

제주 고산 지역의 에어러솔 수농도 변동과 기상요소와의 상관성 연구 : 2001-2003

Relationship between Meteorological Elements and Aerosols Number Concentration at Gosan, Jeju for 2001~2003

이 명 주* / 오 성 남** / 김 은 연*** / 장 기 호****

Myoung-Joo Lee / Sung-Nam Oh / Eun-Yun Nho-Kim / Ki-Ho Chang

Abstract

With the aim to develop the monitoring technology on background atmosphere and climate change over Korean Peninsula, observations and studies on chemical, physical and optical properties of the atmospheric aerosols are made. Aerosol number concentration are measured with Optical Particle Counter from 2001 to 2003 at Gosan for 8 size intervals from 0.3 to 25 μm diameter range. For the seasonal variation, the number concentration of coarse particles in spring at Gosan was higher than other seasons due to the influence of sand storm in spring. There is no significant correlations between fine particles (0.3~0.5 μm) and meteorological parameters, such as relative humidity, wind speed and visual range, while the correlation between the number concentration of small particles (0.5~2.23 μm) and relative humidity showed a positive value. This trend was inverted for the case of wind speed: aerosol number concentration showed a small decreasing tendency with increasing wind speed for small particles but the high wind speed in winter season increased coarse particle concentration. Finally, particles most efficient in light extinction were found to be at the size of about 0.5~1 μm .

key words : aerosol, number concentration, particle size, relative humidity, wind speed, wind direction, visual range

요 지

기후변화와 관련한 한반도 배경대기의 에어러솔에 대한 특성 연구는 관측된 입자 수농도와 대기 복사 관측 자료를 바탕으로 에어러솔의 물리적, 화학적 및 광학적 특성에 대하여 분석하였다. 에어러솔의 물리적 특성 연구는 2001년부터 2003년까지 제주도 고산관측소에 설치된 광학입자계수기(Optical Particle Counter, OPC)로 0.3~25 μm 직경의 에어러솔을 8개 구간으로 나누어 관측하여 분석하였다. 그 결과 황사의 발생률이 높은 봄철에 조대 입자(2.2 μm 이상)의 수농도가 다른 계절보다 높게 나타났다. 기상요소(상대습도, 풍속, 풍향, 시정 등)와 입자 수농도의 상관관계 분석에 의하면 0.3~0.5 μm 크기 구간에서는 상관성이 없는 것으로 나타났으며 0.5~2.23 μm 구간에서는 에어러솔 수농도와 상대습도가 서로 양의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 풍속과

* 기상연구소 원격탐사연구실 연구원 (e-mail : mjlee@metri.re.kr)

** 정회원 · 기상연구소 원격탐사연구실 실장

*** 정회원 · 서울시청 나급 공무원

**** 기상연구소 원격탐사연구실 연구관

의 상관성에서 작은 입자들은 풍속이 강해질수록 감소하는 패턴으로 분석되었으며 겨울철에는 조대입자 수농도가 높은 풍속에 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 시정거리는 0.5 ~ 1 μm 크기 정도의 에어로솔 수 농도와 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났으며 에어로솔 수 농도가 증가할수록 시정거리는 감소하는 경향을 보였다.

핵심용어 : 에어로솔 수농도, 입자 크기, 상대습도, 풍향, 풍속, 시정

1. 서론

대기의 에어로솔 입자별 분포는 대기의 복사에너지 효과와 구름 발생과 관련하여 그 영향이 매우 중요하다(Carlson and Heintzenberg, 1994; IPCC, 1995). 특히 인구가 밀집하고 산업이 크게 성장되고 있는 한반도를 중심으로 하는 동북아 지역은 지구환경 변화뿐만 아니라 강수현상과 연결되는 기상 방재에 있어서도 그 대기 미세먼지의 역할이 중요한 결과를 초래한다. 최근에 전지구적 기후변화에 대한 에어로솔의 역할과 작용에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Nho-Kim, *et al.*, 2004; Penner, *et al.*, 1994). 김용표와 문길주(1996)은 고산에서 1994년 봄철과 여름철에 PM_{2.5} (Particle Matter 2.5)와 TSP (Total Suspending Particle) 입자 조성을 측정하여 토양성분이 입자 특성에 미치는 영향을 연구하였으며, 배귀남 등 (2003)은 2001년 겨울철 (2001년 11월 30일~2002년 1월 14일)에 0.02~20 μm 범위의 에어로솔을 측정하여 겨울철 서울 대기 에어로솔 특성과 기상요소와의 관련성에 관하여 분석한 바 있다. 봄철 안면도에서 관측된 황사의 물리·화학적 특성과 광학적 특징에 관한 연구가 1998년 (신도식 등, 1999)과 2001년 (최재천 등, 2002)에 이루어졌으며, 전영신 등 (1999)에 의해 황사발생시 서울과 안면도의 에어로솔 수농도 특성에 관하여 분석되었다. 그리고 제주 고산에서 봄철에 대기의 미세 분진 이동에 대한 유적선 분석 (Backward Trajectory Analysis)을 이용하여 관측기간 내에 발생한 황사 등의 대기 오염물질의 장거리 수송에 대한 연구도 이루어진 바 있다(신혜정 등, 2002).

대기 입자상 물질의 물리·화학적 특성에 대한 국내 연구는 대부분 집중관측기간 또는 황사기간 등 특정 시기에 관측한 결과에 의존해 왔으며, 지리적으로는 인위적인 오염원이 집중되어 있는 도시지역에서 주로 조사되어져 왔다(김용표 등, 1996; 배귀남 등, 2003; 신도식 등, 1999; 신혜정 등, 2002; 정창훈 등, 2003; 전영신 등, 1999; 최재천 등, 2002). 그러나 에어로솔이 기후변화에 미치는 근본적인 원인을 파악하고 규명하기 위해서는 청정한 배경대기 지역에

서의 장기적 관측과 자료 분석이 이루어져야한다. 기상 연구소에서는 우리나라 청정대기라고 할 수 있는 제주도 고산에 지구대기감시관측소(33.17° N, 126.10° E, 해발고도 71.2m)를 설치하여 에어로솔의 물리, 화학 및 광학적 특성을 관측하고 있다. 이 관측소에 설치된 광학입자계수기 (Optical Particle Counter, OPC)는 입경구간별 수농도를 측정하고, 파장별 일사계인 Sunphotometer와 Skyradiometer는 대기광학깊이 (Aerosol Optical Depth)와 입자의 크기를 평가하는 Ångström exponent (α)를 산출한다. 산출된 Ångström exponent (α)와 대기광학깊이로부터 대기 중 입자상 물질의 광학적 특성을 분석하고 대기 혼탁도를 평가한다.

제주고산은 한반도와 100km 거리로서 한반도에서 발생하는 오염물질의 영향은 거의 받지 않는 대기 청정지역으로 평가된다. 그러나 대륙의 동쪽에 위치하여 중국대륙에서 배출되는 오염물질의 장거리 수송과정을 감시하기에 유리한 지리적 조건을 갖추고 있어 2001년 봄철에 아시아 에어로솔 국제공동 집중관측 (Aerosol Characterization Experiment in Asia: ACE-Asia)이 수행된 바 있다.

이에 따라 본 연구 제주 고산에서 3년간 연속적으로 관측된 대기 중 입자상 물질들의 크기별 수 농도를 이용하여 입자상 물질의 시간에 따른 수 농도의 특성과 기후학적 변화, 기상학적 요소와의 상관성 등을 분석하고 제주지역 미세먼지 특성을 도출하고자 한다.

2. 측정

제주도 고산에서 대기 중 입자 수농도 (number concentration) 관측에 이용된 광학입자계수기 (Optical Particle Counter, HIAC/ROYCO Model 5230)는 광산란식으로서 각각의 입자에 대한 산란광의 강도를 측정하여 그 강도와 실험실에서 얻어진 강도와의 관계에 의해 입자의 크기를 추정한다. 즉 내장된 펌프에 의해 흡입된 시료 공기가 광원의 조사 영역을 통과할 때 각 입자에 의한 산란광의 강도를 특정한 산란각에 대해 측정하는 것이다. 산란광은 광전자증배관에 의해 산란광의 양에 비례하는 펄스 형태의 전기적 신호로 변환되는데, 이 전기적 신호의 크기는 입자

크기와 관계되고, 펄스 수는 입자 수와 관계되므로, 입자의 크기 별 수농도를 측정할 수 있다(한국대기환경학회, 1999). 광학산란계수기는 전방 광산란방식으로 산란광의 광량을 측정하고, 광원으로는 Laser diode(He-Ne tube)를 사용한다. 본 측정의 측정 가능한 에어러솔의 크기 범위는 $0.30\sim 25.0\mu\text{m}$ 이며 $0.3\sim 0.5\mu\text{m}$, $0.5\sim 0.82\mu\text{m}$, $0.82\sim 1.35\mu\text{m}$, $1.35\sim 2.23\mu\text{m}$, $2.23\sim 3.67\mu\text{m}$, $3.67\sim 6.06\mu\text{m}$, $6.06\sim 10.0\mu\text{m}$, $10.0\sim 25.0\mu\text{m}$ 크기의 8개 구간으로 나누어 단위 부피당 개수로 정의되는 수농도를 측정하였으며 연구자의 목적에 따라 크기를 변경하여 관측할 수 있다(김지영 등, 2002). 입자 시료 채취는 매 시간마다 5초 동안 시료를 흡입하여 측정하는 과정을 2회 반복하여 평균된 자료를 이용하여 분석하였다. 이 연구에서는 2001년 5월부터 2003년 6월까지 약 2년간의 자료를 사용하였으며, 총 13757개의 데이터를 가진다. 본 연구에서는 559개의 일 데이터로 산술평균하여 사용하였다. 또한 풍향, 풍속, 상대습도, 시정 등의 기상요소와의 비교를 위하여 제주고층 기상대의 지상 기상자료(2001년 5월 ~ 2003년 6월)를 이용하였다.

3. 결과

3.1 입자 수농도의 시간별 변화 경향

Fig. 1은 측정기간 동안 입자 수농도의 구간별 월 평균값으로서 입자 크기가 증가하는 순으로 $36,040,138\text{ea}\cdot\text{m}^{-3}$ ($0.3\sim 0.5\mu\text{m}$), $12,683,888\text{ea}\cdot\text{m}^{-3}$ ($0.5\sim 0.82\mu\text{m}$), $1,359,721\text{ea}\cdot\text{m}^{-3}$ ($0.82\sim 1.35\mu\text{m}$), $477,675\text{ea}\cdot\text{m}^{-3}$ ($1.35\sim 2.23\mu\text{m}$), $144,325\text{ea}\cdot\text{m}^{-3}$ ($2.23\sim 3.67\mu\text{m}$), $11,600\text{ea}\cdot\text{m}^{-3}$ ($3.67\sim 6.06\mu\text{m}$), $1,251\text{ea}\cdot\text{m}^{-3}$ ($6.06\sim 10.0\mu\text{m}$), $1,376\text{ea}\cdot\text{m}^{-3}$ ($10.0\sim 25.0\mu\text{m}$)로 나타나, 입자 크기가 증가함에 따라 수농도가 꾸준히 감소하는 경향을 보였다.

입자 수농도의 월별변화는 미세 입자 (fine particle)의 경우 연중 변화가 거의 나타나지 않고, 입자의 입자 크기가 증가할수록 그 변화율이 증가하는 것을 보여준다. 월별자료의 년평균값에 대한 표준편차의 비율이 입자 크기가 커질수록 꾸준히 증가하여 직경이 $0.3\sim 0.5\mu\text{m}$ 크기에서는 약 10% 정도였으나 $6.06\sim 25.0\mu\text{m}$ 크기에서는 약 70%로 나타났다. 계절적인 특성도 조대 입자 (직경 $2\mu\text{m}$ 이상)에서만 관측되었는데 봄과 여름에 각각 최대와 최소를 나타내었다 (Fig. 2). 이는 정창훈 등 (2003) 및 최재천 등 (2002)이 서울 및 안면도의 경우에서 지적인 바와 같이 관측 지점이 봄철에 황사의 영향권에 있어 크기가

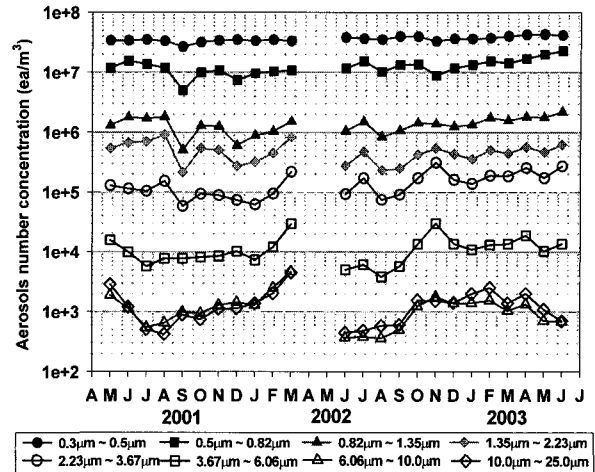


Fig. 1. Monthly variation of aerosols number concentration from May 2001 to June 2003 at Gosan Supersite (Total number of data : 559).

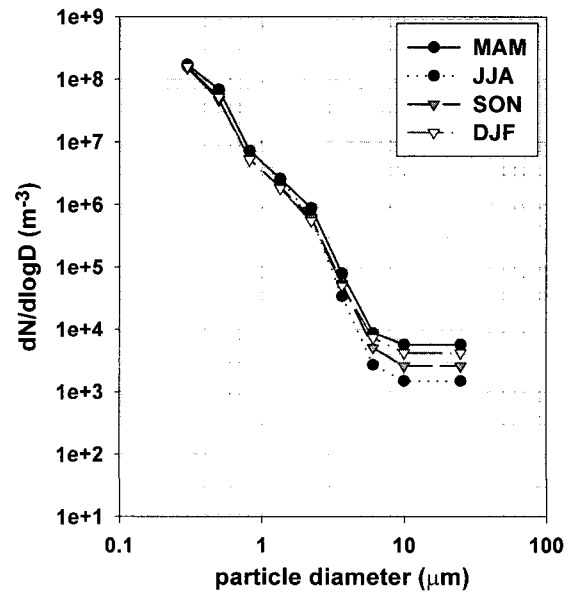


Fig. 2. Seasonal variation of aerosols number concentration from May 2001 to June 2003 at Gosan Supersite (Total number of data : 559).

큰 입자 수는 증가하는 반면, 여름철에는 강우에 의한 대기의 세정작용, 특히 세정 (washout) 작용에 의해 큰 입자들이 우선적으로 제거되어 그 입자수가 감소되었다고 해석할 수 있다. 실제로 세정 효율은 입자 직경 $1\mu\text{m}$ 부근에서 급격히 증가한다(Chaumerliac, 1984; Seinfeld and Pandis, 1998). 황사 발생은 고비 사막, 황토지역과 가까운 만주지역에서 2월말에서 4월초에 집중적으로 나타나는 것으로 연구되어 있다

(전영신 등, 2003; 정관영과 박순웅, 1995). 그러나 본 연구에서는 황사 기간이 아닌 겨울철에도 조대 입자들의 수 농도가 비교적 높게 나타났다. 이는 대기가 건조하고 토양의 수분함량이 적은 겨울철 강한 바람에 의해 지표나 해양으로부터 토양이나 해양 입자들이 부유되어 대기 중으로 유입된 것으로 장거리 수송에 의한 현상이기 보다는 국지적인 현상의 영향으로 생각된다. 입자 수농도의 일변화 경향도 계절 변화와 마찬가지로 큰 입자들에서 크게 나타나고 입자 크기가 작아질수록 줄어드는 것으로 나타났다(Fig. 3). 즉, 10.0~25.0 μm 입자 구간에서는 일변화 폭이 일 평균값의 60%에 이르나 6.06~10.0 μm 구간에서는 45% 정도로 줄어들고, 가장 작은 입자 구간인 0.30~0.50 μm 에서는 2% 이내로 일일 변화를 거의 보이지 않았다. 또한 일일 평균 최대치와 최소치는 큰 입자들 (6.06~25.0 μm)의 경우 현지시각으로 각각 14시 및 5시경으로 나타났으나, 작은 입자들 (0.50~3.67 μm)의 경우에는 그 반대로 현지시각으로 6시와 15시경에 각각 최대치와 최소치를 보였다. 이러한 현상은 이 측정 장소가 수송이나 난방 등 인간 활동의 직접적인 영향권에서 비교적 벗어나 있음을 감안하면 그 원인은 발생원의 조건과 제거과정, 그리고 기상요인 등에서 찾아볼 수 있다. 먼저 강우가 없는 상태에서 입자상 물질을 대기로부터 제거하는 유일한 기작인 건식 침적시의 건식침적속도는 입자의 크기, 지표 (거칠기 등) 및 기상조건 등의 함수이다. 이 건식침적속도는 주어진 크기의 입자와 지표조건 하에서 대기가 불안정해질수록 증가하며 이러한 경향은 입자 자체무게에 의한 침적 속도가 건식 침적속도를 지배하는 직경 약 5 μm 입자들까지 유효하다(Nho-Kim *et al.*, 2004). 따라서 대기안정도의 일

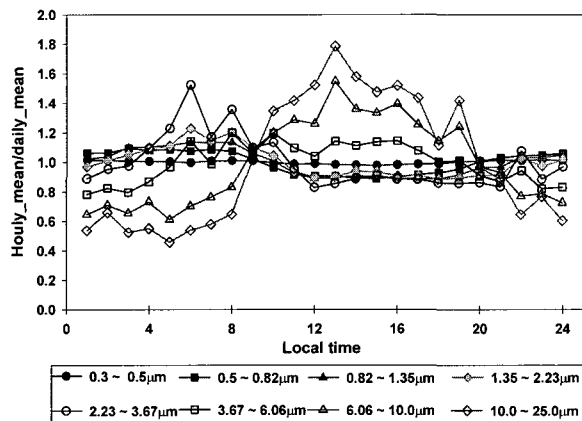


Fig. 3. Diurnal variation of aerosols number concentration from May 2001 to June 2003 at Gosan Supersite (Total number of data : 559).

변화 형태와 같은 경향을 보이는 0.50~3.67 μm 의 입자 수농도 일변화 경향은 건식침적에 의한 제거과정과 관련이 있다고 할 수 있으며, 직경이 6.06~10.0 μm 인 입자들의 건식제거과정은 입자 자체무게에 지배되므로 관측된 일변화 경향에 영향을 미쳤다고 보기 어렵다. 유사한 논리로, 응축모드 (0.50~3.67 μm) 입자들은 대기혼합고도의 증감으로 그 농도가 희석 혹은 농축되는 효과를 나타낼 수 있으며 최대 희석 효과가 예상되는 낮 시간에 입자 수 농도의 감소가 예상되나, 조대 입자들의 경우에는 자체무게에 의한 침강 작용이 난류에 의한 혼합보다 우세해 이러한 희석 효과를 나타내지 않았을 것으로 생각된다. 직경이 6.06~10.0 μm 인 조대 입자들의 일변화 경향은 관측 장소의 지리적인 위치와 연관시켜 생각해볼 수 있다. 즉, 본 관측 장소는 중국과 접해있는 제주도 서남단이며 바다로부터 약 10m거리에 있는 70m 높이의 절벽에 위치하기 때문에 해양 입자들의 직접적인 영향권에 있다. 실제로 이러한 영향을 확인하기 위해 관측기간 동안 매시 풍향관측자료를 분석한 결과 조대입자들의 수농도 일변화와 해-육풍의 발생 빈도간에 매우 밀접한 상관성을 가지는 것을 알 수 있다(Fig. 3 와 Fig. 4) 육지부분인 50° 와 140° 방향에 대해서 24시간 변화를 분석하여 오전 8시경부터 감소하여 오후 2시경에 풍향빈도수가 최소를 나타내는 것을 확인할 수 있었고, 해안쪽인 180° 와 320° 방향인 경우는 풍향의 빈도수가 야간에 감소하고 주간에 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 입자 수농도의 일변화경향에서 조대입자와 미세입자가 서로 증가하고 감소하는 교차 시점이 방향별 일변화경향의 교차점과 같은 시간인 9시경과 19시경에 발생하는 것으로 분석되어졌다.

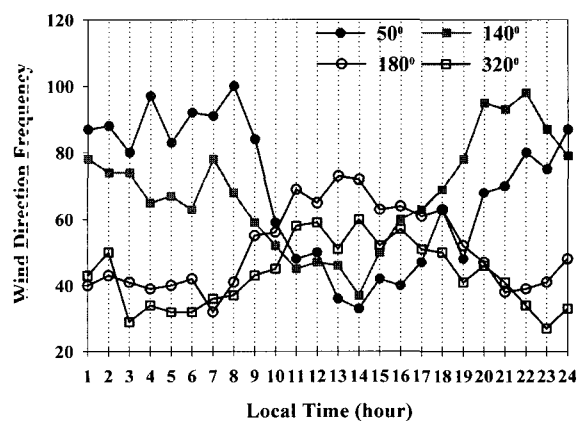


Fig. 4. Occurrence of Wind direction at Gosan Supersite obtained from observed hourly wind direction data from May 2001 to June 2003.

3.2 대기습도와와의 관계

상대습도에 따라 에어러솔에 미치는 영향과 입자 크기별 변화를 규명하기 위하여 각 입자 크기 구간별로 입자 수농도를 상대습도에 따라 분류하였다. 배귀남 등 (2003)의 연구에서 상대습도와 에어러솔과의 직접적인 상관성을 보여주지 못하였고, 단지 상대습도가 70%보다 높거나 작은 경우에 대해서 입자 수농도만을 표출하였다. 그러나 본 연구에서는 상대 습도에 따라 입자들의 성장과 침적에 관하여 분석하였다. 이때 상대습도와 입자 수 농도는 각각 일 평균값이며, 측정 기간 동안 관측된 상대습도 범위인 35%~95% 까지를 5% 구간으로 나누어서 입자 크기 구간에 대해 각각 분류하였다. 관측기간 동안 나타난 상대습도의 평균값은 70~75%구간으로 배귀남 등 (2003)의 연구에서 상대습도의 기준치와 비슷하게 나타났다. Fig. 5는 각 상대습도 구간에 대응하는 입자 수농도의 평균값을 입자 크기 구간에 대해 각각 나타낸 것이다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 0.30~0.50 μm 의 경우 상대습도의 변화에 따른 입자 수농도의 변화가 나타나지 않았으며, 0.50~2.23 μm 의 경우에는 상대습도가 증가할 때 입자 수농도도 증가하는 경향을 보였다. 2.23~3.67 μm 에서는 요동 (fluctuation)이 있으나 전체적으로는 다시 0.3~0.5 μm 구간과 같이 상대습도의 증감에 대해 입자 수농도의 변화를 보이지 않았으며, 3.67~25.0 μm 크기에서는 작은 입자들과 반대로 상대습도가 증가함에 따라 입자 수농도는 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 입자 수농도의 상대습도에 대한 의존성은 입자 크기에 따라 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 이러한 상대습도와 입자 수농도의 상관관계를 좀 더 정량적으로 나타낸 것으로

각 입자 크기 구간별 증가율을 정규화(normalization) 하여 비교한 것이다. 여기서 증가율이란 전 구간 평균 농도에 대한 각 구간별 농도의 비를 일차함수 회귀선으로 나타내었을 때의 기울기를 말한다. 이러한 결과는 다음과 같이 해석될 수 있다. 즉, 대기 중 입자들은 상대습도가 증가하면 수증기의 응축으로 일반적으로 그 크기가 커진다. 이때 직경이 큰 입자가 작은 입자에 비해 충분한 시간이 주어진다면 일정 상대습도의 증가 시 더 큰 성장률 (growth factor)을 보여주고 있다(Kelvin effect). 그러나 입자의 성장 속도는 큰 입자가 작은 입자에 비해 느려서, 직경이 1 μm 이상인 입자들의 경우 실제 관측 현장에서 일정 상대습도가 유지될 수 있는 시간 규모인 1시간 정도의 시간 동안에는 그 증가율이 대체로 미미하다(제주 고산의 경우 $\frac{\Delta RH}{\Delta t} \leq \pm \frac{2\%}{h}$, 기상청 기상정보자료).

따라서 0.50~2.23 μm 의 경우 상대습도가 증가하면 그 아래 구간의 입자가 성장하여 이들 구간으로 유입되는 입자 수 농도가 이 구간들의 입자가 성장하여 그 다음 구간으로 유출되는 입자 수농도보다 크기 때문에 그 입자 수농도가 증가하는 것으로 보인다. 반면에 3.67~25.0 μm 크기의 입자들은 이미 조대 입자들로서 상대습도의 증가로 인한 입자의 성장은 곧 이들 입자들의 침강 속도를 증가시켜 대기로부터 이들 입자들이 제거되는 것을 가속하게 되는데 이렇게 제거되는 양이 이 구간으로 유입되는 입자수보다 많아 그 농도가 감소하는 것으로 해석된다. 2.23~3.67 μm 는 이들 두 부류의 전이점으로 이 구간으로 유입되는 입자 수농도와 이 구간을 벗어나는 입자 수, 곧 대기로부터 제거되는 것과 더 작은 입자 크기에서 유입되는 입자 수농도 간에 평형을 이루고 있기 때문으로 해석될 수

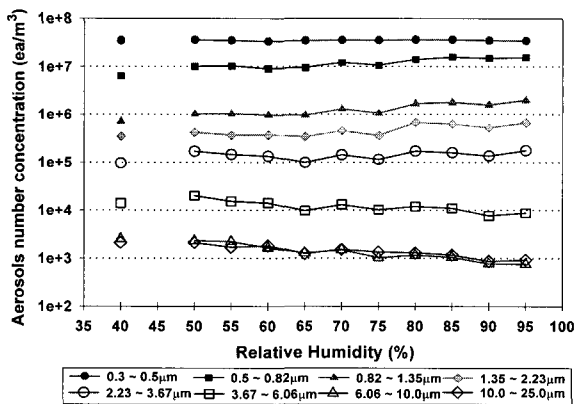


Fig. 5. The aerosol number concentration according to the relative humidity from May 2001 to June 2003.

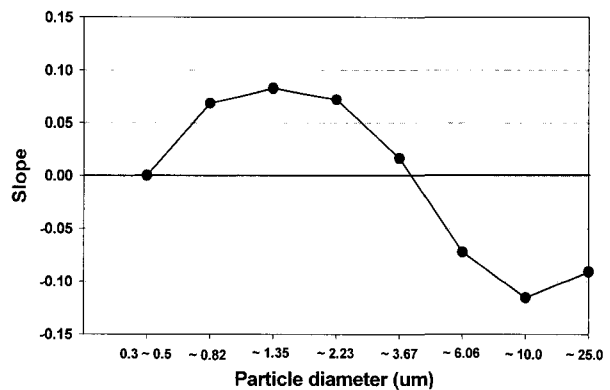


Fig. 6. Variation of slope (particle number concentration/relative humidity) with particle size.

있다. 0.30~0.50 μm 크기 입자 수농도는 0.50~2.23 μm 의 크기 입자 수농도와 같은 맥락으로 생각하면 입자 수농도가 증가할 것으로 예측되었으나 상대 습도의 증감에 따른 입자 수농도의 변화가 없었다. 그런데 0.30~0.50 μm 입자는 Brownian 운동이 중요해지기 시작하는 크기로 입자간 응결 (coagulation)에 의한 입자 수농도의 감소를 생각할 수 있다. 응결 현상은 이 구간의 입자들 간 혹은 이 구간과 다른 구간의 입자들 간에 일어날 수 있으며 결과적으로는 이 구간의 입자 수농도를 감소시키는 역할을 하는 것으로 생각되나 이를 뒷받침하기 위해서는 더 작은 입자들에 대한 연구가 필요하다. 또한 3.67~6.06 μm 및 6.06~10.0 μm 과 달리 10.0~25.0 μm 에서 기울기가 다시 증가하는 경향을 나타내는데 그 이유는 10.0~25.0 μm 크기의 입자들이 대기 중에 머무르는 시간이 짧아 상대 습도의 변화에 대해 반응할 수 있는 충분한 시간을 가지지 못했고 또한 그 성분이 주로 토양 성분으로 3.67~6.06 μm 나 6.06~10.0 μm 의 입자들에 비해 친수성이 낮기 때문으로 생각된다.

3.3 풍속과의 관계

관측 기간 중 최소 및 최대 일평균 풍속은 각각 2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 및 25 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 이며 전체 자료의 50% (293/559)이상이 4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 범위인 것으로 나타났다. Fig. 7은 상대 습도의 경우와 마찬가지로 입자 수농도와 그 때의 일평균 풍속을 대응시킨 것으로 8개의 입자 크기 구간에 대해 분류한 것이다. 일평균 풍속이 24~28 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 인 사례는 한번의 경우 (2001년 12월 13일)를 제외하면 0.5~1.35 μm 의 입자들은 풍속이 증가하면 입자 수 농도가 감소하는 경향을 보이며 그 감소 정도는 입경이 커질수록 크게 나타났다. 그런데 이런 감소율은 1.35~2.23 μm 에서부터

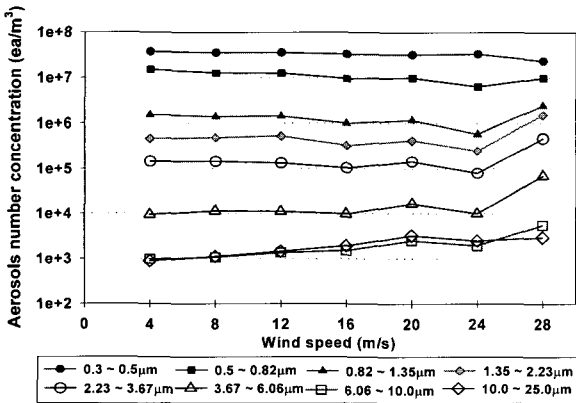


Fig. 7. The aerosol number concentration with wind speed from May 2001 to June 2003.

분화되어 입경이 6.06 μm 이상에서는 풍속이 증가함에 따라 입자 수농도가 오히려 증가하는 추세를 나타내었다.

이러한 현상은 입자상 물질의 생성 및 제거 과정에 있어서 풍속이 미치는 영향을 살펴봄으로써 그 원인을 찾아볼 수 있다. 입자상 물질의 건식침적속도는 지표 거칠기 등의 조건이 일정할 때 풍속이 증가하면 커지며 입자가 클수록 그 영향을 많이 받게 된다. 그런데 입자가 더욱 커져서 직경이 10.0 μm 이상이 되면 입자들의 건식침적속도는 거의 입자 자체의 무게에 의해 결정된다(Nho-Kim *et al.*, 2004). 또한 직경이 약 1 μm 이하의 입자들은 일반적으로 인간 활동에 의해 생성되며 대기로 유입되는 양이 풍속에 의해 영향을 받는 토양 혹은 해염 입자들 보다는 작은 입자들이라고 할 수 있다(Brimblecombe, 1996). 따라서 이 구간의 입자들은 풍속이 증가하면 제거과정이 더욱 활성화되어 입자 수농도는 감소하는 경향을 나타내게 된다고 할 수 있다. 그러나 직경이 약 1 μm 이상의 입자들은 풍속이 증가하면 건식침적속도가 증가하여 대기로부터 제거되는 양도 많아지나 국지적으로 대기 중에 유입되는 양이 비슷하거나 오히려 더 많아지는 것으로 해석할 수 있다. 실제로 Marticorena and Bergametti (1995)에 의하면 토양 입자가 부유하여 대기 중으로 유입되는 유속은 풍속의 거듭제곱 (power law)에 비례한다. 결국, 풍속에 대한 입자 수농도의 변화는 입경이 1 μm 부근의 입자들이 가장 민감한 음의 상관관계를 보이고 입경이 10 μm 이상의 입자들에서는 양의 상관관계를 나타낸다고 할 수 있다. 또한 풍속이 25 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 이상에 도달했을 때 조대 입자의 경우 입자 수 농도의 급격한 증가를 보이나 그 빈도수가 낮아 특별한 의미 해석을 할 수 없다.

3.4 풍향과의 관계

Fig. 8는 제주 고산기상대에서 관측한 2년간의 풍향 빈도수를 나타낸 것으로 16방향의 일 최대 풍향이 다. 2001년 5월부터 2003년 6월 (OPC 데이터와 관련된 기간)까지 풍향 분석 결과 340°가 24.86% (139/559)이고, 360°가 15.56% (87/559)로 주 풍향은 북풍으로 나타났다. Fig. 9은 풍향에 따른 입자 수농도 경향을 보여준다. 0.30~0.50 μm 구간은 풍향에 영향을 받지 않고 전 방향에 대해서 일정한 수 농도를 나타낸다. 그런데 이 다음 크기 구간인 0.50~3.67 μm 구간의 입자들의 경우 230° 풍향 입자 수농도가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 이 방향에서 오는 데이터의 수는 총 559개 중에 5개였으며, 이때 관측된 공

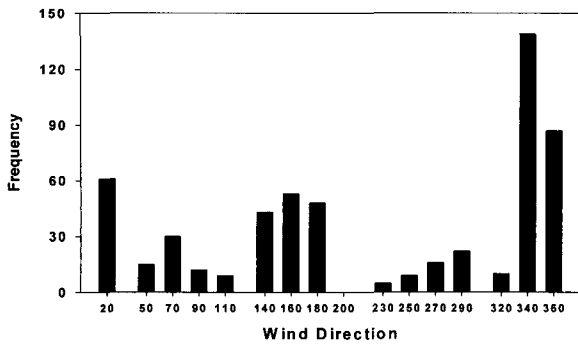


Fig. 8. Frequencies of occurrence at 18 wind directions at Gosan Supersite from May 2001 to June 2003 (Total number of data : 559).

기 덩어리의 기원 및 수송경로를 추적하기 위해 HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델 (Version 4.7)을 사용하여 72시간 역궤적을 계산하였다 (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). 이 계산은 3시간 간격으로 고도 500m, 1000m, 1500m, 3000m에 대해서 이루어졌다. 이들 5개의 데이터는 모두 2001년 6월부터 8월 사이에 발생하였으며, 한 번의 경우 (2001년 6월 18일: 해양으로부터 유입됨)를 제외하고는 중국의 남부공업지대 (광저우, 상하이, 정저우, 우한공업지역등)를 경유하여 제주도 고산에 도착하는 것으로 분석되었다(Fig. 10). 이것은 중국남부공업지역에서 발생한 인위적인 오염물질이 장거리 수송되고 노후화 (aging)되어 고산 지역에 유입된 것으로 보인다

다(강창희 등, 2003). 이와 비교하기 위해 250° 방향에서 불어오는 기단의 기원 분석을 같은 방법으로 실시하였으며, 그 결과 230° 방향과는 달리 중국 남부 공업지대를 통과하는 경우는 10% (2건/18건)정도로 나타났다. 또한 모든 풍향에 대해서 계절별 역궤적 분석에서도 중국 남부공업지대를 통과하여 제주도 고산에 도착하는 경우는 20%미만으로 나타났다. 결국, 제주 고산지역에서 230° 풍향이 관측될 경우 중국남부 공업지역에서 발생하는 오염물질이 이 지역을 통과하고 있는 것으로 해석할 수 있었다. 3.67~25.0 μ m까지의 조대입자는 모든 방향에서 골고루 유입되고 있으면 단지 290° (NWN)에서 피크가 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이 데이터의 50% 이상이 그 발생 시기가 3월인 것으로 미루어 토양입자의 유입이 그 원인인 것으로 생각된다. 그리고 조대입자들 중에 특이한 점은 동풍 계열과 서풍 계열에 대해 서로 다른 입자 수 농도 분포를 보이는 것이다. 풍향에 따른 입자수 농도의 변화가 동풍계열의 경우 거의 없는 반면 서풍계열에서는 나타났는데, 이는 동풍의 경우 국지적인 발생 원인이 꾸준히 영향을 미치는 것으로 생각되며, 서풍의 경우는 다양한 기원이 간헐적으로 영향을 미친 것으로 생각된다.

3.5 시정과의 관계

대기 중에 존재하는 입자상 및 기체상 물질이 빛을 얼마나 산란, 흡수하는가에 따라 시정거리는 달라진다. 백남준 등 (1996) 연구에서는 상대습도와 관련한 에어러솔의 입자들이 시정에 관련한 상관성을 찾지

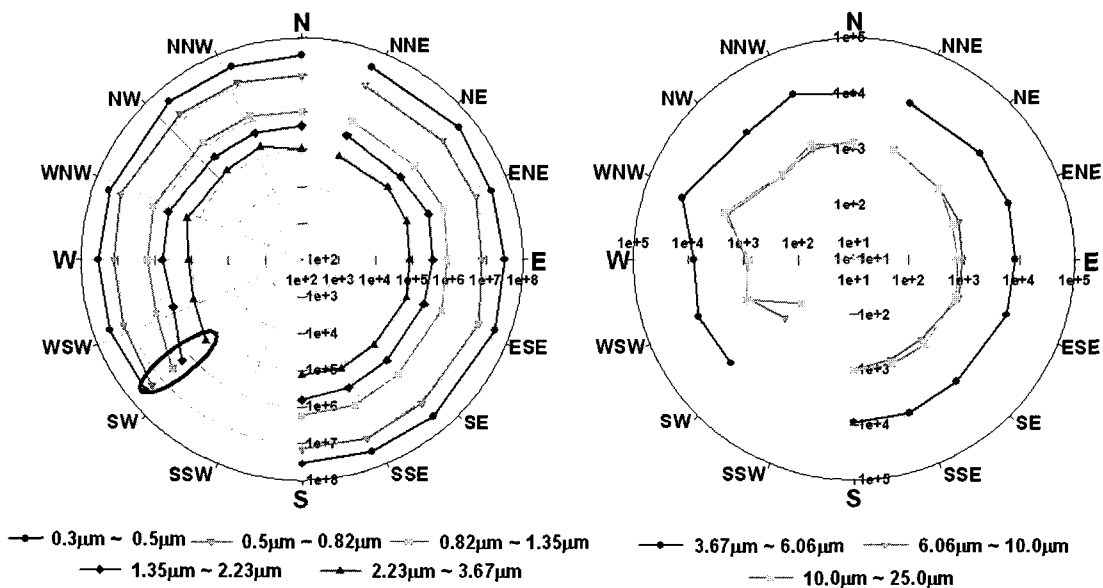


Fig. 9. The aerosol number concentration with wind direction from May 2001 to June 2003.

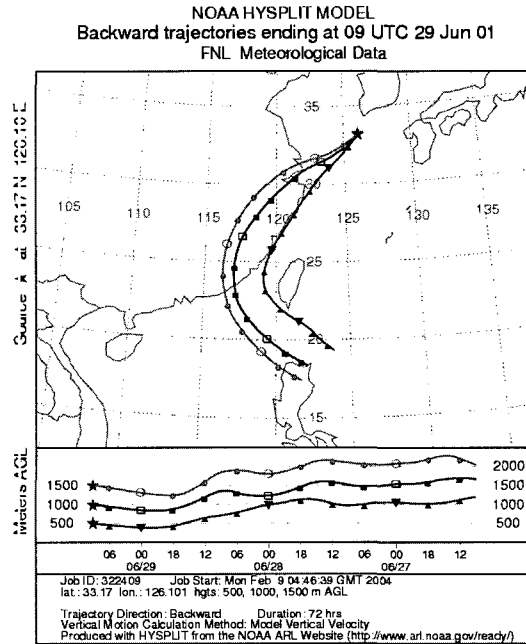
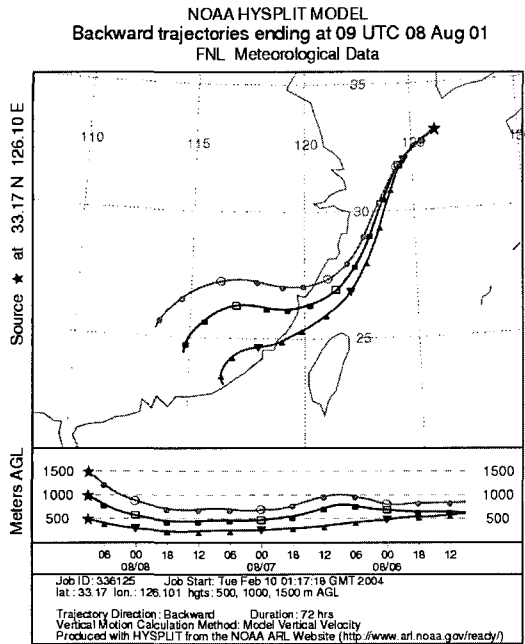


Fig. 10. Backward trajectories for 230° wind direction passing from the industrial region of South east China (left : 8 Aug. 2001, right : 29 June 2001).

못하였으나, 시정이 입자크기분포나 입자 중의 성분특성에 좌우되는 것을 확인하였다. 따라서 입자상 물질의 농도 및 입경 분포와 시정거리와의 관계를 도출하기 위해 제주도 고산 기상대에서 목측한 일평균 시정거리 자료를 사용하였다. 관측기간 동안 이 지역에서의 최대 시정거리는 약 30km였으며 계절적으로는 가을철에 시정거리가 증가하고 겨울철부터 다음해 여름철까지 서서히 감소하는 유형을 나타냈으며, 본 연구기간 3년간에는 전체적으로 시정이 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 11은 시정에 따른 입자상 물질의 수농도 변화를 보여준다. 시정의 분류는 5km 단위로 나누어서 설정하였다. 0.30~0.50 μm 크기의 입자들은 다른 기상요소와 마찬가지로 시정의 변화에 대해 입자 수농도의 변화를 보이지 않았으며, 0.50~6.06 μm 크기의 입자들은 시정이 증가함에 따라 입자 수농도가 뚜렷이 감소하는 것을 알 수 있었다. 특히, 시정에 따른 입자 수농도의 감소율은 0.82~1.35 μm 구간에서 가장 크게 나타났다는데 이는 직경이 0.50~1.0 μm 내외인 입자들이 빛의 산란에 가장 효율적이라는 사실과 일치한다 (Seinfeld and Pandis, 1998; 배귀남 등, 2003). 그러나 6.06~25.0 μm 크기 구간에서는 다시 시정에 따른 입자 수농도의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

대기 중에 존재하는 수분도 빛을 산란하는데 크게 기여하며, 그 형태는 액적이나 증기상의 순수한 수분이 빛 산란을 일으키거나 또는 조해성인 화학성분에

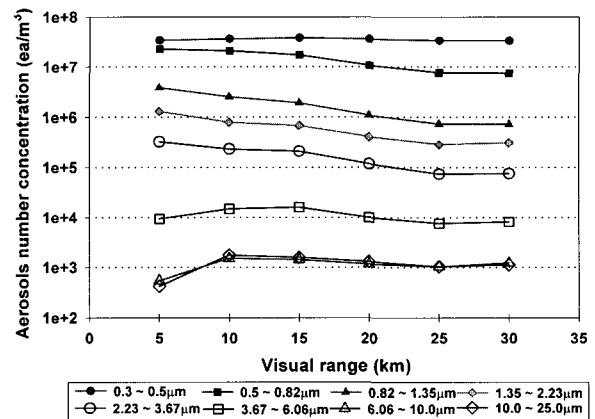


Fig. 11. The aerosol number concentration with the visual range from May 2001 to June 2003.

수분이 달라붙거나 입자 표면에 막을 형성함으로써 입자의 크기가 커져 산란계수에 영향을 주는 것이다 (대기환경연구회, 1998). 실제로 Fig. 12는 제주 고산에서의 시정거리와 상대습도의 상관성을 나타낸 것으로 상대습도가 낮을수록 시정거리가 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 관측한 입자상 (액체상 및 고체상) 물질의 수농도와 시정거리와의 상관관계에서 수증기가 미치는 영향을 알아보기 위해 건조 공기/습윤 공기로 상대습도를 구분하여 시정거리에 따라 입자 수농도를 분류하였다. 건조 공기/습윤 공기의 구분은 관측 장소가 바다와 접해있어 상대습도의

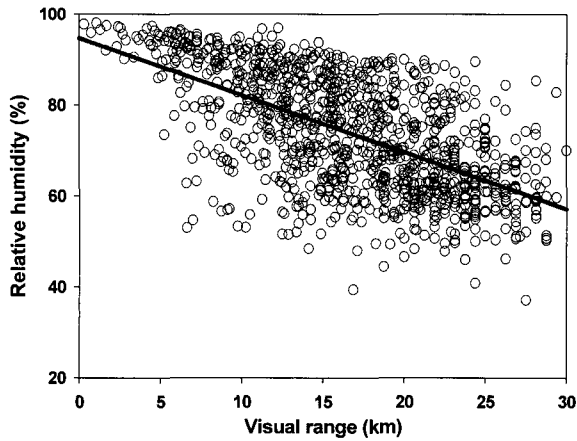


Fig. 12. Relationship between eye-measured visual range and relative humidity from 2001 to 2003 at Gosan, Jeju.

Table 1. Correlation between the particle number concentration and visual range.

	RH<60%	60%<RH<80%
0.3 ~ 0.5 μm	-0.48	-0.39
0.5 ~ 0.82 μm	-0.93	-0.93
0.82 ~ 1.35 μm	-0.93	-0.88
1.35 ~ 2.23 μm	-0.95	-0.90
2.23 ~ 3.67 μm	-0.90	-0.91
3.67 ~ 6.06 μm	-0.68	-0.90
6.06 ~ 10.0 μm	-0.43	-0.83
10.0 ~ 25.0 μm	-0.19	-0.88

평균값이 70% 이상으로 매우 높아 상대습도 60%로 설정하였다. Table 1은 상대습도 조건별, 입자 크기별, 입자 수농도와 시정거리와의 상관관계를 나타내고 있다. 즉, 건조 공기 상태에서는 0.50 ~ 3.67 μm 크기의 입자들은 그 수농도 증가와 시정거리 감소 간에 매우 밀접한 상관관계를 가지나 이보다 더 큰 입자들의 경우에는 이러한 상관관계가 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 반면에 습윤 공기 상태에서는 큰 입자들도 그 수농도가 증가하면 시정거리가 짧아진다는 것을 보여준다. 실제로 Fig. 11을 상대습도 60% 이상과 이하 두 부류로 나누어서 다시 그렸을 때 이러한 사실을 확인할 수 있었다. 이는 시정거리의 다른 표현인 광산계수 (b_{ext})가 다음과 같이 상대습도의 함수이기 때문인 것으로 해석된다(US DOI, 2000).

$$b_{ext} = b_{hygro}f(RH) + b_{non-hygro} + b_{Ray} \quad (2)$$

여기서 b_{hygro} 는 습기를 빨아들이는 입자상 물질의 산란 계수이며, $b_{non-hygro}$ 는 습기를 빨아들이지 않는 입자상 물질의 산란계수, b_{Ray} 는 Rayleigh 산란계수, 그리고 $f(RH)$ 는 상대습도 보정인자로 상대습도가 증가함에 따라 증가하는데, 예를 들어 상대습도가 70% 및 85%일 때의 $f(RH)$ 값은 각각 35%일 때의 약 2배 및 3.5배에 이른다.

4. 결론

본 연구는 동북아지역 대기 미세먼지 특성을 파악하기 위하여 2001년부터 2003년까지의 제주도 고산 대기 에어러솔의 수농도 관측, 시계열 특성 및 기상장과의 상관성을 분석하였다. 에어러솔의 계절별 특성에서는 황사가 빈번히 발생하는 봄철에 조대입자의 수농도가 타 계절보다 높게 나타났으며 강우에 의한 세정작용이 가장 활발한 여름철에 조대입자의 수농도는 최저값을 나타내었다. 일변화경향은 입경이 0.30~0.50 μm 구간에서는 발견되지 않았으며, 0.50~2.23 μm 구간에서는 대기혼합고가 가장 큰 15시 경에 최저치를 나타냈으나 그 진폭은 매우 작아 평균값의 $\pm 20\%$ 이내인 것으로 나타났다. 그러나 조대입자(3.67~25.0 μm)의 경우에는 일 최대치가 오히려 14~15시경에 나타나고 그 진폭도 일 평균값의 70%에 이르렀는데, 이는 관측 장소의 지리적인 위치가 해륙풍의 영향권에 있어 낮 동안에 직경이 큰 해염입자들이 유입되는 것으로 판단되어지며, 차후 연구에서 해염입자의 현미경 분석 등으로 증명할 생각이다. 기상장과의 에어러솔의 상관성에서 미세입자(0.3~0.5 μm)의 경우에는 그다지 상관성이 없는 것으로 나타났으나, 그 이외의 에어러솔의 입자크기에서는 밀접한 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 0.5~2.23 μm 구간의 입자들은 상대습도가 증가할수록 입자 수농도가 높아지는 것으로 나타났으며 3.67~25.0 μm 구간의 입자들은 감소하는 것으로 나타났다. 또한 풍속이 증가하면 1 μm 이하의 입자들은 그 수농도가 감소하는 경향을 보인 반면 10 μm 이상의 입자들은 오히려 증가하는 경향을 나타내었다. 풍향의 영향으로는 230° 방향일 때 0.50~3.67 μm 크기의 입자들의 수가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 기단의 수송경로 분석에 의하면 이들은 중국의 남부 공업지대를 경유하여 제주 고산에 도착하

는 것으로 나타나 인위적인 오염물질의 유입에 기인한 것으로 해석되었다. 시정거리는 1 μ m부근의 입자 수 농도가 증가할 때 가장 민감한 반응을 나타내었으며 상대습도가 높을 경우 이보다 큰 입자들도 시정거리에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (R01-2006-000-11233-0) 일부 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

강창희, 김원형, 한진석, 선우영, 문길주 (2003). 1997~2001년 제주도 고산지역 PM2.5 미세분진의 오염 특성, 한국대기환경학회지, 19, 263-273.

김용표, 문길주 (1996). 토양 성분이 입자 특성에 미치는 영향: 제주도 고산에서의 1994년 측정결과 모사, 한국대기보전학회, 12, 289-296.

김지영, 최병철 (2002). 한반도에서 측정된 에어러솔의 크기 분포와 지역별 특성, 한국기상학회지, 38, 1225-0899.

대기환경연구회 (1998). 대기오염개론, 동화기술, 127-134.

배귀남, 김민철, 임득용, 문길주, 백남준 (2003). 2001년 겨울철 서울 대기 에어로졸의 입경별 수 농도 특성, 한국대기환경학회지, 19, 167-177.

백남준, 이종훈, 김용표, 문길주 (1996). 1994년 6월 서울지역 시정장애의 측정 및 분석, 한국대기보전학회지, 12, 407-419.

신도식, 김산, 김정식, 차주완 (1999). 안면도에서 1998년 봄철에 관측된 황사의 광학적 특성, 한국대기보전학회지, 15, 739-746.

신혜정, 김지영, 최병철, 오성남, Jianzhen Yu, Keith Bower (2002). ACE-Asia 집중관측기간에 제주고산에서 측정된 대기오염물질의 농도 분포특성, 한국대기환경학회지, 18, 487-501.

전영신, 김지영, 최재천, 신도식 (1999). 황사 시 서울과 안면도의 대기 중 에어로졸 수 농도 특성, 한국대기보전학회지, 15, 575-586.

—, 조경숙, 김영화, 이종국 (2003). 만주에서 발원한 황사 현상, 한국기상학회지, 39, 251-263.

정관영, 박순용 (1995). 한반도에 황사 출현시의 종관기상 특징. 한국기상학회지, 31, 45-63.

정창훈, 전영신, 최병철 (2003). OPC (광학적 입자 계수기)로 측정된 2001년 서울지역 에어로졸의 입경분

포, 한국대기환경학회지, 19, 515-528.

최재천, 차주완, 방소영, 윤용훈 (2002). 2001년 봄철 안면도에서 관측된 황사의 물리·화학적 특성에 관한 연구, 한국기상학회지, 38, 105-117.

한국대기환경학회 (1999). 대기오염물질의 측정기술. 231pp.

Carlson, R. J. and J. Heintzenberg (1994). Aerosol Forcing of Climate, John Wiley & Sons, 52-56.

Chaumerliac (1984). Evaluation des depots humides des polluants atmospheriques dans un modele meteorologique a mesoechelle. 1-Captation Dynamique, N. Chaumerliac, Note IOPGn 74, 1984.

IPCC (1995). Climate Change 1995. The science of climate change. edited by J. H. Houghton *et al.* Cambridge University Press, Cambridge, UK, 572 pp.

Marticorena B. and G. Bergametti (1995). Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme. *J. Geophys. Res.*, 100, 16,415-16,430.

Nho-Kim, E.-Y., M. Michou, V.-H. Peuch (2004). Parameterization of size-dependent particle dry deposition velocities for global modeling. *Atmos. Environ.*, 38, 1933-1942.

Penner, J.E., R.J. Charlson, J.M. Hales, N. Laulainene, R. Leifer, T. Navakov, J. Ogren, L.F. Radke, S.e. Schwartz, and L. Travis (1994). Quantifying and Minimizing uncertainty of climate forcing by anthropogenic aerosols. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 75, 375-400.

Erimblecombe P. (1996). Air composition & chemistry, *Cambridge university press*. 55-80.

Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (1998). Atmospheric chemistry and physics. Wiley-Interscience, New-York, 1326pp.

US DOI, Federal land managers' air quality related values workgroup (FLAG) phase 1 report, December 2000 (<http://www2.nature.nps.gov/air/permits/flag>).

© 논문접수일 : 2005년 11월 03일
 © 심사의뢰일 : 2005년 11월 09일
 © 심사완료일 : 2006년 08월 11일