

## 풍속과 풍향이 미세먼지농도에 미치는 영향

채희정\*

서울특별시 물관리부 물재생시설과

### Effect on the PM10 Concentration by Wind Velocity and Wind Direction

Hee-jeong Chae

*Department of Sewage Division of Water Management, Seoul City*

#### ABSTRACT

The study has analyzed impacts and intensity of weather that affect PM<sub>10</sub> concentration based on PM<sub>10</sub> forecast conducted by the city of Seoul in order to identify ways to improve the accuracy of PM<sub>10</sub> forecast. Variables that influence PM<sub>10</sub> concentration include not only velocity and direction of the wind and rainfalls, but also those including secondary particulate matter, which were identified to greatly influence the concentration in complicated manner as well. In addition, same variables were found to have different impacts depending on seasons and conditions of other variables.

The study found out that improving accuracy of PM<sub>10</sub> concentration forecast face some limits as it is greatly influenced by the weather. As an estimation, this study assumed that basic research units and artificially estimated pollutant emissions, study on mechanisms of secondary particulate matter productions, observatory compliment, and enhanced forecaster's expertise are needed for better forecast.

Key words : PM<sub>10</sub>, pollutant emissions.

---

\*Corresponding author E-mail: chj0625@Seoul.go.kr

## I. 서론

대기오염은 인류가 물질과 에너지를 과다하게 사용하고, 특히 오염성 연료를 사용한 데서 비롯된 것으로, 화석연료의 사용, 인구 증가, 과학기술의 발달, 경제수준의 향상 등이 주요 원인이며, 이로 인하여 매년 바람직스럽지 않은 부정적 영향이 확대되고 장거리 이동이 가능하여 피해가 광역적으로 나타나고 있다.

대기오염을 줄이기 위해서는 세계 모든 국가와 민족이 인구증가율을 낮추어 난방연료를 적게 사용하고 화석연료 사용량을 줄이며 연소시설이나 산업체에서 배출되는 오염물질을 제거한 후 사용하여야 한다. 특히 대기오염물질 배출량이 많은 경제대국과 중국, 인도 등 신흥 공업국가들이 배출량을 대폭 삭감하여야 하는데, 선진국들은 물질의 풍요와 문명의 이기를 포기하기 어렵고 후진 개발도상국들도 빈곤의 퇴치와 문명국으로의 진입을 포기하기 어렵기 때문에 획기적인 계기가 없이는 단기간에 해결되지 않을 것으로 전망된다.

미세먼지(particulate matter; 이하  $PM_{10}$ )는 건강을 해치고 재산을 손상시키며, 대기의 화학반응을 촉진하고 시정거리를 감소시킨다. 또한 강우, 안개 및 구름생성을 증가시키고, 지표에 도달하는 태양복사열을 감소시켜 지구온도를 낮추고 식물성장을 저해하며 건축물을 더럽힌다. 특히 인위적으로 배출되는 먼지의 양은 자연발생원에 비해 현저히 적지만 입도가 작아서 건강에 미치는 영향이 크고, 재산 및 동식물에 끼치는 피해가 크다.

허 등[허중배 et. al 3, 2008]이 보고한 서울시 미세먼지( $PM_{2.5}$ )와 사망의 연관성 분석에 의하면, 입경  $0.1\mu m$  이하인 입자가 직경  $0.25\mu m$  이하의 모세혈관(Cilia)에 유입되어 침착(deposition)되는 것을 전제로 사망

자의 원인별 증가율을 연구하였는데, 심혈관 질환으로 인한 사망자가 가장 높게 나타났다.

사망의 영향인자는 sulfate, nitrate, ammonium, OC 등 2차 먼지의 기여율이 높고, 노출된 후 1~2일 후에 효과가 가장 큰 것으로 조사되었다. 오염원에 따른 사망률 증가는 모든 오염원에서 유의하게 나타났으나 특히, diesel emission으로 인한 영향이 가장 높고 노출된 후 3~4일 후에 효과가 가장 크므로 향후 대기환경 개선방향은 경유자동차의 배출량 저감이 관건이라고 판단된다.

또한 서울시  $PM_{10}$ 의 기여율이 높은 오염원은 2차 먼지인데, 전구물질인 황산화물, 질소산화물, 암모니아, 탄산가스 등이 수도권지역에서만 배출되지 않고 중국에서 월경되는 양이 많기 때문에 이를 근원적으로 개선하기 위해서는 장기간 모니터링에 의한 원인규명 및 극동 아시아지역 국가들의 공동저감대책이 추진되어야 한다.

이와 같이  $PM_{10}$ 이 건강과 생활에 미치는 영향이 크고 발생원이 어느 정도 알려져 있으나,  $PM_{10}$ 에 영향을 미치는 다양한 변수와 기작들에 대해서는 명확히 규명되지 않고 있다. 오염원인과 반응기작을 규명함으로써 효율적인 저감대책을 수립할 수 있을 것이다.

본 연구는 서울지역의 2차 먼지 생성에 대한 기초 자료를 확보하기 위하여, 기체상 물질의 이동인자인 풍속(wind speed)과 풍향(wind direction)이  $PM_{10}$ 생성에 미치는 영향과 계절별 특성을 조사하였다.

## II. $PM_{10}$ 의 오염특성과 유해성

대기오염물질은 먼지와 유해가스로 대별되는데, 먼지(particulate materials or dust)는 화산재, 황사, 산불, 바닷물보라, 바람에 의한 지면의 침식, 도로 먼지, 식물의 꽃가루 등 자연적인 현상에 의해 생성되거나, 자동차, 공장, 화력발전소, 난방, 폐기물

소각장 등에서 인간의 생활과 산업활동에 의해 인위적으로 발생하며, 대기화학반응에 의해서도 생성된다.

대기 중의 먼지는 무거워서 쉽게 강하하는 강하먼지와 가벼워서 오래 부유하는 비산먼지로 구분된다. 비산먼지는 입경이 100  $\mu\text{m}$  이하인 것을 대용량 시료채취기(high volume air sampler)로 측정하여 나타내왔으나, 먼지의 건강영향이 크게 대두된 1991년대 중반 이후부터 호흡성먼지인 입경 10 $\mu\text{m}$  미만의 PM<sub>10</sub>을 대상으로 관리하고 있다.

PM<sub>10</sub>은 이산형 분포로서 대개 입경 2.5  $\mu\text{m}$ 를 기준으로 조대입자와 미세입자로 구분되는데, 조대입자는 대개 자연계에 기인한 것으로 모양이 다양하고 유해성이 낮지만, 미세입자는 대부분 인위적으로 배출되거나 대기화학반응에 의해 합성된 물질로서 구형(球形)이며 매우 유해하다.

PM<sub>10</sub>의 인체침입과 배출기전을 살펴보면 입경이 5 $\mu\text{m}$ 이상인 것은 코와 상기도에 대부분 침착되어 콧물, 기침, 가래와 함께 체외로 배출되고, 2 $\mu\text{m}$ 이하인 것은 폐의 모세기관이나 폐도에 침착되며, 1 $\mu\text{m}$ 이하인 것은 혈액에 흡수된다. 0.5~5 $\mu\text{m}$ 의 입자들이 인체에 유해하고 진폐증을 유발할 수 있다고 알려져 있다.

또한 PM<sub>10</sub>은 금속(金屬), 유기물(有機物), 산(酸). NO<sub>2</sub> 등과 결합하여 2차 오염물질로 변환한 후 인체의 기관지 또는 폐포(肺胞)에 침착됨으로서 위해요인(危害要因)으로 작용한다. 특히, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, 휘발성유기화합물(volatile organic compounds) 등 연소부산물에 의해 대기화학반응에 의해 생성된 먼지는 인체의 폐기능(肺機能)을 저해하고 폐암(肺癌)발생에 기여한다고 보고되고 있다.

한편 PM<sub>10</sub>은 호흡기의 세기관지(細氣管枝)에 염증을 일으키고, 천식, 만성기관지염, 기도폐쇄(氣道閉鎖) 등을 유발하며, 폐(肺) 조직에서 박테리아의 불활성화 혹은

제거작용 방해로서 호흡기계가 감염될 수 있다고 알려져 있다.

또 PM<sub>10</sub>은 심근경색, 뇌졸중, 심박동수 이상 등 심혈관계 질환에 대해서도 염증반응, 사이토카인(cytokine) 및 케모카인(chemokine)의 분비, 백혈구 수 증가, 폐에서 활성산소의 생성, 엔도톡신(endotoxin)에 의한 세포 및 조직의 반응 등이 보고된 바 있다(신동찬, 2006).

서울시 PM<sub>10</sub>은 자동차, 산업체 및 공사현장의 먼지배출량 저감 등 지속적인 노력에 의해 꾸준히 저감되어 2001년과 2002년에 각각 71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2004년부터 2005년 사이에 58~61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 크게 개선되었으나, 아직은 외국의 주요도시에 비해 높은 편이며, 최근 기후변화에 따른 복사안개 생성일수 증가, 서해안으로부터 이류안개 등의 영향이 커서 인위적으로 더 이상 감소시키기 어려운 실정이다.

서울시에서 2005년부터 3년 동안 1,095일간 측정된 PM<sub>10</sub>은 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하인 날이 518일로서 47.3%, 51~100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 날은 458일로서 41.8%, 101~150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 날은 106일로서 9.7%, 151 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상인 날은 13일로서 1.2%로 나타났다. 이러한 결과를 미국 대기환경지수(AMI) 분류기준에 적용하면 155~254 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위의 “민감한 사람에게 유해”한 정도 이상이 11일간 지속된 셈이다.

2005년 서울시 PM<sub>10</sub>발생량은 도로 비산먼지를 제외하고 4,310ton/year로서 전국 발생량 67,343ton/year 중 6.4%를 차지하며, 배출량이 가장 많은 울산시가 제조업 연소부문이 가장 높은 반면, 서울시는 도로이동오염원이 3,009ton/year로서 약 70%를 점유하고, 비도로 이동오염원 21%, 비산업연소 부문 8.5 % 등의 순으로 높게 나타났다. 특히 도로이동오염원 부문은 1999년부터 자동차대수 증가에 편승하여 지속적으로 증가하고 있다.

표 1. 배출원별 PM10 발생량

(unit : ton/year)

	계	에너지 산업연소	비산업연소	제조업연소	도로이동 오염원	비도로 이동오염원	폐기물 처리
2005	4,310	14	367	3	3,009	913	4
2006	3,433	7	363	4	2,690	350	19

- 자료 : 국립환경과학원(2008). 대기오염물질 배출량 2006

대기질에 영향을 미치는 환경요소는 지리, 지형 등 자연적 요소와 인구밀도, 오염물질의 배출밀도 등 인위적 요소로 구분되는데, 서울시의 경우 인구밀도가 높고 남쪽과 북쪽에는 높은 산이 있고 동쪽은 비교적 높은 구릉으로 둘러싸인 분지형태이기 때문에 대기가 정체되기 쉽다.

서울지역은 강수량이 여름철에 집중되어 있고 겨울에 대륙성 고기압의 영향으로 매우 추운 날씨를 나타내는 등 스모그 잠재력(2차 오염물질 생성잠재력)이 타 도시에 비해 크다. 서울시 대기질이 타 도시보다 나쁜 이유는 오염물질의 배출밀도가 높은 것이 주된 원인이지만, 자연적으로 확산잠재력이 낮은 것도 대기질 악화에 크게 기여하고 있다. 이는 서울에서 청정지역으로 분류되는 북한산측정소의 2007년도 PM<sub>10</sub>농도가 46  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ('06년 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , '05년 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )인 것을 보더라도 외부적 요인과 서울의 지형적 요인에 의해 PM<sub>10</sub>이 높음을 알 수 있다.

### III. 연구범위 및 분석방법

PM<sub>10</sub>생성의 영향인자는 배출원에서 발생되는 먼지와, 대기화학반응의 전구물질인 가스상 물질 및 기상요소 등이라고 추정된다.

PM<sub>10</sub>의 배출원별 기여도는 수용모델링(PMF, CMB)에 의해 규명된 기여율을 기초할 때 2차 먼지가 가장 많은데, 2차 먼지의 전구물질인 가스상 물질이 중국 등 외국에서 유입되는 양이 많기 때문에 장거리 이동요소인 풍속과 풍향의 역할이 주목된다.

특히 풍속은 서울지역 연중 강수일이 적고, 연간 강수량의 2/3가 장마철에 집중되어 있으며 강설량이 감소되는 추세 등을 고려할 때 풍향보다 더 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

2005년부터 2007년까지 1,095일간의 대기질 실측자료를 통계프로그램(SPSS 13.0 for windows)을 이용하여 다중회귀분석(Multi Regression Analysis)한 결과, 온도와 풍속은 양의 상관관계, 강우와 상대습도는 음의 상관관계를 보였다. 이는 황사 발생일을 포함한 분석결과이며, 황사의 영향을 제외할 경우 결과가 달라질 것으로 추정된다.

PM<sub>10</sub>과 대기오염물질의 상관관계는 SO<sub>2</sub>가 0.417로서 가장 높고 다음은 NO<sub>2</sub> 0.369, CO 0.395 순으로 높으나 오존은 0.074로서 매우 낮게 나타났다( $Y = -76.876 + 1,873.119\text{SO}_2 + 1,117.14\text{O}_3 + 491.194\text{NO}_2 + 76.907\text{CO} + 0.289\text{Temp} + 13.04\text{Ws} - 0.024\text{Rain} - 0.318\text{Rh}$ ).

표 2. '05년-'07년 PM10과 변수의 상관관계

(황사일 포함)

	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	temp	Ws	Hum
Pearson Corr	0.417	0.074	0.369	0.395	0.092	0.059	0.051

한편, 대기오염물질을 제외하고 기상항목만을 회귀할 경우 기온과 풍속, 강우, 상대습도가 모두 음의 상관관계를 보였으며 풍속의 영향이 큰 것으로 나타났다.

$$Y = 87.259 - 0.646Temp - 12.662Ws - 0.613Rain - 0.031Rh$$

황사 발생일과 황사의 영향이 지속되었던 39일간을 제외한 1,056일간에 대하여 회귀 분석하면, 황사일을 포함한 분석결과보다 모든 항목에 있어 상관관계가 높은 것을 알 수 있다.

따라서 대기질과 PM<sub>10</sub>의 상관성을 파악하기 위해 황사발생일과 강우일, 기상요건별 범위구간을 정하여 분석하고, 풍속 및 강우량 등의 양적인 상관성과 시차에 의한 오염농도의 변화 등을 파악하기 위하여 Time Lag-Regression을 실시하는 것이 상관관계 분석에 유효할 것으로 판단되었다.

표 4. '05년-'07년 PM10과 상관관계(황사일 제외)

구분	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	temp	ws	rain	hum
Pearson Corr	0.659	0.122	0.598	0.64	-0.14	-0.22	-0.06	-0.07

기상요인 외에 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO 등의 농도가 높아짐에 따라 PM<sub>10</sub>이 동반 상승하는 다중공선성(multicollinearity)을 나타내었고, O<sub>3</sub>(오존)은 여름철에 자외선 및 온도와 다중공선성을 나타내었다.

풍속은 풍계(風系)의 지표면과 함께 고공(500m, 1,000m)의 풍향과 풍속, 기단의 이동경로와 대기 중 오염원의 유무 및 풍향(wind direction) 등을 고려하여야 한다.

풍속의 영향을 분석하기 위해 2005년부터 2007년까지 서울시 27개 대기측정소에서 측정된 대기오염도 자료와 기상청에서

관측한 서울시 기상자료를 이용하여 SPSS 13.0로 회귀분석을 실시하고 계절별 특성을 파악하였다. 황사가 발생한 날과 그 영향이 지속되어 PM<sub>10</sub>이 높았던 날은 제외하였다.

풍속은 강우와 상대습도 등 다른 기상항목과 상관성이 있고 SO<sub>2</sub> 등 가스상 오염물질과 함수관계가 있으므로, 전체적인 회귀결과를 분석하였으며, 풍향은 변수의 질적 특성을 더미변수로 변환하였다. 풍향의 PM<sub>10</sub> 기여도는 서북풍, 서서북풍, 남서풍, 남남서풍 등의 서풍계열은 1, 동풍계열은 0을 회귀식에 적용하였다.

대기오염항목별 측정값은 서울시 PM<sub>10</sub> 예보시스템에 입력되어 PM<sub>10</sub>예보 및 적중률 분석에 이용된 데이터를 우선 사용하고, 강우량과 풍속 등 기상자료는 기상청에서 측정된 값을 사용하였다. 또한 황사 및 기상 에피소드(episode)가 발생한 날은 시간별로 측정데이터를 확인하고 영향의 지속시간을 감안하여 발생일과 그 다음날까지 영향을 미친 경우 동일 영향군(影向群)으로 보고 제외하였다.

## IV. 연구결과

### 1. 풍속의 영향

서울시 기상자료와 대기오염측정 자료를 분석한 결과, 비황사일의 평균 풍속과 PM<sub>10</sub>의 변화추이는 계절과 상관없이 풍속이 강하면 PM<sub>10</sub>이 낮아지는 경향을 보였으며, PM<sub>10</sub>이 높게 유지되던 날도 풍속이 강해지면 PM<sub>10</sub>은 낮아졌다.

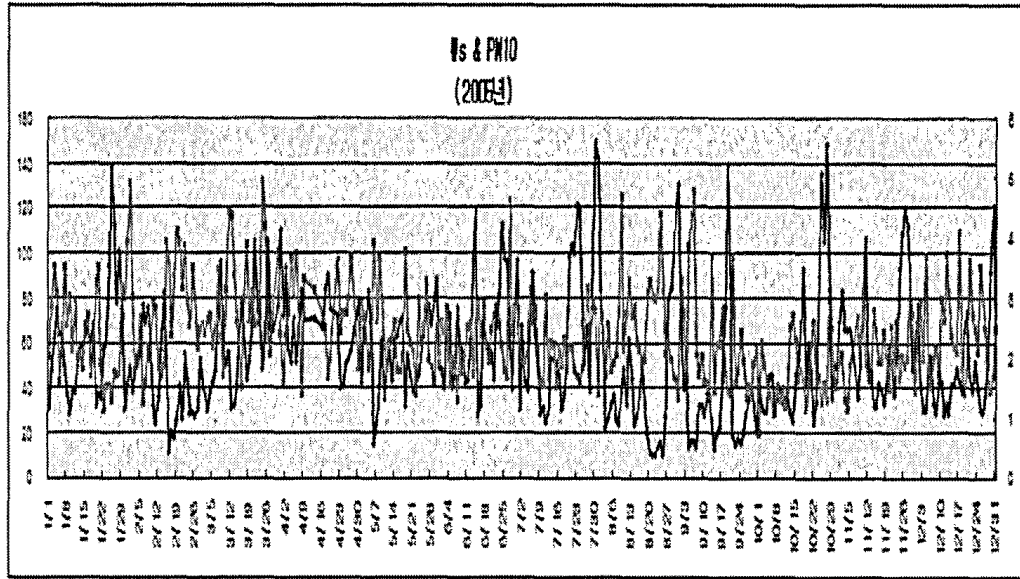


그림 1. 2005년 Ws & PM10.

2005년부터 2007년까지의 조사기간 동안 일평균 풍속은 황사발생일과 데이터가 손실된 날을 제외한 1,056일 중 일평균 풍속이 1m/s미만인 날은 1일, 평균풍속이 1~2m/s인 날은 362일, 2~3m/s인 날은 476일, 3~4m/s인 날은 172일, 4~5m/s인 날은 41일, 5m/s 이상인 날은 4일로서, 2~3m/s인 날이 가장 많고 3~4m/s인 날이 2번째로 많았으며, 서울시 평균풍속은 2.4m/s이었다.

표 5. 일평균 풍속

풍속(m/s)	<1	1~2	2~3	3~4	4~5	5<	계
일 수	1	362	476	172	41	4	1,056

풍속에 따른 PM<sub>10</sub>은 서울시 평균풍속과 가까운 2~3m/s범위에서 50µg/m<sup>3</sup> 이하인 날이 254일로 가장 많고 50~100µg/m<sup>3</sup>범위의 날은 194일이며, 100µg/m<sup>3</sup>을 초과하는 날은 28일이었다. 풍속이 강할수록 PM<sub>10</sub>은 낮고, 평균풍속 4m/s이상인 날 PM<sub>10</sub>이 100µg/m<sup>3</sup>을 넘는 날은 단 1일이었다.

대기질은 시정거리로서 쉽게 알 수 있고,

박무나 연무가 없으면 시정거리가 멀어진 다. 쾌감을 느낄 수 있는 PM<sub>10</sub>은 30µg/m<sup>3</sup> 이하라고 알려져 있다. 풍속에 따른 기상변수와 PM<sub>10</sub> 상관관계 및 분포도를 살펴보았다.

①②

일평균풍속이 1~2m/s일 때 PM<sub>10</sub>은 30µg/m<sup>3</sup>이하인 날이 33일, 31~50µg/m<sup>3</sup>인 날이 114일, 51~80µg/m<sup>3</sup>인 날이 118일, 81~100µg/m<sup>3</sup>인 날이 46일이었으며 100µg/m<sup>3</sup>를 초과하는 날은 51일이었다.

표 6. 풍속별 PM10

풍속(m/s) \ PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	<1	1~2	2~3	3~4	4~5	5<	total
≤30		33	95	51	16	2	197
30~50	1	114	159	44	11	1	330
50~80		118	154	62	11	1	346
80~100		46	40	9	2		97
100~150		50	28	6	1		85
150~200		1					1
total	1	362	476	172	41	4	1,056

PM<sub>10</sub>과 대기오염물질의 상관관계를 보면 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO는 상관성이 높고, 기상항목 중에서 온도, 풍속 및 강우량은 음의 상관

관계를 보였다. 계절적으로는 7~10월 사이에 낮은 농도일이 많고, 겨울철에는 고농도일이 많았다.

표 7. 풍속 1~2m/s일 때 PM10과 영향요소의 상관관계

	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	temp	ws	rain	hum
Pearson Corre	0.66	0.05	0.60	0.57	-0.18	-0.09	-0.13	-0.008

일평균풍속이 1~2m/s일 경우 PM<sub>10</sub>이 30 $\mu$ g/m<sup>3</sup>이하인 날은 여름철인 7~10월에만 나타났는데, 이처럼 낮은 풍속 하에서 낮은 농도를 유지하는 것은 강우에 의한 세정효과와 강한 바람에 의한 확산현상 때문이며, 특히 9월에 30 $\mu$ g/m<sup>3</sup>이하인 날이 가장 많은 이유는 큰 일교차에 의하여 생성된 이슬의 세정작용에 기인한다고 생각한다.

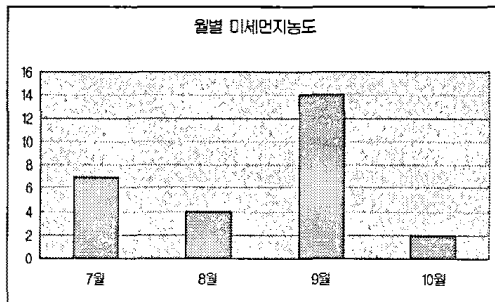


그림 2. 월별 PM10 30 $\mu$ g/m<sup>3</sup>이하 일 분포.

한편, 11~5월에 풍속이 2m/s이하일 경우 PM<sub>10</sub> 30 $\mu$ g/m<sup>3</sup>이하인 날이 없는 이유는 주로 서풍 계열의 영향으로 중국에서 유입되는 양이 많고, 강수에 의한 세정효과가 적고 도로에서 발생하는 비산먼지양이 많기 때문이다.

일평균풍속이 2~3m/s일 때 PM<sub>10</sub>이 30 $\mu$ g/m<sup>3</sup>이하로서 쾌청일은 95일이었다. 월별로는 8~9월이 많고, 2월에는 4일, 3월에는

3일이 있었으며, 4월에는 없었다. 이와 같이 겨울철과 초봄에 해당하는 2~4월에 쾌청일이 적은 이유는 난방연료사용에 의한 먼지와 강풍에 의한 토양기원의 먼지발생량이 많은 반면 강수량이 적고 대지에 나뭇잎이 없고 풀이 말라서 제거효과가 미미하기 때문이다. 또한 3, 4월에는 황사일이 많아서 쾌청일이 적어지고, 편서풍에 의하여 중국으로부터 다량의 PM<sub>10</sub>이 유입됨에 따라 강우에 의한 세정작용과 강한 풍속에 의한 확산작용도 약화된다.

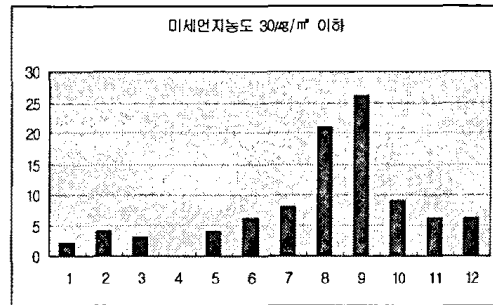


그림 3. 풍속 2~m/s일 때 월별 PM10 30 $\mu$ g/m<sup>3</sup> 이하·일

일평균 풍속이 3~4m/s인 날은 172일로 이 풍속 범위에서의 PM<sub>10</sub>별 일수를 보면 30 $\mu$ g/m<sup>3</sup> 이하가 51일, 30 $\mu$ g/m<sup>3</sup> 초과 50 $\mu$ g/m<sup>3</sup> 이하가 44일, 50 $\mu$ g/m<sup>3</sup> 초과 100 $\mu$ g/m<sup>3</sup> 이하가 71일, 101 $\mu$ g/m<sup>3</sup>을 넘는 경우는 6일로 나타났다. 평균풍속이 3m/s 넘는 경우 풍속이 낮은 날에 비하여 특이할만한 점을 보인다고 보기는 어려우나 100 $\mu$ g/m<sup>3</sup>을 초과하는 날이 상대적으로 적은 것으로 나타난다. 즉, 풍속이 2m/s 이하인 날은 PM<sub>10</sub>이 100 $\mu$ g/m<sup>3</sup>을 초과하는 날이 14%이며, 풍속이 3m/s 이하인 날은 PM<sub>10</sub>이 100 $\mu$ g/m<sup>3</sup>을 초과하는 날이 5.9%였으나, 풍속이 3m/s 이상인 경우는 PM<sub>10</sub>이 100 $\mu$ g/m<sup>3</sup>을 초과하는 날이 3.5%로 점차 낮아졌으며 풍속이 5m/s를 초과하는 경우 PM<sub>10</sub>이 100 $\mu$ g/m<sup>3</sup>을 초과하는 날이 없는바, 이는 풍속과 PM<sub>10</sub>사

이의 상관관계를 확연히 드러나게 하는 것으로 볼 수 있을 것이다.

일평균 풍속이 3m/s 초과, 4m/s인 날의 PM<sub>10</sub>이 30 $\mu$ g/m<sup>3</sup> 이하인 날의 월별 분포를 보면 여름철인 7월, 8월, 9월에 집중되고 모든 계절에 있어 나타남을 알 수 있다. 평균 풍속이 3m/s 이하인 경우 4월은 30 $\mu$ g/m<sup>3</sup> 이하인 날이 없었으나 3m/s를 초과하는 경우는 꽤 많은 날이 나타날 수 있으며, 유입되는 풍향이 북쪽으로 치우쳐 차가운 바람이 유입되는 2월에도 중국발 오염물질의 유입이 적어 많은 낮은 농도일이 나타나는 것으로 보인다.

한편, 일평균 풍속이 4m/s를 초과하는 날은 총 45일에 불과하며 일평균 PM<sub>10</sub>이 30 $\mu$ g/m<sup>3</sup> 이하인 날이 18일로 가장 많았으며 50 $\mu$ g/m<sup>3</sup> 이하인 날이 절반이 넘는 30일이었다. 이 때 81 $\mu$ g/m<sup>3</sup>을 넘는 날은 3일로서, '07년 5월 14일, 11월 18일과 12월 31일이었는데, 5월 14일은 박무가 심했던 날이며, 11월 18일은 서해에서 남쪽으로 흐르는 황사의 기류가 강한 바람에 의해 수도권으로 유입되었고, 12월 31일은 전일 발생된 황사영향이 일부 시간 동안 지속되었다.

이를 감안하면 평균풍속이 4m/s 이상으로 유지되는 경우 PM<sub>10</sub>은 계절적 요인이나 다른 기상여건 등을 고려하지 않더라도 80 $\mu$ g/m<sup>3</sup>을 넘지 않음을 알 수 있다.

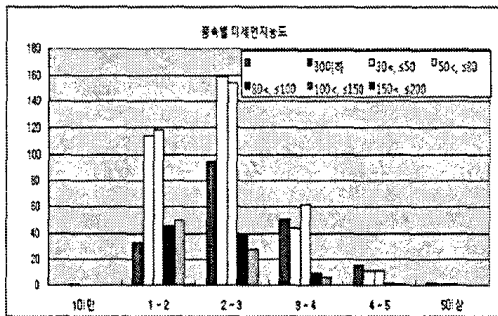


그림 4. 풍속별 PM10 분포.

2005~2007년의 일별 PM<sub>10</sub>과 풍속자료로서 산정한 피어슨상관계수는 2007년 -0.212, 2006년 -0.249, 2005년 -0.265

로 나타났다. 2007년은 강우일과의 상관관계가 매우 낮은데 이는 2007년 강우일이 2005년에 비해 32일 많아 강우에 의한 세정효과가 크고 풍속의 영향이 적기 때문이다.

표 8. 연도별 강우 및 비강우시 PM10 & WS

	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	temp	Ws	rain	hum
2005	rain-exclude(data-351)							
	0.592	0.129	0.551	0.467	0.103	-0.265		0.087
	rain-only(data-130)							
	0.511	0.121	0.475	0.506	0.025	-0.265	-0.154	-0.026
2006	rain-exclude(datar-354)							
	0.700	-0.05	0.668	0.641	-0.188	-0.249		-0.022
	rain-only(data-131)							
	0.699	-0.06	0.698	0.657	-0.278	-0.208	-0.263	-0.294
2007	rain-exclude(data-351)							
	0.728	0.029	0.642	0.698	-0.284	-0.212		-0.073
	rain-only(data-158)							
	0.707	0.154	0.599	0.675	-0.357	-0.066	-0.236	-0.274

계절별로는 겨울과 가을철에 강우가 없는 경우 풍속과의 상관관계가 높고, 7~9월에는 강우일 풍속과의 상관관계가 높았다. 겨울철에는 강우량이 적어 세정효과가 작고 미량 강우 시에는 고습도 및 대기 정체에 의해 PM<sub>10</sub>이 증가하고, 여름철 강우 시에는 강한 풍속의 영향으로 감소하였다.

PM<sub>10</sub>에 대한 배경농도가 설정되지 않아서 풍속과의 상관관계를 나타내기 어렵고, 풍속이 일관성 있게 PM<sub>10</sub>에 영향을 미치지 않지만 계절에 관계없이 풍속이 강하면 PM<sub>10</sub>이 낮아지는 경향을 보여 풍속이 PM<sub>10</sub>의 강력한 지배인자로 판단된다.

표 9. 계절별 Ws & PM10농도

period item	Yearly Mean	1분기 (1~3월)	2분기 (4~6월)	3분기 (7~9월)	4분기 (10~12월)
Total	-0.240	-0.314	-0.184	-0.314	-0.277
Rain-exclude	-0.250	-0.397	-0.160	-0.243	-0.329
Only-rain	-0.168	-0.161	-0.167	-0.336	-0.181

따라서 풍력이 2007년 서해상의 강한 황사와 같은 등 장거리 이동오염물질의 거동을 분석하는 데 있어 주요 변수일 것으로



여겨진다.

## 2. 풍향의 영향

풍속이 PM<sub>10</sub>에 계절별로 일정하게 영향을 미치지 않는 이유는 기단의 오염도가 다르기 때문이다. 일반적으로 황사는 서풍이 강할 때 가 발생하였고 동시에 PM<sub>10</sub>도 급격히 상승하였다. 서울지역에 유입되는 PM<sub>10</sub>은 기단의 오염정도보다는 풍속의 강약이 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

2005~2007년 서울지역 대기측정소에서 관측된 1,095일간의 주풍향은 서풍 297일,

남서서풍 210일 등 서쪽에서 기류가 유입된 날이 70% 이상인 768일로 가장 많았다. 반면에 오염도가 상대적으로 낮은 동풍, 북동풍 및 동동남풍은 259일이고, 북동풍과 북북동풍은 30일이었으며, 남풍, 동남풍 및 동남남풍은 38일로 적었다.

계절별로는 겨울철(11~2월)에는 360일 중 서풍은 95일, 서북풍, 남서서풍 및 남서풍은 148일 등 서풍계열이 76%인 273일이었으며, 동풍계열은 82일에 불과하였다. 봄철(3~5월)에는 276일 중 겨울철과 마찬가지로 서풍이 106일 등 서풍계열이 81%인 224일로서 주로 서해기류가 지배적으로 유입됨을 알 수 있다.

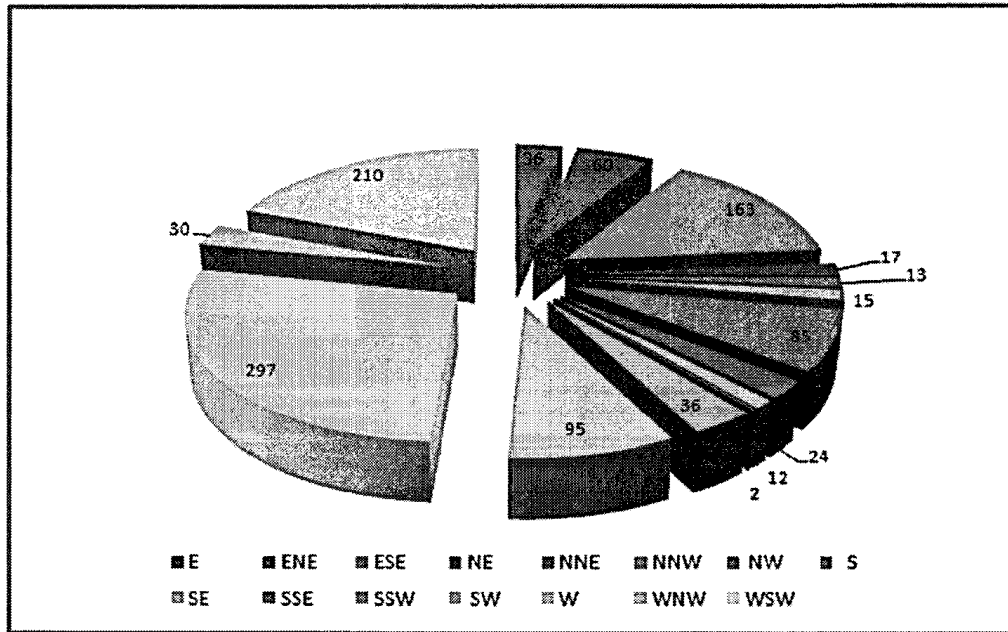


그림 5. 풍향별 PM10분포(2005년 ~ 2007년).

여름철(6~8월)에는 366일 중 남서서풍 68일, 동동남풍 55일이고, 서풍계열은 66%인 182일로서 겨울과 봄철에 비해 동풍과 남풍이 증가하였다. 가을철(9~10월)에는 동동남풍이 54일로 가장 많고 서풍계열은 48%인 89일이었으며 동풍계열은 50%인

91일이었다.

이상의 풍향에 대한 계절별 특성을 종합하면 겨울과 봄철에는 서풍이 지배적이고 여름과 가을철로 갈수록 동풍과 남풍이 증가함을 알 수 있다.

풍속을 연계하여 보면 봄철에 평균풍속이

가장 높고 가을철이 가장 낮음에도 PM<sub>10</sub>은 풍향에 의해 영향을 받는 것이 뚜렷하게 나타난다. 따라서 서풍이 지배적인 경우는 중국과 인천, 경기서부지역 등 서쪽에서 발생하는 PM<sub>10</sub> 등 대기오염물질의 유입에 의해 서울의 PM<sub>10</sub>이 높아지는 것을 알 수 있다. 앞에서 풍속과 PM<sub>10</sub>의 상관관계 분석시, 풍속이 높아지는 경우 PM<sub>10</sub>이 낮은 날이 많아졌으나 풍속과 PM<sub>10</sub>의 상관관계가 경험적 예측치보다 낮아진 이유를 풍향이 설명해 줄 수 있는 것으로 판단된다.

표 10. 서풍 빈도 & PM<sub>10</sub>(2005~2007년)

	winter	spring	summer	autumn
서풍 일(%)	273(76)	224(81)	182(66)	89(48)
평균풍속(m/s)	2.31	2.76	2.34	2.13
PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	62.7	75.7	49.7	43.9

다음으로 풍향별 PM<sub>10</sub>의 변화를 세부적으로 보면, 일평균 PM<sub>10</sub>이 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상인 119일의 경우 주풍향이 서풍인 경우가 46일, 서남서풍인 경우가 26일로 가장 많았으며, 동풍인 경우는 2일이었는데 '05. 10. 26일의 경우 전 24일부터 27일까지 풍속이 낮고(0.64~0.77m/s) 박무가 지속되어 PM<sub>10</sub>이 높게 유지되던 중 27일 강우가 있는 후에 낮아졌으며, '06. 1. 28일의 경우도 역시 전 26일부터 풍속이 낮고(0.8~1.3m/s) 박무가 지속되어 PM<sub>10</sub>이 높아졌으며 강우가 조금 있는 후 점차 낮아졌다.

즉, 서풍이 유입되지 않는 경우 PM<sub>10</sub>이 높아지는 경우는 풍속이 낮고 박무가 형성되는 경우로 추정해 볼 수 있고, 서풍 또는 서남서풍이 유입되는 경우 PM<sub>10</sub>은 높아질 수 있음을 알 수 있다.

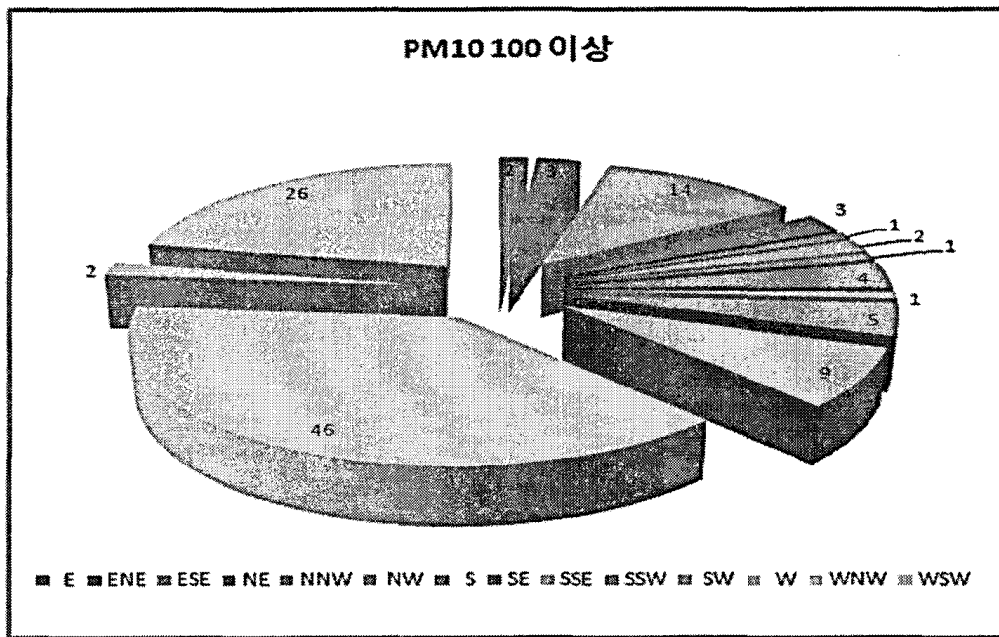


그림 6. PM<sub>10</sub> 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상 일의 주풍향.

계절별 특성을 보면 겨울철의 경우 PM<sub>10</sub>이 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상인 날이 81일이었는데, 이 중 서풍인 날이 28일, 서풍 계열인 날은 총

60일로 74%였으며, 동풍 계열인 경우는 총 21일이었고 남풍 또는 북풍은 없었다. 한편, 일평균 PM<sub>10</sub>이 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  미만인 날은

총 145일로서 북서풍이 139일로 가장 많았고 서풍이 37일이었으며, 동풍 또는 남풍

계열인 날이 24일이었다.

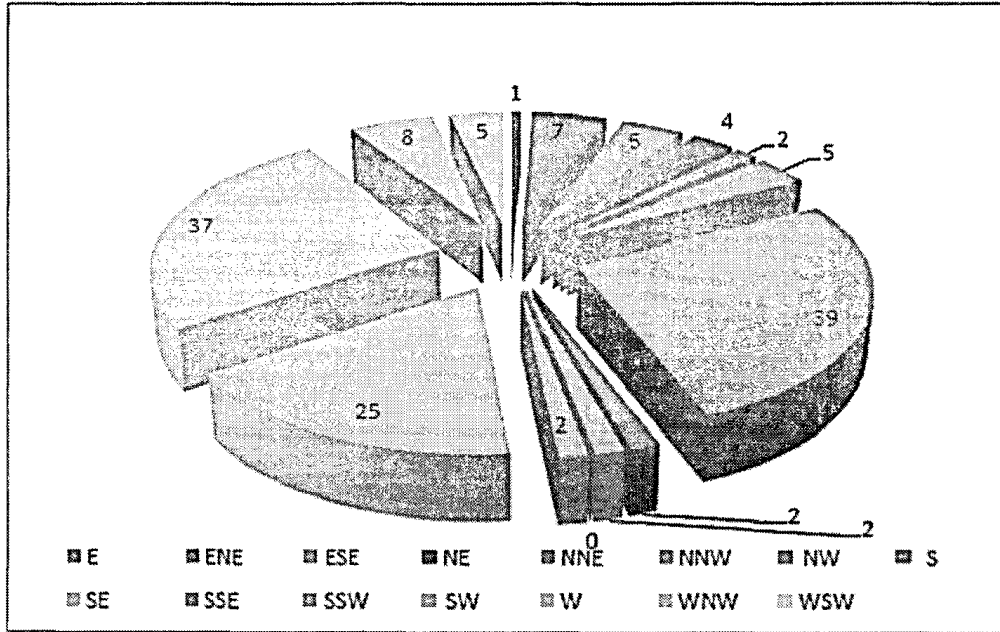


그림 7. 겨울철 PM10 50µg/m³이하 일의 주풍향.

봄철의 경우에는 일평균 PM<sub>10</sub>이 80µg/m<sup>3</sup> 이상인 날이 총 82일로서 겨울철과 마찬가지로 서풍인 날이 37일로 가장 많았으며, 서풍 계열의 총 일수는 70일로 85%에 달하였으며, 동풍 계열인 날은 총 11일인 13%에 불과했다.

일평균 PM<sub>10</sub>이 50µg/m<sup>3</sup> 미만인 날은 77일로서 주풍향이 서풍인 날이 25일로 역시 많았으나 겨울철에 비해 줄어들고, 동풍 계열인 날이 20일인 26%로서 PM<sub>10</sub>이 80µg/m<sup>3</sup> 이상인 경우에 비하여 2배 가량 증가하였다.

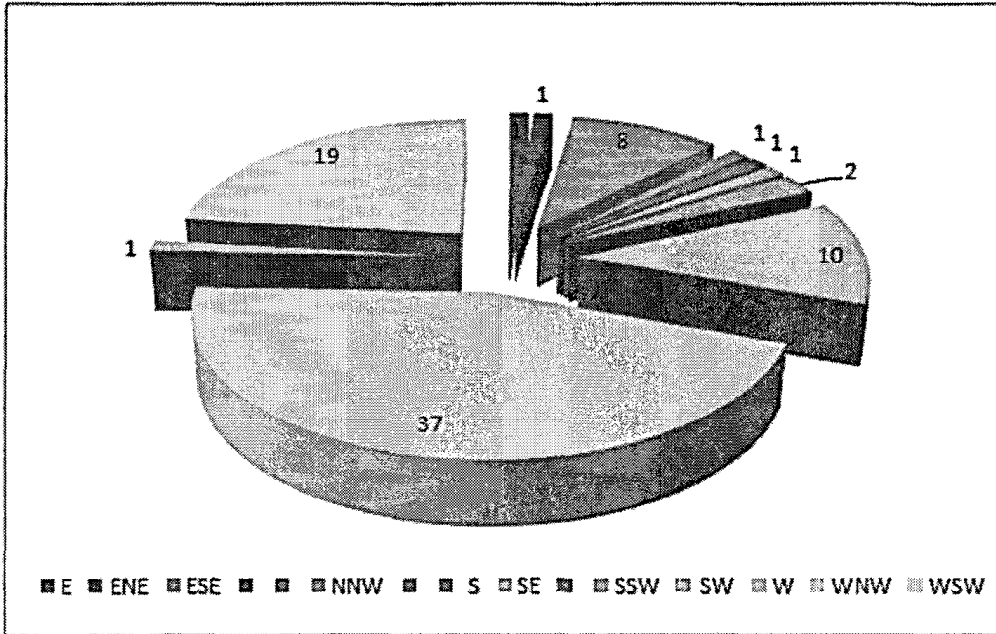


그림 8. 봄철 PM10 80µg/m³이상 일의 주풍향.

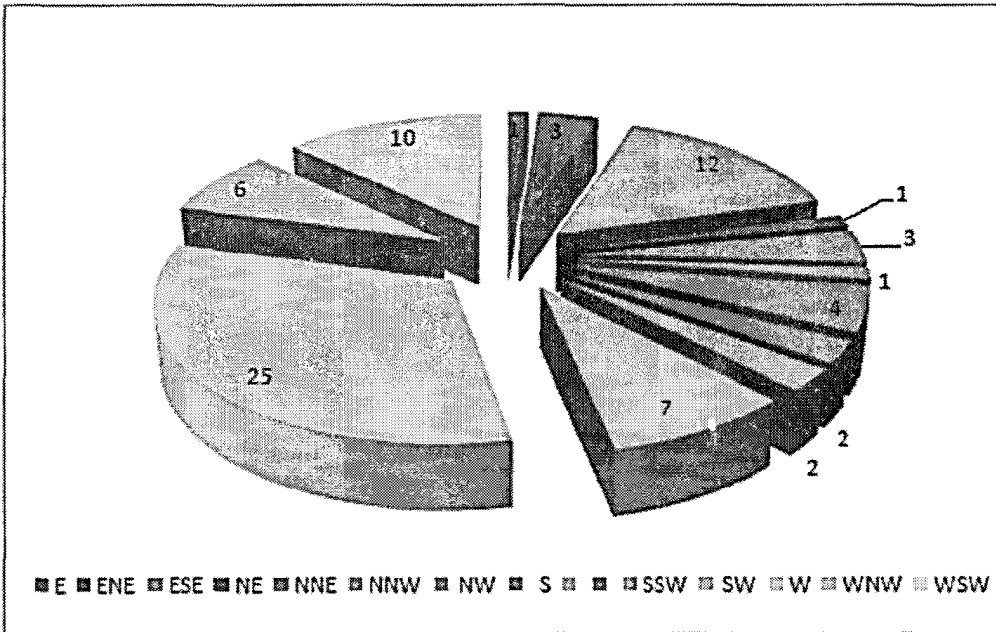


그림 9. 봄철 PM10 50µg/m³이하 일의 주풍향.

여름철에는 PM<sub>10</sub>이 80µg/m<sup>3</sup> 이상인 날이 37일, 50µg/m<sup>3</sup> 미만인 날이 161일로 대체로 낮은 오염도를 유지하였으며 PM<sub>10</sub>이 80 µg/m<sup>3</sup> 이상으로 높은 날은 동풍의 영향이 거의 없고 대체로 서풍 또는 남서풍이 유입

되었으며, PM<sub>10</sub>이 50µg/m<sup>3</sup> 미만으로 낮았던 날은 동남동풍이 41일로 가장 많았다.

여름철에 PM<sub>10</sub>이 낮은 이유는 강우에 의한 영향도 많이 있을 것으로 추정되는데, PM<sub>10</sub>이 50µg/m<sup>3</sup> 미만으로 낮았던 날 중에

서풍과 서남서풍, 남서풍, 남남서풍이 있었던 총 88일 중 53일은 강우가 있었다.

가을철에도 여름과 비슷한 양상을 보이는데 PM<sub>10</sub>이 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상인 경우는 총 20일로서 서풍 계열인 날이 13일, 동풍 계열이었던 날이 7일이었으며, PM<sub>10</sub>이 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

미만인 날은 총 135일로서 서풍 계열인 날이 56일, 동풍 계열이었던 날이 77일이었고 남풍이 2일이었다. 이와 같이 볼 때 서풍이 유입되는 경우 PM<sub>10</sub>은 높아지는 것을 알 수 있고 동풍이 부는 경우에는 반대의 영향이 나타나는 것을 볼 수 있다.

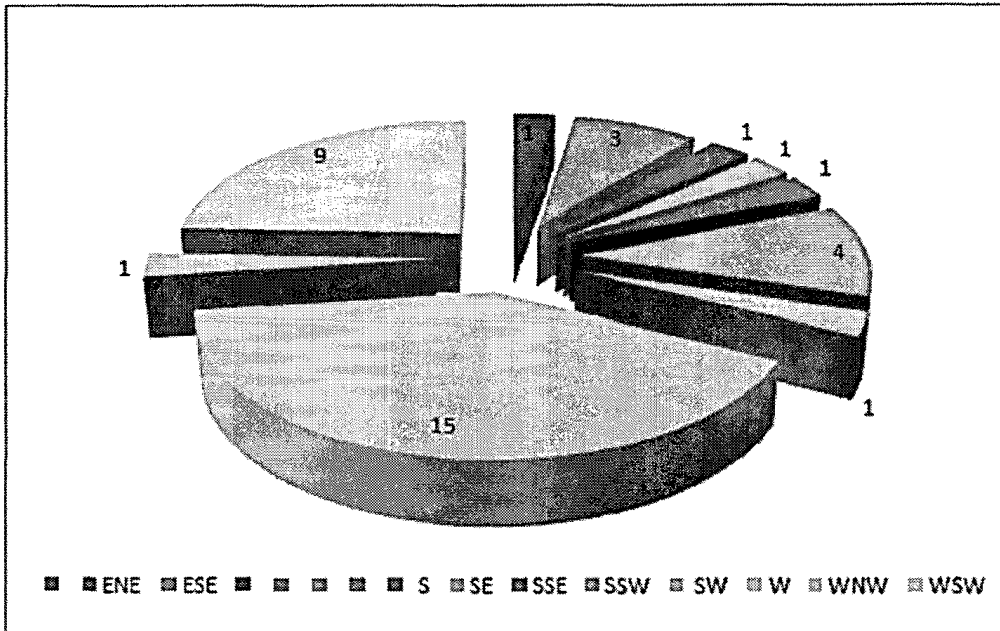


그림10 여름철 PM<sub>10</sub> 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상 일의 주풍향.

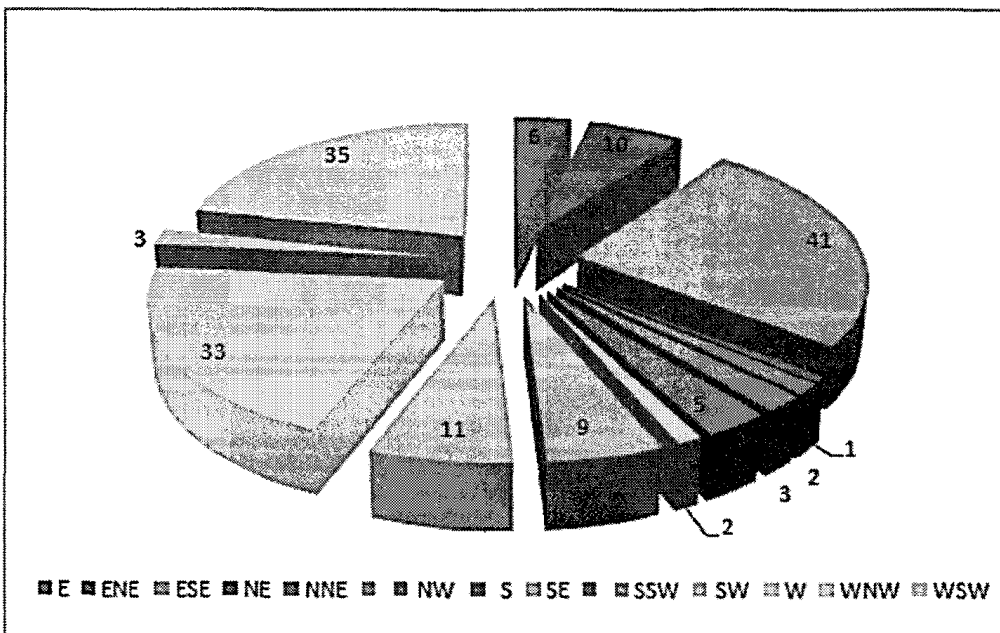


그림 11. 여름철 PM<sub>10</sub> 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하일의 주풍향.

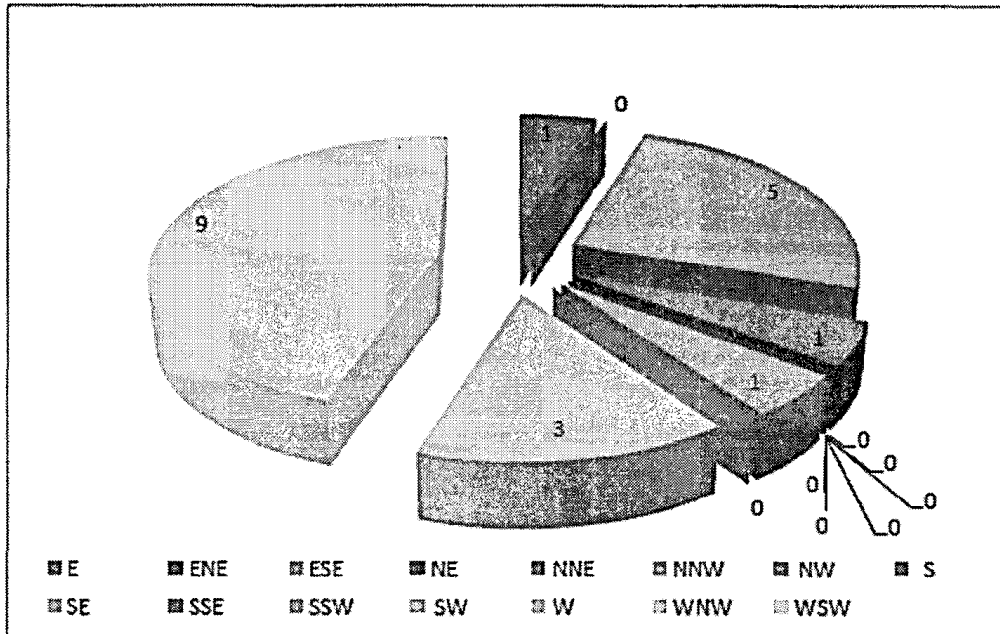


그림 12. 가을철 PM10 80µg/m³이상일의 주풍향.

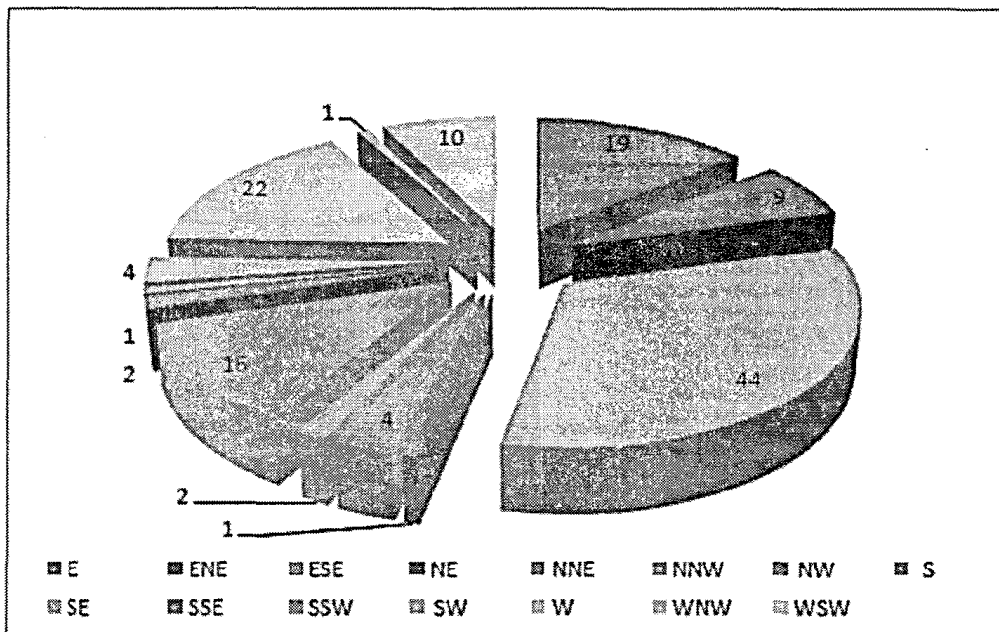


그림 13. 가을철 PM10 50µg/m³이하일의 주풍향.

이와 같이 PM<sub>10</sub>이 높았던 날은 서풍 계열의 영향이 크게 작용하고, 동풍의 영향이 많아질수록 PM<sub>10</sub>이 낮아질 수 있음을 알 수 있는데, 이는 동풍의 경우 낮은 오염도의 기류가 유입되는 경우의 영향으로 파악되는바 서울지역의 PM<sub>10</sub>은 외부의 조건, 풍향에 의해 많은 영향을 받고 있음을 반증하

는 것이라 볼 수 있겠다.

풍향과 PM<sub>10</sub>의 함수관계를 알아보기 위하여 풍향별 더미변수를 이용하여 회귀분석을 실시하였다. 동풍과 남풍, 동북동풍, 동남동풍, 북동풍 등 동쪽에서 유입되는 풍향 계열은 더미변수를 '0'으로, 서풍과 북서풍, 남서풍 등 서쪽 풍향 계열은 '1'로 부여하

여 풍속을 포함한 회귀분석을 실시하였다. 분석방법은 Microsoft Excell 2007을 이용하였으며 풍속과 풍향은 황사가 발생한 날을 포함하였고 유의수준은 5%로 하였다.

2005년부터 2007년까지 전체 데이터를 이용한 회귀분석결과 풍속(X1)은 PM<sub>10</sub>과 부(-)의 상관관계를 나타냈고, 서풍 계열(X2)인 경우는 정(+)의 상관관계를 보였는데 서풍의 회귀계수는 아래와 같이 비교적 크게 나타났다. 전체적으로 풍속은 PM<sub>10</sub>을 낮추는 영향이 있으며 서풍 계열이 유입되는 경우는 풍속이 낮추는 PM<sub>10</sub>의 2배수 가량을 높이는 것으로 추정 가능하다는 것을 알 수 있으며, 변수별 표준오차는 ±3μg/m<sup>3</sup> 정도로 나타났다.

표 11. 풍향, 풍속의 PM<sub>10</sub> 회귀분석(2005~ 2007년)

		St Error	t 통계량	P-value
constant	59.68	4.217	14.15	7E-42
X 1	-8.464	2.983	-2.838	0.005
X 2	15.38	2.828	5.438	7E-08

계절별 상관관계를 보면 모든 계절에 있어 풍속(X1)은 PM<sub>10</sub>과 부(-)의 상관관계를, 서풍 계열(X2)인 경우 정(+)의 상관관계를 나타냈는데, 봄철에는 풍속의 회귀계수가 가장 적게 나타나 풍속이 높을 경우라도 황사 등 서쪽에서 유입되는 오염물질에 의해 PM<sub>10</sub>을 저감시키는 효과가 반감되는 것으로 추정되었다.

반면에 여름철과 가을철에는 동풍 계열의 영향이 커 풍속의 회귀계수가 크게 나타나 풍속에 의한 PM<sub>10</sub>저감효과가 큰 것으로 추정되며, 서풍 계열의 회귀계수도 크게 나타나 서풍에 의한 PM<sub>10</sub>증가효과도 큰 것으로 이해되었다. 즉 겨울철보다 봄철부터 가을철까지 서풍에 의해 PM<sub>10</sub>이 높아지는 영향이 상대적으로 크다는 의미로 볼 수 있다.

표 12. 겨울철 풍향, 풍속의 PM<sub>10</sub>회귀분석 (2005~2007)

	계수	표준 오차	t 통계량	P-value
Constant	87.13	4.785	18.21	7.08E-53
X 1	-20.35	3.513	-5.79	1.52E-08
X 2	1.2377	3.791	0.326	0.744261

표 13. 봄철 풍향, 풍속의 PM<sub>10</sub> 회귀분석 (2005~2007)

	계수	표준 오차	t 통계량	P-value
Constant	69.105	15.005	4.6055	6.32E-06
X 1	-0.9375	9.0035	-0.105	0.917178
X 2	9.9085	10.215	0.975	0.332827

표 14. 여름철 풍향, 풍속의 PM<sub>10</sub> 회귀분석 (2005~2007)

	계수	표준 오차	t 통계량	P-value
Constant	65.207	6.99	9.328	3.85E-18
X 1	-21.21	5.06	-4.19	3.73E-05
X 2	15.88	3.36	4.720	3.77E-06

표 15. 가을철 풍향, 풍속의 PM<sub>10</sub> 회귀분석 (2005 ~ 2007)

	계수	표준 오차	t 통계량	P-값
Constant	68.91173	6.282	10.969	9.15E-22
X 1	-29.0527	5.035	-5.769	3.41E-08
X 2	14.76194	3.668	4.024	8.42E-05

이와 같이 풍향은 PM<sub>10</sub>에 미치는 영향이 일관되게 나타나고 있으나 대류층의 높이에 따른 유동방향이나 기류 층고별 정량적 파악이 어려운 관계로 정략적 변동범위를 규명하기 어려운 점이 있다. 그러나 다른 변수에 비해 영향의 방향(+ or -)이 비교적 일정하게 나타나므로 PM<sub>10</sub>의 변화를 추정 시 활용변수로서 가치가 크다고 볼 수 있겠다.

## V. 결론

PM<sub>10</sub>은 통상적으로 풍속이 높아지는 경우 낮아지는 부(-)의 관계가 일반적으로 보이나, 오염도가 높은 서풍 계열이 주 풍향으로 작용하는 경우 높아지는 현상을 나타낼 수 있다. 육안으로 관찰이 가능하듯이 황사 등 고농도의 기단이 유입되는 경우 당연히 PM<sub>10</sub>은 높아지고 있으나, 2차 생성물질의 유입도와 그 변동은 유추하기가 용이하지 않은 것이 현실이다.

풍속과 풍향 외에 대기오염도와 기상항목, 대기여건에 의한 2차 생성 PM<sub>10</sub> 등의 비정형적 요인 등과 같이 현재까지 입증하지 못한 다수의 영향요인이 작용되는 것으로 여겨진다. 최근의 Eulerian 모형과 Gradient 기법에 의한 활발한 연구에도 불구하고 2차 생성물질의 메커니즘 규명은 미숙한 부분이며, 도로재비산먼지의 규명과 오염배출원별 특성 및 기여도 규명은 많은 연구를 필요로 한다.

그러나 다양한 변수가 상호작용하고 공변성이 작용되는 부분도 일정하지 않아 PM<sub>10</sub>의 확실적인 변화체계를 도출해 내기는 어려우며, 다만 계절별 풍속과 풍향은 PM<sub>10</sub>에 유사한 영향특성을 보이는 것으로 나타난다. 그러나 통상적으로 경험에 의해 인지되어 있는 내용과 PM<sub>10</sub>에 영향을 미치는 변수(Variable)로서 풍향(Wind Direction)을 제외한 각각의 인자들은 다른 양상을 보이는 경우도 있었다.

이는 기후변화에 의해 기상요인들의 PM<sub>10</sub>에 대한 작용기작의 변동과 3년간의 비교적 짧은 기간의 실측자료에 의한 이유도 있을 것으로 판단되며, 앞으로 이에 대한 연구가 조금 더 세밀하게 진행되고 더 많은 자료가 축적되면 보다 나은 연구결과가 있을 것으로 기대된다.

PM<sub>10</sub>을 관리에 있어서 PM<sub>10</sub>을 예측할 때

대기오염물질 배출량을 토대로 모델링할 경우 오차가 많으므로, 과거 실측자료에 대해 배출량 증감이나 반응과정 등을 조정하여 오차를 최소화하여야 한다. 또 조정된 모델링 상태를 이용하여 장래의 오염도 예측을 실시하고 있으나, 과거와 마찬가지로 지속적인 오차를 보이는 이유로 배출량의 부정확도를 들고 있다.

이러한 예측오차는 전체적으로 기상의 변화에서만 기인되는 것인지, 오염물질 배출량의 불확실성에 기인하는 것인지는 현재에도 논란이 있으며, 수도권 PM<sub>10</sub> 저감정책이 일관성 있는 정책효과를 보이지 못하는 이유도 2차 입자의 생성과 동아시아의 오염물질 배출량, 수도권의 지역적 배출량의 정확도를 파악하지 못한 이유에 기인하는 것으로 추정되는 만큼, 오염물질 배출량의 산정은 연구의 선제적 요건으로 판단할 수 있다.

현재까지 배출원(Emission Source)과 배출면적, 배출계수와 활동도 등에 의해 오염물질의 배출량을 산정하는 방법에서 국내의 자료는 미비하여 배출량 산정의 정확도가 떨어지는 것으로 평가되고 있다. 국내 자료 중 도로나 점오염원의 현황은 비교적 파악하고 있으나, 비산먼지의 배출원의 규모와 이동오염원 등의 활동도에 대한 배출량을 산정할 수 있는 기초적인 자료가 미비되어 있으며, 배출계수 또한 EPA(Environmental Protection Agency)의 자료를 활용하는 부분이 많다.

따라서 대기오염도 저감을 위한 정책이나 PM<sub>10</sub> 예보의 정확도를 높이는 데 있어 배출량의 산정의 정확도를 높이는 것이 관련 연구에 필요한 과제로 볼 수 있으며, 배출량 산정의 정확도를 높이는 조사방법으로 시차적 오차를 최소화 할 수 있도록 전체 지역에 대한 동시 조사방법을 상정해 볼 수 있을 것이다. 또한 배출원별 기여도 규명을 위해서는 확산모델과 수용모델 등 다양한 방법에 의한 동시 연구가 현상에 대한 분석



오차를 줄일 수 있는 방법으로 판단된다.

대기오염도를 줄이는 목적은 사람들의 건강상 피해를 줄이고 쾌적한 생활환경을 조성하기 위한 것이므로 오염물질의 확산과 거동에 대한 분석의 정확도가 높아지면 배출원에 대한 통제와 더불어 불가피한 배출물질에 대하여 주변에 영향을 최소화하도록 하는 등의 차선 방안이 연구될 수도 있을 것이다.

### 참고문헌

1. 국립환경과학원, 수도권지역 미세먼지 오염현상 해석 및 장래 예측(최종보고서), (2007).
2. 국립환경과학원, 환경오염질환 모니터링을 통한 위해성 관리방안 구축, (2005).
3. 김나경, 김용표, (2006), 배경지역에서의 국지오염원의 영향 : 2000년 3월 고산측정결과, 한국대기환경학회지, 22(6) : 821~830.
4. 김용표, (2006), 서울의 미세먼지에 의한 대기오염, 한국대기환경학회지, 22(5) : 535~553.
5. 김운수, 서울시 미세먼지 배출량 현황 및 저감방안, 서울시정개발연구원, (2004).
6. 배귀남, 이진욱, 신동천, 극미세입자 평가관리기반구축, 국립환경과학원, (2006).
7. 송철한, 광화학모델링을 이용한 미세먼지 오염예측, 국립환경과학원, (2008).
8. 서울시, 2006년 서울의 대기질 평가보고서, 서울시 환경국, (2007).
9. 신동천, 대기오염으로 인한 건강 영향, 한국대기환경학회, 서울시 대기질 개선을 위한 기획심포지움(Session A), (2006).
10. 신문기외 3, (2007), 기상인자가 미세먼지농도에 미치는 영향, 한국대기환경학회지, 23(3) : 322~331.
11. 이종태, 미세먼지의 건강유해성 및 통계적 연구 분석 방법, (2007).
12. 이학성의 3, (2004), 미세입자(PM<sub>2.5</sub>)의 배출원 구성물질 성분비 개발에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 20(3) : 317~330.
13. 임종한, 대기오염으로 인한 질병부담과 취약그룹의 건강피해, (2007).
14. 하은희, 산모와 영유아의 환경적 요인과 건강영향, 모자환경보호센터, (2007).
15. 허종배외 3, 서울시 대기중 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 오염원 기여도와 사망과의 연관성 분석, 서울대학교 보건대학원, (2008).
16. 허종배외 2, Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in seoul, korea, 서울대학교 보건대학원, (2008).
17. 황인조, 김동술, (2003), PMF 모델을 이용한 대기 중 PM<sub>10</sub> 오염원의 확인, 한국대기환경학회지, 19(6) : 701~717.
18. 황인조, 김동술, (2003), PMF 모델을 이용한 대기 중 PM<sub>10</sub> 오염원의 정량적 기여도 추정, 한국대기환경학회지, 19(6) : 719~731.
19. Andra's Gelencse.al, (2007), Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> organic aerosol over Europe : Primary/secondary, natural/anthropogenic, and fossil/biogenic origin, Journal Of Geophysical Research, Vol. 112, D23S04.
20. Erika K Wise.al, (2004), Air Quality and Climate Variability in the Southwestern United state, Air Quality Forum Tucson, AZ.
21. Gary W. Fuller, David Green, (2006), Evidence for increasing concentrations of primary PM<sub>10</sub> in London 「Atmospheric Environment」 40(2006) : 6134~145.
22. John R. Stedman, Emma Linehan, (2000), Beth Conlan, Receptor modelling of PM<sub>10</sub> concentrations at a United Kingdom national network monitoring site in central London, Atmospheric Environment, 35(2001), 297~304.
23. Judith C. Chow, John G. Watson, (2001), Review of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> Apportionment

- for Fossil Fuel Combustion and Other Sources by the Chemical Mass Balance Receptor Model. *Energy & Fuels*, 2002(16) : 222~260.
24. Kostas Tsigaridis et al., (2007), Secondary organic aerosol importance in the future atmosphere. *Atmospheric Environment*(41), 4682~4692.
25. Michael J. Kleeman, (2007), Source apportionment of secondary organic aerosol during a severe photochemical smog episode.
26. Michael Lewandowski, (2007), Primary and Secondary Contributions to Ambient PM in the Midwestern United States.
27. Tadeusz E. Kleindienst et al., (2007), Estimates of the contributions of biogenic and anthropogenic hydrocarbons to secondary organic aerosol at a southeastern US location, *Atmospheric Environment*, 41(2007) : 8288~8300.