

서울과 외국 대도시의 미세먼지 조성 비교

홍선예 · 이정진 · 이지연 · 김용표*

이화여자대학교 환경학과

(2007년 11월 30일 접수, 2008년 1월 26일 채택)

Comparison of the fine particle concentrations in Seoul and other foreign mega-cities

Seon Yeh Hong, Jung Jin Lee, Ji Yeon Lee and Yong Pyo Kim*

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

(Received 30 November 2007, accepted 26 January 2008)

Abstract

Temporal trends of the PM10 and PM2.5 mass concentrations, and the concentrations of chemical species (sulfate, nitrate, ammonium, OC, and EC) in PM2.5 at Seoul are compared with the reported results from other mega cities in the world. The mass concentrations of PM10 and PM2.5 at Seoul show decreasing trend. However, the concentration levels are still higher than other cities except Beijing. The sulfate concentration at Seoul has decreased while those of nitrate and ammonium have increased. The concentrations of OC and EC show no apparent trend.

Key words : PM10, PM2.5, Ions, OC, EC

1. 서 론

서울을 비롯한 국내 대도시 미세먼지(PM10) 농도가 외국 대도시보다 높은 것으로 조사됐다. 2006년 발간된 경제협력개발기구(OECD)보고서에 의하면 서울의 대기오염도는 뉴욕, 런던, 파리 도쿄(東京) 등 선진국 주요도시에 비해 미세먼지는 1.8~3.5배, 이산화질소(NO₂)는 1.2~1.7배 수준이다. 대기 중 미

세먼지의 농도는 OECD 국가 중 최하위이고 이산화질소 농도는 OECD 국가 중 상위 두 번째이다. 미세먼지에 의한 시정장애 역시 지속적으로 저하되어 최근 수도권지역 평균 가시거리가 약 10km 정도 수준에 불과하다. 또한 지난해 국립환경과학원이 발표한 '대기환경 기준 개선 조사연구' 보고서에 따르면 2004년 기준 국내 미세먼지(PM10)의 연평균 농도는 37~80 µg/m³로 나타났다. 이는 뉴욕(22 µg/m³), 런던(27 µg/m³), 시드니(18.5 µg/m³)에 비해 최고 4배 이상 높은 수치이다. 이산화질소(NO₂) 연평균 농도는 0.02~0.04 ppm 수준으로 세계보건기구(WHO) 권

*Corresponding author.

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

고 기준 0.021 ppm에 비해 최고 2배 가까이 높아 건강에 영향을 미칠 수 있는 수치로 드러났다(NIER, 2006).

우리나라는 국토 11.8%에 불과한 수도권(서울, 인천, 경기) 면적에 인구의 절반인 48%, 무려 2,300만 명이 몰려 살고 있는 만큼 도시 환경의 질은 국민 삶의 질과 직결된다. 이에 수도권 지역의 대기질 개선을 위하여 정부와 각종 연구기관, 학회, 업계 등에서도 대기개선을 위한 다양한 연구와 노력이 진행되고 있다. 정부에서는 수도권의 대기질을 선진국 수준으로 개선하기 위해 2014년까지 서울시내 미세먼지 농도를 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 절감시키는 대기질 개선 특별 대책을 추진하고 있다(Kim, 2006).

수도권 지역의 대기오염실태를 파악하여 대기질 개선대책 수립을 위해 필요한 기초자료를 확보하고, 대도시 대기환경을 개선하기 위한 정책이 올바르게 수립되고 효과적으로 이행되기 위해서는 대기환경의 변화 추이와 그 과학적, 정책적 원인을 정확하게 이해하여야만 한다. 또한 선진국 주요 대도시의 대기환경 개선 정책과 그 효용성을 파악하는 것도, 앞으로 나아가야 할 방향을 정하고 그 효과를 예측하는 데 길잡이 역할을 할 수 있을 것이다. 이 연구에서는 서울의 미세먼지와 극미세먼지(PM_{2.5})의 질량농도와 주요 무기이온 성분과 유기탄소(OC), 원소상탄소(EC)의 질량농도 추이를 파악하고, 이를 외국 대도시(뉴욕, 로스엔젤레스, 베이징, 런던, 파리) 자료와 비교하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서 서울과 외국 도시의 미세입자 조성 비교를 위해 인구가 밀집되어 있는 대도시를 대상으로 하였다. 서울의 경우 과거 1985년부터 2006년 사이에 발표된 국내외의 학회지와 논문을 중점적으로 조사했다. PM₁₀ 질량농도의 경우에는 정부에서 발표한 자료도 같이 조사하였다. 뉴욕, 로스엔젤레스, 베이징, 런던, 파리의 경우에는 발표된 보고서와 연구논문을 조사하였다. 조사 항목은 PM₁₀과 PM_{2.5}의 질량농도, PM_{2.5}의 이온성분과 OC, EC 농도이다. 각 자료는 대표성을 지니기 위해 최소 3일 이상 측정된 평균값을 이용하였고, 황사, 스모그 등의 특별한 현상

이 나타난 경우의 자료는 제외하였다. 자세한 측정 결과 자료는 Hong *et al.* (2007)에 제시하였다.

3. 결 과

3.1 PM₁₀

우리나라는 1984년부터 주요 도시에서 총부유분진(total suspended particle, TSP)측정을 시작하였다. 이어 1995년부터 미세먼지로 기준을 변경하고 총부유분진 측정기를 미세먼지(PM₁₀) 측정기를 교체하기 시작하여 2001년 1월 1일부터 미세먼지 관리 체제로 전환하였다. 따라서 정부에서 발표한 미세먼지 농도의 경우 1990년대 중반 이후부터 측정되고 있다. 한편 미국은 극미세먼지를 대기환경기준으로 사용하고 있다.

우리나라는 깨끗한 대기질에 대한 국민의 요구가 높아지고 있어 대기환경기준의 강화 및 새로운 환경기준 항목 설정의 필요성이 지속적으로 제기됨에 따

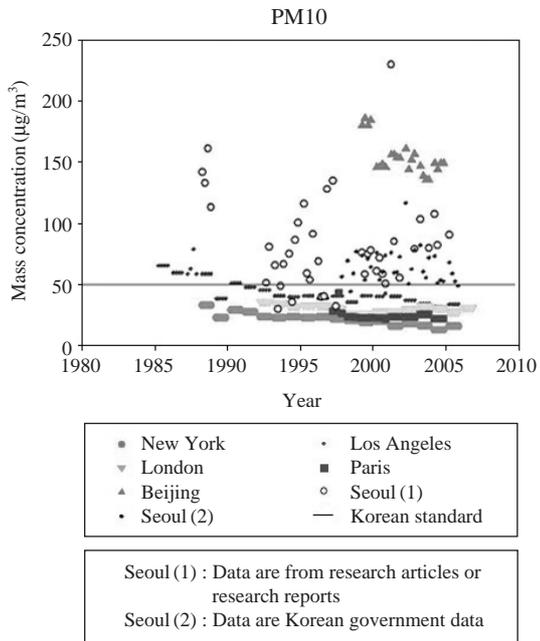


Figure 1. Trend of the PM₁₀ mass concentrations in Seoul and other mega-cities. Seoul (1) data are from research articles or research reports and Seoul (2) data are Korean Government data. Information on the data sources are given in Hong *et al.* (2007).

라 대기환경기준을 선진국 수준으로 강화하기 위하여 2007년부터 PM10 연간평균치 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 선진국 수준으로 환경기준을 강화하였다.

그림 1을 보면 서울의 PM10 질량농도는 정부가 측정한 경우 전체적으로 감소하고 있으며 대부분 개정이전의 대기환경 기준치인 PM10 연평균기준 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 비슷하거나 낮은 농도를 보인다. 그러나 국내외 보고서나 논문에서 측정된 PM10의 농도는 정부에서 측정한 것보다 다소 높게 나타나고 있다. 이는 학술발표에 나타난 측정은 대기오염도가 상대적으로 심한 기간에 주로 관측되었고, 연속적으로 측정된 정부 자료보다 측정 기간이 짧았던 것 때문으로 보인다. 그리고 2007년에 들어서 새롭게 개정된 대기환경기준을 만족하기에는 아직 서울의 PM10 농도가 높은 값을 나타내고 있다. 또한 서울은 한국의 대기 기준 아래로 다른 유럽이나 미국처럼 안정되어 있지 않고 증감을 반복하고 있다. 따라서 서울의 PM10은 전체적으로 조금씩 감소하는 것처럼 보이나 그 변화의 폭이 다양하여 아직 경향을 판단하기에는 이르고 좀 더 효과적인 절감 대책이 필요함을 알 수 있다.

베이징을 제외한 다른 대도시에 비해 서울은 높은 농도를 보이고 있다. 런던, 파리, 뉴욕, 로스엔젤레스의 미세먼지 농도는 서울에 비해 낮고 지속적으로 감소하는 추세이다. 다만 로스엔젤레스는 다른 대도시에 비해 서울보다 조금 낮은 정도의 농도를 보이고 있다. 이는 주변 사막의 영향으로 인해 토양 입자의 유입에 의한 것으로 추측된다(AQMD, 2007).

3. 2 PM2.5

PM2.5는 미세먼지로 구분되는 PM10 중에서도 지름이 2.5 μm 이하를 의미하는 것으로 극미세먼지 또는 초미세먼지라고 한다. PM2.5는 PM10에 비해 시정장애나 인체위해성이 높은 것으로 알려져 있다 (Ghim *et al.*, 2005).

그림 1에서 나타난 PM10과 그림 2에서 나타난 PM2.5의 질량농도 추이를 비교해보면 미세먼지 가운데서 극미세먼지가 차지하는 질량농도의 비율은 60~80% 정도 된다. PM2.5는 PM10에 비해 인체에 더욱 치명적이므로 미국의 경우 법으로 기준을 규제하고 있으나 우리나라에서는 아직 PM2.5에 대한 환경기준이 없다. 그림 2에 나타난 PM2.5 질량농도는

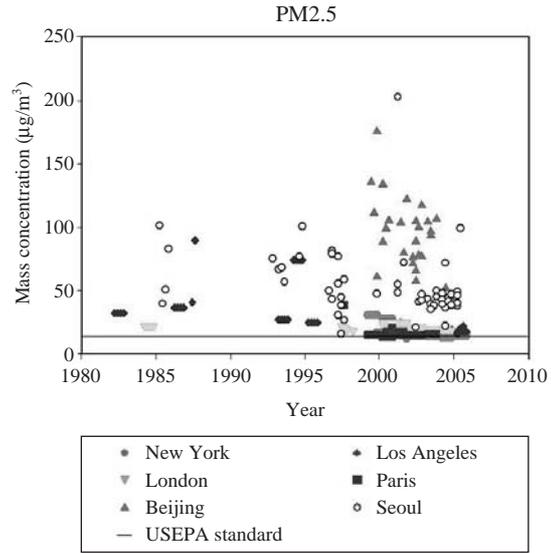


Figure 2. Trend of the PM2.5 mass concentrations in Seoul and other mega-cities. Information on the data sources are given in Hong *et al.* (2007).

서울을 비롯하여 모든 대도시들이 감소추세를 보인다. 서울은 미국, 유럽의 도시들에 비해 농도가 높고 베이징보다는 농도가 낮다. 미국 대도시들은 미국환경보호청 연평균기준인 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 근사한 농도를 보이고 런던, 프랑스도 비슷한 수준이다. 뉴욕보다 로스엔젤레스가, 파리보다 런던이 더 높은 농도를 보였다. 서울은 모든 측정 자료가 미국 연평균기준보다 높다.

3. 3 PM2.5의 NH_4^+

그림 3에 PM2.5의 NH_4^+ 이온 질량농도를 나타내었다. PM2.5의 NH_4^+ 농도는 서울의 경우 증가하는 추세이다. 베이징의 NH_4^+ 농도는 서울과 비슷하거나 감소하는 모습이나 대체적으로 서울보다 높은 농도를 보인다. 베이징의 경우 보통 겨울에 NH_4^+ 농도가 높으나 2000년에는 봄에 이온 농도가 특히 높았다. 서울도 대체적으로 겨울에 NH_4^+ 농도가 높았다.

3. 4 PM2.5의 NO_3^-

그림 4에서 보듯 NO_3^- 는 뉴욕을 제외한 모든 도시에서 대체로 높은 농도를 보이고 있으며 뉴욕을 포함하여 모든 도시에서 증가하는 경향을 보인다.

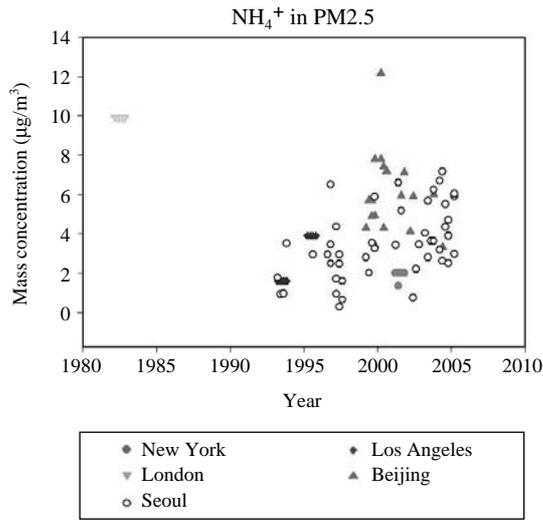


Figure 3. Trend of the NH_4^+ in $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations in Seoul and other mega-cities. Information on the data sources are given in Hong *et al.* (2007).

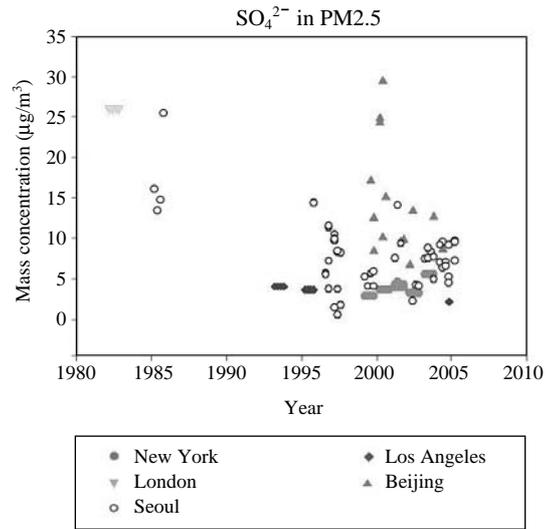


Figure 5. Trend of the SO_4^{2-} in $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations in Seoul and other mega-cities. Information on the data sources are given in Hong *et al.* (2007).

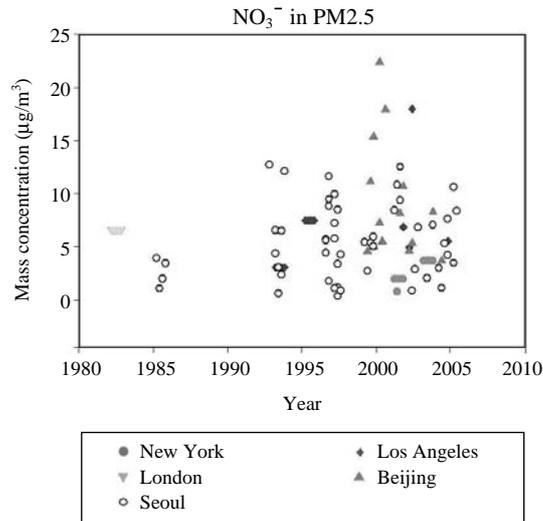


Figure 4. Trend of the NO_3^- in $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations in Seoul and other mega-cities. Information on the data sources are given in Hong *et al.* (2007).

NO_3^- 농도의 증가는 자동차에서의 질소산화물 배출에 의한 것으로 보인다. 서울의 NO_3^- 농도 역시 증가하는 경향을 보이고 최근 몇 년 다른 대도시들과 비슷하거나 약간 높은 농도를 보인다. NO_3^- 는 다른 이

온들에 비해 계절별 편차가 매우 컸는데 봄과 겨울에 높은 농도를 보였다. 그러나 2001년에는 가을에 높은 농도값을 보였다. 관련 논문에서는 역학적 분석 결과에 의하면 중국북동부지역과 러시아 동부에서 출발하여 북한 지역을 통과한 대기오염물질이 장거리 수송에 의하여 한반도에 영향을 끼쳤기 때문이라고 한다(Lee *et al.*, 2005). 베이징 역시 대개 겨울에 농도가 높았으나 2000년에는 봄에 특히 농도가 높았다. 로스엔젤레스의 경우 2002년에는 여름에 특히 농도가 높았다.

3. 5 $\text{PM}_{2.5}$ 의 SO_4^{2-}

그림 5에서 보여주고 있는 $\text{PM}_{2.5}$ 의 SO_4^{2-} 질량농도는 다른 이온에 비해 낮은 편이다. 베이징의 경우 2000년 이후로 크게 감소하는 추세이다. 서울의 경우도 역시 1995년 이후 농도가 현저하게 감소하는 추세에 있으며 대체로 일정한 값을 유지하고 있다. 그러나 여전히 미국의 뉴욕이나 로스엔젤레스에 비해 SO_4^{2-} 의 농도가 높은 편이다. 서울의 경우 대체적으로 겨울에 SO_4^{2-} 의 농도가 높았다.

3. 6 $\text{PM}_{2.5}$ 의 OC

우리나라에서 OC와 EC의 측정 결과는 이온 성분

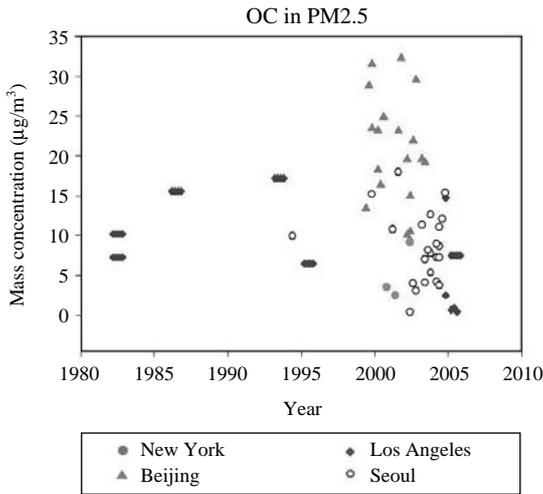


Figure 6. Trend of the OC in PM2.5 mass concentrations in Seoul and other mega-cities. Information on the data sources are given in Hong *et al.* (2007).

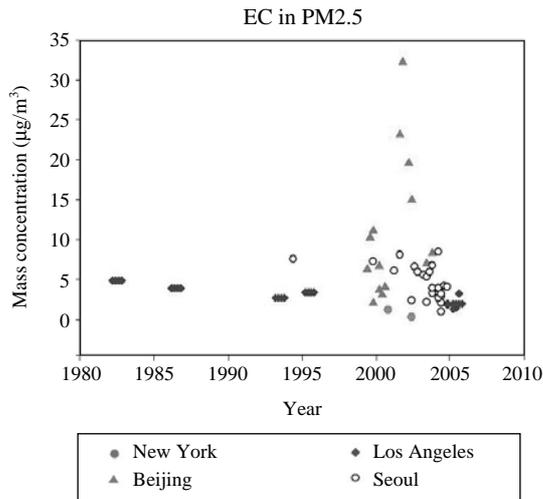


Figure 7. Trend of the EC in PM2.5 mass concentrations in Seoul and other mega-cities. Information on the data sources are given in Hong *et al.* (2007).

에 비해 측정값이 매우 적다. Kim *et al.* (1999)이 1994년 서울과 제주도에서 OC와 EC를 측정했던 것이 외국에서 널리 인정되는 방법으로 측정된 첫 번째 결과이며, 이 후에도 간헐적으로 측정이 이루어지다가 2003년 이후 지속적인 측정이 이루어지고 있다. 그

림 6의 OC(입자상 유기 탄소, Organic Carbon)의 최근 농도 변화를 살펴보면 서울은 증가, 베이징은 감소하는 경향을 보이고 로스엔젤레스는 또한 전반적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 서울이 베이징보다 농도가 낮고, 로스엔젤레스는 서울과 비슷한 농도이나 최근 농도는 서울보다 낮아지고 있다. 베이징의 OC자료에서 계절별로 큰 편차를 보였고 겨울에 높은 농도를 나타냈다. OC는 측정 시에 분류하기가 어렵고 자료가 충분치 않으므로 지속적인 측정이 필요하다.

3. 7 PM2.5의 EC

그림 7의 EC(원소 탄소, Elemental Carbon)는 서울의 경우 자료 수가 적어 경향을 판단하기 어렵으나 자료 내에서는 감소추세를 보인다. 전반적인 농도를 보면 베이징이 OC와 비슷한 분포를 보이며 가장 높은 농도를 나타내고 있다. 역시 계절별로 편차가 큰 편이며 겨울에 높은 농도를 보였다. 미국의 로스엔젤레스는 OC의 결과보다 전반적으로 낮은 농도를 나타내고 있다. 서울은 베이징보다는 낮은 농도이고, 로스엔젤레스와는 비슷하나 약간 높은 농도의 경향을 나타내고 있다.

4. 검토 및 요약

연구 논문에서 제시된 서울 PM10 질량농도는 정부에서 측정된 결과에 비해 높은 경향을 보이고 있다. 이는 학회지나 논문에 나온 결과의 측정기간이 정부에서 연속적으로 측정된 자료보다 기간이 짧기 때문으로 보인다. 전체적으로 서울의 PM10이나 PM2.5 질량농도는 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 미국의 로스엔젤레스나 뉴욕, 유럽의 런던이나 파리에 비해서는 계속 높고, 베이징보다는 낮다. PM2.5도 미국환경보호청의 기준에 근접해 있는 유럽이나 미국과 달리 아직 서울의 농도는 상당히 높은 상황이다. 이 두 가지 결과로 볼 때 서울의 미세먼지 농도의 감소가 지속되어야 한다. 또한 PM10 중에서 PM2.5가 전체의 60~80% 정도를 차지하고 있음을 알 수 있었다. 대기 오염이 인체에 미치는 영향은 PM10보다 PM2.5의 영향이 훨씬 크므로 PM2.5 관리체계로의 전환을 위한 준비가 필요하다.

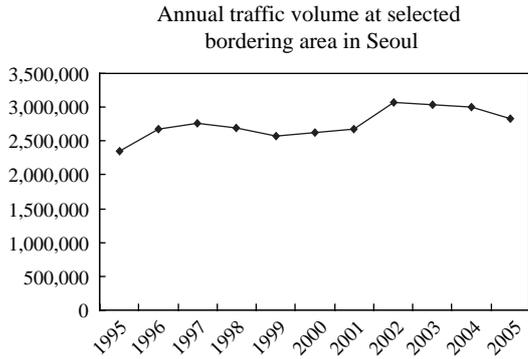


Figure 8. Traffic volume at selected bordering areas in Seoul (Seoul, 2007).

서울의 PM_{2.5} 이온의 경우 NH₄⁺, NO₃⁻는 증가하는 추세이고, SO₄²⁻는 감소하는 추세를 보인다. 서울의 이온들 농도는 베이징보다 낮거나 비슷한 수준을 보이고 미국의 대도시에 비해서는 높은 농도를 나타내고 있다. NO₃⁻농도의 경우 대기 중 NO₂농도에 큰 영향을 받는다. 따라서 NO₂의 주 배출원인 자동차에 의한 NO₂농도 증가가 NO₃⁻의 농도 증가라는 결과를 가져왔을 것이고 또한 서울은 전국에서 NO₂의 농도가 높은 도시로 이에 대한 대책이 필요하다. 그림 8과 그림 9를 보면 서울시 교통량에 따라 NO₂의 농도도 비슷한 경향을 보인다. NO₃⁻농도 역시 90년대 후반에 약간 감소했다 증가하고 있음을 알 수 있다. NO₃⁻의 경우 뉴욕을 제외한 모든 대도시에서 높은 값을 나타내고 있다. SO₄²⁻는 대기 중 SO₂의 농도에 영향을 받는데 지난 10여 년간 서울의 SO₂농도는 저유황유, LNG 등의 청정연료 공급확대 등으로 인해 크게 감소하였다. 따라서 SO₄²⁻의 농도는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 최근에 들어 일정한 농도를 유지하고 있음에도 불구하고 다른 대도시에 대해 여전히 높은 수준이므로 이에 대한 대책이 필요하다.

서울의 경우 PM_{2.5} 전체 질량농도 중 1980년대와 1990년 초반까지 SO₄²⁻의 농도가 제일 큰 비중을 차지하였다. 그러나 1990년 후반 이후 SO₄²⁻의 농도가 현저하게 감소하면서 SO₄²⁻와 NO₃⁻의 질량농도 비중이 비슷하거나 간혹 NO₃⁻의 농도가 높게 나타나는 자료도 있다. OC와 EC의 경우도 PM_{2.5} 전체 질량농도 중 높은 비중을 차지하는 것으로 보인다. 대

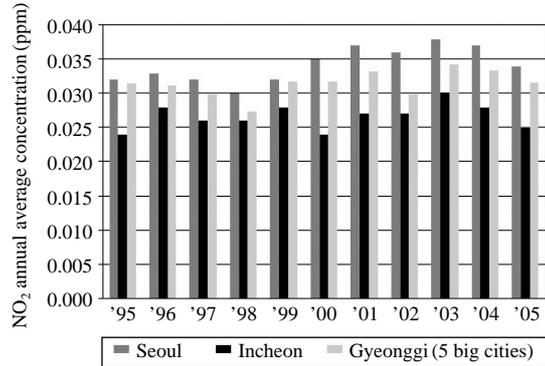


Figure 9. NO₂ annual average concentration between 1995 and 2005 (MOE, 2006).

체적으로 이온들의 농도는 겨울에 높은 경향을 보이고 있다. 그러나 때때로 여름에 높은 농도가 나타나기도 하는데 이는 강수가 없을 때의 강렬한 태양빛에 의한 활발한 대기반응으로 인한 것으로 생각된다. 이온들에 대한 자료는 충분하지 않아 정확한 해석이 어려웠으며 앞으로의 지속적인 측정이 필요하다.

PM_{2.5}의 OC와 EC는 서로 비슷한 분포의 양상을 나타내고 있다. 자세한 경향을 보면 OC가 EC보다 전반적으로 높은 농도를 나타낸다. 베이징이 OC와 EC의 값에서도 월등히 높은 수치를 기록하고 있다. OC와 EC의 자료는 다른 자료에 비해 적어서 전체적인 추이나 비교가 힘들어 앞으로의 연구가 필요하다.

본 연구에서는 수도권 지역의 대기환경의 현황을 정확히 파악하고 대기질 개선을 위한 기초자료 수립을 위해 서울과 외국 도시의 미세입자 조성 비교를 하였다. 이 연구가 좀 더 정확성을 갖기 위해서는 인위적 오염이 배제된 자연 상태 그대로의 대기 중 오염물질 농도(배경농도)를 알 필요가 있다.

수도권의 배경농도와 현재 오염물질의 농도와의 비교를 통해 인위적 오염원의 기여도를 파악하고 이를 이용해 오염원별로 다른 제어수단을 사용하여 대기오염 목표치 달성을 이룰 수 있을 것이다. 또한 수도권의 배경농도와 비교대상으로 외국 대도시의 배경농도를 알아봄으로써 기본적인 수도권 대기환경 개선의 한계를 인지하고 정확한 환경의 질을 판정하는데 도움이 될 것이다.

미세먼지 및 미세먼지의 화학 조성 분석은 미세먼

지의 원인을 분석하고 대책을 수립하는데 유용한 기초적 자료가 된다. 또한 미세먼지를 분석함으로써 국내지역뿐만 아니라 다른 지역의 특성을 이해하는데도 도움이 된다. 더 정확한 서울의 대기질 변화를 알기 위해서는 미세먼지와 그 성분에 대한 지속적인 측정이 필요하고 이를 바탕으로 대기질 개선 및 방안을 세울 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 과학재단의 국가지정연구실 (과제번호 R0A-2006-000-10221-0) 과제지원으로 작성되었습니다.

참 고 문 헌

AQMD, South Coast Air Quality Management District (2007). www.aqmd.gov.

Ghim, Y.S., Moon, K.-C., Lee, S.H., and Kim, Y.P. (2005). Visibility trend in Korea during the past two decades, *Journal of Air & Waste Management Association*, 55, 73-82.

Hong, S.Y, Lee, J.J., Lee, J.Y., and Kim, Y.P. (2007). Comparison of the fine particle compositions and policies in Seoul and other mega-cities in China, London, Paris and USA, *Proceedings of the 2007 Fall Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment*, 407-408.

Kim, Y.P. (2006). Air pollution in Seoul caused by aerosols, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22, 535-553.

Kim, Y.P., Moon, K.-C., Lee, J.H., and Baik, N.J. (1999). Concentrations of carbonaceous species in particles at Seoul and Cheju in Korea, *Atmospheric Environment*, 33, 2751-2758.

Lee, H.S., Kang, C.M., Kang, B.W., and Lee, S.K. (2005). A study on the PM2.5 source characteristics affecting the Seoul area using a chemical mass balance receptor model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 21, 329-341.

MOE, Ministry of Environment, Korea (2007). Annual Report of Ambient Air Quality in Korea.

NIER, National Institute of Environmental Research (2006). www.nier.go.kr.

Seoul (2007). Seoul Statistical Year Book.