

## 부산 지역 미세먼지 농도의 시간변동 특성 및 기상인자 분석을 통한 먼지생성 해석

김 지 아 · 진 형 아 · 김 철 희  
부산대학교 지구환경시스템학부 대기환경과학전공, \*환경부 낙동강유역환경청 대기분석과  
(2007년 3월 26일 접수; 2007년 9월 7일 채택)

### Characteristics of Time Variations of PM<sub>10</sub> Concentrations in Busan and Interpreting Its Generation Mechanism Using Meteorological Variables

Ji-A Kim, Hyung-Ah Jin\* and Cheol-Hee Kim

*Division of Earth Environmental System, Atmospheric Science Major, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*  
*\*Nakdong River Basin Environmental Office, Changwon 642-722, Korea*  
(Manuscript received 26 March, 2007; accepted 7 September, 2007)

In an effort to interpret the characteristics of fine particle concentrations in Busan, time variations of hourly monitored concentrations PM<sub>10</sub> (Particulate Matter with aerodynamic Diameter  $\leq 10 \mu\text{m}$ ) in Busan are analyzed for the period from 2000 to 2005. The characteristics of aerosol second generation formation process is also interpreted qualitatively, by using the statistical analysis of the meteorological variables including temperature, wind speed, and relative humidity.

The result shows some significant annual, seasonal, weekly and diurnal variations of PM<sub>10</sub> concentrations. In particular, seasonal(i.e., spring) variations are governed by frequency of yellow sand events even for the non-yellow sand cases where yellow-sand days are eliminated in our analysis. However, in seasonal variation, summer season predominate lower PM<sub>10</sub> concentrations due to the frequent precipitation, and weekly and diurnal variations are both found to be reflecting the emission rate from traffic amount.

Correlation coefficients between PM<sub>10</sub> concentration and meteorological variables for non-yellow sand days show overall negative correlation with visibility, wind speed, cloud amounts, and relative humidity. However for non-precipitation days, during non-yellow sand period positive correlation are found clearly with relative humidity, suggesting the importance of secondary aerosol formation in Busan that can be achieved by both homogeneous aerosol formation and heterogeneous transformations resulting from hygroscopic aerosol characteristics.

Key Words : PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, Secondary aerosol formation, Relative humidity

#### 1. 서 론

입자상 오염 물질은 먼지, 스모그, 안개 등을 포함한 고체와 액체상으로 구성되며, 가벼운 것은 대기 중에 부유하고 무거운 것은 지면으로 침적된다. 입자상 물질, 즉 에어로졸은 태양 복사를 흡수 또는 산란시키거나 구름 형성 과정에 작용하여<sup>1~4)</sup> 지구

대기의 복사 강제력에 직·간접적으로 작용하는 아주 중요한 역할을 한다. 또 대도시의 오염물질인 미세먼지(PM<sub>10</sub>: Particulate Matter with aerodynamic Diameter  $\leq 10 \mu\text{m}$ )를 구성하여 시정 악화, 인간의 호흡기 질환 유발, 식물의 광합성 작용 억제 등 부정적인 영향을 가중시키게 된다<sup>5~7)</sup>.

최근 수도권을 비롯한 도시에서의 인구집중과 운행 차량의 증가 등으로 대기 중 먼지 농도는 계속 증가하고 있으며, 이미 수도권 먼지 농도 감소 대책이 대기오염 문제 해결에 있어 주요 현안이 되어 그

Corresponding Author : Cheol-Hee Kim, Division of Earth Environmental System, Busan 609-735, Korea  
Phone: +82-51-510-3687  
E-mail: chkim2@pusan.ac.kr

에 대한 연구가 매우 활발하다. 특히 PM<sub>10</sub>은 발생원에서 직접 방출한 1차 오염물질(primary air pollutant)이며, 동시에 가스상 물질이 대기 중에서 물리·화학적 반응을 통하여 먼지 입자로 생성, 변환된 2차 오염물질(secondary air pollutant)이기도 하여 그 특성을 연구하는 데 어려움이 많다.

외국의 인체 위해성 연구에 대한 세계보건기구에서 발표한 바에 따르면 PM<sub>10</sub>을 포함한 대기 중의 먼지 증가로 인해 유럽인 수명이 평균 8.6개월 줄어 들고 있는데 독일은 평균 10.2개월 감소, 이탈리아는 평균 9개월 감소하여 가장 심각하게 타격을 받고 있으며 네덜란드와 벨기에도 높은 인구밀도와 지리적 특성 때문에 PM<sub>10</sub>을 포함한 먼지가 인체에 미칠 위험이 높다고 하였다.<sup>8)</sup> 미국의 경우 PM<sub>10</sub> 농도가 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  씩 증가할 때마다 외인사(unnatural death)를 제외한 총 사망률이 0.3%씩 증가한다고 보도된 최근 연구 사례 결과<sup>9,10)</sup>와 여러 가지 건강상의 이유로 환경보호청(EPA)에서 NAAQS(National Ambient Air Quality Standards)의 총부유분진(TSP, Total Suspended Particle)을 규제하기 위한 기준을 제정하였고, 1987년 TSP에서 PM<sub>10</sub>으로 그 기준을 변경하였다<sup>11)</sup>. 이에 따라 오염원 별 PM<sub>10</sub> 배출량, 실내 및 실외 공중의 PM<sub>10</sub>의 오염도에 대한 자료를 체계적이고 지속적으로 확장하고 있다<sup>12~14)</sup>.

국내의 경우 비황사시보다 황사시에 PM<sub>10</sub> 농도가 급격히 증가하여 기관지염, 안질환 등 많은 건강상의 문제를 일으키는 것으로 알려져 있다<sup>15~18)</sup>. 직경 10  $\mu\text{m}$ 보다 작은 입자가 더욱 유해한 것으로 알려짐에 따라 우리나라에서도 1995년 1월 대기환경기준을 TSP에서 PM<sub>10</sub>으로 변경하였다. 수도권에서는 PM<sub>10</sub> 농도가 증가함에 따라 2003년 말 수도권 대기질 특별법을 만들어 PM<sub>10</sub> 농도를 규제하려는 정부 차원의 노력이 진행 중에 있고 대구<sup>19)</sup>, 포항<sup>20)</sup> 등 각 지역별 PM<sub>10</sub> 현황 및 규제를 위한 연구가 활발하다. 반면 부산의 경우는 PM<sub>10</sub>에 대한 현황 파악이나 분석적 연구가 아직 미흡한 실정이므로 부산지역의 먼지 농도의 물리적 및 화학적 분석 및 연구가 아쉬운 상황이다.

입자상 오염물질을 포함한 모든 대기오염물질의 측정 농도를 분석하는 방법으로 물리·화학적 실험 및 분석 등을 포함하여 여러 방법이 있을 수 있으나 기본적인 방법 중 하나로 기상 조건과의 연관성을 살펴보는 연구를 들 수 있다. 모든 대기 오염물질은 배출량뿐만 아니라 기상학적인 조건에도 항상 영향을 받기 때문에 여러 기상 변수들과 대기오염 농도 간의 상관성 연구가 지금까지 다양하게 진행되어 왔다. 예를 들어 우리가 피부로 느끼는 단기 농도 변화경향은 장기 및 계절적 변화와는 달리 하루 주

기의 해륙풍, 산곡풍과 같은 국지 순환과 연관 있어 이에 대한 연구가 있었으며<sup>21)</sup>, 대기오염도와 기온과의 상관성<sup>22,23)</sup>, 오존 농도와 지형(topography)과의 민감도<sup>24)</sup> 등 2차 오염물질과의 상관성에 대한 연구도 있었다. 그 결과 도시 지역의 대기 오염 농도를 지배하는 기상 요소는 풍속, 강수량, 기온, 대기안정도 등으로 요약되어 왔으며<sup>11,25~28)</sup>, 이러한 연구 결과들은 특정 지역의 오염 특성을 해석하는 데 매우 중요한 정보를 제공하여 왔다.

본 연구는 부산 지역의 PM<sub>10</sub> 농도 특성을 살펴보기 위한 기초 조사 연구로 2000년에서 2005년까지 6년간 측정된 PM<sub>10</sub> 농도 자료의 추이 및 변동 경향을 조사하였고 아울러 부산지역에서 측정된 PM<sub>10</sub> 농도가 국지 기상 변수인 기온, 풍속, 기압, 시정, 구름, 상대습도와와의 관계를 다양하게 살펴보았다. 나아가 부산지역의 PM<sub>10</sub> 농도를 광화학 반응과 연관되는 2차 에어로졸 생성으로 해석되는 특성을 기술하였다. 이러한 시도는 부산지역의 먼지 생성 특성을 이해하는 데 있어 배출량뿐만 아니라 화학적 성장과 연관된 기상 특성을 이해할 수 있는 기초 연구가 될 것으로 판단된다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 분석영역 및 자료

본 연구의 분석영역은 Fig. 1에 제시된 바와 같이 부산광역시 전역과 일부 외곽지역을 포함한다. 분석영역의 지형 및 지표 조건 등은 다양한 선행 연구에서 충분히 기술되었으므로 생략하였다<sup>29~31)</sup>. 본 연구에 이용된 자료는 환경부가 운영하는 자동오염농도 측정망 자료 중 부산지역에 위치한 시간별 13개

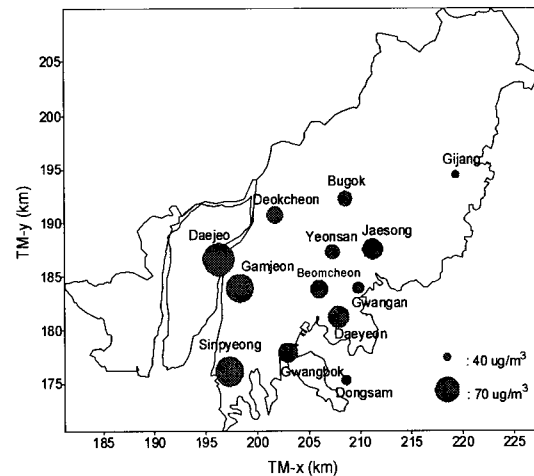


Fig. 1. Locations of the air pollution monitoring stations in Busan and annual mean PM<sub>10</sub> concentrations in each station.

측정소 자료이다(Fig. 1). 또 기상변수와의 상관성을 조사하기 위하여 동 기간의 부산지방기상청 정규 관측소에서 관측하는 매 시간별 기상 관측 자료 중 바람, 온도, 시정, 상대습도 등 대기오염 농도와 연관성이 높은 변수를 선별하여 사용하였다

분석 기간은 부산지역 PM<sub>10</sub> 농도가 본격적으로 측정되기 시작한 2000년 1월부터 최근 2005년 12월 까지이며 매 시간 측정된 PM<sub>10</sub> 자료는 특별한 여과 과정 없이 그대로 사용하였다. 부산지역의 경우 대부분 2000년 이후 TSP에서 PM<sub>10</sub> 농도로 그 측정 항목이 변경되었으나 측정항목 변경시기가 분석기간인 2000년 이후에 이루어진 두 측정소인 부곡동(2000년 11월에 변경)과 광안동(2001년 11월에 변경)자료는 항목변경이 PM<sub>10</sub>으로 변경된 이후 자료를 사용하였다.

### 2.2. 분석방법

2000년에서 2005년까지 매 시간 PM<sub>10</sub> 농도 자료에서 장거리 이동에 의한 영향을 배제하기 위하여 황사가 보고된 날(Table 1)을 제외하였다. Table 1에 의하면 황사 발생일수는 2000년 9일, 2001년 21일, 2002년 12일, 2004년 5일, 2005년 2일이고 2003년에는 황사가 관측되지 않았다. 또한 강수가 발생한 경우 먼지 입자가 대부분 강수에 의한 세정 효과로 제거되는 작용이 우세하므로 먼지 발생 특성을 살펴보는 본 연구의 대상에서 제외시켰다.

이렇게 황사일을 제외된 날의 부산지역 PM<sub>10</sub> 농도의 일변화, 주간 변화, 월변화 그리고 연변화 경향을 살펴보고 특히 차량 배출원 특성에 따른 PM<sub>10</sub> 농도 경향을 살펴보기 위하여 측정 자료를 요일별로 살펴보았다. 또한 강수일과 황사일을 제외한 날의 PM<sub>10</sub> 농도와 기온, 풍속, 기압, 시정, 구름, 상대습도의 기상학적 조건과의 관계를 알아보기 위하여

Table 1. Yellow sand days in Busan for the period from 2000 to 2005

Year	Number of Days	Yellow sand days(month, day)
2000	9	3.19/3.23-24/3.27/3.29/4.7~4.8/ 4.12~4.13
2001	21	1.2~1.3/3.3/3.6~3.7/3.20~3.23/ 4.10~4.14/4.24~4.25/5.16~5.19/12.13
2002	12	3.17~18/3.21~3. 23/4.8~4.11/4.17/ 11.11~11.12
2003	0	
2004	5	2.14/3.11/3.30~3.31/4.23
2005	2	4.20/11.7

최소제곱법을 이용하여 상관성을 구하고 이를 토대로 기상 요소와 연관된 2차 에어로졸 생성 특성을 해석하였다.

### 3. 결과

#### 3.1. 부산 지역의 PM<sub>10</sub> 측정 농도 경향

Fig. 1은 부산에서 PM<sub>10</sub>의 농도가 측정되는 13개의 측정소 지점에 지점별로 2000년에서 2005년까지의 전체 PM<sub>10</sub> 농도의 평균값을 도시하였다. 전체평균 농도는 대저동(74.06  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )이 가장 높게 나타났고 그 다음으로 신평동(70.47  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 감전동(69.07  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )순으로 나타났으며, 기장(45.41  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )은 가장 낮게 나타났다.

Fig. 2a에 각 측정소에서 측정한 농도를 모두 평균한 다음, 연도별로 그 변화 경향을 나타내었다. 황사 발생일(Table 1)을 포함한 경우도 함께 제시하였다. 그 결과 황사 발생일까지 모두 포함한 6년간의 전체평균 농도는 약 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났고 연도별로는 대체적으로 비슷한 값을 나타내나 2002년에는 68.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 제일 높게 나타났으며, 황사 발생일수가 전무한 2003년의 경우에는 54.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 분석 기간 중 가장 낮게 나타났다. 황사 발생일까지 모두 포함한 경우 우리나라의 환경기준치인 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 연도는 없었으나 미국환경청(EPA) 기준인 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 견주면 모두 기준치를 초과하고 있는 것으로 나타났다. 반면 황사 발생일을 제외한 경우 전체 평균은 58.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 황사 발생일을 포함한 경우에 비해 약 3.6% 정도 낮게 나타났으며 2002년의 경우 61.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 황사 발생일을 포함한 경우에 비해 약 10.5% 더 낮아 가장 큰 차이를 보였다. 그러나 연변화 경향은 황사 발생일을 제외한 경우 또한 황사 발생일을 모두 포함한 경우와 유사하게 나타났다. 이것은 비록 황사로 보고된 날을 제외하였지만 서풍 계열의 바람에 의해 장거리 수송된 먼지가 연평균 농도 증가에 기여한 것으로 볼 수 있다.

Fig. 2b는 황사 발생일을 제외하여 부산지역 각 연도별도의 PM<sub>10</sub> 농도값을 전체 평균하여 월별 변화와 표준편차를 나타낸 것이다.

비록 황사 발생일을 제외한 결과이지만 3월에 80.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높게 나타났고 뒤이어 4월에 77.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높게 나타났다. 이때는 황사가 많이 발생하는 시기로 황사일 전후로 영향을 받거나 서풍계열의 바람에 의해 장거리 수송된 먼지의 영향을 받은 것으로 사료된다. 그리고 3월에 24.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 가장 높은 값인 표준편차를 기록했는데 이는 황사가 심했던 2002년과 황사가 전무했던 2003년의

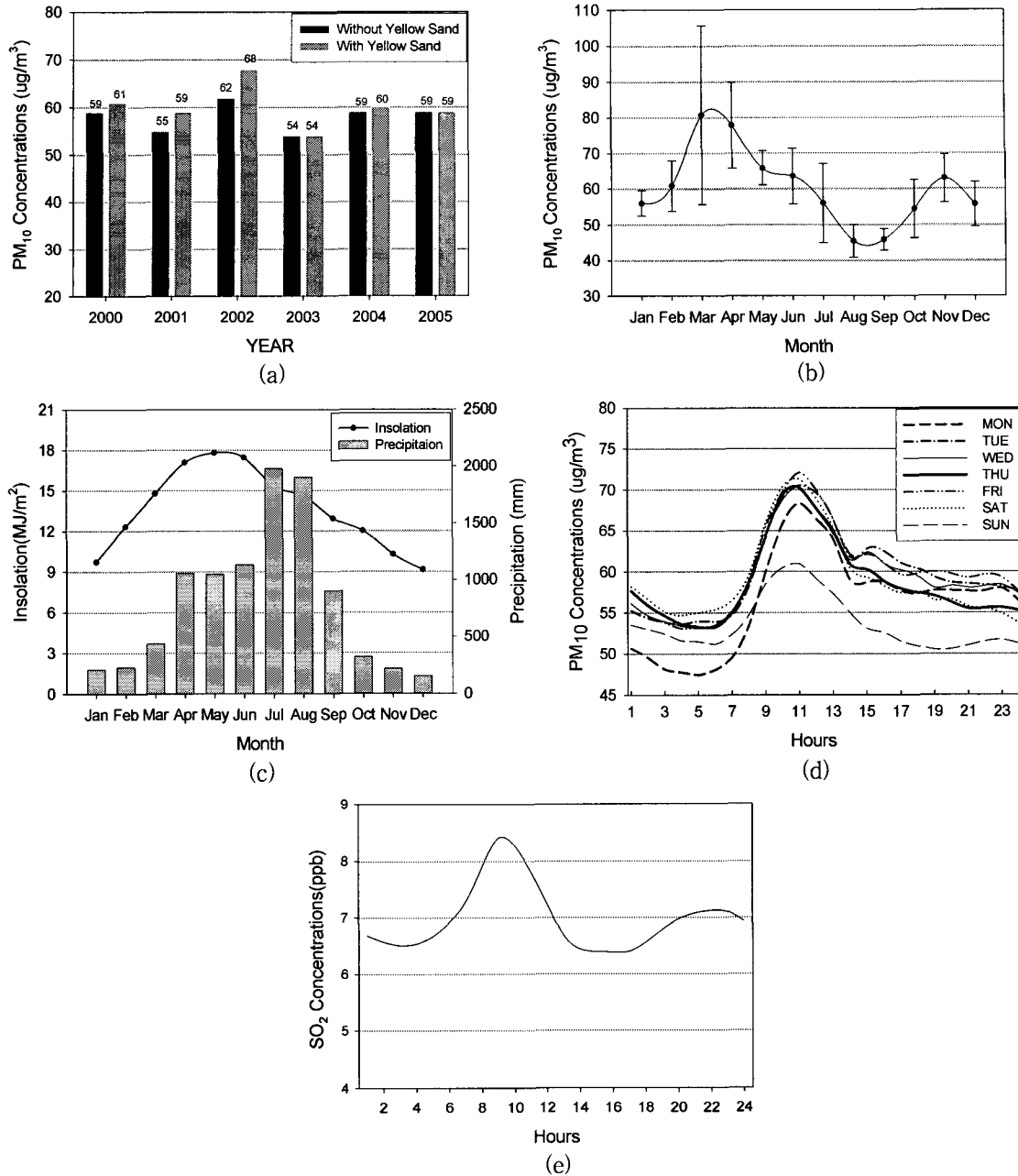


Fig. 2. The a) annual, b) monthly, c) diurnal variations of PM<sub>10</sub> concentrations d) monthly variations of insolation and precipitation e) the diurnal variation of SO<sub>2</sub> concentrations in Busan.

심한 농도차로 인한 것으로 나타났다.

6월부터 서서히 감소하여 8월에 45.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최소값을 기록했는데 이러한 여름철 먼지 농도 감소 경향은 배출량 감소와 여름철 불안정한 대기로 인해 혼합고도가 낮아지는 등 여러 가지가 있을 수 있다. 그러나 가장 큰 영향은 강수일수 증가에 따른 입자상 물질의 세정 작용에 의한 것으로 판단되며

선행연구에서도 서울지역에서 측정된 PM<sub>10</sub> 농도와 강수량의 월변화 경향과 일치하였다고 보고한 바 있다<sup>27)</sup>. 그러나 여름철 전반적인 감소 추세 속의 6월의 최대 농도는 강수량(운량)이 적고 일사의 차단량이 적어 7, 8월에 비해 상대적으로 우세한 광화학 반응으로 활발한 2차 대도시 PM<sub>10</sub> 생성에 부분적으로 기여한 것으로 보인다(Fig. 2c). 보다 명확한 해

석을 위하여 상세한 대기화학적 분석이 병행되어야 할 것이다. 겨울철 먼지 농도의 증가추세는 10월부터 나타났으며 이것은 다른 1차 오염물질과 마찬가지로 난방에 의한 연료 사용량증가로 나타나는 것으로 분석된다.

Fig. 2d는 요일별 PM<sub>10</sub> 농도의 일변화를 나타낸 것이다. 요일별로는 일요일을 제외하고는 농도 변화 경향이 유사하게 나타났으며, 특히 일요일은 뚜렷하게 낮게 나타났다. 월요일의 먼지 농도 변화 경향은 새벽 1시부터 아침 9시 이전까지 오히려 일요일보다 낮게 나타나는 특성을 보여 그 전날인 일요일의 배출량 감소에 따른 야간의 낮은 농도가 다음날 오전까지 영향을 미치는 것으로 판단된다. 시간별로는 8시 이후로 서서히 증가하여 11시 경에 최대값을 보이고 오후 2시 경에 혼합고의 증가에 따라 서서히 감소하다가 새벽 4시 경에 최소값을 보였다. 11시의 최대값은 선행 연구 결과에서도 보고하였듯이 교통량 변화에 따른 배출량 증가의 결과로 보인다<sup>25)</sup>. 그러나 PM<sub>10</sub> 직접 배출량 외에도 광화학 반응에 의해 먼지 농도로 전환되는 주요 원인물질인 아황산가스(SO<sub>2</sub>)의 배출량에도 영향을 받을 수 있는데 부산지역의 SO<sub>2</sub> 농도 일변화 경향 또한 먼지 농도 경향과 유사하다는 점에서(Fig. 2e) 에어로졸의 2차 생성이

기여하였다는 사실을 확인할 수 있다.

부산지역의 측정소별 특성을 더 상세하게 분석하기 위하여 도심지역대기오염 광화학 특성에 따라 구분한 지역 분류 결과<sup>32)</sup>를 이용하여 13개 측정소가 위치한 지역을 도심지역(urban area; UA), 교외지역(suburban area; SA), 산업지역(industrial area; IA), 거주지역(residential area; RA)의 네 개의 소지역으로 분류하였다. 13개 측정소 중 범천동, 광복동, 재송동 측정소는 UA로, 동삼동, 기장읍, 대저동 측정소는 SA로, 신평동, 감전동 측정소는 IA로, 그리고 대연동, 연산동, 덕천동, 부곡동, 광안동 측정소는 RA로 분류하여 소지역별 PM<sub>10</sub> 농도 특성 분석을 시도하였다.

Fig. 3은 각 분류된 소지역별 평균 PM<sub>10</sub> 농도와 표준편차를 나타낸 것이다. 각 지역별 평균값은 다르게 나타났으나 전체적인 월변동 패턴은 IA를 제외하면 그 변동 특성이 매우 유사하였다(Fig. 3a). 이 중 IA의 봄철 및 겨울철 상대적으로 높은 농도 경향이 매우 주목할 만하였다.

Fig. 3b는 지역별 요일별 먼지 농도 특성을 나타낸 것인데 네 지역 모두 그 패턴이 유사하게 나타났으며 평일보다는 일요일에 매우 낮은 농도를 보였다. 지역별로는 IA가 상대적으로 매우 높게 나타나

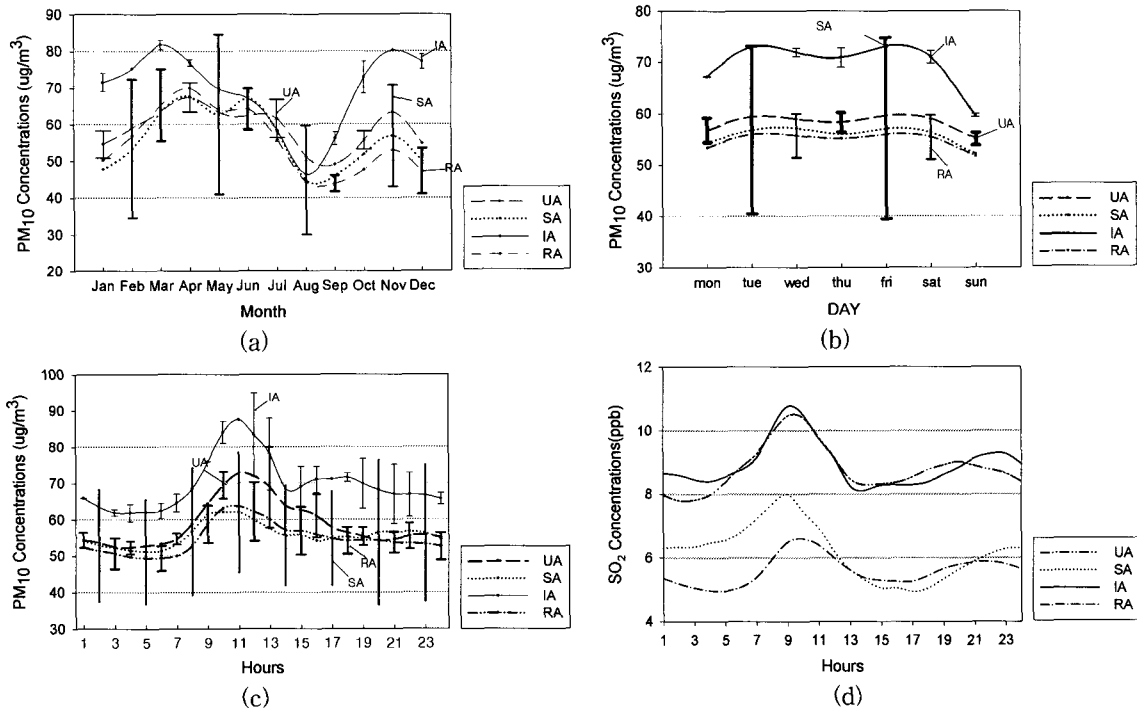


Fig. 3. The a)monthly, b)weekly c)diurnal variations of PM<sub>10</sub> concentrations in d) diurnal variation of SO<sub>2</sub> concentrations in urban, suburban, industrial and residential areas in Busan. (Note ; UA : urban area ; SA : suburban area ; IA : industrial area ; RA : residential area)

배출 특성에 따른 농도 변화가 큰 것으로 판단되며, 주 5일제의 부분적 시행에도 불구하고 토요일에도 여전히 평일과 유사한 수준을 유지하였다.

Fig. 3c는 지역별 일변화 특성을 나타낸 것인데 Fig. 2c와 마찬가지로 출근시간인 오전 8시부터 서서히 증가하여 10시~11시경에 최고 농도를 보였고 그 이후로 서서히 감소하여 일정한 값을 유지하는 특성을 보였다. 특히 IA에서 일 중 모든 시간대에서 다른 지역보다 높게 나타났는데 여름철을 제외하고는 연 중 산업지역 배출량의 영향을 잘 반영해 주고 있음을 반증하고 있다. 그리고 최고 농도가 나타나는 시간대는 한 지역을 제외하고 비슷한데 배출량이 높은 UA 및 IA에서는 11시에 각각  $72.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $87.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최고 농도값을 보였으며, 농도가 상대적으로 낮은 RA에서도 11시 경에  $63.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최고농도가 나타났으나 SA에서는 10시경에  $62.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최고 농도가 나타났다. 이처럼 최대값이 나타나는 시각이 1시간 정도 차이가 나는 것은  $\text{SO}_2$  배출량이 높은 지역의 경우 배출된  $\text{SO}_2$ 가 에어로졸 생성 화학 반응에 의해 입자상 물질로 전환하는데에 필요한 시간이 약 1시간 정도 소요되기 때문<sup>11)</sup>으로 판단되며 Fig. 3d에서 나타난 것처럼 RA를 제외한 지역에는 9시에 최대값이 나타났는데 UA는 10.45 ppb, SA는 7.99 ppb, IA는 10.75 ppb를 나타냈으나 RA는 10시경에 6.49 ppb의 최대값이 나타났다.

표준 편차는 SA가 유난히 크게 나타나는데 이는 SA로 분류된 측정소들 중에서 기장읍(전체평균  $45.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )과 동삼동(전체평균  $47.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 비해

대저동(전체평균  $78.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )이 높게 나타났기 때문인데 대저동의 경우 신도시 건설 및 경전철 공사 지연에 따른 장기간의 비산먼지의 발생이 SA의 표준 편차에 크게 영향을 미친 것으로 보인다.

### 3.2. $\text{PM}_{10}$ 농도와 국지 기상 변수와의 상관관계

대기 중의 오염물질의 농도 수준은 배출되는 오염물질의 양, 기상 조건 그리고 화학반응 등 다양한 변수와 연관된다. 특히 대기의 운동과 관계되는 기상 조건은 이미 배출된 오염물질의 확산되는 정도와 관련이 크므로 오염도의 해석을 위해 많은 부분의 국지기상 및 종관기상 조건을 모두 따져서 대기 오염도를 해석하는 것이 필요하다. 특히 여러 대기 오염 농도가 환경 기준치를 초과한 고농도 사례는 대부분 정체성 고기압의 영향으로 국지적 수송 및 확산이 적은 사례가 많아 종관 기상 조건이 대기오염물질의 농도를 결정하는 주요 인자로 작용하게 되는 사례가 많다. 그러나 본 연구에서는 2차 에어로졸 생성과 연관된  $\text{PM}_{10}$  특성을 부산지역에 국한하여 분석한다는 점에서 종관 기상조건보다는 국지 기상 변수들의 상대적인 중요성을 밝히는데 주력하였다.

매시간 정규 기상 관측자료 중 기온을 포함한 6개 국지 기상 변수와 비황사일의 매시간  $\text{PM}_{10}$  자료를 일대일로 일치시켜 농도와 기상 변수와의 상관성을 조사하였다. 각 변수들의 평균, 표준 편차, 상관계수를 최소제곱법을 통해 계산한 결과를 Table 2에 요약하였다. 여기서 황사발생일과 강수일을 모두 제외한 경우도 계산에 포함시켰다. 그 결과 강수일만 포함한 경우의  $\text{PM}_{10}$  농도는 기상 변수 중 기

Table 2. Summary of statistics on meteorological variables and  $\text{PM}_{10}$  concentrations for non-yellow sand period (Values in parentheses are for non-precipitation days during non yellow-sand period)

	$\text{PM}_{10}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	Wind Speed (m/s)	Surface pressure (hPa)	Visibility (km)	Cloud	RH (%)
AVG ( $\bar{m}$ )	58.3 (61.8)	14.7 (13.7)	3.4 (3.3)	1007.2 (1008.9)	17 (19)	4 (2)	63.5 (55.8)
STD	-	8.1 (8.4)	1.3 (1.2)	6.9 (6.7)	6.5 (6.3)	3.4 (2.6)	19.3 (17.3)
COR	-	0.02 (0.12)	-0.2 (-0.1)	0.02 (0.14)	-0.5 (-0.7)	-0.2 (-0.05)	-0.1 (0.09)
SLP ( $\beta$ )	-	0.007 (0.04)	-0.01 (-0.006)	0.006 (-0.04)	-0.13 (-0.2)	-0.03 (-0.005)	-0.1 (0.07)
INT (a)	-	14.3 (10.8)	4.2 (3.7)	1006.8 (1011.5)	24.7 (30.3)	5.8 (2.3)	69.7 (51.3)

Note ; AVG : Arithmetic average ; STD : Standard deviation ; COR : Correlation Coefficient with  $\text{PM}_{10}$  ; SLP and INT : Beta(the slope) and alpha(Y-intercept) of the squares line of  $y=a+\beta x$  with the depended variable (y) of  $\text{PM}_{10}$  concentrations

온, 지상 기압과는 양(+)의 상관관계를, 그리고 풍속, 시정거리, 운량, 상대습도와는 음(-)의 상관관계를 보였다. 특히 먼지농도와 시정과의 상관계수는 -0.5로 가장 높게 나타나 PM<sub>10</sub>에 의한 빛의 산란이 시정거리와 직접적으로 연관되어 있음을 확인하였다(Table 2). 그러나 황사발생일과 강수일을 제외하였을 경우(Table 2의 괄호) 시정거리는 그 상관관계가 더 뚜렷하게 나타났으며, 상대습도와의 상관 계

수는 양(+)의 상관관계로서, 강수일을 제외하지 않은 경우에 나타났던 음(-)의 상관관계와 반대로 나타났다(Table 2). 이것은 역으로 강수가 없는 맑은 날은 상대습도가 상승하면 오히려 PM<sub>10</sub> 농도가 증가하였다는 것을 의미한다.

상대습도, 기온 등 국지 기상 변수와 PM<sub>10</sub> 농도와의 관계를 보다 상세히 살펴보기 위하여 일대일 분포도(scatter diagram)를 작성하였다. Fig. 4는 황

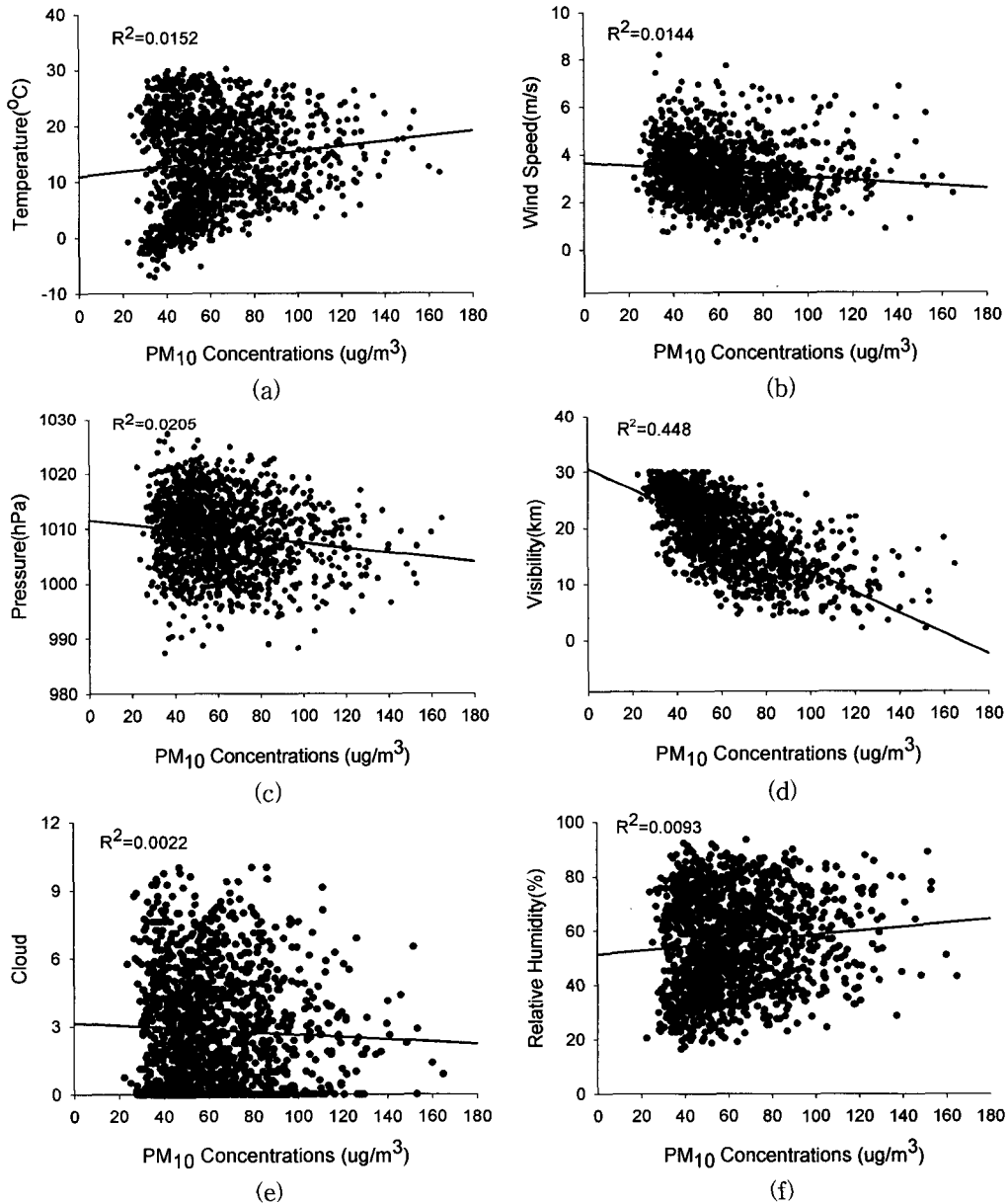


Fig. 4. Scatter diagram and correlation coefficient of PM<sub>10</sub> concentrations with a) temperature, b) wind speed, c) pressure, d) visibility, e) cloud, and f) relative Humidity. The fitting lines are derived from simple linear regression method.

사·강수발생 일을 제외한 경우의 PM<sub>10</sub> 농도와 기상 변수들과의 일대일 분포도이다. 여기서 PM<sub>10</sub> 농도 경향은 활발한 광화학 반응과 연관 지어 기온(양의 상관관계)과 운량(음의 상관관계)과의 관계를 설명할 수 있으며, 풍속(음의 상관관계)과 지상기압(음의 상관관계)은 1차 오염물질과 마찬가지로 통풍효과 및 대기 난류에 의한 혼합고 등으로 설명이 가능하다. 그러나 상대습도와와의 관계는 황사 및 강수 발생일을 제외할 경우 약하긴 하지만 양의 상관관계를 보여 위에서 설명한 핵화(nucleation) 및 응축(condensation)과정과 연관되므로 부산지역의 2차 대기오염물질의 영향을 확인할 수 있었다. 이때 상관관계가 음으로 나타난 날들을 조사해 본 결과 당일이 아닌 그 전날의 강수 영향이 우세한 날이 다수 있어 여름철 누적강수의 영향을 추가로 제거한다면 보다 높은 상관관계가 나타날 것으로 보인다.

상대습도와 미세먼지 농도와의 이러한 상호 관계를 보다 더 자세히 살펴보기 위하여 황사일을 제외한 날 중 PM<sub>10</sub>농도가 가장 높은 날들의 농도값과 상대습도와와의 관계를 살펴보았다. PM<sub>10</sub> 일평균 농도가 높은 순으로 나열한 다음 최고치로부터 10개씩 구분하여 누적 평균값을 구하였다. 즉 농도가 가장 높은 날부터 순차적으로 10일을, 그리고 그 다음 10일을 포함하여 총 20일의 평균 상대습도값을 구하여 순차적으로 총 1390일의 평균 상대습도값을 그림으로 나타내었다(Fig. 5). 그 결과 PM<sub>10</sub> 농도가 제일 높은 10일의 경우 상대습도 또한 제일 높게 나타났으며(Fig. 5a) 전체적으로 PM<sub>10</sub> 농도가 높은 날일수록 상대습도는 전체 평균값의 상한을 크게 웃돌고 있으며 극히 일부분을 제외하고는 PM<sub>10</sub> 농도값이 낮아질수록 상대습도도 낮아지는 음의 상관관계를 경향을 뚜렷이 보였다. 특히 Fig. 5b에서 알 수

있듯이 PM<sub>10</sub> 농도가 149.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 그룹은 상대습도가 63.9%로서 상대습도가 부산지역의 PM<sub>10</sub> 농도에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 결국 일반적으로 대기 중 가스상 물질과 입자상 물질간의 불균일 반응에 의한 2차 에어로졸 생성은 습도가 높은 조건에서 활발하며 특히 흡습성이 큰 입자에서는 불균일 반응에 의한 입자의 생성 혹은 성장이 활발함이 뚜렷하다는 사실에 견주어 볼 때 부산지역에서도 2차 에어로졸 생성 과정이 상당부분 PM<sub>10</sub> 농도 증가에 기여한 것으로 분석된다

일반적으로 상대습도와 2차 에어로졸 생성과정은 대기 중 특히 SO<sub>2</sub>의 SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> 입자로의 변환 과정과 밀접하게 연관된다. 즉 2차 입자의 생성 반응은 가스상들 간의 광화학 반응(photochemical reaction)이 중심이 되는 가스상 물질의 응축, 산화반응에 의해 핵화되어 도시 광화학 스모그 현상을 유발하게 된다. 또 이미 존재하는 먼지 입자에 응축되어 입자 성장에 기여하기도 한다. 따라서 상대 습도는 응축 과정만 아니라 핵화 과정의 경우에도 매우 민감하게 작용한다는 사실이 잘 알려져 있다. 따라서 모델링연구에서는 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)의 경우 임계치 이상으로 올라 갈 경우 그 증가분을 계산하여 PM<sub>10</sub> 농도로 간주한다. 그러므로 임계치가 낮을 경우 대도시 PM<sub>10</sub> 농도가 증가할 수 있는 조건이 된다. 선행 연구 결과 중 한 예로 동질 핵화가 일어나는 기체상 황산의 임계농도(C<sub>crit</sub>)를 모델링 연구에서는 다음과 같이 주어진다<sup>33)</sup>.

$$C_{crit} = 0.16 \times \exp(0.1 \times \text{Temp.} - 3.5 \times \text{RH} - 27.7)$$

여기서 Temp.는 기온(°C), RH는 상대 습도(%)를 나타내며 C<sub>crit</sub>의 단위는  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 이상의 식에서 기상 변수를 통해 본 균질 핵화 반응은 온도가 낮고 상대습도가 높을 때 C<sub>crit</sub>가 낮아지므로 PM<sub>10</sub> 농도가

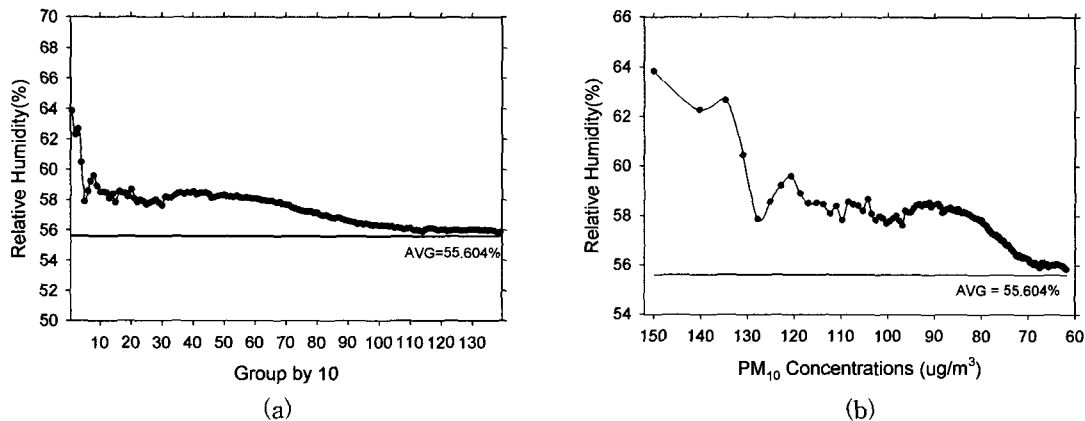


Fig. 5. Relative humidity versus PM<sub>10</sub> concentrations with x axis of a) cumulative ten days of high PM<sub>10</sub> concentrations, and b) cumulative PM<sub>10</sub> concentrations.



높게 나타날 것이다. 여기서 기온과는 역상관 관계를 가지지만 반대로 기체상 광화학 반응과 기온은 양의 민감도를 가지므로 기온과 먼지 농도 증가와의 대기화학적 상관관계를 단언하여 설명하기란 어렵다. 그러나 상대습도와 대도시 PM<sub>10</sub> 농도와의 관계는 핵화 반응과 기존의 PM<sub>10</sub> 입자에 흡착 및 흡수되는 응축과정과 동시에 연관되므로 2차 에어로졸 형성에 따른 PM<sub>10</sub> 농도 증가로 해석할 수 있는 토대가 된다. 따라서 정량적인 접근은 아니지만 부산지역의 PM<sub>10</sub> 농도가 상대습도와 양의 상관관계를 나타냈다는 것은 결국 2차 생성되는 에어로졸의 기여도가 예상보다 훨씬 클 수 있다는 해석이 나올 수 있다. 향후보다 상세한 대기화학적 수치분석과 모델링 연구와 같은 정량적 접근이 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

부산지역의 최근 측정된 PM<sub>10</sub> 농도 특성을 분석하기 위하여 2000년에서 2005년까지 환경부 매시간 부산지역 PM<sub>10</sub> 측정 자료를 연도별, 월별, 주간별, 일별 PM<sub>10</sub> 농도 변화 경향을 분석하였다. 또 PM<sub>10</sub> 농도와 국지 기상 인자와의 관련성을 살펴보고 나아가 부산지역 2차 에어로졸 생성과정과 연관시켜 그 특성을 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 황사일을 제외한 경우와 포함시킨 경우의 부산지역의 PM<sub>10</sub> 연변화 경향의 차이는 황사가 심했던 2002년도에 가장 크게 나타났으나 황사발생일이 부산의 연변화 경향에는 크게 기여하지 못하였다.

- PM<sub>10</sub>의 월변화는 배출량에 의해 좌우가 되는 것으로 나타났으나 강수량과 광화학 반응과 연관된 6월의 이상적인 농도 증가 경향 등 여러 인자와 복잡하게 연관되었다. 주간 변화는 평일과 휴일의 차량 변화에 따른 배출량 증가 경향에 의해 부산지역의 PM<sub>10</sub> 농도가 뚜렷하게 증가하고 있었음을 보였다.

- PM<sub>10</sub>의 일변화 경향은 아침 출근시간대에 그 농도가 서서히 증가하기 시작하여 11시경에 최대값을 나타내었고 오후가 되면서 낮아지는 경향을 보였고 새벽 5시경에 최소값을 보였다.

- 지역별로 부산지역의 13개 측정소를 산업지역, 도시지역, 교외지역, 주거지역으로 소분류하고 각 분류된 지역별 PM<sub>10</sub> 농도 경향을 분석해 본 결과 최고 농도가 나타나는 시간이 다르게 나타났다. 배출량이 높은 산업지역과 도심지역은 오전 11시에 최고 농도를 보였고 주거지역도 오전 11시에, 그리고 농도가 상대적으로 낮은 교외지역은 오전 10시경에 나타났다. 이렇게 최대값이 나타나는 시간대가

지역별로 1시간 이상 차이를 보인 것은 산업지역과 도심지역에서는 SO<sub>2</sub> 배출량이 높아 SO<sub>2</sub>가 에어로졸 생성 화학 반응에 의해 입자상 물질로 전환하는데에 필요한 시간이 약 40분~60분 정도 소요되기 때문으로 추정된다.

- 국지기상 변수들과의 상관성을 알아보기 위하여 PM<sub>10</sub> 농도와의 상관계수를 계산해 본 결과 시정이 0.7로 가장 높게 나타났고 맑은 날 PM<sub>10</sub> 농도는 상대습도와도 양의 상관관계를 보였다. 또한 상대습도와 PM<sub>10</sub> 평균 농도의 누적 평균값을 PM<sub>10</sub>농도가 높은 날부터 순차적으로 계산해 본 결과 PM<sub>10</sub> 농도가 높을수록 상대습도가 뚜렷하게 높게 나타났으며 이것으로 보아 부산지역의 PM<sub>10</sub> 농도는 2차 에어로졸 생성과정과 밀접하게 연관되어 있었음을 알 수 있었다.

이상에서 부산지역의 PM<sub>10</sub> 농도 변동성과 국지 기상 변수와 상관성을 살펴보았다. 시간규모 별로 부산지역의 PM<sub>10</sub> 농도를 평균하여 분석해 본 결과 시간규모별로 기여하는 영향이 다양하였으나 황사의 발생일수와 함께 광화학반응을 포함한 2차 에어로졸의 생성도 중요하다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 2차 오염물질과의 관련성에 대한 대기화학적 분석 연구가 중요할 것으로 판단되며 이와 병행하여 PM<sub>10</sub> 생성 모델링 등의 연구가 병행하여 필요할 것으로 보인다. 아울러 부산지역의 먼지 농도의 공간 분포 특성을 분석하기 위하여 국지 기상이 아닌 중관 기상조건과의 관계도 병행하여 연구할 예정이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2005-003-C00176)입니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Sokolik I. N., Toon O. B., 1996, Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols, *Nature*, 381, 681-683.
- 2) Houghton J. T., Meria Filho L. G., Callander B. A., Harris N., Kattenberg A., Maskell K., 1995, *The Science of Climate Change*, Cambridge University Press., 572pp.
- 3) Peterson P. K., Wagman J., 1997, Mass and composition of an urban aerosol as a function of particle size for several visibility levels, *J. Aerosol Sci.*, 8, 269-279.
- 4) 김기영, 전영신, 오성남, 2000, 기단의 유형과 이동경로에 따른 대기 중 에어로졸 광학 깊이의

- 특성, 한국기상학회지, 36(4), 487-498.
- 5) Robert J. F., Welsing P. R., Rozzi C., 1994, PM<sub>10</sub> and ozone control strategy to improve visibility in the Los Angeles basin, *Atmos. Envir.*, 28, 3277-3283.
  - 6) Liu C., Smith M. H., 1995, Urban and rural aerosol particle optical properties, *Atmos. Envir.*, 29, 3293-3301.
  - 7) 김현탁, 전영신, 이상삼, 2004, 2003년 봄철 서울의 TSP와 PM<sub>10</sub>농도 특성, *한국 기상학회지*, 40(5), 587-602.
  - 8) Krzyzanowski M., 1995, Overview of health impacts of particulate matter in Europe, WHO ECEH Bonn Office Joint WHO/Convention Task Force on Health.
  - 9) Styer P., McMillan N., Gao F., Davis J., Sacks J., 1995, Effect of outdoor airborne particulate matter on daily death counts, *Environ. Health Perspect.*, 103, 490-497.
  - 10) 조용성, 이종태, 김윤신, 김호, 하은희, 박혜숙, 2003, 전국 7개 대도시를 중심으로 대기오염물질과 일일 사망 발생의 상관성 연구(1998-2001), *한국대기환경학회지*, 35, 59-61.
  - 11) 진윤하, 2004, 서울지역 PM<sub>10</sub> 농도 특성과 바람장과의 관계, 석사학위 논문, 지구환경과학부, 서울대학, 서울.
  - 12) 조완근, 권기동, 2004, 대구지역 PM<sub>10</sub> 오염관리를 위한 시각적 및 공간적 오염 특성 평가, *한국환경과학회지*, 13(1), 27-36.
  - 13) Ackermann-Liebrich U., Leuenberger P. H., Schwartz J., Schindler C. H., Monn C. H., 1997, Lung function and long term exposure to air pollutants in Switzerland, *Am. J. Resp. Crit. Care Med.*, 155, 122-129.
  - 14) Larsen R., 1973, An air quality data analysis system for interrelating effects, standards, and needed source reduction, *JAPCA.*, 23, 933-939.
  - 15) 황승식, 조수현, 권호장, 2005, 2002년 봄 서울지역에 발생한 심한 황사가 일련 사망에 미치는 영향, *대한예방의학회지*, 38(2), 197-202.
  - 16) Satoshi K., 1978, Estimation of natural burden to aerosols in urban air, 1978, *J. Air Poll Control Assoc.*, 13, 252.
  - 17) Yoon Y. H., 1990, On the yellow sand transported to the Korean Peninsula, *J. Korean Met Soc.*, 26(2), 111-120.
  - 18) 임영희, 안창혁, 박계영, 정성환, 주영수, 2003, 황사 기간 중 천식환자에서 대기 중 미세먼지 (PM<sub>10</sub>)가 최대호기 유속과 호흡기 증상에 미치는 영향, *대한결핵 및 호흡기학회지*, 55(6), 570-579.
  - 19) 박준호, 박지연, 김모근, 임호진, 2006, 대구 대기 중 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>의 수용성 이온 성분, *한국 대기환경학회지*, 2006년 추계학술대회논문집, 391-392.
  - 20) 이영섭, 김현구, 박종석, 김희경, 2006, 변수변환을 통한 포항지역 미세먼지의 통계적 예보모형에 관한 연구, *한국대기환경학회지*, 22(5), 614-626.
  - 21) Chang Y. S., Carmichael G. R., Kurita H., Ueda H., 1989, The transport and formation of photochemical oxidants in central Japan, *Atmos. Envir.*, 23, 363-396.
  - 22) Kuntasal G., Chang T. Y., 1987, Trends and relationships of O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, and HC in the south coast air basin of California, *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 37, 1158-1163.
  - 23) Wolff G. T., Liroy P. J., 1978, An empirical model for forecasting maximum daily ozone levels in the northeastern United States, *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 28, 7034-1038.
  - 24) Vogel B., Fiedler F., Vogel H., 1995, Influence of topography and biogenic volatile organic components emission in the state of Baden-Wurttemberg on ozone concentrations during episodes of high air temperatures, *J. Geophys. Res.*, 100, D11, 22, 097-22, 928.
  - 25) 박일수, 이덕길, 강인구, 1991, 서울지역 겨울철 SO<sub>2</sub> 농도를 지배하는 기상인자, *한국대기보전학회지*, 7(2), 96-104.
  - 26) 김유규, 전영신, 이현환, 김현미, 1995, 서울 부유분진 농도의 황사 특성에 관한 사례 연구, *한국대기보전학회지*, 11(2), 199-209.
  - 27) Vakeva M., Hameri K., Puhakka T., Nilson E., Hohti K., Makela J., 2000, Effects of meteorological process on aerosol particle size distribution in an urban background area, *J. Geophys. Res.*, 105, 9, 807-9, 821.
  - 28) Laakso L., Hussein T., Aarnio P., Kpompplu M., Hiltunen V., Viisanen Y., Kulumala M., 2003, Diurnal and annual characteristics of particle mass and number in urban, rural and Arctic environment in Finland, *Atmos. Environ.*, 37(19), 2629-2641.

- 29) 김유근, 이화운, 홍정혜, 2001, 부산지역 지표 바람장의 특성에 관한 연구, 한국환경과학회지, 10(2), 135-142.
- 30) 김유근, 이화운, 전병일, 홍정혜, 문운섭, 1996, 부산연안지역에서의 대기오염 기상 예보시스템 개발에 관한 연구, 한국환경과학회지, 5(4), 399-410.
- 31) 오인보, 김유근, 황미경, 2004, 연안도시지역 해풍지역이 오존 분포에 미치는 영향, 한국환경과학회지, 20(3), 345-360.
- 32) National Research Council, 1991, Rethinking the ozone program in urban and regional air pollution, NATIONAL ACADEMY PRESS Washington., 28p.
- 33) Welxer A. S., 1994, Modeling urban and regional aerosols -I. Model development, Atmos. Environ., 28, 531-549.