

## 광학적 입자계수기를 이용한 2004년 황사기간 인천지역 에어로졸 특성

정 창 훈 · 조 용 성 · 이 종 태\*  
경인여자대학 환경보건과 · 국립환경연구원 실내환경연구사업단  
\*한양대학교 보건관리학과  
(2005년 4월 8일 접수; 2005년 6월 22일 채택)

### Characteristics of Incheon Aerosol during Asian Dust Period in 2004 using Optical Particle Counter (OPC)

Chang-Hoon Jung, Yong-Sung Cho\* and Jong-Tae Lee\*\*

Department of Environmental Health, Kyungin Women's College, Incheon 407-740, Korea

\*Indoor Environmental Research Board, National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea

\*\*Department of Health Management, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Manuscript received 8 April, 2005; accepted 22 June, 2005)

The characteristics for the aerosol number distribution was studied during spring, 2004 in Incheon. Optical Particle Counter (OPC, HIAC/ROYCO 5230) was used in order to measure the number concentration of aerosol in the range of  $0.3 \sim 25 \mu\text{m}$ . The obtained results were compared with  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  data during Asian dust events. The results show that the size resolved aerosol number concentration from OPC measurement has a similar tendency with  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration. During Asian dust periods, the number concentrations in large particle (CH5~CH8) increase more than small particles which diameter is less than  $2.23 \mu\text{m}$ (CH5) and the same results were shown when  $\text{PM}_{10}$  was compared with  $\text{PM}_{2.5}$  data compared with non-dust days. Consequently, this study shows that size resolved aerosol number concentration from OPC measurement can be used as a useful tool in comparison of mass concentration data.

Key Words : Aerosol number concentration, Optical Particle Counter,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ , Asian dust, Incheon

#### 1. 서 론

대기 에어로졸은 크기, 지역과 시간, 생성요인, 그리고 입자의 화학적 성질 등에 의해 그 특성이 크게 변화한다. 특히 입자크기와 농도 변화는 에어로졸의 가장 중요한 특성으로 대기 에어로졸의 크기 분포의 측정결과에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다<sup>1,2)</sup>. 도시대기 중 분진의 입경별 농도분포는 크게 공기역학적 직경  $2.5 \mu\text{m}$ 를 기준으로 조대입자와 미세입자로 구분한다<sup>3)</sup>. 직경  $2.5 \mu\text{m}$  이하의 미세입자(fine particle)는 주로 자동차, 트럭, 버스와 같은 이동오

염원과 화학적 공정 등과 같은 고정오염원을 포함한 여러 가지 인위적 배출 원으로부터 방출된다. 반면 직경  $2.5 \mu\text{m}$  이상의 조대입자(coarse particle)는 주로 도로표면, 노천광, 불특정오염원, 농업활동 등을 위시한 여러 유형의 자연적인 오염원을 통해 배출된다. 특히, 한반도를 위시한 동북아 지역은 매년 중국, 만주 등지를 기원으로 하는 황사가 빈번하게 발생되고 있고 황사와 함께 이동되는 대기오염물질들 역시 강한 서풍기류에 의해 북태평양까지 이동할 만큼 장거리 이동현상도 발생되고 있다<sup>4)</sup>.

우리나라는 위도상 중위도 편서풍대에 위치하고 있어 고비(Gobi), 타클라마칸(Taklamakan)사막과 황하강 유역 등에서 발생한 토양먼지가 매년 3~5월 경에 편서풍을 타고 2,000~3,000 km 이상의 거리를 2~4일에 걸쳐 이동하는 황사와 같은 대기오염 물

Corresponding Author : Chang-Hoon Jung, Department of Environmental Health, Kyungin Women's College, Incheon 407-740, Korea  
Phone: +82-32-540-0166  
E-mail: jch@kic.ac.kr

질의 장거리 이동현상이 매년 발생하고 있다<sup>5)</sup>. 장거리 이동되는 황사의 성상은 발원지에서의 토양성분 이외에도 이동과정 중에서 오염된 지역의 가스상 물질들이 추가되고 가스와 입자의 상호작용에 의해 황산염이나 질산염 등이 많이 생성된다. 황사시 증가하는 입자 중 직경 2.5  $\mu\text{m}$  내외의 입자는 호흡기에 침착되거나 기관지염, 천식, 안질환 등의 질환을 일으킬 수 있고 정밀기기의 오작동이나 강수 및 토양에의 영향 등 많은 피해를 발생 시킨다<sup>6)</sup>. 또한, 자연적인 토양발생원으로서의 황사는 그 입경분포가 주로 10  $\mu\text{m}$  이상의 조대입자 군에 속하지만 대기분진의 중요한 성분인 미세입자(PM<sub>2.5</sub> : dp $\leq$ 2.5  $\mu\text{m}$ 로서 fine particulate matters)도 다량 포함하고 있어 햇빛을 산란, 흡수 등에 의한 시정 악화 등의 현상에 중요한 역할을 한다<sup>1)</sup>. 최근의 대기오염과 사망간의 관련성을 조사한 다양한 역학연구의 결과, 대기분진과 오존이 사망에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 규명되었으며, 특히 대기분진의 경우 입자 크기가 작은 미세먼지가 인체에 더 해로운 영향을 준다는 점에서 주목을 받고 있다<sup>7-9)</sup>. 이는 대기분진 표면에는 황산염, 질산염, 산, 각종 중금속 등 다양한 유해물질이 표면에 붙어 있어 동일한 농도일 경우 전체 체 표면적이 상대적으로 큰 미세먼지가 건강에 더 큰 영향을 주기 때문인 것으로 해석된다. 따라서 대기분진의 개수 농도가 생리학적 기전 상 지표농도로 가장 널리 사용되고 있는 질량 농도보다 더 중요한 지표로 인식되고 있다.

이러한 대기 중 에어로졸의 개수 농도의 측정 연구는 많이 진행되어 왔으며<sup>10,11)</sup>, 특히 황사 시 에어로졸 수 농도에 관한 연구 등이 진행된 바 있다<sup>12,13)</sup>. 국내에서는 서울지역 대기 에어로졸의 파장별 대기복사에 의한 연구<sup>14)</sup>, 서울지역에서 0.01~1 $\mu\text{m}$  입경범위의 에어로졸의 개수농도 및 체적농도의 변화경향에 관한 연구<sup>15)</sup> 등과 안면도, 제주 고산 등 청정지역에서의 입자 특성에 관한 연구 등<sup>1,2)</sup>이 수행되었다.

최근에는 광학적 입자 계수기(Optical Particle Counter, OPC)를 이용한 대기 중 부유하는 입자의 측정이 진행된 바 있다<sup>12,16)</sup>. 광학적 입자계수기의 경우 대기 중 에어로졸의 개수 농도 분포를 실시간으로 측정할 수 있는 장점을 가지고 있으나 광학적 방법으로 입자의 크기를 예측하므로 굴절률에 따른 입자 크기 보정문제가 해결되지 않은 문제로 남아 있고 측정 가능 크기 분포가 약 0.3  $\mu\text{m}$  이상으로 한정되어 있는 단점이 있다.

수도권에 위치한 인천 지역은 수송량이 많고 산업 공단이 많이 위치해 있으며, 황사와 같은 월경성

대기 오염물질이 우리나라로 유입되는 관문과도 같은 곳이다. 그러나 입자상 오염물질에 관한 크기 분포에 관한 연구는 매우 부족한 상황이며 최근 인천 지역을 포함한 수도권 지역 전반의 시정장애 에어로졸의 광화학적 특성 등에 대한 연구 및 미세입자의 입경분포에 관한 연구가 진행된 바 있으나<sup>17,18)</sup> 인천지역에서 광학적 입자계수기를 이용한 개수 농도에 관한 분포나 황사시의 에어로졸의 크기 분포 등에 관한 연구는 저자가 아는 한 아직 보고된 바 없다.

따라서, 본 연구에서는 2004년 봄철 인천에서 측정된 광학적 입자 계수기(Optical Particle Counter; HIAC/ROYCO 5230)와 미세먼지 연속측정기(PM<sub>2.5</sub> Mass Concentration; FH95SEQ) 및 환경부 자동측정망 자료를 이용하여 이 기간동안의 인천지역 대기 에어로졸 특성을 파악하려 하였다. 자료는 2004년 2월 24일부터 5월 17일까지 OPC로 측정된 크기별 에어로졸 개수농도의 시간별 자료와 미세먼지 연속측정기로 측정된 PM<sub>2.5</sub> 자료로써 이 기간동안 측정된 에어로졸의 크기 분포의 특성과 입자의 질량 농도를 황사 시와 비황사 시를 중심으로 비교하고자 하였다. 또한 측정 기간동안 이들 자료 간 상관관계 및 기상자료와의 상관관계 등을 분석하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 개수농도 측정을 위한 포집방법

본 연구에서는 인천지역의 황사기간을 포함한 봄철 대기 에어로졸 특성을 분석하기 위해 2004년 2월 24일부터 5월 17일까지 인천광역시 계양구 계산길에 위치한 경인여자대학 5층에서 광학적 입자 계수기(미국 HIAC/ROYCO사, Model: 5230)를 이용하여 매시간별 에어로졸의 개수 농도를 측정하였다. 광학적 입자 계수기는 개개의 입자에 대한 산란광의 강도를 측정하여 그 강도와 미리 정해진 강도와의 관계에 의해 입자의 크기를 추정하는 방법이다. 즉, 펄프로 흡인된 시료 공기가 입자 개개의 산란광의 강도를 특정한 산란각에 대해 측정하고 산란광은 산란광의 양에 비례하는 펄스 형태의 전기적 신호로 변환된다. 이때 전기적 신호의 크기는 입자의 크기와 관계되고, 펄스 수는 입자수와 관계되어 에어로졸 입자의 크기 별 수 농도를 측정할 수 있게 하는 원리이다<sup>2)</sup>.

본 연구에서는 매 시간별로 진공펌프에 의해 1 ft<sup>3</sup>/min의 공기를 흡입시켜 구간별 수 농도를 2회 측정 후 그 평균값을 이용하였다. 측정구간은 0.3~25  $\mu\text{m}$ 인 에어로졸을 지수 척도로 동일한 8개 구간으로 나누었다. 측정 구간 및 채널은 표 1과 같다.

Table 1. The channel and size range of an optical particle counter(OPC)

Channel	Size Range (Geometric mean diameter)
CH1	0.3~0.5 $\mu\text{m}$ (0.39 $\mu\text{m}$ )
CH2	0.5~0.82 $\mu\text{m}$ (0.64 $\mu\text{m}$ )
CH3	0.82~1.35 $\mu\text{m}$ (1.05 $\mu\text{m}$ )
CH4	1.35~2.23 $\mu\text{m}$ (1.74 $\mu\text{m}$ )
CH5	2.23~3.67 $\mu\text{m}$ (2.86 $\mu\text{m}$ )
CH6	3.67~6.06 $\mu\text{m}$ (4.72 $\mu\text{m}$ )
CH7	6.06~10.00 $\mu\text{m}$ (7.79 $\mu\text{m}$ )
CH8	10.00~25.00 $\mu\text{m}$ (15.81 $\mu\text{m}$ )

2.2. 질량농도 측정을 위한 포집방법

질량 농도의 측정을 위해 역시 경인여자대학 옥상에서 미세먼지 연속측정기를 설치하여 24시간 간격으로 질량농도를 관측하였다. 측정 기간은 2004년 4월 9일부터 5월 15일까지이며 측정 장비는 장기간에 걸쳐 연속적으로 PM<sub>2.5</sub> 시료를 측정할 수 있도록 설계된 FH95SEQ(ESM Andersen Instruments)를 이용하여 포집하였으며, 여지(Quartz filter; 46 mm dia, 2.0  $\mu\text{m}$  pore size, Gelman Sciences)는 포집 전과 포집 후에 걸쳐 48시간 항온·항습하여 16.7 l/min의 유량으로 시료를 포집하였다.

3. 측정 결과 및 고찰

3.1. 광학적 입자 계수기로 측정된 대기 분진 농도 분포

그림 1은 광학적 입자 계수기로 측정된 대기 에어로졸의 개수 농도 분포를 보여 주고 있다. 2004년 2월 24일부터 5월 17일까지의 측정 기간 동안의 평균 농도와 표준편차는 각 채널별로 29.3903  $\pm$  8.5726/cm<sup>3</sup> (CH1), 13.1034  $\pm$  8.6908/cm<sup>3</sup> (CH2), 2.2369  $\pm$  2.0213/cm<sup>3</sup> (CH3), 1.3027  $\pm$  1.1205/cm<sup>3</sup> (CH4), 0.5419  $\pm$  0.5490/cm<sup>3</sup> (CH5), 0.1290  $\pm$  0.2171/cm<sup>3</sup> (CH6), 0.0292  $\pm$  0.5779/cm<sup>3</sup> (CH7), 0.0186  $\pm$  0.5917/cm<sup>3</sup> (CH8)로 나타났다.

평균값에 대한 표준 편차의 비를 구하여 보면 29.17 %(CH1), 66.32 %(CH2), 90.36 %(CH3), 92.53 %(CH4), 101.39 %(CH5), 168.39 %(CH6), 1981.01 %(CH7), 3183.69 %(CH8)로 입자의 크기가 증가할수록 입자의 변동폭은 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 특히, CH7과 CH8 크기 영역의 입자의 변동 폭

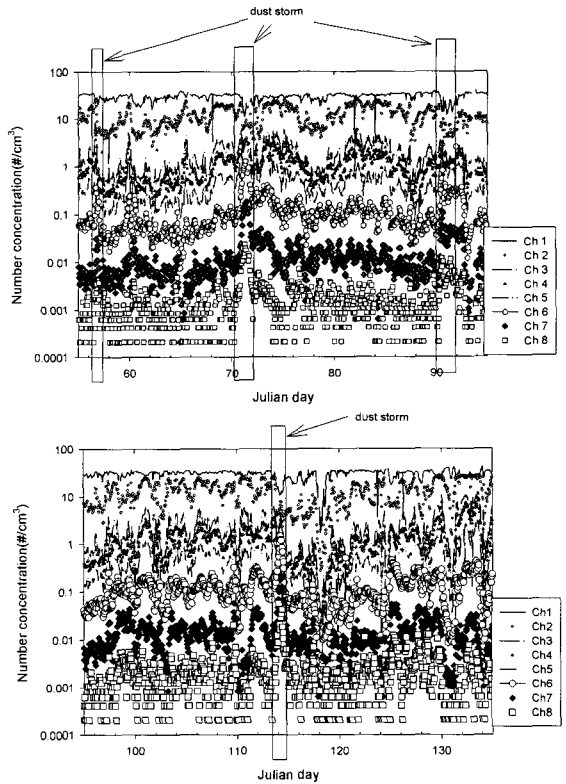


Fig. 1. Aerosol number concentration using OPC measurement in Incheon, 2004.

이 매우 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 황사에 의한 조대입자의 유입량 증가 혹은 강수에 의한 조대입자의 세정, 기타 외부 요인들에 의한 조대입자의 변화폭이 다른 미세입자크기의 영역보다 큰 폭으로 변하고 있음을 보여 준다.

2004년 황사일수는 2월에 1차례 1일, 3월에 2차례 4일, 4월에 1차례 1일로 4차례에 걸쳐 총 6일이 관측되었다. 황사의 발생일시는 표 2와 같다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 황사 발생시 대기 에어로졸의 개수 농도는 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 특히, 채널의 수가 증가할수록, 즉, 입자의 크기가 클수록 조대입자의 개수가 평상일의 평균 개수 농도에 비해 크게 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이는 황사 발생시 토양성분을 함유한 조대입자의 농도가 증가하는 것으로 나타난 일반적인 연구 결과와 일치한다<sup>1,2)</sup>.

에어로졸 입자의 크기 분포형태로 측정 기간 동안의 농도를 살펴보면 그림 2와 같이 표현할 수 있다. 그림에서 실선은 측정 기간의 평균 에어로졸 분포를 나타내고 있고 점선들은 몇몇 황사 발생시의 에어로졸 분포를 나타내고 있다. 그림 2에서 보듯이 황사가 발생하였을 때 주로 직경 1  $\mu\text{m}$  이상의 조대

Table 2. Asian dust periods in Incheon, 2004

Number	Asian dust days(Begin) (Julian day)	Asian dust days(End) (Julian day)
1	25 <sup>th</sup> Feb.(56)	25 <sup>th</sup> Feb.(56)
2	10 <sup>th</sup> March(70)	11 <sup>th</sup> March(71)
3	30 <sup>th</sup> March(90)	31 <sup>th</sup> March(91)
4	23 <sup>th</sup> April(114)	23 <sup>th</sup> April(114)

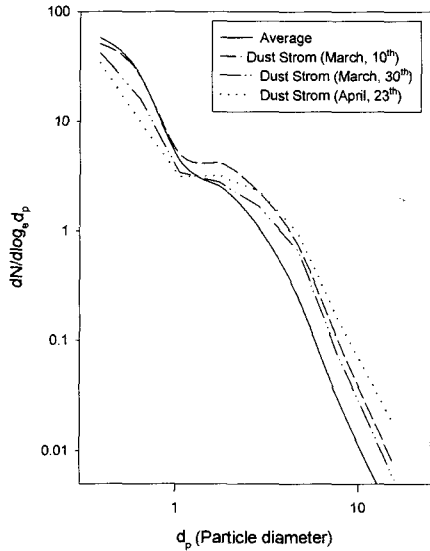


Fig. 2. Comparison of the aerosol size distribution between dust and non-dust days in Incheon during spring, 2004.

입자 구간의 입자가 증가하는 것을 볼 수 있다. 직경 1  $\mu\text{m}$  이하의 미세 입자들은 변화가 없거나 약간 감소하는 것을 볼 수 있다.

그림 3은 2004년 4월 23일 발생한 황사의 농도변화를 시간별로 살펴본 것이다. 광학적 입자계수기로 측정된 입경별 개수 농도 자료와 동일시간 인천 구월동에서 측정된 환경부 측정망 PM<sub>10</sub> 자료를 비교하였다(환경부, 2004)<sup>19)</sup>. 그림 3에서 보듯이 황사가 발생한 시점에서 광학적 입자계수기의 농도와 PM<sub>10</sub>의 질량농도가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 광학적 입자계수기의 측정 자료의 경우 입경이 클수록 그 증가폭은 더 커지는 것을 알 수 있다. 이는 그림 1에서 설명한 바와 같이 황사발생시 상대적으로 크기가 큰 초대입자의 수가 증가하는 것을 보여주는 것이다. 그림 3으로부터 광학적 입자계수기로 측정된 자료와 PM<sub>10</sub>자료가 상관적으로 적용될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 측정기간 동안 농도 변화비를 조사함으로써 보다 정량적으로

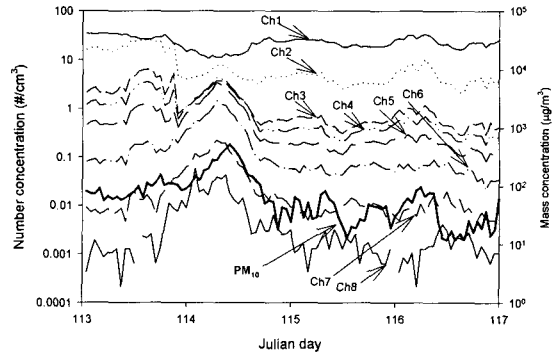


Fig. 3. Comparison of the number concentration from OPC measurement and PM<sub>10</sub> mass concentration.

확인할 수 있다. 그림 4는 광학적 입자 계수기로 측정된 매 시간별 입자 개수 농도를 측정기간의 평균치로 나눈 입자 개수 농도 비이다. 즉 측정 기간 중의 평균 입자 농도를 1로 보고 각 관측 시점에서의 대기분진 입자의 개수 농도가 얼마나 증가하는지를 나타낸다. 입자 개수 농도 비가 2라고 하면 평균 2배 정도 증가한 입자 개수 농도임을 보여주는 것이다. 그림에서 화살표는 황사 발생일을 나타내고 있다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 CH1과 CH2의 농도 비에서는 황사 기간을 보여주는 뚜렷한 시그널이 확인되지 않았다. CH3과 CH4에 이르러서는 황사 기간 중 평소보다 2~4배 이상의 농도가 증가하는 경향을 확인할 수 있으나 이는 다른 외부 환경조건에 의한 변동의 폭과 비슷하여 황사 기간에만 이 크기 구간의 개수 농도가 증가하는 것이 아님을 알 수 있다. 직경 2.23  $\mu\text{m}$  이상인 CH5에 이르러서야 황사에 의해 증가하는 에어로졸 농도의 경향이 뚜렷이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 채널수가 증가할수록 뚜렷이 증가하여 4월 23일 발생한 황사의 경우 CH5에서 6.53배, CH6에서 12.09배, CH7에서 15.79배 그리고 CH8에서는 29.95배로 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 초대입자의 개수 농도 증가비로 확인해 볼 때, 3월 10일 발생한 강도가 3월 30~31일에 발생한 황사의 강도에 비해 다소 큰

광학적 입자계수기를 이용한 2004년 황사기간 인천지역 에어로졸 특성

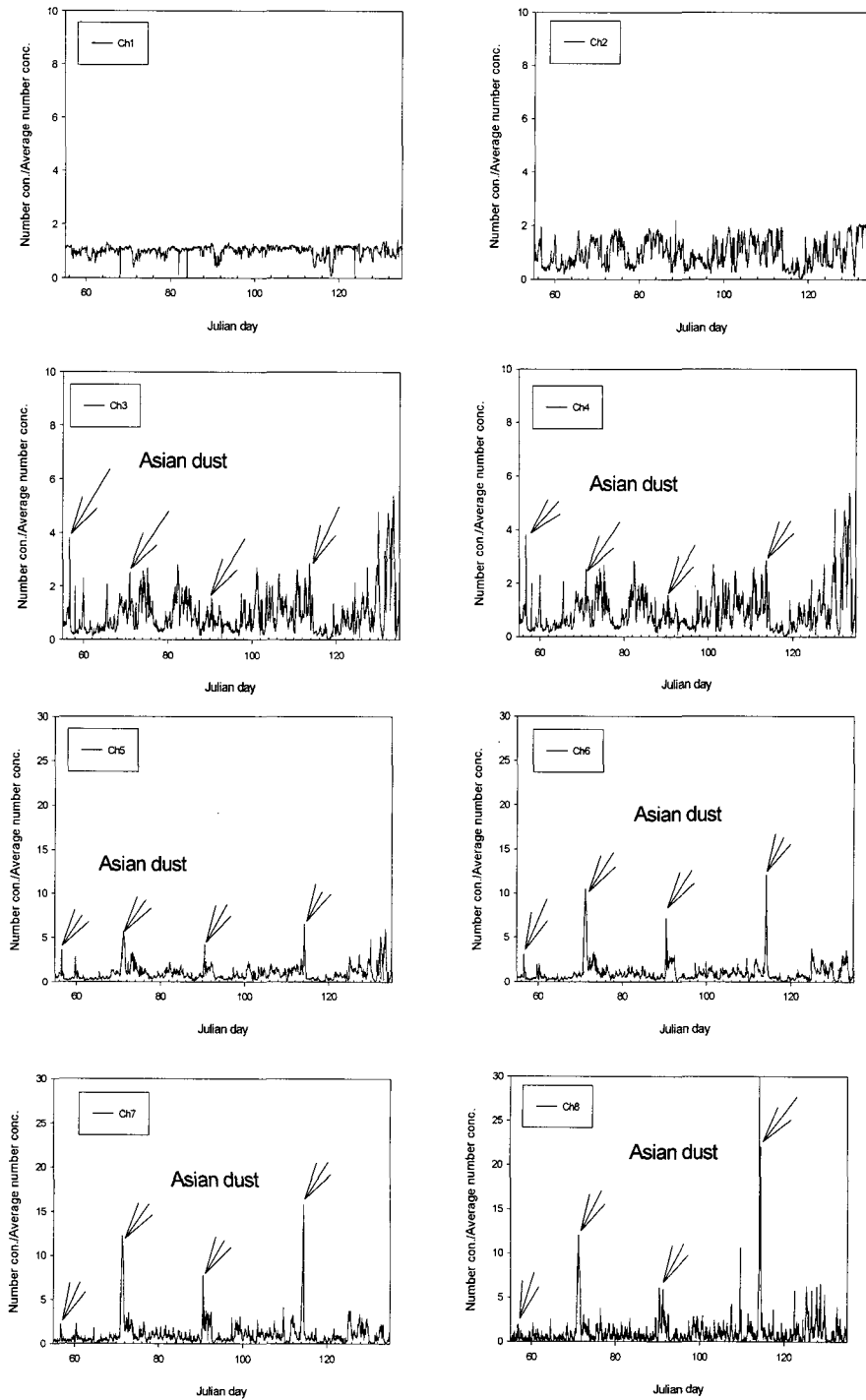


Fig. 4. Size resolved aerosol number concentration ratio using OPC measurement during Asian dust in Incheon, 2004.

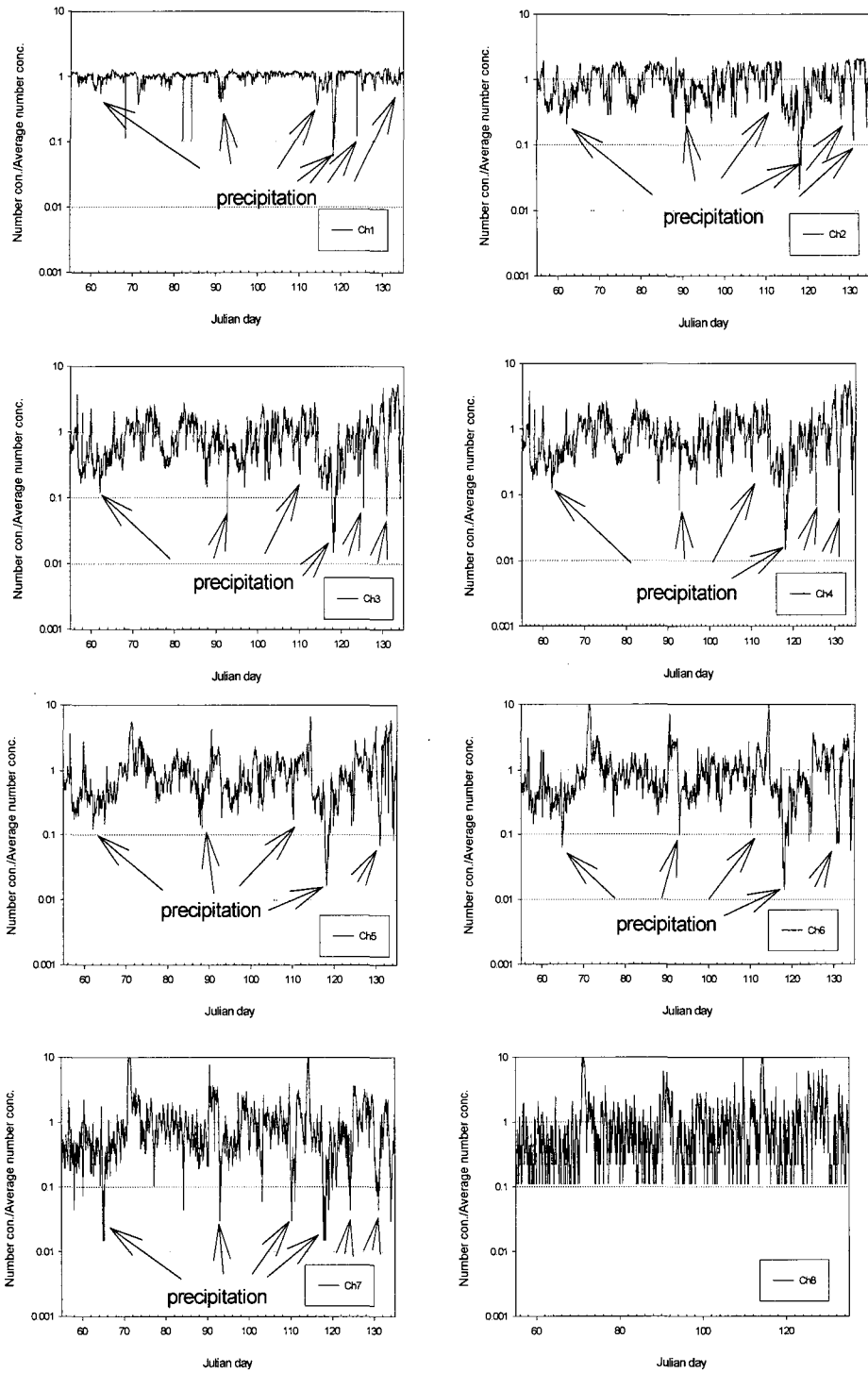


Fig. 5. Size resolved aerosol number concentration ratio using OPC measurement during precipitation in Incheon, 2004.

것을 볼 수 있고, 4월 23일 발생한 황사의 강도가 가장 큰 것을 볼 수 있다. CH4 이하의 미세입자의 증가 비는 조대 입자의 증가비에 비해 상대적으로 미약한 증가를 보임을 알 수 있다.

강수량에 의한 에어로졸의 세정효과를 파악하기 위해 동일 기간 중 개수 농도비를 강수사례에 걸쳐 조사하여 보았다. 그림 5는 강수시 세정된 에어로졸의 농도 변화를 보여 주고 있다. 표 3은 측정 기간 중 발생한 강수일과 강수량을 나타낸 것이다. 표 3에서 볼 수 있듯이 측정 기간 중 크고 작은 강수 사례가 18회 존재하였다. 그림 5에서는 이 중 강수량이 10 mm 이상인 6차례의 강수 사례에 대하여 에어로졸의 개수 농도가 크기별로 어떠한 변화를 보이는지 살펴보았다. 이론적으로 볼 때 강수 과정동안 직경이 큰 에어로졸 입자가 관성 충돌 및 중력의 영향을 받아 더 많이 세정될 것으로 예측된다. 그러나 그림 5에서 볼 수 있듯이 강수에 의한 에어로졸의 감소비는 채널이 증가할수록 증가하고는 있으나 예상만큼 큰 차이를 보이지 않았다. 강수에 의한 에어로졸의 세정과정은 강수입자의 크기분포, 강수량, 그리고 에어로졸의 크기 분포 등 다양한 요소의 영향을 받게 되므로 보다 정량적인 해석을 위해서는 강수 입자의 측정 등을 포함한 심도 있는 관측이 요구된다.

3.2. PM<sub>2.5</sub> 측정 자료와의 비교

측정 기간 중 2004년 4월 19일에서 5월 15일까지

Table 3. Precipitation days and amount during measurement periods

	Precipitation days (Julian day)	Precipitation Amount (mm)
February	26th (57)	0.4
March	4th (64)	10.2
	16th (76)	1.5
	17th (77)	1.5
	24th (84)	1
April	1st (92)	12
	2nd (93)	1
	6th (97)	0.4
	18th (109)	2
	19th (110)	17
	26th (117)	18.5
	27th (118)	13.5
May	2nd (123)	2.5
	3rd (124)	14.5
	4th (125)	0.5
	8th (129)	0.4
	9th (130)	32.5
	10th (131)	16.5

의 기간 동안에 PM<sub>2.5</sub>의 측정을 병행하였다. PM<sub>2.5</sub>는 광학적 입자계수기와 동일한 측정 장소인 경인여자대학 5층 옥상에서 측정하였다. 그림 6은 측정된 PM<sub>2.5</sub> 질량 농도와 광학적 입자 계수기로 측정된 채널별 개수 농도 자료를 두 측정 장비가 동시에 측정된 기간동안 비교한 것이다. 광학적 입자계수기로 측정된 개수 농도 자료는 PM<sub>2.5</sub>에 해당하는 크기 구간인 CH1, 2, 3의 자료를 비교 하였다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 광학적 입자계수기의 자료와 PM<sub>2.5</sub>의 자료는 그 증감 경향이 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 4월 23일의 황사 기간 중 PM<sub>2.5</sub>는 큰 증가를 보이지 않았는데, 이는 그림 4에서 보여준 바와 같이 황사 기간 중 2.23 μm 이하의 입자의 증가가 2.23 μm 이상의 입자의 증가보다 그 폭에 있어 미미했던 광학적 입자 계수기의 측정자료 결과와 일치한다.

3.3. 측정 자료 간 상관성 비교

이와 같이 측정된 자료의 보다 정량적인 비교를 위하여 측정 자료 간 상관도를 조사하여 보았다. 표 4는 37일의 광학적 입자 계수기와 PM<sub>2.5</sub>가 동시에 측정된 연구기간(2004년 4월 9일부터 5월 15일) 동안의 측정 자료의 분포를 통계적으로 비교한 것이다. 광학적 입자계수기로 측정된 시간별 자료를 일 평균한 에어로졸의 개수농도와 FH95SEQ(ESM Andersen Instruments)로 측정된 PM<sub>2.5</sub> 질량농도, 환경부 측정망의 PM<sub>10</sub>자료 및 기상요인에 대한 평균값, 표준편차 및 분포를 나타내었다. 현행 대기환경기준이 시행되고 있는 PM<sub>10</sub>의 경우 일평균 농도가 83.55 μg/m<sup>3</sup>로서 대기기준을 만족하고 있으나 일평균 최고 201.28 μg/m<sup>3</sup>까지 기록된 것을 보았을 때 단기기준(150 μg/m<sup>3</sup>)을 초과하는 날이 많음을 알 수 있다. PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>간의 비율은 약 50 %로서 기존의 연구결과<sup>20~22)</sup>와 유사한 결과를 나타내었다. 에어로졸의 질량농도 분포를 살펴보면 기존의 보고<sup>22)</sup>와 마찬가지로

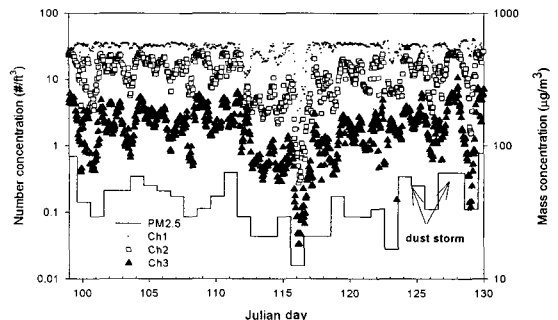


Fig. 6. Comparison of the OPC and PM<sub>2.5</sub> measurement data.

Table 4. Summary statistics for number concentration, surrogate of mass concentration, and mass concentration of aerosol and weather in Incheon of Korea during Spring, 2004

Variable	N <sup>a</sup>	Mean±SD <sup>b</sup>	Min. <sup>c</sup>	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	Max. <sup>d</sup>
OPC <sup>e</sup> data (number/cm <sup>3</sup> )									
CH1 (0.30~0.50 μm)	37	29.19±4.73	12.00	23.39	27.17	31.08	32.19	33.01	34.56
CH2 (0.50~0.82 μm)	37	14.43±5.87	2.01	5.40	10.80	14.45	18.04	23.28	24.91
CH3 (0.82~1.35 μm)	37	2.71±1.83	0.20	0.66	1.67	2.45	3.42	5.61	7.51
CH4 (1.35~2.23 μm)	37	1.57±1.07	0.11	0.43	0.93	1.47	1.90	2.61	4.77
CH5 (2.23~3.67 μm)	37	0.62±0.41	0.04	0.18	0.36	0.59	0.73	1.36	1.86
CH6 (3.67~6.06 μm)	37	0.14±0.12	0.01	0.05	0.06	0.12	0.17	0.24	0.57
CH7 (6.06 ~ 10.00 μm)	37	0.04±0.18	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	1.09
CH8 (10.00 ~ 25.00 μm)	37	0.03±0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	1.10
Surrogate (number/cm <sup>3</sup> )									
CH1_4 (0.30~2.23 μm)	37	47.89±10.42	14.32	33.18	45.27	50.62	53.52	60.25	63.10
CH2_4 (0.50~2.23 μm)	37	18.70±8.50	2.32	6.40	13.03	18.53	23.05	31.82	36.97
CH1_7 (0.30~10.00 μm)	37	48.70±10.74	14.38	33.41	45.61	51.17	54.29	61.33	64.82
CH2_7 (0.50~10.00 μm)	37	19.51±8.97	2.38	6.64	13.52	19.09	25.03	32.60	39.48
Mass data (μg/m <sup>3</sup> )									
PM <sub>2.5</sub> (less than 2.5 μm)	37	41.36±19.28	12.48	20.79	29.11	37.43	49.90	62.38	91.48
PM <sub>10</sub> (less than 10 μm)	32	83.55±33.62	37.06	49.65	59.17	86.72	98.23	116.42	201.28
Weather data									
Temperature (°C)	37	14.28±2.18	7.68	11.79	13.20	14.26	15.73	16.92	18.54
Humidity (%)	37	63.75±15.80	32.00	42.00	53.75	61.08	77.79	84.17	90.67

a. Number of day; b. Standard deviation; c. Minimum; d. Maximum; e. Optical particle counter

가지로 오른쪽으로 치우친 분포(right skewed)를 보인 반면, 개수농도의 경우에는 왼쪽으로 치우친 분포(left skewed)를 나타내었는데 이는 개수 농도의 경우 크기가 작은 입자들이 많이 분포하고 있기 때문이며 질량 농도의 경우 입자의 크기가 클수록 질량이 더 크기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 온도 및 습도와 같은 기상요인은 정규분포를 가지고 있는 것으로 나타났다.

측정 자료간의 상관관계를 보다 정량적으로 알아 보기 위하여 OPC의 측정 자료와 본 연구에서 PM<sub>2.5</sub> 자료 그리고 환경부 측정망의 PM<sub>10</sub>자료사이의 상관도를 기온, 습도 등의 기상 자료와 연관하여 조사하여 보았다.

표 5는 일평균 에어로졸의 개수농도와 질량농도 및 기상요인간의 상관관계를 나타낸 것이다. 표에서 볼 수 있듯이 질량농도와 개수농도간의 상관계수는 모두 0.70 이상의 높은 상관성을 나타내었다. 이는 질량농도자료의 대체(surrogate)로서 개수농도가 적합한 것임을 보여 주는 것이다. 개수 농도자료는 질량 농도 자료와 달리 입자의 크기별 개수 농도를 알 수 있다. 따라서 에어로졸 입자의 크기 분포를 파악할 수 있게 해 주는 장점을 갖게 된다. 질량 농도 자료 중 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>도 상관계수가 0.71로 높은 상관관계를 보였다. 채널별 개수 농도와 이들 질량농

도(PM<sub>2.5</sub> 및 PM<sub>10</sub>)와의 상관관계를 살펴보면 먼저 PM<sub>2.5</sub>의 경우 예상 했던 대로 CH2~CH4까지 0.7이상의 높은 상관계수를 갖고 있으나 CH6 이상, 즉 입경 3.67 μm 이상의 조대입자와의 상관성은 상대적으로 적은 것으로 나타났다. PM<sub>10</sub> 자료와 광학적 입자 계수기의 채널별 개수 농도와와의 상관도는 PM<sub>2.5</sub> 자료와의 상관도에 비해서는 다소 떨어지는 값을 보이고 있으나, CH5~CH6까지의 조대입자와 PM<sub>10</sub>이 가지는 상관계수 값이 미세입자가 갖는 상관도와 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 측정 지점이 PM<sub>2.5</sub>와 광학적 입자계수기의 경우 동일한 지점에서 관측하였으나 PM<sub>10</sub>자료의 경우 환경부 측정망을 사용하는데에서 오는 차이인 것으로 해석된다.

개수농도 중 첫 번째 채널(CH1)의 경우에는 질량 농도 자료와 비교하여 낮은 상관계수와 일관되지 않은 상관성을 나타내었다. 이는 측정오차로 인한 것으로 판단되며 정창훈 등(2003)은 이러한 측정오차의 원인으로서 0.30~0.50 μm 구간의 미세한 입자는 OPC의 측정한계를 벗어나며 입자의 개수 검출 한계와 관계가 있다고 보고하였다<sup>23)</sup>.

일반적으로 기상조건 역시 에어로졸의 농도와 밀접한 관계를 갖는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 기상청에서 측정된 인천 지역의 기온 및 상대 습도자료를 각 채널별 개수 농도 자료와 질량 농도 자



Table 5. Pearson correlation coefficients for daily mean concentrations of aerosol and weather variables (N=37)

	PM <sub>2.5</sub>	CH1_4	CH2_4	PM <sub>10</sub>	CH1_7	CH2_7	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	TEMP <sup>a</sup>	HUMD <sup>b</sup>	
PM <sub>2.5</sub>		0.70*	0.75*	0.71*	0.72*	0.75*	0.21	0.73*	0.72*	0.72*	0.65*	0.44*	0.44*	0.44*	0.31	0.15	
CH1_4			0.89*	0.51*	0.99*	0.88*	0.60*	0.93*	0.78*	0.71*	0.58*	0.28	0.20	0.20	0.58*	0.33*	
CH2_4				0.61*	0.91*	0.99*	0.17	0.99*	0.95*	0.92*	0.81*	0.54*	0.36*	0.35*	0.36*	0.43*	
PM <sub>10</sub>					0.53*	0.62*	-0.12	0.63*	0.49*	0.56*	0.63*	0.57*	0.22	0.18	0.02	0.07	
CH1_7						0.90*	0.56*	0.94*	0.80*	0.74*	0.62*	0.32*	0.24	0.24	0.58*	0.34*	
CH2_7							0.15	0.98*	0.96*	0.93*	0.83*	0.57*	0.39*	0.38*	0.36*	0.42*	
CH1								0.27	0.01	-0.08	-0.18	-0.35*	-0.20	-0.18	0.63*	-0.04	
CH2									0.89*	0.84*	0.74*	0.47*	0.28	0.27	0.40*	0.40*	
CH3										0.97*	0.85*	0.56*	0.45*	0.44*	0.26	0.48*	
CH4											0.93*	0.70*	0.52*	0.51*	0.26	0.40*	
CH5												0.87*	0.55*	0.52*	0.24	0.24	
CH6													0.67*	0.63*	0.17	-0.01	
CH7														0.99*	0.14	0.16	
CH8															0.14	0.18	
TEMP																	0.00
HUMD																	

a. Temperature; b. Humidity; \*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

료와 비교 하였다. 표 5에서 볼 수 있듯이 기상조건과 본 연구의 측정 자료와의 상관성은 명백히 확인할 수 없었다. 이는 본 자료가 2004년 봄철이라는 한 계절의 자료만을 분석한 것이어서 주로 계절별 경향을 반영하는 온도나 습도 자료와의 상관성을 밝히지 못한 것으로 사료된다. 그러나 크기가 작은 CH2나 CH3구간의 입자들의 경우 상대습도에 비례하는 경향을 보였다. 이는 작은 크기의 입자가 응축 등에 의해 개수농도가 증가하는 것을 보여주는 것으로 해석할 수 있다. 본 연구를 통하여 얻어진 크기별 대기 에어로졸의 개수농도자료를 질량 농도로 환산하기 위해서는 입자의 크기별 개수농도를 부피 농도로 환산하여 밀도를 곱하여 주면 된다. 광학적 입자 계수기는 입자에 의해 산란된 빛의 강도가 입자크기에 의존한다는 가정 하에서 입자의 크기를 측정하는데 입자에 의해 산란되는 빛의 산란세기는 Mie의 이론에 의해 구하여 진다<sup>24)</sup>. Mie 이론에 의하면 산란강도는 산란각과 입사된 빛의 파장 그리고 입자의 굴절률의 함수로 정의되어 있다. 광학적 입자 계수기의 경우, 에어로졸의 크기구간 설정을 위해 일반적으로 굴절률이 1.59인 폴리스티렌 라텍스 (Polystyrene latex, PSL) 입자를 기준으로 설계되어 있다. 그러나 실제 대기의 에어로졸은 입자의 구성에 따라 각기 다른 굴절률을 갖게 된다. 이러한 실제 대기 에어로졸과 폴리스티렌 입자의 굴절률의 차이로 인해 입자의 크기 설정 구간의 정확도는 감소하게 된다. 따라서 정확한 크기별 입자의 개수농

도를 측정하기 위해서는 대기 에어로졸의 굴절률을 고려한 광학적 입자 계수기의 보정이 필요하다<sup>25,26)</sup>. 때문에 질량 결과와 개수 농도간의 정확한 상관관계 예측을 위해서는 정확한 대기 중 입자의 굴절률 보정이 선행되어야 할 것으로 보인다.

#### 4. 결 론

본 조사에서는 광학적 입자계수기와 PM<sub>2.5</sub> 측정을 통하여 2004년 봄철 인천지역의 대기 에어로졸의 크기 분포 특성을 살펴보았다. 측정된 자료는 PM<sub>10</sub> 환경부 측정망 자료 및 동일 지점에서 측정된 PM<sub>2.5</sub> 자료등과 비교해 보았다. 비교 결과 광학적 입자 계수기의 개수 농도의 변화 경향이 PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub> 자료와 경향에 있어 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

2004년에 발생한 4차례의 황사 발생 일을 살펴본 결과 황사의 발생시 채널의 수가 증가할수록, 즉, 입자의 크기가 클수록 조대 입자의 개수가 정상일의 평균 개수 농도에 비해 크게 증가하는 것을 볼 수 있었다. 직경 0.82~2.23 μm에 해당하는 CH3과 CH4에 이르러 황사 기간 중 평소보다 2~4배 이상의 농도가 증가하는 경향을 확인할 수 있으나 다른 조건에 의한 개수농도의 변동 폭과 비슷한 것에 비해 직경 2.23 μm이상인 CH5에 이르게 되면 황사 시 에어로졸 개수 농도의 증가가 다른 변화 폭에 비해 두드러짐을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 입자 크기별 개수 농도 측정을 통하여 기존 질량 측정기가 본

석해 내지 못하는 입자 개수 농도의 변화를 크기별로 파악할 수 있음을 보여 주고 있다.

대기 에어로졸 표면의 황산염, 질산염, 산, 각종 중금속 등 다양한 유해물질은 입자의 표면에 붙어 있어 동일한 농도일 경우 전체 체표면적이 상대적으로 큰 미세먼지가 건강에 더 큰 영향을 줄 것으로 보고되고 있어, 현재 대기 에어로졸의 지표농도로 가장 널리 사용되고 있는 질량 농도보다는 개수 농도가 생리학적 기전상 상대적으로 더 중요한 지표농도로 여겨지고 있는 추세이다<sup>7-9)</sup>. 따라서 본 연구 결과는 이를 뒷받침해 줄 수 있는 연구결과라 판단된다. 따라서 향후 개수 농도와 질량 농도의 상관관계 보정에 관한 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것으로 보이며 이를 위해 굴절률 보정 및 보다 장기적인 종합 관측이 선행되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업 지원(Eco-technopia 21 Project)에 의해 수행된 연구결과의 일부입니다.

#### 참고 문헌

- 1) 전영신, 김지영, 최재천, 신도식, 1999, 황사시 서울과 안면도의 대기 중 에어로졸 수농도 특성, 한국대기환경학회지, 15(5), 575-586.
- 2) 김지영, 최병철, 2002, 한반도에서 측정된 에어로졸의 크기 분포와 지역별 특성, 한국기상학회지, 38(2), 95-104.
- 3) Seinfeld, J. H. and S. N. Pandis, 1998, Atmospheric Chemistry and Physics, Wiley, New York, USA.
- 4) Merrill, J. T., M. Uematsu and R. Bleck, 1989, Meteorological analyses of long-range transport of mineral aerosol over the North Pacific, J. Geophys. Research, 94, 8584-8598.
- 5) 정용승, 김태군, 1991, 대기오염의 장거리 이동 사례연구: 황사, TSP, Sulphate의 발원지 추적, 한국대기보전학회지, 7(3), 197-202.
- 6) 윤용황, 1990, 한반도에 수송되는 황사의 특징에 관한 연구, 한국기상학회지, 26(2), 111-120.
- 7) Laden, F., L. M. Neas, D. W. Dockery and J. Schwartz, 2000, Association of fine particulate matter from different sources with daily mortality in six US cities, Environ. Health Perspect., 108, 941-947.
- 8) Pekkanen, J., K. L. Timonen, J. Ruuskanen, A. Reponen and A. Mirme, 1997, Effects of ultrafine and fine particles in urban air on peak expiratory flow among children with asthmatic symptoms, Environ. Res., 74, 24-33.
- 9) Peters, A., H. E. Wichmann, T. Tuch, J. Heinrich and J. Heyder, 1997, Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles, Am. J. Respir. Crit. Care Med., 155, 1376-1383.
- 10) Whitby, K. T., 1978, The physical characteristics of sulfur aerosols, Atmos. Environ., 12, 135-159.
- 11) Schutz, L. and R. Jaenicke, 1982, Particle number and mass distributions above 10~4cm radius in sand and aerosol of the Sahara desert, J. Appl. Meteor., 13, 863-870.
- 12) Wang, G., L. Huang, S. Gao and L. Wang, 2002, Measurements of PM10 and PM2.5 in urban area of Nanjing, China and the assessment of pulmonary deposition of particle mass, Chemosphere, 48, 689-695.
- 13) 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.
- 14) 조희구, 1980, 서울의 대기 aerosol 입자 크기 분포에 관한 연구, 한국기상학회지, 16, 1-9.
- 15) 김필수, 김윤장, 이양호, 조숙현, 안승태, 1986, 도시대기 Aerosol의 입자직경 0.01~1.0  $\mu\text{m}$  범위의 농도변화 특성, 한국대기보전학회지, 2, 41-50.
- 16) Chun, Y., J. Kim, J. C. Choi, K. O. Boo, S. N. Oh and M. Lee, 2001, Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust period in Korea, Atmos. Environ., 35, 2715-2721.
- 17) 유인경, 조석연, 2004, 인천 지역 미세먼지의 입경 분포 특성에 관한 연구, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 176-177.
- 18) 김영준, 이병욱, 정현록, 김민정, 김경원, 김신도, 한진석, 2004, 서울·인천 지역 시정장에 에어로졸의 광·화학적 특성, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 217-218.
- 19) 환경부, 2004, 대기환경 월보.
- 20) Chow, J. C., 1995, Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles, J. Air & Waste Manage. Assoc., 45, 320-382.
- 21) 조용성, 이종태, 김윤신, 홍승철, 김호, 하은희, 박혜숙, 이보은, 2003, 서울시 대기오염과 일별

- 사망의 상관성에 관한 시계열적 연구(1998-2001년), 한국대기환경학회지, 19(6), 625-637.
- 22) 조용성, 이홍석, 김운신, 이종태, 박진수, 2003, 서울 성동구 지역 미세먼지의 화학적 조성에 관한 연구, 한국환경과학회지, 12(6), 665-676.
- 23) 정창훈, 전영신, 최병철, 2003, OPC(광학적 입자계수기)로 측정된 2001년 서울지역 에어로졸의 입경 분포, 한국대기환경학회지, 19(5), 515-528.
- 24) Bohren, G. F. and D. R. Hoffman, 1983, Absorption and Scattering of Light by Small Particles, Wiley, New York, 296pp.
- 25) Friclmelt, 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.
- 26) 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.