

도로변 대기질 장·단기 특성에 대한 연구

자동차공해연구팀

조수석 · 조석주 · 윤호균 · 고한성 · 하현주 · 김호만 · 정종흠 · 김주형

The Characteristics of Long- and Short-term Air Quality at Roadside Monitoring Stations

Automobile Pollution Research Team

**Soo-seock Cho, Seok-ju Cho, Ho-kyun Yoon, Han-sung Go,
Hyun-ju Ha, Ho-mann Kim, Jong-heub Jung and Joo-hyung Kim**

Abstract

This study was conducted to investigate the trends of long- and short-term air quality at roadside stations between 2002 and 2010. Compared to the yearly air pollutant concentrations in 2002, those of PM₁₀, PM_{2.5}, NO_x and CO were decreased by 36, 17, 30 and 20% in 2010, but that of O₃ was increased by 20%. With respect to the variations in the concentrations for each season, the concentrations of air pollutants, with the exception of O₃, were highest during winter and lowest during summer. The highest concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} occurred in November, but the lowest occurred in September. Despite a five-day week, the air pollutant concentrations on Saturdays were high, especially those of PM₁₀ and PM_{2.5}. The lowest concentrations of PM₁₀, PM_{2.5}, NO_x and CO were recorded on Sundays.

Key words : PM₁₀, PM_{2.5}, air quality, roadside, long- and short-term trend

서 론

지리적으로 3면이 높은 산들로 둘러싸여져 있어, 자동차와 소규모 공장 등의 오염원에서 발생하는 대기오염물질들을 상대적으로 원활히 확산시키지 못하는 서울은 605 km²의 한정된 면적에 인구 및 자동차 대수가 매년 증가하고 있다. 특히 서

울시에 등록된 차량대수는 2002년 261만대에서 매년 증가하여 2010년 298만대에 이르고 있다. 이는 주택지역의 대기오염도보다 도로변 대기오염도가 더욱 높은 농도를 유지하는 원인이 되고 있다. 이에 환경부에서는 1997년부터 일반대기측정소와 구분된 도로변대기측정소를 설치 운영하여, 자동차가 인접 도로변대기에 미치는 영향을 파악

하기 위해 모니터링을 실시하고 있다(1). 또한 '수도권 대기환경 개선에 관한 특별법'을 2003년 12월 31일에 제정 및 2005년 1월 1일부터 시행하였는데, 주 내용에 자동차의 오염도저감대책과 관련된 부분을 포함하고 있다(2).

일반적으로 자동차의 배출 특성 및 미치는 영향을 평가하는 연구는 실험실에서 엔진 동력계 및 차대 동력계를 이용하는 방법, 실제 도로에서 교통 흐름에 따라 주행하는 자동차의 배출 특성을 연구하는 이동형 자동차 배출가스 측정 시스템(Mobile Emission Laboratory, MEL)방법 및 터널 내부에서 대기오염물질을 측정하는 방법 등이 진행되고 있다(1, 3). 그렇지만, 이런 연구들은 단기적인 기간에 수행하는 경우가 대부분으로 장기적인 자동차의 영향을 평가하기에는 부족한 부분이 있다. 이에 자동차와 다른 요인들에도 영향을 받지만, 장기적인 자동차의 영향을 파악하기에는 도로변 대기 측정망을 장기적으로 운영하여 추세를 보는 방법도 있다.

2002년부터 2010년까지 일반도로변 측정소의 자료를 이용하여 연도별 경향과 2010년 자료만을 이용하여 계절별, 월별 및 요일별 경향을 알아보고, 앞으로 대기오염 저감대책을 수립하는데 기초 자료로 제공하고자 한다.

연구방법

본 연구는 2002년부터 2010년까지 서울시에 위치한 일반도로변측정소에서 대기오염자동차측정기를 이용하여 측정한 결과를 사용하였다. 일반도로변 대기측정소들의 위치는 그림 1과 같다. 측정자료는 2002년(PM_{10} , O_3 : 6곳, NO_x , CO: 7곳, $PM_{2.5}$: 3곳) → 2003년(PM_{10} , O_3 , NO_x , CO: 7곳, $PM_{2.5}$: 6곳) → 2004년(PM_{10} , O_3 , NO_x , CO, $PM_{2.5}$: 7곳) → 2008년(9곳) → 2010년(10곳)으로 되어 있다. 연도별 대기오염도의 경향을 파악하기 위해 사용한 데이터는 9년간의 일반도로변측정소의 측정결과를 이용하였으며, 계절별(3~5월 봄, 6~8월 여름, 9~11월 가을, 12~2월 겨울), 월별 및 요일별 경향은 2010년의 측정결과만을 이용하였다.

2010년에 황사(Asia dust)가 발생한 날은 총 10일로 기상청자료를 이용하였고, 월요일~일요일까지 3회, 2회, 0회, 2회, 4회, 4회 및 0회이었다.

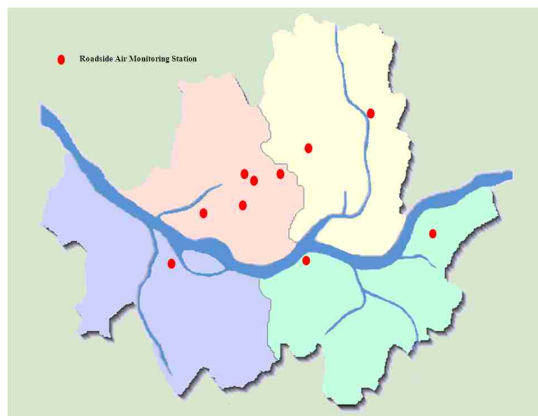


Fig. 1. Location of the roadside air monitoring stations in Seoul.

결과 및 고찰

PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO, NO_x 및 O_3 의 2002~2010년 일반 도로변 연평균농도의 전체적인 추세는 O_3 을 제외한 PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO 및 NO_x 항목에서 감소하는 경향을 보이고 있었다.

1. PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 장·단기 경향

2002~2010년 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 일반 도로변 연평균농도는 $54 \mu g/m^3$ (2010)~ $84 \mu g/m^3$ (2002) 및 $27 \mu g/m^3$ (2006, 2008)~ $36 \mu g/m^3$ (2002, 2004)이었다. 9년 동안 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 연평균농도는 감소하는 경향을 보였다. 전체적으로 보면 $84 \mu g/m^3$ (2002)에서 $54 \mu g/m^3$ (2010)로 약 36% 정도 감소하였으며, $PM_{2.5}$ 는 $36 \mu g/m^3$ (2002)에서 $30 \mu g/m^3$ (2010)으로 약 17% 정도 감소하였다. 서울시에 등록된 차량대수의 증가에도 불구하고, 2002년부터 지속적으로 천연가스차량(시내·마을버스, 청소차, 10년 기준 8,645대로 94%) 보급 및 노후경유차저공해화사업(매연저감장치, LPG엔진개조, 조기폐차, 10년 기준 20만8천대로 60%) 등의 영향으로 감소한 것으로 판단한다. 특히

PM_{2.5}농도보다 PM₁₀ 농도가 더 크게 감소하였다. 도로변 미세먼지의 주된 배출원 중에는 자동차 배출가스, 도로 재비산 및 외부공기 유입 등이 도로변 주변에 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있는데, 자동차에서 배출되는 300 nm 이하의 미세입자에 해당하는 PM_{2.5}의 감소폭은 적고, 오히려 도로 재비산 등과 같은 입자크기가 큰 PM_{2.5-10}의 질량농도가 더욱 크게 감소한 결과로 판단된다(3). 그림 2는 9년간의 일반대기 PM₁₀농도와 도로변일반대기 PM₁₀농도를 비교한 것이다. 도로변 대기 PM₁₀과 일반대기 PM₁₀의 차이는 4 μg/m³(6%) ~ 12 μg/m³(21%)로 일반도로변 대기 PM₁₀이 높은 농도를 보이고 있다. 평균적으로 일반도로변 대기 PM₁₀이 7 μg/m³ 정도 높은 것으로 나타났다. 이는 정 등(2009)의 서울시 1996~2006년 동안의 차이인 8 μg/m³ 보다 낮은 농도를 보였다(4).

2010년 PM₁₀과 PM_{2.5}의 계절별 농도를 보면, PM₁₀은 그림 3처럼 겨울>봄>가을>여름 순으로 높은 농도를 보였으며, PM_{2.5}는 겨울>가을>여름>봄 순으로 높은 농도를 보였다. 겨울에 높은 농도를 보이는 것은 자동차 외에도 난방을 위한 화석연료 연소로 생각된다. 그리고 가을철 PM₁₀의 경우, 6~14시쯤에는 9월 강수량의 영향으로 여름과 비슷하게 낮은 농도를 보였지만, 20~02시쯤까지는 11월의 박무와 황사의 영향으로 높은 농도를 보였다. 그리고 PM_{2.5}는 전반적으로 봄 및 여름과 비슷한 농도를 보이다가 17시쯤에 증가하기 시작하여 22시에 최대 농도를 보였다. PM_{2.5}에서 박무를 제외하면, 봄, 여름 및 가을은 비슷한 농도를



Fig. 2. Comparison of concentration of PM₁₀ between roadside stations and residential.

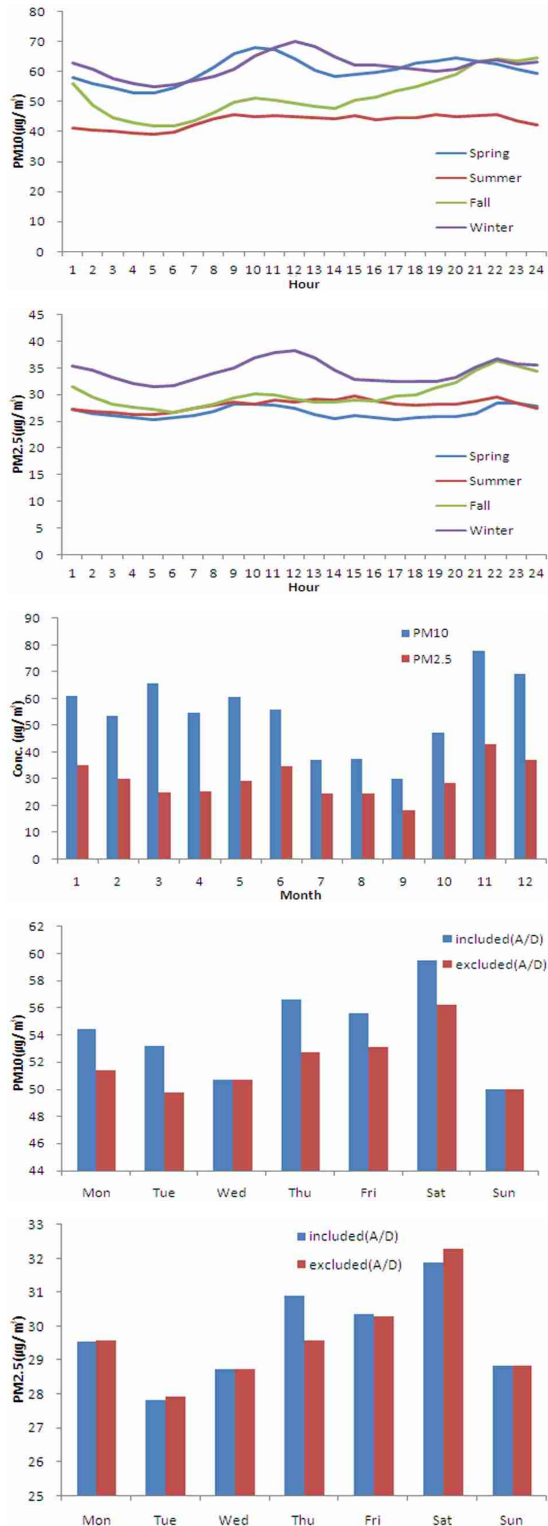


Fig. 3. The trend of the average concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} in 2010.

보였다. PM₁₀의 월별 경향은 9월에 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최소 농도를 보였고, 11월에 78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최대 농도를 보였다. 그리고 PM_{2.5}는 PM₁₀과 마찬가지로 9월에 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 11월에 43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 9월의 농도는 연평균의 33%에 해당하는 강수량에 의한 세정효과로 가장 낮은 농도를 보였다. 11월의 농도는 황사와 함께 고농도의 박무영향으로 다른 월에 비해 크게 증가하였다(5). 일반도로변 대기의 PM_{2.5}/PM₁₀은 0.38~0.67로 평균 0.55이었지만, 이 등(2007)의 이동 차량에서 측정된 1월 PM_{2.5}/PM₁₀인 0.78보다는 낮은 값을 보였다(6). 요일별 경향은 황사(Asia dust)의 영향을 고려하면 특별한 경향을 볼 수 없었다. 그렇지만, 황사일을 제외하면 화요일부터 토요일까지 지속적으로 증가하여 토요일에 최대농도를 보였다. 이는 주 5일 근무의 실시에도 불구하고, 서울시내의 오염도는 감소하지 않고 오히려 더욱 증가하는 결과를 보였다. 그러나 자동차 운행 및 산업활동이 상대적으로 적은 일요일에 최소농도를 보였다.

2. NOx 장·단기 경향

2002~2010년 NOx의 일반 도로변 연평균농도는 0.121 ppm(2010)~0.174 ppm(2002)이었다. 9년 동안 NOx의 연평균농도는 감소하는 경향을 보였다. 전체적으로 보면 0.174 ppm(2002)에서 0.121 ppm(2010)으로 약 30% 정도 감소하였다. O₃을 제외한 다른 대기오염물질들과 비슷하게 감소하는 경향을 보였다. 도로변에 인접한 일반도로변 측정소는 일반대기 측정소보다 자동차에 더 근접하여, 자동차에서 배출되는 NOx에 직접적인 영향을 더 많이 받는 것으로 알려져 있다. Pandey 등(2008)의 1996~2006년간 NOx의 일반도로변 평균농도는 일반대기 평균농도보다 95 ppb 높았다(7). 이는 일반 대기평균의 3.7배에 해당되는 것으로 자동차가 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다. 그렇지만, 서울시에 등록된 자동차대수와 NOx를 비교하면 2002년 269만대에서 2010년에 298만대로 지속적으로 증가하고 있는데, NOx는 전체적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 감소 경향이 다른 외부적인 요인에 의해 영향을 받았지만, 휘발유차에는 기본적으로 삼원촉매장치가 부

착되어 있고, 경유차는 저감장치부착 및 CNG버스 등과 같은 저공해자동차로 대체되었기 때문으로 생각한다.

2010년 NOx의 계절별 농도를 보면, 그림 4처럼 겨울>가을>봄>여름 순으로 높은 농도를 보였다. 겨울에 높은 농도를 보이는 것은 자동차 외에도 난방을 위한 화석연료 사용량증가에 의한 것으로 생각한다. 계절별 시간최대 농도는 겨울을 제외한 계절에서는 오전 9시에서 최대 농도를 보였고, 겨울은 오전 10시에 최대 농도를 보였다.

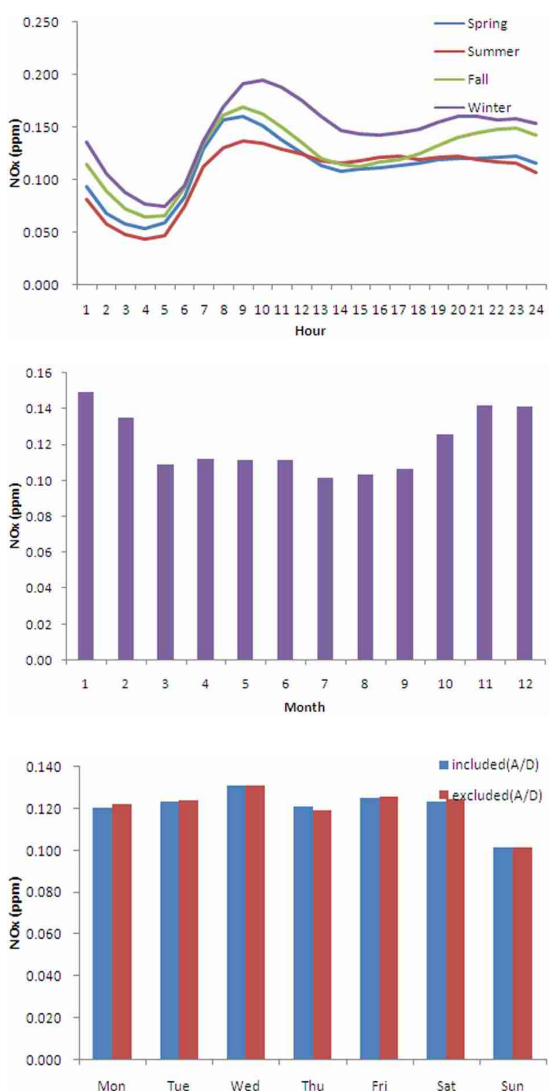


Fig. 4. The trend of the average concentration of NOx in 2010.

NOx의 월별 경향은 1월에 0.149 ppm으로 최대농도를 보였으며, 7월에 0.102 ppm으로 최소농도를 보였다. 요일별 경향은 자동차 운행 및 산업활동이 상대적으로 적은 일요일에 최소농도를 보였으며, 수요일에 최대농도를 보였다. 이는 입자상 오염물질인 PM₁₀ 및 PM_{2.5}와 다른 경향이었으며, 주 등(2006)의 경향과도 다른 결과였다(8).

3. O₃ 장·단기 경향

2002~2010년 O₃의 일반도로변 연평균농도는 0.007 ppm(2004)~0.012 ppm(2010)이었다. 2002~2004년 O₃의 연평균농도는 감소하였다가 2005년부터 다시 증가하는 경향을 보였다. 전체적으로 보면 0.010 ppm(2002)에서 0.012 ppm(2010)으로 20% 정도 증가하였다. 다른 대기오염물질들과는 반대되는 경향을 보였다. 정 등의 1996~2006년간 O₃농도 결과는 자동차에 영향을 덜 받는 일반대기 평균농도가 일반도로변 대기 평균농도보다 5 ppb 정도 높은 것으로 나타났다(4). 이는 O₃의 연평균농도 경향이 NOx의 연평균농도 경향과 관련이 있는데, 이는 O₃이 2차 광화학오염물질로 NOx, VOC 등과 광화학 반응을 하여 생성되기도 하지만, 자동차와 같은 오염원에서 배출되는 NO와의 반응에 의해 소멸되기도 하기 때문이다.

2010년 O₃의 계절별 농도를 보면, 그림 5처럼 봄>여름>가을>겨울 순으로 높은 농도를 보였다. 이는 정 등의 결과인 여름>봄>가을>겨울과 다소 차이가 있었다(4). 계절별 시간최대 농도는 여름을 제외한 계절에서는 오후 3시에서 최대 농도를 보였고, 여름은 오후 4시에 최대 농도를 보였다. O₃의 시간평균별 경향은 새벽 4시와 오후 3시에 두 번의 피크를 보였으며, 이는 야간에 혼합기의 감소에 의한 것과 광화학반응에 의한 O₃ 생성 및 유입에 따른 것으로 판단한다(4, 9).

O₃의 월별 경향은 1월부터 증가하기 시작하여 6월에 최대농도를 보인 후, 감소하기 시작하여 12월에 최소 농도를 보였다. 6월의 O₃의 최대농도는 일사량증가에 따른 것으로 알려져 있으며, 7월 O₃농도의 감소는 강수 영향을 받는 것으로 알려져 있다(4).

요일별 경향은 자동차 운행 및 산업활동이 상대

적으로 적은 일요일에 최대농도를 보였으며, 다른 대기오염물질들이 높게 나타나는 토요일에는 최소농도를 보였다.

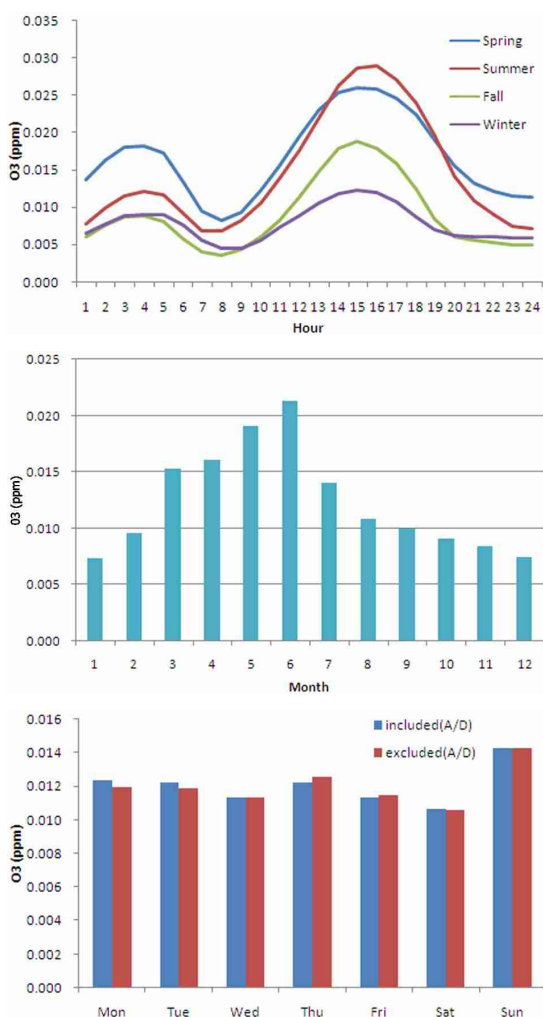


Fig. 5. The trend of the average concentration of O₃ in 2010.

4. CO 장·단기 경향

2002~2010년 CO의 일반도로변 연평균농도는 0.8 ppm(2010)~1.0 ppm(2002)이었다. 2002년~2010년 CO의 연평균농도는 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 전체적으로 보면 1.0 ppm(2002)에서 0.8 ppm(2010)으로 20% 감소하였다.

2010년 CO의 계절별 농도를 보면, 그림 6처럼 겨울>가을>여름>봄 순으로 높은 농도를 보였

다. 계절별 시간최대 농도는 여름을 제외한 계절에서는 오전 10시에서 최대 농도를 보였고, 여름은 오전 11시에 최대 농도를 보였다. CO의 시간별 경향은 오전 5시를 저점으로 하고 나서 11시를 고점으로 다시 하락하여 비슷한 농도 경향을 보였다. CO의 월별 경향은 1월 0.9 ppm부터 감소하기 시작하여 3월의 0.7 ppm으로 비슷한 농도를 유지하다가 10월부터 증가하여, 12월에 1.0 ppm까지 증가하였다. 이는 자동차 외에도 가정용 난방과 같은 화석연료 연소에 영향을 받는 것으로 보인다. 요일별 경향은 일요일에 0.7 ppm으로 최소 농도를 보였으며, 월요일부터 토요일까지는 0.8 ppm으로 비슷한 농도를 보였다.

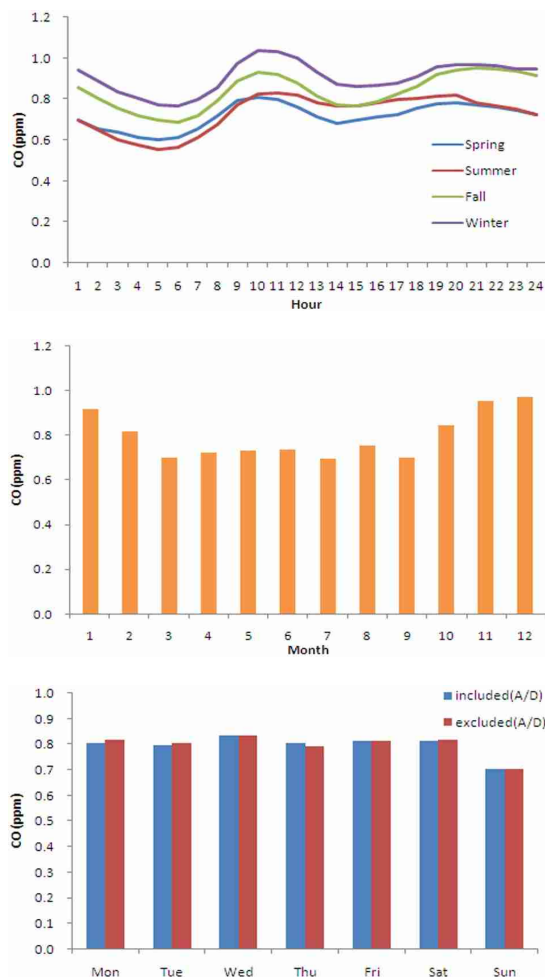


Fig. 6. The trend of the average concentration of CO in 2010.

결론

2002~2010년 일반 도로변 대기오염물질들인 PM₁₀, PM_{2.5}, CO, NO_x 및 O₃의 연평균농도는 두 가지 경향을 보였다. 첫 번째는 PM₁₀, PM_{2.5}, CO 및 NO_x와 같이 감소하는 경향을 보이는 항목들과 두 번째는 O₃과 같이 증가하는 경향을 보이는 항목이다. O₃은 20% 증가하였지만, 감소하는 경향은 17~36%로 이 중에서 PM₁₀이 36% 가장 크게 감소하였다. 자동차 배출가스에서 나오는 미세입자와 더욱 관련 있는 PM_{2.5} 농도도 17% 감소하였지만, 상대적으로 PM_{2.5-10}에 해당하는 부분이 더욱 감소하였다. 이는 시내 및 마을 버스의 천연가스차량으로 보급 및 매연저감장치, LPG엔진 개조 및 조기폐차의 노후경유차저공해화사업 등의 영향 외에, 도로변 재비산먼지제거 등과 같은 다른 요인들에 의해 영향을 받은 것으로 생각된다. 그리고, 2002~2010년 도로변대기 PM₁₀과 일반대기 PM₁₀의 농도차이는 평균 7 μg/m³이었지만, 2010년은 5 μg/m³로 점점 차이가 줄어드는 경향을 보였다.

계절별로 보면, PM₁₀은 겨울>봄>가을>여름, PM_{2.5}은 겨울>가을>봄>여름, NO_x는 겨울>가을>봄>여름, CO는 겨울>가을>여름>봄 및 O₃은 봄>여름>가을>겨울 순이었다. O₃을 제외한 나머지 항목들은 겨울철에 최고 농도를 보였으며, 여름철에 최소 농도를 보였다. 겨울에 높은 농도는 자동차 외에도 난방을 위한 화석연료 연소량 증가에 영향을 받는 것으로 보인다.

월별로 보면, PM₁₀과 PM_{2.5}는 11월에 황사와 박무에 영향을 많이 받아 최대농도 보였으며, 9월에는 약 670 mm에 해당하는 강수량에 의해 최소 농도를 보였다. NO_x는 1월에 최대농도를, 7월에 최소농도를 보였고, CO는 12월에 최대농도를 보였으며, O₃은 6월에 최대농도를 보였다.

요일별로 보면, O₃을 제외한 나머지 항목들은 일요일에 최소 농도를 보였지만, PM₁₀과 PM_{2.5}는 주중보다 오히려 주말인 토요일에 더 높게 나타났다. 그리고 다른 항목들에서도 토요일에 낮은 농도를 보이는 것은 아니었다.

시간별로 보면, O₃은 오후 3시에 최대 농도를 보였지만, 나머지 항목들은 오전 10~11시에 최대 농도를 보였다.

참고문헌

1. 이승복, 배귀남, 박수미, 정상근 : 봄철 서울 도로변의 검댕 오염 특성. 한국대기환경학회지, 23(4):466~477, 2007.
2. 서진현, 선우영, 김수향, 오진주, 우정현 : 2003~2006년 서울시 도로변 자동측정망의 PM₁₀과 NO₂ 농도 변화 추이 연구. 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, p363~364, 2008.
3. 이승재, 김진영, 진현철, 배귀남 : 이동형 자동차 배출가스 측정 시스템(MEL)을 이용한 서울 내부 순환도로의 대기오염 모니터링. 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, p293~295, 2010.
4. 정수연, 김기현, 김동호, 조석주, 김민영 : 서울시 도로주변 및 주거지역의 오존농도 변화에 대한 장기연구. 한국환경분석학회지, p204~220, 2009.
5. 이준복, 강미혜, 안미진, 김영호, 유승성, 신덕영, 전은미, 김홍주, 정권 : 2007년 서울지역 연무 사례조사. 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, p540~541, 2008.
6. 이승복, 변두섭, 박수미, 이준현, 배귀남 : 겨울철 서울 도로 위 입자상 물질의 농도 특성. 환경공동학술대회, p293~294, 2007.
7. Pandey SK, Kim KH, Chung SY, Cho SJ, Kim MY and Shon ZH : Long-term study of NO_x behavior at urban roadside and background locations in Seoul, Korea. Atmospheric Environment, 42:607~622, 2008.
8. 주옥정, 박수미, 이승복, 진현철, 변두섭, 배귀남 : 대도시 도로변에서 가스상 대기오염물질의 농도 특성. 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, p288~289, 2006.
9. 강미혜, 길혜경, 김길식, 김학수, 박후경, 신덕영, 김두래 : 자동측정망에 의한 서울시 대기오염도 평가. 서울시보건환경연구원보, 40:331~341, 2004.