

## 서울시 미세먼지 농도에 영향을 미치는 요인 분석 : 기상 요인 및 장거리 이동 물질 중 일산화탄소를 중심으로

박애경<sup>1)</sup> · 허중배<sup>2)</sup> · 김 호<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교 의과대학 의과학과, <sup>2)</sup>위스콘신주립대학교-메디슨 환경공학과

<sup>3)</sup>서울대학교 보건대학원 보건학과

(2011년 5월 26일 투고, 2011년 6월 22일 게재확정)

## Analyses of factors that affect PM<sub>10</sub> level of Seoul focusing on meteorological factors and long range transferred carbon monoxide

A.K. Park<sup>1)</sup> · J.B. Heo<sup>2)</sup> · H. Kim<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>*Departments of Biomedical Sciences, Seoul National University College of Medicine*

<sup>2)</sup>*Civil and Environmental Engineering Department, University of Wisconsin-Madison*

<sup>3)</sup>*Department of Epidemiology and Biostatistics, School of Public Health, Seoul National University*

(Received 26 May 2011; accepted 22 June 2011)

### Abstract

The objective of the study was to investigate the main factors that contribute the variation of PM<sub>10</sub> concentration of Seoul and to quantify their effects using generalized additive model (GAM). The analysis was performed with 3 year air pollution data (2004~2006) measured at 27 urban sites and 7 roadside sites in Seoul, a background site in Gangwha and a rural site in Pocheon. The diurnal variation of urban PM<sub>10</sub> concentrations of Seoul showed a typical bimodal pattern with the same peak times as that of roadside, and the maximum difference of PM<sub>10</sub> level between urban and roadside was about 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  at 10 in the morning. The wind direction was found to be a major factor that affects PM<sub>10</sub> level in all investigated areas. The overall PM<sub>10</sub> level was reduced when air came from east, but background PM<sub>10</sub> level in Gangwha was rather higher than the urban PM<sub>10</sub> level in Seoul, indicating that the PM<sub>10</sub> level in Gangwha is considerably influenced by that in Seoul metropolitan area. When hourly variations of PM<sub>10</sub> were analyzed using GAM, wind direction and speed explained about 34% of the variance in the model where the variables were added as a 2-dimensional smoothing function. In addition, other variables, such as diurnal variation, difference of concentrations between roadside and urban area, precipitation, month, and the regression slope of a plot of carbon monoxide versus PM<sub>10</sub>, were found to be major explanatory variables, explaining about 64% of total variance of hourly variations of PM<sub>10</sub> in Seoul.

**Keywords** : PM<sub>10</sub>, Meteorological condition, Generalized additive model

---

\* Corresponding author.

Tel : +82-2-745-9104, E-mail : hokim@snu.ac.kr

## 1. 서 론

수도권 미세먼지 특별법, 서울시 내의 대기오염 배출시설 규제 등의 제도적 규제에도 불구하고 서울시의 미세먼지의 농도현황은 개선되지 못하고 있다(Kim, 2006; Lee and Kim, 2007). 미세먼지 농도를 저감하기 위해서는 먼저 그 지역의 미세먼지 오염현상의 특징을 보다 정확히 규명하여야 한다(Kerschbaumer et al., 2008). 즉 서울의 미세먼지 농도를 저감하기 위해서는 미세먼지 변화 원인을 정밀하게 분석하여 서울의 미세먼지 오염도의 변화특성을 이해하는 것이 우선적으로 이루어져야 한다. 도시 대기내의 미세먼지 농도는 지역내의 생성원인과 외부 유입에 따른 영향 등으로 나눌 수 있는데, 이들의 규명을 위해서는 측정과 분석을 통한 메커니즘적 설명이 필요하다. 그러나 본 연구에서는 이미 파악되어 있는 기존 자료 분석을 통하여 서울시 미세먼지 농도에 영향을 미치는 요인을 분석하는 것을 목적으로 하였다. 즉 기존 측정망에서 측정된 미세먼지 질량농도값과 기상자료, 장거리 이동 가능 물질인 일산화탄소의 농도 자료를 이용하여 서울의 미세먼지 농도에 영향을 미치는 요인을 분석하고 각 요인이 미치는 영향을 정량화 하고자 하였다. 분석은 크게 두 부분으로 나누어 분석하였다. 먼저 첫 번째 분석은 강화 배경 농도와 서울의 미세먼지 농도를 비교하여 배경 요인이 미치는 영향을 분석하고자 하였고 서울의 미세먼지 농도를 도시 농도(urban)와 도로변 농도(roadside)로 분류하여 서울의 미세먼지 농도에 영향을 미치는 지역적 요인을 분석하고자 하였다. 도로변에서의 자동차에 의한 기여는 자동차 배출가스에 포함된 먼지 성분과 타이어 마모, 비산 등에 의한 먼지를 포함한다. 단 도시 기여 농도에도 그 도시를 주행하는 자동차 배출가스와 비산 등에 의한 먼지를 포함하고 있으므로, 도로변 자동차에 의한 기여는 자동차 통행이 많은 도로변에서 그 도로에 주행하는 자동차에 의한 영향이라고 할 수 있다. 그 외 교외대기 측정망 측정소인 포천시 관인면 자료를 추가로 분석하였는데 그 이유는 강화의 미세먼지 농도가 서울보다 오히려 높게 나타나는 날이 있어서 강화가 수도권 배경 농도로 타당한지의 여부와, 포천을 수도권 배경농도로 사용할 수 있는지를 알아보기 위해서였다. 두 번째

분석에서는 일반화 가법 모형 [Generalized Additive Model (GAM)] (Hastie et al., 1990)을 사용하여 기상 요인, 월, 요일, 시간 및 일일 미세먼지 농도 변화량, 도로변과 도심 농도의 차이 등의 요소가 서울시 일일 최고 미세먼지 농도에 미치는 영향을 모델링하여 각 요소가 미세먼지 농도 변화에 미치는 영향을 정량화하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 자료 및 자료 기술

PM<sub>10</sub> 농도 자료는 2004년에서 2006년까지의 측정망 자료를 사용하였다. 배경 농도는 국가배경농도 측정소인 강화군 석모리 측정소, 또는 교외대기측정망 측정소인 포천시 관인면 측정소 자료를 사용하였다. 도시 농도는 서울시의 도시대기측정망 측정소를 사용하였고 도로변 측정소는 서울시의 도로변 측정소의 평균 농도를 대상으로 하였으며 자료는 1시간 평균 자료를 이용하였다. 미세먼지 자료 중 음수 및 영의 값을 갖는 자료는 모두 결측치로 처리하였다. 서울 도시농도의 일일 최고 평균 미세먼지 농도는 27개 상시측정소의 시간 자료를 먼저 시간별로 평균한 다음 그 농도 중 최고 농도를 일일 최고 미세먼지 농도로 하였다. 서울의 도로변의 일일 최고 평균 미세먼지 농도는 7개 도로변측정소의 자료를 동일한 방법으로 처리하여 사용하였다. 강화나 포천의 경우에는 측정소가 1개이므로 시간별 평균값 중 최고 농도를 취하여 일일 최고 농도로 사용하였다. 기상자료는 2004-2006년의 서울시 1시간 평균 자료를 사용하였고 일일 평균 풍향은 1시간 풍향자료를 벡터로 환산하여 xy 좌표를 구하여 평균한 후 이를 다시 360도 기준 풍향으로 변환하여 사용하였다. 일일 평균 풍속은 1시간 자료를 평균하여 사용하였다. 강수일은 일일 누적 강수량이 0.1mm 이상인 날로 하였다.

### 2.2 미세먼지 농도에 영향을 미치는 요인 분석

일반화 가법모형(GAM)(Hastie et al., 1990)을 사용하여 서울시 시간 평균 미세먼지 농도에 미치는 요인을 분석하였다. 일반화 가법모형은 일반화 선형모형[Generalized Linear Model (GLM)]이 확장된 모

형으로 GLM의 모수 항(parametric term)에 비모수 평활함수(독립변수의 non-parametric smoothing 함수)를 더할 수 있으며 다음과 같은 수식으로 나타낸다.

$$g(E(y_i)) = \eta_i = X_i^* \beta + f_1(X_{1i}) + f_2(X_{2i}, X_{3i}) + f_3(X_{4i}) + \dots$$

$g$  , link function  
 $f_i$  , smooth function  
 $X^* \beta$  , linear parametric bit

$X^* \beta$ 는 일반적인 GLM에서 사용되는 선형관계로 설명되는 독립변수의 효과를 의미하며 여기에 각 비선형 평활함수  $f_i$ 가 더해지게 된다.  $f_2(X_{2i}, X_{3i})$ 는 두 개의 독립변수를 함께 설명하는 2차원 평활함수를 의미한다. 본 연구에서는 서울시 시간 평균 미세먼지 농도를 종속변수로 하고 온도, 풍향, 풍속, 기압, 강수량 등의 기상 요인과 월, 요일, 시간변수, 그 외 24시간 동안 일산화탄소 농도에 대한 미세먼지 농도의 회귀직선(regression line)의 기울기(이하  $[PM_{10}]/[CO]$ 라 함), 24시간 동안의 미세먼지 변화량(diurnal variation, 24시간 동안 최고 미세먼지 농도와 최저 미세먼지 농도 차), 24시간 동안 도로변 농도 평균과 도심 농도 평균 차이(Difference of concentrations between roadside and urban)를 설명변수로 하여 모델링 하였다. 각 설명변수로 사용된 기상요인 및  $[PM_{10}]/[CO]$ 는 각 해당 시간까지의 24시간 동안의 평균값을 사용하였다. 예를 들면 풍향의 경우 해당 시간을 포함하여 이전 24시간 동안의 풍향 자료를 벡터 환산 후 평균을 구하여 사용하였다.  $[PM_{10}]/$

$[CO]$ 는 24시간 동안의  $PM_{10}$  농도를 종속변수로 하고 일산화탄소 농도를 설명변수로 하여 단순회귀분석을 한 후 얻어지는 기울기를 사용하였다. 종속변수인 시간 평균 미세먼지 농도는 로그 값을 취하여 사용하였으며 설명변수 중 미세먼지 변화량(diurnal variation)도 로그값을 사용하였고  $[PM_{10}]/[CO]$ 는 절대값을 로그변환하여 설명변수로 사용하였다. 강수량은 0.1~1.5mm, 1.6~15.5mm, 15.5mm 이상으로 나누어 범주형 변수로 첨가하였으며 월, 요일, 년도 변수도 범주형 변수로 하였다. 그 외 다른 변수는 평활함수(smoothing function)의 형태로 첨가하였고 풍속과 풍향은 2차원 평활함수로 첨가하였다(Wood, 2006). 모델링은 R 프로그램의 mgcv 패키지를 사용하였다(Wood et al., 2002; Wood, 2003).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 미세먼지 농도 및 기상 요인 특성

2004~2006년 3년간의 서울시의 도로변 농도, 도시 농도, 강화 배경농도, 포천의 미세먼지 농도 및 기상 변수 특성을 표 1에 요약하였다. 3년간 서울의 일일 최고 도로변 농도 평균은  $103.1 \mu g/m^3$  이었고 서울 도심 농도 평균은  $87.8 \mu g/m^3$  로서 약  $15.3 \mu g/m^3$ 의 차이를 보였다. 이 차이는 서울 평균 미세먼지 농도에 비하여 차량 통행이 많은 곳에서의 미세먼지 농도 증가 정도라고 볼 수 있다. 3년 동안 서울 도심 미세먼지 농도가 가장 높았던 날은 2006년 4월 8일이었

Table 1. Characteristics of daily maximum  $PM_{10}$  concentrations and daily mean meteorological conditions(2004~2006).

		Min	Q1	Median	Mean	Q3	Max
$PM_{10}$ ( $\mu g/m^3$ )	Seoul	Road	18.4	65.1	90.4	103.1	1570
		Urban	12.9	52.0	74.6	87.8	1487
	Gangwha	4.0	56.8	77.0	95.8	112.0	1673
	Pocheon	13.0	52.0	76.0	93.1	112.0	1000
Temperature ( $^{\circ}C$ )	Seoul	-14.0	4.1	14.7	12.8	21.7	30.4
Humidity (%)	Seoul	21.1	49.1	61.5	61.1	71.8	96.0
Pressure (hPa)	Seoul	993.7	1009.0	1016.0	1016.0	1023.0	1038.0
Rain (mm)	Seoul	0	0	0	4.1	0.3	241
Wind speed (m/s)	Seoul	0.8	1.8	2.2	2.4	2.8	5.2
Wind direction (degree)	Seoul	0.12	76.1	271.0	219.3	299.4	358.5

으며 그 농도는  $1486.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

### 3.2 미세먼지 농도의 일변화 특성

서울시 미세먼지 농도에 미치는 요인을 서울시 도로에 의한 지역적 요인과 강화 배경 농도에 의한 배경적 요인을 구분하여 각 영향을 보기 위하여 서울시 도로측정망, 도시 대기 측정망, 강화 배경 농도의 3년간(2004~2006년) 시간별 평균을 구하였다(Fig. 1). 이 때 미세먼지가 너무 높은 날의 영향을 배제하기 위하여 서울 일일 최고 도시 대기 미세먼지 농도가  $200\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상인 날은 제외하였다. 결과를 보면 서울시의 도시 대기 시간별 미세먼지 농도 변화 추이는 서울시 도로변 농도 추이와 거의 같은 양상을 나타내고 있으나 전체적인  $\text{PM}_{10}$  농도수준은 강화 배경농도에 의해 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다(Fig. 1). 서울시 도로변 미세먼지 농도와 서울시 평균 미세먼지 농도의 차가 가장 많이 나는 시간은 오전 10시 부근으로 그 차이는 약  $14\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 된다. 이것은 이 시간대에 서울시내 차량소통이 많은 지역에서 서울 평균에 비하여 미세먼지 농도가 높아지는 정도라고 볼 수 있을 것이다.

포천의 경우 새벽에서 오전 10시경까지는 가장 낮은 미세먼지 농도를 보이나 강화와는 달리 교통량이 증가하는 출근시간 대에 농도가 급격히 증가하는 양상을 나타내어 서울과 비슷한 일일 농도 변화 추이를 나타내고 있음을 알 수 있다(Fig. 1). 이것은 서울지역의 주풍이 서풍계열이므로 포천이 수도권 지역의 풍하지역에 위치하여 수도권 지역으로부터

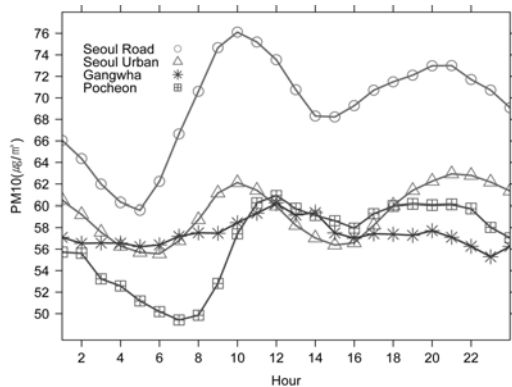


Fig. 1. iurnal variation of  $\text{PM}_{10}$  concentrations of Seoul road, Seoul urban, Gangwha and Pocheon.

터 영향을 받아 미세먼지 농도가 높아진다고 추측할 수 있다. 또한 서울의 일변화 추이와 약 2시간의 시간 차이를 보이는 것 역시 포천의 미세먼지 농도는 수도권 지역의 풍하 지역이라는 영향권 내에 있음을 말한다. 그러나 수도권 지역의 영향 때문이 아니라 포천시 안에서의 차량 증가나 포천 주변에 있는 큰 도로의 통행량 증가로 인해 나타나는 결과라고 볼 수도 있을 것이다. 그렇다면 풍향에 따라 포천이 서울의 풍하 지역이 되기도 하고 풍상지역이 되기도 하므로 서울의 일일 평균 풍향을 기준으로 서풍, 동풍으로 자료를 나누어 미세먼지의 일일 변화추이를 살펴보았다(Fig. 2). 이 경우에도 역시 미세먼지가 너무 높은 날의 영향을 배제하기 위하여 서울 일일 최고 도시 미세먼지 농도가  $200\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상인 날은 제외하였다. 그 결과 서울지역의 풍향을 중심으로 보았을 때 주풍향이 서풍인 날들의 경우 동풍인 경우 보다 높은 미세먼지 농도를 나타내었으며 풍상지역과 풍하지역이 반대가 되는 것이 뚜렷하게 나타났다. 즉 주풍향이 서풍인 경우 포천이 수도권의 풍하지역으로 되어 오후의 미세먼지 농도가 오히려 서울보다 증가하는 경향을 나타내었고 반면 강화는 수도권의 풍상지역으로 시간별 농도 변화가 크지 않은 경향을 보이며 배경농도로서의 추이를 나타내었다. 서울지역의 주풍향이 동풍인 경우는 강화가 수도권의 풍하지역이 되어 오히려 서울의 도시 대기 농도보다 더 높은 미세먼지 농도를 나타내었고 일일 농도 변화 폭도 증가되었다. 반면 포천은 수도권의 풍상지역이 되므로 서울 도시 농도보다 훨씬 낮은 미세먼지 농도를 나타내었다. 결과를 제시하지는 않았으나 서울의 일일 주풍향을 기준으로 하지 않고 강화의 일일 주풍향을 기준으로 하였을 경우에도 거의 비슷한 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 일일 주풍향이 수도권의 미세먼지 농도에 미치는 영향이 매우 커서 서울 및 주변 대도시에서 발생한 미세먼지가 풍향에 따라 어디로 이동하는가에 의해 수도권 각 지역의 미세먼지 농도가 크게 변화함을 알 수 있다. 이 결과는 이전 연구에서 기상요인, 특히 풍향과 풍속이 미세먼지 농도 변화에 중요한 요소라고 밝혀진 것과 일치하는 결과이다 (Turalioglu et al., 2005; Sanchez-Reyna et al., 2006; Guerra et al., 2006; Yu et al., 2006). 특히 수도권 배경농도인 강화의 미세먼지 농도는 풍향에

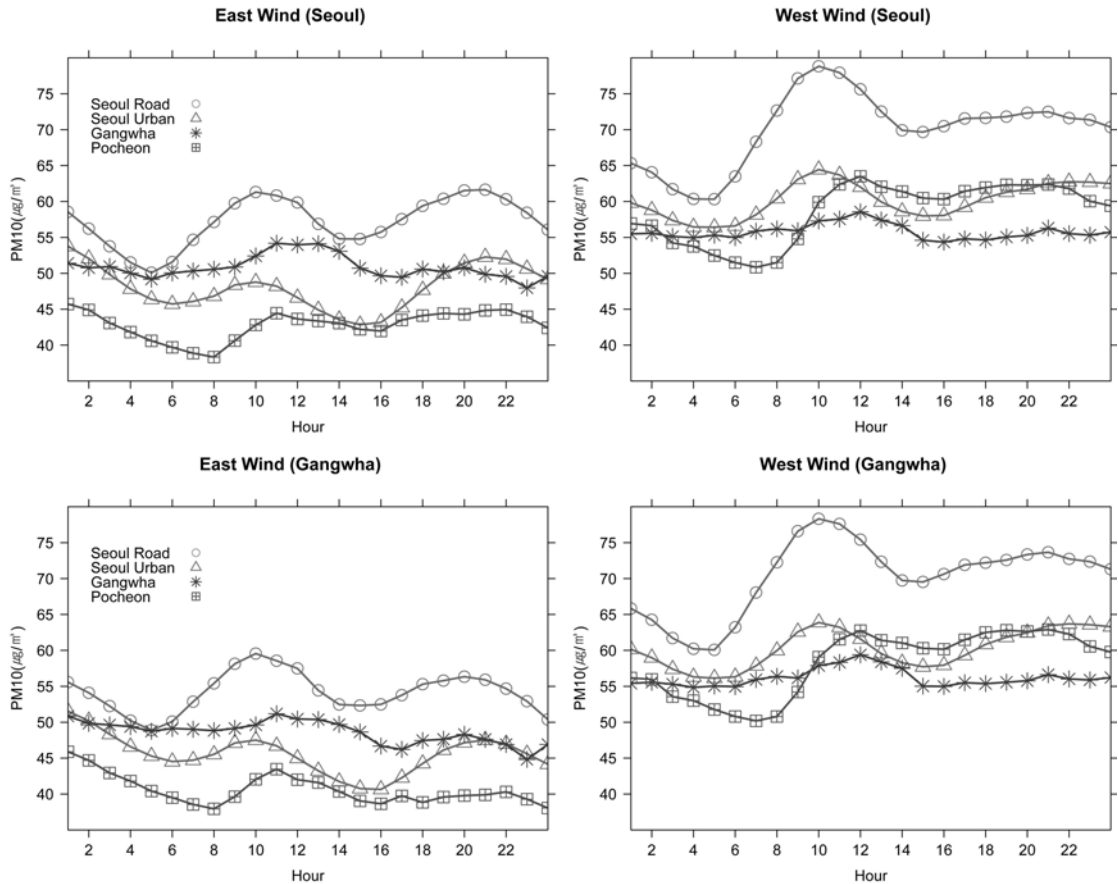


Fig. 2. Diurnal variation of PM<sub>10</sub> concentrations of Seoul road, Seoul urban, Gangwha and Pocheon according to daily wind direction of Seoul and Gangwha.

따라 오히려 수도권의 미세먼지 영향을 받게 되므로 이에 대한 고려가 필요하다고 하겠다. 예를 들어 강화보다 수도권 지역에서 좀 더 멀리 떨어져 있는 지역을 배경농도로 재설정하는 것도 필요할 수 있다고 하겠다.

### 3.3 일반화 가법 모형을 이용한 서울시 미세먼지 농도에 영향을 미치는 요인 분석

#### 3.3.1 일반화 가법 모델링에 사용된 변수들의 특성 및 상관성

일반화 가법 모델링에 사용된 변수 중 연속변수들의 특성을 표 2에 나타내었다. 시간 평균 미세먼지 농도의 평균은 59.4µg/m<sup>3</sup>였으며 최고치는 1487.0

µg/m<sup>3</sup>로 분석기간 동안 최고 일일 농도를 나타낸 2006년 4월 8일 23시에 나타낸 농도였다. Table 2에 있는 변수들은 미세먼지 농도를 제외하고 모두 해당 시간까지 24시간 동안의 평균 혹은 그 시간동안의 변화된 변수량이다. Table 3에는 변수들의 상관계수를 나타내었는데 기상변수 중 기압, 습도, 온도는 서로 상관성이 높은 것으로 나타났고 [PM<sub>10</sub>]/[CO]는 미세먼지 변화량 (Diurnal variation)과 상관계수 0.31 정도의 상관성이 있는 것으로 나타났다.

#### 3.3.2 일반화 가법 모델링에 의한 서울 미세먼지 농도에 영향을 미치는 요인

Fig. 3은 시간 평균 서울 미세먼지 농도를 종속변수로 한 일반화 가법 모델링 결과 각 변수가 시간

Table 2. Characteristics of 1hr mean PM<sub>10</sub> concentrations and 24hr mean meteorological conditions(2004–2006).

	Min	Q1	Median	Mean	Q3	Max
PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (urban)	5.9	33.6	50.3	59.4	74.8	1487.0
Wind speed (m/s)	0.7	1.8	2.2	2.4	2.8	5.6
Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	-15.0	4.1	14.6	12.9	21.8	30.5
Humidity (%)	19.1	49.6	61.5	61.1	71.8	96.2
Pressure (hPa)	980.8	999.7	1006.0	1006.0	1012.0	1027.0
Rain (mm)	0.0	0.0	0.0	4.1	0.3	288.0
Slope PM10/CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{ppm}$ )	-122.7	1.8	3.2	4.2	5.5	275.1
Diurnal variation ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	4.0	23.1	35.8	48.6	56.5	1376.0
Difference of conc. between roadside and urban ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	-11.3	5.1	9.6	9.8	13.7	53.5

평균 미세먼지 농도에 미치는 영향을 나타내고 있다. 이 결과에서 각 변수에 따른 미세먼지 농도변화는 다른 변수들을 보정한 후 각 변수가 미세먼지 농도에 미치는 영향을 나타낸다. 연도별로 보면 2006년에 가장 높은 미세먼지 농도가 나타났고 월별로 보면 9월에 가장 미세먼지 농도가 낮으며 1월에 가장 높은 농도를 보였다. 요일 변수를 보면 화요일에 가장 높은 미세먼지 농도를 나타냈고 일요일에 미세먼지 농도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 또한 강수에 의해 미세먼지 농도가 낮아져 강수량이 증가하면서 미세먼지 농도가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 일일 시간에 따른 미세먼지 농도변화는 시간 별 추이가 뚜렷하게 나타나고 있어 새벽 5시 경 하루 중 가장 낮은 미세먼지 농도를 나타내고 출퇴근 시간의 차량통행 증가로 인해 오전 10시경과 저녁 10시경에 미세먼지 농도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 온도는 5 $^{\circ}\text{C}$  혹은 25 $^{\circ}\text{C}$  근방에서 미세먼지 농도가 높

고 25 $^{\circ}\text{C}$  이상 혹은 5 $^{\circ}\text{C}$  이하에서는 미세먼지 농도가 낮아지는 것으로 나타났다. 기압의 경우에는 990hPa 정도에서 가장 낮은 농도를 보였다가 기압이 증가하면서 미세먼지 농도가 증가하는 추세를 나타내고 반면 990hPa 이하 저기압에서는 오히려 미세먼지 농도가 매우 증가하는 추세를 나타내었다. 습도의 경우에는 30~40%의 습도에서 가장 낮은 미세먼지 농도를 보이고 습도가 증가하면서 점차 미세먼지 농도가 증가하였다가 습도가 90% 이상이 되면 오히려 미세먼지 농도가 급격히 감소하는 양상을 나타냈다. 각 해당시간 까지 24시간 동안에 미세먼지 변화량(diurnal variation)은 미세먼지 농도와 거의 양의 기울기를 갖는 비례 관계를 나타냈다. [PM<sub>10</sub>]/[CO] 기울기 [Fig. 3에서 abs(slope)로 나타냄]는 절대값을 취하여 로그변환 한 값을 설명변수로 사용하였을 때 로그 기울기가 약 2 정도 까지. 즉 미세먼지와 일산화탄소의 농도비가 약 7.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{ppm}$

Table 3. Correlation coefficients between continuous explanatory variables.

	road-urban	log(absolute(slope PM <sub>10</sub> /CO))	Humidity	Temperature	Pressure	Wind speed
log(absolute(Diurnal variation))	0.22	0.31	0.043	0.029	0.078	0.07
Difference of conc. between roadside and urban	-	0.10	0.067	0.006	0.013	0.057
log(absolute(slope PM10/CO))	-	-	0.091	0.18	0.19	0.014
Humidity	-	-	-	0.45	0.51	0.075
Temperature	-	-	-	-	0.71	0.16
Pressure	-	-	-	-	-	0.18

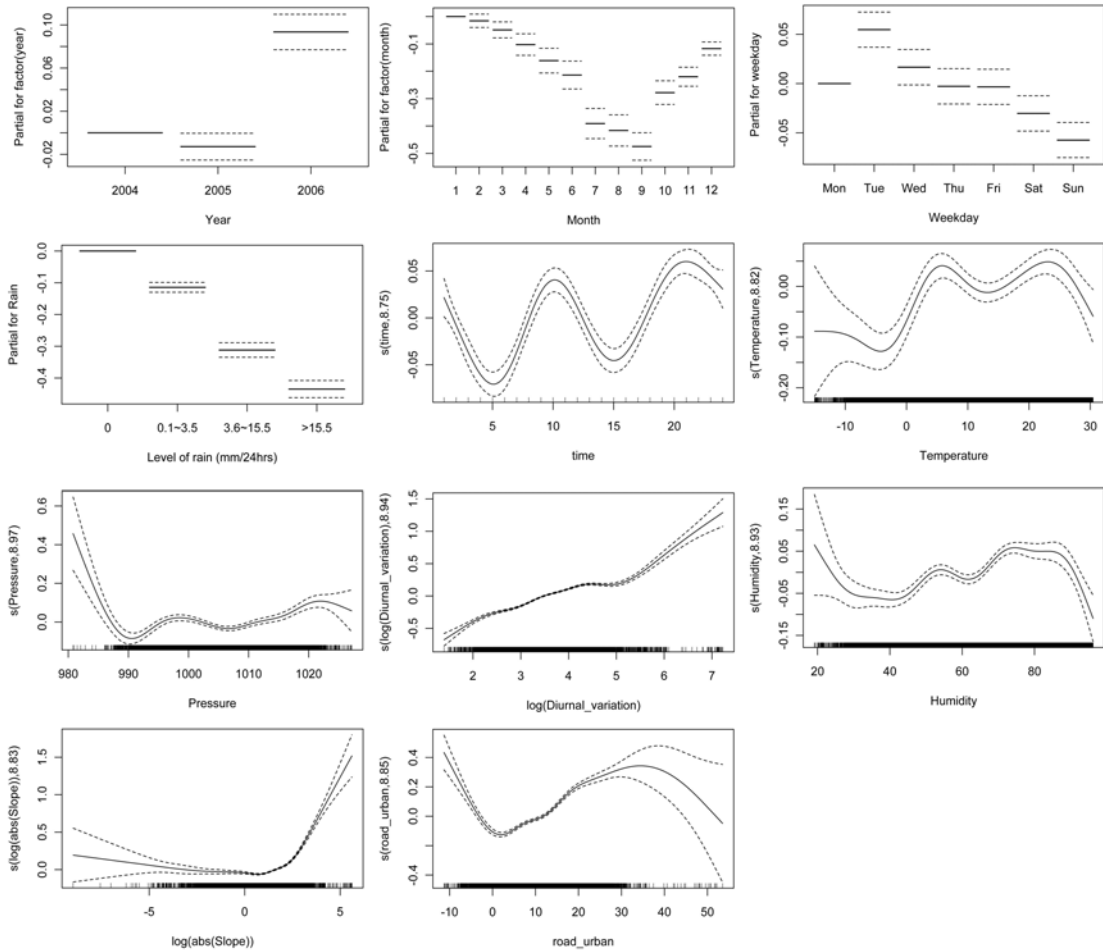


Fig. 3. Change of concentration of hourly mean PM<sub>10</sub> of Seoul according to the explanatory variables in GAM modeling.

까지는 미세먼지 농도에 거의 영향을 주지 않다가 농도비가 그 이상이 되면서 미세먼지 농도와 비례 관계를 나타내는 것을 볼 수 있다. 또한 24시간 동안의 도로변 농도와 도심 농도의 차이 평균(Fig. 3에서 road\_urban)도 양의 값인 경우 서울시 미세먼지 농도와 비례 관계를 나타내는 것으로 나타났으며 음의 값인 경우에는 오히려 미세먼지 농도와 음의 비례 관계를 나타내는 것으로 나타났다. 도로변 농도와 도심 농도가 양의 값으로 큰 차이가 날수록 도로변 서울시 차량 소통량이 많았던 날이라고 추측 할 수 있으므로 차량 소통량에 비례하여 서울시 도심 농도가 증가하는 것은 당연한 것이라고 볼 수 있다.

반면 도로변 농도와 도심농도의 차가 음이 되는 경우는 보통 황사가 나타난 날들이 주로 포함되어 있었으며 이는 황사로 인해 서울시 전역에 설치되어 있는 27개 관측소에서 측정된 도심 전체 평균이 7개 관측소에서 측정된 도로변 평균보다 높아졌다는 것을 의미한다. 따라서 이 경우에는 음의 값이 커질수록 서울시 도심 농도가 증가하는 것이라고 설명할 수 있다.

Fig. 4는 일반화 가법 모델링에 풍속과 풍향을 2차원 평활함수로 첨가하여 나타난 결과를 나타내고 있다. 결과를 보면 풍속이 매우 낮은 경우 서울시 미세먼지 농도가 높고 풍향이 약 200~270°, 즉 서울

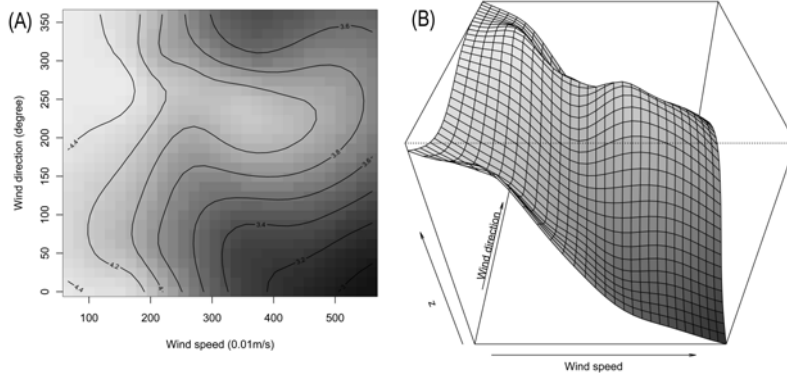


Fig. 4. Change of concentration of hourly mean PM<sub>10</sub> of Seoul according to the daily wind speed and wind direction in GAM modeling.

시 주풍향이 남서향인 경우 풍속이 강해질 때 서울시 미세먼지 농도가 증가함을 볼 수 있다. 이것은 남서향으로 강한 풍속의 바람이 불 때 중국으로부터의 도입되는 장거리 미세먼지 이동에 의한 결과라고 볼 수 있을 것이다. 주풍향의 영향을 보면 주풍향이 약 50~100°, 즉 북동풍~동풍인 경우에 가장 낮은 미세먼지 농도를 나타내고 있음을 알 수 있으며 이 결과는 3.2항에서 나타난 결과와 일치하는 것이다.

### 3.3.3 각 요인들이 미세먼지 농도 변화에 미치는 영향

Table 4는 일반화 가법 모형에서 서울의 미세먼지 농도 변화가 각 요인들에 의해 얼마나 설명될 수 있는가를 나타낸 것으로 모형에서 각 변수에 의해 설명되는 잔차를 백분율로 나타낸 것이다. 먼저 Table 4에서 “partial”이라고 명명된 잔차는 모형에 모든 변수들을 넣고 나머지 해당 변수를 첨가하였을 때 설명되는 잔차가 얼마나 증가하는 가를 나타낸 것이고 “single”로 표시된 잔차는 모형에 각 해당 변수만을 첨가하였을 때 그 변수에 의해 설명되는 잔차를 말한다. 모형에 첨가된 변수들은 서로 상관관계가 있으므로 “partial”에서 각 변수에 의해 설명되는 잔차 증가분은 단독 변수의 첨가에 의해 증가되는 잔차(“single”)에 비하여 작다는 것을 알 수 있다. 먼저 3년간 모든 날을 대상으로 한 경우(total days) 시간 평균 PM<sub>10</sub> 농도 변화(로그농도)는 설명변수로 첨가

된 변수들에 의해 약 63.6% 정도 설명이 가능하였다 (Table 4). 변수들 중 미세먼지 농도에 가장 많은 영향을 주는 것은 풍향과 풍속을 2차원 평활함수로 하여 단독변수로 첨가한 모형에서였으며 미세먼지 농도변화의 약 34% 정도가 풍향과 풍속에 의해 설명됨을 알 수 있다. 풍향과 풍속은 다른 변수를 모두 첨가하고 난 후에 모형에 넣었을 때 잔차 설명분을 약 10% 증가시켰으며 풍향과 풍속을 각각 다른 1차원 평활함수로 첨가하였을 때의 결과를 보면 풍속에 비하여 풍향이 더 큰 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 풍향은 계절적 요인 등과 상관관계가 커서 “partial” 모형에서는 잔차 증가분이 크지 않다. 반면 풍속은 다른 변수와의 상관성이 비교적 적어서 단독으로 첨가하였을 경우나 다른 변수를 첨가한 후에 첨가하였을 경우에 설명되는 잔차분이 크게 다르지 않았다.

그 외 24시간 동안의 미세먼지 변화량(diurnal variation), 24시간 동안 도로변 농도 평균과 도심 농도 평균 차이(Difference of concentrations between roadside and urban) 변수도 단독으로 첨가한 경우 각각 약 28%, 16%, 다른 변수와 함께 첨가한 경우 3.7%, 1.8%의 미세먼지 농도 변화를 설명하였다. 이 두 변수가 다른 변수와 함께 첨가된 경우 설명력이 크게 감소하는 것은 다른 변수들과 서로 상관관계가 매우 크기 때문이다. 실제로 Table 3에서 보면 이 두 변수 및 [PM<sub>10</sub>]/[CO] 간에 상관관계가 나타나고 있다.



서울시 일일 최고 PM<sub>10</sub> 농도에 따라 설명변수들에 의해서 설명되는 잔차분을 살펴보면 미세먼지 농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하이거나 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상이 되면 설명되는 잔차가 약 65% 정도이나 50~150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  사이에는 오히려 설명변수에 의해 설명되는 잔차가 줄어 약 40~50% 정도의 설명력을 가진다. 이것은 설명변수로 첨가되지 않은 다른 중요한 변수들이 있어서 일일 최고 PM<sub>10</sub> 농도가 50~150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  수준인 날들의 서울시 미세먼지 농도에 이 변수들이 영향을 많이 미친다는 것을 의미한다.

#### 4. 결 론

서울시의 도시 대기 시간별 미세먼지 농도 변화 추이는 서울시 도로변 농도 추이와 거의 같은 양상

을 나타내고 있으나 전체적인 PM<sub>10</sub> 농도수준은 강화 배경농도에 의해 크게 영향을 받고 있었다. 그러나 서울지역의 주풍향이 동풍인 경우는 강화가 수도권 풍하지역이 되어 오히려 서울의 도시 대기 농도보다 더 높은 미세먼지 농도를 나타내었다. 일 반화 가법 모형으로 서울시 시간 평균 미세먼지 농도를 모델링 한 결과 미세먼지 농도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 풍향과 풍속이었으며 이 두 변수를 2차원 평활함수로 단독으로 모형에 첨가했을 때 약 34%의 잔차를 설명하였다. 그 외 24시간 동안의 미세먼지 변화량(diurnal variation), 24시간 동안 도로변 농도 평균과 도심 농도 평균 차이(Difference of concentrations between roadside and urban)도 서울시 미세먼지 농도를 결정하는 데 중요하였으며 강수량, 월 (month), 24시간 동안의 일산화탄소 농도에 대한 미세먼지 농도의 회귀직선 기울기 등도 중요한 요

Table 4. Residuals explained by each variable in GAM models.

Level of daily maximum PM <sub>10</sub>	0-50 (248days)		50-75 (309days)		75-100 (208days)		100-125 (150days)		125-150 (90days)		150-200 (68days)		>200 (23days)		Total days	
	Residuals explained (%)															
	Partial <sup>1)</sup>	Single <sup>2)</sup>	Partial	Single	Partial	Single	Partial	Single	Partial	Single	Partial	Single	Partial	Single	Partial	Single
Diurnal variation	1.6	17.4	3.7	9.4	3.3	10.8	3.2	14.0	4.8	9.8	6.1	22.3	6.7	46.0	3.7	27.8
Difference of conc. between roadside and urban	0.3	4.0	3.4	1.9	1.9	3.4	2	9.1	2.3	3.3	1.3	5.4	1.1	31.6	1.8	15.6
Time	2.1	2.8	1.5	2.5	1.4	1.5	0.7	0.7	1.5	2.9	1.3	1.6	0.4	2.6	0.1	0.5
Year	0.4	1.5	0.3	0.2	1.1	0.8	0.1	0.6	0.8	0.4	0.2	0.3	0.7	12.2	0.3	0.3
Weekday	0.5	0.9	0.3	0.4	0.8	0.4	0.7	2.0	1.9	1.6	4.2	0.8	0.1	15.9	0.3	0.7
Month	1.5	14.1	0.8	4.3	1.6	3.4	1.9	3.5	5.1	10.4	4.7	8.7	1.9	4.6	0.9	15.3
Rain	1.2	13.6	1.1	10.6	3.5	11.0	2.1	17.5	0.4	3.8	1.7	8.3	0.1	8.3	1.6	10.1
Humidity	0.6	11.7	0.5	8.4	0.9	5.4	1.6	7.5	3.7	1.9	5.9	11.2	0.9	7.7	0.3	4.8
Temperature	1.2	16.9	0.2	2.9	0.5	0.8	1.1	4.0	4.4	5.8	1.6	4.5	1.5	16.0	0.3	7.5
Pressure	0.5	16.4	0.5	5.3	0.8	2.0	3.3	10.1	5.3	5.7	1.6	4.5	1.7	7.1	0.2	2.4
Slope PM <sub>10</sub> /CO	0.3	1.3	0.5	1.3	0.5	1.8	0.7	1.3	-0.2	3.2	0.7	3.2	0.6	22.4	1.4	10.2
Wind speed	5.4	13.0	5.1	2.8	4.7	5.5	8.1	7.3	5.4	7.7	7.5	12.8	1.5	10.4	5.6	6.5
Wind direction	6.9	35.8	8.6	12.0	5.1	8.5	7.8	10.1	5.0	5.1	6.0	5.6	3.9	16.0	5.9	20.9
Wind speed and direction <sup>3)</sup>	13.7	47.7	12.3	18.3	8.4	18.1	10.5	30.5	7.9	17.0	9.1	25.2	4.5	41.1	10.8	33.7
Total	64.6		41.1		39.0		53.2		43.7		64.6		95.8		63.6	

<sup>1)</sup> Partial represents the percentage of increase in model sum of squares due to adding the variable to a model that already contains all the other variables.

<sup>2)</sup> Single represents the percentage of increase in model sum of squares due to adding each variable to a model that contains only intercept.

<sup>3)</sup> Two variables were added to a model in the form of a 2-dimensional smoothing function.

인으로 나타났다. 따라서 수도권 대기환경 개선을 위한 여러 정책적 수단이 이들 중요 변수에 미치는 영향을 파악한다면, 이들 정책들의 효율을 과학적으로 평가하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

- 김용표 (2006) 서울의 미세먼지에 의한 대기오염, 한국대기환경학회지, 22(5), 535-553.
- 이형민, 김용표 (2007) 자동차 부제에 의한 서울 대기 오염 저감 효과 분석, 한국대기환경학회지, 23(4), 498-506.
- Guerra, S.A., D.D. Lane, G.A. Marotz, R.E. Carter, C.M. Hohl, and R.W. Baldauf (2006) Effects of wind direction on coarse and fine particulate matter concentrations in southeast Kansas, J Air Waste Manag Assoc. 56, 1525-1531.
- Hastie, T.J., and R.J. Tibshirani (1990) Generalized Additive Models. Chapman and Hall.
- Kerschbaumer, A and M. Lutz (2008) Origin and influence of PM<sub>10</sub> in urban and in rural environments, Adv. Sci. Res., 2, 53-55.
- Sanchez-Reyna, G, K.Y.Wang, J.C.Gallardo, and D.E.Shallcross (2006) Association between PM<sub>10</sub> mass concentration and wind direction in London. Atmos.Sci. Let, 6, 204-210.
- Turalioğlu, S., A. Nuhoglu, and H. Bayraktar (2005) Impacts of some meteorological parameters on SO<sub>2</sub> and TSP concentrations in Erzurum, Turkey. Chemosphere, 59, 1633-1642.
- Wood, S.N. (2003) Thin plate regression splines, J. R. Statist. Soc. 65, 95-114.
- Wood, S.N. (2006) Low rank scale invariant tensor product smooths for generalized additive mixed models, Biometrics, 62, 1025-1036.
- Wood, S.N., and N.H. Augustin (2002) GAMs with integrated model selection using penalized regression splines and applications to environmental modelling, Ecological Modelling, 157, 157-177.
- Yu, T.Y., and I.C. Chang (2006) Spatiotemporal features of severe air pollution in northern Taiwan. Environ. Sci. Pollut. Res. Int, 13, 268-275.