

Aerodynamic Particle Sizer (APS)를 이용한 고농도 PM₁₀ 사례 중 황사 판별기법 개발

이영곤^{1,*} · 조천호² · 김명수¹

¹기상청/기상연구소/지구대기감시센터, ²기상청

(2007년 10월 16일 접수; 2008년 2월 12일 승인)

Developing a Method for Detecting the Asian dust event Among High PM₁₀ events Using Aerodynamic Particle Sizer (APS)

Young-Gon Lee^{1,*}, Chun-Ho Cho² and Myoung-Soo Kim¹

¹Korea Global Atmosphere Watch Observatory, Meteorological Research Institute, Korea Meteorological Administration, Taejeon-gun 357-961, South Korea

²Korea Meteorological Administration, 460-18, Shindaebang-dong, Dongjak-ku, Seoul, 156-720, South Korea

(Manuscript received 16 October 2007; in final form 12 February 2008)

Abstract

Log normalized volume size distribution ($dV/d\log D_p$) with 52 size ranges from 0.5 to 20.0 μm was measured for the cases of high PM₁₀ mass concentration ($> 200 \mu\text{g m}^{-3}$) using the Aerodynamic Particle Sizer (APS) at the Korea Global Atmosphere Watch Center (KGAWC) from 6 April, 2006 to 5 April, 2007. Black Carbon (BC), gaseous pollutants of NO_x and SO₂, and Ångström exponent were also measured to examine the properties of the volume size distribution. From distinct difference of the high volume concentration ($> 100 \mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$), the volume size distribution for each event day was classified into four types: (1) Type 1 had the high volume concentration for supermicron particles from 2.3 to 6.0 μm and maximum average volume concentration was $160.7 \mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ at 3.5 μm . (2) Type 2 represented the high volume concentration in the both size range of submicron (0.7 - 1.0 μm) and supermicron particles (2.1 - 4.1 μm) and similar maxima of $126.1 \mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ and $136.2 \mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ were found at 0.8 and 3.3 μm respectively. (3) Type 3 showed the high volume concentration in the size range of 0.5 - 3.5 μm and highest volume concentration of $201.1 \mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ at the particle size bin of 0.8 μm . (4) Type 4 was characterized by the high volume concentration for the fine particles less than 1.2 μm and very high concentration of $446.8 \mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$. Ångström exponent, concentration of gaseous (NO_x and SO₂), and particle (BC) pollutants suggested that Type 1 was a typical volume size distribution for the Asian dust and Type 3 provided transportation of air pollutants. The distribution in Type 2 found to have both characteristics of the Asian dust and air pollutants, and Type 4 was took place during the foggy atmosphere containing high density of local pollutants. Based on the properties of volume size distribution, we can identify the three major events contributing the increase of PM₁₀ mass concentration, and hope to provide a guideline for discriminating the Asian dust from high PM₁₀ events. More case studies and longer measurements provide a data set to advance this determination method.

Key words: Aerodynamic Particle Sizer (APS), Volume size distribution, Asian dust

1. 서 론

한반도를 포함한 동북아시아 지역은 공단에서 배출

되는 오염물질 및 농경지 소각, 황사 등 다양한 배출원이 복합적으로 공존하기 때문에 대기 중 에어로솔의 분포가 매우 복잡하다 (Bates *et al.*, 2004). 특히, 봄철 (3월 ~ 5월)에 중국내륙에서 발원한 먼지 폭풍이 한국과 일본 등 이웃한 국가뿐만 아니라 태평양을 가로질러 미국에 까지 영향을 줌으로서 황사의 환경 및 기후변화에 미치는 영향에 대해 많은 관심을 불러일으키고 있다 (Sun *et al.*, 2001; Jaffe *et al.*, 2003). 과거 20년 동안 황사에 대한 연구는 물리, 화학, 광학적 특성에 대한 연

*Corresponding Author: Young-Gon Lee, Global Atmosphere Watch Center (GAWC), Meteorological Research Institute, Korea Meteorological Administration, 1764-6, Seungjeon-Ri, Anmyeon-Up, Taejeon-Kun, Chung-Nam, 357-961, South Korea. Phone: +82-41-674-6420, fax: +82-41-674-6422 E-mail: yglee@kma.go.kr

구에 국한되지 않고, 수치모델, 위성 및 라이다에 이르기까지 광범위한 분야에서 수행되었다 (Cahill and Perry, 1996; Zhou *et al.*, 2002; Uno *et al.*, 2004; Darnenova *et al.*, 2005). 그러나 황사에 대한 많은 연구에도 불구하고 황사에 대한 정량적인 영향 평가는 아직도 많은 부분에서 미흡하다 (Sokolik *et al.*, 2001).

기상청에서는 황사로부터 국민들의 피해를 최소화하기 위하여 대기 중 미세먼지 농도를 기준으로 2002년 4월부터 황사 특보제를 시행하고 있으며, 2007년 현재 전국 기상 관측망에 황사를 실시간 감시를 위하여 23개의 PM₁₀ 장비를 운영하고 있다 (<http://www.kma.go.kr>). 이외에도 황사의 효율적인 예측과 진단을 위하여 기상청에서는 황사에측도모델과 인공위성 자료 및 라이다를 운영하고 있다 (http://www.metri.re.kr/metri_home/Yellowsand/uIndex.jsp). 그러나 현재 운영되고 있는 방법들은 PM₁₀ 질량농도가 300 $\mu\text{g m}^{-3}$ 이하에서 증가할 때 황사와 비 황사를 객관적으로 판별하는 데는 한계가 있다. 따라서 특정 계기관측을 통하여 PM₁₀ 농도가 200 $\mu\text{g m}^{-3}$ 이상으로 증가 시 황사와 비 황사를 신속하게 판별할 수 있는 방법이 절실히 요구된다.

이영곤과 조천호 (2007)는 지구대기감시센터 (Korea Global Atmosphere Watch Center, KGAWC)에서 운영되는 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS, model 3034, TSI, Inc., USA)와 Aerodynamic Particle Sizer (APS, model 3321, TSI, Inc., USA)를 이용하여 PM₁₀ 질량 농도를 입경별 수농도 및 표면적농도, 부피농도와 황사 발생 전후에 대해 연속적으로 비교한 결과 부피농도가 가장 황사의 영향을 잘 나타냄을 확인하였다. 따라서 황사의 영향을 잘 표현할 수 있는 입자 크기별 부피농도 분포 특징이 다른 황사 사례에도 동일하게 적용되고 황사 이외의 사례와 뚜렷이 구분될 경우 황사와 비 황사를 신속히 판별하는데 중요한 지침을 제시할 수 있다.

본 연구에서는 KGAWC에서 최근 1년 동안 (2006년 4월 6일부터 2007년 4월 5일) 황사를 포함한 PM₁₀ 질량 농도가 200 $\mu\text{g m}^{-3}$ 이상인 사례일에 대하여 APS로 관측된 에어러솔 입자 크기 별 부피농도 분포 특성을 분석하였다. 또한 분류된 부피농도에 대해 검댕 (Black Carbon, BC)과 가스상 오염물질인 NO_x와 SO₂ 농도, 옹스트롬 지수를 비교하여 PM₁₀ 질량 농도의 증가에 기여한 에어러솔의 특성을 비교하였다. 최종적으로 입경별 부피농도 분포 특성을 사례별로 정리하고 황사와 비 황사를 판별할 수 있는 지침으로 제시하였다.

2. 관 측

한반도 서해안에 위치한 KGAWC (36°32' N, 126°19' E, 45.7m a.s.l.)은 1996년부터 현재까지 기후변화에 영향을 미치는 온실 및 반응가스, 에어러솔, 산성비, 대기복사 등 다양한 기후변화 요소를 감시하고 있다 (http://www.metri.re.kr/metri_home/KGAWO/uIndex.jsp). 다양한 에어러솔의 물리 및 광학적 특성을 관측하기 위하여 KGAWC은 연구동 건물 옥상에서 관측실 내부까지 연결된 8.0 m 높이의 에어러솔 통합 흡입구를 통하여 다양한 에어러솔 관측장비에 공기 시료가 층류 (laminar flow)에서 등역학 포집 (isokinetic sampling)이 되도록 구축하였으며 자연상태의 에어러솔 특성을 파악하기 위하여 제습장치를 설치하지 않았다 (Lee and Choi, 2005).

본 연구에서 PM₁₀ 질량농도를 측정하기 위해 이용된 장비는 베타 (β) 선원으로 탄소 (C) - 14를 이용한 입자 측정기 (FH62C14, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)로 필터 테이프에 포집된 입자에 의해 베타 선이 감쇄되는 정도로부터 농도를 측정한다. 입자 측정기의 샘플 유량은 16.7 L min⁻¹이며, 관측 불확실성은 $\pm 2 \mu\text{g m}^{-3}$ 이다.

입경별 수농도 분포를 관측하기 위하여 운영되는 장비 중 APS는 0.5 ~ 20.0 μm 입경의 에어러솔을 52개의 입경 구간에 대해 수농도를 매 3분마다 관측한다. APS의 샘플 및 외부 (sheath) 유량은 각각 1 L min⁻¹와 4 L min⁻¹이며, 수농도에 대한 불확실성은 약 $\pm 10\%$ 이다 (Wang *et al.*, 2002). 관측자료는 로그 형식의 각 입경 (D_p)에 대한 수농도 ($dN/d\log D_p$)로 출력되며 본 연구에서는 10분 평균한 자료를 이용하였다. 모든 입자가 동일한 조성을 가진 성분이라고 가정했을 때 부피가 질량에 선형적으로 비례한다는 아래의 관계식을 사용하여 부피농도 ($dV/d\log D_p$)를 구하였다 (Hobbs, 2000):

$$\frac{dV}{d\log(D_p)} = \frac{\pi}{6} D_p^3 \frac{dN}{d\log(D_p)} \quad (1)$$

지구대기감시센터에서는 배경 해안지역의 반응가스 농도의 장기변동 및 중국 및 수도권 주변 지역의 오염물질 수송 경향을 분석하기 위하여 대기질 모니터링 시스템 (Air Quality Monitoring System, AQMS, model ML9800B, Ecotech, Australia)을 운영하여 매 10분

평균 관측자료를 생산하고 있다. 본 연구에서는 AQMS에서 측정되는 요소들 중 주요 가스상 오염물질인 NO_x와 SO₂의 농도 변화를 분석하였다. NO_x와 SO₂ 분석기의 샘플 유량은 각각 0.6과 0.5 L min⁻¹이며, 관측 농도의 정확성은 모두 ±0.5 ppb이다.

가스상 오염물질 외에 Aethalometer (model AE-16U, Magee Sci., USA)를 이용하여 연료의 연소에 의해 발생하는 대표적 입자상 오염물질인 검댕 (Black Carbon, BC)의 농도를 관측하였다. BC 농도는 Aethalometer 내부의 필터 테이프에 포집된 입자에 880nm의 빛을 조사하여 감쇄되는 정도로부터 구해지며, 본 연구에서 관측된 BC 농도 정확도는 4.5 L min⁻¹의 샘플 유량과 5분 간격의 관측 주기를 고려하면 약 ±5 ng m⁻³의 값이 구해진다.

Nephelometer (model 3523, TSI, Inc., USA)는 장비 내부로 유입된 에어러솔에 450, 550, 700 nm의 파장을 각각 주사하여 빛이 입자에 의한 산란계수를 매 5분마다 관측한다 (Anderson *et al.*, 1999). Nephelometer의 흡입 유량은 40 L min⁻¹이며 입자의 이동 효율 (Particle Transport Efficiency)은 0.05 - 5 μm의 입자에 대해 95% 이상으로 정확도가 매우 높다. 옹스트롬 지수 (Ångstrom exponent, α)는 빛의 파장에 따른 에어러솔 광학 두께 (aerosol optical thickness)에 대한 종속성을 의미하는 것으로 대기 중 에어러솔의 평균 크기와 역상관을 가지는 값으로 아래의 관계식으로부터 구해진다 (Liou, 2002):

$$\alpha = \sum_{\lambda} \frac{\log \tau_{\lambda} - \log \tau_{\lambda_0}}{\log \lambda - \log \lambda_0}, \quad \lambda = 450, 550, 700 \quad (2)$$

여기서 λ는 Nephelometer에서 관측되는 세 파장이며, τ_λ는 각 파장에 대한 산란계수이다. λ₀와 τ_{λ₀}와 는 각각 기준 파장과 기준 파장에 대한 산란계수로, 본 연구에서는 기준 파장과 기준 파장에 대한 산란계수를 식 (3)과 같이 로그 합에 대한 산술 평균으로 정의하였다:

$$\log \tau_{\lambda_0} = (\sum_{\lambda} \tau_{\lambda})/3, \quad \log \lambda_0 = (\sum_{\lambda} \lambda)/3 \quad (3)$$

이상에서 설명한 각 장비의 관측 설비 및 방법에 대한 보다 상세한 내용은 지구대기감시보고서 (기상청, 2006)에서 확인할 수 있다.

3. 결과

본 연구에서는 지구대기감시센터에서 APS 장비가 안정적으로 운영되기 시작한 2006년 4월 6일부터 2007년 4월 5일까지 하루 중 10분 평균 PM₁₀ 질량농도가 200 μg m⁻³ 이상 증가하여 1시간 이상 지속된 사례일들에 대해 분석하였다. 분석 기간 중 최대 PM₁₀ 질량농도가 1,000 μg m⁻³ 이상의 강한 황사로 기록된 2006년 4월 8 - 9일과 2007년 3월 31일 - 4월 2일은 3 μm 부근의 부피농도 값이 3,500 μm³ cm⁻³ 이상으로 매우 높게 나타났다 (Lee and Cho, 2007). 이러한 극단적인 사례는 황사와 비황사를 판별하기 위한 기준을 제시하는데 어려움을 줄 것으로 예상되어 두 사례를 제외한 나머지 13일의 사례에 대해 APS로부터 산출된 입경별 부피농도를 분석하였다 (표 1). 위 기준에 의해 분류된 200 μg m⁻³ 이상의 고농도 PM₁₀ 사례일은 겨울철과 봄철에 각각 4일로 대부분을 차지하였으며, 여름철에는 6월에 단 한차례 관측되었다.

3.1 입경별 부피농도 분포

전체 사례 일에 대해 APS에서 관측된 부피농도 분포 특성을 보다 정밀하게 분석하기 위하여 부피농도 값이 주로 1 μm³ cm⁻³ 이하의 값을 갖는 8.0 μm 이상의 큰 입자를 제외하고 0.5 - 8.0 μm 사이 입자에 대한 부피농도 분포의 시계열을 분석하였으며 그림 1 같이 네 가지 Type들로 분류되었다. Type 1으로 정의된 그림 1(a)의 경우 부피농도 1 μm 이상의 조대 입자에서 100 μm³ cm⁻³ 이상의 높은 농도 값을 나타내었으며, 그림 1(b)의 Type 2는 1.5 μm 부근 입경을 중심으로 미세

Table 1. Event days when PM₁₀ mass concentration increased higher than 200 μg m⁻³. The number in each parenthesis represents the maximum PM₁₀ mass concentration for each event day at the GAWC.

Event days (Max. PM ₁₀ , μg m ⁻³)		Event days (Max. PM ₁₀ , μg m ⁻³)	
2006. 4. 12.	(255)	2007. 2. 4.	(303)
2006. 4. 24.	(347)	2007. 2. 8.	(214)
2006. 6. 27.	(207)	2007. 2. 14.	(285)
2006. 9. 22.	(223)	2007. 3. 6.	(258)
2006. 11. 5.	(229)	2007. 3. 27.	(245)
2006. 11. 9.	(253)	2007. 3. 28.	(260)
2006. 11. 22.	(213)		

Table 2. Event days classified into four types of the volume size distribution shown in Figure 1. The dark gray color indicates Asian dust events defined from the Korea Meteorological Administration (KMA) during the observation period.

Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
2006. 4. 12.	2006. 11. 5.	2006. 6. 27.	2007. 2. 8.
2006. 4. 24.	2006. 11. 9.	2006. 9. 22.	
2007. 2. 4.	2007. 2. 14.	2006.11. 22.	
2007. 3. 6.	2007. 3. 28.	2007. 3.27.	

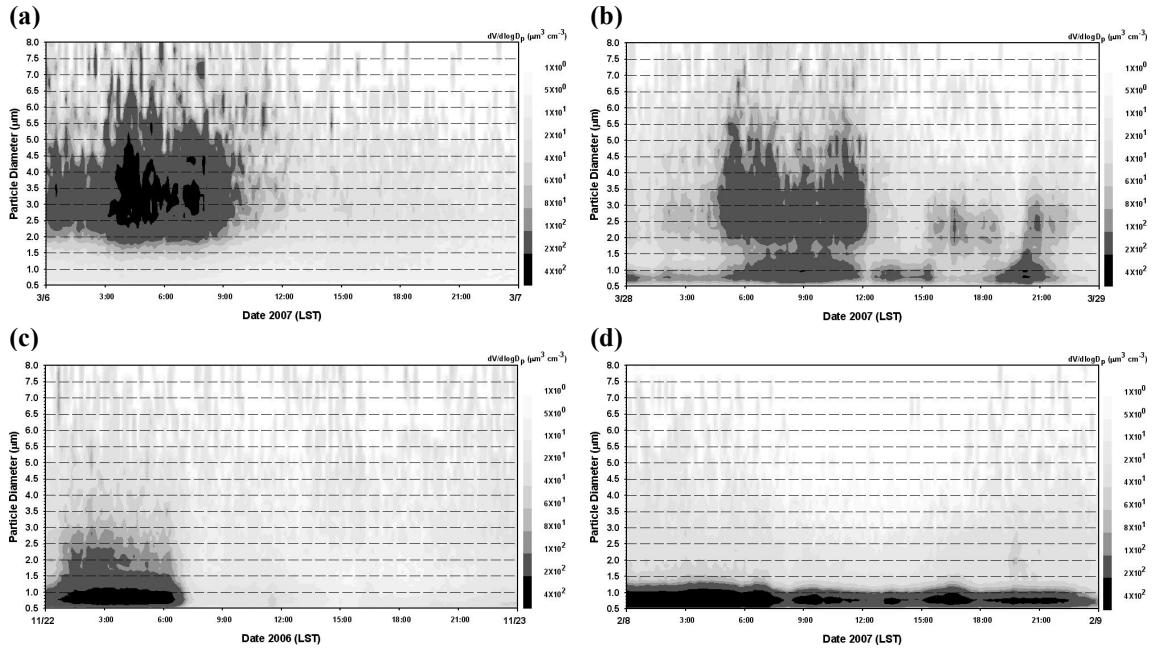


Fig. 1. Examples of typical volume size distribution among the high PM₁₀ event days: (a) Type 1 : 6 March 2007, (b) Type 2 : 28 March 2007, (c) Type 3 : 22 November 2006, and (d) Type 4 : 8 February 2007. The x-axis represents the time (Local Standard Time, LST) and y-axis particle diameter.

입자와 조대 입자 양쪽으로 $100 \mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 이상의 부피농도 값을 나타내었다. 그림 1(c)의 Type 3은 $100 \mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 이상의 높은 부피농도를 나타낸 입경 구간이 0.5 - 3.5 μm 까지 연속적으로 관측되었으며, Type 4로 정의된 그림 1(d)는 1 μm 이하의 미세 입자 영역에 대해서만 $200 \mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 이상의 부피농도를 나타내었다.

표 2는 그림 1의 입경별 부피농도 형태에 따라 사례 일을 분류한 것이며 회색으로 표시한 날은 기상청에서 관측기간 동안 황사로 정의한 날이다. 관측기간 동안 PM₁₀ 질량농도가 $200 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상인 사례일 중 총 5일이 황사일로 분류되었으며 주로 Type 1과 2에 포함되었다. 표에서 입경별 부피농도 분포가 Type 1인 경우는 주로 2 - 4월에 관측되었으며, Type 2는 2 - 3월 외에도 11월에 2차례 관측되었다. Type 3는 전체 계절에

서 관측되었으며, Type 4는 그림 2(d)와 같이 2월 8일 한차례 관측되었다.

각 Type 별로 분류된 사례 일에 대해 PM₁₀ 질량농도가 $200 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상 관측된 시간에 대해 입경별 부피농도 분포를 그림 2에 나타내었다. 네 가지 색으로 나타낸 점들은 각 Type에 대한 입경별 부피농도의 평균값이며 연직 바는 5와 95 퍼센트 내에 포함된 입경별 부피농도 값이다. 그림에서 Type 1은 1 μm 이하의 미세 입자 영역에서 평균 부피농도가 $20 \mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 이하의 낮은 값을 나타내다가 1 μm 이상의 큰 입자로 갈수록 부피농도가 증가하여 입경 2.3 - 6 μm 사이의 조대 입자에서 $100 \mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 이상의 높은 평균값을 나타내었다. Type 2는 0.7 - 1 μm 와 2.1 - 4.1 μm 의 두 입경 구간에서 $100 \mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 이상의 높은 부피농도를 나타

내었지만 1 μm 이상의 조대 입자의 부피농도는 Type 1에 비해 상대적으로 낮게 나타났다. Type 3은 0.5 - 3.5 μm 에 걸쳐 넓은 입경에 대해 100 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 이상의 높은 부피농도를 나타내었으며, 특히 0.8 μm 의 미세 입자 구간에서 100 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 이상의 높은 부피농도를 나타내었으며 이후 큰 입자 쪽으로 갈수록 부피농도가 점차 감소하는 경향을 나타내었다. Type 4는 0.5 μm 부터 부피농도가 급격히 증가하여 Type 3과 같이 0.8 μm 에서 200 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 이상의 매우 높은 부피농도를 나타내다 이후 1 μm 이상의 조대 입자 입경 구간에서 급격히 100 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 이하로 빠르게 감소하는 경향을 나타내었다.

표 3은 그림 2에 나타낸 입경별 부피농도의 네 가지 분포 Type들에 대한 입경별 평균 부피농도의 최대값과 평균 부피농도 값이 100 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 이상을 갖는 입경 구간을 나타내었다. 표 3에서 1 μm 이상의 조대 입자에 대한 최대 평균부피 농도는 Type 1의 3.3 μm 에서 160.7 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 로 가장 높게 나타났으며, 1 μm 이하의 미세 입자는 Type 4의 0.8 μm 에서 446.8 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 로 매우 높게 나타났다. Type 3은 0.5 - 3.5 μm 에 걸쳐 가장 넓은 입경에 대해 100 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 이상의 높은 부피 농도를 나타내었으며, 최대 평균부피 농도는 미세 입자

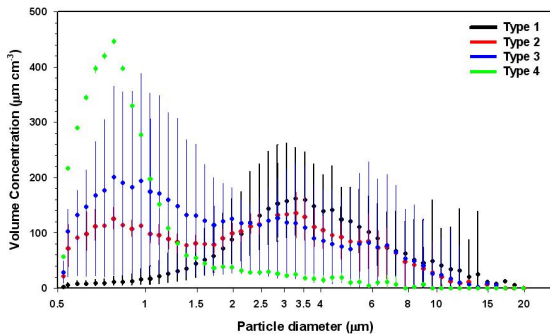


Fig. 2. Comparison of volume size distribution for each four types shown in Table 2. Mean values (colored dots) and bars (5 and 95 percentiles) in the particle size bins were calculated for the period when PM₁₀ concentration was larger than 200 $\mu\text{g m}^{-3}$.

구간인 0.8 μm 에서 201.1 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 으로 산정되었다. Type 2는 그림 2에서와 같이 Type 1과 Type 3의 입경별 부피농도 분포 특징을 모두 가지는 형태로 1 μm 기준으로 미세 입자와 조대 입자에 대해 최대 부피농도가 각각 0.8 μm 에서 126.1 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 와 3.3 μm 에서 136.2 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 로 나타났다.

3.2 오염물질 농도 및 에어러솔 광학적 특성

그림 3은 네 Type별로 분류된 사례 일에 대해 PM₁₀ 질량 농도가 200 $\mu\text{g cm}^{-3}$ 이상을 유지하는 시간에 AQMS에 관측된 NO_x와 SO₂의 10분 평균 농도 값 및 Aethalometer에서 관측된 BC 농도, Nephelometer의 관측 값에서 산정된 옹스트롬 지수의 분포이다. 그림 2에서와 마찬가지로 각 Type에 대한 값의 분포에 표시된 점과 연직 바는 평균값과 5와 95 퍼센트 내에 포함된 값이다. 그림에서 점으로 표시된 부피농도 분포 Type에 따른 옹스트롬 지수와 가스 및 입자상 오염물질의 평균 농도를 표 4에 함께 나타내었다.

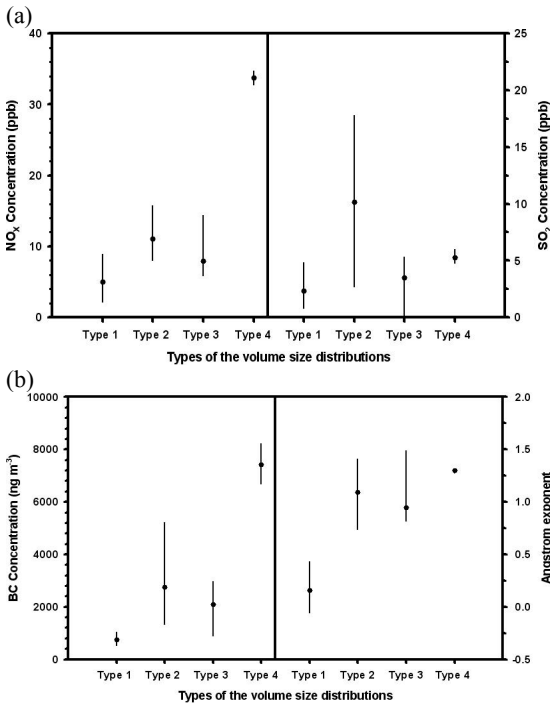
그림 3에서 Type 1의 NO_x와 SO₂ 농도는 각각 10 ppb와 5 ppb이하의 낮은 농도 분포를 나타내었으며, 표 4에서 Type 1의 NO_x와 SO₂ 평균 농도는 5.1과 2.3 ppb로 나타났다. 가스상 오염물질과 마찬가지로 입자상 오염물질의 대표적인 요소인 BC 농도 역시 Type 1에서 관측된 값이 746 ng m^{-3} 으로 다른 Type에서 관측된 농도에 비해 매우 낮게 나타났으며, 옹스트롬 지수의 평균 값 역시 0.2로 네 Type 중 가장 낮은 값을 보였다. 따라서 Type 1의 부피농도를 나타내는 입자들은 토양과 같은 자연적 발생원에 의해 생성된 큰 입자들에 의한 전형적인 부피농도 분포 특성임을 알 수 있으며 다른 관측 결과들과도 잘 일치한다 (Bates *et al.*, 2001; Bates *et al.*, 2002). Type 2의 경우는 NO_x의 평균 농도가 11.1 ppb로 Type 1에 비해 2배정도 높으며 SO₂ 평균 농도는 10.1 ppb로 네 사례 중 가장 높은 값을 나타내었다. BC 농도와 옹스트롬 지수의 평균값은 Type 4 다음으로 높은 2,749.5 ng m^{-3} 와 1.1을 각각 나타내

Table 3. The maximum average and the size range where the average values are higher than 100 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ in the volume size distribution shown in Figure 2. D_p indicates the particle diameter at which the maximum average was obtained.

	Max. average ($\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$)	Particle size > ($100 \mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$)
Type 1	160.7 (D _p = 3.3 μm)	2.3 - 6.0 μm
Type 2	136.2 (D _p = 3.3 μm)	0.7 - 1.0 and 2.1 - 4.1 μm
Type 3	201.1 (D _p = 0.8 μm)	0.5 - 3.5 μm
Type 4	446.8 (D _p = 0.8 μm)	0.5 - 1.2 μm

Table 4. Mean values of NO_x, SO₂ and BC concentration, and Angstrom exponent for each four volume size distribution types during the period of high PM₁₀ concentration over 200 µg m⁻³.

	NO _x (ppb)	SO ₂ (ppb)	BC (ng m ⁻³)	Angstrom exponent
Type 1	5.1	2.3	746.0	0.2
Type 2	11.1	10.1	2749.5	1.1
Type 3	8.0	3.5	2100.6	0.9
Type 4	33.8	5.3	7428.0	1.3

**Fig. 3.** (a) Ten-minute averaged distributions of NO_x and SO₂ concentration, and (b) BC concentration and Angstrom exponent for the four volume size distribution types during the maintaining time of PM₁₀ concentration over 200 µg m⁻³. Dot and bar in each type represent mean and 5 and 95 percentile respectively.

었다. Type 3 역시 SO₂ 외에 모두 Type 2와 비슷한 평균 값을 나타내었다. 그림 2와 표 3에서 Type 3의 부피 농도가 주로 1 µm 이하의 미세 입자에서 주로 높은 부피 농도를 나타내고 Type 1에 비해 가스 및 입자상 오염 물질의 평균 농도가 높다는 사실에서 Type 2의 부피 농도 분포는 주로 미세한 대기오염물질의 수송에 의해 나타나는 것임을 알 수 있다. 따라서 Type 1과 Type 3의 주요 입경별 부피 농도 분포 특성을 모두 가지는 Type 2의 경우는 황사와 오염물질이 동시에 수송되어 나타나는 것으로 유추할 수 있다. Type 4는 가스상 오염물질 중 NO_x와 입자상 오염물질인 BC 농도가 각각 33.8

ppb 및 7,428 ng m⁻³으로 아주 높게 나타났으며 옹스트롬 지수 역시 1.3으로 네 부피 농도 분포 type 중 작은 입자의 영향이 가장 크게 작용한 것으로 나타났다. 이 영곤 등 (2007)은 2008년 2월 8일 사례일에 짙은 안개가 지구대기감시센터에서 관측되었으며, Type 1 - 3의 사례와 달리 기류가 한반도 내륙을 거쳐서 유입되었음을 확인하였다. 따라서 Type 4와 같은 입경별 부피 농도 분포 특성은 주로 안개가 발생했을 때 관측지점 주변의 오염물질이 영향을 미쳤을 때 나타나는 분포임을 알 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2006년 4월 6일부터 2007년 4월 5일 까지 지구대기감시센터에서 PM₁₀ 질량 농도가 200 µg cm⁻³ 이상인 사례일 중 강한 황사에 의해 PM₁₀ 농도가 1,000 µg cm⁻³ 이상으로 증가한 사례 일을 제외한 13일에 대하여 APS에서 관측된 로그 정규화된 형태의 에어러솔 입경별 부피 농도 (dV/dlogD_p) 분포 특성을 분석하였다. 또한 입경별 부피 농도에 대한 세부적인 특징을 살펴보기 위하여 AQMS에서 관측된 가스상 오염물질 중 NO_x 및 SO₂ 농도와 Aethalometer에서 관측된 입자상 오염물질인 BC 농도, Nephelometer의 파장별 산란 계수로부터 산정된 옹스트롬 지수를 함께 비교하였다.

관측기간 중 유사한 입경별 부피 농도 분포 별로 사례를 분류한 결과 총 네 가지 Type으로 나눌 수 있었다. Type 1은 주로 입경 2.3 - 6.0 µm 사이의 조대 입자에서 100 µg cm⁻³ 이상의 높은 부피 농도를 나타내었으며 3.3 µm에서 평균 부피 농도가 160.7 µg cm⁻³로 최대값을 보였다. Type 2는 1.5 µm의 입경을 기준으로 미세 입자와 조대 입자 두 영역에서 각각 100 µg cm⁻³ 이상의 높은 부피 농도가 나타났으며 평균 부피 농도 최대값도 0.8 및 3.3 µm에서 126.1과 136.2 µg cm⁻³의 유사한 값을 나타내었다. Type 3은 0.5 - 3.5 µm의 넓은 입경 범위에서 100 µg cm⁻³ 이상의 높은 부피 농도

를 나타내었고 0.8 μm 에서 201.1 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 의 평균 부피농도의 최대값을 나타내었다. Type 4의 부피농도 분포는 주로 1 μm 이하의 미세 입자 영역에 대해서만 100 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 이상의 부피농도를 나타내었으며 평균 부피농도의 최대값도 446.8 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 로 다른 세 Type의 최대값보다 2배 이상 높게 관측되었다.

각 Type에 속한 사례일 중 PM₁₀ 농도가 200 $\mu\text{g cm}^{-3}$ 이상을 유지하는 시간대에 관측된 NO_x, SO₂, BC 농도 및 웅스트롬 지수를 상호 비교한 결과 Type 1은 중국대륙에서 소송된 토양과 같은 자연적 발생원에 의한 조대 입자가 영향을 미칠 때 주로 나타나는 부피농도 분포 특성으로 황사와 같은 대륙의 광물성 먼지가 수송되었을 때 관측한 결과와도 잘 일치하였다. 그러나 Type 2와 3의 경우 오염물질 농도가 Type 1에 비해 매우 높고 웅스트롬 지수가 1 부근으로 낮게 나타남에 따라 미세한 대기오염물질의 수송에 의한 영향이 부피농도 분포에 나타남을 알 수 있다. 특히 1.5 μm 를 중심으로 미세 입자와 조대 입자에서 높은 부피농도를 나타내는 Type 2의 경우는 Type 1의 황사와 Type 3의 오염물질 수송에 대한 특성을 모두 나타내는 것으로 사료된다. 1.2 μm 이하의 미세 입자에 대해서만 높은 부피농도를 나타내는 Type 4는 안정된 대기상태에서 관측소 주변에서 발생한 오염물질이 정체되어 NO_x와 BC 농도가 다른 Type들에 비해 3배 이상 높고 웅스트롬 지수도 가장 높았다.

이상의 결과로부터 PM₁₀ 질량농도가 200 $\mu\text{g cm}^{-3}$ 이상으로 증가할 때 APS에서 산출된 입경별 부피농도 분포 자료가 황사 및 오염물질 수송, 안개 발생시 특징을 표 5와 같이 정리하였다. 따라서 표 5는 특정지역에

서 황사를 감시하기 위해 운영 중인 PM₁₀ 장비의 질량농도가 200 $\mu\text{g cm}^{-3}$ 이상으로 증가할 경우 APS에서 관측된 부피농도 분포 자료로부터 황사와 비 황사를 빠르게 판단할 수 있는 지침으로 사용될 수 있다. 그러나 Type 2와 같이 두 가지 이상의 현상이 복합적으로 작용하는 사례의 경우는 보다 신중한 분석이 필요하며 더 많은 사례연구로부터 보다 정확한 현상별 판별 지침을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 기상연구소 “지구대기감시센터 기본연구” 사업에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

기상청 (2006) 지구대기감시보고서 2005, 기상청, 125pp.
 이영곤, 김명수, 윤익상 (2007) 지구대기감시센터에서 Aerodynamic Particle Sizer (APS)를 이용한 고농도 PM₁₀ 사례분석, 한국입자에어로졸학회 학술대회, 용평리조트, 45 - 46
 Anderson, *et al.* (1999) Aerosol backscattering fraction and single scattering albedo: Measured values and uncertainties at a coastal station in the Pacific Northwest, *J. Geophys. Res.*, **106**, D18, 20,767 - 20,782.
 Bates, T. S., *et al.* (2001) Regional physical and chemical properties of the marine boundary layer aerosol across the Atlantic during Aerosol99: An overview, *J. Geophys. Res.*, **106**, D18, 20,767 - 20,782.
 _____, D. J. Coffman, D. S. Covert, and P. K. Quinn (2002) Regional marine boundary layer aerosol size distributions in the Indian, Atlantic, and Pacific Oceans: A comparison of INDOEX measurements with ACE-1, ACE-2, and Aerosol99, *J. Geophys. Res.*, **107**, D19, 8026, doi:10.1029/2001JD001174.
 _____, *et al.* (2004) Marine boundary layer dust and pollutant transport associated with the passage of a frontal system over eastern Asia, *J. Geophys. Res.*, **109**, D19S19, doi:10.1029/2003JD004094.
 Cahill, T. A., and K. D. Perry (1996) Asian transport of aerosols to Mauna Loa Observatory, Spring 1994, in Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory, *Summary Report 1994 - 1995*, No. 23, edited by D. J. Hofmann, J. T. Peterson, and R. M. Rosson, pp. 114 - 116.
 Darnenova, K., I. N. Sokolik, and A. Darnenov (2005) Characterization of east Asian dust outbreaks in the spring of 2001 using ground-based and satellite data, *J. Geophys. Res.*, **110**, D02204, doi:10.1029/2004JD004842.

Table 5. Typical characteristics of the volume size distribution measured by APS during the occurrence of the Asian dust, the transport of air pollutants, and the fog respectively.

Characteristics of volume size distribution	
Asian dust	Volume concentration higher than 100 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ at the large particles above 2.0 μm , and its mean maximum at around 3.3 μm
Air pollutants	Volume concentration higher than 100 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ across the wide size range from 0.5 to 3.5 μm and its maximum at around 0.8 μm
Fog	Narrow size range of high volume concentration above 100 $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ from 0.5 - 1.2 μm , and its maximum larger two times than other two events at around 0.8 μm

- Hobbs, P. V. (2000) Introduction to atmospheric chemistry, *Cambridge Univ. Press*, 262 pp.
- Jaffe, D., S. Julie, and O. Cooper (2003) The 2001 Asian Dust Events: Transport and Impact on Surface Aerosol Concentrations in the U.S., *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, **84**(46), 501 - 516.
- Lee, Y. G. and B. C. Choi (2005) Design and install of the integrated aerosol inlet in the KGAWO, *Autumn Conference of the Korean Meteorological Society*, Seoul, Korea, 456 - 457.
- Liou, K. (2002) An Introduction to Atmospheric Radiation, *International Geophysics Series*, No. **84**, Academic Press, 583 pp.
- Sokolik, I. N., D. Winker, G. Bergametti, D. Gillette, G. Carmichael, Y. Kaufman, L. Gomes, L. Schuetz, and J. Penner (2001) Introduction to special section on mineral dust: Outstanding problems in quantifying the radiative impact of mineral dust, *J. Geophys. Res.*, **106**, 18, 015 - 18,028.
- Un, J., M. Zhang, and T. Liu (2001) Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960 - 1999: Relations to source area and climate, *J. Geophys. Res.*, **106**, 10,325 - 10,333.
- Uno, I., *et al.* (2004) Numerical study of Asian dust transport during the springtime of 2001 simulated with the Chemical Weather Forecasting System (CFORS) model, *J. Geophys. Res.*, **109**, D19S24, doi:10.1029/2003JD004222.
- Wang, J., *et al.* (2002) Clear-column radiative closure during ACE-Asia: Comparison of multiwavelength extinction derived from particle size and composition with results from Sun photometry, *J. Geophys. Res.*, **107**(D23), doi:10.1029/2002JD002465.
- Zhou, J., *et al.* (2002) Lidar observations of Asian dust over Hefei, China, in spring 2000, *J. Geophys. Res.*, **107**(D15), 4252, 10.1029/2001JD000802.