.6	-3.3

자료 : 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr/>)

② 2월 사례일

2월 4일부터 2월 8일까지의 경우, 이산화질소는 24시간 환경기준을 초과하는 단기 고농도사례가 발생하는 등 비교적 높은 농도를 보였으며, 오존은 월평균이나 연평균농도와 비교 시 비교적 낮은 농도를 보였다(<표 4-12> 참조).

〈표 4-12〉 미세먼지 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(2월)

발생일	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppm)
2009. 2. 4	114	65	0.005
2009. 2. 5	105	52	0.009
2009. 2. 6	142	58	0.006
2009. 2. 7	145	60	0.005
2009. 2. 8	101	50	0.008
2월 월평균	80.6	42.2	0.013
2009년 연평균	54	35	0.021

자료 : 서울시, 2009년 서울시 측정 자료, 2009

〈표 4-13〉 2월 4~8일의 기상요소 일평균(서울)

요소		4일	5일	6일	7일	8일	2월 평균 (합계)
기온(℃)	평균	8.7	9.8	10.9	14.1	16.2	11.6
	최고	12.7	15.8	17.0	21.3	23.9	17.6
	최저	6.0	5.7	5.4	7.8	9.8	6.8
일강수량(mm)		-	-	-	-	-	4.1 (36.9)
풍속(m/s)		2.9	2.5	2.8	2.2	2.1	2.6
최대(m/s)	풍향	WSW	WNW	SW	W	WNW	W
	풍속	6.2	5.6	5.7	4.7	4.9	6.3
습도(%)	평균	67.6	68.4	54.3	46.3	37.4	50.3
	최소	48	34	30	17	15	26.9
일조합(hr)		3.0	9.3	11.3	10.6	11.1	4.5 (125.6)
일조율(%)		23.6	72.7	88.3	82.2	86.0	70.8
일사합(MJ/m ²)		15.52	20.34	22.55	21.88	21.52	8.5 (238.99)
증발량(mm)		2.5	4.3	5.3	5.6	6.5	1.7 (51.0)
전운량(10)		6.1	0.6	0.0	0.0	0.0	2.0
현지기압(hPa)		1009.0	1007.1	1003.9	1006.2	1009.7	1009.7
지면온도(℃)		10.9	13.2	14.2	16.0	18.1	14.2

자료 : 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr/>)

이 기간의 기상분석 결과, 대부분 서풍계열의 약한 바람이 불어 북서쪽에서 수송되어 온 기류의 영향이 있었으나 대기가 안정화되면서 오염물질의 농도가 증가하였다.

③ 4월 사례일

미세먼지와 이산화질소가 고농도로 발생한 4월 7일부터 4월 12일까지의 경우, 오존도 단기기준을 초과하는 수준의 고농도는 아니나 4월 평균이나 2009년 연평균농도와 비교 시 높은 농도를 나타냈다(<표 4-14> 참조).

〈표 4-14〉 미세먼지와 이산화질소 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(4월)

발생일	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppm)
2009. 4. 6	92	47	0.031
2009. 4. 7	126	59	0.031
2009. 4. 8	124	76	0.022
2009. 4. 9	144	77	0.031
2009. 4. 10	148	75	0.036
2009. 4. 11	116	74	0.029
2009. 4. 12	103	46	0.047
4월 월평균	66.3	44.4	0.028
2009년 연평균	54	35	0.021

자료 : 서울시, 2009년 서울시 측정 자료, 2009

〈표 4-15〉 4월 6~11일의 기상요소 일평균(서울)

요소		6일	7일	8일	9일	10일	11일	4월 평균(합계)
기온(°C)	평균	10.9	14.1	16.2	17.5	17.3	18.5	12.7
	최고	17.0	21.3	23.9	24.9	23.6	25.3	18.0
	최저	5.4	7.8	9.8	10.9	11.8	11.8	8.1
일강수량(mm)		-	-	-	-	-	0.1	7.4 (66.5)
풍속(m/s)		2.8	2.2	2.1	2.1	2.4	2.0	2.6
최대(m/s)	풍향	SW	W	WNW	WNW	WSW	WNW	WSW
	풍속	5.7	4.7	4.9	5.5	5.4	6.2	5.4
습도(%)	평균	54.3	46.3	37.4	37.6	37.6	31.8	54.4
	최소	30	17	15	19	17	13	31.2
일조합(hr)		11.3	10.6	11.1	11.3	11.1	10.4	6.8 (204.5)
일조율(%)		88.3	82.2	86.0	87.6	85.4	80.0	52
일사합(MJ/m ²)		22.5	21.88	21.52	21.60	22.29	21.31	17.2 (517.7)
증발량(mm)		5.3	5.6	6.5	6.8	7.1	7.2	4.5 (135.9)
전운량(10)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	4.1
현저기압(hPa)		1003.9	1006.2	1009.7	1011.4	1010.8	1008.3	1004.9
지면온도(°C)		14.2	16.0	18.1	18.8	19.4	19.5	14.4

자료 : 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr/>)

이 기간의 기상분석 결과, 4일부터 우리나라 서해상에 위치한 이동성고기압의 영향을 지속적으로 받으며 서풍계열의 약한 바람이 지배하였다. 낮동안에는

강한 일사와 평균 이상 온도의 건조한 대기상태가 유지되면서 대기오염물질의 농도가 서서히 증가하였다.

④ 5월 사례일

오존 고농도가 나타난 5월 8일의 경우, 미세먼지와 이산화질소 농도는 단기 기준은 만족하나 5월 평균 및 2009년 연평균농도에 비하여 높게 조사되었다.

〈표 4-16〉 오존 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(5월)

발생일	PM10 (㎍/㎥)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppm)
2009. 5. 7	76	48	0.043
2009. 5. 8	98	60	0.038
2009. 5. 9	74	41	0.052
5월 월평균	57	38	0.032
2009년 연평균	54	35	0.021

자료 : 서울시, 2009년 서울시 측정 자료, 2009

〈표 4-17〉 5월 7~9일의 기상요소 일평균(서울)

요소		7일	8일	9일	5월 평균(합계)
기온(℃)	평균	14.6	16.7	19.0	17.2
	최고	20.6	23.0	25.2	22.0
	최저	9.6	12.1	13.4	13.0
일강수량(mm)		-	-	-	4.0 (124.0)
풍속(m/s)		3.7	2.7	2.0	2.6
최대(m/s)	풍향	WSW	SW	WNW	SW
	풍속	6.0	4.7	7.2	9.9
습도(%)	평균	52.8	49.9	45.8	62.2
	최소	22	25	27	39.4
일조합(hr)		12.3	11.7	7.5	5.8 (178.5)
일조율(%)		88.5	83.6	53.6	40.8
일사합(MJ/㎡)		26.79	24.60	21.51	17.28 (535.71)
증발량(mm)		6.5	5.9	6.3	4.6 (140.9)
전운량(10)		0.4	2.9	7.0	5.4
현지기압(hPa)		997.9	999.1	998.6	1000.6
지면온도(℃)		16.5	18.5	20.7	18.7

자료 : 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr/>)

이 기간의 기상분석 결과, 오존이 고농도로 발생한 5월 8일은 온도가 높았고 일조합과 일조율의 값도 5월 평균값보다 높게 나타난 맑은 날이었다.

⑤ 6월 사례일

미세먼지 고농도 사례일인 6월 1~2일의 경우, 이산화질소는 6월 평균 및 연평균농도보다 낮았으며, 오존은 6월 평균 및 연평균농도보다 높았던 것으로 조사되었다(<표 4-18> 참조).

이 기간의 기상분석 결과, 풍속과 미세먼지 농도의 증감 패턴은 비슷하나 풍속이 강하지 않았고, 서남서풍의 주풍이 나타났으며, 상대습도 또한 약간 증가하였다.

<표 4-18> 오존 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(6월)

발생일	PM10 (μg/m ³)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppm)
2009. 6. 1	103	32	0.057
2009. 6. 2	109	23	0.063
2009. 6. 3	55	26	0.043
6월 월평균	50	32	0.033
2009년 연평균	54	35	0.021

자료 : 서울시, 2009년 서울시 측정 자료, 2009

<표 4-19> 6월 1~3일의 기상요소 일평균(서울)

요소		1일	2일	3일	6월 평균(합계)
기온(℃)	평균	19.1	21.0	21.1	23.4
	최고	26.2	26.6	26.5	28.2
	최저	12.1	14.8	16.2	19.3
일강수량(mm)		-	-	-	4.3 (127.6)
풍속(m/s)		2.1	1.9	2.7	2.1
최대(m/s)	풍향	w	W	WNW	WNW
	풍속	4.8	4.7	5.0	6.0
습도(%)	평균	45.0	48.1	57.5	61.7
	최소	12	28	39	39.3

〈표 계속〉 6월 1~3일의 기상요소 일평균(서울)

요소	1일	2일	3일	6월 평균(합계)
일조합(hr)	13,3	12,2	12,8	6,8 (203,0)
일조율(%)	91,1	83,6	87,7	46,0
일사합(MJ/m ²)	29,74	26,02	27,59	19,37 (581,11)
증발량(mm)	7,0	6,5	6,7	5,2 (154,9)
전운량(10)	1,3	0,5	0,3	5,0
현지기압(hPa)	1004,7	1006,8	1008,3	999,5
지면온도(°C)	21,8	23,4	25,3	26,1

자료 : 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr/>)

오존 고농도 사례일인 6월 18일의 경우, 이산화질소와 미세먼지는 월평균 및 연평균농도에 비해 약간 높게 나타났다(<표 4-20> 참조). 이 기간의 기상분석 결과, 고농도 사례일에 온도가 높았고, 습도는 낮은 것으로 분석되었다.

〈표 4-20〉 오존 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(6월)

발생일	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppm)
2009. 6. 17	60	50	0,009
2009. 6. 18	55	41	0,033
2009. 6. 19	50	42	0,021
6월 월평균	50	32	0,033
2009년 연평균	54	35	0,021

자료 : 서울시, 2009년 서울시 측정 자료, 2009

〈표 4-21〉 6월 17~19일의 기상요소 일평균(서울)

요소		17일	18일	19일	06월 평균(합계)
기온(°C)	평균	24,0	25,9	23,0	23,4
	최고	27,6	31,1	25,8	28,2
	최저	20,9	22,8	21,5	19,3
일강수량(mm)		-	0,4	4,5	4,3 (127,6)
풍속(m/s)		1,6	2,1	2,2	2,1
최대(m/s)	풍향	W	WNW	WSW	WNW
	풍속	4,2	4,1	5,9	6,0

〈표 계속〉 6월 17~19일의 기상요소 일평균(서울)

요소		17일	18일	19일	06월 평균(합계)
습도(%)	평균	73.1	67.5	79.1	61.7
	최소	58	37	62	39.3
일조합(hr)		0.0	3.4	0.3	6.8 (203.0)
일조율(%)		0.0	23.0	2.0	46.0
일사합(MJ/m ²)		11.48	15.85	11.92	19.37 (581.11)
증발량(mm)		2.8	3.4	3.0	5.2 (154.9)
전운량(10)		9.4	7.6	9.0	5.0
현지기압(hPa)		996.5	992.7	994.1	999.5
지면온도(°C)		24.6	27.2	25.1	26.1

자료 : 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr/>)

⑥ 7월 사례일

오존이 고농도로 발생한 7월 16일의 경우, 미세먼지는 7월 평균 및 2009년 연평균농도에 비하여 다소 높았으나 이산화질소는 7월 평균 및 2009년 연평균 농도에 비해 낮게 나타났다.

〈표 4-22〉 오존 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(7월)

발생일	PM10 (μg/m ³)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppm)
2009. 7. 15	55	23	0.040
2009. 7. 16	58	30	0.044
2009. 7. 17	32	37	0.009
7월 월평균	41	30	0.028
2009년 연평균	54	35	0.021

자료 : 서울시, 2009년 서울시 측정 자료, 2009

〈표 4-23〉 7월 15~17일의 기상요소 일평균(서울)

요소		15일	16일	17일	7월 평균(합계)
기온(°C)	평균	23.1	26.7	24.8	24.3
	최고	25.9	32.4	26.6	28.2
	최저	19.9	21.3	22.9	21.0
일강수량(mm)		-	-	56.5	30.0 (659.4)

〈표 계속〉 7월 15~17일의 기상요소 일평균(서울)

요소		15일	16일	17일	7월 평균(합계)
풍속(m/s)		3.5	2.0	1.5	2.3
최대(m/s)	풍향	WSW	WNW	SW	WSW
	풍속	6.0	4.3	4.3	10.4
습도(%)	평균	80.6	67.0	67.0	75.8
	최소	67.0	36.0	36.0	55.8
일조합(hr)		1.6	9.2	0.0	3.7 (115.8)
일조율(%)		11.0	63.4	0.0	25.9
일사합(MJ/㎡)		13.77	25.26	4.73	14.1 (437.75)
증발량(mm)		3.8	5.6	1.8	4.1 (127.4)
전운량(10)		8.0	5.8	9.8	6.7
현지기압(hPa)		995.8	995.6	995.1	995.3
지면온도(℃)		23.8	27.5	25.2	25.1

자료 : 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr/>)

이 기간의 기상분석 결과, 오존이 고농도로 발생한 16일은 온도가 높았고 일조합과 일조율의 값도 7월 평균값보다 높게 나타난 맑은 날이었다.

고농도 오존이 두 번째로 발생한 7월 30일의 경우, 미세먼지는 낮았고, 이산화질소는 평균적인 농도보다 다소 높게 나타났다(<표 4-24>). 이 기간의 기상분석 결과, 사례일인 30일은 온도가 높았고, 일조합과 일조율, 습도값이 7월 평균값보다 높게 나타났다.

〈표 4-24〉 오존 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(7월)

발생일	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppm)
2009. 7. 29	21	23	0.026
2009. 7. 30	40	36	0.033
2009. 7. 31	42	39	0.025
7월 월평균	41	30	0.028
2009년 연평균	54	35	0.021

자료 : 서울시, 2009년 서울시 측정자료, 2009

〈표 4-25〉 7월 29~31일의 기상요소 일평균(서울)

요소		29일	30일	31일	7월 평균(합계)
기온(℃)	평균	25.5	26.5	26.7	24.3
	최고	30.4	30.6	30.4	28.2
	최저	21.5	22.6	24.1	21.0
일강수량(mm)		0.1	-	0.0	30.0 (659.4)
풍속(m/s)		1.9	2.0	1.9	2.3
최대(m/s)	풍향	WNW	WNW	W	WSW
	풍속	4.2	3.6	4.2	10.4
습도(%)	평균	67.1	67.6	63.9	75.8
	최소	44	47	51	55.8
일조합(hr)		3.7	7.3	4.4	3.7 (115.8)
일조율(%)		61.3	54.9	31.2	25.9
일사합(MJ/m ²)		21.53	13.70	14.55	14.1 (437.75)
증발량(mm)		5.3	5.5	4.2	4.1 (127.4)
전운량(10)		3.5	5.0	3.3	6.7
현기압(hPa)		996.5	999.6	919.9	995.3
지면온도(℃)		26.4	27.4	23.1	25.1

자료 : 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr/>)

⑦ 8월 사례일

오존이 고농도로 발생한 8월 14일 ~ 15일의 경우, 미세먼지와 이산화질소 농도는 단기기준을 만족하나 8월 평균 및 2009년 연평균농도에 비하여 높게 조사되었다.

이 기간의 기상분석 결과, 14일~15일 사이에는 평균풍속이 8월 평균값(2.2 m/s)에 비해 낮았으며, 일조합, 일조율도 8월 평균값에 비해 높게 나타난 맑고 무더운 날씨로 활발한 오존생성의 조건을 갖추고 있음을 알 수 있다.

〈표 4-26〉 오존 고농도 사례일에 대한 각 오염물질 농도표(8월)

발생일	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppm)
2009. 8. 14	80	35	0,045
2009. 8. 15	72	39	0,044
2009. 8. 16	45	30	0,038
8월 월평균	31	26	0,024
2009년 연평균	54	35	0,021

자료 : 서울시, 2009년 서울시 측정 자료, 2009

〈표 4-27〉 8월 13~17일의 기상요소 일평균(서울)

요소		13일	14일	15일	16일	17일	8월 평균(합계)
기온(℃)	평균	26,3	27,6	27,9	29,1	26,8	25,7
	최고	30,9	33,4	33	34,4	30,9	29,5
	최저	21,9	23,3	22,8	24,7	24	22,4
일강수량(mm)		-	-	-	-	0,2	17,8 (285,3)
풍속(m/s)		1,9	1,6	1,7	1,8	2,3	2,2
최대(m/s)	풍향	SW	WNW	W	ENE	NW	-
	풍속	5	4,5	4,1	3,5	3,7	4,4
습도(%)	평균	74,6	64,9	64	55,8	62,6	69,1
	최소	49	29	44	24	53	49,8
일조합(hr)		7,8	9,4	11,6	12,1	1,6	4,9 (150,9)
일조율(%)		56,9	68,6	85,3	89	11,8	35,9
일사합(MJ/m ²)		20,15	23,35	23,15	25,56	13,32	15,00 (465,59)
증발량(mm)		5	6,5	6,5	7,9	3,6	4,5 (140,6)
전운량(10)		2,9	0,6	0	0	5,8	5,6
현지기압(hPa)		994,2	998,8	1000,4	1003,2	1004,4	998,9
지면온도(℃)		26,8	28,8	29,4	31,8	29,3	26,7

자료 : 수도권대기환경청, 수도권대기환경정보 2010년 1월호

⑧ 모델분석을 위한 고농도 대표 사례기간

모델링 분석을 위해 위에서 조사한 오염물질별 고농도사례일 중 세 가지 오염물질의 농도가 평균적인 경향보다 높았던 사례일을 선정하고자 하였다. 이에 따라, 2월 4~8일, 4월 7~12일, 5월 8일, 6월 18일, 7월 30일, 8월 14~15일을 고농도 대표 사례기간으로 선정하였다.

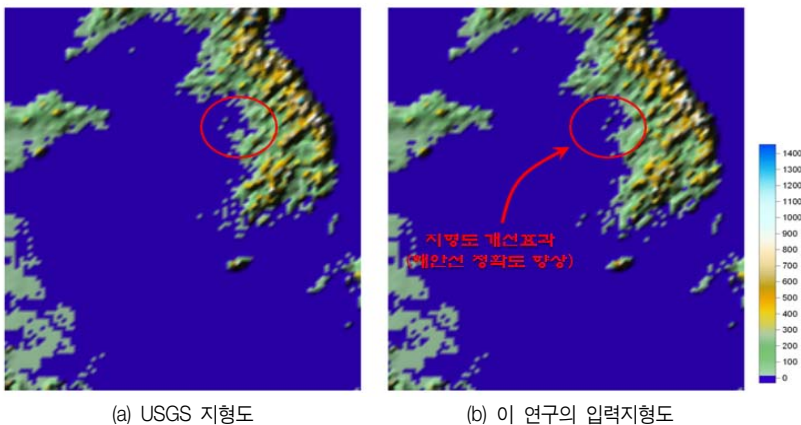
제3절 모델링 입력자료

1. 기상모델링 입력자료 구축

기상모델링 수행을 위해서는 지형자료와 토지이용도가 기본적인 입력 자료로 필요하며, 일반적으로 USGS 자료가 활용된다. 이 연구에서는 지형도와 토지이용도를 환경부 최신자료로 대체하고 기상모델의 초기 입력 자료와 기상 관측 자료를 활용하여 모델링의 정확도를 개선하였다.

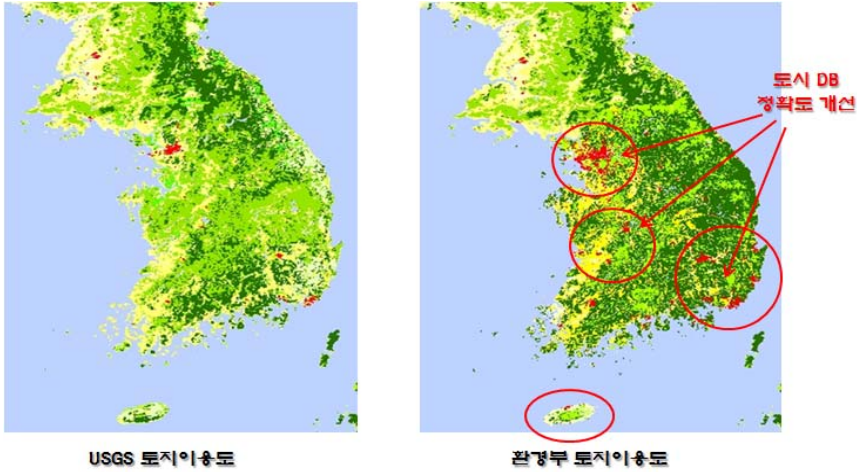
1) 지형도 및 토지이용도

일반적으로 기상예보모델 또는 화학수송 모델 등 장거리 이동 계산을 위하여 모델에서 제공하는 USGS의 지형 및 토지이용도 자료 대신 최신의 한반도 토지 및 지형의 변화를 반영하고 있는 환경부 제공 자료를 재가공하여 입력자료로 사용하였다.



〈그림 4-16〉 USGS 지형도와 종합시스템 구축 지형도

<그림 4-17>은 USGS에서 제공되는 토지피복지도와 환경부에서 조사된 토지피복지도를 비교한 것이다. USGS의 토지피복지도는 지형자료와 동일한 기



〈그림 4-17〉 USGS 토지이용도와 종합시스템 구축 토지이용도

간인 1976년에 생산된 자료로, 서울, 부산, 대구 권역만 도시화를 나타내는 붉은색으로 구성되어 있으나, 환경부의 토지피복지도에는 서울에서 확장된 수도권과 광역시가 도시로 나타나고 있으며, 기타 해안지역에서도 상세한 토지피복도가 나타나고 있다.

2) 기상인자 DB 구축

기상청은 현재 자동기상관측장비(ASOS)를 77개 지점에 설치하여 지표기상 관측자료를 생성하고 있으며, 속초, 백령도, 포항, 고산, 흑산도, 오산, 광주 등 7개 지점에서 고층기상을 측정하고 있다.

과거 특정 일자에 대한 모델링 수행을 위하여, 지표기상관측자료와 고층기상 관측자료가 모델링의 정확도 향상을 위한 FDDA(자료동화) 적용 시 입력 자료로 사용되었다.

기상모델인 WRF를 수행하기 위해 필요한 초기 기상 입력자료로는 기상청에서 생성하는 RDAPS자료와 NCEP에서 생성하는 FNL자료를 이용하였다.

미국의 NCEP는 전 지구를 1도 간격으로 모델링을 수행하고 있으며, 6시간 간격의 시간해상도를 갖는 자료를 생성하고 있다. 이 연구에서는 NCEP이 생성하는 여러 자료 중에서 NCEP FNL Analysis Data를 이용하였다. 이 자료는 GRIB포맷으로 생성된 25개 항목의 기상요소와 24개의 수직해상도를 갖는다. 더욱이 이 자료는 지표기상관측자료와 지형고도 등의 자료로 1차 계산된 자료를 다시 재분석하여 모델링 결과의 신뢰도를 높인 자료이며, 과거기간의 모델링을 수행하는 데에 보다 높은 신뢰도를 기대할 수 있다.

2. 배출량 자료

수도권 대기질을 예측하기 위하여 동아시아, 한반도, 수도권 영역에 대한 모델링을 수행하였으며, 이를 위해 동아시아 배출량과 한반도영역에 대한 배출량 자료를 입력자료로 구축하였다.

동아시아 배출량 자료는 INTEX-B 배출량 자료에서 한국을 제외하고 사용하였으며, 국내 배출량 자료는 국립환경과학원의 2007년 CAPSS 자료를 이용하여 서울시에서 성장인자, 저감대책 등을 고려하여 2009년에 대하여 재산정한 자료를 활용하였다(서울시, 2010).

INTEX-B 배출량 자료는 NASA(National Aeronautics and Space Administration)의 지원을 받아 Qiang Zhang, David G. Streets, Decision, Information Sciences Division, Argonne National Laboratory에서 작성하였으며 중국을 포함한 아시아 지역에 대한 0.5도 해상도의 격자별 배출량 자료이다.

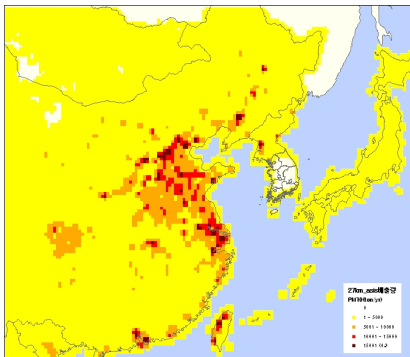
모델링 시스템 구축에는 INTEX-B의 2006년 배출량 자료가 이용되었으며 2006년도 자료에는 NH₃ 배출량이 누락되어 있기 때문에 2000년 자료를 활용하였다. 또한 배출량 모델인 SMOKE의 초기 입력자료로 사용할 수 있도록 재가공하였으며, 동아시아 권역의 SMOKE를 수행함으로써 화학수송모델의 배출량을 생성할 수 있도록 Data Base를 구축하였다.

〈표 4-28〉 2006년 아시아 배출량 자료

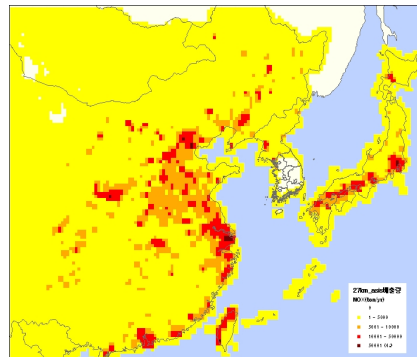
(단위: 천톤/년)

국가명	CO	NOx	SOx	PM10	PM2.5	VOC	NH ₃
China	166,889	20,830	31,020	18,223	13,266	23,247	12,908
Japan	5,314	2,404	871	195	141	2,033	336
Mongolia	351	38	84	27	22	23	82
Taiwan	1,672	642	189	337	175	864	151
other	10,839	2,094	1,714	1,059	782	2,302	163
North Korea	3,583	270	233	301	245	212	101

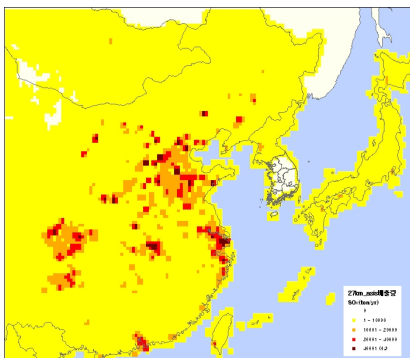
주 : NH₃ 배출량은 2000년 자료 이용



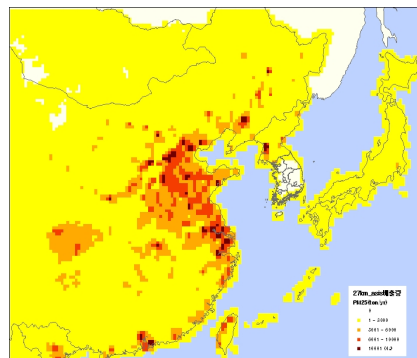
(a) PM10(톤/년)



(b) NOx(톤/년)

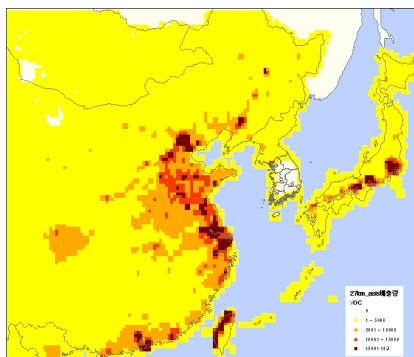


(c) SOx(톤/년)

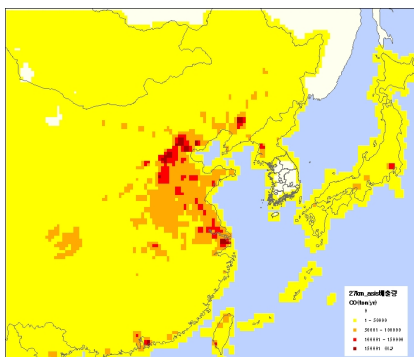


(d) PM2.5(톤/년)

〈그림 4-18〉 2006년 아시아 배출량의 분포도



(e) VOCs(톤/년)



(f) CO(톤/년)

〈그림 계속〉 2006년 아시아 배출량의 분포도

모델링에 이용된 2009년 국내 배출량자료는 <표 4-29>와 같다.

〈표 4-29〉 2009년 국내 배출량

(단위: 톤/년)

구분		PM10	CO	NOx	SOx	VOC
연료연소 (CAPSS)	에너지산업 연소	2,951	40,360	156,304	94,317	5,870
	비산업 연소	2,208	78,135	70,720	64,083	2,910
	제조업 연소	53,144	15,424	155,053	102,172	2,941
	생산공정	6,074	21,771	48,725	85,709	140,357
	에너지수송 및 저장	0	0	0	0	29,752
	유기용제 사용	0	0	0	0	531,282
	도로이동오염원	22,273	489,326	492,502	846	85,470
	비도로이동오염원	3,887	22,021	85,454	50,761	6,338
	폐기물처리	302	2,231	13,097	2,574	40,379
	농업	0	0	0	0	0
이동 오염원 보완	기타 면오염원	294	6,870	163	0	597
	휘발유승용차	645	0	0	0	0
연료연소 보완	이륜차	450	197,153	3,131	11	23,614
	건설기계	8,916	85,975	201,249	482	20,296
비산먼지 추가	가스히트펌프	0	31,165	23,210	0	0
	도로비산(포장)	51,867	0	0	0	0
	도로비산(비포장)	68,807	0	0	0	0
	건설활동	17,372	0	0	0	0
	건설폐기물 재활용	3,383	0	0	0	0
	농업활동	11,291	0	0	0	0
	나대지	17,454	0	0	0	0
	축산활동	8,008	0	0	0	0
	고기구이	2,860	0	0	0	266
	생물성 연소 추가	노천소각(폐기물)	10,440	23,354	1,648	275
노천소각(농업부산물)		14,277	65,902	4,876	710	7,511
숯가마		12,754	9,023	773	0	9,023
아궁이		8,204	56,896	586	3,426	51,580
화목난로		2,177	19,945	283	2,155	4,391
총합계		330,036	1,165,551	1,257,776	407,521	964,930

자료 : 서울시, 서울시 대기 중 미세먼지의 상세모니터링을 통한 미세먼지 특성조사 2차 연구, 2010

제4절 모델링 정합도 평가

1. 모델링 결과 정합도 통계분석 방법

대기질 모델링의 정합도 및 신뢰도 분석을 위해 기본적인 항목인 IOA, RMSE, NMB, MBIAS가 이용되었고 항목별 정의는 아래와 같다.

- IOA(Index of Agreement) : 모델 결과와 측정값의 일치도를 보기 위한 항목(IOA =1 :완전일치, IOA = 0 : 완전불일치, IOA > 0.5이면 적합)

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Model - Obs)^2}{\sum_{i=1}^N (|Model - AVG(Obs)| + |Obs - AVG(Obs)|)^2}$$

- MBIAS(Mean Bias) : 모델값과 측정값의 차이를 전 기간에 대하여 평균하여 구하는 값으로, 측정값에 비해 모델값이 +값이면 과대평가, -값이면 과소평가된 것으로 간주

$$MBIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Model - Obs)$$

- RMSE(Root Mean Square Error) : 모델값과 측정값의 평균 제곱근 오차

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Model - Obs)^2}$$

- NMB(Normalized Mean Bias) : 모델값과 측정값의 차이의 합을 측정값의 합으로 평균화

$$NMB = \frac{\sum_{i=1}^N (Model - Obs)}{\sum_{i=1}^N Obs} \times 100\%$$

- 상관계수(R) : 두 변수 간의 관련성의 정도를 측정하는 통계방법으로, 두 변수 간의 상관성이 높을수록 1에 근접

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N Obs * Model - \left(\sum_{i=1}^N Obs \right) \left(\sum_{i=1}^N Model \right) / n}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^N Obs^2 - \left(\sum_{i=1}^N Obs \right)^2 / n \right] \left[\sum_{i=1}^N Model^2 - \left(\sum_{i=1}^N Model \right)^2 / n \right]}}$$

- MNB(Mean Normalized Bias) : 모델이 관측된 공간적, 시간적 패턴을 재현하는 능력을 평가하는 지표로 정확도를 판단

$$MNB = \frac{\sum_{i=1}^N (Model - Obs)}{\sum_{i=1}^N Obs} \times 100\%$$

- MFE(Mean Fraction Error) : 예측값과 관측값 간의 편차와 오차를 표준화하는 지표(범위 : -200%에서 +200%까지)

$$MFE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Model - Obs|}{\left(\frac{Obs + Model}{2} \right)} \times 100\%$$

2. 기상 모델링 결과 정합도 평가

WRF 모델에 의한 기상모델링 결과를 지역별 기상대(서울, 인천, 수원)의 측정결과와 비교하여 통계분석을 수행하였다.

1) 기상 모델링 결과 통계 분석

2009년 평균적 변화를 조사하기 위한 계절별 대표 사례기간인 1, 4, 8, 11월

과 고농도 대표 사례일이 포함된 2, 5, 6, 7월의 기간을 대상으로, WRF 모델에 의한 기상모델링 결과와 지역별 기상대의 측정결과를 비교하여 통계분석을 수행하였다. 분석 결과, 습도의 일치도지수(IOA)가 0.8, 풍속은 0.7~0.8, 온도는 0.9 이상으로 기상모델링의 정합도가 높은 것으로 조사되었다. 또한, 오차범위(RMSE)가 온도는 2℃ 이내, 습도는 20% 이내, 풍속은 1.5m/s 이내로 나타나 일변화를 기상모델이 잘 모사하고 있는 것으로 나타났다.

〈표 4-30〉 기상모델링 결과 통계분석(서울 기상대)

구분	실측평균	모델평균	IOA	RMSE	MBIAS	NMB
풍속(m/s)	2.4	2.7	0.80	1.2	0.3	11.9
온도(℃)	14.2	14.4	1.00	1.4	0.2	1.2
습도(%)	61.9	57.1	0.89	13.6	-4.7	-7.7

〈표 4-31〉 기상모델링 결과 통계분석(인천 기상대)

구분	실측평균	모델평균	IOA	RMSE	MBIAS	NMB
풍속(m/s)	2.8	2.8	0.83	1.3	-0.001	-0.03
온도(℃)	13.6	14.1	0.99	1.5	0.4	3.3
습도(%)	69.0	62.0	0.84	15.1	-6.9	-10.1

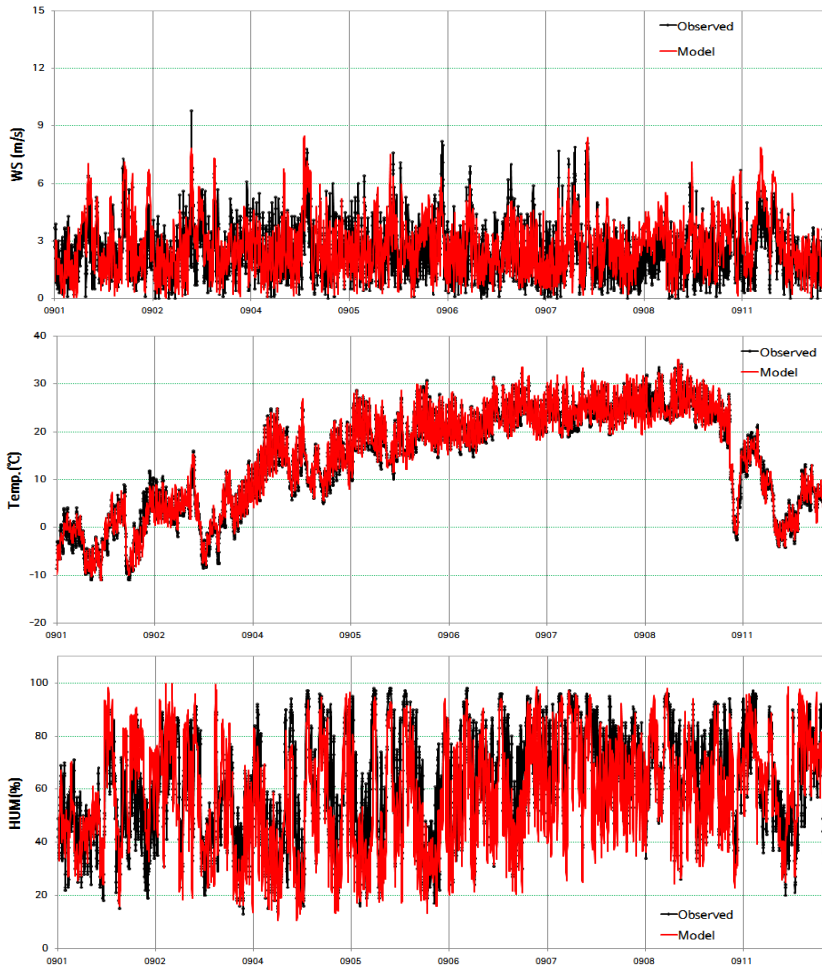
〈표 4-32〉 기상모델링 결과 통계분석(수원 기상대)

구분	실측평균	모델평균	IOA	RMSE	MBIAS	NMB
풍속(m/s)	1.8	2.6	0.76	1.4	0.9	49.3
온도(℃)	13.8	14.5	0.99	1.9	0.7	5.1
습도(%)	72.0	59.5	0.81	18.2	-12.6	-17.5

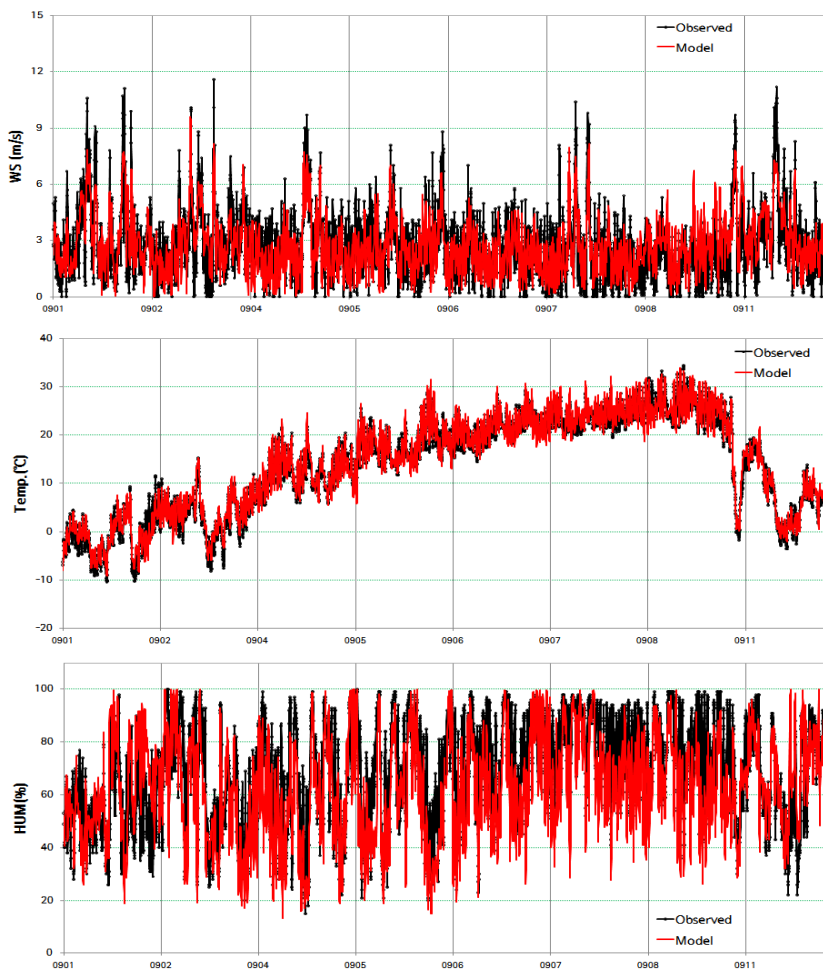
2) 기상 모델링 결과 시계열 및 상관도 분석

<그림 4-19> ~ <그림 4-22>는 WRF 기상모델링 결과를 측정자료인 서울, 인천, 수원 기상대의 시간별 풍속, 온도, 습도 측정결과와 비교하여 시계열 및 상관도로 나타난 그래프이다. 분석 결과, 시계열 및 상관도에서 기상인자의 모사

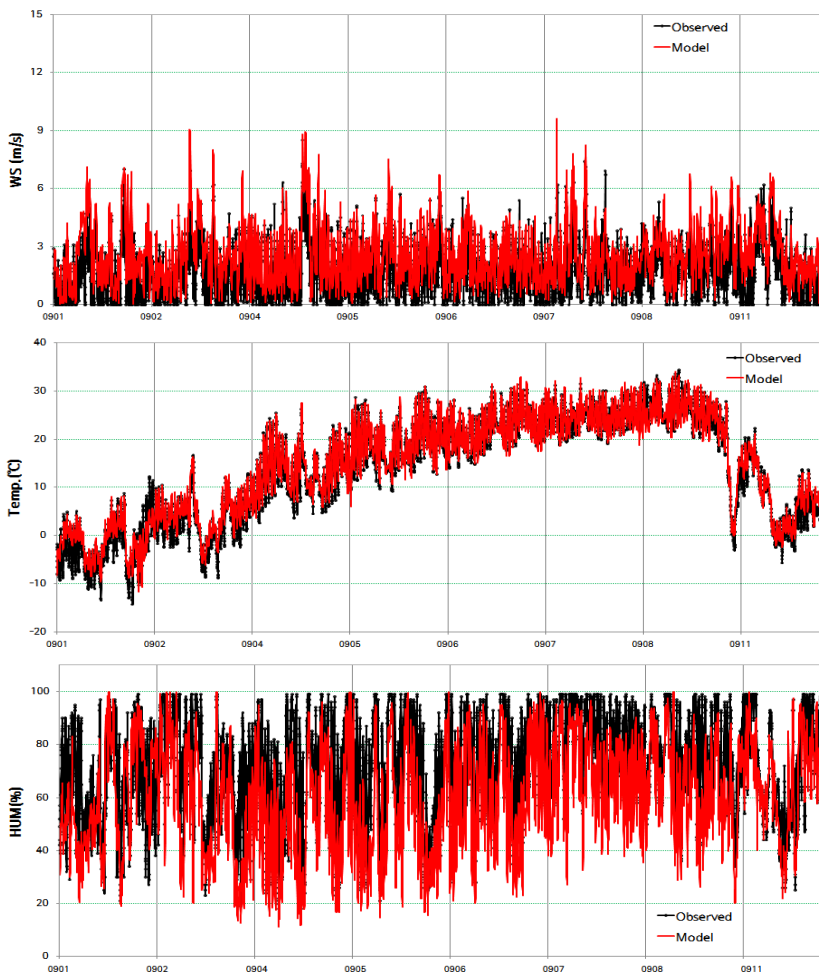
결과가 실측값과 상당히 유의하게 나타나고 있다.



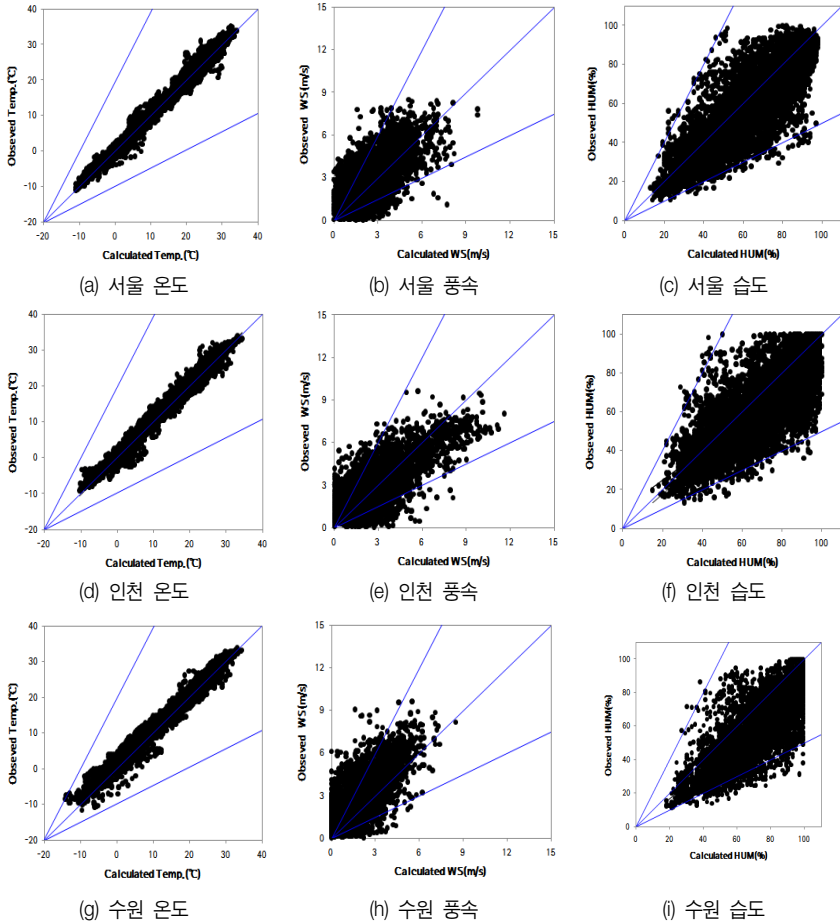
〈그림 4-19〉 2009년 WRF 모델링 결과 시계열 분석(서울 기상대)



〈그림 4-20〉 2009년 WRF 모델링 결과 시계열 분석(인천 기상대)



〈그림 4-21〉 2009년 WRF 모델링 결과 시계열 분석(수원 기상대)



〈그림 4-22〉 2009년 수도권 지역 기상대 측정결과와 WRF 모델링 결과 상관도

3. 대기질 모델링 결과 정합도 평가

2009년 1, 4, 8, 11월과 고농도 사례일이 포함된 2, 5, 6, 7월에 대하여 서울시 25개 대기오염측정지점에서 측정된 실측농도와 대기질 모델로 계산된 결과를 비교하여 통계분석 및 시계열, 상관도를 살펴보았다. 오존이 고농도로 나타난

5, 6, 7, 8월에 대해서는 별도로 시계열 및 상관도를 분석하였다.

1) 대기질 모델링 결과 통계 분석

통계분석 결과, PM10의 경우, 25개 지점의 예측농도가 $36.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 실측농도인 $53.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮게 나타났으나, 일치도지수(IOA)는 0.62 ~ 0.72 범위, R값은 모든 지점에서 0.8 이상으로 실측값과의 높은 상관관계를 나타냈다. 또한, 모든 측정지점에 대한 미세먼지(PM10)의 MFE 통계값이 모두 75% 이하를 나타내고 있으며, 이는 기존의 미세먼지 모델링 정합도 평가에 적용되는 규정을 만족하는 결과이다(James et. al., 2006; 유철 외, 2009).

NO₂는 25개 지점의 예측농도가 38.1ppb로 실측농도인 36.1ppb보다 다소 높게 나타났으나, 모든 지점에서 일치도지수(IOA)는 0.7 이상, R값은 0.85 이상으로 실측값과의 높은 상관관계를 보여주었다. 이산화질소(NO₂)의 MNB값은 -4% ~ +68%의 범위로 평균 24.1%로 조사되었다.

오존의 경우, 25개 지점의 예측농도가 22.3ppb로 실측농도인 23.1ppb보다 다소 낮게 나타났으며, 모든 지점에서 일치도지수(IOA)는 0.7 이상, R값은 0.8 이상으로 실측값과의 높은 상관관계를 나타냈다. 오존의 MNB는 5% ~ 160%의 범위로 평균 72.5%로 조사되어 NO₂와 PM10보다 높았다.

〈표 4-33〉 지점별 PM10 통계결과정리

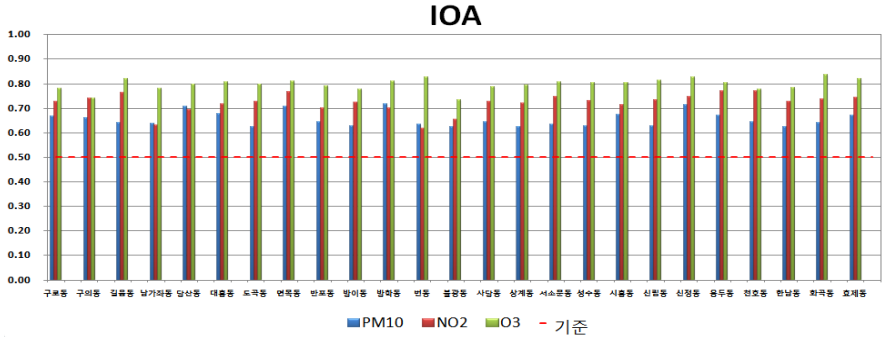
구분	Obs ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Model ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	IOA	MBIAS	RMSE	NMB (%)	R	MFE (%)
구로동	53,3	38,5	0,67	-14,8	36,2	-27,8	0,85	50,9
구의동	50,3	38,6	0,66	-11,6	35,3	-23,1	0,83	50,7
길음동	48,9	36,0	0,64	-12,8	35,0	-26,2	0,83	52,6
남가좌동	56,0	35,8	0,64	-20,4	38,0	-36,5	0,85	60,1
당산동	50,1	36,2	0,71	-14,7	31,0	-29,2	0,87	54,7
대흥동	55,4	37,7	0,68	-18,1	37,5	-32,6	0,86	53,7
도곡동	53,0	37,8	0,62	-16,9	37,1	-31,9	0,83	55,8
면목동	47,7	36,7	0,71	-13,4	29,1	-28,1	0,87	54,6
반포동	52,8	36,5	0,64	-16,4	38,3	-31,0	0,84	53,7
방이동	50,4	35,7	0,63	-15,0	37,3	-29,7	0,83	52,3
방학동	47,6	31,9	0,72	-15,8	30,2	-33,2	0,88	57,3
번동	56,1	34,2	0,63	-21,8	38,1	-38,9	0,86	61,1
불광동	51,0	34,2	0,62	-16,4	37,5	-32,1	0,83	56,4
사당동	56,3	36,1	0,64	-19,6	37,0	-34,9	0,86	57,8
상계동	59,0	35,0	0,63	-24,1	40,3	-40,8	0,86	64,5
서소문동	51,5	36,0	0,63	-15,7	37,0	-30,4	0,83	54,2
성수동	54,6	37,7	0,63	-16,8	39,8	-30,8	0,83	55,6
시흥동	55,6	38,2	0,67	-17,2	34,5	-30,9	0,87	54,0
신림동	54,0	32,8	0,63	-21,3	37,9	-39,3	0,85	62,0
신정동	52,8	40,2	0,71	-12,5	31,3	-23,6	0,87	49,0
용두동	50,4	36,8	0,67	-13,7	33,5	-27,1	0,84	54,7
천호동	55,2	33,5	0,64	-21,4	35,1	-38,8	0,86	64,3
한남동	54,9	38,3	0,62	-16,7	39,9	-30,4	0,83	53,8
화곡동	56,2	38,0	0,64	-17,8	39,6	-31,7	0,85	53,2
효제동	53,4	36,0	0,67	-17,4	34,8	-32,6	0,86	55,1
평균	53,1	36,3	0,7	-16,9	36,0	-31,7	0,8	55,7

〈표 4-34〉 지점별 NO₂ 통계결과정리

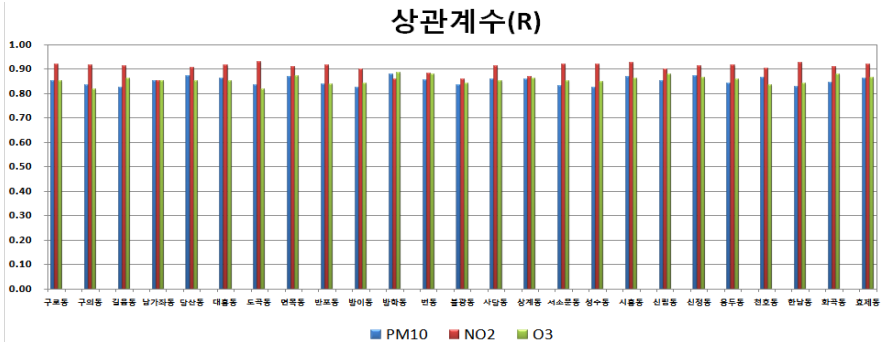
구분	Obs (ppb)	Model (ppb)	IOA	MBIAS	RMSE	NMB (%)	R	MNB (%)
구로동	37.0	45.5	0.73	8.4	19.6	22.8	0.92	48.1
구의동	34.8	42.7	0.74	8.0	19.2	22.9	0.92	42.8
길음동	38.6	34.2	0.76	-4.4	17.5	-11.3	0.91	-4.3
남가좌동	37.3	34.8	0.63	-2.6	23.0	-6.9	0.85	17.3
당산동	39.1	39.8	0.69	1.0	19.0	2.6	0.91	16.9
대흥동	35.5	44.5	0.72	9.0	20.0	25.4	0.92	49.7
도곡동	44.8	45.3	0.73	-0.4	18.4	-0.8	0.93	11.2
면목동	34.2	37.9	0.77	3.3	17.4	9.6	0.91	25.2
반포동	35.0	45.2	0.70	10.2	20.4	29.2	0.92	57.4
방이동	30.8	38.5	0.72	7.6	19.0	24.8	0.90	53.4
방학동	33.5	24.4	0.70	-8.8	20.2	-26.2	0.86	-14.5
변동	39.2	29.6	0.62	-9.3	19.6	-23.8	0.88	-19.9
불광동	24.9	26.7	0.65	2.0	16.5	8.0	0.86	21.5
사당동	34.6	41.8	0.73	7.3	18.9	21.2	0.91	45.3
상계동	31.6	30.2	0.72	-1.4	18.5	-4.4	0.87	17.1
서소문동	38.6	40.3	0.75	1.7	17.5	4.3	0.92	17.7
성수동	32.5	42.2	0.73	9.8	19.2	30.1	0.92	68.1
시흥동	42.2	40.6	0.71	-1.6	17.4	-3.9	0.93	5.2
신림동	36.2	29.6	0.73	-6.6	18.2	-18.1	0.90	-5.2
신정동	36.7	40.5	0.75	3.8	18.2	10.3	0.91	28.4
용두동	38.4	39.0	0.77	0.6	17.6	1.7	0.92	16.4
천호동	34.5	33.9	0.77	-0.5	17.3	-1.4	0.90	11.7
한남동	40.3	47.8	0.73	7.5	19.5	18.6	0.93	40.0
화곡동	35.5	38.3	0.74	3.2	17.9	9.0	0.91	27.2
효제동	36.1	40.3	0.74	4.1	17.5	11.4	0.92	26.1
평균	36.1	38.1	0.72	2.1	18.7	6.2	0.90	24.1

〈표 4-35〉 지점별 O₃ 통계결과정리

구분	Obs (ppb)	Model (ppb)	IOA	MBIAS	RMSE	NMB (%)	R	MNB (%)
구로동	24,6	17,7	0,78	-7,2	17,3	-28,8	0,85	5,2
구의동	25,4	18,4	0,74	-7,0	19,6	-27,6	0,82	9,3
길음동	22,5	25,1	0,82	2,4	16,5	10,7	0,86	123,0
남가좌동	19,8	24,9	0,78	5,1	16,3	25,9	0,85	144,7
당산동	20,5	21,3	0,80	1,3	15,5	6,3	0,85	97,1
대흥동	18,2	18,1	0,81	0,1	13,3	0,5	0,85	45,6
도곡동	17,4	17,5	0,80	0,1	14,9	0,7	0,82	89,7
면목동	25,6	22,1	0,81	-2,4	16,3	-9,3	0,87	39,1
반포동	21,7	17,6	0,79	-4,2	15,7	-19,2	0,84	18,9
방이동	25,1	21,8	0,78	-3,4	18,6	-13,5	0,84	78,1
방학동	26,8	32,1	0,81	5,3	17,6	19,9	0,89	134,3
번동	25,4	28,3	0,83	2,7	16,5	10,7	0,88	86,9
불광동	26,3	30,6	0,73	4,2	19,6	15,8	0,84	140,3
사당동	25,2	19,9	0,79	-5,5	17,9	-21,8	0,85	24,4
상계동	24,6	26,7	0,79	2,1	17,0	8,4	0,86	112,1
서소문동	22,1	20,8	0,81	-1,2	15,9	-5,5	0,85	50,5
성수동	21,8	19,4	0,80	-2,4	15,7	-10,8	0,85	38,9
시흥동	24,8	20,8	0,80	-4,0	16,8	-16,0	0,86	51,5
신림동	23,2	29,0	0,81	5,9	16,8	25,6	0,88	160,0
신정동	23,2	20,9	0,83	-2,4	15,5	-10,3	0,87	49,8
용두동	24,9	21,8	0,80	-2,8	17,5	-11,1	0,86	79,7
천호동	20,3	24,7	0,78	4,2	16,9	20,5	0,84	127,5
한남동	21,8	15,9	0,78	-5,8	16,2	-26,8	0,84	11,4
화곡동	23,9	22,4	0,84	-1,8	15,2	-7,5	0,88	49,9
효제동	21,8	20,8	0,82	-0,9	14,5	-4,1	0,87	43,4
평균	23,1	22,3	0,80	-0,7	16,6	-2,7	0,85	72,5



〈그림 4-23〉 지점별 IOA

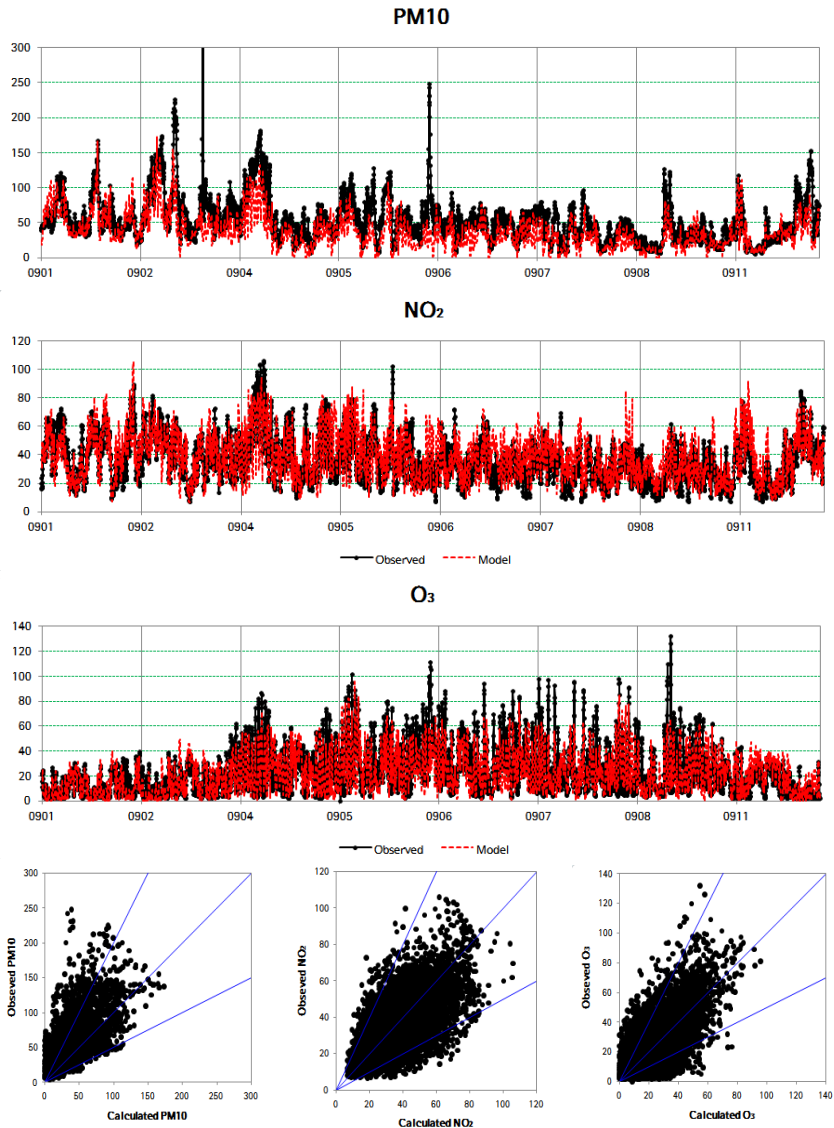


〈그림 4-24〉 지점별 상관계수(R)

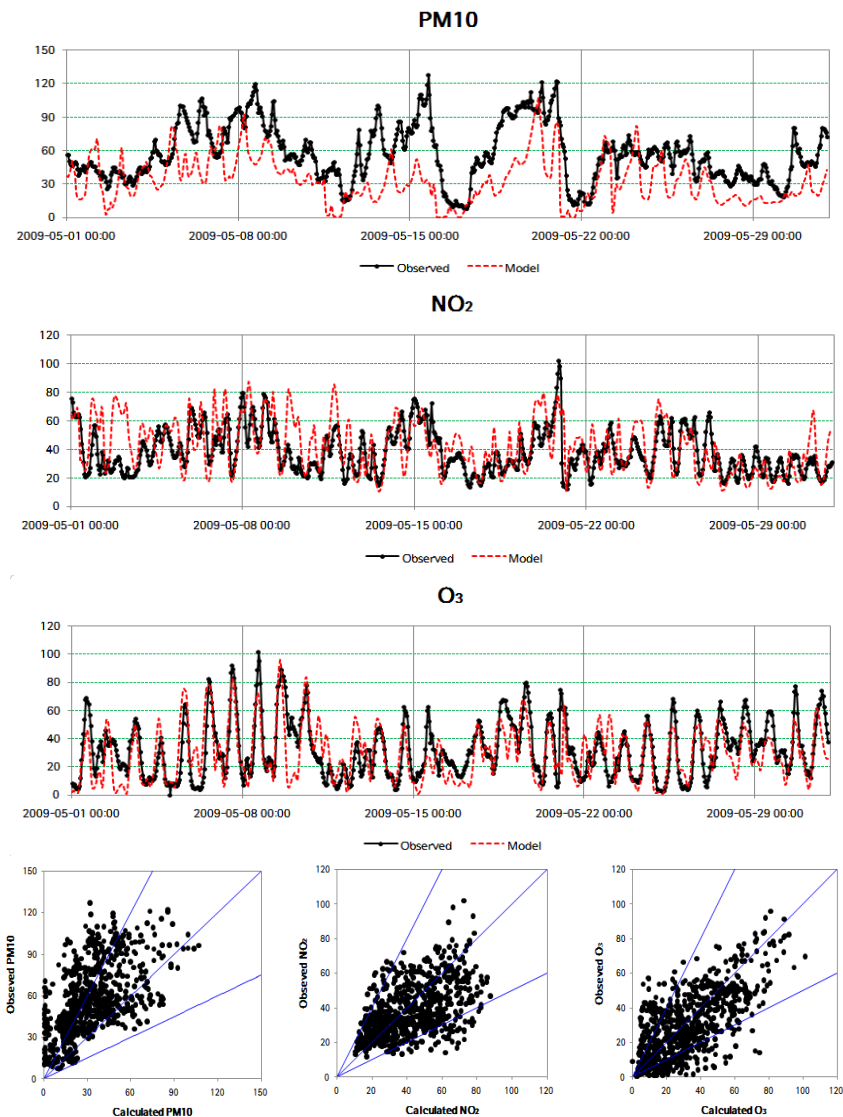
2) 대기질 모델링 결과 시계열 및 상관도 분석

<그림 4-25> ~ <그림 4-29>는 서울시 25개 대기측정지점의 PM10, NO₂, O₃ 1시간 평균 측정자료와 모델결과를 시계열 및 상관도로 나타낸 것이다. PM10의 경우 전반적으로 모델값이 측정값에 비해 낮게 예측되고 있으나 일변화의 경향은 잘 모사하고 있는 것으로 판단된다. PM10의 경우, 동아시아 배출량 자료가 비산면지를 포함하고 있지 않고 황사와 같은 상황이 모델링을 통해 모사되지 못하는 점이 저평가의 한 원인이 될 것으로 보인다. NO₂와 O₃의 시계열 분포는 대체적으로 유사하게 모사되고 있으나 O₃의 최고농도가 실측값보다 다

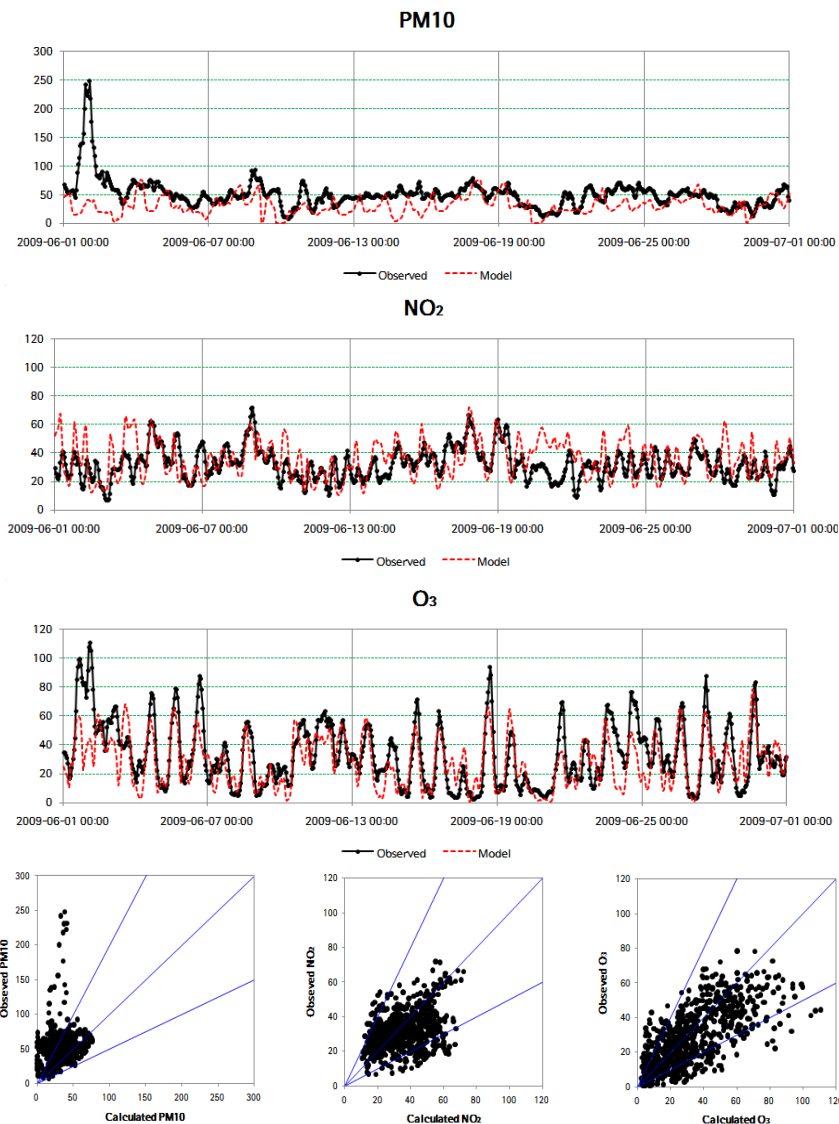
소 낮게 나타나고 있다.



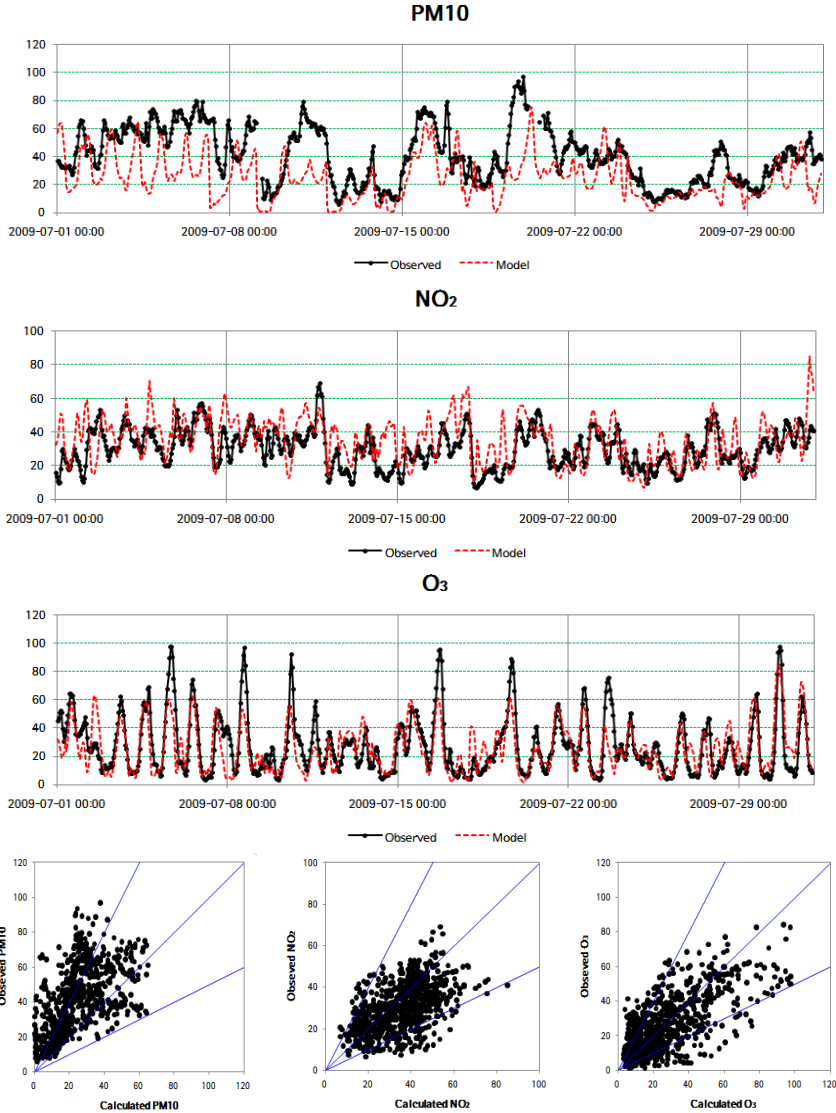
〈그림 4-25〉 2009년 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 11월의 모델링 결과와 측정값 비교 시계열 및 상관도



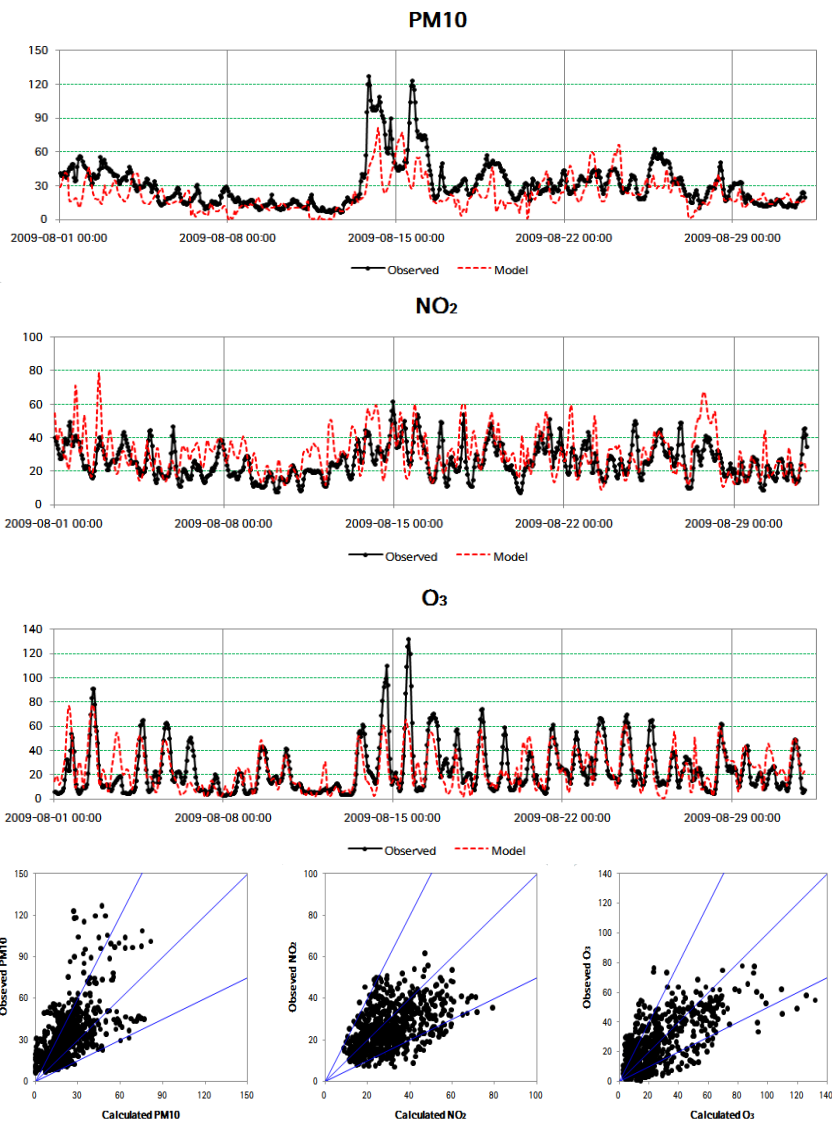
〈그림 4-26〉 2009년 고농도 사례일인 5월의 모델링 결과와 측정값 비교 시계열 및 상관도



〈그림 4-27〉 2009년 고농도 사례일인 6월의 모델링 결과와 측정값 비교 시계열 및 상관도



〈그림 4-28〉 2009년 고농도 사례일인 7월의 모델링 결과와 측정값 비교 시계열 및 상관도



〈그림 4-29〉 2009년 고농도 사례일인 8월의 모델링 결과와 측정값 비교 시계열 및 상관도

3) 정리

2009년 1, 2, 4~8, 11월에 대한 PM10, NO₂, O₃에 대한 모델결과와 실측값의 통계분석 결과에서는 25개 모든 측정지점에서 일치도지수가 0.6 이상, 상관계수는 0.8 이상을 나타내어 유의한 상관성을 보여주었다. 시계열 분석에서 PM10이 전반적으로 모델농도가 낮게 예측되었고 오존의 고농도가 저평가되는 경향을 보였으나, 대체적으로 모델이 각 오염물질의 일변화를 잘 모사하고 있는 것으로 나타났다.

제5장 모델의 적용 및 분석

제1절 대기관리정책의 복합영향 분석

제2절 서울시 대기질 특성분석

제1절 대기관리정책의 복합영향 분석

1. 기존 대기관리정책의 배출량 저감 효과

대기환경 개선을 위한 수도권 기본계획은 서울(전 지역), 인천(옹진군(영흥면 제외)을 제외한 전 지역), 경기도(24개시 일부)가 지역별 추진주체가 되어 시행되고 있다. 대기오염물질 배출 삭감대책은 크게는 도로이동오염원(저공해 자동차 보급, 운행차 관리, 교통수요관리), 비도로이동오염원(건설기계관리, 농기계관리, 선박관리), 사업장관리(대형사업장 총량관리, 종량규제 미대상 사업장 관리), 면오염원 관리(VOC 배출저감, 비산업연소 관리, 비산먼지 관리), 친환경에너지 및 도시관리(집단에너지 보급, 신재생에너지 보급, 친환경건물 설치, 녹지조성) 대책으로 구분할 수 있으며, 계획 대비 추진 실적들이 매년 평가되고 있다.

수도권 대기환경관리를 위한 시행계획의 저감정책들은 3~5년 이상의 저감효과가 지속적으로 진행되어 누적 효과를 보이는 저감정책과 1년 이상의 지속적 효과 없이 당해 연도에만 효과가 있는 정책들로 구성되어 있다. 2010년 수도권 대기환경청에서 발표한 ‘기본계획 추진실적 보고서(2007~2009)’의 2009년 사

업별 저감실적을 기본으로 하여 미세먼지, 이산화질소, 오존에 대한 사업추진의 복합영향을 살펴보았다. <표 5-1>은 2009년 배출원 부문별 오염물질 삭감실적이며, 비산먼지는 포장도로 청소의 비산먼지 방지효율을 13%(최대방지효율 26%, 이행률 50% 적용)로 적용하여 삭감량을 추가 산출하였다(미국 Western Governor's Association, 2006).

<표 5-1> 2009년 오염물질별 삭감실적

(단위 : 톤/년)

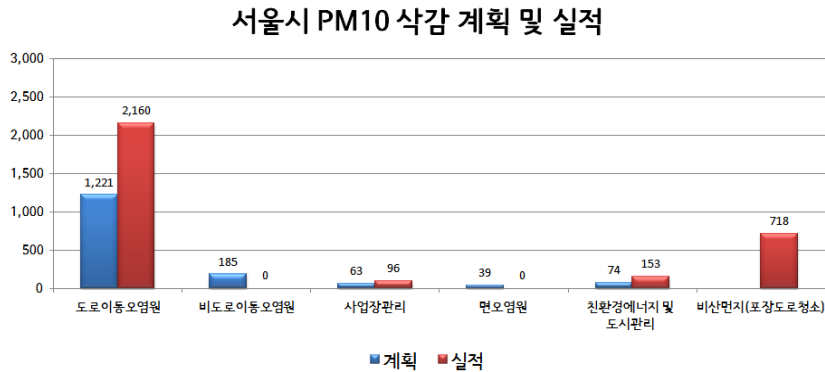
구분		서울				인천				경기			
		PM10	NOx	SOx	VOC	PM10	NOx	SOx	VOC	PM10	NOx	SOx	VOC
수도권 대기 환경 관리 시행 계획	도로이동 오염원	2,160	12,186	773	7,156	844	4,339	459	1,820	2,257	13,926	1,738	5,442
	비도로이동오염원		0,09		0,004		0,06	540	0,003		0,34		0,02
	사업장 관리	96	4,599	2,784	3	933	18,939	9,875	16	1	21,926	17,382	156
	면오염원				18,078				10,799				40,818
추진 실적	친환경 에너지 및 도시관리	153	4,270	238	68	99	538	113	6	263	2,480	98	58
추가	비산먼지 (포장도로 청소)	718				182				890			
합계		3,127	21,055	3,795	25,305	2,058	23,816	10,987	12,641	3,411	38,332	19,218	46,474

자료 : 수도권대기환경관리 기본계획 추진실적 보고서(2007~2009), 수도권대기환경청, 2010.

서울시의 2009년 오염물질 삭감실적은 VOC > NO_x > SO_x > PM10 순이지만 계획대비 달성률은 PM10 > SO_x > NO_x > VOC 순이다. 수도권 오염물질 전체에 대한 분야별 삭감실적은 도로이동오염원 분야의 경우 제작차 배출허용 기준 강화 > 저감장치 부착 > 연료품질 강화 순서이며, 사업장관리 분야는 도장·세정시설의 VOC비산배출기준 설정 > 제작차 배출허용기준 강화 및 저감장치 부착 순이다. 친환경에너지·도시관리 분야의 삭감실적은 폐기물에너지 > 친환경건축인증 > 실내냉난방관리 > 도시관리 > 지역난방 순으로 나타났다(수도권 대기환경청, 2010).

서울시의 오염물질별 저감실적을 살펴보면, 미세먼지의 경우 제작차 배출허용기준 강화와 저공해사업 추진 등 도로이동오염원 분야에서의 배출량 저감량

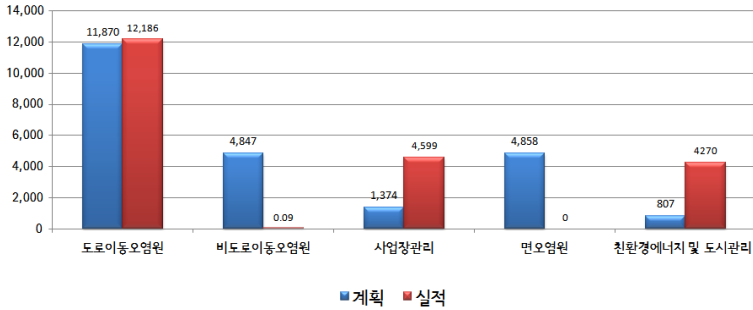
이 가장 많은 것으로 나타났다. 총 삭감량은 계획량을 초과하여 152%의 달성률을 보였다.



〈그림 5-1〉 서울시 2009년 저감대책별 삭감계획 및 실적(PM10)

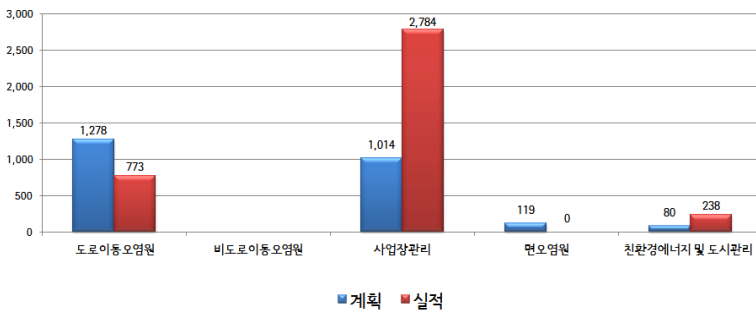
NO_x의 경우 도로이동오염원 관리, 사업장 총량관리, 친환경에너지 관리, SO_x는 사업장 총량관리와 연료 황함유기준 강화를 통한 도로이동오염원 관리가 주요하게 추진되었다. VOC는 도장/세정시설 등 면오염원 분야와 도로이동오염원 분야에서 저감정책으로 실적을 냈으며, SO_x는 실적이 계획을 초과 달성하여 152%의 달성률을 나타냈다. NO_x의 경우 89% 달성률, VOC의 경우 60% 정도의 달성률을 보여, 특히 VOC 배출원에 대한 관리가 계획대로 추진되지 않았음을 알 수 있다. 수도권 전체에 대한 목표 달성률에서도 PM10, NO_x, SO_x의 경우 대부분이 100%에 가까운 실적을 보였으나 VOC의 경우 54%의 저조한 달성률을 보였다.

서울시 NOx 삭감 계획 및 실적



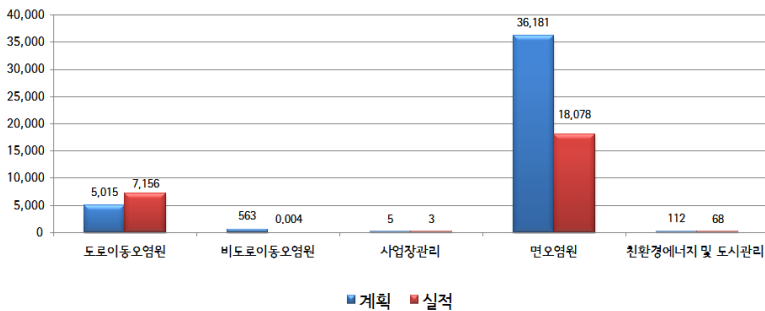
〈그림 5-2〉 서울시 2009년 저감대책별 삭감계획 및 실적(NOx)

서울시 SOx 삭감 계획 및 실적



〈그림 5-3〉 서울시 2009년 저감대책별 삭감계획 및 실적(SOx)

서울시 VOC 삭감 계획 및 실적



〈그림 5-4〉 서울시 2009년 저감대책별 삭감계획 및 실적(VOC)

2. 모델결과의 분석

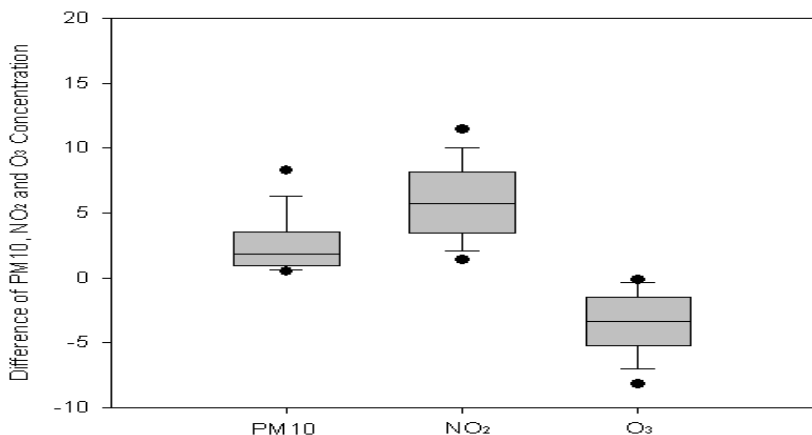
1) 2009년 1, 4, 8, 11월에 대한 저감사업 복합영향 분석

(1) 저감실적 효과분석

앞서 정리한 2009년 오염물질별 저감실적을 2009년 기본 배출량에서 차감하여 저감대책 시행 전·후에 대한 모델링을 수행하였다. <표 5-2>는 2009년 저감대책 시행 전·후의 계절별 대기오염도 변화를 살펴보기 위하여, 각 계절을 대표하는 월별 예측 결과와 이의 평균값을 나타낸 것이다. 오염물질별(PM10, NO₂, O₃)로 저감대책 시행 전·후를 비교한 결과, PM10의 농도는 저감대책 적용 전 42.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 적용 후 39.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 2.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도, NO₂의 농도는 저감대책 시행으로 5.5ppb 정도 감소한 것으로 분석되었다. 하지만 O₃의 농도는 저감정책 시행으로 3.3ppb 정도 증가한 것으로 예측되었다. <그림 5-5>는 오염물질별 저감대책 적용 전·후 저감차이를 box plot으로 표현한 것이다.

<표 5-2> 오염물질별 저감대책 적용 전·후 서울시 평균 농도분석

구분	기간	대책 적용 후	대책 적용 전	대책 적용 전·후 차이	최고 농도차	최저 농도차
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	연평균	39.8	42.4	2.6(감)	6.1	0.7
	겨울(1월)	59.8	63.8	4.0(감)	2.5	0.2
	봄(4월)	42.9	45.2	2.3(감)	7.7	0.5
	여름(8월)	24.2	25.8	1.5(감)	5.0	1.4
	가을(11월)	32.1	34.8	2.7(감)	9.3	0.5
NO ₂ (ppb)	연평균	24.5	30.0	5.5(감)	13.4	1.4
	겨울(1월)	30.8	38.5	7.7(감)	28.0	1.7
	봄(4월)	28.5	35.7	7.2(감)	9.5	1.8
	여름(8월)	21.3	25.8	4.5(감)	9.0	1.3
	가을(11월)	17.3	20.0	2.7(감)	7.0	0.7
O ₃ (ppb)	연평균	23.5	20.1	3.4(증)	3.6	0.3
	겨울(1월)	16.9	13.1	3.8(증)	5.4	0.0
	봄(4월)	32.4	27.1	5.2(증)	4.5	0.8
	여름(8월)	38.8	35.4	3.4(증)	0.2	0.4
	가을(11월)	5.7	4.9	0.9(증)	4.2	0.0



주 : 단위 PM10 - $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO2 & O3 - ppb

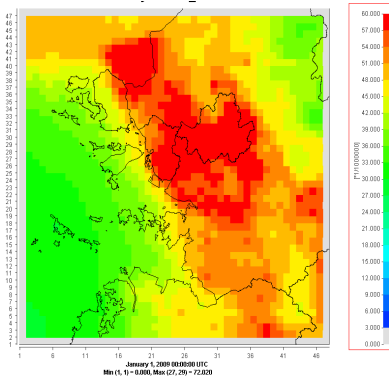
<그림 5-5> 오염물질별 저감대책 적용 전·후 저감차이 분포(1, 4, 8, 11월)

계절별 저감농도차이 분포를 살펴보면, PM10과 NO₂는 농도가 가장 높은 계절로 나타난 11월(가을철)에 저감대책 전·후의 평균농도차이도 가장 크게 나타났다. O₃의 경우, 가장 문제가 되는 여름철인 8월에 저감대책 전·후의 평균 농도차이는 3.4ppb 정도이며, 봄철에 가장 큰 차이, 가을철에 가장 작은 차이를 보였다.

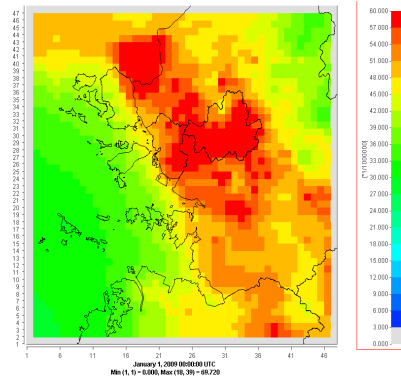
(2) 저감실적 효과의 공간분포 분석

① PM10

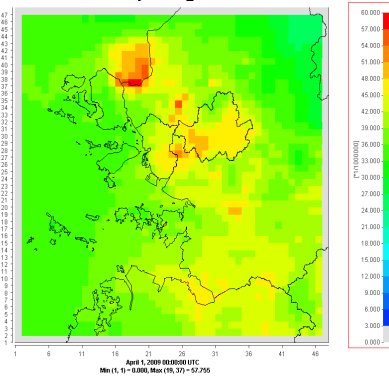
사계절을 대표하는 1월(겨울), 4월(봄), 8월(여름), 11월(가을)의 저감대책 시행 전·후에 대해서 PM10 농도의 공간적 분포를 <그림 5-6>과 같이 나타냈다. 앞서 분석한 결과와 마찬가지로 PM10은 저감대책 시행 전에 비하여 시행 후에 농도가 감소한 것으로 나타났다. 빨간색이 농도가 높은 것으로 저감대책 시행 후에 농도가 높은 지역의 분포가 줄어든 것을 확연히 볼 수 있다.



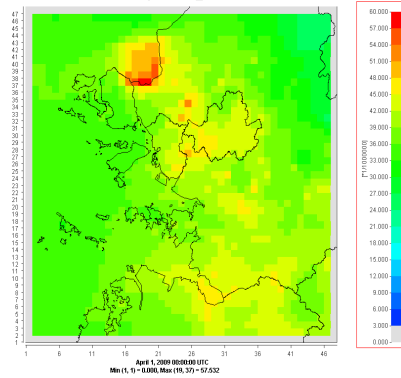
(a) 1월 대책적용 전



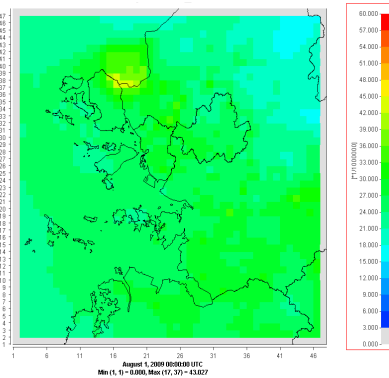
(b) 1월 대책적용 후



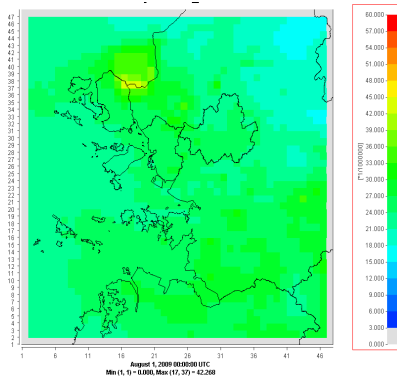
(c) 4월 대책적용 전



(d) 4월 대책적용 후

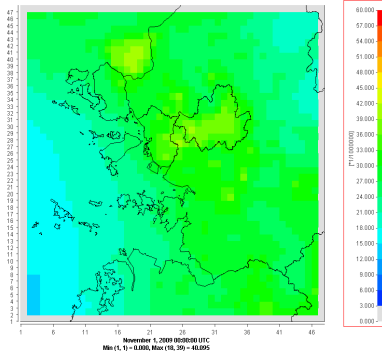


(e) 8월 대책적용 전

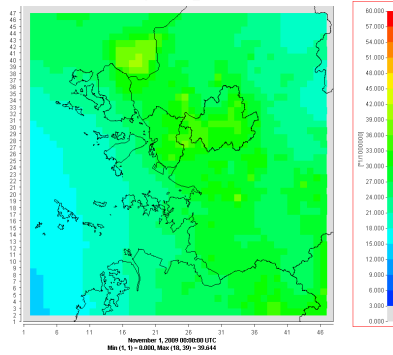


(f) 8월 대책적용 후

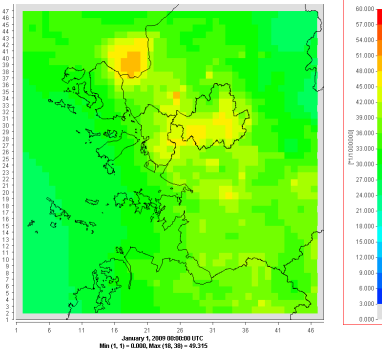
〈그림 5-6〉 저감대책 적용 전 · 후의 미세먼지(PM10) 농도분포



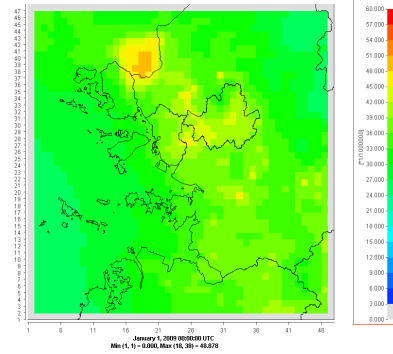
(g) 11월 대책적용 전



(h) 11월 대책적용 후



(i) 1, 4, 8, 11월 대책적용 전

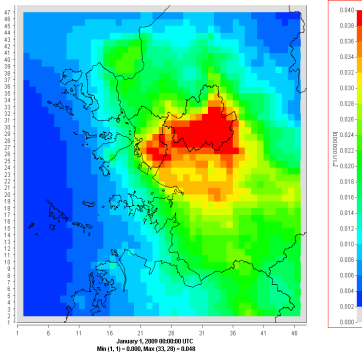


(j) 1, 4, 8, 11월 대책적용 후

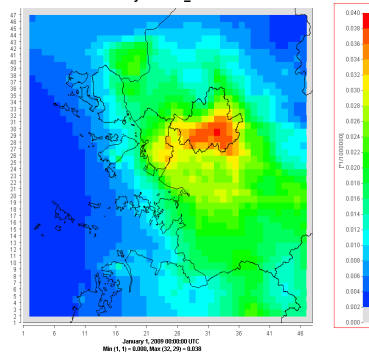
<그림 계속> 저감대책 적용 전 · 후의 미세먼지(PM10) 농도분포

② NO₂

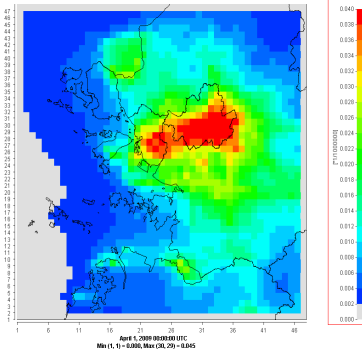
NO₂에 대한 분석결과, <그림 5-7>과 같이 저감대책 적용 전에 비하여 적용 후에 농도가 감소한 것으로 나타났으며, 특히 1, 4, 8월의 경우 저감대책 적용 전에 서울을 중심으로 붉은 계열의 높은 농도 분포가 적용 후에 상당 부분 완화 된 것을 볼 수 있다.



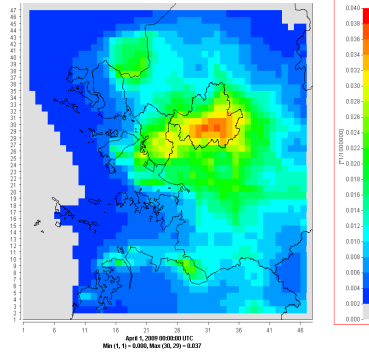
(a) 1월 대책적용 전



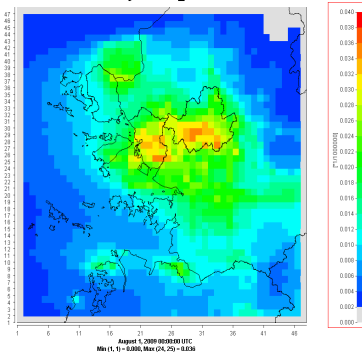
(b) 1월 대책적용 후



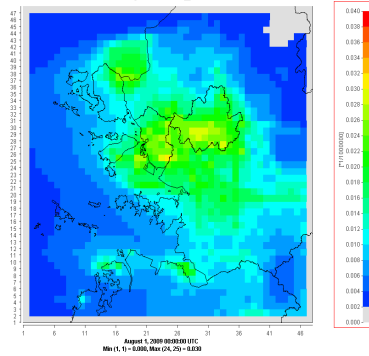
(c) 4월 대책적용 전



(d) 4월 대책적용 후

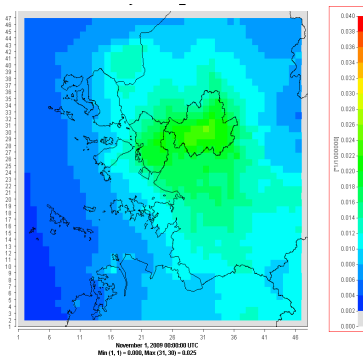


(e) 8월 대책적용 전

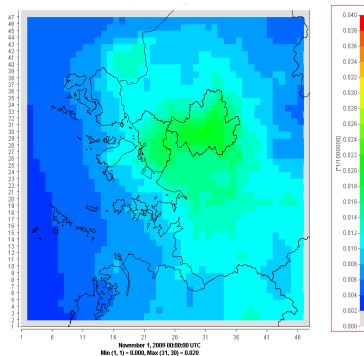


(f) 8월 대책적용 후

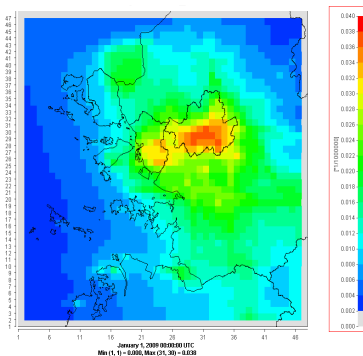
〈그림 5-7〉 저감대책 적용 전 · 후의 이산화질소(NO_2) 농도분포



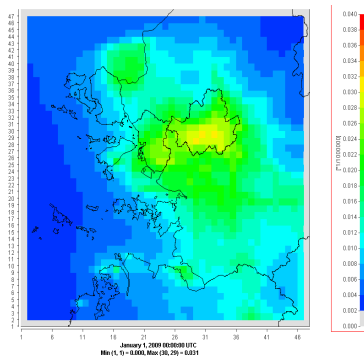
(g) 11월 대책적용 전



(h) 11월 대책적용 후



(i) 1, 4, 8, 11월 대책적용 전

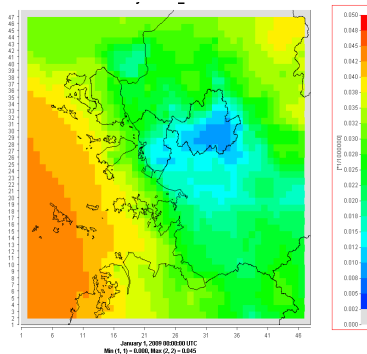


(j) 1, 4, 8, 11월 대책적용 후

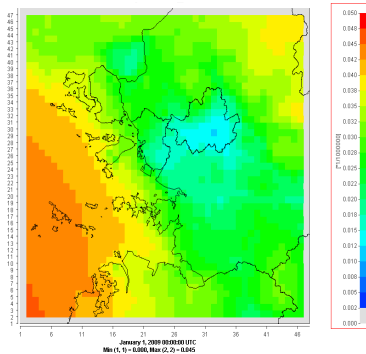
<그림 계속> 저감대책 적용 전 · 후의 이산화질소(NO_2) 농도분포

③ O_3

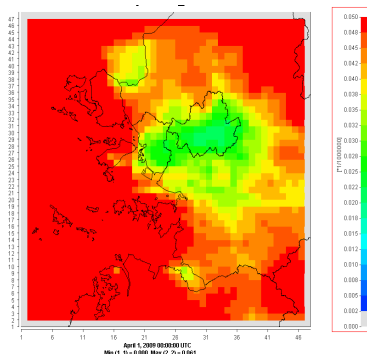
O_3 분석결과, <그림 5-8>과 같이 다른 두 오염물질과는 반대로 저감대책 적용 전에 비해 적용 후에 농도가 다소 증가하는 것으로 나타났다. 오존이 고농도로 나타나는 8월의 공간분포를 보면 O_3 농도가 증가하는 현상이 보다 확연하게 나타나고 있다.



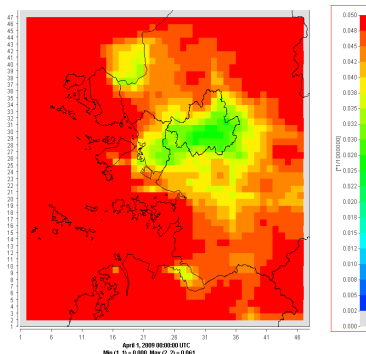
(a) 1월 대책적용 전



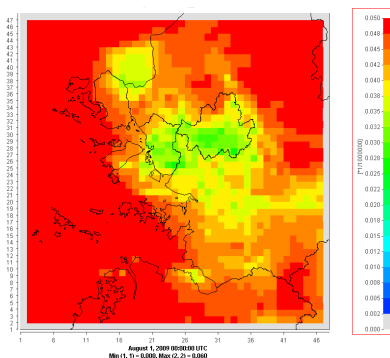
(b) 1월 대책적용 후



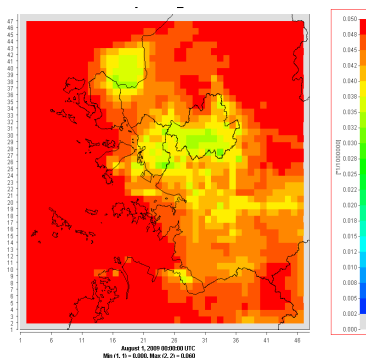
(c) 4월 대책적용 전



(d) 4월 대책적용 후

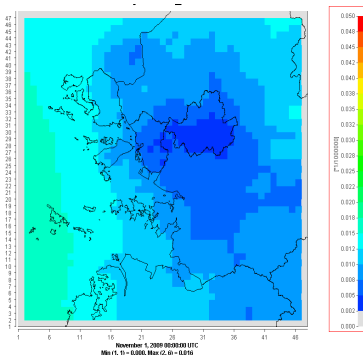


(e) 8월 대책적용 전

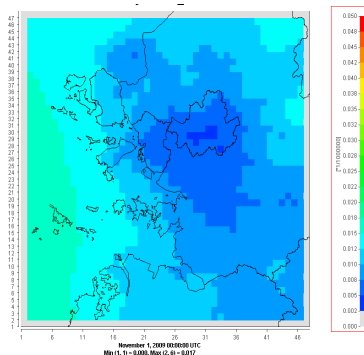


(f) 8월 대책적용 후

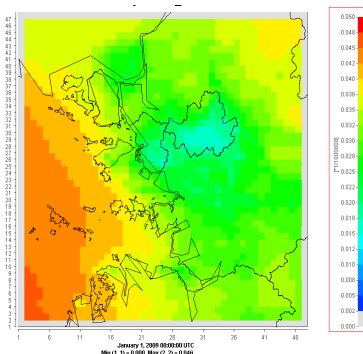
〈그림 5-8〉 저감대책 적용 전·후의 오존(O₃) 농도분포



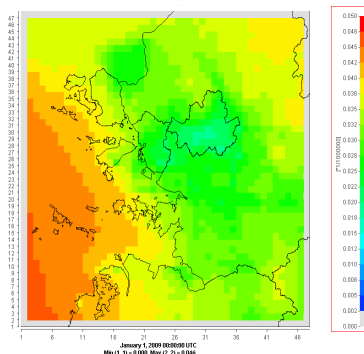
(g) 11월 대책적용 전



(h) 11월 대책적용 후



(i) 1, 4, 8, 11월 대책적용 전



(j) 1, 4, 8, 11월 대책적용 후

〈그림 계속〉 저감대책 적용 전 · 후의 오존(O₃) 농도분포

2) 2009년 고농도일에 대한 분석

고농도 사례일인 2월 4~8일, 4월 7~12일, 5월 8일, 6월 18일, 7월 30일, 8월 14~15일에 대해서도 앞서 계절별 분석과 같이 저감대책 시행 전 · 후의 대기오염도 예측결과를 분석하였다.

① 2월 사례일(2월 4~8일)

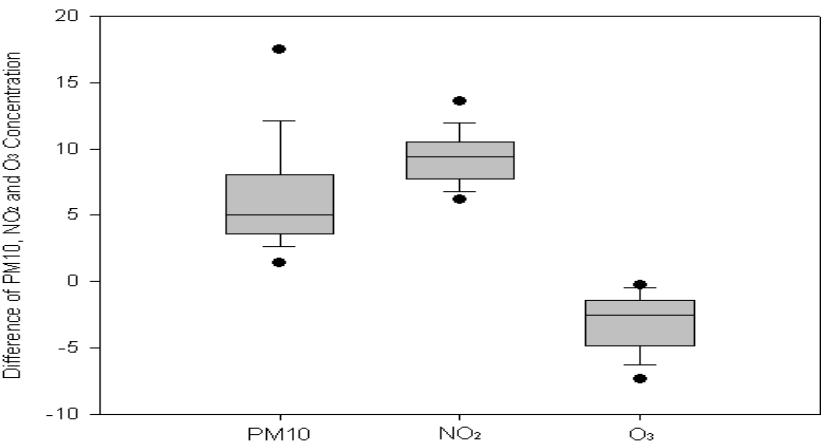
<표 5-3>은 오염물질별(PM₁₀, NO₂, O₃) 저감대책 적용 전 · 후를 비교한 결과이다. PM₁₀은 저감대책 적용 전 104.4 μ g/m³에서 적용 후 98.4 μ g/m³로 5.9 μ g/

m³, NO₂는 저감대책 적용 전 47.9ppb에서 적용 후 39.3ppb로 8.6ppb 감소한 것으로 분석되었다. O₃의 경우, 저감대책 적용 전 7.4ppb에서 적용 후 10.6ppb로 3.2ppb 증가한 것으로 예측되었다(<그림 5-9> 참고).

각 오염물질의 시간별 평균농도의 저감대책 적용 전·후 비교에서도 PM10과 NO₂는 저감대책 적용 후가 적용 전보다 농도가 감소된 것으로 나타나나, O₃은 저감대책 적용 후에 농도가 증가하는 경향을 보이고 있다(<그림 5-10> 참조).

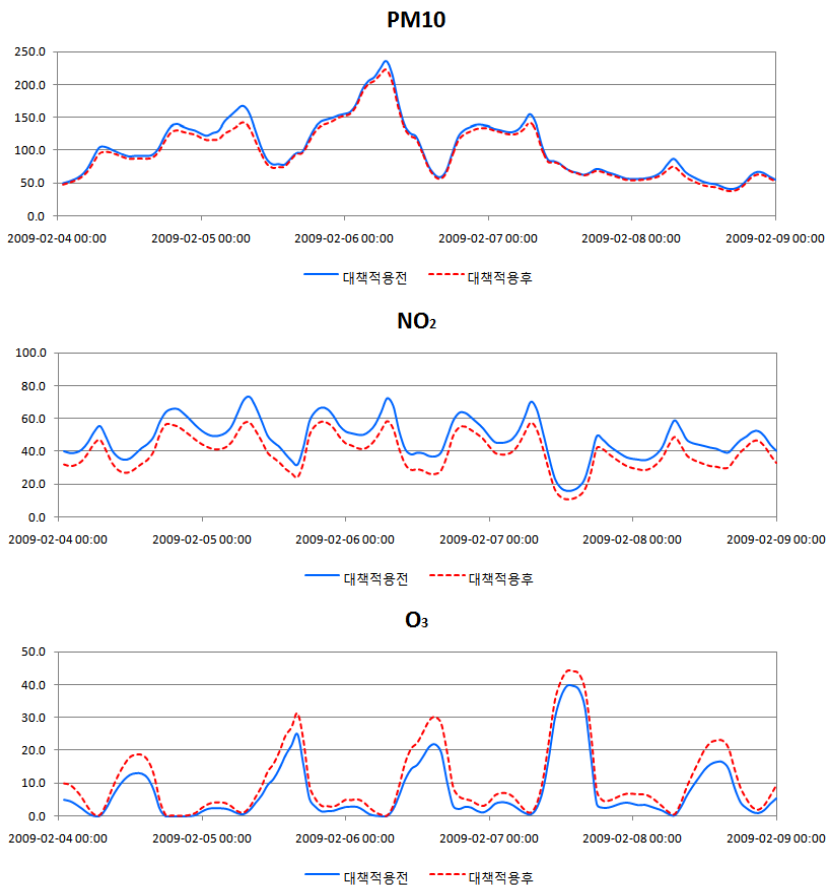
〈표 5-3〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 서울시 평균 농도분석(2월 고농도일)

구분	기간	대책적용 후	대책적용 전	대책 적용 전·후 차이	최고 농도차	최저 농도차
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2월 4~8일	98.4	104.4	5.9(감)	13.3	3.4
NO₂ (ppb)		39.3	47.9	8.6(감)	14.8	5.2
O₃ (ppb)		10.6	7.4	3.2(증)	4.4	0.1



주 : 단위 PM10 - $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂ & O₃ - ppb

〈그림 5-9〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 저감차이 분포(2월 고농도일)



〈그림 5-10〉 저감대책 적용 전·후 오염물질 농도의 시계열 분석(2월 고농도일)

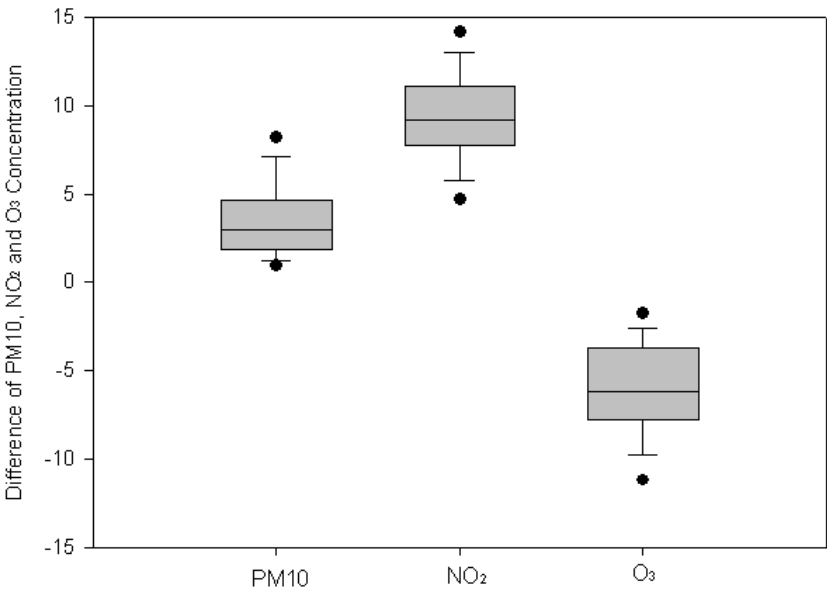
② 4월 사례일(4월 7~14일)

<표 5-4>는 오염물질별(PM10, NO₂, O₃)로 저감대책 적용 전·후를 비교한 결과이다. PM10은 저감대책 적용 전 77.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 적용 후 74.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 3.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂는 저감대책 적용 전 49.9ppb에서 적용 후 40.5ppb로 9.3ppb 감소된 것으로 분석되었다. O₃의 경우, 저감대책 적용 전 25.4ppb에서 적용 후 31.4ppb로 6.0ppb 증가한 것으로 예측되었다(<그림 5-11> 참조).

오염물질별 저감대책 시행 전·후의 시계열 분석에서도 PM10과 NO₂는 저감 대책이 긍정적 결과를 가져온 것으로, O₃은 반대의 결과를 가져온 것으로 나타났다(<그림 5-12> 참조).

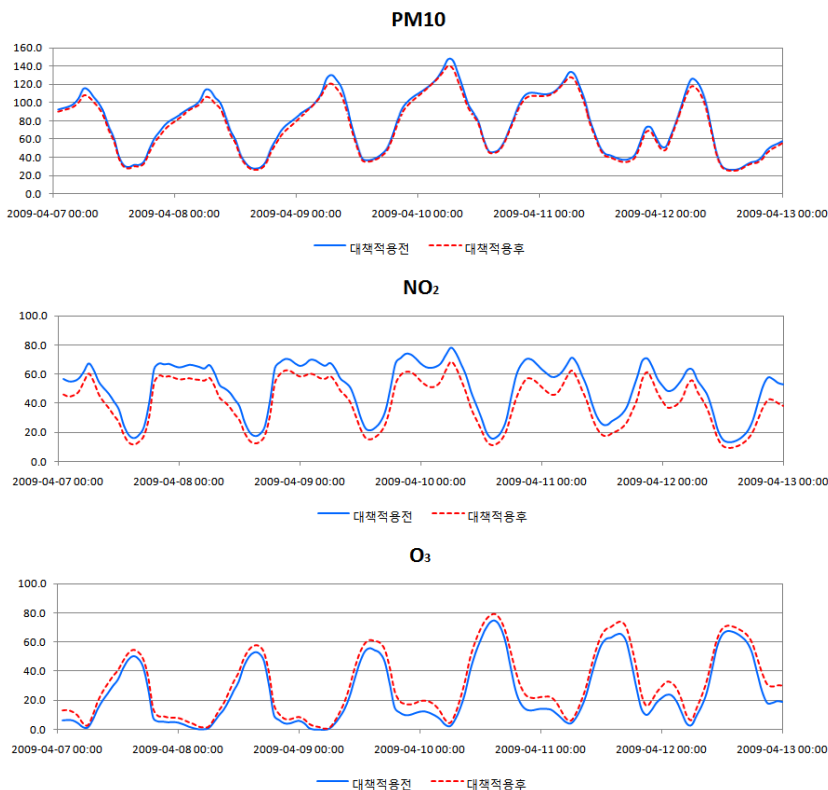
〈표 5-4〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 서울시 평균 농도분석(4월 고농도일)

구분	기간	대책적용후	대책적용전	대책 적용 전·후차이	최고농도차	최저농도차
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	4월 7~14일	74.3	77.8	3.5(감)	7.7	0.8
NO ₂ (ppb)		40.5	49.9	9.3(감)	9.5	4.0
O ₃ (ppb)		31.4	25.4	6.0(증)	4.5	0.8



주 : 단위 PM10 - $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂ & O₃ - ppb

〈그림 5-11〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 저감차이 분포(4월 고농도일)



〈그림 5-12〉 저감대책 적용 전·후 오염물질 농도의 시계열 분석(4월 고농도일)

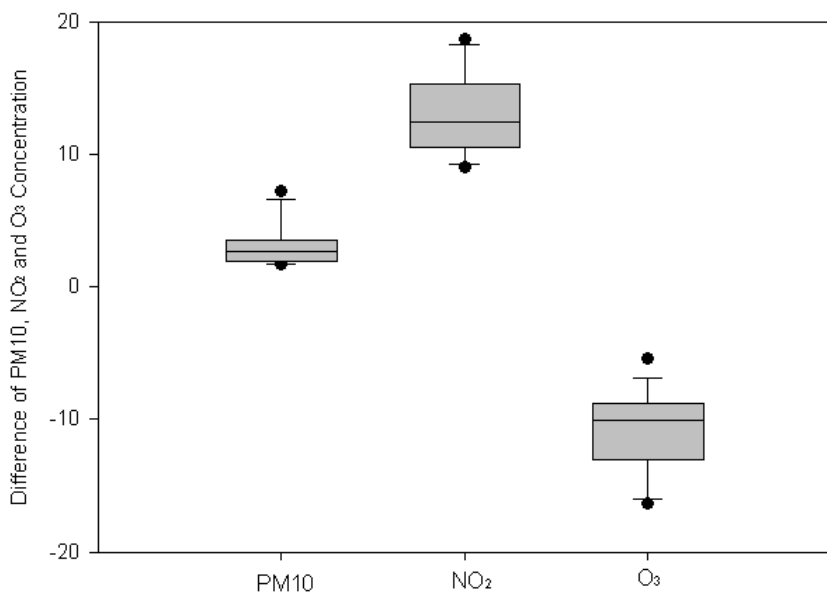
③ 5월 사례일(5월 8일)

<표 5-5>는 오염물질별(PM10, NO₂, O₃)로 저감대책 적용 전·후를 비교한 결과이다. PM10은 저감대책 적용 전 67.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 적용 후 64.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 3.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂는 저감대책 적용 전 53.2ppb에서 적용 후 39.9ppb로 13.3ppb 감소한 것으로 분석되었다. O₃의 경우, 저감대책 적용 전 38.7ppb에서 적용 후 49.4ppb로 10.7ppb 증가한 것으로 예측되었다(<그림 5-13> 참조).

오염물질별 저감대책 시행 전·후의 시계열 분석에서도 앞선 고농도사례일과 유사한 결과를 보여주었다(<그림 5-14> 참조).

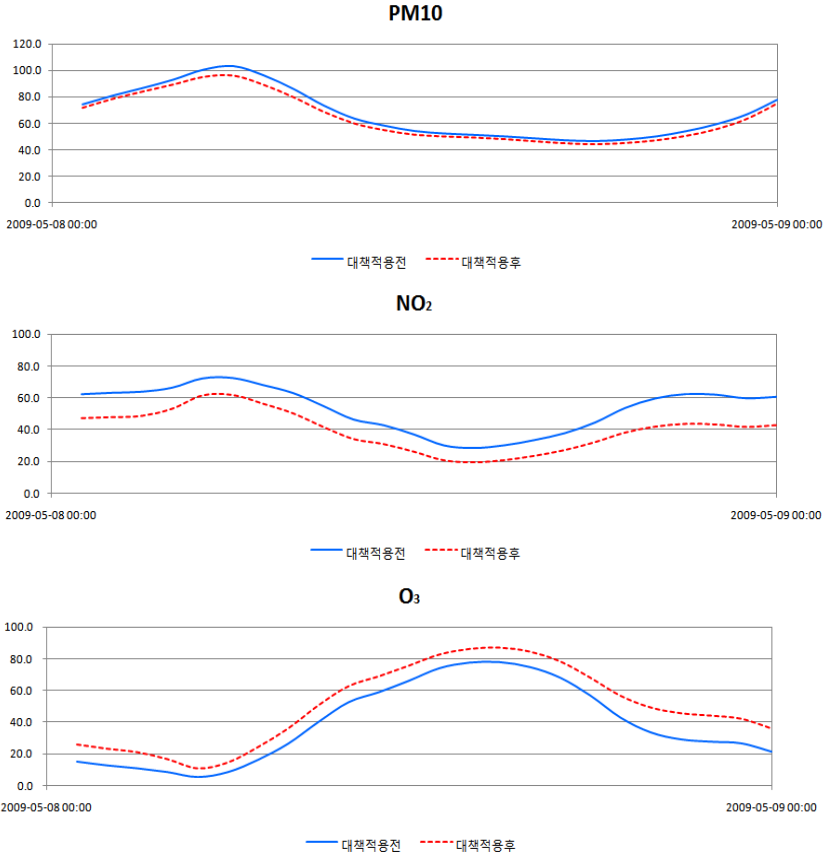
〈표 5-5〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 서울시 평균 농도분석(5월 고농도일)

구분	기간	대책적용 후	대책적용 전	대책 적용 전·후 차이	최고 농도차	최저 농도차
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5월 8일	64.1	67.4	3.3(감)	7.2	2.0
NO ₂ (ppb)		39.9	53.2	13.3(감)	10.6	9.0
O ₃ (ppb)		49.4	38.7	10.7(증)	9.2	5.3



주 : 단위 PM10 - $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂ & O₃ - ppb

〈그림 5-13〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 저감차이 분포(5월 고농도일)



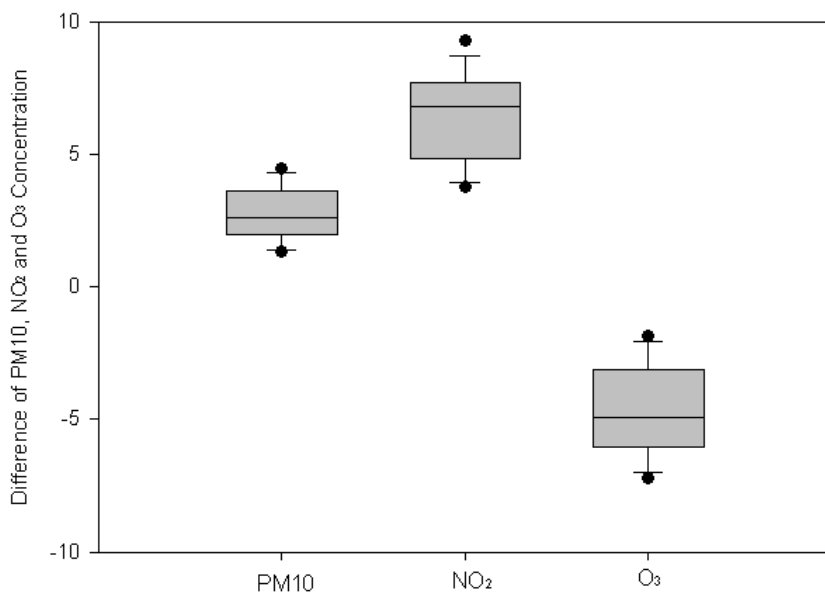
〈그림 5-14〉 저감대책 적용 전·후 오염물질 농도의 시계열 분석(5월 고농도일)

④ 6월 사례일(6월 18일)

<표 5-6>은 오염물질별(PM10, NO₂, O₃)로 저감대책 적용 전·후를 비교한 결과이다. PM10은 저감대책 적용 전 68.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 적용 후 65.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 2.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂는 저감대책 적용 전 36.2ppb에서 적용 후 29.8ppb로 6.5ppb 감소한 것으로 분석되었다. O₃의 경우, 저감대책 적용 전 46.8ppb에서 적용 후 51.5ppb로 4.7ppb 증가한 것으로 예측되었다(<그림 5-15> 참조).

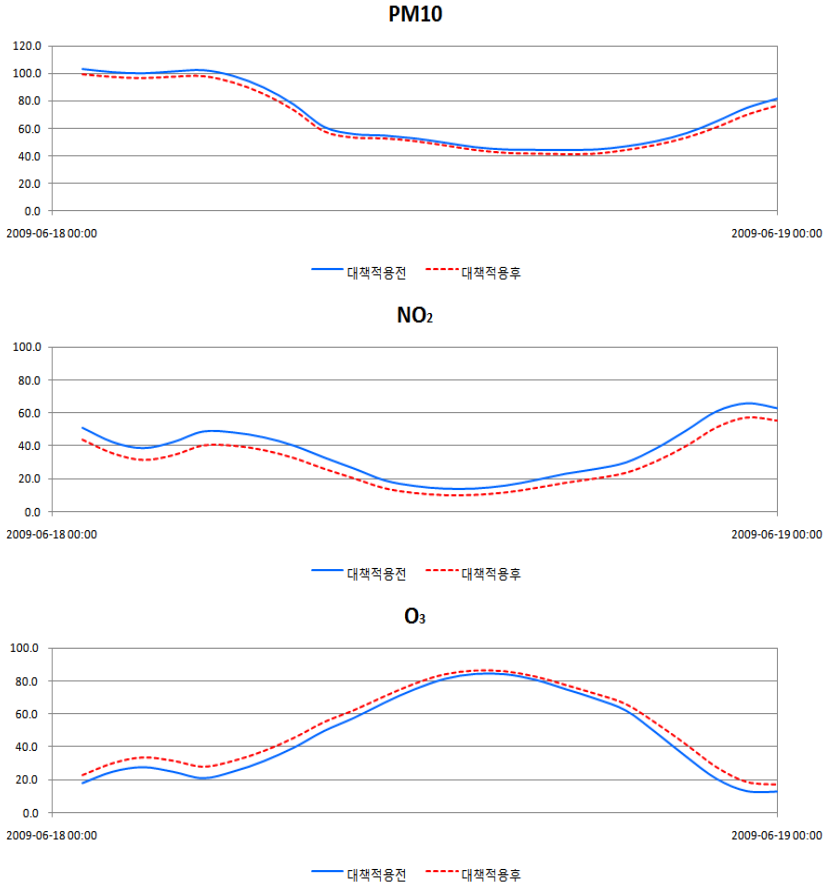
〈표 5-6〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 서울시 평균 농도분석(6월 고농도일)

구분	기간	대책적용 후	대책적용 전	대책 적용 전·후 차이	최고 농도차	최저 농도차
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	6월 18일	65.6	68.4	2.8(감)	3.3	2.5
NO ₂ (ppb)		29.8	36.2	6.5(감)	8.3	3.8
O ₃ (ppb)		51.5	46.8	4.7(증)	2.1	4.2



주: 단위 PM10 - $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂ & O₃ - ppb

〈그림 5-15〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 저감차이 분포(6월 고농도일)



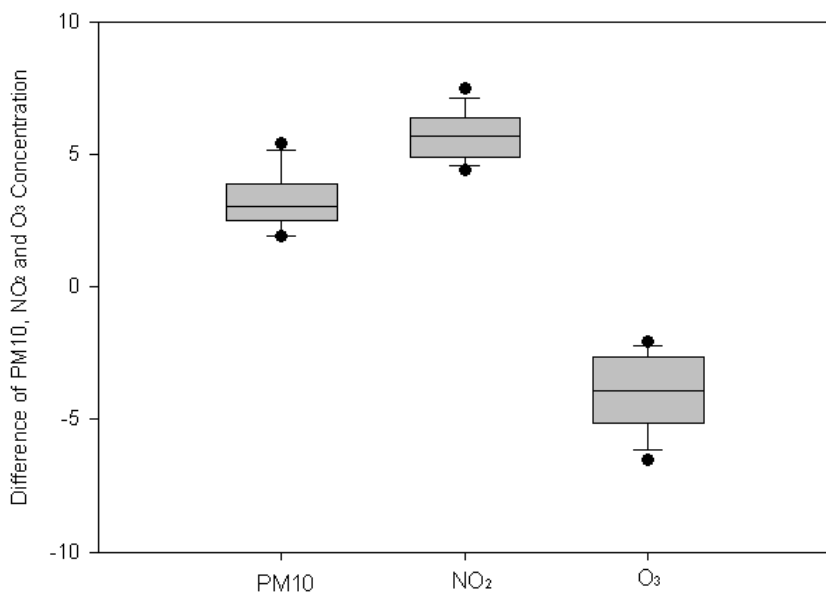
〈그림 5-16〉 저감대책 적용 전·후 오염물질 농도의 시계열 분석(6월 고농도일)

⑤ 7월 사례일(7월 30일)

<표 5-7>은 오염물질별(PM10, NO₂, O₃)로 저감대책 적용 전·후를 비교한 결과이다. PM10은 저감대책 적용 전 42.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 적용 후 39.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 3.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂는 저감대책 적용 전 28.3ppb에서 적용 후 22.6ppb로 5.7ppb 감소한 것으로 분석되었다. O₃의 경우, 저감대책 적용 전 51.0ppb에서 적용 후 55.0ppb로 4.0ppb 증가한 것으로 예측되었다(<그림 5-17> 참고).

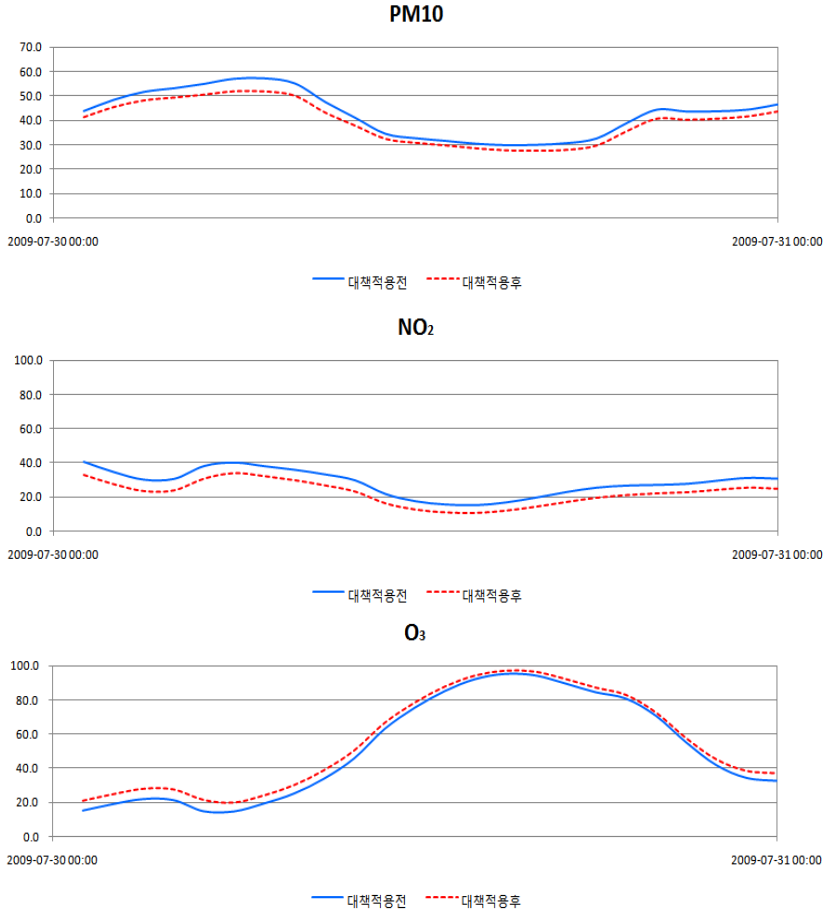
〈표 5-7〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 서울시 평균 농도분석(7월 고농도일)

구분	기간	대책적용 후	대책적용 전	대책 적용 전·후 차이	최고 농도차	최저 농도차
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	7월 30일	39.4	42.8	3.3(감)	5.4	2.4
NO ₂ (ppb)		22.6	28.3	5.7(감)	6.5	4.4
O ₃ (ppb)		55.0	51.0	4.0(증)	2.1	5.2



주 : 단위 PM10 - $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂ & O₃ - ppb

〈그림 5-17〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 저감차이 분포(7월 고농도일)



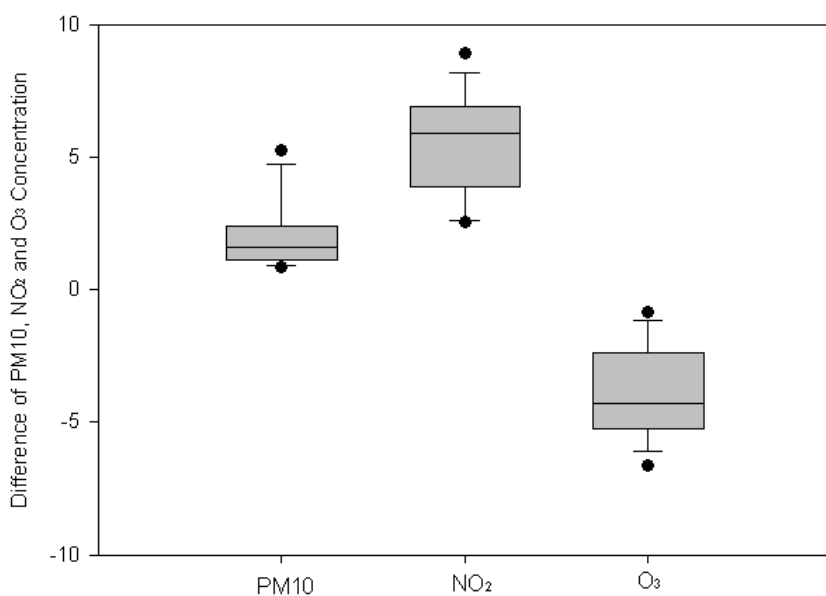
〈그림 5-18〉 저감대책 적용 전·후 오염물질 농도의 시계열 분석(7월 고농도일)

⑤ 8월 사례일(8월 14~15일)

<표 5-8>은 오염물질별(PM10, NO₂, O₃)로 저감대책 적용 전·후를 비교한 결과이다. PM10은 저감대책 적용 전 46.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 적용 후 44.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 2.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂는 저감대책 적용 전 34.8ppb에서 적용 후 29.1ppb로 5.7ppb 감소한 것으로 분석되었다. O₃의 경우, 저감대책 적용 전 39.0ppb에서 적용 후 42.9ppb로 3.8ppb 증가한 것으로 예측되었다(<그림 5-19> 참고).

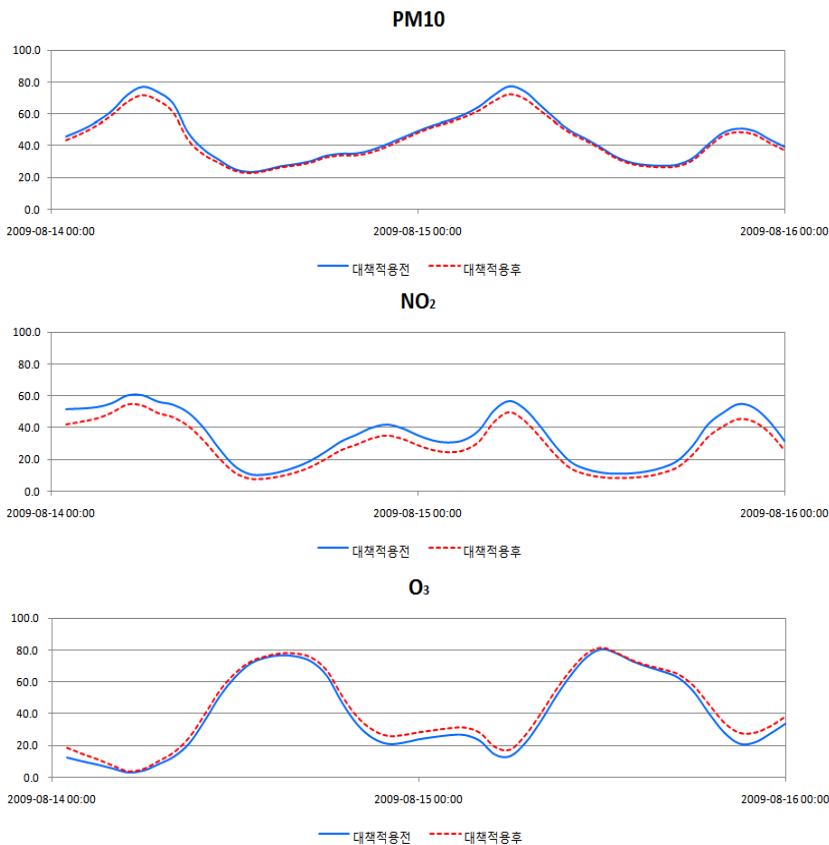
〈표 5-8〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 서울시 평균 농도분석(8월 고농도일)

구분	기간	대책적용 후	대책적용 전	대책 적용 전·후 차이	최고 농도차	최저 농도차
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	8월 14~15일	44.4	46.5	2.2(감)	5.0	0.8
NO ₂ (ppb)		29.1	34.8	5.7(감)	5.6	2.3
O ₃ (ppb)		42.9	39.0	3.8(증)	1.1	1.3



주: 단위 PM10 - $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂ & O₃ - ppb

〈그림 5-19〉 오염물질별 저감대책 적용 전·후 저감차이 분포(8월 고농도일)



〈그림 5-20〉 저감대책 적용 전·후 오염물질 농도의 시계열 분석(8월 고농도일)

제2절 서울시 대기질 특성분석

1. 분석방법

CAMx모델은 지역별, 배출원별 배출량의 대기질 영향을 분석하고 장래 삭감량을 반영하여 미래 대기질을 예측하는 모델로 CMAQ모델과 더불어 대기질 관리 정책 수립 시 적용 사례가 많고 가장 활발하게 사용되는 모형이다. CAMx모

텔은 미세먼지를 포함한 다양한 대기오염물질 농도를 모사하기 위해 기본적인 알고리즘이 CMAQ 모델과 유사하나 모델링 과정 및 결과를 분석하기 위해 다양한 분석 기능을 제공하고 있는 것이 특징이다. 이 연구에서는 그 기능 중 OSAT(Ozone Source Apportionment Technology)을 이용하여, 주요한 배출원 부문 및 외부지역으로부터의 기여도를 분석하여 서울시의 대기질 특성을 보다 면밀히 조사하고자 한다. 조사·분석 자료는 통합적 관점에서의 효과적 대기질 관리 방향 도출에 기초적인 자료로 활용될 수 있다.

일반적으로 특정오염물질에 대한 지역별, 배출원별 기여도 분석을 위하여 적용되는 방법인 Brute force로 한 번에 한 가지의 오염원 또는 한 지역에 대한 배출량을 모두 제거(zero-out)하여 이에 따른 영향을 각각 살펴보는 것으로 많은 시간과 노력이 요구된다. 하지만 CAMx모델은 OSAT를 이용하여 이러한 과정을 보다 수월하게 수행할 수 있다. OSAT은 Reactive Tracer를 이용하는 방법으로 특정 지역/배출원으로부터 배출되는 오염물질을 추적하기 위해 개별 지역/배출원에 Tracer를 추가하여 Tracer의 농도 변화에 따라 기여도가 분석된다.

앞서 살펴본 바와 같이, 서울시 오존 고농도 발생 빈도수의 지속적 증가가 관찰되고 있는바, 보다 효과적인 오존 관리를 위하여 오존 중심의 서울시 대기질 특성을 모델링을 이용하여 분석하였다.

2. 분석결과

1) 기여도 분석을 위한 배출원 구분

CAMx OSAT을 이용하여 서울지역에 영향을 주는 지역 및 배출원의 기여도를 파악하기 위해서는 관심 지역과 그 지역의 배출원에 대하여 모델 입력자료를 해당 지역 및 배출원별로 구비하고 있어야 한다. 따라서, 지역 구분은 <표 5-9>와 같이 한국을 제외한 아시아 지역, 서울 지역, 인천, 경기 지역, 그 외 지역으로 구분하였다. 또한, 기여도 분석을 위해 배출원별로 세 그룹으로 분류하

었고, 제1그룹은 연소(자동차, 생물성, 화석연료)부분, 제 2그룹은 산업공정, 기타부분은 에너지 및 유기용제 등과 관련된 것으로 구분하였다(<표 5-10>).

<표 5-9> 기여도 분석을 위한 지역 구분

지역	지역	비고
지역1	아시아	한국을 제외한 동아시아 지역
지역2	서울	서울 지역
지역3	인천	인천 지역
지역4	경기	경기 지역
지역5	그 외 지역	그 외 모든 지역

<표 5-10> 기여도 분석을 위한 배출원 그룹별 분류(수원대 추가 배출원 포함)

그룹	배출원	CAPSS 분류
그룹1	자동차연소	도로이동오염원, 휘발유승용차, 이륜차, 건설기계
	생물성연소	고기구이, 노천소각, 숯가마, 아궁이, 화목난로
	화석연료연소	에너지산업 연소, 비산업 연소, 제조업 연소, 가스히트펌프, 비도로이동오염원 (건설기계 제외)
그룹2	산업공정	생산공정, 폐기물처리
기타		기타 배출원 (에너지수송 및 저장, 유기용제 사용, 농업, 기타 면오염원, 자연오염원 등)

2) 지역별/배출원별 O₃ 기여도 평가

2009년 오존주의보 발령일은 5월 8일, 6월 18일, 7월 16일, 7월 30일, 8월 14일~15일이었으며, 모든 권역에서의 총 발령횟수는 14회였고 발령시간은 대부분 14시~17시 사이였다. 이에따라 OSAT 분석은 오존주의보 발령일에서 오존농도가 가장 높게 나타난 시점(3시간)에 대하여 수행하였으며 오존주의보 발령일 중 5월 8일, 6월 18일, 7월 16일, 8월 15일을 분석 대상으로 선정하였다.

OSAT 결과를 이용하여 서울지역의 O₃ 농도에 대한 지역별 기여도를 분석한 결과를 <그림 5-22>에 나타냈다.

〈표 5-11〉 서울지역 2009년 오존주의보 발령현황

발령번호	발령일	지역	발령 농도	해제 농도	최고 농도	발령 시간
			(ppm)	(ppm)	(ppm)	
1	2009-05-08	서울 북동	0.12	0.118	0.12	16:00
2	2009-05-08	서울 북서	0.125	0.108	0.108	16:00
3	2009-06-18	서울 남서	0.122	0.088	0.122	17:00
4	2009-07-16	서울 남서	0.127	0.104	0.127	17:00
5	2009-07-30	서울 남서	0.121	0.103	0.122	15:00
6	2009-07-30	서울 북동	0.127	0.095	0.143	16:00
7	2009-08-14	서울 북동	0.137	0.084	0.138	15:00
8	2009-08-14	서울 남동	0.129	0.103	0.129	16:00
9	2009-08-14	서울 남서	0.124	0.098	0.137	16:00
10	2009-08-14	서울 북서	0.127	0.094	0.127	18:00
11	2009-08-15	서울 북서	0.123	0.093	0.129	14:00
12	2009-08-15	서울 북동	0.137	0.094	0.164	14:00
13	2009-08-15	서울 남서	0.14	0.097	0.153	15:00
14	2009-08-15	서울 남동	0.141	0.117	0.144	15:00

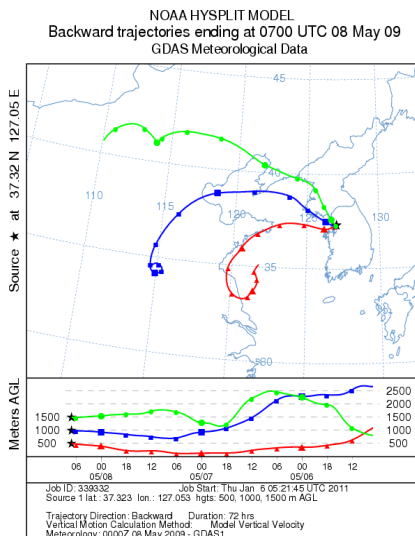
자료 : <http://www.airkorea.or.kr/>

5월 8일의 오존 농도에 대한 서울지역의 기여도는 아시아 57.8%, 경기 13.4%, IC/BC(초기조건/경계조건) 11.8%, 서울 7.2%, 인천 7.0%, 수도권 외 한국 2.7% 순으로 조사되었고, 6월 18일은 경기 40.8%, 수도권 외 한국 15.7%, IC/BC 15.5%, 서울 12.5%, 아시아 11.2%, 인천 4.4% 순으로 나타났다. 7월 16일은 경기 30.0%, IC/BC 22.9%, 아시아 21.4%, 서울 20.9%, 수도권 외 한국 3.0%, 인천 1.8% 순으로 조사되었고, 8월 15일은 아시아 39.7%, 경기 27.6%, IC/BC 24.4%, 서울 5.0%, 수도권 외 한국 3.3%, 인천 0.1% 순으로 나타났다.

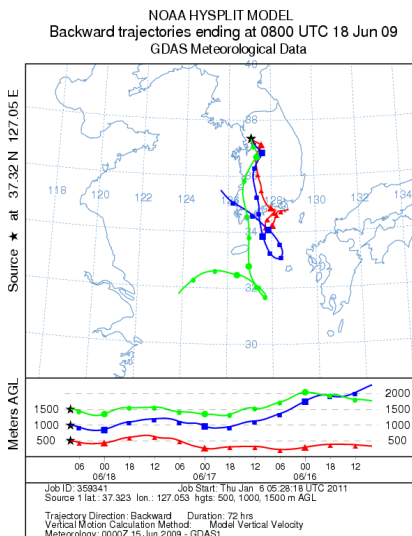
상층의 기상정보를 종합적으로 해석하여 공기괴의 이동 현상을 규명하는데 주로 사용되는 역궤적 분석을 이용하여 미비하나마 대기질 모델링 결과를 보완하고자 하였다. 역궤적 분석에 이용되는 모델은 HYSPLIT(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integration Trajectory)로 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration; 미국해양대기국)에서 제공하며, 궤적의 길이에 따

른 풍속의 변화와 오염물질의 이동경로를 파악할 수 있다.

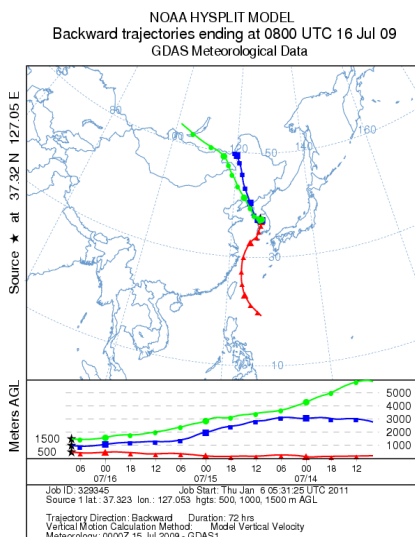
<그림 5-21>은 오존 고농도 사례일에 대한 3일간의 역궤적을 분석한 것이다. 대기질 모델링 결과, 아시아 지역의 오존 기여가 높게 나타난 5월 8일과 8월



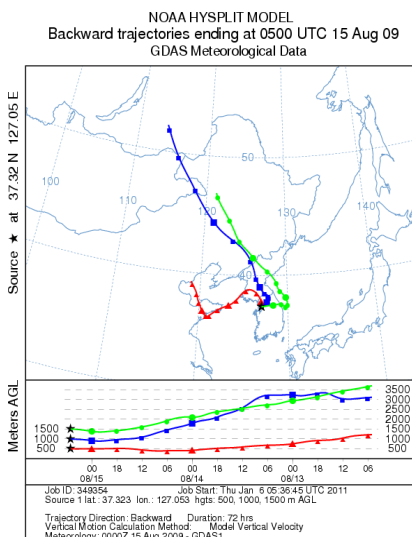
오존 고농도 사례일(5월 8일) 역궤적 분석



오존 고농도 사례일(6월 18일) 역궤적 분석



오존 고농도 사례일(7월 16일) 역궤적 분석

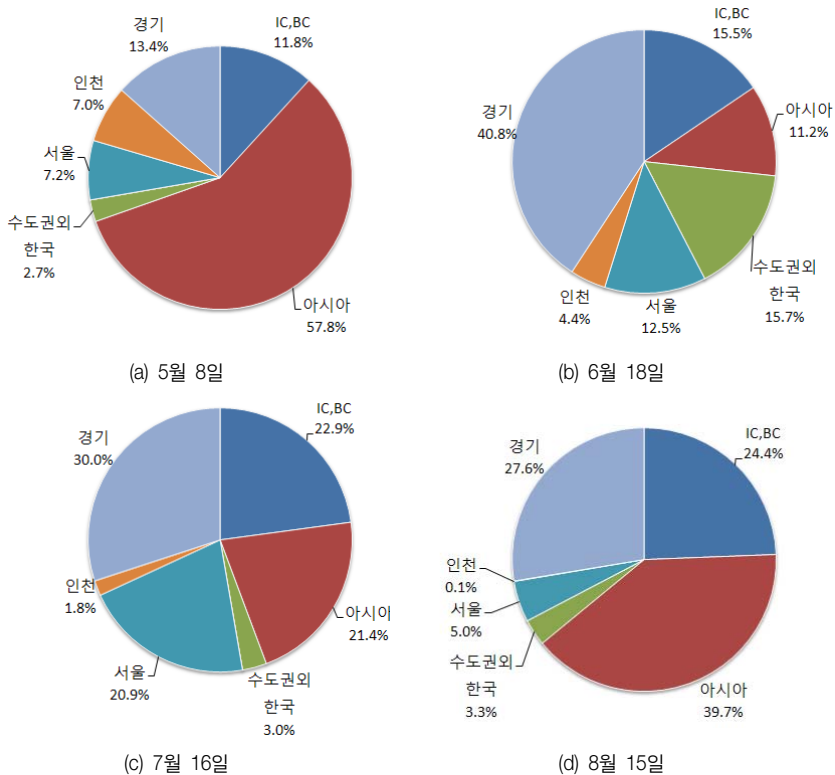


오존 고농도 사례일(8월 15일) 역궤적 분석

<그림 5-21> 오존 고농도 사례일에 대한 역궤적 분석

15일의 공기기단은 500m 고도의 역계적 분석결과에서도 공업지역이 산재하여 오염물질의 배출이 많은 중국 동부지역에서부터 느리게 이동해 온 것을 볼 수 있다. 반면, 대기질 모델링 결과, 서울을 포함한 수도권의 영향을 많이 받은 것으로 나타난 6월 18일과 7월 16일의 공기기단은 500m 고도의 역계적 분석결과 비교적 오염도가 낮은 남쪽으로부터 느리게 이동되어 온 것으로 나타나 대기질 모델의 OSAT 결과와 어느 정도 일치하는 것을 알 수 있다.

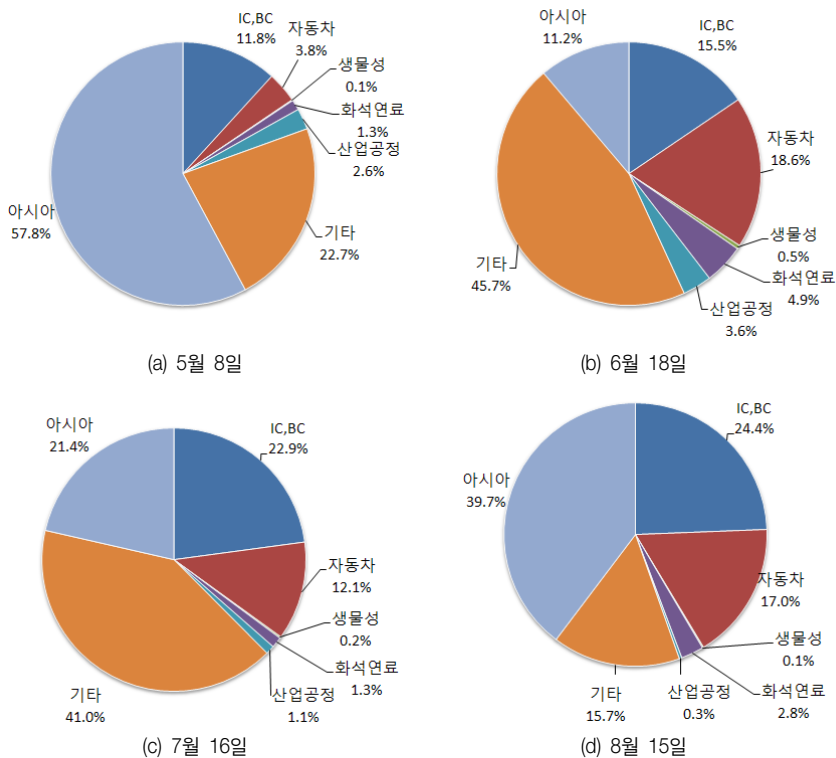
OSAT의 결과를 바탕으로 보면, 오존 고농도 발생의 경우 일부 사례는 중국 등으로부터 장거리 이동의 영향이 보다 크고 일부 사례는 지역배출의 영향이 주요하게 작용함을 알 수 있다. 서울지역 O_3 농도에 대한 서울 기여도는 5.0~20.9%, 서울을 포함한 수도권의 기여도는 27.6~57.6%로 나타나 서울시 오존농



〈그림 5-22〉 서울지역에 대한 지역별 O_3 기여도 분석 결과

도의 저감을 위해서는 수도권의 공동노력이 필요함을 알 수 있다.

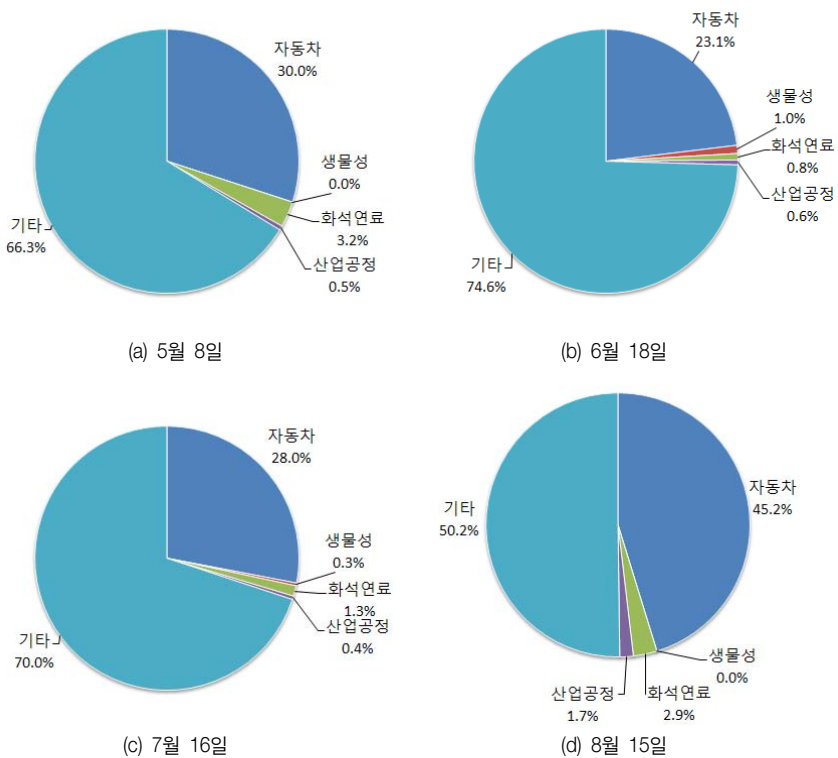
<그림 5-22>와 같이 배출원별 기여도를 살펴보면, 5월 8일은 아시아 57.8%, 기타 22.7%, IC/BC 11.8%, 자동차 3.8%, 산업공정 2.6%, 화석연료 0.1%, 생물성 0.1% 순으로 조사되었고, 6월 18일은 기타 45.7%, 자동차 18.6%, IC/BC 15.5%, 아시아 11.2%, 화석연료 4.9%, 산업공정 3.6%, 생물성 0.5% 순으로 나타났다. 7월 16일은 기타 41.0%, IC/BC 22.9%, 아시아 21.4%, 자동차 12.1%, 화석연료 1.3%, 산업공정 1.1%, 생물성 0.2% 순으로 조사되었고, 8월 15일은 아시아 39.7%, IC/BC 24.4%, 자동차 17.0%, 기타 15.7%, 화석연료 2.8%, 산업공정 0.3%, 생물성 0.1% 순으로 나타났다. 이 결과를 보면, 외부의 영향이 컸던 5월 8일과 8월 15일, 내부 배출의 기여도 컸던 6월 18일과 7월 16일 모두에서



<그림 5-23> 서울지역에 대한 배출원별 O₃ 기여도 분석 결과

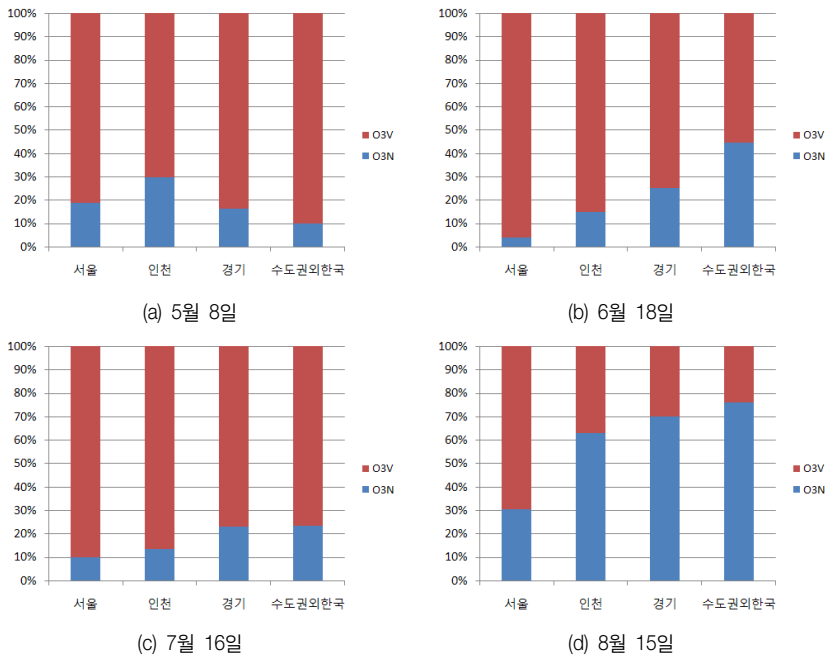
배출부문별 기여도는 기타 부문인 자연배출원, 유기용제 사용, 에너지 수송 및 저장이 가장 높았으며, 자동차가 그다음을 차지하는 것으로 분석되었다(<그림 5-23> 참조).

마찬가지로 국내 배출원을 100%로 가정하였을 때, 서울지역의 오존농도에 기여하는 배출원은 고농도 사례일인 5월 8일(66.3%), 6월 18일(74.6%), 7월 16일(70.0%), 8월 15일(50.2%) 모두 기타부문(에너지수송 및 저장, 유기용제 사용, 농업, 기타 면오염원, 자연오염원 등)이 가장 높았으며, 자동차(5월 8일 30.0%, 6월 18일 23.1%, 7월 16일 28.0%, 8월 15일 45.2%)는 두 번째로 높은 것으로 나타났다(<그림 5-24> 참조).



<그림 5-24> 서울지역에 대한 국내 배출원별 O₃ 기여도 분석 결과

<그림 5-25>는 NO_x가 오존생성의 제한인자(NO_x-limited)로 작용하여 생성된 오존인 O₃N, VOC가 제한인자(VOC-limited)로 작용하여 생성된 오존인 O₃V를 구분하여 백분율로 나타낸 것이다. 외부의 영향이 강했던 5월 8일에는 서울, 인천, 경기, 수도권 외 지역 대부분은 O₃V의 기여도가 높은 VOC-limited 조건에서 오존이 생성된 것으로 나타났다. 내부 배출의 영향이 강했던 6월 18일과 7월 16일에는 수도권 지역은 O₃V의 기여도가 높은 VOC-limited 조건에서 오존이 생성된 것으로 분석되었다. 외부의 영향이 컸던 8월 15일에는 서울을 제외한 지역의 오존은 O₃N의 기여도가 높게 나타나 NO_x-limited 특성을 보이거나 서울시는 다른 사례와 마찬가지로 VOC-limited의 특성으로 오존이 생성된 것으로 나타났다. 따라서, 이를 종합하면 서울시에서 발생하는 오존 고농도는 VOC-limited의 조건에서 나타나는 것으로 판단할 수 있다.



〈그림 5-25〉 서울지역에 대한 지역별 O₃N, O₃V 기여도 분석 결과

3. 서울시 대기질 특성

배출원으로부터 직접 배출되는 일부 미세먼지들은 배출원의 관리가 직접적인 효과를 보이나 다른 기체상 물질들의 복합적 반응을 통해 2차적으로 생성되는 일부 미세먼지, 오존 등의 경우 지역적 특성을 고려한 해당 전구물질들의 효과적 관리가 무엇보다 중요하다. 따라서, 2차 생성의 전구물질인 NO_x , VOC, SO_x 등 기체상 물질에 초점을 두고 통합적 관점에서의 효과성을 최대화하기 위한 저감전략의 개발이 필요하다.

앞서 해외사례에서 살펴본 바와 같이, 해당 지역의 특성을 파악하는 것이 효과적 통합관리에 중요하므로 서울지역의 오염물질 생성과 관련된 특성을 자세히 조사하는 것이 효과적 관리 방안 도출을 위한 첫 단계라 할 수 있다. 배출량 자료와 이를 이용하는 모델링 분석에 있어서는 모델의 입력자료나 모델자체로부터 야기되는 다소의 불확실성이 존재하므로 이를 보완할 수 있는 방법으로 서울지역의 오존, 미세먼지의 생성 특성을 연구한 기존의 자료들을 수집·분석하고, 이 연구에서 수행한 모델링의 결과들과 함께 비교하여 다음과 같이 서울시 대기질의 특성을 도출하였다.

1) 오존생성 특성

다양한 NO_x 와 VOC의 배출원이 산재한 대부분의 도시지역은 그 지역 특유의 지형 및 기상조건으로 인하여 이들 오염물질의 광화학반응, 수송·이동 및 누적 등의 특성이 다를 수 있어 생성되는 오존의 양도 다양하게 나타날 수 있다 (Mao et al., 2009; Kleinman et al., 2001; 손장호 외, 2010).

서울시의 경우, 오존이 고농도로 발생하는 기상학적 특성은 많은 고농도 사례일 조사를 통하여 연구되었으며, 정체성 고기압과 북태평양 고기압의 영향권에 있으면서 온도가 높고 구름이 적은 날에 고농도 발생 확률이 높은 것으로 나타났다. 기온의 증가는 VOC 증발량을 증가시키며, 광화학 반응에 필수적인

일사와 풍속은 오염물질의 이동 및 확산과 관련되므로 오존 생성에 중요한 기상인자가 된다(한진석 외, 2006).

기상인자 이외에 오존생성에 있어서 주요 전구물질인 NO_x와 VOC의 농도 외에도 이들의 적정비율도 중요한 요소이다(이종범 외, 2005). 일반적으로 대상 지역이 VOC농도가 낮고 NO_x농도가 높은 환경일 경우, 오존생성의 제한요소로 작용하는 VOC를 감소시키는 것이 오존농도의 감소를 야기한다(VOC-limited). 반면, VOC농도가 높고 NO_x농도가 낮은 환경의 지역에서는 오존생성의 제한요소가 되는 NO_x의 배출 감소가 오존농도 감소로 연결될 수 있다(NO_x-limited). 따라서 대상 지역에서는 어떠한 조건이 오존생성을 주도하는지 판별하는 것은 대기 중 오존농도를 감소시키기 위한 효율적인 대책 강구에 필수적임을 알 수 있다.

서울시를 대상으로 1996~2000년 기간 동안 관악과 시청의 2개 측정지점에서 오존 농도 특성을 조사한 김정화와 김용표(2003)의 연구에서는 이들 지역이 NO_x가 과잉상태, 즉 VOC-limited 지역의 특성을 보인다고 분석하였다. 또한, 국립환경과학원에서 측정자료 분석과 광화학 모델링을 이용하여 수행한 연구에서도 서울을 포함한 수도권 지역의 오존 생성은 VOC-limited 경향이 많은 것으로 조사되었다(이종범 외, 2005). 환경부 보도자료(2007. 3)에서는 수도권 지역의 대기 상태는 VOC가 오존생성의 제한인자로 작용하는 경우와 NO_x가 오존생성인자의 제한인자로 작용하는 경우가 혼재되어 있으나 도심지역의 경우 VOC를 줄이는 것이 최고 오존농도를 줄이는 데 효과적인 것으로 설명하고 있다. 더 나아가 수도권을 대상으로 주요한 VOC 화학종들에 대한 오존 생성기여도를 분석한 연구에서는 수도권에서 배출량이 많은 Toluene과 Xylene이 오존생성에 대한 기여도가 가장 높은 것으로 조사되어 수도권 오존대책 수립 시 이 두 물질을 저감할 것을 제안한 바 있다(이종현 외, 2007; 환경부 보도자료, 2007.3). 또한, 홍유덕 등이 서울지역을 대상으로 오존 저감방안을 분석한 연구에서도 VOC의 주요 배출원인 유기용제 사용을 줄이는 것이 서울시 오존농도

저감에 가장 효율적인 것으로 제시되었다(홍유택 외, 2005). 하지만, 최근 서울의 휘발성유기화합물 배출량 자료에 대한 연구에서는 서울시 VOC의 주요 배출원이 유기용제가 아닌 자동차 배출가스일 수 있으며 기존의 VOC 배출량 자료의 검토가 필요함을 제기하기도 하였다(김용표, 2009).

오존 고농도 사례일에 대한 서울시 오존생성 특성을 모델링으로 분석한 이 연구의 결과에서도 서울시의 고농도 오존은 VOC-limited 조건에서 생성되는 것으로 조사되었다. 또한, 주요한 오존생성을 야기하는 내부 배출원도 유기용제, 에너지 수송 및 저장, 자동차로 분석되어 과거의 연구결과와 유사함을 알 수 있다.

앞 절에서 살펴본 바와 같이, 미세먼지와 이산화질소의 저감을 목표로 하고 있는 수도권 대기환경개선을 위한 실행계획의 추진으로 미세먼지와 이산화질소의 농도는 개선되고 있는 것으로 나타났다. 하지만 VOC와 NO_x의 광화학 반응으로 생성되는 2차 물질인 오존의 경우, 기존의 대기환경 개선정책의 추진이 긍정적 효과를 야기했다고 판단하기에는 무리가 있다. 특히, 오존 생성에 있어서는 전구물질인 VOC와 NO_x 배출량의 절대량을 줄이는 것도 중요하지만 두 전구물질의 배출량의 상대적 비율을 적절히 고려하여 저감정책을 추진하는 것이 무엇보다 필요하다.

배출량 자료와 이를 이용하는 모델링 분석에 있어서는 다소의 불확실성이 존재하나 측정자료 분석결과와 연계하여 종합하면, 과거 연구 자료들은 서울시의 고농도 오존 발생을 줄이기 위해서는 VOC 배출량의 저감, 특히 Toluene과 Xylene의 배출이 많은 배출원의 관리가 필요함을 시사하고 있다. Toluene과 Xylene의 배출이 많은 배출원은 도료용 유기용제이며 VOC의 60% 이상이 Toluene과 Xylene 성분으로 구성되어 있다. 경유 연소배출은 VOC의 30%, 휘발유의 연소배출은 VOC의 20% 정도가 Toluene과 Xylene의 두 성분으로 구성되어 있는 것으로 조사되었다(이종범 외, 2005). 따라서 서울시의 경우 친환경 도료 사용 강화와 도장 및 세정시설 등의 비산배출 관리 강화, 자동차 배출의

관리 강화가 오존 저감에 효과적일 것으로 판단된다. 또한, Toluene과 Xylene과 같은 방향족 VOC는 오존뿐 아니라 미세먼지 생성의 주요 물질이기도 하므로, 오존과 미세먼지 양쪽 측면에서 Toluene과 Xylene 배출이 많은 배출원이 우선적 관리 대상이 될 수 있을 것으로 생각된다. 하지만, 최근 VOC에 대한 연구결과에서 VOC 배출량 자료의 불확실성이 제기되고 있는바, 향후 효과적 VOC 관리를 위해서는 서울시 VOC 주요 배출원에 대한 확인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

2) 미세먼지 생성 특성

대기 중 미세먼지는 원소, 수용성 이온성분, 탄소입자 및 유기물질 등 복잡한 성분들로 구성된 입자상 오염물질을 총칭한다. 이 중 일부는 발생원에서 직접 배출된 일차 발생입자와 기체상 물질들의 물리-화학반응(응축, 산화·중화반응, 입자상 물질과의 불균일 반응, 화학반응, 흡수, 흡착 반응 등)으로 입자로 생성·변환된 이차생성 입자들로 구성된다. 2차생성 입자의 주요 성분은 황산염, 질산염, 암모늄, 일부 유기탄소 등으로 대부분 입경의 크기가 $2\mu\text{m}$ 이하이다(김신도 외, 2007). 앞서 살펴본 바와 같이, 이러한 2차생성 입자들은 SO_x , NO_x , NH_3 , VOC들이 전구물질로 작용하여 생성되는 물질이며, 이 중 NO_x 와 VOC는 오존, 이산화질소 생성의 전구물질이기도 하다. 따라서, 오존, 이산화질소와 전구물질을 공유하는 2차생성 미세먼지만을 고려하여, 서울시의 미세먼지 특성을 조사한 과거 연구자료들을 분석하였다.

서울시와 수도권을 대상으로 측정자료를 이용한 과거 수용모델 연구결과에서는 황산염, 질산염, 암모늄 등 2차 생성에 의한 미세먼지의 기여가 25% ~ 40% 정도인 것으로 추정되었다(서울시, 2010). 이 중 일부는 장거리이동으로, 일부는 국지적인 전구물질의 배출원에 의한 2차 생성으로 나타날 수 있다. 황산염의 경우에는 석탄을 많이 사용하는 중국으로부터의 장거리 이동영향이 국지 배출에 의한 영향보다 클 것으로 추정되고 있는 반면, 질산염은 자동차 연소배

출 등 국지적 배출의 영향이 보다 큰 것으로 보고 있다(서울시, 2007). 이 외에도 VOC의 광화학 반응으로 생성되는 2차 생성 유기탄소도 전체 유기탄소의 10% ~ 60% 정도이며, 특히 광화학 반응이 활발한 여름철에 더 많이 생성되는 것으로 조사되었다(박진수와 김신도, 2005). 따라서, 미세먼지 2차 생성 저감을 위해서는 국지배출의 영향이 큰 질산염이나 유기탄소 등의 생성을 억제하는 방향으로 관리가 진행되어야 할 것으로 판단된다. Lee et al.(2006)은 서울을 대상으로 모델링을 이용하여 수행한 연구에서 NO_x 배출 저감보다는 VOC 배출 저감이 2차 생성 미세먼지 저감에 더 효과적인 것으로 제시하기도 하였다.

제 6 장 결 론 및 제 언

제1절 대기질 관리의 방향

제2절 연구의 한계 및 향후 과제

제1절 대기질 관리의 방향

연료규제, 배출허용기준 강화, 자동차 저공해사업 추진 등 다양한 대기관리 정책 추진으로 일산화탄소(CO), 아황산가스(SO₂) 등 일차형 대기오염물질은 가시적인 개선효과를 보이거나, 2차형 오염물질인 미세먼지(PM), 오존(O₃), 이산화질소(NO₂)는 단기 환경기준을 초과하는 사례가 꾸준히 발생하고 있다. 특히 오존의 경우 단기기준 초과횟수가 증가하는 경향이 관찰되고 있는 상황이다.

미세먼지, 이산화질소, 오존은 대기 중에서의 생성 및 소멸과정들이 복잡·다양하여 배출원의 배출량 저감이 대기 중의 농도 감소로 나타나는 선형적 특성을 보이지 않는다. 또한, 일부 미세먼지 성분, 오존, 이산화질소는 화학적으로 생성·소멸의 과정이 상호 밀접하게 연계되어 있으므로 한 대기오염물질을 타깃으로 하는 대기관리의 정책이 다른 오염물질의 농도변화에 긍정적 혹은 부정적 영향을 미칠 가능성도 존재한다.

이러한 2차형 대기오염물질에 대한 기존의 개별적 오염물질 관리의 한계가 미국 등 선진국을 중심으로 인지되면서, 새로운 대안으로 대기오염물질 통합관리가 시범적으로 시도되고 있다. 즉, 오존(O₃), 미세먼지(PM)와 같은 2차 오염물질은 ‘개별적 오염물질 관리’의 기존 접근방법으로는 효과적 관리가 어려우

므로 ‘대기오염물질의 위해성 최소화’로 대기질 관리의 목표를 설정하고 통합적 관점으로 대기질 관리 방향 전환을 모색하고 있다.

서울시의 대기관리는 2006년에 수립된 ‘수도권 대기환경개선 기본계획 추진을 위한 서울특별시 시행계획’을 기초로, 2014년까지 미세먼지와 이산화질소의 농도 개선을 목표로 하여 도로이동오염원, 사업장, 에너지 등 광범위한 분야에 걸친 오염물질 배출량 저감정책을 추진하고 있다.

2009년 대기질 개선 정책 추진실적 분석결과, 미세먼지, NO_x, SO_x는 계획대비 100% 정도 또는 그 이상으로 배출량 저감이 실현된 것으로 나타나나 VOC의 경우 배출관리가 계획대로 진행되지 못한 것으로 분석되었다. 이와 같은 대기관리정책 추진으로 미세먼지와 이산화질소의 농도는 개선되었으나 VOC와 NO_x의 광화학 반응으로 생성되는 2차 물질인 오존농도는 개선된 것으로 판단하기에는 어려운 모델결과가 예측되었다. 물론, 중국 등 동아시아지역의 대기환경 변화로 인한 장거리이동 오염물질의 증가는 서울시 오존농도 증가에 일부 영향을 주었을 것으로 판단되나 지역 내 VOC, NO_x 등의 대기오염물질 배출로 인한 오존 농도 증가도 일정부분 영향을 줄 것으로 추정되는바, 서울시의 오존생성특성을 고려한 신중한 오염물질 배출관리가 필요할 것으로 보인다.

오존 생성에 있어서는 전구물질인 VOC와 NO_x의 절대 배출량을 줄이는 것도 필요하지만 두 물질 배출량의 상대적 비율을 적절히 고려하여 저감정책을 추진하는 것이 무엇보다 중요하다. 과거 연구 자료나 이 연구 결과는 서울시 오존생성과 2차 생성 미세먼지가 VOC-limited의 특성을 보이는 것으로 추정하고 있으므로 VOC 배출 저감을 강화하는 것이 오존 및 2차 생성 미세먼지를 동시에 완화하는데 효과적일 것으로 보인다.

따라서, 미세먼지, NO₂, 오존을 모두 효과적으로 관리하고자 하는 통합적 관점에서 서울시의 대기질 관리 방향은 기존의 수도권 대기환경개선을 위한 시행계획의 지속적 추진과 더불어, 특히 VOC 배출과 관련된 배출원에 대한 보다 적극적 관리가 필요할 것으로 판단된다. 즉, PM₁₀, SO_x의 1차 배출원에 대해서

는 지속적 관리를, 오존, 미세먼지, NO₂ 등 2차 생성을 야기하는 NO_x와 VOC에 대해서는 VOC와 NO_x의 배출을 함께 줄이되 VOC 배출 저감을 보다 강화·시행하는 방향으로 추진하는 것이 효과적일 것으로 추정된다. 특히, VOC 배출저감의 경우 toluene과 xylene의 배출이 많은 것으로 보고되고 있는 유기용제와 이동오염원에 중점을 둔 관리가 필요할 것으로 보인다.

또한, 중국 등 장거리 이동의 영향뿐 아니라 국내 내부 배출의 영향이 컸던 오존 고농도 사례에 대한 대기질 모델링 분석결과, 경기 지역의 배출원에 의한

〈표 6-1〉 대기질 통합관리를 위한 정책 방향

	주요 저감대책의 지속적 추진	강화대책(VOC 배출관리 강화)
사업장 관리	■ 대형사업장 총량관리 ■ 대기오염물질 배출허용기준 강화 ■ 저NO_x버너 보급	
면배출원 관리	■ 비산먼지 관리 ■ 가정용 저NO_x보일러 보급	■ 유기용제 관리 강화 - 친환경 도료 보급 - 도료 유기용제함량 단계적 강화 - 도장, 세정시설 등 비산 배출 VOC 시설 관리 기준 및 감독 강화 - 소비자 유기용제 함량 제한 강화 ■ 주유소 유증기 회수설비(stage II)설치 의무화
에너지·도시 관리	■ 지역 냉난방 보급확대 ■ 신재생에너지 보급 확대 ■ 환경친화적 도시관리	
자동차 관리	■ 제작차 배출허용기준 강화 ■ 저공해 자동차 보급 ■ 운행차 저공해화 ■ 노후차 조기폐차 확대 ■ 전기차 보급 확대 및 충전인프라 구축 ■ 유사 석유 사용의 단속 강화, 자동차 연료 품질 개선 ■ 건설기계 등 비도로이동오염원 관리 강화 ■ 대중교통 확충 등 친환경적 교통 수요 관리	

서울시 오존 생성 기여 정도가 적지 않은 것으로 조사되었다. 이는 서울시의 대기질 개선에 있어서 수도권 지역의 공동협력이 반드시 필요함을 시사하므로, 수도권 대기질 개선을 위한 공동연구 및 노력이 지속적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

제2절 연구의 한계 및 향후 과제

이 연구는 배출량 자료를 바탕으로 하는 모델링을 사용하여 분석된 결과이므로 모델과 관련된 불확실성에 따른 결과해석의 한계가 존재한다. 비록 모델 결과의 정합도 분석을 통하여 모델의 신뢰도를 검증하였으나 여전히 개선이 필요한 부분이 존재하는 것이 사실이다. 예를 들면 배출량 자료, 기상자료 등 모델 입력 자료의 불확실성, 2차 유기물질 생성 등 대기 중 물리·화학반응에 대한 모델의 정확한 구현의 한계 등이 있다. 하지만 모델의 한계를 정확히 인지하면서 모델을 적용하여 도출된 결과를 주의 깊게 해석하고 측정자료 분석 등의 다른 방법을 통한 결과들과 비교하는 방식으로 어느 정도는 모델결과의 한계를 극복해 나아갈 수 있을 것으로 본다. 이에 따라 이 연구에서는 모델 결과들을 과거의 연구결과들과 비교하여 결론을 도출하여 제시하였으나 연구의 범위를 벗어나 조사되지 못한 중요한 부분이 있으므로 향후에 추가적 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

이 연구를 통하여 다루지 못한 중요한 부분들 중 향후에 연구가 진행되어야 할 방향은 다음과 같다.

첫째, 배출량 자료는 모델입력자료 중 가장 기초적이고 중요한 자료이며 대기관리 정책 입안의 핵심자료이기도 하다. 국내 배출량자료는 배출계수 개발 및 활동도 조사 연구 등 지속적인 노력을 통해 상당히 보완·개선되고 있으나

일부 배출원은 정확한 배출활동 및 배출량이 확인되지 못하는 경우도 있다. 이 연구를 통해 통합관리의 관점에서 중요한 관리 대상으로 확인된 VOC 배출의 경우, 배출량 자료의 배출원별 배출기여와 측정자료를 이용하여 분석된 배출원별 기여가 다소 다르다는 조사연구가 보고되고 있고(김용표, 2010) 정품제품에 비해 대기오염물질 배출량이 매우 많은 것으로 알려진 유사 경유·휘발유의 사용이 증가되고 있는바, 보다 정확한 VOC 배출관리를 위해서는 서울시 주요 VOC 배출원에 대한 정확한 확인이 필요할 것으로 보인다. 따라서, 향후 VOC 주요 배출원 확인 및 관리방안에 대한 추가 연구가 필요하다.

둘째, 선진국의 대기질 관리 동향 파악에서 살펴본 바와 같이 향후 대기질 관리는 위해성에 기초한 통합관리의 방향으로 진행되어야 할 것이다. 따라서, 대기오염으로 인한 건강영향을 대기질 정책 도출에 적용할 수 있는 방안의 도입이 필요하다. 해외와 국내 일부 연구에서 대기질 모델링과 건강영향 모델링을 접목하여 대기질 개선 정책의 건강 편익을 경제적 가치로 추정하여 대기 정책의 효과를 평가한 바 있다(환경부, 환경오염 저감정책의 건강편익산정 모형 확립 및 적용연구, 2007; 국립환경과학원, PM_{2.5} 대기환경기준 설정을 위한 연구, 2009). 건강영향 모델링 중 많이 사용되고 있는 모델은 미국 EPA에서 개발된 BenMAP(Environmental Benefits Mapping and Analysis Program) 모델로 대기 오염물질의 농도 변화와 관련된 건강영향을 예측하고, 그에 따른 경제적 인가치를 추정할 수 있어 대기질 관리 정책별 편익비교뿐 아니라 대상지역의 인구집단별·지역단위별 대기오염물질의 노출지도도를 작성할 수 있어, 보다 구체적으로 집중 관리대상 및 지역을 확인할 수 있다. 따라서, BenMAP과 같은 건강영향 평가모델 도입에 필요한 국내 대기오염물질 농도와 질병(사망) 발생률 사이의 상관관계에 대한 지속적인 연구 및 자료의 보완이 필요하며, 이러한 국내 자료들을 적용하여 대기정책의 건강편익을 정량적으로 평가하는 방안을 강구해야 할 것이다.

참 고 문 헌



참 고 문 헌

- 이종현 외, 2007, “수도권에서 오존생성 기여도 산출에 관한 연구”, 『한국대기환경학회지』, 제23권 6호, pp.286-296.
- 국립환경과학원, 2009, 『PM2.5 대기환경기준 설정을 위한 연구』
- 국립환경과학원, 2010, 『국가 대기오염물질 배출량 연보(2007)』
- 김신도 외, 2007, “수도권 미세먼지 중 광역적 발생원에 의한 이차생성입자에 관한 연구”, 환경공동학술대회, pp.299-302.
- 김용표, 2006, “서울의 미세먼지에 의한 대기오염”, 『한국대기환경학회지』, 제22권 5호, pp.535-553.
- 김용표, 2009, “서울의 휘발성유기화합물 배출량 자료 검증”, Particle and Aerosol Research, 5, pp.139-148.
- 김용표, 2010, “수도권 대기 미세먼지 1999-2008년 추이 분석”, 『환경영향평가』, 제19권 1호, pp.59-74.
- 김유정, 2010.08, “이동패턴에 따른 동북아시아에서의 장거리 이동 입자상 물질의 특성에 관한 연구”, 건국대학교 대학원
- 김정화와 김용표, 2003, “관악과 시청의 용일별 오존 농도 : 1996-2000년 측정자료”, 『한국대기환경학회지』, 제19권 5호, pp.611-619.
- 미국 EPA, 2008, Multipollutant Report: Technical concepts & Examples.
- 미국 Western Governor's Association, WRAP fugitive dust Handbook, 2006.
- 박진수 · 김신도, 2005, “서울과 인천지역 PM10과 PM2.5 중 2차 생성 탄소성분 추정”, 『한국대기환경학회지』, 제21권 1호, pp.131-140.
- 서울시, 2009, 서울시 일별 측정자료
- 서울특별시 맑은환경본부, 2009, 『2009 서울의 대기질 평가보고서』

서울특별시 홈페이지, 서울시보건환경연구원 보도 자료(2010.01.07)

서울특별시, 2006. 11, 수도권 대기환경 개선 기본계획 추진을 위한 서울특별시 시행계획

_____, 2007, 「서울시 미세먼지 특성 분석」, 한국외국어대학교

_____, 2009, 「서울의 환경; 환경백서 2008」

_____, 2010, 「서울시 대기 중 미세먼지의 상세모니터링을 통한 미세먼지 특성조사 2차 연구」

손장호 외, 2010, “2009년 봄, 여름철 광양만 지역 오존의 광화학적 특성 분석”, 「한국대기환경학회지」, 제26권 2호, pp.161-176.

수도권대기환경청, 2009 ~ 2010, 수도권대기환경정보(월별 자료)

_____, 2009.11, 「2008년도 수도권 대기환경개선 시행계획 추진실적 평가보고서」

유철 외, 2009, “대기환경관리 시행계획 추진에 따른 수도권의 대기오염 저감효과 분석”, 국립환경과학원.

이종범 외, 2005, “광화학 대기오염 생성과정 규명과 저감대책 수립”, 국립환경과학원.

이형민 외, 2010, “서울과 고산의 PM2.5 수분함량 계절 특성”, 「한국대기환경학회지」, 제26권 1호, pp.94-102.

한진석 외, 2006, “고농도 오존 발생이 오존전구물질 및 기상인자 연구”, 「국립환경과학원보」, 제28권, pp.51-63.

홍유덕 외, 2005, “OZIPR을 이용한 서울지역 광화학오존농도 저감방안에 관한 연구”, 「환경영향평가」, 제14권 3호, pp.117-126.

환경부 보도자료, 2010. 2, “환경친화형 페인트 보급 확대기로”.

- 환경부, 1999, 대기환경규제지역 휘발성유기화합물질 배출시설 규제 업무편람 1999
- _____, 2004. 08, 수도권 지역 배출총량 관리제 추진방안환경부 보도자료, 2007. 3,
“수도권 오존 개선의 관건은 톨루엔과 자일렌, 시정과 PM2.5에 대한 영향
은 1차 배출원 중 자동차가 가장 커”.
- _____, 2007, 「환경오염 저감정책의건강편익산정 모형확립 및 적용연구」
- _____, 2009, 대기환경연보(2008) Annual Report of Ambient Air Quality in Korea,
2008
- _____, 2009, 환경통계연감
- Chow, J. C., 2010, “Multipollutant air quality management”, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 60, pp. 642-644.
- Hidy, G. M., Pennell, W. T., 2010, “Multipollutant air quality management”, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 60, pp. 645-674.
- Kleinman, L.I. et al., 2001, “Sensitivity of ozone production rate to ozone precursors” *Geophys. Res. Lett.*, 28, pp.2903-2906.
- Lee, S. H. et al., 2006, “Estimation of the seasonal variation of particulate nitrate and sensitivity to the emission changes in the greater Seoul area”, *Atmospheric Environment*, 40, 3724-3736.
- Liao et al., 2008, Current and future linked responses of ozone and PM2.5 to emission controls, *Environ. Sci. Technol.*, 42, 4670-4675.
- Liu et al., 2010, Understanding of regional air pollution over China using CMAQ, part II: Process analysis and sensitivity of ozone and particulate matter to precursor emissions, *Atmospheric Environment*, 44, 3719-3727.

- Luecken, D., Cimorelli, A., Stahl, C., Tong, D., 2008, Evaluating the effects of emission reductions on multiple pollutants simultaneously, *Air Pollution Modeling and Its Application XIX*, 623-631.
- Mao, J. et al., 2009, “Atmospheric oxidation capacity in the summer of Houston 2006: Comparison with summer measurements in other metropolitan studies”, *Atmos. Environ.*, doi:10.1016
- Missouri DNR/Illinois EPA, 2010, *St. Louis Air Quality Management Plan*.
- NARSTO, 2010, *Technical challenges of risk-and result-based multipollutant air quality management: A summary for policymakers*.
- North Carolina DENR, 2010, *North Carolina’s Air Quality Multi-Pollutant Process*.
- Wesson, K., Fann, N., Morris, M., Fos, T., Hubbell, B., 2010, “A multi-pollutant, risk-based approach to air quality management: Case study for Detroit”, *Atmospheric Pollution Research*, 1, 296-304.

[http://www.kma.go.kr/\(기상청 홈페이지\)](http://www.kma.go.kr/(기상청 홈페이지))

[http://www.seoul.go.kr\(서울특별시 홈페이지, 맑은환경본부\)](http://www.seoul.go.kr(서울특별시 홈페이지, 맑은환경본부))

[http://www.me.go.kr/mamo/\(수도권 대기환경청\)](http://www.me.go.kr/mamo/(수도권 대기환경청))

[http://www.me.go.kr/ecopaint\(환경친화적 도로 홈페이지\)](http://www.me.go.kr/ecopaint(환경친화적 도로 홈페이지))

영문 요약 (Abstract)



Co-effect Analysis of Air Quality Management Measures in Seoul

Yu-Jin Choi · Woonsoo Kim · Kyung-Jin Ko

The Single-Pollutant air quality management strategy has been effective, resulting in reduction of primary air pollutants such as SO₂ and CO, which respond directly to emission reduction of sources. However, secondary air pollutants such as O₃ and a portion of PM do not necessarily change in response to emission reductions due to complex relation of their precursors having common or intermingled emission sources. Limitations of the Single-Pollutant air quality management have been recognized and a new approach, the Multi-pollutant air quality management, has gotten increasing attention.

Air pollution problem of Seoul has gone through similar steps to that of developed cities. Currently, O₃, NO₂ and PM are persisting air quality problems in Seoul, especially O₃ showing adverse trend. These pollutants have been managed with the Single-Pollutant approach, and it is high time to examine if current air quality management measures bring beneficial co-effects on the three air pollutants, O₃, NO₂ and PM. Given this background, in this study co-effect of current air quality management measures has been analyzed using an air quality model, and suggestions to more effective and efficient multi-pollutant control have been made.

The result of modeling suggests that current air quality measures focused on PM and NO₂ control can cause O₃ increase. In order to reduce O₃ concentration, more actions to reduce VOC emissions should be taken, considering that Seoul is VOC-limited area in terms of O₃ formation. In the

future, a study on identifying major VOC emission sources and evaluating VOC emission inventory should be followed in order to effectively control VOC emissions in Seoul.

Table of Contents

Chapter 1 Introduction

1. Background and Objectives
2. Methodologies

Chapter 2 Analysis of Current Air Quality Measures

1. Current Status of Air Quality Measures in Seoul
2. Air Quality Policies for Individual Pollutant Control
3. Summary

Chapter 3 Case study of Foreign Countries' Air Quality Management

1. New Trend of Air Quality Management
2. Multi-Pollutant Approach to Air Quality Management
3. Policy Implications

Chapter 4 Implementing Air Quality Modeling System

1. Air Quality Model Description
2. Modeling Domains and Periods
3. Modeling Inputs
4. Evaluation of Model Performance

Chapter 5 Analysis of Modeling Results

1. Co-effect Analysis of Air Quality Measures
2. Analysis of Air Quality Characteristics of Seoul

Chapter 6 Conclusion and Suggestions

1. Policy Direction of Air Quality Management
2. Further Issues

References

시정연 2010-PR-45

서울시 주요 대기관리정책의 복합영향 분석

발 행 인 김 상 범

발 행 일 2011년 1월 31일

발 행 처 서울시정개발연구원

137-071 서울특별시 서초구 서초동 391

전화(02)2149-1234 팩스(02)2149-1025

값 6,000원 ISBN 978-89-8052-778-6 93530

본 출판물의 판권은 서울시정개발연구원에 속합니다.