

ORIGINAL ARTICLE

황사 시 제주지역 에어로졸의 수농도 특성

강창희 · 허철구^{1)*}

제주대학교 화학과, ¹⁾제주대학교 환경공학과

The Characteristics of the Aerosol Number Concentration in Jeju Area During Asian Dust Events

Chang-Hee Kang, Chul-Goo Hu^{1)*}

Department of Chemistry, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

¹⁾Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

Abstract

The aerosol number concentration have measured with an aerodynamic particle sizer spectrometer(APS) at Gosan in Jeju Island, which is known as background area in Korea, from March 2010 to February 2011. The obtained results of asian dust events and non-asian dust period have been compared.

The results show that the entire averaged aerosol number concentration from APS measurement during asian dust events and non-asian dust period are about 341 particles/cm³ and 240 particles/cm³, respectively. During asian dust events, the number concentration in small size ranges($\leq 0.4 \mu\text{m}$) are similar to non-asian dust period, however, those in large size ranges($\geq 0.7 \mu\text{m}$) are very higher than non-asian dust period.

The contributions of the size resolved number concentration(23 channel in 0.25~10.0 μm) to total number concentration in that range are dramatically decreased with increased particle size. The contributions of smaller size ranges($\leq 0.4 \mu\text{m}$) during asian dust events are very low compared with non-asian dust period, on the other hand, those of larger size ranges($\geq 0.4 \mu\text{m}$) are higher than non-asian dust period.

The number concentration in each size range are strongly correlated with the concentration in adjacent size range. And the total aerosol number concentration are depended on the number concentration in range of smaller than 0.58 μm during non-asian dust period and asian dust events. On the other hand, PM₁₀ mass concentration has mainly affected with the number concentration in range of smaller than 1.0 μm during non-asian dust period, however, during asian dust events, the mass concentration has mainly affected with the number concentration in range of 0.65~3.0 μm .

Key words : Aerosol, Number concentration, Asian Dust, Size distribution, Jeju area

1. 서론

대기 중에 부유하는 에어로졸은 주요 대기오염물질 중의 하나로서 인체 건강과 산업 활동에 영향을 줄

뿐만 아니라 시정장애 등에도 많은 영향을 미치며 태양복사의 산란 및 흡수 그리고 구름과의 상호작용 등을 통해 지구대기의 복사에너지 균형 등에도 큰 영향

Received 20 December, 2012; Revised 27 December, 2012;

Accepted 7 February, 2013

*Corresponding author : Chul-Goo Hu, Dept. of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea
Phone: +82-64-754-3443
E-mail: huchulgo@jeju.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

을 미침에 따라 이에 대한 관심이 집중되고 있다. 대기 에어로졸은 입자의 크기, 생성요인, 공간적 분포와 시간적 변동특성, 화학적 조성 등에 따라 그 특성이 크게 변화한다. 특히, 입자 크기와 농도 변화는 에어로졸의 가장 중요한 특성 중의 하나로서 대기 중에서의 거동, 건강 및 기후변화에 미치는 영향 등을 이해하고 평가하는 데 중요한 인자로 작용하는 것으로 알려져 있어 이에 대한 연구가 다양하게 진행되어 왔다(Kim과 Choi, 2002; Vyziene와 Girgzdys, 2009; Sharma 등, 2003).

대기 중에 부유하는 에어로졸의 크기는 대체로 수 μm ~ 100 μm 크기인데, 일반적으로 2.5 μm 를 기준으로 조대입자와 미세입자로 구분한다. 입경이 큰 조대입자 ($\geq 2.5 \mu\text{m}$)들은 대부분 파쇄, 연마, 바람에 의한 비산 먼지 등과 같이 물리적 과정을 통해 생성되는 반면 입경이 2.5 μm 보다 작은 에어로졸은 연소과정과 화학공정 등에서 직접 배출되거나 황산염, 질산염 및 암모늄과 같이 대기 중에서 2차적으로 생성된 인위적 기원으로부터 생성된다. 특히 우리나라는 편서풍대에 위치하고 있어 고비사막과 타클라마칸 사막 그리고 황하강 유역 등에서 발원한 황사가 편서풍을 타고 한반도로 유입되고 있어 대기 중에 부유하는 에어로졸의 분포특성에 많은 영향을 미치고 있다.

황사현상은 3~5월 사이의 봄철에 주로 발생하는데 사막화 현상 등으로 인해 최근에는 가을과 겨울철에도 종종 발생하고 있다. 황사 발원지에서 상승기류를 타고 수 km까지 상승한 토양입자는 편서풍을 타고 2,000~3,000 km 이상을 이동하면서 한반도를 비롯한 동북아 지역의 대기환경에 많은 영향을 미친다. 황사가 대기환경에 미치는 주요 영향은 대기 에어로졸의 급격한 농도 증가에 따라 유발되는데, 태양빛을 산란·차단하여 시정악화를 초래하고 일조량 감소와 식생의 호흡기공에 대한 영향으로 생태계에도 영향을 미칠 뿐 아니라 인체에 호흡기 질환 유발, 안질환 및 알레르기 질환 발생등과 정밀기계의 손상 등 산업에 미치는 영향도 적지 않다. 황사는 원래 자연적인 토양 기원 비산입자로서 입경분포는 주로 10 μm 이상의 크

기를 갖는 조대입자 군에 속하지만 장거리 이동을 통해 한반도로 유입되는 황사에는 입경 2.5 μm 이하의 미세입자도 다량 포함되어 있다(Chun 등, 1999; Jung 등, 2005).

대기 중에 부유하는 다양한 크기의 에어로졸 중 조대입자는 인후부나 기관지에서 쉽게 제거되어 인체에 미치는 영향이 크지 않으나 미세입자는 폐에 까지 쉽게 침투할 수 있고 상대적으로 조대입자에 비해 비표면적이 커 유해물질 운반이 용이해 인체에 미치는 영향이 훨씬 큰 사실이 밝혀져 있으며, 기후에 미치는 직접적인 영향도 미세입자가 상대적으로 크다고 알려져 있다(Sharma 등, 2011; Buzorius 등, 1999; Stanier 등, 2004; Bigi와 Ghermandi, 2011). 일반적으로 미세입자는 에어로졸의 질량농도에 대한 기여도는 상대적으로 낮지만 수농도에는 지배적 영향을 미치기 때문에 입자상 물질이 인체에 미치는 영향을 평가하는 데는 대기 부유분진 관리의 지표농도로 가장 널리 사용되고 있는 질량농도보다는 수농도가 훨씬 중요한 영향인자임이 밝혀짐에 따라 최근에는 에어로졸 수농도에 대한 관심이 높아지고 있다(Yan 등, 2004; Bigi와 Ghermandi, 2011).

에어로졸의 수농도에 대한 연구는 주로 특정 지역의 에어로졸 입경별 수농도 현황과 공간적 분포특성 및 시간적 변동특성, 수농도와 질량농도 간의 상관성 및 기상인자가 에어로졸 수농도 특성에 미치는 영향 등에 관한 연구들이 이루어져 왔다. 우리나라를 포함한 동북아지역을 중심으로 황사가 에어로졸 수농도에 미치는 영향에 대해서도 다수의 연구결과가 보고된 바 있다. 측정기술의 발달에 힘입어 최근에는 극미세 입자($\leq 100 \text{ nm}$)에 대한 연구결과도 많이 보고되고 있다. 국내에서도 황사기간 인천지역 에어로졸 특성, 황사 시의 에어로졸 수농도 변화특성, 연직 에어로졸 수농도 크기 분포 특성 및 지역별 수농도 비교 등에 대한 연구가 다수 이루어졌다(Jung 등, 2005; Kim과 Choi, 2002; Chun 등, 1999; Choi 등, 2005; Vyziene와 Girgzdys, 2009; Sharma 등, 2003; Stanier 등, 2004;

Buzorius 등, 1999; Watanabe 등, 2005; Renjian 등, 2008; Sharma 등, 2011; Longly 등, 2005; Minoura와 Takekawa, 2005).

에어로졸의 수농도는 생성기원과 수송과정 및 대기 중에서의 물리·화학적 변화 과정에 따라 분포특성이 크게 달라진다. 특히 인위적 발생원의 활동도에 직접적인 영향을 받는 도시지역과 뚜렷한 인위적인 발생원이 없는 배경지역에서의 에어로졸 수농도 변화는 전혀 다른 특성을 나타낸다. 본 연구가 수행된 측정지점은 인위적인 발생원의 직접적인 영향을 배제할 수 있는 대기배경지역으로서 에어로졸의 수농도에 미치는 황사의 영향을 규명하기에 적합한 지역이다.

본 연구에서는 광산란분광 원리를 이용한 입자개수측정기인 APS(aerodynamic particle sizer spectrometer)로 2010년 3월 1일부터 2011년 2월 28일까지 에어로졸의 입경별 수농도를 측정하고 황사 시와 비황사 시의 수농도를 비교·분석하여 황사현상이 제주지역 대기 중 에어로졸의 수농도에 미치는 영향을 밝히고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 측정지점

제주도는 한반도로부터 약 100 km, 중국 상하이로부터 약 500 km, 일본 규슈와는 250 km 정도 떨어져 있는 중국과 일본의 중간 지점에 위치한 청정지역으로서 대륙에서 장거리 이동되는 오염물질들의 특성을 파악하는 데 아주 유리한 지리적 조건을 갖추고 있다. 특히 본 연구를 수행한 측정지점(33°17'N, 126°10'E, 제주특별자치도 제주시 한경면 고산리 소재 수월봉)은 Fig.1에서 보는 바와 같이 제주도 서쪽 끝 지점으로 인가와 떨어져서 주변에 국지 오염원이 거의 없는 해발 72 m 해안가 언덕에 위치해 있고, 제주도 고층레이다기상대와는 서쪽 방향으로 약 300 m 떨어져 있다. 따라서 이 지역의 에어로졸 측정 결과는 대기 에어로졸의 장기적 변화를 예측하고 동북아시아에서 장거리 이동되는 에어로졸의 영향을 평가하는 데 아주 유용한 자료로 활용될 수 있는 대기배경지역이다(Park 등, 1994).

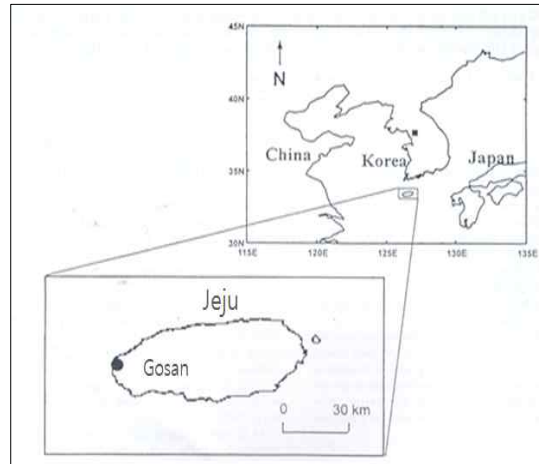


Fig. 1. Location of the monitoring site and surrounding region.

2.2. 측정방법

본 연구에서 에어로졸 수농도 측정을 위해 사용한 APS(aerodynamic particle sizer spectrometer)는 광산란법 분광기(Grimm Aerosol Technik GmbH & Co., model #179, Germany)로써 야외 현장용 미세분진 연속측정 수분제어시스템(Grimm Aerosol Technik GmbH & Co., model #365, Germany)을 부착하여 사용하였다. 이 시스템은 온·습도 및 압력계, 자동 영점 교정 장치, 수분제거용 nafion dryer, TSP head 등을 갖추고 있다. 이 APS 장비는 광산란으로 입자의 개수와 크기 분포를 측정하는 방식이다. 레이저 광원을 에어로졸 입자에 조사하고, 측방에서 산란광의 크기와 빈도를 검출하여 수농도를 측정하며, 장치의 구성은 광원인 반도체 레이저, 분진과 레이저가 교차되는 sensing 챔버, 흡입공기 유량을 일정하게 유지하는 펌프로 이루어졌다.

본 연구에 사용한 APS 장비의 입경 측정범위는 0.25 ~ 32 μm 로서 측정 입경 구간은 (0.25-0.28-0.3-0.35-0.4-0.45-0.5-0.58-0.65-0.7-0.8-1.0-1.3-3.5-4.0-5.0-6.5-7.5-8.5-10.0-15.0-17.5-20.0-25.0-30.0-32.0 μm) 30개 구간이며, 수농도 측정범위는 0.1 ~ 1,500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 그리고 Grimm사에서 개발한 프로그램을 이용하여 수농도를 PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{1.0} 질량농도로의 환산도 가능하다.

APS 장비를 이용한 에어로졸 수농도 측정은 2010

년 3월 1일부터 2011년 2월 28일까지 연속적으로 이루어졌으며 측정된 데이터는 5분 간격으로 수집한 후 1시간 단위로 평균하여 본 연구의 에어로졸 수농도 자료로 이용하였다. 그리고 PM₁₀ 농도는 수농도 측정지점으로부터 약 1.5 km 북쪽에 위치한 국립환경과학원 장거리이동측정소의 측정자료를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 황사 시 에어로졸의 수농도 현황

본 연구기간 중 제주지역에서 관측된 황사현상은 Table 1에서 보는 바와 같이 3월 2회, 4월, 5월, 11월 각 1회, 12월 2회로 총 7차례에 걸쳐 나타났으며 지속 시간은 짧게는 2시간 정도에 불과했으나 11월에 발생한 황사현상은 29시간 동안 지속되었다. 황사현상이 나타날 때 에어로졸 질량농도는 크게 증가하는데, 대체로 지속시간이 길수록 증가폭이 크게 나타났다. 지속시간이 가장 짧았던 5월에 나타난 황사기간 중 PM₁₀ 농도는 최고가 94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 평상시 제주지역 평균 PM₁₀ 농도의 약 2배 정도로 대기 중 미세먼지 질량농도에 미치는 영향이 크지 않았으나 지속시간이 가장 길었던 11월에 발생한 황사 시에는 PM₁₀ 농도가 749 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 매우 높은 값을 보였다. 본 연구에서는 기상청의 강한 황사 구분 기준인 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 기준으로 약한 황사(WAD)와 심한 황사(SAD)로 구분하였다. 심한 황사가 나타난 경우는 3월 15~16일 사이의 1

시간, 3월 20~21일 사이의 8시간 그리고 11월 11~13일 사이의 17시간으로 11월에 발생한 황사현상이 본 연구기간 동안 발생한 황사현상 중 지속시간도 가장 길었을 뿐 아니라 강도도 가장 강한 황사현상이었다.

황사현상이 대기 중 에어로졸 수농도 변화에 미치는 직접적인 영향을 살펴보기 위하여 황사현상이 발생한 3월, 4월, 5월, 11월, 12월의 PM₁₀ 농도와 에어로졸 수농도의 동일 시간에 대한 시계열 변화를 Fig. 2에 나타냈다. 여기서 보면 5월 말과 11월 초를 제외하고는 PM₁₀ 농도와 에어로졸 수농도는 유사한 시계열 변화를 보이며 특히, 황사가 발생한 시간대에는 PM₁₀ 농도 뿐 아니라 수농도도 뚜렷한 증가를 보임을 알 수 있다. PM₁₀ 농도와 에어로졸 수농도 사이에 강한 상관성을 보이는 이러한 시계열 특성은 황사기간 중 인천지역 에어로졸 특성을 연구한 선행연구에서 보고된 바 있다(Jung 등, 2005). 5월 말과 11월 초 경에는 PM₁₀ 농도가 높지 않음에도 에어로졸 수농도가 높게 나타나는 경우가 있는데 이는 동일 시간대에 발생한 박무현상의 영향으로 생각된다. 그리고 11월 11일부터 13일까지 지속된 강한 황사현상이 나타났을 때 PM₁₀ 농도는 매우 높은 값을 나타냈으나 에어로졸 수농도는 크게 높지 않는데, 이는 황사현상이 발생한 시기 전후의 수농도가 워낙 낮아 황사의 영향으로 증가하는 경향이 상대적으로 뚜렷하지 않은 것으로 생각된다(Watanabe 등, 2005).

Table 1. Asian dust events occurred during experimental period

Event	Days	Duration(hrs)	Range of PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ^{a)}	Classification
1	15~16 Mar	12	100~519	WAD ^{b)} : 11hr SAD ^{c)} : 1hr
2	20~21 Mar	14	148~608	WAD: 6hr SAD: 8hr
3	27 Apr	3	76~148	WAD: 3hr
4	11 May	2	68~94	WAD: 2hr
5	11~13 Nov	29	90~749	WAD: 12hr SAD: 17hr
6	3 Dec	6	38~324	WAD: 6hr
7	11 Dec	5	174~250	WAD: 11hr

a) PM₁₀ means the concentration of particulate matter less than 10 μm

b) WAD means weak asian dust (PM₁₀ < 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

c) SAD means severe asian dust (PM₁₀ \geq 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

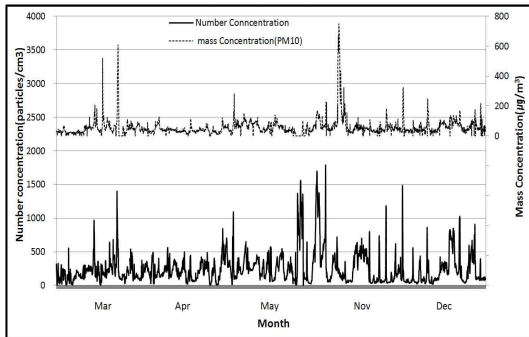


Fig. 2. Time series of total aerosol number concentration and mass concentration of PM₁₀ during five month occurred asian dust event.

본 연구기간 동안 0.25 ~ 32 μm 크기 범위의 에어로졸에 대해 가장 미세한 0.25 ~ 0.28 μm 구간부터 가장 큰 30.0 ~ 32.0 μm 구간까지 30개 구간으로 나누어 측정된 입경 범위별 에어로졸 수농도를 비행사, 약한 황사, 심한 황사로 구분하여 Table 2에 정리하여 나타냈다. 여기서 비행사 시 농도는 전 측정자료 중 기상청에서 황사현상으로 관측한 시간의 측정치를 제외한 측정치이며 약한 황사 시 농도는 황사가 발생한 기간 중 PM₁₀ 농도가 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만인 경우의 수농도 측정치이다. 그리고 심한 황사 시 농도는 황사가 발생한 기간 중 PM₁₀ 농도가 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 경우의 수농도 측정치이다.

Table 2. The basic statistics of the aerosol number concentration data obtained in this measurement

size range(μm)	NAD ^{a)}				WAD				SAD			
	Max	Min	Mean	Std	Max	Min	Mean	Std	Max	Min	Mean	Stdev
0.25-0.28	461.5	0.0	81.5	62.9	262.6	28.5	83.3	60.1	188.8	28.5	67.1	44.9
0.28-0.30	297.9	0.0	48.9	46.4	208.6	15.9	53.7	49.7	149.2	16.5	42.6	35.4
0.30-0.35	403.3	0.0	47.2	53.0	272.5	14.2	55.9	57.7	162.3	15.3	45.3	37.8
0.35-0.40	478.3	0.0	35.1	48.4	272.4	9.4	47.2	52.5	139.8	13.5	41.7	31.4
0.40-0.45	236.1	0.0	13.6	19.6	130.0	3.8	28.2	30.1	94.2	9.3	29.8	21.3
0.45-0.50	80.2	0.0	4.1	6.3	49.4	1.1	11.6	11.1	35.5	4.5	13.8	8.6
0.50-0.58	65.4	0.0	4.2	5.6	50.7	1.5	15.0	12.2	42.2	7.9	19.3	9.1
0.58-0.65	45.0	0.0	1.9	2.7	38.0	1.2	11.4	8.6	38.0	6.8	17.4	9.0
0.65-0.70	21.5	0.0	0.6	1.0	18.5	0.5	4.6	3.7	18.5	3.0	7.7	4.1
0.70-0.80	61.6	0.0	0.7	1.7	29.1	0.8	6.7	5.6	29.1	4.5	11.7	6.3
0.80-1.0	44.9	0.0	0.6	1.8	25.6	0.8	5.9	4.9	25.6	3.9	10.4	5.4
1.0-1.3	55.9	0.0	0.5	2.1	21.7	0.6	4.8	4.2	21.7	3.3	8.6	4.6
1.3-1.6	43.1	0.0	0.3	1.5	13.1	0.4	2.7	2.5	13.1	1.9	4.9	2.9
1.6-2.0	51.0	0.0	0.3	1.8	14.0	0.3	2.6	2.7	14.0	1.8	5.0	3.1
2.0-2.5	110.5	0.0	0.4	4.1	20.0	0.3	3.4	3.8	20.0	2.1	6.7	4.7
2.5-3.0	84.7	0.0	0.2	2.8	11.0	0.1	1.7	2.1	11.0	1.0	3.4	2.7
3.0-3.5	48.0	0.0	0.1	1.3	7.9	0.1	1.1	1.5	7.9	0.6	2.3	1.9
3.5-4.0	18.7	0.0	0.0	0.5	4.6	0.1	0.6	0.9	4.6	0.3	1.3	1.2
4.0-5.0	11.3	0.0	0.0	0.4	5.8	0.1	0.7	1.1	5.8	0.3	1.4	1.5
5.0-6.5	21.9	0.0	0.0	0.3	2.3	0.0	0.2	0.4	2.3	0.1	0.5	0.6
6.5-7.5	15.5	0.0	0.0	0.2	0.6	0.0	0.1	0.1	0.6	0.0	0.1	0.2
7.5-8.5	6.6	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1
8.5-10.0	5.5	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
10.0-12.5	2.4	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
12.5-15.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
15.0-17.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17.5-20.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20.0-25.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25.0-30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30.0-32.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

a) NAD means non-asian dust

Table 2에서 보면 본 연구기간 동안 측정된 에어로졸의 전 구간 수농도의 총합평균은 비황사 시 240.2 particles/cm³이며 약한 황사 시는 341.4 particles/cm³, 그리고 심한 황사 시는 341.0 particles/cm³로서 황사 시의 수농도가 비황사 시에 비해 약 100 particles/cm³ 정도 높은 값을 보이며 심한 황사 시와 약한 황사 시에는 거의 비슷한 수농도를 나타냈다. 입경 구간별 수농도를 비교해 보면 입경이 0.4 μm 이하의 입경 구간에서는 황사 시와 비황사 시의 에어로졸 수농도가 큰 차이가 없거나 오히려 심한 황사 시의 수농도가 비황사 시보다 작게 나타났다. 그러나 0.45 μm 이상의 입경 구간에서는 황사 시와 비황사 시의 에어로졸 수농도가 큰 차이를 보이기 시작하여 황사 시의 수농도가 비황사 시의 수농도보다 월등히 높고 심한 황사 시의 수농도가 약한 황사 시의 수농도보다 높게 나타난다. 입경이 클수록 그 차이는 더욱 크게 나타나 1.0 μm 이상의 입경 구간에서는 심한 황사 시의 수농도가 약한 황사 시의 수농도 약 2배 정도 높게 나타나며 약한 황사 시의 수농도는 비황사 시의 수농도보다 10배 가까이 높은 값을 보인다.

이러한 경향은 우리나라와 일본 등 황사 발원지로부터 편서풍의 풍하측에 위치한 동북아시아지역으로 이송되는 황사입자는 수 μm 이상의 조대입자가 대부분을 차지하기 때문에 미세한 입경 구간의 수농도에 적은 영향을 미치기 때문이다. 또한 1.0 μm 이하의 미세한 입자는 연소과정 등에서 직접 배출되거나 황산염, 질산염 및 암모늄과 같이 대기 중에서 2차적으로 생성된 인위적 기원에서 발생되는데 황사 시에는 일반적으로 빠른 기단의 이동을 동반하는 경우가 많아 인위기원의 미세입자를 분산시키는 효과가 있어 미세입자의 수농도가 오히려 감소하는 경향이 나타날 수 있다. 일본의 Tama Hills와 서울에서 수행된 황사 시 에어로졸의 수농도 특성에 관한 선행 연구에서도 이와 유사한 연구결과가 보고된 바 있다(Watanabe 등, 2005; Chun 등, 2001).

3.2. 황사기간과 비황사기간 중의 에어로졸 수농도 비교

황사기간과 비황사기간 중의 에어로졸 수농도를 비교하기 위하여 비황사 시의 입경 구간별 평균 수농도와 연구 기간 중 나타난 7회의 황사 사례의 입경 구

간별 평균 수농도를 Fig. 3에 나타냈다. 대기 중 에어로졸의 입경별 수농도는 황사 시와 비황사 시 모두 입경이 커짐에 따라 급격히 감소하는 유사한 경향을 보이지만 황사 사례에 따라 큰 차이를 보인다. 3월에 나타난 황사 시의 에어로졸 수농도는 0.5 μm 이하의 미세 입경 범위에서는 다른 시기에 나타난 황사 사례는 물론 비황사 시의 농도보다 낮은 경향을 나타냈으나 5.0 μm 이상의 조대 입자 범위에서는 다른 황사 사례에 비해 월등히 높은 수농도를 나타냈다. 4월에 발생한 황사 시의 수농도는 0.5~2.0 μm 범위의 입경 구간에서 비황사 시와 다른 사례에 비해 다소 높은 농도를 보였다. 5월에 발생한 황사는 지속시간도 짧고 PM₁₀ 농도 증가도 크지 않았으나 에어로졸 수농도에는 가장 큰 영향을 미쳤으며 특히, 0.65~5.0 μm 입경 범위에서는 다른 황사 사례 및 비황사 시보다 현저히 높은 수농도를 보였다. 그리고 11월에 나타난 황사 현상은 0.25~2.0 μm 범위의 작은 입경 구간의 수농도 증가에 큰 영향을 미쳤으며 12월에 나타난 두 번의 황사에는 대부분 입경 범위에서 비황사 시보다 오히려 낮은 에어로졸의 수농도 값을 보였다.

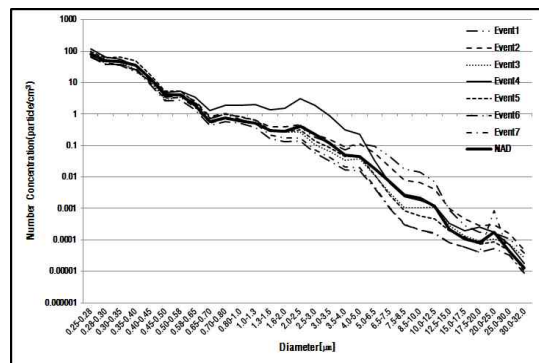


Fig. 3. Size resolved aerosol number concentration during asian dust events (event1~event7) and non-asian dust period(NAD).

황사가 에어로졸의 입경별 수농도에 미치는 영향을 알아보기 위해 비황사 시의 입경별 평균 수농도에 대한 약한 황사 시의 입경별 평균 수농도와 심한 황사 시의 입경별 평균 수농도 비를 구하여 Fig. 4에 나타냈다. 여기서 보면 0.4 μm 이하의 입경 범위에서는 약한

황사 시의 에어로졸 수농도는 비황사 시의 수농도와 거의 같은 수준이며 심한 황사 시의 수농도는 비황사 시의 수농도보다 다소 낮게 나타난다. 그러나 0.4 μm 이상의 입경 범위부터는 황사 시의 수농도가 비황사 시에 비해 현저히 높게 나타나기 시작하는데, 약한 황사의 경우 0.7 μm 이상의 입경 범위에서부터는 비황사 시에 비해 거의 10배 가까이 수농도가 높게 나타난다. 한편 심한 황사의 경우 0.65 μm 이상의 입경 범위에서부터는 비황사 시에 비해 거의 10배 이상의 수농도 증가를 보이며 3.0 μm 이상의 입경부터는 수농도 차이가 20배 이상 나타난다. 이 결과로 미루어 볼 때 황사현상에 의해 제주지역으로 유입되는 에어로졸의 입경은 대체로 0.7 μm 이상의 에어로졸이 대부분을 차지함을 알 수 있다. 이와 같이 황사현상이 발생하면 0.7 μm 이상의 입경 범위 수농도가 비황사 시에 비해 거의 10배 이상 높게 나타남에도 불구하고 전체 수농도는 약 1.5배 정도로 나타나는 것은 0.4 μm 이하의 미세한 에어로졸의 수농도가 전체 수농도의 90% 이상을 차지해 전체 수농도는 미세 입자 수농도에 지배되므로 전체 수농도에 대한 황사의 영향은 상대적으로 적게 나타난다.

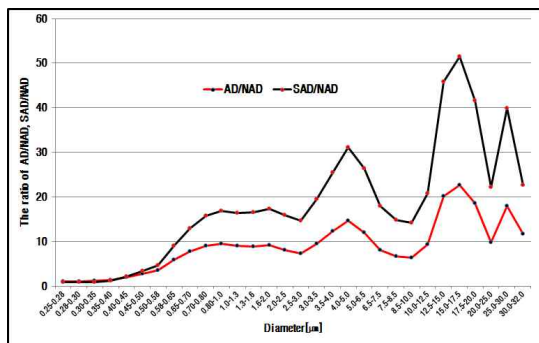


Fig. 4. The ratio of the averaged aerosol number concentration during weak and severe asian dust events to those during non-asian dust period.

대기 중 부유분진의 오염정도와 관리의 척도로서 많은 국가에서 입경이 10 μm 이하인 부유분진을 중점 관리하고 있으며 우리나라에서도 미세먼지(PM₁₀)를 대기환경기준 설정 항목으로 지정하여 관리하고 있다. 대기환경기준 설정 항목으로 설정된 PM₁₀에 대한

기준은 질량농도로 설정되어 있으나 대기 중 에어로졸이 인체의 건강에 미치는 영향은 질량농도보다는 수농도가 훨씬 중요한 영향인자라고 알려져 있다. PM₁₀의 질량농도는 10 μm 이하의 모든 에어로졸 전체에 대한 질량으로 측정하므로 측정 방법에 따른 차이가 크지 않은 반면, 수농도는 측정 입경 범위(특히, 최저 측정 한계입경)에 따라 큰 차이를 보이므로 측정 결과에 대한 비교나 해석에서 이 점을 유의할 필요가 있다. 본 연구에서 사용한 APS의 측정 범위는 0.25 ~ 32 μm 로써 0.25 μm 보다 작은 에어로졸 수농도는 측정되지 않으며 0.25 ~ 10 μm 까지는 23개 구간으로 나누어 입경 구간별 수농도가 측정된다.

황사현상이 대기환경기준 설정 항목인 PM₁₀의 수농도에 미치는 영향을 평가하기 위해 입경이 10 μm 이하(PM₁₀)인 에어로졸 전체 수농도 중 입경별 수농도가 차지하는 비율을 의미하는 PM₁₀ 전체 수농도에 대한 각 입경별 수농도의 상대적 기여율을 계산하고 이를 비황사 시와 약한 황사 시, 심한 황사 시로 구분하여 Fig. 5에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 본 연구의 측정 범위에서는 PM₁₀ 전체 수농도에 대한 각 입경별 수농도의 상대적 기여율은 미세한 입경 구간이 크고 입경이 클수록 기여율은 급격히 낮아져 비황사 시의 경우 0.58 μm 이상인 입경 구간의 기여율은 1%에도 미치지 못하는 결과를 보였다. 비황사 시 입경 구간별 기여율을 보면 0.25 ~ 0.28 μm 입경 구간의 기여율이 약 34%를 차지하고 0.28 ~ 0.30 μm 구간과 0.30 ~ 0.35 μm 구간은 약 20%로 비슷한 값을 보이며, 0.35 ~ 0.40 μm , 0.40 ~ 0.45 μm 구간의 기여율은 각각 약 15%와 6%를 차지한다. 반면에 황사 시에는 입경이 클수록 기여율이 급격히 낮아지는 경향은 비황사 시의 경우와 유사하지만 그 차이가 상대적으로 적으며 심한 황사가 발생할 때는 2.5 ~ 3.0 μm 구간의 기여율이 1%를 초과하는 결과를 보였다. 특히 입경 0.45 μm 를 경계로 0.45 μm 보다 작은 입경 구간에서는 비황사 시의 기여율이 황사 시에 비해 월등히 높고 이보다 큰 입경 구간에서는 황사 시의 기여율이 비황사 시에 비해 현저히 높게 나타났다. 아울러 약한 황사가 발생한 경우와 심한 황사 시의 기여율을 비교해 보면 0.4 μm 보다 작은 입경 구간에서는 약한 황사 시의 기여율이 심한 황사 시에 비해 상당히 높지만 이보다 큰 입경

구간에서는 심한 황사 시의 입경별 수농도 기여율이 약한 황사 시에 비해 높게 나타남을 알 수 있다. 이 결과로 볼 때 제주지역에 황사현상이 발생하면 0.4 μm 보다 큰 입경을 갖는 에어로졸의 수농도에 지대한 영향을 미침을 알 수 있다.

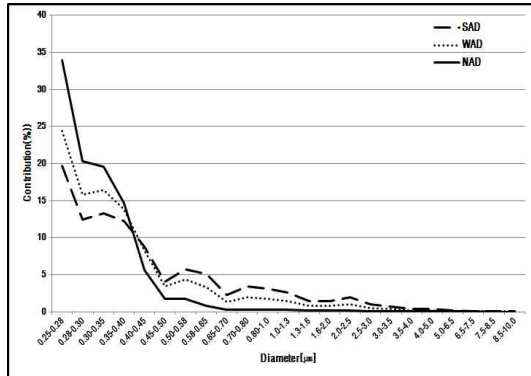


Fig. 5. The contribution percentage of the aerosol number concentration in each size range to total aerosol number concentration in size range of 0.25~10 μm .

3.3. 황사 시 에어로졸 수농도의 입경분포 특성

대기 중 에어로졸의 수농도는 특정 입경 구간에 속하는 농도를 측정하게 됨에 따라 개별 입자 크기의 농도와 입자 크기별 분포특성을 파악하기 위하여 구간별 측정치를 이용하여 입경에 따른 입경분포($N(D)=dN/d\log(D)$)곡선을 만들어 이용하는 것이 일반적이다.

입자 크기별 수농도 분포특성을 파악하기 위하여 본 연구의 전 측정 자료에 대한 에어로졸 수농도 입경분포곡선을 비황사 시와 약한 황사, 심한 황사로 구분하여 Fig. 6에 나타냈다. 여기서 보면 제주지역 대기 중 에어로졸의 입경별 수농도는 입경이 작을수록 높고 입경이 커짐에 따라 수농도는 감소하는데, 감소하는 정도는 입경 구간별로 뚜렷한 차이를 보임을 알 수 있다. 황사와 같은 특이 환경조건이 아닌 경우 0.25 ~ 1.0 μm 입경 범위의 미세한 에어로졸의 수농도는 입경이 커짐에 따라 급격히 감소하다가 1.0 ~ 2.0 μm 구간에서는 완만한 감소를 보이며, 2.0 ~ 2.5 μm 구간에서 약간 증가하는 경향을 나타내고 2.5 μm 보다 큰 입자 구간에서는 0.25~1.0 μm 입경 범위와 유사한 감소 경향을 나타낸다. 이와 같은 입자 크기별 에어로졸 수농

도 분포특성은 측정 입경 범위가 비슷한 다른 연구 결과에서도 밝혀진 바 있다. 미세입자 구간의 변화 추이는 연구결과들 간 대체로 유사한 경향을 보이지만 2.5 μm 보다 큰 입자 구간에 대해서는 대상지역에 따라 서로 다른 양상을 보였다. 특히, Kim과 Choi가 안면도, 제주 고산, 대관령에서 0.3 ~ 10 μm 입경 구간의 에어로졸 수농도 입경분포특성을 비교한 연구 결과에서 보면 2.0 μm 부근의 증가가 약간 큰 것 외에는 본 연구와 아주 유사한 입경분포특성을 보임을 알 수 있었다 (Chun 등, 1999; Yan 등, 2004; Kim과 Choi, 2002).

그러나 황사현상이 발생하면 에어로졸 수농도 입경분포특성이 비황사 시와 뚜렷한 차이를 보인다. 전체적으로 볼 때 거의 모든 입경에서의 수농도가 비황사 시보다 황사 시에 높은 농도를 보이며 입경에 따른 농도 변화 경향은 확연한 차이를 보인다. 0.4 μm 보다 작은 입경 구간에서는 농도 차이 외에는 황사 시와 비황사 시의 입경분포특성 차이가 크지 않으나, 0.4~2.0 μm 입경 범위에서는 황사 시의 입경 증가에 따른 수농도 감소 정도가 비황사 시에 비해 훨씬 적음을 알 수 있다. 이는 황사로 인해 0.4 μm 보다 큰 입경을 갖는 에어로졸이 제주지역으로 유입되기 때문으로 생각된다.

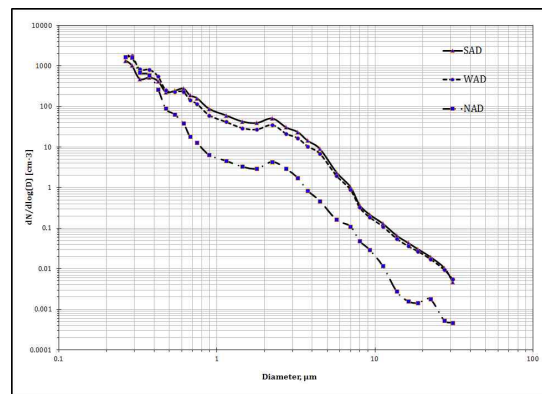


Fig. 6. Size distribution of the averaged aerosol number concentration during asian dust events and non-asian dust period.

한편 황사 시 입경별 에어로졸 수농도의 상호 관련성 및 전체 수농도에 대한 각 입경별 수농도의 영향 정도, PM_{10} 질량농도와 각 입경별 수농도의 상관성을 밝히기 위해 측정된 에어로졸 수농도 자료 중 상호 비교가

Table 3. Pearson correlation coefficients for hourly mean aerosol number concentration in each size range and PM₁₀

size range (μm)	0.25- 0.28	0.28- 0.30	0.30- 0.35	0.35- 0.40	0.40- 0.45	0.45- 0.50	0.50- 0.58	0.58- 0.65	0.65- 0.70	0.70- 0.80	0.80- 1.0	1.0- 1.3	1.3- 1.6	1.6- 2.0	2.0- 2.5	2.5- 3.0	3.0- 3.5	3.5- 4.0	4.0- 5.0	5.0- 6.5	PM ₁₀ ^{a)} TNC ^{b)}	
0.25-0.28	0.99	0.97	0.91	0.87	0.81	0.74	0.48	0.25	0.14	0.05	0.02	0.03	0.03	0.04	0.06	0.07	0.09	0.10	0.10	0.13	0.13	0.94
0.28-0.30	0.97	0.99	0.95	0.92	0.87	0.80	0.53	0.29	0.17	0.08	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.10	0.11	0.14	0.14	0.97
0.30-0.35	0.91	0.98	0.99	0.96	0.91	0.85	0.58	0.34	0.22	0.13	0.09	0.08	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.14	0.14	0.98
0.35-0.40	0.83	0.91	0.98	0.97	0.94	0.89	0.63	0.40	0.28	0.19	0.15	0.13	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.17	0.17	0.98
0.40-0.45	0.79	0.87	0.94	0.98	0.99	0.96	0.75	0.53	0.41	0.32	0.28	0.26	0.26	0.26	0.25	0.26	0.26	0.27	0.27	0.28	0.28	0.98
0.45-0.50	0.75	0.81	0.88	0.93	0.97	0.99	0.84	0.65	0.55	0.46	0.42	0.40	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.40	0.40	0.96
0.50-0.58	0.75	0.80	0.85	0.89	0.95	0.97	0.89	0.72	0.62	0.55	0.50	0.48	0.47	0.45	0.45	0.44	0.44	0.44	0.43	0.42	0.42	0.92
0.58-0.65	0.66	0.62	0.63	0.73	0.81	0.86	0.96	0.90	0.86	0.84	0.83	0.82	0.80	0.80	0.80	0.79	0.78	0.77	0.75	0.75	0.75	0.72
0.65-0.70	0.52	0.44	0.42	0.40	0.50	0.60	0.64	0.93	0.99	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.92	0.91	0.89	0.87	0.87	0.87	0.51
0.70-0.80	0.39	0.30	0.28	0.26	0.34	0.45	0.47	0.79	0.94	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.91	0.89	0.89	0.89	0.39
0.80-1.0	0.34	0.23	0.20	0.18	0.27	0.37	0.40	0.77	0.93	0.97	1.00	0.99	0.98	0.96	0.95	0.94	0.93	0.91	0.88	0.88	0.88	0.31
1.0-1.3	0.31	0.18	0.15	0.13	0.21	0.31	0.35	0.73	0.87	0.85	0.95	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.90	0.90	0.90	0.27
1.3-1.6	0.29	0.16	0.13	0.11	0.18	0.28	0.32	0.71	0.86	0.84	0.94	0.99	1.00	0.99	0.98	0.98	0.97	0.95	0.93	0.93	0.93	0.26
1.6-2.0	0.28	0.15	0.12	0.10	0.17	0.27	0.30	0.69	0.84	0.82	0.93	0.98	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.94	0.94	0.94	0.26
2.0-2.5	0.28	0.14	0.11	0.09	0.16	0.25	0.27	0.66	0.82	0.80	0.90	0.95	0.98	0.99	1.00	0.99	0.99	0.98	0.96	0.96	0.96	0.26
2.5-3.0	0.27	0.13	0.11	0.09	0.15	0.24	0.25	0.63	0.78	0.76	0.84	0.89	0.93	0.95	0.98	1.00	1.00	0.99	0.97	0.97	0.97	0.27
3.0-3.5	0.26	0.13	0.11	0.09	0.15	0.23	0.23	0.60	0.74	0.71	0.78	0.84	0.87	0.90	0.95	0.99	1.00	0.99	0.98	0.98	0.98	0.28
3.5-4.0	0.25	0.13	0.11	0.09	0.15	0.21	0.21	0.57	0.71	0.68	0.72	0.76	0.80	0.83	0.89	0.95	0.98	1.00	0.99	0.99	0.99	0.28
4.0-5.0	0.21	0.12	0.10	0.08	0.13	0.19	0.18	0.48	0.65	0.71	0.66	0.59	0.62	0.66	0.72	0.79	0.83	0.90	1.00	0.99	0.98	0.30
5.0-6.5	0.02	0.02	0.02	0.01	0.04	0.06	0.02	0.10	0.26	0.50	0.32	0.06	0.06	0.06	0.08	0.11	0.12	0.20	0.55	0.55	0.55	0.31
PM ₁₀	0.53	0.54	0.54	0.53	0.51	0.51	0.54	0.49	0.47	0.41	0.27	0.20	0.15	0.08	0.06	0.07	0.08	0.08	0.01	0.01	0.01	(0.36)
TNC	0.95	0.98	0.98	0.95	0.93	0.90	0.88	0.73	0.54	0.40	0.34	0.29	0.27	0.26	0.25	0.24	0.24	0.23	0.20	0.04	0.55	

a) PM₁₀ means mass concentration of aerosol less than 10 μm , b) TNC means total aerosol number concentration in overall range

c) \blacktriangledown : for asian dust events, \blacktriangle : for non-asian dust period, d) () : correlated negatively

가능한 6.5 μm 이하의 입경 구간에 대한 수농도를 황사 시와 비황사 시로 구분하여 각 입경별 수농도와 전체 수농도, PM_{10} 질량농도 간의 상관계수를 구하고 그 결과를 Table 3에 정리하여 나타냈다. Table 3에서 보는 바와 같이 비황사 시 전체 수농도는 0.58 μm 보다 작은 입경 구간의 입경별 수농도와 매우 큰 상관성을 가지며 이보다 큰 입경 범위의 수농도와는 상관성이 급격히 낮아져 1.0 μm 이상의 에어로졸 수농도와는 상관계수가 0.3 이하로 작아진다. 황사 시에도 전체 수농도와 입경별 수농도의 상관성은 대체로 비황사 시와 비슷한 결과를 보인다. 다만 2.0 μm 이상의 입경 구간에서는 전체 수농도에 대한 입경별 수농도의 상관성이 비황사 시보다 다소 크게 나타났다. 이 결과로 볼 때 제주지역 대기 중 에어로졸의 전체 수농도는 0.58 μm 보다 작은 입경 구간의 수농도에 지배됨을 알 수 있었으며, 황사의 영향을 받는 경우에도 이러한 경향은 크게 변하지 않음을 알 수 있었다.

그리고 인접한 입경별 수농도 간에는 매우 높은 상관관계를 보이고 입경 차이가 큰 입경 간의 상관계수는 아주 낮게 나타나는데, 이러한 경향은 황사 시에 더욱 두드러지게 나타났다. 황사 시 입자 크기가 0.65 μm 보다 큰 입경 범위의 수농도 간에는 전체적으로 매우 큰 상관성을 보이지만 0.65 μm 보다 큰 입경 범위의 수농도와 0.4 μm 보다 작은 입경 범위의 수농도 간에는 상관관계가 거의 없었다. 이 결과로 볼 때 유사한 크기의 에어로졸은 동일한 생성기원으로부터 유래되고 입경 차이가 큰 입자의 유입경로는 명확히 다르다는 사실을 확인할 수 있었다. 특히 연구기간 중 발생한 황사 현상이 7차례나 되며 시기적으로 큰 차이가 있음에도 이와 같은 결과를 보이는 것으로 볼 때 황사현상에 의해 제주지역으로 유입되는 에어로졸은 황사의 발생시기나 수송경로에 관계없이 유사한 입경분포를 갖는 것으로 생각된다.

한편 에어로졸의 전체 수농도와 PM_{10} 질량농도와 상관성을 보면 비황사 시에는 상관계수가 0.55 정도로 약간의 상관성을 보이지만 황사 시에는 아주 약한 음의 상관성을 나타낸다. PM_{10} 질량농도와 입경별 수농도 간의 상관성도 황사 시와 비황사 시 확연한 차이를 보인다. 비황사 시에는 0.65 μm 이하의 입경 구간에서 PM_{10} 질량농도와 입경별 수농도 간의 상관계수

가 0.5 이상으로 나타나며 2.0 μm 이상의 입경 구간에서는 상관계수가 0.1 이하로 아주 낮다. 반면에 황사 시에는 0.7~2.5 μm 입경 범위에서 PM_{10} 질량농도와 입경별 수농도 간의 상관계수가 0.5 이상으로 나타나며 그 이상의 입경 구간에서도 상관계수가 0.2 이상을 보이지만 0.58 μm 이하의 입경 범위에서는 PM_{10} 질량농도와 입경별 수농도 간에 약한 음의 상관성을 보였다. 이 결과로 볼 때 제주지역 대기 중 에어로졸의 총 수농도는 황사 시와 비황사 시 구분 없이 미세입자의 수농도에 대체로 지배적 영향을 받지만 황사 시에는 조대입자 수농도 영향이 증대된다. 반면에 PM_{10} 질량농도는 비황사 시에는 1.0 μm 이하의 입자 수농도에 비슷한 정도로 영향을 받으나 황사 시에는 0.65~3.0 μm 입경 범위의 수농도가 PM_{10} 질량농도에 결정적 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

황사현상이 제주지역 대기 중 에어로졸의 수농도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 광학입자개수측정장치(APS)를 이용해 2010년 3월 1일부터 2011년 2월 28일까지 에어로졸 수농도를 측정하고 그 결과로부터 황사 시의 에어로졸 수농도 특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

본 연구 기간 동안 황사 사례는 총 7회에 걸쳐 나타났다. 이 때 측정된 에어로졸 수농도 총합평균은 약 341.0 particles/ cm^3 로서 비황사 시에 비해 약 100 particles/ cm^3 정도 높은 값을 보였으며 심한 황사 시와 약한 황사 시에는 거의 비슷한 수농도를 나타냈다.

입경 구간별로는 0.4 μm 이하의 입경 구간에서는 황사 시와 비황사 시의 에어로졸 수농도가 큰 차이가 없었으나 0.45 μm 이상의 구간에서는 황사 시가 월등히 높아 0.7 μm 이상의 입경별 수농도는 비황사 시에 비해 거의 10배 이상 높게 나타나지만 전체 수농도는 미세 입자(<0.45 μm) 수농도에 지배됨에 따라 황사의 영향이 상대적으로 적어 전체 수농도는 약 1.5 배 정도 높게 나타났다.

10 μm 이하 구간 전체 수농도에 대한 각 입경별 수농도의 상대적 기여율은 입경이 클수록 급격히 낮아지며 0.4 μm 보다 작은 입경 구간에서는 비황사 시의

기여율이 황사 시에 비해 월등히 높고 이보다 큰 입경 구간에서는 황사 시의 기여율이 비황사 시에 비해 현저히 높게 나타나 제주지역에 황사현상이 발생하면 0.4 μm 보다 큰 입경을 갖는 에어로졸의 수농도에 지대한 영향을 미침을 알 수 있었다.

황사현상이 발생하면 에어로졸 수농도 입경분포특성이 뚜렷한 차이를 보여 0.4 μm 보다 작은 입경 구간에서는 농도 차이 외에는 황사 시와 비황사 시의 입경분포특성 차이가 크지 않으나, 0.4~2.0 μm 입경 범위에서는 황사 시의 입경 증가에 따른 수농도 감소 정도가 비황사 시에 비해 훨씬 적음을 알 수 있었다.

제주지역 대기 중 에어로졸의 수농도는 인접한 입경별 수농도 간에 매우 높은 상관성을 보이며 총 수농도는 황사 시와 비황사 시 구분 없이 0.58 μm 보다 작은 미세입자의 수농도에 대체로 지배적 영향을 받지만 황사 시에는 초대입자 수농도 영향이 증대된다. 반면에 PM₁₀ 질량농도는 비황사 시에는 1.0 μm 이하의 입자 수농도에 주로 영향을 받으나 황사 시에는 0.65~3.0 μm 입경 범위의 수농도에 가장 큰 영향을 받음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2012-3010)의 연구비를 지원받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Bigi, A. B., Ghermandi, G., 2011, Particle number size distribution and weight concentration of background urban aerosol in a Po Valley site, *Water Air Soil Pollut.*, 220, 265-278.
- Buzorius, G., Hämeri, K., Pekkanen, J., Kulmala, M., 1999, Spatial variation of aerosol number concentration in helsinki city, *Atmos. Environ.*, 33, 553-565.
- Choi, B. C., Iwasaka, Y., Lim, J. C., Jeong, S. B., Kim, Y. S., Dmitri, T., Nagatani, T., Yamada, M., Kim, S. B., Hong, G. M., Lee, Y. G., Yoo, H. J., 2005, Features on the vertical size distribution of aerosols using ballon-borne optical particle counter at Anmyon, *J. of Atmosphere, KMS*, 15(3), 149-153.
- Chun, Y. S., Kim, J. Y., Choi, J. C., Shin, D. S., 1999, The characteristics of the aerosol number concentration observed in Seoul and Anmyondo during an yellow sand phenomenon, *J. of Korean Atmos. Environ.*, 15(5), 575-586.
- Chun, Y. S., Kim, J. Y., Choi, J. C., Boo, K. O., Oh, S. N., Lee, M. H., 2001, Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust period in Korea, *Atmos. Environ.*, 35, 2715-2721.
- Jung, C. H., Cho, Y. S., Lee, J. T., 2005, Characteristics of Incheon aerosol during asian dust period in 2004 using optical particle counter(OPC), *J. Environ Sci.*, 14(6), 565-575.
- Kim, J. Y., Choi, B. C., 2002, Aerosol size distributions and their regional characteristics over Korea, *J. of the Korean Meteorological Society*, 38(2), 95-104.
- Longley, I. D., Inglis, D. W. F., Gallagher, M. W., Williams, P. I., Allan, J. D., Coe, H., 2005, Using NO_x and CO monitoring data to indicate fine aerosol number concentrations and emission factors in three UK conurbations, *Atmos. Environ.*, 39, 5157-5169.
- Minoura, H., Takekawa, H., 2005, Observation of number concentrations of atmospheric aerosols and analysis of nanoparticle behavior at an urban background area in japan, *Atmos. Environ.*, 39, 5806-5816.
- Park, K. Y., Lee, H. G., Suh, M. S., Jang, K. M., Kang, C. H., Hu, C. G., Kim, Y. J., 1994, Analysis of air pollution concentrations at Cheju baseline measurement station, *J. of Korea Air Pollution Res. Assoc.*, 10(4), 252-259.
- Renjian, Z., Zhiwei, H., Zhenxing, S., Junji, C., 2008, Continuous Measurement of Number Concentrations and Elemental composition of aerosol particles for a dust storm event in Beijing, *Adv. Atmos. Sci.*, 25(1), 89-95.
- Sharma, D. K., Rai, J., Israil, M., Singh, P., 2003, Summer variations of the atmospheric aerosol number concentration over Roorkee, India, *J. Atmos. Solterr. Phy.*, 65, 1007-1019.
- Sharma, N. L., Sharma, J. C., Singh, M., Sharma, P., Chand, K., Negi, A. K., Sharma, M., Thakur, H. K., 2011, Atmospheric ultrafine aerosol number concentration and its correlation with vehicular

- flow at two sites in the western Himalayan region: Kullu-Manali, India, *J. Earth Syst. Sci.*, 130(2), 281-290.
- Stanier, C. O., Khlystov, A. Y., Pandis, S. N., 2004, Ambient aerosol size distributions and number concentrations measured during the pittsburgh air quality study (PAQS), *Atmos. Environ.*, 38, 3275-3284.
- Vyziene, R., Girgždys, A., 2009, Investigation of aerosol number concentration in jonava town, *J. of Environ. Eng. Landsc.*, 17(1), 51-59.
- Watanabe, K., Suzuki, I., Dokiya, Y., 2005, Aerosol number concentrations during kosa events on suburban hills in Japan, *Water, Air, and Soil Pollution*, 5, 195-206.
- Yan, F., Hu, H., Yu, T., 2004, Analysis of particulate mass concentration, aerosol number concentration and visibility in Beijing, Chin. *Particology*, 2(1), 25-30.