

## OPC (광학적 입자 계수기)로 측정한 2001년 서울지역 에어로졸의 입경 분포

### Characteristics of Aerosol Size Distribution from OPC Measurement in Seoul, 2001

정 창 훈\* · 전 영 신<sup>1)</sup> · 최 병 철<sup>2)</sup>

경인여자대학 산업·환경공학부,

<sup>1)</sup>기상연구소 응용기상연구실 · <sup>2)</sup>기상연구소 지구대기감시관측소

(2002년 12월 28일 접수, 2003년 8월 29일 채택)

Chang Hoon Jung\*, Youngsin Chun<sup>1)</sup> and Byoung Cheol Choi<sup>1)</sup>

*School of Industrial and Environmental Engineering, Kyungin Women's College*

<sup>1)</sup>*Applied Meteorology Research Laboratory, Meteorological Research Institute / KMA*

<sup>2)</sup>*Korea Global Atmospheric Watch Observatory / KMA*

(Received 28 December 2002, accepted 29 August 2003)

#### Abstract

The characteristics of one year observation aerosol data in Seoul, 2001 was studied using an OPC (Optical Particle Counter). The size resolved aerosol number concentrations of 0.3 ~ 25  $\mu\text{m}$  were measured. The results were compared with  $\text{PM}_{10}$  mass concentration data under various meteorological conditions including dust and precipitation events. For fine particles whose diameter is less than 2.23  $\mu\text{m}$ , the number concentration increases in the early morning which is considered due to transportation, while the coarse mode particles increase during daytime. This increase can be explained as local sources and human activities near sampling site. Hourly averaged data show that there exists diurnal variation. Generally,  $\text{PM}_{10}$  data showed a similar tendency with OPC data. The size resolved OPC data showed that the particles of 0.5 ~ 3.67  $\mu\text{m}$  are positively correlated with  $\text{PM}_{10}$  data. The accumulated volume fraction of size resolved aerosol concentration in 0.5 ~ 10  $\mu\text{m}$  showed that 0.5 ~ 2.23  $\mu\text{m}$  particles occupied 59.2% of total aerosol volume of 0.5 ~ 10  $\mu\text{m}$ .

**Key words** : Aerosol, OPC (optical particle counter), Size resolved distribution,  $\text{PM}_{10}$

#### 1. 서 론

대기 중 부유하는 에어로졸은 그 발생원에 따라

크기와 조성에 있어 다양한 분포를 갖게 되는데 일반적으로 크게 3개의 모드(mode)를 갖는 삼봉(three modal) 분포로 이루어져 있다(Whitby, 1978). 이 중 아이트켄 모드(Aitken mode) 입자는 직경 0.01 ~ 0.1  $\mu\text{m}$  범위의 입자로서, 주로 가스에서 입자로의 변환 과정을 통해 생성되며, 이렇게 생성된 아이트켄 모드

\* Corresponding author

Tel : +82-(0)32-540-0166, E-mail: jch@kic.ac.kr

입자가 응집 (coagulation)과 응결 (condensation)과정을 통해 0.1~1  $\mu\text{m}$  범위의 적산모드 (accumulation mode)를 형성하게 된다. 아이트켄 모드 입자와 적산모드 입자는 인위적인 기원을 갖는 경우가 많다. 이에 비해 조대 입자 영역은 주로 자연적인 기원에 의해 형성된 입자로서 크기는 일반적으로 직경 1~2  $\mu\text{m}$  이상이며, 해염 및 황사 등의 입자가 조대 입자 영역에 해당된다.

이러한 에어로졸은 크기, 지역과 시간, 생성요인, 그리고 입자의 화학적 성질 등에 의해 그 특성이 크게 변화한다. 특히 입자크기와 농도 변화는 에어로졸의 가장 중요한 특성으로 대기 중 에어로졸 크기 분포의 측정결과에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다. 국내에서는 서울지역 대기 에어로졸의 파장별 대기 복사에 의한 연구 (조희구, 1980), 서울지역에서 0.01~1  $\mu\text{m}$  입경 범위의 에어로졸의 개수농도 및 체적농도의 변화 경향에 관한 연구 (김필수 등, 1986) 등과 안면도, 제주 고산 등 청정지역에서의 입자 특성에 관한 연구 등 (김용표 등, 1996; 전영신 등, 1999; 김지영 과 최병철, 2002)이 수행된 바 있다. 특히, 김필수 등 (1986)은 0.01~1  $\mu\text{m}$  범위의 도시대기 에어로졸을 1984년 5월부터 10월까지 6개월간 EAA (Electrical Aerosol Analyzer)를 이용하여 입자 개수, 표면적 및 체적농도의 일변화 양상을 크기별로 조사하고, 이를 대기오염물의 방출, 대기의 성질 및 생멸과정과 비교분석 하였으며, 에어로졸 농도와 시정 및 기상 요인 등과의 상관관계를 다루었다. 그러나 입자의 크기한계가 1  $\mu\text{m}$ 까지로 황사 등에 의해 발생하는 조대 입자에 대한 크기 분석이 불가능한 단점이 있었다. 반면 광학적 입자 계수기 (Optical Particle Counter, OPC)는 직경 0.3~25  $\mu\text{m}$ 의 입자 산란광의 강도를 측정하여 입자의 크기를 추정하는 기기로 대기 중 부유하는 입자의 측정에 널리 사용되고 있다 (김지영과 최병철, 2002; Chun *et al.*, 2001a, b; 전영신 등, 1999). 국외 연구로는 이미 오래 전부터 에어로졸의 크기분포에 관한 연구 (Whitby, 1978; Schutz and Jaenicke, 1974; Whitby *et al.*, 1972; Junge, 1953), 특히 황사시 에어로졸 수 농도에 관한 연구가 진행된 바 있다 (Zaizen, 1995; Wang *et al.*, 1982). 또한 최근 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>의 일 변화에 관한 연구 (Kuhlbusch *et al.*, 2001)와 시공간적 분포에 관한 많은 연구가 수행되었다 (Marcazzan *et al.*, 2002; Shen *et al.*, 2002;

Vega *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2002). 그러나 이들 연구는 주로 수 일에서 수 개월동안의 짧은 집중관측이나 비정기적인 관측결과로서 OPC를 이용한 에어로졸의 크기분포에 관한 1년 이상의 장기적인 관측에 관한 연구결과는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 기상청 기상연구소에서 측정된 OPC (HIAC/ROYCO 5230)의 측정자료를 이용하여 2001년도 1년간 서울지역의 대기 에어로졸의 특성과 경향을 분석하였다. 자료는 2001년도 1월부터 12월까지 OPC로 측정된 크기별 에어로졸 개수농도의 시간별 자료와 이를 24시간 평균한 일 평균 자료를 이용하였다. 측정된 결과는 황사, 강수 등에 의한 입경 분포의 변화, 상대습도 및 풍속 등의 기상요소와의 상관관계 등을 분석하였으며, 일 변화 경향을 입자크기 구간별로 구분하여 조사하였다. 또한 대기환경월보 (환경부, 2001)의 PM<sub>10</sub> 자료를 이용하여 OPC로 측정된 크기별 개수농도와와의 상관관계를 정량적으로 밝히고, 각 크기별 입자가 PM<sub>10</sub> 농도에 차지하는 기여율을 구하였다.

## 2. 관측 실험

### 2.1 관측 장소 및 기간

대기 중 에어로졸의 입경별 수농도 자료는 기상청 기상연구소 (서울시 동작구 신대방동)에서 시간별로 연속 측정하였다. 관측에 이용된 기기는 미국 HIAC/ROYCO의 광학적 입자계수기 (Optical Particle Counter; Model 5230)로, 측정원리는 개개의 입자에 대한 산란광의 강도를 측정하여 그 강도와 미리 정해진 강도와의 관계에 의해 입자의 크기를 추정하는 방법이다. 측정은 2001년 1월 2일부터 12월 20일까지 매 시간별로 측정하였으며 측정시 진공펌프에 의해 1 ft<sup>3</sup>/min의 공기를 흡입시켜 구간별 수 농도를 3회 측정 후 그 평균값을 이용하였다. 측정구간은 0.3~25  $\mu\text{m}$ 인 에어로졸을 지수 척도로 동일한 8개 구간으로 나누었다. 본 연구에서는 8개의 구간별 범위를 0.3~0.5  $\mu\text{m}$ , 0.5~0.82  $\mu\text{m}$ , 0.82~1.35  $\mu\text{m}$ , 1.35~2.23  $\mu\text{m}$ , 2.23~3.67  $\mu\text{m}$ , 3.67~6.06  $\mu\text{m}$ , 6.06~10  $\mu\text{m}$ , 10~25  $\mu\text{m}$ 의 8채널을 설정하였다.

OPC는 입자에 의해 산란된 빛의 강도가 입자크기에 의존한다는 가정 하에서 입자의 크기를 측정한다

다. 각각의 개별적인 입자는 기기의 산란 장치로 유입되어 빛이 광 검출기(photo detector)에 의하여 산란된다. 광 측정부는 각각의 입자가 산란장치로 유입될 때마다 전압 신호를 발생시키며 이 광 측정부에서의 신호는 입자의 크기에 따라 변화하게 된다. 각각의 입자에 의해 산란되는 빛의 산란세기는 Mie의 scattering code에 의해 계산되어 진다(Borhen and Hoffman, 1983). 각각의 입자는 신호에 따라 계수되는 동시에 그 크기가 전기적으로 처리되어 적당한 보정식에 의하여 입자의 크기로 환산된다(Chung, 1998). Mie 이론에 의하면 산란강도는 산란각과 입사된 빛의 파장 그리고 입자의 굴절률의 함수로 정의되어 있다. 제작사에 의해 제공된 OPC의 기기보정에는 일반적으로 단분산 latex 입자(굴절률=1.59)가 사용된다. 즉, 측정기기 제작시 주어진 입자의 크기별 전압과 단분산 latex 입자를 주입하였을 때의 전압을 비교하여 반응함수값을 보정하게 된다. 본 연구에서 사용된 기상연구소에서 측정하고 있는 OPC의 경우, 1년의 2회 제작회사를 통해 기기 보정을 시행하고 있다.

이 반응함수 값은 입자의 굴절률에 따라 변화하게 되므로 OPC가 측정하는 입자성분이 동일하지 않는 한 입자의 크기 측정의 정확도는 감소하게 된다. OPC의 굴절률에 관한 많은 연구 중 Garvey and Pinnick (1983)은 OPC의 일종인 ASASP(Active Scattering Aerosol Spectrometer Probe)의 반응함수를 계산한 결과 제작사의 보정계수가 비흡수성 입자인 경우에 만 적합한 것을 보였고, Kim and Boatman (1990)은 다양한 상대습도에 따른 굴절률을 이용한 ASASP의 반응함수 계산을 통하여 적절한 반응계수 계산이 이루어지지 않을 경우에 에어로졸 부피 분포에 대한 측정 결과가 실제보다 낮게 계산되는 것을 보였다. 따라서 정확한 크기별 입자의 개수농도를 측정하기 위해서는 대기 에어로졸의 굴절률을 고려한 OPC의 보정이 필요하다. 이러한 대기 중 에어로졸의 굴절률 보정에 관한 연구가 몇몇 진행되고 있으나(Liu and Daum, 2000; Friehmelt and Heidenreich, 1999), 정확한 대기중 입자의 굴절률을 보정하지는 못하고 있다. 이에 대한 보다 정확한 연구가 진행되어야 할 것으로 보이며, 본 연구에서는 굴절률 보정에 관한 사항은 고려하지 않고 단분산 latex 입자의 굴절률에 의거한 반응함수를 사용하였다.

**Table 1. The summary of the pollution episode in 2001 (Ministry of Environment, 2001).**

Month	Date	Episode	Remarks
January	2	Dust event	
February	20	Pollution episode due to atmospheric stagnation	
March	3~7, 20~25	Dust event, High ozone episode	
April	7~12, 24~26	Dust event	
August			Heavy rain
November	20~24	Pollution episode due to fog	
December	13	Dust event	

**2.2 사례 및 연구 범위 선정**

표 1은 대기환경 월보(환경부, 2001)의 주요 오염도 분석 사례이다. 표 1에서 볼 수 있듯이, 미세입자에 관한 오염도 분석은 주로 봄철의 황사, 여름철의 강수, 그리고 안개 등의 기상상황의 변화에 따른 상대습도, 풍속, 시정과 PM<sub>10</sub>의 관계 등을 다루고 있다. 본 연구에서는 OPC로 측정된 2001년 1년간의 자료를 중심으로 서울 대기 에어로졸의 전체적인 일 변화 경향, 크기별 OPC 입자농도 자료와 PM<sub>10</sub>과의 상관성, 상대습도, 풍속과의 관계, 그리고 황사 및 강수 등의 기상조건과 입자농도의 변화 등을 살펴보았다.

**3. 결과 및 고찰**

**3.1 OPC로 측정된 2001년 에어로졸의 연변화**

그림 1은 2001년 한 해 동안 OPC로 측정된 크기 구간별 입자개수 변화의 비(ratio)를 시간에 따라 나타낸 것이다. 크기 구간별 입자의 농도변화를 더 명확히 파악하기 위하여, 각각의 구간별 농도를 연평균 농도로 나누어 개수농도의 비를 조사하였다.

일반적으로 도시지역에 부유하는 대기 중 먼지농도는 봄철에 황사 등으로 인하여 증가하고, 여름철에 강수로 인하여 감소하는 것으로 알려져 있다. 이러한 경향은 미세한 입자보다 조대입자 구간으로 갈수록 더욱 확실히 나타나는데, 이는 황사의 경우 입자 직경이 수 μm 이상의 크기에 주로 분포하며, 특히 입자가 클수록 그 증가폭이 더 크기 때문이다. 또, 강수 현상이 발생할 경우 수 μm 이상의 입자는 관성충돌(inertial impaction)의 영향으로 크기가 큰 입자가 더

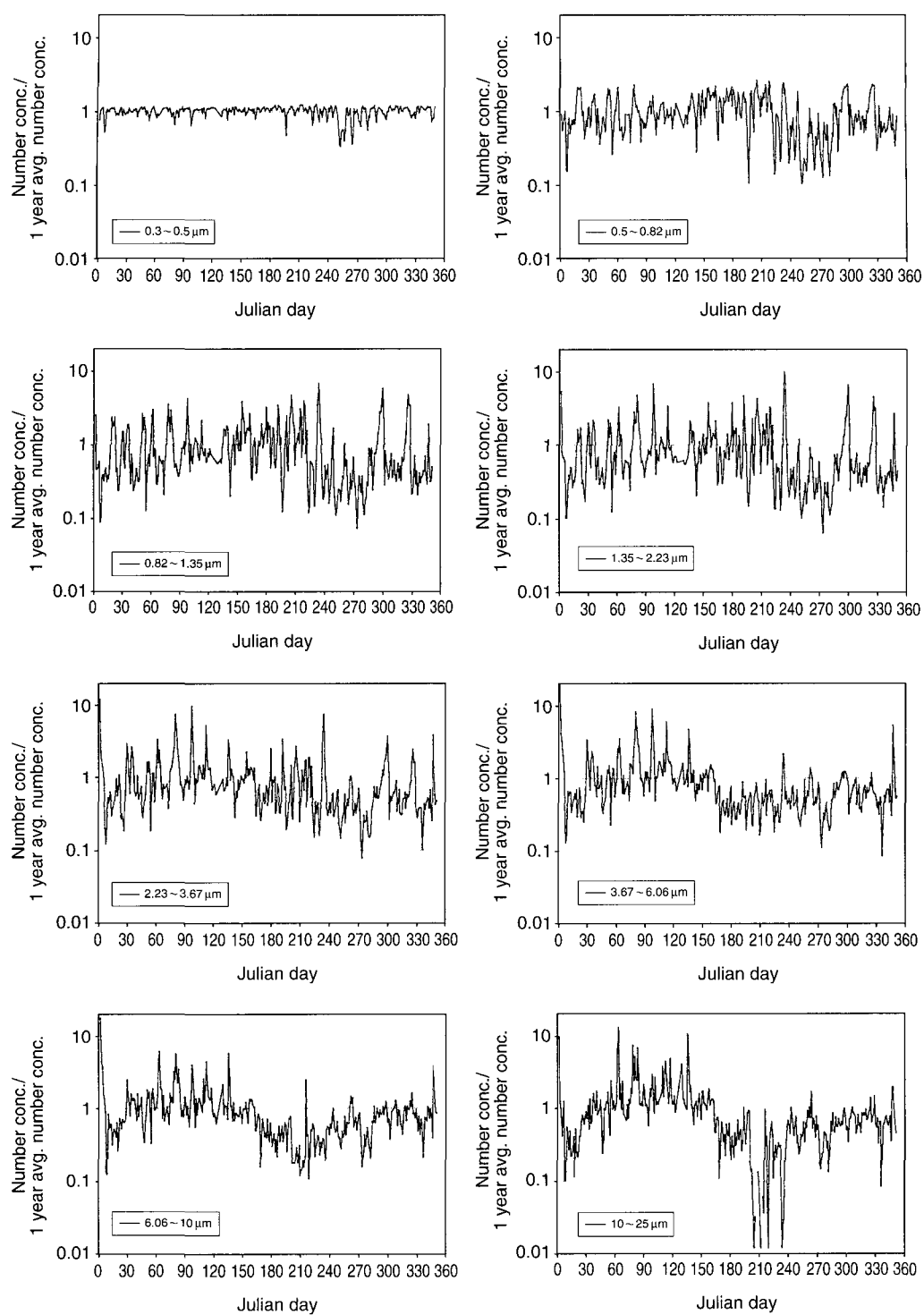


Fig. 1. Size resolved daily averaged aerosol number concentration ratio in Seoul, 2001 using OPC measurement.

높은 세정효율로 제거되거나 수  $\mu\text{m}$  이하의 미세한 입자는 관성충돌의 영향을 많이 받지 않기 때문에 세정효율이 상대적으로 높지 않은 것으로 설명할 수 있다(Choi *et al.*, 2002).

그림 1에서 볼 수 있듯이 대체적으로 입자 개수농도는 1년 중 3~6월의 봄철에는 평균보다 높은 값을 보이고, 여름과 가을철에는 평균보다 낮은 농도 값을 갖게되며, 특히  $2.23 \mu\text{m}$  이상의 조대입자에서 이러한 변화의 폭이 크다는 것을 알 수 있다. 봄철의 경우 주로 황사 등의 영향으로 입자의 크기가 큰 조대 입자 구간에서는 개수농도의 증가폭이 매우 큰 반면,  $0.5 \sim 0.82 \mu\text{m}$ 의 미세 입자구간에서는 상대적으로 증가폭이 작았다. 또한 5~6월의 경우, 각종 식물체에서 방출되는 분비물과 꽃가루의 영향도 입자 개수농도의 증가에 영향을 주는 것으로 해석된다(김필수 등, 1986). 여름철의 경우, 강수에 의한 입자의 세정작용 역시 조대입자 구간에서 뚜렷하게 나타난 반면, 미세입자 구간에서는 세정의 효과를 판단하기 힘들었다. 이는  $1 \mu\text{m}$  이하의 작은 미세입자 크기의

경우, 관성충돌에 의한 입자의 제거 기작이 큰 영향력을 발휘하지 못하기 때문으로 해석할 수 있다. 직경  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 의 미세한 입자는 입자의 화학적 성분이 흡습성인 경우, 강수 전후의 높은 상대습도로 인해  $0.1 \mu\text{m}$  이하의 초미세입자가 응축에 의해 성장하여  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$  구간의 입자가 되므로 오히려 그 개수가 증가하기도 한다. 가을철의 경우 미세입자를 중심으로 그 개수농도가 다시 증가하게 되는데 이는 가을이 여름철에 비해 대기가 안정되고 상대적으로 기상변화가 적으므로 입자수가 증가하는 것으로 해석할 수 있다.

그림 2는 입자의 크기 분포 변화를 로그-로그 축으로 나타낸 것이다. 2001년도에 측정된 1년간의 자료를 황사가 많이 발생한 3~4월, 강수가 많이 발생한 7~8월의 경우의 평균 값과 비교하여 보았다. 크기별 구간에서의 막대의 상한과 하한은 표준편차이다. 그림 2에서 보듯이, 황사가 발생한 3~4월 자

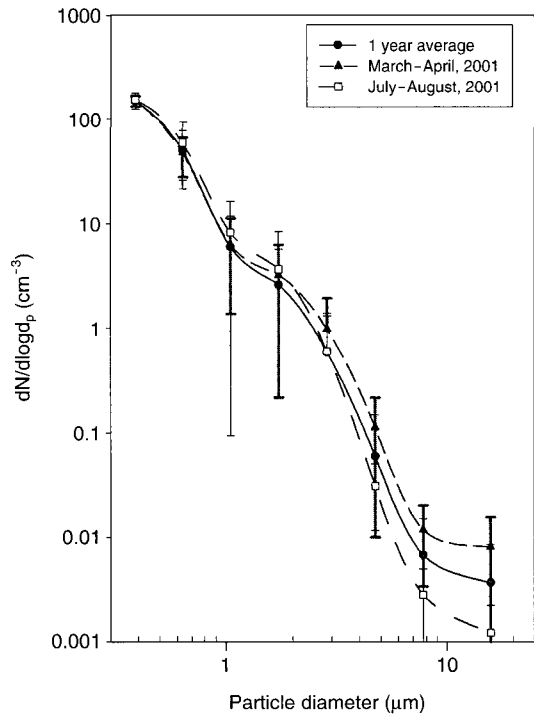


Fig. 2. Comparison of the aerosol size distribution in different time period during 2001, Seoul.

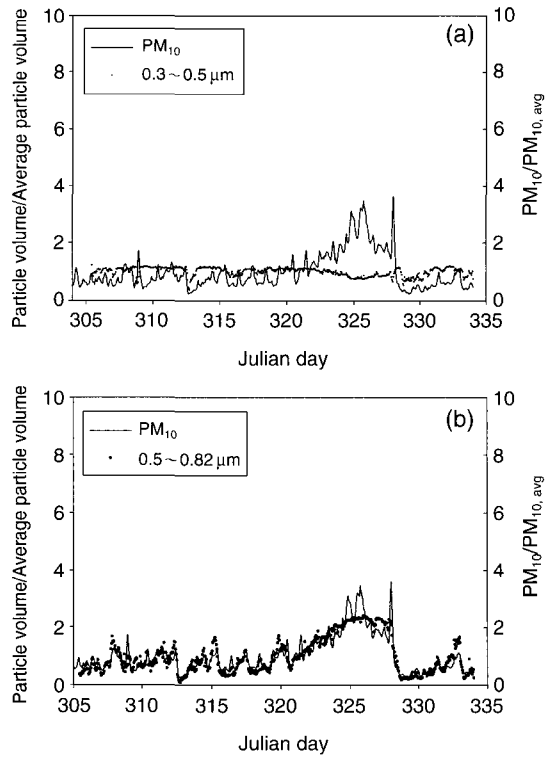


Fig. 3. Comparison of the  $\text{PM}_{10}$  mass concentration ratio and particle volume concentration ratio calculated from OPC.

료의 경우, 초대입자 구간에서 1년 평균보다 높은 개수 농도를 보이며, 강수가 많이 발생한 7~8월 자료의 경우 1년 평균보다 낮은 개수 농도를 보여주고 있다.

첫 번째 채널 구간인 0.3~0.5 $\mu\text{m}$  구간의 입자 개수 농도의 경우, 이러한 물리적 과정과 크게 관련을 갖지 않고 비교적 일정한 개수 농도를 유지하고 있는 것을 알 수 있다. 특히, OPC를 이용한 몇몇 연구 결과를 통해 알 수 있듯이 황사시 이 크기구간의 입자

개수농도는 오히려 감소하는 경향을 보이고 있다 (Choi *et al.*, 2002; 전영신 등, 1999). 그림 3은 환경부에서 2001년도 측정된 서울지역의 PM<sub>10</sub>자료와 OPC 자료를 크기구간에 대해 비교한 것이다. OPC로 측정된 0.3~0.5 $\mu\text{m}$  구간과 0.5~0.82 $\mu\text{m}$  구간의 입자 개수농도는 구간의 기하평균을 직경으로 하여 부피로 환산하였고, 각 변수를 부피 평균으로 나누어 구한 부피 비를 비교하였다. PM<sub>10</sub> 역시 2001년의 평균 PM<sub>10</sub> 값으로 각 시간의 PM<sub>10</sub> 값을 나누어 그 비를

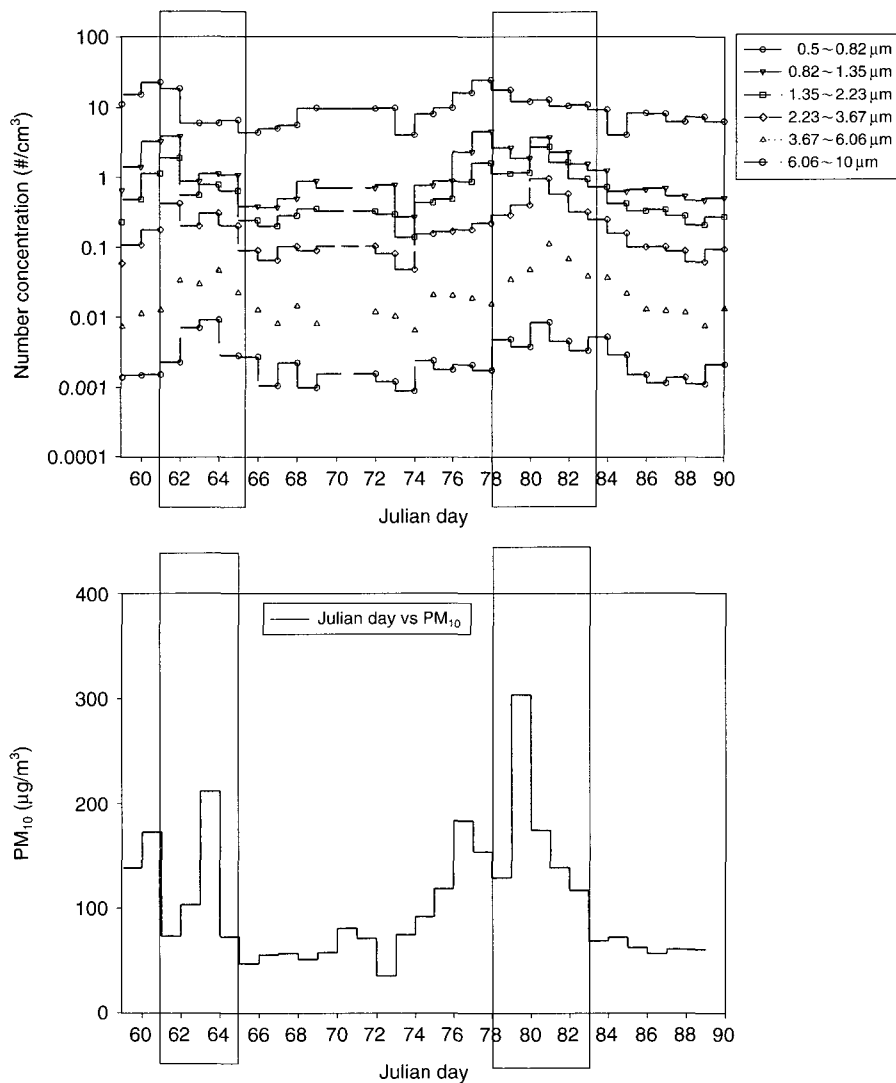


Fig. 4. Comparison of the size resolved aerosol number concentration and PM<sub>10</sub> in dust event cases during March 2001, Seoul.

나타내고 있다. 그림 3a에서 보듯이 OPC의 가장 작은 측정 구간인 0.3~0.5 $\mu\text{m}$  구간의 입자를 보면, 이 구간의 입자는 PM<sub>10</sub>이 증가하는 고농도 오염사태 기간에 오히려 감소하는 것을 볼 수 있다. 즉, 입자의 고농도 사태가 나타난 320~330 Julian day 부근에서 첫 번째 구간의 농도가 증가하지 않는 것을 알 수 있다. 반면, 그림 3b에서 보듯이, 평균적인 PM<sub>10</sub>의 변화와 크기구간별 입자 부피의 변화는 0.5~0.82 $\mu\text{m}$  구간의 경우 비슷한 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 지금까지의 OPC를 이용한 많은 연구에서 황사 현상 등 조대입자의 개수가 증가하는 경우에 OPC의 첫 번째 채널 구간인 0.3~0.5 $\mu\text{m}$  구간의 입자 개수는 감소하는 것으로 나타났다. 이에 대한 해석으로는 황사 시 다른 기단의 유입 때문이라는 주장(전영신 등, 1999)과 미세 입자사이의 응집에 의하여 입자개수가 감소하는 것이라는 주장 등이 있었다(Choi *et al.*, 2002). 그러나 PM<sub>10</sub>과 OPC의 0.3~0.5 $\mu\text{m}$  구간의 입자 개수는 PM<sub>10</sub>의 질량농도가 작은 경우 양의 상관관계를 갖게 되나, PM<sub>10</sub>의 질량농도가 증가함에 따라 OPC의 부피농도는 일정 수준의 값을 넘지 못하고 일정한 값을 유지하는 경향을 보인다. 이는 증가된 미세입자의 개수를 OPC가 모두 계수하지 못한다는 것을 보여준다. 즉, 황사 등에 의해 입자의 개수 농도가 급격히 증가하는 경우 0.3~0.5 $\mu\text{m}$  구간의 미세한 입자는 OPC의 측정한계를 벗어나는 것으로 보여지며 이는 입자의 개수 검출 한계에 관계된 것으로 해석할 수 된다. 본 측정 결과와 해당지역의 PM<sub>10</sub>자료를 비교해 볼 때, 0.3~0.5 $\mu\text{m}$  입자의 검출한계는 약 개수 농도로 50,000,000개/m<sup>3</sup> 정도로 예측된다. 따라서 본 연구에서는 첫 번째 채널 구간인 0.3~0.5 $\mu\text{m}$  입자는 분석 및 해석 대상에서 제외하기로 하였다.

그림 4에서는 황사기간동안 입자의 크기구간별 농도변화를 보다 정밀히 조사하기 위하여 3월의 시간자료를 평균하여 일 평균 자료로 바꾸고, 이를 환경일보(환경부, 2001)의 서울지역 평균 PM<sub>10</sub> 자료와 비교하였다. 서울지역의 경우 2001년 3월 중 두 차례의 황사가 발생하였다. 그림 4에서 볼 수 있듯이, PM<sub>10</sub>과 OPC의 입자 크기구간별 변화는 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 3월 3~7일, 20~25일 발생한 두 차례의 황사 기간동안, 입자의 개수 농도가 뚜렷이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 입자

의 크기가 큰 구간일수록 증가폭은 더 크게 나타나게 됨을 알 수 있다. 따라서 그림 4는 PM<sub>10</sub> 질량농도 자료와 OPC의 개수농도 자료가 높은 상관관계에 있음을 보여주며, OPC 측정을 통해 황사 등 특이 기상현상동안의 크기 구간별 입자의 개수농도를 보여줄 수 있음을 보여주고 있다. 특히, 그림 4를 볼 때 1.35~10 $\mu\text{m}$  크기의 입자 개수 농도가 PM<sub>10</sub>의 증가를 잘 반영하고 있는 것을 볼 수 있다.

### 3.2 기상자료와 입자 개수 농도

입자의 농도 변화는 다양한 기상현상과 지역적 조건에 의해 영향을 받게 된다. 일반적으로 시정과 에어로졸의 농도는 뚜렷한 음의 상관성을 나타낸다. 즉, 에어로졸의 농도가 낮을수록 시정이 길어지는데, 특히, 빛을 잘 산란시키는 0.1~1 $\mu\text{m}$  범위인 입자의 수 농도와 상관성이 높은 것으로 알려져 있다(배귀남 등, 2003).

그림 5는 2001년 한 해 동안 기상청에서 관측한 서울 지역의 일별 강수량, 상대습도 및 평균 풍속과의 관계를 나타낸 것이다. 그림 1의 크기별 입자 개수 자료를 토대로 대기 오염물질의 고농도 사태가 발생한 날의 기상상태를 보면 황사 등이 발생하는 건조한 봄철을 제외하고는 일반적으로 상대습도가 증가하고 평균 풍속은 낮아지는 것으로 알려져 있다(Marcazzan *et al.*, 2002). 그림 5에서 볼 수 있듯이 상대습도는 주로 봄철에 낮은 값을 보이다 여름철에 강수의 영향으로 증가하는 경향을 보인다. 또한 강수일이 집중되어 있는 여름철의 경우 상대습도는 증가하고 풍속은 타 계절에 비해 감소하는 것을 볼 수 있다. 기상자료의 월 평균값을 기준으로 각 상관계수를 계산하여 보면 상대습도와 평균풍속, 상대습도와 강수량은 각각 -0.67와 0.75로 음의 상관과 양의 상관성이 뚜렷이 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 일반적으로 상대습도가 높은 달의 풍속은 낮고, 강수량은 높다. 반면, OPC로 측정된 크기별 일 평균 입자 개수와 상대습도와의 상관 계수를 보면 0.5~0.82 $\mu\text{m}$ , 1.35~2.23 $\mu\text{m}$ 의 미세입자 구간에는 각각 0.65, 0.41로 양의 상관을 보이는 반면, 2.23~3.67 $\mu\text{m}$ , 3.67~6.06 $\mu\text{m}$ , 6.06~10 $\mu\text{m}$ 의 조대입자 구간의 경우 각각 -0.30, -0.64, -0.72의 음의 상관을 보였다. 이는 상대습도가 증가할수록 미세입자의 개수는 증가하나, 조대입자의 개수는 오히려 감소하는 것을 보여준

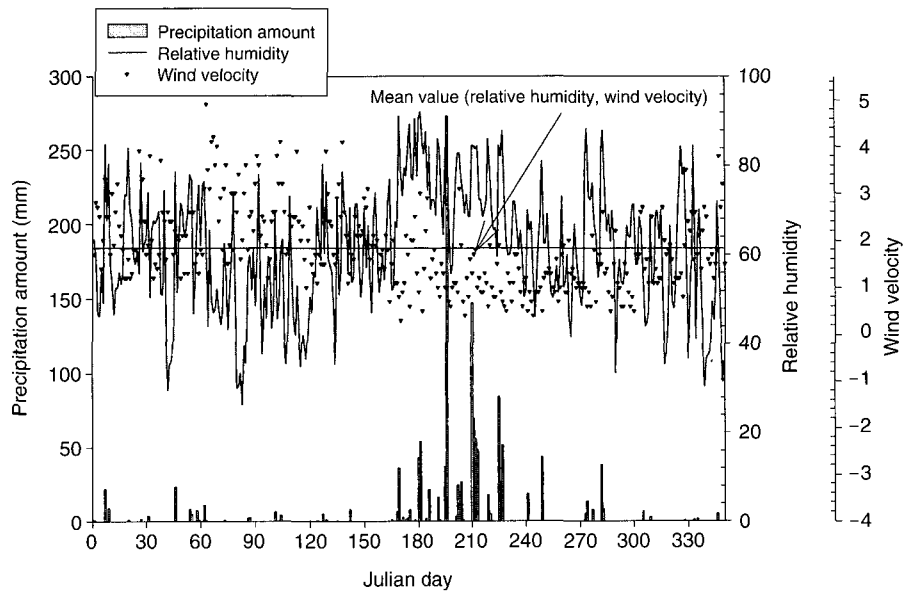


Fig. 5. Daily averaged meteorological conditions in Seoul (Precipitation amount, relative humidity and wind velocity) during 2001.

다. 상대습도가 증가할수록 미세입자구간의 개수 농도가 증가하는 것은 상대습도가 증가하게 되면 상대적으로 개수가 많은 작은 크기의 미세 입자가 응축에 의해 성장하므로 각 크기영역의 입자 개수가 증가하게 됨을 의미한다. 이에 비해 조대입자가 상대습도와 음의 상관관을 보이는 것은 조대입자의 경우 응축에 의한 입자 성장의 영향이 미미하고 주로 강수에 의해 상대습도가 증가한 경우 빗방울에 의해 제거된 조대입자 때문에 이러한 음의 상관관을 보이는 것으로 해석된다. 즉, 강수시 상대습도는 증가하게 되므로 조대입자의 경우 상대습도가 증가하면 강수에 의해 조대입자 개수는 감소하게 된다. 그러나 보다 정확한 자료의 해석을 위해서는  $0.5 \mu\text{m}$  이하의 미세 입자영역의 개수농도 변화와 상대습도와의 관계를 장기적으로 조사할 필요성이 있다.

대기 오염에 의한 시정 감소의 사례를 보면 2001년 11월 20~24일 동안은 서해상에서 형성된 해무가 육상으로 유입되고, 내륙 지방에서는 고기압 중심권에서 복사냉각이 심하여 짙은 안개 및 박무가 5일 동안 지속되었으며, 동 기간중 시정이 감소함에 따라 대기오염도가 급격히 악화되었다. 특히 서울의 시정이  $0.9\text{km}$ 까지 감소한 11월 22일의 경우 미세먼지와

이산화질소의 평균 오염도가 서울시 평균의 2.9배 및 1.6배 수준을 나타낸 것으로 분석되었다(2001년 11월 대기 환경월보). 그림 6은 2001년 11월 15~26일 사이에 OPC로 관측한 서울의 크기별 입자 개수 농도와 시정사이의 관계를 나타낸 것이다. 그림 6에서 보듯이 시정이 가장 감소한 11월 22일(Julian day : 326)과 크기별 입자 개수농도를 보면  $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ ,  $0.8 \sim 1.35 \mu\text{m}$  구간의 입자는 뚜렷하게 증가하였으며, 시정과 입자 농도사이의 역 상관 관계를 볼 수 있다. 이에 비해 조대입자 구간인  $6.06 \sim 10 \mu\text{m}$  구간의 입자 개수 농도와 시정과 관계는 미세입자 구간의 개수농도 만큼 뚜렷한 역 상관 관계를 찾기가 힘든 것을 볼 수 있다. 실제로 이 기간 중  $\text{PM}_{10}$ 과 시정과 상관계수는  $-0.84$ 를 보였다. 입자크기 구간별 시정과 상관관계를 조사하여 보면,  $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ ,  $0.8 \sim 1.35 \mu\text{m}$ ,  $1.35 \sim 2.23 \mu\text{m}$ ,  $2.23 \sim 3.67 \mu\text{m}$  구간의 입자와 시정의 상관 계수는  $-0.94$ ,  $-0.80$ ,  $-0.74$ ,  $-0.68$ 로 음의 상관관을 갖으며 특히  $2.23 \mu\text{m}$  이하의 입자와 시정이 높은 음의 상관관을 갖는 반면,  $3.67 \sim 6.06 \mu\text{m}$ ,  $6.06 \sim 10 \mu\text{m}$  구간의 입자와 시정의 상관관계는 각각  $-0.24$ ,  $-0.17$ 로 매우 낮은 상관성을 갖고 있음을 알 수 있다. 이는 시정과 관련 있는 입자의 크기는



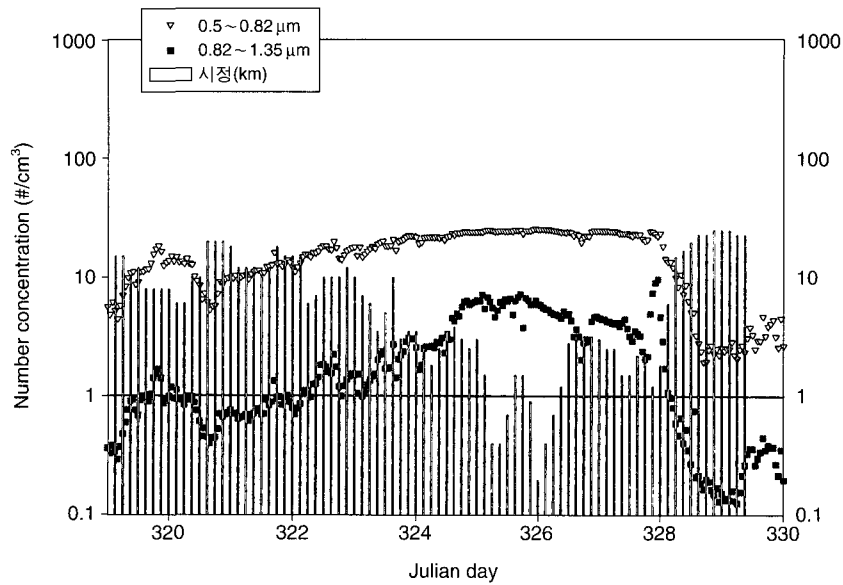


Fig. 6. Comparison of the aerosol number concentration and visibility in different size ranges (November, 2001).

2.23  $\mu\text{m}$  이하의 미세한 입자임을 확인시켜 주고 있으며,  $\text{PM}_{10}$ 의 입자농도 역시 2.23  $\mu\text{m}$  이하의 입자와 많은 상관성을 갖고 있음을 의미한다.

### 3.3 에어로졸 농도의 일 변화 경향

일반적으로 도시지역에 부유하는 대기 중 미세먼지는 일 변화 경향을 보이는데, 아침 8시경 출근시간에 증가하기 시작하여 21시 이후에 크게 감소하는 것으로 보고된 바 있다(김필수 등, 1986). 그림 7은 1년 동안의 크기 구간별 OPC의 측정자료를 시간별로 구분하여 평균과 표준편차를 조사한 것이다. 그림 7에서 볼 수 있듯이, 2.23  $\mu\text{m}$  이하의 미세입자의 경우에 입자의 개수농도는 출근시간인 7~8시경에 증가하기 시작하여 9시경에 최고조를 이루고 점차로 감소하는 경향을 보여준다. 이는 배귀남 등(2003)의 기존 연구에서도 확인할 수 있는데 출근시간 이후에도 미세 입자의 개수농도가 평균치 이상으로 한동안 유지되는 것은 대기 중에 존재하는 기체상의 각종 오염물질이 가스에서 입자로의 변환(gas-to-particle conversion)과 광화학 반응에 의해 성장함으로써 입자 수 농도가 쉽게 감소하지 않는 것으로 해석될 수 있다(배귀남 등, 2003). 반면 조대 입자 구간인 2.23~10  $\mu\text{m}$  영역의 경우는 일과시간인 9시에 증가된

농도가 오후 3시경에 최고조를 이루며, 오후 4~5시까지 유지되어 있다가 6시 이후 완만히 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 미세 입자의 경우 자동차 등의 이동 배출원에 기인한 반면, 조대 입자의 경우 이동 배출원과 더불어 인간의 활동과 관측장소의 지역적 특성에 의거한 고정적 오염원(local source)에 기인하기 때문인 것으로 해석된다.  $\text{PM}_{10}$ 과의 상관성을 알아보기 위하여 해당지역의 1년간  $\text{PM}_{10}$  측정자료의 시간평균을 보면(그림 8), 미세 입자와 조대 입자의 일 변화 경향의 혼합된 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 새벽과 낮 시간대의 일정한 농도를 보이는 것은 조대 입자의 경향을 따라가고 있으며, 오전 9~10시경에 최고조를 이루는 것은 미세입자의 경향을 따라가고 있는 것이다.

야간과 새벽의 입자의 개수 농도를 비교하여 보면, 조대입자는 19시 이후 감소하여 새벽에 최저치를 이루나 미세입자는 야간에도 큰 감소를 이루지 않고 0.5~0.82  $\mu\text{m}$ , 0.82~1.35  $\mu\text{m}$  구간의 입자는 오히려 19시 이후 23시까지 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 퇴근시간에 증가된 차량에 기인한 것으로 이 시간에 증가된 초 미세 입자들이 응집 및 응축에 의하여 성장하여 미세입자 구간의 입자 개수를 증가시켜 입자농도가 밤에도 크게 감소하지

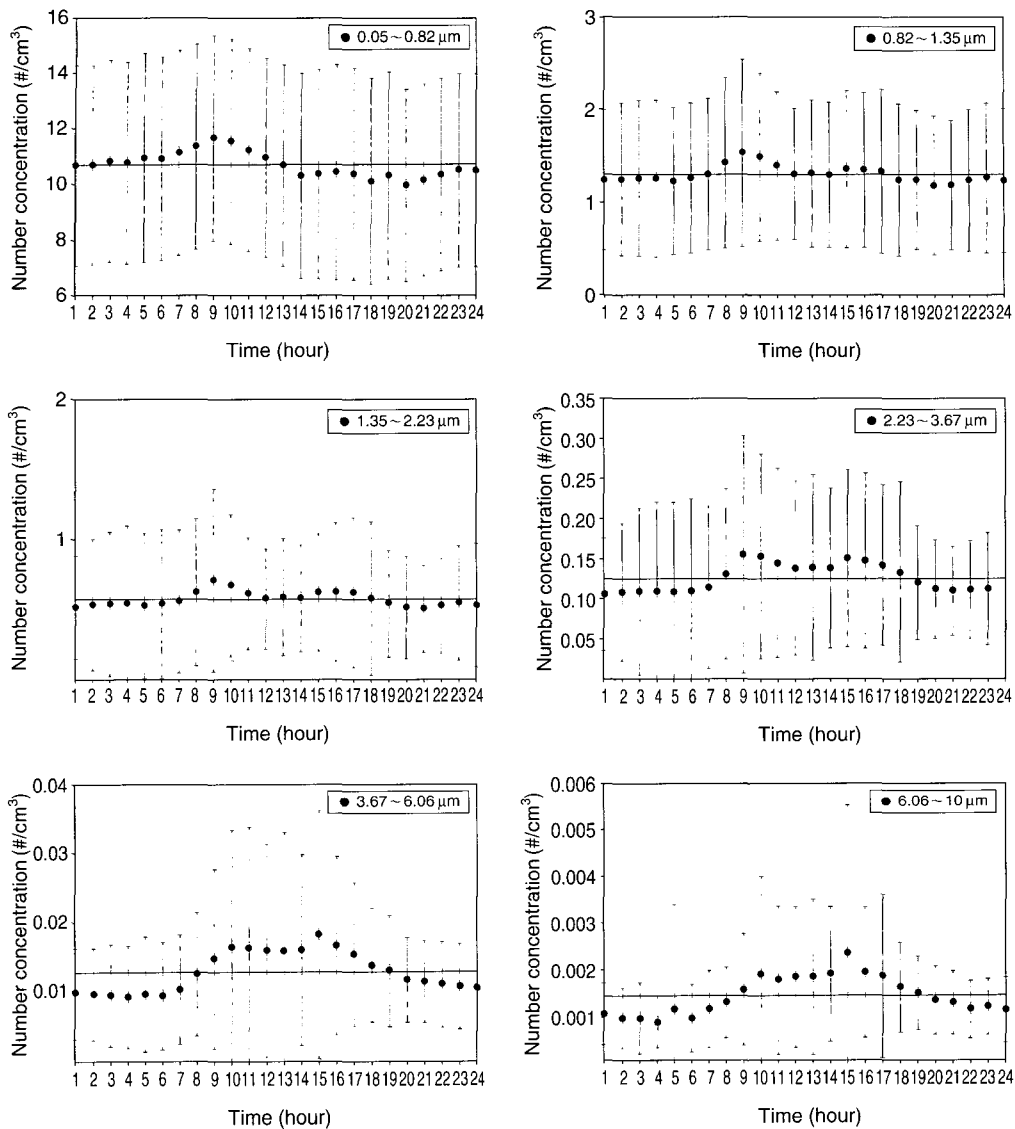


Fig. 7. Diurnal variation of size resolved aerosol number concentration in Seoul, 2001 using OPC measurement.

않는 것으로 설명할 수 있다(김필수 등, 1986). 그림 8에서는 또한 2001년도 한해동안의 시간별 상대습도를 평균하여 상대습도의 일 변화를 알아 보았다. 그림에서 막대는 각 변수의 표준편차를 나타낸다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 상대습도는 낮 15시경에 최저치를 갖고, 저녁부터 점차로 증가하여 오전에 최고치를 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 저녁 시간대와

새벽 시간대의 미세한 입자구간에서 상대적으로 입자 개수가 높게 나타나는 것은 높은 상대습도에 의한 입자의 응축에 의한 것으로 해석할 수 있다. 이는 상대습도의 영향을 상대적으로 적게 받는 2.23  $\mu\text{m}$  이상의 조대입자 구간에서는 새벽에 오히려 입자수가 평균 입자개수보다 감소하는 것을 볼 때도 알 수 있다.

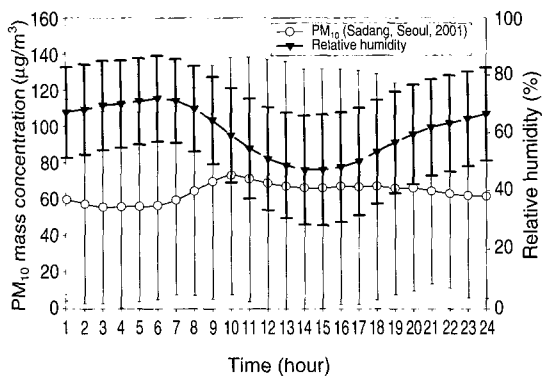


Fig. 8. Diurnal variation of PM<sub>10</sub> and relative humidity in Seoul, 2001.

### 3. 4 PM<sub>10</sub>과 크기구간별 OPC 개수농도의 상관성

PM<sub>10</sub>은 대기 중에 존재하는 10 µm 이하의 입자 질량의 합이므로, 각 크기별 입자의 농도와 PM<sub>10</sub>과의 상관성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 특히, 미세입자의 경우 조대입자와 다른 분포 경향을 갖고 있으며, 개수는 많으나 부피 및 질량은 조대입자보다 적게 되므로, 이들 미세입자들이 총 질량 혹은 부피에 있어서, 크기별로 PM<sub>10</sub>의 어느 정도를 차지하느냐 하는 것은 PM<sub>10</sub> 자료를 해석하고 입자의 기원을 밝히는데 있어 유용하게 사용될 수 있다.

PM<sub>10</sub>과 OPC를 이용한 크기구간별 입자농도와의 상관성을 보다 정량적으로 나타내기 위해서 이 두 계수의 선형관계와 상관계수를 구하여 보았다(그림 9). 그림 9는 2001년 11월 PM<sub>10</sub>의 질량농도와 OPC의 부피농도와의 선형성을 잘 보여주고 있다. 특히, 0.5~0.82 µm 구간과 0.82~1.35 µm 구간의 경우 각각 r<sup>2</sup> 값이 0.73과 0.76로 상대적으로 높은 상관성을 갖게 됨을 알 수 있다. 반면, 3.67 µm 이상의 입자의 경우 PM<sub>10</sub>과의 상관도가 0.15 이하로 나타나 이 영역의 입자와 PM<sub>10</sub>과의 상관성이 매우 낮은 것으로 나타났다. 이는 PM<sub>10</sub>의 주요 경향이 조대입자보다는 미세 입자의 경향에 더 많은 영향을 받고 있는 것임을 시사한다.

이와 같이 측정된 크기 구간별 입자가 전체 입자 중 얼마만큼의 부피를 차지하는 지를 알아보기 위하여 2001년 1년간 측정된 OPC 측정자료의 일 평균 자료의 10 µm까지의 총 부피 비에 대한 각 입자 크

Table 2. Yearly Averaged Volume fraction of size resolved aerosol concentration in 0.3~10 µm.

Size range (Geometric mean diameter)	Volume fraction	Accumulated volume fraction	Standard deviation
0.5~0.82 µm (0.64 µm)	26.43%	26.43%	8.82%
0.82~1.35 µm (1.05 µm)	11.46%	37.89%	3.42%
1.35~2.23 µm (1.74 µm)	21.33%	59.22%	5.07%
2.23~3.67 µm (2.86 µm)	22.46%	81.68%	5.02%
3.67~6.06 µm (4.72 µm)	11.61%	93.29%	5.10%
6.06~10.00 µm (7.79 µm)	6.7%	100%	3.71%

기구간의 부피비율을 그림 10에 나타내었다. 그림 10에서 볼 수 있듯이 봄철에는 조대입자의 부피비가 상대적으로 증가하였다가 여름철 강수 기간에는 미세 입자의 부피비율이 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 즉, 봄철 황사에 의해 조대입자의 비중이 상대적으로 높아지고, 여름철 강수에 의해 조대입자가 세정되는 경향을 잘 보여주고 있다. 표 2는 2001년 한 해 동안의 각 입자크기별 평균 부피 비를 계산한 것이다. 구간별 입경의 기하학적 평균 직경을 대표 입경으로 하였으며, 이 구간별 대표 입경을 이용하여 부피를 계산하였다.

표 2에서 볼 수 있듯이 0.5~10 µm의 입자 중 0.5~0.82 µm의 입자가 26.4%로 가장 많은 부피비율을 차지하며, 2.23 µm까지의 부피가 10 µm까지 전체 부피의 59.2%, 3.67 µm까지의 부피가 10 µm까지 전체 부피의 81.7%를 차지하고 있다. 이는 PM<sub>10</sub>의 부피를 차지하는 입자에는 평균적으로 크기가 크고 개수가 적은 입자보다 대략 2.23 µm 이하의 크기가 작고, 개수가 많은 입자가 지배적으로 영향을 미치고 있음을 의미한다. 이는 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 질량을 비교한 최근의 연구 결과와 많은 일치를 이루는데, 이탈리아 도시지역의 입자 농도에 관한 연구(Marcazzand *et al.*, 2001)에 의하면, PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>과의 질량비 (PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>)는 0.61~0.63으로 본 연구의 2.23 µm 이하의 부피비 0.59와 비슷한 값을 보였다. 또 중국 난징의 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 값 역시 0.54~0.88로 2.5 µm 이하의 미세입자가 PM<sub>10</sub>의 주된 성분을 차지하고 있는 것으

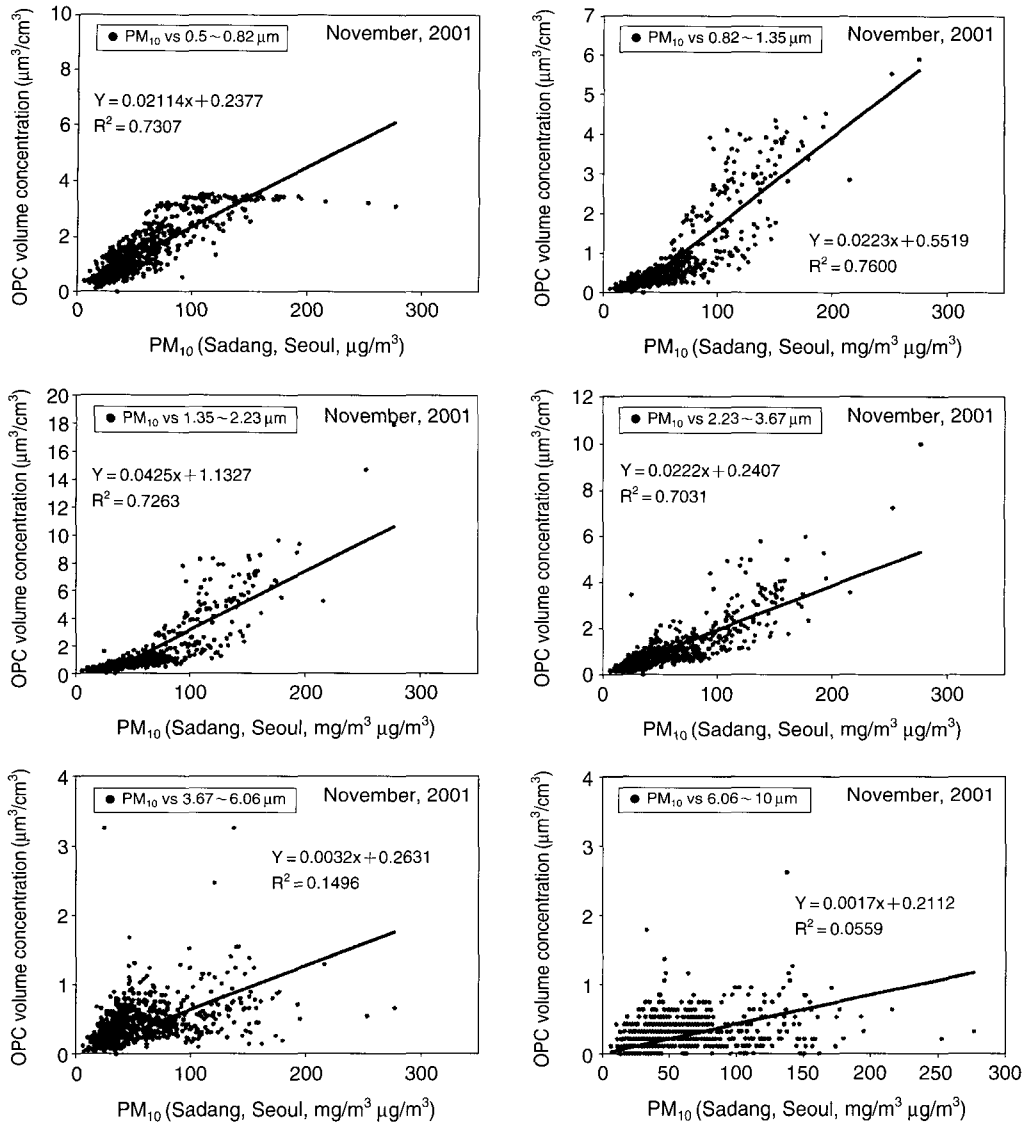


Fig. 9. The linear regression of size resolved aerosol volume concentration from OPC and PM<sub>10</sub> in Sadang, Seoul during November, 2001.

로 나타났다 (Wang *et al.*, 2002). 본 연구에서는 라텍스 입자의 굴절률을 적용하였을 때의 크기 구간을 설정한 것이다. 실제 입자의 경우, 굴절률이 입자의 구성에 따라 상당한 차이가 있으므로, 이들 굴절률을 적용할 경우, 입자 크기 구간의 보정이 필요하게 된다. 따라서, 보다 정확한 입자의 보정을 위해서는 굴절률에 대한 연구가 필요하다 (이권호 등, 2002; Chung,

1998).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 2001년 한 해 동안 기상연구소에서 OPC를 이용하여 측정된 0.5~25 μm 사이에 존재

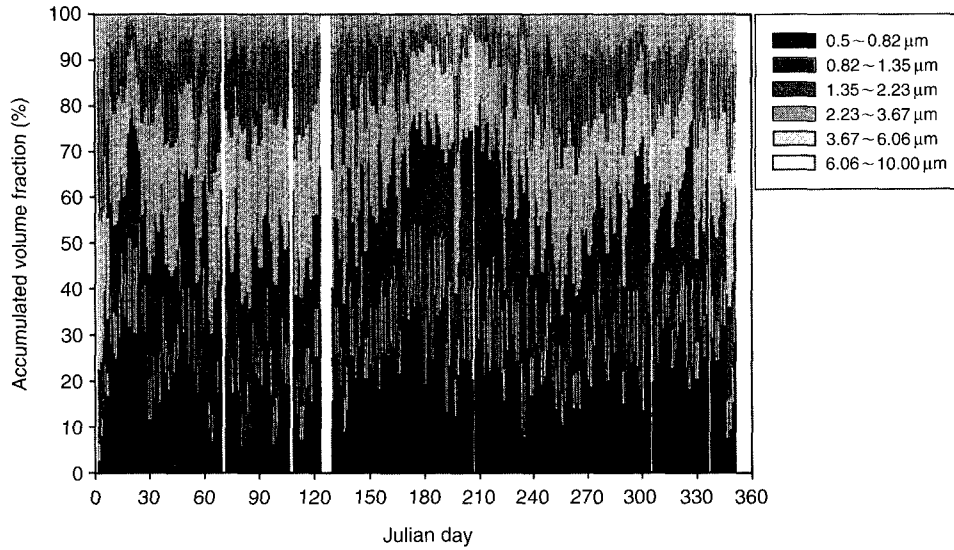


Fig. 10. Accumulated volume fraction of size resolved aerosol concentration in diameter of 0.5 ~ 10  $\mu\text{m}$  range.

하는 에어로졸 개수농도를 기존의 기상자료 및  $\text{PM}_{10}$  자료 등과 비교하였다. 일 변화 경향을 살펴보면 2.23  $\mu\text{m}$  이하의 미세입자들은 출근시간에 개수농도가 증가하는 일 변화를 보이고, 2.23  $\mu\text{m}$  이상의 조대입자들은 일과 시간에 증가하는 경향을 보였다. 이는 미세입자의 경우 자동차 등의 이동오염원의 영향을 많이 받고, 조대입자들은 관측지점 주변의 지역적인 고정 오염원의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 설명된다.

풍속과 입자상 물질의 농도를 살펴보면 풍속은 입자 물질의 농도와 서로 반비례하는 것으로 나타났는데, 이는 풍속이 낮을수록 대기 오염물질이 정체되기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 상대습도와 미세입자상 농도와의 관계는 일반적으로 상대습도가 증가할수록 미세 입자의 농도도 증가하는데, 이는 상대적으로 개수가 많은 작은 크기의 입자들이 응축에 의하여 크기가 증가하기 때문인 것으로 해석할 수 있었다. 상대습도와 풍속은 대체적인 경향에 있어서 음의 상관관계를 뚜렷이 보여주었다. 즉, 입자의 개수농도는 상대습도에 비례하고 풍속에 반비례하는 경향을 보이고 있다. 또한 시정과 입자크기별 개수농도를 비교해 보면 미세입자 영역의 경우에는 시정과 입자 개수농도가 뚜렷한 음의 상관관계를 보이는 반면, 조

대입자 영역은 뚜렷한 상관관계를 보이지 않음을 알 수 있었다.

$\text{PM}_{10}$ 의 질량농도 변화추이는 OPC로 측정된 각 크기별 에어로졸 입자 크기 변화와 대체로 비슷한 추이를 가지며 변화하며 특히 1.35~10  $\mu\text{m}$  입경의 개수 농도가  $\text{PM}_{10}$ 의 증가를 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다. 측정결과에 의하면  $\text{PM}_{10}$  부피의 59.2%가 2.23  $\mu\text{m}$  이하로 나타났으며 이는 기존의 여러  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  측정결과와 비슷한 수치를 갖는다. 본 연구에서는 광학적 입자 계수기를 이용하여, 입자의 크기별 농도 변화 및 추세 등에 대해 많은 자료를 얻을 수 있었다. 보다 정확한 측정과  $\text{PM}_{10}$  자료와의 상관성을 높이기 위해서는 OPC의 대기입자에 대한 굴절률의 보정에 관한 연구와 유입구의 손실률 등의 실험을 통한 보정이 요구된다. 향후 이러한 보정을 고려한 상태에서 각 입자 크기가  $\text{PM}_{10}$ 에 차지하는 부분에 대한 연구가 동일 지점에서의 동시관측자료 분석 등을 통하여 필요할 것으로 사료된다. 또한, 상대습도 및 시정 등과 미세입자의 농도의 관계 등을 보다 정량적으로 해석하기 위해서는 0.01~0.5  $\mu\text{m}$  구간 입자의 개수 농도에 대한 지속적인 측정 자료를 더불어 분석해야 될 것으로 보인다.

## 감사의 글

본 연구는 기상청 「지역 대기환경 예측 기술개발」 과제에 의하여 지원되었습니다.

## 참고 문헌

- 김필수, 김윤장, 이양호, 조숙현, 안승태 (1986) 도시대기 Aerosol의 입자직경 0.01~1.0 $\mu\text{m}$  범위의 농도변화 특성. 한국대기보전학회지, 2(2), 41-50.
- 김용표, 박세욱, 김진영, 심상규, 문길주, 이호근, 장광미, 박경윤, 강창희 (1996) 고산에서의 1994년 3~4월 측정연구 : (I) 입자상 오염물질의 이동, 한국대기보전학회지, 12(1), 79-90.
- 김지영, 최병철 (2002) 한반도에서 측정된 에어로졸의 크기 분포와 지역별 특성. 한국기상학회지, 38, 95-104.
- 배귀남, 김민철, 임득용, 문길주, 백남준 (2003) 2001년 겨울철 서울 대기 에어로졸의 입경별 수 농도 특성, 한국대기환경학회지, 19(2), 167-177.
- 이권호, 김영준, 정희숙, 정창훈 (2002) 입자의 굴절률변화에 따른 광학적 입자 계수기로 측정된 대기 에어러솔 크기분포의 측정오차, 2002년 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 314-315.
- 조희구 (1980) 서울의 대기 aerosol 입자 크기 분포에 관한 연구, 한국기상학회지, 16, 1-9.
- 전영신, 김지영, 최재천, 신도식 (1999) 황사시 서울과 안면도의 대기 중 에어로졸 수농도 특성. 한국대기환경학회지, 15(5), 575-586.
- 환경부 (2001) 대기환경월보.
- Choi, B.C., C.H. Jung, J. Kim, and S.N. Oh (2002) Characteristics of size distribution for atmospheric aerosols at Kosan, Korea during dust events, 2001, Korean J. Atmos. Sci., 191-198.
- Chun, Y., J. Kim, J.C. Choi, K.O. Boo, S.N. Oh, and M. Lee (2001a) Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust period in Korea, Atmos. Environ., 35, 2715-2721.
- Chun, Y., K.O. Boo, J. Kim, S.U. Park, and M. Lee (2001b) Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea, J. Geophys. Res., 106, 18,461-18,469.
- Chung, H.S. (1998) Validity analysis of atmospheric aerosol size distribution measurement with an Optical Particle Counter, Master thesis, Kwangju Institute of Science and Technology.
- Friehmelt, R. and S. Heidenreich (1999) Calibration of a white-light/90° optical particle counter for "Aerodynamic" size measurements-Experiments and calculations for spherical particles and quartz dust, J. Aerosol Sci., 30, 1271-1279.
- Kim, Y. and J. Boatman (1990) Size calibration corrections for the forward scattering spectrometer probe (FS-SP) for measurement of atmospheric aerosols of different refractive indices, J. Atmos & Oceanic Technol., 7, 681-688.
- Kuhlbusch, T.A.J., A.C. John, and H. Fissan (2001) Diurnal variation of aerosol characteristics at a rural measuring site close to the Ruhr-Area, Germany, Atmos. Environ., 35, S13-S21.
- Liu, Y. and H. Daum (2000) The effect of refractive index on size distributions and light scattering coefficients derived from optical particle counters, J. Aerosol Sci., 31, 945-957.
- Marcazzan, G.M., S. Vaccaro, G. Valli, R. Vecchi (2001) Characterization of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> particulate matter in the ambient air of Milan (Italy), Atmos. Environ., 35, 4639-4650.
- Marcazzan, G.M., G. Valli, and R. Vecchi (2002) Factors influencing mass concentration and chemical composition of fine aerosols during a PM high pollution episode, The Sci. Total Environ., 298, 65-79.
- Shettle, E.P. and R.W. Fenn (1979) Models for the aerosols of the lower atmosphere on their optical properties, AFGL-TR-79-0214, Environmental Research Paper No. 675, NTIS ADA 085951.
- Wang, G., L. Huang, S. Gao, and L. Wang (2002) Measurements of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in urban area of Nanjing, China and the assessment of pulmonary deposition of particle mass, Chemosphere, 48, 689-695.
- Whitby, K.T. (1978) The physical characteristics of sulfur aerosols, Atmos. Environ., 12, 135-159.
- Schutz, L. and R. Jaenicke (1982) Particle number and mass distributions above 10~4 cm radius in sand and aerosol of the Sahara desert, J. Appl. Meteor., 13, 863-870.
- Shen, S., P.A. Jaques, Y. Zhu, M.D. Geller, and C. Sioutas (2002) Evaluation of the SMPS-APS system as a continuous monitor for measuring PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and coarse (PM<sub>2.5-10</sub>) concentrations, Atmos. Environ., 36, 3939-3950.
- Zaizen, Y., M. Ikegami, K. Okada, and Y. Makino (1995) Aerosol concentration observed at Zhangye in China, J. Meteorological Society in Japan, 73, 891-897.