

서울의 대기환경기준물질 농도 추이

The Trend of the Concentrations of the Criteria Pollutants over Seoul

김 용 표* · 여 민 주

이화여자대학교 환경공학과

(2013년 7월 7일 접수, 2013년 8월 6일 수정, 2013년 8월 6일 채택)

Yong Pyo KIM* and Min Ju YEO

Department of Environmental Science and Engineering Ewha Womans University

(Received 7 July 2013, revised 6 August 2013, accepted 6 August 2013)

Abstract

The trends of the criteria air pollutants' concentrations over Seoul are reviewed, relative contributions of major sources are discussed, and directions for future air quality management are suggested. It was shown that the yearly average concentrations of the criteria air pollutants except nitrogen dioxide and ozone have decreased significantly over the last three decades. Though the concentration of nitrogen dioxide has not decreased, the concentration of NO_x has decreased significantly. The major reason for the reduction of the criteria air pollutants has been strict government regulations such as establishment of strict emission standards and switch to cleaner fuels. However, it is not clear the major reason(s) for the reduction of the PM_{10} concentration. It is suggested that to further reduce the concentrations of secondary air pollutants such as ozone and $\text{PM}_{2.5}$, understanding the major chemical pathways for them is essential. In addition, influence from outside Seoul should be quantified and effectively controlled.

Key words : Seoul, Criteria air pollutants, Vehicular emission, Photochemical reactions, Transport from outside Seoul

1. 서 론

수도권, 특히 서울은 인구와 여러 시설이 집중되어 있어 대기환경이 우리나라 다른 지역에 비해 악화되었고, 이를 해결하기 위해 여러 대책도 다른 지역에 비해 먼저 다양하게 시행되었다.

대표적인 예로 전국적으로 대기환경기준이 1978년 아황산가스(SO_2)에 대해 설정되었고, 이후 계속 기준물질과 측정방법, 기준농도가 개정되었다(표 1, 2 참조). 그리고 1991년 배출허용기준예고제가 공고된 이후, 2010년까지 5년마다 기준이 강화되고 있다. 또한 황합유기준 제도(저황유연료유 사용제도)를 서울을 포함한 주요 도시에 도입하여 1981년 연료유 기준강화(중유: 4.0→1.6% 이하, 경유: 1.0→0.4% 이하)를 시행하고, 1993년에는 기준을 한 단계 더 강

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-3277-2832, E-mail : yong@ewha.ac.kr

Table 1. History of the national ambient air quality standard for criteria air pollutants in Korea (adapted from MOE, 2011).

Year	1983	1991	1993	2001	2007	2010	
Sulfur Dioxide (ppm)	0.05/year* 0.15/day*	S	0.03/year** 0.14/day** 0.25/hour**	0.02/year 0.05/day 0.15/hour	S	S	
Carbon Monoxide (ppm)	8/month 20/8hour	S	9/8hours 25/hour	S	S	S	
Nitrogen Dioxide (ppm)	0.05/year 0.15/hour	S	0.05/year 0.08/day 0.15/hour	S	0.03/year 0.06/day 0.1/hour	S	
Particulate Matters ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	TSP	150/year 300/day	S	S	-	-	
	PM ₁₀	-	-	80/year** 150/day**	70/year 150/day	50/year 100/day	S
	PM _{2.5}	-	-	-	-	-	25/year**** 50/day****
Ozone (ppm)	0.02/year 0.1/hour	S	0.06/8hours 0.1/hour	S	S	S	
Lead ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-	1.5/3months	S	0.5/year	S	S	
Benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-	-	-	-	5/year***	S	
Total hydrocarbon (ppm)	3/year 10/hour	S	-	-	-	-	

*From 1978; **From 1995; ***From 2010; ****From 2015. 'S' means the same as the existing value and '-' means no standard. Standards for hour base values: 99.9 percentile value of one-hour average value should not exceed the standard value and 99 percentile value of eight- or 24-hour value would not exceed the standard value.

Table 2. Analytical methods for the criteria air pollutants (MOE, 2011).

Species	Method
Sulfur dioxide (SO ₂)	Pulse U.V Fluorescence Method
Carbon monoxide (CO)	Non-Dispersive Infrared Method
Nitrogen dioxide (NO ₂)	Chemiluminescent Method
Ozone (O ₃)	U.V Photometric Method
PM-10	β -Ray Absorption Method
Lead (Pb)	Atomic Absorption Spectrophotometry

화(중유: 1.6 → 1.0% 이하, 경유: 0.4 → 0.2% 이하)하였고, 1996년에는 이 제도 대상지역을 확대하고, 기준을 한 단계 더 강화(중유: 1.0 → 1997년부터 0.5%, '01년부터 0.3% 이하, 경유: 0.2 → 0.1% 이하)하였다. 2012년에는 경유는 대상지역을 전국으로 확대하고, 중유는 대상지역을 확대하고 기준도 강화하였다(경유: 0.1% 이하, 중유(LSWR포함): 61개 지자체에서 0.3% 이하, 104개 시군에서 0.5% 이하, 나머지 지역에 해당하는 전국에서 1.0% 이하). 그리고 고체연료

사용규제를 서울을 포함한 6개 광역시와 경기도 13개 지역에 대해 1985년부터 시행하고, 청정연료 공급 및 사용 확대를 1988년 서울의 발전소와 빌딩에 대해 시행하고 이를 1991년 수도권으로, 1993년부터는 다른 도시 지역으로 확대하여 시행하고 있다(MOE, 2012).

1997년에는 수도권을 환경기준을 초과하였거나 초과할 우려가 있는 지역으로 대기질 개선이 필요하다고 인정되는 대기환경규제지역으로 지정하였다. 2003년 수도권대기환경개선에 관한 특별법을 제정하고 2005년에는 수도권 대기환경관리 기본계획을 수립하여 2007년부터 시행하고 있으며, 1997년 설정된 대기환경규제지역을 대기관리권역으로 지정, 관리하고 있다. 이 기본계획에 의하면 서울시의 경우 PM₁₀ 미세먼지와 이산화질소(NO₂) 연평균 농도를 2014년에 각각 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 22 ppb로 줄이도록 되어 있다. 이 목표 달성을 위해 관리대상 오염물질인 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x), PM₁₀ 미세먼지, 휘발성유기화

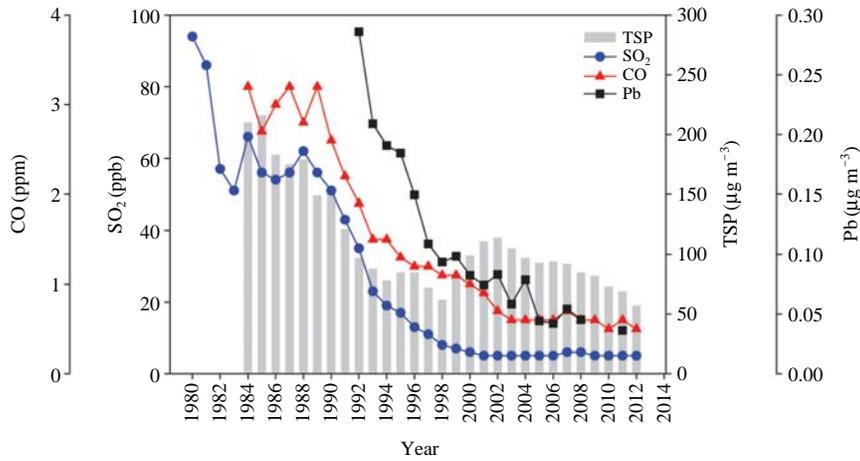


Fig. 1. Trend of the yearly average ambient concentrations of sulfur dioxide, carbon monoxide, TSP, and lead in Seoul between 1980 and 2010.

합물 (Volatile Organic Compounds, VOCs)의 2014년도 배출허용총량을 산정하였으며, 이는 2001년 대비 각각 53.0, 38.7, 38.7, 38.7% 삭감한 양이다. 이를 달성하기 위해 사업장 총량제 및 배출권 거래제, 도로 이동오염원 배출 저감(연료 전환, 저감장치 부착 등 주로 경유자동차에 대한 대책을 통한 관리), 환경친화적 에너지, 도시 관리 등의 정책을 시행하고 있다 (MOE, 2012).

서울의 대기질은 서울의 배출뿐만 아니라 수도권, 한반도, 동북아시아 다른 지역의 영향이 중첩하여 나타나므로, 효과적인 관리를 위해서는 서울의 대기오염물질 배출 특성뿐만 아니라 외부에서의 영향도 파악하여야만 한다(Kim, 2010) 따라서 서울의 대기환경 추이를 파악하고, 적용된 대책들의 효율성을 평가하는 것은 우리나라 다른 지역의 대기관리와 외국의 대도시 대기환경 관리에도 도움이 될 것이다.

이 논문에서는 (1) 서울의 대기환경기준물질 농도 추이를 검토하고, (2) 대기 농도 추이와 연관된 관리 대책을 파악하며, (3) 앞으로 남은 문제들을 정리하였다.

2. 추 이

2.1 1차오염물질 (아황산가스, 일산화탄소, TSP, 납, 벤젠) 추이

대기환경을 개선하기 위해 1장에서 설명한 여러 정

책가운데 2000년대 초반까지 시행된 정책들은 주로 대기오염물질 발생이 적거나 없는 연료로의 전환이며, 이는 그림 1의 아황산가스, 일산화탄소, 총부유분진(TSP), 납의 농도 추이에서 보듯이 발생원에서 발생하여 대기로 직접 배출되는 1차오염물질에 대해 성공적이었다. 이들 물질의 농도는 1980년대와 1990년대에 획기적으로 줄어들었다. 다른 대기오염물질과 달리 납은 연료 연소 가운데에서도 자동차 연료인 휘발유 성능향상제로 사용되는 것으로 1987년 무연 휘발유의 공급을 시작하고, 1996년 유연휘발유 판매를 중단하여 대기의 납 농도도 크게 줄었다.

그 가운데에서도 아황산가스와 일산화탄소는 2000년대 초반부터는 그 농도가 거의 변하지 않고, 연평균농도가 아황산가스는 5~6 ppb, 일산화탄소는 0.5~0.7 ppm을 유지하고 있다. 그러나 TSP는 2001년 111 μg/m³에서 2010년 73 μg/m³으로 계속 연평균농도가 감소하고 있다. 이는 2.3절에서 미세먼지(PM₁₀과 PM_{2.5}) 농도 추이와 연계하여 설명할 것이다. 또한 납의 농도도 2001년 0.0743 μg/m³에서 2010년 0.0278 μg/m³으로 계속 줄어들고 있다. 이는 그 기간에 시행된 정책가운데 TSP와 납 농도 저감을 가져온 정책이 있다는 것을 의미한다.

벤젠은 2006년부터 유해대기물질측정망에서 측정 및 관리되고 있으며, 그림 2를 보면, 벤젠의 연평균 농도는 2008년까지 0.5 ppb 이상의 농도를 보이다가 2009년 0.27 ppb로 급격히 감소하는 추세를 보인다.

벤젠 농도는 서울뿐만 아니라 전국적으로도 2009년부터 연평균 농도가 급감하는 추이를 보이며, 이는 2009년 유해대기물질측정망에서의 측정방식과 분석장비의 변화에 따른 영향일 가능성이 있다(NIER, 2011).

2.2 이산화질소 추이

1차오염물질농도의 성공적인 저감과는 달리 그림 3에서 보듯이 이산화질소(NO₂) 연평균농도는 크게 감소하고 있지 않다. 우리나라, 특히 서울에서는 질소산화물 배출이 대부분 이동오염원에서 이루어진다.

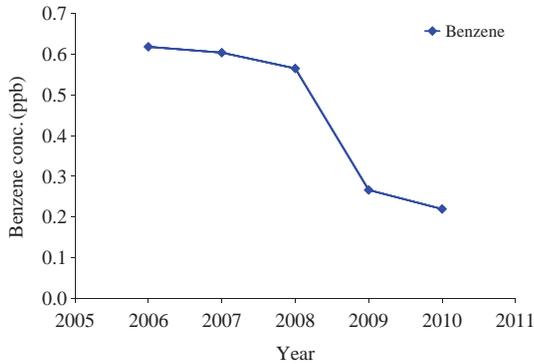


Fig. 2. Trend of the yearly average ambient concentrations of benzene in Seoul between 2006 and 2010.

2010년의 경우 이동오염원에서의 질소산화물 배출은 우리나라 전체로는 전체배출량의 56%, 서울은 69%이다. 도로이동오염원만 고려할 경우, 질소산화물 배출은 우리나라 전체로는 전체배출량의 36%, 서울은 55%이다(MOE, 2011). 따라서 우리나라는 이산화질소의 농도를 줄이기 위해 자동차의 배출허용기준을 계속 강화하고 있다.

휘발유 차는 미국의 기준체계 준용하여 2008년부터 초저공해차(ULEV, Ultra Low Emission Vehicle) 기준을 적용하였고, 2009년부터 평균 배출량 관리제도(FAS, Fleet Average System)을 도입해 적용하였으며, 경유차는 유럽의 기준 체계 적용하여 2009년부터 EURO 5 수준을 적용하고, 2014년 1월 1일부터는 신차 기준으로 EURO 6 기준을 적용할 예정이다. 천연가스를 연료로 사용하는 대형차의 경우 EURO 6기준을 2013년 1월 1일부터 신차 기준으로 시행한다. EURO 6기준은 EURO 5보다 질소산화물(NO_x)은 80%, 입자상물질(PM)은 50%가 강화된 수준으로 이 기준을 적용받는 경우 질소산화물의 경우 0.4 g/kwh, PM의 경우 0.01 g/kwh를 만족해야 한다(MOE, 2011). 그러나 이산화질소 농도 추이를 언뜻 보면 서울에 등록된 자동차 대수가 2001년 255만대에서 2010년 298만대로 증가하며 배출허용기준 강화에 의한 배출저감 효과를 상쇄하고 있는 것으로 보인다.

그러나 그림 3의 질소산화물(NO_x) 농도 추이를 보

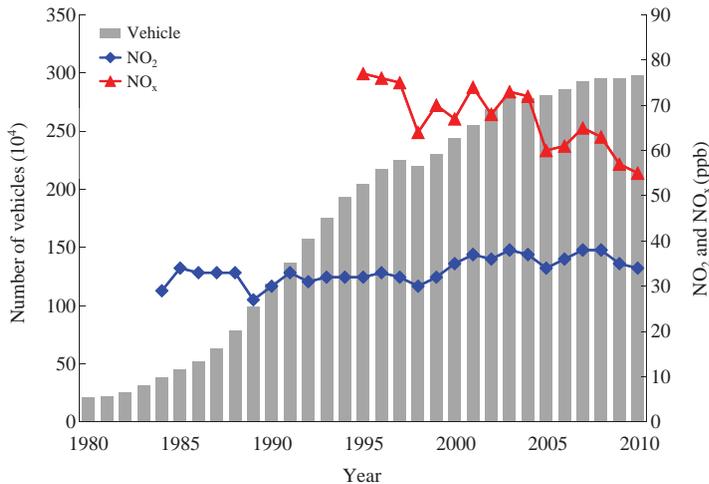


Fig. 3. Trend of the yearly average ambient concentrations of nitrogen dioxide, the oxides of nitrogen, and number of vehicles between 1980 and 2010.

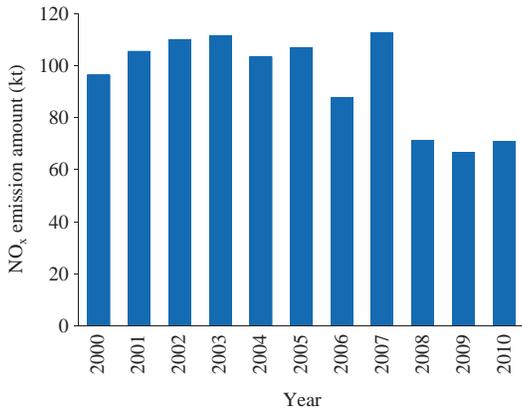


Fig. 4. NO_x emission amount of Seoul between 2000 and 2010 (<http://airemiss.nier.go.kr>).

면 이산화질소와는 달리 감소 추세가 확연하다. 또 그림 4에서 보듯이 서울의 질소산화물 배출량은 전체적으로 2000년대에 감소하는 추세를 보이고 있다. 질소산화물은 일산화질소(NO)와 이산화질소(NO₂)의 합으로, 연소과정에서 일산화질소 형태로 발생하나 대기에서 빠르게 산화하여 이산화질소로 바뀌어서 두 성분을 구분하기 힘들어 질소산화물을 관측하기도 한다. 질소산화물은 황산화물에 비해 국지적인 배출과 농도사이의 상관성이 높기 때문에 이 결과들은 서울에서 질소산화물 배출과 농도가 실제로 줄고 있음을 입증하는 것이다.

이와 같이 질소산화물 배출과 농도는 감소하지만 이산화질소의 농도는 그다지 줄지 않은 것에는 여러 이유가 복합적으로 작용하는 것으로 보인다. 우선은 수도권 대기환경관리 기본계획에서 시행하고 있는 경유자동차에 입자제거장치(Diesel Particulate Filter, DPF) 설치가 한 원인으로 생각된다(SDI, 2011). 즉, 자동차에서 발생한 일산화질소가 입자제거장치에서 이산화질소로 산화되어 배출되는 비율이 증가하게 되는 것이다. 그러나 이것만으로 이산화질소와 질소산화물 농도 변화 추이를 설명하기는 불충분하다. 이를 설명할 수 있는 가능한 다른 원인들은 (1) 우리가 아직 파악하지 못하고 있는 이산화질소 형태의 질소산화물 배출원이 존재하거나 (2) 서울 대기의 OH기 농도 등의 광화학반응 조건이 변화한 것이나 아직 정확한 이유는 파악하지 못하고 있다.

이산화질소는 그 자체로도 농도가 높으면 인체에

피해를 주지만 그보다는 대기에서 휘발성유기화합물과 함께 광화학반응에 참여하여 오존과 각종 유기 에어로졸을 생성하여 오존과 미세먼지 농도를 증가시킨다. 따라서 이산화질소와 질소산화물 농도, 그리고 질소산화물 배출량을 파악하고, 이들 사이의 관계를 정확히 이해하는 것은 이산화질소 농도 관리뿐만 아니라 오존과 미세먼지 농도 저감과도 밀접한 관련이 있다.

질소산화물 배출량과 농도를 효과적으로 관리하기 위해서는 여러 어려움이 있다. 첫째, 그림 4에서 보듯이 2010년 질소산화물의 배출량이 증가하였고, 수도권에서 화력발전소 건설 등으로 질소산화물 배출량이 증가할 것으로 예상되므로(MAQMO, 2013), 이에 대한 추가적인 관리 대책이 필요하다. 또 하나는 서울 대기의 광화학반응 특성에 대한 정확한 이해 없이는 효과적인 관리 대책을 수립하기 힘들다는 점이다. 서울에서 질소산화물 배출만을 저감할 경우 오존이나 미세먼지 농도가 증가할 가능성이 크므로(예를 들어 오존은 Jin *et al.* (2012), 미세먼지는 Lee *et al.*, 2006) 이에 대한 보다 심도 깊은 연구에 바탕을 둔 관리가 필요하다. 이에 대해서는 다음 장에서 상세하게 다루었다.

2.3 미세먼지 및 오존 추이

대기오염물질의 인체 위해성과 그 피해 연구에 의하면 미세먼지에 의한 건강 피해가 다른 오염물질에 비해 압도적으로 큰 것으로 나타나 있다(예를 들어 Laden *et al.*, 2000). 그 밖에도 먼지는 스모그, 지구 냉각화 등 여러 대기오염, 지구환경 현상을 유발하는 물질이다. 현재 미세먼지의 대기환경기준은 PM₁₀이나, 2015년부터는 PM_{2.5}도 기준이 될 예정이다. PM_{2.5}는 초미세먼지라고도 불린다.

그림 5에서 보듯 PM₁₀과 PM_{2.5}의 연평균 농도가 같이 감소하는 경향을 보이고 있다. 2.1절에서 보듯이 다른 1차오염물질의 농도는 2000년대 들어서 거의 같은 수준을 보이지만 TSP와 납의 농도는 2000년대 들어서도 계속 감소하였다. 따라서 서울에서 지난 2000년대, 특히 2000년대 중반 이후에 TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 농도가 같이 감소한 원인을 파악하는 것은 앞으로의 효과적인 대기오염관리 정책 수립을 위해서도 중요하다.

2005년 수립되고 2007년부터 시행된 수도권 대기

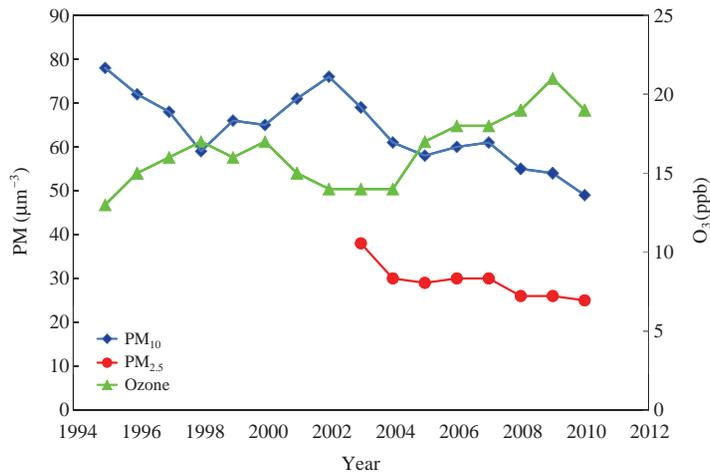


Fig. 5. Trend of the yearly average ambient PM₁₀, PM_{2.5}, and ozone concentrations in Seoul between 1995 and 2010.

환경관리 기본계획에서 PM₁₀ 저감은 사업장, 면오염원, 도로, 비도로, 그리고 비산먼지로 구분하여 저감대책을 수립하였다. 그러나 사업장의 총량규제 및 배출권거래제, 배출허용기준 강화 등의 사업장 저감대책의 주요 대책들이 시행되지 않았고, 면오염원 관리에서도 질소산화물 관리 강화를 통한 PM₁₀ 저감대책이 시행되지 않았다. 또한 이동오염원 가운데 비도로오염원에 대한 PM₁₀ 저감대책들이 시행되지 않았다. 이에 따라 PM₁₀ 배출 저감은 주로 제작차 배출허용기준 강화 및 조기폐차, DPF 부착 등의 운행차 대책에 의해 이루어졌다. 더구나 배출량과 대기중 농도의 관계가 불분명하기 때문에 정확한 관계 규명이 이루어져야 한다(MAQMO, 2013).

수도권 대기의 먼지는 배출, 반응에 의한 생성, 그리고 외부로부터의 이동의 세 변수에 의해 농도가 증가하고, 침적, 외부로의 이동, 반응 및 평형이동에 의한 제거의 세 변수에 의해 농도가 감소한다. 따라서 효과적인 미세먼지 저감 대책을 수립하고, 보완하기 위해서는 각 변수의 상대적인 영향을 이해하여야 한다. Kim(2007, 2006)은 서울의 먼지 농도 추이, 조성 변화, 주요 배출, 생성원을 외국 결과와 비교하여 앞으로의 연구방향을 제시하였다. 그 후 Kim(2010)은 수도권에서의 1999년부터 2008년 사이의 미세먼지 농도추이를 분석하여 아래와 같은 세 가지 결론을 제시하였다: (1) 1999년부터 2005년 사이의 수도권에

서 관측한 도시대기 측정소 변화 추이는 서울은 감소, 인천은 증가, 경기는 감소 내지는 변화 없음으로 판단할 수 있다. 특히 서울에서는 2004년부터 2008년 사이에 대기 미세먼지 농도가 눈에 보이게 감소하였다. (2) 2004~2008년의 도로변 측정소와 도시대기 측정소 결과와 여러 정책, 배출량 저감 실적 등을 검토하여 PM₁₀ 농도가 감소한 것은 주로 도로재비산먼지 감소가 원인이며, 그 외 나대지에서의 비산먼지 발생 저감, 경유자동차에 DPF 부착 및 천연가스 자동차 도입 등의 경유자동차의 저공해화도 효과를 나타내는 것으로 보인다. (3) 미세먼지 농도에 외부 영향 정도는 현 상태에서는 측정 자료로부터는 정확화하기 힘들며, 3차원 광화학 모델과 수용모델 결과는 불확실성이 크기는 하지만 외부 영향이 30% 이상으로 보인다.

Kim(2010)이 주장하였듯이 PM₁₀ 배출량 저감에서 도로재비산먼지 등의 비산먼지 저감이 PM₁₀ 농도 저감에 가장 크게 기여하였고, 도로재비산먼지 제거를 위해 사용하는 도로청소는 PM₁₀뿐만 아니라 TSP에도 효과적인 것을 고려하면(Chang *et al.*, 2005) 2.1절에서 보인 2000년대의 TSP 농도 저감도 비산먼지 저감 정책에 의한 것일 가능성이 크다. 비산먼지는 조대입자가 대부분이지만 비산먼지의 일부분이 PM_{2.5} 영역에 존재하므로, PM_{2.5} 농도가 줄고 있는 것은 자동차에서의 배출 저감정책과 비산먼지 저감정책이

복합적으로 효과를 내고 있는 것으로 보인다. 그러나 PM_{2.5} 배출량 자료가 확립되어 있지 않아, 정확한 효과분석은 힘들다.

그림 5에 연평균 오존 농도를 같이 나타내었다. 연평균 오존 농도는 미세먼지 농도와는 달리 증가하고 있다. Shin *et al.* (2012)는 서울을 포함한 우리나라 6대 도시의 2001년부터 2008년의 오존 농도 추이를 Kolmogorov and Zurbenko (KZ) 필터법과 다변수 선형회귀분석(multiple linear regressions)을 사용하여 분석하였다. 그 결과 일최고 1시간 오존 농도는 서울의 경우 매년 3.3% 증가하는 것으로 나타났다. 동아시아의 일반적인 오존 농도 추이도 증가여서, 서울의 오존 농도는 국지적인 영향과 배경농도 증가에 의한 영향을 받을 것으로 보인다. 다변량분석 결과 서울의 오존 농도에 가장 큰 영향을 끼치는 인자는 기상 요소였으며, 기상 인자를 고려하여 오존 농도의 장기추이를 분석한 결과는 국지적인 전구물질 배출량 변화보다 동아시아 배경농도 변화에 더 크게(2.5배 정도) 영향을 받는 것으로 나타났다.

2007년부터 시행된 수도권 대기환경관리 기본계획에서 오존에 대한 명시적인 관리 대책은 없지만, 질소산화물과 휘발성유기화합물 배출량 관리를 통해 간접적으로 관리하고 있는 것으로 생각된다. 그러나 오존 농도가 계속 증가하고 있고, 2.2절에서 제시한 것처럼 오존과 미세먼지 농도 관리는 서울의 광화학반응 특성을 파악하여야만 효과적으로 이루어질 수 있어, 앞으로 오존 관리는 보다 명시적으로 시행되어야 할 것이다.

3. 요약 및 제언

서울의 대기환경기준물질 가운데 1차대기오염물질 농도는 정부의 연료 전환과 배출허용기준 강화 등의 적극적인 정책으로 지난 30년 동안 감소하였다. 그러나 이산화질소는 주배출원인 자동차의 배출허용기준 강화에도 불구하고 농도가 저감되지 않고 있다. 그러나 질소산화물 농도는 감소하고 있어 이에 대한 원인 분석이 필요하다. TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 농도 모두 2000년대 들어 감소하고 있으며, 이는 조대입자는 비산먼지 저감정책이 미세먼지는 비산먼지 저감정책과 자동차 배출먼지 저감정책이 효과적인 것으로 보인다. 대표

적인 2차오염물질인 오존의 농도는 증가하는 추세를 보이고 있으며, 효과적인 오존과 미세먼지 농도 저감을 위해서는 서울의 광화학반응 특성을 이해하여야 할 것으로 보인다. 또한 서울 외부에서의 이동이 서울의 대기오염물질 농도에 큰 영향을 미치는 것으로 보여 이에 대한 대책이 필요하다.

효과적인 대기오염물질 농도 저감정책을 수립하기 위해서는 구체적인 생성원별 기여도를 알아야 한다. 미세먼지에 대해 예를 들면 (1) 휘발유 자동차와 경유 자동차에서의 배출 기여도는 어떻게 되는지, (2) 자동차와 생체소각 과정에서의 배출 기여도는 어떻게 되는지, (3) 배출된 것인지, 대기 중에서 광화학반응에 의해 생성된 것인지, (4) 국지적인 것인지, 외부 이동에 의한 것인지를 구분할 수 있다면 효과적인 미세먼지 저감대책을 수립할 수 있을 것이다(Kim, 2010).

이를 달성하기 위해서는 특히 다음 연구가 필요하다.

(1) 보다 정확한 배출량 자료 구축

정확한 배출량 자료의 구축은 그 자체로도 정책 수립에 중요하거나, 수용모델이나 3차원 모델을 활용한 모델링 연구를 통한 시나리오 연구에도 필수적이다. 따라서 배출량 자료를 구축하고, 이의 신뢰성을 높이는 작업이 필요하다. 예를 들어 PM_{2.5} 질량농도의 상당부분을 차지하는 2차에어로졸 가운데 유기에어로졸은 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)과 질소산화물의 광화학반응에 의하여 생성된다. 또한 오존도 같은 반응경로를 통하여 생성된다. 따라서 미세먼지 농도 저감을 위해서도, 앞으로 저감대책을 수립하여야 할 오존 저감을 위해서도 휘발성유기화합물 제어는 필수적이다. 그러나 Na and Kim (2007)이 밝혔듯이 서울에서의 휘발성유기화합물의 주요배출원은 배출량 자료에서는 용제사용이나 수용모델 결과는 자동차로 나타나, 두 결과가 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 휘발성유기화합물을 포함한 대기오염물질에 대한 정확한 배출원과 배출량 파악을 위한 연구와 정책을 수립되어야 할 것이다.

(2) 시나리오 분석

주요 배출원과 생성원의 상대적인 기여도, 그리고 외부 영향을 정량화하기 위해서는 모델링을 통한 현상 이해가 필수적이다. 또한 모델링 체계를 구축하면, 앞으로의 정책 변화에 따른 대기질의 시나리오 분석을 수행할 수 있을 것이다.

(3) 외부로부터의 영향 평가 및 저감 방안 추진

앞에서도 보았지만 외부 영향에 대한 모델링 연구 결과는 외부, 특히 중국의 영향이 큰 것으로 나타났다. 따라서 이를 저감하기 위한 국제적인 협력체제 구축이 필요하다. 이는 우리나라뿐만 아니라 일본도 시급한 문제이다.

또 하나 서울, 수도권의 대기환경에 영향을 미칠 수 있는 변수는 북한의 영향이다. 북한의 대기환경 현황이나 에너지 사용시 방지시설 현황 등에 대해서는 자세한 정보가 없어, 개략적인 대기오염물질 배출량 자료나 대기오염도 자료가 있을 뿐이다(예를 들어 MOLEP, 2012; UNEP, 2003). 북한이 수도권과 가까운 것을 고려하면, 비록 중국에 비해 적은 양의 대기오염물질이 배출되더라도, 수도권에 미치는 영향은 더 클 가능성이 있다. Lee and Kim (2007)은 서울에서 관측된 입자상 PAHs의 대부분이 외부 영향일 가능성을 제시하였고, Kim *et al.* (2013)은 2002~2003년 서울에서 측정된 입자상 PAHs 농도의 20%까지가 북한에서 배출된 것으로 평가하였다. 따라서 북한의 대기오염도와 배출량에 대한 자료수집과 함께 북한과 가까운 관측소에서의 지속적인 측적이 필요하다.

(4) 2차오염물질 관리를 위한 대기화학 이해

오존과 미세먼지의 상당 부분, 특히 $PM_{2.5}$ 질량농도의 상당 부분은 2차오염물질이다. 서울이 대체적으로 VOCs limited인 지역으로 알려져 있으므로 (Jin *et al.*, 2012), 질소산화물 배출 저감보다는 휘발성유기화합물(VOCs) 배출 저감이 더 효과적인 것으로 예상된다. 따라서 오존 농도를 저감하기 위해서는 질소산화물뿐만 아니라 휘발성유기화합물도 적절하게 저감하여야 한다. Shin *et al.* (2013)은 서울에서 2004~2008년에 측정된 휘발성유기화합물 농도와 조성으로부터 오존과 2차유기 에어로졸(secondary organic aerosol, SOA, $PM_{2.5}$ 의 주성분의 하나) 잠재생성량을 산출하였다. 그 결과 방향족 화합물이 광화학반응에 의한 오존 생성 잠재량의 35~45%, SOA 생성 잠재량의 85% 이상을 차지하고, 그 다음이 탄소 2~6개의 알칸류였다.

이와 함께 광화학반응에 의해 생성되는 2차유기 에어로졸의 생성기작과 생성잠재량에 대한 보다 자세한 분석이 필요하다. 지난 수십 년 동안 미세먼지 내 무기오염물질 특성에 관한 연구는 많은 진척을 이루었으나, 유기입자에 대해서는 현재 EC와 OC의 총 농

도의 측정에 대한 연구만 주로 진행되었을 뿐, 유기입자를 구성하는 개별 유기오염물질들의 종류 및 성질에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다(Kanakidou *et al.*, 2005). 따라서 스모그 챔버 등을 활용한 서울 대기의 광화학반응 특성을 이해하여야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구사업(No. 2011-0016297)의 지원으로 작성되었습니다.

References

- Chang, Y.-M., C.-M. Chou, K.-T. Su, and C.-H. Tseng (2005) Effectiveness of street sweeping and washing for controlling ambient TSP, *Atmospheric Environment*, 39, 1891-1902.
- Jin, L., S.-H. Lee, H.J. Shin, and Y.P. Kim (2012) A study on the ozone control strategy using the OZIPR in the Seoul Metropolitan Area, *Asian J. Atmospheric Environment*, 6, 111-117.
- Kanakidou, M., J.H. Seinfeld, S.N. Pandis, I. Barnes, F.J. Dentener, M.C. Facchini, R. van Dingenen, B. Ervens, A. Nenes, C.J. Nielsen, E. Swietlicki, J.P. Putaud, Y. Balkanski, S. Fuzzi, J. Horth, G.K. Moortgat, R. Winterhalter, C.E.L. Myhre, K. Tsigaridis, E. Vignati, E.G. Stephanou, and J. Wilson (2005) Organic aerosol and global climate modelling: A review, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 1053-1123.
- Kim, I.S., J.Y. Lee, and Y.P. Kim (2013) Impact of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) emissions from North Korea to the Air Quality in the Seoul Metropolitan Area, South Korea, *Atmospheric Environment*, 70, 159-165.
- Kim, Y.P. (2006) Air Pollution in Seoul caused by aerosols, *J. Korean Society for Atmospheric Environment*, 22, 535-553. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.P. (2007) Trend and characteristics of ambient particles in Seoul, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 1, 9-13.
- Kim, Y.P. (2010) Analysis of the trend of atmospheric PM_{10} concentration over the Seoul Metropolitan Area between 1999 and 2008, *J. Environmental Impact*

- Assessment, 19, 59-74. (in Korean with English abstract)
- Laden, F., L.M. Neas, D.W. Dockery, and J. Schwartz (2000) Association of fine particulate matter from different sources with daily mortality in six US cities, *Environ. Health Perspect.*, 108, 941-947.
- Lee, J.Y. and Y.P. Kim (2007) Source apportionment of the particulate PAHs at Seoul, Korea: Impact of long range transport to a megacity, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 3587-3596.
- Lee, S.H., Y.S. Ghim, Y.P. Kim, and J.Y. Kim (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.
- MAQMO, Metropolitan Air Quality Management Office (2013) Draft Report on the Second Phase Special Measures for Metropolitan Air Quality Improvement, Ansan.
- MOE, Ministry of Environment (2011) White Paper of Environment, Seoul.
- MOE, Ministry of Environment (2012) White Paper of Environment, Seoul.
- MOLEP, Ministry of Land and Environment Protection, Democratic People's Republic of Korea (2012) Democratic People's Republic of Korea Environment and Climate Change Outlook, Pyongyang.
- Na, K. and Y.P. Kim (2007) Chemical Mass Balance Receptor Model applied to ambient C2-C9 VOC concentration in Seoul, Korea: Effect of chemical reaction losses, *Atmospheric Environment*, 41, 6715-6728.
- NIER, National Institute of Environmental Research (2011) Annual report of air quality in Korea 2010, Incheon.
- SDI, Seoul Development Institute (2011) Analysis of the reason for the slow reduction of Nitrogen Dioxide (NO₂) Concentration and Countermeasures in Seoul, Seoul.
- Shin, H.J., K.M. Cho, J.S. Han, J.S. Kim, and Y.P. Kim (2012) The effects of precursor emission and background concentration changes on the surface ozone concentration over Korea, *Aerosol and Air Quality Research*, 12(1), 93-103.
- Shin, H.J., J.C. Kim, S.J. Lee, and Y.P. Kim (2013) Evaluation of the optimum volatile organic compounds control strategy considering the formation of ozone and secondary organic aerosol in Seoul, Korea, *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 1468-1481.
- UNEP, United Nations Environment Programme (2003) DPR Korea: State of the environment, UNEP RRC.AP, Thailand.